

論文 実大 RC 橋脚における軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し特性とその評価

星隈 順一^{*1}・運上 茂樹^{*2}・長屋 和宏^{*3}

要旨：本研究では、著者らが別途実施した曲げ破壊型の実大鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験の結果を用いて、実橋脚における軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し現象について分析を行った。その結果、実大クラスの橋脚においても軸方向鉄筋の伸び出しによる橋脚基部の回転運動は生じること、また、その回転運動はエネルギー吸収の期待できる現象であることが確認された。さらに、軸方向鉄筋の伸び出し変形について、既往の評価式による推定値と比較した結果、軸方向鉄筋の降伏時では比較的一致したが、終局時においては推定精度が十分でないことがわかった。

キーワード：軸方向鉄筋の伸び出し、実大鉄筋コンクリート橋脚実験、塑性変形性能

1. はじめに

鉄筋コンクリート橋脚に対する既往のじん性評価式において、軸方向鉄筋の伸び出しの影響に関する取扱い方には幾つかの考え方がある。まず、太田¹⁾や石橋ら²⁾は、橋脚断面部の変形と軸方向鉄筋の伸び出しによる変形をそれぞれ評価して足し合わせる手法を提案しており、平成11年鉄道構造物等設計標準³⁾でも同様な考え方が適用されている。檜貝⁴⁾、町田ら⁵⁾、島らの研究⁶⁾を基本としたコンクリート標準示方書⁷⁾の評価式では、じん性率を軸方向鉄筋の伸び出しによる影響を含めた形で定式化している。また、Priestleyらは、軸方向鉄筋の伸び出しの影響を塑性ヒンジ長の評価式の中に組み入れることにより考慮している⁸⁾。一方、道路橋示方書⁹⁾では、載荷実験に用いられる寸法の小さい模型では軸方向鉄筋の伸び出しの影響は相対的に大きい、道路橋のような大断面な橋脚になると、その影響が小さくなる場合があるとの懸念から¹⁰⁾、終局変位の算定において、軸方向鉄筋の伸び出しの影響は考慮されていない。

このように、軸方向鉄筋の伸び出しについては、橋脚断面寸法の影響等未解明な点も残され

ている。小林らは、軸方向鉄筋の伸び出しを橋脚模型実験により詳細に検討しているが¹¹⁾、断面寸法に対する軸方向鉄筋径の比が3.2~4.8%であり、道路橋で実際に設計されている橋脚と比較すると、軸方向鉄筋径が相対的に数倍大きい模型による検討となっており、大断面な橋脚に対しては、その目的にあった新たな検討が必要と考えられる。

そこで本研究では、著者らが別途実施した曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚に対する破壊までを考慮した実験としては世界でも最大級の模型による正負交番載荷実験の結果^{12),13)}を用い、実橋脚基部における軸方向鉄筋の伸び出し現象について分析を行った。さらに、既往の伸び出し変形の評価式による推定値と実験値との比較を行い、その適用性について考察を行った。

2. 実大RC橋脚の正負交番載荷実験の概要

2.1 実験供試体

本研究で対象とした実験供試体の構造諸元は図-1に示す通りである^{12),13)}。供試体は、断面寸法が2.4m×2.4mの正方形断面で、橋脚基部から載荷点までの高さは9.6mであり、フー

*1 建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室主任研究員 工博（正会員）

*2 建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室室長 工博（正会員）

*3 建設省土木研究所耐震技術研究センター耐震研究室研究員

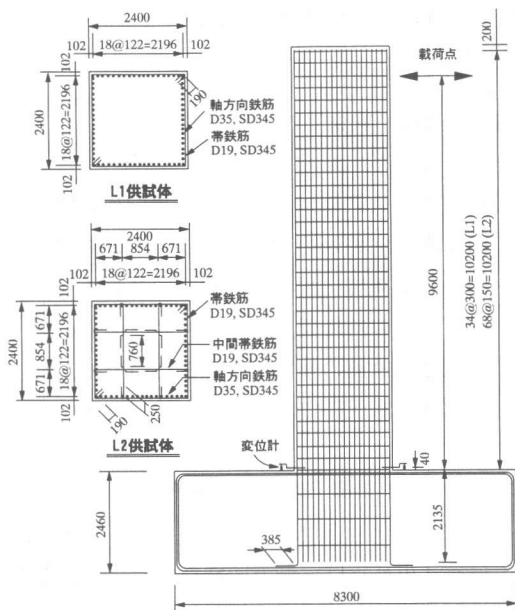


図-1 実験供試体の構造諸元

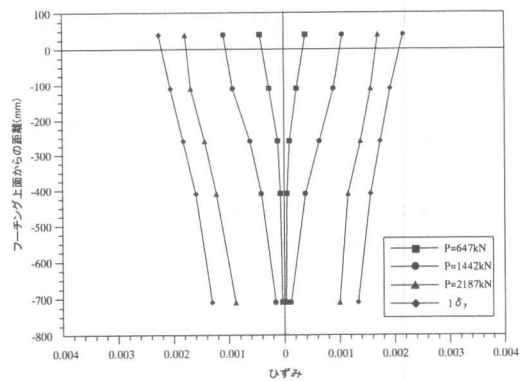
チングは $8.3 \times 4.8\text{m}$ 、高さが 2.46m である。

L1 供試体では、実橋における配筋を考慮し、D35 の鉄筋を 122mm 間隔で合計 72 本配置し、軸方向鉄筋比は 1.20% である。また、軸方向鉄筋はフーチング上面から 2135mm (軸方向鉄筋径の 61 倍) の深さまで真っ直ぐに伸ばし、その端部をフック長 385mm の 90° フックにより定着している。また帯鉄筋としては、D19 の鉄筋が 300mm 間隔で配置されている。一方、L2 供試体は、軸方向鉄筋に関する条件は全て L1 供試体と同一である。ただし、帯鉄筋間隔は 150mm で、各断面の帯鉄筋には D19 の中間帯鉄筋が井型に配筋されている。

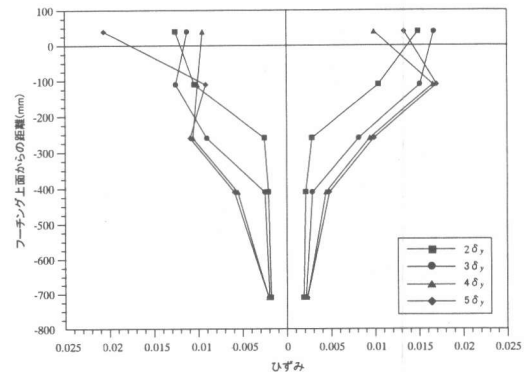
なお、軸方向鉄筋の降伏点は 424N/mm^2 、引張強度は 639N/mm^2 、フーチングコンクリートの強度は 33N/mm^2 である。

2.2 荷重方法と基部の回転角の計測

実験は、反力床に供試体を固定させ、基部から 9.6m の位置に大変位加力ジャッキ 2 機により水平力を与えた。荷重は、降伏耐力までは 4 段階に分けて荷重制御により水平力を漸増させ、その後変位制御により、降伏変位 (50mm) の整数倍毎に正負交番に繰り返し回数を 3 回として荷重した。なお、本実験においては、種々の事情



(a) 弾性変形時



(b) 塑性変形時

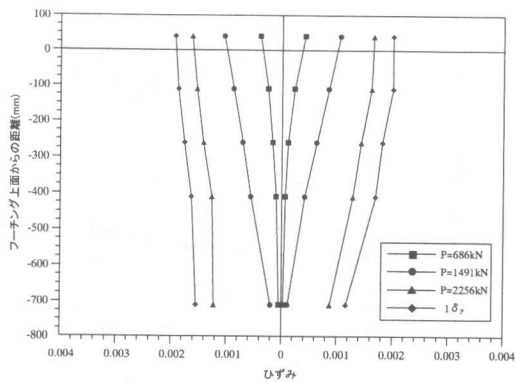
図-2 L1 供試体のひずみ分布

により軸力は与えていない。

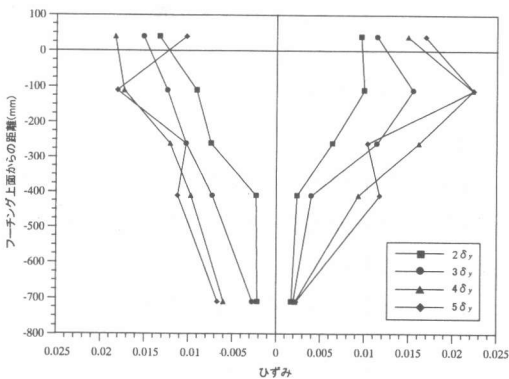
軸方向鉄筋の伸び出しによる基部の回転角は、図-1 に示すように、圧縮縁ならびに引張縁となる面において、フーチング上面と基部から高さ 40mm の区間の相対変位を変位計により計測し、平面ひずみ保持の仮定の基に評価した。

3. 軸方向鉄筋ひずみのフーチング内部への進展

図-2~3 は、各供試体のフーチング内部における軸方向鉄筋のひずみ分布を各荷重ステップ毎に示したものである。これより、降伏耐力のおよそ半分程度の荷重までは、軸方向鉄筋のひずみが基部から概ね直線的に減少し、フーチング上面から 710mm (軸方向鉄筋径のおよそ 20 倍) の断面においてほぼ収束している。しかし、降伏耐力のおよそ $3/4$ の水平力による荷重では、その断面におけるひずみが増大し始めていることがわかる。本実験では、フーチング上



(a) 弾性変形時

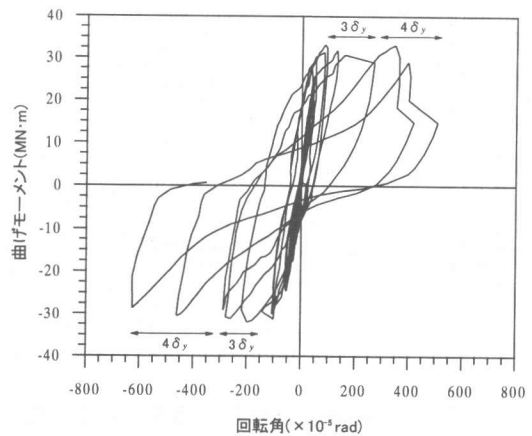


(b) 塑性変形時

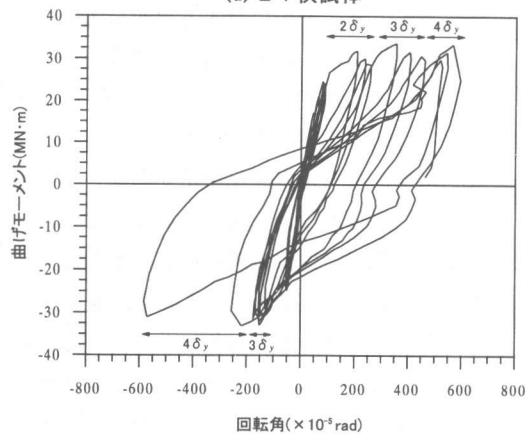
図-3 L2 供試体のひずみ分布

面から 710mm 下方の断面までしか軸方向鉄筋にひずみゲージを貼付していなかったため、これ以深のひずみ分布はわからないが、弾性ひずみレベルではあるが、軸方向鉄筋のひずみがさらに深い断面にまで進展したものと考えられる。

軸方向鉄筋が橋脚基部で降伏した後は、曲げ変形の増加とともに、塑性ひずみの生じる範囲が徐々に深くなっている。L1 供試体では、フーチング上面から 710mm 下方の断面では最終的に降伏ひずみ程度までの変形で抑えられているが、橋脚部の拘束効果を高めた L2 供試体ではその深さにまで塑性ひずみが進展していることがわかる。また、フーチング上面から 410mm 下方の断面で比較しても、ひずみが L1 供試体よりも大きくなっており、橋脚基部の拘束効果を高めると、軸方向鉄筋のひずみの塑性化がより深い範囲まで進展する傾向が見られる。



(a) L1 供試体



(b) L2 供試体

図-4 基部における M-θ 履歴曲線

4. 橋脚基部の曲げモーメントと回転角の関係

図-4 は、各供試体の橋脚基部における曲げモーメント-回転角関係の履歴曲線を示したものである。ここで、かぶりコンクリートがはらみだしたり剥落し始めたりすると、そのコンクリート片が回転角計測用の変位計に接触したため、それ以降の回転角の計測はできていない。これより、両供試体とも履歴曲線は安定した形状を示していることがわかる。これは、軸方向鉄筋の伸び出しによる基部の回転運動はエネルギー吸収のある運動であることを意味している。

そこで、曲げモーメント-曲率関係の履歴曲線より、各載荷ステップにおける基部の回転による履歴吸収エネルギーを算定し、橋脚全体系

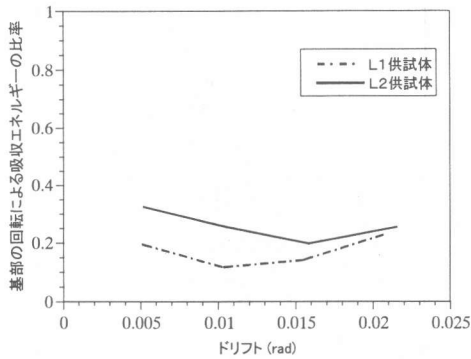


図-5 基部の回転によるエネルギー吸収比率とドリフトの関係

の履歴吸収エネルギーに対する比を算出した。ここで、橋脚全体系の履歴吸収エネルギーは、載荷点における水平カー水平変位の履歴曲線から求めた。そして、橋脚の水平変形（ドリフト）と吸収エネルギー比の関係を示すと図-5の通りである。これより、全履歴吸収エネルギーに占める基部の回転による履歴吸収エネルギーの比率は、ドリフトの増加とともに若干変動しているものの、概ね一定に推移していることがわかる。またその比率は、L1 供試体で15~20%、L2 供試体で25~30%であり、帯鉄筋比の大きく橋脚断面部の拘束効果が高い方が、相対的に基部の回転によるエネルギー吸収の割合が高くなっている。これは、帯鉄筋比を高めたL2 供試体の方が軸方向鉄筋の座屈長が短く、橋脚部の塑性ヒンジ長が小さくなったことにより^{12),13)}、軸方向鉄筋の伸び出しによる変形にそれだけ負担がかかったためと考えられる。

5. 橋脚基部の回転による水平変位と全水平変位の関係

単柱式橋脚の模型に対する正負交番載荷実験においては、載荷点で計測される水平変位には、前述した軸方向鉄筋の伸び出しによる基部の回転に伴う水平変位が含まれている。そこで、載荷点における軸方向鉄筋の伸び出しによる水平変位を、式(1)により算出した。

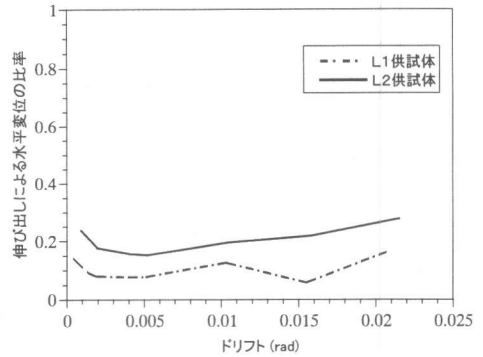


図-6 伸び出しによる水平変位の比率とドリフトの関係

$$\delta_{\theta} = \theta \times L \quad (1)$$

ここに、

δ_{θ} : 軸方向鉄筋の伸び出しによる水平変位

θ : 軸方向鉄筋の伸び出しによる橋脚基部の回転角

L : 基部から載荷点までの高さ

そして、式(1)により算出される軸方向鉄筋の伸び出しによる水平変位と載荷点における全水平変位の比を求め、それとドリフトの関係を両供試体間で比較した結果が図-6である。これより、伸び出しによる水平変位の比は載荷変位の増大とともにやや上昇する傾向があるが、L1 供試体で6%~15%、L2 供試体で15%~25%であり、その変動は顕著なものではない。また、載荷点における水平変位で比較しても、帯鉄筋比を高めた方が軸方向鉄筋の伸び出しの影響が相対的に大きくなっていることがわかる。これは図-5に示した吸収エネルギー比で比較した場合の結果と同様である。

以上の実験結果を踏まえると、道路橋のような大断面な鉄筋コンクリート橋脚においても、軸方向鉄筋の伸び出しはエネルギー吸収の期待できる運動であり、耐震設計における終局変位やじん性率の算定において、この影響を考慮できるものと考えられる。

6. 軸方向鉄筋の伸び出しに関する既往の評価手法に関する考察

前述したように、鉄筋コンクリート橋脚における軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しによる基部の回転に関しては、これまでに幾つかの評価式が提案されている。そこで、ここでは、本実験により計測された軸方向鉄筋の伸び出しによる基部の回転角と既往の評価式による計算値との比較を行った。既往の評価式としては、太田の手法¹⁾、石橋らの手法²⁾、コンクリート標準示方書⁷⁾の手法の3つを取り上げた。

各評価式に基づいて算定される橋脚基部の回転角を比較して示すと表-1の通りである。ここで、降伏時と終局時における値を比較しているが、既往の評価式の定義に基づき、降伏時とは軸方向鉄筋が基部で降伏する時、終局時とはかぶりコンクリートが剥落して水平力が大きく低下し始める時である。また、回転角の計測値には計測手法に起因するばらつきがあるため、正側載荷時ならびに負側載荷時の両方の回転角を示した。これより、評価手法によって基部の回転角の推定値が大きくばらついていることがわかる。降伏時に着目すると、コンクリート標準示方書の手法が比較的精度良く実験値を評価できていると言える。また、太田の手法による推定値は実験値を大きく上回っている。降伏時において実験値とこのような差が生じるのは、繰返し変形の影響を考慮するために、太田は、軸方向鉄筋の伸び出し変位をフーチング内のひずみ分布を三角形と仮定して算出される伸び出し変位の2倍として考慮しており、それが過大な評価となっているためではないかと考えられる。仮に、交番繰返し載荷の補正を行わなければ、その評価値は土木学会コンクリート標準示方書の手法による評価値や実験値とも近似している。このような考察も踏まえると、弾性挙動の範囲内である降伏時においては、伸び出し変位の評価においては、交番繰返し載荷の補正は行う必要はないのではないかと考えられる。一方、終局時における回転角に関しては、い

表-1 伸び出しによる基部回転角の推定値と実験値の比較

		(単位: rad)	L1 供試体	L2 供試体
降伏時	太田の手法		0.00111	0.00111
		交番繰返し補正なし	0.00056	0.00056
	石橋らの手法		0.00030	0.00031
	コンクリート標準示方書の手法		0.00048	0.00050
	基部回転角の実験値	正側載荷	0.00039	0.00080
負側載荷		0.00055	0.00052	
終局時	太田の手法		0.0105	0.0257
		交番繰返し補正なし	0.00525	0.0129
	石橋らの手法		0.000316	0.000313
	コンクリート標準示方書の手法		-	-
	基部回転角の実験値	正側載荷	0.00346	0.00543
負側載荷		0.00462	0.00571	

(注)コンクリート標準示方書においては終局時に対する伸び出し変位の評価法が明記されていない。

ずれの手法も推定精度が十分ではない。まず、太田の評価式では、先述した交番繰返し載荷の補正に関する問題の他に、フーチング内部での軸方向鉄筋ひずみ分布のモデル化について注意が必要である。すなわち、太田はひずみ分布を三角形モデルにより仮定しているが、終局時になると、図-2~3に示したように、ひずみ分布は非線形となる。したがって、ひずみ分布のモデル化が十分でないことも、伸び出し変位の推定精度を低下させている原因と考えられる。さらに、太田の評価式では、橋脚基部における軸方向鉄筋のひずみ ϵ_s に比例して伸び出し変位が算定されるが、一般に、 ϵ_s は平面保持を前提とした曲げモーメント-曲率解析に基づいて設定される。すなわち、L1及びL2供試体では、終局時における軸方向鉄筋ひずみの計算値はそれぞれ0.0249及び0.0619である。しかしながら、図-2~3に示される実験結果からわかるように、かぶりコンクリートが剥落して圧縮側の軸方向鉄筋が座屈するような段階において、実際に基部の引張側軸方向鉄筋に生じていたひずみは、L1供試体で0.01~0.015程度、L2供試体で0.015~0.02程度であり、実験値の方が計算値よりも小さくなっている。終局時において、軸方向鉄筋のひずみレベルが解析値と一致しない理由は明確ではないが、終局に近

い状態となると軸方向鉄筋の座屈も生じており、もはや断面の平面保持が成り立っていないこともひとつの可能性として考えられる。したがって、太田の手法により終局時の軸方向鉄筋の伸び出し変位を推定する場合には、 ϵ_s をどのように設定するかについても注意が必要である。

また、石橋らの手法による推定値は、 ϵ_s を0.02と仮定して終局時の伸び出し変位を評価したものであり²⁾、これは本実験において計測された終局時の ϵ_s とも比較的近似している。しかしながら、基部の回転角の推定値は実験値よりもやや小さめの評価となっている。

7. 結論

実橋規模の断面寸法の鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験結果を基に、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出し挙動について詳細な分析を行った。本研究により得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 実橋脚と同様な配筋をした大型供試体においても、軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しが有意に生じ、これにより橋脚基部に回転運動が生じることが確認された。また、この回転運動の履歴曲線はエネルギー吸収のある安定したループ形状であり、この運動により吸収するエネルギーは、橋脚の全吸収エネルギーの15~30%であった。
- 2) 載荷点における基部の回転による水平変位は、全水平変位の6~25%で、橋脚断面部の拘束効果が高いほどその比率が大きくなった。
- 3) 軸方向鉄筋のフーチングからの伸び出しによる橋脚基部の回転角を既往の評価式により推定し実験値と比較した結果、降伏時についてはコンクリート標準示方書の手法により比較的よく推定できることがわかった。ただし、終局時については、既往の評価式の推定精度が十分ではなかった。これは、終局時における橋脚基部における軸方向鉄筋のひずみとフーチング内での分布の仮定に起因するものと考えられる。

謝辞：本研究は、建設省土木研究所、日本道路公団、首都高速道路公団、阪神高速道路公団との共同研究「鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に及ぼす寸法効果の影響に関する研究」として実施した内容であり、関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 太田実：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，No.292，pp.65-74，1979.12
- 2) 石橋忠良，吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能に関する研究，土木学会論文集，No.390/V-8，pp.57-66，1988.2
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説，耐震設計編，1999.10
- 4) 檜貝勇：大変位の繰返しによりせん断破壊するRC部材の変形能力，第8回コンクリート工学年次論文報告集，pp.769-772，1986
- 5) 町田篤彦，陸好宏史，豊田和彦：鉄筋コンクリート部材の塑性変形能定量化に関する研究，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.203-212，1987.2
- 6) 島弘，周礼良，岡村甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.165-174，1987.2
- 7) 阪神淡路大震災被害分析と靱性評価式，阪神大震災調査研究特別委員会WG報告，土木学会コンクリート技術シリーズ12，1996.8
- 8) M. J. N. Priestley, R. Park : Strength and Ductility of Reinforced Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading, ACI Structural Journal, Vol. 84, No.1, Jan.-Feb. 1987, pp.61-76
- 9) (社)日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編（平成8年版），1996.12
- 10) 首都高速道路公団：耐震設計に関する調査研究報告書，1986.3
- 11) 小林薫，海原卓也，石橋忠良：大変形領域の交番荷重を受けるRC橋脚のフーチングからの鉄筋拔出し特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.3，pp.1249-1254，1999
- 12) 建設省土木研究所他：鉄筋コンクリート橋脚の耐震性に及ぼす寸法効果の影響に関する共同研究報告書，共同研究報告書第234号，1999.10
- 13) 星隈順一，運上茂樹，長屋和宏：実大鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム，pp.189-194，1999.12