

(43) PCa 床版のせん断連結継手の耐荷力および耐久性に関する実験的研究

Experimental Study on Strength and Durability of Shear Transmmission Joints of Precast Concrete Decks

松井 繁之*, 金 閔七**, 樋口 雅善***, 石井 英則****

Shigeyuki MATSUI, Yoonchil KIM, Masayoshi HIGUCHI and Hidenori ISHII

*工博, 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0078 吹田市山田丘 2-1)

**工修, 大阪大学大学院, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0078 吹田市山田丘 2-1)

*** 川田建設 (株) 技術部 技術課 (〒550-0014 大阪市西区堀江 1-22-19)

****川田建設 (株) 技術部 技術課 (〒550-0014 大阪市西区堀江 1-22-19)

Recently, development of precast decks and their joints is prosperous for labor-saving and high durability. The authors are interesting in developing a new jointing system. In this respect, a precast RC slab having unique jointing system which is called 'ST-Slabs' has been developed for steel bridges. In the new system, the precast panels are jointed by using studs and non-shrinkage mortar to transmit only shearing forces between the panels without longitudinal prestressing. For the new type of joint, the shear strength was verified under static load. Durability of the joint under alternating shear force was investigated. Consequently, the jointed panels seems to behave as an integrated deck slab under traffic loads with good load distribution. The results of this study shows that the new joint can be considered applicable for actual bridge decks.

Key words: precast slab, shear transmittion joint, durrability, wheel running test and alternating shear test

1. ま え が き

近年, 鋼橋の新設あるいは損傷床版の打換えにおいて, 現場施工の省力化と高耐久性の確保のために, プレキャスト床版 (以下, PCa 床版と呼ぶ) が多く採用される。PCa 床版としては, 基本パネルが PC 床版と RC 床版の 2 種があるが, いずれの構造においてもパネル相互間の連結に対して各種の継手が提案されている^{1)~2)}。

橋軸方向の連結方法は基本的に, 橋軸方向にプレストレスを導入する方法と, しない方法の 2 種類に大別できる。前者については, すでに数多くの実績があり, 設計基準類が作成されつつある^{3)~4)}。しかし, PC 鋼材を用いて縦締めを行う作業工程が全工程を長くし, 工費の増加も避けられないと指摘されている。また, 部分的に取替えが困難である。これに対し, 現場施工の省力化と工期短縮および経済性向上のために, 縦締めを省略した方法が提案されており, その代表例がループ継手である^{5)~6)}。

本研究では, PC 鋼材による縦締めを必要せず, 現場施工の省力化および急速施工が可能な PCa 床版の継手構造に頭付きスタッド等を用いた複合構造を考

案し, その実用性を評価するものである。この継手部分の概要は図-1 に示すように, 鋼板と頭つきスタッドを用いたもので, PCa 床版同士の連結部において主にせん断力伝達を考えた構造で, 橋軸方向の曲げモーメント伝達は設計上考慮しない。支持桁と床版との剛な連結を考えると, 継手間の開きは小さく, 曲げモーメントの伝達も実質は期待できる (以下, せん断連結継手床版あるいは ST 床版と呼ぶ)。これら

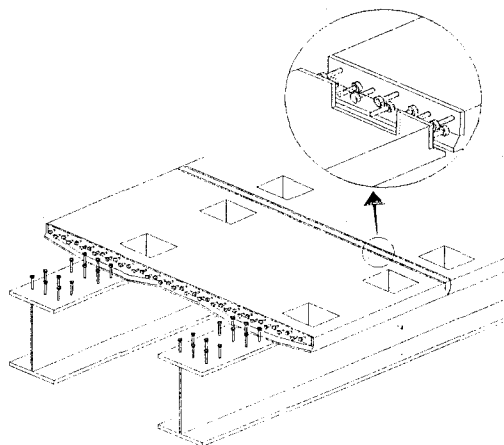
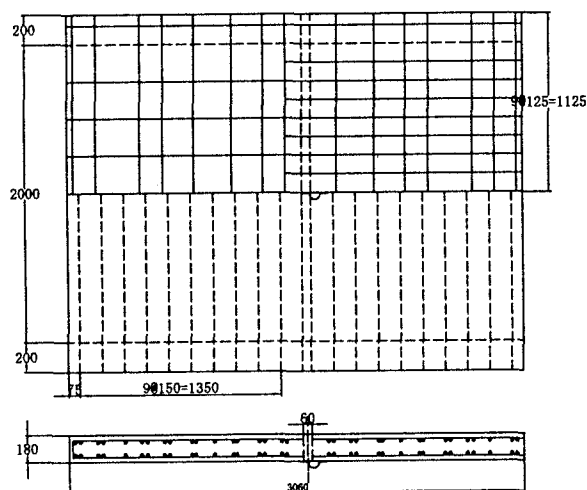


図-1 Pca 床版継手の概念図



図－2 PCa 床版の概要図

の継手を有する実物大 PCa 床版を作成し、継手部分において、板として連続性および耐久性を調べるため、輪荷重走行試験機によって疲労実験を行った。また、継手がない PCa 床版を用意し、継手の有無による版挙動の違いも調べた。この結果、輪荷重走行試験機による交番繰返しせん断力とねじりモーメントによって継手部分における貫通ひび割れは発生するが、ひび割れ幅は小さく実験終了時まで安定し、たわみおよび応力は安定しており、継手の性能と耐久性が確認できた。

加えて、継手部分の耐荷機構を明確に把握するため、継手部分の構造をはり状に取り出し、継手構造をパラメータとし変化させて、静的および動的実験も行った。この時、継手部分において純せん断力がかかる試験装置を用いて、はり供試体による耐荷力および耐久性実験を行った。

ここで、せん断連結継手を有する床版およびはり供試体の耐荷力および耐久性の結果を述べる。

2. PCa 床版供試体

2.1)PCa 床版の寸法

図－2 に PCa 床版供試体の概要を示す。床版パネル本体はプレテンションで橋軸直角方向にプレストレスした PCa 床版であり、橋軸方向は通常の RC 構造である。支間長は 200cm とし、橋軸方向 300 cm、床版厚さ 18cm、継手幅は 6cm とした。また、橋軸直角方向の PC 鋼材 (SWPR 7B) は $\phi 12.7\text{mm}$ を 15cm ピッチで配置し、有効プレストレス力は約 6Mpa である。また、継手なしの PCaNJ 供試体を用意し、継手を有する PCa 床版との比較を行った。また、供試体に用いたコンクリート、鉄筋の物性値を表－1 に示す。6cm 継手構造においてスタッドを用いたものとスタッドを鉄筋に替えて経済性を図ったものを各々 1 体ずつ用意した。

表－1 使用材料の物性値

項目		強度	弾性係数
コンクリート	母体	55 Mpa	34.3Gpa
	継手部	65 Mpa	35.9Gpa
鉄筋	D19	533 Mpa	184.2Gpa
	D16	519 Mpa	185.2Gpa
	D13	537 Mpa	184.2Gpa

2.2)継手構造の詳細

継手部分の鋼板と頭付きスタッドおよび継手背面でのアンカー鉄筋の配置詳細を図－3 に示す。この継手は PCa 床版端部にアンカー筋をつけた 12mm 厚の鋼板を取り付けて前面に頭付きスタッドを鋼板に千鳥形式に溶植したものである。床版の継手部分において輪荷重によって交番するせん断力が作用するため、スタッドを千鳥形式に溶植した。(ただし、図－3 は片側のみ示し、正面図の黒丸は相手側のスタッド位置を示す) 鋼板背面には $\phi 16 \times 350\text{mm}$ のアンカー筋を 2 段組に溶接し、床版部に埋め込んでいる。両パネル間で鋼板間の純間隔を 6cm にして、それに、無収縮モルタルを充填して一体化させた (ST-DECK-A と呼ぶ)。

図－3 (b) は先の頭付きスタッドに代わり、その位置に $\phi 19\text{mm}$ の穴をあけ、D16mm 配力鉄筋を通し、ねじり鉄筋にナットを取りつけたもので、経済性を図ったものである (ST-DECK-B と呼ぶ)。白丸の部分は配力鉄筋がアンカー筋を兼ねるもので、黒丸部ではアンカーを溶接している。よって、アンカー筋本数は ST-DECK-A と同量である。

2.3) 輪荷重走行試験機による実験方法及び測定項目

輪荷重走行試験機による疲労載荷荷重と回数は表－2 に示したとおりである。最終回数までの走行試験の途中、適宜静的測定を行った。測定時における輪荷重の載荷位置は床版のセンター (C)、南側 (S、センターから 75cm 離れた点) および北側 (N) である。測定項目は床版たわみ、継手部分の開き、各部の鉄筋とコンクリート表面のひずみの変化、ひび割れ幅およびひび割れ状況の観察である。

表－2 各 PCa 床版の輪荷重走行回数 (往復)

	ST-DECK-A	ST-DECK-B	PcaNJ
147.11kN			100,000
176.53kN	500,000	500,000	100,000
205.95kN			150,000

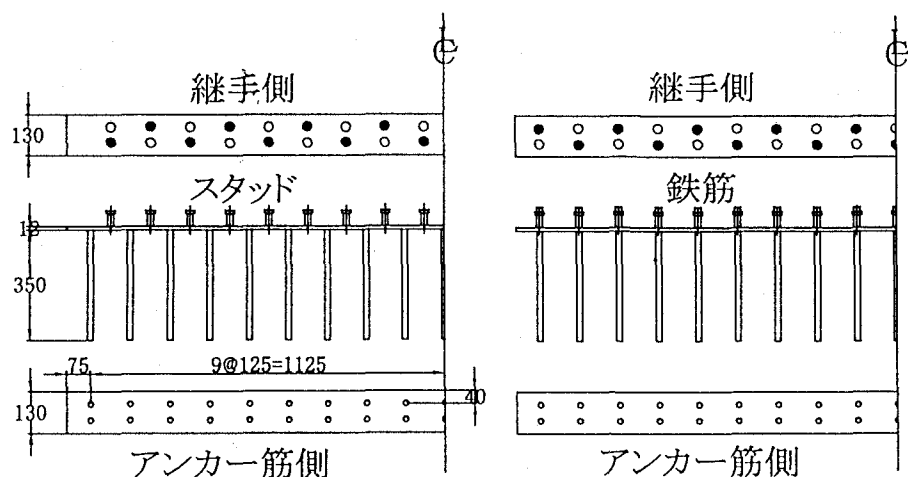


図 - 3(a)および図 - 3(b)せん断連結継手の構造詳細

2.4) 輪荷重走行試験機による動的試験結果及び考察

2.4.1 繰返し回数－たわみの関係

図 - 4 に各 PCa 床版中央の走行回数の増加に伴う活荷重たわみの変化を示した。継手があるものと継手がないものを同じ荷重で比較すると約 30～40%程度たわみが増加することがわかる。これは継手が損傷したためではなく、橋軸方向の鉄筋が連結していないための剛性低下が大きく異方性度が発現しているためである。継手ありの両供試体の活荷重たわみ変化は走行開始後すぐに安定し、50 万往復の後で 10%程度しか増加していない。外見上継手部に激しい損傷もないことと符号しており、継手は十分耐久性があると判断できる。経済性を図った ST-DECK-B 床版は ST-DECK-A 床版と比較すると全体的に約 10%程度のたわみが増加していることがわかる。これは ST-DECK-B 床版の鋼板において $\phi 19\text{mm}$ の穴をあけ、D16 の鉄筋を通したため、引張側鉄筋の伸び量が大きくなったためと考えられる。

2.4.2 各々PCa 床版の継手の挙動

図-5 は継手を有する PCa 床版の継手における連続性および継手の耐久性の確認のため、最終的に 50 万往復回時の南側 (S) に載荷した時の橋軸方向たわみ分布を示す。これから、本床版の継手はせん断力を

主に伝える継手であるが、狭い幅の継手であったため、継手部分において角折れなどの現象はまだ発生していないと判断できる。また、橋軸方向の主鉄筋ひずみ分布を図-6 に示した。この結果からは継手が存在すると載荷パネル側の荷重分担がおおきいことが分かる。しかし、非載荷側でも継手がない場合と同等以上のひずみを発生しており、荷重分配が悪いとは言い切れない。従って、スタッドを用いた本継手構造は橋軸方向にプレストレスしない PCa 床版の継手として充分、役割を果たしていると言える。

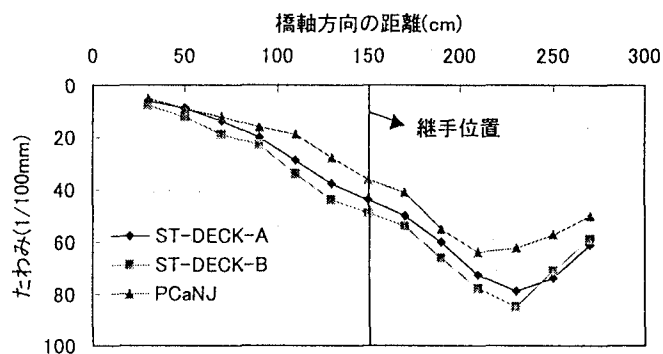


図 - 5 南側に載荷した場合の橋軸方向たわみ分布

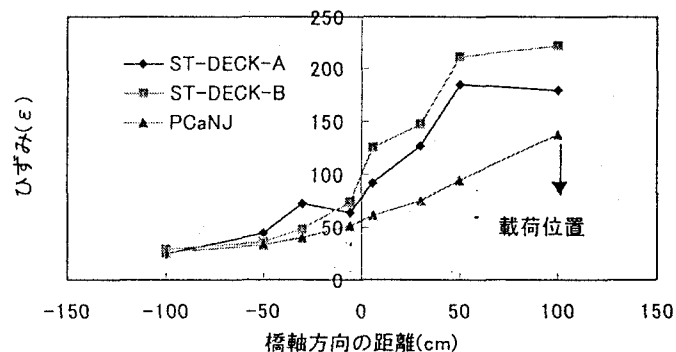


図 - 6 南側に載荷したときの主鉄筋ひずみ分布

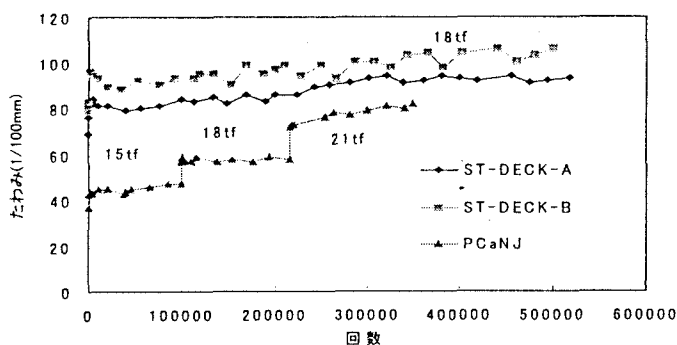


図 - 4 各供試体の繰返し回数 - たわみ関係

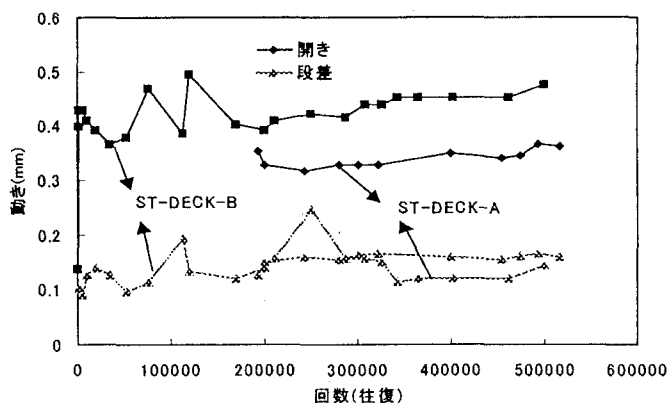


図-7 継手部分における段差および開きの比較

2.4.3 継手部のひび割れの動き

図-2に示した床版のセンター（ハッチング部分）の下面において、継手部の鋼板を挟んだ床版コンクリートと間詰モルタル間の動的変位を（180kN時の開きおよび段差）図-7に示す。ST-DECK-Aにおいて開きと段差が約0.35mmと0.1mm程度で安定していることがわかる。また、ST-DECK-Bにおいて開きと段差は50%程度大きい約0.45mmと0.15mm程度であるが、開きは若干増加傾向にある。0.1mm～0.15mmの段差量では貫通ひび割れがあったとしても十分なせん断剛性が残留しているといえ、50万往復後でもこの値を確保しており、本継手の耐久性が認められる。ただし、漏水しないことが原則であるので、本床版上面に防水工を設けることを前提としたい。

3. はり供試体によるせん断耐荷力

3.1 実験概要

輪荷重走行試験機による実験から継手の疲労耐久性は確認できた。しかし、継手部分における耐荷機構を明確に把握するため、継手部分の構造をはり状に取り出し、純せん断力がかかる試験装置を用いてはり供試体による耐荷力および耐久性の実験を行うことにした。一般に床版は支持桁に沿って固定されるため、設計荷重程度の輪荷重下では変形量は小さく、曲げ疲労破壊することは考えにくい。しかし、移動輪荷重によって継手の橋軸直角断面には交番せん断力が作用し、本継手ではこれによる疲労損傷の進行が分配されるためである。

3.2 はり供試体の継手詳細

継手供試体は床版での構造詳細と同様である。図-2に示した床版から幅50cmで取り出したものとした。そして、スタッドを50cm幅に3本が等間隔になるよう配置した。図-8(a)に示したようにST-BEAM-Aは頭付きスタッドであり、図-8(b)は鋼板に穴を開け、

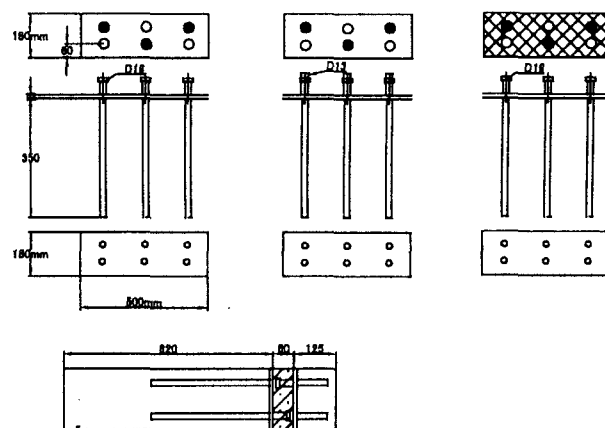


図-8 (a) (b) (c) 継手構造詳細

配力鉄筋を穴に通し、経済性を図ったものである。また、図-8(c)は図-8(a)と同様であるが、鋼板に12mmの縞鋼板を用いたものである。静的はり供試体の数は各タイプ毎に3体ずつ用意した。

3.3 継手における純せん断静的試験装置

実験装置は図-9に示したように、供試体の一部をPC鋼棒で締め付けて片持はりとし、その先端部位置で荷重をかけるが、片持部先端の回転を回転拘束装置で拘束することによって、供試体の継手中央部で曲げモーメントがゼロで、純せん断応力状態になるようにした⁷⁾。継手部がせん断破壊位置となるようにせん断スパン比($a/d=1.5$)を決めた。また、交番繰返し荷重をかける場合には回転拘束部材を下にも対称につければよい（点線部分）。これによると輪荷重走行試験に代る簡易試験にもなると考えられる。

3.4 試験結果

全てはり供試体のせん断耐荷力の結果を表-3に示した。各供試体は6cmの継手幅に斜めひび割れが発生すると同時に耐荷力を失った。

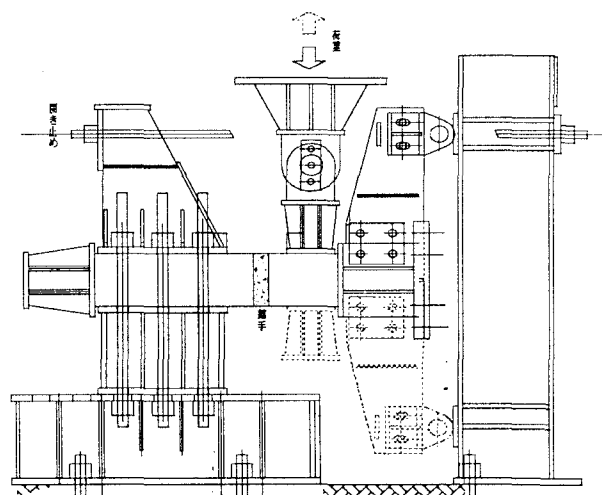


図-9 純せん断静的および動的試験装置

表-3 静的結果

タイプ	せん断耐力 (kN)	
ST-BEAM-A	143	148.1kN
	149	
	152	
ST-BEAM-B	74	77.18kN
	79	
	78	
ST-BEAM-C	215	215.75kN
	213	
	218	

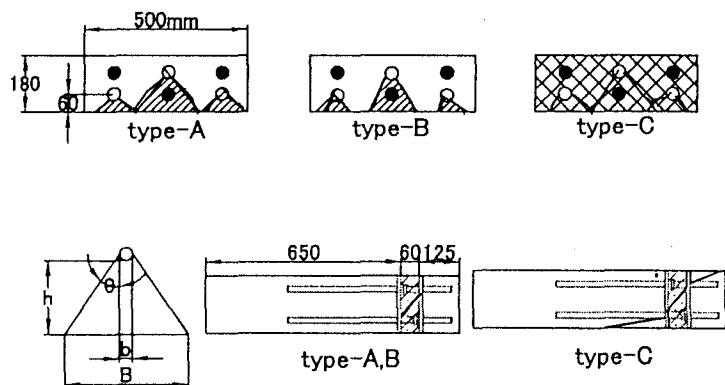


図-10 静的供試体の最終ひび割れ状況

継手部分のモルタルをはつとスタッド部分はコーン破壊が発生したことが分かった。図-10に全ての供試体の継手部正面の最終ひび割れ状況を示した。

このひび割れ発生機構から、全てのはり供試体の継手部におけるせん断耐力は、斜めひび割れが発生するとともに、スタッドにコーン破壊が起こる時の耐力と考えられる。

スタッド自身がせん断破壊する場合は終局せん断耐力⁹⁾は次のように表せる。

$$p_{cu} = 31.4As\sqrt{(h/d_s)f'_c} + \alpha \quad (1)$$

ここで、 P_{cu} :終局せん断耐力 (kN)、 As :スタッドの断面積 (mm²)、 h :スタッドの全高、 d_s :スタッドの軸部の直径、 f'_c :コンクリート円柱圧縮強度、 α :定数である。しかし、本継手ではスタッドの破断はなかったので、図-10のようにコンクリートのコーン破壊で破壊したと言える。ST-BEAM-A タイプの破壊はスタッドから 45° 角度として破壊すると観察した。また、ST-BEAM-B タイプはスタッドの破壊角度から 30° 程度であった。終局せん断耐力 S_{cr} は次のようにコーン破壊の投影面積にコンクリートの引張強度の積で表される。

$$\sum (2h_i \tan \theta + b_i) \cdot t \cdot \sigma_t \quad (2)$$

ここに、 h_i :スタッドまでの高さ、 b_i :コーン破壊する幅、 B :コーン破壊する全幅、 σ_t :モルタルの引張強度

t : 継手幅 (但し、斜め部分)

縞鋼板を用いた ST-BEAM-C タイプではせん断ひび割れは母床版部側で先に発生した。最終的に継手内の充填モルタルにひび割れが発生するが、終局破壊は床版部であり、アンカー鉄筋のダウエル効果で破壊耐力が決まると考えられる。従って、式(3)で表される鉄筋のダウエル力でせん断耐力が与えられる。

$$S_{cr} = 2 \cdot \sigma_{lmax} \cdot C_m \cdot B \quad (3)$$

ここに、 σ_{lmax} : 最大引張応力、 C_m : 鉄筋のかぶり厚さ、 B : はり幅

各供試体の算定結果を表-4に示す。算定式がやや危険側になるが、コーン破壊する角度を正確に計ることによって、精度を高めると考えられる。しかし、現算定式が実測値とほぼ一致することで、この算定式でもよいと考えられる。

表-4 算定式と実測値との比較

タイプ	実測値①	算定式②	①/②
ST-BEAM-A	148.1kN	161.9kN (2)式	0.91
ST-BEAM-B	77.18kN	82.2kN (2)式	0.94
ST-BEAM-C	215.75kN	215.9kN (3)式	1

4. はり供試体によるせん断連結継手の耐久性試験

4.1 純せん断力の交番繰返し耐久性試験

図-9に示した装置の下側の回転拘束具をつけ、交番繰返しせん断力による疲労実験を行った。継手の種類は静的と同様に ST-BEAM-A、ST-BEAM-B および ST-BEAM-C タイプで2体ずつ用意した。

支間 3m の単純支持の実橋床版を想定して、実橋床版に発生する曲げモーメントおよびせん断力と等価な断面力を与えるはり供試体の載荷荷重を求めた。

設計活荷重 9.8kN を載荷し、継手部分に最大せん断力が発生するよう FEM 解析を行った。その結果、最大せん断力は 30.4kN、曲げモーメントは 8.8kN・m となった⁹⁾。これらの断面力を発生する荷重を設計荷重として、20万回毎に設計荷重の1.5倍および2倍に荷重を増加し、総計60万回の繰返し載荷を行った。測定項目は継手部分の開き、段差、たわみおよびひび割れの観察であった。

4.2 交番繰返し疲労試験結果

図-11および図-12に各タイプごとに継手部分における開きおよび段差の関係を示す。せん断連結継手の開きの結果は輪荷重走行試験の結果と同様に ST-BEAM-A が ST-BEAM-B より小さい開きが発生していることがわかる。また、段差の結果も ST-BEAM-A

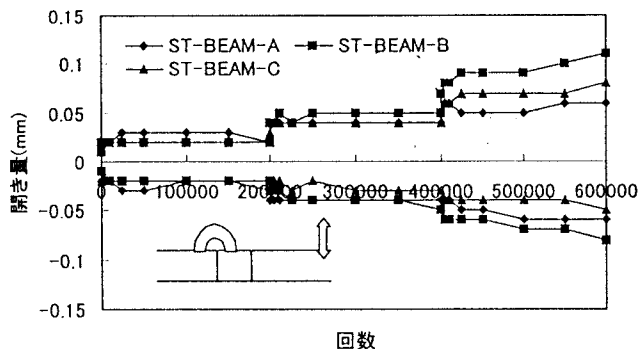


図-11 継手部分における荷重-開き関係

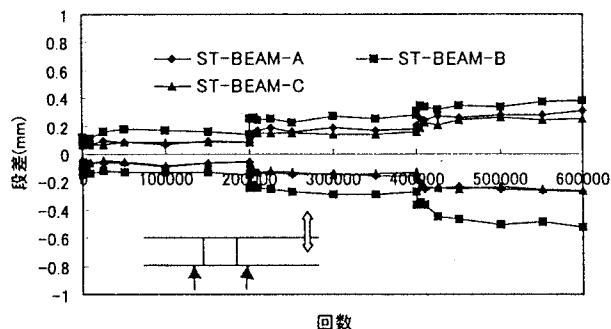


図-12 継手部分における荷重-段差関係

が若干 ST-BEAM-B より小さい結果を示した。純せん断による静的および動的の結果からは、縞鋼板を用いた C タイプ継手が最もよい結果を示した。しかし、ST-BEAM-A とあまり差は見られなかった。また、図-13 に最終ひび割れ状況を示す。全ての供試体は継手部分において貫通するひび割れが発生したが、ST-BEAM-C は継手部分の外側にひび割れが発生したが、縞鋼板の摩擦によって継手内部にひび割れは発生しなかった。従って、この簡易試験のひび割れ結果と輪荷重走行試験のひび割れ発生状況は一致することが分かった。

このはり供試体における継手の疲労試験の結果からは、各タイプ毎の回数と開きおよび段差は弾性的な挙動を示したが、設計荷重に対する静的耐荷力の比較すると、B タイプは約 2 倍、A タイプは約 3 倍、C タイプは約 5 倍に比例した性状を示したと言える。

実床版では板作用のため、差はさらに縮まると思われるが、安全側を考えて A タイプおよび C タイプが望ましいと考えられる。

6. まとめ

継手を有する PCa 床版を用いて連続性および耐久性に関する実験から得られた主な結果は以下のようである。

1) スタッドを用いたせん断連結継手を有する PCa 床版の耐久性および連続性はほぼ問題なく確保している。しかし、貫通ひび割れを完全に防止するのは困難であるので、防水工の設置が必ず必要である。

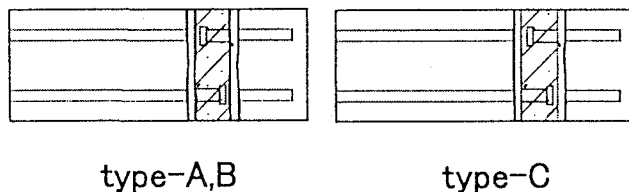


図-13 純せん断疲労実験による最終ひび割れ状況

2) 輪荷重走行試験で疲労荷重を行い、継手部に貫通ひび割れが発生していても、たわみおよび応力はなだらかに流れ、構造的には連続性を確保している。

3) 交番繰返しせん断実験のひび割れパターンは輪荷重走行試験のものと同様になる。

4) はり供試体を用いた純せん断実験から各タイプ供試体のせん断耐力および破壊機構を調べ、スタッドおよび縞鋼板の有効性を確認した。

【参考文献】

- 1) 松井, 中井, 竹中: プレストレスを導入する PCa 床版の継目部の連続性と耐荷力に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 34A, pp. 275-284, 1988. 3.
- 2) 栗原, 金崎, 金田, 松井: 橋軸方向にプレストレスをした RC プレキャスト床版の疲労性状, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 1365-1372, 1998. 3.
- 3) プレストレスト・コンクリート建設業協会: プレキャスト床版設計施工マニュアル, 1994.
- 4) プレストレスト・コンクリート建設業協会: プレキャスト床版設計施工マニュアル, 1994. 3
- 5) 浜田, 松尾, 山本: プレキャスト床版の合成構造継手の開発に関する研究, 第 1 回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 1998. 11
- 6) 佐々木, 八部, 太田他: RC ループ継手を有するプレキャスト PC 床版の輪荷重載荷実験, 第 1 回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, 1998. 11
- 7) 金, 松井, 江頭, 宮川: プレキャストコンクリート床版のせん断キー継手の耐荷力に関する実験的研究, JCI, 1999. 7
- 8) 松井, 平城: 限界状態設計法のための頭付きスタッドの静的・疲労強度に関する評価式, 第 2 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp163-168, 1989.
- 9) 松井, 金, 樋口, 石井: せん断継手を有するプレキャスト床版の開発, プレストレストコンクリート協会論文集, 1999.
10. (投稿中)