

大阪大学大学院工学研究科 学生会員 ○橋本 祥太
 大阪大学工学部 学生会員 石川 達也
 大阪市立工業研究所 非会員 山田 信司

大阪大学大学院工学研究科 正会員 小野 潔
 大阪大学大学院工学研究科 学生会員 北市 さゆり
 株式会社 IHI インフラシステム 正会員 岡田 誠司

1. 目的

土木構造物の弾塑性履歴挙動を有限要素法などの数値解析で正確に再現するためには、鋼材の塑性履歴特性を精度よく再現できる構成則が必要となる。構成則を開発するには鋼材の繰り返し材料試験を行い、塑性履歴特性を明らかにする必要がある。

そこで本稿では強度および降伏比の異なる SM400(引張強度 400N/mm² 級), SM570(引張強度 570N/mm² 級)および SBHS700(引張強度 780N/mm² 級)の繰り返し材料試験を行い、繰り返し塑性履歴特性の把握を行った。また試験結果から既往の構成式に含まれる値を決定し、各種鋼材の塑性履歴特性および構成則の比較を行った。

2. 各種鋼材の引張試験結果

各種鋼材の単調引張時の応力-ひずみ関係を把握するため、引張試験を行った。図-1 に引張試験結果から得られた応力-ひずみ関係を示す。また図-2 に引張試験結果から得られた各鋼材の降伏応力 σ_y , 引張強さ σ_u , 降伏比 YR を示す。図-2 から強度が低い鋼材ほど、降伏比が小さくなる特性が見られる。

3. 各種鋼材の塑性履歴特性

各種鋼材の繰り返し塑性履歴特性の特性を把握するため、正負のひずみを漸増する両振り試験を行った。図-3 に実験より得られた真応力を降伏応力で無次元化した値と塑性ひずみの関係($\sigma/\sigma_y - \epsilon^p$ 関係)を示す。図-3 より SM400 の履歴ループは繰り返し回数に応じて増大する特性を有している。これに対し、SM570 および SBHS700 は、繰り返し回数による応力の増加の割合は少なく、1 つ前の履歴ループの延長上を通るという特性がみられる。特に SBHS700 においては繰り返し回数による応力の増加はほとんど見られなかった。

4. 構成式の概要

構成式の概要^{1),2)}を以下に示す。図-4(b)の点 0~8 は図-4(a)の点 0~8 に対応している(点 4, 7 を除く)。図-4(b)において、一軸状態における塑性履歴曲線の真応力-塑性ひずみの関係を 0-1 の初期弾性域、式(1)で表現される 1-3, 5-6, 8 以降の単調載荷荷曲線に準ずる領域、式(2)で表現される 3-4, 6-7 の弾性域、式(3), 式(4), 式(5)で表現される 4-5, 7-8 の非線形遷移領域に分けて表現している。次項に各領域における構成式と定数を表現する式を示す。

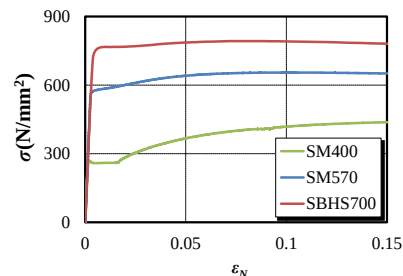


図 - 1 各鋼材の応力ひずみ関係

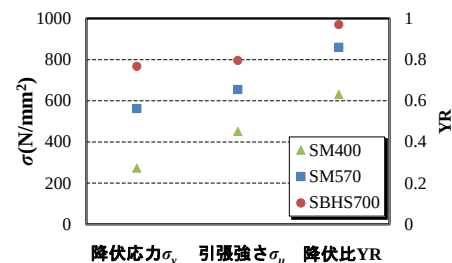


図 - 2 各鋼材の塑性履歴特性

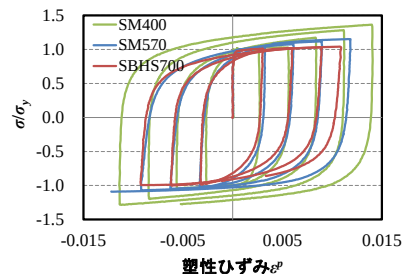


図 - 3 各鋼材の塑性履歴特性

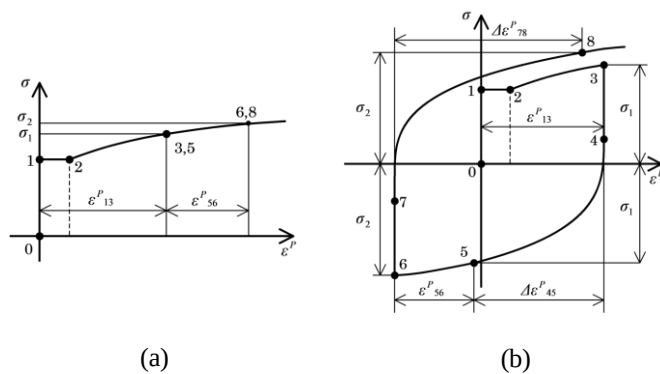


図 - 4 構成式の概要

$$\frac{\kappa}{\kappa_0} = \frac{1-c}{(\varepsilon_{mon}^P + 1)^n} + c \quad (1) \quad , \quad \sigma = \frac{E_{st}^P}{b} e^{a\varepsilon_{mon}^{P*}} \ln(1+b\varepsilon_{mon}^{P*}) + \sigma_y \quad (a \geq 0) \quad (2)$$

$$E^P = \frac{dy}{dx} = E^P_0 + (1+m)^2 \left(E^P_0 - \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon^P} \right) \left(\frac{x}{\Delta\varepsilon^P} \right)^m \ln \left(\frac{x}{\Delta\varepsilon^P} \right) \quad (3) \quad , \quad \Delta\varepsilon^P = \frac{e}{d} \sqrt{(\varepsilon_{mon}^P)^2 + 2d\varepsilon_{mon}^P} \quad (4)$$

$$m = \frac{f}{\varepsilon_{mon}^{P*} \{1 + \exp(g)\}} - 1 \quad (5)$$

ここで、 E_{st}^P ：ひずみ硬化勾配、 $\Delta\varepsilon^P$ ：遷移領域の塑性ひずみの大きさ、 κ ：弾性域の大きさ、 κ_0 ：初期の弾性域の大きさ(=2 σ_y)、 ε_{mon}^{P*} ：ひずみ硬化開始点を原点とした単調載荷曲線上の塑性ひずみ、 a, b, c, n, d, e, f, g ：鋼材ごとに決まる定数

5. 鋼材の構成則

構成式に含まれる定数決定のため、単調載荷実験(図-5)、弾性域の大きさの減少を調べる実験(図-6)、両振り実験(図-7)の3種類の実験を行った。繰り返し載荷実験については大阪市立工業研究所のデジタル油圧サーボ式材料試験機(インストロン8801型)で行った。図-8、図-9、図-10にSM400、SM570およびSBHS700それぞれの鋼種の単調載荷曲線を表す構成式(式(1))、弾性域の大きさの減少に関する構成式(式(2))、非線形遷移領域を表す構成式(式(4))を示す。図-8から降伏比が小さい鋼材ほど、ひずみ硬化による応力の増分が大きい傾向がみられた。また図-9および図-10から強度の小さい鋼材ほど、弾性域の大きさ κ にあまり減少がみられず、同一ひずみでの非線形遷移領域の塑性ひずみの大きさ $\Delta\varepsilon^P$ が小さい傾向がみられた。このことから降伏比が小さい鋼材ほど荷重を反転させた際に、ひずみの変化がより小さい段階で単調載荷曲線に準ずる領域に移行することが判断できる。これはひずみ硬化の影響から、繰り返し載荷時に繰り返し回数に応じて応力が増大しやすいという傾向を示している。これらの傾向は引張試験より得られた鋼材の降伏比や繰り返し材料試験より得られた塑性履歴特性を適正に表現できている。

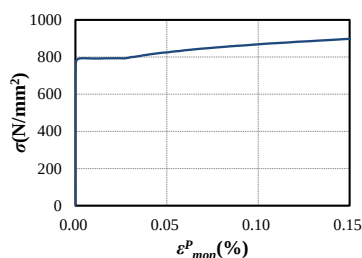


図-5 単調載荷実験

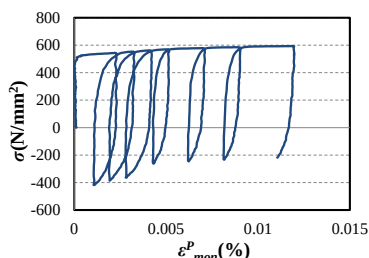


図-6 弾性域の大きさの減少を調べる実験

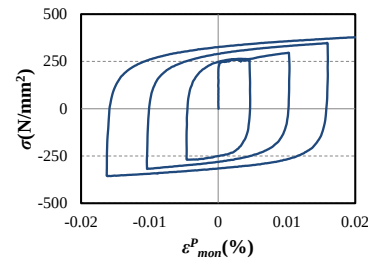


図-7 両振り実験

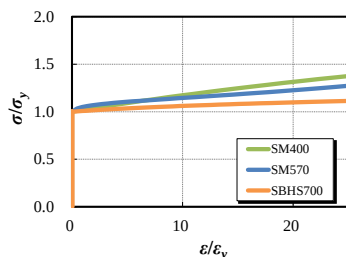


図-8 単調載荷曲線

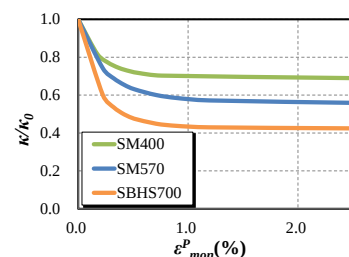


図-9 弾性域の大きさ κ の減少

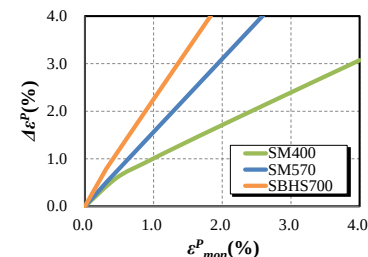


図-10 $\varepsilon_{mon}^P - \Delta\varepsilon^P$ 関係

6. まとめ

本稿では、SM400、SM570、SBHS700の引張試験および繰り返し材料試験を行い、塑性履歴特性を明らかにするとともに、構成則の決定を行った。引張試験および繰り返し材料試験の結果から強度が低い鋼材の繰り返し回数に応じて応力が増大しやすいという傾向は降伏比に影響していることが分かった。また決定した構成則は、引張試験より得られた鋼材の降伏比や繰り返し材料試験より得られた塑性履歴特性を適正に表現できていることが分かった。

7. 謝辞

本稿は、基盤研究(C) (課題番号：25420483)により実施したものです。ここに記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 西村宣男, 小野潔, 池内智行: 単調載荷曲線を基にした繰り返し塑性履歴を受ける鋼材の構成式, 土木学会論文集, No513/I-31, pp.27-38, 1995.
- 2) 橋本祥太, 小野潔, 北市さゆり, 岡田誠司: 繰り返し塑性履歴を受ける SBHS の構成則に関する実験的研究, 第 16 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.385-390, 2013.