

# 合成桁の終局曲げ強度特性の解明に関する研究

建設構造研究室 北川 将士  
指導教官 長井 正嗣  
岩崎 英治

## 1.はじめに

近年、橋梁建設コスト縮減が強く求められており、各機関あげて対応に取り組んでいる状況にある。鋼橋設計においては、過去 30~40 年間に渡り、鋼重量ミニマムを基本コンセプトとする設計が採用されてきたが、最近では、一層のコスト縮減を意図した、桁本数の少ない少数主桁橋へと移行し、1990 年代の終わり頃からは連続合成桁の建設が活発化している。このような極めてシンプルな新しい橋システムを導入することで、工場制作費（塗装まで含む）ベースで約 10%強のコストダウンが可能となる試算結果が報告されている。一方で、以上の橋システムは極めてシンプルな構造形態のため、更なるシンプル化によるコストダウンは限界となり、最近ではコスト縮減に向けた閉塞感が漂っている。

そこでこの打開策として、このシンプルな構造への改革、移行に加えてデザイン改革の同時導入を提唱している。具体的には、これまでの弾性設計から、塑性の範囲に踏み込んだ設計法の導入である。より具体的には、コンパクト断面設計の導入により、前述の合成少数主桁形式の終局曲げ強度が現行設計に比べて約 25~30%のアップを期待できることから、コストダウンが可能であると考えられる。しかも、腹板の板厚を現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>（以後、道示と呼ぶ）の規準より更に薄くしても全塑性モーメントが達成できることを示す。

以上より、本研究では、正曲げモーメント作用時の活荷重合成桁を対象として FEM 弾塑性解析<sup>3) 4)</sup>を行い、鋼材の材質、腹板厚および腹板高

を変化させた際の終局挙動および曲げ強度特性を解明して、終局状態が全塑性状態に達する最少腹板厚を同定することを目的とする。また、AASHTO および EC のコンパクト断面の定義に関する規定についても一考察を加える。

## 2.計算モデル

2 主桁橋を対象とした合成断面を図 1 に示す。なお、モデルのアスペクト比(垂直補剛材間隔/腹板高)を 3.0(現行、道示<sup>1)</sup>では最大 1.5 まで許容)とした合成桁を対象としている。

ここで、鋼桁は 4 節点シェル要素で、床版は 8 節点ソリッド要素でモデル化しており、単純支持における対称性から構造の半分を簡略化してモデルを作成した。また、腹板高、板厚、材質、初期導入な内力をパラメータとした 72 モデルを用いて解析を行った。各パラメータを以下に示す。

- 1) 腹板高  $h_w = 2,500 \text{ mm}, 3,000 \text{ mm}$
- 2) 板厚  $t_w = 8.50 \text{ mm} \sim 24.19 \text{ mm}$
- 3) 材質 SM400, SM490Y, SM570
- 4) 初期内力  $P_0 = 0.4 \text{ y}, 0.5 \text{ y}$

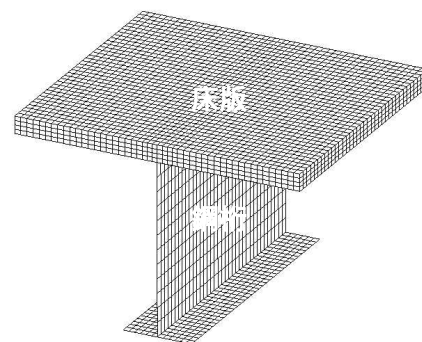


図 1 解析モデル

### 3.材料特性

鋼材の応力 - ひずみ曲線は、式 1 を用いて定義した。また、降伏条件として Von Mises の降伏条件を用いた。各材質の応力 - ひずみ関係を図 2 に示す。コンクリートの応力 - ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>に示す軟化領域を持たない式 2 を用いて定義した。また等方硬化、関連流れ則を仮定し、降伏条件として Mohr Coulomb の降伏条件を用いている。コンクリートの応力 - ひずみ関係を図 3 に示す。

$$\frac{\sigma_y}{E} = \frac{1}{E} E_{st} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{\sigma_y}{E_{st}}\right)} \right\} + 1 \quad (\sigma_y \leq E_{st}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = \sigma_{ck} \left( \frac{\epsilon_c}{0.002} \right) \left( 2 - \frac{\epsilon_c}{0.002} \right) \quad (\epsilon_c \leq 0.002) \quad (2)$$

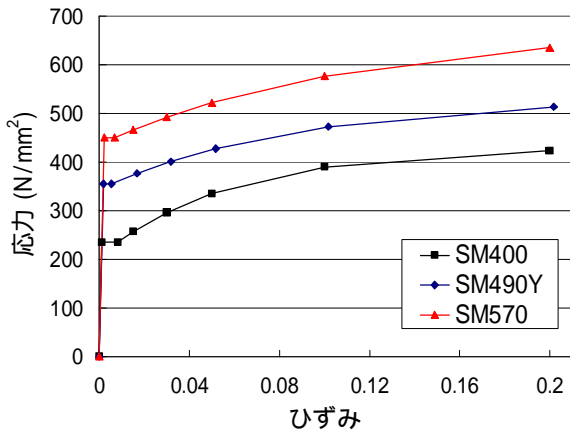


図 2 鋼材の応力 - ひずみ曲線

### 4.荷重条件および境界条件

荷重条件および境界条件を図 4 に示す。荷重条件として、活荷重合成桁を念頭に、腹板高中央の  $P_1$  に回転角を与えることにより、鋼桁状態に正曲げモーメントを作用させて初期内力  $\sigma_0$  を導入し、その後床版を取り付けた合成桁に荷重を負荷した。また境界条件として、支間中央において対称性を考慮するため、 $u_x, y, z$  を拘束し、支点上では  $u_z, x, z$  を拘束した。合成前断面と合成後断面との垂直応力分布の例を図 5 に示す。

### 5.初期不整

終局強度の低下要因となる初期不整として、溶接に伴う残留応力と制作上さけられない初期たわみを考慮する必要がある。このうち、残留応力が曲げ耐力に与える影響は小さいことが知られているので無視する。

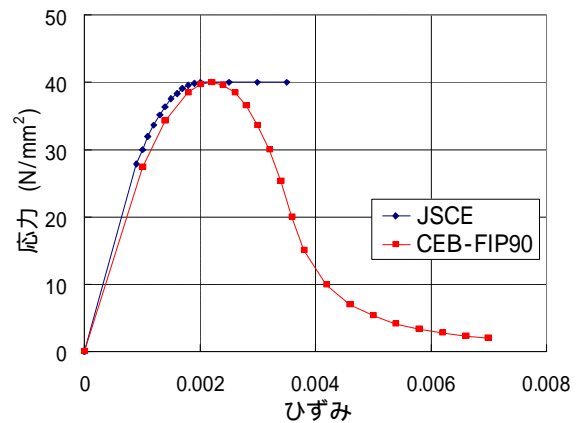


図 3 コンクリートの応力 - ひずみ曲線

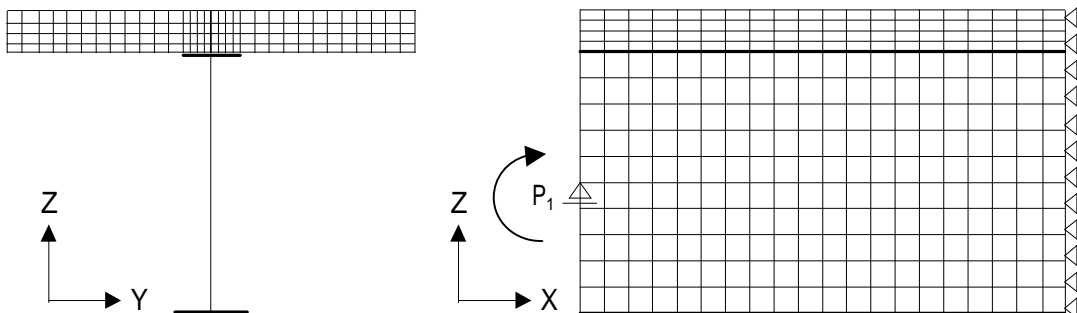


図 4 荷重条件および境界条件

腹板の初期たわみとして図6に示すように、腹板高中央を最大とした腹板面外方向に最大  $h_w/250$  mm の  $\cos$  の半波形を仮定した。なお橋軸方向に対しては、支間中央を最大とした腹板面外方向に最大  $h_w/250$  mm の  $\sin$  の半波形を仮定した。以上より、腹板の初期たわみは次式のようになる。

$$w_0 = \frac{h_w}{250} \sin\left(\frac{\pi}{h_w} x\right) \cos\left(\frac{\pi}{h_w} z\right) \quad (3)$$

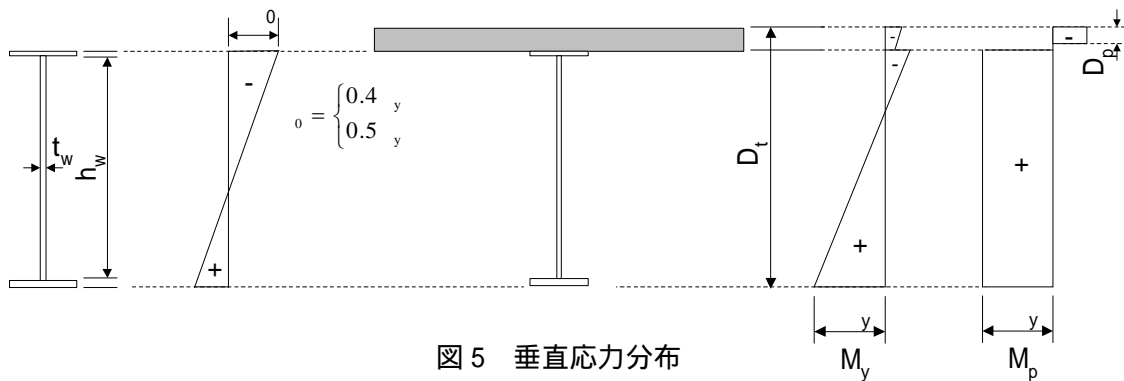


図5 垂直応力分布

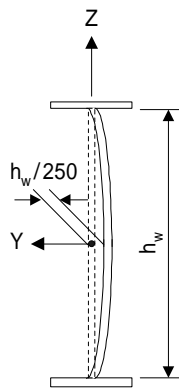


図6 腹板の初期たわみ

## 6. 解析結果と考察

図7~9に  $h_w=3,000$  mmにおける各材質の結果を示す。死・活荷重合成桁、活荷重合成桁での  $\theta=0.4$  rad,  $0.5$  radのいずれのケースも、降伏モーメント ( $M_y$ )に達するあたりから回転角の線形性が失われ、最終的に全塑性モーメント ( $M_p$ )に達することがわかる。

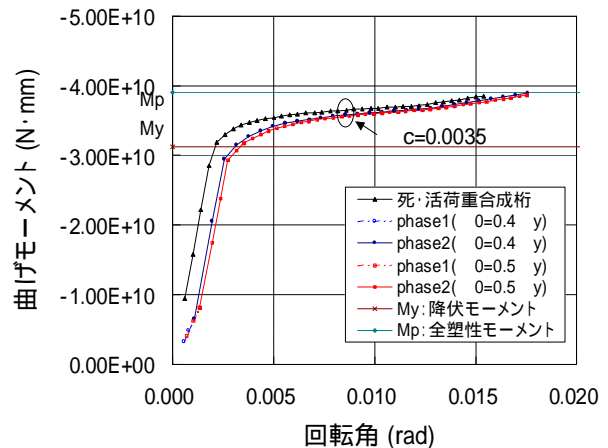


図7 曲げモーメントと回転角の関係(SM400)

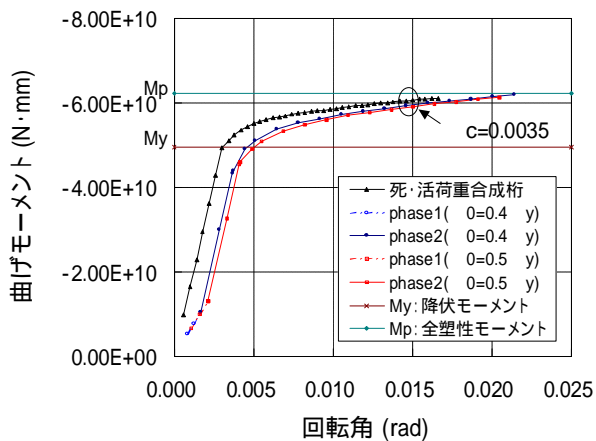


図8 曲げモーメントと回転角の関係(SM490Y)

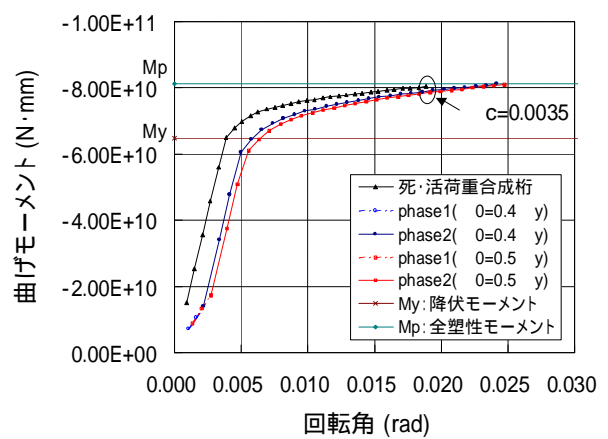


図9 曲げモーメントと回転角の関係(SM570)

また死・活荷重合成桁の場合は、当然のことながら同じ作用モーメントに対して常に小さい回転角を示し、全塑性モーメントに達する。一方、活荷重合成桁を対象とした 2phase（鋼桁のみと合成桁）解析においては、初期応力  $\sigma_0$  の影響はあまり小さくなく、 $\sigma_0=0.5 \sigma_y$  が架設時に導入されていたとしても、 $M_p$  に達することがわかる。なお、 $h_w=2,500\text{mm}$  のケースでも、 $h_w=3,000\text{mm}$  で考察したのと同様のことが言える。

図 10、図 11 に本計算結果を整理したものを示す。図 10 では、 $c=0.0035$  を制限とすると、SM570 材の一部を除いて全塑性モーメントに達しないことがわかる。また材質に応じてほぼ線形的に終局強度比 ( $M_n/M_p$ ) が上昇している。一方図 11 では、SM400 材の  $h_w=2,500\text{mm}$  のケースで、終局強度が全塑性モ

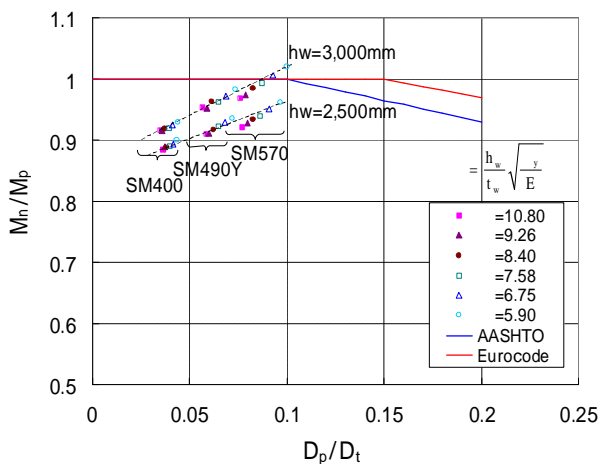


図 10 終局モーメントと塑性中立軸の関係

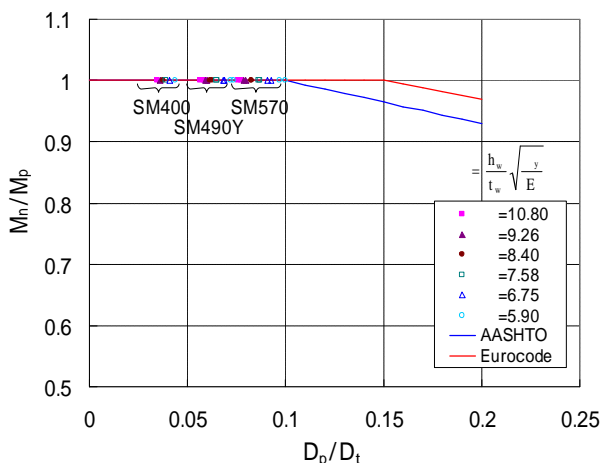


図 11 終局モーメントと塑性中立軸の関係

ーメントに達していないケースがあるが、ほとんどのケースで  $M_p$  以上となる。

AASHTO/LRFD, EC とともに、 $D_p/D_t < 0.1$  または  $0.15$  で  $M_n/M_p = 1.0$  と定義しているが、コンクリートのひずみ制限 ( $c=0.0035$ ) が設けられているか否か、あるいは CEB - FIP90<sup>5)</sup> に与えられている軟化曲線を採用した結果であるかについて今後検討の課題を残した。

## 7. 結論

本研究で得られた結論を要約すると以下のようになる。

1) 終局条件としてコンクリートのひずみ ( $c=0.0035$ ) を設定すると、ほとんどのモデルで、降伏モーメントは超えるが、全塑性モーメントには達しない。

2) 上記の制約を解除すると、ほとんどのケースで全塑性モーメントに達する。すべてのモデルの塑性中立軸は床版内にあり、この場合、AASHTO/LRFD や EC の設計式と対応する。

3) 上記 1), 2) のいずれが真実であるかについて、コンクリートの構成則を変更した解析、また実験が必要となることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説, I 共通編, 鋼橋編, 丸善, 2003
- 2) (社)土木学会：コンクリート標準示方書, 基準編, 丸善, 2002
- 3) Frits C. de Witte and Wiltze Pieter Kikstra 編：DIANA User's Analysis Procedures, TNO DIANA BV, 2003
- 4) Frits C. de Witte and Wiltze Pieter Kikstra 編：DIANA User's manual Element Library, TNO DIANA BV, 2003
- 5) COMITE EURO - INTERNATIONAL DU BETON: CEB - FIP MODEL CODE 1990, Thomas Telford House, 1993