

論文 UFC パネルの接合方法に関する実験的研究

千明 英祐^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}・大熊 光^{*3}・前堀 伸平^{*4}

要旨：優れた流動性、高い圧縮強度および高い靱性といった特徴を持つ超高強度繊維補強コンクリート（UFC）が注目されている。本研究では UFC をプレキャストパネルに適用した構造を検討し、この UFC パネルの適切な接合方法を明らかにすることを目的とする。そこで、UFC パネル間の接合部に異形 PC 鋼棒、ループ筋および孔あき鋼板を用いたパネルを製作し、曲げ載荷実験を行った。実験結果より、初期剛性は孔あき鋼板を用いたケースで、最大荷重は、定着効果を上げる目的で頭部加工を行った異形 PC 鋼棒を用いたケースならびにループ筋を用いたケースで優れていることが確認できた。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、プレキャストパネル、接合

1. はじめに

近年実用化が増えているプレキャストパネルは、施工期間の短縮ならびに工場で厳格な管理のもとで作製されることによる品質の安定という利点を持つ。しかし、重量ならびに大きさが輸送・架設などのコストに直接影響するといった検討すべき点もある。このような状況の中で、超高強度繊維補強コンクリート（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete：以下 UFC）¹⁾が、新材料として注目されている。UFC は、高強度の鋼繊維を混入することで、ひび割れ面における繊維の架橋により高靱性を発揮し、粉体により充填構造を細密化することで高い圧縮強度（約 200MPa）ならびに優れた耐久性を示す。また、鋼繊維を混入した場合でも高い流動性（フロー値 240mm～270mm）を有することで、振動締固めを行うことなく流込みによって成形が可能である。このように優れた自己充填性を有するために、複雑な形状の部材を比較的容易に作製することが可能である。そこで、高強度の UFC を用いてパネル厚を薄くすることで、部材の重量を軽減でき、省力化やコスト削減につながると考えた。

プレキャストパネルではパネル同士を接合し一体化することが重要である。しかし、一般に薄い部材ほど接合が困難である。そこで、本研究では UFC パネル間の有効な接合方法の検討を行った。実験ケースは、接合部に異形 PC 鋼棒、ループ筋²⁾および孔あき鋼板^{3),4)}を用いたケースとし、曲げ載荷実験を行うことで比較・検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料ならびに特徴

UFC はセメント、シリカフュームおよび珪石微粉末をあらかじめ混合したプレミックス粉体に水、高性能減水剤および鋼繊維を練り混ぜて製造する。

表-1 に本研究における UFC の配合を示す。鋼繊維は径 0.2mm、長さ 15mm、引張強度 2.5GPa 以上のものを体積比で 2%混入した。流動性はフロー値 270±10mm で管理した。

表-1 UFC の配合[kg/m³]

水	プレミックス粉体	鋼繊維	高性能減水剤
180	2254	157	28

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻教授 工博（正会員）

*3 大成建設(株) 技術センター土木技術開発部ダクトル事業推進室 修(工)（正会員）

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所ダクトル技術開発チーム 修(工)（正会員）

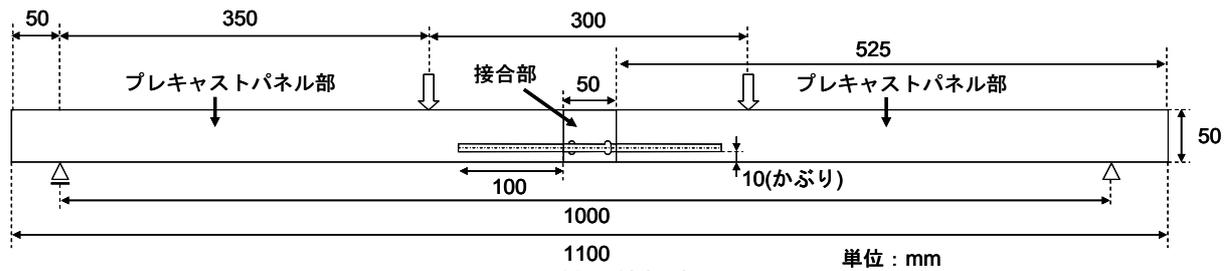


図-1 供試体概念図

表-2 供試体の名称と接合用鋼材の力学特性

名称 ^{*1}	種類	断面積 ^{*3} [mm ²]	降伏強度 ^{*4} [N/mm ²]
PC-H5	異形 PC 鋼棒	40 (6.4)	1275
PC-H10	先端加工有り		
PC-N7	異形 PC 鋼棒	30 (7.1)	
PC-N12	先端加工無し		
L-N	ループ筋(鉄筋無し)	390	245
L-R	ループ筋(鉄筋有り) ^{*2}		
PBL-H	鋼板 SS400(水平)	390	245
PBL-V	鋼板 SS400(上下)		

^{*1} 数字は片側の本数を表し、L-N ならびに L-R は 7 組、PBL-H ならびに PBL-V は 3 枚

^{*2} L-R に用いる鉄筋は D10, SD490

^{*3} 括弧内は公称径[mm]を示す

^{*4} 降伏強度は保証されている最低値を表す

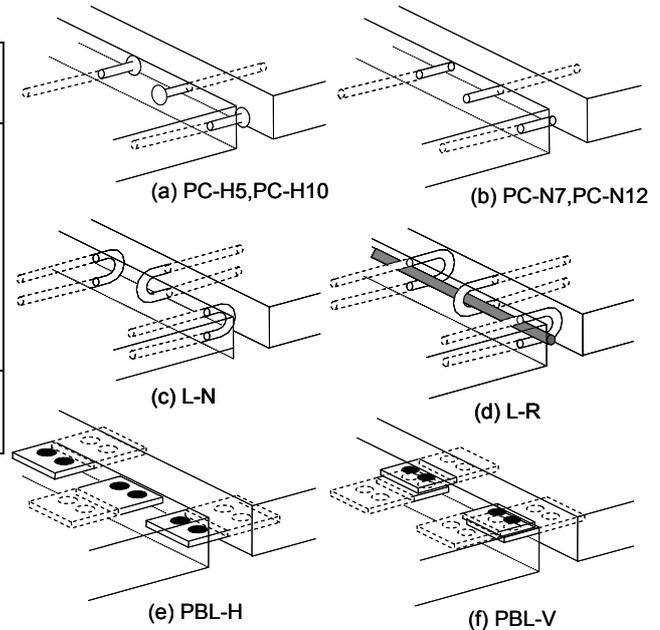


図-2 接合の概念図

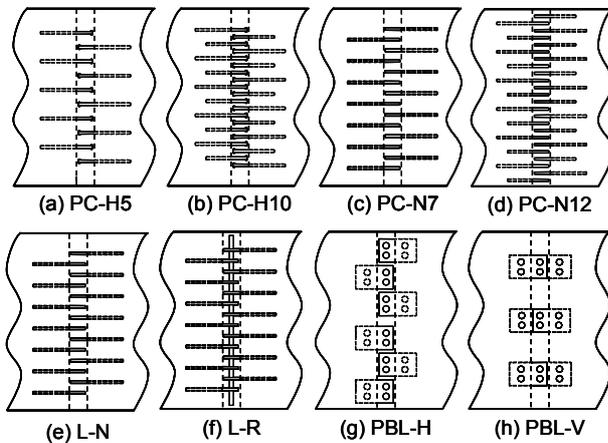


図-3 接合方法の平面図

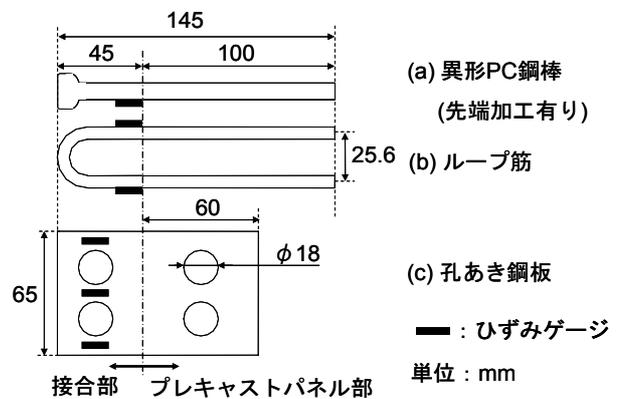


図-4 各接合用鋼材

2.2 UFC パネルの载荷実験

(1) 供試体概要

図-1 に示すように供試体の形状は、全長 1100mm、厚さ 50mm、幅 500mm とした。長さ 525mm、厚さ 50mm、幅 500mm のパネルを二枚接合し、パネル間の接合部の長さを 50mm とした。また、支間長を 1000mm、せん断スパンを 350mm とした。図-1 では、例として頭部加工をした異形 PC 鋼棒を用いたケースを示す。ここ

で、接合を行う前の 2 枚のパネルをプレキャストパネル部、パネル間の場所打部を接合部、プレキャストパネル部と接合部の間の境界面を打継面と呼ぶことにする。

表-2 に供試体の名称と接合用鋼材の力学特性を、図-2 に接合の概念図を、図-3 に接合方法の平面図を、図-4 に各接合用鋼材を示す。接合方法は、接合部の定着効果を上げるために頭部加工をした異形 PC 鋼棒を用いるケース (片側

5本、10本の2体)、加工の無い異形PC鋼棒を用いるケース(片側7本、12本の2体)、異形PC鋼棒を曲げ加工したループ筋を用いるケース(間に通す鉄筋の有無で2体)、孔あき鋼板を用いるケース(孔あき鋼板を横に並べたものと上下に重ねたものの2体)とし、計8体の供試体を作製した。供試体は接合用鋼材以外の鉄筋補強は行っていない。ここで、PC-H5、PC-N7、ループ筋ならびに孔あき鋼板を用いるケースでは、用いた接合用鋼材の打継面における総断面積×降伏強度を一定とした。なおループ筋を用いたケースでは、打継面における圧縮側(上側)の鋼棒の断面積は考慮していない。異形PC鋼棒ならびにループ筋を用いたケースでは、接合用鋼材の埋込長さを100mmとした。ただしPC-H10ならびにPC-N12では、図-3に示すようにプレキャストパネル部の異形PC鋼棒の端部での応力集中を防ぐために半数の埋込長さを70mmとしている。孔あき鋼板を用いるケースでは、埋込長さを60mmとした。なお全ての供試体において、接合部への接合用鋼材の突き出しは45mm、供試体下面から接合用鋼材までのかぶりは10mmとした。

プレキャストパネル部ではUFCの目標強度を200MPa、接合部では実際の現場での打込みを考慮し、目標強度を150MPaとした。このため供試体の養生方法は、20℃湿潤養生を48時間行い、脱型後、プレキャストパネル部では90℃で48時間、接合部では90℃で3時間の蒸気養生とした。

実際の施工現場では150MPaの圧縮強度を得るには、40℃以上を一週間保つ必要があるが、本研究では同等の強度を得ることが出来る上記の方法で養生を行った。

(2) 実験方法

載荷は2000kN耐圧試験機にて静的2点単調載荷を行った。載荷点間の距離は、接合用鋼材が全て等モーメント区間に入るようにするために、300mmとした。支点と供試体間には減摩パッドを挿入し、支点の拘束による水平反力の発生を防いだ。主な計測項目は、荷重、供試体スパン中央部のたわみ、および接合用鋼材の図-4に示す位置でのひずみとし、目視により破壊モードならびにひび割れ進展の観察を行った。

3. 実験結果

ここでは、載荷実験における8体の供試体の挙動を示すと同時に、接合用鋼材の種類ごとに4ケースに分け、それぞれのケースにおける比較を行う。各供試体の強度特性と最大荷重を表-3に、荷重-たわみ曲線を図-5に、供試体全体の下面のひび割れ図を図-6に示す。なお、PBL-Vについては、下側に配置した孔あき鋼板のみを示すものとする(図-6(h))。

3.1 頭部加工をしたPC鋼棒を用いるケース

PC-H5では、荷重が約22kNに達した時にプレキャストパネル部の異形PC鋼棒の端部にひび割れが発生し剛性が低下した。次に荷重が

表-3 UFCの強度と最大荷重

供試体 名称	プレキャストパネル部			接合部			最大 荷重 [kN]
	圧縮 強度 [N/mm ²]	ひび割れ 発生強度 [N/mm ²]	弾性 係数 [kN/mm ²]	圧縮 強度 [N/mm ²]	ひび割れ 発生強度 [N/mm ²]	弾性 係数 [kN/mm ²]	
PC-H5	224.8	9.5	58.9	147.7	8.4	52.0	26.7
PC-H10							29.2
PC-N7	213.2	9.6	55.7	162.1	5.6	51.9	11.9
PC-N12							20.8
L-N	219.8	9.3	54.1	179.7	6.5	53.5	28.7
L-R	224.8	9.5	58.9	147.7	8.4	52.0	26.6
PBL-H							18.1
PBL-V							19.3

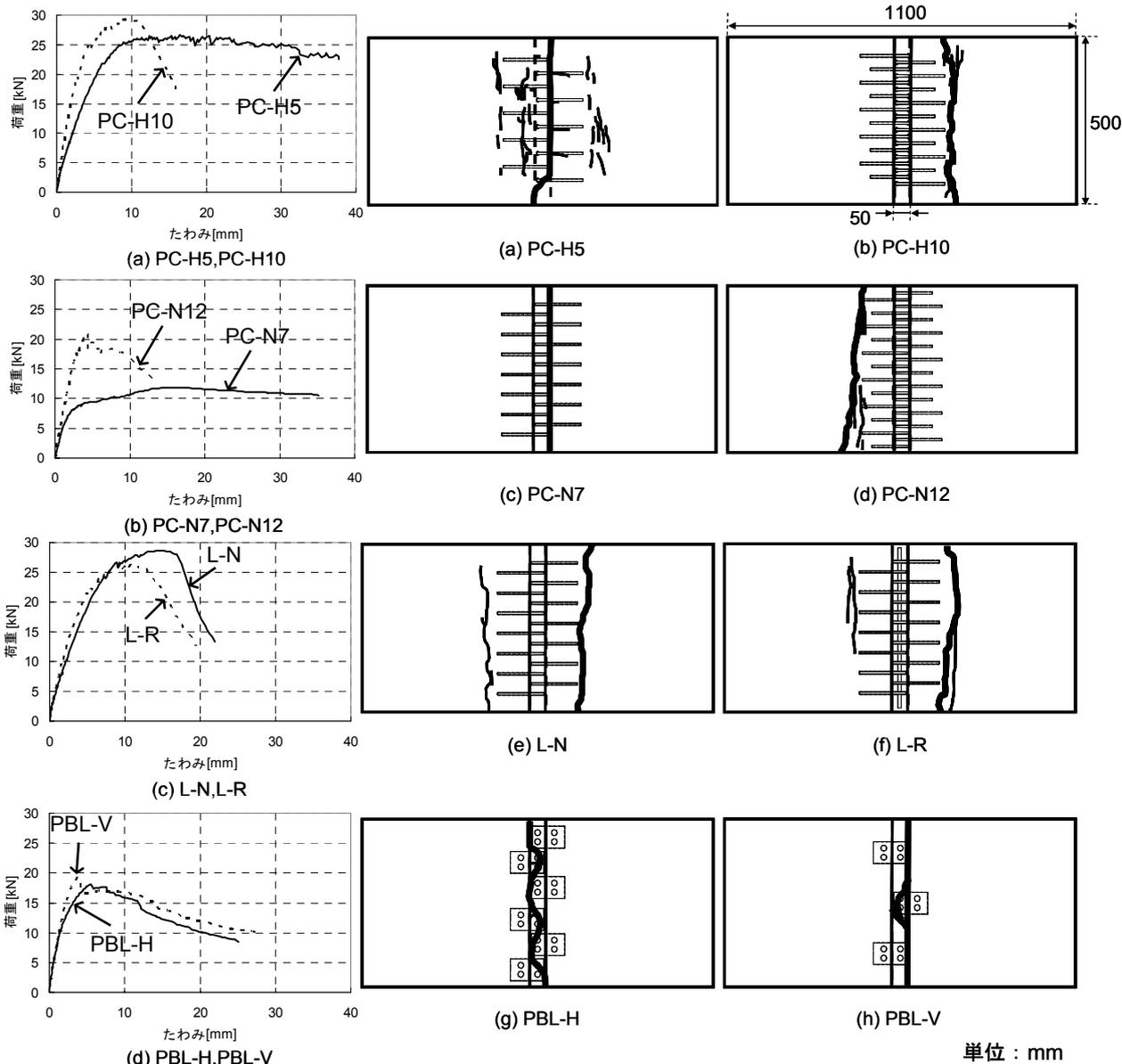


図-5 荷重-たわみ曲線

図-6 供試体下面のひび割れ図

26.2kN に達した時に、打継面の開口とともに異形 PC 鋼棒のひずみが減少し、荷重が一時的に減少した。このことから、異形 PC 鋼棒の抜出しが発生したと考えられ、その後も異形 PC 鋼棒の抜出しを伴って荷重は上下を繰り返す、最終的に打継面が大きく開いて荷重が緩やかに低下し、打継面上部の UFC が圧壊した。

PC-H10 では、荷重が 19.6kN に達した時に、PC-H5 と同様にプレキャストパネル部の異形 PC 鋼棒の端部でひび割れが発生し剛性が低下した。その後ピーク近くになると、プレキャストパネル部の異形 PC 鋼棒の端部でひび割れが鋼棒の端部を結んだ線に沿って進展し、そのひび割れ

幅の拡大とともに荷重が低下した。

PC-H5 と PC-H10 を比較すると、PC-H10 の方が最大荷重は高いが脆性的に破壊する傾向にあった。破壊の原因は、PC-H5 では打継面の開口であるのに対して、PC-H10 ではプレキャストパネル部の異形 PC 鋼棒の端部でのひび割れの開口が主な原因であり、打継面は十分な強度を示した。PC-H5 に比べ PC-H10 では異形 PC 鋼棒の数が多いため、鋼棒 1 本に作用する付着応力が小さく、抜出し量が減少し打継面の開口が抑制されたものと考えられる。

3.2 頭部加工無しの PC 鋼棒を用いるケース

PC-N7 では、荷重が約 5.2kN を越えてから異形

PC 鋼棒の拔出しにより打継面の開口幅が徐々に大きくなり剛性が低下した。その後、荷重は上下しながらも上昇を続けたが、11.9kN でピークに達し、それ以後、荷重は緩やかに低下した。プレキャストパネル部にひび割れは発生せず、打継面だけが開口し、除荷後にも約 5mm 打継面が開いており内部の異形 PC 鋼棒が目視で確認できた。

PC-N12 では、荷重が 17.7kN に達するとプレキャストパネル部の異形 PC 鋼棒の端部でひび割れが開口し、剛性が低下した。ピークに達した後もこのひび割れは開口し続け、荷重は低下した。

PC-N12 は PC-N7 に比べ最大荷重が約 2 倍であるが、PC-N7 に比べ脆性的になる傾向が確認できた。破壊の要因は、PC-N7 では打継面の開口が顕著であるのに対し、PC-N12 ではプレキャストパネル部の異形 PC 鋼棒の端部でのひび割れの開口が顕著であり、打継面は十分な強度を示した。

3.3 ループ筋を用いるケース

L-N ならびに L-R においてはそれぞれ荷重が 24.3kN, 21.5kN においてプレキャストパネル部のループ筋の端部でひび割れが発生して、一時的な荷重の低下が起きた。また、ループ筋の拔出しが発生し、打継面が徐々に開口した。その後ピークに達し、プレキャストパネル部のループ筋の端部でひび割れの進展・開口が顕著となり、荷重が低下した。

L-N と L-R を比較すると剛性はやや L-R の方が高く、最大荷重は L-N の方が高い。その他、打継面の開口幅は L-N の方がやや大きいなどの差はあるが、大きな相違点は確認できなかった。UFC は圧縮強度が高いため、引抜け防止の鉄筋を挿入することの効果は小さかったものと考えられる。

3.4 孔あき鋼板を用いるケース

PBL-H は 18.09kN で、PBL-V は 19.26kN で鋼板の拔出しが発生し、荷重が低下した。その後 PBL-H では孔あき鋼板の形状に沿って、PBL-V では中央下面に配置した孔あき鋼板の形状に沿ってそれぞれひび割れが進展・開口した。また、それに伴って打継面の開口幅が拡大し、荷重は緩やかに低下した。

PBL-V は PBL-H に比べ、初期剛性ならびに最大荷重はやや高い値を示したが、大きな相違点は確認できなかった。

4. 接合方法の検討

ここでは、打継面における接合用鋼材の総断面積×降伏強度を一定としたケースについて比較・検討を行う。

4.1 剛性, 最大荷重および打継面の開口幅の比較

検討を行うケースの荷重-たわみ曲線を図-7 に示す。PBL-H ならびに PBL-V は他のケースに比べ初期剛性が高く、特に PBL-V では他のケースと異なり、目視で確認できる打継面の開口は荷重が約 10kN に達するまで確認できなかった。しかし最大荷重は PC-H5, L-N, L-R の方が高い値を示した。孔あき鋼板を用いたケースは打継面の鋼材の総断面積が大きいいため、初期剛性は高い値を示したが、定着効果を上げるための孔の両側の部分が、断面積が小さくなっていることにより降伏したため、最大荷重が他のケースに比べ低くなったと考えられる。PC-N7 に関しては、定着効果を上げる工夫を行わなかったため、異形 PC 鋼棒の拔出しにより最大荷重は小さい値を示した。

図-8 に示すように供試体スパン中央下面に接合部を挟むようにπ型変位計を設置し、打継面の開口幅を計測した。図-9 に荷重とπ型変位計の変位の関係を示す。なお、PC-N7 のデータに関しては測定データの不備によりここに示していない。この結果より、PBL-H, PBL-V および L-R のピーク前における打継面の開口幅が小さく、打継面が高い強度を持つことが確認でき

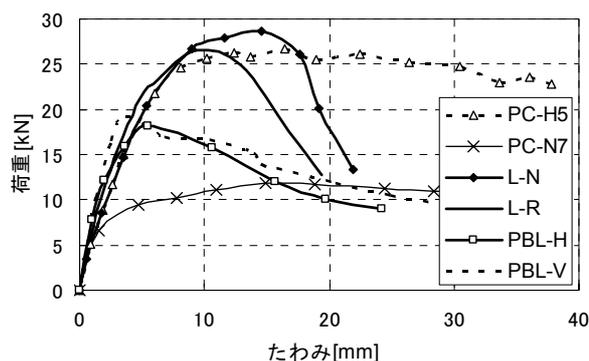


図-7 荷重-たわみ曲線

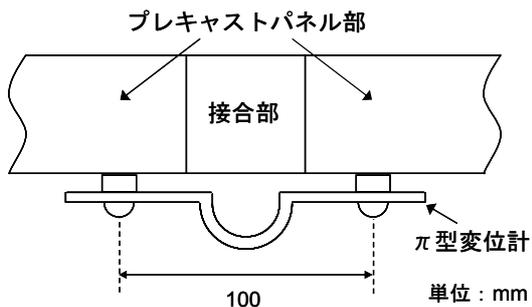


図-8 π 型変位計貼り付け位置

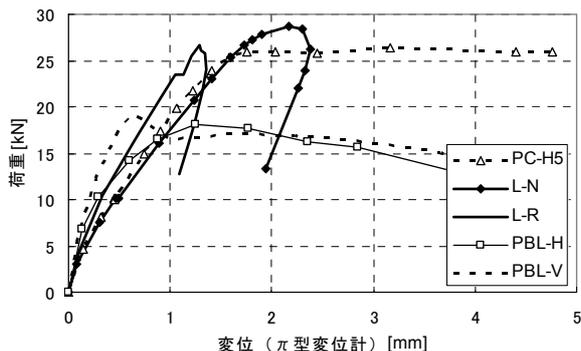


図-9 荷重-変位 (π 型変位計) 関係

た。また、L-N ならびに L-R の π 型変位計の変位がピーク後に減少しているのは、プレキャストパネル部のループ筋の端部でのひび割れが拡大したためである。

4.2 ピーク後の挙動の比較

図-7 を見ると、ピーク後の挙動は2つのケースに分類することができる。第1は、接合用鋼材が徐々に抜出すことにより打継面が開口し、緩やかに荷重が低下するケース (PC-H5, PC-N7) であり、第2は、プレキャストパネル部の接合用鋼材の端部でのひび割れが大きく開口し、荷重が前者に比べ脆性的に低下するケース (L-N, L-R) である。なお、孔あき鋼板を用いたケースは、打継面と同時に孔あき鋼板が押し下げられたことによる接合部下面でのひび割れが開口したことで荷重が低下しており、ピーク後の荷重-たわみ曲線は2つのケースの中間の挙動を示している。

打継面で破壊しなかった第2のケースの方が打継面の強度は高く有効であると言える。また、異形 PC 鋼棒を用いたケースでも PC-H10 ならびに PC-N12 の場合は第2のケースの挙動を示しており、異形 PC 鋼棒の本数を増やすことで打継面における十分な強度の発現が可能であることが

確認できた。

4.3 異形 PC 鋼棒における頭部加工の検討

図-7 において PC-H5 と PC-N7 を比較すると、打継面における異形 PC 鋼棒の断面積が等しいにもかかわらず、最大荷重に大きく差が生じた。PC-H5 と異なり PC-N7 では、異形 PC 鋼棒の抜出しが発生し、打継面の開口が顕著であったことから、定着効果を上げるための頭部加工は有効であると確認できた。

5. まとめ

- (1) 初期剛性ならびに打継面の開口の抑制では孔あき鋼板を用いたケースが、最大荷重では頭部加工をした異形 PC 鋼棒もしくはループ筋を用いたケースが優れている。
- (2) ピーク後の挙動は、打継面の開口が原因で荷重が緩やかに低下するケース (PC-H5, PC-N7) と、プレキャストパネル部の接合用鋼材の端部でのひび割れが原因でやや脆性的に荷重が低下するケース (L-N, L-R, PC-H10, PC-N12) に分けられ、打継面の強度が高いほど後者のケースの挙動を示す傾向が確認された。孔あき鋼板を用いたケースでは、打継面と接合部下面のひび割れ両方の開口が原因で荷重が低下しており、両ケースの中間の挙動を示した。
- (3) 異形 PC 鋼棒を用いたケースで、定着効果を上げる目的で頭部加工を行ったケースでは、これを行っていないケースの最大荷重を大きく上回り、頭部加工の有効性が示された。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)，コンクリートライブラリー，第113号，2004
- 2) 浜田純夫：プレキャスト床版の接合に関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.13，No2，pp.659-664，1991.6
- 3) 平陽兵：鋼とコンクリートを一体化する孔あき鋼板ジベルの耐力評価式に関する最近の研究，コンクリート工学，vol.42，No.3，pp.61-67，2004.3
- 4) 土木学会：複合構造物の性能照査指針 (案)，構造工学シリーズ11，2002