

極低降伏点鋼の歪み速度効果に関する一考察

(株)日本構造橋梁研究所 正 飛鳥馬隆志
 東京都立大学大学院工学研究科 学 阿部 義
 東京都立大学大学院工学研究科 正 長嶋 文雄

1. はじめに

構造物の耐震安全性を高める目的で、鋼製の高減衰装置を用いる場合がある。形式としてはパネル型、トラス型、テーパビーム型、マリオン型、リンク型など種々考案されているが¹⁾、これら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が必要である。例えば、コンピュータによる3次元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、静的載荷試験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。

2. 静的および高速載荷試験

極低降伏点鋼 (BT-LYP100) の歪み速度効果を明らかにするため、静的載荷試験と高速載荷試験を行った。

静的載荷試験は5本の鋼棒 ($\phi 10.4, L=400\text{mm}$) について行った。高速載荷試験は図1, 2に示す試験機を使用した。

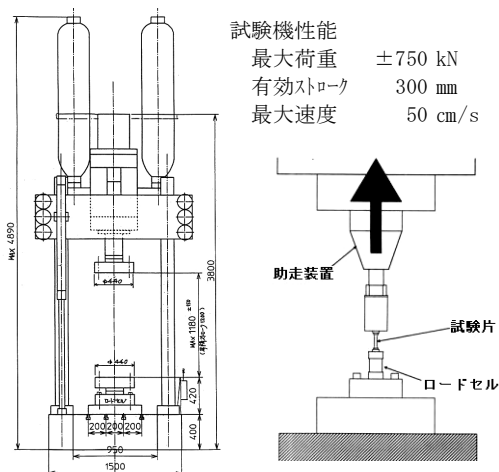


図1 高速載荷試験機

図2 試験片設置図

載荷速度は、図3に示すように助走区間を設けて載荷時に等速となるように設定されている。歪み速度は $15, 7.5, 5, 2.5, 1, 0.5, 0.25, 0.05 \text{ sec}^{-1}$ の8ケースとした。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20mmで除したものである。試験は、各歪み速度ごとに2回行った (試験片総本数16本)。図4に試験片形状と寸法を示す。

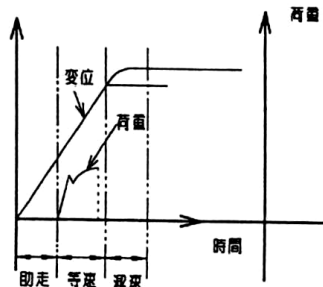


図3 載荷方法

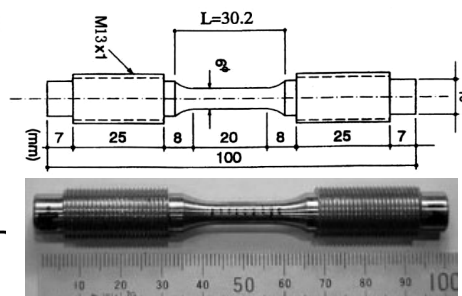


図4 高速載荷試験用試験片

3. 試験結果

1) 静的載荷試験結果

図5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 となった。破断歪みは標点間距離を20mm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程度であった。

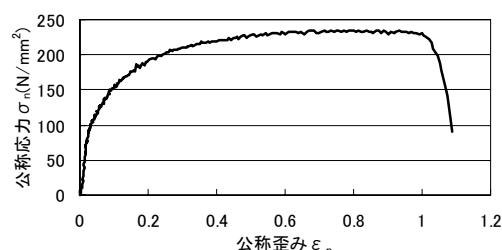


図5 静的載荷試験 応力-歪み曲線

2) 高速載荷試験結果

図6に代表的な4種類の歪み速度 ($0.05, 0.5, 5, 15 \text{ sec}^{-1}$) 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6には片方のみの結果を示した。破断歪みは最低速の 0.05 sec^{-1} のときやや大きく、他は歪み速度による大きな変化は見られなかった。弾性係数は静的載荷試験のものとはほぼ等しく、歪み速度による変化は殆ど見られなかった。

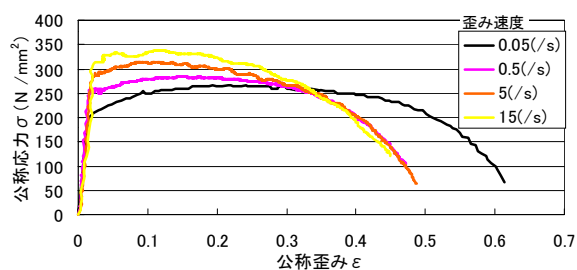


図6 高速載荷試験 応力-歪み曲線

図7は、歪み速度の変化による降伏応力、引張強度の変化

キーワード：極低降伏点鋼、歪み速度効果、損傷制御設計
 連絡先：〒107-0062 港区南青山5-12-4

(株)日本構造橋梁研究所 TEL:03-3400-9101 FAX:03-3400-7861

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ほぼ線形関係にあるとみなすことができる。図8に、歪み速度 1sec^{-1} 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不変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ることで、精度の高いシミュレーション解析が可能となる。

4. 標点間距離に応じた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、回帰分析を行うことによって式(1)および図9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 $\dot{\varepsilon}$ と標点間距離 L_0 の関数となっている。有限要素解析には、図10に示すように、最大および最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*—塑性真歪み関係が補間によって計算され用いられている。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_0 &= 0.0 \\ \sigma_0 &= 20.76 \ln(\dot{\varepsilon}) + 248.8 \\ \varepsilon_1 &= -0.01 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.14 \ln(L_0) + 0.495 \\ \sigma_1 &= 11 \ln(\dot{\varepsilon}) - 50 \ln(L_0) + 464 \\ \varepsilon_2 &= -0.03 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.18 \ln(L_0) + 0.751 \\ \sigma_2 &= 2.5 \ln(\dot{\varepsilon}) - 63 \ln(L_0) + 527 \\ \varepsilon_3 &= -0.02 \ln(\dot{\varepsilon}) - 0.216 \ln(L_0) + 1.033 \\ \sigma_3 &= \sigma_2 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &(0.05 \leq \dot{\varepsilon} \leq 15 \text{ (sec}^{-1}\text{)}) \\ &(2.0 \leq L_0 \leq 20 \text{ (mm)}) \end{aligned} \quad \dots \text{式(1)}$$

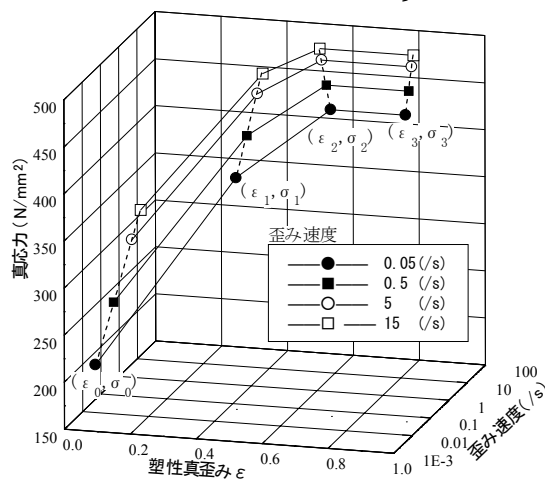


図10 モデル化の概念図

[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： $8.01 \times 10^{-10} (\text{kgf sec}^2/\text{mm}^4)$
 弾性係数： $4.845 \times 10^3 (\text{kgf/mm}^2)$
 ポアソン比：0.3
 刻み時間：約 8.0×10^{-8} 秒
 解析時間：歪み速度 $1(\text{sec}^{-1})$ のとき約 20 時間

5. まとめ

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、歪み速度依存型材料特性のモデル化を試みた。その結果、図11,12に示すように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、モデル化の妥当性が確認できた。今後は、実験と平行して当モデルを用いたシミュレーション解析を行い、種々の鋼製減衰装置の開発をしたいと考えている。

[参考文献] 1) 和田章 他共著；建築物の損傷制御設計（丸善）

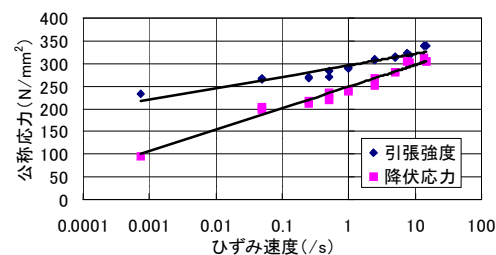


図7 歪み速度と降伏応力・引張強度の関係

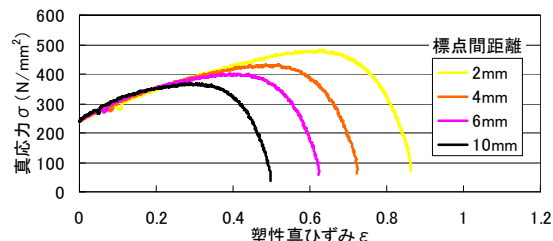


図8 真応力—塑性真歪みの関係(歪み速度 1sec^{-1})

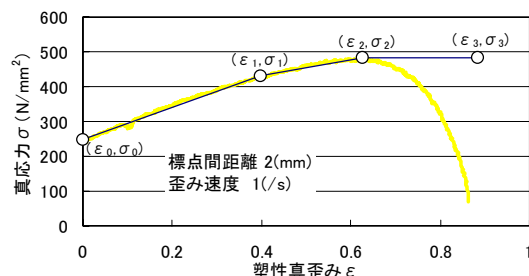


図9 真応力・塑性真歪みのモデル化

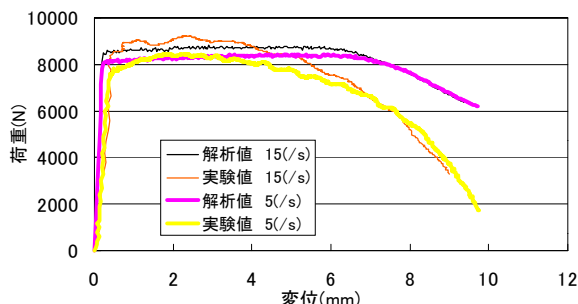


図11 シミュレーション解析結果(荷重—変位関係)



図12 載荷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形状比較