

衝撃荷重を受けるアイバー型耐震連結板の破壊シミュレーション

Fracture analysis of eye-bar type bridge restrainer plates subjected to impact load

○藤谷 健* 皆川 勝** 小田切 亮***

Takeshi TOYA, Masaru MINAGAWA and Ryo ODAGIRI

ABSTRACT This study focuses on energy absorption performance of eye-bar type bridge restrainer plates considered to be superior to bridge restrainer plates which have been employed in the past decades.

First, impact fracture behaviors of these two types of plates are analyzed and load carrying capacity as well as energy absorption performance are compared. Second, suitable dimensions of the eye-bar type plates are examined from the view point of energy absorption performance through parametric analyses.

Keywords : 耐震連結板, 衝撃荷重, 衝撃応答解析

Bridge restrainer plates, Impact load, Fracture analysis

1. はじめに

旧道路橋示方書¹⁾では、従来上部構造が橋脚または橋台から逸脱、落下しないための落橋防止構造を設置するように定めていた。しかし、それらの細部構造についての規定が無いために、各道路公団・公社ごとに設計法が異なっているといった指摘もある。さらに、設置以後、高架橋の多い都市部において大地震が発生せず、明らかに落橋防止構造によって落橋を免れたといった実際的な効果については確認することができなかった²⁾。

先の兵庫県南部地震では、都市部の高架橋などの橋梁構造物に甚大な被害が生じた。特に鋼板を用いた落橋防止装置の破損が顕著であった。その中でも落橋という事態に関しては、直接的に人命に関わる他、地震後の緊急車両の通過や復旧作業にも大きな影響を及ぼすことになった³⁾。

これらの事を受けて震災後に改定された道路橋示方書⁴⁾では、橋梁における各構成要素の役割を明確にして桁掛かり長、落橋防止構造、変位制限構造、段差防止構造からなる落橋防止システムへと再整理された。しかし、現在の落橋防止構造の設計では、耐震連結板、ピン、補強板、及び主桁腹板の部分とも地震時における静的な強度の応力照査を行っており、どの部分をもっとも弱点にするかという思想をとっていない。そのため、今回の大地震における落橋防止構造の損傷に関しては様々な事例が発生したものと考えられる。

兵庫県南部地震のように、供用期間内で発生する可能性の小さい巨大な荷重に対して局所的な損傷は許容してこの部分でエネルギーを吸収し、構造物全体の安全性を確保する「損傷許容設計法」という考え方

*武蔵工業大学大学院土木工学専攻 (〒158-8557 世田谷区玉堤 1-28-1)

**武蔵工業大学工学部土木工学科 (同上)

*** (株) CRC 総合研究所 (〒136-8581 江東区南砂 2-7-5)

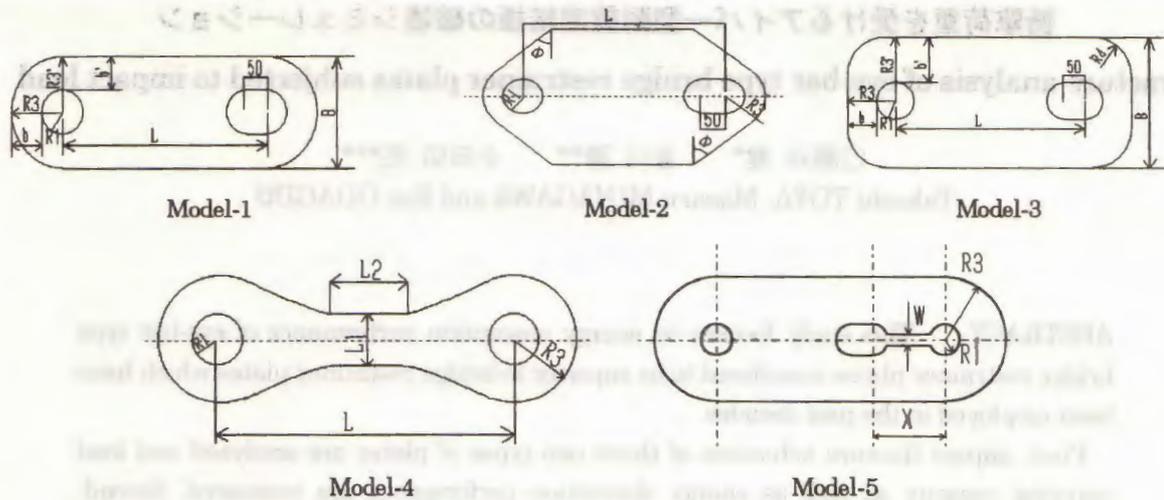


図-1 これまで用いられてきた耐震連結板の形状

がある。構造物に対してこのような設計法を確立するためには、構造物の破壊挙動を解明するための適切な解析方法が必要となる。一方、落橋防止構造についての研究においては、耐震連結板そのものについての静的あるいは動的な実験⁹⁾あるいは解析的な研究^{6),7),8)}がなされているものの、衝撃問題として取り扱った例³⁾はまだ少ない。

そこで、本研究では特に従来の耐震連結板に比べてエネルギー吸収性能の面で優れていると思われるアイバー型耐震連結板に焦点を絞り、耐荷力及び吸収エネルギーの観点から効果的な連結板の形状について解析的に検討を行う。

2. 現行の設計法及び既往の研究

従来の耐震連結板に関する研究は必ずしも多くない。すなわち、弾性応力評価法の合理化に関するもの⁶⁾、耐荷力やエネルギー吸収性能に関する実験・解析、衝撃荷重下での連結板の強度に関する実験・解析^{9),7),8)}などである。例えば、静的とみなせる荷重に対して文献 7), 8) にそれぞれ詳細な実験及び数値解析結果が与えられ、耐震連結板の強度・破壊特性に与える影響因子について論じられている。図-1の Model-1, Model-2 に現在一般的に使用されている耐震連結板、Model-3, Model-4, Model-5 に実験等で形状による力学特性を検討するために考えられた耐震連結板の形状を示す。これらの実験において板厚、材質と最大荷重との関係などについて検討がなされている。その結果、次のことが指摘されている。

- ・現行の設計式における応力照査位置と実際に最大応力が発生する位置は異なる。
 - ・最大強度は、ピン孔内縁から外縁までの軸方向距離を一定にした場合、連結板の形状を変えても際立った差は生じない。特に矩形タイプの連結板において軸直角方向を幅広にしても、幅を大きくする効果は非常に小さい。
 - ・ピン孔が円、長孔であるかは破壊様式には影響を及ぼさない。
 - ・ピン孔径に比べてピン径を小さくしていくと、耐震連結板の最大強度と吸収エネルギーは低下していく。
- また、伸び、エネルギー吸収という点からいうと、よく使用されている Model-1, 2 よりも Model-3, 4の方が優れているといえる。これは、Model-3, 4は、変形が連結板全体で生じているのに対して、Model-1, 2は連結板の中央部分とピンより外側部分との断面積に差があるために、変形が主にピンより外側の部分のみで生じているためであると考えられる。

さらに、現在の設計法は、ピンと連結板の接触によって生ずる応力をリングの接触モデルを用いて算定し (Timoshenko の弾性理論におけるアイバーの応力集中係数に基づくもの)、弾性変形の範囲内で照査するものである^{4),9),10)}。これには、力学モデルの妥当性、適用範囲が必ずしも明確にされていない上に、

耐震連結板の本来の機能を考えると、弾性変形にとどまらず、塑性変形をも考慮した終局強度をより重視すべきという点で十分に合理的ではないという問題がある⁷⁾。

また、より合理的な連結板の形状に関する小畑らの研究⁸⁾において、既設の多くの鋼道路橋に設置されている落橋防止構造の機能を出来るだけ活用しながら、高い補強方法を提案するために図-1の Model-5 に示したスリット型耐震連結板が提案されている。これは、衝撃吸収性能や変形能を期待すると同時にスリットの長さにより変位制限装置の役割も期待しているものである。さらに、低降伏点鋼の使用についても検討されており、板厚を増加させるか使用する連結板の枚数を増やすことでメリットがあるとしている。

3. アイバー型耐震連結板の優位性

ここではまず、現在一般的に使用されている形状の耐震連結板と、現行設計上ほぼ同程度の形状、寸法を有するアイバー型耐震連結板を対象として、耐荷特性、エネルギー吸収性能等を比較することによりアイバー型耐震連結板の優位性を示す。

3. 1 材料モデル

衝撃応答解析には、PC/LS-DYNA-3D¹¹⁾を使用し、3次元破壊要素(Isotropic elastic-plastic with failure)を用いた。この要素は、破壊基準として、相当塑性ひずみが最大塑性ひずみを超える場合と、相当応力が限界応力を上回る場合の二つを設定している。これらの条件に該当した要素は、解析上削除される。これにより、耐震連結板の亀裂の進展状況をシミュレートすることができる。

3. 2 材料定数の検討

主な材料定数は質量密度、降伏応力、降伏後弾性係数などであり、これらについては文献 5)における破壊実験の結果と比較するため、同一の数値を用いることとした。また、ひずみ速度効果によって鋼材の材料特性が変化することは一般的に知られている。そこで、本解析においても載荷速度による材料定数の変化を考慮する。文献 12)によると降伏応力、引張強度、破壊ひずみに関して静的力学特性に対する動的力学特性の変化率が示されている。変化率を表-1に示し、それによってスケールされた材料定数を表-2に示す。さらに、連結ピン側面と連結板のピン孔側面にスライド面を設定し、速度によって変化する摩擦を考慮する。ここでは、摩擦係数を 0.1 としている。この値は、一般的な値より低めであるが、実際の現

表-1 鋼材の材料特性に及ぼすひずみ速度の影響¹²⁾

変化率	係数
降伏点 $f_{y1}/f_{y2} = a_1 + b_1 \cdot \log \dot{\epsilon}$	$a_1 = 1.202, b_1 = 0.040$
引張強度 $f_{su}/f_{su} = a_2 + b_2 \cdot \log \dot{\epsilon}$	$a_2 = 1.172, b_2 = 0.037$
破壊ひずみ $\epsilon_{su}/\epsilon_{su} = a_3 + b_3 \cdot \log \dot{\epsilon}$	$a_3 = 1.044, b_3 = 0.013$

表-2 SS400 のスケールした材料定数

質量密度	$7.85 \cdot 10^{-6}$	Kg/mm
弾性係数	$2.01 \cdot 10^5$	N/mm ²
ポアソン比	0.303	-
せん断弾性係数	$7.72 \cdot 10^4$	N/mm ²
降伏応力	$3.56 \cdot 10^2$	N/mm ²
降伏後弾性係数	$5.51 \cdot 10^2$	N/mm ²
破壊ひずみ	0.322	-
破壊圧力	$-5.32 \cdot 10^2$	N/mm ²
体積弾性係数	$1.70 \cdot 10^5$	N/mm ²

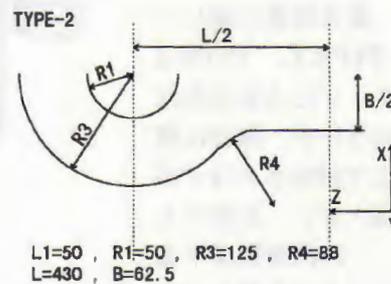
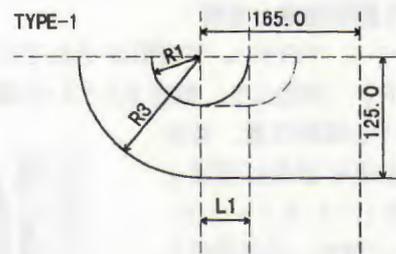


図-2 解析対象

象ではピンが変形することから摩擦による拘束は見かけ上小さくなり、低めの値を与えることが適当であり、さらに耐荷力に対しては安全側の値を与える¹⁾。

3. 3 解析対象

図-2 に解析対象を示す。TYPE-1 は現在一般に使用されている耐震連結板、TYPE-2 は各機関において現設計式の力学モデルとして用いられているアイバー型耐震連結板である。TYPE-1 において、内孔 R_1 、内孔の直線部の長さ L_1 は、桁長が 150m 程度の 3 径間連続鋼箱桁橋で使用されている耐震連結板の形状が参考にされている。また、ピン孔径($2R_2$)とピン径($2R_2$)との比は、クリアランスを実橋で用いられている 5mm としたため、ピン径として $\phi 90\text{mm}$ 、 $R_1/R_2 \approx 1.11$ とした。

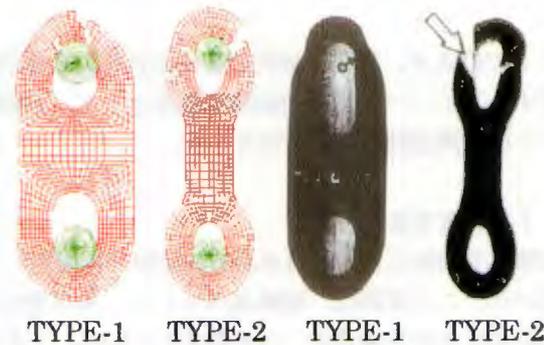
3. 4 境界条件および荷荷条件

境界条件として、一方のピンを完全固定とし、他方のピンは X-Z 平面で対称性を考慮している。荷荷速度は、橋脚-上部構造物連成系の非線形時刻歴応答解析²⁾の結果を参考に、ピンに一定速度の強制変位を与える。文献 2)によれば、橋脚高さが 20m の鋼製橋脚における上部構造の最大応答速度は、139cm/sec~222cm/sec 程度になる。しかも、橋桁が逆位相で運動する場合にはこの 2 倍程度の速度を見込んだ設計が必要である。したがって本解析では 500cm/sec の速度を想定した。

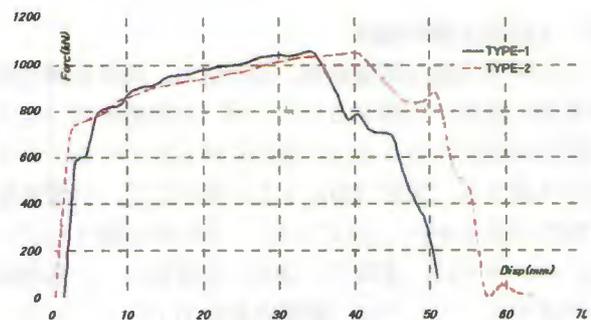
また、耐震連結板の強度は、ピン、連結板、固定部の強度によって決定される。しかし、塑性変形によりエネルギーを吸収することを期待できる構造要素は連結板であるので、ピンは連結板より先に破壊することのないように設計されているものとした。

3. 5 解析結果と考察

図-3 に TYPE-1、TYPE-2 それぞれの破壊様式を示す。同図より、報告されている破断実験⁵⁾における破断位置、変形形状を解析結果は精度よく再現しているといえる。図-4 に荷重-変位関係を示す。最大荷重に関しては、TYPE-1、TYPE-2 の各タイプに大きな差は見られないが、伸びに関しては TYPE-2 のほうが 20%程大きい。前述のように、これは連結板中央部とピンより外側との断面積の差による変形の生

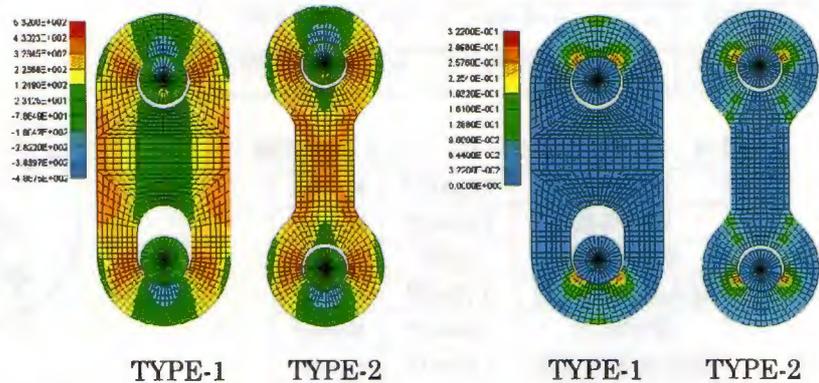


TYPE-1 TYPE-2 TYPE-1 TYPE-2
図-3 各タイプの解析及び実験⁵⁾の破壊様式



	TYPE-1	TYPE-2
最大荷重(kN)	1054.4	1048.1
最大変位(mm)	34.5	40.5
エネルギー吸収量(kN*mm)	3.32×10^4	4.32×10^4

図-4 荷重-変位関係



TYPE-1 TYPE-2 TYPE-1 TYPE-2
(a) 相当応力分布 (b) 相当塑性ひずみ

図-5 各タイプの相当応力及び相当塑性ひずみ

じ方の違いだといえる。なお、TYPE-2 では、変曲部の半径 R4 を小さくすることによる応力集中を避けるために、TYPE-1 のピン間距離と比べると長い。そこで、図-4 の変位、吸収エネルギーの値は単純に TYPE-1 とのピン間距離の比(L(1)/L(2)=0.767)を掛け合わせて補正をしている。また、変形能は破断時までの伸びをとる場合もあるが、ここでは最大荷重時の伸びを示している。

次に、図-5 に、耐震連結板に亀裂が生じる直前の各タイプの(a)相当応力分布、(b)相当塑性ひずみ分布を示す。静的な実験において指摘されていた、“最大引張応力の発生する位置が、現行の設計基準に見られる応力照査位置と異なる”ことが衝撃的な荷重を受ける場合にもいえることが分かった。

以上のことから、想定を超える地震力や変位、変形が橋に生じた場合、吸収エネルギーの大きい TYPE-2 のようなアイバー型耐震連結板をフィルセーフ機構として機能的に働かせ得ることが示されたと考える。

4. アイバー型耐震連結板の衝撃応答解析

上記の結果を踏まえ、「損傷許容設計法」という考え方で設計を行うことを考えると、耐震連結板で“どれだけ多くの量のエネルギーを吸収できるか”が重要となる。ここでは、アイバー型耐震連結板に焦点をしばり、望ましい連結板の形状について解析的に検討を行う。

4.1 解析対象

まず、中央部分の寸法により耐荷力、エネルギー吸収性能にどのような影響があるかを検討した。3. の TYPE-1 のような従来の連結板の場合、破断強度は連結板の形状に関係なく、連結板の外径 R₃ と内径 R₁ の差によりほぼ一定となり、最大強度は連結板の厚さに比例するということが確認されている。しかし、アイバーの形状を決定するパラメータについての検討は従来なされていない。そこで、解析対象を図-2 に示すものを基本(TYPE-C)とし、表-3 のように B の値を変化させて破壊までの挙動を解析した。

次に、R₃/R₁ の値を変化させ、これにより耐荷力、エネルギー吸収性能にどのような影響があるかを検討した。表-3 に示された解析対象の内、TYPE-A、TYPE-B、TYPE-C について R₃/R₁ を変化させた。R₃/R₁ については現設計式の範囲が R₃/R₁=2~4 であることから、この範囲を含み R₃/R₁=1.5~3.5 とした。さらに、ピン孔径およびピン間距離の影響を調べるためのモデルも用意した。なお、ピンを通すための内孔の形状には長孔と円の二種類があるが、このどちらか一方から必ず破断するというのではなく、内孔の形状は破断とは直接関係ないといわれており、実際内孔を変化させ解析を行った結果図-6 に示すような荷重変位関係が得られ、内孔の形状は破断と直接関係ないことが分かる。そこで、ここでは形状のバランスをとるために両方の内孔を円とした。また、要素数が解析結果にどのような影響を与えるか確認するため TYPE-B について要素数を 2256、

表-3 解析モデルのパラメータ

種類	主パラメータの値					
	R3	R2(ピン径)	R1	t	B	L
A	75	45	50	25	90	430
	100					
	125					
	150					
	175					
AB	125	45	50	25	97.6	430
B	75	45	50	25	107	430
	100					
	125					
	150					
	175					
BC	125	45	50	25	118.2	430
C	75	45	50	25	125	430
	100					
	125					
	150					
	175					
R1-70	100	63.6	70	25	110	430
	125					
	150					
R1-30	75	27.3	30	25	100	430
	100					
	125					
L-480	125	45	30	25	100	480
L-380						380

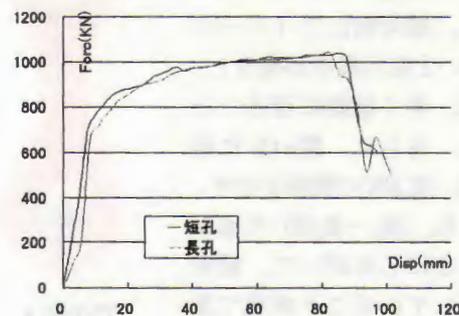


図-6 内孔を変化させたときの荷重変位関係

6048, 17024 の 3 種類について検討した。なお、材料モデル、材料定数、諸条件は前節で用いたものと同様であり、以下に示す解析結果に関してはピン間距離による補正はしていない。そして、図-7 に要素数を変化させたときの荷重変位関係を示す。ここから、要素数を変化させても荷重変位関係には影響が無いと言える。

4. 2 解析結果と考察

図-8 に TYPE-A, AB, B, BC, C の $R_3/R_1=2.5$ の場合について荷重変位関係を示し、表-4 には伸び、最大荷重、エネルギー吸収量を示す。なお、荷重と変位は、長さ L 、幅 B 、板厚 t の同材質の鋼板を引張ったときの降伏荷重と降伏変位で無次元化している。したがって、縦軸で 1 を基準に、これを上回れば連結板中央部で降伏に至り、下回れば連結板中央部では降伏に至っていないことになる。次に、図-9 にそれぞれのタイプの変形・破壊様式を示す。同図から破壊様式は二つに分けられ、TYPE-A, AB, B では連結板中央部、TYPE-BC, C においてはピン孔内周のき裂発生から破壊に至っている。そして、図-10 にエネルギー吸収量の時刻歴を示す。同図からは、TYPE-B において最もエネルギー吸収量が大いことが分かる。そこで、TYPE-B のピン孔内周と連結板中央部の相当塑性ひずみの増加を図-11 に示す。同図より、連結板中央部及びピン孔内周のひずみは、ほぼ同じ値を示し、どちらから破壊してもおかしくない状況であったことが分かる。

以上のことから、ここで得られた 2 種類の破壊形態のどちらであるかということは、耐荷特性、エネルギー吸収性能に対して大きく影響を及ぼすものではない。しかし、2 つの破壊形態が混在するような、すなわちピン孔内周、連結板中央部双方でバランス良くエネルギーを吸収できる TYPE-B が最も優れた形状であると考えられる。

図-12 には、応力集中係数と $(R_3-R_1)/B$ の関係を示す。同図からは、本研究で用いたモデルにおいて、相対的にアイパーの頭が小さいと応力集中が発生し、その結果、早く破壊に至ることが分かる。さらに、図-13 に耐荷力と $(R_3-R_1)/B$ の関係を示す。ここからも、 $(R_3-R_1)/B$ の値が小さくなるにしたがって、耐荷力が低下していることが見て取れる。また、 $(R_3-R_1)/B=0.7$ 付近を境界としてそれ以上では連

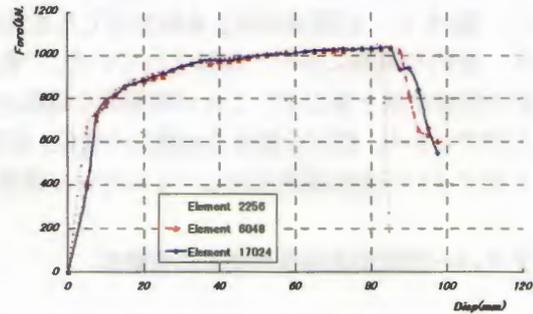


図-7 要素数を変化させたときの荷重変位関係

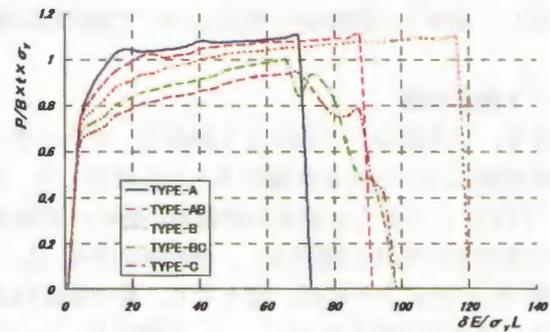


図-8 $R_3/R_1=2.5$ のときの荷重変位関係

表-4 最大荷重・伸び・エネルギー吸収量

	P(kN)	δ (mm)	E(kN*mm)
TYPE-A	878.4	52.7	4.28×10^4
TYPE-AB	956.6	66.5	5.79×10^4
TYPE-B	1040.3	80.3	8.31×10^4
TYPE-BC	1046.0	50.0	5.37×10^4
TYPE-C	1048.0	52.8	5.62×10^4

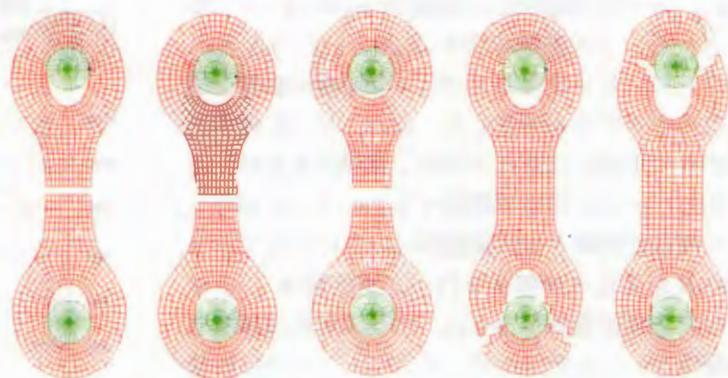


図-9 各タイプの破壊様式

図-9 各タイプの破壊様式

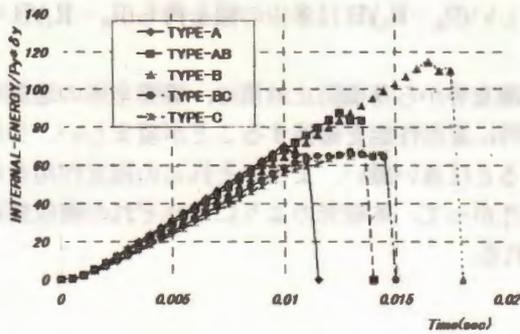


図-10 エネルギー吸収量の変化の様子

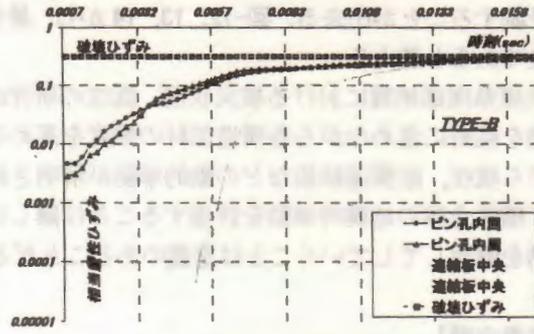


図-11 相当塑性ひずみの増加の様子

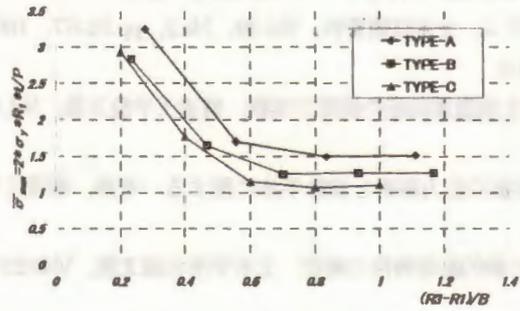


図-12 $(R_0-R_1)/B$ と応力集中係数の関係

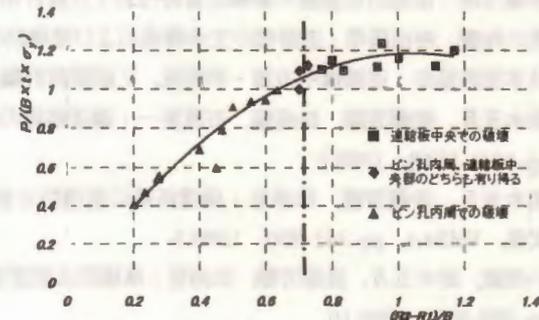


図-13 $(R_0-R_1)/B$ と耐荷力の関係

結板中央部での破壊, それ以下ではピン孔内周において破壊し, 急激に耐荷力が低下する. なお, 図-13には, R_1 を変化させたもの, およびピン間距離を変化させた解析対象の結果も含まれており, R_1 と L による耐荷力, 破壊様式への影響はないと考える. これは, 図-14 のエネルギー吸収量との関係においても示すことが出来る.

5. 結論

本研究では, 兵庫県南部地震において橋梁構造物

に様々な被害が生じたこと, 特に落橋という事例に注目し, 耐震連結板がフェイルセーフ機構として機能的に働いたための望ましい形状について衝撃応答解析を通して検討した. その結果, 耐震連結板の衝撃的荷重に対する特徴的な事項は次のようにまとめることが出来る.

- ・ここで用いたような衝撃応答解析を行なうことによって, 衝撃破壊実験における破断様式, 最大荷重・伸びを精度良く予測することが出来る.
- ・静的実験で既に指摘されていることではあるが, 最大引張応力の発生位置は, 従来各機関の設計基準に見られる応力照査位置とは異なる点で発生していることが確認できた.
- ・現在一般的に使用されている耐震連結板の形状(図-1 の Model-1)よりも, 今回解析対象としたアイパー型耐震連結板の方が耐荷力特性, エネルギー吸収性能ともに優れている.
- ・アイパー型耐震連結板について, 耐荷力特性, エネルギー吸収性能の両面から, ピン孔内周および連結板中央部分の双方での破壊の可能性があるような形状が望ましい. ここでは, TYPE-B が最も望ましい形状である.
- ・アイパー型耐震連結板について, $(R_0-R_1)/B$ をパラメータにすることにより, その破壊様式をほぼ正確

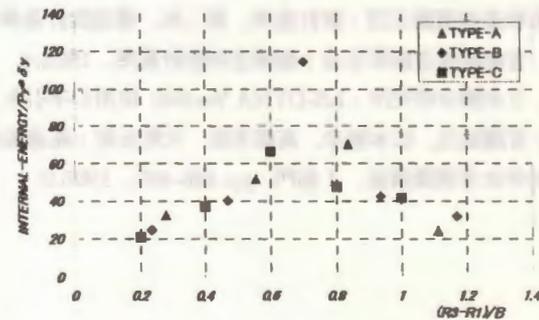


図-14 $(R_0-R_1)/B$ とエネルギー吸収率の関係

に予測することが出来る。図-12, 13, 14 から, 最も望ましい $(R_3 - R_1)/B$ は多少の幅を持ち $(R_3 - R_1)/B = 0.7$ 前後であると考えられる。

兵庫県南部地震における被災状況, 既往の研究成果の調査等から落橋防止対策は, 橋梁全体の地震時の挙動を視野に含めながら各構造部材の強度を高めると同時に変形性能を確保することが望ましい。しかしながら現在, 耐震連結板などの動的挙動が解明されているとは言い難い。よってそれらの相互作用を考慮して橋梁全体の地震時挙動を評価することは難しい。したがって, 本研究のようにそれぞれの構成要素の挙動を解明してしていくことは意義のあることだと思われる。

【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, 1990.2.
- 2) 長嶋文雄: 落橋防止装置の衝撃応答特性および設計法に関する研究, 文部省科学研究費補助金 基礎研究, 1997.3.
- 3) 西川和廣, 神田昌幸: 道路橋の支承構造および落橋防止システム, 土木技術資料, Vol.39, No.2, pp.62-67, 1997.2.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 1994.2.
- 5) 鈴木五月, 後藤芳顕, 松浦聖, 石原英一: 鋼道路橋の落橋防止装置連結板の耐荷力実験, 構造工学論文集, Vol.35 A, pp.1011-1018, 1989.3.
- 6) 鈴木五月, 後藤芳顕, 松浦聖: 鋼道路橋の落橋防止装置連結板の応力解析と設計手法に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.34A, pp.341-350, 1988.3.
- 7) 小畑誠, 鈴木五月, 後藤芳顕, 松浦聖: 落橋防止装置連結板の静的耐荷特性の解析, 土木学会論文集, Vol.422/I-14, pp.295-302, 1990.10.
- 8) 小畑誠, 栗原位充, 後藤芳顕: 高エネルギー吸収型耐震連結板の強度および変形特性, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.239-249, 1999.1.
- 9) 阪神高速道路公団: 設計基準, 第二部, 構造設計基準 (橋梁編), 1994.7.
- 10) 首都高速道路厚生会: 鋼構造物設計基準, 1992.4.
- 11) 日本総合研究所: LS-DYNA Ver.940 使用の手引き, 1997.6.
- 12) 首藤誠志, 松本憲幸, 高橋芳彦, 大野友則: 高速载荷を受ける鋼材の動的応力-ひずみ関係モデル, 土木学会第 45 回年次学術講演会, I 部門, pp.486-487, 1990.9.