

巨大地震に対する超高層建物の動的応答における下層部変形集中現象 その 1 純ラーメン骨組(魚骨フレームモデル)の応答

正会員 ○荒木 慶一*¹ 同 西本 篤史*²
同 上野 泰永*² 同 岡山 真之介*³
同 金 紋廷*⁴ 同 上谷 宏二*⁵

巨大地震 超高層 動的応答
変形集中現象 ドリフト現象 幾何非線形

1. 序

今後高い確率で発生すると予測されている M8 クラスの東海・東南海・南海などの海洋型巨大地震では、東京・名古屋・大阪などの大都市圏において超高層建築物などの長周期構造物に長時間の大きな揺れが生じる危険性が指摘されている[1,2]。これらの地震動に対しては、梁降伏型に設計された骨組であっても、梁の降伏後に下層部に弓型たわみが発生し、最終的には柱に塑性化が生じて崩壊に至る危険性が指摘されている[3,4]。

この現象は変形集中現象と呼ばれ[5-7]、等価骨組の座屈固有値解析に基づく発生メカニズムの検討と予測式が提案されている。しかし、これらは静的載荷時における予測理論に基づいており、動的解析との比較により一定の妥当性は示されているものの、動的挙動を理論的に説明するには十分でない面が残る。また解析モデルも魚骨モデルなど比較的単純なモデルに限定されており、近年、多数建設されるようになった制振ブレース付骨組における変形集中現象の検討も行われていない。

そこで本研究では、超高層骨組の変形集中現象について様々な角度から分析・考察を行い、その結果をふまえて超高層建物の耐震安全性についての私見を述べる。その 1 では、魚骨フレームモデルを対象に、幾何非線形性の考慮の有無により応答の差異が顕著に現れた解析例を示す。その 2 では、その 1 と同一の解析モデルを用いて、振動固有値解析に基づき下層部変形集中現象の発生メカニズムの検討を行う。その 3 では制振ブレース付骨組を対象に、フルフレームモデルを用いて下層部変形集中現象の検討を行う。その 4 では、これらの研究成果を踏まえて、超高層建物における耐震安全性に関する私見を述べる。

2. 解析モデル

2.1 概要

- ・[概要] 40 層鋼構造魚骨モデル(固有周期 4.5 秒)
- ・[柱復元力特性] 1 層柱脚は完全弾塑性、他は弾性保持
- ・[梁復元力特性] 梁による曲げ抵抗をバイリニアの回転バネに置換(硬化係数 $\alpha=0.010$)
- ・[断面] モデルの断面を表 1、表 2 に示す。

2.2 設計クライテリア等

- ・[一次設計] A_i 分布($C_0=0.3$, $T=0.025H$, 2 種地盤)
 - (1) 最大層間変形角 $<1/200$, (2) 全部材弾性
- ・[二次設計] $PGV=50\text{cm/s}$ に増幅した標準 3 波(EI Centro NS, Taft EW, Hachinohe NS)
 - (1) 最大層間変形角 $<1/100$, (2) 柱弾性
- ・階の高さは 4m, 梁のスパン長は左右 6m×奥手前 9m
- ・単位面積当り床荷重を 10kN/m^2 とする(柱 1 本負担分→ $6\times 9\times 10=540\text{kN/m}^2\rightarrow 500\text{kN}$ で近似)
- ・梁降伏型の骨組とするため柱梁耐力比 >1.5
- ・柱は溶接組立箱形断面、梁は H 形断面であり、全部材で 490N/mm^2 級の鋼材を用いる
- ・常時荷重による柱軸力比 <0.45
- ・全部材が FA ランク
- ・ヤング係数 $E=205\text{ kN/mm}^2$ とし、降伏応力 $\sigma_y=325\times 1.1=357.5\text{N/mm}^2$ とする。せん断変形は無視する。部材の横座屈、局部座屈、破断は考慮しない
- ・合成梁効果として、RC 床スラブによる曲げ剛性の増加のみ評価し、1.5 倍とする。耐力の増加は考慮しない
- ・設計時は幾何非線形効果を考慮しない

3. 静的増分解析

A_i 分布比例載荷で最大層間変形角が $1/75$ に至るまで変位制御静的増分解析を行った結果を図 1 に示す。塑性化後剛性が、幾何非線形無視の場合には正、考慮の場合には負になっている。したがって幾何非線形を考慮した場合、ドリフト現象の発生が予想される。今回行った動的解析では、さらに変形集中現象も発生した。なお、図中 ○ は振動固有値 Ω が初めて負になった瞬間を表し、これは剛性が負になる瞬間と一致している。

表 1 柱断面

STORY	SECTION	A, cm^2	I, cm^4	Z_p, cm^3
40	□-550×22	464.6	216,000	9,210
37~39	□-550×22	464.6	216,000	9,210
34~36	□-550×25	525.0	242,000	10,300
31~33	□-550×28	584.6	266,000	11,500
28~30	□-550×32	663.0	298,000	12,900
25~27	□-550×36	740.2	328,000	14,300
22~24	□-600×32	727.0	392,000	15,500
18~21	□-600×36	812.2	432,000	17,200
15~17	□-600×40	896.0	471,000	18,600
13~15	□-600×45	999.0	516,000	20,800
10~12	□-600×50	1,100	559,000	22,800
7~9	□-600×55	1,199	600,000	24,600
4~6	□-600×60	1,296	638,000	26,400
1~3	□-600×60	1,296	638,000	26,400

表 2 梁断面

STORY	SECTION	I, cm^4	Z_p, cm^3
40	H-600×250×12×19	99,100	3,750
37~39	H-600×250×12×19	99,100	3,750
34~36	H-600×250×12×19	119,000	4,160
31~33	H-600×250×12×15	145,000	5,030
28~30	H-650×250×16×28	165,000	5,810
25~27	H-700×300×14×25	206,000	6,630
22~24	H-700×300×16×28	228,000	7,390
19~21	H-700×300×16×28	228,000	7,390
16~18	H-800×300×16×22	261,000	7,520
13~15	H-800×300×16×22	261,000	7,520
10~12	H-800×300×16×22	261,000	7,520
7~9	H-800×300×16×25	285,000	8,170
4~6	H-800×300×16×25	285,000	8,170
1~3	H-800×300×16×25	285,000	8,170

Deformation Concentration in Lower Stories in Dynamic Response of High-Rise Buildings to Huge Earthquakes: Part I Response of MRFs

ARAKI Yoshikazu, NISHIMOTO Atsushi, UENO Yasunori
OKAYAMA Shinnosuke, KIM Moonjeong, UETANI Koji

4. 動的応答解析

4.1 入力地震動

- ・[地震動概要] 想定南海地震により西大阪地区で発生する予測長周期地震動, KK-WOS EW 波[1,2] (図 2)
- ・[継続時間] 297 秒 ・[卓越周期] 4.7 秒
- ・[PGV] 25Kine, ・[PGA] 68Gal

4.2 解析設定等

- ・[使用プログラム] オリジナル(MATLAB 利用)
- ・[運動方程式解法] Newmark- β 法 ($\beta=1/4$)+Newton 法
- ・[弾塑性問題の解法] 1 次元 Return-Mapping 法
- ・[1 ステップ当たりの Δt] 1/500 秒
- ・[幾何非線形効果] 無視&考慮

4.3 解析結果

幾何非線形無視の解析と幾何非線形考慮の解析における層間変形角応答の比較を図 3 に示す。幾何非線形無視の解析では、地震波を最後(297 秒)まで入力しても柱が弾性範囲内かつ最大層間変形角が 1/100 以下に収まった。これに対して幾何非線形考慮の解析では、132 秒の時点で柱が塑性化し、層間変形角は 1/20 を超えていた。詳しくはその 2 で述べるが、これは単なるドリフト現象ではなく、変形集中現象が同時に発生した例である。132 秒時点における幾何非線形無視時・考慮時の応答比較を図 4 に示す。各図について以下説明を加える。

- ・[柱変形図] 黒丸：その階の梁端は弾性，白丸：その階の梁端は塑性負荷，グレー色実線：その時刻までに経験した最大変位，破線：水平変位 1.6m(骨組高さ(160m)の 1/100 を表す目安)
- ・[柱モーメント図] 内側の実線：その時刻における柱モーメント，2 番目の実線：その時刻までに経験した柱最大モーメント，外側の実線：柱の全塑性モーメント
- ・[注] なお，図 2 にも 132 秒時点に縦線を記入している

図 4 を見ると，幾何非線形無視の場合には骨組全体が同程度の変形で振動しているのに対し，幾何非線形考慮の場合には 1-15 層あたりで変形集中が生じている。

5. 結

想定南海地震に基づく長周期地震動を 40 層魚骨モデルに入力すると下層部変形集中現象が発生した。幾何非線形効果は無視した解析では柱弾性かつ最大層間変形角 1/100 以下であったのに対し，幾何非線形効果を考慮した解析では柱が降伏し最大層間変形角が 1/20 を超えた。本解析結果は，超高層建物の耐震安全性を時刻歴応答解析により検証する際に，幾何非線形効果を考慮することの重要性を示唆している。

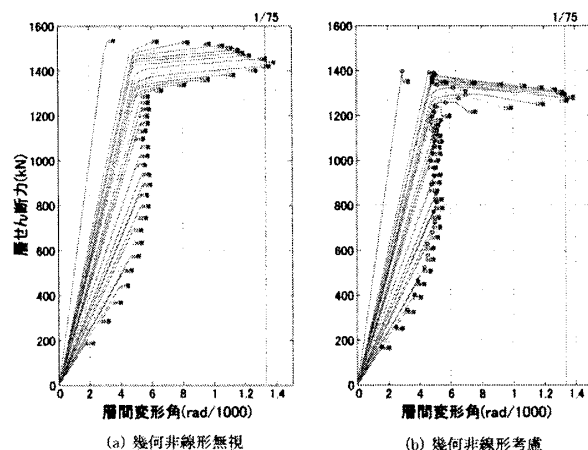


図 1 静的増分解析結果

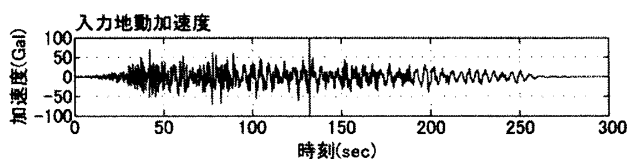


図 2 KK-WOS EW 波(縦線は 132 秒時点)

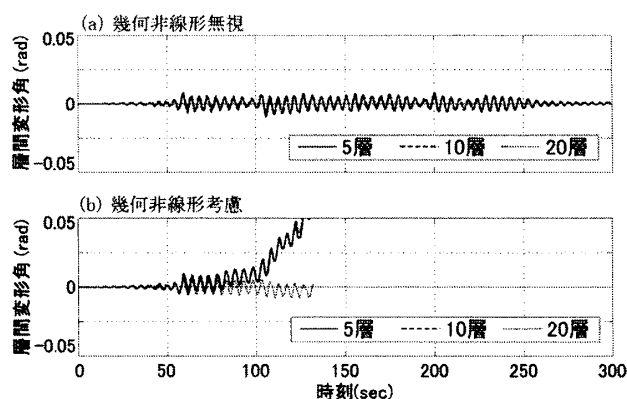


図 3 層間変形角応答

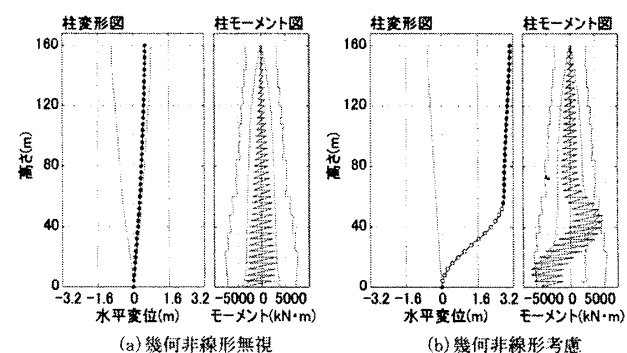


図 4 柱変形・柱モーメント(132 秒時点)

*1 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 准教授・博士(工学)

*2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 修士課程

*3 大成建設 設計本部

*4 国立防災研究所(韓国) 博士(工学)

*5 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工学博士

*1 Associate Prof., Dept. Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.

*2 Graduate Student, Dept. Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.

*3 Design Dept., Taisei Corporation

*4 National Institute for Disaster Prevention (Korea), Dr. Eng.

*5 Prof., Dept. Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr.Eng.