

# 鉄筋コンクリート建物の立体骨組弾塑性解析 (その2)

——スーパーコンピュータによる地震応答解析——

江戸 宏彰 永原 克巳  
表 佑太郎 吉岡 研三

## Three-dimensional Inelastic Frame Analysis of Reinforced Concrete Buildings (Part 2)

——Seismic Response Analyses by Supercomputer——

Hiroaki Eto Katsumi Nagahara  
Yutaro Omote Kenzoh Yoshioka

### Abstract

Buildings of complex plan and elevation configurations are liable to suffer local damage due to torsional vibration during severe earthquakes, which will hasten overall failure. But with such buildings, it is possible for safe and high-quality design to be made by grasping in detail the three-dimensional inelastic behaviors of buildings during severe earthquakes at the level of individual members.

Therefore, a three-dimensional inelastic dynamic response frame analysis program, "DREAM-3 D," was developed as supercomputer software. And simulation analyses of a 23-story highrise reinforced concrete building was carried out with the use of this program. In these analyses, the behaviors as a three-dimensional framework which cannot be grasped by conventional analysis of a plane frame, and the inelastic behavior under triaxial stress of column can be pursued in detail at the member level.

### 概要

複雑な平面・立面形状の建物は、大地震時にはねじれ振動が生じ、建物の一部に変形・損傷の集中を招き、耐震性の劣るものとなりやすい。しかし、柱・梁・壁などの個々の部材が、大地震時にどのような弾塑性挙動を示すかを詳細に把握できれば、大地震時にも安全で経済的な建物を設計することができる。

このような観点から、本研究では標記の解析プログラム「DREAM-3 D」の開発を行なった。すでに静的解析版は開発済みであり、今回は動的解析版を開発し、スーパーコンピュータ(SX-1 EA)に移植した。これを用いて、平面・立面形状が不整形な、23階建超高層鉄筋コンクリート造集合住宅の地震応答シミュレーション解析を行なった。その結果、従来の平面骨組による解析だけではとらえることのできない立体骨組としての挙動や、柱の3軸応力下での弾塑性挙動などを部材レベルで詳細に追跡・把握することができた。

### 1. はじめに

今日では、建物の用途、計画・デザイン等の社会的要求が多様化し、複雑な平面・立面形状の建物が増加している。このような建物は、大地震時にはねじれ振動が生じ、建物の一部に変形・損傷の集中を招き、耐震性の劣るものとなりやすい。従って、大地震時にも安全で経済的な建物を設計するには、柱・梁・壁などの個々の部材が大地震時にどのような弾塑性挙動を示すかを詳細に把握することが肝要である。

従来、このような建物の設計では、建物の各構面を平面骨組あるいはせん断形多質点系モデルに置換し、これ

らを剛床で連結するという、擬似立体骨組弾塑性解析法が用いられてきた。しかし、このような解析法では、柱の軸方向力と2方向の曲げとの3軸降伏相関関係、及び外柱(特に、隅柱)の軸力変動などの影響を実情に即して検討することができないという欠点があった。

このような観点から、本研究では部材レベルによる立体骨組の弾塑性解析プログラム「DREAM-3 D」の開発を行なった。すでに静的解析版を開発しており、前報<sup>1)</sup>に報告した。本報では動的解析版を開発し、スーパーコンピュータ(SX-1 EA)に移植した。

このプログラムは、任意多方向からの地震入力に対する建物の3次元弾塑性挙動を把握することを目的として

おり、2方向の曲げと軸方向力との3軸降伏相関関係を考慮できる柱部材モデルと、骨組内の任意の位置に配置でき、直交する架構の影響を取り入れることのできる壁部材モデルを用いることなどを特徴としている。

このような部材レベルの弾塑性地震応答解析法を用いて、高層鉄筋コンクリート建物を立体解析する場合はコンピュータの記憶容量、計算時間などが莫大となり、汎用コンピュータで計算を実行することは実用的でなく、スーパーコンピュータを利用することによって、このような大規模なシミュレーション解析が初めて可能となった。

ここでは、平面・立面形状が不整形な、23階建超高層鉄筋コンクリート(RC)造集合住宅の地震応答シミュレーション解析を行なった。解析結果はエンジニアリングワークステーション(EWS)などを用いてアニメーション化し、大地震時に建物が揺れ動く様子をビジュアルに再現した。その結果、従来の平面骨組による解析だけではとらえることのできない立体骨組としての挙動や、柱の3軸応力下での弾塑性挙動などを部材レベルで詳細に追跡・把握することができた。

本報告では、解析法の概要、及び23階建超高層 RC 建物の解析結果とその検討結果について示す。

## 2. 解析法の概要

解析法についてはすでに前報に示した。ここでは主な点について簡単に示し、さらに前報と異なる事項について示す。

### 2.1 解析手法

建物は梁、柱、壁、柱梁接合部及び節点拘束ばねなどの部材モデルによって立体骨組としてモデル化され、建物全体のねじれ変形が考慮される。

解析は初期解析と主解析よりなる。初期解析では、長期荷重時などの応力と変形を求め、主解析の初期条件とする。主解析では増分解析法を用い、任意の分布モードの静的水平力によって建物の保有水平耐力・崩壊過程を追跡する「静的応答解析」と、任意の入力地震波による「地震応答解析」を行なうことができる。主解析での不釣合い力の解除は次ステップで行なう。

### 2.2 部材モデル

部材モデルは、復元力特性を各部材の曲げ、せん断、軸方向などの変形成分ごとに独立に定義できるものとする。なお、各部材のねじれ変形は考慮していない。

梁部材モデルは、片持梁結合モデルと材端ばねモデルを併用した平面部材モデルを用いる。

柱部材モデルは、材端の断面をコンクリート及び鉄筋の軸方向特性を表す等価な軸方向ばねに分割する（それぞれ、9分割）マルチスプリングモデルを用いており、2方向の曲げと軸方向力の3軸降伏相関関係を降伏曲面を用いることなく自動的かつ容易に表現できる。

なお、鉄骨造の柱を対象として、分割梁モデルを用いた3軸解析モデルも用意されており、ここでは3軸降伏相

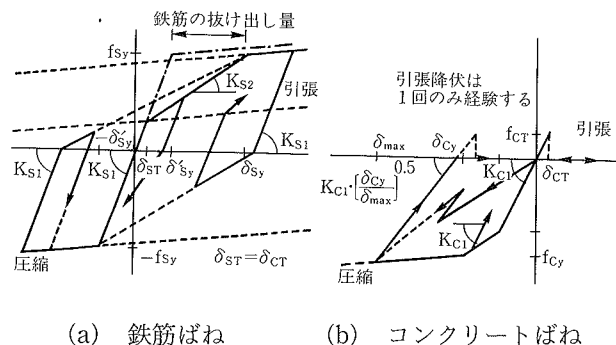


図-1 軸方向ばねの復元力特性モデル

関関係を降伏曲面（楕円型と放物線型の2種類）によって表現している。

壁部材モデルは、付帯柱と壁板部分をそれぞれの要素に置換する壁谷沢モデルを用いる。付帯柱は柱部材と同じ3軸解析モデル（ただし、壁面内方向は両端ピン接合）として、直交する架構の影響を考慮できるものとする。このモデルは骨組内の任意の位置へ配置された耐震壁の解析が可能であるとともに、曲げモーメント分布の変動に対応できるため、連層耐震壁の解析にも適したモデルである。

### 2.3 復元力特性モデル

復元力特性モデルは、TAKEDA モデルをはじめとして、Tri-Linear 耐力低下型モデルなど多数用意されており、解析対象に適したモデルを選択して用いることができる。

なお、軸方向ばねに用いる鉄筋ばねモデル（柱梁接合部からの主筋の抜け出しによる変形を考慮）とコンクリートばねモデルは、今回修正を行ない、より実状に即したモデルとした（図-1）。

### 2.4 応答解析

通常は、床は剛と仮定して解析を行なう。この場合は振動方程式において、各層の重心位置で水平2自由度、上下1自由度、回転1自由度の計4自由度を考慮する。

入力地震波は、水平2方向、上下1方向の3波を同時に入力できる。減衰は速度に比例する粘性減衰とし、質量比例型減衰、剛性比例型減衰、Rayleigh 減衰などを選択して用いることができる。固有値解析法はQR法、Bisection法と逆反復法の併合法、Jacobi法を、数値積分法はNewmark- $\beta$ 、Wilson- $\theta$ 法を用いることができる。連立1次方程式の解法はSkyline法を用いている。

なお、本プログラムは汎用コンピュータで開発しSX-1EAに移植したもので、スーパーコンピュータ用の高速化（ベクトルチューニング）は特には行なっていないが、SX-1EAによる自動ベクトル化機能を用いている。

### 2.5 ポスト処理

節点や部材の応力・変位などの出力は、プリント量が莫大となるため、プロッター(D-SCAN EP 2100)、エンジニアリングワークステーション(SUN-4, IRIS-4D)などによる作図システムが用意されており、モデル図、変



写真-1 建物外観

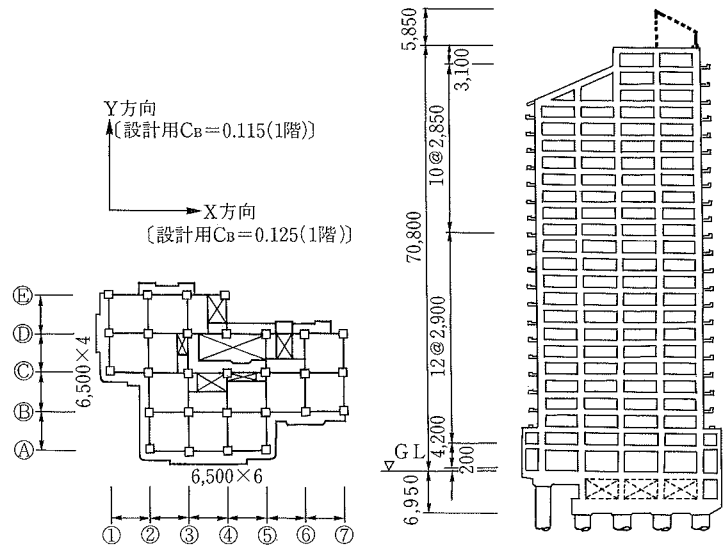


図-2 建物概要

位図，応力図，塑性率図などの各種の図化を行なうことによって，建物の大地震時の弾塑性挙動を迅速かつ容易に把握することができる。さらに，SUN-4, IRIS-4 D とビデオコンバータ，VTR 編集システムを用いて，シミュレーション結果をアニメーション化することによって，大地震時に建物が揺れ動く様子をビジュアルに再現することができ，動的弾塑性挙動を容易に理解することができる。

### 3. 23階建高層 RC 建物の立体骨組地震応答解析

#### 3.1 建物の概要

本建物<sup>2)</sup>は地上23階，地下1階のRC造集合住宅で，地下に耐震壁をもつほかは純ラーメン構造の建物である(写真-1，図-2)。平面・立面形状が不整形であるとともに，短辺方向(Y方向)の④フレームの途中階で梁抜けがあるなどの特徴がある。

なお，保有水平耐力はベースシア係数 $C_B$ でX方向0.183，Y方向0.166である。

#### 3.2 解析方法

解析モデル図を写真-2に示す。各層を剛床と仮定し，最下層(地下1階)は基礎梁下部でピン支持とした。柱，梁のせん断ばねは弾性，耐震壁の壁板部分はせん断ばねのみを弾塑性とした。柱梁接合部は剛域とした。

固有値解析法はQR法，数値積分法はNewmark- $\beta$ 法( $\beta = 1/6$ )，減衰定数は3% (内部減衰初期剛性比例型)，計算時間増分は0.005 sec，計算継続時間は20 sec間とした。

地震応答解析は，梁抜けのあるY方向の挙動を検討することを主目的とし，通常的设计時と同様に地震波をY方向のみに1方向に入力した場合(1方向入力)と，実際の地震時を想定してX・Y方向の2方向に同時に入力した場合(2方向入力)の2種類の解析を行なった。

Y方向の入力地震波は，各種の強震記録を入力地震波

表-1 固有周期

[単位:sec]

		せん断形多質点系解析	平面骨組解析	せん断形ねじれ応答解析	立体骨組解析
X	T <sub>1</sub>	1.358	1.365	1.366	1.369
	T <sub>2</sub>	0.505	0.476	0.502	0.471
Y	T <sub>1</sub>	1.501	1.523	1.503	1.513
	T <sub>2</sub>	0.568	0.517	0.570	0.510
$\theta$	T <sub>1</sub>			1.280	1.275
	T <sub>2</sub>			0.530	0.440

とするせん断形多質点系振動モデルによる略算解析結果から，応答が最大であったEL CENTRO 1940 NS強震記録とし，最大速度は大地震を対象として50 kine(511 gal，原記録の1.495倍)とした。X方向の入力地震波は，EL CENTRO 1940 EW強震記録とし，Y方向と同じく原記録を1.495倍に拡大(55.2 kine，314 gal)して用いた。

SX-1 EAによる演算時間(CPU)は，1方向入力，2方向入力ともに約5時間であった。

#### 3.3 解析結果

変位図の一例(変位は30倍に拡大)を写真-3に示す。以下に，1方向入力と2方向入力の解析結果のうち，主としてY方向の挙動について示す。

**3.3.1 固有周期** 表-1に，各方向の1~2次の弾性時固有周期を種々の地震応答解析法による結果と比較して示す。

立体骨組解析(DREAM-3D)の固有周期は平面骨組解析とほぼ等しいが，Y方向の固有周期は立体骨組解析の方が若干小さくなっている。

**3.3.2 層せん断力の最大応答値** 図-3に，1方向入力の層せん断力Qの最大応答値から求めた層せん断力係数Cの分布を示す。立体骨組解析結果は他の解析結果とほぼ一致している。各層の層せん断力は建物の保有水平耐力(図中の層せん断力係数 $C_y$ ； $C_y$ は静的解析結果のQ~層間変位 $\delta$ 関係において，層の上下階のすべての

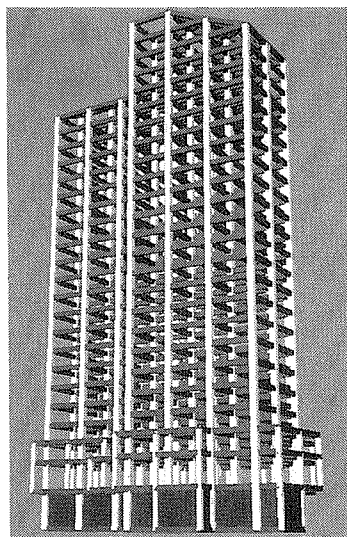


写真-2 解析モデル図

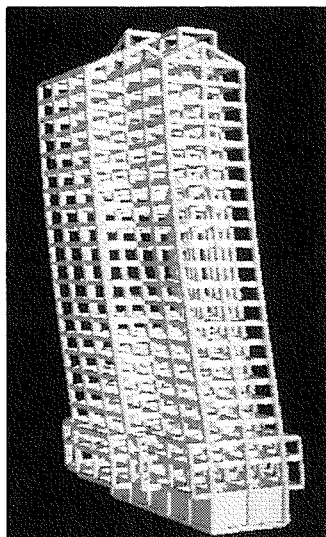


写真-3 変位図の一例

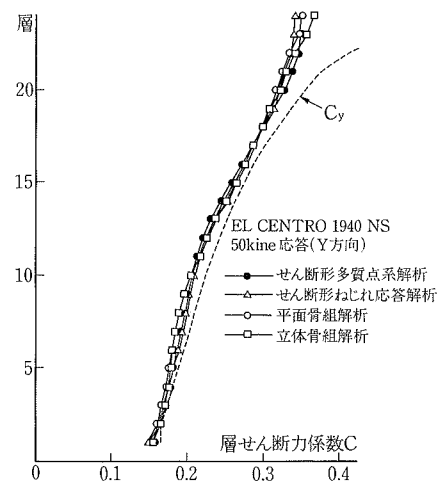
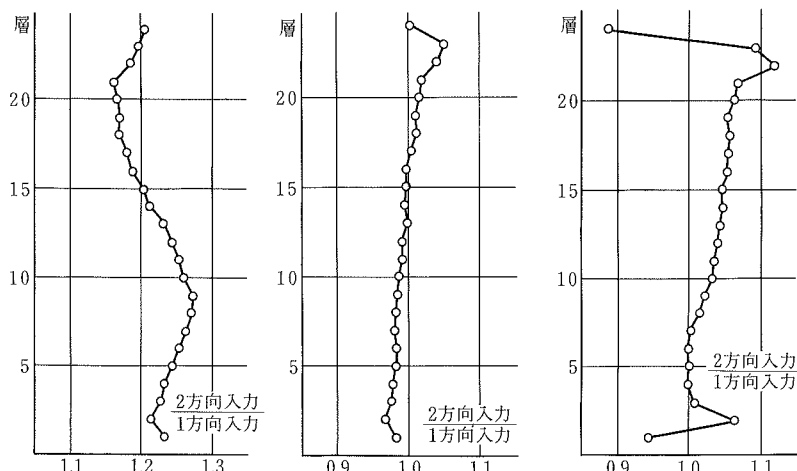


図-3 層せん断力係数の最大値 (1方向入力)



(a) 層せん断力 (ベクトル和) (b) 層せん断力 (Y方向) (c) 層間変位 (Y方向)

図-4 1方向入力と2方向入力の最大値の比較

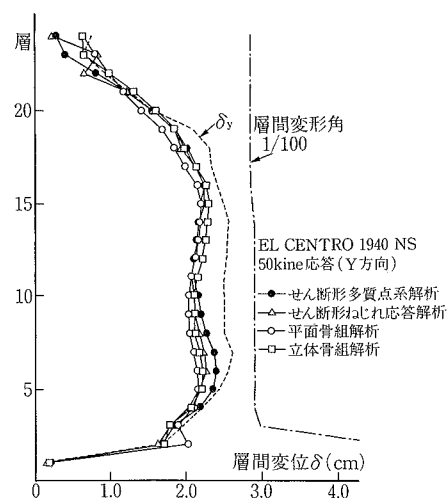


図-5 層間変位の最大値 (1方向入力)

梁に降伏ヒンジが発生し、瞬間剛性が初期剛性の1/100程度に達した荷重ステップ時の層せん断力係数)以下である。

また、立体骨組解析の1方向入力と2方向入力の層せん断力の最大応答値を比較して、図-4 (a), (b)に示す。1方向入力よりも2方向入力の方が入力エネルギーが大きいため、2方向入力のX, Y方向の層せん断力のベクトル和の最大値は、1方向入力の解析結果の1.16~1.27倍と大きい。しかし、2方向入力の層せん断力のY方向の最大応答値は、上層では1方向入力の結果より大きく、下層では小さいが、1方向入力の解析結果の0.97~1.05倍で、1方向入力の解析結果とほぼ等しい。これは、最大応答変位が層の塑性率で1程度(3.3.3項参照)と比較的小さいことと、本建物が偏心量が少ない

ためであろう。

3.3.3 層間変位の最大応答値 図-5に、1方向入力の各層の重心位置における層間変位 $\delta$ の最大応答値の分布を示す。立体骨組解析結果はせん断形ねじれ応答解析結果とほぼ等しい。

立体骨組解析の2方向入力の層間変位の最大応答値は、最上層と最下層を除けば、1方向入力の解析結果より大きく、上層へ行くほど大きくなり、22層で1方向入力の1.12倍となっている(図-4 (c))。

層間変位の最大応答値は $\delta=2.31$  cm(1方向入力)、 $2.42$  cm(2方向入力)、層間変形角 $R=1/125$ (1方向入力)、 $1/118$ (2方向入力)、層の塑性率(降伏層間変位 $\delta_y$ は、静的解析結果の $Q \sim \delta$ 関係において、層の上下階のすべての梁に降伏ヒンジが発生した荷重ステップ時の

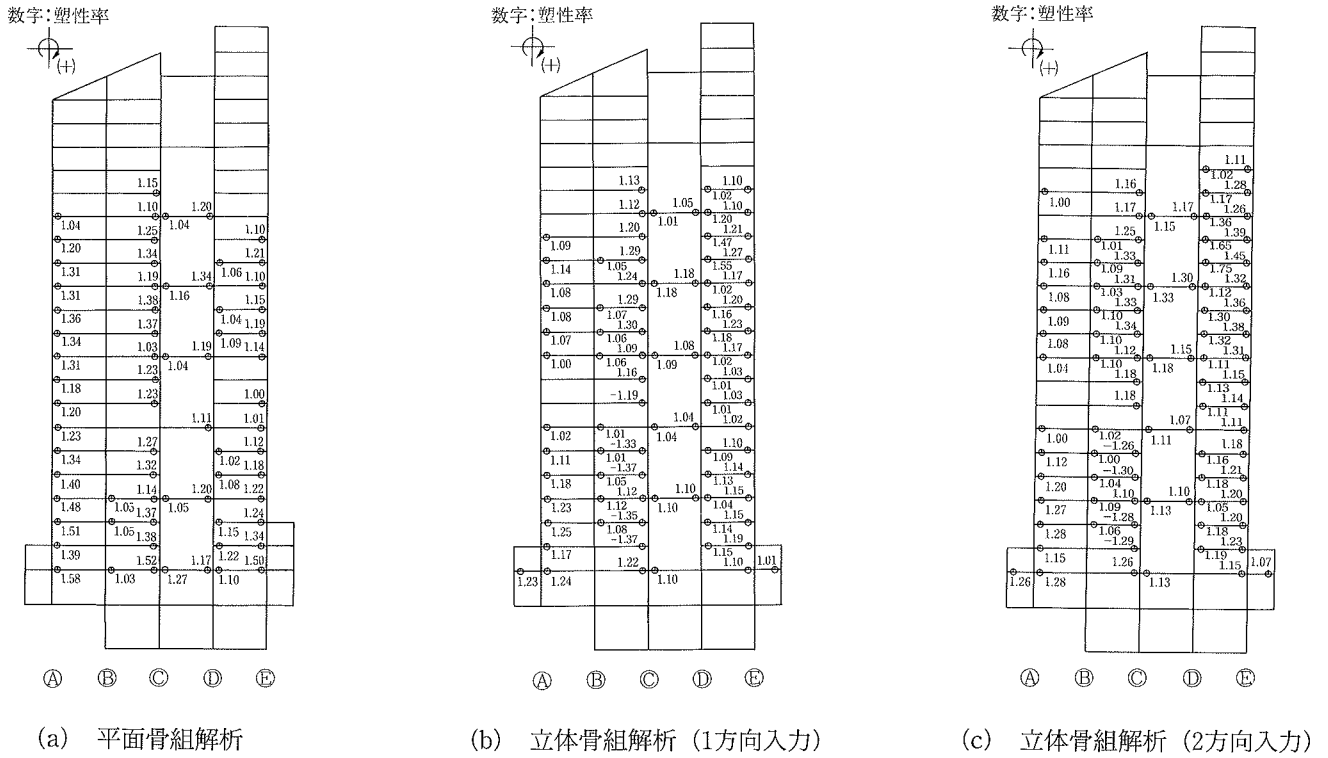


図-6 梁、柱の降伏ヒンジ発生位置 (④フレーム)

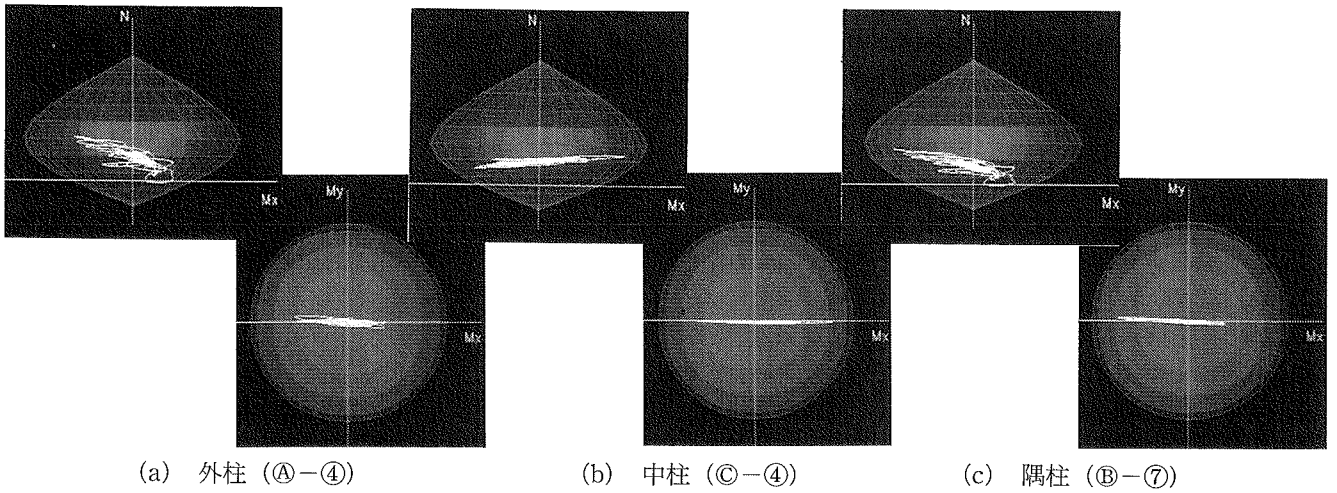


図-7 1階柱脚の N-M<sub>x</sub>-M<sub>y</sub> 応答履歴 (1方向入力)

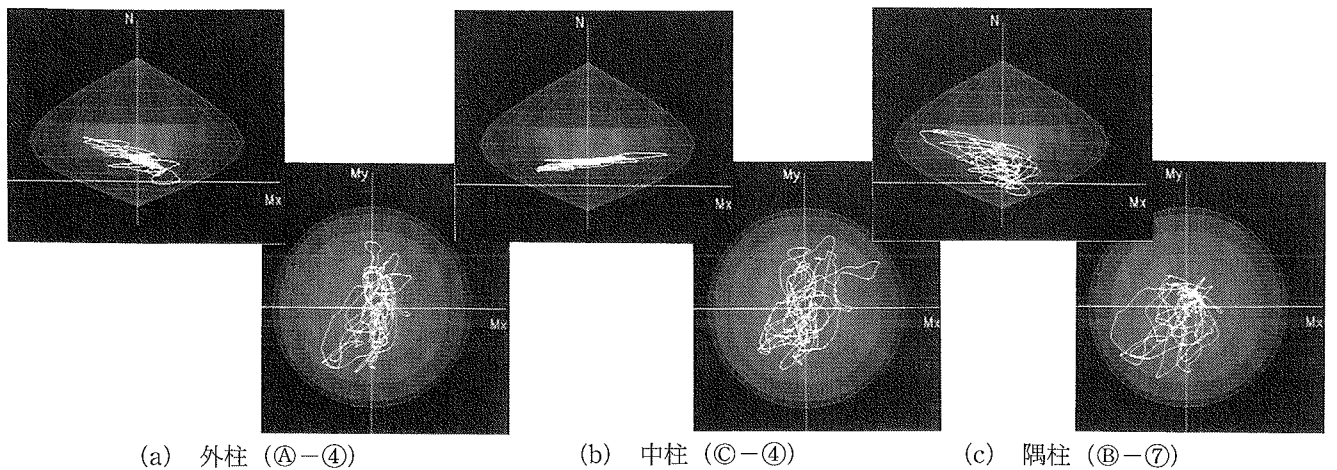


図-8 1階柱脚の N-M<sub>x</sub>-M<sub>y</sub> 応答履歴 (2方向入力)

層間変位  $\mu=1.08$  (1方向入力),  $1.21$  (2方向入力)である。

**3.3.4 梁、柱の降伏ヒンジ発生位置と塑性率** 図-6に、④フレームにおける梁、柱の降伏ヒンジの発生位置と塑性率  $\mu$  を示す。設計で意図したように梁降伏形となっているが、崩壊機構には至っていない。

立体骨組解析では直交する架構の影響が考慮されるため、1方向入力の梁の塑性率は平面骨組解析結果より、⑩～⑪間の上層部の梁抜けのある側の梁端(⑩端)では大きくなり、⑨～⑩間の梁の外端(⑨端)では全体的に小さくなっている。また、1方向入力の解析結果では、下層部で外へ飛び出している1スパンを除くと、全フレームにおいて柱には降伏ヒンジは発生していない。

2方向入力の解析結果は1方向入力の結果より、③～④、⑩～⑪間の上層部の梁端の塑性率が大きくなっている。また、他フレームの一部の1階柱脚(④-⑤と⑧-⑨)に降伏ヒンジが発生しており、2方向入力の影響がみられる。

梁、柱の塑性率の最大応答値は、下層部で外へ飛び出している1スパンを除くと、1方向入力では  $\mu=1.55$  (Y方向梁)、2方向入力では  $\mu=1.75$  (Y方向梁)、 $1.10$  (柱)、 $1.17$  (X方向梁)であった。

**3.3.5 柱の  $N-M_x-M_y$  相関関係** 図-7、8にそれぞれ1方向、2方向入力の解析結果の、1階の外柱(④-④)、中柱(③-④)及び隅柱(⑧-⑦)の柱脚での、 $M_y$  軸方向からみた  $N-M_x$  応答履歴曲線と  $N$  軸方向からみた  $M_x-M_y$  応答履歴曲線を示す。図中には参考のため、降伏相関曲線として阿部の提案する強度包絡曲線<sup>3)</sup>を示す。

隅柱(⑧-⑦)の柱脚のみ降伏している。

$N-M_x$  応答履歴曲線をみると、外柱と中柱では1方向入力と2方向入力の解析結果はほぼ等しい。隅柱(⑧-⑦)では、2方向入力の解析結果は2方向の変動軸力が加算されて、1方向入力の結果より軸力変動が大きい。この柱の軸力は長期荷重時は  $N=612$  tf で、最大応答値は  $N=1,199$  tf (1方向入力)、 $1,807$  tf (2方向入力)である。なお、図には示していないが、隅柱(⑧-⑦)では逆に2方向の変動軸力が相殺されて、2方向入力の解析結果の方が軸力変動が小さくなっている。

$M_x-M_y$  応答履歴曲線をみると、2方向入力の解析結果は、いずれの柱も曲げモーメントの最大応答時には  $M_x-M_y$  平面上でほぼ45°方向に動いており、2軸曲げの影響がでる傾向にある。

図-9に、隅柱の1方向入力と2方向入力の変動軸力の最大応答値を比較して示す。2方向入力の変動軸力の最大応答値は、1方向入力の解析結果よりかなり大きく、最大で1方向入力の2.23倍となっている。設計時には、実際の大地震時には1方向入力時よりも、隅柱の軸力変動は著しく大きいことに留意する必要がある。

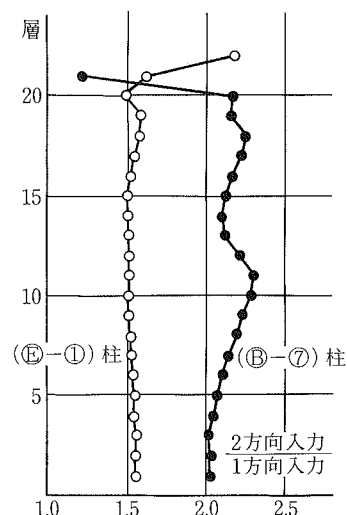


図-9 隅柱の1方向入力と2方向入力の変動軸力の最大値の比較

#### 4. 結び

任意多方向からの地震入力に対する高層RC建物の3次元弾塑性挙動をより詳細に把握するために、理想化された部材モデルを用いた立体骨組の弾塑性地震応答解析プログラム「DREAM-3D」を開発し、23階建RC建物のスーパーコンピュータによるシミュレーション解析を行った。

本解析では、従来の平面骨組による解析だけではとらえることのできない立体骨組としての挙動(たとえば、直交する架構の影響など)や、柱の3軸応力下での弾塑性挙動を部材レベルで詳細に追跡することができ、複雑な平面・立面形状の高層RC建物の耐震設計において、設計の質を向上させる有力なツールとなる。

#### 謝辞

本解析プログラムは、当社「RC超高層集合住宅研究開発グループ」の研究開発の一環として、東京本社 情報システムセンターと共同で開発を行なった。また、本店建築設計第七部からは、本報告の解析建物のデータを提供していただいた。関係各位に深く感謝致します。

#### 参考文献

- 1) 永原, 江戸, 他: 鉄筋コンクリート建物の立体骨組弾塑性解析 (その1), 大林組技術研究所報, No.40, p. 64~71, (1989. 3)
- 2) 金沢, 八木, 他: 23階建鉄筋コンクリート造建物の耐震設計 (その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 813~818, (1989. 10)
- 3) 阿部: 鉄筋コンクリート柱の曲げ終局耐力算定式と強度包絡曲面, 日本建築学会構造系論文報告集, 第366号, p. 94~105, (1986. 8)