

論 文

[2101] 変形性能に着目した大型模型と小型模型実験の比較

幸左 賢二^{*1}・小林 和夫^{*2}・村山八洲雄^{*3}・吉澤 義夫^{*4}

1. はじめに

道路橋のRC橋脚は、多くの場合、地震荷重によってその断面設計が決まることが多く、橋梁の耐震性において極めて重要な構造部材となっている。RC橋脚が通常規模の地震に対してのみならず、長期的な大規模地震に対して必要な耐震性を有するためには、十分な部材耐力に加えて、じん性に富んだ破壊モード特性を具備していなければならない。RC橋脚の耐力とじん性に関しては、これまで多くの実験研究が行われており、部材の破壊形態も鉄筋配置、コンクリートの材料特性等からかなりの程度まで予測できるようになってきた。しかし、従来の実験研究のほとんどが小型模型試験体によるものであったため、これらの部材挙動が実際の橋脚の場合にどの程度あてはまるのかは必ずしも確認されていない。そこで、この観点から都市内高速道路橋の橋脚を対象に、できるだけ実橋脚の配筋詳細を模擬した1/3縮尺の試験体を製作し、柱頭部での水平交番加力実験を行った。あわせて、従来の実験で使用された大きさを配筋状態も類似の1/10縮尺試験体の実験も行い、比較検討して従来の小型模型実験の実橋脚への適用性について調べた。

2. 実験方法

2. 1 実験の考え方

RC橋脚のじん性の指標であるじん性率 μ （天端での終局変位量と降伏変位量の比）は、一般に、せん断スパン比、鉄筋比、軸力の大きさに影響を受ける。じん性率に係わる終局変位を構成要素から見ると、柱基部の塑性変形分、柱上部の弾性変形分、およびフーチングからの柱筋抜き出しによる回転分から成り立っている。また、終局に至る過程は、かぶりコンクリートが剥落し、柱筋が座屈することが引き金となっている。

ここで、従来の小型試験体では、実橋脚に比べて以下のような相違点があった。

- ①鉄筋径の部材寸法に対する比が大きく、相対的に太径のものが使用されていた。
- ②柱筋は実橋脚が多段配筋であるのに対し、1段配筋であった。
- ③柱筋は実橋脚では段落とし（途中定着）されるのに対し、同一配筋であった。
- ④帯筋の平面形状は実橋脚が非閉合タイプであるのに対し、閉合タイプであった。

これらの相違点のうち、①、②、③は終局変位の構成要素の面でじん性率に影響する可能性があり、①、②、④は柱筋の座屈の面で影響する可能性が想定される。そこで、1/3縮尺大型試験体では阪神高速道路公団の標準橋脚を参考にし、せん断スパン比、鉄筋比、軸応力度のほか、段落とし、多段配筋、鉄筋径と部材寸法の比、および帯筋の平面形状をできるだけ実際に合わせた。また、1/10縮尺小型試験体では、せん断スパン比、鉄筋比、軸応力度は大型試験体の場合と同じであるが試験体寸法や鉄筋径などは従来の実験¹⁾で使用されたものと同程度にした。

*1 阪神高速道路公団 工務部設計課係長 Ph.D. (正会員)

*2 大阪工業大学 土木工学科 教授 工博 (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所第一研究部 主管研究員 (正会員)

*4 建設技術研究所(株) 大阪支店技術四部

2. 2 試験体諸元

(1) 形状と配筋

試験体の数は大型試験体と小型試験体各1体の合計2体である。大型試験体の形状寸法を図-1に示したが、小型試験体はこれと相似形になっている。柱のせん断スパン比はいずれも4.3である。断面の寸法と配筋を図-2に示す。柱基部での柱筋比（柱筋断面積の部材断面積に対する）は2.2%、帯筋比は0.3%となっている。実橋脚では、柱筋にD35が、また帯筋にD19が多く使用されているが、大型試験体ではその縮尺率に合わせてD13、D6鉄筋を使用した。柱筋は柱下部で3段配筋とし、高さ2.16mの位置で最内側の柱筋を段落ししている。段落とし位置は、計算上必要でなくなる断面から、柱断面の有効高に等しい長さだけ延ばした。また、鉄筋はフーチング下面まで延ばして定着している。各段内の柱筋の間隔は 3.8Φ （ Φ ：鉄筋径）、段間隔は 2.6Φ である。帯筋はコの字型に加工したものを両方から差し込み、重ね継手を介して1周を形成している。重ね継手部は、別途、帯筋比換算で0.1%の差し筋（中子筋）で補強している。小型試験体では、柱筋比と帯筋比を大型試験体と合わせているが、柱筋と帯筋には既往の実験結果を参考にして相対的に太径のD19とD6を使用した。また、柱筋の間隔は 7.6Φ である。

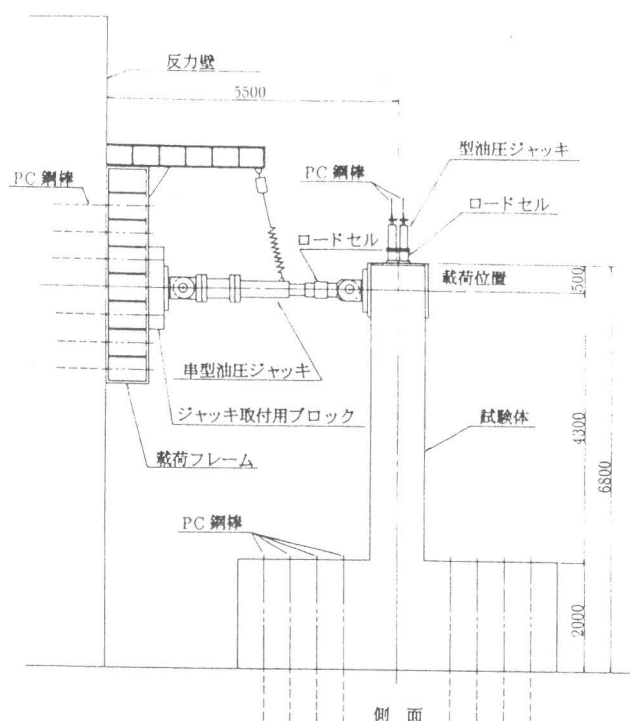


図-1 試験体形状寸法と加力方法（大型試験体）

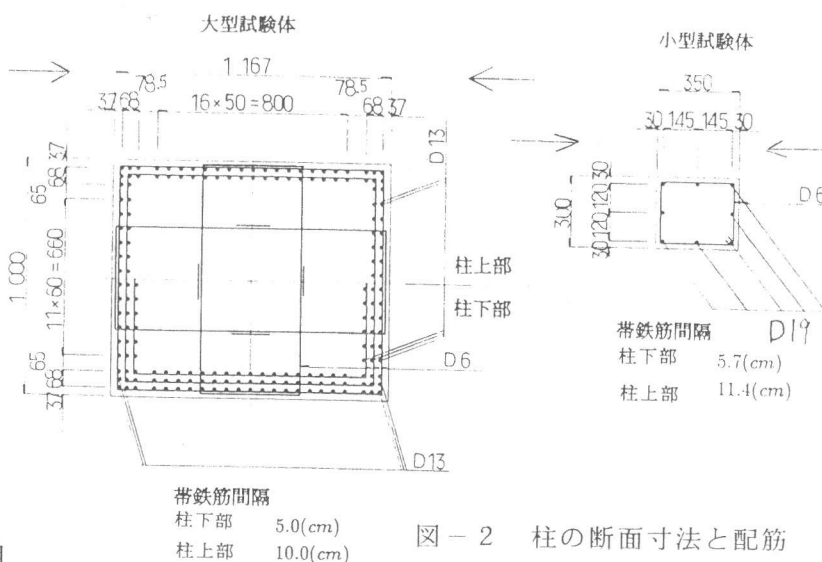


図-2 柱の断面寸法と配筋

表-1 使用した鉄筋の諸性質

	鉄筋径	降伏点 (kgf/mm ²)	引張り強さ (kgf/mm ²)	硬化点ひずみ (%)	伸び (%)	絞り (%)
大型試験体柱筋	D13	38.3	57.1	1.7	26	48
小型試験体柱筋	D19	39.1	57.7	1.5	23	42
帯鉄筋	D6	32.6	44.2	3.0	16	57

表-2 コンクリートの配合

	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 ($\times 10^6$ kgf/cm ²)
大型試験体	283	24	0.22
小型試験体	278	26	0.29

表-3 実験時のコンクリート強度

	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメン ト比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
大型試験体	10	18	4	62.0	46.0	200	323	785	951	0.808
小型試験体	20	15	4	57.5	44.8	175	305	801	1015	0.762

(2) 使用材料

使用した鉄筋の降伏点と引張強さ、およびひずみ硬化点などは、表-1に示すように、大型試験体と小型試験体の場合ではほぼ同様であった。コンクリートにはいずれも早強セメントを使用した。大型試験体の場合は、充填性を考慮して最大骨材寸法 $G_{max}10\text{mm}$ のマイクロコンクリートを、小型試験体には、 $G_{max}20\text{mm}$ のレディミクストコンクリートを使用した。コンクリート実験強度と配合を表-2、-3に示す。

2. 3 加力方法と測定項目

試験体の加力方法を図-1に示す。柱頭部で軸力を与え交番水平力を加力した。軸力は、フーチング下端で定着し試験体の中心を通るP C鋼材を介して柱頭部のジャッキにより軸応力度換算で 15kgf/cm^2 に保持した。P C鋼材を通すダクトは断面が加力方向に細長いものを使用し、試験体の変形でP C鋼材とダクトが接触しないように配慮した。いずれの試験体においても、計算上の降伏荷重 P_y (柱基部の最外縁鉄筋が降伏する荷重) までは、荷重制御で漸増交番荷重を加力し、降伏荷重以降は、変位制御で降伏時変位 δy の整数倍の変位で各10サイクルの交番繰返荷重を加力した。荷重は最大荷重経過後、降伏荷重に低下するまで載荷し、そのときの変位を終局変位とする。大型試験体の計算 P_y は 92tf で、対応する実測 δy は 26mm 、また、小型試験体では 8.5tf および 10.5mm であった。測定項目は、図-3に示すように、加力点変位、柱水平変位の高さ方向分布、フーチングと柱の相対変位、およびフーチング内部の柱筋ひずみ量である。

3. 実験結果と考察

3. 1 荷重-変位曲線と試験体の変状

① 各試験体の加力点での荷重-変位曲線を図-4に示す。各変位ステップの水平変位の柱高さ方向分布を図-5に、また、ひびわれと破壊状況を図-6に示す。加力試験中の試験体の変状は以下のものであった。

大型試験体： $1. \delta y$ の繰返しにより、柱

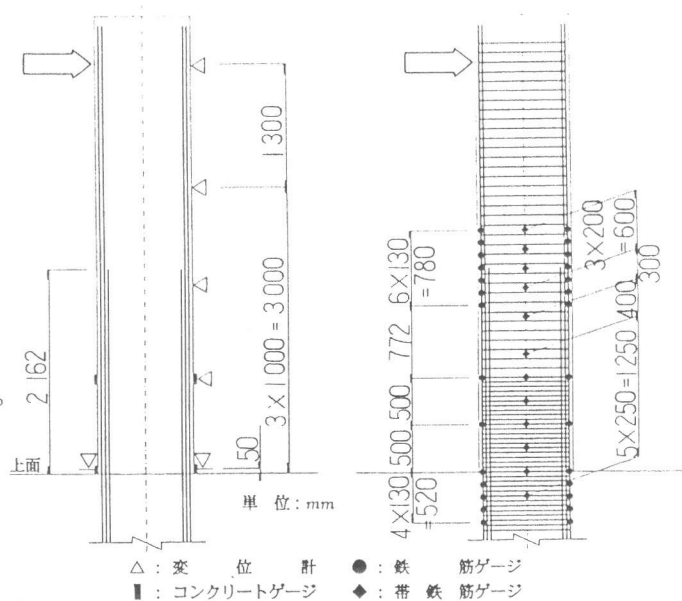


図-3 測点位置

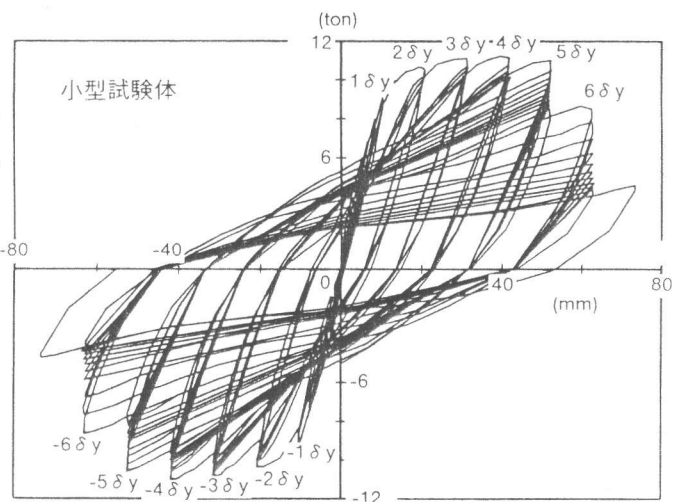
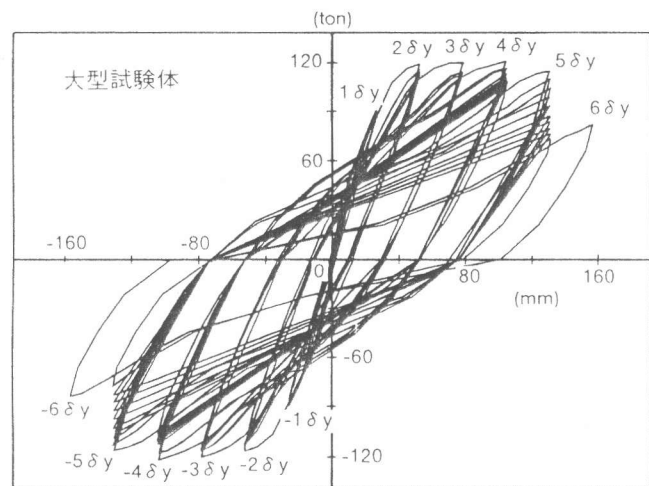


図-4 加力点の荷重-変位関係

筋段落とし付近で斜めの交差ひびわれ発生。2 δy で柱基部付近に斜めひびわれ進展、ひびわれの交差確認。3 δy の $n=1$ で柱基部の隅角部の局部的なコンクリート剥離。4 δy の $n=2$ でコンクリート剥離（最大荷重:122.1t）。同、繰り返しによりコンクリートの剥落増加。5 δy の繰り返しで部材の著しい損傷。同、 $n=3$ で柱筋の一部破断。

小型試験体：1 δy の繰り返しではひびわれの殆どは曲げひびわれ。2 δy で柱基部付近斜めひびわれ進展、同ひびわれ交差確認。3 δy の $n=1$ で柱筋にそった明確な縦ひびわれ。4 δy の $n=$ 後半で柱下端の一部コンクリート剥落（最大荷重:11.2t）。5 δy の繰り返しでコンクリートの剥落増加。6 δy の繰り返しで部材の著しい損傷

②小型供試体の実験結果は、従来の実験結果とじん性率（荷重が降伏荷重相当まで低下した変位量）、破壊範囲ともに整合している。大型試験体での荷重—変位曲線は、小型試験体の場合とほぼ相似の形状になっている。ただし、終局時は大型試験体に急激な破壊が生じ、じん性率も約 5.5と、小型試験体の約 6に比べて若干小さい値となった。大型試験体でのじん性率低下の原因としては、コンクリートの断面内ひずみ勾配が小さいことによるコンクリート強度の低下、帯筋の長尺化に伴う拘束効果の低下などが考えられる。なお、大型試験体での降伏変位 δy （26mm）は、寸法比（10/3）と照らし合わせると小型試験体の場合（10.5mm）よりも小さかった。

③大型試験体では、加力ステップの初期の段階から柱筋の段落とし付近で斜めひびわれが発生したが、最大荷重下でも段落とし部は降伏しない位置にあるので、この部分での損傷の進展は認められなかった。加力ステップの進展に伴う部材の損傷は、どちらの試験体も柱の基部付近に限定されている。3 δy 程度以上の場合の水平変位の高さ方向分布がほとんど直線分布になっている（図—5）ことから、終局変位のほとんどはフーチング面から1 d（d：断面せい）の区間の変形に支配されており、塑性ヒンジと柱筋の抜け出しに伴う基部の回転で決まっているといえる。しかし、破壊の範囲を詳細にみると、大型試験体では高さ約 0.4 dの範囲であり、小型試験体の約 0.8 dに比べて約半分の領域であった。これは、使用している柱筋の直径の影響と、鉄筋の座屈長さの相違などによるものと推定される。

3. 2 柱筋抜け出しに伴う基部回転

①柱基部における柱部材とフーチングとの鉛直相対変位の測定値と、基部回転の状況を図—7に示す。フーチング内柱筋のひずみの高さ方向分布を図—8に示す。これらをもとに、柱筋の抜け出し量を2つの方法によって求めた。一つは、フーチングとの相対変位から柱筋位置の変位量に換算したもの、他の一つは、鉄筋のひずみ量を高さ方向に積分したものである。後者の方法において、積分開始点となるひずみが0の位置は、ひずみ分布を外挿して（直線状にひずみ点を結ぶ）推定した。また、鉄筋ひずみは降伏点に達してから、急激にひずみが増大すると仮定した。柱筋の抜け出し量、抜け出しによる基部回転角、および柱頭部変位に占める基部回転分の割合を、柱頭部変位との関係で表したものをそれぞれ図—9、図—10、図—11に示す。

②塑性率($n \delta y$)が同じのときは、柱筋の抜け出し量はD13を用いた大型試験体の方がD19を用いた小型試験体の場合よりも常に大きかった。抜け出し量の値を鉄筋径で無次元化したものを終局状態に近い4 δy で比較すると、大型試験体では小型試験体の場合の約 3倍となっている。これは、大型試験体での鉄筋間隔(3.8 Φ 、2.6 Φ)が小型試験体の場合(7.6 Φ)よりも密になっているためであるが、石橋ら²⁾のデータから求められる約 1.5倍と比べると著しく大きなものとなっている。この相違は、大型試験体が多段配筋になっているためと考えられる。見掛け上の付着強度が小さくなり、鉄筋応力度がフーチング内の深いところまで伝達されている（図—8）ためである。

③大型試験体では断面せいが大きいいため、基部回転に対する抜け出しの影響は緩和されて小型試験体の場合より小さく（図-10）、終局変位に占める割合も小さい（図-11）が、終局変位の25%程度は抜け出しによる回転分となっている。

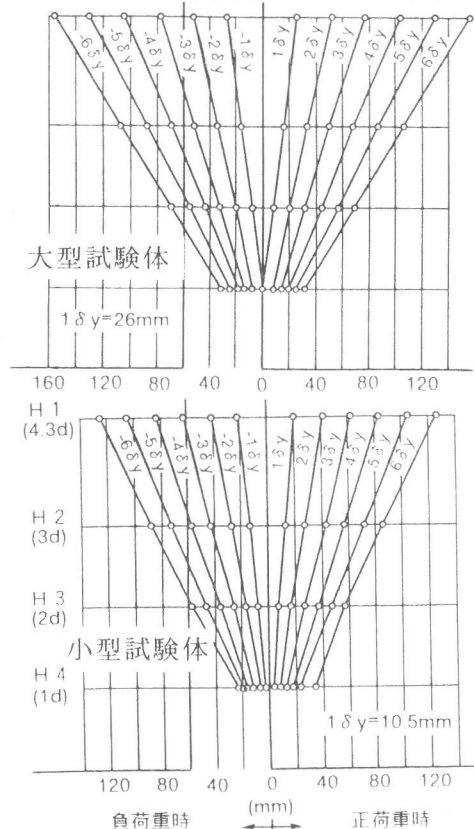


図-5 柱部の変形状態

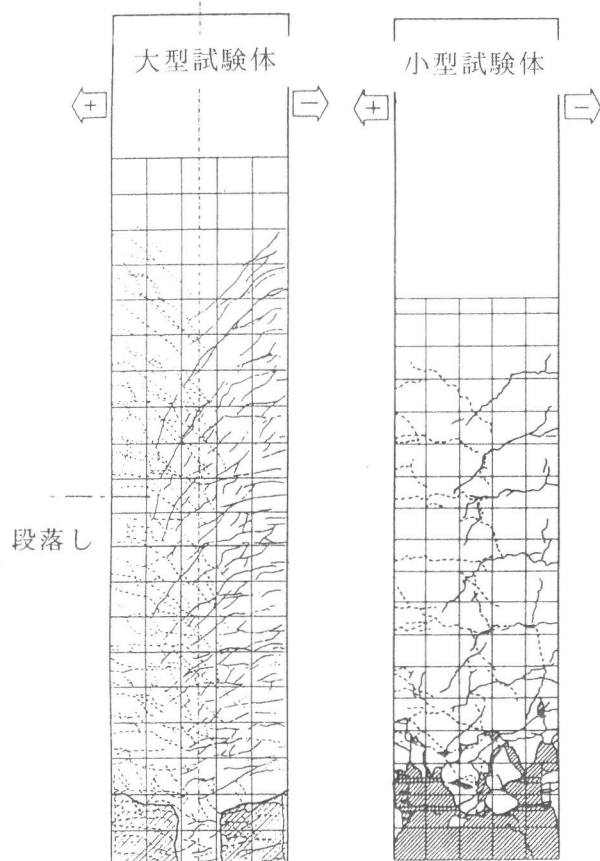


図-6 ひびわれと破壊状況

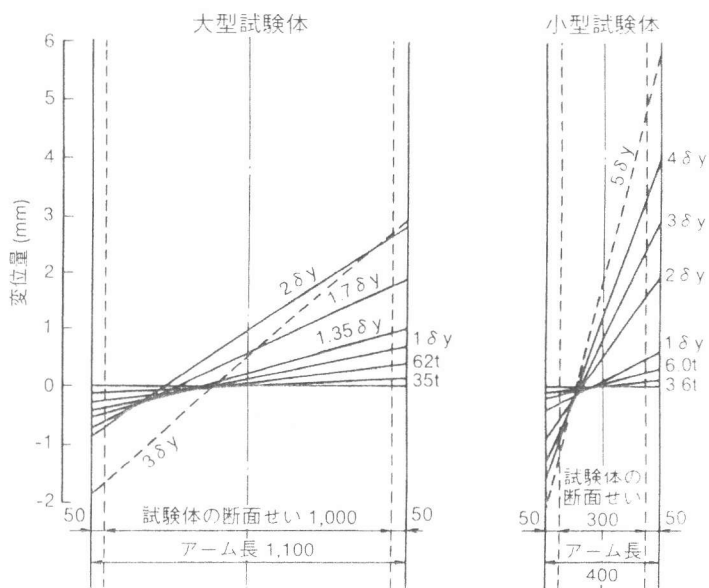


図-7 柱基部とフーチングの鉛直方向相対変位

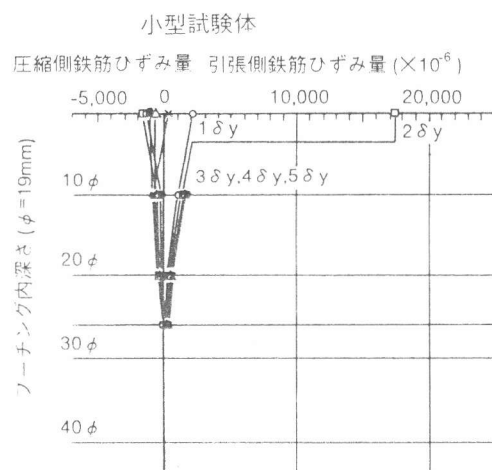
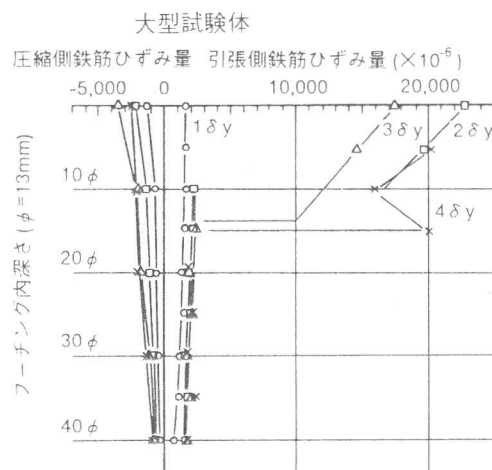


図-8 フーチング内柱筋のひずみ分布

④ここで、 $2\delta y$ の2サイクル目の1ループについて柱筋抜け出し回転による吸収エネルギー E_θ (基部 $M-\theta$ ヒステリシスから計算) と、試験体全体の吸収エネルギー E_δ (加力部 $P-\delta$ ヒステリシスから計算) とを計算した。更に、その比 r_E を求め変位に対する回転分の占める割合 r_δ と併記し、表-4に示した。

⑤エネルギーの相似比と照らし合わせると、大型試験体は小型試験体に比べて相対的にエネルギー吸収量が小さくこの傾向は $3\delta y$ 以降も同様であった。これは、前述のように、大型試験体では終局時の損傷が狭い範囲に集中していると考えられる。

⑥ r_E は r_δ の値よりも大きく、エネルギー吸収の面では、抜け出しの影響が大きい。また大型試験体においても、吸収エネルギーの48%が抜けだし回転によるもので、その影響がかなり大きいことが分かる。

4. 結 論

柱筋の多段配筋や段落とし、帯筋の形状などをできるだけ実橋脚を模擬した大型試験体の交番水平加力実験を行った。また、既往の実験で用いられた試験体の大きさと配筋詳細を模擬した小型試験体による実験も行い、部材の変形性能の観点から両者を比較検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

①大型試験体の荷重-変位関係は、小型試験体の場合とほぼ相似形となるが、じん性率は小型試験体の場合に比べて若干低下する。また、大型試験体では、ヒステリシスループによる吸収エネルギーが小型試験体に比べて相対的に小さくなる。これらの原因としては、部材断面内のひずみ勾配の影響、帯筋の長尺化に伴う拘束効果の低下、部材損傷範囲の減少等が考えられる。

②配筋を模擬した大型試験体の柱筋の抜け出し量は、小型試験体の場合よりも逆に大きな値を示す。これは鉄筋間隔が小さく多段配筋が抜け出し量に大きな影響を及ぼすためと考えられる。

③大型試験体の抜け出しに伴う基部回転分の全体変位に占める割合は約25%であった。

参考文献：

(1)太田、繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究、土木学会論文集、第292号/V-12、1979年12月

(2)石橋・吉野、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、1988年2月

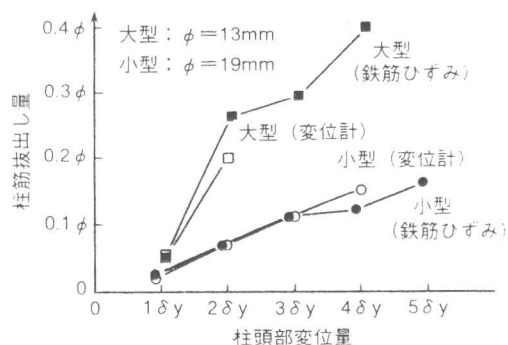


図-9 抜け出し量と柱頭部変位の関係

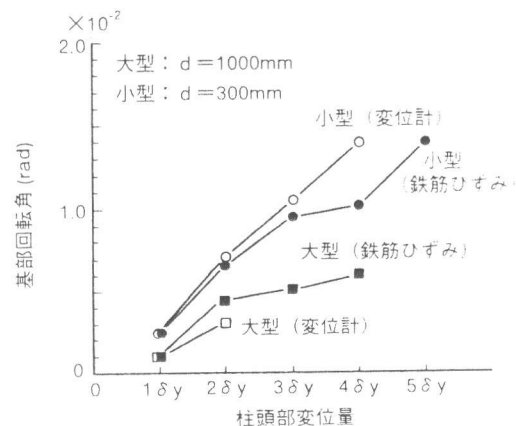


図-10 抜け出し回転量と柱頭部変位の関係

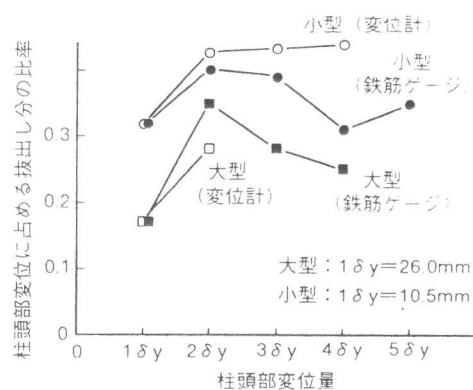


図-11 抜け出し回転分の終局変位への割合

表-4 $2\delta y$ の2サイクル目の
1ループ吸収エネルギー

	大型試験体	小型試験体	比率*
抜け出し回転による吸収エネルギー E_θ	1.6(tm)	0.096(tm)	16
試験体全体の吸収エネルギー E_δ	3.3(tm)	0.15(tm)	22
$r_E = E_\theta / E_\delta$	0.48	0.64	—
基礎回転分が全体変位に占める割合 r_δ	0.28	0.43	—
r_E / r_δ	1.7	1.5	—

*: エネルギーの相似則 $(10/3)^3 = 37$