

鋼 - コンクリート合成断面の正曲げ耐力に及ぼす鋼材特性の影響

Influence of steel properties on the positive flexural strength of steel-concrete composite sections

江頭克礎*, 中村聖三**, 高橋和雄***, 呉慶雄****

Katsuki EGASHIRA, Shozo NAKAMURA, Kazuo TAKAHASHI and QingXiong WU

*長崎大学大学院 生産科学研究科博士前期課程 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

**長崎大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

***長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

****長崎大学大学院 生産科学研究科博士後期課程 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

In this study, the influence of steel material properties on the flexural strength of steel-concrete composite sections under positive bending is investigated. Analyses with the fiber model are performed on 18 sections. The stress-strain model with yield plateau and strain-hardening region is used for the steel girder and its plastic properties such as size of yield plateau and yield ratio are changed in the analyses. Consequently, it is shown that the flexural strength of the section becomes large so that the yield plateau is small and yield ratio is small.

Key Words: steel material properties, flexural strength, composite structure, plastic design

キーワード: 鋼材特性, 曲げ耐力, 合成構造, 塑性設計

1. はじめに

我が国で道路橋を建設する場合, 周知のごとく道路橋示方書・同解説¹⁾ (以下, 道示) に基づき設計される. 現在の道示では, 大地震に対する耐震設計を除き, 設計法として鋼材の降伏点を基準とする許容応力度法が採用されているため, 道示により設計された橋梁は, 定められた条件下で弾性応答することが求められていることになる. したがって, 鋼橋の設計においては, 鋼材の弾性域のみが利用されていることとなり, 鋼材の特徴である塑性域での伸び性能やひずみ硬化といった性質は活用されていない. この場合, 鋼材特性のうち降伏点とヤング率のみが設計上必要なパラメータとなる. 一方, アメリカ²⁾ やヨーロッパ³⁾ 等諸外国の設計基準には部分安全係数設計法の書式を用いた限界状態設計法が採用されており, 圧縮域における座屈現象が生じないような断面においては, その曲げ抵抗として全塑性モーメントをとる場合もある. また, 例えば弾性解析で得られた連続桁の中間支点における負曲げモーメントを, 降伏後のモーメントの再配分を考慮し, 10%まで低減することを認める規定²⁾ もある. この場合, 弾性域のみならず, 塑性域における鋼材特性が重要となる.

近年わが国においては, 厳しい経済状況を反映して公共事業の見直しなどが進められているが, 橋梁に関

しても構造的な工夫や新材料の開発によるコスト縮減が試みられている. 鋼橋に関して言えば, 従来の橋梁用鋼材より優れた性能を有する鋼材, いわゆる高性能鋼材が開発されており, それらを積極的に活用しようという取り組みが行われている⁴⁾. 高性能鋼材の製造において核となる技術は TMCP (Thermo-Mechanical Control Process: 熱加工制御プロセス) である. TMCP の構造用鋼材への適用は, 大径パイプライン用厚鋼板から始まり, その後, 造船用鋼, 建築用鋼へと広まり, 近年になって橋梁用鋼へも本格的に適用されつつある. 現在ではこの技術を用いることにより, 鋼材の破壊じん性, 降伏比 (YR) などの機械的性質をある程度制御することが可能となっている.

以上のような背景を踏まえ, 近年, 鋼材の塑性域における応力-ひずみ関係を規定するパラメータと部材性能の関係について検討したいいくつかの研究が報告されている. 例えば, 平板あるいは補剛板を対象とした解析的な研究として, 森脇^{5), 6)}, 奈良⁷⁾, 河上⁸⁾ の研究が, 補剛板あるいは片持ち柱部材を対象とした実験的な研究として, 中村⁹⁾, 富永¹⁰⁾, 山尾^{11), 12)} の研究がある. これらは主に鋼製橋脚の耐震設計を念頭に置いた検討であり, 塑性域の応力-ひずみ関係の違いが, 極限強度, 変形能, 吸収エネルギーなどの耐震性能指標に及ぼす影響について検討している. 特定の構造物を対象にせず, 塑性設計が適用される I 形はり

について、全塑性モーメント時の最大ひずみに及ぼす材料特性の影響を解析的に検討した征矢の研究¹³⁾もある。しかし、本研究で対象とする橋梁上部構造について、その曲げ耐力と鋼材特性との関係を調査した研究は、国内には見当たらない。

本研究では、鋼橋上部構造への塑性設計法の適用を可能にするために必要な材料特性を明らかにすることを最終目的とし、基礎的な検討を行う。具体的には、AASHTO LRFD²⁾の規定の根拠となった文献¹⁴⁾を参考とし、正曲げを受ける鋼-コンクリート合成断面を対象に、断面の種類、鋼材の強度および塑性域の応力-ひずみ関係を変化させた解析を行うことによって、断面の正曲げ耐力に及ぼす鋼材特性の影響を明らかにする。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

解析は図-1に示したコンクリート床版と鋼桁の合成断面を対象とした。鋼桁は900mm×300mm×16mm×28mmのH形鋼を基準として、フランジ幅を16mm～3000mmの間で変化させることにより18種類の断面に対して解析を行った。そのため、対象とした断面は、必ずしも現実的な諸元にはなっていない。桁高を一定としフランジ幅のみをこのように変化させたのは、文献14)で合成断面の曲げ耐力は断面形状による影響をほとんど受けず、3.1に示す D_p/D^* の値のみに依存するという結果が得られており、所定の D_p/D^* を有する断面を設定するにあたり、必ずしも現実的な断面とする必要はないと考えたためである。

2.2 解析方法

ファイバーモデルを用いて図-2に示す流れで終局モーメント M_{res} を算定する。すなわち、まず床版上縁のひずみをコンクリートの破壊ひずみとし、中立軸の位置を仮定することによりひずみ分布を平面保持の法則に基づき決定する。次に、決定されたひずみ分布に対して材料の応力-ひずみ関係から応力分布を求める。そして式(1)から断面の力の総和を計算し、力の総和が0になるまで中立軸の位置を変化させ、繰り返し計算を行う。最後に力の総和が0の状態の応力分布から式(2)よりモーメントを計算し、これを終局モーメントとする。

$$F = \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i \quad (1)$$

$$M = \sum_{i=1}^n \sigma_i A_i y_i \quad (2)$$

ここに、 σ_i : ファイバー*i*における平均ひずみによる応

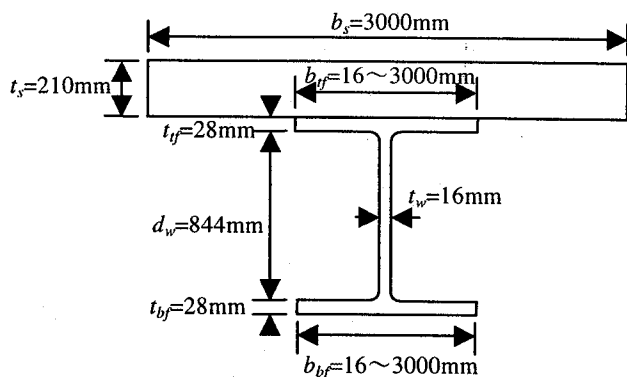


図-1 解析断面

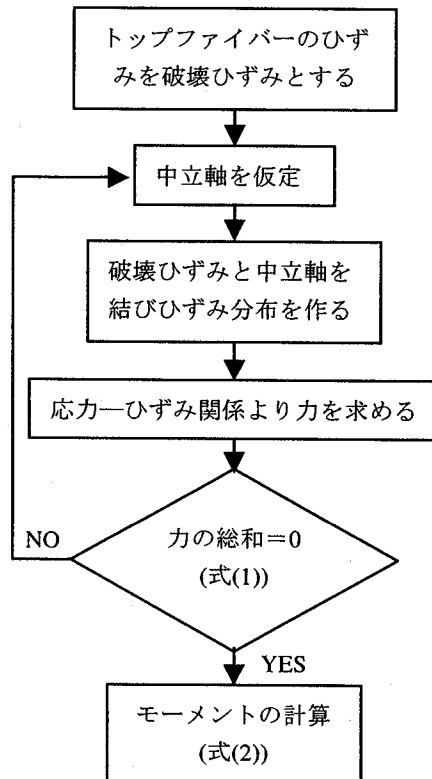


図-2 解析の流れ

力、 A_i : ファイバー*i*の面積、 y_i : 中立軸からファイバーの重心までの距離である。

2.3 材料特性

(1) コンクリートの特性

解析におけるコンクリートの応力-ひずみ関係には、コンクリート標準示方書¹⁵⁾で規定されている式(3)を用いた。その概略図を図-3に、また今回用いたコンクリートの解析条件を表-1に示す。

$$\sigma'_c = 0.85 f'_c \left(\frac{\epsilon'_c}{0.002} \right) \left(2 - \frac{\epsilon'_c}{0.002} \right), \quad \epsilon'_c \leq 0.002 \quad (3)$$

$$\sigma'_c = 0.85 f'_c, \quad 0.002 \leq \epsilon'_c \leq 0.0035 \quad (f'_{ck} \leq 50 \text{ kN/mm}^2)$$

$$\leq 0.0025 \quad (f'_{ck} \geq 60 \text{ kN/mm}^2)$$

表-1 コンクリートの解析条件

設計基準強度 f_{ck}	30N/mm ²
設計圧縮強度 f_c'	f_{ck}
終局ひずみ ϵ_{cu}	0.0035

(2) 鋼材特性

鋼材の応力-ひずみ関係には式(4)で表わされる土木学会鋼構造新技術小委員会で提案されたモデル¹⁶⁾を用いた。その概略図を図-4に示す。

$$\sigma_s = E\epsilon_s \quad \epsilon_s \leq \epsilon_y$$

$$\sigma_s = \sigma_y \quad \epsilon_y \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{st}$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \left[1 - \exp \left\{ -\xi \left(\frac{\epsilon_s}{\epsilon_y} - \frac{\epsilon_{st}}{\epsilon_y} \right) \right\} \right] + 1 \quad \epsilon_s \geq \epsilon_{st} \quad (4)$$

なお、ヤング率は200000N/mm²、ポアソン比は0.3とした。

3. 解析結果

3.1 コンクリートの応力-ひずみ関係の影響

(1) 検討内容

今回の解析では、コンクリート標準示方書に従い、応力が最大に達した後も、そのまま強度を保つモデルを用いることとした。しかし、文献14)では応力が最大に達した後劣化するモデル(Comitè Européen du Béton (CEB) Model)を用いており、より実現象に近い挙動が得られていると考えられる。そこでここでは、コンクリートの応力-ひずみ関係、特に強度劣化が、どの程度曲げ耐力に影響を及ぼすか検討する。CEB Modelは式(5)で表される¹⁷⁾。また両モデルの応力-ひずみ関係を比較して図-5に示す。

$$f_c = \frac{0.85f_c' (a - 206,600\epsilon_c)}{1 + b\epsilon_c} \quad (5)$$

ここに、 f_c と f_c' の単位はN/mm²である。

$$a = 39,000 \left(0.85f_c' + 7.0 \right)^{-0.953}$$

$$b = 65,500 \left(0.85f_c' + 10.0 \right)^{-1.085} - 850$$

(2) 検討結果

解析結果の一例を図-6に示す。図の縦軸は終局モーメント M_{test} と全塑性モーメント M_p の比であり、その値が1.0以上であれば、断面は M_p 以上の曲げ耐力を有することになる。横軸は床版上縁から塑性中立軸までの距離 D_p と文献14)に示されている ductility factor

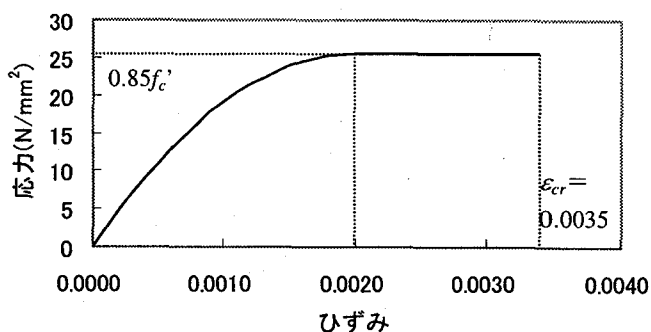


図-3 コンクリートの応力-ひずみ関係

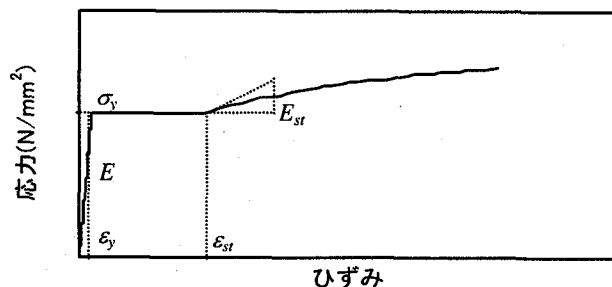


図-4 鋼材の応力-ひずみ関係

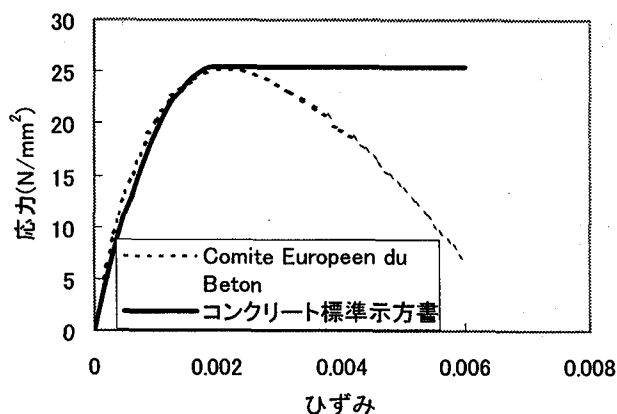


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係の比較

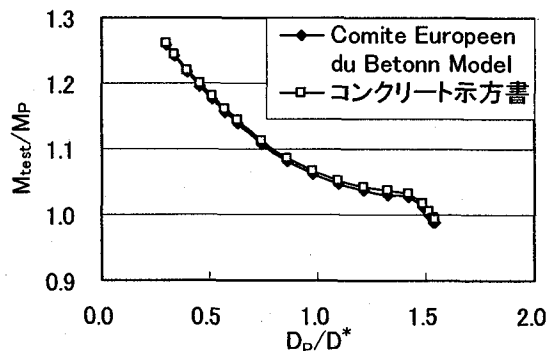


図-6 コンクリートの応力-ひずみ関係による曲げ耐力の変化

D^* (AASHTO LRFD では D で示されている) との比である。 D^* は合成断面が全塑性モーメントに到達できるか否かを判断するための指標となる値であり、鋼桁の高さ d 、床版厚 t_s を用いて $D^* = (d + t_s)/7.5$ と表わされる。これは、コンクリートの終局ひずみを0.3%、引張フラ

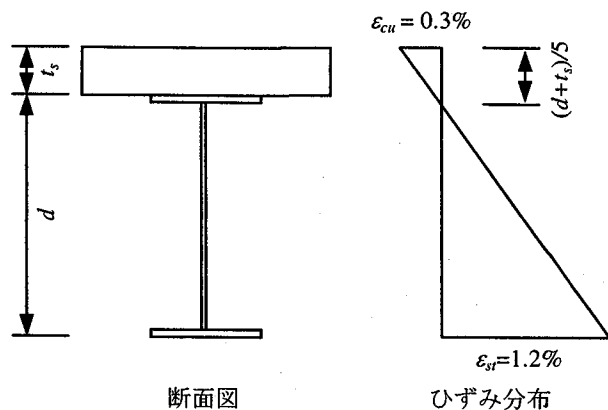


図-7 D^* の説明図 (ハンチ高 $t_h=0$ の場合)

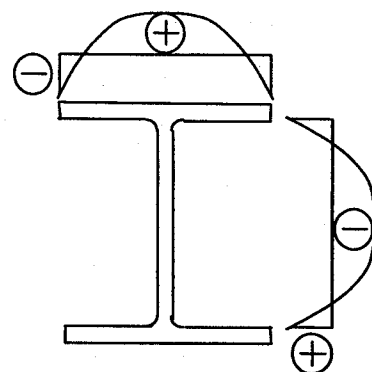


図-8 仮定した残留応力分布

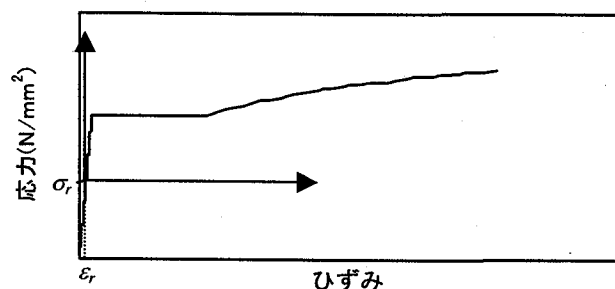


図-9 残留応力の考慮方法

ンジのひずみ硬化開始ひずみを 1.2%と仮定した場合に、図-7 に示すようなひずみ分布を基本に、床版上縁のひずみが終局に到達した時点でフランジ下縁が十分なひずみ硬化を生じるよう塑性中立軸までの距離を 1.5 で除す¹⁸⁾ことにより得られたものである。同図からもわかるように、どちらのモデルの応力-ひずみ関係を用いても曲げ耐力はほとんど変わらない。他の場合に対しても同様の傾向であったため、コンクリートの強度劣化が曲げ耐力に及ぼす影響はほとんどないと思われる。

3.2 残留応力の影響

(1) 検討内容

ここでは、鋼材に含まれる残留応力が曲げ耐力に及ぼす影響について検討する。今回仮定した残留応力分布は、圧延形鋼を想定しフランジ、ウェブともに図-8 に示すような2次関数としている。

なお、曲げ耐力の算定時には、残留応力およびそれに相当する残留ひずみ分だけ材料の応力-ひずみ関係の原点をシフトすることにより残留応力を考慮した。その時の応力-ひずみ関係の式を式(6)に、概念図を図-9 に示す。

$$\begin{aligned}\sigma_s &= E(\epsilon_s - \epsilon_r) & \epsilon_s + \epsilon_r &\leq \epsilon_y \\ \sigma_s &= \sigma_y - \sigma_r & \epsilon_y &\leq \epsilon_s + \epsilon_r \leq \epsilon_{st}\end{aligned}$$

表-2 残留応力考慮の有無による比較

	床版上面から 塑性中立軸までの 距離 (mm)	終局モーメント (N・mm)
残留応力なし	126.15	4.998×10^9
残留応力あり	126.21	5.004×10^9

表-3 降伏棚の変化範囲

	σ_y (N/mm ²)	ξ	E/E_{st}	$\epsilon_{st} / \epsilon_y$	YR
基準モデル	235	0.06	40	10	0.706
変化範囲	235	0.06	40	1~12	0.706

$$\sigma_s = \frac{\sigma_y E_{st}}{\xi E} \left[1 - \exp \left\{ -\xi \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_y - \epsilon_r} - \frac{\epsilon_{st} - \epsilon_r}{\epsilon_y - \epsilon_r} \right) \right\} \right] + (\sigma_y - \sigma_r) \quad \epsilon_s + \epsilon_r \geq \epsilon_{st} \quad (6)$$

(2) 検討結果

解析結果の一例を表-2 に示す。残留応力の考慮の有無に関わらず終局モーメントはほぼ同じ値を取っている。このことから、残留応力は終局モーメントにほとんど影響を及ぼさないと考えられる。ただし、今回は1種類の断面に対して1種類の残留応力分布を仮定して計算しており、今後断面形状や残留応力分布を変えた検討を実施することにより、結果の妥当性を検証する必要があると考えられる。

3.3 鋼材の応力-ひずみ関係の影響

ここでは、本研究の主たる着目点である鋼材の塑性域における応力-ひずみ関係を規定するパラメータが、曲げ耐力に及ぼす影響について検討する。変化させたパラメータは式(4)における E_{st} 、 ϵ_{st} 、 ξ である。

(1) 降伏棚の大きさの影響

まず、降伏棚の曲げ耐力に及ぼす影響について検討

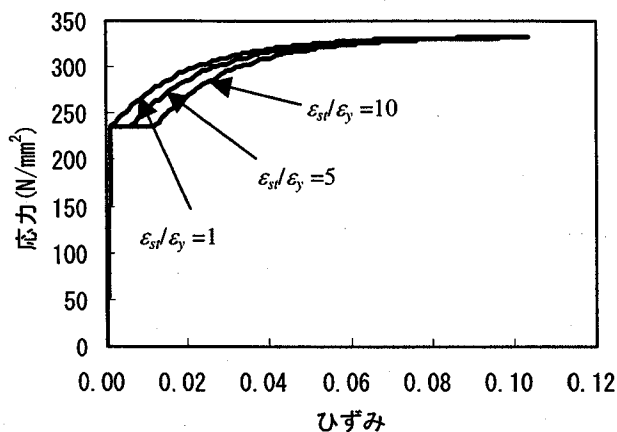


図-10 $\varepsilon_{st}/\varepsilon_y$ による応力-ひずみ曲線の変化

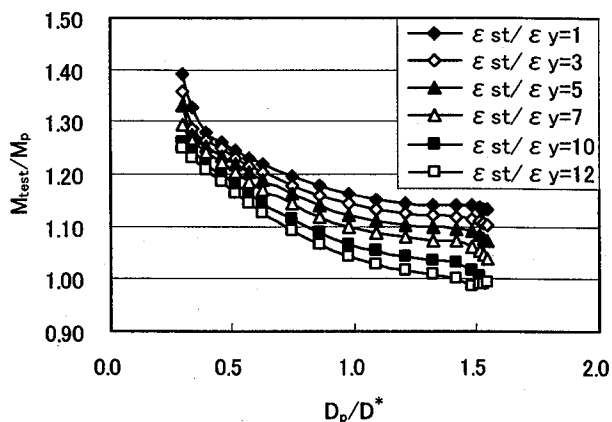


図-11 曲げ耐力と D_p/D^* の関係 (ε_{st} の影響)

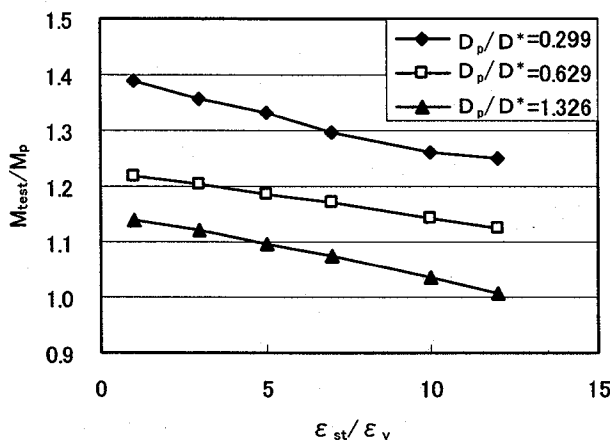


図-12 ε_{st} による曲げ耐力の変化

する。解析に用いた鋼材特性は、SS400 の平均的な特性を表わすパラメータ値をベースとし表-3 に示す降伏棚の範囲で解析を行った。図-10 に 3 種類の降伏棚の大きさに対する応力-ひずみ曲線を示す。

解析結果を図-11, 12 に示す。図-11 は降伏棚の大きさごとに、曲げ耐力と塑性中立軸の位置との関係を示したもので、図-12 は D_p/D^* をある値に固定したときの曲げ耐力と降伏棚の大きさの関係を示したものである。

図-11 からわかるように、 D_p/D^* の増加に伴い M_{test}/M_p が単調に減少している。また、図-12 を見ると、 D_p/D^* が一定の場合、降伏棚の大きさと M_{test}/M_p の関係がほぼ直線で表わされ、傾きもほぼ一致しており、降伏棚の大きさの影響は D_p/D^* の大きさに関わらずほぼ一定だと考えられる。 D_p/D^* の各値に対して、 $\varepsilon_{st}/\varepsilon_y$ に対する M_{test}/M_p の変化率は -0.01 程度となっているため、図-11 における M_{test}/M_p と D_p/D^* の関係は近似的に式(7)で表現される。

$$\frac{M_{test}}{M_p} = 0.13 \left(\frac{D_p}{D^*} - 1.68 \right)^2 + 0.01 \left(10 - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_y} \right) + 1 \quad (7)$$

図-13 に $\varepsilon_{st}/\varepsilon_y = 1, 5, 10$ の場合について、解析結果

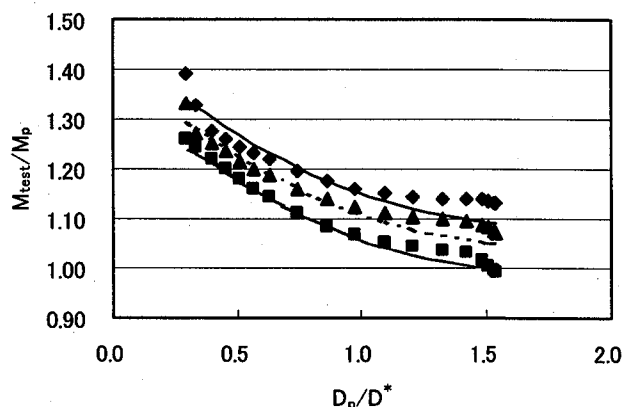


図-13 解析結果と式(7)との比較

と式(7)との比較を示すが、 $0.4 \leq D_p/D^* \leq 1.1$ においては、比較的良好に一致していると言える。

(2) 降伏比 YR の影響

ここでは、降伏比 YR が曲げ耐力に及ぼす影響について検討する。式(4)のパラメータのうち、 ξ および E_{st} が YR に影響するパラメータである。破断伸びを 20% と考えると、 ξ の値が 0.04 程度以上であれば式(4)における指数関数の項は 1 に比べ極めて小さい値となる。したがって、引張強度を σ_u とすると、式(4)より式(8)が得られる。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} + 1 \quad (8)$$

式(8)における σ_u/σ_y は YR の逆数であるから、 ξ が小さくなるほど、また E_{st} が大きくなるほど YR が小さくなることからわかる。しかし、同じ YR に対して ξ と E/E_{st} の組み合わせは表-4 のように複数存在し、それぞれの応力-ひずみ関係は図-14 に示すように異なる。

表-4 同じ YR に対するパラメータの組み合わせ

	YR	σ_y (N/mm ²)	ξ	E/E_{st}	$\varepsilon_{st}/\varepsilon_y$
①	0.706	235	0.12	20	10
②	0.706	235	0.06	40	10
③	0.706	235	0.02344	100	10

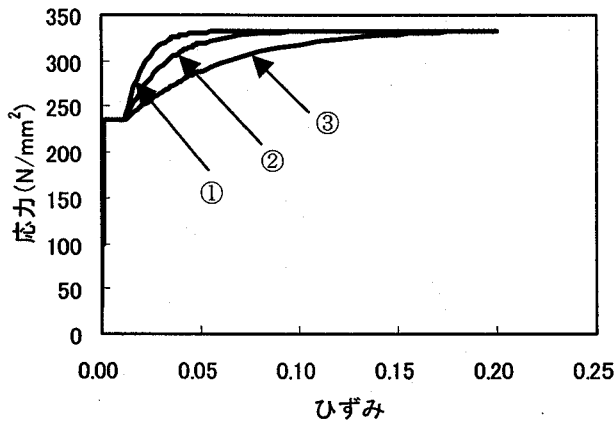


図-14 応力-ひずみ関係の変化

表-5 E/E_{st} と YR の組み合わせに対する ξ の値

YR E/E_{st}	0.545	0.706	0.783	0.828	0.857
20	0.0600	0.1200	0.1800	0.2400	0.3000
40	0.0297	0.0600	0.0900	0.1200	0.1500
60	0.0191	0.0400	0.0600	0.0800	0.1000
80	0.0132	0.0298	0.0450	0.0600	0.0750
100	0.0093	0.02344	0.0359	0.0480	0.0600

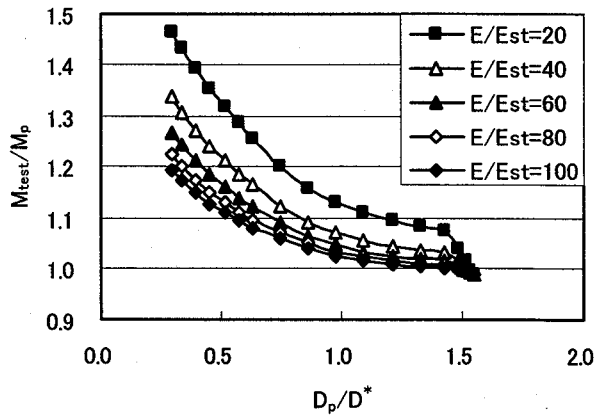


図-15 YR=0.545 の解析結果

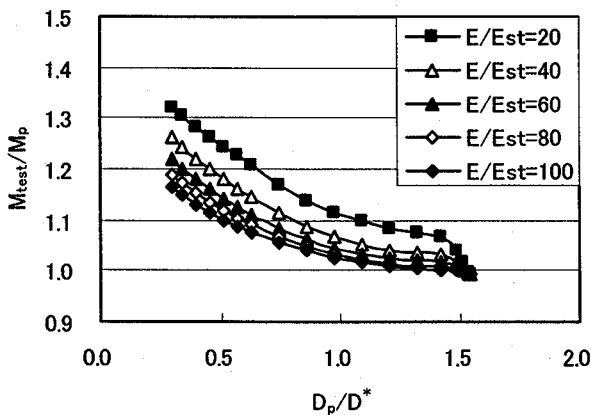


図-16 YR=0.706 の解析結果

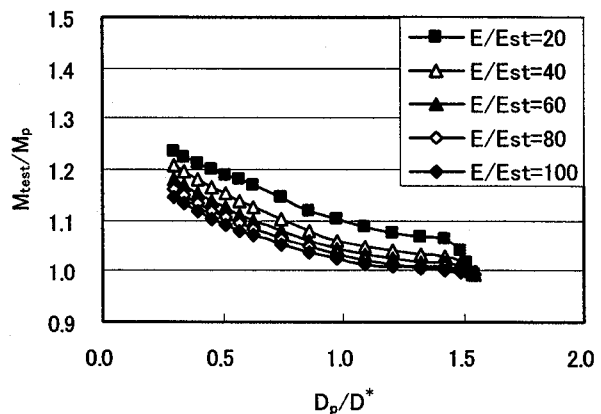


図-17 YR=0.783 の解析結果

まず、同じ降伏比でもパラメータの組み合わせが異なる場合について検討していく。解析に用いた降伏比 YR と E/E_{st} および ξ の組み合わせを表-5 に、その解析結果を図-15~19 に示す。解析においては、降伏強度 235N/mm²、 $\varepsilon_{st}/\varepsilon_y=10$ とした。

図-15~19 を見ると、どの YR に対しても D_p/D^* の増加に伴い M_{test}/M_p が単調に減少していることがわかる。また同じ YR でも、 E/E_{st} が小さいほど、すなわちひずみ硬化領域の初期の傾き E_{st} が大きいほど曲げ耐力は大きくなっており、YR が低い場合には E/E_{st} の影響が比較的顕著であるが、YR が高くなるにつれてその影響度合いは小さくなっている。

次に、降伏棚の大きさ同様、YR の影響を定量的に表現するため、降伏棚の大きさを $\varepsilon_{st}/\varepsilon_y=10$ とした場合

について、降伏比による曲げ耐力の算定式を提案することを試みる。前述したように YR が一定の場合、 E/E_{st} が大きいほど曲げ耐力が小さくなるため、今回は安全側の推定式を提案するという観点から、 $E/E_{st}=100$ の解析結果に対して近似曲線を求めることとする。 $E/E_{st}=100$ に対する降伏比における曲げ耐力と D_p/D^* の関係を図-20 に示す。この図における M_{test}/M_p と D_p/D^* の関係を表現する近似式として得られたのが式(9)である。3 種類の YR に対する解析結果を式(9)による推定結果と比較して図-21 に示すが、両者はよく一致していることがわかる。ただし、式(9)は D_p/D^* に関する 2 次関数であり、 $M_{test}/M_p=0.996$ を極小値とする放物線形状を呈することになる。しかし、解析結果では D_p/D^* の増加に対して M_{test}/M_p が一定値に漸近していく傾向

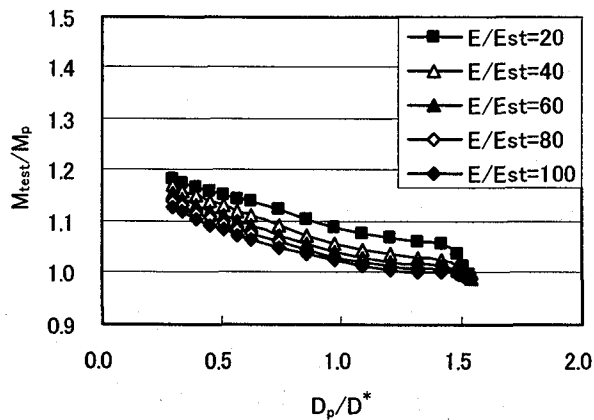


図-18 YR=0.828 の解析結果

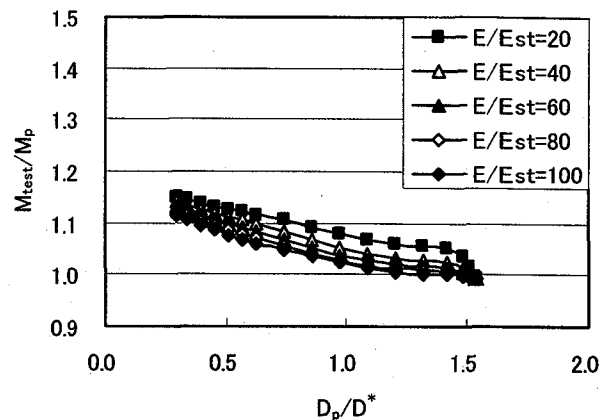


図-19 YR=0.857 の解析結果

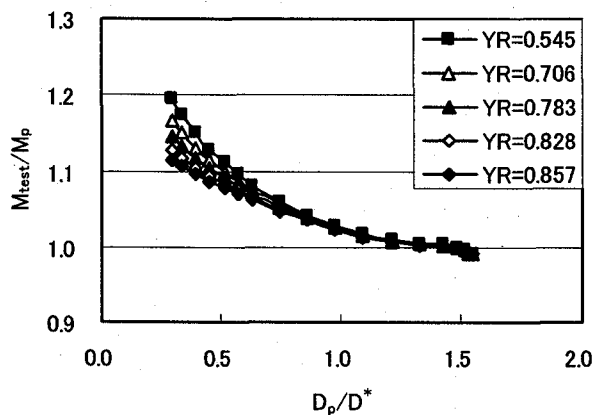


図-20 $E/E_{st}=100$ の場合の解析結果

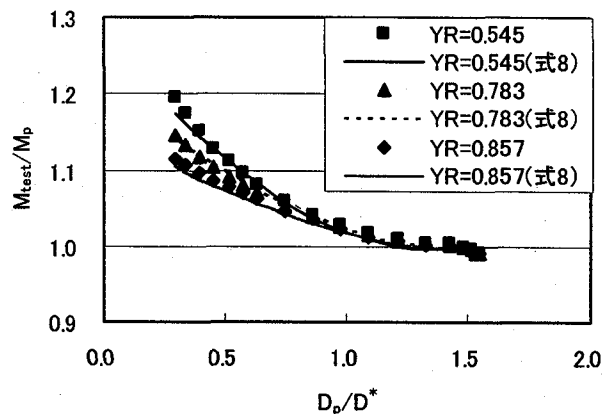


図-21 解析結果と式(9)の比較

にあるため、推定式の関数形には改善の余地があると考えている。

$$\frac{M_{test}}{M_p} = \left\{ -0.580(YR - 0.460)^2 + 0.156 \right\} \left\{ \frac{D_p}{D^*} - (0.7YR + 1) \right\}^2 + 0.996 \quad (9)$$

4. まとめ

本研究では、正曲げをうける鋼-コンクリート合成断面の曲げ耐力に及ぼす鋼材特性の影響について検討し、次のような結果が得られた。

- 1) D_p/D^* が大きくなるほど M_{test}/M_p は低下する。
- 2) 降伏棚が小さいほど曲げ耐力は大きくなる。また、降伏棚の大きさが M_{test}/M_p に与える影響はほぼ一定であり、 $\varepsilon_{st}/\varepsilon_y$ の変化に対する M_{test}/M_p の変化率は約-0.01 程度である。
- 3) YR が一定でも塑性領域のパラメータの変化で曲げ耐力は変化し、ひずみ硬化域の初期の傾きが大きいほど曲げ耐力は大きくなる。また、YR が小さいほど曲げ耐力は大きくなる。

- 4) 曲げ耐力の観点からは、降伏棚がなく、YR が低い鋼材が望ましい。
- 5) 限られた適用範囲ではあるが、降伏棚の大きさおよび YR による曲げ耐力の計算式を提案した。

本研究は、1.にも述べたように、鋼橋上部構造への塑性設計法の適用を可能にするために必要な材料特性を明らかにすることを最終目的としており、今回はその端緒として曲げ耐力の観点から検討を実施したに過ぎない。しかも、着目するパラメータの影響を調べるにあたり、他のパラメータの組み合わせは1種類のみとしたため、降伏棚の大きさと YR を同時に考慮した推定式の確立には至っていない。今後より多くのパラメータの組み合わせに対して解析を実施し、降伏棚の大きさと YR を与えれば、設定した断面形状に対して曲げ耐力が推定できるようにしたい。その際、基本となる断面形状を数種類設定し、曲げ耐力に及ぼす断面形状の影響が小さいことも確認したい。また、連続桁などの不静定構造物においては、曲げ耐力以外に断面の変形性能を確保することが重要となってくるため、そうした観点からの検討も実施したいと考えている。

謝辞

本研究は、(社)鉄鋼連盟の委託により(社)日本鋼構造協会に設置された鋼橋の性能照査型設計対応研究委員会 安全性・使用性部会（主査：依田照彦 早稲田大学教授）の活動の一環として実施したものであり、部会の委員各位には貴重なご意見をいただいた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成14年3月
- 2) AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications, 1998.
- 3) Eurocode 3 : Design of steel structures - Part 2: Steel bridges (ENV 1993-2)
- 4) 工藤純一：高性能鋼と橋梁への適用，第2回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.27-38, 1999.8.
- 5) 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，Vol.39A, pp.115-124, 1993.3.
- 6) 森脇良一：鋼材の機械的性質が圧縮板の極限強度と変形性能に与える影響，大阪産業大学論集，自然科学編，第100号，1996
- 7) 奈良敏，梅村哲夫，服部松利，森脇良一：鋼材特性を考慮した圧縮補剛板の極限強度と変形性能，構造工学論文集，Vol.39A, pp.125-132, 1993.3.
- 8) 河上守，増田陳紀：鋼材の応力～ひずみ関係が圧縮力を受ける平板の履歴吸収エネルギーに及ぼす影響に関する基礎的検討，高機能・高性能鋼材の橋梁への利用研究報告，(社)日本鋼構造協会，pp.224-233, 平成12年3月
- 9) 中村俊一：600MPa級の低降伏比鋼を用いた補剛

板の圧縮特性に関する実験的研究，高機能・高性能鋼材の橋梁への利用研究報告，(社)日本鋼構造協会，pp.240-249, 平成12年3月

- 10) 富永知徳，安波博道：厚肉少補剛断面を有する鋼製橋脚の変形能に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.40A, pp.189-200, 1994.3.
- 11) 山尾敏孝，荒毛徹，崎元達郎：鋼材特性を考慮した薄肉鋼 H 形短柱の耐荷力と終局挙動について，構造工学論文集，Vol.40A, pp.355-364, 1994.3.
- 12) 山尾敏孝，岩坪要，崎元達郎：降伏比が異なる高張力鋼を用いた短柱の耐荷力と変形能力に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.43A, pp.147-145, 1997.3.
- 13) 征矢勇夫：全塑性モーメント時の最大歪に及ぼす材料特性と梁断面寸法の影響，埼玉工業大学紀要，9号，pp.9-15, 2000.3.
- 14) Wittry, Dennis M.: An Analytical Study of the Ductility of Steel Concrete Composite Sections, Masters thesis, University of Texas at Austin, December 1993
- 15) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.23-25, 1996
- 16) 土木学会鋼構造委員会 鋼構造新技術小委員会：鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術，1996
- 17) Rotter, J. M. and Ansourian, P.: Cross-Section Behavior and Ductility in Composite Beams, Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part 2, Volume 67, pp.453-474, June 1979
- 18) Ansourian, P.: Plastic Rotation of Composite Beams, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST3, pp.643-659, March 1982

(2002年9月13日受付)