

平成21年 5月27日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18760416  
 研究課題名（和文） RC構造物を対象としたマクロモデルによる3次元弾塑性地震応答解析方法の開発  
 研究課題名（英文） DEVELOPMENT OF THREE DIMENSIONAL ELASTO-PLASTIC EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS METHOD OF R/C STRUCTURES BY USING MACRO MODEL  
 研究代表者  
 西村 康志郎（NISHIMURA KOSHIRO）  
 東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
 研究者番号：00343161

## 研究成果の概要：

地震応答解析では構造物の復元力特性を適切にモデル化が必要である。モデル化では、ミクロなモデル化とマクロなモデル化に大別できるが、本研究ではマクロモデルに着目している。鉄筋コンクリート構造では、梁や柱に比べると耐震壁の多軸復元力モデルは確立していると言いがたい。本研究の成果は、耐震壁の実験結果を基に、鉄筋コンクリート部材に見られるスリップ性状に着目し、梁、柱、耐震壁などに適用できる多軸復元力モデルを提案したことである。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	800,000	0	800,000
2007年度	1,600,000	0	1,600,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	300,000	3,700,000

## 研究分野：建築構造

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鉄筋コンクリート構造物、3方向地震応答、復元力特性、弾塑性、マクロモデル

## 1. 研究開始当初の背景

建築物の構造設計において、特に高層建築物では、弾塑性地震応答解析が行われるが、地震動が3次元のものであるにも関わらず、水平1方向の解析しか行われない場合が多い。これは、効率よく3次元応答解析をする方法が確立されていないからであり、これを解決するためには構成部材の3軸非線形復元力特性の使い易いマクロモデルが必要である。

構造物をモデル化するには、柱、梁、壁といった構造部材の復元力特性をそれぞれモデル化する必要がある。部材の復元力特性のモデル化では、3軸の相関を考慮することは

大変重要である。

鉄筋コンクリート部材の3軸非線形復元力モデルについて、柱や梁のモデルはいくつか提案されているが、精度良くマクロにモデル化するには課題が多く残っている。耐震壁にいたっては、3軸の復元力特性が柱や梁に比べて複雑であり、その3軸復元力モデルはほとんど見られない。

鉄筋コンクリート部材の復元力特性のモデル化の難しさは、コンクリートの曲げひび割れやせん断ひび割れ、鉄筋とコンクリートの滑り、など応力伝達機構が複雑になる要因が1つの部材に複数存在することに起因する。

これらは、部材のカー変形関係で、剛性の軟化やスリップ性状、ピッチングなどとして現れる。これらの3軸での特性を把握し、適切に表現しつつ、マクロにモデル化できる手法が求められている。

## 2. 研究の目的

(1) 一つ目の目的は、鉄筋コンクリート(RC)部材の曲げ変形、せん断変形、スリップ変形に対応し得る、片持ち部材の3軸非線形復元力特性のマクロモデルを提案する。

モデル化には、塑性論との類似性を利用したアナロジーモデルを基本とする。アナロジーモデルに着目した理由は、3軸の強度の相関が容易に表現でき、部材降伏後の変形が塑性論の流れ則より決定できるからである。現在、曲げ変形とせん断変形に対応し得るモデル化手法についてはすでに発表しており、実験結果を基に実用的な形にする。提案したモデルの特徴は、RC部材が曲げせん断力を受けた場合、負荷のときには曲げ変形が増加すると同時に軸方向は伸び、除荷のときには曲げ変形が戻ると同時に軸方向の伸びが戻る挙動を定式化した点である。スリップ変形に対応するモデルについては、これに関する実験を行ったので、実験結果を基にモデル化を進める。ここで、スリップ変形とは、荷重が零付近で、荷重が増減せずに変形のみ変化するような変形成分のこととする。曲げ変形、せん断変形、スリップ変形に対応するそれぞれのモデルを直列に並べて一つのばねモデルと考える。

(2) 提案した復元力モデルを用いて、材端ばね法による部材モデルを3軸に拡張する。

提案した復元力モデルを用いて、RC骨組の3次元弾塑性解析方法を提案するものである。様々な部材モデルの中で材端ばね法に着目したのは、簡素であることが最も大きな理由である。3次元の解析では、1次元や2次元と比較して自由度が大きく増加するので、モデル自体は簡素であることが重要と考えている。材端ばね法は、部材両端を剛塑性ばね、その間を弾性体で結ぶ単純な線材モデルであり、比較的適応性にも優れている。これを3軸に拡張する。

(3) 3軸に拡張した部材モデルで構成される骨組に、効率よく組み込める、壁と床スラブのモデルを確立する。

基本的な方針は、壁のモデルと床スラブのモデルを作り、骨組モデルに組み込むというものである。そのため、柱や梁の曲げ戻しを考慮する必要があり、壁や床スラブのモデル、或いは、骨組モデルに組み込むときに工夫が必要である。また、壁や床スラブは、柱や梁に比べて異方性が強い。これらの問題を解決

してモデル化するために、柱と梁が付帯する耐震壁を用いた実験を行う。試験体は基本的には2種類で、一つは柱・梁付帯の耐震壁構造、もう一つは壁を取り除いた柱・梁ラーメン構造とする。すなわち、柱・梁付帯の壁構造の復元力特性からラーメン構造の復元力特性を差し引いたものを、壁自体の復元力特性をしてモデル化する考え方である。実験方法は、まず1方向繰り返し水平加力試験を行い、その結果を踏まえて多方向加力試験を行う。モデル化手法は、強度の相関が容易に表現できる塑性論を利用したアナロジーモデルを基本とするが、強い異方性を解決するためのばねモデルを直列に組み込むことも考えている。また、床スラブのモデル化は、壁のモデルに準じて行う予定である。

## 3. 研究の方法

(1) 先ず、RC片持ち部材の曲げ変形に対応できる3軸非線形復元特性のマクロモデルを完成させる。このモデルは、履歴ループでのエネルギー消費が大きいモデルである。また、軸力変動や材軸方向変形、曲げせん断の軸方向と材軸方向の相関も考慮されている。過去に行った実験結果と比較することで、モデルの検証を行う。

(2) 過去に行った実験結果を基に、せん断変形とスリップ変形に対応できるマクロモデルを完成させる。これらのモデルは、履歴ループでのエネルギー消費が大きいモデルであり、前者と後者の違いは、せん断変形対応型は原点指向型、スリップ変形対応型は荷重が零付近でスリップするものとし、スリップ変形が生じる条件を設定する関係上、曲げせん断が作用する2軸間の相関関係はスリップ変形対応型のほうが複雑なものとなる。また、軸力変動や材軸方向変形は考慮するが、曲げせん断の軸方向と材軸方向の相関については、曲げ変形対応型と組み合わせることで対応する。

(3) 提案した3軸非線形復元力モデルを用いた1質点系および多質点系の地震応答解析を行い、水平方向と鉛直方向の相関を考慮した場合の地震応答について考察する。

(4) 柱と梁の骨組モデルを作成する。部材モデルには材端ばね法を用いる。材端に剛塑性ばね、その間を弾性部分とする。提案したRC片持ち部材モデルを2つ合わせた形の、逆対称曲げを受ける部材モデルを基本とする。逆対称曲げを受ける部材モデルの弾塑性構成方程式から弾性変形分を差し引く形で、材端ばね法による部材モデルが完成するが、これを3軸に拡張する。

(5) 壁のモデル化のための実験を行う。水平1方向の繰り返し加力実験、水平1方向の繰り返し加力と変動軸力の2方向加力実験、および、3方向加力実験を行う。試験体は、柱・梁が付帯する耐震壁試験体が3体、壁のない柱・梁ラーメン構造試験体が3体の計6体で行う。耐震壁の復元力特性を把握することが目的である。

(6) 実験結果を基に、壁の復元力特性のモデル化を行う。壁のモデルは、柱・梁の骨組モデルに効率よく組み込めるようにし、曲げ戻しについても考慮できるように工夫する。床スラブの復元力モデルは壁のモデルに準じて作成する。

#### 4. 研究成果

(1) 鉄筋コンクリート建物を対象としたスリップ型の2軸非線形復元力モデルを提案した。鉄筋コンクリート部材の復元力特性は、低荷重時に荷重の増減がほとんどない状態で変形のみ増減するスリップ性状を示すことがある。提案したモデルは、塑性論を利用した完全弾塑性の2軸のアナロジーモデルを拡張したマクロモデルである。テンソルで表現されたスリップ変位を提案し、スリップ領域を表す関数を力のポテンシャルとすることで、簡素な形に定式化されている。このモデルは、汎用性、応用性、独創性が大変豊かであると高い評価を受けている。多方向加力時のスリップ性状を把握するために、主筋の付着を除去した鉄筋コンクリート柱試験体を用いた3方向加力実験を過去に行っており、提案した復元力モデルはその実験結果を巨視的に表現できることを確認した。

(2) 提案した2軸スリップ型復元力モデルを用いた1質点系の地震応答解析を行った。スリップ性状を示す構造物の2軸の応答変位は、放射状になる特徴があることが分かった。また、固有周期によって応答最大変位が非常に大きくなる場合があることがわかった。

(3) スリップ型復元力モデルを用いた1質点系の地震応答解析の結果、2方向の地震動を入力した場合と1方向の地震動を入力した場合を比較すると、総エネルギー入力量は2方向入力のほうが若干大きい、最大変位応答はほとんど変わらないことが分かった。

(4) 鉄筋コンクリート(RC)耐震壁の多軸非線形復元力特性を把握するために、耐震壁の3方向加力実験を行った。縮小率7分の1程度のI型RC耐震壁試験体を5体作製し、耐震壁に面外方向力が作用した状態での面内方向への繰り返し加力、および、軸力変動など、これまであまり行われていない載荷経

路を採用した。

軸力比0.1の一定軸力下での面内方向繰返し加力において、面外方向水平力を作用させない試験体と、面外方向の曲げ計算強度の半分程度の一定面外方向水平力を作用させた試験体の結果を比較すると、面内方向の復元力特性には面外方向水平力の影響がほとんど見られなかったが、その影響は面外方向の大きな変形に見られた。

一定の面外方向水平力下で変動軸力と面内方向繰返し荷重を作用させた試験体の結果より、面内方向の曲げ強度は、低軸力では面外方向水平力の影響をほとんど受けず、高軸力ではその影響が大きいと考えられることがわかった。

耐震壁の2軸曲げ強度について、コンクリートと鉄筋を剛塑性体として平面保持仮定を基に算出した2軸曲げ強度と、実験結果を比較した結果、一定軸力下での2軸曲げに対しては計算強度で実験結果を良く評価できたが、変動軸力下での2軸曲げを作用させた実験結果は、低軸力では計算強度のほうが低く、高軸力では計算強度のほうが高くなる結果となった。これは、耐震壁が降伏した後に軸力を変動させたため、引張鉄筋の引張歪や圧縮縁コンクリートの圧縮歪が、一定軸力の場合に比べて大きくなった可能性があり、今後、検討が必要である。

一定軸力下での2軸曲げ実験の結果より、計算した2軸曲げ強度曲線の法線方向と、耐震壁の曲げ降伏後の変形方向がほぼ一致し、2軸曲げ強度曲線を降伏曲面として塑性ポテンシャルと関連させることで2軸復元力特性を定式化できる可能性を示した。

壁板破壊後に側柱のせん断破壊を防止するための設計用せん断力の評価方法についても検討した。

(5) 図1に示すように、耐震壁の2軸非線形復元力特性を定式化するために、完全弾塑性型の2軸復元力特性と以前提案したスリップ型の2軸復元力特性との並列系で表現することを試みた。この並列系のモデルの特徴は、図2に示すように、耐震壁が降伏した後の繰返し加力において、周期特性をスリップ型のモデルで、履歴エネルギー消費を完全弾塑性型のモデルで表現しえることにある。鉄筋コンクリート部材の復元力特性は、弾性的な挙動、降伏、塑性化による剛性低下、履歴ループ、スリップ性状、などに特徴があるため、提案した並列系のモデルは、耐震壁だけでなく、梁や柱部材にも適用可能である。

並列系のモデルは、耐震壁の2軸非線形復元力特性を巨視的に表現できることを示した。今後は、梁や柱部材への適応性の確認や、3軸への拡張を進めていく。

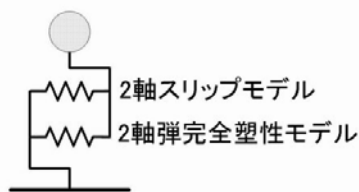


図1 並列系モデル

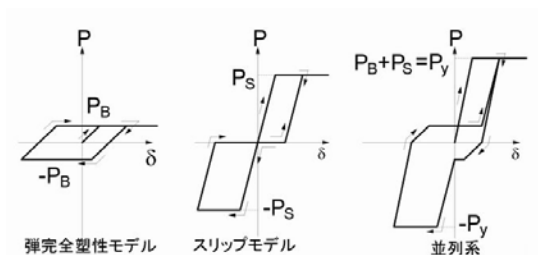


図2 1軸の復元力特性

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

1) 西村康志郎, グエン ホアン フィ, 瀧口 克己, “RC 部材のスリップ型多軸復元力特性の定式化に関する研究”, 日本建築学会構造系論文集, No. 609, pp147-154, 2006. 11, 査読有

[学会発表] (計 10 件)

1) Koshiro Nishimura, Katsuki Takiguchi, “FORMULATION OF BI-AXIAL NON-LINEAR RESTORING FORCE CHARACTERISTICS WITH SLIPPING BEHAVIOR BY USING THE THEORY PLASTICITY”, Proceedings of Sixth International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, pp 191-195, 2009.3.3, 査読有

2) Koshiro NISHIMURA, Katsuki TAKIGUCHI, Kazuteru KOJIMA, “EXPERIMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE SHEAR WALLS SUBJECTED TO THREE -DIRECTIONAL LOADING”, Proc. of the Eleventh East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-11), Taipei, Taiwan, Paper ID B07-07, 2008.11.19, 査読有

3) Nishimura Koshiro, Nguyen Hoang H., Takiguchi Katsuki, “Study on Bi-Axial Earthquake Responses of Reinforced Concrete

Structures with Slipping Type Restoring Force Characteristics”, 14th World Conference on Earthquake Engineering Conference Proceedings (14WCEE), Beijing, China, Paper ID 05-01-0023, 2008.10.15, 査読有

4) 小嶋一輝, 瀧口克己, 西村康志郎, 高木博文 “I 型 RC 耐震壁の 3 軸復元力特性に関する実験研究 (その 1) 実験概要及び水平力と水平変位の関係”, 日本建築学会大会, 広島, 構造IV, pp. 369-370, 2008.9.18, 査読無

5) 高木博文, 瀧口克己, 西村康志郎, 小嶋一輝, “I 型 RC 耐震壁の 3 軸復元力特性に関する実験研究 (その 2) 変形性状及び曲げ耐力”, 日本建築学会大会, 広島, 構造IV, pp. 371-372, 2008.9.18, 査読無

6) Nguye Hoang Huy, Koshiro Nishimura, Katsuki Takiguchi, “Bi-axial Non-linear Earthquake Response Analysis of Structures Contain Slipping Behavior”, 日本建築学会大会, 広島, 構造IV, pp. 263-264, 2008.9.18, 査読無

7) H. H. Nguyen, K. Nishimura, K. Takiguchi, “Bi-axial Non-linear Macroscopic Response Analysis of Slipping Type R/C Structure to Strong Earthquake Motion”, Proceedings of Forth International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, pp 699-706, 2007.3.6, 査読有

8) K. Nishimura, H. H. Nguyen, K. Takiguchi, “STUDY ON SLIPPING TYPE BI-AXIAL RESTORING FORCE MODEL OF RC MEMBERS”, Proceedings of The Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-10), REAL STRUCTURES, pp. 481-486, Bangkok, 2006.8.3, 査読有

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

西村 康志郎 (NISHIMURA KOSHIRO)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：00343161

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし