

繰り返し载荷を受ける鉄筋コンクリート柱の RBSM 解析

Rigid-body-spring model of reinforced concrete columns under cyclic loading

斉藤成彦*, 札立重好**, 中村光***, 檜貝勇****

Shigehiko Saito, Shigeyoshi Fudatate, Hikaru Nakamura and Takeshi Higai

*博 (工), 山梨大学助手, 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 甲府市武田 4-3-11)

**山梨大学大学院, 工学研究科土木環境工学専攻 (同上)

***工博, 山梨大学助教授, 工学部土木環境工学科 (同上)

****工博, 山梨大学教授, 工学部土木環境工学科 (同上)

Numerical analyses of reinforced concrete structures under cyclic loading are presented. A rigid-body-spring model (RBSM) is used to represent concrete material as an assemblage of rigid particles interconnected along their boundaries through flexible interfaces. The material is discretized into a large number of random particles using Voronoi diagrams in order to reduce mesh bias on the fracture conditions. Rather than averaging the effect of reinforcing over a regional material volume, reinforcing material is explicitly modeled. Discrete approaches greatly help comprehensively understand failure mechanisms of reinforced concrete columns under cyclic loading. The model performance is verified by predicting deterioration of loading capacity due to shear failure after yielding of main reinforcing steel.

Key Words: RBSM, reinforced concrete columns, cyclic loading

キーワード: 剛体-バネモデル, 鉄筋コンクリート柱, 繰り返し载荷

1. はじめに

兵庫県南部地震以降, 鉄筋コンクリート (以下, RC) 構造物の設計において耐力力特性や変形性能の詳細な検討が要求されるようになり, RC 構造物の耐力劣化性状の精度良い評価方法の確立が重要な課題となっている。また, 仕様規定型設計から性能規定型設計への移行に伴い, RC 構造物を合理的かつ経済的に設計するためには, 要求耐震性能を正当に判定するシステムの確立が必要である。このような状況から, 耐震性能評価手法として数値解析技術に対する期待が高まっている。

RC 構造物の耐震設計では, 震災以後に動的解析の使用が基本とされており^{1), 2)}, 実務耐震設計では, モーメント-曲率関係により部材の復元力特性を仮定する簡便な多質点系骨組み解析や, 各構成材料の特性を考慮したファイバーモデルによる非線形動的解析が, RC 構造物の曲げ性状の予測に有効である³⁾。しかしながら, フレーム要素に基づくこれらの解析手法では, せん断挙動や破壊性状の詳細な予測が難しく, 繰り返し载荷を受ける RC 構造物のせん断破壊型耐力劣化特性や損傷度を把握することは困難である。

平面応力要素による2次元非線形有限要素法を用いて RC 構造物の動的解析も行われているが, 解析モデルが煩雑であり多大な計算時間を要することからまだ適用例は少ない^{4), 5)}。しかし, 静的な繰り返し载荷を受ける RC 構造物の解析に関する研究は多く, RC 構造物の破壊性状や被害要因の詳細な検討に対して, 静的非線形解析は十分に有用である。

Kawai⁶⁾により提案された剛体-バネモデル (RBSM: Rigid-Body-Spring Model) は, 塑性変形や破壊の本質はすべりにあるとして開発されたモデルで, 要素自身を剛体と仮定し, 要素境界面上に体積変化とせん断変形に抵抗するバネを設け, 要素内の仕事の代わりに要素境界面上に集中化された表面力の仕事を用いてエネルギーを評価する方法である。したがって, 分布ひびわれモデルを用いた有限要素法と比べ, ひびわれのような材料の不連続現象の取扱いが比較的容易であるという利点がある。剛体-バネモデルを静的な繰り返し曲げを受ける RC 部材の解析に適用した研究が報告されているが⁷⁾, コンクリートを三角形要素を用いて分割しているため, ひびわれの発生・進展が要素分割に依存することから破壊挙動の十分な考察がなされているとは言い難い。

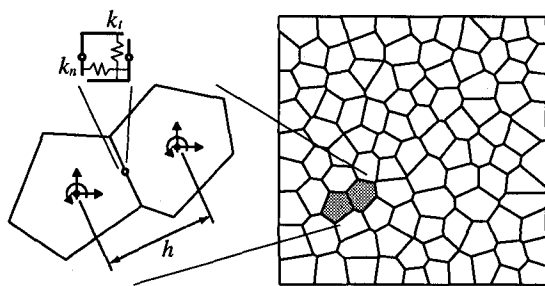


図-1 剛体-バネモデル

本研究では、著者ら⁸⁾が開発した離散型鉄筋モデルを導入した剛体-バネモデルを用いて、静的繰返し載荷を受ける RC 柱の解析を行い、その耐力劣化特性や破壊性状の考察を行った。鉄筋モデルがコンクリートの要素分割に依存しないため、ランダムな要素分割を適用して破壊の要素分割依存性を低減し、破壊性状の詳細な予測を試みた。Priestley ら⁹⁾が行った繰返し載荷を受ける RC 柱の実験を解析対象に選び、解析手法の適用性を検証した。また、実験供試体はせん断破壊や曲げ降伏後せん断破壊を起こしており、耐力劣化特性の違いを数値解析結果より考察した。

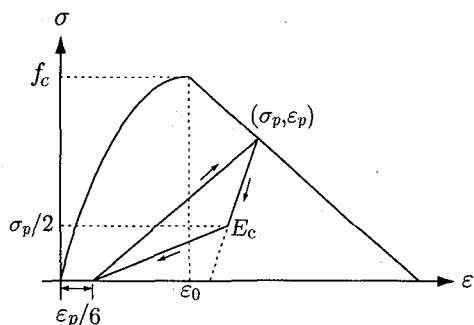
2. コンクリートのモデル化

2.1 剛体-バネモデルによるコンクリートの離散化

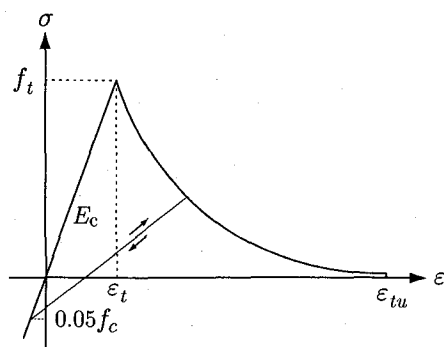
Kawai⁶⁾によって提案された剛体-バネモデルをコンクリート材料の離散化に適用した。剛体-バネモデルは、対象物を有限個の要素に分割し、要素自体は剛体と仮定し、各要素をその境界面上に連続して分布しているバネによって連結させ、バネの変形によって内力の伝達が行われると仮定したものである。

図-1のように、コンクリート要素を剛体と仮定し、要素の境界面に分布する垂直バネ (k_n) およびせん断バネ (k_t) からなるバネ系を設ける。各要素の任意点 (例えば重心点) に 2 次元剛体変位の 3 自由度 (u , v , θ) を配置し、表面力に関する評価点としての積分点を要素境界面上の中点にとる。要素境界面上に分布するそれぞれのバネに、対象とする材料の特性を導入し、このバネに蓄えられるエネルギーを評価することによって要素境界面上の力を求める。このため、要素間のすべりやひびわれなどの不連続現象を比較的簡単に表現できる。要素剛性マトリックスの定式化等は、文献⁶⁾に詳しい。

本解析手法におけるコンクリートのひびわれは、要素境界面に沿って発生するため、ひびわれの発生・進展がコンクリートの要素分割に大きく依存する。三角形や四辺形要素を用いて分割を行った場合、ひびわれ進展経路に大きな制約を加えることになるため、解析前に予めひびわれを想定して分割を行う必要があり不便である。そこで、剛体-バネモデルでは任意形状の要素を使用できるという利点を活かし、計算幾何学の概念である Voronoi



a) 圧縮応力下のモデル



b) 引張応力下のモデル

図-2 コンクリートの材料モデル

多角形分割を用いてコンクリートをランダムな要素に分割し、ひびわれの要素分割依存性を低減した (図-1)。供試体形状を与えれば、Voronoi 多角形分割はコンピュータが自動的に行うため、要素分割の手間は軽減される。

2.2 繰返し応力下のコンクリートの材料モデル

剛体-バネモデルでは、要素境界面に分布するバネに材料の 1 軸特性を直接導入するため、連続体力学に基づく有限要素法に比べて材料のモデル化が容易である。コンクリートの材料特性は、要素境界面上の垂直バネおよびせん断バネに、それぞれ引張-圧縮挙動、せん断すべり挙動を以下のようにモデル化することで表現した。

図-2a に示すように、圧縮応力下のコンクリートの特性は、垂直応力が圧縮強度 f_c に達するまで放物線で仮定し¹⁰⁾、その後は圧縮終局ひずみ ϵ_{cu} に達するまで線形で軟化するように、次式で設定した。

$$\sigma = \begin{cases} f_c \left\{ \frac{2\epsilon}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 \right\} & (0 \leq \epsilon \leq \epsilon_0) \\ f_c \frac{(\epsilon_{cu} - \epsilon)}{(\epsilon_{cu} - \epsilon_0)} & (\epsilon_0 < \epsilon \leq \epsilon_{cu}) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $\epsilon_0 = 2f_c/E_c$ 、 E_c はコンクリートの弾性係数である。 ϵ_{cu} は、要素寸法に依らず一定の破壊エネルギーを消費するように次式で仮定した。

$$\epsilon_{cu} = \frac{2G_{fc} + \epsilon_0}{f_c h} \quad (2)$$

ここで、 h は隣接する 2 要素の自由度設定点間の距離で

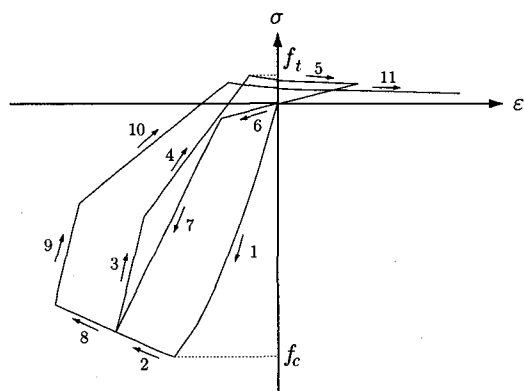
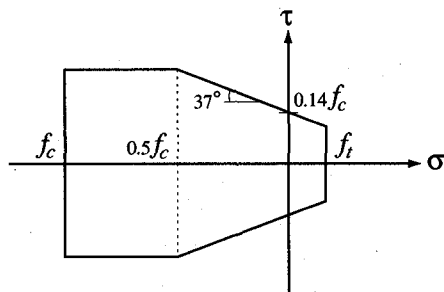
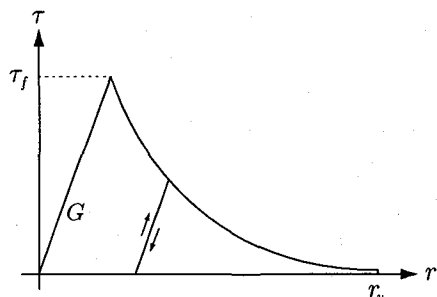


図-3 繰返し応力下のコンクリートモデル



a) モール・クーロン型破壊曲面



b) せん断軟化モデル

図-4 コンクリートのせん断伝達モデル

ある(図-1)。 G_{fc} (MPa mm) は圧縮破壊エネルギーで、次式より求めた¹¹⁾。

$$G_{fc} = 8.8\sqrt{f_c} \quad (3)$$

圧縮応力下の除荷・再負荷経路は図-2aに示すように、応力が除荷開始時(σ_p, ϵ_p)における応力の半分($\sigma_p/2$)になるまで初期剛性 E_c に従い、その後は $\epsilon_p/6$ に向かって除荷されるものとし、再負荷は除荷開始点に向かうものと仮定した⁷⁾。

引張特性は、垂直応力が引張強度 f_t に達するまで線形と仮定し、その後は引張軟化挙動を考慮した(図-2b)。引張軟化曲線は、指数曲線を用いて次式で仮定した⁸⁾。

$$\sigma = f_t \exp\left[-\frac{5}{\epsilon_m}(\epsilon - \epsilon_t)\right] \quad (4)$$

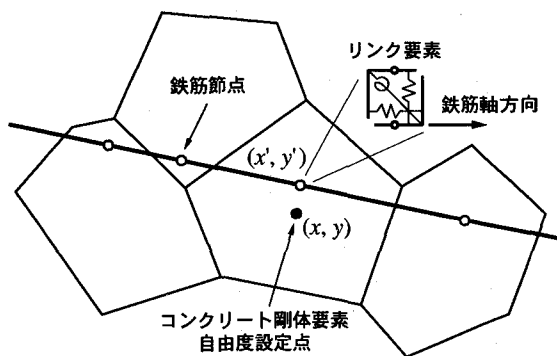


図-5 離散鉄筋モデル

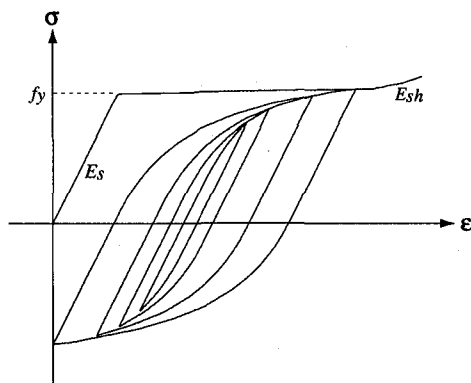


図-6 繰返し応力下の鉄筋モデル¹⁴⁾

ここで、引張終局ひずみ ϵ_m は、要素寸法によらず一定の引張破壊エネルギー G_f が消費されるように次式で近似した。

$$\epsilon_m \approx 5 \left(\frac{G_f}{f_t h} - \frac{f_t}{2E_s} \right) \quad (5)$$

引張破壊エネルギーは、CEB のモデルコード¹²⁾に従って算出した。除荷・再負荷経路は図-2bに示すように、圧縮側の負荷経路における圧縮強度の20分の1($0.05f_c$)の点に向かって除荷されるものとし、再負荷は除荷開始点に向かうものと仮定した。上記の圧縮・引張応力下の材料モデルを結合すれば、繰返し応力下の履歴は図-3のようになる。

せん断バネに対しては、コンクリートのせん断伝達機構のモデル化を行った。図-4aに示すようなモール・クーロン型の降伏条件を用いて、降伏後は塑性流れ則に従い、終局せん断ひずみに達するまで降伏曲面上を移動するものとした¹³⁾。ただし、ひびわれ面においては、図-4bで示されるせん断軟化モデルを導入した⁸⁾。除荷・再負荷は、初期せん断剛性(G)に従うものと仮定した。

3. 鉄筋モデル

Ueda ら¹³⁾の剛体-バネモデルによる RC 構造物の

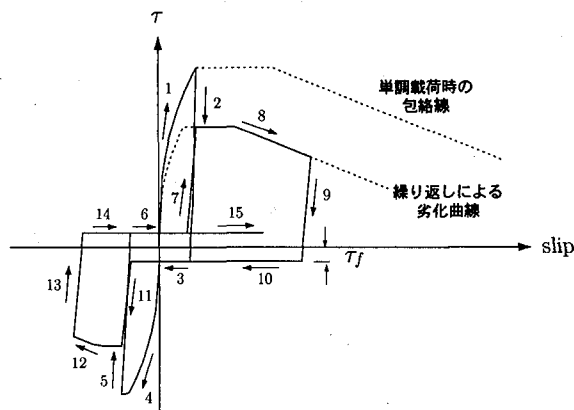


図-7 繰り返し応力下の付着-すべりモデル¹⁵⁾

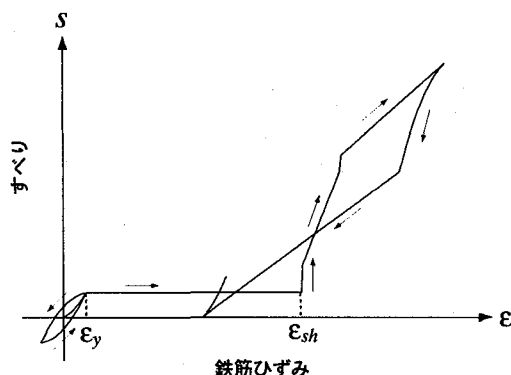


図-8 鉄筋の抜け出しモデル¹⁶⁾

解析では、鉄筋を等価な直交異方性板に置き換えた RC 剛体要素を用いている。そこでは、一層のコンクリート要素と数層の鉄筋異方性要素の重ね合わせを行って一つの RC 要素を表現し、ひびわれ後の付着効果は、コンクリートにテンション・スティフニング効果を持たせることにより表現している。この他に、剛体-バネモデルにおいて鉄筋を扱う場合に鉄筋を棒要素として離散化する方法もあるが、いずれの場合もコンクリートの要素分割が鉄筋の配置に大きく影響を受けるため、前節で述べた Voronoi 多角形を用いたランダムな要素分割を用いることは困難である。そこで、著者ら⁸⁾によって開発されたコンクリートの要素分割に依存しない新たな離散鉄筋要素を用いて鉄筋のモデル化を行った。本鉄筋モデルは、コンクリート剛体要素内の任意の位置に配置することができるため、コンクリートの要素分割に依存せず、Voronoi 分割を利用した任意多角形からなるランダムな要素分割に対しても適用することができる。

それぞれの鉄筋は、一連の梁要素によって構成され、梁要素の節点においてリンク要素を介してコンクリート剛体要素に接合される(図-5)。コンクリート剛体要素上の任意点 (x', y') の変位 (u', v', θ') は、微小回転を仮定すると剛体要素の自由度設定点 (x, y) の変位 (u, v, θ) を用いて以下の式より求めることができる。

$$\begin{aligned} u' &= u - (y' - y)\theta \\ v' &= v + (x' - x)\theta \end{aligned} \quad (6)$$

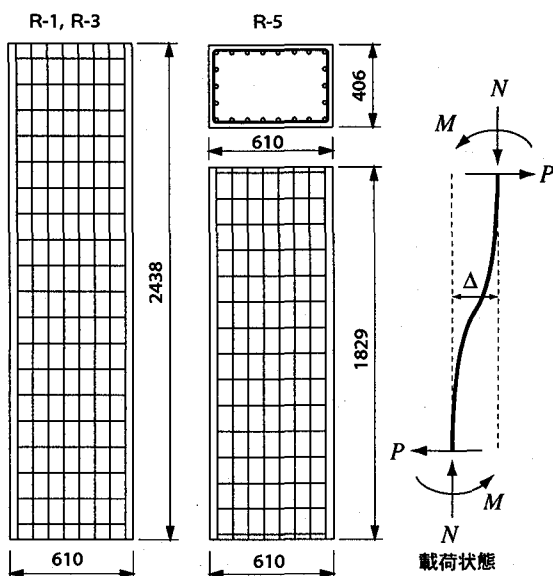


図-9 実験供試体概要 (mm)

表-1 材料諸元

	アスペクト比	軸力 (MPa)	f_c (MPa)	f_y (MPa)
R-1	2	2	37.9	317
R-3	2	2	34.1	469
R-5	1.5	2	32.7	469

したがって、点 (x', y') を鉄筋節点の座標とすれば、コンクリート剛体要素と鉄筋梁要素の節点との相対変位 $\mathbf{d}^T = [\delta, \delta_n, \phi]$ は、コンクリート剛体要素および鉄筋節点の変位 $\mathbf{u}^T = [u, v, \theta, u_r, v_r, \theta_r]$ より次式で表される。

$$\mathbf{d} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (7)$$

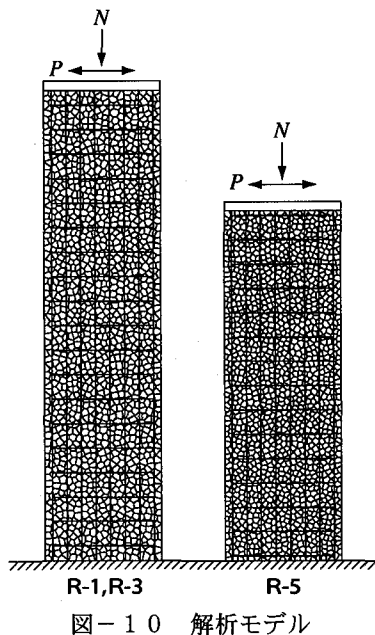
ここで、

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & (y' - y) & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -(x' - x) & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

この相対変位 $\mathbf{d}$ をリンク要素のバネの変位とすれば、鉄筋要素はリンク要素を介してコンクリート剛体要素に結合することが可能である。モデル化の詳細は、文献⁸⁾を参照されたい。

繰り返し応力下の鉄筋の材料モデルには、図-6のような福浦と前川¹⁴⁾によって提案された応力-ひずみ関係を用いた。このモデルは、鉄筋をバネと塑性スライダーを有する微少要素の集合体として扱い、微少要素ごとの塑性挙動に不均一な強度分布を与えることによりバウジンガー効果を表現するもので、数値解析モデルへの適用が容易であるという利点を有する。図中の f_y は降伏強度、 E_s はヤング率、 E_{sh} は降伏後の硬化剛性で、 $E_{sh} = E_s/50$ とした。

鉄筋要素とコンクリート要素を結合するリンク要素は、鉄筋軸方向、垂直方向、回転方向のバネによって構成され、鉄筋軸方向のバネを適切にモデル化することによって、鉄筋とコンクリート間の付着すべりを表現すること



ができる。鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係には、図-7で表される CEB のモデルコード¹²⁾を用い、図中のパラメータは、拘束・付着条件の良いコンクリートに関するものを用いた。繰り返し応力下の付着応力-すべり関係は、Ciampi ら¹⁵⁾によって提案されたモデルを用いた。垂直方向、回転方向のバネには無限大の剛性を与え、鉄筋とコンクリート間に相対ずれは起こらないものとした。

本解析では、実験供試体のフーチング部をモデル化せず柱部分のみで解析を行う。そのため、フーチングからの鉄筋の抜け出しは、図-8で示される三島ら¹⁶⁾によって提案された鉄筋ひずみ-すべりモデルを用いて考慮した。このモデルは、抜け出しを考えるひびわれ面での鉄筋ひずみから抜け出し量(すべり)を予測するもので、繰り返し载荷に対しても適用できるものとなっている。

4. 解析結果

4.1 実験概要

本論では、Priestley ら⁹⁾によって報告されている静的な繰り返し载荷を受ける RC 柱の実験を解析対象に選び、解析手法の適用性を検証するとともに、RC 柱の耐力劣化性状や破壊挙動について考察を行った。図-9に実験供試体概要と载荷状態を示す。実験に用いられた材料の諸元を表-1に示す。実験では、軸方向主鉄筋の降伏強度と柱のアスペクト比をパラメータとして、一定軸力(2MPa)のもと正負繰り返し载荷を行い、RC 柱のせん断破壊挙動を検討している。R-1 は曲げ破壊型の耐力性状を示すように設計されたものであり、R-3 は R-1 と供試体形状は同様であるが降伏強度の高い軸方向鉄筋を用いて、せん断型の破壊を示すように期待したものである。R-5 は R-1、R-3 と同断面を有するが、

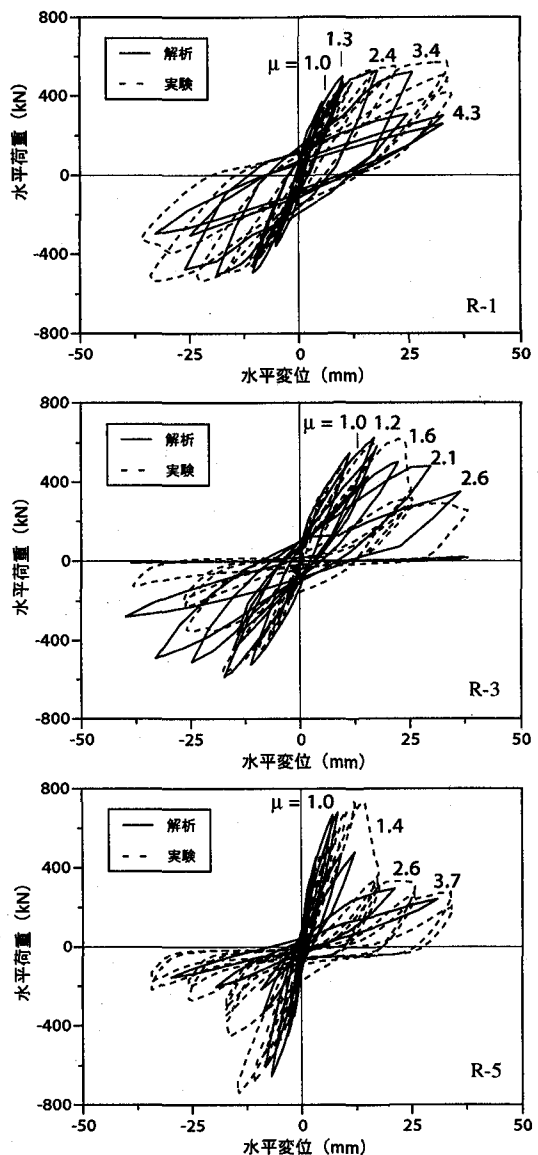


図-11 水平荷重-水平変位関係

アスペクト比を小さくし、降伏強度の高い軸方向鉄筋を用いることで、よりせん断破壊型の耐力性状を示すようにしたものである。

4.2 解析モデル

図-10に解析に用いた要素分割と境界条件を示す。コンクリートは Voronoi 多角形を用いて 1500 剛体要素に分割し、実験供試体の配筋通りに全ての鉄筋をはり要素でモデル化した。解析に用いた材料定数は表-1の通りであるが、実験で与えられていないコンクリートのヤング率および引張強度は、コンクリート標準示方書¹⁾により算定した。

4.3 荷重-変位関係

図-11に、各供試体の柱天端における水平荷重-水平変位 ($P-\Delta$) 関係を示す。図中の解析結果には、靱性に関する指標 (μ) として、各サイクルにおけるピ

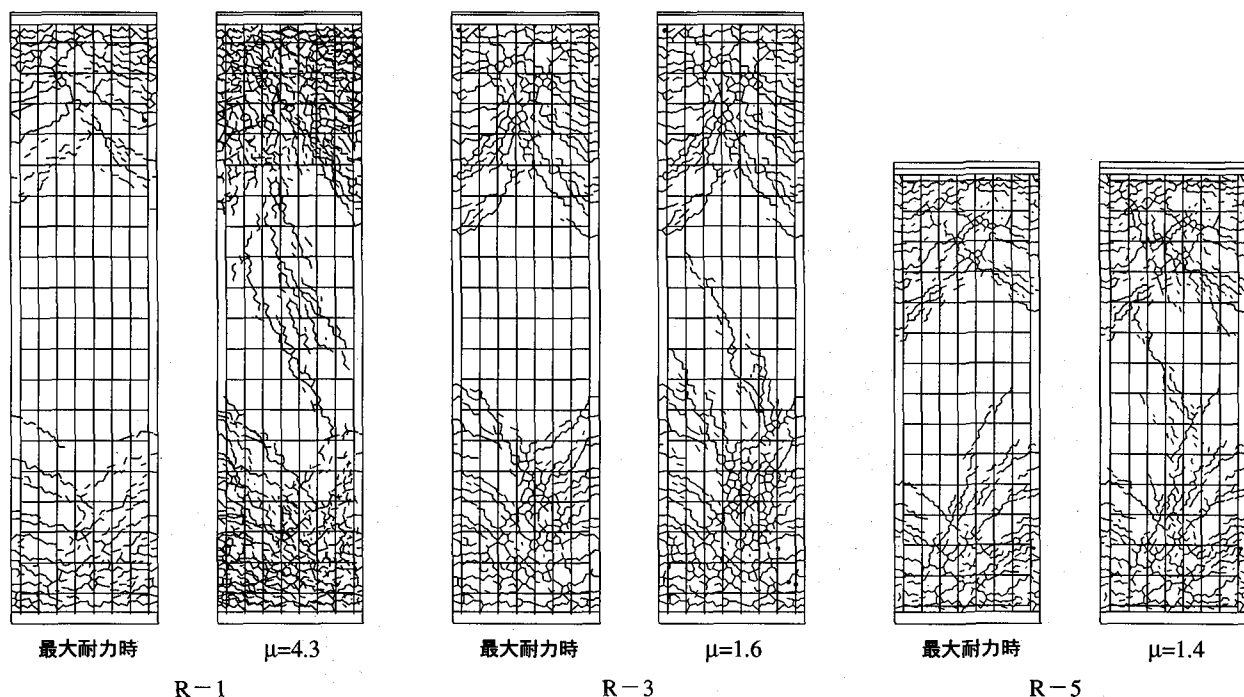


図-12 ひびわれ状況

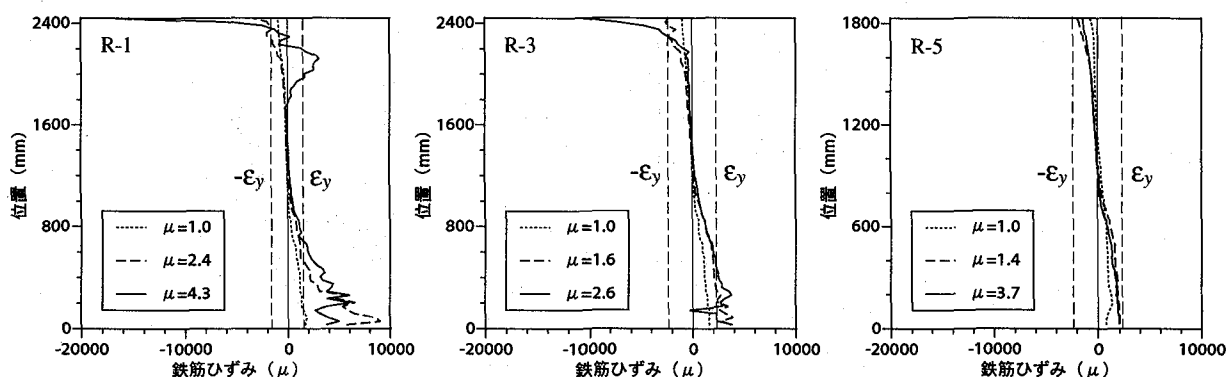


図-13 軸方向主鉄筋ひずみ分布

ーク荷重時の変位 Δ と軸方向主鉄筋の降伏時変位 Δ_y の比 ($\mu = \Delta / \Delta_y$) を付記してある。全ての供試体に対して、解析で予測された変位は実験結果に比べてやや小さい値を示しているが、最大耐力は実験結果とよく対応している。

R-1 の解析結果では、軸方向主鉄筋が降伏した後 $\mu = 2.4$ で最大耐力を示し、しばらく安定して繰り返し荷重を受けるが、 $\mu = 3.4$ を超えると急激に耐力を失っている。同様の傾向が実験においても確認でき、R-1 の破壊が曲げ破壊型からせん断破壊型へ移行したものと考えられる。

軸方向主鉄筋の降伏強度を高くした R-3 の解析結果では、最大耐力後すぐに急激な耐力低下を示しており、曲げ降伏後ただちにせん断破壊したものと考えられる。実験でも同様の傾向を示している。

供試体のアスペクト比を小さくした R-5 では、軸方向主鉄筋の降伏とほぼ同時に急激な耐力低下が実験で観察されている。解析では、軸方向主鉄筋は降伏してお

ず、降伏ひずみに達する直前に急激に耐力が低下しており、せん断破壊型の耐荷力劣化性状を示した。軸方向鉄筋が降伏しなかったため、図中の μ は便宜的に最大耐力時の変位を Δ_y として算定した。解析結果と実験結果は同様の傾向を示しているが、実験で観察されるせん断破壊後のピンチング挙動を解析では表現することができなかった。原因として、解析におけるコンクリートの材料モデルや鉄筋とコンクリート間の付着モデルの影響等が考えられ、更なる検討が必要である。

本解析手法では、曲げ破壊型とせん断破壊型の耐荷特性を表現できることが確認され、繰り返し載荷による曲げ破壊型からせん断破壊型への移行をよく再現することができた。

4.4 ひびわれ状況

図-12に、解析で得られた最大耐力時と最大耐力後のひびわれ状況を示す。R-1 は、最大耐力時では供試体底部と上部で曲げひびわれが多数発生しており、破壊

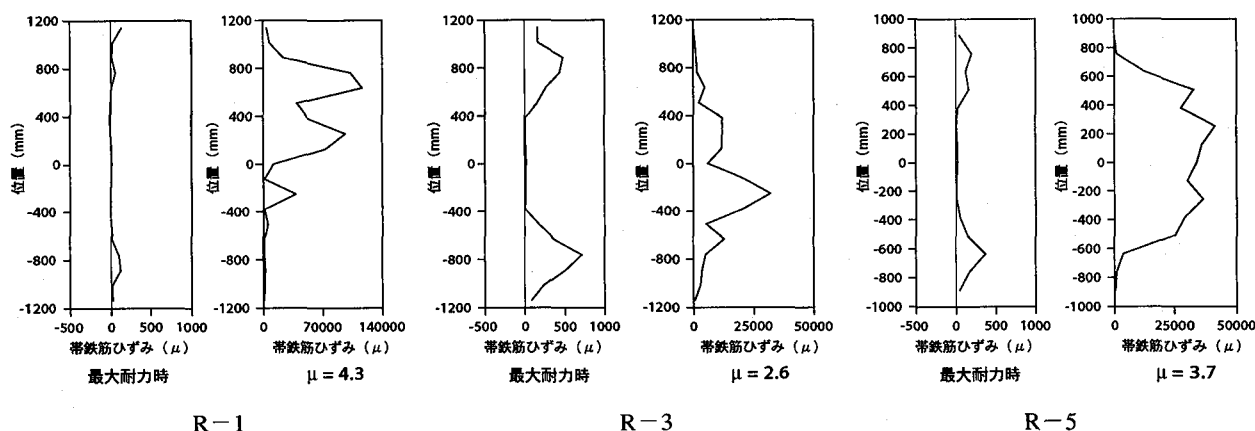


図-14 帯鉄筋ひずみ分布

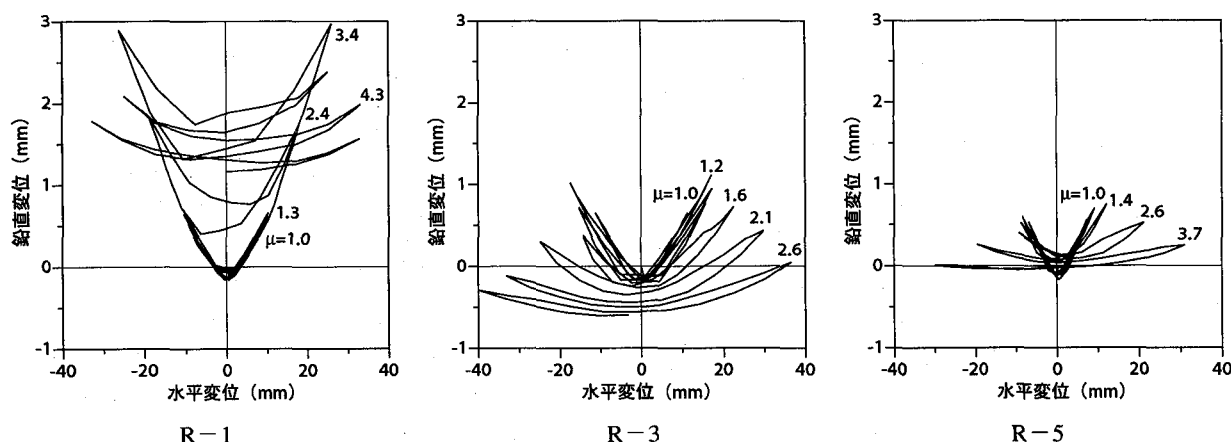


図-15 水平変位-鉛直変位関係

が供試体端部に集中しているのが分かる。載荷が進むと曲げひびわれが斜めひびわれとなって進展し、やがて大きな斜めひびわれが発達して急激に耐力を失っている。ひびわれ状況からも、曲げ破壊型からせん断破壊型へ移行していく様子が確認できる。

軸方向主鉄筋の降伏強度が高い R-3 では、最大耐力時は供試体底部と上部で曲げひびわれが多数発生しており、R-1 と同様に中央部近くまで進展し、斜めひびわれへと発達している。最大耐力後では、供試体中央部を通過する大きな斜めひびわれが形成されたため、急激に耐力を失ったことが確認できる。

供試体のアスペクト比が小さい R-5 では、R-3 と同様に最大耐力時に斜めひびわれが発達しており、最大耐力後に大きな斜めひびわれの形成によって急激な耐力低下を示したことが確認できる。解析結果は、実験で観察されたひびわれ性状⁹⁾を良く表現できている。

本解析手法によって得られるひびわれパターンは、分布ひびわれモデルを用いた有限要素法に比べてより実際のひびわれ状況に近く、破壊挙動の詳細な検討に有用であると考えられる。

4.5 軸方向主鉄筋のひずみ分布

図-13に、解析で得られた軸方向主鉄筋の柱軸方向

ひずみ分布を示す。R-1 のひずみ分布によれば、供試体底部と上部のひずみが降伏ひずみを大きく超えており、曲げによる破壊が供試体端部に集中しているのが分かる。

R-3 でも、供試体底部と上部のひずみが降伏強度を超えており、鉄筋降伏後すぐにせん断破壊型に移行したため、R-1 ほどひずみは大きくない。

R-5 では、主鉄筋のひずみは降伏ひずみに達しておらず、顕著なせん断破壊を示したことが確認できる。

4.6 帯鉄筋のひずみ分布

図-14に、解析で得られた帯鉄筋の軸方向ひずみ分布を示す。帯鉄筋のひずみは、最大耐力時と最終サイクル時における柱断面中央位置のものをういた。各供試体とも最大耐力時のひずみは小さいが、最終サイクル時には、斜めひびわれの発達によってかなり大きなひずみを示している。最大耐力以後もしばらく曲げ型耐力性状を示した R-1 でも、せん断破壊型に移行したことにより急激に耐力を失ったため、最終サイクルの帯鉄筋のひずみはかなり大きいことが確認された。

4.7 水平変位-鉛直変位関係

解析で得られた柱天端における水平変位-鉛直変位関係を図-15に示す。R-1 の結果より、最大耐力以降

$\mu=3.4$ まで鉛直変位は増加しており、曲げ変形による柱の伸び上がりが確認できる。 $\mu=3.4$ を超えるとせん断型の挙動に移行するため、鉛直変位が小さくなっており、柱がせん断変形によって潰れていく様子がうかがえる。R-3 および R-5 では、最大耐力までは曲げ変形による鉛直変位の増加が見られるが、すぐにせん断破壊によって鉛直変位が小さくなっている。これらの結果より、曲げ型の挙動とせん断型の挙動で、柱の鉛直方向の変形が異なることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、離散型鉄筋モデルを導入した剛体-バネモデルを用いて、静的繰り返し载荷を受ける RC 柱の解析を行い、解析手法の適用性を検証するとともに、耐力劣化特性や破壊性状の考察を行った。本研究で得られた知見をまとめれば、以下の通りである。

- (1) 剛体-バネモデルによる解析結果は実験結果と比較的良好に対応しており、実験で観察された繰り返し载荷による RC 柱の耐力劣化性状を表現することができた。
- (2) 本解析手法により、曲げ破壊型からせん断破壊型への破壊形態の移行が再現でき、せん断破壊による急激な耐力低下特性も確認することができた。しかしながら、実験で見られたせん断破壊におけるピンチング挙動は、本解析によっては表現できず、解析モデルの更なる検討が必要である。
- (3) 離散型の本解析手法で得られたひびわれ性状は、分布ひびわれモデルによる有限要素法で得られるものに比べて、より実際のひびわれ挙動に近く、破壊挙動の詳細な検討に本解析手法は有用であると考えられる。
- (4) 水平変位-鉛直変位関係の解析結果から、鉛直変位の履歴特性が繰り返し载荷を受ける RC 柱の耐力劣化性状や変形性能と大きく関係していることが確認された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編，設計編，1996.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 耐震設計編，1996.
- 3) 土木学会：阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証，コンクリート技術シリーズ，No.36，2000.
- 4) An, X. and Maekawa, K : Failure analysis of underground RC frame subjected to seismic actions, J. of Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.571/V-36, pp.251-267, 1997.
- 5) 水野要，中村光，檜貝勇：兵庫県南部地震で被災した一壁式橋脚の被害分析，コンクリート工学年次論文報告集，日本コンクリート工学協会，Vol.22, pp.1399-1404, 2000.
- 6) Kawai, T. : New discrete models and their application to seismic response analysis of structure, Nuclear Engrg. and Design, Vol.48, pp.207-229, 1978.
- 7) 富田充宏，梶川康男，吉田直司：軸力と繰り返し曲げを受ける RC 部材の RBSM による挙動解析，構造工学論文集，土木学会，Vol.43A, pp.347-354, 1997.
- 8) Saito, S. and Hikosaka, H. : Numerical analyses of reinforced concrete structures using spring network models, J. of Materials, Conc. Struct., Pavements, JSCE, V-44, pp.289-303, 1999.
- 9) Xiao, Y., Priestley, M. J. N. and Seible, F : Steel jacket retrofit for enhancing shear strength of short rectangular reinforced concrete columns., Structural System Research Project, Report No. SSRP-92/07, University of California, San Diego, 1993.
- 10) Owen, D. R. J., Figueiras, J. A. and Damjanic, F. : Finite element analysis of reinforced and prestressed concrete structures including thermal loading, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier Science Publishers, Vol.41, pp.323-366, 1983.
- 11) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI, pp.259-272, 1999.
- 12) Comité Euro-International du Béton : CEB-FIP Model Code 1990 First Draft, CEB, 1990.
- 13) Ueda, M., Takeuchi, N., Higuchi, H. and Kawai, T. : A discrete limit analysis of reinforced concrete structures, Computer-Aided Analysis and Design of Concrete Structures, Pineridge Press, pp.1369-1384, 1984.
- 14) 福浦尚之，前川宏一：RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰り返し履歴モデル，土木学会論文集，No.564/V-35, pp.291-295, 1997.
- 15) Ciampi, V., Elgehausen, R., Bertero, V. V. and Popov, E. P. : Analytical model for concrete anchorages of reinforcing bars under generalized excitations., Earthquake Engineering Research Center Report, No.82(23), University of California, Berkeley, 1982.
- 16) 三島徹也，Bujadham, B., 前川宏一，岡村甫：鉄筋コンクリート離散ひびわれを構成する材料モデルの開発，土木学会論文集，No.442/V-16, pp.171-179, 1992.

(2000年9月14日受付)