

論文

## [2152] 耐震壁の浮き上がりを考慮した立体壁フレーム構造物の弾塑性挙動解析

正会員○傳 金華 (東北大学大学院)

正会員 柴田明徳 (東北大学建築学科)

正会員 齊藤大樹 (東北大学建築学科)

### 1. はじめに

耐震壁を含む鉄筋コンクリート構造では、耐震壁の高いせん断剛性とせん断耐力のため、優れた耐震性が期待できる。又、耐震壁の脚部の曲げ降伏と基礎の浮き上がりなどが許容されることにより、建物にはかなり大きな靱性が得られる。この時、耐震壁とつながる直交梁には基礎の浮き上がり、あるいは耐震壁脚部の回転によって、大きな上下変形が生じ、耐震壁に対する拘束作用が生ずる。又、耐震壁が大きなせん断力を負担するため、基礎の浮き上がりを生ずると、骨組全体の挙動に大きな影響を与える<sup>[1][2]</sup>。したがって、立体壁フレーム構造における直交梁の拘束効果及び基礎の浮き上がりの影響を明らかにすることは極めて重要である。

現在、鉄筋コンクリート造純フレーム構造については、立体解析はかなり盛んに行なわれている<sup>[3][4][5]</sup>。耐震性の優れた耐震壁を有する鉄筋コンクリート造骨組(壁フレーム架構)の立体解析は弾性範囲での研究が多くなされているが<sup>[6]</sup>、弾塑性範囲では主に骨組の立体性を無視し、各フレーム連成の平面解析であり、壁に直交する梁による拘束効果や壁の浮き上がりの影響などまだ不明な点が多い。

本研究では、柱の2方向曲げ、軸力と曲げの相互作用及び耐震壁の浮き上がりなどを考慮した立体弾塑性解析プログラムSTERA (Program For Structural Earthquake Response Analysis)を開発した。又、このプログラムを用いて、同一耐震壁骨組に対して、直交梁を無視した平面解析とこれを考慮した立体解析を行ない、直交梁の拘束作用、柱軸力の変動などについて検討した。

### 2. 解析方法

#### 2.1 解析骨組モデル

本研究における解析骨組の基本モデルは、文献7)を参考にして、図1(a)に示されるようなX方向(壁方向)3スパン、Y方向2スパンの3層鉄筋コンクリート造骨組とした。これをモデル1とする。なお、耐震壁とつながる直交梁の有無の影響を調べるため、直交梁を除いた同じ骨組をモデル2として解析した(図1(b)参照)。図1(b)の点線部の直交梁は通常の平面解析では考慮されていない。この2種類のモデルにおける部材の寸法及び配筋を表1に示す。各層単位面積当りの重量は両モデルとも $0.91\text{t/m}^2$ とし、各節点に作用する初期軸力は柱の支配面積により計算された。なお、部材のひび割れモーメント、ひび割れせん断力、曲げ耐力及びせん断耐力は建築学会の鉄筋コンクリート構造計算基準により求めた。解析モデルの部材の主筋の降伏強度は $\sigma_y=3500\text{kg/cm}^2$ 、せん断補強筋は $\sigma_y=2400\text{kg/cm}^2$ 、コンクリートの強度は $F_c=210\text{kg/cm}^2$ としている。

本解析では、主として直交梁の拘束効果と壁の浮き上がりを検討の対象としているため、入力は、X方向のみの1方向静的漸増荷重とした。外力分布は三角形とし、1層の層変位5cm(層間変形角1/70)まで解析した。

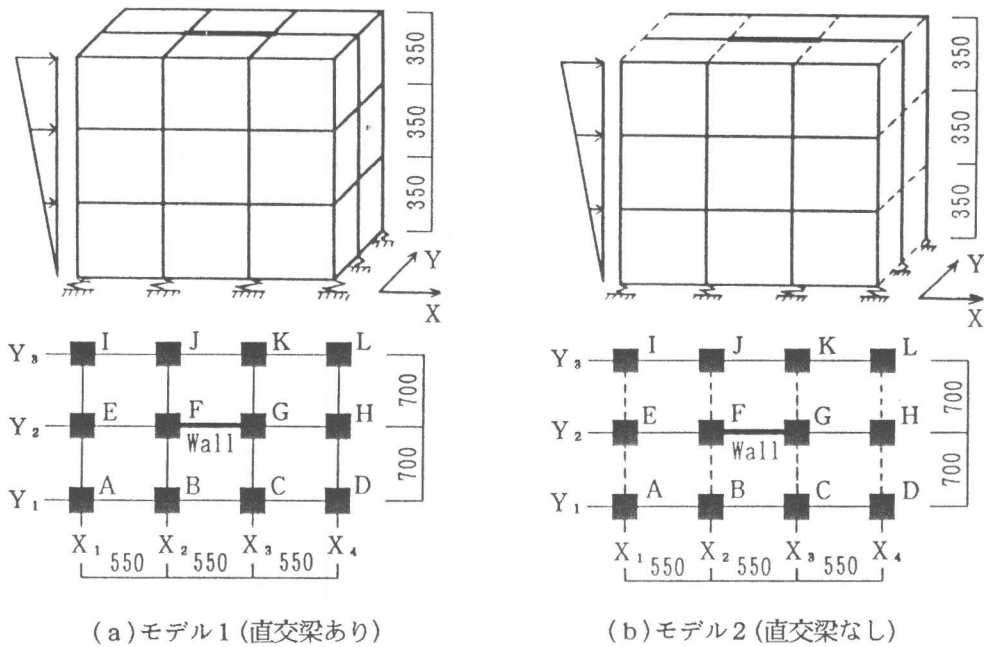


図1. 解析対象骨組

## 2.2 基礎バネの特性

基礎の浮き上がりを考慮するため、モデルのすべての基礎は地盤条件により定めた弾塑性鉛直バネ支持とした(図1参照)。本解析では、独立基礎を想定し、文献7を参考に全ての基礎の深さは1.5m、隅柱、外柱及び内柱の基礎の底面積はそれぞれ(2.1×2.1)、(2.3×2.3)と(3.3×3.3)m<sup>2</sup>とし、地盤係数を2.0kg/cm<sup>3</sup>とした<sup>[7]</sup>。各基礎バネの剛性は隅柱で88.2kg/cm、外柱で135kg/cm及び内柱で217.8kg/cmである。又、土と基礎の平均重量は2t/m<sup>3</sup>とし、鉛直外力として基礎バネに作用させた。基礎バネは圧縮領域で線形であるが、引張になると、基礎バネを外し、剛性は0として解析する。基礎の復元力を図2に示す。

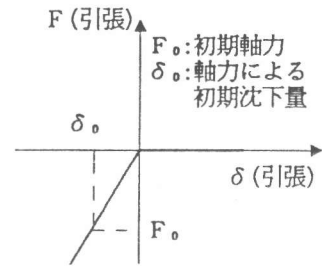


図2. 基礎バネの復元力モデル

## 3. 部材モデル

柱と耐震壁の部材モデルには、2方向曲げと変動軸力の影響を表すため、材端に弾塑性軸方向バネを配置したマルチスプリングモデルを用い<sup>[8][9]</sup>、梁には、軸方向の変形を無視した材端弾塑性曲げバネモデルを用いた。又、部材の中央には、弾塑性せん断特性を表すせん断バネを付けた<sup>[10]</sup>(図3)。柱と耐震壁における軸方向弾塑性バネ、梁の両端についている曲げバネ及びせん断バネの復元力モデルを図4に示す。なお、接合部は材端の剛域としてモデル化した。

表1. 部材の断面と配筋

階数	基礎	2	3	R	柱	断面	60×60
		壁 方 向	上	5-D22		4-D22	3-D22
下	5-D22		4-D22	3-D22	5-D19	帯筋	13φ@100
直 交 方 向	断面	40×120	35×75	30×70	30×70	耐 震 壁	壁柱 断面: 60×60 主筋: 12-D19 帯筋: 2-13φ@100
	上	4-D25	5-D22	4-D22	3-D22		
	下	4-D25	5-D22	2-D22	2-D22		
断面	40×120	40×75	35×75	35×75			

#### 4. 解析結果

本解析では、X方向（壁方向）のみの静的線形及び非線形増分解析を行ない、骨組の性状を調べた。この解析では、剛床仮定により、モデル1とモデル2の全体剛性マトリックスを作成した。外力分布は3角形とし、第1層のX方向変位により制御した。刻みは0.005cmで、漸増载荷を行ない、1層の最大変形5cm（1層の層間変形角1/70）まで解析した。

最初に、立体弾塑性解析プログラムSTERAにより、各節点に建物の自重による鉛直荷重、基礎バネに基礎と土の重量を作用させ、各基礎バネの初期軸力及び沈下量を計算した。表2に各基礎バネの軸力と沈下変形を示す。基礎(柱)番号A～Lは図1に示す通りである。なお、梁には分布荷重による曲げモーメントは考慮していない。

##### 4.1 層せん断力-層間変位の関係

図5に層せん断力-層間変位の関係を示す。実線はモデル1、破線はモデル2の結果である。この図を見ると、壁につながる直交梁の拘束によりモデル1はモデル2と比べて、層せん断力が大きい。つまり、直交梁の拘束を考慮したモデル1の方が、直交梁を無視したモデル2よりも建物全体としての剛性が大きくなる事が分かる。

次に、基礎の浮き上がりにより骨組全体のみかけの剛性が低下することの影響を明らかにするため、弾塑性解析と共に部材を弾性とした解析を行い、両者を比較した。図6に基礎の浮き上がり点と1層のせん断力を示す。(a)はモデル1、(b)はモデル2である。図の中の実線は弾塑性解析、破線は弾性解

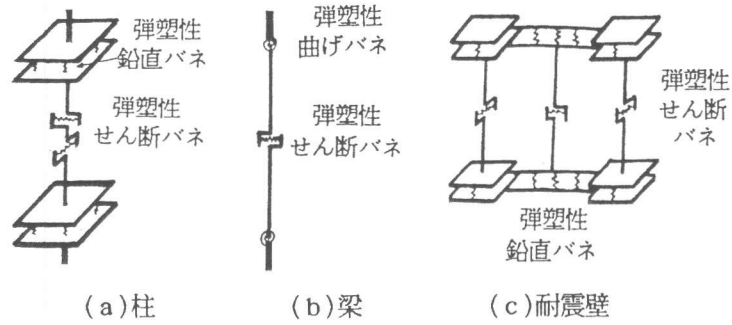


図3. 部材の解析モデル

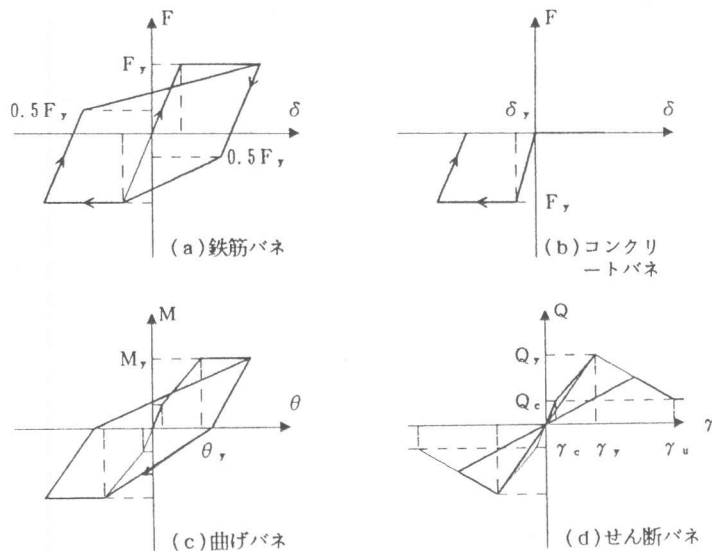


図4. 部材の復元力モデル

表2. 基礎バネの初期軸力と沈下量

モデル	柱	A	B	E	F
モデル1	軸力(t)	44.4	71.9	73.1	127.0
	変形(cm)	0.504	0.532	0.542	0.584
モデル2	軸力(t)	41.9	69.4	76.9	134.0
	変形(cm)	0.475	0.514	0.569	0.613

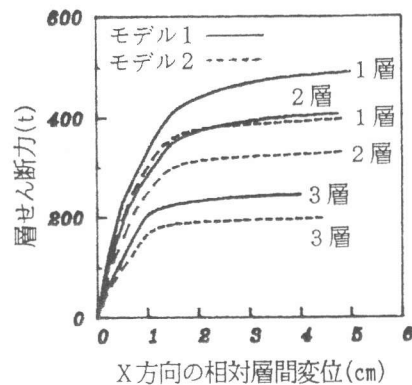


図5. 層せん断力と層間変位との関係

析である。黒丸は浮き上がり点を表し、記号は浮き上がりを生じた基礎の位置を表す(図1参照)。弾性解析の結果を見ると、基礎の浮き上がりによって骨組の水平力に対するみかけの剛性がかなり低下することが分る。又、浮き上がりは骨組の外柱Eから順に内側の耐

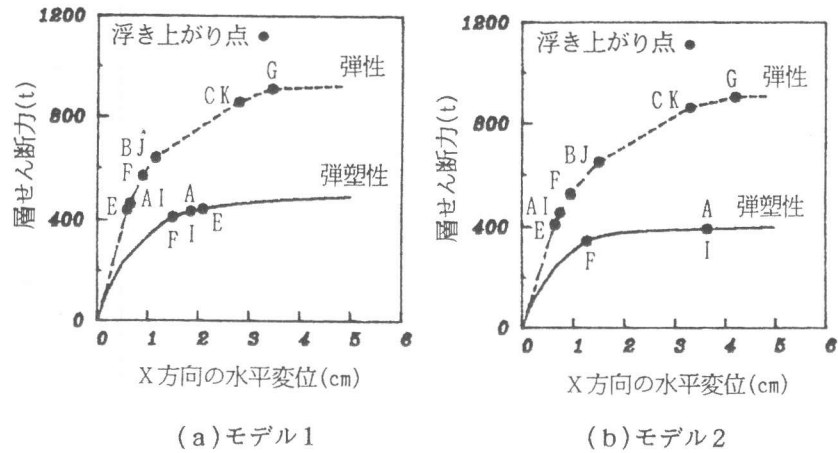


図6. 1層の層せん断力と骨組の浮き上がり点

震壁基礎Fへと生じている。これに対し、弾塑性解析では、浮き上がりと共に部材の非線形化により、骨組の水平剛性が弾性解析よりも低下していることや、最初の浮き上がりが外柱Eではなく耐震壁基礎Fであることが分る。モデル1とモデル2を比較すると、モデル2では、直交梁の拘束効果がないため、耐震壁基礎Fの浮き上がり後しばらくしてから外柱A、Iが浮き上がっている。又、耐震壁基礎の浮き上がり時に、両モデルのY<sub>2</sub>フレーム(壁フレーム)はほぼ梁降伏型になり、梁の最大塑性率はモデル1で2.53(2層GH梁)、モデル2で2.39(3層GH梁)であることが分る。

#### 4.2 フレームのせん断力

次に、X方向についてフレームごとにせん断力を求めたものを図7に示す。(a)はY<sub>1</sub>フレーム(純フレーム)、(b)はY<sub>2</sub>フレーム(壁フレーム)である。図の中の実線はモデル1、破線はモデル2の解析結果である。黒丸は耐震壁基礎の浮き上がり

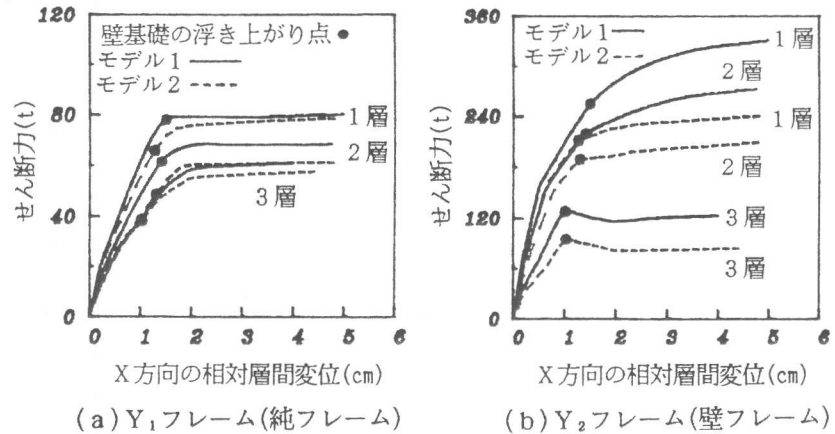


図7. Y方向フレームのせん断力

点を示す。耐震壁が存在しないY<sub>1</sub>フレームは、モデル1とモデル2の各層のせん断力の差が小さく、耐震壁の浮き上がりの影響も小さい。しかし、耐震壁を含むY<sub>2</sub>フレームについては、モデル1の最大1層せん断力がモデル2の1.35倍に達している。しかも、耐震壁が浮き上がりを生ずると、3層の負担するせん断力が減少する傾向を示した。そこで、Y<sub>2</sub>フレームのせん断力に占める耐震壁の負担分を示したのが図8である。耐震壁のせん断力の変化はY<sub>2</sub>フレームと同じ傾向を示した。又、Y<sub>2</sub>フレームの最大せん断力の約8割を耐震壁が負担していることが分る。

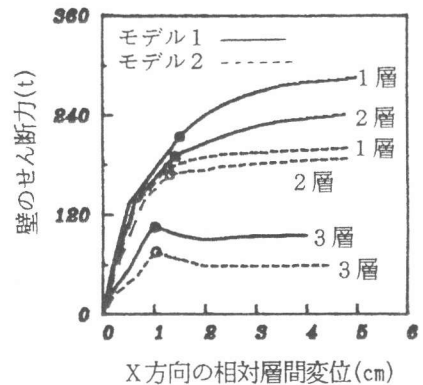


図8. 耐震壁のせん断力

### 4.3 直交梁のせん断力

耐震壁に直交する梁の拘束効果を明らかにするため、図9に柱B、Cに作用する $X_2$ 、 $X_3$ フレームの梁(直交梁)のせん断力を示す。

(a)は $X_2$ フレーム、(b)は $X_3$ フレームの梁である。黒丸は耐震壁基礎の浮き上がり点、▲は直交梁の降伏点を

表している。両図ともモデル1の結果である。図9(a)の結果を見ると、耐震壁の浮き上がりを生じてから、直交梁特に基礎直交梁のせん断力が増大している。又、浮き上がりを生じた後、全ての直交梁が塑性化している。しかし、同図(b)の圧縮側の直交梁では耐震壁の浮き上がりの影響が小さいため、3層直交梁の外には降伏していない。

### 4.4 柱の軸力

耐震壁に平行した構面にある柱B、Cは耐震壁の挙動により大きな軸力変動を示すと考えられる。そこで、図10に各柱の軸力の値を示す。実線はモデル1、破線はモデル2の解析結果である。モデル1の柱Bは直交梁の引張り作用を受け、圧縮軸力は著しく減少している。これに対して、モデル2の柱Bの軸力は直交梁がないために、逆に増加の傾向にある。又、柱Cの軸力は、モデル1では直交梁の圧縮作用により圧縮軸力は増加しているが、モデル2では大きな変化は見られない。

次に、耐震壁の側柱

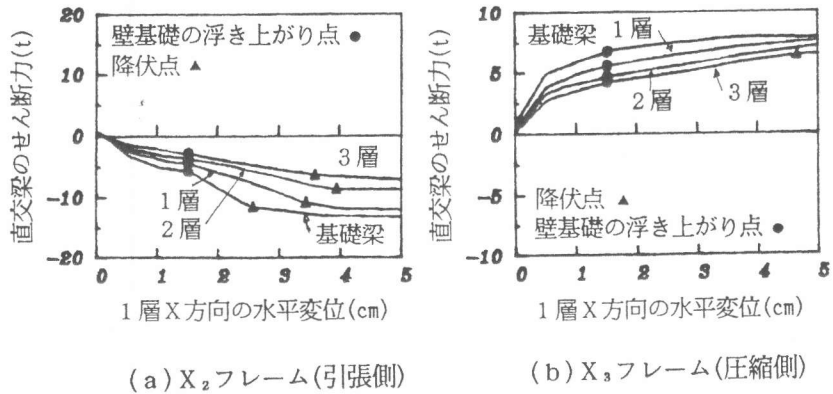


図9. 直交梁のせん断力

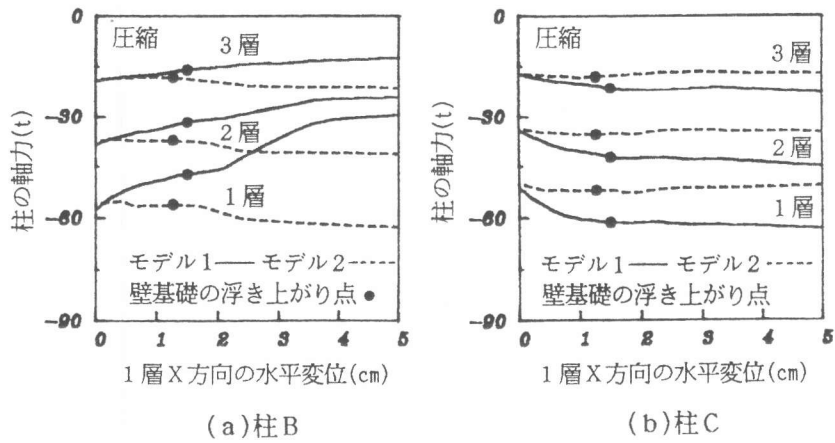


図10. 耐震壁近傍の柱の軸力変動

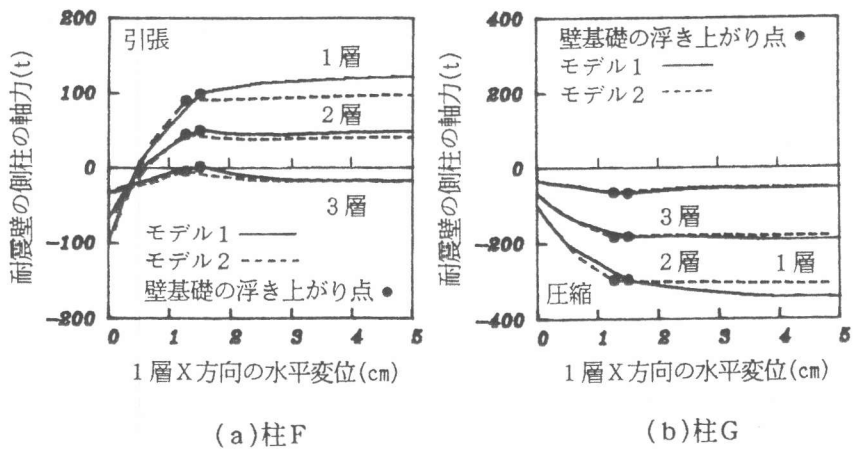


図11. 耐震壁側柱の軸力変動

の軸力変動の様子を図11に示す。(a)は引張側の柱Fの軸力、(b)は圧縮側の柱Gの軸力であるこれを見ると、耐震壁の浮き上がり以前は、圧縮側と引張側とも軸力が大きく変動しているが、浮き上がりが生じた後はほとんど変化していない。

さらに、図12に耐震壁の基礎バネの変形を示す。実線はモデル1、破線はモデル2の解析結果である。図を見ると、モデル2の方が直交梁の拘束がないため、モデル1よりも大きいことが分かる。この傾向は浮き上がりを生じてから特に顕著である。一方、圧縮側については、その変形が小さく、両モデルの差はあまり見られない。

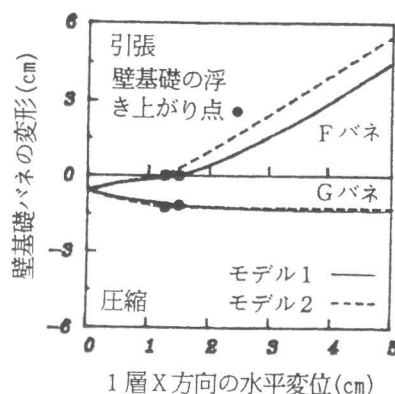


図12. 耐震壁基礎バネの変形

## 5. まとめ

耐震壁を含む鉄筋コンクリート造骨組の水平1方向漸増载荷に対する立体及び平面弾塑性解析を行なった。これより以下の解析結果を得た。

- (1). 直交梁の拘束効果により、耐震壁の負担せん断力は増加し、骨組全体の剛性は上昇する。
- (2). 基礎の浮き上がりにより、骨組全体の剛性は漸減する。その性状は動的挙動に大きく影響するものと考えられる。
- (3). 耐震壁のせん断力負担は基礎の浮き上がり後も境界梁の拘束により漸増することがある。このことは、耐震壁の終局設計に於いて考慮される必要があると考えられる。
- (4). 直交梁を通じて耐震壁とつながる柱の軸力に対しては、直交梁の拘束作用が無視できない。
- (5). 大変形時には、耐震壁に直交する梁が塑性化する場合がある。

以上、静的解析を通じて、立体耐震壁骨組の弾塑性性状を調べ、その問題点を考察した。地震時に基礎バネの強弱が骨組挙動に及ぼす影響、動的な2方向地震が入力する時における立体壁フレーム構造物の弾塑性挙動の評価などは今後の課題である。

### [参考文献]

- 1) 岩下恒雄、酒井直巳：脚部に浮き上がりを生じた平面架構内の耐震壁の力学性状、日本建築学会論文報告集、第286号、昭和54年12月、pp. 55-63
- 2) 岩下恒雄、酒井直巳：脚部に浮き上がりを生じた立体架構内の耐震壁の力学性状、日本建築学会論文報告集、第295号、昭和55年9月、pp. 63-69
- 3) 李康寧、小谷俊介、青山博之：軸力-曲げモーメントの相互作用を考慮したRC造立体骨組の弾塑性地震応答、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12、No. 2、1990、pp. 125-130
- 4) 周泉通、壁谷沢寿海、末永保美：鉄筋コンクリート柱の3軸非線形解析モデル、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 12、No. 2、1990、pp. 149-154
- 5) 飯藤将之、柴田明德、渋谷純一：柱の二軸曲げと変動軸力を考慮したRC骨組の弾塑性地震応答コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 2、1991、pp. 607-612
- 6) 網干眞一、西川孝夫：耐震壁を含む立体架構の地震時に関する研究、第7回日本地震工学シンポジウム、pp. 1783-1787
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・解説
- 8) 李康寧、小谷俊介、青山博之：3軸変動軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の解析モデル、構造工学論文集、1987、pp. 169-178
- 9) 齊藤大樹、小川淳二、渋谷純一、傅金華：耐震壁フレーム構造物の弾塑性挙動解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No. 2、1991、pp. 613-618
- 10) 志賀敏男、柴田明德、渋谷純一、高橋純一：東北大学工学部建設系研究棟における強震応答解析とその弾塑性応答解析、日本建築学会構造系論文報告集、第301号、昭和56年3月、pp. 119-128