

平成 18 年度 卒業論文

ゴムの応力ひずみ曲線の
Mooney-Rivlin 式による検討

河野 学

平成19年3月

武蔵工業大学 工学部 都市基盤工学科

建設情報マネジメント研究室

目次

第1章 序論	1-1
1.1 背景	1-2
1.2 研究目的	1-2
1.3 本論文の構成	1-3
第2章 落橋防止システム及び落橋防止用緩衝材	2-1
2.1 本章の内容	2-2
2.2 落橋防止システムについて	2-3
2.2.1 落橋防止システムを構成する要素	2-3
2.2.2 桁かかり長	2-4
2.2.3 落橋防止構造	2-5
2.2.4 変位制限構造	2-7
2.2.5 段差防止構造	2-8
2.3 落橋防止システムの被害	2-9
2.3.1 落橋事例	2-9
2.3.2 兵庫県南部地震における落橋防止構造の被害	2-14
2.3.3 落橋防止構造の被害	2-14
2.3.4 落橋防止構造に求められる働き	2-16
2.4 落橋防止システムの作動シナリオ	2-17
2.4.1 落橋モード	2-17
2.4.2 落橋防止システムの作動	2-19
2.4.3 落橋防止構造が正常に作動せずに落橋に至るケース	2-20
2.5 落橋防止用緩衝材	2-21
2.5.1 衝突力低減効果とエネルギー吸収性	2-21
2.5.2 緩衝材の役割	2-24
2.5.3 緩衝材に要求される機能	2-25
2.5.4 緩衝材の形式	2-26
2.5.5 緩衝材の分類	2-28

第3章 ゴム製緩衝材・ゴム支承に関する研究の紹介	3-1
3.1 本章の内容	3-2
3.2 落橋防止構造が構造全体に及ぼす効果に着目した研究	3-3
3.2.1 衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の低減効果	3-3
3.2.2 桁間衝突に対するゴム製緩衝装置の有効性に関する実験的検討	3-4
3.3 落橋防止構造及び緩衝材の力学的挙動に着目した研究	3-5
3.3.1 ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究	3-5
3.3.2 ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察	3-6
3.3.3 高面圧を受ける直方体ゴム製耐震緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究	3-7
3.3.4 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究	3-8
3.3.5 弾塑性型特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究	3-9
3.3.6 エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果	3-10
3.4 ゴム製緩衝材の性能評価法・設計法に関する研究	3-10
3.4.1 落橋防止用矩形状ゴム製緩衝材の性能評価法に関する基礎的考察	3-11
3.4.2 落橋防止用矩形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察	3-12
3.5 ゴム製緩衝材・ゴム支承の温度特性に関する研究	3-13
3.5.1 天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究	3-13
3.5.2 寒冷地気温変動下における高減衰ゴム支承材内部温度の応答確認実験及び数値解析	3-14
3.6 ゴム製緩衝材・ゴム支承の配合に関する研究	3-15
3.6.1 フェライト混練高減衰積層ゴムの開発	3-15
第4章 ゴムの種類と配合	4-1
4.1 本章の内容	4-2
4.2 ゴムの種類と特徴	4-3
4.2.1 原料ゴム	4-3

4.2.2	ゴムの特徴	4-5
4.2.3	試料として選択したゴムの紹介	4-8
4.2.4	試料として選択したゴムの特徴	4-8
4.3	ゴムの配合	4-10
4.3.1	ゴム製品の作成手順	4-10
4.3.2	ゴムの配合設計	4-10
4.3.3	配合剤の種類と目的	4-11
4.3.4	ゴムの架橋	4-14
4.3.5	架橋剤の配合量によるゴムの性能の変化	4-15
4.3.6	ゴムの補強	4-16
4.3.7	補強材の配合量によるゴムの性能の変化	4-17
第5章	ゴム弾性とゴムの静的粘弾性挙動	5-1
5.1	本章の内容	5-2
5.2	ゴム弾性と非線型挙動	5-3
5.2.1	ゴムの力学的特徴	5-3
5.2.2	エネルギー弾性とエントロピー弾性	5-4
5.2.3	ミクロブラウン運動とエントロピー弾性	5-5
5.2.4	エントロピー弾性における分子鎖の変形	5-6
5.2.5	温度による高分子物質の状態変化	5-7
5.2.6	ゴムの非線形挙動	5-8
5.2.7	エネルギー弾性とエントロピー弾性の寄与率	5-8
5.2.8	ゴムの応力-ひずみ関係を表す式	5-11
5.3	ゴムの静的粘弾性挙動	5-15
5.3.1	粘弾性	5-15
5.3.2	粘弾性模型	5-16
5.3.3	応力緩和と Maxwell 方程式	5-18
第6章	ゴムの動的粘弾性挙動	6-1
6.1	本章の内容	6-2
6.2	ゴムの動的性質	6-3
6.2.1	動的応力と動的ひずみ	6-3

6.2.2	理想的弾性体の動力学的性質	6-4
6.2.3	純粘性体の動力学的性質	6-5
6.2.4	粘弾性体の動力学的性質	6-6
6.2.5	複素弾性率	6-7
6.2.6	ゴムの一般的なエネルギー吸収性の評価法	6-10
6.3	ゴムの動的粘弾性の温度依存性と周波数依存性	6-11
6.3.1	動的粘弾性の温度依存性	6-11
6.3.2	動的粘弾性の周波数依存性	6-12
6.3.3	温度-周波数換算法則	6-13
6.3.4	動的粘弾性と動的比熱の関連性	6-14
第7章	引張試験	7-1
7.1	本章の内容	7-2
7.2	引張試験の説明	7-3
7.2.1	引張試験	7-3
7.2.2	ゴムの応力-ひずみ関係	7-3
7.2.3	勾配の定義	7-4
7.3	試験方法に関する検討	7-5
7.3.1	目的	7-5
7.3.2	試料・試験体	7-5
7.3.3	実験条件	7-6
7.3.4	実験結果	7-6
7.3.5	考察	7-7
7.3.6	結論	7-7
7.4	引張速度に関する検討	7-8
7.4.1	目的	7-8
7.4.2	試料・試験体	7-8
7.4.3	実験条件	7-8
7.4.4	実験結果	7-9
7.4.5	考察	7-17
7.4.6	結論	7-17

第 8 章 圧縮試験	8-1
8.1 本章の内容	8-2
8.2 圧縮試験の説明	8-3
8.2.1 圧縮試験	8-3
8.2.2 エネルギー吸収量とエネルギー吸収率の定義	8-3
8.2.3 ひずみ速度の定義	8-4
8.3 エネルギー吸収性に関する検討	8-5
8.3.1 目的	8-5
8.3.2 試料・試験体	8-5
8.3.3 実験条件	8-5
8.3.4 実験結果	8-6
8.3.5 考察	8-11
8.3.6 結論	8-11
第 9 章 フィットティング	9-1
9.1 本章の内容	9-2
9.2 Neo-Hookean 式, Mooney-Rivlin 式のフィッティング	9-3
9.2.1 目的	9-3
9.2.2 Neo-Hookean 式, Mooney-Rivlin 式の紹介	9-3
9.2.3 試料・試験体	9-4
9.2.4 実験条件	9-4
9.2.5 実験結果	9-5
9.2.6 考察	9-10
9.2.7 結論	9-10
9.3 カーボンブラックによる適用範囲の変化に関する検討	9-11
9.3.1 目的	9-11
9.3.2 硬度とカーボンブラック重量分率	9-11
9.3.3 試料・試験体	9-11
9.3.4 実験条件	9-12
9.3.5 実験結果	9-12
9.3.6 考察	9-28
9.3.7 結論	9-28

第 10 章 応力緩和	10-1
10.1 目的	10-2
10.2 試料・試験体	10-2
10.3 実験条件	10-2
10.4 応力緩和量と応力緩和速度の定義	10-2
10.5 実験結果	10-3
10.6 考察	10-15
10.7 結論	10-16

第 11 章 結論	11-1
11.1 結論	11-2

謝辞

参考文献

付録

付録.1	2006.6.28	建設情報マネジメント研究室	第 1 回中間発表	概要
付録.2	2006.6.28	建設情報マネジメント研究室	第 1 回中間発表	Power Point
付録.3	2006.8.21	建設情報マネジメント研究室	第 2 回中間発表	概要
付録.4	2006.8.21	建設情報マネジメント研究室	第 2 回中間発表	Power Point
付録.5	2006.11.11	建設情報マネジメント研究室	第 3 回中間発表	概要
付録.6	2006.11.11	建設情報マネジメント研究室	第 3 回中間発表	Power Point
付録.7	2007.1.9	建設情報マネジメント研究室	第 4 回中間発表	概要
付録.8	2007.1.9	建設情報マネジメント研究室	第 4 回中間発表	Power Point
付録.9	2006.10.10	ソフトマテリアル研究室	第 1 回中間発表	Power Point
付録.10	2006.12.7	ソフトマテリアル研究室	第 2 回中間発表	概要
付録.11	2006.12.7	ソフトマテリアル研究室	第 2 回中間発表	Power Point
付録.12	2006.12.28	ソフトマテリアル研究室	第 3 回中間発表	概要
付録.13	2006.12.28	ソフトマテリアル研究室	第 3 回中間発表	Power Point
付録.14	2007.2.19	卒業論文発表会		概要
付録.15	2007.2.19	卒業論文発表会		Power Point

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 背景

1995年の兵庫県南部地震では、大きな地震力を受けて橋梁が変位し、隣接桁間及び桁と橋台間で高いレベルの衝突力が作用した。そのことによって桁や橋台、さらには落橋防止構造までもが損壊し、落橋に至る被害が多数見られた。

これを契機として道路橋示方書が改訂され、落橋防止装置の見直しが行われた。すなわち、従来の落橋防止装置では落橋を完全に防止することは困難であるため、落橋防止装置の高性能化や高機能化が必要とされ、改訂後の示方書では、桁かかり長、落橋防止構造、変位制限構造及び段差防止構造からなる落橋防止システムが提唱された^{1.1)}。特に落橋防止構造と変位制限構造においては、落橋や損壊の原因となった衝突力を緩和するために緩衝材を設置することが推奨されている。

落橋防止システムに用いられる緩衝材には、衝突力の低減効果とエネルギー吸収性という二つの性能が要求される^{1.2)}。衝突力を低減させるためには剛性の低い材料が望ましいのに対し、エネルギー吸収させるには、破壊や変形によりエネルギーを吸収する材料が望ましく、両者を同時に満たすことは容易ではない^{1.2)}。

現在、ゴムは鋼材やコンクリート等の一般的な土木材料に比べて剛性が約 1/1000～1/10000 と極端に低く、衝突力の低減効果に優れているため、緩衝材としての利用が有望であると考えられている^{1.3)}。さらに、ゴムには可逆的な大変形が可能で繰り返し衝突に対応できる^{1.4)}、比較的 low コストであるなどの利点がある。しかしながら、ゴムは高分子材料であり、粘弾性を有することから、種類や配合、入力周波数、繰り返し载荷、温度などにより発揮する性能が大きく変化する^{1.5)}。このため、ゴム製緩衝材の設計や作成には注意が必要である。

1.2 研究目的

本研究では、一般的な力学試験として引張試験、圧縮試験、応力緩和試験を行い基本的なゴムの物性の把握、正確なゴム応力-ひずみ関係を求めるための簡便な試験方法の考察、緩衝ゴムとして用いる上で重要なエネルギー吸収性を評価した。さらに、ゴム製品の設計において重要になる応力-ひずみ関係を Mooney-Rivlin 式、Neo-Hookean 式により検討をおこない、両式の適用範囲に関する考察、Mooney-Rivlin 式中の未定定数の考察を行った。

1.3 本論文の構成

本論文は以下に示す構成から成り立っている。「第1章 序論」と「第11章 結論」に本研究の内容と結論を記しており、研究の大まかな内容はここで把握できるようになっている。また、詳しい内容については各章に解説と考察を記している。

第1章 序論

本研究の内容を端的に解説する。本研究に至る社会的背景から研究の着眼点までについて述べる。

第2章 落橋防止システム及び落橋防止用緩衝材

落橋防止に関する基礎知識や落橋防止システムについて解説する。また、過去の地震による落橋被害を確認する。緩衝材に求められる性能等についても紹介する。

第3章 ゴム製緩衝材・ゴム支承に関する研究の紹介

他の論文からみる落橋防止構造の必要性や開発の取り組みを様々な視点から紹介する。このことにより現在行われている研究の動向を知ることができる。

第4章 ゴムの種類と配合

ゴムの種類や配合など工業的な内容について解説する。

第5章 ゴム弾性とゴムの静的粘弾性挙動

ゴム弾性の発現メカニズムについて分子鎖の変形をもとに解説する。さらに粘弾性模型を用い、応力緩和などの静的粘弾性挙動についてまとめる。

第6章 ゴムの動的粘弾性挙動

粘弾性の動的性質について解説する。また、振動エネルギー吸収性の指標である正接損失について解説する。

第7章 引張試験

ゴムに対して様々な速度で引張試験を行い、そこから得られた実験結果よりゴムの基本的物性を検討した。

第8章 圧縮試験

種類・硬度の異なるゴムに対して様々な速度で圧縮試験を行い、そこから得られた実験結果よりゴムの基本的物性を検討した。

第9章 フィッティング

ゴムの引張試験と圧縮試験から得られた荷重-変位から、応力-伸長率関係を求め、Neo-Hookean 式、Mooney-Rivlin 式、を用いてフィッティングを試みた。

第 10 章 応力緩和

引張・圧縮応力緩和試験において測定された荷重をもとに、応力を計算することで応力の時刻歴変化を求め、応力緩和量，応力緩和速度，ゴムのエネルギー吸収性について考察した。

第 11 章 結論

本研究により明らかになったことを，結論としてまとめる。

第2章

落橋防止システム及び 落橋防止用緩衝材

第2章 落橋防止システム及び落橋防止用緩衝材

2.1 本章の内容

本章では、本研究で着目している緩衝材について解説する。緩衝材は落橋防止システムの一部を担うものである。そのため、落橋防止システムについて解説し、その中での緩衝材の位置付け、具体的な役割や性能について紹介していく。本章の構成は以下のようになっている。

2.2 落橋防止システムについて

落橋防止システムとそれに含まれる落橋防止構造の説明を述べる。さらに、落橋防止システムを構成する要素について解説する。

2.3 落橋防止システムの被害

過去に生じた落橋事例、落橋防止システムが正常に作動されずに落橋に至った事例を紹介し、落橋防止システムの必要性を再確認する。

2.4 落橋防止システムの作動シナリオ

落橋を防止するために、落橋防止システムがどのように作動するのか把握する。

2.5 落橋防止用緩衝材

落橋防止システムの中で、本研究で取り扱っている緩衝材について詳細に解説する。さらに、落橋防止用緩衝材に求められる性能について述べる。

2.2 落橋防止システムについて

本節では落橋防止システムについて紹介していく。落橋防止構造は落橋防止システムの一部であるため、落橋防止構造の概念を把握するためには、落橋防止システムについて理解する必要がある。したがって、落橋防止システムを構成する要素、落橋防止システムに求められる性能について簡単に解説する。

2.2.1 落橋防止システムを構成する要素

「落橋」とは「地震により橋梁の上部構造が落下する」ことである。落橋防止システムを設置する目的は、構造部材や地盤の破壊に伴い、予期していないような構造系の破壊が生じて、上部構造の落下を防止することである。後述に示すが、落橋によって甚大な被害が発生する。上部工で活動している人間や物が落下する危険性、落下した上部構造が橋梁付近に存在する人間や物に与える危険性は非常に高い。さらに、落橋によって、交通の麻痺、救援・復旧の遅延など二次災害が発生する可能性がある。このような被害の発生をくいとめるため、落橋防止システムは如何なる場合においても落橋を防ぐ必要がある。落橋防止システムの主な構成要素として、次の四つが挙げられる。

- ①けたかかり長
- ②落橋防止構造
- ③変位制限構造
- ④段差防止構造

以下の説明の中にタイプ A、タイプ B の支承と表記があるため、これらの特性について以下に示す。一般に落橋防止システムについて検討する場合、タイプ B の支承を採用することを原則としている。

タイプ A

橋台の拘束により、桁に大きな振動が生じにくい場合や支承部の構造上やむを得ない場合、落橋防止システムと補完し合って等価水平震度に相当する慣性力に抵抗する場合に用いる支承である。

タイプ B

支承部単独でこの慣性力に抵抗する場合に用いる支承である。

2.2.2 桁かかり長

桁かかり長とは、桁が下部構造に乗っている部分の長さのことである。桁かかり長を長くすることで、下部構造や支承が破壊し、上下部構造に予期しない大きな相対変位が生じた場合にも、落橋を防止することができる^{2.1)}。

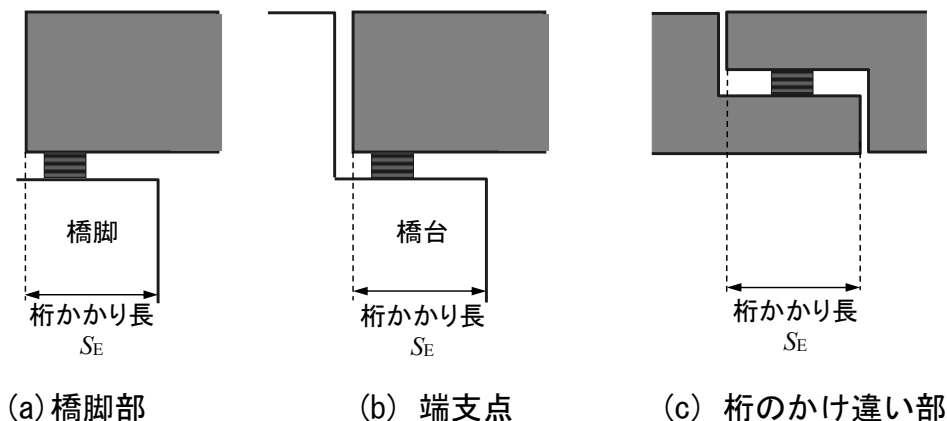


図-2.1 桁かかり長^{2.1)}

①桁かかり長に要求される性能

(1)対象地震動

想定外地震動（大規模地震以上）を対象としており，最大値の規定はない。

(2)設計地震力

桁の移動量に対する機能であり，地震力の設定は不用である。

(3)移動量

機能し始めるのは支承の最大移動量（降伏変位）を越えてからである。また，落橋防止構造の設計最大移動量時にも次式に示す桁かかり長の25%を確保するものとしている。

$$S_E = U_R + U_G \geq S_{EM} \quad \text{式 2.1}$$

$$S_{EM} = 70 + 0.5l \quad \text{式 2.2}$$

$$U_G = 100\varepsilon_G L \quad \text{式 2.3}$$

ここで、 S_E は桁かかり長であり図-2.1では、桁端から下部構造頂部縁端までの上部構造の長さ、およびかけ違い部の桁の長さに相当する。 U_R は地震時保有水平耐力法の用いる等価水平震度に相当する慣性力を作用させた場合に、桁かかり長を算出する位置において生じる上部構造と下部構造天端間の相対変位である。 U_G は地震時の地盤ひずみによって生じる地盤の相対変位。 S_{EM} は桁かかり長の最小値である。 ε_G は地震時における地盤のひずみである。 L は桁かかり長に影響を及ぼす下部構造間の距離である。 l は支間長であり、一つの橋脚上に二つの上部構造の端部が支持され、両側の桁の支間長が異なる場合には、大きい方の支間長を用いる。

(4)緩衝材の必要性

設計地震力に対する耐力を要する構造ではないので，緩衝材は不要である。

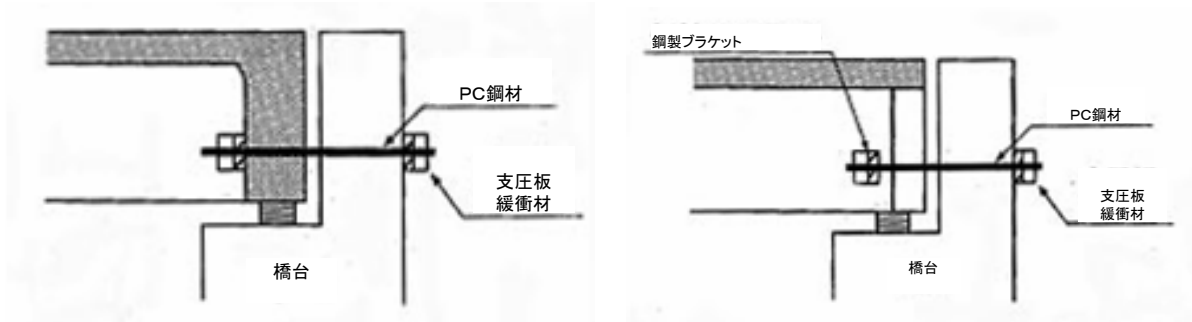
2.2.3 落橋防止構造

桁かかり長を補完するもので、下部構造や支承が破壊し、上下部構造間に予期し得ない大きな相対変位が生じた場合にこれが桁かかり長に達する前に機能するものである^{2.1)}。

①落橋防止構造の形式

落橋防止構造は、図-2.2 に示す3つの構造とされている。また落橋防止構造と変位制限構造は、類似した構造となる場合でも、その機能は異なっているため原則として兼用してはならない。

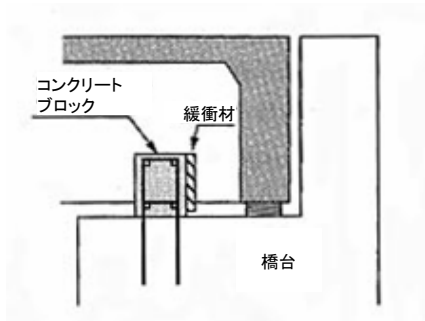
- (1)上部構造と下部構造を連結する構造 (PC鋼材, アンカーバー)
- (2)上部構造および下部構造に突起を設ける構造 (落橋防止壁, 緩衝材)
- (3)2連の上部構造を相互に連結する構造 (PC鋼材, 桁間連結装置)



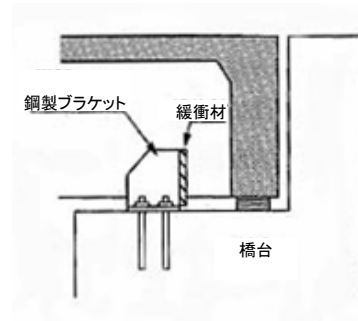
(A) 鋼上部構造の場合

(B) コンクリート上部構造の場合

(1) 上部構造と下部構造を連結する落橋防止構造の例

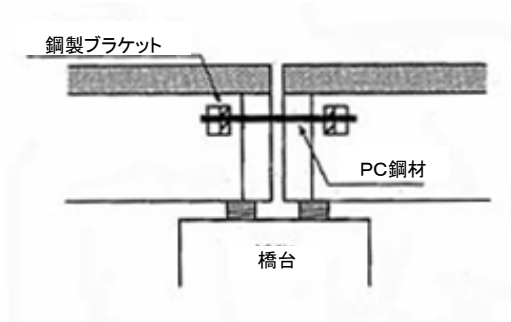


(C) コンクリートブロックを用いる落橋防止構造

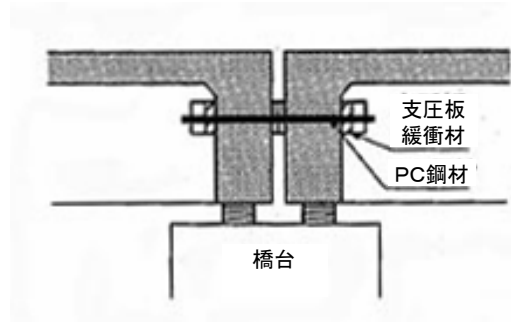


(D) 鋼製ブラケットを用いる落橋防止構造

(2) 上部構造および下部構造に突起を設ける落橋防止構造の例



(E) 鋼上部構造の場合



(F) コンクリート上部構造の場合

(3) 2連の上部構造を相互に連結する落橋防止構造の例

図-2.2 落橋防止構造^{2.1)}

②落橋防止構造に要求される性能

落橋防止構造に要求される性能は次の四つである。

- 桁かかり長を越えるような移動が生じないようにする。
- 支承の移動や回転などの機能を損なわない構造とする。
- 橋軸直角方向への移動にも追従し、衝撃的な地震力を緩和できる構造とする。
- 支承部の維持管理を考慮した構造とする。

(1)対象地震動

想定外地震動（大規模地震以上）を対象としているにもかかわらず、設計地震力は上部工反力の1.5倍までとしている。

(2)設計地震力

落橋防止構造の耐力は、次式より算出される設計地震力を下回ってはならない。ここで、落橋防止構造の耐力は、割増し係数1.5を考慮した許容応力度から算出してよい。

$$H_F = 1.5R_d \quad \text{式 2.4}$$

ここで、 H_F は落橋防止構造の設計地震力である。 R_d は死荷重反力である。ただし、2連のけたを相互に連結する構造を用いる場合には、いずれか大きい方の鉛直反力の値をとるものとする。

③移動量

(1)機能開始となる移動量

支承がその機能を損なう移動量であり、支承タイプおよび支承条件により異なる。タイプBのゴム支承を用いる場合、大地震時においてゴム支承の変形能力を最大限活用するため、ゴムの許容せん断ひずみに相当する移動量を確保する。

(2)機能限界となる移動量

落橋防止構造の設計最大移動量は、橋全体の構造的損傷を避けるため、ある程度の変位を許容する。さらに、移動量を桁かかり長 S_E よりも小さくしなければならないという観点から、式2.5^{2.2)}で計算される S_F を越えない範囲で可能な限り大きな値となるものとする。

$$S_F = C_F \times S_E \quad (C_F = 0.75) \quad \text{式 2.5}$$

ここで、 S_F は落橋防止構造の設計最大移動量、 C_F は落橋防止構造の設計変位係数であり、0.75とする。さらに、 S_E は桁かかり長である。

④緩衝材の必要性

衝撃的な地震力を緩和するためゴムなどの緩衝材を用いて耐衝撃性を高める構造とすることから、緩衝材が最も必要となる構造である。

2.2.4 変位制限構造

タイプAの支承と補完し合って地震時慣性力に抵抗することを目的としたもので、支承が損傷した場合に上下部構造の相対変位が大きくなるようにするための構造である。ジョイントプロテクターの機能を兼ねることもできる^{2.1)}。

変位制限構造に要求される性能

変位制限構造に要求される性能を、次に挙げる。

- 支承タイプ A の場合、支承と補完し合って、大規模地震に抵抗する。
- 支承の移動や回転などの機能を損なわない構造とする。
- 支承部の維持管理を考慮した構造とする。
- 落橋防止構造の機能を阻害するような位置に設けてはならない。

①対象地震動

中小規模地震以上、大規模地震以下を対象とする。

②設計地震力

変位制限構造は、式 2.6 により算出する設計地震力を下回ってはならない。ここで、変位制限構造の耐力は割増し係数 1.5 を考慮した許容応力度から算出してよい。

$$H_s = 3k_h R_d \quad \text{式 2.6}$$

ここで、 H_s は変位制限構造の設計に用いる設計地震力、 k_h は震度法の用いる設計水平震度、 R_d は死荷重反力である。

③移動量

(1)機能開始となる移動量

震度法による支承変形量。

(2)機能限界となる移動量

支承の変形能力と同程度とする(ゴム支承・タイプ A の場合:許容せん断ひずみ 150% に相当する変形量)。ジョイントプロテクターの機能を兼ねる場合は、伸縮装置の移動量とする。

④緩衝材の必要性

落橋防止構造よりも対象地震動は小さく、先行して機能を発揮するものであるが、緩衝材の設置が望ましいと考えられる。

2.2.5 段差防止構造

大地震の発生後において住民の緊急避難や緊急車両の通行をできる限り可能とするためのものであり、路面に車両の通行が困難となる段差が発生するのを防止するために設置されるのが段差防止構造である。特に、支承高が大きい鋼製支承などには設置することが望ましい^{2.1),2.2)}。

①段差防止構造の構造形式

- (1)予備のゴム支承
- (2)コンクリート構造による台座

これに代用がきく場合は、別途に設置せず橋脚天端の煩雑さを避けるのがよい。

②段差防止構造に要求される性能

支承が破損した場合でも上部構造を適切な高さに支持できる構造とする。

(1)対象地震動

想定外地震動（保有水平耐力レベル以上）。

(2)設計地震力

規定はない。上部構造を支えればよく、地震による慣性力（水平方向に設計地震力）を考慮する必要はない。

(3)移動量

一般に、被災後の路面の沈下量が5～10cm程度以下であれば、地震直後の緊急車両の通行に致命的な影響を与えないと考えられているので、路線の性質によって制限値を定めるものとする（但し、桁端部及び掛け違い部のみとする）。

(4)緩衝材の必要性

支承破損後、桁が橋座面に落ちるのを支持する構造であり、その衝撃を緩和するために緩衝材が必要であると考えられる。

2.3 落橋防止システムの被害

本節では近年に起きた落橋防止システムの必要性が考えられる被害事例を紹介していく。中でも、特に兵庫県南部地震での被害について詳しく説明する。

2.3.1 落橋事例

落橋事例の発生した地震を以下に挙げる。

1891年10月28日	濃尾地震	1978年6月12日	宮城県沖地震
1923年9月1日	関東大震災	1989年10月17日	ロマプリータ地震
1946年12月21日	南海地震	1995年1月17日	兵庫県南部地震
1948年6月28日	福井地震	1999年9月21日	集集地震
1964年6月16日	新潟地震		

濃尾地震から新潟地震までの落橋の原因は橋脚本体の脆弱さによる倒壊や地盤の液状化による基礎の過大な変位として考えられる。これらの被害を受けて耐震設計基準が見直され、橋脚本体や基礎工の耐震強度が高くなった。下部工の被害は減少したものの、支承の損壊に伴って上部構造の相対変位が発生し、桁が下部構造から逸脱して落橋するという被害が生じるようになってきた。桁間連結装置を設置しているにも関わらず、それ自体も破壊され落橋に至るケースも兵庫県南部地震では見受けられた。また、集集地震の落橋は特殊で、活断層が支間に発生したために生じた。これら個々の落橋事例について紹介していくこととする。

①濃尾地震

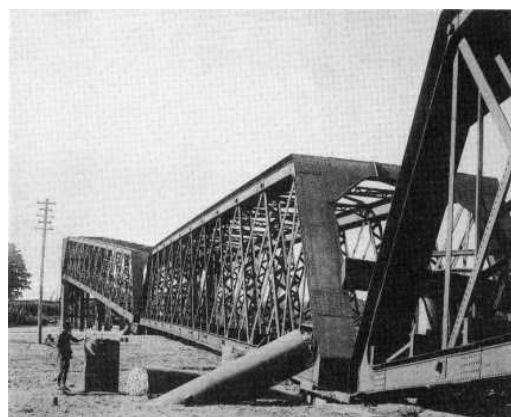
地震の規模：M=8.0

橋梁名：枇杷島橋，長良川鉄橋

落橋原因：橋脚の倒壊



(A) 枇杷島橋の被害



(B) 長良川鉄橋の被害

図-2.3 濃尾地震での被害^{2,2)}

②関東大震災

地震の規模：M=7.9

橋梁名：豊国橋

落橋原因：橋脚が2~8° 流心方向に傾斜

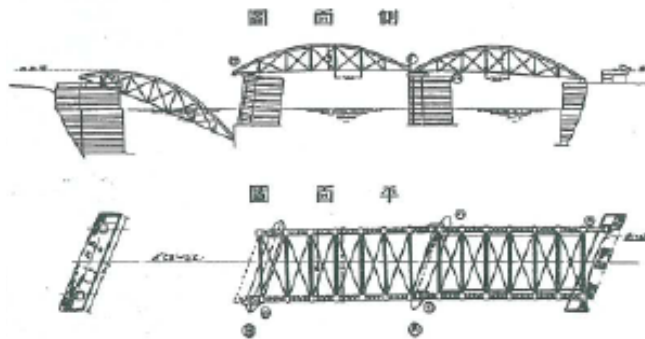


図-2.4 関東大震災での被害^{2,2)}

③南海地震

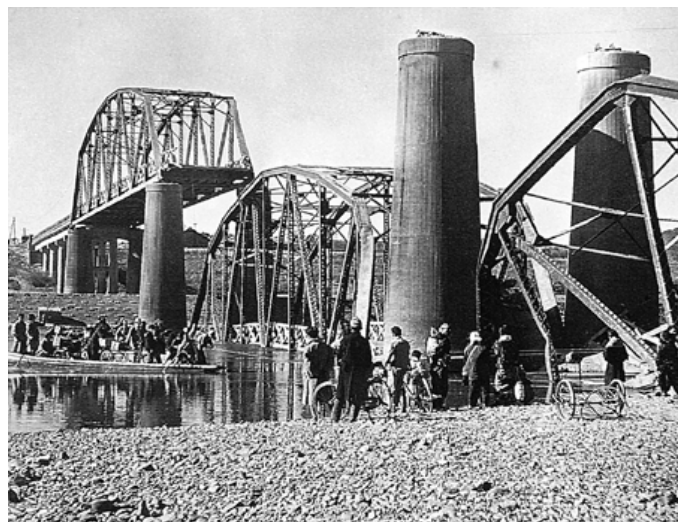
地震の規模：M=8.0

橋梁名：四万十川橋

落橋原因：落ちた部分の橋脚は下部で大きな口をあげ、落ちない部分及び T 型橋脚には全て亀裂が生じていた。



(A) 四万十川橋全体での被害の様子



(B) 落橋の様子

図-2.5 南海地震での被害^{2,2)}

第2章 落橋防止システム及び落橋防止用緩衝材

④福井地震

地震の規模：M=7.1

橋梁名：三等橋，丸頭竜橋，中角橋

落橋原因：下部構造の被害，特にその根入れ不足が原因



図-2.6 福井地震での被害(中角橋)^{2.2)}

⑤新潟地震

地震の規模：M=7.5

橋梁名：新潟駅東跨線橋，昭和大橋

落橋原因：震災前後の航空写真より求めた地盤の永久変位分布を見ると，最大 2m 程度生じたことがわかった．基礎の RC 杭も曲げ塑性変形により，液状化の発生に起因する地盤全体の変位が落橋の主要因と考えられる．



(A) 新潟駅東跨線橋の被害



(B) 昭和大橋の被害

図-2.7 新潟地震での被害^{2.2)}

⑥宮城県沖地震

地震の規模：M=7.4

橋梁名：錦桜橋

落橋原因：支承の破損により受桁が最大 55cm 移動した。ゲルバー桁部 1 径間のみ落橋した。他の支承もほとんど破損し桁移動が生じている。

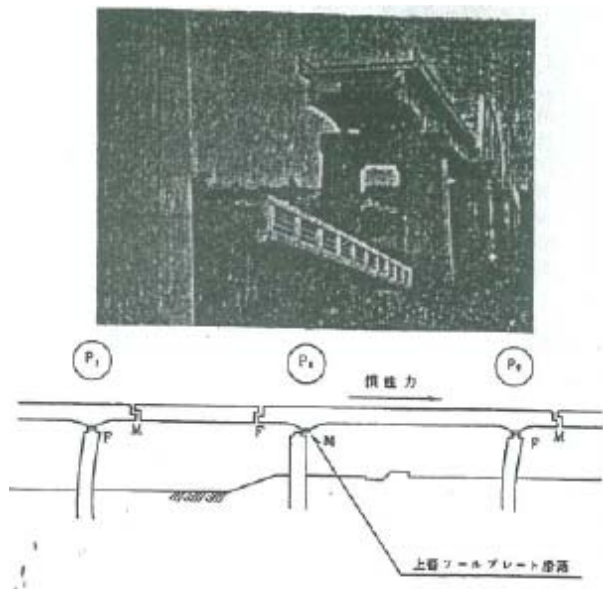


図-2.8 宮城県沖地震での被害^{2.2)}

⑦ロマプリータ地震

地震の規模：M=7.1

橋梁名：ベイブリッジ

落橋原因：桁受けの長さが 13cm しかなかった。支承連結ボルトの破断，落橋防止構造の変形。



図-2.9 ロマプリータ地震での被害^{2.2)}

第2章 落橋防止システム及び落橋防止用緩衝材

⑧兵庫県南部地震

地震の規模：M=7.2

橋梁名：阪神高速3号神戸線

落橋原因：振動による支承の損壊に続く、主桁の玉突き衝突による桁の過大な移動

橋梁名：国道171号門戸高架橋

落橋原因：橋脚の倒壊



図-2.10 兵庫県南部地震による被害①^{2.2)}



図-2.11 兵庫県南部地震による被害②

⑨集集地震

地震の規模：M=7.5

橋梁名：卑豊橋

落橋原因：基礎の近傍に断層が現れ、ケーソン基礎が転倒した。

隆起7m. 右ズレ2~4m

落橋防止構造も破壊。

橋梁名：石圍橋

落橋原因：左岸側橋台と橋脚との間になんらかの地盤変状（断層活動に伴う地表面の段差の発生と考えられる）



図-2.12 集集地震による被害①^{2.2)}



図-2.13 集集地震による被害②^{2.2)}

2.3.2 兵庫県南部地震における落橋防止構造の被害

兵庫県南部地震での被害は、以前の耐震設計に大きな衝撃を与えた。本地震ではこれまで想定していた地震のレベルをはるかに超えており、その時点での落橋防止装置の性能では落橋を完全に防止することができなかった。このことを踏まえて、落橋防止装置のさらなる高性能化、高機能化の必要になり、種々の研究開発が行われている。

本節では兵庫県南部地震での落橋被害の中でも特に本研究と結びつきの深い、落橋防止構造の損壊が原因で落橋に至ったケースについてまとめた。これらの被害から落橋防止構造の高性能化、高機能化が必要であることが分かる。

2.3.3 落橋防止構造の被害

兵庫県南部地震では落橋防止構造の一端である桁間連結装置が大きな被害を被っている。桁間連結装置については、2.2.3 節の落橋防止構造の部分で解説した。改訂前の道路橋示方書V（平成2年2月）により設計された落橋防止構造は以下に示す式 2.7 で基準となる設計地震力を算出している。

$$HR = 2.0 \times kh \times Rd \quad \text{式 2.7}$$

ここで、 Rd は上部構造の死荷重反力、 kh は震度法に用いる設計水平震度である。桁間連結装置の移動可能量は以下の式 2.8 で与えられる。

$$Uj = Us + 10 \quad (\text{mm}) \quad \text{式 2.8}$$

ここで、 Uj は桁間連結装置の移動可能量、 Us は支承の移動可能量である。以上の設計法における問題として、以下のことが挙げられる。

- 静的な強度の応力度照査しか行っていない。
- 各部のどこが弱点とするかの優先順位を考えていない。
- 衝撃的な荷重が作用した。
- 橋軸直角方向の相対変位差により、曲げモーメントが働いた。

兵庫県南部地震の被害を受けて道路橋示方書V（平成8年12月）では新たに以下のことを規定した。

- 設計地震力 $HF = 1.5 \times Rd$ と増大。
- 大きな設計移動量の確保。
- 橋軸直角方向への移動も考慮する。
- 衝撃的な地震力を緩和できること。

第2章 落橋防止システム及び落橋防止用緩衝材

図-2.14 から図-2.16 に桁間連結装置の被害状況を示す。連結ピンの破損，連結板取り付け金具の破損，連結板本体の破損の3種類に分類しており，ともに落橋に直接繋がる被害である。



図-2.14 桁間連結装置の被害（ピンの破損）^{2.2)}



図-2.15 桁間連結装置の被害（取り付け金具の破損）^{2.2)}

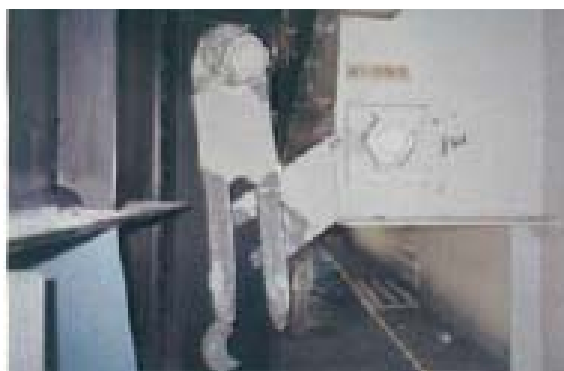


図-2.16 桁間連結装置の被害（連結板の破損）^{2.2)}

2.3.4 落橋防止構造に求められる働き

現在の道路橋示方書における要求性能は「想定しきれない破壊」に対するものであるから、具体的な落橋防止構造の設計水平力は、「想定できない」はずである。ここでは設計水平力という数値にこだわらず、過去の落橋事例から落橋の形態と、その大まかな原因と対策、さらには落橋防止システムに求められる働きを表2.1に示すように分類した。表2.1の落橋防止システムに求められる働きから、「緩衝型」落橋防止システム（緩衝材をもつ落橋防止システム）が求められる。緩衝材に要求される機能として以下の3つが挙げられる。

- ①衝突速度の緩和による衝突力の減少，落橋防止構造への作用力の低減。
- ②桁のぶら下がり状態に至る落橋時の衝撃エネルギー吸収。
- ③桁間衝突における衝撃エネルギー吸収。

表 2.1 落橋事例から落橋防止システムに求められる働き^{2.2)}

落橋の基本モード	主な原因	落橋防止対策	落橋防止システムに求められる働き	
上部工破壊モード	上部工の耐力不足	上部工の補強 免震化	—	
狭義の落橋モード (上部工の橋脚からの逸脱)	桁間の玉突き衝突	桁遊間の拡大	桁間衝突の衝撃吸収	
	支承の損壊	支承の補強	移動制限(桁かかり長でおさめる)	
	桁かかり長不足	桁かかり長の拡大 支承の補強	桁のぶら下がり	
下部工破壊モード	橋脚の崩壊	柱の耐力不足	柱の補強 免震化	—
		基礎の耐力不足	基礎の補強 免震化	—
	基礎地盤の変形による 基礎の傾斜・移動	液状化による流動力に対する耐力不足	基礎の補強 地盤改良 桁かかり長の拡大	移動制限(桁かかり長でおさめる) 桁のぶら下がり
		断層による地盤変形	長スパン化 桁かかり長の拡大	

2.4 落橋防止システムの作動シナリオ

本節では落橋の危険が生じるレベルの地震が生じた際に、落橋防止システムがどのように作動することを想定しているかを解説していく。最初に、想定される基本的な落橋モードを紹介し、その時に落橋防止システムがどのように作動することが理想なのかを述べる。次に、落橋防止システムが理想的に作動せず、落橋に至るケースの落橋防止構造の要素について考察する。

2.4.1 落橋モード

落橋が生じるケースとして、図-2.17に示す3つのモードが考えられる。上部工破壊モードは、桁間衝突等が生じた結果、過大な外力が上部工に作用し、そのことによって損傷、落橋へとつながると考えられる。下部工破壊モードは、ジョイントプロテクターや支承の強度が強すぎたために保耐法レベルを超えても破壊せずに、過大な力が下部工に作用して損傷、落橋へと繋がると考えられる。ジョイントプロテクターとは伸縮装置を補完するためのもので、上部工と下部工の変位を抑制するものである。狭義落橋モードは、落橋防止構造が正常に作動せずにけたかかり長を超える相対変位が生じて、上部工が下部工から脱落し、宙づりになったり落橋に至ったりするケースのことである。これらの上部工破壊モード、下部工破壊モード、狭義落橋モードのそれぞれについて、防止策を以下に示す。

①上部工破壊モード

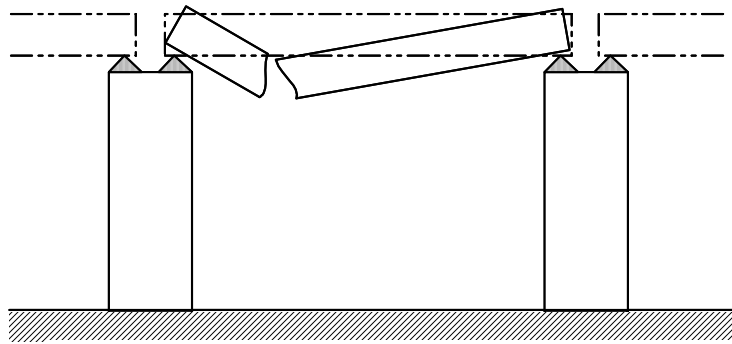
- (1)上部工に十分な強度をもたせる。
- (2)桁間衝突現象の回避。
- (3)桁間衝撃の緩和。
- (4)桁間衝突における緩衝作用をコントロールして落橋を防止。

②下部工破壊モード

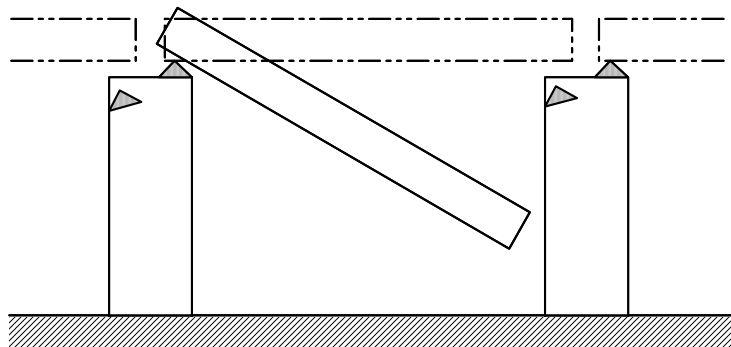
- (1)ジョイントプロテクターや支承を過度に安全側に設計しない。
- (2)倒れた後も桁と橋脚を拘束するような倒れ方の回避。

③狭義落橋モード

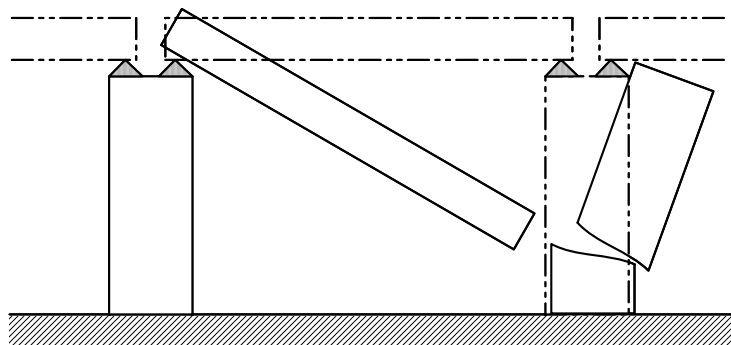
- (1)落橋防止構造が作動し始める時期が支承の破壊と同時になるようにする。
- (2)衝突力が橋脚に伝わるため、落橋防止システムに緩衝効果をもたせる。



上部工破壊モード



狭義落橋モード



下部工破壊モード

図-2.17 落橋の基本モード^{2.2)}

2.4.2 落橋防止システムの作動

落橋防止システムの理想的な作動は図-2.18 に示す。地震を受けて橋梁が示す挙動に応じてそれぞれの要素が機能する。ここで重要なのは機能を開始する時期だけではなく、それぞれの要素が破壊するタイミングも重要となる。このように一連のシステムとして落橋の防止を図っている。

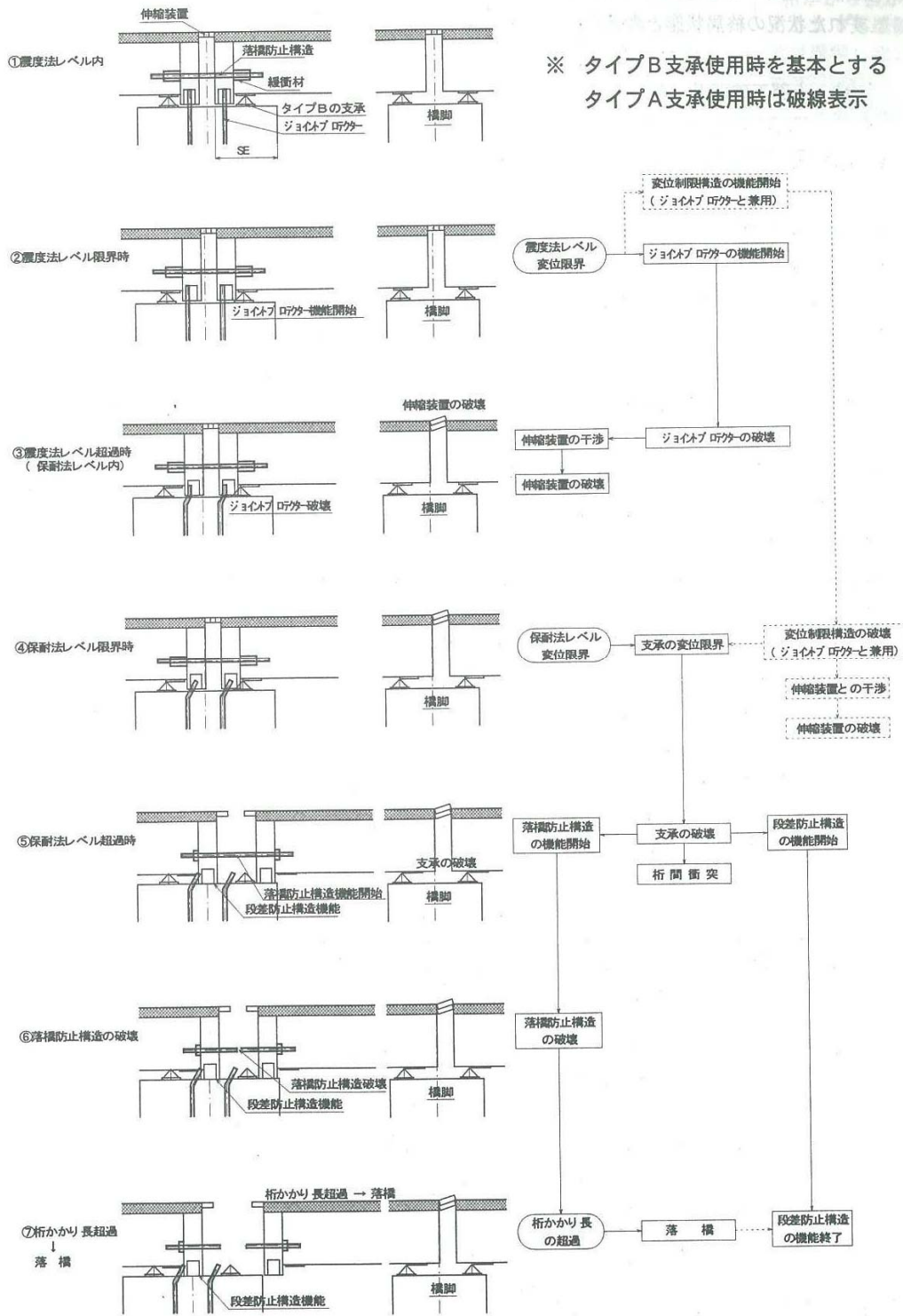


図-2.18 落橋防止システムの理想的な作動^{2.2)}

2.4.3 落橋防止構造が正常に作動せずに落橋に至るケース

落橋防止システムが理想通りに作動せずに落橋に至るケースがある。その中でも落橋防止構造の作動に着目し、それらの内容を表 2.2 に表記する。

表 2.2 落橋防止構造が作動せずに落橋が発生する条件^{2,2)}

遊間の距離	落橋防止構造の強度	落橋防止構造の影響	備考
短い	弱い	支承が破壊する前に、落橋防止構造が機能する。強度が足りない場合、保耐法レベル限界前に落橋防止構造と支承が連続して破壊し、落橋する可能性がある。	落橋防止構造の強度不足は致命的な設計のミスである。
	強い	支承が破壊する前に落橋防止構造が機能するが、落橋防止シナリオを逸脱することはない。	
長い	弱い	落橋防止構造が機能する前に桁かかり長をオーバーして橋脚から脱落する可能性がある。この場合、桁はぶら下がり状態となるが、強度が足りないと落橋防止構造が破壊し、落橋する可能性がある。	落橋防止構造の強度不足や、桁かかり長さをオーバーするまで落橋防止構造が機能しないなどは致命的な設計ミスである。
	強い	落橋防止構造が機能する前に桁かかり長をオーバーし橋脚から脱落する可能性がある。この場合、桁はぶら下がり状態となるが、落橋には至らない。	桁かかり長さをオーバーするまで落橋防止構造が機能しないのは致命的な設計ミスである。

2.5 落橋防止用緩衝材

落橋防止用緩衝材は本研究に関連する落橋防止システムの1つの要素である。緩衝材は、兵庫県南部地震以降、高架橋を構成する主要部材のひとつとして考えられる重要度の高いものとなっている。本節では緩衝材の必要性、役割、要求される機能、そしてどのような形式のものがあるかについて示していく。

2.5.1 衝突力低減効果とエネルギー吸収性

地震発生時に想定される桁同士、桁と橋台、桁と落橋防止装置の間で発生する衝突は、衝撃的な現象として扱うことができる。「衝撃」とは、当初離れた位置にある二つ、あるいはそれ以上の物体が瞬間的に衝突することである。

二つの物体の衝突開始（接触）までに、運動する物体が持っているエネルギーは、図-2.19(A)に示すように、衝突によって生じる衝突力と、衝突している時間（接触している時間）の積である力積に変換され、物体のひずみエネルギーとなる。したがって、衝突においては二つの物体が衝突している時間が重要である。衝突時の応答は、作用する衝突力が同じでも衝突する物体の剛性、質量、大きさなどによって、その物体に発生する応力やひずみは異なる。

兵庫県南部地震の際、橋梁で発生した衝突は、鋼材のような剛性の高い材料同士の衝突であり、衝突している時間は非常に短い。このため、大きな衝突力が発生し、落橋の原因となった。このことから、落橋防止装置には衝突力を緩和する目的で剛性の低いゴムなどの緩衝材が有効といわれている。剛性の低い材料の場合、図-2.19(B)に示すように衝突する時間が長いため発生する衝突力は小さくなる。ゆえにここで呼ばれる「衝突力低減効果」とは、剛性の低い材料を介して剛性の高い材料を衝突させることにより、衝突している時間（接触している時間）を長くして発生する衝突力を小さくする効果のことを言う。現在では、衝突後の衝突物体の運動について着目した、衝突エネルギー吸収効果も考慮にいった設計が提案されている。

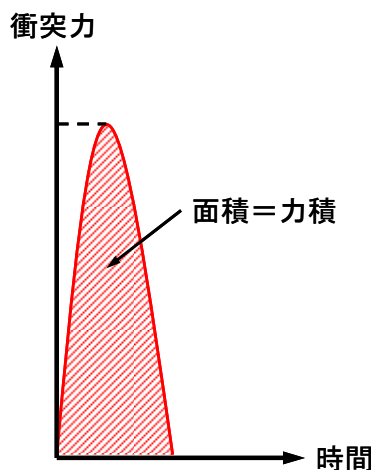


図-2.19(A) 力積

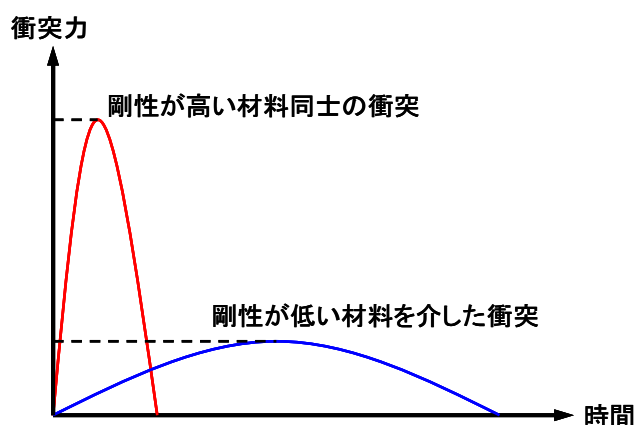


図-2.19(B) 衝突時間と衝突力

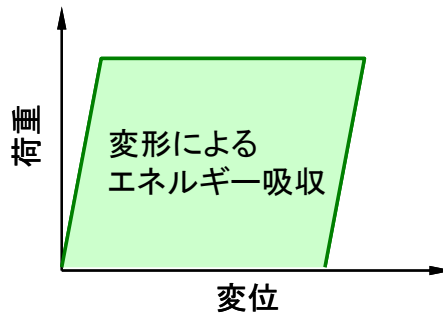


図-2.20 変形によるエネルギーの吸収(鋼材の場合)

図-2.21 に示すように、衝突を単純にモデル化して、固定物に剛性の低い材料(緩衝材)を取り付けた場合を想定する(ストッパー式の落橋防止装置にあたる)。一般に、衝突においてエネルギー保存則は成立しないが、衝突時間内に外力が作用しなければ、ニュートンの第2法則より力積と運動量の関係式が成り立つ。式2.9に示すように質点の運動量の時間変化率は、その質点に作用している力に等しい。式2.9を力と運動量に分解して時間で積分すると式2.10になる。式2.10は、質点に作用した力積と衝突前後の運動量が等しいことを示している。

$$F = m \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt} \quad \text{式 2.9}$$

$$\int F dt = \int dp \quad \text{式 2.10}$$

ここで、 F は質点に作用する力、 m は質点の質量、 v は質点の速度、 t は時刻、 P は運動量($P=mv$)、 $\int F dt$ は力積、 $\int dp$ は運動量の変化量である。

したがって、衝突に力積と運動量の関係式を適用すると、式2.11に示されるように衝突される側の剛性に関係なく衝突前後の衝突物の速度によって、力積の大きさが決定される。つまり、衝突前後の速度が等しい場合に力積が最大となり、衝突後の跳ね返りの速度が小さいほど力積が小さくなる。言い換えると、衝突物が衝突後に持つ運動エネルギーが小さくなるほど力積が小さくなるといえる。

$$\int_{\Delta t} F dt = mv_1 - mv_2 \quad \text{式 2.11}$$

ここで、 $\int_{\Delta t} F dt$ は衝突力による力積、 Δt は衝突力の作用時間、 m は衝突物の質量、 v_1 は衝突前の衝突物の速度、 v_2 は衝突後の衝突物の速度である。このことから、緩衝材が桁などの衝突物の持つ運動エネルギーを吸収しない場合、桁は衝突後も衝突前の速度で運動することになり、衝突後の桁の運動を抑制できないため、落橋に至る可能性を軽減することは難しい。また、図-2.21に示すような衝突において、運動エネルギーが吸収されたとすると、吸収された運動エネルギー ΔE は、衝突物の衝突前後の速度を用いて式2.12で表される。

$$\Delta E = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_2^2 \quad \text{式 2.12}$$

第2章 落橋防止システム及び落橋防止用緩衝材

以上より，緩衝材には衝突物に比べて剛性の低い材料を用いる必要があり，これらを介して衝突をさせることが重要である．また，緩衝材に求められる性能として，衝突している時間を長くさせることにより，発生する衝突力を低減させる「衝突力の低減効果」と，衝突後の衝突物の運動エネルギーを吸収及び低減させ，力積を小さくする「エネルギー吸収効果」の二つが考えられる．

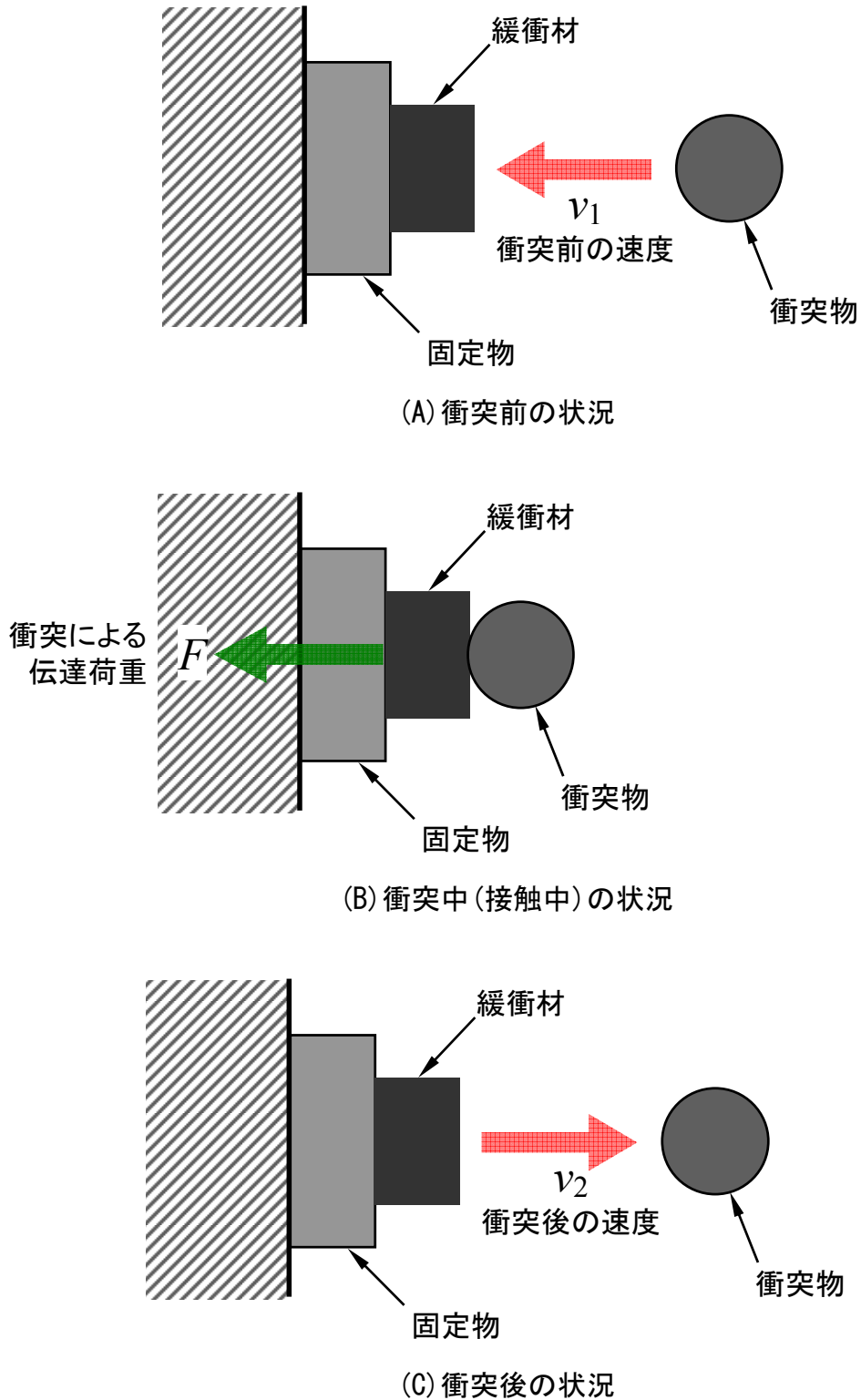


図-2.21 衝突のモデル化

2.5.2 緩衝材の役割

緩衝材の役割を大きく分けると、次に挙げる①と②がある。

①瞬間的に作用する上部構造の運動エネルギーを吸収する

緩衝材は地震力によって運動する上部構造の運動エネルギーを吸収する必要がある。上部構造の運動エネルギーを吸収しなければ、桁の運動は抑制されず、落橋に至る可能性がある。緩衝材を設置するスペースは狭小である場合が多いため、緩衝材には高いレベルのエネルギー吸収性能が要求される。

②瞬間的に作用する衝突力を低減する

緩衝材を設置する必要がある隣接桁間、桁と橋台の間での衝突や落橋防止装置への瞬間的な衝突力を低減させる必要がある。低減される衝突力は、許容される応力レベル以下でなければならない。

上記の①と②は緩衝材に求められる大きな役割である。これら以外に、③緩衝材ヒューズ論という考えがある。

③緩衝材ヒューズ論^{2.2)}

緩衝材の供用期間中に発生する確率の高い中小規模の地震、発生する確率の高い大規模地震、この二種類の地震に対して両方対応できる緩衝材を設置できることが望ましい。大規模地震にのみ対応したものでは、中小地震が生じるたびに補修が大掛かりな補修が必要となり、コスト増を招いてしまう。逆に中小地震に対応を合わせると、大地震では落橋等の被害が予想される。ここで2段階設計法の適用が考えられるのである。「支承ヒューズ論」の考え方では、地震がある程度以上になったら固定支承が破壊し、可動支承となる。これにより、上部構造の運動エネルギーを吸収でき、振動を抑制できる。この考え方を緩衝材に当てはめることができる。緩衝材の降伏点を明確にし、大規模地震時には降伏後のエネルギー吸収性能によって他の構成部材の損傷を防ぐ。中小地震においては降伏しないような設計をするというものである。

2.5.3 緩衝材に要求される機能

前節では緩衝材の役割について述べた。それらのことを踏まえると、緩衝材に要求される性能として、次に挙げるようなものがある。

①衝突力の低減

落橋防止装置及び落橋防止システム用緩衝材は、地震時に想定される隣接桁間、桁と橋台間の衝突及びこの間に設けられた落橋防止装置への衝撃的な衝突力を低減させる必要がある。また、低減された衝突力は、許容される応力レベル（構造物に着目した応力レベルもしくは、落橋防止システム用緩衝材の性能に着目した応力レベル）以下にしなければならない。

$$H_{max} < 1.5R_d < F_p \quad \text{式 2.13}$$

ここで、 F_p は落橋防止装置の最大耐力、 R_d は上部構造の死荷重反力、 H_{max} は衝突力が作用したときの緩衝材の最大発生荷重である。式 2.13 より、落橋防止装置の最大耐力は、最低限、桁の死荷重反力を 1.5 倍した設計地震力の値を満足しなければならない。また、緩衝材によって低減された衝突力は、落橋防止装置もしくは上部構造の設計強度以下（桁の死荷重反力を 1.5 倍した設計地震力の値以下）に設定する必要があるといえる。

②上部構造（桁）の運動エネルギーの吸収

落橋防止装置及び落橋防止システム用緩衝材は、地震力によって運動する上部構造（桁）の運動エネルギーを吸収する必要がある。また、設置スペースが狭小であることを考慮すると、落橋防止装置及び落橋防止システム用緩衝材には変形性能と高いエネルギー吸収性能を保障するものが望ましいと考えられる。

$$E = \frac{W \cdot V^2}{2g} < E_s = \sum E_i \quad \text{式 2.14}$$

ここで、 E は上部構造の最大変位速度から換算される運動エネルギー量、 W は落橋防止システムの上部工分担重量、 V は上部構造の最大応答速度、 g は重力加速度、 E_s はシステム全体で吸収できるエネルギーの総量、 E_i は落橋防止装置および落橋防止システム用緩衝材 1 個の吸収エネルギー量である。

式 2.14 より、落橋防止装置もしくは落橋防止システム用緩衝材が確実に上部構造の運動エネルギーを吸収するだけのエネルギー吸収性能を有することが重要であると考えられ、落橋防止システム用緩衝材のエネルギー吸収性能を明確にする必要がある。システム全体で考えると支承や複数の落橋防止システム用緩衝材を取り付けた落橋防止装置を設置する場合を考慮して、個々の落橋防止装置に対し、吸収エネルギーの分担率を明確にさせる必要があるといえる。

③桁かかり長に達するまでの運動制限

落橋防止装置および落橋防止システム用緩衝材は、地震によって、上部構造が桁かかり長に達するような運動を制限する必要がある。

$$S_E > \Sigma S \quad \text{式 2.15}$$

ここで、 S_E は桁かかり長、 ΣS は落橋防止システム用緩衝材を取り付けた落橋防止装置の変形量である。

式 2.15 より、落橋防止システム用緩衝材を取り付けた落橋防止装置の変形量は、桁かかり長以下に設定しなければ、落橋防止システム用緩衝材が機能を発揮する以前に落橋する可能性がある。ここで、複数個の落橋防止装置を設置した場合、個々の限界変位量から計算される総合的な変形量は桁かかり長以下に設定されるべきであるといえる。

2.5.4 緩衝材の形式

落橋防止用緩衝材の形式には図-2.22(A)、図-2.22(B)のようなものがある。桁同士、桁と橋台を連結させることによって引張側にも相対変位を生じさせないようにする連結方式、桁と桁の間、または桁と橋台間に設置することによって衝突を緩和し、落橋に至る相対変位や上・下部構造またはその他の落橋防止構造の破壊を防ぐことを目的とするストッパー式の二種類に大きく分けることができる。本研究では主に後者を対象としている。

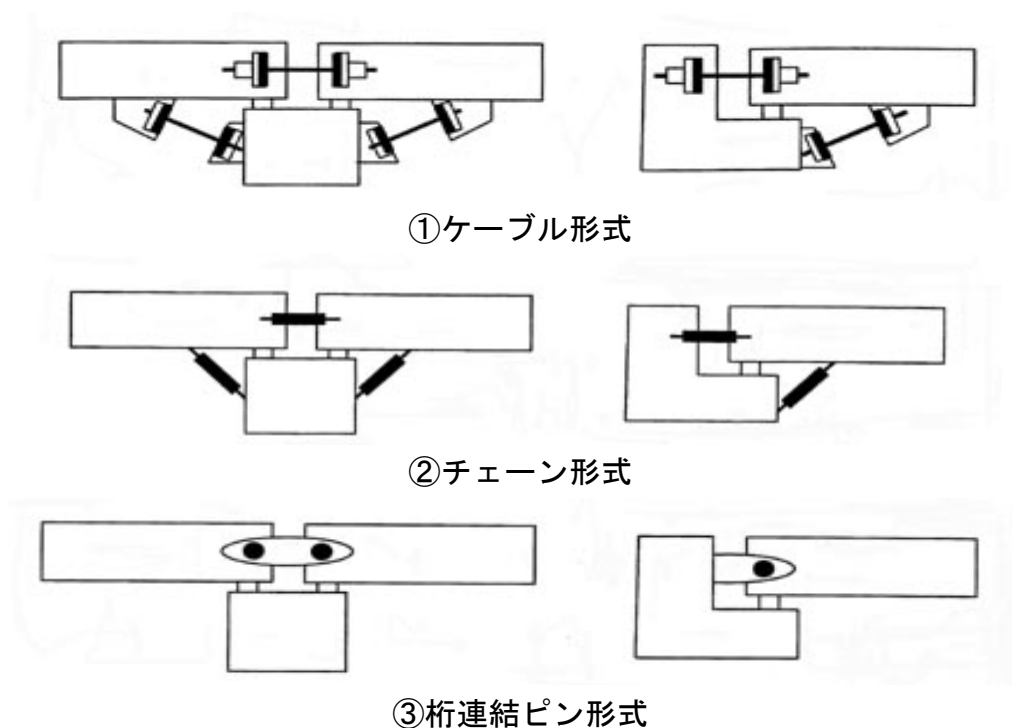


図-2.22(A) 連結方式の緩衝材^{2,2)}

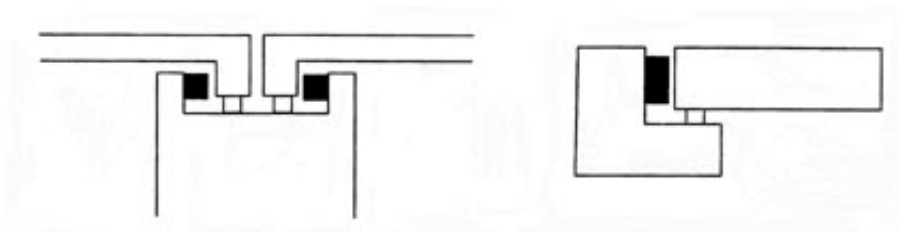


図-2.22(B) ストッパー式の緩衝材^{2.2)}

連結方式

①ケーブル形式

隣接する桁間及び桁と橋台間をケーブル式の落橋防止装置で連結する方式である。一般に、ケーブルなどに作用する衝撃的な力を緩和するためにゴム製緩衝材が用いられている。この装置は、ケーブルと分離されたもので、ゴム本来の圧縮ばねを利用し、衝突力を緩和するものである。最終的には、ケーブルの引張強度にて落橋を防止する構造となる。

②チェーン形式

隣接する桁間及び桁と橋台間をチェーン式の落橋防止装置で連結する方式である。一般に、チェーンなどに作用する衝撃的な力を緩和するためにゴム製緩衝材が用いられている。この装置は、弛緩状態のチェーンとゴムを一体化した構造とし、チェーンがゴムの変形を拘束するためゴムの剛性を向上させ、チェーンの作動時から降伏状態までに衝撃的に作用する力を緩和させる。なお、最終的にはチェーンの引張強度とチェーンの塑性変形より落橋を防止する。

③桁連結ピン形式

隣接する桁間及び桁と橋台間を桁連結ピン式の落橋防止装置で連結する方式である。桁連結板に作用する衝撃的な力を緩和するために繊維補強ゴム製緩衝材を取り付けたゴム緩衝ピンが用いられている。この装置は、連結ピンと一体化した繊維補強ゴムが連結ピンと桁連結板との剛性のバランスをとり、瞬間的な力が作用した場合の桁連結板への応力集中を緩和し、連結板の延性を高めるようにしている。すなわち、ゴム緩衝ピンにより荷重を低減させ、桁連結板にて落橋を防止する。

④ストッパー式

桁と橋台間及び落橋防止装置としての落橋防止壁に取り付けられ、主に落橋防止システム用緩衝材の圧縮変形特性を利用して、上部構造と橋台もしくは落橋防止壁との衝突が生じた際の衝突力を低減する効果に加え、上部構造の運動エネルギーを吸収する効果を期待したものである。落橋防止システム用緩衝材としては、通常の矩形ゴムに加え、高減衰ゴム、繊維補強ゴム、FRP、熱可塑性エストラマー等を使用した各種の構造がある。

2.5.5 緩衝材の分類

落橋防止用緩衝材を力学的，性能・機能に分類すると以下のようなになる。

①力学的分類

(1)ひずみ硬化型の荷重-変位関係を示す緩衝材

圧縮初期の荷重が小さく，変形（ひずみ）が進行するに伴い荷重が急激に増加する材料．一般にゴムに代表される荷重-変位関係を有する緩衝材を示す。

(2)弾塑性型の荷重-変位関係を示す緩衝材

荷重-変位関係において，明確な変曲点（降伏点）が存在し，変形が進行しても一定荷重を有する領域のある材料を指す．一般に鋼材料はこの特性を持っている。

それぞれの応力-ひずみ関係の型を図-2.23 に示す．落橋防止システム用緩衝材の力学特性は，作用する衝突速度の影響を受けると考えられるため，静的載荷実験の荷重-変位関係より分類している。

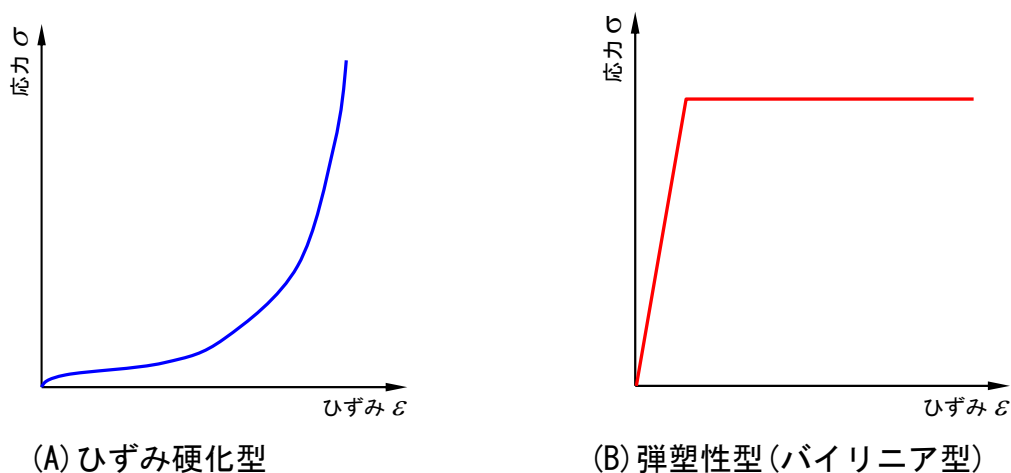


図-2.23 力学特性から分類できる緩衝材の荷重-変位関係図^{2.2)}

②性能・機能による分類

耐力(落橋防止装置の設計荷重)，ストローク(設計荷重が作用したときの緩衝材の変位)，落橋防止システムとしての適用(落橋防止構造および変位制限構造)，落橋防止装置及び落橋防止システム用緩衝材の吸収エネルギー量での分類を行うことができる。

第3章

ゴム製緩衝材・ゴム支承 に関する研究の紹介

第3章 ゴム製緩衝材・ゴム支承に関する研究の紹介

3.1 本章の内容

本章では兵庫県南部地震以降、盛んに行われている落橋防止構造及び、緩衝材に関する研究について、どのようなものがあるか紹介する。他の研究についての理解を深めることで、本研究の目的や必要性の位置付けが明確となる。また、他の研究の優位性や特徴を認識することも重要となる。特に、落橋防止構造に設置が推奨されている緩衝材を設けている文献を調査しており、本研究の参考としている。その中でも緩衝材として有望とされているゴムを用いた緩衝材に着目した研究を調査している。他の研究について5種類に分類していくつかを示す。

3.2 落橋防止構造が構造全体に及ぼす効果を追求している研究

主に落橋防止構造(緩衝材)を、高架橋を構成する一つの要素として考え、大地震時における落橋防止構造の高架橋全体への損傷低減効果に着目した研究である。

- ①衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果
- ②桁間衝突の影響に対するゴム製緩衝装置に有効性に関する実験的検討

3.3 落橋防止構造及び緩衝材の力学的挙動そのものに着目した研究

落橋防止構造及び緩衝材の力学的挙動そのものに着目した研究である。

- ①ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究
- ②ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察
- ③高面圧を受ける直方体ゴム製耐震緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究
- ④落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究
- ⑤弾塑性型特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究
- ⑥エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果

3.4 ゴム製緩衝材の性能評価法・設計法に関する研究

ゴム製緩衝材の性能評価法、設計法に関する研究である。

- ①落橋防止用矩形状ゴム製緩衝材の性能評価法に関する基礎的考察
- ②落橋防止用矩形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察

3.5 ゴム製緩衝材・ゴム支承の温度特性に関する研究

周囲の温度による、ゴムの劣化速度や力学特性の変化に関する研究である。

- ①天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究
- ②寒冷地気温変動下における高減衰ゴム支承材内部温度の応答確認実験及び数値解析

3.6 ゴム製緩衝材・ゴム支承の配合に関する研究

ゴムそのものの材料設計に関する研究で、ゴムの配合に関しての検討を行っている。

フェライト混練高減衰積層ゴムの開発

3.2 落橋防止構造が構造全体に及ぼす効果に着目した研究

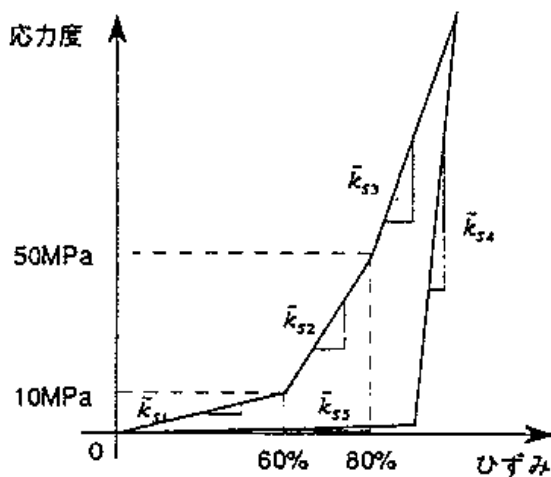
3.2.1 衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の低減効果

川島ら^{3.1)}は2連の5径間連続高架橋において桁間衝突用緩衝装置と桁間連結材を組み合わせて設置し、緩衝装置の効果について解析的研究を行った。構造物間の衝突やケーブル式桁間連結装置の効果については、既往の研究で検討されていたが、ゴム製の緩衝装置の効果を検討したものは存在しなかった。ゴム製緩衝装置の衝突低減効果を検討した先駆的な研究といえる。

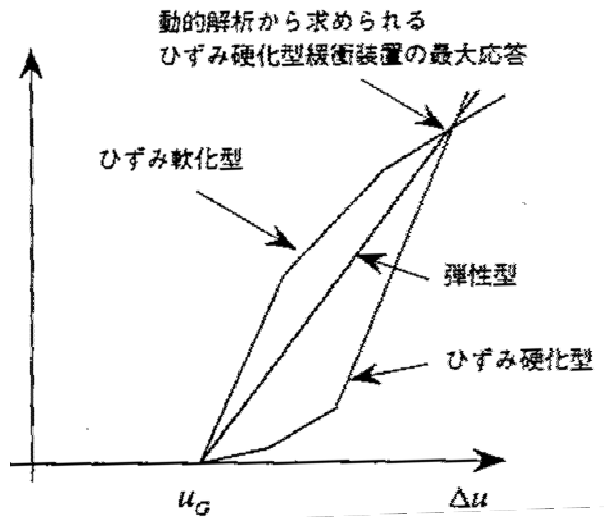
解析に用いたゴム製緩衝装置は、別途に行ったゴムの繰り返し実験より得られた結果を用いて圧縮特性をモデル化している。圧縮特性はひずみ硬化型を示しており、比較のためにひずみ軟化型の圧縮特性をもつ緩衝装置についても解析検討している。また、エネルギー吸収性の有無を比較するために、緩衝装置の履歴曲線にエネルギー吸収性をもたせないものも検討している。

緩衝装置を設けた場合と設けない場合とで解析を行っており、桁中央部及び桁かけ違い部において最大応答加速度、桁間での衝突力が緩衝装置を設けた場合に大幅に低減できていることから、ゴム製緩衝装置による衝突力低減効果が示されている。エネルギー吸収性の点からみると、緩衝装置に生じる最大作用力は、エネルギー吸収性を持っているものの方が低減することができている。

ひずみ硬化型の方が、大きな緩衝力を桁間に伝える。そのため桁同士の応答は均等化され、連続橋のように連結して応答する。このことから落橋の危険性は減少するとされる。



(A) ゴムの応力-ひずみ関係



(B) 様々な応力-ひずみ曲線

図-3.1 解析に用いる緩衝装置のモデル化^{3.1)}

3.2.2 桁間衝突に対するゴム製緩衝装置の有効性に関する実験的検討

庄司ら^{3,2)}は振動台実験装置を用いて2連の桁橋と桁端部にゴム製緩衝装置を設置し、衝突力低減効果について検討を行った。桁間衝突の再現やゴム製の緩衝装置を設置した場合の衝突力低減効果の検討について、解析的に検討されているケースがほとんどで、実験的検討はほとんどない。振動台での実験であるため、解析の対象となっている実橋レベルの再現は可能ではないが、衝突力低減効果の点からみると十分に有意義な検討で、先駆的であると言える。

固有周期の異なる2連の桁橋に、兵庫県南部地震で観測された地震波をスケールダウンしたものを入力地震動として加震し、緩衝装置を設置した場合と設置しない場合とでその応答特性を比較している。緩衝装置は直方体のゴム材として、圧縮側に桁の相対変位が生じた場合、引張側に桁の相対変位が生じた場合の両方に設置されている。

結果としては、緩衝装置を設けることによって瞬間的に生じる（パルス状）応答加速度が低減されていることから、地震応答の低減効果が発揮されている。桁同士の平滑化（隣接する桁の応答変位が近づくこと）についても、緩衝装置を設置することによって進むことが分かり、このことから桁同士が連結され、あたかも一つの連続橋として応答する。これは緩衝装置が変位ストッパーとして機能するため、桁の応答変位を抑える上では望ましいとされている。この連結効果は、先に示した川島らが行った解析的検討と同じ現象が生じていることが分かる。

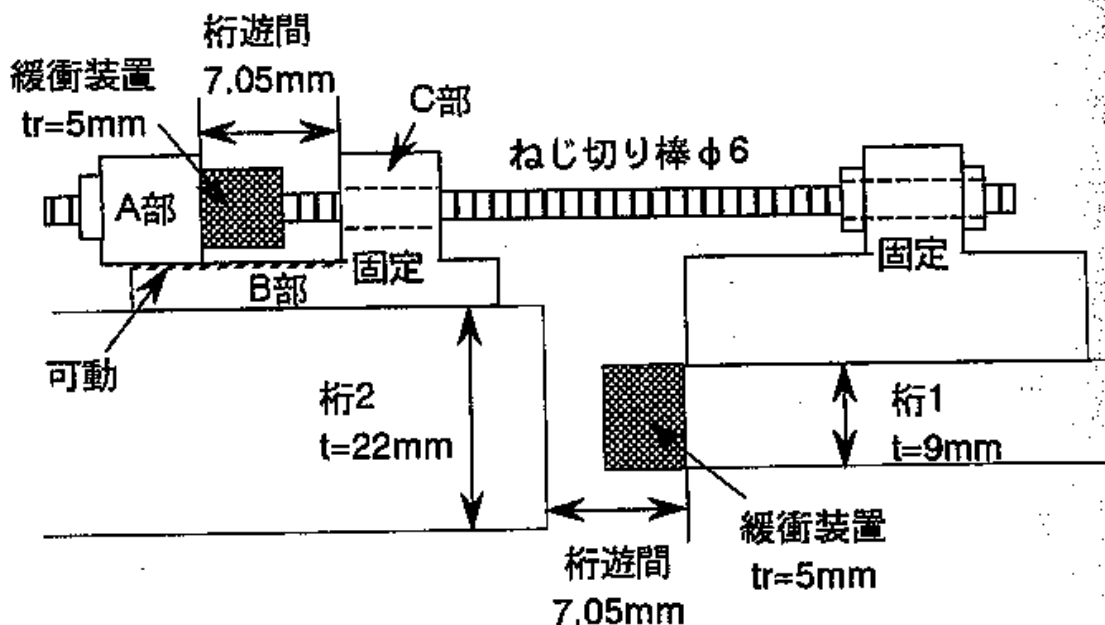


図-3.2 緩衝材の設置状況^{3,2)}

3.3 落橋防止構造及び緩衝材の力学的挙動に着目した研究

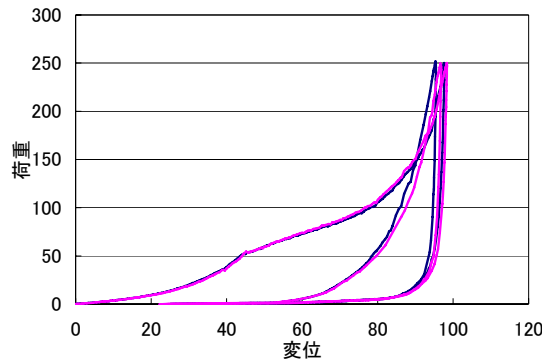
3.3.1 ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究

ゴム製の緩衝材より低価格で、省スペースでよりエネルギー吸収性に優れる市販の型钢を緩衝材として用いることに着目している。種々の型钢の中でエネルギー吸収性能が相対的に高い鋼管を緩衝材として用いることにし、緩衝装置を有する免震橋の動的解析によってその緩衝装置の有効性を立証している^{3,3)}。その結果、鋼管が緩衝材として優れていることが示されたものの、鋼管が完全に破壊した際に反力が上昇してしまうという欠点が指摘された。これにより、繰り返し衝突が生じた際に緩衝効果が得られなくなってしまう。皆川ら^{3,4)}は、この欠点を補うために、繰り返し衝突に対して安定した緩衝性・エネルギー吸収性があるゴムを鋼管に巻く形式のものを提案している。

ゴム鋼併用型緩衝材の衝撃低減効果や衝撃時のエネルギー吸収量を静的載荷実験により測定し、評価が行われている。これにより、優れたエネルギー吸収性を持つことを示し、鋼管を単独で緩衝材として使用するよりも耐衝撃性は優れることを示している。そして、ゴムが復元することから繰り返し衝突にも対応できることも示している。また、中小の地震ではゴム管のみでエネルギー吸収し、大地震では鋼管も併用してエネルギー吸収することから、2章で示した「緩衝材ヒューズ論」という二段階設計法としての働きが可能となる。



(A) ゴム鋼併用型緩衝材



(B) 荷重-変位関係

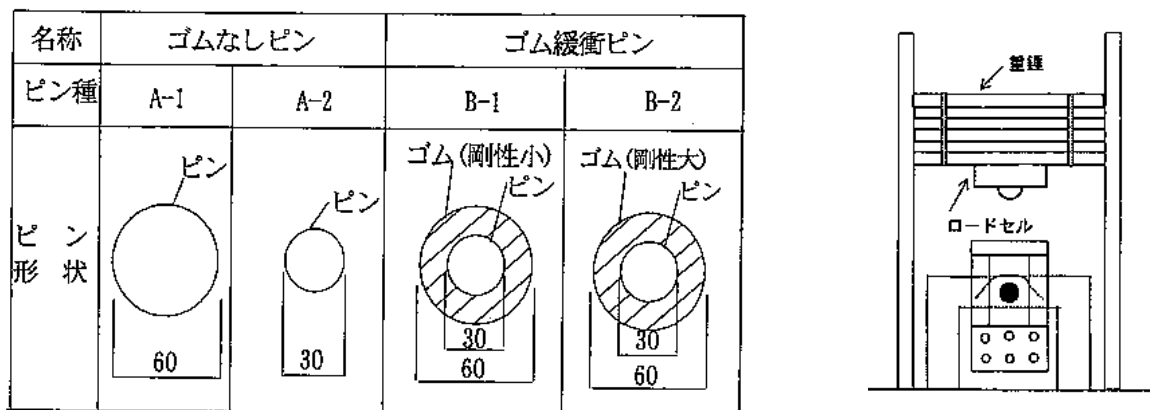
図-3.3 ゴム鋼併用型緩衝材に関する研究^{3,4)}

3.3.2 ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察

兵庫県南部地震レベルの地震に対しては、落橋防止装置によって落橋を防ぐことは困難であると考えており、より高い耐震性能をもつ落橋防止連結板装置等と併用して、それぞれの装置の破壊を想定した多段階な落橋防止システムの開発が望ましいとされている。しかし、既存の落橋防止装置の改修が困難な箇所も非常に多く、園田ら^{3.5)}は施工実績が多いメガネタイプの落橋防止用連結板装置の簡易な改良による耐震性能の向上を目指している。改良手段としては、鋼製の連結ピンの周囲に、緩衝材として高強度の積層繊維ゴムを巻く形式を提案している。そして、その効果について定性的・定量的な評価を行っている。

衝突力低減効果の観点からは剛性の低い材料特性が望ましいのに対して、衝撃的なエネルギーを吸収する効果については、大変形をする剛性の高いものが望ましいとされている。ゴムは鋼材に比べ、剛性が $1/1000 \sim 1/10000$ と低く、衝撃エネルギーを吸収するにはあまりにも剛性が低いため、ゴムの中に高強度の繊維を埋め込む形式を選択し、ゴムの特性を有したまま、剛性と破断強度を向上させている。積層繊維ゴムの緒元によって、ゴムの剛性と破断強度は異なってくるため、2種類のものを用いている。そして、落錘式衝撃実験と高速破壊実験の2種類を行い、衝突力の低減効果と衝撃エネルギーの吸収性能について検討している。

結果としては、使用時レベルでは荷重分散効果と衝突力低減効果に優れており、終局時レベルにおいては限界吸収エネルギーの増大することが確認されている。



(A) ピンとゴムの巻き方

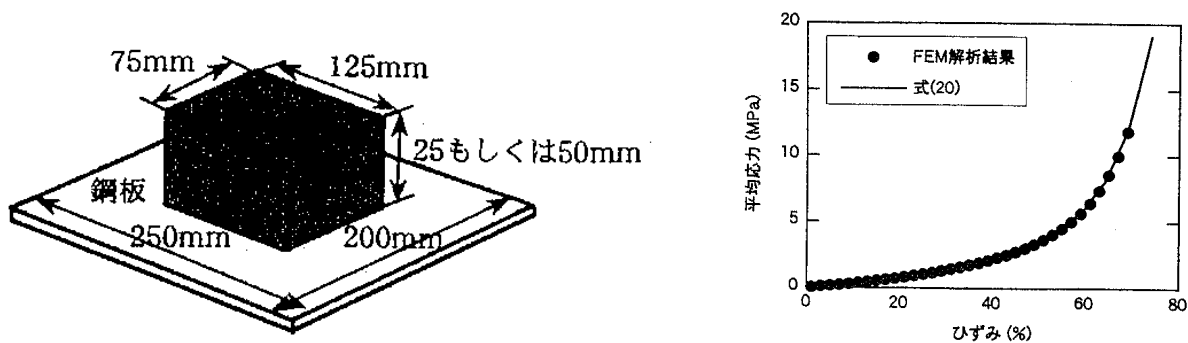
(B) 落錘式実験装置

図-3.4 ゴム緩衝ピンに関する研究^{3.5)}

3.3.3 高面圧を受ける直方体ゴム製耐震緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究

潤田ら^{3,6)}は大変形時におけるゴム製緩衝装置の応力-ひずみ関係を推定できる方法を提案している。弾性ゴム製緩衝材の圧縮特性は、荷重の繰り返しや载荷速度に対して安定していることは既に確認されている。圧縮ひずみが80%に達する大きな変形下においても、ゴムのエネルギー吸収特性・復元力特性は安定しており、衝突緩衝装置として有望であると考えられている。そのため、ゴム製緩衝装置を設計するにあたって応力-ひずみ関係のモデルの構築は重要となり、この研究で定式化を試みている。

緩衝装置として、直方体の弾性ゴムの一面に橋梁取り付け用の鋼板を固定し、他の面は自由とした状態で桁間衝突に伴う圧縮力を受けるタイプとしている。载荷実験とMooney-Rivlin式を用いた大変形有限要素解析を行っている。結果としては、要素実験に基づいて係数を定めれば、70%程度までのゴム製緩衝装置の応力-ひずみ関係を精度良く表すことができている。



(A) 直方体ゴムの形状 (B) 応力-ひずみ関係の比較

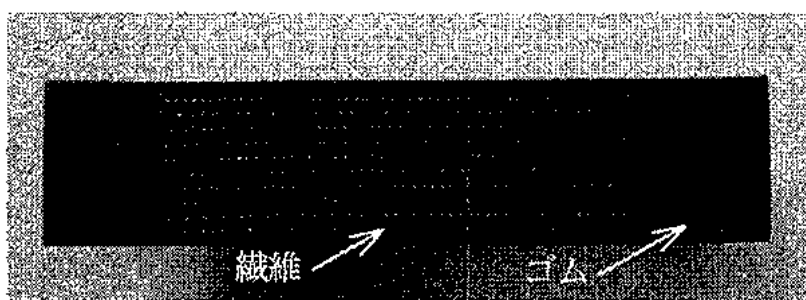
図-3.5 直方体ゴム緩衝装置に関する研究^{3,6)}

3.3.4 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究

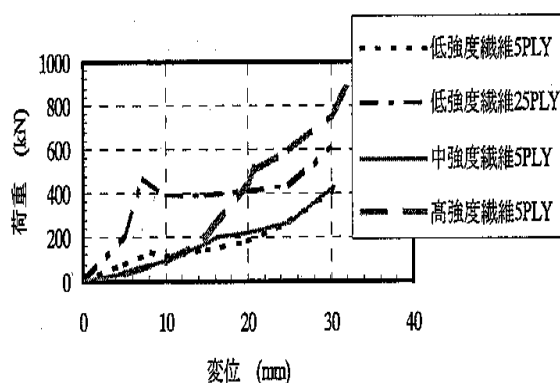
西本ら^{3.7)}は3.3.2節の「ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止用連結板」と同様に、積層繊維ゴムを用いた緩衝材の開発を行っている。3.3.2節では連結板のピンに使用する緩衝材であったが、ここでは3.3.3項の場合と同様に、桁間衝突の際に生じる圧縮部材としての緩衝装置の開発を行っている。積層繊維補強ゴムは通常のゴムよりも高い剛性を示し、繊維が破断する現象を降伏点と定義することができている。延性的な圧縮挙動を示し、さらには通常のゴムよりも高いエネルギー吸収性能を示している。

積層繊維補強ゴムの衝突力低減効果や衝撃時のエネルギー吸収量を落錘式衝撃実験により測定し、その評価をこの研究で行っている。そして、緩衝材を介して落橋防止構造に伝達される荷重を、静的・高速載荷実験から得られる荷重-変位関係をもとに予測している。

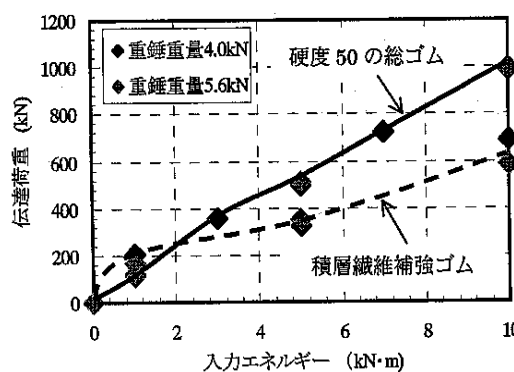
衝突力低減効果について、落錘の入力エネルギーが小さい時には高剛性であるために通常のゴムよりも期待できないとされている。逆に繊維が破断する大きな入力エネルギーのもとでは衝突力低減効果がかなり発揮されている。このように、埋設繊維の衝突力低減効果を犠牲にすることができれば、通常のゴムよりも有用な緩衝材となるといえる。しかし、埋設繊維の本数や強度等が変化することによって、圧縮特性は大きく変化するため、実際の落橋防止システムに適用するにあたっては、積層繊維補強ゴムの材料緒元の決定法を確立する必要がある。



(A) 積層繊維補強ゴムの断面写真



(B) 荷重-変位関係 (PLY=埋設繊維数)



(C) 伝達荷重-入力エネルギー関係

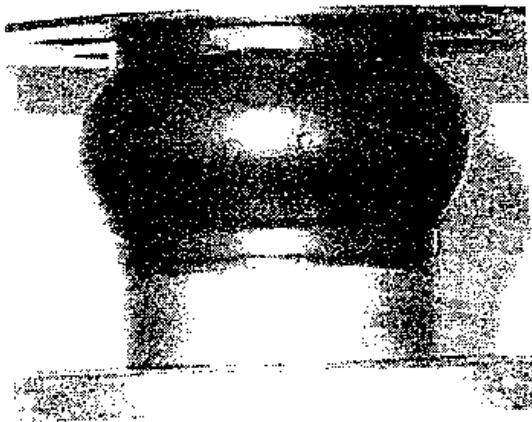
図-3.6 積層繊維補強ゴムに関する研究^{3.7)}

3.3.5 弾塑性型特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究

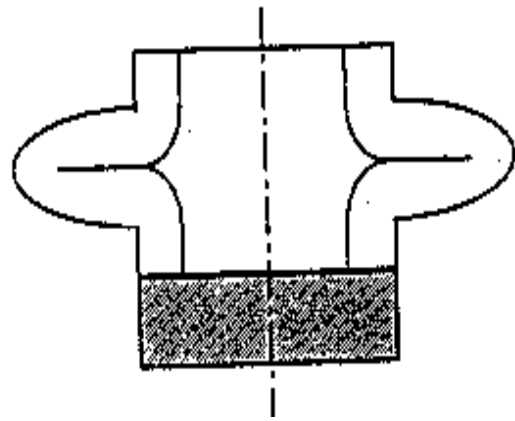
越峠ら^{3,8)}は弾塑性特性を有する円筒型のゴム製緩衝材を提案している。円筒型のゴムに圧縮変位を作用させると、ある変位で座屈が生じる。このことから荷重-変位関係は弾塑性型となり、エネルギー吸収性能に優れたものとなる。

この研究では、圧縮載荷実験で得られた結果を踏まえて振動台実験を行い、地震時における衝突力低減効果を把握している。そして、動的解析を用いて衝突時の挙動を再現している。さらに円筒型ゴム製緩衝装置の設計法について検討を行っている。

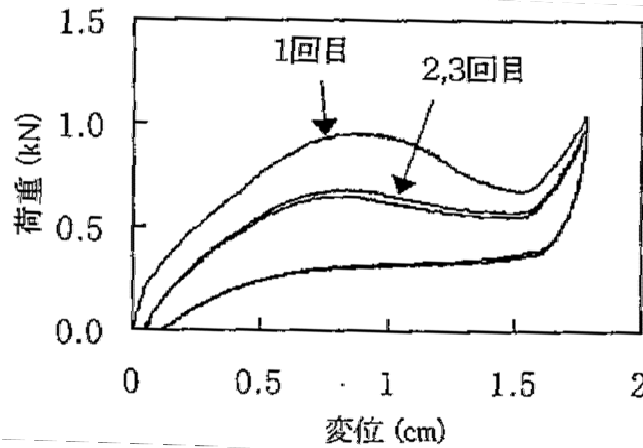
円筒型ゴム製緩衝材は、直方体ゴム製のものよりも衝撃荷重・桁の応答加速度を低減する効果が大きくなる結果より分かっている。また、動的解析によって、振動台実験で得られた結果を再現することが可能としている。



(A) 試験体の座屈変形



(B) 変形状態



(C) 円筒型ゴム製緩衝装置の荷重-変位関係

図-3.7 円筒型ゴム製緩衝装置に関する研究^{3,8)}

3.3.6 エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果

村田ら^{3.9)}は二段階ばね構造をもつ落橋防止装置について、そのエネルギー吸収性能からみた耐震補強効果を中心に検討を行っている。落橋防止装置の基本構造として、レベルⅠ地震時には水平移動量を数mmに抑え、レベルⅡ地震時には桁座縁端までの距離を越えないように装置の変位量を数百mm以下に制限しつつ、桁からの衝突エネルギーに対してエネルギー吸収性能を有することが必要である。これらのことを踏まえて、この研究では、装置の初期剛性を大きくするための剛構造要素と、エネルギー吸収性能を高めた柔構造要素からなる二段階ばね構造としている。レベルⅠ地震時では外殻が桁の移動に抵抗し、レベルⅡ地震時では、外殻が破壊したとしても、内部のエネルギー吸収性能の高い柔構造により衝突力を緩和させる構造としている。

この研究において、緩衝設置を設置する構造物として考慮しているのは鋼鉄道橋で、落橋防止構造を単純なものとするために、小型化を目指している。このことも考慮して動的解析・動的載荷実験を試みている。結果より、二段階ばね緩衝装置は、桁の水平変位を抑制しつつも、エネルギー吸収効果によって桁からの作用を低減できること、橋脚基部の塑性化を抑制することが可能であることが確認されている。落錘式衝撃実験においても、衝撃力低減効果が示されている。

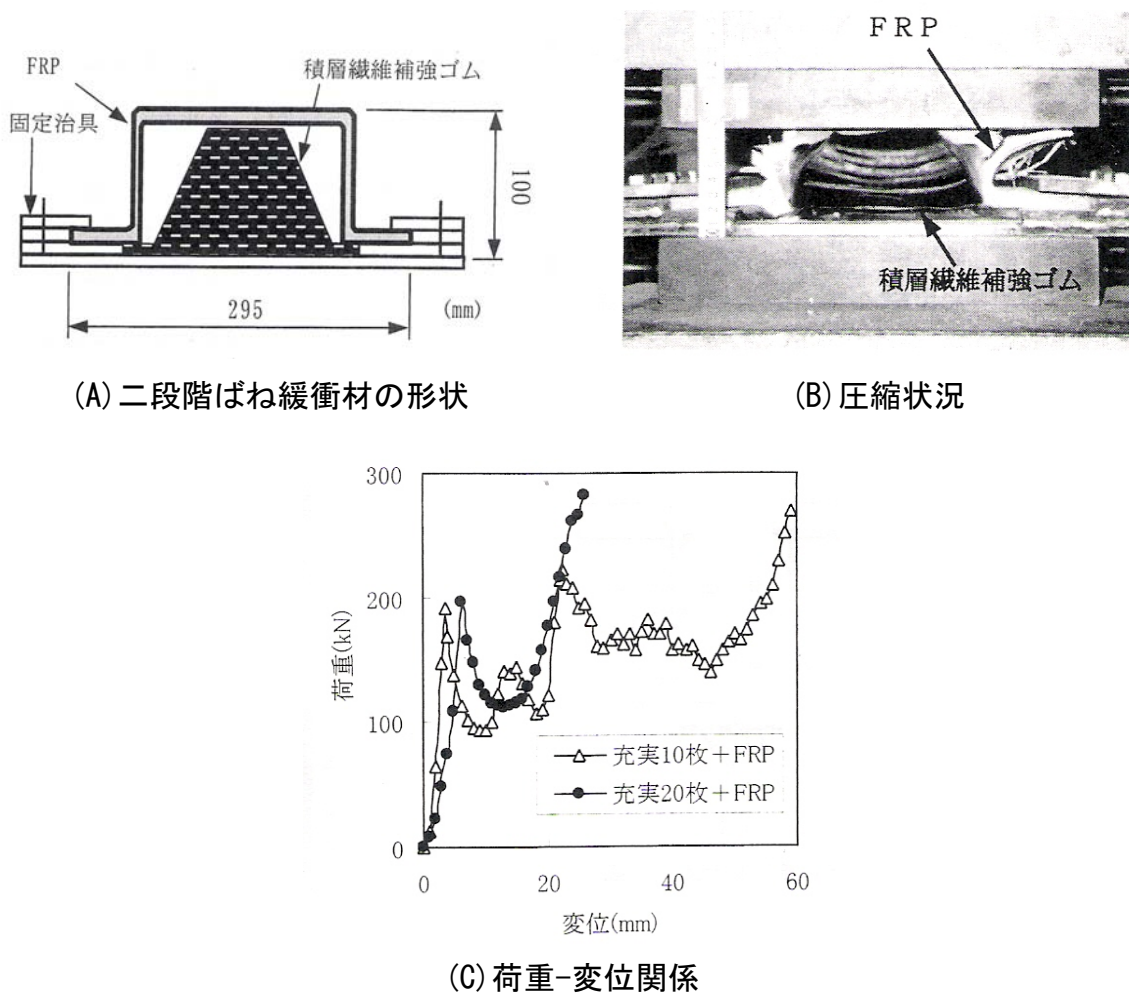


図-3.8 二段階ばね緩衝材に関する研究^{3.9)}

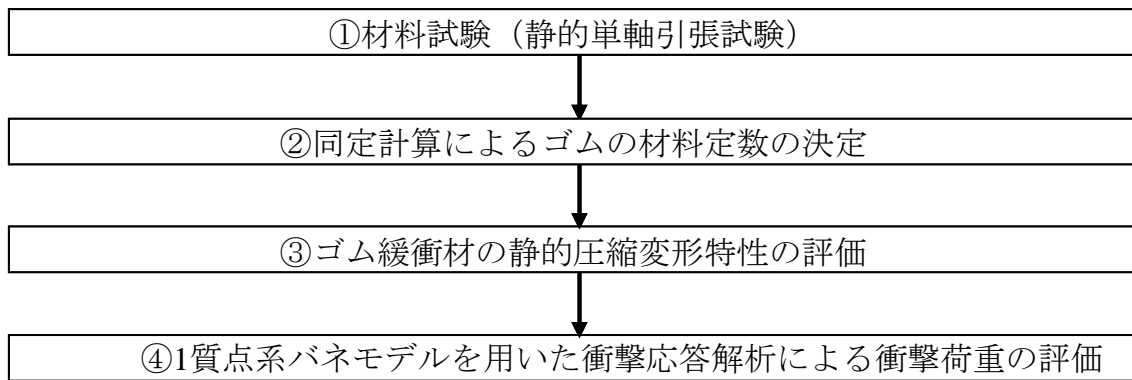
3.4 ゴム製緩衝材の性能評価法・設計法に関する研究

3.4.1 落橋防止用矩形形状ゴム製緩衝材の性能評価法に関する基礎的考察

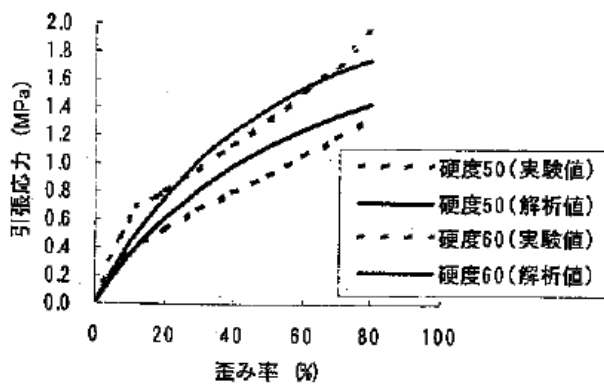
現在、緩衝材としてゴムの使用が推奨されているが、ゴムの性能評価について汎用的な方法は確立されておらず、実験データに基づいた現象論的な検討をもとに使用するゴムの種類や寸法を決定しているのが実状である。

園田ら^{3.10)}は、落橋防止用緩衝ゴムの性能を簡易に評価する手法について検討している。まず、ゴム製緩衝材に対する重錘落下実験を行い、発生する衝撃荷重を測定した。次に、JIS規格に基づく単軸圧縮試験から求めた材料定数を超弾性体の構成式に適用した3次元大変形有限要素解析を行うことで、緩衝ゴムの基本的性能を表す静的圧縮荷重-変位特性が精度良く得られることを確認している。

さらに、数値解析で求めた圧縮荷重-変位関係を非線形バネとした1質点系モデルによる簡易な衝撃応答解析で、実際の衝突荷重を実用レベルで推定することについて検討した。また、一次元波動解析によりゴム内の応答波の伝達状況を調べ、適用範囲についても検討した。この研究で示す手順を用いれば、使用するゴムの引張試験を行うだけで矩形形状緩衝ゴムの性能評価を行うことが可能であることを確認している。



(A) ゴム緩衝材の衝撃緩衝効果の評価方法



(B) 応力-ひずみ率関係

図-3.10 ゴム製緩衝材の性能評価法に関する研究^{3.10)}

3.4.2 落橋防止用矩形形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察

ゴムは、剛性が小さく可逆的な大変形が可能であり、繰り返し衝突への対処が必要な場合にも適用できることから、兵庫県南部地震以降には落橋防止用緩衝材として利用される機会が多くなっている。一般に、ゴムは厚さとともに基本的性質である荷重-変位特性が大きく変化するなど、厚さは重要な因子と考えられ、その決定については十分な検討を行う必要がある。しかし、使用するゴムの種類や寸法は、その汎用的な性能評価法が確立されていないため、実験データに基づいた現象論的な検討をもとに決定されているのが実状である。

西本^{3.11)}らは、落橋防止用矩形形状ゴム緩衝材の合理的な設計を簡易に行う手法について検討している。すなわち、設計者が緩衝材に期待する衝突力低減効果とエネルギー吸収量を設定すれば、3次元有限要素法によるゴムの大变形解析結果を用いて、緩衝材として要求を満足するゴムの種類や寸法を決定する手法を提示した。また、提示した設計手法により、通常の硬度の2種類を用いた場合の試設計を行っている。さらに、通常のゴム製緩衝材よりもエネルギー吸収能力が大きい積層繊維補強ゴムについても検討を行っている。

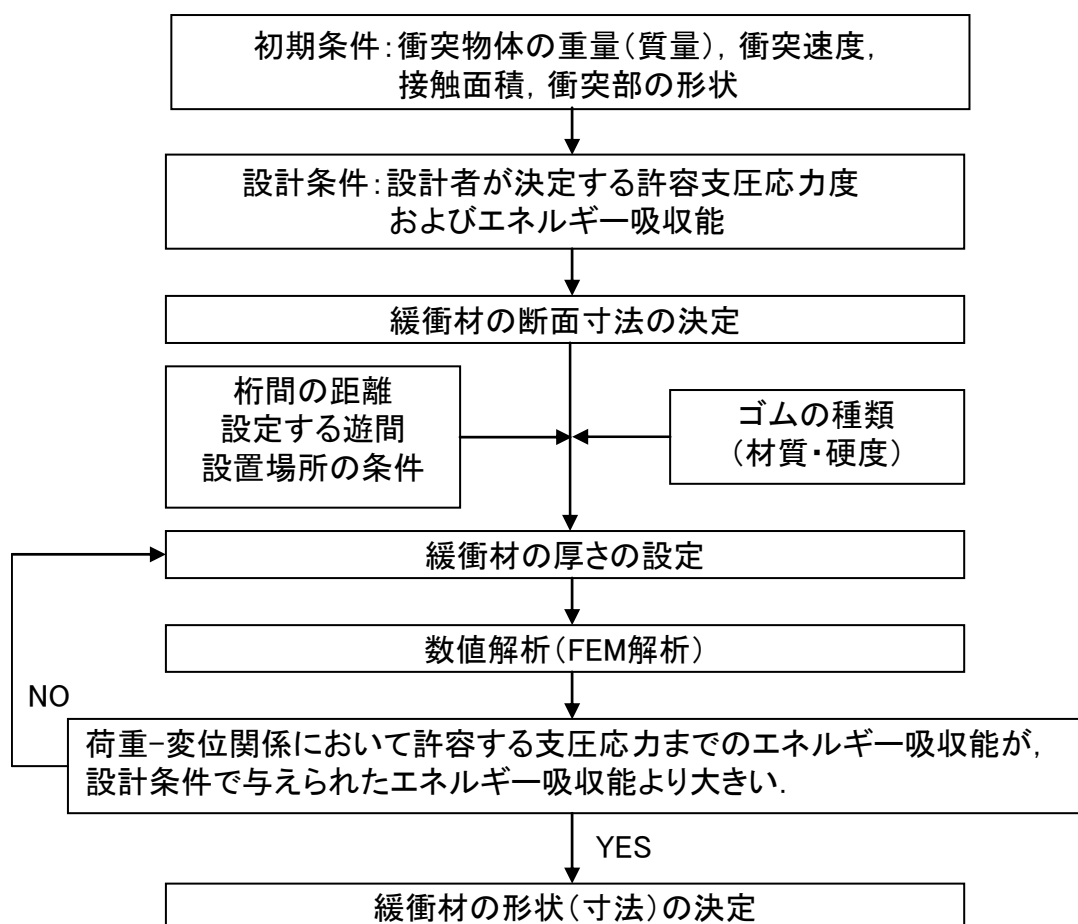


図-3.11 ゴム製緩衝材の設計法に関する研究における緩衝材の設計フロー^{3.11)}

3.5 ゴム製緩衝材・ゴム支承の温度特性に関する研究

3.5.1 天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究

杉本、溝江ら^{3,12)}は、天然ゴム支承の耐候性、特に寒冷地での低温耐候性に関する研究を行っている。近年、弾性率の経年安定性や機械的強度に優れるため、天然ゴム支承が多く用いられるようになった。このような背景の中で、北海道を始めとした寒冷地では、一冬を経過した天然ゴム支承の側部被覆ゴムの表面に亀裂が発生していることが判明した。これを地域ごとに集計すると、北海道では20.6%、東北地方では2.9%、北陸地方では2.8%の天然ゴム支承に亀裂が生じたにもかかわらず、そのほかの地域では、亀裂が生じておらず、著者らは寒冷地での低温環境におけるゴムの耐オゾン性に原因があると考えた。一般的に、天然ゴムは機械的強度に優れるが、耐候性(耐オゾン性)にはやや劣る。このため、ゴムの材料設計段階で、老化防止剤を配合し、これをゴム表面に滲出させて、保護膜を形成し、オゾンによる劣化を防止している。

荷重・温度・オゾン・紫外線・水・氷雪などを天然ゴムに作用させて、亀裂の原因を特定した結果、オゾンと水・氷雪が作用する場合のみ、亀裂が確認できた。このことから、ゴム表面に滲出した老化防止剤が水や氷雪により洗い流され、老化防止剤が剥離した部分にオゾンが作用し、亀裂が生じたと考えられる。さらに、老化防止剤の滲出速度は温度により変化し、0°C以下の低温ではゴム表面への滲出速度が、20°Cの場合に比べ、1/6~1/7と遅いことが分かった。また、亀裂の発生箇所は、FEMにより求めた引張応力が作用する部分に一致することが分かった。

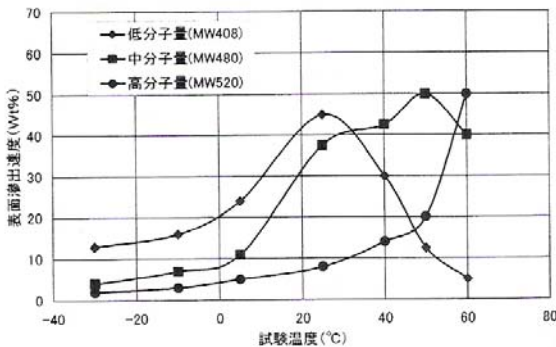
以上のことから、寒冷地における天然ゴム支承の亀裂は、氷雪による老化防止剤の剥離と低温による老化防止剤滲出速度の低下により発生すると結論付けている。



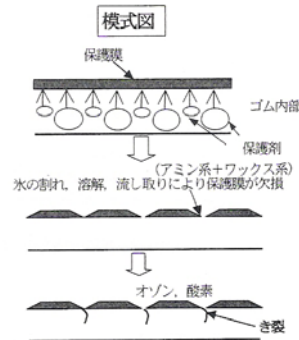
(A) 亀裂の発生した地域

No	引張 ひずみ	高温	低温	表面 粗さ	衝突 オン	紫外 線	水	氷雪	実験 時間 (H)	再現 性	
1	○								168H	亀裂なし	-
2	○			○					同上	-	-
3	○				○				同上	-	-
4	○					○			同上	-	-
5	○						○		同上	-	-
6	○		○						同上	-	-
7	○			○					同上	-	-
8	○		○				○		48H	亀裂発生	◎
9	○		○				○		48H	亀裂発生	◎
10	○	○							168H	亀裂なし	-
11	○						○		同上	-	-
12	○							○	同上	-	-

(B) 亀裂の発生条件



(C) 老化防止剤滲出速度の温度依存性



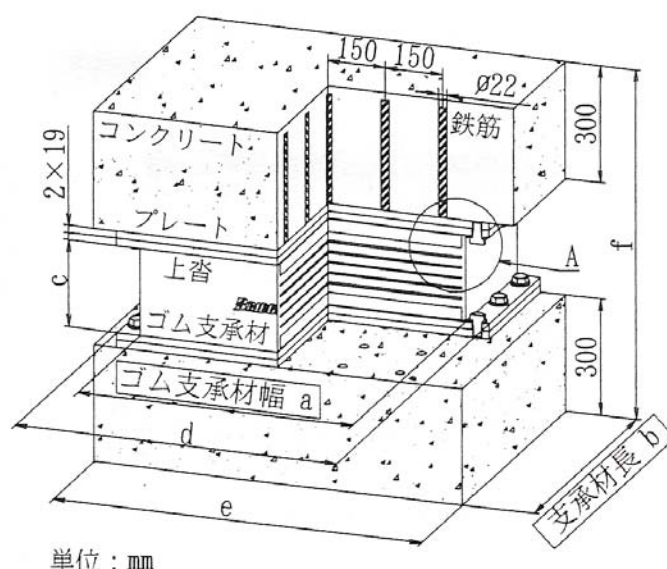
(D) 亀裂の発生メカニズム

図-3.11 天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究^{3,12)}

3.5.2 寒冷地気温変動下における高減衰ゴム支承材内部温度の応答確認実験及び数値解析

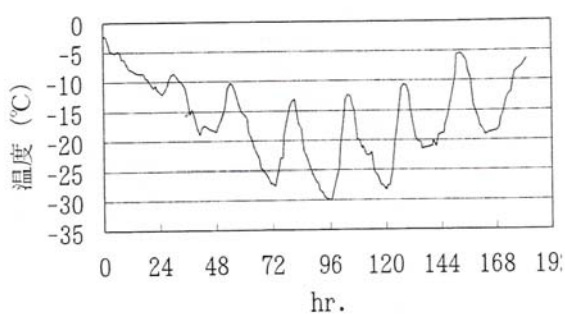
潤田、山崎ら^{3.13)}は、温度がゴムに与える影響に着目し、周囲の気温により、ゴム支承内部の温度がどのように変化するか有限要素法FEMにより解析している。ゴム材料のせん断特性には温度依存性があり、高減衰ゴムではその傾向が強い。この研究では、ゴム支承材のせん断特性が影響を受けやすい低温側、つまり、寒冷地の気温変動を対象とした高減衰ゴムの内部温度応答を実験・計測している。さらに、その結果と有限要素法による非定常熱伝導解析との比較している。また、実験結果を反映した簡単な予測式の適用についても検討している。

実験及び解析の結果、FEMによる解析と実験による測定値の対比は良く、再現性も十分であることが分かった。

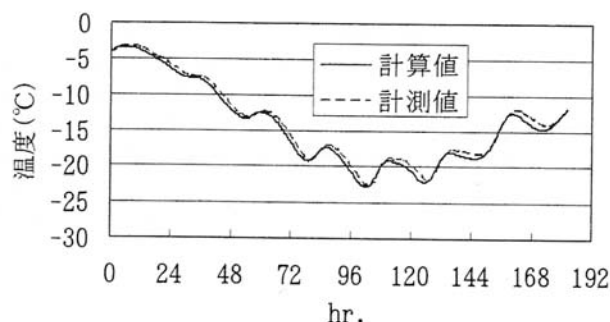


単位：mm

(A) 供試体の構造図



(B) 寒冷地観測気温(最低気温時)



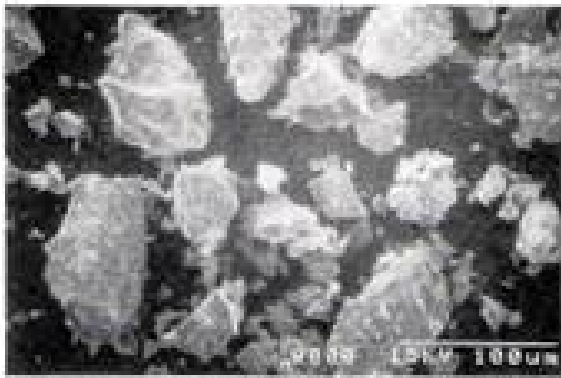
(C) 供試体内温度変動の計測値と計算値

図-3.12 寒冷地気温変動下における高減衰ゴム支承材内部温度の応答確認実験及び数値解析^{3.13)}

3.6 ゴム製緩衝材・ゴム支承の配合に関する研究

3.6.1 フェライト混練高減衰積層ゴムの開発

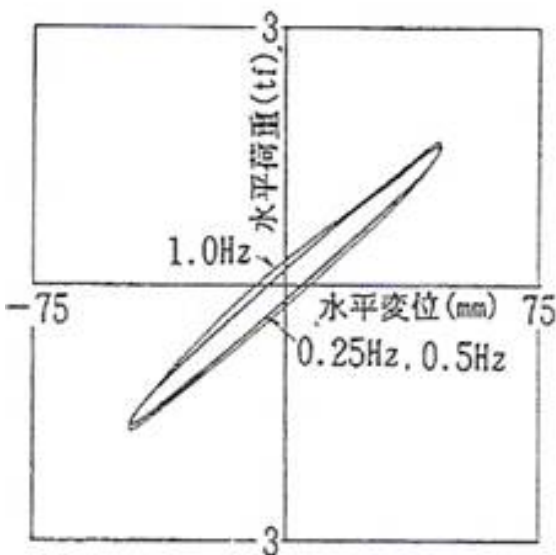
ゴムの配合に関する研究として、鈴木、間山らによる研究^{3.14)}がある。この研究では、ゴム支承に用いられるゴムを対象として、製鉄等による副産物であるフェライト(主成分 Fe_3O_4)をゴムに混入することにより、高減衰ゴムを開発している。さらに、開発した高減衰ゴムを用いて、実物大の積層ゴムを作成し、免震装置に想定される種々の荷重・変位・振動数での力学試験と耐久性試験を行っている。その結果、フェライト混練高減衰積層ゴムの減衰定数は約 11%であり、これは通常の天然積層ゴムの 3~4 倍の値に相当する。このようにフェライトを混入することにより、減衰性能の優れたゴムを開発することが可能となった。さらに、減衰性能に大きな影響を及ぼすフェライトの量は、ゴムとの重量比で 200%程度の際に、減衰定数が最大となることがわかった。



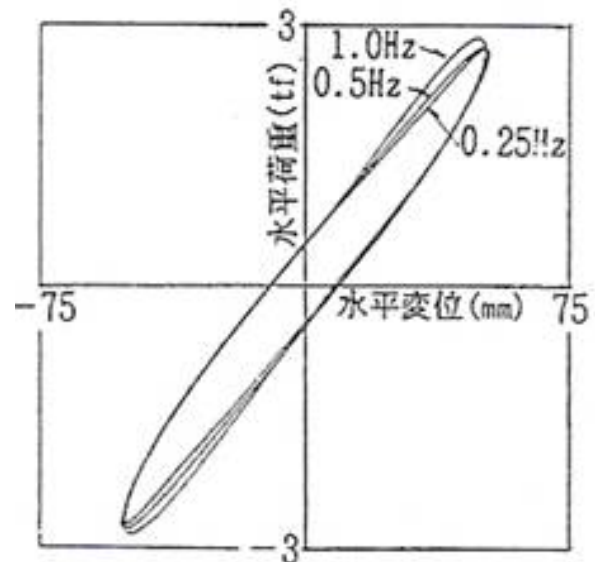
(A) 副産物フェライトの顕微鏡写真



(B) 水平方向加振試験の様子



(C) 天然積層ゴムの履歴曲線



(D) フェライト混入積層ゴムの履歴曲線

図-3.13 フェライト混練高減衰積層ゴムの開発^{3.14)}

第4章

ゴムの種類と配合

第4章 ゴムの種類と配合

4.1 本章の内容

本章ではゴムの種類や製法などに注目し，工業的な内容について触れる．ゴムは配合により性能が大きく変化するため，緩衝ゴムの材料設計を行うにあたって重要になる．特にゴムの配合に関する研究は土木・建築分野では少なく，より高機能な緩衝ゴムを開発するためには必要不可欠な研究であると考えられる．

本章の構成は以下のようになっている．

4.2 ゴムの種類と特徴

ゴムの種類について，大きく天然ゴムと合成ゴムに分類して解説する．これらのゴムの中でも本研究で試料として選択しているクロロプレンゴム(CR)，天然ゴム(NR)，スチレンブタジエンゴム(SBR)，ブチルゴム(IIR)について特徴や分子構造まで詳しく解説する．

4.3 ゴムの配合

ゴムは混ぜ物の化学である．通常，ゴムは原料ゴムのほかに様々な材料が混ぜ込まれた複合材料である．ここでは，ゴムに配合される配合剤について紹介し，各配合剤がゴムにどのような影響を与えるのか解説する．

4.2 ゴムの種類と特徴

4.2.1 原料ゴム

原料ゴムとは架橋剤や補強材などが配合されゴムが製品として作成される前の段階でのゴムである。これは生ゴムとも呼ばれ、ゴムの樹から採取される天然ゴムと、工場で生産される合成ゴムとに大別される^{4.26)}。天然ゴムであれば、ゴムの樹から採取された樹液を乾燥させたシートやブロック状、合成ゴムであれば、プラントで化学的に合成されたゲル状であることが多い。以下に天然ゴムと合成ゴムの詳細を解説する。また、原料ゴムの分類を図-4.1に示す。

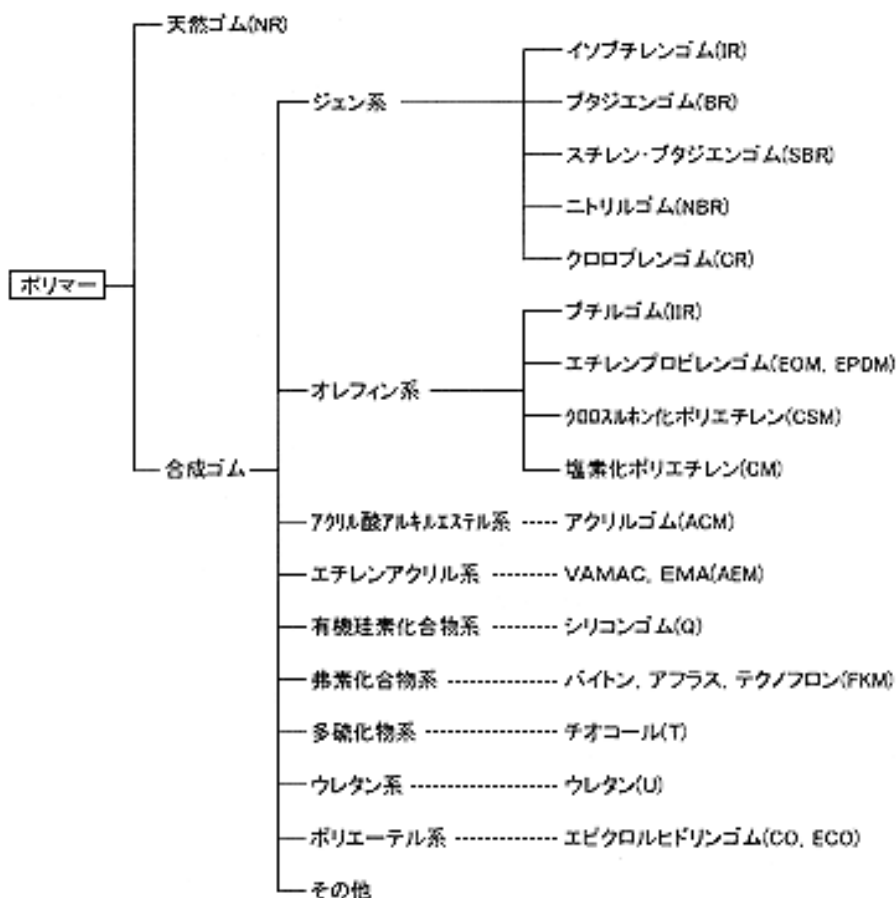


図-4.1 原料ゴムの種類と分類^{4.28)}

①天然ゴム(Natural Rubber)^{4.1)}

天然ゴムは基本的に北緯・南緯15度圏内の1年中高温多湿で強風の吹かない熱帯地方で栽培可能な、ヘベア・ブラジリエンス(*Hevea brasiliensis*, 図-4.2)というゴムの樹を図-4.3に様に傷つけ、流れ出るゴムラテックスと呼ばれる樹液から採取される天然由来のゴムである。分子量が高くゴム質がよくて収穫が多いという工業用原料としての条件を満たし、かつ企業栽培の対象となっているのはヘベア・ブラジリエンスだけである。生産国は主に、タイ、インドネシア、マレーシアである。天然由来であるため、若干不純物が混入しているものの、ゴムラテックスの化学構造はポリイソプレンであり、炭素と水素

のみで構成されている。天然ゴムそのものに種類は無いが、樹液を採取した後の加工方法により、リブドスモークドシートやペールクレープなど、いくつか性質の異なる原料ゴムが造られている^{4.27)}。現在までに様々な合成ゴムが開発されてきたが、天然ゴムの強度に匹敵するような合成ゴムはいまだ開発されておらず、特に高い強度を求められるゴム製品には天然ゴムが使用されている。



図-4.2 ヘベア・ブラジリエンス



図-4.3 樹液の採取

②合成ゴム(Synthetic Rubber)^{4.1)}

合成ゴムは天然ゴムとは異なり、人工的に合成されたゴムの総称である。非常に多くの種類が存在し大部分は石油から作られている。合成ゴムの種類により製造方法の詳細は異なるが、大まかな作業の流れは種類によらず同様で、石油からモノマーを作り、さらにモノマーを重合または重縮合させ合成ゴムにするという手順を経ている。合成ゴムは非常に多くの種類があるため、しばしば汎用ゴムと特殊ゴムに分類する。前者はタイヤなどに用いられる大量消費型のゴムでありスチレンブタジエンゴム、ブタジエンゴム、イソプレンゴムなどがある。後者は、その特性が重要視されているゴムであり、アクリロニトリルブタジエンゴム、クロロプレンゴム、ブチルゴムなどがある、これらは消費量こそ少ないものの、用途は多岐にわたっている。

15世紀末にコロンブスによって文明社会に紹介された天然ゴムは約500年という古い歴史を持つゴムだが、アマゾン川流域の野生のゴムの樹からの採取に頼っていたため、生産性が低く、品質も安定しないという欠点を持っていた。しかし、1876年にイギリスはヘベア・ブラジリエンスの種子を原産地であるアマゾン川流域からイギリスに運び、ロンドンでの発芽に成功させた。この成功によりイギリスは東南アジアでゴムの樹の農園を作り、1900年ごろからイギリスは世界の天然ゴムを独占するようになった。

しかしながら当時は貴重な物性を持つ物質であったため、19世紀後半に自動車工業や諸産業が発展していくと、アメリカやドイツでは天然ゴムの入手が困難になった。そしてこれらの国々では次々と合成ゴムが開発されるようになる。結果、需要に対応できなかった天然ゴムは合成ゴムに生産量を追い越され、現在では合成ゴムが年間1000万トンに対し天然ゴムは年間500万トンが消費されている。

4.2.2 ゴムの特徴

代表的なゴムの物性を表4.1, 表4.2, 表4.3にまとめる.

表 4.1 ゴムの物性表 1^{4.4)}

一般名	クロロプレンゴム	天然ゴム	スチレンブタジエンゴム	ブチルゴム
略称	CR	NR	SBR	IIR
引張強度(MPa)	5~25	3~35	2.5~30	5~20
伸び率(%)	100~1000	100~1000	100~800	100~800
硬度(度)	10~90	10~100	30~100	20~90
電気絶縁性($\Omega \cdot \text{cm}$)	$10^{10} \sim 10^{12}$	$10^{10} \sim 10^{14}$	$10^{10} \sim 10^{15}$	$10^{15} \sim 10^{18}$
高温使用限界($^{\circ}\text{C}$)	130	120	120	150
低温使用限界($^{\circ}\text{C}$)	-30~-40	-50~-70	-40~-65	-30~-60
ガラス転移温度($^{\circ}\text{C}$)	-45	-69~-74	-44~-46	-67~-75
反発弾性	○	◎	○	×
引裂強度	○	◎	△	○
圧縮永久ひずみ	○	◎	△	△
耐屈曲亀裂性	○	◎	○	◎
耐摩耗性	◎	◎	◎	○
耐老化性	◎	○	○	◎
耐オゾン性	◎	×	×	◎
耐光性	◎	○	○	◎
耐炎性	○	×	×	×
耐放射線性	△	△	○	×
耐水性	◎	◎	◎	◎
耐油性	○	×	×	×
耐溶剤性	×	×	×	△
耐酸性	△	×	×	◎
耐アルカリ性	◎	○	○	◎
耐ガス透過性	○	○	○	◎
主な用途	電線被服材 防振ゴム 接着剤	大型タイヤ 履物 ホース	タイヤ 履物 床タイル	タイヤチューブ 防振ゴム 電線被服材

◎ : 優 ○ : 良 △ : 可 × : 不可

表 4.2 ゴムの物性表 2^{4.4)}

一般名	イソプレングム	ブタジエンゴム	アクリロニトリル ブタジエンゴ ム	シリコンゴム
略称	IR	BR	NBR	Q
引張強度(MPa)	3~30	2.5~20	5~25	3~15
伸び率(%)	100~1000	100~800	100~800	50~500
硬度(度)	20~100	30~100	20~100	30~90
電気絶縁性($\Omega \cdot \text{cm}$)	$10^{10} \sim 10^{15}$	$10^{14} \sim 10^{15}$	$10^{10} \sim 10^{11}$	$10^{11} \sim 10^{16}$
高温使用限界($^{\circ}\text{C}$)	120	120	130	280
低温使用限界($^{\circ}\text{C}$)	-50~-70	-70	-40~-50	-70~-120
ガラス転移温度($^{\circ}\text{C}$)	-63~-72	-95~-110	-47~-22	-118~-132
反発弾性	◎	◎	△	○
引裂強度	○	○	△	△
圧縮永久ひずみ	◎	△	○	◎
耐屈曲亀裂性	◎	△	○	△
耐摩耗性	◎	◎	○	△
耐老化性	○	○	○	◎
耐オゾン性	×	×	×	◎
耐光性	○	×	△	◎
耐炎性	×	×	×	△
耐放射線性	△	×	△	○
耐水性	◎	◎	◎	○
耐油性	×	×	◎	△
耐溶剤性	×	×	×	×
耐酸性	×	×	△	○
耐アルカリ性	○	○	○	◎
耐ガス透過性	○	○	○	△
主な用途	タイヤ 履物 ベルト	タイヤ 履物 防振ゴム	オイルシール ガスケット 印刷ロール	医療用品 電気絶縁材 耐熱製品

◎：優 ○：良 △：可 ×：不可

表 4.3 ゴムの物性表 3^{4.4)}

一般名	エチレンプロピレンゴム	フッ素ゴム	ウレタンゴム	アクリルゴム
略称	EPDM	FKM	U	ACM
引張強度(MPa)	5~20	7~20	20~45	70~12
伸び率(%)	100~800	100~500	300~800	100~600
硬度(度)	30~90	50~90	60~100	40~90
電気絶縁性($\Omega \cdot \text{cm}$)	$10^{12} \sim 10^{16}$	$10^{10} \sim 10^{14}$	$10^9 \sim 10^{12}$	$10^8 \sim 10^{10}$
高温使用限界($^{\circ}\text{C}$)	150	300	80	180
低温使用限界($^{\circ}\text{C}$)	-40~-60	-10~-50	-30~-60	-10~-30
ガラス転移温度($^{\circ}\text{C}$)	-50~-58	-7~-25		
反発弾性	○	△	◎	△
引裂強度	△	○	◎	△
圧縮永久ひずみ	○	△	◎	○
耐屈曲亀裂性	○	○	◎	○
耐摩耗性	○	◎	◎	○
耐老化性	◎	◎	○	◎
耐オゾン性	◎	◎	◎	◎
耐光性	◎	◎	◎	◎
耐炎性	×	◎	△	×
耐放射線性	△	△	○	△
耐水性	◎	◎	△	△
耐油性	×	◎	◎	◎
耐溶剤性	×	◎	△	×
耐酸性	○	◎	×	△
耐アルカリ性	◎	○	×	△
耐ガス透過性	△	△	△	△
主な用途	電線被服材 窓枠ゴム ホース	パッキング材	ソリッドタイヤ 高圧パッキング	オイルシール 高温耐油製品

◎ : 優 ○ : 良 △ : 可 × : 不可

4.2.3 試料として選択したゴムの紹介

試料として選択したゴムを以下に挙げる.

- ①クロロプレンゴム(Chloroprene Rubber : CR)
- ②天然ゴム(Natural Rubber : NR)
- ③スチレンブタジエンゴム(Styrene Butadiene Rubber : SBR)
- ④ブチルゴム(Isobutene Isoprene Rubber : IIR)

これらのゴムのうち, CR, NR, SBRは緩衝ゴムとして一般的であり, 道路橋のゴム支承^{4,5)}にも用いられていることから試料に選択した. また, IIRは防振ゴム^{4,6)}として用いられているため試料に選択した. 防振や防音という観点からすれば, ゴムの種類はある程度決定される. しかし, 緩衝材と防振ゴムを比較すると, 作用する力, 振動の周波数, 使用される頻度や期間などが異なるため, 防振ゴムが緩衝材にも適していると一概には言い切れない.

4.2.4 試料として選択したゴムの特徴

試料として選択した四種類のゴム特徴, 分子構造, ガラス転移温度を以下に示す.

①クロロプレンゴム(Chloroprene Rubber : CR)

最も古い時期から使用されている合成ゴムであり, 耐油性, 耐薬品性, 耐熱性がよいという特徴を持つ. それぞれの性質に対しては, それに特化したゴムのほうが優れているが, 全体的に性質のバランスのとれたゴムである. 試料とした他のゴムに比べガラス転移温度が -45°C と高温で, 低温時に脆性的になりやすい傾向があるため, 低温時の使用には不向きである. クロロプレンゴムの分子構造を図-4.4に示す.

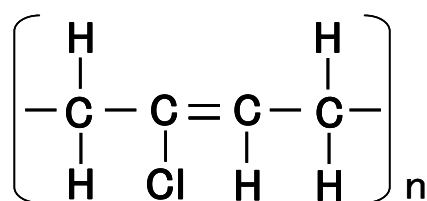


図-4.4 クロロプレンゴムの分子構造^{4,26)}

②天然ゴム(Natural Rubber : NR)

原料が天然由来のゴムであり, ヘベア・ブラジリエンスという樹木から取れる樹液から作られる. 弾性, 耐摩耗性など機械的強度が大きい, 耐熱性や耐油性が悪いという特徴を持つ. その他, 原料が天然ゆえの物性のばらつき, ゴミなどの異物混入, 価格変動などが多少あるが, 近年は改善される傾向にある.

天然ゴムの分子構造は図-4.5に示すイソプレンであり, これが数多く結合して分子鎖を形成している. 化学的に合成したイソプレンから作られたゴムは, 原料が天然由来である天然ゴムと区別してイソプレンゴム(Isoprene Rubber : IR)という. イソプレンゴムは

第4章 ゴムの種類と配合

天然ゴムより防振性能に優れる反面，高価である。

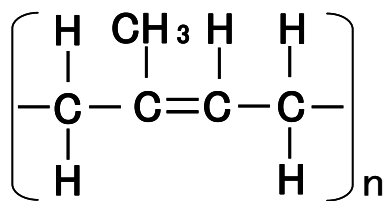


図-4.5 天然ゴムの分子構造^{4.1)}

③スチレンブタジエンゴム(Styrene Butadiene Rubber : SBR)

弾性，強度，耐摩耗性のバランスがよく加工しやすい反面，耐熱性，耐油性が悪いという特徴を持つ。また十分な強度を得るためにはカーボンブラックなどの補強材が多量に必要な。比較的low価格で，主にタイヤ用として多量に生産されているゴムである。

スチレンブタジエンゴムの分子構造は図-4.6 に示すようなスチレンとブタジエンがランダムに結合し分子鎖となるランダム共重合体^{4.3)}である。

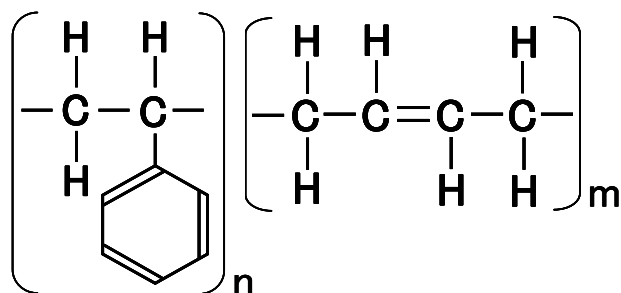


図-4.6 スチレンブタジエンゴムの分子構造(左がスチレン，右がブタジエン)^{4.1)}

④ブチルゴム(Isobutene Isoprene Rubber : IIR)

耐熱性，耐薬品性に優れる化学的に安定なゴムである。他のゴムと混ざりにくく，耐油性が悪いという特徴を持つ。また，反発弾性が非常に小さく，防振性能に優れるという性質を持つので防振ゴムや防音材として用いられる。

ブチルゴムの分子構造は図-4.7 に示すような構造であり，多量のイソブチレンに対し，少量のイソプレンが結合することで，分子鎖を形成している。

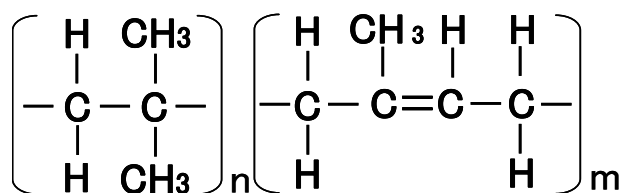


図-4.7 ブチルゴムの分子構造(左がイソブチレン，右がイソプレン)^{4.1)}

4.3 ゴムの配合

4.3.1 ゴム製品の作成手順^{4.1)}

ゴム製品には軟らかく、大変形しても復元する性能が求められることが多いので、ふつうは加硫ゴム(架橋されたゴム)の状態で作品となる。原料ゴムをそのまま製品として使用する事は稀である。ゴムは原料ゴムに配合する架橋剤や架橋補助剤の種類、加硫法、加硫時間によっても性質が大きく変化する。本節では一般的なゴム製品の作成手順について解説する。通常、ゴム製品は次のような手順で作成される。この作成手順をフローチャートにして図-4.8に示す。

- ①原料ゴムを素練りする。
- ②素練りした原料ゴムに配合剤を加える。
- ③目的の形に成形する。布や繊維などといっしょに成形することもある。
- ④加熱して架橋させる。

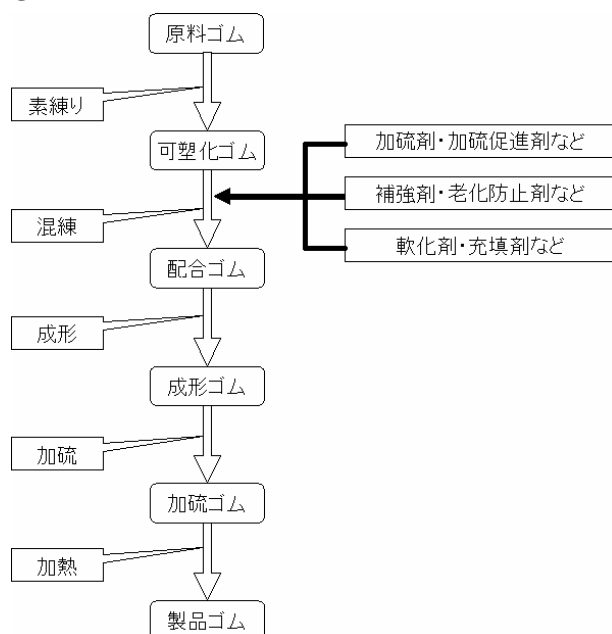


図-4.8 ゴム製品の作成手順

4.3.2 ゴムの配合設計^{4.7)}

ゴムはその作成段階で様々な材料や薬品が添加される。これらを配合剤と呼び、配合剤の種類と量を決めることを配合設計と呼ぶ。配合設計を変えることにより、ゴムの物性は大きく変化する。ゴム製品は、品種が多く使用条件が種々異なっているため、それらに合った物を作る必要があり、非常に多くの原料ゴム、配合剤等を使っている。従って、製品の要求性能を満足させ、加工性、コストを考えながら配合を立てる必要がある。それらに対応したゴムを作成するため多くの配合剤が存在する。

通常、配合設計や材料評価には重量分率(phr)という値を用いる。重量分率は原料ゴムの重量やゴム試料の重量を100%と定義したときに、配合剤の重量が何%になるかという指標である。特に配合設計を行う際には原料ゴムの重量を100%と定義し、どれぐらいの重量分率で配合剤を加えるか考える。

4.3.3 配合剤の種類と目的^{4.6)}

本節では、原料ゴムからゴム製品になるまでの過程でゴムに配合される配合剤の種類と目的を紹介する。主な配合剤の分類を図-4.9に示す。さらに、各配合剤の効果について述べる。

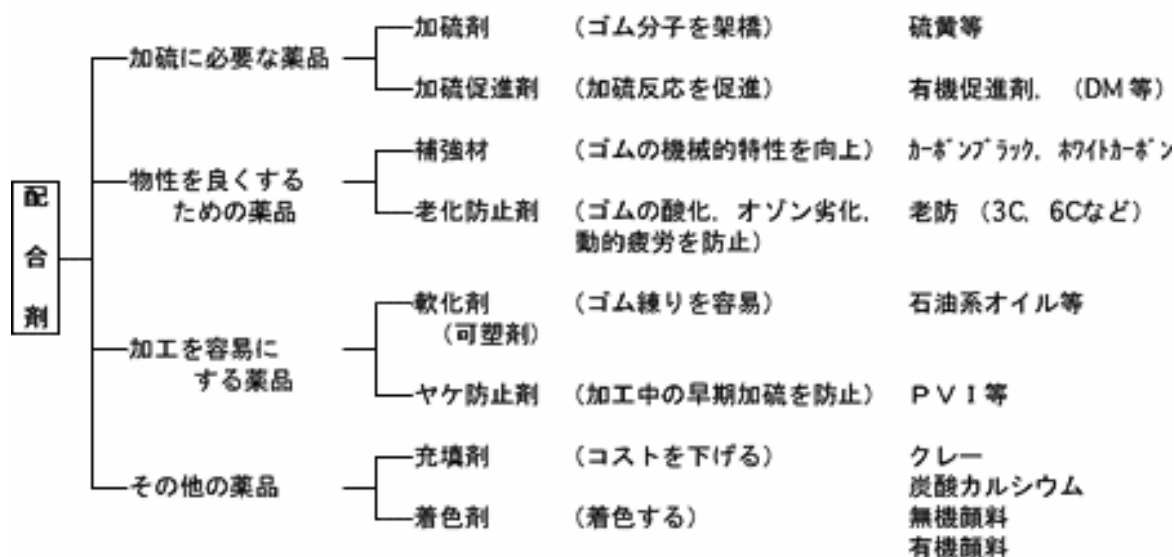


図-4.9 配合剤の分類^{4.3)}

①架橋剤(Vulcanizing agent)^{4.6)}

ゴムの分子鎖を架橋し、ゴム弾性を持たせるための配合剤を架橋剤という。ゴムは基本的に長い分子鎖が絡み合っていてできている。架橋する前のゴムでは、分子鎖同士が結合されていないため、分子鎖は動くことができる。このため、ゴム弾性が発揮されず、ゴムを変形させるとその変形が残る。そこで架橋剤により分子鎖の一部を他の分子鎖の一部と結合させ、橋架け構造を作ることによって、分子鎖は三次元の網目状になる。これを架橋という。架橋を行うことで、ゴムはゴム弾性を示すようになり、大変形を与えても元の形状に戻るようになる。また、架橋部分が多いか少ないかにより、ゴムのように柔らかいものから、エボナイトのように硬い物質まで様々な物質を作ることができる。代表的な架橋剤として硫黄(Sulfur)が挙げられる。硫黄は、特にイソプレンからなる天然ゴム系のゴムに用いられる。天然ゴム系のゴムは生ゴムに硫黄を加え、加熱することで架橋される。この工程を特別に加硫という。硫黄以外の架橋剤として有機過酸化物、金属酸化物、有機アミン化合物などがある。

②架橋促進剤(Accelerator of vulcanization)^{4.6)}

架橋促進剤とは、架橋剤と併用することにより、架橋時間の短縮、架橋温度の低下、架橋剤使用量の低減、ゴムの品質向上などを目的とした配合剤である。

③架橋促進助剤(Activator of vulcanization)^{4.6)}

架橋促進剤を活性化し、架橋促進剤の効果を助ける配合剤を架橋促進助剤という。

④架橋遅延材(Retarders of vulcanization)^{4.6)}

ゴムの加工中に、架橋促進剤が活性化しすぎてしまい、架橋が進行してしまう現象をスコーチ(Scorch)という。スコーチによりゴムの可塑性が無くなり、ゴムの加工が難しくなる。スコーチを防止する目的で使用される配合剤を、架橋遅延剤という。

⑤補強材(Reinforcing agent)^{4.6)}

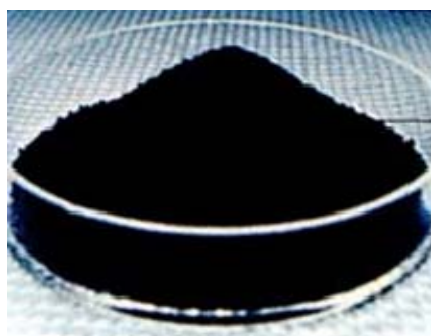
ゴム製品の硬度、弾性率、耐摩耗性など機械的な強度を高めるための配合剤を補強材という。補強材は天然ゴムにおいても重要であるが、合成ゴムには原料ゴムのままでは機能を発揮することができないゴムも多く、特に重要である。補強材として頻繁に用いられるカーボンブラックとシリカについて以下で述べる。

(1)カーボンブラック(Carbon Black : CB)^{4.7)}

カーボンブラックをゴムに配合することでゴムの硬度、耐摩耗性、反発弾性、耐候性等を高くすることができる。これをカーボンブラック補強と呼ぶ。図-4.29(A)に示すカーボンブラックとは原油を精製した後に残るピッチやタールを原料として製造される工業用煤の総称で、粒子の形状や大きさにより、様々な種類が存在する。多くのゴムに配合されており、一般的にゴムの黒い色はカーボンブラックによるものである。カーボンブラックの粒径は10nm~800nm程度であるが、粒径により補強の効果が変化し、粒径が小さければ小さいほど補強の効果は高くなる。

(2)シリカ(二酸化ケイ素 : SiO₂)^{4.7)}

ゴムに図-4.10(B)に示すシリカを配合することで、カーボンブラックと同様にゴムの耐摩耗性、反発弾性、耐候性、耐光性等を高くすることができる。カーボンブラックと異なる点は、製品として完成したゴムの色が黒色で無いことである。



(A) カーボンブラック



(B) シリカ

図-4.10 代表的な補強材

⑥充填材(Fillers)・増容材^{4.6)}

ある一定の量の原料ゴムに対して混ぜることで、ゴム本来の性質を大きく変化させずに、嵩を増すために用いられるのが充填材である。補強効果やその他の効果に関わらず、ゴムに混ぜて嵩を増やすことのできる材料をすべて充填材としている。充填材によりゴムの嵩を増やすことができるので、ゴム製品の容積あたり単価を低くし、コストを低く抑えることができる。代表的な充填材として、カーボンブラック、シリカ、炭酸カルシウム(図-4.11)、クレイなどがある。



図-4.11 炭酸カルシウムの粉末

⑦軟化剤(Softeners)・可塑剤(Plasticizers)^{4,6)}

軟化剤や可塑剤はゴムに可塑性を与え、補強材や充填剤などの混入及び分散、加工性の改善などの目的で用いられる。軟化剤には、ゴムの分子鎖を切断することで可塑化する化学的軟化剤と、ゴムの分子間に作用する引力を低減する物理的軟化剤がある。軟化剤や可塑剤には石油系のオイルなどが多く用いられている。

⑧粘着剤(Tackifiers)^{4,6)}

ゴムに粘着性を与えることにより加工性を改良する配合剤で、特に合成ゴムにおいて重要である。

⑨硬化剤(Stiffeners)^{4,6)}

架橋する前のゴムに加えて、ゴムを硬くし、型崩れを防ぐために用いる配合剤を硬化剤という。

⑩分散剤(Dispersing agents)^{4,6)}

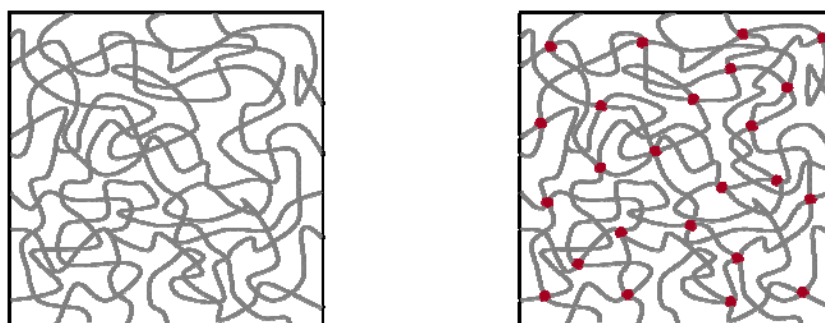
ゴムに補強材や充填剤を配合する場合、ゴムの中で偏りがあると、均一な品質のゴム製品を作ることができない。このため、ゴムの中に補強材や充填剤を均一に分散させる必要があり、このために使用される配合剤を分散剤という。

4.3.4 ゴムの架橋^{4.9)}

原料ゴムにはそのままの状態でも弾性を発揮するものがあるが、分子鎖同士が架橋点により固定されていないため、引っ張ると弱い力でも元の形に戻らなくなり、強く引っ張ると簡単に破断してしまう。しかし、1839年にアメリカのチャールズ・グッドイヤー(C.Goodyear)が偶然、原料ゴム(天然ゴム)に硫黄を混ぜ加熱することで、著しく強靱な弾性を有し、通常の条件下で流動せず、製品として形を保つことができるようになった。この過程を加硫と呼び、このようにして作成されたゴムを加硫ゴムと呼ぶ。この発見により以後、ゴムは材料としての価値が上昇し、ゴム工業が盛んになった。

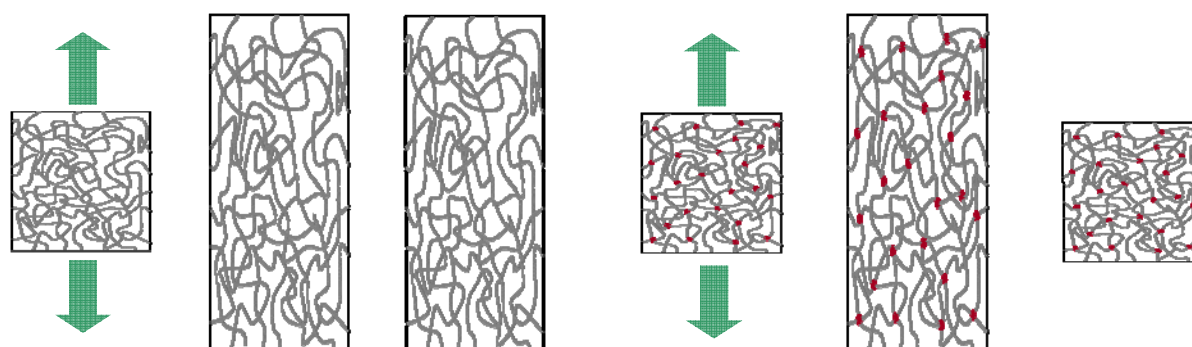
加硫は原料ゴムに硫黄を添加し、加熱することであるが、この時ゴムの鎖状分子同士が化学結合する。これを架橋という。化学結合であるため、加硫によって架橋したゴムは温度を上げても架橋が切れる事はない。そのため、ゴムの成形は加硫する前に行う必要がある。また、温度を高くしても軟らかくなることは無いので、プラスチックのように溶かして再利用することは出来ない。

架橋する前のゴムは、**図-4.12(A)**のように分子鎖が架橋されて固定されていない。このため、変形させたときに分子鎖がすり抜けて塑性変形し、変形は完全には回復しない。これが、架橋することにより**図-4.12(B)**に示すように分子鎖同士が接続され、三次元の網目構造となる。こうすることにより、大変形させても、元の形に復元するゴム特有の性能を発揮するようになる。上で述べたような、未架橋ゴムと架橋ゴムの変形の様子を**図-4.13**に示す。



(A) 架橋されていない高分子鎖

(B) 架橋点が形成された高分子鎖

図-4.12 ゴムの架橋構造^{4.9)}

(A) 未架橋ゴムの変形

(B) 架橋ゴムの変形

図-4.13 未架橋ゴムと架橋ゴムの変形^{4.9)}

4.3.5 架橋剤の配合量によるゴムの性能の変化^{4.9)}

ゴム中の架橋点の数は、ゴムに配合する架橋剤の量によって調節できる。架橋剤の量を増せば、架橋点の数は多くなり、ゴムは硬くなる。架橋点が適度に存在している場合は一般的なゴムとなるが、極端に架橋点を多くすると、エボナイトと呼ばれる樹脂状の材料になる。エボナイトは万年筆の柄やボウリングの球などに用いられる。このような架橋点数の変化を図-4.14に示す。架橋剤の種類にもよるが、一般的なゴムに含まれる架橋剤の配合量は、重量分率で数%程度であり、重量分率が30%以上になると、エボナイトになる。

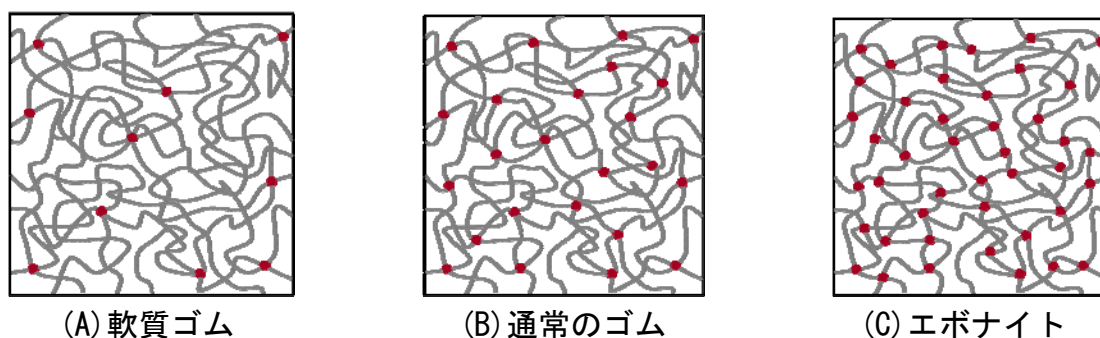


図-4.14 架橋点数によるゴムの物性変化

前述したように、架橋剤の配合量により、ゴムは様々な材料に変化する。架橋剤の配合量が重量分率で数%程度であれば、ゴムはゴムとしての特性を発揮する。この場合、架橋剤の配合量はゴムの低ひずみ領域における応力や弾性率と関係があるといわれている。このため、低ひずみ領域でのゴムの応力-ひずみ関係に関して提案されている、Neo-Hookean式では式中に架橋点密度(単位体積あたりの架橋点数)が登場する^{4.32)}。さらに、ゴムに微小なひずみを与えた際に発生する応力や、動的粘弾性測定で測定される貯蔵弾性率から架橋点密度を求める式が、Floryらにより提案されている^{4.10)}。

4.3.6 ゴムの補強^{4.9)}

前述のように，ゴムを工業的に利用する場合，硬度，弾性率，耐摩耗性，耐候性などを向上させるために，ゴムに補強材が配合される．本節では代表的な補強材として，カーボンブラックに注目し，その補強メカニズムについて解説する．

ゴムにカーボンブラックを配合すると，カーボンブラック粒子にゴムの分子鎖の末端部分が結合する．このため分子鎖は端部で固定されている状態になり，分子鎖全体の運動性が低下する．分子鎖の運動性が低くなれば，ゴムを変形させるのに必要なエネルギーは多くなり，変形させるために必要になる力も大きくなる．このように，補強材は周囲の分子鎖の運動を拘束することにより，ゴムの硬度や弾性率を上昇させる．図-4.15にカーボンブラックにより補強された架橋ゴムの構造をまとめる．また，カーボンブラックの構造を図-4.16に示す．

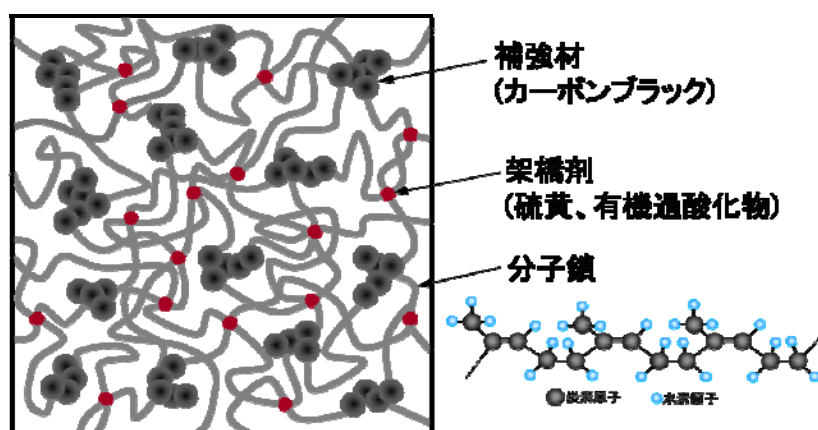


図-4.15 カーボンブラックにより補強された架橋ゴムの構造

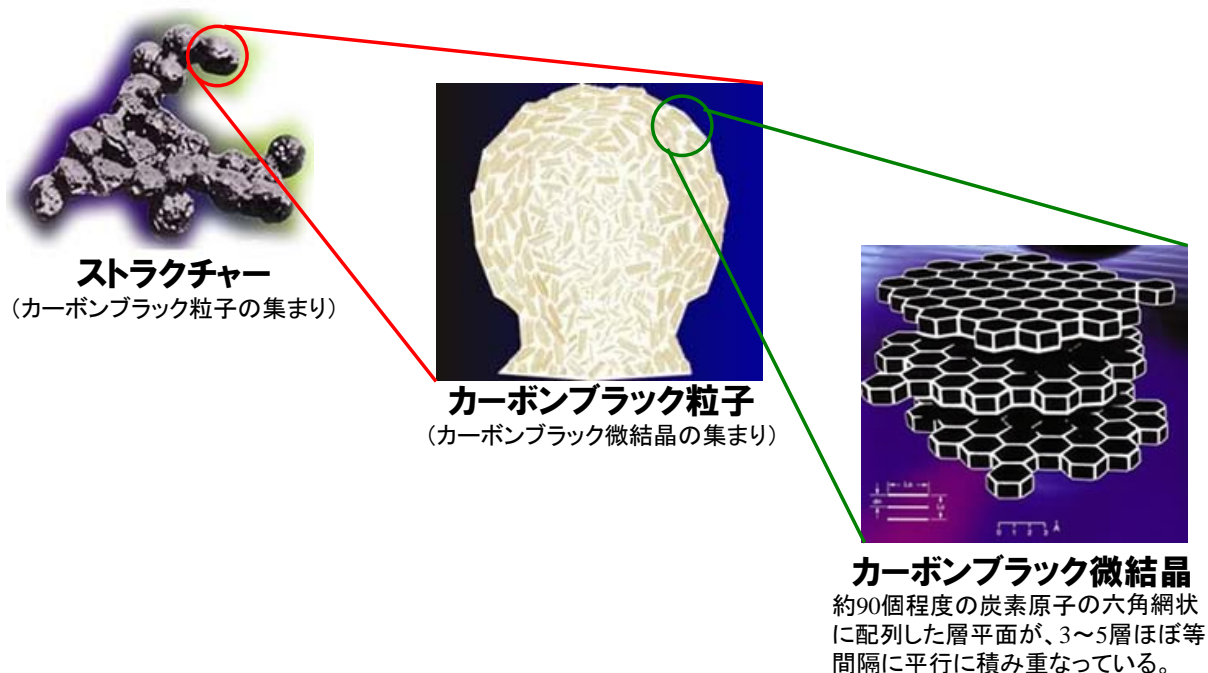


図-4.16 カーボンブラックの構造^{4.11)}

4.3.7 補強材の配合量によるゴムの性能の変化^{4.7)}

本節では、補強材の配合量によるゴムの性能変化について、カーボンブラックを補強材の例として解説する。

①硬度

補強材の配合量が増加していくにつれて、硬度や初期弾性率は上昇していく。このメカニズムは前節で解説したとおりである。硬度が同じであっても、ゴムの種類によりカーボンブラックの配合量は異なり、このことから、補強効果はゴムの種類により異なると言える。

②破断強度と破断ひずみ

カーボンブラック配合量と破断強度の関係は、ゴムの種類やカーボンブラックの種類によって異なる。これらの関係を図-に示す。図-に様にどちらも複雑な挙動を示すが、一般的にはカーボンブラックの配合量の増加に伴い、破断強度は上昇する。しかし、逆に配合量が多くなりすぎると破断強度は低くなっていく。このことから、破断強度を最大にする最適なカーボンブラック配合量が存在することが分かる。また、破断ひずみはカーボンブラック配合量の増加に伴い減少していく。破断強度と破断ひずみは配合より、ゴムの種類に強く依存しており、配合について検討する以前に、種類の選定が重要になるといえる。

③耐候性

耐候性とはゴムを屋外で使用した際の老化に対する抵抗性のことである。カーボンブラックの配合量が多くなると耐候性は向上する。これは様々な劣化要因の中でも紫外線による劣化を防ぐためである。カーボンブラックには光の遮蔽効果があり、ゴムにとって有害な紫外線を遮蔽することができるので、紫外線による劣化をゴム製品の表面にとどめることができる。

第5章

ゴム弾性とゴムの 静的粘弾性挙動

第5章 ゴム弾性とゴムの静的粘弾性挙動

5.1 本章の内容

本章ではゴム弾性とゴムの静的粘弾性挙動について解説する。ゴム弾性では分子鎖や三次元ネットワーク構造といったミクロな観点から出発し、ゴムの非線型挙動やエントロピー弾性、エネルギー弾性についてまとめる。

静的粘弾性挙動とは外部からの刺激(応力や変位)が時間的変化しない場合、または非常に変化が遅い場合の粘弾性体の挙動である。具体的には粘弾性体の応力緩和やクリープなどがこれに該当し、いずれも変位が一定の場合と、応力が一定の場合の挙動である。さらに、ゴムの応力-ひずみ関係を記述する式をいくつか詳解し、それぞれの式がどのような仮定の下で導出され、どのような特徴があるのかまとめる。

本章の構成は以下のようにになっている。

5.2 ゴム弾性と非線型挙動

ゴムが工業的に重要な材料になったのは、他の材料に比べ軟らかく良く伸び、大きく変形しても復元する性能を有しているためである。ここでは、このような特徴的な性能がなぜ発揮されるのか、分子鎖などゴムの構造をもとに解説する。

5.3 ゴムの静的粘弾性挙動

応力緩和やクリープなどの静的な粘弾性挙動を理解するために、粘弾性体について弾性を表すバネと粘性を表すダッシュポットという二つの模型を用いてモデル化する。これにより粘弾性体は二種類の粘弾性模型としてモデル化することができる。それぞれの粘弾性模型について応力緩和を記述できるか検討した。

5.2 ゴム弾性と非線型挙動

5.2.1 ゴムの力学的特徴

主なゴムの力学的特徴をまとめると、以下の六つになる^{5.1)}。

- ① ゴム弾性(エントロピー弾性)により、金属などに比べ格段に軟らかい。
- ② ひずみの大きさにより、支配的となる弾性成分が変化する。
- ③ 応力-ひずみ関係がひずみ硬化型の非線型挙動となる。
- ④ 大きく変形させても復元する。
- ⑤ 粘性と弾性を併せ持つ粘弾性体である。
- ⑥ 明確な弾性域・塑性域を定義することができない

これらの力学的特徴のうち、材料としてのゴムの価値を高めているのは、①と④を両方有している点である。ゴムとその他の様々な材料との弾性率の値を表5.1にまとめる^{5.2, 5.3)}。この表より、ゴムは金属やセラミックスなどに比べ格段に弾性率が低く、軟らかいことが分かる。他の材料に比べゴムが軟らかいのは、後述するように高分子特有のエントロピー弾性(ゴム弾性)が発揮されるためである。さらに、伸び率の高いゴムであれば、引張した際に、元の長さの8倍程度(ひずみ800%)は簡単に伸ばすことができ、はなすとほぼもとの長さ復元する。鋼材ではひずみで1%以上変形すると降伏して塑性領域に入り完全には復元しなくなるため、ゴムが復元するひずみ領域は、鋼材のそれよりはるかに大きい。鋼材に比べると、ゴムはHookの法則に従う領域が相対的に小さく、また鋼材ほど強度が高くないため、切断するのに必要な応力も小さい。このような二つの性能は、架橋することにより顕著に発現する物性である。

表5.1 主な物質の弾性率^{5.2, 5.3)}

物質名	物質の分類	弾性率(MPa)
鋼材	金属	20.0×10^4
アルミニウム	金属	7.00×10^4
鉛	金属	1.63×10^4
ダイヤモンド	セラミックス	71.4×10^4
NaCl	セラミックス	4.17×10^4
フリントガラス	セラミックス	5.50×10^4
水晶	セラミックス	6.10×10^4
炭素繊維	高分子	100×10^4
アラミド繊維	高分子	10.0×10^4
パラフィン	高分子	1.60×10^3
ポリエチレン	高分子	0.85×10^3
ポリスチレン	高分子	3.63×10^3
天然ゴム	高分子	1.5

5.2.2 エネルギー弾性とエントロピー弾性

ゴムなど高分子の弾性成分を分解してみると、エネルギー弾性(結晶弾性)とエントロピー弾性(ゴム弾性)に分解することができる。高分子の場合、特にエントロピー弾性が顕著に発揮されるが、一般的に両弾性は変形の際に同時に発揮される。このように二つの弾性が、分子鎖のどのような変化に起因しているのか、以下に述べる。

①エネルギー弾性(結晶弾性)^{5.4)}

図-5.1のように主鎖分子中の原子価角、原子間隔または分子自身の変形、あるいは分子相互間の変位に基づいて生ずる弾性である。この弾性は金属など結晶構造の材料が発揮する弾性と同様に、外部からの力により原子間隔が広がり、元の安定な位置に戻ろうとするために生じる。これは、図-5.1(A)から図-5.1(B)のようにバネを引き伸ばして、原子間隔を広げ、バネが元に戻ろうとする挙動と等しい。

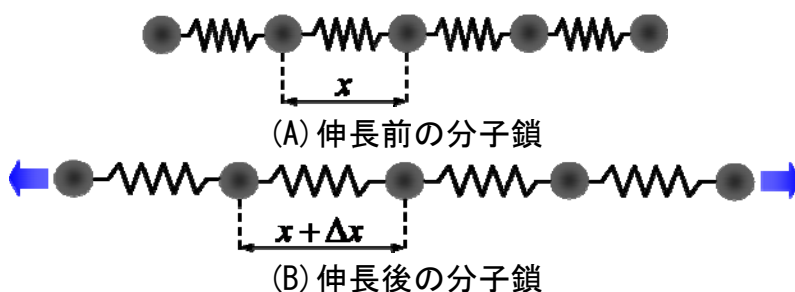


図-5.1 エネルギー弾性

②エントロピー弾性(ゴム弾性)^{5.4)}

分子がミクロブラウン運動によりランダムに運動することで、高分子鎖が最も安定な屈曲状態をとろうとして発現する弾性である。ゴムはエントロピー弾性を有しているために、金属などに比べ格段に軟らかい性質と、大変形させても塑性的になりにくく元の形状に復元する性質の二つを発揮する。エントロピー弾性については次節で詳しく解説する。

5.2.3 ミクロブラウン運動とエントロピー弾性

一般的なゴムは固体だが、他の固体と決定的に異なるところがある。それはゴムが液体と同じような性質を持っていることである。ゴムの分子は液体と同じようにブラウン運動^{5,5)}をしている。ブラウン運動とは本来、固体には見られず液体や気体のみに見られ、分子やコロイド微粒子（分子の集合体）が様々な方向に動き回って、自由に位置を変える運動を指す。ゴムは非常に長い分子鎖が、複雑にとぐろを巻いて絡み合っているため、分子全体として移動や回転はない。そのため液体のように流動はしないが、固体であるにもかかわらず、一本一本のゴムの分子鎖は、結合している鎖に沿って、分子の回転や振動による分子運動が非常に多く無秩序に起こっている。この運動は小さな分子鎖中の運動なので、ミクロブラウン運動と呼ばれている。

長い分子鎖の集合体であるゴムを静置している時は、図-5.2(A)のように糸毬状に丸まっているのが最も安定な状態であり、この状態では分子は乱雑であるためエントロピーは高い。しかし、図-5.2(B)のようにゴムの鎖の両端を手で持って引っ張って伸ばすと、真っ直ぐに整い、分子は乱雑な状態ではなくなるためエントロピーは低くなる。さらに、分子鎖は分子のランダムなミクロブラウン運動によって元の丸まった状態に戻ろうとし、張力すなわち弾力を発生する。このようにエントロピー弾性は分子のミクロブラウン運動に起因している。

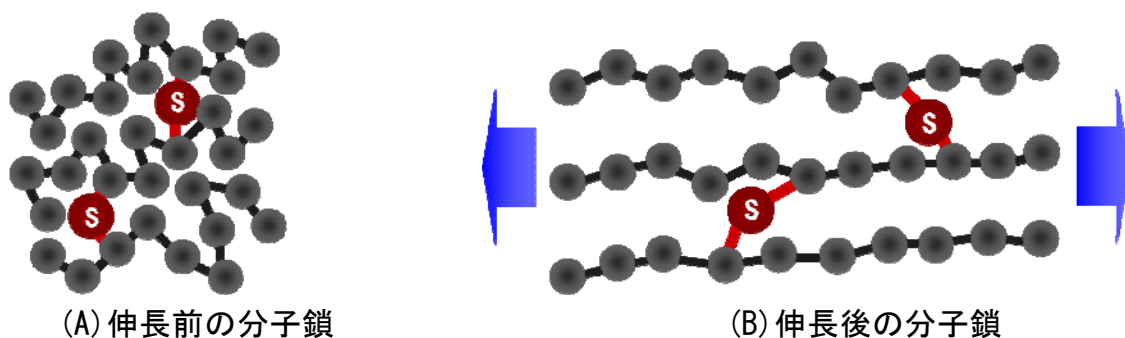


図-5.2 エントロピー弾性

ここでエントロピーという概念が出てくるが、これは乱雑さを表す状態量である。どんな物理的・化学的現象も整った状態(エントロピーの低い状態)から、より乱雑な状態(エントロピーの高い状態)へと変化する。これを熱力学の第二法則(エントロピー増大の法則)^{5,6)}という。熱などのエネルギーについて考えてみれば、あるところに局所的にエネルギーが存在していた場合、そのエネルギーが全体的に均一になり、系が安定する方向にエネルギーが移動する。自然界ではこれと逆方向にエネルギーが移動するようなことはない。熱力学の法則では、自由エネルギーを F 、内部エネルギーを U 、エントロピーを S 、温度を T とすると、次式のようなヘルムホルツ(Helmholz)の自由エネルギーの式^{5,6)}が成立することが知られている。

$$F = U - TS \quad \text{式 5.1}$$

5.2.4 エントロピー弾性における分子鎖の変形^{5.4)}

次に、分子鎖が具体的にどのように変形していくのか述べる。ここでは図-5.3 のような、簡単な高分子構造を持つにポリエチレンを例に、分子鎖がどのように変形していくのか解説する。同図の X と X' は、C と C をつなぐ鎖を表す。そして同図を X から X' の方向から見ると図-5.4 のようになる。原子は近づくと反発するという性質があるため同図-(1)の状態が存在するときが最も安定しており、この状態をトランス(Trans)という。また同図-(2)の状態が存在するときが次に安定しており、この状態をゴーシュ(Gaushe)という。そして同図-(3)の状態が最も不安定である。これらの状態は図-5.5 におけるポテンシャルエネルギー Ω と内部回転角との関係において、それぞれピークの極小点で示されている。

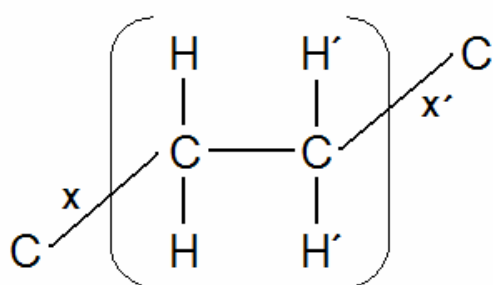


図-5.3 ポリエチレン^{5.4)}

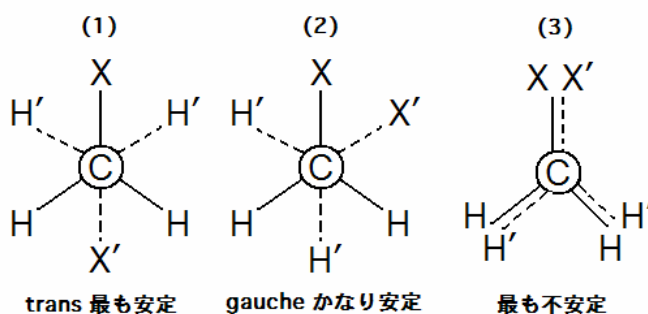


図-5.4 各原子の取りうる状態^{5.4)}

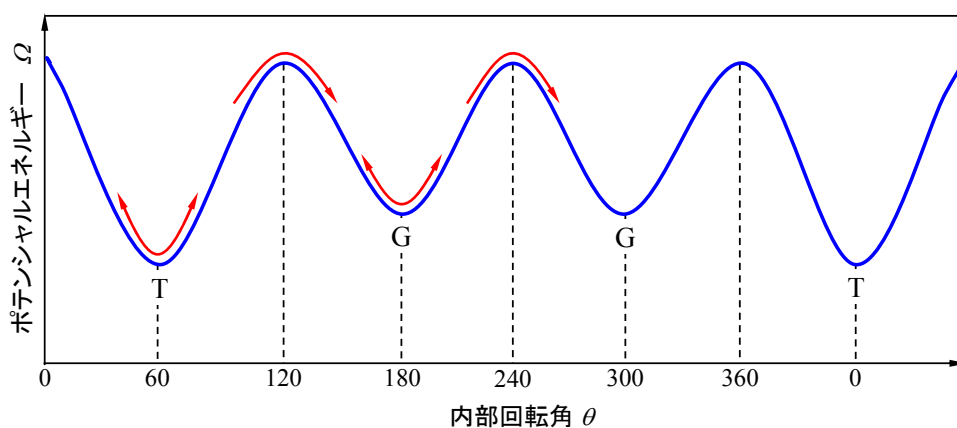


図-5.5 ポテンシャルエネルギーと内部回転角^{5.4)}

5.2.5 温度による高分子物質の状態変化^{5.4)}

ミクロブラウン運動など分子の運動性は、温度により大きく変化する。本節では温度による分子の運動性の変化に伴い高分子物質の状態がどのように変化するのかまとめる。絶対温度を T 、ボルツマン定数を k とすると、分子の振動エネルギー ΔE は式 5.2 のより表される。

$$\Delta E = kT \quad \text{式 5.2}$$

そして、ガラス転移点 T_g より低い温度 T_1 の領域では、ポテンシャル障壁 ΔE のエネルギーが $\Delta E/kT_1 \gg 1$ である。これは温度 T_1 にある分子、原子の振動エネルギーよりはるかに大きい事を意味し、そのため図-5.5 のピークの極小点を中心にして、原子、分子は振動するのみで ΔE の障壁を超えることはできず、この状態では高分子鎖は動かずに止まっている。しかし温度が T_g に近づきそれ以上の温度 T_2 に上昇すると、原子、分子の振動エネルギーが ΔE の障壁を超える値 $\Delta E/kT_g=1$, $\Delta E/kT_2 \ll 1$ となる。すると分子鎖中の分子がミクロブラウン運動を行うようになり、長い分子鎖が回転運動を始める。さらに高い温度になると、分子鎖は回転運動だけではエネルギーを消費しきれずに、元にあった位置から次第にずれるように運動するようになる。つまり高分子は液体状になってしまう。この運動をマクロブラウン運動と呼ぶ。以上の説明から、図-5.7 に示すように、高分子は低分子(図-5.6)と異なり、同じ固体状態でも3態の変化が存在する。

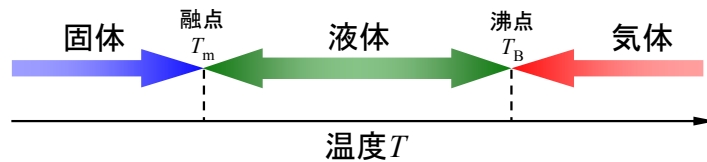


図-5.6 温度による低分子物質の相変化^{5.4)}

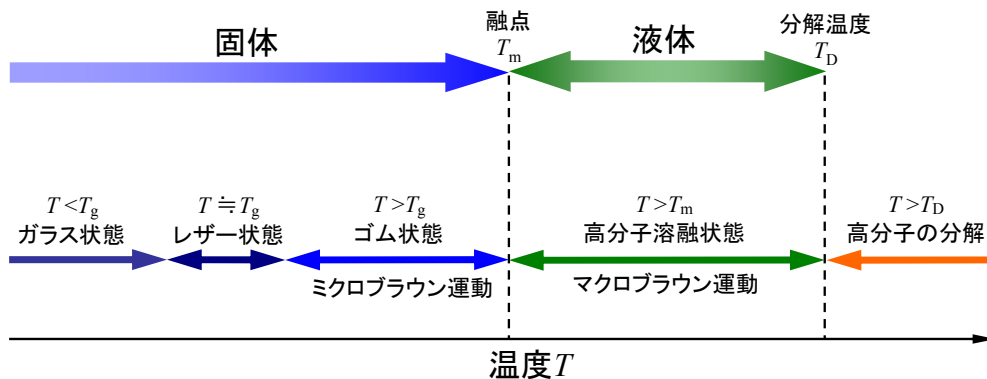
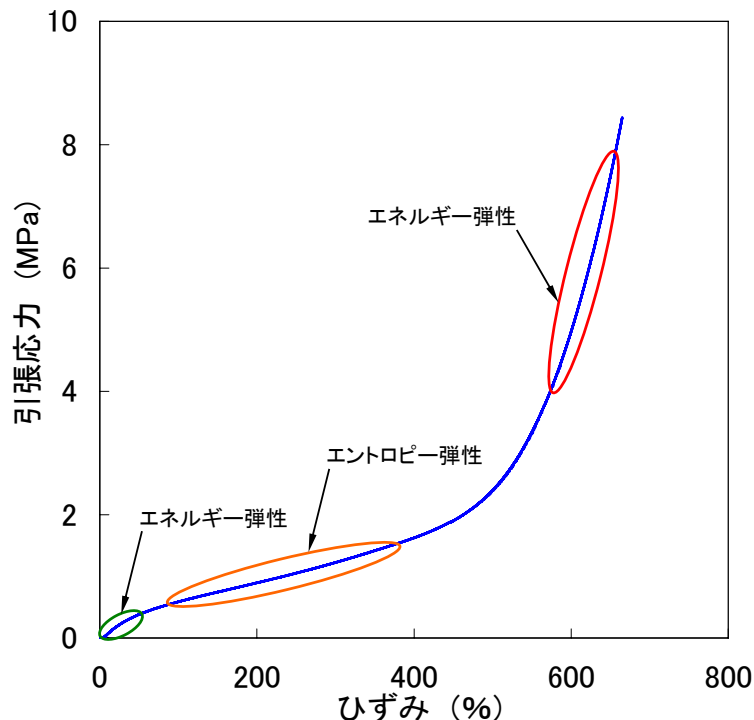


図-5.7 温度による高分子物質の相変化^{5.4)}

5.2.6 ゴムの非線形挙動^{5.7)}

ゴムについて一軸単純引張試験を行った場合、その引張応力-ひずみ関係は図-5.8に示すような非線型挙動となる。このため、ゴムの応力-ひずみ関係全体ではHookの法則には従わず、鋼材のように降伏点や弾性域を定義し、応力-ひずみ関係の傾きである弾性率をひとつだけ決定するということはできない。ゴムがHookの法則に従うのはひずみが1%程度までである。

このようなゴムの応力-ひずみ関係の非線型性は、ひずみの大きさにより支配的となる弾性が異なるためである。前述のように、ゴムなどの高分子はエネルギー弾性とエントロピー弾性の二つを有しており、これらはひずみの大きさにより図-5.8のように支配的になる。特にひずみが500%以上の高ひずみ領域では、ゴムの分子鎖は伸びきり、図-5.8に示すようなエネルギー弾性が支配的となるため、ゴムは硬化(Hardening)していく。このためゴムはひずみ硬化型の挙動を示す。



ゴムの応力-ひずみ曲線における支配的な弾性の変化(一軸引張試験)

5.2.7 エネルギー弾性とエントロピー弾性の寄与率^{5.4)}

本節ではゴムの応力についての、エネルギー弾性とエントロピー弾性の寄与率を算出する。例えば、加硫されたゴムを単位長さ分だけ引張するのに必要な力を k とする。これを出来るだけゆっくり引張り、ゴムを等温変化させると次式が得られる。

$$dF = dU - TdS \quad \text{式 5.3}$$

そしてこのゴムを dl だけ引張ると、ゴムの内部エネルギー dU は kdl だけ増え、熱エネ

第5章 ゴム弾性とゴムの静的粘弾性挙動

ルギーは TdS だけ減る. ここで dU も dl も正であるのに対して, dS は減少する事に注意し式 5.3 を変形すると次式のようになる.

$$dU = kdl + TdS \quad \text{式 5.4}$$

そして式 5.3 と式 5.4 を足し合わせると, 次式となる.

$$dF = kdl \quad \text{式 5.5}$$

$$k = \frac{dF}{dl} = \left(\frac{\partial U}{\partial l} \right)_T \quad \text{式 5.6}$$

よって, 式 5.1 と式 5.6 から次式が得られる.

$$k = \left(\frac{\partial F}{\partial l} \right)_T = \left(\frac{\partial U}{\partial l} \right)_T - T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T \quad \text{式 5.7}$$

このように式 5.7 から張力 k にはエネルギー弾性とエントロピー弾性の2つの要素で成り立っていることがわかる. 今度はゴムを長さ一定としたまま温度を変化させることを考える. 長さは一定なのでエントロピー U は変化せずに温度 T が変化するから, 式 5.3 は次式のようになる.

$$dF = dU - TdS - SdT \quad \text{式 5.8}$$

また式 5.4 も次式のようになる.

$$dU = TdS \quad \text{式 5.9}$$

式 5.8 と式 5.9 より次式が得られる.

$$dF = -SdT \quad \text{式 5.10}$$

$$S = -\frac{dF}{dT} = -\left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_l \quad \text{式 5.11}$$

式 5.11 を長さ l で微分すると, 次式のようになる.

$$\left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T = -\left(\frac{\partial^2 F}{\partial l \partial T} \right) \quad \text{式 5.12}$$

また式 5.6 を T で微分すると, 次式のようになる.

$$\left(\frac{\partial k}{\partial T} \right)_l = \left(\frac{\partial^2 F}{\partial T \partial l} \right) \quad \text{式 5.13}$$

よって, 式 5.12 と式 5.13 より以下の式が得られる.

$$\left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_T = -\left(\frac{\partial k}{\partial T}\right)_l \quad \text{式 5.14}$$

式 5.14 を式 5.7 に代入すると以下の式が得られる。

$$k = \left(\frac{\partial F}{\partial l}\right)_T = \left(\frac{\partial U}{\partial l}\right)_T + T\left(\frac{\partial k}{\partial T}\right)_l \quad \text{式 5.15}$$

ここで上記の式は、張力 k が既知な上、 $(\partial k/\partial T)_l$ も実験で求める事ができる事から、 $(\partial U/\partial l)_T$ も求められるようになる。よって張力 k のうち何割がエネルギー弾性であるとの何割がエントロピー弾性か計算により求める事が可能である。この実験は図-5.9 のような、試料の長さを一定にして温度を変化させる事により、張力 k の温度変化を観察する実験である。

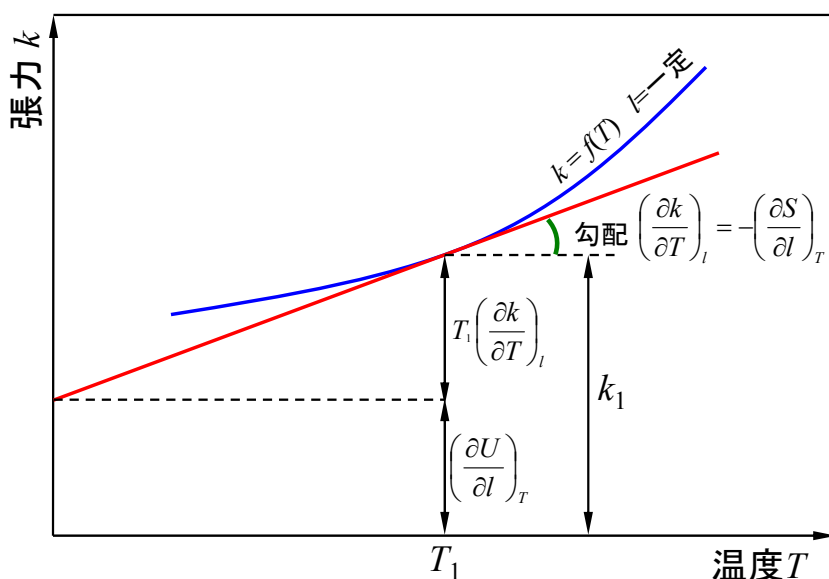


図-5.9 張力 k の温度変化^{5.4)}

5.2.8 ゴムの応力-ひずみ関係を表す式

ゴムの応力-ひずみ関係を表す式として以下に示す三つの式がある。以下に三つの式の特徴や適用範囲について述べる。

①Neo-Hookean式^{5.8)}

この式は Kuhn, Guth, Mark らにより導かれた式であり、気体の分子運動などで用いられる統計力学の考え方を利用したものである。この式を導くにあたって、幾つかの仮定がなされている。まず一つ目は、「ゴム試料のマクロなひずみの大きさと、ゴム分子鎖のミクロなひずみの大きさが同じである」という仮定である。二つ目は、「ゴム試料中に、分子鎖は無数に存在するので、自然状態にある分子鎖の末端間距離(図-5. 10A と図-5. 10B)がガウス分布に従う」という仮定である。三つ目は「ゴムの分子鎖はどこも同じ弾性率を有している」という仮定である。一つ目の仮定は「アフィン変形」とも呼ばれる、二つ目の仮定は「ガウス鎖」と呼ばれ、統計力学の概念が導入されている。

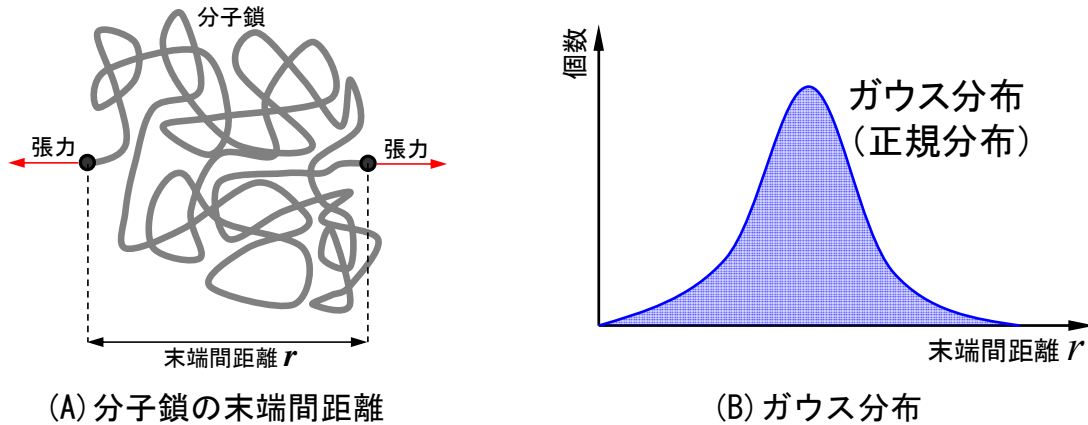


図-5.10 ガウス鎖の仮定

このようにして提案された式がNeo-Hookean式^{5.3)}であり、式の形は式 5.16 の様になる。

$$\sigma = nkT \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) = G \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad \text{式 5.16}$$

ここで、 σ は応力、 n は単位体積あたりの分子鎖の本数、 k は Boltzmann 定数、 T は絶対温度、 λ は伸長率、 G はせん断弾性率(剛性率)である。伸長率 λ とはゴムのよう到大変形する材料によく適応される物理量であり、試験体の初期長さ 1 としたとき、その何倍に伸びたかを表すものである。このため、ひずみ ε との関係は以下の式となる。

$$\lambda = \varepsilon + 1 \quad \text{式 5.17}$$

ひずみを用いると、式は次式のように書きなおすことができる。

$$\sigma = nkT \left\{ (\varepsilon + 1) - \frac{1}{(\varepsilon + 1)^2} \right\} = G \left\{ (\varepsilon + 1) - \frac{1}{(\varepsilon + 1)^2} \right\} \quad \text{式 5.18}$$

Neo-Hookean 式はゴムの応力-ひずみ曲線において、ひずみがゼロから 400%程度の比較的小さいひずみで実験結果と良く一致する。Neo-Hookean 式によるフィッティング結果を図

-5.11に示す. この結果より, ひずみが400%(伸長率では4)程度までであればNeo-Hookean式により実験結果を良く表せることが分かる. しかし, ひずみが400%以上になると, 実験結果との一致は悪くなる, これは先に述べた仮定のうち, ガウス鎖の仮定が成り立たなくなるためである. これは高ひずみ領域では, 分子鎖は引き伸ばされた状態になり, 分子の熱運動が束縛を受けるためである. Neo-Hookean式を用いる際には, 適用範囲について留意する必要がある.

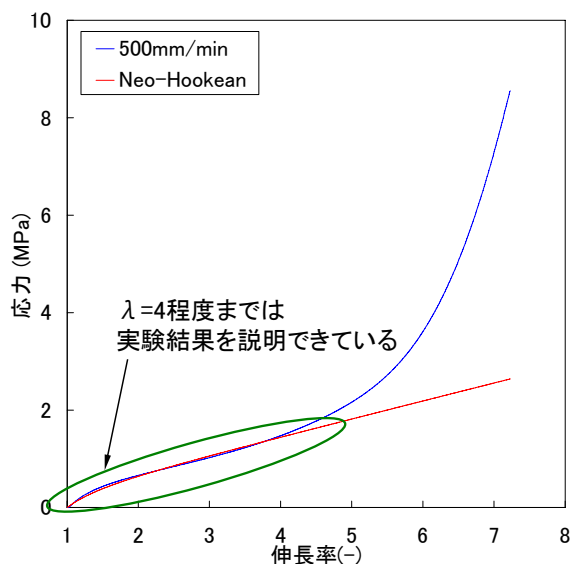


図-5.11 ゴムの引張応力-ひずみ関係と Neo-Hookean 式による理論曲線

②Mooney-Rivlin式^{5.8)}

この式は, Neo-Hookean 式のように分子鎖などミクロな観点から導かれた式ではなく, ひずみエネルギー関数から求められたものである. この式のポイントは以下の三点である.

- (1)ゴムのよう到大変形が可能な弾性材料が応力を受けてひずんだとき, 外部から与えられたエネルギーはひずみという形で, ゴム試料の中に貯蔵されると考える. このようにひずみに変化して貯蔵されているエネルギーをひずみエネルギーと呼ぶ.
- (2)ゴムについて一軸引張試験を行うと, ゴムが伸びるにつれて, 引張している方向と直角方向にもひずみが生じる. ゴムは圧縮・引張による体積変化がほぼゼロの非圧縮性であるため, 引張ひずみの増大に伴い, 断面積が減少していく. このように, 一軸引張により生じるひずみは三次元的なものであるため, ひずみはベクトルやテンソルとして取り扱う.
- (3)ゴムがひずんだときに蓄えられるひずみエネルギーをひずみに関する多項式で表し, それをひずみエネルギー関数とする.

上記のような手順で導いたひずみエネルギー関数から, 応力とひずみの関係を導き, これを二項目までとればMooney-Rivlin式^{5.9)}となる. また, 一項目まで取れば, 先に述べたNeo-Hookean式となる. Mooney-Rivlin式には様々な書き方があるが, 一般的な形状の式を式 5.19 に示す.

$$\sigma = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \right) \quad \text{式 5.19}$$

ここで、 σ は応力、 λ は伸長率、 C_1 、 C_2 は未定係数である。このように、二項目までとっているため、未定係数が二つ存在する。Mooney-Rivlin式には適用できる範囲が存在し、実験結果を $1/\lambda$ と $\sigma/(\lambda - \lambda^{-2})$ の関係としてプロットすることで適用範囲が分かる^{5.10}。このような操作をMooneyプロットと呼び、プロットが右肩上がりで直線的となる範囲が式の適用範囲となる^{5.10}。図-5.12にMooneyプロットを示す。さらにそれにより求めた適用範囲での実験データを用いたフィッティング結果を示す。図-5.13からも明らかのように、伸長率が3程度(ひずみ300%程度)までは実験データとの一致が良いが、それ以上のひずみになると一致は悪くなる。これは、Mooney-Rivlin式はゴムを完全弾性体と仮定しているため、式中の C_1 、 C_2 を定数としているためである。

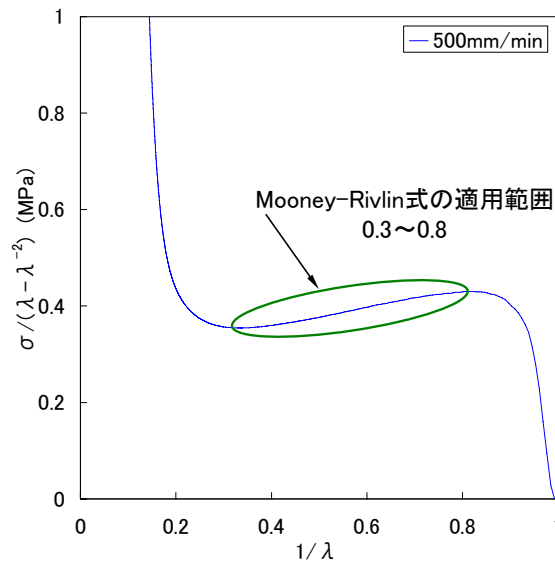


図-5.12 Mooney プロットによる式の適用範囲の検討

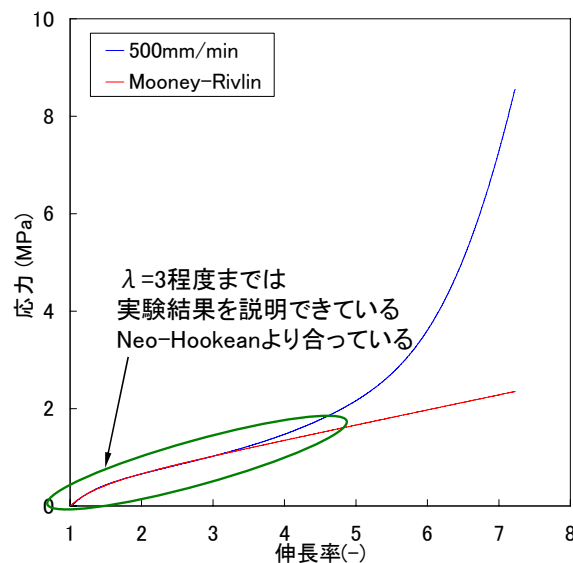


図-5.13 ゴムの引張応力-ひずみ関係と Mooney-Rivlin 式による理論曲線

③ Treloar式^{5.8)}

Neo-Hookean式とMooney-Rivlin式では様々な仮定がなされているため、高ひずみ領域までの応力-ひずみ関係を説明することができなかった。この問題を解決するために、L.R.G.TreloarはLangevinの理論^{5.11)}を利用した。Langevinの理論とは、磁場中に散らばった無数の磁気素子の配列に関するものである。磁気素子に作用する力は、磁場の方向に配列しようとする力と熱運動により配列を乱そうとする力があり、この二つが釣り合う平衡位置に磁気素子は落ち着くことになる。Treloarは磁気素子をゴム分子鎖の繰返し単位に置き換え、磁界の方向を応力の方向に対応させてLangevinの理論からゴムの応力-ひずみ関係を導いた。この式をTreloar式と呼ぶ。Treloar式は逆Langevin関数(Inverse Langevin Function)を含む式で、前の二つの式と異なり仮定が無いいため、微小変形から破断にいたるまでの広いひずみ領域について適用できる。式 5.20 にTreloar式^{5.12)}を示す。

$$\sigma = \frac{G}{3\alpha} \left\{ L^{-1} \left(\alpha\lambda - \frac{3\alpha}{\lambda^2} \right) \right\} \quad \text{式 5.20}$$

ここで、 σ は応力、 α は未定係数、 G は剛性率(せん断弾性率)、 λ は伸長率、 L^{-1} は逆Langevin関数である。以下に、逆Langevin関数の5項目(9乗の項)までの展開式^{5.13)}を次式に示す。

$$L^{-1}(x) = 3x + \frac{9}{5}x^3 + \frac{297}{175}x^5 + \frac{1539}{875}x^7 + \frac{126117}{67375}x^9 \cdots \quad \text{式 5.21}$$

この展開式において、考慮する項数を増やせば実験データとの一致が良くなるが、我々の行った検討では、5項程度考慮すれば実験データをほぼ説明することができる。以下の図-5.14 に実験データと、逆Langevin関数を5項目まで採用したTreloar式による理論曲線を示す。

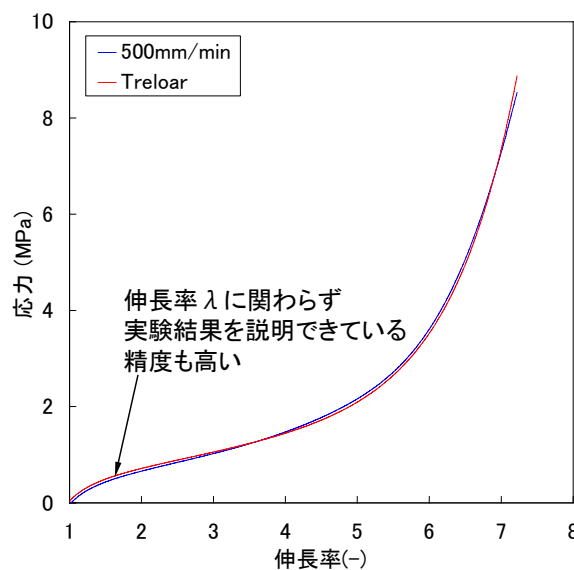


図-5.14 ゴムの引張応力-ひずみ関係と Treloar 式による理論曲線

5.3 ゴムの静的粘弾性挙動

5.3.1 粘弾性

固体物質の力学的性質の代表として、弾性、粘性、塑性などがある。これらの性質について以下に述べる。

①弾性(Elasticity)

弾性とは物体に力を与えた際に、与えた応力に対応するひずみが生じ、与えている力を取り除けば、残留変形が残らず完全にもとの形状に復元する性質である。このような変形を弾性変形と呼び、物体に与えた力学的エネルギーは物体の変形として貯蔵される。そして、復元する際に与えた力学的エネルギーは放出される。このためエネルギー吸収は無い。

②粘性(Viscosity)

粘性とは物体を変形させる際のひずみ速度に比例した応力が発生し、変形を止めれば応力はゼロとなり粘性体は変形したまま残る性質である。また、粘性体にある一定の応力を作用させると、時間とともにひずみが増大していく。このように粘性はひずみ速度(刺激の速度)や時間により応力やひずみが増大する。さらに、粘性体を変形させるために加えた力学的エネルギーは粘性体の分子や分子鎖の内部摩擦により熱となり、外部に散逸して行く。

③塑性(Plasticity)

弾性とは対称的に、物体に応力を作用させたあと、その応力を取り去っても物体に変形が残る性質を塑性という。弾性変形の場合は、変形が復元する過程で物体に蓄えられていたエネルギーが放出されるが、塑性変形の場合は変形が元に戻らないので、与えたエネルギーは物体が変形することにより吸収される。

多くの高分子物質は、弾性と粘性の両方を併せ持つ粘弾性^{5.4)}という性質を示す。さらに、応力を取り去っても変形が残るため、粘弾塑性体とも呼ばれる。これら三つの性質の中でも、高分子の静的・動的力学挙動を複雑にしているのは粘性である。これは、粘性では弾性と異なり時間や速度といった要因が重要になるためである。

5.3.2 粘弾性模型^{5.4)}

粘弾性を単純な模型で表すと，**図-5.15**に示すような二種類の模型で表される．模型はスプリングとダッシュポットと呼ばれる二つの要素からなり，弾性部分はスプリングでモデル化され，弾性率 G で表される．一方，粘性部分はダッシュポットでモデル化され，粘性率 η で表される．

これら二つの要素を**図-5.16 (A)**のように直列に繋いだ模型を Maxwell 模型，**図-5.16 (B)**のように並列に繋いだ模型を Voigt 模型という．このように，スプリングとダッシュポットを組み合わせることにより粘弾性を表すことが出来る．スプリングは载荷した瞬間に伸び，除荷した瞬間に縮む．それに対し，ダッシュポットは载荷すると载荷している時間に比例して伸びが増大し，一度伸びると，その伸びが永久ひずみとして残るといいう性質を持っている．

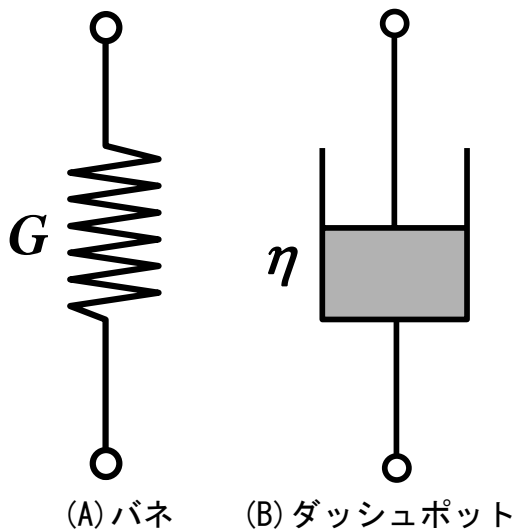


図-5.15 弾性と粘性の基本模型

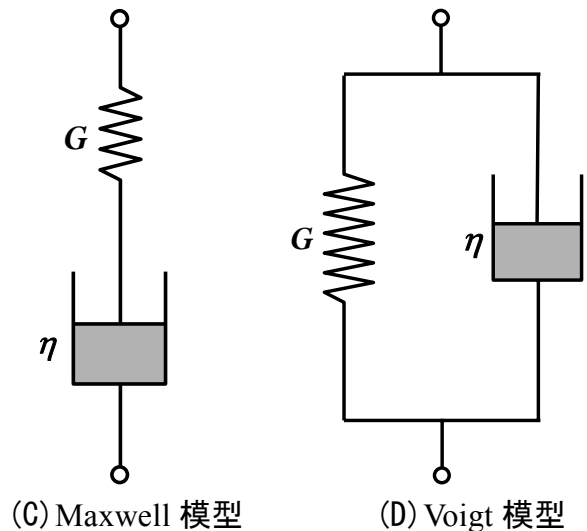


図-5.16 基本的な粘弾性模型

Maxwell 模型と Voigt 模型での全体の伸び率 γ ，応力 S とダッシュポットでの伸び率，応力の関係は以下のように表すことが出来る．

$$\text{Maxwell 模型} \quad \gamma = \sum_{i=1}^n \gamma_i \quad S = \text{一定} \quad \text{式 5.22}$$

$$\text{Voigt 模型} \quad S = \sum_{i=1}^n S_i \quad \gamma = \text{一定} \quad \text{式 5.23}$$

以上の式をもとに Maxwell 模型を式で表すと，

$$S = G \gamma_1 \quad \text{式 5.24}$$

$$S = \eta \frac{d\gamma_2}{dt} \quad \text{式 5.25}$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \quad \text{式 5.26}$$

ここで、 γ_1 は弾性部分の伸び率、 γ_2 は粘性部分の伸び率である。さらに式 5.24, 式 5.26 を時間で微分すると、

$$\frac{ds}{dt} = G \frac{d\gamma_1}{dt} \quad \text{式 5.27}$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{d\gamma_1}{dt} + \frac{d\gamma_2}{dt} \quad \text{式 5.28}$$

式 5.25, 式 5.27, 式 5.28 より以下の式が導き出せる。

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{ds}{dt} + \frac{S}{\eta} \quad \text{式 5.29}$$

式 5.29 を Maxwell 方程式といい、応力と変形に加えて時間の要素が入っている。次に、Voigt 模型を同じように式で表すと、

$$S_1 = G\gamma \quad \text{式 5.30}$$

$$S_2 = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{式 5.31}$$

$$S = S_1 + S_2 \quad \text{式 5.32}$$

ここで、 S_1 は弾性部分の応力、 S_2 は粘性部分の応力である。そして、式 5.30, 式 5.31, 式 5.32 より以下の式が導き出せる。

$$S = G\gamma + \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{式 5.33}$$

5.3.3 応力緩和とMaxwell方程式^{5.4)}

前項の式をもとに粘弾性挙動について述べる．粘弾性挙動はさまざまあるが，その中で典型的な応力緩和(Stress Relaxation)とクリープ(Creep)について述べる．応力緩和は一定延伸下にある試料の応力が時間とともに緩和して減少していく現象であり，クリープは一定荷重下にある試料が時間とともに流動し変形していく現象である．まず，応力緩和を式で表す．Maxwell 模型を示す式 5.29 に応力緩和の γ =一定という条件を代入して整理すると，

$$\frac{1}{G} \frac{ds}{dt} + \frac{S}{\eta} = 0 \quad \text{式 5.34}$$

式 5.34 を積分し，初期条件を代入して解くと， $t=0$ のとき $C = \log S_0$ であるので，

$$S = S_0 e^{-t/\tau} \quad \text{式 5.35}$$

ここで， S_0 は初期応力， τ は緩和時間で $\tau = \eta/G$ である．また，Voigt 模型により導かれた式 5.33 に γ =一定という条件を代入すると以下の式 5.36 となる．

$$S = G \gamma \quad \text{式 5.36}$$

式 5.35，式 5.36 を用い，応力緩和を示すグラフに当てはめると図-5.17 のようになり，応力緩和は Maxwell 方程式より求められることが示される．

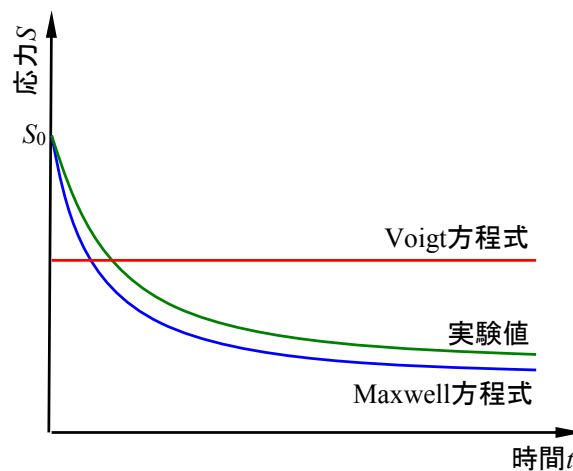


図-5.17 応力緩和曲線と実験値の比較

第6章

ゴムの動的粘弾性挙動

第6章 ゴムの動的粘弾性挙動

6.1 本章の内容

本章では、ゴムや高分子などの動的粘弾性挙動について解説する。動的粘弾性挙動とは周期的に変動する刺激(応力やひずみ)が作用した際の粘弾性挙動である。動的粘弾性挙動は刺激の周波数(速度)、温度、刺激の大きさなどにより変化するため、その評価が複雑となる。本章の構成は以下のとおりである。

6.2 ゴムの動的性質

理想的弾性体、純粘性体、粘弾性体に周期的な刺激が作用した際の応答について解説する。さらに、粘弾性体の動的挙動から複素弾性率(貯蔵弾性率と損失弾性率)を導出し、複素弾性率の周波数依存性について述べる。複素比熱の導出過程は動的粘弾性測定(DMA)の基本的な解析方法と同様である。動的粘弾性は粘弾性体に振動が作用した際の挙動を表しており、複素弾性率からはゴムを防振や防音などに使用する際のエネルギー吸収性の指標である正接損失 $\tan\delta$ を求めることができる。

6.3 ゴムの動的粘弾性の温度依存性と周波数依存性

複素弾性率、正接損失 $\tan\delta$ の温度依存性と周波数依存性についての例を示す。これらの依存性は類似しており、温度-時間換算則により結び付けられる。また、複素弾性率の温度依存性と複素比熱の温度依存性はどちらも動的な物理量であり、二つの間には相関関係があることを示す。

6.2 ゴムの動的性質

6.2.1 動的応力と動的ひずみ^{6.1)}

物質にある一定の刺激を与えた場合の性質を静的性質と呼ぶのに対し、周期的に変動する刺激を与えた場合の性質を動的性質と呼び、これらは区別して評価される。繰り返し刺激を受ける物質にとって動的性質は非常に重要な性質である。また、物質に動的な刺激を与えることにより、静的刺激のみでは得られなかった情報を得ることができる。物質の力学的な動的性質を評価する場合、動的な刺激として正弦波、または余弦波などの刺激を与えるのが普通である。例えば、周期的に変動する動的応力を図-で表すと、正弦波は図-6.1 の中の赤線であり、余弦波は同図-中の青線で示される。

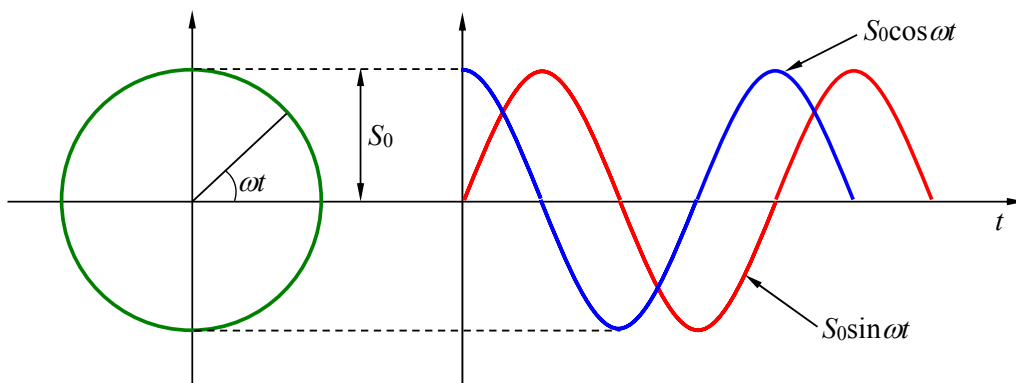


図-6.1 正弦波と余弦波の動的な応力^{6.1)}

このような動的刺激は複素数表示を用いて表すと便利である。刺激として応力を作用させる場合、周期的に変動する応力 S は次式表される。

$$S = S_0 (\cos \omega t + i \sin \omega t) \quad \text{式 6.1}$$

ここで、 S_0 は応力の振幅、 ω は角振動数である。また、オイラーの定理により式 6.2 のように三角関数の和の部分は自然対数の底である e の累乗の形で表すことができる。

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta \quad \text{式 6.2}$$

よって、式 6.1 に式 6.2 を代入することにより、

$$S = S_0 e^{i\omega t} \quad \text{式 6.3}$$

6.2.2 理想的弾性体の動力学的性質^{6.1)}

スプリング部分 G のみからなる理想的弾性体の場合, Hook の法則より次式が成立する.

$$S = G \gamma \quad \text{式 6.4}$$

ここで S は応力, G は弾性率, γ はひずみである. この場合の S は周期的に変動する応力なので, 式 6.3 を式 6.4 に代入して,

$$\gamma = \frac{S_0}{G} e^{i\omega t} \quad \text{式 6.5}$$

速度勾配は上式を時間により一階微分したものなので, 次式となる.

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = i\omega \frac{S_0}{G} e^{i\omega t} \quad \text{式 6.6}$$

このことから S , γ および $\dot{\gamma}$ の間の関係は図-6.2 のようになり, S と γ は同位相, $\dot{\gamma}$ は i をかけているので, 90° 左回りの虚軸に位置することが明らかである. つまり周期的に変動する応力 S に対して同位相で応答する γ を示す曲線を描く.

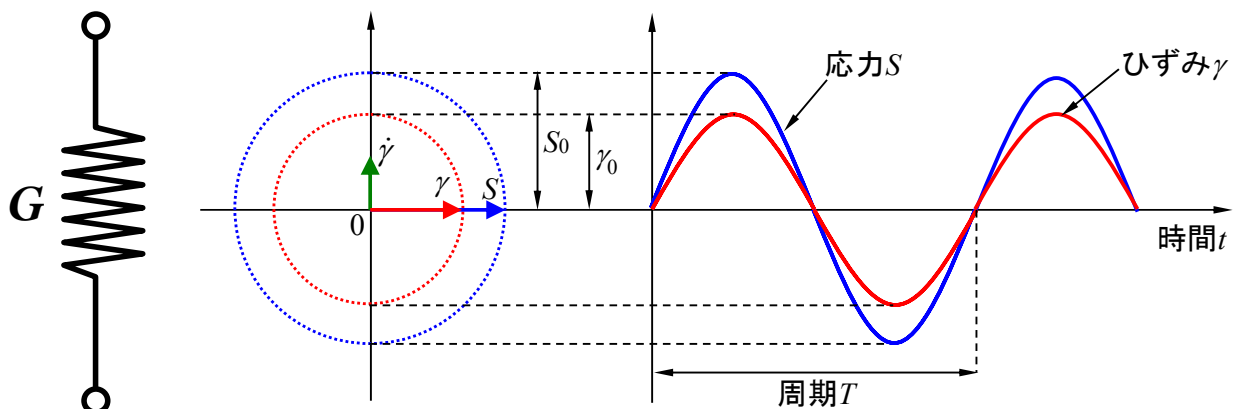


図-6.2 理想的弾性体の応力, ひずみ, 速度勾配の関係^{6.1)}

6.2.3 純粘性体の動力学的性質^{6.1)}

次に、理想的弾性体とはまったく対称的な、純粘性体の場合を考えてみる。図-6.3のダッシュポットに関しては、Newton粘性が成り立つので応力が式6.7で表され、これに式6.3を代入すると式6.8が得られる。

$$S = \eta \frac{d\gamma}{dt} \quad \text{式 6.7}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{S_0}{\eta} e^{i\omega t} \quad \text{式 6.8}$$

これを時間で積分して、

$$\gamma = -i \frac{S_0}{\eta\omega} e^{i\omega t} \quad \text{式 6.9}$$

この場合は、図-6.3となり、 S と $\dot{\gamma}$ は同位相、 γ は $-i$ をかけたので 90° 右回りの虚軸となる。応力 S とひずみ γ との関係は、図-6.3のようになり、両者の位相差は $\pi/2\omega$ となる。

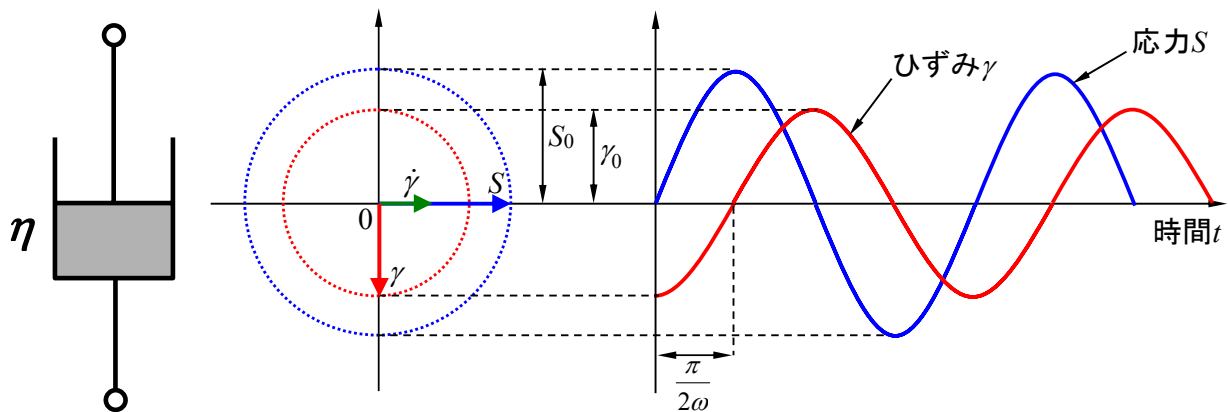


図-6.3 純粘性体の応力，ひずみ，速度勾配の関係^{6.1)}

6.2.4 粘弾性体の動力学的性質^{6.1)}

次に、弾性と粘性を併せ持つ粘弾性体の動力学的性質について述べる。ここでは、最も簡単な粘弾性モデルとして、Maxwell 模型の場合について考えてみる。単純な Maxwell 模型の場合、式 5.29 が成立するので、式 5.29 に式 6.3 を代入すると、次式が得られる。

$$\frac{d\gamma}{dt} = \left(\frac{1}{\eta} + \frac{i\omega}{G} \right) S_0 e^{i\omega t} \quad \text{式 6.10}$$

これを時間で積分すると、

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{S_0}{i\omega} \left(\frac{1}{\eta} + \frac{i\omega}{G} \right) e^{i\omega t} \\ &= \frac{1}{G} \left(1 - \frac{i}{\omega\tau} \right) S_0 e^{i\omega t} \quad \text{式 6.11} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{G} \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}} S_0 e^{i(\omega t - \delta)} \\ &= \gamma_0 e^{i(\omega t - \delta)} \quad \text{式 6.12} \end{aligned}$$

ただし、 $\tan\delta = 1/\omega\tau$ である。次に $S = S_0 \sin\omega t$ の形を用いて展開すると、次式となる。

$$\gamma = \frac{1}{G} \sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \tau^2}} \cdot S_0 \sin(\omega t - \delta) = \gamma_0 \sin(\omega t - \delta) \quad \text{式 6.13}$$

この場合の S と γ の関係は、図-6.4 のとおりであり、正弦的応力 S と応答ひずみ γ との間には δ/ω の位相がある。

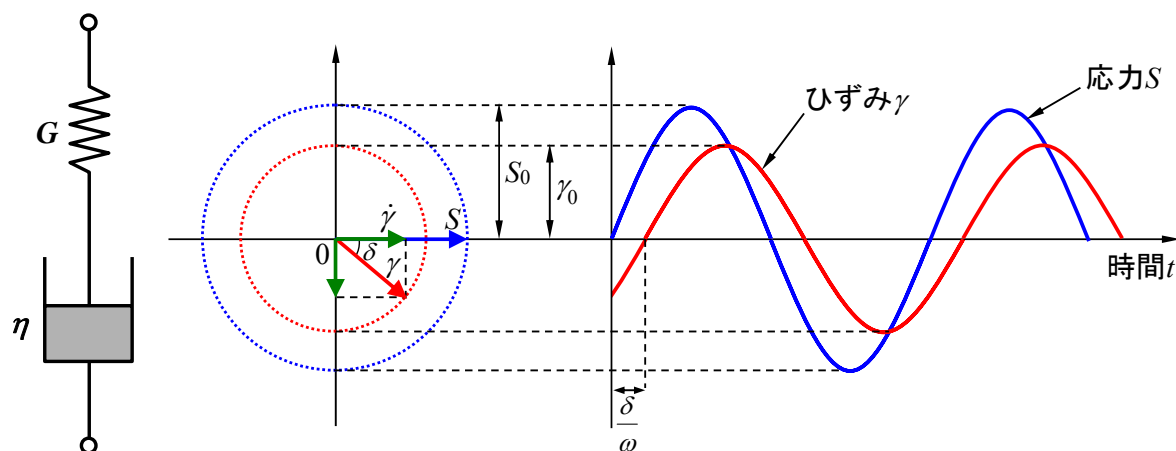


図-6.4 粘弾性体の応力，ひずみ，速度勾配の関係^{6.1)}

6.2.5 複素弾性率^{6.1)}

粘弾性体に動的刺激が作用する場合において弾性率 E を定義してみる． $E^*(\omega)$ は一般的に複素弾性率と呼ばれ，次式で示される．

$$E^*(\omega) = \frac{S}{\gamma} \quad \text{式 6.14}$$

$s = S_0 e^{i\omega t}$ および γ として式 6.11 を用い，これを式 6.14 に代入すると，

$$\begin{aligned} E^*(\omega) &= \frac{S_0 e^{i\omega t}}{\frac{1}{E} \left(1 - \frac{i}{\omega\tau}\right) S_0 e^{i\omega t}} = \frac{1}{\frac{1}{E} \left(1 - \frac{i}{\omega\tau}\right)} \\ &= E \frac{\omega^2 \tau^2 + i\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{式 6.15} \end{aligned}$$

また， $E^*(\omega)$ は複素数なので，実数部と虚数部からなり，式 6.16 で示される．

$$E^*(\omega) = E'(\omega) + iE''(\omega) \quad \text{式 6.16}$$

$E'(\omega)$ を貯蔵弾性率， $E''(\omega)$ を損失弾性率と呼ぶ． $E'(\omega)$ は応力が作用した際にエネルギーがひずみとして貯蔵される弾性成分であり，Maxwell 模型でいうとスプリング部分の E の変化に対応する．一方， $E''(\omega)$ は呼び方が弾性率であってもエネルギー損失を現しており，Maxwell 模型のダッシュポット部分 η の変化に対応している．

$$E'(\omega) = E \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{式 6.17}$$

$$E''(\omega) = E \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad \text{式 6.18}$$

静的実験の場合における時間 t の代わりに角振動数 ω を用いて，図-6.5 のMaxwell模型を上下に伸縮運動させる．図-6.5 の左側は角振動数 ω の小さい場所，つまり上下の伸縮運動がゆっくりしている領域であり，右方へ行くに従い ω は大きくなり伸縮運動は激しくなっていく．図-6.5 は複素弾性率 $E^*(\omega)$ と ω との関係をプロットしたものであり， $E'(\omega)$ と ω との関係は，式 6.17 に基づく理論曲線として，図-中変曲点を持つ上昇曲線で示される．一方， $E''(\omega)$ と ω との関係は式 6.18 に基づく理論曲線として，ピークを持った山形の曲線として示される．なお，横軸を ω でなく $\omega\tau$ としたのは，規格化により，変曲点または山形のピークの点を横軸の1に調整するためである．

まず貯蔵弾性率 $E'(\omega)$ であるが，この値は ω が増加するほど次第に増大して，ついには Maxwell 模型のスプリング E 部分のみの弾性値に近づいていく．これを式で示せば，式 6.17 より，

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} E'(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} E \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} = E \quad \text{式 6.18}$$

すなわち、この周辺領域の上下運動を詳しく述べると次の通りである。図-6.5の横軸の左側へいくほど ω が小さくなるので、図-6.5に示した矢印のようなくり返しの上下振動がゆっくりと行われる。そして、 ω が次第に大きくなり、くり返し上下振動が激しくなると、ダッシュポットの η 部分の動きが逆に鈍くなっていき、 E 部の動きが活発となる。さらに上下振動が活発化し、 ω が大となると、 E 部の動きが100%スプリングの動きのみに近づき、式6.18でも明らかのように、100% E 値に漸近していく。

次に損失弾性率 $E''(\omega)$ の場合を見てみる。横軸 $\omega\tau$ において、 ω が小さい、つまり上下くり返し振動のゆっくりしている左側の領域では、粘性部（ダッシュポット）の中を上下するピストンによって消費されるエネルギーは非常に少なく、 $E''(\omega)$ の値は小さい。しかし、次第に $\omega\tau$ が横軸右方へいくに従って、上下振動が次第に早くなるので、ダッシュポット部分を上下するピストンの運動も次第に早くなる。これにより消費、発熱するエネルギーは次第に増大していき、 E'' の値が大きくなっていく。 E'' がピークに達してから、さらに上下くり返し振動が早くなっていくと、図-6.5の粘弾性模型のように、上下くり返しが早くすぎるため、次第に粘性部（ダッシュポット）の動きが鈍くなってくる。つまり、スプリング部のみが働くようになっていく。そのため、ダッシュポットで費やされる消費エネルギーが次第に減少していくのである。式6.18に対応する式としてこの様子を式6.19に示すと、

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} E''(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} E \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} = 0 \quad \text{式 6.19}$$

すなわち、 η 部分中のピストンの上下振動は次第に減少して、消費エネルギーがゼロに近づくので式6.19となるのである。

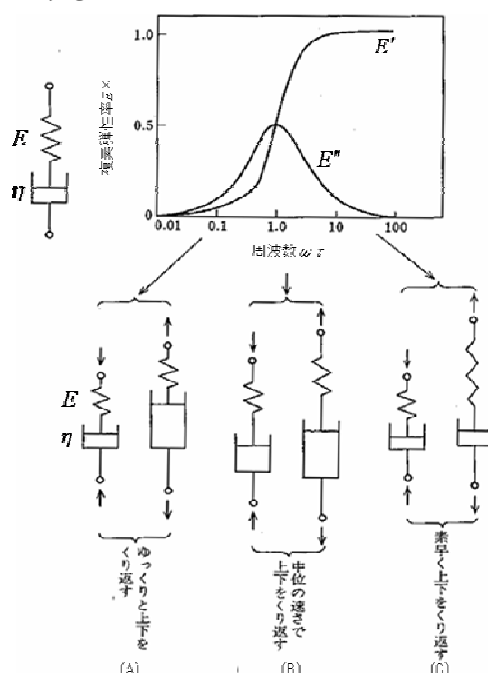


図-6.5 Maxwell模型の動的挙動^{6.1)}

図-6.6 に示すように、正弦波の応力とひずみに対応する場合を考える。この場合、応力とひずみのどちらを付与、他方を応答と考えても同じである。ここでは仮にひずみを付与したと考え、ひずみと応力を式で表すと次のようになる^{6.2)}。

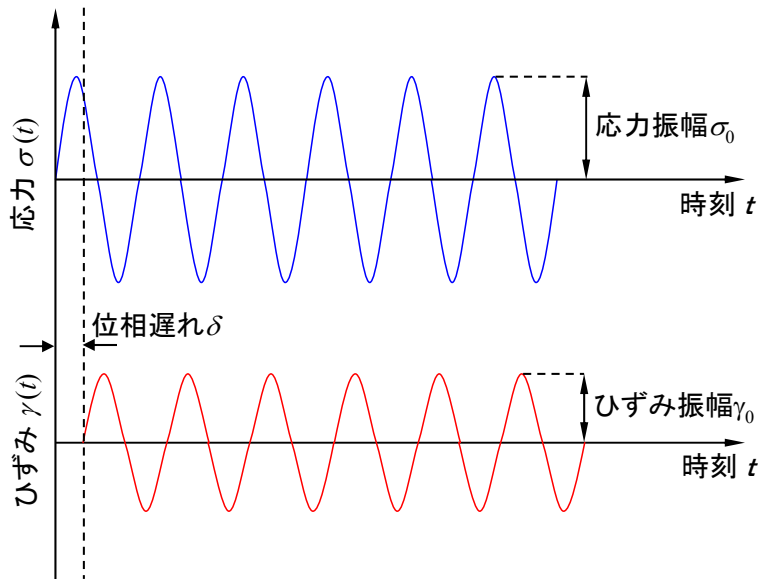


図-6.6 正弦波の応力とひずみ^{6.2)}

ひずみ $\gamma(t) = \gamma_0 \cos \omega t$ 式 6.20

応力 $\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta)$ 式 6.21

実在の物質では応力は常にひずみより位相が進んでいるので、ひずみと応力の位相差 δ は下記の範囲にある。

$$0 \leq \delta < 90^\circ$$

そして、式 6.21 を三角法の公式で書き直すと、

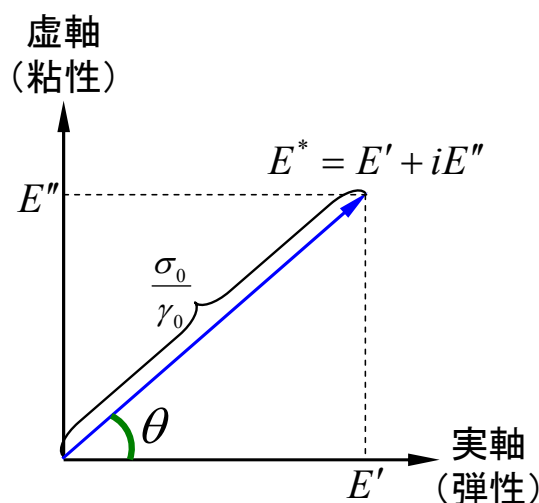
$$\sigma(t) = \sigma_0 (\cos \delta \cos \omega t - \sin \delta \sin \omega t) \quad \text{式 6.22}$$

この右辺の第一項はひずみと同位相の応力成分、第二項は 90° 位相の違った応力成分である。ここで、前節で述べた複素弾性率の概念を取り入れると、貯蔵弾性率 E' 、損失弾性率 E'' は以下の式で表される。

$$E' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \quad \text{式 6.23}$$

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \quad \text{式 6.24}$$

このように、ひずみと同期的な E' が弾性成分、ひずみと 90° 位相の違う E'' が粘性成分を示している。この関係を図-示すると図-6.7 のようになる。

図-6.7 貯蔵弾性率と損失弾性率の複素平面での表示^{6.1)}

今までに述べた E' , E'' , および後述する $\tan\delta$ といった動的性質は一般には次の因子で変化する量である。

- ①温度
- ②振動数 (周波数)
- ③平均ひずみとひずみ振幅, または平均応力と応力振幅

上記の三因子のうち一因子の影響を調べるときには, 他の二つの因子を一定に保って実験する必要がある。このようにして得られた動的性質に, 変化させる独立変数の名を冠して, 温度特性, 周波数特性, 振幅依存性などと呼ぶ^{6.3)}。

6.2.6 ゴムの一般的なエネルギー吸収性の評価法

主に防振, 防音目的に用いられるゴムには, 周期的で小さな刺激が複数回繰り返し作用する。このとき, 外部からの振動によりゴム内の分子鎖は強制的に運動させられ, 分子鎖同士の間で摩擦が発生する。これをゴムの内部摩擦と呼び, 内部摩擦により力学的なエネルギーは熱エネルギーに変換され, 外部に散逸してゆく^{6.4)}。これが, ゴムに振動が作用した際のエネルギー吸収メカニズムである。ゴムの内部摩擦(減衰)の大きさは, 前節で述べた貯蔵弾性率 E' と損失弾性率 E'' の割合として次式で示される^{6.3)}。

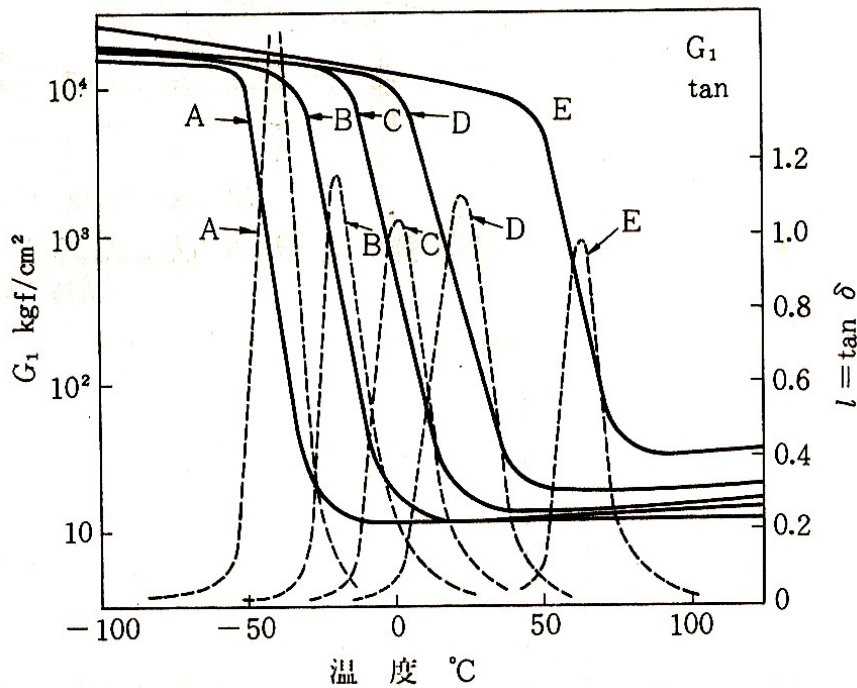
$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad \text{式 6.25}$$

したがって, 防振ゴムや防音ゴムのエネルギー吸収性を評価する場合, 損失正接 $\tan\delta$ をエネルギー吸収性の指標として用いるのが一般的である。通常はゴムに周期的に微小変形を与える動的粘弾性測定(DMA)により測定される^{6.5)}。大変形を与えるとゴムの吸収するエネルギーが多くなりすぎて, 試料の温度が急激に上昇してしまうため, 大変形を与えるような動的粘弾性測定は不可能である。

6.3 ゴムの動的粘弾性の温度依存性と周波数依存性

6.3.1 動的粘弾性の温度依存性^{6.3)}

振動数と振幅を一定に保ったままゴムの温度を下げていくと、それぞれのゴムで異なるが、図-6.8に示すようにある温度域で E' が急激に上昇し、 $\tan\delta$ ではピークが現れる。前述したように、この現象はゴム状態からガラス状態への転移で、ガラス転移という。そして、振動数が高いほどガラス転移領域は高温側に移る。ガラス状態ではゴム特有のゴム弾性が発揮されないため、緩衝ゴムとして適当な温度範囲の下限はこの転移域で決められる。ガラス転移点は分子鎖の運動性に関連しているため、高分子の種類や配合などにより決まる。

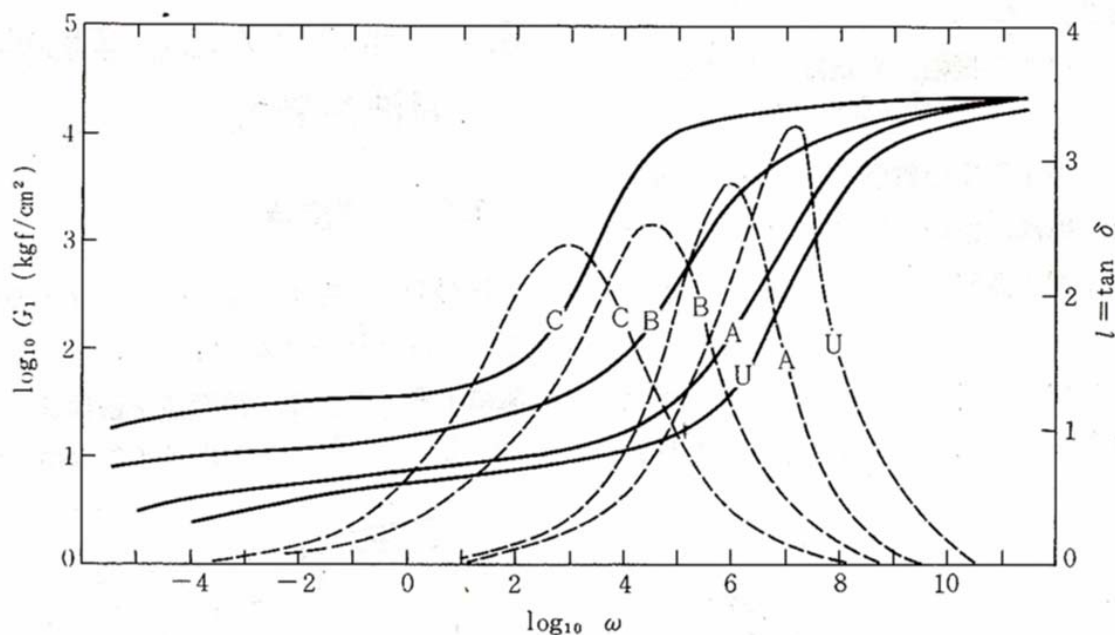


天然ゴム，硫黄配合量 (phr) A : 5, B : 10, C : 15, D : 20, E : 30,

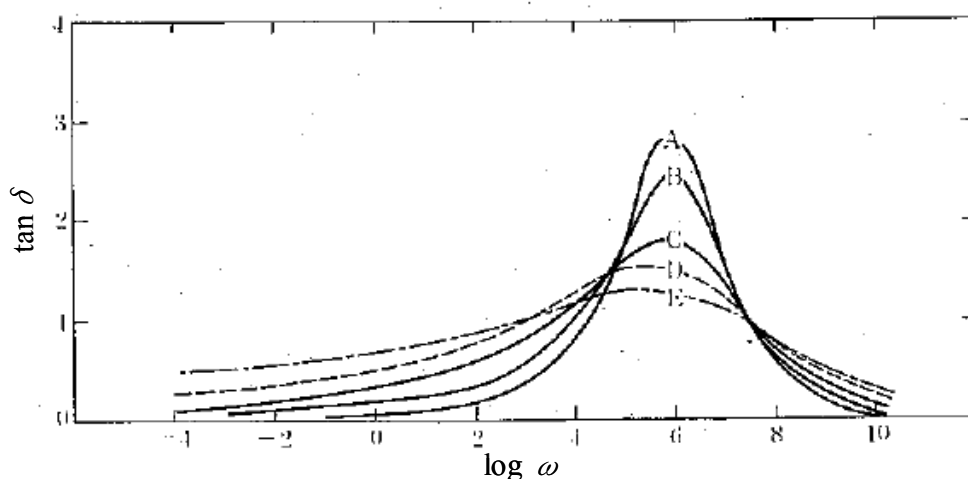
図-6.8 動的粘弾性の温度特性^{6.3)}

6.3.2 動的粘弾性の周波数依存性 ^{6.3)}

温度と振幅を一定に保ったまま振動数を上げていくと、ゴムの種類や配合にもよるが、図-6.9に示すように、ある振動数域で E' が急激に上昇する。そして、この振動数域で $\tan\delta$ のピークが現れる。室温にあるゴムの場合、 E' の急激な上昇や $\tan\delta$ のピークは一般に超音波のような高周波数領域に現れる。図-からも明らかなように、周波数を上げたときの周波数特性は、温度を下げたときの温度特性と似た傾向を示す。

(A) 天然ゴムの E' と $\tan\delta$

硫黄配合量 (phr) U : 未加硫, A : 1.5, B : 3.5, C : 7.5

(B) 天然ゴムの $\tan\delta$

カーボンブラック配合量 (phr) A : 0, B : 10, C : 20, D : 30, E : 50

図-6.9 動的粘弾性の周波数特性^{6.3)}

6.3.3 温度-周波数換算法則^{6.6)}

前節で述べたように、動的粘弾性の温度依存性と周波数依存性とが、定性的に似た傾向を示すことがわかる。ゴムなど高分子における動的粘弾性の温度依存性と周波数依存性には定量的な平行的性質があることが知られており、両者の関係は温度-周波数換算法則に当てはまる。温度-周波数換算法則について詳しく述べる。異なる温度において、周波数の関数として E' や E'' を測定する場合を考える。得られた曲線は、対数で表した周波数軸と平行にずらすことで、互いに重ね合わせることができ、重ね合わせた曲線をマスターカーブ、または合成曲線と呼ぶ。これは時間・温度重ね合わせの原理(Principle of Time-Temperature Superposition)^{6.6)}と呼ばれ、その様子を図-6.10に示す。つまり、曲線を移動係数 a_T 、

$$\log a_T = \log \omega_r - \log \omega \quad \text{式 6.26}$$

だけ移動すると、温度 T_r 、周波数 ω_r のスペクトルに重ね合わせることができる。 T_r 、 ω_r はそれぞれ基準の温度、周波数である。移動係数の温度依存性は、Williams, Landel, Ferryら三人により経験的に以下の式で表されることが示されている。

$$\log a_T = \frac{C_1(T - T_r)}{C_2 + (T - T_r)} \quad \text{式6.27}$$

ここで、 C_1 、 C_2 は定数である。式4.44は一般にWilliams-Landel-Ferry式(WLF式)^{6.6)}と呼ばれ、ガラス転移点近傍の多くの高分子系で成り立っており、 T_r をガラス転移温度 T_g で置き換えると、定数は多くの高分子系の挙動を近似的に記述する普遍的な値 ($C_1=-17.4$, $C_2=51.6$ K) となる。このことから、周波数を温度に、温度を周波数に換算することができる。

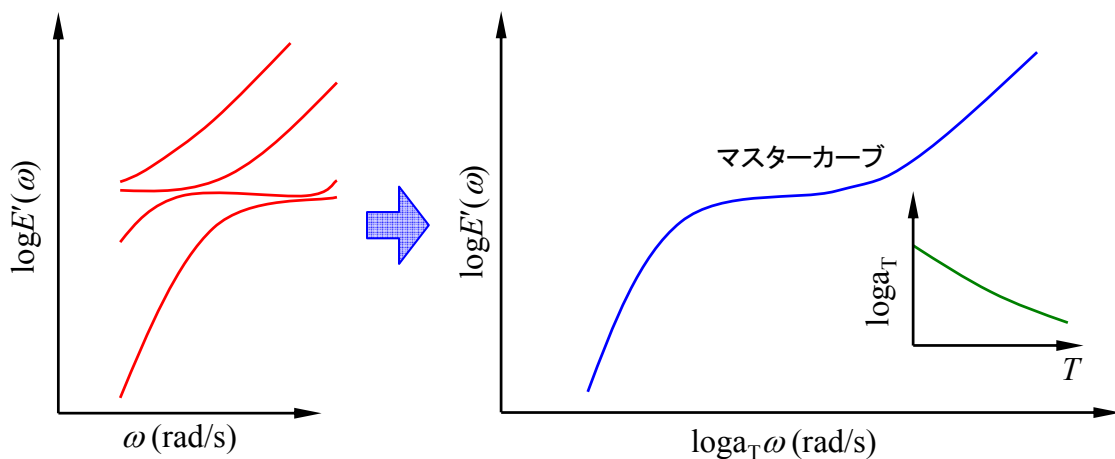


図-6.10 時間・温度重ね合わせの原理の模式図^{6.6)}

6.3.4 動的粘弾性と動的比熱の関連性

前述したように，ゴムなど粘弾性体に周期的に変動するひずみを与えると，与えたひずみに対して同期的な応力成分と 90° 位相の異なる非同期的な応力成分が発生する．前者が弾性成分，後者が粘性成分であり，それぞれを貯蔵弾性率 E' と損失弾性率 E'' で表し，粘弾性を複素数表示すると複素弾性率 E^* は以下のように示される．

$$E^* = E' + iE'' \quad \text{式 6.28}$$

熱的応答でもこれと同じことがいえる．ゴムに周期的な温度変調を与えると，温度変調に同期的な熱流束成分と非同期的な熱流束成分が発生する．同じように複素数表示すると，複素比熱 c^* は力学的応答の貯蔵弾性率 E' に対応する c' と損失弾性率 E'' に対応する c'' で示すことができる．ここで熱流束とは単位時間に移動した熱量のことであり単位はmWで示される．また，比熱とは物質 1gの温度を 1°C 上げるのに必要な熱量であり，単位は $\text{J/g}^\circ\text{C}$ である．

$$c^* = c' + ic'' \quad \text{式 6.28}$$

力学的応答から得られる E' 、 E'' と，熱的応答から得られる c' 、 c'' の温度依存性を図-6.11、図-6.12に示す．このことから，温度に対するそれぞれの挙動は類似しており，力学的応答から得られる E' 、 E'' と，熱的応答から得られる c' 、 c'' には相関があることが分かる^{6.7)}．

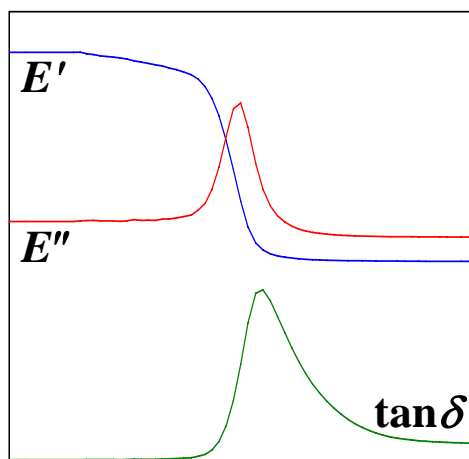


図-6.11 複素弾性率の温度依存性^{6.8)}

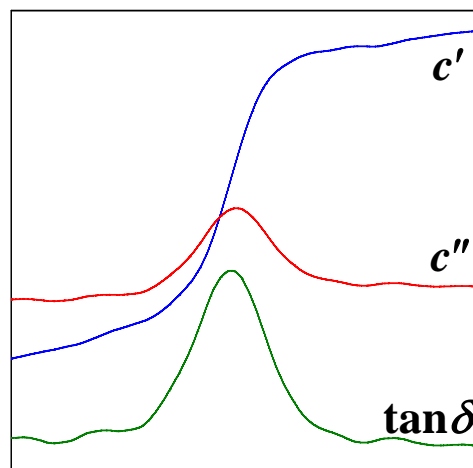


図-6.12 複素比熱の温度依存性^{6.8)}

第7章

引張試験

第7章 引張試験

7.1 本章の内容

本章では様々な速度で引張試験を行い，そこから得られた実験結果よりゴムの基本的物性を検討した．本章の構成を以下に示す．

7.2 引張試験の説明

引張試験についての解説と，評価した物性量の定義について述べる．

7.3 試験方法に関する検討

短冊状，ダンベル状，バンド状の異なる形状の試験体で引張試験を行い，そこから得られた応力-ひずみ関係を比較し間便で正確な試験方法を検討する．

7.4 引張速度に関する検討

様々な変位速度で引張試験を行い，引張速度の違いによる応力-ひずみ曲線の変化について検討する．また，引張試験によって求められた応力-ひずみ曲線からそれぞれのひずみにおいての勾配（真応力・真ひずみの傾き）と引張速度の関係を求め，引張速度の違いによる勾配の速度依存性について検討する．

7.2 引張試験の説明

7.2.1 引張試験

引張試験とはゴムに限らず、強度部材の最も一般的な試験であり、試験体に引張荷重を作用させ、その時の変位を測定する方法である。引張試験によりゴムの引張荷重-変位関係、引張応力-ひずみ関係を測定することができる^{7.1)}。これらから破断強度、破断ひずみなど、ゴムを使用する際に必要な物性を知ることができる。また、材料の変形に関する特質を知るには引張試験によるのが普通であり、引張試験は試験体をチャックで挟み、チャック間距離を広げてゆくことで試験体を引っ張るタイプのものが多く、本研究で採用したのもこの方法である。荷重は試験機に取り付けられているロードセル、変位は試験体に描かれた標線の間隔を画像処理による変位測定システムを用いて測定するのが一般的である。

7.2.2 ゴムの応力-ひずみ関係^{7.2)}

ゴムの引張試験の結果である荷重と変位より、試験体の荷重-変位関係を測定することができる。そこから得た荷重-変位関係と試験体の断面積と厚さを用いて、材料の応力-ひずみ関係を求めることができる。また、ひずみに関しても変形前と変形後の変位より求めることができる。応力、ひずみの定義式を以下に示す。

$$\sigma_0 = F / A_0 \quad \text{式 7.1}$$

$$\varepsilon_0 = (L_i - L_0) / L_0 \quad \text{式 7.2}$$

ここで、 σ_0 は公称応力、 F は荷重、 A_0 は初期の試験体の断面積である。 ε_0 は公称ひずみ、 L_i は試験体長さ、 L_0 は初期の試験体長さである。

上式 7.1, 7.2 は断面積 A_0 が変わらないとして求めたが、実際には伸びが大きくなると引張られた試験体の断面積 A_i は初期の断面積 A_0 より小さくなる。よって公称応力 σ_0 の代わりに変形中のそのときどきの断面積 A_i で荷重を除した真応力 σ_i を用いた。

$$\sigma_i = F / A_i \quad \text{式 7.3}$$

ゴムを体積変化のない非圧縮性と仮定すると

$$A_0 L_0 = A_i L_i \quad \text{式 7.4}$$

が成り立つので、式 7.2, 7.4 より

$$1 + \varepsilon_0 = A_0 / A_i \quad \text{式 7.5}$$

となるから

$$\sigma_i = F / A_i = F(1 + \varepsilon_0) / A_0 \quad \text{式 7.6}$$

よって式7.5, 7.6より

$$\sigma_i = \sigma_0(1 + \varepsilon_0) \quad \text{式7.7}$$

また、ひずみに関しても公称ひずみ ε_0 を使う代わりに変形中の各瞬間の試験体の長さ L に対するひずみの増分として $d\varepsilon = dL/L$ を考え真ひずみ ε_i を用いた。

$$\varepsilon_i = \int_{L_0}^{L_i} d\varepsilon = \int_{L_0}^{L_i} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_i}{L_0} = \ln(1 + \varepsilon_0)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_0) \quad \text{式7.8}$$

とした。ここで σ は真応力、 ε_i は真ひずみである。

7.2.3 勾配の定義

金属など明確な弾性域と塑性域を有する材料の場合、弾性域での応力-ひずみ関係は直線となり、その傾きが弾性率 E となる。式で表すと応力 σ とひずみ ε の割合で次式のようになる。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{式7.9}$$

ゴムの応力-ひずみ関係は非線形挙動であり、明確な弾性域や塑性域を見出すことはできない。このため弾性率を定義しようとする、ひとつの値で定義することができず、ひずみにより弾性率が変化する。したがって、真応力 σ_i を真ひずみ ε_i で除したものを、そのひずみにおける勾配 E_i と定義した。

$$E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \quad \text{式7.10}$$

7.3 試験方法に関する検討

7.3.1 目的

ゴムの変形挙動は複雑なため、ゴム製品の設計において応力-ひずみ関係の検討が重要になる^{7.3)}。本研究では正確な応力-ひずみ曲線を求めるために、より簡便な試験方法の確立を目的としてゴムの材料物性を知るための試験方法に関しての検討を行った。

7.3.2 試料・試験体

試料には、増容材など様々な配合剤を含む市販の(株)共和製天然ゴムのゴムバンド(NR-band)を選択した。なお詳しい配合は不明である。試験体の形状は図-7.1~7.3に示すようにバンド状, 短冊状, ダンベル状であり, サイズはバンド状が折径 100mm, 幅 6mm, 厚さ 1.1mm, 短冊状, ダンベル状がチャック間 10mm, 幅 2mm, 厚さ 2mmの試験体を用いた。

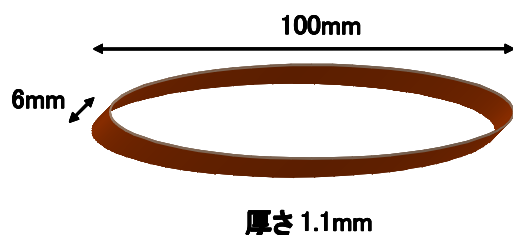


図-7.1 バンド状試験片

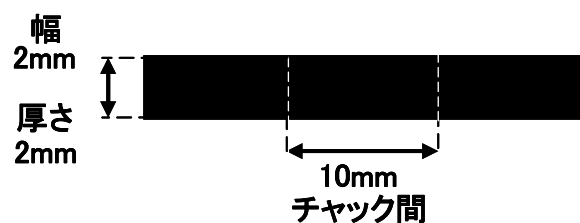


図-7.2 短冊状試験片

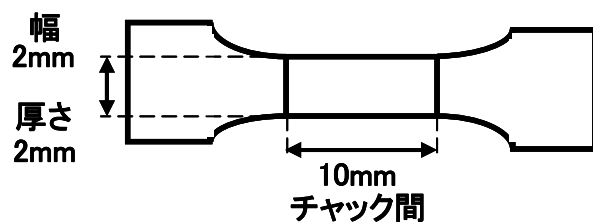


図-7.3 ダンベル状試験片

7.3.3 実験条件

試験機は島津製作所製のオートグラフAGS-J 1KNを使用した。試験機の概容を図-7.4に示す。測定は変位速度 300mm/minで試料が破断するまで行った。サンプリング間隔は0.1秒とした。またバンド状試験体はチャック固定用のピンに設置した。

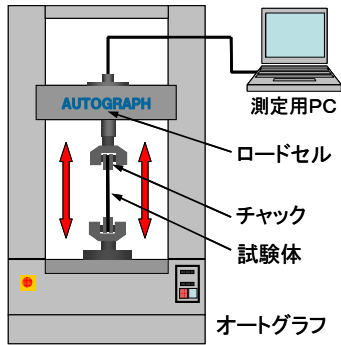


図-7.4 オートグラフ

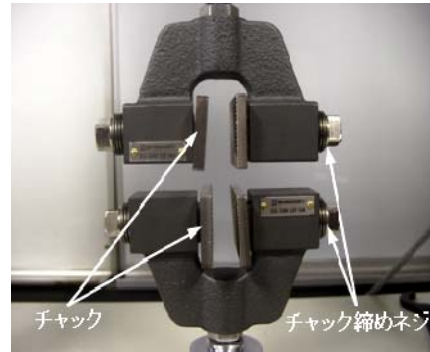


図-7.5 引張試験機のチャック

7.3.4 実験結果

形状の異なる試験体の引張試験による応力-ひずみ関係を図-7.6に示す。

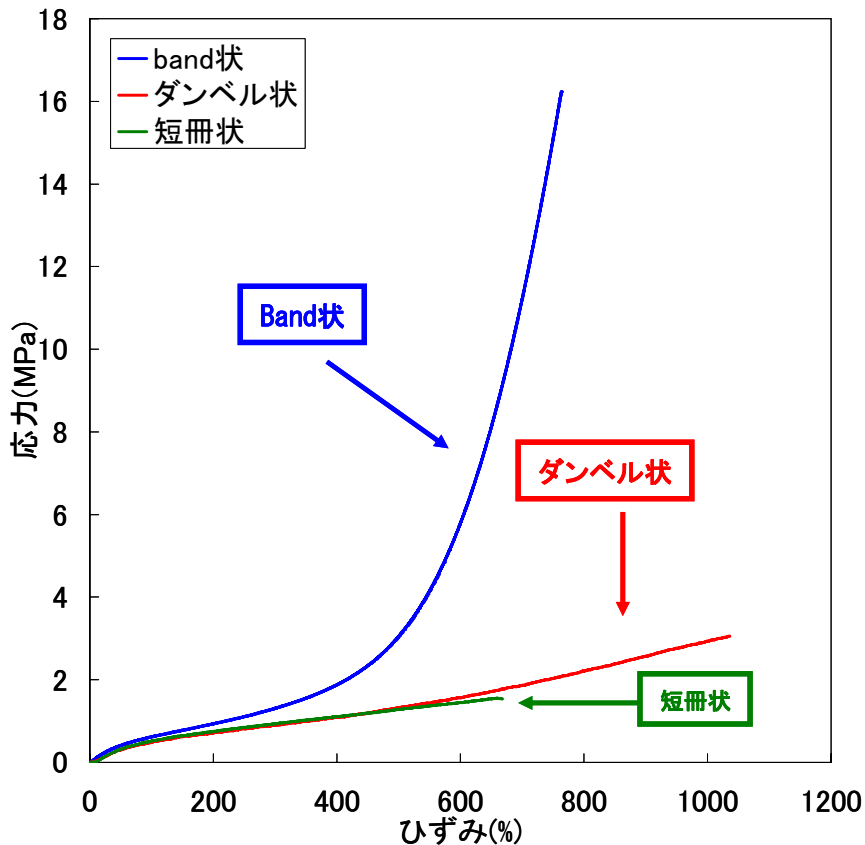


図-7.6 異なる形状の応力-ひずみ関係

7.3.5 考察

短冊状，ダンベル状，バンド状のNR-bandの応力-ひずみ曲線を図-7.6 に示す．図-7.6 からわかるように，滑りやチャックの挟みによる破断のないバンド状はゴムの大変形領域までの挙動をみることができる．

短冊状，ダンベル状に関してはNR-bandと比較すると同じひずみでも応力が低くなっていることから，共にひずみ 100%以上からすべりが生じているといえる．しかし，短冊状に比べチャックで挟む面積の大きいダンベル状の方がより大きなひずみまでの挙動を見ることができる．これより簡便な応力-ひずみ関係を求めるにはバンド状が適しており，短冊状・ダンベル状はひずみ 100%までは信頼性があるといえる．

7.3.6 結論

本研究ではより簡便で正確な試験方法の確立を目的として，形状の異なる試験体の応力-ひずみ曲線を比較し検討を行った．その結果を以下にまとめる．

- ① バンド状はゴムの大変形領域までの挙動をみることができる．
- ② 短冊状，ダンベル状は共にひずみ 100%以上からすべりが生じている．
- ③ 短冊状に比べチャックで挟む面積の大きいダンベル状の方がより大きなひずみまでの挙動を見ることができる．
- ④ 簡便な応力-ひずみ関係を求めるにはバンド状が適している．
- ⑤ 短冊状・ダンベル状はひずみ 100%までは信頼性があるといえる．

7.4 引張速度に関する検討

7.4.1 目的

ゴムは粘性と弾性とをあわせ持つ粘弾性体である^{7,2)}。このため、変位速度によりその性質が変化する。また、ゴムの性質は、ゴムの種類、配合などによって大きく変化する。これらのことがゴムの性能評価を複雑なものにしている。

本研究ではゴムの基礎的な物性を把握するためにゴムの引張速度を変えての引張試験を行い、試験結果から得られた荷重-変位関係から応力-ひずみ関係を求め、引張速度の違いによる応力-ひずみ曲線の変化について考察した。また、それぞれのひずみにおける勾配（真応力・真ひずみの傾き）と引張速度の関係を求め、引張速度の違いによる勾配の速度依存性について考察した。

7.4.2 試料・試験体

試料には、増容材など様々な配合剤を含む市販の(株)共和製天然ゴムのゴムバンド（NR-band）を選択した。なお詳しい配合は不明である。試験体の形状は図-7.7に示すようにバンド状であり、サイズは幅6mm、折径100mm、厚さ1.1mmとした。

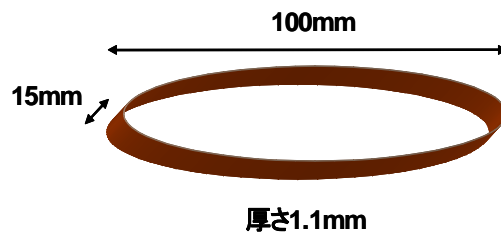


図-7.7 バンド状試験片

7.4.3 実験条件

試験機は島津製作所製のオートグラフAGS-J 1KNを使用した。試験機の概容を図-7.8に示す。測定は変位速度50, 100, 200, 300, 400, 500mm/minの6通りで試料が破断するまで行った。サンプリング間隔は0.1秒とした。また試験体は滑りを考慮して図-7.9に示すようなチャック固定用のピンに設置した。

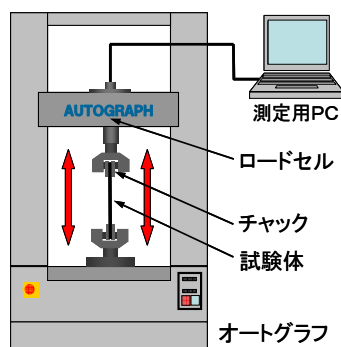


図-7.8 オートグラフ

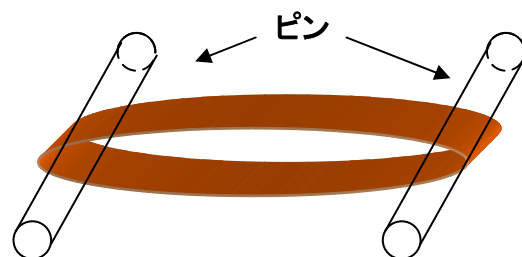


図-7.9 固定用チャックピン

7.4.4 実験結果

引張試験による荷重-変位関係を図-7.10 にNR-bandの公称応力-公称ひずみ関係を図-7.11 にNR-bandの真応力-真ひずみ関係を図-7.12 に示す。またNR-bandの勾配-真ひずみ関係を図-7.13 勾配-引張速度関係を図-7.14 に示す。そこから得られた結果として真ひずみ 0.05, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 1.95 の勾配-引張速度関係を図-7.15, 7.16, 7.17, 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23 に示す。

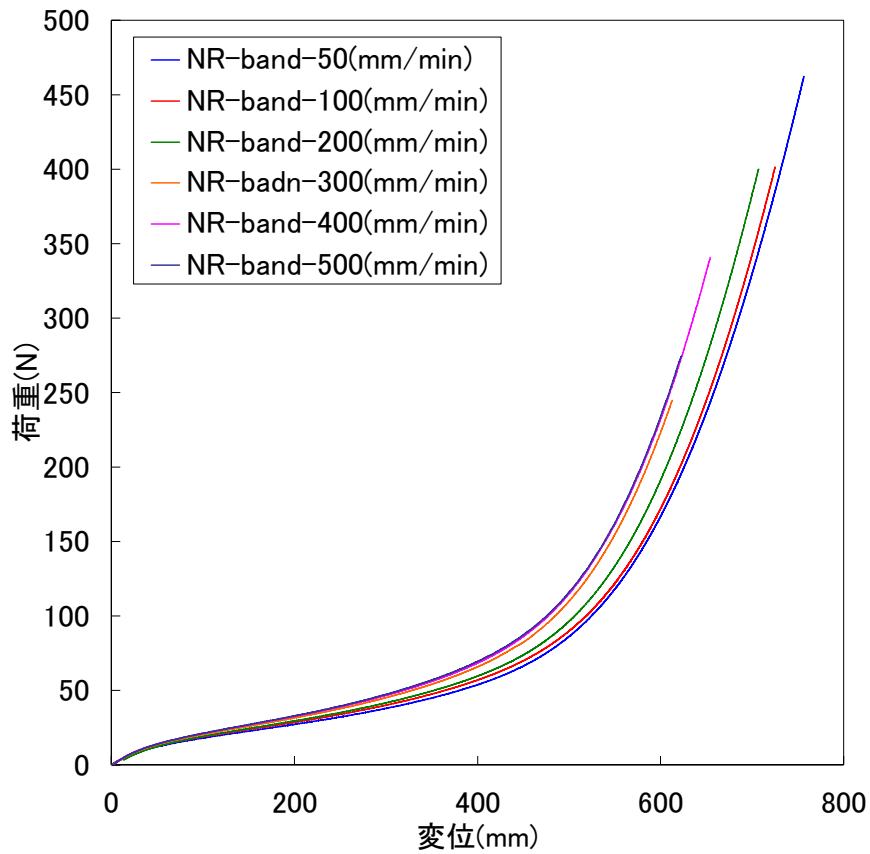


図-7.10 NR-bandの変位-加重関係

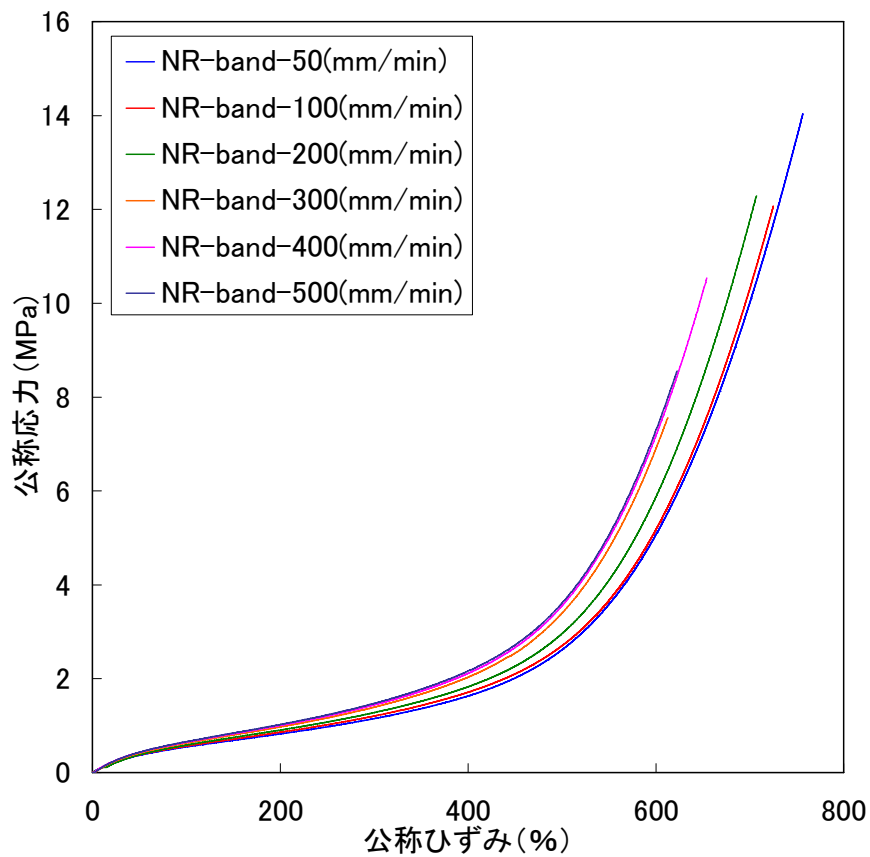


図-7.11 NR-bandの公称応力-公称ひずみ関係

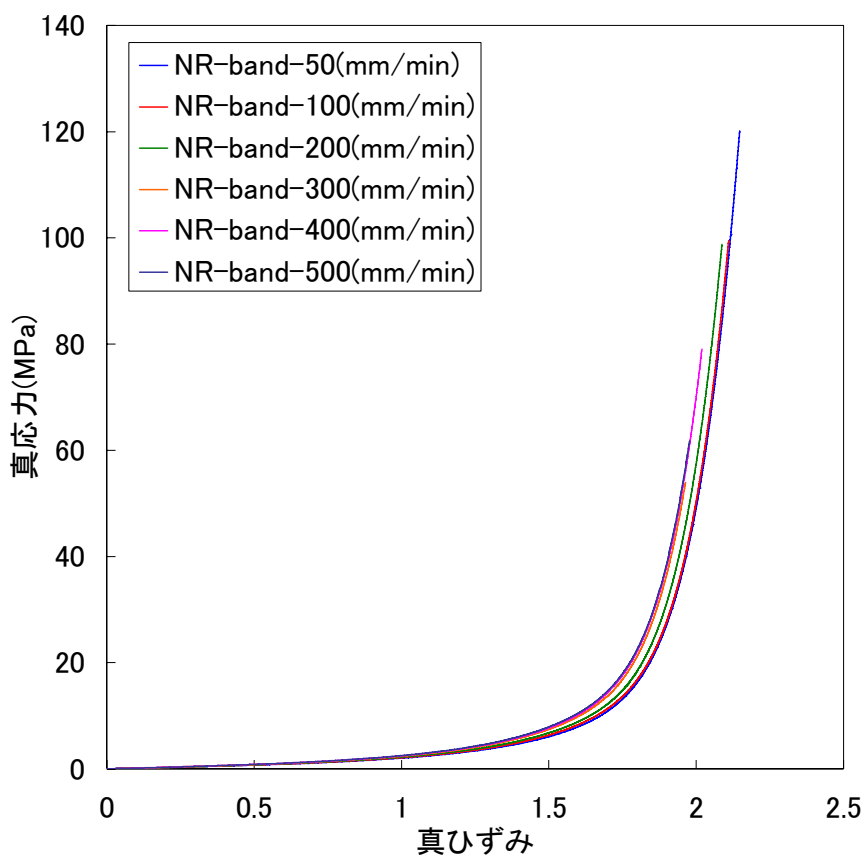


図-7.12 NR-bandの真応力-真ひずみ関係

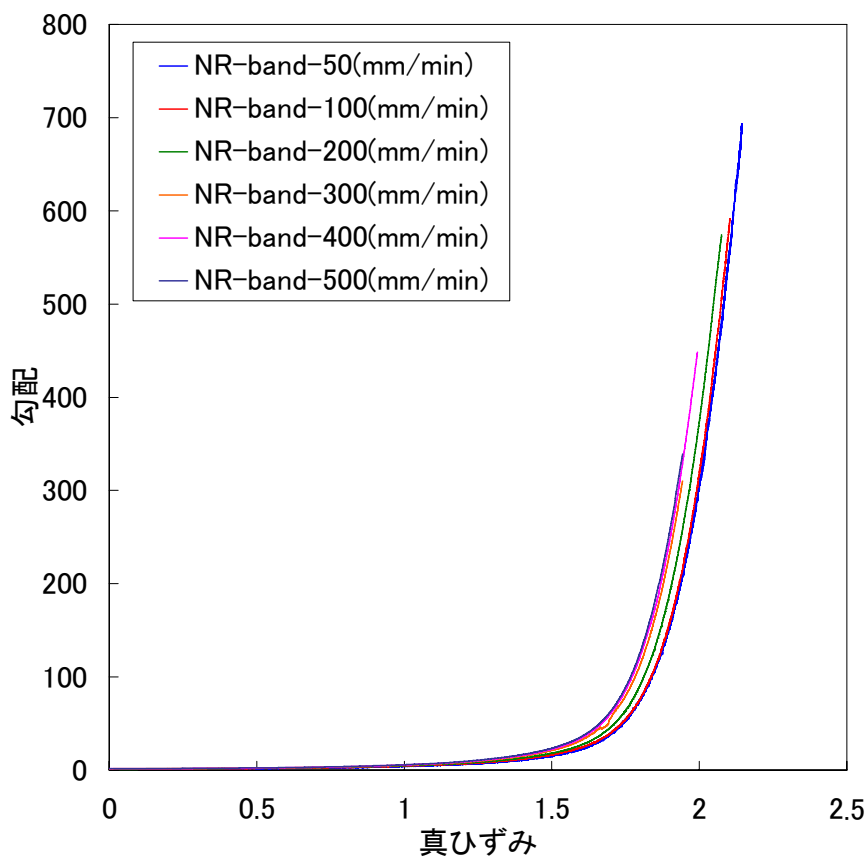


図-7.13 NR-bandの勾配-真ひずみ関係

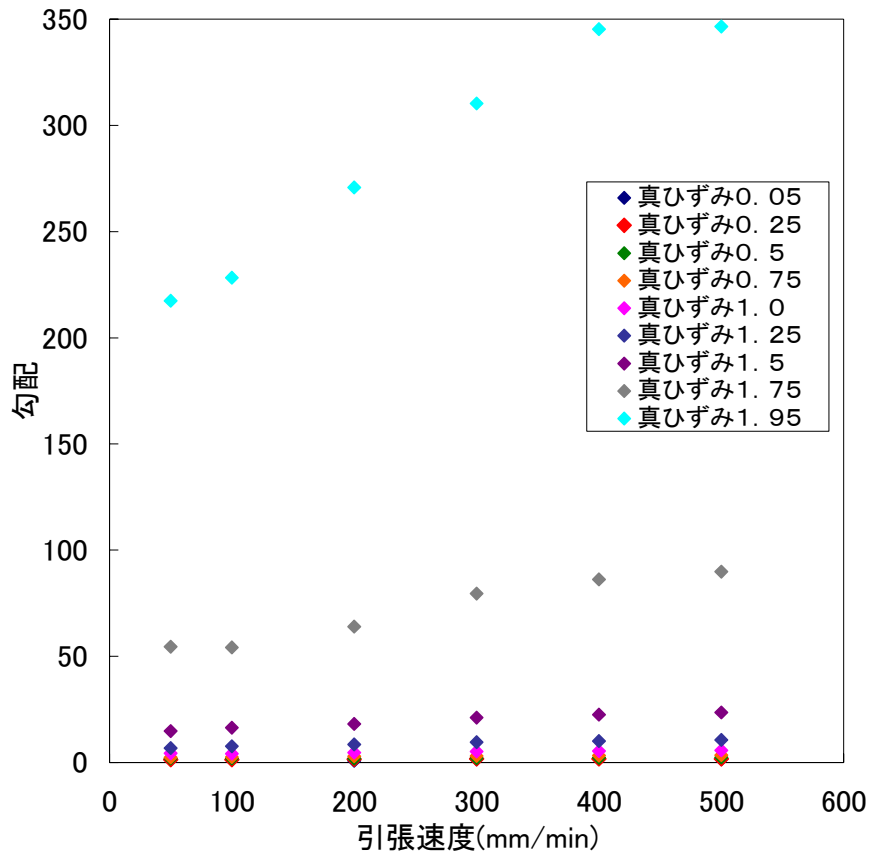


図-7.14 勾配-引張速度関係

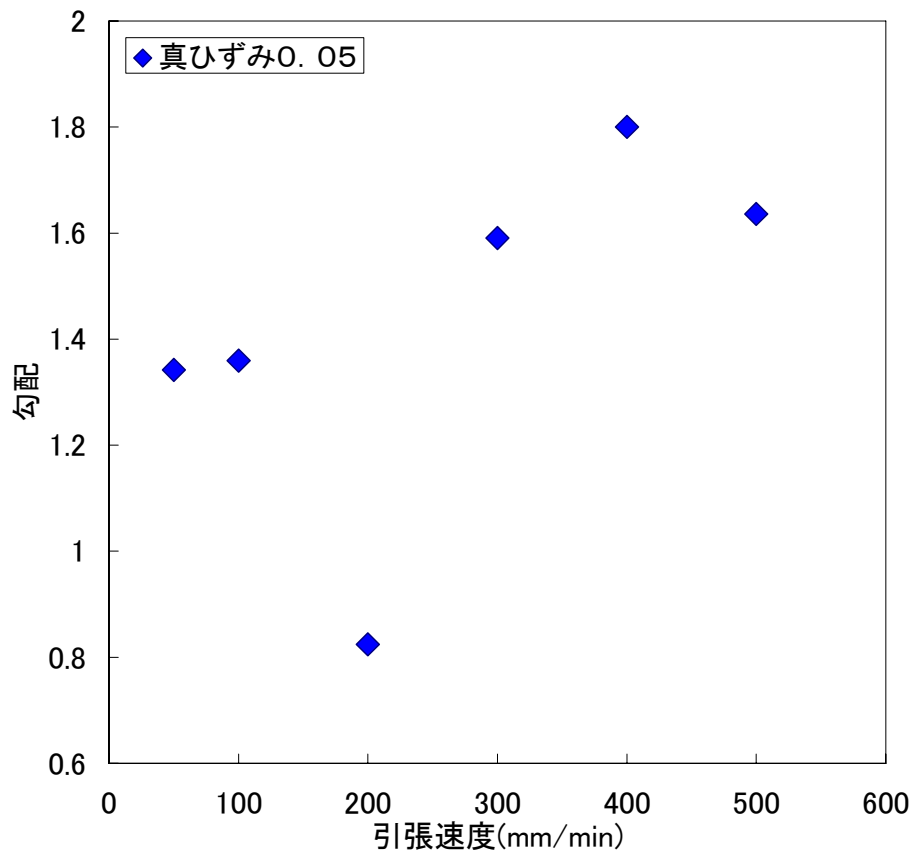


図-7.15 真ひずみ 0.05 の勾配-引張速度関係

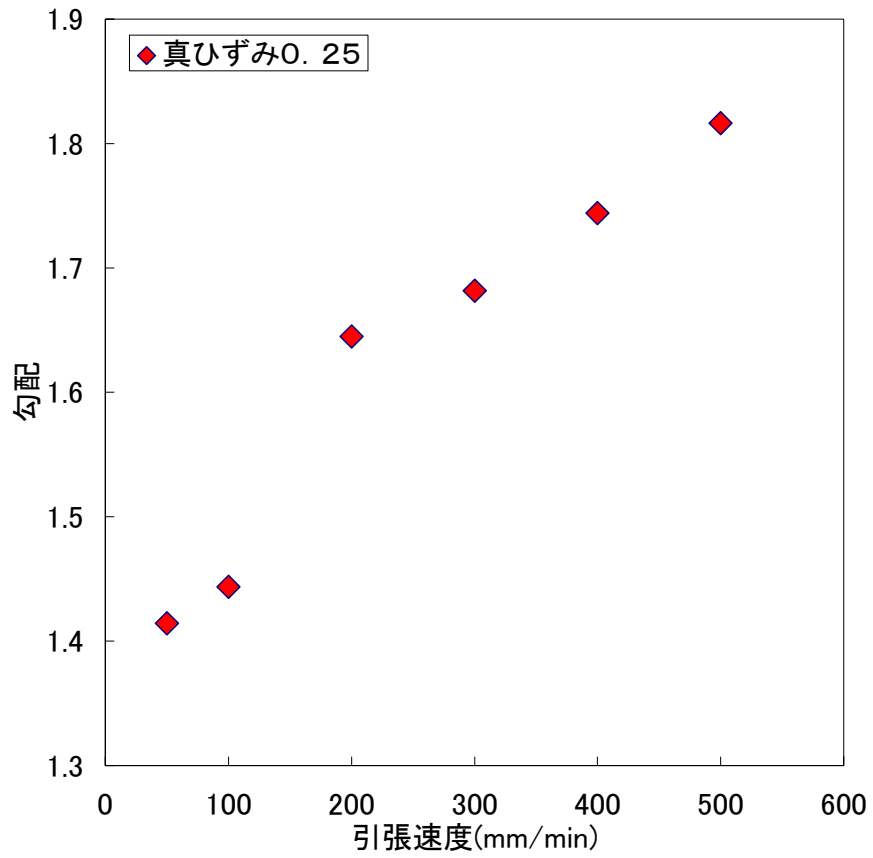


図-7.16 真ひずみ 0.25 の勾配-引張速度関係

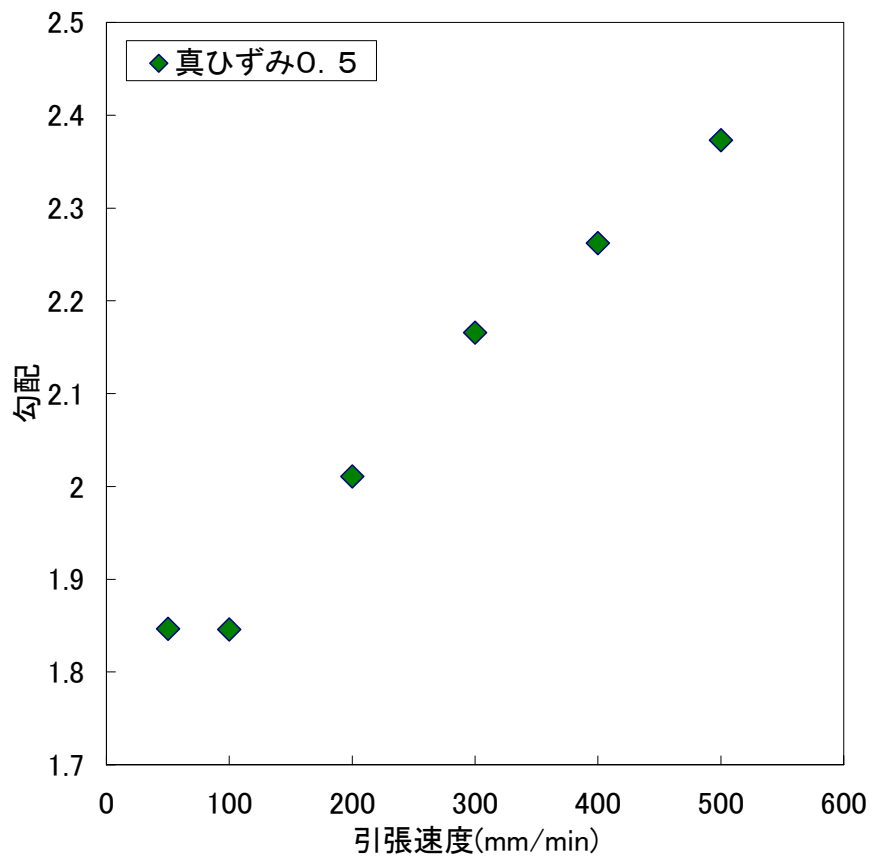


図-7.17 真ひずみ 0.5 の勾配-引張速度関係

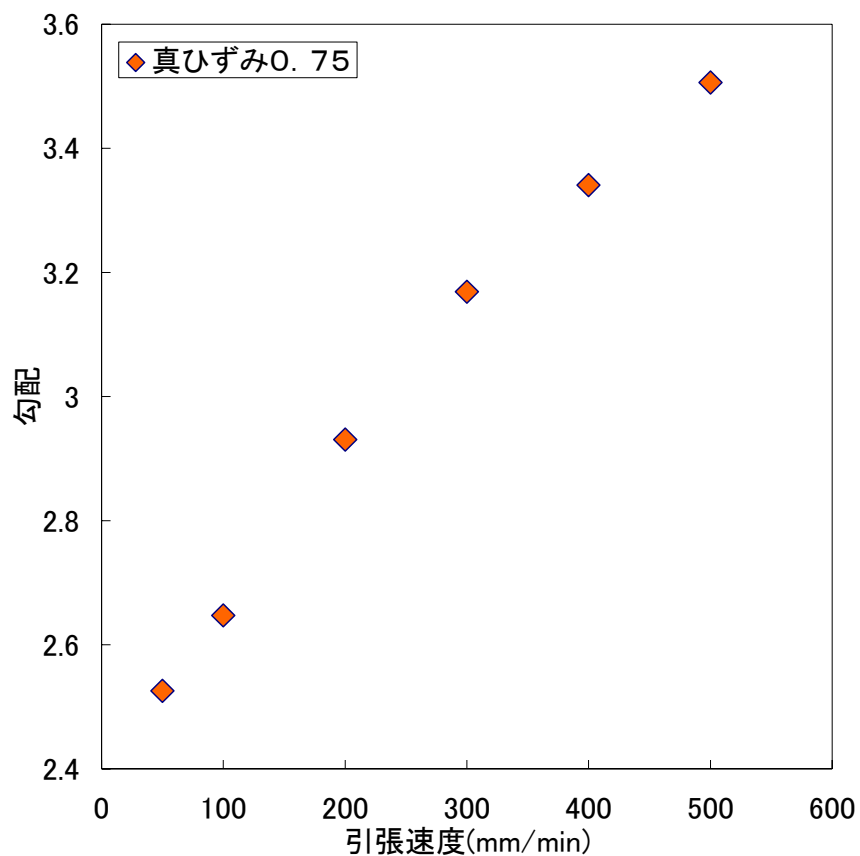


図-7.18 真ひずみ 0.75 の勾配-引張速度関係

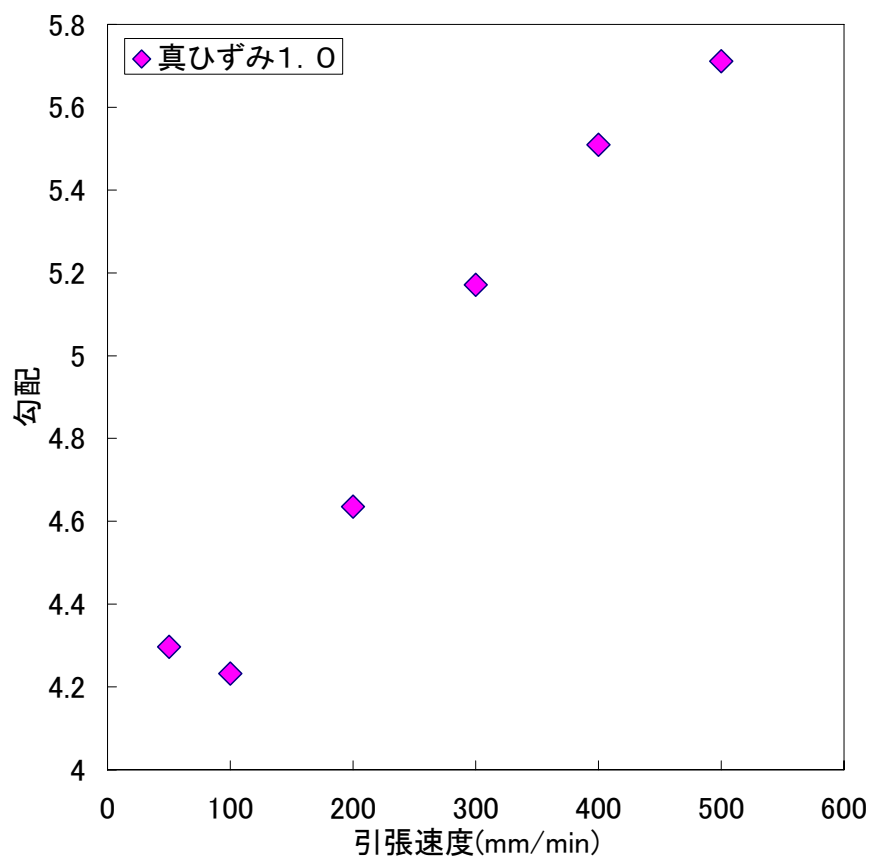


図-7.19 真ひずみ 1.0 の勾配-引張速度関係

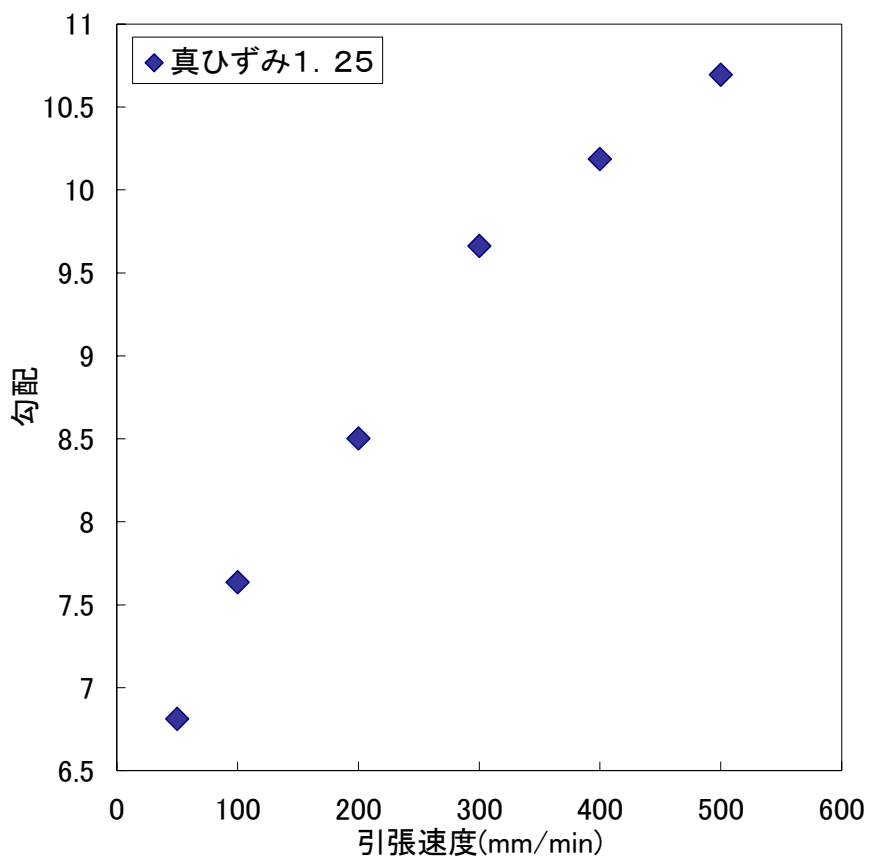


図-7.20 真ひずみ 1.25 の勾配-引張速度関係

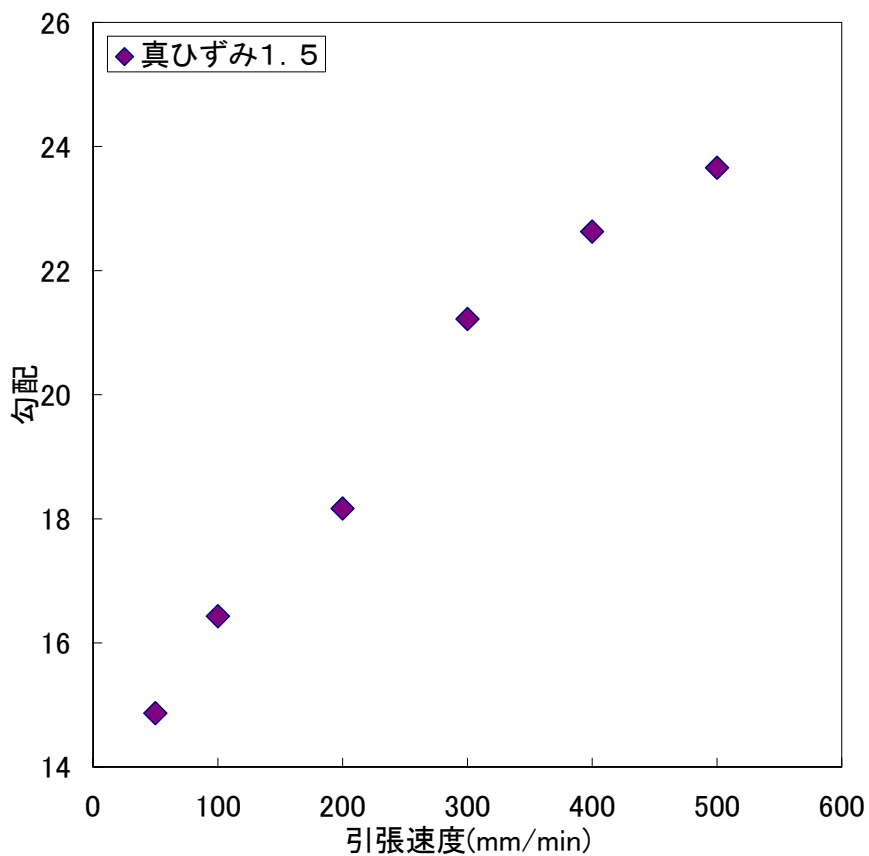


図-7.21 真ひずみ 1.5 の勾配-引張速度関係

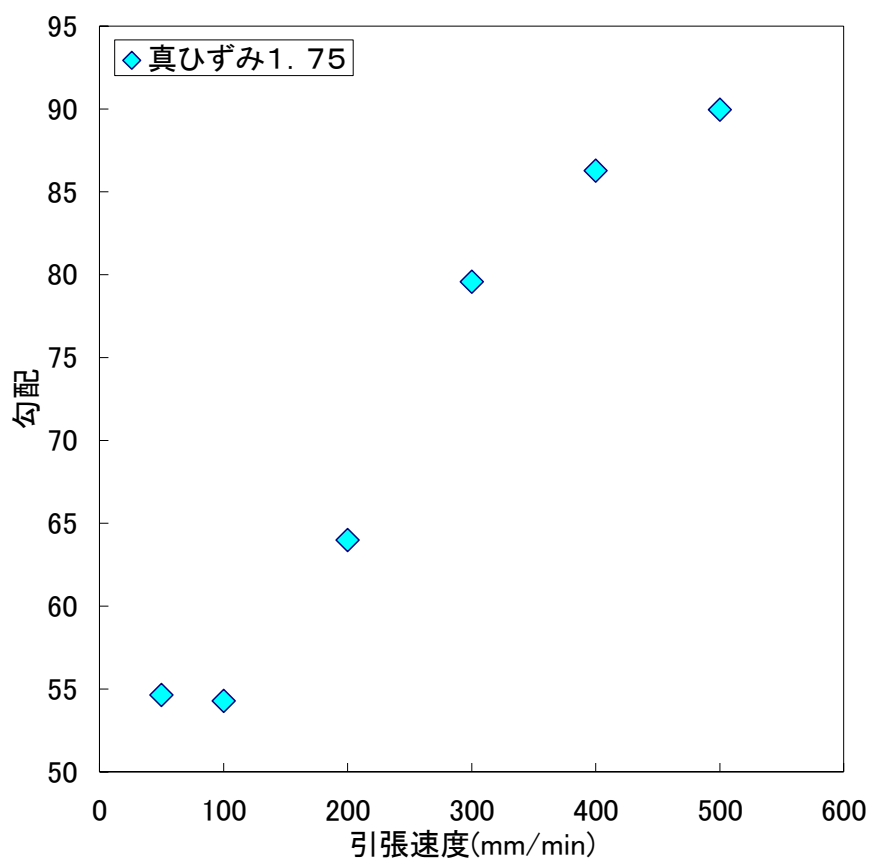


図-7.22 真ひずみ 1.75 の勾配-引張速度関係

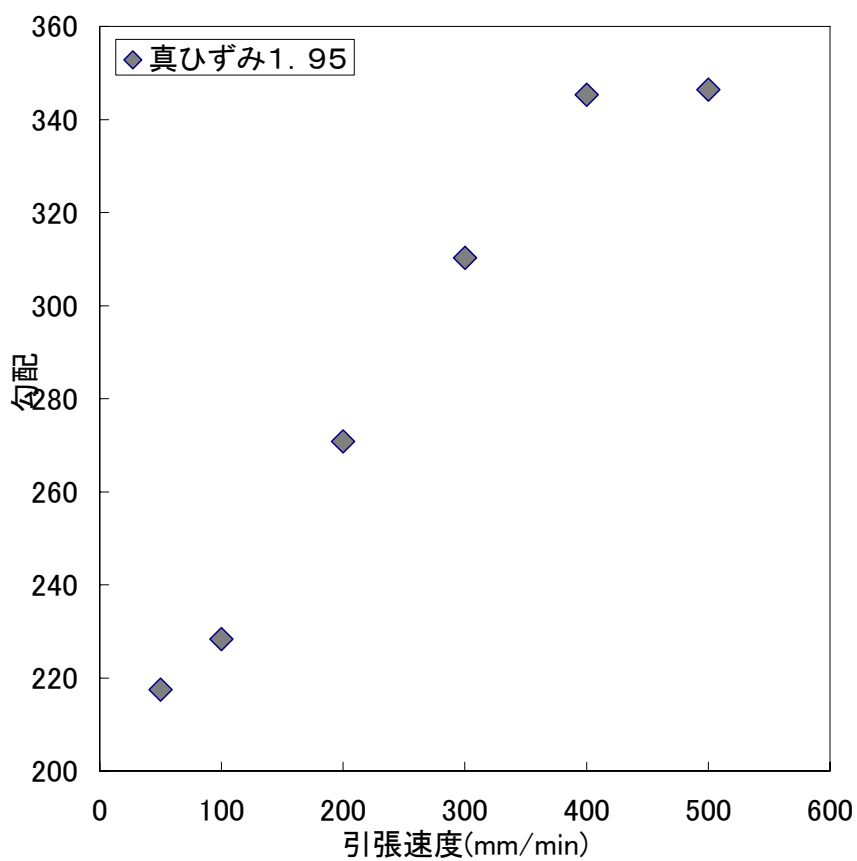


図-7.23 真ひずみ 1.95 の勾配-引張速度関係

7.4.5 考察

①ゴムのエネルギー弾性とエントロピー弾性

ゴムの応力-ひずみ曲線を図-7.11に示す。この図からわかるようにゴムの応力-ひずみ曲線は非線形挙動で、ひずみ硬化型である。これはゴムの弾性がエネルギー弾性とエントロピー弾性から成り、ひずみによって支配的になる弾性が変化するためである。

②ゴムの真応力-真ひずみ関係

引張速度が異なる場合のNR-bandの真応力-真ひずみ曲線を図-7.12に示す。図-7.12より、引張速度が速いほど曲線の傾きが急になっていることがわかる。これより引張速度が速いほど勾配（真応力と真ひずみの傾き）が上昇する（硬くなっていく）、ゴムの勾配の速度依存性を確認することができた。

③ E と真ひずみの関係、 E と変位速度の関係

E と真ひずみの関係を図-7.13に示す。この図から真ひずみと勾配の関係を引張速度の違いで比較するために領域を細かく分け、真ひずみが0.05~1.95の間を9つの領域に分けて考察した。真ひずみが0.05, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 1.95のときの E と引張速度の関係を図-7.14に示す。図-7.15~7.20より、真ひずみが0.05~1.25のときは速度の増加と共に E も上昇しているため、 E と引張速度の間に線形関係があると考察することができる。図-7.21~7.23より真ひずみが1.5~1.95のときは、 E は引張速度300 mm/minまでは速度と共に増加しているが、引張速度400, 500 mm/minでは E の変化をほとんどみることができない。これより勾配 E はひずみにおいて挙動が変化していき、高ひずみの領域においてはある速度を超えると一定の値に収束すると考察することができる。これはゴム弾性がエネルギー弾性とエントロピー弾性から成り支配的になる弾性が変化するためによるものと考察できる。

7.4.6 結論

本研究では試験結果から得られた荷重-変位関係から応力-ひずみ関係を求め、引張速度の違いによる応力-ひずみ曲線の変化について考察した。また、それぞれのひずみにおいての勾配（真応力・真ひずみの傾き）引張速度の関係を求め、引張速度の違いによる勾配の速度依存性について考察した。その結果を以下にまとめる。

- ① ゴムの応力-ひずみ曲線は非線形挙動でひずみ硬化型である。
- ② ゴムの弾性はエネルギー弾性とエントロピー弾性から成り、ひずみによって支配的になる弾性が変化する。
- ③ 引張速度が速いほど勾配（真応力と真ひずみの傾き）が上昇する（硬くなっていく）、ゴムの勾配の速度依存性を確認できた。
- ④ 勾配 E はひずみにおいて挙動が変化していき、高ひずみの領域においてはある速度を超えると一定の値に収束すると考察することができる。

第 8 章

圧縮試験

第 8 章 圧縮試験

8.1 本章の内容

本章では様々な速度で圧縮試験を行い，そこから得られた実験結果よりゴムの基本的物性を検討した．本章の構成を以下に示す．

8.2 圧縮試験の説明

圧縮試験についての解説と，評価した物性量の定義について述べる．

8.3 エネルギー吸収性に関する検討

硬度の異なるゴムに変位速度を変化させて圧縮試験を行い，そこから得られた荷重-変位関係，応力-ひずみ関係よりゴムのエネルギー吸収率を評価した．

8.2 圧縮試験の説明

8.2.1 圧縮試験

圧縮試験とは、試験体に圧縮荷重を作用させ、その時の変位を測定する方法である。これにより、試験体の荷重-変位関係が分かり、それをもとに様々な力学的特性を知ることができる。試験体の荷重-変位関係からは、その材料が持つ力学的特性に加え、試験体の形状や大きさの特性がわかる^{8.1)}。応力-ひずみ関係からは、その材料の持つ固有の力学的特性を知ることができる。圧縮試験では圧縮するための圧盤間に試験体をセットし、圧盤間距離を狭めることで試験体を圧縮するものが多く、本研究でもこの方法を採用した。荷重は試験機に取り付けられているロードセル、変位はレーザー変位計などで電気的な信号に変換して測定するのが一般的である。

8.2.2 エネルギー吸収量とエネルギー吸収率の定義^{8.2)}

物体が力を受けて図-8.1のAからBまで変形する際に必要となるエネルギー W は力 F を変位 x に沿って積分した次式で表される。

$$W = \int_B^A F dx \quad \text{式 8.1}$$

したがって、載荷時に試験体に与えられるエネルギーは、載荷時の荷重を変位に沿って積分したものになる。一方、除荷時に試験体が放出するエネルギーは、除荷時の荷重を変位に沿って積分したものになる。このため、試験体のエネルギー吸収量は両者の差となり、これは荷重-変位曲線に囲まれた面積となる。いま、A点(変位 x_A 、荷重 F_A)からB点(変位 x_B 、荷重 F_B)まで載荷し、B点からC点(変位 $x_C=x_A$ 、荷重 F_C)まで除荷したとすると、載荷時に入力されるエネルギー W_{in} と除荷時に放出されるエネルギー W_{out} はそれぞれ次式で表される。

$$W_{in} = \int_{x_B}^{x_A} F_{in} dx \quad \text{式 8.2}$$

$$W_{out} = \int_{x_C}^{x_B} F_{out} dx \quad \text{式 8.3}$$

ここで、 F_{in} は載荷時の荷重-変位関係、 F_{out} は除荷時の荷重-変位関係、 x は変位である。 W_{in} と W_{out} の差は吸収されたエネルギーなので、エネルギー吸収量 ΔW は以下の式 8.4 で表される。

$$\Delta W = W_{in} - W_{out} = \int_{x_B}^{x_A} F_{in} dx - \int_{x_C}^{x_B} F_{out} dx \quad \text{式 8.4}$$

この様に定義されたエネルギー吸収量 ΔW は試験体の大きさにより変化する。このため、試験体の大きさによる影響を除き、材料固有の性能としてエネルギー吸収率 W_{ABR} を以下の式式 8.5 で定義した。

$$W_{ABR} = \frac{\Delta W}{W_{in}} \times 100\% \quad \text{式 8.5}$$

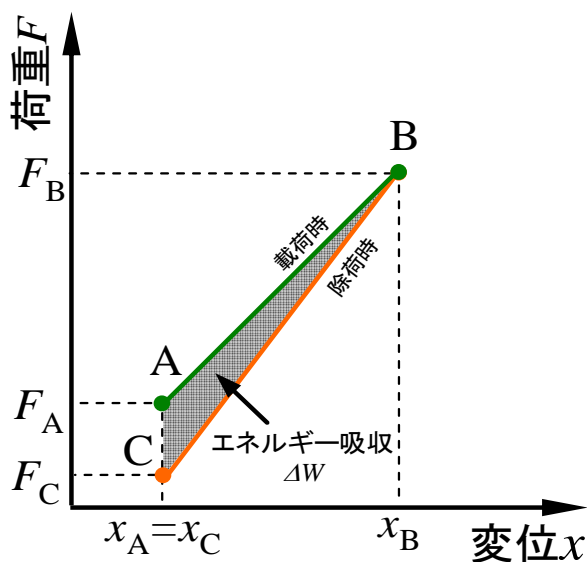


図-8.1 エネルギー吸収の定義

8.2.3 ひずみ速度の定義

圧縮試験では単位時間当たりにある一定の変位置で圧盤間隔を狭めてゆく。このときの単位時間当たりの変位置を変位速度と呼び、単位は mm/min とする。

本研究では変位速度によるゴムの性能変化についての検討も行っている。この場合変位速度が同じでも、試験体の厚さが異なると、試験体に作用している入力速度は異なる。したがって、変位速度を初期の試験体厚さで除し、単位時間当たりのひずみの増加量である、ひずみ速度 v_ε を以下の式 8.6 で定義した。

$$v_\varepsilon = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{v_D}{L_0} \times 100\% \quad \text{式 8.6}$$

ここで、 ε はひずみ、 t は時刻、 v_D は変位速度、 L_0 は初期の試験体厚さである。また、ひずみ速度の単位は%/minである。

8.3 エネルギー吸収性に関する検討

8.3.1 目的

本研究では硬度の異なるゴムに変位速度を変化させて圧縮試験を行い、そこから得られた荷重-変位関係、応力-ひずみ関係よりゴムのエネルギー吸収率を評価した。これらの結果からゴム製緩衝材に要求されるゴムのエネルギー吸収性についての基礎的な性質を検討した。

8.3.2 試料・試験体

試料は天然ゴム(NR)とし、カーボンブラックのみで硬度が 40, 55, 65, 75 度に調節したものを用いた。試験体はゴムの種類に硬度を添えて、NR55 のように呼ぶこととする。試験体の形状とサイズは直径 6.0 mm, 厚さ 2.4 mm の円盤状である。

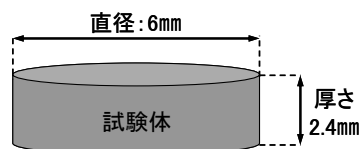


図-8.2 円盤状試験片

8.3.3 実験条件

試験機は島津製作所製のオートグラフ AGS-J 1 kN を用いた。変位速度は 1, 5, 10, 20mm/min の四通りで最大荷重を 800N とした。

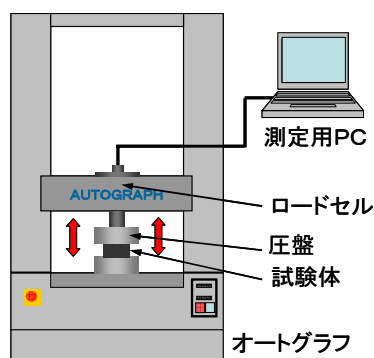


図-8.3 オートグラフ

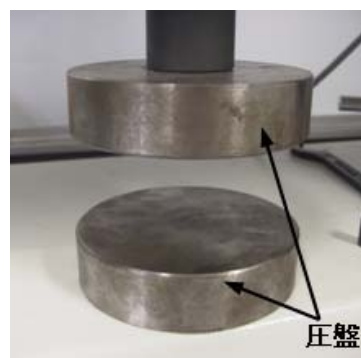


図-8.4 圧縮試験の圧盤

8.3.4 実験結果

変位速度 20mm/min で圧縮試験を行った際の NR40, 55, 65, 75 の荷重-変位関係を図-8.5 に、応力-ひずみ関係を図-8.6 に、に示す。また、NR40, 55, 65, 75 の真応力-真ひずみ関係を図-8.7 に示す。そこから得られた結果から、エネルギー吸収率-載荷速度関係を図 8.11 に、エネルギー吸収率-硬度関係を図-8.12 に、エネルギー吸収率-ひずみ速度関係を図-8.13 示す。

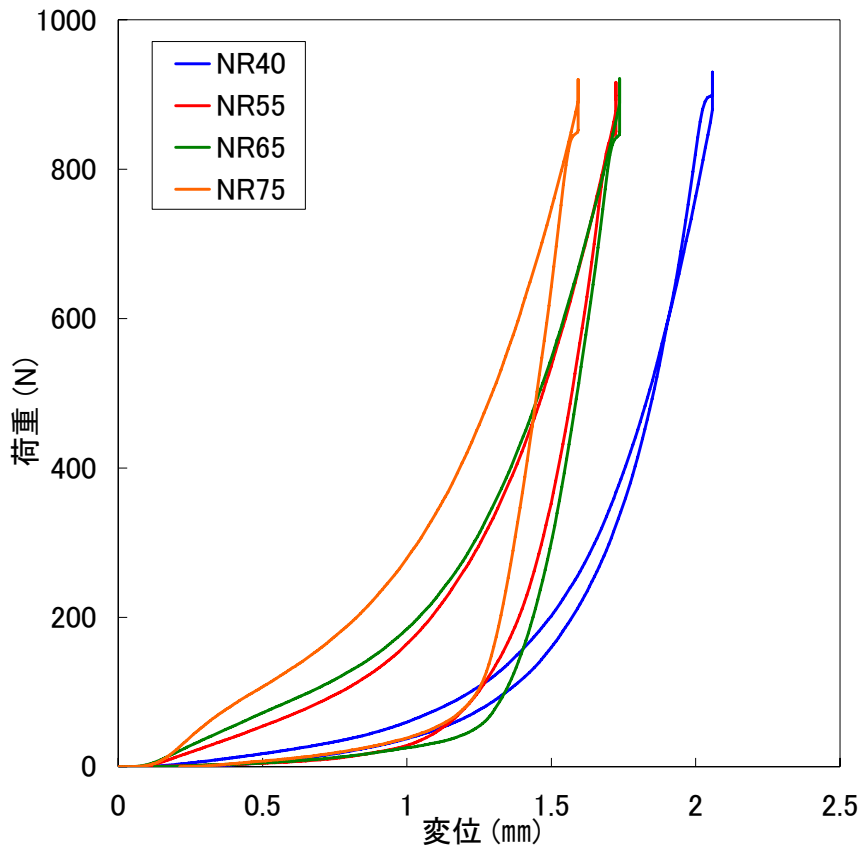


図-8.5 NR (40, 55, 65, 75) の荷重-変位関係

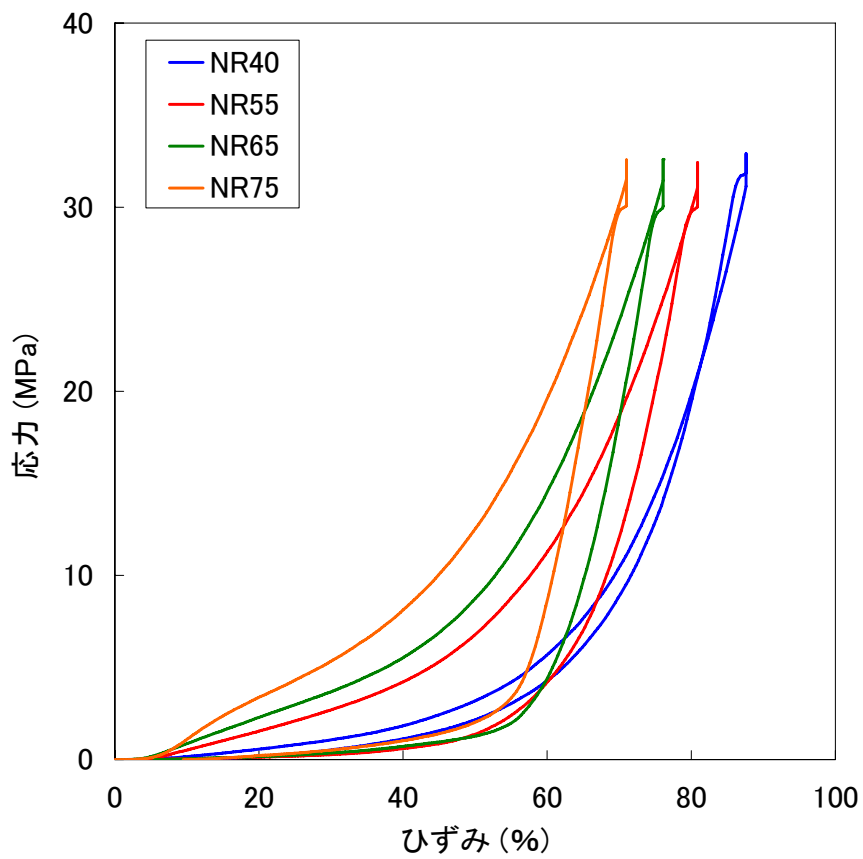


図-8.6 NR (40, 55, 65, 75) の応力-ひずみ関係

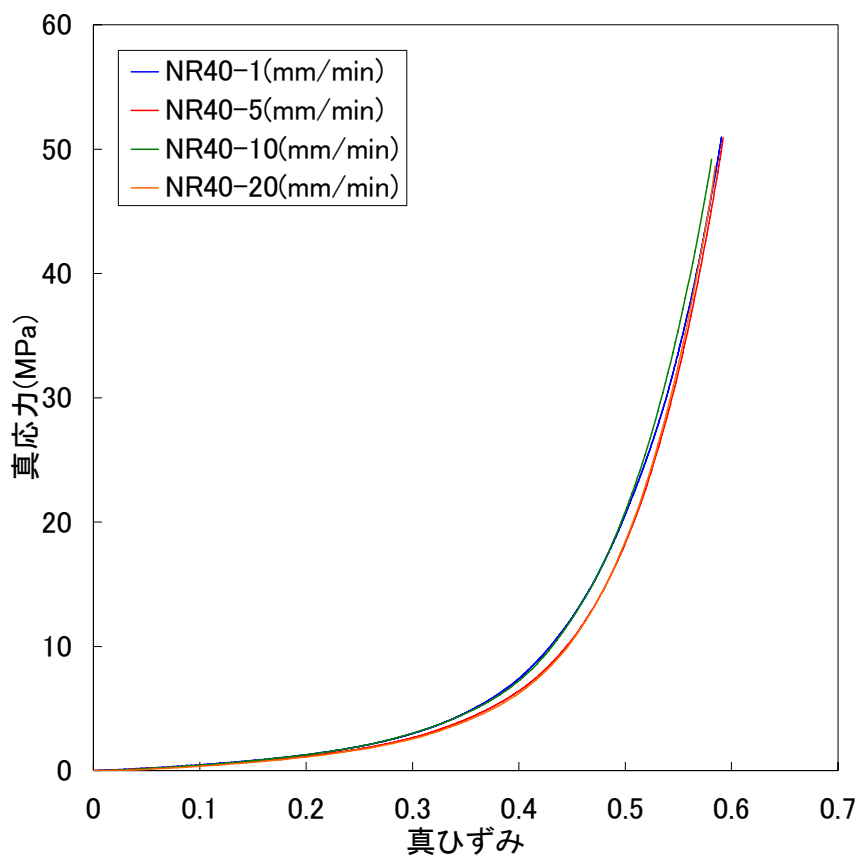


図-8.7 NR40 の真応力-真ひずみ関係

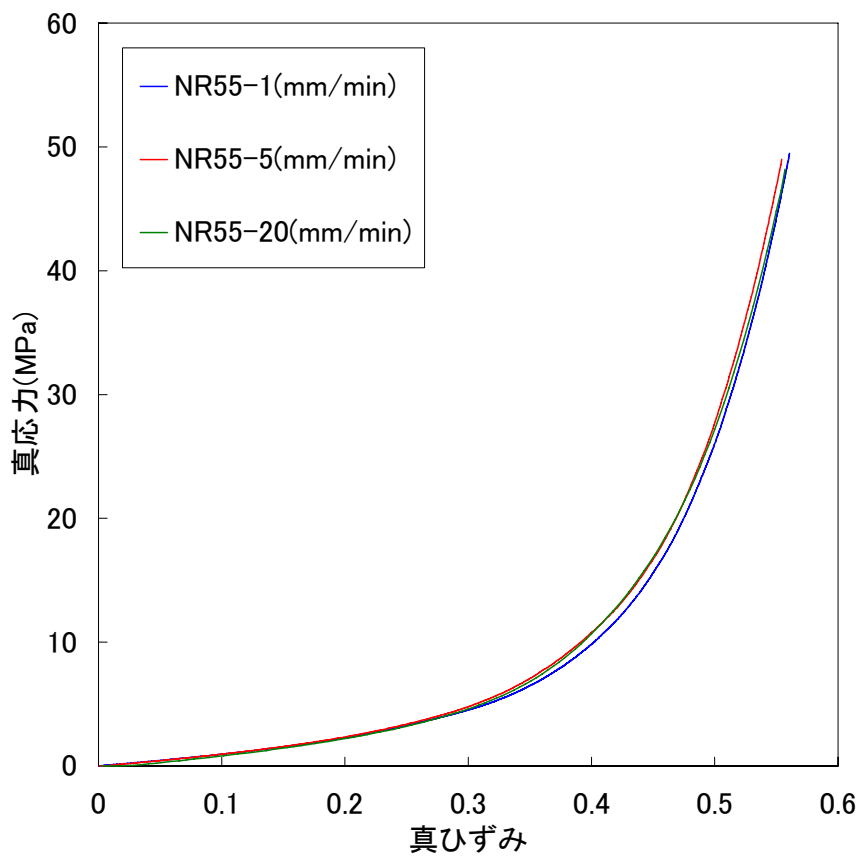


図-8.8 NR55 の真応力-真ひずみ関係

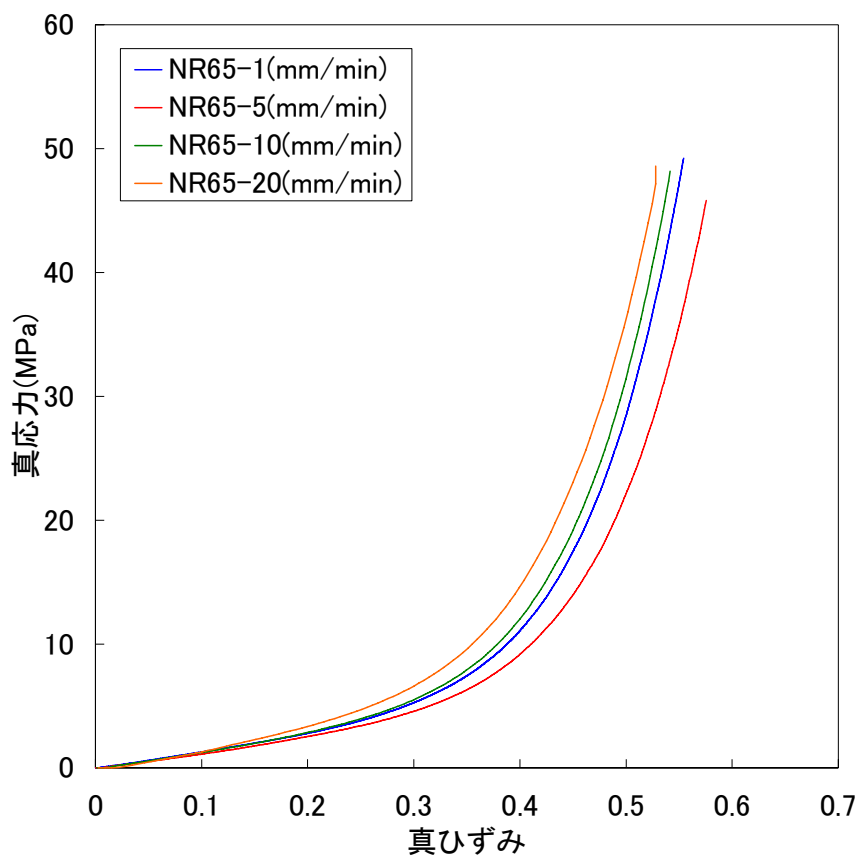


図-8.9 NR65 の真応力-真ひずみ関係

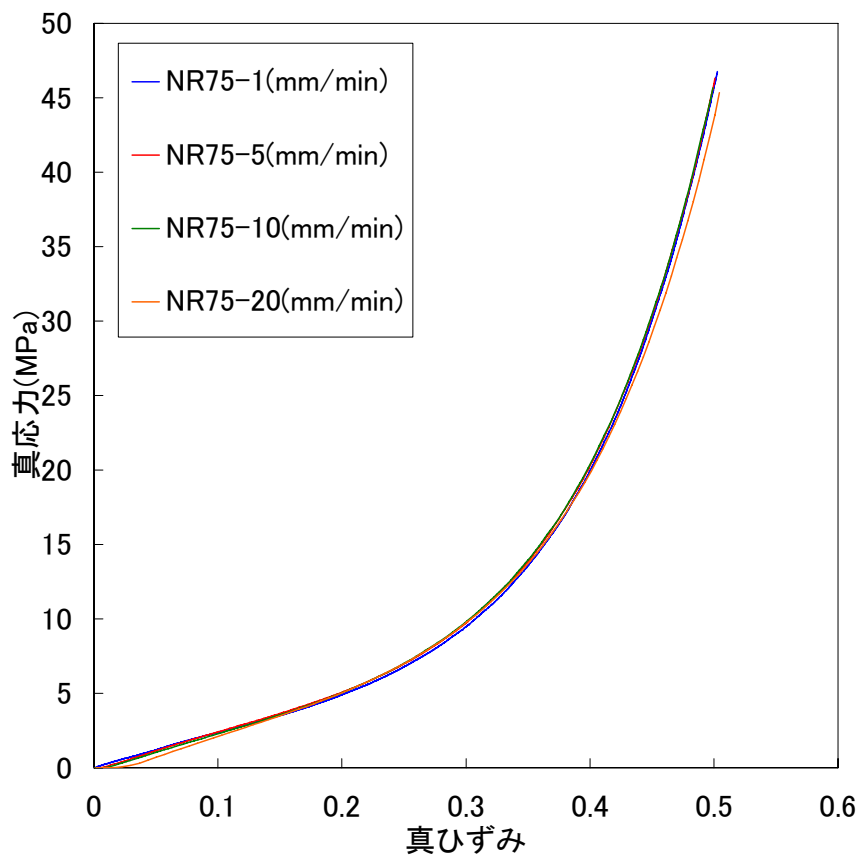


図-8.10 NR75 の真応力-真ひずみ関係

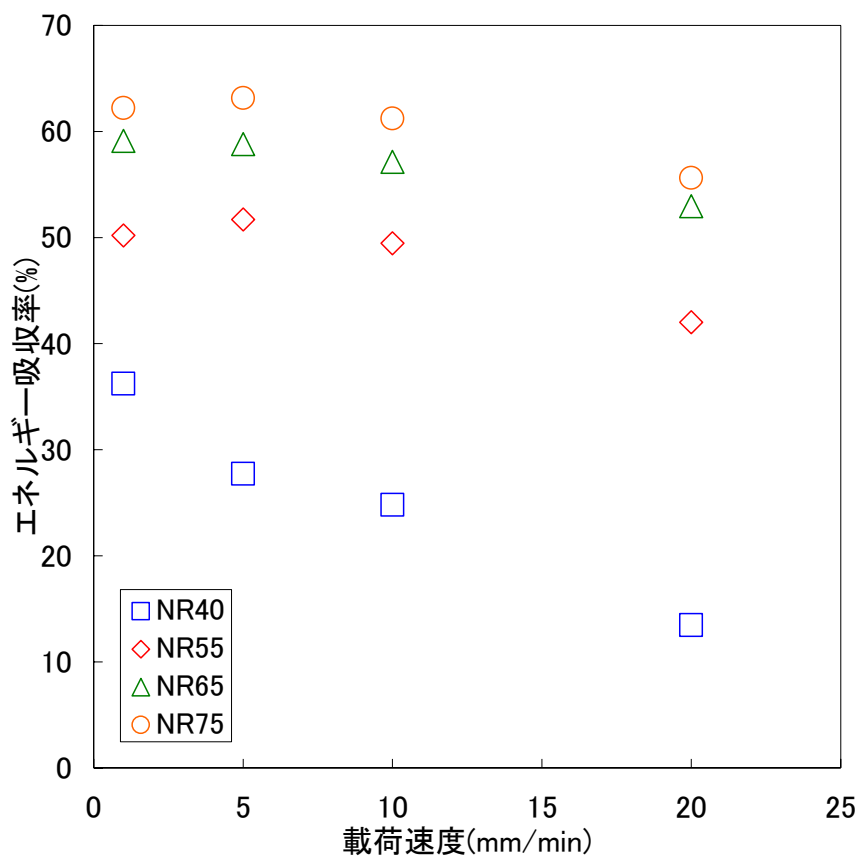


図-8.11 NR のエネルギー吸収率-載荷速度関係

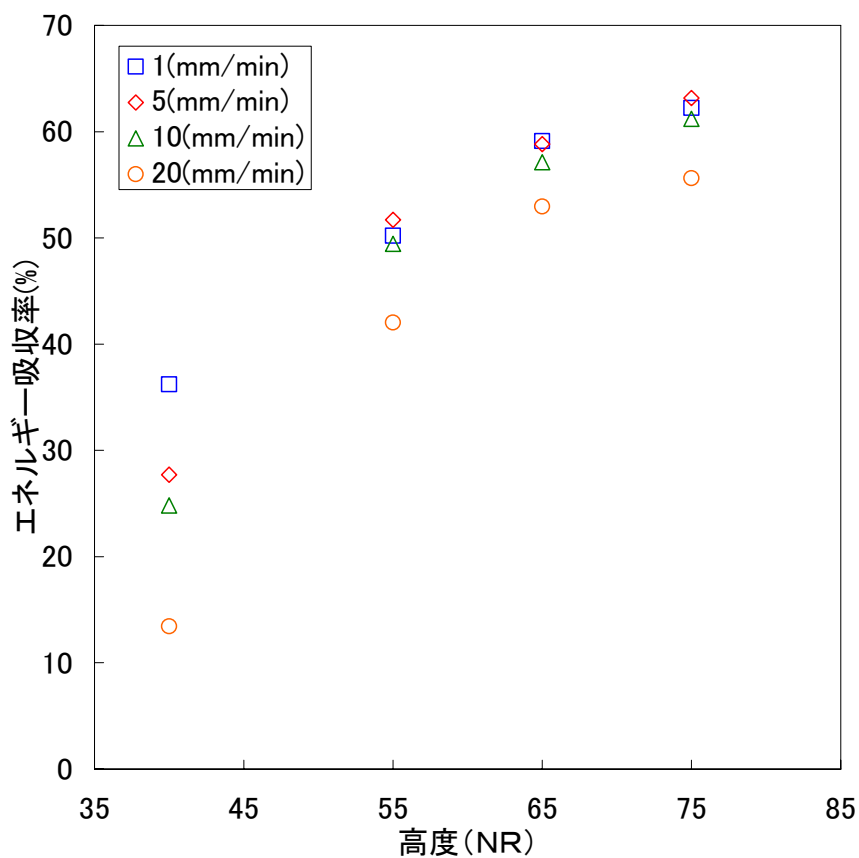


図-8.12 NR のエネルギー吸収率-硬度関係

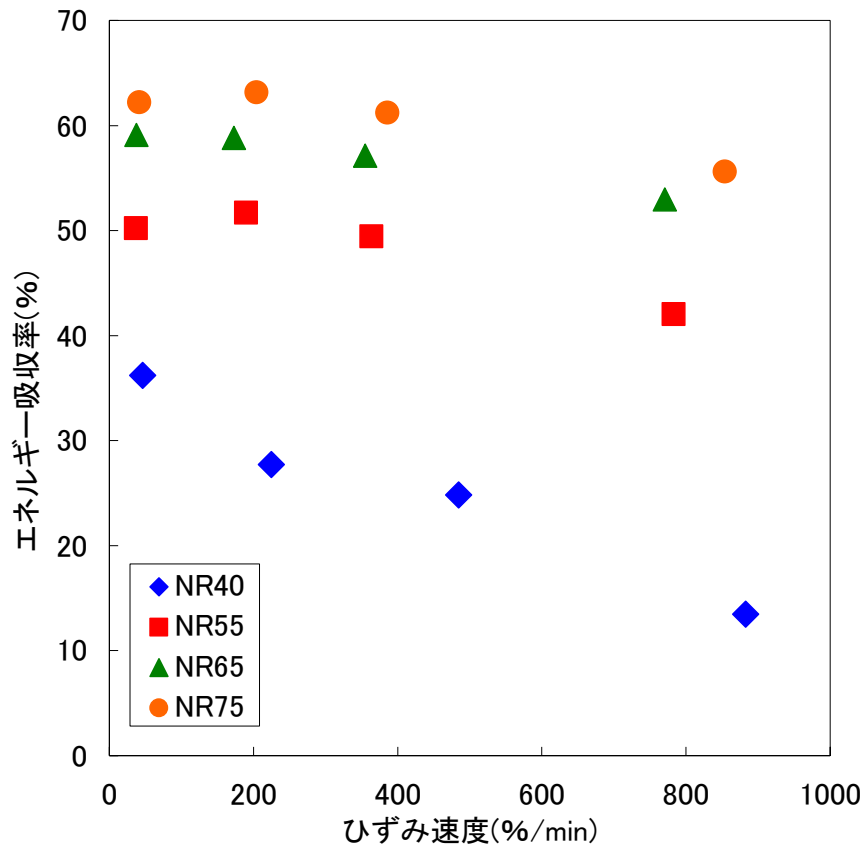


図-8.13 NRのエネルギー吸収率-ひずみ速度関係

8.3.5 考察

①裁荷速度の違いによるエネルギー吸収率に関する考察

図-8.11 から載荷速度が速くなるにつれてエネルギー吸収率が減少していく傾向があることがわかる。これはゴムが応力を緩和する時間と関係があると考えられる。載荷速度を速くするとゴムに応力が作用している時間が短くなり、入力されたエネルギーの多くが放出されると考えられる。その結果エネルギー吸収率の定義より入力エネルギーが減少するため吸収率が低下したと考察することができる。

②高度の違いによるエネルギー吸収率に関する考察

図-8.12 からゴムの硬度が高くなるにつれてエネルギー吸収率が増加していく傾向があることがわかる。これはカーボンブラックの配合量が多いと応力を緩和する速度が速くなるためであると考察できる。その結果として短時間応力が作用するだけでも応力の緩和量は多くなり吸収率が増加したと考察できる。

③ひずみ速度とエネルギー吸収率に関する考察

ひずみ速度とエネルギー吸収率の関係を図-8.13 に示す。この図からひずみ速度が速くなるにつれてエネルギー吸収率が低下することが分かる。これはひずみ速度が速くなると衝突の時間が短くなり、応力の緩和量が少なくなるためであると考えられる。その結果、エネルギー吸収率の定義より除荷時に放出されるエネルギーが多くなるためエネルギー吸収率が低下したと考えられる。

8.3.6 結論

本研究では硬度の異なるゴムに変位速度を変化させて圧縮試験を行い、そこから得られた荷重-変位関係、応力-ひずみ関係よりゴムのエネルギー吸収率を評価した。その結果を以下に示す。

- ① 載荷速度が速くなるにつれてエネルギー吸収率が減少していく傾向がある。
- ② ゴムの硬度が高くなるにつれてエネルギー吸収率が増加していく傾向がある。
- ③ カーボンブラックの配合量が多いと応力を緩和する速度が速くなる。
- ④ ひずみ速度が速くなるにつれてエネルギー吸収率が低下する。
- ⑤ ひずみ速度が速くなると衝突の時間が短くなり、応力の緩和量が少なくなる。

第9章

フィッティング

第9章 フィットティング

9.1 本章の内容

本章ではゴムの引張試験と圧縮試験から得られた荷重-変位より，応力-伸長率関係を求め，Neo-Hookean 式，Mooney-Rivlin 式，を用いてフィットティングを試みた．本章の構成を以下に示す．

9.2 Neo-Hookean 式，Mooney-Rivlin 式でのフィットティング

NR-band の応力-伸長率関係について Neo-Hookean 式，Mooney-Rivlin 式により各伸長率でフィットティングを行う．また適用範囲の検討を目的として Mooney プロットを行い実験値との比較を行う．

9.3 カーボンブラックによる適用範囲の変化に関する検討

硬度の異なる IIR，SBR の応力-伸長率関係について Mooney プロットを行い，カーボンブラックの重量分率と Mooney プロットとの関連を検討する．

9.2 Neo-Hookean 式, Mooney-Rivlin 式のフィッティング

9.2.1 目的

ゴムの応力-ひずみ関係は非線型挙動である。このためゴム製品の設計やシミュレーションには応力-ひずみ関係が重要になると考えられる^{9.1)}。このためゴムの応力-ひずみ関係の定式化を試みた。本研究では補強材を配合していない天然ゴムバンド (NR-band) について、引張試験と圧縮試験を行い、引張と圧縮両方の荷重-変位曲線を測定した。さらに測定された荷重-変位関係から公称応力-伸長率関係を求め、Neo-Hookean式, Mooney-Rivlin式を用いて各伸長率でフィッティングを試みた。また Mooneyプロットを行い実験値との比較を行うことにより、Mooney-Rivlin式の適用範囲や精度について検討した。

9.2.2 Neo-Hookean式, Mooney-Rivlin式の紹介^{9.2)}

ゴムの応力-ひずみ曲線を記述する代表的な式を以下に挙げる。

・ Neo-Hookean 式

$$\sigma = G \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \quad \text{式 9.1}$$

ここで、 σ は応力、 G は剛性率(せん断弾性率)、 λ は伸長率である。

この式は Kuhn, Guth, Mark らにより導かれた式であり、気体の分子運動などで用いられる統計力学の考え方を利用したものである。この式はゴム試料のマクロなひずみの大きさと、ゴム分子鎖のミクロなひずみの大きさが同じであるという仮定、ゴム試料中の自然状態にある分子鎖の末端間距離がガウス分布に従うという仮定、ゴムの分子鎖はどこも同じ弾性率を有しているという3つの仮定から成っている。

・ Mooney-Rivlin 式

$$\sigma = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \right) \quad \text{式 9.2}$$

ここで σ は応力、 λ は伸長率、 C_1 と C_2 は未定定数である。

この式は、Neo-Hookean式のように分子鎖などミクロな観点から導かれた式ではなく、ゴムのように大変形が可能な材料が応力を受けてひずんだとき、外部から与えられたエネルギーをひずみエネルギーという形でゴム試料の中に貯蔵される仮定をし、そのひずみエネルギーをひずみ関数として多項式で表したのから求めたものである。

9.2.3 試料・試験体

試料には(株)共和製の市販されている天然ゴムバンドを用いた。補強材と増容材は配合されていないが、架橋剤などの詳しい配合は不明である。また、硬度についても未測定なので不明である。試験体の形状は折径 100 mm，幅 6 mm，厚さ 1.1 mm のバンド状である。また、圧縮試験には天然ゴムバンドを直径 6.0 mm の円盤状に打ち抜き、これを三枚重ねて圧縮試験の試験体とした。

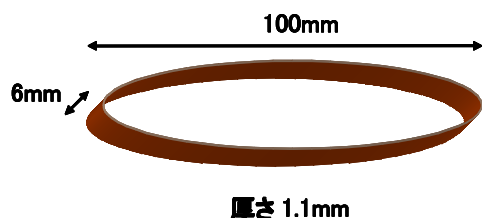


図-9.1 バンド状試験片

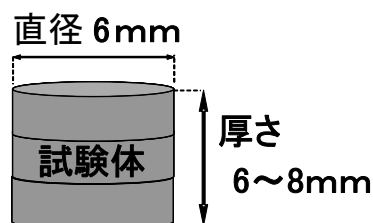


図-9.2 円盤状試験片

9.2.4 実験条件

試験機は島津製作所製のオートグラフ AGS-J 1kN を用いた。試験条件は引張速度を 300 mm/min で一定とし実験は試験体の破断まで行った。試験体はチャック本体を試験機に固定するためのピンに取り付けた。これにより試験体のすべりや、チャックによる試験体の破断を防ぐことができる。圧縮試験には同じ装置を用い、引張試験のときとひずみ速度が同じになるように計算した結果、変位速度は 10 mm/min とした。最大荷重は 900N とした。

9.2.5 実験結果

引張・圧縮試験によるNR-bandの荷重-変位関係を図-9.3 に、応力-伸長率関係を図-9.4 に示す。その結果と各伸長率でのNeo-Hookean式によるフィッティング結果を図-9.5, 9.6 に、Mooney-Rivlin式によるフィッティング結果を図-9.7, 9.8 に示す。また、適用範囲の検討として行ったNR-bandのMooneyプロットを図-9.9 に、その結果と実験値との関係を図-9.10, 9.11 に示す。

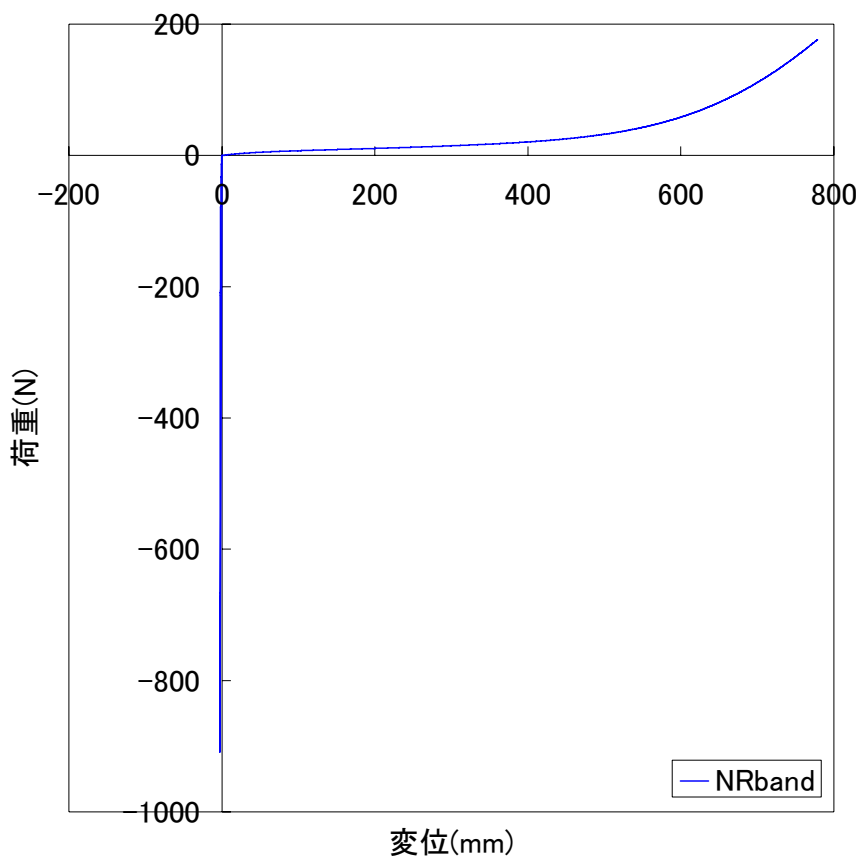


図-9.3 NRbandの変位-荷重関係

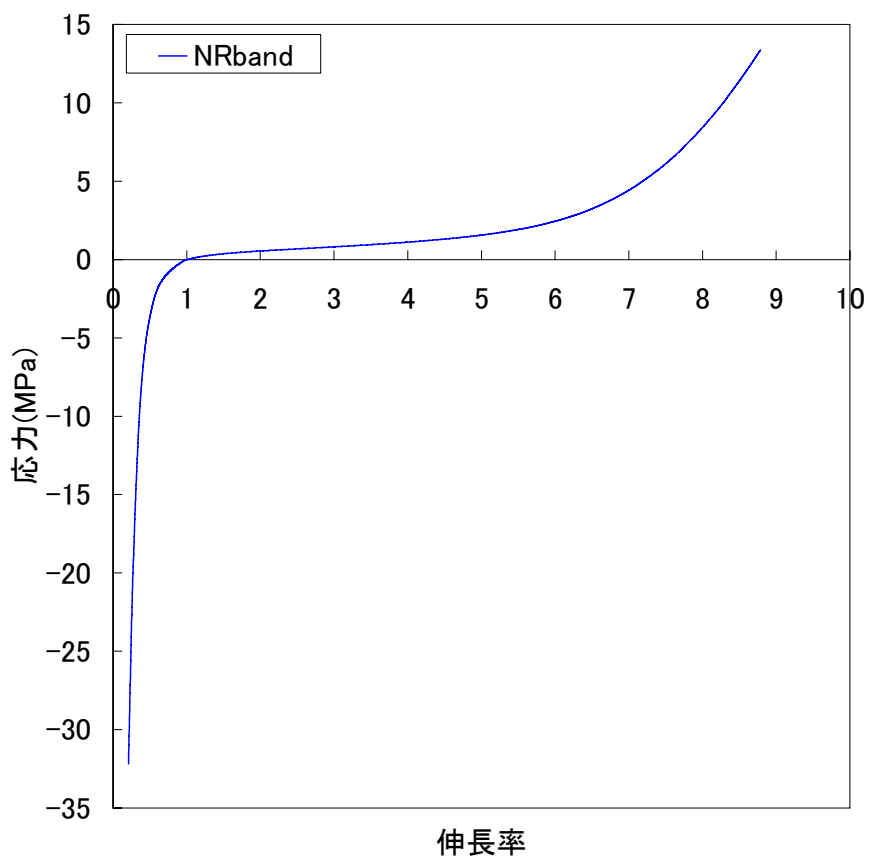


図-9.4 NRbandの応力-伸張率関係

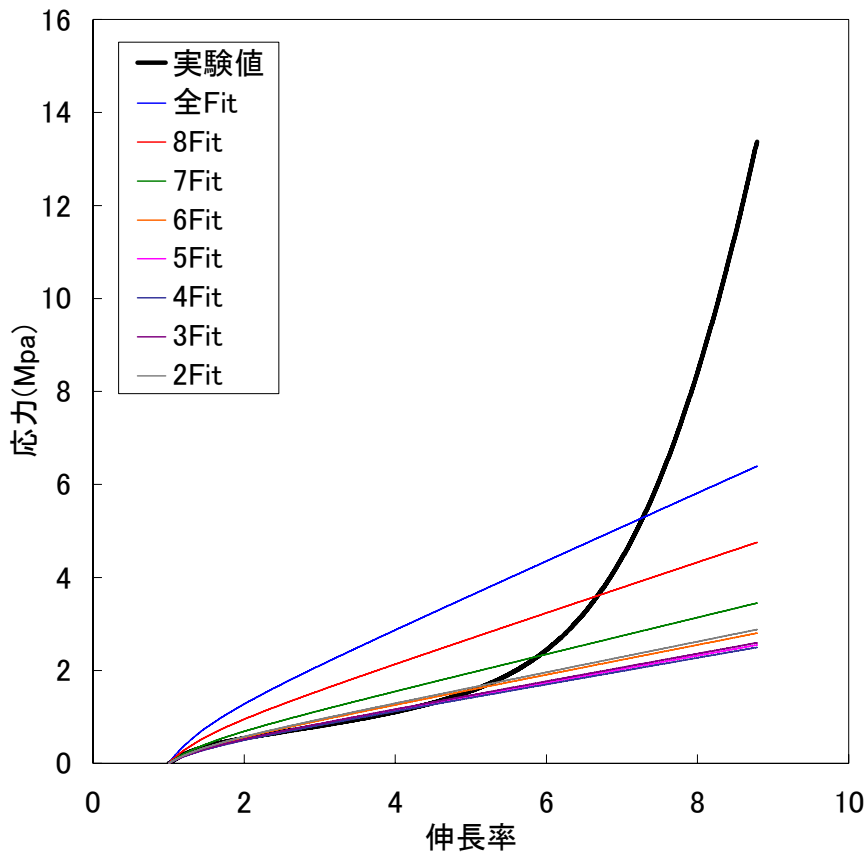


図-9.5 Neo-Hookean式によるフィッティング結果（引張）

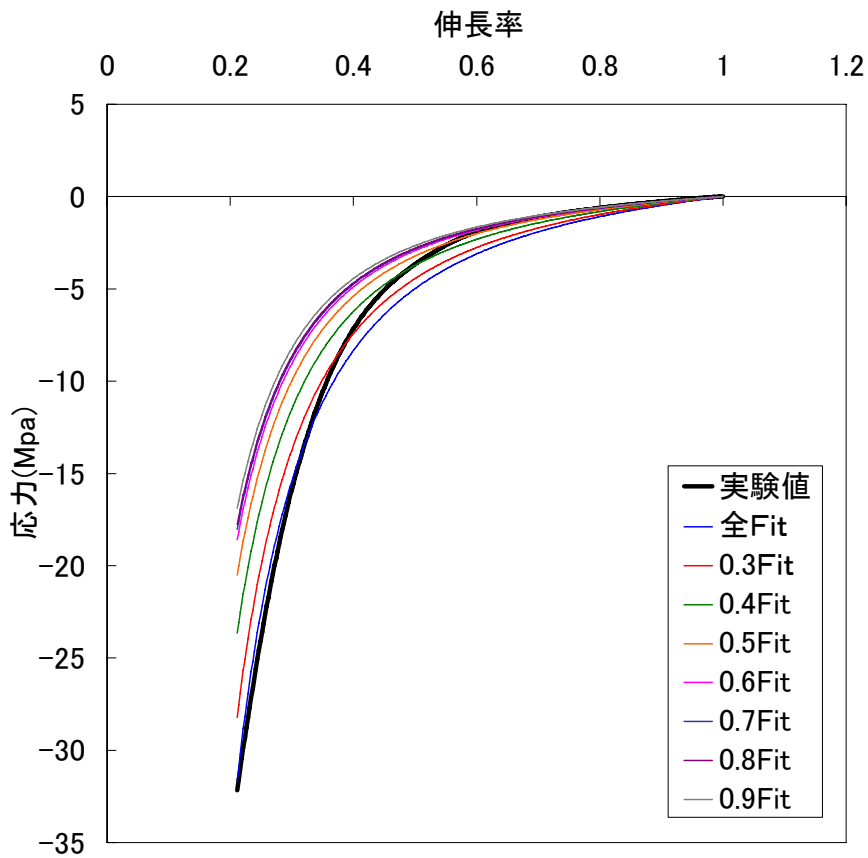


図-9.6 Neo-Hookean式によるフィッティング結果（圧縮）

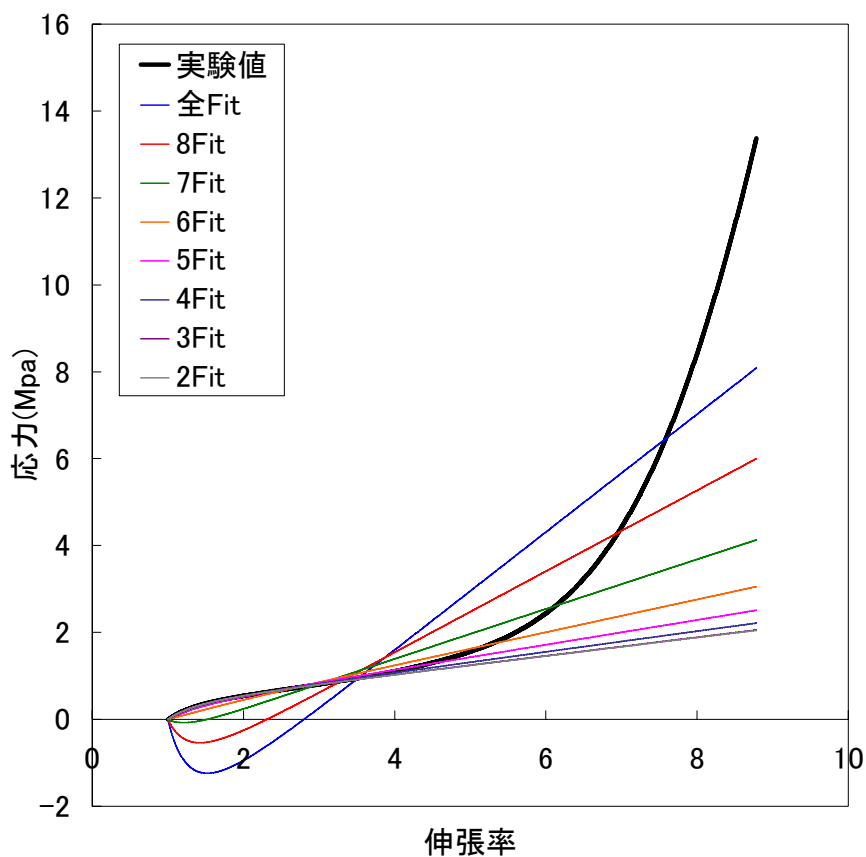


図-9.7 Mooney-Rivlin式によるフィッティング結果（引張）

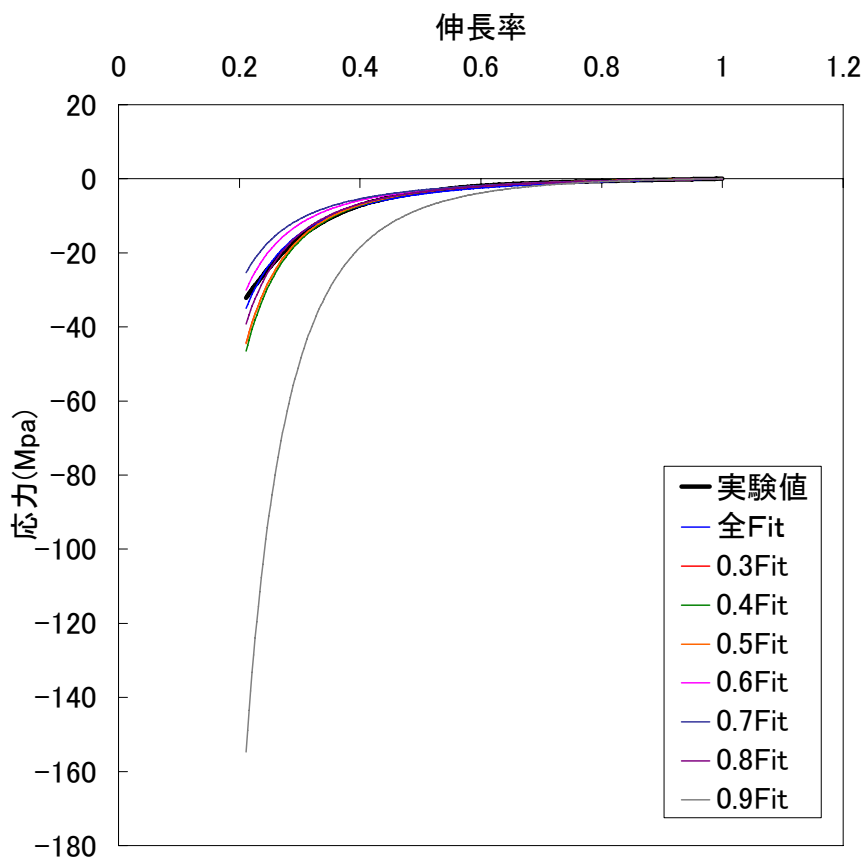


図-9.8 Mooney-Rivlin式によるフィッティング結果（圧縮）

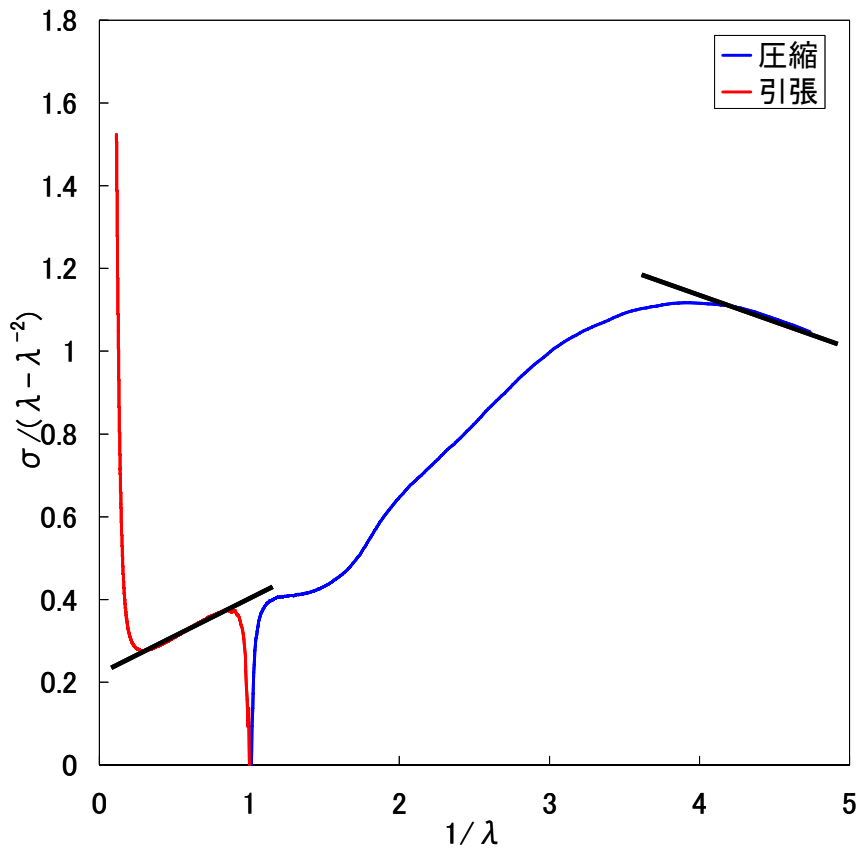


図-9.9 NRbandのMooneyプロット

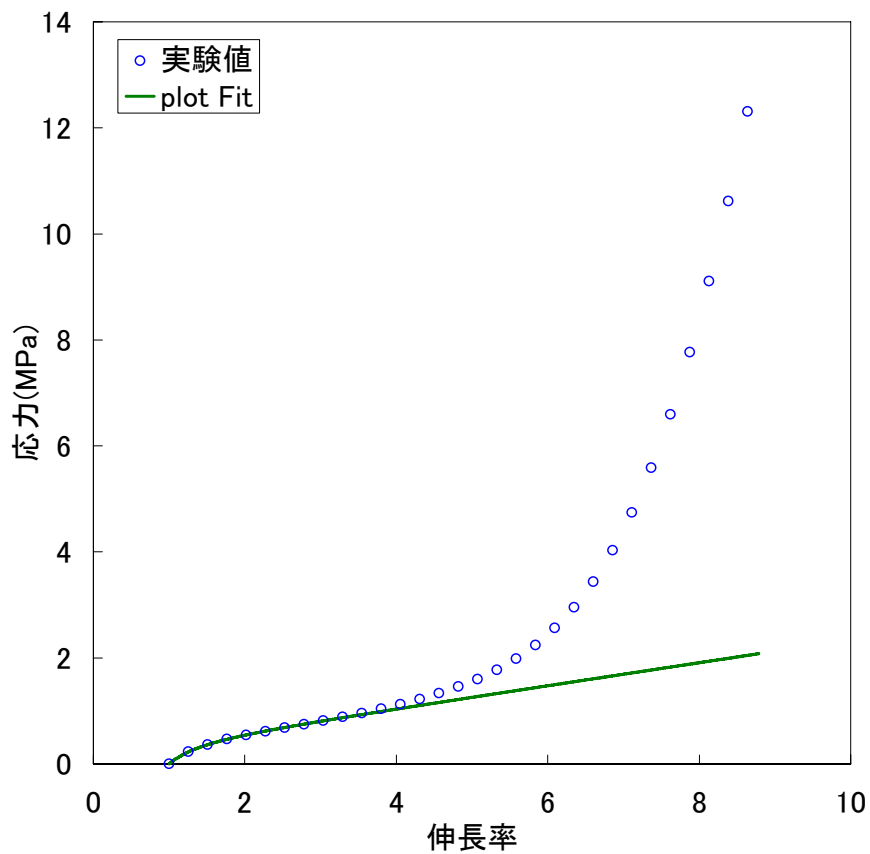


図-9.10 MooneyプロットによるNR-bandの引張フィット結果

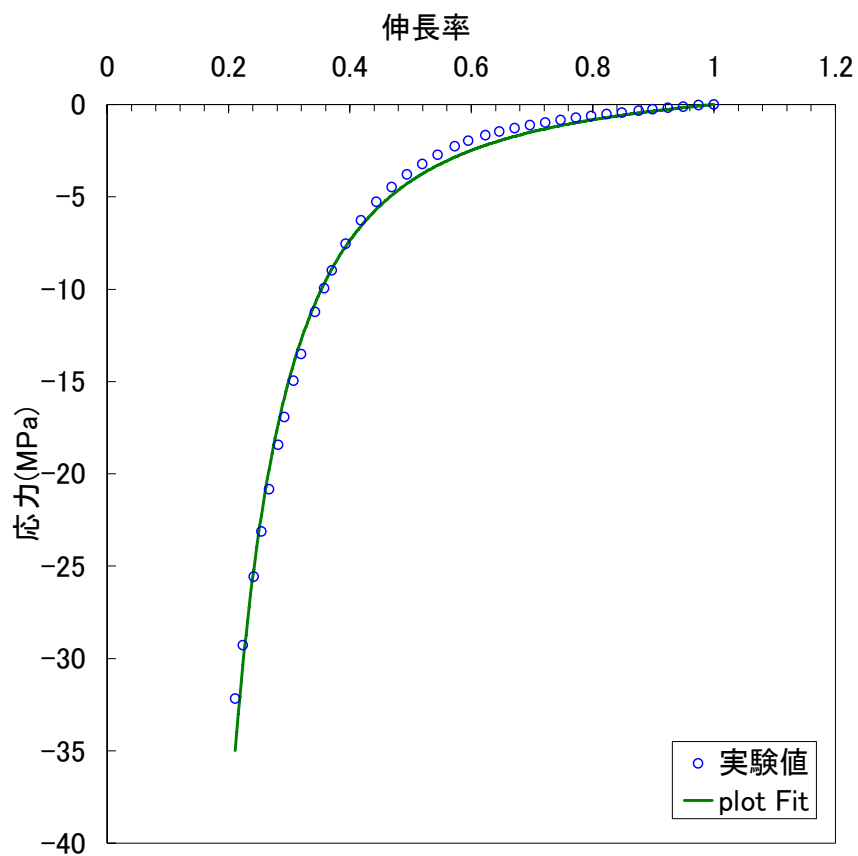


図-9.11 MooneyプロットによるNR-bandの圧縮フィット結果

9.2.6 考察

①Neo-Hookean 式に関する考察

図-9.5より引張の場合、伸長率 λ が1~4の領域まではNeo-Hookean式は実験結果と良く一致することが分かった。フィットングに用いる伸長率 λ の範囲を大きくしてゆくと、Neo-Hookean式によるフィットングの曲線はどんどんずれていき、伸長率 λ が6以上の領域であるゴムの大変形領域までは記述することはできなかつた。また、図-9.6より、圧縮の場合も同様に伸長率 λ が0.6程度までは記述が可能であるが、それ以上の伸長率では記述することはできていないことがわかる。これらのことからNR-bandのNeo-Hookean式の適用範囲は、伸長率で約0.6~4程度であると考察することができる。

②Mooney-Rivlin 式に関する考察

図-9.7より引張の場合、Neo-Hookean式と同様に伸長率 λ が1~4程度の領域まではMooney-Rivlin式は実験結果と良く一致することが分かった。この式も伸長率 λ が6以上のゴムの大変形領域までは記述することはできなかつた。また、図-9.8より圧縮でもNeo-Hookean式と同様に伸長率 λ が0.6程度までは記述が可能であるが、それ以上の伸長率では記述することはできていないことがわかる。これらのことからNR-bandのMooney-Rivlin式の適用範囲は、伸長率で約0.6~4程度であると考察することができる。また、Mooney-Rivlin式を用いる場合は五章で述べたMooneyプロット¹⁾を行い、式の適用範囲を設定する必要があることがわかつた。

③Mooney プロットのフィットングによる結果

NR-bandのMooneyプロットを図-9.9に示す。この図から引張・圧縮共に直線になっている範囲を読み取り、得られた範囲でフィットングした結果と実験値を図-9.10, 9.11に示す。図-9.10より引張は適用範囲に関する検討を行ったフィットング結果が伸長率で約4程度まで実験値と近似している。また図-9.11より圧縮は適用範囲に関する検討を行ったフィット結果がほぼ実験値と近似していることがわかる。これらのことからMooneyプロットを行なうことにより、実験値とよく近似するフィット結果を導くことができ、伸長率が約0.2~4までは記述できることがわかつた。しかし図-9.10, 9.11からもわかるように適用範囲の検討を行っても引張の大変形領域までは記述することができない。

9.2.7 結論

- ①NR-bandのNeo-Hookean式の適用範囲は伸長率で約0.6~4程度である。
- ②NR-bandのMooney-Rivlin式の適用範囲は伸長率で約0.2~4程度である。
- ③Mooney-Rivlin式を用いる場合はMooneyプロットを行い、適用範囲を設定する必要がある。
- ④適用範囲の検討を行っても引張の大変形領域までは記述することができない。

9.3 カーボンブラックによる適用範囲の変化に関する検討

9.3.1 目的

本研究ではIIR（硬度 27, 55, 65, 75），SBR（硬度 55, 65, 75）について，引張試験と圧縮試験を行い，引張と圧縮両方の荷重-変位曲線を測定した．さらに測定された荷重-変位関係から公称応力-伸長率関係を求め，Mooneyプロット^{9.3)}を用いてフィッティングを試みた．これから，カーボンブラック重量分率の違いによるMooneyプロットの変化，適用範囲の変化，Mooney-Rivlin式中の C_1 ， C_2 について考察し，ゴムの応力ひずみ曲線のMooney-Rivlin式による検討を目的とした．

9.3.2 硬度とカーボンブラック重量分率

表 9.1 に試料名と硬度，カーボンブラックの重量分率の関係を示す．本研究では硬度の異なるIIR，SBRを用いカーボンブラックの重量分率に関しての検討を行った．

表 9.1 IIR, SBRの材料物性

試料名	高度	カーボンブラック重量分率 (%)
SBR55	55	27.77
SBR65	65	32.48
SBR75	75	38.04
IIR27	27	0.00
IIR55	55	22.73
IIR65	65	29.43
IIR75	75	36.39

9.3.3 試料・試験体

試料にはIIR（硬度 27, 55, 65, 75），SBR（硬度 55, 65, 75）を用い，試験体の形状について引張試験はJISに定められているダンベル状試験片（図-9.12）を，圧縮試験には直径 6.0 mmの円盤状試験片を（図-9.13）用いた．

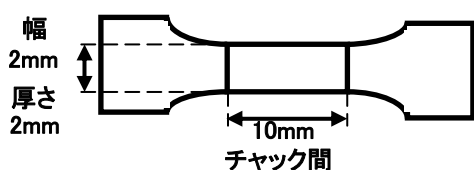


図-9.12 ダンベル状試験片

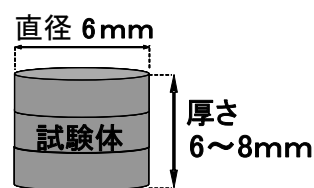


図-9.13 円盤状試験片

9.3.4 実験条件

試験機は島津製作所製のオートグラフ AGS-J 1kN を用いた。試験条件は引張速度を 100 mm/min で一定とし実験は試験体の破断まで行った。

圧縮試験には同じ装置を用い、引張試験のときとひずみ速度が同じになるように計算した結果、変位速度は 10 mm/min とした。最大荷重は 900N とした。

9.3.5 実験結果

IIR, SBRの引張・圧縮試験による荷重-変位関係を図-9.14, 9.15, 9.29, 9.30 に示す。そこから得られた応力-伸長率関係を図-9.16, 9.17, 9.31, 9.32 に示す。また、IIR, SBRのMooneyプロットを図-9.19, 9.34 に、Mooneyプロットと C_1 , C_2 の関係を図-9.19, 9.34 に、Mooneyプロットの傾き-カーボンブラック重量分率関係を図-9.20, 9.35 に示す。Mooneyプロットを行った結果からフィッティングを行った結果を図-9.21, 9.22, 9.23, 9.24, 9.25, 9.26, 9.27, 9.28, 9.36, 9.37, 9.38, 9.39, 9.40, 9.41 に示す。

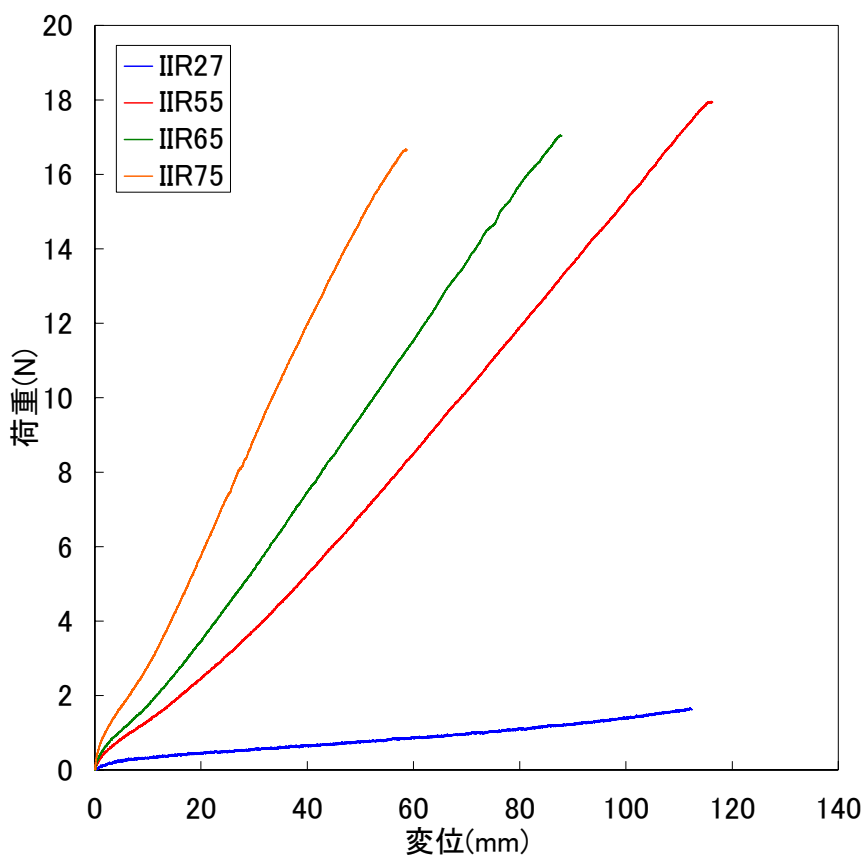


図-9.14 IIR荷重-変位関係 (引張)

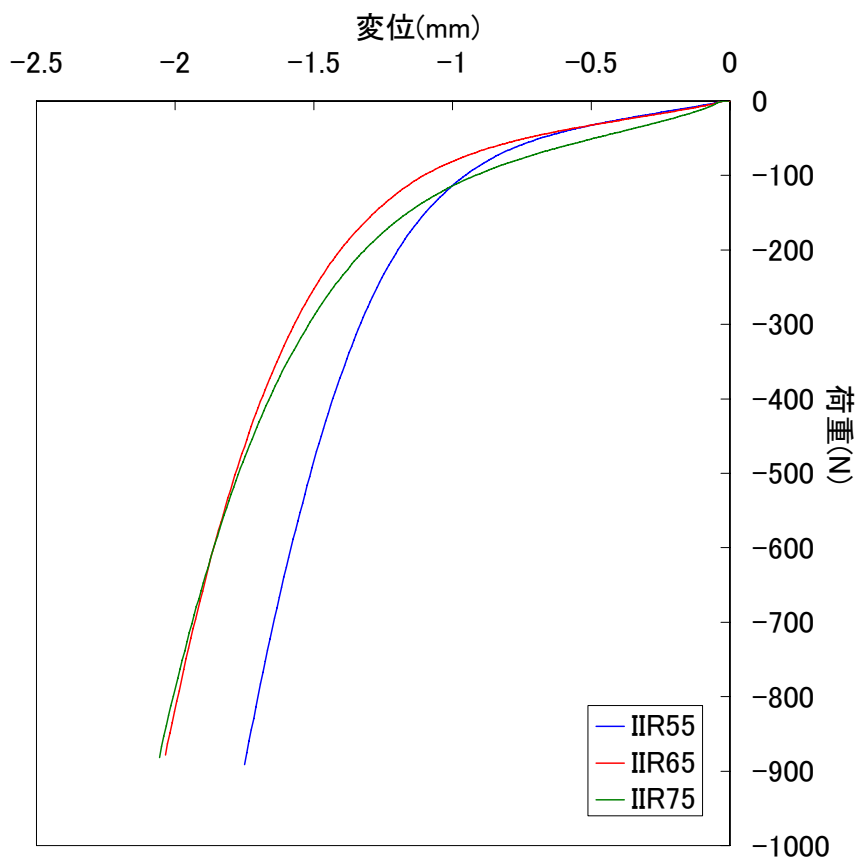


図-9.15 IIR荷重-変位関係 (圧縮)

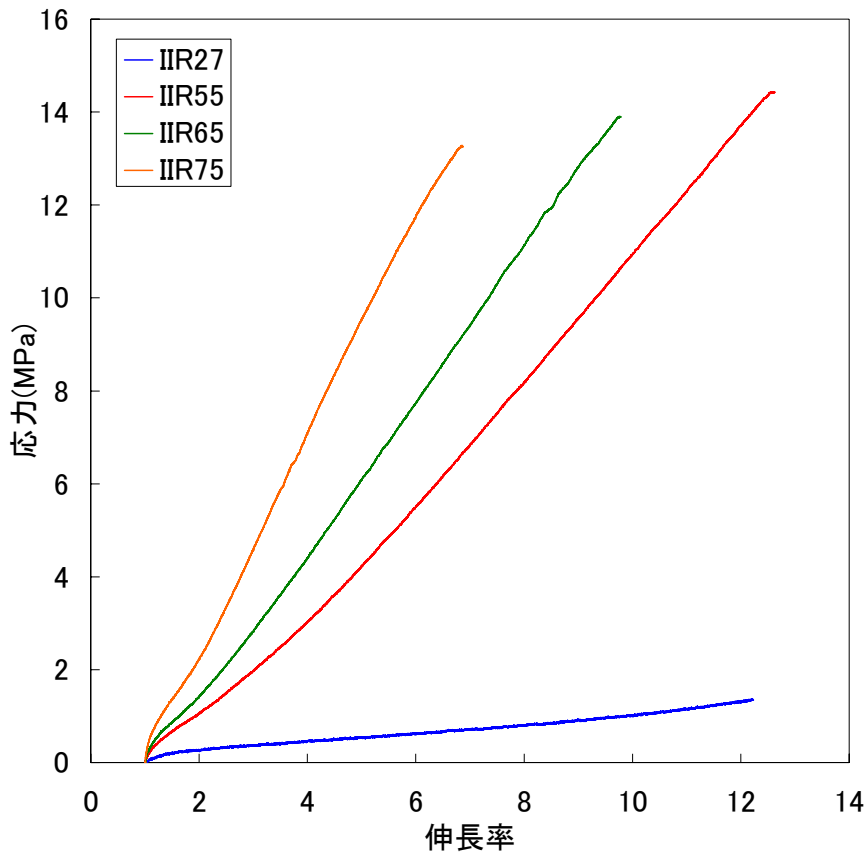


図-9.16 IIR応力-伸長率関係 (引張)

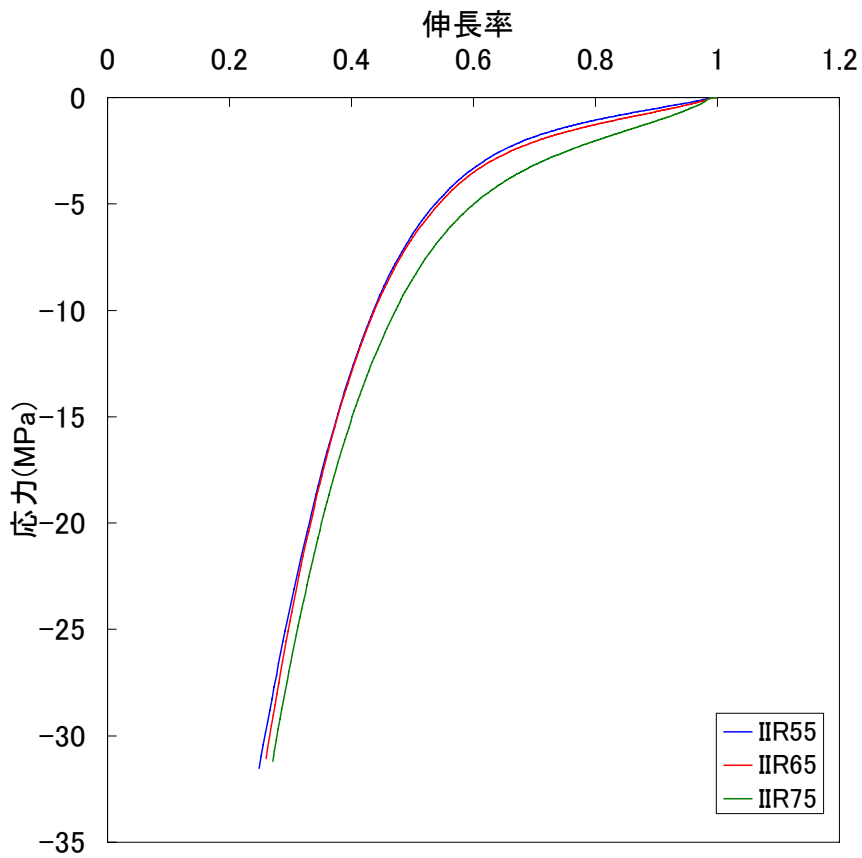


図-9.17 IIR応力-伸長率関係 (圧縮)

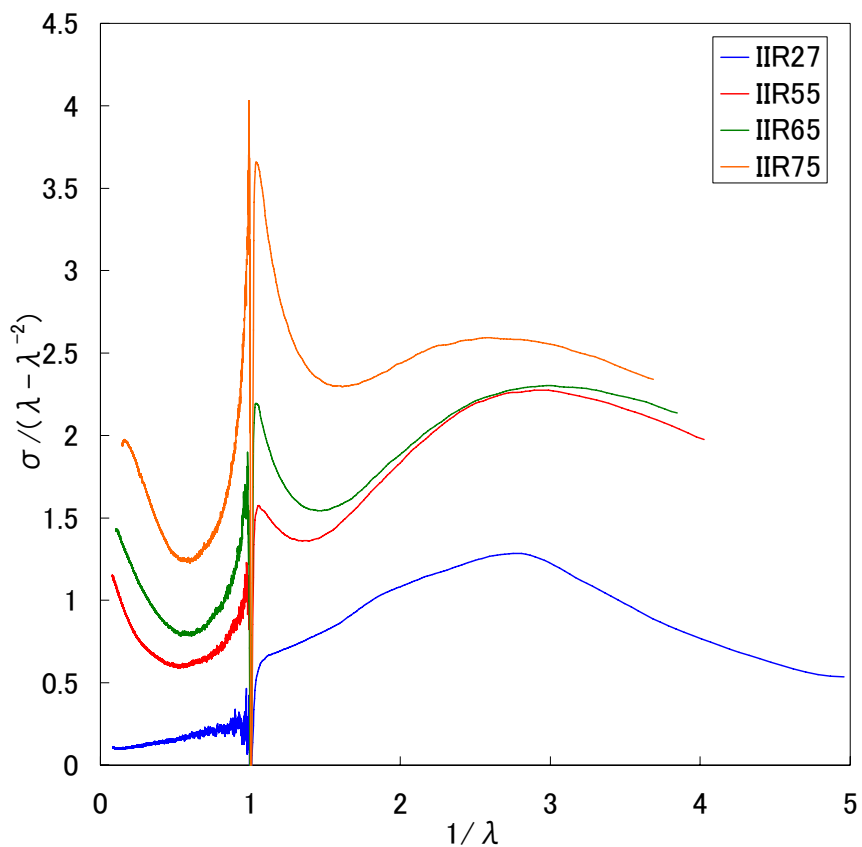


図-9.18 IIRのMonneyプロット

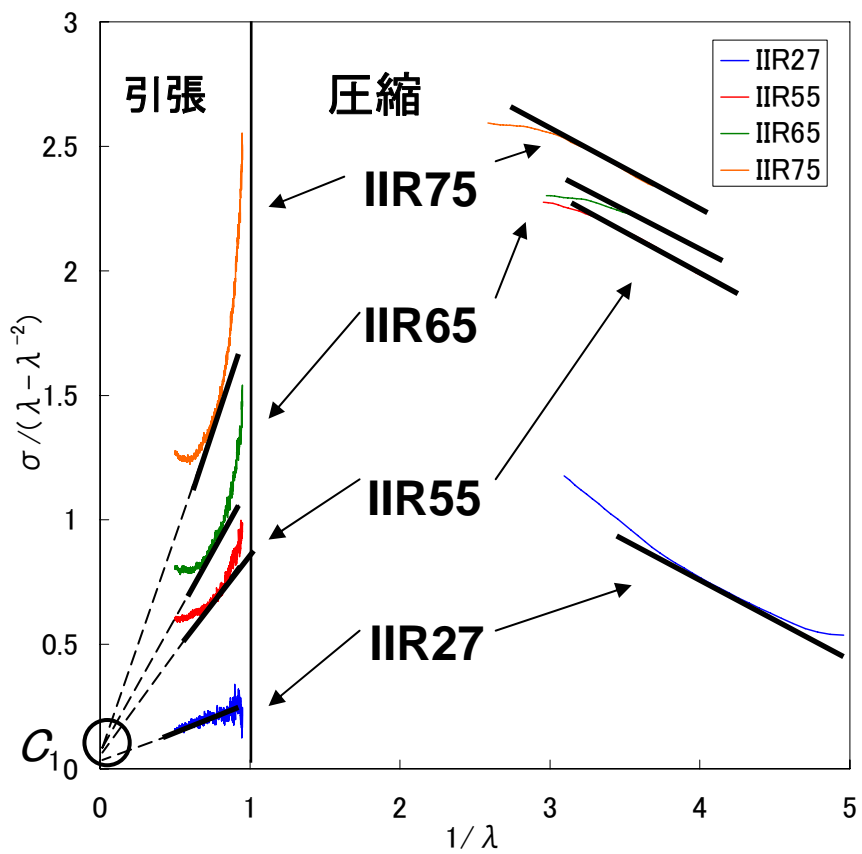


図-9.19 IIRのMonneyプロットと C_1 , C_2

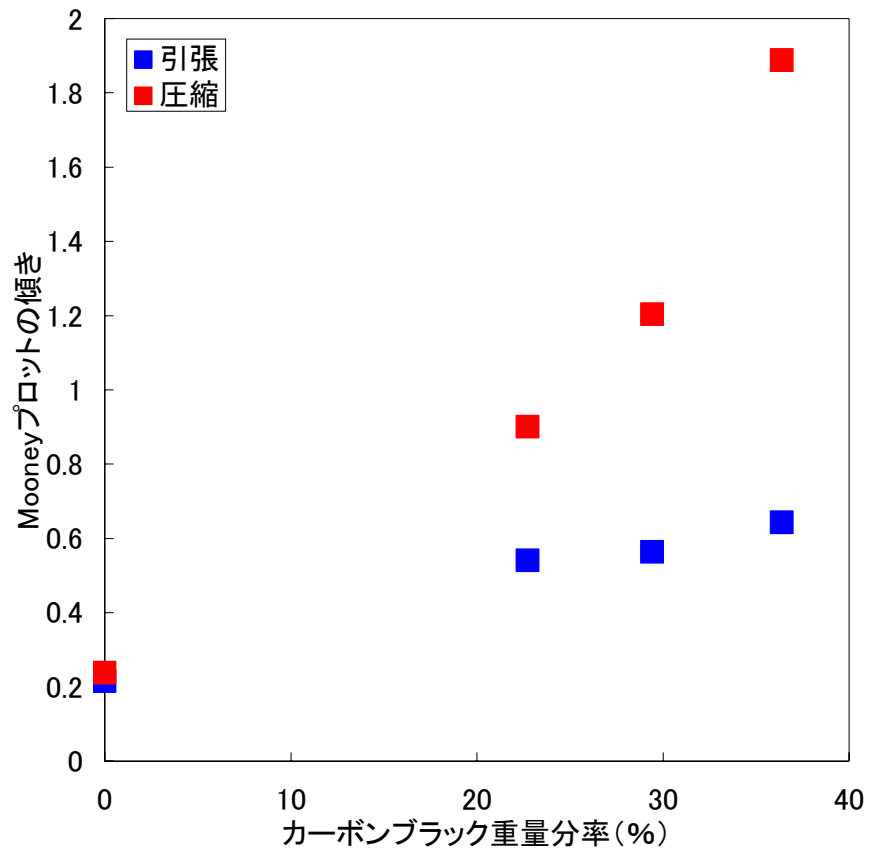


図-9.20 IIRのMooneyプロットの傾き-カーボンブラック重量分率関係

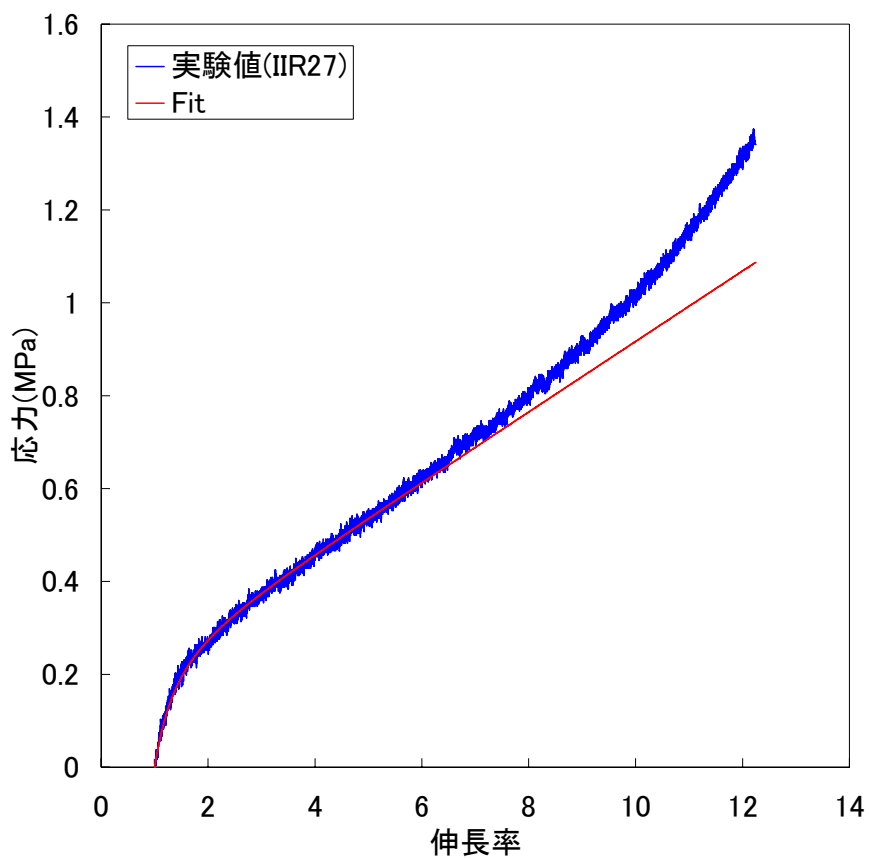


図-9.21 IIR27のFit結果（引張）

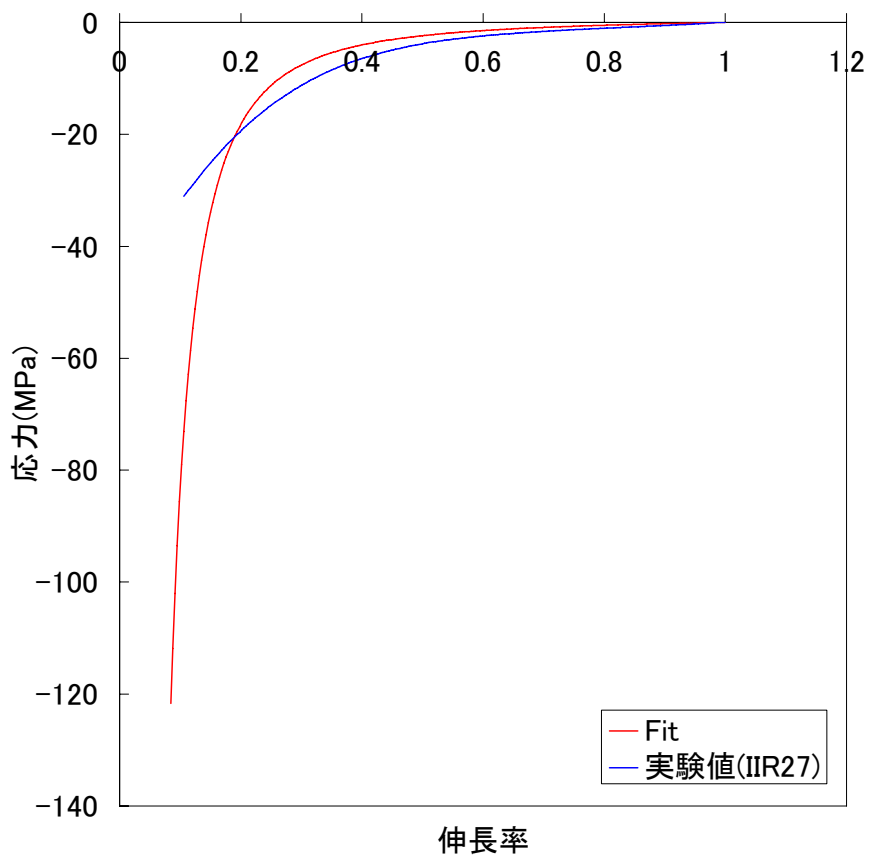


図-9.22 IIR27のFit結果（圧縮）

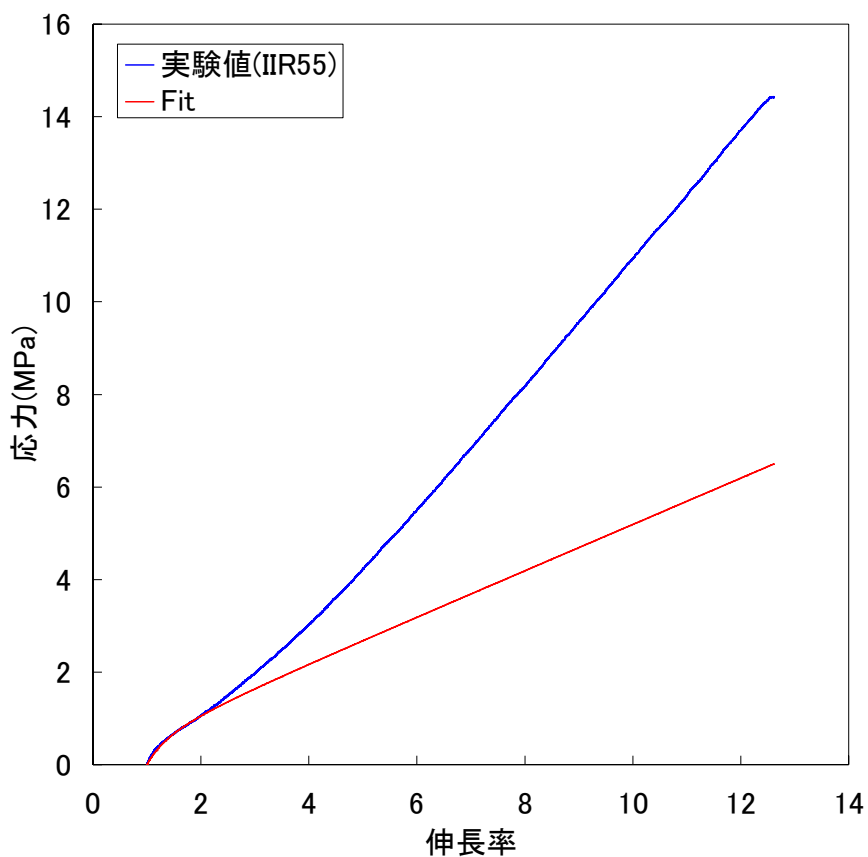


図-9.23 IIR55 の F i t 結果 (引張)

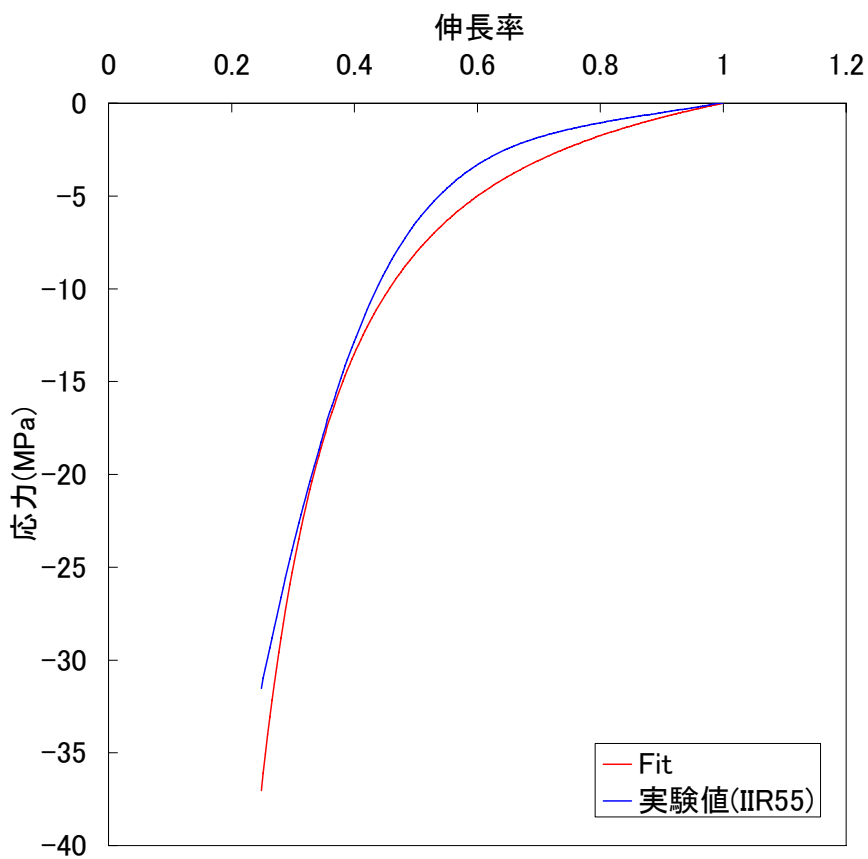


図-9.24 IIR55 の F i t 結果 (圧縮)

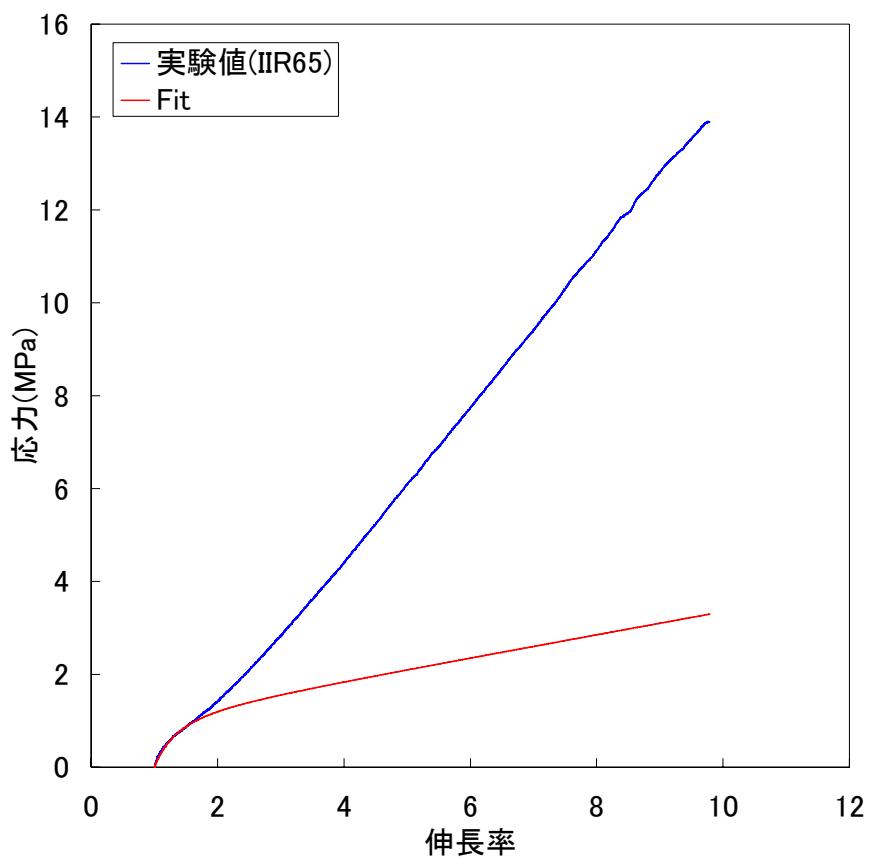


図-9.25 IIR65のFit結果(引張)

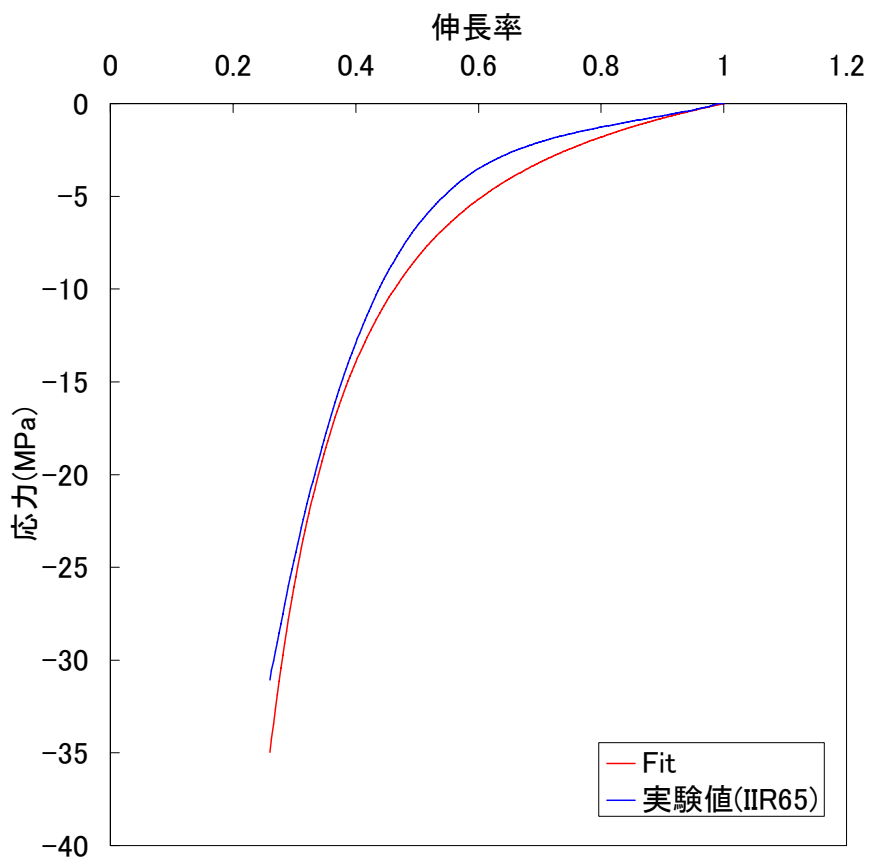


図-9.26 IIR65のFit結果(圧縮)

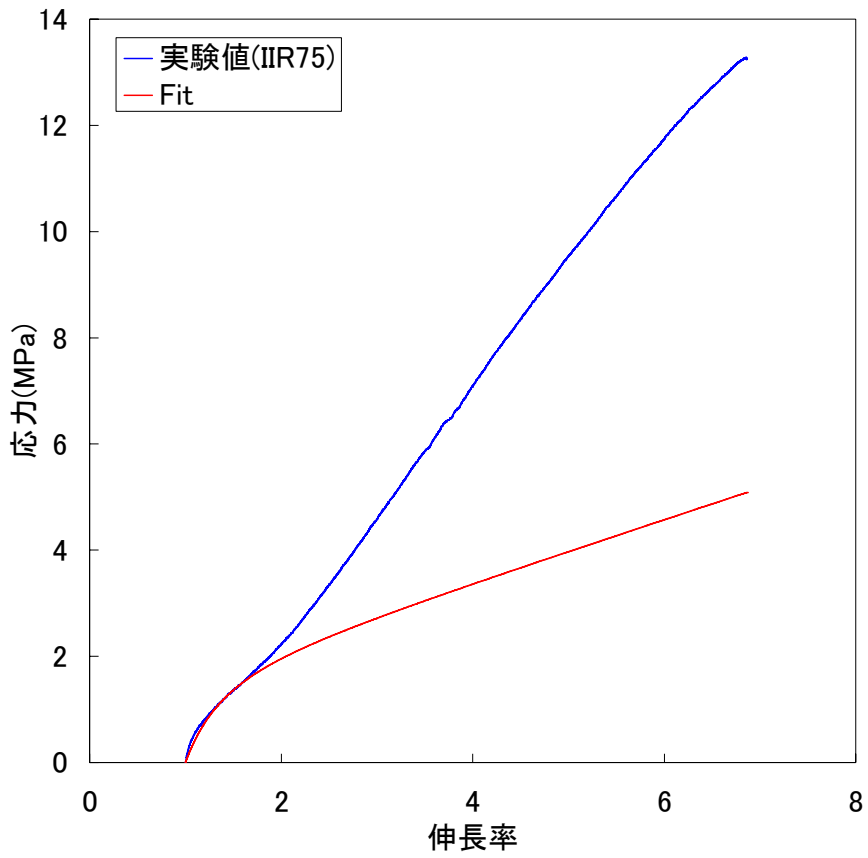


図-9.27 IIR75 の F i t 結果 (引張)

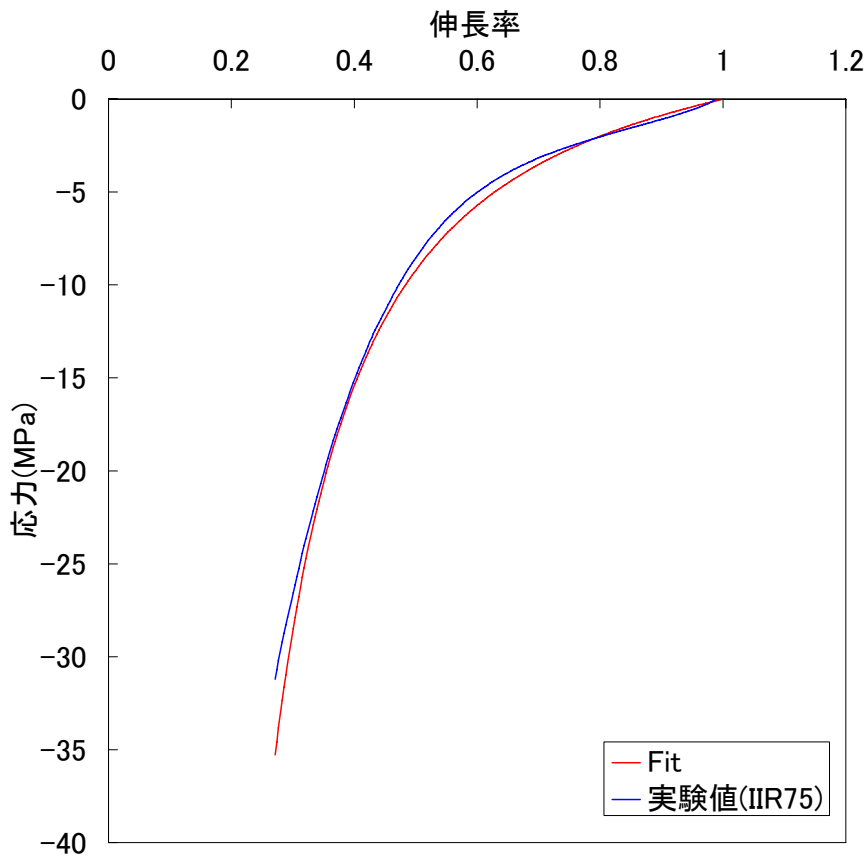


図-9.28 IIR55 の F i t 結果 (圧縮)

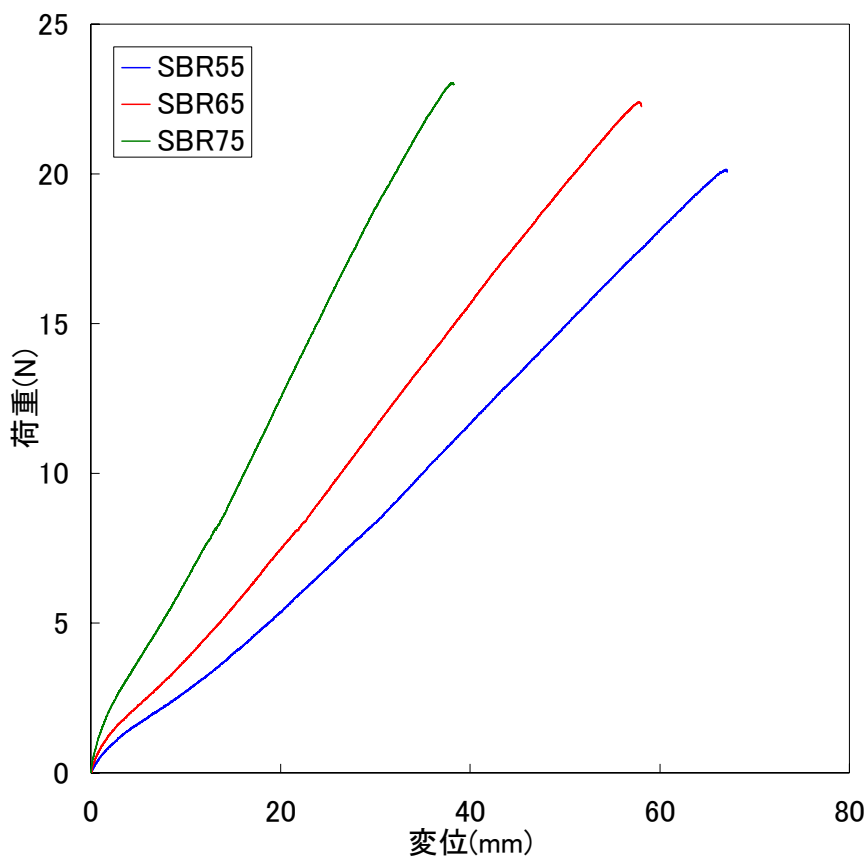


図-9.29 SBR荷重-変位関係 (引張)

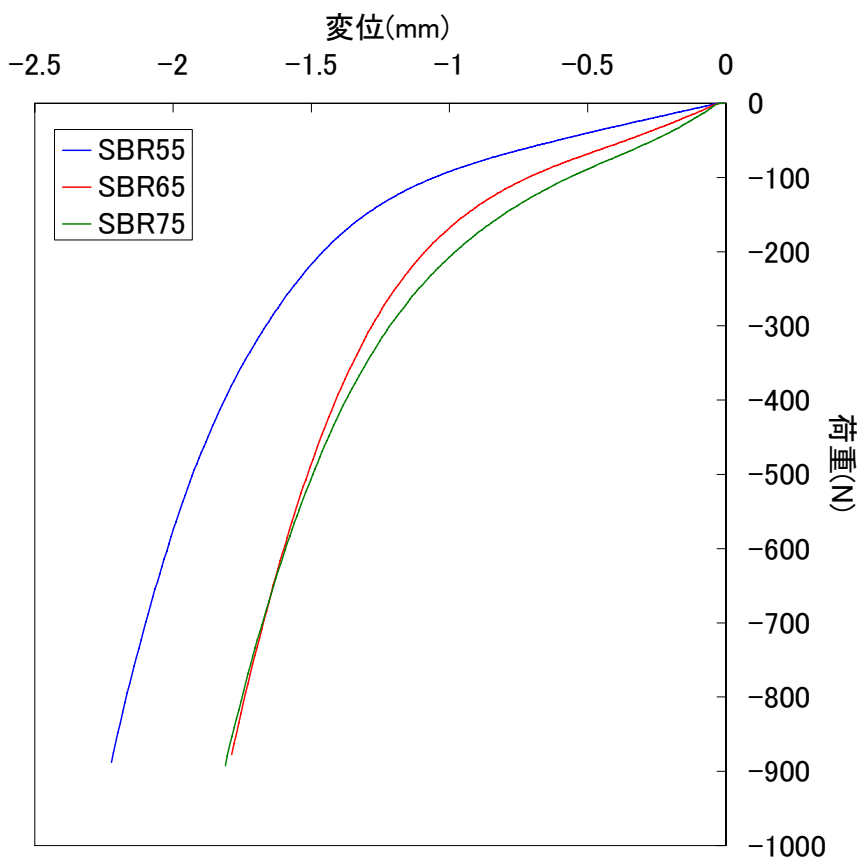


図-9.30 SBR荷重-変位関係 (圧縮)

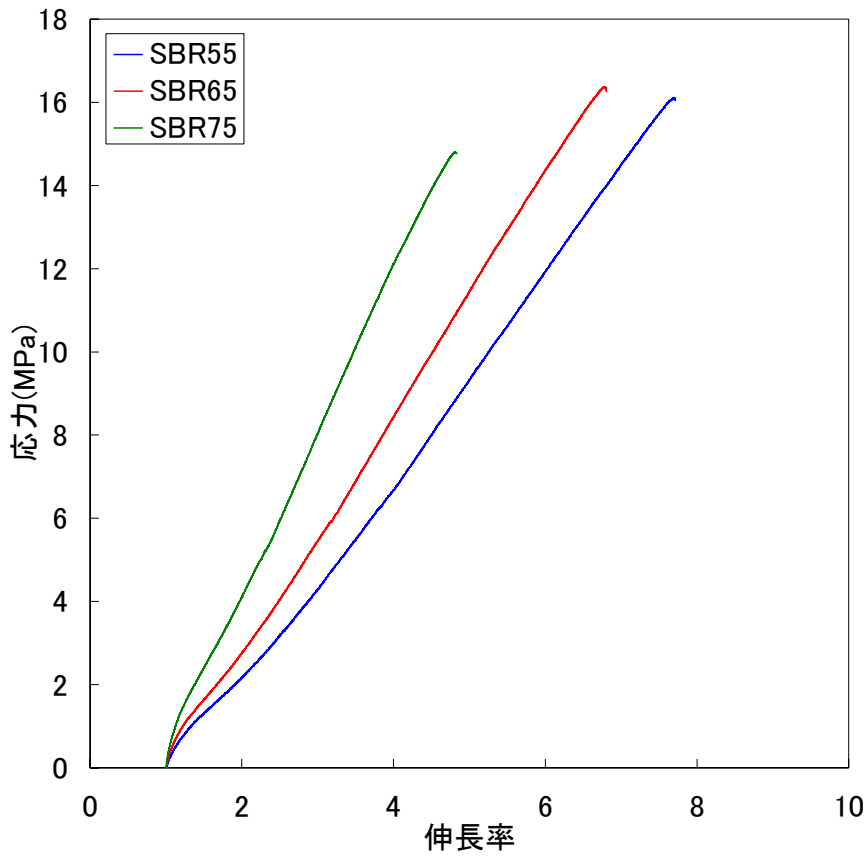


図-9.31 SBRの応力-伸長率関係（引張）

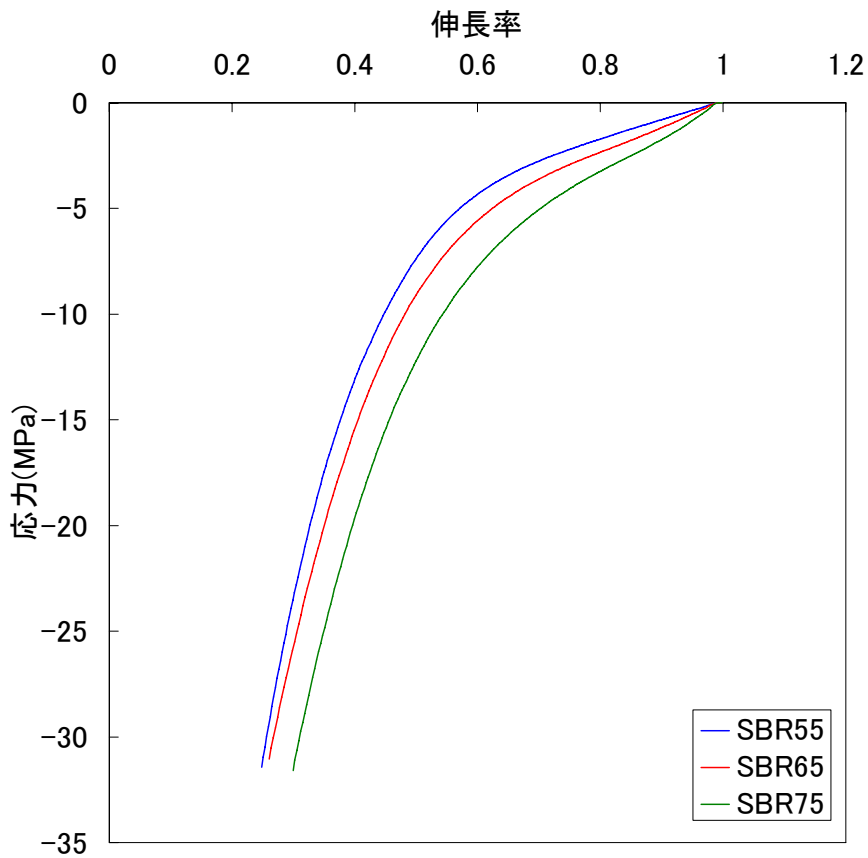


図-9.32 SBRの応力-伸長率関係（圧縮）

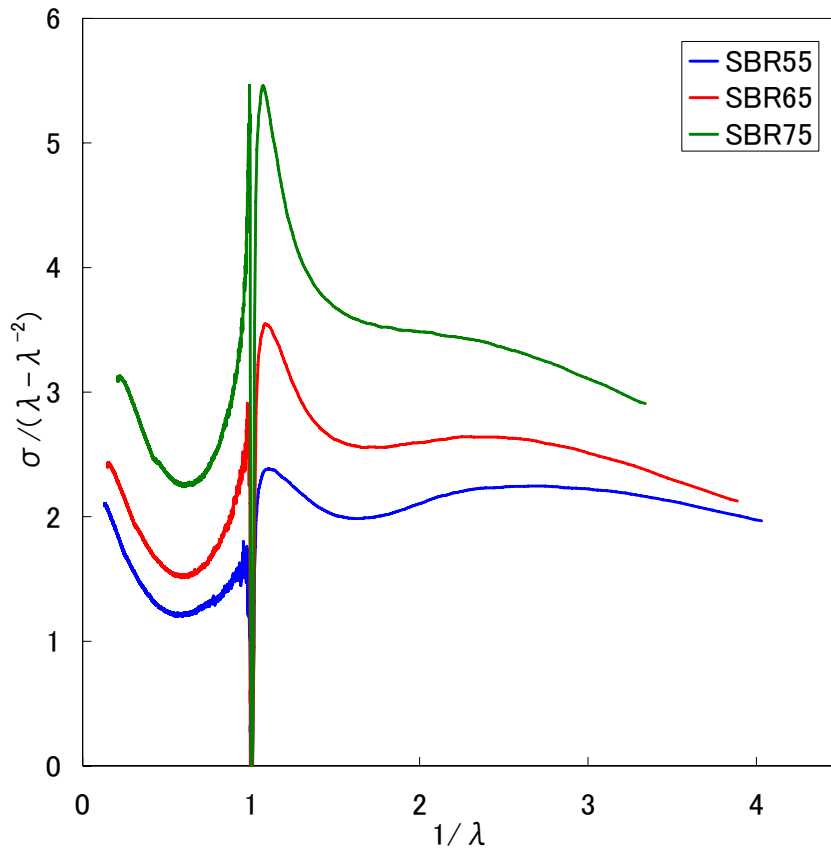


図-9.33 SBRのMooneyプロット

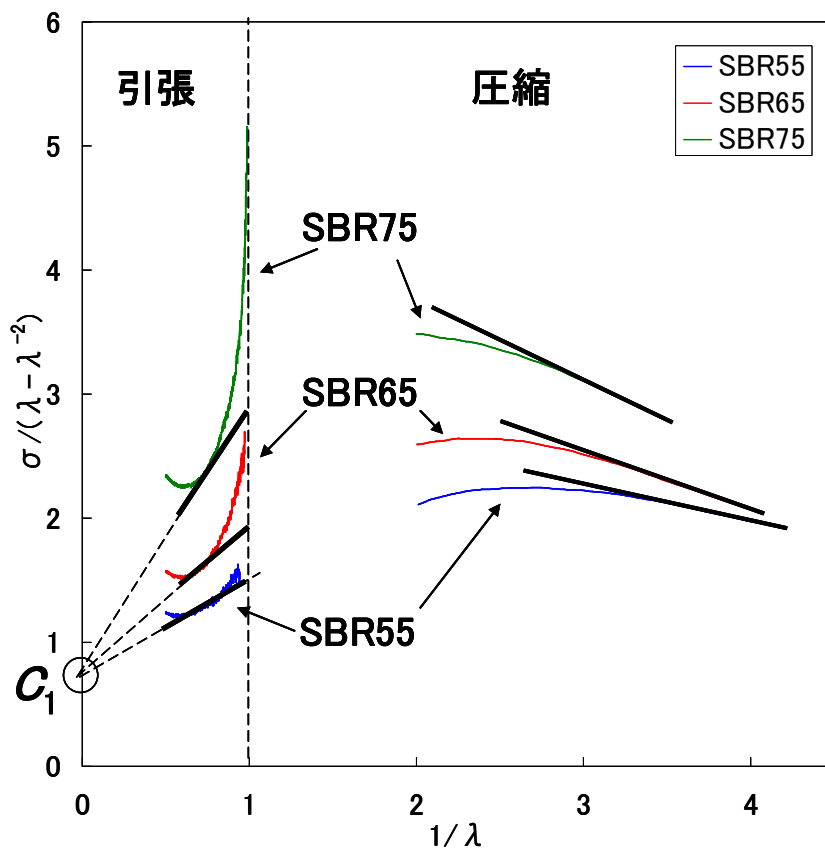


図-9.34 SBRのMooneyプロットと C_1 , C_2

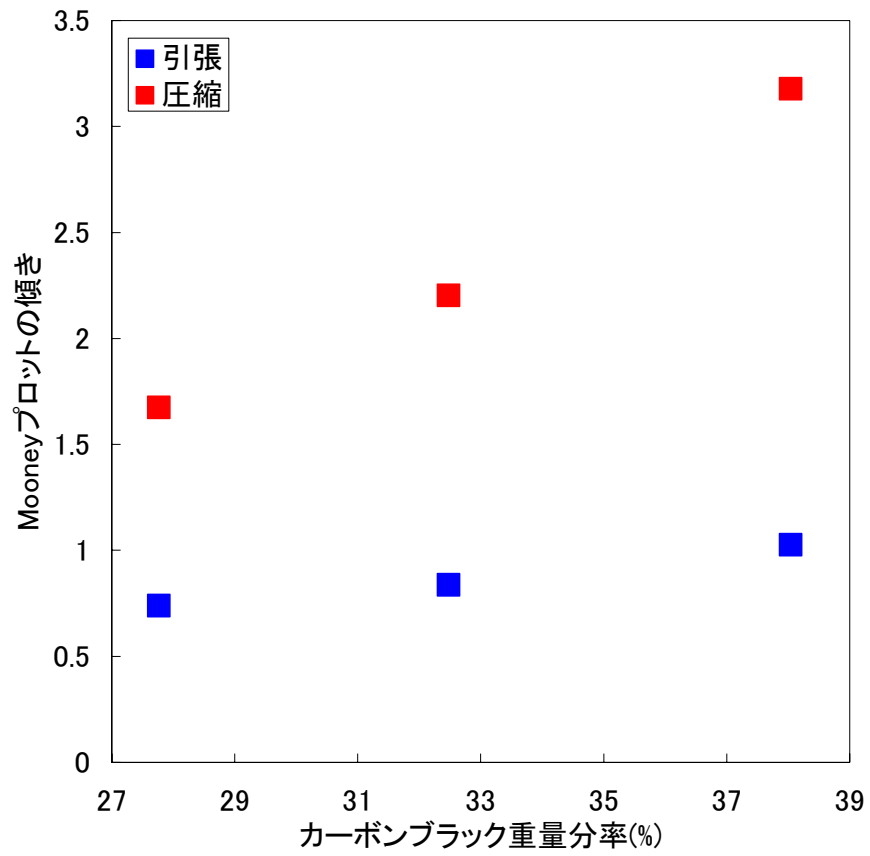


図-9.35 SBRのMooneyプロットの傾き-カーボンブラック重量分率関係

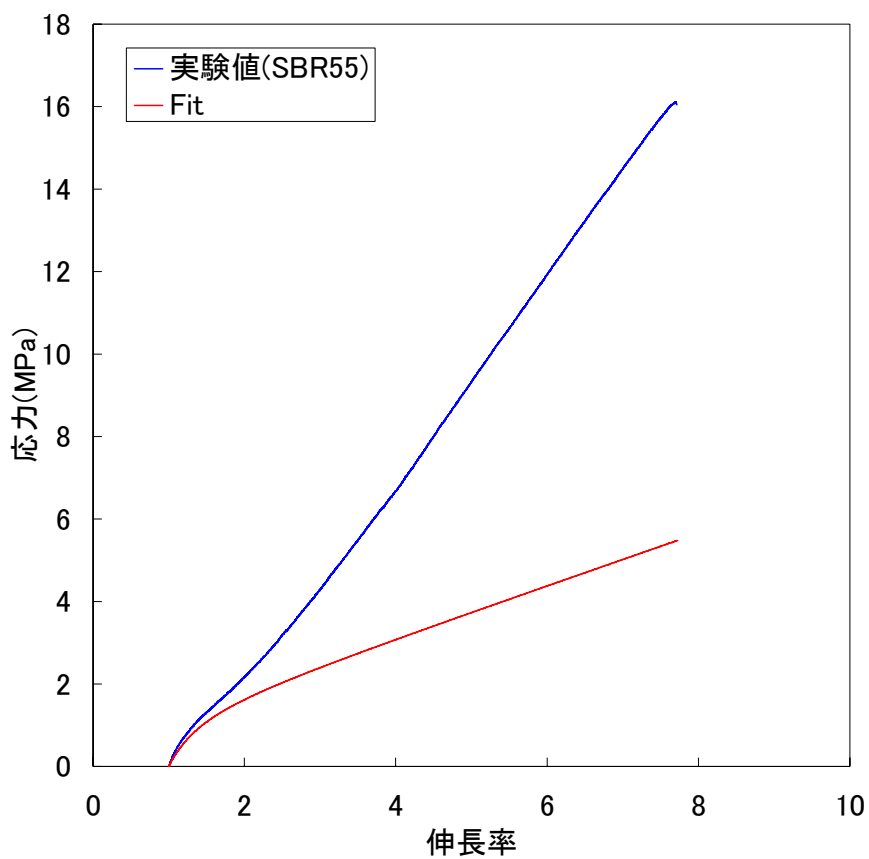


図-9.36 SBR55 の F i t 結果 (引張)

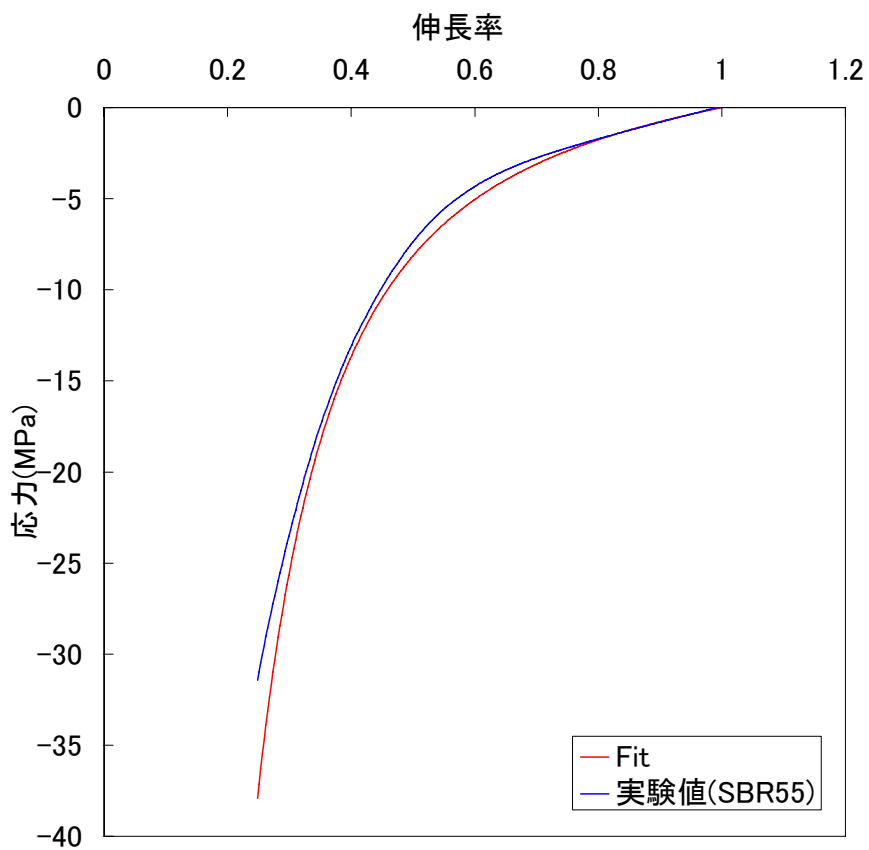


図-9.37 SBR55 の F i t 結果 (圧縮)

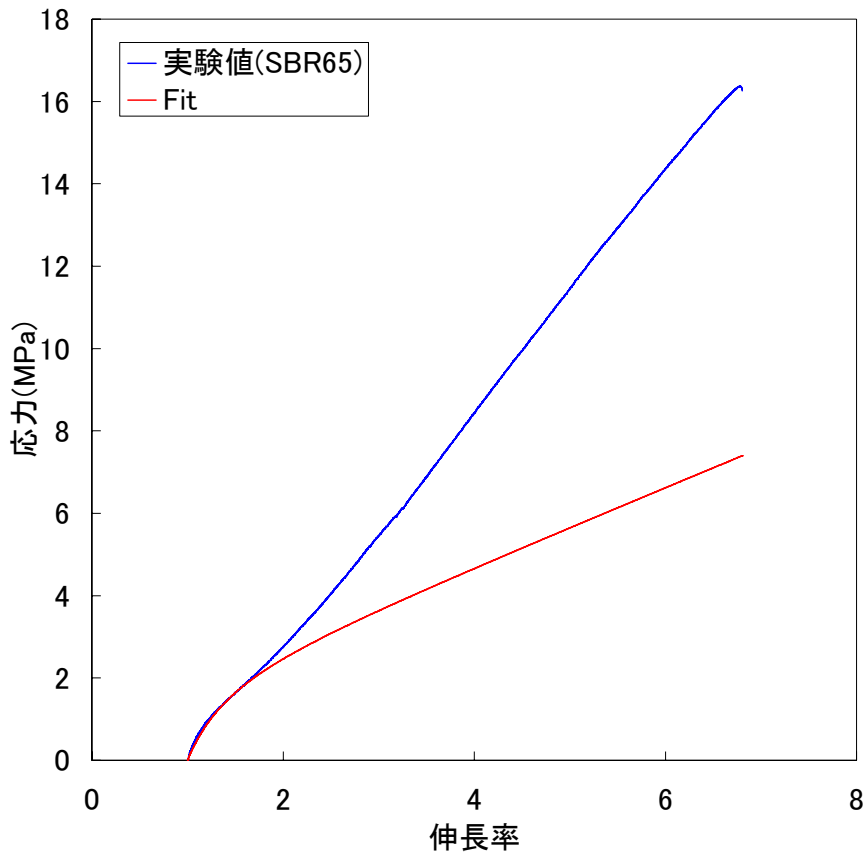


図-9.38 SBR65 の F i t 結果 (引張)

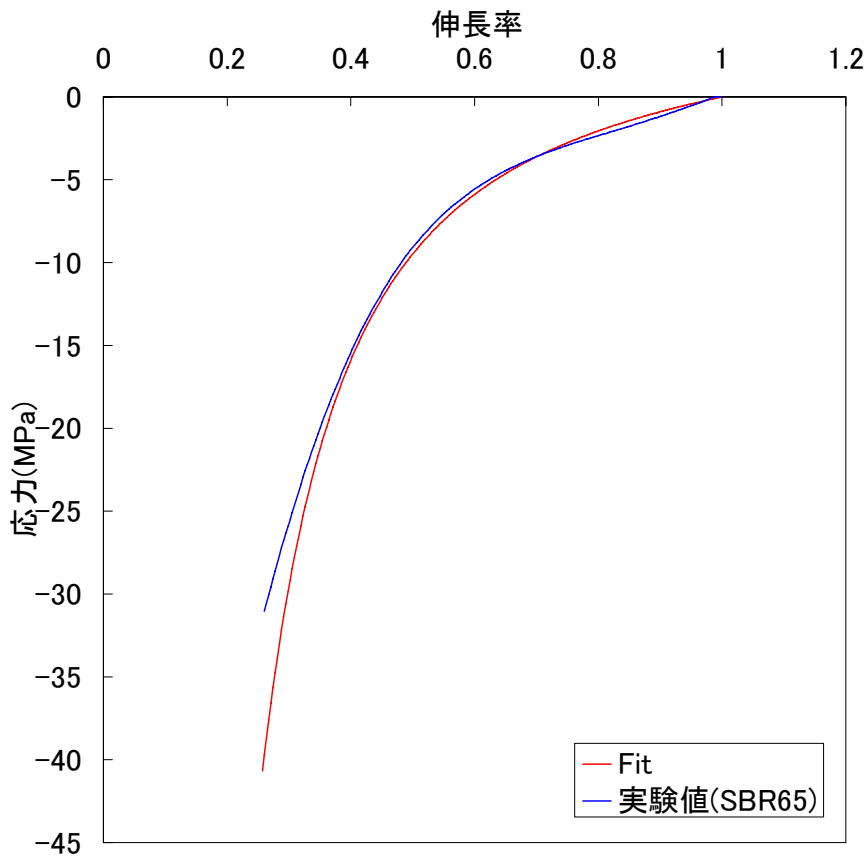


図-9.39 SBR65 の F i t 結果 (圧縮)

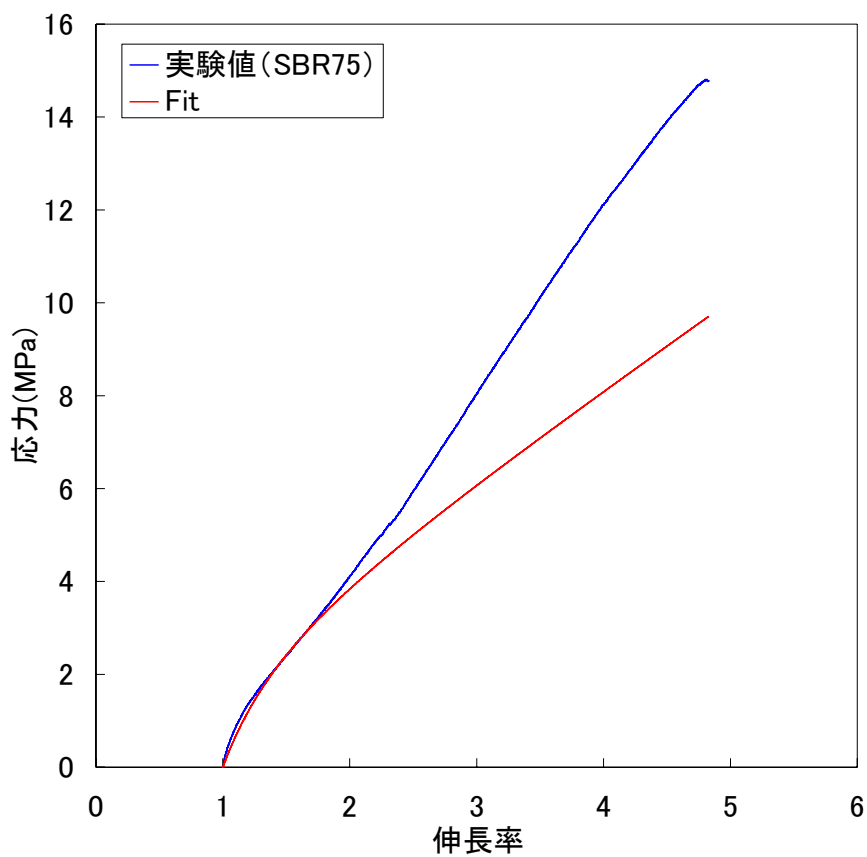


図-9.40 SBR75 の F i t 結果 (引張)

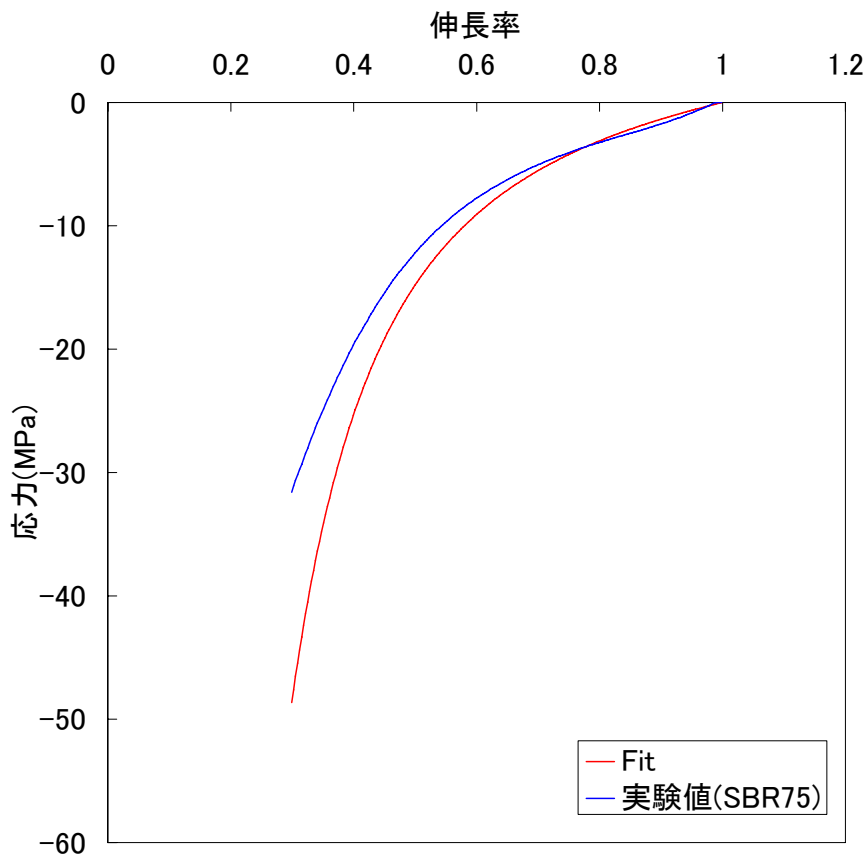


図-9.41 SBR75 の F i t 結果 (圧縮)

9.3.6 考察

①カーボンブラックによる傾きの変化

IIR, SBRのMooneyプロットと C_1 C_2 の関係を図-9. 19, 9. 34 に示す. これよりカーボンブラックの配合量の増加に伴い直線の傾きが急になっていく傾向があることがわかる. 図-9. 20, 9. 35 に示す直線の傾きとカーボンブラック重量分率の関係からもカーボンブラックが増加するにつれて傾きが急になっていることがわかる. Mooney-Rivlin式より直線の傾きは C_2 , 直線の切片は C_1 であることから, C_2 の変化はカーボンブラックによる擬似的な架橋点の数に関係しており C_1 は硫黄による架橋を表していると考えられる. これは硫黄による架橋点に加えてカーボンブラックが多くなることで擬似的な架橋点が生成されることによるものであると考えられる.

② C_1 C_2 の考察

Mooney-Rivlin式より直線の傾きは C_2 , 直線の切片は C_1 であることから, C_2 の変化は擬似的な架橋点の数に関係しており C_1 は硫黄による架橋を表している. これは, 図-9. 20 のカーボンブラックが配合されていないIIR27 の C_1 C_2 の値が同じであることからわかる. しかし, 図-9. 19, 9. 34 よりカーボンブラックが配合されている試料に関して引張試験の結果からは上記の考察の説明がつくものに対して, 圧縮に関しては C_1 C_2 の説明がつかないことがわかる. これは試験機の性能状, 圧縮試験における圧縮荷重に限界があることから圧縮の挙動が途中までしかみれていないこと, 圧縮した際にはカーボンブラックによる擬似的な架橋点というものが考えられなくなるためであると考察できる.

③カーボンブラック配合量による適用範囲の変化

図-9. 19, 9. 34 よりカーボンブラック配合量が増加していくにつれ直線的になる範囲が狭くなっていくことがわかる. そのため Mooney プロットでの範囲も狭まりフィッティングを行う際の適用範囲が少なくなっていくことがわかる.

9.3.7 結論

本研究では高度の異なるゴムで引張・圧縮試験をおこない, ゴムの応力-ひずみ関係について, 式の適用範囲や精度, 式中のパラメータ等を Mooney-Rivlin 式により検討した. その結果わかったことを以下に示す.

- ①カーボンブラックの配合量の増加に伴い直線の傾きが急になっていく傾向がある.
- ②Mooney-Rivlin式中の C_2 はカーボンブラックの配合量により変化する.
- ③ C_2 の変化はカーボンブラックによる擬似的な架橋点の数に関係している.
- ④圧縮した際にはカーボンブラックによる擬似的な架橋点というものが考えられなくなる.
- ⑤ C_1 は硫黄による架橋を表している.
- ⑥カーボンブラック配合量が増加していくにつれ直線的になる範囲が狭くなる.

第 10 章

応力緩和

第 10 章 応力緩和

10.1 目的

ゴムは弾性と粘性を併せ持つ粘弾性体であるため、応力緩和^{10.1)}という現象が生じる。応力緩和は粘弾性体の粘性成分によるものであり、エネルギー吸収も粘性成分により生じる。このことからゴムの応力緩和とエネルギー吸収には関連があると考えられる。

本研究では、引張・圧縮において応力緩和試験を行った。応力緩和試験とは試験体に一定の変位を作用させ、発生する荷重の変化を測定するものである。測定された荷重をもとに、受圧面積から応力を計算することで応力の時刻歴変化を求め、応力緩和量、応力緩和速度、ゴムのエネルギー吸収性について考察した。

10.2 試料・試験体

試料には市販の天然ゴム (NR-band), 天然ゴム(NR), スチレンブタジエンゴム(SBR), ブチルゴム(IIR)の四種類を選択した。硬度は補強材であるカーボンブラックの配合量のみで 55, 65, 75 に調節されたものを用いた。試験体はゴムの種類に硬度を添えて、NR55 のように呼ぶこととする。NR-bandにはカーボンブラックは配合されていない。上記の試料のほかにも、補強材を配合していない試料であるNR40 と IIR27 を試料に加えた。

引張試験について試料はNR-bandを選択し試験体の形状は折径 100mm, 幅 6mm, 厚さ 1.1mm のバンド状とした。圧縮試験について試料はNR, SBR, IIRを選択し試験体の形状は直径 6mm, 厚さ 2~2.5mmの円盤状とした。

10.3 実験条件

試験機は島津製作所製オートグラフ AGS-J 1kNを用いた。引張試験は引張速度 100, 300, 500mm/minの 3 通りで行い、変位は 500mmで一定としたまま 40000 秒~80000 秒間にわたり荷重を測定した。サンプリング間隔は 2 秒とした。

圧縮試験は圧盤が試験体に触れたところで変位と荷重をゼロに設定し、変位速度 10.0mm/min で荷重が 900N となるまで載荷した。その後、変位を一定としたまま 1000 秒間にわたり荷重を測定した。なお、変位と荷重のサンプリング間隔は 0.05 秒である。

10.4 応力緩和量と応力緩和速度の定義^{10.2)}

まず応力緩和量と応力緩和速度を次のように定義した。応力緩和量 $\Delta\sigma(t)$ は応力緩和が始まった瞬間からの応力の減少量なので、次式で定義される。

$$\Delta\sigma(t) = \sigma(0) - \sigma(t) \quad \text{式 10.1}$$

ここで、 $\sigma(0)$ は応力緩和が始まった瞬間の応力、つまり時刻 $t=0$ における応力である。また、 $\sigma(t)$ は時刻 t における応力である。また、応力緩和により粘性成分からの寄与が少なくなっていくので、応力緩和量は粘性成分を表している。

応力緩和速度 v_R は微小時間あたりに緩和されて減少していく応力と定義した。したがって、応力緩和速度は式で表される。

$$v_R = \frac{\sigma(t + \Delta t) - \sigma(t)}{\Delta t} \quad \text{式 10.2}$$

したがって、微小な時間間隔で離散的に測定されている実験値について、二点間の傾きを取ったものが v_R となる。また、最大応力緩和速度は変位を一定とし、応力緩和が始まった瞬間に表れる。

10.5 実験結果

図-10.1 に NR-band の引張応力緩和試験によって得られた応力緩和曲線を示す。またその結果から時刻-真応力関係を図-10.2 に、時刻- Δ 応力関係を図-10.3 に示す。

図-10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 10.10, 10.11, 10.12 に NR の圧縮応力緩和試験によって得られた応力緩和曲線を示す。その結果から得られた、緩和量-カーボンブラック重量分率の関係を図-10.13 に、応力緩和量-初期応力関係を図-10.14 に、最大緩和速度-最大荷重関係を図-10.15 に示す。

図-10.16, 10.18 に IIR, SBR の最大荷重 900N での応力-時刻関係を示す。また、図-10.17, 10.19 に IIR, SBR の応力緩和速度-時刻関係を示す。

ゴムの種類による比較として NR, SBR, IIR の応力緩和に関する検討を行った。図-10.20 に応力緩和量-カーボンブラック重量分率関係を、図-10.21 に最大緩和速度-カーボンブラック重量分率関係を、図-10.22 に最大緩和速度-エネルギー吸収率関係を示す。

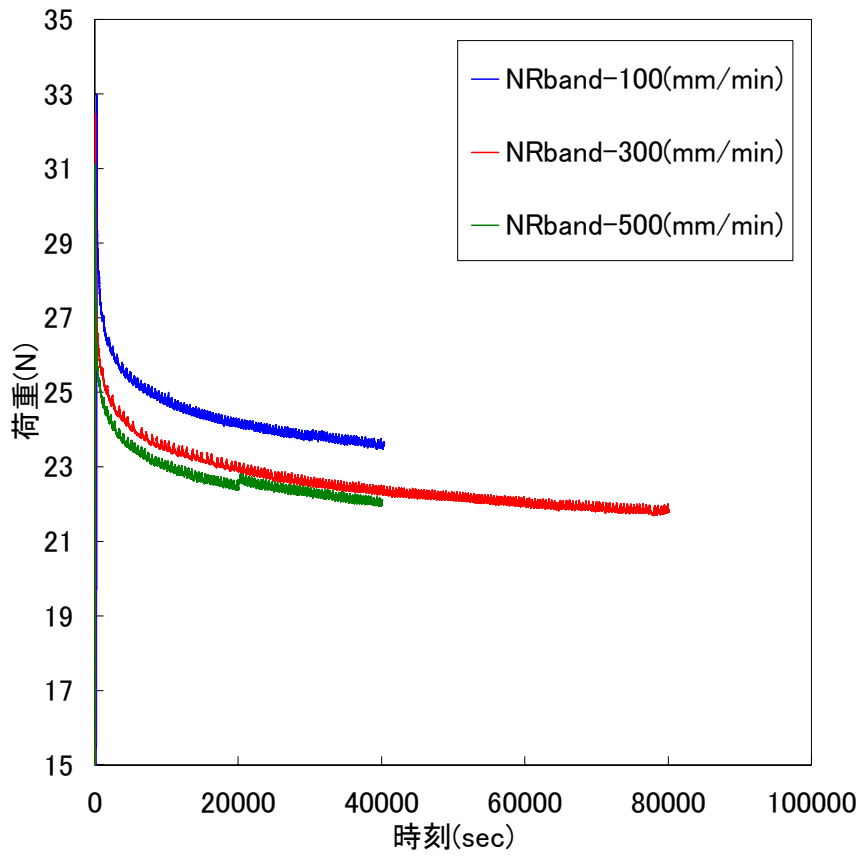


図-10.1 NR-band 引張応力緩和 時刻-荷重関係

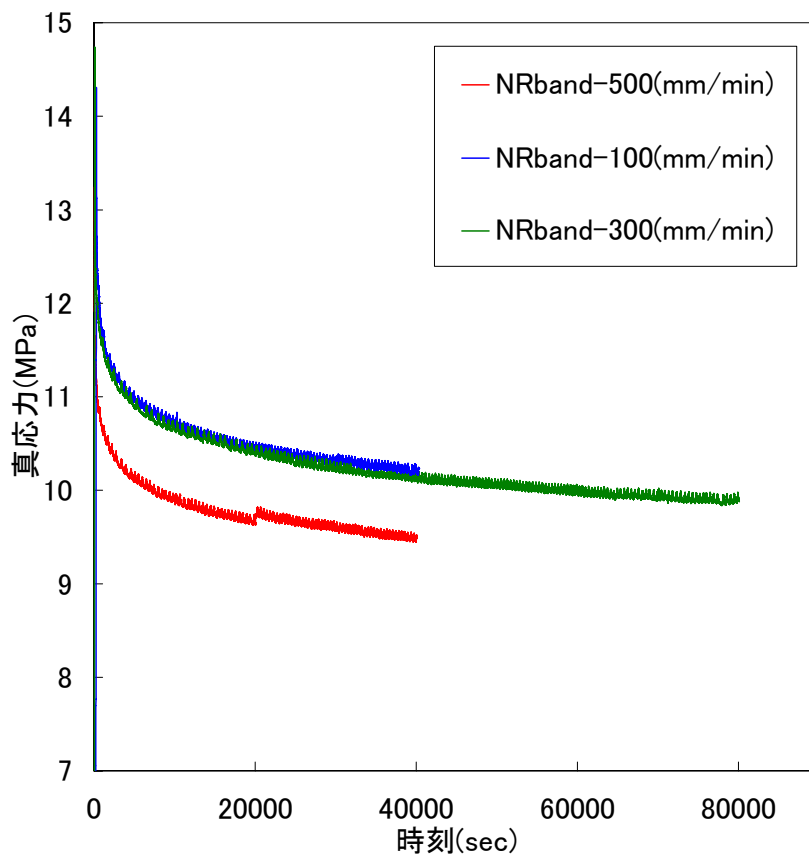


図-10.2 NR-band 引張応力緩和 時刻-真応力関係

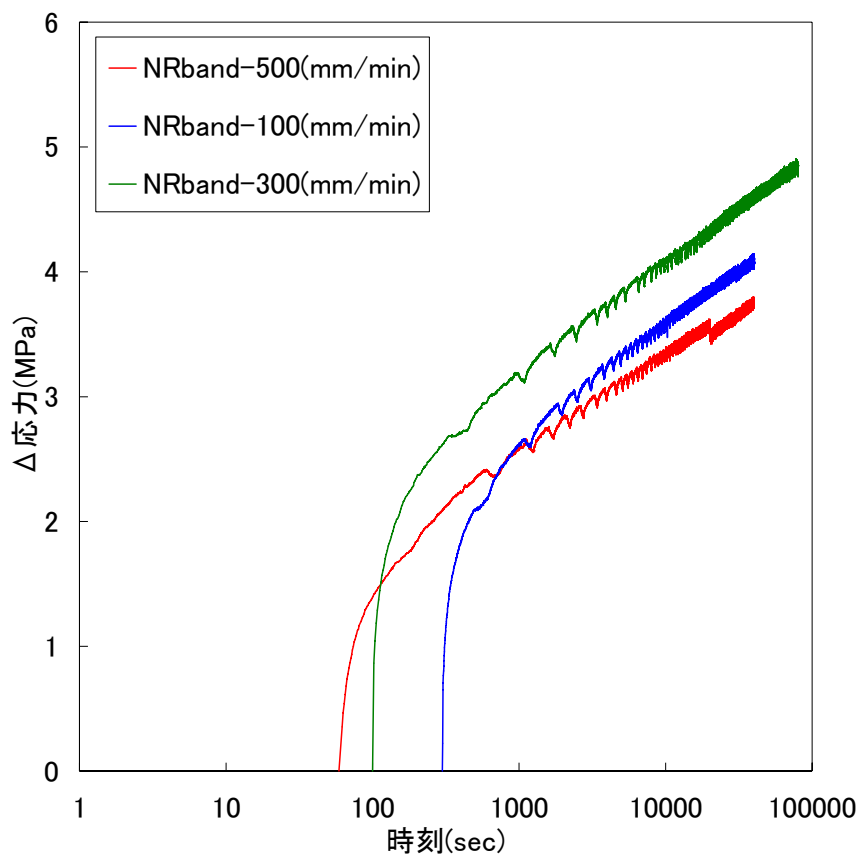


図-10.3 NR-band 引張応力緩和 時刻- Δ 応力関係

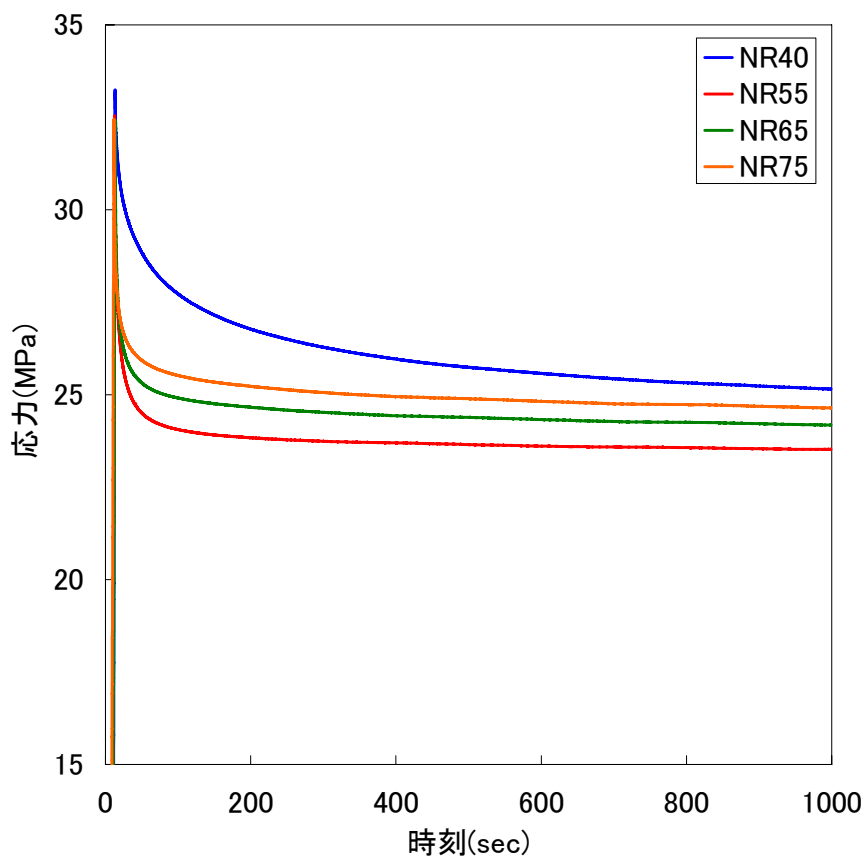


図-10.4 NR の 900 (N) 圧縮応力緩和

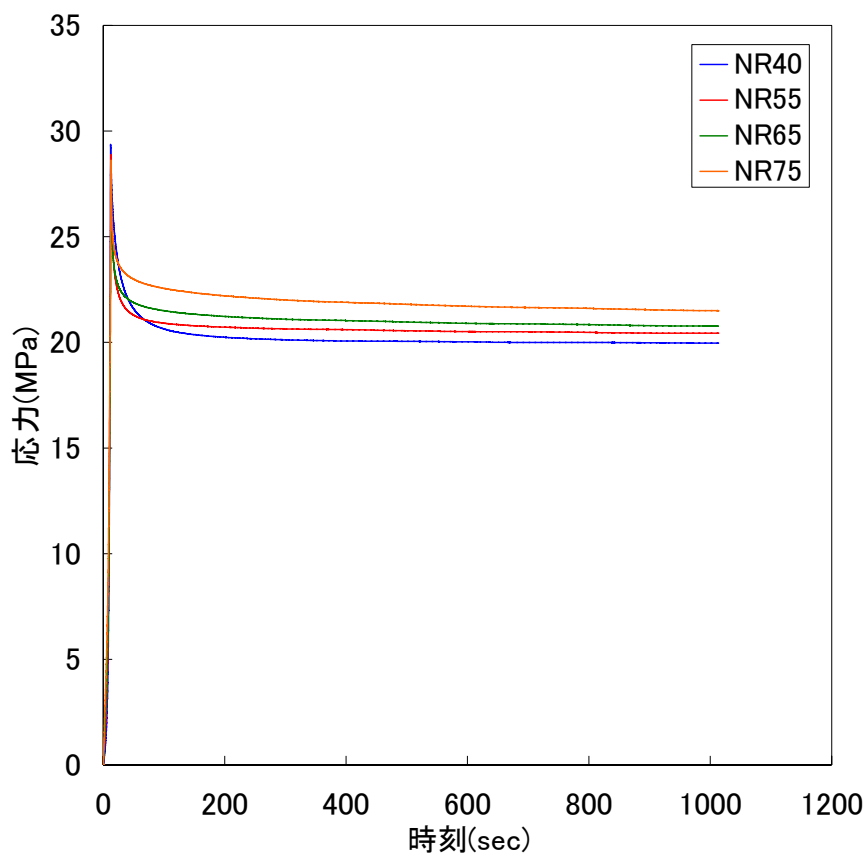


図-10.5 NRの800(N)圧縮応力緩和

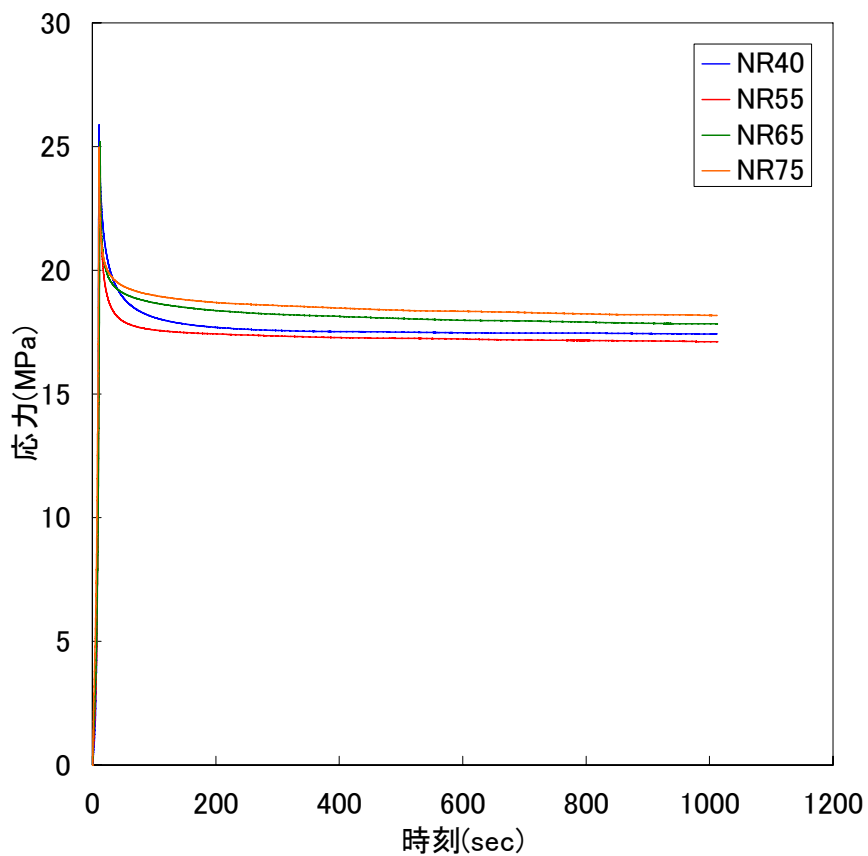


図-10.6 NRの700(N)圧縮応力緩和

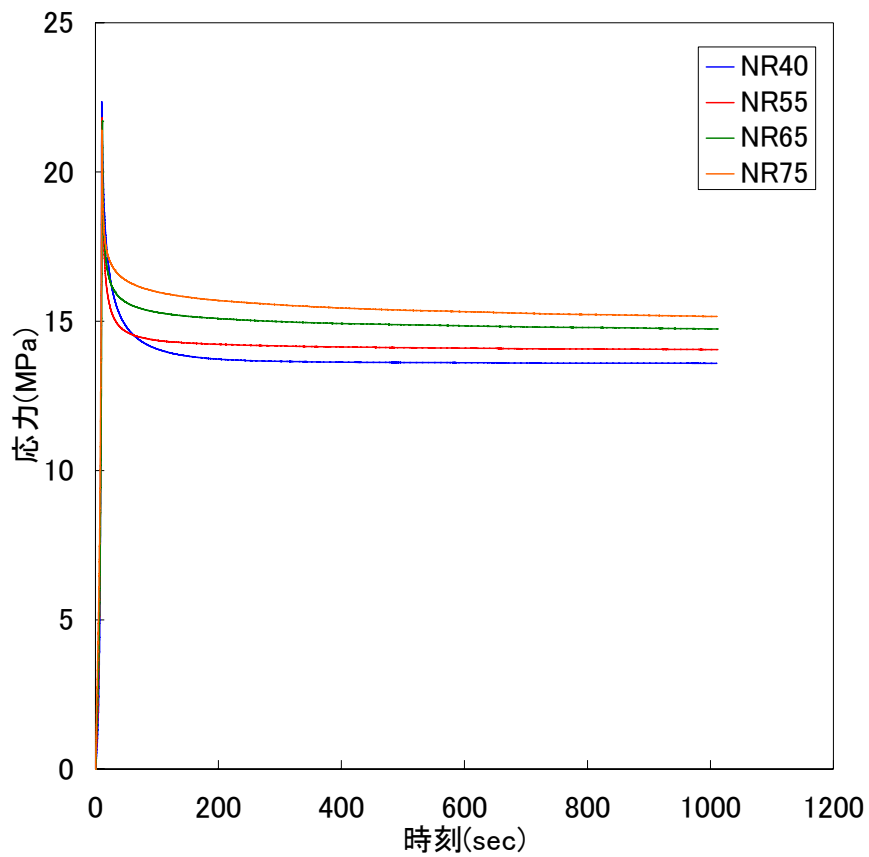


図-10.7 NRの600(N)圧縮応力緩和

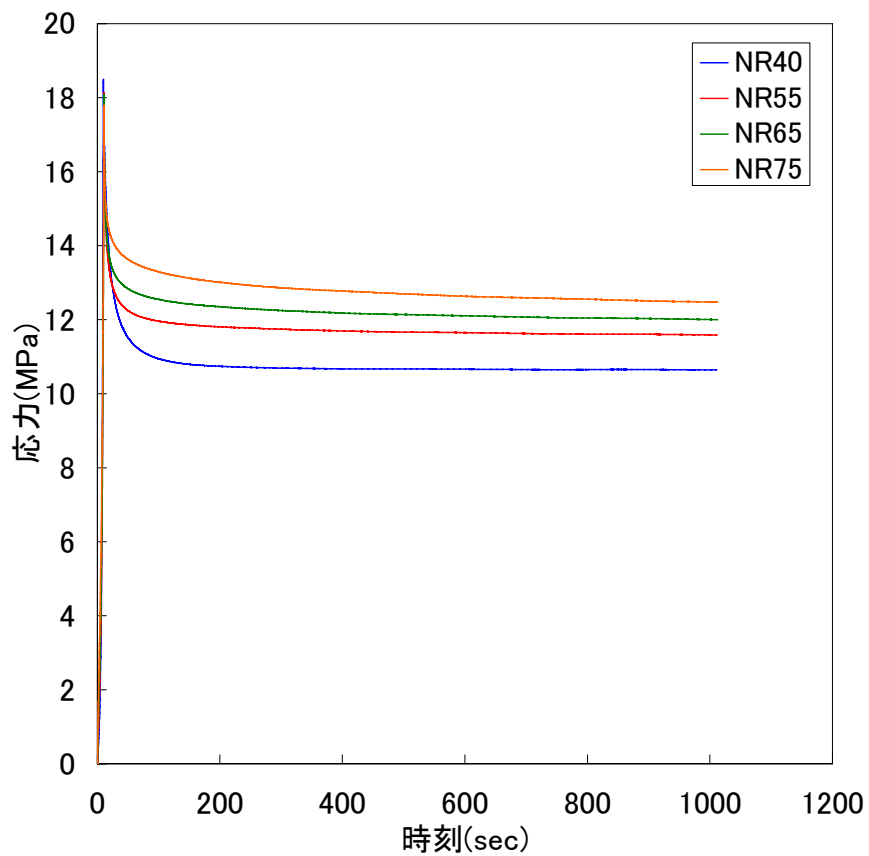


図-10.8 NRの500(N)圧縮応力緩和

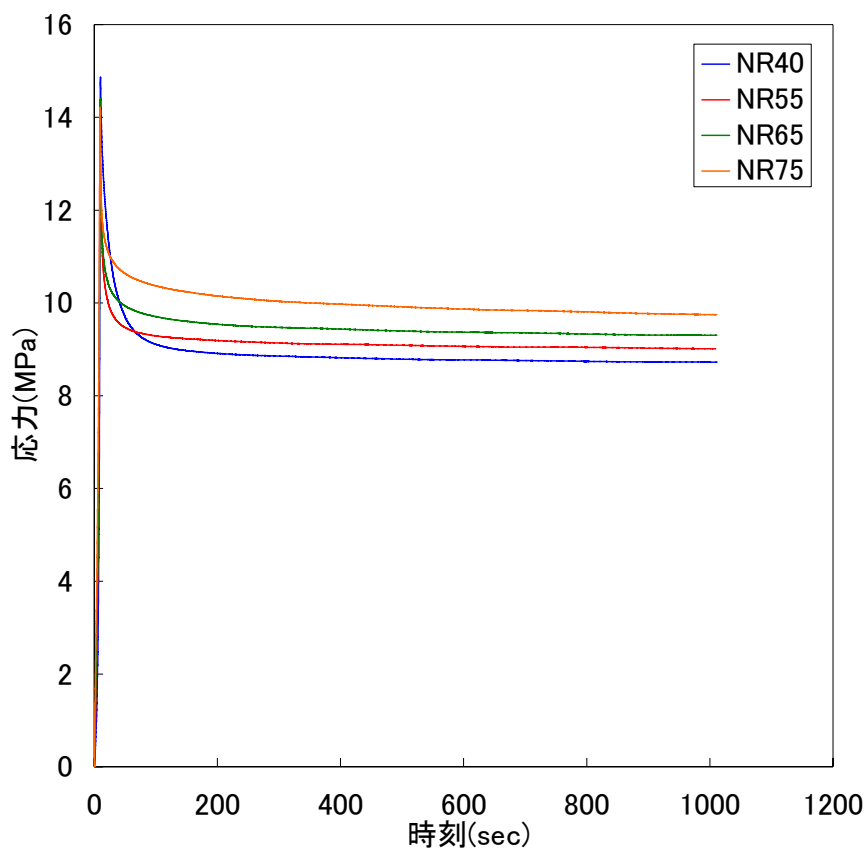


図-10.9 NRの400(N)圧縮応力緩和

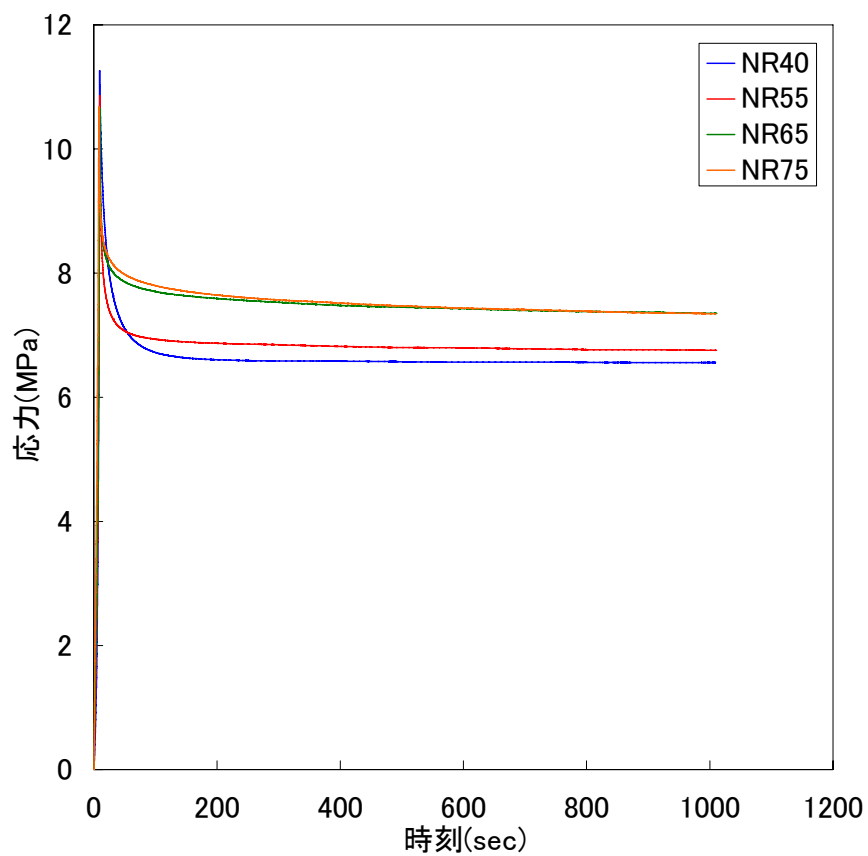


図-10.10 NRの300(N)圧縮応力緩和

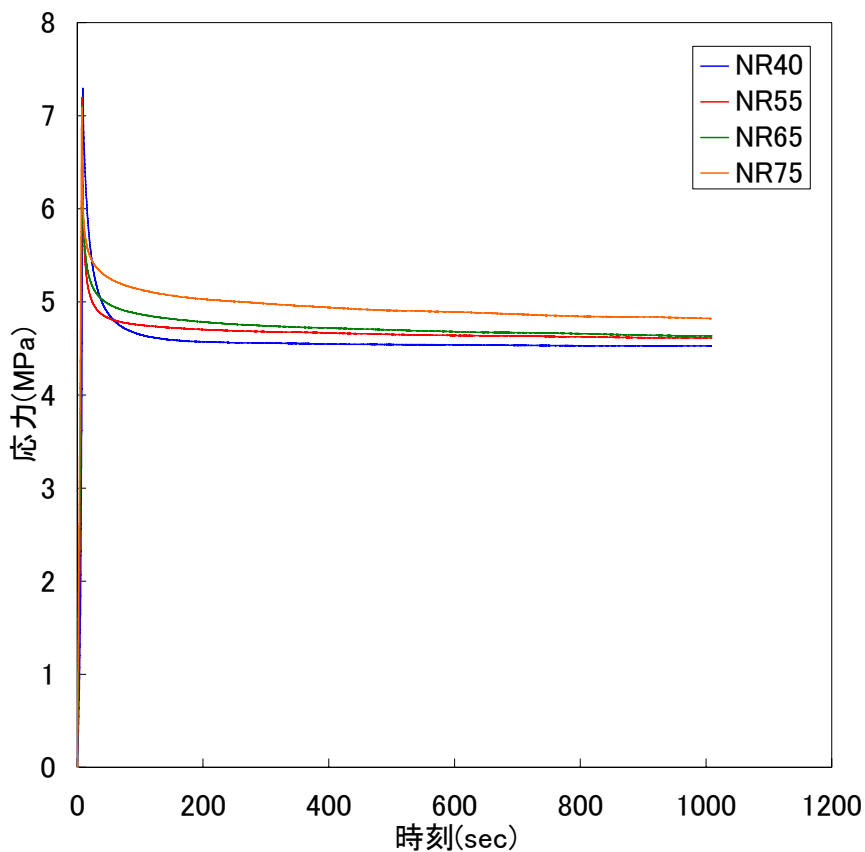


図-10.11 NRの200(N)圧縮応力緩和

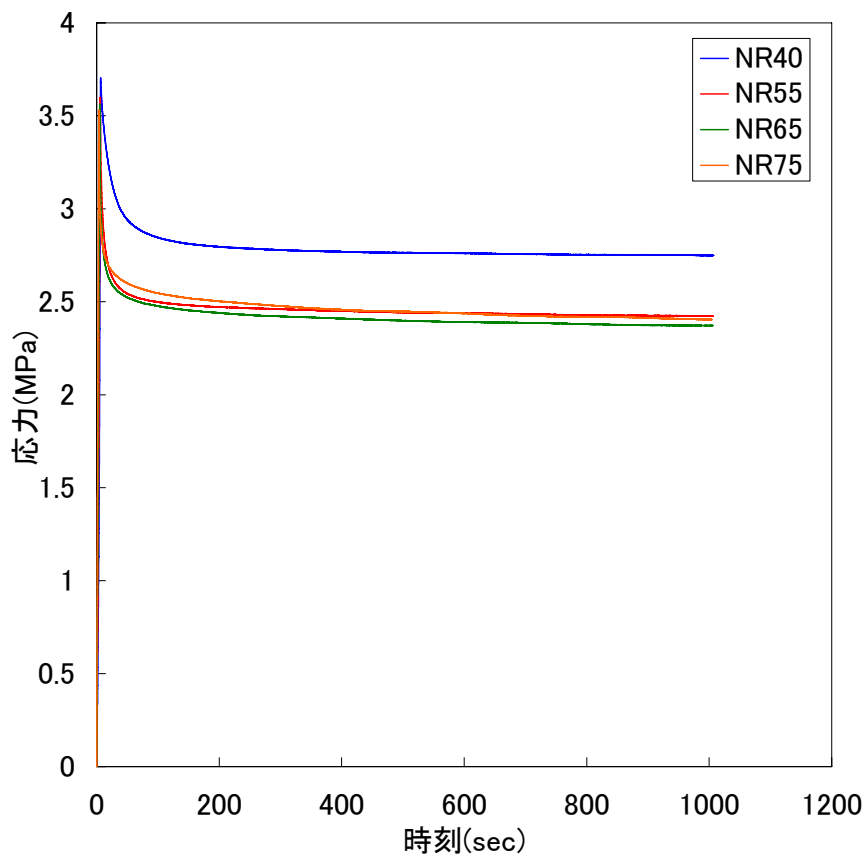


図-10.12 NRの100(N)圧縮応力緩和

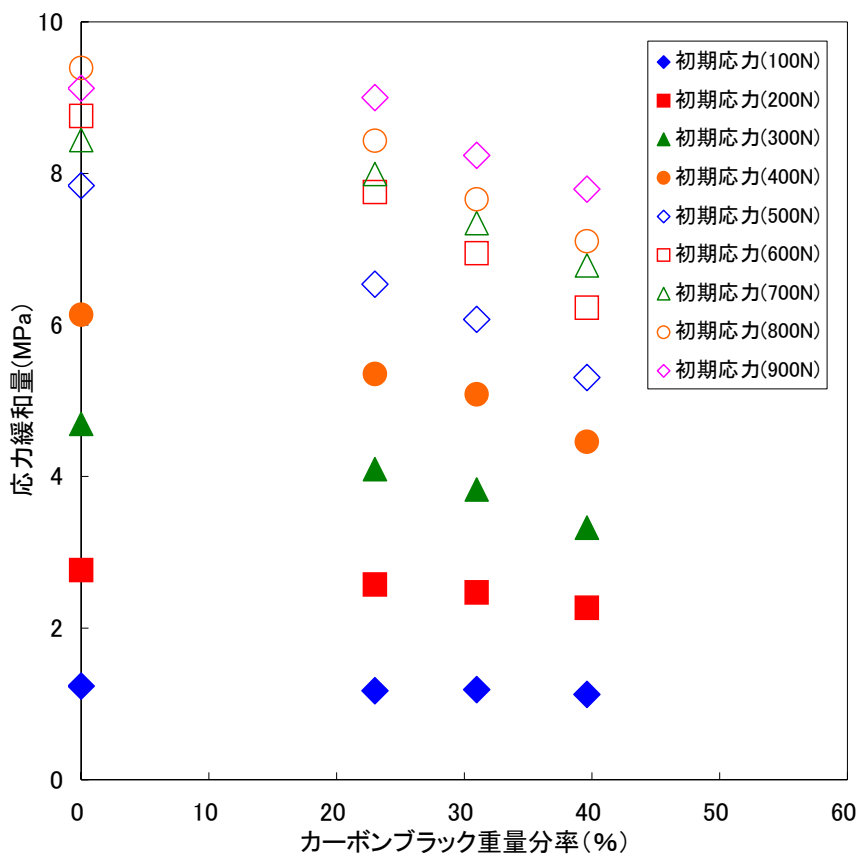


図-10.13 応力緩和量-カーボンブラック重量分率関係

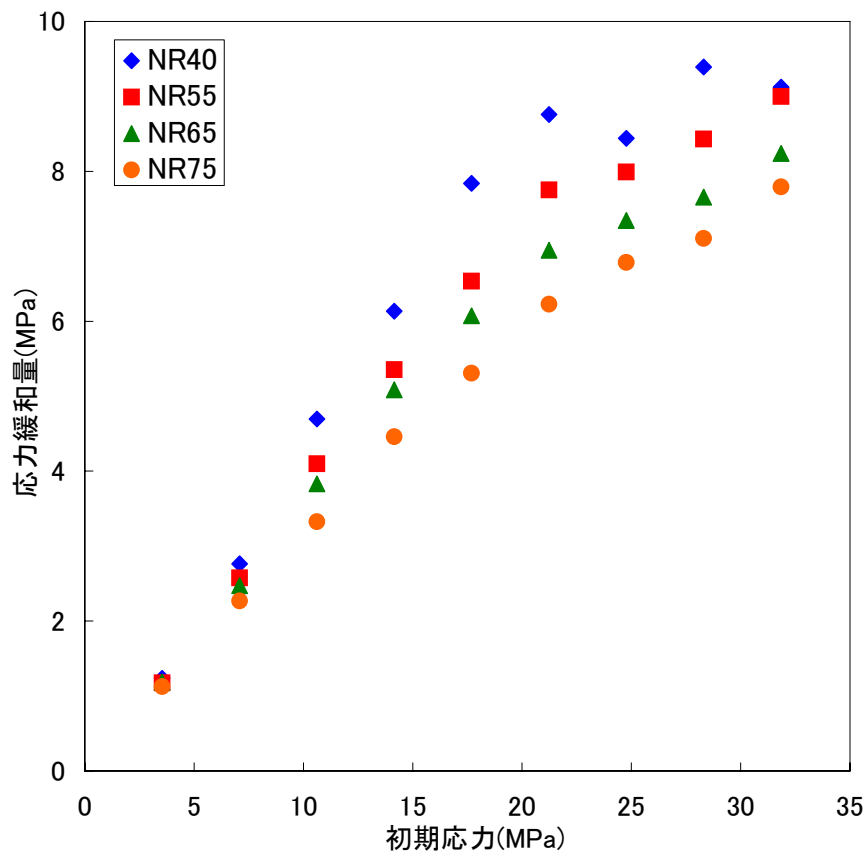


図-10.14 応力緩和量-初期応力関係

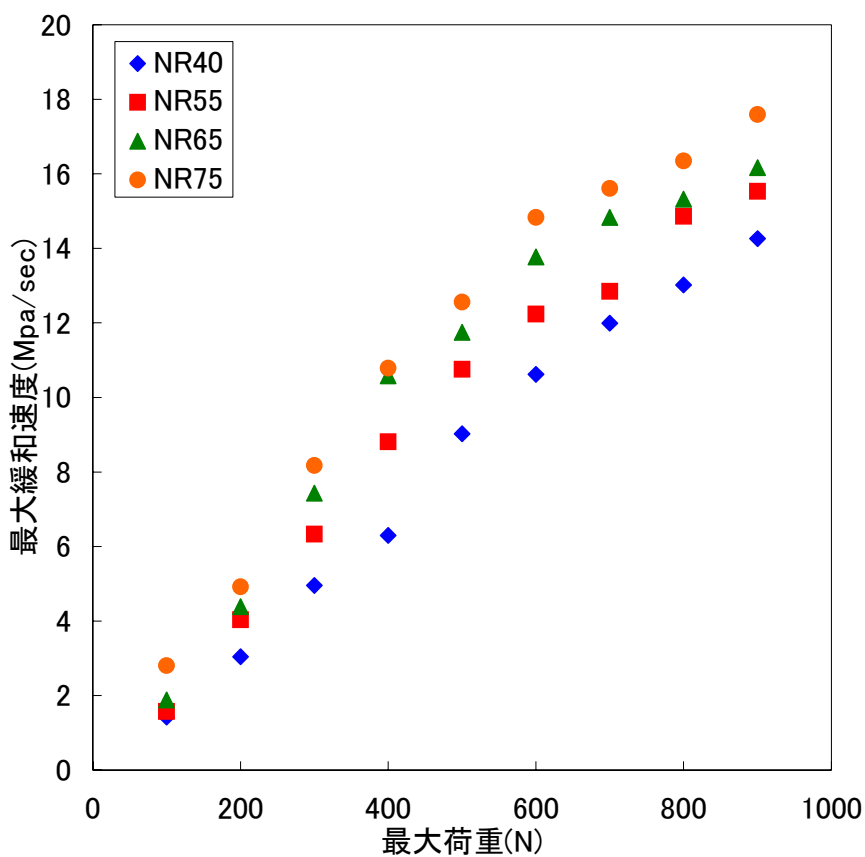


図-10.15 最大緩和速度-最大荷重関係

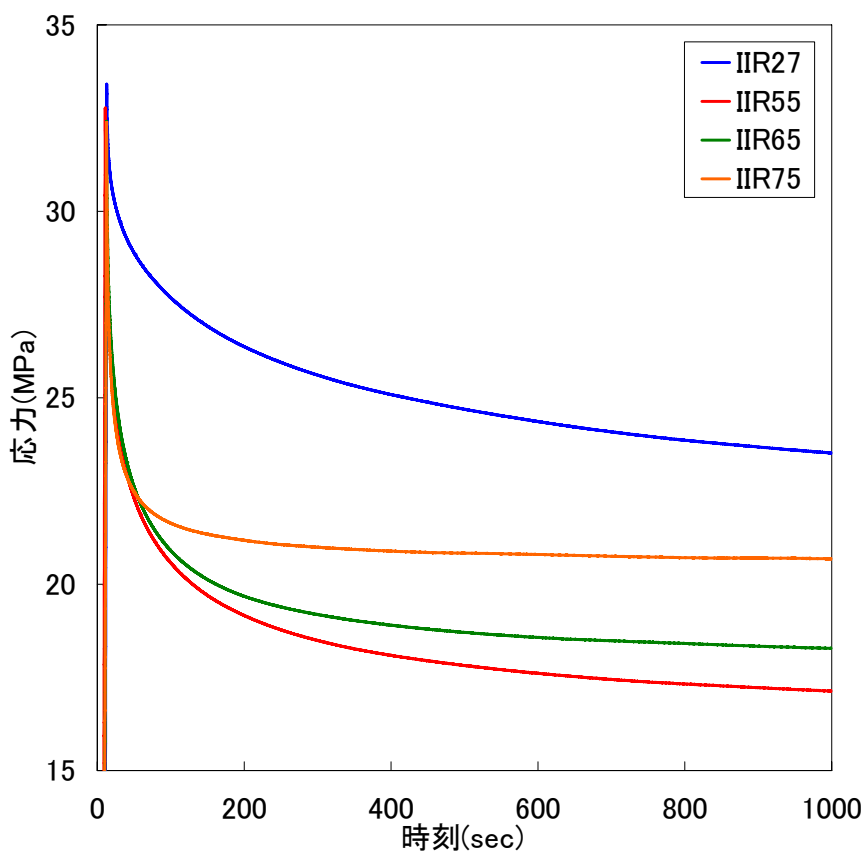


図-10.16 IIR の 900 (N) 圧縮応力緩和

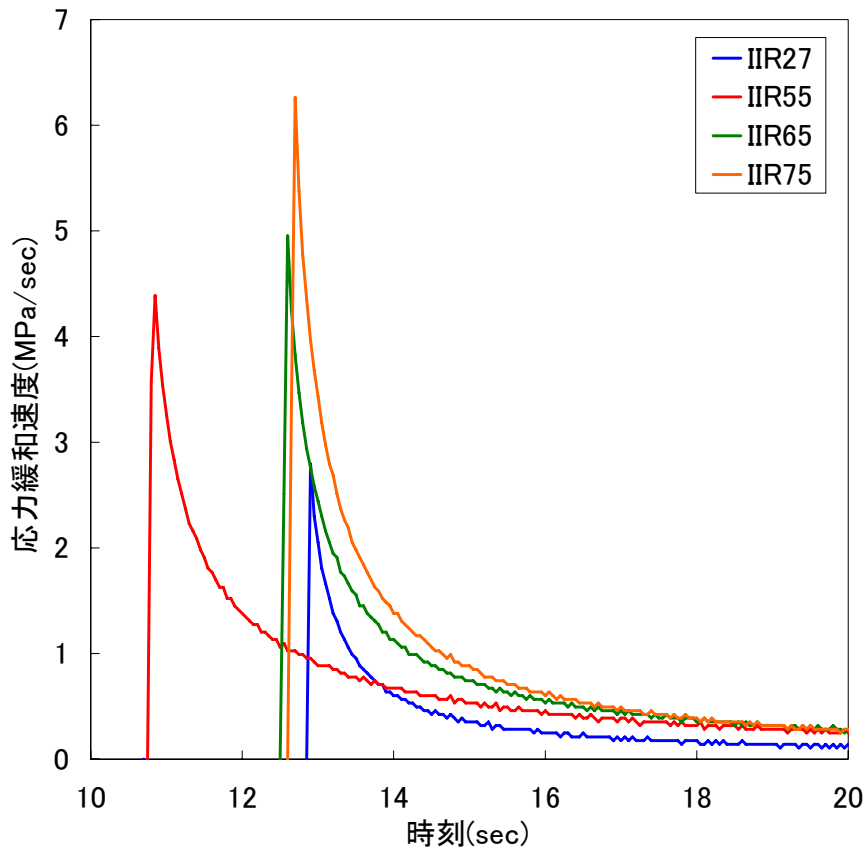


図-10.17 IIRの応力緩和速度-時刻関係

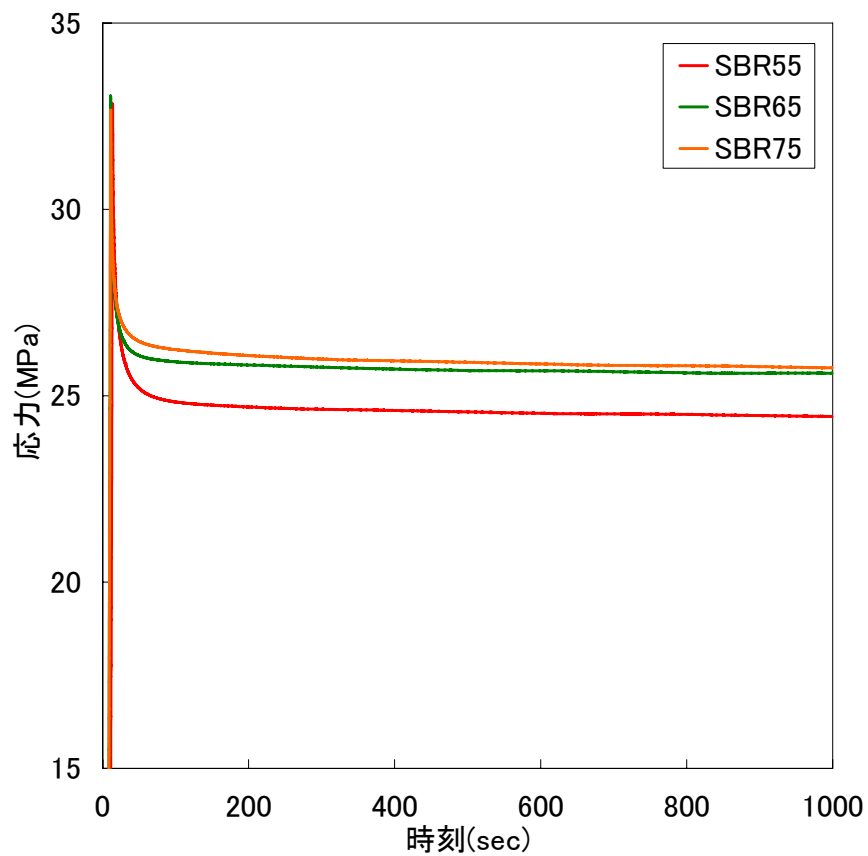


図-10.18 SBRの900(N)圧縮応力緩和

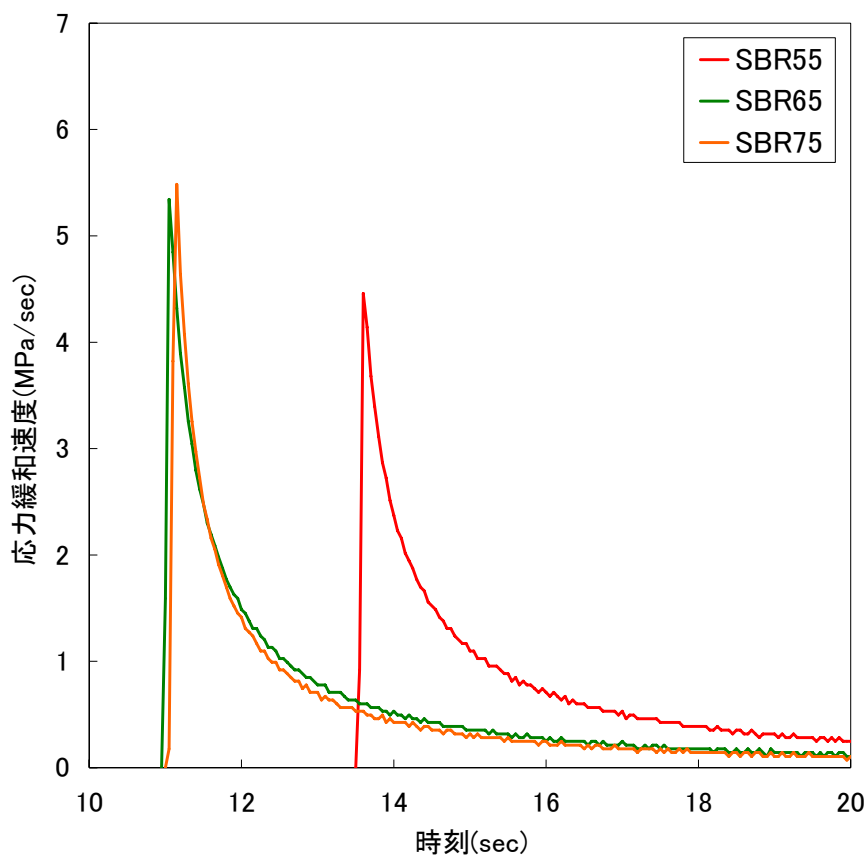


図-10.19 SBRの応力緩和速度-時刻関係

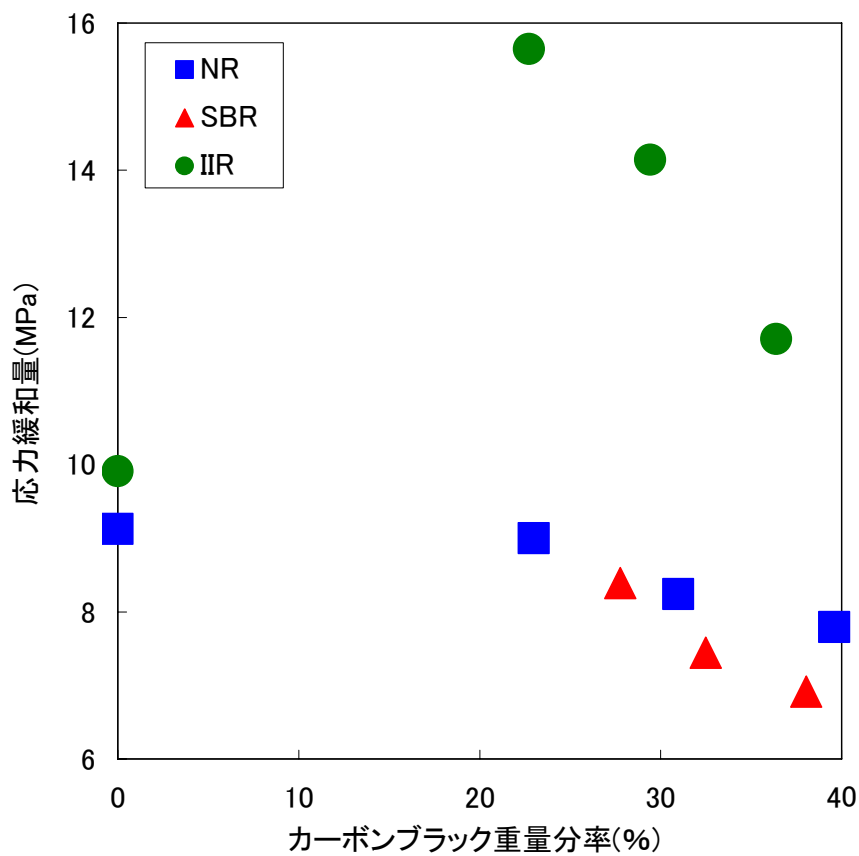


図-10.20 NR, SBR, IIRの応力緩和量-カーボンブラック重量分率 (900N)

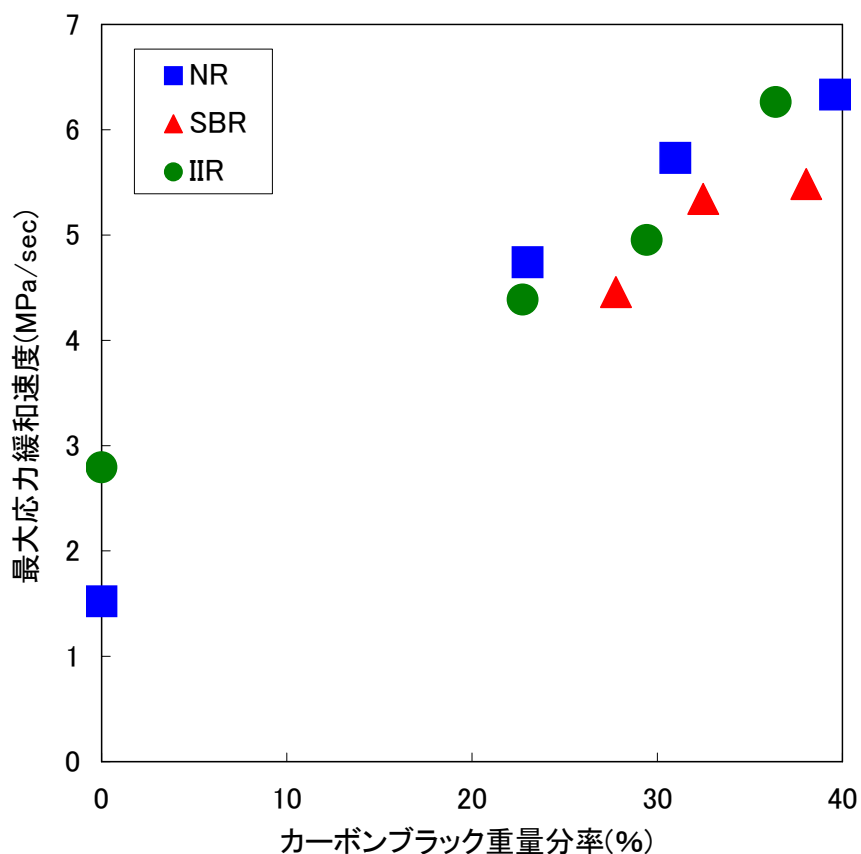


図-10.21 NR, SBR, IIR の最大緩和速度-カーボンブラック重量分率 (900 N)

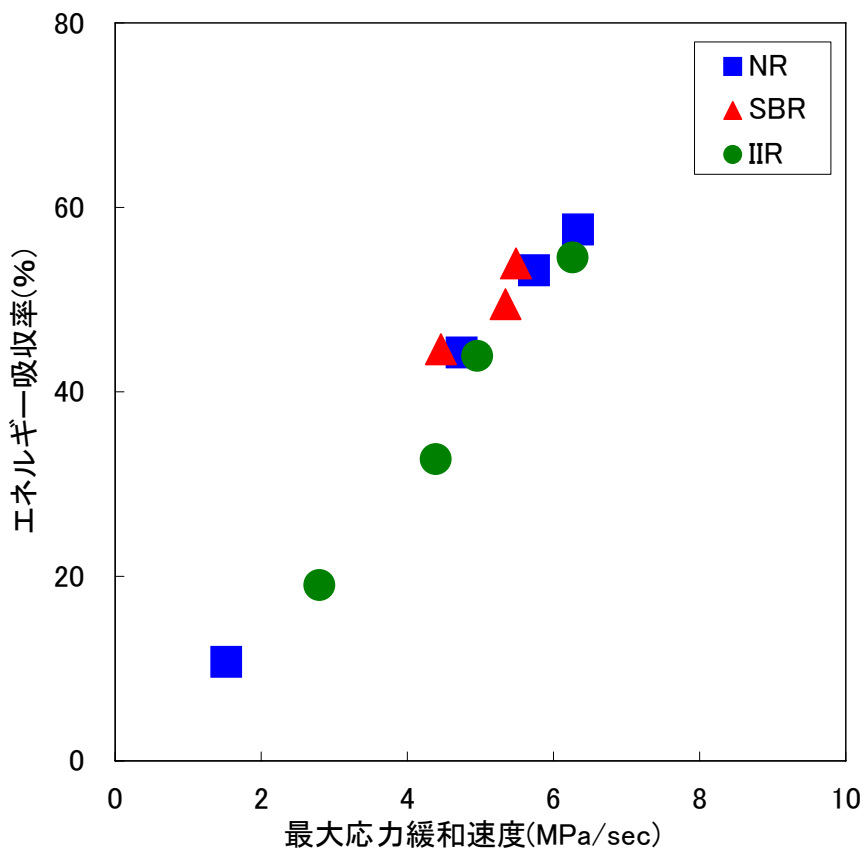


図-10.22 NR, SBR, IIR の最大緩和速度-エネルギー吸収率 (900 N)

10.6 考察

①NR-bandの引張試験による応力緩和

引張応力緩和試験の真応力と時刻の関係を図-10.2に示す。図-10.2からもわかるようにNR-bandは80000秒を過ぎてもまだ応力は緩和し続けていることがわかる。これは最大応力から緩和していき変化していく応力を引いた値 Δ 応力と時間の関係からもいうことができる。図-10.3からもわかる通り 10^5 秒においても Δ 応力は増加し続けていることから、応力が一定の値に収束していないといえる。これよりNR-bandの応力は経過時間に関係なく減少していくと考察することができる。よってエネルギー吸収に関連がある粘性成分と弾性成分とを、応力緩和試験によって分けることはNR-bandではできないと考察できる。

②NR(40, 55, 65, 75)の圧縮試験による応力緩和

圧縮応力緩和試験の真応力と時間の関係を図-10.4～図-10.12に示す。これからわかるように引張試験の応力緩和と比べて、1000秒程度で応力が一定の値に収束していることがわかる。これよりカーボンブラックが配合されるとゴムの弾性成分の依存が強くなり、粘性と弾性とを分けることができると考察できる。

③圧縮試験による応力緩和量に関する考察

図-10.13より、カーボンブラックの配合量が少ないゴムほど応力の緩和量が多いことが分かる。これから、ゴム支承や免震ゴムなど、長期間にわたって荷重が作用し続けるゴム製品について考えると、カーボンブラック配合量の少ないゴムではクリープ量が多くなり、カーボンブラック配合量の多いゴムではクリープ量が少なくなると考えられる。

④応力緩和速度・エネルギー吸収率に関する考察

図-10.15, 10.21からカーボンブラックの配合量、最大荷重が増加すると最大応力緩和速度が速くなることが分かる。また図-10.22より最大応力緩和速度が速くなるとエネルギー吸収率が高くなることがわかる。このことから応力が作用してから短時間のうちに応力を緩和するゴムはエネルギー吸収性に優れていると考えられる。衝突のように瞬間的な応力が作用する場合のエネルギー吸収性は、最大応力緩和速度を用いて評価できると考えられる。

⑤異なる種類によるゴムの比較に関する考察

NR, IIR, SBRの最大荷重900Nでの圧縮応力緩和試験による応力緩和量・最大緩和速度・エネルギー吸収率の関係を図-10.20, 10.21, 10.22に示す。これらから最大緩和速度、エネルギー吸収率に関してはNR, IIR, SBR共に同じ挙動を示していることから、ゴムの種類に関係はないことがわかる。しかし、図-10.20より応力緩和量に関してはNR, SBRに比べてIIRが大きな値を示していることがわかる。これよりIIRはNR, SBRよりも粘性成分が多くエネルギー吸収にすぐれていると考察できる。

10.7 結論

本研究では、引張・圧縮において応力緩和試験^{7,12)}を行った。測定された荷重をもとに、受圧面積から応力を計算することで応力の時刻歴変化を求め、応力緩和量、応力緩和速度、ゴムのエネルギー吸収性について考察した。その結果もとめられたことを以下に示す。

- ① NR-band の応力は経過時間に関係なく減少していく。
- ② NR-band は粘性成分と弾性成分を応力緩和試験によって分けることはできない。
- ③ カーボンブラックが配合すると粘性と弾性を分けることができる。
- ④ カーボンブラックの配合量が少ないゴムほど応力の緩和量が多い。
- ⑤ カーボンブラックの配合量、最大荷重が増加すると最大応力緩和速度が速くなる。
- ⑥ 最大応力緩和速度が速くなるとエネルギー吸収率が高くなる。
- ⑦ 短時間のうちに応力を緩和するゴムはエネルギー吸収性に優れている。
- ⑧ 応力緩和量は NR, SBR に比べて IIR が大きな値を示していることより、IIR はエネルギー吸収にすぐれている。
- ⑨ 最大緩和速度、エネルギー吸収率はゴムの種類に関係はない。

第 1 1 章

結論

第11章 結論

11.1 結論

本研究により明らかになったことを以下に示す.

- ① バンド状はゴムの大変形領域までの挙動をみることができることから, 簡便な応力-ひずみ関係を求めるにはバンド状が適している.
- ② 短冊状, ダンベル状は共にひずみ 100%以上からすべりが生じていることから, 実験データとして 100%までは信頼性があるといえる.
- ③ 短冊状に比べチャックで挟む面積の大きいダンベル状の方がより大きなひずみまでの挙動を見ることができる.
- ④ ゴムの応力-ひずみ曲線は非線形挙動でひずみ硬化型である. また, ゴムの弾性はエネルギー弾性とエントロピー弾性から成り, ひずみによって支配的になる弾性が変化する.
- ⑤ 引張速度が速いほど勾配 (真応力と真ひずみの傾き) が上昇する (硬くなっていく) ゴムの勾配の速度依存性を確認でき, 勾配 E は高ひずみの領域においてある速度を超えると一定の値に収束する.
- ⑥ 载荷速度, ひずみ速度が速くなるにつれてエネルギー吸収率が減少していく傾向があり, ゴムの高度が高くなるにつれてエネルギー吸収率が増加していく傾向がある.
- ⑦ カーボンブラックの配合量が多いと応力を緩和する速度が速くなる.
- ⑧ ひずみ速度が速くなると衝突の時間が短くなり, 応力の緩和量が少なくなる.
- ⑨ カーボンブラックの配合量の増加に伴い直線の傾きが急になっていき, 直線的になる範囲が狭くなっていく傾向がある.
- ⑩ Mooney-Rivlin式中の C_2 はカーボンブラックの配合量により変化し, C_2 の変化はカーボンブラックによる擬似的な架橋点の数に関係している.
- ⑪ 圧縮した際にはカーボンブラックによる擬似的な架橋点というものが考えられなくなる.
- ⑫ C_1 は硫黄による架橋を表している.
- ⑬ NR-band の応力は経過時間に関係なく減少していくことから, 粘性成分と弾性成分を応力緩和試験によって分けることはできない.
- ⑭ カーボンブラックの配合量が少ないゴムほど応力の緩和量が多い.
- ⑮ カーボンブラックの配合量, 最大荷重が増加すると最大応力緩和速度が速くなりエネルギー吸収率が高くなる.
- ⑯ 最大緩和速度, エネルギー吸収率はゴムの種類に関係はなく, 応力緩和量は NR, SBR に比べて IIR が大きな値を示していることより, IIR はエネルギー吸収にすぐれている.

謝辞

午前3時アメリカンフットボール部のミーティングが終わり、マテ研の扉を開けるといつも通り丸山先輩がパソコンと格闘していました。どんなに遅い時間でも、どんなに忙しい時でも、どんなにくだらない質問でも熱心に御指導していただいた丸山先輩いなくして自分の研究、いや、大学4年生の1年間は成り立たなかったと思います。

自分の4年間を振り返ってみると部活の2文字につき、それ以上でもそれ以下でもないように思います。ろくに頭も使わず、アメフト中心で3年間生活してきた自分が4年生になりいきなり研究などできるはずもなく、前期はただ悶々とした日々を過ごすばかりでした。後期になり、皆川先生・飯島先生の御厚意で研究の場をソフトマテリアル研究室に移し、他学科の学生にもふれ、辛いながらもとても充実した時間を過ごすことができました。

この論文を書くにあたって、あらためて1人では何もできない自分がある事の理解と同時に、自分の周りにはいっしょになって朝まで徹夜でがんばってくれる友、優しく指導してくれる先輩方、厳しくご指摘していただける先生方がいることに気づきました。自分が弱くてよかった、馬鹿でよかった、駄目野郎でよかった、1年間を通して本当にそう思います。たくさんの人のお力添えがあって、今こうして卒業論文を書いている自分はとても幸せ者だと感じております。

本研究を行うにあたり、ご多忙な中、皆川勝教授、吉田郁政教授、飯島正徳助教授、佐藤安雄技士には有益なご助言・ご指導を多数頂きましたことを深く感謝しております。更に、研究室の諸先輩方には日頃から様々な面でお世話になりましたことを感謝しております。また、共に卒業論文に取り組んだ4年生にも色々な面で助けられたことを感謝しております。その中でも特にアメリカンフットボール部・研究室と本当に4年間べったりと腐れ縁だったコウジ、ガースー、ケンゴには本当お世話になりました。ありがとう。

最後に小、中、高、浪人、大学と常に温かい目で見守ってもらい、愛情を注いでくれた両親にこの場を借りて篤く御礼申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

第1章 序論

- 1.1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996.12.
- 1.2)西本安志，梶田幸秀，石川信孝，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1865-1874，2000.3.
- 1.3)川島一彦，庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999.1.
- 1.4)西本安志，園田佳巨，石川信隆，彦坂熙，西川信二郎：落橋防止用矩形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.335-360，2001.10.
- 1.5)村上謙吉：レオロジー基礎論，産業図書，1993.2.

第2章 落橋防止システム及び落橋防止用緩衝材

- 2.1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12.
- 2.2)土木学会関西支部：緩衝型落橋防止システムに関する調査研究，土木学会関西支部講習会テキスト，2001.7.

第3章 ゴム製緩衝材・ゴム支承に関する研究の紹介

- 3.1)川島一彦，庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.129-142，1999.1.
- 3.2)庄司学，川島一彦，Anat Ruangrassamee，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：桁間衝突の影響に対するゴム製緩衝装置の有効性に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.45A，pp.891-902，1999.3.
- 3.3)皆川勝，藤谷健，高寄太一，長嶋文雄：ゴム又は鋼管製緩衝装置を有する免震橋の地震時挙動に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第8巻，pp.163-170，2000.11.
- 3.4)皆川勝，藤谷健：ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.343-353，2001.10.
- 3.5)園田佳巨，衛藤芳昭，石川信隆，生駒信康，彦坂熙：ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察，土木学会論文集，No.598/I-44，333-346，1998.7.
- 3.6)潤田久也，川島一彦，庄司学，須藤千秋：高面圧を受ける直方体ゴム製耐震緩衝装置の圧縮特性の推定法に関する研究，土木学会論文集，No.661/I-53，pp.71-83，2000.10.
- 3.7)西本安志，梶田幸秀，石川信孝，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1865-1874，2000.3.
- 3.8)越峠雅博，運上茂樹，足立幸郎，長屋和宏：弾塑性型特性を有する円筒型ゴム製緩衝装置の衝撃緩衝効果に関する実験研究，土木学会論文集，No.689/I-55，pp.99-112，2001.4.
- 3.9)村田清満，高山智弘，後藤貴士，山田正人，生駒信康，浮島徹：エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.275-288，2001.10.

参考文献

- 3.10) 園田佳巨, 西本安志, 石川信隆, 彦坂熙: 落橋防止用矩形状ゴム製緩衝材の性能評価法に関する基礎的考察, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp215-224, 2001.10.
- 3.11) 西本安志, 園田佳巨, 石川信隆, 彦坂熙, 西川信二郎: 落橋防止用矩形状ゴム緩衝材の設計法に関する一考察, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp335-360, 2001.10.
- 3.12) 杉本博之, 溝江実, 山本吉久, 池永雅良: 天然ゴム支承の低温耐候性に関する研究, 土木学会論文集, No.693/VI-53, pp73-86, 2001.12.
- 3.13) 潤田久也, 山崎智之, 大島俊之, 中村昌弘: 寒冷地気温変動下における高減衰ゴム支承材内部温度の応答確認実験及び数値解析, 土木学会論文集, No.773/I-69, pp113-123, 2004.10.
- 3.14) 鈴木英世, 間山正一, 竹内幹雄, 朝倉正雄: フェライト混練高減衰積層ゴムの開発, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp101-109, 1991.8.

第4章 ゴムの種類と配合

- 4.1) 小松公栄: ゴムのおはなし, 日本規格協会, 2002.4.
- 4.2) 株式会社ブリヂストン: ブリヂストンの概要, 株式会社ブリヂストン, 2006.12.
- 4.3) 横浜ゴム株式会社ホームページ: 役立つ基礎知識 第四回, <http://www.yrc.co.jp/mb-techno/use/>
- 4.4) 国澤新太郎ら: ゴム材料選択のポイント, 日本規格協会, 1979.8.
- 4.5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 1996.12.
- 4.6) 古谷正之, 国澤新太郎: ゴム技術ガイドブック, 日刊工業新聞社, 1969.7.
- 4.7) 日本ゴム協会: ゴム技術の基礎, 日本ゴム協会, 1995.5.
- 4.8) 日本ゴム協会: 日本ゴム協会誌 ゴム補強の化学 6 講 pp424-428, 日本ゴム協会, 2003.11.
- 4.9) 日本ゴム協会: ゴム技術入門, 丸善, 2006.4.
- 4.10) L.E.Nielsen: 高分子と複合材料の力学的性質, 化学同人, 1976.
- 4.11) 梅本石油(株)ホームページ: カーボンブラックの構造, http://www.umeoil.com/products_ink_carbon.html

第5章 ゴム弾性とゴムの静的粘弾性挙動

- 5.1) 久保亮五: ゴム弾性, 河出書房, 1952.4.
- 5.2) 西敏夫, 長谷川正木: 高分子基礎科学, 昭晃堂, 2002.3.
- 5.3) 根本紀夫, 高原淳: 高分子の力学物性, 共立出版, 1996.6.
- 5.4) 村上謙吉: レオロジー基礎論, 産業図書, 1993.2.
- 5.5) 米沢富美子: ブラウン運動, 共立出版, 1989.10.
- 5.6) 梶山正登: 物理学概論(上巻), 日刊工業新聞社, 1991.2.
- 5.7) L.R.G.Treloar: 高分子化学入門, 共立出版, 1976.11.
- 5.8) 日本ゴム協会: ゴム技術入門, 丸善, 2006.4.
- 5.9) 日本ゴム協会: ゴム技術の基礎, 日本ゴム協会, 1995.5.
- 5.10) G.Strobl: 高分子の物理, シュプリンガー・フェアラーク東京, 1998.10.
- 5.11) 近角聡信: 強磁性体の物理(上), 裳華房, 1984.7.

第6章 ゴムの動的粘弾性挙動

- 6.1)村上謙吉：レオロジー基礎論，産業図書，1993.2.
- 6.2)佐伯千歳：熱分析セミナーInfo-Days2004 資料，METTLER TOLEDO 株式会社，2004.2.
- 6.3)戸原春彦ら：防振ゴム，日本鉄道車輛工業会，1975.8.
- 6.4)日本ゴム協会：ゴム技術入門，丸善，2006.4.
- 6.5)日本熱測定学会：熱量測定・熱分析ハンドブック，丸善，1999.10.
- 6.6)小野木重治：化学者のためのレオロジー，化学同人，1990.7.
- 6.7)L.W.Hamley：ソフトマター入門，シュプリンガー・フェアラーク東京，2002.10.
- 6.8)村田昌祥，丸山健司，長田剛，飯島正徳，皆川勝：熱量測定によるゴムのエネルギー吸収性の評価に関する研究，構造工学論文集，Vol.52A，pp.547-556，2006.3.

第7章 引張試験

- 7.1)飯塚博，山下義裕：ゴム材料の力学特性と FEM 解析への利用，日本ゴム協会誌，vol77，pp306-311，2004.9
- 7.2)村上謙吉：レオロジー基礎論，産業図書，1993.2.
- 7.3)吉川弘道：鉄筋コンクリートの設計，丸善，2003.6.

第8章 圧縮試験

- 8.1) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの設計，丸善，2003.6.
- 8.2) 日本ゴム協会：ゴム技術入門，丸善，2006.4.

第9章 フィッティング

- 9.1)飯塚博，山下義裕：ゴム材料の力学特性と FEM 解析への利用，日本ゴム協会誌，vol77，pp306-311，2004.9
- 9.2)村上謙吉：レオロジー基礎論，産業図書，1993.2.
- 9.3) 日本ゴム協会：ゴム技術入門，丸善，2006.4.

第10章 応力緩和

- 10.1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996.12.
- 10.2)Macromolecules 2004：A Model Treating Tensile Deformation of Semicrystalline Polymers 2004

付録

- 付録.1 2006.6.28 建設情報マネジメント研究室 第1回中間発表 概要
- 付録.2 2006.6.28 建設情報マネジメント研究室 第1回中間発表 Power Point
- 付録.3 2006.8.21 建設情報マネジメント研究室 第2回中間発表 概要
- 付録.4 2006.8.21 建設情報マネジメント研究室 第2回中間発表 Power Point
- 付録.5 2006.11.11 建設情報マネジメント研究室 第3回中間発表 概要
- 付録.6 2006.11.11 建設情報マネジメント研究室 第3回中間発表 Power Point
- 付録.7 2007.1.9 建設情報マネジメント研究室 第4回中間発表 概要
- 付録.8 2007.1.9 建設情報マネジメント研究室 第4回中間発表 Power Point
- 付録.9 2006.10.10 ソフトマテリアル研究室 第1回中間発表 Power Point
- 付録.10 2006.12.7 ソフトマテリアル研究室 第2回中間発表 概要
- 付録.11 2006.12.7 ソフトマテリアル研究室 第2回中間発表 Power Point
- 付録.12 2006.12.28 ソフトマテリアル研究室 第3回中間発表 概要
- 付録.13 2006.12.28 ソフトマテリアル研究室 第3回中間発表 Power Point
- 付録.14 2007.2.19 卒業論文発表会 概要
- 付録.15 2007.2.19 卒業論文発表会 Power Point

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究

学生氏名 河野 学

指導教員 皆川 勝 吉田 郁政

1. 研究背景

兵庫県南部地震の甚大な被害から橋梁に対する免震設計が採用されるようになったが、免震橋では橋桁の応答変位が大きくなるため、桁と橋台間及び隣接桁間にかかる衝撃も大きくなる恐れがある。

本研究では衝突時に作用する衝撃荷重を緩和するための緩衝装置に着目し設置コストやメンテナンス費用を考慮してゴムを併用した鋼管を緩衝材として用いる。鋼管は低コストでエネルギー吸収性に優れ、ゴムは衝突力の低減効果があり、鋼管にゴムを巻きつける形（写真-1）であれば鋼管圧壊後も緩衝材として機能し、変形後に形状が復元する特性から繰り返し衝突に対しても緩衝効果を保持できる。小・中規模の地震の変位に対しては、落橋防止装置用緩衝材の弾性範囲の変形で吸収させ、大規模地震に対しては、緩衝材の損傷を許容し、降伏後の塑性変形によって桁の運動エネルギーを吸収させる。これにより、落橋防止構造及び橋梁における他の構造部材の損傷を防ぎ、かつ上部構造が桁かかり長に達するような運動を制限することができる。さらに、地震後には速やかに復旧できることから合理的といえる。皆川ら¹⁾は、緩衝装置に静的載荷実験を施し、ゴム管及び鋼管の基本特性から推定する荷重変位関係のモデルを構築した。



写真1 ゴム鋼併用型緩衝材

2. 皆川らによる、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置を有する免震橋の動的応答解析に関する問題点

- ① 今まで考慮していなかった繰り返し荷重に対しての緩衝材の応答。
- ② 静的載荷実験、落錘式衝撃実験だけではなく、動的載荷実験をおこなう必要がある。
- ③ 橋軸方向のみの緩衝だけを考えているので、それ以外の方向に対する緩衝も考える。
- ④ 緩衝装置の設置方法について考える。

3. 目的

ゴム鋼併用型緩衝材は、衝撃荷重の低減効果と衝撃エネルギーの吸収性に優れ、地震発生時には緩衝材としてその性能が期待される。ゴム鋼併用型耐震緩衝材を高架橋を構成する一つの要素として考え実用的に用いるには、緩衝装置のエネルギー吸収性、コスト、耐衝撃性、繰り返し衝突に対しての緩衝効果、2段階設計法としての働きを検討する必要がある。

後藤らが構築したモデルでは、緩衝材に静的載荷実験を施した結果を用いて構築している。しかし、ゴム鋼併用型耐震緩衝材を実橋に設置するためには、動的な荷重が作用する際の荷重 - 変位関係、繰り返し荷重が作用する際の荷重 - 変位関係を把握する必要がある。本研究は、今までにおこなわれた静的載荷・衝撃載荷試験に加え動的載荷試験・繰り返し載荷試験よりその基本的な性能を把握し、緩衝材としての有効性を検討していく。今回はゴム製緩衝材に関する文献を調査し、その知識を深めることを目的とした。

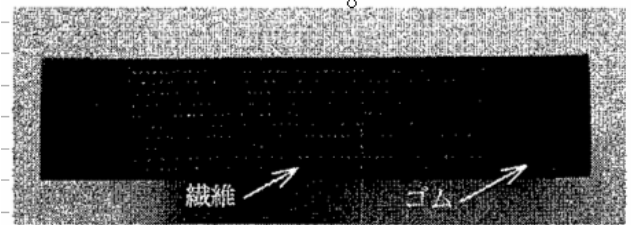
4. ゴム製緩衝材に関する文献調査

1) 積層繊維補強ゴムを用いた緩衝材

西本²⁾らは積層繊維補強ゴムを用いた緩衝材の開発を行っている。積層繊維補強ゴムは通常のゴムよりも高い

剛性を示し、繊維が破断する現象を降伏点と定義することができている。延性的な圧縮挙動を示し、さらには通常のゴムよりも高いエネルギー吸収性能を示している。積層繊維補強ゴムの衝撃低減効果や衝撃時のエネルギー吸収量を、落錘式衝撃実験により測定し評価をこの研究で行われている。そして、緩衝材を介して落橋防止構造に伝達される荷重を、静的・高速載荷実験から得られる荷重-変位関係をもとに予測している。

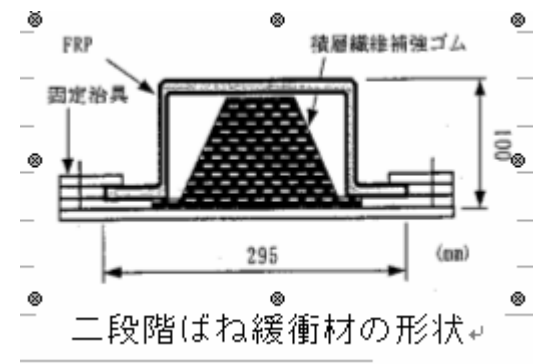
荷重低減効果について、落錘の入力エネルギーが小さい時には高剛性であるために通常のゴムよりも期待できないとされている。逆に繊維が破断する大きな入力エネルギーのもとでは低減効果はかなり発揮されている。このように、埋設繊維の荷重低減効果を犠牲にすることができれば、通常のゴムよりも有用な緩衝材となるといえる。しかし、埋設繊維の本数や強度等が変化することによって、圧縮特性は大きく変化するため、実際の落橋防止システムに適用するにあたっては、積層繊維補強ゴムの材料緒元の決定法を確立する必要となる



積層繊維補強ゴムの断面写真

2) 二段階ばね緩衝装置

この研究では、装置の初期剛性を大きくするための剛構造要素と、エネルギー吸収性能を高めた柔構造要素からなる二段階ばね構造がいいとしている。小・中地震時では外殻で桁移動を力で抵抗、大地震時では外殻を破壊して内部のエネルギー吸収性能の高い柔構造で衝撃力を緩和させる構造としている。ちなみに、本研究ではこの場合と逆で、外側に柔なゴムを配し、大地震時のみで内側の剛である鋼管を破壊させてエネルギー吸収を図り、衝撃力を緩和する仕組みとなっている。この研究で設置を考慮している場所としては鋼鉄道橋で、落橋防止工を容易なものとするために、小型化を目指している。このことも考慮して動的解析・動的



二段階ばね緩衝材の形状

載荷実験を試みている。結果より、二段階ばね緩衝装置は、桁の水平変位を抑制しつつもエネルギー吸収効果によって桁からの作用を低減できること、橋脚基部の塑性化を抑制することが可能であることが確認されている。落錘式衝撃実験においても、衝撃力の低減効果が示されている。

5. 今後の展開

- ・実験棟、試験機の使い方を憶える。
- ・繰返し載荷実験・動的載荷実験をおこない基本的な性能を把握していく。
- ・設置形状や個数といった細かい部分も含めた検討をおこなっていく。
- ・論文調査を引き続き行ない、改善されていない問題点を検討する。

参考文献

- 1) 皆川勝, 石黒聡, 後藤学: ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の荷重-変位関係の更新と衝撃荷重への対応性
- 2) 西本安志, 梶田幸秀, 石川信孝, 西川信二郎: 落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1865-1874, 2000.3
- 3) 村田清満, 高山智弘, 後藤貴士, 山田正人, 生駒信康, 浮島徹: エネルギー吸収機能を有する落橋防止装置による耐震補強効果, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.275-288, 2001.10

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の 開発に関する研究

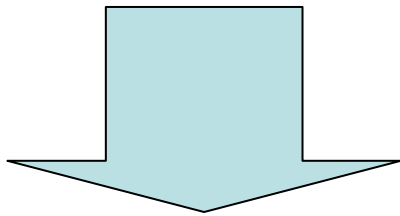
建設情報マネジメント研究室

学生氏名 河野 学

指導教員 皆川 勝

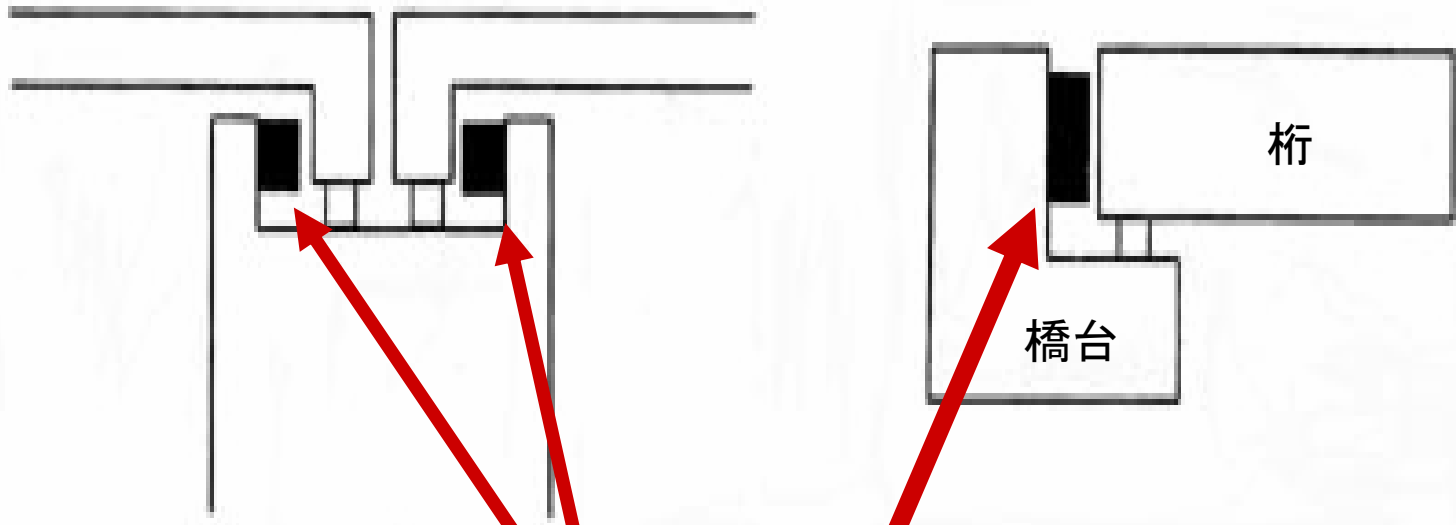
研究背景

- 大地震時では、隣接する桁間、桁と橋台間で高いレベルの衝撃エネルギーを持つ衝突が作用する
- 桁・橋脚が損傷し、落橋につながる

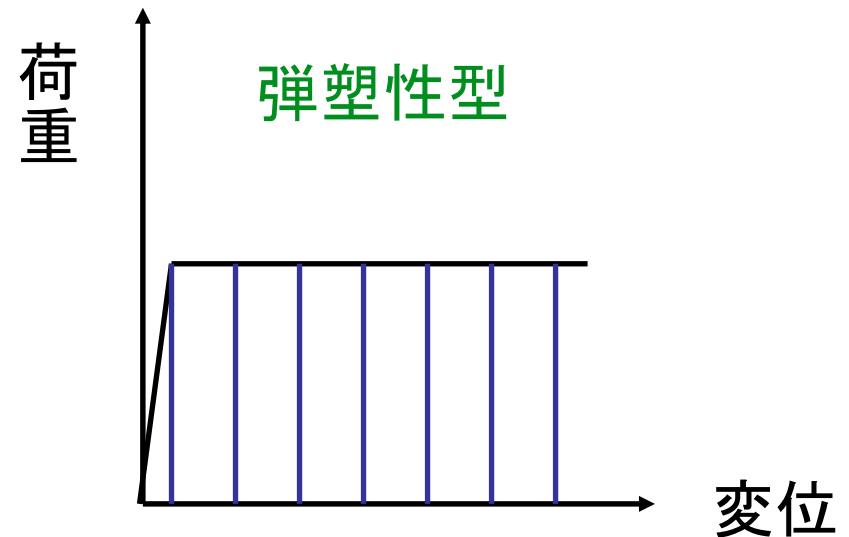
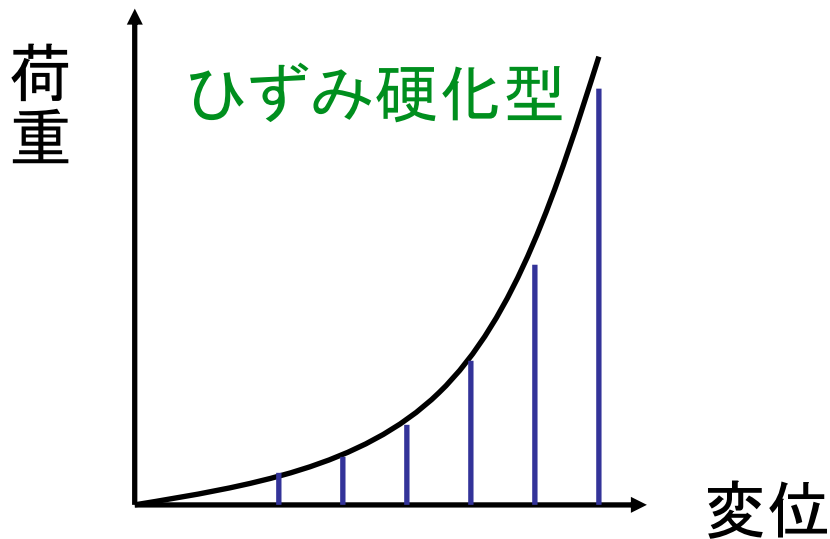


- ・人的被害
- ・交通麻痺→復旧活動の遅延

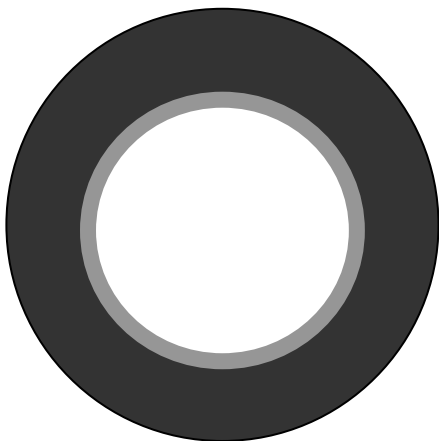
衝撃を緩和する**緩衝装置**が必要となる



緩衝装置



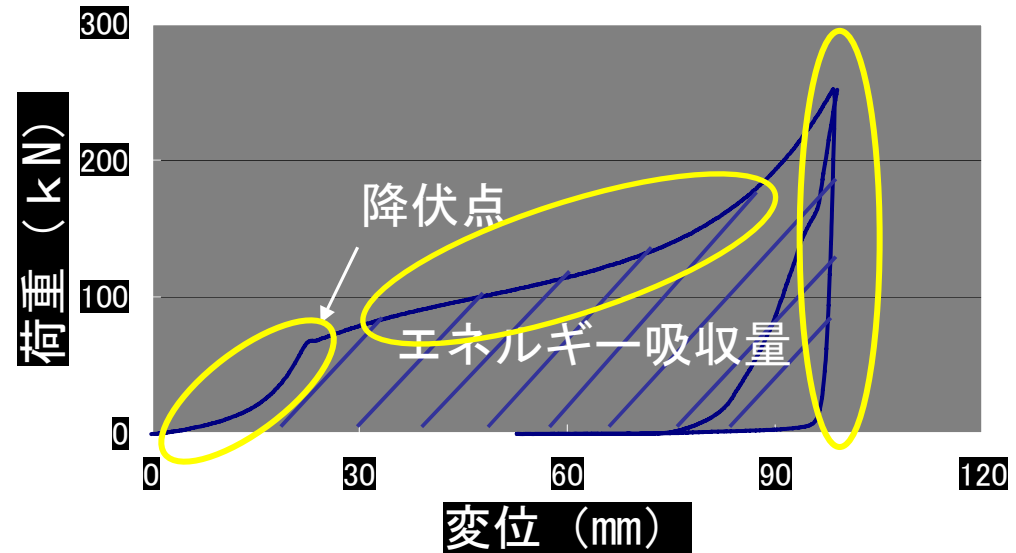
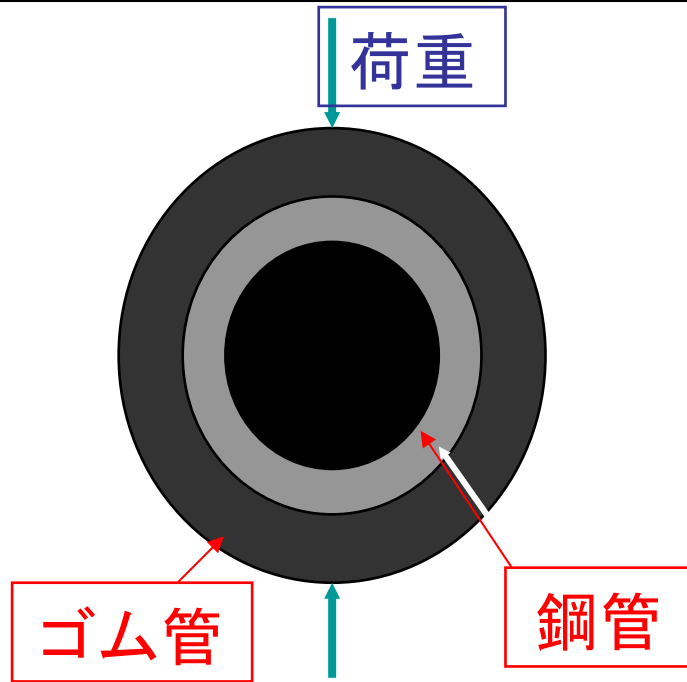
桁の衝撃エネルギーの吸収性能
桁同士、桁と橋台の衝撃荷重の低減効果



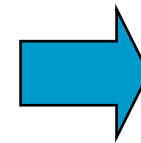
- 高いエネルギー吸収性能
→ 鋼管
- 衝撃荷重の低減効果
- 繰り返し衝突
→ ゴム管

ゴムを併用した鋼管について

本研究では、落橋防止装置用緩衝材としてゴムを併用した鋼管を用いることに着目した



- ・ 中小の地震→ゴム管のみでエネルギーを吸収
- ・ 大地震→ゴム管と鋼管を併用してエネルギーを吸収



二段階設計
が可能 5

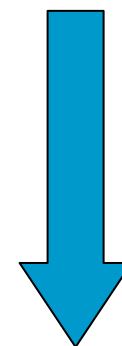
落橋防止構造・緩衝材に関する研究

- ・落橋防止構造を、高架橋を構成する1つの要素として考え、大地震時における落橋防止構造にある高架橋全体の損傷低減効果に着目したもの。
- ・落橋防止構造および緩衝材の力学挙動そのものに着目したもの

実橋に設置
現象の把握



無理



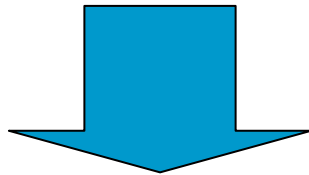
構造全体の
解析



各部材レベルで
実験・解析

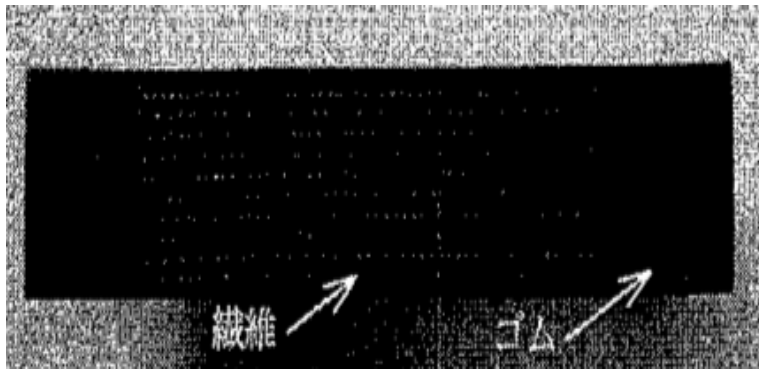
目的

- ・問題点の明確化
- ・設置方法や緩衝材としての有効性の検証

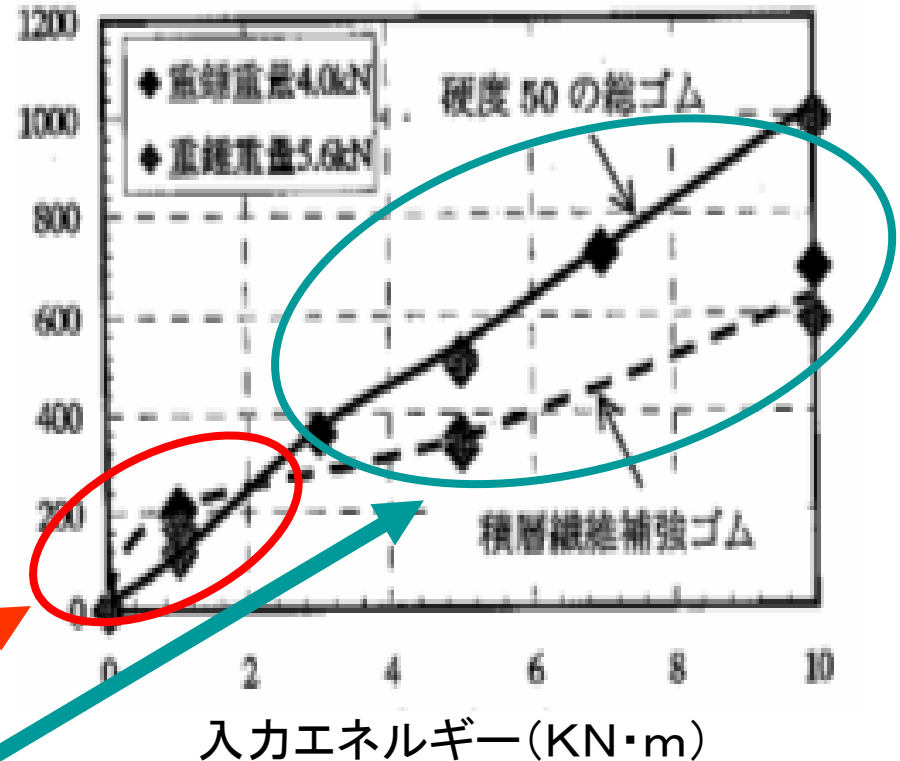


今回はよりよい緩衝材を模索するために、ゴムの性質・設置方法などについて現在提案されているゴム製緩衝材に関する文献調査をおこなった

積層繊維補強を用いた緩衝材



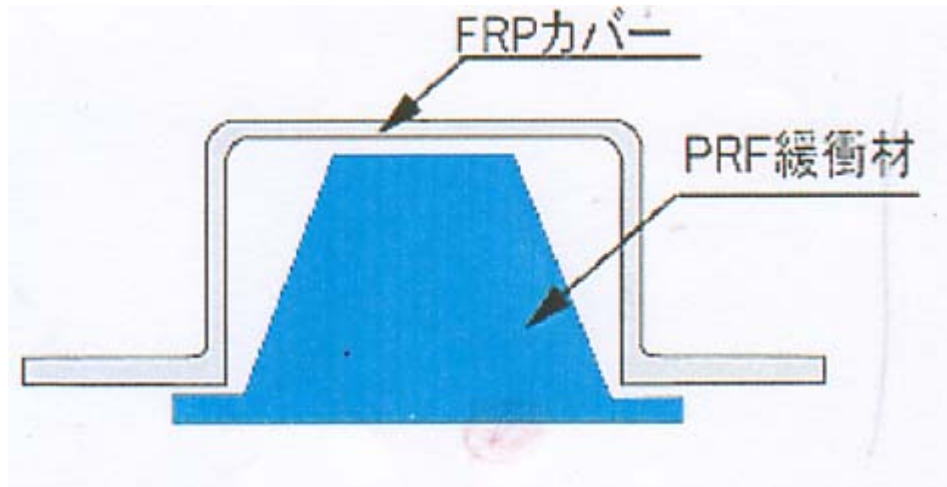
伝達荷重 (kN) (3・m)



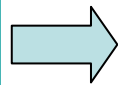
入力エネルギーが小さい時には高剛性であるため通常のゴムよりも期待できない

繊維が破断する大きな入力エネルギーのもとでは荷重低減効果が発揮される

二段階ばね緩衝装置

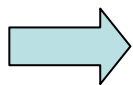


中小の地震



FRP(剛性体)

大地震



FRPの破壊と
繊維積層ゴム(弾性体)



2段階の
ばね特性を持つ

問題点・課題

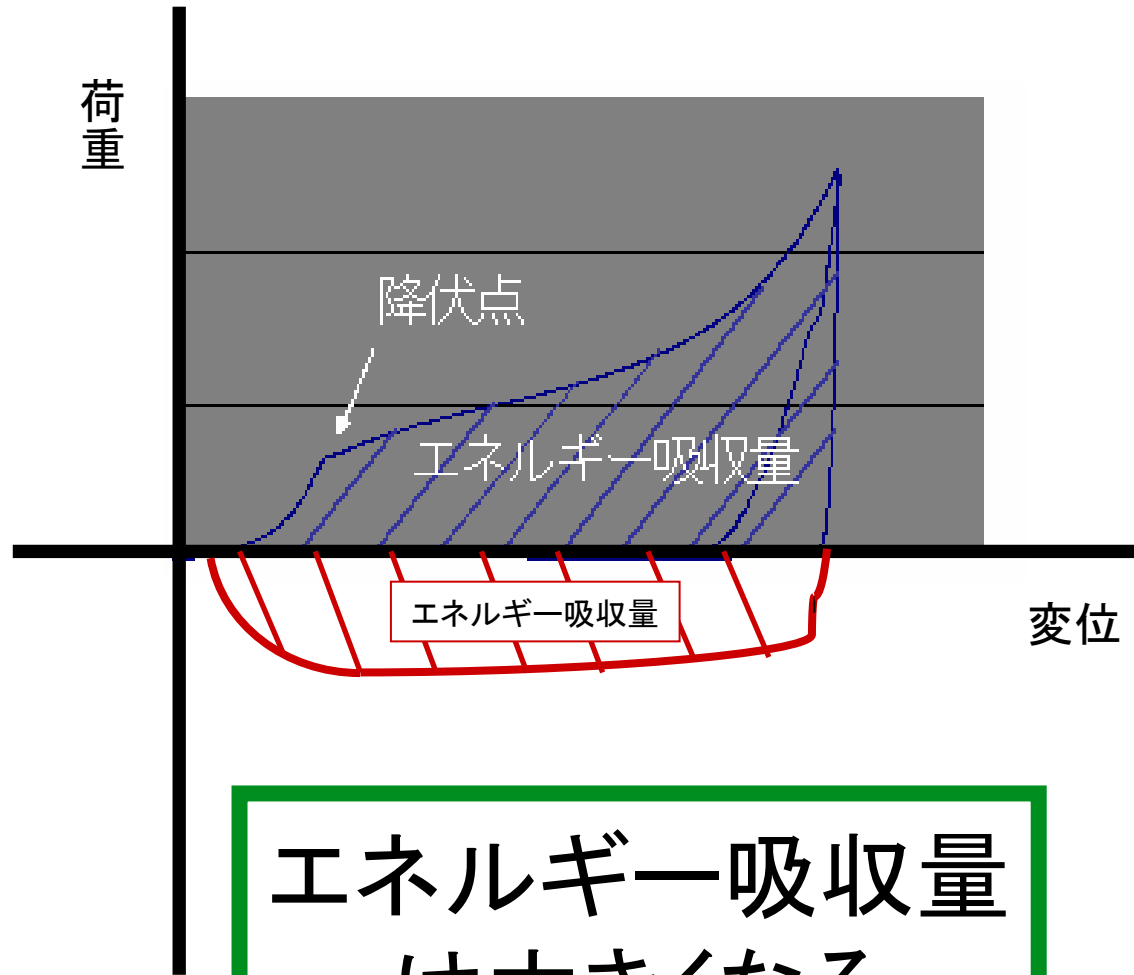
①繰返し荷重に対しての応答

②動的載荷実験の必要性

③緩衝材の設置方法

①繰返し荷重に対しての応答

圧縮側

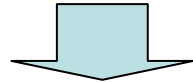


引張り側

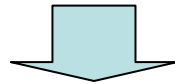
エネルギー吸収量
は大きくなる

②動的載荷実験の必要性

静的載荷実験・落錘式衝撃実験



- ・載荷速度の幅がありすぎる
- ・落錘式衝撃実験をモデル化できていない



動的載荷実験をおこなう必要がある

③緩衝材の設置方法

繰返し載荷実験・設置場所などを考慮し決定していく

おわりに

今回は過去の論文，緩衝材の文献調査をおこない理解を深めることができた。

現在、今この瞬間に大地震が起きてもおかしくないとされている状況で、地震を想定しその被害を最小限におさえるための対策・準備は急務だと考えている。

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の実用 にむけて研究をおこなっていきたい

今後の展望

- ・今回あげた問題点の解決
- ・試験機の使用方法を学び実験を行なう
- ・引き続き文献調査をおこない理解を深めていく

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究

学生氏名 河野 学

指導教員 皆川 勝

1. はじめに

兵庫県南部地震の甚大な被害から橋梁に対する免震設計が採用されるようになったが、免震橋では橋桁の応答変位が大きくなるため、桁と橋台間及び隣接桁間にかかる衝撃も大きくなる恐れがある。このため、大型の伸縮装置や落橋防止装置の設置が必要となるが、設置コストやメンテナンス費用を考慮すると後者を用いるほうが合理的であると考えられる。本研究では衝突時に作用する衝撃荷重を緩和するための緩衝装置に着目し、ゴムを併用した鋼管を緩衝材として用いる。鋼管は低コストでエネルギー吸収性に優れ、ゴムは衝突力の低減効果があり、鋼管にゴムを巻きつける形であれば鋼管圧壊後も緩衝材として機能し、変形後に形状が復元する特性から繰り返し衝突に対しても緩衝効果を保持できる。小・中規模の地震の変位に対しては、落橋防止装置用緩衝材の弾性範囲の変形で吸収させ、大規模地震に対しては、緩衝材の損傷を許容し、降伏後の塑性変形によって桁の運動エネルギーを吸収させる。これにより、落橋防止構造及び橋梁における他の構造部材の損傷を防ぎ、かつ上部構造が桁かかり長に達するような運動を制限することができる。さらに、地震後には速やかに復旧できることから合理的といえる。皆川ら²⁾³⁾は、緩衝装置に静的載荷実験を施し、ゴム管及び鋼管の基本特性から推定する荷重変位関係のモデルを構築した。

2. 目的

ゴム鋼併用型緩衝材は、衝撃荷重の低減効果と衝撃エネルギーの吸収性に優れ、地震発生時においては緩衝材としてその性能が期待される。これを実用的に用いるため、ゴム鋼併用型緩衝材を高架橋を構成する一つの要素として考え、その性能を有効的に発揮できる設計を検討する必要がある。本研究では、様々な設計指標を調査し、その知識を深めることを目的とした。

3. 耐震設計の基本方針

・耐震設計の基本⁴⁾

- (1) 橋の耐震設計は、設計地震動のレベルと橋の重要度に応じて、必要とされる耐震性能を確保することを目的として行う。

地震発生後、橋は避難路及び緊急物資の輸送路と重要な役割を担う。そのため、橋の耐震設計においては安全性の確保を根本とし、地域社会に影響を与える機能低下を、橋の重要度に応じて制限する必要がある。これらの役割を踏まえ、橋の耐震設計では設計地震動のレベルと橋の重要度に応じた耐震性能の確保を基本として示している。

- (2) 耐震設計に当たっては、地形・地質・地盤条件、立地条件等を考慮し、耐震性に高い構造形式を選定するとともに、橋を構成する各部材及び橋全体系が必要な耐震性を有するように配慮しなければならない。

橋の構造形式は、地形・地質・地盤条件、立地条件等から十分な耐震性を有するような選定が必要である。また、部材の強度及び変形性能の向上により橋全体系として地震に耐える構造系を目指すことが重要である。以上のことから、要求される構造形式について述べる。

- 1) 上部構造の落下防止のためには、多径間連続構造を用いることが望ましい。多径間連続構造の支承条件には1点固定方式や水平力分散方式等があるが、1点固定方式の場合では固定支承を支持する下部構造に大きな負担がかかるため、水平力分散方式が望ましい。また、山岳部において、高橋脚を有する橋等での橋台部の地盤条件が良好であれば、橋脚よりも橋台に地震時水

平力を負担させより合理的な構造となる場合もあるため、橋の構造条件や基礎地盤の支持条件等に応じて適切に支承条件を選定することにより、橋全体としての耐震性を確保できる。

- 2) 軟質粘性土層のすべりや砂質地盤の液状化、液状化に伴う流動化等、地盤の変状が生じる可能性がある埋立地盤や沖積地盤上では、水平剛性の高い基礎を選定する。また、多点固定式やラーメン形式等といった上部構造と下部構造の接点ができるだけ多い構造系を選定するのがよい。
- 3) 地盤条件が適当で、固有周期が短い多径間連続形式の橋では、免震設計の採用が望ましい。
- 4) 部分的な破壊より、全体系の崩壊に繋がる危険性のある構造系においては、損傷を当該部分に限定するような配慮が必要である。
- 5) 地盤条件や構造条件が著しく変化する箇所では、橋脚上で上部構造を切り離すのか、連続構造を採用するのか、条件に応じて検討しなければならない。

・落橋防止システム

- (1) 落橋防止システムを構成する要素は、橋の形式、支承のタイプ、地盤条件等に応じて、けたかかり長、落橋防止構造、変位背減構造及び段差防止構造から適切に選定するものとする。
- (2) 橋軸方向の落橋防止システムとしては、端支点及びかけ違い部において規定のけたかかり長及び規定の落橋防止構造を設けるものとする。なお、構造特性により橋軸方向の変位が生じにくい橋については落橋防止構造を省略してもよいが、規定に該当する橋、ならびに、地震時に不安定となる地盤がある場合については省略してはならない。
- (3) 橋軸直角方向の落橋防止システムとしては、端支点及びかけ違いでは、規定に該当する橋において、橋軸方向に規定された変位制限構造を設けるものとする。
- (4) 高速自動車国道、都市高速道路、指定都市高速道路、本州四国連絡道路、一般国道の橋、都道府県道、市町村道のうち複断面、跨線橋、跨道橋及び地域の防災計画上の位置付けや当該道路の利用状況等から特に重要な橋、これらの橋において支承高さが高い支承を用いる場合には、規定の段差防止構造を設ける等、構造的な配慮をするものとする。

4. 終わりに

ゴム鋼併用型緩衝装置を用いた橋脚の設計を検討するにあたり、今回は示方書に定められている基本的な部分を調査し、理解を深めることができた。

5. 今後の展開

今後は、設置形状や個数といった細かい部分も含めた検討を行うため、さらに掘り下げたところの規定や知識の理解を深めていきたい。また、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置が橋梁全体の動的挙動にどのような役割結果をもたらすか検討するため、FORUM8社のUC-win/F-RAME(3D)を用いゴム鋼併用型耐震緩衝材を有する免震橋の解析を行っていきたい。

<参考文献>

- 1) 土木学会関西支部：緩衝型落橋防止システムに関する調査研究，土木学会関西支部講習会テキスト，2001.7
- 2) 皆川勝，藤谷健：ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発に関する研究，土木学会論文集，No689/I-57，pp.343-353，2001.10.
- 3) 後藤学，松島祥子，皆川勝：ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発，平成15年度武蔵工業大学卒業論文概要集，2003.2
- 4) 社会法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置 の開発に関する研究

学生氏名

河野 学

指導教員

皆川 勝

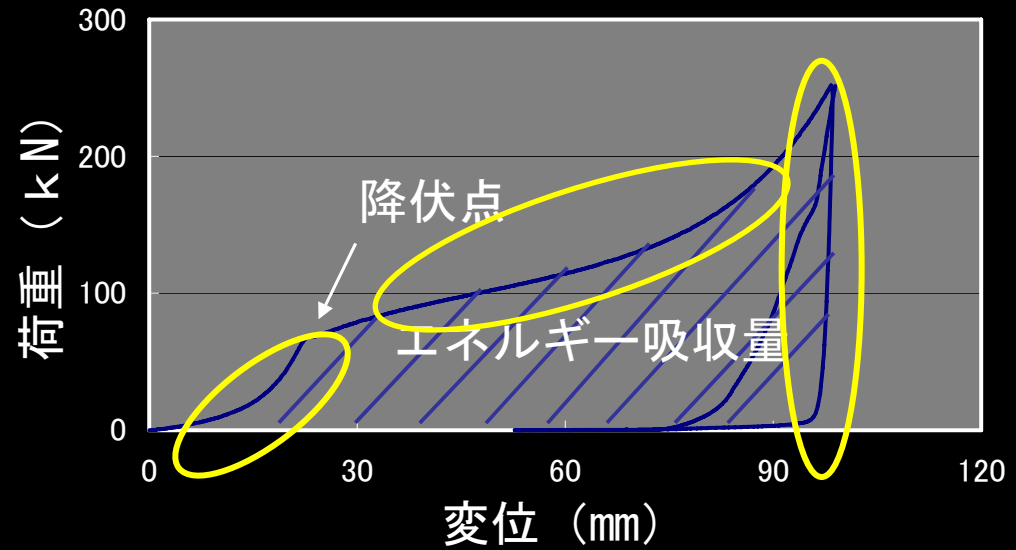
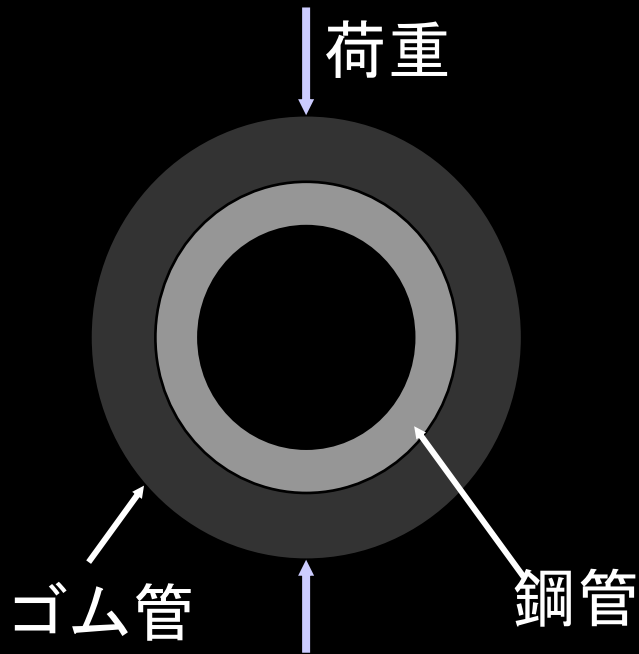
はじめに

大規模な地震が発生した際、橋梁に高いレベルの衝撃が生じ、落橋の被害が生じる



被害を未然に防ぐために、桁の橋台間あるいは桁同士の相対変位を吸収するための落橋防止装置が必要になる

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の性能



- ・ 中小の地震 → ゴム管のみでエネルギーを吸収
- ・ 大地震 → ゴム管と鋼管を併用してエネルギーを吸収

二段階設計法
が可能

実橋に設置，現象の把握



無理

各部材レベルで実験・解析



構造全体の解析

目的

今回はゴム鋼併用型耐震緩衝装置を実用的に用いるため、ゴム鋼併用型緩衝材を高架橋を構成する一つの要素として考え、その性能を有効的に発揮できる設計を検討するため、様々な設計指標を調査し、その知識を深めることを目的とする

耐震設計の基本方針

橋の耐震設計は、**設計地震動のレベル**と**橋の重要度**に応じて、必要とされる**耐震性能**を確保することを目的として行う

耐震設計に当たっては、地形・地質・地盤条件、立地条件等を考慮し、耐震性に高い構造形式を選定するとともに、橋を構成する各部材及び橋全体系が必要な耐震性を有するように配慮しなければならない

設計地震動のレベル

- ・**レベル1地震動** → 橋の供用期間中に発生する確立が高い地震動
- ・**レベル2地震動** → 橋の供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動

タイプⅠ：プレート境界型の大規模な地震

タイプⅡ：内陸直下型地震

橋の耐震性能

- ・耐震性能1 →地震によって橋として健全性を損なわない性能
- ・耐震性能2 →地震による損傷が限定的なものにとどまり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る性能
- ・耐震性能3 →地震による損傷が橋として致命的とならない性能

落橋防止システム

落橋防止のための各構成要素の役割

- ・ **けたかかり長** → 上下部構造間に予期しない大きな相対変位が生じた場合に上部構造が下部構造頂部から逸脱して落下するのを防止する
- ・ **落橋防止構造** → 大きな相対変位が生じた場合に、けたかかり長を超えないようにする
- ・ **段差防止構造** → 支障たかさが高い支障部が破損した場合に、路面に車両の通行が困難となる段差を防止する

終わりに

ゴム鋼併用型緩衝装置を用いた橋脚の設計を検討するにあたり、今回は示方書に定められている基本的な部分を調査し、理解を深めることができた。

今後の展開

今後も設置形状や個数といった細かい部分も含めた検討を行うため、さらに掘り下げたところの規定や知識の理解を深めていきたい。

また、ゴム鋼併用型耐震緩衝装置が橋梁全体の動的挙動にどのような役割結果をもたらすか検討するため、FORUM8社のUC-win/F-RAME(3D)を用いゴム鋼併用型耐震緩衝材を有する免震橋の解析を行っていきたい。

変位速度によるゴムの応力-ひずみ曲線の変化

学生氏名 河野 学

指導教員 飯島正徳 皆川 勝 吉田郁政

1. 研究背景

大地震が発生した際、隣接桁間・桁と橋台間では衝突が発生し、その際高い衝突力が作用する。これにより桁・橋台、さらには落橋防止構造までもが損壊し、落橋に至る危険性が高い。これを受けて、大地震時に隣接桁間・桁と橋台間で生じる衝突力を緩和するため、緩衝材を設置することが推奨されている¹⁾。

緩衝材に求められる性能として、衝突力の低減効果とエネルギーの吸収性が挙げられる。現在では、鋼材等に比べ剛性が低く、衝突力の低減効果に優れること、繰り返し衝突に対応できること、比較的低コストであることなどから、緩衝材としてゴムが用いられる機会が多くなっている。

2. 研究目的

ゴムは粘性と弾性とをあわせ持つ粘弾性体である。このため、変位速度によりその性質が変化する⁴⁾。また、ゴムの性質は、ゴムの種類、配合などによって大きく変化する。これらのことがゴムの性能評価を複雑なものにしている。本研究では、ゴムの種類や引張速度を変え引張試験を行い、これらの結果から応力-ひずみ曲線をもとめ、配合による破断強度・破断ひずみの違い、引張速度の違いによる弾性率の速度依存性について考察した。

3. ゴムの非線形挙動

典型的なゴムの応力-ひずみ曲線を図-1 に示す。この図からゴムの応力-ひずみ曲線は非線形挙動で、ひずみ硬化型であることがわかる²⁾。これはゴムの弾性がエネルギー弾性とエントロピー弾性から成り、ひずみによって支配的になる弾性が変化するためである³⁾。ゴム特有のやわらかく、大きく変形しても復元する性質は主にエントロピー弾性に起因している。

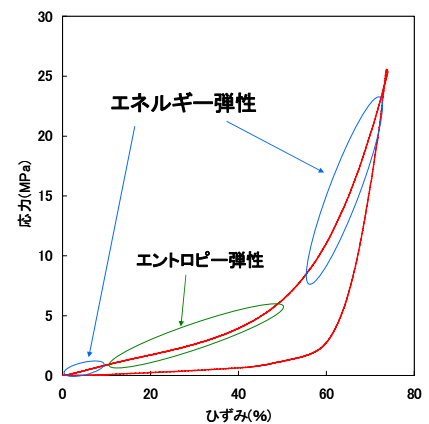


図-1 ゴムの応力-ひずみ曲線

4. 引張試験

引張試験により試験体の荷重-変位関係を測定することができる。そこから材料の応力-ひずみ関係、弾性率、破断強度、破断ひずみなどといったゴムの基本的な物性を知ることができる。

5. 実験概要

【試料】 試料には、カーボンブラックのみで硬度 65 度にコントロールした天然ゴム (NR65) とカーボンブラックの他に増容材など様々な配合剤を含む市販の天然ゴム (NR市販) を選択した。

【形状】 形状は図-2 に示すように短冊状としサイズはNR65 では幅 5mm、長さ 70mm、厚さ 2mm、NR市販では幅 5mm、長さ 70mm、厚さ 1mmとした。

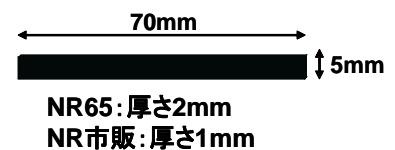


図-2 試料形状

【試験機】 試験機は島津製作所製のオートグラフAGS-J 1KNを使用した。試験機の概要を図-3 に示す。測定は変位速度 1, 10, 100mm/min の 3 通りで試料が破断するまでおこなった。また測定においてのチャック間隔は 40mm、サンプリング間隔は 0.1 秒である。

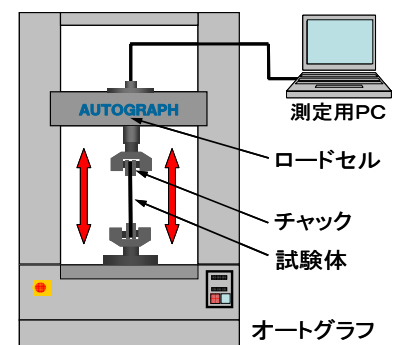


図-3 オートグラフ

6. 実験結果

NR65 の速度の違いによる応力-ひずみ曲線を図-4 に示す。NR市販の速度の違いによる応力-ひずみ曲線を図-5 に示す。またNR65 とNR市販の応力-ひずみ曲線を図-6 に示す。

7. 考察

① 応力-ひずみ曲線の速度依存性

NR65 の応力-ひずみ曲線 (図-4) とNR市販の応力-ひずみ曲線 (図-5) より,引張速度が速いほど傾きが急になっており弾性率が上昇していることがわかった.これより引張速度の変化に伴い弾性率が変化していることを確認することができた.

② 配合による応力-ひずみ曲線の変化

NR65 とNR市販の応力-ひずみ曲線 (図-6) よりNR65 とNR市販の引張強度を比較すると, NR市販の破断強度が1.80MPaに対して, NR65 の破断強度は8.62MPaと約5倍もの違いがあった. また, 破断ひずみに関してもNR市販が289%であるのに対し, NR65 は427%と値が大きく異なっている. これより, ゴムの種類が同じであってもゴムは配合によって性質が大きく変化することがわかった.

③ 問題点

今回の実験の問題点として以下の2点が挙げられる.

【破断箇所】 破断箇所は本来ならばチャック間で生じなければならない.しかし試料のすべりを防ぐための必要以上の絞めつけにより,チャックで絞めている部分に応力集中が起きてしまい破断に至った. 今後はトルクレンチなどを用い最適な絞め具合を確立すると共に, 試料の形状を JIS に定められているようなダンベル型試験片 (図-7) とし, 破断箇所を試料の中央にする必要がある.

【試料のすべり】 試料のすべりに関しては新しいジグの提案, すべらない様にするための試料の設置方法, レーザー変位計などを用いて標線間を読むようにする測定方法の確立など上にあげた破断箇所の問題も含め, より正確な実験データを得るための実験方法を確立していく必要がある.

8. まとめ

本研究では異なる配合のゴムに引張速度を変え引張試験を行い, 配合による破断強度・破断ひずみの違い, 引張速度の違いによる弾性率の速度依存性について検討した. その結果示されたことを以下にまとめる.

- 引張速度による弾性率の変化を確認することができた.
- 引張速度が速くなると弾性率が上昇する.
- 破断強度・破断ひずみの比較から, 同じ種類のゴムであっても配合により性質が大きく変化することがわかった.
- 現状のゴムの引張試験では破断箇所と試料のすべりという問題があることがわかった.

9. 今後の展開

- 今回挙げられた問題点をふまえ, より正確な応力-ひずみ曲線が測定できる実験方法を考案する.
- 真応力, 真ひずみの測定方法を考案する.
- せん断試験を行いエネルギー吸収性の評価を行う.

[参考文献]

- 1) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12.
- 2) 日本ゴム協会: ゴム技術入門, 丸善株式会社, 2006.4.
- 3) 久保亮五: ゴム弾性, 河出書房, 1952.4.
- 4) 日本規格協会: ゴムのおはなし, 日本規格協会, 2002.4.

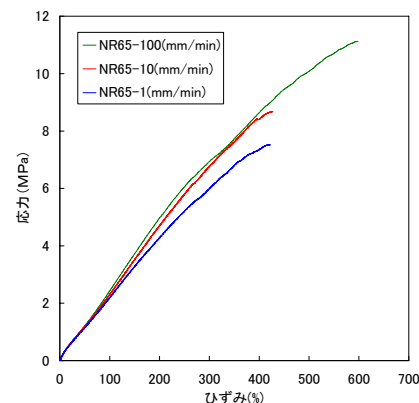


図-4 NR65 応力-ひずみ関係

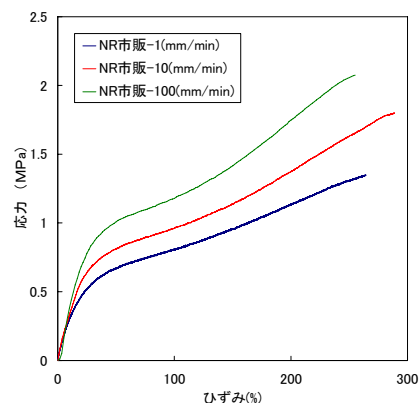


図-5 NR 市販応力-ひずみ関係

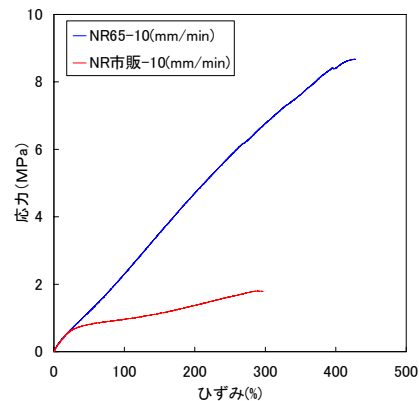


図-6 配合の違いによる
応力-ひずみ関係

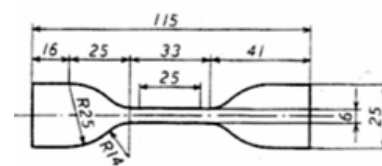
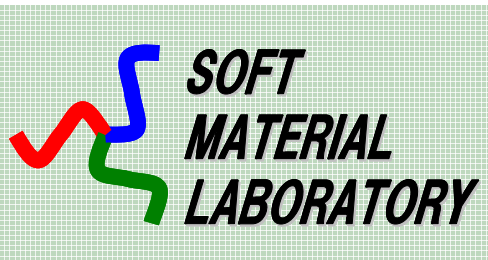


図-7 ダンベル型試験片

2006年 11月1日
建設情報マネジメント研究室 中間発表

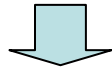
変位速度による ゴムの応力-ひずみ曲線の変化



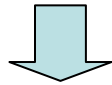
学生氏名 河野 学
指導教員 飯島正徳 皆川 勝 吉田郁政

研究背景

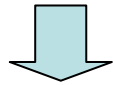
大規模な地震が発生



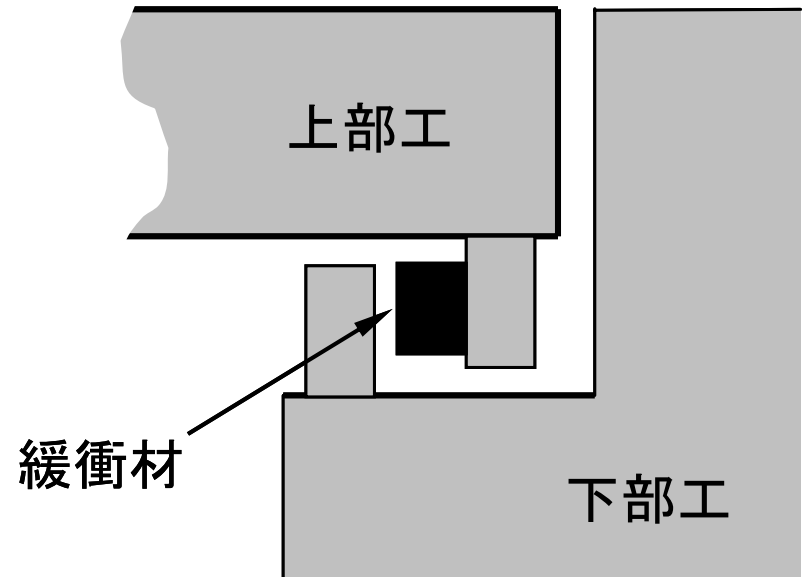
橋梁の隣接桁間に
高いレベルの衝撃が生じる



落橋などの被害

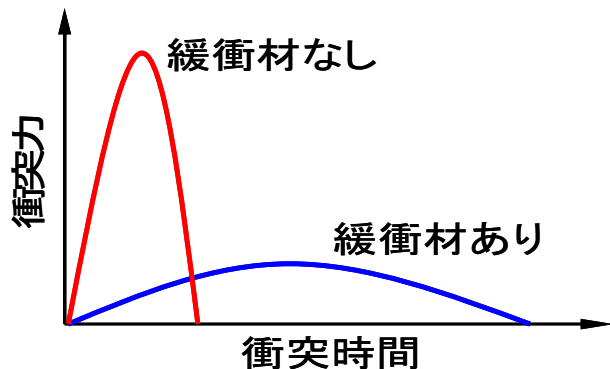


桁の橋台間あるいは桁同士の衝突エネルギーを吸収するための**緩衝材**が必要になる

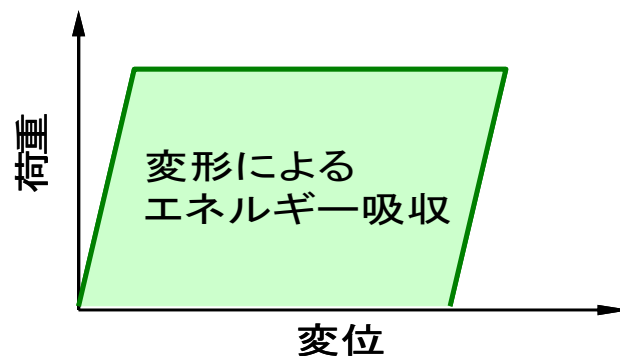


緩衝材に要求される性能

衝突力の低減効果



エネルギー吸収性



衝突力の低減効果、繰り返し衝突、低コストを兼ね備え持つ緩衝材

ゴム製緩衝材

研究目的

ゴム

弾性と粘性を併せ持つ
粘弾性体である

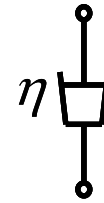
外部からの刺激の速度により
その性能が変化する。

弾性



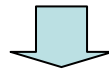
スプリング

粘性

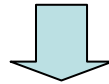


ダッシュポット

配合の異なるゴムについて様々な変位速度で引張試験を行う

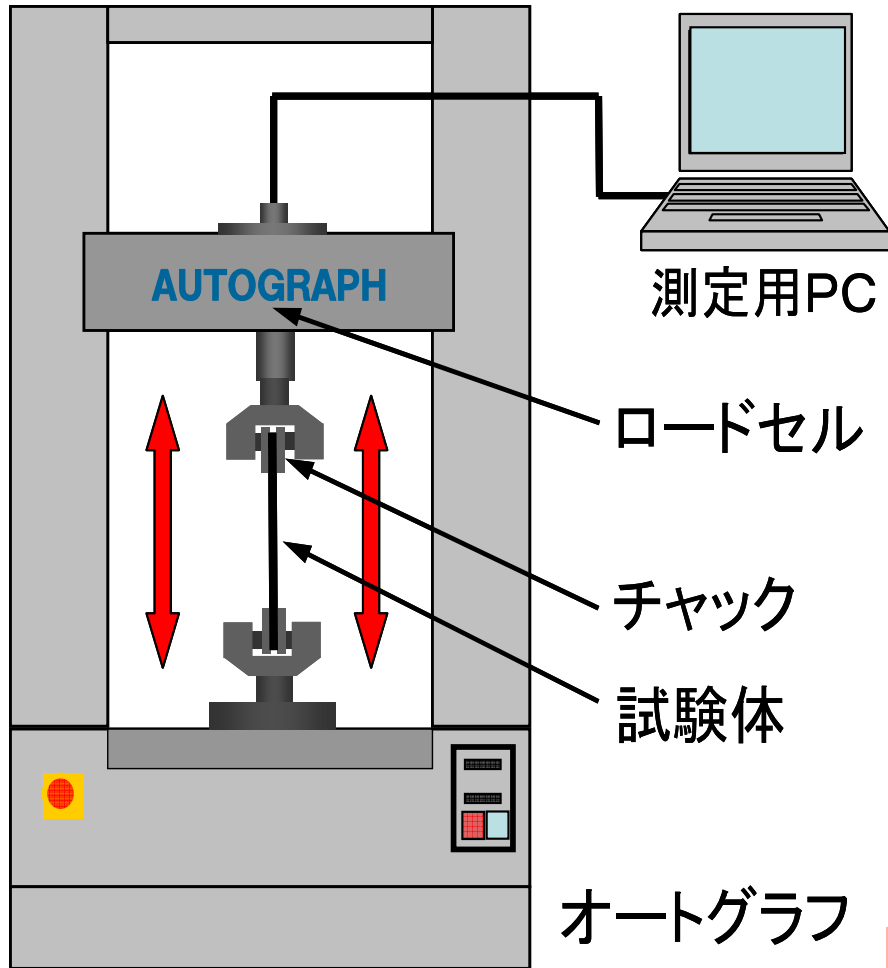


応力-ひずみ曲線を比較する



異なる変位速度・配合によるゴムの応力-ひずみ曲線の変化について検証した

引張試験



試料をチャックでつかみ
引張る試験

荷重-変位関係



応力-ひずみ関係



弾性率

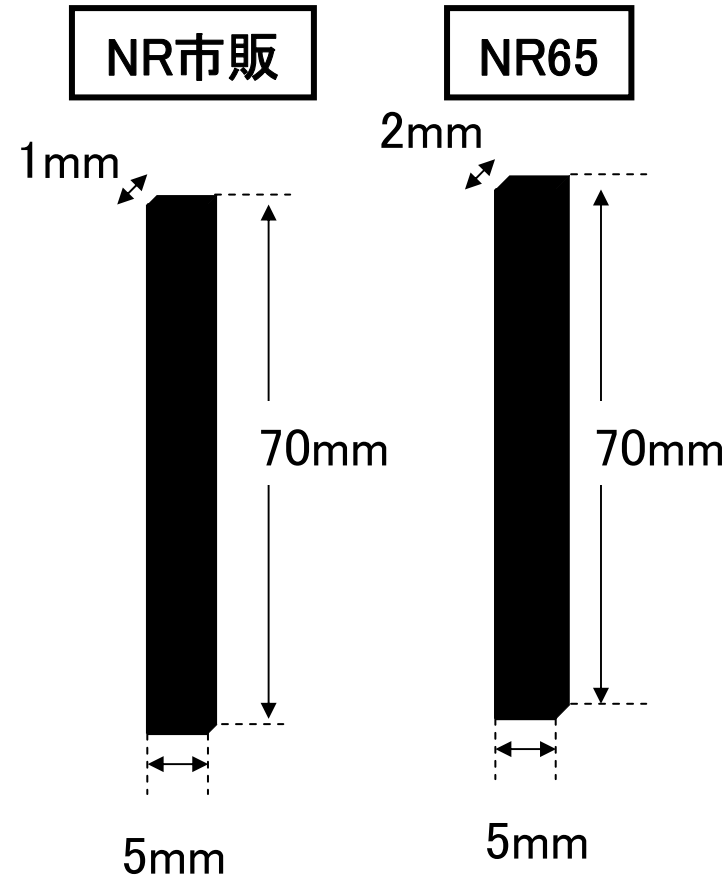
破断強度

破断ひずみ

島津製作所製 オートグラフAGS-J 1KN

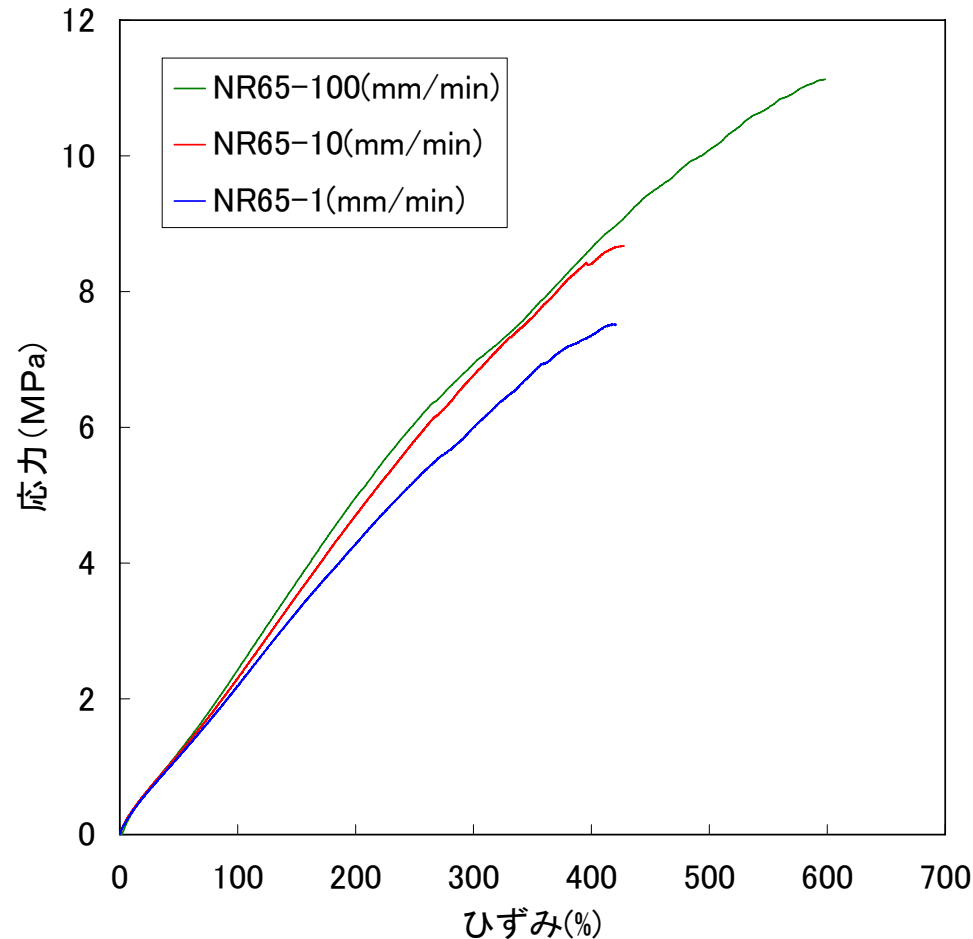
実験概要

試料名	天然ゴム (NR65) 市販の天然ゴム (NR市販)
形状	短冊状 (幅5mm, 高さ70mm)
チャック間隔	10mm
装置	島津製作所製 オートグラフAGS-J 1KN
変位速度	1 (mm/min) 10 (mm/min) 100 (mm/min)
サンプリング間隔	0.1秒



実験結果

天然ゴム(NR65) 応力-ひずみ曲線



引張速度が速い



傾きが急である。



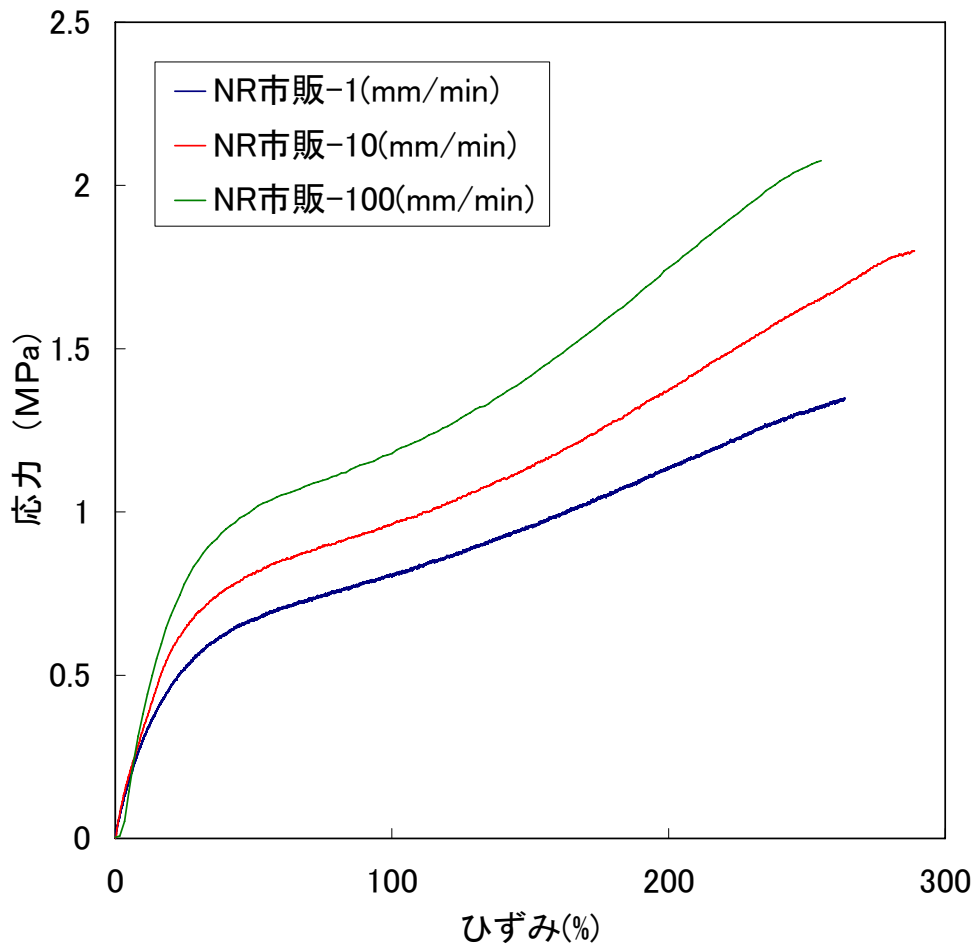
引張速度の変化に伴い弾性率が変化



弾性率の速度依存性がある。

実験結果

市販の天然ゴム(NR市販) 応力-ひずみ曲線



NR65と同様に引張速度の変化に伴い弾性率が変化



弾性率の速度依存性がある。

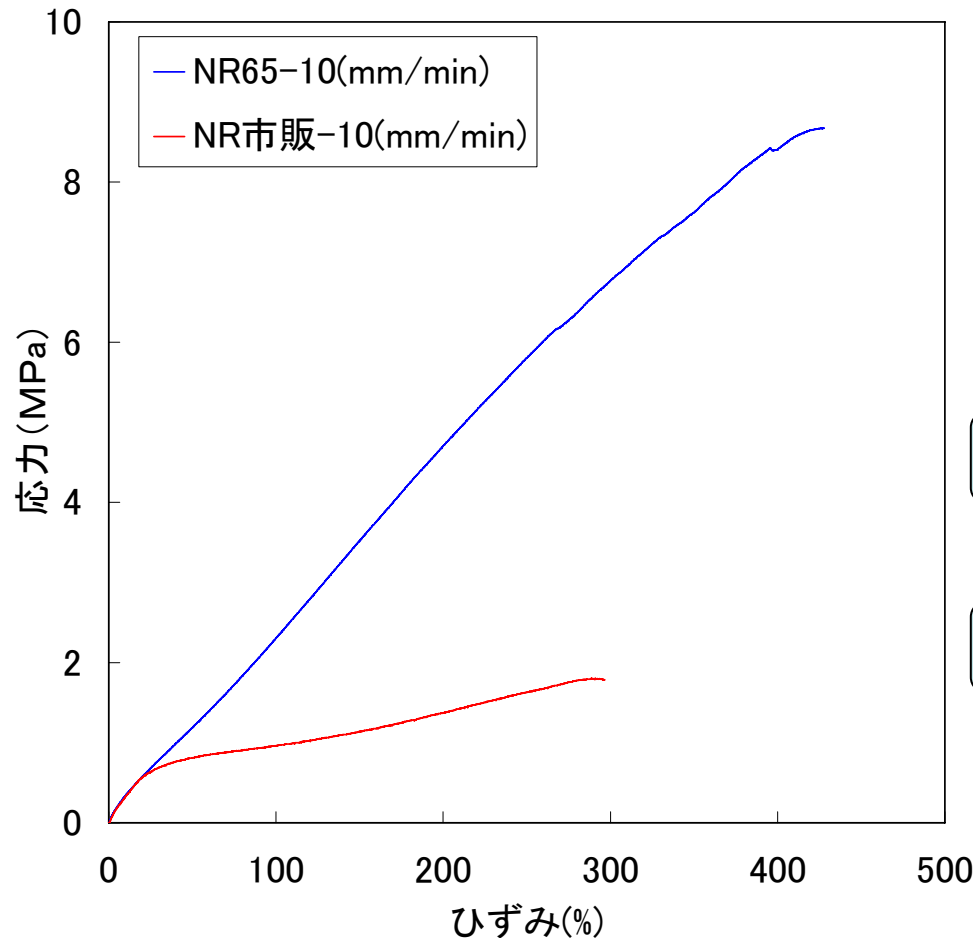
NR65に比べ破断強度、破断ひずみが小さい。



配合によって性質が大きく変化する。

実験結果

NRの比較10(mm/min) 応力-ひずみ曲線



	NR65	NR市販
破断強度 (MPa)	8.62 MPa	1.80 MPa
破断ひずみ (%)	427 %	289 %

破断強度



約5倍もの違いがある。

破断ひずみ



値が大きく異なっている。

配合(増容材)の影響と考えられる。

まとめ

- 引張速度の変化に伴い弾性率が変化する弾性率の速度依存性を確認することができた.
- 引張強度・ひずみの比較から同じ種類のゴムであっても配合により性質が大きく変化することがわかった.
- 現状のゴムの引張試験では破断箇所と試料のすべりという問題があることがわかった.

今後の展開

1, 今回挙げられた問題点をふまえ, より正確な応力-ひずみ曲線がとれる実験方法を考案する.

- ・トルクレンチなどを用いチャックの最適な絞め具合を確立する.
- ・試料の形状をJISに定められているようなダンベル状にする.
- ・新しいジグの提案をする.
- ・すべらない様にするための試料の設置方法を考える.
- ・レーザー変位計などを用いた測定方法を確立する.

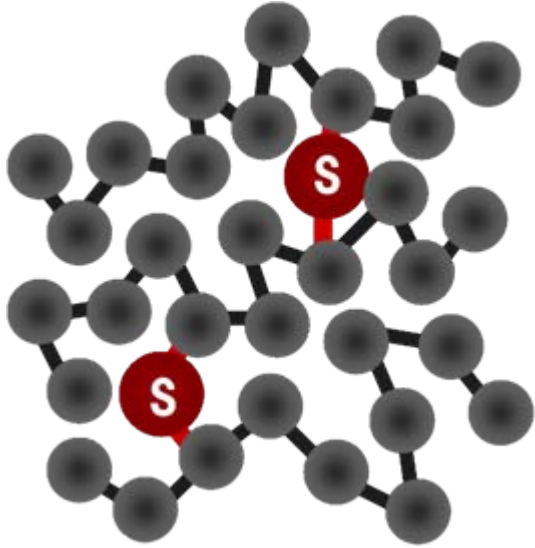
2, 真応力, 真ひずみの測定方法を考案する.

3, せん断試験を行いエネルギー吸収性の評価を行う.

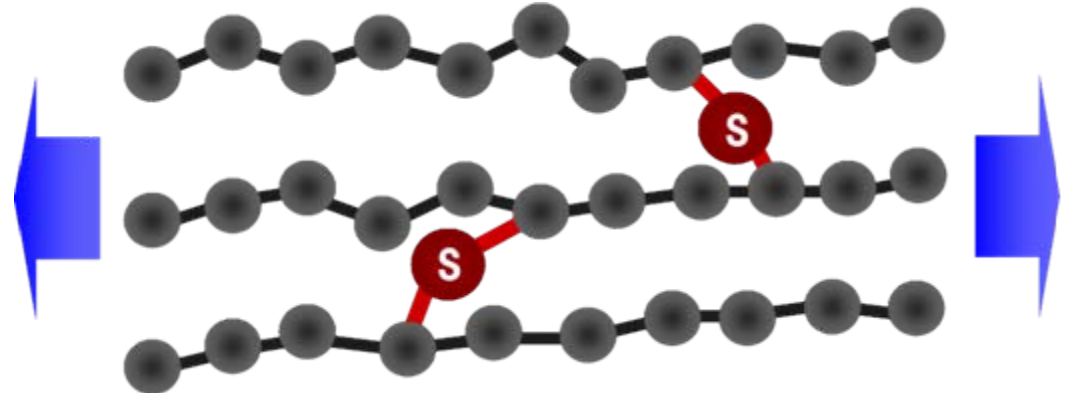
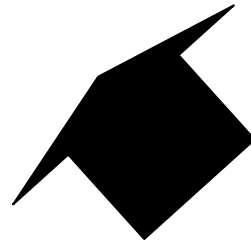
参考文献

- 1)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12
- 2)日本ゴム協会:ゴム技術入門, 丸善株式会社, 2006.4
- 3)丸山健司,渡辺大輔:熱量測定によるゴムのエネルギー吸収性能の評価,平成17年度武蔵工業大学修士論文,2005.2.
- 4)玉井裕基:動的粘弾性測定によるゴムのエネルギー吸収性能の評価,平成17年度武蔵工業大学卒業論文, 2006.3
- 5)日本規格協会:ゴムのおはなし, 日本規格協会, 2002.4

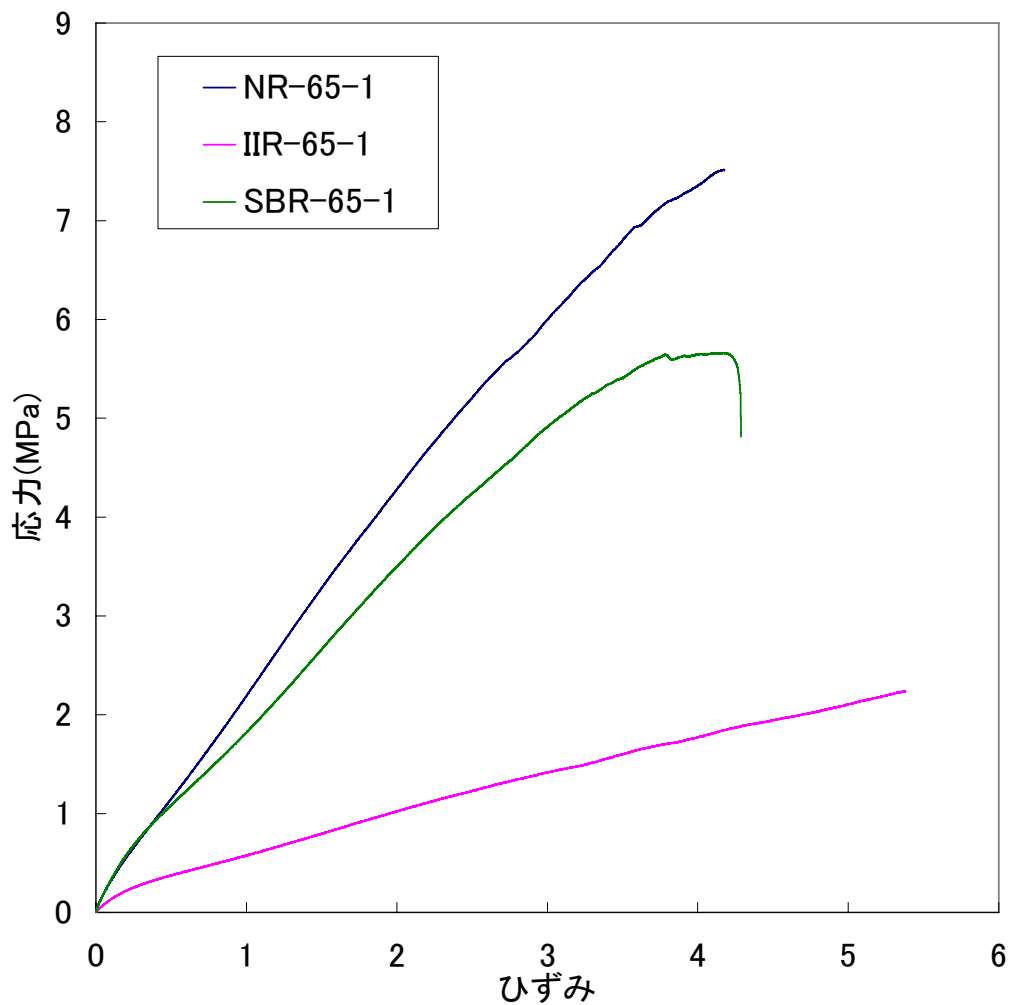
エントロピー弾性



分子鎖が自由に動ける様な状態に
戻ろうとするときの弾性



速度別 1(mm/min)
応力-ひずみ曲線



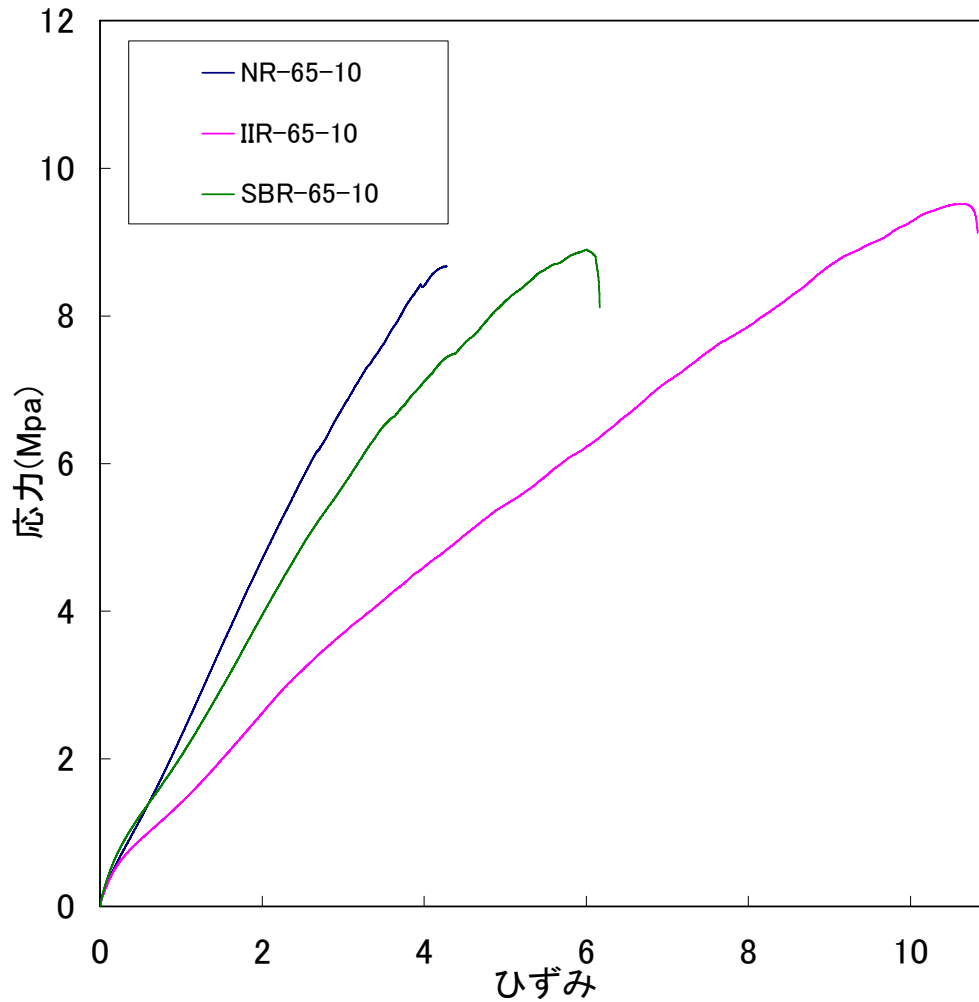
天然ゴム

スチレンブタジエンゴム

ブチルゴム

の順で傾きが急になっている。

速度別 10(mm/min)
応力-ひずみ曲線



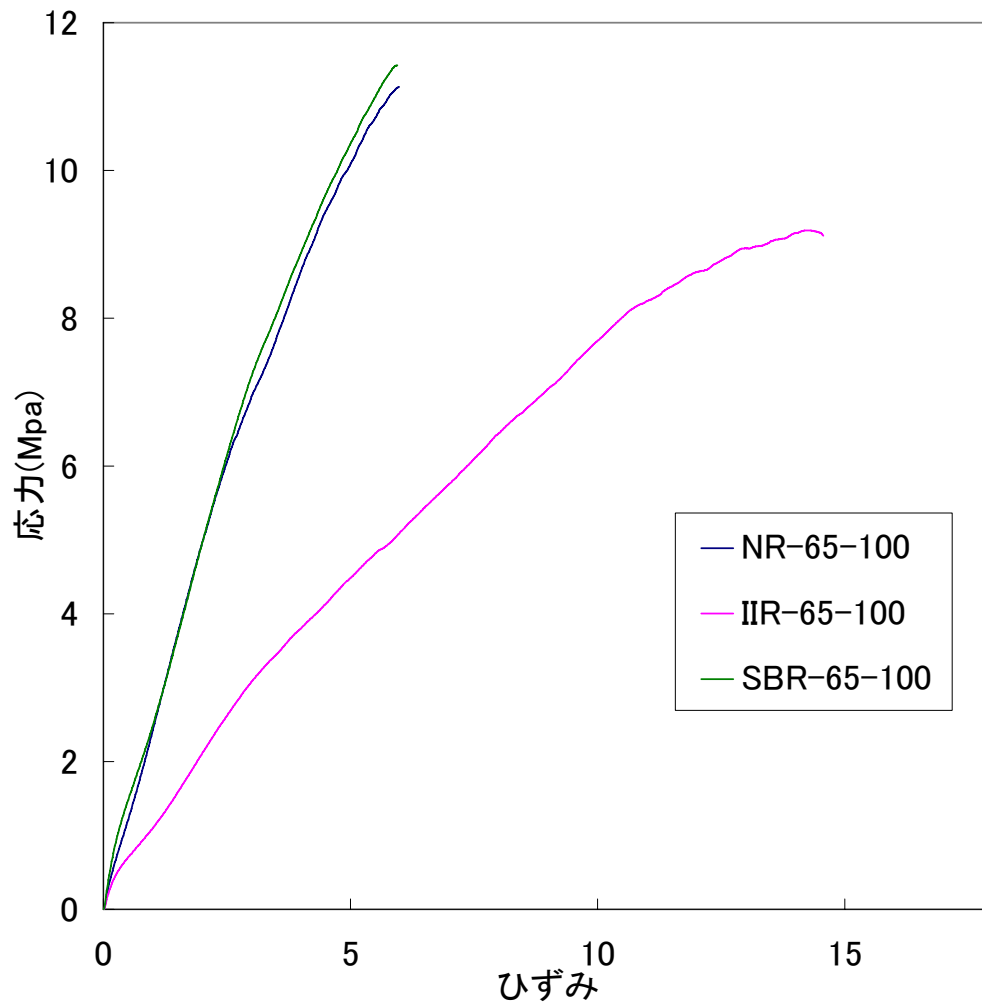
天然ゴム

スチレンブタジエンゴム

ブチルゴム

の順で傾きが急になっている。

速度 100(mm/min)
応力-ひずみ曲線

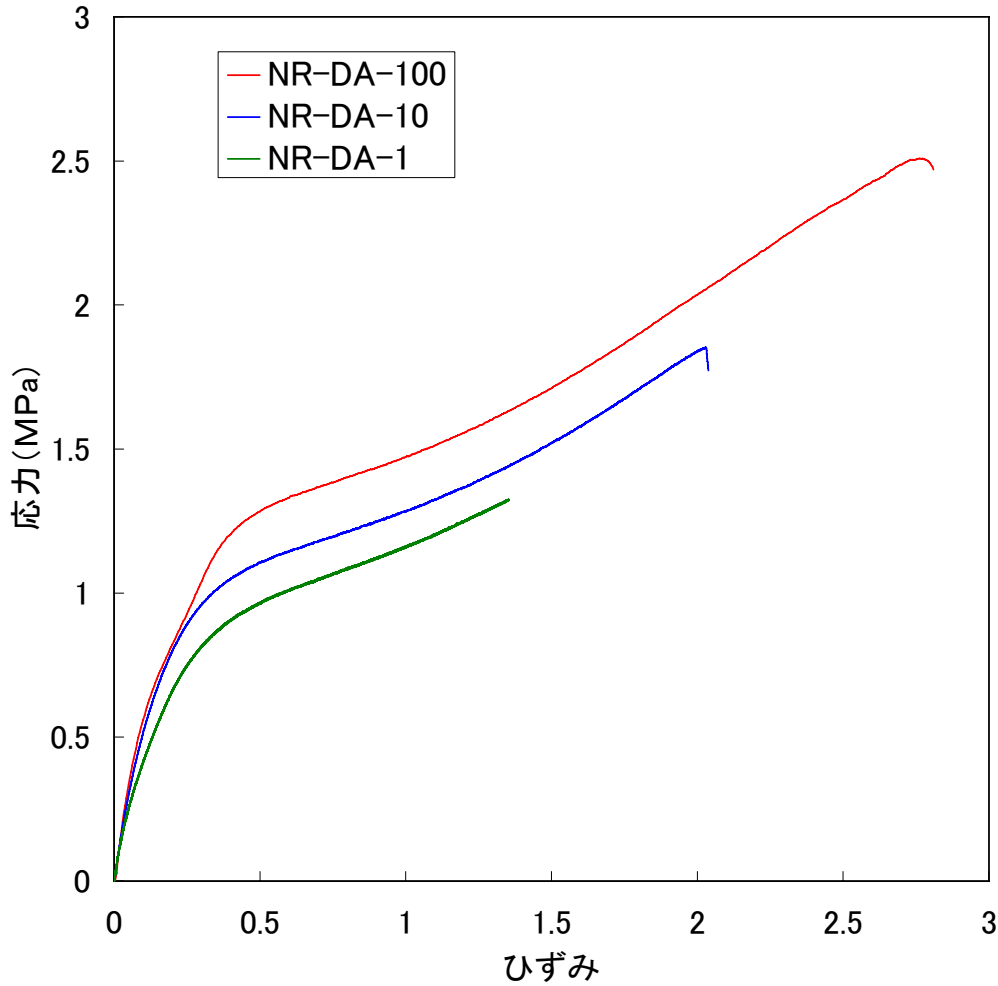


スチレンブタジエンゴム

天然ゴム

ブチルゴム

の順で傾きが急になっている。



ダンベル型試験片
応力-ひずみ曲線

引張速度の違いによるゴムの勾配（真応力と真ひずみの傾き）の関係

学生氏名 河野 学

指導教員 飯島正徳 皆川 勝 吉田郁政

1. 研究背景

大地震が発生した際、隣接桁間・桁と橋台間では衝突が発生し、その際高い衝突力が作用する。これにより桁・橋台、さらには落橋防止構造までもが損壊し、落橋に至る危険性が高い。これを受けて、大地震時に隣接桁間・桁と橋台間で生じる衝突力を緩和するため、緩衝材を設置することが推奨されている¹⁾。

緩衝材に求められる性能として、衝突力の低減効果とエネルギーの吸収性が挙げられる。現在では、鋼材等に比べ剛性が低く、衝突力の低減効果に優れること、繰り返し衝突に対応できること、比較的低コストであることなどから、緩衝材としてゴムが用いられる機会が多くなっている。

2. 研究目的

ゴムは粘性と弾性とを合わせ持つ粘弾性体である。このため、変位速度によりその性質が変化する⁴⁾。また、ゴムの性質は、ゴムの種類、配合などによって大きく変化する。これらのことがゴムの性能評価を複雑なものにしている。本研究ではゴムの基礎的な物性を把握するためにゴムの引張速度を変えての引張試験を行い、これらの結果から引張速度の違いによる勾配（真応力と真ひずみの傾き）の速度依存性について考察した。

3. 実験

[試料] 試料には、増容材など様々な配合剤を含む市販の天然ゴムのゴムバンド（NR-band）を選択した。なお詳しい配合は不明である。

[形状] 試料の形状は図-1 に示すようにバンド状であり、サイズは幅 6mm、折径 100mm、厚さ 1.1mmとした。試料はチャック固定用のピンに設置した。

[試験機] 試験機は島津製作所製のオートグラフ AGS-J 1KNを使用した。試験機の概容を図-2 に示す。

[引張試験] 引張試験により試験体の荷重-変位関係を測定することができる。そこから材料の応力-ひずみ関係、弾性率、破断強度、破断ひずみなどといった材料の基本的な物性を知ることができる。今回、測定は変位速度 50, 100, 200, 300, 400, 500mm/minの 6 通りで試料が破断するまで行った。サンプリング間隔は 0.1 秒とした。

[応力とひずみの定義] 本研究では、試験体の荷重-変位関係から、公称応力-公称ひずみ関係、体積変化が一定とした際の真応力-真ひずみ関係を算出した。公称応力と公称ひずみ、真応力と真ひずみ、また真応力と真ひずみの傾き（勾配）の定義式を以下に示す。

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \quad \varepsilon_n = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\sigma_i = \sigma_0(\varepsilon_0 + 1) \quad \varepsilon_i = \ln(\varepsilon_0 + 1) \quad E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$$

ここで、 σ_0 は公称応力、 F は荷重、 A_0 は初期の断面積、 σ_i は真応力である。 ε_0 は公称ひずみ、 L は試験体長さ、 L_0 は初期の試験体長さ、 ε_i は真ひずみである。 E_i は真応力と真ひずみの傾き（勾配）である。

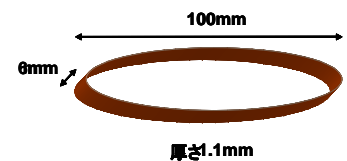


図-1 ゴムバンド

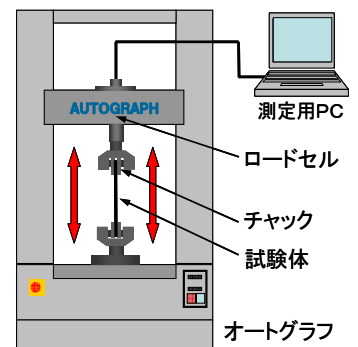


図-2 オートグラフ

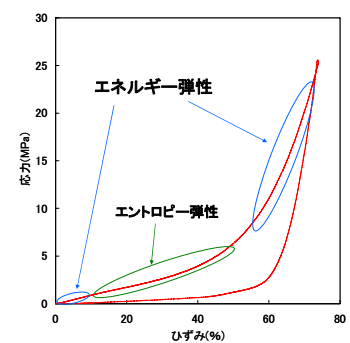


図-3 ゴムの応力-ひずみ曲線

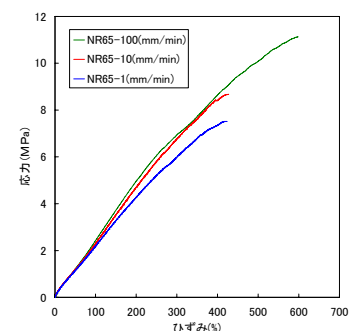


図-4 短冊状の応力-ひずみ曲線

4. 結果と考察

① ゴムのエネルギー弾性とエントロピー弾性

ゴムのエネルギー弾性とエントロピー弾性ゴムの応力-ひずみ曲線を図-3に示す。この図からわかるようにゴムの応力-ひずみ曲線は非線形挙動²⁾で、ひずみ硬化型である。これはゴムの弾性がエネルギー弾性とエントロピー弾性から成り³⁾、ひずみによって支配的になる弾性が変化するためである。

② ゴムの真応力-真ひずみ関係

引張速度が異なる場合のNR-bandの真応力-真ひずみ曲線を図-5に示す。図-5より、引張速度が速いほど曲線の傾きが急になっていることがわかる。これより引張速度が速いほど勾配（真応力と真ひずみの傾き）が上昇する（硬くなっていく）、ゴムの勾配の速度依存性を確認することができた。また今回は前回の反省であったゴムの滑りを考慮して、試験片の形状を短冊形からバンド状にした。図-4、図-5を比較してもわかる通りゴムの滑りが改善され、ゴムの大変形領域までの挙動をみるできるようになった。

③ E と真ひずみの関係、 E と変位速度の関係

E と真ひずみの関係を図-6に示す。この図から真ひずみと勾配の関係を引張速度の違いで比較するために今回は領域を細かく分け、真ひずみが0.05~1.95の間を9つの領域に分けて考察した。その中で真ひずみが0.25, 1.5, 1.95のときの E と引張速度の関係を図-7, 図-8, 図-9に示す。図-7より、真ひずみが0.25のときは速度の増加と共に E も上昇しているため、 E と引張速度の間に線形関係があると考察することができる。図-8と図-9より真ひずみが1.5, 1.95のときは、 E は引張速度300 mm/minまでは速度と共に増加しているが、引張速度400, 500 mm/minでは E の変化をほとんどみることができない。これより高ひずみの領域においては、ある速度を超えると一定の値 E に収束すると考察することができる。

5. まとめ

本研究ではゴムの引張速度を変え引張試験を行い、引張速度の違いによる勾配（真応力と真ひずみの傾き）の速度依存性について検討した。その結果示されたことを以下にまとめる。

- 形状をバンド状にすることにより大変形領域の挙動を確認することができた。
- 引張速度が速くなると勾配（真応力と真ひずみの傾き）が急になる。
- 勾配 E と真ひずみの関係より高ひずみの領域では勾配 E は一定の値に収束するのではないか（硬さが一定になるのではないか）と考察できた。

6. 今後の展開

- 様々な速度・変位で引張・圧縮の応力緩和試験を行う。
- ゴムの圧縮試験をおこない引張・圧縮のエネルギー吸収量を測定する。
- 卒論に向けて様々な実験データ・結果をまとめる。

[参考文献]

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12.
- 2) 日本ゴム協会：ゴム技術入門，丸善株式会社，2006.4.
- 3) 久保亮五：ゴム弾性，河出書房，1952.4.
- 4) 日本ゴム協会：ゴム技術の基礎，日本ゴム協会 1983.4.1

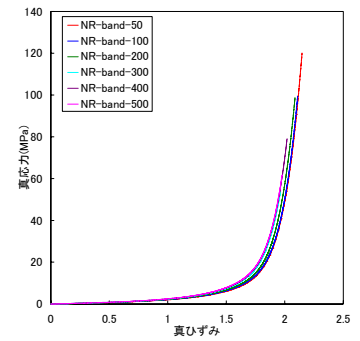


図-5 NR-bandの真応力-真ひずみ曲線

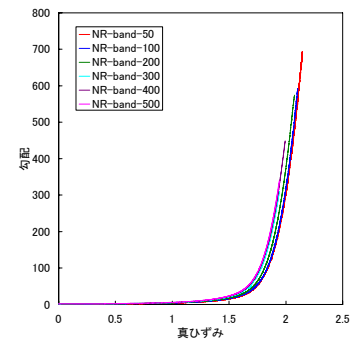


図-6 勾配-真ひずみ関係

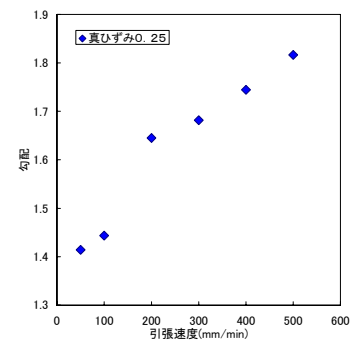


図-7 真ひずみ 0.25 の

勾配-引張速度関係

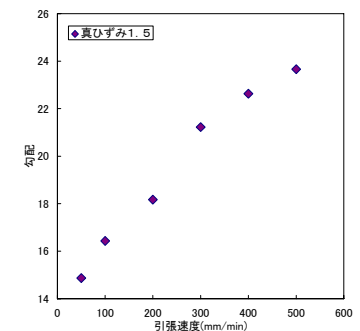


図-8 真ひずみ 1.5 の

勾配-引張速度関係

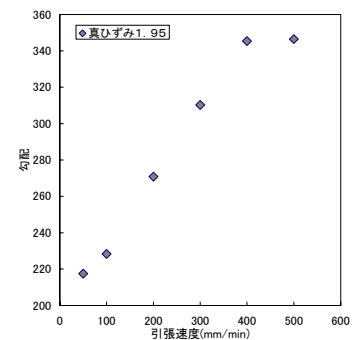


図-9 真ひずみ 1.95 の

勾配-引張速度関係

2007年 1月9日
建設情報マネジメント研究室 中間発表

引張速度の違いによるゴムの 勾配(真応力と真ひずみの傾き)の関係

学生氏名 河野 学
指導教員 飯島正徳 皆川 勝 吉田郁政

研究背景

大規模な地震が発生



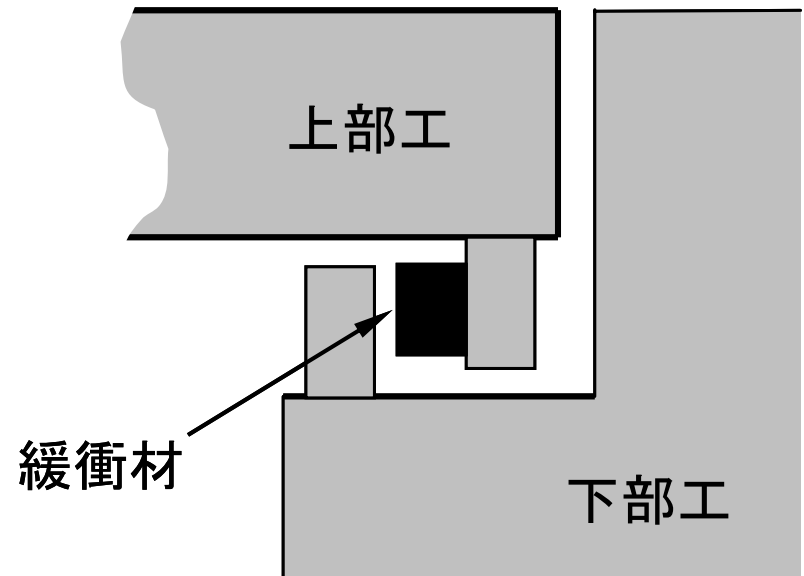
橋梁の隣接桁間に
高いレベルの衝撃が生じる



落橋などの被害



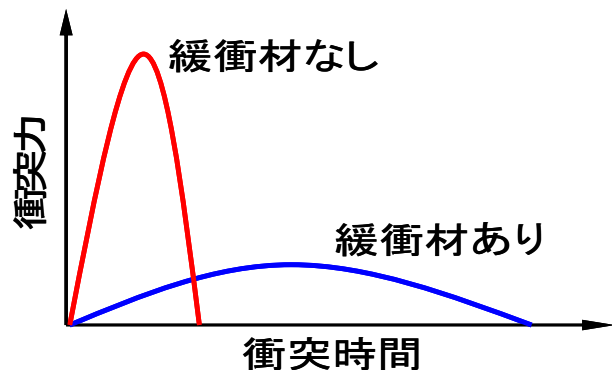
桁の橋台間あるいは桁同士の衝突エネルギーを吸収
するための**緩衝材**が必要になる



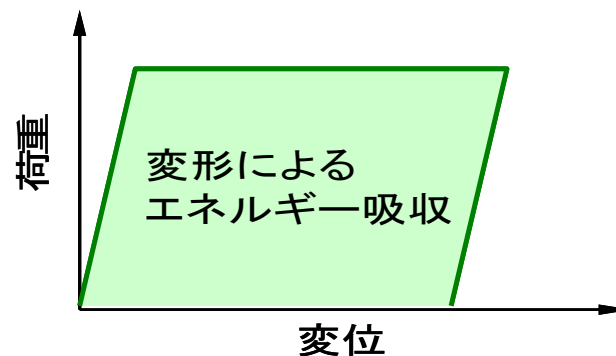
緩衝材に要求される性能



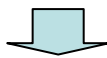
衝突力の低減効果



エネルギー吸収性



衝突力の低減効果、繰り返し衝突、低コストを兼ね備え持つ緩衝材



ゴム製緩衝材

研究目的

ゴム

弾性と粘性を併せ持つ
粘弾性体である

外部からの刺激の速度により
その性能が変化する

弾性



スプリング

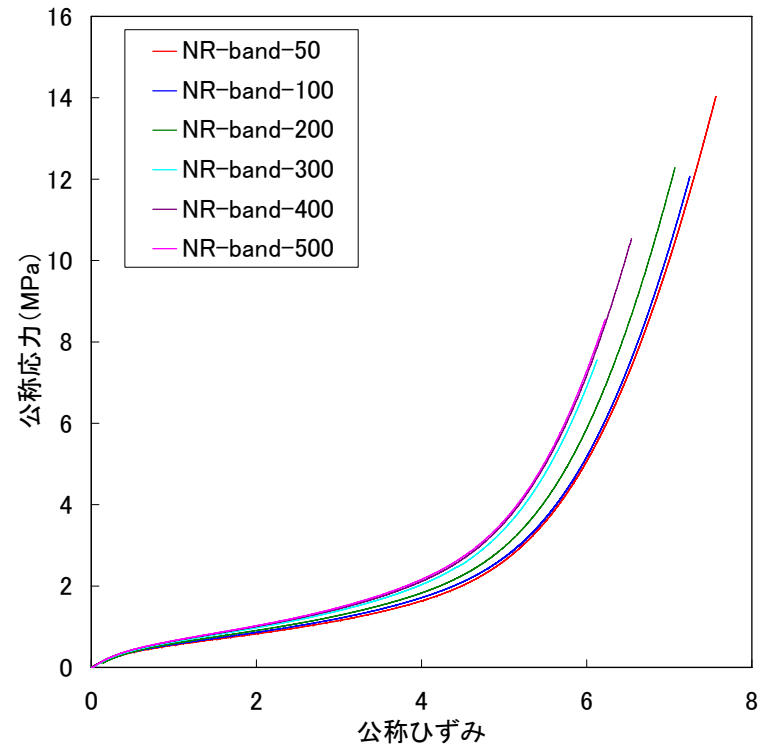
粘性



ダッシュポット

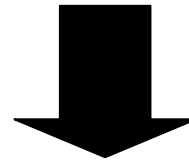
ゴムの応力-ひずみ曲線は非線形挙動である

ひずみ硬化型であるため評価をすることが難しい

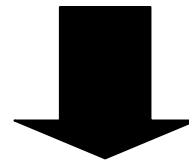


研究目的

様々な変位速度で引張試験を行う

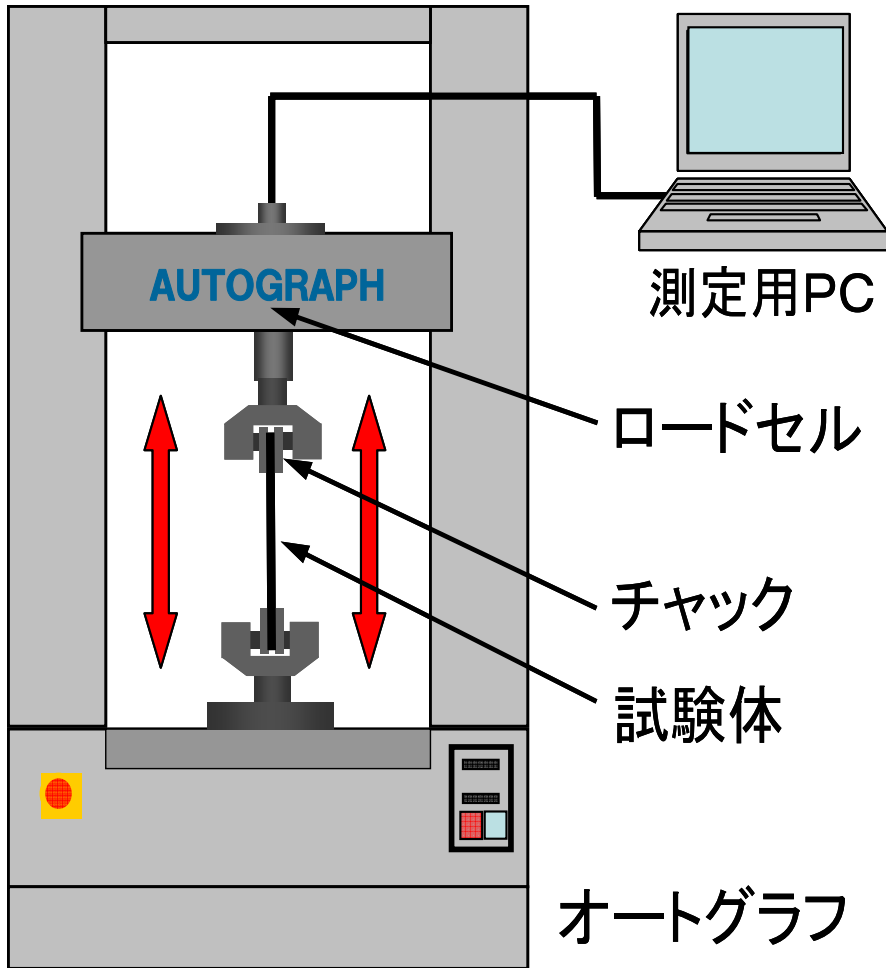


真応力-真ひずみ曲線を比較する



真応力-真ひずみの傾きと引張速度の関係を
検討した

引張試験



ピンに試料を引っ掛けて
引張る試験

荷重-変位関係



真応力-真ひずみ関係



弾性率

破断応力

破断ひずみ

島津製作所製 オートグラフAGS-J
1KN

実験概要

引張試験

試料名 天然ゴム (NR band)

形状 バンド 幅6mm
折径100mm
厚さ1.1mm

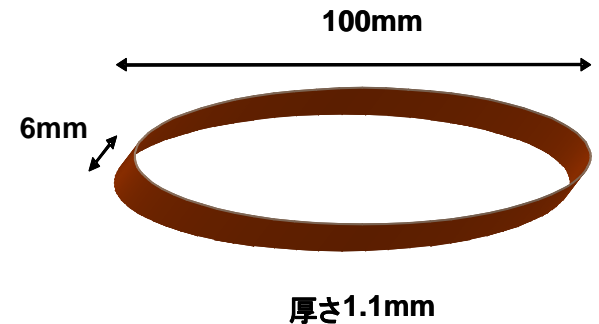
チャック間隔 10mm

装置 島津製作所製
オートグラフAGS-J 1KN

変位速度 50 (mm/min) 100 (mm/min)
200 (mm/min) 300 (mm/min)
400 (mm/min) 500 (mm/min)

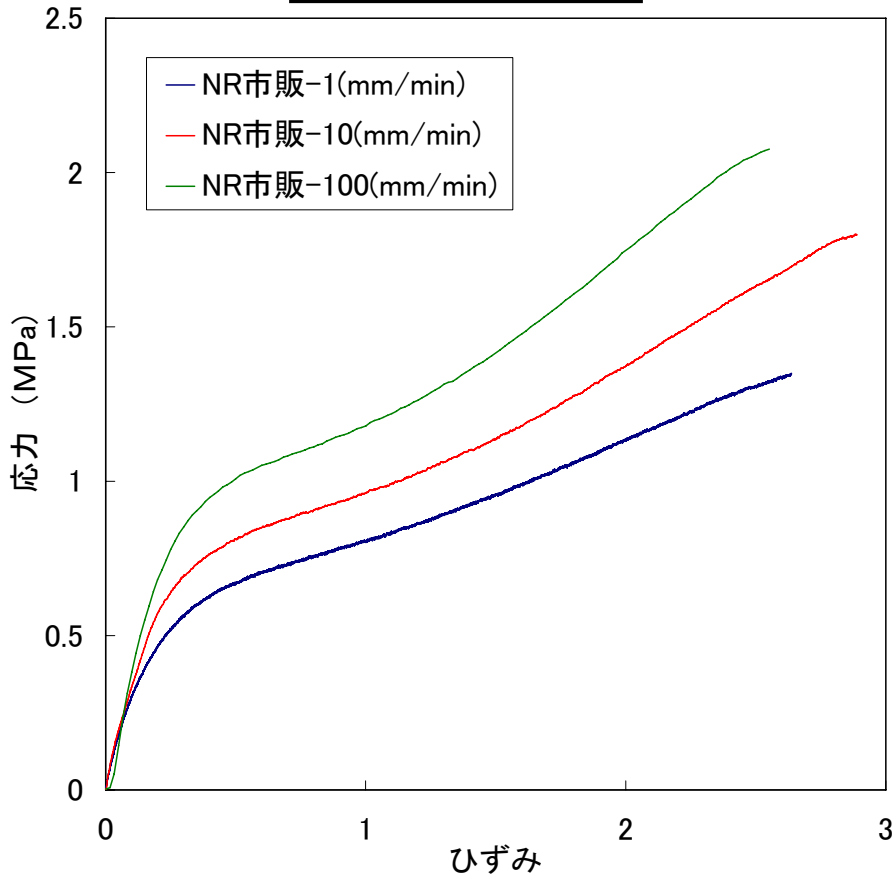
サンプリング間隔 0.1秒

NR band

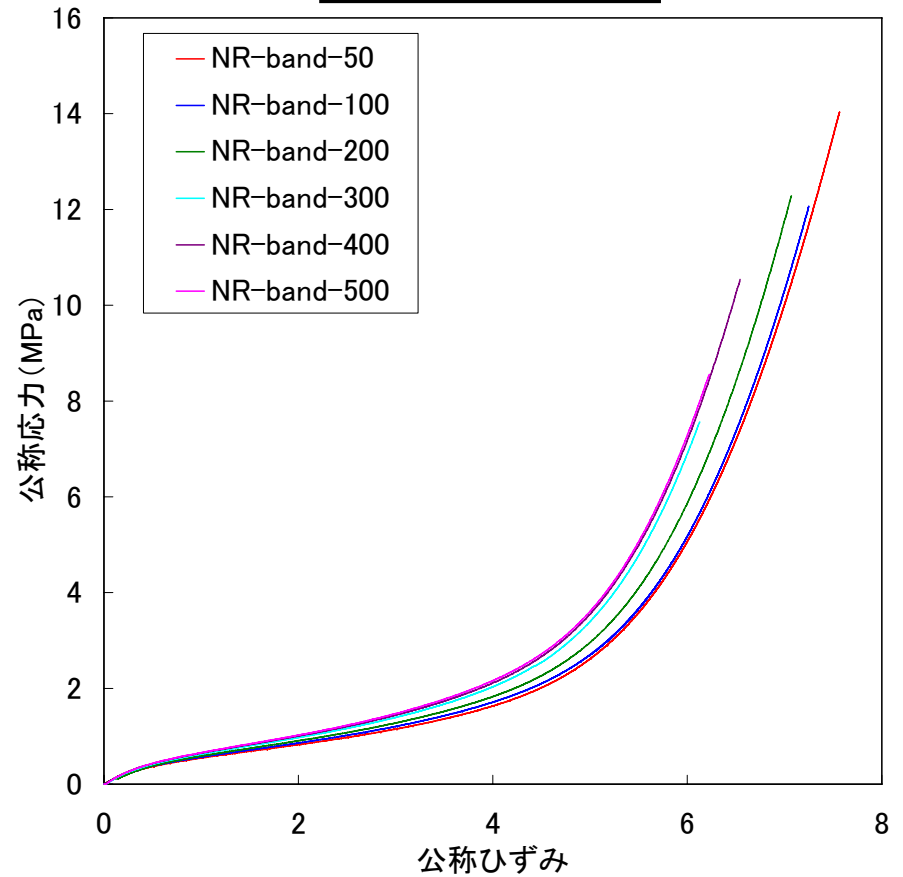


実験結果

短冊状



Band状



バンド状にすることにより、大変形領域までみるできるようになった

実験結果

体積一定

$$A_0 L_0 = A_i L_i$$



$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0}$$



$$\frac{L_i}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} + 1$$



$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0} = \varepsilon_0 + 1$$

公称応力

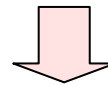
$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0}$$

公称ひずみ

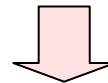
$$\varepsilon_0 = \frac{L_i - L_0}{L_0}$$

$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0} = \varepsilon_0 + 1$$

$$\sigma_i = \frac{F}{A_i}$$



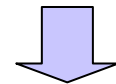
$$\sigma_i = \frac{F}{A_0} \times \frac{A_0}{A_i}$$



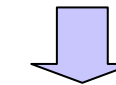
真応力

$$\sigma_i = \sigma_0 (\varepsilon_0 + 1)$$

$$\varepsilon_i = \int_{L_0}^{L_i} \frac{1}{L_0} dl$$



$$\varepsilon_i = \ln \frac{L_i}{L_0}$$

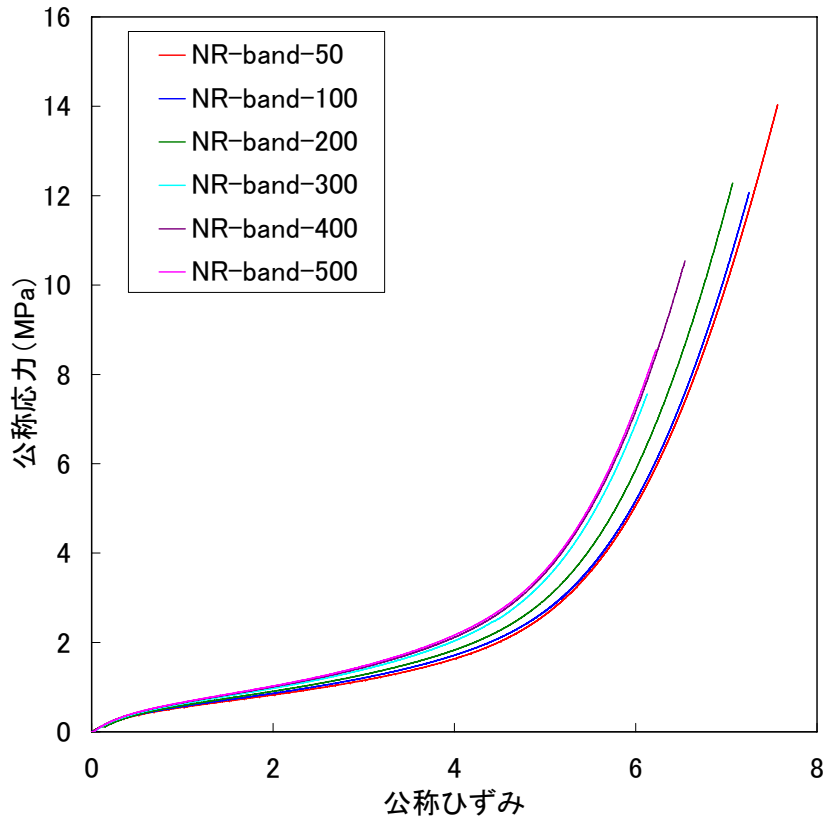


真ひずみ

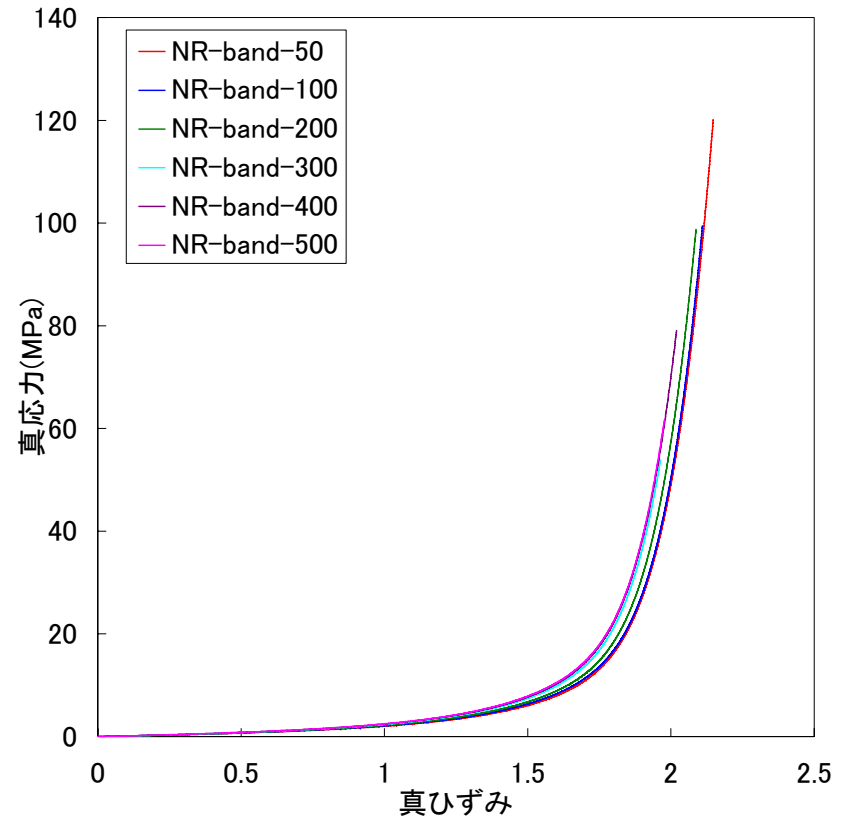
$$\varepsilon_i = \ln(\varepsilon_0 + 1)$$

実験結果

公称応力-公称ひずみ関係



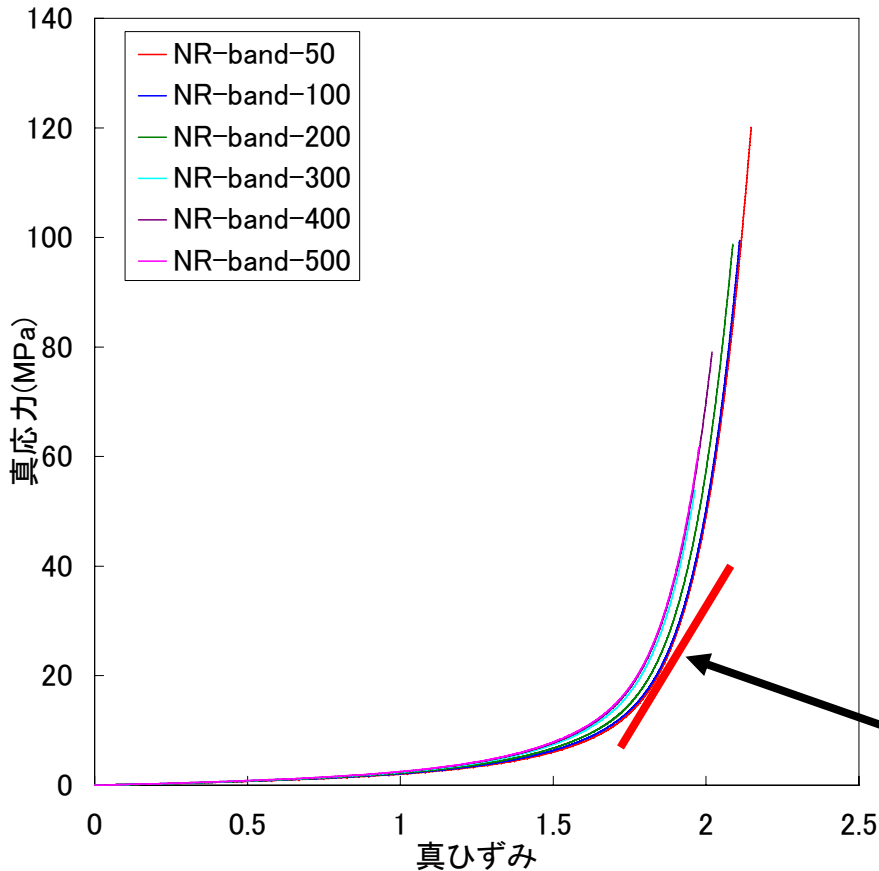
真応力-真ひずみ関係



真応力-真ひずみ関係でも速度の増加に伴い傾きが急になっていくことを確認できた

実験結果

真応力-真ひずみ関係



ゴムの硬さと真ひずみの関係を見るため



真応力と真ひずみの傾き(硬さ)を勾配 E_i とした

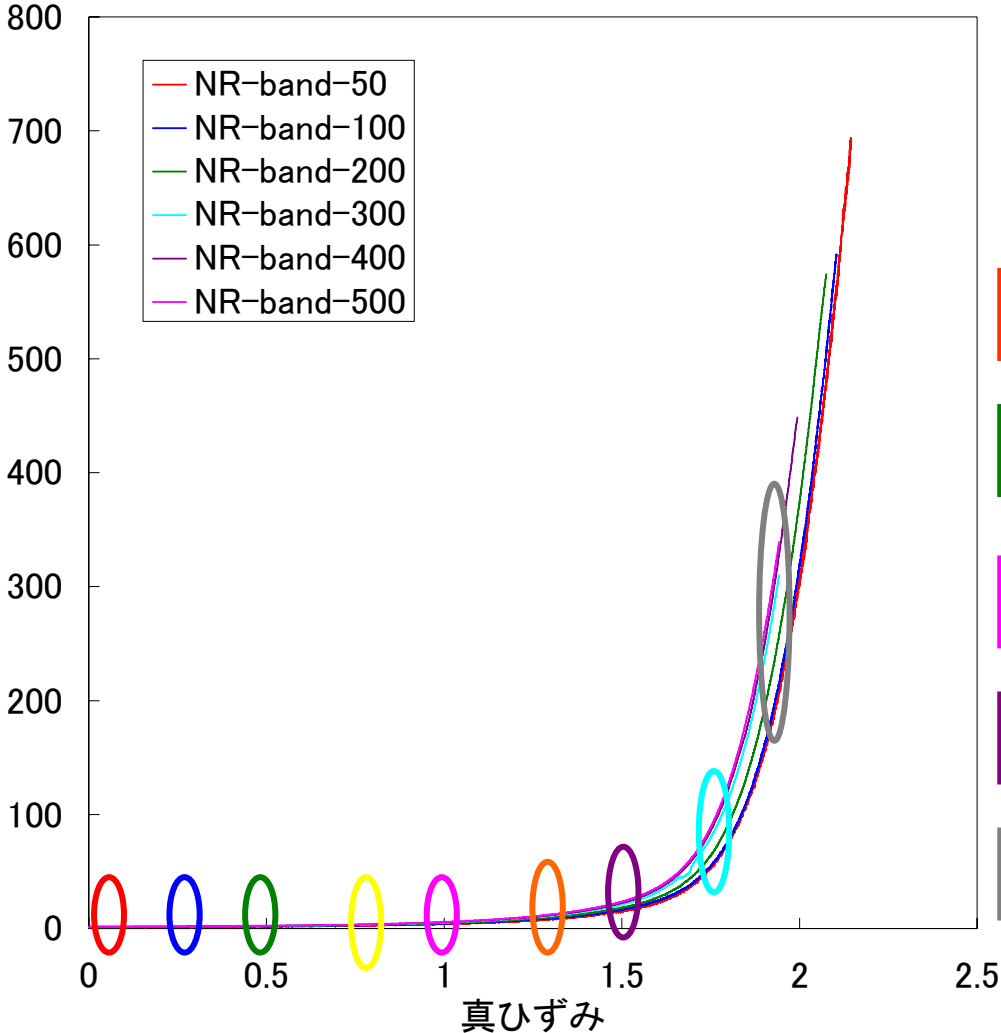


勾配と真ひずみの関係を表した

$$E_i = \frac{\sigma_i(\text{真応力})}{\varepsilon_i(\text{真ひずみ})}$$

実験結果

勾配 E_i と真ひずみ関係



$$E_i = \frac{\sigma_i(\text{真応力})}{\varepsilon_i(\text{真ひずみ})}$$

真ひずみ0.05の E_i

真ひずみ0.25の E_i

真ひずみ0.5の E_i

真ひずみ0.75の E_i

真ひずみ1.0の E_i

真ひずみ1.25の E_i

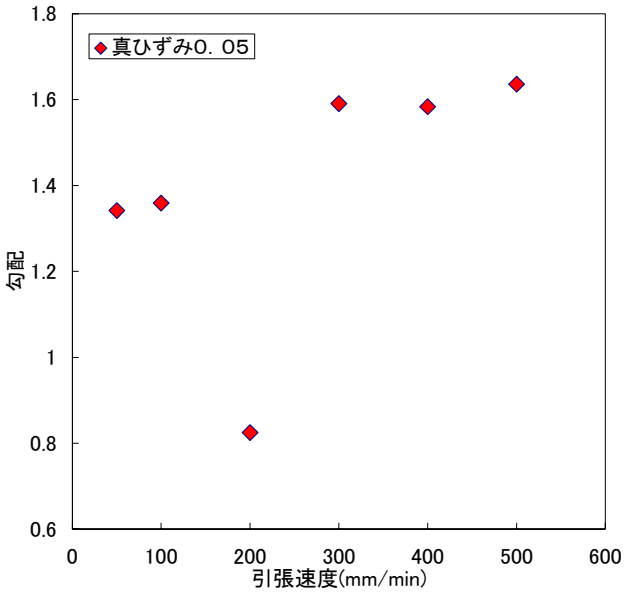
真ひずみ1.5の E_i

真ひずみ1.75の E_i

真ひずみ1.95の E_i

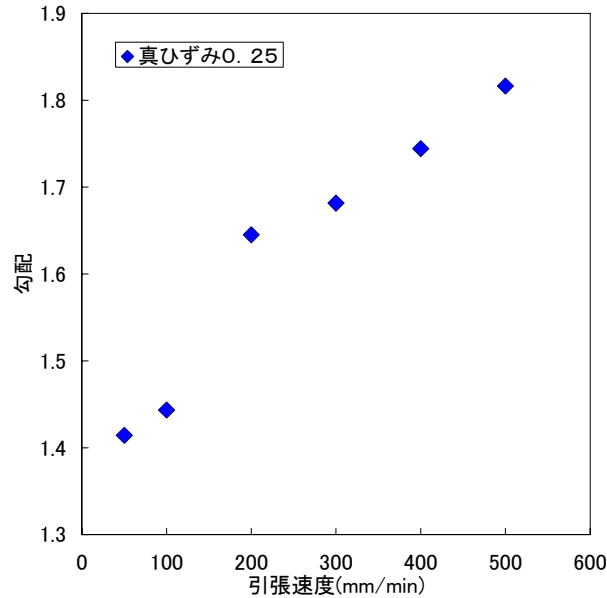
実験結果

真ひずみ0.05の E_1



引張速度200mm/minを除いて考えると、速度の増加と共に E_1 も増加している

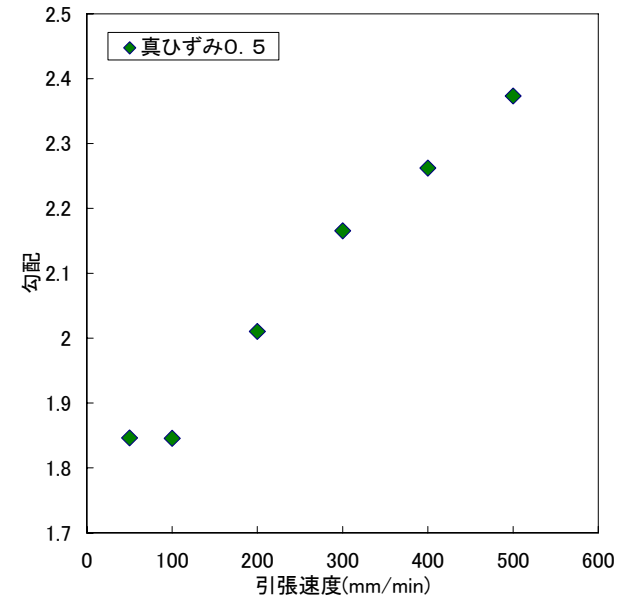
真ひずみ0.25の E_1



速度の増加と共に E_1 も増加している

線形関係があると考察できる

真ひずみ0.5の E_1



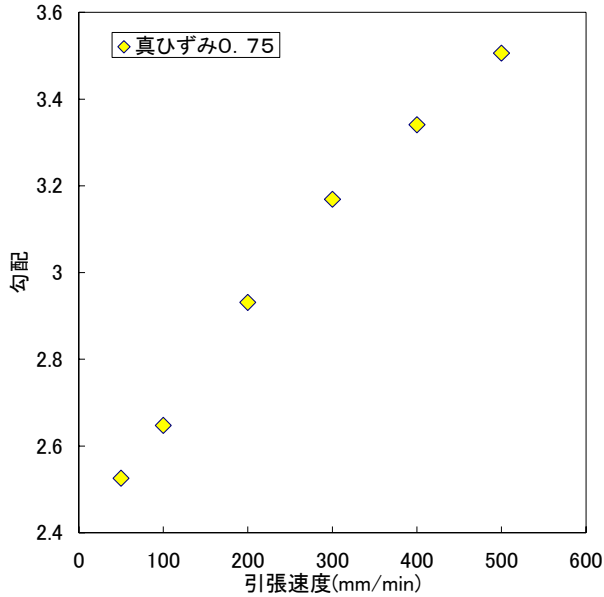
引張速度50,100mm/minは同じ値である

速度の増加と共に E_1 も増加している

線形関係があると考察できる

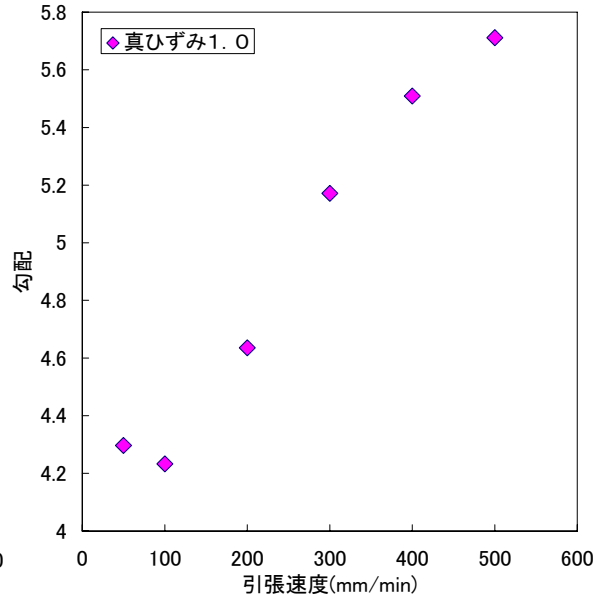
実験結果

真ひずみ0.75の E_i



速度の増加と共に E_i も増加している

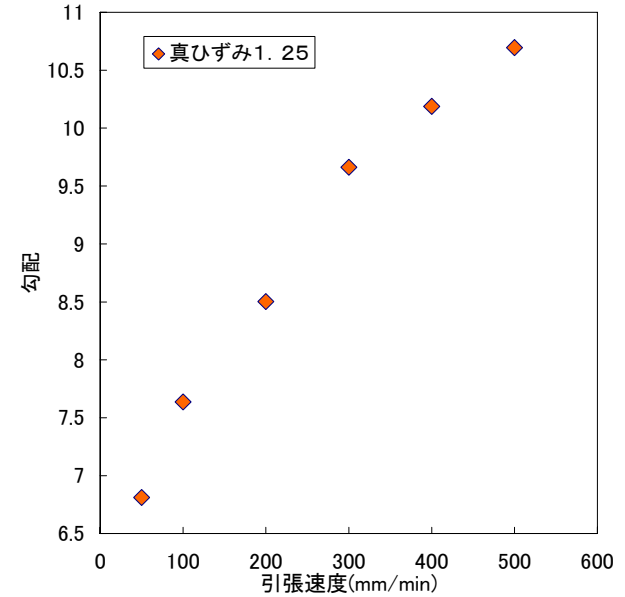
真ひずみ1.0の E_i



引張速度50,100mm/minの間でいったん減少している

速度の増加と共に E_i も増加している

真ひずみ1.25の E_i

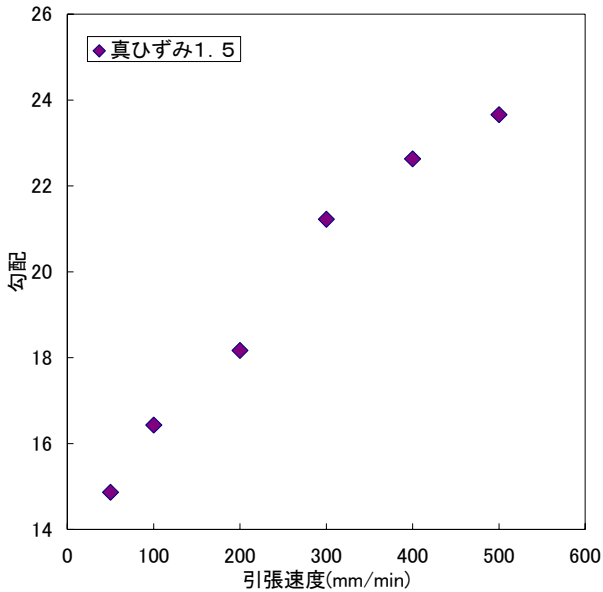


速度の増加と共に E_i も増加している

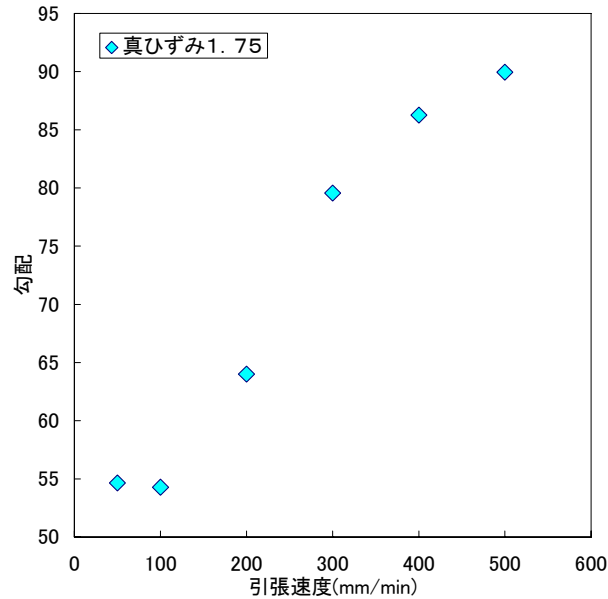
線形関係があると考察できる

実験結果

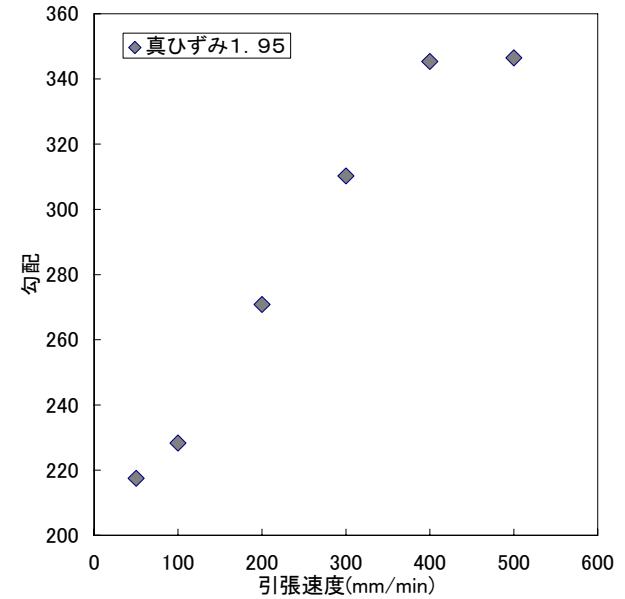
真ひずみ1.5の E_1



真ひずみ1.75の E_1



真ひずみ1.95の E_1



引張速度300,400,500(mm/min)と増加していくと E_1 がある一定の値に収束している

引張速度300,400,500(mm/min)と増加していくと E_1 がある一定の値に収束している

引張速度400,500(mm/min)はほとんど同じ E_1 の値である

E_1 がある一定の値に収束している

高ひずみの領域においては、ある速度を超えると一定の値 E_1 に収束する

まとめ

●形状をバンド状にすることにより大変形領域の挙動を確認することができた.

●真応力-真ひずみ関係から引張速度が速くなると勾配(真応力と真ひずみの傾き)が急になっていることがわかった.

●勾配 E_1 と真ひずみの関係より高ひずみの領域では勾配 E_1 は一定の値の収束するのではないか(硬さが一定になるのではないか)と考察することができた

今後の展開

・様々な速度で引張試験を行い勾配-引張速度の関係を明確にする.

・様々な速度・変位で引張・圧縮の応力緩和試験を行う.

・ゴムの圧縮試験をおこない引張・圧縮のエネルギー吸収量を測定する.

・卒論をまとめていく.

参考文献

- 1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12
- 2)日本ゴム協会：ゴム技術入門，丸善株式会社，2006.4
- 3)丸山健司,渡辺大輔：熱量測定によるゴムのエネルギー吸収性能の評価,平成17年度武蔵工業大学修士論文,2005.2.
- 4)日本ゴム協会：ゴム技術の基礎，日本ゴム協会 1983.4.1
- 5) Macromolecules 2004: A Model Treating Tensile Deformation of Semicrystalline Polymers 2004

2006年 10月10日
ソフトマテリアル研究室 中間発表



変位速度による ゴムの応力-ひずみ曲線の変化



学生氏名 河野 学
指導教員 飯島正徳 皆川 勝

自己紹介

名前 河野 学

出身 千葉県千葉市 (小・中・高と野球部に所属・主将を務める)

特徴 黒い、ヒゲ、汚い(イメージ)、足が短い

2003年 武蔵工業大学入学 (体育会アメリカンフットボール部に入部)

2004年 連絡員に任命・学ランを20歳にして着る (丸山先輩と出会う)

2005年 43代体育会会長を務める

2006年 現在副将を務め1部昇格を目指す

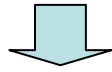
武蔵工業大学体育会 アメリカンフットボール部 HELIOS



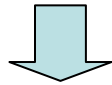
2006 8 13

研究背景

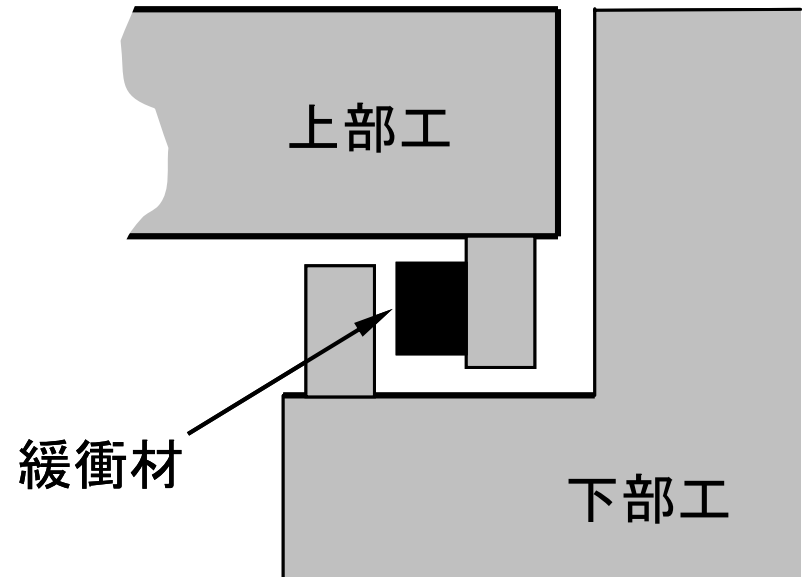
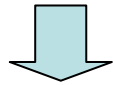
大規模な地震が発生



橋梁の隣接桁間に
高いレベルの衝撃が生じる



落橋などの被害

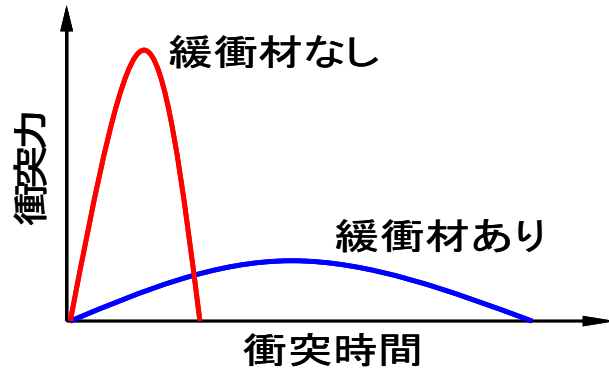


桁の橋台間あるいは桁同士の相対変位を吸収するための
の**緩衝材**が必要になる

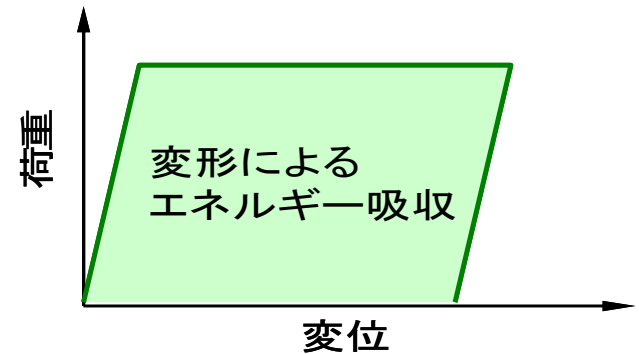
研究背景

緩衝材に要求される性能

衝突力の低減効果



エネルギー吸収性

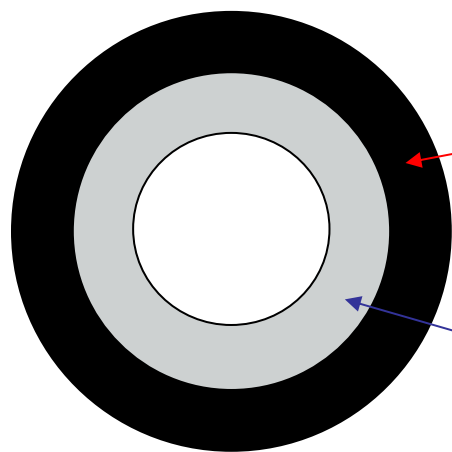


衝突力の低減効果、繰り返し衝突、低コストを兼ね備え持つ緩衝材

ゴム製緩衝材

研究背景

ゴム鋼併用型耐震緩衝装置



ゴム管

衝突力の低減効果

鋼管

エネルギー吸収性

研究目的

ゴム

弾性と粘性を併せ持つ
粘弾性体である

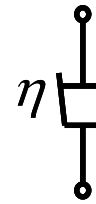
外部からの刺激の速度により
その性能が変化する。

弾性



スプリング

粘性

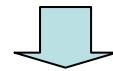


ダッシュポット

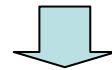
粘弾性



ゴムについて様々な変位速度で引張試験を行う



応力-ひずみ曲線を比較する



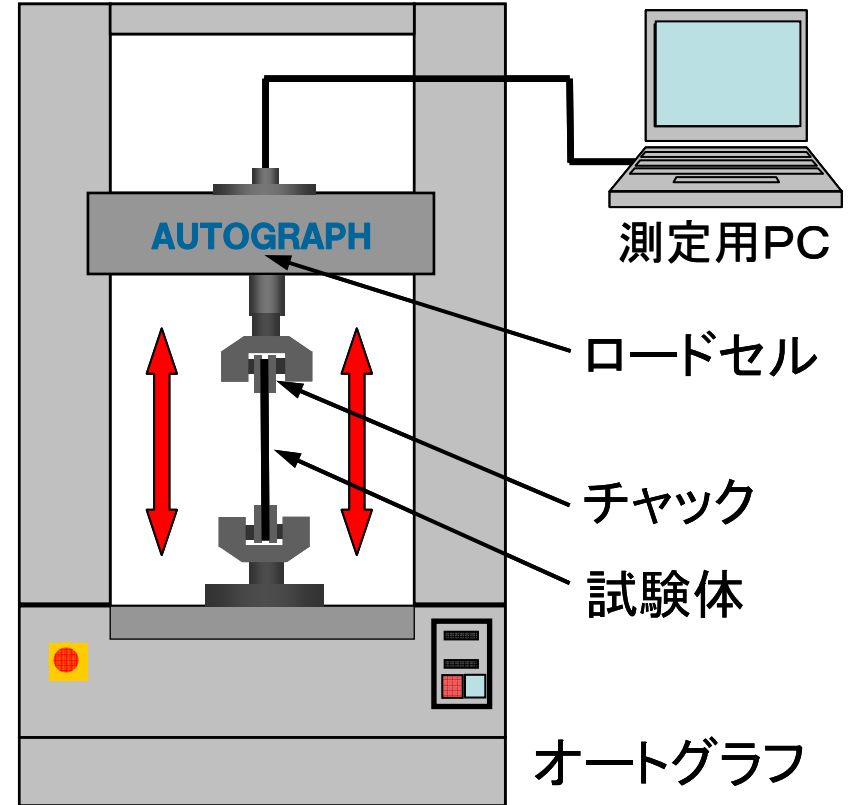
変位速度によるゴムの応力-ひずみ曲線の変化について検証した

引張試験

NR-65 (天然ゴム)

IIR-65 (ブチルゴム)

SBR-65 (スチルブタジエンゴム)



以上3種類のゴムについて実験を行った

実験概要

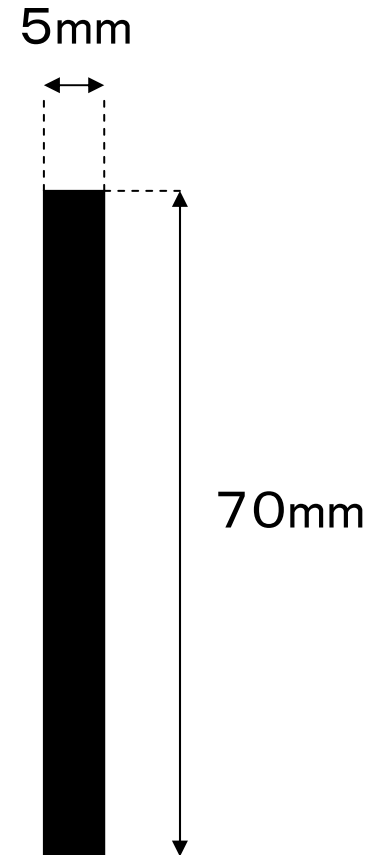
試料名 天然ゴム (NR)
ブチルゴム (IIR)
スチルブタジエンゴム (SBR)

形状 短冊状 (幅5mm, 高さ70mm)

チャック間隔 10mm

装置 島津製作所製

変位速度 1 (mm/min)
10 (mm/min)
100 (mm/min)

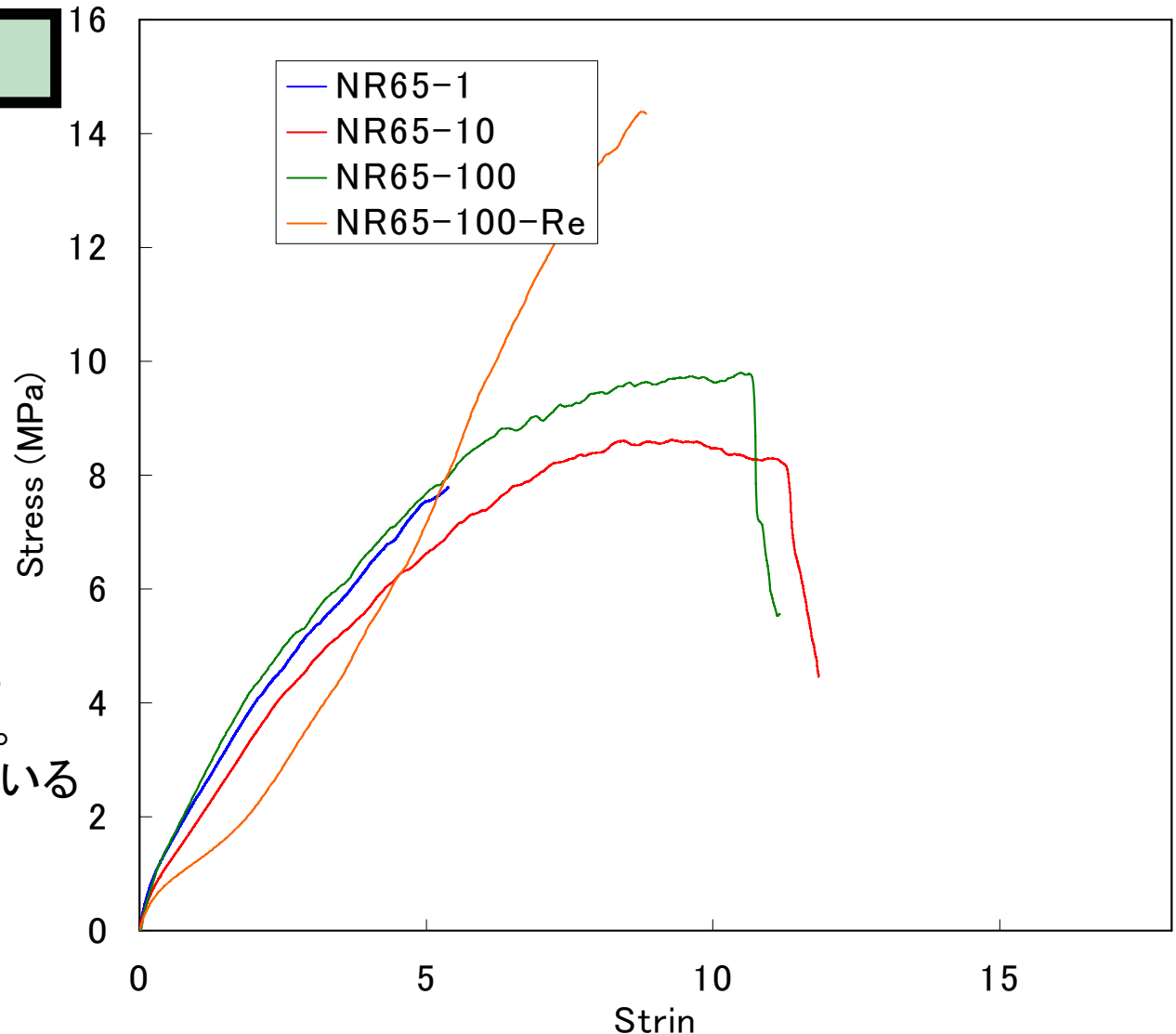


実験結果

NR-65 (天然ゴム)

速度による関連性は
みられなかった

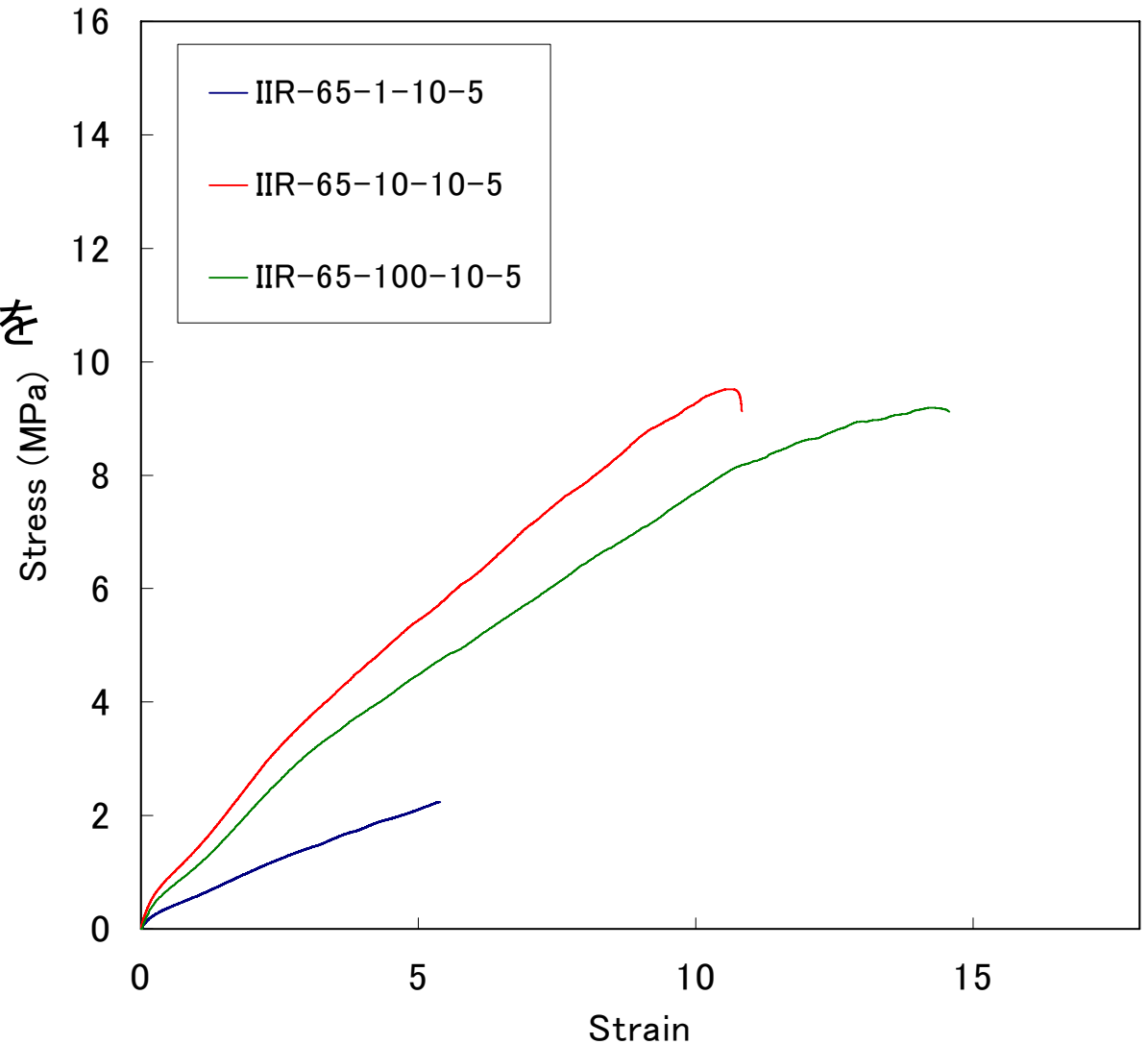
グラフからもわかるように
グラフ全体がぶれている。
これは試験体がすべっている
ことをあらわしている。



実験結果

IIR-65 (スチルゴム)

NRと同様に速度の関連性を
みることができなかった

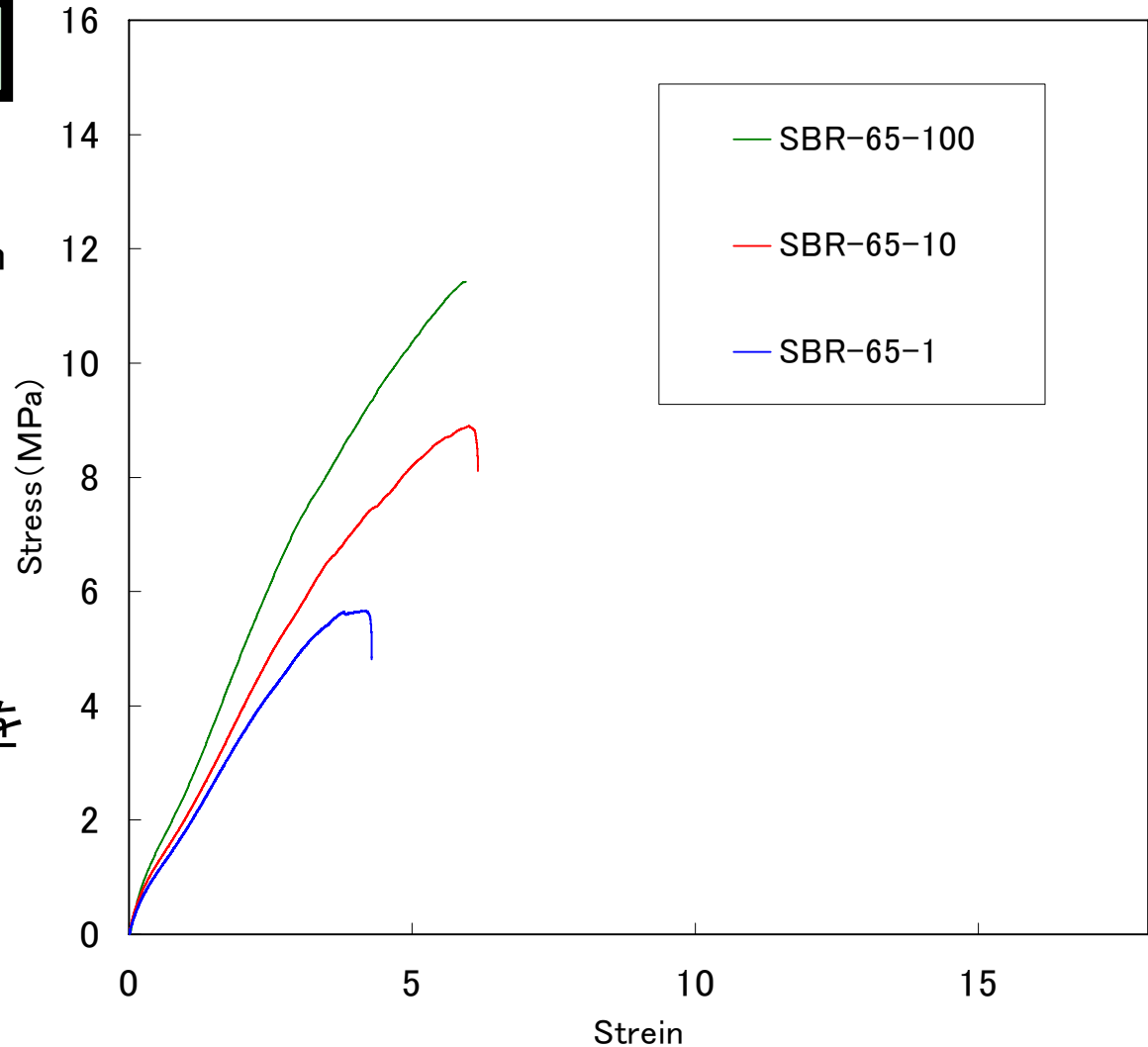


実験結果

SBR-65 (スチルブタジエンゴム)

100mm/min, 10mm/min, 1mm/min
の順に傾きが急になっている。

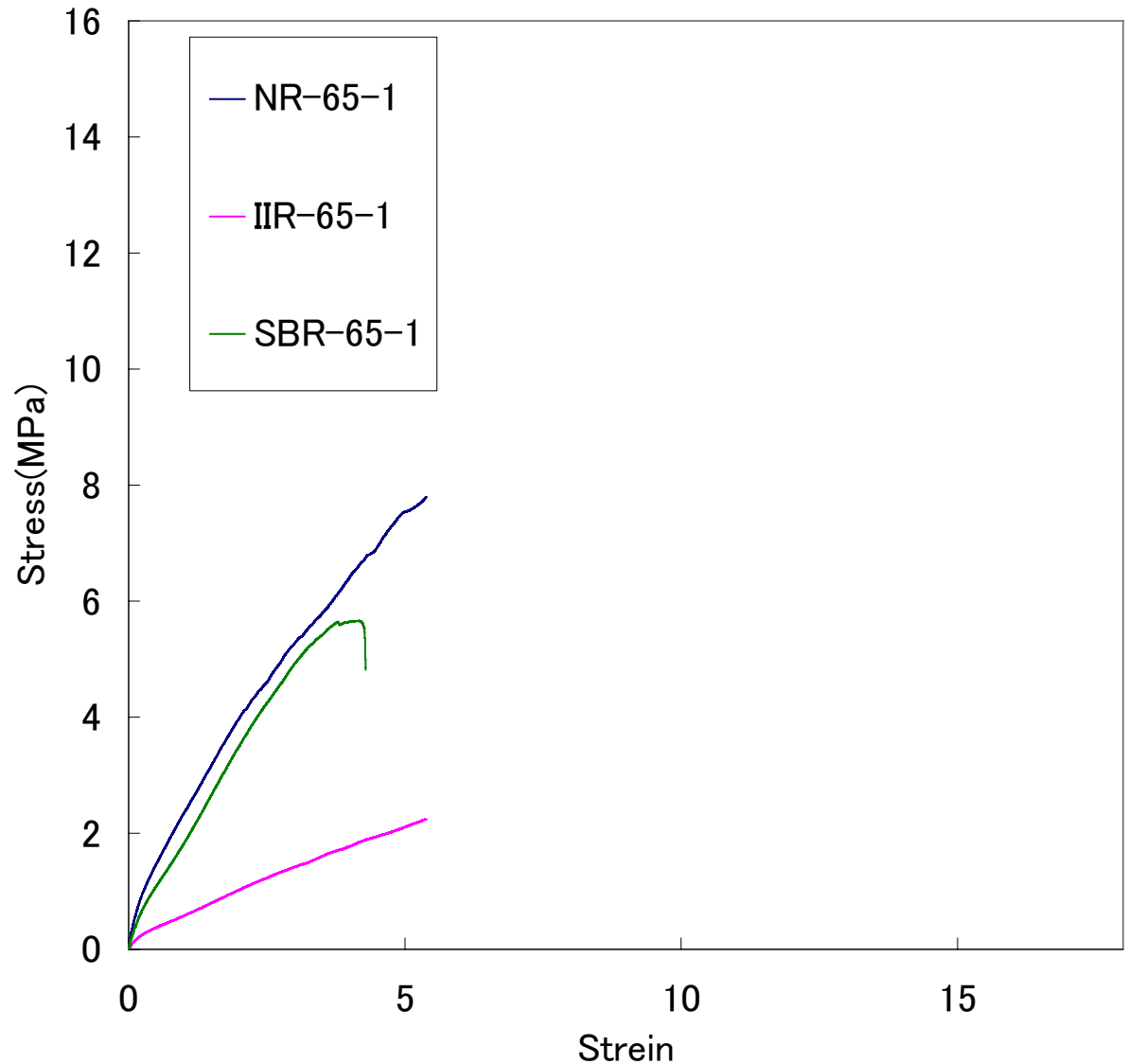
速く引っ張れば引っ張る程
硬くなるという**粘弾性**の性質を
確認することができた



実験結果

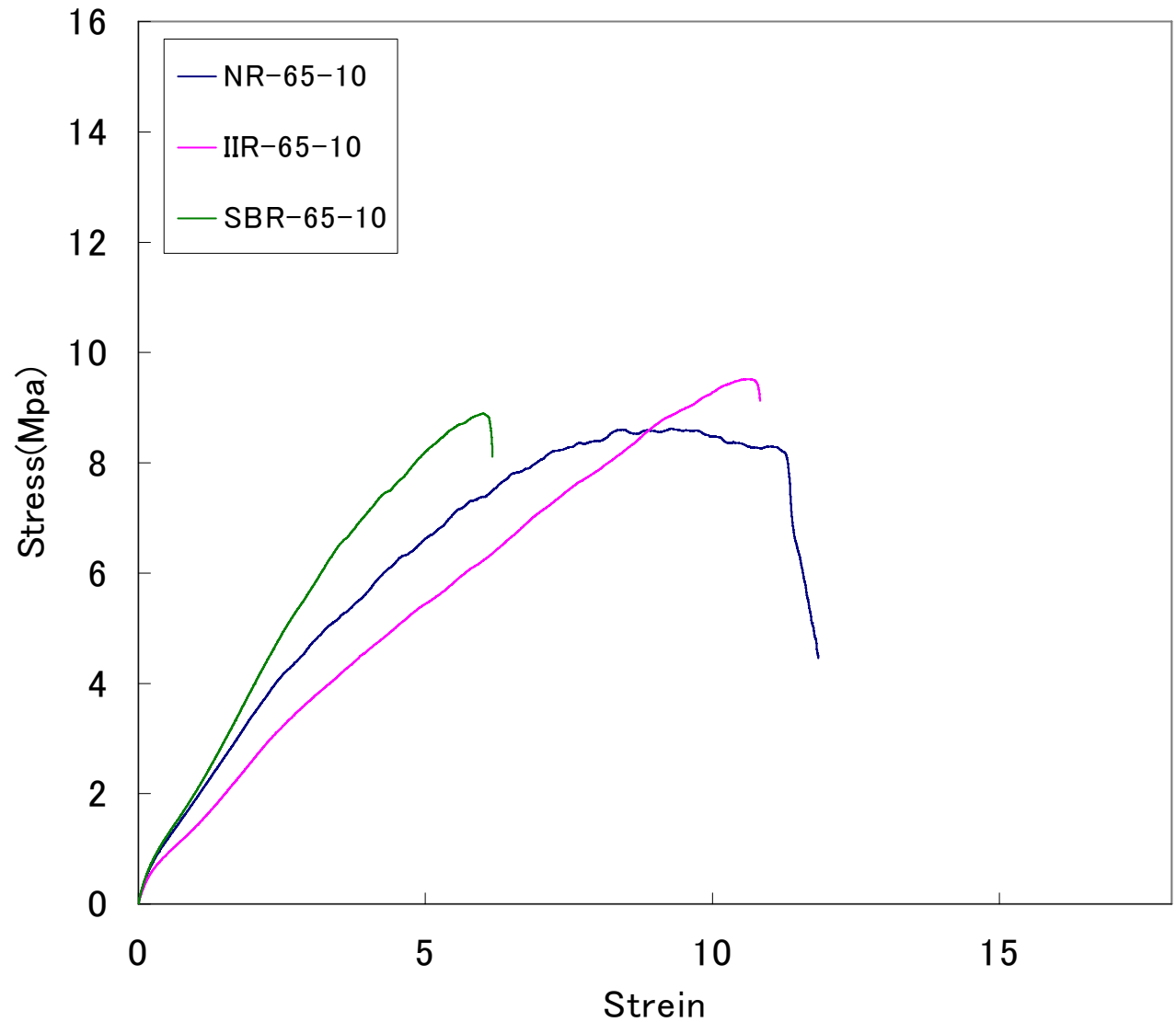
1mm/min

NR, SBR, IIRの
順に傾きが急である。



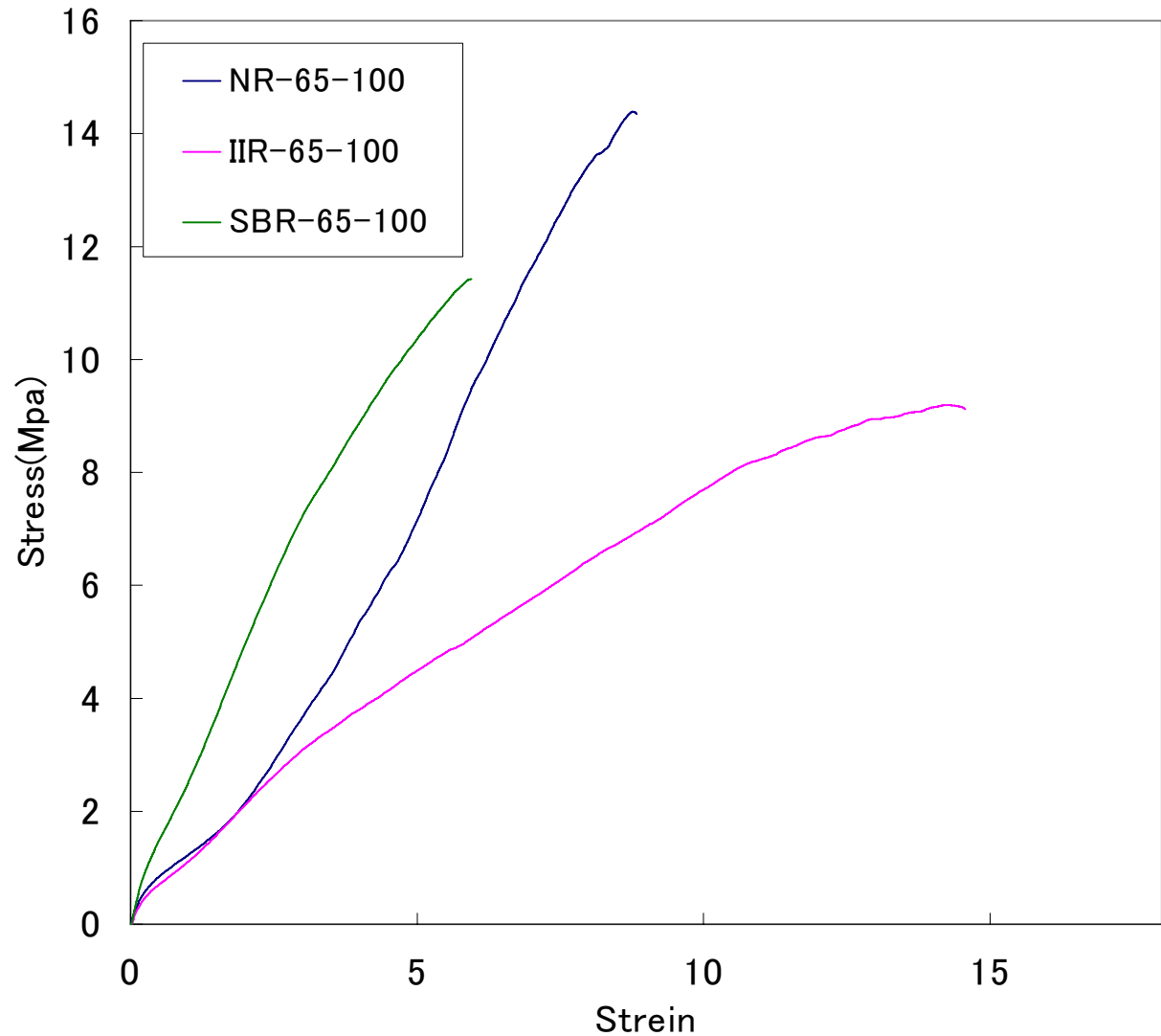
実験結果

10mm/min



実験結果

100mm/min



まとめ

●オートグラフを使い実験をする方法を理解することができた。

●SBRの実験では引張速度を上げると硬くなるというゴムの粘弾性の性質を確認することができた。

●種類別の比較についてはSBR, NR, IIRの順に傾きが急になっていた。

●実験において引張る際に試験体がすべってしまう問題を解決する必要がある。

●試験体が切れる位置がバラバラであった。

今後の展開・問題点

●試験体が滑ってしまう問題を解決する。

●試験体が切れる位置がバラバラであった問題点を解決する。

●ゴムの硬度を変えて様々な硬度に対しての実験を行う。

●今回は1, 10, 100 (mm/min)という速度で引張実験を行ったが様々な引張速度で実験を行う。

●今回は破断までの実験であったが、繰り返し実験を行いヒステリシスループについても考察する。

参考文献

- 1)日本ゴム協会:ゴム技術入門, 丸善株式会社, 2006.4
- 2)後藤学, 松島祥子, 皆川勝:ゴム鋼併用型耐震緩衝装置の開発,
平成15年度武蔵工業大学卒業論文概要集, 2003.2
- 3)玉井裕基:動的粘弾性測定によるゴムのエネルギー吸収性能の評価,
平成17年度武蔵工業大学卒業論文, 2006.3

試合予定

10月14日(土)

場所 アミノバイタルフィールド

2006 シーズン 第4戦

武蔵工業大学
HELIOS

VS

上智大学
Eagles

13:30 Kick Off

応援よろしく申し上げます

ゴムの弾性率とひずみ・変位速度関係

学生氏名 河野 学
指導教員 飯島正徳

Abstract : Recently, rubber is used for shock absorber in civil engineering. The present study, get to know more rubber's fundamental property as a result testing of rubber in tension. Show the stress-strain diagram, and relationship of elastic modulus and tension velocity, elastic modulus-strain diagram.

As a result elastic modulus depend on tension velocity. And relationship of elastic modulus and strain represent elastic modulus depend on hardening elastic range.

1. 緒言

大地震が発生した際、隣接桁間・桁と橋台間では衝突が発生し、その際高い衝突力が作用する。その衝突力を緩和するため、現在では衝突力の低減効果に優れること、繰り返し衝突に対応できること、比較的低コストであることなどからゴム製緩衝材を設置することが推奨されている¹⁾。本研究ではゴムの基礎的な物性を把握するために、ゴムの引張速度を変えて引張試験を行った。これらの結果から応力-ひずみ曲線をもとめ、引張速度の違いによる弾性率の速度依存性、破断強度・破断ひずみの変化について考察した。

2. 実験

[試料] 試料には、増容材など様々な配合剤を含む市販の天然ゴムのゴムバンド (NR-band) を選択した。なお詳しい配合は不明である。

[形状] 試料の形状は図-1 に示すようにバンド状であり、サイズは幅 15mm, 折径 100mm, 厚さ 1.1mmとした。試料はチャック固定用のピンに設置した。

[試験機] 試験機は島津製作所製のオートグラフ AGS-J 1KNを使用した。試験機の概容を図-2 に示す。測定は変位速度 50, 100, 200, 300, 400, 500mm/min の 6 通りで試料が破断するまで行った。サンプリング間隔は 0.1 秒とした。

[引張試験] 引張試験により試験体の荷重-変位関係を測定することができる。そこから材料の応力-ひずみ関係、弾性率、破断強度、破断ひずみなどといった材料の基本的な物性を知ることができる。

[応力とひずみの定義] 本研究では、試験体の荷重-変位関係から、公称応力-公称ひずみ関係を算出した。公称応力と公称ひずみの定義式を以下に示す。

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (1) \quad \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

ここで、 σ は公称応力、 F は荷重、 A_0 は初期の断面積、 ε は公称ひずみ、 L は試験体長さ、 L_0 は初期の試験体長さである。

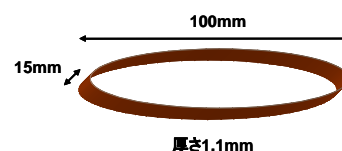


図-1 ゴムバンド

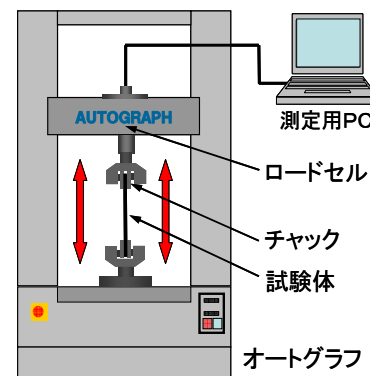


図-2 オートグラフ

3. 結果と考察

①ゴムのエネルギー弾性とエントロピー弾性

ゴムの応力-ひずみ曲線を図-3 に示す。この図からわかるようにゴムの応力-ひずみ曲線は非線形挙動²⁾で、ひずみ硬化型である。これはゴムの弾性がエネルギー弾性とエントロピー弾性から成り³⁾、ひずみによって支配的になる弾性が変化するためである。引張速度が異なる場合のNR-bandの応力-ひずみ曲線を図-4 に示す。図-4 より、引張速度が速いほど傾きが急になっており弾性率が上昇していることがわかる。これより引張速度が速いほど弾性率が上昇する、ゴムの弾性率の速度依存性を確認することができた。また今回は前回の反省であったゴムの滑りを考慮して試験片の形状を短冊形からバンド状にした。図-4、図-5 を比較してもわかる通りゴムの滑りが改善され、

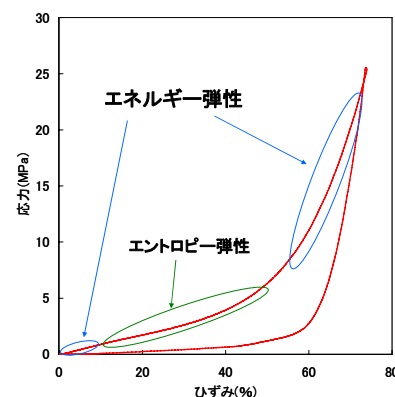


図-3 ゴムの応力-ひずみ曲線

ゴムの大変形領域までの挙動をみることができるようになった。

②ゴムの弾性率とひずみの関係，弾性率と変位速度の関係

ゴムの弾性率とひずみの関係を図-6に示す。この図より弾性率-ひずみ関係は、大きく3つの領域に分けて考えることができる。1つめはゴムを引張始めてすぐの初期弾性領域，2つめは弾性率が横ばいになるエントロピー弾性領域，3つめは弾性率が急激に上昇していくエネルギー弾性領域⁴⁾である。それぞれの領域について，初期弾性率の最大値 E_1 ，ひずみが100~200%における弾性率の平均値 E_2 ，ひずみが600%のときの弾性率 E_3 のように弾性率を定義した。 E_1 ， E_2 ， E_3 と引張速度の関係をそれぞれ図-7，図-8，図-9に示す。図-7より， E_1 は引張速度300 mm/minまでは速度と共に増加しているが，引張速度400，500 mm/minでは弾性率は変化していない。これより E_1 はある速度を超えると一定の弾性率に収束すると考えられる。図-8と図-9より， E_2 ， E_3 は速度の上昇と共に上昇していることがわかる。弾性率と変位速度の間に線形関係があると仮定し，実験結果を一次関数でフィットした。フィットした直線上の2点(引張速度100mm/minと600mm/minを外挿)を用いて弾性率の増加率を求めたところ， E_2 増加率が約34%であるのに対して E_3 の増加率は51%という結果になった。したがって，エネルギー弾性領域では弾性率の引張速度依存性が強いと考えられる。

③破断強度と変位速度関係，破断ひずみと変位速度関係

変位速度と破断強度の関係図を図-10に，変位速度と破断ひずみの関係図を図-11に示す。引張速度100，300，500 mm/minの際に，それぞれ破断強度の平均値は11.8MPa，12.8MPa，12.7MPaとなり，破断ひずみの平均値は754%，770%，765%となった。平均値の変化に比べ，実験結果のばらつきが大きいので，今回の実験では引張速度と破断強度・破断ひずみの関連を見出すことはできなかった。

4. 今後の展開

- 画像処理機を用いて，真応力・真ひずみの測定をする。
- ゴムの圧縮試験をおこない引張・圧縮のエネルギー吸収量を測定する。
- 実験結果を理論式にフィットし考察する。

[参考文献]

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1996.12.
- 2) 日本ゴム協会：ゴム技術入門，丸善株式会社，2006.4.
- 3) 久保亮五：ゴム弾性，河出書房，1952.4.
- 4) 日本規格協会：ゴムのおはなし，日本規格協会，2002.4.

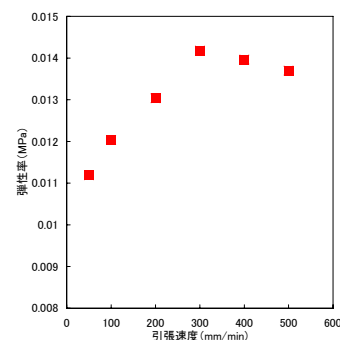
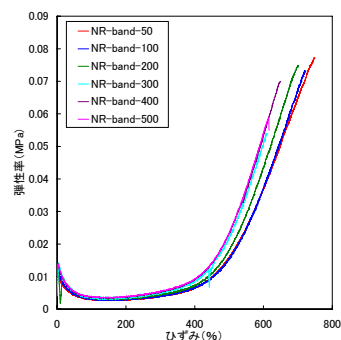
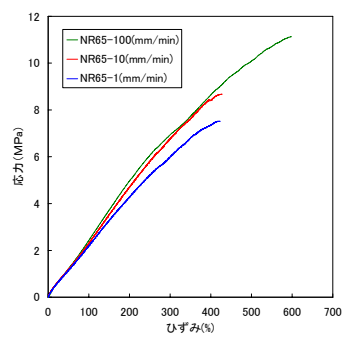
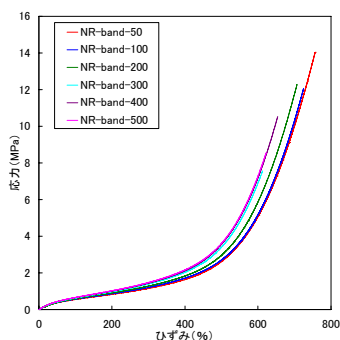


図-4 NR-bandの応力-ひずみ曲線

図-5 NR65 応力-ひずみ関係 (短冊状)

図-6 ゴムの弾性率とひずみの関係

図-7 初期弾性率-変位速度関係

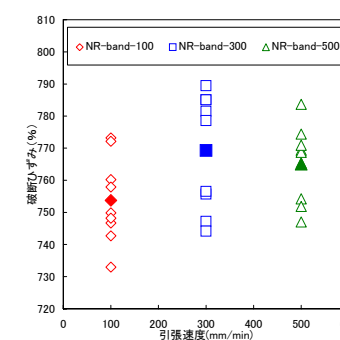
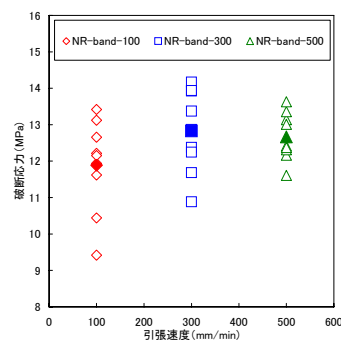
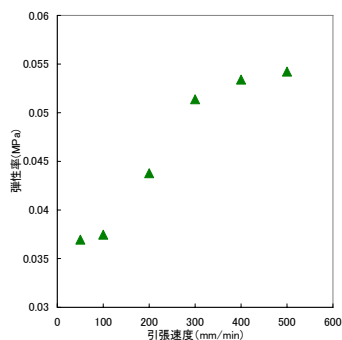
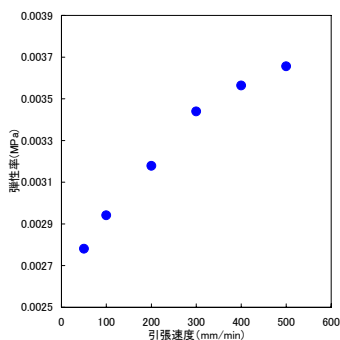


図-8 エントロピー弾性域の弾性率

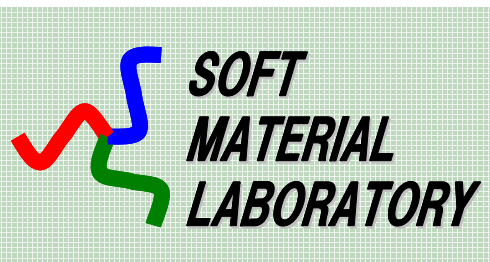
図-9 硬化弾性率-変位速度関係

図-10 変位速度と破断応力の散布図

図-11 変位速度と破断ひずみの散布図

2006年 12月7日
ソフトマテリアル研究室 中間発表

ゴムの弾性率と ひずみ・変位速度関係



学生氏名 河野 学
指導教員 飯島正徳

現状

マテ研へきて3ヶ月

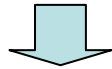
週6日程度の研究



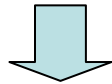
週7日程度の部活で頑張っております

研究背景

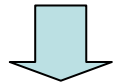
大規模な地震が発生



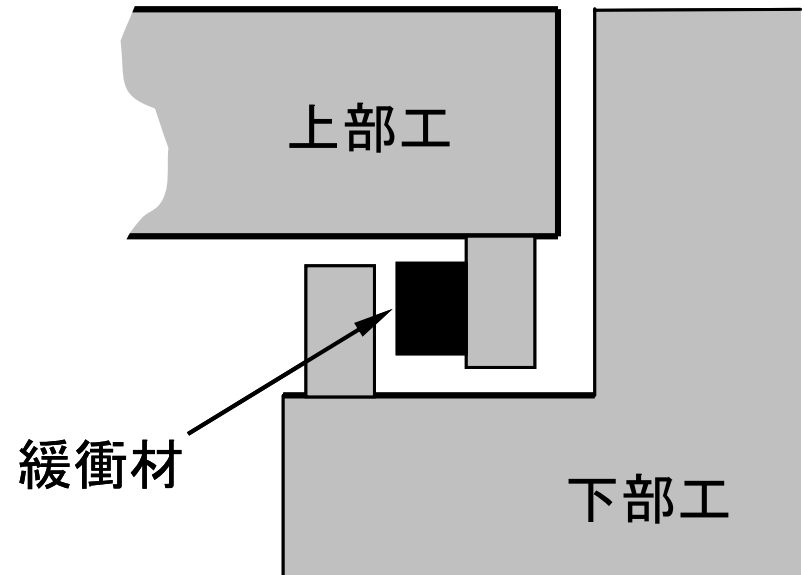
橋梁の隣接桁間に
高いレベルの衝撃が生じる



落橋などの被害



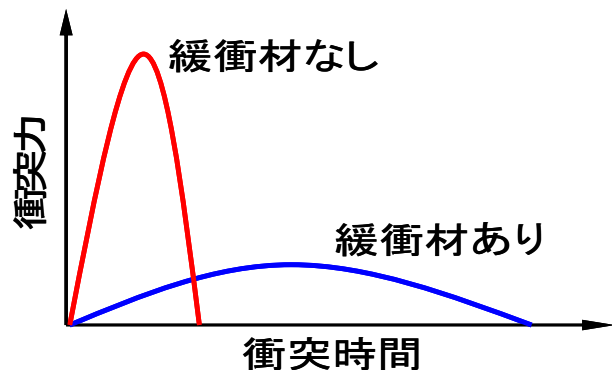
桁の橋台間あるいは桁同士の衝突エネルギーを吸収
するための**緩衝材**が必要になる



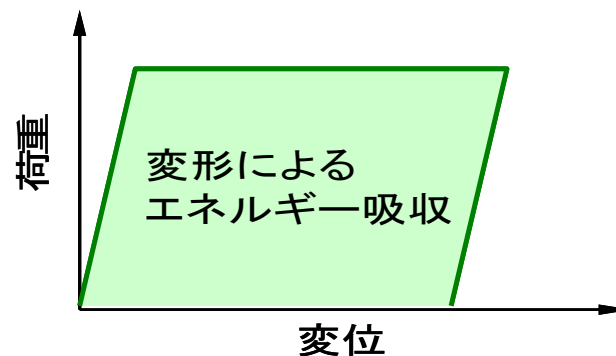
緩衝材に要求される性能



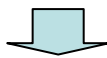
衝突力の低減効果



エネルギー吸収性



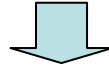
衝突力の低減効果、繰り返し衝突、低コストを兼ね備え持つ緩衝材



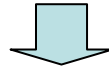
ゴム製緩衝材

研究目的

様々な変位速度で引張試験を行う



応力-ひずみ曲線を比較する



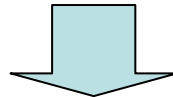
異なる変位速度によるゴムの応力-ひずみ曲線の変化について検証した

弾性率とひずみの関係

弾性率と変位速度関係

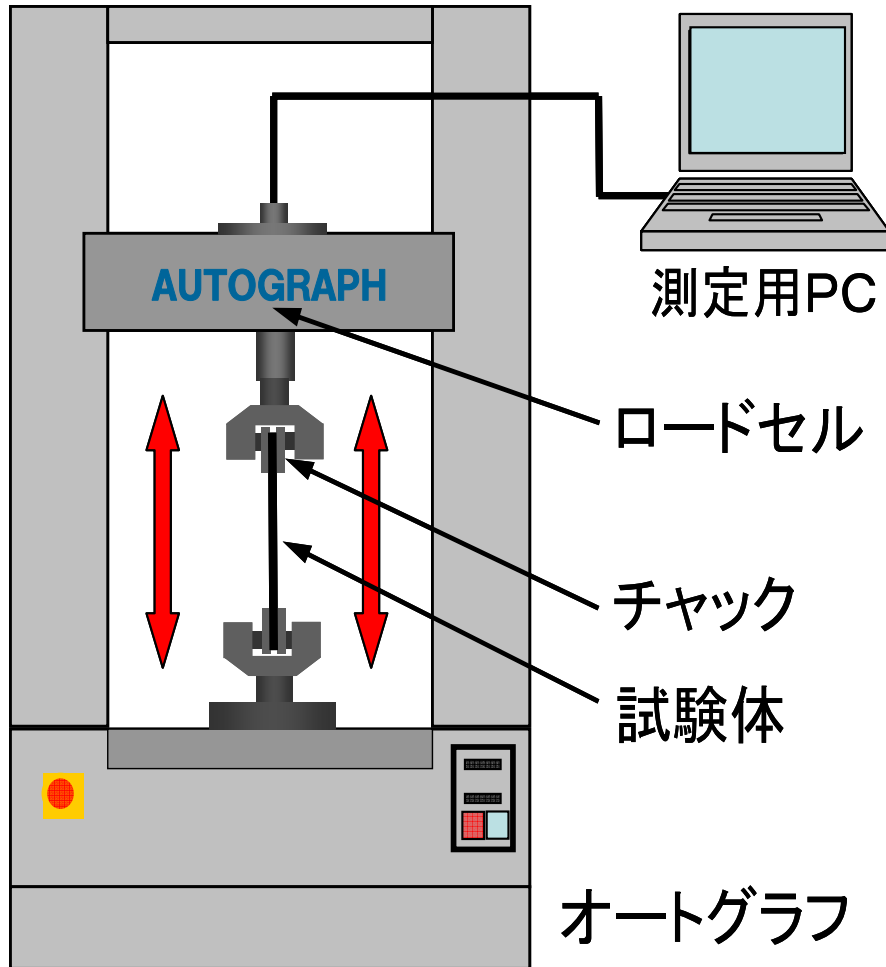
破断応力と変位速度関係

破断ひずみと変位速度関係



変位速度の違いによる弾性率・破断ひずみ・破断応力の変位速度関係を検証した

引張試験



荷重-変位関係



応力-ひずみ関係



弾性率

破断応力

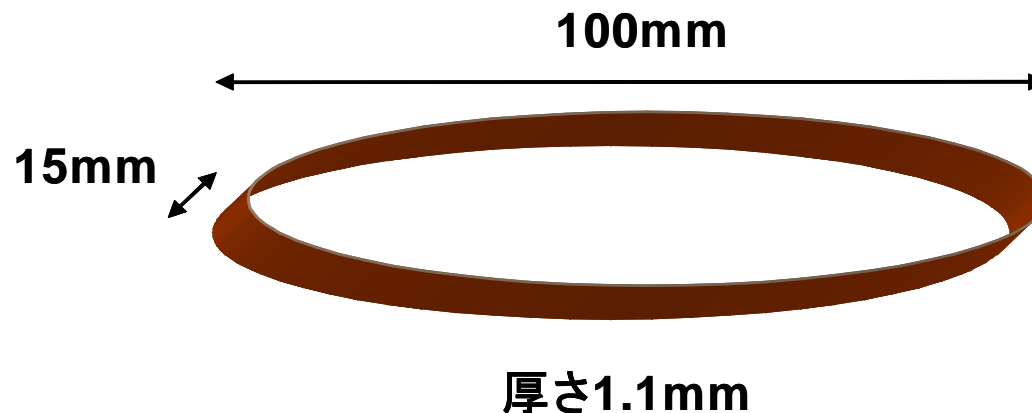
破断ひずみ

島津製作所製 オートグラフAGS-J
1KN

実験概要

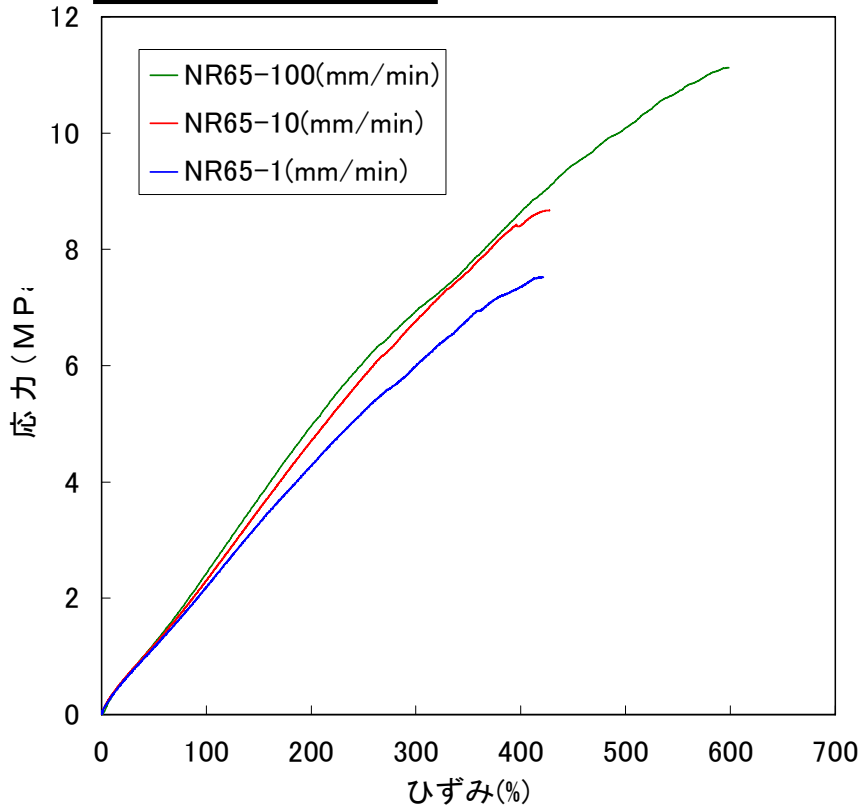
試料名	天然ゴム (NR band)		
形状	バンド (幅15mm, 折径 100mm, 厚さ1.1mm)		
チャック間隔	10mm		
装置	島津製作所製 オートグラフAGS-J 1KN		
変位速度	50 (mm/min)	100 (mm/min)	200 (mm/min)
	300 (mm/min)	400 (mm/min)	500 (mm/min)
サンプリング間隔	0.1秒		

NR band

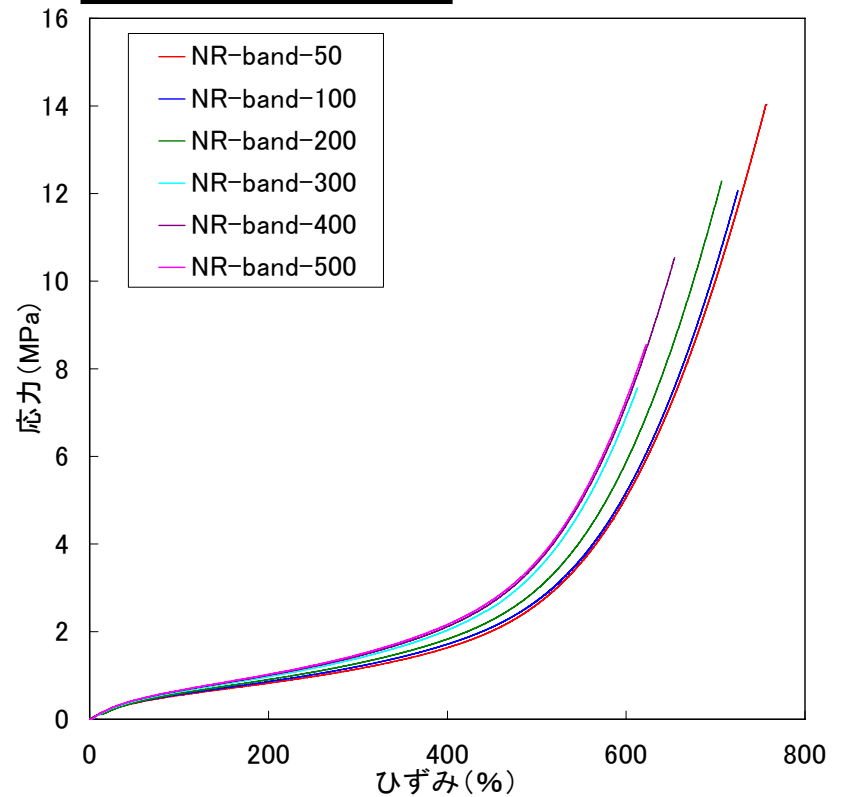


実験結果

短冊状試験片



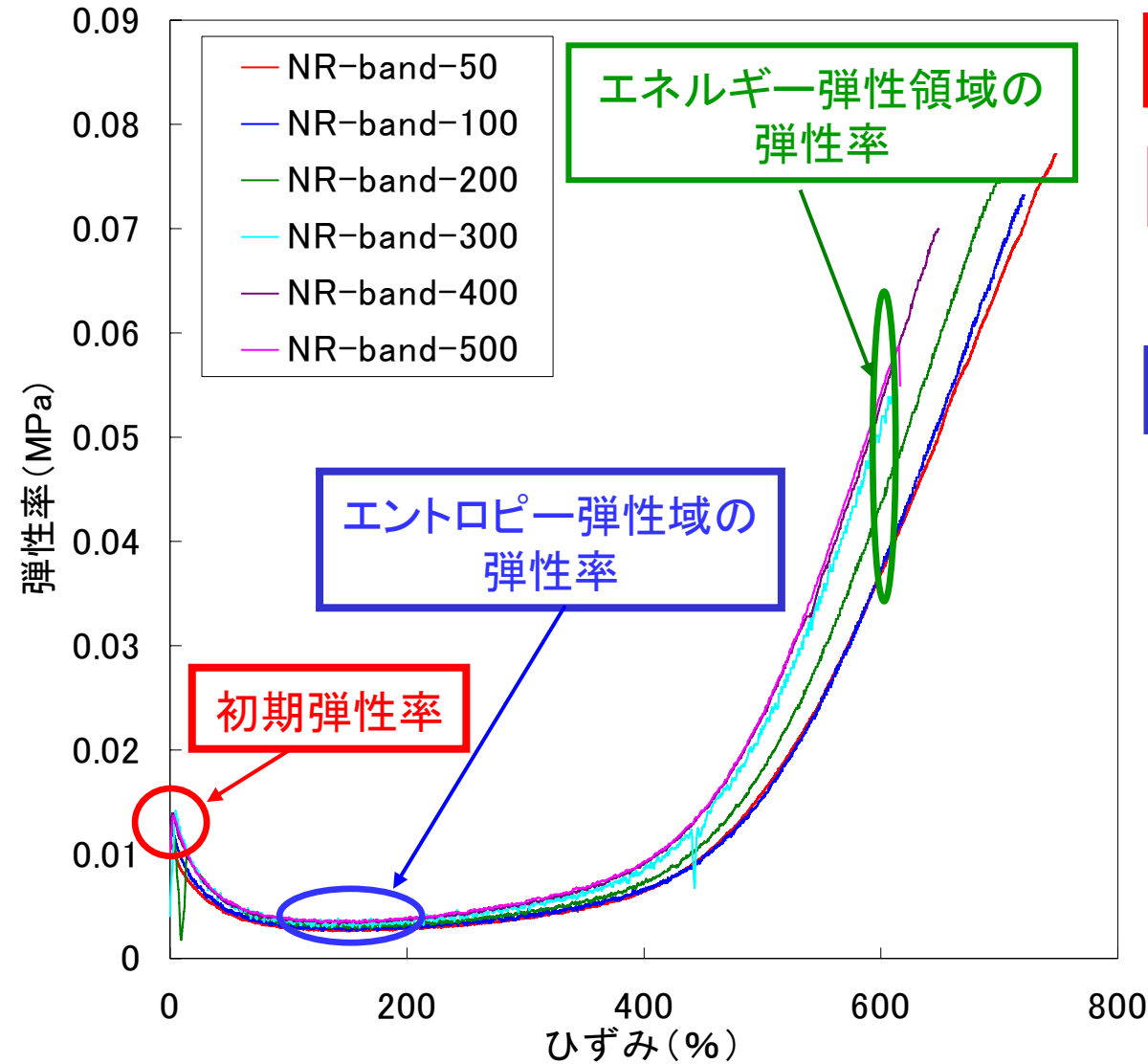
バンド状試験片



試験片のすべりがなくなった

大変形域までの挙動を確認できるようになった

実験結果



初期弾性率

初期弾性の最大値

エントロピー弾性域の弾性率

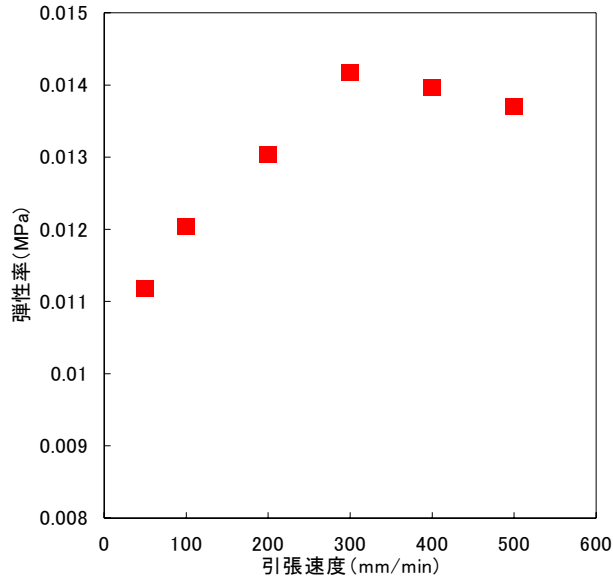
ひずみが100%~200%の
ときの弾性率の平均値

エネルギー弾性領域の弾性率

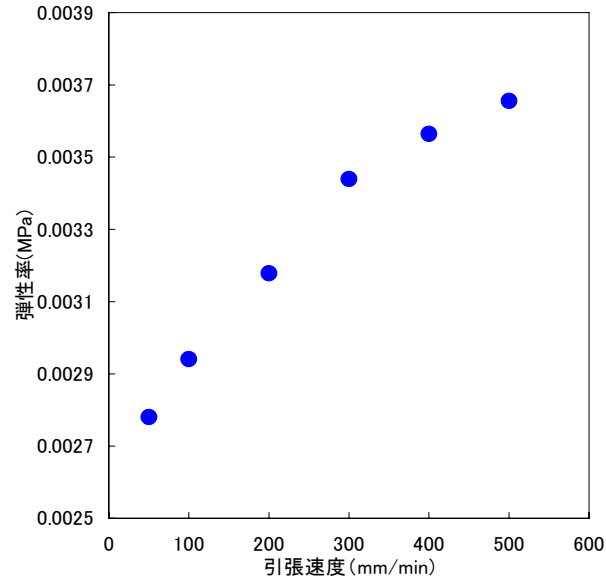
ひずみが600%の
ときの弾性率

実験結果

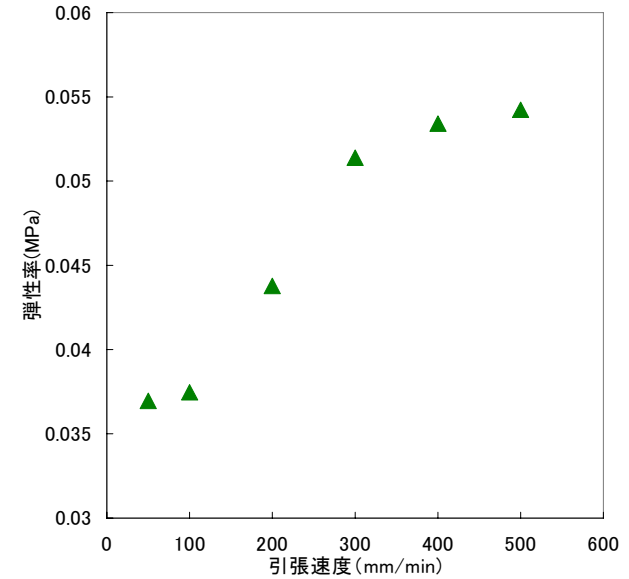
初期弾性率



エントロピー弾性域の弾性率



エネルギー弾性領域の弾性率



引張速度300mm/minまでは速度の増加と共に弾性率も増加している

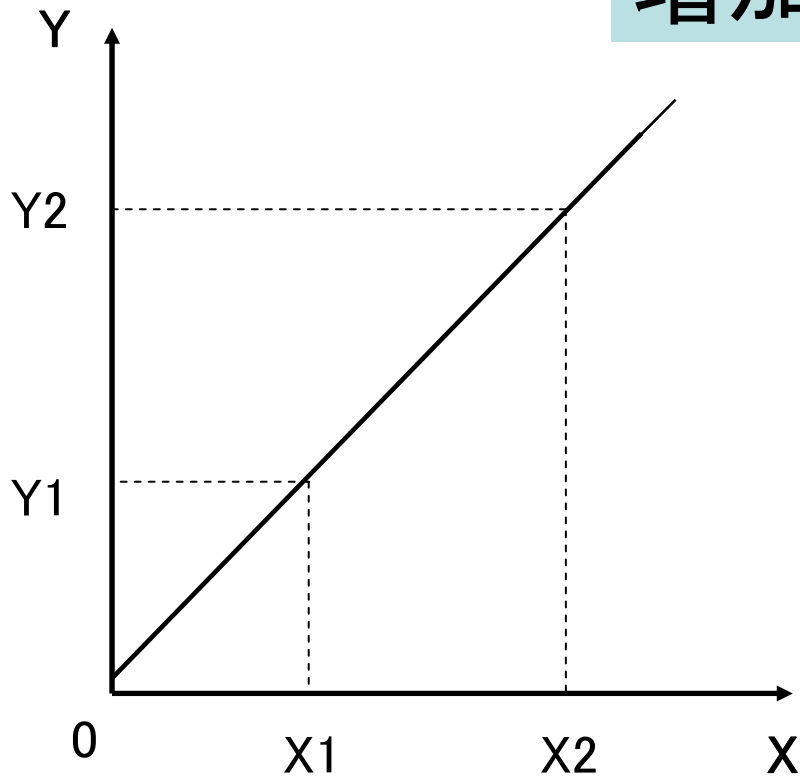
速度の増加と共に弾性率も増加している

速度の増加と共に弾性率も増加している

引張速度300, 400, 500mm/minのときの弾性率はほとんど変化がないといえる

弾性率の増加率の定義

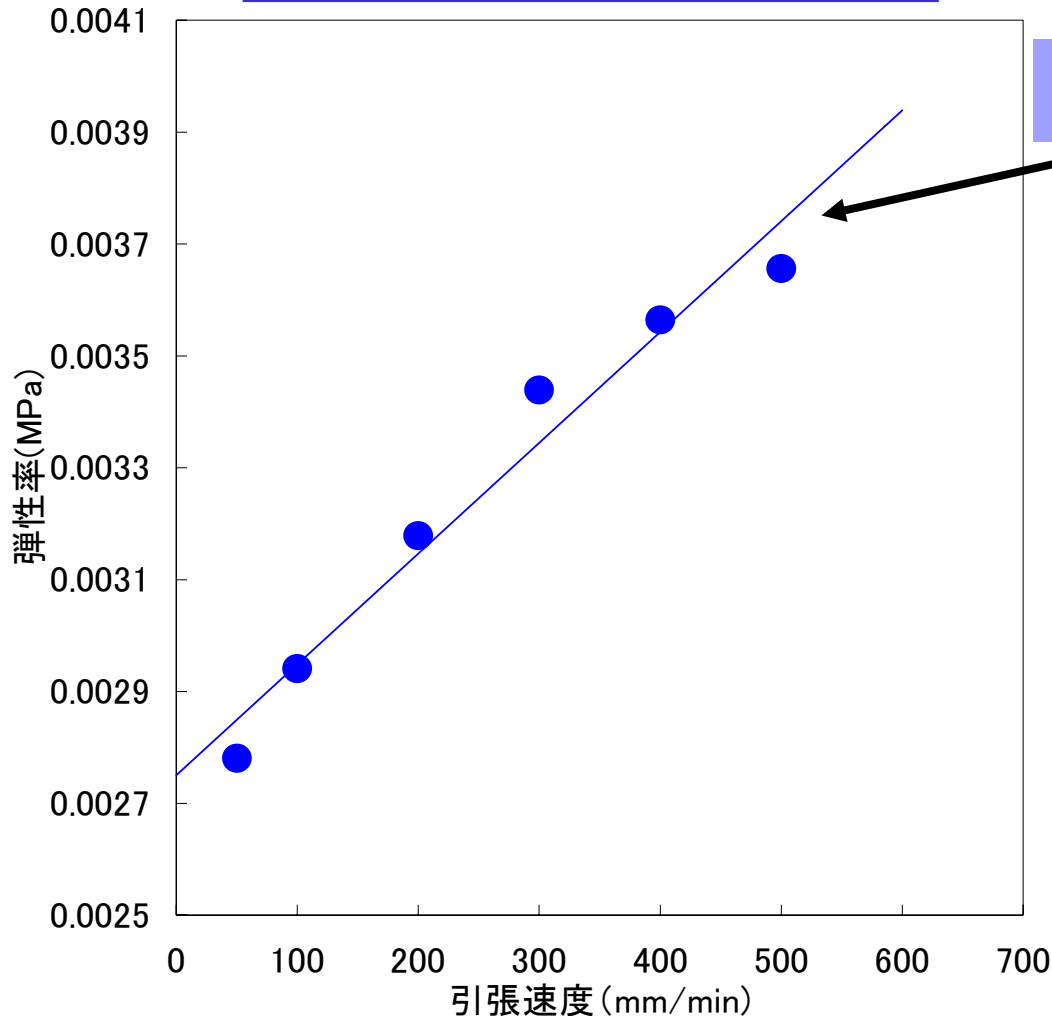
$$\text{増加率} = (Y2 - Y1) / Y1 \times 100$$



値の大・小に関らず弾性率の速度依存性を比較するために上記の式を自分で勝手に定義した

実験結果

エントロピー弾性域の弾性率



$$Y=0.000001981X + 0.00275$$

$$Y1 = 0.0029481$$

(X=100mm/min)

$$Y2 = 0.0039386$$

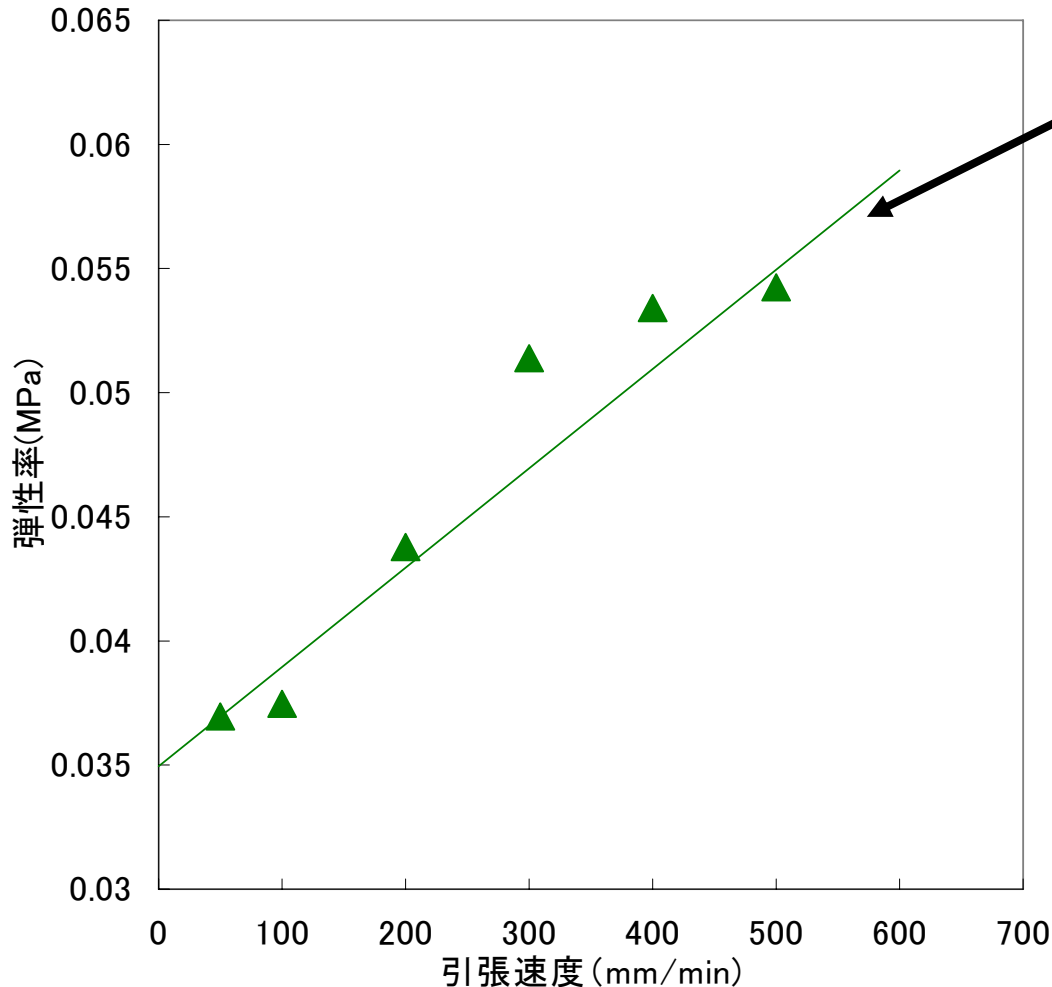
(X=600mm/min)

$$(Y2-Y1)/Y1 \times 100 = 33.60$$

約34%の増加率である

実験結果

エネルギー弾性領域の弾性率



$$Y=0.00004X + 0.03495$$

$$Y1=0.03895 \quad Y2=0.05895$$

(X=100mm/min) (X=600mm/min)

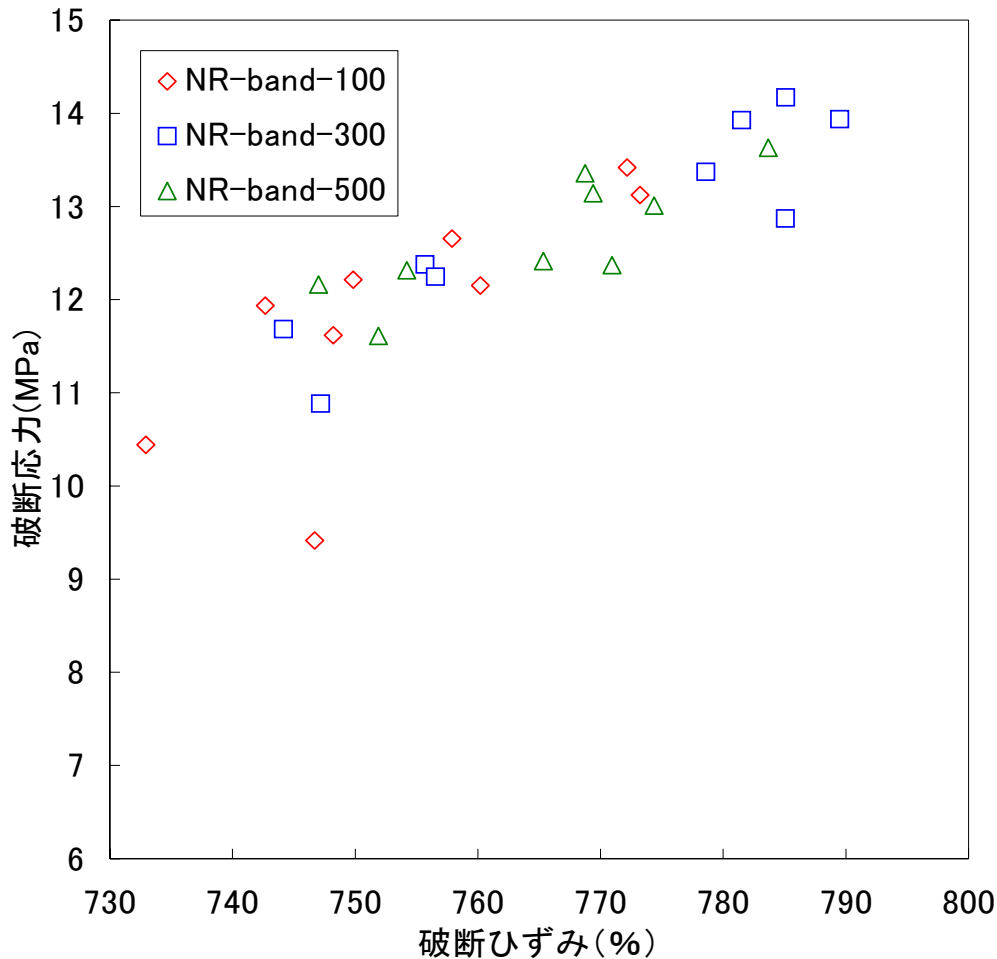
$$(Y2-Y1)/Y1 \times 100 = 51.35$$

約51%の増加率である

エネルギー弾性領域では弾性率の引張速度依存性が強いと考えられる

実験結果

破断応力-破断ひずみ関係

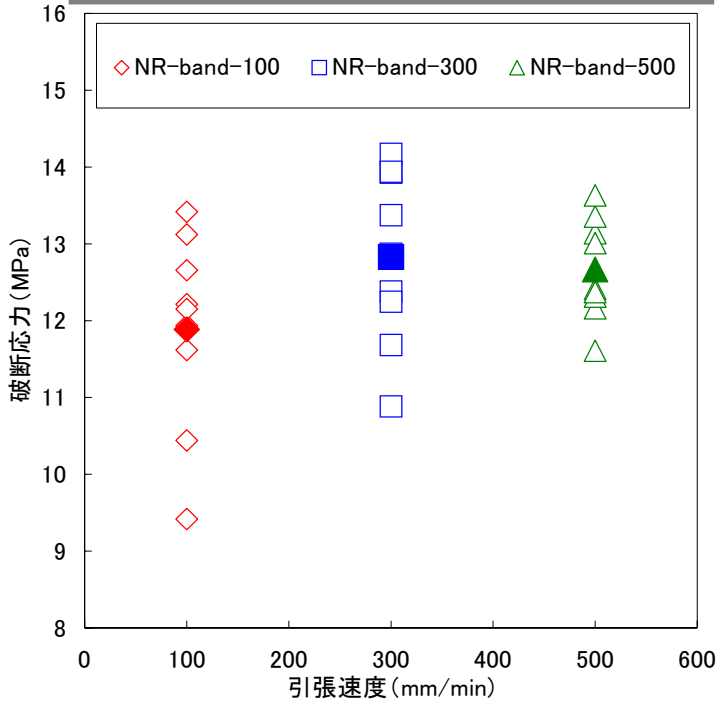


引張速度100, 300, 500mm/min
全てばらつきがある

引張速度300mm/minのときが
比較的破断応力・破断ひずみ
共に大きな値を示している

実験結果

破断応力と変位速度関係

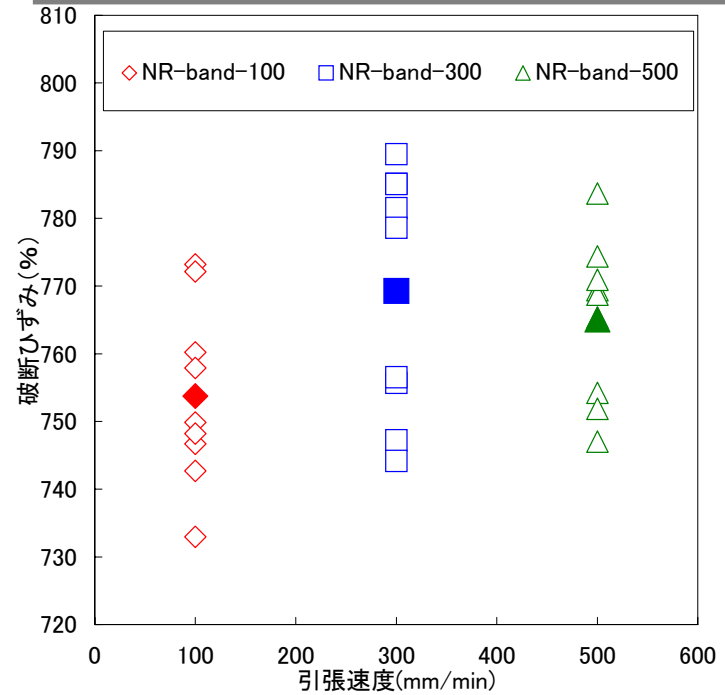


11.8MPa

12.8MPa

12.7MPa

破断ひずみと変位速度関係



754%

770%

765%

平均値の変化に比べ、実験結果のばらつきが大きいので、今回の実験では引張速度と破断強度・破断ひずみの関連を見出すことはできなかった。

まとめ

●前回の反省であった試験片の滑りという問題をバンド状にすることにより改善することができた。

●応力-ひずみ曲線の大変形領域の挙動を確認することができた。

●弾性率とひずみの関係より弾性率の速度依存性が強い領域を確認することができた。

●破断応力・破断ひずみについては平均値の変化に比べ、実験結果のばらつきが大きいので、今回の実験では引張速度と破断強度・破断ひずみの関連を見出すことはできなかった。

今後の展開

・画像処理機を用いて、真応力・真ひずみの測定をする。

・ゴムの圧縮試験をおこない引張・圧縮のエネルギー吸収量を測定する。

・実験結果を理論式にフィットし考察する。

参考文献

- 1)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12
- 2)日本ゴム協会:ゴム技術入門, 丸善株式会社, 2006.4
- 3)丸山健司,渡辺大輔:熱量測定によるゴムのエネルギー吸収性能の評価,平成17年度武蔵工業大学修士論文,2005.2.
- 4)日本規格協会:ゴムのおはなし, 日本規格協会, 2002.4

12月10日(日) 13:30 より アミノバイタル
フィールドにて神奈川大学と1部入れ替え戦が行
われます。応援よろしくお願ひします。



1部昇格

ゴムの真応力-真ひずみ関係と応力緩和

学生氏名 河野 学
指導教員 飯島正徳

Abstract : Recently, rubber is used for shock absorber in civil engineering. The present study, get to know more rubber's fundamental property as a result testing of rubber in tension. Show the stress-strain diagram, and relationship of elastic modulus and tension velocity, elastic modulus-strain diagram. As a result elastic modulus depend on tension velocity. And relationship of elastic modulus and strain represent elastic modulus depend on hardening elastic range.

1. 緒言

大地震が発生した際、隣接桁間・桁と橋台間では衝突が発生し、その際高い衝突力が作用する。その衝突力を緩和するため、現在では衝突力の低減効果に優れること、繰り返し衝突に対応できること、比較的lowコストであることなどからゴム製緩衝材を設置することが推奨されている¹⁾。本研究ではゴムの基礎的な物性を把握するためにゴムの引張速度を変えての引張試験、変位・引張速度を変えての応力緩和試験を行った。これらの結果から、引張速度の違いによる勾配（真応力と真ひずみの傾き）の速度依存性、参考文献の解析から緩和応力と時間の関係について考察した。

2. 実験

[試料] 試料には、増容材など様々な配合剤を含む市販の天然ゴムのゴムバンド（NR-band）を選択した。なお詳しい配合は不明である。

[形状] 試料の形状は図-1 に示すようにバンド状であり、サイズは幅 6mm、折径 100mm、厚さ 1.1mmとした。試料はチャック固定用のピンに設置した。

[試験機] 試験機は島津製作所製のオートグラフAGS-J 1KNを使用した。試験機の概容を図-2 に示す。

[引張試験] 引張試験により試験体の荷重-変位関係を測定することができる。そこから材料の応力-ひずみ関係、弾性率、破断強度、破断ひずみなどといった材料の基本的な物性を知ることができる。今回、測定は変位速度 50, 100, 200, 300, 400, 500mm/minの 6 通りで試料が破断するまで行った。サンプリング間隔は 0.1 秒とした。

[応力とひずみの定義] 本研究では、試験体の荷重-変位関係から、公称応力-公称ひずみ関係、体積変化が一定とした際の真応力-真ひずみ関係を算出した。公称応力と公称ひずみ、真応力と真ひずみ、また真応力と真ひずみの傾き（勾配）の定義式を以下に示す。

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \quad \varepsilon_n = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\sigma_i = \sigma_0(\varepsilon_0 + 1) \quad \varepsilon_i = \ln(\varepsilon_0 + 1) \quad E_i = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}$$

ここで、 σ_0 は公称応力、 F は荷重、 A_0 は初期の断面積、 σ_i は真応力である。 ε_0 は公称ひずみ、 L は試験体長さ、 L_0 は初期の試験体長さ、 ε_i は真ひずみである。 E_i は真応力と真ひずみの傾き（勾配）である。

[応力緩和試験] 応力緩和とはゴムに一定の変形を長い時間かけると時間経過と共に応力がゆっくりと減少していく現象をいう。本研究では引張速度 100, 300, 500mm/minの 3 通りで行い、変位は 500mmで行った。サンプリング間隔は 2 秒とした。応力緩和の定義式を以下に示す。

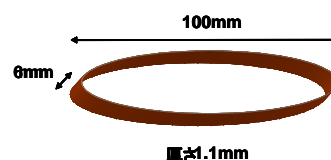


図-1 ゴムバンド

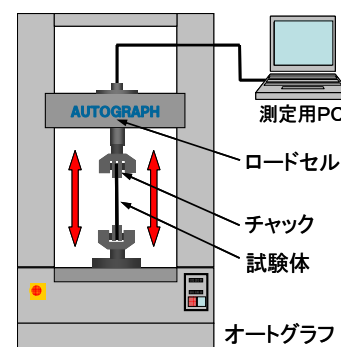


図-2 オートグラフ

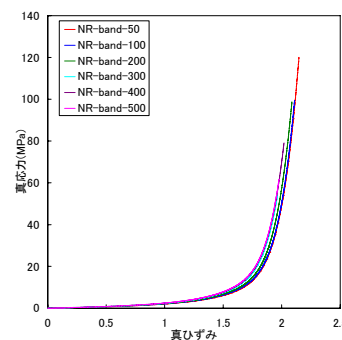


図-3 ゴムの応力-ひずみ曲線

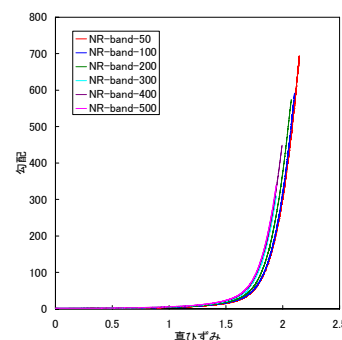


図-4 ゴムの応力-ひずみ曲線

$$p = p_0 e^{\frac{-t}{M}} \quad M = \frac{\eta}{\gamma}$$

ここで p は時刻 t における応力、 p_0 は最初の応力、 η は粘性率、 γ は弾性率である。

3. 結果と考察

①ゴムの真応力-真ひずみ関係

引張速度が異なる場合のNR-bandの真応力-真ひずみ曲線を図-3 に示す。図-3 より、引張速度が速いほど曲線の傾きが急になっていることがわかる。これより真応力-真ひずみの関係において、引張速度が速いほど勾配が上昇する（硬くなっていく）勾配の速度依存性を確認することができた。

②Eと真ひずみの関係、Eと変位速度の関係

Eと真ひずみの関係を図-4 に示す。前回は3領域に分けて考察したが、今回は領域を細かく分けるために、真ひずみが0.05~1.95の間を9つの領域に分けて考察した。その中で真ひずみが0.25, 1.5, 1.95のときのEと引張速度の関係を図-5, 図-6, 図-7 に示す。図-5 より、真ひずみが0.25のときは速度の増加と共にEも上昇しているため、Eと引張速度の間に線形関係があると考察することができる。図-6と図-7より真ひずみが1.5, 1.95のときは、Eは引張速度300 mm/minまでは速度と共に増加しているが、引張速度400, 500 mm/minではEの変化をほとんどみることができない。これより高ひずみの領域においては、ある速度を超えると一定の値Eに収束すると考察することができる。

③ゴムの応力緩和

参考文献 5) の解析を参考にしてゴムの応力緩和試験における真応力と時間の関係を解析した。応力緩和試験の真応力と時間の関係を図-8 に示す。参考文献 5) では2500秒で応力は一定の値に収束しているのに対して、ゴムは80000秒を過ぎてもまだ応力は緩和し続けている。これは最大応力から緩和していき変化していく応力を引いた値 Δ 応力と時間の関係 (図-9) からもうことが出来る。参考文献 5) では Δ 応力是对数目盛で 10^4 秒までは直線的になり、そこから一定の Δ 応力に収束しているが、ゴムは図-9 からわかる通り 10^5 秒においても Δ 応力は増加し続けている。これよりゴムの応力は経過時間に関係なく減少していくと考察することができる。よって文献 5) で述べている粘性成分と弾性成分とを、応力緩和試験によって分けることはゴムではできないと考察できる。

4. 今後の展開

- 様々な引張速度・変位で応力緩和試験を行う。
- 圧縮の応力緩和試験を行う。
- ゴムの圧縮試験をおこない引張・圧縮のエネルギー吸収量を測定する。

[参考文献]

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12.
- 2) 日本ゴム協会：ゴム技術入門，丸善株式会社，2006.4.
- 3) 久保亮五：ゴム弾性，河出書房，1952.4.
- 4) Macromolecules 2004：A Model Treating Tensile Deformation of Semicrystalline Polymers 2004
- 5) 日本ゴム協会：ゴム技術の基礎，日本ゴム協会 1983.4.1

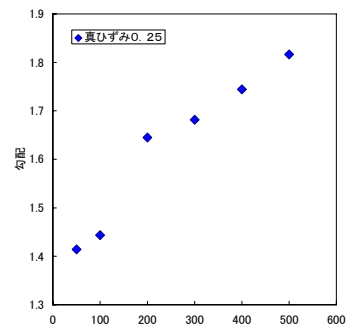


図-5 真ひずみ 0.25 の
勾配-引張速度関係

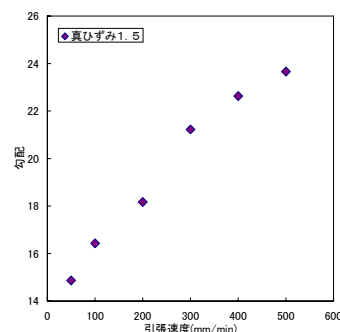


図-6 真ひずみ 1.5 の
勾配-引張速度関係

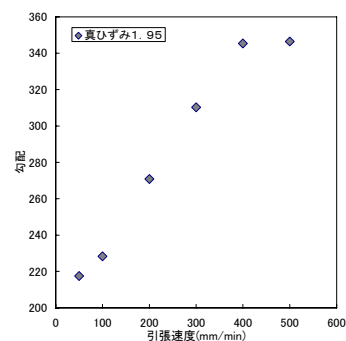


図-7 真ひずみ 1.95 の
勾配-引張速度関係

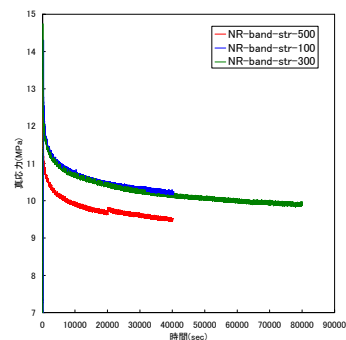


図-8 真応力-時間関係

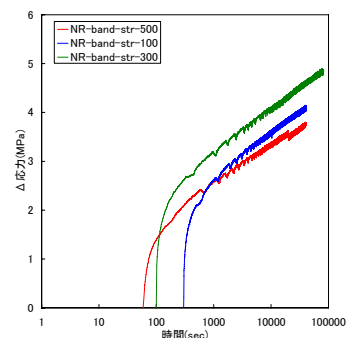
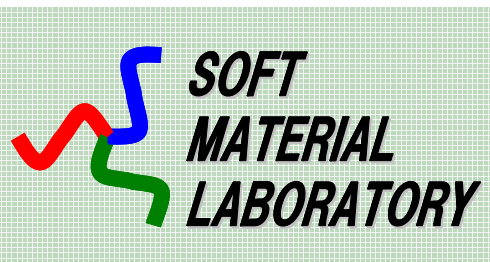


図-9 Δ応力-時間関係

2006年 12月28日
ソフトマテリアル研究室 中間発表

ゴムの真応力-真ひずみ関係 と応力緩和



学生氏名 河野 学
指導教員 飯島正徳

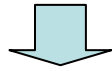
現状

HELIOS 1部昇格

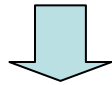
素晴らしい研究の
毎日の始まり
!!!!!!

研究背景

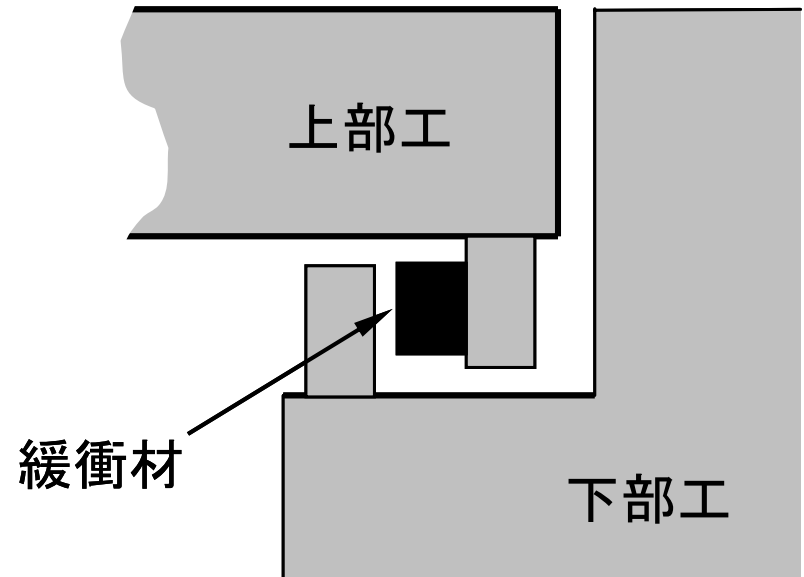
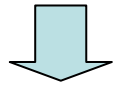
大規模な地震が発生



橋梁の隣接桁間に
高いレベルの衝撃が生じる



落橋などの被害

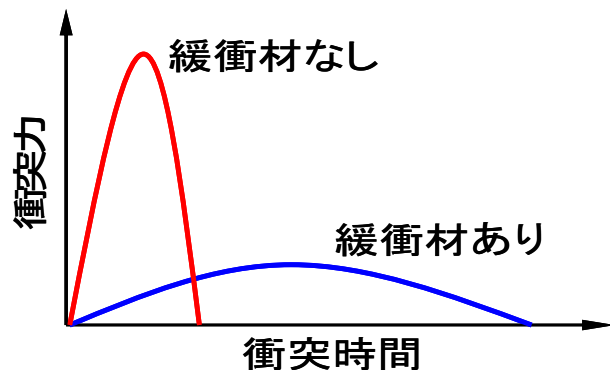


桁の橋台間あるいは桁同士の衝突エネルギーを吸収するための**緩衝材**が必要になる

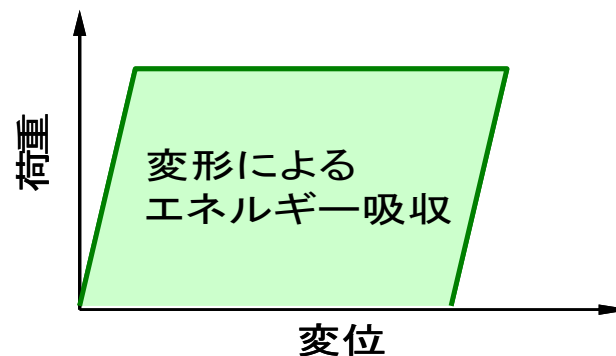
緩衝材に要求される性能



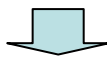
衝突力の低減効果



エネルギー吸収性



衝突力の低減効果、繰り返し衝突、低コストを兼ね備え持つ緩衝材



ゴム製緩衝材

研究目的

ゴム

弾性と粘性を併せ持つ
粘弾性体である

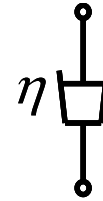
外部からの刺激の速度により
その性能が変化する。

弾性



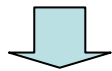
スプリング

粘性

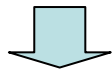


ダッシュポット

様々な変位速度で引張試験を行う

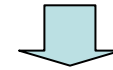


真応力-真ひずみ曲線を比較する

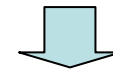


真応力-真ひずみの傾きと
引張速度の関係を検討した

応力緩和試験を行う

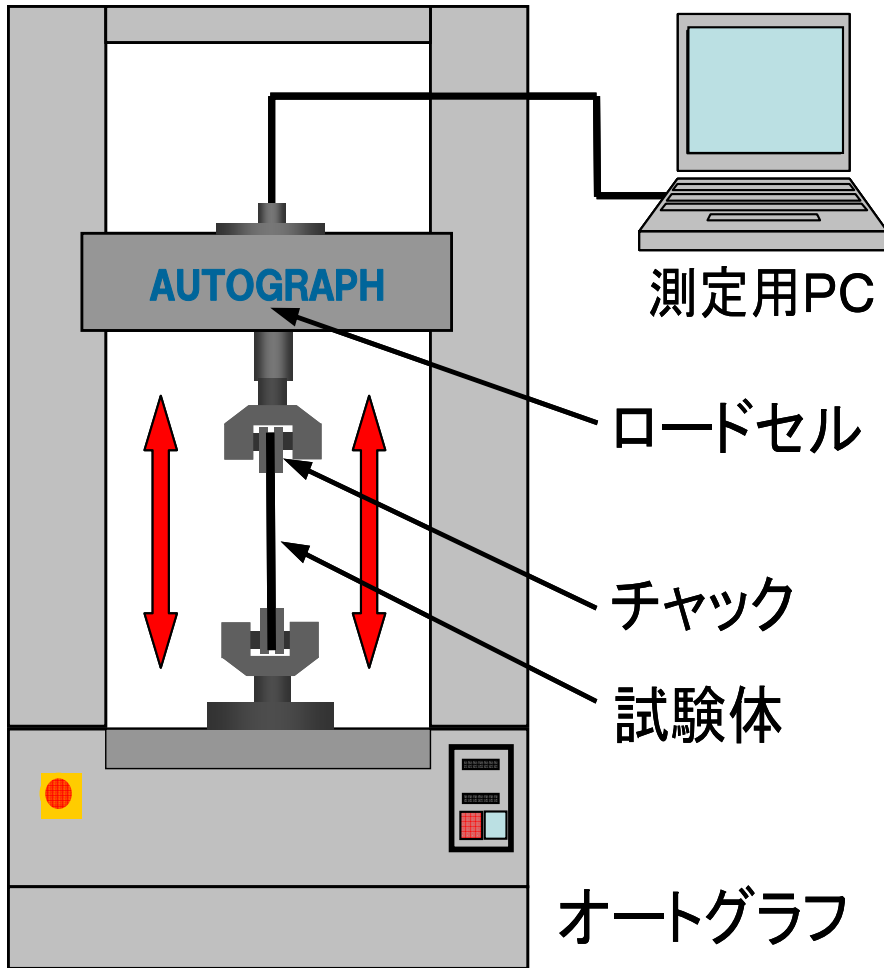


文献を参考に同様の解析を行う



ゴムの応力と時間の関係を検討した

引張試験



島津製作所製 オートグラフAGS-J
1KN

実験概要

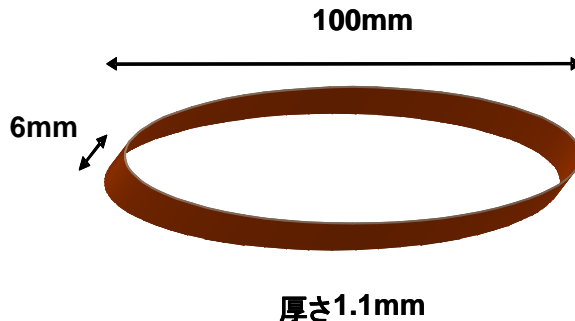
引張試験

試料名 天然ゴム (NR band)
形状 バンド 幅6mm
折径100mm
厚さ1.1mm
チャック間隔 10mm
装置 島津製作所製
オートグラフAGS-J 1KN
変位速度 50 (mm/min) 100 (mm/min)
200 (mm/min) 300 (mm/min)
400 (mm/min) 500 (mm/min)
サンプリング間隔 0.1秒

応力緩和試験

試料名 天然ゴム (NR band)
形状 バンド 幅6mm
折径100mm
厚さ1.1mm
チャック間隔 10mm
装置 島津製作所製
オートグラフAGS-J 1KN
変位速度 100 (mm/min)
300 (mm/min)
500 (mm/min)
変位 500 (mm)
計測時間 40000~80000 (秒)
サンプリング間隔 2秒

NR band



実験結果

体積一定

$$A_0 L_0 = A_i L_i$$



$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0}$$



$$\frac{L_i}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0} + 1$$



$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0} = \varepsilon_0 + 1$$

公称応力

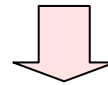
$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0}$$

公称ひずみ

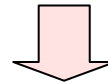
$$\varepsilon_0 = \frac{L_i - L_0}{L_0}$$

$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{L_i}{L_0} = \varepsilon_0 + 1$$

$$\sigma_i = \frac{F}{A_i}$$



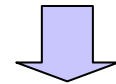
$$\sigma_i = \frac{F}{A_0} \times \frac{A_0}{A_i}$$



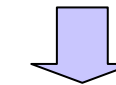
真応力

$$\sigma_i = \sigma_0 (\varepsilon_0 + 1)$$

$$\varepsilon_i = \int_{L_0}^{L_i} \frac{1}{L_0} dl$$



$$\varepsilon_i = \ln \frac{L_i}{L_0}$$

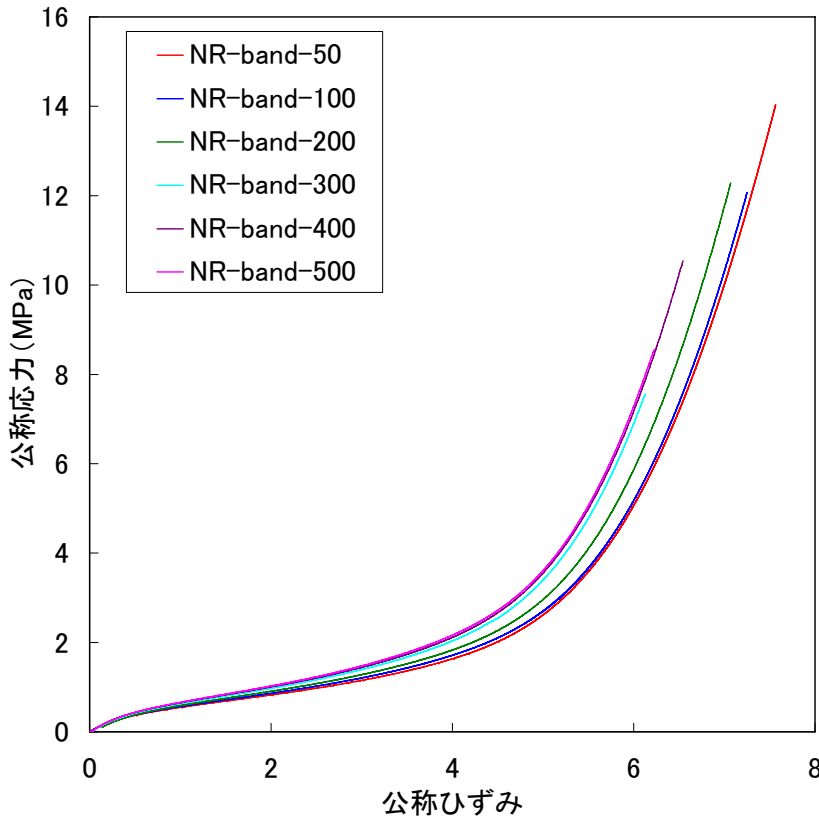


真ひずみ

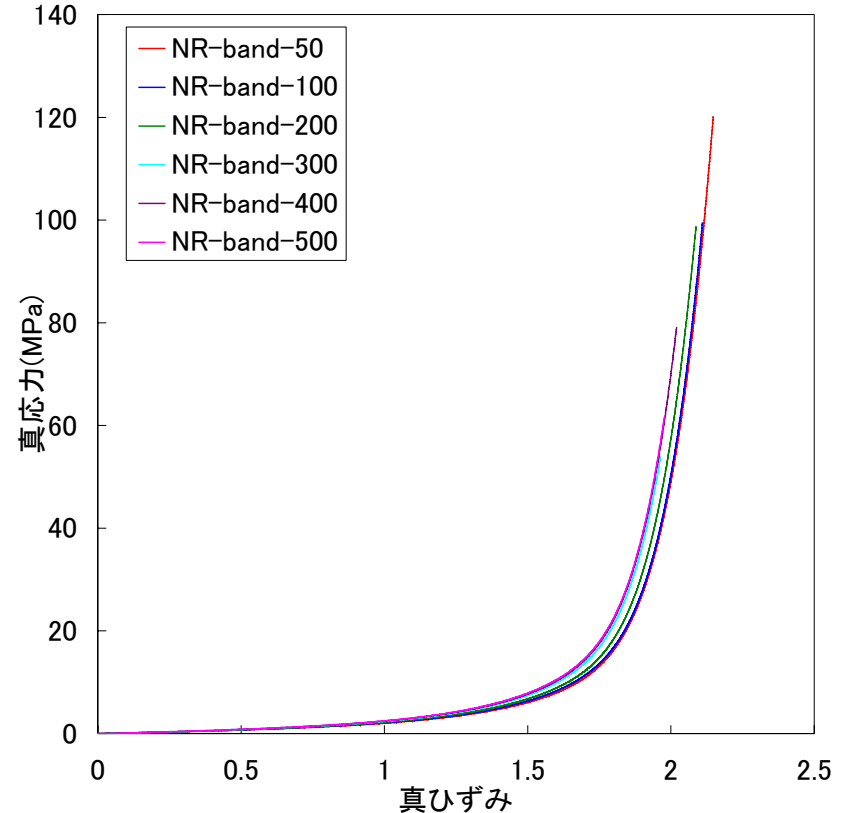
$$\varepsilon_i = \ln(\varepsilon_0 + 1)$$

実験結果

公称応力-公称ひずみ関係



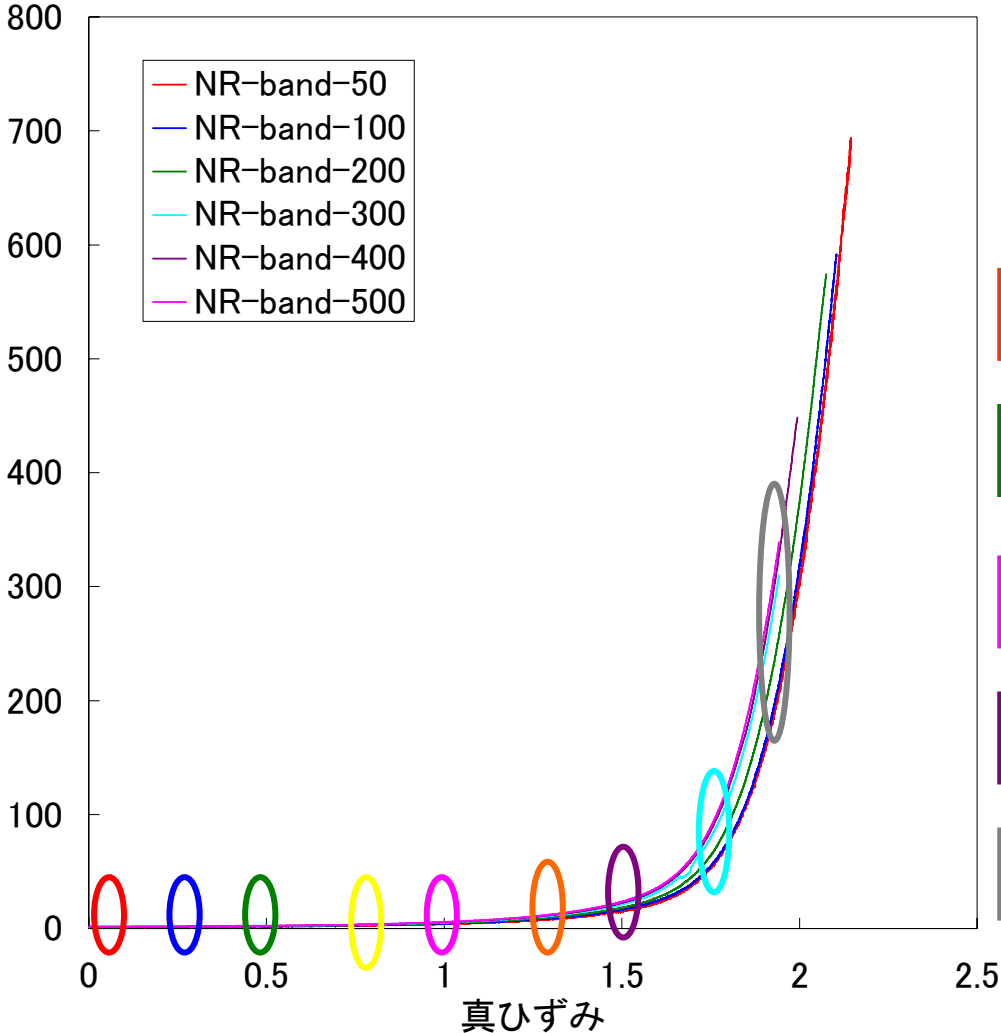
真応力-真ひずみ関係



真応力-真ひずみ関係でも速度の増加に伴い傾きが急になっていくことを確認できた

実験結果

勾配 E_i と真ひずみ関係



$$E_i = \frac{\sigma_i(\text{真応力})}{\varepsilon_i(\text{真ひずみ})}$$

真ひずみ0.05の E_i

真ひずみ0.25の E_i

真ひずみ0.5の E_i

真ひずみ0.75の E_i

真ひずみ1.0の E_i

真ひずみ1.25の E_i

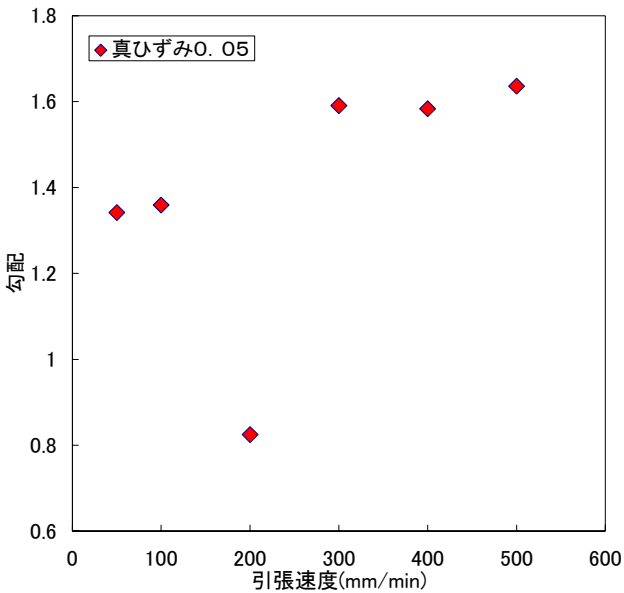
真ひずみ1.5の E_i

真ひずみ1.75の E_i

真ひずみ1.95の E_i

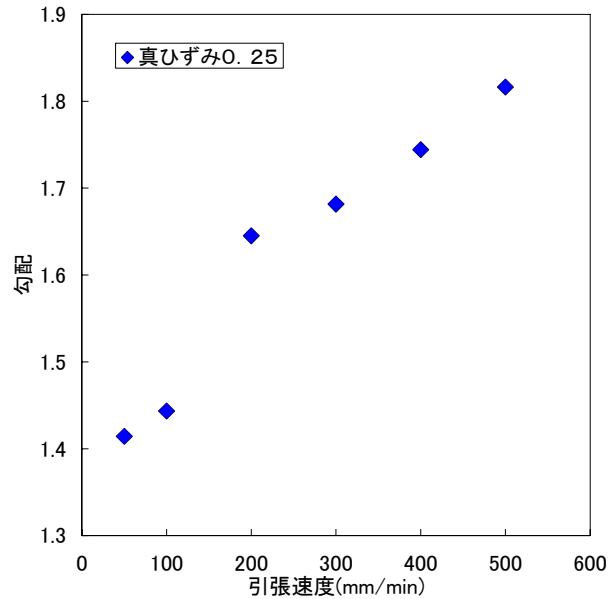
実験結果

真ひずみ0.05の E_1



引張速度200mm/minを除いて考えると、速度の増加と共に E_1 も増加している

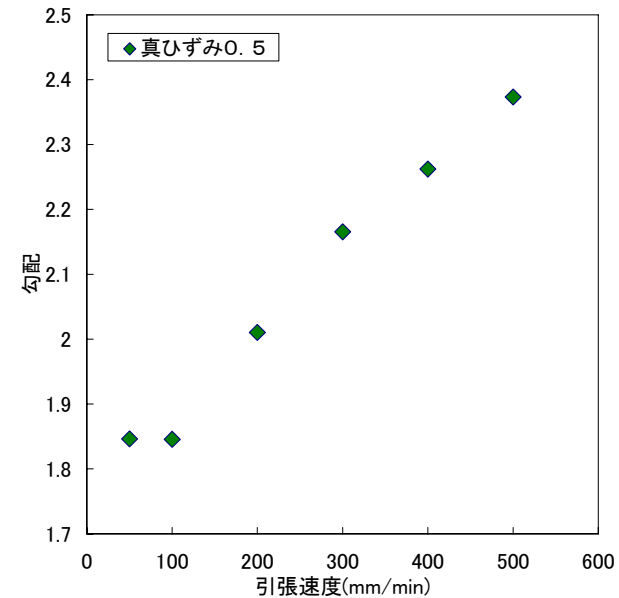
真ひずみ0.25の E_1



速度の増加と共に E_1 も増加している

線形関係があると考察できる

真ひずみ0.5の E_1



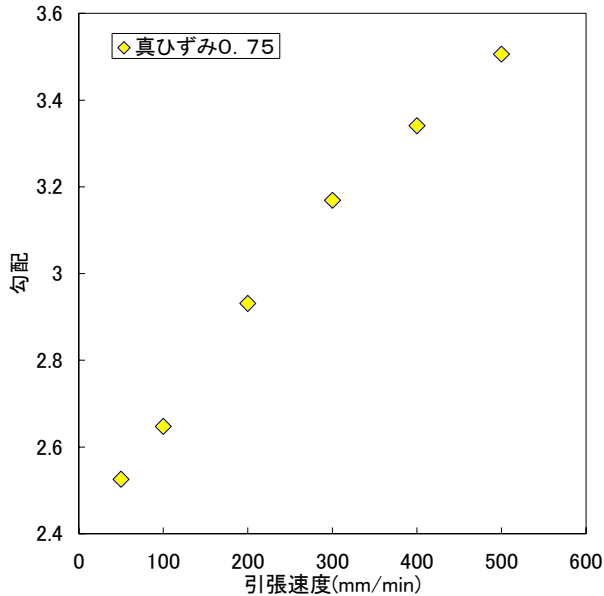
引張速度50,100mm/minは同じ値である

速度の増加と共に E_1 も増加している

線形関係があると考察できる

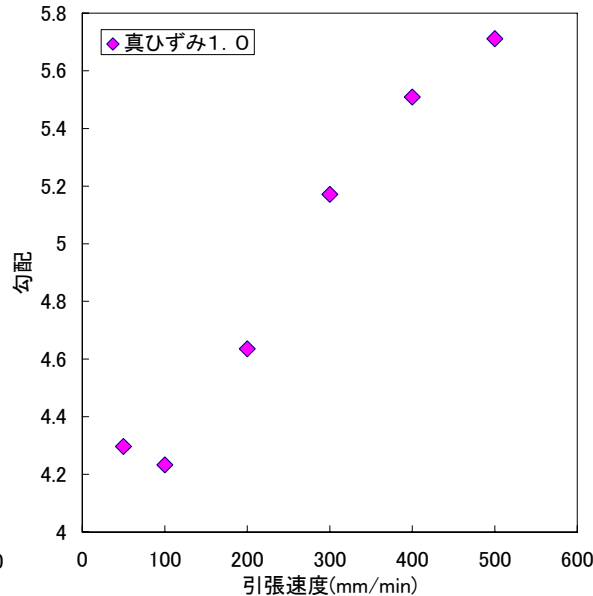
実験結果

真ひずみ0.75の E_i



速度の増加と共に E_i も増加している

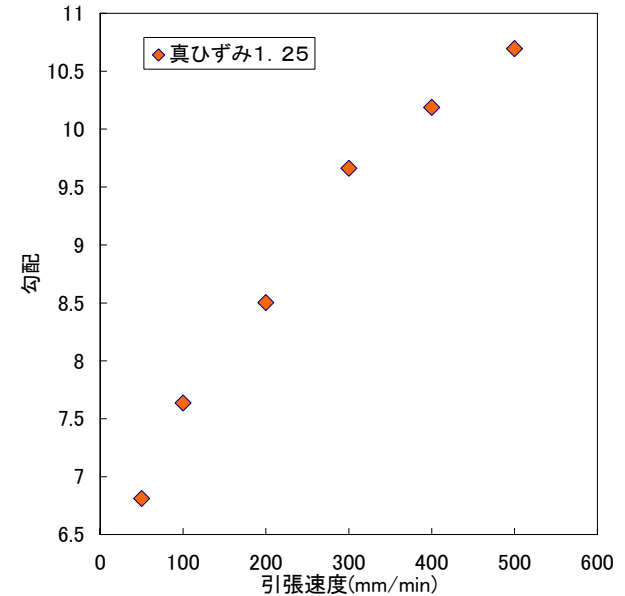
真ひずみ1.0の E_i



引張速度50,100mm/minの間でいったん減少している

速度の増加と共に E_i も増加している

真ひずみ1.25の E_i

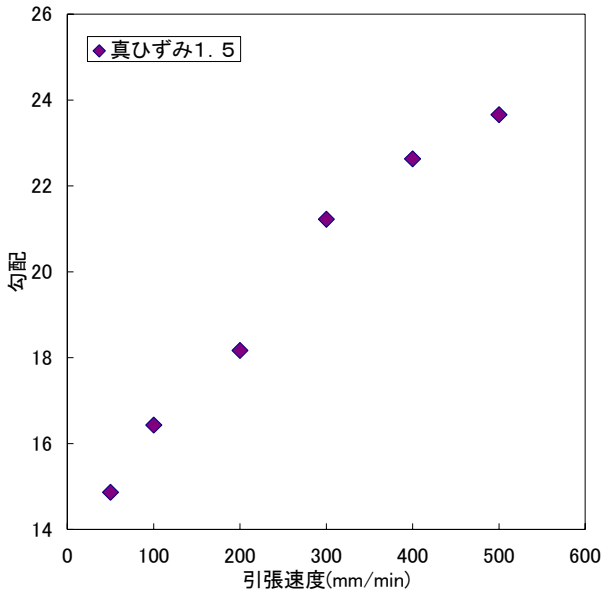


速度の増加と共に E_i も増加している

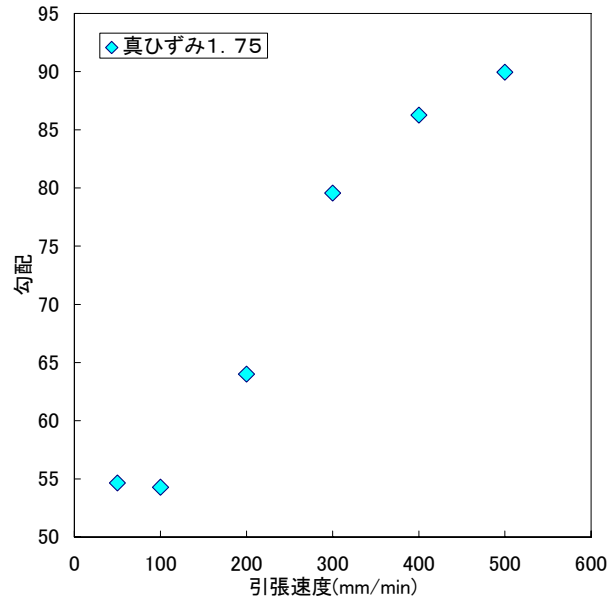
線形関係があると考察できる

実験結果

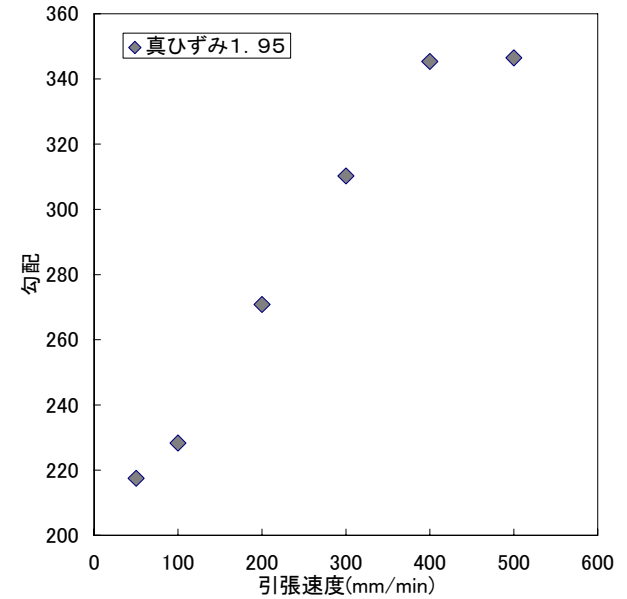
真ひずみ1.5の E_1



真ひずみ1.75の E_1



真ひずみ1.95の E_1



引張速度300,400,500(mm/min)と増加していくと E_1 がある一定の値に収束している

引張速度300,400,500(mm/min)と増加していくと E_1 がある一定の値に収束している

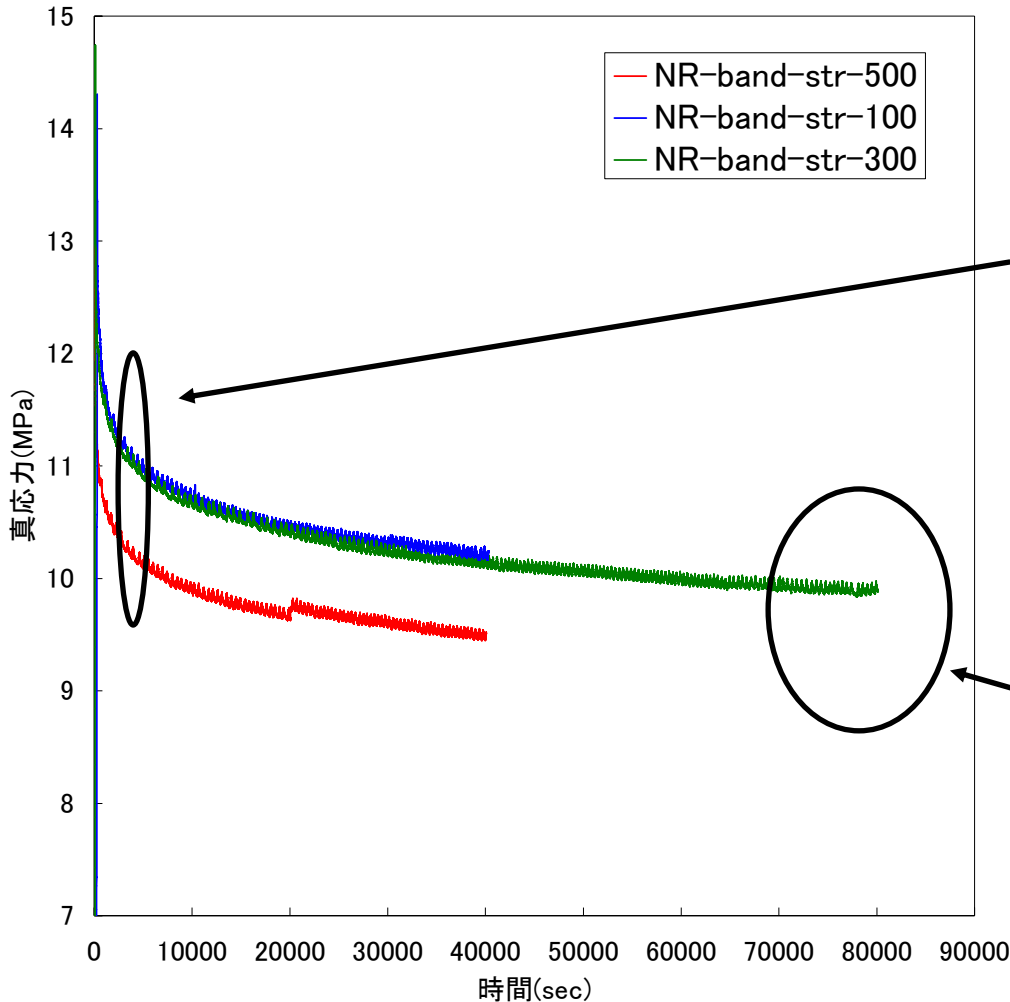
引張速度400,500(mm/min)はほとんど同じ E_1 の値である

E_1 がある一定の値に収束している

高ひずみの領域においては、ある速度を超えると一定の値 E_1 に収束する

実験結果

緩和応力-時間関係



参考文献では

PEVA

2500秒で応力は一定の値に収束

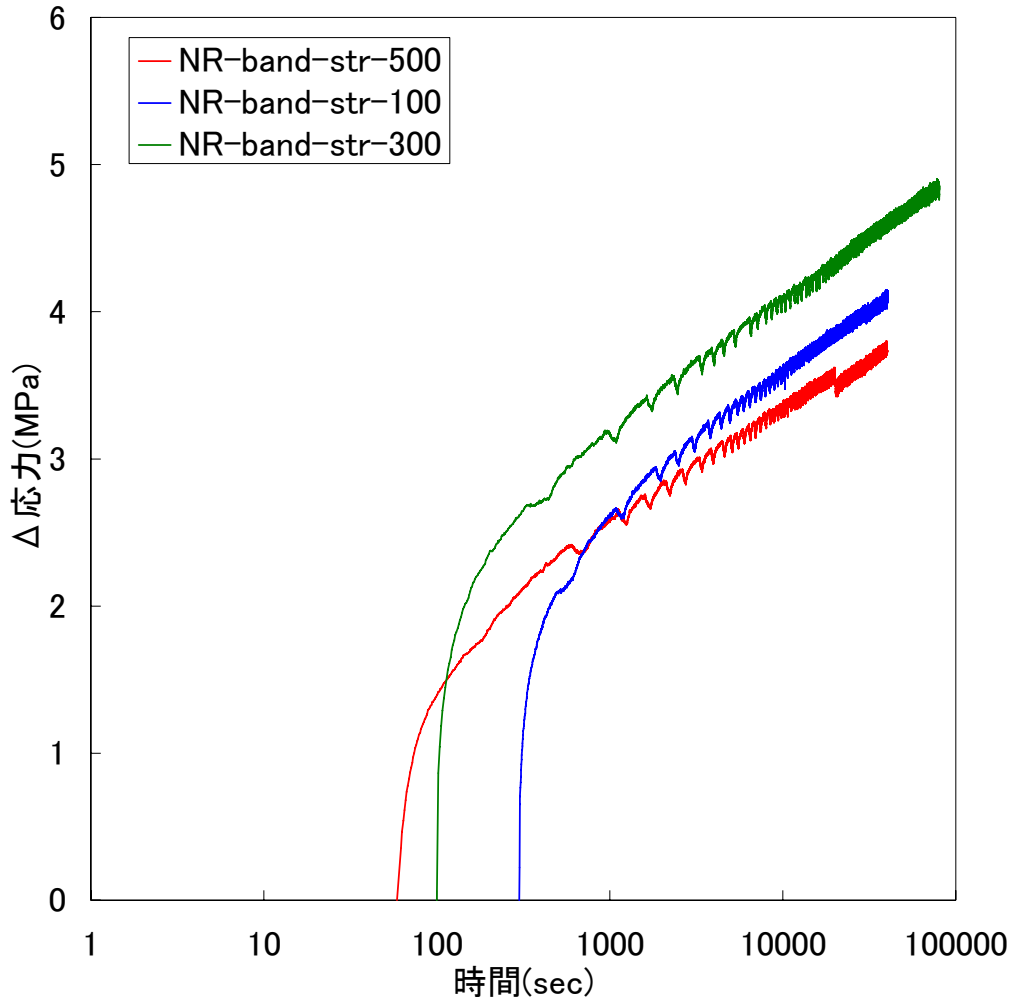
本研究では

ゴム

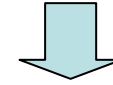
80000秒を過ぎても
まだ応力は緩和し続けている

実験結果

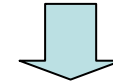
△応力と時間関係



参考文献では



対数目盛で 10^4 秒までは直線的



10^4 秒以降は一定の△応力に収束

本研究では



10^5 秒においても△応力は増加し続けている

まとめ

●真応力-真ひずみ関係を見ることができ、大変形領域の挙動を確認することができた

●勾配 E_i と真ひずみの関係より高ひずみの領域では勾配 E_i は一定の値の収束するのではないかと考察できた

●応力緩和試験よりゴムは80000秒ではまだ応力が緩和し続けていることがわかった

●今回の応力緩和試験からはゴムは粘性と弾性を分けることができないといえる

今後の展開

・より長時間で応力緩和試験を行う。

・様々な引張速度・変位で応力緩和試験を行う。

・圧縮の応力緩和試験を行う。

・ゴムの圧縮試験をおこない引張・圧縮のエネルギー吸収量を測定する。

・卒論についてどうまとめていくか考える。

参考文献

- 1)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12
- 2)日本ゴム協会：ゴム技術入門，丸善株式会社，2006.4
- 3)丸山健司,渡辺大輔：熱量測定によるゴムのエネルギー吸収性能の評価,平成17年度武蔵工業大学修士論文,2005.2.
- 4)日本ゴム協会：ゴム技術の基礎，日本ゴム協会 1983.4.1
- 5) Macromolecules 2004: A Model Treating Tensile Deformation of Semicrystalline Polymers 2004

ゴムの応力ひずみ曲線の Mooney-Rivlin 式による検討

0317034 河野 学

指導教員 皆川 勝 吉田 郁政 飯島 正徳

1. 研究背景

大地震が発生した際、隣接桁間・桁と橋台間では衝突が発生し、その際高い衝突力が作用する。これにより桁・橋台、さらには落橋防止構造までもが損壊し、落橋に至る危険性が高い。これを受けて、大地震時に隣接桁間・桁と橋台間で生じる衝突力を緩和するため、緩衝材を設置することが推奨されている¹⁾。

緩衝材に求められる性能として、衝突力の低減効果とエネルギーの吸収性が挙げられる。現在、鋼材等に比べ剛性が低く、衝突力の低減効果に優れること、繰り返し衝突に対応できること、比較的 low コストであることなどから、緩衝材としてゴムが用いられる機会が多くなっている。

2. 研究目的

ゴムの弾性は主に分子鎖が乱雑な状態になろうとして生じるエントロピー弾性であるため、ゴムの応力-ひずみ関係は非線型挙動になる²⁾。このようにゴムの変形挙動は複雑なため、ゴム製品の設計において応力-ひずみ関係の検討が重要になる⁴⁾。本研究ではより簡便で正確な試験方法の確立とゴム製品の設計のため以下の2つについて検討した。

- ① ゴムの材料物性を知るための試験方法に関する検討。
- ② ゴムの応力ひずみ曲線の Mooney-Rivlin 式による検討。

3. 実験

[試料・試験体形状] 試料にはスチレンブタジエンゴム(SBR)、市販の天然ゴムバンド(NR-band)を選択した。SBRはカーボンブラックのみで硬度を55, 65, 75に調節したものを用いた。試料名はゴムの種類に硬度を添えて示す。NR-bandにはカーボンブラックは配合されていない。試験体は引張試験においてNR-bandは図-1に示すような折径100mm, 幅6mm, 厚さ1.1mmの試験体をSBRは図-2に示すようなチャック間が10mm, 幅2mm, 厚さ2mmの試験体を用いた。圧縮試験においては直径6mm, 厚さ2~2.5mmの円盤状の試験体を用いた。

[試験機] 試験機は島津製作所製のオートグラフAGS-J 1kNを使用した。引張試験に使用するチャックと圧縮試験に使用する圧盤を図-3に示す。

[入力条件] 引張試験は変位速度 300mm/minで試験体の破断まで、圧縮試験は変位速度 10.0mm/minで荷重 900Nになるまで行った。

4. Mooney-Rivlin 式と Mooney プロット

ゴムの応力-ひずみ関係を記述する式として式-1の Mooney-Rivlin 式がある。

$$\frac{\sigma}{(\lambda - 1/\lambda^2)} = 2C_1 + 2C_2 \frac{1}{\lambda} \quad (\text{式-1})$$

ここで σ は応力, λ は伸長率, C_1 と C_2 は未定定数である。この式はゴムのよう到大変形が可能な材料が応力を受けてひずんだとき、外部から与えられたエネルギーをひずみエネルギーという形でゴム試料の中に貯蔵される仮定をしており、そのひずみエネルギーをひずみ関数として多項式で表したのから求めたものである²⁾。実験結果を $1/\lambda$ と $\sigma/(\lambda - 1/\lambda^2)$ の関係としてプロットする Mooney プロットでは式-1は直線となる。しかし図-5に示すNR-bandの Mooney プロットは部分的にしか直線にならないことがわかる。 C_1 と C_2 を決定することができるのはプロットが直線となる範囲であることから、プロットが直線となる範囲が式の適用範囲となる。

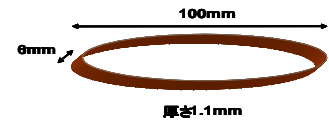


図-1 バンド状試験片

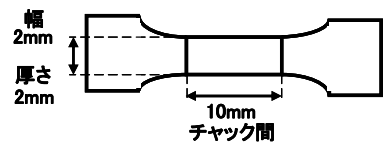
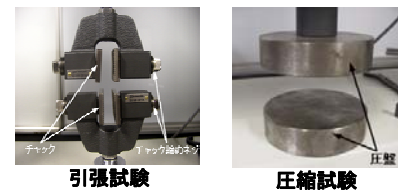


図-2 ダンベル状試験片



引張試験

圧縮試験

図-3 試験機のチャックと圧盤

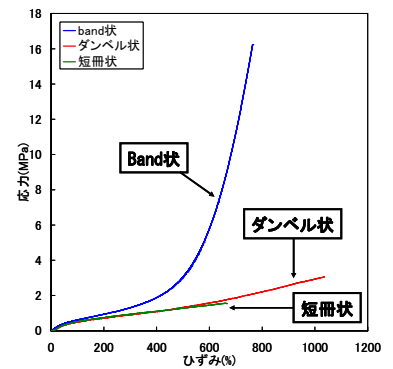


図-4 試験体形状による
応力-ひずみ関係の変化

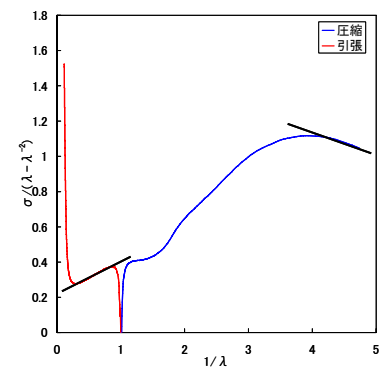


図-5 NR-band の Mooney プロット

4. 結果と考察

①試験体形状に関する検討

短冊状, ダンベル状, バンド状のNR-bandの応力-ひずみ曲線を図-4 に示す. 図-4 からわかるように, 滑りやチャックの挟みによる破断のないバンド状はゴムの大変形領域までの挙動をみる事ができる. 短冊状, ダンベル状に関してはNR-bandと比較すると同じひずみでも応力が低くなっていることから, 共にひずみ 100%以上からすべりが生じているといえる. しかし, 短冊状に比べチャックで挟む面積の大きいダンベル状の方がより大きなひずみまでの挙動を見ることができる. これより簡便な応力-ひずみ関係を求めるにはバンド状が適しており, 短冊状・ダンベル状はひずみ 100%までは信頼性があるといえる.

②Mooney-Rivlin式のフィットによる結果

NR-band のMooneyプロットを図-5 に示す. この図から引張・圧縮共に直線になっている範囲を読み取り, 得られた範囲でフィットした結果と実験値を図-6, 図-7 に示す. 図-6 より引張は適用範囲に関する検討を行ったフィット結果が伸長率で約 4 程度まで実験値と近似している. また図-7 より圧縮は適用範囲に関する検討を行ったフィット結果がほぼ実験値と近似していることがわかる. これらのことからMooneyプロットを行なうことにより, 実験値とよく近似するフィット結果を導くことができ, 伸長率が約 0.2~4 までは記述できることがわかった. しかし図-6 からわかるように適用範囲の検討を行っても引張の大変形領域までは記述することができない.

③カーボンブラック配合量による適用範囲の変化

SBRのMooneyプロットを図-8 に示す. これよりカーボンブラックの配合量の増加に伴い直線の傾きが急になっていく傾向があることがわかる. 図-9 に示す直線の傾きとカーボンブラック重量分率の関係からもカーボンブラックが増加するにつれて傾きが急になっていることがわかる. 式-1 より直線の傾きは C_2 , 直線の切片は C_1 であることから, C_2 の変化は擬似的な架橋点の数に関係しており C_1 は硫黄による架橋を表している²⁾. これは図-10 のように硫黄による架橋点に加えてカーボンブラックが多くなることで擬似的な架橋点が生成されることによるものであると考察できる³⁾. また図-8 よりカーボンブラック配合量が増加していくにつれ直線的になる範囲が狭くなっていくことがわかる.

5. 結論

本研究ではMooney-Rivlin式を用いゴムの応力-ひずみ関係の適用について検討した. その結果示されたことを以下にまとめる.

- Mooney-Rivlin式は適用範囲が限定されており, NR-bandでは伸長率が約 0.2 ~4 までの範囲のみ適用することができる.
- Mooney-Rivlin式中の未知定数 C_2 はカーボンブラックによる擬似的な架橋点の数に関係している.
- カーボンブラックの配合量が増加すると Mooney-Rivlin 式で記述できる応力-ひずみ曲線の範囲が狭くなっていく.

[参考文献]

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1996.12.
- 2) 村上兼吉：レオロジー基礎論, 産業図書株式会社, 1997.3.
- 3) 日本ゴム協会：ゴム技術の基礎, 日本ゴム協会 1983.4.
- 4) 飯塚博, 山下義裕：ゴム材料の力学特性と FEM 解析への利用, 日本ゴム協会誌, vol77, pp306-311, 2004.9

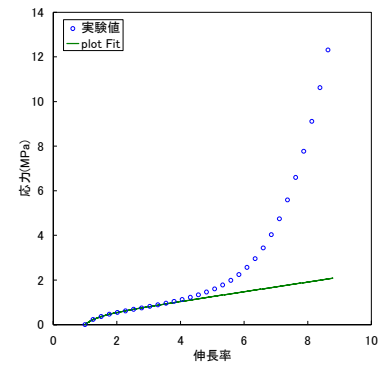


図-6 NR-band の引張フィット結果

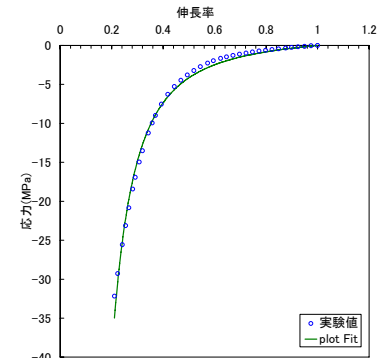


図-7 NR-band の圧縮フィット結果

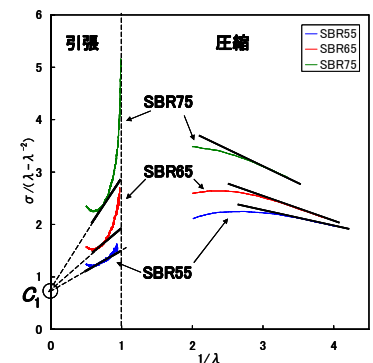


図-8 SBR の Mooney プロット

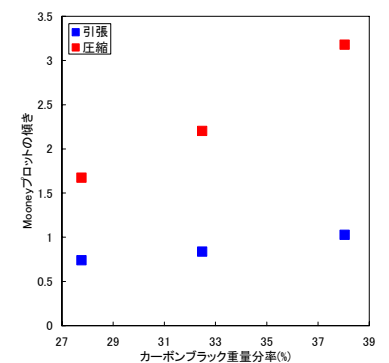


図-9 配合による C_2 の変化

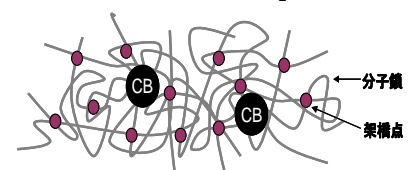


図-10 ゴムの分子構造

2007年 2月19日

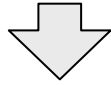
建設情報マネジメント研究室 卒業論文発表会

ゴムの応力-ひずみ曲線の Mooney-Rivlin式による検討

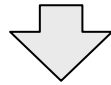
学生氏名	河野 学
指導教員	皆川 勝
	吉田郁政
	飯島正徳

研究背景

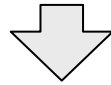
大規模な地震が発生



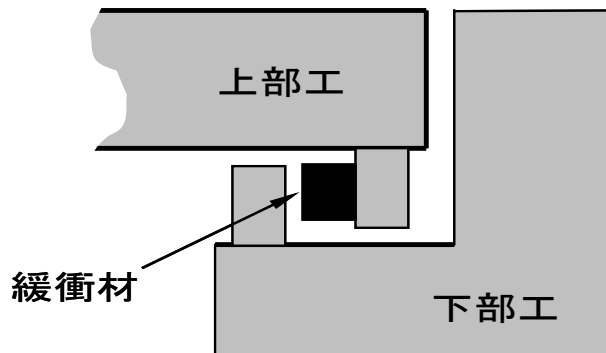
隣接桁間で衝突が生じる



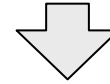
落橋などの被害



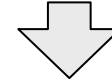
緩衝材が必要になる



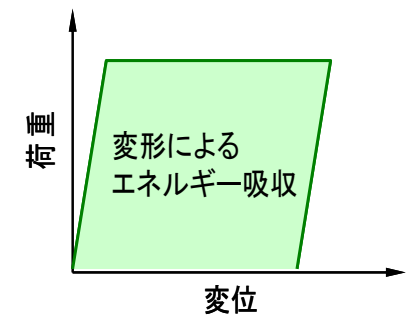
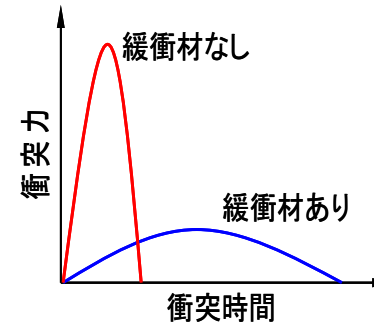
緩衝材に要求される性能



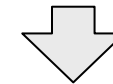
衝突力の低減効果



エネルギー吸収性



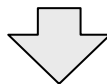
衝突力の低減効果 + 繰り返し衝突 + 低コスト



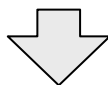
ゴム製緩衝材

研究目的

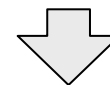
ゴムの変形挙動は複雑



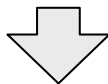
ゴム製品の設計において応力-ひずみ関係が重要



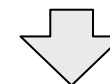
簡便な試験方法の策定



応力-ひずみ関係



形状に関する検討

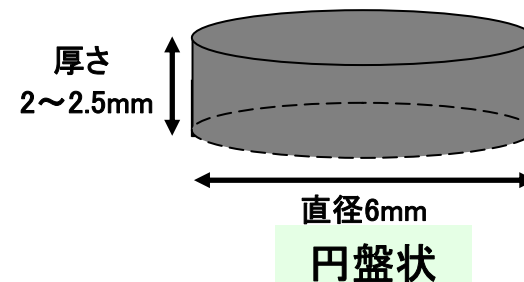
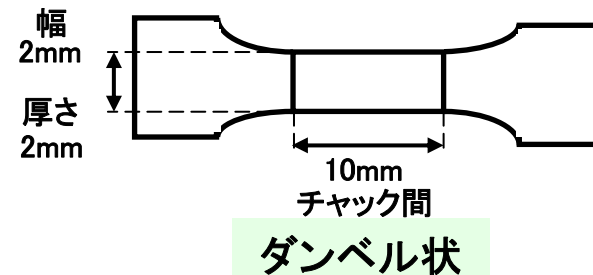
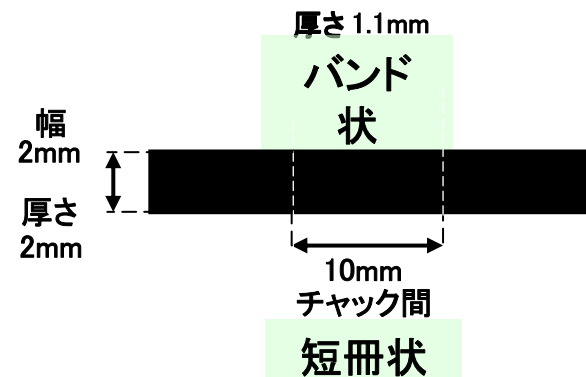
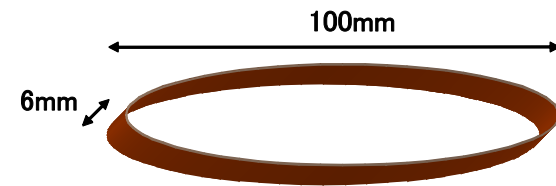


Mooney-Rivlin式による検討

試料・試験体

試料 **天然ゴム (NR band)**

形状	バンド状	短冊状	円盤状
	幅 6mm 折径 100mm 厚さ 1.1mm	幅 2mm チャック間 10mm 厚さ 2mm	厚さ 2~2.5mm 直径 6mm



試料 **スチレンブタジエンゴム (SBR)**

形状	ダンベル状	円盤状
	幅 2mm チャック間 10mm 厚さ 2mm	厚さ 2~2.5mm 直径 6mm

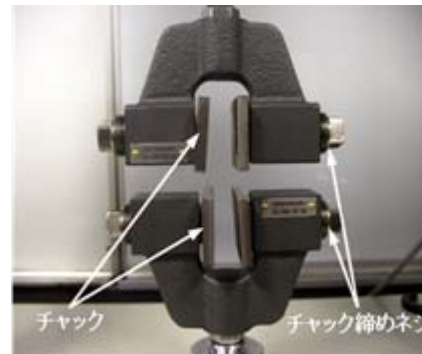
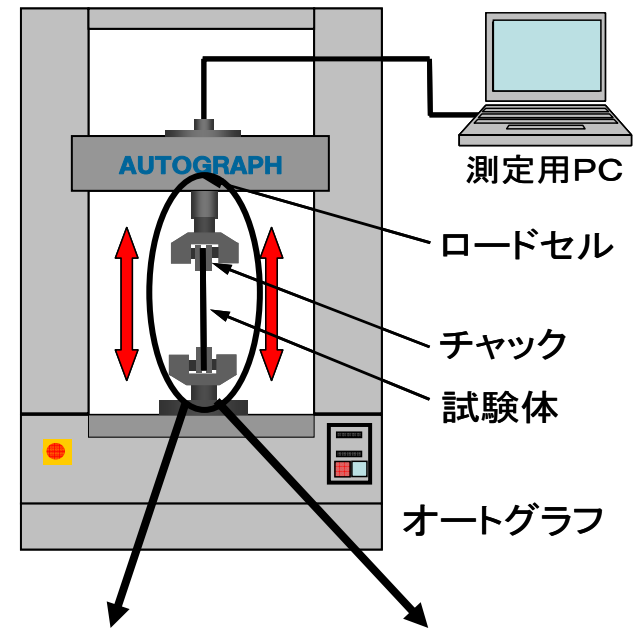
実験概要

装置 島津製作所製
オートグラフAGS-J 1kN

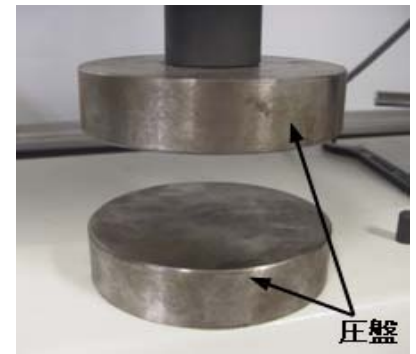
入力条件 **引張試験**
変位速度 300 (mm/min)
破断まで

圧縮試験
変位速度 10 (mm/min)
荷重900Nまで

サンプリング間隔 0.1秒

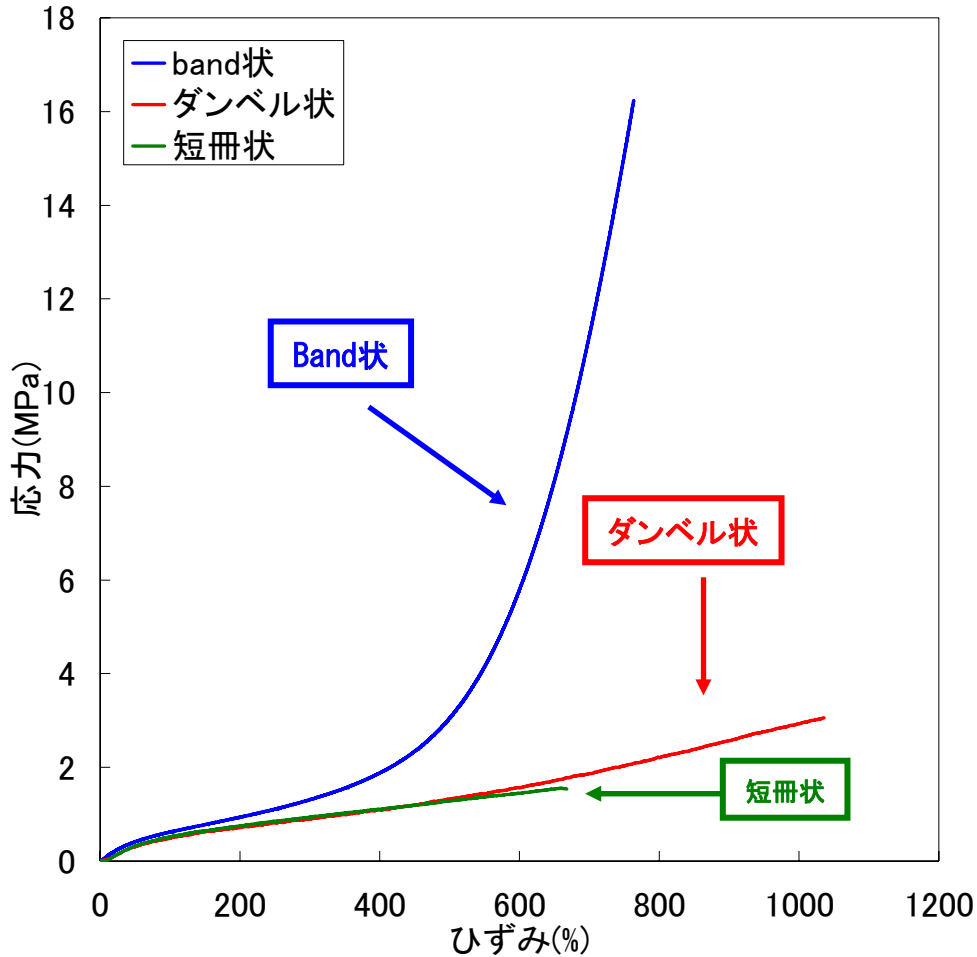


引張試験



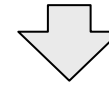
圧縮試験

実験結果



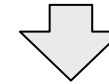
異なる試験体形状の応力-ひずみ関係

バンド状



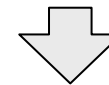
大変形領域までの挙動をみることができる

短冊状, ダンベル状



ひずみ100%以上からすべりが生じている

簡便に応力-ひずみ関係を求めるには



バンド状が適している

Mooney-Rivlin 式

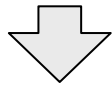
ゴムの応力-ひずみ関係を記述する式としてMooney-Rivlin式がある

$$\sigma = 2 \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right) \left(C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \right)$$

σ は応力

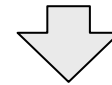
λ は伸長率

C_1 と C_2 は未定定数

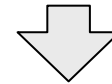


$$\frac{\sigma}{\left(\lambda - 1/\lambda^2 \right)} = 2C_1 + 2C_2 \frac{1}{\lambda}$$

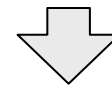
$1/\lambda$ と $\sigma/(\lambda - \lambda^{-2})$ の関係としてプロット



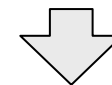
Mooneyプロット



Mooneyプロットが直線となる範囲

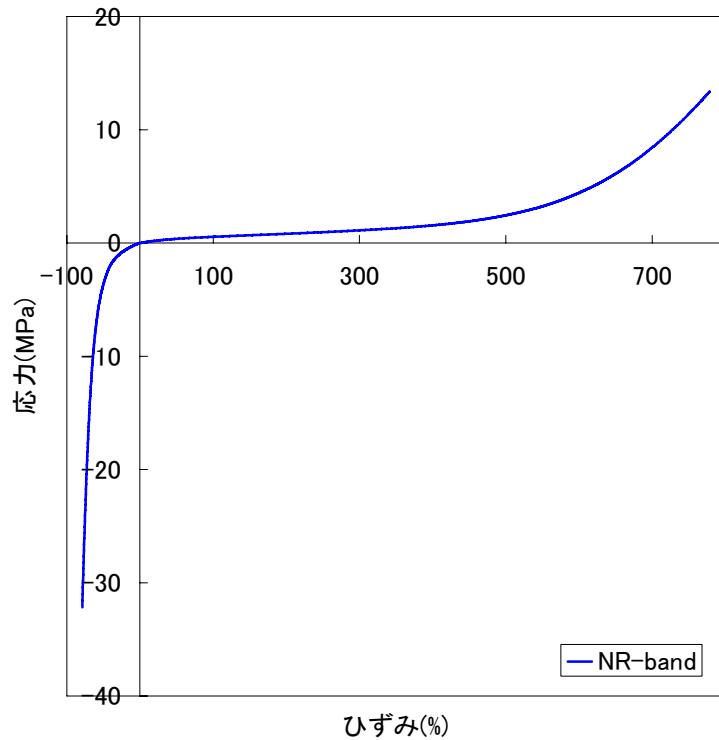


C_1 と C_2 が決定できる



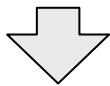
式の適用範囲となる

実験結果とMooneyプロット

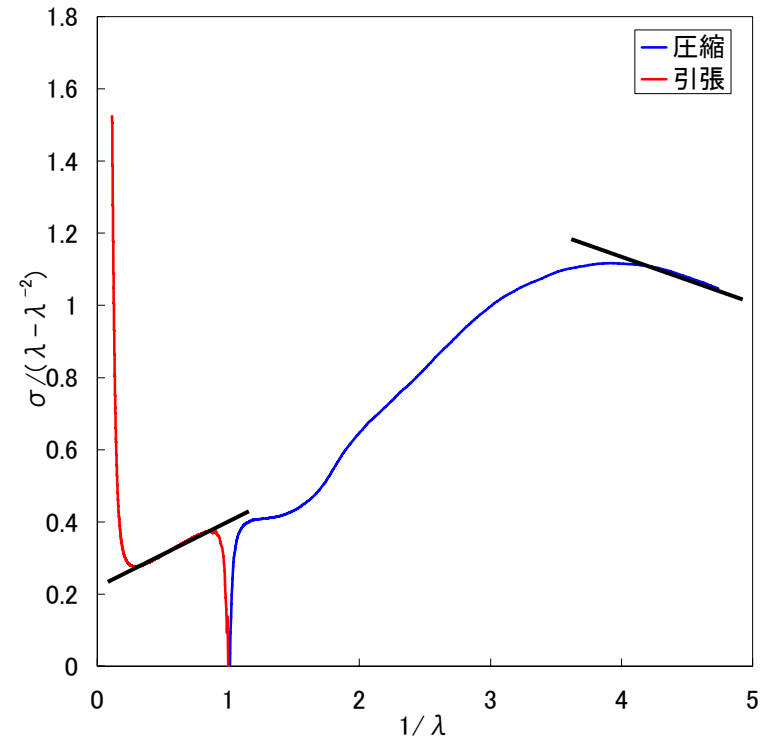


NR-bandの応力-ひずみ関係

ゴムの応力-ひずみ関係

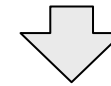


非線形挙動(ひずみ硬化型)



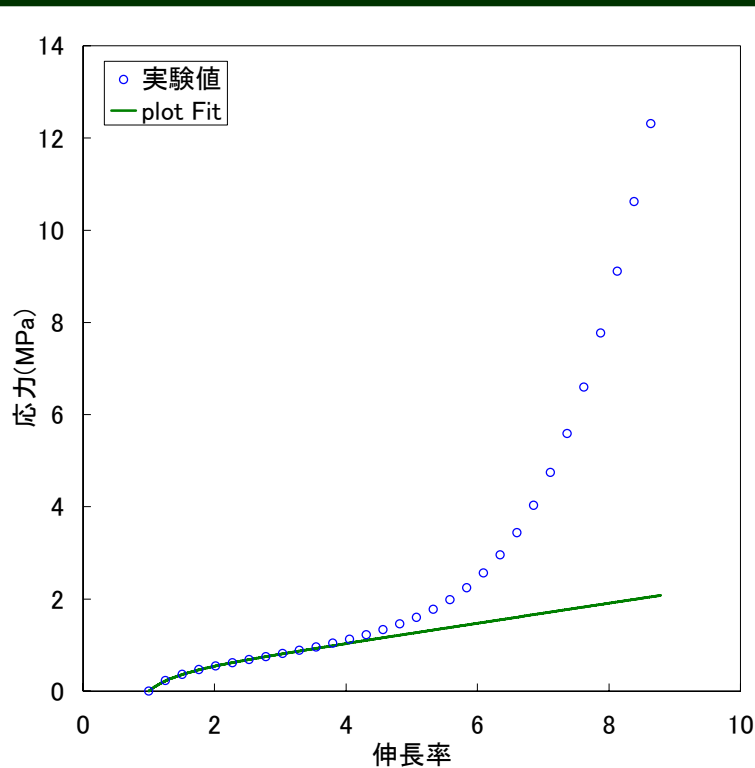
NR-bandのMooneyプロット

直線的になっている範囲



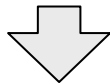
C_1 と C_2 を決定することができる

フィット結果

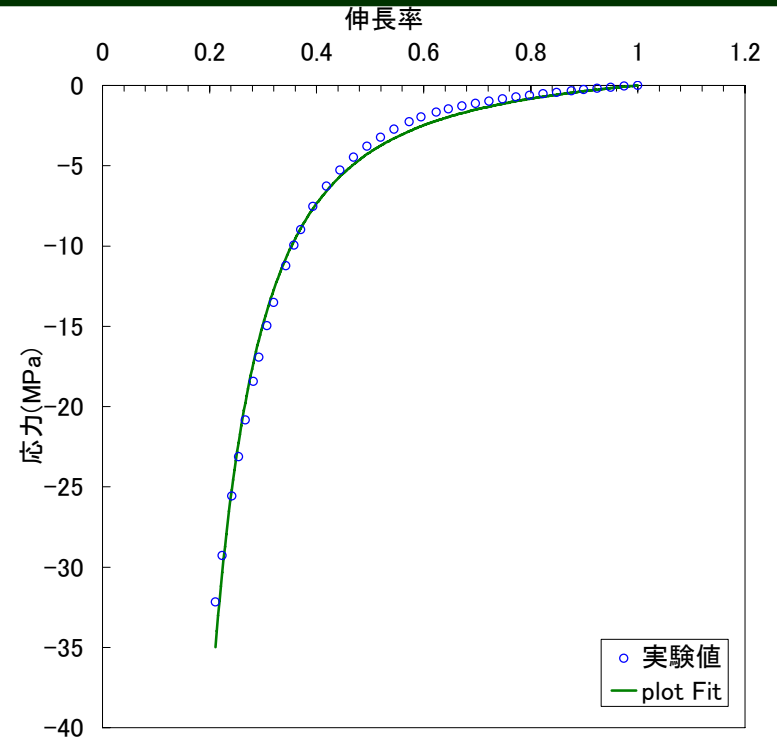


NR-bandの引張フィット結果

引張の場合

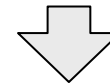


伸長率が約4まで記述可能



NR-bandの圧縮フィット結果

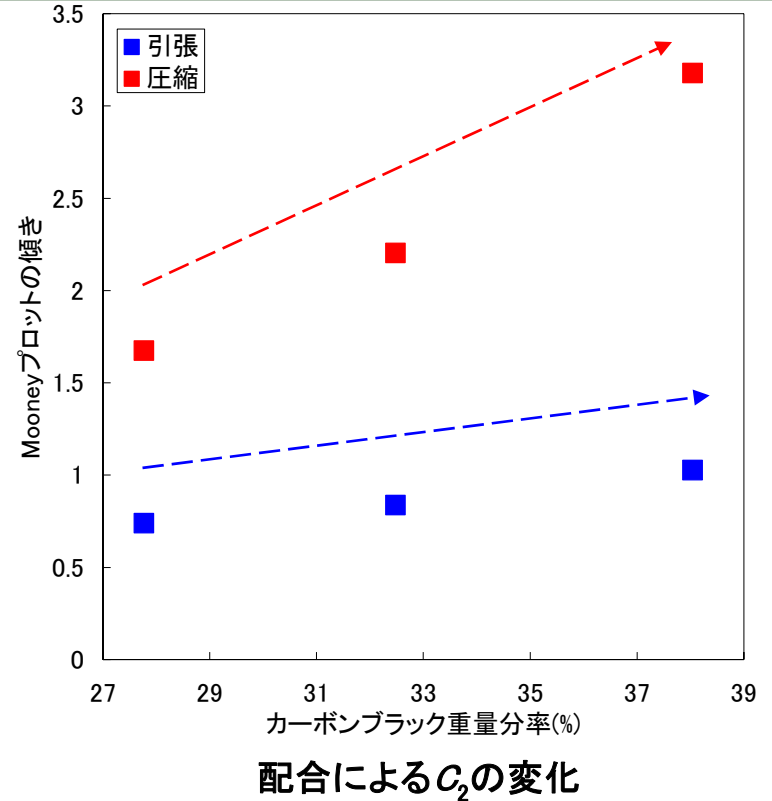
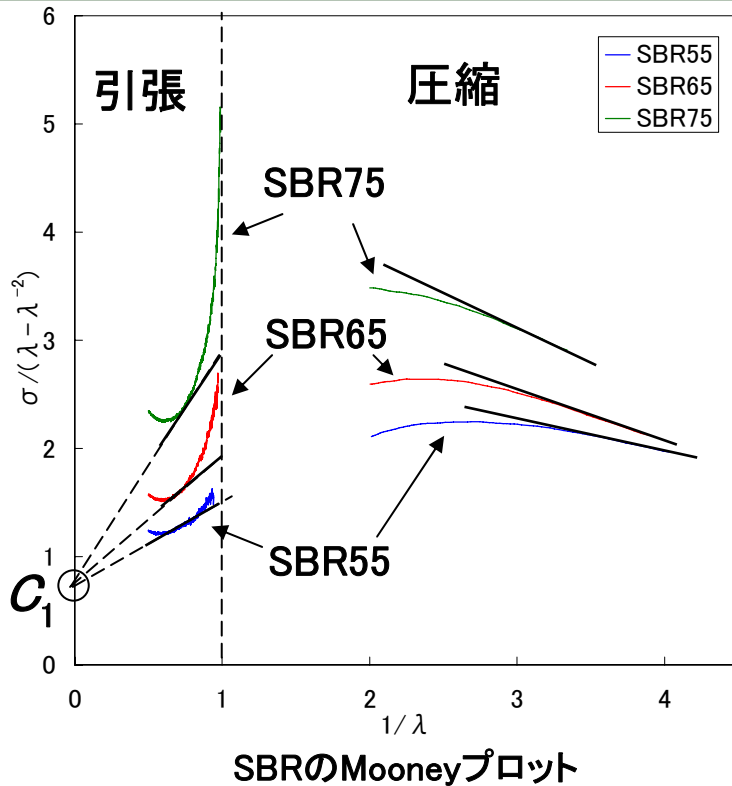
圧縮の場合



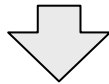
大変形まで記述可能

NR-bandは伸長率が約0.2~4まで記述可能である

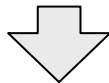
Mooneyプロットの変化



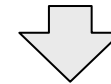
カーボンブラック配合量の増加



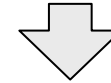
直線的になる範囲が狭くなる



式で記述できる範囲が狭くなる



C_1 は一定, C_2 は大きくなる



CBによる擬似的な架橋点の数に関連

結論

本研究では簡便な試験方法の策定として形状に関する検討と Mooney-Rivlin式を用いゴムの応力-ひずみ関係について検討した
そこから示されたことを以下にまとめる

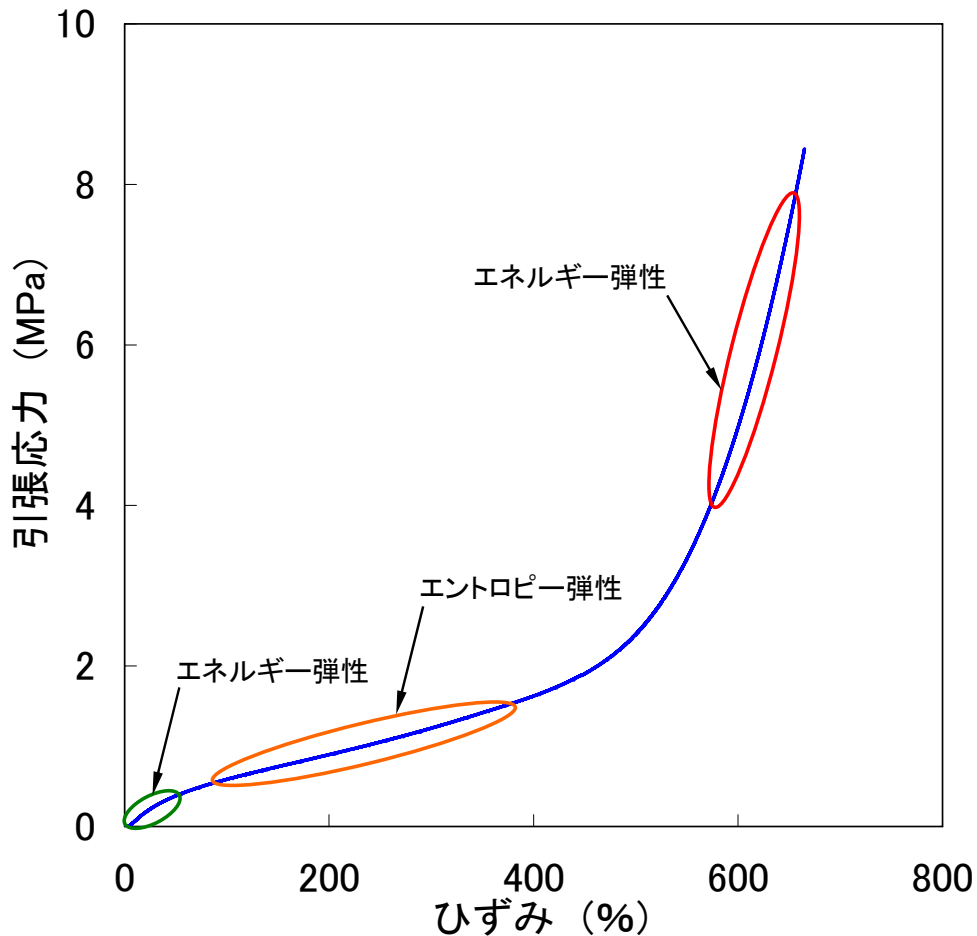
- ① 簡便な応力-ひずみ関係を求めるにはバンド状の試験体が適している
- ② 短冊状・ダンベル状の試験体はひずみ100%までは信頼性がある
- ③ Mooney-Rivlin式は適用範囲が限定されている
- ④ NR-bandでは伸長率が約0.2～4までの範囲のみ適用することができる
- ⑤ Mooney-Rivlin式中の C_2 はカーボンブラックの配合量により変化する
- ⑥ C_2 の変化はカーボンブラックによる擬似的な架橋点の数に関連している
- ⑦ カーボンブラックの配合量が増加するとMooney-Rivlin式で記述できる応力-ひずみ曲線の範囲が狭くなっていく

参考文献

- 1) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.12.
- 2) 村上兼吉:レオロジー基礎論, 産業図書株式会社, 1997.3.
- 3) 日本ゴム協会:ゴム技術の基礎, 日本ゴム協会 1983.4.
- 4) 飯塚博, 山下義裕:ゴム材料の力学特性とFEM解析への利用,
日本ゴム協会誌, vol77, pp306-311, 2004.9

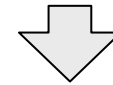


ゴムの応力-ひずみ曲線

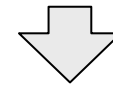


ゴムの応力-ひずみ曲線

ゴムの応力-ひずみ曲線

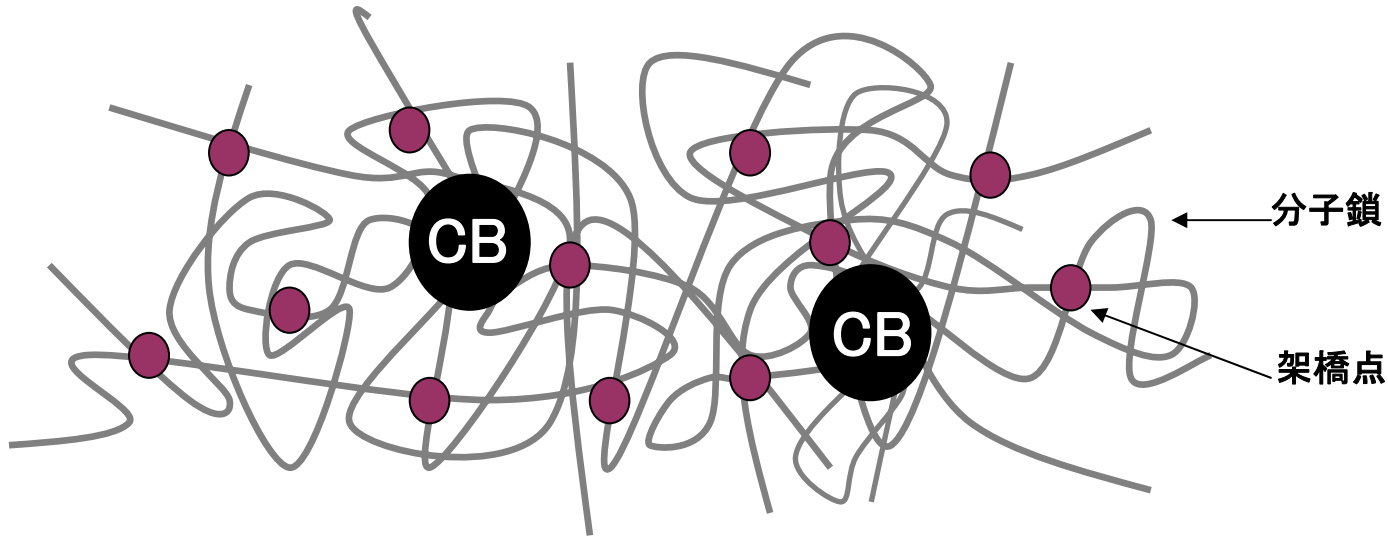


エントロピー弾性が主

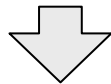


挙動が複雑

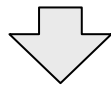
ゴムの架橋



C_1 は1次架橋点

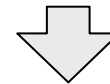


硫黄による架橋

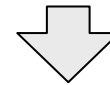


一定の値をもつ

C_2 は2次架橋点

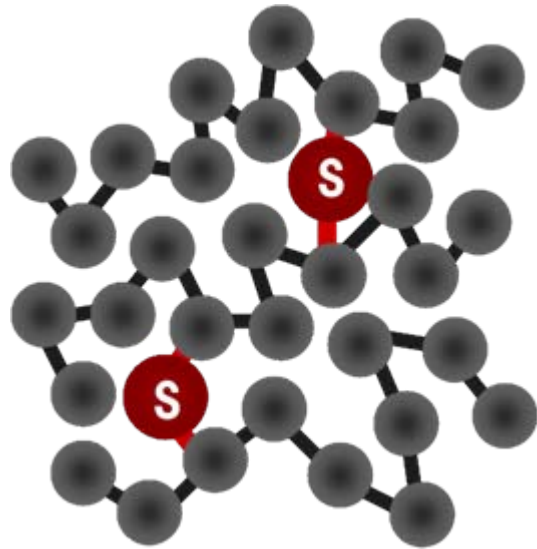


CBによる擬似的な架橋

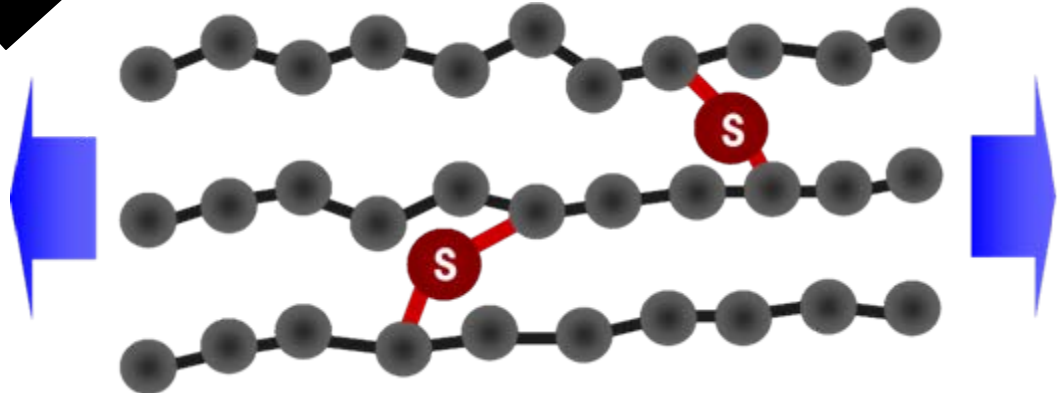
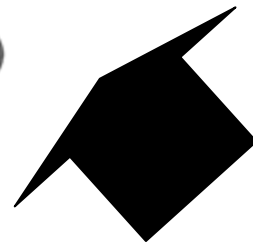


CBの数により変化

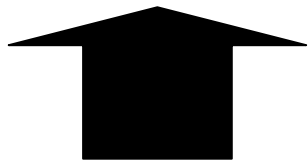
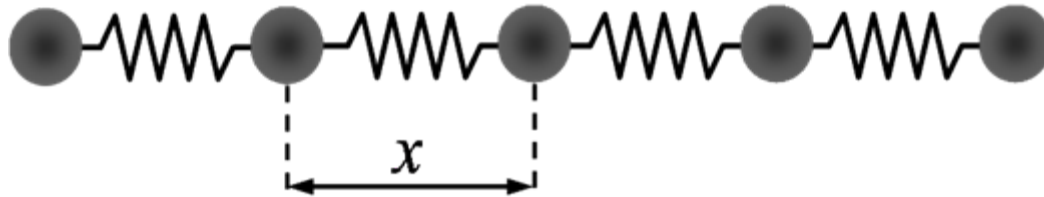
エントロピー弾性



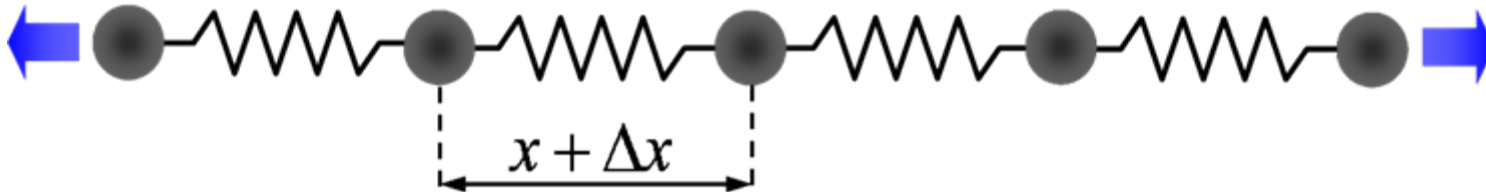
分子鎖が自由に動ける様な状態に
戻ろうとするときの弾性



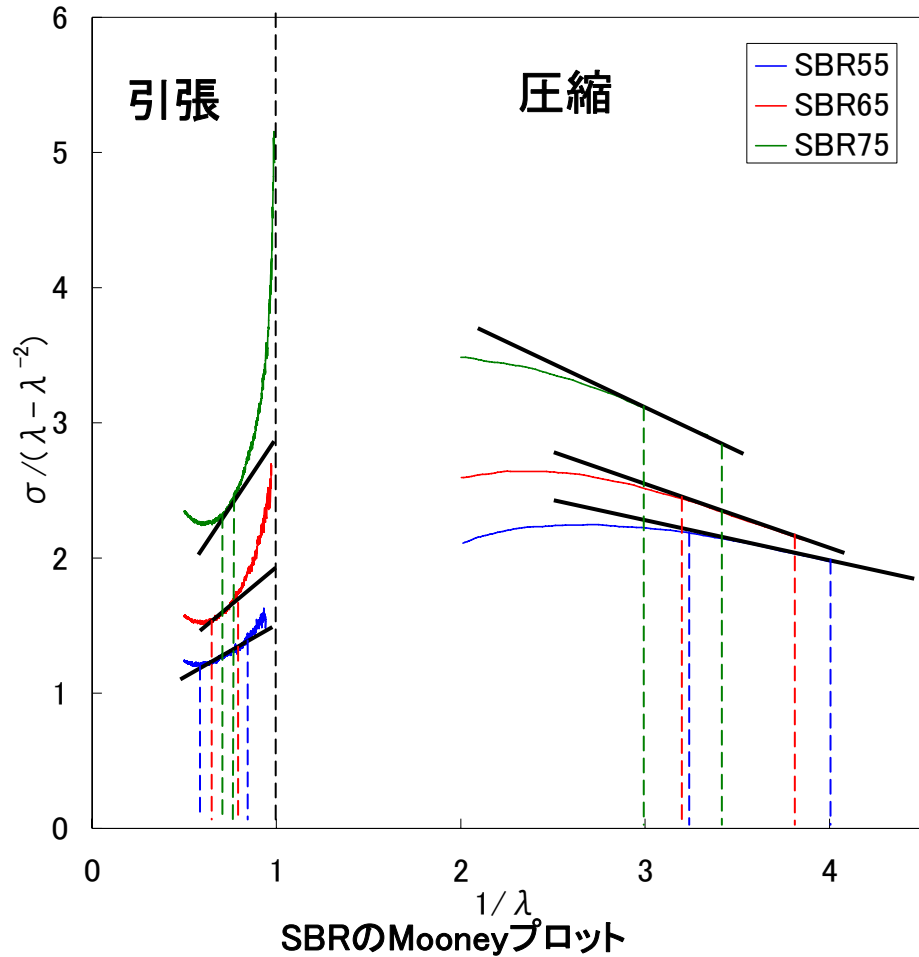
エネルギー弾性



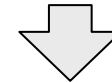
外部からの力により原子間隔が広がり、元の安定な位置に戻ろうとするために生じる



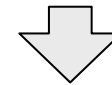
Mooneyプロットの範囲の変化



カーボンブラック配合量の増加

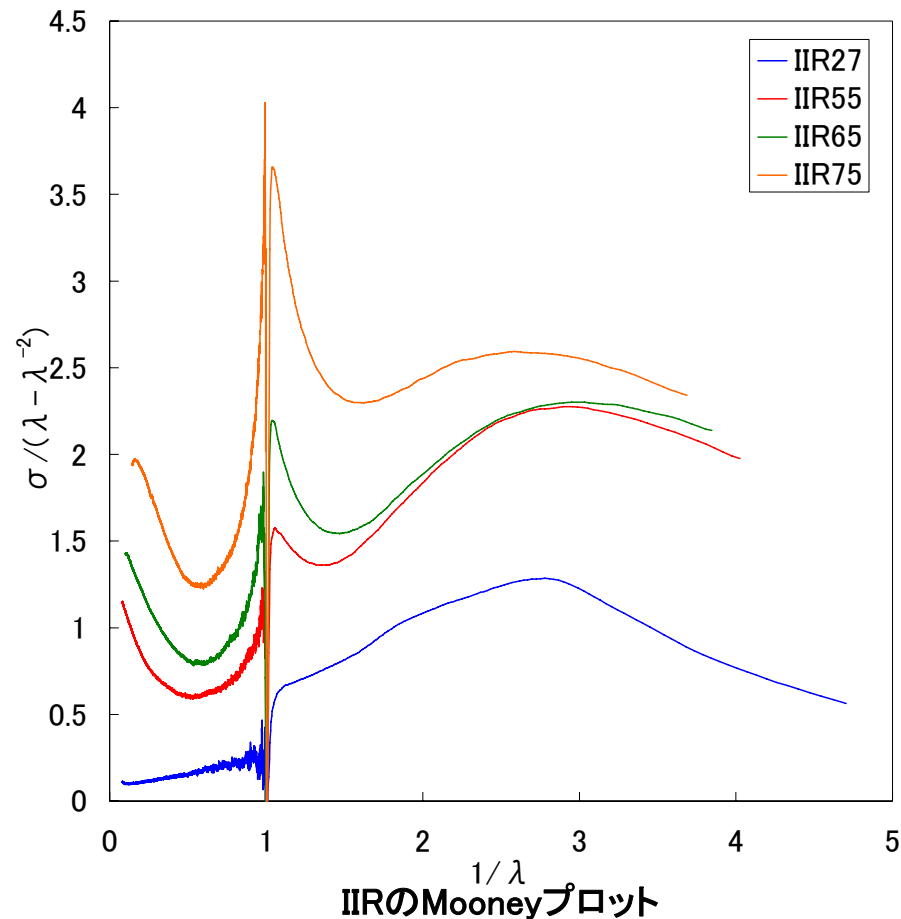
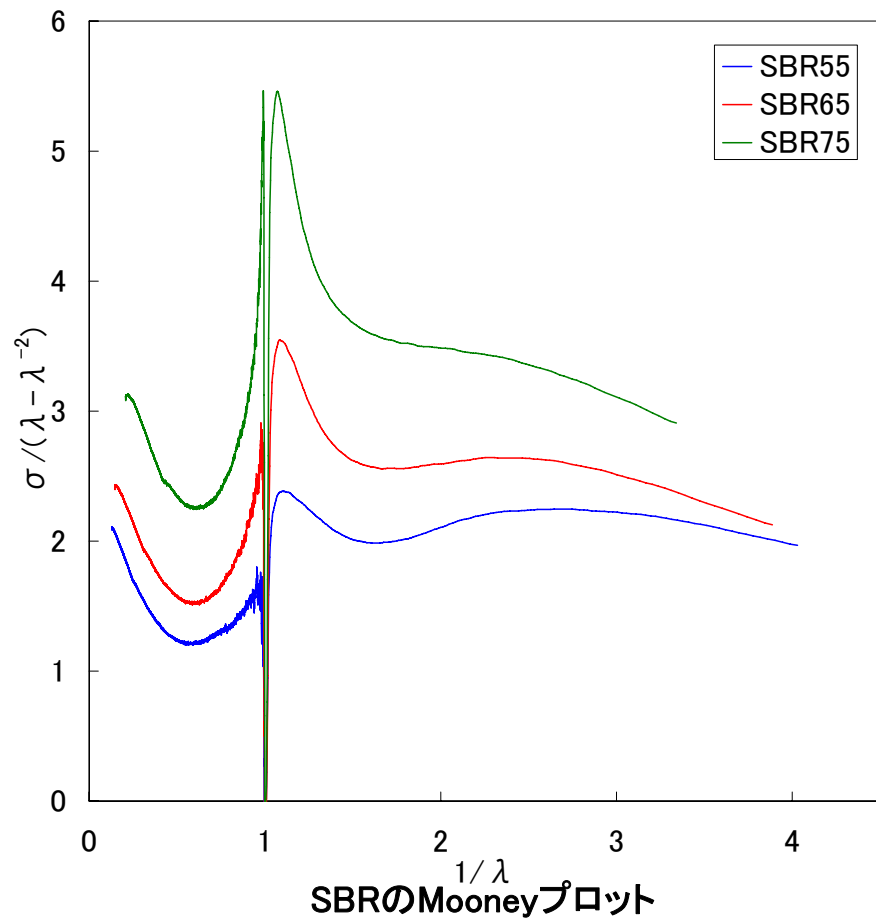


直線的になる範囲が狭くなる



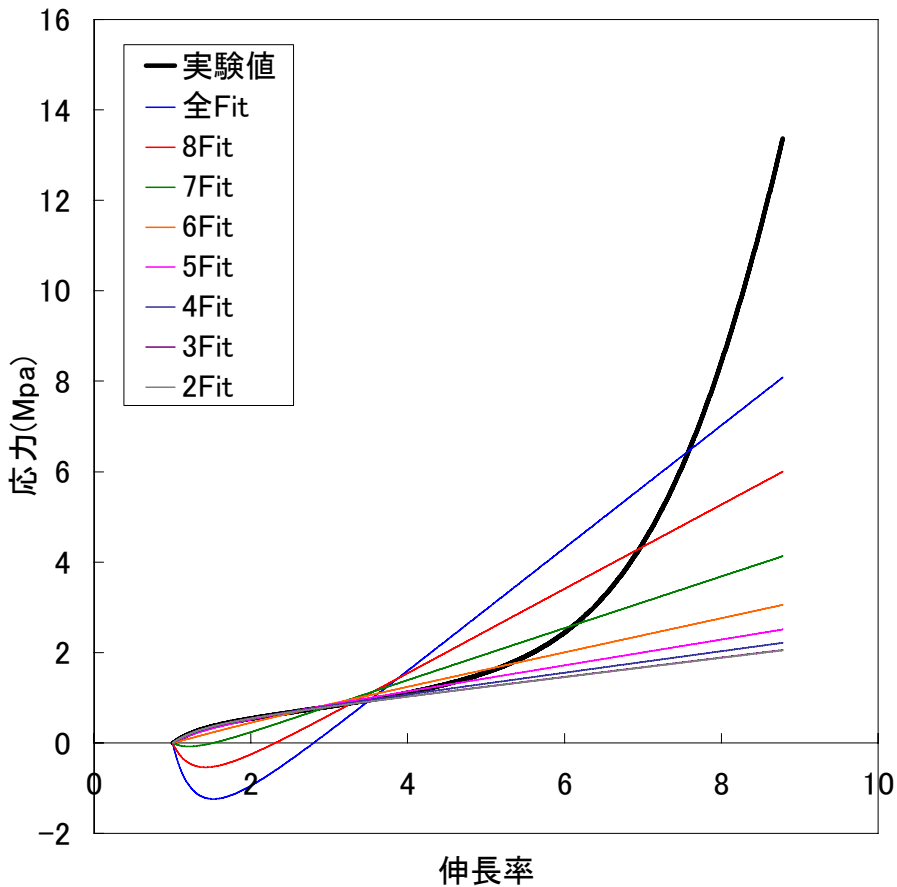
式で記述できる範囲が狭くなる

SBR,IIRのMooneyプロット



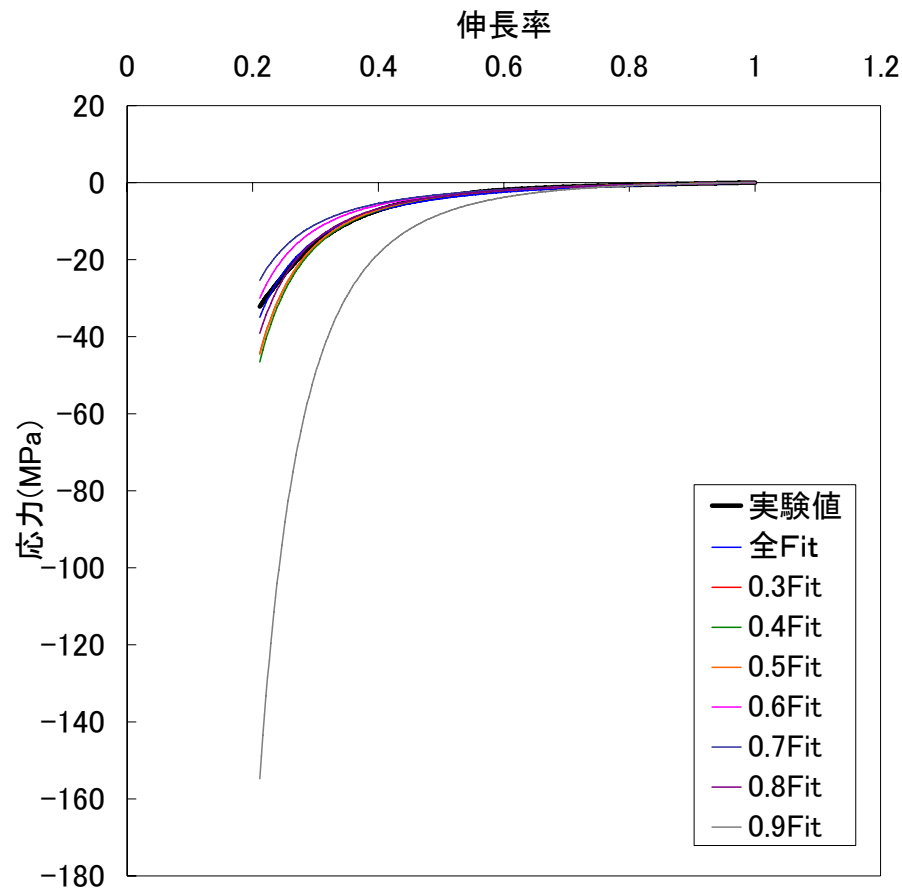
ゴムの種類に関係なく傾きは急になっていく

SBR, IIRのMooneyプロット



引張 各伸長率ごとのFit結果

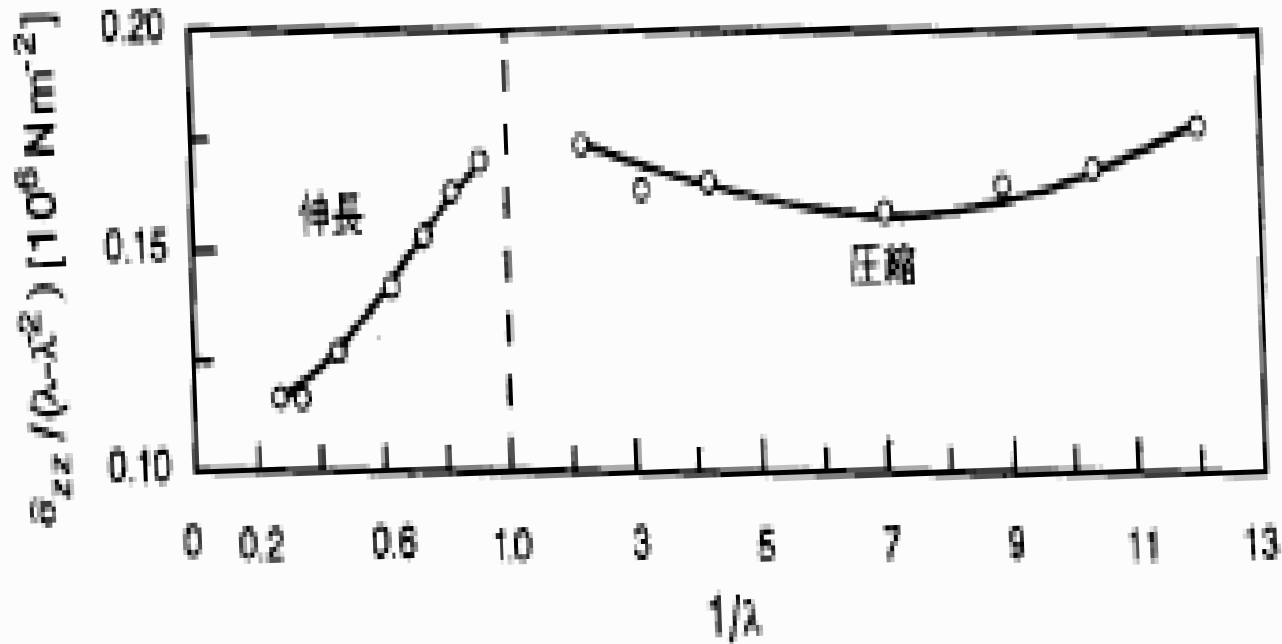
伸長率4までの結果まで記述可能



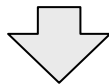
圧縮 各伸長率ごとのFit結果

伸長率0.3までの結果まで記述可能

Mooneyプロットの直線の範囲

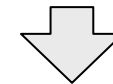


引張の適用範囲



約0.2~0.9までの範囲

圧縮の適用範囲



約2~13までの範囲

SBR,IIRの材料物性

試料名	高度	カーボンブラック重量分率 (%)
SBR55	55	27.77
SBR65	65	32.48
SBR75	75	38.04
IIR27	27	0.00
IIR55	55	22.73
IIR65	65	29.43
IIR75	75	36.39