

# 交番載荷及び温度荷重を受けるRC構造の 離散ひびわれ有限要素解析

三島徹也\*・山田一字\*\*・前川宏一\*\*\*

本研究では、正負交番載荷に対しても安定して解を与えることができる非線形求解法の確立に主眼を置き、離散ひびわれモデルに基づく有限要素解析の開発を行った。正負交番載荷を受ける耐震壁、はり、柱の解析を通じて、本解析がRC部材の復元力特性を求めるに十分な実用性を有していることを示した。また、温度荷重を受ける壁試験体の解析を通じて、離散ひびわれモデルによる解析が温度ひびわれ制御に対して有効な手段となり得ることを示した。

**Keywords:** FEM, discrete crack, joint element, reversed cyclic loading, thermal loads

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物を対象とした、分散ひびわれモデル<sup>1),2)</sup>と離散ひびわれモデル<sup>3)</sup>に基づく解析手法が近年大幅に整備されるに至り、種々の鉄筋コンクリート構造物の挙動を解析的に求めることが可能となってきた。繰り返し荷重を考慮可能な分散ひびわれモデルが既に開発されており<sup>4)</sup>、耐震壁等の解析<sup>5)</sup>を通じて、比較的多数のひびわれを有するRC部材の復元力特性の予測に有効であることは既往の報告に詳しい<sup>6)</sup>。

一方、著者らは、数本のひびわれが部材全体の力学的特性を支配する場合を対象として、離散ひびわれモデルの研究を行ってきた<sup>7)-10)</sup>。この一連の研究の中で、まず、単数のひびわれのみに限定したRC板の正負交番載荷試験を実施し<sup>7)</sup>、ひびわれ面の局所挙動に注目することによって、一様な直応力-せん断応力下での繰り返し載荷を考慮可能なRC離散ひびわれモデルを開発した<sup>8)</sup>。ついで、上記RC板試験およびRC部材の一面せん断試験との比較から、鉄筋モデルとひびわれ面の応力伝達モデル<sup>11)</sup>を組み合わせることで得られる離散ひびわれモデルの検証を行った<sup>9)</sup>。さらに、上記離散ひびわれモデルを曲げ-せん断-直応力下へ拡張し、その検証を行った後、この一般化離散ひびわれモデルを用いて、RC部材の復元力特性における載荷経路依存性の解明に役立てたのである<sup>10)</sup>。

本研究の目的は、これらの研究成果を取りまとめ、離散ひびわれモデルを有限要素解析に組み込み、離散ひびわれと周辺連続体を組合わせて取り扱う、より一般化された解析手法の提案を行うことにある。有限要素解析の

利点は、単調、交番、繰り返し載荷、および内的拘束に起因する温度荷重等の種々の荷重履歴、任意の境界条件、ならびに任意の変位場を統一的に考慮できる点にある。離散ひびわれモデルを有限要素解析に組み込むことによって、より広範囲な問題に適用することが可能となるのである。ただし、ひびわれの開閉に伴ってひびわれ面の剛性が急激に変化するため、数値解析上、安定した解を求めることが困難となる<sup>12)</sup>。したがって、つり合い収束解を求めるための繰り返し計算手法を確立することがその前提となる。本研究の第2の主眼は、離散ひびわれモデルを含む要素システムの安定非線形求解法を確立する事である。ついで、種々の荷重に対する広範囲のRC構造物の解析を行い、本解析モデルの有効性を示す。

## 2. 接合要素を用いた有限要素解析

### (1) 接合要素の有限要素解析への組み込み

本研究で用いる離散ひびわれモデルは、ひびわれ面の鉄筋の抜け出し特性<sup>13)</sup>と骨材のかみ合いによる応力伝達特性<sup>14)</sup>を考慮したモデルであり前報<sup>9)</sup>に詳しい。ここでは、接合要素の離散化手順と有限要素解析に組み込んだ際の非線形求解方法について述べる。とくに、接合要素を用いた交番繰り返し載荷を対象とする解析では、要素の接触・分離時に大きな剛性変化が伴うために、収束計算には特別の配慮が必要である。

#### a) 接合要素

本研究では、図-1に示す6節点のアイソパラメトリック接合要素<sup>14)</sup>を採用した。要素の高さは接合面の長さに対して十分短く、要素内で一定とする。この時、局所局線座標 $\xi$ の関数であるマトリクス  $[B(\xi)]$  を導入することにより接合面上の任意点に置けるすべり変位 $\delta$ と開口変位 $\omega$ は、要素の節点変位ベクトル  $\{U\}$  を用いて次式で表される。

$$\{u\} = [B] \{U\} \dots \dots \dots (1)$$

\* 正会員 前田建設工業(株)技術研究所  
(〒179 練馬区旭町1-39-16)

\*\* 正会員 工博 前田建設工業(株)技術研究所

\*\*\* 正会員 工博 東京大学助教授(1992年までAITに派遣)  
工学部土木工学科

○ 曲線座標  $(x)$  と節点座標  $(X_i)$  の関係

$$(x) = N_1(\xi) \frac{(X_1 + X_2)}{2} + N_2(\xi) \frac{(X_5 + X_6)}{2} + N_3(\xi) \frac{(X_2 + X_3)}{2}$$

$$N_1 = \xi(\xi - 1)/2, N_2 = (1 - \xi^2), N_3 = \xi(\xi + 1)/2$$

○ 要素変位  $(u)$  と節点変位  $(U) = [U_1, V_1, \dots, U_6, V_6]^T$  の関係

$$(u) = M^{-1}[L](u_G) = M^{-1}[L][A](U) = [B](U)$$

$$M = \sqrt{\left(\frac{dx}{d\xi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\xi}\right)^2}, [L] = \begin{bmatrix} \frac{dx}{d\xi} & \frac{dy}{d\xi} \\ -\frac{dy}{d\xi} & \frac{dx}{d\xi} \end{bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -N_1 & 0 & -N_2 & 0 & N_2 & 0 & N_1 & 0 & -N_3 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & -N_1 & 0 & -N_2 & 0 & N_2 & 0 & N_1 & 0 & -N_3 & 0 & N_3 \end{bmatrix}$$

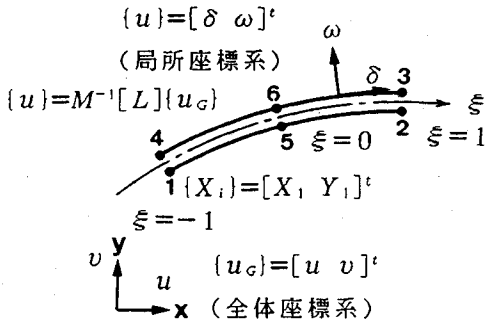


図-1 6 節点アイソパラメトリック接線要素

ここに、 $(u) = [\delta \ \omega]^T$

本接線要素の材料モデルは、前報<sup>8)</sup>で報告したように、接合面の相対変位  $(u)$  に対して定式化されており、接合面の任意点に置ける応力を  $(\sigma) = [\tau \ \sigma]^T$  とすると、一般に、次式で表される。

$$\tau = \bar{\tau}(\delta, \omega), \sigma = \bar{\sigma}(\delta, \omega) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $\bar{\tau}$ 、 $\bar{\sigma}$  は鉄筋の抜け出し特性、ひびわれ面の応力伝達特性から得られる関数であり、相対変位  $\delta$ 、 $\omega$  の履歴に依存する。各節点の荷重ベクトル  $(F)$  は、仮想仕事の定理を適用することによって、次式となる。

$$(F) = b \int [B]^T (\sigma) M d\xi \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 $b$  は要素の奥行き方向の厚さである。接線材料マトリクスを  $[D]$  とすると、要素の接線剛性マトリクス  $[K]$  は、

$$[K] = b \int [B]^T [D] [B] M d\xi \dots \dots \dots (4)$$

で与えられる。

**b) 非線形求解法**

本接線要素の材料モデルは要素変位が要素節点力に対して非線形であるため、つり合い変位を求めるには、非線形求解法が必要となる<sup>15)</sup>。一般に、接線要素の剛性がひびわれの開閉に伴って大きく変化するために、解を安定して求めることが往々にして困難となる。特に、ひびわれ面の応力伝達モデルにダイレイタンスー効果を考慮できるモデルを用いた場合、つり合い解を求める過程で

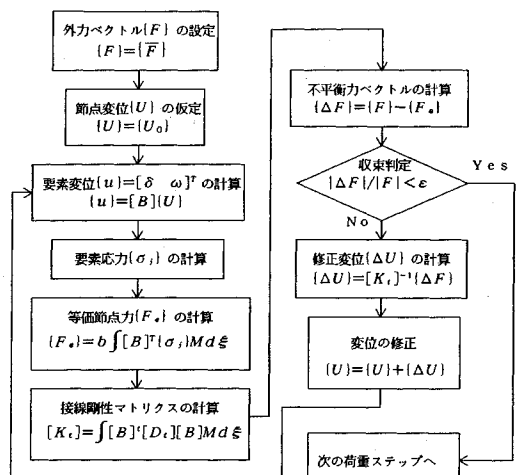


図-2 非線形求解の計算フロー

発散や振動状態に陥りやすく、収束過程が不安定になりやすい<sup>12)</sup>。本解析では、繰り返し荷重も対象としていることから、安定した求解は本研究に必須の要件である。解を安定して求める観点からは初期剛性法が適しているが、ひびわれ問題では計算時間が増大する傾向にある。逆に、接線剛性を用いる Newton-Raphson 法では、繰り返し数は少なくなるが、ひびわれが閉じる点等の剛性が急変するところで解が発散する危険性が非常に高い。このような観点から、本研究では、修正 Newton-Raphson 法に属する非線形求解法を採用し、不平衡力の再分配には前記 2 者の中間的手法を採用したのである<sup>16)</sup>。ただし、良好に収束する状況においては、解が発散しない範囲で可能な限り接線剛性マトリクスに近いものを用いた。図-2 に本解析のフローを示す。

繰り返し計算時の不平衡節点力の分配に用いる剛性マトリクスの算定方法について、申の研究<sup>6)</sup>を参考に、種々の検討を行った結果、実際の材料接線剛性より、やや高めの剛性を用いて繰り返し計算を行うと、本解析においても安定した収束が得られることが判明した。具体的な算定方法は、以下の通りである。

- 1) 繰り返し計算の 3 回目までは除荷剛性を用いる。
- 2) 4 回目以降は、接線剛性を用いるが、安全のため計算された剛性の 10% 増しの剛性を用いる。
- 3) 5 回目以降に不平衡力が前回の不平衡力より小さくなった場合、増分変位を半分にして再計算する。
- 4) 不平衡力が前回の不平衡力の 5 倍を超えた場合、除荷剛性を用いて再計算する。

**(2) 解析例**

**a) 解析モデル**

本接線要素を用いた解析例として、著者らが行った柱の水平加力試験の解析結果を示す。解析の対象とする試験体は、前報の試験体<sup>10)</sup>と同様、柱脚部のみに離散ひ

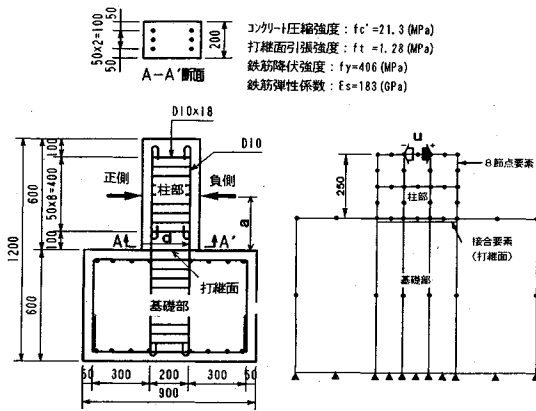


図-3 柱試験体とその要素分割

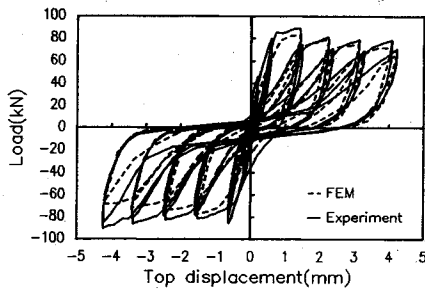


図-4 荷重-変位関係 (試験結果とFEM解析の比較)

びわれを持つ橋脚型試験体 ( $a/d=1.0$ ) である。ただし、本試験体は柱と基礎部が2度に分けて打設されており、ひびわれ面が打継面となっている点が前報<sup>10)</sup>と異なっている。

図-3に供試体の概略と解析に用いた要素分割を示す。柱脚部の打継面以外にひびわれは発生していないことから、接合要素以外は弾性要素とした。離散ひびわれモデルを構成するBujadhamらの一般化接触面密度モデル<sup>11)</sup>は打継面に対しても適用可能であり<sup>12)</sup>、打継面に対する接触密度関数を使用した。なお、打継面の引張強度は、現状では不明な点が多いため、便宜的に供試体の割裂引張強度の6割に低減した値を使用した<sup>13)</sup>。

試験では、柱の左右の面に交互に荷重を作用させているが、解析では柱中央に加力点を設け、その点の変位を制御する方法を用いた。本試験体の発生ひびわれは柱脚部に限られているため、加力点位置が当該ひびわれ面の応力状態に与える影響は非常に少ないと考えられる。各変位ループ ( $1\delta_v$  等) の約50等分を解析変位ステップとし、 $5\delta_v$  ループまでを2サイクルずつ繰り返した。全体で約500ステップとなった。

先に述べた非線形求解法を用いた結果、1ステップ当たりの収束に要する繰り返し数の平均は約10回であり、収束状況によって収束方法を調整する等の手を加えるこ

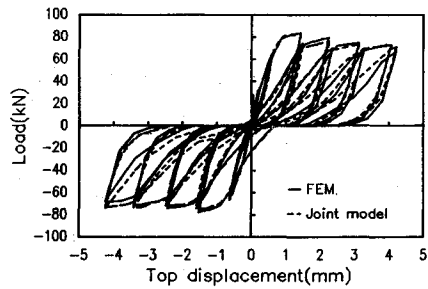


図-5 荷重-変位関係 (部材解析とFEM解析の比較)

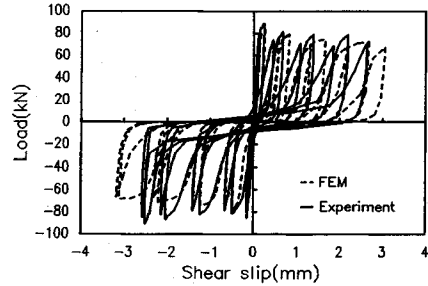


図-6 荷重-すべり関係

となく、全計算を統一的な手法で計算可能であった。なお、本解析では次式を用いて収束の判定を行った。

$$|\Delta F|/|F| < \epsilon \dots \dots \dots (8)$$

ここに、 $|\Delta F|$ : 不平衡力のノルム

$$\epsilon = 5.0 \times 10^{-3} \text{ (繰り返し数 10 回まで)}$$

$$1.0 \times 10^{-2} \text{ (10 回以降)}$$

b) 解析結果

図-4に荷重と荷重点水平変位関係 (以下、荷重-変位関係と呼ぶ) に関するFEM解析と試験結果の比較を示す。なお、水平変位は基礎からの相対変位である。FEM解析の方が試験結果に比べて剛性、耐力とも若干小さめとなっている。特に、この傾向は負側の載荷時に顕著である。この差異は主に打継面に対するコンクリートの応力伝達モデルの精度に起因すると考えられるが、全体的な傾向はよく一致している。図-5に前報のモデルによる解析と本研究のFEM解析の比較を示す。両解析結果はほぼ一致しており、FEM解析プログラムと前報のモデルにおける開口変位に対する平面保持の仮定の妥当性が併せて確認できる。

図-6に柱脚部のズレ変位と荷重関係を示す。FEM解析のズレ変位の方が試験結果に比べて大きめとなっており、コンクリートの応力伝達モデルがやや小さめのせん断剛性を与えることが分かる。打継面の応力伝達特性は打継面の処理方法によって大きく変化すると考えられ、本試験体の打継状況が打継モデルを構築した際のそれと異なっていたものと推定される。今後、打継面の処

表-1 WALL 4 試験体諸元

コンクリート 圧縮強度 (MPa)	コンクリート 引張強度 (MPa)	打継面 引張強度 (MPa)	鉄筋 降伏強度 (MPa)	鉄筋比 (%)	鉄筋径 (mm)
33.0	3.3 <sup>*1</sup>	2.0 <sup>*2</sup>	480	0.80	11.3

\*1 圧縮強度の1割を仮定、\*2 スラットの引張強度の6割を仮定

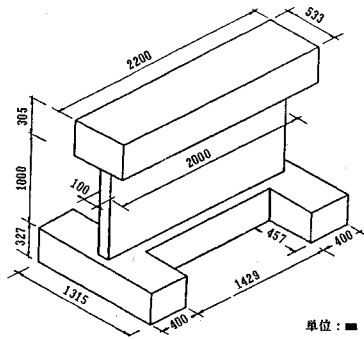


図-7 試験体寸法形状 (WALL 4)

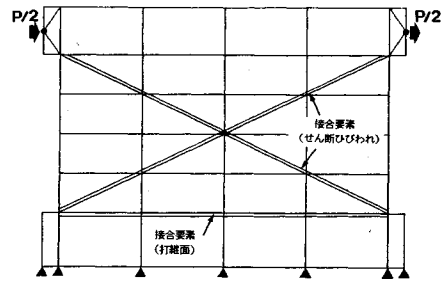


図-8 要素分割図

理方法等を考慮にいれ、より高精度なモデル化を行う必要がある。ただし、試験結果と解析結果の差は最終変位ループ時でも 20% (0.5 mm) 程度である。

### 3. RC 耐震壁に対する有限要素解析の検証

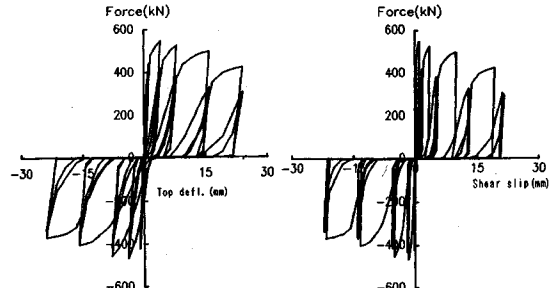
#### (1) 検証用試験体

検証用試験体として Saatcioglu の正負交番載荷された耐震壁 (WALL 4)<sup>19)</sup> を選定した。試験体の寸法形状を図-7に示す。加力は試験体上部の上層梁に油圧ジャッキを用いて水平力のみを正負交番で載荷することによって行われており、軸力は作用していない。試験体の諸元を表-1に示す。壁部の鉄筋比は縦、横筋とも 0.8% であり、比較的低鉄筋比である。

変形がベースと壁の接合部に発生したひびわれに集中しており、壁部には、わずかに数本のせん断ひびわれと曲げひびわれが見られたのみであることが報告されている。したがって、本試験体は離散ひびわれモデルの検証に最も適していると言えよう。試験における破壊モードは壁とベース接合部のすべり破壊である。

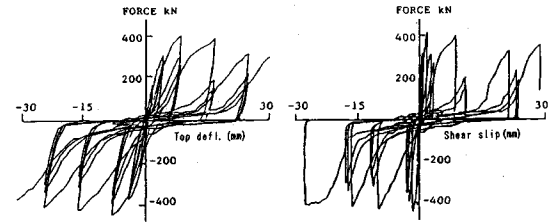
#### (2) 解析モデル

図-8に解析に使用した要素分割を示す。接合要素は、壁とベース間接合部の他に、壁の対角線にも配置した。壁とベース間の接合要素には2章で用いた打継面に対する離散ひびわれモデルを用いた。接合要素以外の要素は全て弾性要素である。試験結果から判断すると、試験体の挙動を支配している主要因はひびわれ面の挙動であり、ひびわれ部以外を弾性要素として特に問題ないものと思われる。また、試験結果によると壁の対角線上のひびわれ開口はほとんど進行しておらず、もっぱら接合部の開口幅に注目すれば十分である。



(a) 解析結果

(a) 解析結果



(b) 試験結果

(b) 試験結果

図-9 荷重-変位関係

図-10 荷重-すべり関係

#### (3) 試験結果との比較

図-9に本研究の接合要素を用いた解析結果と試験結果の頂部変位-荷重関係を比較したものを示す。解析と試験結果の初期剛性に違いが見られるが、試験結果の特徴をよく捉えていることが分かる。特に、変位レベルが大きくなるにつれて耐力が徐々に低下し、履歴曲線のピンチ効果が顕著になる点等、試験体の復元力特性をよく表現している。さらに、最終ループ近くにおける荷重反転時の変位スリップ区間が非常に長くなっている点についてもよく一致している。著者らは前報で、繰り返しの劣化を無視した材料モデルを用いた解析においても、鉄筋モデルとコンクリートモデルの履歴依存性の相互作用によって、部材全体の靱性が低下する機構を指摘した<sup>11)</sup>。本解析でも靱性の低下現象が顕著に現れている。なお、解析と試験の初期剛性に差異が見られた原因としては、乾燥収縮による初期ひびわれの影響等が考えられるが、その原因は明確でない。

図-10に壁とベース間接合部のすべりと水平荷重の

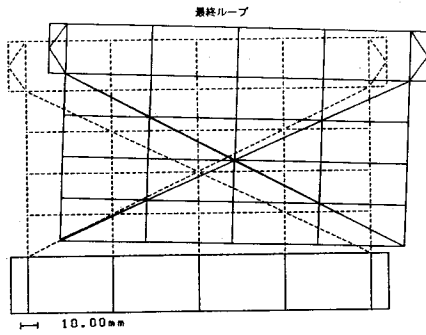
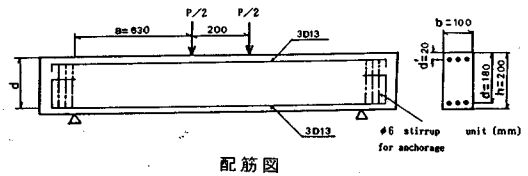
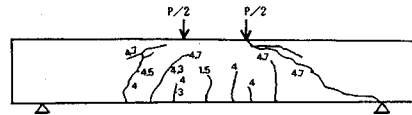


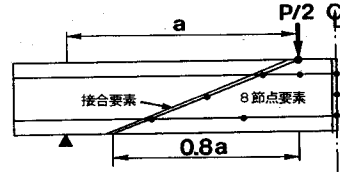
図-11 最終変形状態 (解析結果)



配筋図



最終破壊状態



要素分割

図-12 はり試験体

表-2 はり試験体諸元

a/d	コンクリート 圧縮強度 (MPa)	コンクリート 引張強度 (MPa)	コンクリート 弾性係数 (GPa)	鉄筋 降伏強度 (MPa)	鉄筋 弾性係数 (GPa)	鉄筋径 (mm)
3.5	23.5	2.35 <sup>*1</sup>	19.6	366	203	D13

\*1 日本建築の1型に設定

関係を示す。試験、解析結果とも、非常に大きなすべりが発生しており、本接合要素が接合部の局所挙動（特に、打継面での応力伝達特性）について精度良く予測していることが分かる。載荷点変位と接合部のすべりの比率から考えると、変形の大部分は接合部のすべりによって占められており、接合面の力学的挙動が部材全体の復元力特性に大きな影響を与えていることが理解される。

図-11に解析による変形状態の代表的なものを示す。壁部のせん断ひびわれは、解析においてもほとんど開口しておらず、斜めひびわれに対する精度も大きな問題はないことが確認できる。

#### 4. その他の試験体に対する検証

##### (1) はり試験体

a/dが比較的大きく、せん断補強筋を持たないはり試験体は、曲げに対する抵抗力が十分強い場合、斜め引張破壊することが知られている。斜め引張破壊は一本のせん断ひびわれが支持点付近から加力点に向けて貫通することによって生じる。したがって、試験体の力学的性状を主に支配しているのはこのせん断ひびわれであり、離散ひびわれモデルの今後の適用が期待されている。

##### a) 試験体

池田らが行った図-12に示すはり試験体を対象に、せん断ひびわれに接合要素を適用したFEM解析を試みる。本試験体はJCI選定はり試験体のマイクロデータNo.1であり<sup>20)</sup>、せん断補強筋を持たないスレンダーなはり試験体である。同図に示すように、一本のせん断ひびわれが加力点に向けて貫通することによって破壊に至っており、典型的な斜め引張破壊である。試験体の諸元を表-2に示す。本試験では、せん断破壊後一旦除荷し、その後繰り返し荷重を行っている。これまで、せん断破壊するはりを対象とした有限要素解析は数多くなされてきたが、せん断破壊後の挙動を解析で求めた例は無い。本問題は経路依存性を追求した接合要素モデルの検証に有効であり、数値解析の安定性を確認するにも好都合である。

##### b) 解析モデル

離散ひびわれモデルを鉄筋コンクリート部材に適用する場合、ひびわれ発生位置を予測して要素分割を行う必要がある。ここでは、試験結果があらかじめ分かっているので、試験体の特徴を表現するに最低限必要な要素分割を行うことを念頭に、図-12に示す対称要素分割を使用した。はり高方向に3分割し、上側と下側要素に実際の圧縮鉄筋、引張鉄筋と等量の鉄筋をそれぞれ配し、曲げひびわれは試験体中央に接合要素を配すことによって考慮した。せん断ひびわれについては、図-12に示すように、はり下端のせん断ひびわれ貫通点と加力点の距離がせん断スパンaの8割になるよう設定した。実際のせん断ひびわれはある程度蛇行しているが、ここでは、加力点を通る直線として表現した。接合要素以外の有限要素はすべて弾性である。

加力点を接合要素が貫通しているため、加力点は数値解析上、2重節点となり、図-13に示すように、2重節点のどちら側の節点に加力するかによって解析結果が異なると思われる。そこで、両ケースについて解析を行い、その影響度合いを検討することとした。以下では、せん断ひびわれが加力点の真下を貫通するモードを上側荷重(Case-1)と呼び、外側を貫通するモードを下側荷重(Case-2)と呼ぶ。最大耐力到達までは、0.02 mm ピッ

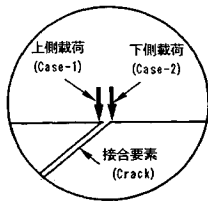


図-13 加力節点の選択

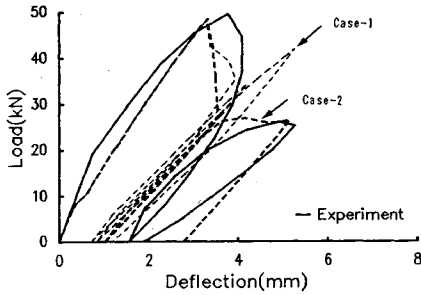


図-14 荷重-変位関係

チの変位ステップを用いた加力点の変位制御で解析を行うこととし、破壊後の繰返しループについては載荷時は変位制御、除荷時は荷重制御にて解析を行った。

c) 解析結果

図-14 に荷重-スパン中央のたわみ関係に対する試験結果と解析結果の比較を示す。非常に簡素な要素分割にもかかわらず、最大耐力までの試験結果と解析結果は比較的よく一致している。最大耐力までの曲線形状が試験結果に比べて直線的であり、解析の比線形性が弱い傾向にあるが、これは曲げひびわれを一本の接合要素で表現したためと思われる。解析上の最大耐力は 48.1 kN であり、試験結果の 46.3 kN に対して良好な結果となった。解析においても、せん断ひびわれを模擬した接合要素が開裂したと同時に破壊に至った。なお、Case-1, 2 の最大耐力に差はなく、加力点の違いが最大耐力に及ぼす影響は全く見られなかった。

せん断破壊後の繰返し載荷に対しても解析を試みたことは前述した通りであるが、Case-1, 2 とも非常に安定して解を求めることができた。一般に、最大耐力到達後の RC 部材の挙動を解析で求めることは困難であるが、これは構成材料の圧縮軟化特性に起因して部材が最大耐力に達する場合に当てはまる。この場合、つり合い解は軟化要素の領域面積に依存するため、解が一意的に定まらないのである。しかし、斜め引張破壊後の部材の挙動解析では非線形領域は限定されており、つり合い解の存在と言う観点から見ると、比較的容易に解を得ることができると考えられる。本解析において、数値解析上非常に安定して解を得ることができたのも、非線形性を持つ要素の配置を限定した点による所が大きい。

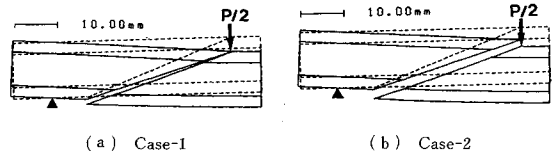


図-15 最終破壊状況 (解析結果)

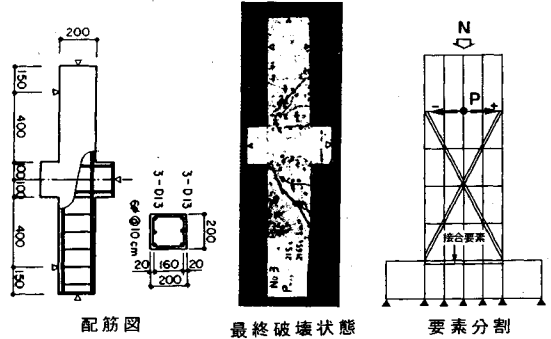


図-16 柱試験体

表-3 柱試験体諸元

試験体仕様				コンクリート	コンクリート	コンクリート	鉄筋降伏強度	
b × D (cm)	軸力 N (kN)	柱主筋	7-7 筋	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	D13 (MPa)	6φ (MPa)
20 × 20	160	3-D13	2-6φ	18.4	21.4	2.04	473	333

図-15 は解析で得られた繰返し載荷後の最終破壊状況である。Case-1 と Case-2 で、大きく破壊性状が異なっている。図-14 の荷重-変位曲線からも分かるように、載荷方法の違いによって最大耐力到達後の挙動も大きく異なっている。試験結果と比較すると、Case-2 (下側載荷) の方が実際の挙動に近いようである。ただし、ディープビーム等ではこの傾向が逆転する可能性もあり、今後、慎重な検討が必要と思われる。一般に、せん断破壊するばかりでは、載荷点のどちら側をひびわれが貫通するかによってひびわれ発生後の挙動が大きく変化することが指摘されており、解析結果もこの事実を反映したものである。

今後、ひびわれ発生基準、鉄筋・コンクリートの 3 次元効果等を考慮して、精度を高めることを前提とした上で、鉄筋コンクリートはりのせん断破壊問題を離散ひびわれモデルで解析するための素地ができたものと考えられる。

(2) 柱試験体

a) 試験体

ここでは、図-16 に示す遠藤らが実施した柱試験体の解析を行う。試験体の諸元を表-3 に示す。本試験体は、はり試験体と同様、JCI の柱選定試験体であり、ミクロデータ No.2 に対応する<sup>21)</sup>。曲げ降伏以降のせん断破壊は、RC の重要な経路・履歴依存性であり、これを

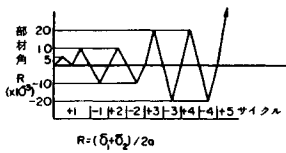


図-17 荷重方法

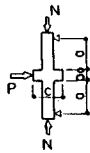


表-4 柱試験体解析結果一覧

	ひびわれ発生荷重(kN)		主筋 降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
	曲げ ひびわれ	せん断 ひびわれ		
試験結果	78.4	137.2	192.1	211.7
解析結果	61.7	166.6	196.0	-

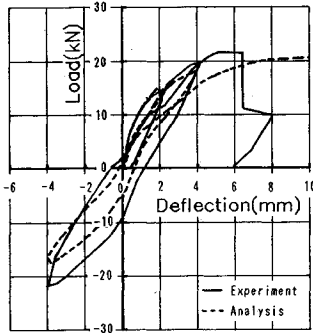


図-18 荷重-変位関係

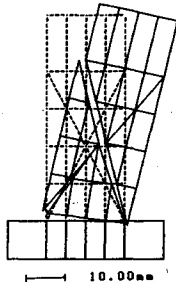


図-19 最終破壊状況 (解析結果)

解析できることは意義がある。さらに、鉄筋モデルのせん断補強筋への適用性を合わせて検討する。

図-17に示すように、軸力を加えた後、単純はり形式で荷重されており、試験は部材角を段階的に増加させることによって正負交番で行われている。試験体の諸元は、引張鉄筋比  $p_t = 0.95\%$ 、せん断補強筋比  $p_w = 0.26\%$  であり、引張鉄筋に比較して、せん断補強筋量が少ない試験体である。破壊モードは引張主筋降伏後のせん断引張破壊であり、最終破壊状況を図-16に併せて示す。

b) 解析モデル

要素分割は図-16に示す通りであり、試験体の対称性を考慮して、上側半分だけをモデル化した。試験体の破壊状況を考慮して、曲げひびわれとせん断ひびわれをそれぞれ接合要素でモデル化した。本解析も、解析の簡便性を考慮して必要最小限の要素分割とした。なお、接合要素以外の平面要素はすべて弾性である。柱主筋、せん断補強筋は、実際の鉄筋量と等価になるように接合要素の鉄筋比を調整してモデル化した。

c) 解析結果

図-18に荷重-変位関係に対する試験結果と解析結果の比較を示す。試験結果に比べて解析結果のループ面積が小さい等若干の差異が見られるが、最大耐力到達までの変形状態は概ね一致している。解析のループ面積が小さくなる原因としては、接合要素以外を弾性要素とした点や複数のひびわれを一本の曲げひびわれやせん断ひびわれで代表させた点等が考えられる。

試験では、せん断ひびわれ貫通後、急激に耐力低下が生じているのに対して、解析では、このような耐力低下

は見られず、柱引張主筋の降伏によって耐力が決定されており、破壊性状も穏やかなものとなっている。ただし、解析においても、図-19の最終破壊状況図が示すように、せん断ひびわれは大きく開口している。せん断破壊後の急激な耐力低下は、せん断補強筋の拘束効果、せん断ひびわれ先端部のコンクリートの破壊基準等も関連しており、この点のモデル化が未だ不十分である。本解析では、せん断補強筋の定着長が十分であることを仮定しているが、実際のせん断補強筋は、鉄筋を折曲げることによって定着されている。折曲げ鉄筋のひびわれ面からの抜け出し性状は、十分長い定着長を持った鉄筋のそれとは大きく異なることが予想される。ひびわれ近傍での鉄筋の定着方法に見合ったモデルの構築が必要であろう。また、せん断ひびわれ先端部は、せん断応力と直応力が非常に卓越した箇所であり、ひびわれ面の応力伝達モデル以外にコンクリートの構成則自身も大きく関連していると思われる。今後より精密なモデル化を要する点である。

表-4に試験結果と解析結果の概要を示す。せん断ひびわれ発生荷重等、概ね一致しているが、先に述べたように、破壊モードの予測精度等、改良の余地は残されている。なお、本解析においても、全載荷過程にわたって、安定したつり合い解を求めることができた。今後、離散ひびわれモデルとその周辺要素の細部を詰めることによって、より精度の高い解析を目指すつもりである。

(3) 温度荷重を受ける壁試験体

壁部材、はり試験体、柱試験体等に接合要素を適用する場合、鉄筋の定着方法の考慮、ひびわれ発生位置の予測等、いくつかの問題が残されている。これに対して、マスコンクリートに発生する温度ひびわれは、ひびわれ発生本数が少なく、ひびわれ発生パターンも容易に推定できる場合が多い。例えば、壁部材では、水平打継面に沿ったひびわれや壁部材軸に直交するひびわれの発生が容易に予測できる。温度ひびわれ制御の問題は、接合要素の応用が適している分野である。

a) 試験体

解析対象とする試験体は、図-20に示す、河野らによる被拘束体と拘束体からなる壁状試験体である<sup>22)</sup>。本試験体は、壁状構造物の温度ひびわれ性状を検討するために実施されたものである。試験体は、実際の施工法を考慮して2度打設されており、拘束体打設後1週間、打継目に目荒らし処理を施した後、被拘束体が打設された。本試験の特徴は、拘束体と被拘束体の温度をコント

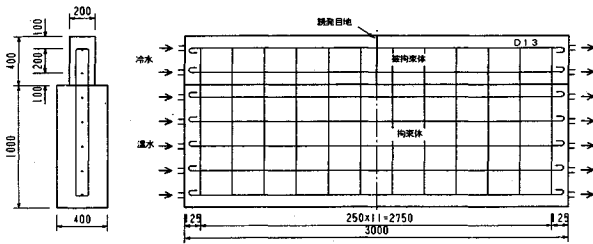


図-20 温度荷重を受ける壁状試験体

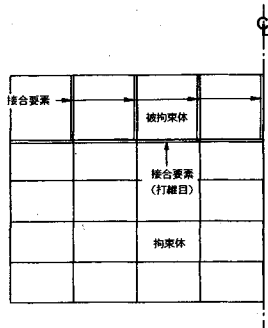


図-21 要素分割

ロールする事によって、人為的に温度荷重を発生させている点である。試験は、試験体全体に埋め込まれたパイプに温水を通して、一様に温度上昇させた後、被拘束体のパイプに冷却水を流し、被拘束体の温度分布を出来るだけ一様に保ちながら、徐々に冷却することによって行われた。なお、試験体表面を断熱材で覆うことによって、断面内の温度分布を一様にするよう留意されている。コンクリートの硬化がほぼ終了した時点で、短時間に試験が実施されているため、コンクリート物性の時間依存性（硬化特性、クリープ特性等）の影響を極力排除した状態で、温度荷重による構造挙動を検討することが可能な点が、本試験体を選定した理由である。

b) 解析モデル

図-21 に解析で使用した要素分割を示す。試験体の対称性を考慮して、左半分のみをモデル化した。打継面については、2章で用いた打継に対応する接合要素を使用した。打継面直交方向のコンクリートの引張強度についても同様に、通常の引張強度の6割とした。ひびわれ発生間隔をある程度把握できるように、壁高さ程度の間隔で接合要素を配置した。なお、被拘束体中央部には、深さ 10 mm の誘発目地が設けられている。誘発目地部の接合要素の奥行き方向の厚さを変えることで、その影響を考慮した。

拘束体と被拘束体の温度の差の平均値を一樣温度荷重として入力することによって解析を行った。なお、試験体内の温度差は、最大でも 4℃ 程度であり、一樣温度分布として解析を行ってもその影響は少ないものと思

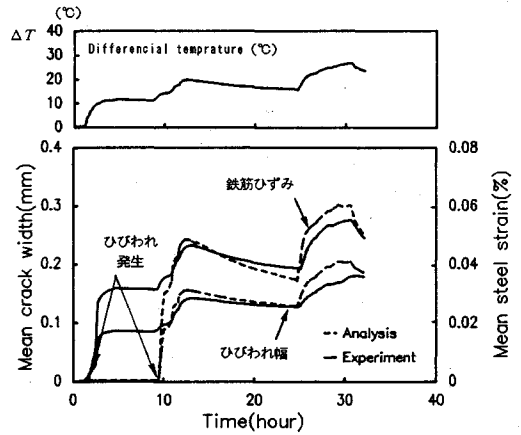


図-22 平均ひびわれ幅、鉄筋ひずみの時間変化

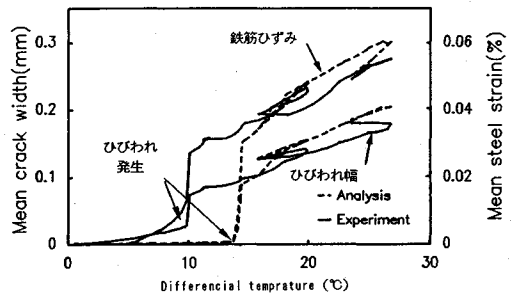


図-23 平均ひびわれ幅、鉄筋ひずみと温度降下量の関係

れる。

c) 解析結果

図-22 に被拘束体誘発目地に発生したひびわれの平均ひびわれ幅と平均鉄筋ひずみの時刻歴を示す。ここでの平均値は、壁部上下のひびわれ幅と鉄筋ひずみを平均したものである。同図から分かるように、解析結果と試験結果は非常によく一致している。ただし、ひびわれ発生時期が試験に比べて若干遅れたため、試験初期についてはかなりの差異が生じている。ひびわれ発生時期は、乾燥収縮ひずみや誘発目地での応力集中が影響を及ぼすと考えられ、解析ではこの影響を無視したためこのような差が生じたものと思われる。

図-23 は、平均ひびわれ幅、鉄筋ひずみと温度降下量の関係を示したものである。試験、解析結果とも、温度降下量とひびわれ幅、鉄筋ひずみはほぼ線形関係になっていることが分かる。従来から、温度降下量とひびわれ幅はほぼ直線関係になることが指摘されているが<sup>23)</sup>、本解析結果からも、温度降下量とひびわれ幅の関係を線形と考えることの妥当性が理解される。ただし、これは、あくまでコンクリートの時間依存性を無視した場合に成立する関係であるため、実際のコンクリート構造物に適用する際には、さらにクリープの考慮が必要で



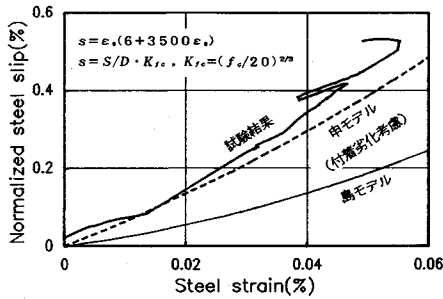


図-24 鉄筋ひずみ-すべり関係

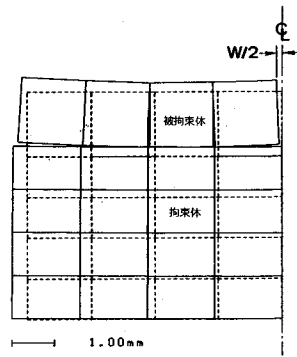


図-25 ひびわれ発生状況

ある。

本試験体誘発目地部のひびわれ幅を支配している最も大きな要因は、ひびわれ位置での鉄筋の抜け出し性状である。本解析が誘発目地のひびわれ幅を高精度で予測できた原因は、鉄筋モデルの精度によるところが大きい。著者らの離散ひびわれモデルを構成する鉄筋モデルは、申らによるひびわれ近傍での付着劣化を考慮した鉄筋ひずみ-すべりモデルである。図-24は、試験から得られた無次元化鉄筋すべりと鉄筋ひずみの関係と申モデルを比較したものである。申モデルと試験結果はよく一致しており、温度荷重によって生じたひびわれ面での鉄筋の抜け出し性状についても、有効であることが確認された。なお、申モデルは間接的にひびわれ幅  $\omega$  と鉄筋ひずみ  $\epsilon_s$  を結び付けるものであり、弾性範囲での  $\omega$  と  $\epsilon_s$  の関係は次式となる。

$$\omega/2 = \epsilon_s(6 + 3500\epsilon_s) \cdot (20/f_c)^{2/3} \cdot D \dots \dots \dots (a)$$

ここに、 $f_c$ : コンクリート強度 (MPa),  $D$ : 鉄筋径である。本研究ではさらに、鉄筋の構成則を用いて  $\epsilon_s$  から鉄筋応力  $\sigma_s$  を算定している。

図-25は解析で得られた最終ひびわれ発生状況である。誘発目地部のひびわれが大きく開口しているのに対して、他のひびわれは全く開いていないか、開いていても非常に小さいひびわれ幅となっており、貫通ひびわれは無い。試験後の目視では、誘発目地部のひびわれ以外の発生は認められなかったため、若干の差異があるが、解析で得られた誘発目地部以外のひびわれ幅は0.02 mm程度である。仮に発生していたとしても目視では発見できない可能性がある。また、構造物の耐久性や止水性の観点からは、0.02 mmのひびわれ幅は無視できる程度であり、解析においても、誘発目地部以外に有害なひびわれは発生していないと言える。この観点からみると、本解析は、ひびわれ間隔についてもある程度の精度で予測できるといえよう。

打継面の挙動に着目すると、解析では、試験体端部及び打継面近傍で大きな剝離現象が生じていることが確認できる。本試験では、打継目のひびわれ幅等の測定を行っていないため、定量的な検討はできないが、試験後の目

視によれば、解析とほぼ同様な剝離が確認されている。打継目のモデル精度は、ひびわれ間隔、目地部のひびわれ幅に影響を及ぼすと考えられ、これらに対する解析精度が比較的良好であったことから、打継面の応力伝達に対するモデル化も妥当なものであったと推定される。

### 5. まとめ

本研究において、アイソパラメトリック接合要素に著者らが開発した離散ひびわれモデルを組み入れて、種々のRC部材を対象とした解析を行った。特に、少数のひびわれのみを含む耐震壁の解析を通じて、部材レベルでの離散ひびわれモデルの適用性を検証した。以下に、本研究の結論をまとめる。

- 1) 接合要素が接触・分離を繰り返す高非線形挙動に対して、安定した取束をもたらす解法を提案した。
- 2) 離散ひびわれを含む領域の剛性が高いケースについて、部材レベルでの検証を行い、繰り返し載荷経路を含めて、十分な精度を有していることを示した。
- 3) 複数の離散ひびわれが導入される場合のひびわれ交差点付近の鉄筋や折曲げ定着された鉄筋の抜け出し特性等のディテールをさらに詰めていき、分散ひびわれモデルとの併用によるはり・柱の靱性予測、マスコンクリートの温度ひびわれ制御への応用に発展させていく素地が解析手法の上で確認された。

謝 辞：本研究を遂行するにあたって東京大学教授 岡村 甫博士から始終有益なご指導を賜りました。また、数値解析におきましては、間組技術研究所 坂田英一氏のご協力をいただきました。ここに深甚なる謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 岡村・前川：鉄筋コンクリートの非線形有限要素解析，土木学会論文集，No. 360/V-3, pp. 1~10, 1985年8月。
- 2) 出雲・島・岡村：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学，Vol. 25, No. 9,

- pp.107~120, 1987年9月.
- 3) 野口・長沼：繰り返し受ける RC 柱・はり接合部の非線形解析，第2回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.139~146, 1973年10月.
  - 4) 出雲・申・前川・岡村：正負繰り返し面内応力下における RC 板要素の解析モデル，土木学会論文集，No.408, V-11, pp.51~60, 1989年8月.
  - 5) 申・前川・岡村：繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の復元力解析，コンクリート構造物の靱性とその評価方法に関するコロキウム論文集，JCI-C12, pp.2-45~2-56, 1988年3月.
  - 6) 申 鉉穆：繰り返し面内力を受ける鉄筋コンクリート部材の有限要素解析，東京大学博士論文，1988年6月.
  - 7) 三島・山田・前川：正負交番荷重下における鉄筋コンクリートひびわれ面の局所的挙動，土木学会論文集，No.442/V-16, pp.161~170, 1992年2月.
  - 8) 三島・Bujadham, B.・前川・岡村：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年2月.
  - 9) 三島・Bujadham, B.・前川：正負交番荷重に適用可能な RC 離散ひびわれモデルの開発とその適用範囲，土木学会論文集，No.442/V-16, pp.181~190, 1992年2月.
  - 10) 三島・原・前川：交番荷重による RC ひびわれ面のせん断剛性低下のメカニズム，土木学会論文集，No.442/V-16, pp.191~200, 1992年2月.
  - 11) Bujadham, B., LI, B. and Maekawa, K. : Path-dependent stress transfer along crack in concrete, Proceedings of the JCI colloquium on analytical studies on shear design of reinforced concrete structures, JCI, pp.65~72, Oct.1989.
  - 12) Feenstra, P.H., de Borst, R. and Rots, J.G. : Stability analysis and numerical evaluation of crack-dilatancy models, Proceedings of 2nd international conference on computer aided analyses of concrete structures, Zell-am-See, Vol.2, pp.987~999, April 1990.
  - 13) Sima, H., Chou, L. and Okamura, H. : Micro and macro models for bond behavior in reinforced concrete, Journal of the faculty of engineering, The University of Tokyo (B), Vol.39, No.2, 1987.
  - 14) 山田・江澤：接合要素とその有限要素解析における応用，生産研究，31巻6号，pp.20~27, 1985年.
  - 15) 前川・二羽・岡村：鉄筋コンクリート用解析プログラム「COMM2」，第2回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.79~86, 1983.
  - 16) 前川宏一：有限要素法による鉄筋コンクリート非線形解析の数値計算上の特徴，コンクリート構造物の設計に FEM 解析を適用するためのガイドライン，日本コンクリート工学協会，pp.127~134, 1989.
  - 17) 原・三島・Bujadham, B.・前川：一般化された RC 接合要素の打継ぎ面への適用，第45回土木学会年次学術講演会講演概要集，第5部，pp.600~601, 1990年9月.
  - 18) 飯島・大塚・佐藤・原：打継目におけるせん断伝達耐力の評価について，コンクリート工学年次論文報告集，第12巻第2号，pp.311~314, 1990年.
  - 19) Saatcioglu, M. : Hysteric shear response of lowrise walls, International workshop on concrete shear in earthquake, Houston, pp.112 (1~10), Jan. 1991.
  - 20) 二羽淳一郎：「はり選定試験体」選定理由および実験データの概要，第2回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム解析モデル検証用試験体の実験データ集，pp.1~8, 1983年10月.
  - 21) 吉岡研三：「柱選定試験体」選定理由および実験データの概要，第2回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム解析モデル検証用試験体の実験データ集，pp.9~20, 1983年10月.
  - 22) 河野・横沢・谷：マスコンクリートの温度ひびわれ幅に関する実験的研究，土木学会第26回年次学術講演会概要集，第5部，pp.462~463, 1991年9月.
  - 23) 長滝重義他：水和熱による温度ひびわれ幅の実用算定法，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.1~4, 1985年.

(1991.5.23 受付)

## DISCRETE CRACK FINITE ELEMENT ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO ALTERNATE FORCE AND THERMAL LOAD

Tetsuya MISHIMA, Kazuie YAMADA and Kohichi MAEKAWA

A FEM analysis with discrete crack modeling based upon an isoparametric joint element is presented. The steel slip model and stress transfer model along cracks are incorporated in the discrete crack model. The aim of this paper is to establish the numerical method which can give a stable solution under any reversed cyclic loading path, and to show the wide applicability to RC structures subjected to reversed cyclic as well as the thermal loads. Through the comparison with experimental results of various RC members, proposed analytical method is effective enough to estimate the behavior of RC structures subjected to various loads.