

(57) 落橋防止連結板の高速変形特性に関する解析的考察

HIGH SPEED DEFORMATION CHARACTERISTICS OF BRIDGE RESTRAINER PLATE

園田佳巨\*, 石川信隆\*\*, 彦坂熙\*\*\*

Yoshii SONODA Nobutaka ISHIKAWA and Hiroshi HIKOSAKA

\*博士(工学) 防衛大学校助手 土木工学科(〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\* 工博 防衛大学校教授 土木工学科(〒239 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

\*\*\* 工博 九州大学教授 工学部建設都市工学科(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)

キーワード: 落橋防止連結板, 高速変形, 弾塑性解析

(bridge restrainer plate, high speed deformation, elastic-plastic analysis)

1. 緒言

兵庫県南部地震において、落橋防止連結板の破壊にともなう橋桁の橋脚や橋台からの落下事故が数多く見られ、既設の落橋防止連結板装置が、直下型大地震に対しては必ずしも十分な耐震性能を有しているとは言えないことが明らかとなった。現在の連結板の構造形式は各監督官庁によりそれぞれ異なるが、いづれも連結ピンと連結板の接触により地震力に抵抗する簡単な構造であり、ゴム緩衝材等を利用した改良の余地が今後の検討課題として十分に残されているものと考えられる。そのためには連結装置の変形性能を考慮した検討を行う必要があるが、連結ピンとの接触部には変形の局所的な進展や高速変形にともなう材料特性の変化が生じるものと思われ、これらを考慮に入れた解析的な検討も行う必要がある。

本研究は、新しいゴム巻きピンを用いた落橋防止装置<sup>1)</sup>の開発のための基礎的段階として、連結板単体の高速変形時の挙動特性について、有限要素法を用いた弾塑性解析手法による定量的な検討を行い、縮尺モデルを用いた高速載荷実験結果との比較・検討を試みるものである。なお、落橋防止連結板の弾塑性挙動特性に関しては、小畑らにより一連の詳細な研究<sup>2),3)</sup>がすでになされている。

2. 解析手法の概要

2.1 解析モデル

本研究は、図-1に示すような実際の連結板の片側半分をモデル化した試験体を用いた高速載荷実験に対する解析を行う。ここでは、試験体の形状および荷重が対称に載荷されることから、解析モデルとして図-2に示すようなボルトによる定着部から先端の半分のみを対象に、三角形1次要素による要素分割を行った。なお、境界条件はA点を固定とし、AB上の節点はY軸方向変位を拘束、CDおよびEA上の節点はX軸方向変位を拘束した。なお、ピンと連結板の接触位置の節点には、載荷速度に応じた強制変位をy軸方向に与えた。

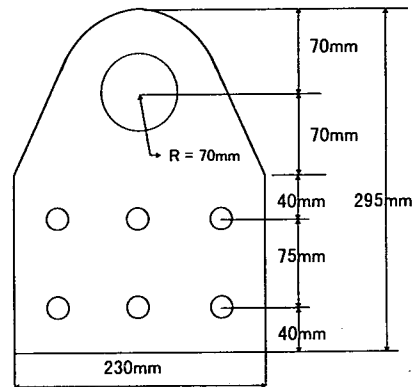


図-1 連結板試験体

## 2.2 ひずみ速度効果の導入

一般に、構造用鋼材の高速変形時の応力-ひずみ関係にはひずみ速度効果の影響が見られることは知られており、連結板の動的挙動特性の検討にもその影響は無視できないことが指摘されている<sup>3)</sup>。そこで、本研究では高橋ら<sup>4)</sup>が行った鋼材の一軸高速引張試験結果を引用し、ひずみ速度効果を導入することとした。すなわち、鋼材に対して一般に用いられる Mises の降伏基準のもとで、塑性変形により体積変化は生じないことを仮定することにより、図-3に示すような一軸応力-ひずみ関係を、相当応力-相当塑性ひずみ関係に置換した。図-4はその結果を示したもので、図-3の式自体が線形化された簡易な関係であることから、加工硬化特性として一般的なn-乗硬化式ではなく、式(1)および表-1に示す定数で表される簡易な線形の硬化式を各ひずみ速度レベルで用いた。

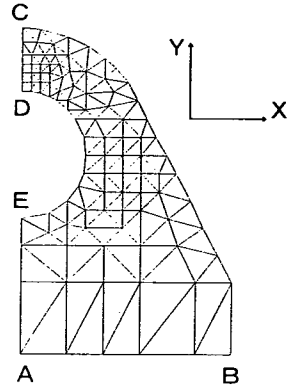


図-2 解析モデル

$$\bar{\sigma} = c(a + \bar{\epsilon}^p) \quad (1)$$

ただし、 $\bar{\sigma}$  : 相当応力  $\bar{\epsilon}^p$  : 相当塑性ひずみ

$c, a$  : 塑性硬化パラメータ

## 2.3 解析手順

本研究では、試験体に肉厚方向の拘束が生じないことから平面応力の仮定のもとに Mises の降伏基準による以下の弾塑性構成式を用いた。

$$d\sigma = D^{ep} d\epsilon \quad (2)$$

ここに、 $D^{ep} = D^e - D^p$ ; 弾塑性剛性行列

$$D^e = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$D^p = \frac{1}{S} \begin{bmatrix} s_1^2 & s_1 s_2 & s_1 s_3 \\ s_1 s_2 & s_2^2 & s_2 s_3 \\ s_1 s_3 & s_2 s_3 & s_3^2 \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$\text{ただし、} s_1 = \frac{E}{(1-\nu^2)}(s_x + \nu s_y), \quad s_2 = \frac{E}{(1-\nu^2)}(s_y + \nu s_x),$$

$s_3 = \tau_{xy}$   $s_x, s_y, s_{xy}$ : 偏差応力成分

$$S = \frac{4^{-2}}{9} H' + s_1 s_x + s_2 s_y + 2s_3 s_{xy} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma} : \text{相当応力} \quad H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\bar{\epsilon}^p} : \text{硬化係数(本解析の場合、線形硬化則を用いるため} H' \text{は定数となる。)}$$

本研究が対象とする高速載荷実験は、試験体が破壊するまで一方向の単調な載荷であることから、ここでは最

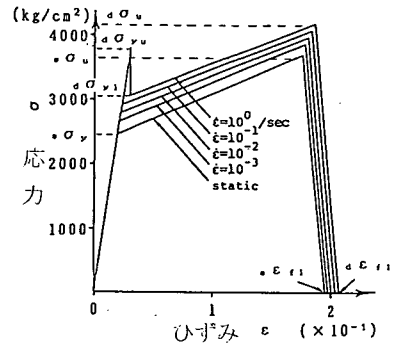


図-3 鋼材の高速変形時の応力-ひずみ関係

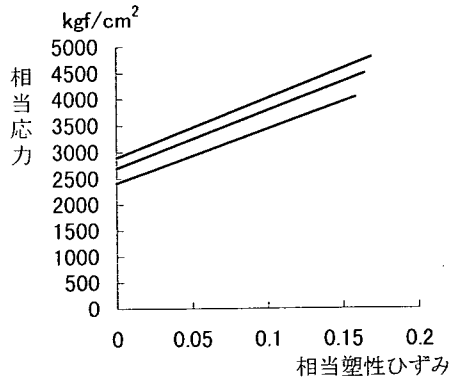


図-4 鋼材の相当応力-相当塑性ひずみ関係

も簡易な等方硬化を仮定した。解析の手順としては、連結ピンが接触すると想定した節点に強制変位増分を与え、r-min 法により各ステップの変位増分を制御しながら計算を行った。なお、各ステップの変位増分倍率は、弾性状態の各要素が降伏するための値と塑性状態の各要素の相当塑性ひずみ増分を制限値以下にするための値の中の最小値とした。また、各ステップ毎に全節点の座標の更新を行うとともに、実験条件である載荷速度とステップ間の強制変位増分から得られる時間間隔をもとに全要素の相当塑性ひずみ増分速度を簡易に求め、図-4から対応する硬化式を選択することによりひずみ速度効果の影響を考慮した。以上の計算手順を図-5に示す。

### 3. 数値計算例および考察

#### 3.1 静的載荷実験のシミュレーション

まず、直径 40mm のピンを用いた静的載荷実験のシミュレーションを試みた。図-6は、荷重-連結板変位の関係について実験結果と計算結果を比較したものである。この図より、計算値は全般的に実験値をほぼシミュレートしていることが認められるが、詳細に比較すると、計算値が約8tfで塑性化が生じた後もほぼ線形に耐力が増加しており、実験値の曲線を完全に捉えきれていない。これは、図-4に示したような線形の硬化特性を使用したことに主な原因があるものと考えられる。

#### 3.2 高速載荷実験のシミュレーション

次に、同一径のピンを用いた高速載荷実験のシミュレーションを試みた。図-7は、荷重-連結板変位の関係を比較したもので、計算値が低めの耐力(最大で約20%の差)を示すことが認められた。これは、ひずみ速度効果による耐力の増加が実験結果においては20%程度の値を示したのに対して、数値計算上では約5%しか表現できないためである。この主な原因として、本解析手法では、要素に相当塑性ひずみの値が生じたときにひずみ速度効果を考慮した硬化式が初めて選択されるため、ひずみ速度効果の大きな特徴である降伏応力の上昇が計算結果にうまく反映されていないことが考えられる。したがって、一軸引張試験のデータを引用した本手法で、高速変形時の最大耐力の正確な推定を行う

表-1 ひずみ速度を考慮した硬化パラメータ

ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$	$c$	$a$
$10^{-4}$	10569	0.2365
$10^{-3}$	10768	0.2412
$10^{-2}$	10970	0.2455
$10^{-1}$	11168	0.2497
$10^0$	11354	0.2541

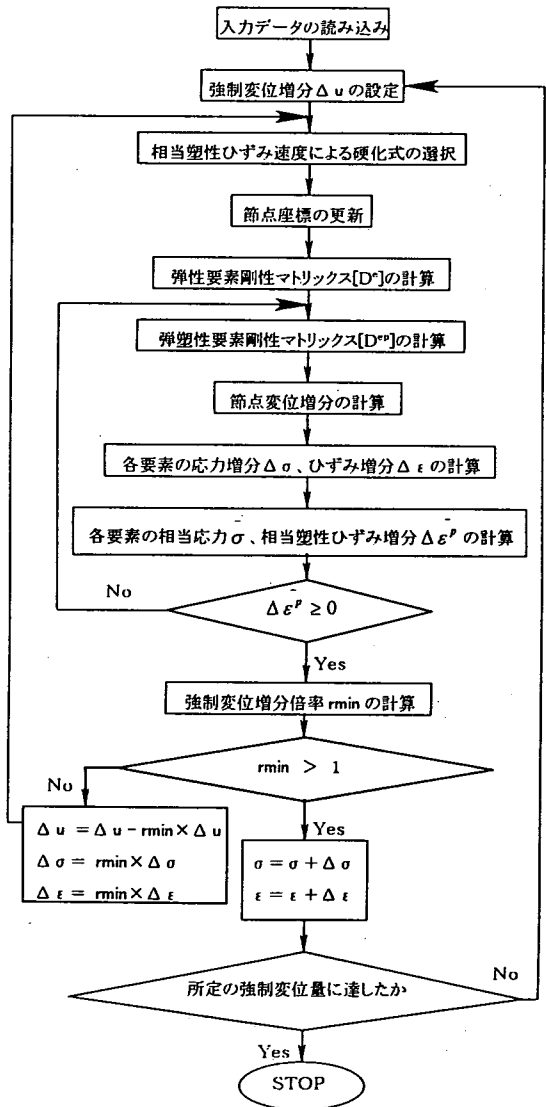


図-5 解析手順

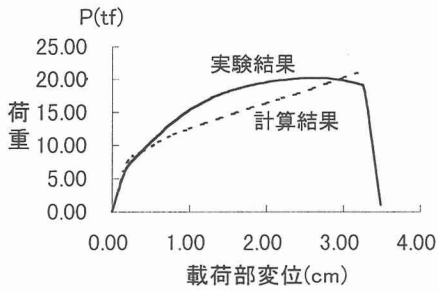


図-6 荷重-変位関係の比較(静的載荷)

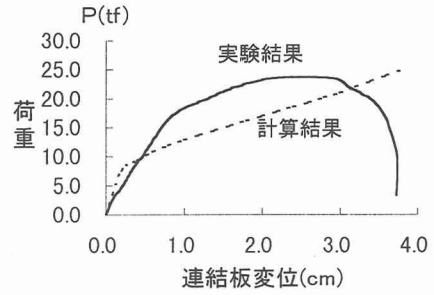


図-7 荷重-変位関係の比較(高速載荷)

にはある程度の限界があるものと思われ、多軸応力下でのひずみ速度効果を考慮した構成式の提案とその活用が必要である。図-8は、連結板の終局時の変形状況に関する解析結果であり、図中の黒色の部分は、相当塑性ひずみの値が鋼材の破断ひずみ程度の値(ここでは20%と仮定した)に達した要素を表わしている。この図より、連結板の破断はピンが接触している先端部付近(図中の一点鎖線方向)に発生することが推定され、写真-1の実験後の連結板の破壊状況と良く一致することが確認された。

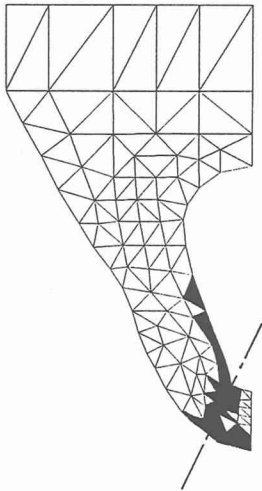


図-8 連結板の終局変形状況

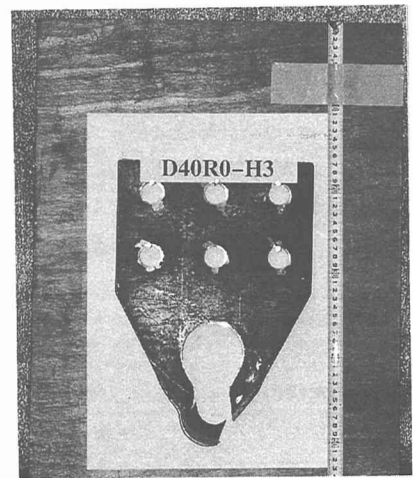


写真-1 連結板の破壊状況

#### 4. 結論

本研究は、現行の鋼製連結板単体の高速変形時の弾塑性挙動を捕捉する簡易解析手法を作成したもので、縮尺モデルを用いた高速載荷実験結果との比較・検討を行った。本研究で得られた成果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 本手法により、連結板の静的な荷重～変形特性に関しては実験結果を比較的良好的にシミュレートできた。
- (2) 連結板の高速変形時の荷重～変形特性は、実験結果と約20%程度の相違が認められた。これは、本手法が鋼材のひずみ速度効果による塑性化後の硬化特性の変化に関しては考慮しているが、降伏耐力の上昇について考慮できないためであり、今後の改善が必要である。
- (3) 連結板の高速変形時の変形状況は実験結果を良好にシミュレートしており、相当塑性ひずみの分布より概略の

破断位置の推定は可能であることが認められた。

#### 参考文献

- 1)石川信隆、竹本憲介、彦坂熙、佐藤浩明、生駒信康:ゴム巻きピンを用いた落橋防止連結板の衝撃緩衝効果に関する一考察, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 1996年5月
- 2)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, 第422号/I-14, pp.295~302, 1990年10月
- 3)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, No441/I-18, pp.97~105, 1992年1月
- 4)高橋芳彦、大野友則、太田俊昭、日野伸一:衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの弾塑性挙動に及ぼす材料のひずみ速度効果, 構造工学論文集 Vol.37A, pp.1567~1580, 1991年3月

