

高機能鋼材を用いたハイブリッド桁の力学的特性に関する研究

A study on mechanical properties of hybrid girders using high-performance steels

成瀬久聡*, 利根川太郎**, 渡邊英一***, 杉浦邦征****, 宇都宮智昭*****

Hisaaki NARUSE, Taro TONEGAWA, Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA and Tomoaki UTSUNOMIYA

*学生員, 京都大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻修士課程 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**正会員, 工博, 住友金属工業㈱ (〒541-0041 大阪市中央区北浜4丁目5番33号)

***フェロー Ph.D., 工博, 京都大学名誉教授 (〒567-0826 茨木市大池2-6-24)

****正会員, Ph.D., 京都大学助教授, 工学研究科都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*****正会員, 工博, 京都大学助教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

Studied herein is the structural performance of hybrid box girders using high-performance steels under both bending and shear force by FEM analysis. Remarkable performance of hybrid girders observed through the study are as follows: (1) Under pure bending, the bending moment can reach to almost the fully plastic moment depending on the width thickness ratio of web. (2) Under both bending and shear force, the box girder can keep the load level even after the buckling occurs and may be superior depending on the ratio of the area of the flange to the area of the web.

Key Words: hybrid girder, high-performance steel, bending, shear force

1. はじめに

1.1 研究背景

昨今、合理化・省力化された鋼2主桁桁の採用により、支間長 30~60m 程度の橋梁においては鋼橋の競争力が向上しつつある。しかしながら、支間長 80~100m 程度の橋梁においては PC (プレストレスコンクリート) 橋に競争力で劣っていることは否定できない。鋼橋の経済性追求には、重量と構成部材数を減らすことが必要であり、断面の軽量化と部材の簡素化を図る必要がある。

米国においては、高機能鋼材の採用により、鋼橋の競争力が向上したとの報告がある¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。またフランスを中心とする欧州においても、TGV 鉄道橋への採用増に見られるように、シンプルな構造である合成2主桁橋の適用拡大が図られている。我が国においても、材料面からは高機能鋼材、構造面からはシンプルな構造の提案という両面を重視し、研究開発を行う必要があった。

しかし、支間長 80~100m クラスの橋梁を桁橋で断面構成した場合、比強度的に鋼材単価と加工工数の高い SM570 クラスの鋼材が必須となり、一般的に SM490Y にて大部分の断面が構成されるスパン 60m 程度までの連続合成2主桁桁と比較して、材料面からの経済性低下が懸念される。また、桁桁構造の適用については耐風安定性などの面での懸念事項もあり、一般的には箱桁やトラス橋の形式が採用されている。このことから、トンあたり積算単価が相対的に高く、構造面でも経済性低下を否定できない。

以上の課題を解決するために、支間長 80~100m クラスに適用される一般的な鋼箱桁の合理化・省力化が第一に必須となる。従来の箱桁は一般的に薄肉多補剛構造により、長スパンでの軽量化を第一に設計されることが多かったが、近年、箱桁の合理化に関する研究も進み、開断面箱桁や細幅箱桁などの経済性に優れた鋼箱桁形式が開発され、設計・施工実績も増えつつある。

1.2 研究目的

材料面からは高機能鋼材、構造面からはシンプルな構造という両面を重視した提案構造として、高機能鋼材を用い、薄肉少補剛化を図ったハイブリッド細幅箱桁が考えられている。しかし、その基本となる構造・材料面での課題として、高機能鋼材を用いた構造物の製造実績がなく、実耐荷力の検証データが少ないことが挙げられる。そこで本研究では、高機能鋼材を用いた供試体の弾塑性 FEM 解析により、提案構造の耐荷力特性を明らかにすることを目的とする。

2. 提案構造概要

2.1 ハイブリッド桁

ハイブリッド桁とは、フランジに高強度の鋼材、ウェブに低強度の鋼材を用いることにより、材料費の低減を図った鋼桁であり、国内では、JSSC の設計指針⁵⁾に設計法が示

されている。一般的に、ハイブリッド桁に対して、鋼部材で構成する断面が同一材質のものをホモジニアス桁と呼ぶ。プレートガーダー橋のウェブは、曲げに対してあまり効果的に抵抗しない。例えば、フランジとウェブの断面積がほぼ等しい場合、ウェブはフランジの1/6～1/4程度しか、曲げモーメントを分担しない。したがって、曲げに対してあまり効果的ではないウェブに低材質の鋼材、曲げに対して有効に働くフランジに高強度の鋼材を用いれば、鋼桁の高い曲げ強度が保証されたまま、低価格な鋼橋を製作できると考えられ、ハイブリッド桁の開発が進められてきた。

ただし、欧州の統一基準であるユーロコードにおいても正式に採用されておらず、開発途上である。しかしながら、ヨーロッパにおいても中小スパン橋梁の鋼橋の競争力向上を目指した開発プロジェクトなどにおいて、ハイブリッド桁の実橋適用をにらんだ疲労強度特性の確認実験などが行われており、ユーロコードでの規格化もそう遠くないと思われる。

国内においては、古くは国広らの研究⁶⁾、前田らの研究⁷⁾など、その基本特性を把握する試みが行われてきた。また、合成ハイブリッド桁の実橋施工事例もある。しかしながら、設計指針の整備が着手されたのはここ数年であり、ハイブリッド桁設計施工指針(JSSC)が唯一の設計資料的な存在である。

2.2 高機能鋼材の適用

本研究で扱う高機能鋼材は「降伏強度がSM570鋼より50MPa高く、引張強度がSM570鋼と同等」と仮定した⁸⁾。これを「YP500鋼」と表記する。

2.3 細幅箱桁への薄肉少補剛設計

JSSCの設計指針においては、ハイブリッド桁は通常桁に対して強度の低いウェブが先行して降伏することを想定し、道路橋示方書より最小ウェブ厚を分厚く設定している。しかし、昨今、日本道路公団(JH)を中心に、合成桁正曲げ部におけるウェブの薄肉少補剛化の試みもあり、合成桁正曲げ部にハイブリッド桁を適用した場合、ウェブの重量増による経済性の低下が懸念される。ハイブリッド桁を設計基準として既に取り入れている米国設計基準(AASHTO-LRFD)においては、ハイブリッド桁、ホモジニアス桁それぞれで明確な設計法の区分はない。そこで、本研究では、合成桁正曲げ部への薄肉少補剛ウェブを用いたハイブリッド桁の適用を想定し、ウェブの幅厚比を道路橋示方書やハイブリッド桁指針より大きくとり、圧縮フランジの幅厚比を小さめに設定する。また、アスペクト比についてはハイブリッド桁指針より大きい3とした。

鋼箱桁橋の合理化・省力化構造として期待される細幅箱桁については、志村らがその基本性状ならびに立体挙動について解析的に確認し、今後の合理化省力化橋梁となりうることを示唆している^{9),10)}。

本研究では、高機能鋼材を用いたハイブリッド細幅箱桁の鋼桁単体の力学的特性把握に着目した。

3. 解析全般

3.1 解析モデル

解析には床版のない鋼桁のみのモデルを用いた(図-1参照)。スケールは別途行われた載荷実験の実験供試体モデル(実橋断面の1/4程度)と同等とした。(ウェブ高さ850, フランジ幅325, ウェブ間隔300, 橋軸方向区間長4200, ダイヤフラム間隔2550, 単位(mm))

解析には汎用有限要素解析コードABAQUS Ver.6.4¹¹⁾を用い、4節点で1次の低減積分シェル要素により解析モデルを構築した。解析モデルの要素分割数は、ウェブ高さ方向17分割(要素長さ50(mm))、フランジ幅方向8分割(ウェブ間6分割、要素長さ50(mm))、橋軸方向56分割(ダイヤフラム間34分割、要素長さ50(mm))とした。実験供試体は橋軸直角方向に対称のため、1/2モデルで解析を行った。なお、本論文中に示す解析モデルの変形図、応力コロン図等はすべて1/2モデルで表示する。

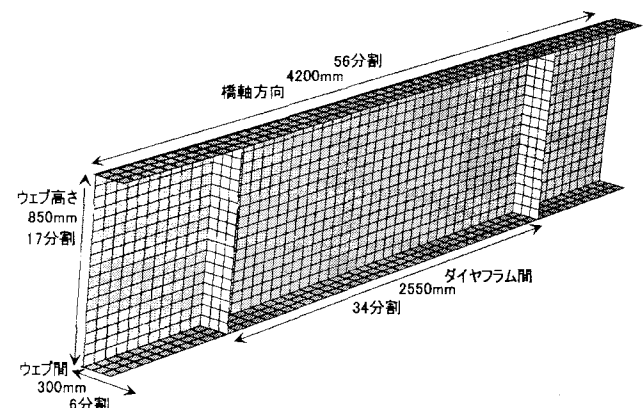


図-1 解析モデル(箱桁, 1/2モデル)

3.2 鋼材の材料特性

今回用いた鋼材は、SM490Y、SM570 および YP500 の3種である。弾性係数は、 $E = 205 \text{ kN/mm}^2$ 、ポアソン比は0.3とした。各鋼材の降伏応力をそれぞれ $\sigma_y = 355 \text{ MPa}$ 、 450 MPa 、 500 MPa とし、降伏後の応力-ひずみ関係には次式(1)を用いた¹²⁾。また、YP500について、 σ 以外の諸量はSM570と同値と仮定した。

$$\frac{\sigma}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \left\{ 1 - e^{-\xi \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_y} \frac{E_{st}}{E_y} \right)} \right\} + 1 \quad (\epsilon_{st} \leq \epsilon) \quad (1)$$

ここで、 E_{st} はひずみ硬化時の接線係数、 σ_y は降伏応力、 ϵ_y は降伏ひずみ、 ϵ_{st} はひずみ硬化開始時のひずみ、および ξ は材料特有の係数ある。なお、解析に用いた各鋼材の応力-ひずみ曲線を図-3に示す。

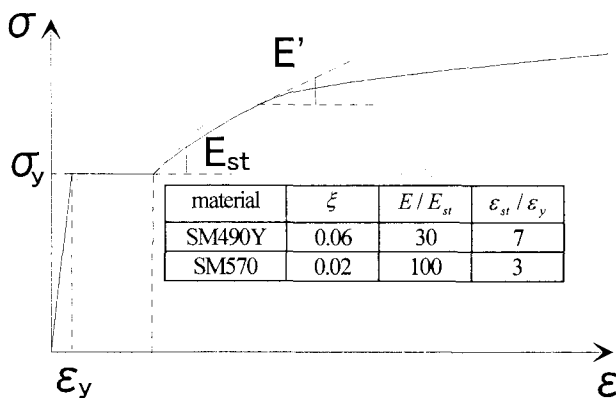


図-2 鋼材の応力-ひずみ曲線概念図

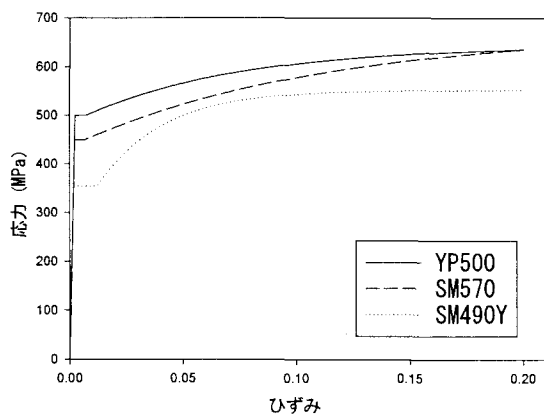


図-3 解析に用いた鋼材の応力-ひずみ曲線

3.3 初期不整

初期不整として、残留応力は曲げ耐力に及ぼす影響が少ないとされているため無視し、初期たわみのみを考慮した。初期たわみは道路橋示方書にしたがい、ウェブ高さ (h)、ウェブ間隔 (w) に対して、ウェブの面外変形、フランジの面外変形の最大値をそれぞれ $h/250$ 、 $w/150$ として正弦半波を仮定し、細幅箱桁の初期形状を設定した。さらに剛な部分を除いた着目区間長 (L) に対し、部材のそりを $L/1000$ として、上方向に正弦半波を仮定して桁部材の初期形状とした (図-4,5 参照)。

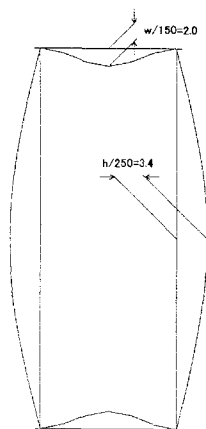


図-4 初期たわみ

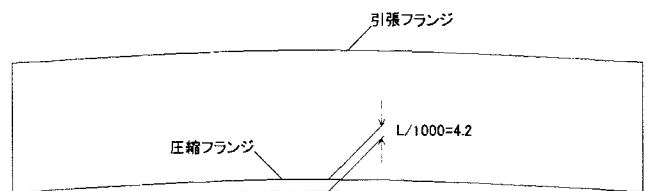


図-5 初期たわみ

4. 純曲げ解析

4.1 解析方法

ハイブリッド桁に純曲げモーメントを作用させる場合、曲げモーメントを漸増することで、鋼材の降伏などによって断面内で中立軸が変化する。一般にホモジニアス桁では、圧縮フランジの座屈が防止されている場合、部材の初期降伏曲げモーメントは引張フランジの降伏時の曲げモーメントと一致する。しかし、ハイブリッド桁の場合、引張フランジ降伏時 (部材の初期降伏曲げモーメントの定義である) には、ウェブには既に降伏領域が広がっている。したがって、この時点で既に全断面弾性時と異なり、中立軸が圧縮フランジ側に移動するため、弾性中立軸を一定とした場合、フランジ初期降伏曲げモーメントを正確に評価できない。このため、本解析では、中立軸位置に回転モーメントを作用させる方法をとらずに、着目区間両端に剛桁を定義し、載荷点の変位漸増にて解析を行った (図-6 参照)。解析モデル諸元を表-1 に示す。

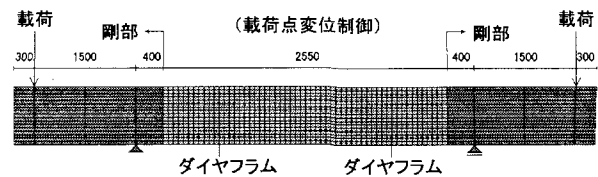


図-6 純曲げ解析における載荷形式

表-1 純曲げ解析モデル諸元

断面	case	ウェブ		圧縮フランジ			形式
		厚(mm)	λ_y	厚(mm)	材質	λ_f	
A	A-1	6.00	1.98	16.0	YP500	0.49	ハイブリッド
	A-2				SM570		ホモジニアス
	A-3				YP500	0.46	ハイブリッド
	A-4				SM570		ホモジニアス
B	B-1	4.72	2.52	22.0	YP500	0.35	ハイブリッド
	B-2				SM570		ホモジニアス
	B-3				YP500	0.34	ハイブリッド
	B-4				SM570		ホモジニアス

注) 引張フランジ (板厚 12.0(mm)) は圧縮フランジと同材質、ハイブリッド桁のウェブ材は SM490Y とする。

λ_f : 圧縮フランジの幅厚比パラメータ

λ_y : ウェブの幅厚比パラメータ

4.2 結果・考察

(1) 初期不整の影響

断面 A-1、B-1 について、初期たわみを考慮したモデルと考慮しないモデルの曲げ耐力比較を行った。各モデルの曲げモーメントー回転角の関係を図-7、8 に示す。図-7、8 を見ると、初期たわみを考慮した場合も考慮しない場合も、座屈するまではほぼ同じ挙動をとっており、座屈後若干初期たわみを考慮した方に耐力の低下が見られることがわかる。モデルの変形や応力分布にもほとんど違いは見受けられなかった。今回対象としたモデルについては、純曲げ荷重下における初期たわみの影響は少ないと言える。

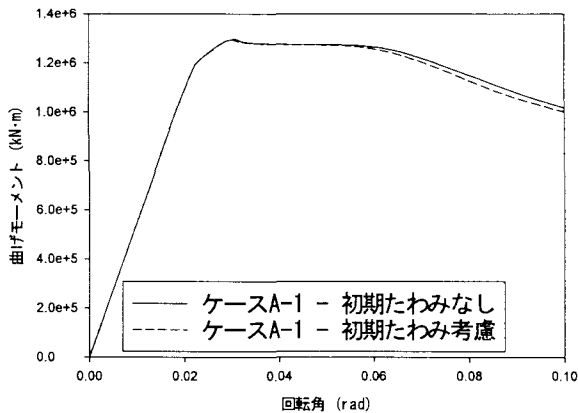


図-7 曲げモーメントー回転角関係 (ケース A-1)

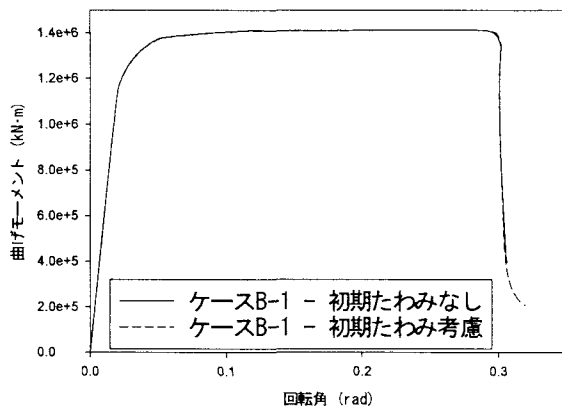


図-8 曲げモーメントー回転角関係 (ケース B-1)

(2) 各ケースの挙動について

フランジに高機能鋼材を用いた各ケースの変形・応力分布図を図-9～12 に示す。いずれのケースもまず引張フランジが降伏し、最大耐荷力を示した後、圧縮フランジ中央部の座屈の発生により耐力が低下するという挙動をとった。なお、ハイブリッド桁では、引張フランジの降伏時にウェブの引張フランジ縁側が降伏応力を超えていることが確認された。また、ケース B-1 ではケース A-1 よりも圧縮フランジが座屈しにくく、 λ_f が小さければ λ_f が大きくなっても、ウェブが全塑性状態に到達しやすいことが考えられる。

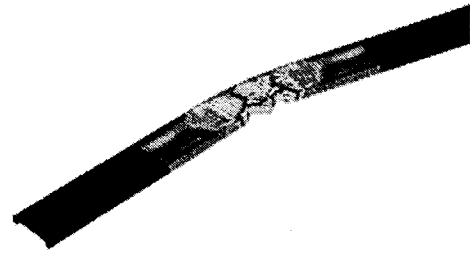


図-9 変形・応力分布図 (ケース A-1, 解析終了時)

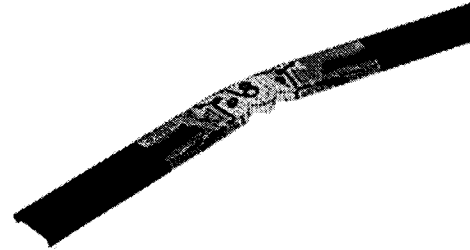


図-10 変形・応力分布図 (ケース A-2, 解析終了時)

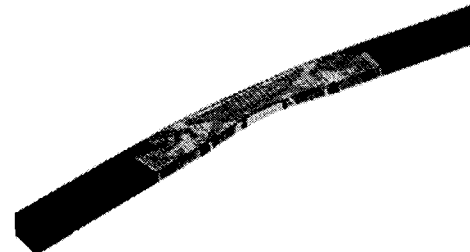


図-11 変形・応力分布図 (ケース B-1, 解析終了時)

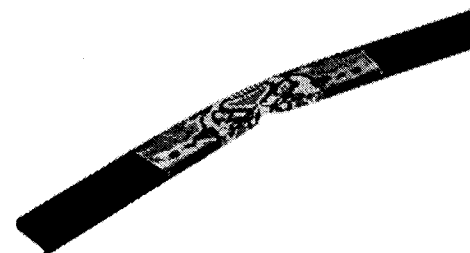


図-12 変形・応力分布図 (ケース B-2, 解析終了時)

(3) ハイブリッド桁とホモジニアス桁の耐力比較

ハイブリッド桁とホモジニアス桁の耐力比較結果を表-2 に示す。また、各ケースの曲げモーメントー回転角関係を図-13、14 に示す。回転角はダイヤフラム間での平均値とした。ホモジニアス桁のウェブに低強度の鋼材を用いてハイブリッド桁にしても、鋼桁としての終局耐力は3～5%程度しか低減せず、全塑性曲げモーメント程度まで到達するという結果になった。これより、等曲げ状態ではアスペクト比3でも顕著な耐力低下は発生せず、設計上問題ないと考えられる。

表-2 ハイブリッド桁とホモジニアス桁の耐力比較

case	形式 (ウェブ材質)	ウェブ降伏点比	終局耐力比
A-1	ハイブリッド (SM490Y)	355/500 =0.71	0.95
A-2	ホモジニアス (YP500)		
A-3	ハイブリッド (SM490Y)	355/450 =0.79	0.96
A-4	ホモジニアス (SM570)		
B-1	ハイブリッド (SM490Y)	355/500 =0.71	0.95
B-2	ホモジニアス (YP500)		
B-3	ハイブリッド (SM490Y)	355/450 =0.79	0.97
B-4	ホモジニアス (SM570)		

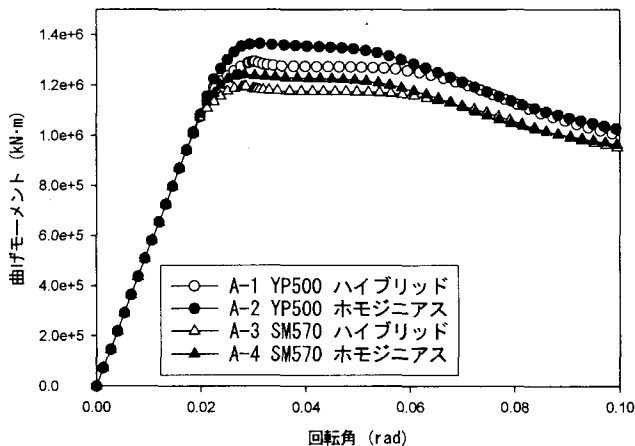


図-13 曲げモーメント-回転角関係 (ケース A-1～A-4)

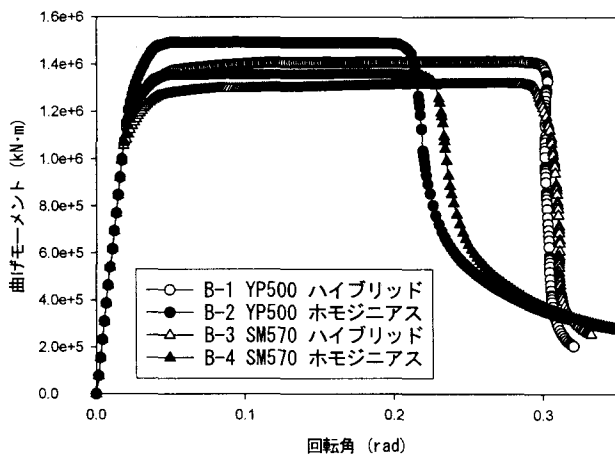


図-14 曲げモーメント-回転角関係 (ケース B-1～B-4)

(4) 高機能鋼材の効果

フランジ材質の異なるハイブリッド桁の耐力比較結果を表-3に示す。すべてのケースにおいて引張フランジが圧縮フランジに先行して降伏したため、引張フランジが降伏した時点の耐力を降伏耐力とした。ケース A-1 と A-3 の降伏耐力比は 1.10、B-1 と B-3 では 1.08 となっている。フランジの降伏点比が $500/450=1.11$ であることから、フランジの強度比がほぼそのまま反映されていると考えられる。しかしながら YP500 と SM570 とは引張強度が同一

であるため、終局耐力比は降伏点の比より小さめの値となった。

以上より、SM570 と引張強度が同等で降伏強度が 1 割程度高い YP500 を上下フランジに用いたハイブリッド桁は SM570 を上下フランジに用いたハイブリッド桁に対して、効果的に降伏耐力を上げることができると考えられる。

表-3 フランジ材質の異なるハイブリッド桁の耐力比較

case	フランジ材質	降伏耐力比	最大耐力比
A-1	YP500	1.10	1.08
A-3	SM570		
B-1	YP500	1.08	1.07
B-3	SM570		

(5) 変形性能

図-14 において、ホモジニアス桁のほうが座屈による急激な耐力の低下が早いことが顕著である。曲げ耐力が、全塑性モーメント程度まで到達する断面においては、ハイブリッド桁のほうが相対的に変形性能が高くなる可能性が考えられる。

(6) 重量/材料費低減の可能性

断面 B のほうが全断面積は小さいが、耐力は高くなっており、曲げに対してウェブが効果的に抵抗しないことがわかる。一般に、圧縮フランジに比べウェブの断面積に占める割合は小さいため、曲げが支配的な区間においては、圧縮フランジを厚く、ウェブ厚を薄く設計することにより、重量/材料費の低減が図れる可能性が考えられる。

5. 曲げ・せん断組み合わせ解析

5.1 はじめに

ハイブリッド桁は、フランジの降伏前にウェブの部分的な降伏を許すため、曲げとせん断を受ける荷重下においては、せん断耐力が低下し、一般のホモジニアス桁における斜張力場理論を適用しないこととされている¹³⁾。したがって、桁橋の中間支点部付近にハイブリッド桁を採用する場合、ホモジニアス桁に対してせん断強度が低く見積もられることとなり、ハイブリッド桁の経済性低下が懸念される。また一般に、箱桁のフランジは圧縮補剛板としての機能を確保するため、多数のリップによって補剛される構造のため、鉋桁のフランジと比較して薄肉であり、フランジが斜張力場理論でのアンカーとなりえるか疑問視されている¹⁴⁾。

しかしながら、本研究で対象とするハイブリッド細幅箱桁はウェブ間隔が小さいことから無補剛フランジとなっており、一般的に厚肉フランジを採用していることや、既往の研究¹⁵⁾などから、ある程度の後座屈強度を具備すると考えられる。

5.2 セン断強度について

ハイブリッド桁のせん断強度はJSSCのハイブリッド桁指針⁵⁾においては、腹板の斜め張力場理論を考慮せず、下記のとおり設定されている。

$$\tau_u / \tau_y = 1.0, \quad \lambda_s < 0.89$$

$$\tau_u / \tau_y = 0.89 / \lambda_s, \quad 0.89 \leq \lambda_s \leq 1.10$$

$$\tau_u / \tau_y = 1.0 / \lambda_s^2, \quad 1.10 < \lambda_s$$

$$\text{ここに、} \lambda_s = \frac{b}{t_w} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)F_{yw} / \sqrt{3}}{\pi^2 E k_r}}$$

$$k_r = 5.34 + \frac{4.00}{(a/b)^2}, \quad 1.0 < a/b$$

$$k_r = 4.00 + \frac{5.34}{(a/b)^2}, \quad a/b \leq 1.0$$

τ_y : ウェブの降伏せん断応力 (N/mm^2)

E : ヤング係数 (N/mm^2)

ν : ポアソン比 (=0.3)

F_{yw} : ウェブの材料強度の規格値 (N/mm^2)

a : ウェブの垂直補剛材間隔 (mm)

b : ウェブの高さ (mm)

t_w : ウェブの板厚 (mm)

一方、米国基準 AASHTO-LRFD において、斜張力場理論を考慮したせん断強度の値が次のように表されている。

$$\tau_u / \tau_y = C + \frac{0.87(1-C)}{\sqrt{1+(a/b)^2}}$$

$$\text{ここに、} C = 1.0, \quad \frac{b}{t_w} \leq 1.12 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}}$$

$$C = \frac{1.12}{b/t_w} \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}}, \quad 1.12 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}} < \frac{b}{t_w} \leq 1.40 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}}$$

$$C = \frac{1.12}{b/t_w} \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}}, \quad \frac{b}{t_w} > 1.40 \sqrt{\frac{Ek}{F_{yw}}}$$

$$k = 5 + \frac{5}{(a/b)^2}$$

5.3 解析方法

純曲げ解析同様、着目区間両端に剛行を定義し、左右荷点の荷重比 $P1 : P2$ を制御することで、荷重荷重の曲げ (M/M_0) とせん断 (Q/Q_0) の組み合わせ比率を変化させた (図-15 参照)。なお、引張フランジ厚は 12(mm)、断面はすべてウェブ材質が高機能鋼材、フランジ材質が SM490Y 材のハイブリッド桁とする。また、解析に用いた断面の諸

元を表-4 に示す。

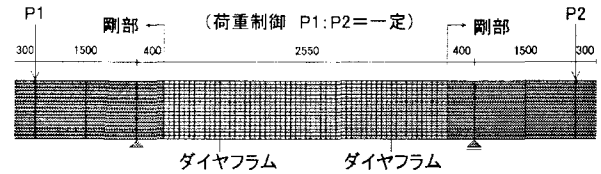


図-15 曲げ・せん断組み合わせ解析における荷重形式

表-4 曲げ・せん断組み合わせ解析断面諸元

断面	ウェブ厚 (mm)	下フランジ厚 (mm)	λ_s	A_w / A_f
A	6.00	16.0	1.98	2.24
B	6.00	18.0	1.98	2.09
C	6.00	22.0	1.98	1.85
D	6.00	30.0	1.98	1.49
E	4.72	22.0	2.52	1.45
F	4.72	25.0	2.52	1.33

5.4 結果・考察

(1) セン断強度について

$P1 : P2 = 1 : -1$ のせん断解析結果より、各断面のウェブの幅厚比パラメータに対するせん断強度をプロットし、JSSC 指針の値および、AASHTO-LRFD における斜張力場理論を考慮したせん断強度の値と比較した (図-16 参照)。

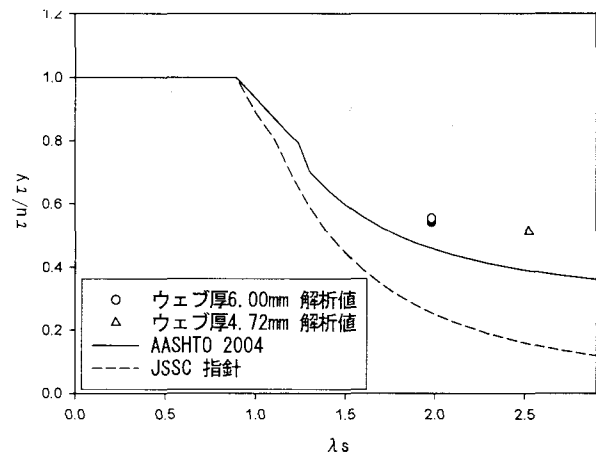


図-16 $\lambda_s - \tau_u / \tau_y$ 関係

$\lambda_s = 1.98$ の 4 ケースでは、 $\tau_u / \tau_y = 0.54 \sim 0.55$ 、 $\lambda_s = 2.52$ の 2 ケースでは、 $\tau_u / \tau_y = 0.51$ であり、斜張力場理論を考慮した AASHTO 基準と比べて、それぞれ 1.2、1.3 倍程度の値となった。また、応力分布図からも、ある程度の斜張力場作用が働いていることがうかがえる。一例を、図-17 に示す。この結果より、桁橋の中間支座位付近にハイブリッド桁を採用する場合、ホモニアス桁に対して経済性の低下が懸念されるというハイブリッド桁の問題点を解消できる可能性が示された。

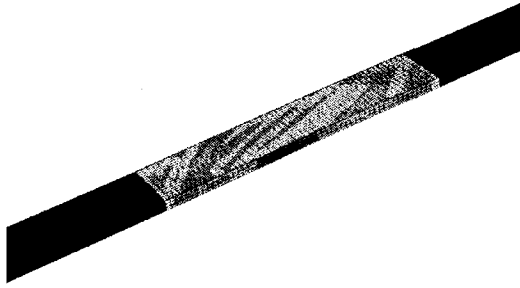


図-17 変形・応力分布図の一例 (断面F, 応力最大時)

(2) 曲げとせん断が同時に働く場合について

各解析ケースの終局強度相関関係グラフ (横軸: 曲げ強度 M/M_y 縦軸: せん断強度 Q/Q_{ub}) を図-18, 19 に示す。終局強度相関をウェブとフランジの断面積比 $A_w/A_f = 2Dt_w/(b_f t_{fc} + b_{ft} t_{ft})$ に着目して、2 乗式 $(M/M_y)^2 + (Q/Q_{ub})^2 = 1$ 、および 4 乗式 $(M/M_y)^4 + (Q/Q_{ub})^4 = 1$ を用いて評価、考察する。また、評価結果をまとめたものを表-5 に示す。

各パラメータは以下のとおりである。

- D : ウェブ高さ
- t_w : ウェブ厚
- b_{fc} : 圧縮フランジ幅 (箱桁のため 1/2 で計算)
- t_{fc} : 圧縮フランジ厚
- b_{ft} : 引張フランジ幅 (箱桁のため 1/2 で計算)
- t_{ft} : 引張フランジ厚
- M_y : 圧縮フランジ降伏時の曲げ応力
- Q_{ub} : 後座屈強度を考慮した終局せん断強度

組み合わせ終局強度は、2 次式を用いると $A_w/A_f < 2$ 程度で安全側、4 次式で評価すると $A_w/A_f < 1.5$ 程度で安全であるといえる。この結果より、曲げとせん断を同時に受ける桁について、ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f によっては安全の評価ができる可能性が示されたといえる。

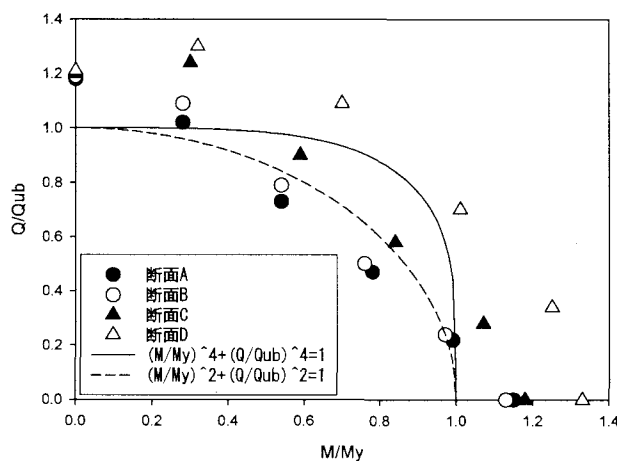


図-18 終局強度相関評価 ($M/M_y - Q/Q_{ub}$)

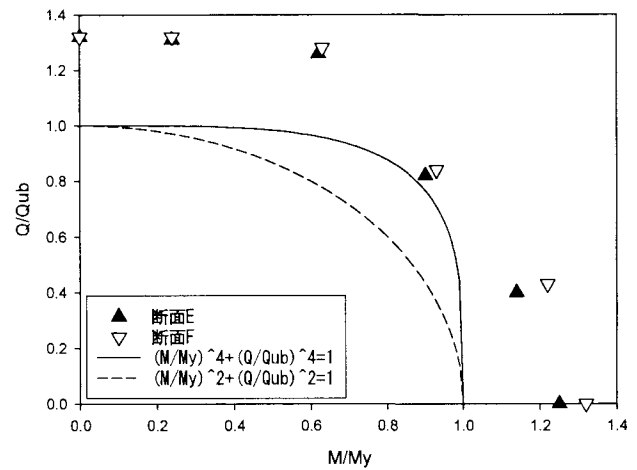


図-19 終局強度相関評価 ($M/M_y - Q/Q_{ub}$)

表-5 曲げ・せん断組み合わせ終局強度評価

断面	$\min(M/M_y)^2 + (Q/Q_{ub})^2$	$\min(M/M_y)^4 + (Q/Q_{ub})^4$	A_w/A_f
A	0.83 <1.0	0.37 <1.0	2.24
B	0.83 <1.0	0.40 <1.0	2.09
C	1.04 >1.0	0.61 <1.0	1.85
D	1.51 >1.0	1.28 >1.0	1.49
E	1.45 >1.0	1.11 >1.0	1.45
F	1.57 >1.0	1.25 >1.0	1.33

6. 結論および今後の課題

本解析的検討より、以下の結果が得られた。

(1) 曲げが卓越する荷重下について

- ・ 純曲げ载荷に対しては、圧縮フランジの幅厚比を小さくすることで、ウェブの幅厚比を道路橋示方書、ハイブリッド桁指針より大きくとっても全塑性モーメント程度まで到達した。
- ・ アスペクト比をハイブリッド桁指針の 2 を超える値をとっても降伏強度以上の強度を持ち、アスペクト比 3 でも問題ないことが考えられる。
- ・ 上下フランジに YP500 を用いたハイブリッド桁は、引張強度の規格値が同じである SM570 材を上下フランジに用いたハイブリッド桁より、効果的に降伏耐力を向上させることが可能である。
- ・ 全塑性モーメント程度まで到達する断面においてはハイブリッド桁採用による変形性能向上の可能性が示された。

(2) 曲げとせん断力が同時に作用する荷重下について

- ・ 本提案構造はハイブリッド桁であり、かつ、箱桁であるが、せん断強度については斜張力場作用によるある程度の後座屈強度が考慮できると考えられる。
- ・ 桁橋の中間支点部付近にハイブリッド桁を採用する

場合、ホモジニアス桁に対して経済性の低下が懸念されるというハイブリッド桁の問題点を解消できる可能性が考えられる。

- ・ ウェブとフランジの断面積比 A_w/A_f がある程度より小さければ、安全な構造と評価できることが考えられる。

今後の課題として以下のようなことが挙げられる。

- ・ 本論文では床版のない非合成桁の特性について解析を行った。しかし、連続合成桁へのハイブリッド桁の適用に際しての設計資料整備が望まれる昨今、合成ハイブリッド桁の力学的特性を明らかにすることが必要である。

参考文献

- 1) J. Muller: High Performance Steel Bridge Concepts, AISI, 1996.11.
- 2) J.M. Vigo, R. Hudo, J. Raoul: Modern Steels for Constructional Bridges, Longitudinally profiled-LP-plate, Journal of Constructional Steel Research, Vol.46, Paper No.28, 1998.
- 3) E. Wasserman, A. Azizinamini, H. Pate and W. Greer : Civil Engineering, pp.69, 1998. 4.
- 4) U.S.Department of Transportation: High Performance Steel Designer's Guide, 2nd edition, 2002.4.
- 5) (社)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, No.53, 2002.3.
- 6) 国広哲夫, 古庄通隆: ハイブリッドゲーターその力学的挙動と経済性一, 橋梁と基礎, 1974.1.
- 7) 前田幸雄, 石渡正夫, 川井豊: 薄肉ハイブリッド・ゲーターの疲労強度に関する研究, 川鉄技報, Vol.6, No.1, pp. 61-77, 1974.
- 8) 三木千寿, 市川篤司, 楠隆, 川端文丸: 橋梁用, 高性能鋼材 (BHS500, BHS700) の提案, 土木学会論文集, No.738/I-64, pp.1-10, 2003.7.
- 9) 志村勉, 辻角学, 宮森雅之, 依田照彦: 狭小箱桁橋におけるコスト縮減効果の試算と最適箱幅に関する検討, 土木学会論文集, 37 巻, VI-45 号, pp.43-52, 1999.12.
- 10) 志村勉, 辻角学, 宮森雅之, 依田照彦: 中間横桁を省略した狭小箱桁橋の 3 次元変形挙動の解析的検討, 土木学会論文集, Vol.654, I-52 号, pp.121-130, 2000.7.
- 11) ABAQUAS / Standard User's Manual, Ver.6.4.
- 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) Design of Hybrid Steel Beams (Report of the Subcommittee 1 on Hybrid Beams and Girders Joint ASCE-AASHTO Committee on Flexural Members), Proc. of ASCE, Vol.97, ST6, pp.1397-1426, 1968.6.
- 14) 土木学会: 座屈設計ガイドライン, pp.200, 1987.
- 15) 野村正孝, 野坂克義, 上平哲, 伊藤満: ハイブリッド桁の斜め張力場作用に関する実験的研究, 土木学会第 38 回年次学術講演会概要集, 2004.9.

(2005 年 4 月 15 日 受付)