

論文 ねじりと曲げ/せん断力を交番载荷した RC 柱部材の応答解析

土屋智史*¹・市川衡*²・前川宏一*³

要旨：偏心軸力と曲げ/せん断力およびねじりモーメントを作用させた実験結果を対象として、非線形 3 次元立体解析を実施し、その精度と適用範囲について検討を行った。対象構造物を特定しない 3 次元立体解析手法は、現時点では計算に要する時間から実用的なレベルには到達していないものの、非線形挙動を精度良く追跡できる状況に達しつつあることを確認した。実務的な立場から自由度を縮退した解析手法との比較検討も行い、設計業務における構造解析手法の活用と連携について考察を行った。

キーワード：非線形 3 次元立体解析, RC 柱, 交番ねじり, 交番曲げ/せん断, 偏心軸力

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の非線形構造解析手法は、安全性・使用性の照査を行う有益な手段の 1 つである¹⁾。特に、任意の载荷経路を考慮した材料モデルに基づく構造解析手法は、材料レベルでの経時変化を考慮する枠組みを構築することも可能であり、今後ますますの研究成果が期待されている。一般に、解析次元・自由度等を大きくし、忠実に非線形挙動のモデル化を行えば、より詳細な情報を多く得ることができるが、計算時間が飛躍的に増大する場合が多い。逆に簡略なモデル化を行えば、容易に計算を行うことができるものの、解析可能な対象が限定され、得られる情報も限られたものとなる。

あらゆる事象について、任意の载荷経路および载荷速度を考慮した 3 次元立体解析を実施することが本来望まれる姿である。しかし、計算機環境や構造解析レベルの現状を鑑みて、これを当面次期世代の解析手法と捉えることとし、現時点においては実務的判断に基づき、何らかの簡略化を行い目的用途に応じて適宜選択することが実用的である。この時、用いる解析手法と対象構造物に応じて、適切な安全係数を設定することが実務技術者に求められる。

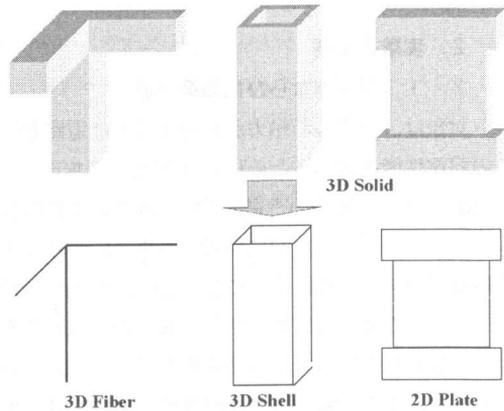


図-1 自由度を縮退した解析モデル

次世代型の 3 次元立体解析を基本とし、自由度を縮退する簡略化の方法として、図-1 に示す 3 つが考えられる。すなわち、平面 2 次元解析・積層 3 次元（シェル）解析・線材 3 次元（ファイバー）解析の 3 つである。この場合、面部材にはシェル解析を適用し、線部材にはファイバー解析を適用するのが良い。平面 2 次元解析は、構造形状を任意に設定できるものの、3 次元効果を考慮することができない。

本研究では、これまでに述べた解析手法の現状

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 工修（正会員）

*2 首都高速道路公団 東東京管理局保安全管理課 工修（正会員）

*3 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 工博（正会員）

を念頭に置き、RC 柱の実験²⁾をモデルとした 3 次元立体解析を行った。この実験は、偏心軸力と曲げ/せん断力、およびねじりモーメントの相互作用下における RC 柱の耐震性能を確認するために行われたものである。解析対象としてこの実験を選択したのは、多軸応力下におかれる部材で検証が不十分なこと、各種解析手法の適用範囲の確認作業に最適であると考えたからである。すなわち、次世代型の解析手法と定義した 3 次元立体解析の現状レベルの把握と課題点の抽出が第一の目的である。第二の眼目は、ねじりを加えない実験ケースに対する、自由度を縮退した線材 3 次元解析³⁾による結果との精度と適用範囲についての比較検証を行うことである。

2. 実験の概要

2.1 試験体ならびに載荷方法

対象は、常時偏心軸力が作用する RC 道路橋脚の耐震性能を調べるために行った実験である²⁾。着眼点は、偏心軸力と曲げ/せん断力およびねじりモーメントが複合的に作用する場合の耐震性能の確認であり、残留変位に与える偏心軸力の影響について考慮したものである。偏心軸力によるモーメントと直交方向に水平荷重を交番に加えている点に、この実験の独自性がある。試験体は、橋軸直角方向の張り出し部を想定した RC 橋脚をおよそ 1/5 スケールで縮小した柱モデルであり、寸法ならびに柱の断面諸元は図-2 に示す通りである。供試体作成にあたっては、鉄筋の定着やコンクリートの充填等を考慮した上で、できる限り断面寸法比を実橋脚レベルに近づけることに努めた。使用した材料特性は、表-1 に示す通りである。

実験供試体は No.1~No.3 まで 3 体作成し、交番ねじりと常時偏心軸力をパラメーターとして、表-2 に示すような組み合わせにより、交番曲げ/せん断力を載荷させた。No.1 では、鉛直荷重 245kN を柱図心位置に作用させるが、No.2 と No.3 では常時偏心軸力として、柱図心位置から 70cm の位置に 147kN 加えている。また、供試体 No.1 と No.2 における交番ねじりと曲げ/せん断力の載荷方法は、図-3 に示す通りである。すなわち、水平変

位原点位置において強制変位によりねじり(+方向)を加え、それを保持したまま $+n\delta y$ を経て原点まで戻し、今度は逆方向にねじり(-方向)を加え、 $-n\delta y$ を経て原点まで戻す作業を繰り返す方法を採用した。ねじり量は、それぞれ No.1 で $\pm 2.5\text{mm}$ ($1\delta y$ のみ $\pm 1.6\text{mm}$)、No.2 で $\pm 15.0\text{mm}$ とした。

2.2 実験結果

3つの試験体の実験結果を図-4~図-10に示す。

No.1 については、水平載荷方向の荷重-変位関係(図-4)と、水平載荷方向のねじり(載荷点の反力の差)-変位関係(図-5)を示した。水平載荷方向においては、柱試験体が十分なせん断補強筋を有していることから、ねじりひび割れ発生モーメントを付加していても高靱性な挙動を示し、斜めひび割れの進展に伴う急激な耐力低下は見られなかった。ただし、大変位領域では若干のピンチ効果がみられた。

当初導入されたねじりによる反力は、主たる変形成分である曲げ変形が増大するにつれて、消散していく様子が確認された。3~4 δy 以降、1/10 程度以下にまで減少している(図-5)。また、5 δy 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 δy から鉄筋の破断が起これ、9 δy で載荷を終了した。

No.2 については、No.1 と同様の結果(図-6, 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、No.3 では、水平載荷方向の荷重-変位関係(図-9)と、偏心モーメント方向変位-水平載荷方向変位関係(図-10)を示した。水平載荷方向においては、No.2, 3 とともに、高靱性型の挙動を示し、優れたエネルギー吸収能力を保持していた。ピンチ効果はみられなかった。ただし、No.2 では No.3 に比べ 2 割程度の曲げ耐力の減少が見られた。ねじり降伏モーメントを加えていることに由来すると考えられる。ねじりによる反力は、No.1 同様曲げ変形が増大するにつれて、消散していく様子が確認された。(図-7)

一方、水平載荷と直交する方向においては、ねじりの有無にかかわらず、この方向に変形が蓄積して行く現象が確認され、しかもその変形量は加

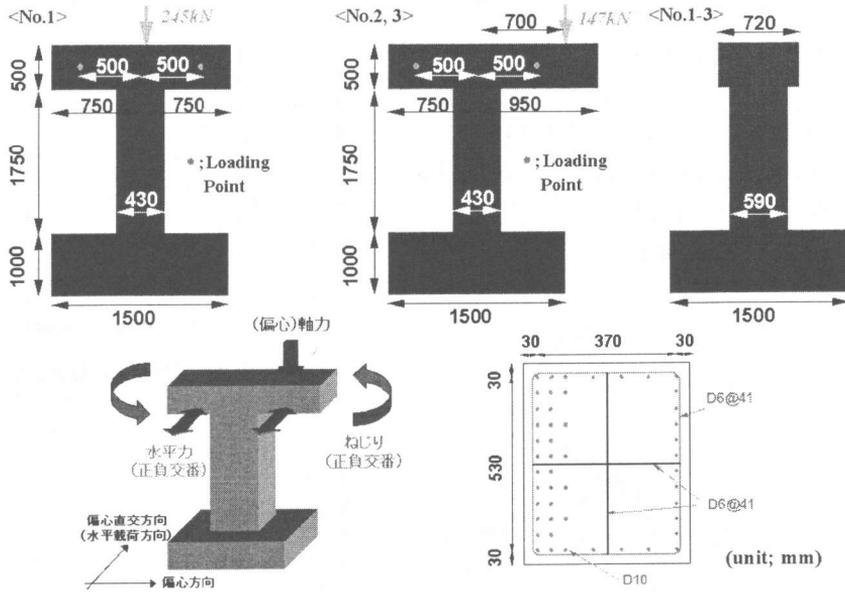


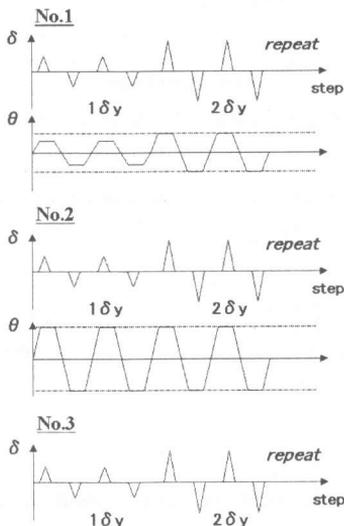
図-2 実験供試体の概要

表-1 材料試験結果

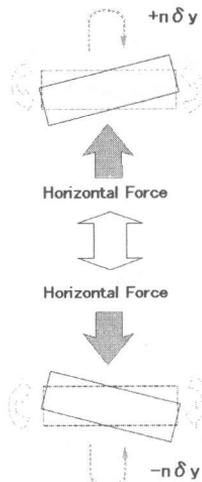
		No.1	No.2	No.3
コンクリート	圧縮強度 (MPa)	34.4	34.8	36.9
	弾性係数 (*10 ⁴ MPa)	2.68	2.32	2.53
	引張強度 (MPa)	2.75	3.05	3.33
	ポアソン比	0.161	0.189	0.164
D10	降伏強度 (MPa)	402	393	393
	弾性係数 (*10 ³ MPa)	1.87	1.88	1.88
D6	降伏強度 (MPa)	384	384	384
	弾性係数 (*10 ³ MPa)	1.83	1.92	1.92

表-2 載荷方法の組合わせ

	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	±9 δ y (2cycles)	±6 δ y (2cycles)	±7 δ y (2cycles)



Torsion of No.1 & 2



No.1

+ δ y = +9.9mm, - δ y = -9.0mm
θ = ±2.5mm (1 δ y のみ 1.6mm)

No.2

+ δ y = +8.0mm, - δ y = -8.0mm
θ = ±15mm

No.3

+ δ y = +8.0mm, - δ y = -8.0mm

図-3 載荷方法

えた直交方向の強制変位を大きく上回るものであった(図-8, 10). No.2, No.3 では、この予期せぬ変形の増大により実験装置の限界に達し、载荷を終了したのである。最終的な残留変形量は、No.2 で約 140mm, No.3 で約 120mm であり、1/20 を越える回転角を示した。また No.2 で $4\delta y$, No.3 で $5\delta y$ 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、それぞれ $5\delta y$ および $6\sim 7\delta y$ で圧壊した。

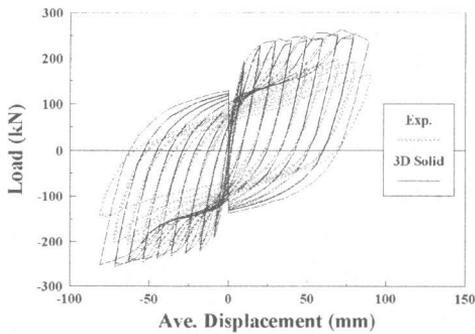


図-4 No.1 水平载荷方向荷重-変位関係

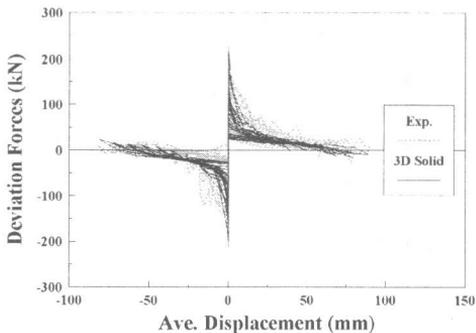


図-5 No.1 水平载荷方向反力差分-変位関係

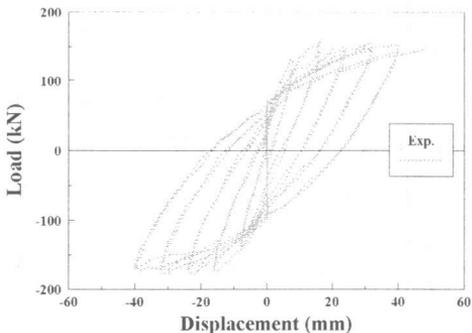


図-6 No.2 水平载荷方向荷重-変位関係

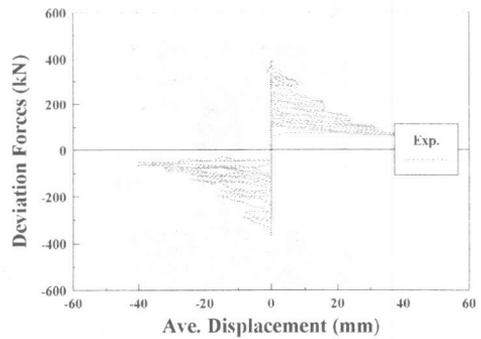


図-7 No.2 水平载荷方向反力差分-変位関係

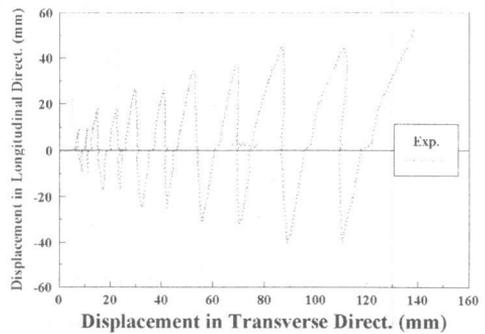


図-8 No.2 偏心方向変位-水平载荷方向変位関係

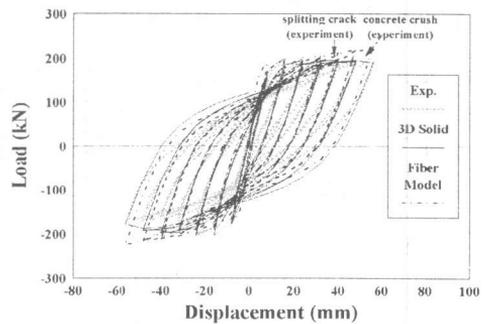


図-9 No.3 水平载荷方向荷重-変位関係

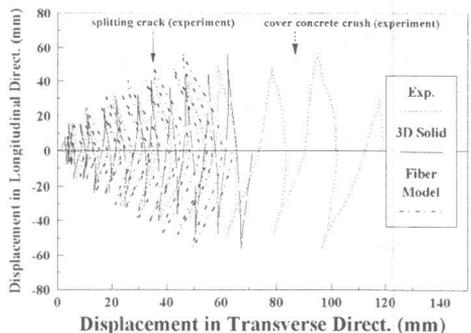


図-10 No.3 偏心方向変位-水平载荷方向変位関係

3. 数値解析手法の概要

本研究で用いる3次元立体解析手法は、任意の荷重経路を考慮した材料構成モデルに基づく平面モデル⁴⁾を3次元に拡張したものである⁵⁾。最大4方向までのひび割れを考慮することができる多方向固定ひび割れモデルが採用されており、いかなる荷重履歴でも追従できる枠組が構築されている⁶⁾。また、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」を採用することにより、粗い要素分割に対しても解析精度を確保している⁷⁾。

一方、比較検証に使用する線材3次元解析は、平面保持の仮定を基に、平均軸ひずみと2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、3次元立体解析のものと同じである。面外方向の変形を簡略化することにより自由度を縮退し、収束安定性に優れた解析法を組み上げることが可能であり、計算負荷は立体解析に比べ大幅に減少する³⁾。

今回の解析検討では、対象実験として No.1 と No.3 を2つのケースを選定した。いずれの試験体も曲げ変形が主体となるものの、No.1 ではひび割れ荷重を上回る交番ねじりも加えているため、線材3次元解析を適用することは賢明でない。逆に、このケースでは、少なくとも3方向以上のひび割れが発生し、しかも変形が卓越するひび割れ方向が時々刻々と変化するため、本研究で使用する立体3次元解析手法の検証には最適である。一方、ねじりを加えない No.3 では、曲げ変形のみが卓越するため、平面保持の仮定が成立する範囲において線材3次元解析も適用可能である。No.3 に対しては、立体解析手法を適用するだけでなく、線材解析結果³⁾との比較検討もあわせて行い、2種類の解析手法の適用範囲についても考察を加えることとする。

4. 解析結果

3次元立体解析を適用した結果を図-4、5および図-9、10に実験結果と合わせて示した。No.3 については、さらに線材解析の結果³⁾も合わせて

示してある。

水平荷重方向の荷重-変位関係を見てみると、いずれの解析においても高靱性型の曲げ挙動を示し、降伏耐力を良好に評価している(図-4、9)。しかし、強制変位が大きくなるにつれて、実験と解析結果の間で乖離が生じ、その差は徐々に広がっていく傾向が見られた。ねじりを加える No.1 において特に顕著であった。これは、かぶりコンクリートの剥離や鉄筋の座屈等の現象を解析では考慮していないことに由来すると考えられる。今後より解析精度を向上させるには、これら大変形時に局所的に起こる現象を精度良くモデル化する必要がある。また、No.1 試験体において強制変位原点位置で導入されたねじりによる反力は、解析においても曲げ変形が増大するにつれて消散していき、実験結果と同様の傾向を示した(図-5)。

次に No.3 試験体における水平荷重直交方向に着目すると、立体解析においても残留変形が蓄積されて行く現象が確認された。ただし、柱基部のかぶりコンクリートに大きな損傷が現れる領域では、解析結果が残留変位を小さめに評価している。かぶりコンクリートの剥離を考慮していないことが、要因の1つとして挙げられる。

続いて2種類の解析手法による結果を比較すると、2~3δ_y程度までは両者の解析結果の間でほとんど差は見られない(図-10)。すなわち、この変形領域では平面保持の仮定が成立していると考えられる。ところが、変形が進むにつれて線材解析の結果がさらに残留変形を寡少に評価してしまう。損傷が断面外縁部に集中し、徐々に平面保持の仮定が崩れ始めたことが主因と考えている。実際には、解析で考慮していないかぶりコンクリートの剥離等の現象により、益々実験結果との乖離が生じる。また変形が進展していく状況も、当初は強制変位を加えるにつれて荷重直交方向の変位が戻る(小さくなる)弓形の形状を示している。しかし、実験並びに立体解析では強制変位量が大きくなるにつれてその傾向が弱まり、強制変位を加えてもあまり荷重直交方向の変位が戻らなくなる。これに対し、線材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

ンクリートが圧縮軟化領域に至ると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由来すると推察される。

なお、No.3 試験体において、水平載荷直交方向に残留変形が蓄積されて行く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ものだと考えられるが、詳細は既に文献³⁾に報告済みであることから参照に願うこととし、本稿ではその考察を割愛する。

5. まとめ

交番曲げ/せん断力に偏心軸力と交番ねじりを組合わせて載荷した RC 柱の実験を対象として、立体 3 次元解析を実施した。その結果、3 次元立体解析は、現時点では実用的とはいえない状況にあるものの、既に次世代型の構造解析手法としての枠組み構築は終了しつつあることを示した。今後は、ハードウェアの発達とあわせて実用的なレベルにまで昇華させることが必要である。ただし、かぶりコンクリートが剥離し鉄筋の座屈が発生し始めるピーク以降は、実験と解析結果の間で乖離が生じる。ポストピークを含めた大変形領域の挙動を正確に追跡するには、これらモデルを解析手法に取りこむことが必要であることも改めて確認した。今回は解析を行っていない No.2 の検討と合わせて、研究課題としたい。

線材解析を棒部材に適用する場合には、面外方向の変形挙動を簡略化していることと、平面保持の仮定を前提としていることに留意する必要がある。しかし、曲げ変形に比してねじりやせん断変形が無視できる No.3 の解析結果を比較する限りにおいて、大きな変形領域で立体解析との精度の差が多少現れてくるものの、線材解析による結果の精度はさほど劣るものではない。解析に費やす労力等を含めて総合的に判定すれば、線材解析の利用価値は高い。線材解析から得られた結果に工学的判断を付加することで、十分実用的な範疇に入るものと考えられる。なお、解析に要する時間は使用する計算機の性能にも依存するが、立体解析ではおおよそ 10 日のオーダーであったのに対し、線材解析ではおおよそ 10 分程度で計算を終了

した。以上により、立体解析手法の環境が整うまでの今後数年間は、この線材解析をメインフレームの 1 つとして多に活用することが望まれる。その際、解析手法の条件と適用範囲を勘案し、不完全なところは適宜安全係数等で補完しながら利用していくことが肝要であると思われる。

参考文献

- 1) 前川宏一ほか：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
- 2) 市川衡ほか：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、「塑性域の繰返し劣化性状」に関するシンポジウム論文集、pp.359-368, 1998.8
- 3) 土屋智史ほか：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.131-143, 1999.11
- 4) 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
- 5) Hauke, B. and Maekawa, K.: Three-dimensional modelling of reinforced concrete with multi-directional cracking, Proc. of JSCE, No.634, Vol.45, pp.349-368, 1999.11
- 6) 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, Vol.45, pp.177-196, 1999.11
- 7) An, X. et al.: Numerical simulation of size effect in shear strength of RC beams, Proc. of JSCE, No.564, Vol. 35, pp. 297-316, 1997.

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。