# 論文 RC 高架橋柱部材の交番載荷による曲げ耐力低下領域での変形性能

瀧口 将志\*1·谷村 幸裕\*2·仁平 達也\*3·大塚 久哲\*4

要旨:曲げ破壊型 RC 柱部材の実物大試験体を使用した正負交番載荷試験結果を用いて,ポ ストピークに着目した検討を行った。その結果,鉄筋の破断に関し,帯鉄筋比が小さい場合 には帯鉄筋が破断するが大きい場合には軸方向鉄筋が破断すること,試験体が同一形状・同 一載荷条件の場合には帯鉄筋比にかかわらず軸方向鉄筋破断までの繰返し載荷回数は同じ であること,軸力が小さいほど軸方向鉄筋・帯鉄筋の破断は遅くなること,載荷パターンも 鉄筋座屈・破断に影響を与えることが分かった。また軸力がある程度以上の場合には,軸方 向鉄筋が破断しない限りある程度の耐荷力を保持できる可能性があることが分かった。 キーワード: RC 柱,曲げ破壊,変形性能,ポストピーク,交番載荷,鉄筋破断

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物、特に既設構造物の 耐震性能を合理的に照査するためには、ポスト ピーク(曲げ耐力低下領域)を含めた RC 部材の 挙動を極力精度よく把握する手法を開発し、そ れを実務の照査に適用することが重要である。 著者らは、曲げ破壊型 RC 柱部材に関して、鉄道 RC ラーメン高架橋の柱部材を模した実物大試 験体を用いた水平力正負交番載荷試験を行い、 ポストピーク初期(耐荷力低下が降伏荷重程度 まで)を含めた荷重変位曲線について提案して いるところである<sup>1)</sup>。当該モデルにおけるポス トピークの荷重変位曲線は、1 δ y ごと3回の繰 返し載荷時の平均的な包絡線としてモデル化を しており、一般的には安全側の評価になってい るものと考えられる。しかしながらポストピー クの荷重変位曲線は、繰返し載荷回数の影響を 大きく受けることが既にわかっており<sup>3)</sup>,同一 変位における耐荷力は、一般的には繰返し載荷 回数が少ないほど大きくなる。実際の地震動は ランダムな波形を有しており、地震時における 構造物の応答を適切に評価するためには、繰返

し載荷回数の影響を考慮した荷重変位曲線のモ デル化が望まれる。現在,著者らは,軸方向鉄 筋が座屈したのち破断するまでを目標にした荷 重変位曲線のマクロ的なモデル化に取り組んで いるところである。本研究では,交番載荷試験 結果を基に,軸方向鉄筋等が破断する時期,な らびに軸方向鉄筋が座屈した場合の耐荷力算定 等に着目し,基礎的な検討を行うものである。

#### 2. 実験の概要

#### 2.1 試験体の形状および諸元

実験に用いた試験体は,鉄道 RC ラーメン高架 橋の柱部材の実物大モデルである。試験体の形 状および諸元を図-1および表-1に,試験体 の断面形状を図-2に,使用したコンクリート および鉄筋の材料試験結果を表-1,表-2に 示す。なお使用した鉄筋種類は全て SD345 であ る。試験体の形状は,H および O シリーズ,T シリーズの2タイプあり,Hおよび O シリーズ は900mm×900mmの正方形断面でせん断スパン が 3300mm,T シリーズは 800mm×800mmの正 方形断面でせん断スパンが 3000mm である。

\*1 九州旅客鉄道(株) 施設部保線課防災計画 工修 (正会員)
\*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造室長 工博 (正会員)
\*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部コンクリート構造 工修 (正会員)
\*4 九州大学 大学院工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

軸圧絲 引張 王縮強度 帯鉄筋 断面 引張鉄筋 側方鉄筋 応力度 鉄筋比 鉄筋比 部材 載荷 ーチン f'cf 形状 (最外縁軸 (片側あたり) 鉄筋径@間隔 σο Pt Pw f'c ペターン 接合方法 方向鉄筋 (mm)×組数 (%) (%)  $(N/mm^2)$ V/mm N/mm<sup>2</sup> 25.6 H97-1 D16@100×1 5組 0.66 26.9 Н D16@100×2組 0.88 28.2 25.6H97-2 i Ŷ 3.87 H97-3 D19@100×2組 フレア 29.2 27.0 А 1.27ÿ D32-10本 D32-5本 1.07 溶接 ii 30.9 31.3 H97-4D16@100×2組 0.88 H97-5 0.97 30.7 32.5 ズ i D16@100×1.5組 0.66 H97-6 3.87 31.8 34.0 В T97-1 3.68 30.0 33.4 0.79 D13@80×2組 フラッシュ А Т 0.78 D25-9本 D25-7本 0.00 32.6 34.9T97-2iii バット溶接 T97-3 D10@80×2組 3.68 0.45 24.334.6 C D32-5本 0 O04-L1 D32-10本 D16@100×1.5維 フレア 3.87 1.07 0.66 36.0 36.0 D

表一1 試験体諸元<sup>1),2)</sup>

注) 断面形状 :i, ii, iii は, 図-2参照 引張鉄筋比 :Pt=At/(b・d) At:最外縁の軸方向鉄筋の断面積 b:部材幅 d:有効高さ

引張鉄筋比は 0.78%~1.07%, 帯鉄筋比は 0.45%~1.27%, 軸圧縮応力度は 0~3.87N/mm<sup>2</sup> (軸力比 0~0.15) である。いずれも, せん断耐 力が曲げ耐力を上回り, 破壊形態が曲げ破壊型 となるように設計されている。

## 2.2 載荷方法および計測項目

載荷はフーチングを床に固定し,鉛直方向に 油圧ジャッキで所定の軸力を加えたのち,図-1に示す載荷点に水平方向に正負交番載荷を行 った。

そして, 柱基部の引張鉄筋が降伏ひずみに達 した時点における載荷点位置の水平変位を降伏 変位1δyとし, これを基準に図-3に示す載荷 パターンで変位制御にて載荷を行った。計測項 目は, 試験体の水平変位, 鉛直変位, 鉄筋のひ ずみ, ひび割れ状況である。

### 3 実験結果

# 3.1 荷重一変位曲線

各試験体の荷重-変位曲線を図-4に示す。 それぞれの損傷レベル1限界点(Y点:降伏点), 損傷レベル2限界点(M点:繰返し載荷による 曲げ耐力低下が顕著とならない最大変位)につ いては,既往の研究<sup>1)</sup>により概ね妥当な荷重・ 変位が算定可能であるため,本研究ではM点以 降に着目することとする。各試験体とも(漸減 載荷の O04-L1 を除く),M点以降に軸方向鉄 筋の座屈が顕著となって耐力低下が生じ,その 載荷パターン : A, B, C, Dは, 図-3参照

帯鉄筋組数 :2組とは、各段に中間帯鉄筋を配置したもの。 1.5組とは、1段おきに中間帯鉄筋を配置したもの。

表-2 鉄筋の材料試験結果

$\backslash$	鉄筋径	引張降伏強度	弾性係数
		$(N/mm^2)$	$(N/mm^2)$
H97-1~6	D32	368	161
	D19	366	155
	D16	409	153
T97-1~2	D25	371	189
	D13	373	182
Т97-3	D25	377	195
	D13	402	182
O04-L1	D32	370	195
	D16	377	196



H・Oシリーズ Tシリーズ図-1 試験体形状(単位:mm)





図-3 載荷パターン

後帯鉄筋の破断あるいは軸方向鉄筋の破断のい ずれかが生じて耐力が大きく低下する結果とな った。なお図-4では、軸方向鉄筋あるいは帯 鉄筋が破断した載荷サイクル以降を破線で示し ている。

# 3.2 鉄筋の破断

#### (1) 鉄筋の破断位置

いずれの試験体においても、帯鉄筋の破断が 生じる場合には、柱全周を囲う帯鉄筋の隅角部 が破断し、中間帯鉄筋の破断は生じなかった。 また軸方向鉄筋の破断が生じる場合には、柱全 周を囲う帯鉄筋と中間帯鉄筋とで2重に拘束さ れている、載荷面の中央部付近の軸方向鉄筋が 破断した。

## (2) 帯鉄筋比の影響

H シリーズの1 δy×3回の繰り返し載荷(載 荷パターン A) 試験体に着目する。帯鉄筋比が 小さい Pw=0.66%の場合(H97-1,5) は帯鉄筋破 断,帯鉄筋比が大きい Pw=1.27%(H97-3)の場 合は軸方向鉄筋の破断が生じた。Pw=0.88%の場 合(H97-2, 4)は、断面形状 iの H97-2 では帯鉄 筋が破断、断面形状 iiの H97-4 では軸方向鉄筋 が破断し,帯鉄筋形状により破断する鉄筋は異 なる結果となった。また T シリーズでは,帯鉄 筋比 (Pw=0.45~0.79%) にかかわらず,全て軸 方向鉄筋が破断する結果となった。この原因と しては,T シリーズでは帯鉄筋間隔が 80mm と 密であることが考えられる。

## (3) 軸方向鉄筋破断までの繰返し回数

Hシリーズの1δy×3回の繰り返し載荷試験 体に着目する。軸方向鉄筋破断の場合(H97-3,4) は、帯鉄筋比にかかわらず、繰り返し載荷22サ イクル目(8δyの1回目繰返し)に鉄筋破断が 生じた。また、帯鉄筋破断の場合(H97-1,2,5) は、22サイクル目より前に帯鉄筋破断が生じ、 軸方向鉄筋は破断しなかった。(2)より帯鉄筋が 破断するのは帯鉄筋比が小さい場合であり、そ の場合軸方向鉄筋は拘束が小さく破断しにくい ものと考えられる。したがってHシリーズ載荷 パターンAの試験体では、本実験の範囲内では、 繰返し載荷21回目までは軸方向鉄筋は破断しな いものと推定される。

## (4) 軸力が鉄筋破断に与える影響

軸応力度 3.68 N/mm<sup>2</sup>の T97-1 と, 軸応力度 0



の **T97-2** の軸方向鉄筋破断時期 を比較する。**T97-1** は-6δy×2 (変位 176mm のサイクル)に破 断したのに対し,**T97-2**は+9δy ×2 (202mm) に破断した。破断 までの繰返し載荷サイクル数は, それぞれ 17 回と 26 回であり, 軸力が小さいほど軸方向鉄筋が 破断しにくい結果となった。こ れは軸力が小さいため軸方向鉄 筋に作用する圧縮応力が小さく, それが軸方向鉄筋の座屈程度に 影響を与え,その結果破断の時 期が遅くなるものと考えられる。

同様に軸応力度 3.87 N/mm<sup>2</sup>の H97-1 と,軸応力度 0.97 N/mm<sup>2</sup> の H97-5 の帯鉄筋破断時期を比 較する。H97-1 は+4δy×3 (12 サイクル目)に破断したのに対 し,H97-5 は-5δy×2 (14 サイ

クル目)であり、軸力が小さいほど帯鉄筋の破 断が遅くなっている。

## (5) 載荷繰返し回数が鉄筋破断に与える影響

繰り返し回数が1δyごと3回のH97-1と,1 δ y ごと1回と少ない H97-6 とを比較する。帯鉄 筋破断時の変位は, H97-1 の+4δy×3 に対し, H97-6 は+7δy×1 であり, 繰返し回数が少ない 場合には、帯鉄筋破断は大きな変位で生じた。 これは載荷繰返し回数が少ない場合, 軸方向鉄 筋の座屈程度が小さくなるためと考えられる。 しかしながら,同試験体で帯鉄筋破断までの累 積繰返し回数に着目すると, H97-1の12 サイク ル目に対して H97-6 は7 サイクル目であり, 繰 返し回数が少ない場合,少ないサイクルで破断 が生じた。ここで、両試験体で軸方向鉄筋の座 屈が同程度になったときに帯鉄筋の破断が生じ たものと仮定すると,+4δyまでの3回ずつの繰 返し載荷は、+7δyまでの1回ずつの繰返し載荷 と同程度の軸方向鉄筋の座屈を生じさせること となる。



図-5 軸方向鉄筋が破断しない場合の荷重変位曲線(想定)



(6) 漸増載荷と漸減載荷の比較

漸増載荷(H97-1)と漸減載荷(O04-L1)を比較 する。H97-1では+4 $\delta$ y×3(12サイクル目)で 帯鉄筋破断が生じたのに対し,O04-L1では $6\delta$ y から $1\delta$ yまでの3回の繰返し載荷(合計18サ イクル)を行ったのちも、帯鉄筋の破断は生じ なかった。これは載荷初期に大変形を受けた場 合、軸方向鉄筋が早期に塑性伸び変形を生じ、 その後の小変位の繰返し載荷でコアコンクリー トの損傷が進むため、軸方向鉄筋が外側だけで なく内側にも座屈することが可能となるためと 考えられる。

# 3.3 軸方向鉄筋が破断しない場合の最終耐荷力 の検討

軸方向鉄筋は、座屈した後も破断しない限り、 引張側では有効に作用するものと考えられる。 そのとき、コアコンクリートの損傷が少ない場 合には、図-5に示すように、ある程度の耐荷 力を保持することが想定される。ここでその耐 荷力は、圧縮側のかぶりコンクリートならびに 圧縮鉄筋を無視した曲げ耐力 (以下,終局耐力計算値とする) により算出できると仮定し,各 試験体の最終耐荷力との比較を 行うこととする。なお側方鉄筋 は全て有効として算出した。終 局耐力計算値を表-3に,図-4に太線で示す。

まず,軸圧縮応力度が実構造 物に近い試験体について検討す

る。帯鉄筋が破断した H97-1,2 に着目すると,図 -4より,最終サイクルの荷重は前サイクルの 荷重とほぼ同じであること,またその値は終局 耐力計算値を上回っていることが分かる。また 軸方向鉄筋が破断した H97-3,4,T97-1,3 では,軸 方向鉄筋破断までは荷重は終局耐力計算値を上 回っているが,破断後には下回る結果となった。

次に,軸圧縮応力度が小さい H97-5,T97-2 に着 目する。両試験体とも最終的な荷重は終局耐力 計算値を下回る結果となった。図-6に,H97-1, H97-5 の軸方向鉄筋の試験後の最終位置を示す。 軸力が小さい H97-5 では,コアコンクリートの 引張領域が広くなるため,側方鉄筋の位置ずれ も生じており,そのため最終的な荷重が小さく なったものと思われる。

同様の傾向は、漸減載荷を行なった O04-L1 に も見られる。これは、載荷初期に大変形を受け た場合、軸方向鉄筋が早期に塑性伸び変形を生 じるため、その後の小変位の繰返し載荷におい てもコアコンクリートの損傷が進むためと考え られる。

### 4. まとめ

本研究は、曲げ破壊型 RC 柱部材の実物大試験 体を使用した正負交番載荷試験結果を用い、ポ ストピークの鉄筋破断と最終耐荷力に関する考 察を行なったものである。まとめを以下に示す。

(1) 鉄筋の破断に関し、帯鉄筋比が小さい場合 には帯鉄筋が破断するが大きい場合には軸 方向鉄筋が破断すること、試験体が同一形

表-3 圧縮側のかぶり・圧縮鉄筋を無視した曲げ耐力

	曲げ耐力/せん断スパン			
	通常	圧縮鉄筋・ かぶり無視	鉄筋破断	備考
	(kN)	(kN)		
H97-1	1210	887	帯鉄筋破断	
H97-2	1220	904	帯鉄筋破断	
H97-3	1230	915	軸方向鉄筋破断	
H97-4	1240	934	軸方向鉄筋破断	
H97-5	1060	839	帯鉄筋破断	軸力小
H97-6	1250	944	帯鉄筋破断	
T97-1	827	640	軸方向鉄筋破断	
T97-2	685	550	軸方向鉄筋破断	軸力小
T97-3	799	598	軸方向鉄筋破断	
O04-L1	1270	984	破断なし	漸減載荷

状・同一載荷条件の場合には帯鉄筋比にか かわらず軸方向鉄筋破断までの繰返し載荷 回数は同じであること、軸力が小さいほど 軸方向鉄筋・帯鉄筋の破断は遅くなること、 載荷パターンも鉄筋座屈・破断に影響を与 えることが分かった。

(2) 最終耐荷力に関し、終局耐力計算値(圧縮 側のかぶりコンクリートならびに圧縮鉄筋 を無視した曲げ耐力)との比較を行なった。 本検討で用いた実験の範囲では、軸力比0.1 ~0.2程度の漸増載荷においては計算値は安 全側の評価となる。しかしながら軸力が小 さい場合、あるいは漸減載荷のように早期 に大変形を受ける場合には、側方鉄筋の位 置ずれやコアコンクリートの損傷が進行す るため、計算値は危険側の評価となる。

## 参考文献

- 渡辺忠朋,谷村幸裕,瀧口将志,佐藤勉:鉄 筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した 変形性能算定手法,土木学会論文集, No.683/V-52, pp.31-45, 2001.8
- 2) 仁平達也,谷村幸裕,岡本大,田所敏弥:RC 高架橋柱における載荷履歴が変形性能に及 ぼす影響,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.2, pp.943-948, 2005.6
- 3) 瀧口将志,渡辺忠朋,谷村幸裕: RC 部材の 繰返し載荷による曲げ耐力低下に関する実 験的研究,土木学会第56回年次学術講演会, V-371, pp.742-743,2001.10