

極低降伏点鋼の歪み速度依存型 応力-歪み関係のモデル化

吉田 康治¹・阿部 義²・長嶋 文雄³

¹正会員 工修 佐藤鉄工㈱橋梁設計三課 (〒103-0011 東京都中央区日本橋大伝馬町 2-7 日本橋第一ビル 5F)

²学生会員 東京都立大学・修士 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)

³正会員 工博 東京都立大学助教授 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)

構造物の耐震安全性を高める目的で極低降伏点鋼などを用いた鋼製の高減衰装置を取り付ける場合がある。このエネルギー吸収性能を明らかにするためには、実験的研究の他にも解析的な検討が不可欠である。例えば、コンピュータによる3次元動的破壊挙動解析などを行う必要があるが、歪み速度効果を加味した材料特性のモデル化について詳しく検討されたものが殆ど見当たらない。

本報告は、極低降伏点鋼の静的および高速載荷試験を行い、特に塑性域から破断に至るまでの動的シミュレーション解析精度を向上させるために、有限要素メッシュに応じた応力-歪み関係のモデル化に関する検討を行ったものである。また、3次元動的破壊挙動解析を行い、これを実験結果と比較検討することによって、ここで得た歪み速度効果を加味した材料特性モデルの適合性を検証した。

Key Words : *low-yield-point steel, strain-rate effect, fracture analysis, shear damper*

1. はじめに

現行の橋梁耐震設計は、構造物の供用期間中に発生する確率が低い激震に対しては、主構の損傷をある程度許し、その部分のエネルギー吸収によって致命的な被害を防止する考え方、すなわち「損傷許容設計法」に基づいたものである。合理的な設計手法ではあるが、構造物が倒壊しなくとも主構に塑性ヒンジが生じて塑性変形が残れば、平成7年の阪神・淡路大震災で見られたように復旧工事のために膨大な費用がかかり、さらに長期間にわたって交通系が麻痺するために多大の経済的損失を覚悟しなければならない。

一方、性能規定型設計法の導入の流れがあるが、これは従来のやや画一的な耐震設計から脱却して、構造物の重要度(目的)や経済性などにより現行規定よりも細かい耐震安全性のランクを合理的に選択できるものである。この設計法を導入するために、より高度の耐震安全性を有する構造物の設計手法を確立する必要性が生じて来ている。

耐震性能のランクを上げるための手法の一つに「損傷

制御設計法」がある。本手法は、高強度特性を有する鋼構造物の耐震設計に適した設計手法であり、極低降伏点鋼などを用いた鋼製のエネルギー吸収装置によって主構造物をほぼ弾性範囲内に留めようとするものである。これにより、激震を受けても主構造は健全であることによって、迅速な復旧作業が可能になる。

鋼製の高減衰装置のエネルギー吸収性能を明らかにするためには、実験的研究の他に解析的な検討も必要である。例えば、コンピュータによる動的載荷シミュレーション解析などを行う必要があるが、材料特性のモデル化について詳しく検討されたものが殆どない。特に鋼製高減衰装置によく用いられている極低降伏点鋼材の歪み速度効果についてはデータが不足している。

本報告は、静的および高速載荷試験を通して上記の点について明らかにし、特に塑性域から破断に至るまでのシミュレーション解析精度を向上させるため、有限要素メッシュに応じた材料特性のモデル化に関する検討を行ったものである。また、3次元動的破壊挙動解析を行い、この結果を実験結果と比較検討す

ることによって、ここで得た歪み速度効果を加味した材料特性モデルの適合性を検証したものである。

2. 極低降伏点鋼の静的および高速引張試験

(1) 試験装置および試験方法

静的引張試験、高速引張試験共に同種の極低降伏点鋼 (BT-LYP100) を用いた。供試体はいずれも極低降伏点鋼板から削り出し、静的引張試験には鋼棒 (平均径: $\phi_{ave}=10.4\text{ mm}$, 標点間距離: $L_0=60\text{ mm}$) 6本を、また高速引張試験には図-1 に示すような形状・寸法 ($\phi_{ave}=5.88\text{ mm}$, $L_0=20\text{ mm}$) のもの21本をそれぞれ用意した。ただし、予備試験等に幾本かを費やしたため、試験データとして用いたのは、静的および高速試験でそれぞれ5本、16本である。供試体の標点間には図-1の写真にあるように2 mm ピッチでマークをし、破断試験後に塑性歪み量を計測することにした。

静的引張試験では一般的な万能試験機を用いたが、載荷速度は歪み速度換算で $8.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 程度とした。

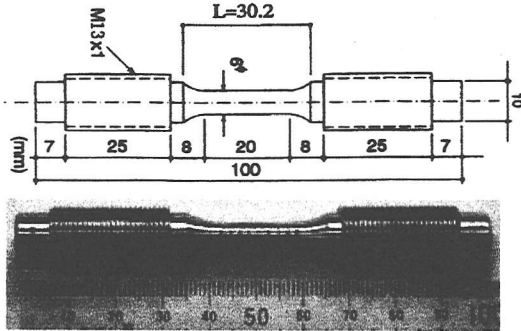


図-1 高速載荷試験用試験片形状

試験機性能
最大荷重 $\pm 750\text{ kN}$
有効ストローク 300 mm
最大速度 50 cm/s

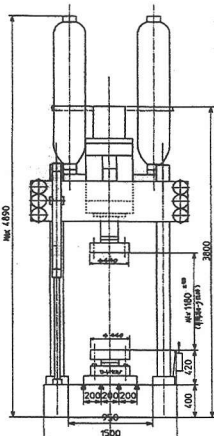


図-2 高速載荷試験機

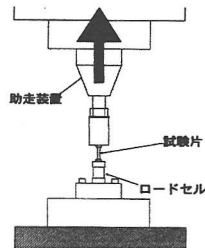


図-3(a) 試験片設置図

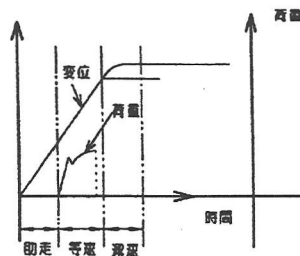


図-3(b) 載荷方法

高速引張試験は、図-2に示すような高速載荷試験機を使用した。載荷速度は、図-3(a), (b)に示すような助走装置による助走区間が設定されるようになっており、これによって載荷時にほぼ等速となるように設定されている。

歪み速度は、15.0, 7.5, 5.0, 2.5, 1.0, 0.5, 0.25, 0.05 sec^{-1} の 8 ケースとなるように載荷速度を設定した。なお、ここでの歪み速度とは載荷速度を試験片の標点間距離の長さ20mmで除した平均歪み速度である。また、試験は各歪み速度毎に2回行っている。

(2) 静的載荷試験結果

図-4に静的載荷試験の公称応力-公称歪み曲線を示す。5回の引張試験の平均として降伏応力は 95.7 N/mm^2 、引張強度は 233.4 N/mm^2 であった。破断歪みは標点間距離を20 mmとした場合、1.15であった。なお、弾性係数は平均で $E=8.6 \times 10^4\text{ N/mm}^2$ となり、一般構造用鋼材の $E=2.1 \times 10^5\text{ N/mm}^2$ に対し1/2.4 程度と低かった。

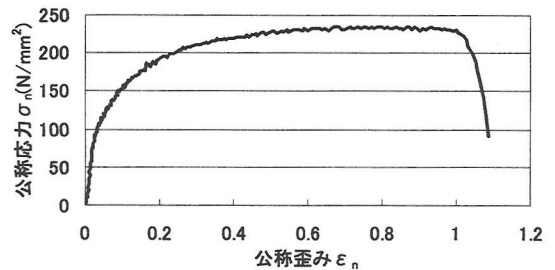


図-4 静的引張試験 公称応力-公称歪み曲線

(3) 高速載荷試験結果

図-5に代表的な4種類の歪み速度 (0.05, 0.5, 5.0, 15.0 s^{-1}) における公称応力-公称歪み曲線を示す。なお、高速載荷試験においては歪み速度ごとに2回の試験を行っているが、2回の試験結果はほぼ同じであったため、図-5には片方のみを示した。破断歪みには、歪み速度依存性は殆ど認められないが、高速になるにつれて幾分減少する傾向がある。弾性係数は静的載荷試験のものとほぼ等しく、歪み速度による変化は殆ど見られなかった。

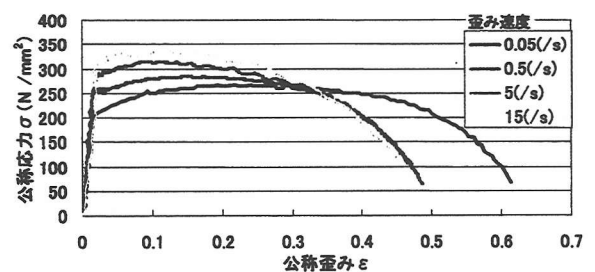


図-5 高速引張試験 公称応力-公称歪み曲線

図-6は、歪み速度の変化による降伏応力、引張強度の変化を示したもので、両者とも歪み速度に対し片対数グラフ上ではほぼ線形関係にあるとみなすことができる。図-7に、歪み速度 1.0 s^{-1} のときの標点間距離をパラメータとした真応力*－塑性真歪み曲線を示す。真応力*は各標点間距離に対して体積一定の条件で求めたものであるため、真の真応力とはなっておらず、破断直前には低下することになる。ここでの標点間距離は有限要素メッシュとして読み替えることができ、解析モデルのメッシュに応じた真応力－塑性真歪み関係を用いれば、精度の高いシミュレーション解析が可能となる。

3. 歪み速度依存型材料特性のモデル化

歪み速度依存型の真応力－塑性真歪み関係を各標点間距離毎にまとめて回帰分析することによって式(1)および図-8に示すようなトリリニア型の関係曲線モデルを得た。当曲線は歪み速度 $\dot{\epsilon}$ と標点間距離 L_0 の関数となっている。 $\dot{\epsilon}$ と L_0 の有効範囲は式中に示したとおりである。有限要素解析には、図-9に示すように、最大および最

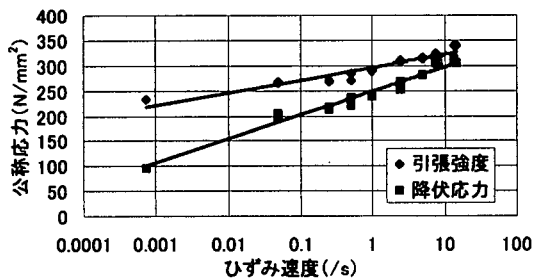


図-6 歪み速度と降伏応力・引張強度の関係

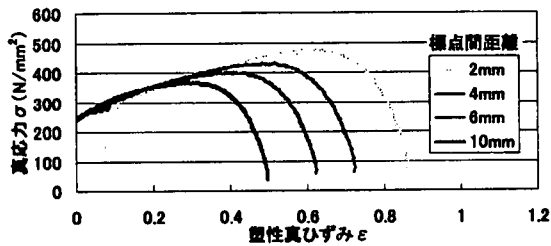


図-7 真応力*－塑性真歪みの関係(歪み速度 1 s^{-1})

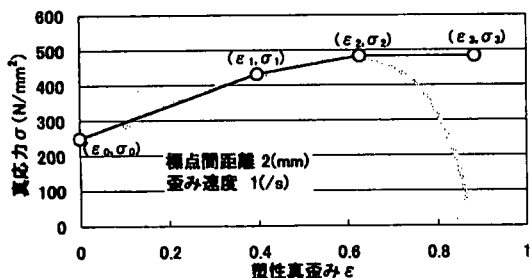


図-8 真応力*－塑性真歪みのモデル化

低歪み速度をカバーする複数本の関係曲線を入力データとして与え、各時刻における各要素の歪み速度に応じた真応力－塑性真歪み関係は補間によって計算されて用いられる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_0 &= 0.0 \\ \sigma_0 &= 20.76 \ln(\dot{\epsilon}) + 248.8 \\ \epsilon_1 &= -0.01 \ln(\dot{\epsilon}) - 0.14 \ln(L_0) + 0.495 \\ \sigma_1 &= 11 \ln(\dot{\epsilon}) - 50 \ln(L_0) + 464 \\ \epsilon_2 &= -0.03 \ln(\dot{\epsilon}) - 0.18 \ln(L_0) + 0.751 \\ \sigma_2 &= 2.5 \ln(\dot{\epsilon}) - 63 \ln(L_0) + 527 \\ \epsilon_3 &= -0.02 \ln(\dot{\epsilon}) - 0.216 \ln(L_0) + 1.033 \\ \sigma_3 &= \sigma_2 \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

[有効範囲]
 $0.05 \leq \dot{\epsilon} \leq 15 \text{ (sec}^{-1}\text{)}$
 $2.0 \leq L_0 \leq 20 \text{ (mm)}$

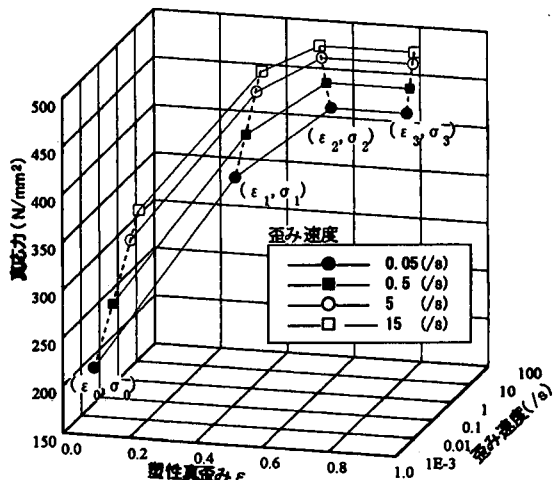


図-9 モデル化の概念図

4. 歪み速度効果を加味した3次元有限要素解析

(1) 高速引張破断挙動解析

ここで提案した歪み速度依存型の応力－歪み関係式(1)と表-1に示す解析条件を用いて高速引張破断挙動のシミュレーション解析を行った。解析時間は、歪み速度 1 s^{-1} で約20時間であった。図-10, 11に、それぞれ荷重－変位関係、変形形状に関する解析結果と実験結果との比較図を示す。破断近傍での応力低下傾向に若干の差が見られる（これは、 $\epsilon_2 - \epsilon_3$ 間の応力変化に敢えて負勾配を与えなかったためである）が、弾性域から破断に至るまで解析結果と実験結果は良く合っている。

表-1
解析条件

使用プログラム	LS-DYNA
作成モデル	1/4 モデル(184 要素)
質量密度	$8.01 \times 10^{-10} \text{ (kgfsec}^2\text{/mm}^4\text{)}$
弾性係数	$4.845 \times 10^3 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$
ポアソン比	0.3
時間刻み	約 $8.0 \times 10^{-8} \text{ 秒}$

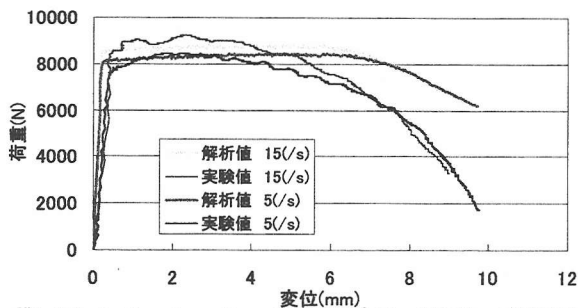


図-10 シミュレーション解析結果 (荷重-変位関係)

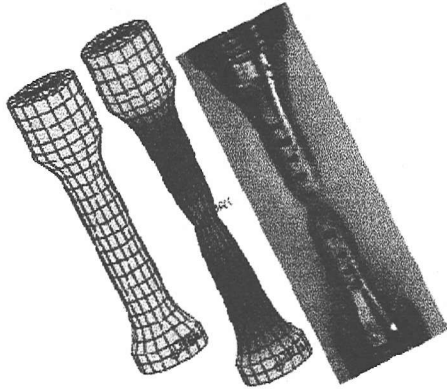


図-11 荷重前および破断直後の解析結果と実験による破断後の試験片の変形状比較

(2) せん断パネルの交番荷重解析

文献 3) で用いられた、せん断型の極低降伏点のリブ付きパネルダンパーの概略図を図-12 に示す。実験は正弦波加振で行われ、最大せん断変形角 $\gamma_{\max}$ の範囲は $1/500 \sim 1/25 \text{ rad}$ 、平均せん断歪み速度 $\dot{\gamma}_{\text{ave}}$ の範囲は $0.02 \sim 0.32 (/ \text{sec})$ であった。ここで、 $\gamma_{\max}$ は図-13 に示す通りであり、 $\dot{\gamma}_{\text{ave}}$ は平均速度 $4D/T$ を高さ h で除したものとし、 $\dot{\gamma}_{\text{ave}} = 4D/Th$ と定義する。

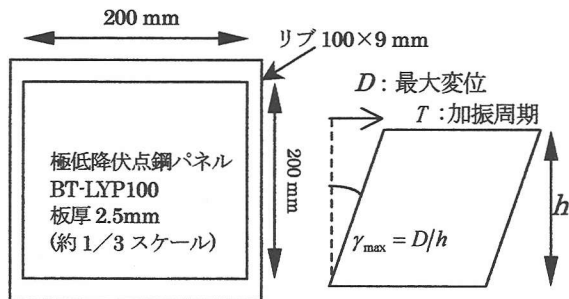


図-12 文献 3) で用いられたリブ付パネルダンパー

図-13 最大せん断変形角 $\gamma_{\max}$

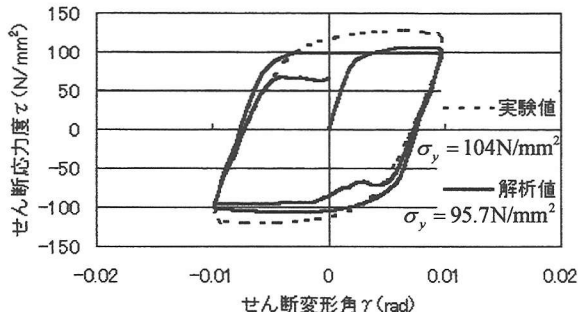


図-14 $\tau - \gamma$ 関係曲線 ($D: 2 \text{ mm}$, $T: 1 \text{ sec}$)

これらの条件を基に、汎用ソフトである LS-DYNA を用いた動的シミュレーション解析を行った。

解析には、高速引張破断試験から得られた歪み速度効果を考慮した真応力-真歪み関係を用いた。パネルは $20 \times 20 \text{ mm}$ のシェル要素、リブは $20 \times 25 \times 9 \text{ mm}$ のソリッド要素でモデル化した。尚、解析は 2 周期間行うことにした。

図-14 に、せん断応力度 τ - せん断変形角 γ 関係について実験結果と解析結果を比較した図を示す。解析結果の 2 周期目はパネルの塑性化の進行により、せん断変形角が零付近で面外座屈の発生位置が入れ替わる事による応力の低下が見られた。これは文献 2)、3) でも観察されており、载荷速度が増すにつれて目立たなくなるようである。実験³⁾と解析の引張降伏応力 σ_y の違い (図-14 中に記す。実験の方が 8.7% 大きい。) を考慮すると、両者は非常に良く似ている。降伏せん断応力度 ($\tau_0 = \sigma_0 / \sqrt{3}$) を基準として、最大せん断応力度に関する動的応答倍率 ($\tau_{\max} / \tau_0$) についても求めてみたが、値、傾向ともによく合致していた。

5. おわりに

極低降伏点鋼の高速引張破断試験から数値シミュレーション解析を行うための歪み速度依存型材料特性のモデル化を試み、提案式(1)を得た。有限要素解析の結果、弾性域から塑性域を経て破断に至るまでの挙動を良好に再現できることが分かり、モデル化の妥当性について確認することができた。今後は、ここで提案した数値モデルを用いて種々の鋼製減衰装置に関する検討・開発を行いたいと考えている。

【謝辞】

本研究における極低降伏点鋼の高速引張試験は、(社) 鋼橋技術研究会・耐震設計研究部会の活動の一環として行われたものである。本研究を遂行するにあたり、熱心な討議をしていただいた部会員各位に感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 和泉章他共著；建築物の損傷制御設計 (丸善)。
- 2) 例えば、田中・佐々木：極低降伏点鋼を用いた制震パネルダンパーの静的履歴減衰性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第509号、1998。
- 3) 佐藤・和泉他：低降伏点鋼せん断パネルの動的加力実験、建築学会大会概要集、1999。