

## P- $\Delta$ 効果を考慮した質点系による超高層建築物の地震応答解析

岡崎 汐里\*, 永野 康行\*\*, 荒木 慶一\*\*\*, 辻岡 静雄\*\*\*\*

### Earthquake Response Analysis for High-Rise Building considered P-Delta Effect

Shiori OKAZAKI, Yasuyuki NAGANO, Yoshikazu ARAKI and Shizuo TSUZIOKA

We study the influence P- $\Delta$  effect on the dynamic response of 20 story steel frames under extreme earthquake ground motions. In this paper, we perform nonlinear time-history analyses lumped mass system models having different design base shear.

Keywords: P-Delta effect, great earthquake, high-rise building, structural design, lumped mass system model

#### 1. はじめに

P- $\Delta$  効果とは、水平力と鉛直荷重を同時にかけるときに考慮される効果で、水平力によって発生する水平方向の変位と軸力の組み合わせにより追加モーメントが発生することである。P- $\Delta$  効果を考慮した場合、通常では水平力による水平方向変位は微小なので、軸方向耐力の低下は無視することが出来るが、特殊な場合、例えば、柱が長い場合や巨大地震により水平変位が大きい場合、当然、軸方向耐力の低下も無視できなくなる。

山崎と遠藤は、P- $\Delta$  効果による歪エネルギーのひとつの方向への偏りおよび塑性率の増加減少を推定するための指標として安定比（安定比とは振動系の特性と入力の大きさを含む指標）を導入し、その有効性を1質点系および多質点系モデルに対する弾塑性応答解析により検証している<sup>1)</sup>。石鍋らは、P- $\Delta$  効果を考慮することにより、P- $\Delta$  バネの負の剛性分だけ、構造物の剛性が低下するが、この剛性の低下を完全弾塑性系に復元力特性を限定することで、1質点系による解析的検討を実施している<sup>2)</sup>。曾我と小高は、復元力特性に対するP- $\Delta$  効果のメカニズムをエネルギー応答の立場から考察し、P- $\Delta$  による最大応答変位の増大率に対する推定式を提案している<sup>3)</sup>。秋山は、P- $\Delta$  効果を考慮することによるせん断型骨組の所要強度の割増率を明らかにしている<sup>4)</sup>。金らは、既存超高層建物の代表例としてフレームモデルの非線形時刻歴応答解析により、P- $\Delta$  効果が巨大地震を受ける超高層建物の動的応答に及ぼす影響を検討している<sup>5)</sup>。

本論文では、金らが解析対象としたフレームモデル<sup>5)</sup>を、計算負荷を低減するため縮約されたモデルの質点系モデルに置換する。この簡易なモデルを対象に、非線形時刻歴応答解析により、P- $\Delta$  効果が巨大地震時における超高層建物の動的応答にどのような影響を及ぼすかを検討する。

---

\*建設工学専攻，\*\*兵庫県立大学，\*\*\*京都大学，\*\*\*\*建築学科

## 2. 超高層建物の静的解析

本章では、汎用構造解析プログラム MIDAS/Gen Ver7.80 を用いて、既往の研究<sup>5)</sup>で使用されている3種類の既存超高層建物のフレームモデルの静的増分解析を、P- $\Delta$ 効果を考慮しない場合と考慮した場合の2ケースを行う。ここでは、MIDAS/Gen の P- $\Delta$ 効果を考慮した構造解析機能を使用している。P- $\Delta$ 効果を考慮する場合は、与えられた荷重系に対して静的解析を行った後、各要素に発生する断面力及び応力度を用いて幾何剛性マトリックスを構成し、幾何剛性マトリックスと弾性剛性マトリックスとを組み合わせられた剛性マトリックスから、収束条件を満足するまで解析を繰り返して解を求めている。

### 2.1 解析モデルの概要

解析モデルは20層3スパン平面骨組を解析対象とする。構面内のスパン長は均等で9.6m、構面直行方向のスパン長は6.4mとする。1階の高さを5m、その他の階高を4m、軒高を81mとする。単位面積当り床荷重を7.84kN/m<sup>2</sup>として層重量を算定した。各モデルは既往の研究<sup>5)</sup>より、モデルAが既存超高層建物の固有周期と設計用ベースシア係数の分布中最も固有周期が長い建物、モデルCが分布中平均の建物、モデルBがモデルAとCの中間の建物になる。図1にモデル建物の形状寸法を示す。表1に内柱の断面一覧、表2に外柱断面一覧、表3に梁断面一覧を示す。

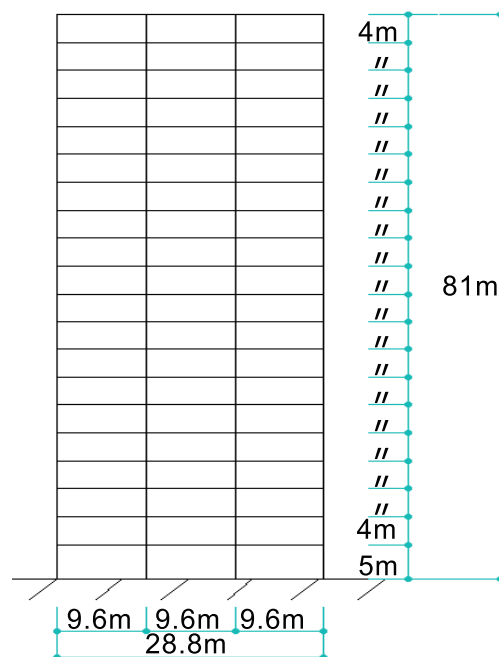


図1 建物モデル

表1 内柱断面一覧

FL	Model A	Model B	Model C
19-20	□-500×22	□-550×25	□-600×28
16-18	□-500×28	□-550×28	□-600×28
13-15	□-550×22	□-550×36	□-600×36
10-12	□-550×28	□-550×36	□-600×40
7-9	□-550×32	□-600×36	□-600×45
4-6	□-550×36	□-600×36	□-600×45
1-3	□-550×36	□-600×40	□-600×50

表2 外柱断面一覧

FL	Model A	Model B	Model C
19-20	□-500×22	□-550×25	□-600×28
16-18	□-500×28	□-550×28	□-600×28
13-15	□-550×22	□-550×32	□-600×36
10-12	□-550×28	□-550×36	□-600×40
7-9	□-550×28	□-600×32	□-600×45
4-6	□-550×32	□-600×32	□-600×45
1-3	□-550×32	□-600×32	□-600×45

表3 梁断面一覧

FL	Model A	Model B	Model C
19-20	H-550×250×12×28	H-650×300×16×25	H-850×300×16×25
16-18	H-550×250×12×28	H-700×300×16×28	H-850×300×16×25
13-15	H-650×300×16×22	H-750×300×16×25	H-900×300×19×25
10-12	H-650×300×16×28	H-850×300×16×25	H-950×300×19×28
7-9	H-700×300×14×25	H-850×300×16×28	H-1000×300×19×28
4-6	H-750×300×14×25	H-850×300×16×28	H-1000×300×19×28
1-3	H-750×300×14×25	H-850×300×16×28	H-1000×300×19×28

1 次設計では、層間変形角の制限値を  $1/200$  として、近似  $A_i$  分布に基づく許容応力度設計を行う。地震力の設定には略算固有周期  $T (=0.03H=2.43s)$  を用いている。ここで、 $H$  は建物高さ ( $=81m$ ) である。

層水平力の求め方として、初めに、1 階の層せん断力をベースシア係数に総重量を乗じることで算定する。各モデルのベースシア係数は標準せん断力係数に振動特性係数を乗じることで設定した。2 階から 20 階は 1 階の層せん断力に各階の  $A_i$  分布を乗じることで求めた。層水平力は層せん断力と 1 つ上の層せん断力の差で求める。表 4 に各モデルの固有周期、ベースシア係数、標準せん断力係数を示す。

表 4 固有周期，ベースシア係数，標準せん断力係数

Model	固有周期 (s)	ベースシア係数	標準せん断力係数
A	3.06	0.08	0.2
B	2.56	0.12	0.3
C	2.18	0.16	0.4

## 2.2 静的増分解析

静的増分解析では、日本建築学会の鋼構造設計規準に従うが、梁の横座屈は考慮せず、幅厚比の検討はしないことにした。最上階の水平変位について 500 ステップの増分解析を行った。解析結果の層せん断力—層間変位の関係より、傾き  $K_1$  と  $K_2$  の直線の交点 ( $\delta_1$ ,  $Q_1$ ) を設定することで、バイ・リニア型モデルを設定した。設定したバイ・リニア型モデルから地震応答解析に必要な第 2 分枝剛性比  $\alpha_1 (=K_2 / K_1)$  を算定する。図 2 にバイ・リニア型モデルの層せん断力—層間変位の関係、図 3 にその復元力特性を示す。ここで、 $K_1$  は初期剛性、 $K_2$  は 2 次剛性、 $\delta_1$  は弾性限変位、 $Q_1$  は弾性限変位時の層せん断力を示す。

## 3. 地震応答解析

### 3.1 解析モデルの概要

フレームモデルを基礎固定の 20 質点系モデルに置換した。図 4 に質点系モデルを示す。

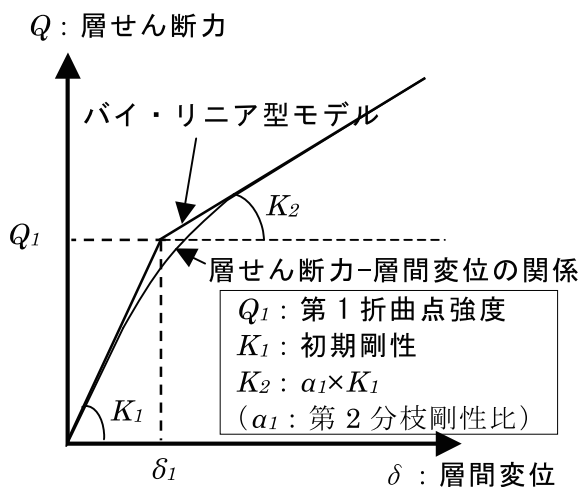


図 2 バイ・リニア型モデル

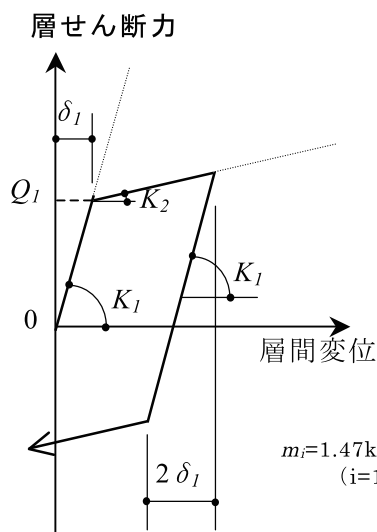


図 3 復元力特性

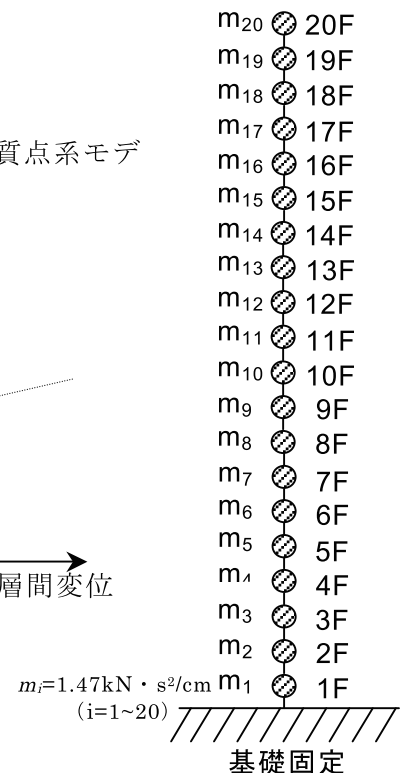


図 4 質点系モデル

表5～表7にP- $\Delta$ 効果を考慮しない場合（without P- $\Delta$ ），P- $\Delta$ 効果を考慮する場合（with P- $\Delta$ ）の各モデル（Model A, Model B, Model C）の解析諸元を示す。

表5 Model A 解析諸元

階数	without P- $\Delta$			with P- $\Delta$		
	$\alpha_1$	$Q_1$ (kN)	$K_1$ (kN/cm)	$\alpha_1$	$Q_1$ (kN)	$K_1$ (kN/cm)
20	0.34	1084	430	0.52	994	421
19	0.21	1561	486	0.22	1554	476
18	0.16	1832	540	0.15	1927	527
17	0.13	2173	573	0.13	2184	556
16	0.12	2435	647	0.12	2408	627
15	0.11	2613	738	0.11	2625	714
14	0.10	2793	767	0.11	2810	741
13	0.10	2989	812	0.10	2977	782
12	0.09	3112	910	0.10	3125	876
11	0.09	3199	932	0.10	3215	895
10	0.09	3360	961	0.10	3259	921
9	0.09	3282	1012	0.09	3352	968
8	0.09	3387	1036	0.09	3463	989
7	0.09	3450	1091	0.09	3466	1039
6	0.08	3617	1185	0.09	3522	1129
5	0.08	3628	1210	0.08	3808	1151
4	0.08	3678	1230	0.09	3694	1169
3	0.08	3747	1255	0.09	3732	1189
2	0.08	3913	1288	0.09	3863	1219
1	0.07	3977	1292	0.08	4003	1226

表6 Model B 解析諸元

階数	without P- $\Delta$			with P- $\Delta$		
	$\alpha_1$	$Q_1$ (kN)	$K_1$ (kN/cm)	$\alpha_1$	$Q_1$ (kN)	$K_1$ (kN/cm)
20	0.53	1527	616	0.54	1552	607
19	0.26	2423	752	0.27	2434	741
18	0.19	2898	863	0.17	2998	848
17	0.16	3099	914	0.15	3235	897
16	0.15	2985	964	0.13	3369	945
15	0.11	3607	1062	0.12	3613	1038
14	0.11	3748	1101	0.11	3873	1075
13	0.11	3995	1191	0.11	4011	1161
12	0.10	4237	1297	0.11	4250	1263
11	0.10	4309	1331	0.1	4389	1295
10	0.10	4527	1381	0.11	4480	1341
9	0.10	4563	1587	0.10	4546	1542
8	0.10	4617	1623	0.10	4612	1576
7	0.09	4740	1652	0.10	4687	1601
6	0.09	4830	1619	0.09	4775	1565
5	0.09	4898	1647	0.09	4830	1590
4	0.08	5057	1682	0.09	4880	1621
3	0.08	4942	1755	0.09	5038	1689
2	0.08	5119	1809	0.09	5067	1740
1	0.07	5336	1794	0.08	5323	1728

表 7 Model C 解析諸元

階数	without P- $\Delta$			with P- $\Delta$		
	$\alpha_1$	$Q_1$ (kN)	$K_1$ (kN/cm)	$\alpha_1$	$Q_1$ (kN)	$K_1$ (kN/cm)
20	0.71	1737	964	0.58	2081	953
19	0.30	3337	1151	0.31	3341	1139
18	0.22	3866	1254	0.20	4040	1239
17	0.15	4414	1325	0.15	4425	1308
16	0.12	4698	1395	0.13	4597	1375
15	0.11	4869	1554	0.12	4875	1530
14	0.11	5156	1609	0.11	5058	1582
13	0.11	5368	1709	0.11	5372	1679
12	0.10	5594	1863	0.10	5673	1828
11	0.10	5905	1915	0.10	5828	1877
10	0.10	6084	1999	0.10	6045	1958
9	0.09	6118	2151	0.10	6138	2106
8	0.09	6308	2198	0.09	6216	2150
7	0.09	6517	2239	0.09	6283	2187
6	0.08	6540	2281	0.09	6589	2226
5	0.08	6570	2326	0.09	6590	2267
4	0.11	6629	2376	0.08	6588	2313
3	0.10	6669	2481	0.08	6685	2414
2	0.08	6846	2543	0.08	6903	2472
1	0.07	7266	2418	0.07	7132	2352

### 3.2 弾塑性型モデルの地震応答解析

3.1 節で設定した表 5～7 に示す力学特性を持つせん断型構造物に対して、時刻歴応答解析を行った。構造物の減衰は剛性比例型とし、1 次の減衰定数は 0.02 を採用した。地震応答解析における入力地震動は、観測地震波 3 波（El Centro 1940 NS, Taft 1952 EW, Hachinohe 1968 NS ; 最大速度振幅 100cm/s）とした。なお、解析アルゴリズムは Newmark- $\beta$  法 ( $\beta=1/6$ ) を用いた。

巨大地震時を想定し、入力地震動の最大速度振幅は 100cm/s で基準化している。上記の観測地震波 3 波を入力地震動として採用した理由は、超高層建築物の設計用入力地震動として採用された実施例が多くあるためである。El Centro 1940 NS の最大加速度は 2,044cm/s<sup>2</sup>, Taft 1952 EW の最大加速度は 1,992cm/s<sup>2</sup>, Hachinohe 1968 NS の最大加速度は 1,320cm/s<sup>2</sup>である。

#### (1) フレームモデルと質点系モデルの比較

図 5 にフレームモデルと P- $\Delta$  効果を考慮した場合（with P- $\Delta$ ）の質点系モデルとの最大層間変形角の比較を示す。

質点系モデルはフレームモデルを正確に再現することは出来ていないが、層間変形角応答の傾向はある程度表現できていると言える。

(2) P- $\Delta$  効果の考慮の有無による応答結果の比較

図 6 に P- $\Delta$  効果を考慮しない場合 (without P- $\Delta$ ) と P- $\Delta$  効果を考慮する場合 (with P- $\Delta$ ) の最大層間変形角を示す。

P- $\Delta$  効果を考慮しない場合と P- $\Delta$  を考慮する場合の層間変形角応答は、本解析の範囲内では傾向にそう大きな違いは見受けられない。これは、弾性限変位以降の 2 次勾配がそれほど小さくなかったためと考えられる。

(3) 入力地震動の変化時の比較

入力地震動のレベルの変化の影響を調べるため、25cm/s、50cm/s、100cm/s、150cm/s にそれぞれ基準化した。図 7 に最大層間変形角、図 8 に最大層せん断力を示す。

各地震波共 50cm/s までは最大層間変位角はほぼ一様と見なせ、最大層せん断力も第 1 折曲点強度以下となっている。100、150cm/s では上層部と下層部に変形集中が見られ、層せん断力も大きくなっている。この傾向は Model A で著しい。これは、第 2 分枝剛性が小さいため等と考えられる。

(4) 第 2 分枝剛性比の変化時の比較

図 9 に P- $\Delta$  効果を考慮した時の第 2 分枝剛性比を仮に元のもの ( $\alpha_1$ ) の 1/10、1/100、1/1000 にした最大層間変形角の比較を示す。

仮に P- $\Delta$  を考慮する場合の 2 次勾配を小さめに变化させた場合の層間変形角応答から、設定値の 1/10 の 2 次勾配を採用した場合では、特に下層階において変形増大が見受けられた。

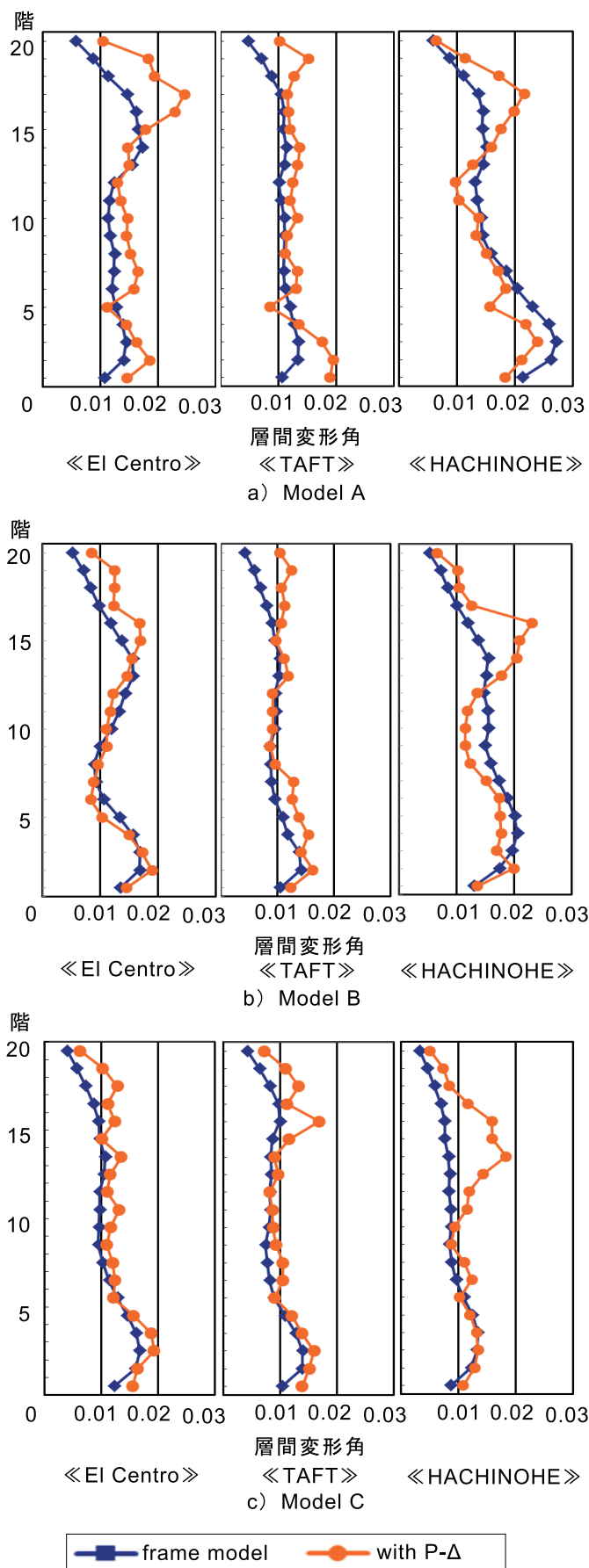


図 5 最大層間変形角応答 (解析モデルの影響)



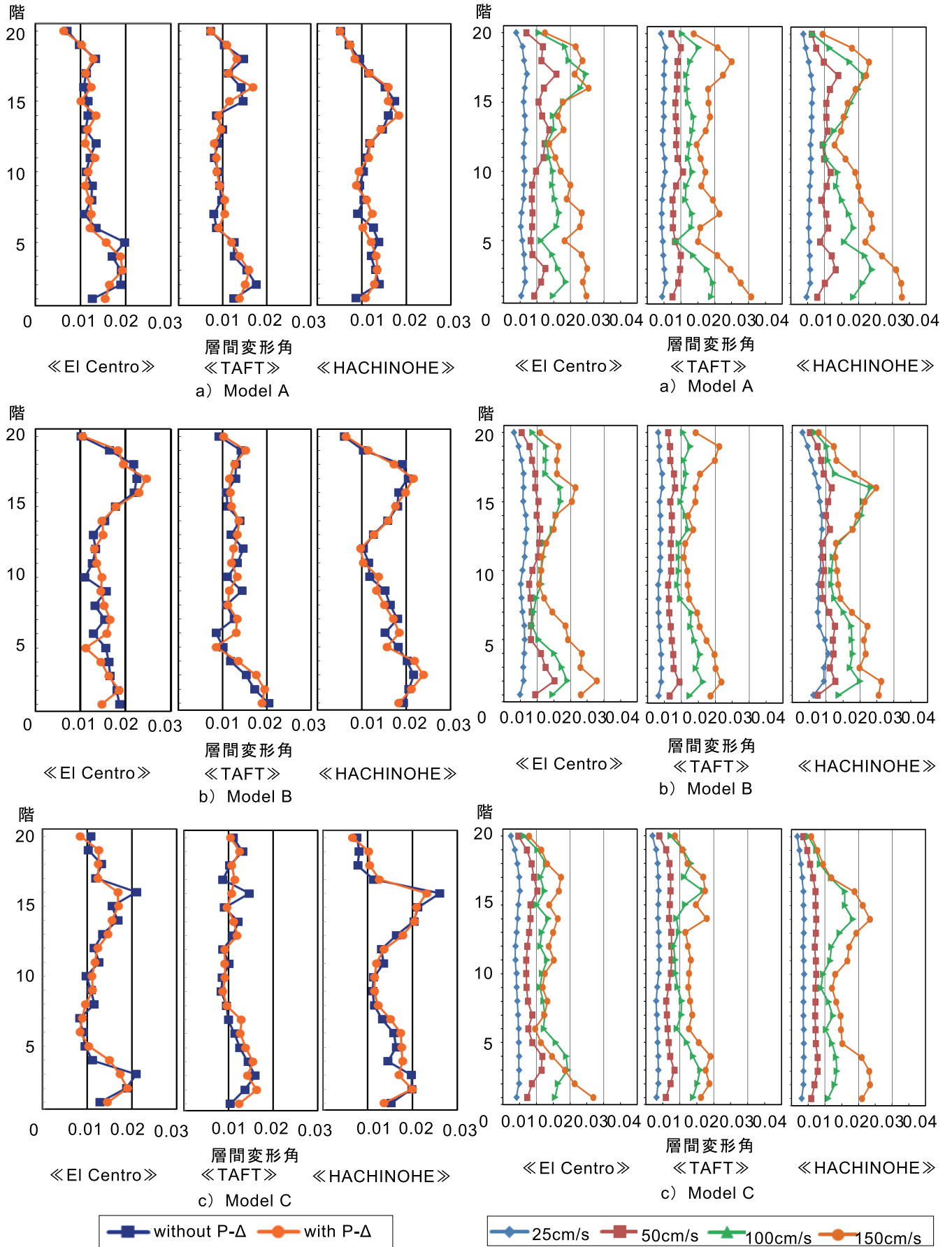


図6 最大層間変形角応答 (P- $\Delta$ 効果の有無) 図7 最大層間変形角応答 (入力地震動レベルの影響)

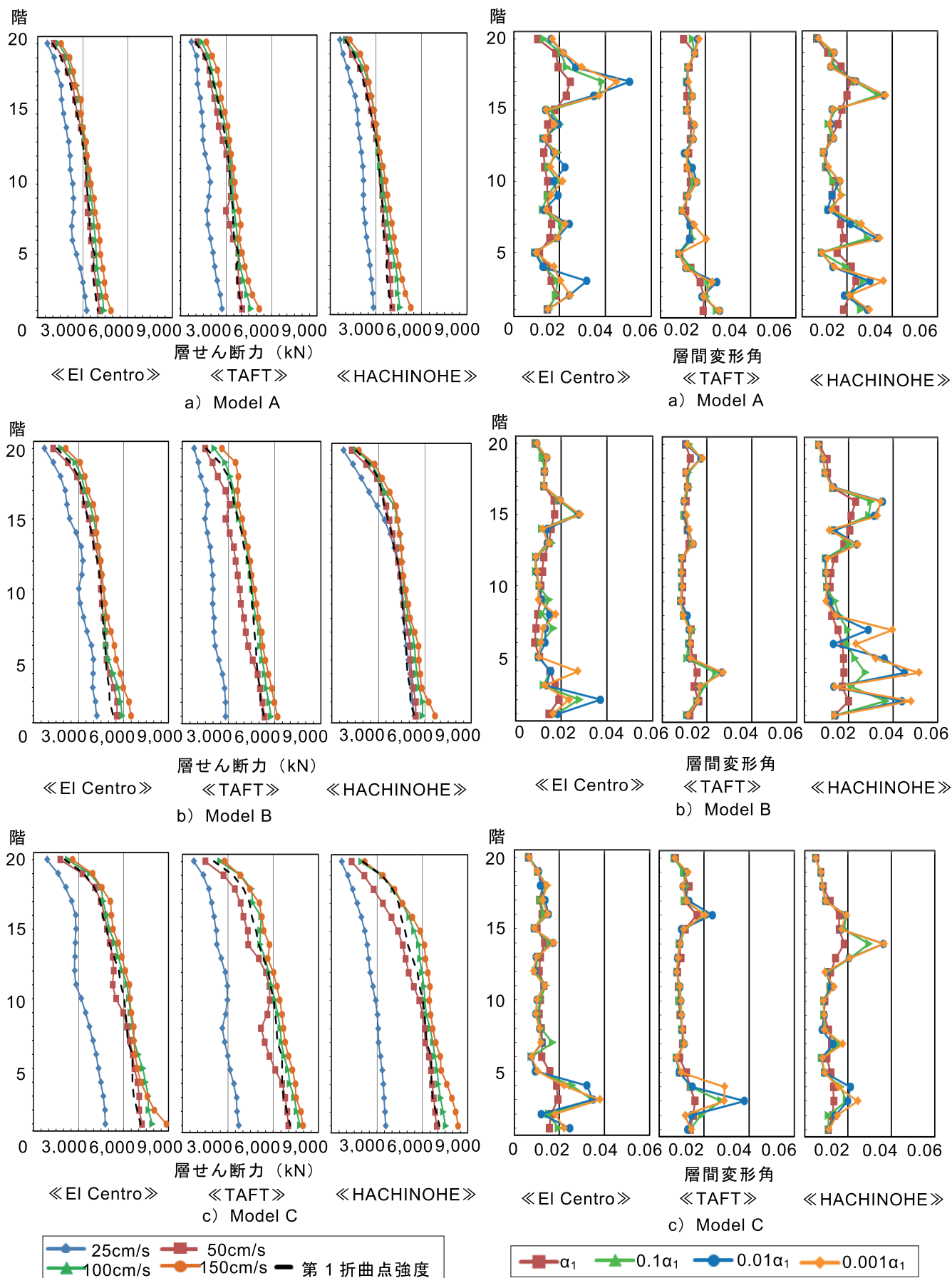


図 8 最大層せん断力応答（入力地震動レベルの影響） 図 9 最大層間変形角応答（第 2 分枝剛性比の影響）



#### 4. 結論

本論文では、金ら<sup>5)</sup>が設定した鋼構造純ラーメン 20 層 3 スパン平面骨組の既存超高層建物を元に、その静的増分解から質点系モデルを作成し、巨大地震（最大速度振幅を 100cm/s に基準化）時における地震応答解析を行った。その結果から P- $\Delta$  効果を考慮しない場合と P- $\Delta$  効果を考慮した場合の層間変形角を比較した。

本論文で得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 層間変形角応答に P- $\Delta$  効果の影響は小さい。
- 2) 層間変形角応答において、入力地震動レベルが 100cm/s 以上では上層部と下層に変形増大がある。
- 3) 復元力特性の第 2 分枝勾配を 1/10 以上とする場合には層間変形角応答において、下層部に変位増大が生じる。

以上、モデルの応答解析結果に P- $\Delta$  効果の影響は少なく、入力地震動レベルおよび第 2 分枝剛性等の影響を大きく受けることがわかった。

**謝辞** 本研究は、平成 22 年度科学研究費補助金基盤研究（B）課題番号：20360254（代表：京都大学大学院 教授 上谷宏二）により実施した。本論文の解析では、平成 22 年度福井工業大学 永野研究室卒研究生（現 大江観光株式会社）山口拓臣氏の協力を得た。ここに記し謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 山崎真司，遠藤和明：弾塑性地震応答における P- $\Delta$  効果と安定比，日本建築学会構造系論文集，第 527 号，pp.71-78，2000.1
- 2) 石鍋雄一郎，半貫敏夫，秋山宏：地震下における骨組の変形応答に及ぼす P- $\Delta$  効果の影響，日本建築学会構造系論文集，第 559 号，pp.79-83，2002.9
- 3) 曾我部博之，小高昭夫：強震を受ける弾塑性質点系の P- $\Delta$  効果について，日本建築学会論文集，第 463 号，pp.19-26，1994.9
- 4) 秋山宏：P- $\delta$  効果を考慮したせん断型多層骨組の耐震設計，日本建築学会構造系論文集，第 617 号，pp.87-94，2007.7
- 5) 金紋延，荒木慶一，山川誠，田川浩，五十子幸樹：極大地震動に対する超高層純ラーメン鋼構造建物の動的応答に及ぼす P- $\Delta$  効果の影響，日本建築学会構造系論文集，第 644 号，pp.1861-1868，2009.10

（平成 24 年 3 月 31 日受理）