

高性能鋼を用いた圧縮板の劣化域における ダクティリティーと鋼材の機械的性質について

三上 市藏¹・丹羽 量久²・宮西 淳³

¹フェロー 工学博士 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²正会員 博士(工学) 日本電子計算株式会社 大阪支店技術営業部 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島2-12-11)

³学生会員 関西大学 大学院工学研究科 博士課程前期課程 土木工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

One of methods to secure ultimate strength and ductility of steel structures is practical use of high performance steel. In this paper, the improvement of ductility of steel plates subjected to uniaxial compression by practical use of high performance steel is discussed. The elasto-plastic finite displacement analysis of the steel plates was carried out by using FEM. The influences of yield ratio, yield plateau length, and strain-hardening modulus of materials on the ductility of compressive steel plates are theoretically examined, and the ductility o stage over ultimate strength can be obtained by the control of yield plateau length or strain-hardening modulus of steel.

Key Words :high performance steel, material properties, ductility, uniaxial compression, steel plate

1. まえがき

地震時の鋼製橋脚に変形性能を持たせるため、コンクリート充填¹⁾、断面形状²⁾、補剛形式³⁾など様々な検討が行われている。一方、橋脚の耐震設計については、3種類の地震の大きさに対して構造物を4種類に区分し、限界状態と許容する被害の程度を考慮⁴⁾する3段階耐震設計法が検討されるようになった。

巨大地震によっても、構造物は機能を失っても崩壊してはならないことから、終局強度までの変形性能だけでは不十分であり、劣化域におけるダクティリティーが重要である。宇佐美ら⁵⁾はハイダクティリティー鋼製橋脚として、鋼板要素の幅厚比に制限を設けることで局部座屈の進展を遅らせ、補剛断面の場合には補剛材が座屈しないように強度を持たせることを提案している。また、三上ら⁶⁾は、鋼円筒パネルについて、動的緩和法を用いて弾塑性有限変位解析を劣化域まで行い、ダクティリティーを考慮した限界幅厚比を検討している。これらの研究では部材構成板要素に幅厚比制限を設けて、ダク

ティリティーを持たすようにしている。

近年の製鉄技術の進歩には目覚ましいものがあり、鋼材の機械的性質をある程度制御することが可能な高性能鋼が誕生した。高性能鋼の有効な利用方法の検討の中で変形吸収能力の確保の要求に対して、低降伏比化や、加工硬化性能および一様伸びの増大などの提案^{7)~9)}がされている。しかし、鋼部材の構成板要素としての所要の変形性能を規定し、それを確保できるような機械的性質を明らかにするまでには至っていない。

本研究では、圧縮を受ける鋼板要素について、単調増加荷重のもとで有限要素解析を行い、劣化限界状態におけるダクティリティーを確保するために必要な鋼材の機械的性質を明らかにする。

2. 圧縮鋼板の弾塑性有限変位解析

(1) 解析モデル

解析モデルは一方向圧縮を受ける4辺単純支持の鋼板で、最大荷重以降の劣化域における挙動に注

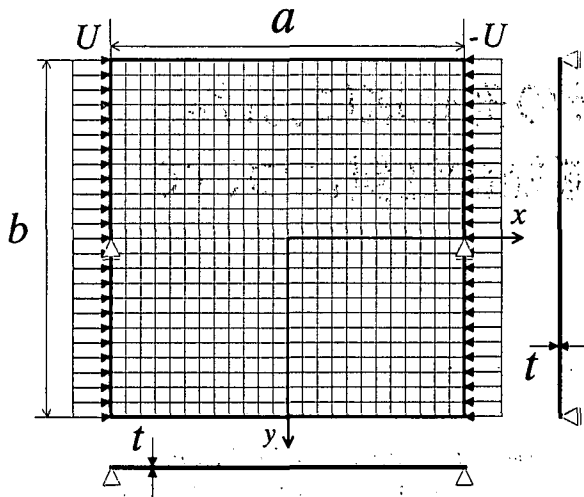


図-1 解析モデル

目する。変形は2軸対称であるとは限らないので、図-1に示すように、全体モデルを扱う。

板は長さ a 、幅 b 、厚さ t とする。座標軸として原点を中央に取り、荷重方向に x 軸、荷重直角方向に y 軸、板厚方向に z 軸をとる。 x 、 y 、 z 軸方向の変位成分を u 、 v 、 w とし、 x 、 y 方向の面内応力成分を N_x 、 N_y とする。

解析には汎用構造解析プログラム MARC-verK7 を使用し、要素番号 75 の厚肉シェル要素を用いた。要素分割については、種々の解析を行って解の精度を調べ、 x 、 y 方向にそれぞれ 24 分割、 z 軸方向に 12 分割とした。

境界条件は面外変形に関しては、周辺単純支持とする。面内変形に関しては、 $y = \pm b/2$ の辺上 ($x = \pm a/2$ の点を除く) で $N_x = N_y = 0$ とし、圧縮荷重は強制変位 U で与えることにし、 $x = -a/2$ の辺上で $u = U$ 、 $N_y = 0$ 、 $x = a/2$ の辺上で $u = -U$ 、 $N_y = 0$ とし、変位増分法で解析を行う。計算誤差に基づく板全体の移動を防ぐために、 $x = \pm a/2$ 、 $y = 0$ の節点で $v = 0$ とした。

本研究では次の幅厚比パラメータ R を用いる。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E} \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (1)$$

ここに、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 σ_Y は降伏応力、 k は座屈係数で、 $k = 4$ とした。本研究では、地震時に変形性能が発揮できるような鋼板を対象としているので、 $R = 0.3 \sim 0.5$ を解析対象とし、 $\alpha = a/b = 1.0$ 、 $t = 10\text{mm}$ とした。

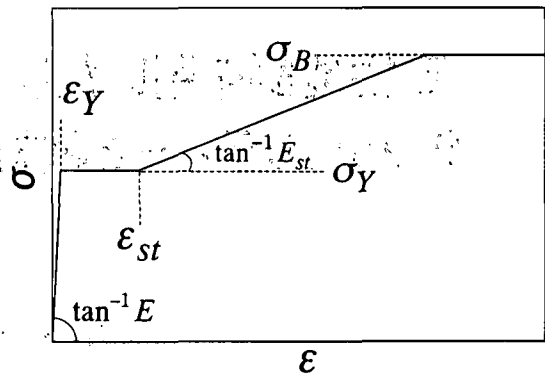


図-2 解析に用いた応力-ひずみ関係

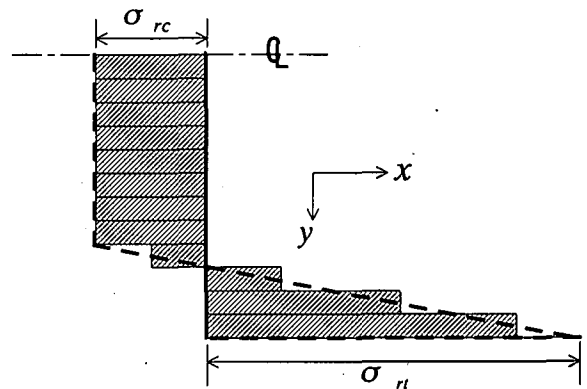


図-3 残留応力分布

(2) 鋼材の応力-ひずみ曲線

鋼材の応力-ひずみ曲線は図-2のもの考える。ここに E_{st} はひずみ硬化勾配、 ϵ_Y は降伏ひずみ、 ϵ_{st} はひずみ硬化開始ひずみ、 σ_B は引張強度である。普通鋼を想定して、 $E = 205800\text{N/mm}^2$ 、 $\nu = 0.3$ 、 $\sigma_B = 600\text{N/mm}^2$ 、降伏比 $YR = \sigma_Y / \sigma_B = 0.6$ とし、降伏棚の長さ $\epsilon_{st} / \epsilon_Y = 10$ 、ひずみ硬化勾配 $E_{st} / E = 0.1$ を基本鋼材とし、 ϵ_{st} と σ_{st} を変化させた。

(3) 初期たわみ

初期たわみ w_0 は1半波とし、次の式で与えた。

$$w_0 = w_{0,\max} \cos \frac{\pi}{a} x \cos \frac{\pi}{b} y \quad (2)$$

ここに、 $w_{0,\max}$ は最大初期たわみで、道路橋示方書の許容製作誤差 $w_{0,\max} = b/150$ を用いる。

(4) 残留応力

残留応力としては荷重方向のもののみを考え、図-3の波線で示すように自己平衡状態が成立する分布とした。ただし、板厚方向には一様分布とし

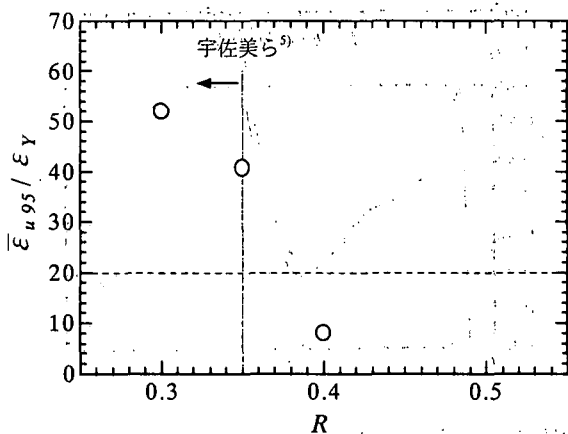


図-4 幅厚比とダクティリティーの関係

た. 解析には $\sigma_{rc} = 0.2\sigma_Y$, $\sigma_{rt} = 240\text{N/mm}^2$ とし, 平衡状態を乱さないように要素ごとに一様分布の階段状にした. この残留応力は解析の初めの段階で, 初期応力として与えた.

3. 圧縮板の劣化域におけるダクティリティーと鋼材の機械的性質の関係

(1) 劣化域におけるダクティリティー指標について

巨大地震を想定し, 劣化域の挙動を考慮してダクティリティーを検討するには, ダクティリティーを評価する指標を定義しなければならない. 解析結果は, 板の中央断面での x 方向の平均応力 $\bar{\sigma}$ と平均ひずみ $\bar{\epsilon}$ ($=2U/a$) を用いて整理することにする. 終局強度以降, 劣化域に入って強度が低下する場合, 平均応力が終局強度 $\bar{\sigma}_u$ の 95% まで低下した時点を考える. その時のひずみを限界ひずみ $\bar{\epsilon}_{u95}$ とする.

劣化域のダクティリティーを表す指標として $\bar{\epsilon}_{u95}/\epsilon_Y$ を用いることにして, ダクティリティーは, $\bar{\epsilon}_{u95}/\epsilon_Y > 20$ となる場合に確保される⁷⁾ と考える.

(2) 幅厚比とダクティリティーの関係

これまでの研究は, 崩壊を防ぐための鋼部材構成板要素としての変形性能を幅厚比の制限を行うことで確保している. 宇佐美ら⁷⁾ は, $\bar{\epsilon}_{u95}/\epsilon_Y \geq 20$ を確保するための幅厚比を $R \leq 0.35$ と導いている. 図-4 に普通鋼を想定した, 基本鋼材 ($YR=0.6$, $\epsilon_{st}/\epsilon_Y = 10$, $E_{st}/E = 0.1$) を用いた鋼板の解析結果から得られた R と $\bar{\epsilon}_{u95}/\epsilon_Y$ の関係

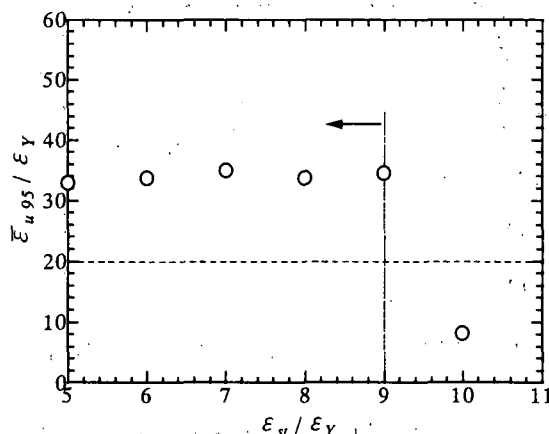


図-5 降伏棚の長さとのダクティリティーの関係

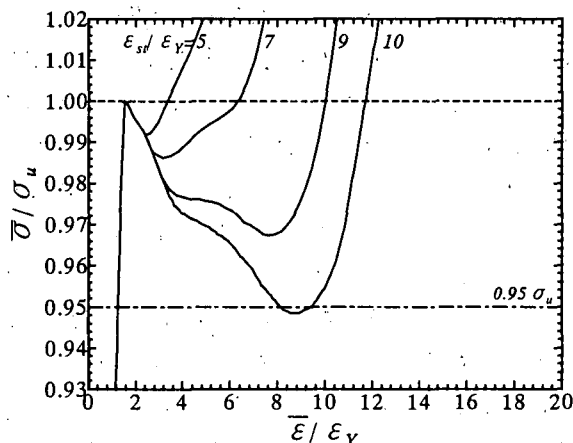


図-6 降伏棚の長さとの劣化域挙動の関係

を示す. $R=0.4$ の場合, $\bar{\epsilon}_{u95}/\epsilon_Y = 8.14$ となり, ダクティリティーを確保できないが, $R \leq 3.5$ だと確保できる⁷⁾ ことがわかる.

(3) 降伏棚の長さとのダクティリティーの関係

ここでは基本鋼材の $R=0.4$ の板において, 高性能鋼を用いることで, ダクティリティーを確保する方策を検討するために, ひずみ降下勾配 ($E_{st}/E = 0.1$) はそのまま, 降伏棚を短くすることを考える. 図-5 に ϵ_{st}/ϵ_Y と $\bar{\epsilon}_{u95}/\epsilon_Y$ の関係を示す. この図から降伏棚の長さを短くする ($\epsilon_{st}/\epsilon_Y \leq 9$) ことによって, $\bar{\epsilon}_{u95}/\epsilon_Y \geq 20$ となり, ダクティリティーを確保できることがわかる. 図-6 に平均応力 $\bar{\sigma}/\sigma_u$ と平均ひずみ $\bar{\epsilon}/\epsilon_Y$ の関係を示す. $\epsilon_{st}/\epsilon_Y = 10$ のとき, $\bar{\epsilon}_{u95}/\epsilon_Y = 8.14$ であるが, 降伏棚の長さを短くすると, 劣化域での平均応力が $0.95\bar{\sigma}_u$ を越え, その結果 $\epsilon_{st}/\epsilon_Y > 20$ となりダクティリティーが確保できることがわかる. すなわち $YR=0.6$, $E_{st}/E = 0.1$ の場合, $R=0.4$ の板でも $\epsilon_{st}/\epsilon_Y \leq 9$ にすれば, ダクティリティーが確保できる.

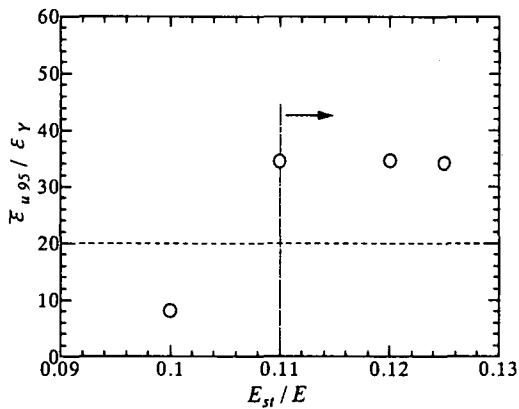


図-7 ひずみ降下勾配とダクティリティーの関係

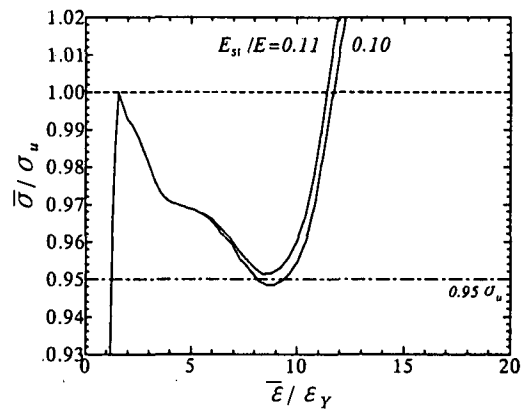


図-8 ひずみ硬化勾配と劣化域挙動の関係

(4) ひずみ硬化勾配とダクティリティーの関係

ここでは基本鋼材の $R=0.4$ の板において、降伏棚の長さ ($\varepsilon_{st}/\varepsilon_Y=10$) はそのまま、ひずみ降下勾配を上げること考える。図-7 に E_{st}/E と $\varepsilon_{u95}/\varepsilon_Y$ の関係を示す。この図からひずみ硬化勾配を上げる ($E_{st}/E \geq 0.11$) ことによって、 $\varepsilon_{u95}/\varepsilon_Y > 20$ となり、ダクティリティーを確保できることがわかる。図-8 に平均応力 $\bar{\sigma}/\sigma_u$ と平均ひずみ $\bar{\varepsilon}/\varepsilon_Y$ の関係を示す。 $E_{st}/E=0.1$ のとき、 $\varepsilon_{u95}/\varepsilon_Y=8.14$ であるが、ひずみ降下勾配を上げると降伏棚を短くする場合と同様に、劣化域での平均応力が $0.95\sigma_u$ を越え、その結果、 $\varepsilon_{st}/\varepsilon_Y > 20$ となりダクティリティーが確保できる。すなわち、 $YR=0.6$ 、 $\varepsilon_{st}/\varepsilon_Y=10$ の場合、 $R=0.4$ の板でも $E_{st}/E \geq 0.11$ にすれば、ダクティリティーが確保できる。

4. あとがき

本研究では汎用構造解析ソフトを用いて鋼材の機械的性質を変化させた圧縮平板の弾塑性有限変位解析を行い、その劣化域挙動を明らかにした。

圧縮を受ける鋼板要素について、劣化域におけるダクティリティーを確保するために必要な鋼材の機械的性質として降伏棚の長さ、ひずみ勾配のあり方を検討した。普通鋼を想定した $YR=0.6$ 、 $\varepsilon_{st}/\varepsilon_Y=10$ 、 $E_{st}/E=0.1$ の鋼板が $R=0.4$ の場合、ダクティリティーを確保するためには、降伏棚の長さを $\varepsilon_{st}/\varepsilon_Y \leq 9$ にするか、ひずみ硬化勾配を $E_{st}/E \geq 0.11$ にすればよい。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、(社) 鋼材倶楽部の

平成 11 年度土木鋼構造教育助成金を受けた。また、高性能鋼の利活用に関する研究を始めたのは東京工業大学の三木千寿教授からの示唆によるもので、高性能鋼に関する情報は新日鐵(株)から頂いた。ここに記して、深謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 宇佐美勉, 鈴木森晶, Iraj H.P. Mamaghani, 葛 漢彬: コンクリートを部分的に充填した鋼製橋脚の地震時保有水平耐力照査法の提案, 土木学会論文集, No. 513/I-31, pp. 69-82, 1995 年 10 月。
- 2) 渡邊英一, 杉浦邦征, 播本章一, 長谷川敏之: ダクティリティーに基づく鋼製橋脚の有効な断面形状に関する実験的研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 38A, pp. 133-142, 1992 年 3 月。
- 3) 北田俊行, 中井 博, 加賀山泰一, 松村政秀: 既設鋼製橋脚における補剛板の耐震補強に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 45A, 1999 年 3 月。
- 4) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造終局強度研究小委員会: 鋼構造物の終局強度と設計, 鋼構造シリーズ 6, 土木学会, 4.1 鋼構造物のダクティリティーを考慮した設計法, pp. 303-320, 1994 年 7 月。
- 5) 宇佐美勉: ハイダクティリティー鋼製橋脚, 橋梁と基礎, 1997 年 6 月。
- 6) 三上市蔵, 辻 省吾, 中野唯史, 竹原和夫: 円周方向内圧縮力を受ける鋼製円筒パネルのダクティリティーと幅厚比, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 39A, pp. 37-50, 1993 年 3 月。
- 7) 豊田政男, 小井 衛, 萩原行人, 瀬戸厚司: 骨組み溶接構造体の変形能からみた鋼材の降伏比・一様伸び特性のあり方, 溶接学会論文集, 第 8 巻, 第 1 号, pp. 119-125, 1990 年。
- 8) 加藤 勉: 建築用鋼材の降伏比について, 鉄と鋼, 第 74 巻, 第 3 号, pp. 951, 1988 年。
- 9) 森脇良一: 鋼材特性を考慮した圧縮板の極限強度と塑性変形能力について, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 39A, pp. 115-124, 1993 年 3 月。