ポストピーク挙動を考慮した鉄筋コンクリート橋脚の地震応答特性

星隈順一[1]・運上茂樹[2]

[1]正会員　工博　独立行政法人土木研究所　耐震研究グループ（〒305-0801 茨城県つくば市南原1番地6）
[2]正会員　工博　独立行政法人土木研究所　耐震研究グループ（〒305-0801 茨城県つくば市南原1番地6）

鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験によると、軸方向鉄筋が大きく座屈し、内部コンクリートにまで損傷が進展してくると、水平力の低下が生じ始めるだけでなく、履歴特性にピンチングの影響が現れることが知られている。このようなポストピークの領域まで踏み込んで構造物の耐震設計を行う場合には、鉄筋コンクリート部材の非線形履歴モデルとして従来から用いられている武田モデル等の経験則では不十分であり、ポストピーク域での履歴特性を解析モデルに適切に反映させる必要がある。そこで、本論文では、ポストピーク域における非線形履歴モデルとして、著者らが行った実大橋脚実験により得られた結果を反映させたモデルを適用し、ポストピーク域における履歴モデルの違いが橋脚の非線形応答特性に及ぼす影響について検討した結果をまとめた。

Key Words : *reinforced concrete columns, seismic response, pinching behavior, inelastic analyses*

1．はじめに

一般的な曲げ破壊型の鉄筋コンクリート柱部材に対する正負交番載荷実験等の結果によると、柱部材に与えた水平変位の増大とともに、水平ひび割れ、軸方向鉄筋の座屈によるかぶりコンクリートのはらみだし・剥落、帯鉄筋のはらみだし、内部コンクリートの圧壊の順に損傷が進展してゆき、最終的には、軸方向鉄筋が破断するケースもある。実験により得られる履歴曲線を見ると、一般に、軸方向鉄筋の座屈によるかぶりコンクリートの剥落が生じるまでは、ループの形状が紡錘形となり、安定したエネルギー吸収がなされる。しかしながら、帯鉄筋がはらみだし、内部コンクリートにまで損傷が進展してくると、水平力の低下が生じ始めるとともに、履歴曲線のループ形状にピンチングの影響が見られるようになることが知られている[1]。したがって、このような損傷領域にまで踏み込んで鉄筋コンクリート部材の耐震設計を行う場合には、ポストピーク域におけるピンチングの影響を考慮して部材に生じる非線形応答値を評価する必要がある。

鉄筋コンクリート部材に対する地震応答解析モデルとしては、大別して、コンクリートと鉄筋の応力度－ひずみ関係の履歴則に基づいたファイバーモデルと武田モデル[2]等のような経験則に基づいた部材断面モデルの２種類がある。ファイバーモデルは、様々な構造条件に対して適用でき汎用性が高いが、ピンチングの影響が生じるような大きな塑性変形域までを考慮するためには、軸方向鉄筋の座屈後の応力度－ひずみ関係の履歴モデル[3]や圧壊までを考慮したコンクリートの応力度－ひずみ関係の履歴モデル[4]を適切に設定する必要があるが、このような大きな塑性変形域における地震応答値の推定精度については、まだ十分に検討されていない。一方、経験則に基づく部材断面モデルでは、ピンチングのモデル化に関する定性的な手法は提案されているものの[5]、その具体的な評価手法に関して報告されている研究は少ない。

そこで、本研究では、著者らが別途行った実大橋脚に対する正負交番載荷実験[1]の結果を基に、鉄筋コンクリート部材の履歴モデルとして多用されている武田モデルにピンチング挙動を付加させたモデルを作成した。そして、実験に用いた橋脚構造を対象として、非線形動的解析を行い、ポストピーク域におけるピンチング挙動が橋脚の非線形応答に及ぼす影響について検討を行った。

2．実大鉄筋コンクリート橋脚に対する実験結果に基づく非線形履歴モデルの作成

ピンチングの影響を考慮した非線形履歴モデルを作成するために、本研究では、著者らが実施した断面が2400mmの正方形、橋脚高さが9600mmの曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚に対する正負交番載荷実験[1]を参照

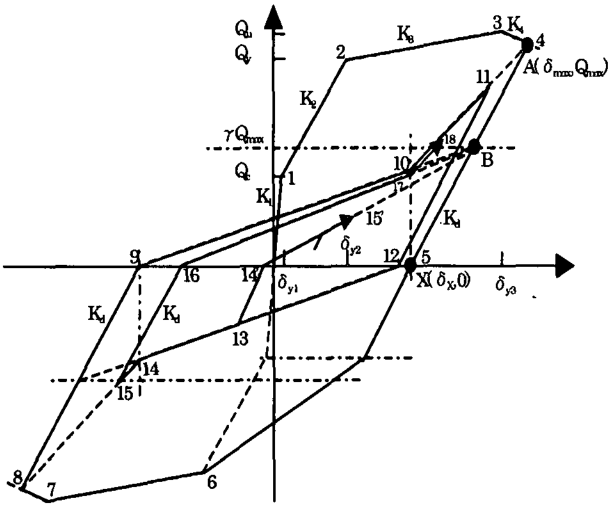


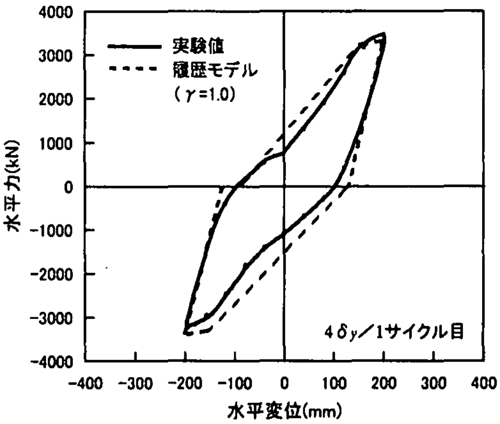
図-1　ピンチング挙動を考慮した非線形履歴モデル

することとした。

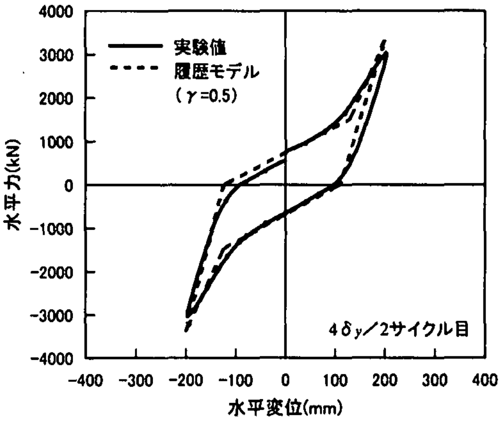
実験結果によると、軸方向鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートが剥落するような損傷に至ると、水平力－水平変位関係の履歴曲線にピンチングの影響が生じ始めることがわかっている。これは、圧縮変形により外側にはらみだした軸方向鉄筋は、逆方向の変形により引張側に転じても、直ちには引張抵抗力を発揮できないためと考えられる。そこで、当該供試体の実験結果を基に、軸方向鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートが剥落し始める時の水平変位δ_uを道路橋示方書[5]に基づいて算出し、橋脚に生じる水平変位がδ_u以上となればピンチングの影響を考慮することとした。すなわち、載荷点における水平変位がδ_u未満であれば、従来の武田モデル[2]に従うものとした。この時、除荷勾配係数βは0.4とした。

橋脚に生じる水平変位がδ_u以上となった場合には、Kunnathらのピンチングモデル[3]を適用することとした。すなわち、図-1に示すように、過去の履歴における最大変形点を指向するのではなく、図中の点B（最大変形点からの除荷曲線上で、復元力が最大変形点における復元力Q_{max}のγ倍となる点）を指向して進み、変形がδ_xを超えた後は、最大変形点を指向する履歴モデルである。ここでは、γの値を1.0よりも小さくすることにより、ピンチングの影響を考慮することができる。そこで、実験結果を基に、γの値について検討を行った。

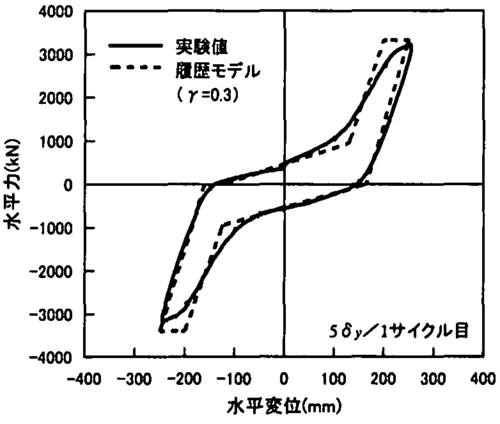
図-2は、実験により得られた軸方向鉄筋の座屈後（4δ_yの載荷以降）における水平力－水平変位の履歴曲線と、図-1に示す手法により設定される履歴モデルを比較したものである。ここで、γの値としては幾つかのケースを設定して検討したが、図中には実験値と比較的一致するγの値により履歴モデルを作成した結果のみを示している。これより、軸方向鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートの剥落が生じ始めた4δ_yの２サイクル目では、γの値を0.5とした方が実験値とよく一致するが、変形が大きくなり損傷が進展してくると、γの値を0.3として



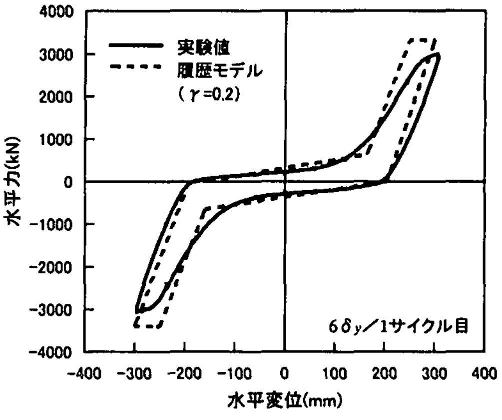
(a)4δ_yの１サイクル目の載荷



(b)4δ_yの２サイクル目の載荷



(c)5δ_yの１サイクル目の載荷



(d)6δ_yの１サイクル目の載荷

図-2　実験値と履歴モデルの比較

設定した方が実験値に近い履歴モデルとなっていることがわかる。これは、損傷の進展に伴い、ピンチングの影響が顕著となり、γの値が小さくなることを示している。

3．非線形動的解析

前述した非線形履歴モデルを用いて、軸方向鉄筋の座屈後のピンチング挙動が鉄筋コンクリート橋脚の非線形応答特性に及ぼす影響について検討した。本解析では、前述の実験に用いた実大鉄筋コンクリート橋脚の構造条件をそのまま解析条件として用いた。ただし、実験では死荷重反力に相当する鉛直力が負荷されていないが、実際の橋梁構造を想定し、ここでは橋脚基部における軸圧縮応力が1.5N/mm^{2}となるように、基部から9600mmの高さの位置に7000kNの重量を持つ質点を設定した。その結果、本橋脚の1次の固有周期は0.33秒となった。

本解析では、鉄筋コンクリート橋脚躯体部を曲げモーメントー曲率関係に基づく梁モデルによりモデル化し、基部は固定とした。ここで、前述したピンチングの影響を考慮した履歴モデルは、水平力ー水平変位の履歴曲線に基づいて設定したが、曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚においては、水平力ー水平変位の関係は、塑性ヒンジとなる断面における曲げモーメントー曲率の関係に支配されることから、曲げモーメントー曲率関係の履歴曲線に対しても、水平力ー水平変位の履歴曲線と同様な履歴則が適用できるものと考えた。なお、曲げモーメントー曲率の関係の骨格曲線は、ひびわれ点、降伏点、終局点の3点を勾配変化点とするテトラリニア型とし、これらの各点は道路橋示方書[6]に基づいて算出した。ただし、終局点以降の第4勾配は、一般に負の値となるが、今回の解析では、解の収束性に関する制約から第1勾配の0.001倍とし、概ねx軸と平行となるようにした。

入力地震動は、1978年宮城県沖地震における開北橋近傍地盤、ならびに1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台近傍地盤での加速度波形を基本とし、地震動により解析対象とした鉄筋コンクリート橋脚に終局変位を超えるような非線形応答が生じるように、時間軸はそのままで、加速度のみを増幅させた。最終的に本解析で用いた入力地震動の加速度の倍率は、開北橋波形は10倍、神戸海洋気象台波形は2倍とした。

4．ピンチング挙動が鉄筋コンクリート橋脚の非線形応答特性に及ぼす影響

ピンチング挙動が鉄筋コンクリート橋脚の非線形応答特性に及ぼす影響を検討するために、前述した実験結果との比較を基に、ピンチングの影響度を示すγの値を1.0, 0.7, 0.5, 0.3とした4ケースの履歴モデルを作成して動的解析を行った。図-3ならびに図-4は、開北橋波形ならびに神戸海洋気象台波形に対する解析結果の例として、γの値が1.0と0.3の場合に対して求められた橋脚基部の断面における曲げモーメントー曲率の関係の履歴曲線と応答曲率の時刻歴波形を比較して示したものである。

これより、開北橋波形による解析結果に着目すると、ピンチングの影響を考慮しない場合（γ=1.0）には、8.5秒付近で正側に0.016m^{-1}程度、また、9.3秒付近で負側に0.02m^{-1}程度の曲率が生じ、その後は、これらの曲率を超えるような応答は生じていない。一方、γの値を0.3としてピンチングの影響を見込むと、正側の応答では、8.5秒付近で0.016m^{-1}程度の曲率が生じた後、この値を上回る曲率が4度生じており、時刻の経過とともに、応答曲率が徐々に大きくなる傾向が確認される。正側に対しては、最大応答曲率は0.02m^{-1}程度であり、これはピンチングの影響を考慮しない場合の約1.25倍となっている。また、残留曲率の値も大きくなっていることがわかる。

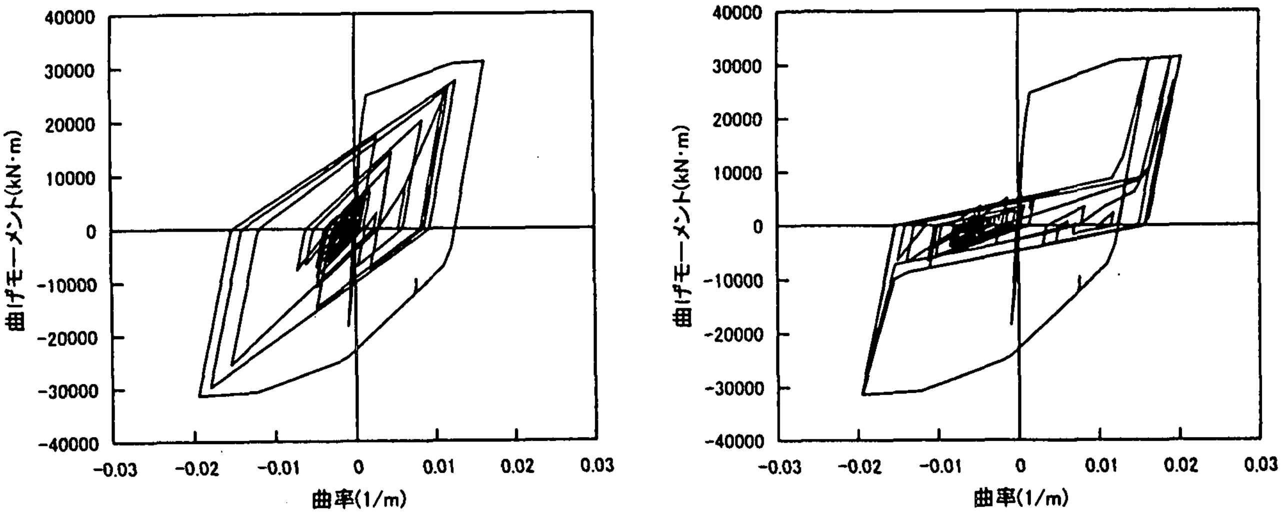
同様に、神戸海洋気象台波形による解析結果においても、γの値を小さく設定するにつれて、最大応答曲率や残留曲率が大きくなる傾向が確認される。今回の解析結果のように、γの値を小さくすると、応答曲率が大きくなるのは、ピンチングの影響によりエネルギー吸収性能が低下し、履歴減衰が小さくなるためである。ただし、今回の解析結果からは確認できていないが、鉄筋コンクリート橋脚の応答がピンチング挙動の領域に入ると、周期が急激に長くなるため、もともとの系の固有周期と入力地震動の周期特性によっては、逆に慣性力が低減されるケースがあることも考えられる。

このように、ピンチング挙動は、鉄筋コンクリート橋脚の非線形応答特性に大きな影響を及ぼす。したがって、軸方向鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートが剥落するような変形よりも大きな変形を耐震設計で見込む場合には、ピンチングの影響に注意して非線形応答を評価する必要があると考えられる。

5．まとめ

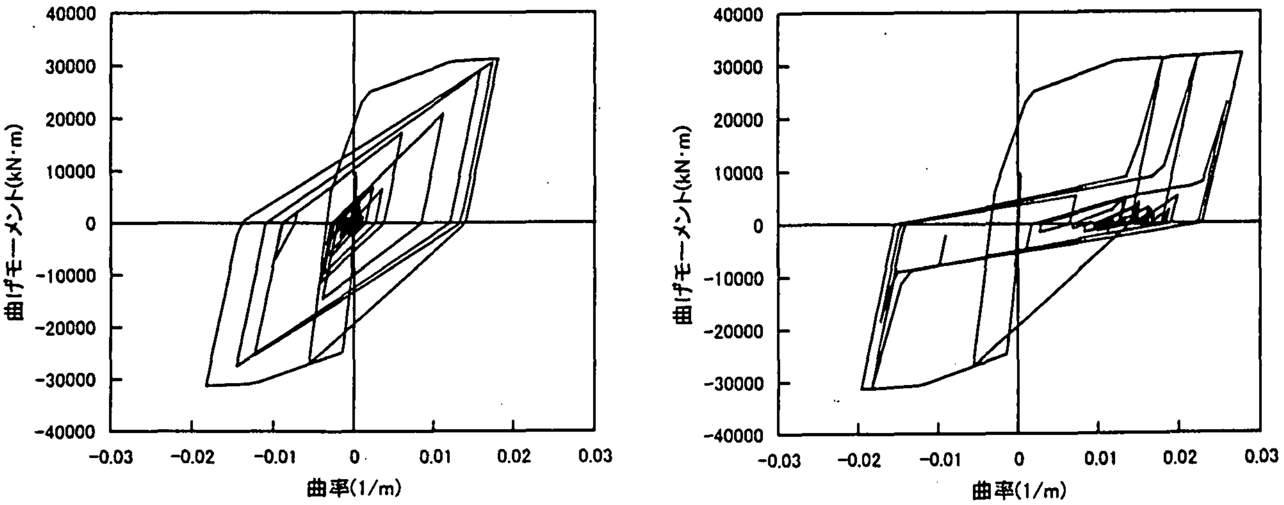
本研究では、鉄筋コンクリート橋脚の軸方向鉄筋に大きな座屈が生じるような損傷段階において生じるピンチング挙動に着目し、それが非線形応答特性に及ぼす影響度合いを、著者らが実施した実大鉄筋コンクリート橋脚に対する実験結果を基に考察した。本研究により得られた知見をまとめると以下の通りである。

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と比較すると、Kunnathらのピンチングモデルにおけるパラメータγの値は、軸方向鉄筋の座屈によるかぶりコンクリートの剥落が生じ始めるような損傷の段階において0.5程度であり、その後損傷の進



(a) γ=1.0 とした場合　　(b) γ=0.3 とした場合

図-3　開北橋波形を入力した場合の橋脚基部の非線形挙動



(a) γ=1.0 とした場合　　(b) γ=0.3 とした場合

図-4　神戸海洋気象台波形を入力した場合の橋脚基部の非線形挙動

展に伴い徐々に低下してくる。

2) 本解析で用いた入力地震動は限定された数ではあるが、ピンチングモデルのパラメータγの値が小さいほど、エネルギー吸収性能が低下するため、非線形応答が大きくなり、また残留変形も大きくなる傾向がある。

3) 軸方向鉄筋が座屈し、かぶりコンクリートが剥落するような変形よりも大きな変形を耐震設計で考慮する場合には、ピンチングの影響に注意して非線形応答を評価する必要がある。

参考文献

1) 星隈順一、運上茂樹、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究、土木学会論文集、No.669/V-50、pp.215-232、2001年2月

2) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, *Journal of Structural Division*, ASCE, 96(12), 2557-2573, 1970

3) 田上和也、中村光、斉藤成彦、檜貝勇：繰り返し荷重を受ける鉄筋の座屈モデルに関する研究、構造工学論文集、Vol.47A、pp.725-734、2001年3月

4) 堺淳一、川島一彦、庄司学：横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度～ひずみ関係の定式化、土木学会論文集、No.654/I-52、pp.297-316、2000年7月

5) Kunnath, K. S., Reinhorn, M. A., Park, J. Y.: Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of R/C Structures, *Journal of Structural Division*, ASCE, 116(4), 996-1017, 1990

6) (社)日本道路協会：道路橋示方書Ⅴ耐震設計編、1996年12月