

# 高エネルギー吸収型耐震連結板の強度および変形特性

小畑 誠<sup>1</sup>・栗原 位充<sup>2</sup>・後藤 芳顕<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 Ph.D. 名古屋工業大学助教授 社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

<sup>2</sup> 佐藤工業株式会社土木本部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-20)

<sup>3</sup>正会員 工博 名古屋工業大学教授 社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

阪神大震災後の示方書の改訂をうけて、既設鋼橋に対する落橋防止対策として鋼板を使用した従来の連結板にかわりスリットを有する連結板を利用することが提案されている。スリット型連結板の特徴はピンがスリットを通過することで地震エネルギーを吸収し、同時に示方書に規定されている移動量内での大きな移動を防ぐことができることである。このため塑性変形することを前提とした強度や変形特性を考慮して設計することが求められる。本研究では延性に富む低降伏点鋼を連結板に利用することも視野に入れながら数値解析によるパラメトリック解析により強度や変形量に対する設計式を提案する。また延性破壊に対する安全性を数値解析により検討することも試みる。

**Key Words:** bridge restrainer, seismic design, elasto-plastic analysis, ductile fracture

## 1. はじめに

地震時に桁が橋脚から逸脱する落橋は、橋梁の機能だけでなく下部の交通も遮断するため、絶対に避けなければならない崩壊形態のひとつである。このため道路橋にはいくつかの落橋防止対策がなされているがそれにもかかわらず1995年の阪神・淡路大震災の際には落橋の被害にいたった例が見られた。その原因のひとつとして震災前の道路橋示方書<sup>1)</sup>には落橋防止装置に関して終局状態の考慮がなく、想定していない所に無理な力がかかったことが考えられている<sup>2),3),4),5),6),7)</sup>。その結果として具体的にはピンの破壊、ウェブの座屈・損傷が目立った。また、上部構造全体の問題点としてあきらかになったことは支承の破壊等により落橋防止構造にかかる力がそれぞれの桁で一様でなく、結果として想定どおり機能をしなかったこともあげられる。

このような被害状況をうけて震災後に改訂された道路橋示方書<sup>8)</sup>では、落橋防止に支承、変位制限構造、落橋防止構造を含めたひとつのシステムとして対応することになっている(図-1)。そこでは桁かかり長を十分にとることを基本としてフェイルセーフのために桁連結装置などの落橋防止構造を備える

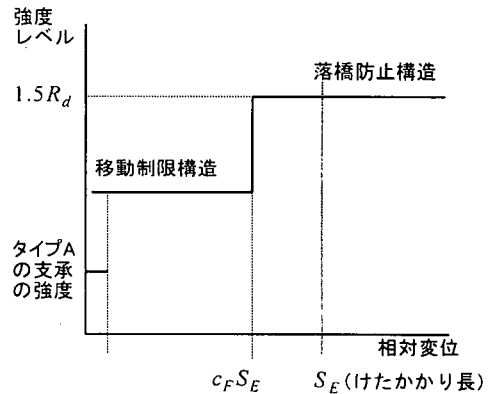


図-1 落橋防止システムにおける機能分担

こととしている。このため、従来支間長のみで算出されていた桁かかり長が、改訂後は橋脚の振動特性、地盤のひずみや液状化の地域差、斜橋・曲線橋なども考慮に入れて十分確保することになっている。さらに落橋防止構造については、桁が橋脚から逸脱しても桁をつり下げることができるように上部構造の死荷重反力の5割増しに設定されている。そして機能分担を明確化するために、落橋防止構造に新たに

移動量の規定などを含めることとなっている。

このように改訂された示方書では、落橋防止対策の規定が大幅に変更されており既設の鋼橋に対しても新示方書にそった落橋防止対策を早急に立てることが重要である。しかしながら現実には種々の制約により既設橋梁に対して新示方書に準じた補強を施すことは簡単でない場合も考えられる。そこで本研究では、既設の多くの鋼道路橋に取り入れられている鋼板を使用した図-2のような桁連結装置に着目し、その構造をできる限り活用しながら効果の高い補強法について提案することを考える。まず桁連結装置全体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と考えられる。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ものとする。すなわち、補強板、ピンそして取り付け部においては従来どおり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ものとする。したがって桁連結装置全体としては終局強度を考慮して設計することになり、装置の終局強度や変形性能は連結板の挙動に依存することになる。

すでに著者らは耐震連結装置の終局挙動を考慮した設計についてのいくつかの結果や考察<sup>9),10),11)</sup>をもとに実際に高い変形能と衝撃吸収能を実現するものの一例としてスリット型連結板を提案した<sup>12),13)</sup>。そしてその基本的な特性について一連の発表をしてきた。本研究では詳細な数値解析によりスリット型連結板の終局状態の検討を行い実務設計において重要な強度式を提案する。また、破断に対する安全性を高めるために延性の高い低降伏点鋼の適用についても考察を加える。同様の観点からの研究には桁連結装置のピンに緩衝材を巻いた衝撃力低減効果についての研究<sup>14)</sup>や桁連結板と緩衝材を組み合わせた衝撃吸収の研究<sup>15)</sup>などがあるが、いずれも衝撃吸収能を高めることをねらったものであり、変形能に対する大きな改善には直接つながるものではないと思われる。本研究では桁連結装置の衝撃吸収能だけでなく変形能を増加させることについても注目する。

## 2. 設計法と解析モデル

### (1) 設計法

著者らの実験<sup>12)</sup>によれば、外力が加わりピンがスリットに進入したときのスリット型連結板の基本的

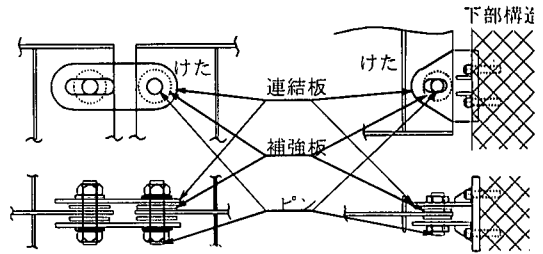


図-2 鋼橋の耐震連結装置

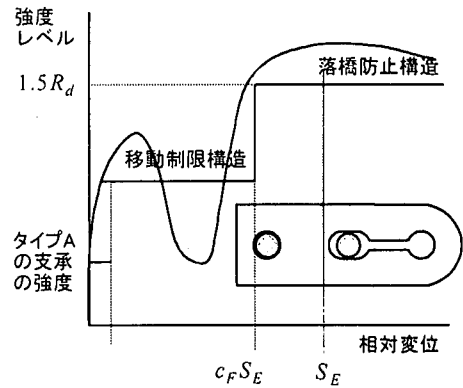


図-3 スリット型連結板を用いた耐震連結装置の予想される挙動

な荷重変位曲線は図-3に示すようになる。これからピンがスリットを通過すればスリットの長さの分だけ大きい変形量が確保できると同時にある程度の衝撃吸収効果も期待できることがわかる。このように提案する連結板が期待される特性を発揮するためにはピンがスリットに進入し通過することが必要である。荷重変位曲線にはピンがスリットに進入するときまず小さい荷重のピークがありスリットを完全に通過した後に終局強度をとることから、図-1に示される改訂された示方書での変位制限構造と落橋防止構造の機能を考えると、図-3にあるように最初の荷重ピーク値を変位制限構造の強度に対応させれば、スリット型連結板にそのふたつの機能を同時に持たせることが可能であると考えられる。そしてこれは鋼製支承を大きな免震支承に変更できないような場合には特に有用である。

以上のことから提案するようなスリット型連結板を設計するにあたって考慮しなければならない重要な点は a)ピンがスリット部に進入し通過すること、b)最初に現れる荷重のピーク値（以下「一次強度」と呼ぶ）と最終強度、それに c)変形能ということになる。このうち c)変形能に関しては少なくともスリットの長さの分は確保できるので、ここでは a),b)の項に注目する。そして通常の供用状態では機能する

必要はなく中規模以上の地震時に対応するという落橋防止構造の機能を考慮し設計は終局強度に対して行うことを前提として以下の議論を進める。

ピンがスリットに進入したとき図-3にあるように移動制限構造の役割も兼ねるようにするためには、一次強度は新示方書にそって Type B の支承に対する水平地震力よりも大きい強度を持たせるようにする。また想定以上の外力がかかった場合にも、下部構造に過大な外力が伝達することを避け、全体として変形モードを一定に保たせるためその強度の上限は設計荷重までとする。また、落橋防止構造における最大移動量は桁かかり長  $S_E$  の 0.75 倍までとなっているため、終局強度は  $0.75S_E$  より大きい変位があったところで終局強度を発揮させれば良い。

したがって本研究では以上のようなスリット型連結板の設計上のポイントを考慮して、有限要素法によるパラメトリック解析を行い特に次の3点について検討する。

- 1) ピンが確実にスリットに通過する形状パラメータの範囲および鋼材質の影響。
- 2) 終局強度と一次強度との関係。
- 3) 変形特性と鋼材質の関係、および延性破壊に対する数値解析的検討の可能性。

## (2) 解析モデル

解析モデルを図-4 にパラメトリック解析を行った形状パラメータを表-1, 2 にまとめる。形状や大きさは文献 12) の実験結果との比較検討をするために、その実験の供試体を参考にしてている。ピン径  $D$  は 16mm (半径  $R = 8\text{mm}$ )、ピン孔半径  $R_i$  は 8.25mm、そして板厚は 4.6mm とした。ストップホールの径  $R_s$  がピン孔半径  $R_i$  より小さい場合にはピンがスリットを通過しにくいことを確認しているので、 $R_s$  はピン孔半径と等しくとった。一方ピン径とピン孔径は強度の点からもまた応力集中をさけるためにもできる限り近い値にするのが望ましい。ここでは実務上ほぼ上限に近い  $R_i/R = 1.03$  としている。スリットの幅  $W$  は広すぎると意味を持たなくなるため  $W/D = 0.25 \sim 0.75$  とした。外径とストップホール径の比、 $R_o/R_i (= R_o/R_s)$  は従来の連結板で使用されている範囲で考慮した。さらに上記 2) 項に関連してスリット入口の丸み  $R_m$  についても表-2 にある範囲で詳しく検討した。

数値解析は有限要素法で行っており、使用した解析プログラムは ABAQUS Ver5.6<sup>(6)</sup> である。有限変形解析は更新ラグランジュ法で定式化されており、ピンと連結板の接触の取り扱いは接触要素を用いたマ

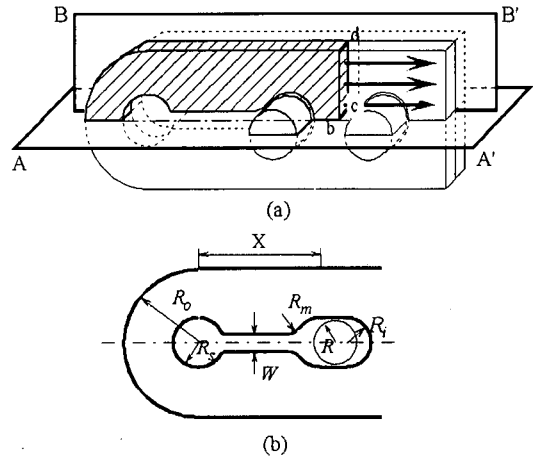


図-4 解析モデル

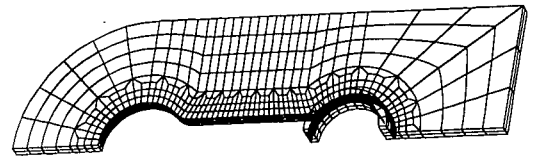


図-5 メッシュ分割の一例

表-1 形状パラメータ

$R_o/R_i$	$W/D$	$X/D$
2	0.375, 0.5625	2.5
2.5	0.25, 0.375, 0.5625, 0.75	1.875, 2.5, 3.125
2.75	0.375, 0.5625	2.5
3	0.25, 0.375, 0.5625, 0.75	1.875, 2.5, 3.125
3.25	0.375, 0.5625	2.5

表-2 入口の丸み

$R_o/R_i$	$W/D$	$X/D$	$R_m/R$
2	0.375, 0.5625	2.5	0.375, 0.625, 0.9375, 1.25
3	0.375, 0.5625	2.5	0.375, 0.625, 0.9375, 1.25

スター・スレーブ法によっている。なお、連結板とピンとの間の摩擦はないものとしている。この仮定は参考文献 10) にあるように耐荷力に関しては常に安全側の値を与える。実際に連結板に荷重が作用する場合にはスリット部に変形が集中することはあきらからずであり、またそのように設計しなければならない。したがって解析対象は図-4 の斜線部として示したように図のスリット部を含む部分のみとし、A-A' 面に関する対称性も用いた。さらにピンがスリットを無理なく通過する場合には連結板の面外への変形

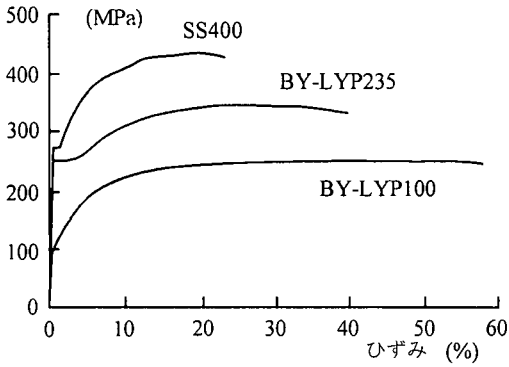


図-6 応力ひずみ関係

表-3 材料定数

	SS400	BY-LYP100
E(GPa)	206	206
$\nu$	0.3	0.3
$\sigma_y$ (MPa)	294	116
$\sigma_u$ (MPa)	448	270
$h$ (MPa)	784	588
$n$	0.25	0.5
$\epsilon_N$	0.3	0.3
$s_N$	0.1	0.2
$f_N$	0.04	0.02

が小さいことを確認しているため<sup>12),13)</sup>板厚方向についてもB-B'断面に関しての対称性を利用している。なお、文献12),13)にもあるようにこのような仮定を用いた解析モデルでも実験結果と解析結果の対応は非常に良い。要素分割の一例を図-5にあげる。使用した要素は20節点3次元6面体要素と27節点3次元6面体要素である。なお、ピンについては接触部のみ弾塑性体とし内部は剛体として扱った。この解析で最も困難な点はピンがスリット部で連結板と接触し大規模な塑性変形を起こしながら通過していく現象を考慮するところにある。接触変形問題で安定した解を得るためには要素の選択や分割に十分注意しなければならないが、ここではスリット部近傍の要素分割をやや細かくすることで対応した。なお、載荷はピンを固定し面abcdで矢印の方向に変位を与えることによって行った。

鋼材の加工硬化については等方硬化にしたがうものとして次式で表すべき乗則を用いた。

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

ここに $h$ 、 $n$ は材料定数、 $\sigma$ は相当応力、 $\epsilon^p$ は相当塑性ひずみである。材料は通常よく使用されるSS400の他にピンのスリットへの入りやすさや想定以上の変位に対する安全性を期待し延性が高い低降伏点鋼についても解析を行った。ここで用いた低降伏点鋼はBY-LYP100であり典型的な応力ひずみ曲線<sup>17)</sup>を図-6に示す。SS400に比較して強度は小さいが伸びは2倍程度期待できるものであり、現在のところ高層建築の制振用ダンパーとして実用化されている。図-6を見てもわかるように低降伏点鋼の特徴は構造用軟鋼に比べて格段に大きな破断伸びである。特に最大荷重点を超えたあとの伸びが著しい。すなわち低降伏点鋼に期待されるひとつのメリットは予期せぬ大きな変形に対しても延性破壊を起こさないことである。しかしながら数値解析を考えたとき、材料が式(1)で表されるように硬化していく以上、何らかの破壊基準を設けることなしに幾何学的非線形性以外の原因による崩壊を数値解析によって定量的に予測するのは不可能である。骨組構造物とは異なり連結板のような部材では通常、材料の延性破壊により終局状態へといたる。材料の延性破壊は材料中の介在物から発生する微小空隙による材料レベルでの軟化挙動が引き金になっており、式(1)のように材料劣化による軟化を表すことができない応力ひずみ関係では部材の破壊を定量的に把握することは不可能ではないが難しい。したがって低降伏点鋼を適用することのメリットを正しく評価することもできない。そこで材料の延性破壊を表現するために材料中の微小空隙の発生と成長を考慮したグルソン型構成則モデルを用いた解析を行った。ここで用いたグルソン型モデルはTvergaardとNeedlemanら<sup>18),19),20)</sup>によって改良されたものであり、微小空隙の発生は相当塑性ひずみの大きさにより支配され、かつ応力の静水圧成分が正(引張り)のときのみ空隙が発生および成長するものとしている。グルソンモデルの詳細は文献18)を参照するものとして基質材料の加工硬化則とあわせて材料パラメータを表-3にまとめる。この材料定数の決定については後述する。なお、グルソン型モデルのパラメータについては概略を補遺に示す。

### 3. 解析結果と考察

#### (1) ピンのスリットの通過

スリット型連結板の設計で最も重要な点はピンにスリットを通過させることであるが、まずその観点

表-4 ピンがスリットを通過する範囲

鋼種	$R_o/R_i$	$W/D$
SS400	< 3	0.375 <
BY-LYP100	< 3.25	0.25 <

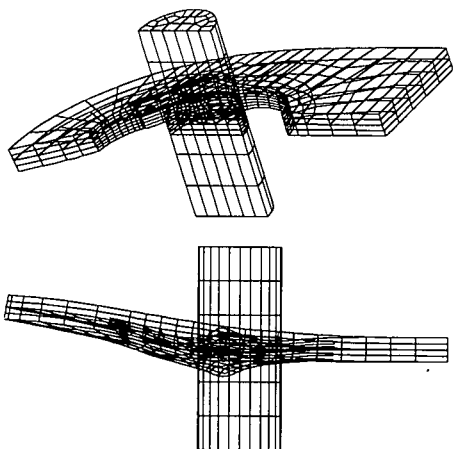


図-7 面外変形によりピンがスリットに入らない例<sup>13)</sup>

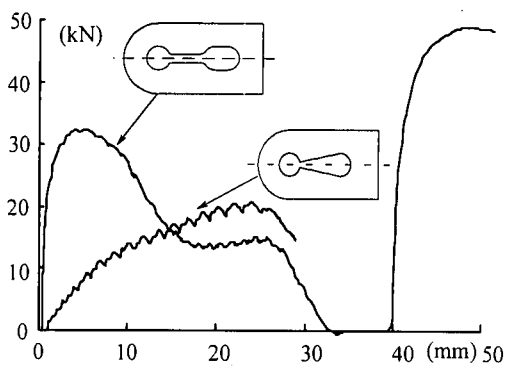


図-8 テーパー付き連結板の挙動

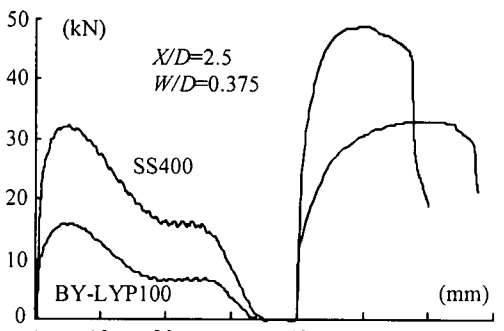


図-9 材質の荷重変位曲線への影響

から結果をまとめる。この数値解析においてピンがスリットに進入し通過するかどうかは数値解が収束

性を保ったまま続行できるかどうかで判断した。このような判定と実現象との対応が問題になるが、文献(12,13)にも見られるように大きな面外曲げやスリット入口の面内曲げ抵抗によりピンがスリットに入らない現象は、図-7のような変形や一部の要素の過大な変形により収束解が得られなくなるという意味で程度数値解析結果にも反映されている。さらに文献(12,13)の結果や著者らが予備的に行った解析によって、数値解析でピンがスリットを通過すれば対応する実験でも必ずピンがスリットを通過していることがわかっている。したがって解析における収束のしやすさはピンの入りやすさには対応していると考えて良いと思われる。そしてより実現象に近い高速引張り実験との比較においてもこの傾向は変わらない。表-4はこの基準にしたがってピンがスリットに進入し通過するときの形状パラメータの範囲をまとめたものである。ピンにスリットを通過させるために重要なパラメータは、連結板の外径と内径の比  $R_o/R_i (= R_o/R_s)$  とスリットの幅  $W$  でありスリットの長さ  $X$  とスリット入口の丸み  $R_m$  は表-1, 2 のパラメータの範囲では影響がなかった。

変形に対する細かい点をあげると SS400 では内径と外径の比  $R_o/R_i$  が 3 を超えるとピンはスリットに進入するがスリット通過中の抵抗が大きく出口を十分に広げられずピンがとまってしまうような挙動を示し、 $R_o/R_i$  が 3.25 より大きいとピンがまったくスリットに入らなくなった。スリット幅  $W$  に関しても鋼種によって多少の違いはあるが幅が狭くなるとスリット出口を十分に広げられないような挙動を示すようになり、さらに狭くなるとスリットに入らなくなる。スリットの長さ  $X$  については長い方がピンに対する抵抗が小さいことを確認したが、実際に使用し得る長さの範囲内ではその差は小さく実用上は影響がないものと考えられる。次にスリット入口の丸み  $R_m$  については極端な例としてスリットをテーパー状に入れることも可能であるため参考のため  $W/D=0.375$ ,  $X/D=2.5$ ,  $R_o/R_i=2.5$ , 鋼種 SS400 の場合について比較解析を行った。荷重-変位曲線を図-8 に示すが一次強度の発生変位が他のものに比べてかなり大きく、本論文で意図しているような移動制限装置としての役割を期待できないような挙動を示している。したがってこのテーパー付きスリット型連結板は興味深い挙動はするが著者らの目的にそって用いることは難しい。少なくとも図-3 に示すような挙動を期待するならばスリット部の大部分が平行であることが望ましいことになる。なお、この解析例では数値解析は途中で続行不能となっている。

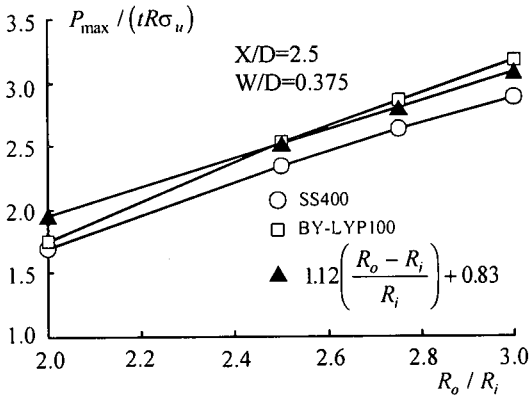


図-10  $R_o/R_i$  と終局強度

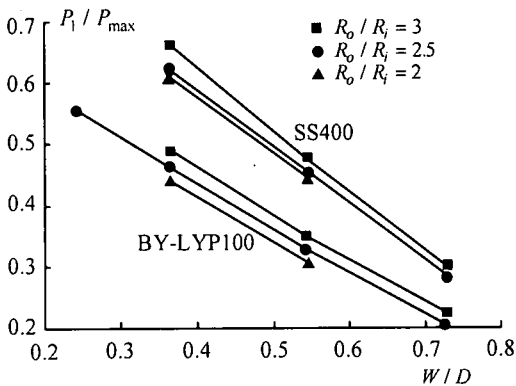


図-11 スリット幅の一次強度への影響

鋼材種についていえば柔らかい鋼材を用いることはスリット型連結板の特性を活かすうえでは有利である。図-9 から変形能についてはそれほどのメリットはないが表-4 からわかるように低降伏点鋼 LYP-100 の方がピンがスリットへ入りやすい形状についての許容範囲が大きい。しかも図-9 にあるように荷重変位曲線の基本的な特性は普通鋼と同じである。スリット型連結板では連結板を塑性変形させるといことがその使用目的に明確に組み込まれており、その点からも延性に富む柔らかい材質を用いる利点はあきらかであろう

## (2) 終局強度

本研究でのパラメトリック解析ではストップホルの径とピン孔の径をほぼ同じにとっているの、終局強度は  $R_o/R_i$  ( $\approx R_o/R$ ) のみに依存しているとみなして良いことがあきらかになった。代表的な数値解析結果を図-10 に示す。スリット幅  $W$  やスリット長  $X$  などの終局強度に対する影響は高々1%程度でありほとんど無視できるものであった。図-10 には

同時に次の耐荷力式<sup>21)</sup>による直線もあわせて示している。

$$\frac{P_{\max}}{\sigma_u t R_i} = 1.12 \left( \frac{R_o - R_i}{R_i} \right) + 0.83, \quad 2.00 < \frac{R_o}{R_i} \quad (2)$$

上式は角形の連結板でピン径とピン孔の径がほぼ等しい場合について提案されたものであり、実験結果との対応も非常に良い。ここで解析対象としたような通常の丸形の場合、終局強度が角形の95%程度であることを考えると、SS400 に対してもこの耐荷力式は良く数値解析結果に一致していることがわかる。その一方で、丸形であることを考慮しなくても式(2)は低降伏点鋼に対してより良い結果を与えているがこれは図-9 に示すように低降伏点鋼では終局強度時の変形がSS400 に比べて大きく式(2)が本来対象とした角形の連結板に挙動が近いためと考えられる。しかしながら式(2)と数値解析結果との差は高々5%程度であり、ストップホール径とピン孔径を同じにとれば鋼種にかかわらず式(2)を当てはめてもほぼ問題がないことがわかる。

## (3) 一次強度

ピンがスリットに進入するときの強度である一次強度に対する外径とストップホール径の比、スリット幅、スリット長さそれぞれの影響を図-11~13 にまとめる。それぞれ縦軸には一次強度と終局強度の比  $P_1/P_{\max}$  をとって表している。図-11 はスリット幅に対する影響を見たものであるが鋼種が同じであれば外径と内径の比の値にかかわらずスリット幅が増加するにしたがってほぼ直線的に  $P_1/P_{\max}$  は減少していく。このときの直線の傾きは他の形状パラメータによらずほぼ同じであり  $P_1/P_{\max}$  の  $W/D$  に対する依存性は同じであることがわかる。次に図-12 は一次強度の  $R_o/R_i$  に対する依存性を見たものであるが、この場合も考慮した範囲で  $P_1/P_{\max}$  はほぼ直線的に変化する。ただし  $P_1/P_{\max}$  のこのパラメータへの依存性は  $W/D$  に比べてかなり小さい。このふたつの図からわかるようにいずれの場合も  $P_1/P_{\max}$  は想定した範囲内ではこれらの形状パラメータとほぼ一次関数の関係にあるとみなすことができる。

スリット入口の丸み  $R_m$  の影響を図-13 に示した。  $W/D$  や  $R_o/R_i$  あるいは鋼種によって依存性は若干異なるものの丸みが大いほど一次強度がほぼ直線的に減少する傾向が見られた。しかしながらその依存性は  $R_o/R_i$  に対するものよりもさらに小さい。先にも述べたようにピンがスリットに進入することに関して  $R_m/R$  の影響はほとんどないと判断できるの

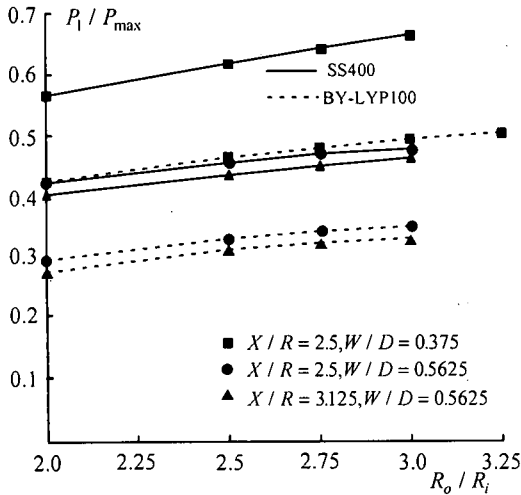


図-12  $R_o/R_f$  の一次強度への影響

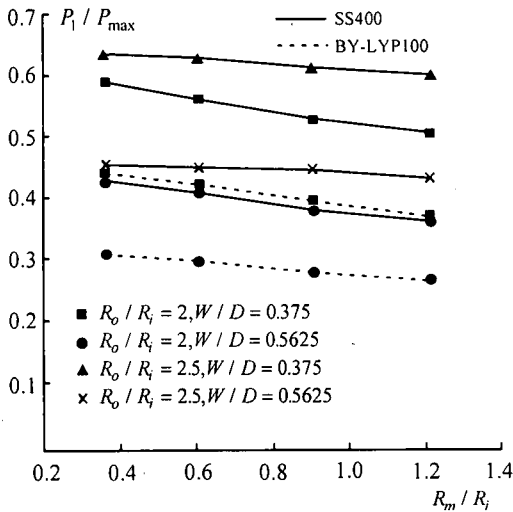


図-13 スリット入口丸みの一次強度への影響

で  $P_1/P_{max}$  をコントロールするために  $R_m/R$  を制御する必要性は少ない。実際にはある適当な値に固定して考えるのが妥当であろう。最後にスリット長の影響であるがグラフには示さないがこれについては事実上無視できることがあきらかになった。

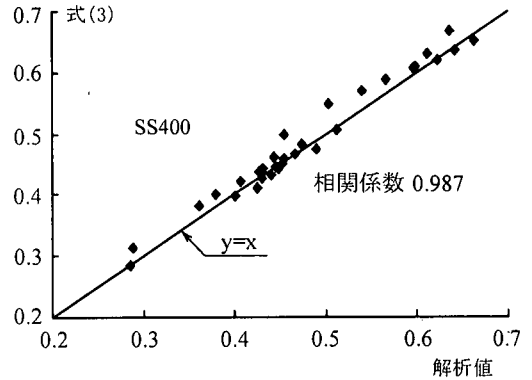
以上の解析結果をまとめると結局一次強度は形状パラメータ  $W/D$ ,  $R_o/R_f$ ,  $R_m/R$  それぞれに関して一次関数の関係にあると考えられるので、数値解析結果に対して回帰分析を行うことにより次式を得た。

$$\frac{P_1}{P_{max}} = a_1 \frac{W}{D} + a_2 \left( \frac{R_o}{R_f} - 2.5 \right) + a_3 - 0.068 \left( \frac{R_m}{R} - 0.59 \right) \quad (3)$$

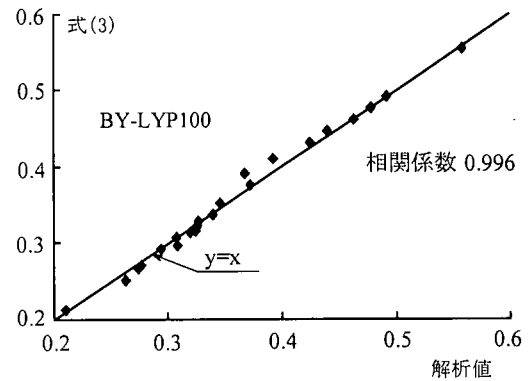
係数  $a_1, a_2, a_3$  は鋼種に依存するパラメータであり表

表-5 式(3)の係数

鋼種	SS400	BY-LYP100
$a_1$	-0.926	-0.771
$a_2$	0.073	0.0571
$a_3$	-0.958	-0.743



(a) SS400



(b) BY-LYP100

図-14 一次強度式

-5にまとめる。また式(3)とすべての解析値をプロットしたものを図-14(a), (b)に示す。以上のことから一次強度と終局強度の比を適当な範囲に設定するにはスリットの幅を制御することが最も有効であることがわかる。しかしながらスリット幅の選択は同時にピンにスリットを通過させるための重要な因子でもあるので実際の設計では  $P_1/P_{max}$  を 0.65 以上に設定するのは難しい。したがって一次強度の絶対値を上げるには  $R_o/R_f$  を大きくとり  $P_{max}$  を増加させることが最も効果的であることがわかる。

#### (4) 伸びおよび延性破壊に対する安全性

先にも述べたように提案する耐震連結板は弾性変

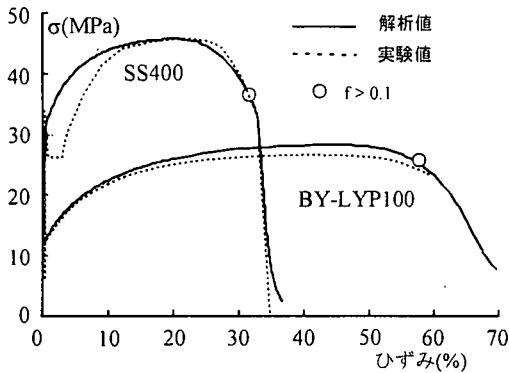


図-15 グルソンモデルによる応力ひずみ曲線

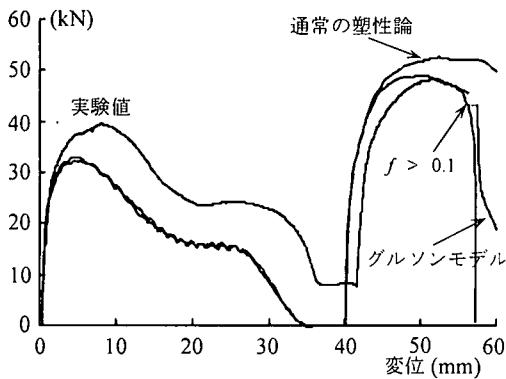


図-16 グルソンモデルの影響

表-6 低降伏点鋼による延性の増加

鋼材	引張り強度時 の変位(mm)	延性破壊時 の変位(mm)
SS400	50.4	56.5
BY-LYP100	59.8	66.5

$$R_o / R_t = 2.5, X / R = 2.5, W / D = 0.375$$

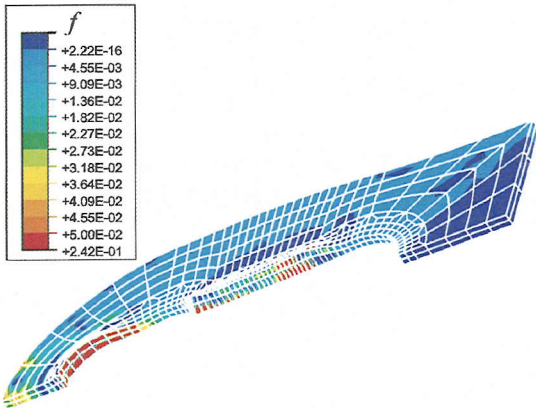
形の範囲内での強度ではなく塑性変形を前提とした強度や変形特性の考慮して設計されなければならない。強度に関しては幾何学的非線形性と材料強度を的確に考慮すればすでに示されたよう数値解析により正確な予想が可能である<sup>12,13)</sup>。しかしながらもうひとつの重要な点である変形特性、言い換えれば伸びや延性破壊に対する安全性は数値解析により評価することは容易ではない。しかし、構造物自体の延性が重要視されるにしたがって、過大な変形による延性破壊に対する安全性の評価の必要性は耐震連結装置のような特殊な部材にとどまらず全般的にたかまわっていくものと考えられる。また低降伏点鋼など高い延性を持つ新しい材料を適用することの有用性などを的確に評価するためにも延性破壊に対する数値解析法の確立が望まれる。金属材料の延性破壊に

関する研究はすでに一定の蓄積をみており、その微視的なメカニズムも明らかにされている。ここで用いたグルソンモデルはこういったメカニズムを考慮した最も簡単なものである。

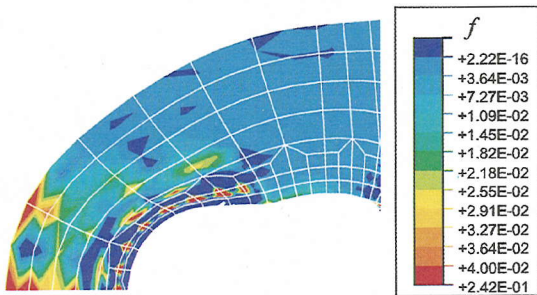
数値解析に用いた材料定数は SS400, 低降伏点鋼 BY-LYP100 ともに標準的な一軸引張試験における荷重変位曲線より推定した(図-15)。具体的には  $\epsilon_N$  と  $s_N$  以外を表-3 に示す値に固定し標準試験体(4号試験片)に対する有限要素法解析による引張り荷重変位曲線における破断点付近の挙動が実験値に近くなるように  $\epsilon_N$  と  $s_N$  を決めている。ただし軟化型塑性モデルではあるがグルソンモデルを用いても解析モデル自体は連続体のモデルである。補遺に示す構成則モデルの詳細を見てもわかるように、空孔体積比率  $f$  がある程度大きくなれば急激に材料の荷重伝達能力がなくなるが、実際には部分的に延性破壊による亀裂が生じた時点で、モデルの有効性はなくなる。したがって図-15 で荷重が激減している所で破断が生じたと判断できるわけではなく、それよりも幾分前の段階で亀裂が生じていると考えられる。実際には各要素の  $f$  が一定の値を超えたところでその引張荷重伝達能力が 0 になるとシコンクリートの分散ひび割れモデルと同様に荷重の再配分を考慮しながら解析を進めていくのが望ましい。しかしながら材料定数や構成則モデル自体の精度が議論できないこの段階でより複雑な数値解析手法を用いることは必ずしも合理的とは言えない。図-15 では、引張り試験で破断が生じたと考えられるとき、○印で示すように標準供試体を対象とした数値解析で空孔体積比率  $f$  が 0.1 を超える領域が断面を横断したときと比較的良好に対応しているために、これをひとつの指標として用いることにした。

数値解析結果の一例を図-16 に示す。図-16 は同じ形状、同じ要素分割で構成則のみ変えたものの荷重-変位曲線の比較である。ピンがスリットを通過している間は空孔の発生による影響は少なく通常の塑性論とほぼ一致した曲線を描くが、その後は連結板全体の変形が大きくなり空孔の発生による軟化の影響を見ることが出来る。実験値と解析を比較すると、グルソンモデルを使った解析は終局強度を示す前から通常の塑性論より低い荷重となり終局強度に達した後ある程度伸びた後に荷重伝達能力を失い破壊にいたっている。実験結果は文献 12) にあるようにスリット通過後も含めて試験体治具との摩擦の分だけ荷重が高めにでておりその点を考慮すると本解析結果と実験結果は破壊点を含めて定量的に良く一致していると考えられる。解析において破断点の判断基準





(a) 全体図



(b) 詳細図

図-17 空孔体積比の分布

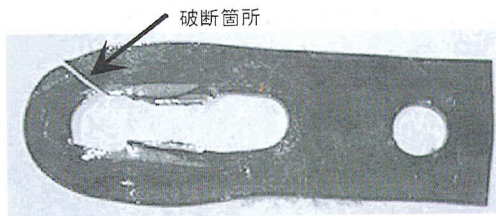


写真-1 破断した供試体

とした  $f > 0.1$  の範囲が荷重伝達領域を横断するとき  
は解析値で急激に荷重が減少するよりもわずかに前  
である。したがって今回採用した簡略化した破断基  
準でも実験結果を比較的良く説明することができる  
ことがわかる。ただしこの点についてはさらに詳細  
な検討が必要である。

図-17 は  $R_o/R_i = 2.5, X/D = 2.5, W/D = 0.375$  の形

状で SS400 を用いたときの全体の変形の様子 (a) と  
最大荷重時のピンと接触している付近の変形と空孔  
体積比率  $f$  の分布 (b) を示したものである。この図を  
見てわかるように  $f$  の分布はストップホールの外側  
では連結板先端部、内側ではやや斜め上部付近で高  
くなっておりこのどちらかにおいて破断が生じること  
が予想され、実験においても破断箇所はこのどちら  
からであり写真-1 に見るようにその位置も図-17 から  
予想されるものにきわめて近い。少なくとも単調  
載荷による変形で破断やき裂の発生にいたるような  
場合では破断時や破断箇所の推定にこの種の解析は  
有効であると思われる。しかしながら、精度につい  
てはさらに十分な検討が必要である。

同形状で鋼材を変えて解析したものの荷重-変位  
曲線の比較は図-9 に見られるが、引張り強度は低い  
が引張り強度時の変位や延性破壊までの変位が大き  
いという低降伏点鋼の特徴ははっきり見て取れる。  
図-9 に示される結果の延性の指標を表-6 にまとめ  
た。低降伏点鋼では引張り強度時・破断時の変位と  
も SS400 より 15%以上大きいことがわかる。ただし  
変形の集中により図-6 にある材料試験の結果ほどは  
差がない。これらの結果から連結板の形状と鋼材の  
種類によりどのくらいの変位まで破断に耐えるか、  
言い換えれば過大な変形に対する安全性を検討する  
ことができる。

以上の結果によりスリット型連結板に低降伏点鋼  
を適用することはピンのスリットへの進入しやすさ  
や想定を超える変位に際して延性破壊に対する安全  
性等の観点から望ましいと考えることができる。し  
かし、強度面では降伏強度ならびに引張り強度が低  
いので連結板の厚さを増したり連結板の数を多くす  
る等の対策が必要である。

#### 4. まとめ

本研究ではスリット型連結板を既設鋼道路橋の補  
強という観点で適用することを念頭におき、有限要  
素法による数値解析によりその強度および変形特性  
を詳細に検討した。また、スリット型連結板の特性  
を活かすために延性に富む低降伏点鋼の適用につ  
いても検討した。スリット型連結板は適切な設計がな  
されれば移動制限装置としても落橋防止装置として  
も同時に機能させることができる。このときスリッ  
ト型連結板の設計において重要なのはピンに確実に  
スリットを通過させることと進入時の強度（一次強  
度）と終局強度を適切な値にすることである。そこ

で本研究では、パラメトリックな数値解析により通常の構造用鋼材 SS400 と低降伏点鋼 LYP-100 についてピンがスリットを通過するために形状が満たすべき条件、一次強度、終局強度のそれぞれについて簡便な算定式を与えた。

低降伏点鋼を適用するメリットは同一の形状でも SS400 よりピンがスリットを通過しやすいので設計において形状選択の自由度が大きいこと、そして高い延性を有することから予期しないような大きな変位に対しても破断に対する安全性が高いことがあげられる。一方、材料そのものの強度は小さいので板厚を増加させるか、使用する連結板そのものを増やす等の措置も必要である。また破断や破壊に対する安全性は従来あまりふれられることがなかったが、本研究では単純なグルソンモデルを導入することにより数値解析によってもある程度の精度をもって検討することができる見通しを示した。

もちろん落橋防止対策は橋梁の支承まわりだけではなく橋梁全体としての地震時の挙動を視野に含めながら実施していくことが望ましい。しかしながら、現段階では基礎、定着部、橋脚、支承、落橋防止装置といったそれぞれの構成要素の動的挙動そのものが必ずしもあきらかではなく、したがって強震時にそれらの相互作用を考慮して橋梁全体の挙動を総合的に判断することはさらに難しい。このような現状を考えたときでは本研究のようにそれぞれの構成要素の挙動を明確化することを積み上げていくことが必要であると考えられる。

謝辞：この研究の一部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WGから援助を受けました。また新日本製鐵㈱のご高配をいただきました。ここに感謝します。

## 補遺

グルソンの構成方程式は金属材料の延性破壊に関係した空隙の発生と成長を考慮した弾塑性材料に関する構成方程式であり、金属材料の延性破壊の評価に有効なものとしてこれまで多くの数値シミュレーションに使われてきている。以下に Tvergaard と Needleman<sup>19)</sup>によって修正されたグルソンの構成方程式の概略を示す。まず降伏関数  $\phi$  は

$$\phi = \left( \frac{\sigma_e}{\sigma_M} \right)^2 + 2f^* q_1 \cosh \left( \frac{\text{tr} \sigma}{\sigma_M} \right) - \left\{ 1 + (q_1 f^*)^2 \right\} = 0 \quad (\text{A-1})$$

で与えられる。ここに  $\sigma_M$  は空隙を含まない基質材

料そのものの降伏応力、 $\sigma_e$  はミゼスの相当応力、 $f^*$  は空隙の体積比率  $f$  の関数として与えられる。あきらかなように  $f^*$  の値の増加により材料は急速に軟化する。また  $q_1$  は空隙の相互作用を考慮するために導入されたパラメータである。 $f^* = f$  かつ  $q_1 = 1$  でグルソンの基本的な式になる。本研究では簡単のため  $f^* = f$  とし、Tvergaard<sup>19)</sup> にならって  $q_1 = 1.5$  とする。次に空隙の体積比率  $f$  の成長率  $\dot{f}$  は  $f_{nucl}$  を空隙の発生率、 $f_{growth}$  を既存空隙の成長率として

$$\dot{f} = f_{nucl} + f_{growth} \quad (\text{A-2})$$

となる。このうち  $f_{growth}$  は基質材料の非圧縮性を仮定することにより、 $D^p$  を変形率テンソルの塑性変形分として

$$f_{growth} = (1-f) \text{tr} D^p \quad (\text{A-3})$$

となる。一方、 $f_{nucl}$  は金属材料中に含まれる微小な介在物と基質材料との相互作用を考慮することにより以下のように与えられる。

$$f_{nucl} = A \left( \frac{EH}{E-H} \right) \varepsilon^p + \frac{1}{3} B \text{tr} \sigma \quad (\text{A-4})$$

ただし、 $E$  はヤング率、 $H = H \left( \varepsilon_M^p \right)$  は基質材料の加工硬化係数、 $A, B$  は空隙発生に関する材料パラメータである。式(A-4)からわかるように係数  $A$  は基質材料の相当塑性ひずみ  $\varepsilon^p$  に関するものであり、係数  $B$  は静水圧成分に関するものである。空隙の発生が主に基質材料の塑性変形に依存すると考えられる場合には  $B=0$  とすれば良い。ここでは  $B=0$  の場合を考えることにする。Chu と Needleman<sup>21)</sup> は係数  $A$  として次のような正規分布関数を適当として与えている。

$$A = \left( \frac{1}{H} - \frac{1}{E} \right) \frac{f_N}{s_N \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{\varepsilon_M^p - \varepsilon_N}{s_N} \right)^2 \right\} \quad (\text{A-5})$$

$f_N$  は空隙を発生する介在物の初期体積比率である。上式は基質の相当塑性ひずみ  $\varepsilon_M^p$  が  $\varepsilon_N$  に等しいときに空隙の発生率が最大になりまた、そのばらつきは  $s_N$  で与えられることを意味している。したがって  $f_N$ 、 $\varepsilon_N$  および  $s_N$  が重要な材料パラメータとなる。なお、本研究では静水圧成分が正のときのみ式(A-4)、(A-5)にしたがって空隙が発生するものとしている。以上まとめて塑性流れが関連流れ則に従うものとし応力ひずみ関係をデカルト座標系で総和規約を用いて成分表示すると以下の式のようになる。

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= \left\{ L_{ijkl} - \frac{1}{Q} P_{ijkl} \right\} D_{kl} \\ P_{ijkl} &= L_{ijpq} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{pq}} \left( \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{mn}} + \frac{1}{3} \frac{\partial \phi}{\partial f} B \delta_{mn} \right) L_{mnkl} \quad (A-6) \\ Q &= h + \left( \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ab}} + \frac{1}{3} \frac{\partial \phi}{\partial f} B \delta_{ab} \right) L_{abrs} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{rs}} \\ \frac{1}{h} &= - \left\{ (1-f) \frac{\partial \phi}{\partial f} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \delta_{ij} \right. \\ &\quad \left. + \frac{EH}{E-H} \frac{1}{\sigma_M} \left( A \frac{\partial \phi}{\partial f} + \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_M} \right) \sigma_{ij} \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_{ij}} \frac{1}{1-f} \right\} \end{aligned}$$

ただし  $L_{ijkl}$  は弾性テンソルである。

### 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 1996.
- 9) 鈴木五月，後藤芳顯，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. 35A, p.1011-1018, 1988.
- 10) 小畑誠，鈴木五月，後藤芳顯，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.
- 11) 小畑誠，後藤芳顯，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，I-14/No.441, pp.295-302, 1992.
- 12) 小畑誠，大見敬一，後藤芳顯：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，pp.385-390, 1996.
- 13) 小畑誠，栗原位充，後藤芳顯：スリット型耐震連結板による落橋防止対策の提案，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，1997.
- 14) 衛藤芳昭，園田佳巨，石川信隆，生駒信康：落橋防止連結板に用いるゴム緩衝ピンの衝撃力低減効果について，土木学会第52回年次学術講演会，1997.
- 15) 森山卓郎，中島康介，依田照彦：緩衝材を有する落橋防止連結板の衝撃力緩和効果，土木学会第52回年次学術講演会，1997.
- 16) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc : ABAQUS/Standard User's Manual Ver.5.6.1 Vol.1,2 1997
- 17) 新日本鉄鋼：低降伏点鋼に関する資料
- 18) Tvergaard, V.: Influence of voids on shear band instabilities under plane strain condition, Int. J. Fracture Mech., Vol. 17, p. 389, 1981.
- 19) Needleman, A. and Tvergaard, V.: An analysis of ductile rupture in notched bars, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 32, p. 461, 1984.
- 20) Chu, C.C. and Needleman, A.: J. Eng. Mat. Tech., Vol. 102, p. 249, 1980.
- 21) 鈴木勝久：鋼道路橋の耐震連結装置の新しい設計法について，名古屋工業大学修士論文，1993.

(1998. 3. 27 受付)

## MECHANICAL BEHAVIORS OF A SHOCK ABSORBING BRIDGE RESTRAINER PLATE

Makoto OBATA, Tamamitsu KURIHARA and Yoshiaki GOTO

We have proposed a slit-type bridge restrainer as a possible method to retrofit a steel highway bridge to prevent the fall-off of girders. The slit type restrainer provides enough moving distance and energy absorption capability to comply with the revised specification of highway bridges. These characteristics critically depend on the large plastic deformation of the restrainer plate. In this work, we examine the mechanical behaviors of the slit type restrainer by parametric FEM analyses with the establishment of practical design method in mind. The numerical analysis also covers the possible application of new type material (low yield point steel) and the estimation of ductile fracture.