

論文

[2123] RCラーメン構造物の終局変位に関する解析的研究

正会員 ○中村 光 (名古屋大学大学院)

正会員 二羽淳一郎 (名古屋大学工学部)

正会員 田辺 忠顕 (名古屋大学工学部)

1. 序

鉄筋コンクリート (以下RC) 構造物の耐震性状に関する研究は数多く行われている。そのうち橋脚などの静定構造物および単一部材に関する靱性および靱性率の算定手法については、様々な報告がなされいくつかの実験式も提案されている。¹⁾ しかしながら、鉄道の高架橋などに多くみられるRCラーメン構造のような不静定構造物の靱性に関しては、ほとんど定量化されていないのが現状である。これは、複数の部材の組合せや部材内部に生じる軸力変動などによりその変形性能が大きく異なってくるためと思われる。

一般に、ラーメンのような不静定構造物は、橋脚などの静定構造物とは異なり一つの部材が破壊したからといって、構造物全体が崩壊するわけではない。そのためRCラーメン構造物の靱性を考える場合は、部材単体としてではなく、構造物全体としての靱性を考える必要が生じてくる。

そこで本研究では、一層RCラーメン構造物を対象として、有限変形理論に基づき、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮した有限要素解析を行い、構造物全体の剛性マトリクスより得られる固有値によりRCラーメン構造の靱性の評価を試みた。さらに靱性に及ぼす諸要因の影響を解析的に検討した。

2. 解析方法²⁾

2. 1 剛性方程式

本解析で用いた方法は、はり要素に対する有限変形理論に基づく有限要素法である。解析に用いるはり要素の増分形剛性方程式を次式に示す。

$$([K] + [K_g])^{(n+1)} \{\Delta d\}^{(n+1)} = \{\Delta F\}^{(n+1)} + \{F_r\}^{(n)} \quad (1)$$

第(n)段階の応力・変位の分布が既知であるとした時、(1)式により第(n+1)段階の状態が求まる。ここで、K, K_gはそれぞれ構造物の剛性マトリクスおよび幾何剛性マトリクスであり、F_rは第(n)段階における釣合方程式が完全に満足されないために生じる不平衡力である。

2. 2 数値計算プログラム

(1)式中の各剛性マトリクスおよび不平衡力を求めるために積分を行う。計算法としては、各要素の任意部分を軸方向および断面方向に層状分割し、各微小要素ごとに材料の応力-ひずみ関係を導入して、これらの総和を求める。

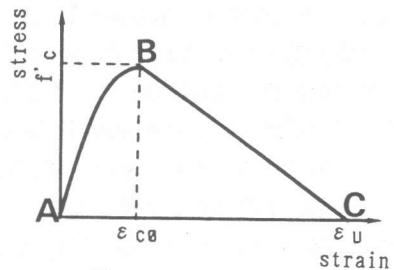


図-1 コンクリートの
応力-ひずみ曲線

$$\begin{aligned} AB \quad \sigma &= f'_c \{ 2\epsilon_c / \epsilon_{c0} - (\epsilon_c / \epsilon_{c0})^2 \} \\ BC \quad \sigma &= f'_c \{ 1 - 0.5(\epsilon_c - \epsilon_{c0}) / (\epsilon_{50H} + \epsilon_{50u} - \epsilon_{c0}) \} \\ \epsilon_{50H} &= 0.75p(b/s)^{0.5} \\ \epsilon_{50u} &= (0.21 + 0.002f'_c) / (f'_c - 70) \end{aligned}$$

材料の応力-ひずみ関係として、鉄筋は引張側圧縮側ともに降伏点までは線形を保ち、降伏点を越えると初期勾配の1/100の傾きで応力が増加するバイリニア型を仮定した。コンクリートの応力-ひずみ関係は図-1 に示すようにひずみが ε_{c0} （圧縮強度時のひずみ）までは2次曲線とし、それ以降は ε_u まで直線的に応力が減少するとした。応力降下直線の傾きはKent and Parkモデル⁴⁾により決定している。

各要素の増分形剛性方程式を各変位段階ごとに部材座標系から全体座標系に変換した構造物全体の増分形剛性方程式を用い、Newton-Raphson法に基づく変位増分法により解析を行っている。フーチング内の鉄筋ひずみを鉄筋降伏後の付着応力の低下を考慮したモデルにより算定し、軸方向鉄筋のフーチングからの引き抜け量を求めた。

また各変位段階で、構造物の接線剛性マトリクス（ $[K] + [K_g]$ ）の固有値・固有ベクトルを求めている。

3. 既往の実験結果と本解析値との比較

松本ら³⁾の行った一層RCラーメン構造の水平交番載荷試験に単調載荷解析を適用して、実験結果との適合性を検討してみた。この実験は、実際の鉄道RCラーメン高架橋を模擬した約1/5の縮小モデルであり、不静定構造物の靱性について定量的に把握することを目的として行われたものである。荷重は、上層梁の軸線に作用するように載荷されている。また載荷は、降伏荷重（この時点の変位 $=\pm\delta y$ ）、 $\pm 2\delta y$ 、 $\pm 3\delta y$ 、・・・、破壊という段階で行われ、降伏荷重に達するまでは荷重制御により、それ以降は変位制御により行われている。降伏荷重、降伏変位は、試験体の中でいずれかの部材の引張側軸方向鉄筋が降伏ひずみに達した荷重、およびその時点の載荷点側の柱・上層梁接合部中心点の水平変位量で定義されている。

供試体の形状および諸元をそれぞれ図-2、表-1 に示す。供試体の軸方向鉄筋比およびせん断補強筋比を表-2 に示す。表-2 における軸方向鉄筋比（ P_t ）は、この引張領域の最外縁に配置されている軸方向鉄筋のみに対する値である。また、表中（ ）内の値は軸方向鉄筋の全量に対する値である。

図-3、図-4 にNo.1とNo.2の載荷点における水平方向の荷重-変位曲線の実験値の包絡線と解析値との比較を示す。実線が実験値を、破線が解析値を表している。解析は右側柱上端部の水平方向変位を制御して行った。ここで解析モデルは、供試体断面の中心線によりモデル化している。No.1は左右の柱の剛度が等しい供試体で、No.2は左右の柱の剛度が異なる供試体である。

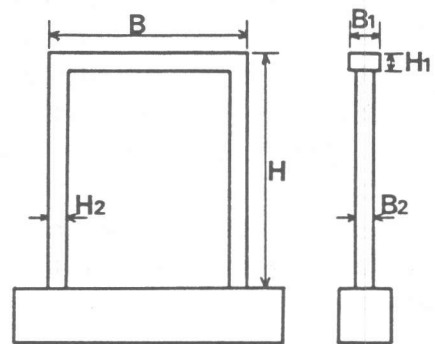


図-2 試験体形状

表-1 試験体諸元

試験体 No.	全体寸法(mm)		部材寸法(mm)	
	H	B	梁 (H1×B1)	柱 (H2×B2)
1	2190	1850	300×400	250×250
2	1750	2700	300×400	柱L 350×250 柱R 250×250

表-2 試験体の軸方向鉄筋比、せん断補強筋比

試験体 No.	部材名称	A _s	P _t (%)	A _{sw}	P _w (%)	f'c
1	上層梁 柱	D16-6	0.99(2.41)	D6	0.2	286
		D13-4	1.01(3.24)	D6	0.4	
2	上層梁	D16-6	0.99(2.41)	D6	0.2	269
		D16-4	0.91(2.72)	D6	0.2	
	柱(L) 柱(R)	D13-4	0.81(2.43)	D6	0.2	

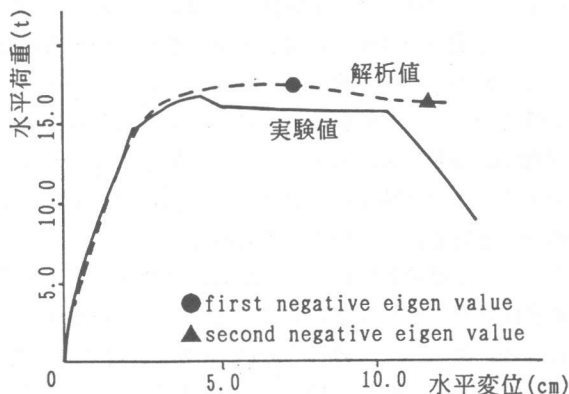


図-3 荷重-変位曲線 (No. 1)

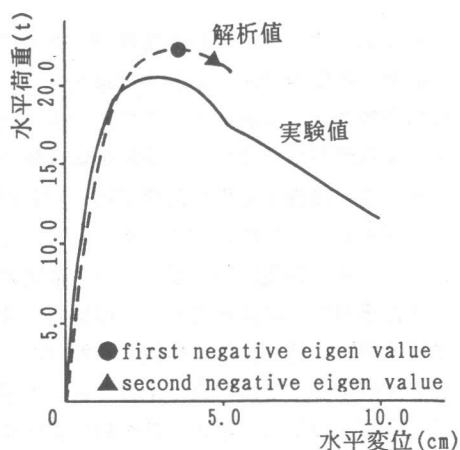


図-4 荷重-変位曲線 (No. 2)

実験で繰り返しにより耐力が急激に低下するまでは、解析値と実験値は概ねよく一致している。実験における耐力の急激な低下は、柱下端のコンクリートが剥落し、軸方向鉄筋が座屈して内部コンクリートが圧壊することにより生じている。No. 2では解析値の最大耐力が実験値よりやや大きくなっているが、その差は10%程度であり、解析結果は良好である。いずれにしても、形状・剛度の異なる一層RCラーメン構造に対し、解析値は実験値を良く追従していると言え、本解析手法の妥当性が示されたものと考えられる。

4. RCラーメン構造の靱性評価

一般に、ラーメンのような不静定構造は、橋脚などの静定構造物とは異なり一つの部材が破壊したからといって、構造物全体が崩壊するわけではない。そのためRCラーメン構造の靱性を考える場合は、部材単体としてではなく、構造物全体としての靱性を考える必要があると思われる。

図-5に供試体No. 1の解析より得られた、各水平変位段階における左側の柱の上下端部のモーメントを破線と一点鎖線で、右側の柱の下端のモーメントを2点鎖線で示す。併せてその時の荷重-変位曲線を実線で表している。左側の柱では、軸圧縮力の影響により右側の柱より大きなモーメントが生じている。水平変位が約4 (cm) で左側の柱下端部の断面耐力が低下し始め、続いて水平変位が約6 (cm) で左側柱上端部の断面耐力も低下している。しかしながら、構造物の水平耐力は低

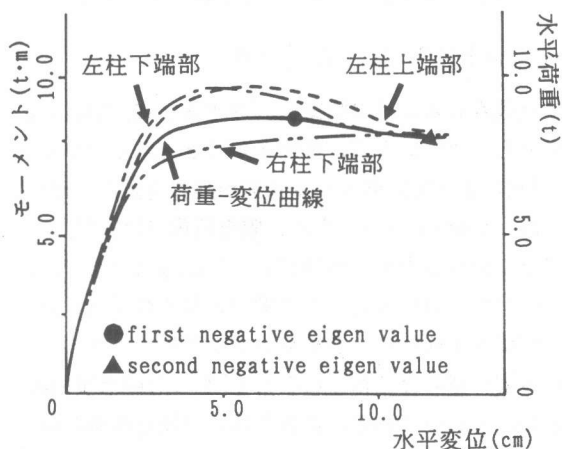


図-5 モーメント-変位曲線 (No. 1)

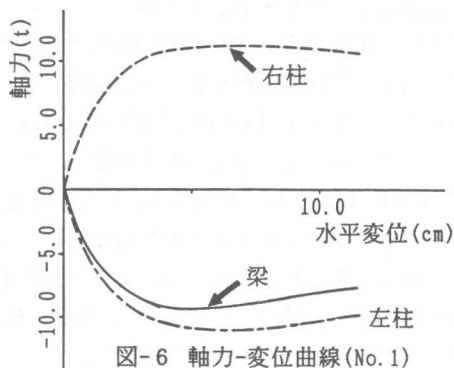


図-6 軸力-変位曲線 (No. 1)

下しておらず、●点で初めて低下し始めている。●点は後で述べる極限点(limit point)に対応している。極限点で水平耐荷力は最大となり、その後耐荷力は徐々に減少し構造物は一つの負の固有値を持つ。また右側の柱の断面耐荷力は、この範囲では低下することはなかった。ラーメンのような不静定構造物は、一部材の耐荷能力が構造物としての耐荷能力に必ずしも一致しないことが分かる。橋脚などの静定構造物に対し解析的に終局変位を求める場合に、圧縮縁のコンクリートひずみが0.35%に達するとき、あるいは最大モーメント時などというように仮定されているが、RC ラーメン構造に対してこれらの仮定は物理的意味を持たないと考えられる。

また橋脚などにより得られた成果を、RC ラーメン構造に用いるとしても、RC ラーメン構造では各部材(柱、梁)に作用する軸力が、各変位段階により大きく異なっており、この影響を正しく評価することは非常に困難であると思われる。図-6 に、供試体No.1の解析より得られた各水平方向変位段階における、各部材に作用する軸力を示す。部材が約±10(t)(柱部材の応力で約 $\sigma = 16(\text{Kgf/cm}^2)$)の軸力の変動を受けていることが認められる。

本解析結果と実験結果を比較すると、実験により水平荷重が急激に低下する変位が、構造物全体の接線剛性マトリクスの固有値が負となる変位と良く一致しているのが判る。図-3、図-4の●点が一番小さな固有値が負になる点で、▲点が2つ目の固有値が負となる点である。

負の固有値の意味は次のようなことである。(1)式に示す、有限変形理論により定式化を行った増分形剛性方程式の求解を進めていくと、幾何学的非線形問題では構造物の接線剛性マトリクス($[K] + [K_g]$)の行列式が零、すなわち

$$\det [[K] + [K_g]] = 0 \quad (2)$$

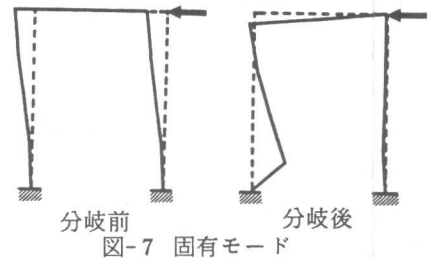
で定義されるような状態に到達する。(2)式は少なくとも一つの固有値が零であることを示している。

(2)式によって定義される状態が限界荷重点(critical point)である。また、限界荷重点は極限点(limit point)と分岐点(bifurcation point)の2つに分かれ、材料非線形の問題では多くの場合、最大荷重点が前者に、不安定点が後者に相当する。負の固有値の存在はそれぞれ極限点、分岐点後の状態を示すものである。このうち、分岐点は複数の

平衡状態が共存する点である。つまり、微小変形理論に基づく変形様式と、有限変形理論に基礎をおく変形様式とが共存する点である。

本解析では、各変位段階で構造物の固有モードを求めているが、負の固有値の存在により構造物の固有モードが急変する点を分岐点と定義している。図-3、図-4の▲点が分岐点に対応している。実験において水平荷重が急激に低下する点とよく一致している。図-7 に分岐点前と後の接線剛性マトリクスから得られる一次の固有モードの一例を示す。本解析では解析手法上▲点後、図-7に示す一次の固有モードを追うことはできなかった。しかしながら、一次モードを適切に選択しうる数値解析のアルゴリズムを採用すれば、▲点で急激に耐力の低下する解析値が得られたのではないかと考えられ、さらに検討したいと考えている。

部材の終局変位を分岐点(δ_{bif})で定義し、靱性率を δ_{bif} と解析上部材のいずれかの軸方向鉄筋が降伏した変位(δ_y)の比で定義する。



$$\mu = \delta_{bif} / \delta_y$$

(3)

著者らがRC橋脚を対象にして行った解析では、実験において繰り返し中に急激に耐力が低下する点と分岐点が必ずしも一致しなかった。RC橋脚を対象として行われた実験は多くの場合、繰り返し中にせん断変形が急増することで復元力が著しく低下しており、これが実験値と解析値が必ずしも一致しない理由と思われる。一方、ここで対象としたRCラーメンの実験では、構造物の破壊がラーメンの柱部分の軸方向鉄筋の座屈と内部コンクリートの圧壊に支配されており、これが解析値の▲点が実験で水平荷重が急激に低下する変位とよく一致する理由と思われる。

5. RCラーメンの靱性率に及ぼす諸要因の影響

RCラーメンに対する靱性率を(3)式により定義したので、No.1の供試体をモデルにして、各種パラメーターの靱性率への影響を調べた。

5.1 帯鉄筋比の影響

図-8に帯鉄筋比を変化させたときの、靱性率を示した。帯鉄筋比の影響は、コンクリートの応力-ひずみ曲線の応力低下直線の傾きを変化させることで与えられる。町田らがRC橋脚を対象にして行った実験によれば、帯鉄筋比と靱性率の関係はほぼ線形であった。しかし、RCラーメンを対象にした本解析では、RCラーメンに対する靱性率は帯鉄筋比の増加により、放物線的に増加した。しかしながら、本解析ではかぶり部分のコンクリートにも拘束効果を考慮した応力-ひずみ関係を用いているので、帯鉄筋比が増加するに従い、靱性率を若干大きめに見積っている。

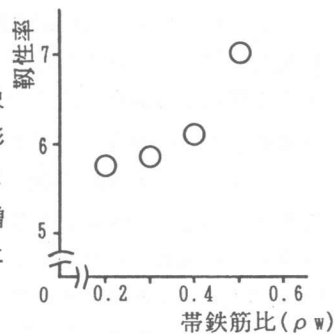


図-8 靱性率

5.2 柱の長さ(H)と梁の長さ(B)の影響

梁の長さを一定にして、柱の長さを変化させた時の影響を調べた。柱のせん断支間比(H/H₂)は、8.0, 10.0, 12.0の3通りである。図-9に解析より得られた荷重変位関係を示す。せん断支間比が小さいほど耐力は増加し、終局変位は小さくなる傾向を示した。

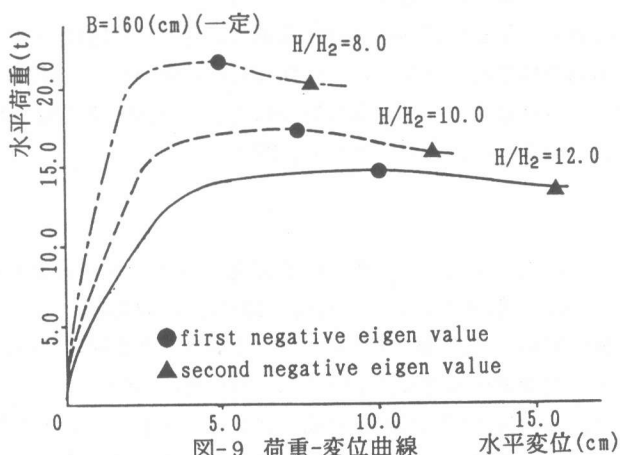


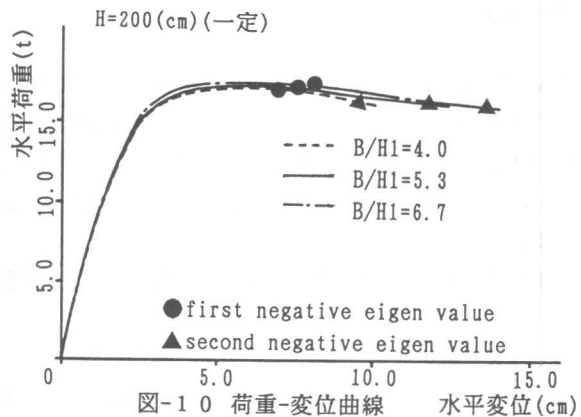
図-9 荷重-変位曲線

次に柱の長さを一定にして、梁の長さを変化させた時の影響を調べた。梁のせん断支間比(B/H₁)は、4.0, 5.3, 6.7の3通りである。図-10に解析より得られた荷重変位曲線を示す。

梁の長さが、水平耐力に及ぼす影響はほとんど見られなかった。しかし梁の長さが長くなるにつれ、終局変位は非常に増大している。これは、梁の長さが長くなれば、梁が大きく変形することで柱の破壊を遅くしているものと考えられる。

以上の結果を用いて、B/H（梁の長さとの柱の長さの比）と靱性率の関係を示したのが図-11

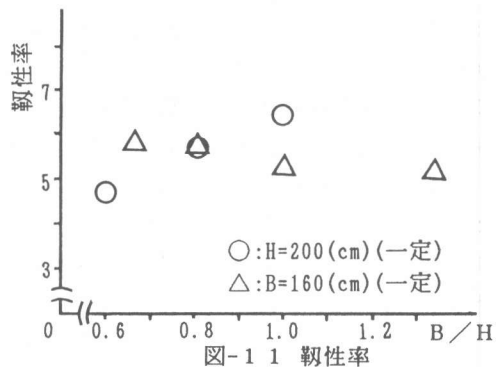
である。 B/H と靱性率との間にはほとんど関係がみられなかった。このことは、ラーメン構造物の靱性はラーメンの形状ではなく、各部材の長さに大きく影響を受けることを意味している。柱の長さは、耐力能力および靱性に影響を及ぼし、梁の長さは、耐力能力にはほとんど影響を及ぼさないが靱性への影響は非常に大きいことが解析的に明らかになった。



6. 結論

一層RCラーメン構造物の終局変位の解析的検討を行い以下の結論を得た。

- 1) 実験値と解析値を比較することで、本解析手法の妥当性が確認された。
- 2) ラーメンのような不静定部材の靱性を考える場合、橋脚のような単一部材より得られた成果をそのままラーメン構造物に取り込むことは困難と考え、構造物全体の剛性マトリクスから得られる固有値によりその靱性を定義することを提案した。つまり、一層RCラーメン構造物の



の終局変位を解析的に評価する場合、構造不安定性を意味するbifurcation pointで定義することが合理的であると考えた。bifurcation pointは、有限変形問題の大きな特徴の一つである。

- 3) 一層RCラーメン構造物の靱性率に及ぼす諸要因の影響を解析的に調べることができ、特に柱、梁などの長さの影響を解析的に示した。

参考文献

- 1) 町田篤彦, 睦好宏史, 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, 第378号/V-6, pp. 203-222, 1987年2月
- 2) 中村光, 田辺忠顕: 繰り返し荷重を受けるRC構造物の終局変位に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集11-2, pp. 281-286, 1989
- 3) 松本信之, 渡邊忠朋ら: 鉄筋コンクリートラーメン構造の靱性に関する実験的研究, コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 1988.3
- 4) Kent, D. C. and Park, R.: Flexural members with confined concrete, Proceedings of ASCE, Vol. 97, No. ST7, pp. 1969-1990, July, 1971