

# 論文 縦横比の異なる RC 橋脚模型の耐荷性状に関する実験的研究

谷本俊充\*1・佐藤昌志\*2・三上 浩\*3・岸 徳光\*4

要旨：RC 橋脚の静的、動的耐荷挙動を検討する目的で、実橋脚の 1/3 ~ 1/5 規模の橋脚模型を用いて、水平単調加力実験及び上載荷重を与えた水平交番加力実験を行なった。実験に用いた橋脚模型は縦横比を変化させた矩形断面とし、耐荷性状に与える断面の縦横比の影響を検討するとともに、軸方向鉄筋の段落しの影響も合わせて検討した。実験結果から、水平力を受ける橋脚の耐荷性状は、断面の縦横比ならびに段落しと橋脚に作用する上載荷重の影響を大きく受けることが明かとなった。

キーワード：RC 橋脚, 水平加力実験, 段落し, 縦横比

## 1. はじめに

平成 7 年 1 月 17 日未明、阪神地方に発生した阪神淡路大地震は、近年にない大きな人的、物的被害をもたらした。なかでも土木建築構造物の被害は甚大であった。これらの被害は、今回の地震がこれまで想定されていた以上の大きな地震力を構造物に与えたことが主たる原因とされている。しかしながら、コンクリート構造物の構造形式、断面形状、構造細目及び施工法などについて見直しを含めた再検討が必要であるとも言われている。土木構造物は公共構造物であり、各種の災害に対する十分な安全性を有するとともに、その被害を最小限に抑えることが要求されている。今回の地震では、土木構造物の中でも高速道路や鉄道の高架橋の橋脚が大きな被害を受け、その後の災害復旧に大きな障害をもたらした。

本研究では、RC 橋脚断面の縦横比及び主筋の段落しの静的及び動的耐荷挙動に与える影響を検討した。載荷方法は片側水平単調加力及び上載荷重を考慮した水平交番加力の 2 種類とした。単調加力実験は橋脚模型の静的耐荷性状を検討するため、交番加力実験は繰り返し荷重下における耐荷性状を検討するために行った。測定項目は水平荷重及び水平変位であり、荷重-変位関係を中心に検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験体の一覧を表 1 に示す。試験体の名称は、頭文字 M, R で各々単調加力、交番加力を、数字で縦横比を示し、一以後は段落し部の位置を示している。なお、試験体に用いたコンクリートの実験時の材令における平均圧縮強度は  $260 \text{ kgf/cm}^2$  であり、用いた鉄筋はすべて SD295A である。

単調加力実験に用いた試験体は、柱部の高さが 100 cm で断面寸法が  $40 \times 40 \text{ cm} (1:1)$ 、 $33 \times 66 \text{ cm} (1:2)$ 、 $48 \times 24 \text{ cm} (2:1)$  及び  $20 \times 80 \text{ cm} (1:4)$  の 4 種類とした。試験体の形状寸法及び配筋の例を図 1 に示す。軸方向鉄筋として M14 は D25, その他は D16 の異形鉄筋を用い、基部の鉄筋比はそれぞれの断面に対して 4.0%, 3.3%, 4.2% 及び 4.2% として、基部における曲げ耐力をほぼ同等とした。また、軸方向鉄筋は通常行われているように基部から上 1/3 以上の範囲で鉄筋量の半分を段

\*1 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室 主任研究員, (正会員)

\*2 北海道開発局開発土木研究所 構造研究室室長, (正会員)

\*3 三井建設(株)技術研究所 主任研究員, 工博(正会員)

\*4 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科, 工博(正会員)

落ししたものと、段落しないものを検討した。本研究では、せん断破壊が先行するような部材断面を用いた場合の耐力と破壊性状を検討するため、あえて試験体の軸方向鉄筋比（約4%）を通常のRC橋脚より大きいものとした。

交番加力実験に用いた試験体の断面寸法は単調加力と同様であるが、柱部の高さは150cmである。試験体の寸法、配筋を図-2に示す。試験体の軸方向鉄筋にはD13を用い、鉄筋比は柱基部でそれぞれの断面に対して約2%、スターラップはD10を20cm間隔で配筋している。また、軸方向鉄筋は全ての試験体で基部から1/3以上の範囲で半分に減少させるように段落しを行なっている。

## 2.2 実験方法

単調加力実験は、厚さ50cmのコンクリート剛基礎と一体となった厚さ150cmの反力壁を用いて行った。試験体のフーチングはボルトを用いて反力ベッドに固定した。荷重は水平加力用油圧ジャッキを反力壁に固定し、この油圧ジャッキにロードセルを介して単調に加力した。試験体には載荷点部の変形挙動を検討するために載荷点と反対側に変位計を取り付けている。

一方、交番加力実験は水平荷重載荷用の圧縮、引張り両用の油圧ジャッキを用いて行った。試験体天端には、上部工の重量を模擬した寸法が150×150×100cmで総重量が20tfの鉛塊からなる重りを載せ、これに水平力を与えている。載荷位置は柱基部から190cmの高さである。荷重はロードセルにより検出し、載荷側に対して反対側の載荷点位置に取り付けた変位計によって水平変位を検出した。なお、フーチングの天端にも変位計を取り付けて固定状況を検討し、完全固定状態に近いことを確認している。載荷は交番載荷であり、始めに引張力を与えたことより便宜的にこれを正載荷とし、圧縮力を与える場合を負載荷とした。また、最初に軸方向鉄筋が降伏するまでは段階的な載荷を行った。すなわち、正載荷によって引張側の鉄筋歪が500μに達するまで

表-1 試験体の一覧

試験体の名称	断面寸法 (cm)	段落し
M11-0	40 × 40	なし
M11-1/3		1/3
M12-0	33 × 66	なし
M12-1/3		1/3
M14-0	20 × 80	なし
M14-1/3		1/3
M21-0	48 × 24	なし
R11-1/3	40 × 40	1/3
R12-1/3	33 × 66	1/3
R14-1/3	20 × 80	1/3
R21-1/3	48 × 24	1/3

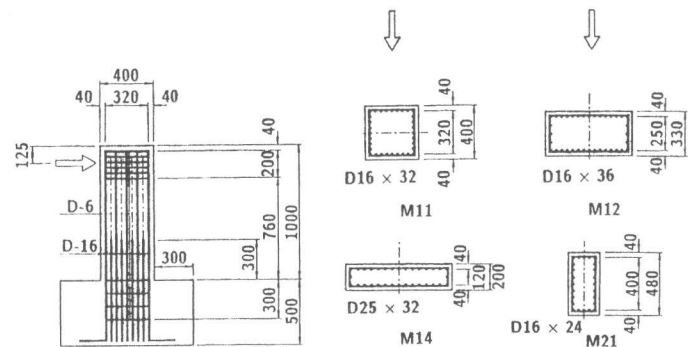


図-1 試験体の断面寸法及び配筋（単調載荷）(mm)

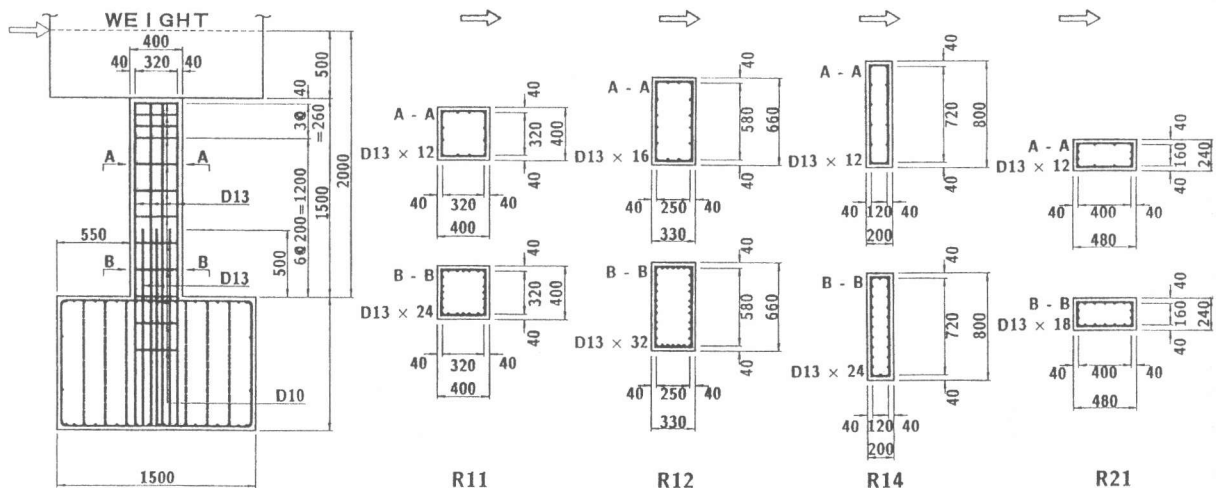


図-2 試験体の断面寸法及び配筋（交番載荷）(mm)

載荷する。次に負荷荷によって、反対側の引張鉄筋歪が  $500 \mu$  に達するまで載荷する。さらにこのような載荷方法を鉄筋歪  $1000 \mu$ ,  $1300 \mu$ ,  $1500 \mu$  の各レベルに対して適用した。本文では試験体の基部の鉄筋歪が  $1500 \mu$  に達した時点で引張鉄筋が降伏したものとみなし、この時の正・負荷荷の平均変位、平均荷重を各々  $\delta_y$ ,  $P_y$  と定義した。これは、正・負荷荷の変形状態をできるだけ均等にするように配慮したためである。その後、 $\delta_y$ ,  $2\delta_y$ ,  $3\delta_y \dots$  の各変位段階毎に繰り返し回数 5 回の交番載荷を行った。なお、交番載荷は荷重レベルが  $P_y$  を下回る程度に減少するまで行った。ただし、R14 試験体はこのような試験方法が困難であったため後述のように荷重制御で行っている。

### 3. 実験結果

#### 3.1 単調加力実験

図-3~4 に各試験体の荷重-変位関係を示す。また、最大変位量が残留するものと仮定した荷重-変位曲線で囲まれる面積を吸収エネルギーと定義し、橋脚模型の靱性評価のための指標として検討した。ここで、最大変位量は試験体が破壊（急激な耐力低下）するまでの変位量である。ただし、曲げ破壊型の場合は急激な耐力低下がみられないまま変位が増大していくため 40 mm 程度の変位量で載荷を終了している。

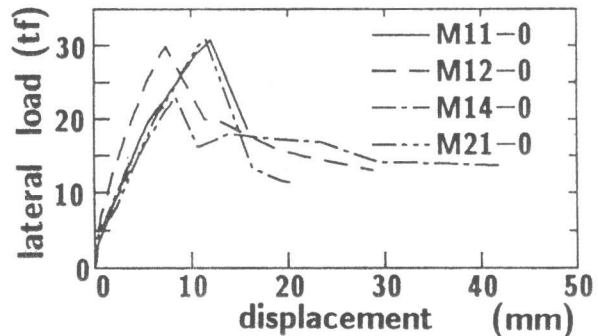


図-3 荷重-変位関係（段落しなし）

図-3 に、段落しのない試験体の荷重-変位関係を示す。M11-0 における荷重は 20 tf 前後で増加勾配に変化がみられるものの、ほぼ最大荷重（30.8 tf）まで単調に増加している。勾配の変化はせん断ひびわれが発生したことによるものと考えられる。最大荷重に達した後は荷重が急激に減少して破壊に至っており、破壊形式はせん断破壊であった。この試験体は破壊に至るまでの変位の伸びが少ないことから、吸収エネルギーは約 3180 kgf·cm となっている。

M12-0 では最大荷重（約 29.8 tf）まで荷重が単調に増加しており、このときの変位は約 7 mm である。その後急激な耐力低下を示すが破壊に至らず、変位 20 mm 程度でも 15 tf 程度の耐力を保持している。この場合も破壊形式はせん断破壊である。また、このときの吸収エネルギーは約 5140 kgf·cm である。M14-0 試験体も最大荷重までほぼ一様な勾配で荷重及び変位が増加し、最大荷重を示した後急激に荷重が減少する傾向は他の試験体と同様である。しかし、M14-0 試験体は最大荷重が約 23.0 tf（変位約 9 mm）と他の試験体と比較して小さいこと及び最大荷重後の荷重の低下が少なく、最大変位も約 41.8 mm と他の試験体と比較して大きくなっている。そのため、吸収エネルギーは約 6440 kgf·cm であり、段落しのない試験体では最大となっている。

M21-0 試験体は  $P = 7.0$  tf と  $P = 22.0 \sim 23.0$  tf において小さな勾配の変化がみられるが、全体的にほぼ単調に増加して約 31.0 tf（変位約 11.5 mm）で最大を示した後急激に耐力を失い、最大変位約 20.5 mm で破壊している。破壊形式はせん断破壊であり、吸収エネルギーは約 3620 kgf·cm である。

段落しのある試験体の荷重-変位関係を図-4 に示す。M11-1/3 試験体は、荷重 7 tf 及び 17 tf 前後で勾配の変化がみられるがその後荷重は増加して最大荷重約 21.8 tf を示している。このときの変位は約 14 mm であった。最大荷重到達後に急激に耐力が低下して最大変位約 16.5 mm で破壊しており、吸収エネルギーは約 2430 kgf·cm である。破壊形式はせん断破壊である。M12-1/3 試験体は単調に荷重及び変位が増加した後、約 24 tf で勾配が急変して、その後ゆるやかな荷重増加を示して約 26.5 tf で最大と

なっている。このときの変位は約 20 mm である。その後わずかに荷重が減少しながら最大変位約 35 mm を示している。破壊形式は曲げ破壊であり、吸収エネルギーは約 7700 kgf·cm である。M14-1/3 試験体は最大荷重まで単調に増加し、最大荷重の約 18.9 tf (変位約 15 mm) を示した後、徐々に荷重が減少しながら最大変位約 39.9 mm を示している。破壊形式は曲げ破壊であり、吸収エネルギーは約 4950 kgf·cm であった。

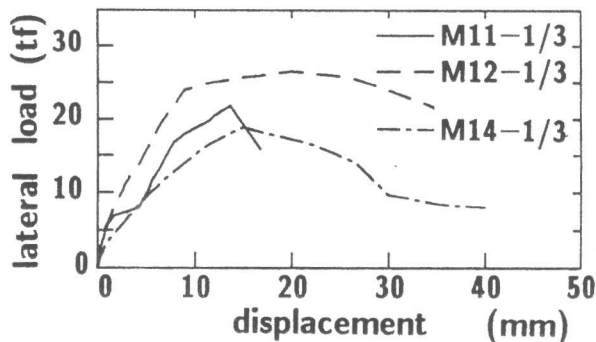


図-4 荷重-変位関係 (段落しあり)

以上、単調加力試験結果に基づき、縦横比の耐荷性状に与える影響を要約する。表-2 にはそれらの結果を整理している。なお、曲げ耐力の計算は断面分割法によって行い、実測のコンクリート強度及び鉄筋の規格値を基に解が一定して得られる分割数以上として 5 mm 厚の 40 分割以上で行った。段落しのある場合は、段落し部の曲げ耐力が基部の耐力よりも小さいことより、表中には段落し部の曲げ耐力を示している。

表-2 単調加力試験結果

試験体の名称	計算曲げ耐力 (tf)	計算せん断耐力 (tf)	最大荷重 (tf)	吸収エネルギー (kgf·cm)	破壊形式
M11-0	33.9	11.3	30.8	3180	せん断
M11-1/3	27.7	9.3	21.8	2430	せん断
M12-0	35.4	17.0	29.8	5140	せん断
M12-1/3	28.0	13.8	26.5	7700	曲げ
M14-0	35.1	14.3	23.0	6440	曲げ
M14-1/3	28.3	11.7	18.9	4950	曲げ
M21-0	29.5	7.2	30.9	3620	せん断

また、せん断耐力はコンクリート標準示方書に基づき算定評価している。

段落しがない場合は、1:1 及び 2:1 で耐力が計算せん断耐力より大きく、計算曲げ耐力を若干下まわっているが、最終的に耐力低下が急激に生じるせん断破壊を示している。これに対して、縦横比が 1:2, 1:4 と断面が幅広になるに従って耐力が計算せん断耐力より大きく曲げ型の破壊形式になっている。ただし、M14 は段落しのある場合で最大荷重が約 23.0 tf、ない場合で 19 tf 程度と計算曲げ耐力の 66 ~ 67 % 程度の小さな荷重で曲げ破壊を示している。これは、断面の幅が広い場合には鉄筋の抜け出しの影響が大きく、本来せん断破壊すべきものが曲げ破壊型に移行したためと推察される。計算耐力と同程度の最大荷重を示し、最大荷重レベルが比較的大きく、かつ吸収エネルギーの大きいものが効果的な縦横比と考え、総合的に判断して段落しの有無に関わらず縦横比 1:2 の断面がより効果的であるものと考えられる。

以下に、段落しの影響を要約する。1:1 はともにせん断破壊を示し、最大耐力、吸収エネルギーともに段落しのある場合がない場合の 70 ~ 76 % 程度と小さい。一方、1:2 では段落しの有無によって荷重-変位関係は大きく異なり、段落しのない場合がせん断破壊、ある場合が曲げ破壊であった。なお、最大荷重は段落しのある場合が 10 % 程度小さいが、吸収エネルギーは段落しのある場合がない場合に比べると 50 % 程度も大きくなっている。1:4 では、段落しによって最大荷重及び吸収エネルギーが 20 ~ 23 % 程度低下している。このように、1:2 を除いて段落しは最大荷重及び吸収エネルギーを低下させていることが分かる。一方、1:2 では段落しの有無による最大荷重の差が少なく、段落しによって吸収エネルギーが大きくなっている。このように、段落しと静的耐荷性状に与える影響は断面の縦横比に大きく影響されることが分かる。

### 3.2 交番加力試験

各試験体の荷重-変位関係を図-5 ~ 8 に示し、表-3 に実験及び計算結果を整理している。図-5

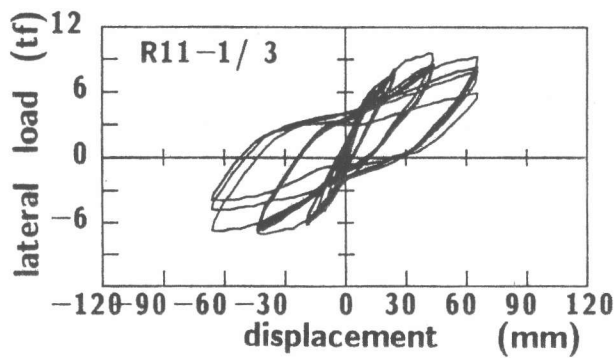


図-5 R11-1/3 の荷重-変位関係

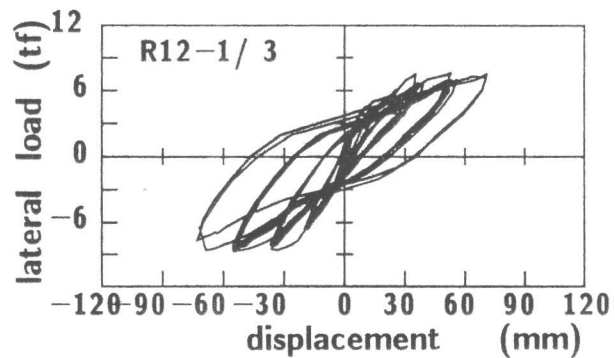


図-6 R12-1/3 の荷重-変位関係

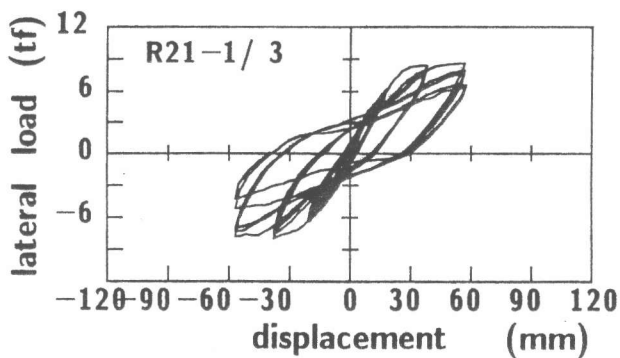


図-7 R21-1/3 の荷重-変位関係

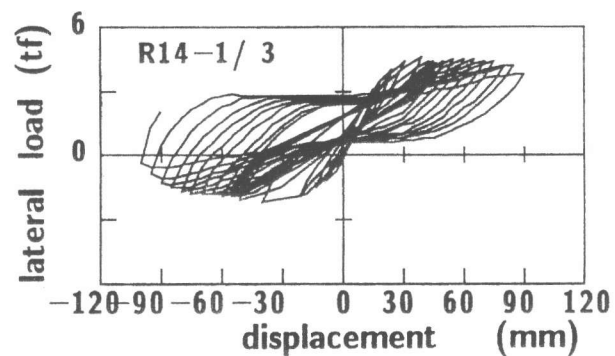


図-8 R14-1/3 の荷重-変位関係

に示すように、R11-1/3 試験体の  $\delta_y$  は正・負荷荷を平均して 21.9 mm であり、 $P_y$  は 7.0 tf である。その後  $2\delta_y$  で最大耐力 ( $P_u$ ) 8.1 tf を示し、 $3\delta_y$  4 回目の正荷荷において段落し部のコンクリートが剥落し、鉄筋が座屈して耐力を失った。最大変位 ( $\delta_u$ ) は 65.7 mm である。図-6 に R12-1/3 試験体の結果を示す。 $\delta_y$  は 13.0 mm であり、 $P_y$  は 5.6 tf である。その後  $2\delta_y$  で最大耐力 ( $P_u = 8.2$  tf) を示し、 $4\delta_y$  2 回目終了時点で段落し部のコンクリートが剥落し、鉄筋が露出して耐力を失った。正・負荷荷を平均した  $\delta_u$  は 71.0 mm である。図-7 に示すように、R21-1/3 試験体の  $\delta_y$  は 18.0 mm であり、 $P_y$  は 6.3 tf である。 $2\delta_y$  でやや耐力が増加し、最大耐力  $P_u$  は 8.4 tf である。その後繰り返しとともに荷重が徐々に低下して  $3\delta_y$  5 回目負荷荷で基部のコンクリートが剥落し、鉄筋が座屈して耐力を失った。R14-1/3 試験体は奥行きが最も小さい断面であり、水平加力によって模型橋脚に生じる水平変位がわずかな場合に対しても上載荷重による付加モーメントの影響が大きい試験体である。軸方向鉄筋の降伏時の変位程度でもその影響は大きく、変位制御が困難なために降伏変位  $\delta_y$  を確定できなかった。このため、R14 試験体に対しては最大荷重による繰り返し載荷を行っている。R14-1/3 の実験結果を図-8 に示す。図より、降伏荷重  $P_y$  は 2.5 tf 程度、降伏変位  $\delta_y$  は 18.3 mm 程度と思われる。 $\delta_y$  以降、繰り返し 14 回目の負荷荷で段落し部のコンクリートが剥落し、鉄筋が座屈して破壊した。最大荷重 ( $P_u$ ) は 3.4 tf、最大変位 ( $\delta_u$ ) は 90 mm 程度である。

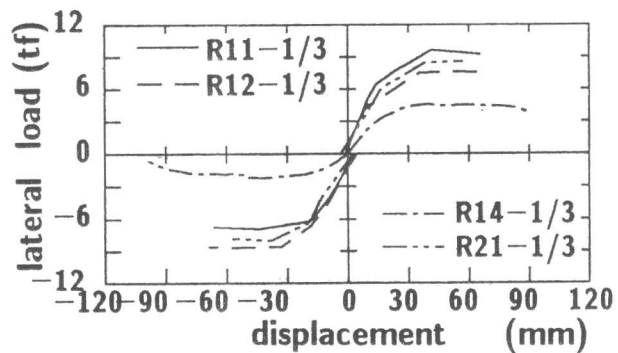


図-9 繰り返し荷重-変位曲線の包絡線

各試験体の繰り返し荷重-変位曲線の包絡線を図-9 に示す。なお、R14 を除いて各載荷振幅の 1 回

目の正・負荷荷における荷重—変位関係を用いた。R11, R12 及び R21 では、正載荷時と負載荷時で傾向が異なり、正載荷では R11 の荷重が最も大きく、R21, R12 の順に減少している。負載荷ではこれと逆の傾向である。しかしながら、正負の平均では 3 者は荷重及び変位量の絶対値並びに傾向がほ

表- 3 交番加力試験結果

試験体の名称	変位(mm)		荷重(tf)									終局塑性率(%)
	$\delta_y$	$\delta_u$	Py			Pu			計算曲げ耐力	計算せん断耐力		
			正	負	平均	正	負	平均				
R11-1/3	21.9	65.7	8.0	6.0	7.0	9.2	7.0	8.1	7.5	8.6	3.0	
R12-1/3	13.0	71.0	4.7	-6.6	5.6	7.6	8.7	8.2	7.5	12.0	5.5	
*R14-1/3	18.3	89.8	3.5	1.5	2.5	4.6	2.2	3.4	3.5	10.4	*4.9	
R21-1/3	18.0	56.8	6.2	6.4	6.3	8.6	8.0	8.3	8.4	7.0	3.2	

ぼ同様であると考えられる。これに対して、R14 試験体の荷重—変位関係は他の 3 体とは明らかに異なり、繰り返し載荷によって荷重が小さいにも関わらず変位量が大幅に増大していることが分かる。

表— 3 に示すように上載荷重を考慮した交番加力試験体の計算曲げ耐力と実測耐力は比較的良好に対応しているが、R14 の耐力は計算値、実測値ともに他に比べて最も小さい。これは、1 : 4 の断面の耐力に与える上載荷重による付加モーメントの影響が最も顕著であることを示している。他方、終局変位量は耐力が最も小さいにも関わらず最も大きい。これは、単調載荷と同様に 1 : 4 の断面において鉄筋の抜け出し及び伸びの影響が最も顕著であるためと考えられる。

交番加力試験の結果を要約する。1 : 4 を除いた断面では最大耐力に大差はないものの終局塑性率は 1 : 2 が最も大きい。一方、1 : 4 は上載荷重による付加モーメントが耐力を大幅に減少させている。なお、 $\delta_y$  を確定することができないために終局塑性率は求まらないが繰り返し載荷の総数が 14 回であり、他の試験体で各載荷振幅を 5 回ずつ繰り返していることを考えると、終局塑性率もさほど大きくないものと予想される。表— 3 に参考値として実験から得られた塑性率を示した。従って、交番加力試験においても耐力及び靱性能の観点から、縦横比 1 : 2 が最も効果的な断面であるものと考えられる。

#### 4. まとめ

RC 橋脚の静的、動的耐荷挙動を検討する目的で、実橋脚の 1/3 ~ 1/5 規模の模型橋脚を用いて水平単調加力実験及び水平交番加力実験を行なった。実験に用いた模型橋脚は縦横比を変化させた矩形断面とし、縦横比の影響を検討するとともに軸方向鉄筋の段落しの影響も合わせて検討した。本実験の範囲内で得られた結果を以下に要約する。

- 1) 単調加力試験で耐力及び吸収エネルギーが総合的に大きい断面は縦横比 1 : 2 の断面であった。
- 2) 上記試験から、縦横比 1 : 2 断面では段落しによって耐力が若干低下したものの吸収エネルギーは増加し、一方他の断面では耐力及び吸収エネルギーの両者が低下した。すなわち、段落しが耐荷性状に与える影響は縦横比によって異なる。
- 3) 交番加力試験から、終局塑性率は縦横比が 1 : 2 の場合が最も大きい。断面がより偏平な壁式の場合には上載荷重による付加モーメントの影響によって耐力は大幅に低下するため、終局塑性率は終局変位量が大きいものの小さいことが予想される。
- 4) 以上から、段落しの有無に関わらず耐力、吸収エネルギー及び靱性能の観点から縦横比 1 : 2 断面が最も効果的な断面であるものと考えられる。

本研究を行うにあたり室蘭工業大学建設システム工学科の松岡健一教授、ならびに大学院生の大山高輝君、亀石暁君はじめ構造力学研究室の諸君に多大な協力を戴いた。ここに記して謝意を表します。