

地震荷重を受ける鉄筋コンクリート橋脚の 塑性ヒンジ領域について

浅津直樹¹・運上茂樹²・近藤益央³・林 昌弘³

¹正会員 工修 建設省土木研究所 耐震研究室交流研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所 耐震研究室室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

³正会員 建設省土木研究所 耐震研究室研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

大規模地震荷重を受ける鉄筋コンクリート橋脚では、橋脚基部に形成される塑性ヒンジの回転変形によって変形性能が確保される。したがって、橋脚の終局水平変位を正確に評価するためには、塑性ヒンジ長の設定が重要な要素となる。塑性ヒンジ長は、断面高さ及びせん断支間比の他、軸方向鉄筋径や帯鉄筋等によって変化することが指摘されており、詳細については十分解明されていないのが現状である。本報告では、軸方向鉄筋の座屈長が塑性ヒンジ長を決定づけるという仮定のもとで、有限変形理論によるFEM解析によって軸方向鉄筋の座屈長を検討した。この結果、塑性ヒンジ長は軸方向鉄筋径や帯鉄筋径の影響を受けると同時に、橋脚高さが低い場合には軸方向鉄筋の降伏領域に依存することが明らかになった。

Key Words : Reinforced concrete pier, Plastic hinge length, Axial reinforcing bar, Buckling, Seismic design

1. まえがき

大規模地震荷重を受ける鉄筋コンクリート（以下、RC）橋脚では、橋脚基部に形成される塑性ヒンジの回転変形によって変形性能が確保される。橋脚の変形性能は塑性ヒンジ長が長いほど向上するため、終局水平変位を精度よく推定するためには、塑性ヒンジ長を合理的に設定する必要がある。現在、道路橋示方書V耐震設計編（以下、道示）に規定される塑性ヒンジ長は、断面高さ及びせん断支間比のみの関数として与えられているが、実際には軸方向鉄筋径や帯鉄筋量等によって変化する可能性が指摘されており^{1) 2)}、この理由の一つとして軸方向鉄筋の座屈長との関連性が考えられる³⁾。本報告では、軸方向鉄筋の座屈長が塑性ヒンジ長を決定づけるという仮定のもとで、軸方向鉄筋の座屈がその降伏領域という限定された領域で発生するというメカニズムを想定し、これをモデル化したFEMによる座屈解析を実施して、塑性ヒンジ長に関する検討を行ったものである。

2. 軸方向鉄筋の座屈メカニズムの仮定

RC橋脚基部に発生する軸方向鉄筋の座屈は、鉄筋が繰返し荷重を受けることによって塑性化した後、軸方向圧縮力を受けることによって発生するものであり、単調軸圧縮による座屈とは区別して考える必要がある。図-1は正負交番荷重実験における軸方向鉄筋の降伏領域とそ

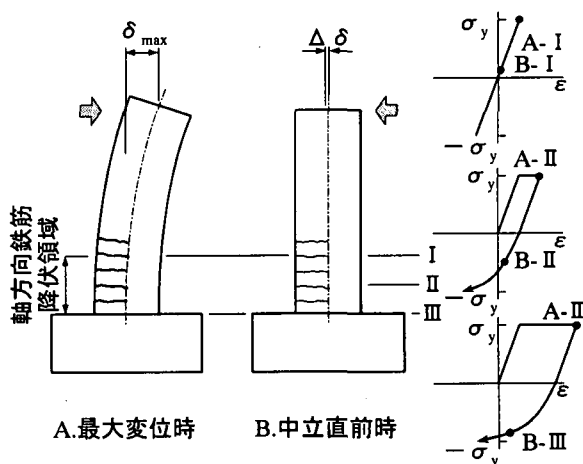


図-1 軸方向鉄筋の降伏領域と応力・ひずみ状態

の部分の応力ひずみ関係を模式的に示したものである。橋脚上部に水平変位を与えていくと、最外縁の軸方向鉄筋が柱下端で降伏する初降伏時を越えても、側方に配置された軸方向鉄筋や鉄筋のひずみ硬化の影響を受けてさらにモーメントが増加するため、最外縁の軸方向鉄筋が降伏する範囲は図に示すように柱基部である高さをもって存在することになる。初降伏モーメントを M_{y0} 、最大モーメントを M_{max} とすれば、降伏領域 L_{ps} は式(1)で表される。

$$L_{ps} = (1 - M_{y0}/M_{max}) H \quad (1)$$

水平変位がある荷重段階の最大点Aに達した後、逆方向に荷重して中立の状態に戻していくと、軸方向鉄筋のひずみはゼロに近づくが、降伏領域内では圧縮応力が

生じることになり、その分布は柱下端で最大となる。中立に戻る直前Bの段階では、コンクリートの曲げひびわれが閉じていないために、軸方向鉄筋に対するかぶりコンクリートの拘束力があまり期待できず、軸方向鉄筋は座屈に対して最も不安定な状態にあると考えられる。この段階で鉄筋の軸圧縮応力が増加していくと、座屈する可能性が高いと考えられる。一方、載荷が完全に逆方向に転じると、コンクリートの曲げひびわれが閉じて圧縮応力が生じ、かぶりコンクリートの耐力が増加して軸方向鉄筋に対する拘束力が回復するために、中立直前よりも安定した状態になると考えられる。載荷が圧縮側に転じる前に軸方向鉄筋の座屈が生じる現象は、既往の研究でも報告されている⁴⁾。以上のような座屈メカニズムを想定すると、軸方向鉄筋の座屈長を算定するためには鉄筋の降伏領域という限定された範囲をモデル化し、解析を実施するのが合理的と考えられる。

3. FEMによる軸方向鉄筋の座屈解析

(1) モデル化と解析方法

本研究では、有限変形理論に基づく非線形FEM解析によって軸方向鉄筋の座屈長の算出を試みた。モデル化の範囲はRC橋脚のうち軸方向鉄筋が降伏する基部のみを対象とし、軸方向鉄筋が帯鉄筋に拘束された状態を、図-2に示すようにバネ要素に支持された梁要素としてモデル化した。バネ要素のバネ定数は引張側では帯鉄筋の拘束力とし、圧縮側についてはコアコンクリート壁面のモデル化として、十分剛なバネ（帯鉄筋のバネに対して100倍）を与えるものとした。このような剛の圧縮バネを設けることによって軸方向鉄筋が波打つようなモードの出現を回避することができる。なお、ここではかぶりコンクリートの拘束力については無視した。次に、軸方向鉄筋の圧縮側の応力-ひずみ関係は図-3に示す加藤モデル⁵⁾におけるパウシンガー部の曲線を用いた。この曲線は、引張側で経験した塑性ひずみの関数として与えられる。軸方向鉄筋の降伏領域の上端では塑性ひずみはゼロ、下端では最大となることから、応力-ひずみ関係は図-3に示すように梁要素の中で段階的に変化させて与えるものとした。

また、降伏領域における軸方向鉄筋の軸力の分布としては、2.で述べたように降伏領域上端でゼロ、下端で最大となるような分布が想定されるため、ここでは最も単純な三角形分布を仮定し、このような分布を再現するために、梁要素に等分布の軸方向荷重を設定した。解析はこの荷重分布を保ったまま荷重漸増させることが可能で、かつ、座屈後の変形も追跡することができる弧長増分法を用いた。

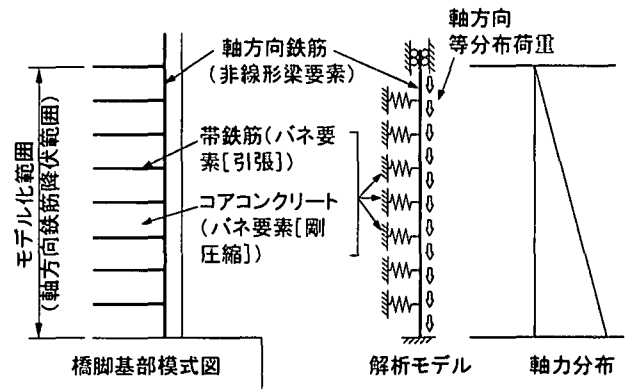


図-2 FEMによる座屈解析モデル

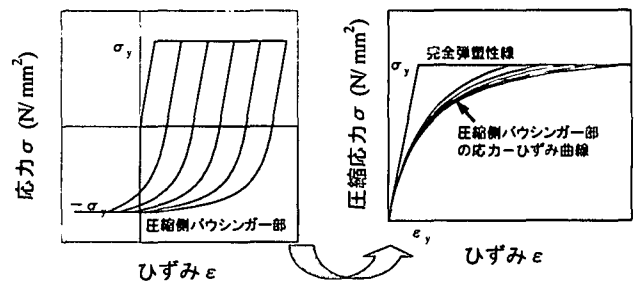


図-3 加藤モデルによる鉄筋の応力-ひずみ関係

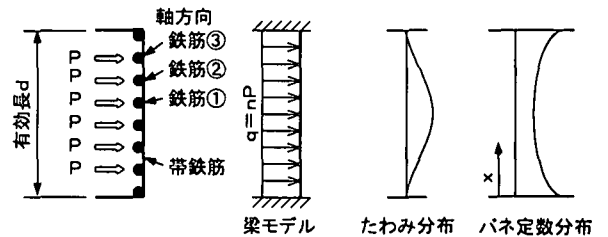


図-4 帯鉄筋1段あたりのバネ定数

表-1 解析対象とした実験供試体

単位:mm							
供試体寸法	軸方向鉄筋(1段配筋)	帯鉄筋(中間帯鉄筋なし)					
断面寸法	柱高	径	間隔	鉄筋比	径	間隔	帯鉄筋比
600×600	3010	D13	74.3	0.99%	D6	75	0.325%

(2) 実験供試体をモデルとした解析

柱基部で測定された曲率より等価塑性ヒンジ長が算出されている既往の実験供試体をモデルとして、本手法による座屈解析を実施した。実験供試体の緒元を表-1に示す。

まず、モデル化範囲の軸方向鉄筋の降伏領域は式(1)を用いて算出し、750mmとした。次に、バネ要素のバネ定数については、図-4に示すように帯鉄筋を両端固定梁でモデル化した場合のたわみ曲線より算出し、図中に示す鉄筋①、②、③でそれぞれ、7.8N/mm、11.2N/mm、31.2N/mmとした。また、加藤モデルにおける応力-ひずみ曲線を決定する際のひずみは、柱下端で $10 \epsilon_y$ (塑

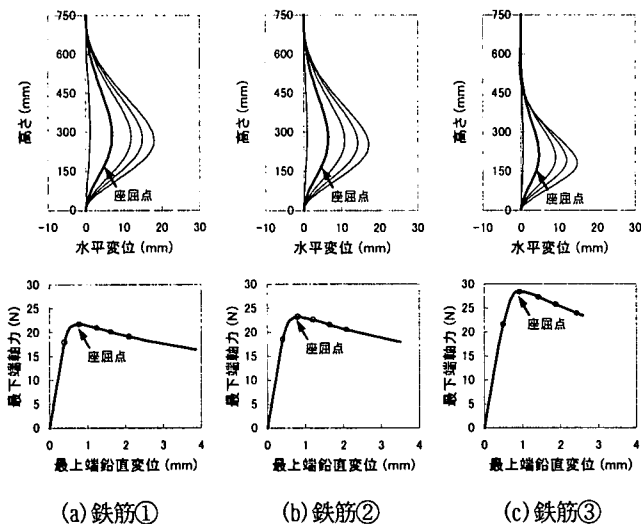


図-5 D13の座屈モードと荷重-変位関係 (実験供試体)

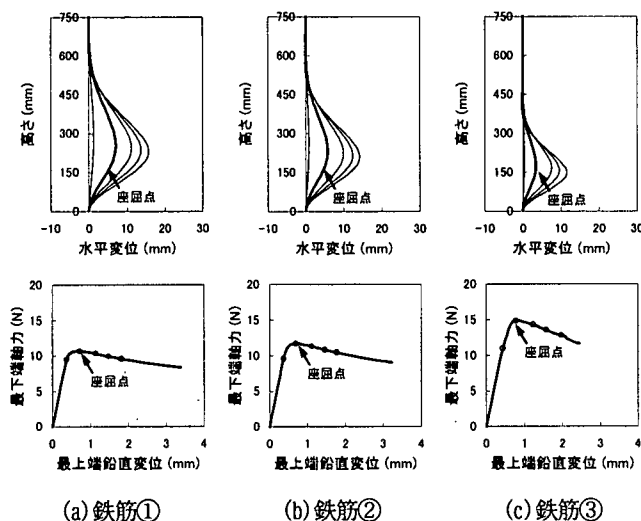


図-6 D10の座屈モードと荷重-変位関係

性ひずみ $9\epsilon_y$) を仮定した。なお、有限変形解析において座屈を誘起させるために、本解析では初期不整として微小な曲率 (1.0×10^{-6}) をあらかじめ与えた。

図-5 に解析により得られた鉄筋①～③の座屈前後の変形モード及び最下端荷重(軸力)と最上端鉛直変位の関係を示す。座屈点としては荷重-変位曲線において最大荷重が生じる点であり、このときの変形モードを図中の太線で示している。また、各変形モードは、座屈時の鉛直変位を 1δ として、約 0.5δ ピッチの鉛直変位に対応する変形を描いたものである。

各変形モードをみると、座屈は軸力が大きい柱基部を基点として生じており、本解析によって実際の橋脚と同様な座屈モードを発生できることがわかる。変形は荷重最大点前後で急激に進み、座屈後も座屈時のモードをほぼ保ちながら変形が進んでいくことがわかる。したがって、座屈長としては最大荷重時の変形モードにおいて、最下端から曲線がゼロクロスするまでの長さで定義す

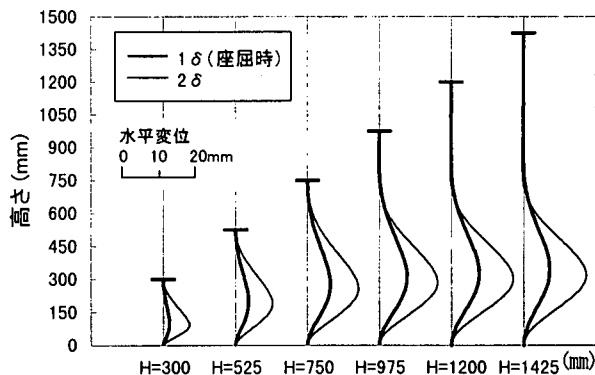


図-7 軸方向鉄筋の降伏領域と座屈モード

ばよいと考えられる。これによれば、座屈長は鉄筋①、②、③でそれぞれ、750mm、735mm、564mm となる。

鉄筋①～③の座屈長を比較すると、支点バネ定数が小さい場合は座屈長が小さくなっており、帯鉄筋による拘束が弱いと軸方向鉄筋の座屈長が長くなるといえる。ただし、鉄筋①の場合には座屈長がモデル化範囲全長に及んで頭打ちとなり、鉄筋②との差が小さくなっている。ここで、実験による等価塑性ヒンジ長は 557mm、損傷図にみられる実際の座屈長も 500mm 前後となっており、これらと比較して解析による座屈長は全体的に長くなっている。この理由としては、解析においてかぶりコンクリートの拘束力を見込んでいないことが挙げられる。

図-6 は軸方向鉄筋径に 1 サイズ小さい D10 を用い、他の条件は全て同一として、同様の解析を行った結果を示している。図-5 と比較すると全体的に座屈長が短くなっており、鉄筋①、②、③でそれぞれ 673mm、583mm、431mm である。すなわち、太径の鉄筋を使うほど座屈長は長くなるといえる。また、支点バネ定数と座屈長の関係は図-5 と同様である。

図-5、図-6 の結果は、弾性座屈解析による理論解や塑性ヒンジ長の一般的な傾向と一致している。

4. 橋脚高が軸方向鉄筋座屈長に与える影響

図-7 に表-1 の実験供試体の鉄筋②を対象として、降伏領域を変化させた場合の座屈モードの変化を示す。太線が座屈時の 1δ 時、細線が 2δ 時を示している。図をみると $H=750\text{mm}$ 以下のケースでは、座屈は解析全長で生じており、座屈長は降伏領域と一致している。 $H=750\text{mm}$ を越えるケースでは座屈長の大きな変化はなく、降伏領域とは無関係にほぼ一定の長さとなっている。ただし、最大水平変位が生じる位置に着目すると、降伏領域が長いケースほど高い位置で生じる傾向にあり、座屈モードに微妙な違いが生じていることがわかる。この理由は軸力分布及び応力-ひずみ関係を高さ方向に変化させている影響と考えられ、高さが座屈範囲に対して十分

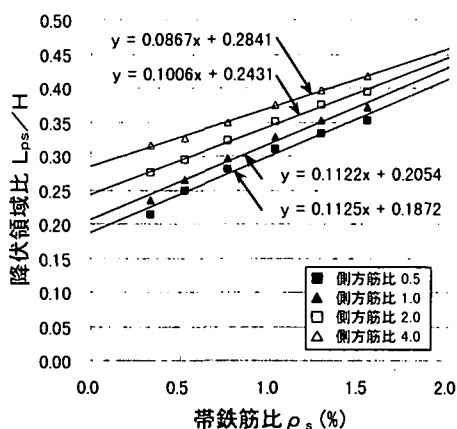


図-8 帯鉄筋比及び側方筋比が降伏領域比に与える影響

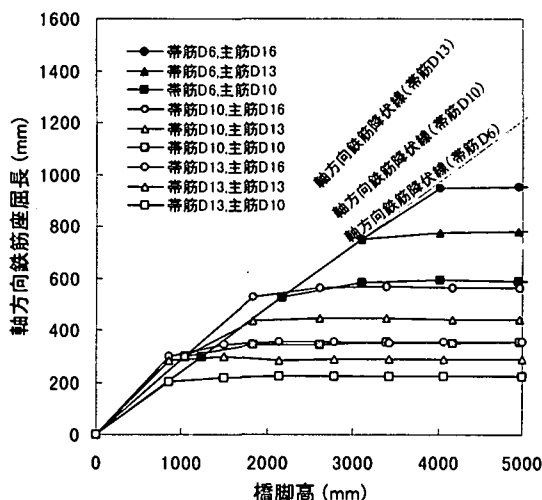


図-9 橋脚高と軸方向鉄筋の座屈長の関係

高くなると、この影響が小さくなって変形曲線がsin波形に近似されるためと考えられる。ただし、このような座屈モードの違いはわずかであり、座屈長としては変わらないことから、塑性ヒンジ長に与える影響は小さいと考えられる。

軸方向鉄筋の降伏領域は式(1)に示したように橋脚高さの関数となるため、上述した点を橋脚高さとして発展させることができる。ここで、降伏領域については、鉄筋のひずみ硬化を考慮したM-φ逐次解析をパラメトリックに実施した結果、図-8のような関係を得ている⁶⁾。したがって、側方筋比1.0の正方形断面における降伏領域 L_{ps} は、帯鉄筋比 ρ_s と橋脚高さ L_{ps} の関数として式(2)で表される。

$$L_{ps} = (0.11\rho_s + 0.21)H \quad (2)$$

ここでは、表-1の実験供試体を基準にして軸方向鉄筋径と帯鉄筋径の組み合わせを9ケース設定し、図-7と同様に降伏領域を増減させた座屈解析を実施した後、式(2)の関係をjいて橋脚高さとして座屈長の関係を整理した。この結果を図-9に示す。同図によれば、軸方向鉄筋径と帯鉄筋径の組み合わせによって存在する座屈長は、

図-7と同様に降伏領域が大きくなるとこの影響を受けないことがわかる。また、同図では橋脚高が低い場合の塑性ヒンジ長は高さに比例し、橋脚高が高い場合には橋脚高以外のパラメータに依存するという点で、現在の道示に示される塑性ヒンジ長の規定と同様の傾向を示しているといえる。ここで注目すべき点は、橋脚高さがかなり低くなると座屈長は降伏領域で決定されるようになるため、軸方向鉄筋径や帯鉄筋量が座屈長に与える影響は小さくなり、局所的には帯鉄筋径が太い場合が細い場合よりも座屈長が長くなるようなケースも存在するという点である。したがって、橋脚高さが低い場合の軸方向鉄筋の座屈長を算定する際には、橋脚の降伏領域を慎重に算定する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、FEMによる座屈解析を通じて塑性ヒンジ長に関する検討を行った。得られた結果をまとめる以下ようになる。

- (1) 軸方向鉄筋の降伏領域をモデル化した有限変形理論に基づくFEM解析により、実際の橋脚と同様な鉄筋の座屈モードを誘起できる。解析によって得られる座屈長は弾性座屈理論解や実験結果同様に、鉄筋径が太いほど長く、帯鉄筋による拘束力が大きいほど短くなる。
- (2) 軸方向鉄筋の降伏領域がある高さ以下では、座屈長は降伏領域に一致し、これを越えると座屈長は変化しなくなる。降伏領域は橋脚高さの関数となることから、塑性ヒンジ長としては橋脚高さが低い場合は降伏領域に依存し、橋脚高さが高い場合には、軸方向鉄筋径や帯鉄筋量の影響を大きく受ける。

参考文献

- 1) M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi : Seismic Design and Retrofit of Bridges, 1996
- 2) 星隈順一、運上茂樹、川島一彦、長屋和宏：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法、構造工学論文集、Vol.44A、pp.877-888、1998年3月
- 3) 浅津直樹、運上茂樹、林 昌弘：鉄筋座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する一考察、第2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講演論文集、pp.283-286、1998年12月
- 4) 須田久美子、村山八洲雄、一宮利通、新保弘：交番繰返し荷重下における柱筋の座屈挙動、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.467-472、1994
- 5) Ben KATO : Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic action, Bulletin Dinformation, No.131, CEB, IABSE-CEB Symposium, May, 1979
- 6) 浅津直樹、運上茂樹、林 昌弘：鉄筋コンクリート橋脚における塑性ヒンジ領域の検討、土木学会第54回年次学術講演会講演概要集、1999年11月(投稿中)