

論文 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

山本 亨輔^{*1}・河野 広隆^{*2}・杉浦 邦征^{*3}・大島 義信^{*4}

要旨: 座屈破壊の懸念があるハイブリッド桁を合成桁とすると、座屈破壊の抑制が期待できる。よって本研究では、正曲げを受けるハイブリッド合成桁に対し、構成材料であるコンクリート、普通鋼、高性能鋼の材料特性を確率変数として与え、座屈を考慮した三次元弾塑性有限変位解析を行い、耐力分布を算出した。その結果、耐力設計に全塑性曲げモーメントを用いた場合でも、材料変動を少なくすることで、安全に設計できることが分かった。

キーワード: ハイブリッド合成桁, 正曲げ耐力, 材料特性, FEM, 全塑性曲げモーメント

1. はじめに

一般に橋梁の経済性向上には、軽量化と製作材料コストの抑制が重要である。断面の軽量化においては、降伏強度が 500MPa 以上で、溶接加工性に優れる高機能鋼材¹⁾が開発されており、支間長 70m の二径行間連続桁橋を試設計した結果、10%以上の鋼重低減と、13%の全体コスト低減が可能であると報告されている¹⁾。

また、製作材料コスト低減の観点からは、フランジとウェブに異なる強度の材料を用いたハイブリッド鋼桁^{2), 3), 4)}が有効であると考えられている。例えば、フランジとウェブが同じ強度で規格される通常の桁に SM570 を適用する場合、これをハイブリッド桁に変更することで経済性が向上するとする試設計の報告²⁾がある。これは曲げ抵抗力改善にはフランジの材料強度が大きく影響するためである。さらに、ハイブリッド桁の耐荷特性^{2), 3)}や疲労強度特性⁵⁾を把握するための研究も進められている。

しかしながら、ハイブリッド桁はウェブの降伏がフランジに先行することから、通常桁とは異なる曲げ耐荷特性を有する。そのため、JSSC 基準案²⁾では通常桁より厳しい座屈係数や座屈パラメータをハイブリッド桁に採用している。これにより、ハイブリッド桁はウェブの限界幅厚比が相対的に厳しく制限される。この制限により、ハイブリッド桁採用による製作材料コスト削減効果は、期待されているほどにはなっていない。

一方、鉄筋コンクリート床版と鋼桁をずれ止めで連結した合成桁の採用も橋梁の経済性向上に有効である。なぜなら合成桁に正曲げが作用している場合、床版に圧縮荷重が配分されることから、鋼ウェブ及び鋼フランジの圧縮領域が縮小し、弾塑性座屈が抑制される。ゆえに、

限界幅厚比を現行規定⁶⁾よりも大きく取ることが可能となり、大きな幅圧比を採用することで、鋼材の量を少なく抑え、経済性を向上させることが出来るからである。

また、採用する設計法によっても、橋梁の経済性は変化する。国内の道路橋の設計に対しては耐震設計を除いて許容応力度設計法が採用されてきたが⁶⁾、これは鋼単一桁を対象に策定されたもので、合成桁が持つ本来の性能を十分に発揮できる設計法とはいえなかった。たとえば、鋼材は塑性域での特徴的な伸び性能やひずみ硬化といった有用な性質を持っているが、許容応力度設計法では降伏点を基準に弾性設計される⁶⁾ため、これらの塑性特性は活用されることがない。鋼桁に限界状態設計法の導入を考えた場合、終局限界状態の設計では、座屈による脆弱的破壊の可能性や塑性域での材料特性の多様性のため、安全性を確保する観点から、設計基準を降伏点に定める必要があった。そのため、終局限界状態の定義を定める必要がなく、新しい設計法を導入する必要性が生じなかった。しかし、先に述べたように合成桁は座屈破壊が抑制され、コンクリートの圧縮破壊が先行することから、設計基準を降伏点以降に定め、鋼材の塑性特性を活用した設計も可能である。この観点から、近年、鋼橋の設計にも限界状態設計法が導入されつつあり、終局限界設計の検討や研究が進められるようになった。すでに、アメリカ⁸⁾やヨーロッパ⁹⁾など諸外国の設計基準には部分安全係数法の書式を用いた限界状態設計法が導入されており、圧縮域における座屈破壊が終局限界状態に先行しないような断面であれば、その曲げ抵抗として全塑性曲げモーメントを取ることが可能となっている。これらの基準を参考として、国内での合成桁の正曲げ耐力設計式の検討¹⁰⁾がすでに進められており、全塑性曲げモー

*1 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻

*2 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 教授(正会員)

*3 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授

*4 京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 助教(正会員)

ントを基準とした設計式¹⁰⁾も提案されるに至っている。

以上の合理化手法を同時に採用した構造として、ハイブリッド合成桁を塑性設計することで橋梁の経済性向上が期待される。しかしながら、ハイブリッド合成桁は、同じ全塑性曲げモーメントを持つ通常の合成桁と比べた場合、高機能鋼を用いたフランジが大きな荷重を分担していることから、相対的にウェブの幅厚比が大きくなっていると考えられる。さらに、高機能鋼が大きな荷重を分担するために圧縮フランジが早期に降伏に達し、塑性座屈を生じる可能性もある。このため、通常桁と同様の設計式を、ハイブリッド合成桁に採用することは、座屈破壊に対する懸念から適切ではない。さらに、合成桁の設計式を検討した既往の研究¹⁰⁾においては、桁断面の終局曲げ耐力算定には、座屈破壊を考慮できないファイバー法による断面解析が採用されており、その設計式の算定手法をそのままハイブリッド合成桁の設計式の検討に適用することも不適切である。

そこで、本研究では座屈破壊による影響を考慮できる三次元弾塑性有限変位解析手法により、ハイブリッド合成桁の終局耐力の評価を行う。また材料特性を確率分布で与え、実際の材料変動を表現する。

2. 解析概要

2.1 断面解析の種類と解析方法

本研究では、座屈が考慮できる三次元弾塑性有限変位解析と、考慮できない断面解析を行う。これらの比較により、座屈破壊による影響を評価できる。断面解析の手法はいくつか存在するが、通常合成桁の設計基準として採用されている全塑性曲げモーメントと、現行の設計基準と比較するために降伏曲げ耐力、座屈破壊の影響を評価するために終局曲げ耐力を算出する。さらに終局曲げ耐力は簡便な手法と、より詳細な手法の2つの手法により算出した。ここで、終局限界状態とは、コンクリート床版の上縁ひずみがコンクリートの圧壊ひずみに達した時点と言うものとする。

全塑性曲げモーメントは鋼材の全塑性状態を仮定したものであり、実際には鋼材のひずみ硬化により、桁断面はより大きな断面耐力を発揮すると期待される。したがって、座屈破壊が生じないと仮定すると、終局曲げ耐力は全塑性曲げモーメントを上回ると期待できる。

合成桁断面においては一般に荷重の増加に伴い、断面内に荷重の再配分が生じる。これは、中立軸の移動とともに応力分布が変化することで、位置によっては除荷されることもある。この影響を考慮した場合とそうでない場合で終局曲げ耐力の算出結果は大きく変化する可能性がある。それぞれの耐力算出フローを図-1、図-2に示す。ここで、フロー中の式(1)、(2)は以下の通りである。

$$F = \sum_{i=0}^{i<n} \sigma_i A_i \quad (1)$$

$$M = \sum_{i=0}^{i<n} \sigma_i A_i y_i \quad (2)$$

ここに、 σ_i :ファイバー*i*における平均ひずみに対する応力、 A_i :ファイバー*i*の面積、 y_i :中立軸からファイバーの図心までの距離である。

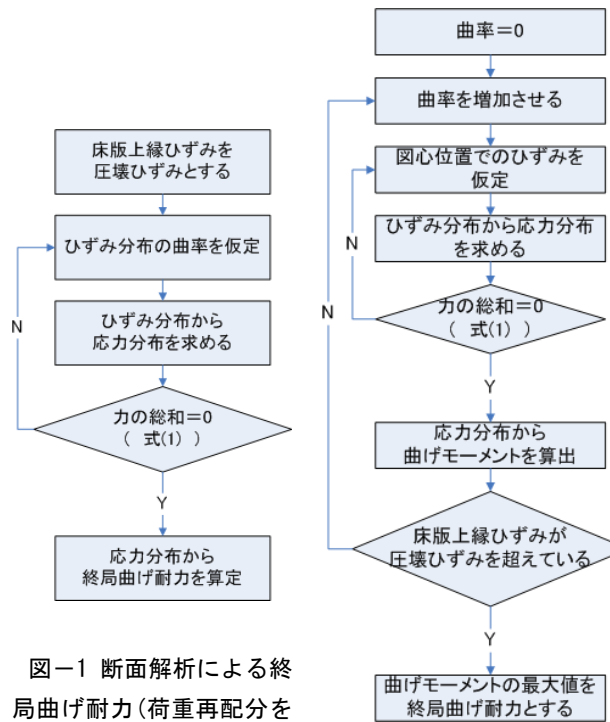


図-1 断面解析による終局曲げ耐力(荷重再配分を考慮しない)の算出フロー

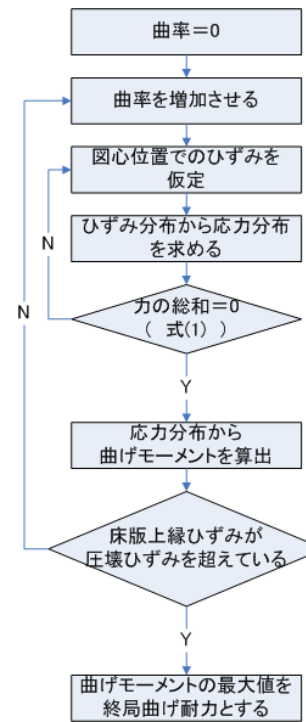


図-2 荷重再配分を考慮できる詳細な終局曲げ耐力の算出フロー

合成桁の曲げ耐力設計式に関する既往の研究¹⁰⁾では図-1に示したフローを用いているが、弾塑性有限変位解析モデルでは荷重再配分の影響も考慮に入らるため、図-2に示すフローを採用した場合の耐力も同時に算定した。

また、従来の設計基準である降伏耐力も算出した。これは全塑性曲げモーメントを基準とした場合と比較、検討をするためである。算出に当たっては実用的に用いられている、荷重再配分を考慮しない手法を採用した。なお、正曲げを受けるハイブリッド合成桁の降伏点はウェブ下端(引張側フランジのウェブ端側)のひずみが降伏ひずみに達した時点である。

一方、参考とした設計基準にアメリカの設計基準であるAASHTO⁸⁾があり、この設計基準に基づく耐力も同時に算出した。AASHTO 3rd Ed. (以下、AASHTO2004)⁸⁾では、終局限界状態をコンクリート床版の圧縮破壊と鋼桁

の座屈破壊に定めている。さらに、コンクリート床版の圧縮破壊が先行するような桁断面をコンパクト断面、座屈破壊が先行する桁断面をノンコンパクト断面として、分類し、それぞれ異なる曲げ耐力の設計式を与えている。コンパクト断面の条件は、以下の式(3), (4), (5)をすべて満たす場合である。

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

$$f_{yu}, f_{yw} \leq 485 \text{ (MPa)} \quad (4)$$

$$\frac{2D_{cp}}{t_w} \leq 3.76 \sqrt{\frac{E}{F_{yc}}} \quad (5)$$

ここで、 D : ウェブ高、 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、 F_{su} : 圧縮フランジの降伏強度、 F_{sw} : ウェブの降伏強度である。公称曲げ耐力 M_n は全塑性曲げモーメント M_p を用いて、

$$M_n = \phi \cdot M_p \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{D_p}{D_t} < 0.1 \text{ の場合, } \phi = 1.0 \\ \frac{D_p}{D_t} \geq 0.1 \text{ の場合, } \phi = 1.07 - 0.7 \cdot \frac{D_p}{D_t} \end{cases} \quad (7)$$

と表される。ただし、 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。

一方、ノンコンパクト断面の場合の公称耐力は、

$$M_n = R_h \cdot M_y \quad (8)$$

と表される。ここで、 M_y : ホモジニアス桁とした場合の降伏曲げ強度、 R_h : ハイブリッド係数である。ハイブリッド係数は、

$$R_h = \frac{12 + \beta(3\rho - \rho^3)}{12 + 2\beta} \quad (9)$$

$$\text{ここで, } \beta = \frac{2D_n t_w}{A_{fn}} \quad (10)$$

$$\rho = \min\left(\frac{F_{yw}}{f_n}, 1.0\right) \quad (11)$$

であり、 D_n : 弾性中立軸から距離の大きい方のフランジ側までの距離、 f_n : D_n の距離をとるフランジの降伏強度(距離が等しい場合、降伏が先行する方の降伏強度)、

A_{fn} : D_n の距離をとるフランジの断面積(距離が等しい場合、降伏が先行する方の断面積)、 F_{yw} : ウェブの降伏強度である。

2.2 解析モデル

(1) 材料特性

材料特性値は確率変数として与えられるが、断面解析の時点では実際の設計を考慮して、公称値のみを用いた。ハイブリッド合成桁はコンクリート、圧縮フランジ及びウェブに用いられる普通鋼、引張フランジに用いられる高機能鋼の3種類の材料からなる複合材料であるが、普通鋼と高機能鋼には同じ応力-ひずみ関係を用いた。

コンクリートの応力-ひずみ関係¹¹⁾はコンクリート標準示方書¹¹⁾に示された式(12)を用いる。

$$\sigma'_c = E_0 K (\epsilon'_c - \epsilon'_p) \geq 0 \quad (12)$$

$$\text{ここで, } E_0 = \frac{2f'_{cd}}{\epsilon'_{peak}} \quad (13)$$

$$K = \exp\left(-0.73 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}} R_k\right) \quad (14)$$

$$R_k = 1 - \exp\left(-1.25 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}}\right) \quad (15)$$

$$\epsilon'_p = \epsilon'_{max} - 2.86 \epsilon'_{peak} \cdot R_p \quad (16)$$

$$R_p = 1 - \exp\left(-0.35 \frac{\epsilon'_{max}}{\epsilon'_{peak}}\right) \quad (17)$$

であり、 σ'_c : コンクリートの圧縮応力、 ϵ'_c : コンクリートの圧縮ひずみ、 ϵ'_{peak} : 圧縮応力が最大となるひずみ、 ϵ'_{max} : 過去に受けた最大圧縮ひずみである。式(12)~(17)は圧縮方向を正としている。また、コンクリートは引張方向の応力を担当しないものとする。

普通鋼及び高機能鋼の応力-ひずみ関係¹²⁾には土木学会新技術小委員会で提案された式(18)~(20)を用いる。

$$\text{弾性域 } (0 \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{sy}) \quad \sigma_s = E \cdot \epsilon_s \quad (18)$$

$$\text{塑性域 } (\epsilon_{sy} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{st}) \quad \sigma_s = \sigma_{sy} = E \cdot \epsilon_{sy} \quad (19)$$

硬化後 ($\epsilon_{st} \leq \epsilon_s \leq \epsilon_{su}$)

$$\sigma_s = \sigma_{sy} \left(1 + \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} (1 - \exp(-R_s))\right) \quad (20)$$

$$\text{ここで, } R_s = \xi \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_y} \right) \quad (21)$$

また、 σ_s ：鋼材の引張応力、 ε_s ：鋼材の引張ひずみ、 E ：ヤング率、 ε_y ：降伏ひずみ、 ε_{st} ：ひずみ硬化開始点ひずみ(以後、硬化ひずみと略す)、 E_{st} ：ひずみ硬化係数(以後、硬化係数と略す)、 ξ ：ひずみ硬化後の応力-ひずみ曲線を規定するパラメータである。本稿ではこのパラメータを硬化曲率と呼ぶことにする。 ξ の値が 0.04 以上であれば $\varepsilon_s \cong \varepsilon_{st}$ の時、式(20)は

$$\sigma_s \cong \sigma_{sy} \left(1 + \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \right) \quad \dots(22)$$

となる。このように、 E_{st} と ξ は降伏比 YR を規定するパラメータである¹⁰⁾。

(2) 入力諸元

今回は時間の制約上、2つのモデルについて解析を行った。一つは AASHTO2004⁸⁾においてコンパクト断面とされるものであり、もう一方はノンコンパクト断面である。両者の入力諸元の違いはウェブ幅だけである。その幅厚比は前者が 137.76 に対して、後者は 160.07 である。これは JSSC 基準案²⁾の制限値である 109 より大きな値であるが、ハイブリッド合成箱桁の耐荷特性に関する実験¹³⁾では制限値は 150 程度としており、この値を参考に設定した。その断面形状は図-3 のようになる。詳細な値を記したものを図-4 に示す。また、断面寸法は表-1 にまとめた。モデルには図-4 のように 2 点荷重による変位制御で荷重を加えた。また、鋼材には確率変数で初期不整を与えてある。その値は桁方向の長さを L として、平均値 0、標準偏差 $L/1000$ の正規分布確率変数と仮定した。この値は鋼板の品質保証値を参考に推定したものである。

予め前述の手法を用いた断面解析により設計値を算出し、材料特性値を確率変数として与えた三次元弾塑性有限変位解析モデルを用いて算出した耐力分布と比較した。なお、三次元弾塑性有限変位解析には、ABAQUS Ver.6.7.1¹⁴⁾を用いた。構成則を定めるに当たり、ポアソン比 $\nu = 0.30$ を仮定し、式(12)、(18)を応力-ひずみ関係式として用いた等方性材料とした。

材料特性の値は通常の合成桁に関する同様の検討¹⁰⁾を参考に設定した。具体的にはコンクリートの値は変動係数を一般工事における管理状態が普通と判断される 17.5%と仮定し、設計基準値を下回る確率を 5%とした場合の平均値及び標準偏差値を算出し、その性質を持つ確率変数を与えた。鋼材に関しては、ヤング率を確定量として固定し、それ以外のパラメータに関しては先の文献¹⁰⁾のものを用いた。高機能鋼に関しては統計的資料が少ないことから、試験結果を元に推定した。

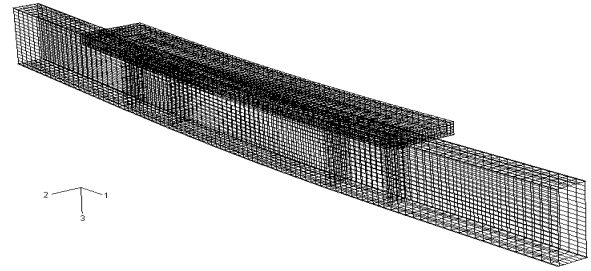
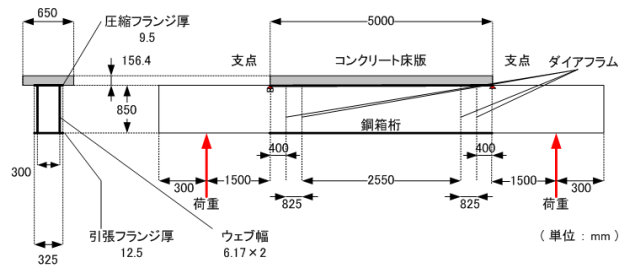


図-3 三次元弾塑性有限変位解析モデル (立体図)



断面図

側面図

図-4 三次元弾塑性有限変位解析モデル (断面寸法)

表-1 構造寸法

モデルの断面分類		コンパクト	ノンコンパクト
床版	厚(mm)	156.4	
	幅(mm)	650.0	
圧縮フランジ	厚(mm)	9.5	
	幅(mm)	325.0	
ウェブ	高(mm)	850.0	
	幅(mm)	6.17×2	5.31×2
引張フランジ	高(mm)	12.5	
	幅(mm)	325.0	

表-2 材料特性値

		設計基準	平均値	標準偏差
コンクリート	圧縮強度(N/mm ²)	35	42.37	3.568
	ピークひずみ	0.002	0.002	0.0002
	ピーク比	0.5714	0.5714	0.0002
普通鋼	ヤング率(N/mm ²)	200000.0		
	降伏強度(N/mm ²)	235	293.75	23.50
	硬化係数(N/mm ²)	4070	4156	1342
	硬化ひずみ	0.0180	0.0185	0.0049
	硬化曲率	0.049	0.049	0.027
高機能鋼	ヤング率(N/mm ²)	200000.0		
	降伏強度(N/mm ²)	500	603.899	36.502
	硬化係数(N/mm ²)	5000	5000	1500
	硬化ひずみ	0.0089	0.0082	0.0041
	硬化曲率	0.350	0.350	0.027

耐力分布は以下の手順によって得た。

- 1) 確率変数として算出したパラメータを固定した状態で、モデルに載荷する。荷重は変位を徐々に大きくしていくことで与える。
- 2) 荷重の大きさは圧壊または座屈破壊が生じるまでは上昇を続け、最大値に達した後、低下する。この荷重の最大値から耐力分布の標本を算出し、記録する。
- 3) 1), 2)の操作を繰り返して、耐力分布を得る。

今回は時間の制約から、ふたつのモデルの母数はともに 100 である。また、2)で荷重が最大値に達した際にコンクリート床版のひずみが圧壊ひずみを超えていれば圧縮破壊とし、そうでない場合は座屈破壊と判断した。

3. 解析結果

断面解析の結果を表-3 に示す。なお、コンパクトモデルのハイブリッド係数は 0.86、ノンコンパクトモデルのハイブリッド係数は 0.87 である。また、表-3 に示したように、荷重再配分の影響が少なからず断面解析の結果に影響していることがわかる。このことから、三次元弾塑性有限変位解析の結果と比較するものとしては、荷重再配分を考慮できる詳細なフローにより算出した値を用いるものとする。

三次元弾塑性有限変位法により算出した終局曲げ耐力分布を図-5、図-6 に示す。なお、耐力の値は全塑性曲げモーメントで割り、無次元化してある。

コンパクトモデルの場合、平均値 1.15 で、約 1.1~1.3 に分布した。これは断面解析により算出した終局曲げ耐力 1.05 に対しても大きな範囲で分布している。この理由として、材料特性の設計基準値が実際の統計量に対して安全側に設定されていることが挙げられる。このように幅厚比が非常に大きな断面であっても、十分な耐力を有することがわかる。また、この結果は、断面解析で求めた終局曲げ耐力よりも大きな値である。理由としては、材料特性値にはその変動を考慮して安全側に設定した設計基準値を断面解析で用いたことが原因であると推測される。本モデルでは、分布の範囲が狭く、かつ、全塑性曲げモーメントより大きな値で分布していることから座屈破壊が生じなかったと考えられる。結果より、座屈破壊が先行しない場合では、全塑性曲げモーメントが実際の耐力を精度良く表すと思われる。

一方、ノンコンパクトモデルの場合、耐力は約 0.9~1.3 の広い範囲に分布することがわかった。平均値は 1.15 である。分布をみると、コンパクトモデルの耐力分布とは

表-3 断面解析の結果

	コンパクトモデル				ノンコンパクトモデル			
	曲率	中立軸 ^{*)}	耐力 M_n	M_n/M_p	曲率	中立軸 ^{*)}	耐力 M_n	M_n/M_p
			(MN·m)				(MN·m)	
降伏点	1.43×10^{-6}	0.227	1.27	0.435	1.41×10^{-6}	0.215	1.21	0.428
終局点 (荷重再配分なし)	1.36×10^{-5}	0.294	2.79	0.951	1.47×10^{-5}	0.273	2.69	0.952
全塑性	1.28×10^{-5}	0.194	2.93	1.000	1.29×10^{-5}	0.144	2.83	1.000
終局点 (荷重再配分あり)	1.45×10^{-5}	0.099	3.09	1.053	1.76×10^{-5}	0.075	2.97	1.051
AASHTO			2.81				1.06	

*) 中立軸位置は圧縮フランジ上縁から中立軸までの距離を鋼桁全高で割ったものとした。

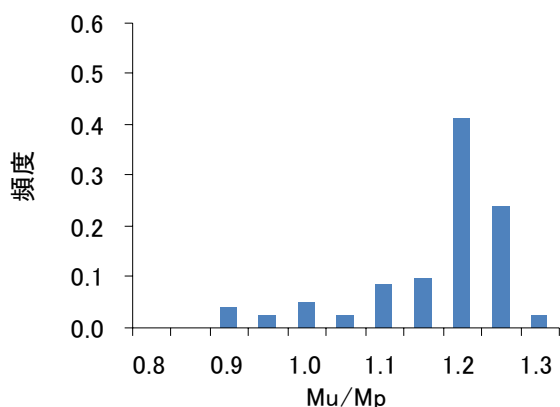


図-5 コンパクトモデルの終局曲げ耐力分布

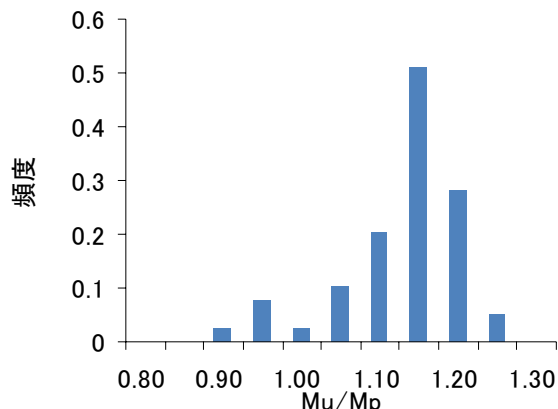


図-6 ノンコンパクトモデルの終局曲げ耐力分布

異なり、2つの山を持つような形で広く分布していることがわかる。低い方は1.0を下回ることから、座屈破壊により耐力が低下したと考えることができる。一方で、座屈破壊が起らなかった場合、全塑性曲げモーメントに対して約1.2倍程度に分布する。これより、AASHTOによるノンコンパクトモデルでは、座屈破壊する断面と、床版が圧縮破壊する断面を完全に分類できていないことが分かる。

4. 結論

今回の解析により、正曲げを受けるハイブリッド合成桁に関して得られた知見を以下に示す。

- 1) 断面解析により、ハイブリッド合成桁の終局耐力を算定する場合、荷重再配分の影響が大きい。(全塑性曲げモーメントの約10%の差が生じる。)このため、簡便な算出フローを用いた場合、終局曲げ耐力が全塑性曲げモーメントを下回ることがあるが、詳細な算出フローを用いれば、終局曲げ耐力は全塑性曲げモーメントを上回る。
- 2) 耐力分布は、座屈破壊が先行しなければ、断面解析で算定した値よりも十分に大きな値で分布する。
- 3) 耐力分布は、座屈破壊が先行した場合でも、断面解析で算定した値より大きな値で分布する。これは断面解析で用いた材料特性値が設計基準値であり、平均値よりも小さな値が設定されているためである。
- 4) 今回用いた条件式では、座屈破壊が生じる場合と生じない場合を明確に分類できないため、合理化の余地が残っていることが示された。条件式の改善や材料特性変動幅の改善により、橋梁の合理化が可能である。
- 5) ハイブリッド合成桁に対しても、通常の合成桁と同様に、簡便な全塑性曲げモーメントを用いて耐力の設計を行うことが可能である。
- 6) ハイブリッド合成桁の耐力設計において、ウェブの幅厚比を大きくとった場合は座屈破壊による耐力の低下を考慮する必要がある。
- 7) ハイブリッド合成桁の曲げ耐力設計式の策定に当たっては、断面解析のみの検討では不十分である。
- 8) 座屈破壊により耐力が低下するとされる断面においても、床版の圧縮破壊が先行する可能性があることから、構造材料の材料特性や条件式の改善により、合理化の余地がある。

謝辞：本研究に当たっては利根川太郎氏（住友金属株式会社）より高機能鋼のデータを頂いただけでなく、多くの助言と資料を頂いた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 三木千寿, 市川篤司, 楠隆, 川端文丸: (招待論文) 橋梁用高性能鋼剤 (BHS500, BHS700) の提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.1-10, 2003.
- 2) 日本鋼構造協会: 限界状態設計法に基づいたハイブリッド桁の設計基準 (案), JSSC テクニカルレポート, No53, 2002.3.
- 3) 利根川太郎, 渡辺英一, 杉浦邦征, 山口隆司, 岩川貴志: 薄肉ウェブを用いた合成ハイブリッド箱桁の提案, 土木学会論文集 A, Vol.62/No.3, pp.643-655, 2006.7.
- 4) 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.
- 5) 前田幸雄, 石渡正夫, 河合豊: 薄肉ハイブリッド・ガーダーの疲労強度に関する研究, 川鉄技報, Vol.6, No.1, 1974.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 平成14年3月.
- 7) 土木学会, 鋼構造委員会, 鋼・合成構造標準示方書委員会: 鋼・合成構造標準示方書, 2007.3.31
- 8) AASHTO: LRF Bridge Design Specifications, 3rd Ed., American Association of State Highway and transportation Officials, Washington D.C., 2004.
- 9) Eurocode 3: Design of steel structure-Part 2: steel bridge (ENV 1993-2)
- 10) 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
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書, pp.22-25, 1996.
- 12) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造新技術小委員会, 耐震設計研究 WG: 鋼橋の耐震設計指針案と耐震設計のための新技術, 1996.7.
- 13) 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.
- 14) ABAQUS: Standard User's Manual, Version6.