

せん断連結継手を有するプレキャスト床版の開発

～STスラブの開発～

Development of Pre-cast PC-Slabs with Shear Transmission Joint

石井 英則
Hidenori ISHII

川田建設㈱大阪支店技術部技術課

樋口 雅善
Masayoshi HIGUCHI

川田建設㈱大阪支店技術部技術課長

梶川 靖治
Yasuharu KAJIKAWA

大阪工業大学短期大学部土木工学科教授
(川田建設㈱顧問)

本報告で提案する「STスラブ」は、PC鋼材による縦締めを必要とせず、現場施工の省力化および急速施工が可能な高耐久性床版を目指すものであり、現場形成のせん断連結構造によりパネル相互間のせん断のみを確実に伝達できるような継手構造を持つプレキャストPC床版である。

本文は、「STスラブ」の実物大供試体による移動走行試験および梁供試体によるせん断試験結果の結果を報告するものであり、1998年（Vol.17）の続報である。

キーワード：せん断連結継手，耐久性，交番繰り返しせん断耐荷力試験

1. はじめに

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）が多く採用されている。しかし、PCa床版の継手には施工上多種の問題がある。

そこで、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、継手間詰め部間隔を狭小化したせん断連結継手を有するわが社独自のPCa床版を考案した。このPCa床版の構造は、**図1**に示すように鋼板と頭付きスタッドを用いたもので、橋軸方向の曲げモーメントの伝達は考慮せず、継手の段差解消と荷重分配のため、PCa床版の連結部の応力伝達は主にせん断力のみを考えた構造である（以下、STスラブ：Precast Slabs with Shear Transmission Jointと呼ぶ）。この継手は、鋼板に頭付きスタッドを千鳥状に溶接し、本体側にはアンカー筋を2段組に溶接して、PCa床版端部に取り付けたものである。

1998年（Vol.17）では、この継手を有する実物大PCa床版供試体を作成し、STスラブの力学特性、版としての連続性および耐久性を調べるために行った定点載荷による静的および疲労試験について報告した。

今回は、走行する輪荷重を本格的にシミュレートするために、実物大供試体を用いた輪荷重走行試験機による

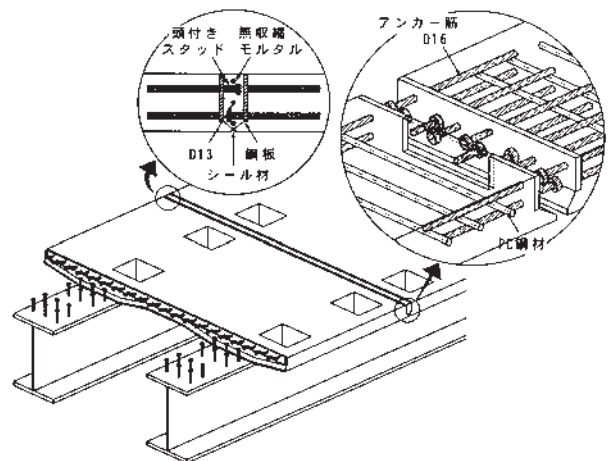


図1 STスラブ概要図

疲労試験結果および、継手構造のはり供試体による静的および疲労耐久性実験について報告する。

2. 輪荷重走行試験

走行する輪荷重を本格的にシミュレートするために実物大供試体を用いた輪荷重走行試験を行い、継手部の連続性および耐久性を確認した。

(1) PCa床版の寸法

図2にPCa床版の概要を示す。橋軸方向はRC構造であり、橋軸直角方向にプレテンション方式でプレストレス

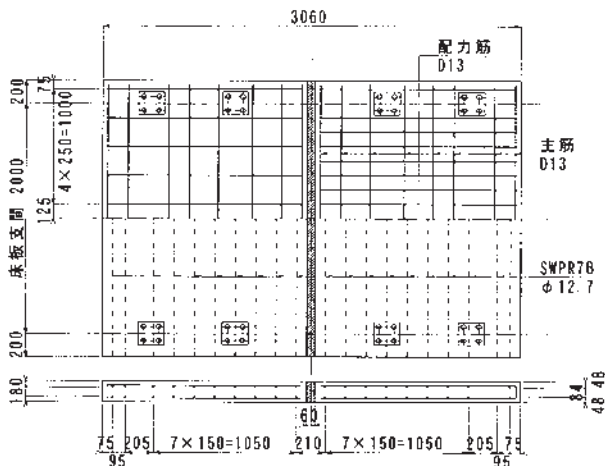


図2 PC床版概要

を与えた一方向PC床版である。支間は200cmであり、橋軸方向300cm、床版厚さ18cm、継手幅は6cmである。また、橋軸直角方向はPC鋼材(SWPR7B) 12.7mmを15cmピッチで配置し、有効プレストレスは約6MPaである。

(2) PC床版の寸法

図3に輪荷重走行試験に用いた継手詳細、表1に供試体種類を示す。定点載荷試験の結果より改良を加えた点は、以下の通りである。

鋼板厚の違いによる差異は見られなかったことより鋼板厚は $t = 12\text{mm}$ とした。

疲労性状の改善を図るため、頭付きスタッドとアンカー筋の溶接点をずらし、アンカー筋ピッチを12.5cmとし図2に示す配力筋と結束した。アンカー筋の埋込み長は、 $L = 20\text{cm}$ から $L = 35\text{cm}$ とした。

表1 輪荷重走行試験に用いた供試体

供試体	スタッド間隔	鋼板 ($t = 12\text{mm}$)
ST-A	19 × 125mm	千鳥溶接
ST-B	D16 × 125mm	穴あき鋼板を使用
ST-NJ	1枚版	

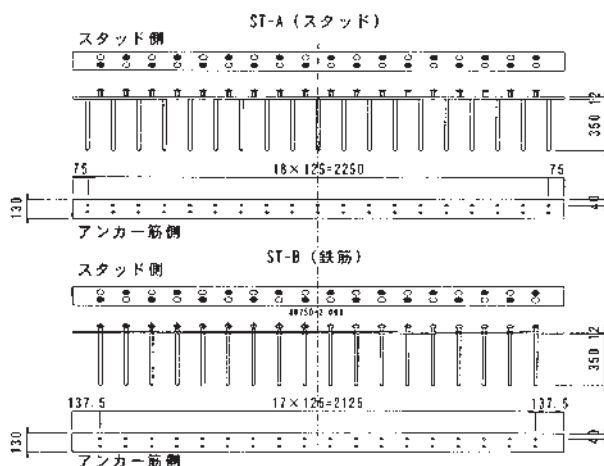


図3 継手部の構造詳細

(3) 実験方法および測定項目

輪荷重走行試験による疲労載荷重と回数は表2に示すとおりである。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60cm離れた点)および北側(N)である。測定項目は床版のたわみ、継手部の開き、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 各供試体の輪荷重走行回数(往復)

	ST-A	ST-B	ST-NJ
147.11kN			100 000
176.53kN	500 000	500 000	100 000
205.95kN			150 000

(4) 輪荷重走行試験による動的試験結果および考察

a) 繰り返し回数 - たわみの関係

図4に各供試体の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。ST-A、BとST-NJ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、異方性が発現したためと思われる。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合しており、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-BはST-A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-Bの鋼板において19mmの穴に、D16の鉄筋を通したため径の差により、ずれ止めとしての剛性が低下したためと考えられる。

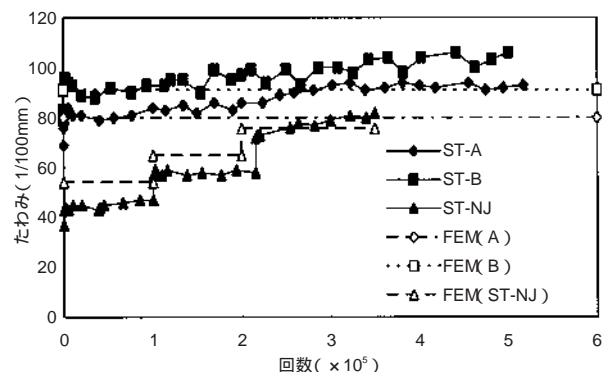


図4 繰り返し回数 - たわみの関係

b) PC床版の継手の挙動

図5は、STスラブの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、継手部分において角折れなどの現象は見られない。

また、橋軸方向の主鉄筋（橋軸直角方向筋）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ひずみが大きく、このひずみ差を設計に考慮しなければならない。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、荷重分配が行われていることがわかる。したがって、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。

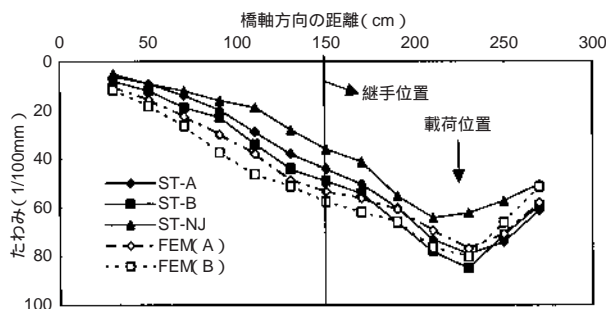


図5 たわみ分布

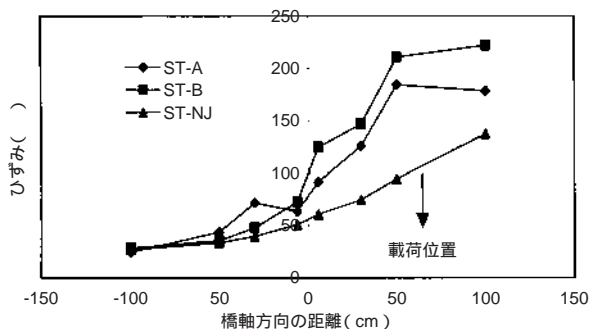


図6 主鉄筋ひずみ分布

c) 継手部のひび割れの動き

床版コンクリートと間詰めモルタル間の相対変位と継手部の動的変位を図7に示す。ST-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-Bにおいて開きと段差はST-Aより50%程度大きい約0.45mmと0.15mm程度である。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言え、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試験

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、

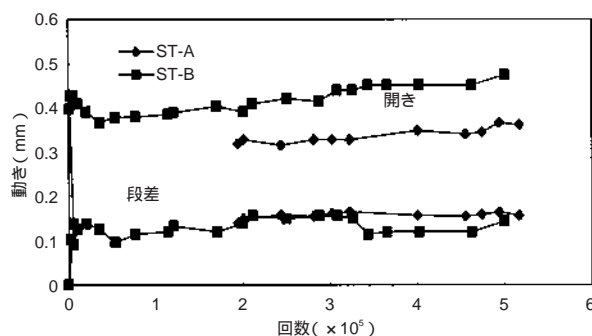


図7 継手部における段差および開きの関係

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。

(1) はり供試体の構造詳細

継手供試体は、図2に示した床版から幅50cmで取り出したものとした。供試体は、50cm幅に3本のスタッドが等間隔になるよう配置した。供試体を図8に示す。ST-BEAM-Aは頭付きスタッドであり、ST-BEAM-Bは鋼板に穴をあけ、配力鉄筋を穴に通し、経済性を図ったものである。また、ST-BEAM-CはST-BEAM-Aの鋼板を編鋼板とした。静的はり供試体の数は各タイプごとに3体ずつ用意した。

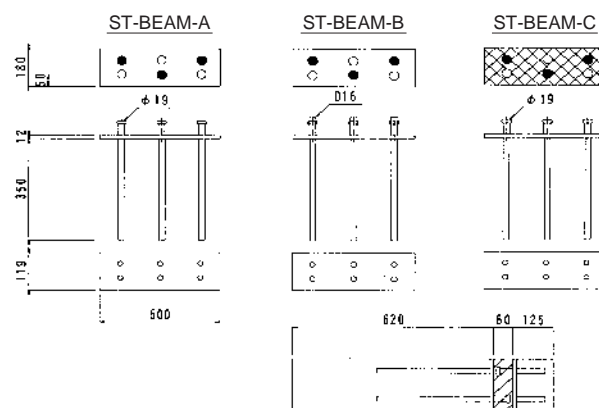


図8 はり試験供試体

(2) 継手における純せん断静的試験装置

実験装置は図9に示すように、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拘束する回転拘束装置を用いて、供試体の継手中央部で曲げモーメントがゼロかつ、純せん断応力状態となるようにした²⁾。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、交番繰り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た(点線部分)。これは、輪荷重走行試験に代わる簡易試験にもなると考えられる。

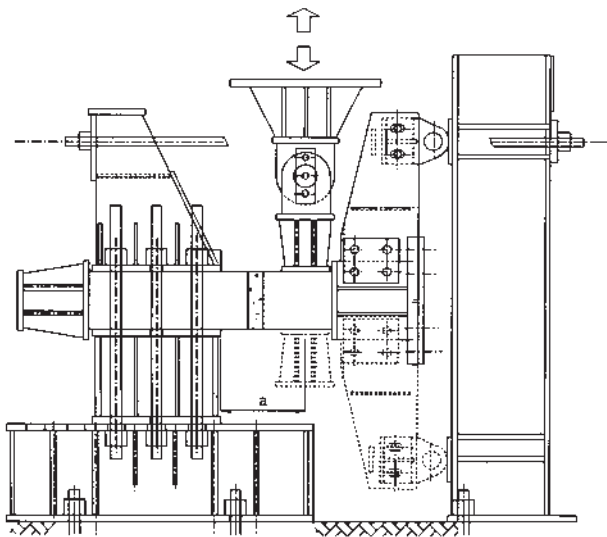


図9 純せん断静的および動的試験装置

(3) 試験結果

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の継手部に斜めひび割れが発生すると同時に耐荷力を失った。

継手部のモルタルをはつとスタッド部分にコーン破壊が発生したことがわかった。図16にすべての供試体の継手部正面の最終ひび割れ状況を示す。このひび割れ発生機構から、すべ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。

スタッドの終局せん断耐力³⁾は次のように表せる。

$$P_{cu} = 31.4 A_s \sqrt{(h/d_s) f'_c} + \quad (1)$$

ここで、 P_{cu} ：終局せん断耐荷力 (kN)

A_s ：スタッドの断面積 (mm²)

h ：スタッドの全高 (mm)

d_s ：スタッドの軸部の直径 (mm)

f'_c ：コンクリートの円柱圧縮強度 (N/mm²)

：定数

しかし、本継手ではスタッドの破断はなく、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。

表3 静的結果

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

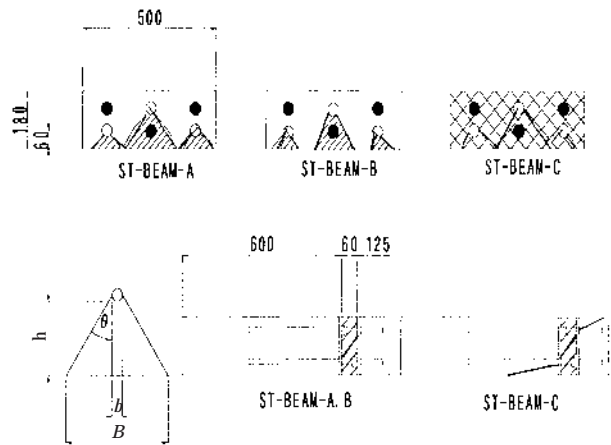


図10 静的供試体の最終ひび割れ状況

ST-BEAM-Aタイプの破壊は、スタッドから45°角度で破壊すると観察された。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。終局せん断耐荷力 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。

$$(2h_i \tan \theta + b_f) \cdot t \cdot f_t \quad (2)$$

ここで、 h_i ：スタッドまでの高さ (mm)

b_f ：コーン破壊する幅 (mm)

B ：コーン破壊する全幅 (mm)

f_t ：モルタルの引張強度 (N/mm²)

t ：継手幅 (mm)

編鋼板を用いたST-BEAM-Cタイプでは、せん断ひび割れは床版側で先に発生し、つづいて継手内の充填モルタルにひび割れが発生した。最終的には、床版部の破壊であった。このため床版部の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。したがって、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。

$$S_{cr} = 2 \cdot f_{tmax} \cdot C_m \cdot B \quad (3)$$

ここで、 f_{tmax} ：モルタルの引張強度 (N/mm²)

C_m ：鉄筋のかぶり厚さ (mm)

B ：はり幅 (mm)

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、精度を高められると考えられる。

図11、図12に各供試体の荷重 - たわみの関係、荷重 - 段差の関係を示す。ST-BEAM-Cは、ST-BEAM-Aと同様の頭付きスタッドを使用しているが、編鋼板を使用しているためせん断変形も小さくなっている。ST-BEAM-Bは、D16と他の供試体のスタッドφ19よりも径が小さく鋼板の穴φ19との差もあるが、たわみ量はほぼ同じであった。しかし、早期に破壊してしまった。

表4 算定式と実測値の比較

タイプ	実測値	算定式	/
ST-BEAM-A	148.1kN	161.9kN (2)式より	0.91
ST-BEAM-B	77.18kN	82.2kN (2)式より	0.94
ST-BEAM-C	215.75kN	215.9kN (3)式より	1.00

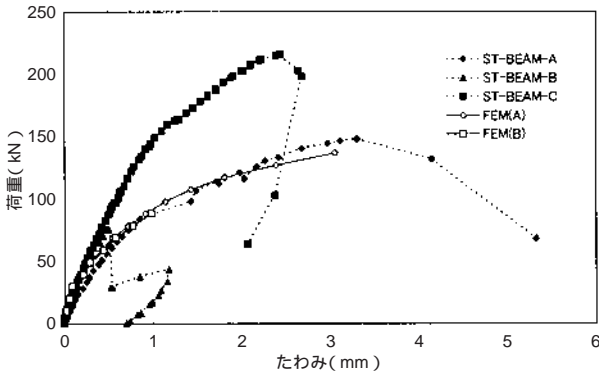


図11 各供試体の荷重 - たわみの関係

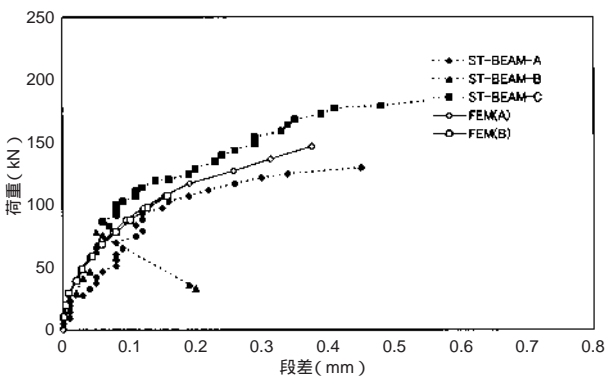


図12 各供試体の荷重 - 段差の関係

また、継手部の終局せん断耐力は、コーン破壊により決定されるため、適切な鉄筋で補強することが考えられた。そこで、図13に示すような2種類の補強鉄筋をST-BEAM-Bに用い再試験を行った。表5に改良型のせん断耐力結果を示す。

その結果、せん断終局耐力が約20kN増加し、若干であるが段差の減少も見られ、補強鉄筋の有効性が確認できた。

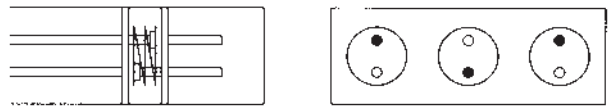
(4) はり供試体によるせん断連結継手の耐久性試験

a) 純せん断による交番繰り返し継手の耐久性試験

図9に示した装置の下側の回転拘束具をつけ、交番繰り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。

補強鉄筋-1



補強鉄筋-2

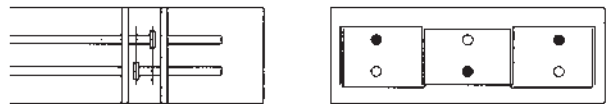


図13 補強筋配置図

表5 補強後せん断耐力

	せん断耐力
補強筋-1	98kN
補強筋-2	108kN

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解析にて算出した。その結果、最大せん断力は30.4kN、曲げモーメントは8.8 kN・mとなり、この断面力を発生する荷重を設計荷重とした。20万回ごとに設計荷重の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。

b) 交番繰り返し疲労試験結果

図14および図15に各タイプごとの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。

図16に最終ひび割れ状況を示す。すべ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。

はり供試体の疲労試験結果からは、各タイプごとの回数と開きおよび段差は弾性的な挙動を示したが、設計荷重時の静的測定値を比較すると、Bタイプは約2倍、Aタイプは約3倍、Cタイプは約5倍になっていた。

4. 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。

スタッドを用いたせん断連結継手を有するPCa床版

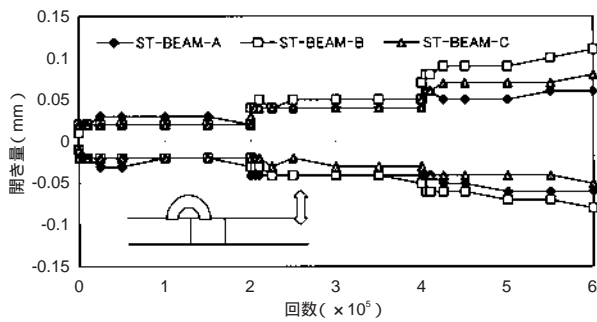


図14 継手部における荷重 - 開きの関係

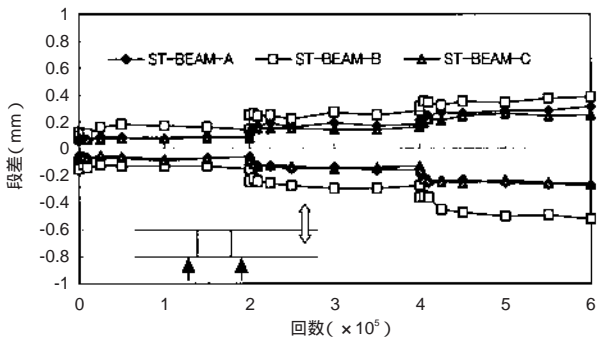


図15 継手部における荷重 - 段差の関係

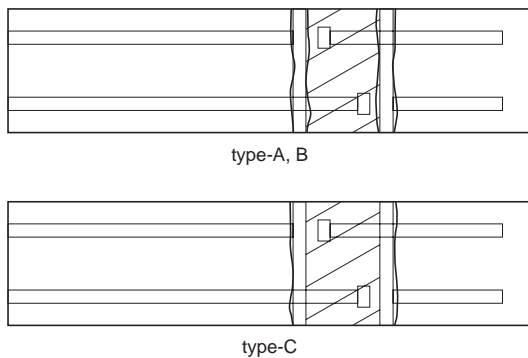


図16 最終ひび割れ状況

の疲労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、継手部において貫通ひび割れが発生するので、防水工の設置が必要である。

交番繰り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。

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が確認できた。

せん断耐力を向上させるためには、下記の対策が有効であることが検証できた。

- a. スタッドを取り巻く補強鉄筋を配置し、コンクリート破壊耐力を向上させる。ただし補強筋-1は施工が煩雑になるため、補強筋-2の方が望ましいと思われる。
- b. 縞鋼板を使用し、せん断力の分散を図る。

今後、構造および経済性の観点から、縞鋼板 + 貫通鉄筋の組み合わせについても検証したい。

最後に、STスラブの開発にあたり、多大なるご指導を賜った大阪大学 松井繁之教授ならびに実験開発にご尽力いただいた各位に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 樋口・梶川・新井：せん断継手を有するプレキャスト床版の開発，川田技報，Vol.17. 1998.
- 2) 金・松井・江頭・宮川：プレキャスト床版せん断キー継手の耐荷力に関する実験的研究，JCI, 1999.7.
- 3) 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，1989, pp.163-168.
- 4) 梶川・松川・児島・渡辺・大石：頭付きスタッドを連結継手に用いたプレキャスト床版の静的挙動，第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，1995.11, pp. 203-208.
- 5) 松井・金・樋口・高谷：頭付きスタッドを連結継手に用いたプレキャスト床版の耐久性に関する研究，平成10年土木学会関西支部年次学術講演会，1998.5.
- 6) 松井・金・樋口・石井：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，第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集，1999.11.
- 7) 松井・金・樋口・石井：頭付きスタッドを用いたせん断連結継手を有するPCa床版の開発研究，構造工学論文集，Vol.46A, 2000.3.