

# ハイブリッド合成桁の終局曲げ耐力設計における 部分安全係数設定方法に関する基礎的検討

## Numerical Study on the Partial Safety Coefficient method for the ultimate bending capacity design of hybrid composite girder

千野 隆之介

Ryunosuke CHINO

(指導教員 山本 亨輔)

**Abstract** – In Japan, Allowable Stress Design (ASD) is used generally after the introduction of Limit State Design Method (LSDM), because plastic design has difficulty ensuring safety and small economic benefit. For the economic reason, hybrid composite girder (HCG) is developed. HCG is a superstructure for bridge, and it has concrete slab and steel girder which uses different steel material for each element. However, safety problem becomes more complex. In this research, capacity based on full plastic moment and partial safety coefficient is calculated by setting several statistic parameter. As the condition, considering dispersion of material property and initial imperfection, we carried out Monte Carlo simulation by FEM.

## 1 はじめに

### 1.1 研究背景

我が国において、橋梁設計は道路橋示方書に基づき、行われている。旧来、設計法は許容応力度設計法を用い、降伏点を基準に弾性設計されてきた。鋼材は塑性域におけるひずみ硬化や伸び性能などの優れた変形特性を持つが、許容応力度設計法では、弾性設計であるため、これらを設計時に考慮することができない。

鋼橋設計に塑性特性を取り入れる場合、塑性域におけるパラメータを扱いやすい限界状態設計法の導入が考えられる。限界状態設計法とは、設計者が設定した各種限界状態に対して安全照査を行う手法である。実際に、北米や欧州では、終局限界に対して耐力設計を採用している。ここでは、圧縮域における座屈破壊が終局限界状態に先行しない断面であれば、曲げ抵抗として全塑性曲げモーメントを取り入れることが可能である。

しかし、鋼橋を塑性設計する場合、座屈による脆性破壊や塑性域での材料特性のばらつきに対して安全性を担保できないため、降伏点を基準に弾性設計することになる。従って、全塑性曲げモーメントを最大曲げ耐力とした設計式を導入しても、コストの削減効果は大きくないと考えられる。また、鋼桁が全塑性曲げモーメントに達するには薄肉構造の座屈防止を要する。そのため、水平補剛材の取り付け、もしくは、厚板の採用が必要とされ、コストの上昇につながる。さらに、全塑性曲げモーメントは、降伏曲げモーメントの 1.1~1.2 倍程度

であるため、当初よりコストの削減余地が小さいと考えられる。

弾性設計においても、降伏点を大きくすることで経済的設計が可能になる。例えば、ハイブリッド鋼桁は、ウェブと、曲げに対して大きな負担を受け持つフランジに異なる高強度の鋼材を適用した桁のことである。ハイブリッド鋼桁ではウェブの降伏が先行するが、フランジの拘束効果によってウェブに生じた残留ひずみが抑制されると期待される。しかし、高機能鋼の導入に伴い、さらなる薄肉化が可能である。そのため、座屈が発生しやすい断面となることわかる。

そこで、本研究では合成桁に着目する。合成桁は、鋼桁とコンクリート床版がずれ止めによって結合され、一体となって挙動する上部構造である。圧縮フランジがコンクリート床版によって拘束され、座屈抑制効果があるため、薄板を使用することができる。また、全塑性曲げモーメントは降伏曲げモーメントの 1.4~1.5 倍程度になるため、コスト削減余地がより大きい。よって、ハイブリッド桁と合成桁の両方の性質を合わせ持つハイブリッド合成桁が開発された。ハイブリッド合成桁では、圧縮抵抗力はコンクリートに期待するため、上フランジは普通鋼とし、下フランジのみ高機能鋼材を導入する。

塑性時の変形特性を設計に取り入れる場合、安全性の担保が大きな課題となる。現状では、AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) や Eurocode の強度式を用いた設計が中心である。これらは各部材に対して一律の係数を用いている。

様々な材料特性を有し、よりコスト削減効果を高めることが可能なハイブリッド合成桁の設計を行う場合、そのまま一律の値を適用することは非効率的である。そこで、ハイブリッド合成桁においても、統計的に十分な安全性を担保しつつ、よりコスト削減効果の高い設計手法を提案するため、確率論に基づく安全係数の設定方法が求められる。

本研究では、ハイブリッド合成桁の曲げ耐力に関して、材料特性、初期不整の不確定性を考慮したモンテカルロシミュレーションを、有限要素法によって数値計算をした。確率論的なハイブリッド合成桁の安全係数設定手法について、妥当性を検証した。

## 1.2 部分安全係数法の書式を用いた限界状態設計法

部分安全係数設計法の書式を用いた限界状態設計法の照査式を以下の式(1)に示す。

$$\gamma_i \frac{\sum \gamma_a S(\gamma_f F_k)}{R(f_k/\gamma_m)/\gamma_b} \leq 1.0 \quad (1)$$

ただし、 $S$ ：荷重作用、 $R$ ：抵抗作用、 $F_k$ ：荷重の公称値、 $f_k$ は材料強度の公称値、 $\gamma_i$ ：構造物係数、 $\gamma_a$ ：構造解析係数、 $\gamma_f$ ：荷重係数、 $\gamma_m$ ：材料係数、 $\gamma_b$ ：部材係数を表す。本研究では、終局曲げ耐力設計を扱うため、2種類の部分安全係数 $\gamma_m$ 、 $\gamma_b$ を取り扱うこととする。ここでは、ハイブリッド合成桁における終局状態を、鋼桁の座屈破壊もしくはコンクリートの圧縮破壊と定義し、それらに対して安全性を担保する必要がある。

座屈破壊、圧縮破壊のどちらが先行するかは材料特性のばらつき、および、断面寸法や初期不整などの幾何学的パラメータに依存する。前者のばらつきは材料係数 $\gamma_m$ で、後者のばらつきは部材係数 $\gamma_b$ で考慮すべきである。材料係数は、材料パラメータの公称値から設計基準値を算出する際に用い、部材係数は、全塑性曲げモーメントに対する安全度を評価する際に用いる。

また、コスト削減効果を高めるフレームワーク作りとは、材料係数と部材係数の分離である。これにより、材料の品質管理や、部材の初期不整抑制によるコスト削減を定量的に把握しやすくなる。

## 2 研究手法

本研究では、汎用有限要素法ソフトである Abaqus を用いてハイブリッド合成桁モデルを作成し、4点曲げ試験により純曲げ区間を再現した。その際、材料特性及

び初期不整を確率分布とし、モンテカルロシミュレーションを行うことで、終局曲げ耐力分布を得た。

### 2.1 モデル形状

アメリカの設計基準である AASHTO、および文献4)の値を参考にモデル形状を決定した。AASHTO では、終局限界状態を、鋼桁の座屈破壊が生じた時点、もしくはコンクリートの圧縮破壊が生じた時点と定義している。最大曲げ耐力が全塑性曲げモーメントに達することのできる断面をコンパクト断面、最大曲げ耐力が鋼桁の座屈破壊により全塑性曲げモーメントに達することのできない断面をノンコンパクト断面と呼んでいる。また、座屈により降伏曲げモーメントに達することのできないスレンダー断面という定義もあるが、本研究では塑性設計を念頭に置くため用いない。図1に断面区分を表す曲げモーメントと曲率の関係を示す。 $M_y$ は降伏曲げモーメント、 $M_{pl}$ は全塑性曲げモーメントである。コンパクト断面の条件は以下、式(2)(3)(4)をすべて満たす場合である。

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{f_{yc}}} \quad (2)$$

$$\frac{D}{t_w} \leq 150 \quad (3)$$

$$f_{yc}, f_{yw} \leq 485 \quad (4)$$

ここで、 $D_{cp}$ ：塑性中立軸までのウェブ圧縮高さ、 $t_w$ ：ウェブ厚、 $E$ ：ヤング係数、 $F_{yc}$ ：圧縮フランジの降伏強度、 $D$ ：ウェブ高、 $f_{yc}$ ：圧縮フランジの降伏強度、 $f_{yw}$ ：ウェブの降伏強度である。また、塑性中立軸位置が低い場合は、鋼材が全塑性曲げモーメントに達する前にコンクリートの圧縮が先行する可能性がある。そこで、塑性中立軸位置に依存し全塑性曲げモーメントを、公称曲げモーメント $M_n$ として補正する規定がある。その補正式を式(5)(6)に示す。

$$M_n = \varphi \cdot M_y \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{cases} \frac{D_p}{D_t} < 0.1 \text{ の場合, } \varphi = 1.0 \\ \frac{D_p}{D_t} \geq 0.1 \text{ の場合, } \varphi = 1.07 - 0.7 \cdot \frac{D_p}{D_t} \end{cases} \quad (6)$$

ここで、 $D_p$ ：床版上縁から塑性中立軸位置までの距離、 $D_t$ ：床版上縁から合成桁下面までの全高である。ただし、本研究では安全側である全塑性曲げモーメント $M_p$ を基準とした設計を行う。

式(2)(3)(4)の一つでも満たさないものをノンコンパクト断面とし、ウェブ厚のみ異なる値とすることで、断

面区分を変化させた。以上のことに基づき、決定した断面、断面寸法を図2及び表1に示す。 $t_w = 5\text{mm}$ 時はノンコンパクト断面、それ以外はコンパクト断面である。

また、モデルには図3に示すように初期不整 $\delta$ を正規分布で与えた。初期不整のばらつきは、非超過率が1%となるときのため $\delta$ が、 $d_w/250$ 程度となることが、実橋梁の統計データから知られている<sup>[12]</sup>。そのため、平均0mm、標準偏差1.25mmとした。乱数により発生させたたわみ値のヒストグラムを図6に示す。

表1 構造寸法

床版幅 $w_c(\text{mm})$	500				
床版厚さ $t_c(\text{mm})$	150				
上フランジ幅 $w_{ft}(\text{mm})$	300				
上フランジ厚さ $t_{ft}(\text{mm})$	10				
ウェブ幅 $d_w(\text{mm})$	850				
ウェブ厚さ $t_w(\text{mm})$	5	6	8	10	12
下フランジ幅 $w_{fb}(\text{mm})$	350				
下フランジ厚さ $t_{fb}(\text{mm})$	15				

## 2.2 材料特性

ハイブリッド合成桁は、床版にコンクリート、ウェブおよび上フランジに普通鋼、下フランジに高機能鋼を適用した複合材料である。圧縮力はコンクリートが受け持つため、上フランジは普通鋼としている。材料特性値は文献3,4)を参考に設定した。

コンクリート特性の応力ひずみ曲線として、式(7)を用いる。これはコンクリート示方書で規定されている式である。また、その概略図を図4に示す。

$$\sigma_c = 0.85f_c \left( \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right) \left( 2 - \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right), \quad (\varepsilon_c \leq 0.002) \quad (7)$$

$$\sigma_c = 0.85f_c \quad (0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.035)$$

ただし、 $\sigma_c$  : 与えられたひずみに対する応力、 $f_c$  : 圧縮強度、 $\varepsilon_c$  : ひずみである。

本研究で用いたコンクリートの材料特性値を表2に示す。一般にコンクリートの確率分布は正規分布とされているため、圧縮強度 $f_c$ を正規分布で与えた。終局ひずみ $\varepsilon_u$ は一定量とした。

鋼材特性の応力ひずみ曲線として、土木学会鋼構造技術賞委員会で規定されている式(8)を用いる。また、その概略図を図5に示す。

$$\sigma_s = E\varepsilon_s \quad (\varepsilon_s \leq \varepsilon_y)$$

$$\sigma_s = \sigma_y \quad (\varepsilon_s \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st})$$

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \left[ 1 - \exp \left\{ -\xi \left( \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_y} \right) \right\} \right] + 1 \quad (8)$$

$$(\varepsilon_s \geq \varepsilon_{st})$$

ここで、 $\sigma_s$  : 与えられたひずみに対する応力、 $E$  : ヤング率、 $\varepsilon_s$  : 降伏ひずみ、 $\varepsilon_{st}$  : ひずみ硬化開始点ひずみ、 $\sigma_y$  : 降伏強度、 $E_{st}$  : 硬化係数、 $\xi$  : ひずみ硬化後の応力ひずみ曲線を規定するパラメータ (硬化曲率と呼ぶこととする) である。 $\varepsilon_s$ が鋼材の破断ひずみに近い領域では $\exp$ の項が1に比べて十分小さな値となるため、引張強度 $\sigma_u$ を用いて、式(8)中の第3式は式(9)のように近似可能である<sup>[3]</sup>。

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} + 1 \quad (9)$$

従って、 $E_{st}$ 及び $\xi$ は降伏比を規定するパラメータであることがわかる。表3、表4に普通鋼、高機能鋼の材料特性値を示す。ヤング率はばらつきが十分小さいと考えられるため、一定とした。また、塑性域における応力ひずみ関係を規定するパラメータ ( $E_{st}$ 、 $\varepsilon_{st}$ 、 $\xi$ ) は降伏強度やコンクリートの圧縮強度の影響に比べて小さいことが既往の研究により明らかにされている。

3) その為、降伏強度のみ不確定性を正規分布で与えることとする。

設計基準となる全塑性曲げモーメント算出の際には、公称値を材料係数で除した値である設計基準値を用いた。材料係数は各パラメータの非超過確率が1%となるように設定した。値は、コンクリートの圧縮強度の材料係数 $\gamma_{mc} = 1.03$ 、普通鋼の降伏強度の材料係数 $\gamma_{ms} = 0.98$ 、高機能鋼の降伏強度の材料係数 $\gamma_{mh} = 0.96$ であった。

乱数により発生させた普通鋼、高機能鋼の降伏強度、および、コンクリート圧縮強度のヒストグラムをそれぞれ、図7、図8、図9に示す。

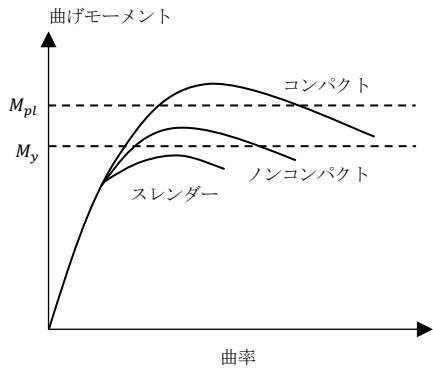


図1 断面区分

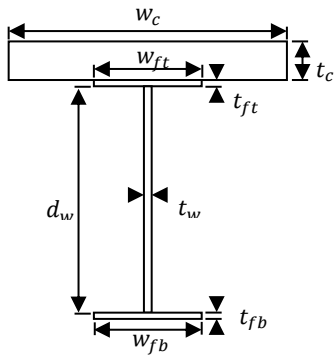


図2 ハイブリッド合成桁断面図

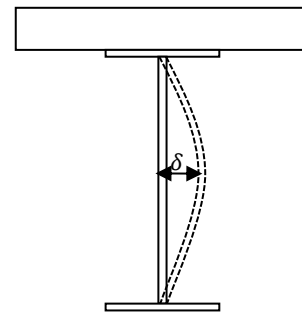


図3 初期不整

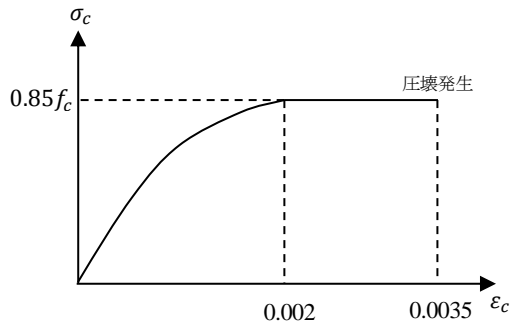


図4 コンクリートの応力ひずみ曲線

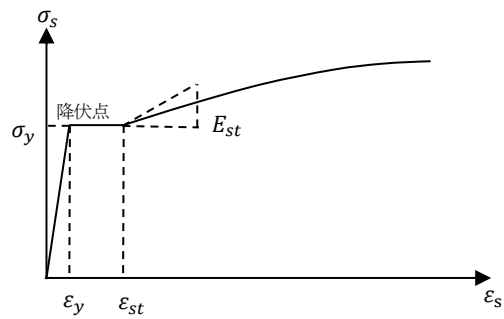


図5 鋼材の応力ひずみ曲線

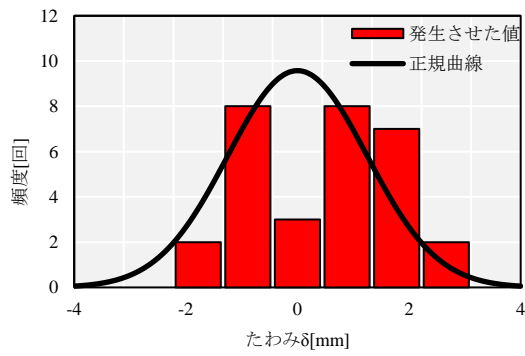


図6 初期不整の確率密度関数

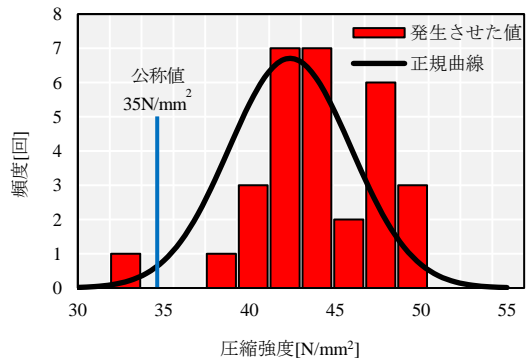


図7 コンクリートの圧縮強度の確率密度関数

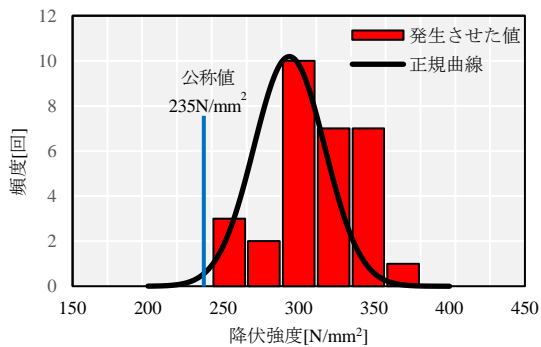


図8 普通鋼の確率密度関数

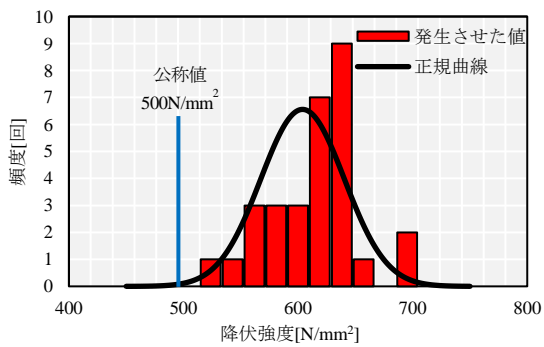


図9 高機能鋼の確率密度関数

表2 コンクリートの材料特性値

コンクリート	設計基準値	公称値	平均値	標準偏差
圧縮強度( $N/mm^2$ )	33.98	35	42.37	3.568
終局ひずみ	0.0035	0.0035		

表3 普通鋼の材料特性値

普通鋼	設計基準値	公称値	平均値	標準偏差
ヤング率( $N/mm^2$ )	200000.0	200000.0		
降伏強度( $N/mm^2$ )	293.78	235	293.75	23.5
硬化係数( $N/mm^2$ )	4070	4070		
硬化ひずみ	0.0180	0.0180		
硬化曲率	0.49	0.49		

表4 高機能鋼材の材料特性値

高機能鋼	設計基準値	公称値	平均値	標準偏差
ヤング率( $N/mm^2$ )	200000.0	200000.0		
降伏強度( $N/mm^2$ )	520.83	500	603.899	36.502
硬化係数( $N/mm^2$ )	5000	5000		
硬化ひずみ	0.0089	0.0089		
硬化曲率	0.350	0.350		

### 3 数値解析モデルの妥当性検証

シミュレーションを実施する際の主要な問題として、実現現象の再現性が挙げられる。境界条件の設定方法によっては実現現象と全く異なる挙動が得られる可能性がある。用いるモデルの妥当性および境界条件設定を検証し、実験値との比較を行う。H型鋼の4点曲げ実験から得られたデータを検証に用いた。

#### 3.1 H型鋼の4点曲げ実験概要

図10のように、試験体を配置し、単純梁とした。鉛直方向に強制変位を与えることで実験を行った。また、図11はH型鋼の断面図、表5は断面寸法値を表す。

#### 3.2 Abaqusによるモデリング

H型鋼の4点曲げ試験の実験環境を模擬しAbaqus上で4点曲げ試験を行った。H鋼の曲げ実験と合わせ同種の鋼材で引張試験を実施した。実験から得られた鋼材特性のデータを入力した。解析モデルを図12に示す。

#### 3.3 結果の比較

試験体中央部(図10内黒丸)の鉛直方向変位を記録し荷重-鉛直方向変位関係のグラフを、実験及び解

析対し描いた。その結果を図13、図14に示す。増減傾向は概ね一致している。しかし、数値計算結果における荷重の伸びが小さいことがわかる。鉛直たわみが107mm程度の時、荷重の実験値は約320kN、荷重の解析値は約264kNである。これは、実験で摩擦の影響によってローラーの再現が十分でなく、理想的な単純梁より拘束が強かったことが推察される。また、曲げ試験終了時の破壊形状を図15、図16に示す。上フランジにおける局部座屈を含め、破壊形状は概ね一致していることがわかる。

以上より、本モデルで設定した解析条件は実現現象と一致していると考え、本条件設定をハイブリッド合成桁モデルに適用し、数値計算を行った。

表5 H型鋼の寸法

全長L(mm)	1350
試験区間 $l_1$ (mm)	350
試験区間 $l_2$ (mm)	450
フランジ厚さ $t_f$ (mm)	8.8
フランジ幅b(mm)	125
ウェブ厚さt(mm)	6.8
ウェブ幅h(mm)	107.4

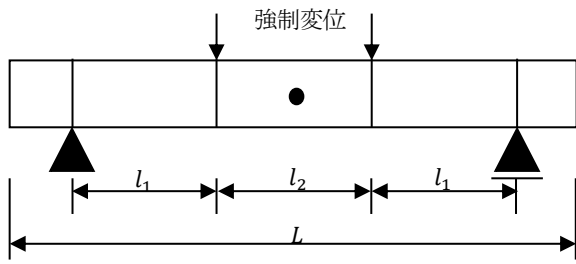


図 10 4点曲げ試験概念図

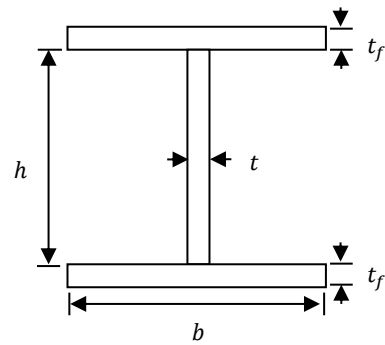


図 11 H型鋼の断面図

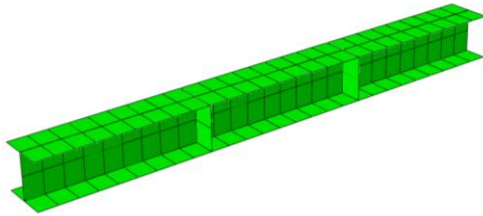


図 12 有限変位解析モデル

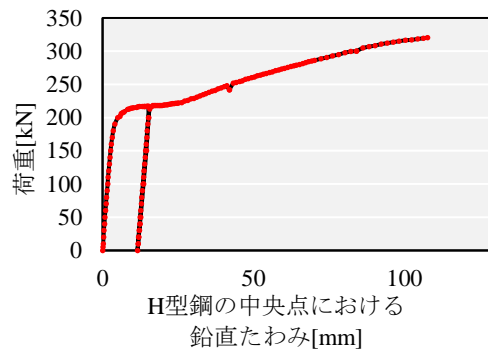


図 13 4点曲げ試験における荷重-中央変位関係

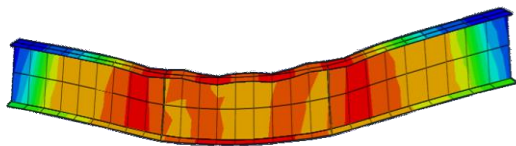


図 15 解析における H 型鋼の破壊形状

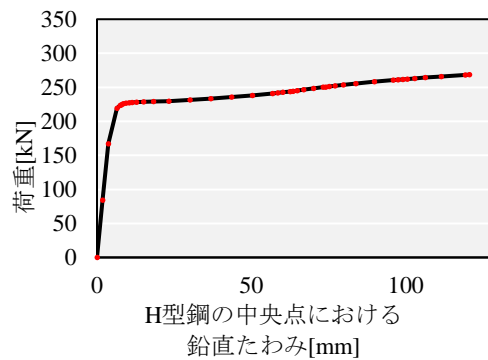


図 14 シミュレーションにおける荷重-中央変位関係



図 16 実験における H 型鋼の破壊形状

## 4 結果と考察

### 4.1 解析結果

図 17 は数値計算で用いたハイブリッド合成桁モデルであり、その破壊形状は図 18 のようになる。図 19、図 20、図 21 は、ある材料パラメータおよび初期不整を用いた場合の結果である。図 20 から、荷重の変化率が負になる瞬間、座屈が発生したと判断し終局曲げ耐力  $M_u$  を算出した。また、圧縮破壊が先行した

場合は、圧壊ひずみに達した瞬間の荷重から終局曲げ耐力 $M_u$ を算出した。横軸は時間であるが、定常解析を行ったため時間に物理的意味はない。最終的な状態が時間1という定義である。図21は、荷重-ウェブ中央(図17内赤丸)における面外方向変位関係である。座屈発生後、荷重の減少とともに面外方向に大変形を起こしている様子が見て取れる。図22は、荷重-下フランジ中央(図17内黒丸)における鉛直方向変位関係を表している。変位の変化率は次第に小さくなり負方向への変位が見られた。

材料特性値及び初期不整の値をばらつかせ、各断面に対し30回試行を繰り返した。その結果として、図19に各ウェブ厚毎の $M_u/M_p$ に関するヒストグラムを示す。各図を見比べるとわかるように、ウェブ厚上昇に伴い $M_u/M_p$ の分布値上昇の様子が見て取れる。これは、ウェブ厚の座屈抵抗性能に及ぼす影響が大きく、耐力が増加したためだと考えられる。 $M_u/M_p$ の平均値はそれぞれ0.42, 0.55, 0.80, 1.01, 1.12である。

ウェブ厚5mm、6mm、8mm、10mmの場合は全試行において座屈が先行した。12mmの場合は座屈破壊先行が9回、コンクリートの圧縮破壊先行が21回であった。ウェブ厚5mm以外の断面はすべてコンパクト断面として設計したが、ほぼすべての断面で座屈が先行する形となった。AASHTOで定められた断面区分設定式ではコンパクト断面とノンコンパクト断面を明確に区別できないことがわかった。

5mm, 6mm, 8mm時は $M_u/M_p$ は1よりも小さな値で分布した。しかし、補剛材による座屈抑制がなされれば、耐力の増加が期待できる。10mm時は座屈が先行するにもかかわらず基準値 $M_p$ より大きい $M_u$ 分布が見られた。これは、座屈が先行する場合でも、全塑性曲げモーメントを用いた設計が適用可能な断面が存在することを示している。12mm時は座屈破壊と圧縮破壊の両方が発生した。座屈が先行する場合に耐力が低くなると予想していたが、 $M_u/M_p$ の最小値0.97は圧壊

先行時に算出された値であった。ここで、 $M_u/M_p$ が0.97となったとき、20回目の試行で得られた値であるため「ケース20」と呼ぶこととする。ウェブ厚12mm以外の断面においてケース20で得られた $M_u/M_p$ の値を、表6にまとめる。ケース20において $M_u/M_p$ 値が最小値をとったのは、ウェブ厚12mmの断面のみである。その他の断面においては最小値でない。同じ材料パラメータを用いても、幾何学的パラメータが異なることで、曲げ耐力分布へ影響が発生することを確認できた。各幾何学的パラメータが、曲げ耐力分布にどのような影響を及ぼすのか検討する必要がある。

公称値を用いて解析を行った。すべての断面において座屈破壊が先行した。その際の $M_u/M_p$ の値を断面毎に表7に示す。公称値から算出された $M_u/M_p$ は、モンテカルロシミュレーションにより算出されたどの値よりも小さくなった。

表6 ケース20の $M_u/M_p$ の値

ウェブ厚	$M_u/M_p$
5mm	0.390
6mm	0.530
8mm	0.759
10mm	0.893

表7 公称値使用時の $M_u/M_p$ の値

ウェブ厚	$M_u/M_p$
5mm	0.337
6mm	0.432
8mm	0.603
10mm	0.752
12mm	0.883

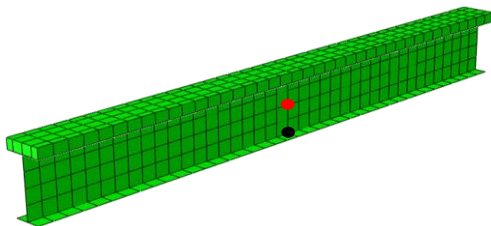


図17 ハイブリッド合成桁モデル

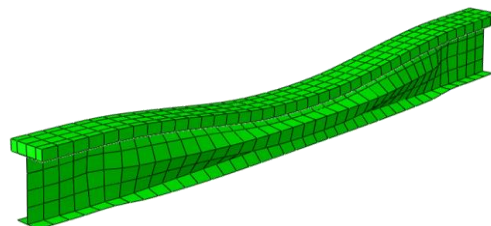


図18 ハイブリッド合成桁の破壊形状

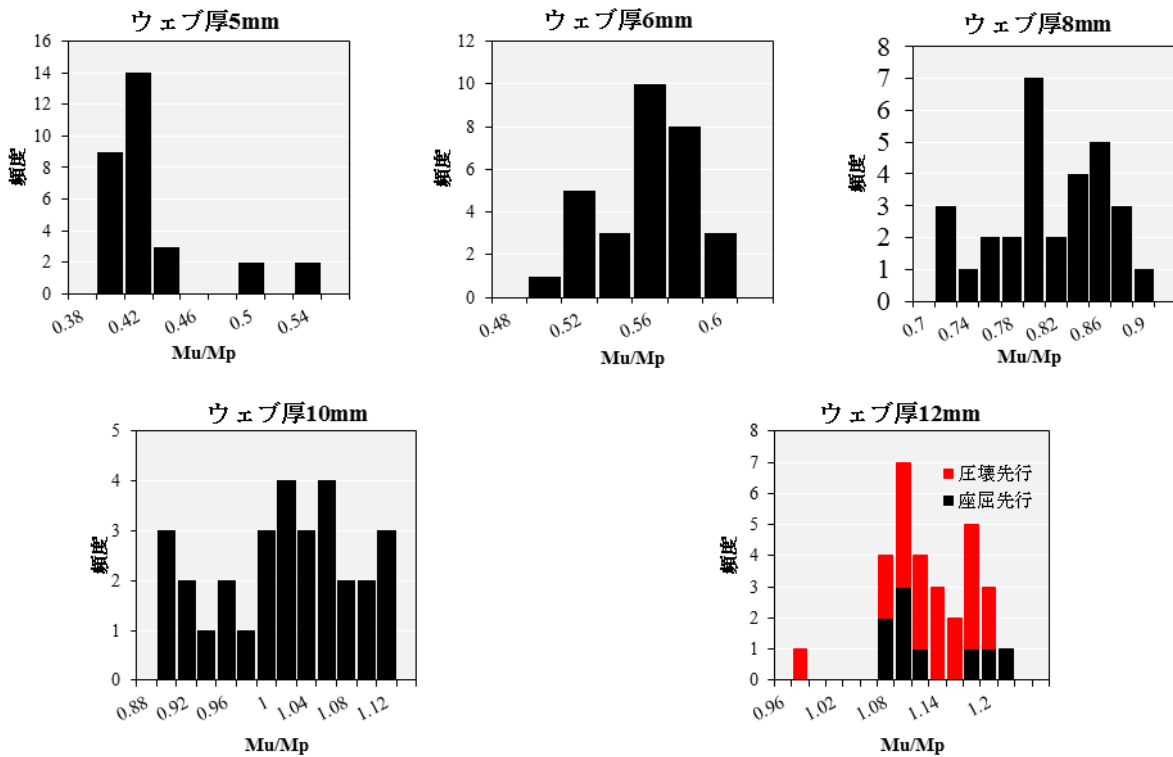


図 19 ウェブ厚毎の $M_u/M_p$ に関するヒストグラム

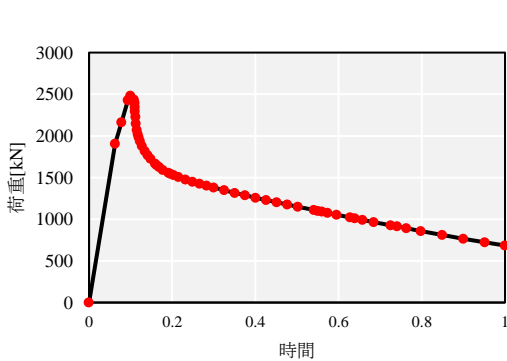


図 20 ウェブ厚 8mm 時における荷重-時間関係

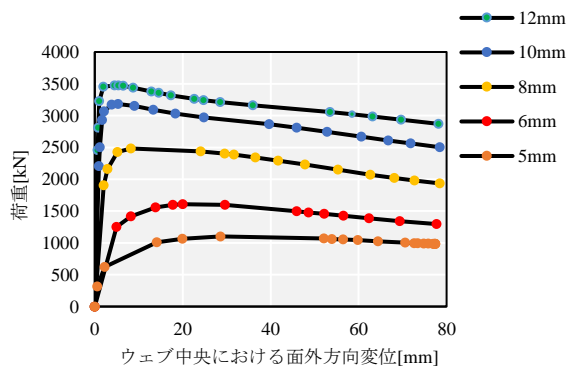


図 21 荷重-ウェブ中央における面外方向変位関係

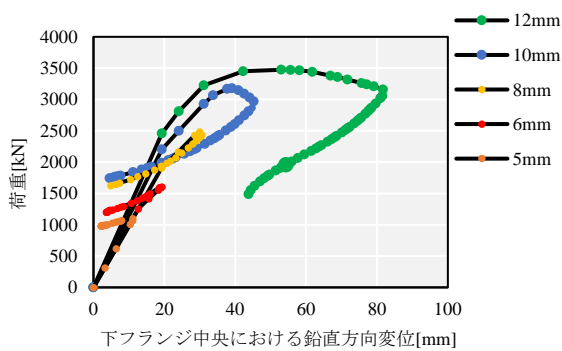


図 22 荷重-下フランジ中央における鉛直変位関係

#### 4.2 部材係数の設定

部材係数の設定方法について記載する。図 19 により、全塑性曲げモーメントを基準とした終局曲げ耐力の分布を確認した。安全と判断できるのは $M_u/M_p \geq 1$ を満たす時である。従って、 $M_u/M_p < 1$ となる確率が小さくなるような部材係数を設定することが合理的である。本研究では $M_u/M_p < 1$ となる確率が1%程度となるように部材係数を設定した。各モデルに対して設定した部材係数の値を表 8 にまとめる。

10mm、12mm 時は全塑性曲げモーメントに対して大きな曲げ耐力が算出されることがある。しかし、ばらつきが原因で部材係数は安全側の値設定となった。



材料特性や初期不整のばらつきを少なくすることができれば、低コスト化可能な部材係数の設定に繋がる。

表 8 各モデルに対する部材係数の値

ウェブ厚	部材係数 $\gamma_b$
5mm	0.381
6mm	0.500
8mm	0.710
10mm	0.890
12mm	0.973

## 5 まとめ

本研究では、材料特性・初期不整のばらつきを考慮してハイブリッド合成桁の材料係数・部材係数の設定方法を検証した。以下に本研究の結論及び、今後の検討課題をまとめる。

- (1) ばらつきを考慮しモンテカルロシミュレーションを行うことで、確率的に信頼性のある安全係数設定が可能であることを確認した。本研究の試行回数は30回であったが、試行回数を増やすことでより信頼性の高い安全係数の設定に繋がる。
- (2) AASHTO で規定されている断面区分設定式では、座屈破壊が先行する断面と圧縮破壊が先行する断面を区別できない。
- (3) 鋼桁の座屈が先行する場合でも、全塑性曲げモーメントより大きな曲げ耐力を持つ断面が存在する。
- (4) ウェブの幅厚比を大きく取った場合は座屈が先行し、全塑性曲げモーメントまで達しない。しかし、補剛材の導入により座屈抵抗性能を改善することで、合理化の余地が残っている。
- (5) 本研究でばらつきを考慮したパラメータは、普通鋼及び高機能鋼の降伏強度、コンクリートの圧縮強度、初期不整であったが、より多くの不確定性を導入することが必要である。
- (6) 材料は寸法によって材料特性値の値も変化することが知られている。実現象の再現性を改善するために必要な今後の検討課題である。
- (7) 各種幾何学的パラメータが、曲げ耐力分布に及ぼす影響の検討が必要である。

## 参考文献

- [1] 国土交通省：道路構造物の現状(橋梁)
- [2] 日本鋼構造協会：合成桁の限界状態設計法試案, JSSC テクニカルレポート, No70, 2006. 10
- [3] 江藤克礎, 中村聖三, 荒木智, 高橋和雄：材料特性のばらつきを考慮した合成コンパクト断面の正曲げ耐力設計式, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, 576-585, 2007.10
- [4] 山本亨輔, 河野広隆, 杉浦邦征, 大島 義信：材料特性が鋼-コンクリートハイブリッド合成桁の曲げ耐力確率分布に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, 2008
- [5] 荒木智, 中村聖三, 江頭克礎, 高橋和雄, 呉慶雄：塑性域の鋼材特性が鋼-コンクリート合成桁の曲げ耐力の確立分布に及ぼす影響, 構造工学論文集, 51A, pp.1247-1255 ; 2005
- [6] 利根川太郎, 山口隆司, 杉浦邦征, 渡邊英一：薄肉少補剛ウェブ合成ハイブリッド箱桁の正曲げ終局強度に関する解析的研究, 土木学会論文集A, Vol.62/No.2, pp.300-311, 2006.4.
- [7] 利根川太郎, 浦野友樹, 杉浦邦征, 山口隆司, 渡邊英一, 中村雅樹：高機能鋼材を用いた合成ハイブリッド箱桁の正曲げ耐荷特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, 643-655, 2006.7.
- [8] 小西拓洋, 高橋和也, 三木千寿：高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性, 土木学会論文集 No.654/I-52, 91-103, 2000.7.
- [9] 長井正嗣, 宮下剛, 劉翠平, 稲葉尚文, 本間淳史：鋼及び合成ハイブリッド桁の設計と適用性に関する考察, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.68, No1, 203-215, 2012.
- [10] 利根川太郎, 浦野友樹, 杉浦邦征, 山口隆司, 渡邊英一, 中村雅樹：高機能鋼材を用いた合成ハイブリッド箱桁の正曲げ耐荷特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol.62, No.3, 643-655, 2006.7.
- [11] 稲葉尚文：鋼・コンクリート 2 重合成 I 桁橋の実用化に向けた研究, 2011.
- [12] 土木学会鋼構造委員会座屈設計ガイドライン改定小委員会：鋼構造シリーズ 座屈設計ガイドライン 改定第 2 版[2005 年改訂版]

謝辞

本研究に際して、丁寧なご指導をいただきました山本亨輔先生と松島亘志先生に深謝いたします。また、日々の生活から研究までお世話になったフロンティア工学研究グループの方々、そしていつも支えてくれた家族に心より感謝いたします。