

(31) 鉄道用合成桁を対象とした各種設計手法 による試設計検討

久保 武明¹・谷口 望²・藤原 良憲³・林 偉偉⁴・依田 照彦⁵

¹正会員 トーニチコンサルタント 本社事業本部 (〒151-0071東京都渋谷区本町1-13-3)
E-mail: T_Kubo@tonichi-c.co.jp

²正会員 前橋工科大学 社会環境工学科 (〒371-0816群馬県前橋市上佐鳥町460-1)
E-mail: n-tani@maebashi-it.ac.jp

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 (〒231-8315神奈川県横浜市中区本町6-50-1)
E-mail: fujiwara.yos-8j6u@jr-tt.go.jp

⁴正会員 早稲田大学 理工学術院 国際教育センター (〒169-8555東京都新宿区大久保3-4-1)
E-mail: linweiwei@aoni.waseda.jp

⁵フェロー会員 モニタリングシステム技術研究組合 理事長 (〒101-0041東京都千代田区神田須田町1-16)
E-mail: yoda1914@waseda.jp

鉄道橋の設計基準においては、許容応力度設計法が用いられてきたが、平成4年に限界状態設計法、平成21年に性能照査型設計体系が導入され、設計手法の合理化が図られている。近年、更なるコスト縮減が求められているなかで、鋼・合成標準示方書や複合構造示方書において採用されているAASHTOやEurocodeによる断面分類（コンパクト断面、ノンコンパクト断面、スレンダー断面）を行い、断面強度を算定する設計手法が注目されている。そこで、本研究では、これらの各種設計法を、鉄道用合成桁に適用した場合、どの程度の合理化効果があるかを検証することとし、試設計検討を行うこととした。

Key Words : Allowable stress design method, Limit state design method, Compact cross section, composite girder for railway

1. はじめに

近年、鉄道橋の建設においては、周辺環境への影響に配慮するため、騒音対策が重要な事項となっている。特に、新幹線の鋼橋は、桁下制限を受ける架道橋などに適用されているが、遮音効果に優れたRC床版を有した合成桁を採用している。

鉄道用合成桁の設計基準は、昭和38年に合成桁鉄道橋設計示方書（案）が制定されて以来、許容応力度設計法が用いられてきたが、平成4年の設計標準改訂に伴い許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行が行われ、平成21年には照査方法は限界状態設計法であるが、性能照査型の設計体系が導入され、設計手法の合理化が図られているところである。

しかし、近年、更なるコスト縮減が求められているなかで、鋼・合成標準示方書¹⁾や複合構造示方書²⁾において採用されているAASHTOやEurocodeによる断面分類（コンパクト断面、ノンコンパクト断面、スレンダー断面）を行い、断面強度を算定する設計手法（以下、コンパクト断面とする）が注目されて

おり、道路橋においては種々の検討³⁾が行われ、実橋への適用事例⁴⁾もあるが、鉄道橋での検討は行われていないのが現状である。

そこで、本検討では、これらの各種設計法を、鉄道用合成桁に適用した場合、どの程度の合理化効果を得られるのかを検証することを目的として、試設計検討を行うこととした。

2. 設計法概要

本検討においては、各種の設計法として、①許容応力度設計法⁵⁾、②限界状態設計法⁶⁾、③コンパクト断面¹⁾、の3手法により単純桁の支間中央における断面検討を行うものとした。以下に、各設計法の概要を示す。

(1) 許容応力度設計法

許容応力度設計法は、想定される作用に対して、構造物の部材に生じる作用応力度の最大値が、部材の材料の弾性限界から安全率を考慮して定められた

表-1 試設計に用いた材料の許容応力度

		鋼材 SM570	コンクリート	
降伏強度	(N/mm ²)	450	—	—
設計基準強度	(N/mm ²)	—	30	40
安全率	(—)	1.77	3.5	3.5
許容応力度	(N/mm ²)	260	8.6	11.4

許容応力度以内とすることで、構造物の安全性を確認する設計手法であり、国内においては建築や土木の分野において広く用いられている。

例えば、鉄道橋においては、鋼材に対しては降伏強度に1.6～1.8程度の安全率を、合成桁の圧縮フランジとしてのコンクリートに対しては設計基準強度に3.5の安全率を考慮して許容応力度を定めている。本検討に用いた材料の許容応力度を表-1に示す。

(2) 限界状態設計法

限界状態設計法は、その構造物に生じてはならない種々の限界状態を想定し、それぞれの状態に対する安全性を個々に照査する方法で、終局、使用、疲労の3つの限界状態に分類することが出来る。

終局限界状態は、構造物または部材が破壊したり、大変形などにより機能や安定を失う状態を想定した最大耐力に対応する限界状態であり、耐用期間中に稀に作用するかもしれない非常に大きな荷重によって生じる状態である。

使用限界状態は、構造物または部材が過度な変形、変位、振動等を起こし、正常な使用ができなくなる状態を想定した通常の供用または耐久性に関する限界状態であり、頻繁に作用する荷重により生じる状態である。

疲労限界状態は、構造物または部材が繰り返し荷重により疲労損傷して機能を失う状態であり、変動荷重、荷重振幅の影響が大きい。

限界状態設計法は許容応力度設計法と異なり、作用から応答値を求める過程と、材料特性から部材性能の限界値を求める過程の2系統において、安全係数を複数考慮した部分係数法である。鉄道橋では安全係数として、表-2に示す作用係数 γ_f 、構造解析係数 γ_a 、材料係数 γ_m 、部材係数 γ_b 、構造物係数 γ_i を考慮するものとしている。

合成桁の終局限界状態の曲げ耐力の基本照査式を以下に示す。

$$\gamma_i \cdot M_d / M_{ud} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここで、 γ_i は構造物係数、 M_d は設計曲げモーメント（設計応答値）、 M_{ud} は曲げ耐力（設計限界値）である。耐力は、コンクリート床版上面における曲げ圧縮耐力、上フランジ上面における曲げ圧縮耐力、下フランジ下面における曲げ引張耐力など部位ごとに算定し照査を行っている。

なお、現行の設計基準⁹⁾において合成桁の終局限界として想定している状態は、供用期間中における最大作用として、桁が支持する全線路に、最大乗車状態の列車が最高速度で同時に載荷する状態としているが、耐力は降伏耐力を用いた弾性範囲の設計手法となっている。

限界状態設計法により合成桁の断面決定を行った場合の決定要因を示す。

コンクリート床版は、橋面を支持する版としての機能と主桁の圧縮フランジとしての機能を合わせ持つことから、厚さは版として決定し、材料強度は主

表-2 鉄道橋の限界状態設計法における安全係数

種類	係数に考慮される内容	数値
作用係数 γ_f	作用の変化変動、算定の不確実性、環境の影響等	1.0 ～1.2
構造解析係数 γ_a	構造解析の不確実性	1.0
材料係数 γ_m	材料の変化変動、試験体と構造物での差異、材料特性の経時変化	鋼材は1.05 コンクリートは1.3
部材係数 γ_b	部材性能算定の不確実性、部材寸法のばらつき、部材の重要度	1.05 ～1.1
構造物係数 γ_i	構造物の重要度、構造物が限界状態に達したときの社会的影響	1.0 ～1.2

桁の圧縮フランジとしての必要強度から決定する。

上フランジは圧縮側で、合成後は合成断面の中立軸に近い位置にあることから、架設時（鋼桁架設後のコンクリート打設時、抵抗断面は鋼断面）においてある程度の必要板厚が仮定され、その後作用する後荷重により終局時に必要となる板厚が決定する。

下フランジは架設には比較的余力が大きく、終局時に板厚が決定する。

なお、使用限界状態の照査として鉛直たわみ量の照査、疲労限界状態の照査として局部的な溶接継手に着目した照査を行う必要があるが、桁下制限により腹板高が抑制されない場合においては、概ね上記で述べたとおり、各部位ともに終局限界状態の照査により断面が決定される。

(3) コンパクト断面を用いた設計法

本設計法による断面耐力は、断面区分により算出方法が異なる。部材の断面は最大幅厚比、すなわち局部座屈に対する抵抗能力によって、コンパクト断面、ノンコンパクト断面、スレンダー断面の3種類に区分される。

コンパクト断面は全塑性モーメントに到達することが出来る断面、ノンコンパクト断面は圧縮域の最縁端で降伏ひずみに到達するが局部座屈の発生により全塑性には至らない断面、スレンダー断面は局部座屈により圧縮状態で降伏に至らない断面と定義され、鋼合成標準示方書¹⁾においては、以下に示す判

定式により断面区分を行うものとしている。

- コンパクト断面の判定式

$$\frac{b_w}{t_w} \leq \frac{2.0}{\alpha} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\text{ただし, } \alpha < 0.4) \quad (2)$$

- ノンコンパクト断面の判定式

$$\frac{b_w}{t_w} \leq \frac{1.7\Lambda}{0.67 + 0.33\Psi} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\Psi > -1.0) \quad (3)$$

$$\frac{b_w}{t_w} \leq 2.5\Lambda (1 - \Psi) \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (\Psi \leq 1.0) \quad (4)$$

$$\text{ただし, } \Lambda = \left[1 - 0.1 \left(\frac{M1}{M_{ys}} \right) + 2.31 \left(\frac{M1}{M_{ys}} \right)^2 \right] \quad (5)$$

$$(\text{ただし, } \frac{M1}{M_{ys}} \leq 0.4)$$

- スレンダー断面は上記以外

コンパクト断面の設計曲げ耐力は図-1に示す応力分布から全塑性曲げモーメントを用いることが出来る。ノンコンパクト断面は降伏曲げモーメントを、スレンダー断面は鋼部材の有効断面を考慮して算出した曲げモーメントを用いて算出することが可能である。なお、本検討では、コンパクト断面の設計曲げ耐力は、EurocodeとAASHTOの規定を参照し、全塑性曲げモーメントの0.9倍と降伏モーメントの1.3倍の小さい方を採用するものとした。

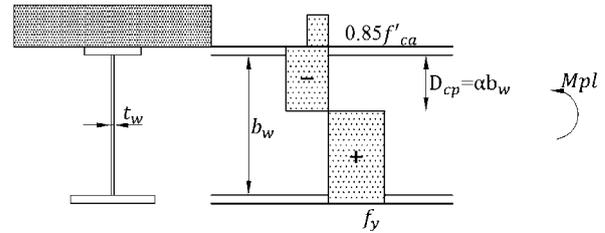


図-1 コンパクト断面における全塑性モーメント時の応力分布図

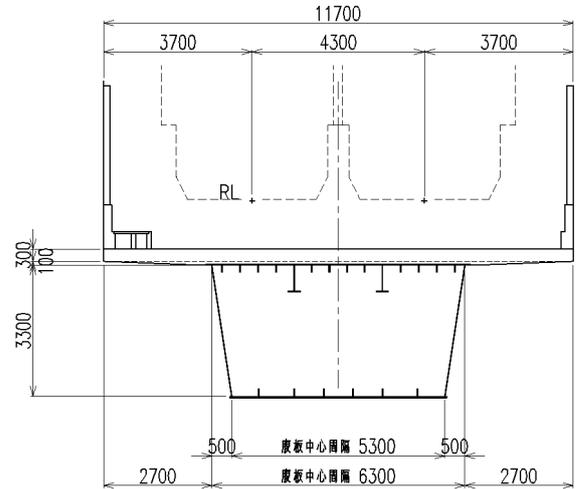


図-2 A橋の支間中央断面図

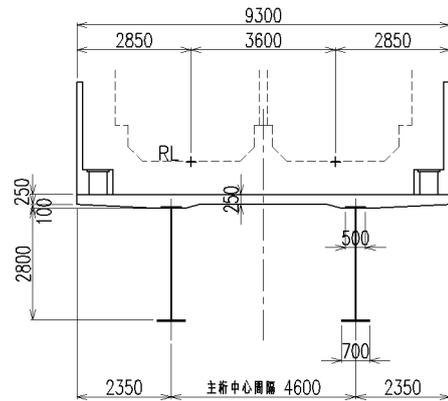


図-3 B橋の支間中央断面図

3. 試設計検討

本検討においては、以下に示す2橋を対象として、単純桁の支間中央における断面検討を行うものとした。

(1) 検討対象橋梁

検討には、最近の施工実績から、以下に示す2橋を用いた。断面図を図-2、-3に示す。

A橋は新幹線鉄道用合成桁で一般的に用いられている断面形状であり、支間長59.8mの単純合成桁（複線1主箱桁形式、腹板中心間隔6.3m、腹板高2.7m、新幹線荷重）であるが、桁下制限の厳しい箇所に建設されることから腹板高を抑制し、たわみの照査が断面決定要因となっているため、腹板高を3.3mとして再計算を行った。

B橋は道路橋での採用実績が近年多い構造形式で、総支間長118.4m（39.2m+40.0m+39.2m）の3径間連続合成桁（複線2主I桁形式、腹板中心間隔4.6m、腹板高2.35m、在来線電車荷重）であるが、本検討においては単純桁を想定していることから、側径間の端支点側半分を単純桁として再計算し、支間長38.4mの単純合成桁（複線2主I桁形式、腹板中心間隔4.6m、腹板高2.8m）とした。

(2) 設計荷重と組合せ

本検討に用いた設計荷重と組合せおよび作用係数を表-3に示す。許容応力度設計法と限界状態設計法はそれぞれの設計基準⁵⁶⁾によるものとした。

表-3 設計荷重と組合せおよび作用係数

	死荷重 D			列車荷重 L	衝撃荷重 I	乾燥収縮 SH	温度差 T
	合成前		合成後				
	鋼	コンクリート					
許容応力度設計法	1.0			1.0 (1.125)	1.0	1.0	
限界状態設計法	1.0	1.1	1.0 1.2	1.1 (1.23)	1.0	1.0	

限界状態設計法における死荷重に対する作用係数の概要を以下に示す。死荷重は合成前死荷重と合成後死荷重に分類し、合成前死荷重のうち鋼桁の自重に対する作用係数は1.0、コンクリート床版の自重

表-4 A橋の支間中央断面の計算結果総括表

				① 許容応力度法	② 限界状態設計法	③ コンパクト断面		
断面形状 および 概算鋼重	床版			1- 11700 × 300	1- 11700 × 300	1- 11700 × 300		
	U.FLG			1- 6600 × 17	1- 6600 × 17	1- 6600 × 16		
	U.RIB			12- 180 × 20	12- 180 × 20	12- 180 × 20		
	ST.WEB			2- 660 × 10	2- 660 × 10	2- 660 × 10		
	ST.FLG			2- 250 × 12	2- 250 × 12	2- 250 × 12		
	WEB			2- 3300 × 14	2- 3300 × 14	2- 3300 × 14		
	L.RIB			6- 180 × 16	6- 180 × 16	6- 180 × 16		
	L.FLG			1- 5420 × 44	1- 5420 × 36	1- 5420 × 27		
	鋼断面積			522,760 mm ²	479,400 mm ²	424,020 mm ²		
概算鋼重			368 t	338 t	299 t			
使用材料				f _{ck} = 40N/mm ²				
鋼材				SM570				
限界状態設計法 での照査結果	耐荷性	床版	合成後	上縁	0.817 < 1.0	0.841 < 1.0	0.886 < 1.0	
			合成前	上縁	0.495 < 1.0	0.502 < 1.0	0.599 < 1.0	
		鋼桁	合成前	下縁	0.329 < 1.0	0.387 < 1.0	0.486 < 1.0	
				合成後	上縁	0.812 < 1.0	0.820 < 1.0	1.008 > 1.0
			合成後	下縁	0.833 < 1.0	0.980 < 1.0	1.227 > 1.0	
	せん断		0.049 < 1.0	0.049 < 1.0	0.049 < 1.0			
	耐疲労性	鋼桁	合成後	下縁	0.325 < 1.0	0.385 < 1.0	0.481 < 1.0	
			たわみ	走行安全性	0.723 < 1.0	0.817 < 1.0	0.973 < 1.0	
					使用性	0.336 < 1.0	0.380 < 1.0	0.452 < 1.0
	許容応力度法 での照査結果 (N/mm ²)	床版	合成後	上縁	10.9 < 11.4	11.2 < 11.4	11.8 > 11.4	
合成前				上縁	133.3 < 260	135.2 < 260	143.0 < 260	
鋼桁		合成前	下縁	96.0 < 260	112.9 < 260	141.7 < 260		
			合成後	上縁	252.7 < 260	255.0 < 260	265.1 > 260	
		合成後	下縁	251.1 < 260	295.4 > 260	369.6 > 260		
				せん断	8.5 < 150	8.5 < 150	8.5 < 150	
コンパクト断面 での照査結果	曲げ			0.710 < 1.0	0.815 < 1.0	0.979 < 1.0		
	せん断			0.115 < 1.0	0.115 < 1.0	0.115 < 1.0		
鋼断面積の比	許容応力度法を1.0			1.000	0.917	0.811		
	限界状態法を1.0			1.090	1.000	0.884		

に対する作用係数は1.1としている。合成後死荷重は、橋面上の地覆や防音壁やレール等の軌道の重量として、作用係数は1.0としているが、将来の変動を考慮していない場合においては1.2を用いるものとしている。

列車荷重はA橋は新幹線荷重P-16、B橋は在来線電車荷重M-16を用いており、いずれも16は1軸重が160kN（16tf）であることを示しているが、車両内の座席配置や利用状況に配慮して、新幹線荷重は定員乗車状態を、電車荷重は最大乗車状態での軸重を示している。そのため、新幹線荷重については、許容応力度設計法では修正係数として18t/16t=1.125を、限界状態設計法では最大350%乗車であることから1.23を用いて補正を行っている。

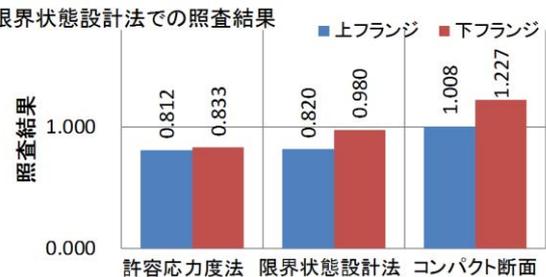
道路橋のコンパクト断面の検討³⁾⁴⁾においては、供用期間中の最大作用を表現するため、死荷重に対して作用係数1.3、活荷重に対して作用係数2.0を用いているが、作用係数の設定には別途の検討が必要であると考えられることから、本検討のコンパクト断面の算定においては限界状態設計法と同じとした。

(2) A橋の計算結果

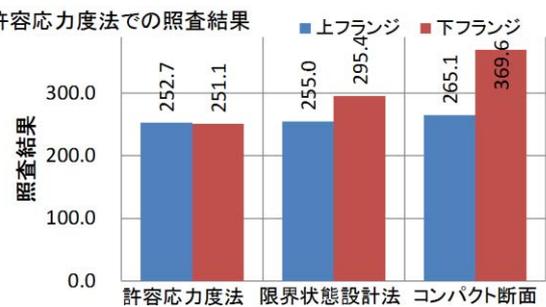
A橋の断面計算結果を表-4に、設計法別の照査値の比較を図-4に示す。

表-4に示す断面形状は、それぞれの設計手法によ

限界状態設計法での照査結果



許容応力度法での照査結果



コンパクト断面での照査結果

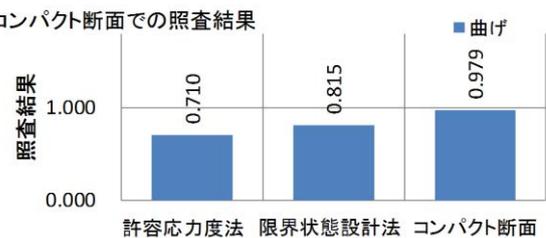


図-4 B橋の支間中央断面図

表-5 B橋の支間中央断面の計算結果総括表

			① 許容応力度法	② 限界状態設計法	③ コンパクト断面			
断面形状 および 概算鋼重	床版		1- 4650 × 250	1- 4650 × 250	1- 4650 × 250			
	U.FLG		1- 500 × 40	1- 500 × 30	1- 500 × 23			
	WEB		1- 2800 × 13	1- 2800 × 13	1- 2800 × 13			
	L.FLG		1- 700 × 52	1- 700 × 40	1- 700 × 28			
	鋼断面積		92,800 mm ²	79,400 mm ²	67,500 mm ²			
	概算鋼重		73 t	62 t	53 t			
使用材料			f _{ck} = 30N/mm ²					
			SM570					
限界状態設計法 での照査結果	耐荷性	床版	合成後 上縁	0.587 < 1.0	0.621 < 1.0	0.668 < 1.0		
			合成前 上縁	0.730 < 1.0	0.882 < 1.0	1.080 > 1.0		
		鋼桁	合成前	下縁	0.389 < 1.0	0.489 < 1.0	0.644 < 1.0	
				合成後 上縁	0.847 < 1.0	0.987 < 1.0	1.565 > 1.0	
			合成後	下縁	0.792 < 1.0	0.975 < 1.0	1.259 > 1.0	
				せん断	0.049 < 1.0	0.049 < 1.0	0.049 < 1.0	
	耐疲労性	鋼桁	合成後 下縁	0.642 < 1.0	0.743 < 1.0	0.979 < 1.0		
			たわみ	走行安全性		0.227 < 1.0	0.267 < 1.0	0.325 < 1.0
				使用性		0.274 < 1.0	0.321 < 1.0	0.392 < 1.0
	許容応力度法 での照査結果 (N/mm ²)	床版	合成後 上縁	5.3 < 8.6	5.7 < 8.6	6.1 < 8.6		
鋼桁			合成前 上縁	175.6 < 260	215.2 < 260	260.2 > 260		
		合成前	下縁	124.3 < 260	156.1 < 260	205.5 < 260		
			合成後	上縁	254.1 < 260	296.6 > 260	343.7 > 260	
		下縁		253.7 < 260	312.6 > 260	403.9 > 260		
せん断		8.9 < 150	8.9 < 150	8.9 < 150				
コンパクト断面 での照査結果	曲げ		0.650 < 1.0	0.753 < 1.0	0.974 < 1.0			
	せん断		0.052 < 1.0	0.052 < 1.0	0.052 < 1.0			
鋼断面積の比	許容応力度法を1.0		1.000	0.856	0.727			
	限界状態法を1.0		1.169	1.000	0.850			

り決定される形状を示している。単純桁の支間中央断面であることから、腹板厚は幅厚比によって求められる最小板厚を採用し、フランジ厚についてはそれぞれの設計手法によって決定する板厚を求めた。なお、いずれの断面形状においても、その他の設計手法で計算した結果も記載している。

上フランジにおける板要素による最小板厚は14mmであり、箱桁断面のため上フランジ幅が広いことから、3手法にて大きな板厚差は生じていない。許容応力度設計法と限界状態設計法では17mm、コンパクト断面では16mmとなった。

下フランジは最外縁に位置する曲げに抵抗する板であることから、3手法で大きな差が生じている。許容応力度設計法は44mm、限界状態設計法では36mm、コンパクト断面では27mmである。

許容応力度設計法と限界状態設計法の照査値の変化は、図-4より上フランジは板厚と同様に大きな変化は無いが、下フランジには照査値の変化が確認出来る。

A橋におけるコンパクト断面を採用した場合の経済性（鋼重，鋼断面積）は，許容応力度設計法と比較した場合は18%で概算鋼重の差は69t，限界状態設計法と比較した場合は11%で概算鋼重との差は39tとの結果を得た。

(3) B橋の計算結果

B橋の断面計算結果を表-5に，設計法別の照査値の比較を図-5に示す。

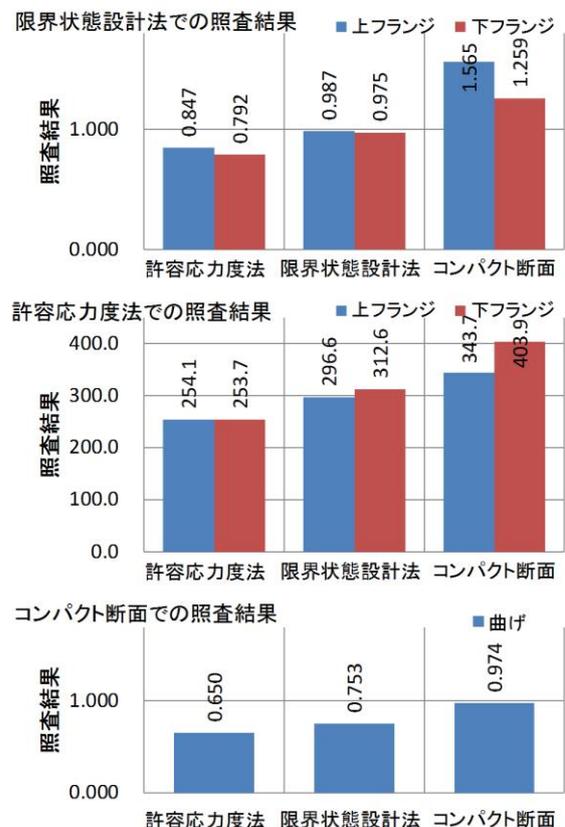


図-5 B橋の支間中央断面図

B橋はI断面であり，上下フランジにおいて3手法での計算結果に大きな差が生じている。

上フランジは、許容応力度設計法で40mm、限界状態設計法で30mm、コンパクト断面で23mmとなった。上フランジにおける板要素による最小板厚は23mmであり、コンパクト断面で算定された板厚と同じである。

下フランジは、許容応力度設計法で52mm、限界状態設計法で40mm、コンパクト断面で28mmと大きな変化が確認出来た。

B橋におけるコンパクト断面を採用した場合の経済性（鋼重、鋼断面積）は、許容応力度設計法と比較した場合は27%で概算鋼重の差は20t、限界状態設計法と比較した場合は15%で概算鋼重との差は9tとの結果を得た。

4. まとめ

コンパクト断面を採用した場合の経済性（鋼重、鋼断面積）は限界状態設計法と比較し、A橋では11%、B橋では15%となった。コンパクト断面の採用により、現行の設計基準に採用されている限界状態設計法に比べ、約1割程度の合理化効果が得られる可能性が確認出来た。

しかし、採用に至るまでには今後課題の抽出や検討の深度化など、さらなる検討が必要であると考えている。現時点において、課題と考えられる事項を以下に示す。

(1) 終局限界状態における荷重の組合せと作用係数の設定

コンパクト断面は塑性化を許容した設計手法となるため、終局時に考慮する荷重等は、耐用期間中に稀に作用するかもしれない非常に大きな荷重である。本検討においては、現行の基準を参照に荷重の組合せと作用係数を設定したが、検討の深度化が必要であると考えられる。

(2) 使用限界状態における荷重の組合せと作用係数の設定

使用限界状態は通常の供用状態である。この状態においては塑性化を許容せず、弾性範囲内とすることが望ましいと考えられる。現行の設計基準においては、終局限界状態において弾性設計範囲としていることから、一般に、使用限界状態において応力度等の照査は行っていない。そこで、コンパクト断面を採用する場合においては、使用限界状態の照査に用いる荷重の組合せと作用係数について、検討の深度化が必要であり、本検討においては、この使用限界状態について検討していないことから、検討結果によっては合理化の程度も変化するものと考えられる。

謝辞：本検討にあたり、埼玉大学・奥井教授、NEXCO 東日本・関東支店の皆様にご指導ご協力を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会，鋼・合成構造標準示方書，2016.7.
- 2) 土木学会，複合構造標準示方書，2015.5.
- 3) (財) 高速道路技術センター（東日本高速道路（株）関東支店委託）：鋼連続合成桁橋の構造合理化に関する技術検討業務，平成18年3月
- 4) 高久英彰，藤野 和雄，岸隆，佐々木力，三宅隆文，田中雅人：コンパクト断面を設計に採用した鋼連続合成桁橋一圏央道 金谷郷高架橋一，橋梁と基礎，Vol.45, No.12, pp.5-10, 2011.
- 5) 土木学会，国鉄建造物設計標準 鋼鉄道橋 鋼とコンクリートの合成鉄道橋，昭和58年5月.
- 6) 国土交通省鉄道局監修，財団法人鉄道総合技術研究所編：鉄道建造物等設計標準・同解説 鋼・合成建造物，丸善，2009.7.

STUDY ON DESIGN METHODS FOR RAILWAY COMPOSITE GIRDERS

Takeaki KUBO, Nozomu TANIGUCHI, Yoshinori FUJIWARA, Weiwei LIN,
Teruhiko YODA,

In the design standards for railway bridges, allowable stress level design methods have been used, but the limit state design methods were introduced in 1992 and the performance check type design systems were introduced in 2009, and the design method were streamlined. In recent years, as further reductions in cost have been sought, cross sectional classification (compact cross section, non-compact cross section, slender cross section) by AASHTO and Eurocode adopted in the steel-synthetic standards specification and composite structures specification are carried out, the design methods to calculate section strength have attracted attention. Therefore, in this research, we decided to examine the test design and examination to see how much rationalization effect is obtained when applying these various design methods to railway synthetic digits.