

# 鋼 - コンクリート合成桁における材料強度を確率変数とする曲げ耐力の確率分布

長崎大学大学院 学生会員 荒木 智 長崎大学工学部 正 会 員 中村聖三  
 長崎大学工学部 フェロー 高橋和雄

## 1. はじめに

我が国の道路橋は、大地震に対する耐震設計を除き、許容応力度設計法が採用されている道路橋示方書・同解説に基づき設計される。許容応力度は使用鋼材の保証降伏点を基準に定められているため、構造物は材料の弾性域で設計されることになる。一方、諸外国の設計基準には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塑性設計法も規定されている。本研究は、我が国独自の塑性設計法の確立を最終目的とする研究の一環として、江頭ら<sup>1)</sup>が用いた手法にモンテカルロシミュレーションを応用し、コンクリート強度、鋼材の降伏点が確率的に変動する場合における鋼 - コンクリート合成桁の正曲げ耐力の確率分布を算定したものである。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析モデルと材料特性

本研究では、図 - 1 に示す正曲げを受ける単スパンの鋼 - コンクリート合成桁を解析対象としている。

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<sup>2)</sup>で規定されているものを用い、その特性は表 - 1 に示すとおりとする。表中の平均値、標準偏差は、一般工事において管理状態が普通と判断できる変動係数 17.5%を仮定し、コンクリート強度が設計基準強度を下回る確率が 5%となるよう定めた。鋼材の応力 - ひずみ関係には、土木学会新技術小委員会<sup>3)</sup>で提案された構成則を用いる。その概略図を図 - 2 に、用いた材料特性を表 - 2 に示す。パラメータ  $\xi$ ,  $E_{st}$ , および  $\varepsilon_{st}$  の値、および降伏点の平均値、標準偏差は文献 4), 5)を参考に設定したものである。

### 2.2 解析方法

本研究における正曲げ耐力の計算にはファイバーモデルを用い、以下の手順で確率分布を算定する。

- 1) モンテカルロシミュレーションにより、コンクリート強度は正規分布、鋼材の降伏点是对数正規分布に従う乱数を発生させ、その値を決定する。
- 2) コンクリート床版の上縁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平面保持の法則に基づきひずみ分布を決定し、材料の応力 - ひずみ関係を用いて応力分布を求める。
- 3) 釣り合い条件より、各ファイバーにおける力の総和が零となるまで 2)を繰返し、釣り合った時点での応力分布から曲げ耐力を算定する。
- 4) 所定回数（本研究では 5 万回）2)~ 3)を繰返し、得られた曲げ耐力をヒストグラム化する。各範囲の頻度を発生回数で除することで対応する確率を求める。

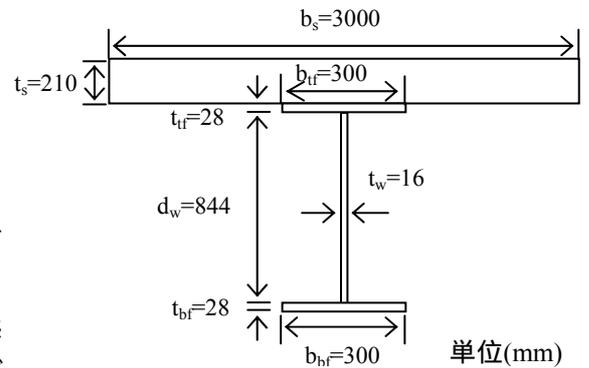


図 - 1 解析モデル

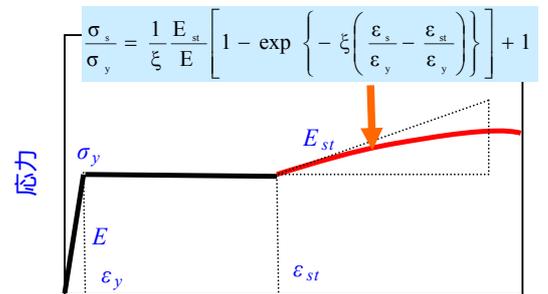


図 - 2 鋼材の応力 - ひずみ関係

表 - 1 コンクリート特性

|                                       |        |       |
|---------------------------------------|--------|-------|
| 設計基準強度 $f_{ck}'$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 30     |       |
| コンクリート強度 $f_c'$ (N/mm <sup>2</sup> )  | 平均値    | 42.08 |
|                                       | 標準偏差   | 7.36  |
| 終局ひずみ $\varepsilon_u'$                | 0.0035 |       |

表 - 2 鋼材特性

|                                     |        |        |
|-------------------------------------|--------|--------|
| 鋼 種                                 | SS400  |        |
| $\xi$                               | 0.049  |        |
| $E_{st}$ (N/mm <sup>2</sup> )       | 4070   |        |
| $\varepsilon_{st}$                  | 0.0185 |        |
| ヤング係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )      | 200000 |        |
| 降伏点 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 平均値    | 293.75 |
|                                     | 標準偏差   | 23.50  |
| 降伏点の規格下限値 (N/mm <sup>2</sup> )      | 235    |        |

キーワード：合成桁，正曲げ耐力，確率分布，材料強度，塑性設計法，ファイバーモデル

連絡先：〒852-8521 長崎市文教町 1-14 長崎大学工学部社会開発工学科 (TEL) 095-819-2610 (FAX) 095-819-2627

### 3. 解析結果と考察

図-3にモンテカルロシミュレーション5万回によって得られたコンクリート強度のヒストグラムと仮定した正規分布, 図-4に鋼材の降伏点のヒストグラムと仮定した対数正規分布の確率密度関数を比較して示す. 図中には, シミュレーションで得られたコンクリート強度と鋼材の降伏点の平均値( $\mu$ ), 標準偏差( $\sigma$ ), 歪度( $Ske$ ), 尖度( $Kur$ )も併せて示している. いずれのパラメータについても, ヒストグラムと理論分布の曲線はほぼ重なっている. また, 表-1~2の値と比較すると, 算出されたパラメータの平均値, 標準偏差の誤差は最大でも0.2%と極めて小さく, シミュレーションから得られたデータは仮定した理論分布に従っていると判断できる.

図-5に解析によって得られた曲げ耐力を全塑性モーメントで無次元化した値のヒストグラムとその平均値, 標準偏差, 歪度, 尖度を併せて示す. 全塑性モーメントは, 設計基準強度と降伏点の規格下限値を用いて算出しており, その値は $4.369\text{GN}\cdot\text{mm}^2$ である.

図-5(a)はコンクリート強度のみを確率変数とし, 鋼材降伏点は確定量として平均値を用いた場合のヒストグラムであるが, 分布形は右にかたより, 正規分布よりとがっているといえる. 一方, 鋼材降伏点のみを確率変数とし, コンクリート強度は確定量として平均値を用いた場合の分布形は, 図-5(b)に示すようにやや左にかたよっているが, 対数正規分布に近い形であるといえる. 図-5(a)と比較すると, 標準偏差の値が大きくなっていることから分布幅が広く, ピークでの確率が5%程低くなっている. コンクリート強度と鋼材降伏点の両者を確率変数とした場合のヒストグラムを図-5(c)に示すが, 図-5(a), (b)と比較すると, 分布幅が広く, ピークでの確率が低くなっている. また, 歪度と尖度が零に近い値となり, 正規分布に近い形といえる.

図-5より今回解析したケースにおいて, すべての曲げ耐力の値が全塑性モーメントの値 $[4.369(\text{GN}\cdot\text{mm}^2)]$ を上回っており, 平均的には設計値の1.4倍程度になっていることがわかる.

### 4. まとめ

本報告では解析においてコンクリート強度と鋼材の降伏点を統計値とした解析結果を掲載したが, 確定値とした鋼材のひずみ硬化域を支配するパラメータ,  $\xi$ ,  $E_{st}$ , および $\varepsilon_{st}$ もコンクリート強度, 鋼材の降伏点と同様に統計値として解析を行っているため, その解析結果も含めて講演時に報告する.

**参考文献** 1) 江頭ら: 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, 構造工学論文集, Vol.49A, pp.791-798, 2003.3. 2) 土木学会: コンクリート標準示方書, pp.23-25, 1996. 3) 土木学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. 4) 青木ら: 素材引張試験結果による構造用鋼材の力学的性質に関する統計的調査, 日本建築学会構造系論文報告集第358号, pp.94-102. 5) 奈良ら: 橋梁向け構造用鋼板の板厚および強度に関する統計調査, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.299-310, 2004.

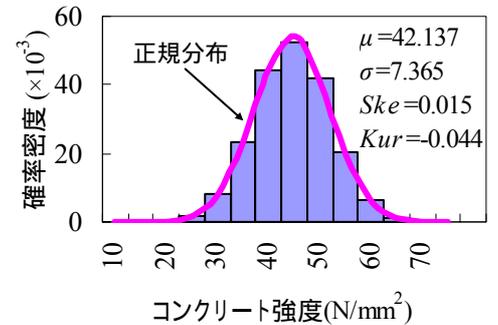


図-3 コンクリート強度の確率密度関数

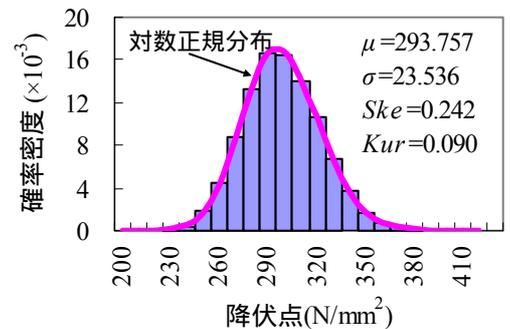
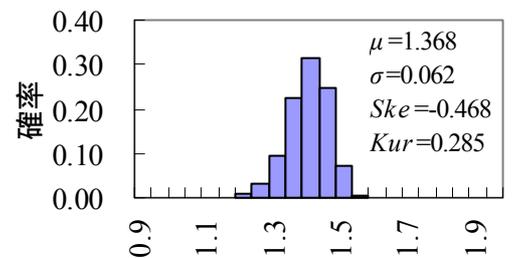
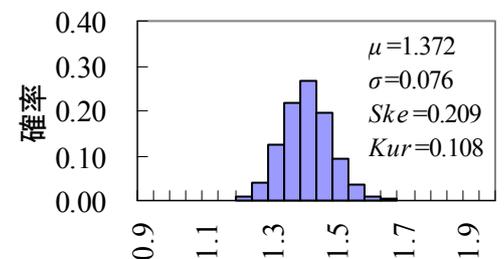


図-4 鋼材の降伏点の確率密度関数



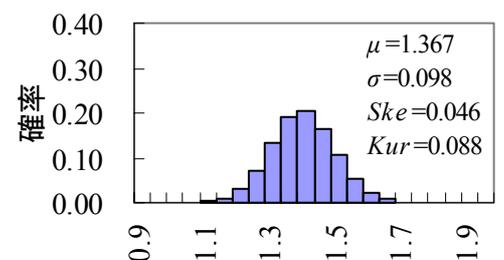
曲げ耐力/全塑性モーメント

(a) コンクリート強度の変動



曲げ耐力/全塑性モーメント

(b) 鋼材の降伏点の変動



曲げ耐力/全塑性モーメント

(c) コンクリート強度と降伏点の変動

図-5 曲げ耐力の確率分布