

# 非直交する独立4方向ひび割れ群を有する 平面RC要素の空間平均化構成則

福浦尚之<sup>1</sup>・前川宏一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 大成建設株式会社 技術研究所 (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京大学大学院社会基盤工学専攻教授 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

本研究は、2次元平面応力状態で最大4方向まで、独立して交差するひび割れを有するRCの履歴依存型空間平均化構成モデルの構築を行ったものである。提案するRCモデルは、従来の2方向ひび割れ挙動に関するアクティブクラック法を拡張し、疑似直交2方向ひび割れを対象とするRCモデルと組み合わせたものである。多方向ひび割れ間の開口と閉合をモデルに取り込み、できる限り実際の力学現象に対応したモデル化を図った。要素レベルの検証として、本研究にて実施した一様応力場での3・4方向ひび割れRC要素実験との比較解析を行い、作用応力-ひずみ関係、作用応力の変化に伴う新規ひび割れの発生とアクティブクラックの乗り移りなど、良好に挙動を追跡できることを確かめた。

**Key Words :** constitutive model, multi-directional cracks, reversed cyclic loading, FEM, smeared crack

## 1. 序論

鉄筋コンクリート構造の動的応答解析は、耐震性能の評価に有用な情報を提供する技術であり、今後一層の精度向上と適用範囲の拡大が求められている。構成材料の非線形挙動から力学モデルを組み上げ、変位法に基づく非線形解析を通じて部材・構造の挙動を予測する方法は、構造形式や荷重形態に特段の制限が無く、高い一般性を有するために長年、研究開発が続けられてきた<sup>1)</sup>。特に、場所毎に異なる構成材料の損傷状態が数量化されて出力されるため、地震作用中の安全性のみならず、地震後の残存機能を評価する情報も提供される。大地震に対する構造物の損傷制御を考える上で、今後、重要な意味を有するものと思われる。

地震作用のように繰り返し応力経路が導入される場合、部位によっては独立多方向にひび割れが導入されることも多々、観察される。耐震壁のように、大きなせん断力が交番して作用する場合は、2方向にひび割れを有する鉄筋コンクリート要素の構成モデルが、動的応答解析結果の信頼性をほぼ確定するといっても過言ではない。独立2方向にひび割れを有する構成モデルは、これまで幾つか提案されており<sup>2)~7)</sup>、静的繰り返し作用下の挙動解析や、一部、動的非線形応答解析などにも適用されてきた<sup>8)・9)</sup>。

今日、多方向入力<sup>10)・11)</sup>下の応答解析、三次元非線形解析の展開<sup>12)~14)</sup>、主応力軸の回転を伴う複

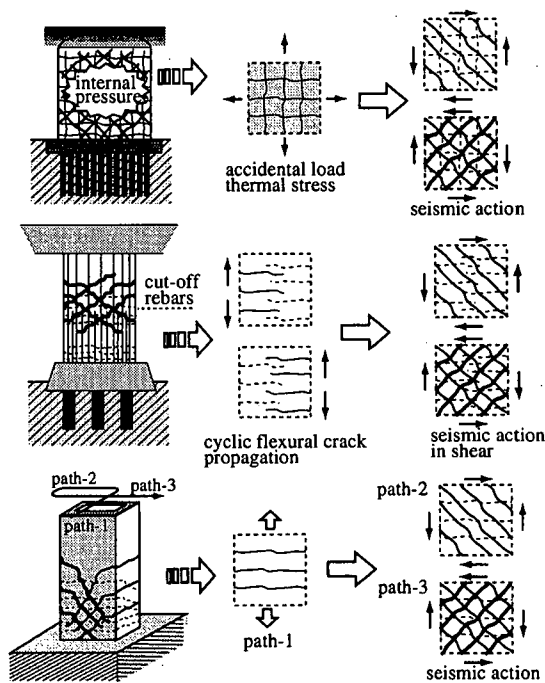


図-1 多方向ひび割れ<sup>20)</sup>

合荷重下の非線形挙動、配筋のパターンが急変する領域を有する応答など(図-1参照)、従来の2方向ひび割れに立脚する非線形応答解析では、十分に対処しきれない構造工学上の問題も現れてきている。有限要素法に基づく非線形応答解析の適用性拡大には、もはや独立2方向ひび割れに留まった構成則では不

十分となりつつある。

3・4方向にまで展開する多方向ひび割れを陽な形で、しかも交番繰り返しを含む経路に対して構成則に取り入れることに成功した例は、現時点ではまだ見られない。ただし、多方向ひび割れを陰な形で連続的に表現しようとするモデル化は、過去に幾つかの提案が行なわれている。いわゆるRotating Crackモデル<sup>15)</sup>および修正圧縮場理論<sup>16)</sup>は、ひずみの主軸と応力主軸の一致を仮定することで、あたかも連続的にひび割れが順次、異なる方向に導入されたかのごとく、ひび割れ非線形を扱う力学モデルである。また、マイクロプレーンモデル<sup>17), 18)</sup>は、予め空間に多方向の非線形バネが配置されているとし、各々のバネはひび割れ破壊を呈する自由度が付与されている。その集合として、ひび割れが内在するコンクリートの平均的な構成関係を与えようとする力学モデルである。これを用いて繰り返し応力を受ける柱はり接合部の3次元解析に適用した事例も報告されている<sup>19)</sup>。

これらの力学モデルは、ひび割れの方向が少なくとも空間的に固定していると扱うものではない。実際、ひび割れは要素内で分散して導入される場合でも、その方向角は離散的であり、現実の多方向ひび割れと直接的に関連づけることが難しい。Rotating crackモデル・圧縮場理論・マイクロプレーンモデルでは、非線形の主たる起源である想定ひび割れ面は相互に独立したものとして扱われる。非直交ひび割れに見られるひび割れ間の相互依存性は、これらのモデル設定において暗黙に無視されている。そのため、何らかの等価置換をおこなえば、現実の多方向ひび割れを有するコンクリートの損傷状況と対応させることが難しい。

耐震性能評価に用いられる構成則では、材料損傷状況をできる限り物理現象に忠実に再現した形で表現することが求められる。これらの背景から、筆者らは、構造要素内に独立3・4方向のひび割れ群を有するRC挙動に対し、多方向ひび割れの相互作用を考慮しつつ、従来のアクティブクラックの概念<sup>2)</sup>が適用可能であることを、速報にて報告した<sup>20)</sup>。本研究は、既に構築した疑似直交2方向RCモデル<sup>21)</sup>を基礎とし、多方向に導入されるひび割れの方向を陽な形で構成則に取り込み、異なる方向を有するひび割れ群間の相互作用（内的釣り合いと適合条件）を考慮した鉄筋コンクリートの構成則を追求するものである。

本研究では、疑似直交ひび割れを、交差角度 $\pi/2 \pm \pi/8$ の範囲で交差するひび割れと定義する。そして、非直交ひび割れを、その交差角の内、小さい鋭角が

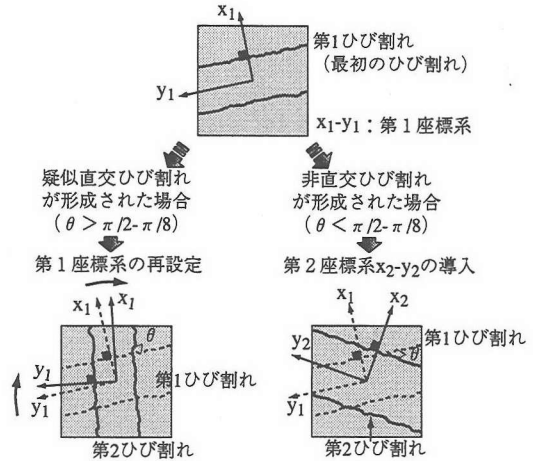


図-2 発生ひび割れと第1, 2座標系の関係

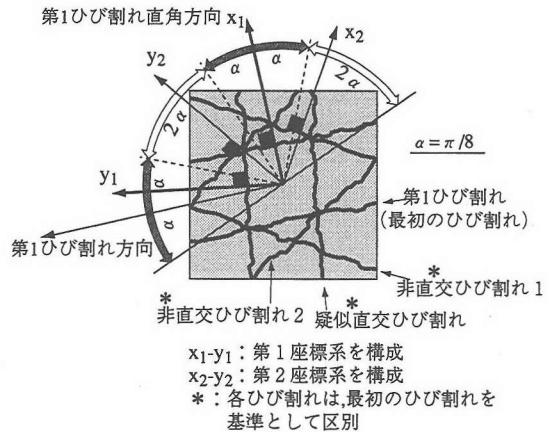


図-3 独立4方向ひび割れのモデル化

$\pi/2 - \pi/8$ 未満であるひび割れと定義する。

## 2. 疑似直交ひび割れ群とアクティブクラック座標系の選択

多方向ひび割れRC挙動に対する本研究の基本戦略は、疑似直交(2方向)ひび割れ群を含む鉄筋コンクリート領域に対する構成モデル<sup>21)</sup>を複合させることにより、4方向の非直交ひび割れ群を有するRCの力学を構築しようとするものである。

まず、独立4方向に生じるひび割れを、2つの直交座標系(以下、単に座標系と称す)と関連付ける。図-2に示すように、第1座標系の $x_1$ 軸は、最初に発生したひび割れに直交する方向に設定される。新たに発生した第2ひび割れが、第1ひび割れと疑似直交ひび割れの関係にある場合には、第1座標系の $y_1$ 軸を第2ひび割れ直角方向に再設定、すなわち移動する。もし、第2ひび割れが第1ひび割れと非直

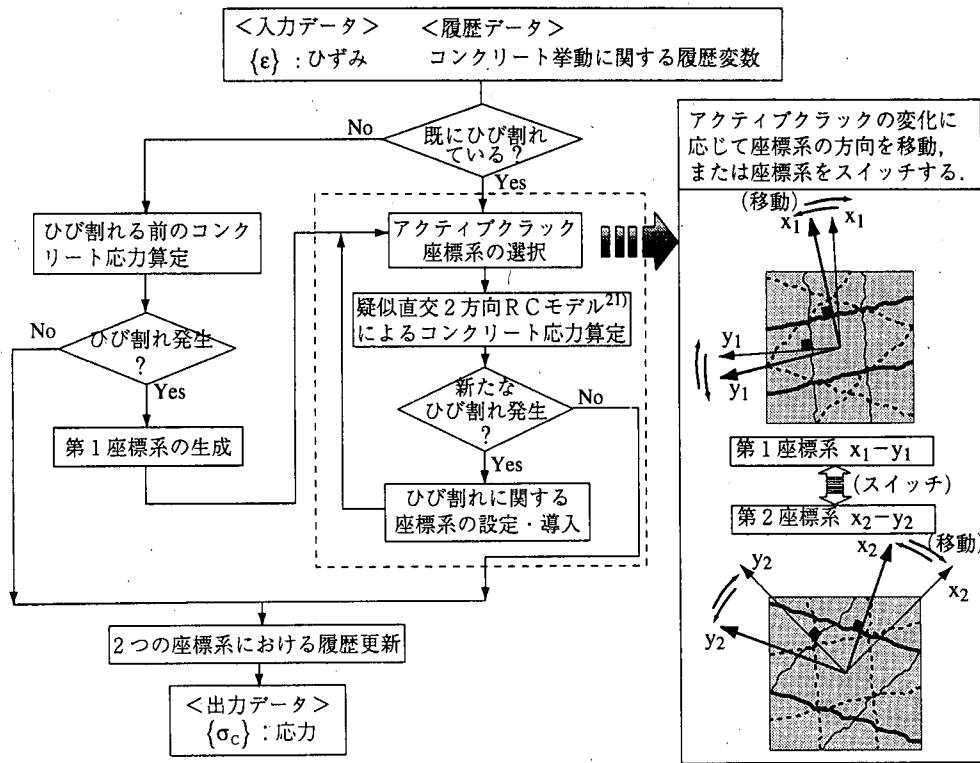


図-4 独立4方向にひび割れを有するコンクリート応力算定の仮説

交関係にある場合は、第2座標系を新たに導入して、第2ひび割れ直交方向が $x_2$ 軸となるように設定する。そして、図-3に示すように、独立4方向に発生するひび割れ群を2つの座標系のそれぞれの座標軸に関連付ける。このとき、 $x_1$ と $y_1$ に関係付けられるひび割れは互いに疑似直交ひび割れの関係に有り、 $x_2$ と $y_2$ に関係付けられるひび割れも互いに疑似直交ひび割れの関係にある。しかし、1方の疑似直交ひび割れ群からみれば、他方の疑似直交ひび割れ群は非直交ひび割れになっている。

本論文において、鉄筋コンクリートの非線形性が、上記2つの疑似直交ひび割れ系のいずれかによって支配される、との簡略化した力学モデルを提案する。即ち、どちらか一方の座標系に含まれる疑似直交ひび割れ群が、せん断ずれを起こしながら変形している際には、他方の非直交するひび割れ群に沿ってせん断ずれは進行しない、と仮定することに等価である。前者の座標系を、『アクティブクラック座標系』と定義し、後者のひび割れ群に対応する座標系を、『dormantクラック座標系』と定義する。これは、元来、2方向ひび割れに対して提案されたアクティブクラック法の概念<sup>2)</sup>を、2つのひび割れ集合に拡張した概念と言える。アクティブクラック座標系が選定されれば、それに準拠して、2方向疑似直交

ひび割れを有するRCの構成則<sup>2)</sup>が適用され、与えられたひずみ $\{\epsilon\}$ からコンクリート応力 $\{\sigma_c\}$ を算定する事ができる。以上の仮説をまとめたフローを図-4に示す。

このモデルにおいて、コンクリートの履歴挙動を表現するために必要な履歴変数は、それぞれの座標系において定められる。せん断ずれ変形に関する履歴変数は、アクティブクラック座標系上で更新され、相対するdormantクラック座標系上のせん断履歴変数は当然ながら、更新されない。アクティブクラック座標系が荷重履歴に応じてスイッチした場合には、スイッチした座標系において過去に受けたひずみ経路と現ひずみ値から応力が算定され、その座標系においてせん断履歴変数が変更される。なお、各方向のひび割れに直交する応力伝達機構の履歴変数は、アクティブ・dormantの別にかかわらず、両座標系における応力・ひずみ履歴に従って更新される。

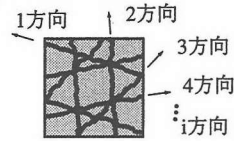
このRCモデル構築の基本仮説である、アクティブクラック法の概念<sup>2)</sup>を2つのひび割れ集合に拡張することの妥当性については、次章の数値実験で確認することができた。さらに、4章では、具体的なRC応力の算定フローを構築する。

a) 応力ひずみ関係のマトリックス表示<sup>22)</sup>

$$\{\sigma\}_{rc} = \{\sigma\}_r + \{\sigma\}_c = \left( [D_c] - [D_c][T_c] \left( [GS] + [T_c]^T [D_c][T_c] \right)^{-1} [T_c]^T [D_c] \right) \{\varepsilon\} + [D_r][T_r] \{\varepsilon\}$$

$\{\sigma\}_{rc}, \{\sigma\}_r, \{\sigma\}_c$ : 鉄筋コンクリート, 鉄筋, コンクリート応力  
 $\{\varepsilon\}$ : ひずみ

$= \{\varepsilon\}_{d0} + \{\varepsilon\}_{c1} + \{\varepsilon\}_{c2} + \dots + \{\varepsilon\}_{ci}$   $i$ : ひび割れの方向数  
 $\{\varepsilon\}_{d0}$ : ひび割れに挟まれたコンクリートのひずみ  
 $\{\varepsilon\}_{ci}$ :  $i$ 方向のひび割れに関するひずみ



$[D_c]$ : ひび割れに挟まれたコンクリートの割線剛性マトリックス

$[D_r]$ : 鉄筋の割線剛性マトリックス

$[T_c]$ : すべてのひび割れ(1~ $i$ 方向)のずれ・開口ひずみの座標変換マトリックス

$[T_r]$ : 鉄筋ひずみの座標変換マトリックス

$[GS]$ : すべてのひび割れ(1~ $i$ 方向)面でのせん断・直方向の割線剛性マトリックス

b) 材料モデル

ひび割れに挟まれたコンクリートモデル: 弾性

鉄筋モデル: 弾性

$i$ 方向のひび割れ面での応力伝達モデル

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \tau \end{Bmatrix}_i = [GS]_i \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \gamma \end{Bmatrix}_i = \begin{bmatrix} S_i & SG_i \\ 0 & G_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \gamma \end{Bmatrix}_i$$

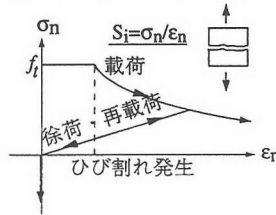


$i$ 方向ひび割れ

$S_i, SG_i, G_i$

:  $i$ 方向ひび割れ面での応力伝達に関する割線剛性 (右図)

(ひび割れ直角方向モデル)



(ひび割れせん断方向モデル)

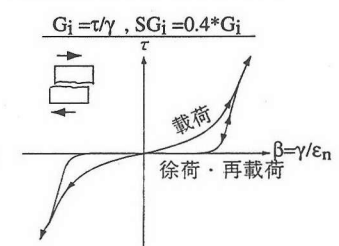


図-5 Implicit型RCモデル

3. アクティブクラック法の妥当性に関する数値実験

第2章のアクティブクラック法の仮説は、既往の非直交2方向ひび割れモデルを拡張したものである。この仮説の検証には、最終的には多方向ひび割れを含む鉄筋コンクリートの実挙動実験を通じて行なわれなければならない。これは第5章にて実証検討する。

本章ではそれに先立ち、数理展開上、最も厳密と思われるImplicit型RCモデルで多方向ひび割れ状態の内的釣り合いと適合条件を満足する数値解を求め、簡便法としてのアクティブクラック仮説の数理科学的根拠と等価性について、まず事前検討を行なう。

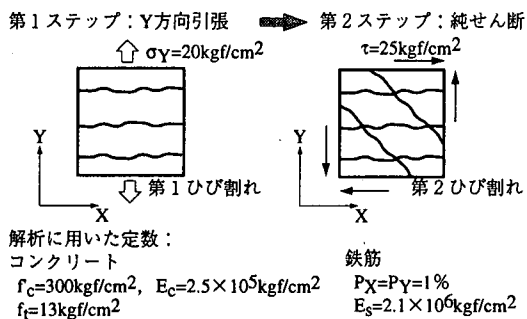
ひび割れ面での力の伝達とひずみの適合条件に基づく、2次元平面応力下でのひび割れた鉄筋コンクリートの応力とひずみの関係は、図-5a)に示すマトリックス形式で表される。この表現式は、de Borstら<sup>22)</sup>が導出している形式と同じである。

数値計算に用いる、ひび割れに挟まれたコンクリートおよびひび割れ面での応力伝達に関する割線剛性マトリックスを図-5b)に示す。RCモデルの構成を明確にするために、これらの関係には簡易なモデルを採用した。ここで、ひび割れ間の応力伝達に関

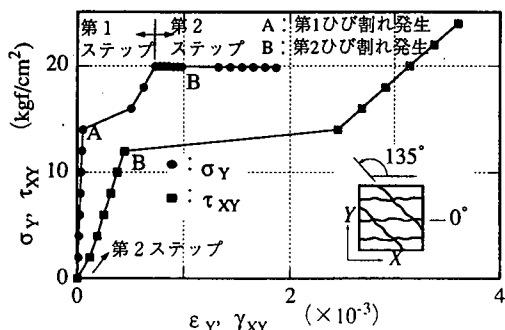
しては、せん断ひずみによる直応力への影響 (shear-dilatancy) を考慮した。なお、本数値シミュレーションでは鉄筋弾性範囲を対象とする事から、鉄筋モデルは弾性挙動とした。

(1)非直交2方向ひび割れ状態の数値シミュレーション

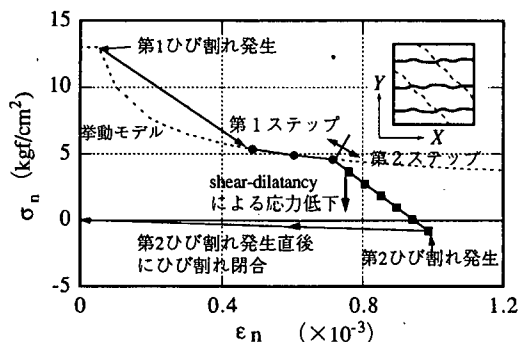
図-6a)に示すように、Y方向に引張力を載荷し第1ひび割れを発生させた後、せん断力を載荷し第1ひび割れに直交しない第2ひび割れが発生する過程を数値シミュレーションした。図-6b,c,d)に計算結果を示す。第1ステップ終了時に、Y方向には約700μの引張ひずみが生じている (図中b)。第2ステップでのせん断載荷により第1ひび割れに沿ったせん断ずれが生じひび割れ面でせん断応力が伝達される (図中d)。この時、第1ひび割れ直角方向の伝達応力が低下するとともに開口ひずみが増加しているが、shear-dilatancyによるものである (図中c)。これによるコンクリート応力の低下分は、Y方向鉄筋の伸びにより分担されている。せん断力を載荷し続けると第1ひび割れ間のコンクリートが引張強度に達し新たな第2ひび割れが発生する。第2ひび割れ発生直後に第1ひび割れは開口・せん断モードに関して徐荷経路に入り閉合し (図中c,d)、第2ひび割れ



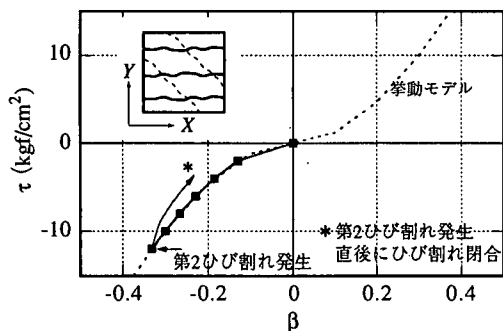
a) 計算条件



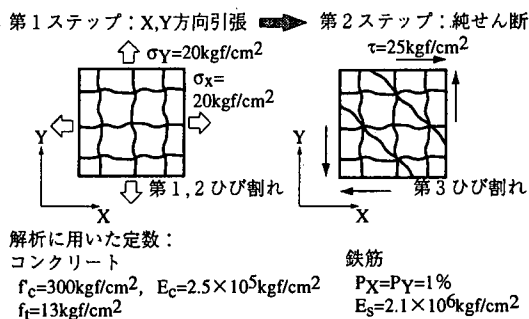
b) RC応力-ひずみ関係



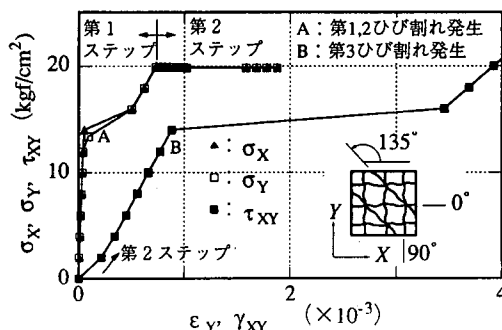
c) 第1ひび割れの引張挙動



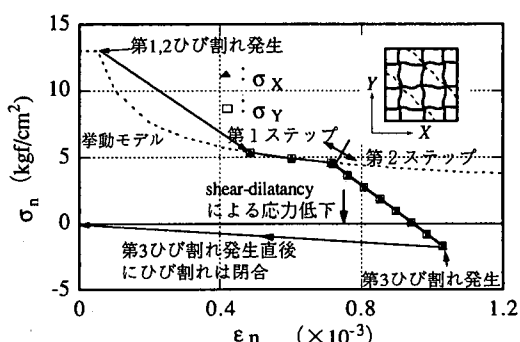
d) 第1ひび割れのせん断挙動



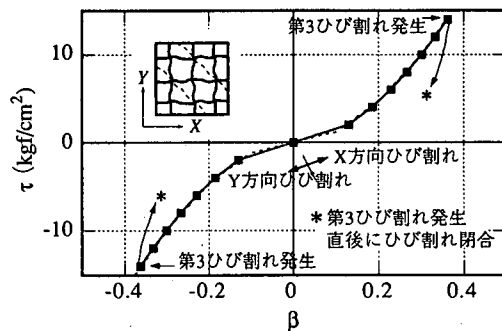
a) 計算条件



b) RC応力-ひずみ関係



c) 第1,2ひび割れの引張挙動



d) 第1,2ひび割れのせん断挙動

図-6 非直交2方向にひび割れるRC挙動の数値シミュレーション

図-7 独立3方向にひび割れるRC挙動の数値シミュレーション

の開口が進展する結果が得られた。この時、第2ひび割れ平行方向は圧縮応力状態に有り、直角方向は引張応力状態になっている。

### (2) 3方向ひび割れ状態の数値シミュレーション

3方向ひび割れ状態でのRC挙動の数値計算を行った。図-7a)に示すように、X,Y方向に引張力を載荷し、第1,2ひび割れを発生させた後にせん断力を載荷し第1,2ひび割れに直交しない第3ひび割れが発生する過程を数値シミュレーションした。図-7b,c,d)に計算結果を示す。直交2方向ひび割れ状態に新たな第3のひび割れが発生すると、既存のひび割れは開口・せん断に関して徐荷経路に入り閉合し、第3ひび割れの開口が進行する。この3方向ひび割れ状態でのRC挙動は、第3ひび割れに関するひび割れ直角方向・平行方向・せん断方向のコンクリートモデルと鉄筋モデルを組み合わせることにより近似的に表現できる事になる。これより、3方向ひび割れ状態でのRC挙動についても、アクティブクラック法の妥当性が厳密なRC数理挙動モデルから確認された。

### (3) Implicit型RCモデルによるRC挙動のまとめ

非直交2方向,3方向ひび割れ状態の数値シミュレーションにおいて、既存ひび割れに非直交するひび割れが発生した場合には、既存ひび割れは閉合し新たなひび割れの非線形性が卓越し、それがRC全体の非線形性を担う事が示された。この事は、アクティブクラック法の仮定が、十分に妥当性を有することを支持する数値実験結果と言える。

このImplicit型RCモデルのコンクリート応力 $\{\sigma\}_c$ と全ひずみ $\{\epsilon\}_c$ を関係付ける剛性マトリックスは、連続体コンクリートの剛性マトリックス $[D]_c$ 、各方向のひび割れ面での剛性マトリックス $[GS]$ から構成されている。各剛性マトリックスは、全ひずみ $\{\epsilon\}$ から分離されたひずみ $\{\epsilon\}_{c0}$ , $\{\epsilon\}_{ci}$ に関して非線形な関係となるのが一般的である。よって、与えられた全ひずみを分離し、各剛性マトリックスを構成してコンクリート応力を求める手順を実行するには、繰り返し計算によるなくてはならない。図-6,7)に実施したような簡単な事象に対しては、上記モデルを用いて各ひび割れの相互作用を陰解法にて厳密に解くことは、数値計算上多くの困難は伴わない。しかし、交番繰り返し作用を受け、しかも多方向にひび割れが存在する場合には、必要十分な簡略化を施し、数値解析上の効率と安定性を考えなければ、このImplicit型RCモデルにより実用的な解析システムを組むことは難しいと考えた。

## 4. アクティブクラック座標系(強非線形軸)の選択モデル

異なる方向の複数のひび割れが交差するとき、非直交関係にあるひび割れ同士については相互作用を無視する、という簡単な仮定は、十分に妥当であることが前章の数値実験により示された。あるひび割れに沿った非線形性が卓越する(強非線形あるいはactive)際には、他方向の非直交ひび割れに沿った非線形性は低い(弱非線形あるいはdormant)、として数値処理できることを意味する。岡村・前川らは、これを2方向ひび割れ群について適用した<sup>2)</sup>。

独立3方向にひび割れが交差する状況に対して、強・弱非線形軸の考えを拡張することを試みる。2方向ひび割れに対してactive,dormantの設定は容易かつ自明である。岡村・前川らはせん断剛性の低いひび割れ方向を強非線形軸と設定した<sup>2)</sup>。本論文でも同様に、3方向のひび割れの内、最もひび割れ面に沿ったせん断剛性が小さい方向を強非線形軸とする。ここで、設定した強非線形軸以外の2方向ひび割れ群に対しては全て相互作用を考慮しない、という方法がまず考えられる。しかし、残りの2方向ひび割れ群のいずれかが、強非線形軸を形成するひび割れに対して、直交あるいはそれに近い交差角を有する、すなわち疑似直交関係にある場合には、両者の相互作用を無視するのは、簡略に過ぎる可能性がある。

以上を鑑み、非線形性を強く呈する主たるひび割れに関して、それと最も直交関係に近い他方向ひび割れにのみ、相互作用(両ひび割れ群はせん断ずれを同時に起こす)を考慮し、その他の非直交関係にあるひび割れに対して、相互作用を無視する仮定を設けることとした。

独立4方向ひび割れ群についても同様である。まず、3方向ひび割れ群と同様の方法により、強非線形軸を形成するひび割れ群を確定する。残り3方向のひび割れの中で、最も強い相互作用関係にあるひび割れ軸を1つ選択し、残り2方向のひび割れはdormant状態とする。この時、疑似直交関係にある相互作用を考慮する強・弱非線形軸で、アクティブクラック座標系を構成する。そして、この上で疑似直交関係にあるひび割れのせん断変形の相互作用を考慮したRCモデル<sup>2)1)</sup>を適用することにより、伝達応力の全てを計算することができる。さらに、独立1~4方向に導入されるひび割れ群を、最大2つの座標系で指定できるように設定する。そして、載荷履歴による強非線形軸の変化をアクティブクラック座標系の変化に関連付ける事により、極めて簡略化された計

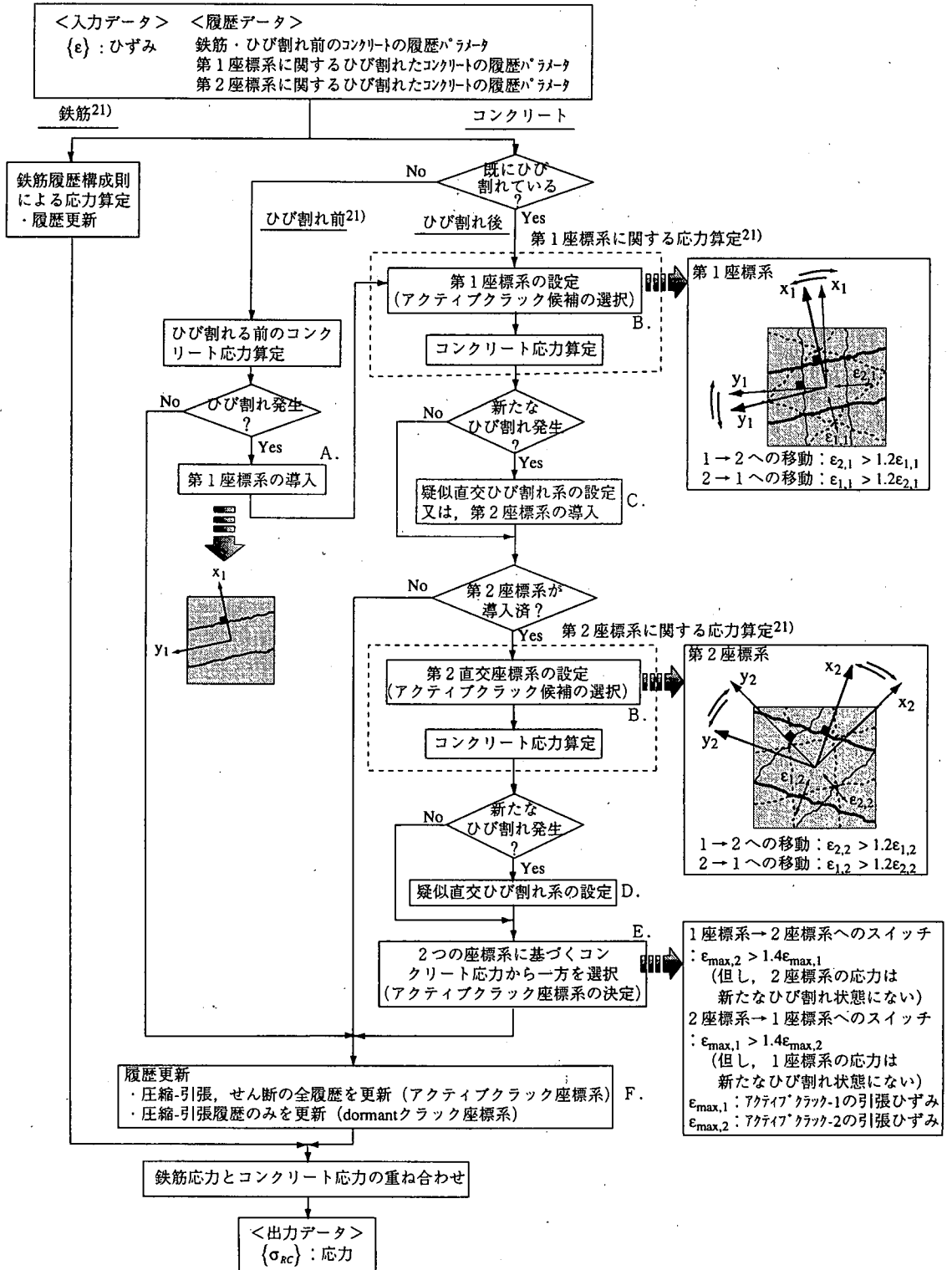


図-8 独立4方向にひび割れる鉄筋コンクリート要素の応力算定

算モデルの構築が可能となる。2つの座標系の内、強非線形軸を含む座標系を選択するのみで、あとはその系に基づき応力を算定すれば良いからである。

既往のアクティブクラックの概念は、独立したひび割れ軸の選択に基づくものである。本研究では、これを、疑似直交ひび割れに関連付けられる独立した座標系の選択に拡張した。最も強いひび割れ相互依存性を考慮しつつ、その他のひび割れとの相互作用は無視する仮説を導入したのである。

このRCモデルにおいて、ひび割れたコンクリートの履歴挙動を表現する履歴パラメータは、2つの座標系に関してそれぞれ別に必要である。但し、基本モデルである疑似直交2方向RC構成モデルの履歴パラメータはそもそも少ない<sup>2)1)</sup>ことから、実用上の不便はない。

図-8に、独立4方向に交差するひび割れ群を含むRCの、具体的な応力算定フローを示す。RC応力は、鉄筋とコンクリートの応力を重ね合わせて求める。また、ひび割れたコンクリートの応力算定に用いられる2つの座標系は、必要に応じて導入される。

この計算モデルにおいて、強非線形軸となるアクティブクラックの判定には、ひび割れ直角方向の引張ひずみの大きい方を選択する方法を基本的に用いた。これはひび割れ面でのせん断剛性の比較による判定とはほぼ同等であり、かつ与えられたひずみから直接に判定できる事から数値計算プログラム上、便利な方法である。ひび割れる前のコンクリートモデルから求めた応力により、最初のひび割れが発生した場合、第1座標系が導入され(A)、ひび割れたコンクリート応力の算定フローに進む。

応力履歴の過程で、第1座標系で算定された応力より新たなひび割れが生じた場合、ひび割れ発生方向を基に第1座標系に関する疑似直交ひび割れ系の設定、もしくは第2座標系の導入を行う(C)。第1座標系が、疑似直交2方向ひび割れ状態にある場合には、2方向のどちらがアクティブクラックであるかを判定し、座標系の設定を行う。但し、アクティブクラックの変化に伴う座標系の移動を円滑にするために、ひび割れ直角方向の引張ひずみ $\epsilon_{1,1}$ と $\epsilon_{2,1}$ の比較において1.2倍の安全を見込んでいる(B)。そして、最初のひび割れに対して、非直交ひび割れが発生していない間は、コンクリート応力は第1座標系に関して算定される。

第1座標系において算定された応力から、非直交ひび割れが発生した場合に、第2座標系が導入される(C)。また、第2座標系に関して算定された応力から、新たなひび割れが発生した場合には、そのひび割れ方向が第2座標系において疑似直交ひび割れと

なる場合のみを考慮する(D)。

座標系が2つ導入されている場合には以下の方法によりアクティブクラックとコンクリート応力を定める。まず、第1座標系と第2座標系の両方について、それぞれの疑似直交2方向ひび割れに関するひび割れ直角方向の引張ひずみ( $\epsilon_{1,1}$ と $\epsilon_{2,1}$ ,  $\epsilon_{1,2}$ と $\epsilon_{2,2}$ )からアクティブクラックの候補(アクティブクラック-1,2)を判定し、応力の算定を行う。次に、アクティブクラック-1,2の引張ひずみ $\epsilon_{\max,1}$ と $\epsilon_{\max,2}$ を比較してアクティブクラックを選択する。但し、引張ひずみが大きくても、その座標系において求められたコンクリート応力が新たなひび割れ発生状態にある場合には、他方をアクティブクラックと判定する。そして、アクティブクラックを含む座標系において算定されたコンクリート応力を採用する(E)。引張ひずみの比較においては、アクティブクラックの変化に伴う座標系のスイッチを円滑にするために1.4倍の安全を見込んだ。この値は、6章で示す検証解析での解の収束性を加味して定めた。

2つの座標系に関する履歴変数の更新は、アクティブクラック座標系とdormantクラック座標系に関して行う。但し、dormantクラック座標系におけるせん断伝達に関しては、履歴の更新はしない(F)。

ひび割れたコンクリートに新たに発生するひび割れの発生基準については不明確な所が多い。本計算モデルでは、ひび割れ発生前から発生以後を通して、ひび割れを含まないコンクリートに関するひび割れ発生基準を、とりあえず準用した。

## 5. 3方向および4方向ひび割れ群を含むRC面内要素の交番繰り返し挙動

多方向ひび割れ実験は過去にほとんど例を見ないことから、今回新たに実験を行い、3・4方向ひび割れ状態での挙動を実験的に検討するとともに、本RCモデルの検証データとした。

### (1)実験方法

#### a)載荷方法

実験は、円筒試験体に内圧・軸引張力により鉛直・水平先行ひび割れを生じさせた後、ねじり加力による交番載荷により正負2方向の斜めひび割れを生じさせ、多方向ひび割れ状態を発生させる。試験体形状を円筒としたのは、極力均一な応力・ひずみ場を実現させるためである。図-9に載荷模式図を示す。

#### b)試験体・材料・載荷ケース

試験体は図-10に示すように、外径100cm、高さ



表-1 コンクリート配合

水セメント比 (W/C)	細骨材率 (s/a)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )				スランブ (cm)	Gmax (mm)
		水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)		
60	51	179	298	893	874	20	13

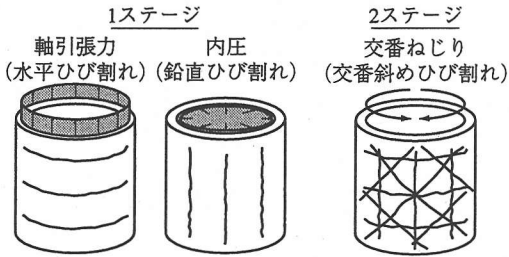


図-9 載荷模式図

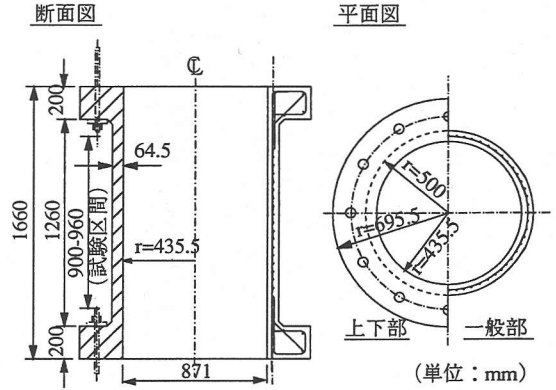


図-10 試験体構造図

表-2 載荷ケース

試験体	配筋		コンクリート強度		先行ひび割れ導入パターン			試験時材令 (日)
	円周方向 $p_{\theta}$ (%)	鉛直方向 $p_v$ (%)	$f_c$ *1 (MPa)	$f_t$ *2 (MPa)	ひび割れ方向	目標とした導入ピークひずみ	導入後の先行荷重の扱い	
A-1	1.0 (@50)	1.0 (@6°)	23.3	2.2 (1.5)	1方向 鉛直	$\epsilon_{\theta} = 2500 \mu$ (鉄筋降伏)	徐荷	36
A-2	1.0 (@50)	1.0 (@6°)	22.5	2.0 (1.4)	2方向 水平 鉛直	$\epsilon_{\theta} = \epsilon_v = 2500 \mu$ (鉄筋降伏)	徐荷	42
B-1	0.8 (@60)	1.2 (@5°)	24.4	2.2 (1.5)	1方向 水平	$\epsilon_v = 1000 \mu$ (鉄筋弾性)	保持 ( $\sigma_v = 3 \text{Mpa}$ )	44
C-1	1.2 (@40)	0.8 (@7.5°)	24.1	1.8 (1.0)	1方向 鉛直	$\epsilon_{\theta} = 4000 \mu$ (鉄筋降伏)	徐荷	55
C-2	1.2 (@40)	0.8 (@7.5°)	23.7	2.0 (1.2)	2方向 水平 鉛直	$\epsilon_{\theta} = \epsilon_v = 4000 \mu$ (鉄筋降伏)	徐荷	50

\*1: 試験時テストピース(現場養生)圧縮強度, \*2: 試験時テストピース(現場養生)割裂強度 ( )は, 検証解析に用いた値

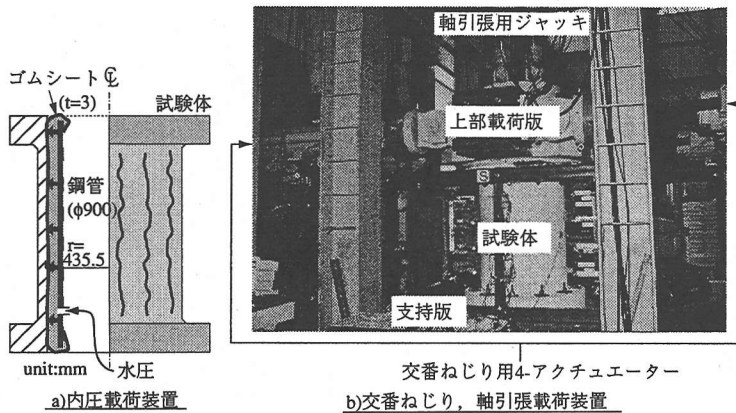


図-11 載荷装置

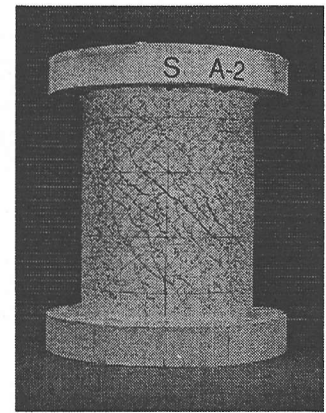


図-17 最終ひび割れ状況 (A-2)

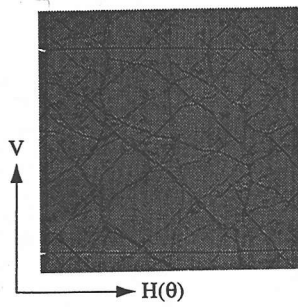
166cm (試験区間90~96cm), 壁厚6.5cmの中空円筒形である。鉄筋はSD345相当( $f_t=391 \text{MPa}$ )のD6を用い、鉛直・円周方向ともに単筋配とした。コンクリート強度は試験時24MPaを目標とした。

試験体は壁厚が薄く、円筒形であることから、製作精度確保に特に留意した。型枠製作には円筒紙型

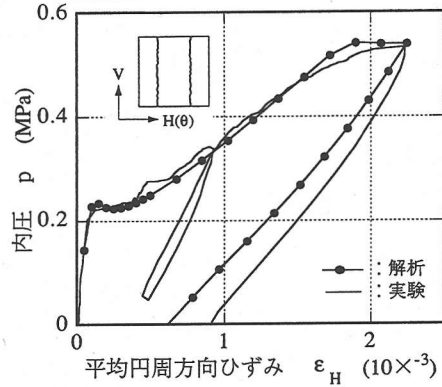
枠を用いた。コンクリート打設後28日で脱型し、実験棟内に気中乾燥状態で静置し順次実験に供した。コンクリートの配合を表-1に示す。

実験はねじり載荷の前に発生させる先行ひび割れ方向・鉄筋比・ねじり載荷時の先行力の有無をパラメータとして行った。実験ケース、各試験体のコ

a) 最終ひび割れ状況 (実験)



b) 内圧荷荷時



c) 交番ねじり荷荷時

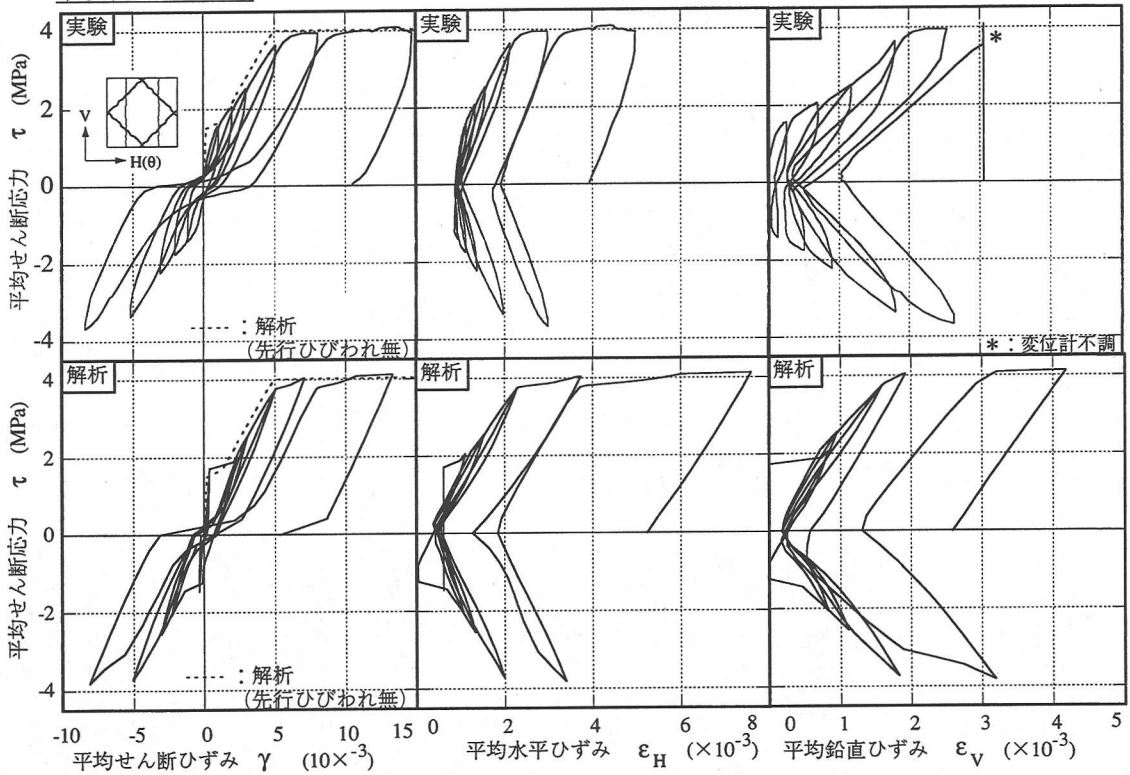


図-12 実験結果と検証解析結果 (A-1)

ンクリート強度試験結果を表-2に示す。

c) 荷荷装置・計測

荷荷装置を図-11に示す。試験体は、反力床に固定された試験体支持版にPC鋼棒にて固定した。試験体上部には、上部荷荷版をPC鋼棒にて固定し、加力機を取りつけた。図-11b)に示すように、4台のアクチュエーターを用いて上部荷荷版に偶力を荷荷するねじり加力により交番斜めひび割れを生じさせた。水平ひび割れについては、上部荷荷版に取りつけた2台のジャッキによる引張荷荷により生じさせた。鉛直ひび割れは、図-11a)に示すように、鋼管を

覆ったゴムシートの中に注水し、ゴムシートを介して試験体内側から圧力をかけることにより生じさせた。この時、様な鉛直ひび割れを発生させるために、試験体は支持版に固定しない。さらに、試験体上下部の固定のための突起部には一定間隔 (@300) で縁切り材を埋め込んでおき、試験体の円周方向剛性の上下部への偏りを極力防止した。

3方向のひび割れを生じさせるA-1・C-1の荷荷手順は、まず、内圧荷荷により先行鉛直ひび割れを発生させた後、荷重を徐荷し、試験体と上部荷荷版・支持版を固定し、ねじり荷荷を行った。4方

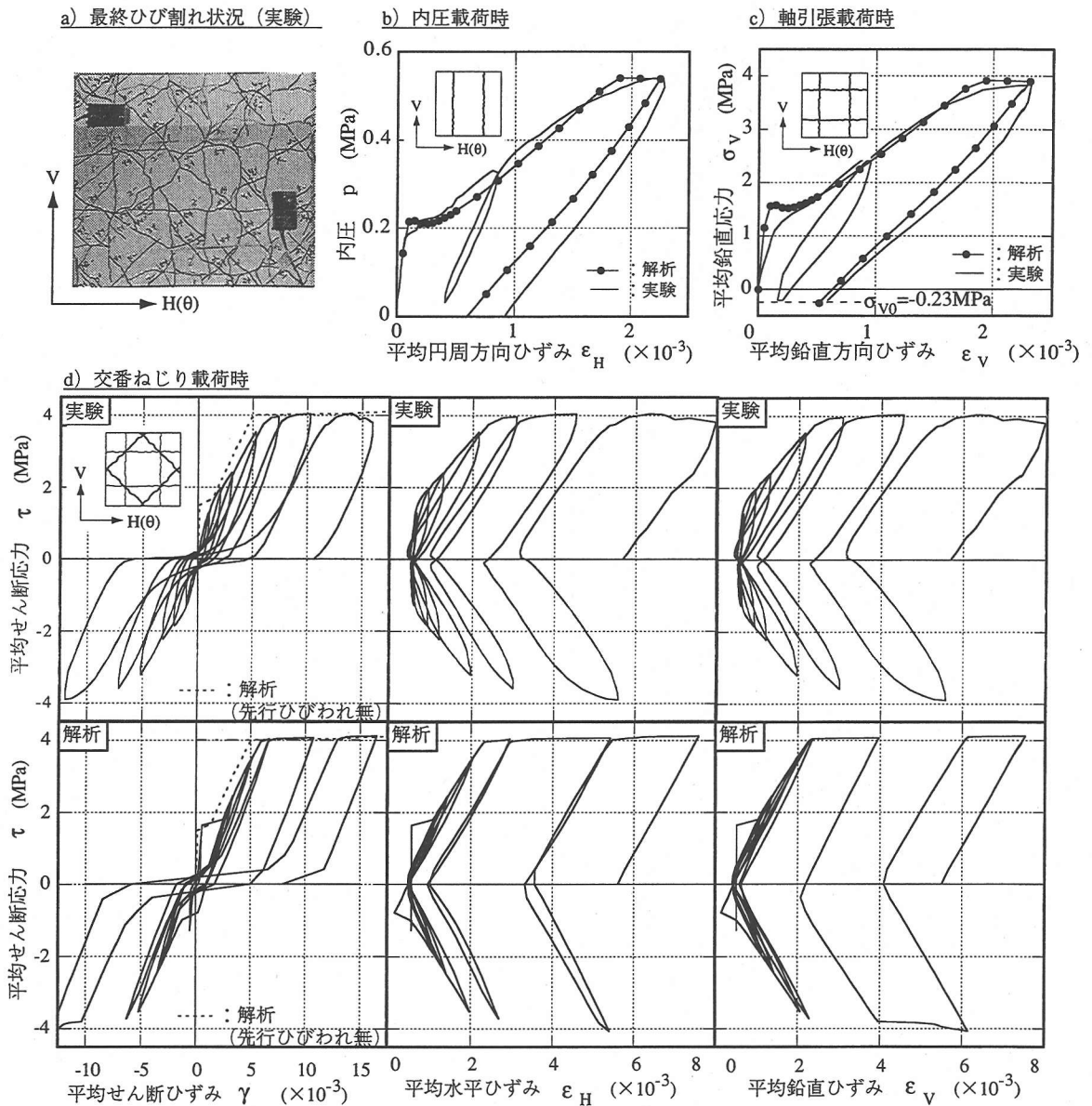


図-13 実験結果と検証解析結果 (A-2)

向のひび割れを生じさせるA-2・C-2の場合は、同様に内圧载荷により先行鉛直ひび割れを発生させた後、荷重を徐荷し、試験体と上部载荷版・支持版を固定し、軸引張载荷を行い先行水平ひび割れを発生させた。そして軸引張荷重を徐荷した後、ねじり载荷を行った。B-1の場合は、上部载荷版を設置し軸引張载荷を行い、先行水平ひび割れを発生させ、軸引張荷重を保持した状態でねじり载荷を行った。交番ねじり载荷時の载荷サイクルは、ひずみ制御による漸次増加载荷とした。

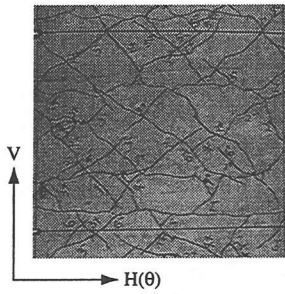
計測は、荷重計測と変位計による鉛直・円周・半

径方向の3方向の計測を基本とし、確認のため、コンタクトゲージによる先行ひび割れ導入後の残留ひずみの計測、鉄筋ひずみの計測を行った。

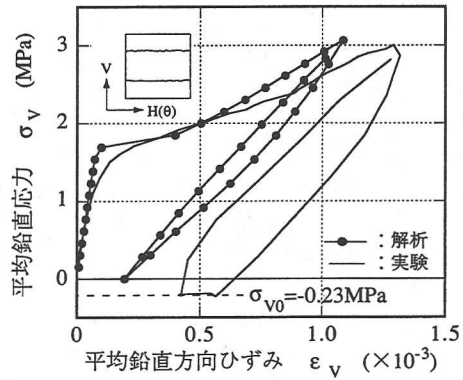
## (2) 実験結果

図-12~16に各試験体についての結果のまとめを示す。本実験では、先行ひび割れのないケースの実験は行っていない。そこで、適用性が確認されている、既往のRC構成則<sup>2)</sup>による予測解析値を併記することとした。図-17にA-2試験体のひび割れ状況図を示す。

a) 最終ひび割れ状況 (実験)



b) 軸引張載荷時



d) 交番ねじり載荷時

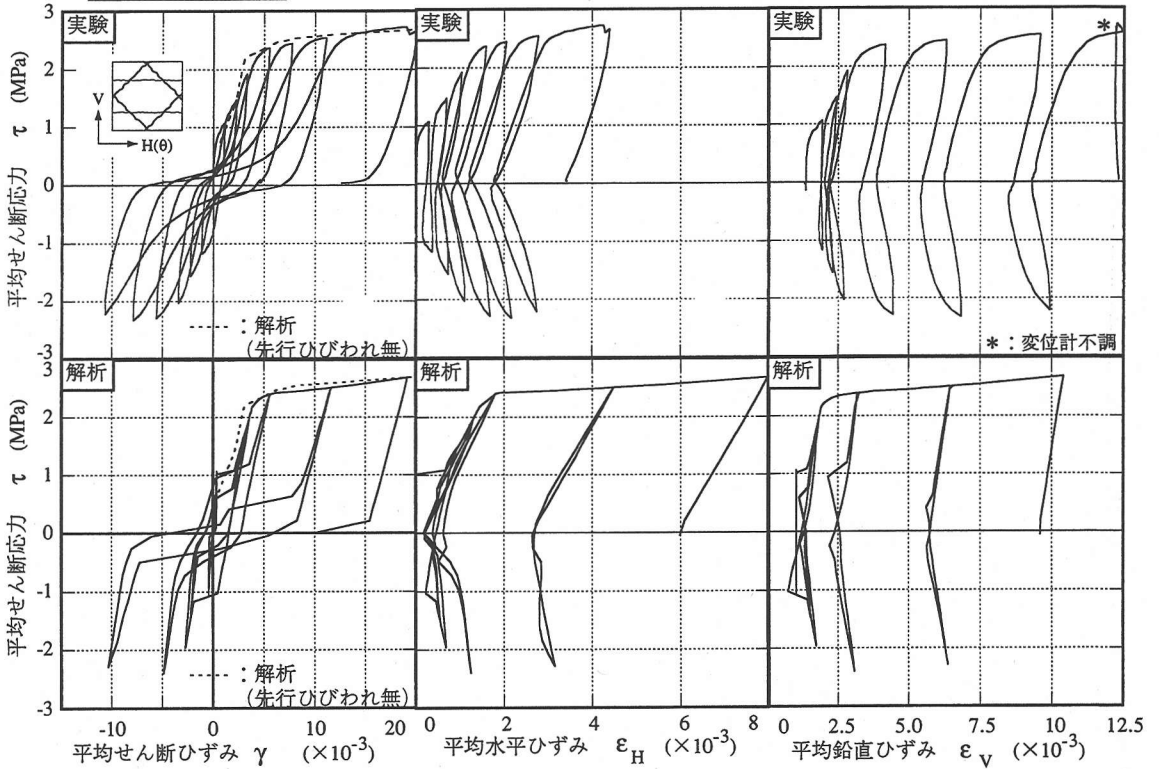


図-14 実験結果と検証解析結果 (B-1)

(3) 実験結果のまとめ

3方向, 4方向にひび割れが生じるRCの交番繰り返し載荷実験結果をまとめる。

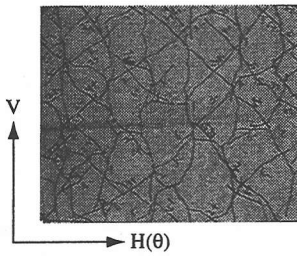
1) 各試験体ともに、内圧および軸引張力により事前に導入された先行ひび割れは、ねじり載荷による正負斜めひび割れの発生と進展に伴い閉じていくことが目視により観察された。先行ひび割れ幅の小さいケースほど低い荷重レベルで閉じる傾向にあった。

2) ねじり載荷により、鉄筋が降伏した後も安定し

た挙動を示し、平均せん断ひずみが15000~20000 $\mu$ 程度で試験体中央部の斜めひび割れの面外方向(半径方向)ずれと開口が局部的に急増し、載荷荷重の低下に至った。ただし、導入した先行ひび割れが大きいケースC-2は、ねじり載荷による鉄筋降伏に至る前に、試験体上部の先行ひび割れとねじりによる斜めひび割れが、他のケースと同様に局部的に大きくずれ、載荷荷重の低下に至った。

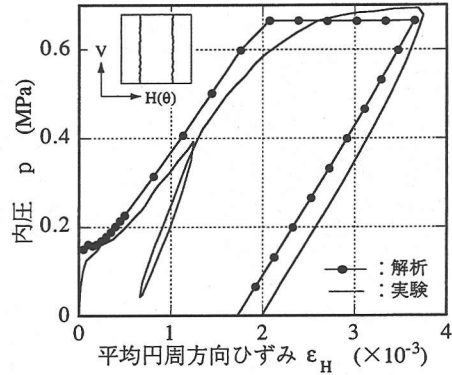
すべての試験体において、コンクリートの明瞭な圧壊は観察されず、かぶりコンクリートの剥離も生じなかった。今回の試験体配筋仕様では、面内せん

a) 最終ひび割れ状況 (実験)



ひび割れ状況 (実験)

b) 内圧载荷時



c) 交番ねじり载荷時

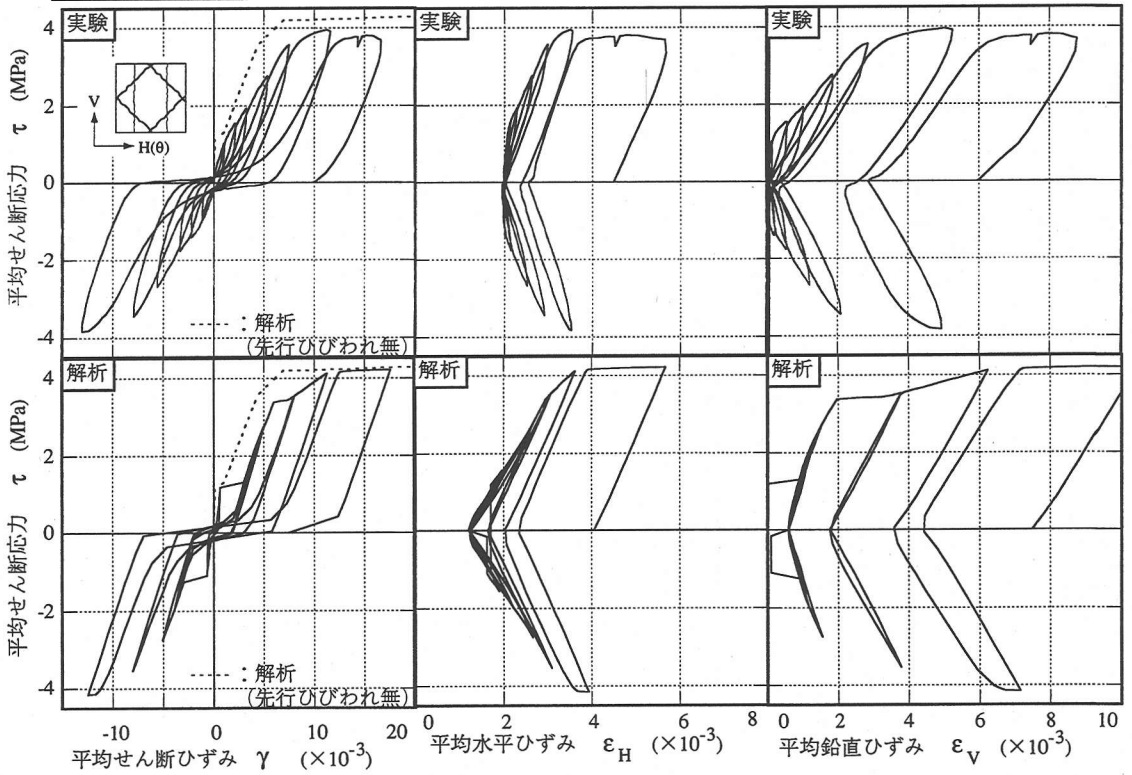


図-15 実験結果と検証解析結果 (C-1)

断耐力は鉄筋降伏で決まり、コンクリートの圧縮応力は支配的でない事が主たる理由と考えられる。

3) 先行水平・鉛直ひび割れの影響により、交番ねじり载荷時における鉄筋降伏までの平均せん断応力-ひずみ関係は、先行ひび割れのない場合に比べて小さな剛性で進行する。

4) 剛性低下の要因は、ねじり载荷によるひび割れ発生までについては、先行ひび割れ面でのせん断すべりによるものである。さらに、先行して载荷された内圧・軸引張荷重により鉄筋が降伏する場合には、徐荷時残留ひずみが大きいほど、ねじり载荷時

の鉄筋降伏時平均せん断ひずみは大きくなり、鉄筋降伏までの剛性は先行ひび割れのない場合に比べて常に下回ることになる。

5) 交番ねじり载荷における降伏時の平均せん断ひずみは、先行荷重による鉄筋降伏の影響を受けるものの、降伏荷重は先行ひび割れの影響を受けない。降伏後は、先行ひび割れのない場合と同様に安定した挙動を示す。ただし、先行荷重により大きな残留ひずみが導入されている場合には、降伏に至る前に耐力が低下する場合もある。

6) 先行ひび割れがある場合の  $\tau-\gamma$  関係における

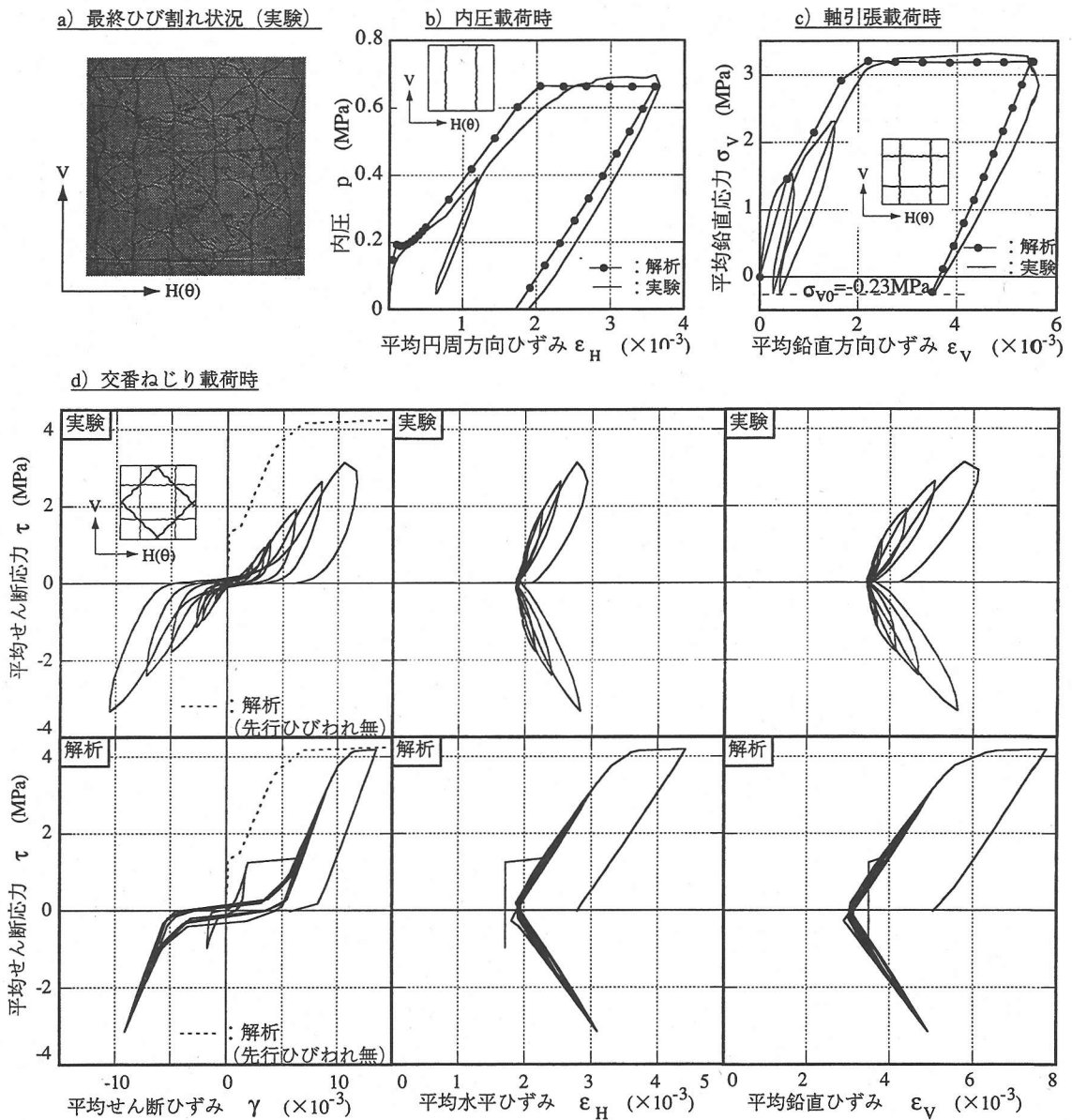


図-16 実験結果と検証解析結果 (C-2)

徐荷・再載荷時の挙動には、先行ひび割れの影響は顕著に表れていない。鉄筋降伏までは、包絡部の剛性低下により履歴吸収エネルギーは先行ひび割れない場合に比べて小さくなるものの、鉄筋降伏後はほぼ同程度の履歴吸収エネルギーになっているものと予想される。

7) 今回の実験は、鉄筋の降伏で耐力が定まるケースであった。耐力がコンクリートの圧壊で定まるケースについての多方向ひび割れ挙動については、今後の検討を待つ必要がある。

## 6. 4方向ひび割れRCモデルの検証

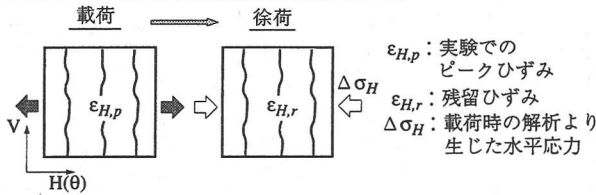
### (1) 検証解析

実験では、ほぼ一様な応力状態が得られていると判断される事から、1つのRC要素を用いた均一応力場での有限要素解析により検証を行った。

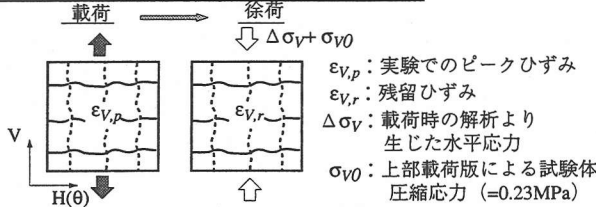
解析の手順を4方向にひび割れが生じるA-2を例に説明する。図-18に示すように、ステップ1では内圧により鉛直ひび割れを導入する過程を解析する。この場合、実験で得られている内圧載荷時のピークひずみまで、変位制御にて水平方向に載荷し



ステップ1：内圧・軸引張徐荷（第1ひび割れ）



ステップ2：軸引張荷重・徐荷（第2ひび割れ）



ステップ3：交番せん断力荷重（第3,4ひび割れ）

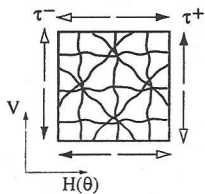
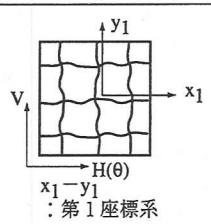


図-18 解析ステップ (A-2)

た後、ピークひずみ時の作用応力分を徐荷する。続いて、ステップ2では軸引張力により水平ひび割れを導入する過程を解析する。この場合も、実験で得られている軸引張荷重時のピークひずみまで、変位制御にて鉛直方向に荷重した後、ピークひずみ時の作用応力分を徐荷する。この時には、上部荷重版の重量 ( $\sigma_{v0}=0.23\text{MPa}$ ) を考慮に入れている。ステップ3において、交番せん断力を荷重する過程を解析する。他のケースにおいても、A-2と同様な方法により解析ステップを定めた。

図-12~16に、解析結果と実験との比較結果を示す。比較のため、交番せん断力荷重時の平均せん断応力-せん断ひずみ関係については、先行ひび割れがない状態でせん断力を単調に荷重した場合の解析結果を併せて示した。本提案モデルは、実験から得られた多方向ひび割れ状態の挙動を良好に追跡できる事が認められる。なお、解析で使用する引張強度は、シリンダー試験値から低減したものをを用いた。一般に、構造体中の見かけの引張強度は、材料シリンダー試験値よりも小さい。これは、乾燥収縮や鉄筋による拘束・自己初期応力などによるものである。この構造体中での引張強度をシリンダー強度と構造諸元・養生状態から推定することは、現状においては困難である。本解析では、引張強度は実験のひび割れ発生荷重に適合するように逆推定して定め

内圧・軸引張徐荷荷重時



交番ねじり荷重時

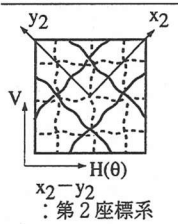


図-19 発生ひび割れと座標系 (A-2)

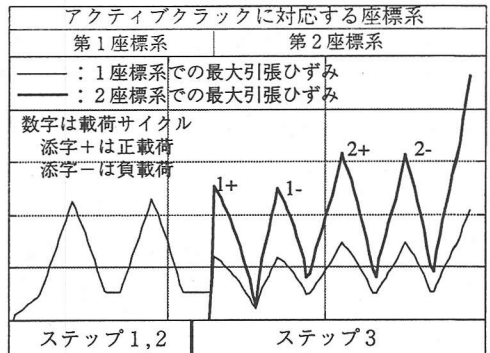
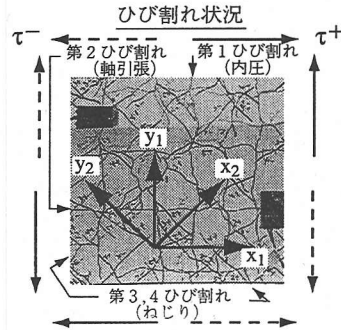


図-20 各座標系での最大引張ひずみ (A-2)

た。以下、比較結果について説明、検討を加える。

(2)発生ひび割れと2つの直交座標系の関係

4方向のひび割れが発生するA-2を例に、発生ひび割れとコンクリート応力の算定に用いられる座標系との関係を示す(図-19)。まず、内圧荷重時において鉛直ひび割れが発生する。この時、鉛直ひび割れに沿って第1座標系が導入され、コンクリート応力が算定される。次に、鉛直引張力によって水平ひび割れが発生する。この場合、水平ひび割れは、内圧による鉛直ひび割れと直交関係に有ることから、第1座標系にてコンクリート応力が求められる。そして、交番せん断力の荷重により、さらに第3,4のひび割れが発生する。これらのひび割れは、既に発生している鉛直・水平ひび割れと約45°の角

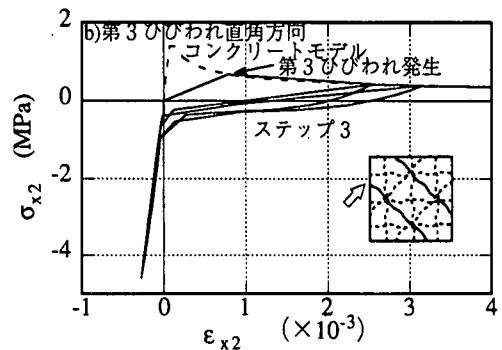
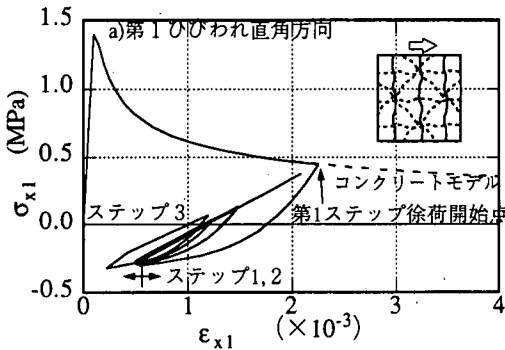
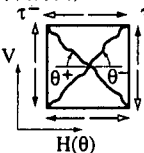


図-21 ひび割れ直角方向のコンクリート応力履歴 (A-2)

表-3 ひび割れ発生角度

検討 ケース	ひび割れ発生角度(°)		備考
	実験(*1) $\theta_{exp}$	解析 $\theta^+$ $\theta^-$	
A-1	45	44 46	*1: 正負載荷時の平均値  (負載荷側) (正載荷側)  $H(\theta)$
A-2	45	45 47	
B-1	40	38 24	
C-1	43	45 45	
C-2	43	44 46	

度を成していることから、新たな第2座標系が導入され、コンクリート応力が第2座標系に関して求められる

図-20に、解析ステップを通しての各座標系に関するひび割れ直角方向の引張ひずみの変化、図-21にコンクリート応力履歴を示す。これより、先行載荷(内圧、軸引張)時には第1座標系に関する引張ひずみ卓越し、ねじり載荷時には第2座標系に関する引張ひずみが卓越することがわかる。

このように、本RCモデルは、4方向にひび割れる実験のRC挙動を、それぞれのひび割れに対応する座標系の導入と選択に基づくコンクリートの応力算定により、適切に表現できている。

### (3)内圧載荷・軸引張載荷時挙動

全体的な挙動は良好に一致しているが、A-1などのように、徐荷時の残留ひずみが実験値を下回る場合がある。実験において、内圧載荷・軸引張載荷により発生するひび割れの方向は、鉛直・水平に完全に一致しているわけではなく、若干のズレを持っている。これにより、載荷時に僅かであるがひび割れ面でのせん断ずれ変形が生じていた。このせん断ずれ変形は、徐荷時におけるひび割れの再接触を早める事から、実験の荷重徐荷時における残留ひずみが大きくなっているものと考えられる。

### (4)交番せん断載荷時挙動

#### a)平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係

包絡線および繰り返し挙動において、いずれのケースもひび割れの発生から鉄筋降伏以後を通して、ほぼ実験結果の挙動が追跡できている。

A, B及びC-1のケースでは、交番せん断力により鉄筋の降伏が生じる。正載荷時に鉄筋が降伏した場合、反転後の負載荷時には、その前の負載荷時の反転位置を目指すわけではない。これにより、見掛け上の復元力の低下が生じる。実験でもほぼ解析と同様な傾向が得られている。これは前報<sup>21)</sup>に示したように、面内力を受ける2方向に配筋されたRC面要素の鉄筋は、正負載荷において共に引張力を分担することによる。正載荷によって鉄筋が降伏した場合、負載荷時の鉄筋挙動は、降伏後の徐荷・再載荷過程を経て、正載荷時の最大応力点を目指す。この場合の見掛け上の復元力の低下は、第1回の履歴ループに生じ、それ以後の同一変位の繰り返しでは、せん断応力の低下は生じない。本RCモデルを構成する各材料モデル(鉄筋モデル、コンクリートモデル)は、繰り返しによる応力低下をモデル化していない。すべて過去最大点に戻るモデルであるが、上記の挙動過程により、見掛け上の復元力の低下が表現される。

ケースC-2では、A, B及びC-1のケースに生じたような見掛け上の復元力低下は生じず、解析の履歴挙動は必ず荷重反転位置を通っている。実験においてもほぼ同様である。これは、C-2では交番せん断力載荷により鉄筋の降伏が生じていないことによるものである。図-16の先行内圧・軸引張力載荷時の鉛直・水平方向(鉄筋方向に一致)の最大引張ひずみとせん断載荷時の鉛直・水平方向のひずみの関係からも推定できる。

いずれのケースの比較においても、斜めひび割れ発生前の解析の剛性は実験よりも高い。実験での先



行ひび割れは完全に鉛直でないことから、せん断力載荷時に、先行ひび割れのせん断ずれ変形だけでなく、先行ひび割れの開口変形も若干は生じている事が理由と考えられる。解析では、完全に鉛直なひび割れが生じるため、剛性にはひび割れ面でのせん断剛性が主に反映されている。さらに、実験では斜めひび割れの発生の前後で、滑らかな平均せん断応力-ひずみ関係が得られているのであるが、解析においては、斜めひび割れ発生直後に急激にせん断ひずみが増加している。

本RCモデルが基本としているアクティブクラック法では、一方の疑似直交ひび割れ群がアクティブである時、他方の疑似直交ひび割れ群はせん断ずれに対して非線形が進行しないとモデル化している。すなわち、コンクリート応力を算定する座標系が第2座標系に移ったと同時に、第1座標系に関するひび割れは閉合したものと扱う。この時、コンクリートの応力は、全ひずみが第2座標系に関するひび割れの開口・せん断ずれに集中するとして、第2座標系に関する圧縮・引張・せん断の各材料モデルに従って求められる。これより、解析では平均せん断応力-ひずみ関係における急激なせん断ひずみの増加が生じる。先行ひび割れが最も開口しているケースC-2(図-16)において、その差は顕著である。実験の観察からは、斜めひび割れの開口の進展と先行ひび割れの閉合は作用荷重の進行とともに同時進行している。現時点において、これら非直交ひび割れ間の応力伝達機構の相互依存性を厳密にモデル化することは、少なくともアクティブクラック法の仮定のものとは困難と判断した。今後の課題である。

しかし、これらの差異は本解析と実験結果との比較からも明らかなように、比較的lowひずみ領域に限られている。構造解析にRC非線形解析を用いる場合は、非線形性が大きくなる比較的高引張・圧縮ひずみ領域での挙動解析が対象であることを考慮すれば、本提案モデルは、動的応答解析上の必要十分な精度を有すると考えられる。この点は、部材・構造レベルでの検証にゆだねたい。

#### b) 平均せん断応力-平均水平・鉛直ひずみ関係

せん断力の増加に伴い、水平・鉛直ひずみが増加する挙動、および鉄筋降伏により水平・鉛直ひずみに残留ひずみが生じ、鉄筋降伏の進行に伴い残留ひずみが増加していく挙動が、解析においても表現できている。

#### c) ひび割れ発生角度

実験における交番せん断力載荷時のひび割れの発生角度は、表-3に示すように水平面からほぼ45°の角度で発生している。解析結果と比較すると、A-1・A-2・C-1・C-2については、実験と同様なひび割れ発生角度である。B-1については、正載荷にて斜めひび割れが発生した後の負載荷によるひび割れの発生角度が、実験とは幾分異なっている。これより解析から得られる挙動は、実験と比較して若干、異なっている。図-14に示したB-1の平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係に、その差を明瞭に確認することができる。

新たなひび割れ発生の判定方法は、最初のひび割れ発生の判定方法と同じである。ひび割れ前の、ほぼ一様な応力状態におけるひび割れ発生基準を適用していることになる。しかし、実際のひび割れたコンクリートの応力は局所的に異なっている。特に引張挙動に関しては、鉄筋との付着作用によりコンクリート応力分布は、ひび割れ間で不均一に分布する。さらに、多方向にひび割れた状態においてはより複雑な局所応力状態にあると考えられる。空間平均化構成則を導出する際には、これらの局所不均一性は平準化される。ひび割れ破壊は、局所応力が最も高いところから発生するため、平均応力を用いて判定することは難しい。第2,3ひび割れの判定方法について、今後、検討が必要と考えられる。

新たなひび割れ発生の判定方法は、最初のひび割れ発生の判定方法と同じである。ひび割れ前の、ほぼ一様な応力状態におけるひび割れ発生基準を適用していることになる。しかし、実際のひび割れたコンクリートの応力は局所的に異なっている。特に引張挙動に関しては、鉄筋との付着作用によりコンクリート応力分布は、ひび割れ間で不均一に分布する。さらに、多方向にひび割れた状態においてはより複雑な局所応力状態にあると考えられる。空間平均化構成則を導出する際には、これらの局所不均一性は平準化される。ひび割れ破壊は、局所応力が最も高いところから発生するため、平均応力を用いて判定することは難しい。第2,3ひび割れの判定方法について、今後、検討が必要と考えられる。

## 7. 結論

2次元平面応力状態で、最大4方向まで独立して交差するひび割れを有するRCの履歴依存型空間平均化構成モデルの構築と、その検証を行った。

以下に、本研究により得られた結論を列記する。

(1) 疑似直交ひび割れを有する鉄筋コンクリート構成モデルと、アクティブクラックの概念を組み合わせることで、独立4方向に交差するひび割れ群を含む鉄筋コンクリートの構成モデルを定式化することに成功した。最大4方向までのひび割れ群を陽に特定することが可能であり、一様応力場の元で交番繰り返しを含む任意の履歴に対して適用性が示された数力学モデルは、過去に事例をみない。

(2) 3~4方向ひび割れの相互作用と繰り返し履歴特性を実証する目的で、円筒型試験体を用いた多方向加力システムを考案した。先行するひび割れに、斜め方向から交差する斜め(せん断)ひび割れを導入することが可能となり、ひび割れ相互の依存性を実験的に明らかにすることができた。

(3) (1)により提案された多方向ひび割れRCモデルと実挙動との比較検討を行い、適用範囲をほぼ特定することができた。アクティブクラックの仮説は、独立4方向ひび割れまでの範囲内で成立すること、交番繰り返しにまで適用が可能であることが確認さ

れた。

(4) アクティブクラック座標系の選択・乗り移りに際して、剛性が現実よりも急変することが、検証の過程から認められた。現実にはある程度のばらつきを有するひび割れの方向や、ひび割れ開閉の非同時性などが、モデルにおいてはあくまで確定離散量として扱われているためである。これらの適用範囲と限界を評価し、今後の改善方向と精度向上に必要な事項について考察を行った。

なお、構造解析への適用を目的として構成モデルの適用性を検証するには、さらに部材・構造レベルでの検証が不可欠である。これについては別途報告を行う。

謝辞：本研究は、第一著者が東京大学において受託研究員として、第2著者とともに行った研究を取りまとめたものである。実験の実施にあたり、大成建設(株)技術研究所の多大な支援を得た。また、同社技術研究所 田中良弘土木構造研究室長には、この展開研究の実現にあたり、温かいご支援を賜った。ここに感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1)前川宏一, 土屋智史, 福浦尚之: 鉄筋コンクリートの非線形解析の現況と耐震性能照査法の構築に向けた今後の取り組み, 第2回鋼構造物の非線形解析と耐震設計への応用に関するシンポジウム論文集, pp.1-16, 土木学会, 1998.11.
- 2)岡村 甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.
- 3) Stevens, N. J., Uzumeri, S. M. and Collins, M. P. : Analytical modeling of reinforced concrete subjected to monotonic and reversed loadings, University of Toronto, 1986.
- 4)Rots, J. G. : Computational modeling of concrete fracture, Ph.D. Thesis, Delft Univ. of Tech., 1987.
- 5)de Borst, R. and Nauta, P. : Non-orthogonal cracks in a smeared finite element model, Engineering Computations, Vol. 2, pp.35-46, 1985.3.
- 6)Ueda, M., Seya, H., Ohmiya, Y., Taniguchi, H. and Kanbayashi, A. : Nonlinear analysis on RC shear wall shaking table test, Transaction of SMiRT14, Vol.5, Division H, pp.433-440, August, 1997.
- 7)Yang, K., Inoue, N. and Shibata, A. : Nonlinear analysis of 3-D RC shear walls by finite element method, 構造工学論文集, Vol.41B, 1995.3.
- 8)Song, C. and Maekawa, K. : Dynamic nonlinear finite element analysis of reinforced concrete, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol.XLI, No.1, 1991.
- 9)Kitada, Y., Akino, K., Terada, K., Aoyama, H., Miller, A. : Report on seismic shear wall international standard problem organized by OECD/NEA/CSNI, Transaction of SMiRT14, Vol.5, Division H, pp.321-332, August, 1997.
- 10)山中憲行, 芳村 学: 柱の2軸相関を考慮した鉄筋コンクリート造建物のねじれ応答, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), pp.775-776, 1997.
- 11)Hauke, B. and Maekawa, K. : Three-dimensional R/C model with multi-directional cracking, Computational Modeling of Concrete Structures, EURO-C, pp.93-102, 1998.
- 12)Irawan, P. and Maekawa, K. : Path-dependant nonlinear analysis of reinforced concrete shell, J. Materials Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.557/V-34, pp.121-134, 1997.
- 13)Maekawa, K., Irawan, P. and Okamura, H. : Path-dependant three dimensional constitutive laws of reinforced concrete - formulation and experimental verification -, Structural Eng. and Mechanics, Vol.5, No.6, pp.743-754, 1997.
- 14)Gupta, S. and Tanabe, T. : 3D analysis of RC members by unified concrete plasticity model, J. Materials Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.592/V-39, pp.169-180, 1998.5.
- 15)Chervenka, V. and Margoldova, J. : Tension stiffening effect in smeared crack model, ACSE EMD Specialty Conference, May 21-24, University of Colorado, Boulder, USA, 1995.
- 16)Vecchio, F. J., Collins, M. P. : The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, ACI Journal, Vol.83, No.2, pp.219-231, 1986.11.
- 17)Bazant, Z. P. and Prat, P. C. : Microplane Model for Brittle-Plastic Material I. Theory, J. of Engineering Mechanics, pp.1672-1688, 1988.
- 18)長谷川俊昭: 一般化マイクロプレーンモデルの再構築, 土木学会論文集, No.538/V-31, pp.129-147, 1996.5.
- 19)Li, Y., Ozbolt, J. and Elgehausen, R. : Numerical verification of the new microplane model for concrete, Computational Modeling of Concrete Structures, EURO-C, pp.127-132, 1998.
- 20)Fukuura, N. and Maekawa, K. : Multi-directional fixed crack model of reinforced concrete under cyclic stresses, Computational Modeling of Concrete Structures, EURO-C, pp.143-152, 1998.
- 21)前川宏一, 福浦尚之: 疑似直交2方向ひび割れを有する平面RC要素の空間平均化構成モデルの再構成, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.157-176, 1999.
- 22)de Borst, R. : Stability and uniqueness in numerical modeling of concrete structures, IABSE Colloquium Delft, pp.161-176, 1987.

(1999.2.12受付)

**SPATIALLY AVERAGED CONSTITUTIVE LAW FOR RC IN-PLANE  
ELEMENTS WITH NON-ORTHOGONAL CRACKING  
AS FAR AS 4-WAY DIRECTIONS**

**Naoyuki FUKUURA and Koichi MAEKAWA**

Path-dependant spatially averaged constitutive model for in-plane RC domain containing 4-way cracks is formulated. Through the composition of the active crack concept for 4-way cracks and RC constitutive model with quasi-orthogonal cracks, real behavior including crack open/close among multi-directional cracks is modeled. Experiment of RC shells including multiple cracks up to 4-way is conduct. Verification of the proposed model is examined with the cyclic shear loading test of RC shell which have uniformly stress state, and good performance for predicting stress-strain relation, generation of crack and switching of active crack is shown.