

論文 高強度材料を用いたプレキャスト RC 有孔梁の変形性能に関する実験的研究

中野克彦*1・松崎育弘*2・佐々木勇*3・松谷輝雄*4

要旨：本研究は、高強度コンクリートおよび高強度補強筋（開口補強金物、せん断補強筋）を用いたプレキャスト RC 有孔梁の曲げ・せん断実験を行い、一体打ち試験体と比較しながら開口部が水平打継ぎ面に与える影響を検討し、報告したものである。結果として、開口部は十分な補強効果が得られ、水平打継ぎ面に存在する開口補強金物は、ダボ抵抗要素としてそれを抑えるせん断補強筋と同様に効果があることが確認された。

キーワード：高強度コンクリート、高強度開口補強金物、有孔梁、水平打継ぎ

1. はじめに

現在進められている建築の工業化により梁をハーププレキャスト材とした場合、梁の有効断面内に後打ちコンクリートとの打継ぎ面が生じ、打継ぎ面に生じるせん断力に対する評価が重要となる。一方、先打ちPCa部材に設備用開口を設ける場合、開口補強金物が打継ぎ面に存在することになる。

本研究では、高強度材料を用いたPCa有孔梁部材の曲げせん断実験を行い、一体打ち試験体と比較することにより、開口部が打ち継ぎ面に与える影響を把握することを目的とした。

2. 実験概要

2. 1 試験体

試験体形状および開口部の詳細を図1に、試験体一覧を表1に示す。試験体形状は、梁幅 (b) 21cm、梁せい (D) 36cm、せん断スパン (a) 72cm (a/D=2.0) とした。

PCa部材は、梁下端から26cmの部分为先打ちし、上部10cmおよび柱型(スタブ)

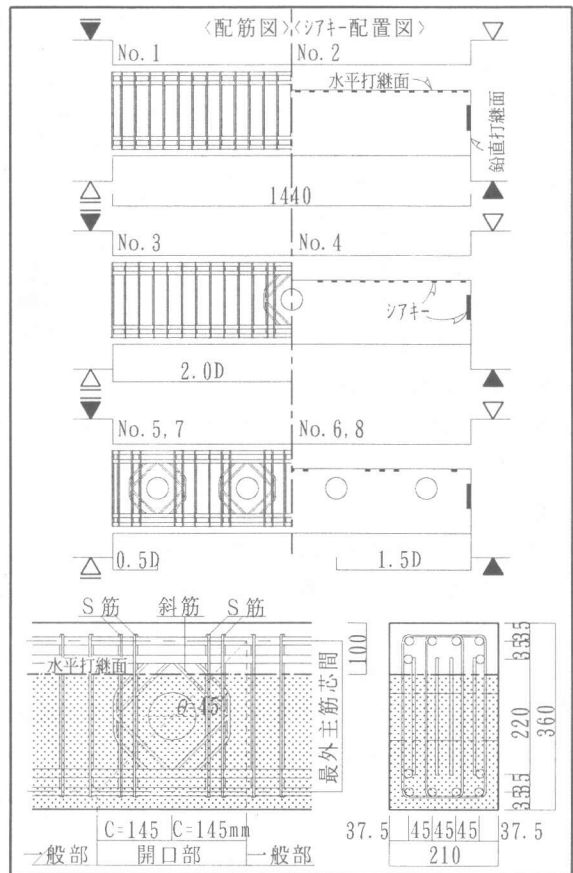


図1 試験体形状および開口部詳細

- * 1 東京理科大学工学部建築学科助手（正会員）
- * 2 東京理科大学工学部建築学科教授、工博（正会員）
- * 3 東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻
- * 4 鴻池組（株）技術研究所副所長

表1 試験体一覧

No.	試験体名	断面形状	孔数	主筋形式	一般部 pw(%)	開口部		打ち継ぎ面の構成要素			
						S筋 [pwos(%)]	金物 [pwod(%)]	補強筋 [As(cm ²)]	コッター [Ac(cm ²)]	付着面 [Ab(cm ²)]	
1	RN-0-S	一体打ち	0	8-D16 [2.47]	4-4φ 25組 [0.42]	—	—	—	—	—	
2	RH-0-S	PCa	0			—	—	12.6	312.0	2699.4	
3	RN-1-S	一体打ち	1			4-4φ 20組 [0.42]	4-4φ 4組 [0.33]	4-6φ 4組 [1.18]	—	—	—
4	RH-1-S	PCa	1			—	—	18.5	264.0	2741.5	
5	RN-4-S	一体打ち	4	6-D16 [1.81]	4-4φ 8組 [0.42]	4-4φ 16組 [0.33]	4-6φ 16組 [1.18]	—	—	—	
6	RH-4-S	PCa	4		—	—	37.6	132.0	2854.4		
7	RN-4-B	一体打ち	4	6-D16 [1.81]	4-4φ 8組 [0.42]	4-4φ 16組 [0.33]	4-6φ 16組 [1.18]	—	—	—	
8	RH-4-B	PCa	4		—	—	37.6	132.0	2854.4		

pw:一般部せん断補強筋比 pwos:開口部せん断補強筋比 pwod:S筋せん断補強筋比
As:せん断補強筋および開口補強金物の全断面積 Ac:コッターの全断面積 Ab:水平打ち継ぎ面からAsとAcを除いた全断面積

表2 鉄筋材料試験結果

使用箇所	種類	降伏応力度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	降伏ひずみ (×10 ⁻³)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
主筋	D16	4980	6940	2510	2.01×10 ⁶
せん断補強筋	4φ	8710	9970	4290	2.13×10 ⁶
開口補強金物	6φ	9630	10060	4480	2.16×10 ⁶

表3 コンクリート材料試験結果

打設位置	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (×10 ⁶ kgf/cm ²)
先打ち部分	611~664	35.6~37.6	3.09~3.46
後打ち部分	520~569	34.2~42.4	2.88~2.95

部分を後打ちした。水平接合部および鉛直接合部には、シアコッターを設けた。水平接合面のコッター形状は20×20×5mm(3列, @57mm)であり、開口部上部を除く梁全面の補強筋と主筋の間に設けた。鉛直接合面のコッター形状は130×100×12mmであり、左右梁端に2箇所設けた。

図1に開口部の詳細を示したが、開口部の補強形式は斜筋(開口補強金物)とS筋(開口部内のせん断補強筋)とした。

変動要因は、1)引張鉄筋比2水準(pt=1.81%, 2.47%)、2)孔数(孔位置)を変化させた試験体3種類(梁中央部に孔1個設けた試験体、梁端部0.5Dを含め孔4個を設けた試験体、無孔梁)とし、PCa試験体と一体打ち試験体についてそれぞれ実施した。

本実験で使用した鉄筋の材料試験結果を表2に、コンクリートの材料試験結果を表3に示す。

高強度コンクリート(cσB=600kgf/cm²級)と高強度せん断補強筋・開口補強金物(wσy=8000kgf/cm²級)を組み合わせた有孔梁の構造性能評価は、著者らにより研究が進められているが[1]、本研究においては普通強度レベルで示されている諸耐力式を用いて評価を行った。広沢修正式により求めた開口部せん断耐力を曲げ略算式により求めた曲げ耐力で除した開口部せん断余裕度は、

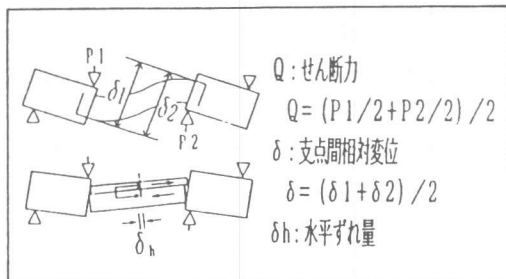


図2 加力・測定模式図

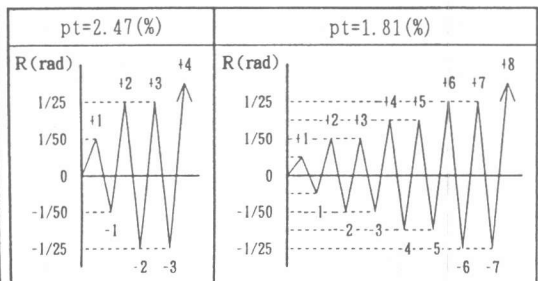


図3 载荷履歴図

表4 実験結果一覧

No.	試験体名		降伏荷重時		最大荷重時		最終破壊時		1/50rad時		1/25rad時		計算値		破壊経過
			正	負	正	負	cycle		正	負	正	負	正	負	
1	RN-0-S	Q(tf)	31.5	28.8	33.1	32.6	-2	30.6	33.8	32.6	33.1	21.1	30.5	30.5	曲げ降伏後のせん断破壊
		δ (mm)	16.6	10.2	54.1	28.9		28.9	28.9	28.9	54.1	57.7			
2	RH-0-S	Q(tf)	30.5	29.6	32.9	30.6		-	32.9	30.6	31.7	29.0	30.5	30.5	曲げ降伏後のずれ破壊
		δ (mm)	15.7	22.0	28.8	28.8		-	28.8	28.8	57.6	57.6			
3	RN-1-S	Q(tf)	31.0	29.4	33.1	32.3	-2	32.3	33.2	32.5	33.2	17.5	30.5	30.5	曲げ降伏後のせん断破壊
		δ (mm)	15.7	11.2	57.7	28.8		42.1	28.7	28.8	57.7	60.7			
4	RH-1-S	Q(tf)	30.6	29.6	33.3	29.6		-	33.3	29.6	31.7	28.6	30.5	30.5	曲げ降伏後のずれ破壊
		δ (mm)	14.3	28.9	28.8	28.9		-	28.8	28.9	57.6	57.7			
5	RN-4-S	Q(tf)	31.0	29.5	32.4	32.3	+2	30.1	32.6	32.3	18.4	-	30.5	30.5	曲げ降伏後の開口部破壊
		δ (mm)	15.7	12.9	28.8	28.9		32.0	28.8	28.9	57.6	-			
6	RH-4-S	Q(tf)	30.8	27.7	33.1	31.2	+2	31.1	33.1	31.2	19.1	-	30.5	30.5	曲げ降伏後の開口部破壊
		δ (mm)	15.7	12.4	28.9	28.8		34.0	28.8	28.8	57.7	-			
7	RN-4-B	Q(tf)	23.4	22.2	25.8	25.7	-4	25.5	25.8	25.7	25.2	25.5	23.3	23.3	曲げ降伏後の開口部破壊
		δ (mm)	11.1	9.4	28.9	28.8		41.2	28.9	28.8	43.3	41.2			
8	RH-4-B	Q(tf)	23.4	22.2	26.1	25.1	-4	24.7	26.1	25.1	25.4	22.7	23.3	23.3	曲げ降伏後の開口部破壊
		δ (mm)	11.1	8.7	28.8	28.8		35.0	28.8	28.8	43.1	43.4			

計算値：曲げ略算式より求めた曲げ降伏時のせん断力（実験値/計算値）

pt=2.47%の試験体で0.85、pt=1.18%の試験体で1.15となっている。

2. 2 加力・測定方法

加力・測定模式図を図2に、载荷履歴図を図3に示す。加力は、試験体左右端をピンローラー支持した状態で、上下の油圧ジャッキを個々に制御することにより、梁両端の相対変位($\delta 1, \delta 2$)が等しくなるように正負交番繰り返し载荷した。荷重(P1, P2)はロードセルにより、支点間相対変位($\delta 1, \delta 2$)および水平打継ぎ面の水平ずれ量(δh)は電気式変位計により測定した。

3. 実験結果および検討

3. 1 実験経過・破壊性状

表4に実験結果の一覧、図4に破壊状況の一例を示す。高強度コンクリートと高強度補強筋(せん断補強筋・開口補強金物)を組み合わせた有孔梁において、開口部は十分な補強効果が得られ、開口部せん断余裕度が1未満として設計した試験体も曲げ降伏に至るまで耐力が上昇し、1以上の試験体では変形性能が向上した。

以下に、実験経過を示す。

1) せん断余裕度を0.85と設定した試験体

(No. 1, 2, 3, 4, 5, 6)

+1cycle時では、孔の有無・個数、打継ぎの有無による影響はみられなかった。相対変形

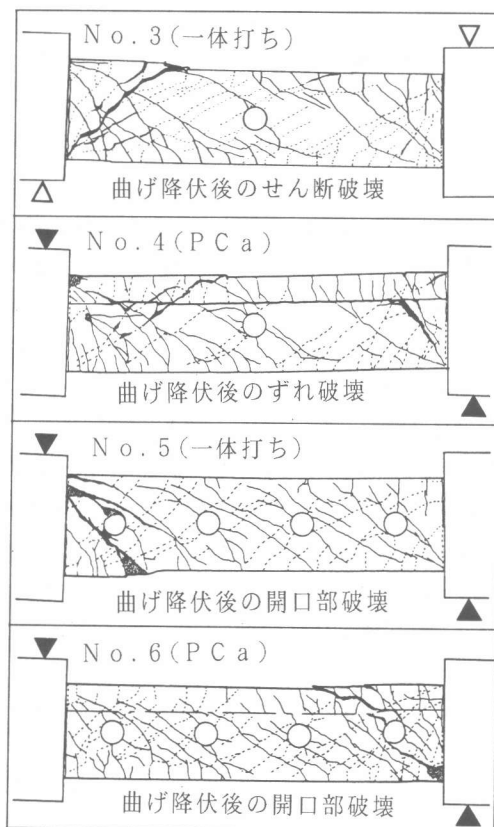


図4 破壊状況一例

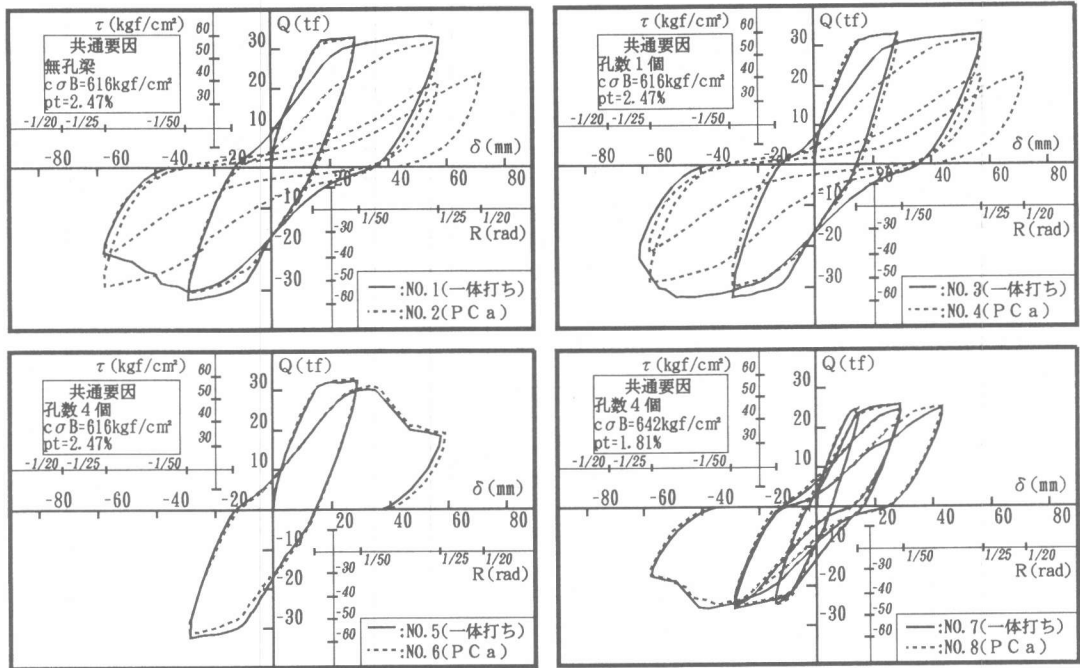


図5 セン断力-相対変形関係

R=1/3000 rad時までに曲げひび割れが発生し、有孔梁はR=1/700rad時付近で孔45度方向のせん断ひび割れ、R=1/400rad時付近で一般部にせん断ひび割れが発生した。Q=32tf、R=1/85rad時付近で部材降伏に至り、R=1/50rad時の耐力は降伏時の1.05倍程度であった。-1cycle時では、PCa試験体の無孔梁 (No. 2) および孔 1 個の有孔梁 (No. 4) においてR=-1/120rad時に水平打継ぎ面にずれが生じ、剛性が低下した。PCa試験体の孔 4 個の有孔梁 (No. 6) は水平打継ぎ面にずれは生じず、一体打ち試験体 (No. 7) と同様な性状を示した。打継ぎ面でずれを生じなかったNo. 1, 3, 5, 6試験体では約R=-1/120rad時、ずれを生じたNo. 2, 4試験体では、約R=-1/50rad時に部材降伏に至った。2cycle以降では、No. 1, No. 3試験体では左右両端部のせん断ひび割れが口開き-2cycle時に梁端部より1.0D (D:梁せい) 区間のせん断ひび割れが大きく口開きせん断破壊に至った。No. 2, No. 4の水平ずれを生じた試験体では、梁両端部より1.0D区間のせん断ひび割れが変形の増大とともに口開き、繰り返し荷に伴う水平ずれが増長し、耐力低下がすすんだ。No. 5, 6試験体では、+2cycle以降せん断ひび割れが梁全体に分散し、+2cycle時に梁端部のせん断ひび割れが大きく口開き、孔に接するひび割れが拡大し、梁端部より0.5Dの孔で開口部せん断破壊に至った。

2) セン断余裕度を1.15と設定した試験体 (No. 7, 8)

ひび割れ発生等は1) で述べた性状と同様であり、Q=23tf、R=1/130rad時付近で部材降伏した。R=1/33radまで正負ともに耐力上昇がある良好な履歴性状が得られ、負荷荷のR=1/40rad時付近で一体打ち (No. 7)、PCa部材 (No. 8) とともに梁端部より0.5Dの孔で開口部せん断破壊に至った。

3. 2 変形状

図5にせん断力 (Q)-相対変形 (δ) 関係を示す。水平打継ぎ面にずれを生じなかったPCa試験体 (No. 6, 8) は、一体打ち試験体 (No. 5, 7) と同様な履歴曲線を描いており、最大耐力時および最終破壊時の耐力・変形・破壊状況に違いはみられなかった。水平ずれが生じた試験体 (No. 2, 4) は、一体打

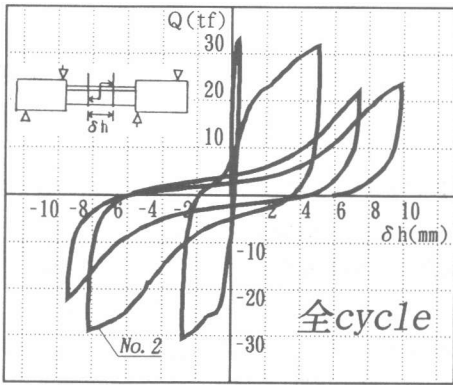


図6 せん断力-水平ずれ量関係

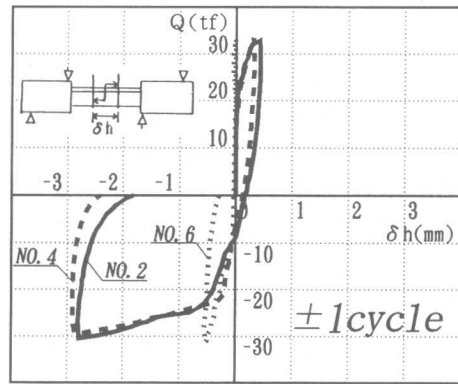


図7 せん断力-水平ずれ量関係の比較

ち試験体 (No. 1, 3) が $R=1/35\text{rad}$ 時にせん断補強筋の破断により急激な耐力低下したのに対し、水平ずれ発生後、履歴曲線が逆 S 字型となり、 $R=1/20\text{rad}$ 時まで急激な耐力低下は示さなかった。

3. 3 水平打継ぎ面におけるずれ性状

水平打継ぎ面にずれを生じた No. 2 試験体のせん断力 (Q)-水平ずれ量 (δh) 関係を図 6 に、PCa 試験体 (No. 2, 4, 6) の $R=1/50\text{rad}$ 時における $Q-\delta h$ 関係の比較を図 7 に示す。水平ずれを生じた No. 2, 4 試験体の $Q-\delta h$ 関係は、孔の有無に関わらず類似した性状を示した。+1cycle ($R=0\sim 1/50\text{rad}$) では、部材降伏時まで水平ずれはほとんど生じず、 $R=1/50\text{rad}$ で $\delta h=0.42\text{mm}$ (No. 2), 0.31mm (No. 4), 0.0mm (No. 6) であった。-1cycle ($0\sim -1/50\text{rad}$) では、No. 2 が $Q=26\text{tf}$, $\delta h=1.4\text{mm}$ (No. 2), No. 4 が $Q=23\text{tf}$, $\delta h=0.53\text{mm}$ で急にずれを生じ、 $R=-1/50\text{rad}$ で $\delta h=2.78\text{mm}$ (No. 2), 2.86mm (No. 4), 0.54mm (No. 6) であった。1/25rad 時における同一部材角時の繰り返しにおける水平ずれ量は、繰り返しによりせん断力が低下しているにもかかわらず増長した。表 1 に打継ぎ面を横切る補強筋 (せん断補強筋・開口補強金物) の断面積が示したが、開口補強金物を除くせん断補強筋の断面積は、No. 2, 4, 6 ではほぼ等しく、開口補強金物の断面積が 0cm^2 (No. 2), 6.4cm^2 (No. 4), 25.6cm^2 (No. 6) と異なる。開口補強金物が増加するにつれ、水平ずれ量が減少することにより、開口補強金物は打ち継ぎ面の水平ずれを抑えるせん断抵抗要素として効果を発揮していることが確認された。

次に、水平打継ぎ面に作用するせん断力とずれに対する抵抗力について、PCa 試験体 (No. 2, 4, 6) の実験結果をもとに検討を行う。水平打継ぎ面に生じるせん断伝達力 (eQ_j) は、上端主筋の引張側の張力とした。水平接合部に存在する抵抗要素は、a) コッター、b) コンクリート面の付着、c) せん断補強筋、d) 開口補強金物 と考えられる。開口補強金物は、図 1 に示すように、水平打継ぎ面においては 4 本の鉄筋がせん断抵抗要素として存在しており、打継ぎ面に対しては 45° と 135° に傾斜しているため、一種のトラス筋として抵抗していると思われる。打継ぎ面にトラス筋が存在するせん断伝達性能については、せん断力に対して引張側と圧縮側で異なる挙動を示し、最大耐力は累加できないが剛性は上昇すると報告されていることから全ての鉄筋を抵抗要素とした [2]。

水平打ち継ぎ面のせん断抵抗力 (cQ_j) は、式 (1) に示すように各抵抗要素の累加とした。

$$cQ_j = scQ_j + cbQ_j + sdQu \quad (1)$$

scQ_j : コッターのせん断耐力 ($0.1 \cdot c\sigma B \cdot cAs$; $c\sigma B$: コンクリート圧縮強度, cAs : コッター断面積)

cbQ_j : コンクリート間の付着強度 ($10 \cdot cAb$; cAb : コンクリート面の付着面積)

sdQ_j:せん断補強筋および開口補強金物のダボ抵抗力($\alpha \cdot s\sigma_y \cdot sA_s$; sA_s :補強筋断面積, $s\sigma_y$:鉄筋降伏応力度)

各抵抗要素の累加は各々のずれ剛性の違い考慮する必要があるが[3]、scQ_j,cbQ_jの変形を考慮した耐力を求めるのは難しく式(1)中に示す値を用いた。sdQ_jは、著者らの研究の打継ぎ面の抵抗力が鉄筋のダボ抵抗力のみであるPCa梁試験体の実験結果を参考に、シアキー等と累加して耐力評価を行うには、水平ずれ量が1mm程度の時の抵抗力とし、 $\alpha=0.45$ として求めた[4]。また、関連の報告により高強度せん断補強筋を用いた場合のダボ抵抗力が普通強度のせん断補強筋を用いた場合のダボ抵抗力と差がないことから $s\sigma_y=4000\text{kgf/cm}^2$ を採用した[5]。

各抵抗要素の耐力を累加すると、cQ_j=68.9tf(No2),77.0tf(No4),104.4tf(No.6)となる。各試験体とも+1cycle折り返し時(Q=32tf)に入力されたeQ_j=80tfでは、ずれを生じておらず、打継ぎ面の抵抗力は各抵抗要素の累加により推測できると思われる。No4,6試験体は、繰返し載荷の影響により打ち継ぎ面の付着力が減少し、-1cycle中(Q=26tf,eQ_j=41tf)でずれが生じ、以降の繰返し載荷では鉄筋のダボ力のみで抵抗している様相がみられる。一方、No.6試験体は-1cycle折り返し時(Q=29tf)においてもずれは生じなかった。以上のことより打継ぎ面の抵抗力を評価する為には繰返しによる打継ぎ面の抵抗力の変化、抵抗する打継ぎ面の有効断面積等を明らかにする必要があるが、No.6試験体では開口補強金物がシアキーとして効果があり、全くずれを生じさせない補強がされていたことが確認された。

4. まとめ

600kgf/cm²級の高強度コンクリートと8000kgf/cm²級の高強度補強筋(せん断補強筋・開口補強金物)を用いた有孔梁の曲げ・せん断実験を行い以下の結果が得られた。

- 1) 開口部は十分な補強効果が得られ、開口部せん断耐力を普通強度レベルで示されている広沢修正式により評価した開口部せん断余裕度を0.85と設定した試験体においても曲げ降伏に至るまで耐力が上昇し、せん断余裕度を増すことにより変形性能は向上した。
- 2) 打継ぎ面に存在する開口補強金物は、ずれを抑える抵抗要素として効果がありシアキーとして評価できることが確認された。水平ずれが生じなかったPCa試験体は一体打ち試験体と同様な性状を示し、ずれが生じた試験体は逆S字型の履歴ループを示すが急激な耐力低下は無かった。
- 3) 梁主筋の降伏引張力に対して、開口補強金物を含んだ水平打継ぎ面のせん断抵抗要素を累加したせん断抵抗力を設定することにより、ずれ発生の有無を推測できるが、繰返しによる打継ぎ面の抵抗力の変化、抵抗する打継ぎ面の有効断面積等を明らかにする必要があると思われる。

謝辞:コーリョー建販(株)より開口補強金物を提供して頂きました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- [1] 松崎育弘,渡辺高朗 他:高強度せん断補強筋($w\sigma_y=8000\text{kgf/cm}^2$ 級)を用いたRC有孔梁のせん断耐力評価に関する実験的研究,建築学会梗概集,C,pp929-930,1994
- [2] 松崎育弘 他:トラス補強合成部材の構造性能に関する実験研究,建築学会梗概集,C,pp171-172,1988
- [3] 松崎育弘 他:プレキャスト部材接合面におけるせん断伝達に関する実験研究,建築学会梗概集,C,(その1),(その2),pp759-762,1992,(その3),(その4),pp591-594,1993
- [4] 松崎育弘,中野克彦 他:水平打ち継ぎを有するRCはり部材のずれ性状に関する実験研究,建築学会梗概集,C,611-612,1993
- [5] 松崎育弘,中野克彦 他:水平打ち継ぎを有するRC梁のせん断耐力に関する実験研究,建築学会梗概集,C,pp791-792,1992