

# 常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断力を複合 載荷した RC 柱の非線形三次元有限要素立体解析

土屋智史<sup>1</sup>・津野和宏<sup>2</sup>・前川宏一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工学) コムスエンジニアリング 第2事業部 (〒113-0031 東京都文京区根津2丁目20-1)

<sup>2</sup>正会員 工修 首都高速道路公団 工務部工務企画課 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関一丁目4-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京大学大学院教授 工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷七丁目3-1)

非直交性を許容する三次元多方向ひび割れ構成則の検証を目的とし、常時偏心軸力と交番繰返しねじり・曲げ/せん断力の複合を受ける中実RC柱部材の挙動を、非線形三次元有限要素立体解析を通じて検討した。多方向ひび割れが三次元空間に導入される状況が、解析により概ね追跡することが可能であることを検証するとともに、ねじり・曲げ・せん断力下で発生するかぶりコンクリートの剥離と主鉄筋のはらみ出しに関するモデル化が、大変形領域では重要となることを確認した。主鉄筋の大変形挙動を簡便に考慮した解析も併せて実施し、これらが構造挙動に及ぼす影響について検討した。卓越するひび割れ方向が順次変化していく様子を三次元空間で視覚的に認知することが、解析を通じて可能となった。

**Key Words:** full 3D FE solid analysis, RC column members, cyclic torsion, cyclic horizontal force, permanent eccentric axial force, buckling behavior

## 1. 序論

我が国では、立地条件等の制約から、都市部で橋軸直角方向に偏心した逆L型やT型のRC道路橋脚が、少数ではあるが存在する。常時偏心軸力を前提とする耐震部材の構造安全性の確保も、重要な課題である。この種の構造形式の耐震性能を明らかにするためには、慣性力に伴う曲げ/せん断力(主たる作用)と、常時偏心軸力と付加ねじりモーメント(従たる作用)との相互作用を適切に考慮しなければならない。外荷重が任意の繰返し載荷経路を辿ることも、今後性能照査で詳細に検討する必要がある。

純ねじり、或いはねじりと曲げ/せん断力が作用するRC部材の載荷実験、ならびに解析的検討がこれ迄に報告されている<sup>1),2)</sup>など。これらは、一般に主応力方向が大きく転換しない条件を対象とし、導入される多数のひび割れ群は、ほぼ直交する位置関係にある。

一方、三方向以上の多方向ひび割れを含む鉄筋コンクリート要素の履歴依存性がおよそ解明され、

これらの知見を構成則の形で取り入れた鉄筋コンクリート構造物の三次元非線形構造解析手法<sup>3)</sup>が開発されつつあり、適用範囲(構造形式、荷重履歴等)の拡大が図られている。自由度の縮退を行わないために、梁-柱ファイバー要素や積層シェル要素を用いた三次元解析よりも計算効率は低下するが、解析解の信頼性は多角的な検証と改良を重ねるに従って、向上しつつある<sup>4),5),6)</sup>。この手法を用いれば、実験で得ることのできない構造内部の力の流れや損傷の定量評価が可能となり、多方向入力下の構造耐荷機構の解明や設計耐力式の改良等にも、威力を発揮するものと期待される。筆者らは、自由度の縮退を前提としない動的三次元非線形立体解析手法(以下「立体解析」とする)を中期開発目標に据え、計算環境が一層充実する近未来を前提として、開発を進めているところである。本研究は、この解析法の核をなす非直交多方向ひび割れ構成則の検証を、三次元応力場で行うことを目的とするものである。

自由度を縮退したシェル要素を使用して、交番繰返しねじりと曲げ/せん断力が作用するRC箱型

中空柱実験の解析が既に行われている<sup>7)</sup>。シェル要素を用いた解析（以下「シェル解析」とする）では、立体解析と比較して解析自由度を減少させることができる反面、面外変形の取り扱いと回転拘束条件に制約が加わることになる。ここでは、ねじりによるかぶりコンクリートの剥離や鉄筋座屈発生以降のねじり剛性の評価に課題を残しつつも、ねじり剛性および終局に至るまでの曲げ/せん断挙動は、精度良く予測できるようになってきた。

三次元立体解析手法を適用した例<sup>8)</sup>として、純ねじりが作用する RC 柱および多方向せん断力が作用する RC 柱実験があり、解析結果は実験結果と良好な整合を見せている。鋼板および炭素繊維シートで耐震補強された RC 柱の載荷実験についても検討が行われ、変形能力の向上を評価できることが示された。しかし、いずれも単調載荷下での議論であり、ひび割れは殆ど単方向、あるいは直交関係に留まっている。従って、非直交三次元多方向ひび割れ構成則の一部のみを検証したに留まり、これらの結果をもって、モデル化の適否を判断するのは早計である。

本稿では以上の背景を踏まえ、非直交多方向ひび割れの力学モデル検証の対象として、常時偏心軸力と交番繰り返しねじり、および交番繰り返し曲げ/せん断力をパラメーターとする既往の RC 中実柱の載荷実験<sup>9)</sup>を選定し、三次元立体解析を行った。そもそも実験自体は、偏心軸力と曲げ/せん断力・ねじりモーメントの相互作用が、RC 柱の耐震性能に及ぼす影響を検討するために行われたものである。本検討を通して、大変形領域では、かぶりコンクリートの剥離や主鉄筋の座屈挙動も全体変形挙動に無視できない程度の影響を及ぼすことが示唆された。そこで、既往の研究成果<sup>10),17),18)</sup>を基に、簡便な鉄筋座屈モデルを三次元立体解析に導入し、応答挙動に及ぼす影響について検討を加えることとした。

交番繰り返しねじりと曲げ/せん断力が作用する多軸応力下の RC 柱では、少なくとも三方向以上にひび割れが導入されるので、載荷経路依存型の多方向固定分散ひび割れモデル<sup>3),9)</sup>の検証に適している。自由度を縮退した解析モデルでこの問題を取り扱うことはできず、載荷履歴を考慮した三次元立体解析が必要不可欠である。面外変形を簡略化したファイバーモデルに基づく三次元非線形解析（以下「ファイバー解析」とする）は、そのまま適用することができず、なんらかの置換作業が必要となる。

一方、ここで取り上げる実験シリーズの中で、

常時偏心軸力と交番曲げ/せん断力だけを加えた柱（詳細は後述）については、多軸曲げ挙動が卓越することから、ファイバー解析を適用することも可能と思われる<sup>11)</sup>。そこで、ねじりを加えない実験ケースに対しては、自由度を縮退したファイバー解析と立体解析結果を比較し、それらの精度と適用範囲についても併せて考察を行うこととした。

本文では既往の文献<sup>11)</sup>に習い、偏心軸力によってもたらされるモーメントを「偏心モーメント」、その作用する方向を「偏心方向」と定義する。一般に、偏心方向は橋軸直角方向と一致する。

## 2. 既往の実験結果概要<sup>9),9)</sup>

### (1) 実験供試体と載荷方法

解析モデルの検証に選定した既往の実験の概略を以下に述べる。常時に作用する偏心モーメントが比較的大きい実 RC 橋脚をモデルに選び、およそ 1/5 に縮小した供試体が、本論文の対象である。鉄筋の定着やコンクリートの充填等を考慮しつつ、できる限り、断面と配筋の寸法比が実物大橋脚と同一になるように、鉄筋径や配筋方法が選定されている。実験供試体の寸法と断面諸元を図-1 に、使用した材料試験結果を表-1 に示す。

実験供試体は No.1～No.3 の 3 体で、交番ねじりと常時偏心軸力をパラメーターとして、表-2 に示す組合せで、交番繰り返し曲げ/せん断力が載荷された。No.1 では、鉛直荷重 245[kN]を柱断面図心位置に作用させ、No.2 と No.3 では、柱断面図心位置から 700[mm]の位置に 147[kN]一定の常時偏心軸力を加えている。これは、偏心軸力の載荷により主鉄筋に発生する引張応力が、 $1200[\text{kgf}/\text{cm}^2]=117.6[\text{MPa}]$ 以下となるように定めたものであり、柱基部コンクリートにはひび割れが発生する。供試体 No.1 と No.2 の交番繰り返しねじりと曲げ/せん断力の載荷方法は、図-2 に示す通りである。すなわち、「水平変位原点位置において、変位制御によりねじり(+方向)を加え、ねじり回転角を保持したまま曲げ/せん断力を加える。平均水平変位が  $+n\delta y$  になるまで加力した後、原点まで戻し、今度は逆方向にねじり回転角(-方向)を加え、同じく  $-n\delta y$  を経て原点まで戻す。」という作業を繰り返す。ねじり量は、No.1 がねじりひび割れ発生モーメント、No.2 がねじり降伏モーメント相当となるように、載荷中に状況を確認しつつ決定する(表-2)。それぞれジャッキの変位量で表すと、No.1 が  $\pm 2.5[\text{mm}](1\delta y$  のみ  $\pm 1.6[\text{mm}])$ 、No.2 が  $\pm 15.0[\text{mm}]$  であった<sup>9)</sup>。

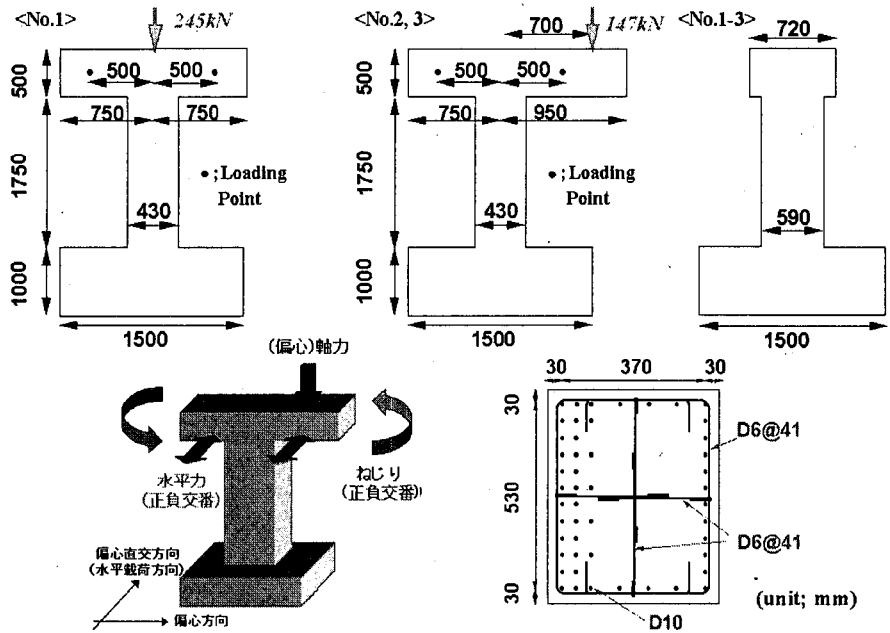


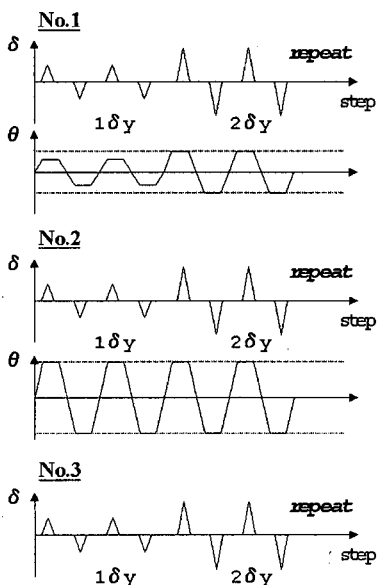
図-1 実験供試体の概要

表-1 材料試験結果

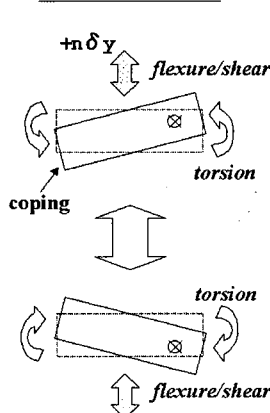
		No.1	No.2	No.3
コンクリート	圧縮強度 (MPa)	34.4	34.8	36.9
	弾性係数 (*10 <sup>4</sup> MPa)	2.68	2.32	2.53
	引張強度 (MPa)	2.75	3.05	3.33
	ポアソン比	0.161	0.189	0.164
D10	降伏強度 (MPa)	402	393	393
	弾性係数 (*10 <sup>5</sup> MPa)	1.87	1.88	1.88
D6	降伏強度 (MPa)	384	384	384
	弾性係数 (*10 <sup>5</sup> MPa)	1.83	1.92	1.92

表-2 荷荷方法の組合わせ

	No.1	No.2	No.3
偏心軸力	なし (図心軸力)	あり	あり
交番ねじり	ねじり ひび割れ	ねじり 降伏	なし
交番曲げ/せん断	±9δy (2cycles)	±6δy (2cycles)	±7δy (2cycles)



Torsion of No.1 & 2



No.1

+δy=+9.9mm, -δy=-9.0mm  
θ; ねじりひび割れ発生回転角  
(2δy以降は, 等モーメント角)  
ジャッキ変位差は, ±2.5mm  
(1δyのみ 1.6mm)

No.2

+δy=+8.0mm, -δy=-8.0mm  
θ; ねじり降伏回転角  
ジャッキ変位差は, ±15mm

No.3

+δy=+8.0mm, -δy=-8.0mm

<plane figure>

図-2 荷荷方法

供試体 No.1~No.3 のいずれのケースにおいても、曲げ変形が主体となる。しかし、交番ねじりを加える No.1 と No.2 では、少なくとも 3 方向以上の非直交ひび割れが発生し(ねじり/せん断斜めひび割れと曲げ水平ひび割れ)、卓越するひび割れ方向が時々刻々と変化する。しかも No.2 では、ねじり降伏程度までの、かなり大きなねじり量が付加されており、その影響は無視できない。

## (2) 実験結果

### a) 供試体 No. 1

水平載荷方向の荷重-変位関係(図-3)と、水平載荷方向のねじり力(2つの載荷点反力の差)-変位関係(図-4)を示した。5 $\delta y$  付近から曲げ圧縮を受ける側のかぶりコンクリートの剥落が始まり、8 $\delta y$  から鉄筋の破断が観察され、9 $\delta y$  で載荷を終了した。9 $\delta y$  の第 1 サイクル載荷終了時におけるひび割れ図を図-5 に、柱基部の損傷の様子を写真-1 に示す。主鉄筋では、破断とともに若干のはらみ出し現象が認められた。

### b) 供試体 No. 2

水平載荷方向の荷重-変位関係(図-6)と、水平載荷方向のねじり力(2つの載荷点反力の差)-変位関係(図-7)に加え、偏心モーメント方向変位-水平載荷方向変位関係(図-8)を示した。水平載荷と直交する方向に、大きな残留変形が蓄積して行く現象が確認された(図-8、写真-2)。この残留変位は、主たる荷重作用方向の変位を上回るものである。偏心方向の変形が載荷装置の限界に達し、実験を終了した。最終的な残留変形量は約 140[mm]であり、1/20 を越える回転角を示した。また、4 $\delta y$  程度から柱基部の偏心軸力により、圧縮を受ける側のかぶりコンクリートの損傷が顕著となり、5 $\delta y$  で圧壊した。6 $\delta y$  の第 1 サイクル載荷終了時におけるひび割れ図を図-9 に、実験終了後の柱基部の様子を写真-3 に示す。主鉄筋の明瞭なはらみ出し現象は認められなかったが、剥落に伴いコンクリートとの一体性は失われていた。

### c) 供試体 No. 3

水平載荷方向の荷重-変位関係(図-10)と、偏心モーメント方向変位-水平載荷方向変位関係(図-11)を示した。水平載荷と直交する方向において、ねじりを加えていないこの場合でも、偏心方向に変形が蓄積する現象が確認された(図-11、写真-4)。ここでも、偏心方向変位が実験装置の限界に達し、載荷を終了した。最終的な残留変形量は、約 120[mm]であった。5 $\delta y$  程度から、柱基部の偏心軸力により圧縮を受ける側のかぶりコンクリートの損傷が

顕著となり、6~7 $\delta y$  で圧壊した。7 $\delta y$  の第 1 サイクル載荷終了時のひび割れ図を図-12 に、実験終了後の柱基部の様子を写真-5 に示す。主鉄筋の明瞭なはらみ出し現象は認められなかったが、剥落に伴いコンクリートとの一体性は失われていた。

## 3. 三次元有限要素非線形解析手法

### (1) 解析手法の概要

本稿で用いる三次元立体非線形解析手法は、任意の載荷経路依存性を考慮した材料構成モデルに基づく RC 平面モデル<sup>12)</sup>を三次元に拡張したものである<sup>9)</sup>。平面応力下では、最大四方向までの非直交ひび割れを考慮することができる、多方向固定分散ひび割れモデル<sup>3)</sup>が採用されている。ひび割れ間の相互作用については、ひび割れ幅の大きいひび割れ(アクティブクラック)に関する非線形挙動が主であるとするコンセプトに基づく、active crack 法が採用されている。四方向ひび割れそれぞれの開閉とずれ、並びに相互作用を考慮することで、任意の載荷履歴でも、伝達応力を算定できる枠組が構築されている。二次元 RC 平面モデルを三次元に拡張する際には先ず、最初のひび割れ面に垂直方向に主軸(1)を設定し、第一ひび割れ面内に直交軸(2 と 3)を導入して、軸(1,2),(2,3)および(1,3)によって定義される準平面(sub-plane)を規定する(図-13)。これら 3 つの準平面に二次元 RC 構成モデルを適用し、算定された伝達応力を重ね合わせることで、三次元応力状態を表現するものである。ここで、回転応力テンソルがゼロとなる条件を付与する。その結果、三次元空間上において、九面の非直交ひび割れ面の相互作用を考慮することが可能となる。

比較的粗い要素分割に対しても解析精度を確保するために、直交三方向に対して、構造物を鉄筋が密に配置されている領域(RC Zone)と鉄筋の付着作用が及ばない領域(Plain Concrete Zone)に分割するゾーニング手法<sup>13)</sup>を採用した。配筋に応じて要素分割を行い、RC Zone ではテンションスティッピングを考慮する。Plain Concrete Zone では、引張破壊エネルギー( $G_f$ )と要素寸法から、破壊力学上の要件を満たすべく、応力解放率を決定するものである。

一方、ファイバー解析では、平面保持の仮定を基に、平均軸ひずみと二方向曲率から断面軸力とモーメントを求める。面内方向の変形挙動に適用される材料構成モデルは、立体解析のものと同じ

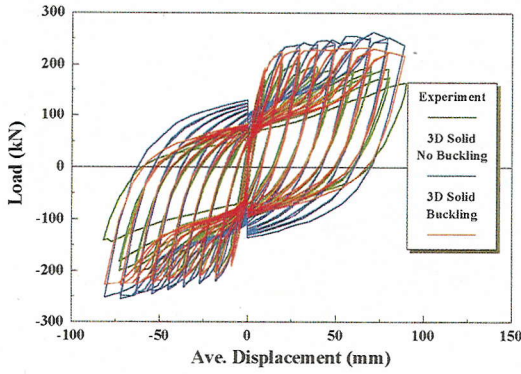


図-3 No.1 水平載荷方向荷重-変位関係

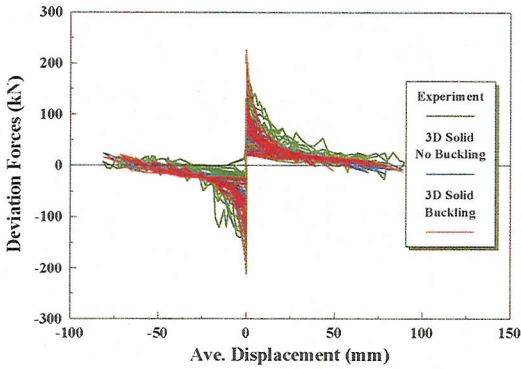


図-4 No.1 水平載荷力差分(ねじり)-変位関係

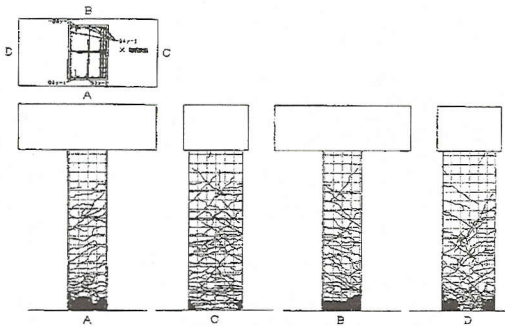


図-5 No.1 載荷終了後のひび割れ図



写真-1 No.1 柱基部での損傷

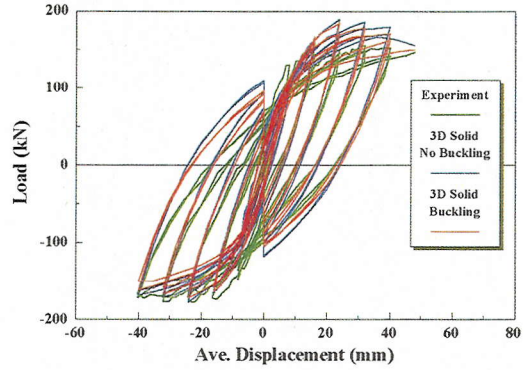


図-6 No.2 水平載荷方向荷重-変位関係

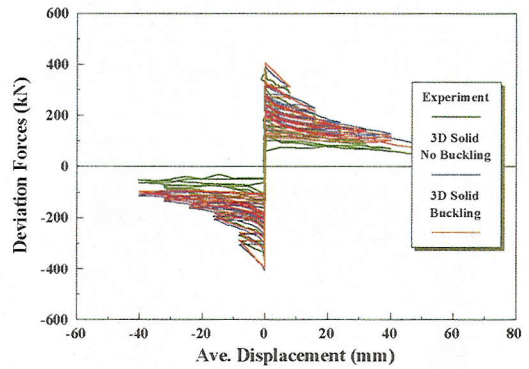


図-7 No.2 水平載荷力差分(ねじり)-変位関係

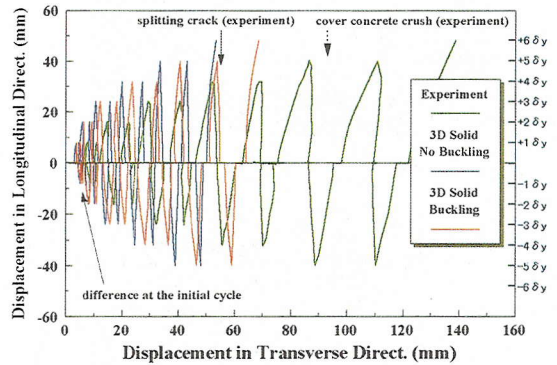


図-8 No.2 偏心方向変位-水平載荷方向変位関係

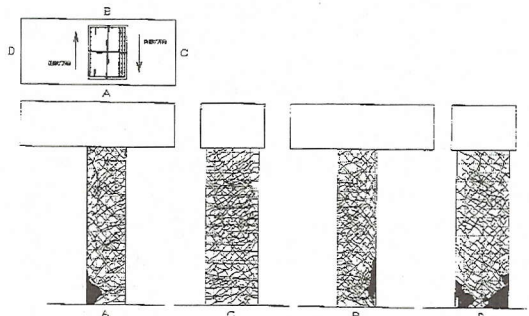


図-9 No.2 載荷終了後のひび割れ図



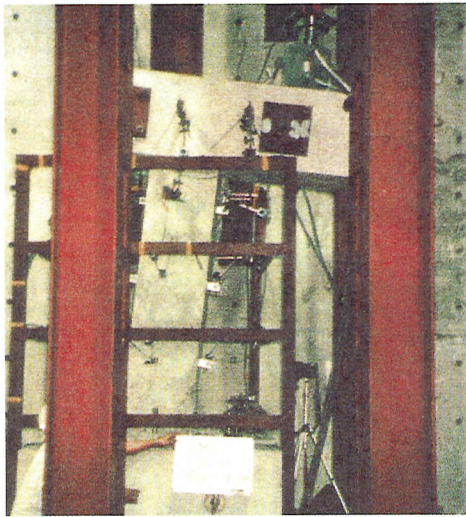


写真-2 No.2 偏心方向変形の様子

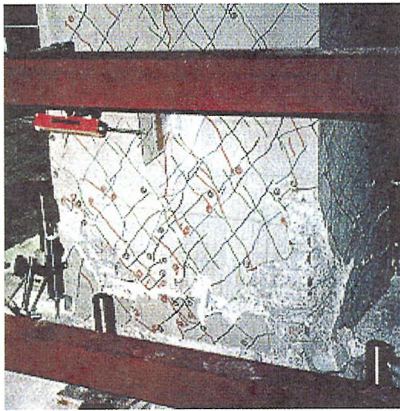


写真-3 No.2 柱基部での損傷

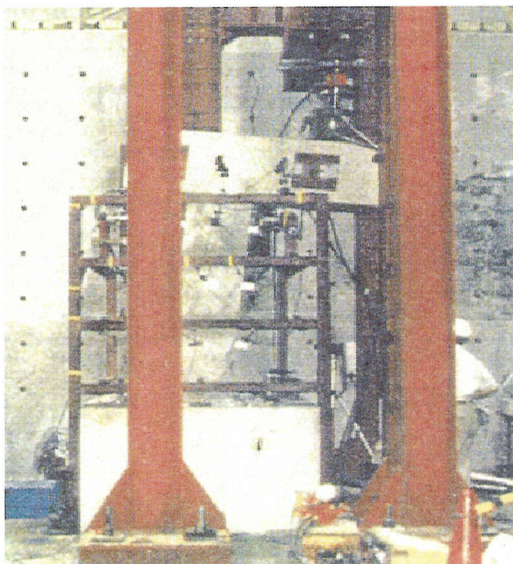


写真-4 No.3 偏心方向変形の様子<sup>1)</sup>

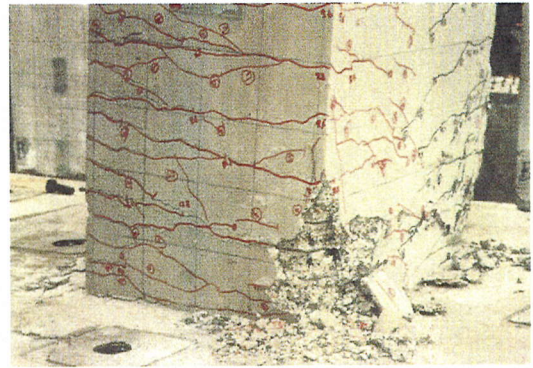


写真-5 No.3 柱基部での損傷<sup>1)</sup>

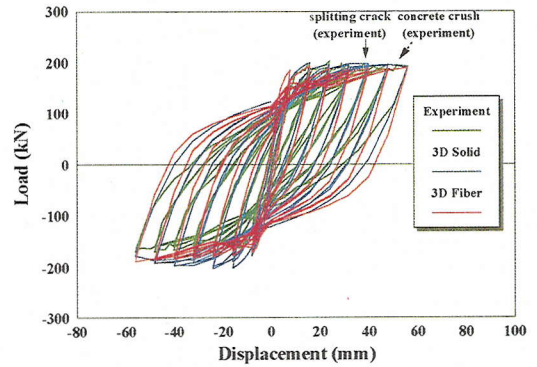


図-10 No.3 水平載荷方向荷重-変位関係

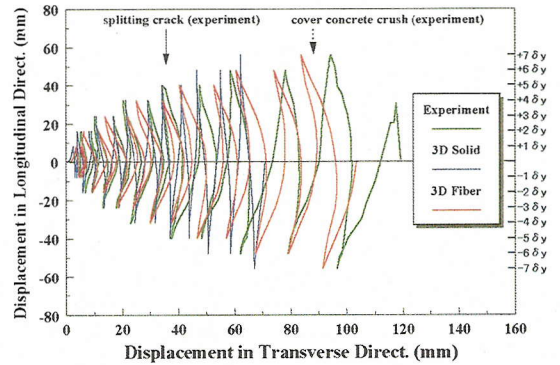


図-11 No.3 偏心方向変位-水平載荷方向変位関係

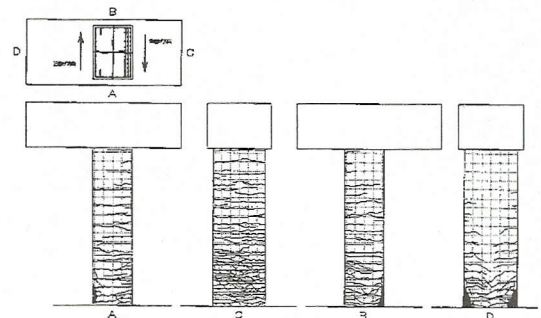


図-12 No.3 載荷終了後のひび割れ図

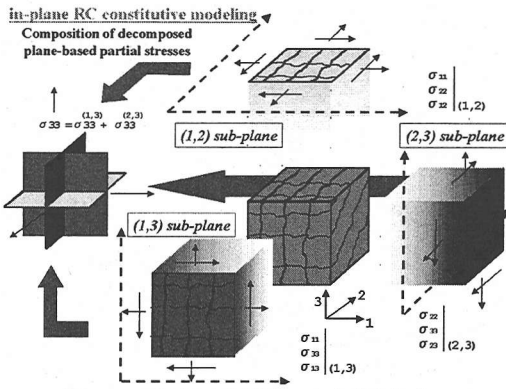


図-13 三次元立体要素の応力算定法<sup>5)</sup>

Solid Analysis (Full 3D):  
No.1-No.3 Specimen

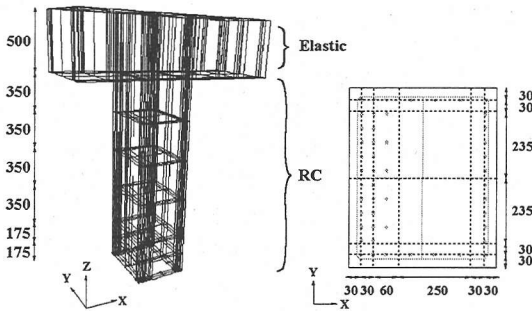


図-14-1 立体解析の要素分割

Frame Analysis (Fiber Model):  
No.3 Specimen Only

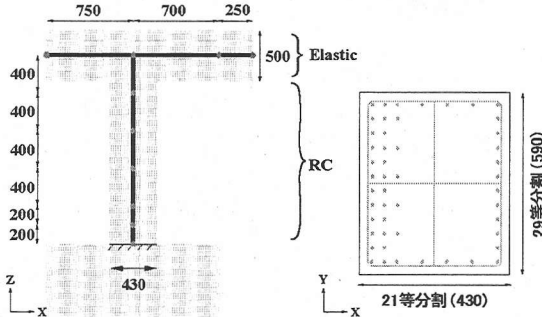


図-14-2 ファイバー解析の要素分割<sup>11)</sup>

であるが、面外方向の変形を線形関係として簡略化することにより、自由度を縮退している<sup>11)</sup>。曲げ変形が卓越するRC柱に対して有効な手段であるが、せん断変形を過小評価することに留意する必要がある。

フーチングからの主筋の抜け出し量は、部材変位のおよそ十数%程度と小さいことが、実験実測より確認されている<sup>14)</sup>。これは、実物大橋脚を忠実に再現した断面諸元を、実験において設定したためである。よって本論文では、柱基部での鉄筋の引き抜けを特に解析で考慮しなかった。

要素分割を図-14に示す。損傷の集中する基部では、部材軸方向の要素寸法を小さくして、精度の確保を図った。断面内の分割では表面部を細かく分割し、中心部は比較的粗く分割した。これは、ねじりによって部材表面部にせん断流れが集中すること、二方向曲げ作用によって圧縮力が部材表面に集中すること、部材中央部は曲げひび割れが卓越して、応力伝達に殆ど寄与しないので、大きく分割しても精度を落とす恐れがないからである。

## (2) 簡易鉄筋座屈モデル

ねじりと曲げモーメントが作用するRC構造物の変形能力と靱性は、かぶりコンクリートの剥離や鉄筋の座屈現象によっても左右される。日本における実橋脚相当の寸法と配筋を有するRC柱では、一般に、かぶりコンクリートの剥離や主鉄筋の座屈挙動が曲げ変形以降の耐力値に及ぼす影響は、比較的小さいものと思われる。実断面に対するかぶり厚や鉄筋径が、室内実験の場合と比較して相対的に小さいためである。しかし、除荷剛性やエネルギー吸収量に影響が及ぶため、繰り返し载荷を受ける場合には、この影響を考慮しておくのが好ましい。また、ポストピーク挙動までを評価するには、これらの現象を解析手法に取り入れることが必要である。

幾何学的非線形を考慮した微小要素に基づく三次元立体解析が、この問題に対して最も直接的な解法である。鉄筋のはらみ出しは局所座屈として取り扱うことができよう。コンクリートの材料構成則は、無筋領域を対象とする基本モデル<sup>例えば13)</sup>でよく、要素内の鉄筋とコンクリートとの付着特性を代表する tension-stiffness は考慮しなくてもよい。しかしこの場合には、解析要素を異形鉄筋の節間隔程度に小さく定める必要があり<sup>16)</sup>、現時点の計算環境では現実的でない。

一方、かぶりコンクリートの剥離と構造物中に交差して配置された鉄筋の座屈挙動を空間平均化して扱う等価材料モデルの提案も行われるようになってきた<sup>10),17),18)</sup>。これらは、解析要素寸法をある程度、大きく設定することを許容する。Dhakarらのモデル<sup>10)</sup>は、細長比(L/D)と鉄筋降伏強度をパラメーターとして表現するもので、ファイバー解析に用いることを念頭に置いて開発されている。座屈長(L)は、図-15に示すように、座屈後の鉄筋形状を余弦関数と仮定することにより、軸力と帯鉄筋の横拘束力に関するエネルギーの釣り合いを考慮して決定される<sup>10)</sup>。これにより、鉄筋径、配筋方法、および使用材料特性に応じて、座屈長が

$$y_n = \frac{a_n}{2} \left( 1 - \cos \frac{2n\pi x}{ns} \right), \quad y_{n+1} = \frac{a_{n+1}}{2} \left( 1 - \cos \frac{2(n+1)\pi x}{(n+1)s} \right)$$

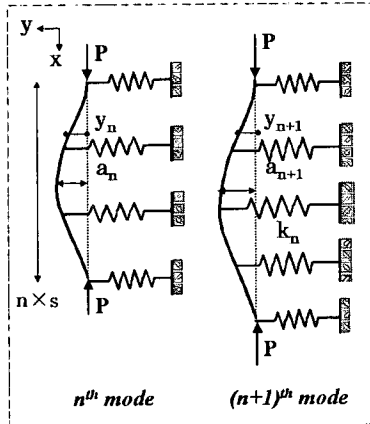


図-15 座屈長決定法の概要<sup>10)</sup>

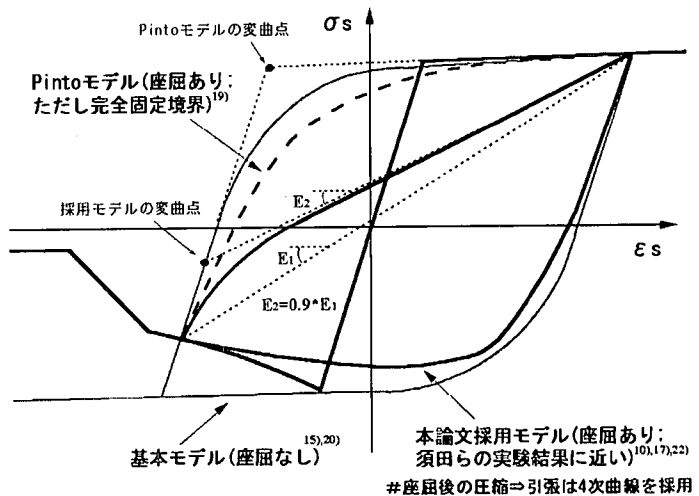


図-16 解析で適用した鉄筋座屈モデルの概略

算出される。また、想定された座屈長と解析要素長さが異なる場合には、非線形性が卓越する領域と除荷領域とを比較して、要素内の平均構成則に、寸法効果が考慮されるようになっている<sup>22)</sup>。

本稿では、この鉄筋座屈モデルを採択し、三次元立体解析に取り入れた。繰り返し履歴に関しては、Dhakarらは独立鉄筋を対象とするPintoらのモデル<sup>19)</sup>をそのまま採用しているが、両端固定の境界条件を仮定しているために、幾分、エネルギー吸収を過大側に評価する傾向がある。そこで、須田らが行った、実部材中の鉄筋挙動の計測に関する研究成果<sup>17)</sup>を基にして、エネルギー吸収が小さい経路を設定することとした。すなわち、図-16に示すように、Pintoらのモデルで定めている変曲点応力値を低下させることで、簡略的に圧縮領域から引張領域に至る剛性を低下させるものである。前述の通り、RC構造中の鉄筋は、両端完全固定の鉄筋単体での挙動に比べ、除荷・再載荷剛性が低下することを考慮するための処置である。

ねじりを加えた供試体 No.1 と No.2 に対して、座屈を考慮しない基本モデルに加え、提案した鉄筋座屈モデルを取り入れた解析も合わせて実施し、耐力以後の挙動についても検討を加えることとした。鉄筋の座屈現象が曲げ挙動に及ぼす検討は過去に見られるが、ねじりを含む荷重経路に対する検討は緒についたばかりである。前述のごとく、採用した鉄筋座屈モデルは、局所座屈を考慮しない静的解析の中で、鉄筋のはらみ出しを便宜的に表現するものである。挙動を忠実に追跡する厳密解法も平行して検討されるべき課題であるが、本稿では構造応答への影響度の検討を先ず優先して、簡易モデルで解析を進めることとしたい。なお、

No.2 供試体の実験においては、明瞭な主鉄筋のはらみ出しは観察されなかったものの、横方向への膨らみは正負交番載荷によって徐々に進展していく現象であり、急激に座屈するものではない。そこで、かぶりコンクリートの剥落がみられた No.2 供試体に対しても、座屈モデルを適用した解析を行うこととした。

## 4. 解析結果と考察

### (1) 荷重-変位関係

三次元立体解析を適用した結果を図-3, 4, 6, 7, 8, 10, 11 に実験結果と重ねて示した。供試体 No.3 については、ファイバー解析の結果も合わせて示した。筆者らは既往の文献<sup>11)</sup>で、鉄筋の材料構成則<sup>15)</sup>をバイリニア型としたときの解析結果を既に提示した。その後、塑性の局所化と破断までを含めて高精度化を行ったトリリニアモデル<sup>20)</sup>が提示されたことを受けて、改めて本論文で高精度化された鉄筋モデルによる解析を実施し、提示した。

#### a) 供試体 No. 1

鉄筋のはらみ出し(座屈)を考慮しない場合の水平載荷方向の荷重-変位関係を見ると、実験同様に、解析でも高靱性・高エネルギー吸収型の曲げ挙動を示している(図-3)。しかし、降伏耐力を若干高めに評価しており、強制変位が大きくなるにつれて、実験と解析結果の間で、その差が徐々に広がっていく傾向が見られる。強制変位が大きいサイクルとなるにつれて、除荷剛性を高めに評価するようになる。



鉄筋座屈モデルを取り入れた解析では、 $3\delta_y$  から座屈を考慮しない解析との間で差が生じ始め、実験結果との適合度は向上することが分かる。荷重-変位関係の包絡線では、降伏以降も耐力がほとんど増加しておらず、解析精度の改善が伺える。除荷・再載荷経路を比較すると、除荷剛性が小さくなり、ピンチ効果が認められる。鉄筋座屈モデルを導入することによって、柱部材の剛性とエネルギー吸収の低下が明瞭に解析で表現されるようになり、実験結果に近付くことが分かる。正側の降伏荷重値を解析では若干、高めに評価している点は现阶段で不明であるが、試験体の概要や曲げ挙動に関する実績を鑑みて、解析精度は特に問題にならないと思われる。以上より、鉄筋の局所的な座屈を模擬した解析を行うことで、大変形領域の部材挙動の予測精度は、有意に向上することが確認できた。

水平載荷方向のねじり力(2 載荷点反力の差)-変位関係を見てみると、初期に導入されたねじり力は、曲げ変形が増大するにつれて消散する。この現象は、解析によって良好に予測可能である(図-4)。曲げせん断に伴うひび割れの導入が、ねじり方向の剛性も同時に低下させるからである。これは、ねじりせん断斜めひび割れと曲げひび割れの交差効果が、解析で適切に表現できていることを意味し、ファイバーモデルでは根源的に表せない三次元挙動である。なお、ねじり力の低減に対しては、鉄筋座屈の効果は、解析上、殆ど見られなかった。

#### b) 供試体 No. 2

座屈を考慮しない場合の水平載荷方向の荷重-変位関係を見ると、最も載荷履歴が複雑となるこの場合でも、曲げ/せん断挙動を概ね精度良く評価している(図-6)。初期ねじりモーメントがほぼ鉄筋降伏モーメントに近いことから、かぶりコンクリートの損傷は相対的に激しく、解析でも軟化挙動が現れ、実験同様、ピンチ効果は見られない。内部応力状態を詳細にチェックしたところ、強制変位が大きい領域でも、常時作用する偏心軸力の影響で、曲げひび割れ面が常にどこかで接触を保ち続け、軸方向の圧縮剛性が低下しないことが分かった<sup>11)</sup>。しかし、 $1\delta_y$  における剛性を小さく見積もっており、No.1 供試体と同様に、強制変位が大きくなるにつれて、実験と解析結果の間で曲げ耐力と除荷剛性の乖離が生じ、その差が徐々に広がる傾向が見られた。

鉄筋座屈モデルを取り入れた解析では、座屈を考慮しない解析と比較して、内部包絡線で  $1\delta_y$  か

ら、耐力値で  $2\delta_y$  から差が生じ始め、その差が徐々に大きくなっている。荷重-変位関係の包絡線では、 $3\delta_y$  以降の耐力低下が著しくなり、解析精度の改善が伺える。ただし、座屈を考慮しない解析との差は、それ程大きくはない。除荷・再載荷経路を比較すると、除荷剛性とエネルギー吸収が大きく低下しており、実験結果により接近している。供試体 No.1 同様、鉄筋座屈を模擬した解析は、大変形領域における挙動予測を一層向上させることに貢献する。

水平載荷方向のねじり力(2 載荷点反力の差)-変位関係を見てみると、ねじり力は実験と同様に、いずれの解析においても曲げ変形が増大するにつれて小さくなる(図-7)。供試体 No.1 と異なり、反力差が大変形領域でも残留するのは、ねじり量が大きいためと考えられる。座屈を考慮する解析と考慮しない解析とを比較すると、座屈を考慮する解析の方が、若干、高いねじり力を示した。

水平力が作用していないにも関わらず、偏心モーメント方向の変位が非回復に蓄積して行く三次元挙動が、解析においても明確に示された(図-8)。ただし、変位量を過小に評価している。先ず、損傷がそれ程大きくない  $1\delta_y$  の時点で、既に実験と解析で差が生じており、その差が回復しないまま推移した後、かぶりの剥離や鉄筋座屈等の局所的な損傷が著しくなる大変形領域で、さらにその差が広がっている。前者の乖離については、大きなねじりを加えたことによる柱基部での局所変形や時間依存性等が原因として考えられる。後者の差については、解析で鉄筋のはらみ出しと局所座屈を考慮することで、精度の改善が図られることが分かる。座屈を考慮する解析と考慮しない解析との間で水平変位  $2\delta_y$  から差が生じ始め、その差は変形の増大に従って徐々に大きくなる。

実験結果に漸近するものの、解析ではこの方向の残留変位をなお、小さめに見積もっており、解析精度の向上を検討する余地が高い。本解析では、鉄筋軸方向と主圧縮応力方向が一致する条件を前提とした鉄筋座屈モデルを採用している。また、ねじり作用下では、かぶりコンクリートの剥離は容易に発生することが知られている。鉄筋のはらみ出し効果は、単純な曲げ挙動のそれと比較して異なることは、十分考えられる。

#### c) 供試体 No. 3

水平載荷方向の荷重-変位関係を見ると、実験同様、高靱性型の曲げ挙動を示している(図-10)。ファイバー解析では、降伏変位を幾分、過少評価している。面外せん断変形に現れる非線形性を、

ファイバー解析では考慮できていないことが主因と考えられる。高塑性領域で鉄筋モデルの精度向上が図られているため、曲げ耐力は降伏後の挙動も含め、実験結果と良く一致している。しかし、強制変位が大きい領域で、除荷剛性を高めに評価しており、その差が徐々に広がっていく。ファイバー解析の方が、この傾向が大きい。供試体 No.2 と同様に、偏心軸力の効果により、ひび割れ面のいずれかが常に接触して圧縮力を受け持っているため、解析においてもピンチ効果は見られない<sup>11)</sup>。

偏心方向に対して、ファイバー解析・立体解析ともに残留変形が蓄積されて行く現象が確認された(図-11)。立体解析では、 $5\delta_y$  の第1ループまで、精度良く実験結果を追跡している。実験では、 $5\delta_y$  第2ループ以降、急激に偏心方向の変位が増大しているが、解析ではこの急変を評価できていない。実験における急激な変形の増大は、柱基部のかぶりコンクリートの大きな損傷発生に時期を同じくしている。 $5\delta_y$  の第2ループ以降、解析結果が残留変位を小さめに評価しているのは、かぶりコンクリートの剥離や主鉄筋の座屈を考慮していないことが主要因である。一方、ファイバー解析では、損傷の小さい $2\delta_y$  から $6\delta_y$  の第1ループまで、偏心方向への変位を実験結果よりもむしろ大きめに評価している。特に $3\delta_y \sim 5\delta_y$  にかけて、この傾向が顕著である。鉄筋の材料モデルを高精度化した影響が伺えるところである<sup>11)</sup>。

続いて、立体解析と自由度を縮退したファイバー解析の結果を比較する。両者の主な違いは、面外変形の取り扱いとファイバー解析における平面保持の仮定である。詳細に検討すると、 $2\delta_y$  で偏心方向変位に差が生じ始め、 $4 \sim 5\delta_y$  までにはほぼ一定の差を有したまま推移し、それ以降に差が増大することが分かる(図-11)。面外変形を過小に評価するファイバー解析では、初期段階から加えられる強制変位に対して発生曲げモーメントを大きめに評価し、結果として、鉄筋発生応力も大きめに評価する。偏心方向に変形が蓄積される機構は、偏心軸力下における鉄筋の繰返し塑性の複合効果によるものと考えられるため、この影響が $2\delta_y \sim 5\delta_y$  において両解析結果の違いを産んだものと推察される。

$5\delta_y$  の第2ループ以降に差が増大する要因は、損傷が断面外縁部に集中し、徐々に平面保持の仮定が成立しにくくなることにあると考えられる。変形が進展していく状況も、強制変位が小さい領域では、実験および両解析ともに、強制変位を加えるにつれて載荷直交方向の変位が戻る(小さく

なる)弓形の履歴形状を示している。しかし、実験と立体解析では強制変位量が大きくなるにつれて、徐々にその傾向が弱まり、強制変位を加えても載荷直交方向の変位が戻らなくなる。これに対し、ファイバー解析では明確な弓形の変形形状を、最後まで崩すことはない。この差も、かぶりコンクリートが剥離に至るような大変形領域では、載荷直交方向の剛性が低下し、平面保持の仮定が当てはまらなくなることに起因する、と推察される。

以上、供試体 No.1~No.3 について、解析結果を示した。No.2 と No.3 で見られた、偏心方向に残留変形が蓄積され続ける現象の機構については、偏心軸力下における鉄筋の繰返し塑性の複合効果によることが報告されているので<sup>11)</sup>、本論文ではこの議論は省略する。ねじりモーメントを加える No.2 においても、No.3 と同様の機構で残留変形が蓄積されることが、解析および実験で認められた。

## (2) 損傷の視覚化<sup>21)</sup>

供試体 No.2 に対して、VRML 言語に基づいたグラフィック表示<sup>21)</sup>を用いて、三次元的に分布する様々に傾斜したひび割れが、ステップ毎に変化していく様子を図-17 に表した。各ガウス点における、最も卓越する方向の仮想ひび割れを板で表現している。分散ひび割れモデルに基づく本解析手法では、要素内でのひび割れ発生位置を厳密に特定することはできないが、要素分割をある程度小さくすれば、損傷分布を大まかに捉えることができる。

初期載荷として偏心軸力を加えた状態(図中 A)、正ねじりを加えた状態(図中 B)、 $+1\delta_y$  まで水平力を加えた状態(図中 C)を示している。偏心軸力により導入された曲げの作用で、柱基部に部材直交方向のひび割れが発生し、続いてねじりによる斜めひび割れが発生し、さらに曲げ/せん断による変形が進展する様子が伺える。ただし、平面表示でひび割れの三次元立体構造を認識するのは、自ずと限界がある。特に1要素内に3方向以上のひび割れ面が交差するような部位(例えばねじり交番ひび割れと曲げひび割れが交差する柱側面部)では、立体認識がより難しい。著者らは一つの試みとして、仮想現実技術を応用した没入型立体ディスプレイを介して、損傷を受けた RC 部材内部に入り、移動することによって、ひび割れの空間認識を構成する方法を模索している。ねじり作用に対しては、部材中心部に視点を移動させて、部材軸方向に視点を伸ばすことで、らせん状に展開するひび割れ面を認識する事が可能である。

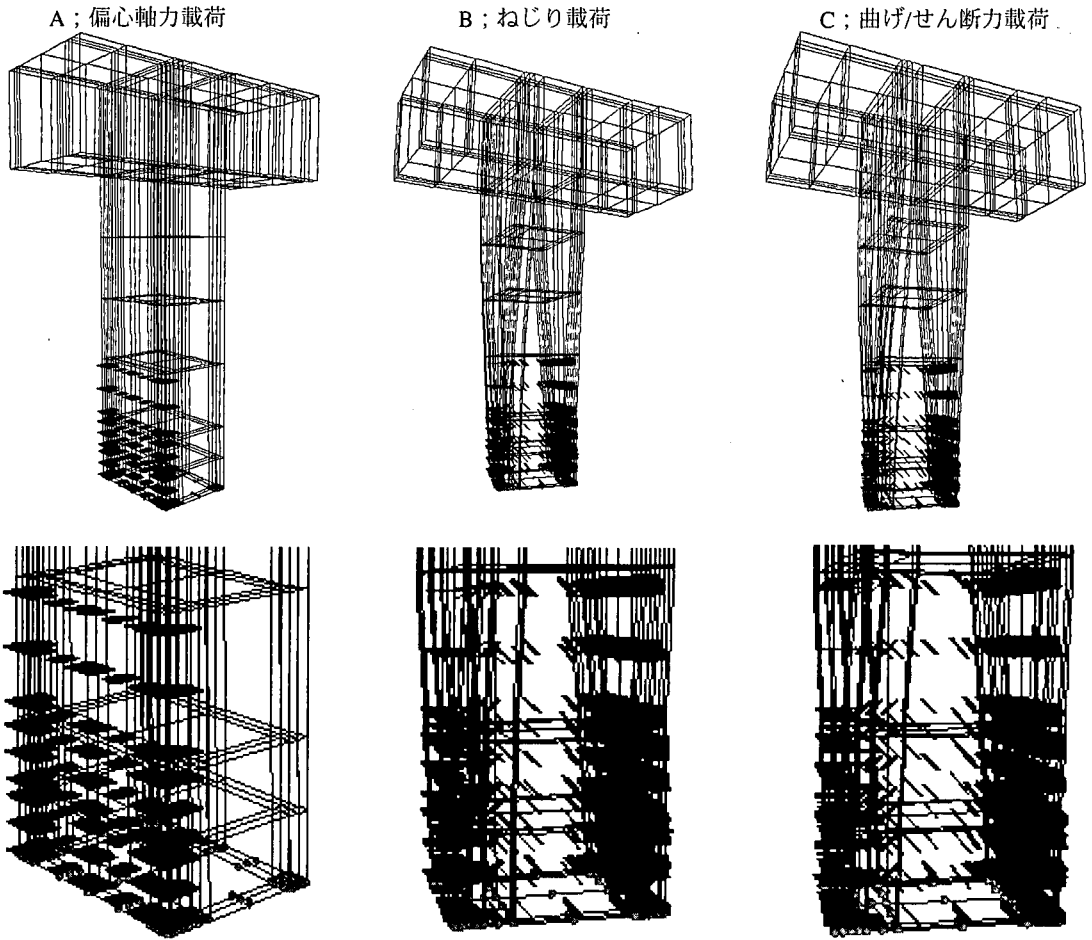


図-17 立体解析によるNo.2 ひび割れ図の描画(上;全体図, 下;基部拡大図)

## 5. 結論

ひび割れの非直交性を考慮することが可能な、多方向固定ひび割れモデルによるRC三次元構成則の検証を行う目的で、常時偏心軸力と交番繰返しねじり・曲げ/せん断の複合载荷を受けるRC柱部材の三次元挙動解析を実施し、以下の結論を得た。

1) 対象としたRC部材には、独立三方向にひび割れが交差して発生し、ねじりと曲げせん断の交番作用によって、それぞれ3つのひび割れが開閉、ズレを繰り返す状況が、部材各所で発生する。これに対して、非直交多方向固定ひび割れモデル(三次元上で最大9方向)による部材解析は、良好にねじり力の低減、二方向曲げ変位の相互依存性と履歴、耐力をほぼ妥当な精度で予測することができることを検証した。これらの現象はひび割れの交差効果に大きく起因することから、最大耐力までの変形については、独立三方向の非直交ひび割れに、構成則は適用可能であるとの見通しを得るこ

とができた。

2) かぶりコンクリートが剥離し、主鉄筋のはらみ出しが発生する耐力以降は、鉄筋の局所的な大変形を考慮することで、解の精度向上を図ることができることを確認した。また、ねじりと曲げ・せん断が同時に作用する場合(鉄筋軸方向とコンクリートに発生する主応力方向が一致しない)には、鉄筋座屈後の耐荷機構の低下が加速されることが推定された。

3) 平面保持を仮定した三次元解析と、自由度の縮退を前提としない立体解析を比較検討した結果、柱基部の角等に変形と損傷が集中するような場合には、平面保持の仮定が幾分崩れ、変位を小さく見積もる場合があることを示した。特に、偏心とねじりを同時に受ける場合には、部材基部の角部に激しい変形の集中が現れる。ただし、最大耐力近傍までの曲げ卓越型の部材では、平面保持の仮定が可能である。

**謝辞**：本研究の一部は、文部省科学研究費・基盤研究 A1「地震作用を受ける地中 RC シェル構造の残存性能と復旧コスト評価システム」（研究代表者：前川宏一、課題番号：11355021）によるものである。また、本検討を行うにあたり、貴重な御助言を頂いた「首都高速道路の橋梁に関する調査研究コンクリート構造物分科会」の委員各位に感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Michael P. Collins and Denis Mitchell : Prestressed Concrete Structures, *Prentice-Hall Inc.*, 1991.
- 2) 長滝重義, 岡本享久, 李承漢, 山岡暁 : 鉄筋コンクリート部材のねじり特性に関する研究, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.157-166, 1986.8.
- 3) 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モデル, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.177-196, 1999.11.
- 4) 前川宏一, 福浦尚之 : 多方向ひび割れを考慮した RC 構成則の部材・構造挙動からの検証, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.209-226, 1999.11.
- 5) Bernhard Hauke and Koichi Maekawa : Three-Dimensional Modelling of Reinforced Concrete with Multi-Directional Cracking, *Journal of Materials, Concrete, Structures and Pavements*, No.634/V-45, pp.349-368, November 1999.
- 6) 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数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.1-16, 1998.11.
- 7) 増川淳二, 須田久美子, 前川宏一 : かぶりコンクリートの剥離と鉄筋座屈を考慮した中空断面 RC 橋脚の 3 次元非線形 FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.37-42, 1999.
- 8) 市川衡, 小笠原政文, 前川宏一 : 偏心軸力およびねじりモーメントを受ける RC 橋脚の耐震性能に関する実験, 「塑性域の繰り返し劣化性状」に関するシンポジウム論文集, pp.359-368, 1998.8.
- 9) 土屋智史, 市川衡, 前川宏一 : ねじりと曲げ/せん断力を交番載荷した RC 柱部材の応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.103-108, 2000.6.
- 10) Rajesh P. Dhakal and Koichi Maekawa : Post-Peak Cyclic Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Columns, *JCI-C51E Seminar on post-peak behavior of RC structures subjected to seismic loads*, Vol.2, pp.151-170, October 1999.
- 11) 土屋智史, 小笠原政文, 津野和宏, 市川衡, 前川宏一 : 常時偏心軸力が作用する鉄筋コンクリート柱の多軸曲げ挙動と非線形解析, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.131-144, 1999.11.
- 12) 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, 1991.5.
- 13) Xuehei An, Koichi Maekawa and Hajime Okamura : Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, *Journal of Materials, Concrete, Structures and Pavements*, No.564/V-35, pp.297-316, May 1997.
- 14) 小坂寛巳, 小笠原政文, 佐々木一哉, 津野和宏, 渡辺英夫, 田中樹由, 坂田英一 : 横拘束筋の定着方法の相違による RC 橋脚の耐震性能の確認実験, 「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集, pp. 87-96, 1997.4.
- 15) 福浦尚之, 前川宏一 : RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰り返し履歴モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5.
- 16) 前川宏一, 安雪暉, 土屋智史 : コンクリート構造物の破壊解析への応用, コンクリート工学, Vol.37, No.9, pp.54-60, 1999.9.
- 17) 須田久美子, 村山八洲雄, 一宮利通, 新保弘 : 交番繰返し荷重下における柱筋の座屈挙動, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.467-472, 1994.
- 18) Rajesh P. Dhakal and Koichi Maekawa : Determination of Buckling Length of Reinforcing Bars Based on Stability Analysis, *Proc. of JCI*, No.22, Vol.3, pp.73-78, 2000.
- 19) CEB : RC Elements under Cyclic Loading -State of the Art Report, *Thomas Telford*, 1996.
- 20) Hamed Salem and Koichi Maekawa : Spatially Averaged Tensile Mechanics for Cracked Concrete and Reinforcement under Highly Inelastic Range, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, No.613/V-42, pp.277-293, February 1999.
- 21) 高橋敏樹, 前川宏一 : 没入型多面ディスプレイを用いた 3 次元 RC ひび割れ解析結果のビジュアルイゼーション, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.149-154, 1998.
- 22) Rajesh P. Dhakal and Koichi Maekawa : Post-Peak Cyclic Response Analysis and Energy Dissipation Capacity of RC Columns, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, No.676/V-51, pp.117-133, May 2001.

(2000. 11. 16 受付)



# NONLINEAR THREE-DIMENSIONAL FE SOLID RESPONSE ANALYSIS OF RC COLUMNS SUBJECTED TO COMBINED PERMANENT ECCENTRIC AXIAL FORCE AND REVERSED CYCLIC TORSION AND BENDING/SHEAR

Satoshi TSUCHIYA, Kazuhiro TSUNO and Koichi MAEKAWA

The response behaviors of RC solid columns subjected to the combined permanent axial force, the reversed cyclic torsion and bending/shear force were investigated with the nonlinear 3D FE analysis to verify the 3D multi-directional constitutive models considering non-orthogonal cracking. It was recognized that this analytical method could pursue the situation multi-directional cracks were introduced at the 3D space, and the modeling of spalling and buckling under torsion, bending and shear became important in the high inelastic range. A primitive analysis covering the large deformation of main reinforcement was also simultaneously conducted. The visual comprehension that predominant 3D variable inclined cracks had changed step by step could be obtained through the analysis.