

孔あき鋼板リブを用いたプレキャスト鋼・コンクリート合成床版の継手構造に関する実験的研究

An experimental study for joint structures of pre-cast steel-concrete composite slab with perfobond rib

井上 武* , 村上修司* , 水越秀和** , 佐々木保隆***
 Takeshi Inoue, Shuji Murakami, Hidekazu Mizukoshi, Yasutaka Sasaki

*工修 株式会社 横河ブリッジ 技術本部技術研究所第二課 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27)
 **工修 株式会社 横河ブリッジ 橋梁営業本部技術部第二課 (〒592-8331 大阪府堺市築港新町 2-3)
 ***工博 株式会社 横河ブリッジ 技術本部技術研究所長 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27)

It is well known that steel-concrete composite slab with perfobond rib has large fatigue strength and high durability.

Introducing pre-cast concrete is one of the rationalizing method of this composite slab. Using pre-cast concrete is effective in shortening of the construction period and rationalizing work on site.

New joint structure using high strength bolt is proposed for this pre-cast composite slab. Static loading tests are conducted to investigate to crack behavior and ultimate behavior, in order to confirm design method of proposed joint structure.

Key Words : pre-cast composite slab , perfobond rib , joint structure , high strength bolt

1. まえがき

孔あき鋼板リブを用いた鋼・コンクリート合成床版(以下, 合成床版, 図-1)は, 孔あき鋼板リブ(以下, リブ)を底鋼板に溶接したパネルにコンクリートを打設し, コンクリートがリブ孔内を満たすことでずれ止めとして作用する構造をとる. このずれ止めにより, 鋼パネルとコンクリートが合成され, 優れた疲労耐久性を發揮する. また, 鋼パネルを型枠として用いることで現場施工を省力化することが可能であり, 最近, 施工事例が増えている^{1)~3)}. この合成床版の施工をさらに合理化する方法として, 現在, 現場打設しているコンクリートをプレキャスト化する方法が考えられる. プレキャスト化により現場でのコンクリート打設は床版継手部のみとなるため, 現場施工の省力化, および現場工期の短縮が期待できる. 一方, プレキャストパネルは, 運搬時や部材搬入時の重量や寸法などの制限によりパネルサイズが決定され, パネルどうしの現場継手構造が必須のものとなる.

プレキャスト床版パネルの継手には, これまでRC ループ継手が多く採用されているが, ループ内の接合部補強鉄筋の現場施工が困難であり, 設計法ならびに負曲げ性状についても明らかであるとは言い難い⁴⁾. そこで, 既存のRC 構造物の設計法を用いて設計ができる接合法として, 高力ボルト摩擦接合で直接連結する継手を提案した. 橋軸方向の継手は底鋼板を, 橋軸直角方向は, リブを高力ボルト摩擦接合により直接連結し, コンクリートを打設する形

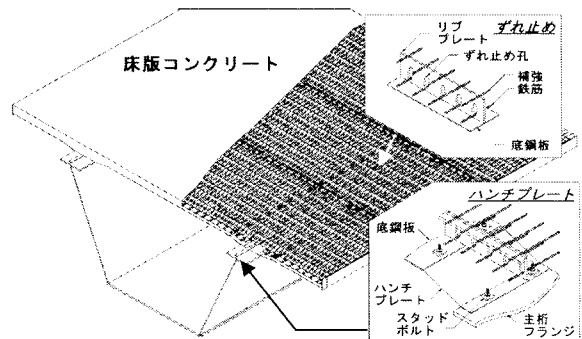


図-1 孔あき鋼板リブを用いた合成床版の概要
 橋軸直角方向の継手

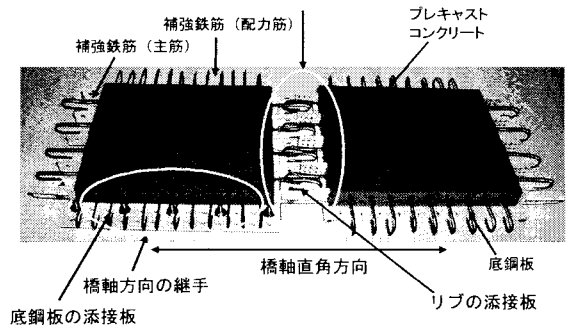


図-2 実験対象とする継手構造

式とした. 図-2 に実験対象とする継手位置を示す.

本文は, 上記のプレキャスト合成床版の継手部の力学的挙動を確認するために行った実験結果について報告し, 継手部の設計手法について有用な資料を提供するものである.

表-1 実験供試体(橋軸方向継手)

供試体	供試体の概要	継手部	目的
A-1 A-2			継手部の曲げ性状の確認 ・試験体A-1 健全な施工をしたもの。 ・試験体A-2 運搬および施工時の衝撃による剥離を考慮するため、継手部の一部に剥離剤を使用したもの。
B			一般部の曲げ性状の確認 試験体A-1との比較
C			継手部のせん断性状の確認

表-2 コンクリートの示方配合(橋軸方向継手)

粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ (cm)	水粉体比 W/P (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					水 W	粉体 P		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE減水剤 A
						セメント C	膨張材 B			
20	8	45.6	4.5	41.4	169	341	30	715	1056	0.928

表-3 圧縮強度試験結果(橋軸方向継手)

コンクリート部位	材齢	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
プレキャスト コンクリート	19日 (載荷開始時)	45.8	33.3
	23日 (載荷終了時)	46.2	33.6
継手部 コンクリート	13日 (載荷開始日)	46.8	33.6
	17日 (載荷終了日)	48.0	33.6

2. 橋軸方向継手に着目した静的荷重実験

(1) 実験概要および実験供試体

橋軸方向継手には、正曲げモーメントおよびせん断力が作用する。また、施工面では底鋼板とプレキャストコンクリートの剥離が懸念される。そこで、継手部の力学的挙動の把握を目的とし、静的荷重実験を行った。表-1に供試体一覧を示す。供試体は床版支間 4.0m の連続版として設計されたプレキャスト合成床版の継手部を橋軸方向に取り出した梁形式とし、A：継手部の曲げ荷重用供試体、B：一般部の曲げ荷重用供試体、C：せん断荷重用供試体の3種類とした。継手部を有する供試体では実施工を考慮し、プレキャストコンクリートと現場打設コンクリートの打継目を設けるため、コンクリートを二度に分けて打設した。また、供試体 A では、健全な施工をした供試体 A-1 に対し、運搬および施工時の衝撃による剥離をモデル化するために、継手部打継目近傍底鋼板とコンクリート境界面に剥離剤を塗布した供試体 A-2 を製作することでこの剥離をパラメータとした。継手部では、底鋼板が突出しているため、リブまでの底鋼板とコンクリートが剥離しやすい

と考えたためである。供試体 A および供試体 B では、継手の有無をパラメータとした。

コンクリートの配合を表-2 に、圧縮強度試験結果を表-3 に示す。コンクリートの配合条件は、設計基準強度 30N/mm² であり、セメントの種類は早強セメントである。

(2) 荷重方法

図-3 に本実験における荷重方法を示す。曲げ荷重は、支間長 2625mm、荷重幅 500mm の 2 点集中線荷重で行った。せん断スパン比は 4.5 である。

せん断荷重は支間長 1875mm、荷重長 500mm の 2 点集中線荷重により行った。せん断荷重のせん断スパン比は 3.0 である。せん断荷重ではせん断耐力を確認するため、

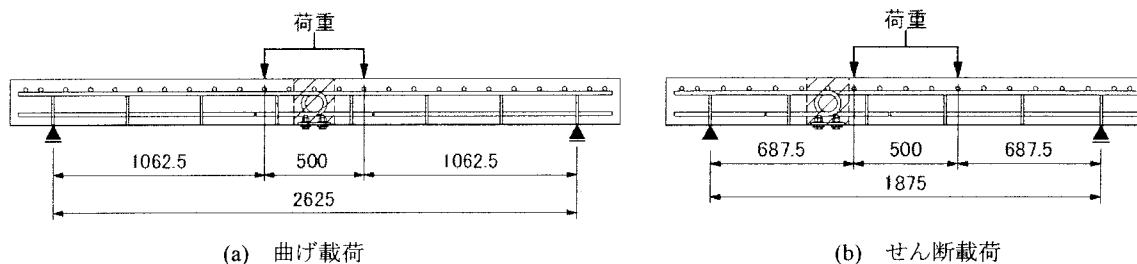


図-3 荷重方法(橋軸方向継手)

曲げ荷重よりもせん断スパン比を小さくした。荷重にあたっては各目標荷重ごとに荷重・除荷を行ってから次の荷重に移行する形とした。

(3) 実験結果および考察

表-4 に最大荷重と破壊モードを示す。以下、曲げ荷重の結果とせん断荷重の結果を分けて考察する。

(a) 曲げ荷重実験

表-4 の供試体 A-1, 供試体 A-2, および供試体 B には設計曲げモーメントに相当する荷重を併せて示す。また、供試体 C にはコンクリート標準示方書⁵⁾によって計算した押抜きせん断耐力を併せて示す。

各供試体の破壊モードは、供試体 A-1 および供試体 A-2 では底鋼板添接部のすべりによる曲げ破壊となった。供試体 B では、荷重位置に曲げひび割れが入った後、せん断破壊した。供試体 A-1, 供試体 A-2 の最大荷重は、各々296kN, 291kN であり、設計荷重の 6 倍程度であった。また、供試体 B の最大荷重は 440kN であり、設計荷重の 8.85 倍となった。

図-4 に曲げ実験における供試体支間中央の荷重-たわみ関係を示す。図-4 中には底鋼板と引張側コンクリート断面を無視した断面により計算したたわみの計算値と設計荷重を併せて示す。なお、この計算値で用いた静弾性係数比 $n(E_s/E_c)$ は材料試験結果により求めた値($n=6.13$)を使用している。図-4 より、供試体 A-1 および供試体 A-2 は、設計荷重の 1.7 倍程度までは計算値とほぼ一致した挙動を示した。また、供試体 A-1 および供試体 A-2 を比較するとほぼ同じ挙動となっており、継手部コンクリートの剥離の影響は小さかった。供試体 B については、設計荷重の 2.3 倍まで計算値とほぼ一致した挙動を示した。供試体 A-1 および供試体 A-2 と供試体 B の結果から、高力ボルト摩擦接合を用いた継手は、設計荷重の 1.7 倍まで一般部と同様計算値とほぼ一致した挙動を示すことが確認できた。

図-5 に載荷荷重と底鋼板添接部開き量の関係を示す。荷重と底鋼板添接部の開き量について計測したところ、設計荷重まで載荷し、その後除荷した時の残留開き量は 0.004mm と微小であることが確認できた。

図-6 に設計荷重における載荷位置断面のひずみ分布を示す。供試体 A-1, 供試体 A-2, および供試体 B は同じような直線のひずみ分布となっており、設計仮定に近い鋼とコンクリートの合成断面として挙動していることが確認で

表-4 最大荷重と破壊モード

供試体	最大荷重 P_{max} (kN)	設計荷重 P_d (kN)	$\frac{P_{max}}{P_d}$	破壊モード
A-1	296	49.7	5.96	曲げ
A-2	291	49.7	5.86	曲げ
B	440	49.7	8.85	曲げ→せん断
C	420	409*	1.03	せん断

*コンクリート標準示方書による押抜きせん断耐力

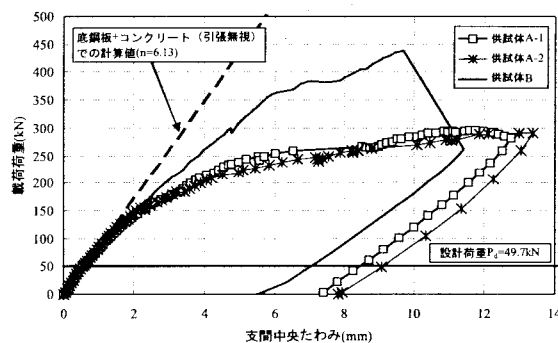


図-4 荷重-たわみ関係(曲げ荷重時)

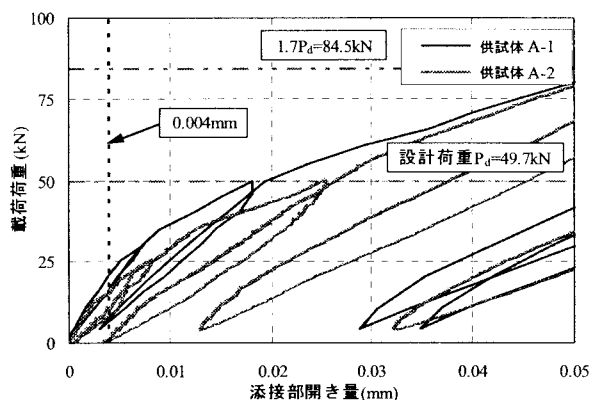


図-5 荷重-添接部開き量関係(曲げ荷重時)

きた。

いずれの供試体も、ひび割れ発生後に荷重を増加させてもひび割れの急激な進展は見られなかった。

(b) せん断荷重実験

表-4 より、せん断荷重用の供試体である供試体 C の最大荷重は 420kN であった。また、供試体 C の破壊モードはせん断破壊であったが、図-7 の供試体 C のひび割れ分布でわかるように、継手部打継目ではなく梁全体のせん断破壊となり、せん断破壊時のせん断ひび割れは一般部側で発生した。コンクリート打継目のひび割れは破壊時にのみ

確認された。これにより、継手部はせん断荷重に対して弱点とならないことが確認できた。

以上のことから、曲げモーメント、せん断力ともに提案した継手構造は十分な耐力を有しており、現行のRC断面としての設計法で問題ないことがわかった。また、運搬や施工時の衝撃による剥離についても健全に施工したものと同様の挙動を示したことから、影響が小さいことがわかった。

3. 橋軸直角方向継手に着目した静的載荷実験

橋軸直角方向では、中間支点上に継手部が配置されることを想定し、継手部には構造的に負曲げモーメントが作用するものと仮定した。本実験ではこの主桁上の負曲げモーメントを考慮して、負曲げ載荷実験を行った。

(1) 実験概要および供試体

表-5 に供試体の概要を示す。供試体は床版支間 4.5m の連続版として設計された合成床版の継手部を床版支間方向に取り出した梁形式とした。供試体の種類はリブ形状および上段に配置する補強鉄筋の有無をパラメータとして、表-5 に示す 4 タイプとした。供試体 E-1 および供試体 E-2(以下、まとめて供試体 E)は、フランジプレート付きリブを一面摩擦の高力ボルト接合により連結した。また、供試体 D-1 および供試体 D-2(以下、まとめて供試体 D)はフランジプレートを取り付けずに板厚を増すことで同程度の剛性を確保し、材質を SM400 から SM490 に変更することで設計上の断面を構成した供試体である。

表-6 に橋軸直角方向供試体のコンクリートの配合を、表-7 にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。

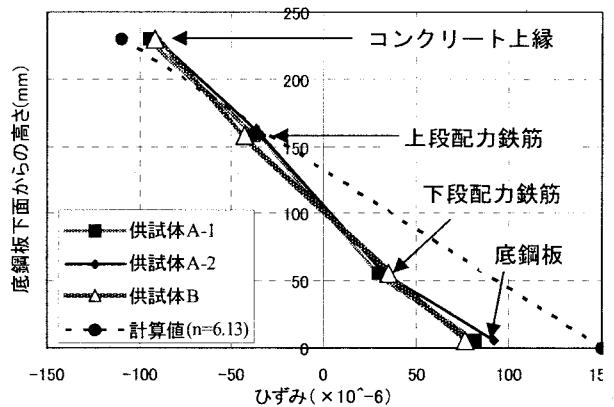


図-6 設計荷重におけるひずみ分布

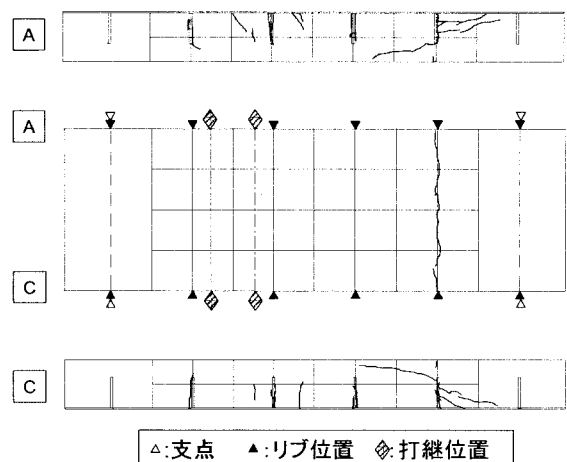


図-7 供試体 C の床版上面のひび割れ分布

表-5 実験供試体(橋軸直角方向継手)

試験体		一般図	継手部リブ形状	上段主鉄筋
D-1			 A-A断面	-
D-2			 A-A断面 リブ t=12mm 鋼種 SM490 両面摩擦接合	D16×2本
E-1			 A-A断面	-
E-2			 A-A断面 フランジプレート リブ t=12mm 鋼種 SM400 一面摩擦接合	D16×2本

表-6 コンクリートの示方配合(橋軸直角方向継手)

粗骨材の最大寸法(mm)	スランプ (cm)	水粉体比 W/P (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					水 W	粉体 P		細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AE減水剤 A
						セメント C	膨張材 B			
20	10	45.2	4.5	41.3	175	357	30	702	1040	0.968

表-7 圧縮強度試験結果(橋軸直角方向継手)

供試体名	D-1	D-2	D-3	D-4
材齢	8日	10日	13日	15日
圧縮強度 (N/mm ²)	41.8	47.3	50.2	51.0

(2) 載荷方法

図-8 に載荷方法を示す。負曲げ載荷実験は、支間長1980mm で供試体中央に1点集中線載荷で行った。載荷に際しては各目標荷重ごとに載荷・除荷を行ってから次の目標荷重に移行する形とした。

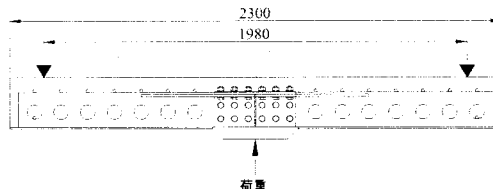


図-8 載荷方法(橋軸直角方向継手)

(3) 実験結果および考察

図-9 に支間中央における荷重-たわみ関係を示す。上段補強鉄筋の有無により比較した場合、補強鉄筋を配置した供試体(D-2, E-2)は配置していないものと比べて若干終局耐力が大きく、補強鉄筋が有効に作用していることが分かった。いずれの供試体も、たわみに関してはフランジプレートの有無による有意な差異は認められず、フランジプレートの有無が終局耐力およびたわみに与える影響は小さいといえる。また、図-9 中の破線は供試体を全断面有効として計算したたわみを示しており、ひび割れ発生前までの挙動とよく一致していた。ここで、たわみの計算におけるコンクリートの静弾性係数は、コンクリートの圧縮強度より推定した。

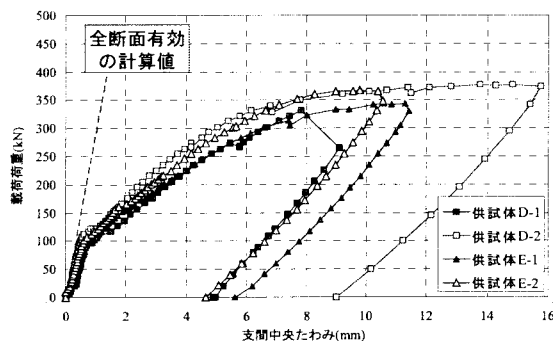


図-9 荷重-たわみ関係

図-10 に初期ひび割れ発生荷重までの荷重-ひび割れ幅関係を示す。設計荷重時(93kN)のひび割れ幅の最大値は供試体 E-1 が 0.03mm であり、そのほかの供試体は 0.02mm であった。また、供試体 E-1 については 0.01mm のひび割れの残留を確認した。

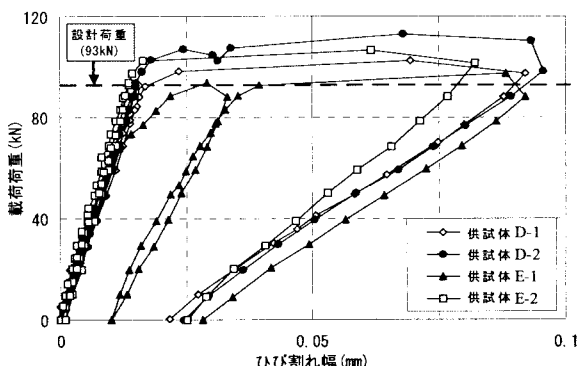


図-10 荷重-ひび割れ幅関係

図-10 において、ひび割れ発生荷重後の荷重除荷時に残留するひび割れ幅は 0.025mm 程度であり、特に有害なひび割れではない。また、ひび割れ幅について補強鉄筋およびフランジプレートの有無による有意な差は無いが、補強鉄筋を配置した供試体(供試体 D-2, 供試体 E-2)についてはひび割れ発生荷重の増加が認められるため、補強鉄筋がひび割れ耐力増加に有効に作用していることが分かる。

図-11 に各供試体のひび割れ分布を示す。載荷点直上の支間中央にひび割れを生じたものは供試体 D-1 のみであった。これは補強鉄筋およびフランジプレートが無いため、最も負曲げの卓越するところにひび割れが発生したものと考えられる。一方、供試体 D-2 は配置された補強鉄筋が有効に作用して、支間中央のひび割れ進展を抑制する効果および荷重を分配してひび割れを分散する効果があった

ものと推察される。

フランジプレート付きリブでは、補強鉄筋の有無によるひび割れ分布の差異はほとんど無く、均等に荷重が伝達されていることが確認された。

以上のことから、ひび割れを分散させるには補強鉄筋を配置することが望ましい。また、平リブ形式の継手の場合、床版支間が大きくなると材質のランクアップや大幅な板厚の増加が必要となるため、フランジプレート付きが、有利であると考えられる。

4. 結論

孔あき鋼板リブを用いた合成床版のプレキャスト化に対応するため、橋軸方向と橋軸直角方向の継手構造を提案し、継手部を梁形状に取り出した供試体による静的載荷実

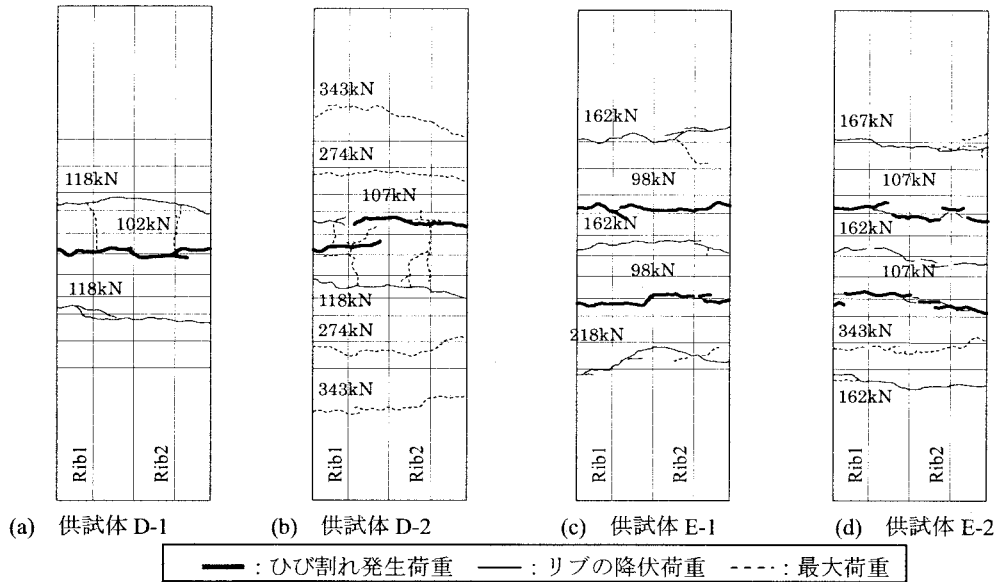


図-11 床版上面のひび割れ分布

験を行った。以下に本実験により得られた知見を示す。

(1) 曲げ載荷実験(橋軸方向)

- ・ 継手部を有する供試体(供試体 A-1, A-2)のたわみは、設計荷重の約 1.7 倍まで計算値とほぼ一致した。
- ・ 継手部を有する供試体(供試体 A-1, 供試体 A-2)の破壊モードは底鋼板添接部のすべりによる曲げ破壊となり、最大荷重は 296kN と 291kN であった。この値は設計荷重の約 6 倍であった。
- ・ 一般部の供試体(供試体 B)の破壊モードはせん断破壊となり、最大荷重は 440kN であった。
- ・ 継手部を有する供試体では、設計荷重レベルでの底鋼板添接部の残留開き量が微小であることが確認できた。
- ・ 設計荷重における荷重位置断面のひずみ分布は、継手部および一般部ともに同様の直線分布を示しており、設計仮定に近い鋼とコンクリートが合成断面として挙動していることがわかった。

(2) せん断載荷実験(橋軸方向)

- ・ 破壊モードは梁全体のせん断破壊となり、その最大荷重は 420kN となった。
- ・ せん断破壊時の梁供試体(供試体 C))は、一般部のせん断破壊を呈しており、コンクリート打継目付近は弱点とならず、ひび割れは一般部のせん断破壊後に発生した。

(3) 曲げ載荷実験(橋軸直角方向)

- ・ 設計荷重レベルにおいては、いずれのタイプの継手形式も有害なひび割れは発生せず、有意な差は認められなかった。
- ・ リブ方向に補強鉄筋を追加することにより、初期ひび割れの発生耐荷重を向上させることが可能である。
- ・ 補強鉄筋もしくはフランジプレートを有する供試体は、補強鉄筋ならびにフランジプレートを有しない供試体と比較して、ひび割れ分散性の向上が見られた。これは、

補強鉄筋ならびにフランジプレートが荷重を分配し、ひび割れを分散したからだと考えられる。

- ・ リブの形状は、フランジ付きリブを標準とするのが望ましい。平リブタイプでは床版支間が大きくなる場合にさらなる材質のランクアップが必要となり、設計が不可能となることや、リブの発生応力が大きくなることによりひび割れ幅が増大することが予想される。

以上の孔あき鋼板リブを用いたプレキャスト合成床版の継手部の力学的挙動を確認するために行った一連の実験により、提案する継手構造が橋軸方向、橋軸直角方向のどちらにも、十分な性能を有していると考えられる。また、現行の RC 断面の設計法を用いることにより、十分ひび割れ制御が可能となる。

参考文献

- 1) 横山誠二, 加地敦志, 野村宗弘, 原田利彦, 下田晃伸: 雄物川橋工事報告-合成床版を有する開断面箱桁橋の設計, 製作と架設について-, 横河ブリッジグループ技報 No.32, pp.82-93 2003.1.1
- 2) 風早良則, 古田富保, 久保敏則, 白石靖樹: 福岡高速 5 号線 的場高架橋工事報告-5 径間連続鋼開断面箱桁橋の設計・施工について, 横河ブリッジグループ技報, No.33, pp84-93 2004.1
- 3) 小林一雄, 平峯圭治, 春日井俊博: 第二東名高速道路上倉橋の設計, 横河ブリッジグループ技報 No.32, pp.82-93 2003.1.1
- 4) (財)高速道路技術センター: 第二東名高速道路 鋼橋の新技術に関する調査研究(少数主桁橋設計・施工指針(案)), (フォローアップ検討報告書), 2000.12.3
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書(2002 年制定)[構造性能照査編], 2002