

(13) 薄肉ウェブを用いた合成ハイブリッド箱桁の提案

利根川太郎¹・渡邊 英一²・杉浦 邦征³・山口 隆司⁴・岩川 貴志¹

¹正会員 住友金属工業株式会社 土木橋梁エンジニア センタ 技術室 (〒541-0041 大阪市中央区北浜4-5-33)
E-mail: tonegawa-tru@sumitomometals.co.jp

²フェロー 京都大学名誉教授 (〒567-0826 茨木市大池2-6-24)
E-mail: wataei@circus.ocn.ne.jp

³正会員 京都大学大学院 都市環境工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: sugiura@csd.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 大阪市立大学大学院 都市系専攻 (〒558-8585 大阪市住吉区杉本3-3-138)
E-mail: yamaguti@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

ウェブとフランジが異なる規格強度で構成されるハイブリッド桁は、同一強度にて構成される通常の桁より経済性に優れているとされるが、ウェブが先行して降伏することからウェブの限界幅厚比の制限を相対的に厳しくしている。本研究では、引張フランジに近年開発された高機能鋼材BHS500を用い、圧縮フランジとウェブを低強度の同一材とした合成ハイブリッド桁を対象とし、幅厚比の大きな薄肉無補剛ウェブで構成される箱桁とサンドイッチ型複合床版を組み合わせた合成桁構造を提案した。提案構造の妥当性確認のため、縮小モデルによる静的曲げ実験を行った上で、弾塑性FEM解析により、終局曲げ強度とウェブ幅厚比、塑性中立軸位置に対する考察を行い、全塑性曲げ強度に基づく設計の実現性を示した。最後に、試設計検討にて提案構造の優位性を明示した。

Key Words : *Thin-walled box girder, Hybrid girder, Sandwich slab, High performance steel, Composite girder*

1. はじめに

昨今、合理化・省力化された連続合成鋼2主鈑桁橋の登場により、支間長が30～60m程度の橋梁においては、鋼橋のコスト競争力が向上しつつある。しかしながら、支間長が80～100m程度の橋梁を桁橋で断面構成した場合、溶接、加工工数で割増があり、比強度的に鋼材単価と加工工数の高いSM570材クラスの鋼材が必須となることや、構造形式として比較的部材数の多い箱桁やトラス橋が選定されることから、相対的に製作材料費が増加することとなる。以上のことから、支間長が80～100m程度の鋼橋の経済性向上には、重量と構成部材数をミニマムとすることが必須であり、一層の断面の軽量化と部材の簡素化が必要である。

このような中、溶接・加工性に優れた、降伏強度が500MPa程度の高機能鋼材が開発されており¹⁾、2径間連続桁橋(2@70m)の試設計結果によると、SM570材を適用した場合と比較して、本高機能鋼材を用いることで、10%以上の鋼重低減と13%の全体コストの低減が図られ

たとされている。また、材料費の低減の観点からは、フランジとウェブに異種強度の材料を用いたハイブリッド桁が有効であると考えられる²⁾。国内においてもハイブリッド桁の耐荷特性^{3),4)}や疲労強度特性⁵⁾を把握する試みは古くから行われており、合成ハイブリッド桁の実橋施工事例⁶⁾もある。しかしながら、ハイブリッド桁は、ウェブが先行して降伏することから通常桁に対して異なる曲げ耐荷特性を有し、ウェブの限界幅厚比の制限を道路橋示方書⁹⁾(以下、道示)より相対的に厳しくしている²⁾。一方、正曲げを受ける通常の合成桁に対してはフランジとウェブの幅厚比パラメータの相関より、道示の既定より幅厚比を大きくとった設計⁹⁾が現在なされている。このため、ウェブが道示より相対的に分厚いハイブリッド合成桁は、ウェブが道示より相対的に薄い通常の連続合成桁橋に対して、材料費低減のメリットが小さくなることが懸念される。

部材の簡素化という課題に対しては、箱桁の合理化・省力化に関する研究が行われており、開断面箱桁橋や細幅箱桁橋などの経済性に優れた鋼箱桁形式が開発され、

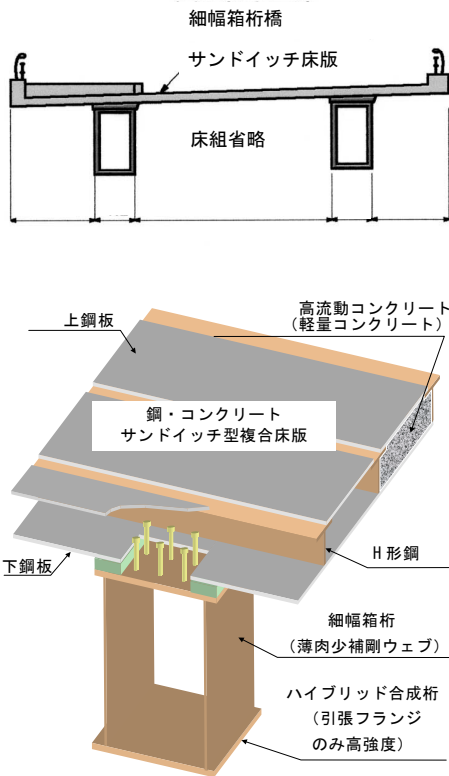


図-1 提案構造の概要

設計・施工実績も増えつつある。しかしながら、支間長100m程度の箱桁を場所打ちの床版と連続合成桁化した際には、支間の増大に伴い、クリープ・乾燥収縮による不静定断面力が非常に大きくなることが懸念される。

そこで、本研究では、上記の諸課題を解決しうる合理化・省力化橋梁として、SM570クラス程度以上の強度を有し、かつ溶接性・加工性に優れた高機能鋼材BHS500を用いた薄肉ウェブの連続合成ハイブリッド細幅箱桁橋を提案している。図-1に本提案構造の概要を示す。なお、合成桁化においては、鋼コンクリートサンドイッチ型複合床版（以下、サンドイッチ床版と略す）を用いている。本床版は、鋼殻内にコンクリートを充填する構造であり、コンクリートのクリープや乾燥収縮を低減できることが確認されており¹⁰⁾¹¹⁾、支間長の長大化に伴うこれらによる不静定力の低減が可能であると想定される。本論文では、提案構造の妥当性確認のための静的曲げ試験結果、および構造の一般化のための弾塑性FEM解析結果を示し、概略試設計検討により提案構造の優位性、ならびに今後の課題について詳述する。

2. ハイブリッド合成桁の曲げ強度について

米国の設計基準である AASHTO では、古くからハイブリッド桁が設計基準として基準化されており、合成ハ

イブリッド桁の曲げ強度 M_{dh} を以下のように定義している。

$$M_{dh} = R_h \times M_y \quad (1)$$

ここに、 M_y ：ホモジニアス桁としての降伏曲げ強度

R_h ：(2)式で示されるハイブリッド係数

AASHTO 3rd Ed.¹²⁾（以下、AASHTO2004 と記す）は、(2)式のような、従来式より比較的簡略な式により表されている。

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

$$\text{ここで、} \quad \beta = \frac{2D_n t_w}{A_{fn}} \quad (3)$$

$$\rho = \min(F_{yw}/f_n, 1.0) \quad (4)$$

A_{fn} ： D_n の距離をとる側のフランジ断面積

D_n ：弾性中立軸から距離の大きい方のフランジ（距離が同じ場合、降伏が先行する）フランジ側のウェブ端までの距離

f_n ： D_n の距離をとる側のフランジ降伏応力度

t_w ：ウェブ厚

F_{yw} ：ウェブの降伏強度

一般に合成桁正曲げ部では、弾性中立軸はウェブ中央より床版近くに位置する。本ハイブリッド係数は、弾性中立軸より引張側のみの断面とした2軸対称断面に相当するため、従来の2軸対称非合成桁に用いられていたハイブリッド係数の算出式のウェブ高さ D の1/2を、合成桁の弾性中立軸位置から引張フランジまでの距離 D_n に置き換えて再定義されている。

一方、合成桁正曲げ部においては、①降伏強度が485MPa以下、②ウェブ幅厚比 $D/t_w \leq 150$ 、③塑性中立軸に対する圧縮側ウェブ幅厚比 $2D_{cp}/t_w \leq 3.76\sqrt{E/F_{yc}}$

（ここで、 D_{cp} ：塑性中立軸までのウェブ圧縮高さ、 E ：ヤング係数、 F_{yc} ：圧縮フランジの降伏強度）を全て満足する場合は、コンパクト断面と見なせることとなっている¹²⁾。この場合、公称曲げ抵抗 M_n はノンコンパクト断面に対する式(1)ではなく、式(5)により定義される。

$$M_n = \phi \cdot M_p \quad (5)$$

$$\text{ここで、} D_p / D_t < 0.1 \text{ の場合、} \phi = 1.0 \quad (6)$$

$$\text{上記以外の場合、} \phi = 1.07 - 0.7 \cdot D_p / D_t \quad (7)$$

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距離

3. 静的曲げ実験^{13),14)}

(1) 供試体の設計

a) 鋼桁断面の設計

実験供試体は、ウェブ高さ850mm、ウェブ間隔300mmの箱桁、供試体桁長は6200mmであり、アスペクト比 $\alpha = 3.0$ (ダイヤフラム間隔2550mm/ウェブ高さ850mm) の、縦横リブおよび水平補剛材を省略した無補剛箱形の試験パネルを持つ鋼桁である。検討対象橋梁主桁の概ね1/4程度の縮小モデルを想定している。実橋想定断面のウェブ幅厚比 (b/t ; b :ウェブ高さ, t :ウェブ厚) は、ハイブリッド桁指針²⁾の制限値 ($b/t \leq 109$; SM490Y) より大きな値とし、 $b/t=150$ を目標として設定した。

b) 床版の設計

床版形式の違いによる挙動を確認するため、同一の鋼板から加工した鋼箱桁に対して、①RC床版タイプ (以下、RC合成桁)、②サンドイッチ床版タイプ (以下、SW合成桁) の2種類の合成桁供試体を製作した。

RC合成桁における床版幅は、合成桁断面の塑性中立軸位置が実橋と同程度となる鋼桁ウェブ内となるように決定した。また、別途実施した弾塑性解析にて、引張フランジの降伏後にコンクリートが圧壊する崩壊機構となるよう設計した。SW合成桁においては、床版幅はRC合成桁と同様とし、上鋼板 (デッキプレート) を無視した合成桁の曲げ剛性がRC合成桁と同程度となるようにサンドイッチ床版厚を設定した。サンドイッチ床版のセル間隔については、セル間隔/床版厚 ($=350/160=2.19$) の比が実橋と同程度となるよう設定した。

なお、供試体諸元、供試体諸元、計測項目などの詳細に関しては、文献^{13),14)}を参照願いたい。

(2) 材料試験結果

図-2に、今回適用したBHS500鋼 ($t=12\text{mm}$) の応力-ひずみ曲線の試験結果を、表-2に各部位に用いた鋼材の降伏点、引張強度の結果を示す。

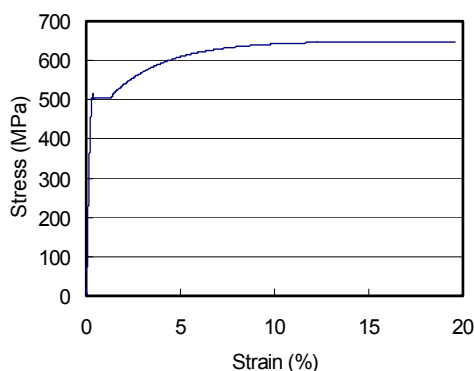


図-2 BHS500鋼の応力-ひずみ曲線 試験結果

表-2 材料試験結果

a) 鋼材引張試験結果 (単位: MPa)

	底鋼板 (SW床版 のみ)	圧縮 フランジ	ウェブ	引張 フランジ
降伏点	344	396	438	530
引張強度	464	538	557	656

b) コンクリート (36-18-20N)

載荷実験当日の圧縮試験結果

材齢	強度 (N/mm ²)	試験対象
20 日	43.2	RC 合成桁
21 日	41.7	SW 合成桁

(3) 実験の結果について

a) 最大耐力について

両供試体ともに、部材の降伏後も荷重が漸増し、床版コンクリートの圧壊によって終局を迎えた。また、アスペクト比30の薄肉ウェブパネルは、両供試体ともに床版コンクリートの圧壊まで大きな変形はみられなかった。表-3に両供試体の終局曲げ耐力と全塑性耐力との比較を示す。

表-3 終局曲げ耐力と全塑性耐力の比較 (単位: kN)

	RC 合成桁	SW 合成桁
終局耐力 P_u	2426	2446
全塑性荷重 P_p	2524	2480
無次元強度 P_u/P_p	0.96	0.99

b) 変形性能について

図-3に、RC合成桁、SW合成桁の無次元強度 (M_u/M_y) と無次元曲率 (ϕ_u/ϕ_y) を示す。あわせて、後述する弾塑性FEM解析結果の無次元 $M-\phi$ 曲線も記入した。

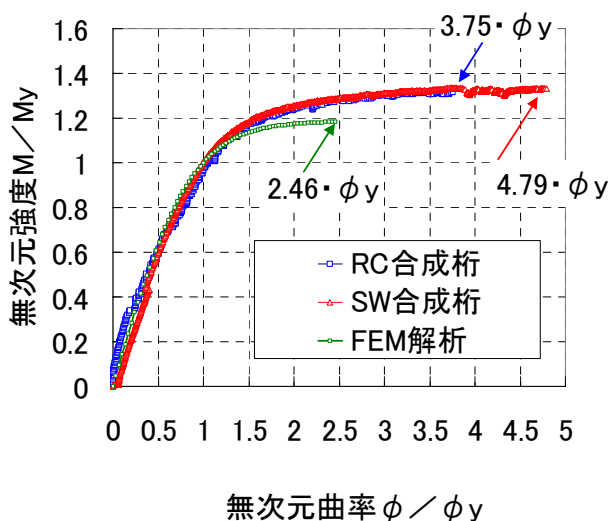


図-3 無次元 $M-\phi$ 曲線の比較

図-3より、無次元強度は降伏強度の約1.3倍程度の値

となった。無次元曲率については、SW 合成桁においては、RC 合成桁の約 1.27 倍程度であることがわかった。また、両供試体の実験結果の無次元強度は、解析値の無次元強度の約 1.1 倍程度の値であり、降伏強度に対する終局強度は、解析により安全側の評価ができると考えられる。

4. 弾塑性 FEM 解析

(1) 概要

今回、載荷実験でのウェブ幅厚比 (b/t) は、板厚や載荷荷重の制約などから $b/t = 142$ としたが、さらなるウェブの薄肉化が可能かどうかを検討するため、実験供試体のモデルを基本に、ウェブ幅厚比 $b/t = 180, 200$ のハイブリッド桁のケースを設定し、弾塑性 FEM 解析を実施した。合わせて、通常合成桁とハイブリッド合成桁の終局強度特性の比較を行う目的で、解析を実施した。表-4 に解析パラメータを、表-5 に実施した解析ケース (C-1 ~ C-14) を示す。なお、表-5 のケース C-2 および C-5 は、ハイブリッド合成桁ではない通常の合成桁モデルとした。

図-4 に解析モデルを示す。解析モデルは、鋼桁は4節

点で1次の低減積分シェル要素を用いてモデル化した。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。鋼材の応力-ひずみ曲線については、ひずみ硬化の影響を考慮した等方硬化則¹⁵⁾とし、降伏条件として von Mises の降伏条件を用いた。なお、鋼材の終局ひずみは0.2とした。なお、コンクリート床版部は、8節点ソリッド要素を用いてモデル化した。

荷重は、着目部分に等曲げを与えるように、張り出し部に変位制御にて漸増載荷した。実構造および実験供試体においては、箱桁圧縮フランジ全面にスタッドジベルが配置されることから、鋼とコンクリートの接合面は、剛結合とし、節点共有とした。コンクリートの応力-ひずみ曲線には、コンクリート標準示方書¹⁶⁾に示される軟化領域を持たない関係式を用いた。また、等方硬化、関連流れ則を仮定し、Drucker-Prager の降伏条件を用いた。なお、コンクリートの強度は設計値である 35N/mm^2 とし、コンクリートの終局ひずみを0.0035とした。

初期不整として、残留応力と初期たわみを考慮する必要があるが、曲げを受ける桁に対して残留応力の影響は

表-4 解析パラメータ

床版幅	Bc (mm)	700	1500	
床版強度	N/mm ²	35	50	
断面構成		hybrid	homogeneous	
使用材質		SM400	SM490Y	SM570
材質構成		SM490Y-SM490Y-BHS500		BHS500
		BHS500-SM490Y-BHS500		
		SM400-SM490Y-BHS500		
		SM400-SM400-BHS500		
		SM490Y-SM490Y-SM490Y		
(圧縮flg-web-引張flg)		BHS500-BHS500-BHS500		
		SM490Y-SM490Y-SM570		
ウェブ幅厚比	bw/tw	142	180	200
引張フランジ厚	tfp (mm)	12	16	22
				25

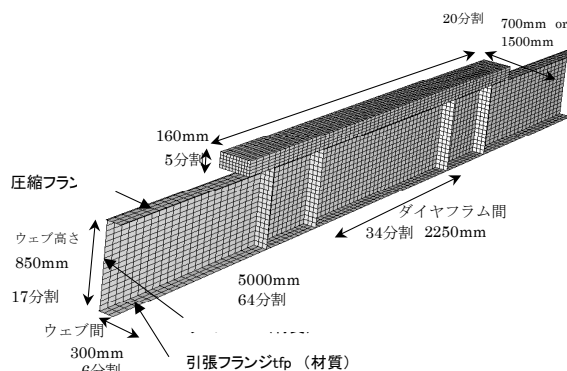


図-4 解析モデルの概要 (モデル半分を表示)

表-5 合成桁の解析モデル

解析ケース	圧縮フランジ				ウェブ				引張フランジ				床版			
	bf	tfp	材質	σ_y	h	tw	h/t	材質	σ_y	bf	tfp	材質	σ_y	Bfc	ts	σ_{ck}
	mm	mm		N/mm ²	mm	mm	幅厚比		N/mm ²	mm	mm		N/mm ²	mm	mm	N/mm ²
C-1	300	9	SM490Y	355	850	6	142	SM490Y	355	300	12	BHS500	500	700	160	3
C-2	300	9	SM490Y	355	850	6	142	SM490Y	355	300	12	SM490Y	355	700	160	3
C-3	300	9	SM490Y	355	850	4.72	180	SM490Y	355	300	12	BHS500	500	700	160	3
C-4	300	9	SM490Y	355	850	6	142	SM490Y	355	300	12	BHS500	500	1800	160	3
C-5	300	9	BHS500	500	850	6	142	BHS500	500	300	12	BHS500	500	700	160	3
C-6	300	9	SM490Y	355	850	6	142	SM490Y	355	300	12	SM570	445	700	160	3
C-7	300	9	SM490Y	355	850	4.25	200	SM490Y	355	300	12	BHS500	500	700	160	3
C-8	300	9	SM490Y	355	850	6	142	SM490Y	355	300	12	BHS500	500	700	160	5
C-9	300	9	SM490Y	355	850	6	142	SM490Y	355	300	16	BHS500	500	700	160	3
C-10	300	9	SM490Y	355	850	6	142	SM490Y	355	300	22	BHS500	500	700	160	3
C-11	300	9	SM490Y	355	850	6	142	SM490Y	355	300	25	BHS500	500	700	160	3
C-12	300	9	BHS500	500	850	6	142	SM490Y	355	300	12	BHS500	500	700	160	3
C-13	300	9	SM400	235	850	6	142	SM490Y	355	300	12	BHS500	500	700	160	3
C-14	300	9	SM400	235	850	6	142	SM400	235	300	12	BHS500	500	700	160	3

bf: ウェブ間隔, σ_y : 降伏強度, その他の記号は、表-4および図-4を参照

小さいと考え、鋼箱桁部材の初期たわみのみ考慮した。仮定した初期たわみは、道路橋示方書の製作許容値に従い、ウェブ高さ (h)、フランジ間隔 (w) に対して、ウェブの面外変形 ($h/250$)、フランジの面外変形 ($w/150$) を最大値として正弦波半波を入力した。また、部材のそりを $L/1000$ (L : 剛な断面を除いた着目区間長) として、下方向に同じく正弦波半波を仮定した。

なお、構造解析には、ABAQUS Ver.6.41 を用いた。

(2) 解析結果について

a) 終局強度と降伏強度について

表-6 に解析結果を示す。実験供試体モデルよりウェブ幅厚比を大きくした解析ケース、ならびに SM490Y 通常桁においても、終局モーメントは降伏モーメントを 1 割以上超える結果となった。また、図-5 より、幅厚比による M_u/M_p の値に明確な差異はみられず、概ね全塑性強度にて評価可能であることがわかった。したがって、ウェブの幅厚比が 200 程度まで大きく、かつアスペクト比が 3.0 のハイブリッド桁であっても、終局強度は降伏強度を超え、概ね全塑性強度で評価出来ることがわかった。

表-6 合成桁モデルの降伏モーメント M_p 、終局モーメント M_u 、全塑性モーメント M_p の関係

(単位: kN・m)						
モデル名	M_y 解析値	M_p 計算値	M_u 解析値	M_u/M_p	M_u/M_y	M_p/M_y
C-1	2.974	3.390	3.383	0.998	1.138	1.140
C-2	2.727	3.079	3.040	0.987	1.115	1.129
C-3	2.706	3.250	3.142	0.967	1.161	1.201
C-4	3.239	3.969	3.977	1.002	1.228	1.225
C-5	3.106	4.076	3.715	0.911	1.196	1.312
C-6	2.727	3.293	3.254	0.988	1.193	1.208
C-7	2.639	2.937	3.045	1.037	1.154	1.113
C-8	3.077	3.497	3.662	1.047	1.190	1.137
C-9	3.449	3.862	3.783	0.979	1.097	1.120
C-10	3.946	4.569	4.284	0.938	1.086	1.158
C-11	4.382	4.880	4.453	0.913	1.016	1.114
C-12	2.938	3.397	3.394	0.999	1.155	1.156
C-13	2.922	3.371	3.319	0.984	1.136	1.154
C-14	2.724	2.684	3.026	1.127	1.111	0.986

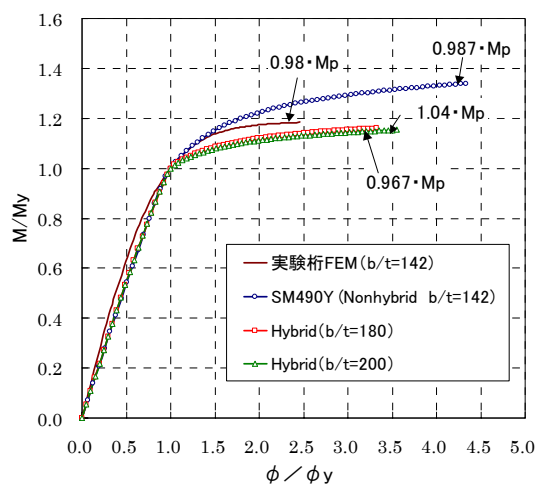


図-5 ウェブ幅厚比に着目した無次元強度

b) 塑性中立軸位置による終局強度の評価

図-6 に解析モデルの終局強度と全塑性モーメントの比を縦軸に、横軸に床版圧縮最外縁から塑性中立軸までの距離 D_p と床版を含めた合成桁全高 D_t の比を横軸にとったものを示す。図-6 中には別途実施した載荷実験 (RC 合成桁, SW 合成桁) の値ならびに, AASHTO, ユーロコード¹⁷⁾ (以下, EC と略す) におけるコンパクト断面に適用される終局強度の低減係数も明示し, 今回の解析結果と比較した。また, 塑性中立軸位置が鋼桁ウェブ内に存在する解析モデルに対して, 終局強度と全塑性曲げモーメントの比を縦軸に, AASHTO のウェブ幅厚比 ($2D_{cp}/t_w$) を横軸にとり, 比較した結果を図-7 に示す。

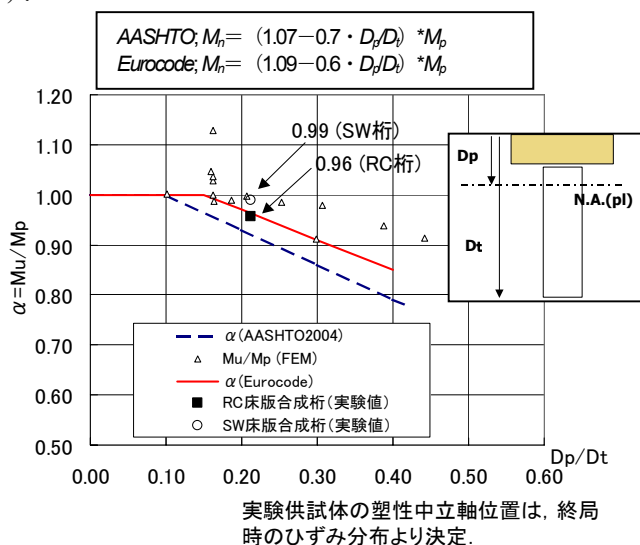


図-6 塑性中立軸位置に着目した終局強度—全塑性強度の相関について

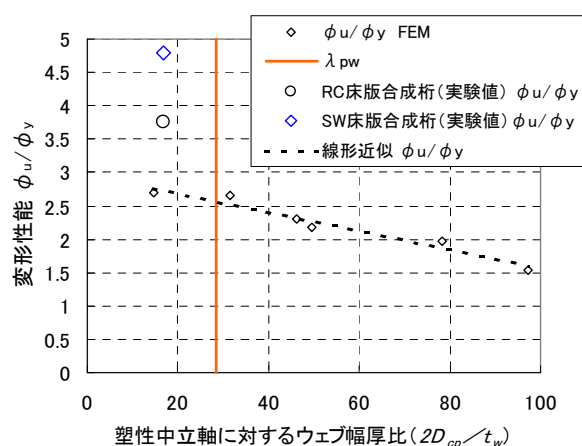


図-7 ウェブ幅厚比と変形性能の相関について

図-6より, AASHTO補正式は降伏強度485MPaまでのコンパクト断面 ($D/t_w \leq 150$ かつ $2D_{cp}/t_w \leq 3.76\sqrt{E/F_{yc}}$), およびEC式はハイブリッド桁には適用外ではあるが,

本解析結果および載荷実験結果から、BHS500鋼を引張フランジに用いたハイブリッド桁においても、曲げ強度の算定に適用可能であり、特にEC低減式は、良好に評価可能であることがわかり、塑性中立軸位置と桁高の比で決定され、その比が大きくなると、全塑性強度に対する終局強度は低下する。また、図-6、図-7よりウェブ幅厚比が大きくなるにつれて、終局強度の低下より変形能の低下が顕著であり、AASHTOのウェブ幅厚比の制限値 ($D/t \leq 150$) を超えた薄肉ウェブハイブリッド桁であっても、終局強度は全塑性強度でほぼ評価可能であり、かつ部材回転能において、SW合成桁の優位性が示された。

5. 試設計検討

(1) 設計条件について

表-7に提案構造の設計方針、表-8に本提案構造を実橋に用いた場合の試設計条件および有効断面の考え方を示す。なお、静的曲げ実験および弾塑性FEM解析結果に基づき、以下のように仮定した。

- 提案構造では、ウェブ幅厚比は $b/180$ 、アスペクト比 30 においても、曲げ強度は全塑性強度で評価可能（正曲げ部）なため、提案構造ではコンパクト断面と見なす。
- BHS500の降伏強度 $\sigma_y = 500\text{MPa}$ とし、許容応力度設計を行う際は、許容応力度 $\sigma_a = 300\text{MPa}$ とする。
- 公称曲げ強度（抵抗値）と荷重値は下記を満足させるものとする。

$$M_n > 1.3M_D + 2.0M_L \quad (8)$$

$$M_n = \phi M_u = M_p \quad (\phi = 1.0) \quad \frac{D_p/D_t}{D_t} < 0.1 \quad (9)$$

$$= M_p \times (1.07 - 0.7 \frac{D_p}{D_t}) \quad 0.1 < \frac{D_p/D_t}{D_t} < 0.42 \quad (10)$$

ここで、

M_n : 公称曲げ抵抗値、

M_D : 死荷重による発生モーメント、

M_L : 活荷重による発生モーメント、

M_u : 終局曲げ強度、

M_p : 全塑性曲げモーメント

- 曲げとせん断の組み合わせ荷重下での照査については、ハイブリッド桁は、従来ウェブの斜張力場を認めていなかった²⁾が、所定の条件下で斜張力場理論が適用できることを別途検証しており¹⁸⁾、式(11)～(15)にて判定する。

$$4\text{乗式} \quad \left(\frac{\lambda M}{M_y} \right)^4 + \left(\frac{\lambda S}{S_y} \right)^4 \leq 1.0 \quad (11)$$

ここで、表-7中の4乗式において、 λ は安全率を示し、

$$*1) \text{ の場合} \quad \lambda = 1.7 \quad (12)$$

$$*2) \text{ の場合} \quad \lambda = 1.5 \quad (13)$$

$$*3) \text{ の場合} \quad \lambda = 1.7 \quad (14)$$

ただし、*3)において

$$A_w / A_f < 1.5^{18)} \quad (15)$$

ここで、 A_w : ウェブ断面積

(箱桁の場合、ウェブ1枚分)

A_f : 圧縮フランジ断面積

(箱桁の場合、圧縮フランジ半分)

- 経済性比較では、BHS500鋼は、鋼材費がSM570材の約1割増し、製作費はSM490Yと同等と仮定する。
- 使用限界状態に対する照査も実施する。ウェブの疲労に対する照査は、活荷重比率が小さいことから省略する。

表-7 提案構造の設計思想

	道示 ⁸⁾	JH合成桁 ⁹⁾	JSSCハイブリッド桁指針 ²⁾	提案構造
設計思想	国内設計基準	連続合成桁正曲げ部において、腹板の薄肉化ならびに少補剛設計を実施(JH設計要領)	ウェブの材質をフランジより低材質として、材料費の低減を図ったハイブリッド桁(限界状態設計法)	ウェブ・圧縮フランジの材質を引張フランジより低材質として、材料費の低減、ならびに腹板の薄肉少補剛設計を実施したハイブリッド合成箱桁
適用	非合成桁、合成桁	連続合成桁の正曲げ部	非合成桁(原則)	連続合成箱桁の正曲げ部
鋼板材料	同一部材内では同一材質	同一部材内では同一材質	ウェブはフランジより低材質 (上下フランジは同一材質)	ウェブは引張フランジより低材質 (上下フランジは同一材質に限定しない)
	SS400, SM490 SM490Y, SM570	← ←	← ←	← ならびにBHS500
ウェブ幅厚比 (水平補剛材0段の場合)	SM490Yの場合 b/123 (b:腹板高)	SM490Yの場合 b/180程度まで	SM490Yの場合 b/109 (ホモジニアス桁より分厚く設定)	SM490Yの場合 b/180程度まで
腹板のアスペクト比	最大 1.5	最大 3.0	最大 2.0	最大 3.0
曲げせん断の照査	腹板の後座屈強度を考慮	4乗式(1)(※1)	4乗式(2)(※2)	4乗式(3)(※3)
		腹板の後座屈強度を考慮	腹板の後座屈強度を無視	腹板の後座屈強度を一定の条件下で考慮
終局強度の算定	(許容応力度設計をベース)	(許容応力度設計をベース) (ただし、全塑性強度が期待できるとの論文コメントあり)	(限界状態設計法)	ノンコンパクト断面であるが、全塑性強度を期待 (実験、解析にて検証)

(2) 試設計結果について

表-9に正曲げ部の最大断面の比較ならびに製作材料費の比率を示す。本比較においては、Case.5が従来鋼材を用いた連続合成桁設計⁹⁾されたものであり、これを「従来構造」と呼ぶこととする。

対象支間が100m程度の橋梁においては、高機能鋼材

表-8 試設計橋梁の諸元および設計用値

		Case.1	Case.2	Case.3	Case.4	Case.5 (従来構造)
設計仕様	BHS500	○	○	○	○	
	ハイブリッド桁	○ (上フランジ低材質化)	○ (上フランジ低材質化)	○		
	薄肉少補剛	○	○		○	○
	コンパ外断面設計	○				
スパン割		85m+100m+100m+85m				
橋梁断面						
コンクリート設計用値		設計基準強度 35MPa, 軽量高流動コンクリート 乾燥収縮率 100 μ , クリープ係数 1.0				
有効断面						

表-9 正曲げ最大断面および製作材料費の比較 (平米鋼重は、有効幅員当たりとする)

	Case.1	Case.2	Case.3	Case.4	Case.5
上フランジ(mm)	1480*37 (SM490Y)	1480*41 (SM490Y)	1480*37 (BHS500)	1480*37 (BHS500)	1480*42 (SM570)
ウェブ (mm)	3000*17 (SM490Y)	3000*17 (SM490Y)	3000*28 (SM490Y)	3000*20 (BHS500)	3000*20 (SM570)
下フランジ(mm)	1480*49 (BHS500)	1480*88 (BHS500)	1480*85 (BHS500)	1480*78 (BHS500)	1480*97 (SM570)
概略鋼重 (kg/m ²)	246.7	281.7	315.0	277.4	297.8
鋼重比	0.84	0.95	1.06	0.93	1.00
製作材料費比	0.71	0.83	0.94	0.92	1.00

BHS500を用いた連続合成桁設計を行うことで、従来構造に対して製作材料費が約8%程度低減できる。鋼桁を薄肉ウェブ合成ハイブリッド桁とすることで、製作材料費がさらに約9%低減できる。さらに、提案構造は鋼桁単体ではノンコンパクトな断面であるが、実験および解析結果より合成桁のコンパクト断面と見なせると考えて、終局強度設計を行うことで、従来構造より製作材料費が約27%低減が可能である。

図-8に国内に実存する細幅箱桁橋との鋼重比較グラフを示す。今回検討はあくまで概略のものではあるが、構造および設計法の新たな提案により、従来構造より約3割程度の鋼重低減を図ることが可能であり、架設費の低減にも期待できる。また、ここでは、全ケースとも断面ブロック割は同一(約8m程度)としたが、板厚低減によって、ブロック長を大きくとれるため、さらなる経済

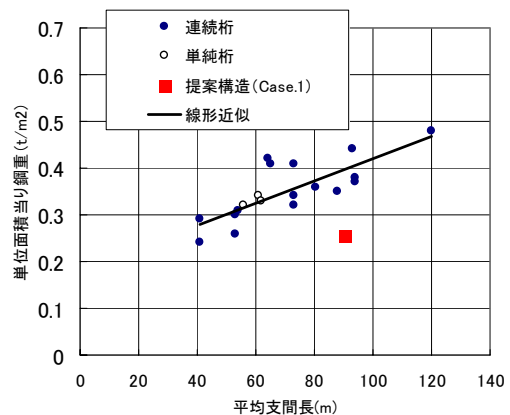


図-8 従来の国内の細幅箱桁橋との平米鋼重の比較

性向上も可能と考えられる。

6. 結論および今後の課題

本研究では、薄肉ウェブを用いた合成ハイブリッド箱桁を提案し、その妥当性の検証および有効性を、実験と解析の両面から検討した。得られた成果を以下に示す。

- ・ 薄肉ウェブを用いた合成ハイブリッド桁であっても、正の純曲げモーメント作用下においては、終局強度はウェブ幅厚比ではなく、コンクリートの圧壊が生じる終局ひずみや塑性中立軸に支配され则认为られる。
- ・ 床版にサンドイッチ床版を用いることで、純曲げ時の変形能が向上する。
- ・ ウェブ単体は薄肉のノンコンパクト断面であっても、終局強度はコンパクト断面と同じく概ね全塑性強度で評価が可能である。
- ・ 高機能鋼材BHS500を用いたハイブリッド合成桁は、十分な曲げ耐荷性能を保有する。

また、試設計検討により下記が得られた。

- ・ 溶接性・加工性に優れた高機能鋼材BHS500を引張りフランジに用いた合成ハイブリッド桁は、製作材料費の大幅な低減が可能である。
- ・ 高機能鋼材BHS500を用いた薄肉ウェブハイブリッド桁に対してコンパクト断面設計を行うことで、従来構造に比して重量軽減ならびに製作材料費の大幅な低減が可能である。

謝辞：本研究の載荷実験は、福山大学ハイテクリサーチセンター（福本教授、上野谷教授、中村助手）にて実施致しました。ご協力いただきました関係各位に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 三木，市川，楠，川端；（招待論文）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.
- 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，No.53，2002.3.

- 3) 建設省土木研究所：ハイブリッドげたの疲労強度，土木技術資料，第961号，1975.3.
- 4) 藤原，竹田，守：ハイブリッドげたの疲労強度，土木学会第30回年次講演会概要集，I-118，pp.241-242，1996.10.
- 5) 国広，古庄：ハイブリッドケターその力学的挙動と経済性，橋梁と基礎，1974.1.
- 6) 前田，石渡，川井：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.
- 7) 久保，石渡，大川：ハイブリッド合成ゲタ（新井橋）の設計，橋梁と基礎，74-9号，pp.39-43，1974.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（鋼橋編），pp.293-297，2002.
- 9) 中藪，大垣，稲葉，川口：PC床版を有する鋼連続合成2主桁橋の設計法（中）腹板の少補剛設計法，Vol.36，No.3，pp.47-54，橋梁と基礎，2002.
- 10) 齊藤，長井，奥井，阿部，井澤：サンドイッチ型複合床版合成桁のクリープ特性に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集第1部(A) Vol.54，pp.340~341，1999.
- 11) 土田，中川，上條，井澤，遠藤：サンドイッチ床版に充填する軽量高流動コンクリートのクリープおよび収縮性状，土木学会第57回年次学術講演会，CS4-063，pp.239-250，1999.
- 12) AASHTO: AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, (3rd Edition), 2004.
- 13) 浦野，利根川，杉浦，大島，小野，中村：高強度鋼を用いた薄肉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，土木学会年次学術講演会，CS2-005，pp.53-54，2005.
- 14) 利根川，杉浦，渡邊，浦野，岩川：高強度鋼を用いた薄肉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（その2），土木学会年次学術講演会，CS2-001，pp.45-46，2005.
- 15) 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.
- 16) 土木学会：コンクリート標準示方書（構造性能照査編），2002.
- 17) EUROCODE: Design of composite steel and concrete structures, part1, prEN1994.
- 18) 成瀬，利根川，渡邊，杉浦，宇都宮：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，応用力学論文集，土木学会，Vol.8，pp.423-430，2005.08.

DEVELOPMENT OF THIN- WALLED HPS COMPOSITE BOX GIRDER

Taro TONEGAWA, Eiichi WATANABE, Kunitomo SUGIURA,
Takashi YAMAGUCHI and Takashi IWAKAWA

Although the hybrid girder requires a certain limitation to width to thickness ratio of web, it is demonstrated experimentally that the composite action of hybrid girder with much thinner web plate to RC slab can assure the ultimate bending strength in positive flexure upto fully plastic bending moment. The ultimate strength for the hybrid girder consisting of different grades of steels for the web and the flange which is classified as the non-compact section, a parametric study is carried out by varying the ratio of width to thickness ratio of the web, material strength by using finite displacement analysis. And, by preliminary design, it is proposed that the thin-walled HPS composite box girder is very cost effective.