

梁端部に開孔を有するヒンジリロケーション RC 梁構法の開発 (その1) 片持ち梁型曲げ実験

Development of RC beams using the hinge relocation construction method with opening at the beam ends (Part1) Test of cantilevered beam

赤井 冬来*

Fuyuki Akai

飯塚 信一**

Shin-ichi Iizuka

金川 基*

Motoi Kanagawa

要 約

筆者らは、RC 造柱梁接合部のプレキャスト化による施工の合理化を目的として、ヒンジリロケーションを応用する研究を行ってきた。本研究では、梁端部に高強度鉄筋を用いて継手先端位置をヒンジ位置とし、さらに梁端部に開孔を設けた片持ち梁型の構造実験を実施した。実験の結果、梁端部に開孔を設けた場合においても継手先端部が先行して降伏し、ヒンジリロケーションが形成され、 $R=1/20 \text{ rad.}$ まで安定した復元力特性を有することを確認した。さらに、コ型補強筋はせん断抵抗に寄与し、継手先端側孔際せん断補強筋の降伏を抑制することや開孔補強筋の寄与分は孔際せん断補強筋およびコ型補強筋で負担できることを確認した。

- § 1. はじめに
- § 2. 実験計画
- § 3. 実験結果
- § 4. 実験の考察
- § 5. まとめ

§ 1. はじめに

筆者らは、柱梁接合部のプレキャスト（以下、PCa）化による施工の合理化を目的として、ヒンジリロケーション（以下、HR）を応用する研究¹⁾を行ってきた。PCa部材の接続に用いられるA級機械式継手は、ヒンジ領域を避けた位置（柱面から梁せいD以上離れた位置）に設ける必要がある。この場合、中柱接合部のPCa部材長さ（接合部せい+鉄筋突出長）は運搬車両で積込できる長さを超え、PCa化できないことが多い。本研究のHRは、梁端部から接合部内の主筋に対し、梁一般部の主筋よりも高強度な鉄筋を用いることで、ヒンジ位置を継手先端位置に移動させるものである。図-1のようにHRを応用して機械式継手を梁端部に設置することで、運搬車両に積込可能な長さとなり、PCa接合部として計画できる。

* 技術研究所建築技術グループ

** 技術研究所

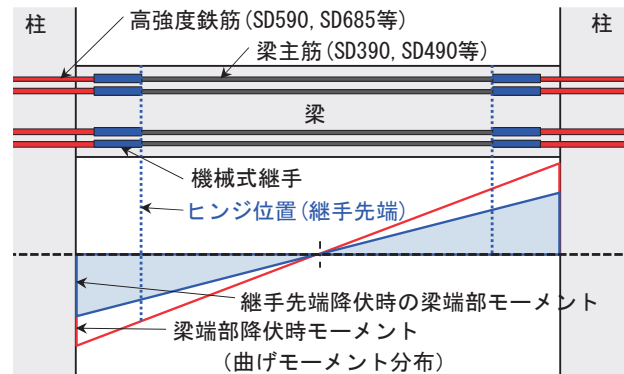


図-1 梁端部を高強度鉄筋で補強した HR 梁

§ 2. 実験計画

HR 接合部の梁端部に開孔を設けた場合の構造性能の確認を目的として実施した片持ち梁型構造実験の計画について以下に示す。

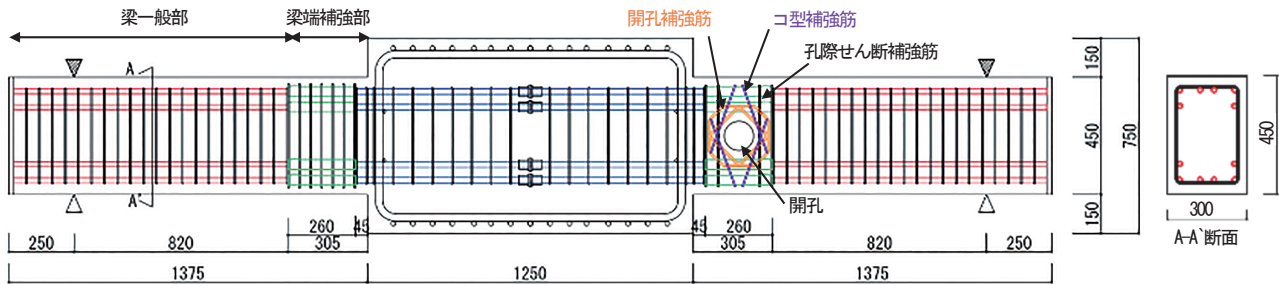
2-1 試験体概要

片持ち梁型実験の試験体諸元を表-1に、鉄筋の材料試験結果を表-2に、試験体形状・配筋の一例を図-2に、開孔部周囲の形状・配筋を図-3に示す。試験体は超高層集合住宅における基準階大梁の約1/2スケールを想定し、梁幅Bを300mm、梁せいDを450mm、せ

表一 試験体諸元

	PB-N	PB-1	PB-2	PB-3	PB-4	PB-5	PB-6	PB-7	PB-8	PB-9
設計基準強度 F_c [N/mm ²]	42.0									
コンクリート強度 σ_B [N/mm ²]	39.2	40.2	34.6	34.9	35.1	36.6	37.0	36.7	37.2	38.2
梁端補強部主筋	6-D19 (SD590)		8-D19 (SD590)		6-D19 (SD590)		6-D19 (SD590)			
引張鉄筋比 ρ_t [%]	1.53		2.10		1.53		1.53			
梁一般部主筋	6-D16 (SD490)		8-D16 (SD590)		6-D16 (SD490)		6-D16 (SD490)			
引張鉄筋比 ρ_t [%]	1.06		1.45		1.06		1.06			
梁端補強部せん断補強筋	2-S6@45 (KSS785)		4-S6@45 (KSS785)		2-S6@45 (SD295)		4-S6@45 (KSS785)		2-S6@45 (KSS785)	
せん断補強筋比 ρ_w [%]	0.47		0.95		0.47		0.95		0.47	
梁一般部せん断補強筋	2-S6@50 (KSS785)		4-S6@50 (KSS785)		2-S6@50 (SD295)		4-S6@50 (KSS785)		2-S6@50 (KSS785)	
せん断補強筋比 ρ_w [%]	0.43		0.85		0.43		0.85		0.43	
コ型補強筋 ^{※1}	—		2-D6 (SD295)		—		2-D6 (SD295)		—	
コ型補強筋比 [%]	—		0.16		—		0.16		—	
開孔補強筋 ^{※1}	—		4-S8 (KSS785)		4-S6 (KSS785)		4-S8 (KSS785)		4-S6 (KSS785)	
開孔補強筋比 [%]	—		0.55		0.35		0.55		0.35	
孔際せん断補強筋 ^{※1}	—		6-S6 (KSS785)		12-S6 (KSS785)		6-S6 (KSS785)		12-S6 (KSS785)	
孔際せん断補強筋比	—		0.38		0.75		0.38		0.75	
かんざし筋の有無	—									
梁一般部せん断余裕度 (靱性指針 ³⁾ , $R_p=0.02$)	1.43	1.45	1.32	1.16	1.33	0.92	1.38	1.58	1.38	1.41
梁端補強部せん断余裕度 ^{※2} (RC規準 ²⁾ , コ型補強筋考慮しない)	1.07	1.20	1.18	1.03	1.06	0.91	1.19	1.09	0.99	1.20
入力せん断応力度レベル	0.050	0.049	0.057	0.073	0.056	0.054	0.053	0.053	0.053	0.051
想定破壊モード	—		曲げ破壊		曲げ降伏後せん断破壊		曲げ破壊		曲げ降伏後せん断破壊	

※1：-の前の数字は、孔周囲の補強筋の有効な範囲内²⁾で、円形中心より45°方向に引いた直線が交差する各補強筋の本数とする
 ※2：無開孔試験体PB-Nは荒川min式²⁾、その他試験体は修正広沢式²⁾により算出



図一 試験体形状・配筋の一例（左：PB-N，右：PB-1）

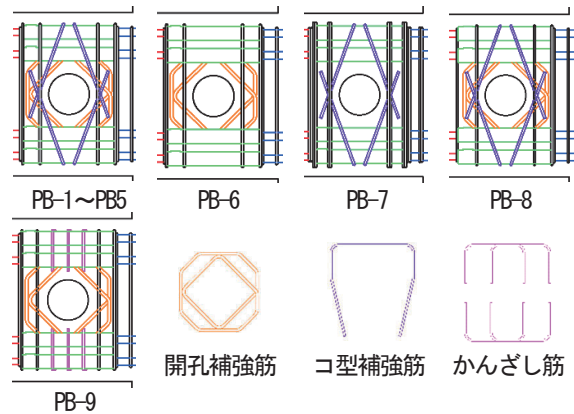
ん断スパン M/Q を 1125 mm とした。開孔の径は $D/4$ とし、水平位置は継手中央（スタブ面から $0.39 D$ ）とした。梁部材としての限界部材角の確認のために、曲げ破壊型を 8 体、曲げ降伏後せん断破壊型を 2 体の合計 10 体を計画した。パラメータは開孔の有無，入力せん断応力度レベル，せん断余裕度，補強筋の有無，孔上下補強方法である。

本報ではスタブ面から継手先端までの区間を梁端補強部，継手先端から先の区間を梁一般部と各区間を定義する。スタブ面から継手末端までの距離 x は、全試験体共通で 45 mm ($0.1 D$) とした。なお、機械式継手に充填するモルタルには 120 N/mm^2 級のものを用いた。試験体設計において、曲げ終局強度および開孔部のせん断終局強度は式(1)，式(2)に示す RC 規準に基づく式²⁾で、梁一般部のせん断終局強度は靱性指針式³⁾で求めた。

$$cQ_{fu1} = 0.9a_f f_t d / L_1 \quad (1)$$

$$cQ_{su2} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (F_c + 18)}{\frac{M}{Qd} + 0.12} \left(1 - 1.61 \frac{H}{D} \right) + 0.85 \sqrt{p_t s_y} \right\} b j \quad (2)$$

ここで、 L_1 は加力点から継手先端までの距離である。



図三 開孔部周囲の形状・配筋

表二 鉄筋の材料試験結果

鋼種	降伏強度 σ_y [N/mm ²]	引張強さ σ_u [N/mm ²]	ヤング係数 E_s [N/mm ²]	部位
D19 (SD590)	637.7	817.3	199800	梁端補強部主筋
D16 (SD490)	539.7	700.0	190300	梁一般部主筋
D6 (SD295)	336.9	507.8	167000	せん断補強筋
S6 (KSS785)	974.9	1135.8	193000	開孔補強筋
S6 (KSS785)	926.6	1123.5	204600	
S8 (KSS785)	995.9	1193.6	190500	
D6 (SD295)	336.9	507.8	167000	コ型補強筋 かんざし筋

その他の記号については文献²⁾を参照されたい。

PB-Nは継手先端での曲げ破壊を想定した無開孔試験体である。PB-1はPB-Nの梁端補強部に開孔を設けた試験体である。PB-2およびPB-3はPB-1に対し、コンクリート強度および主筋の本数を変更することで入力せん断応力度レベル $cQ_{fu1}/(Bd\sigma_B)$ を大きくした試験体である。PB-4およびPB-5はPB-2に対し、開孔補強筋の径およびせん断補強筋の規格を変更することで梁端補強部のせん断余裕度を小さくした試験体である。PB-6およびPB-7はPB-2に対し、コ型補強筋や開孔補強筋を無くした試験体である。PB-8はPB-4に対し、実施工において継手先端とグラウト材注入口の間にせん断補強筋を配筋できない場合を想定し、その位置のせん断補強筋を無くした試験体である。PB-9は開孔補強の合理化のために孔上下を図-3に示すかんざし筋(4-D6 SD295)で補強した試験体である。

2-2 荷重方法

セットアップ状況を図-4に示す。荷重は、変位制御による正負交番漸増繰返し荷重とした。荷重サイクルは加力位置の鉛直変位を加力位置からスタブ面までの距離で除した部材角 $R = \pm 1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/50, 1/33, 1/20$ rad.で、各々2サイクル行った。試験体先端には、面外変形拘束治具およびカウンターウエイトを取付けた。

§3. 実験結果

せん断力-部材角関係および最終破壊状況を図-5に、実験結果および計算値を表-3に示す。曲げ降伏後せん断破壊を想定したPB-5およびコ型補強筋を無くしたPB-6以外の試験体では、実験の最大強度 eQ_m は梁一般部曲げ強度 cQ_{fu1} 以上となっており、安全側に評価できた。

PB-Nでは $R = 1/100$ rad.時に、継手先端の1段筋および2段筋が降伏し、梁一般部における曲げ降伏が確認さ

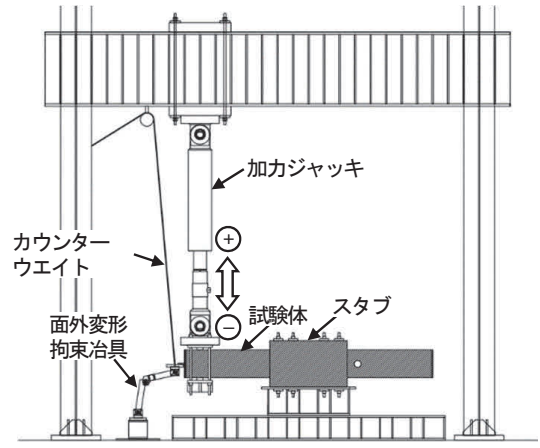


図-4 セットアップ状況

れた。PB-Nでは面外拘束治具を取付けておらず、 $R = 1/20$ rad.の負加力時に試験体が大きくねじれ変形を生じたため、加力を終了した。また、カウンターウエイトを取付けておらず、正負で強度差が生じたために、負側では梁一般部曲げ強度 cQ_{fu1} に達しなかった。正側では $R = 1/20$ rad.まで安定した復元力特性が得られた。

梁端部に開孔を設けたPB-1では、 $R = 1/20$ rad.の1サイクル目まで安定した復元力特性が得られ、開孔部周囲の損傷は比較的抑制されている。2サイクル目では圧縮側のコンクリート剥落や梁一般部主筋1段筋の座屈による応力中心間距離の減少に伴い、せん断力が低下したと考える。PB-1ではカウンターウエイトを取付けておらず、正負で強度差が生じた。

PB-2からPB-9では、 $R = 1/20$ rad.の1サイクル目まで、安定した復元力特性を得られた。

PB-5では $R = 1/100$ rad.時に継手先端主筋に加え、梁一般部および梁端補強部のせん断補強筋が降伏した。その後、 $R = 1/20$ rad.時に、緩やかにせん断力が低下したが、ピークまで最大強度の80%以上を保持した。

コ型補強筋を無くしたPB-6では $R = 1/50$ rad.時に孔際せん断補強筋が降伏したために、最大強度が梁一般部

表-3 実験結果および計算値

試験体	実験値		終局強度計算値										破壊形式 ^{※2}
	最大強度 eQ_m [kN]	最大強度部材角 eR_m [$\times 10^{-3}$ rad]	曲げ			せん断							
			梁一般部曲げ強度 ²⁾ cQ_{fu1} [kN]	梁端補強部曲げ強度 ²⁾ cQ_{fu2} [kN]	$\frac{eQ_m}{cQ_{fu1}}$	梁一般部せん断 $(R_p=2\%)$ ³⁾ cQ_{su1} [kN]	$\frac{eQ_m}{cQ_{su1}}$	梁端補強部せん断 ^{2)※1)} cQ_{su2} [kN]	$\frac{eQ_m}{cQ_{su2}}$	梁端補強部コ型考慮 ²⁾ $cQ_{su2\Delta}$ [kN]	$\frac{eQ_m}{cQ_{su2\Delta}}$	梁端補強部せん断指標 $\frac{cQ_{su2}}{cQ_{fu1}}$	
PB-N	305	49.7	265	329	1.15	379	0.80	285	1.07	-	-	1.08	F
PB-1	306	47.9	265	329	1.15	385	0.80	319	0.96	327	0.94	1.20	F
PB-2	266	48.3	265	329	1.00	350	0.76	313	0.85	320	0.83	1.18	F
PB-3	359	48.8	344	428	1.04	400	0.90	354	1.01	361	1.00	1.03	F
PB-4	270	49.5	265	329	1.02	353	0.77	281	0.96	289	0.94	1.06	F
PB-5	253	29.3	265	329	0.95	245	1.03	240	1.05	250	1.01	0.91	FS
PB-6	261	48.8	265	329	0.98	366	0.71	316	0.82	-	-	1.19	F
PB-7	292	48.6	265	329	1.10	413	0.71	288	1.01	297	0.99	1.09	F
PB-8	271	49.7	265	329	1.02	367	0.74	263	1.03	272	1.00	1.00	F
PB-9	273	49.7	265	329	1.03	373	0.73	317	0.86	-	-	1.20	F

※1: 無開孔試験体PB-Nは荒川min式²⁾、その他試験体は修正広沢式³⁾により算出

※2: 曲げ破壊をF、曲げ降伏後せん断破壊をFSとする

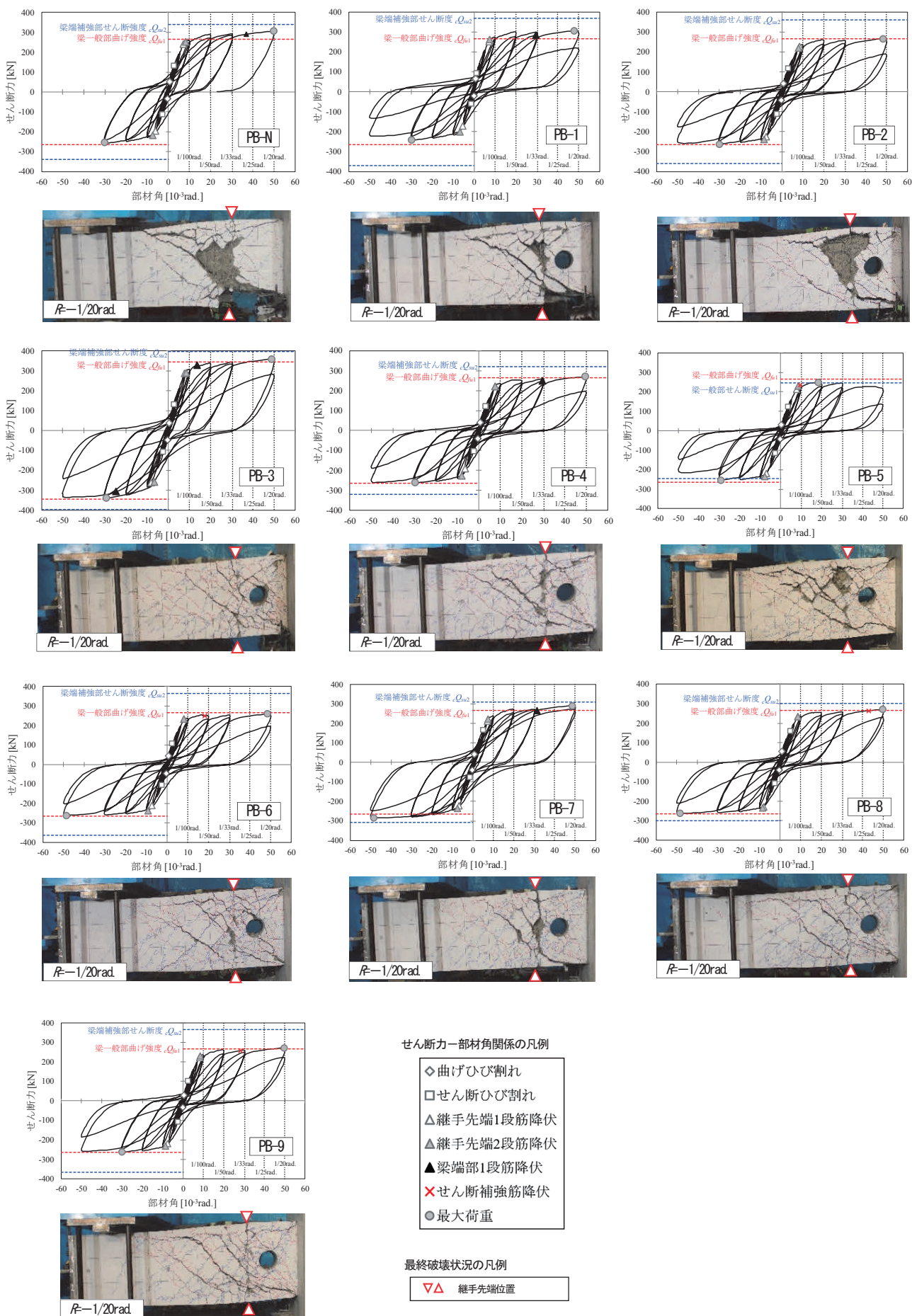


図-5 せん断力-部材角関係および最終破壊性状

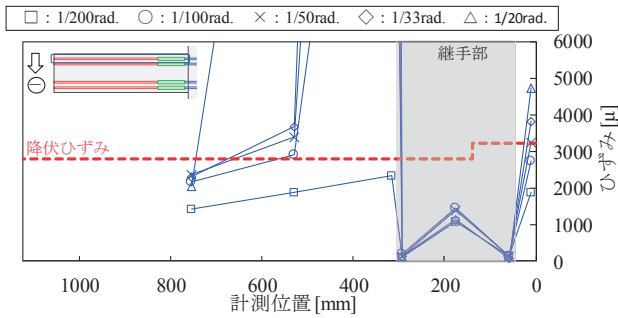


図-6 主筋ひずみ分布 (PB-2)

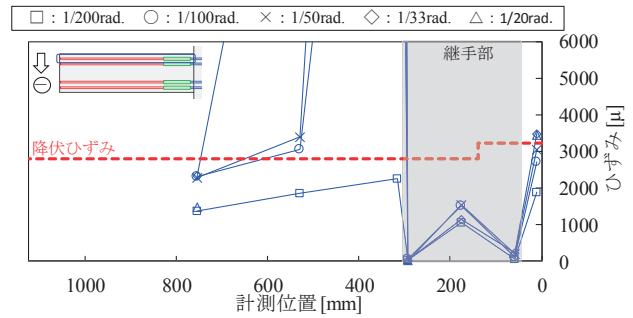


図-8 主筋ひずみ分布 (PB-5)

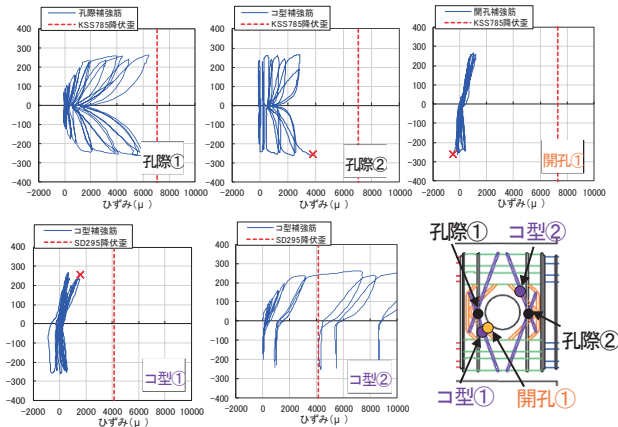


図-7 開孔周囲の各補強筋のひずみ履歴 (PB-2)

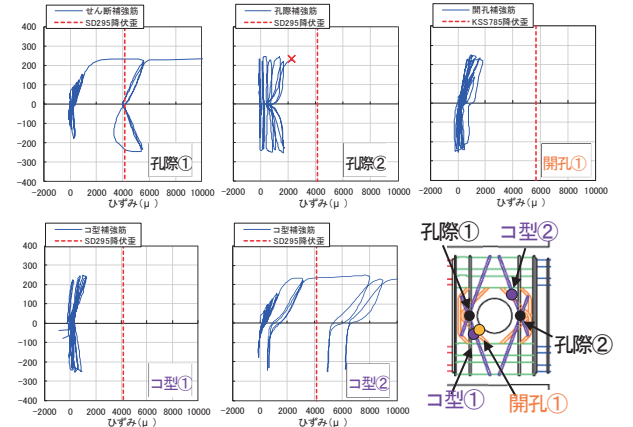


図-9 開孔周囲の各補強筋のひずみ履歴 (PB-5)

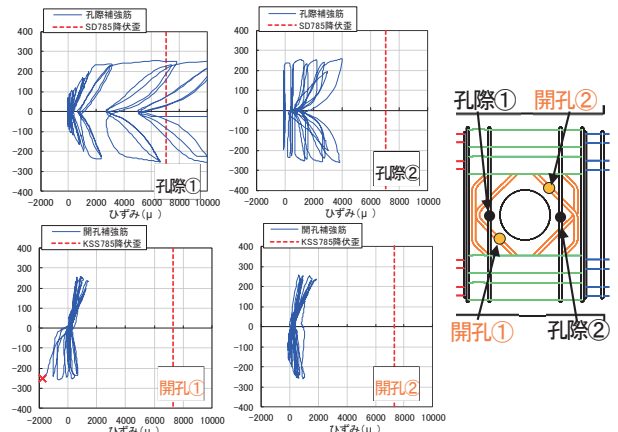


図-10 開孔周囲の各補強筋のひずみ履歴 (PB-6)

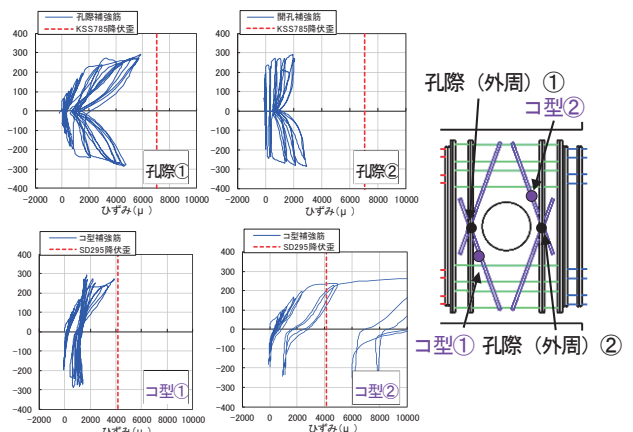


図-11 開孔周囲の各補強筋のひずみ履歴 (PB-7)

曲げ強度に達しなかったと考える。

孔補強筋をなくし、孔際せん断補強筋を増やした PB-7 は $R=1/20$ rad. の 2 サイクル目まで最大強度の 80% 以上を保持した。

§ 4. 実験の考察

4-1 各鉄筋のひずみ

(1) コ型補強筋を設けた PB-2

PB-2 の負側サイクルピーク時における上端筋 (1 段筋) のひずみ分布を図-6 に示す。 $R=1/100$ rad. 時では、継手先端部主筋のひずみが降伏ひずみを超えており、梁端補強部に開孔を設けた試験体 PB-2 においても継手先

端部が梁端補強部に先行して降伏していることが確認できる。孔周囲の各補強筋のひずみ履歴を図-7 に示す。図中にはゲージが剥がれた点を×印で示す。また、梁端補強部主筋のひずみは $R=1/33$ rad. 時において降伏ひずみに達している。継手先端側孔際せん断補強筋 (以下、孔際①) では降伏ひずみの 90% 程度のひずみが、スタブ面側孔際せん断補強筋 (以下、孔際②) では降伏ひずみの 55% 程度のひずみが生じている。開孔補強筋のひずみは他の補強筋と比較して小さく、降伏ひずみの 15% 程度生じている。継手先端側コ型補強筋 (以下、コ型①) では降伏ひずみの 35% 程度のひずみが生じている一方、スタブ面側コ型補強筋 (以下、コ型②) では $R=1/50$ rad. 時の正側において降伏ひずみに達している。なお、コ型②

近傍の開孔補強筋のひずみは開孔①と同程度であり、降伏していない。

(2) 破壊モードが異なる PB-5

PB-5 の負側サイクルピーク時における上端筋 (1 段筋) のひずみ分布を図-8 に、孔周囲の各補強筋のひずみ履歴を図-9 に示す。主筋のひずみ分布の特徴は PB-2 と同様である。PB-2 に対し、せん断補強筋を SD295 にしているため、 $R=1/100 \text{ rad.}$ 時に孔際①が降伏ひずみに達している。また、開孔補強筋を S6 にしているため、降伏ひずみの 30% 程度のひずみが生じており、ひずみが大きくなっている。コ型補強筋は PB-2 と同様の挙動を示している。

(3) コ型補強筋をなくした PB-6

PB-6 の孔周囲の各補強筋のひずみ履歴を図-10 に示す。主筋のひずみ分布の特徴は PB-2 と同様である。コ型補強筋を無くしているため、孔際せん断補強筋のひずみは大きく、孔際①は $R=1/50 \text{ rad.}$ 時において降伏している。開孔補強筋は PB-2 と比較し、若干ひずみが大きくなっている。コ型補強筋を設けた PB-2 では孔際①が降伏していないことから、コ型補強筋はせん断抵抗に寄与し、孔際①の降伏を抑制したと考える。

(4) 開孔補強筋をなくし、孔際せん断補強筋を増やした PB-7

PB-7 の孔周囲の各補強筋のひずみ履歴を図-11 に示す。主筋のひずみ分布の特徴は PB-2 と同様である。孔際①および孔際②ともに PB-2 と比較し、ひずみの最大値が若干減少する傾向を示した。中子筋は外周筋と同様の挙動を示しており、ひずみの最大値も同程度である。PB-2 と比較し、コ型①はひずみが大きくなり、降伏ひずみ近傍まで達している。また、コ型②は PB-2 よりも早期に降伏し、 $R=1/100 \text{ rad.}$ 時において降伏ひずみに達した。以上のことから、開孔補強筋のせん断抵抗の寄与分は孔際せん断補強筋およびコ型補強筋で負担することができると考える。

4-2 等価粘性減衰定数

等価粘性減衰定数と部材角の関係を図-12 に示す。なお、2 サイクル目の等価粘性減衰定数を示す。PB-2 と比較し、PB-5 および PB-6 では大差は生じていない。PB-7 では 5% 程度高くなっている。開孔補強筋よりも孔際せん断補強筋を配した方がエネルギー吸収能力が大きく、開孔補強筋よりも孔際せん断補強筋の方がせん断抵抗に有効に働く結果となった。

§5. まとめ

以下にまとめを示す。

(1) 梁端部に開孔を設けた場合においても継手先端部が

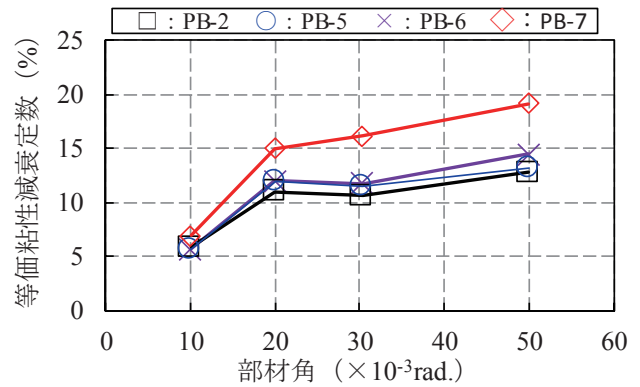


図-12 等価粘性減衰定数 - 部材角関係

先行して降伏し、HR が形成され、 $R=1/20 \text{ rad.}$ まで安定した復元力特性を有することを確認した。

- (2) コ型補強筋を設けた PB-2 では、孔際せん断補強筋が降伏していないことから、コ型補強筋はせん断抵抗に寄与し、継手先端側孔際せん断補強筋の降伏を抑制した。
- (3) 破壊モードが異なる PB-5 では、梁一般部の曲げ強度よりせん断強度を低く計画したため、曲げ強度まで達していないが、 $R=1/20 \text{ rad.}$ まで最大強度の 80% 以上を保持した。
- (4) コ型補強筋をなくし、孔際せん断補強筋を増やした PB-7 では、開孔補強筋の寄与分は孔際せん断補強筋およびコ型補強筋で負担できることを確認した。PB-2 と比較して、等価粘性減衰定数が高くなっており、開孔補強筋より孔際せん断補強筋の方がせん断抵抗に有効に働くことを確認した。

謝辞. 本報は、静岡理工科大学の丸田誠教授との共同研究成果の一部である⁴⁾。また、鋼材の材料手配にあたっては、東京鉄鋼株式会社にご協力頂いた。ここに記し、関係各位に深い謝意を表します。

参考文献

- 1) 小寺直幸ほか：梁端部を高強度鉄筋で補強したヒンジロケーション十字形骨組の実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 42, No. 2, pp. 283-288, 2020
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，2018
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- 4) 金川 基ほか：梁端部に開孔を有するヒンジロケーション接合部に関する研究 (その 1~その 3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 279-284, 2021