

高機能社会における都市部に立地する一般中高層建物の耐震性能評価

Seismic Performance Evaluation of Medium Rise Buildings in High Performance Urban City

2. 構造・2. 振動
高機能社会 入力地震動 SRモデル
耐震性能 一般建物 非線形性

正会員 ○彦坂 智基*
正会員 曾我 裕**
正会員 福和 伸夫***
正会員 護 雅史****

HIKOSAKA Tomoki
SOGA Yutaka
FUKUWA Nobuo
MORI Masafumi

1. はじめに

1944年東南海地震、1946年南海地震以降、都市部はめまぐるしく発展し、これまでにない高機能社会となっている。我々はこれまで、地震被害に学んで安全な建物を世に輩出すべく法律を変え、技術を発展させてきた。

しかし、現代のような高機能社会において、「地震被害経験を活かす」というスタンスでは、被害が起きた時点で持続不可能な社会となってしまうことが想像できる。

現在、いわゆる地震の静穏期は終わりに近づき、活動期に入りつつあるという見方もある。東海地域に暮らす我々にとっては、東海・東南海地震に対する減災対策が逼迫した問題であり、この地震からこの地域を守るためには、まず、現存する建物の耐震安全性を再度確認していく必要がある。

本研究は、いわゆる許容応力度設計法に従い設計された、一般中高層建物の巨大地震に対する耐震安全性について、上部建物、表層地盤の非線形性や、地盤との動的相互作用効果を考慮した地震応答解析を実施する。

解析の流れとしては、(1)工学的基盤深さにおける地震動を作成する。(2)対象とする地点における地盤物性値を用いて、1次元重複反射理論に基づく等価線形解析を行い、基礎底深さにおける入力地震動を作成する。(3)得られた等価地盤物性値を用いて相互作用解析を行い、対象建物に対する動的地盤ばねを計算する。(4)解析モデルを多質点系のSRモデルとして、上部構造物に対する地震応答解析を行う。最後に、応答解析の結果について、その性状を比較検討する。

2. 対象建物・地盤概要

2.1 建物概要

検討対象とする建物は、地上14階、地下1階の高さ60m級のS造ラーメン構造物(以下60mモデル)と、地上8階、地下1階の高さ30m級のS造ラーメン構造物(以下30mモデル)の2通りを対象とする。図1に60mモデルの軸組図を、図2に基準階伏図を示す。また、30mモデルも60mモデルと同様の架構である。

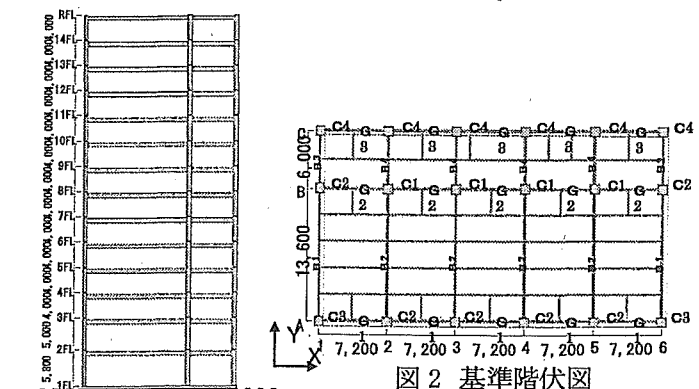


図1 60mモデル軸組図

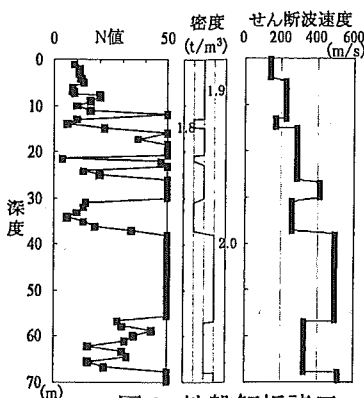


図3 地盤解析諸元

表1 HDモデルのパラメータ

土質	厚さ(m)	$r_{as}(\%)$	$h_{max}(\%)$
砂	2.0	0.05	22.0
砂	5.0	0.07	21.0
砂	10.0	0.08	21.0
砂	12.9	0.12	21.0
粘土	14.8	0.19	17.0
砂	18.0	0.12	21.0
砂	20.7	0.16	19.0
粘土	28.0	0.18	17.0
砂	30.0	0.16	19.0
粘土	37.15	0.18	17.0
砂	43.0	0.07	11.2
砂	50.0	0.08	11.2
砂	58.7	0.09	11.2
砂	67.8	0.16	19.0

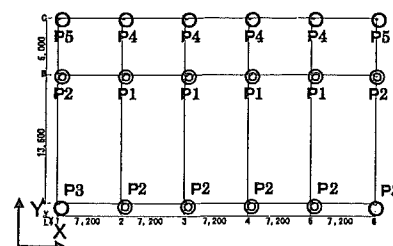


図4 杭基礎概要

杭記号	杭径()内は先端径(mm)
P1	2000(2800)
P2	2000(2200)
P3	1900
P4	1700
P5	1500

(a) 60mモデル杭詳細

杭記号	杭径()内は先端径(mm)
P1	2000(2200)
P2	1800
P3	1600
P4	1300
P5	1100

(b) 30mモデル杭詳細

* 名古屋大学大学院環境学研究科・大学院生
** 竹中工務店 設計部
*** 名古屋大学大学院環境学研究科・教授・工博
**** 名古屋大学大学院環境学研究科・准教授・博士(工学)

Graduate Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.
Building Design Department, Takenaka Corporation.
Prof., Graduate, School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Graduate, School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

2.2 地盤・基礎概要

建設対象地は、名古屋市内の伏見地区とし、その表層地盤は、主に熱田層上部に相当する。図3に地盤の解析諸元を、図4に基礎（杭基礎）の概要を示す。60mモデルの杭長は32mであり、基礎の根入れ深さとあわせ、支持層はGL-39.6の礫層である。30mモデルの杭長は20.8mであり、支持層はGL-27.6mとなっている。

また、地盤の非線形性を考慮するため、土質とその拘束圧に応じた動変形特性をHDモデルとして評価し、 G/G_0 、及び $h-\gamma$ 曲線を表1により与える。砂質土と粘性土については、東京、神奈川、大阪の各エリアにおける試験結果より得られた評価式¹⁾を用い、礫質土は内田らによる評価式²⁾を用いて基準せん断歪み $\gamma_{0.5}$ 、最大減衰定数 h_{max} を設定した。また、減衰定数の下限値は2%としており、今回、砂質土、礫質土については拘束圧を考慮しているが、粘性土に関して、塑性指数は平均値を用いている。

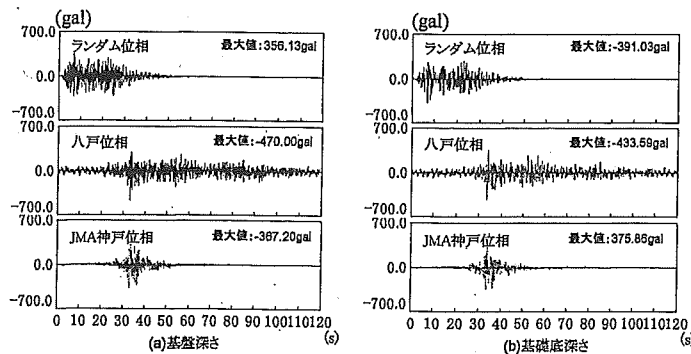


図5 入力地震動の加速度波形

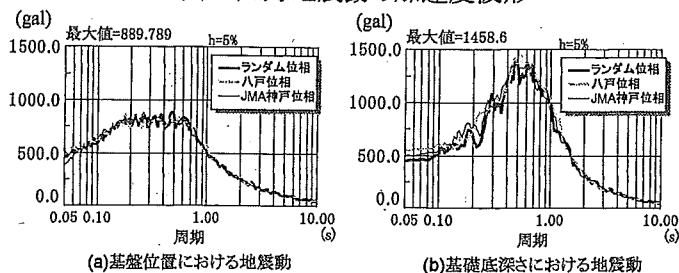


図6 入力地震動の加速度応答スペクトル

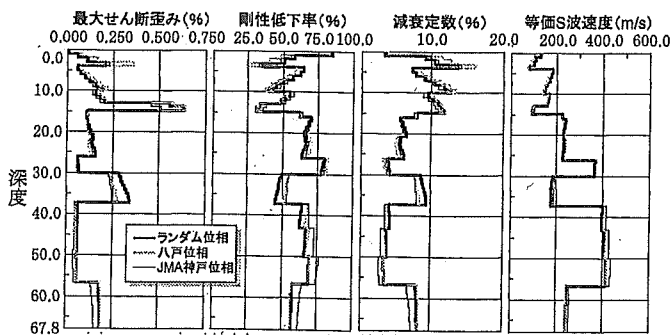


図7 地盤の応答解析結果

3. 地震応答解析モデル

3.1 入力地震動

今回用いる入力地震動には、建設省告示に基づき、極めて稀に発生する地震動の加速度応答スペクトルに対して、フィッティングするよう作成した3波（ランダム位相、八戸位相、JMA神戸位相）を使用したものを工学的基盤位置（GL-67.8m）に入力し、1次元重複反射理論に基づく等価線形解析（SHAKE）により計算された、基礎底深さにおける波形を用いる。ランダム位相を用いる際には、Jenningsによる、M8相当の包絡関数形を用いた。

図5に工学的基盤における地震動と基礎底深さにおける入力地震動、図6に両者の加速度応答スペクトルを示す。また、地盤の応答解析結果を図7に示す。これらは同程度の応答結果となっており、最大で0.6%程度のせん断歪みが生じている。

3.2 上部構造応答モデル

上部構造は、各階の重量を質点に集約した多質点系の等価せん断型のモデルで表現した。図8に解析モデルの概要を示す。今回、建物の復元力特性をNormal-Tri-Linearで与え、骨格曲線は静的増分解析より得られた結果を基に、図9に示す形で近似した。表2に各建物モデルの諸元を示す。また、地下部は剛体としてモデル化している。

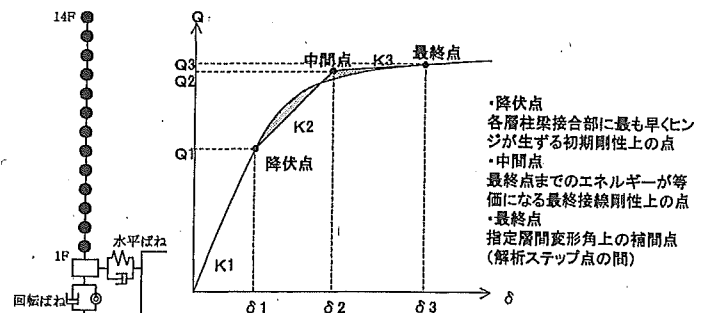


図8 解析モデル

図9 骨格曲線の設定法

表2 上部構造解析諸元

(a) 60mモデル

階	高さ (m)	階高 (m)	X方向						Y方向					
			強度(kN)	Q1	Q2	Q3	変位(mm)		強度(kN)	Q1	Q2	Q3	変位(mm)	
14	8790.13	400.0	6163	6199	6199	1.46	1.68	6.33	4785	5896	6063	1.77	2.41	5.33
13	8210.95	400.0	7013	7379	7501	1.43	2.01	6.33	5181	7110	7354	1.75	2.74	5.33
12	8200.47	400.0	7895	9232	9451	1.70	2.32	6.33	6580	8795	9032	2.01	3.17	5.33
11	8210.07	400.0	8326	10755	10950	1.88	2.72	6.33	7218	9927	10282	2.08	3.18	5.33
10	8235.94	400.0	8997	11724	12141	1.83	2.77	6.33	7844	10822	11224	2.13	3.26	5.33
9	8235.94	400.0	10291	12448	12847	1.84	2.75	6.33	8488	11670	12048	2.21	3.54	5.33
8	8253.98	400.0	10284	13108	13616	1.88	2.74	6.33	8254	12420	12789	2.26	3.61	5.33
7	8272.89	400.0	11130	13882	14207	1.87	2.81	6.33	9897	13110	13482	2.32	3.77	5.33
6	8278.08	400.0	11780	14563	14747	2.04	2.89	6.33	10475	13728	14098	2.39	3.89	5.33
5	8280.04	400.0	11850	14566	14928	2.02	2.83	6.33	10971	14229	14712	2.38	3.84	5.33
4	8287.39	400.0	12301	15054	15713	2.05	3.05	6.33	11397	14661	15245	2.33	3.78	5.33
3	8284.74	400.0	12867	15499	16268	2.09	3.14	6.33	11727	15445	16111	2.29	3.84	5.33
2	8478.24	600.0	12859	16338	17213	2.41	3.80	6.67	11997	16749	17564	2.48	4.20	5.67
1	8203.40	680.0	14787	19188	19828	1.84	4.88	7.73	16249	19234	20113	2.09	4.43	7.59
地下部	42328.20	780.0												

(b) 30mモデル

階	高さ (m)	階高 (m)	X方向						Y方向					
			強度(kN)	Q1	Q2	Q3	変位(mm)		強度(kN)	Q1	Q2	Q3	変位(mm)	
9	8599.09	380.0	5491	5809	5909	1.32	2.52	5.07	4507	5609	5888	1.87	2.41	5.07
7	8222.28	380.0	7822	8360	8380	2.21	4.15	5.07	6180	8324	8489	2.31	3.38	5.07
6	8063.75	380.0	7840	8858	10125	2.40	3.43	5.07	7824	10361	10442	2.74	3.94	5.07
5	8125.11	380.0	8595	11142	11530	2.24	3.28	5.07	8214	12005	12121	2.59	3.81	5.07
4	8140.89	380.0	8873	12168	12708	2.39	3.41	5.07	10118	13022	13336	2.75	4.11	5.07
3	8148.33	380.0	10544	13262	13820	2.24	3.21	5.07	8858	13895	14380	2.35	3.80	5.07
2	8184.20	380.0	11221	14538	16178	2.23	3.28	5.07	10481	14709	15319	2.37	3.85	5.07
1	8548.07	430.0	12601	16269	18407	1.81	2.74	5.73	12271	16393	18528	1.87	3.35	5.73
地下部	39024.00	880.0												

3.3 地盤ばね

等価線形解析時に用いた地盤物性値を用いて、薄層要素法と有限要素法を、容積法を用いた動的サブストラクチャー法によって結合した文らによる手法³⁾により、動的地盤ばねを計算する。このとき、3波それぞれによる等価S波速度、等価減衰定数の平均値を用いた。用いた等価地盤物性を、図10に示す。なお、図中には点線で初期値も同時に示している。

図11に、60mモデルにおける動的地盤ばねの計算結果を例として示す。動的地盤ばねは、振動数依存の複素数

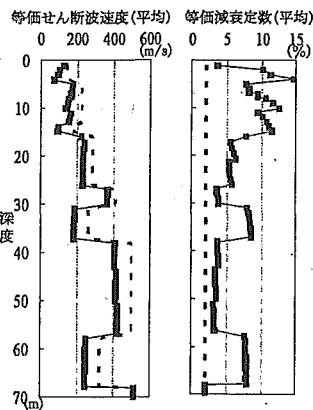


図10 等価地盤物性の平均値

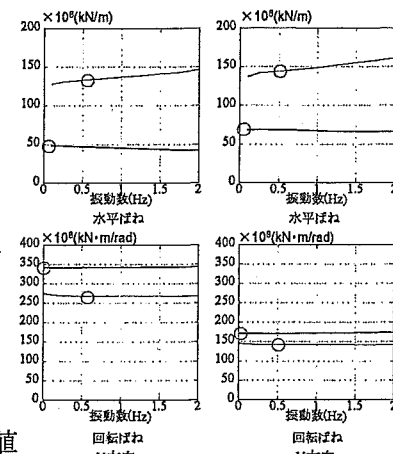


図11 動的地盤ばね計算例
(60mモデル)

表3 地盤ばね定数一覧

(a) 60mモデル

X方向(1次固有振動数 0.55Hz)	
水平ばね定数 (kN/m)	4.91×10^7
水平減衰定数 (kN·s/m)	3.86×10^7
回転ばね定数 (kN·m/rad)	3.41×10^{10}
回転減衰定数 (kN·m·s/rad)	7.75×10^9
Y方向(1次固有振動数 0.50Hz)	
水平ばね定数 (kN/m)	7.06×10^7
水平減衰定数 (kN·s/m)	4.59×10^7
回転ばね定数 (kN·m/rad)	1.71×10^{10}
回転減衰定数 (kN·m·s/rad)	4.53×10^9

(b) 30mモデル

X方向(1次固有振動数 0.85Hz)	
水平ばね定数 (kN/m)	4.82×10^7
水平減衰定数 (kN·s/m)	2.71×10^7
回転ばね定数 (kN·m/rad)	3.13×10^{10}
回転減衰定数 (kN·m·s/rad)	4.80×10^9
Y方向(1次固有振動数 0.80Hz)	
水平ばね定数 (kN/m)	6.92×10^7
水平減衰定数 (kN·s/m)	2.89×10^7
回転ばね定数 (kN·m/rad)	1.51×10^{10}
回転減衰定数 (kN·m·s/rad)	2.67×10^9

表4 各モデルの固有振動数

モデル	方向	振動モデル	1次(Hz)	2次(Hz)
60mモデル	X方向	基礎固定モデル	0.56	1.60
		SRモデル	0.56	1.60
	Y方向	基礎固定モデル	0.50	1.39
		SRモデル	0.50	1.39
30mモデル	X方向	基礎固定モデル	0.84	2.32
		SRモデル	0.84	2.32
	Y方向	基礎固定モデル	0.79	2.17
		SRモデル	0.79	2.17

で表現され、図中では太線が実部、細線が虚部を示している。SRモデルにおいては、実部の静的な値を地盤ばね剛性、1次固有振動数における虚部の傾きを減衰係数として用いる。今回、建物の1次固有振動数は、基礎固定系における値を用いた。また、定数化に用いる値を、図中○印で示している。モデル毎の各定数を、表3に示す。

4. 地震応答解析結果

前章で作成した入力地震動、地盤ばねを用いて上部建物に対する時刻歴応答解析を行う。各モデルにおける固有振動数を表4に示す。今回の解析事例では、振動モデルをSRモデルにすることにおける固有振動数の変化はみられなかった。

4.1 層間変形角、塑性率の比較

ここでは、層間変形角、塑性率の観点から、建物応答を評価する。60mモデルにおける応答解析結果を図12に、30mモデルにおける応答解析結果を図13に示す。なお、図中において、点線白抜きの図形は基礎固定モデルにおける応答結果を示している。

60mモデルにおいては、低層部で最大層間変形角が1/80、塑性率は2~3程度となっており、建物に大きな損傷を与えている可能性はあるが、倒壊するほどの応答には至っていないと考えられる。

しかし、30mモデルにおいては、低層部では最大層間変形角が1/50近く、塑性率も3近くになっており、

(○印は用いる値を示す)

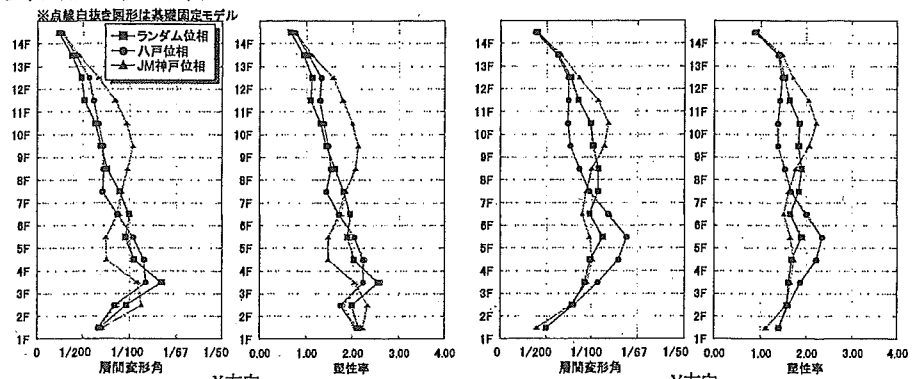


図12 60mモデル応答解析結果(層間変形角、塑性率)

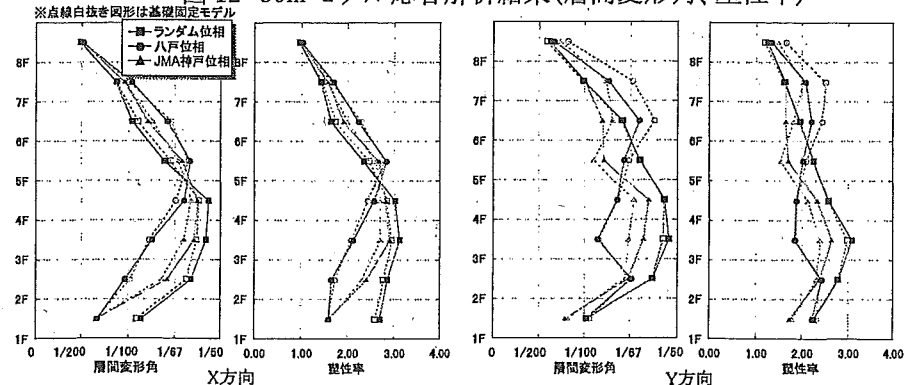


図13 30mモデル応答解析結果(層間変形角、塑性率)

60mモデルに比べ、さらに大きな応答を示している。これは、塑性化が十分に進行した状況で、安全限界に対する耐震性を有しているとは考えにくい結果となった。

また、地盤との連成を考慮することにより、Y方向の上層部では、通常解析で用いる基礎固定モデルに比べて応答が小さくなっている。以上のように、同じサイトに立地していても、階数の違いによって応答に大きな差が生じることが改めて確認された。

4.2 最大加速度、最大速度、計測震度の比較

最大絶対加速度、最大絶対速度、計測震度の分布を、図14、図15に示す。計測震度の値は、X方向、Y方向の時刻歴加速度波形が同時に作用したときの値を合成して用いており、UD方向の成分は考慮していない。

加速度の建物内の増幅は、60mモデルに比べると、30mモデルの方が大きく、30mモデルY方向においては、振動モデルの違いによる影響が大きい。最大絶対速度をみると、各モデルにおける最大値は、阪神・淡路大震災での地面の揺れを上回る150cm/s程度となっている。計測震度でみれば、1階の震度は6弱前後であるのに比べて、上層部の震度は6強から7に近く、家具の転倒によ

る危険性も高くなる。これは、建物の耐震安全性と同様に検討すべき問題である。

5. まとめ

本研究では、名古屋の伏見の地盤に建てられた、高さの異なるS造ラーメン構造物に対して、地盤の非線形性、相互作用効果を考慮した地震時の挙動評価を行った。各層の最大層間変形角、塑性率、最大絶対加速度、最大絶対速度、計測震度の観点から検討を行い、建物の違いにより応答結果に差が生じることや、モデルによって非常に大きな応答値を示すことを確認した。

今後は、東海・東南海地震連動時に予測される地震動波形を使い、この種の評価をしていく予定である。

[参考文献]

- 1) 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計 pp.54-56
- 2) 日本建築学会論文集、「地盤材料の繰返し変形特性の定式化」第544号、69-75、2001年6月
- 3) 文学章：地盤と構造物との動的相互作用における基礎形式・基礎形状・隣接建物の影響に関する解析的研究、名古屋大学学位論文、2006.3.

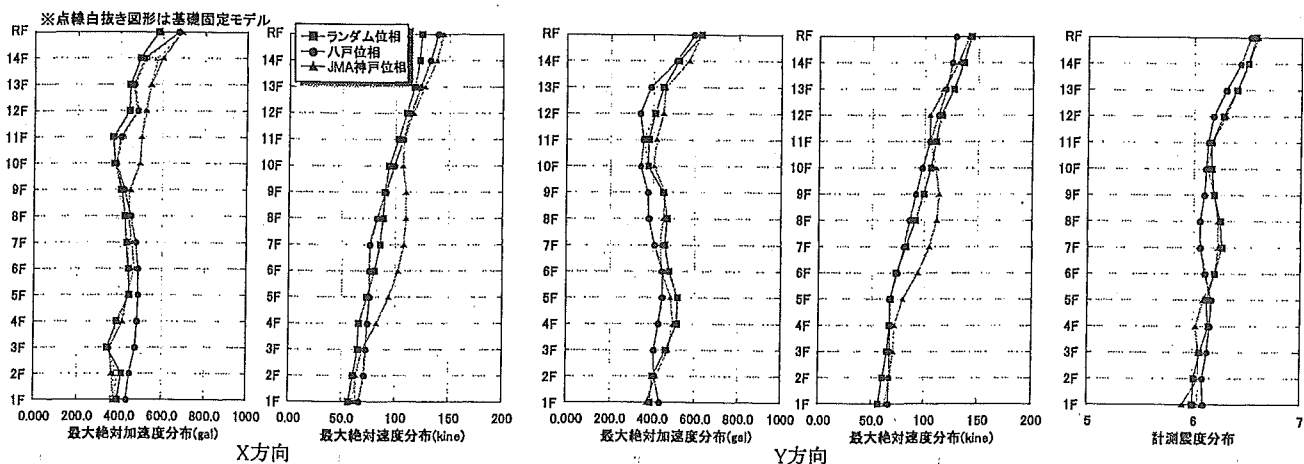


図14 60mモデル応答解析結果(最大絶対加速度、最大絶対速度、計測震度)

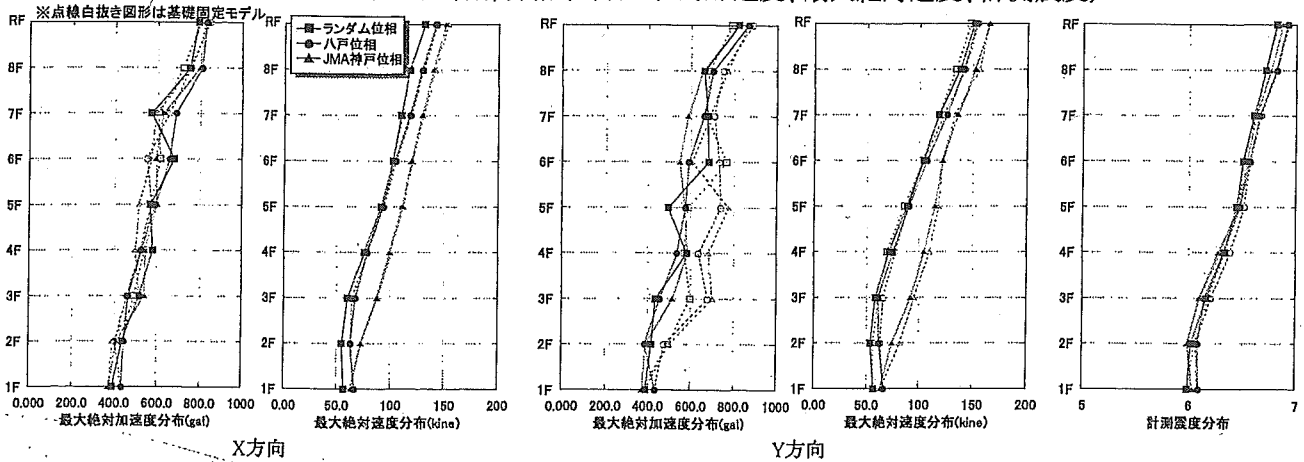


図15 30mモデル応答解析結果(最大絶対加速度、最大絶対速度、計測震度)