

論文 RC 構造部材の三次元繰返し FEM 解析手法

米澤健次*1・長沼一洋*2・江戸宏彰*3

要旨:本研究は、コンクリートの材料構成則として、平面応力下の非直交分散ひび割れモデルの概念を三軸応力場に拡張し、鉄筋コンクリート(RC)構造部材に対する三次元繰返しFEM解析手法の構築を行ったものである。提案するひび割れモデルは、一つの要素積分点に対して、任意の方向に2個のひび割れ座標系(直交3方向)を有し、 2×3 方向計6方向のひび割れを表現することができる。

要素レベルの検証として、非直交ひび割れが生じる荷重条件下の解析を実施し、本ひび割れモデルの有用性を示す。更に、RCのBOX壁及び柱・梁接合部を対象とした三次元繰返しFEM解析を実施し、実験結果と解析結果を比較することにより、本解析手法の精度を確認した。

キーワード: RC 構造部材, 有限要素法解析, 履歴特性, 繰返し荷重解析, 三次元FEM解析

1. はじめに

RC耐震壁等を対象とした平面応力場の材料構成モデルによるFEM解析技術は、繰返し荷重下における構成則もある程度充実し、動的非線形解析も可能になりつつある¹⁾。また、計算機容量や計算速度の飛躍的な進歩に伴い、三次元非線形解析も数多く行われるようになってきた。しかし、三軸応力下の材料構成モデルを用いたFEM解析は、単調荷重で行われているものが多く、繰返し荷重解析及び動的非線形解析を実施した例は数少ない。2000年から施行された建築基準法では性能評価型設計が認められており、繰返し荷重を受ける柱、梁部材の変形性能に対する精度の良い評価手法が求められている。また、建築、土木構造物や原子力構造物において、コンクリートの三軸応力効果に期待した複合構造部材が多用されており、それらを合理的に設計するためにも、繰返し荷重を受ける三軸応力下の材料構成則の開発が不可欠と考えられる。

地震荷重のように繰返し荷重を受けるRC部材には、荷重の組み合わせによって多方向にひび割れが生じることがある。FEM解析でその様々なひび割れパターンに対応すべく、平面応力状態においては、前川・福浦等により非直交する

独立4方向分散ひび割れモデル²⁾が提案されている。現状における三軸応力下のひび割れのモデル化は、固定ひび割れモデルと回転ひび割れモデルに大別される。回転ひび割れモデルは、主応力軸とひび割れ軸の一致を仮定したもので、主応力の回転に伴いひび割れも回転し、複数のひび割れの相互関係を表現できない。一方、三軸応力下の固定ひび割れモデルは、単一のひび割れ座標系(直交3方向)により表現されており、2, 3本目のひび割れは常に1本目のひび割れに直交するものと限定される。

そこで、本研究は三軸応力下の繰返し構成則の開発を目的とし、第1段階として、非直交分散ひび割れモデルに着目し、平面応力下における概念を三軸応力下に拡張し導入を試みた。

ここでは、本ひび割れモデルの有用性を確認するために非直交するひび割れが生じる荷重条件下において要素レベルの解析を行った。更に、RCのBOX壁及び柱・梁接合部を対象とした三次元繰返しFEM解析を実施し、実験結果と解析結果を比較することにより、本解析手法の精度と適用性を確認した。

*1 (株)大林組技術研究所建築構造研究室

博士(工学)(正会員)

*2 (株)大林組技術研究所建築構造研究室主任研究員

博士(工学)(正会員)

*3 (株)大林組技術研究所建築構造研究室室長

工博(正会員)

2. 材料構成則

本研究では大林組開発ソフト”FINAL”に後述するひび割れモデルを導入し使用した。

本研究で用いたコンクリートの応力-ひずみ関係の履歴特性を図1, 2に示す。この履歴特性を用いることにより, 繰返し荷重を受けるRC平板の非線形挙動を精度良く再現できることが参考文献³⁾に示されている。履歴特性の詳細は, 参考文献³⁾を参照されたい。

コンクリートは等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表現し, 三軸応力下の破壊条件としては, Ottesenの4パラメータモデル⁴⁾を用いた。圧縮側応力-ひずみ関係の包絡線には, 修正 Ahmadモデル⁴⁾, 引張側のテンションステイフニング特性の包絡線には, 出雲モデル⁵⁾を用い, 係数c (RC平板では0.4) を対象とする部材により変化させた (図3参照)。ひび割れ面のせん断伝達特性としては, Al-Mahaidiの提案⁶⁾に従い, ひび割れ直交方向のひずみの関数としてせん断剛性を定義した。

鉄筋には図4に示すCiampi等の提案⁷⁾による修正 Menegotto-Pintoモデルを用いた。

3. 三軸応力下の非直交分散ひび割れモデル

コンクリートを直交異方性モデルとし, 分散ひび割れモデルを用いた場合, 非直交するひび割れを表現するために, 本ひび割れモデルは一つの要素積分点に対して2つの直交3方向ひび割れ座標系が設定でき, 2×3計6方向のひび割れを許容できる。また, 互いのひび割れ座標系は, 任意の角度で交わることができるものとする。図5にひび割れモデルの概念を示す。

繰返し荷重による荷重の反転などによる主軸

の回転を表現するために, コンクリートの主軸は, Darwin等の提案に従い, 主軸方向を主応力方向に一致させ, 初期の主軸方向より±45°以上回転した場合は, 3つの方向の履歴データをそれぞれ入れ替える。ひび割れ後は, 主軸方向はひび割れ方向に固定するが, ひび割れ面のせん断伝達により主応力方向はひび割れ方向と異なり, 主応力がひび割れ強度に達した時, 主応力方向に新たなひび割れの発生を許容する。

主軸の方向は, 全てのひび割れが閉じている時は, 主応力方向に一致させ, ひび割れが開い

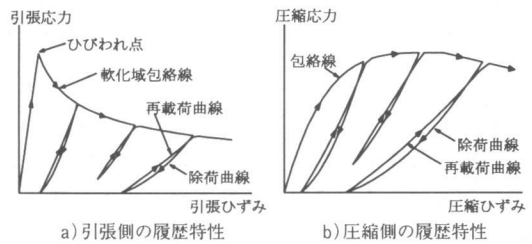


図1 コンクリートの応力-ひずみ関係

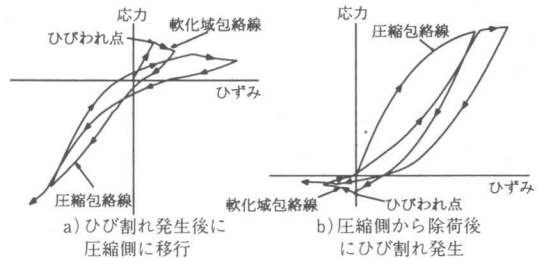


図2 コンクリートの引張～圧縮間の履歴特性

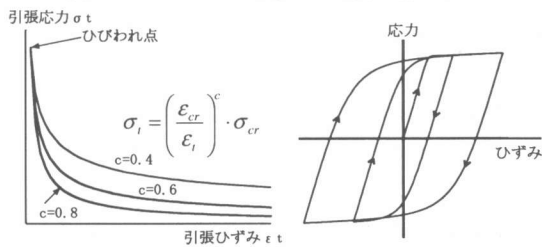
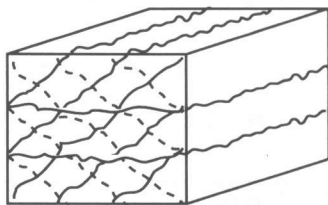
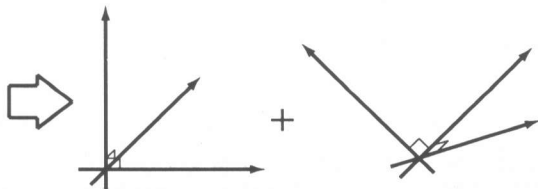


図3 テンションステイフニング特性 図4 鉄筋の応力-ひずみ関係



ひび割れパターン例



1本目のひび割れ軸
2本目のひび割れ軸
図5 非直交分散ひび割れモデルの概念

ている場合には、既存のひび割れのうち、最も主ひびずみ方向との交角が小さい方のひび割れ座標軸に一致するものと仮定した。なお、ひび割れ軸と主軸の各々の方向の最大交差角が 20° 以上になった時新たなひび割れが発生するものと仮定した。

4. 要素レベルの解析

本ひび割れモデルによる解析例として、まず単一の六面体要素の例を示す。図6に示すように、要素の下面を固定し上面に鉛直変位を与え、水平なひび割れを生じさせ、上面の鉛直変位は保持したまま水平力を与えた。要素は、各辺が単位長さの立方体とし、各辺に平行な3方向(x, y, z)に鉄筋比1.5%の等量配筋を設定した。

水平力の荷重パターンとして、単調荷重、 0° 方向(x方向)正負繰返し荷重、及び 45° 方向(x-y面内でx方向より 45° 方向)正負繰返し荷重の3ケースの解析を行った。

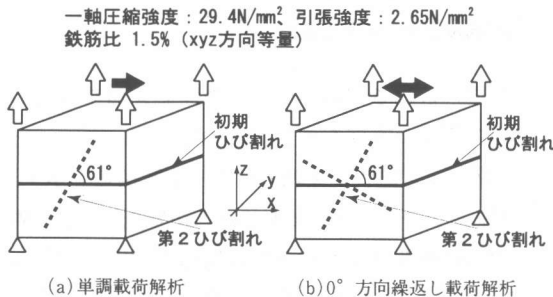


図6 一要素解析の境界条件とひび割れ状況

図7にせん断応力-水平変位関係を示す。比較のため、初期ひび割れの方向に主軸が固定される直交ひび割れモデルと非直交ひび割れモデルの両者の結果を示す。まず、水平力を単調荷重した場合(図7(a)参照)について、直交ひび割れモデルの場合は、主軸が1本目のひび割れ方向に固定されるため、ひび割れ面のせん断伝達剛性により、変位に伴って線形に荷重が増加し、主応力が引張強度を越えても、新たなひび割れが許容できず、不自然な現象を示す。

非直交モデルを用いた場合では、せん断応力1.0MPa程度で1本目のひび割れに対して 61° の交角の方向に新たなひび割れが生じ、非線形性を再現できる。水平力を 0° 方向に正負繰返し荷重した場合には、負荷荷時に図6に示すように2本目のひび割れに対して直角方向にひび割れが生じる。現段階では、2つのひび割れ座標系のみを許容しているため、ひび割れパターンは正負非対称となる。この荷重条件の場合、厳密に正負対称のひび割れを表現するためには、3本のひび割れ座標系を設定する必要がある。しかし、主軸と主応力方向が異なり、主応力方向がほぼ正負対称となるため、ひび割れパターンの非対称の影響は小さく、せん断応力-水平変形関係はほぼ正負対称となる(図7(b)参照)。図7(c)に示す 45° 方向に正負繰返し荷重した場合に関しても、非線形の履歴ループはほぼ正負対称に描かれている。

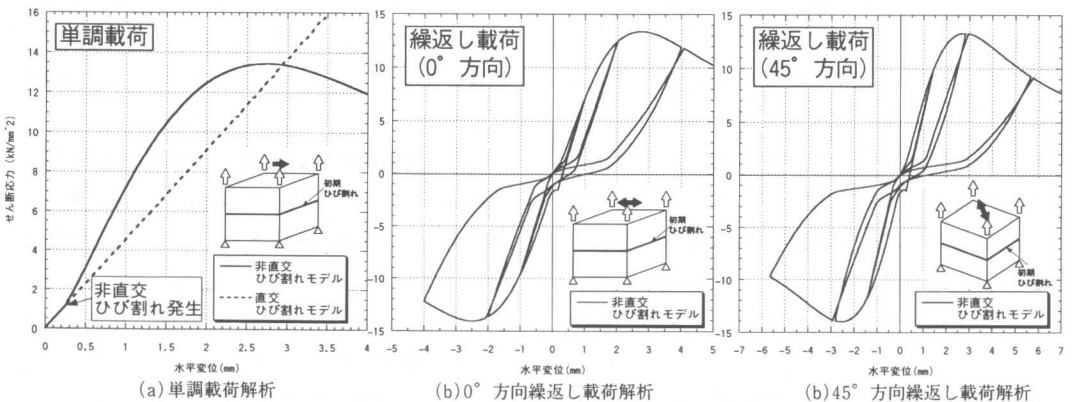


図7 要素レベルによる解析のせん断応力-水平変位関係

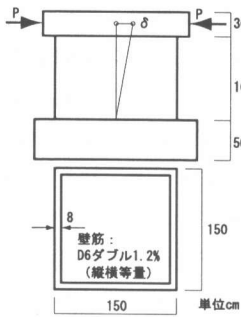


図8 試験体形状

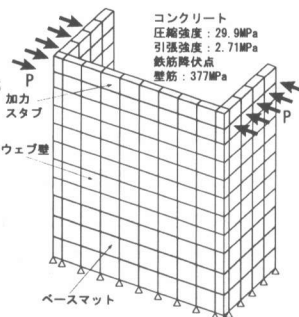


図9 解析モデル

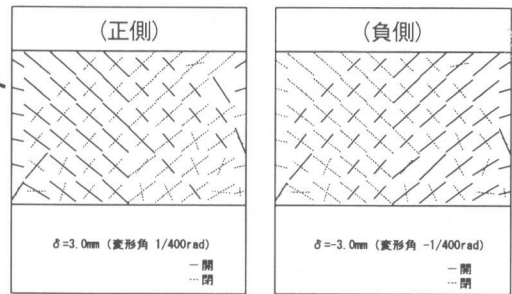


図10 ひび割れ状況

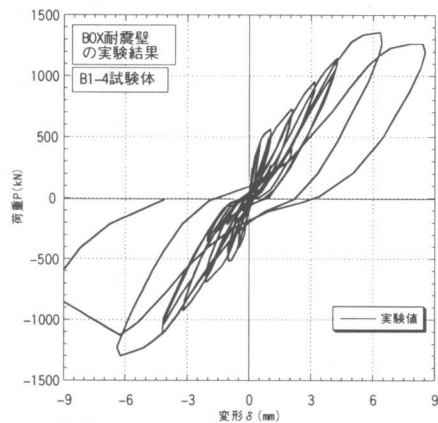
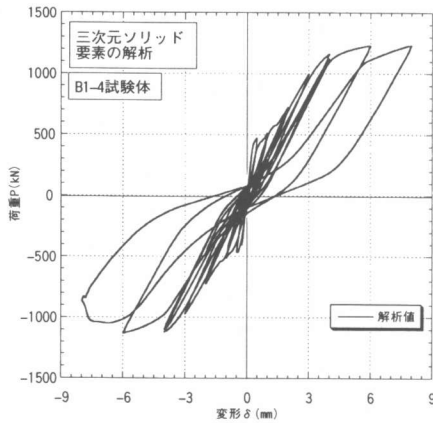


図11 BOX耐震壁の荷重—変形関係の比較（解析と実験）

5. 部材レベルの解析

次に部材レベルの解析例として既往のBOX壁⁸⁾とRC柱梁接合部の実験を対象とした三次元繰返し荷重解析を実施した。

5.1 BOX壁の解析

①解析概要：図8に試験体形状を、図9に解析モデルを示す。本来、BOX壁は面内応力が卓越するため、平面応力を仮定した積層RCシェル要素によりモデル化するのが一般的である。しかし、本研究では三軸応力下のひび割れモデルの適用性を検討するため、六面体要素を用いた。

鉄筋は六面体要素内に定義した分散型埋込み鉄筋としてモデル化した。ベースマット及び加力スラブ部分は、実試験体と同様な厚さを持つシェル要素を重ねて模擬した。水平力の荷重は加力スラブに水平変位を与え、変位制御で解析を行った。

②解析結果：図10に解析から得られたひび割れ状況を示す。本図は、ウェブ壁（加力に平行

な壁）の厚さ方向の中心を切断した面を横切るひび割れの方向を示したものである。

図11に解析と実験の荷重—変形関係を示す。解析では、実験と比較して耐力が若干低いが、両者の剛性及び履歴ループは同様な傾向を示している。実験と解析ともに最終サイクルの負側で耐力低下が生じ、良好な対応を示している。また、解析の履歴ループ及びひび割れ状況はほぼ正負対称であり、この解析対象とした荷重パターン等の諸条件においては、本モデルにより実験結果をほぼ再現できることを確認した。

5.2 直交梁の付いた柱・梁接合部の解析

①解析概要：解析対象は、図12に示すRC柱・梁接合部の実験試験体とした。この試験体は、ハーフプレキャスト(PCa)工法による柱梁接合部で、梁主筋は接合部内、柱主筋は柱脚部でネジスリーブ継手されている。また、梁はハーフPCaで、PCa部と現場打ち部のコンクリート設計強度は30MPaである。実験は、柱頭に一定軸力

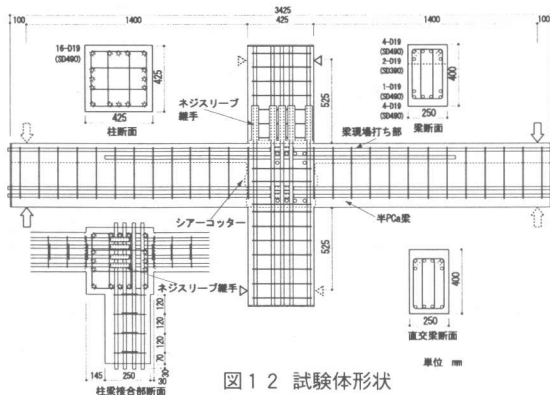
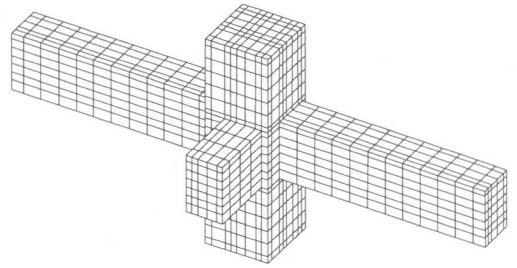
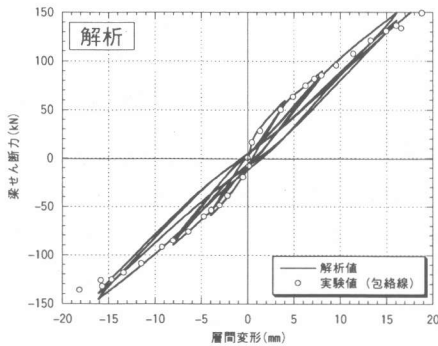


図 12 試験体形状

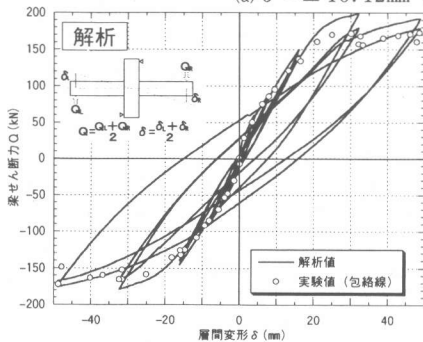
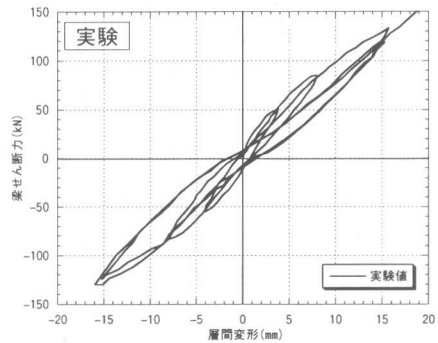


コンクリート強度
 柱：81.8 N/mm²、柱梁接合部：70.5 N/mm²
 梁 (PCa部)：38.5 N/mm²、(現場打ち部)：30.0 N/mm²

図 13 解析モデル



(a) $\delta = \pm 16.12\text{mm}$ (部材角 $\pm 1/100\text{rad}$) までの比較



(b)履歴ループ全体の比較

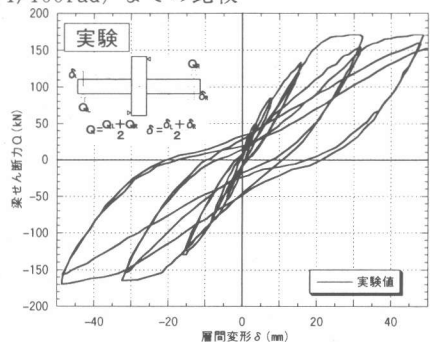


図 14 柱梁接合部の荷重-変形関係の比較 (解析と実験)

98kN (軸力比 0.54N/mm²) を保持させた状態で、梁端にせん断力を正負交番载荷された。

試験体は直交梁を有し、各梁が柱に偏芯して取り付いているため、それらの影響を忠実に再現するには、三次元でモデル化する必要がある。

図 13 に解析モデルを示す。コンクリートは六面体要素、鉄筋はトラス要素で 1 本 1 本を忠実にモデル化した。载荷は、柱頭に一定軸力を与え、梁端部に正負繰返し強制変位を与えた。
 ②解析結果：図 14 (a) (b) に解析と実験から得られた梁せん断力 Q - 層間変位 δ 関係を示す。図

14 (a) は部材角 $\pm 1/100\text{rad}$ ($\delta = 16.12\text{mm}$) まで、図 14 (b) は実験最終ループまでの比較を示している。

図 14 (a) の梁降伏以前の履歴ループに関しては、解析と実験はほぼ同様な傾向を示して、包絡線もほぼ一致している。

図 14 (b) より、梁降伏後の大きな変形領域における履歴ループに関しては、解析は正側において耐力が実験よりやや大きい。また、実験の履歴ループは逆 S 字型を示しているのに対し、解析は紡錘型を示している。この原因としては、実

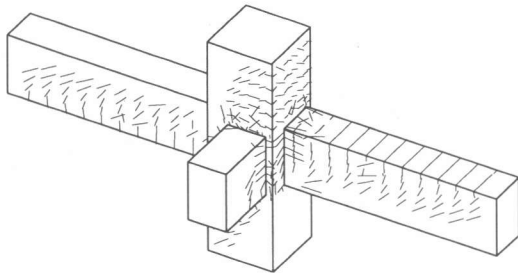


図15 解析から得られた $\delta = +16.12\text{mm}$ (部材角 $+1/100\text{rad}$) のひび割れ状況

験では大変形領域に入り、接合部内における梁主筋の付着劣化によるすべりの影響が履歴ループに現れたと考えられ、解析では梁主筋の付着すべりをモデル化していないことが挙げられる。

図15に解析から得られたひび割れ状況を示し、実験時のひび割れ状況を図16に示す。図15のひび割れ状況は、 $\delta = +16.12\text{mm}$ (部材角 $+1/100\text{rad}$) 時に開いているひび割れのみを描いている。ひび割れの領域やひび割れの方向等、解析と実験はほぼ良好に対応している。

6. まとめ

本報では、RC構造部材の三次元繰返しFEM解析手法の確立を目的に、コンクリートの三軸応力下における非直交分散ひび割れモデルを開発し、要素レベルの解析及び既往の実験試験体を対象とした解析を実施した。以下に得られた知見を示す。

- 1) 要素レベルの解析により、直交しないひび割れが生じる荷重条件において、正負対称な履歴特性を表現できることがわかった。
- 2) BOX壁を六面体要素を用いてモデル化し、正負繰返し載荷解析を実施した結果、解析の履歴ループは、実験と比較的良好に対応した。
- 3) 直交梁を有し、各梁が柱に対して偏芯して取り付く柱・梁接合部の正負繰返し載荷解析を行った結果、梁降伏以前の履歴ループに関しては解析と実験は良好に対応した。しかし、梁降伏後の変形が大きな領域での履歴ループに関しては、解析で主筋の付着すべりの影響を考慮していないため、実験結果と相違が見られた。

本報で示した三次元繰返し載荷解析手法により、今回解析対象とした試験体については、実験結果

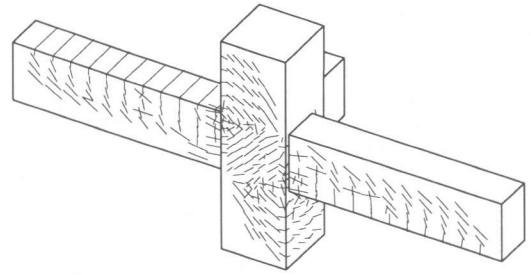
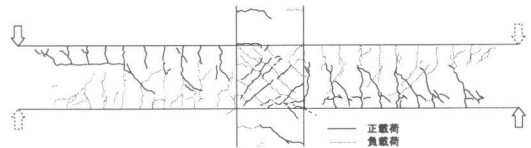


図16 実験から得られた $\delta = +16.12\text{mm}$ のひび割れ状況



を比較的良好に再現できることが確認された。しかし、現状の非直交分散ひび割れモデルは、各要素積分点に対して2つのひび割れ座標系を許容できるが、あらゆる荷重条件、またはひび割れパターンに対応できるわけではない。本報の一要素の解析で示した条件においても、正負繰返し載荷した場合、正負非対称なひび割れ状況を示し、厳密には3つのひび割れ座標系を設定する必要がある。

【参考文献】

- 1) 長沼一洋, 他2名: 鉄筋コンクリート立体耐震壁の動的FEM解析 (その1) 解析概要, (その2) 時刻歴応答解析結果, 日本建築学会大会梗概集, 構造II, pp.1137~1140, 2000.9
- 2) 福浦尚之, 前川宏一: 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, 土木学会論文報告集, No.634, V-45, pp.177~195, 1999.11
- 3) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第536号, pp.135~142, 2000.10
- 4) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp.163~170, 1995.8
- 5) 出雲淳一, 他: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 6) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan. 1979
- 7) Ciampi, V., et al. Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982.
- 8) 秋野金次, 他2名: 原子炉建屋の復元力特性試験 (小型及び部分模型) (その4) B1シリーズ試験, 日本建築学会大会梗概集, pp.963~964, 1982.10