

## 論文 鉄道合成桁に用いる合成床版の軸方向剛性の寄与度に関する検討

谷口 望<sup>\*1</sup>・久保 武明<sup>\*2</sup>・藤原 良憲<sup>\*3</sup>

**要旨**：鉄道橋で合成床版が使用される際には、その橋軸方向の合成断面に合成床版の底鋼板を考慮しないケースがある。これは鉄道設計標準・同解説において、鋼部材同士をボルトで連結する際には2列以上の高力ボルトが必要とされるためであり、合成桁の上フランジと床版底鋼板の連結に2列以上のボルトを配置することが困難な状況から生じている。しかし、この底鋼板の剛性寄与があることは容易に想像できることであるため、詳細な有限要素解析を実施することにより、この剛性寄与について検討を行った。本結果を用い、設計で使用される有効幅の検討や設計の合理化の可能性について検討を行った。

**キーワード**：合成桁, 合成床版, FEM, 剛性寄与, 設計合理化

## 1. はじめに

鋼とコンクリートを組み合わせた合成床版は、施工性、耐荷性、耐久性に優れた構造形式である<sup>1)</sup>。このような中で、合成床版を合成桁の床版として使用するケースも多く、鉄道用の連続合成桁でも複数使用されている<sup>2)</sup>。合成桁床版に底鋼板付の合成床版を使用する場合、設計上の合成床版の底鋼板の取り扱いについて、様々な考え方があり。特に鉄道用合成桁で使用されたケースでは、底鋼板の剛性を橋軸方向の剛性に考慮しないケースがある。この理由としては、底鋼板と合成桁鋼桁部上フランジとの連結方法がある。これらの連結には溶接が使用されることはなく、高力ボルト等により連結されることが一般的であるが、1列以下の高力ボルトでしか連結されていない。合成桁鋼桁の上フランジ上には、スタッド等のずれ止めが配置されているため、複数列の高力ボルトを配置することは困難である。つまり、高力ボルトで鋼部材同士の円滑な連結を行う場合は、2列以上のボルト配置を行うことが、鉄道構造物等設計標準・同解説<sup>3)</sup>に規定されているため、この底鋼板部分を上フランジまたは床版の一部として考慮することは困難であるという判断であると考えられる。

一方、合成床版のRC部は、合成桁の鋼桁部とはずれ止めを介して剛結されており、底鋼板とRC部もずれ止めが剛結されている。このことから考えれば、底鋼板の剛性がコンクリート床版を介して橋軸方向剛性へ寄与することは容易に想像できる。著者らは以前、合成床版を有する合成桁の実橋測定を行い、底鋼板の剛性寄与度の検討を試みた。しかし、本測定では床版上付属構造物の剛性が大きく寄与し中立軸が床版下面付近に達したため、底鋼板が合成桁の中立軸と一致し、明確な剛性寄与度に関する結論は得られない結果となっていた<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、3次元の非線形有限要素解析を用いて、設計上理想的な合成桁を対象に、鋼桁と床版底鋼板の接合部をパラメータとした検討を行う。これにより、底鋼板の合成桁橋軸方向の剛性寄与について検討することとした。また、設計で使用される有効幅の理論と比較した場合の検討を行うとともに、底鋼板の合成桁への剛性寄与がある場合と、寄与しないとした場合で、設計に対してどの程度設計が変化するかを確認した。

## 2. 検討対象および解析概要

検討にあたっては、実際の新幹線構造物で使用されている連続合成桁を事例とすることとした(図-1)。この連続合成桁は、合成床版を使用した4径間連続合成桁であり、ひび割れ制御設計を用いた限界状態設計法で設計されたものである。本橋でも底鋼板は橋軸方向の剛性には考慮されずに設計されている。

有限要素解析(FEM)モデル<sup>4)</sup>では、本橋の一般的断面である、第一・二径間の中間支点部断面(図-2)を用い、鋼板をシェル要素、コンクリートをソリッド要素、鉄筋を梁要素でモデル化した。材料強度は、それぞれ設計用値(表-1)を用い、非線形構成側はコンクリートが修正 Ahmad モデル・出雲モデル<sup>5)</sup>、鉄骨と鉄筋がひずみ硬化 Es/100 のバイリニアモデルを用いている。また、解析対象のスパン設定においては、設計上負曲げ区間部分の解析とするため、負曲げ区間(0.15L+0.15L)に相当するスパン 11.4m 分をモデル化した。解析のモデル化にあたっては、床版をソリッドでモデル化するため有効幅をある程度厳密に考慮できるモデルであることから、床版全幅(11.2m分)をモデル化し、床版のハンチは設計時と同様に無視した。厳密には断面は異なるが、比較検用に正曲げでの挙動も本モデルで検討を行うこととした。

\*1 前橋工科大学 社会環境工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 トーニチコンサルタント 本社事業本部 鉄道本部 第1技術室

\*3 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 設計部 設計第一課 博士(工学)

構造形式：プレストレスしない4径間連続完全合成桁  
 支承構造：ゴム支承を有する地震時水平力分散構造  
 支間：30.2+38.0+38.0+30.2m R=∞(直線)  
 軌道構造：スラブ軌道直結式  
 床版：鋼・コンクリート合成床版  
 (高力ボルトを使用した鉄道用PBL合成床版)  
 設計列車荷重：P-16  
 設計列車速度：260km/h



図-1 検討対象の連続合成桁の概要

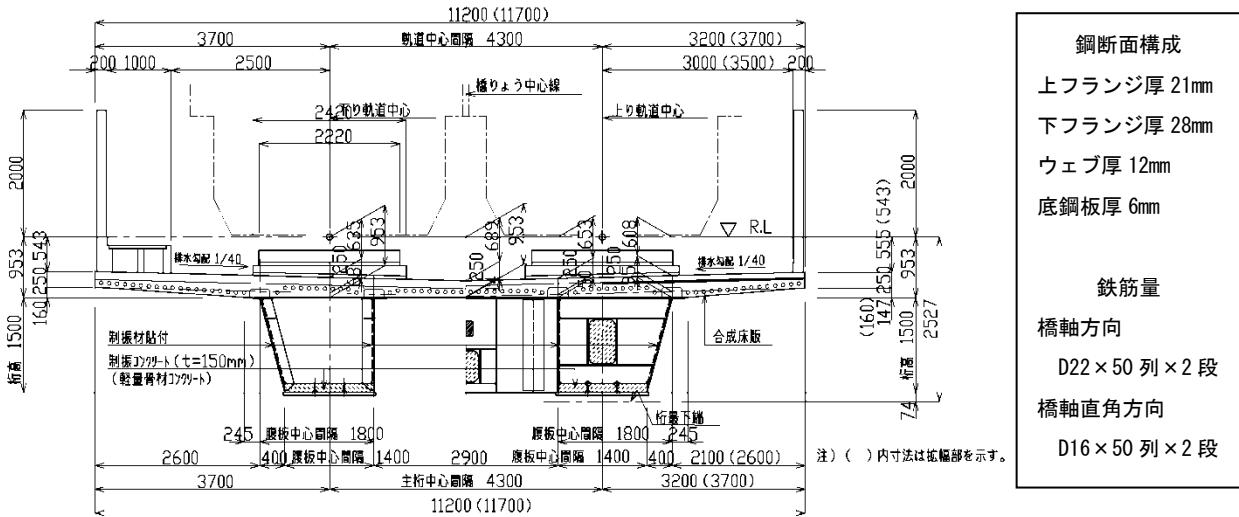


図-2 検討対象の合成桁断面(左：支間中央付近, 右：中間支点付近, 単位 mm)

表-1 材料諸元設定

	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比	一軸強度(N/mm <sup>2</sup> )		引張降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )
			圧縮	引張	
コンクリート	2.95×10 <sup>4</sup>	0.2	27	2.7	
鉄筋(SD345)	2.00×10 <sup>5</sup>	0.3	-	-	345
鋼部分(SMA490)	2.00×10 <sup>5</sup>	0.3	-	-	365

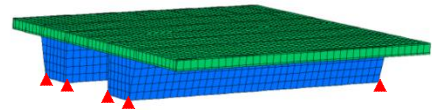


図-3 FEMモデル概要(▲は支点)

モデルの概要を図-3に示す。

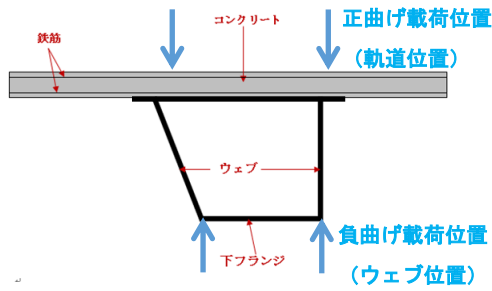
荷重にあたっては、解析モデル端部を支点とした単純桁モデル解析とし、支点は鋼桁ウェブ直下を支持するようにした。また、荷重点は、モデル上のスパン中央(中間支点位置)とし、正曲げの場合は床版上軌道位置(4点)、負曲げの場合は鋼桁ウェブ直下(4点、実際の支幹部近傍)に静的漸増荷重を与えた(図-4(a))。なお、負曲げ荷重時の再現にあたっては、従来の研究においても、負曲げ区間のみを単純支持桁で再現し、負の荷重をかけることにより再現する手法がとられる検討手法があるため、本検討方法により負曲げ時の挙動が再現できると考えた<sup>9)</sup>。

解析のパラメータとしては、正曲げ、負曲げ解析ともに、底鋼板を非合成として無視したもの(従来からの設計法に相当)をCASE0(図-4(a))、底鋼板を鋼桁フランジと完全剛結したものをCASE1(図-4(b))、底鋼板

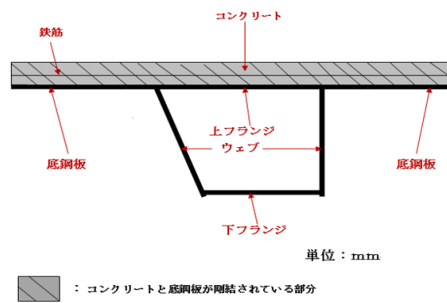
と鋼桁フランジに10mmの隙間をあけて縁を切り、フランジおよび底鋼板とRC床版を完全剛結としたものをCASE2(図-4(c))、さらに、底鋼板と鋼桁フランジに10mmの隙間をあけて縁を切り、フランジおよび底鋼板とRC床版とを一部のみ非連結としたものをCASE3(図-4(d))と設定した。なお、CASE3の鋼材とRC床版が剛結されていない範囲は、実際のずれ止めが設置されていない部分を想定して決定した。また、底鋼板と鋼桁フランジとの隙間10mmは、実際には隙間はないが、接していないことをモデル化するために設定したもので、解析モデル上の1メッシュサイズに相当している。

### 3. 解析結果

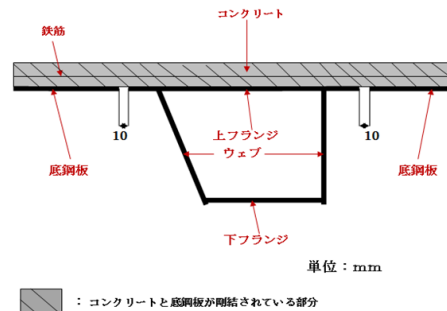
各ケースの解析結果の内、荷重とスパン中央(中間支点)の変位の関係を図-5に示す。本結果からは、負曲げ荷重時、正曲げ荷重時ともに、CASE0が低い値になっているほかは、CASE1~3ではほぼ同じ値となっている



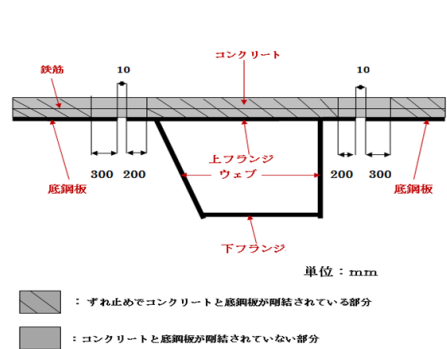
(a) CASE0 (底鋼板を無視したモデル)



(b) CASE1 (底鋼板と鋼桁が剛結されたモデル)



(c) CASE2 (底鋼板と鋼桁が縁切れしたモデル)

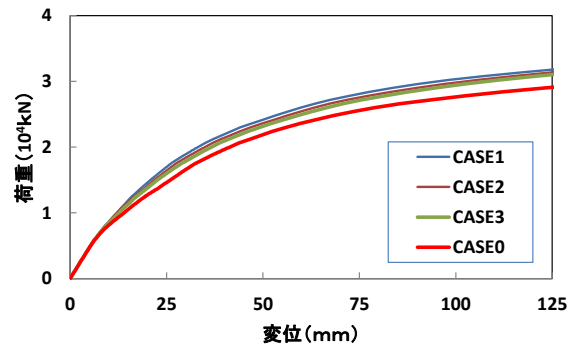


(d) CASE3 (底鋼板と鋼桁が縁切れし、かつ、縁切れ部近傍を非合成としたモデル)

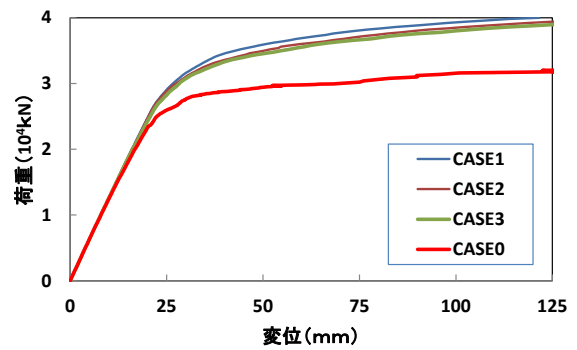
図-4 解析モデル CASE1~CASE3 概要と載荷位置

ことが分かる。なお、解析上、負曲げ載荷では、載荷点断面の床版に曲げによるひび割れが発生したのち、この付近の鉄筋に降伏が生じた。一方、正曲げ載荷ではコンクリートにひび割れは生じず下フランジ鋼材が降伏した。

図-6 は各 CASE 時の荷重-ひずみ関係である。鋼部材のひずみについては、スパン中央の位置の橋軸方向ひずみを表示している。本結果からも、CASE0 を除いてほぼ同様な結果となっており、グラフ上は、底鋼板の連結

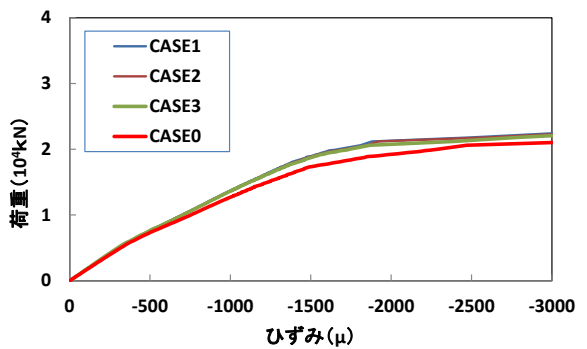


(a) 荷重-変位関係 (負曲げ)

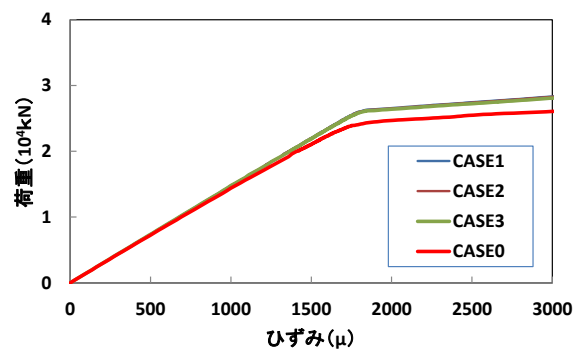


(b) 荷重-変位関係 (正曲げ)

図-5 各 CASE の解析結果の比較 (スパン中央の荷重-変位)



(a) 荷重-ひずみ関係 (負曲げ下フランジ)



(b) 荷重-ひずみ関係 (正曲げ下フランジ)

図-6 各 CASE の解析結果の比較 (スパン中央の荷重-橋軸方向ひずみ)

表-2 各ケースのひび割れ発生荷重  
および降伏荷重の比較

CASE	内容	発生荷重(×10 <sup>4</sup> kN)		
		正曲げ載荷		負曲げ載荷
		下フランジ 降伏荷重	ひび割れ 発生荷重	鉄筋 降伏荷重
CASE0	底鋼板無視(従来設計)	2.350	0.450	1.420
CASE1	底鋼板全有効考慮	2.510	0.488	1.482
CASE2	底板縁切り・ずれ止め範囲非考慮	2.507	0.486	1.475
CASE3	底板縁切り・ずれ止め範囲考慮	2.498	0.479	1.468

表-3 各ケースのひび割れ発生荷重  
および降伏荷重のCASE0 との比

CASE	内容	発生荷重増加率(CASE0基準)		
		正曲げ載荷		負曲げ載荷
		下フランジ 降伏荷重	ひび割れ 発生荷重	鉄筋 降伏荷重
CASE0	底鋼板無視(従来設計)	1.000	1.000	1.000
CASE1	底鋼板全有効考慮	1.068	1.084	1.044
CASE2	底板縁切り・ずれ止め範囲非考慮	1.067	1.080	1.039
CASE3	底板縁切り・ずれ止め範囲考慮	1.063	1.064	1.034

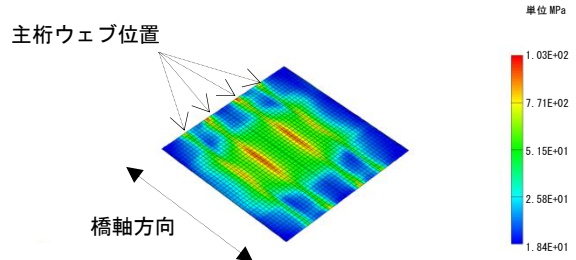
表-4 各ケースのひび割れ発生荷重  
および降伏荷重のCASE1 との比

CASE	内容	発生荷重増加率(CASE1基準)		
		正曲げ載荷		負曲げ載荷
		下フランジ 降伏荷重	ひび割れ 発生荷重	鉄筋 降伏荷重
CASE0	底鋼板無視(従来設計)	0.936	0.958	0.922
CASE1	底鋼板全有効考慮	1.000	1.000	1.000
CASE2	底板縁切り・ずれ止め範囲非考慮	0.999	0.995	0.996
CASE3	底板縁切り・ずれ止め範囲考慮	0.995	0.991	0.982

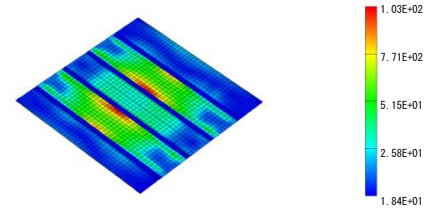
度合いによって、剛性寄与度に大差がない結果となっている。

次に各解析結果のうち、ひび割れ発生荷重、および、下フランジ降伏荷重をまとめたものを、表-2~4に示す。表のうち、正曲げの降伏荷重は下フランジの降伏時、負曲げの降伏荷重は鉄筋の降伏時を示している。表-3からは、CASE0に比べてCASE1~3において、それぞれの発生荷重が増加している様子が分かる。また、CASE1~3の中でも、CASE1から徐々にCASE3に向かって荷重の値が低下している様子が分かる。これより、グラフ上はほぼ差はないものの、多少の剛性低下が生じていることが理解できる。表-4はCASE1を基準とした場合の結果であるが、CASE1とCASE3の間でも、最大で1.8%の差でしかないことが分かる。

図-7は負曲げ載荷におけるCASE1とCASE3の鉄筋降伏時の底鋼板と上フランジのミーゼス応力カウンター図である。両者では底鋼板の応力伝達に差が生じており、CASE3では底鋼板に応力があまり伝達されていないことが分かる。鉄筋降伏時には、コンクリートはひび割れを生じていることから、上フランジと底鋼板の連結がない場合、コンクリートの剛性が低下したことによりあまり底鋼板には応力が伝達されなくなったと考えられる。一方、図-8は正曲げ載荷における同様な図であるが、

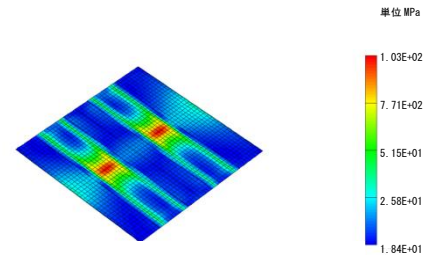


(a) CASE1の底鋼板・上フランジのミーゼス応力

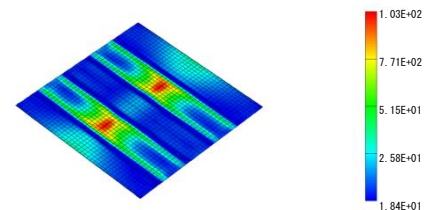


(b) CASE3の底鋼板・上フランジのミーゼス応力

図-7 負曲げ解析における底鋼板のカウンター図  
(鉄筋降伏発生時, 単位 MPa)



(a) CASE1の底鋼板・上フランジのミーゼス応力



(b) CASE3の底鋼板・上フランジのミーゼス応力

図-8 正曲げ解析における底鋼板のカウンター図  
(下フランジ降伏発生時, 単位 MPa)

表-5 各ケースの床版有効率の比較

CASE	内容	床版有効率		
		負曲げ載荷		正曲げ載荷
		ひび割れ 発生	上フランジ 降伏	下フランジ 降伏
設計計算	設計による有効幅算定(床版考慮)	0.772		
FEM-CASE1	底鋼板全幅有効考慮	0.832	1.00以上	0.832
FEM-CASE2	底板縁切り・ずれ止め範囲非考慮	0.828	1.00以上	0.830
FEM-CASE3	底板縁切り・ずれ止め範囲考慮	0.813	1.00以上	0.823

※1.00 以上は全幅有効とした剛性よりも大きな剛性値となったことを示す。

この場合はCASE1とCASE3には差は生じない結果となった。これは、正曲げ載荷時にはコンクリートがひび割れずに、十分な応力伝達可能な剛性を有しているためと考えられる。この図-7と図-8に結果から、表-4において正曲げ載荷ではCASE1とCASE3の差が0.5%でしかない反面、負曲げ載荷ではその差が1.8%に増加している理由であると推測でき、正曲げと負曲げの差はコンクリートの材料非線形性による効果と判断できる。

#### 4. 設計上の有効幅との比較

合成桁の設計では、床版やフランジにおいて有効幅が考慮されるのが一般的である<sup>3)</sup>。この有効幅は、せん断遅れ(シェアラグ)による剛性低下分を考慮するために設計上設定されているものである。ここでは、本検討の解析結果における底鋼板の剛性の寄与の変化を、床版の有効幅の変化ととらえた際に、設計上の有効幅に対してどの程度大きさとになっているかを確認する。本検討では、床版の有効幅の変化度を、床版有効率として評価することとし、以下の式(1)で定義するものとする。

$$\text{(床版有効率)} = \frac{\text{(解析上有効となる床版幅)}}{\text{(全幅有効時の床版幅)}} \quad (1)$$

なお、解析上有効となる床版幅は、上下鋼フランジを全幅有効と仮定し、単純梁のスパン中央に集中荷重を載荷している状況から、図-5に示す荷重-変位関係と近似する底鋼板を含む床版部の幅を求めることにより算出した。

各ケースの床版有効率の比較を表-5に示す。設計における有効幅算定にあたっては、負曲げ検討でもコンクリート断面を有効とし、設計基準<sup>3)</sup>に即して算出した。また、解析結果では、負曲げ載荷のひび割れ発生時、および、正曲げ載荷の下フランジ降伏時の床版有効率は、表-2に示した各荷重載荷時における荷重-変位の曲げ剛性とコンクリートを考慮した断面での理論剛性より算定した結果である。また、負曲げ載荷の上フランジ降伏時においては、非線形領域ではあるが、降伏荷重とその時の変位から求まる割線剛性とコンクリート断面を無視した、いわゆる「鋼+鉄筋」断面の剛性とを比較した。連続合成桁の設計にあたっては、中間支点部のひび割れ後の挙動を照査する際には、この「鋼+鉄筋」断面を用いるのが一般的である<sup>3),6)</sup>。

表-5より、負曲げ載荷のひび割れ発生時、および、正曲げ載荷の下フランジ降伏時では、底鋼板の剛性寄与効果を小さく見込んだ解析であるCASE3であっても、設計上の有効幅よりも4~5%程度大きな有効幅となることが分かる。また、負曲げ載荷の上フランジ降伏時では、「鋼+鉄筋」断面として全幅有効で算定した剛性よりも大きな剛性となった。これは、解析上のコンクリート

表-6 底鋼板の剛性寄与を考慮した試設計結果  
(中間支点断面)

				底鋼板非考慮(従来)		底鋼板考慮				
断面形状	鉄筋	72-	D22			72-	D22			
	底鋼板	1-	2515	×	6	1-	2515	×	6	
	U.FLG	1-	1966	×	21	1-	1966	×	13	
	U.RIB	2-	120	×	10	2-	120	×	10	
	WEB	2-	1479	×	12	2-	1487	×	12	
	L.RIB	2-	180	×	16	2-	180	×	16	
	L.FLG	1-	1373	×	28	1-	1373	×	28	
As(底鋼板含)				138476		122940				
照査結果	耐荷性	鉄筋	合成後	上縁	0.646	<	1.0	0.644	<	1.0
			合成前	上縁	0.377	<	1.0	0.375	<	1.0
		鋼桁	合成前	下縁	0.397	<	1.0	0.398	<	1.0
			合成後	上縁	0.714	<	1.0	0.711	<	1.0
耐久性	ひび割れ幅(mm)			0.246	<	0.248	0.245	<	0.248	
		Asの比	従来法を1.0			1.000		0.888		

表-7 底鋼板の剛性寄与を考慮した試設計結果  
(支間中央断面)

				底鋼板非考慮(従来)		底鋼板考慮				
断面形状	床版	1-	5605	×	250	1-	5605	×	250	
	底鋼板	1-	4805	×	6	1-	4805	×	6	
	U.FLG	2-	400	×	17	2-	400	×	16	
	WEB	2-	1483	×	9	2-	1484	×	9	
	L.RIB	2-	120	×	10	2-	120	×	10	
	L.FLG	1-	1500	×	15	1-	1500	×	14	
As(底鋼板含)				94024		91742				
照査結果	耐荷性	床版	合成後	上縁	0.616	<	1.0	0.631	<	1.0
			合成前	上縁	0.657	<	1.0	0.307	<	1.0
		鋼桁	合成前	下縁	0.335	<	1.0	0.310	<	1.0
			合成後	上縁	0.946	<	1.0	0.557	<	1.0
Asの比	従来法を1.0			1.000		0.976				

構成側にはひび割れ後のコンクリート応力分担を考慮する、いわゆるテンションステイフィング効果を考慮したため、設計で用いる「鋼+鉄筋」断面よりも大きな剛性となったことを示しており、本検討の底鋼板の剛性寄与に関わらず、「鋼+鉄筋」断面剛性の仮定自体に大きな安全率が含まれていることがわかる。

よって、設計上の有効幅を考慮した場合、床版の底鋼板の剛性を考慮したとしても、実際の剛性が不足することはない、十分に安全側であることが示された。なお、設計上の有効幅算定手法は、安全側の観点から、有効幅を小さく算出する傾向があることが知られており、これは表-5におけるCASE1が設計計算よりも大きな床版有効率となっていることから説明できる。

#### 5. 試設計による効果検証

FEMにおける検討結果から、各降伏荷重の増加量を底鋼板の剛性寄与による剛性向上効果ととらえ、試設計検討を行う。試設計検討では、この剛性寄与によりどの程度主桁断面の合理化が可能であるかを図-1、図-2に示

した連続合成桁を事例として検討を行った。

表-6 は、中間支点部断面（負曲げ領域）における試設計検討結果である。上フランジ付近に底鋼板があるため、上フランジの板厚を 21mm から 13mm に低減することが可能となっていることがわかる。なお、上フランジは

ずれ止めを設置するための最小板厚が 13mm となっているため、この最小板厚一致していることになり、剛性寄与度がさらに向上しても、これ以上の板厚低減は困難である。本断面の鋼重低減効果は、約 11% であり、中間支点断面では合理化の可能性が示されたと言える。

表-7 は、支間中央断面（正曲げ領域）における試設計検討結果である。本断面では、表-6 の中間支点断面とは異なり、断面に大きな変化は生じておらず、鋼重低減効果は 2% 程度にとどまっている。鋼桁上縁の照査結果を見ると、底鋼板を考慮したケースでは照査値が大きく減少しており、本結果からすると、鋼桁上フランジはさらなる板厚低減が可能であることになる。しかし、設計基準<sup>3)</sup>上は、圧縮フランジの板厚制限で 15mm 以下には設定できないため、16mm に設定されている。よって、支間中央断面では、応力としてはさらなる合理化が可能であるが、設計上の制限規定によりそれが不可能となっていることがわかる。

なお、本鋼重低減効果を、図-1、図-2 に示した連続合成桁事例の全長で試算すると、約 5% の鋼重低減となっている。

## 6. まとめ

本研究では、合成床版を用いた合成桁において、従来設計では考慮されていなかった床版底鋼板の橋軸方向剛性の寄与について、解析的な検討を行った。本検討結果より以下の結論を得た。

- (1) 合成床版を合成桁に用いた場合、鋼桁フランジと完全に剛結されていない場合においても、底鋼板は橋軸方向の剛性に寄与することが解析上分かった。
- (2) 底鋼板の剛性の寄与度は、コンクリートのひび割れの有無によって変化する。つまり、連続合成桁の場合は、負曲げ区間にひび割れ発生を許容するため、正曲げ区間と負曲げ区間で剛性の寄与度が変化する。本検討事例の結果では、正曲げでは 6%、負曲げでは 4~3% の剛性寄与効果がある結果となった。
- (3) 設計による有効幅と比較検討した場合、FEM 解析上底鋼板の剛性寄与度を小さく見積もったケースでも、設計上の底鋼板を考慮した有効幅よりも

大きくなり、結果として設計計算では安全側な剛性を与えることがわかった。

- (4) 解析上の効果を試設計に取り入れ、底鋼板の剛性寄与を考慮した場合、負曲げ領域である中間支点断面では約 11% の鋼重低減が可能である結果となった。一方、正曲げ領域である支間中央断面では、大きな鋼重低減効果は見込めず、約 2% の鋼重低減効果にとどまり、橋梁全長出の試算では、約 5% の鋼重低減効果がある結果となった。

なお、現状の設計で使用している有効幅算定式は、FEM の結果とは異なるため、底鋼板の剛性寄与度を考慮する設計法確立には、さらに検討ケースを増やして確認を行う必要がある。また近年は、合成桁の設計にコンパクト断面等の塑性化を許容する設計法<sup>1)</sup>も提案されている。本検討では、従来からの鋼部材に塑性化を許容しない設計法を用いた場合の検討であるが、鋼部材に塑性化を許容する設計法を用いた場合に、底鋼板の剛性寄与が変化するかはさらに検討が必要である。よって、本検討結果の実用化に向けて今後の検討課題としたい。

## 謝辞

本検討の実施にあたり、研究当時前橋工科大学の学生であった、グエン・ディン・フン氏に解析やとりまとめについて多大な協力を得ました。また、合成床版の検討にあたっては、横河ブリッジ（株）の水口知樹氏から有益な助言をいただきました。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 2014 年制定 複合構造標準示方書 原則編・設計編、土木学会 複合構造委員会 複合構造標準示方書小委員会、2015.5.
- 2) 谷口望、藤原良憲、林偉偉、依田照彦、松尾仁、久保武明、有限要素解析による鉄道用合成桁の実剛性評価に関する検討、土木学会論文集 A2 (応用力学) Vol.71 (2015) No.2, pp. L\_785-L\_793. 2016.2.
- 3) 鉄道総合技術研究所編、国土交通省監修、：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物、丸善、2007.
- 4) 伊藤忠テクノソリューションズ：コンクリート構造物非線形 FEM 解析プログラム-FINAL-, ホームページ <http://www.engineering-eye.com/FINAL/>
- 5) 出雲淳一、島弘、岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル、コンクリート工学論文、No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9.
- 6) 神谷崇、谷口望、碓山晴久、依田照彦：繰返し荷重を受ける連続合成桁中間支点部のひび割れ挙動に関する実験的研究、土木学会論文集 A, 第 63 号, pp.25-34, 2007.1.