

# 論文 梁の軸方向変形を考慮した鉄筋コンクリート造建物の応答に関する研究

真田 靖士<sup>\*1</sup>・壁谷澤 寿海<sup>\*2</sup>

要旨：梁の軸方向変形を考慮し得る弾塑性骨組解析プログラムを作成し、梁の軸方向変形が建物の応答に与える影響について検討した。既存鉄筋コンクリート造建物を対象として、梁の軸方向変形を考慮する場合としない場合について解析した結果、とくに1階圧縮側外柱のせん断力に大きな違いが生じ、異なる崩壊系を形成することがわかった。梁せいとスパン数をパラメータとした解析では、梁の軸方向変形量が梁せいと密接な関係にあることを示し、また、スパン数が多い建物ほど1階圧縮側外柱の水平変位が増大し、その結果、作用するせん断力も大きくなることを指摘した。

キーワード：梁の軸方向変形、柱のせん断力、崩壊モード

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造純フレーム建物では、地震力が入力する際、梁崩壊型の全体降伏機構を形成することが望ましいと考えられている。これを実現するためにはフレームを構成する柱、梁の応答を正確に把握することが重要であり、このテーマに関し様々な研究が行われてきた。その一つとして梁の軸方向変形に着目した研究<sup>1) 2)</sup>が過去にいくつか行われており、梁の軸方向変形がフレームの応答に影響を与えることが明らかにされている。

本研究では、立体弾塑性骨組解析プログラムを作成し、既存鉄筋コンクリート造建物を例に梁の軸方向変形を考慮する場合としない場合について建物の応答や崩壊モードの違いを比較し、梁せいやスパン数などの建物の形状に関するパラメータが応答に与える影響について検討した。

## 2. 解析方法

梁の軸方向変形の影響を扱うため各節点に6自由度を考慮した立体弾塑性骨組解析プログラムを作成した。ただし、本研究では水平一方向のみの解析を行った。

## 2. 1 部材モデル

部材モデルには鉄筋とコンクリートの材料特性に基づいたファイバーモデルを用いた。ファイバーモデルでは、部材端部に物理的な厚さのないコンクリート要素と鉄筋要素で構成されるファイバースライスを仮定し、材料の応力ひずみ関係からファイバーの柔性を算定し、部材の長さ方向に仮定した柔性分布に従って積分することにより部材の柔性マトリクスを評価する。柔性分布は曲げ、軸方向変形ともに部材中央を弾性として端部と中央を直線で結ぶ分布を仮定した。

## 2. 2 ファイバー要素の履歴モデル

図-1に本解析で使用したコンクリートの履歴モデルを示す。コンクリートは引張応力を負担せず、降伏後は降伏応力を保持するものとして剛性低下は考慮していない。また、ひび割れ応力を超える点からの除荷では除荷時応力の1/4点から剛性が低下し、応力0状態からの再載荷時には図-1の $\epsilon_p$ 点から圧縮応力を負担し始めるモデルとした。また、鉄筋モデルにはパウシンガー効果を考慮し、降伏後の剛性は初期剛性の1/1000とした。

\*1 東京大学大学院 工学系研究科 建築学専攻 (正会員)

\*2 東京大学地震研究所 教授 工博 (正会員)

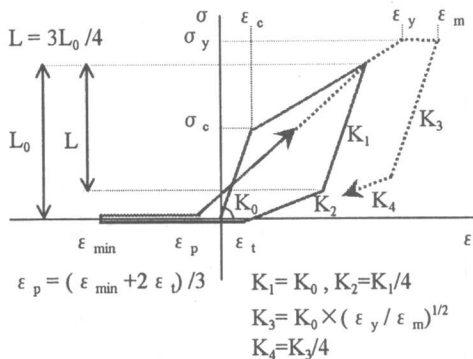


図-1 コンクリートの履歴モデル

### 2.3 ファイバー要素の配置

断面の各ファイバー要素の配置には、文献3)において二方向の曲げと軸力を受ける柱の繰り返し載荷実験とよい相関を示すことが実証されている配置をそのまま用いた。要素の位置は部材断面に釣合軸力と降伏モーメントが作用する時の力の釣合条件から決定される。ただし文献3)では、断面に常に圧縮力が作用する状況下での信頼性が示されているだけなので、梁のように軸力が小さい部材についても適用可能であるかどうかを以下で検証した。

### 3. 解析モデルの検証

本研究で用いた解析モデルを用いて過去に行われた梁の軸方向変形に着目した多層多スパン平面骨組模型の繰り返し載荷実験<sup>2)</sup>を解析し、モデルの妥当性を検証した。

#### 3.1 参照実験概要

試験体は30階建前後の鉄筋コンクリート造純フレーム建物の下層を想定した縮尺1/20の4層3スパン平面骨組模型である。図-2に試験体断面を示す。加力方法は梁の軸方向変形を拘束することなく各柱頭に均等に載荷できるよう工夫されている。また、柱にはそれぞれ1400kgfの定軸力を加えている。載荷は左右両外柱の全体水平変形角の平均値を基準に1/200, 1/100, 1/50正負各2回ずつ繰り返し、最後に正方向に1/20以上まで行っているが、本解析と比較するのは1/50の繰り返しまでとした。

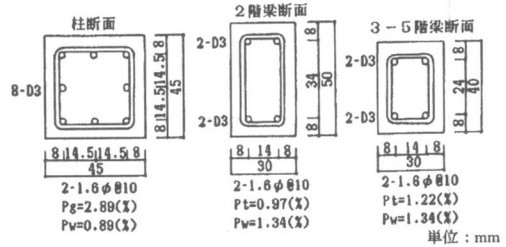


図-2 試験体断面 (文献2)より転載)

### 3.2 実験と解析の比較

実験で用いられた試験体と同様の模型を前述した方法によりモデル化した。ただし、コンクリートのひび割れ応力は降伏応力の1/2とした。

図-3に5階左側外柱柱頭位置の水平変位と水平力の関係を、図-4に5階左側端部に位置する梁の軸方向変形と水平力の関係をそれぞれ実験結果とともに示す。

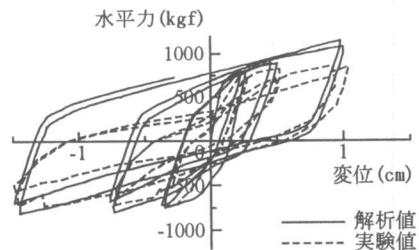


図-3 水平変位と水平力の関係

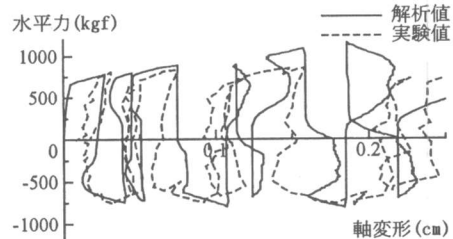


図-4 梁の軸方向変形と水平力の関係

実験結果がやや逆S字型の履歴を示すのに対し、解析結果は紡錘形の履歴を示す。この原因は、主として解析では付着滑りの影響を考慮していないためであると考えられる。また、変形角1/100までの載荷では最大耐力をよく追跡できているが、1/50の載荷時にとくに正方向において実験結果を大きく上回り始める。これはコ

ンクリートモデルに降伏後あるいは繰り返しによる耐力低下を考慮していないためであると考えられる。梁の軸方向変形の履歴についても変形角 1/100 の载荷まではよい対応を示すのに対し、1/50 を超えるとやや実現象を捉えられなくなるようである。この点に関しては今後の課題であり、材料の履歴モデル、断面のパネ配置ともに再検討が必要であろう。

#### 4. 梁の軸方向変形の影響

既存鉄筋コンクリート造建物を対象として梁の軸方向変形を考慮する場合としない場合についてそれぞれ一方向静的解析を行い、応答および崩壊モードの違いに着目して考察した。

##### 4. 1 解析対象建物

解析対象は地上 6 階、地下 1 階で平面が 7×3 スパンの鉄筋コンクリート造純フレーム建物の Y1 通り 1 フレーム（ただし、地下階は考慮しない）である。1 スパンが 12m と非常に長く、建物長手方向の外側フレームが梁せい 1.65m のウォールガーダーにより構成されている点が通常の RC 造建物とは異なる。図-5 に建物の一階床伏図および軸組図を、表-1 に代表的な柱、梁の断面を示す。外力分布には震度逆三角形分布を仮定し、X1 通りから X8 通り方向（図-5）に载荷した。なお、各層の外力は当該層の各節点に支配床面積に応じて分配している。

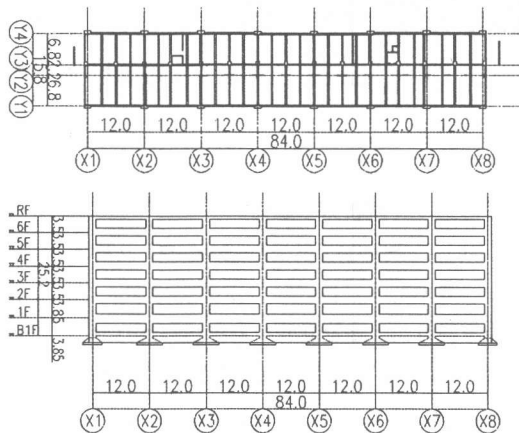


図-5 一階床伏図、軸組図

表-1 柱、梁断面

柱断面	梁断面	単位 : mm	
		B×D	700×1500
		B×D	350×1600
		主筋	12-D25
		上端筋	8-D25
		帯筋	D10@150
		下端筋	4-D25

#### 4. 2 建物のモデル化

梁の軸方向変形を考慮しない場合を CASE1、考慮する場合を CASE2 とする。すなわち、CASE1 は柱をファイバーモデル、梁を材端曲げパネモデルによりモデル化し、CASE2 は柱、梁ともにファイバーモデルによりモデル化した。材端曲げパネモデルの履歴モデルには Takeda Model を用いた。またここでは、簡単のためスラブの効果は考慮していない。

#### 4. 3 解析結果

図-6 に R 階 X8 通りの水平変形角と水平力の関係を示す。梁の軸方向変形を考慮することにより建物の剛性、耐力ともに考慮しない場合を上回る結果となった。これは梁に圧縮力が作用し剛性、耐力がともに上昇した結果である。

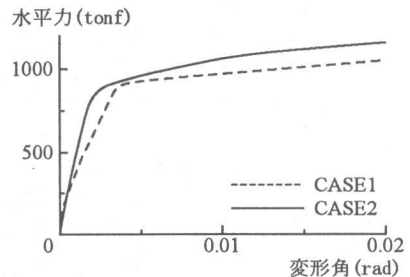


図-6 水平変形角と水平力の関係

図-7 に両モデルとも降伏機構を形成したと考えられる変形角 0.004rad（図-6）における降伏ヒンジ発生状況および梁の軸力を示す。CASE1 はほぼ理想的な梁降伏型全体降伏機構を形成しているのに対し、CASE2 では 5 階を除く全層に柱頭、柱脚ヒンジが発生している。これは梁に圧縮力が作用し曲げ耐力が上昇したためである。

図-8に図-7と同じ変形(0.004rad)での各柱のせん断力を示す。1階柱についてCASE1ではほぼ均等にせん断力を負担しているのに対し、CASE2では負担割合が圧縮側と引張側で著しく異なる。これは梁の軸方向変形によりX1通りからX8通り方向に柱の水平変位が増大するためであると考えられる。またCASE2について、この時点では柱のせん断力が計算上のせん断耐

力を下回っているが、変形角0.01radでは1階X8通りの柱のせん断力がせん断耐力(249.0tonf)を上回る。つまりCASE2では柱がせん断破壊する崩壊型となる。一方、CASE1ではどの柱もせん断耐力を十分下回るせん断力である。

以上、本解析対象では梁の軸方向変形を考慮する場合としない場合とでは崩壊モードが異なるという結果を得た。

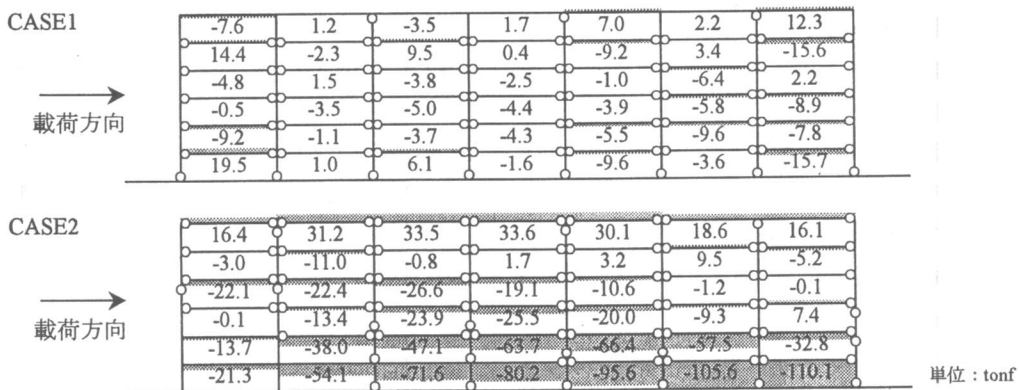


図-7 降伏ヒンジの発生状況および梁の軸力

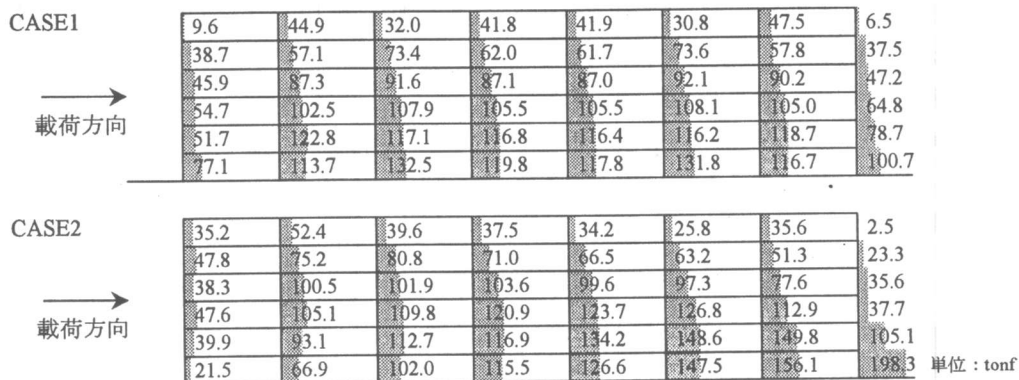


図-8 柱のせん断力

### 5. 建物の形状が応答に与える影響

4. で梁の軸方向変形が建物の応答に大きな影響を与えることを示したが、ここではとくに梁の軸方向変形量との関連が深いと考えられる建物の形状として梁せいとスパン数を考え、これらをパラメータとして解析し、梁の変形量、1階圧縮側外柱のせん断力などに着目し検討した。

#### 5.1 解析対象建物

解析対象として梁せい(60, 90, 120cm)、スパン数(4, 8, 12スパン)をパラメータとした全9通りの4層平面骨組を設計した。1スパン6m、階高3.5mとし、建物の重量として端部節点には10tonf、その他の節点には20tonfを与えている。柱断面は一律に60×60cmとし、梁幅は30cmと

した。ペーシア係数にして 0.25 に相当する震度逆三角形分布水平力に対する弾性応力計算を行い、この時の柱、梁の応力に等しい強度を基準とし、梁降伏型全体降伏機構を仮定したときの非ヒンジ部にはこの 1.5 倍の強度を、ヒンジ部にはそのままの強度を有するように配筋を決定した。ただし、柱、梁ともに各層の最大引張鉄筋断面積をその層の代表値とし、同一断面で設計している。

### 5.2 梁せいによる影響

梁せいが異なるモデルについて、一方向静的解析を行った結果について述べる。外力分布には震度逆三角形分布を仮定し、各層の外力は当該層の各節点到に支配床面積に応じて分配している。図-9 に 4 スパンモデルについて建物の全体水平変形角（ただし、全体水平変形角は中央の柱の頂部水平変位を建物高さで除した値とする）と 1 階圧縮側外柱と接合する梁の軸方向変形（梁の剛域を除いた長さに対する百分率で表記）の関係と比較した。梁の軸方向変形は、全

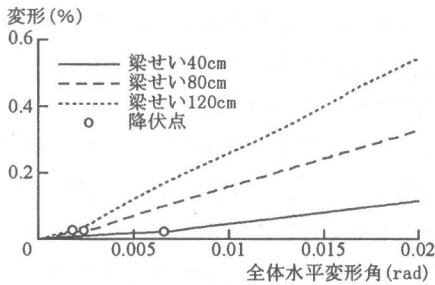


図-9 全体変形角と梁の軸方向変形の関係

体水平変形角 0.002rad までは柱と梁の幾何学的な関係からほぼ梁せいに比例して増大するが、その後、せいの比率よりずっと大きな割合で増大している。同図に示した引張鉄筋の降伏点からも明らかのように、梁せいが大きなモデルの方が引張鉄筋の降伏が早いのである。

### 5.3 スパン数による影響

梁せいが梁単体の軸方向変形量を支配するパラメータであったのに対し、スパン数は梁の軸方向変形量の蓄積を左右するパラメータと考えられる。図-10 は梁せいが 120cm でスパン数が異なるモデルについて全体水平変形角と 1 階のフレーム中央の柱と圧縮側外柱の水平変位の差（1 階圧縮側外柱の付加水平変位）を比較したものである。水平変位の差は、フレームを構成する各梁の軸方向変形が端部に向かい蓄積することを考慮すればスパン数にほぼ比例して増大することが予想されるが、解析結果はスパン数の比率よりは小さい割合でしか増大しないことを示している。

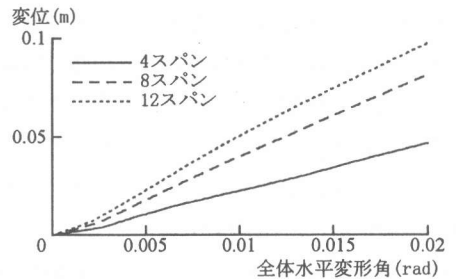


図-10 全体変形角と付加水平変位の関係

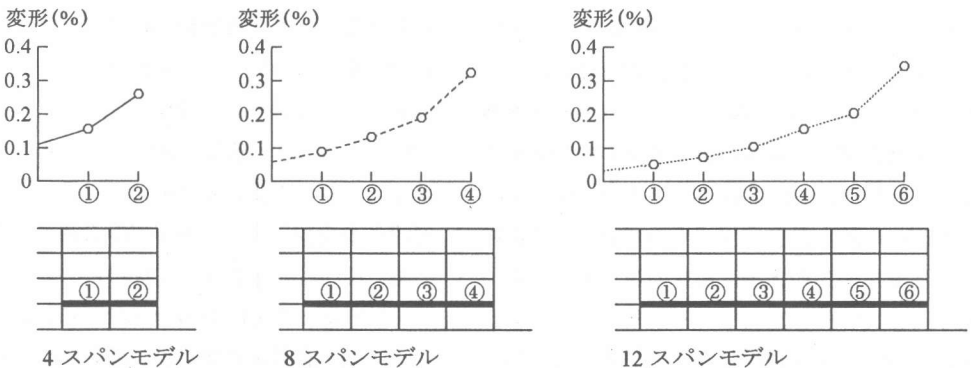


図-11 2階の梁の軸方向変形

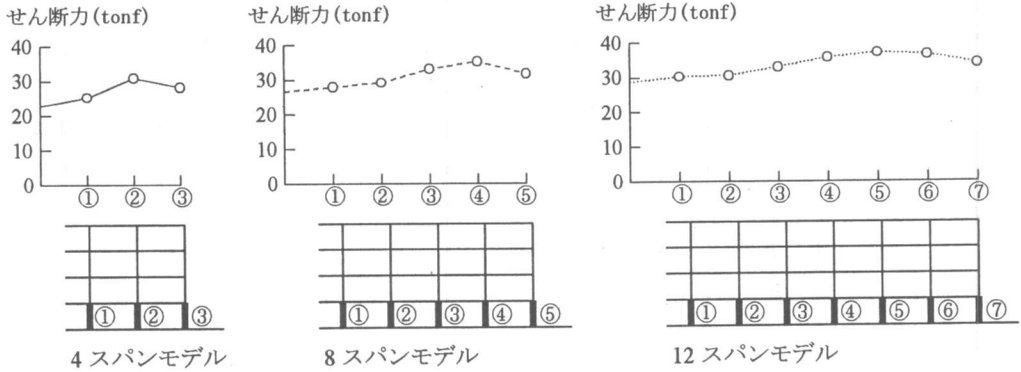


図-12 1階の柱のせん断力

図-11には各モデルについて全体水平変形角が0.01radのとき2階の中央から端部節点までを結ぶ梁の軸方向変形(梁の剛域を除いた長さに対する百分率で表記)を示した。とくにフレーム中央に位置する梁の変形量を比較すると、スパン数が多いモデルの方が少ないモデルよりも小さくなっていることがわかる。これは、多スパンモデルほどフレーム中央の梁の変形を拘束する力が大きいことを示しており、これが図-10で中央の柱と外柱の水平変位の差がスパン数の比率よりも小さくなったことと対応している。また、以上の結果からは梁の軸方向変形により節点に付加される水平変位を正しく評価するためには、建物の幾何学的な性状だけでなく、梁の変形に対するフレームの拘束力も考慮する必要があることがわかる。

図-12に図-11と同じ条件で1階中央の柱から圧縮側外柱までのせん断力を示した。図-10で示したように、各モデルの1階圧縮側外柱にそれぞれ付加される水平変位はスパン数の比率より小さいが、水平変位の絶対値は多スパンモデルの方が大きい。したがって、圧縮側外柱のせん断力も多スパンモデルの方が大きくなっており、たとえば12スパンモデルは4スパンモデルの約1.2倍程度になっている。柱に作用するせん断力の上昇は建物の耐力を正しく評価する上で非常に重要であり、スパン数による効果も無視できない重要な要素であることがわかる。

## 6. まとめ

梁の軸方向変形に着目した平面の静的骨組解析を行い、梁の軸方向変形が建物の応答、とくに柱のせん断力に与える影響について検討した。

既存建物を対象とした解析では、梁の軸方向変形を考慮する場合としない場合で建物の応答が大きく異なり、理想的な崩壊系を形成しなくなる可能性があることを示した。梁せいとスパン数をパラメータとした解析では、梁の軸方向変形量は梁せいの比率以上の割合で増大すること、スパン数は1階圧縮側外柱に付加される水平変位を増大させ、外柱のせん断力を上昇させる効果があることを示した。

本研究では問題を簡単化するためスラブの効果を見逃したが、スラブは柱のせん断力をさらに上昇させる恐れがある。スラブの効果については、モデル化を含め今後の課題と考えている。

## 参考文献

- 1) 滝口克己, 市之瀬敏勝: 鉄筋コンクリート梁の材長変化について, 日本建築学会中部支部研究報告集, pp.251-254, 1977.2
- 2) 和田 章, 林 静雄, 坂田弘安, 大谷晃弘: 繰返し水平力を受ける鉄筋コンクリート平面骨組模型の実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.417, pp.21-29, 1990.11
- 3) 周 通泉: 2方向地震力を受ける鉄筋コンクリート造立体骨組の弾塑性応答に関する研究, 横浜国立大学学位論文, 1990.12