

## 論文 格子モデルによる RC フレームの強度 - 変形解析

伊藤 睦\*1・二羽淳一郎\*2

**要旨:**せん断補強されたコンクリートはりの解析を行うに際して、格子モデルは鉄筋コンクリート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ことが認められている。本研究では格子モデルをRCフレームの強度-変形解析に用い、水平荷重を受ける RC フレームの破壊がどの部材に起因し、どのように起こるのかを数値解析により明らかにするものである。

**キーワード:** 格子モデル, RC フレーム, 耐荷機構

## 1. はじめに

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ことである。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ので有限要素解析と比べれば節点変位の総自由度、解析時間も相当に少ないため非常に簡便な手法である。本研究では、格子モデルをより複雑なRCフレームの解析に用い、モデル化された各部材の応力-ひずみ関係に着目することにより、RC フレームが破壊に至るまで、どの部材が降伏、軟化しているのか数値解析により明らかにするものである。すなわちRC フレームの破壊がどの部材の降伏、軟化によって起こるのか、またどういった破壊状況であるのかを明らかにする。

## 2. 格子モデル

## 2.1 格子モデルの概要

せん断補強されたはりのモデル化にあたっては図-1 のような格子モデルを用いる。格子モデルは連続体である鉄筋コンクリート部材をトラスの集合体に置き換えることにより部材の耐荷機構を解析する方法であり、コンクリートは曲げ圧縮部材、曲げ引張部材、斜め圧縮部材、斜

め引張部材、アーチ部材に、補強鉄筋は軸方向鉄筋とスターラップにモデル化される。図中の太い実線がアーチ部材である。格子モデルでは、トラスの斜材角を45度に固定しているが、このアーチ部材を考えることにより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<sup>1)</sup>。アーチ部材の配置は基本的に、圧縮力を受け持つよう圧縮力の流れに沿うように配置される。集中荷重を受けるはりにおいては載荷点と支点の両端を節点とするものとし、等分布荷重を受けるはりにおいては、経験的に図-1 のように材長の 1/4 の位置に配置する。また、コンクリートの斜め引張部材を考えていることが、従来のトラスモデルとの大きな違いであり、これにより斜めひび割れの発生前後のせん断耐荷挙動を精度良く表現していくことが可能となる。

## 2.2 各要素のモデル化

図-2 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の部分を図-2 に示すようにトラス部分とアーチ部分に区分する。それぞれの断面積は、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、トラス部分の幅は  $b(1-t)$ 、アーチ部分

\*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 工学研究科土木工学専攻 工博 (正会員)

の幅は $bt$ となる。 $t$ を求めるには、仮定した $t$ を用いてモデル化した鉄筋コンクリートはりに微小な荷重を作用させ、弾性解析により各部材のひずみエネルギーを計算する。外力による仕事に要素全体のひずみエネルギーを加えたものが最小となるように $t$ を定める。はりの弾性挙動が終わり非線形性が現れてくるとともにポテンシャルエネルギーの変化が見られるのは当然のことであるが、本研究においてはこの方法を用いることとする。図-3には3章で解析を行った供試体について求めた $t$ と外力仕事との関係を示す。

この供試体の場合 $t$ の値は0.4となる。つまりアーチ部分の幅は $0.4b$ と定める事ができる。またモデル化されたはり高さははりの有効高さ $d$ に一致させている。トラス部分とアーチ部分はそれぞれ高さ $d/2, d$ となる。垂直部材は $d/2$ 間隔で配置した。よってはり側面から見たトラス部分の幅は $d/2\sin 45^\circ$ 、アーチ部分の幅は $d \cdot \sin \theta$  ( $\theta$ :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、 $x = (A_s \cdot f_y) / (0.68 f_c \cdot b)$  (ここで $A_s$ :鉄筋の断面積、 $f_y$ :鉄筋の降伏応力、 $f_c$ :コンクリートの圧縮強度)に $b$ を乗じたもの、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2倍に $b$ を乗じたものとした。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荷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<sup>1)</sup>。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。

アーチ部材の変位はその両端でトラス部材の変位と適合しているが中間では独立としている。これは平面応力場を仮定しないことを意味するものであり、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。現実には両者の変位が完全に独立になることはないと思われるが、はりの幅が相対的に増加していくにつれて通常行われる平面応力場の仮定が成立しなくなることは十分に予想される。

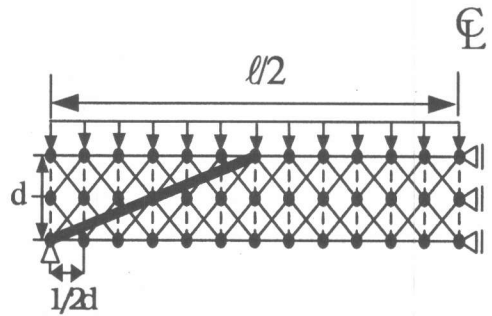


図-1 格子モデルの概念図

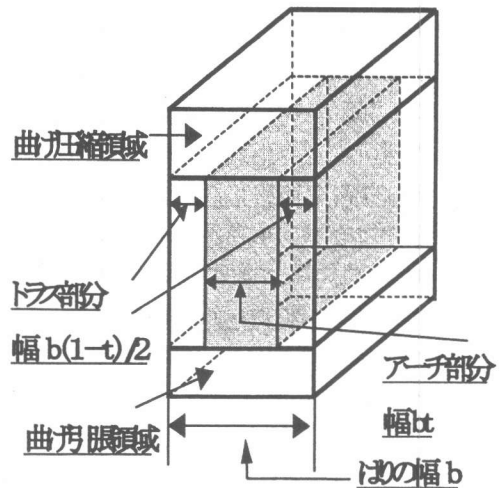


図-2 はり断面の概念図

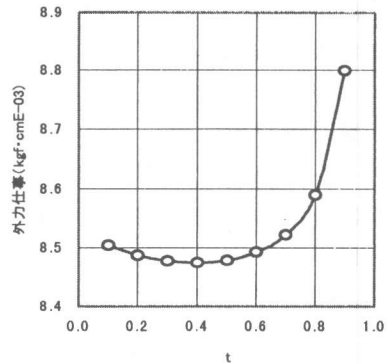


図-3 外力仕事 - t 関係

## 2.3 各部材の応力-ひずみ関係

### (a) コンクリート斜め引張部材

応力が引張強度に達するまでは弾性体とする。引張強度到達後は引張軟化曲線を使用し軟化挙動を与える。図-4には斜め引張部材に使用した軟化曲線である1/4モデルを示す。破壊エネルギー $G_f$ は、2直線で囲まれる面積となる。また、図-4のひび割れ幅 $w$ を引張斜材の長さ $L$ で割ることによりひずみに変換し図-5に示すような、コンクリート斜め引張部材の応力-ひずみ関係を導く。

### (b) 斜め圧縮部材、アーチ部材、曲げ圧縮部材

圧縮部材の応力-ひずみ関係を図-6に示す。圧縮ひずみが $\epsilon_c = -0.0035$ に達するまで

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

$$\epsilon_0 = -0.002$$

$\epsilon_c$ : 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

$\eta$ : 軟化係数

とした。圧縮斜材の軟化係数 $\eta$ は、圧縮斜材と直交する引張斜材の軸方向引張ひずみ $\epsilon_t$ を使用して、次式

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

から求めた。アーチ部材の軟化係数 $\eta$ はアーチ部材の中央で交わる引張斜材の引張ひずみを用い式(2)より定めた。曲げ圧縮部材には、圧縮軟化を考慮しないため式(1)で $\eta = 1.0$ としたものを使用した。

### (c) 曲げ引張部材

曲げ引張側の水平部材には、コンクリートと補強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-7)を用いた。曲げ引張強度は

$$f_t = 0.58(f_c)^{2/3} \quad (3)$$

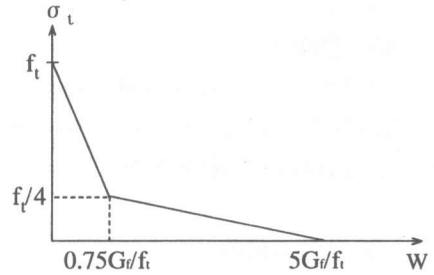


図-4 引張軟化曲線の1/4モデル

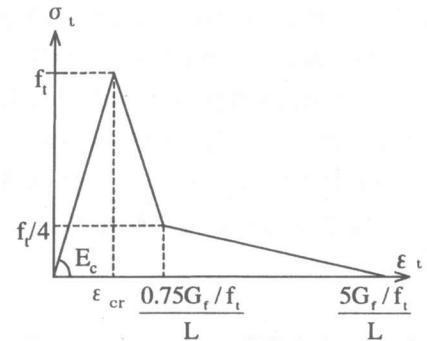


図-5 引張斜材の応力-ひずみ関係

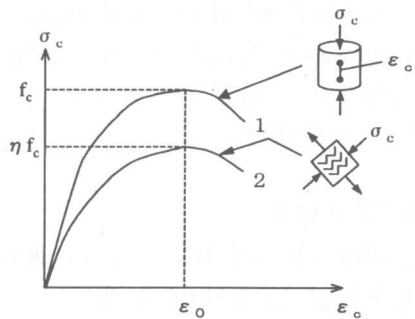


図-6 圧縮軟化挙動

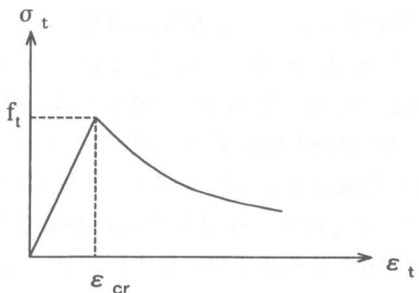


図-7 引張硬化モデル

より定めた。

#### (d) 補強材

軸方向およびせん断補強筋の応力-ひずみ関係には、降伏後に初期剛性の 0.01 倍の勾配で応力が増加する弾塑性モデルを用いた。

### 3. RC はりの解析

RC はりに対する格子モデルの適用性は既に確かめられている<sup>1)</sup>。RC フレームの解析を行う前に格子モデルを用いて RC はりの解析の 1 例を示す。解析する供試体モデルは等分布荷重を受けるせん断補強のない RC はりである<sup>2)</sup>。本解析を行う前に、この供試体について弾性解析を行い、ポテンシャルエネルギーが最小となる  $t$  の値を求めたが、この解析により  $t$  の値は 0.4 となった<sup>3)</sup>。

#### 3.1 供試体概要

供試体の寸法等の概要は幅  $b=1.5\text{m}$ 、高さ  $h=3.14\text{m}$ 、有効高さ  $d=3.0\text{m}$ 、スパン  $36\text{m}$  である。せん断補強筋はなく、軸方向鉄筋の断面積  $A_s=17.68 \times 10^3\text{mm}^2$ 、コンクリート圧縮強度  $f_c=253\text{MPa}$  である。破壊エネルギー  $G_F$  は  $0.098\text{N/mm}$  とした。

#### 3.2 解析結果

図-8は、はり中央の変位と荷重の関係を実験結果と比較したものである。実験値と比べ解析値は、初期の剛性は多少低かったものの耐力や降伏後の挙動はよく表現されている。土木学会のコンクリート標準示方書によるはりのせん断強度算定式を用いた計算値 ( $0.296\text{MPa}$ ) と解析値 ( $0.322\text{MPa}$ )、実験値 ( $0.314\text{MPa}$ ) と解析値の比を計算するとどちらも 1.05 程度に収まった。格子モデルを用いることによりせん断力を受けるせん断補強筋のない RC はりの挙動が予測可能であると言える。

## 4. フレーム解析

### 4.1 解析概要

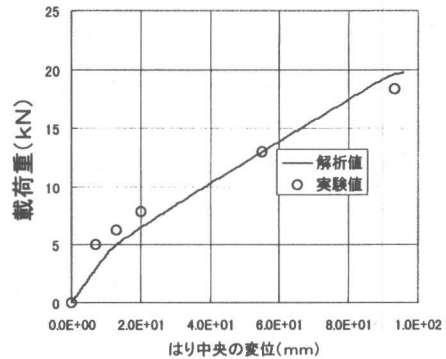


図-8 載荷重-はり中央変位関係

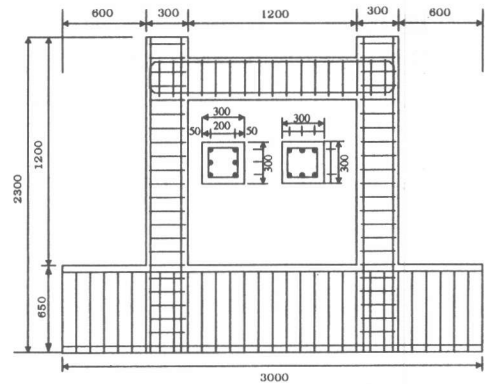


図-9 RCフレーム構造試験体

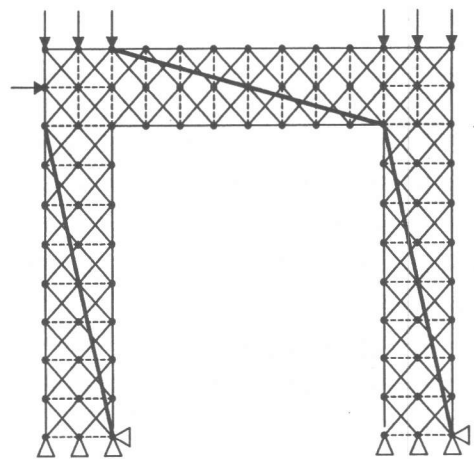


図-10 RCフレームの格子モデル

次に格子モデルを用いてフレーム解析を行った。対象としたものは、曲げ破壊した試験体である<sup>4)</sup>。この試験体をモデル化したものを図-10に示す。はりとの柱の接合部においてはほぼ剛体変形と考え、またアーチ部材は圧縮力の流れにそうように配置した。試験体のスターラップの間隔と格子の間隔が一致しない点はせん断補強鉄筋比を一致させてスターラップの断面積を調整している。また試験体にはスタブが設けてあるが力学的役割が大きくないことからモデル化するにはこれを無視した。

## 4.2 試験体概要

### (1) 試験体

試験体の寸法、配筋状況は図-9に示すとおりである。使用した材料は軸方向鉄筋D16×3、スターラップはφ9を100mm間隔で配筋してある。コンクリートの圧縮強度(28日)は、26.5MPaである。破壊エネルギー $G_F$ <sup>5)</sup>は0.0686(N/mm)とした。

### (2) 荷重方法

実験では2本の柱の頭部に一定の軸方向圧縮応力0.98MPaを荷重し、水平方向に繰り返し加力を与えている。本解析では今のところ繰り返し荷重解析は行っていないため、モニタリング解析とした。実験結果は繰り返しの少ないもの、つまり繰り返しによる劣化の少ないものを選び、実験結果の包絡線と解析結果を比較することとした。

## 4.3 解析結果

格子モデルを用いた解析により得られた荷重-変位関係を図-11に示す。実験結果と比較すると、初期こう配、降伏から耐荷力の軟化前までの挙動を精度よく表現していることがわかる。図中1,2,3において、1では曲げ引張領域でコンクリートにひび割れが発生し始めたため剛性の低下が見られる。2ではRCフレームの耐荷力の鍵となる柱付け根部分での軸方向鉄筋の降伏が始まる。その後3

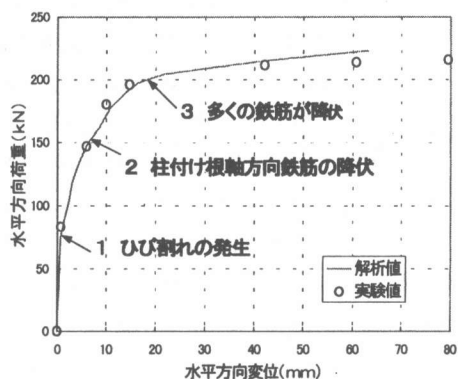


図-11 荷重-変位関係

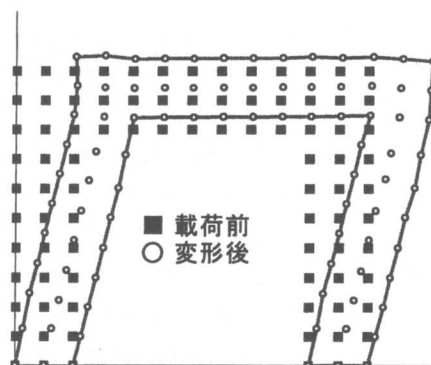


図-12 接点の移動状況

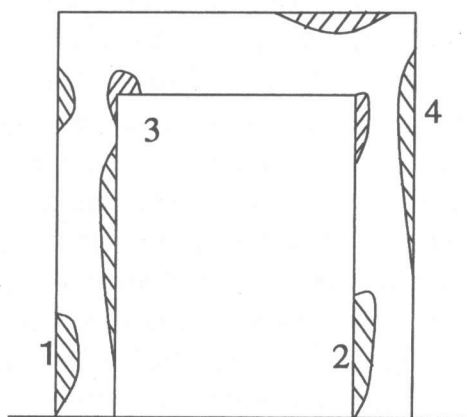


図-13 破壊状況

付近では多くの箇所でも軸方向鉄筋やスターラップの降伏が始まる。破壊モードは曲げ引張破壊であった。格子モデルを用いることに

より、こうした要素の降伏または、コンクリートの軟化過程を客観的に把握することができるとともに、構造物全体の挙動も精度よく表せることがわかる。しかし実験では、変形はもっと大きく起こったのだが解析では水平方向変位が 60mm程度で終了となった。この理由として本解析ではスラブの上方からの軸力載荷のもとで解析を行うために荷重制御としたが、このため耐力力の低下が表現できず、力の釣り合いがとれなかったため解析が発散したからである。

図-12 は各節点毎の最終変位を数値解析により求め、変形後の試験体の形状を表したものである。ただし移動状況を強調するために水平、垂直両方向の変位は 5 倍にしてある。これを見ることにより各要素の応力状態が圧縮状態であるか引張状態であるかはある程度認識できる。

図-13 は解析後、各部材の応力状態から引張コンクリートの破壊(軟化後応力が 0 になったもの)、または降伏した鉄筋要素を調べ、特にコンクリートの破壊、または鉄筋の降伏が多かった部分を斜線で模式的に表したものである。本解析における RC フレーム挙動の過程は、まず曲げ引張領域のコンクリートの破壊から起こる。その後図中に示す1, 4 付近の引張力を受け持つ軸方向鉄筋が降伏した。またその荷重状態と同じところに3付近のコンクリートの軟化、鉄筋の降伏が起こった。そして最後に変形の著しい4付近において、多くの軸方向鉄筋要素が降伏したため解析において釣り合いが保たれなくなり発散した。この内部挙動は実験結果ともよく類似しており、格子モデルを用いることにより、RCフレームの内部的挙動を精度よく表現することが可能であると思われる。

## 5. 結論

本研究により以下の結論が得られた。

1. 格子モデルを用いることにより、曲げ引張破壊するRCフレームの挙動が精度よく予測できる。
2. 格子モデルの各構成要素に着目することにより客観的にRCフレームの耐荷機構を把握することができる。

## 6. 今後の課題

今後の課題としてはこの格子モデルを用いてより複雑な構造物の解析へ取り組むとともに、より精度のよいコンクリートや補強材の構成則(例えば繰り返しによって構造物が吸収するエネルギーによるコンクリートの劣化など)を用いて繰り返し載荷解析を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 二羽淳一郎・崔 益暢・田辺忠顕: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, pp79-88, 1995.2
- 2) 塩屋 俊幸:大型鉄筋コンクリート部材のせん断特性に関する研究, 清水建設研究報告別冊第 25 号, pp.17-24, pp.54-55, pp.143, 1989.2
- 3) 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
- 4) 藤掛一典・大野友則・西岡 隆:鉄筋コンクリートラーメンのエネルギー吸収容量に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 390 号/V-8, pp.113-121, 1988.2
- 5) 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.