

## 構造の合理化・多様化に対応した鋼橋の部分係数設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 26～平 30

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越潤、玉越隆史、上仙靖  
金田崇男、坂本佳也

### 【要旨】

現在、道路橋の技術基準に関して、要求性能の検証方法として限界状態設計法・部分係数設計法の導入に向けた検討を行っており、コスト縮減に向けた構造の合理化・多様化を踏まえ、規定の充実を図っていく必要がある。本研究では、鋼橋の構造合理化・多様化への対応の観点から、床版のコンクリートと鋼桁との合成作用に関する検討、鋼コンクリート接合部設計における要求性能及び強度照査法、厚板・多列を前提とした高力ボルト摩擦接合継手の設計法、ケーブル部材の合理的な安全余裕の確保について検討を行うものである。

キーワード：構造の合理化・多様化、部分係数設計法、合成作用、高力ボルト摩擦接合、スタッド、ケーブル部材

### 1. はじめに

土木・建築分野の各種構造物の設計に係わる技術基準については、文献1)の考え方に沿って、検討・改定を進めていくこととされており、この中で要求性能を満たすことの検証方法として信頼性設計の考え方を基礎とする限界状態設計法の導入が求められている。道路橋に関する技術基準である道路橋示方書<sup>2)</sup>（以下、道示）については、技術基準の国際的整合への対応を図るとともに、品質を確保しつつより合理的かつ効率的な道路橋整備を可能とするため、要求性能の明確化及び充実化並びにみなし規定の充実化に向けた調査検討が行われており、要求性能の検証方法として限界状態設計法の1つである部分係数設計法の導入検討が進められている。

過年度に実施したプロジェクト研究「鋼道路橋の部分係数設計法に関する研究（平成 17-20 年度）」では、鋼道路橋設計への部分係数設計法の導入に向けた検討を行い<sup>3)</sup>、鋼桁橋を対象に抵抗側の部分係数の設定の考え方及び部分係数書式に基づく基準試案を提示している。また、重点研究「構造合理化に対応した鋼橋の設計法に関する研究（平成 21-25 年度）」では、部分係数設計法の導入に向けて、現行設計法との整合性の確保を含め部分係数の設定方法に関する検討、さらに、現行の規定に対し既往の研究成果等を踏まえて合理化の余地があるものを対象に、高力ボルト摩擦接合継手について、接触面に無機ジンクリッチペイントを塗布した場合の各種構造諸元がすべり耐力に及ぼす影響の検討、トラス橋やアーチ橋の圧

縮部材として使用頻度の高い溶接箱断面部材を対象として、設計に用いる基準耐荷力曲線の検討を行った。

今後は部分係数の設定に向けた検討を引き続き行うとともに、個別部材の強度照査規定に関しては、現場ニーズの高い維持管理まで含めたコスト縮減につながる構造の合理化・多様化に対応できるように、規定の充実を図っていく必要がある。

そこで、本研究では、鋼橋の構造合理化・多様化への対応の観点から、現場ニーズの高いものとして、従来床版との合成作用を考慮していない鋼桁を対象とした床版のコンクリートと鋼桁との合成作用に関する検討、多様な条件下での適用を想定した鋼コンクリート接合部設計における要求性能及び強度照査法、部材の厚板化に対応した厚板・多列を前提とした高力ボルト摩擦接合継手の設計法、橋の種類や構造形式ごとに経験的に規定されていたケーブル部材の合理的な安全余裕の確保について検討を行うものである。

### 2. 床版のコンクリートと桁との合成作用に関する検討

#### 2.1 概要

これまで、非合成桁橋はすれ止めにスラブアンカーを用いることで、設計上、床版のコンクリートと鋼桁の合成作用が生じないとし、床版のコンクリートを鋼桁断面に見込まない設計が行われている。一方で、近年採用が増えている合理化した橋梁において、スラブアンカーを用いているものの、実質的に合成作用が生じていると考

表-2.1 検討対象橋梁の一覧

No	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8		
検討対象橋梁	S-NN-18.3	C-NN-37.8	S-NN-20	S-NN-30	S-NN-40	S-NN-50	S-N-55	C-NN-40		
構造諸元	単純I桁	連続I桁	単純I桁				連続I桁			
	RC床版	RC床版	RC床版				RC床版			
床版コンクリートと鋼桁の 合成作用の取り扱い	非合成	非合成	非合成	非合成	非合成	非合成	非合成	非合成		
支間長	L	(m)	18.3	37.8	20.0	30.0	40.0	50.0	55.0	40.0
支間数			1	6	1	1	1	1	1	3
鋼桁										
構造用鋼材			SM400	SM490Y	SM400	SM490Y			SM490Y	
許容引張応力度		(N/mm <sup>2</sup> )	140	210	140	210			210	
コンクリート床版										
設計基準強度		(N/mm <sup>2</sup> )	24.0							
ヤング係数		(N/mm <sup>2</sup> )	2.50E+04							
主桁本数			3	5	5	4	4	3	4	
桁高	h	(mm)	1350	1800	1100	1700	2200	2800	3000	2200
桁間隔		(mm)	2300	2700	2200	2900	2900	2900	4000	2900
アスファルト舗装厚		(mm)	80	80	80	80	80	80	80	80
床版厚		(mm)	220	220	190	250	250	250	290	250
検討断面数			15	245	12	8	12	16	16	40

表-2.2 検討ケース

ケース名	抵抗断面	荷重組合せ	床版コンクリートと 桁との合成作用 ※1	荷重組合せ (内訳)	前死	後死	活荷重	クリープ 乾燥収縮	温度 変化	温度差	許容値の 割増係数 ※2	
					D1	D2	L+I	CR+SH	T	TF		
ケース1	鋼断面	平成24年 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編 の荷重組合せ	考慮しない	死+活	1.00	1.00	1.00	--	--	--	1.00	
ケース2	鋼断面		合成前(死)	1.00	--	--	--	--	--	1.00		
ケース3	合成断面 (鋼or合成)※3		① 合成前後(死+活)	1.00	1.00	1.00	--	--	--	1.00		
ケース4	合成断面 (全て合成)		② 死+活+クリ+乾	1.00	1.00	1.00	1.00	--	--	1.00		
ケース5	鋼断面		③④ 死+活+クリ+乾±温度差	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	--	1.00		
ケース6	合成断面 (鋼or合成)※3		部分係数設計法を 想定した 荷重組合せ	不利なように 考慮する ※4	(1) 死+クリ+乾±温度差	1.00	1.00	--	1.00	--	0.00	--
ケース7	合成断面 (全て合成)				(2) 死+クリ+乾±温度±温度差	1.00	1.00	--	1.00	1.00	1.00	--
		(3) 死+活+クリ+乾±温度差			1.00	1.00	1.00	1.00	--	1.00	--	
		(4) 死+活+クリ+乾±0.75温度±温度差			1.00	1.00	1.00	1.00	0.75	1.00	--	

※1 床版のコンクリートと桁との合成作用は合成断面で断面力を算出して考慮し、断面計算は非合成(鋼断面のみ)として応力照査を行う。  
 ※2 H24道示IIの表-12.3.3に示される許容応力度の割増係数は考慮しない(1.00とする)。  
 ※3 床版に発生する応力が圧縮応力の場合は合成断面、引張応力の場合は鋼断面を抵抗断面とする。  
 ※4 上表に示す荷重組合せの中から最も厳しいケースを抽出することで「不利なように考慮する」ものとする。

えられる場合があり、基準上の取扱いを明確化することが求められている。そこで、本検討では、ずれ止めにスラブアンカーを用いて設計された非合成桁橋を対象とし、合成作用が生じているとみなした場合の影響を把握するため、抵抗断面を鋼桁のみとした場合及び抵抗断面を床版と鋼桁の合成断面とした場合について比較し、合成作用を考慮した場合の実設計に及ぼす影響度の分析を行った。

2.2 検討内容

検討対象とする橋梁は、参考文献 3) において検討対象とされた橋梁のうち、表-2.1 に示す単純 I 桁 5 橋 (No.1-3~1-7)、連続 I 桁 1 橋 (No.1-8) に加え、過年度に部分係数設計法の試設計を実施した単純 I 桁 (No.1-1)、連続 I 桁 1 橋 (No.1-2) の計 8 橋とした。

ここでは、各橋梁に対し荷重組合せ、床版コンクリートと桁との合成作用の考慮の有無及び抵抗断面をパラメータとした場合の影響度分析を行う。検討ケースは表-2.2 に示す 7 ケースとし、各荷重組合せの内訳も併せて示す。

検討対象橋梁の 8 橋に対し、表-2.2 に示す荷重組合せ、床版コンクリートと桁との合成作用の有無及び抵抗断面の組合せについて、照査断面毎に断面力及び応力を整理し影響度を分析する。

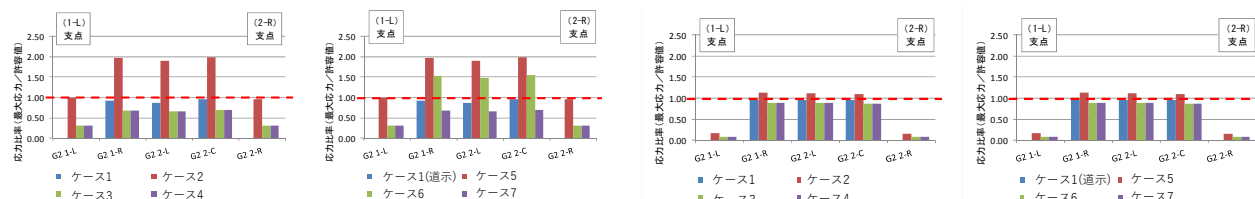
2.3 非合成桁橋設計で合成作用を考慮した場合の影響度について分析する。

抵抗断面や荷重組合せの相違及び床版のコンクリートと桁との合成作用の考慮の有無による傾向の違いを分析するため、抵抗断面の異なる各検討ケースの応力比率(最大応力/許容値)をグラフ化した。ここでは以下に示すグラフを作成した。

- ・応力比率 (最大応力/許容値) の大きい主桁に着目してグラフ化
- ・各グラフには、抵抗断面・検討ケース (荷重組合せ) の異なる以下の①~④を図化

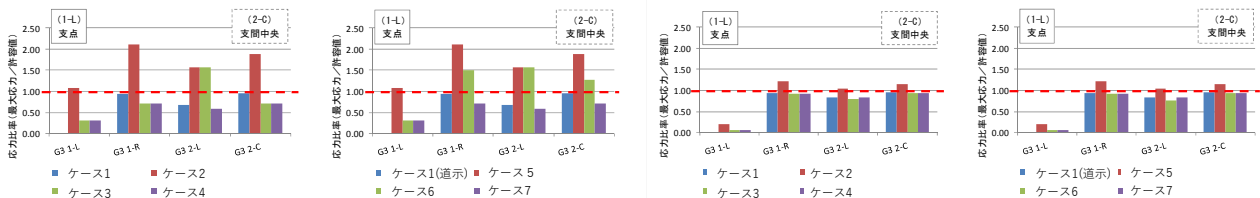
- ① 鋼断面  
ケース 1(道示設計・合成作用なし)
- ② 鋼断面  
ケース 2(道示設計)またはケース 5(部分係数設計)

(A) 道示ー上フランジ (B) 部分係数ー上フランジ (C) 道示ー下フランジ (D) 部分係数ー下フランジ



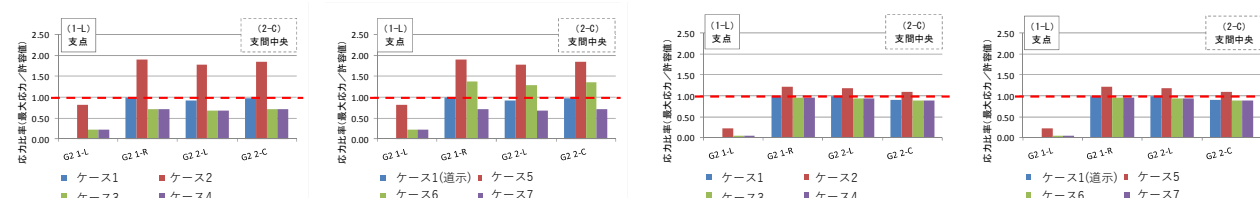
I) No.1-1:単純非合成I桁 支間長 18.3m (S-NN-18.3)

(A) 道示ー上フランジ (B) 部分係数ー上フランジ (C) 道示ー下フランジ (D) 部分係数ー下フランジ



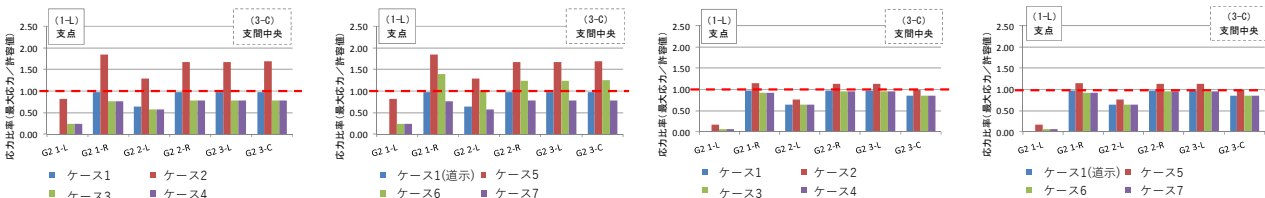
II) No.1-3:単純非合成I桁 支間長 20m (S-NN-20)

(A) 道示ー上フランジ (B) 部分係数ー上フランジ (C) 道示ー下フランジ (D) 部分係数ー下フランジ



III) No.1-4:単純非合成I桁 支間長 30m (S-NN-30)

(A) 道示ー上フランジ (B) 部分係数ー上フランジ (C) 道示ー下フランジ (D) 部分係数ー下フランジ



IV) No.1-5:単純非合成I桁 支間長 40m (S-NN-40)

図-2.1 各検討ケースにおける応力比率(単純非合成桁橋)

③ 合成断面 (鋼 or 合成)

ケース 3(道示設計)またはケース 6(部分係数設計)

④ 合成断面 (全て合成)

ケース 4(道示設計)またはケース 7(部分係数設計)

・着目位置及び検討ケースの異なる以下の(A)~(D)を作図

- (A) 上フランジ側：道示設計
- (B) 上フランジ側：部分係数設計
- (C) 下フランジ側：道示設計
- (D) 下フランジ側：部分係数設計

本稿には結果の一部として図-2.1 に単純非合成桁の結果を図-2.2 に連続非合成桁の結果を示す。

単純非合成桁ならびに連続非合成桁に合成作用を考慮した場合の検討結果について、抵抗断面と検討ケース(荷重組合せ)の違いによる傾向を以下に示す。

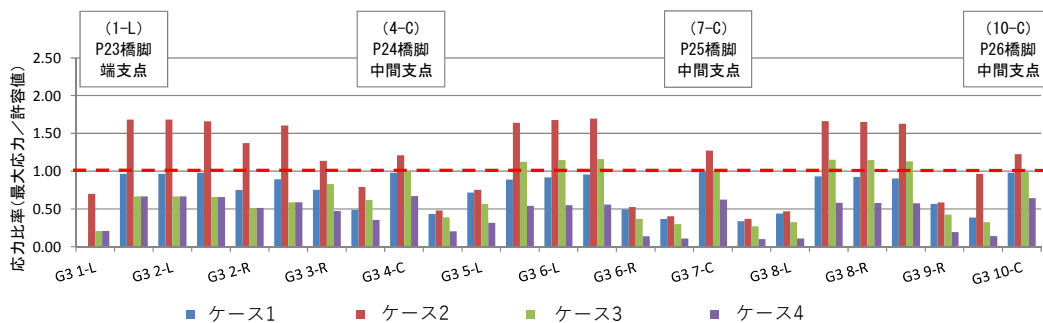
(1) 単純非合成桁橋

抵抗断面を「鋼断面」とした場合で合成作用を考慮し

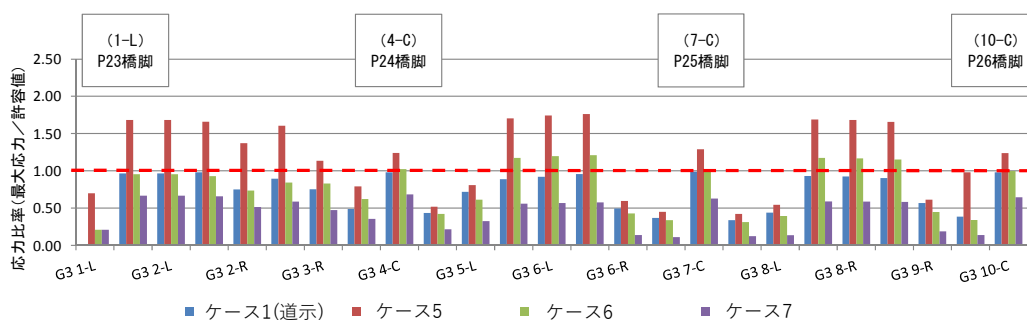
たケース 2 では図-2.1 から許容値を大きく超過していることがわかる。また、No.1-1 の上フランジなど許容値の2倍程度となり降伏点を超過する箇所も存在する。

抵抗断面を「合成断面(鋼 or 合成)」とした場合では、図-2.1 のケース 3、ケース 6 の結果からわかるように上フランジで許容値を超過する断面が生じている箇所がある。これらの断面では死活荷重により正曲げを受けるに

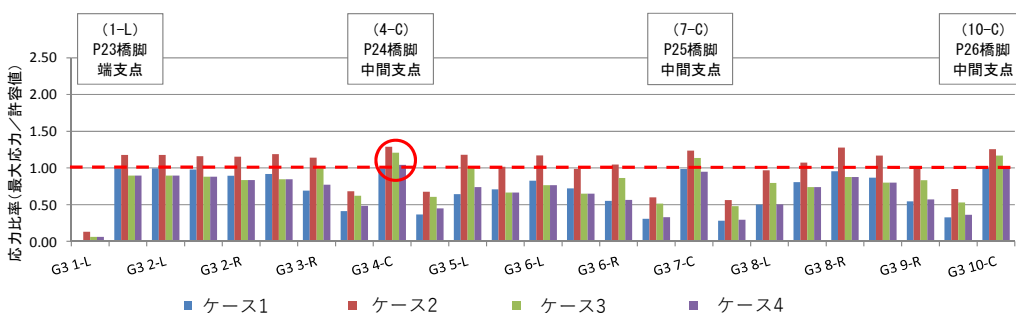
(A) 道示ー上フランジ



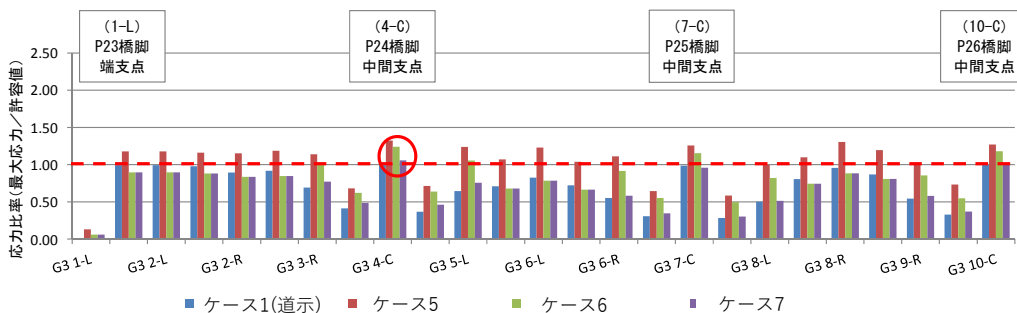
(B) 部分係数ー上フランジ



(C) 道示ー下フランジ



(D) 部分係数ー下フランジ



I) No.1-2 : 6 径間連続非合成 I 桁 支間長 37.8m

図-2.2 各検討ケースにおける応力比率 (連続非合成桁橋)

も関わらず床版に引張が生じ抵抗断面が鋼断面として扱われる。そのため、合成桁の設計にこれらの荷重組合せを考慮する際には留意が必要と思われる。

抵抗断面を「合成断面 (全て合成)」とした場合は、図-2.1 のケース 4、ケース 7 の結果から検討対象とした単純桁全てで許容値を満足していることがわかる。非合成

桁として設計した橋梁について、従来の道示に準じた単純合成桁と同様の照査を行う場合には、概ね許容値を満足できるものと考えられる。

(2) 連続非合成桁橋

抵抗断面を「鋼断面」とした場合で合成作用を考慮し

表-3.1 試験体の形状寸法とパラメータ

試験体No.	1	2	3	4
コンクリート種別	普通コンクリート		高強度コンクリート	
スタッド	軸径 $d$ (mm)			
	22			
	全高 $H$ (mm)			
	100	150	100	150
	$H/d$			
4.55	6.82	4.55	6.82	
ミルシート	本数			
	4			
	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
360	385	360	385	
引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
470	469	470	469	
コンクリートブロック	高さ $A$ (mm) × 幅 $B$ (mm) × 厚さ $C$ (mm)			
	400 × 500 × 200			
	設計基準強度 $\sigma_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )			
	27	50		
	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
31.5	63.4			
材料試験	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
	2.32	3.79		
	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )			
26057	32712			

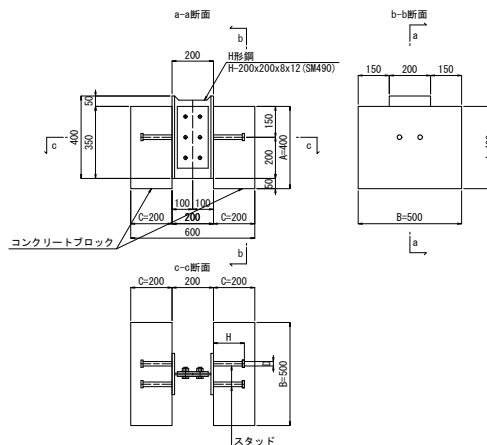


図-3.1 試験体の形状寸法図

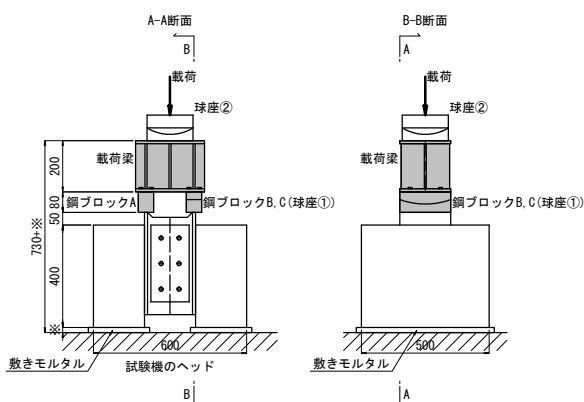


図-3.2 載荷概要図

表-3.2 試験結果

試験体	最大載荷重 $Q_u$ (kN)		最大荷重時変位 (mm)		初期ひび割れ発生荷重 (kN)		破壊形態	
	4本当り	1本当り	4本当り	1本当り	4本当り	1本当り		
No. 1	1-1	589.9	147.5	8.02	8.02	540付近	135付近	コンクリート破壊
	1-2	630.7	157.7	6.02	6.02	630付近	158付近	"
	1-3	620.8	155.2	7.42	7.42	590付近	148付近	"
	平均	613.8	153.5	7.15	7.15	590付近	147付近	
No. 2	2-1	631.7	157.9	8.97	8.97	630付近	158付近	コンクリート破壊
	2-2	662.8	165.7	7.66	7.66	660付近	165付近	"
	2-3	699.5	174.9	11.38	11.38	680付近	170付近	"
	平均	664.7	166.2	9.34	9.34	660付近	164付近	
No. 3	3-1	818.3	204.6	11.62	11.62	800付近	200付近	スタッド破断
	3-2	863.2	215.8	10.36	10.36	860付近	215付近	"
	3-3	881.4	220.4	12.28	12.28	830付近	208付近	"
	平均	854.3	213.6	11.42	11.42	830付近	208付近	
No. 4	4-1	772.7	193.2	11.01	11.01	770付近	193付近	スタッド破断
	4-2	849.0	212.3	9.67	9.67	850付近	213付近	"
	4-3	879.4	219.9	12.14	12.14	880付近	220付近	"
	平均	833.7	208.4	10.94	10.94	830付近	209付近	

たケース 2・ケース 5 では図-2.2 から許容値を大きく超過していることがわかる。

抵抗断面を「合成断面 (鋼 or 合成)」とした場合は、図-2.2 のケース 3・ケース 6 の結果から中間支点上の負曲げ区間以外の範囲においても許容値を超過し床版に引張が生じ抵抗断面を鋼断面と判定される箇所が存在する。そのため、連続非合成桁の設計にこれらの荷重組合せ考慮する際には留意が必要と思われる。

非合成桁に合成作用を考慮した本検討での結果において、中間支点付近の負曲げ区間の下フランジで許容値の超過が確認されている(図-2.2 中、赤枠で囲んだ箇所)。この部位は負曲げが生じる区間であり、通常の合成桁設計においても抵抗断面を鋼断面として扱われる。そのため合成作用を考慮する場合に許容値の超過が懸念される箇所として留意が必要と考えられる。

### 3. 鋼コンクリート接合部の設計法に関する検討

#### 3.1 概要

構造合理化・多様化の観点から、鋼コンクリート接合

部に用いる頭付きスタッド(以下、スタッド)について、道示<sup>2)</sup>の照査式(以下、道示式)の根拠<sup>4)</sup>となった諸元とは異なる材料や外力作用での適用事例が増えている。それに対し、そのような条件での実験及び解析等に基づく検討も平城ら<sup>5)</sup>を初め多数行われており、それらの検討を踏まえたスタッドの強度照査式の設定が求められる。

そこで本検討では、検討事例の少ない高強度コンクリートを用いたスタッドの押抜きせん断試験による破壊状態等の確認と、本試験データ及び既往試験データを用いた道示式の適用性に関する検討を行った。

#### 3.2 スタッドの押し抜きせん断実験

スタッドを用いた接合部の破壊形態及び破壊に至るまでの挙動の確認を目的に、文献(6)を参考にコンクリート設計基準強度  $\sigma_{ck}$  (27, 50N/mm<sup>2</sup>) 及びスタッドの全高  $H$  と軸径  $d$  との比  $H/d$  (4.55, 6.82) をパラメータとした試験体 12 体に対して押抜きせん断試験を行った。表-3.1、図-3.1 に試験体の形状寸法と試験パラメータ、図-3.2 に載荷概要、表-3.2 に試験結果を示す。載荷は漸増繰返し載荷法による変位制御で行い、相対ずれが 1.0mm までは

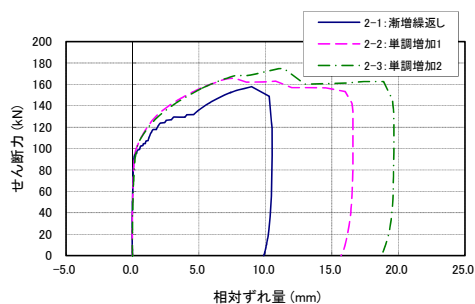


図-3.3 せん断力-相対ずれ曲線 (No. 2)



写真-3.1 試験体切断面 (2-3)

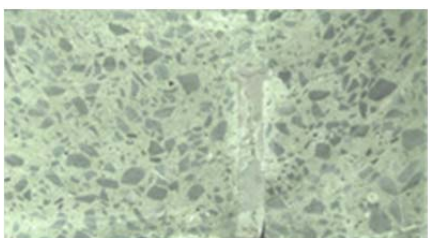


写真-3.2 試験体切断面 (4-3)

0.2mm 増すごとに、それ以後 4.0mm までは 0.5mm 増すごとに、載荷・除荷の漸増繰返し (全 12 サイクル) 載荷を行った。ただし、4.0mm 以降から破壊までは 0.5mm 程度の増分間隔で単調載荷とした。漸増繰返し載荷の場合 (1-1、2-1、3-1、4-1)、全てのケースで最大荷重が低い傾向が見られた。

ずれ止めの破壊形態は、道示では  $H/d \geq 5.5$  ではスタッドのせん断で、 $H/d < 5.5$  では床版コンクリートの割裂によるとされているが、本試験の破壊形態は、 $H/d < 5.5$  の場合でも  $\sigma_{sk}$  が大きい場合にスタッドの破断となった。破壊に至るまでの挙動は、全てのケースにおいて最大荷重付近でコンクリートにひび割れが発生した後 (No.2 の例を図-3.3 に示す)、荷重が低下した。No.3、4 では最大荷重付近でスタッド破断音が生じた。また、破壊状態については、コンクリート破壊 (2-3)、スタッド破断 (4-3) における試験体切断面を写真-3.1、写真-3.2 に示す。スタッド破断時には、スタッド頭部及び基部からのひび割れは、3-3 以外では生じていない。

### 3.3 スタッドの強度照査式の再検討

道示式と試験データとの関係について検討するため、

表-3.3 試験データの整理

		道示式の根拠データ		追加データ	
		文献4) (山本+Viest)	既往試験 <sup>7)-12)</sup>	本試験	
道示式に対するパラメータ	スタッド軸径 d (mm)	12.7~31.8	13.0~25.0	22.0	
	スタッド全高 H (mm)	71.7~214.4	80.0~150.0	100.0, 150.0	
	コンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	20.7~36.9	18.2~55.7	31.5, 63.4	
データ数	降伏荷重	-	21	39	12
	破壊荷重	スタッド破断	9	29	6
		コンクリート破壊	12	39	6
		記載なし	0	4	0
	計	21	72	12	

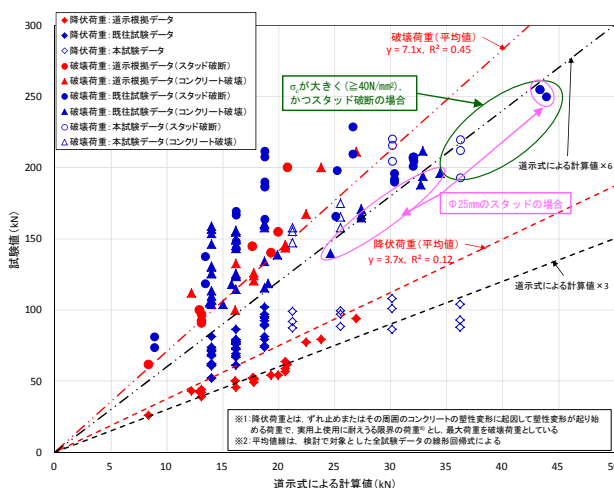


図-3.4 道示式と試験データの関係

道示式の根拠となった試験<sup>4)</sup>の 21 体に加え、それ以降の国内試験<sup>7)-12)</sup>の 72 体と本試験の 12 体を追加し、分析を行った (表-3.3、図-3.4)。対象とする試験データは、スタッドの鋼種が JIS 規格 (SS400 相当) を満たし、試験値が数値データで示されているものとした。

図-3.4 より、道示式による計算値に安全率分 (3、6) を乗じた線 (それぞれ図中、黒の破線ならびに黒の二点破線) は、それぞれ、試験値より得られた降伏荷重、破壊荷重の下限に近い値を示しており、試験データの統計量から算出した下限値相当線より概ね大きい値を示している。そのため、道示式については安全側の照査が行える強度照査式になっていることが伺える。ただし、コンクリート圧縮強度  $\sigma_c$  が大きい場合 ( $\sigma_c > 40 \text{ N/mm}^2$ ) には、破壊形態は主としてスタッド破断となり、試験値 (破壊荷重) は、道示式による計算値の 6 倍より若干下回る傾向がみられることがわかった。

## 4. 高力ボルト摩擦接合継手に関する検討

### 4.1 背景・課題

鋼橋を構成する鋼部材の接合方法として、主に溶接継手と高力ボルト摩擦接合継手 (以下、ボルト継手) の 2

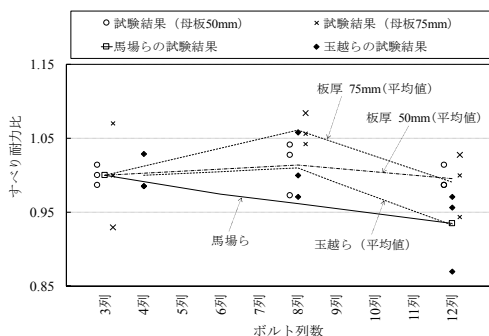


図-4.1 ボルト列数とすべり耐力比

表-4.1 試験体の基本諸元

試験体名称	ボルト列数	母板厚 (mm)	連結板厚 (mm)	母板幅 (mm)	母板すべり耐力 (kN)	すべり/降伏耐力比
3-50 A,B,C	3	50	26	120	576	0.32
8-50 A,B,C	8			190	1,504	0.49
12-50 A,B,C	12			270	2,123	0.46
3-75 A,B,C	3	75	38	120	584	0.22
8-75 A,B,C	8			130	1,527	0.51
12-75 A,B,C	12			190	2,104	0.45

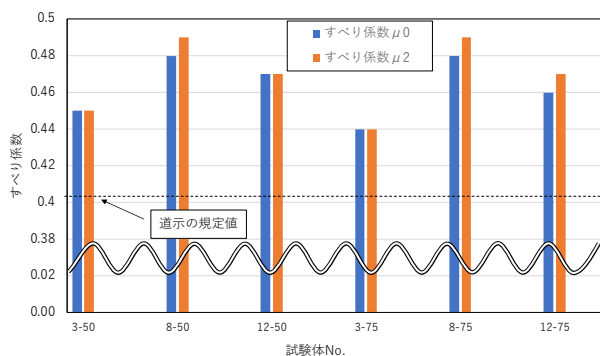


図-4.3 試験体別のすべり係数 (平均値)

種類が用いられる。近年板厚 50mm を超える厚板鋼板を使用する事例が増えつつある一方、溶接継手は厚板になるほど多層溶接となり、品質管理や現場工期が課題となることから、施工性と経済性の面から、ボルト継手が採用される場合が多い。ただし、ボルト継手を厚板鋼板に適用するにあたり、部材の厚板化により接合部の継手自体が大型化し、ボルト列数が増加する傾向にある一方、多列配置がすべり耐力に及ぼす影響が明らかにされていないため、これまでの道示ではボルト列数を無理のない範囲で 8 列程度以下とするのがよいとされていた。

## 4.2 検討方法

ボルト継手の厚板鋼板への適用にあたり、ボルト継手の多列化がすべり耐力に及ぼす影響について、接触面を無塗装とする場合と防食の観点から接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合を対象に、実験及び解析の両面から検討した。過年度の検討では、無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の多列継手を対象に、板厚

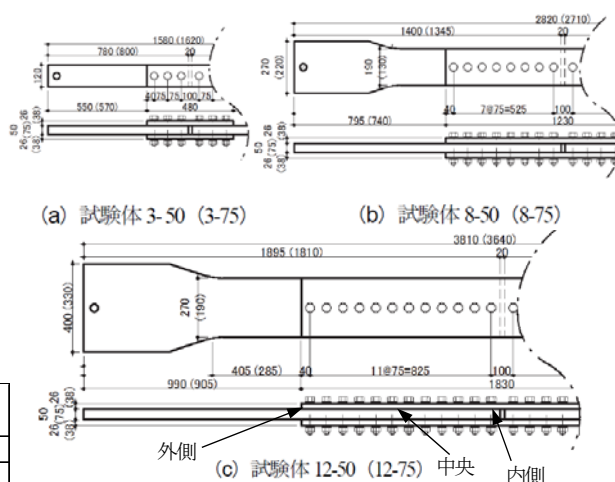


図-4.2 試験体の寸法形状

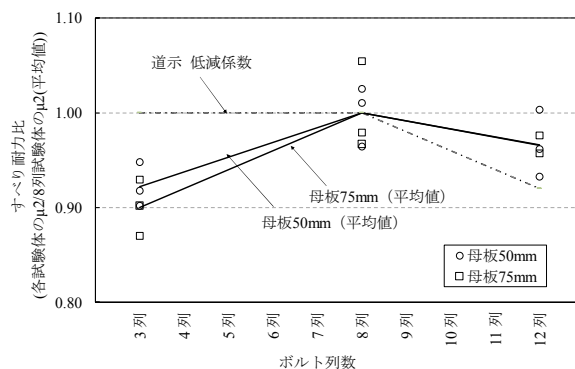


図-4.4 ボルト列数—すべり耐力比

及びボルト列数をパラメータとした試験体のすべり耐力試験及び FEM 解析を行い、図-4.1 に示すように、ボルト列数が 8 列以上となる場合のすべり係数の低下傾向を明らかにした<sup>13)</sup>。この研究成果は、無機ジンクリッチペイントを塗装した場合の、8 列以上の場合の摩擦接合用高力ボルトの許容量に乗じる低減係数として H24 道示解説に反映された。

一方、接触面を無塗装とした場合のボルト列数の影響に関しても、すべり耐力試験等による知見が十分でないため、接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した場合と同様に、板厚及びボルト列数をパラメータとした試験体によるすべり耐力試験を行い、ボルト列数が継手挙動に及ぼす影響を検討した<sup>14)</sup>。

試験体は、板厚を 50、75 mm の 2 種類、ボルト列数を 3、8、12 列の 3 種類とした計 6 ケースで試験を実施した。試験体の基本諸元を表-4.1、寸法形状を図-4.2 に示す。なお、試験体数はケースごとに各 3 体、試験体の材質は、母板と連結板に SM490Y、高力ボルトに F10T-M22 を使

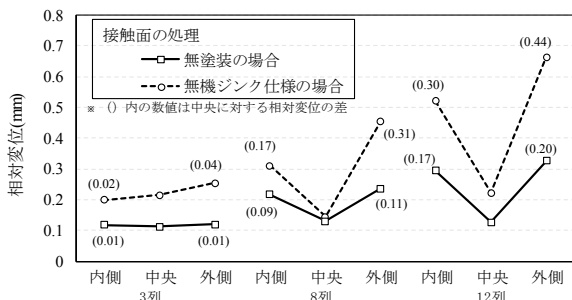


図-4.5 すべり耐力時の母材-連結板間の相対変位 (母板厚 50mm の場合)

表-5.2 橋梁形式別の分析対象数

橋梁形式	橋梁数	ケーブル数
エクストラードーズ橋 (ED橋)	15	454
コンクリート斜張橋	16	485
複合斜張橋	4	179
鋼斜張橋	18	579
吊橋 (主ケーブル)	14	14
吊橋 (ハンガー)	11	1,016
ニールセンローゼ橋 (NL橋)	14	328
計	92	3,055

用している。また、すべり耐力には、母板の降伏耐力に対するすべり耐力の比率 (以下、すべり耐力降伏耐力比) が影響することが明らかにされているため、列数がすべり耐力に与える影響を適切に評価できるよう、すべり/降伏耐力比を 0.5 程度になるよう、試験体の母板幅を設定している。

### 4.3 検討結果

図-4.3 にすべり耐力試験から求めた試験体別のすべり係数の結果を示す。なお、図-4.3 中の  $\mu_0$ 、 $\mu_2$  は設計軸力、試験前の計測軸力から求めたすべり係数である。図-4.3 に示すように、すべり係数は 0.44~0.49 であり、いずれも道示のすべり係数の規定値 (=0.4) を上回っている。また、図-4.4 に示すボルト列数の影響については、ボルト列数 8 列に対する 12 列のすべり係数  $\mu_2$  (各試験体の平均値) は母板厚 50、75 mm とともに約 3% 低下している。これは図-4.5 に示すように、すべり耐力時の母板と連結板間の相対変位が、8 列及び 12 列の場合、継手の中央と端部 (内側、外側) ではすべりが発生するまでに差が大きくなる挙動が確認されていることから、端部で作用力が大きくなる傾向にあることで、すべり係数の低下に影響を及ぼしたものと考えられる。なお、図-4.4 に示

表-5.1 これまでのケーブル安全率

鋼橋					コンクリート橋			
ケーブル		ハンガー		ニールセンローゼ橋	内ケーブル	外ケーブル	エクストラードーズ橋	斜張橋
吊橋	斜張橋	直線部	曲線部					
3.0	2.5	3.5	4.0	3.5	1.67 <sup>※1</sup>		1.67 <sup>※2</sup>	2.5 <sup>※2</sup>

※1: PC 鋼材に対する許容応力度  $0.6\sigma_{pu}$  を換算  
 ※2: 活荷重による変動応力から安全率を 1.67~2.5 の範囲で定める方法もある

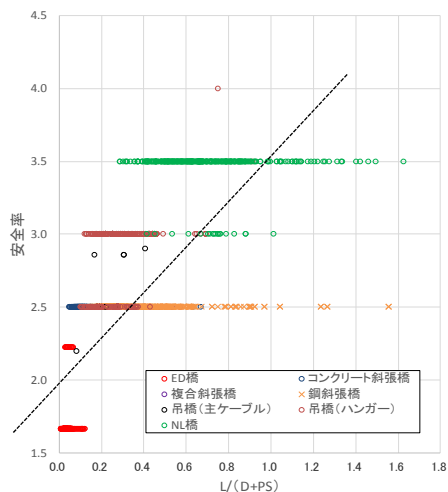


図-5.1 死活荷重断面力比-安全率

したボルト列数の多列化によるすべり係数の低下の傾向のほか、図-4.5 に示したすべり耐力時の継手内の相対変位の不均一さ及びすべり面の発生傾向は、過年度に実施した接触面に無機ジンクリッチペイントを塗布した場合のすべり耐力試験の結果と概ね一致していた。

## 5. ケーブル部材の合理化に関する検討

### 5.1 背景・課題

これまでの道示では、吊構造形式橋梁に用いるケーブル部材の安全率は、表-5.1 に示すように、橋の種類や構造形式ごとに経験的に規定されていた。しかし、ケーブル部材も含めて、橋を構成する各部材に確保すべき安全余裕は、材料品質のばらつきなどの抵抗特性の信頼性に加えて、供用期間中に発生することが想定される応力の大きさや変動の特徴を考慮した合理的なものであることが望まれる。そこで、これまでに建設されてきた吊構造形式橋梁のケーブル部材について、実設計での設計断面力の分析や数値シミュレーションにより求めた供用期間中に生じる荷重により発生する断面力の分析を行い、ケーブル部材の合理的な安全余裕の確保に向けた検討を行った。



表-5.4 各荷重の発生頻度、時刻、規模

荷重の種類	発生頻度 (1年間)	発生時刻	規模 (荷重の大きさ)
永続作用 死荷重 (D)	全区間		死荷重の確率分布モデルを用いて $t=0$ にて100年間の初期値を確率的に与える。その後の100年間は一定とする。
変動作用	活荷重 (L) 【渋滞時】730区間 【渋滞時】渋滞時以外 【通常時】	渋滞発生時刻をポアソン過程により与える	平均大型車混入率を30%とした車両列スナップショットを確率的に構成し、与える
	温度変化の影響 (TH)	全区間	日最大・最小値を6区間ごとに交互に与え、その他の区間は正弦波で補完する。
	風荷重 (W) 【季節風】	12区間	ポアソン過程による
	風荷重 (W) 【台風】	台風発生期の中で3区間	ポアソン過程による
地震の影響 (EQ)	12区間	ポアソン過程による	月最大値分布 (台風の10分間平均風速最大値の分布) の確率分布モデルによって与える

表-5.3 数値シミュレーション対象橋梁

No.	橋梁形式	支間 (m)	着目部材	モデル
1	吊橋	60+140+600+170	ハンガーロープ	立体骨組
2	鋼斜張橋	105+165	斜ケーブル	立体骨組
3	複合斜張橋	55+75+475+75+55	斜ケーブル	立体骨組
4	ED橋	91+182+98	斜ケーブル	平面骨組
5		88.3+122.3+81.2	斜ケーブル	平面骨組
6	NL橋	123	吊材	平面骨組

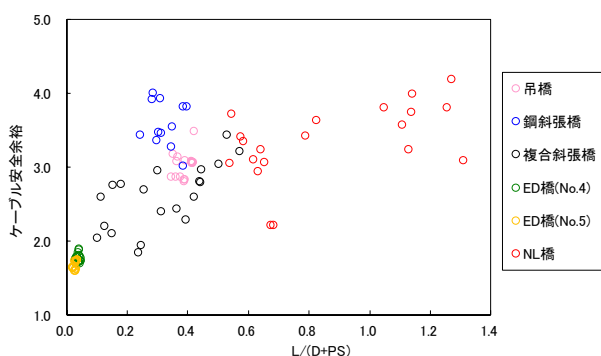


図-5.2 死活荷重断面力比-ケーブル安全余裕

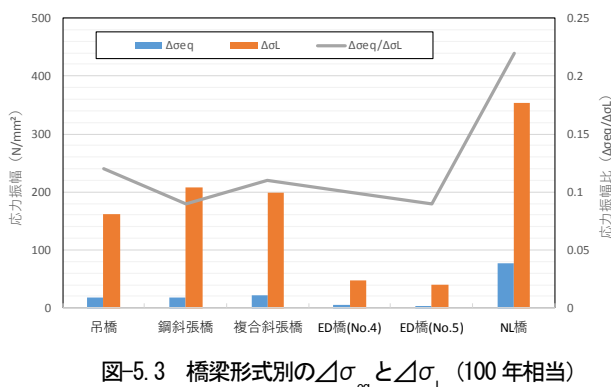


図-5.3 橋梁形式別の  $\Delta\sigma_{eq}$  と  $\Delta\sigma_L$  (100年相当)

## 5.2 実設計での分析による検討

まず、ケーブル部材に発生する断面力の大きさに着目し、表-5.1 に示す安全率を考慮して建設された表-5.2 に示す吊構造形式橋梁の実設計をもとに、設計断面力による分析を行った。分析にあたり、供用中は固定的に作用する死荷重 (プレストレス含む) (以下、D+PS) と不規則に変動する活荷重 (以下、L) が支配的であり、合理的に安全余裕を確保するのであれば、ばらつきが大きく不確実な要因に対してより大きな安全余裕を確保することが合理的であるとされる。そこで、D+PS 及び L ごとの設計断面力を用いて、安全率との関係を整理した。

図-5.1にL及びD+PSにより発生するケーブル部材断面力の比 (以下、死活荷重断面力比) と安全率の関係を示す。なお、図中の破線は形式によらない全データの近似直線を示している。その結果、ばらつきはあるものの死活荷重断面力比と安全率の間に一定の相関が見られた。

## 5.3 数値シミュレーションによる検討

次に、表-5.1 に示す安全率を考慮して建設された吊構造形式橋梁の中から、表-5.3 に示す代表的な吊構造形式橋梁のモデルを用いて、ケーブル部材が置かれる状況を

想定し、表-5.4 に示す各荷重の同時性やばらつき、作用頻度を考慮した数値シミュレーションを行い、算出したケーブル部材に発生する断面力による分析を行った。

図-5.2 に死活荷重断面力比と安全率の関係を示す。なお、ケーブルの安全余裕は数値シミュレーションから求めた断面力の100年最大値分布の非超過確率95%値をケーブル引張強度で除して算出した。図-5.2 に示すように、ケーブル安全余裕は、ばらつきはあるものの、死活荷重断面力比に応じて変化する傾向にあり、これは実設計での結果と同じ傾向である。

このため、ケーブル部材に生じうる死活荷重断面力比に応じて安全余裕を確保することにより、設計の合理化の可能性が伺える結果が得られた。

次に、ケーブル部材に発生する断面力の変動として、疲労耐久性に着目し、表-5.3 に示す吊構造形式橋梁を対象に、ケーブル部材に発生する応力振幅による分析を行った。分析は、実橋で置かれる状況を考慮し、数値シミュレーションで用いた BWIM<sup>15)</sup>による活荷重実態調査結果の車両軸重に着目し、道示で規定されている T 荷重に換算した100年間に相当する応力振幅  $\Delta\sigma_{eq}$  を算出した上で、L 荷重による応力振幅  $\Delta\sigma_L$  と比較した。図-5.3に

L 荷重による振幅が最大となるケーブルでの 100 年相当の応力振幅の関係を示す。図-5.3 に示すように、 $\Delta\sigma_{\infty}$  は  $\Delta\sigma_L$  に比べ十分に小さく、その割合は最大でも  $\Delta\sigma_L$  の 20% 程度である。よって、ケーブル部材に発生する断面力の変動に対しては、L 荷重による応力振幅を考慮することで、疲労耐久性に対して十分な安全余裕を確保できる可能性が明らかとなった。

## 6 まとめ

本研究により得られた主な結果を以下に示す。

### ① 床版のコンクリートと桁との合成作用に関する検討

- 1) 単純非合成桁橋の設計において合成作用を考慮する荷重組合せでは、床版に引張が生じ抵抗断面を鋼断面と判定される箇所が存在しており、合成桁の設計にこれらの荷重組合せを考慮する際には留意が必要と思われる。
- 2) 連続非合成桁橋に合成作用を考慮した本検討での結果から中間支点付近の負曲げ区間の下フランジで許容値の超過が確認された。そのため、合成作用を考慮する場合には、許容値の超過が懸念される箇所として留意する必要があることが明らかになった。

### ② 鋼コンクリート接合部の設計法に関する検討

- 1) 道示式規定化以降の試験データを整理し、道示式による計算値に安全率分(3、6)を乗じた値は試験値より得られた降伏荷重、破壊荷重の下限に近い値を示していた。そのため、道示式については安全側の照査が行える強度照査式になっていると考えられる。ただし、高強度コンクリートについては、道示式を若干下回る傾向が見られた。

### ③ 高力ボルト摩擦接合継手に関する検討

- 1) 母板厚及びボルト列数に関係なく、設計ボルト軸力に対するすべり係数  $\mu_0$  は 0.43~0.51 (平均値 0.46) であり、道示 II に規定されるすべり係数 0.4 を上回った。
- 2) ボルト列数 8 列に対する 12 列の場合のすべり係数  $\mu_2$  (各試験体の平均値) は、母板厚 50mm、75mm とともに約 3% 低下した。また、ボルト列数の多列化によるすべり係数の低下の傾向、すべり耐力時の継手内の相対変位の不均一さ及びすべり面の発生傾向は、同一試験体を用いて過年度に実施した、接触面に無機ジンクリッチペ

イントを塗布した場合のすべり耐力試験の結果と概ね一致していた。

### ④ ケーブル部材の合理化に関する検討

- 1) プレストレスを含む死荷重と活荷重により発生するケーブル部材断面力の比と安全率の関係について実設計ならびに数値シミュレーションによる検討を行い、ばらつきは見られるものの一定の相関が見られることから、ケーブル部材に生じる死活荷重断面力比に応じて安全余裕を確保することで、設計の合理化の可能性が伺える結果が得られた。
- 2) ケーブル部材に発生する応力振幅による分析から T 荷重による応力振幅は最大でも L 荷重による応力振幅の 20% 程度であり、L 荷重による応力振幅を考慮することで、疲労耐久性に対して十分な安全余裕を確保できる可能性が明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本、2002.3.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、II 鋼橋編、2012.3.
- 3) 独立行政法人土木研究所：鋼道路橋の部分係数設計法に関する検討、土木研究所資料、第 4141 号、2009.3.
- 4) 山本、中村：Stud Shear Connector の試験報告、建設省土木研究所報告、第 109 号、pp.67-90、1961.1.
- 5) 平城、松井、福本：頭付きスタッドの強度評価式の誘導—静的強度評価式—、土木学会構造工学論文集、Vol.35A、pp.1221-1232、1989.
- 6) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜きせん断試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状、JSSC テクニカルレポート No.35、1996.11.
- 7) 平野、穂積、吉川、友永：床鋼板つきコンクリートスラブに埋込まれたスタッドコネクタの押抜き試験、日本建築学会論文報告集、第 281 号、pp.57-69、1979.7.
- 8) 田川、平城、尾形、井上、松井：頭付きスタッドの押抜きせん断試験方法の標準化に関する検討、鋼構造論文集、第 2 巻第 8 号、pp.47-60、1995.12.
- 9) 前田、石崎、平城、池尾：合成構造の省力化に適するスタッドの研究、第 4 回復合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp.139-144、1999.11.
- 10) 岡田、依田、Jean-Paul LEBET：グループ配列した

- スタッドのせん断耐荷性能に関する検討、土木学会論文集、No.766/I-68、81-95、2004.7.
- 11) 島、渡部：頭付きスタッドのせん断力-ずれ関係の定式化、土木学会論文集 A、Vol.64 No.4、935-947、2008.11.
  - 12) 大谷、中島：軸径 25mm の頭付きスタッドの押抜きせん断強度性状、土木学会第 69 回年次学術講演会、pp.13-14、2014.9.
  - 13) 村越、澤田、山口、彭雪、大嶽：接触面に無機ジンクリッチペイントを塗装した厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.70、No.1、pp.94~104、2014
  - 14) 村越、石原、澤田、山口：接触面を無塗装とした厚板・多列の高力ボルト摩擦接合継手のすべり耐力試験、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.72、No.1、pp.166~175、2016
  - 15) 玉越、中州、石尾、中谷：道路橋の交通特性評価手法に関する研究-橋梁部材を用いた車両重量計測システム (Bridge Weigh-in Motion System) -、国総研資料No.188、2004

# STUDY ON DESIGN RATIONALIZATION AND DIVERSIFICATION FOR STEEL BRIDGES

**Budgeted** : Grants for operating expenses,  
General account

**Research Period** : FY2014-2018

**Research Team** : Bridge and Structural  
Engineering Research Group

**Author** : MURAKOSHI Jun  
TAMAKOSHI Takashi  
JOSEN Yasushi  
KANEDA Takao  
SAKAMOTO Yoshiya

**Abstract** : For the revision of Japanese Specification of Highway Bridges, partial factor design (PFD) based on reliability analysis is being investigated in order to secure consistency with international technical standard, and to make bridge design more rational and reliable. The goal of this study is to study on how composite action affects the bridge design and to rationalize the design of steel members, including stud joint, high-strength bolted connection, and cable.

**Key words** : rational design, partial factor design method , composite action, high-strength bolted connection, stud joints, cable