

## 二重合成構造による鋼連続合成 I 桁橋の長支間化に関する検討

中日本高速道路(株) 正会員 ○稲葉 尚文 非会員 橋爪 智  
(株) ドーユー大地 フェロー 坂手 道明 非会員 関 宏一郎

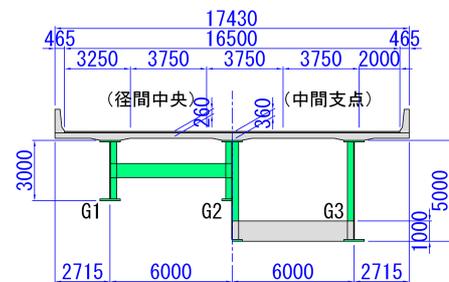
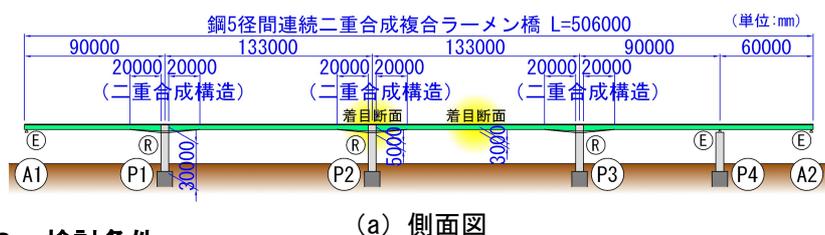
### 1. はじめに

鋼連続合成 I 桁橋は、極めてシンプルな構造であるため、これ以上の部材省略やシンプル化による構造合理化を図ることは困難であるが、中間支点付近の下フランジ圧縮領域に下コンクリート床版を設置し、鋼桁と上下コンクリート床版を合成させた「二重合成構造」の採用によって、中間支点付近の桁剛性を合理的に増加させ、中間支点部の桁高及び板厚低減を図ることが可能であると考えられる。

このような背景から、二重合成構造の採用による鋼連続合成 I 桁橋の更なる経済性追求、長支間化を目的に、径間中央(正曲げ領域)及び中間支点(負曲げ領域)の主要 2 断面での試設計を行った。検討にあたっては、橋梁用高降伏点鋼材(SBHS 鋼)<sup>1)</sup>及び限界状態設計法を導入した場合についても整理した。

### 2. 対象橋梁

検討にあたっては、最大支間長 133m を有する鋼 5 径間連続合成 I 桁橋を対象橋梁とした。対象橋梁を図-1 に示す。なお、ラーメン構造と沓構造の 2 ケースを想定した。



### 3. 検討条件

#### (1) 検討ケース

検討ケースを表-1 に示す。なお、桁高の設定にあたっては、ラーメン構造(変断面)の場合には、一般部(径間中央)は輸送制限から腹板に水平継手が不要となる最大桁高 3.0m、柱頭部(中間支点)は最大板厚を目安とした概略検討により 5.0m とし、沓構造(等断面)の場合には 3.0m で桁高一定とした。

図-1 対象橋梁

表-1 検討ケース

ケース	構造系	鋼種	設計法
CASE-1	沓構造(等断面)	従来鋼	許容応力度設計法
CASE-2			
CASE-3	ラーメン構造(変断面)	SBHS鋼	
CASE-4			

#### (2) 橋梁用高降伏点鋼材(SBHS 鋼)

従来鋼と SBHS 鋼との規定値(降伏点)の比較を表-2 に示す。なお、許容応力度を設定するにあたっては文献 2) を参考とした。

表-2 従来鋼と SBHS 鋼との比較

	従来鋼				SBHS鋼	
	SM400	SM490Y	SM570	HT780	SBHS500	SBHS700
引張強度 $\sigma_u$	400.0 (0.70)	490.0 (0.86)	570.0 (1.00)	780.0 (1.37)	570.0 (1.00)	780.0 (1.37)
降伏強度 $\sigma_y$	235.0 (0.52)	355.0 (0.79)	450.0 (1.00)	685.0 (1.52)	500.0 (1.11)	700.0 (1.56)
許容応力度 $\sigma_a$	140.0 (0.55)	210.0 (0.82)	255.0 (1.00)	355.0 (1.39)	295.0 (1.16)	410.0 (1.61)

(単位: N/mm<sup>2</sup>)

#### (3) 限界状態設計法

##### 1) 使用限界状態の照査

鋼桁に永久変形を許さない、すなわち弾性範囲内(発生応力度が降伏応力度以下)であることを照査した。なお、検討にあたって、安全係数は構造解析係数 1.05 と部材安全係数 1.10 を考慮して 1.15 に設定した。

##### 2) 終局限界状態の照査

荷重係数(1.3D+2.0L)は、現行の「道路橋示方書(II 鋼橋編)」の降伏に対する安全度の照査における荷重組合せに準拠した。また、各種照査式(曲げ強度照査<sup>3)4)</sup>、せん断強度照査<sup>5)</sup>、曲げとせん断による相関強度照査<sup>6)</sup>については表-3 に示す。なお、曲げとせん断による相関強度については、コンパクト断面の場合、相関性が低いことが確認されているため、参考値扱いとした。

キーワード 鋼連続合成 I 桁橋, 複合ラーメン橋, 二重合成構造, 橋梁用高降伏点鋼材, 限界状態設計法

連絡先 〒410-0011 静岡県沼津市岡宮宇焼土手 1300-1 中日本高速道路(株) 沼津工事事務所 TEL055-926-8109

4. 検討結果

検討結果の一部を表-4 に示す。  
許容応力度設計法の場合、沓構造(等断面)では板厚 100mm 以下で断面構成できず、ラーメン構造(変断面)を採用する必要がある。また、SBHS 鋼を導入することで、SBHS700 で板厚 40mm 前後まで薄板化することが可能となり、更に限界状態設計法を導入することで、SBHS500 でも断面構成可能となった。

表-3 各種照査式一覧表

		照 査 式	
限界状態設計法	コンパクト断面判定式	*腹板の限界幅厚比： $\frac{h_w}{t_w} \leq \frac{2.0}{\alpha} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad \left( \alpha = \frac{D_{co}}{h_w} \leq 0.4 \right)$	
	使用限界状態	*曲げ応力度の照査： $\sigma \leq \sigma_y / 1.15$	*せん断応力度の照査： $\tau \leq \tau_y / 1.15$
	終局限界状態	*SBHS鋼の場合 $M_{n(1.3D+2.0L)} \leq M_p$ $M_n = \begin{cases} M_p & (D_p \leq 0.15D_i) \\ M_p \left( 1.05 - 0.33 \frac{D_p}{D_i} \right) & (0.15D_i < D_p \leq 0.4D_i) \end{cases}$ $M_n = \begin{cases} M_p & (D_p \leq 0.13D_i) \\ M_p \left( 1.08 - 0.6 \frac{D_p}{D_i} \right) & (0.13D_i < D_p \leq 0.45D_i) \end{cases}$	
	設計状態	*径間中央(正曲げ領域)： $S_{(1.3D+2.0L)} \leq S_n$ *中間支点(負曲げ領域)： $S_{(1.3D+2.0L)} \leq S_{n1} + S_{n2}$ $S_n = S_y \left( \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \right)$ $S_y = \tau_y h_w t_w$ $S_{n1} = S_{y1} \left( \frac{\tau_{cr}}{\tau_y} + \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1 - \frac{\tau_{cr}}{\tau_y}}{\sqrt{1 + \alpha^2}} \right)$ $S_{n2} = \tau_y h_w t_w \alpha = \frac{L_2}{h_w}$ $\tau_{cr} = \begin{cases} \tau_y & (\tau_y \leq 0.8 \tau_y) \\ \sqrt{0.8 \tau_y} & (\tau_y > 0.8 \tau_y) \end{cases}$ $S_{n2}(=S_{n2}) = \tau_y h_w t_w$	
	曲げとせん断による 相関強度照査	*四乗相関則(参考)： $\left( \frac{M_{n(1.3D+2.0L)}}{M_n} \right)^4 + \left( \frac{S_{(1.3D+2.0L)}}{S_n} \right)^4 \leq 1.0$	
	疲労限界状態	未照査	

表-4 検討結果一覧表

断面諸元	CASE-1 沓構造(等断面)	CASE-2 ラーメン構造(変断面)		CASE-3 ラーメン構造(変断面) ※SBHS鋼		CASE-4 ラーメン構造(変断面) ※限界状態設計法				
		径間中央(正曲げ領域)	中間支点(負曲げ領域)	径間中央(正曲げ領域)	中間支点(負曲げ領域)	径間中央(正曲げ領域)	中間支点(負曲げ領域)	径間中央(正曲げ領域)	中間支点(負曲げ領域)	
		5408 x 260	5408 x 260	5408 x 260	5408 x 260	5408 x 260	5408 x 260	5408 x 260	5408 x 260	
床版	mm	5715 x 260	5408 x 260	5715 x 260	5408 x 260	5715 x 260	5408 x 260	5715 x 260	5408 x 260	
鉄筋		—	D22 etc 100	—	D22 etc 100	—	D22 etc 100	—	D22 etc 100	
材質		SM570	SM570	SM570	SM570	SBHS700	SM570	SBHS500	SBHS500	
上フランジ	mm	1000 x 52	1000 x 100	1000 x 39	1000 x 100	1000 x 30	1000 x 46	1000 x 30	1000 x 47	
ウェブ	mm	2859 x 25	2800 x 30	2895 x 25	4805 x 30	2915 x 25	4919 x 30	2930 x 18	4923 x 24	
下フランジ	mm	1000 x 89	1000 x 100	1000 x 66	1000 x 95	1000 x 55	1000 x 35	1000 x 40	1000 x 30	
下床版	mm	—	2820 x 500	—	2820 x 1000	—	2820 x 1000	—	2820 x 500	
許容応力度設計法	床版	N/mm <sup>2</sup>	-6.8 ≤ -11.4	—	-5.0 ≤ -11.4	—	-5.2 ≤ -11.4	—	-5.6 ≤ -11.4	—
	鉄筋	N/mm <sup>2</sup>	—	162.6 > 140.0	—	75.5 ≤ 140.0	—	104.8 ≤ 140.0	—	109.3 ≤ 140.0
	上フランジ	N/mm <sup>2</sup>	-252.3 ≤ -255.0	593.3 > 255.0	-252.0 ≤ -255.0	254.8 ≤ 255.0	-294.7 ≤ -295.0	406.2 ≤ 410.0	-329.0 > -255.0	433.2 > 295.0
	ウェブ	N/mm <sup>2</sup>	9.7 ≤ 145.0	105.5 ≤ 145.0	6.2 ≤ 145.0	55.8 ≤ 145.0	6.2 ≤ 170.0	54.5 ≤ 240.0	8.5 ≤ 145.0	68.1 ≤ 170.0
	下フランジ	N/mm <sup>2</sup>	254.9 ≤ 255.0	-385.9 > -255.0	252.7 ≤ 255.0	-160.8 ≤ -255.0	292.4 ≤ 295.0	-259.8 ≤ -410.0	385.9 > 255.0	-319.1 > -295.0
	下床版	N/mm <sup>2</sup>	—	-28.2 > -11.4	—	-10.6 ≤ -11.4	—	*-13.7 > -11.4	—	-18.3 > -11.4
	合成応力度		0.92 ≤ 1.2	4.72 > 1.2	0.90 ≤ 1.2	1.08 ≤ 1.2	0.91 ≤ 1.2	1.00 ≤ 1.2	2.18 > 1.2	2.25 > 1.2
	床版	N/mm <sup>2</sup>	-12.0 ≤ -24.0	—	-8.4 ≤ -24.0	—	-8.8 ≤ -24.0	—	-9.4 ≤ -24.0	—
	鉄筋	N/mm <sup>2</sup>	—	266.6 ≤ 345.0	—	124.6 ≤ 345.0	—	173.0 ≤ 345.0	—	180.4 ≤ 345.0
	上フランジ	N/mm <sup>2</sup>	-342.5 ≤ -450.0	766.8 > 450.0	-336.4 ≤ -450.0	355.6 ≤ 450.0	-392.0 ≤ -500.0	562.0 ≤ 700.0	-436.1 ≤ -450.0	598.3 > 500.0
ウェブ	N/mm <sup>2</sup>	374.6 ≤ 450.0	-531.7 > -450.0	359.6 ≤ 450.0	-220.9 ≤ -450.0	415.3 ≤ 500.0	-352.4 ≤ -700.0	549.1 > 450.0	-434.9 ≤ -500.0	
下フランジ	N/mm <sup>2</sup>	—	-41.0 > -24.0	—	-15.4 ≤ -24.0	—	-20.0 ≤ -24.0	—	-26.7 > -24.0	
下床版	N/mm <sup>2</sup>	—	0.215 > 0.186	—	0.120 ≤ 0.186	—	0.152 ≤ 0.186	—	0.156 ≤ 0.186	
ひび割れ幅の照査	mm	—	—	—	—	—	—	—	—	
活荷重たわみの照査	mm	107 ≤ 266	—	26 ≤ 266	—	26 ≤ 266	—	26 ≤ 266	—	
限界状態設計法	床版	N/mm <sup>2</sup>	-7.9 ≤ -34.0	—	-5.8 ≤ -34.0	—	-6.0 ≤ -34.0	—	-6.4 ≤ -34.0	—
	鉄筋	N/mm <sup>2</sup>	—	187.0 ≤ 345.0	—	86.8 ≤ 345.0	—	120.5 ≤ 345.0	—	125.6 ≤ 345.0
	上フランジ	N/mm <sup>2</sup>	-290.1 ≤ -450.0	636.2 > 450.0	-289.9 ≤ -450.0	293.0 ≤ 450.0	-339.0 ≤ -500.0	467.1 ≤ 700.0	-378.4 ≤ -450.0	498.2 ≤ 500.0
	ウェブ	N/mm <sup>2</sup>	11.2 ≤ 259.8	121.3 ≤ 259.8	7.1 ≤ 259.8	64.1 ≤ 259.8	7.1 ≤ 288.7	62.7 ≤ 404.1	9.8 ≤ 259.8	78.3 ≤ 288.7
	下フランジ	N/mm <sup>2</sup>	293.2 ≤ 450.0	-443.8 ≤ -450.0	290.6 ≤ 450.0	-185.0 ≤ -450.0	336.2 ≤ 500.0	-298.8 ≤ -700.0	443.8 ≤ 450.0	-367.0 ≤ -500.0
	下床版	N/mm <sup>2</sup>	—	-32.4 ≤ -34.0	—	-12.2 ≤ -34.0	—	-15.8 ≤ -34.0	—	-21.0 ≤ -34.0
	塑性中立軸	mm	410 (上フランジ)	447 (下床版)	393 (上フランジ)	685 (下床版)	388 (上フランジ)	920 (下床版)	365 (上フランジ)	1450 (ウェブ)
	コンパクト断面判定		114.360 < —	80.000 < —	115.800 < —	130.000 < —	116.600 < —	131.800 < —	162.778 < —	185.542 < 187.460
	ダウティリティ条件		0.122 ≤ 0.15	0.149 ≤ 0.15	0.117 ≤ 0.15	0.137 ≤ 0.15	0.116 ≤ 0.13	0.184 ≤ 0.13	0.109 ≤ 0.15	0.290 ≤ 0.13
	曲げ強度照査	kN·m	111869 ≤ 177121	-280854 > -221718	83972 ≤ 148031	-242865 ≤ -429613	83972 ≤ 147390	-242865 ≤ -421448	83972 ≤ 101069	-242865 ≤ -273845
せん断強度照査	kN	1257 ≤ 9235	12500 ≤ 16782	866 ≤ 9247	11361 ≤ 20635	866 ≤ 9831	11361 ≤ 30013	866 ≤ 5264	11361 ≤ 14062	
相関強度照査	参考	0.159 ≤ 1.0	2.882 > 1.0	0.104 ≤ 1.0	0.194 ≤ 1.0	0.105 ≤ 1.0	0.131 ≤ 1.0	0.477 ≤ 1.0	1.045 > 1.0	
疲労限界状態の照査		未照査	未照査	未照査	未照査	未照査	未照査	未照査	未照査	

※コンクリート強度及び下床版厚の変更等対応可能

5. まとめ

本検討結果より、SBHS 鋼及び限界状態設計法を導入することで、支間長 100m を超える長支間橋梁に対して、鋼連続合成 I 桁橋が十分採用可能であることが分かった。ただし、限界状態設計法において、使用限界状態の照査で断面決定する場合もあるため、部分安全係数 (1.15) の設定根拠が重要となってくる。今後は、耐風安定性及び耐震性について検証を進めるとともに、SBHS 鋼の施工実績が蓄積され、実務レベルでの限界状態設計法に関する設計体系が確立されることを強く望むものである。

最後に、本検討を実施するにあたって、長井正嗣教授 (長岡技術科学大学)、山田均教授 (横浜国立大学)、奥井義昭教授 (埼玉大学) に貴重なご助言をいただいた。関係各位に心より謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 日本工業規格 JIS G3140 : 橋梁用高降伏点鋼板, 2008. 11.
- 2) 岡田, 村上, 川畑 : 橋梁用高性能鋼材の活用による連続合成 2 主 I 桁橋の長支間化に関する検討, 土木学会論文集 F, Vol. 63, No. 2, pp. 141-155, 2007. 4.
- 3) Vivek Kumar GUPTA, Yoshiaki OKUI, Naofumi INABA and Masatsugu NAGAI : Effect of concrete crushing on flexural strength of steel-concrete composite girders, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 3, pp475-485, 2007. 7.
- 4) 岡田, 加藤 : 高強度鋼を用いて塑性化を考慮した合成 I 桁の曲げ耐荷力特性の評価, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 1, pp. 151-164, 2009. 2.
- 5) 稲葉, 奥井, 長井, 本間, 春日井, 野呂 : 2 重合成 I 桁の曲げ及びせん断強度の評価方法に関する実験的研究, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 1, pp117-132, 2010. 3.
- 6) 長井, 稲葉, 奥井, 宮下, 平山, 細見 : 合成 I 桁の正, 負曲げ及び相関強度評価に関する一考察, 構造工学論文集, 土木学会, Vol. 55A, pp115-123, 2009. 3.