

論文 RC 柱の変形性能と損傷レベルに関する実験的研究

田中 寿志^{*1}・岡本 大^{*2}・瀧口 将志^{*1}・佐藤 勉^{*3}

要旨：鉄道RCラーメン高架橋柱をモデル化した実物大供試体を用い、引張鉄筋比、軸力比、繰り返し回数をパラメータにして水平交番載荷試験を行った。そして、RC柱部材の変形性能指標の一つとして、「繰り返し載荷による耐力低下が顕著でない最大変位」に着目し、その変位と実験パラメータとの関係、それ以降の荷重と変位の関係、さらに部材の損傷レベルとの関係について検討を行った。

キーワード：RC柱、変形性能、エネルギー吸収、終局変位、損傷レベル

1. はじめに

従来、土木の分野においては、RC部材の変形性能評価方法として、一般的に、部材の耐力が降伏荷重程度まで低下したときの変位を終局変位とし、それを降伏変位で除することにより得られる部材靱性率が指標として用いられてきた¹⁾。しかしながらラーメン高架橋等の不静定構造物の耐震設計を合理的に行うためには、部材が耐力低下し始める点について、また耐力低下域に入った後の部材の荷重-変位曲線について適切に評価する必要があると考えられる。そこで本研究では、曲げ破壊型のRC柱部材について、「繰り返し載荷による耐力低下が顕著でない最大変位」(以下終局1変位とする)に着目し、軸方向鉄筋比、軸力比および繰り返し回数等が終局1変位に及ぼす影響について明らかにするため、鉄道RCラーメン高架橋柱をモデル化した実物大の形供試体を用いて交番載荷試験を行い、検討を行った。

2. 実験概要

供試体の形状および配筋を図-1に、諸元を表-1に示す。供試体は、一般的な鉄道RCラーメン高架橋の柱をモデル化したく形柱で、

断面は1辺80~90cm、せん断スパン300~330cmとした。実験パラメータは、引張鉄筋比、軸力、繰り返し回数とした(表-2)。

載荷は、アクチュエータを用いた水平方向の正負交番載荷とした。加力サイクルは、最外縁の引張鉄筋が降伏した時点の載荷点変位 δ_y を基準として、その整数倍の δ_y ごとに正負各3

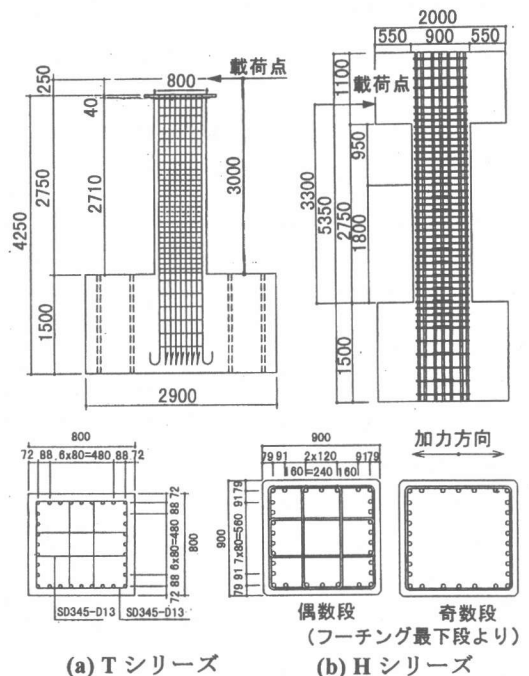


図-1 供試体の形状および配筋

*1 (財) 鉄道総合技術研究所 工修 (正会員)
 *2 東急建設 (株) 技術研究所 工修 (正会員)
 *3 (財) 鉄道総合技術研究所 主任技師 工博 (正会員)

ループくり返すことを基本とした。なお、T97-3 は 2 δy ごとに 3 ループ、H97-6 は 1 δy ごとに 1 ループの繰り返しとした。

表-1 供試体諸元

	断面幅 b (mm)	断面高 h (mm)	有効高 d (mm)	せん断 スパン la (mm)	せん断 スパン 比 la/d	軸方向 鉄筋	帯鉄筋	曲げせん断 耐力比 $V_y \cdot a / Mu$
T97-1	800	800	728	3000	4.12	SD345 32-D32	SD345 D13080×2	2.49
T97-2							SD345 D10080×2	2.95
T97-3							SD345 D10080×2	1.81
H97-1 ²⁾	900	900	821	3300	4.02	SD345 30-D32	SD345 D160100+D160200	2.02
H97-5								2.27
H97-6								1.99

材料試験結果を表-3に、実験結果の概要を表-4に示す。なお荷重は、軸力による二次モーメントの影響(P- Δ 効果)を補正したものである。

表-2 実験パラメータ

	載荷 サイクル	軸力 N (kN)	軸圧縮応力 σ_o (N/mm ²)	軸力 比 η	引張 鉄筋比 P_s (%)	帯鉄 筋比 P_w (%)
T97-1	1 δy ごと3回	2352	3.68	0.123	0.78	0.791
T97-2	1 δy ごと3回	0	0	0.000	0.78	0.791
T97-3	2 δy ごと3回	2352	3.68	0.151	0.78	0.447
H97-1	1 δy ごと3回	3136	3.07	0.114	1.07	0.662
H97-5	1 δy ごと3回	784	0.97	0.032	1.07	0.662
H97-6	1 δy ごと1回	3136	3.07	0.097	1.07	0.662

3. 荷重-変位曲線とエネルギー吸収量

荷重-変位曲線と正負各半ループあたりのエネルギー吸収量(変位 0 の点を基準にして算定した)を図-2に示す。繰り返し3回の供試体に着目すると、同一変位における2回目、3回目の耐力低下は、ある変位を超えると急激に顕著になり、またエネルギー吸収量も低下していることがわかる。さらにその変位以上の領域においては、変位が増加するにもかかわらず、半ループあたりのエネルギー吸収量は増加せず、むしろ減少する傾向がみられる。そこで、「繰り返し載荷による耐力低下が顕著でないことを保証できる最大変位」として、ここでは、繰り返し載荷による耐力低下が顕著となる1つ前の変位量をとることとし、それを終局1変位として検討を行うこととした。また、繰り返し回数のみをパラメータとしたH97-1とH97-6を比較すると、繰り返し回数が終局1変位に与える影響は(あくまでも3回程度の繰り返しの範囲内ではあるが)それほど顕著でない傾向を示した。

表-3 材料試験結果

	コンクリート強度		鉄筋降伏強度		弾性係数		
	く体 $f'c$ (N/mm ²)	フーチング $f'cf$ (N/mm ²)	軸方向 鉄筋 f_{ry} (N/mm ²)	帯鉄筋 f_{wy} (N/mm ²)	く体コン クリート E_c (kN/mm ²)	軸方向 鉄筋 E_r (kN/mm ²)	帯鉄筋 E_w (kN/mm ²)
T97-1	30.0	33.4	371	373	22.5	189	182
T97-2	32.6	34.9	387	373	22.6	190	182
T97-3	24.3	26.1	377	402	22.6	195	181
H97-1	26.9	25.6	368	409	24.4	161	153
H97-5	30.7	32.5	368	409	25.2	161	153
H97-6	31.8	34.0	368	409	24.4	161	153

表-4 試験結果の概要

	荷重 (kN)	鉄筋降伏時(最外縁)				終局1		終局2	
		変位(mm)				荷重 (kN)	変位 (mm)	変位 (mm)	部材 靱性 率
		全変位	く体変形	抜出変位					
T97-1	+	762	24.3	15.5	8.8	964	117.9	188.3	7.7
	-	773	27.6	15.1	12.5	936	118.6	186.5	6.8
T97-2	+	585	19.9	11.2	8.7	762	134.4	185.9	9.3
	-	569	18.8	12.5	6.3	695	134.4	172.0	9.1
T97-3	+	805	25.0	18.3	6.7	940	110.6	200.1	8.0
	-	807	24.6	15.8	8.8	942	110.6	148.4	6.0
H97-1	+	1232	27.1	19.3	7.8	1483	108.6	150.1	5.5
	-	1194	25.7	17.7	8.0	1444	77.3	136.7	5.3
H97-5	+	989	24.0	17.0	7.0	1235	120.3	149.2	6.2
	-	966	23.0	16.4	6.6	1219	92.5	141.2	6.1
H97-6	+	1250	25.9	18.3	7.6	1558	128.3	197.2	7.6
	-	1210	24.8	17.2	7.6	1586	125.3	192.5	7.8

鉄筋抜出による変位はひずみゲージの値を積分したものである。

終局2は荷重-変位曲線の包絡線が降伏荷重まで低下した点とした。

図-3は、コンクリートの圧縮縁ひずみを $\epsilon_c = 0.0035$ としたときの曲げ耐力 M_u と終局1曲げモーメント M_m を比較したものである。図より、本実験の範囲内では、曲げ耐力は終局1曲げモーメントを1~2割程度過小評価している。これは、鉄筋の応力-ひずみ関係でひずみ硬化を考慮していないため等と考えられる。

4. 終局1の荷重と変位

4.1 荷重

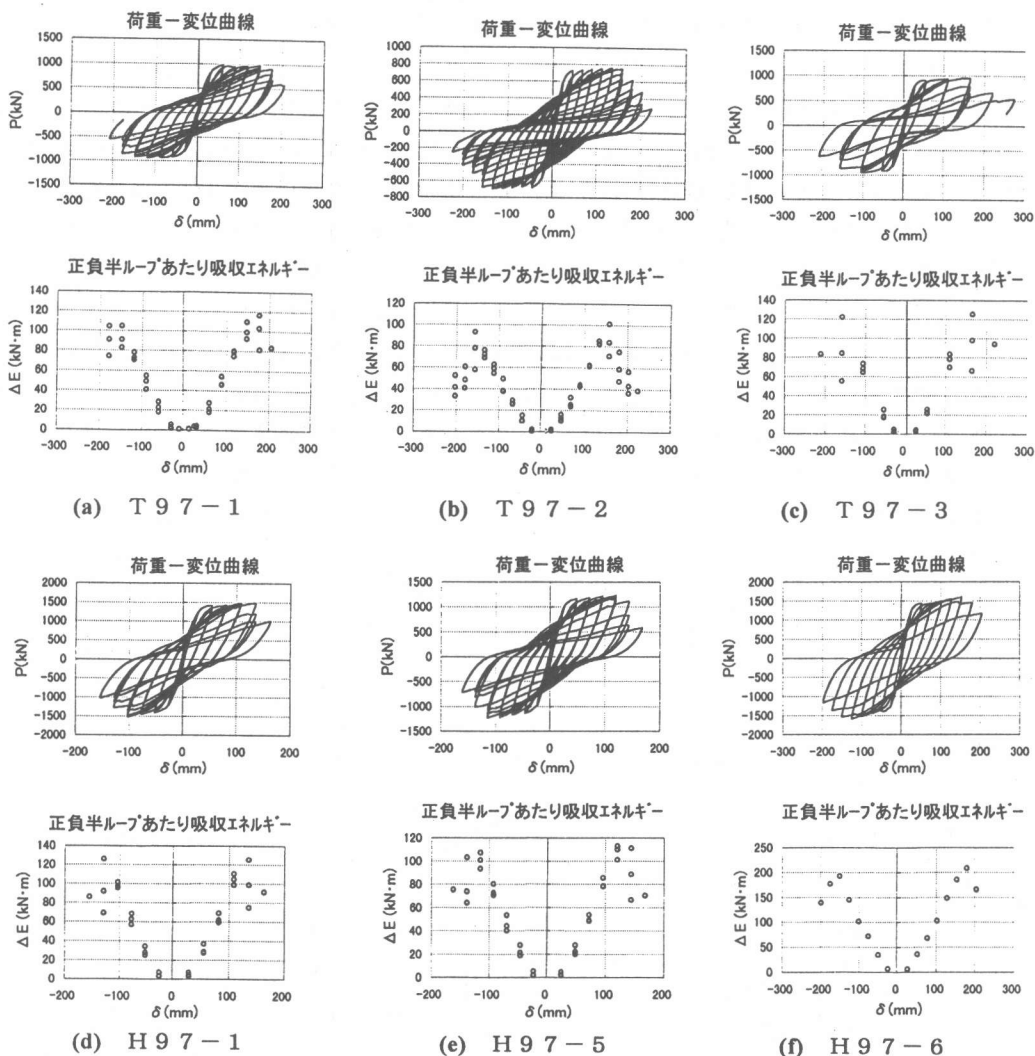


図-2 荷重-変位曲線とエネルギー吸収量

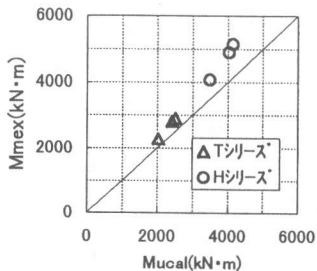


図-3 終局1曲げモーメントと曲げ耐力の比較

4.2 変位

RC部材の変位を適切に評価するためには、柱く体の曲げ変形による変位と、フーチング内

からの軸方向鉄筋の拔出による回転変位を分離して評価する必要があるものと考えられる¹⁾。そこで本検討においても、上記変位を分離して検討を試みた。

(1) 軸方向鉄筋の拔出による回転変位

大変形領域における軸方向鉄筋の拔出については、いくつかの研究が行われてはいるが³⁾、その挙動については未解明な点が多い。そこで、軸方向鉄筋降伏以降の鉄筋拔出による回転変位について検討することとした。各 δ_y の1回目載荷時における部材角 θ と、フーチング内からの軸方向鉄筋の拔出による回転角 θ_1 との関係

を図-4に示す。なお、図には比較のため、 $M-\theta$ 関係の包絡線も示した。ここで、フーチング内からの軸方向鉄筋の拔出による回転角 θ_1 として、フーチング内の引張側および圧縮側の軸方向鉄筋ひずみ積分による鉄筋拔出量の差から算定した値を実線で、柱基部の引張側および圧縮側に設置した変位計の相対変位から算定した値を破線で示す。

図より、 $1\delta y$ においては両者はよく一致している。繰返し回数の異なるH97-1とH97-6を比較すると、繰返し回数が多いH97-1では、変形が進むにつれ、ひずみ積分による θ_1 と柱基部変位計による θ_1 の差は大きくなるが、

繰返し回数の少ないH97-6では、終局1まではよく一致している。ところで、ひずみ積分による θ_1 はフーチング内からの拔出のみを評価しているのに対し、柱基部変位計による θ_1 は柱部分からの拔出や柱基部近傍の塑性ヒンジ部分の変形も含んで評価しているものと考えられる。そして、繰返し回数が多い場合には、柱部分の軸方向鉄筋の付着劣化がフーチング内と比べて相対的に顕著となるため、柱部分からの拔出が増加するものと考えられる。また終局1以降の耐力低下領域においては、ひずみ積分による θ_1 は頭打ちあるいは減少していく傾向がみられる。なお、終局1において、ひずみ積

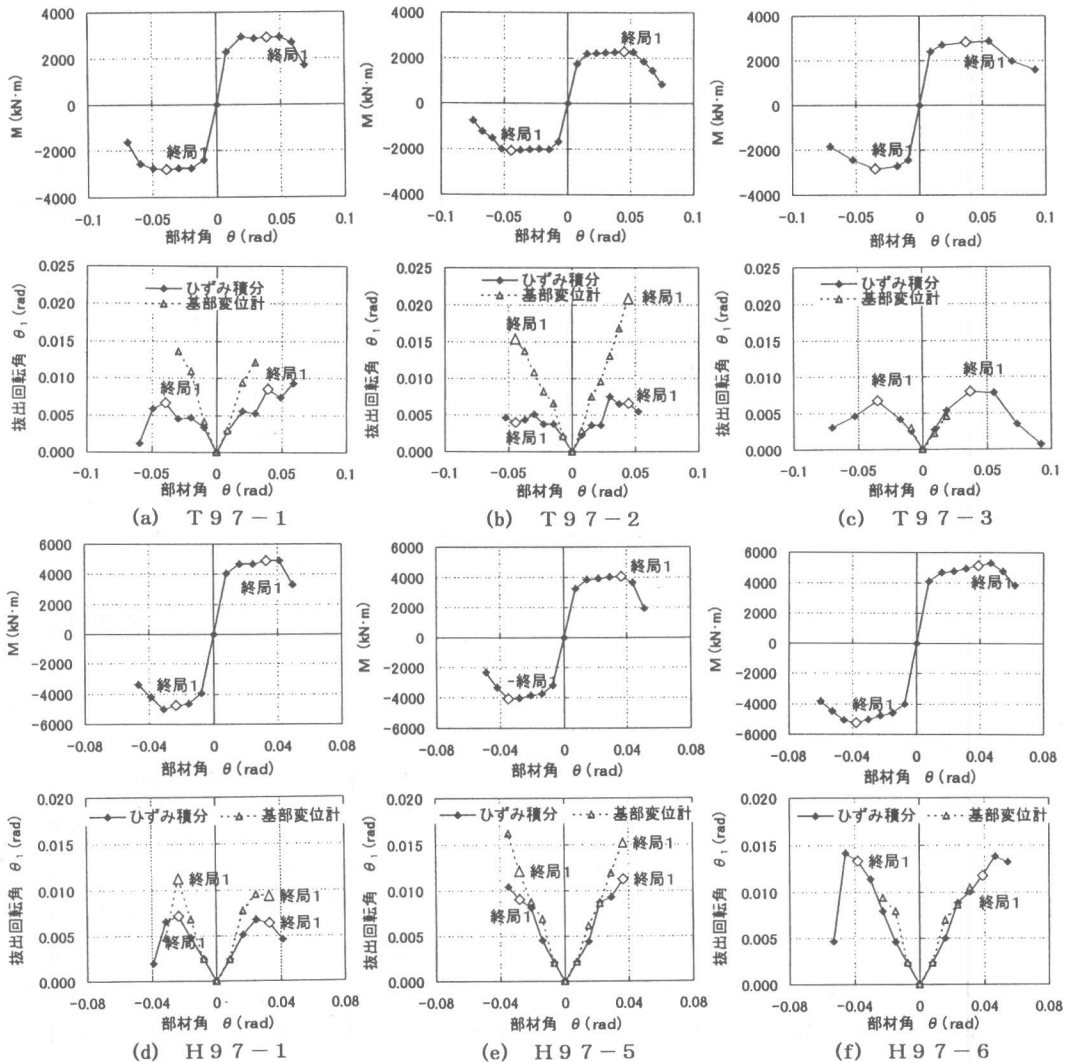


図-4 部材角と鉄筋抜け出しによる回転角の関係

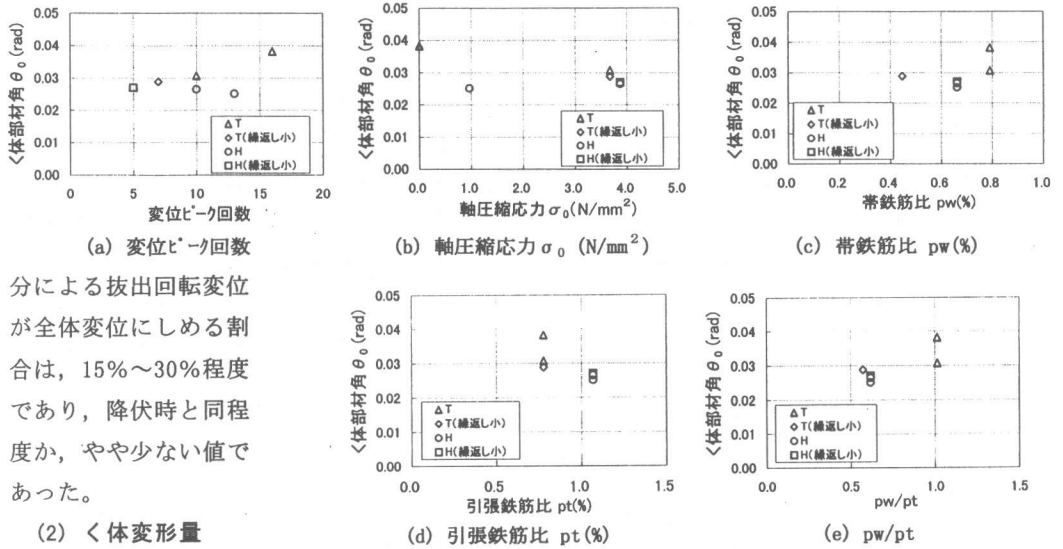


図-5 終局1く体変形による部材角とパラメータの関係

分による抜出回転変位が全体変位に占める割合は、15%~30%程度であり、降伏時と同程度か、やや少ない値であった。

(2) く体変形量

終局1正載荷時におけるく体変形による部材角（以下く体部材角 θ_0 とする）と変位ピーク回数、軸圧縮応力 σ_0 、引張鉄筋比 pt 、帯鉄筋比 Pw 、および Pw/pt との関係を図-5に示す。ここで変位ピーク回数は、1 δy から終局1までの繰り返し載荷において正負ピーク変位に達した合計回数とした。またく体部材角 θ_0 は、フーチング内の軸方向鉄筋ひずみを積分して算定

した抜出回転角 θ_1 を全体部材角 θ から差し引いて算定した。図-5 (a) より、本実験の範囲内では繰り返し回数が終局1のく体部材角に与える影響は小さく、また図-5 (b) より、RCラーメン高架橋の柱程度の軸力範囲では、軸力が終局1のく体部材角に与える影響は小さいものと考えられる。ところで、本実験では帯鉄筋比を主要なパラメータとしていないため、帯鉄筋比が終局1のく体部材角に与える影響については

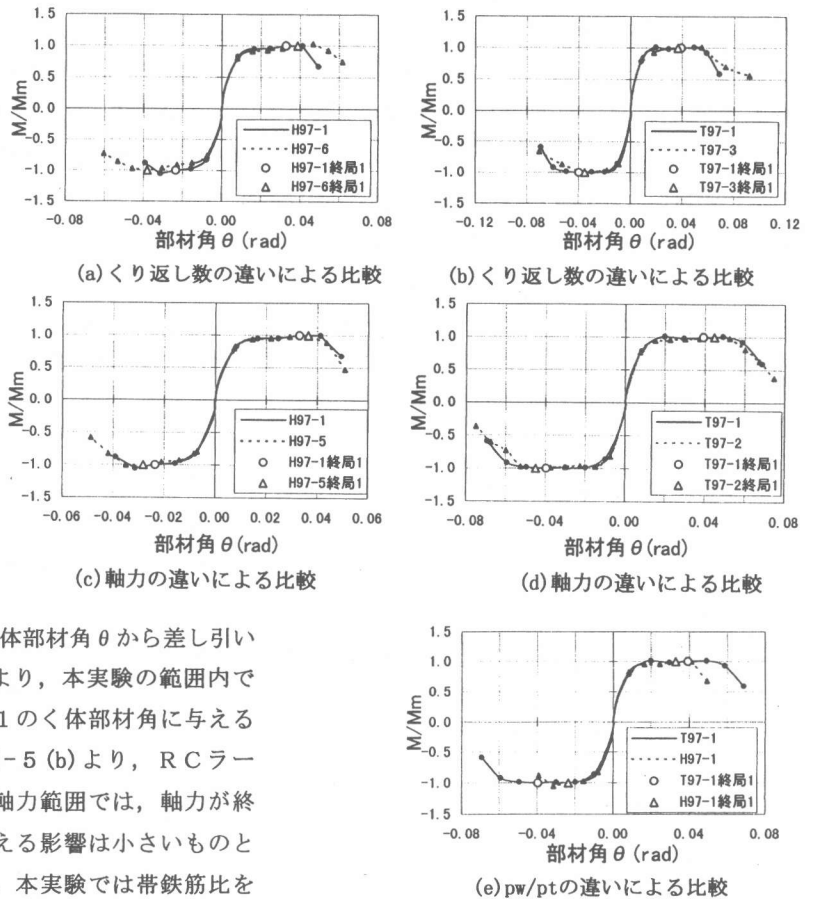


図-6 終局1以降の負勾配の比較

わからないが (図-5 (c)), 帯鉄筋比と引張鉄筋比の比 P_w/P_t は, 終局 1 のく体部材角と相関が見られる (図-5 (e))。

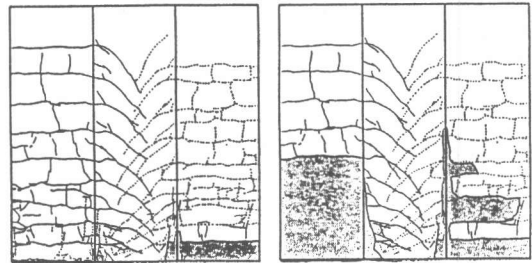
5. 終局 1 以降の荷重と変位

3. より, 終局 1 変位を超えると, 同一変位での繰り返し载荷による耐力低下が顕著となる。そこで, 終局 1 以降については, 荷重-変位曲線の包絡線の負勾配について検討することとした。

終局 1 の曲げモーメント M_m で無次元化した曲げモーメント M/M_m と部材角 θ の関係を図-6 (a)~(e)に示す。図-6 (a), (b)より, 繰り返し回数が多い場合 (実線) は, 少ない場合 (破線) よりも耐力低下が大きくなる傾向がみられる。また, 図-6 (c), (d)より, ラーメン高架橋の柱程度の軸力 (実線) と, それよりも小さい軸力 (破線) を比較すると, 軸力の影響はそれほどみられない。しかしながら現行の降伏変位 δy を基準とした载荷方法では, 軸力により δy の値が大きく変わるため, 同じ $1\delta y$ ごと 3 回の繰り返しであっても, 同一変位までの累積繰り返し回数は異なることとなる。したがって, 軸力が負勾配に与える影響については, 今後の検討課題となった。また, 図-6 (e)より, P_w/P_t が大きい場合 (実線: $P_w/P_t=1.01$) と小さい場合 (破線: $P_w/P_t=0.62$) を, δy の差を無視して比較すると, 大きな違いはみられない結果となった。

6. 終局 1 と部材の損傷レベル

図-7 に H97-1 供試体の終局 1 である $4\delta y$ 1 サイクル目終了時と, その次の $5\delta y$ 1 サイクル目終了時のひび割れ進展状況を示す。終局 1 では, わずかにかぶりが剥落している程度だが, 終局 1 変位を 3 回繰り返して, さらに大きい変位の繰り返しを受けると, かぶりが大きく落ちていくことが分かる。このことより, 終局 1 変位は部材の損傷レベルを考える上で重要な指標になると考えられる。



(a) $4\delta y$ 1 サイクル終了時 (b) $5\delta y$ 1 サイクル終了時

図-7 供試体 H97-1 のひび割れ進展状況

7. 結論

本論で明らかになったことを以下に要約して示す。

- (1) 終局 1 変位を境として, 繰り返し回数が部材の耐力・エネルギー吸収量等に与える影響が大きく変わる。
- (2) 繰り返し回数が, 終局 1 のく体変形量に及ぼす影響は比較的小さいが, 抜出による回転変位に及ぼす影響は大きい。
- (3) 終局 1 を超えた領域での荷重-変位曲線の負勾配は, 本実験の範囲内では, 繰り返し回数の影響が最も支配的なパラメータとなった。
- (4) 終局 1 変位は, 部材の損傷レベルを考える上で重要な指標となる。

参考文献

- 1) 石橋忠良・吉野伸一: 鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究, 土木学会論文集, 第 390 号/V-8, pp. 57-66, 1988. 2
- 2) 田中寿志・佐藤勉・戸塚信弥・金森真: 帯鉄筋を多量に配置した RC 柱の変形性能, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集 第 5 部, pp. 524-525, 1997. 9
- 3) 村山八州雄・須田久美子・三村長二郎: RC 橋脚の変形性能に及ぼす柱筋の抜出しの影響, コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集, pp. II-99-108, 1988. 3