

論文 格子モデルによる RC 柱の繰り返し強度-変形解析

伊藤 睦*1 · 二羽 淳一郎*2 · 田邊 忠顕*3

要旨: 格子モデルの利点は、鉄筋コンクリート部材の斜めひび割れの発生、せん断補強筋の降伏、ウェブコンクリートの破壊までの一連耐荷機構の変化を表現し、かつマクロ的な耐荷機構モデルの構築に役立つ簡易な解析手法である点にある。単調載荷を受ける鉄筋コンクリートはりに対する格子モデルの適用性は既に検証されており、本研究では、繰り返し荷重を受けるRC構造物の変形性能を簡易的に評価することを目的として、格子モデルをRC柱の繰り返し強度-変形解析に拡張し、繰り返し荷重を受けるRC柱の変形性能を数値解析により調べ、実験値と比較した。

キーワード: 格子モデル, 繰り返し解析

1. 序論

鉄筋コンクリート構造物の設計にあたっての問題点は、今なおせん断破壊に対する合理的対策が不十分な点にある。過去には、終局強度を求める理論や、力の釣り合い条件及び変形の適合条件を用いてせん断問題を解こうとする理論など、数多くの研究がなされたが、理論的に難しいものや、解析時間を多く必要とする場合が多く、現実的に使用困難なものも多かった。以上を背景に、著者らは、修正トラス理論をもとに、せん断破壊メカニズムを明らかにすることを目的として、新たに格子モデルの開発を行った¹⁾。

格子モデルの評価すべき点は、計算結果の処理に客観性があり、かつ耐荷機構を明快に表現できる点にある。このモデルは鉄筋コンクリート部材の耐荷機構をトラス要素のみで構成していることから、有限要素解析と比べれば節点変位の総自由度、解析時間が相当に少ない簡便な手法となっている。

本研究では、材料モデルにアンローディングパスを取り入れ、単調なせん断力を受けるはりの解析を行い、実験値と比較すると共に、要素内部挙動を調べる。その後、格子モデルを用いて、繰り返し荷重を受けるRC柱の解析を行い、解析結果と実験値とを比較することにより、このモデルの適用性を評価していく。

2. 格子モデル

2. 1 格子モデルの概要

図-1(a)は、斜めひび割れが発生したコンクリートはりの模式図である。斜めひび割れが部材軸に対して α の角度方向に進展することを考えると同時に、ひび割れ面沿いに作用するせん断応力を無視すると、図-1(a)中に示す斜めひび割れと平行な微小要素には、図-1(b)に示すように、2軸の圧縮・引張応力が作用することとなる。ここで、微小要素に作用する2軸の圧縮・引張応力は、それぞれ主圧縮応力 σ_2 、主引張応力 σ_1 であり、部材軸と主圧縮応力 σ_2 のなす角度が α となる。

以上のようにウェブコンクリートには、圧縮・引張応力が作用すると考え、さらにひび割れ進展角度 α を45度と仮定することにより、連続体であるRC構造物をトラスの集合体にモデル化した。この格子モデルの概念図を、図-2に示す。格子モデルの構成要素は、以下の通りである。コンクリートは、曲げ部材、斜め圧縮部材、斜め引張部材、そしてアーチ部材、補強材は、図中点線で示した水平部材、垂直部材である。はり高さは、有効高さ d と一致させた。また、格子モデルにおける垂直部材の水平間隔は、実験値と格子モデルによる解析値の適合性を考慮して有効高さ d の1/2とした。このことから、はり側面から見たコンクリート斜め部材の幅は、 $d/2 \cdot \sin 45^\circ$ となる。また、アーチ部材の

*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

*3 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻工博 (正会員)

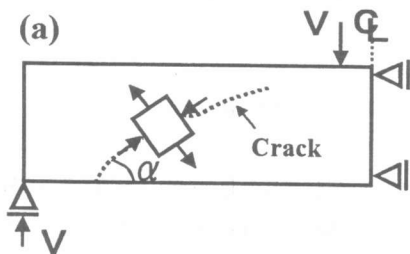
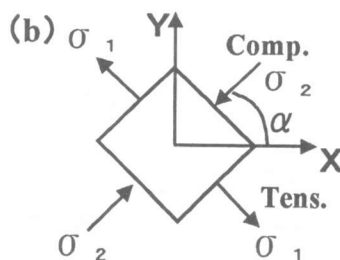


図-1(a) 斜めひび割れ発生コンクリート



(b) 微小要素の応力状態

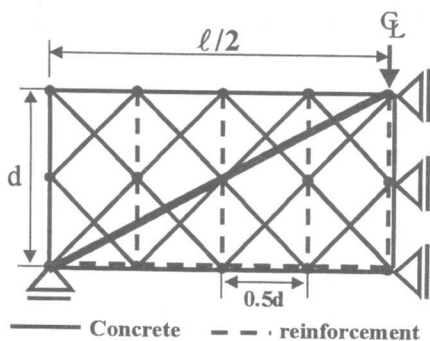


図-2 格子モデル概念図

傾斜角を θ とすると、アーチ部材の側面から見た幅は、 $d \cdot \sin \theta$ となる。

従来のトラス理論との違いは、コンクリートの斜め引張部材、アーチ部材を解析モデルに取り入れた点にある。格子モデルでは、コンクリートの斜め引張部材を考えていることにより、斜めひび割れ発生前後のせん断耐荷挙動をより精度良く表現することが可能である。また、アーチ部材を配置することにより、トラスの斜材角を 45 度に固定しているにも関わらず、せん断補強筋降伏以後の各部材における応力の再分配を表現することができる。図-2 中に太い実線で示されるアーチ部材は、圧縮力を受け持つように、圧縮力の流れに沿うように配置する。この場合、アーチ部材は外力の作用点と支点とを結ぶ長い要素となる。これは、はり内に平面応力場が成り立っていないとする実験結果に基づくものであり、ウェブコンクリートにおけるスターラップの影響範囲を考慮したものである。実際には、アーチの変位が完全に独立することはないと思われるが、はりの幅が相対的に増加するにつれ、通常仮定される平面応力場の仮定が成立しなく

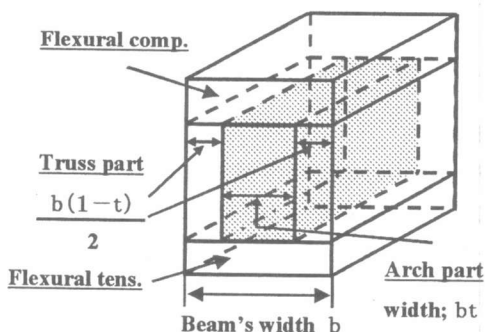


図-3 格子モデルにおけるはりの断面区分

なることは十分に考えられる。さらに、このようにアーチ部材を配置することにより、本解析は2次元解析にも拘わらず、擬似3次元解析となる。

2. 2 各要素のモデル化

図-3 は、格子モデルにおけるはり断面の区分の概念図である。ウェブコンクリート部分は図-3に示すように、トラス部分とアーチ部分に区分する。それぞれの要素の幅は、アーチ部分がはりの幅 b に対して占める割合を t ($0 < t < 1$) とした時、トラス部分の幅を $b(1-t)$ 、アーチ部分の幅を bt とする。

モデルの高さは、はりの有効高さ d に一致させていることから、トラス部分とアーチ部分の高さは、それぞれ $d/2$ 、 d となる。よってはり側面から見たトラス部分の幅は $d/2 \cdot \sin 45^\circ$ となり、アーチ部分の幅は、 $d \cdot \sin \theta$ (θ :アーチの傾斜角)となる。

曲げ圧縮部分の断面積は、曲げ終局時のコンクリート圧縮領域の厚さ、すなわち $x = (A_s \cdot f_y) / (0.68 f_c \cdot b)$ に b を乗じたものとし、曲げ引張領域の断面積は、曲げ補強筋の図心の位置からはり下面までの距離(かぶり)の 2 倍に b を乗じたものとした。

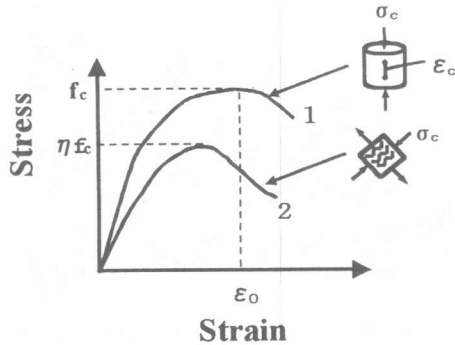


図-4 引張による圧縮軟化挙動

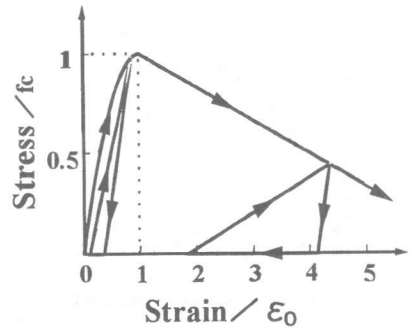


図-5 コンクリート圧縮モデル

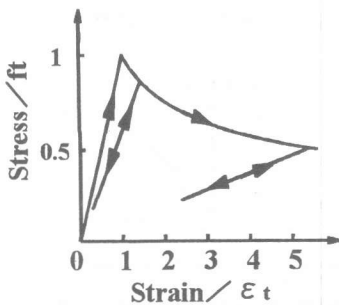


図-6 テンションスティフニングモデル

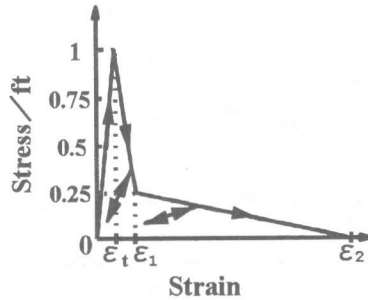


図-7 1/4モデル

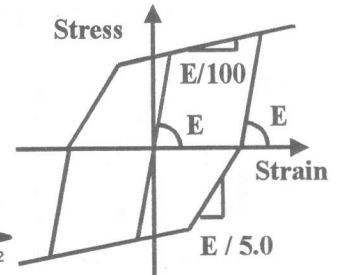


図-8 鉄筋モデル

なお、曲げ圧縮領域と曲げ引張領域の厚さの仮定は、計算されるせん断耐力の大きさにあまり影響を与えないことが、試算の結果確認されている²⁾。軸方向鉄筋の断面積は供試体の鉄筋比と、せん断補強筋の断面積は供試体のせん断補強鉄筋比と等しくなるように調整する。

2.3 拡張された格子モデル

格子モデルを繰り返し載荷解析に拡張する際に、単調載荷に対して提案された格子モデルの概念¹⁾²⁾をなるべく変えぬよう、次の修正を試みた。

構造物の対称性を考え、水平コンクリート部材である曲げ圧縮部材、曲げ引張部材の断面積を曲げ圧縮部材断面積に統一する。

繰り返し荷重を受けることにより、圧縮力の流れが反転することを考慮して、アーチ部材をクロスさせて対称に配置する。

2.4 材料モデル

(1) コンクリート圧縮モデル

図-4 に、2軸状態で引張力を受ける圧縮コンク

リートの軟化挙動、図-5 に、圧縮コンクリートのアンローディングパス・リローディングパスを示す。コンクリート圧縮モデルには、これら2つを組み合わせたものを用いた。圧縮ひずみが軟化開始ひずみ、 ϵ_0 に達するまでは、

$$\sigma_c = -\eta f_c \left\{ 2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$\epsilon_0 = -0.002$$

ϵ_c : 各圧縮部材ごとの圧縮ひずみ

f_c : コンクリート圧縮強度

η : 軟化係数

とし、ピーク強度以降、応力は $7\epsilon_0$ まで直線的に減少するものとした。軟化係数 η は、圧縮部材と直交する引張部材のひずみ ϵ を使用して、次式

$$\eta = \frac{1}{\{0.8 - 0.34(\epsilon/\epsilon_0)\}} \leq 1.0 \quad (2)$$

より求めた。アンローディングパスは、初期勾配で応力が低下するものとし、リローディングパスは、ひずみ履歴の中で、過去最大となったひずみ・応力状態へ向かうものとした。また、圧縮ひずみ領域で

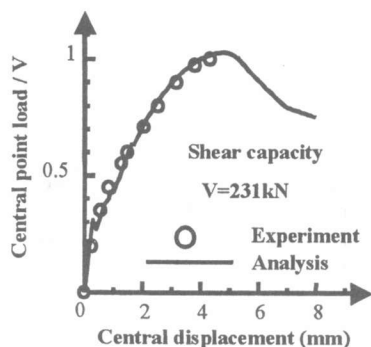


図-9 荷重-変位関係

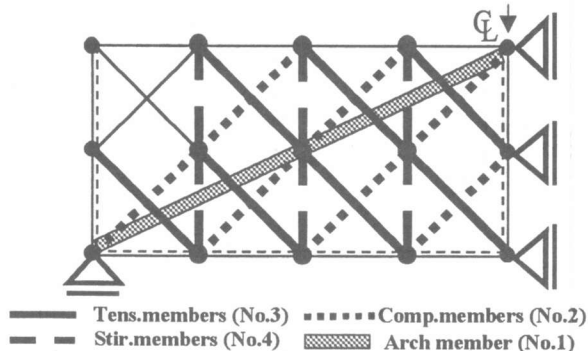


図-10 平均応力算定に用いた要素図

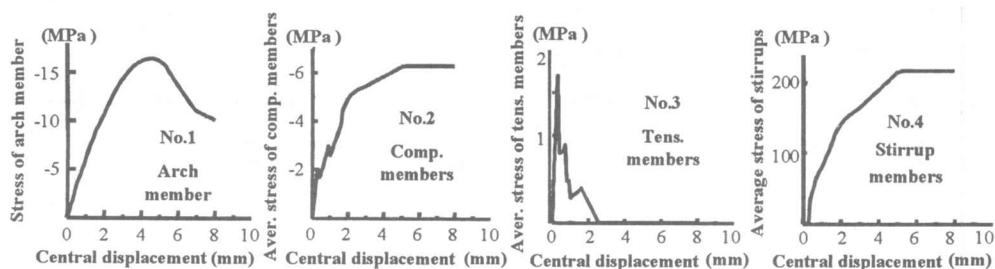


図-11 格子モデル構成要素の平均応力

は、アンローディングの際、引張応力を持たないこととした。

(2) テンションスティフニングモデル

コンクリートの水平部材には、コンクリートと鉄筋の付着を考慮してテンションスティフニングモデル(図-6)を用い、ひび割れ開始ひずみ(ϵ_c)を0.0001とした。ひび割れ発生後の挙動は、次式

$$\sigma_i = f_i(\epsilon_i / \epsilon)^{0.4} \quad (3)$$

とした。 f_i は、コンクリートの引張強度である。アンローディングパスは、原点に向かうものとし、リローディングパスは、コンクリート圧縮モデルと同じように定めた。

(3) コンクリート引張モデル

斜め引張部材には、1/4モデル³⁾(図-7)を用いた。破壊エネルギー G_p は、0.1N/mmとした。

(4) 鉄筋モデル

鉄筋の応力-ひずみ関係(図-8)は、バイリニアモデルとし、降伏後の勾配は、初期勾配の1/100とした。基本的にアンローディング・リローディングパスは、初期勾配で応力が変化するものとするが、

バウシinger効果を考慮して、応力の符号が反転した後は、勾配を1/5とした。

3. 単調なせん断力を受けるはりの解析

単調なせん断力を受ける構造物であっても、ひび割れ発生に伴い、要素レベルではアンローディングが発生する。本研究では、材料モデルにアンローディングパスを取り入れたことから、ある要素のアンローディングが、他の要素に与える影響について調べた。解析に用いた実験データは、Clark⁴⁾によるものであり、 a/d は2、軸鉄筋比及びせん断補強鉄筋比はそれぞれ3.1%、0.38%である。解析では試験体の対称性を利用し試験体の左半分を解析対象とした。図-9にClarkにより行われた実験結果における作用せん断力-変位関係と格子モデルを用いることにより予測された解析結果との比較を示す。実験では、ピーク荷重以後の挙動は得られていないが、格子モデルを用いた解析結果では、軟化挙動を表現することができた。また、図をみてわかるように、実験結果の挙動を格子モデルは精度良く表現することができ、予測された

ん断耐荷力も実験値と比較して 1.05 倍程度と良好であった。

3.1 各部材の応力状態の変化

Clark の実験データを対象に、載荷点変位の増加に伴うコンクリートの引張部材・圧縮部材、およびスターラップの平均応力、そしてアーチ部材の応力の変化を図-11(No. 1~No. 4)に示す。また、図-10には、Clark の実験供試体を格子モデルに置き換えた解析モデル図、および平均応力を求めるために用いたそれぞれの部材を示す。

図-11(No. 3)より、載荷点変位が 0.5mm 付近で斜めひび割れ発生後、コンクリート引張斜材の抵抗力が急激に低下していることがわかる。そして、斜めひび割れ発生に伴い、スターラップの応力が急激に上昇していることが図-11(No. 4)より認められる。そのため、急激な破壊を示すことなく、さらなる荷重の増加に耐えることができる。アーチ部材(図-11(No. 1))は、ひび割れの発生、また、一部分のスターラップの降伏以後も耐荷力の増加を示すが、変形の増加に伴い圧縮軟化挙動を示すことにより、終局を迎える。以上から、解析により得られた破壊形態は、解析モデル中央に位置するスターラップの降伏後、アーチ部材が圧壊することにより引き起こされる、せん断破壊であることがわかる。この結果は実験結果とも一致している。

本研究では、材料モデルにアンローディングパスを取り込んで解析をおこなったが、材料モデルにアンローディングパスを取り込まない場合の解析結果とさほど違いはみられなかった。この理由として、本解析では、構造物全体がローディング状態であっても、要素レベルではアンローディングする要素がみられるが、鉄筋のエネルギー吸収能がコンクリートに比べ非常に大きいため、部分的なコンクリート部材のアンローディング挙動は、構造物全体に

対してさほど影響をもたらさなかったためであると思われる。例えば、軸鉄筋比の低い構造物や、寸法の大きいRCはりであれば、ひび割れが局所化することにより、要素レベルのアンローディングに伴い、例えばスナップバック挙動を示す可能性もあると考えられる。

4. 繰り返し荷重を受けるRC柱の解析

本研究では、拡張した格子モデルを用いて、繰り返し荷重を受ける3体(R1~R3)のRC柱の繰り返し載荷解析を行った。

4.1 実験概要

解析する実験データは、カルフォルニア大学の Priestley⁵⁾ らによるものである。供試体の諸元を表-1に示す。

実験では、一定軸力 2MPaを作用させながら繰り返しせん断力を作用させている。破壊モードは、すべてせん断破壊である。

4.2 柱のモデル化

図-12に、R1, R2の解析に用いた、格子モデル図を示す。解析では、柱全体を解析対象とし、実験と同様、柱上端が回転しないようにモデル化した。図中、太い実線で示した部材が、アーチ部材であり、繰り返し荷重を受けることから、力の流れが反転するため、クロスさせて配置した。また、柱の曲げモーメント図や変形状態から、圧

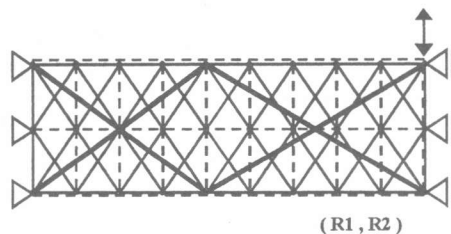


図-12 柱の解析モデル図

表-1 柱の諸元

No	軸力 (MPa)	断面 (mm)				強度 (MPa)			鉄筋比 (%)	
		幅	高さ	有効高さ	長さ (mm)	コンクリート	軸鉄筋	スターラップ	軸鉄筋	スターラップ
R1	2	406	610	572	2430	38	317	360	2.5	0.45
R2	2	406	610	572	2430	34	469	324	2.5	0.45
R3	2	406	610	572	1830	35	469	324	2.5	0.45

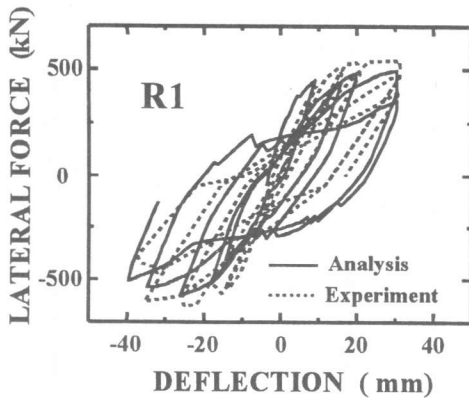


図-13 R1荷重-変位関係

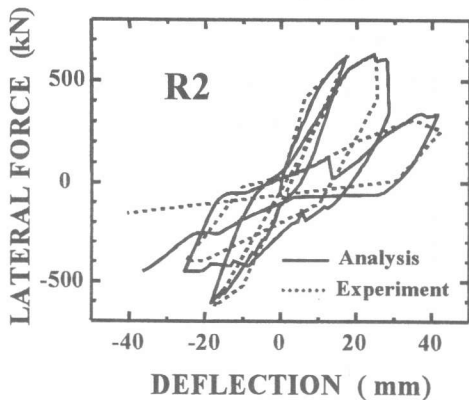


図-14 R2荷重-変位関係

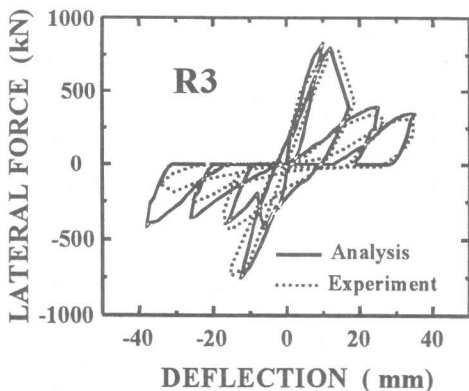


図-15 R3荷重-変位関係

縮力の流れを推測し、図-12 に示すように2段組にアーチ部材を配置した。

4. 3 解析結果

図-13～図-15 に、それぞれ R1～R3 のRC柱の実験結果と、解析より予測された、荷重-変位関

係を示す。3体のRC柱とも、耐荷力・変形性能を精度良く表現できていることがわかる。

R1 では、アンローディング・リローディンググループが実験値と比較して、やや膨らんでおり、エネルギー吸収を高め評価するものとなった。これは、鉄筋の材料モデルが、バウシinger効果を完全には表現できなかったためであると思われる。

R2 と R3 では、R1 に比べ、せん断の影響が大きく、その結果、実験結果同様柱中央部でせん断破壊が生じ、急激な耐荷力の減少を示した。

この3体の解析結果をみる限り、本研究で行った格子モデルの拡張は妥当であり、格子モデルは、繰り返し載荷解析においても適用していくことが可能であると思われる。

5. 結論

本研究により次の結論が得られた。

格子モデルを、繰り返し載荷解析に拡張した結果、3体のRC柱の荷重-変位挙動を、精度よく良好に表現することができた。よって、格子モデルを繰り返し応力場に拡張できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 二羽淳一郎・崔 益暢・田邊忠顕:鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構に関する解析的研究, 土木学会論文集, No508/V-26, pp. 79-88, 1995. 2
- 2) 崔 益暢:コンクリート構造物のせん断耐荷機構の評価に関する研究, 名古屋大学大学院博士論文, pp. 1-7, pp. 25-68, 1996. 3
- 3) 破壊力学の応用研究委員会編:破壊力学の応用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 1993
- 4) Clark, A. P. : Diagonal Tension in Reinforced Concrete Beams, ACI J. , pp. 145~156, 1951
- 5) Yan Xiao, M. J. Nigel Priestley, Frieder Seible : Steel Jacket Retrofit for Enhancing Shear Strength of Short Rectangular Reinforced Concrete Columns, Report No. SSRP-92/07, July 1993