

報告 せん断破壊が先行する薄い PCa 部を持つ RC 梁部材の曲げせん断実験

森末 匠^{*1}・村上輝樹^{*2}・平松道明^{*3}・岸本一蔵^{*4}

要旨: 本論文は、重量軽減を主の目的として PCa 部の厚みを薄くしたハーフ PCa 梁部材 (以下 薄肉ハーフ PCa 梁部材) の部材性能について報告する。筆者等は、既報において曲げ破壊が先行する薄肉ハーフ PCa 梁部材の曲げせん断実験から、同部材が RC 一体型の梁部材と同等の性能を有することを報告した。本論文は、せん断破壊が先行するように設計した薄肉ハーフ PCa 梁部材について曲げせん断実験を行い、せん断破壊が先行する場合でも RC 一体型の梁部材と同等の性能を有することを明らかにした。

キーワード: ハーフ PCa 梁部材, 薄肉 PCa 部, 接合面のずれ, せん断破壊, ひび割れ幅

1. はじめに

PCa コンクリート部材の使用は工期短縮, 労務削減, 品質向上など多くのメリットがある。一方, 運搬や楊重の容易さから部材の小型, 軽量化は重要な課題となっている。そのため, 工場で作製する PCa 部に現場でのコンクリート打設により部材を完成させる構造であるハーフ PCa 梁部材の研究・開発がされている^{1)~2)}。本論文では, 重量軽減を主の目的として梁底にあたる PCa 部の厚みを薄くして作製したハーフ PCa 梁部材に対して曲げせん断実験を行った。また, 同形状, 同配筋を持つ一体型の RC 梁部材に対しても同様の実験を行い, 両者の結果比較から, 梁部材の曲げせん断性状について検討を行う。筆者等の既報³⁾では, 曲げ破壊が先行する試験体について同

等の性能を有することが確認できたため, 本年度ではせん断破壊が先行するように設計した試験体を用いた。

2. 試験体概要

2.1 試験体

試験体概要および一覧を図-1, 表-1 に示す。試験体は, 15 階建て建築物の大梁寸法を想定し, その約 1/2 の縮尺モデルとしている。梁断面(梁幅 $b \times$ 梁せい D)は 400mm \times 500mm, 試験体の梁長さ L は 950mm で, 全試験体で共通である。試験体は, せん断破壊が先行するように設計された 3 体(No.1, No.2, No.3), プレキャスト部と後打ち部の接合面にずれが生じるよう (以下, 接合面破壊と表記) に設計された 1 体(No.4)の計 4 体である。

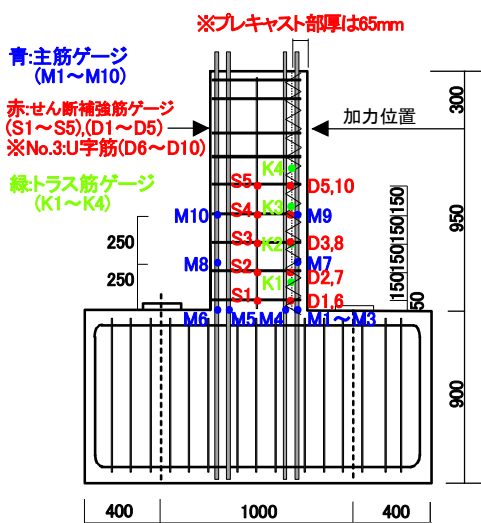


図-1 試験体概要

表-1 使用材料およびゲージ番号

試験体名	No.1	No.2	No.3	No.4		
断面形状						
想定破壊形式	せん断降伏型			接合部破壊型		
Fc(N/mm ²)	RC	27	48	36		
主筋	鋼種	-	SD490	SD295		
径	7-D19	-	7-D22	4-D22		
せん断補強筋(中央)	鋼種	-	SD490	SD295		
径	-	2-D10	-	-		
せん断補強筋(接合面)	鋼種	-	SD295	-		
径	-	-	SD295	-		
打継部仕上げ	-	刷毛引き				
	梁主筋	せん断補強筋(中央)	せん断補強筋(接合面)	トラス筋	接合筋	計測点数
No.1	M1~M10	S1~S5	D1~D5	K1~K4	D6~D10	20
No.2	M1~M10	S1~S5	D1~D5	K1~K4	D6~D10	24
No.3	M1~M10	S1~S5	D1~D5	K1~K4	D6~D10	29
No.4	M1~M10 (M4, M5貼付無し)	S1~S5	D1~D5	K1~K4	D6~D10	24

*1 近畿大学大学院 総合理工研究科 (正会員)

*2 大成ユーレック (株) 設計部

*3 (株) PCaLab (正会員)

*4 近畿大学 建築学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

No.1 は基本となる一体打ちの試験体で、No.2 は No.1 と同じ主筋、せん断補強筋、コンクリート強度で、断面下部を厚さ 65mm の薄肉 PCa 化した試験体である。PCa 部には、実用化時に運搬等で必要とされる補強である山形のトラス筋を梁の材軸方向に配筋している(写真-1)。なお、PCa 部の後打ち部に接する面は刷毛で荒らして節目をつける刷毛引き仕上げ(写真-1)としている。No.3 は No.2 から主筋量を増やし、コンクリート強度を上げた高強度の試験体である。また接合部には、ずれ防止を目的とした接合筋(U 字筋)を配筋している。No.4 は主筋径サイズを上げることにより、PCa 部のかぶり厚さを薄くすることで付着性能を不利になるよう設定した試験体である。表-2 に、使用した材料強度、表-3 に、各試験体の計算耐力の一覧を示す。許容せん断力である長期荷重時せん断力(Q_L)、短期荷重時せん断力(Q_S)の算定には「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」⁴⁾を用いた。また、終局せん断強度(Q_{Su})は荒川 mean 式⁵⁾を用いた。なお、計算で使用するコンクリートの材料強度は、PCa 部、RC

部の強度の低い方を用いている。また No.1~3 は、せん断降伏時の PCa 梁性状の把握を目的としているため、付着に対する検討は「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」⁴⁾、接合部は「現場打ち同型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針(案)・同解説」⁶⁾・「プレキャスト建築技術集成 第4編 R-PC の設計」⁷⁾に準拠してその部分で接合面破壊が生じないように設計している。対して No.4 は、接合面破壊時の性状の把握を目的としているため、せん断強度は「荒川 mean 式」⁵⁾で算出し、十分なせん断強度を確保して、接合面破壊が生じるように設計した。なお、付着や接合面の強度算定は No.1~3 と同様に文献 6,7 に準拠して行った。

PCa 梁部材には一体型と異なり、PCa 部と後打ち部に接合面が存在していることから、その部分でずれが生じることで構造性能に影響を与えていないかの検討が重要なポイントとなる。また、図-1 で示したように本試験体は PCa 部の厚さが 65mm と薄いため、ずれが生じた場合には PCa 部の主筋に対する後打ち側のかぶり厚さが事実

表-2 材料強度一覧

使用部位	鋼種	呼び名	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_{sy} (N/mm ²)	降伏ひずみ ϵ_y (N/mm ²)	Fc(N/mm ²)	試験体名	部位	平均圧縮強度 σ_B (N/mm ²)
梁主筋	SD490	D19	532	694	2593	27	No.1	RC部	26.1
	SD490	D22	511	676	2492	27	No.2	RC部	26.2
せん断補強筋	SD295	D10	347	482	1692	48	No.2	PCa部	49.9
						36		RC部	38.6
接合筋	SD295	D10	347	482	1692	48	No.3	PCa部	55.2
						36		RC部	32.3
トラス筋(ラチス筋)	SWMB	$\phi 6$	500	518	2439	48	No.4	PCa部	45.4



写真-1 トラス筋・刷毛引き仕上



写真-2 加力部付近の治具

表-3 各試験体の計算耐力一覧

単位(kN)	No.1	No.2	No.3	No.4
長期荷重時せん断力(Q_L)	124	124	143	136
短期荷重時せん断力(Q_S)	187	188	217	205
主筋降伏時せん断力(Q_{My})	454	454	588	342
終局せん断強度(Q_{Su})	338	338	418	362
付着割裂時せん断力(Q_{Su})	332	250	470	351

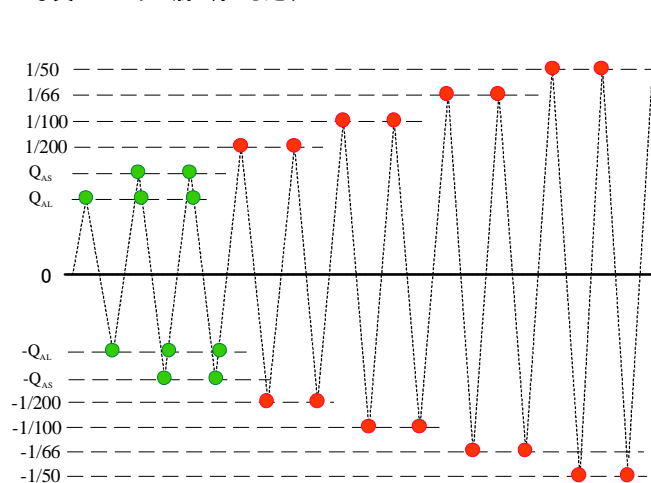


図-3 载荷履歴

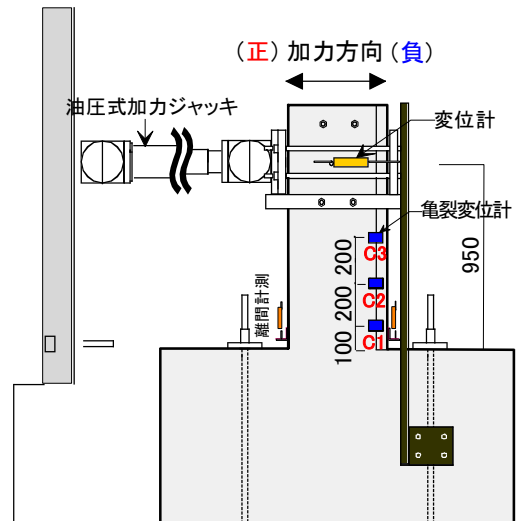


図-2 加力装置概略図

上薄くなることから、主筋の付着性状の検討も必要となる。そこで以下の項目について検討を行った。

- 1) PCa 部と後打ち部の接合面を横切る鉄筋の応力の状況 (各種鉄筋のひずみ推移から確認)
- 2) PCa 部と後打ち部の接合面のずれ状況
- 3) PCa 部内の主筋とコンクリート間の付着状況

実験における測定項目は、載荷で用いる油圧式加力ジャッキの荷重 (500MN ロードセル) と試験体の変位 (変位計)、図-1 に示す位置での鉄筋ひずみ (ひずみ箔ゲージ: 主筋, せん断補強筋 (断面せい中央位置, 接合部近傍位置), トラス筋, U 字筋 (No.3 のみ)), 試験体の梁部分とスタブの境界における離間変位 (変位計), PCa 部と後打ち部の接合面のずれ量 (2 軸型亀裂変位計) である。

2.2 載荷方法

試験体の載荷は、図-2 に示すように試験体を縦置きとして、その頂部付近に油圧式加力ジャッキを用いて正負交番の力を与える片持ち梁形式の載荷方法とした。また載荷方向について、ジャッキは PCa 部と反対側に取り付けられており、PCa 部側が載荷時に曲げ応力によって引張力を受ける載荷方向を正側載荷とした。なお、本実験では PCa 部と後打ち部の接合面でのずれが問題となる可能性があるため、載荷点において試験体を拘束しないように加力治具を設置した。具体的に、試験体を挟むように設置される加力板は PC 鋼材で連結されているが、それらの形状保持は、ナットの手締めで行っている。また、

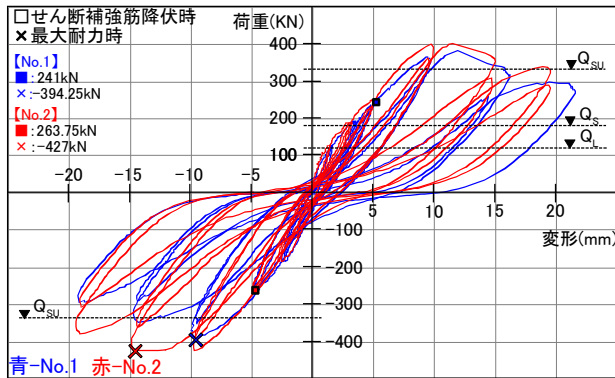
L 型アングルをボルトで試験体に設置し、載荷板を支えることにより載荷点が所定の位置よりずれることを防ぐ形式とした (写真-2)。

載荷履歴は図-3 に示すように長期荷重時の耐力 (Q_L) で各 1 サイクル、短期荷重時の耐力 (Q_S), 部材変形角 R が 1/200 (4.75mm), 1/100 (9.5mm), 1/66 (14.4mm), 1/50 (19mm) で各 2 サイクルとして載荷を行った。No.3 については、実験装置の不具合のため、部材変形角が 1/100 (9.5mm) までは他試験体と同様に、それ以降を 1/85 (11.45mm), 1/66 (14.4mm) で各 2 サイクルとして載荷を行った。

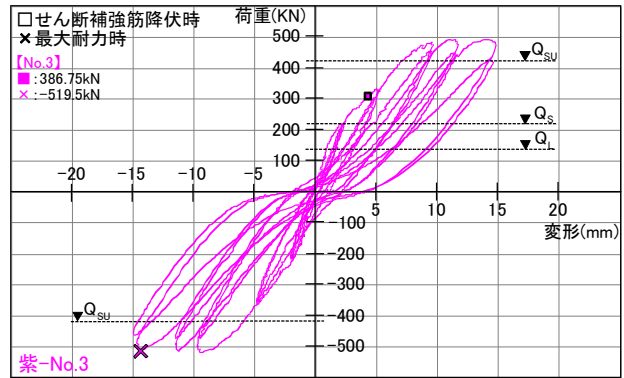
3. 実験結果と考察

3.1 荷重-変形関係

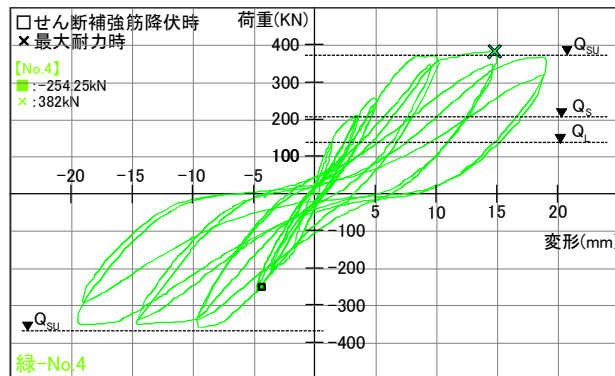
図-4 (1-3) それぞれ、せん断破壊先行型試験体 (No.1, No.2), No.2 より材料を高強度にした試験体 (No.3), 接合面破壊型試験体 (No.4) の荷重変形関係を示す。(1) は、一体型試験体と PCa 試験体の比較のため No.1 と No.2 (No.1 の断面下部を PCa 化した試験体) を重ねて示している。また、各図には材料の実強度を用いて求めた各種耐力 (長期荷重時せん断力 (Q_L), 短期荷重時せん断力 (Q_S), 終局せん断強度 (Q_{SU})) を示している。加えて、各試験体のせん断補強筋降伏時荷重, 最大耐力時についても示している。破壊形式は全ての試験体で、せん断補強筋が主筋より先に降伏するせん断破壊先行型で、その履歴形状は一体型試験体と PCa 試験体に明確な差は見られなかった。一方



(1)せん断破壊先行型試験体



(2)せん断破壊先行型試験体(高強度)



(3)水平接合部破壊型試験体

図-4 荷重-変形関係

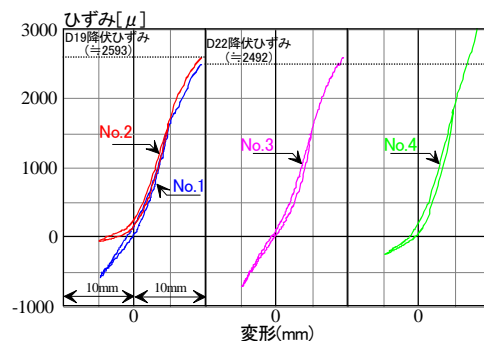


図-5 主筋ひずみの推移 ($R=-200$ (2回目) ~ 1/100 (1回目))

で、本実験において PCa 試験体 (No.2) は一体型試験体 (No.1) と比べて最大耐力が高くなることも確認された。

3.2 主筋ひずみ

図-5 に各試験体の主筋ひずみ (スタブに最も近いひずみゲージ貼付位置:M3) の推移状況を示す。主筋降伏に伴うグラフの煩雑化を避けるために、表示範囲は R=1/200 (負側 2 回目) ~1/100 (正側 1 回目) とし、かつ図-4 と同様、試験体別に分けて示している。また、同図には材料試験から求めた各試験体の降伏時ひずみ (表-2) を示している。ひずみ推移状況において、No.1 とその他の PCa 試験体では圧縮側 (負側載荷時) で差が大きくなる傾向がみられるが、引張側 (正側載荷時) でよく一致している。このことより、PCa 試験体の主筋-コンクリート間の付着性状は一体型試験体と同様であることが分かる。

3.3 セン断補強筋 (断面中央位置) ひずみ

図-6 に各試験体のせん断補強筋のひずみ (断面中央付近のひずみゲージ貼付位置:S3) の推移状況を示す。各試験体で他の貼付位置より降伏が先行した S3 について示している。また、せん断補強筋降伏によるグラフの煩雑化を避けるため、せん断補強筋降伏前である R=1/200 (正側 1 回目) ~1/200 (負側 1 回目) を表示範囲として示している。同図より一体型試験体、PCa 試験体にかかわらず各試験体でひずみの急上昇がみられるが、これはせん断ひび割れがひずみゲージ貼付位置 (S3) 付近のせん断補強筋を横断することに起因すると考えられる。その他のひずみの挙動においては一体型試験体、PCa 試験体で明確な差はみられなかった。S3 と異なるひずみゲージ貼付位置においても同様に明確な差はみられなかった。また、せん断補強筋降伏については全試験体で断面中央位置が接合面位置より先行する結果がみられ、降伏時荷重についても一体型試験体と PCa 試験体で差は見られなかった。

3.4 セン断補強筋 (接合面位置) ひずみ、U 字筋ひずみ

図-7 に S3 と同じ高さ位置のせん断補強筋のひずみ (PCa 部と後打ち部の接合面付近のひずみゲージ貼付位置:D3) の推移状況を示す。全貼付位置の中で各試験体の

ひずみ量の程度が大きかった D3 を挙げている。表示範囲は R=1/200 (正側 1 回目) ~1/200 (負側 1 回目) とした。先述したせん断補強筋 (断面中央位置 (S3)) のひずみ推移と同様にひずみの急上昇がみられたが、ひずみの挙動においては一体型試験体、PCa 試験体で明確な差はみられない。D3 と異なるひずみゲージ貼付位置においても明確な差はみられなかった。さらに、ひずみ量は断面中央位置 (S3) より小さく、接合面のずれ発生などによる付加的な力を受けている様子はみられない。

図-9 に U 字筋 (接合面のずれ防止のために No.3 に配筋されている補強筋) で唯一降伏したひずみゲージ貼付位置 D7 と、同じ高さ位置のせん断補強筋 (接合面位置) D2 のひずみ推移状況を、比較のため重ねて示す。表示範囲は D7 が降伏ひずみに達する R=1/100 (正側 1 回目) ~1/100 (負側 1 回目) 同図より、両者ともひずみの挙動はよく似ている。さらに、他のひずみゲージ貼付位置においても断面中央位置で計測したせん断補強筋のひずみと比べて同程度、若しくは小さい値を示すことから、接合面のずれ発生などによる付加的な力を受けている様子は見れない。

3.5 トラス筋ひずみ

図-8 に S3 と同程度の高さ位置で、各試験体間で最も差がみられたトラス筋 (PCa 部と後打ち部の境界に配置) K2 のひずみの推移状況を示す。表示範囲はトラス筋降伏前の R=1/200 (正側 1 回目) ~R=1/200 (負側 1 回目) とする。同図より、No.4 については負側載荷時に他試験体と比べてやや大きなひずみ量を示す。しかし、これ以降の荷重におけるひずみ量は他の試験体と同程度の量を示している。さらに、せん断補強筋 (断面中央位置 (S3)) のひずみ量と比べて小さい値を示していることから、接合面のずれ発生などによる付加的な力を受けている様子はみられない。また、その他のひずみゲージ貼付位置について各試験体のひずみの挙動はやや異なるが、ひずみ量は K2 と同様にせん断補強筋 (断面中央位置) より小さい値を示している。なお、本実験では R=1/66 時に試験体 No.2 の K2 のみで降伏時ひずみに達する結果がみられ

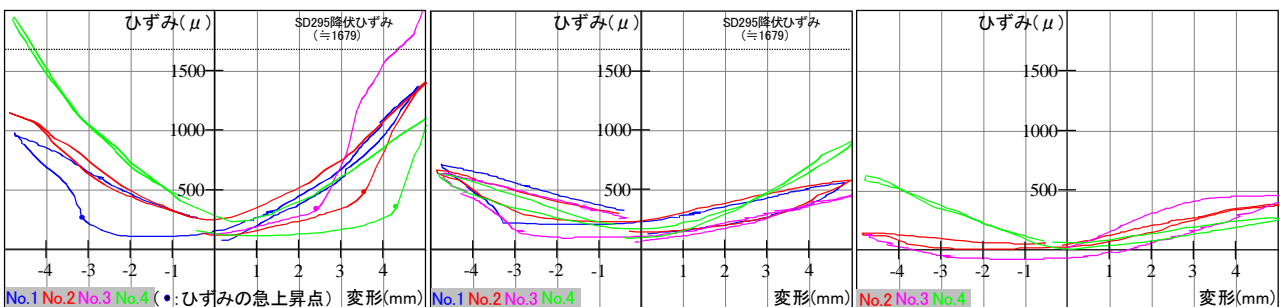


図-6 セン断補強筋ひずみの推移 (S3) (R=1/200 (正側 1 回目) ~1/200 (負側 1 回目)) 図-7 セン断補強筋ひずみの推移 (D3) (R=1/200 (正側 1 回目) ~1/200 (負側 1 回目)) 図-8 トラス筋ひずみの推移 (K2) (R=1/200 (正側 1 回目) ~1/200 (負側 1 回目))

た。

3.6 亀裂変位計による接合面のずれ検計

図-10 に、PCa 部と後打ち部の接合面位置に設置した亀裂変位計 (PCa 部と後打ち部のずれ量を計測) : C3 の値の推移状況を示す。同図 (a) x 方向=断面せい方向, (b) y 方向=部材軸方向の値であり, 正の値は, 前者で「PCa 部と後打ち部が離れる方向」, 後者で「PCa 部が部材の先端側に移動する方向」である。本実験では接合面が存在しない一体型試験体 (No.1) においてもどの程度のずれ量を示すかを確認するため, PCa 試験体と同位置に亀裂変位計を設置した。また, No.4 は変位計の不具合のためデータ不良としている。ただし, 目視では PCa 部と後打ち部の間にはずれがみられなかった。同図上段に示す載荷範囲が短期荷重耐力時 (1 回目) での各試験体比較では x 方向, y 方向ともに一体型試験体の No.1 より PCa 試験体の No.2 がやや大きな値での挙動を示している。しかし, 値としては 0.07mm 程度と絶対値としては極めて

小さい。次に, 同図中段に示す R=1/200 (1 回目) での各試験体比較では, x 方向については No.2 は前回の短期荷重耐力時と同程度であり, ずれ量が增大していないことがわかる。また, y 方向についても No.2 が他試験体と比べてやや大きい値を示すが 0.07mm 程度と極めて小さい値である。次に R=1/100 (1 回目) に写真-3 に示すように各試験体の亀裂変位計の設置位置にひび割れが進展した。この際のずれ量を確認すると接合面が存在しない No.1 においても No.2 と同様に 0.3mm を超える値を示している。この後の荷重時にも No.1 とともに他試験体も変位量が増大することから, ひび割れが亀裂変位計の設置位置に進展したことによってずれ量が上昇したと考えられる。以上のことから, PCa 試験体は接合面の存在しない一体型試験体の値よりやや大きい値を示すが, その値は極めて小さく, 荷重を増加させても変位量の上昇は見られないことからずれは生じていないと考えて良いと判断できる。

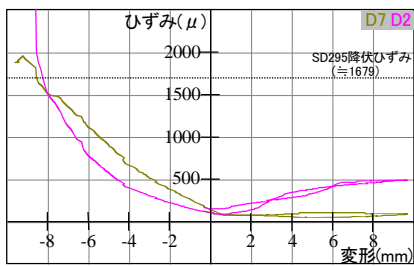


図-9 U字筋(D7).せん断補強筋ひずみの推移比較(D2) (R=1/100(正側1回目)~1/100(負側1回目))



写真-3 亀裂計

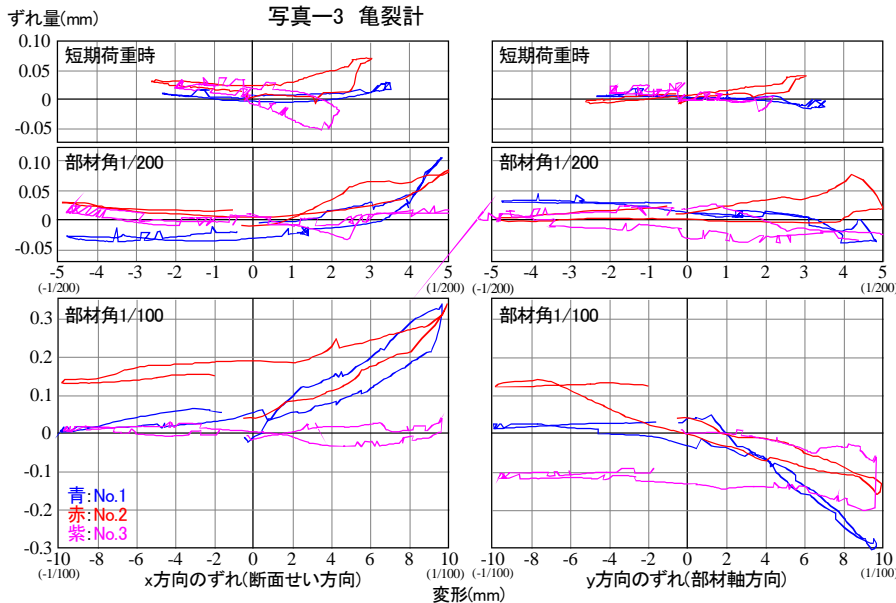


図-10 接合面のずれ量(C3)

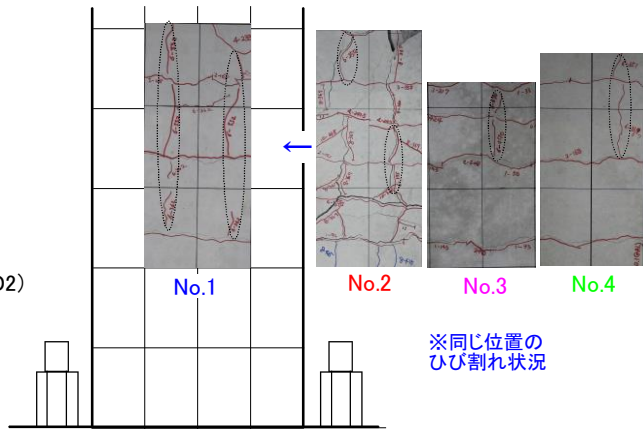


図-11 引張を受ける面のひび割れ状況 (主筋に沿ったひび割れ)

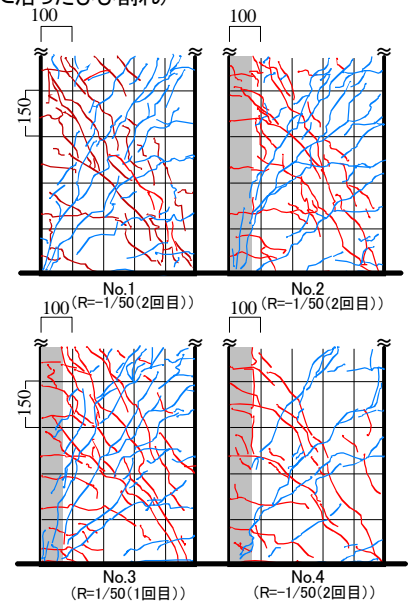


図-12 ひび割れ状況図 (載荷方向に対して側面)

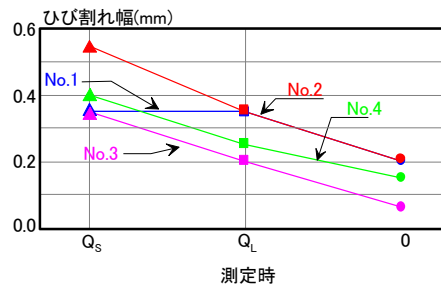


図-13 最大せん断ひび割れ推移
【除荷時: $Q_s \rightarrow Q_l \rightarrow 0$ 】

3.7 主筋に沿って発生するひび割れ

図-11 に、正側荷重時に引張となる側 (PCa 試験体については PCa 部) の $R=1/100$ (正側 1 回目) 時のひび割れ状況を示している。同図より、主筋に沿うひび割れは一体型試験体、PCa 試験体に関わらず全試験体で $R=1/100$ (正側 1 回目) へ向かう荷重時に発生することが確認された。発生時の荷重は No.2 のみ一体型試験体 (No.1) と比べてやや小さい値を示したが、これ以降のひび割れの進展については一体型試験体が PCa 試験体よりも早いサイクルにおいて進展する結果が得られた。以上より、PCa 部が本試験体程度の厚み (65mm) の場合、鉄筋による割り先などが発生し、付着性能劣化が問題となることはないと考えられる。また、主筋径サイズを上げて付着に対して不利に設定した No.4 についても同様の傾向であった。

3.8 ひび割れ状況

図-12 に荷重方向に対して側面となる側の各試験体のひび割れ状況 (各試験体の荷重終了時) を示す。同図から、一体型試験体と PCa 試験体のひび割れ発生状況はよく似ていることが読み取れる。また、PCa 試験体では PCa 部と後打ち部の接合面については、No.2 には若干のひび割れがみられるが、このひび割れが材軸方向に沿って進展することはなかった。一方で、接合面破壊型の No.4 には、せん断ひび割れが接合面の材軸方向に沿って進展したが、その際の部材挙動やせん断補強筋 (接合面位置)、トラス筋のひずみの挙動に変化がみられないことから、せん断ひび割れの進展による影響はないと考えられる。このことから、本実験で用いた PCa 試験体の PCa 部と後打ち部の接合面にはずれが生じていないと考えられる。また、本実験では接合面が破壊するように設計された No.4 の試験体に関しても、接合面破壊が生じなかったと考えられる。

3.9 ひび割れ幅の推移

また、PCa 部に発生するせん断ひび割れ幅が一体打ちと大きく異なることがないことを確認するため、図-13 に、正側荷重時に引張側 (PCa 試験体については PCa 部) となる面に発生するひび割れ幅について、短期荷重時耐力 (Q_s)、そこから除荷し長期荷重時耐力 (Q_l)、荷重 0kN と

なった場合について、縦軸に変形量をとって示している。なお、表示している各試験体のせん断ひび割れ幅は、検討している面で発生したせん断ひび割れの中で最大となるものを示している。同図より、いずれの試験体においても荷重および部材変形量が小さくなるにつれほぼ比例的にせん断ひび割れ幅が小さくなっており、この傾向は一体打ち試験体、PCa 試験体によらず同じである。

4. まとめ

軽量化を目的として PCa 部の厚さを薄くして作製したハーフ PCa 梁部材に対して曲げせん断実験を行った。その結果、本実験で用いた試験体では、1) 主筋、せん断補強筋、トラス筋、それぞれのひずみ状況、2) PCa 部と後打ち部の境界面のずれ量、3) ひび割れ発生状況 のいずれから判断しても、PCa 部と後打ち部の一体性が確保されており、一体型試験体と同等の性能を有していることが確認できた。

謝辞

本研究を行うにあたり、近畿大学建築学部 4 年生の小橋和真氏、米田龍矢氏、寺地勇輝氏、大成ユーレック (株) 長嶋秀雄氏、萬亀山行氏にご協力頂きました。ここに謝意を示します。

参考文献

- 1) 飯島宣章, 原田直哉, 岡野創, 井上富太: 「U 字型ハーフプレキャスト梁部材に関する実験的研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1993.9
- 2) 佐藤圭一, 田中正之, 増田安彦, 吉岡研三: 「主筋とせん断補強筋を内蔵する薄肉 PCa 板を用いたハーフプレキャスト梁の力学的性状に関する研究」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1996.9
- 3) 森末 匠, 村上輝樹, 平松道明, 岸本一蔵: PCa 部の厚みが薄いハーフ PCa 梁部材の曲げせん断実験, 日本コンクリート工学会年次論文報告集, 42 巻 2 号, pp.595-600, 2023.7
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説, 日本建築学会, 2018
- 5) 荒川卓: 鉄筋コンクリート梁の許容せん断応力度とせん断補強について, コンクリート・ジャーナル, Vol8, No.7, pp.11-20, 1970.7
- 6) 日本建築学会: 現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針 (案)・同解説, 日本建築学会, 2002
- 7) 一般社団法人プレハブ建築協会: プレキャスト建築技術集成 第 4 編 R-PC の設計, 一般社団法人プレハブ建築協会, 2003.1