

合成床版における継手構造の疲労性状に関する研究

Fatigue Property of Joints for The Composite Slab

大森健太*, 浅野浩一**, 浜田純夫***

Kenta OMORI, Kouichi ASANO and Sumio HAMADA

- * 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)
- ** 三井造船(株) 鉄構・物流事業本部 設計部 (〒104-8439 東京都中央区築地5丁目6-4)
- *** Ph. D. 山口大学工学部 社会建設工学科 教授 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

A typical problem in the composite slab is the joint of the steel plates, which transfer the tensile stresses, especially, under negative bending moment. Several joint methods have been proposed and a new method is still expected to be developed. Three methods were studied in the present research to know the fatigue and ultimate strengths. The joints were loop reinforcements transferred through stud shear connectors, high tension bolts in a line and high tension bolts in two lines. Presumably the joint with high tension bolts in two lines was the most effective method.

Key words : slab, composite slab, bolt joint, fatigue

1. はじめに

コンクリート標準示方書の改訂¹⁾に伴い、ライフサイクルコストの概念による維持管理費の最小化、高耐久性を期待したミニマムメンテナンス橋など、建設コスト縮減や構造・施工の合理化、高耐久性が鋼橋においても求められている²⁾。

このような背景の中、連続合成桁に合成床版が使用されることが予想されるが、橋梁の合理化の観点から底鋼板を主桁断面に算入する方向に進むと思われる。そこで、継手筋やスタッドを有する継手構造が必要となるが、継手構造のずれ止めにはせん断力の他に軸引張力も作用する。しかし、従来の道路橋示方書ではスタッドの設計耐力はせん断力のみで算定されているが、せん断力の作用する上に軸引張力が作用している場合、スタッドを用いた供試体の押抜き試験を行ったところ、耐力は小さくなり、ずれ止めとしての機能を十分に果たせないことがこれまでの研究で確認されている³⁾。また、連続合成桁に合成床版を採用する場合の課題として、負曲げ区間の底鋼板パネル継手部における応力伝達方法が挙げられ、合理的かつ疲労耐久性に優れた継手構造の開発が望まれている。

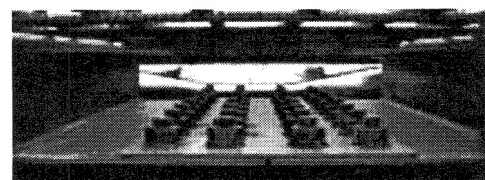
ループ継手筋による継手構造(以下、従来継手と示す)では、底鋼板が継手部で不連続となり、継手筋からスタッドを介して応力を伝達するというメカニズムである。しかし合成断面が不連続となるため、合成床版の性能を最大限に活用できず、鉄筋量が増すと同時に継手部の構造が煩雑になってしまう。高力ボルト(以下、HTBと示す)で摩擦接合とした継手では底鋼板を連続させ、継手部では鋼とコンクリートの合成断面になり、合成床版として合理的である。さらに、連続合成桁の負曲げ区間で下側配筋として下鋼板の断面が算入できるため、鉄筋量を減すことができる。



(a) 従来継手



(b) HTB1列



(c) HTB2列

写真-1 継手部構造

そこで本研究では、施工条件や構造条件(合成桁、非合成桁)により適切に継手構造を使い分けるため、これまで標準として使用されてきた従来継手のみでなく、HTB継手についても適用可能であることの性能確認を目的に、底鋼板を不連続とした従来継手による継手構造(写真-1(a)参照)、底鋼板の応力伝達を考えたHTBによる継手構造、1列タイプおよび2列タイプ(写真-1(b)、(c)参照)を有した合成床版の継手部に着目した定点疲労試験、および移動輪荷重疲労試験を行い、その疲労耐久性を検討した。

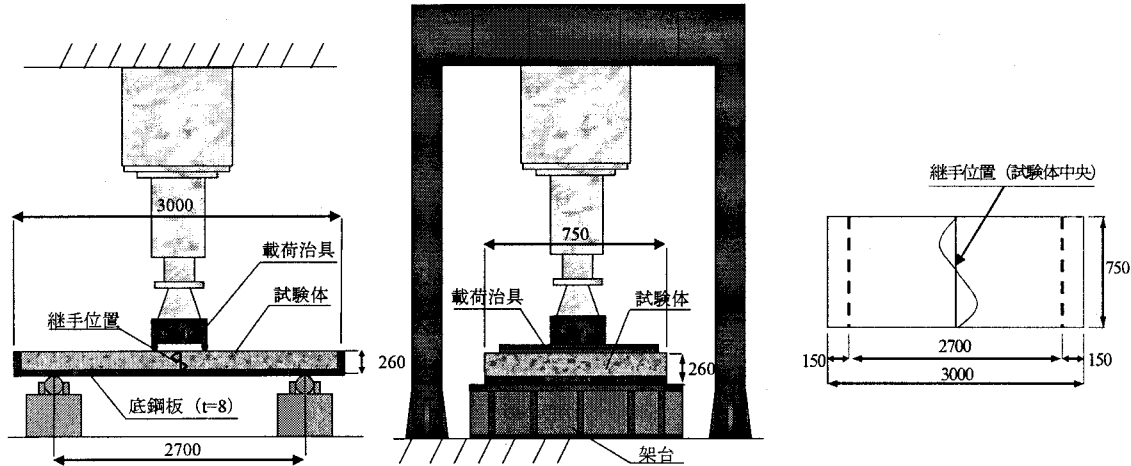


図-1 定点疲労試験概要

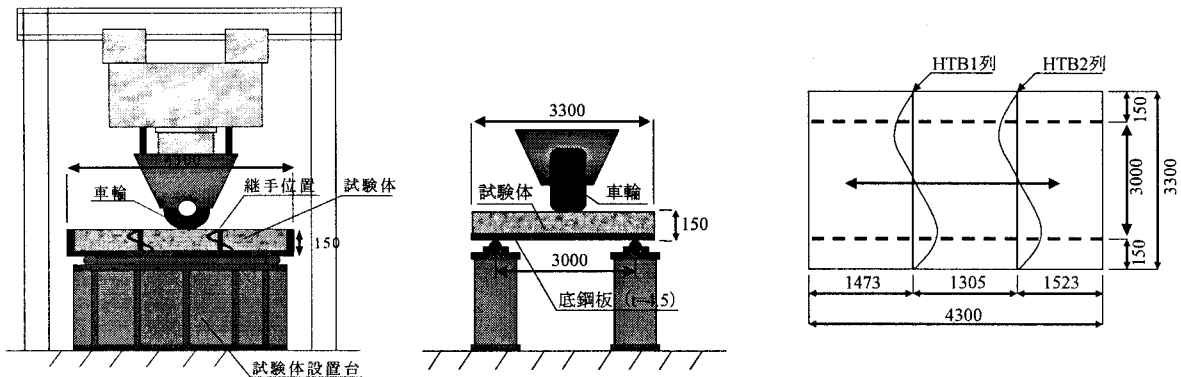


図-2 輪荷重疲労試験概要

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合条件

2.1.1 定点疲労試験

試験体寸法は、床版支間6mを想定した実寸モデルとし、幅750mm、長さ3000mm、厚さ260mmの継手構造の異なる全3体、継手構造は従来継手、HTBを1列、2列配したものとした(写真-1参照)。図-1に定点疲労試験概要を示す。表-1に定点疲労試験体の断面性能と設計断面力の応力度を示す。ボルト1列については、配筋筋方向断面力に対して抵抗できる断面を、ボルト2列については、連続合成桁中間支点部を対象とした底鋼板の全強を伝える断面としている。粗骨材Gは最大寸法20mm、密度2.73g/cm³、細骨材sは密度2.63g/cm³の海砂と砕砂を用い、混和剤AdはAE減水剤標準形を、混和材Exは標準添加量30kg/m³の石灰系膨張材を用いた。鋼板にはSS400の厚さ8mmを用い、鉄筋は主鉄筋にD22(SD295A)を、配筋筋にD16(SD295A)を用いた。表-2、3にコンクリートの配合表と材料試験結果を示す。

2.1.2 輪荷重疲労試験

試験体寸法は試験機の能力、試験設備の制約から1/2縮小モデルとして、幅3300mm、長さ4300mm、床版支間は6mを想定し3000mmとし、2辺単純支持とした。図-2に輪荷重疲労試験概要を示す。表-4に実寸モデルと試験体モデルの比較を表す。床版厚は床版支間6mの最小床版厚を採用すると260mmの1/2で130mmであるが、試験体製作上の制約から150mmとした。

表-1 定点疲労試験体の断面性能と設計断面力の応力度

	単位	単純配筋鉄筋方向			
		従来継手	HTB1列	HTB2列	
B	単位幅	750	750	750	
H	床版厚	262	254	260	
d'	Conc~主鉄筋中心	69	69	69	
d	Conc~配筋鉄筋中心	207	-	-	
As	鉄筋断面積	2323	-	-	
D	鉄筋径	D22	-	-	
ctc		125	-	-	
t	底部鋼板厚	-	2.6	8.2	
As'	鋼板断面積	-	1950	6150	
As'	鉄筋断面積	2323	794.4	794.4	
D	鉄筋径	D22	-	-	
ctc		125	-	-	
n=Es/Ec	ヤング係数比	10	10	10	
X	中立軸までの距離	82.7	89.7	135.4	
I	断面2次モーメント	50467724	70320517	154859762	
Zc	Conc側断面係数	6102506	7839523	11437205	
Zs	鋼板側断面係数	406015	427480	1242855	
M	設計断面力	50.1	50.1	50.1	
M1	活荷重断面力	50.1	50.1	50.1	
$\sigma_c=M/Zc$	Conc圧縮強度	N/mm ²	-8.2	-6.4	-4.4
	設計強度		<10N/mm ²	<10N/mm ²	<10N/mm ²
$\sigma_s1=M1/Zs$	鋼板圧縮強度	N/mm ²	123.4	117.2	40.3
	設計強度		<140N/mm ²	<140N/mm ²	<140N/mm ²

表-2 コンクリートの配合表

試験	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	Ex	G	S	Ad
定点疲労	51.0	47.0	40.1	178	349	30	1074	690	0.95
輪荷重疲労	51.0	-	40.1	183	390	-	1001	737	0.98

表-3 材料試験結果

試験	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	脆度係数 η
定点疲労	47.2	3.3	38.8	6.6	14.3
輪荷重疲労	43.9	2.8	36.9	7.1	15.7

表-4 輪荷重試験体の寸法モデル比較

	実寸モデル	1/2モデル	比率
床版厚 (mm)	300	150	2.00
底鋼板厚 (mm)	8	4.5	1.78
ずれ止め	L75×75×9	L40×40×3	-
補強材	CT125×200×8/13	CT100×100×5.5/8	-
主鉄筋	D22 (CTC150)	D16 (CTC150)	-
配力筋	D16 (CTC300)	D10 (CTC200)	-
断面2次モーメント	主鉄筋方向 (cm ⁴)	30654	4085
	配力筋方向 (cm ⁴)	28726	3821
鋼板下面断面係数	主鉄筋方向 (cm ³)	1935	535
	配力筋方向 (cm ³)	1910	529

表-5 輪荷重試験体の継手部の設計

HTB1列の場合

	単位	実寸モデル	1/2寸法モデル	比率	備考
単位幅	cm	100	100	-	
底鋼板厚さ	cm	0.8	0.45	-	
高力ボルトサイズ		M22(F8T)	M16(F8T)	-	
高力ボルトの許容力:1面摩擦	tf	3.9	2	-	
ボルト最大中心間隔	mm	192	108	-	通示 鋼橋欄 4.3.9ボルトの最大中心間隔に倣う
適用するボルトピッチ	mm	100	-	-	
最大中心間隔から決まるボルト本数		10	9.26	-	
1/2寸法モデルに適用するボルトピッチ	mm	-	95	-	換算板厚が実寸モデルの半分になるよう設定する
1/2寸法モデルに適用するボルト本数	mm	-	10.53	-	最大荷重時に摩擦が切れないように調整
ボルト許容力から決まる添接板軸力	tf	39	21.05	-	
添接板の許容応力度	kgf/cm ²	1400	1400	-	
添接板の換算厚さ	cm	0.28	0.15	-	
添接板の換算厚さを考慮した断面2次モーメント	cm ⁴	13862	1806	7.68	
換算添接板下面の断面係数	cm ³	718	191	3.76	

HTB2列の場合

	単位	実寸モデル	1/2寸法モデル	比率	備考
単位幅	cm	100	100	-	
底鋼板厚さ	cm	0.8	0.45	-	
高力ボルトサイズ		M22(F10T)	M16(F10T)	-	
高力ボルトの許容力:1面摩擦	tf	4.8	2.5	-	
ボルト最大中心間隔	mm	192	108	-	通示 鋼橋欄 4.3.9ボルトの最大中心間隔に倣う
適用するボルトピッチ	mm	85	-	-	
最大中心間隔から決まるボルト本数		23.53	18.52	-	
1/2寸法モデルに適用するボルトピッチ	mm	-	85	-	換算板厚が実寸モデルの半分になるよう設定する
1/2寸法モデルに適用するボルト本数	mm	-	23.53	-	
ボルト許容力から決まる添接板軸力	tf	112.94	58.82	-	
添接板の許容応力度	kgf/cm ²	1400	1400	-	
添接板の換算厚さ	cm	0.81	0.45	-	
添接板の換算厚さを考慮した断面2次モーメント	cm ⁴	28951	3661	7.91	
換算添接板下面の断面係数	cm ³	1931	496	3.89	

表-5に輪荷重試験体の継手部の設計を示す。粗骨材Gは最大寸法15mm、密度2.73g/cm³、細骨材sは密度2.63g/cm³の海砂と砕砂を用い、混和剤AdはAE減水剤標準形を用いた。鋼板にはSS400の厚さ4.5mmを用い、鉄筋は主鉄筋にD16 (SD295A)を、配力筋にD10 (SD295A)を用いた。表-2、3にコンクリートの配合表と材料試験結果を示す。

2.2 試験方法

2.2.1 定点疲労試験

材齢7日以降に試験は行い、支承には直径10cmの丸鋼棒を使用し、浮上がり防止は設けない橋軸方向2700mmで2辺単純支持し、載荷位置は試験体中央、載荷治具を介しての2点載荷とした。載荷荷重は、床版支間6mの配力鉄筋方向の設計曲げモーメントを発生させる荷重⁴⁾とし、初期載荷を5kN、荷重振幅を5kN~79.2kN、目標繰返し回数は200万回とした。

2.2.2 残存耐力確認試験

定点疲労試験で目標繰返し回数200万回に達した試験体については、漸進繰返し載荷による残存耐力確認試験を行う。載荷荷重は、試験体が降伏するまで20kNピッチで増加させ、降伏後は0kN~50kNピッチで降伏荷重まで載荷し、その後は終局耐力まで適宜載荷ピッチを細かくして計測を行う。

2.2.3 輪荷重疲労試験

試験は山口大学所有の輪荷重走行試験機(車輪は産業車両用のゴムタイヤ)を使用して実施した。材齢7日以降に試験は行い、支承には直径10cmの丸鋼棒を使用し、浮上がり防止は設けず、実寸で床版支間6mの単純版に対して、試験体は実寸床版の1/2寸法とし支間3mで2辺単純支持とする。同一試験で

継手構造の比較をするため、試験体に継手位置を2箇所設け、それぞれボルト1列、2列とした。載荷位置は試験体中央で、載荷範囲は50×360cmとした。載荷荷重は、せん断相似則の関係⁵⁾から実寸モデルの1/3とし、階段載荷法を採用し52kNから最大147kN、走行回数4万回毎に荷重を6.6kNずつ上げていき走行回数64万回まで行った。なお、計測については支間中央とし、動的条件下ではなく各荷重ステップにおいて静的載荷試験を実施している。

3. 試験結果および考察

3.1 定点疲労試験結果

3.1.1 破壊状況

全ての試験体において目標繰返し回数200万回に達し、疲労破壊には至らなかった。試験体側面のコンクリートや上面コンクリートにはひび割れなども発生しなかった。

3.1.2 たわみ

図-3に繰返し回数と試験体中央たわみの関係を示す。ボルト1列の試験結果において、繰返し回数110万回を超えたあたりからたわみが減少し、設計値を下回る結果となっている。これは、載荷回数近傍から変位測定に何らかの不具合が生じた可能性が伺える。全試験体において、繰返し回数200万回後もたわみには大きな変化はみられず、試験体の剛性は保たれていると考えられる。また、従来継手とボルト継手のたわみ量を比較すると、合成床版が連続しているとした場合の計算結果0.8mmに対し、従来継手が約1.4mm、ボルト継手では約0.9mmとなった。これより、従来継手と比較してボルト継手は合成床版としての剛性を連続させることが確認でき、曲げに対する抵抗や疲労耐

久性に対して有利であると考えられる。

3.1.3 底鋼板の開き

図-4 に繰返し回数と底鋼板開きの関係を示す。繰返し回数 200 万回後も底鋼板の開きには大きな変化はみられず、継手部に変状が生じていないことがわかる。

3.1.4 コンクリート上面ひずみ

図-5 に繰返し回数と中央コンクリート上面ひずみの関係を示す。繰返し回数 200 万回後も大きな変化はみられず、変曲点もみられなかったことから、コンクリート上面における剛性の低下はみられなかった。200 万回疲労後、従来継手が約-110 μ に対してボルト継手では約-90 μ となり、微小ではあるが従来構造よりもボルト構造の方が比較的小さな値をとった。これは、スタッドのずれがいくらか生じていたものと考えられる。

3.1.5 底鋼板ひずみ

図-6 に繰返し回数と底鋼板下面中央付近のひずみの関係を示す。200 万回後もコンクリートにひび割れが発生していないことから、底鋼板ひずみは全断面有効である値をとったと考えられる。また、鋼板自体の降伏ひずみが約 1100 μ であるのに対して、スパン中央付近において 200 万回後も全試験体で約 30 μ と比較的小さな値をとった。これより、鋼板の疲労耐久性劣化の影響はないものと考えられる。

3.1.6 コンクリート上面と底鋼板ひずみの試算結果と試験結果

表-6 に試験体支点から 450mm の位置のコンクリート上面と底鋼板ひずみの試算結果と試験結果の比較を示す。表中の ϵ_u はコンクリート上面ひずみを、 ϵ_L は底鋼板ひずみを示している。N=15, 10 はそれぞれ、RC 床版の設計、合成床版の設計で用いられるヤング係数比の標準値であり、N=5.2 は本研究における材料試験結果で得られたヤング係数比の値である。表中の試験結果は疲労回数 200 万回までの平均値とした。この表より、いずれの試験体もヤング係数比の比率の違いによる整合性がとれていると考えられる。

3.2 残存耐力確認試験結果

前述のように、全試験体において目標繰返し回数 200 万回に達したので残存耐力確認試験（以下、残存試験）を行った。

3.2.1 終局耐力

表-7 に終局耐力の試験結果と計算値を示す。計算値は材料試験で得られた結果を用い、ヤング係数を 5.2、コンクリート圧縮強度を $\sigma_c=47.2\text{N/mm}^2$ 、引張側のコンクリートは無視し、図-7~9 に示す断面により求めた。終局耐力はボルト 2 列が最も耐力を有していた。また全試験体の試験値は、降伏荷重・終局耐力共に物性値を上回り、従来継手で約 1.5 倍、ボルト 1 列で約 2.8 倍、ボルト 2 列で約 1.1 倍となった。

3.2.2 破壊状況

破壊状況は、写真-2 のように全試験体においてコンクリート部の圧壊による破壊となった。写真-3~6 に試験体側面のひび割れ状況を示す。従来継手では中心から約 55cm、ボルト 1 列では中心から約 25cm、ボルト 2 列では中心から約 30cm の位置に、ほぼ左右対称となるようにひび割れが進展した。これは、コンクリート内部に埋設してある底鋼板に溶接した CT 鋼付近まで

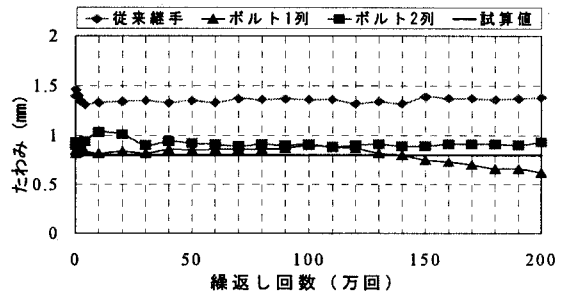


図-3 繰返し回数と中央たわみの関係

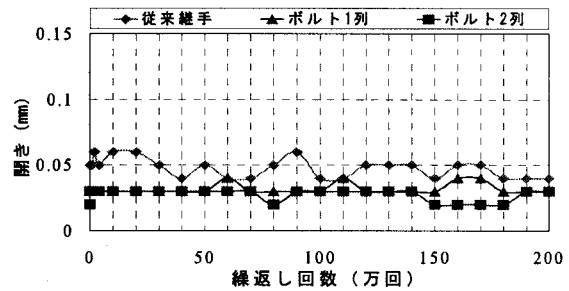


図-4 繰返し回数と底鋼板開きの関係

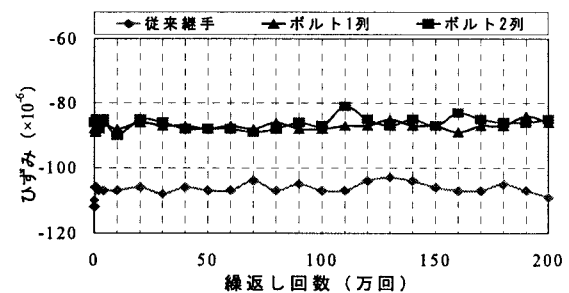


図-5 繰返し回数と中央コンクリート上面ひずみ

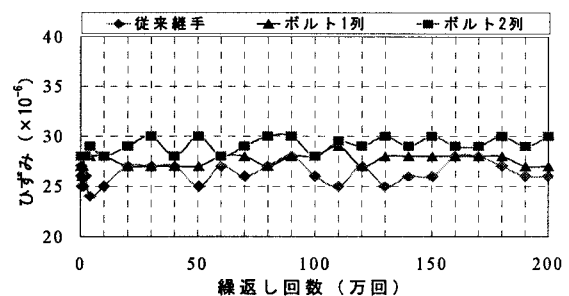


図-6 繰返し回数と底鋼板下面中央付近のひずみ

表-6 コンクリート上面と底鋼板ひずみの
試算結果と試験結果の比較

	従来継手		ボルト1列		ボルト2列	
	ϵ_u	ϵ_L	ϵ_u	ϵ_L	ϵ_u	ϵ_L
N=15	-97.5	56.0	-97.5	56.0	-97.5	56.0
N=10	-70.0	48.0	-70.0	48.0	-70.0	48.0
N=5.3	-42.4	35.0	-42.4	35.0	-42.4	35.0
試験結果	-37.4	26.2	-33.1	27.6	-27.9	29.0

表-7 終局耐荷力

試験体	降伏荷重			終局耐荷力		
	計算値 (kN)	試験結果 (kN)	試験結果 / 計算値	計算値 (kN)	試験結果 (kN)	試験結果 / 計算値
従来継手	200.4	318.5	1.59	246.2	367.5	1.49
ボルト1列	167.3	480.2	2.87	196.7	539.0	2.74
ボルト2列	501.0	558.6	1.11	540.1	637.0	1.18

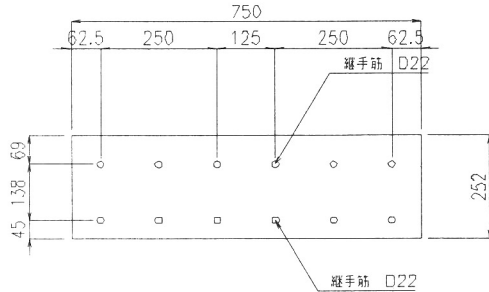


図-7 従来継手の終局耐力計算に用いた断面

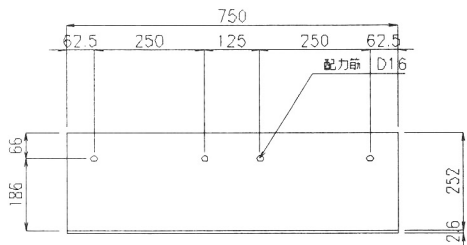


図-8 ボルト継手1列の終局耐力計算に用いた断面

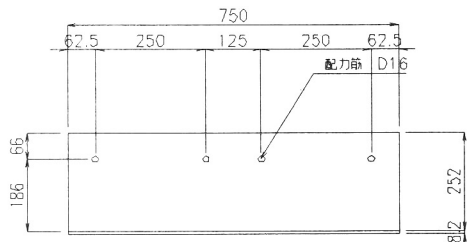


図-9 ボルト継手2列の終局耐力計算に用いた断面

の位置であり、最もひび割れ範囲の大きい従来継手では、継手筋を使用する際に必要とされる作業場の確保のためにCT鋼の埋設間隔が離れ、最も広範囲にひび割れが入ったと考えられる。

3.2.3 たわみ

図-10に残存試験によるたわみと荷重の関係を示す。従来継手では約300kN付近で降伏をむかえ、破壊に至る終局耐荷力までそれほど荷重は上がらずに破壊に至った。しかし、ボルト継手では終局耐荷力までさほど挙動は変わらず、ほぼ比例的な挙動を示した。また、たわみ量7.5mm以上では、従来継手と比較してボルト継手の方が高い荷重下にも耐えることができ、よりたわみに抵抗することができると考えられる。

3.2.4 底鋼板の開き

図-11に残存試験による荷重と底鋼板の開きの関係を示す。使用したεゲージの機能上の制約から開き値0.5mmでのデータ打ち切りとした。その間、全試験体において比較的同じような挙動を示した。開き値0.5mmで比較すると、従来継手では約

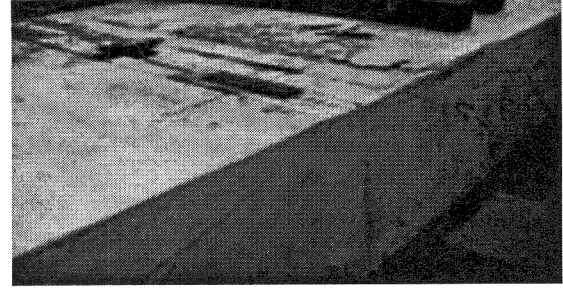


写真-2 コンクリート上面の圧壊

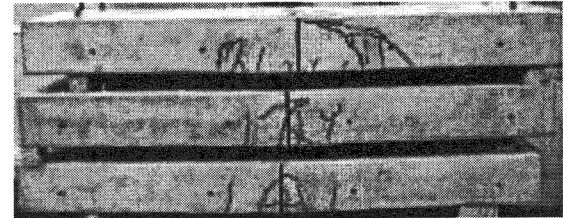


写真-3 残存試験後の側面のひび割れ



写真-4 従来継手のひび割れ状況



写真-5 ボルト1列のひび割れ状況

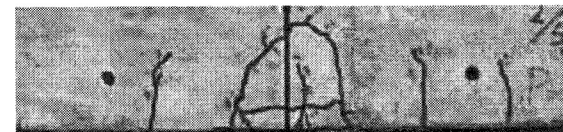


写真-6 ボルト2列のひび割れ状況

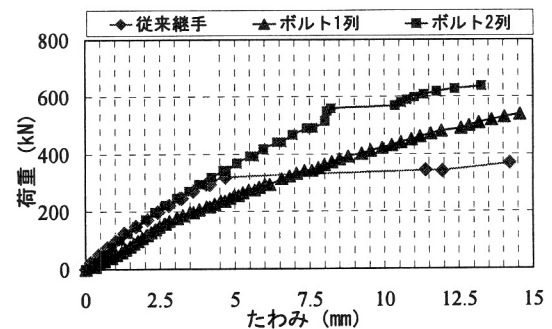


図-10 残存試験によるたわみと荷重の関係

200kN, ボルト1列では約300kN, ボルト2列では約500kNとなった。同じ荷重で比較するため, 比較可能な荷重200kN, 従来継手の開き量0.5mmと比較すると, ボルト1列は約6割, ボルト2列は約8割の開き量低減となった。

3.2.5 コンクリート上面

図-12 にコンクリート上面ひずみと荷重の関係を示す。図より従来継手に最も早く傾きの変化がみられ, これは従来継手のスタッドにすべりが生じたと考えられる。これより従来継手と比較して, ボルト構造は鋼とコンクリートの一体化に対して有利でありすべりが生じにくいことが考えられる。

3.3 輪荷重疲労試験結果

3.3.1 破壊状況

載荷荷重を, 設計荷重に換算して累積載荷回数が供用期間100年を十分に超える階段載荷(図-13, 14 参照)^{5, 6)}として試験を行ったが, 試験体は破壊に至らなかった。試験体上面には, CT形鋼上面に設置された主鉄筋に沿った位置にひび割れが数カ所発生していたが, どれも有害な幅ではなかった。発生したひび割れの要因としては, 本研究で用いた試験体が1/2モデルであるため, かぶりが十分に確保されていなかったこと, またCT形鋼設置位置ではコンクリートのせん断面積が小さいため, 輪荷重の繰返し載荷により正負のせん断力の影響を顕著に受けたものと考えられる。

3.3.2 たわみ

図-13 に走行回数とたわみの関係を示す。走行回数64万回後, たわみは試験体中央において3.2mm, ボルト1列・2列は共に約2.5mmとなり, いずれも大きな変曲点はみられなかった。

3.3.3 継手部の開き

図-14 に走行回数と開きの関係を示す。走行回数64万回後も, ボルト1列・2列共に変曲点, ならびに大きな開きは比較的小さな値となった。これにより, 走行回数64万回後も試験体継手部の機能は十分に保たれていることがわかった。

4. 結論

本研究では, 合成床版継手構造の疲労耐久性を確認するために定点疲労試験, ならびに輪荷重疲労試験を行った。これらから得られた知見を以下に示す。

(1) 定点疲労試験では, 繰返し回数200万回後も剛性の変状はみられず, いずれの継手形式においても継手部のすべり等は見受けられなかった。

(2) 定点疲労試験後の残存試験では, いずれの継手形式においても降伏荷重, 終局耐力共に試験結果は計算値を上回った。

(3) 移動輪荷重疲労試験では, 走行回数の増加に伴いコンクリートのひび割れ等による剛性低下は見受けられるものの, 疲労破壊に至るような急激な剛性劣化は認められず, 試験体の疲労耐久性は十分に保たれていることがわかった。

以上の結果より, HTBによる継手構造を有する鋼・コンクリート合成床版の優れた疲労耐久性が確認された。

【参考文献】

1) 土木学会: コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, 2002年制定版

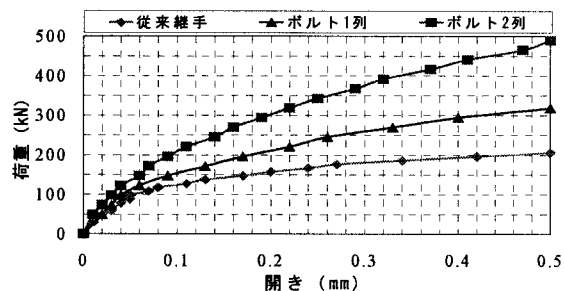


図-11 残存試験による荷重と底鋼板の開きの関係

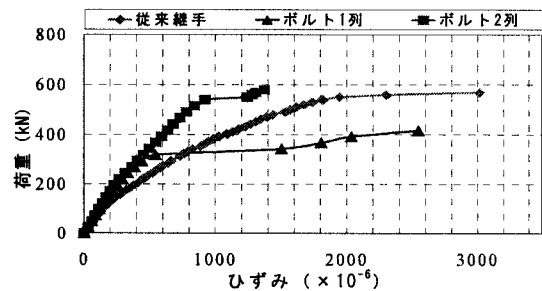


図-12 コンクリート上面ひずみと荷重

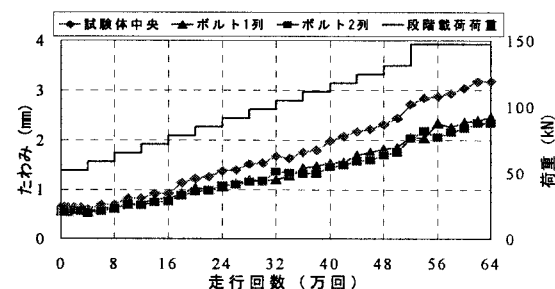


図-13 走行回数とたわみの関係

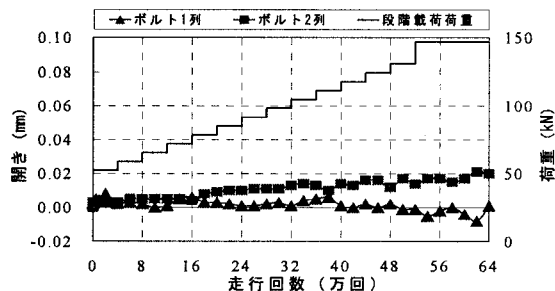


図-14 走行回数と開きの関係

- 2) 社団法人 日本鋼構造協会: 土木構造物の性能設計ガイドライン, 2001.10
- 3) 高海克彦, 西克幸, 浜田純夫: 軸力を同時に受けるスタッドジベルのせん断耐力, 鋼構造年次論文報告集, 第7巻, 1999.7
- 4) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PARTB 合成構造物, 1997.9
- 5) 松井繁之: 移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について, コンクリート工学年次論文報告書 9-2 1987
- 6) 土木研究所: 道路橋の床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価法の開発に関する共同研究報告書 (その1), 1999.3