

論文 変動軸力を受ける連層柱を持つ多スパン骨組の耐震性に関する研究

荒木秀夫*²・嶋津孝之*¹・寺岡 勝*³・前川俊哉*⁴

要旨：超高層ＲＣ造建物の地震時における最重要課題の一つは、外柱に発生する変動高軸力の問題である。そこで本論文は、高層ＲＣ造建物の下層部の力学的特性を模擬した３層２スパン骨組を用いて、側柱軸力を変化させた事による骨組全体の耐震性能を実験的に把握するとともに、それに解析的検討を加えた結果を報告するものである。

キーワード：高軸力，耐力低下，付加曲げ，骨組，解析的検討，復元力特性，崩壊形

１．はじめに

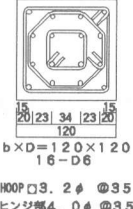
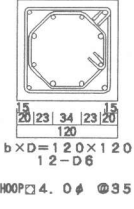
超高層鉄筋コンクリート造骨組の地震時における最重要課題の一つは、外柱に発生する変動高軸力の問題であり、これらが多スパン骨組内に組み込まれた場合、降伏から大変形領域までの骨組全体の耐震性能、特に降伏ヒンジの生成機構、復元力特性などについては未だ不明な点が多く、多層多スパンを対象とした検討が必要である。本研究はこれらの点を明らかにすることを目的としたもので、筆者等は文献[1],[2]に高層鉄筋コンクリート造（以下高層ＲＣ造）下層部の力学的性状を模擬した３層２スパン骨組を用いた基礎的実験の概要を述べてきた。本論文は側柱の変動軸力の最大値を更に上げた時の性能把握を目的とした実験結果並びに解析結果の検討である。

２．実験概要

２－１ 試験体

試験体は３０層の高層住宅試設計の最下層の両側２本の側柱と中柱を模擬した、ＲＣ造純フレーム構造３層２スパンの模型骨組２体である。両試験体は同形状同配筋であり表１に断面及び配筋を、図１に骨組寸法を示すが、各部材断面、階高およびスパンは約１／７縮尺となっている。

表１ 断面及び配筋

	側柱	中柱	梁
FRA-2、5	 $b \times D = 120 \times 120$ 16-D6 HOOP $\square$ 3, 2 ϕ Φ 35 (ヒンジ部 4, 0 ϕ Φ 35)	 $b \times D = 120 \times 120$ 12-D6 HOOP $\square$ 4, 0 ϕ Φ 35	 $b \times D = 90 \times 120$ 上端 4-D6 下端 4-D6 HOOP $\square$ 3, 2 ϕ Φ 45

単位：(mm)

２－２ 材料特性

コンクリート及び鉄筋の材料特性を表２、表３に示す。

表２ コンクリートの材料特性

試験体	圧縮強度 σ_c	割裂強度 σ_t	弾性係数 E_c * *1/3 σ_c 時
FRA-2	41.5	36.0	22.3
FRA-5	45.9	45.8	24.6

単位 σ (kgf/cm²) E_c (tonf/cm²)

２－３ 加力方法

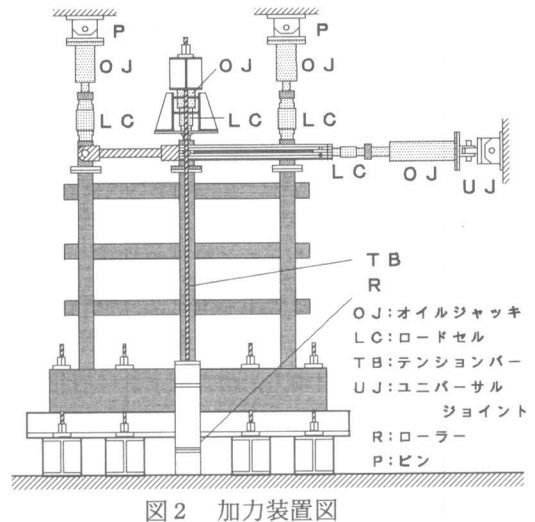
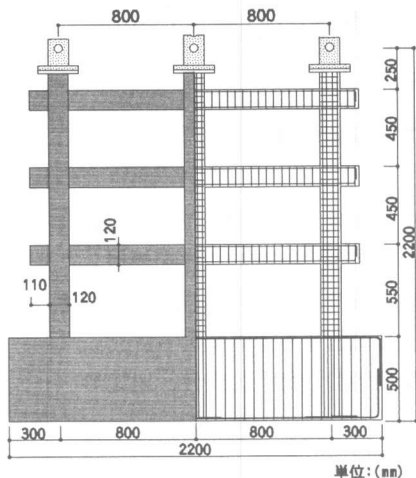
水平加力プログラムは文献[1]と同様で、正負交番繰り返し载荷としている。水平加力方法は図２に加力装置を示すにとどめる。

*1広島大学教授 工学部第四類、工博（正会員）

*2広島大学助教授 工学部第四類、工博（正会員）

*3(株)フジタ技術研究所建築研究部主席研究員、工修（正会員）

*4広島大学大学院 工学研究科構造工学専攻



鉛直加力プログラムは図3に示す通りである。最初に側柱には $N=0.20F_{cbD}$ 、中柱には $N=0.25F_{cbD}$ の一定軸力を加えた。なお本実験では $F_c=400\text{kg/cm}^2$ とした。中柱の場合、梁のせん断力によって発生する軸力は、両側の梁で相殺すると思え実験を通じてこの値($N=0.25F_{cbD}$)を維持した。両側柱は梁のせん断力による軸力変動を考慮して、FRA-2では $-0.15F_{cbD}$ から $0.65F_{cbD}$ まで変化させたが、FRA-5では側柱軸力をさらに増加させ $-0.18F_{cbD}$ から $0.80F_{cbD}$ まで変化させた。

表3 鉄筋の材料特性

鉄筋種類	降伏強度 σ_y	引張強度 σ_u
D 6 (FRA-2)	3. 4 5	5. 3 5
D 6 (FRA-5)	3. 8 9	5. 4 7
4. 0 ϕ	5. 3 8	5. 5 7
3. 2 ϕ	5. 6 6	5. 9 8

3. 実験結果

実験終了時のひび割れ性状をそれぞれ図4に示す。梁端部および柱脚部には完全な降伏ヒンジが形成された。高軸力のFRA-5はヒンジ発生箇所や全体的な傾向はFRA-2とほぼ同じであったが、各所でのひび割れを比較してみると、梁端部にひび割れが集中し、側柱のひび割れ数が多い傾向が見られる。又、接合部でのひび割れも低軸力のものに比べて激しいものであった。

3-2 復元力特性

図5に水平荷重－水平変位関係を示す。高軸力を受ける試験体FRA-5はFRA-2と同じく水平変形角 $1/100\text{rad}$ あたりに剛性が大きく低下し、骨組全体で梁降伏の崩壊機構が実現したと考えられる。水平変形角 $1/50\text{rad}$ 付近で最大耐力に達している。その後、徐々に耐力が低下し始める。耐力低下度合はFRA-2に比べ幾分大きい。しかし、水平変形角 $1/20\text{rad}$ を超えてもなお安定した紡錘形の復元力特性を有している。文献 [3] の連層側柱単体の実験では、圧縮側で水平変形角 $1/30\text{rad}$ で $P-\Delta$ 効果によってほぼ水平耐力が 0 となっているのに比べ、本実験のような骨組全体としてみた場合、このような高軸力になっても十分な耐震性能を有していることが分かる。

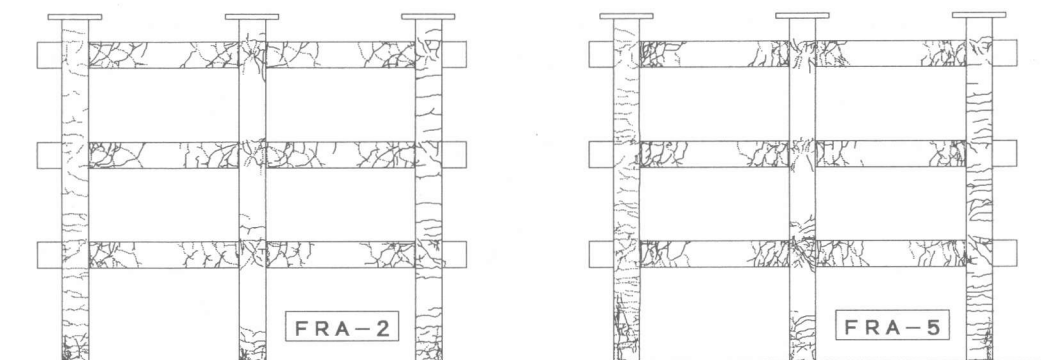


図4 ひび割れ性状

3-3 変形形状

図6に变形形状を示す。両試験体ともほぼ同じ変形形状を示している。幾分ラーメン型ではあるがほぼ均等な層間変形である。

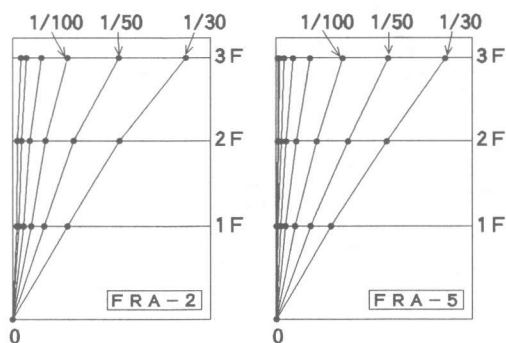


図6 変形形状

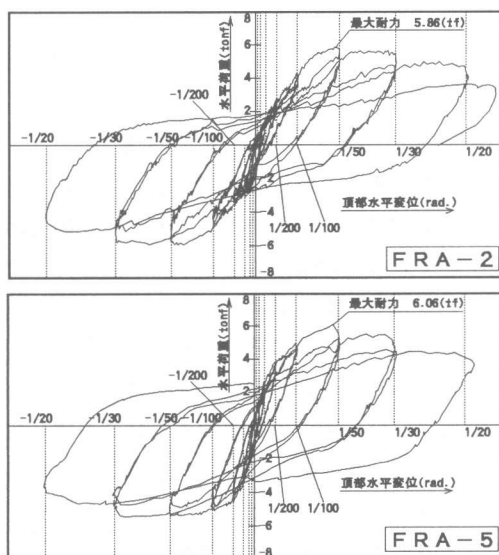


図5 水平荷重-水平変位関係

4. 解析の概要

数値解析は、図7に示す柱・梁を線材としたモデルについて、部材の軸力変動に伴う剛性変化および、曲げ耐力の増減や、座屈現象を含む有限変形を考慮した井上らの提案による、一般化硬化ヒンジ法[4]により行った。即ち、部材の弾性剛性を安定関数[5]の増分式を用いて評価し、塑性域での部材剛性評価には塑性流れ則を用いた一般化塑性ヒンジ法[6]に、Pragerの硬化則[7]にZieglerの修正[8]を加えた移動硬化則を導入した一般化硬化ヒンジ法により数値解析を行った。

数値解析は、実験加力プログラムと同様、所定の一定軸力を加えた後、実験の最大圧縮軸力、または最大引張軸力を水平変形角 $1/100\text{rad.}$ まで8段階で分割して与えた。

水平力は各柱に均等に加わるようにして増分解析を行った。数値解析に用いた柱および梁の剛

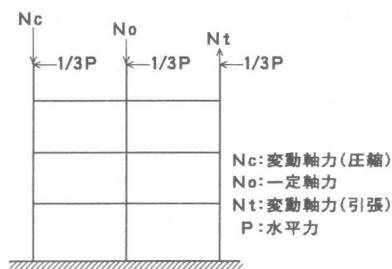


図7 解析モデル

性、耐力などの仮定の詳細を図8に示す。梁については主筋に用いたD6は明確な降伏点がなく、降伏後も耐力が上昇し続けるため、ほぼ終局の引張強度に達しているものとして、建築学会略算式で求めた梁筋の強度を1.5倍したものをを用いている。又、剛性低下率は一律1/3を用いた。柱は横拘束による耐力上昇も考慮したe関数法を用いてモデル化した。

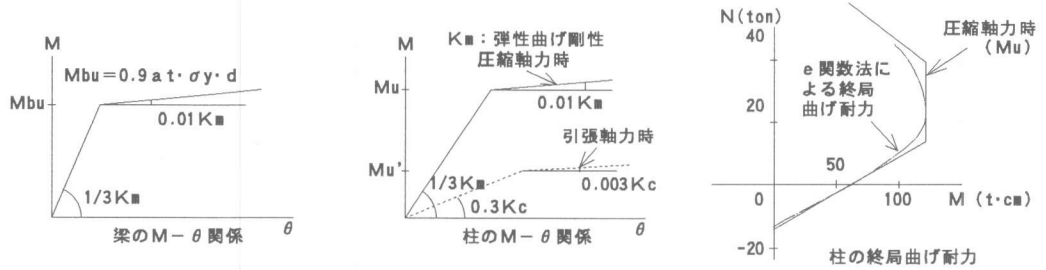


図8 解析に用いた剛性、耐力などの仮定

5. 部分架構の力学的挙動の検討

5-1 包絡線の解析値と実験値との比較

図9に包絡線の解析値と実験値との比較を示す。初期状態においては段階的に水平力、鉛直力を交互に加えているため、変形が進展しないのに耐力が下がる傾向が見られるが、両試験体とも最大耐力はほぼ一致している。また、最大耐力以降の耐力低下も鉛直力による付加曲げの影響を受ける様子もほぼ追跡していることが分かる。初期剛性における相違は部材骨格曲線をバイリニア型にしたためで、ひび割れも考慮したトリリニア型にすることによって解決すると考えられる。

5-2 内部応力に関する解析的検討

実験が正負交番繰返し载荷であるのに対し解析は単調载荷であるが、解析値は実験値をほぼ追跡しており、以下に解析値によって部材内部の応力性状について検討する。

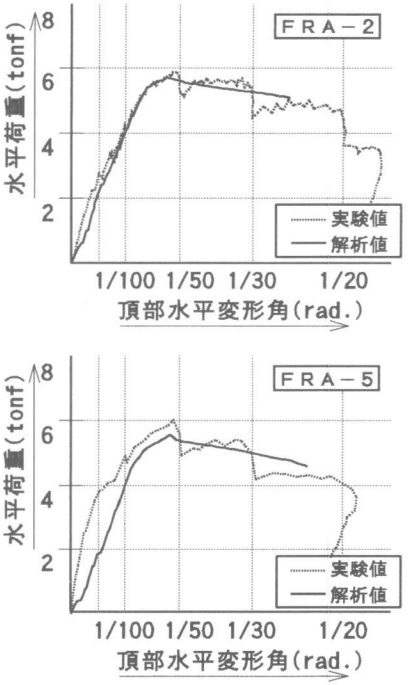


図9 包絡線の比較

(1) 各柱の水平力分担

図10に各最下層柱の水平力分担の推移を示す。圧縮側柱は両試験体とも最大値を記録した後、低下し続けて分担率は0となる。しかし、高軸力のFRA-5の方がFRA-2に比べ早期に低下し始め、変形角1/30rad.で分担率が0となることが分かる。この結果は側柱のみを取り出した文献[3]の実験結果とほぼ一致していた。中柱は両試験体とも1/100rad.以降ほぼ一定値となるが、引張側柱は増加し続ける。圧縮側柱の耐力低下が骨組全体の挙動に影響を与えていると思われるが、引張側柱の耐力が上昇するためその量は相対的に小さくなる。中柱と引張側柱については、高軸力のものと低軸力のものの相違はあまりなかった。

(2) モーメント分布

図11にモーメント図を示す。梁材の場合、両端にヒンジが形成されるため両試験体ともほぼ材中央に反曲点がある。一方、柱材の場合、上層部ではほぼ材中央に反曲点を持っているのに対し、圧縮側柱の下層部になるほど反曲点が柱頭に近づく傾向がある。両試験体のモーメント分布における違いは最終時まであまり見られなかった。

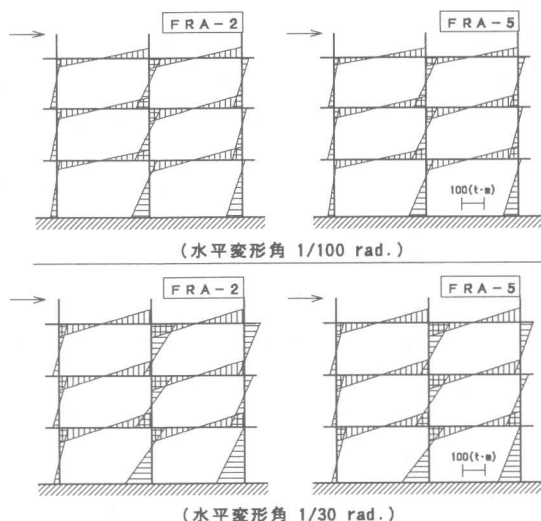


図11 モーメント図

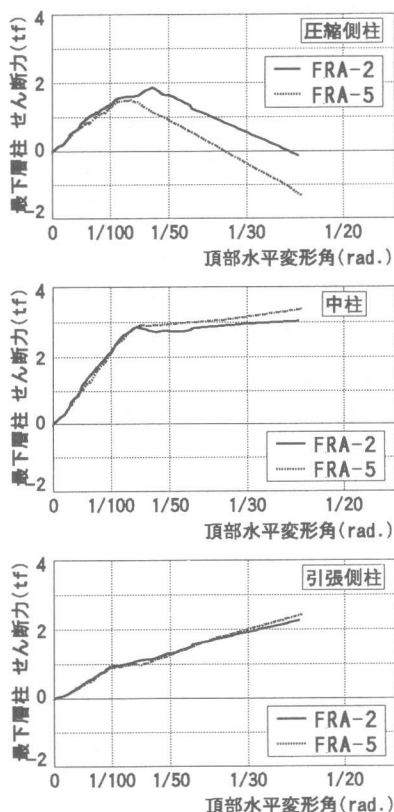


図10 各柱の水平力分担

(3) 梁せん断力

ここでは、梁部材内部応力の一例として、1層における両側の梁のせん断力-変形角関係を図12に示す。変形角 1/100rad. ではほぼ降伏する。変形角1/50rad. くらいまでは引張側柱の負担するモーメントは小さいので、引張側柱側に接続する左側梁左端では降伏ヒンジの発生が右側の梁端より遅れる傾向がある。変形が進むにつれて梁の両端に降伏ヒンジが形成されると一定値に収束する。

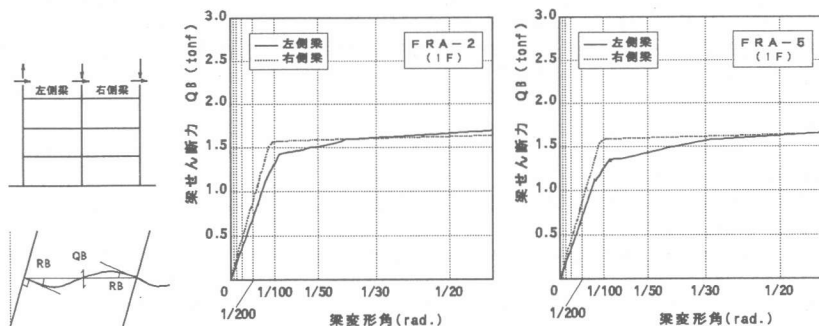


図12 梁のせん断力-変形角関係

(4) 柱の反曲点高比

図13にモーメントから求められる柱の反曲点高比の推移を示す。反曲点の移動の大きい1層柱について例示する。変形が進むにつれて梁端および柱脚に塑性ヒンジが生成し、梁降伏の崩壊機構が形成されるまではほぼ一定値で推移する。更に変形が進み崩壊機構が実現するあたりから、圧縮側柱では増加し、その後緩やかに1に近づく。つまり、柱頭に反曲点が移動する。一方、中柱は一端上昇するが、その後減少し部材中央付近になる。引張側柱では変形の増加と共に減少する。これらの傾向は両試験体ともほぼ同じであった。このように、反曲点高比が変形と共に移動するためせん断強度算定には今後検討を要する。

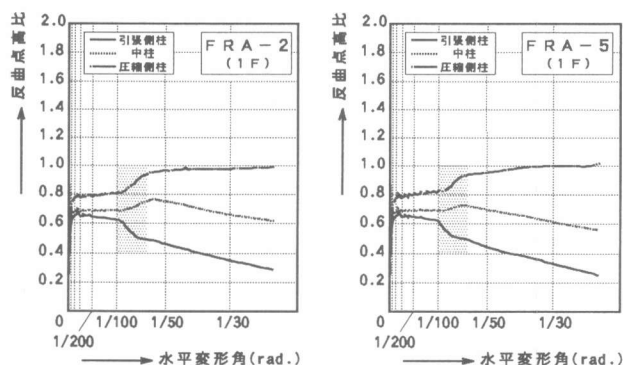
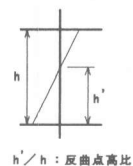


図13 柱の反曲点高比

6. まとめ

高層RC造建物下層部を模擬した縮小骨組を用いた実験を行い、以下のことが明らかとなった。

- 1) 高軸力を受けることによって梁端部や中柱接合部等のひび割れは多くなった。
- 2) 高軸力を受けても、復元力特性は耐力低下が幾分大きいものの全体的には安定していた。

又、高さ方向の変形形状も大きな相違は見られなかった。

同骨組の力学的モデルを用いた解析的検討を行い、大変形領域まではほぼ追跡した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 荷重-変形関係について実験値と比較し、よい一致を見た。
- 2) 最下層柱における水平力分担の推移を明らかにした。
- 3) モーメント分布についても検討し、柱の反曲点高比の推移を明らかにした。

【謝辞】

本研究の一部は(株)フジタ技術研究所からの委託研究である。関係各位に感謝致します。本実験的研究を遂行するにあたり、広島大学文部技官京泉敬太氏、同学院生張冠華、山床仁志、松本孝治、大原晋二の諸君に多大の協力を得た。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 荒木秀夫・嶋津孝之・寺岡勝ほか：超高層RC建物下層部架構の抵抗挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.2、pp.1283-1288、1994
- 2) 山床仁志、嶋津孝之、荒木秀夫、ほか：変動軸力を受ける連層柱を持つ多スパン骨組の抵抗能力に関する研究、第9回日本地震工学シンポジウム、Vol.2、pp.1441-1446、1994.12
- 3) 寺岡勝・狩野芳一ほか：RC造高層骨組下層階柱部部分架構の耐震性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.15、No.2、pp.1137-1142、1993
- 4) K.Inoue and K.Ogawa : Nonlinear Analysis of Strain Hardening Frames Subjected to Variable Repeated Loading ,Technology Reports of Osaka Univ.,No.1222, pp.763-781
- 5) S.A.Saafan : NONLINEAR BEHAVIOR OF STRUCTURAL PLANE FRAMES, Proc. ASCE, No. ST4, pp.557-579, Aug., 1963
- 6) K.E.Bruinette and S.J.Fenves : A General Formulation of the Elasto-Plastic Analysis of Frameworks, Int. Conf. on Space Structures, Univ. of Surrey, pp.92-108, 1966
- 7) W.Prager : The Theory of Plasticity : A Survey of Recent Achievements, Proc. Inst. Mech. Engineering, Vol.199, pp.41-57, 1955
- 8) H.Ziegler : A Modification of Prager's Hardening Rule, Q. Appl. Math. Vol.17, No1, pp.55-65