

論文

[2045] 繰返し荷重を受ける RC 橋脚における耐力の低下に関する解析

正会員 ○伊藤圭一（徳島大学大学院）

正会員 島 弘（徳島大学工学部）

1. はじめに

RC部材が交番繰返し荷重を受ける時、曲げ降伏後、変形がある値まで進んだ時に終局状態をむかえ、耐力が低下する。RC橋脚の耐震性を評価するにあたり、その復元力特性において、耐力が低下し始める点および低下する度合いを知ることが重要である。

現在まで、繰返し荷重を受けたRC橋脚がどこまで変形することができるかという靱性については、数多くの研究がなされており、種々の靱性率算定式が提案されている¹⁾。また、RC橋脚の終局時の破壊メカニズムについても、種々の条件によって分類されている²⁾。しかし、いずれも実験的なものであり、繰返しの影響を受ける構成材料の応力-ひずみ関係から、RC橋脚の破壊メカニズムを解析的にとらえるまでには至っていない。

本研究では、繰返し荷重により曲げ破壊するようなRC部材をとりあげ、耐力の低下の原因を構成材料であるコンクリートと鉄筋の挙動に注目し、定量的にコンクリートと鉄筋の応力-ひずみ関係のモデル化をおこなう。そして、そのモデルにより、終局時における繰返し荷重による破壊メカニズムを明らかにし、繰返し荷重を受けるRC橋脚における耐力の低下および耐力低下時の変形挙動を解析的に求めるものである。

2. 耐力低下を決定する要因のモデル化

RC部材の靱性を知ろうとする時、靱性を決定する要因が何であるか、またどの様に耐力が低下するかを知ることが重要である。

繰返し荷重を受けるRC部材の靱性を決定する要因は、構成要素であるコンクリートおよび鉄筋が、単調荷重では見られない、繰返しによる特有の現象をもつことにある。ゆえに、解析的に靱性を評価しようとする時、それらの正確な現象を表すモデルが必要となってくる。そこで、本研究では、繰返し荷重により曲げ破壊するRC橋脚において、変形の限界を決定するものとして、すでに引張力を受け、引張降伏した後の鉄筋の座屈、そして座屈以後のRC部材の耐力の低下を表すものとして、繰返し荷重を受けるコンクリートの抵抗応力の低下を取り上げた。以下でそれぞれのモデル化の方法について述べる。

(1) 繰返し荷重を受けるコンクリートのモデル化

繰返し荷重を受けたコンクリートの挙動については、現在までに実験的にも解析的にも数多くの研究が行われてきた。実験による一例として、岡本ら³⁾がコンクリートに種々の繰返し荷重を与えることによって、繰返し荷重を受けるコンクリートの特性を的確に示している。その特性の一つを表すものとして、コンクリートに定ひずみ繰返し荷重を与えた実験がある。これにより得られたコンクリートの応力-ひずみ関係を図-1に示す。この結果から明らかなように、コンクリートは繰返し荷重を受けることによって、抵抗応力が低下することがわかる。したがって、繰返し荷重を受けたRC部材の挙動を精度よく解析しようとする時、繰返し荷重を受けるコンクリ

ートの抵抗応力が低下するという特性を考慮することが必要となる。今までに、繰返し荷重下でのコンクリートの挙動を表すモデルは、実験と同様に数多く報告されている。しかし、前に述べた定ひずみ繰返し載荷によりコンクリートの抵抗応力が低下することを表すモデルは明確にはされていない。そこで本研究では、従来の履歴特性に加えて、この繰返しによって抵抗応力が低下する現象をも表せるコンクリートの応力-ひずみモデルを考えた。以下にそのモデル化の方法を述べる。

1) 繰返し荷重を受けるコンクリートの挙動

本研究では、繰返し荷重を受けるコンクリートの挙動を表すモデルとして、弾塑性破壊モデルの立場から理論的に導いている前川モデル⁴⁾を基本形とし、それを修正した。その修正したモデルを図-2に示す。包絡線については、単調載荷した時の応力-ひずみ曲線とし、前川モデルを用いた。除荷および再載荷曲線については、谷川らの Common Point⁵⁾ およびその剛性については、前川モデルの破壊パラメータの考え方を用いた。したがって、すべての除荷および再載荷曲線の定数は、除荷開始点の応力つまり除荷前の包絡線上の応力によって決定されるものである。

2) 繰返しによる抵抗応力の低下を表すための修正

図-1に示したように、コンクリートは繰返し荷重を受けることによって抵抗応力が低下する。この現象は、1)に述べたモデル化のみでは表せない。したがって、本研究では、新しく次に述べる仮定を付加し、修正を加えることによって、抵抗応力の低下を表すことを可能にした。

除荷および再載荷曲線の形を決定する種々の定数は、1)の仮定により、除荷前の包絡線上の応力によって決まるため、繰返しによる抵抗応力の低下を、除荷前の包絡線上の応力を低下させることによって表す。包絡線上の応力の減少量を定める方法としては、除荷によってコンクリートが放出するひずみエネルギーの考え方を用いる。図-3において、ひずみ ϵ_a で除荷を行いひずみ ϵ_c で再載荷する時、除荷によってコンクリートが放出するひずみエネルギーは、横線部の示す面積(U_2)で表せる。また、ひずみ ϵ_a よりコンクリートが圧縮力を負担しなくなるまで(ϵ_b まで)除荷を行った時の除荷行程によってコンクリートが放出するひずみエネルギーは、図に示す斜線部の面積(U_1)で表せる。このひずみエネルギーの考え方を用いて包絡線の応力の減少

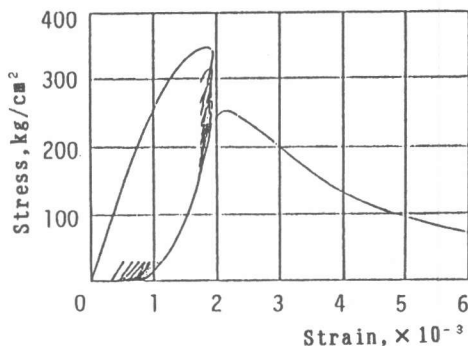


図-1 定ひずみ繰返し実験による
応力-ひずみ関係¹⁾

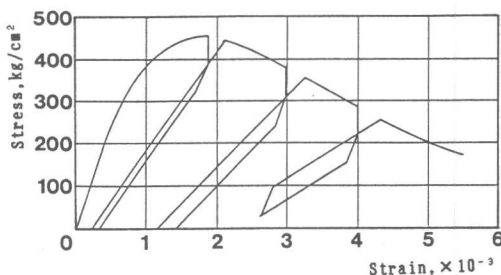


図-2 繰返しモデルの概形

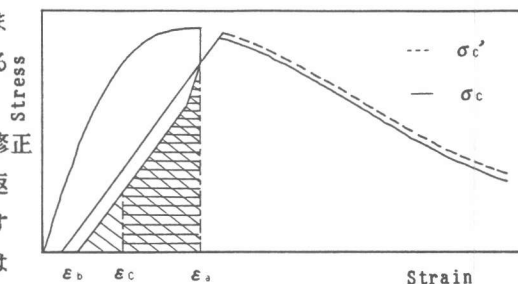


図-3 除荷により放出するひずみエネルギー

を次式で表した。

$$\sigma_c = \sigma_c' \cdot K^U \quad (1)$$

ここで、 σ_c ：繰返しの影響を受けた後のコンクリートの包絡線上の抵抗応力、 σ_c' ：除荷をおこなわないコンクリートの包絡線上の応力、 K ：定数（=0.95）、 U ：ひずみエネルギー比（ $=U_2/U_1$ ）である。図中の包絡線における点線は除荷しない場合であり、除荷・再載荷によって包絡線は、式（1）に従って実線のように低下する。この繰返し後の包絡線の低下により、内部曲線における応力が低下するのである。

以上に述べたモデルを用いることによって、図-1 に示す岡本の実験と同様のひずみ履歴を与えた場合の応力-ひずみ関係を図-4 に示す。図に示されるように、繰返しにより包絡線および内部曲線ともに低下しており、モデルは実験結果の傾向をうまく表している。

（2）鉄筋の応力-ひずみ関係のモデル化

繰返し荷重を受けるRC部材の耐力の低下の原因として、圧縮側鉄筋の座屈を考えた⁶⁾。繰返し荷重を受けるRC部材における圧縮側の鉄筋の座屈のメカニズムを説明する。RC部材が繰返し荷重を受ける時、すでに引張降伏している鉄筋は、繰返しにより拘束力の低下したかぶりコンクリートを押し出し、座屈に至る。つまり、繰返し載荷による座屈は、かぶりコンクリートの繰返しによる劣化と鉄筋の引張降伏履歴により発生し、一方向載荷では見られないメカニズムで座屈する。この鉄筋の座屈により、かぶりコンクリートのはく離およびコンクリートへの圧縮力の集中が生じ、コンクリートの繰返しによる抵抗応力の低下がRC部材全体の耐力に影響を与える。このことから、圧縮側鉄筋の座屈以後のRC部材の抵抗曲げモーメントおよび耐力の低下の仕方を評価する時、鉄筋の座屈および座屈以後の鉄筋の挙動をどの様にモデル化するかが重要となってくる。以下に座屈を取り入れた鉄筋のモデル化の方法を述べる。

繰返し荷重を受ける鉄筋の応力-ひずみ関係のモデルには、加藤モデル⁶⁾を用いる。本研究では、このモデルに座屈という現象を取り入れ、修正した。そのモデルを図-5 に示す。交番繰返し荷重を受けるRC部材では、ある限界に達することによって、かぶりコンクリートのはく離をとめない、圧縮力を受け持つ鉄筋が座屈する（A点）。座屈によって、鉄筋は圧縮力を負担しなくなる（A点→B点）。変形は進んでいるため、鉄筋の見かけのひずみは応力0で減少する（B点→C点）。座屈した鉄筋が再び応力つまり引張力を持ち始めるのは、C点で再載荷され、加藤モデルによる座屈点（A点）で除荷した時の残留ひずみ（D点）に達した時である。再び応力を持ち始めてからの応力-ひずみ曲線は、加藤モデルのA点で除荷した時の再載荷曲線に等しくなる。

また、一度座屈した鉄筋は、二度と圧縮力を受け持つことはない。なぜなら、最初の座屈により、か

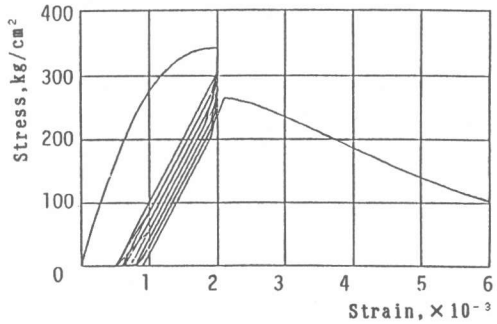


図-4 定ひずみ繰返しによるモデル

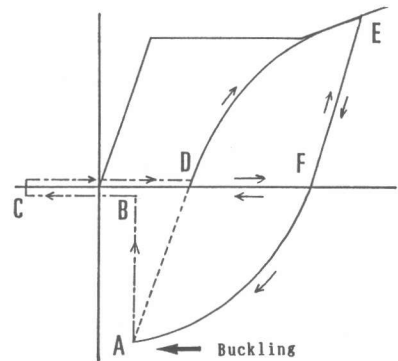


図-5 鉄筋の座屈後の応力-ひずみモデル

ぶりコンクリートがはく離しており鉄筋を拘束することができず、圧縮力を受け持つことができなくなるためである。つまり、図-5において、一度座屈した鉄筋は、E点より除荷されたとしても、F点以降、みかけ上のひずみは減少する（F点→D点→C点）が、受け持つ圧縮力は0であり、すべての圧縮力は、コンクリートが受け持つのである。座屈した鉄筋が再び引張力を持ち始める点は、除荷による残留ひずみ（F点）である。その後、引張力を持った鉄筋の応力-ひずみ曲線は、除荷開始点（E点）に向かう。

3. 繰返し荷重を受けるRC柱の抵抗曲げモーメント-曲率関係の解析

繰返し荷重を受けることによって破壊状態に至るRC柱の抵抗曲げモーメント-曲率関係における抵抗曲げモーメントの低下について解析する。今井・村上⁷⁾らは、繰返し荷重を受ける模型RC柱の躯体部分に多数の測点を設け、その測点間の距離を測定することによって、曲率を求めている。その実験結果を用い、上記の材料モデルを用いた解析の検証を行う。実験結果によると、供試体は曲げ破壊型であるため、圧縮側鉄筋の座屈を機に、抵抗曲げモーメントが1サイクル毎に低下している。今回の解析においては、この圧縮側鉄筋の座屈の時点は、実験結果から適当と思われる履歴曲線上に決定した。解析結果および実験結果を図-6に示す。図-7に鉄筋位置におけるコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。図-6に示すように圧縮側の鉄筋の座屈により、抵抗曲げモーメントは低下する（A点→B点）。同時に、鉄筋の受け持つ圧縮力が0となりコンクリートの圧縮力の負担分が増加し、ひずみは激増する（図-7：①→②）。また、鉄筋の座屈によって、かぶりコンクリートははく離するため、座屈後におけるかぶりコンクリートの受け持つ圧縮力は0である。座屈後、繰返し载荷により再び同一方向に载荷される時、コンクリートは、繰返しの影響を受けて、抵抗応力が低下する（図-7：②→③）。以上のメカニズムにより、抵抗曲げモーメントは、コンクリートの繰返し载荷による抵抗応力の低下により低下する（B点→C点）。この低下は、実験結果の傾向をうまく表している。

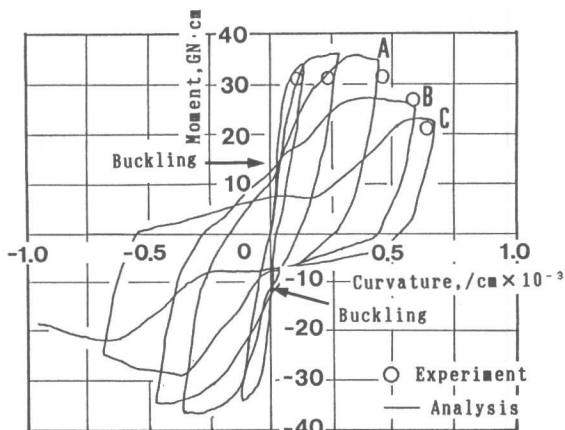


図-6 抵抗曲げモーメント-曲率関係の
実験結果および解析結果

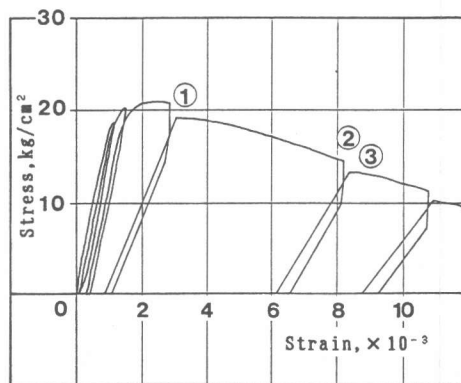


図-7 鉄筋位置におけるコンクリートの
応力-ひずみ関係

4. RC橋脚における荷重-変位関係への応用

土木構造物であるRC橋脚において、抵抗曲げモーメント-曲率関係を発展させ、天端におけ

る荷重-変位関係について解析的に求め、検証をおこなう。解析値の検証をおこなうために、1/5の模型RC橋脚を作製し、載荷実験を行った。実験供試体は、 a/d が4.1、耐力比1.32の曲げ破壊型のRC橋脚である⁸⁾。実験により得られた荷重-変位履歴曲線を図-8に示す。荷重-変位関係の実験結果が示すように、5 δ_y で耐力が低下している。ここで、5 δ_y に向かう時、圧縮力を受け持つ圧縮側の鉄筋が座屈するとともに荷重が低下することを、座屈点を明確にするとともに、物理的に確認した。鉄筋の座屈後、図が示すように、繰返し荷重を受ける度に、荷重が低下しているのがわかる。つまり、破壊形式として、圧縮側鉄筋の座屈をきっかけに、座屈後、載荷を繰返す度に耐力が低下するといえる。以下に、解析方法および解析結果を述べる。

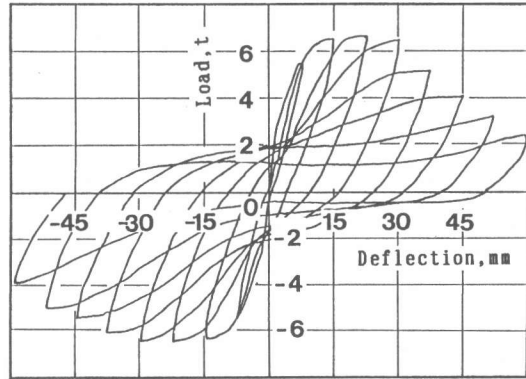


図-8 模型RC橋脚の実験によるP- δ 関係

もに、物理的に確認した。鉄筋の座屈後、図が示すように、繰返し荷重を受ける度に、荷重が低下しているのがわかる。つまり、破壊形式として、圧縮側鉄筋の座屈をきっかけに、座屈後、載荷を繰返す度に耐力が低下するといえる。以下に、解析方法および解析結果を述べる。

(1) 曲げモーメント-曲率関係のモデル化(M- ϕ モデル)

3. では、主鉄筋の座屈をともない、曲げモーメントを表す抵抗曲げモーメント-曲率関係を求めた。ここで、この曲げモーメント-曲率曲線のモデル化をおこなう。このモデルは、RC橋脚における天端変形を求める時、容易であることが必要である。本研究では、この抵抗曲げモーメント-曲率関係を表すモデルとして、Clough Modelを修正することにより、抵抗曲げモーメントの低下を表すM- ϕ モデルを構築した。抵抗曲げモーメント-曲率関係の解析結果とそれを表すM- ϕ モデルを図-9に示す。M- ϕ モデルは、解析結果を表現できている。

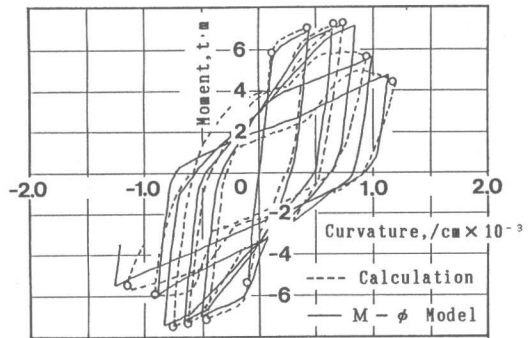


図-9 解析結果とM- ϕ モデル

(2) 解析方法

天端変位の計算方法として、供試体は曲げ破壊型であることから、作用している曲げモーメントは、躯体軸方向に三角形分布しているものと仮定する。その時の軸方向の各断面における曲率を2重積分することにより天端変位を求める。ここで各断面における曲率は、(1)でモデル化をおこなったM- ϕ モデルを用いて求める。さらに、新たな仮定として、次のことを考慮する。図-9のM- ϕ モデルは、座屈を考慮したモデルであるから、鉄筋が座屈する範囲内の断面のM- ϕ モデルである。鉄筋が座屈しな

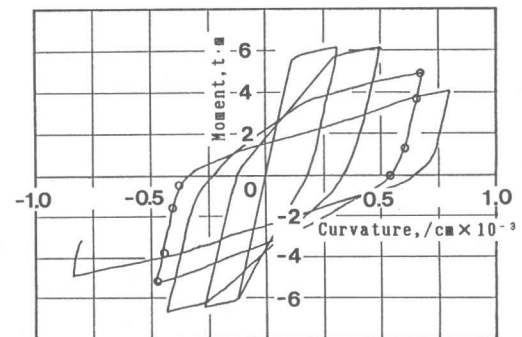


図-10 座屈範囲内のM- ϕ モデル

い断面のM- ϕ モデルは、鉄筋の座屈を取り入れない修正Clough Modelを用いる。図-10および図-11は、座屈範囲内での軸方向における最上端および座屈範囲外の最下端のClough Modelを修正したM- ϕ モデルを示したものである。丸印は、モーメントの低下時の同じ時点のMと ϕ の値である。主鉄筋座屈後、モーメントの低下により座屈範囲外では曲率は減少するが、座屈範囲内では、モーメントが低下するにもかかわらず、曲率が激増する。これは、天端変位において、座屈範囲外の変形の占める割合が減少するに対して、座屈範囲内の変形が増加することを示す。この2種類のM- ϕ モデルを用いることによって、軸方向の各断面における曲率を計算し、二重積分することにより天端変形を求める。

(3) 解析結果および考察

以上のM- ϕ モデルを用い、解析により得られた荷重-変位曲線および実験結果を図-12に示す。ただし、図における実験結果は、各サイクルのピークの値である。解析結果は、耐力の低下の傾向をうまくとらえているが、変形に関しては、必ずしも実験結果に一致しているとは言えない。この原因として、次のことが考えられる。本研究では、フーチングからの主鉄筋の引抜きの影響を差し引いた躯体部の変形量について検討した。この時、とくに主鉄筋の座屈以後の終局時において、ワイヤーによる引抜け量の測定値については問題があり、躯体部の変形量の算出に影響を与えたと考えられる。ゆえに、荷重制御により求めた解析結果が、一概に不適当とはいえない。

5. 結論

鉄筋の座屈およびコンクリートの繰返し荷重による抵抗応力の低下を考慮することによって、RC橋脚の終局時における耐力の低下と変形との関係を解析的に求めることができる。

【参考文献】1)たとえば、町田・睦好・豊田：土木学会論文集, No.378/V-6, 1987年2月。2)檜貝・二羽・岡村：コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, 1987。3)岡本・柳下：昭和46年度建築研究所年報, pp.314-323。4)前川・岡村：コンクリート工学, Vol.21, No.5, 1983年5月。5)谷川・小坂：昭和54年度セメント技術年報, No.33。6)Kato:CEB symposium, Rome, May 1979。7)村上・今井：コンクリート工学, Vol.24, No.5, 1987年5月。8)島・北西・伊藤・ルンロサーラティス：平成元年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集。

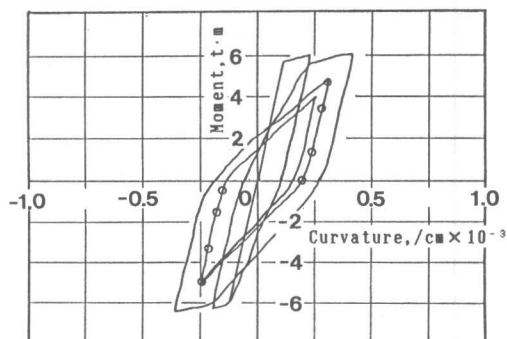


図-11 座屈範囲外のM- ϕ モデル

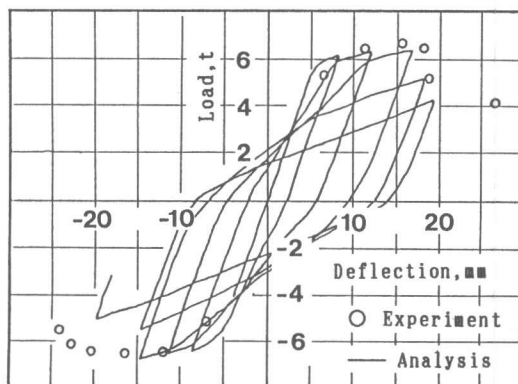


図-12 引抜け量を差し引いたP- δ 関係の実験結果および解析結果