

カーボンブラックがゴムのエネルギー吸収性に及ぼす影響

0517068 中野 淳仁

指導教員 飯島 正徳 皆川 勝

1. 緒言

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。その結果、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とされ、落橋防止装置の高性能化や高機能化が必要であり、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⁾。近年では、落橋防止構造と変位防止構造に、図-1に示すようなコスト面で有利なゴム材を用いる緩衝材が適用される事が多くなっている。

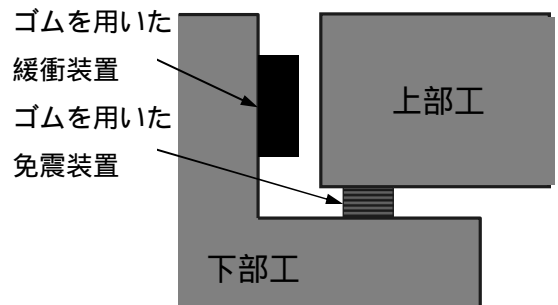


図-1 ゴム製緩衝材の適用例

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。衝突力を低減させるためには弾性率が低く、変形量の大きい材料が望ましいのに対し、エネルギーを吸収させるには、破壊や塑性変形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²⁾。

一般的にゴムは、鋼材やコンクリート等の一般的な土木材料に比べて弾性率が約 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、緩衝材として有望であると考えられている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⁴⁾、比較的低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、入力される周波数、ひずみ、温度や、繰り返し载荷などにより発揮する性能が大きく変化する⁵⁾。このため、ゴム製緩衝材の設計や作成にはこれらゴムの性質に留意する必要がある。

兵庫県南部地震以降、落橋防止構造及び緩衝材としてのゴムの利用法について活発な検討が行われている。緩衝材の形状や構成についての研究として、皆川らのゴム鋼併用型⁶⁾、村田らの二段階ばね⁷⁾などがある。しかしながら、これら研究のほとんどがゴム製緩衝材の形状や、耐震効果に関するもので、ゴムという材料そのものの性質に着目し、種類や配合といったミクロな観点から材料の開発を行っている研究は非常に少ないのが現状である。

2. 研究目的

室温で固体状態でないゴムは架橋によって形状を付与し実用材料としての要求品質を満たすことが可能である。架橋によってできた分子鎖の化学的結合部分を架橋点と言い、その数や形状などにより力学的性質が大きく変化する。一般的に生ゴム状態だと架橋点が少なく、強度や耐久性などを向上させる目的で補強剤や架橋促進剤が添加物として配合する。代表的な補強剤にカーボンブラック(CB; Carbon Black)があるが、そのCBがゴムに与える影響は未だに不明確な部分が多い。また、ゴムの弾性的性質は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が起源であるため、鋼材等が示すエネルギー起源の弾性とは異なる。特に、応力 - ひずみ曲線では大変形領域で応力が急激に増加する非線形挙動を示す。このようにゴムの変形挙動は複雑であるため、ゴム製品の設計において、応力 - ひずみ曲線は重要な基礎データとなっている。⁸⁾

公称応力 - 公称ひずみ, 真応力 - 真ひずみ, エネルギー吸収, カーボンブラッ, Mooney-Rivlin の関係式²⁾

本研究では、補強剤 4 としての CB に着目し、CB が応力 - ひずみ曲線やエネルギー吸収量に及ぼす影響について調べる。解析には Mooney-Rivlin 式を用い、以下の 2 つについて検討を行った。

単純引張試験から真応力 - 真ひずみ曲線についてを求める。

繰返し載荷試験によるエネルギー吸収性の評価。

表 1 クロロプレンゴムの配合

サンプル名	CR2	CR3	CR4
クロロプレン		100.00	
カーボンブラック FEF	30.00	40.00	50.00
MgO		4.00	
Zinc-stearate		0.50	
ZnO		5.00	
TOTAL	139.50	149.50	159.50
SP.GR(OBS)	1.392	1.415	1.435
カーボンブラック割合[%]	21.51	26.76	31.35

3. 実験

ゴム試料は Y 社より提供された CB 配合クロロプレンゴムを用いた。表 1 に試料の配合を示す。CB 配合量だけが異なる 3 種類ゴムを用意し、他の添加剤は同じにしてある。クロロプレンゴムを用いた理由は人工的に製造可能であり、ヤング率や弾性率等が天然ゴムに近く、汎用性が高いといった特徴からである。

図 2 に試験機の概略を示す。試験機は島津製作所製オートグラフ AJS-1 kN を使用した。又、ゴムの断面の変化を考慮して、試料を保持するチャックはコンプレッサーを使用し、空気圧で試料を固定した。画像解析には株式会社 KEYENCE 製の CCD カメラ CV3000 と画像をデータとして解析する KV STUDIO を使用した。引張試験は図 3 に示す 7 号ダンベルを用い JIS K-6251 に準拠した。試験速度は 2 mm/min で計測し、試験体の破断まで行った。エネルギー吸収量の評価は繰返し載荷試験により行った。真ひずみがそれぞれ 0.4, 0.6, 1.0, 1.4 になるまで載荷した後、試験力が 0 になるまで除荷し、再び載荷し、再び載荷してできるヒステリシスを求める。得られたヒステリシスの面積からエネルギー吸収量を評価した。

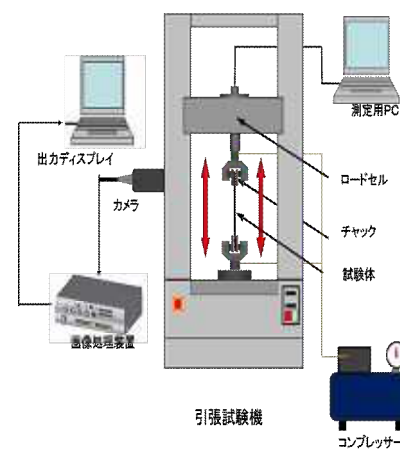


図 2 試験機



図 3 ダンベル型試料片

構造部材として一般的な鋼材等の場合、応力ひずみ曲線は公称応力、公称ひずみによって表されている。しかし、ゴム等の大きく変形する材料の場合、ひずみと断面積の変化が大きいため、真応力、真ひずみが有効となる。そこで、本研究では画像解析装置を用いて変形過程での実際の幅を測定し、断面積からゴムのポアソン比が 0.5 であると仮定して、真応力と真ひずみを求めた。公称応力と公称ひずみの定義を以下 (1) 式、真応力と真ひずみの定義を以下 (2) 式に示す。

$$\text{公称応力 公称ひずみ} \quad \sigma_n = \frac{F_i}{A_0} \quad , \quad \varepsilon_n = \frac{l_i - l_0}{l_0} \quad \dots \quad (1)$$

$$\text{真応力 真ひずみ} \quad \sigma_t = \frac{F_i}{A_i} \quad , \quad \varepsilon_t = 2 \ln \left(\frac{D_0}{D} \right) \quad \dots \quad (2)$$

ここで、 σ_n は公称応力、 F_i は荷重、 A_0 は初期の断面積、 ε_n は公称ひずみ、 l_i は標点間距離、 l_0 は初期の標点間距離、 σ_t は真応力、 A_i は真断面積、 ε_t は真ひずみ、 D_0 は初期の試料の幅、 D は試料の幅である。

ゴムの弾性的振る舞いを記述するために経験則として良く知られた Mooney-Rivlin 式がある。真応力、真ひずみに対する Mooney-Rivlin 式を式に示す。ただし伸長比 $\lambda = \varepsilon_t + 1$ 、 C_1 、 C_2 は実験より求まるパラメータである。

$$\sigma_t = 2 \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda} \right) \left(C_1 + \frac{C_2}{\lambda} \right) \quad \dots \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_t}{\left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right)} = 2C_1 + \frac{2C_2}{\lambda} \quad \dots (4)$$

(3)式を変形した(4)式では、縦軸に $\sigma_t \left(\lambda^2 - \frac{1}{\lambda}\right)$ 、横軸に $\frac{1}{\lambda}$ をとった Mooney plot の直線部分から C_1, C_2 を求めることができる。

Mooney-Rivlin 式は伸長・圧縮領域で適用することができるが、伸長領域では $C_2 > 0$ であるのに対して、圧縮領域では $C_2 = 0$ を示す。特に、圧縮領域では理想ゴムとして取り扱いが可能となる。⁹⁾

4. 結果と考察

図4に公称応力 - 公称ひずみ曲線、図5に真応力 - 真ひずみ曲線を示す。図4はオートグラフの試験力及びストロークから公称ひずみ - 公称応力を求めたものである。図5は画像解析装置を用いて真応力 - 真ひずみを求めたものである。比較すると、公称ひずみは真ひずみの5倍以上であり、公称応力は真応力の5分の1以下である。

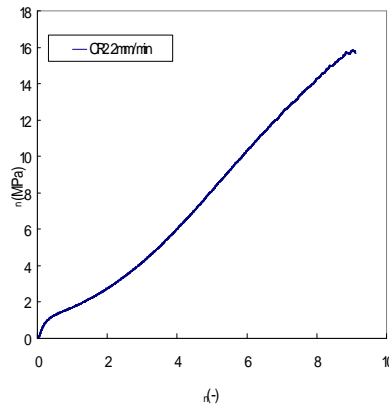


図4 公称応力 - 公称ひずみ曲線

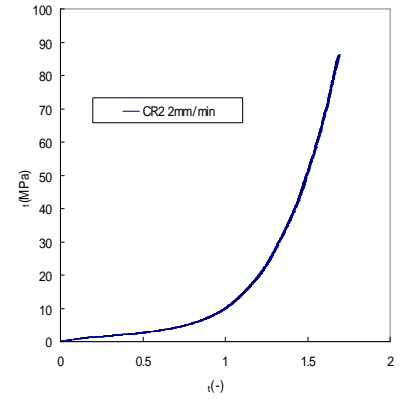


図5 真応力 - 真ひずみ曲線

このことから測定方法の違いで大きな差異が生じているのがわかる。大変形では、

実際の材料特性を評価するには真応力 - 真ひずみで見る必要がある。図6は真応力 - 真ひずみでのCB配合量の比較である。特に大変形過程では同じひずみ量でもCB配合量が多くなると応力も大きくなっている。又、破断時のひずみ量はCB配合量が多いほど小さくなっている。これはCB配合量が多くなるほど分子鎖の絡み合いを強くしているからと考えられる。図7は各CB配合量の Mooney Plot と、伸長比 $1/\lambda$ が0.75~0.85の区間でそれぞれの近似直線を引いたものである。CB配合量が増加すると張力も増加するのがわかる、又、近似直線は傾きが一定で切片が変化している。この直線近似より算出した係数とCB配合量を比較したものが図8である。

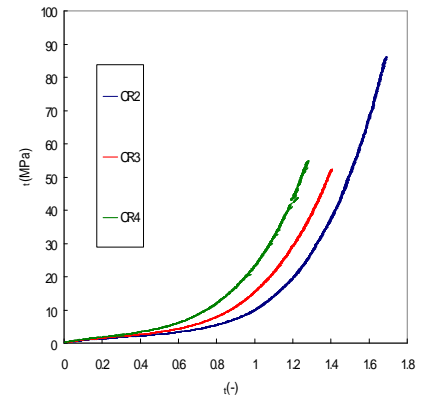


図6 各CB配合量の真応力 - 真ひずみ

C_1 は近似式の切片の値、 C_2 は傾きの値をそれぞれ0.5倍したものである。CB配合量が増加すると係数 C_1 も増加している。しかし、 C_2 はCB配合量が増加してもほぼ一定の値を示している。つまり、 C_1 はCB配合量に対して強い相関性があるといえるが、 C_2 に関してはCB配合量に関係しない。図9は繰返し载荷試験の真応力 - 真ひずみ曲線である。図のヒステリシスの面積を算出することでエネルギー吸収量を求めることができる。図10はCB配合量とエネルギー吸収量との関係を示したもので、CB配合量が増加するとエネルギー吸収量も増加しているのが確認できる。又、その傾向は大変形過程でより強くなっている。つまり、エネルギー吸収量は大変形過程ではCB配合量に比例していない。さらに、図11では Mooney-Rivlin 式での係数 C_1 とエネルギー吸収量との関係を示したもので、図10と同様の結果が得られた。

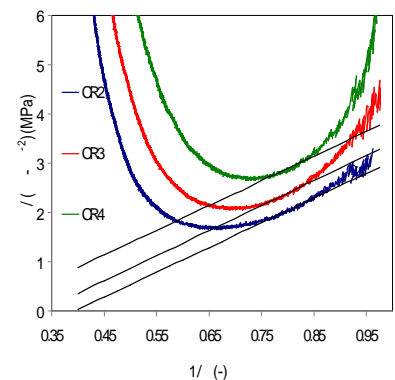


図7 Mooney Plot

5. 結言

CB 配合量が増加すると Mooney-Rivlin 式での係数 C_1 とエネルギー吸収量は共に増加する。又、係数 C_1 が増加するとエネルギー吸収量も増加する。このことから、Mooney-Rivlin 式での係数 C_1 とエネルギー吸収量は相関性があると言える。又、小変形過程に比べ大変形過程では CB 配合量の増加に対してエネルギー吸収量の増加は大きくなる。これは小変形過程と大変形過程ではメカニズムに違いがあると考えられ、エネルギー吸収性について重要である大変形過程のメカニズムについて研究する必要がある。

6. 改善点

- クロスヘッド速度が大きくなるとデータが不安定になってしまう。改善策として試料サイズを大きくすることや、より画素数の高いカメラで画像解析を行うなどが挙げられる。
- 実験では 5% ずつ CB 配合量の異なる試料を用いたが、実験精度を考慮すると 10~20% は差異が必要である。又、CB 配合量 0% の試料があると望ましい。
- ポアソン比を 0.5 として真応力及び真ひずみを求めたが、ひずみが大変形領域になるとポアソン比が 0.5 を下回っている可能性が高い。本研究では試料幅を計測する方法を採用したが、試料表面にドットをマークしてその動きを計測する方法がある。この方法ではポアソン比を考慮は必要ないが、現状ではマークに最適な塗料を選定中である。

7. 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) 西本安志，梶田幸秀，石川信孝ら：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) 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.
- 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.
- 5) 村上謙吉：レオロジー基礎論，産業図書，1993.2.
- 6) 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.
- 7) 村田清満，高山智弘，後藤貴士，山田正人，生駒信康ら：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.
- 8) 河野学：ゴムの応力ひずみ曲線の Mooney-Rivlin 式による検討，武蔵工業大学，2007.3.
- 9) 田中文彦：高分子の物理学，裳華房，1994.11.10

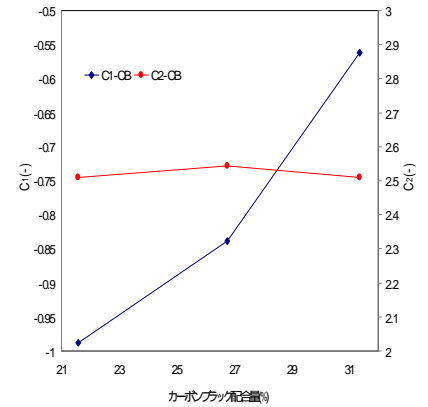


図8 パラメータ C_1, C_2 と CB 配合量の関係

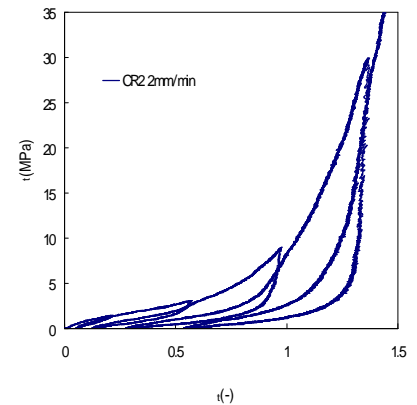


図9 繰返し载荷試験

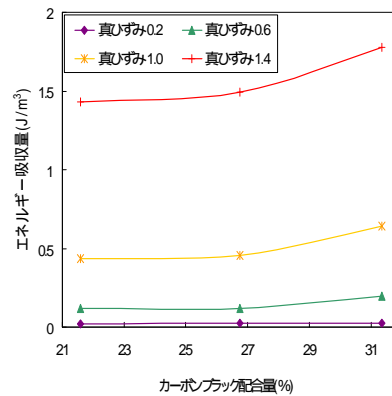


図10 CB 配合量とエネルギー吸収量の関係

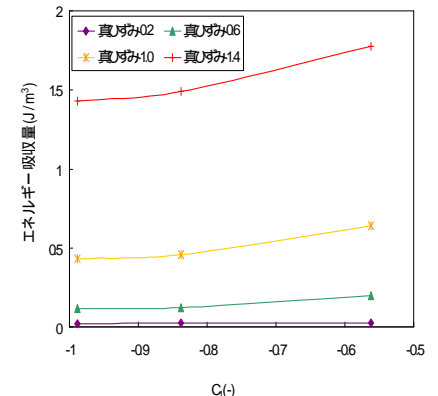


図11 パラメータ C_1 とエネルギー吸収量の関係