

報告

[2111] プレキャスト RC 柱部材の変形性能に関する実験的研究

松本智夫*1・西原 寛*2・近藤修一*3・鈴木英之*4

1. はじめに

架構式プレキャスト (RPC) 構法の発展に伴い、接合部を有するプレキャスト (PCa) 柱部材の力学的挙動に関する研究報告は多数行われてきた[1]。それらの実験結果によれば、柱脚部に継手をもつ PCa 柱は、一体打ちの柱試験体と比較して同等以上の性能を有しているという報告が大半である。しかしながら、柱軸力が小さい、もしくは引張軸力となるような領域での実験データは十分でないため、このような場合に起こることが予想される PCa 柱脚部の敷モルタル接合面でのせん断滑り性状を含めた PCa 柱部材の変形性能については、いまだ不明な点も少なくない。

本報告は、RPC 造の 1 階柱脚部にモルタル充填式継手を有する PCa 柱部材を対象に、軸力比を $-1/10$ (引張) $\sim 1/3$ (圧縮) まで 4 種類に変化させた試験体の曲げせん断実験を行い、その変形性状の違いを検討したものである。

2. 試験体および使用材料

計画した試験体は、表-1に示すように軸力比を変動因子とした4体であり、 $\eta = \sigma_o / f_c'$ (f_c' は材料試験結果) = 0, 1/6, 1/3 (圧縮), $-1/10$ (引張) とし、試験体名の No. 1 ~ 4 にそれぞれ対応させた。帯筋比 (p_w) については、試験体 No. 2, 3 の柱の曲げおよびせん断終局強度を既往の実験式[2]から算定する際、部材の曲げ降伏が先行する (せん断余裕度で約 1.1 倍) ように定め、試験体 No. 4 のそれは No. 2 と同一とし、No. 1 については設計における最小の補強筋比程度とした。また、継手部周囲のせん断補強の割増しは行っていない。図-1は、試験体の形状寸法および配筋例である。なお、本試験体の形状は、敷モルタルを施し、モルタル充填式継手を有する柱脚と、一体打ち柱部材の柱脚との性状を比較することを意図したものであるが、本報告では便宜上、前者を「柱脚」、後者を「柱頭」と称して区別している。試験体の製作は、実施工要領にほぼ則って行い、コンクリートは、粗

表-1 試験体一覧

試験体	共通因子	変動因子	
		軸力比	帯筋比: p_w (%)
No. 1	断面: $b \times D = 45 \times 45$ (cm ²) 主筋: 12-D19 ($p_g = 1.7\%$) せん断スリット比: M/QD=2.0 コンクリート設計基準強度: $F_c = 270$ kgf/cm ²	$\eta = 0$	0.30 (III-D6@95)
No. 2		1/6	0.71 (III-D6@40)
No. 3		1/3	1.14 (III-D6@25)
No. 4		-1/10	0.71 (III-D6@40)

(注) No. 4 は引張軸力を載荷する。

表-2 使用材料の力学的性質

コンクリート試験体	プレキャスト部			敷モルタル		グラウト	
	f_c'	E_c	f_t'	f_c'	E_c	f_c'	E_c
No. 1	310	2.54	28.3	374	2.32	636	2.77
No. 2	315	-	-	389	-	-	-
No. 3	299	-	-	374	-	-	-
No. 4	332	2.62	31.0	398	2.33	787	2.99

f_c' : 圧縮強度 (kgf/cm²), E_c : ヤング率 ($\times 10^5$ kgf/cm²), f_t' : 引張(割裂)強度 (kgf/cm²)

鉄筋	規格	σ_y	E_s	ϵ_y	σ_t	伸び
主筋: D19	SD390	4950	2.01	2500	6560	21%
帯筋: D6	SD295A	3800	1.84	2140	5400	18

σ_y : 降伏点 (kgf/cm²), E_s : ヤング率 ($\times 10^6$ kgf/cm²), ϵ_y : 降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$), σ_t : 引張強さ (kgf/cm²)

*1 安藤建設(株)技術研究所, 工修 (正会員), *2 同左, *3 同左 (正会員), *4 同左, 工修

骨材最大寸法13mm(碎石6号)の早強コンクリートを用いた。使用材料の力学的特性を表-2に示す。

3. 加力および測定方法

加力は、まず所定の柱軸力を載荷させた後、試験区間に正負逆モーメントを作用させる大野式加力で行った。特に、引張軸力の導入は、試験区間両側の加力スタブからダミー一部にあらかじめ埋め込んだ総ネジPC鋼棒の付着力を介して行い、実験中は終始所定の引張軸力となるように調整、保持した。加力制御は、左右の加力スタブ間の相対変位に基づく変位制御とし、加力履歴は、各試験体とも相対変形角 $R = \pm 1/500, \pm 1/300(\text{rad})$ で各1回、 $\pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/67, \pm 1/50, \pm 1/33(\text{rad})$ で各2回ずつ加力した後、 $+1/25(\text{rad})$ まで加力して実験終了とした(図-3参照)。

変形の測定は、試験区間の相対変位、加力スタブと柱脚および柱頭との目開き量、ずれ変位について、また、図-2に示すように、試験区間を材軸方向にDもしくはD/2(D:柱せい)で6分割して、各区間での縦、横、対角線方向の伸縮量についても測定を行った。主筋および帯筋のひずみ性状は、貼付したストレインゲージによった。

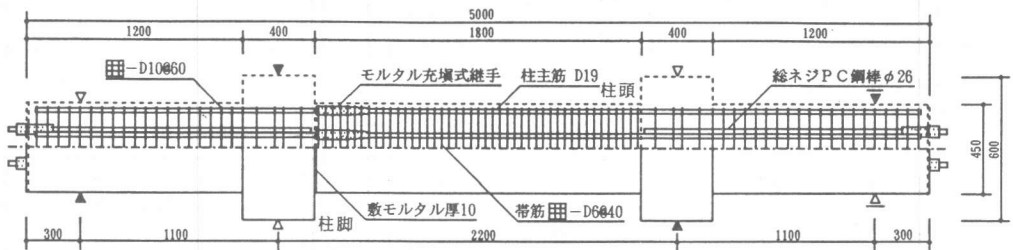


図-1 試験体の形状寸法・配筋例 (No. 2, 4)

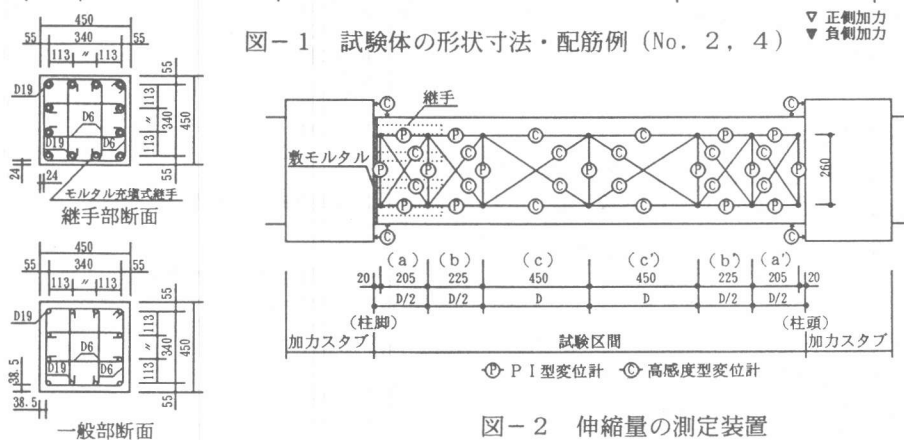


図-2 伸縮量の測定装置

4. 実験結果の概要

図-4に各試験体の最終ひびわれ状況を示す。表-3には柱頭、柱脚のひびわれ時および最大耐力時のせん断力を一覧にした。また、図-5の実線は、各試験体のせん断力-相対変位($Q-\delta$)関係を示したものである。これらの図表によれば、No. 1~3の試験体はいずれも $R = +1/500$ に向かう加力途中で、試験区間と加力スタブとの接合端付近に初ひびわれが目視された。このひびわれ発生荷重を敷モルタルのある柱脚と一体打ちの柱頭とで比較すると、柱軸力0の試験体No. 1では柱脚側がより低い荷重においてひびわれ発生しているが、柱が圧縮軸力を受けているNo. 2, 3では、その発生荷重に大きな差はみられなかった。試験体No. 4は引張軸力を導入する際、最初に敷モルタルの上側に幅0.2mm程の肌分かれを生じ、所定の引張軸力を載荷し終わったときに

は、試験区間の全域にはほぼ等間隔で10本近い引張ひびわれが生じた。また、 $R=+1/500$ ではそのひびわれを起点としてせん断ひびわれが発生した。

一方、各試験体の最大せん断力は、表-3より多段配筋を考慮した曲げ終局強度略算式による計算値を上回り、試験体No. 1~3ではせん断終局強度に近い値となっているが、計算値に対する実験値の比は、軸力比の大きい試験体ほど小さく1に近い値となった。図-5に示す1点鎖線は、 $P-\Delta$ 効果によって補正された計算曲げ耐力を示している。試験体No. 1~3は、 $R=+1/100$ で引張側主筋がすべて曲げ降伏し、圧縮

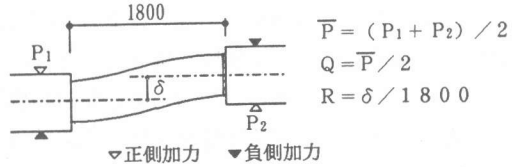


図-3 せん断力および相対変形角の定義

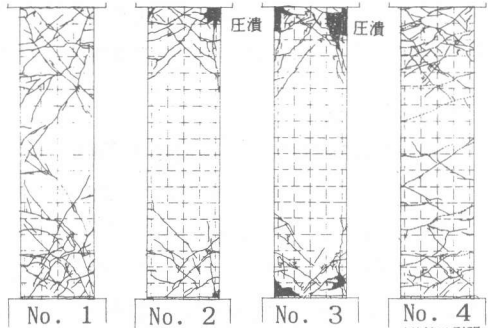


図-4 最終ひびわれ状況

表-3 ひびわれ発生時および最大耐力時せん断力

試験体	柱頭ひびわれ時			柱脚ひびわれ時			最大耐力時				
	Q _{Bc} (実)	Q _{Bc} (計)	(実/計)	Q _{Bc} (実)	Q _{Bc} (計)	(実/計)	Q _{max} (R)	Q _{Bu} (計)	(実/計)	Q _{Su} (計)	(実/計)
No. 1	4.5	6.20	0.73	2.3	6.20	0.37	35.9(+1/33)	25.04	1.43	33.08	1.09
No. 2	17.8	16.53	1.08	16.9	16.53	1.02	52.8(+1/100)	47.19	1.12	49.11	1.08
No. 3	27.7	25.60	1.08	26.0	25.60	1.02	59.7(-1/67)	58.68	1.02	61.64	0.97
No. 4	—	—	—	—	—	—	27.8(+1/25)	15.17	1.83	—	—

$Q_{Bc}(計) = (1.8 \sqrt{F_c + \sigma_o}) Z_e \cdot 2 / \ell$: 文献[2], $Q_{max}(R)$: 最大せん断力(その時点の相対変形角),
 $Q_{Bu}(計) = \{0.5 \alpha_g \sigma_{yg1} D + 0.5 N D (1 - N / (b D F_c))\} \cdot 2 / \ell$: 文献[2], 多段配筋を考慮,
 $Q_{Su}(計) = \{0.0679 p t e^{0.23} (F_c + 180) / (M / Q d + 0.12) + 2.7 \sqrt{p w \cdot w \sigma_y + 0.1 \sigma_o}\} \cdot b j$: 文献[2]

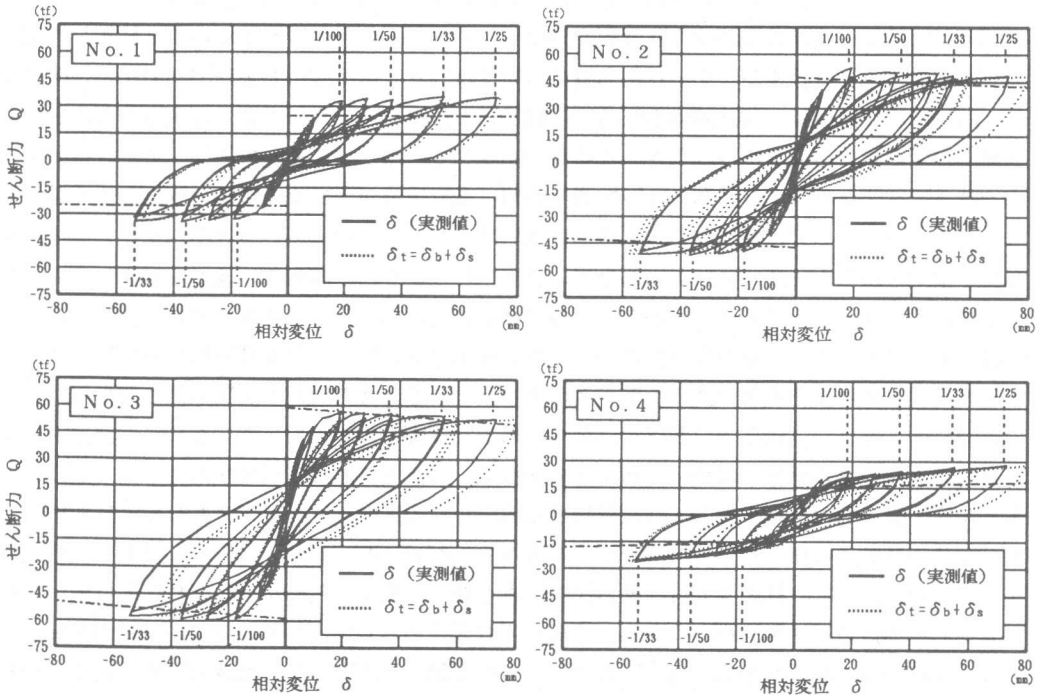


図-5 せん断力-相対変位 (Q-δ) 曲線

軸力のNo. 2はその直後に、No. 3では同時に圧縮側も降伏ひずみに達していた。その時点でNo. 2, 3の柱頭、柱脚の圧縮域には圧潰の兆候がみられ、その後コンクリートの圧潰に伴い耐力は徐々に低下したが、繰返し加力による耐力の低下は小さく、良好な変形能を示した。また、圧潰の程度は、継手を有する柱脚側よりも柱頭部分の方が度合いが激しく、かぶりコンクリートも広範囲に取れ出していた。引張軸力を受ける試験体No. 4は、 $R=+1/200$ ですべての引張側主筋が降伏したが、その後も徐々に耐力は上昇し、繰返しによる耐力の低下も非常に小さい安定した履歴性状を示した。なお、最終的な破壊モードは、全試験体が曲げ破壊であると判断された。

5. 柱脚に継手をもつPCa柱部材の変形性状

5.1 PCa柱部材の曲げおよびせん断変形成分

図-5の破線は、図-2の測定結果を基に各試験体のせん断力と曲げおよびせん断変形による試験体中央での相対変位の和との関係($Q-\delta t$ 関係)を示したものである。これによれば、大変形時では部材端部の圧潰の影響を受け、相対変位の実測値(δ)と幾分相違を生じてくるが、全体としては比較的よく実測値に追従している。

前章で示したように、本実験に供した試験体はいずれも曲げ破壊しており、その変形性状を検討するため、正、負加力時の各変形角での全体変形に対する曲げ変形成分の割合を示したものが図-6である。図-6より、正、負加力時の傾向は類似しており、圧縮軸力の試験体No. 2, 3は、最終変形角までせん断変形の割合は小さく、曲げ変形成分が支配的であるのに対して、柱軸力0のNo. 1および引張軸力のNo. 4はともに、主筋の曲げ降伏以降せん断変形成分が漸増している。さらに、これらの曲げおよびせん断変形成分について、付図に示す6区間ならびに柱頭、柱脚の分布がどのように推移するかを、正加力時について示したものが図-7および図-8である。図-7より、曲げ降伏した後は、各試験体の柱頭、柱脚と加力スタブとの間の目開きによる曲げ変形量が、全体曲げ変形量に占める割合は大きくなる傾向を示しているが、圧縮軸力のNo. 2, 3は、最終加力時まで柱頭からD/2区間((a')区間)の曲げ変形成分が大きく、圧潰の程度がより激しいNo. 3の方が、No. 2に比べ(a')区間の曲げ変形成分も大きくなっている(図-4参照)。逆に柱脚側では、柱脚のみの曲げ変形が大部分で、継手の存在がその区間の曲げ変形を抑制していることが分かる。また、それ以外の区間では、継手部の直上当たる(b)区間の曲げ変形が、そこにひびわれが集中することから幾分大きい。一方、柱軸力0のNo. 1および引張軸力のNo. 4は、ともに柱頭と柱脚が同程度に大きな曲げ変形を示しており、それ以外の区間の曲げ変形量は小さい。特にNo. 4は、大変形時に曲げ変形全体の過半を柱脚のみが負担していることは注目される。

次に、図-8のせん断変形成分の分布の推移からは、各試験体とも変形角が大きくなるに従い、敷モルタル接合面のある柱脚のずれ変位による成分が他の区間に比べて大きくなる。柱頭側では、各試験体の柱頭のみずれ変位は小さく、柱頭から1.0D区間((a'+b')区間)のせん断変形成分が大きいものに対して、柱脚側では、軸力比が小さくなるに従い、柱脚から1.0D区間((a+b)区間)のせん断変形成分の比率も小さくなり、柱脚のずれ変位のみが増大している。引張軸力のNo. 4では、柱脚のせん断ずれ変形が他の区間に比べて特に顕著であり、せん断変形全体の約半分を柱脚のみが負担しており、継手を有する区間のせん断変形は極めて小さくなっている。

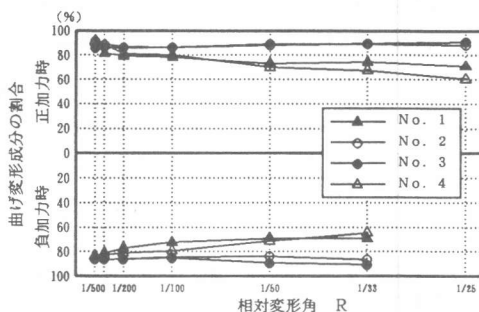


図-6 全体変形に占める曲げ変形成分の割合

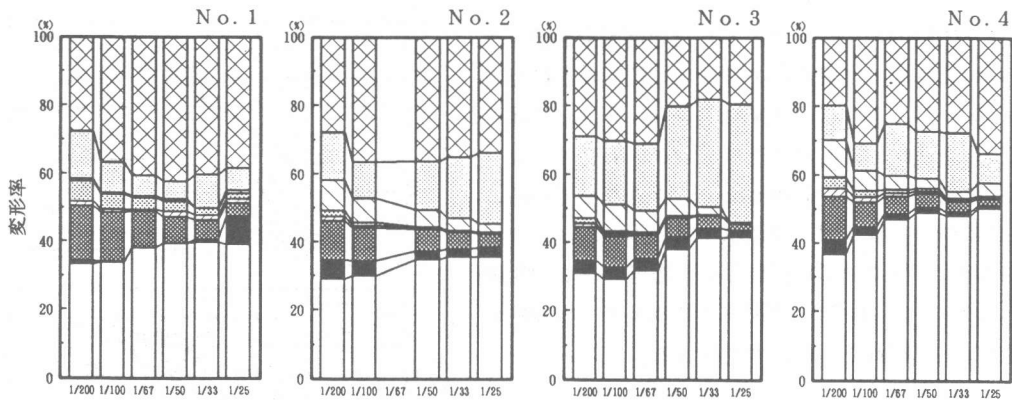


図-7 曲げ変形成分の分布の推移 (正加力時)

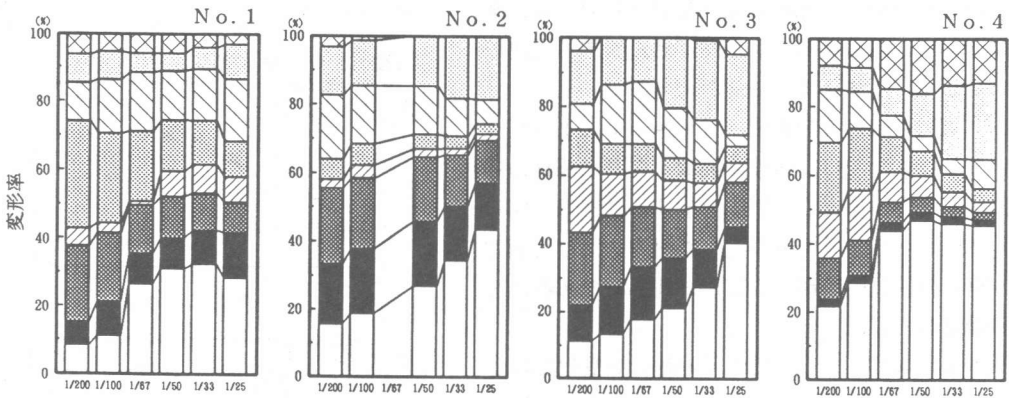


図-8 せん断変形成分の分布の推移 (正加力時)

5.2 柱脚部の継手の有無による部材の変形性能

図-9は、実測された相対変位と接合部の目開きによる回転の影響を除いた柱脚のずれ変位との関係を示したものである。図-9より、柱軸力0および引張軸力の試験体No. 1, 4は、相対変位が大きくなるに従い、柱脚のずれ変位が占める割合も徐々に増加しており、最終変形角時でのその割合は、No. 1が9%、No. 4が19%になっている。これに対して、圧縮軸力のNo. 2, 3のそれらはそれぞれ6%、4%であり、軸力比が大きくなるほど柱脚のずれ変位量は小さくなる。

次に、本実験より、柱脚部の継手の有無による部材の変形性能を比較するため、前節で行った平均曲率の算定結果に基づき、試験区間の中央を反曲点位置と仮定することにより、継手の有無によるせん断力-変位関係の比較を試みた。図-10は、試験区間の中央から柱頭(継手無し)側のせん断力-変位($Q-\delta t_1$)曲線と、柱脚(継手有り)側のせん断力-変位($Q-\delta t_2$)曲線を試験体No. 3, 4について示した。さらに、図-11は、図-10の $Q-\delta t_1, t_2$ 曲線から、繰り

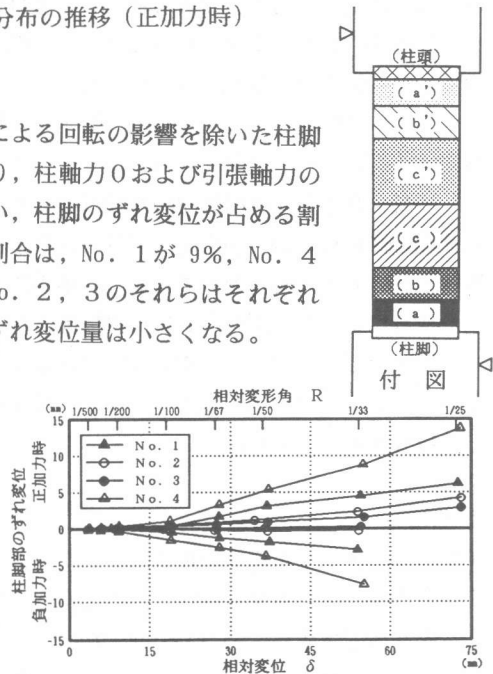


図-9 相対変位と柱脚のずれ変位との関係 (実測値)

返し加力時のループを対象とした等価減衰定数 (h_{eq}) を求め、各変位との関係を比較したものである。図-11によれば、圧縮軸力のNo. 3は、柱頭側、柱脚側で h_{eq} にほとんど差はないが、No. 4では、継手のある柱脚側の方が h_{eq} は大きくなっている。これについては、図-12に示す試験体No. 3, 4の柱頭および柱脚のずれ変位が描く履歴ループの相違が、図-11の柱頭側、柱脚側のエネルギー吸収能の差となって現れたものと考えられる。

6. まとめ

柱脚部にモルタル充填式継手を有するP C a柱部材について、軸力比を変えた曲げせん断加力実験を行い、以下に示すような知見が得られた。

1) 本実験の軸力比の範囲内 ($\eta = -1/10 \sim 1/3$) においては、既往の実験式を基に部材の曲げ降伏が先行するように帯筋を配することで、相対変形角 $1/25$ まで十分安定した耐力および変形性能が得られ、比較的靱性に富んだ柱部材であることが確認された。

2) 本実験より、P C a柱が圧縮軸力を受けている場合は、最終加力時まで全体変形のうち曲げ変形成分が支配的であり、継手の存在によりその部分の曲げ変形は抑制され、圧潰現象も防がれるが、部材のエネルギー吸収能という点からは、継手の有無による差は少ないという結果となった。

3) 柱軸力0あるいは引張軸力を受けるP C a柱では、曲げ降伏以後最終加力時までせん断変形成分が漸増しているが、継手を有する場合、継手部分での変形成分は小さく、部材としての変形能は柱脚敷モルタル接合面の目開き量とずれ変位に大きく依存することで、継手のない場合よりも履歴吸収エネルギーは幾分上昇していた。

参考文献

- 1) 吉野ほか：モルタル充填式継手を用いた柱部材の実験結果に対する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集C，pp. 735-736，1991.9
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料18，pp. 70-71，1987.9

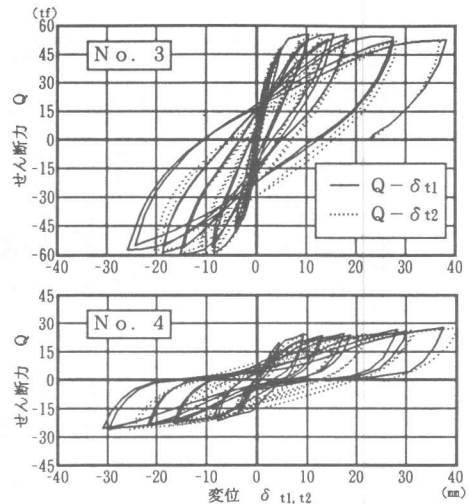


図-10 せん断力-変位曲線

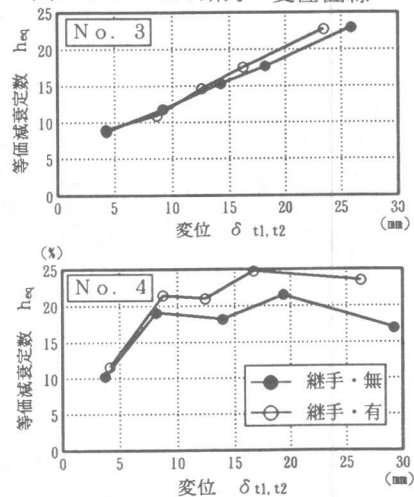


図-11 継手の有無による等価減衰定数の比較

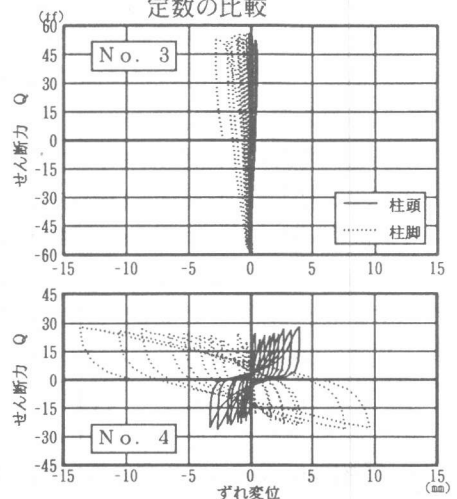


図-12 せん断力-ずれ変位曲線