

リブ付きプレキャストPC床版の疲労耐久性に関する実験的研究

An Experimental Study on Fatigue Durability of Precast Prestressed Concrete Slabs with Ribs

八部順一*, 山本晃久**, 済藤英明***, 星埜正明****, 堀川都志雄*****

Jun-ichi YABE, Akihisa YAMAMOTO, Hideaki SAITO, Masaaki HOSHINO, Toshio HORIKAWA

*工修 川崎重工業(株) 鉄構・機器事業部 橋梁・水門総括部 部長 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118)

**川崎重工業(株) 鉄構・機器事業部 橋梁・水門総括部 課長 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118)

***川崎重工業(株) 関東技術研究所 構造システム研究部 (〒278-8585 千葉県野田市二ツ塚 118)

****工博 日本大学 理工学部交通土木工学科 教授 (〒274 千葉県船橋市習志野台 7-24-1)

*****工博 大阪工業大学 工学部土木工学科 教授 (〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1)

In recent years minimum cost of the bridge as a whole, rather than minimum weight of the steel, is considered more significant in Japan. Saving the labor cost in the construction site, cutting construction times and making the quality of the bridge higher, lead to minimum cost of the bridge. Considering these conditions, precast prestressed concrete deck slabs are desirable for this type of plate girder bridge with fewer girders. One of the problems of these slabs is how to join precast deck panels with each other. In these circumstances a new type deck, in which precast concrete panels are joined by compressing the ribs arranged in both ends of the panels by means of prestressing-steel bars, is conceived. Authors have confirmed the ultimate strength of this type of slab by static loading test till now. Further, we carry out test by running load under wheel trucking machine to confirm durability of this slab. This paper describes the merits of this slab and presents progress report of the test.

Key Word : precast PC slab , joint , wheel trucking machine

1. はじめに

近年、建設費の縮減が求められる中、鋼橋建設においては合理化・省力化の検討が進められており、欧州諸国で多く見られる広幅員のPC床版を有する少数主桁橋が有力な構造形式の一つとして認められ、関係各所で設計・施工事例が見受けられるようになってきた¹⁾。これらの橋梁形式では、床版支間を大きくとるため、我が国では横締めPC床版を採用しているのが一般的である。また現地工事の省力化、工期短縮あるいは木製型枠材の消費削減、さらに品質・耐久性の向上等を視野にいれ、PC床版のプレキャスト化の研究が鋭意進められている^{2), 3), 4)}。

このプレキャスト床版の技術課題の一つとして、パネル相互間の連結部の設計・施工が挙げられる。従来は、あらかじめ床版内にシースを配置しておき、床版を設置した後にPC鋼線縦締めする方法が採用されてきたが、現場作業が複雑で工期も長くなり省力化や経済性という点で問題が残る。また第2東名・東海大府高架橋等においては、輪荷重走行試験などにより耐久性を確認の上ループ継手を採用しているが⁵⁾、継手部が部分的にRC構造となるため、ひび割れ発生後の耐久性にやや不安が残

る。

このような状況の中、新形式のプレキャストPC床版を考案した。これは、図-1に示すように床版接合部にリブを設け、リブ相互を橋軸方向に締付けボルトで結合する方式を採用することにより、継手部におけるせん断力と曲げモーメントの伝達を保持し、各パネルを一体化させて版としての効果を生み出す構造となっている。また応力の伝播機構が複雑となる隅角部にはサークルハンチを設けている。この床版は、弱点と考えられる接合部にリブを設けて曲げ剛性を向上させて部分的にRC構造となるなどの問題点を解決している。以下に特徴を示す。

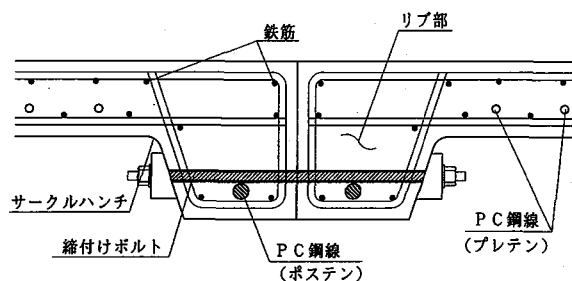


図-1 床版接合部

- ① 橋軸直角方向の曲げに対してリブの剛性が有効に作用して断面効率が上がり、一般部の版厚を減じることができ、全体としての重量の軽減化が図れる。
- ② 別途、コスト等を試算した結果、床版支間が 5m 以上の少数主桁橋に適した構造である。
- ③ 場所打ちによる間詰め部がないので、施工が簡略化され、かつ損傷や漏水の原因となる弱点部がなくなる。
- ④ 接合部の剛性が高く、たわみ量が小さいので、床版間のせん断力によるずれの影響が減少する。
- ⑤ 床版破損時にも部分的な取替えが容易にできる。

現在までに、この床版の模型を製作し、接合部の曲げ実験およびせん断実験、ならびに接合部を含めた床版全体の静的載荷実験を行い、パネル間での曲げモーメント、せん断力の伝達特性および応力集中現象、また接合部でのずれ、および終局耐荷力などに着目した結果、床版の全体挙動では特に問題となる点が無いことを確認している^{6), 7)}。

しかしながら、床版の疲労耐久性については未だ明らかでないため、本研究では 1/2 模型を対象とした輪荷重走行試験機による疲労特性の確認試験を実施した。実験結果から得られる床版のたわみ、接合部の段差と開閉、締付けボルトの軸力変動およびずれ止めに発生する応力などに着目し、本床版の耐久性について述べる。

2. 輪荷重走行試験

2. 1 実験供試体

実験供試体は、実物を想定した大きさ(支間 6m、橋軸方向幅 2m)のリブ付きプレキャスト P C 床版を、1/2 に縮小したモデルを用いた。床版コンクリートの材料特性を表-1 に、供試体の種類、形状等を表-2 に示す。床版厚は一般部で 100mm、リブ部および桁上のハンチ部で 200mm である。また橋軸直角方向に一般部には P C 鋼線

表-1 コンクリートの材料特性

材齢(日)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	ヤング率 (MPa)	ポアソン比
7	48.4	—	—	—
28	58.9	—	—	—
134(開始前)	57.2	3.2	3.37×10^4	0.21
241(終了時)	57.3	3.7	3.41×10^4	0.19

表-2 供試体寸法、仕様

供試体名	パネル寸法 [mm]	P C 鋼線		締付けボルト		スタッド	
		使用鋼線	導入軸力	使用鋼材	導入軸力	寸法	橋軸方向間隔
Panel A, B	3400×1000×100 (リブ部 200)	プレテン(6本)	6本合計	SBPR930/1080 φ 15	55.9KN/本	φ 13×100	600 mm
Panel C, D		SWPR7B-9.5	210.7KN				300 mm
Panel E, F		ポステン(2本)	2本合計			φ 13×80	600 mm
Panel G, H		SWPR7B-12.7	181.3KN				600 mm

SWPR7B-9.5 を 6 本用いてプレテンション方式で、またリブ部には、導入力を大きくするため SWPR7B-12.7 を 2 本用いてポストテンション方式でプレストレスをそれぞれ導入した。静的載荷実験結果^{6), 7)}を踏まえて、このパネル 8 枚をそれぞれ接合面応力が 1.5MPa となるように締付けボルトを介して一体化した。接合面は、実橋施工においては接着剤塗布を前提としているが、本実験においては安全側の評価を得るために、鋼製型枠を脱型した状態ままのドライ継手としている。また実施工における締付けボルト周りは、弾性シール材等によるグラウトで防錆を施すが、供試体は締付け状態のままとした。

また図-2 に示すとおり、鋼桁と床版を結合するずれ止めは、頭付きスタッドを用い、床版ジベル孔に無収縮モルタルを注入施工することによって床版と鋼桁とを一体化させている。ここでは、ずれ止めの差異が床版の動的挙動に与える影響を確認するため、2 枚ごとに頭付きスタッドの配置や高さ等を変化させている。実験開始時の無収縮モルタルの圧縮強度は 55.9MPa であり、表-1 に示した床版の強度とほぼ等しい。また締付けボルトは SBPR930/1080 φ 15mm の高張力棒鋼を採用している。

2. 2 実験方法

(1) 載荷方法

本実験では、図-2 に示すように移動輪荷重が床版支間中央で橋軸方向に走行するように供試体を配置した。供試体は 6m 支間の実橋の 1/2 縮小模型を想定しているが、骨材は通常使用している最大寸法 20mm とした。また本実験に使用した 1/2 モデル供試体に載荷面の大きいジャンボタイヤ輪荷重を載荷したが、実物相当の応力を発生させるために必要な載荷荷重は、別途実施した F E M 解析より 52KN である。しかしながら、実験装置の制約上それよりはるかに大きい T 荷重相当の 98KN の載荷荷重で実験を開始した。載荷プログラムは図-3 に示すとおりである。98KN を基本として、設計荷重の 2 倍強の 127KN で損傷過程等を確認した後、20KN ごと荷重を漸増させた。また総走行回数は 33 万回である。

(2) 計測項目

各荷重での任意の走行回数で輪荷重装置を停止させ、支間中央部およびリブ部において静的載荷を行い、床版のたわみや床版の上下面ひずみ等の経時変化を計測した。また輪荷重走行中の床版各部の挙動についても確認するために、床版の結合材として用いている締付けボルトの軸力やスタッドに作用する応力等を計測した。

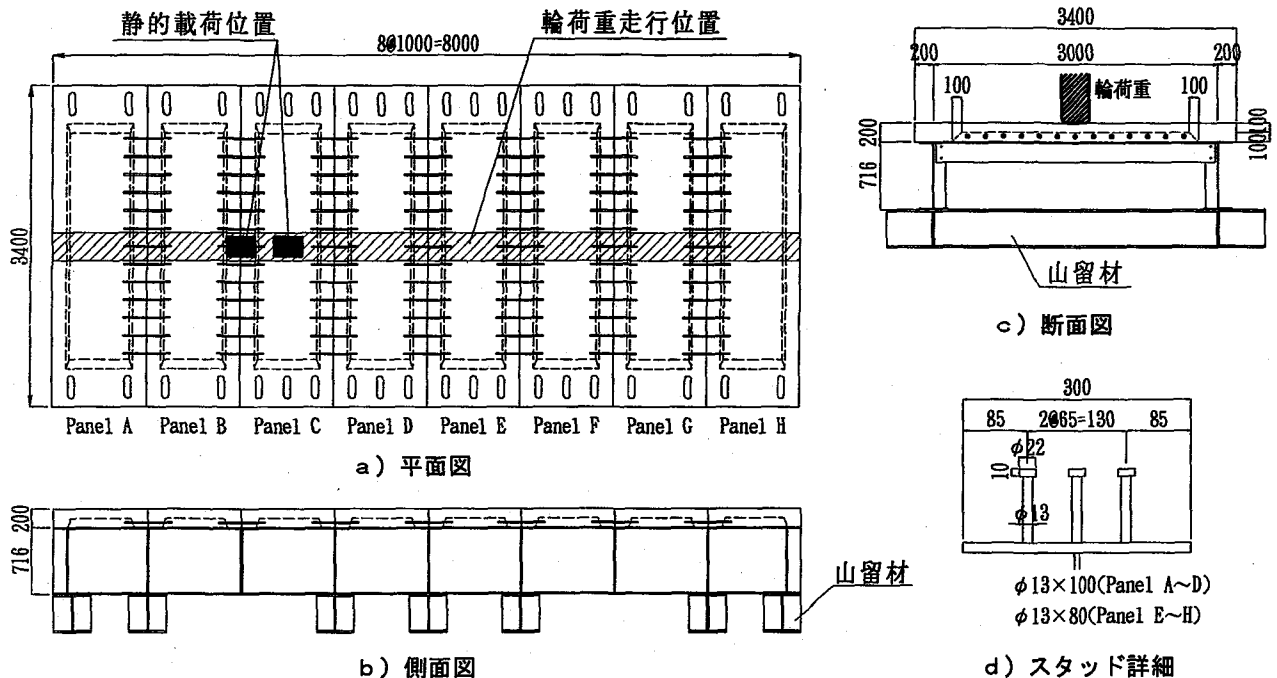


図-2 供試体配置図

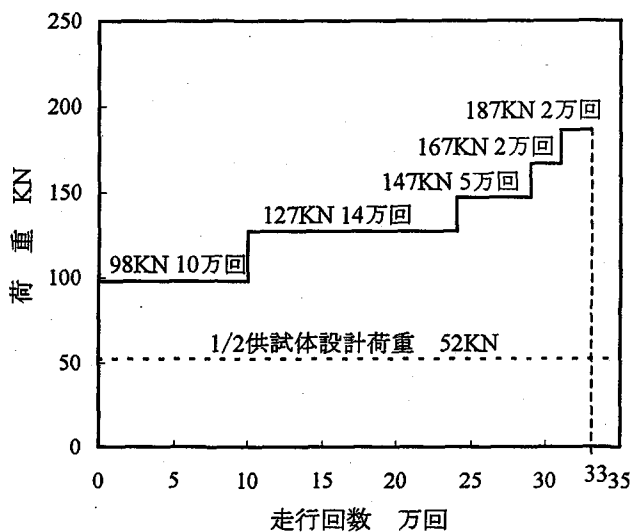


図-3 荷重プログラム

3. 結果と考察

3.1 静的荷重による経時変化

(1) 床版変位

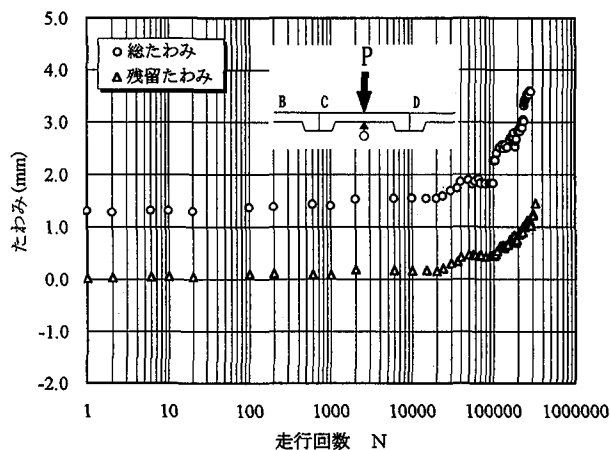
図-4に各輪荷重走行によるCパネル中央点での静的荷重時のたわみの経時変化を示す。同図a)の、△○印はそれぞれ荷重載荷前後のたわみであり、荷重走行の影響による残留たわみと、静的荷重によるたわみを重ね合わせた総たわみを意味している。また同図b)は総たわみと残留たわみの差から求められる弾性たわみであり、床版の復元力特性に関連した性質を示す弾性たわみをT荷重と同等の98kNに換算したもので、各荷重段階における劣化度合が明らかになる。同図中の計算値は、版厚を

一定とした仮定のもとで算出された床版と鋼桁が合成されている場合の立体解析による値である。ここで、 $h=10\text{cm}$ は一般部の版厚を、 $h=20\text{cm}$ はリブ部の版厚を示す。また、 $h=13.3\text{cm}$ はリブ部厚と一般部厚を、それぞれが占有する橋軸方向幅にて平均化した値を示している。同図より、実験開始時においてたわみは、 $h=13.3\text{cm}$ と 20cm の計算値の中間の値を示しており、床版の曲げに対するリブ部の寄与が確認できる。また荷重が127kNに上昇する10万回あたりからたわみが増加する傾向がみられ、 $h=13.3\text{cm}$ の計算値に漸近する様子が見える。すなわち、走行回数の増加につれて床版の曲げ剛性が低下する傾向が見られる。しかしながら、実験終了時においても弾性たわみは約1.8mmであり、開始時に比べても0.6mm程度の増加に留まっている。

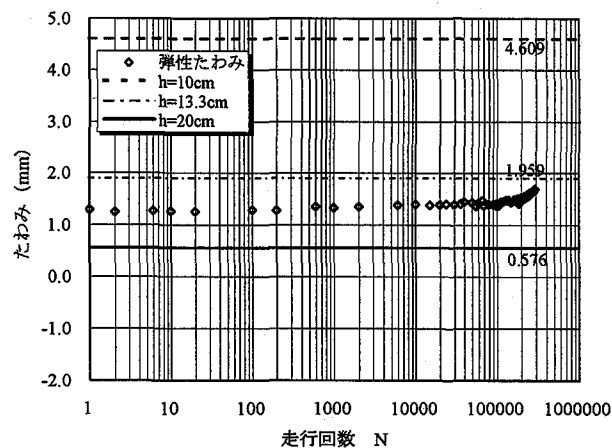
(2) 床版接合部の段差・開閉量

図-5に、Cパネル中央に静的荷重したときのC-Dパネル接合部下面の段差量(ずれ量)を示す。接合面の段差量は、接合面の鉛直方向のずれ量を簡易な治具を介してπ型変位計により計測したものである。同図より、荷重増加後にやや変化がみられるが、接合面がドライな状態にもかかわらずその量は微小であり、床版間の段差は全く生じていないといえる。また最終的に、1/2モデル供試体設計荷重の約3.6倍の荷重187kNが載荷されていることを考えると、せん断力に対する接合部のずれ抵抗は十分な機能を発揮しているといえる。

図-6には、パネルB-C間の接合部に静的荷重したときの接合部間のπ型変位計による下面の開閉量を示す。一般に、RC床版の損傷問題に見られるように下面の開閉量で問題となるのは、弾性開閉量すなわち活荷重載荷



a) 総たわみと残留たわみ



b) 弾性たわみ (98kN 換算)

図-4 床版のたわみ

時のひび割れ挙動である。すなわちRC床版の損傷過程においては、車両の走行による疲労作用でひび割れ面同士がこすり合い、ひび割れの幅や数を拡大し、床版の曲げ耐力が低下すると指摘されている⁹⁾。本実験においては、弾性開閉量は0.06~0.08mm程度であり、床版の損傷をもたらす程の量ではないといえる。

(3) 締付けボルトひずみ

図-7に締付けボルトに発生したひずみを示す。ここでは、パネルB-C接合部に載荷したときの載荷点直下の締付けボルトを代表点として示している。同図より実験終了時での締付けボルトの残留ひずみは、走行回数が増えるとともに圧縮側に変遷していき、最終的に約200 μ (軸方向応力にして約41MPa)となっている。このことは、実験を通して軸方向応力が41MPa程度減少していることを意味しており、その原因は繰り返し走行による衝撃、長期計測における温度変化の影響、締付けボルトのリラクセーション、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮などによるものと考えられる。これらの影響の大小についても、今後検討を行う必要がある。

また図-8には、実験に使用した全ボルトの初期導入軸力に対して残存する軸力の比率を示す。ここで、軸力

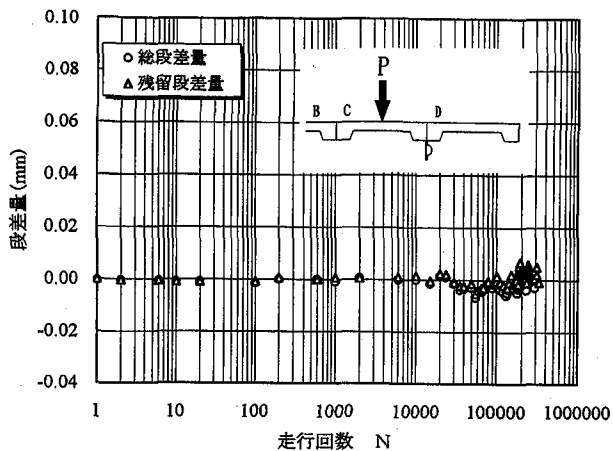
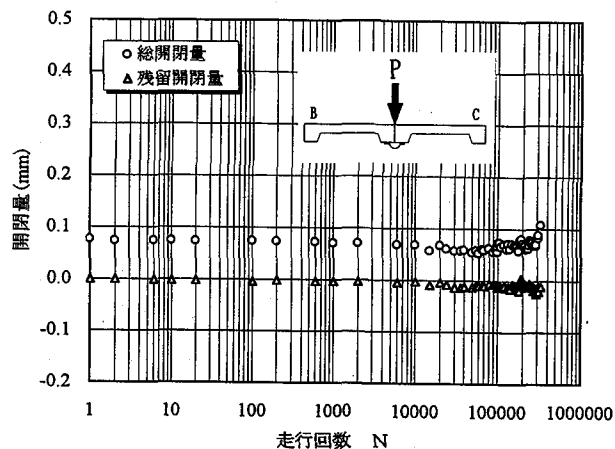
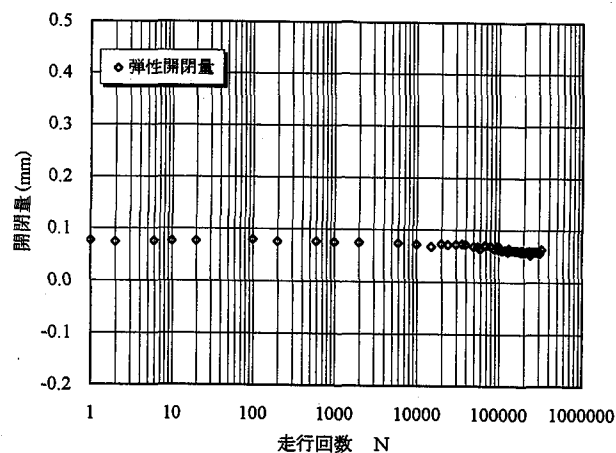


図-5 接合部下面の段差



a) 総開閉量と残留開閉量



b) 弾性開閉量 (98kN 換算)

図-6 接合部下面の開閉量

の変化は、締付け時から超音波軸力計⁸⁾により測定している。

2.2節で述べたように、本実験は設計荷重の2~4倍もの載荷荷重で実施していることや、前述したようにコンクリートのクリープなどの影響もあり、同図a)とb)を比較すれば、載荷荷重や走行回数が増加するにつれて若干軸力が減少していることがわかる。実験終了時(同図

b))においては最高 15%程度(軸力で 8.4kN, 接合面応力で 0.2MPa)の軸力減少がみられたが、大半は 10%以内におさまっている。

(4)スタッド応力

スタッドに生じる弾性ひずみ(98kN 換算)から得られた応力を図-9に示す。ここでは、パネルDに配置したスタッドを対象とした。同図 a)はスタッドの軸方向応力を示したものであり、スタッドの軸部に橋軸直角方向の

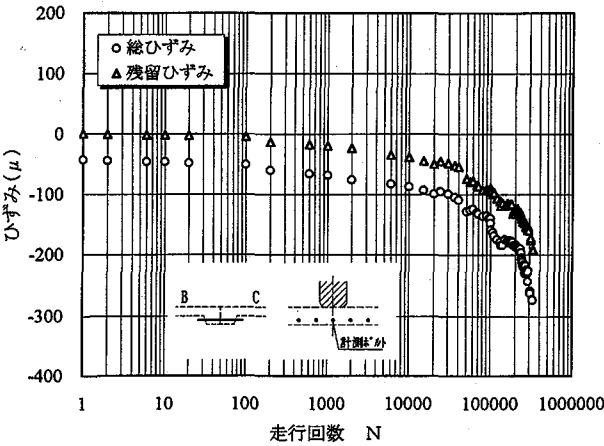
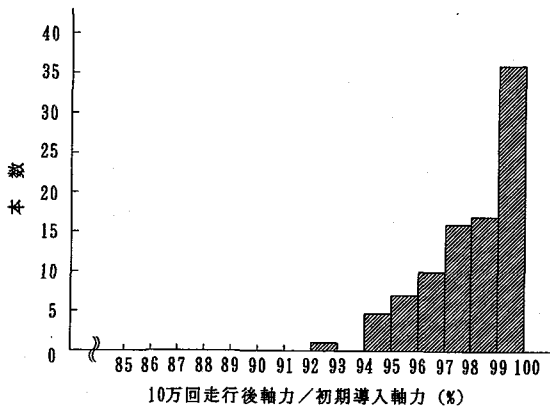
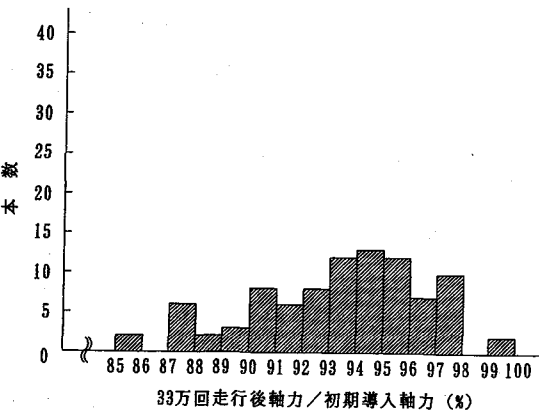


図-7 締付けボルトのひずみ



a) 98kN・累計 10 万回走行後



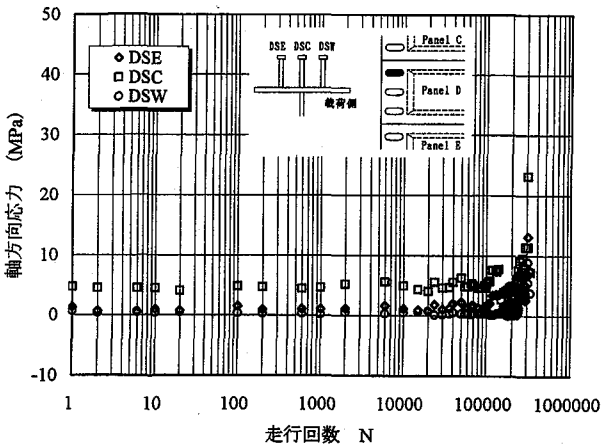
b) 187kN・累計 33 万回走行後

図-8 軸力変動量の頻度分布

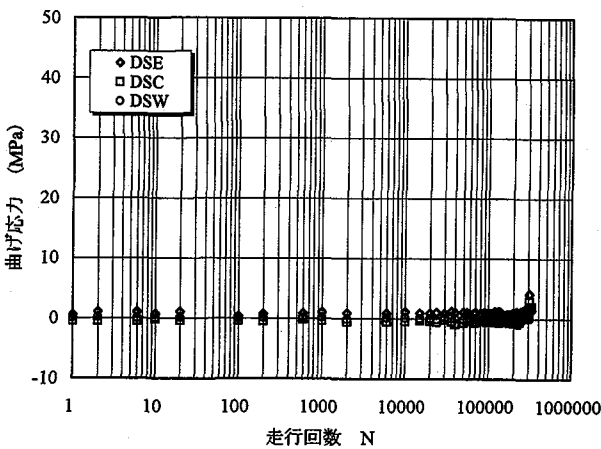
表裏に 2 枚貼り付けたひずみゲージの平均値から得たものである。同図より、スタッドに作用する軸方向応力は、腹板直上の DSC が他の 2 本より大きい。このような挙動は、筆者らが実施した長支間 PC 床版のずれ止めの引抜きに関する実験結果^{10), 11)}からも示されている。

また荷重が増加し始める 10 万回走行後から応力が 3 本とも増加する傾向を示していることがわかる。これは、荷重が増加するとともに鋼桁上断面の偶力も増加し、床版-鋼桁間のモルタルによる付着力が低下し、床版から鋼桁への直接の伝達がなくなり、その結果スタッド自身の分担率が増加したためと考えられる。しかしながら、最も大きい腹板直上の DSC でも最終的な最大応力は 23MPa 程度である。

一方、同図 b) は、2 枚のひずみゲージの差から求められた橋軸直角方向曲げ応力であるが、最終的に DSE と DSC で約 4MPa 程度の応力が生じているに留まっている。ここで、スタッドの軸方向応力および曲げ応力の許容値を 137MPa とすると、本実験において生じた橋軸直角方向曲げによる応力振幅は、ほとんどその 10% 程度以下の小さい値であり、疲労等の影響を受けるような応力振幅には至っていないと考えられる。



a) 軸方向応力



b) 曲げ応力

図-9 スタッドの応力 (98kN 換算)

3. 2 輪荷重の移動に伴う供試体の挙動

(1) 接合部の開閉量

図-10 に載荷荷重 98kN で 10 万回走行時での輪荷重の走行に伴う D-E パネル接合部の上下面の開閉量の動的変動を示す。同図より、輪荷重の走行に伴い、上面では 0.15mm 閉じる方へ、下面では 0.02mm 開く方へ接合部の上下面が動いている。本実験に用いた供試体床版の接合部は、ドライな状態で図心より下方に偏心させた締付けボルトにより結合された構造系となっている。したがって、基本的には RC 構造の単鉄筋断面と同様の性質を有すると考えられる。

RC 床版では、橋軸直角方向のひび割れが形成された後、輪荷重載荷が続くと、ひび割れ面に上下方向ならびに水平方向のこすり合わせ現象が生じ、ひび割れ幅が大きくなり、次第に橋軸方向への荷重分配効果が低下する。板構造から橋軸直角方向に梁を並べた状態へと変化し、耐荷力の低下をまねくといわれている⁹⁾。3.1(2)より、接合面に接着剤を塗布しないドライな状態であってもパネル間のずれはほとんど生じておらず、こすり合わせ現象によるスリット化の心配は無いといえる。しかしながら、図-10 より、接合部上面が 0.15mm 閉じる方へ動いていることがわかるが、このことは接合面同士が圧迫し合い、長期間のうちには接合面上部付近が角落ちする恐れがあることを意味している。したがって、この接合面の開閉作用による面としての力の伝達機能の低下や漏水による締付けボルトの腐食など、接合部の損傷を防止するために接着剤塗布による完全密着により版同士を一体化させ、接合面の開閉作用を制止させておくのが良いと考えられる。ただし、接着剤の使用にあたっては、経年劣化や開閉作用に対する耐久性を十分確認しておく必要がある。

(2) 締付けボルトのひずみ

載荷荷重 98kN の 10 万回走行後での輪荷重の走行に伴う締付けボルトの動的応答を図-11 に示す。パネル D-E 接合部のボルトに着目し、床版支間中央に位置し、

輪荷重直下のボルトを PC1、輪荷重の荷重分散による影響が床版内を 45° 分布で広がると仮定した場合のほぼ境界線付近のものを PC2、そして載荷位置より少し離れた位置を PC3 とした。同図より PC1 の最大ひずみ 65 μ は、PC2 および PC3 の約 2 倍近い値であり、輪荷重直下の締付けボルトに作用する応力が最も大きい。したがって、実橋では、自動車の走行レーンがほぼ限定された範囲内にあることを勘案すれば、輪荷重の分散角度の範囲内にあるボルトを代表的に点検すれば軸力管理も簡素化できる。

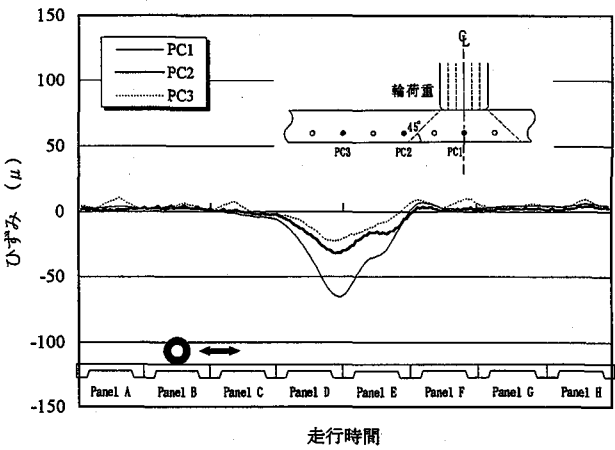


図-11 締付けボルトのひずみ

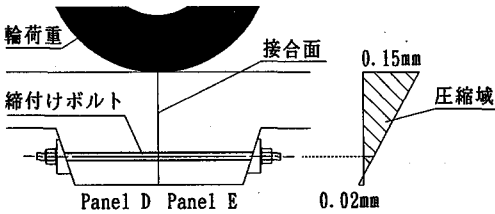


図-12 接合面のひずみ分布

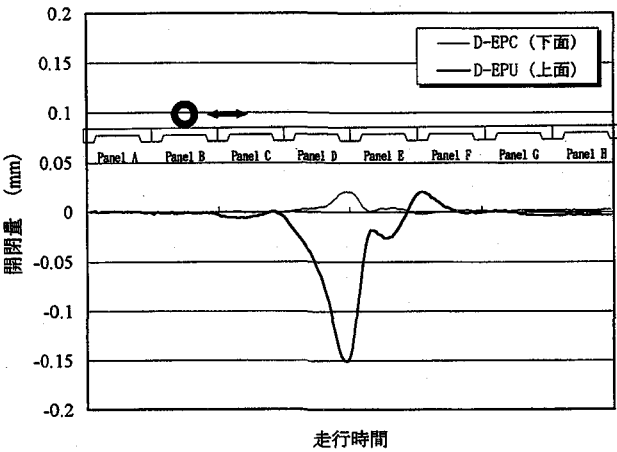


図-10 床版接合部上下面の開閉量

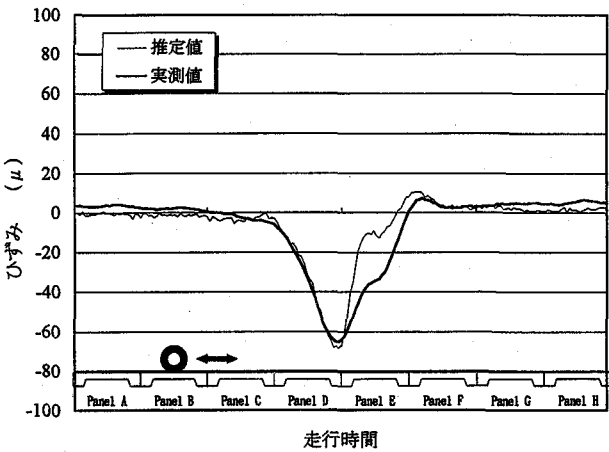


図-13 上下面開閉量によるひずみと推定値の比較

また同図や図-7に示したように、締付けボルトに圧縮ひずみが生じているが、この点については、図-10に示した上下面の開閉量から接合面のひずみ分布を想定すると図-12のようになり、締付けボルト位置が圧縮領域となることから理解できる。また同図より、締付けボルト位置の変位量を算定し、その値を締付けボルトの定着長で除してボルトのひずみを推定したと、PC1のひずみ実測値を比較すれば、互いによく似た性状を示していることがわかる(図-13参照)。

(3) スタッド応力

図-14にスタッドに生じる軸方向応力の動的挙動を示す。着目点は3.1(4)と同様にDパネルに配置されたスタッドとする。3.1(4)より、曲げ応力は軸方向応力に比べて小さい値であったので、ここでは軸方向応力に着目した。同図a)は載荷荷重98KNで10万回走行時の応力である。同図より、内側に配置されたDSWにはほとんど発生しておらず、また腹板直上に配置されたDSCがDSEの約2倍と卓越している。

同図b)は載荷荷重187KNで累計33万回走行時の応力である。3本とも98KN載荷時と比較すると10倍以上の

値となっている。またDSCに対するDSEの力の分担率が、10万回走行時の約45%から約67%へと増加していることを示しているが、これは、引抜き力が卓越するDSCのモルタルとの付着切れ、もしくはスタッド頭部付近にひび割れが発生したことにより、床版から鋼桁への力の伝達においてDSCの分担率が減少し、DSE側へ流れたためと考えられる。しかしながら、最大のDSCにおいても約54MPaの応力となっており設計荷重の約4倍載荷にもかかわらず比較的低い応力レベルに留まっている。また同図b)で25MPa程度応力が残留しているのは、ひずみゲージのイニシャル値から見て塑性によるものとは考え難く、モルタルのずれが何らかの形でスタッドの変形を残留させているものと思われる。

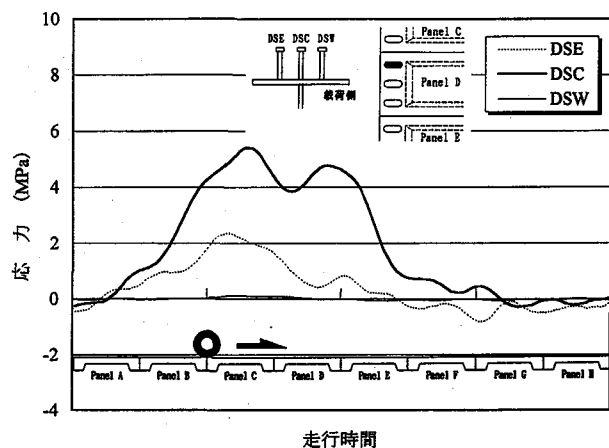
4. まとめ

本研究により、新形式リブ付きプレキャストPC床版が十分な疲労耐久性を有していることが確認できた。本床版の動的特性をまとめると以下の通りである。

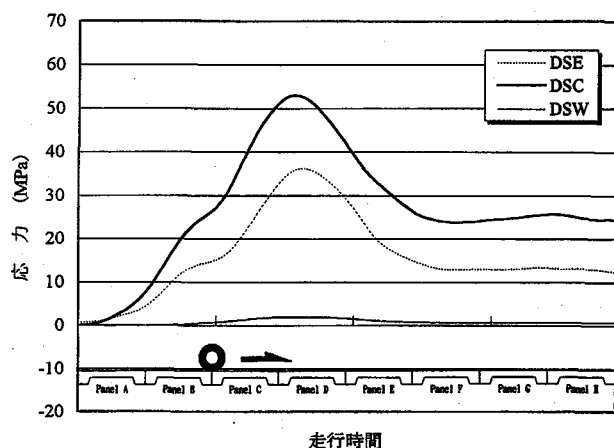
- ① 走行回数の増加に伴い、たわみは増加する傾向を示すが、急激に増大していないことから曲げ剛性の低下は小さいといえる。また弾性たわみは、平均化された版厚の計算値よりも小さいことから、リブ部が曲げに対して寄与していることがうかがえる。
- ② 大きな輪荷重の下でも床版接合部において段差は全く生じず、十分なせん断耐力を有しているといえる。
- ③ 締付けボルト軸力は、輪荷重直下のものほど応力変動が大きい結果を示しており、供用後の維持管理は走行レーンを考えて代表的なボルトを選択してもよいと考えられる。また、その初期導入軸力が損失する大きさは、最大で初期時の15%程度(接合面平均圧縮応力で0.2MPa)であり、接合面に段差が生じていないことを加味すると、パネル間の力の伝達機能には懸念される程の影響を及ぼさないといえる。
- ④ 床版と鋼桁とを結合している頭付きスタッドには引抜き力が発生する。特に、腹板直上に配置されたスタッドの引抜き力が他に比べ卓越する傾向を示すが、その量は98KN・累計10万回走行時で6MPa、187KN・累計33万回走行時でも54MPaに留まっており、スタッドによる接合形式が妥当であることが確認できた。

謝辞

本実験研究の計画・遂行にあたり、大阪工業大学および日本大学の学生の方々には実験実施にあたり、多大なるご協力を頂いた。これらの方々に対し、心より感謝の意を表します。



a) 98KN・累計10万回



b) 187KN・累計33万回

図-14 スタッドの応力

参考文献

- 1) 山本晃久, 大垣賀津雄, 作川孝一, 伊藤聡哉, 川尻克利, 福岡一幸: 連続合成2主桁橋「千鳥の沢川橋」のPC床版設計, 施工, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp.101~106, 1998.
- 2) 水口和之, 村山陽, 北山耕造, 山下茂樹: 東海大府高架橋におけるプレキャストPC床版の設計と施工, プレストレストコンクリート Vol.40, No.2, pp.19~30, 1998.
- 3) 真鍋英規, 林功治, 松井繁之: チャンネル形状プレキャストPC床版の開発, プレストレストコンクリート Vol.40, No.2, pp.36~44, 1998.
- 4) 袴田文雄, 松井繁之, 堀川都志雄, 江頭慶三, 小川久志: セン断キーを有する2主桁橋のプレキャスト床版の開発と設計・施工, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp.95~100, 1998.
- 5) 松井繁之, 角昌隆, 向井盛夫, 北山耕造: RCループ継手を有するプレキャストPC床版の移動載荷試験, プレストレストコンクリート技術協会第6回シンポジウム論文集, pp.149~154, 1996.
- 6) 八部順一, 大垣賀津雄, 作川孝一: 新形式プレキャストPC床版(ニューPPCスラブ)の開発, 川崎重工技報 132号, pp.61~66, 1997.
- 7) 星埜正明, 大垣賀津雄, 八部順一, 長瀬嘉理: 新形式プレキャストPC床版の実験的研究, 構造工学論文集 Vol.43, pp.1121~1130, 1997.
- 8) 星埜正明, 木村智洋, 山本晃久, 済藤英明, 森隆行, 堀川都志雄, 森園伍治: リブ付きプレキャストPC床版のボルト施工管理の合理化, 土木学会第54回年次学術講演会, 1999.
- 9) 松井繁之: 床版の技術開発—耐久性の向上, 施工合理化—, 橋梁と基礎 Vol.31, No.8, pp.84~94, 1997.
- 10) 大垣賀津雄, 八部順一, 済藤英明, 長井正嗣: 長支間PC床版を有する2主桁橋の鋼桁—床版接合部の挙動に着目した実験研究, 鋼構造論文集第5巻第20号, 1998.
- 11) 八部順一, 山本晃久, 大垣賀津雄, 済藤英明: 連続合成2主桁橋のずれ止め作用力の簡易計算法, 川崎重工技報 139号, pp.61~66, 1997.

(1999年9月17日受付)