

## スリット型耐震連結板による落橋防止対策の提案

名古屋工業大学 小畑 誠\*、栗原位充\*、後藤芳顕\*

阪神淡路大震災においては落橋の被害を受けた例が見られ、また落橋には至らなかったが想定されなかったモードで落橋防止構造が破壊した例も見られた。このため落橋防止対策に様々な見直しが行なわれたが、従来との比較で考えると衝撃に対する強度や十分な変形能を落橋防止装置に持たせることが大切であると考えられる。そこで本研究では既設橋梁への対策も考え、既存の鋼板を用いた桁連結装置の耐震連結板をスリット構造にするという簡単な改良を提案する。実際への応用にはスリット構造を持つ連結板の終局挙動を正確に把握する必要があるが、これらを数値解析により精度良く求めることができることを示す。

### 1 はじめに

橋げたの落下は橋梁として最悪の破壊モードであり、特に都市内の高架橋においてはそれ自身の機能が停止するだけではなく、下部交通路も遮断するという意味で絶対に防がなければならない被害形態である。震災以前の道路橋示方書<sup>1)</sup>でもこれを避けるための落橋防止構造の設置を義務づけていたにもかかわらず、阪神・淡路大震災においては都市内高架橋においても落橋の被害を受けた例が数多く見られた<sup>2,3)</sup>。また、落橋までには至らなかったものの、落橋防止構造も予想外のモードで被害を受けたことが報告され<sup>4,5)</sup>落橋防止対策について再考が必要であることがあきらかになった。これらの被害状況をうけた「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説」<sup>6)</sup>では落橋防止対策として①「けたとの下部構造へのかかりを十分に確保」したうえで②「2種類の落橋防止装置を設置すること」などに加えて、③「衝撃に対する強度や十分な変形能を落橋防止装置が持つこと」等を要求している。また、その後、示された新しい落橋防止システムの概略<sup>7)</sup>でも十分な「桁かかり長」の確保を必須とした上で支承の強度を考慮しながら上部構造の落下を防ぐ落橋防止構造や上下部構造の過大な相対変位制限構造を設置することになっている。

本原稿を用意している時点では新しい落橋防止シ

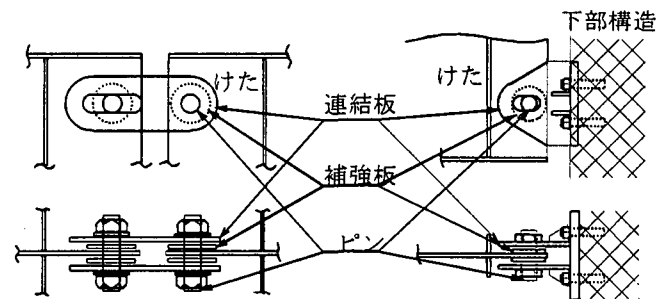


図-1 鋼板型桁連結装置

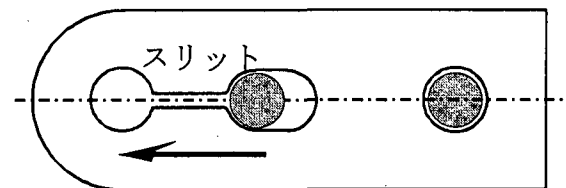


図-2 スリット型耐震連結板

ステムが最終的にどのように規定されるかは不明であるが、いずれにせよ、震災前の規定とは異なり大きな桁かかり長の存在を前提とした上で従来の落橋防止装置と呼ばれてきたものの機能を確保する必要があるものと思われる。これは復旧仕様の③で規定されている「十分な変形能」にも通じるものである。したがって従来の装置に対してはその構造を見直す、あるいは新しい構造を提案することも必要であると考えられる。例えば、上部構造をつり下げることを桁連結装置に期待するとすればこれまで以上に大きな上下部構造の相対変位の後でも機能することを要求しなければならない。

これらの状況をふまえて本研究では、既設橋梁の落橋防止対策にも容易に適用できるように配慮し、現在鋼橋の耐震連結装置として数多く用いられてい

キーワード：落橋防止システム、鋼橋、耐震設計

\*名古屋工業大学社会開発工学科 052-735-5501

る図-1 に示す鋼板タイプを対象に上記を念頭にした改良を主眼におくことにする。そして従来型と同様に上部構造をつりさげることのできるだけの強度を持ち、同時に移動制限装置としても機能する高いエネルギー吸収能を有するものの一例として図-2 に示すようなスリット型耐震連結板を用いた桁連結装置を提案する。スリット型連結板は桁のつり下げに加えて文献 7) でいうところの移動制限装置としてピンがスリットに進入しスリットを押し広げながら通過するときの衝撃吸収と地震力吸収機能も期待するものである。著者らは既に実際の 1/4~1/6 の大きさの供試体モデルに対して静的および高速引張り実験を行い、スリット型連結板の基本的な特性を確認している<sup>8)</sup>。本研究では設計上重要となる数値解析によるスリット型連結板の終局挙動の検討を行う。

## 2 スリット型連結板による桁連結装置

阪神・淡路大震災における被害はこれまでの落橋防止構造の設計に含まれるいくつかの問題点を提示した。なかでも最も注目すべきなのは「復旧指針」においても対策の必要性が言及されているように落橋防止構造における変形能や衝撃力に対する考慮の欠如であったと考えられる。桁連結装置による落橋防止装置はこれまで鋼橋において数多く使用されてきたものであるが、少なくとも震災以前の設計において、その終局挙動はほとんど考慮されておらず予想外の外力が加わった場合の挙動についてはあきらかではなかった<sup>9,10)</sup>。その結果として多くの場合、構造としては靱性に乏しい取り付け部やピンでの破壊を生じることになった。

鋼板を使った桁連結装置の変形能や衝撃吸収能を増加させるためにはまず破壊モードを決定する、あるいは変形能を負担させる部位を決定することから始めるべきである。そうした後で、各構成要素の強度や変形能の配分を考慮し全体としての性能をあげるようにすることができる。図-1にあるような連結板、補強板およびピンによって構成される桁連結装置の場合にはその構造や材質を考えると、変形能や衝撃吸収能を期待するのに最も適しているのは連結板であることはあきらかであろう。そこで、これまでの桁連結装置の構造を原則的に保持しながらも次のような設計法をとることを考える。すなわち、

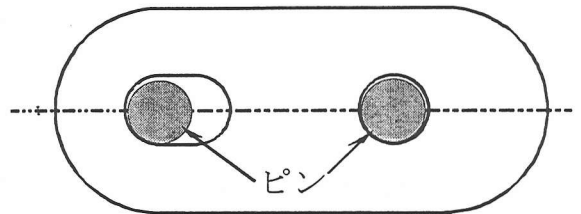


図-3 従来用いられてきた連結板

補強板、ピンそして取り付け部においては設計荷重に対して弾性変形の範囲内におさまるようにし、その一方で連結板においては塑性変形を前提とした終局強度を用いて設計する。

このような設計法によって落橋防止装置（構造）全体の変形能や衝撃吸収能はすべて連結板の持つそのような性能に依存することになる。そこで図-3に示す通常の連結板に対する一つの代替案として図-2にあるようなスリット状のガイドを持つスリット型連結板を提案する。ここで提案するスリット型連結板には次のような2つの効果を期待している。

- 1) ピンがスリットに進入することによる衝撃荷重の緩和。
- 2) ピンがスリットを押し広げながら通過するとき生じる塑性変形による抵抗力およびエネルギー吸収。そしてスリット部の長さだけ保証される変形能力。

幾何学的な形状などが適切に設計されるなら、この種の連結板は、新しい落橋防止システムで言うところの変位制限構造としても落橋防止構造としても機能させることが可能である。また同時に、既存の落橋防止装置に対してもその構造を根本的に変えることなく新システムにスムーズに移行することが可能であると考えられる。

## 3 スリット型連結板のFEM解析

スリット型連結板が期待される性能を発揮するのはその構造からあきらかなようにピンがスリットに進入し非常に大きな塑性変形が生じるときである。したがって、連結板の設計はしかるべき大変形弾塑性変形に加えてピンと連結板の接触による相互作用を考慮したものでなければならない。従来数多く使用されてきた図-3に示すタイプの連結板に対しては、これまで著者らは大変形と弾塑性変形を正確に考慮した数値解析によりその終局挙動を詳細にわた

ってあきらかにしてきている<sup>9,10)</sup>。その解析では連結板は2次元の平面応力要素、ピンは剛体として扱っているが、解析結果は終局強度のみならず破壊モードの予測においても実験結果とよく一致し、弾塑性解析により連結板の変形性能を正確に把握することができることを示した。

本問題で注意しなければならない点は大変形と弾塑性変形、ピンのスリット部への進入変形による非常に非線形性の高い境界条件、連結板の面外への曲げ変形の可能性である。また桁連結装置の靱性を確保する上で連結板とピンといった構成部材の変形および応力状態を知ることはともに重要である。そこで本研究では連結板とピンともに弾塑性体として扱い、両者の接触変形と材料および幾何学的非線形性を考慮した3次元解析を行う。数値解析には汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS Ver.5.5.1<sup>11)</sup>を用いた。数値解析は図-4と表-1に示すモデル実験<sup>8)</sup>に用いた供試体を対象として行った。連結板の材質はSS400、ピンはF10Tである。実際に適用する場合においてもスリット部分に変形が集中することはあきらかなので、ここではスリットの部分の挙動解明を主目的とし、対称性も利用して図-4のシェードした部分のみを解析対象とした。使用した要素は3次元固体要素の一つ、C3D20、であり6面体20節点2次

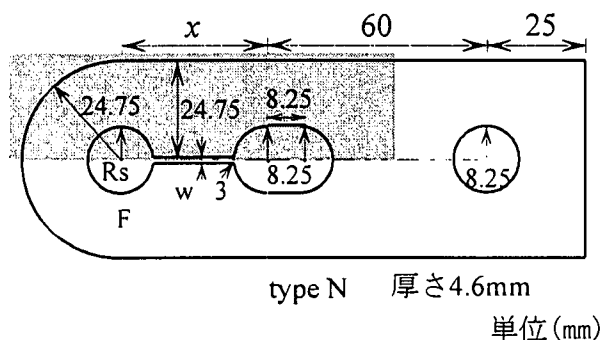


図-4 解析モデル

表-1 解析対象

供試体名	x	w	Rs
N30-6	30	6	8.25
N30-9	30	9	8.25
N40-6	40	6	8.25
N40-9	40	9	8.25
Ns30-6	30	6	5
Ns40-6	40	6	5

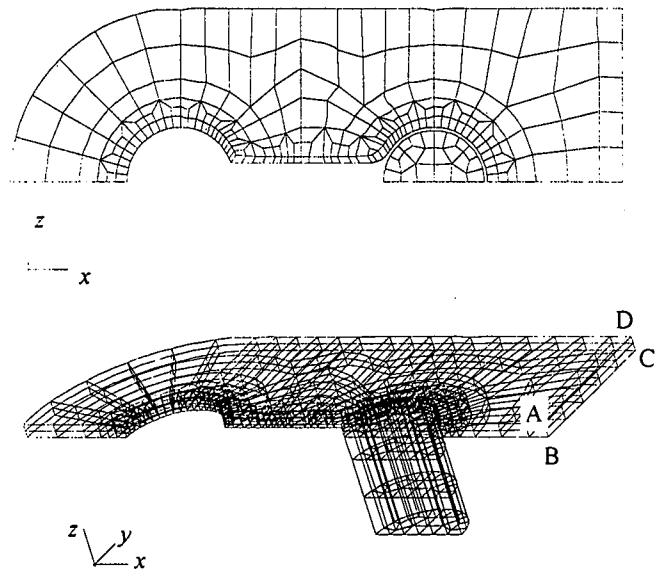


図-5 要素分割(N40-6)

要素である。メッシュ分割の一例を図-5に示す。実験結果<sup>8)</sup>を見る限りにおいて連結板の面外曲げ変形は少なくピンが連結板に進入した場合にはほとんど無視できるものであったため、原則としてこの解析においては連結板の厚み方向に関する対称性を用いた。また一部については厚み方向に関する対称性を仮定しない解析も行ったがピンがスリットに進入した場合には変形挙動は対称性を仮定した場合とほとんど一致することを確認した。

ピンと連結板の大規模な接触による相互作用の評価についてはピンと連結板の間の接触面をスリットおよび孔 F と仮定しその部分に3次元接触要素である ISL32 を配置することにより評価した。ABAQUS では接触問題解析について主接面-従接面の手法を採っている。そこでは従接面上にある節点が主接面に接することになっており、従接面上の節点は主接面を突き破ることはないが、逆に主接面上の節点は従接面を突き破ることを認めている。このような設定で二つの物体の接触を考えると硬い物体に対して主接面を割り当てるのが妥当である。そこで、ここではピン表面を主接面、連結板スリット部および孔部を従接面とした。既に著者らが行った詳細な数値解析<sup>9,10)</sup>により、ピンと連結板の間の摩擦は耐荷力については増加させる傾向にあることがあきらかなっている。そこでここでは安全側の結果を与えたと考えられる摩擦がない場合の解析を行った。

材料の弾塑性挙動に関しては通常の  $J_2$  流れ理論に基づくものを用い、加工硬化に関しては等方硬化則を用いた。少なくともこれらの選択は平面応力要

表-2 解析に用いた材料定数

部材	E(GPa)	$\nu$	$\sigma_y$	h(MPa)	n
連結板	206	0.3	294	784	0.25
ピン	206	0.3	931	1440	0.15

素を用いた著者らの解析において実験結果をよく再現する荷重変位曲線と破壊モードを導いている。ここでの等方硬化則は次式で与えられるべき乗則である。

$$\sigma = h(\alpha + \varepsilon^p)^n, \alpha = \left(\frac{\sigma_y}{h}\right)^{\frac{1}{n}}$$

ここに

$\sigma$ :相当応力

$\varepsilon^p$ :相当塑性ひずみ

$h, n$ :加工硬化パラメータ

$\sigma_y$ :初期降伏応力

である。解析に用いた材料定数については表-2にまとめ示す。これらの値は実験等をもとに決定した。

以上の設定のもとに対称性を満足する境界条件を与え、ピンを固定し図-5の面 ABCD において一定の変位を与え変位制御で変形させ荷重-変位曲線を解析した。

#### 4 解析結果

まず、解析結果についてふれる前に解析モデルの引張り実験結果の一例を図-6に示す<sup>8)</sup>。これは表-1で N40 シリーズに相当するものである。図は参考のためにスリットを持たない現行タイプの連結板の実験結果も含んでいる。横軸はピン間の変位を縦軸は荷重を表している。既にふれたようにピンがスリット部に進入したときの効果は明白である。スリット型連結板の耐荷力は現行タイプのものに比べてわずかに小さいもののその差は最大でも 10%程度である。同時に少なくともスリットの長さの分だけの余裕を持った変形能を有している。しかもスリット通過時の荷重は最大荷重の4割から7割程度にも達しており、そこで十分なエネルギー吸収が期待できる。したがって、スリット型連結板は桁のつり下げに対して有効であるのみならず移動制限装置としても有効に機能するであろうことがわかる。

次に図-7に解析による荷重-変位曲線をまとめて

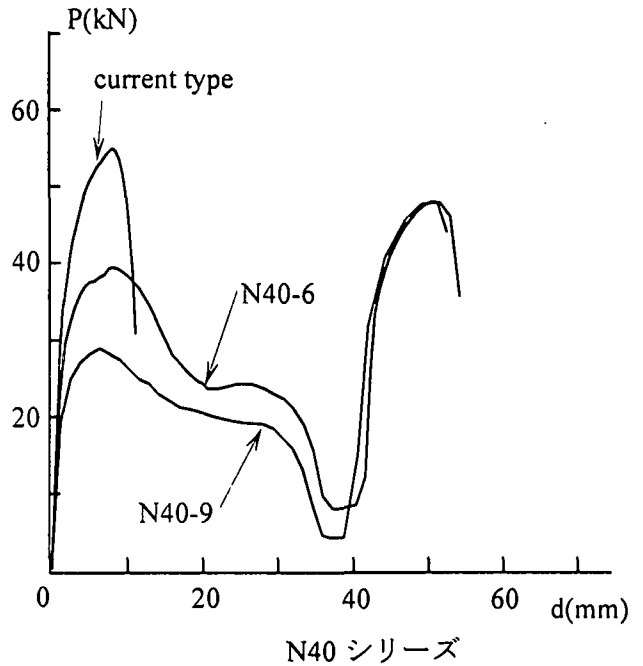
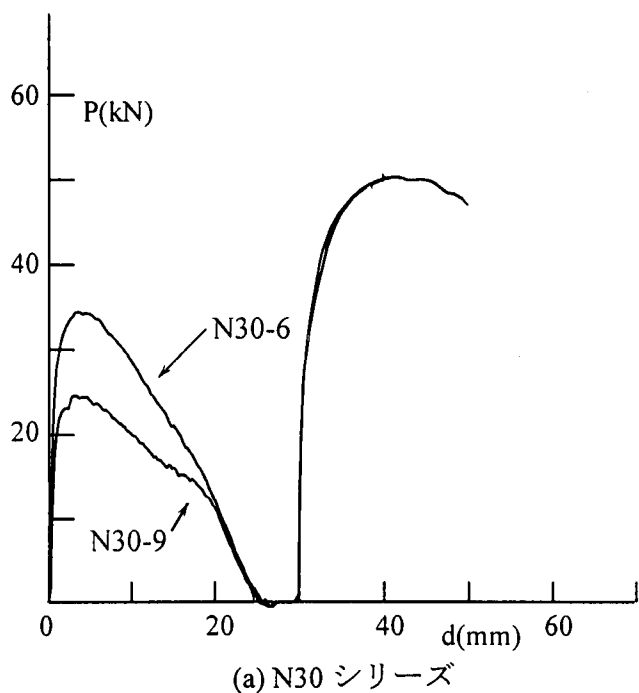
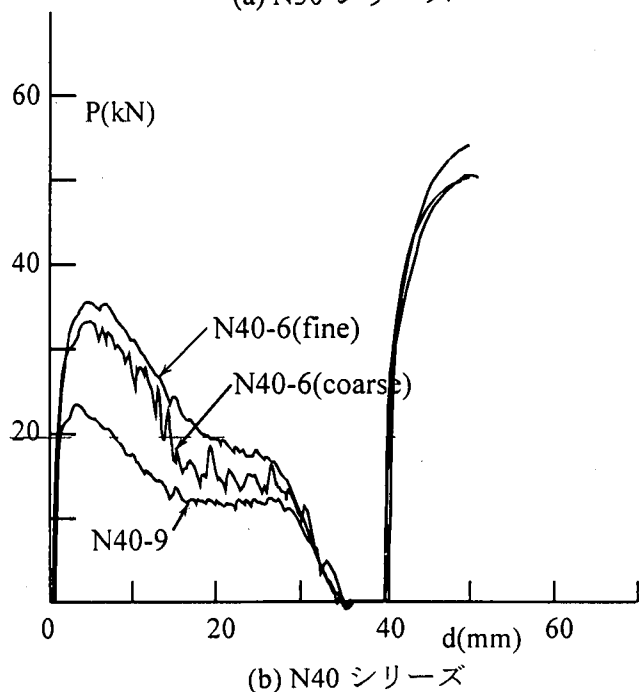


図-6 実験結果(N40 シリーズ)

示す。ここで孔 F の小さい Ns シリーズではいずれもピンがスリットに進入せず、連結板が面外に大きく変形したため(図-8)ピンと連結板の接触部の取り扱いに不都合が生じ数値計算を進めることができなくなった。このため荷重変位曲線は示していない。これらの図では横軸は面 ABCD における変位を表しており、その意味で対応する図-6と図-7(b)でも直接的な比較はできないことに注意する。しかしながら変形がスリット部にほとんど集中しておきる以上、図-6と図-7(b)の基本的な特徴は一致するはずである。事実両図は定量的にもある程度よく一致している。耐荷力は実験結果とほぼ同等の値を示しており、これは2次元での解析結果<sup>9,10)</sup>と同様である。一方、スリット通過時の挙動について見ると、解析値はピンのスリット進入時にまず極大値をとりその後の通過時は荷重が漸減していく傾向をとらえている。またスリットの幅とスリット通過時の荷重の関係も定性的にはよく一致している。しかしながら、定量的には実験値とかなり大きな差が出ており、そこでは実験値の値の方が高くなっている。このような差は実験で治具と連結板との間においたワッシャに帰することができる<sup>8)</sup>。連結板の塑性変形による厚み方向へのはらみだしによりワッシャが治具に接触し、摩擦が生じ抵抗荷重が増加したものと考えられる。そしてその摩擦のために実験ではピンがスリット部を通過した後も荷重が0になっていない。ハイテンボ



(a) N30 シリーズ



(b) N40 シリーズ

図-7 解析結果

ルトを想定したピンの塑性変形は実験結果と同様に解析においてもほとんど認められなかった。連結板との材料強度の差がこの程度あれば静的な荷重に関してはピンでの大きな変形や破壊はさけることができると考えられる。なお、N30 シリーズでも実験値との対応はN40 シリーズと同様であった。

次に接触問題としての結果について考察する。接触領域で大きく弾塑性変形するこのような問題では解の収束性はかなり悪く、図-5に示す要素分割よりも粗い分割に対しては図-7(b)に一例を示すように

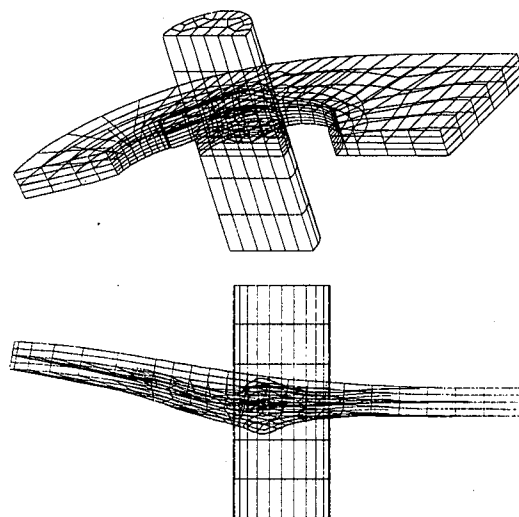


図-8 連結板の面外変形(Ns30-6)

荷重変位曲線は著しく振動する。この傾向は従接面を有する連結板の方のメッシュを細分化することによりかなり改善しているがやはりこのような大規模な接触変形問題において解を収束させるのは難しいようである。大規模な接触変形を含む問題では低次要素を用いる方が望ましいことがあるが、その場合には所要の精度を得るためにより細かい要素分割を必要とする。接触の取り扱いについてはいくつか検討すべき点が残されていると言えよう。

スリット型連結板の設計において最も注意すべき点はピンをスリットへ確実に進入させることである。進入時の荷重があまり高くなるとスリットへの進入が困難になることからするとこれらの解析結果は重要な点がスリットの幅と孔 F の径であることを示唆している。また同じスリット幅に対してはスリットが長く孔 F が大きいほどピンのスリットへの進入は起こりやすくなることになる。孔 F の径はピンがスリットを通過した後、連結板の耐荷力に影響することを考えるとピン径とほぼ同等とすることが望ましいと考えられる。

#### 4 まとめ

本論文では新しい落橋防止システムの中で「落橋防止構造」としても「変位制限装置」としても機能させることができる可能性ある構造の一例として従来の桁連結装置にスリット型耐震連結板を用いたものを提案し、その設計に関する基本的な考え方もあわせて示した。そしてそのような耐震連結板を設計

する上で重要となる数値解析の方針を示した。数値解析においては大規模な接触変形問題を取り扱う必要があるが、ここで示すような配慮により精度のよい結果を得ることができることをあきらかにした。今後は衝撃載荷時の挙動やエネルギー吸収能を衝撃吸収の観点からどのように設計に反映させることができるかなどの問題をあきらかにすることにより、合理的な落橋防止システムに寄与させることができると考える。

#### 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、1994
- 2) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書、1995
- 3) 建設省土木研究所：兵庫県南部地震災害調査報告書、土木研究所報告第196号、1996
- 4) 神田昌幸：道路橋における支承および落橋防止構造の被災の総括、橋梁と基礎、Vol.30, No.8, pp156-162, 1996.
- 5) 土木学会鋼構造委員会、鋼構造新技術小委員会：鋼構造物の安全性の調査報告、1995
- 6) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説、1995
- 7) 西川和廣、神田昌幸：道路橋の支承部構造および落橋防止システムの今後の方向、橋梁と基礎、Vol.30, No.8, pp163-164, 1996.
- 8) 小畑誠、大見敬一、後藤芳顕：高エネルギー吸収型耐震連結板の挙動に関する実験的研究、鋼構造シンポジウム論文集、1996
- 9) 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、422、1990
- 10) 小畑誠、後藤芳顕、松浦聖、藤原英之：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、441、1992
- 11) Hibbit, Karlsson and Sorensen Inc.: ABAQUS/Standard User's Manual, 1996

謝辞：本研究に関する石田財団の援助を受けました。また実験に関しましては土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会・耐震設計ワーキンググループから援助と新日本製鐵株のご高配をいただきました。ここに感謝します。

## THE PREVENTION OF THE FALLING DOWN OF BRIDGE GIRDERS USING SLIT TYPE RESTRAINERS

Makoto OBATA, Tomomitsu KURIHARA, and Yoshiaki GOTO

The prevention of the falling down of bridge girders is an important issue of the seismic design for highway bridges. A bridge restrainer is a device designed for this particular purpose. Unfortunately, some of them were destroyed to lead the fall of girders in the Hanshin-Awaji Earthquake. The objective of this work is to propose a new type restrainer plate for steel bridges. The new type has a slit to enhance ductility while keeping high load carrying capacity. We numerically investigate the behaviors of the new type tie plates to obtain the basis of the rational design.