

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

浅津 直樹¹・運上 茂樹²・林 昌弘³

¹正会員 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 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)

1. まえがき

平成8年に改訂された道路橋示方書では、鉄筋コンクリート橋脚の慣性力作用位置における終局水平変位の算出において、塑性ヒンジの概念が導入された。この方法によれば終局水平変位は塑性ヒンジ長に依存するため、橋脚の変形性能を精度良く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。現在、道路橋示方書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等によって変化する可能性が指摘されており^{1) 2)}、詳細については十分解明されていないのが現状である。

本文は、既往の正負交番載荷実験の結果等において、橋脚基部の損傷領域と軸方向鉄筋の座屈長が一致する傾向にある点に着目し、弾性座屈理論による座屈解析を実施して軸方向鉄筋や帯鉄筋が鉄筋座屈長に及ぼす影響を検討することにより、塑性ヒンジ長に関する考察を行ったものである。

2. 弾性座屈理論による座屈長

軸方向鉄筋が帯鉄筋に拘束された状態のモデル化として、図-1に示すように長さ ns 、曲げ剛性 EI の棒部材が、 $n-1$ 個のバネ定数 K の弾性支承で支持されたモデルを設定した。以下、このモデルを離散バネモデルと称する。実際の橋脚では軸方向鉄筋は帯鉄筋の他にコンクリートでも拘束されているが、この影響については後述することとし、ここではコンクリートを無視して考える。このモデルに軸圧縮力が作用する場合の座屈荷重 P_{cr} は弾性座屈理論により、式(1)で与えられる³⁾。

$$K = \frac{2P_{cr}}{s} \frac{\{1 - \cos(m\pi/n)\}a - b}{1 - \frac{b}{1 - \cos(m\pi/n)}} \quad (1)$$

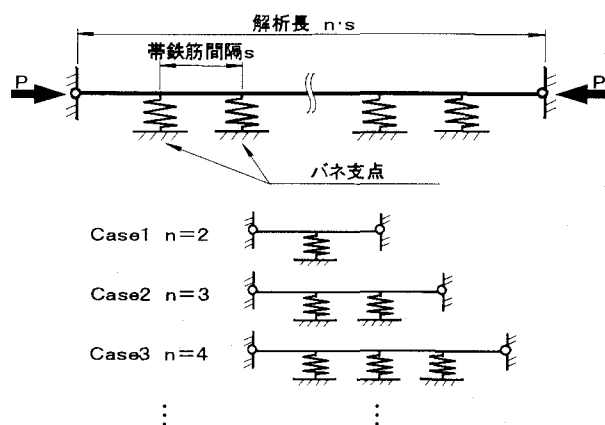


図-1 解析モデル

$$1 - \cos(m\pi/n) = b(1 \pm \sqrt{1 - 1/a})$$

$$a = \frac{\phi}{\phi - \sin \phi}, \quad b = \frac{\phi(1 - \cos \phi)}{\phi - \sin \phi}$$

$$\phi = s \sqrt{P_{cr}/EI}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, n-1$$

ここで、 m は座屈モードであり、バネ定数が曲げ剛性に対して非常に大きい場合には、2次、3次と高次のモードで座屈が生じるようになるが、このような場合でもコアコンクリート側には変位が拘束されるため、実際には1次モードしか発生しない。よって、解析においても、1次モードのみを対象する。

式(1)において、棒部材の曲げ剛性とバネ定数及びバネ支点間隔を与え、バネ支点数を図-1に示すように1から順次増加させていくと得られる座屈荷重が変化していくが、この座屈荷重の最小値をとるケースで実際の座屈が生じることになる。すなわち、軸方向鉄筋の座屈長は、このケースの解析長と考えることができる。

図-2に一例として軸方向鉄筋径 D13、ヤング係数 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ (曲げ剛性 $2.56 \times 10^8 \text{ N}\cdot\text{mm}^2$)、帯鉄筋間隔 75mm を想定した場合に、バネ支点数を増やしていったときの座屈荷重の変化を示す。なお、バネ定数としては 5, 10, 15, ..., 50 N/mm と変化さ

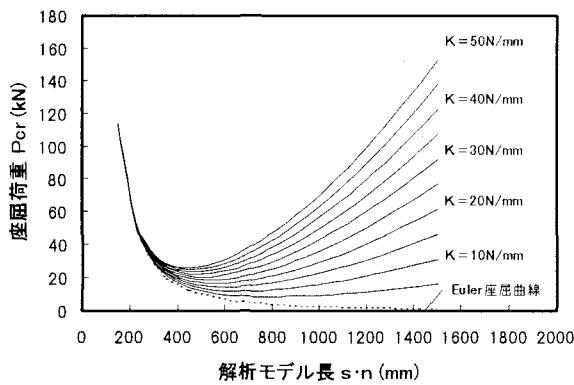


図-2 座屈荷重と解析モデル長の関係

せた場合を示している。また、参考のためバネ支点がないオイラー座屈の状態も併記している。図からわかるように、オイラー座屈の場合は棒部材の長さが長くなる、すなわち細長比が大きくなるほど小さい荷重で座屈が発生しやすくなり、部材長が無限大の場合には座屈長も無限大となる。しかし、バネ支点を設けて棒部材に拘束力を与えることにより、座屈荷重には極小値が存在するようになり、座屈長が得られることがわかる。この極小値はバネ定数が大きくなるにつれて明瞭に現れる。逆にいえば、バネ定数が小さいほど座屈長は定まりにくく、バネ定数のわずかな変化で敏感に変動するといえる。また、バネ定数が大きくなるにつれて極小値が左側にシフトしていき、座屈長が小さくなることがわかる。

図-3～図-5には、バネ支点間隔毎に座屈長とバネ定数及び曲げ剛性の関係を整理した結果を示す。各図はそれぞれバネ支点間隔が75mm、150mm、300mmの場合であり、棒部材の曲げ剛性毎に離散バネモデルにおける座屈長と支点バネ定数の関係を太線で示している。ここで、各図中における細線の連続線は支点バネを等分布バネ $\alpha = K/s$ に換算した連続バネ（弾性床）モデルにおける1次モードの座屈長を示しており、式(2)で与えられる。式(2)は式(3)で与えられる座屈荷重 P_{cr} を $n=1$ のときに最小化する L を算出することによって得られる。

$$L_{cr} = \pi^4 \sqrt{EI/\alpha} \quad (2)$$

$$P_{cr} = \left(n^2 + \frac{\alpha L^4}{n^2 \pi^4 EI} \right) \pi^2 \frac{EI}{L^2} \quad (3)$$

各図をみると、離散バネモデルの場合には支点バネ定数を連続的に変化させていくと、座屈長はバネ支点間隔の倍数として算出され、バネ定数の増大と共に断続的に座屈長が短くなることがわかる。ただし、バネ定数が大きくなるにつれて座屈長は変化しにくくなる。また、各図において棒部材の曲げ

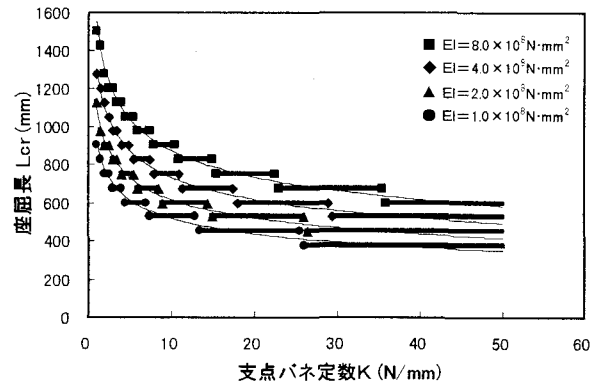


図-3 座屈長と支点バネ定数の関係 (@ 75mm)

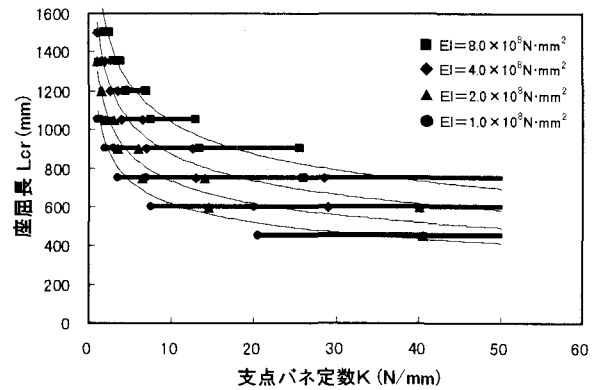


図-4 座屈長と支点バネ定数の関係 (@ 150mm)

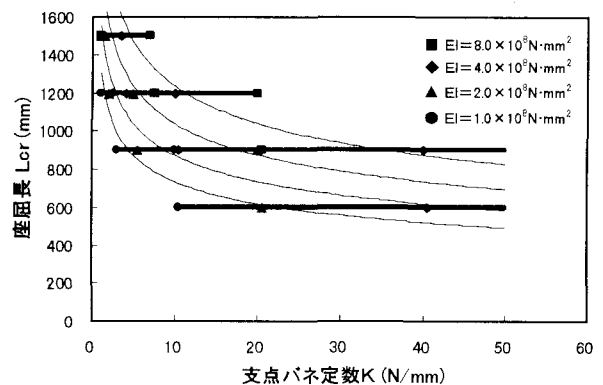


図-5 座屈長と支点バネ定数の関係 (@ 300mm)

剛性が大きいほど座屈長が長くなることもわかる。

次にバネ支点間隔が異なる図-3～図-5を比較すると、バネ支点間隔が大きくなるにつれて選択し得る座屈長が限られてくるために、曲げ剛性が異なっても、座屈長が等しくなるケースが出現するようになる。このような場合は何らかの要因で座屈長が左右され、実際の構造物において出現する座屈長は変動幅が大きくなると考えられる。しかしながら、全体的にはバネ支点間隔が大きくなると座屈長が長

くなることは明らかである。

一方、各図において離散バネモデルによって得られる座屈長は連続バネモデルによって近似されることがわかる。ただし、連続バネモデルによる座屈長は平均値であるため、上述したようにバネ支点間隔が大きくなると、実際には変動幅が大きくなることに注意する必要がある。

以上より、座屈長が塑性ヒンジ長に相当すると仮定すると、軸方向鉄筋径が大きくなると塑性ヒンジ長が長くなり、帯鉄筋による拘束力が強くなると塑性ヒンジ長が短くなるという一般的な現象を弾性座屈理論のもとで説明することができる。実際の塑性ヒンジ長は断面高やせん断スパン比等の影響を受ける可能性があるが、軸方向鉄筋の座屈長が塑性ヒンジ長の決定に大きく関与していると考えられる。

3. 実際の橋脚における軸方向鉄筋座屈長

弾性座屈理論の範囲では軸方向鉄筋の座屈長は支点バネ定数と軸方向鉄筋の曲げ剛性の比率で決定されるため、実際の鉄筋コンクリート橋脚内の軸方向鉄筋における座屈長を算定する場合には、これらの値を精度よく与えることが重要である。ここではこの問題について検討を行う。

(1) 帯鉄筋による支点バネ定数

図-1の離散バネモデルにおいて支点バネ定数の値を検討する。帯鉄筋のバネ値は中間帯鉄筋がない場合として、図-6に示すように有効長dを支間とする両端固定梁を考えた場合のたわみ曲線を用いて式(4)により算出した。なお、帯鉄筋の軸方向の伸びによるバネについては、水平方向のたわみに比べて非常に小さいため無視した。

$$K = \frac{24EI}{nd^3\{(x/d)^2 - 2(x/d)^3 + (x/d)^4\}} \quad (4)$$

式(4)によれば、有効長dの区間に含まれる軸方向鉄筋本数nが多いほど鉄筋1本あたりのバネ定数は小さくなり、この場合には座屈長が長くなると考えられる。また、隅角部に近い軸方向鉄筋ほどバネ定数が大きくなる。

(2) 軸方向鉄筋の剛性低下

正負交番載荷を受ける軸方向鉄筋では、圧縮載荷時にパウシンガー効果によって剛性が徐々に低下するため、実際には非線形座屈（塑性座屈）を考える必要がある。正負交番載荷時の鉄筋の応力-ひずみ関係を実験的に検討した例⁴⁾も報告されているが、任意の条件において整理されるまでには至って

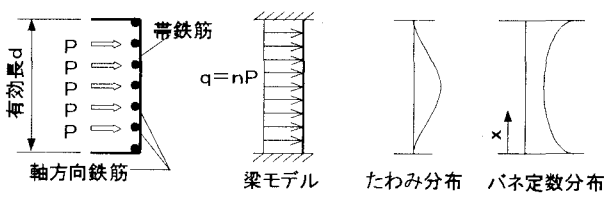


図-6 帯鉄筋1段あたりのバネ定数

表-1 比較解析に用いた実験供試体

供試体 No.		P1	P2	P3	P4
供試体寸法	幅 (mm)	600	600	600	1200
	高さ (mm)	600	600	600	1200
	せん断支間比	5.0	5.0	5.0	4.0
軸方向鉄筋	鉄筋径	D10	D13	D13	D13
	間隔 (mm)	43.3	74.3	74.3	50.0
	鉄筋比 (%)	0.85	0.99	0.99	0.77
横拘束筋	帯鉄筋径	D6	D6	D6	D6
	帯鉄筋間隔 (mm)	75	75	150	120
	中間帯鉄筋	なし	なし	なし	なし
	有効長 (mm)	520	520	520	1100
等価塑性ヒンジ長 (mm)		306	557	320	497

いない。しかしながら、圧縮域の応力-ひずみ関係が不明でも、座屈時の剛性が何らかの形で与えられれば、塑性座屈問題も弾性座屈問題に帰着することができると考えられる。

そこで、本研究では、既往の鉄筋コンクリート橋脚の正負交番載荷実験をもとに、弾性座屈理論による逆解析を実施して座屈時の軸方向鉄筋の剛性（以下、低下剛性とする）を検討するものとした。既往の実験データとしては、柱基部の実測曲率より等価塑性ヒンジ長¹⁾を算出している正方形断面の4供試体を用いた。表-1にこれらの供試体の諸元と等価塑性ヒンジ長を示す。逆解析の方法としては、等価塑性ヒンジ長が軸方向鉄筋座屈長に等しいという仮定のもとで、式(4)で算出される支点バネ定数を用い、座屈長が等価塑性ヒンジ長に等しくなるときの低下剛性を算出した。また、問題を単純化するために解析は式(2)による連続バネモデルを用いた。

ここで、表-1の等価塑性ヒンジ長を見ると、軸方向鉄筋の剛性が高いP2供試体では座屈理論通りに塑性ヒンジ長が長くなっているが、帯鉄筋間隔が大きいため軸方向鉄筋の拘束力が小さいと考えられるP3、P4供試体ではP2供試体よりも塑性ヒンジ長が逆に短くなっていることがわかる。この理由は、各橋脚における帯鉄筋による拘束力の違いよりもより軸方向鉄筋の剛性低下量の違いがより顕著に現れた結果であると推察される。このような観点から、逆解析の結果を図-7に示すように軸方向鉄筋の低下剛性と初期剛性の比E/Eoと軸方向鉄筋径と帯鉄筋間隔の比φ/sの関係として整理した。この図において各供試体でE/Eoの値が複数点あるのは、軸方向鉄筋の位置によって支点バネ定

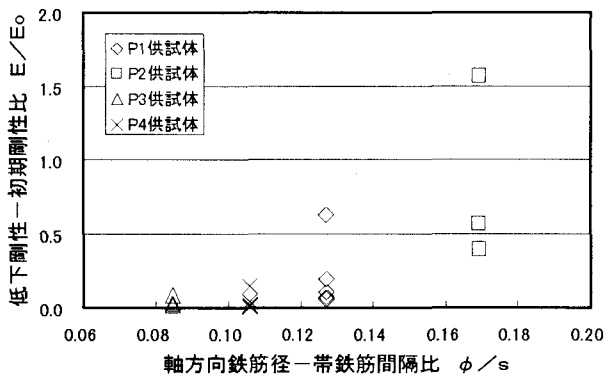


図-7 軸方向鉄筋の剛性低下

数が異なるからである。図を見ると、軸方向鉄筋間隔が大きくなると、剛性低下の割合が大きくなる傾向にあることがわかる。

この理由の1つとして、剛性の低下が鉄筋の局所ひずみ量に依存している可能性が考えられる。一般にコンクリート中にある鉄筋のひずみはコンクリートとの付着がなくなる曲げひびわれの箇所に集中するため⁵⁾、ひびわれ間隔が大きくなると局所ひずみ量が大きくなる必要がある。鉄筋コンクリート橋脚の基部では、帯鉄筋に沿って曲げひびわれが発生するため、帯鉄筋間隔が大きい場合は局所ひずみ量が大きくなると考えられ、このことが剛性低下の大きさに関与していると推察される。ただし、このようなメカニズムは明らかにされておらず、今後検証していく必要がある。

(3) コンクリートによる軸方向鉄筋の拘束力

実際の橋脚では帯鉄筋と共にコンクリートの拘束力が軸方向鉄筋の初期座屈を防止していると考えられ、この大きさはかぶり厚やコンクリートの圧縮強度等によって異なると考えられるが、絶対量としては非常に大きな拘束力を有している必要がある。なぜならば、軸方向鉄筋が座屈する前の荷重段階では、バウシンガー効果によって大きく剛性低下した状態の軸方向鉄筋に降伏応力相当の圧縮力が作用しても、座屈が発生しないだけの拘束力を有している必要があり、帯鉄筋のみの拘束力では理論上座屈を防止できないからである。実際にこの量を式(2)、式(3)を用いて等分布バネ定数に換算してみると表-2のようになる。表中に示す式(4)で算出した各供試体の帯鉄筋のみのバネ値と比較すると1～2オーダー程度大きくなっており、剛性低下が顕著になるほど大きな拘束が必要となる。

表-2のような拘束力を保ったままでは軸方向鉄筋が座屈しないが、コンクリートの拘束力は曲げひびわれの進展と共に徐々に低下していき、かぶりコ

表-2 降伏応力時の座屈防止に必要なバネ定数

剛性比 E/E_0	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2
降伏応力時の座屈防止に必要な分布バネ (N/mm)	1.320	1.650	2.201	3.301	6.602
帯鉄筋による分布バネ (N/mm)					
P1 供試体	0.054 ~ 0.582				
P2 供試体	0.104 ~ 0.416				
P3 供試体	0.052 ~ 0.208				
P4 供試体	0.002 ~ 0.062				

ンクリートの剥離が生じた荷重段階ではコンクリートの拘束力は急激に減少し、ほとんど帯鉄筋の拘束力のみになると考えられる。この直後の荷重段階では、圧縮力の増加途中で軸方向鉄筋の座屈が生じる可能性が高いと考えられる。

以上のようなメカニズムを考えると、コンクリートの拘束力は初期段階では非常に大きい、最終的に座屈長を決定するのは帯鉄筋のみの拘束力によるところが大きいと想像される。

4. まとめ

本研究の結果をまとめると下記のようになる。

- (1) バネ支点を有する弾性座屈モデルにより、軸方向鉄筋の座屈長を得ることができる。この座屈長と塑性ヒンジ長の相関が高いと考えた場合、塑性ヒンジ長は鉄筋の曲げ剛性が大きいほど長く、バネ支点の剛性が大きいほど短くなる。また、バネ支点の剛性は主鉄筋本数が多いほど小さくなり、塑性ヒンジ長が長くなる。
- (2) 正負交番軸力荷重を受ける軸方向鉄筋の剛性はバウシンガー効果により大きく低下し、今回の検討範囲では帯鉄筋間隔が大きいほど剛性低下が顕著であった。
- (3) 軸方向鉄筋の座屈防止に必要な拘束力を逆算すると帯鉄筋のみでは明らかに不足するため、座屈以前のコンクリートの拘束力は非常に大きいと考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi: Seismic Design and Retrofit of Bridges, 1996
- 3) C. R. C. JAPAN: HANDBOOK OF STRUCTURAL STABILITY, コロナ社、1971
- 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) 玉井真一、島弘、出雲淳一、岡村甫：一軸引張部材における鉄筋の降伏以後の平均応力-平均ひずみ関係、土木学会論文集、第378号/V-6、pp.239-247、1987