

鋼橋における耐震連結板の衝撃破壊解析

長嶋文雄*, 島田泰至**, 今野裕士***

* 博士(工学)東京都立大学工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

** 修士2年 東京都立大学工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

*** (株)東京鐵骨橋梁橋梁本部設計部 (〒108-0023 東京都港区芝浦4-19-32)

鋼橋の耐震連結装置の設計において、最終的に桁掛り長さを確保することで落橋を防ぐことにするのであれば、耐震連結板にエネルギー吸収機構としての役割を持たせた設計をすることも可能である。また、既設橋の落橋防止装置に対する補強は、設置スペースが十分でない場合が多く、既にある施設や構造を利用した補強ができるならば経済的である。さらに、免震支承を用いた場合のように、桁の大きな変形に対して十分機能する連結装置に関する検討も必要である。

本研究では、以上のような背景に基づき、従来から鋼橋の耐震連結装置としてよく使われている眼鏡タイプの連結板を用いた桁連結装置に対する3次元衝撃破壊挙動解析を行い、その強度特性とエネルギー吸収能などを調べ、合理的な耐震連結装置について議論した。

Key Word: Bridge restrainer, Seismic tie plates, Impact fracture analysis, Strain rate effect

1. はじめに

兵庫県南部地震においては、従来から鋼橋の耐震連結装置としてよく用いられていた、連結板とピンを使った桁連結装置に損傷が多く見受けられた。このため、既存の橋梁に対する耐震補強の一つとして、ワイヤーやチェーンなど種類の異なる耐震連結装置が併用される場合がある。

しかし、従来のタイプの耐震連結板であっても、巨大地震に対してかなりのエネルギー吸収効果があった形跡も認められる。最終的に桁掛り長さを確保することで落橋を防ぐことになるのであれば、連結板にフェイルセーフ機構としてではなく、エネルギー吸収機構としての役割を持たせた設計が可能である。

直下型地震であったために、衝撃的荷重に対する対策について議論されているが、橋桁の最大応答速度は200~250 cm/sec程度¹⁾であり、衝撃問題の中では低速の衝突問題として扱われる速度である。すなわち、重量物の鈍い衝突問題として扱うべきものであり、このような場合には鋼であっても、塑性変形による緩衝効果が期待できる。

また、既設橋の落橋防止に対する補強は設置スペース

が十分でない場合が多く、既に設置されている構造を利用した補強ができるならば経済的である。さらに、既存の構造を利用すれば現状よりも外観を損なうことはない。

文献2)では、相似率の問題を排除する目的で、実物大の耐震連結装置を用い、これに対して大型垂重(8.44 t)を最大速度313 cm/secで衝突させる実験を行い、連結板の合理的な設計法に関する資料を得ている。この実験では、連結板の破壊形態はすべて延性破壊であり、脆性的な破壊は一例もなかった。これは衝突速度が300 cm/sec強であっても静的な破壊形態と殆ど変わらず、ひずみ速度効果もそれ程大きくないことを示している。

従来、連結板の設計はアイバーの弾性計算式に基づいて行われており、終局耐荷力(破断強度)やひずみエネルギーの議論は十分にされて来なかった経緯がある。この点については、例えば文献3), 4)などのように、高エネルギー吸収型の耐震連結板の開発が必要である。

耐震連結板のもう一つの課題は、免震支承など横剛性の低い支承を用いたときの桁の大変位に対して、従来型の連結装置が十分機能するかどうかという問題である。

本研究は以上のような背景に基づき、3次元衝撃破壊挙

動のシミュレーション解析を通して耐震連結板の強度特性やエネルギー吸収能などを明らかにし、連結装置の合理的な設計法を確立することを最終的な目的としたものである。本論文ではまず兵庫県南部地震における耐震連結装置の被害と耐震効果について議論し、次に解析モデルの検討を文献2)の実験結果を参考にして行い、次に高エネルギー吸収型や大変位追従型の連結板形状について考察する。

2. 兵庫県南部地震で見受けられた耐震連結板の効果

兵庫県南部地震は、落橋防止構造・装置を設置するきっかけとなった新潟地震以上に、落橋防止に関する貴重な教訓を与えてくれた。ここではウェブ補強板の破壊を除く、考えられるあらゆる損傷の形態が見られた。写真1~4は眼鏡タイプの耐震連結装置の被災状況（阪神高速神戸線の高架橋）を示したものである。

巨大地震では、可動支承部の移動制限装置は初期の段階で破壊され、次に落橋防止装置に力が加わる。このときの作用力が連結装置の耐力以下であればその使命を果たすことができ（写真1）、耐力を上回れば落橋防止装置のピンが破断して抜け落ちたり（写真2, 3）、連結板が破断し

たり、定着部が破断したり（写真4）、ウェブが引き千切られたりする。さらに橋脚との相対変位が大きくなりこれが桁の掛け違い長さ S_g を超えるようになると桁が落下する（写真4）ことが分かった。

しかし全体的には、あのような巨大地震に対してよく耐えたという印象があり、落橋防止装置の効果については少なからず認められた。

連結ピンは、せん断破壊を先行させないよう、また曲げ変形によるエネルギーの吸収をさせるように補強板と連結板の間に10 mm程度の間隙を設けるような設計がなされた経緯がある。隣接する2つの橋桁と10 mmの間隙を忠実に再現した耐震連結装置を3次元の有限要素でモデル化して片方の桁端を落下させる衝撃応答解析を行ったところ、兵庫県南部地震でよく見受けられた写真3に示すような連結板の面外方向の塑性変形が現れた（図-1）^{5), 6), 7)}。橋軸方向（図-1の矢印方向）の衝撃力にもかかわらず、ピンの曲げ変形により連結板が面外方向に変形し、これが栓抜き要領で連結ピンを引き抜く働きをすることが分かった。連結ピンの曲げによるエネルギー吸収は連結板に比べて小さいので、ピンの抜け落ちを防ぐような工夫をするこ

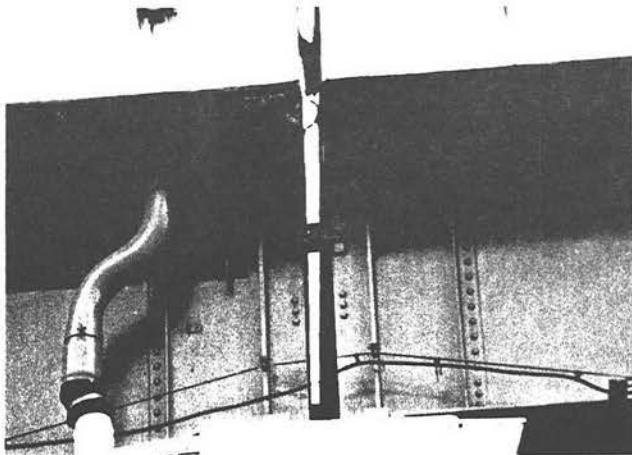


写真1 橋桁の相対移動と耐震連結装置

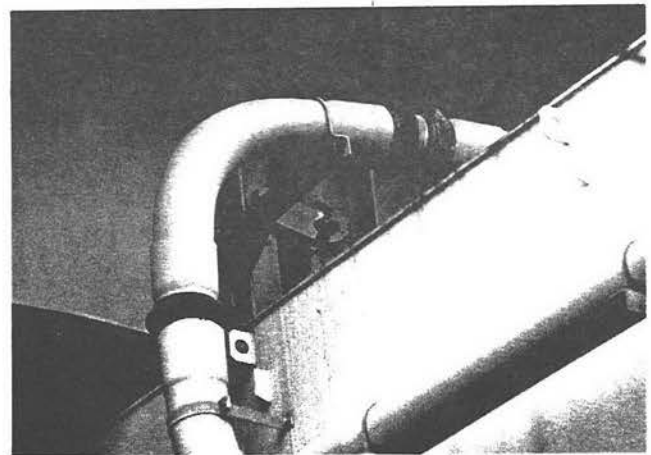


写真3 連結板の面外塑性変形

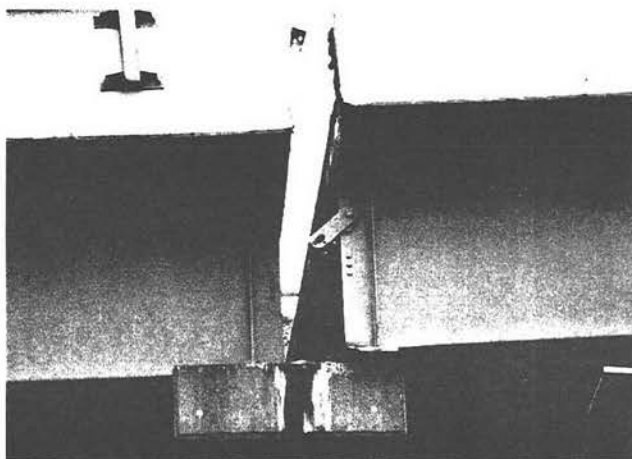


写真2 連結ピンの抜け落ち

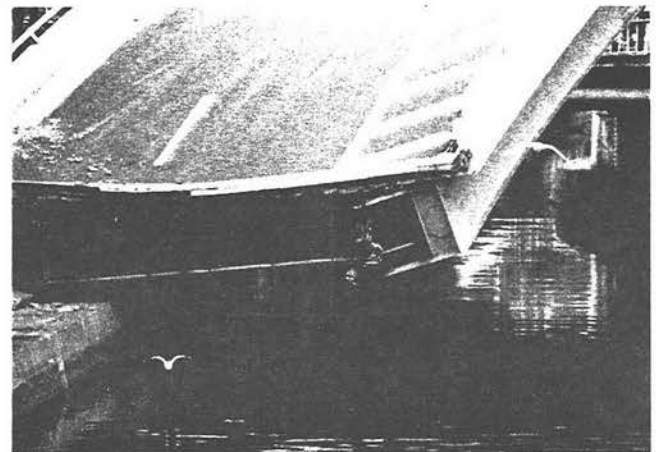


写真4 連結板定着部の破断

とが重要である。

耐震連結装置の破損箇所は、腹板、連結ピン、連結板、定着部などであったが、合理的な設計を行うにはエネルギー吸収能の大きな連結板に着目すべきであることが分かった。

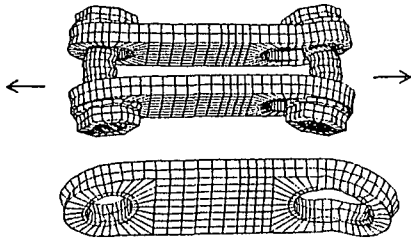


図-1 ピンの曲げ変形による栓抜きに似た作用による連結板の面外塑性変形（衝撃応答解析結果）

3. 耐震連結板の衝撃破壊挙動解析

3.1 検討モデル

文献2)では従来型の眼鏡タイプの連結板を用いた実物大の衝撃破壊実験を行ない、より合理的な連結板形状の検討を行っている。これに関連する過去の研究には、連結板内の破断線を延長して破壊強度の向上をねらった矩形型連結板³⁾を用いたもの、アイバータイプの変形である中央部の断面積を減らした連結板³⁾を用いたもの、さらにスリット部の破壊エネルギーを期待した高エネルギー吸収型連結板²⁾などがある。

ここでは、これらの連結板の強度特性とエネルギー吸収能を解析的に検討するために、表-1に示すような代表的な4種類の連結板を設定した。Aタイプとしては標準的な

表-1 検討モデルの形状と寸法

<p>Aタイプ (標準型) 板厚 25 mm $v = 313 \text{ cm/sec}$</p>	
<p>Bタイプ (矩形型) 板厚 25 mm $v = 313 \text{ cm/sec}$</p>	
<p>Cタイプ (アイバー型) 板厚 25 mm $v = 313 \text{ cm/sec}$</p>	
<p>Dタイプ (高エネルギー吸収型) 板厚 4.6 mm $v = 37.5 \text{ cm/sec}$</p>	

眼鏡タイプの連結板、Bタイプは板の形状を矩形にしてAタイプの連結板の破断線の長さを増し、強度の増加をはかったもの、Cタイプはアイバータイプの変形(まだプロトタイプ段階)、Dタイプは高エネルギー吸収型である。A~Cタイプはピン間隔(350 mm)、連結板の縦横寸法(250 x 600 mm)、板厚(25 mm)、材質(SM490A)を等しくし、形状効果について比較検討することにしたものである。Dタイプは実験結果と比較するために、文献4)で用いられたものと同様の寸法、材質とすることにした。

载荷は、向かって左側のピンを固定し、右側のピンを一定速度 v (A~Cタイプは $v=313 \text{ cm/sec}$; 文献2)の実験で用いられた载荷速度の中で一番速いものを選んだ、Dタイプは $v=37.5 \text{ cm/sec}$; 文献4)の実験で行っている速度の平均値とした)で強制変位させることによって行った。

3.2 解析条件および解析手法

衝撃破壊挙動解析にはLS-DYNA3D[®]を用い、連結板要素には破壊解析用のソリッド要素(Isotropic elastic-plastic element with failure)を使用し、破壊基準は以下の2種類を設定した。

①有効塑性歪みが最大塑性歪みを超える場合、

$$\epsilon_{eff}^p > \epsilon_{max}^p \text{ ただし } \epsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij}^p \dot{\epsilon}_{ij}^p \right)^{1/2} dt \dots\dots (1)$$

ここで、 ϵ_{eff}^p : 有効塑性歪み ϵ_{max}^p : 最大塑性歪み $\dot{\epsilon}_{ij}^p$: 塑性歪み速度である。

②圧縮応力が最大圧縮応力を超える場合、

$$p^{n+1} < p_{min} \text{ ただし } p^{n+1} = K \left(\frac{1}{V^{n+1}} - 1 \right) \dots\dots (2)$$

ここで、 p^{n+1} : $n+1$ ステップの圧縮応力 p_{min} : 最大圧縮応力 K : 体積弾性係数 V^{n+1} : $n+1$ ステップの体積である。

①または②に該当した要素は次の計算ステップから解析上削除され、それにより部材の亀裂の進展状況を把握することができる。

高速载荷については高橋の実験式¹¹⁾に従って歪み速度 $\dot{\epsilon}$ による材料定数の変化を考慮した。高速载荷時の降伏応力 σ_{yd} と静的载荷時の降伏応力 σ_{ys} の比 Δf_y は、

$$\Delta f_y = \frac{\sigma_{yd}}{\sigma_{ys}} = 1.202 + 0.040 \log \dot{\epsilon} \dots\dots (3)$$

また最大耐荷応力は歪み速度 $\dot{\epsilon}$ のとき σ_{ud} 、静的载荷のとき σ_{us} とするとその比 Δf_u は、

$$\Delta f_u = \frac{\sigma_{ud}}{\sigma_{us}} = 1.172 + 0.037 \log \dot{\epsilon} \dots\dots (4)$$

で与えられる(図-2)。

図-2 バイリニア型応力-歪み関係

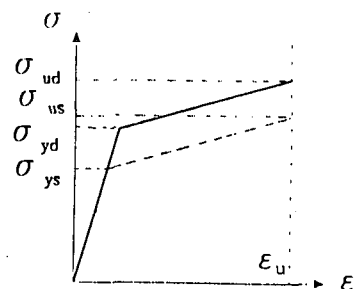


表-2 材料定数表 (zone F, zone Lはそれぞれ高ひずみ領域と低ひずみ領域のもの)

	Type A ~ C	Type D
Young's modulus (kgf/cm ²) E	2.10×10^6	2.10×10^6
Tangent modulus (kgf/cm ²) E _t	8.20×10^3	8.20×10^3
Shear modulus (kgf/cm ²) G	8.08×10^5	8.08×10^5
Yield stress, zone F (kgf/cm ²) σ_y	4.40×10^3	3.60×10^3
" , zone L (kgf/cm ²) σ_y	4.00×10^3	3.27×10^3
Failure strain, zone F ϵ_u	4.50×10^{-1}	4.50×10^{-1}
" , zone L ϵ_u	4.00×10^{-1}	4.00×10^{-1}
Mass density (kgf/cm ³) ρ	8.01×10^{-6}	8.01×10^{-6}

解析モデルはピン表面と連結板内部節点との接触問題を扱うことができる。

解析に必要な歪み速度依存の材料定数は文献⁹⁾などに示される方法を基本にして定めた。使用した材料定数の一覧を表-2に示す。破壊挙動解析には公称値ではなく、体積一定の条件から求められる応力と歪みとの関係を使う必要がある^{10), 11)}。ここで用いた破壊解析用のソリッド要素は歪み速度依存型の要素ではないため、歪み速度効果については一度解析を行い、その結果得られる平均的な歪み速度を次の解析に用いることによって考慮することにした(本解析での歪み速度は50~80 sec⁻¹程度であった)。連結板を歪み速度が低速、高速の2つの領域(zone L, zone F)に分け、それぞれの領域に対して異なる材料定数を与えることにしている。各メッシュ図に高速歪み速度領域(zone F)を薄墨で示した。

3.3 解析結果

図-3に、Aタイプの解析結果、(a)メッシュ図、(b)亀裂発生状況図、(b')破壊状況図を示す。連結板の伸び変形は円孔部分(図-4, b, b')で最も大きく、中央の充実断面部分(図-4, c)では少ない。歪みエネルギーを増すには、中央部分の断面積を円孔部分の強度とのバランスをとりながら減らし、この部分の変形を増す工夫が必要である。

応力集中点は、一般的には3箇所ある。図-4に示すように、まず点(1)に集中し、その後ピンが連結板に食い込んで連結板の塑性変形が増加するとピンと連結板の接触域の端部、点(2)に集中点が移動する。通常の眼鏡タイプの連結板においては、この点(2)付近から亀裂が発生し、破断に至る場合が多い。連結板の塑性変形がさらに進むと、点(3)にも応力集中点が生じる。矩形タイプの連結板では、この点(3)付近から亀裂が発生する場合が多い。

図-5はAタイプの荷重-ピン間変位関係を示したものである。破線が静破壊実験結果、実線が衝撃実験結果、薄い実験が解析結果である。解析結果は実験結果に比べてやや伸びが少なく、最大強度も低い、全体的な傾向は合っている。解析結果の伸びが少ない理由は、歪み速度効果を最大歪み速度に合わせて設定しているために、降伏時の強度が高く、このため伸び変形量が小さくなっているためと

思われる。この傾向は他のタイプについても同様であるが、根本的な原因は、今回使用した破壊解析用のソリッド要素(Isotropic elastic-plastic element with failure)が歪み速度効果を考慮できないことによるものである。

図-6, 7, 8はそれぞれBタイプ、Cタイプ、Dタイプに対する(a)メッシュ図、(b)亀裂発生状況図、(b')破壊状況図(Dタイプのみ)、(c)荷重-ピン間変位関係を示したものである。Bタイプの解析結果では、実験における亀裂発生箇所と同じ所に亀裂が発生しており、良く破壊挙動をシミュレートしていることが分かる。

Cタイプについては、Aタイプの連結板の胴部の幅を狭くしてこの部分の変形を引き出す工夫をしたものであるが、まだ完成された形ではないため、多少Aタイプよりも最大変位が大きくなっている程度である。Dタイプの高エネルギー吸収型はさらに詳しく検討する価値のある。タイプCの荷重-変位関係図は実験結果がないので、Aタイプの実験結果と比較している。A, B, Dタイプの実験結果と解析結果の対応は比較的良い。

連結板の強度は図-4のa部分長さで定まる(せん断破壊強さ)。橋桁の端補剛材によりaの長さについて制約があるとすれば、図-4のc, b部分で歪みエネルギーを確保する必要がある。標準タイプであるAタイプではc部分の伸びがほとんどなく、この点はCタイプ(アイバータイプ)の方が合理的である。

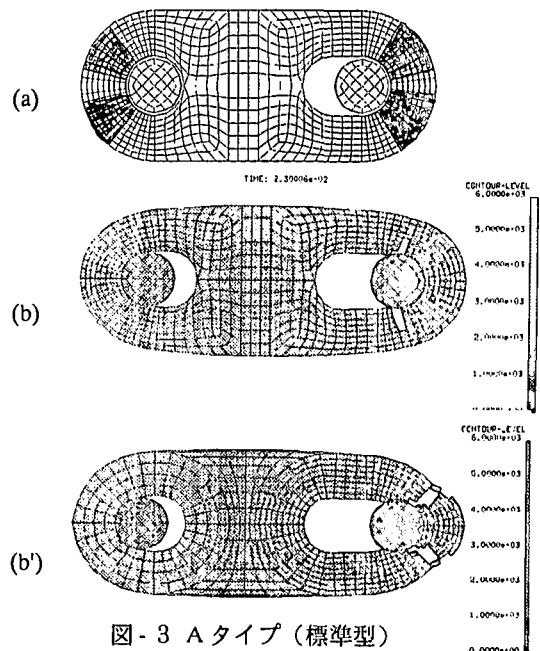


図-3 Aタイプ(標準型)

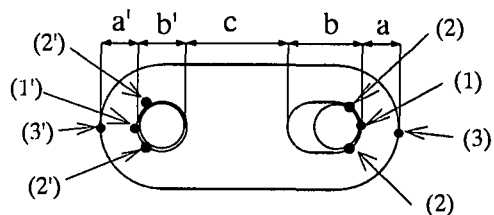


図-4 代表的な応力集中箇所

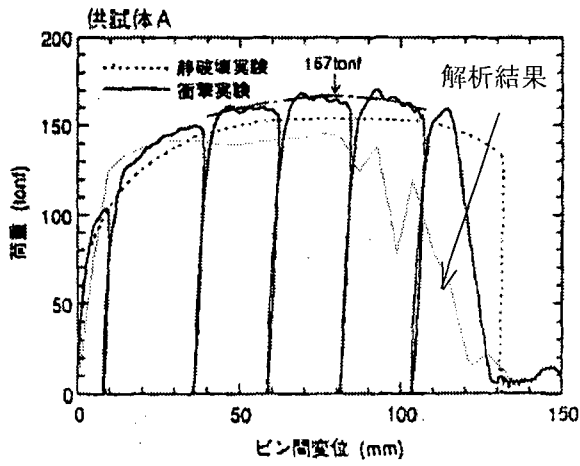


図-5 Aタイプ (標準型) 荷重-ピン間変位関係

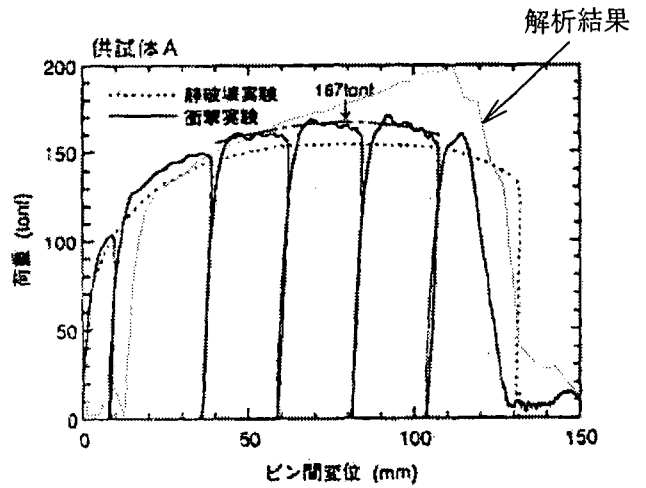


図-7 Cタイプ (アイバー型)

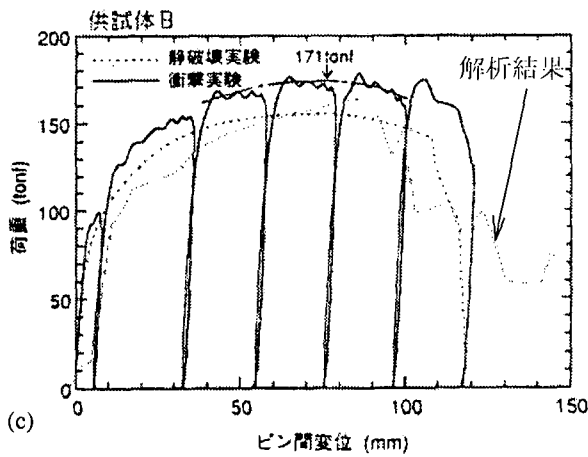
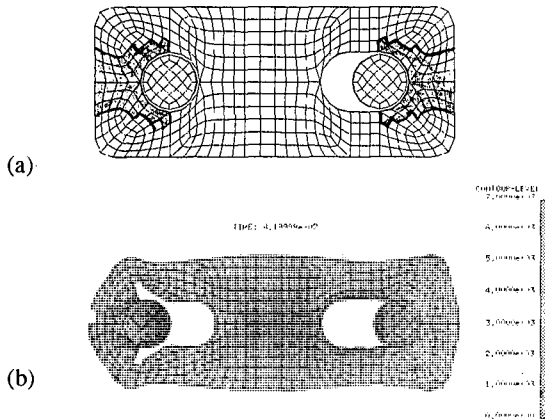


図-6 Bタイプ (矩形型)

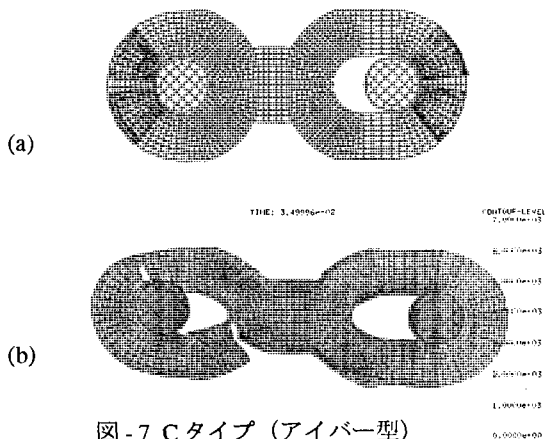


図-7 Cタイプ (アイバー型)

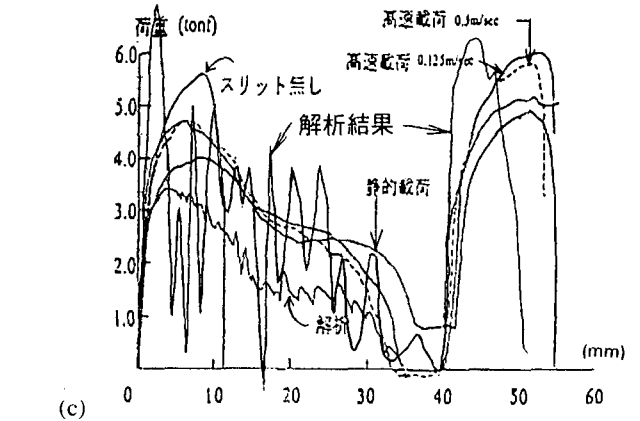
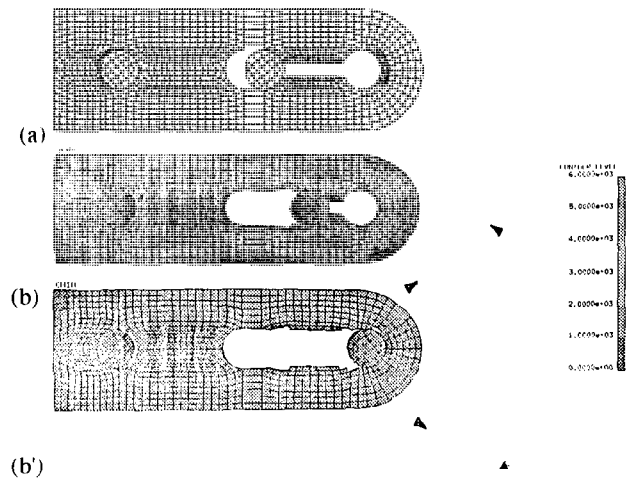


図-8 Dタイプ (スリット型)

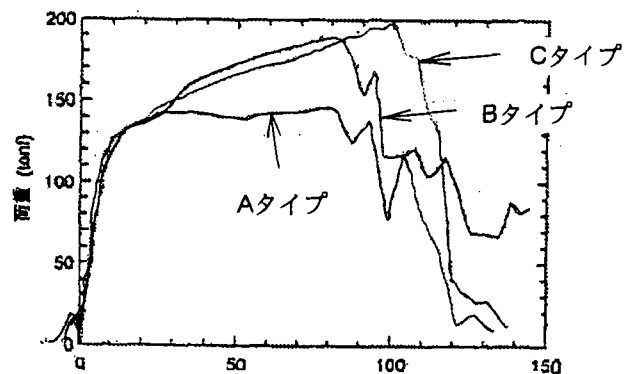


図-9 A, B, Cタイプの荷重-ピン間変位関係の比較

図-10 リンク式連結板

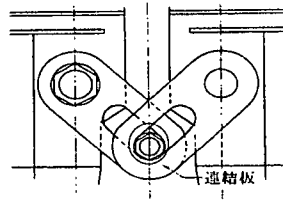


図-9はA, B, Cタイプの荷重-ピン間変位関係を比較したものである。3者の中ではCタイプがエネルギー吸収能が高い。

4. まとめ

兵庫県南部地震における耐震連結装置の効果について調査したところ、巨大地震に対してかなりのエネルギー吸収効果があった形跡が認められた。最終的に桁掛りで落橋を防ぐのであれば、耐震連結装置にエネルギー吸収機構としての役割を持たせる考え方も成立する(桁の運動エネルギーに対して定める)。吸収エネルギーの面からは連結板の塑性変形によるものが大きいので、ピンや固定部は、連結板の破壊よりも先に、抜け出したり破壊することの無いように設計することを前提とする。このとき、連結板の破壊モードは、せん断破壊、割れ破壊、引張破壊、面外曲げなどが考えられ、その破壊強度を決める要因としては、主にせん断強度(せん断長さ、形状、断面積、幅厚比)で決まるので、これを基準強度として他の部材の設計を行えばよい。また、吸収エネルギーを決める要因として破壊強度、靱性[直接的要因]と設置空間、ピン間距離[間接的起因]などがある。これらを考慮すれば、橋桁の大変形時にも有効に機能させるような耐震連結板の一つの形式として、図-10に示すようなリンク方式とアイバータイプやスリットタイプなどの高エネルギー吸収タイプとの併用(ハイブリッド化)が考えられる。

- 1) 長嶋：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・一般研究(C)研究成果報告書、平成9年3月。
- 2) 田嶋・半野・久保田・金井・中村：落橋防止構造連結板の衝撃破壊実験と強度特性、構造工学論文集、Vol. 44A, 1998年3月。
- 3) 小畑・後藤・松浦・藤原：高速引張時の落橋防止装置連結板の強度特性、土木学会論文集、No. 441/I-18, pp.97-105, 1992年。
- 4) 大見・小畑・栗原・後藤：高エネルギー吸収型耐震連結装置の提案、土木学会第51回年次講義集、I-B311, 平成8年。
- 5) 長嶋・阪神・淡路大震災で見られた落橋防止装置の効果に関する一考察、土木学会第51回年次講演概要集、I-A282, pp564-565, 1996年。
- 6) 長嶋・望月：阪神・淡路大震災における橋桁間の耐震連結装置の被害および衝撃応答解析、総合都市研究、No. 61, pp.63-77, Dec., 1996年。
- 7) F. Nagashima, M. Minagawa, Y. Sonoda and N. Ishikawa: Fracture Analysis of Seismic Bridge Restrainers under Impact Loads, Proc. of The 2nd Asia-Pacific Conference on Shock & Impact Loads on Structures, pp395-402, Melbourne, Australia, Nov., 1997.
- 8) J. O. Hallquist: LS-Dyna3D Theoretical Manual, Livermore Software Technology Co., 1994.
- 9) 内田・長嶋・石川：鋼部材の弾塑性破壊挙動解析に関する基礎的研究、土木学会第51回年次講演概要集、I-A271, pp542-543, 1996年。
- 10) 内田・長嶋・石川：耐震連結板の弾塑性破壊挙動解析に関する基礎的研究、鋼構造年次論文報告集、第4巻1996年。
- 11) 高橋：高速載荷試験による鉄筋コンクリートはりおよび鋼板・コンクリート合成はりの耐衝撃性評価に関する基礎的研究、九大博士論文、1990年。
- 12) Priestley, M. J. N., Seible F. and Calvi, G. M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, 1996年。

(1998年8月17日受付)

IMPACT FRACTURE ANALYSIS OF SEISMIC TIE-PLATES OF STEEL BRIDGES

Fumio NAGASHIMA, Hiroyuki SHIMADA and Yuuji KONNO

If we prevent the superstructure from unseating by taking sitting length sufficiently, it is possible to design bridge restrainers with a view that they play a role as the energy absorber. As there is not any sufficient space on and around the pier top for retrofitting existing bridges, it is available and economical to use the existing bridge restrainer structures. In addition, in the case of seismic isolated bridges, it is necessary to examine that the bridge connecting devices work properly until large displacement.

This paper focuses on examining the strength and energy absorbability of glasses-type restrainers by analyzing impact behavior of them using three-dimensional finite element code and discusses rational design method of seismic tie-plates of steel bridges.