

論文 プレキャスト床版の接合界面形状に着目したせん断耐荷挙動に関する実験的検討

新沼 拓也*1・池野 勝哉*2・岩城 一郎*3

要旨: プレキャスト（以下、PCaと称す）床版の接合界面（直線形状、半円形状）に着目したせん断試験を実施した。PCa床版の接合に用いた間詰材は、圧縮強度 100N/mm^2 クラスの高強度繊維補強モルタルである。試験の結果、接合界面が直線形状の場合、荷重初期からせん断ひび割れが接合界面に沿って発生した。一方、接合界面が半円形状の場合、複数の半円形状界面の頂点を連ねる PCa 床版側にせん断ひび割れが生じ、直線形状と比べて使用時荷重レベルのひび割れ幅も小さく、降伏荷重以降の荷重低下が少ない傾向が認められた。

キーワード: プレキャスト床版, 接合界面形状, 高強度繊維補強モルタル, せん断ひび割れ

1. はじめに

近年、老朽化した道路床版の大規模更新事業が進められており、既設鋼橋の RC 床版からプレストレスを導入した PCa 床版への取替工事が行われている。PCa 床版の接合部には、従来のループ継手よりも接合幅が狭く、かつ薄い床版にも適用できる継手として、PCa 床版から突出する橋軸方向鉄筋の先端を拡張し、鉄筋の付着力と先端部の支圧力に期待した継手構造^{2,3)}が数多く開発されている。接合部の間詰材には、一般に収縮補償用の膨張コンクリートが用いられているが、近年、鋼繊維を混入した常温硬化型の超高強度繊維補強コンクリート⁴⁾が開発され、圧縮強度 150N/mm^2 を超える間詰材の高い付着力により、接合幅の更なる縮小が可能となってきた。しかし、超高強度繊維補強コンクリートは比較的高価な材料であると同時に、セメント粉体量が多いことから自己収縮も大きく、また硬化特性が温度環境の影響を敏感に受け易いことなど、実施工においての課題点が指摘できる。水野ら⁵⁾は上記の課題を解決するため、セメント粉体量を減らした圧縮強度 100N/mm^2 クラスの常温硬化型の高強度繊維補強モルタルを開発し、施工性と経済性に配慮した間詰材を提案している。

本研究では、圧縮強度 100N/mm^2 クラスの高強度繊維補強モルタルを間詰材とした PCa 床版の合理的な接合界面の形状に着目している。すなわち、間詰材の使用量を極力減らし、更なる材料コストの削減と施工時間の短縮を図ることが目的である。本稿では、PCa 床版の接合部にせん断力を作用させた静的せん断試験から、接合部のせん断耐荷挙動や接合界面のひび割れについて考察した。また、一部のケースでは定点疲労試験を行い、その後続けて静的せん断試験を実施することで、荷重-変位関係に与える影響について検討した。

2. 本研究で着目する接合界面

本研究で着目する接合界面を図-1 に示す。図-1(a)は、接合界面に半円形状の凹部を設けて、そこに対面する鉄筋先端を収めた合理的な界面形状である。接合界面を従来の直線形状から半円形状に変更することで、間詰材の使用量が約 25%削減される。また、本研究では間詰材に圧縮強度 100N/mm^2 クラスの高強度繊維補強モルタルを用いると同時に、橋軸方向の鉄筋にはネジ節鉄筋を採用している。これは、鉄筋の単位面積当りの突起面積比である支圧面積係数 BA ⁶⁾から説明されるように、波節よりもネジ節の方が高強度繊維補強モルタルとの付着特性に優れているためである。波節およびネジ節鉄筋の支圧面積係数の比較を図-2 に示す。

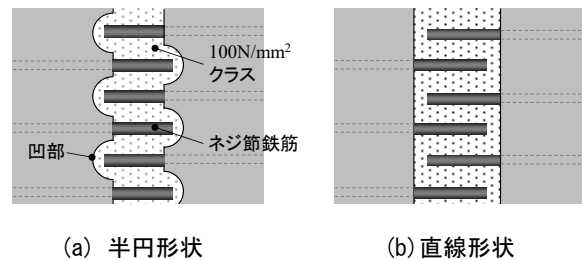


図-1 本研究で着目する接合界面

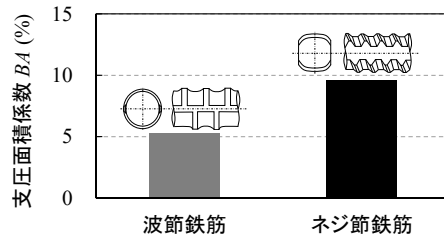


図-2 支圧面積係数の比較

*1 五洋建設（株）技術研究所 土木技術開発部 修士（正会員）

*2 五洋建設（株）技術研究所 土木技術開発部 博士（正会員）

*3 日本大学 工学部土木工学科教授 工博（正会員）

3. 床版接合部のせん断試験概要

3.1 試験体諸元および試験ケース

床版試験体の概要を図-3に示す。試験体は長さ2,400mm、奥行き670mm、厚さ220mmとし、左右の2箇所と同様の接合部を設けた。橋軸方向（長手）には、ネジ節鉄筋D19（エポキシ樹脂塗装）を上下ともに125mmピッチで5本ずつ、橋軸直角方向（短手）に波節鉄筋D13を125mmピッチで配置した。なお、本研究では接合部のせん断破壊が先行するように、接合部以外の箇所に曲げ補強筋を追加した。鉄筋の材質は全てSD345である。PCa床版には接合界面で目荒らし処理を施した鉛直打継面を設け、各ケースの接合部に後から目標圧縮強度100N/mm²の高強度繊維補強モルタルを充填して一体化した。なお、本実験では接合部の平面的な界面形状に着目しているため、接合界面にはシアキーを設けていない。

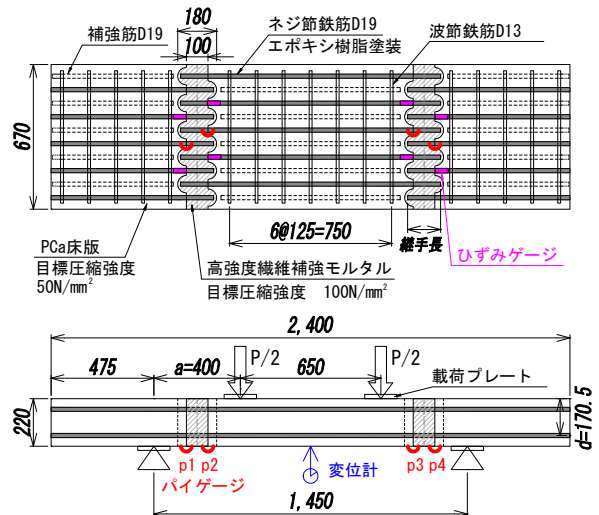


図-3 床版試験体（半円形）の概要 [単位:mm]

試験ケースを表-1に示す。接合界面（半円形状、直線形状）、継手長（6Dおよび8D、D：鉄筋径）や定着具（プレートナット）の有無をパラメータとした。ここで、ケース名の添字 s は静的せん断試験、f は定点疲労試験を実施したケースを表している。試験体の製作状況を写真-1に示す。

表-1 試験ケース一覧

ケース名	界面	継手長	定着具	せん断試験
Case1-s	半円形状	6D	あり	静的
Case1-f				定点疲労→静的
Case2-s	直線形状		静的	
Case3-s	半円形状		なし	静的
Case4-s		静的		
Case4-f		定点疲労→静的		

3.2 使用材料

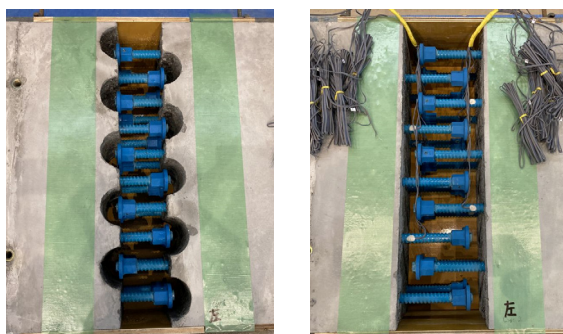
間詰材として使用した高強度繊維補強モルタル⁵⁾の配合を表-2に示す。高強度繊維補強モルタルは、セメント、シリカフューム、細骨材、高炉スラグ微粉末などから構成されたプレミックス材に水および高性能 AE 減水剤を投入し、鋼繊維（直径0.16mm、長さ13mm、引張強度2,750N/mm²以上）を体積比2.0%で混入した。練り混ぜには400lのパン型モルタルミキサーを用い、フロー試験「JIS R 5201：2015セメントの物理試験法」によってフレッシュ性状（フロー値240-310mm）を管理した。高強度繊維補強モルタルは自己充填性を有しているため、流し込み速度を一定に保ちながら橋軸直角方向（短手）に充填した。鉄筋の機械的性質を表-3に、PCa床版（普

表-2 高強度繊維補強モルタルの配合

単位量 [kg/m ³]			
練り混ぜ水	プレミックス	高性能 AE 減水剤	鋼繊維
224.1	2082.1	6.6	157.0

表-3 鉄筋(SD345)の機械的性質

名称	降伏点 f_y [N/mm ²]	引張強度 f_t [N/mm ²]	弾性係数 E [kN/mm ²]	備考
ネジ節鉄筋	404	566	188	D19
波節鉄筋	378	555	176	D13



(a) 半円形状 (b) 直線形状

写真-1 試験体の製作状況（定着具ありの場合）

表-4 床版および間詰材の材料試験値

名称	圧縮強度 f_c [N/mm ²]	割裂引張強度 f_t [N/mm ²]	弾性係数 E [kN/mm ²]
PCa床版	58.8	4.1	40.3
間詰材	126.1	16.2	42.6

通コンクリート) および間詰材 (高強度繊維補強モルタル) の加力日前後で平均した材料試験値を表-4 に示す。

3.3 荷重方法および計測項目

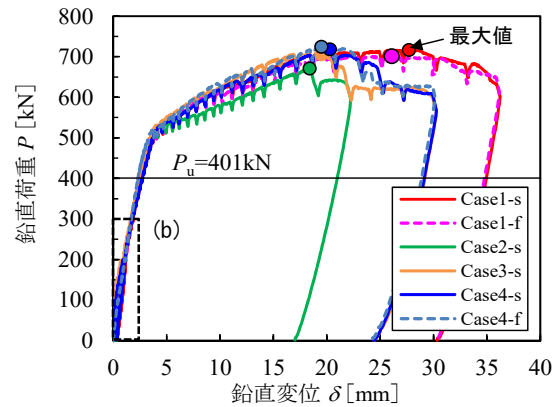
せん断試験は支承点間隔を 1,450mm, 荷重点間隔を 650mm とし ($a/d=2.35$), 4 点荷重により 2 箇所 of 接合部にせん断力を作用させた。静的せん断試験は鉛直ジャッキ (最大 1,000kN) により使用時荷重レベルで 10 回の繰返し荷重した後, 一方向の漸増荷重を行った。ここで, 使用時荷重は道路橋床版の T 荷重 (片側 100kN) を参考とし, 接合部が 2 箇所あるためジャッキ荷重で 200kN とした。定点疲労試験は, 試験機の都合上, 荷重 300kN を振動数 5Hz で計 400 万回荷重し, その後一方向の漸増荷重を行った。ここで, 荷重 300kN は二羽式⁷⁾で算定したせん断耐力の計算値 ($P_u=401\text{kN}$) の約 75% に相当する。なお, 静的せん断試験と定点疲労試験は試験機が異なり, 荷重治具等の違いにより実験条件が両者で完全に一致していないことを付記する。計測項目は, 鉛直ジャッキに取付けた荷重計, 試験体中央での鉛直変位, 鉄筋のひずみ, そしてパイゲージ (奥行き中央) を用いた床版下面における接合界面のひび割れ挙動である。

4. 試験結果および考察

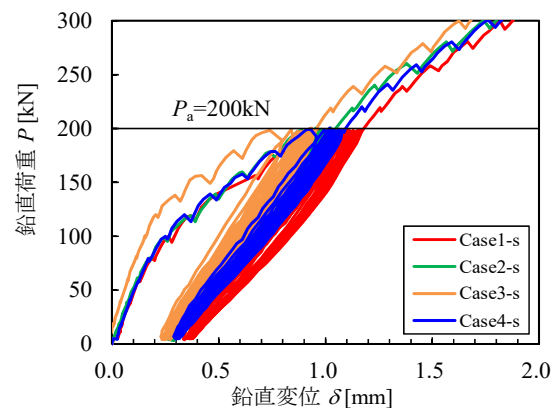
4.1 荷重-変位関係

静的せん断試験で得られた荷重 P -変位 δ 関係を図-4, 試験結果の一覧を表-5 に示す。なお, 図中には 10 回の繰返し荷重を行った使用時荷重 ($P_a=200\text{kN}$) と, 表-4 で示した PCa 床版の材料試験値の結果を用いて, せん断耐力の計算値 ($P_u=401\text{kN}$) を水平線で併記している。せん断試験では, 接合部の内側面から荷重点側にせん断ひび割れ, 純曲げ区間に曲げひび割れが生じた。使用時荷重を超えた辺りから非線形な挙動を示し, 荷重 500kN 付近で上側主鉄筋が降伏ひずみ $\epsilon_y (=2148\mu)$ に達した後, 荷重-変位関係は大きく屈曲した。実験の最大荷重 P_{\max} は計算値 P_u の 1.67~1.81 倍であった。なお, 全てのケースにおいて接合部を貫通するひび割れは発生せず, 後述するひび割れ性状から分かるように, PCa 床版の損傷が支配的であった。

図-4 (a) の接合界面が直線形状である Case2-s に着目すると, 概ね降伏荷重以降 ($P=500\text{kN}$) の傾きが他ケースに比べて緩やかであり, また荷重低下がやや早いことが分かる。これは, 次節で示す接合界面に沿った鉛直方向のひび割れが進展したためであり, 荷重-変位関係において接合界面の形状による挙動の違いが認められた。なお, Case1-s および Case1-f は, 他ケースよりも粘り強い挙動を示しているが, 圧縮応力場である試験体上側の荷重プレート直下にひび割れが進展したことで, 荷重低下が遅れたものと推察される。図-4 (b) を見ると, 各ケ



(a) 全体挙動



(b) 繰返し荷重

図-4 荷重-変位の関係

表-5 試験結果の一覧

ケース名	降伏値		最大荷重		
	変位 δ [mm]	荷重 P_y [kN]	変位 δ [mm]	荷重 P_{\max} [kN]	P_{\max}/P_u
Case1-s	4.7	508.3	27.7	716.3	1.79
Case1-f	4.0	509.3	26.1	700.7	1.75
Case2-s	4.2	500.8	18.4	670.6	1.67
Case3-s	3.7	516.9	19.5	705.7	1.76
Case4-s	4.0	503.8	20.3	718.3	1.79
Case4-f	3.8	499.3	19.5	724.3	1.81

ース間で有意な挙動差はなく, 使用時荷重レベルにおいて接合界面の形状による違いは認められない。図-4 (a) の Case1-f および Case4-f は, 定点疲労荷重の履歴を受けていない Case1-s および Case4-s と概ね挙動が重なっており, 接合界面が半円形状の場合, 荷重 300kN の 400 万回荷重履歴が荷重-変位関係に与える影響は軽微である。また, 今回の試験条件の範囲では, 継手長および定着具による有意な差異は確認されなかった。

4.2 ひび割れ性状

静的せん断試験における最大荷重時の側面状況を写真-2に示す。全てのケースにおいて、接合部にひび割れは発生せず、主として接合部の内側面から荷重点側に向かって斜め方向にせん断ひび割れが進展した。接合界面の形状のみが異なる Case1-s と Case2-s を比較すると、接合界面が直線形状である Case2-s の側面右側では、床版厚の半分程度まで接合界面に沿った鉛直方向のひび割れが顕著に進展し、その後、荷重点側に向かって斜め方向にひび割れが生じていることが分かる。なお、Case3-s の側面右側においても、接合界面に沿った鉛直方向のひび割れが確認できるが、後述するように、複数の半円形状界面の頂点を連ねるようなひび割れであり、接合界面の形状に沿ったものではない。

次に、降伏荷重以前 ($P=300\text{kN}$) における静的せん断試験／定点疲労試験のひび割れ性状を図-5に示す。なお、定点疲労試験は400万回荷重後のひび割れを示している。降伏荷重以前の荷重レベルにおいても、接合界面が直線形状である Case2-s は、接合界面に沿った直線のひび割れが卓越しており、他ケースとはひび割れ性状が異なっている。このひび割れの発生状況の違いに起因して、Case2-s は他ケースよりも荷重低下がやや早く生じたものと推察される。Case2-s 以外のケースでは PCa 床版側において、複数の半円形状界面の頂点を連ねるようなひび割れが生じており、荷重 300kN で400万回の荷重を実施した定点疲労試験 (Case1-f, Case4-f) についても同様の傾向が確認できる。このように接合界面が半円形状

の場合、複数の半円形状界面の頂点を連ねるような PCa 床版側で損傷するため、接合界面はせん断時の弱部にならないことが分かる。

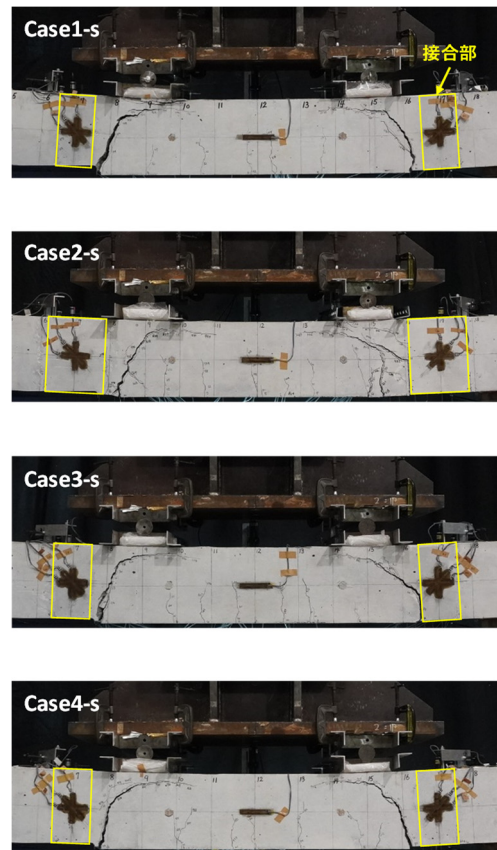


写真-2 静的せん断試験（最大荷重時）

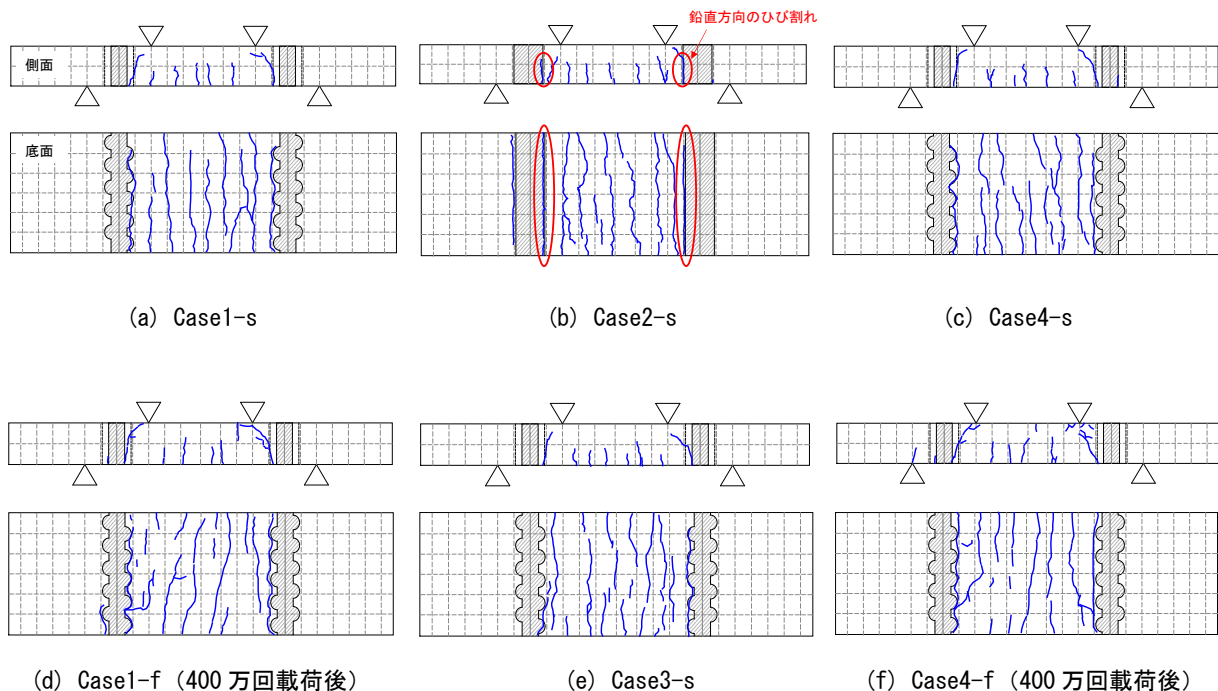


図-5 ひび割れ性状 ($P=300\text{kN}$)

4.3 接合界面のひび割れ挙動

静的せん断試験において、使用時荷重で 10 回の繰返し載荷を行った際の接合界面のひび割れ挙動を図-6 に示す。なお、パイゲージ P1 および P4 はほぼゼロであったため、P2 および P3 について示している。

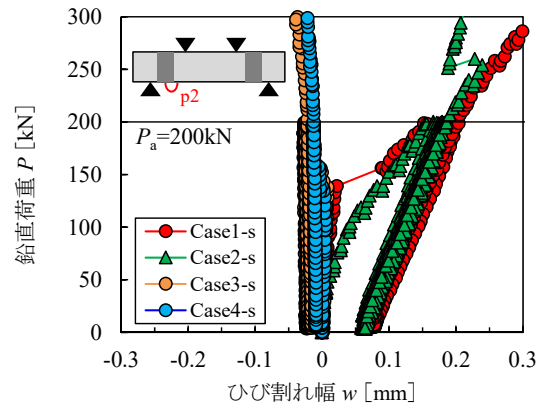
図中より、接合界面が直線形状である Case2-s は、荷重増加とともにひび割れ幅が増大しており、半円形状に比べて接合界面の開きが大きい傾向が確認できる。これは、半円形状に比べて載荷初期から接合界面に沿ったひび割れが生じ易いことを示唆しており、前述した荷重-変位関係やひび割れ性状と調和している。接合界面が半円形状である Case1-s は、P2 において荷重 140kN から 152kN にかけて不明なデータ飛びが見られるが、140kN までは明らかに Case2-s と異なる挙動を示している。なお、Case3-s および Case4-s のひび割れ幅はゼロに近い値であるが、これは図-5 のひび割れ性状のように複数の半円形状界面の頂点を連ねる PCa 床版側のひび割れが生じたため、今回のパイゲージ配置 (図-3 参照) で捉えられていない可能性が考えられる。このように、接合部が直線形状の場合、界面に沿った直線的なひび割れが生じ、半円形状では界面の PCa 床版側でひび割れが生じている。

4.4 定点疲労試験における鉛直変位の変化

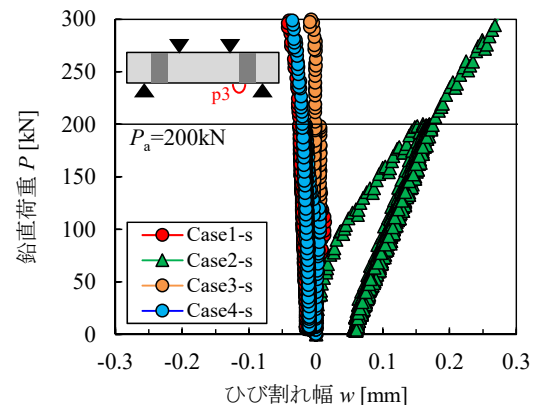
定点疲労試験において、荷重 300kN 時の鉛直変位 δ (試験体中央) を載荷回数の片対数プロットしたグラフを図-7 に示す。なお、定点疲労試験体の接合界面は全て半円形状であり、鉄筋の継手構造が試験因子である。

図中より、Case1-f (継手長 6D 定着具あり) の鉛直変位 δ は、Case4-f (継手長 8D 定着具なし) よりも載荷回数の増加に伴う増加傾向が確認できる。両者の接合界面は同じ半円形状であることを考慮すると、この原因は鉄筋の継手構造の違いによるものと推察される。そこで、代表的な載荷回数 (1 万, 10 万, 100 万, 400 万) にお

る、接合界面のひび割れ挙動 (パイゲージ P3) を図-8 に示す。両ケースとも、載荷回数に伴う顕著なひび割れ幅の増加は見られず、むしろ鉛直変位が小さい Case4-f の方がひび割れ幅は大きい傾向があった。このことから、図-7 の鉛直変位の違いは、鉄筋の継手構造による接合



(a) パイゲージ P2



(b) パイゲージ P3

図-6 接合界面のひび割れ挙動 (静的せん断)

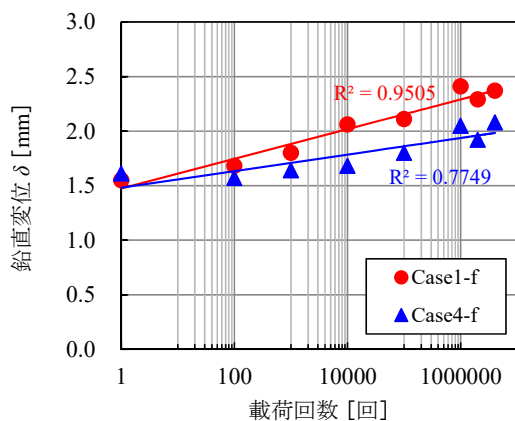


図-7 載荷回数と鉛直変位の関係 (定点疲労)

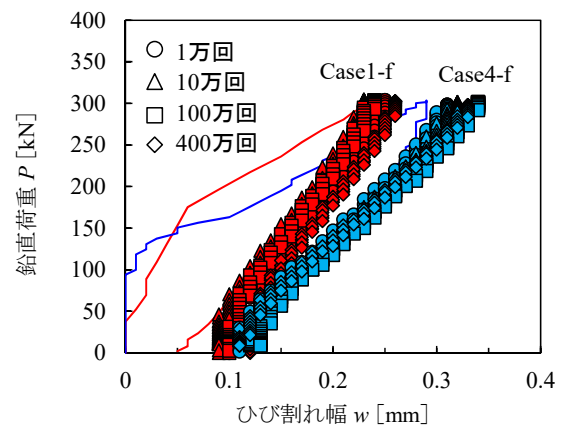


図-8 接合界面のひび割れ挙動 (定点疲労)

界面の開きではなく、PCa床版の損傷の違いによるものと考えられる。なお、別途実施した接合部を有するPCa床版の曲げ試験において、この継手構造（継手長 6D 定着具あり，継手長 8D 定着具なし）による曲げ耐力やひび割れ性状の有意な差異は確認されていない。このように、本研究によるせん断試験および別途実施した曲げ試験において、継手構造（継手長 6D 定着具あり，継手長 8D 定着具なし）の優劣を判断するのは難しく、PCa床版接合部の要求性能を確認するためには、移動荷重下で主応力の回転を考慮した輪荷重走行試験を実施する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、圧縮強度 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルを間詰材とし、PCa床版の接合界面形状に着目した静的せん断試験を実施した。また、一部のケースでは載荷回数 400 万回の定点疲労試験を行い、載荷履歴が荷重-変位関係に与える影響を検討した。

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究のせん断試験において、圧縮強度 100N/mm² クラスの高強度繊維補強モルタルで接合された PCa 床版のせん断耐力は、二羽式より算定される計算値の 1.67~1.81 倍であった。
- (2) 静的せん断試験の荷重-変位関係より、PCa 床版の接合界面が直線形状の場合、半円形状よりも降伏荷重以降の傾きが緩やかであり、荷重低下がやや早い傾向が認められた。
- (3) せん断載荷に伴うひび割れ性状より、全てのケースにおいて高強度繊維補強モルタルを充填した接合部を貫通するひび割れは生じなかった。
- (4) PCa 床版の接合界面のひび割れ挙動より、直線形状に比べて半円形状のひび割れ幅の方が小さい傾向が認められた。これは、前者のひび割れは直線界面に沿って発生するのに対して、後者では複数の半円形状界面の頂点を連ねるような PCa 床版側でのひび割れが卓越するためだと考えられた。
- (5) 定点疲労試験では、Case4-f(継手長 8D 定着具なし) よりも Case1-f(継手長 6D 定着具あり)の方が、載荷回数の増加に伴う鉛直変位の増加傾向があった。これは、鉄筋の継手構造による接合界面の開きではなく、PCa 床版の損傷の違いによるものだと考えられた。

本研究では PCa 床版の接合部の界面形状に着目し、直線形状よりも半円形状の方が降伏荷重以降のせん断耐力や接合界面のひび割れ幅の観点で優位性があることを確認した。一方、実床版の疲労耐久性を議論するためには、本研究で実施した定点疲労試験のみならず、移動荷重下での疲労試験が必要不可欠である。今後は、実床版の試験体を用いた輪荷重走行試験を実施し、継手構造（継手長 6D 定着具あり，継手長 8D 定着具なし）の疲労耐久性（耐用年数 100 年）について検証する予定である。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート工学会：プレキャスト PC 床版による道路橋更新設計施工要領，pp.72-77，2018.
- 2) 福永靖雄，今村壮宏，二井谷教治，角本周，原健悟：機械式定着を併用した重ね継手を有するプレキャスト PC 床版の輪荷重走行疲労試験，土木構造・材料論文集，No.28，pp.39-46，2012.
- 3) 吉松秀和，松井繁之，大澤浩二，中山良直，水野浩，表直也：床版取替え用プレキャスト PC 床版の合理化継手の開発，構造工学論文集，Vol.60A，pp.1159-1168，2014.
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「スリムクリート」に関する技術評価報告書，技術推進ライブラリー，No.10，2017.
- 5) 水野剣一，正木徹，谷口修，茶林敬司：常温硬化特性を有した低炭素型高強度繊維補強モルタルの検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.1，pp.934-939，2022.
- 6) 国分正胤，岡村甫：太径鉄筋の使用に関する研究：土木学会論文報告集，第 202 号，pp.103-113，1972.
- 7) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，Vol.372，V-5，pp.167-176，1986.