

平成23年度建築基準整備促進事業

42. 超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討

(株)大崎総合研究所

1

検討実施体制

1. 事業主体

(株)大崎総合研究所

2. 共同研究者

建築研究所

日本建築構造技術者協会

日本免震構造協会

3. WG設置

長周期地震動・応答WG(大川出主査)

JSCA長周期地震動WG－Ⅱ(北村春幸主査)

JSSI長周期地震動WG(北村佳久主査)

2

検討項目・内容

(イ) 長周期地震動の作成手法の検証

- ・ 改良経験式の作成
- ・ 東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションによる手法の検証

(ロ) (イ)で提案された手法に基づく主要地点の長周期地震動の作成

- ・ 地震本部の長周期地震動との比較(南海地震、東南海地震、東海地震、それぞれの単独地震)
- ・ 東海・東南海・南海地震(3連動地震)の長周期地震動の作成

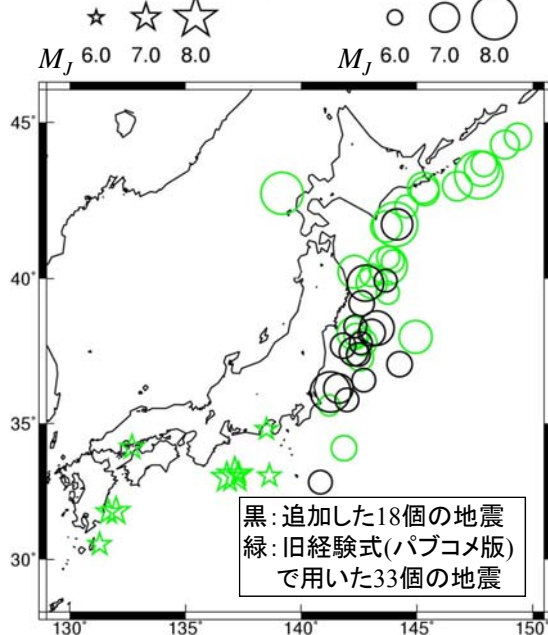
(ハ) (ロ)で作成された波形による超高層建築物等の地震応答計算

- ・ 3連動地震に対する超高層建物の応答計算
- ・ 3連動地震に対する免震建物の応答計算
- ・ 東北地方太平洋沖地震に関する超高層建物等でのアンケート調査

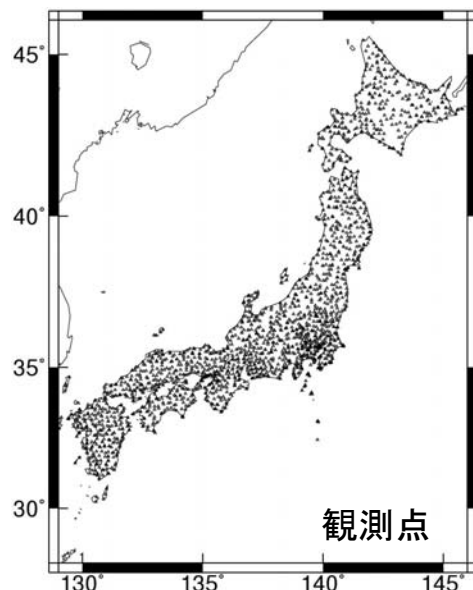
3

改良経験式作成に用いたデータ

フィリピン海プレートの地震 太平洋プレートの地震



- ・ 1988年～2011年5月(東北地方太平洋沖地震は含めない)の51個
- ・ 断層最短距離20～400km
- ・ M_w 5.9～8.2、深さ60km以下



- ・ 旧経験式: K-NET、KiK-net、気象庁87型、関東平野1都6県の気象庁95型と新宿の工学院大学
- ・ 改良経験式: 濃尾平野と大阪平野の気象庁95型を追加

改良経験式

★ $S_A(T)$: 周期 T の $h=5\%$ の加速度応答スペクトル

$$\log_{10} S_A(T) = a_1(T) M_w + a_2(T) M_w^2 + be(T)R + bw(T)R - \log_{10}(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}) + c_0(T) + c_j(T) + cw_j(T)$$

ここで、 M_w : モーメントマグニチュード、 R : 断層最短距離

★ $Z(f)$: 周波数 f の群遅延時間の平均値 μ_{tgr} と分散 σ_{tgr}^2

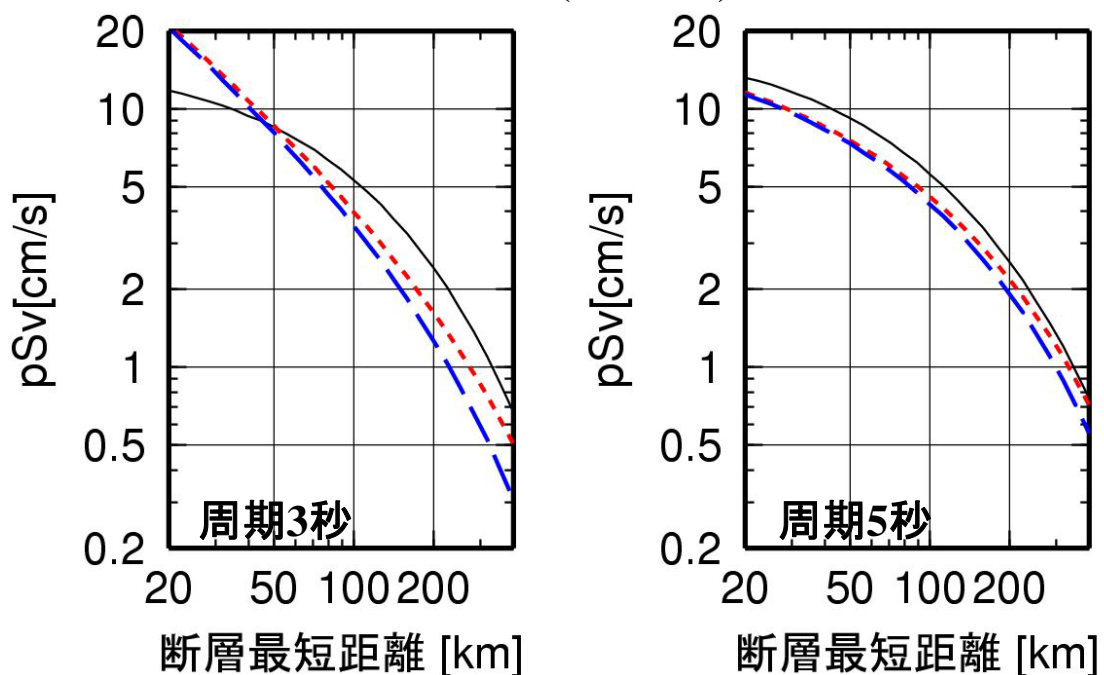
$$Z(f) = A_{tgr}(f) M_0^{1/3} + Be(f)X + Bw(f)X + C_j(f) + Cw_j(f)$$

ここで、 M_0 : 地震モーメント、 X : 震源距離

- ・ 応答スペクトルの式に M_w^2 項を導入
- ・ 太平洋プレート of 地震の距離減衰特性 be 、 Be とフィリピン海プレート of 地震の距離減衰特性 bw 、 Bw を考慮
- ・ 関東平野で地盤の固有周期の長い (>4 秒) 地点では、フィリピン海プレート of 地震の地盤増幅率 cw 、サイト係数 Cw を別途考慮 (なお、パブコメの旧経験式と同様に地殻内地震との平均値)
- ・ $M_w 8.4$ で頭打ち (東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションに基づく)

太平洋プレート of 地震とフィリピン海プレート of 地震による擬似速度応答スペクトルの距離減衰特性 ($M_w 8.0$ 、地震基盤)

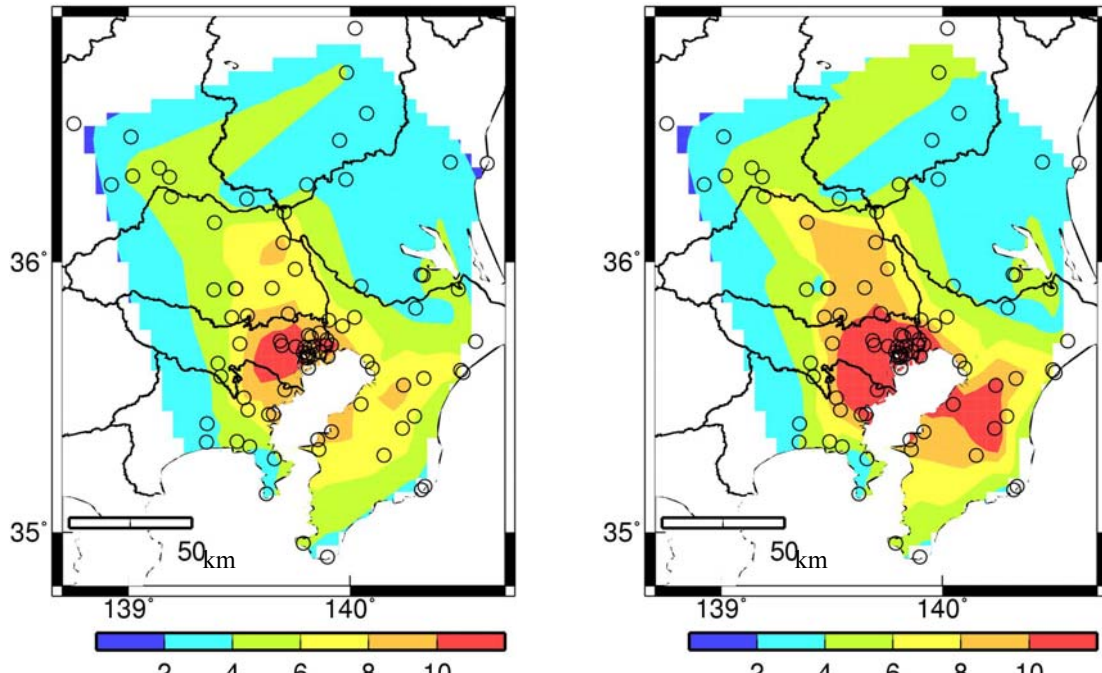
- 太平洋プレート (改良経験式)
- - - フィリピン海プレート (改良経験式)
- 両プレート (旧経験式)



太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震による地盤増幅率(周期8秒)

太平洋プレート

フィリピン海プレート

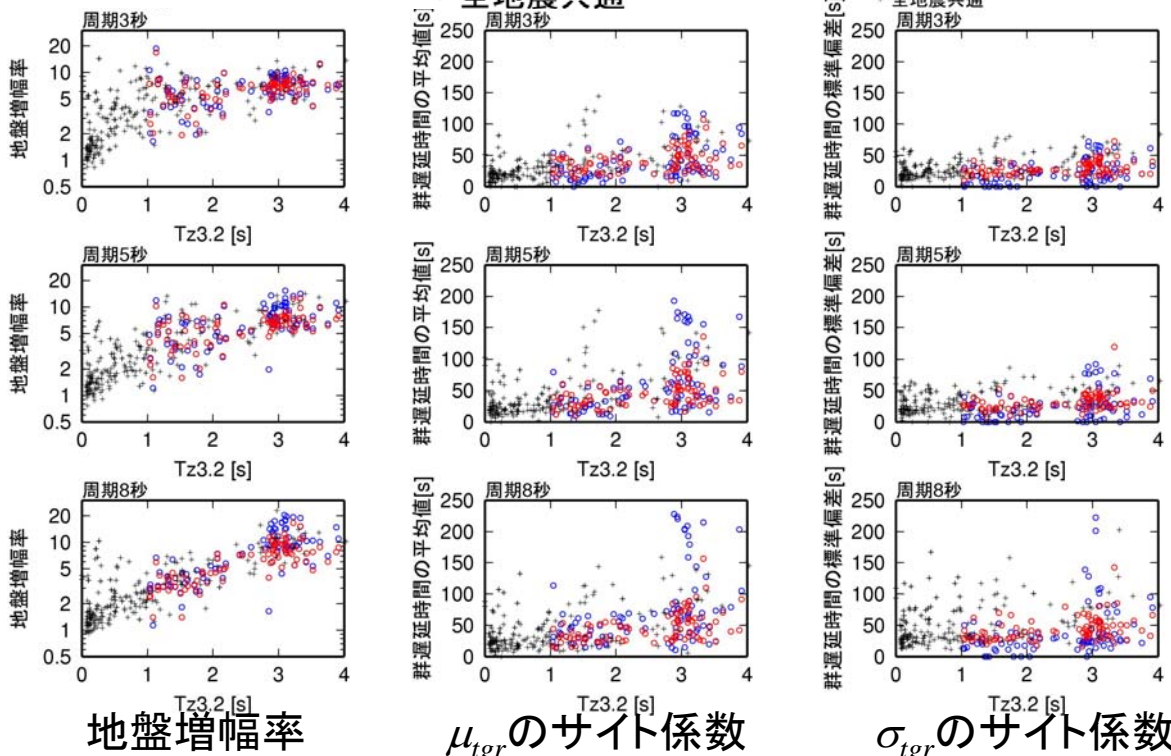


○ Tz3.2>1秒の観測点 (Tz3.2: S波速度3.2km/sの地震基盤
上面から1.0km/sの層上面までの地盤の固有周期の1/4)

7

太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震による地盤増幅率・サイト係数とTz3.2の関係

- 太平洋プレート
- フィリピン海プレート
- + 全地震共通

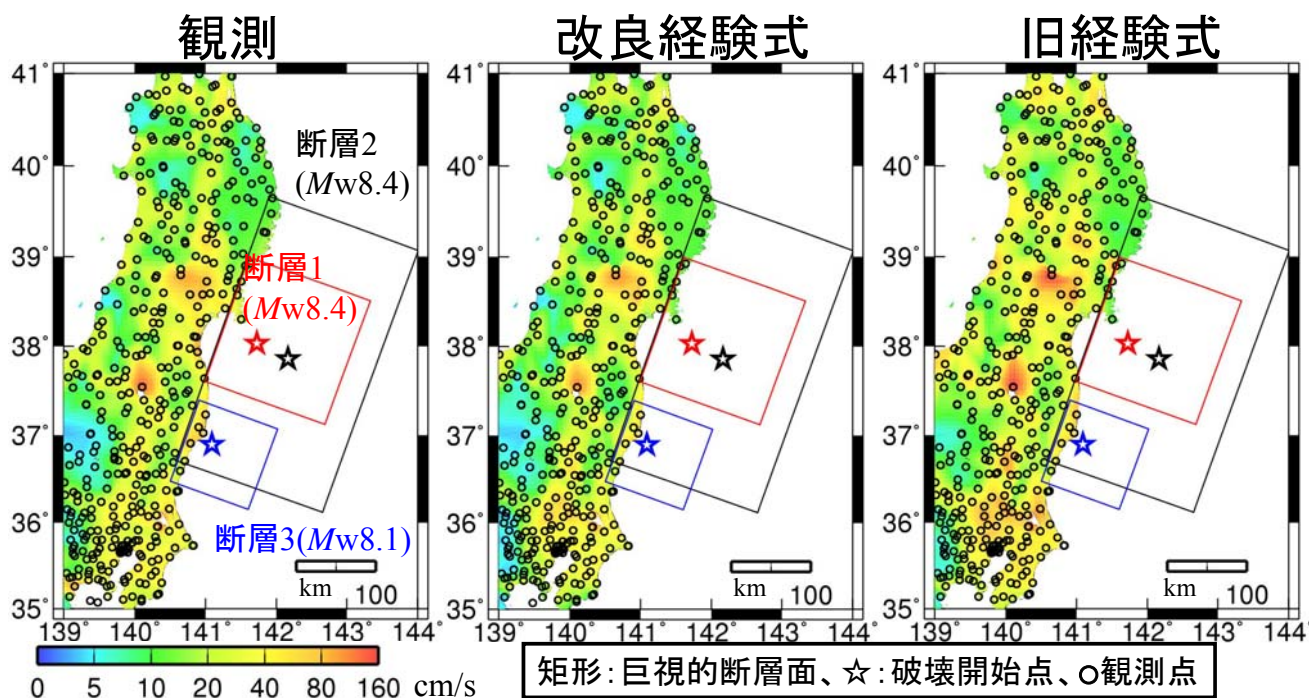


地盤増幅率

μ_{tgr} のサイト係数

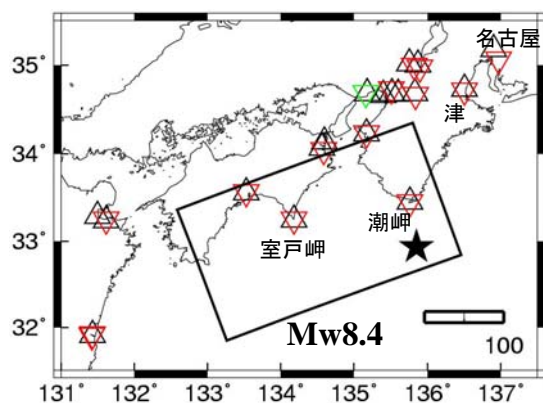
σ_{tgr} のサイト係数

東北地方太平洋沖地震の観測とシミュレーションの 周期3秒での擬似速度応答スペクトル(h=5%)分布



佐藤(2012)の経験的グリーン関数法に基づく強震動生成領域と地震本部(2009)の強震動予測レシピに基づき、静的応力降下量3MPaを仮定して、3連動の震源モデルを設定

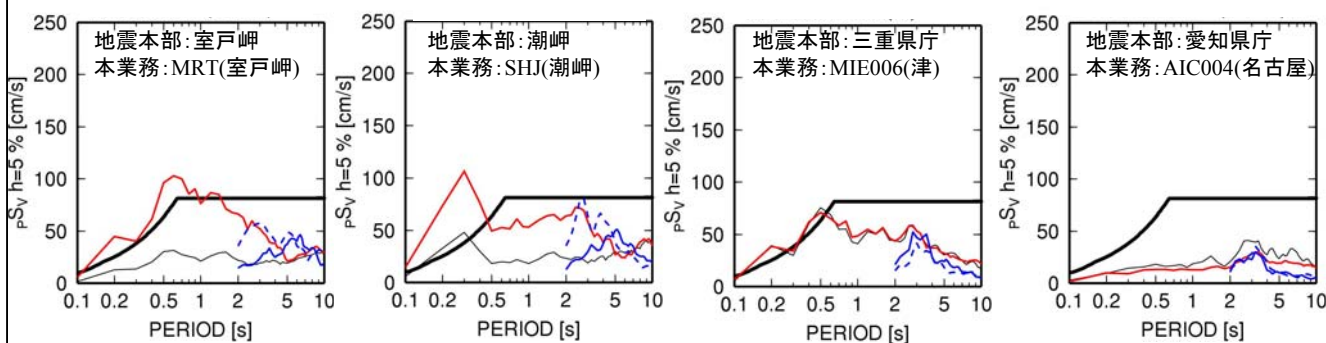
改良経験式と旧経験式による地表での長周期地震動 と地震本部の長周期地震動との比較(南海地震)



△地震本部の計算地点
▽改良経験式と旧経験式による計算地点
▽改良経験式による計算地点

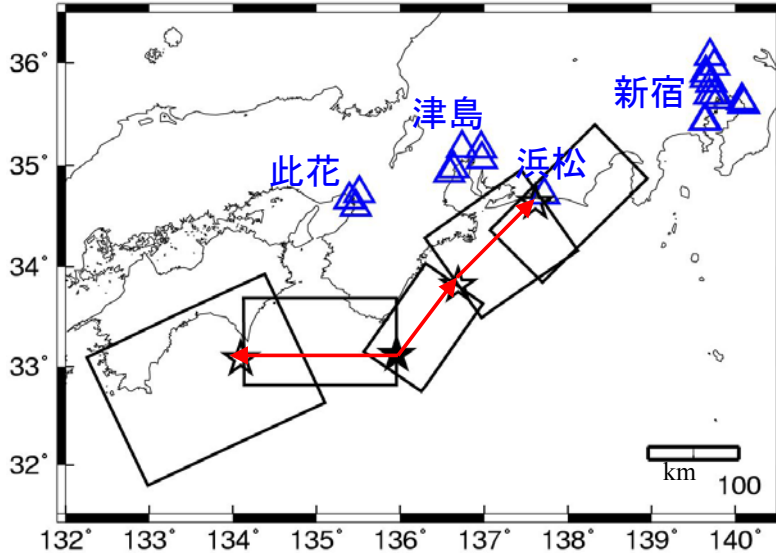
・震源近傍では周期2~5秒で改良経験式は旧経験式より大きく、地震本部の三次元有限差分法による長周期地震動と同レベル
・100km程度以上遠方では、周期2~5秒で改良経験式は旧経験式よりやや小さい。

--- 地震本部:EW
--- 地震本部:NS
— 告示スペクトル
— 旧経験式
— 改良経験式



東海・東南海・南海地震の震源モデルと計算地点

		地震モーメントdyne・cm (Mw)	参考文献
南海	東断層	2.91×10^{28} (8.2)	鶴来・他(2005)
	西断層	5.46×10^{28} (8.4)	鶴来・他(2005)
東南海	東断層	9.01×10^{27} (7.9)	鶴来・他(2005)
	西断層	1.48×10^{28} (8.0)	鶴来・他(2005)
東海		1.12×10^{28} (8.0)	地震本部(2009)
全体		1.2×10^{29} (8.7)	

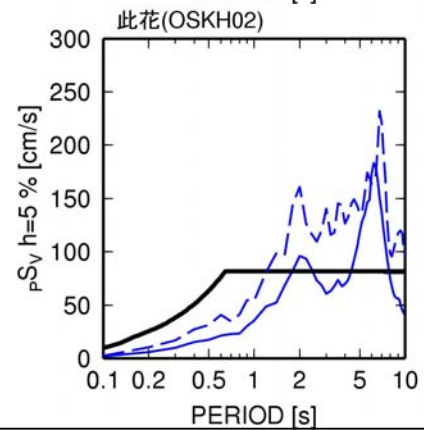
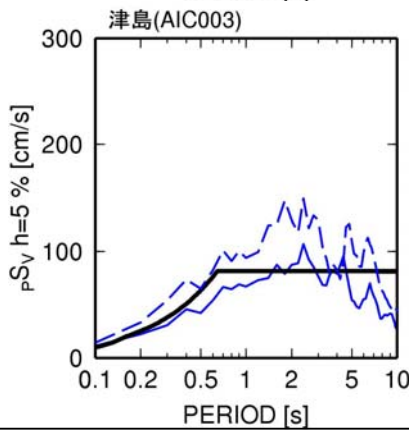
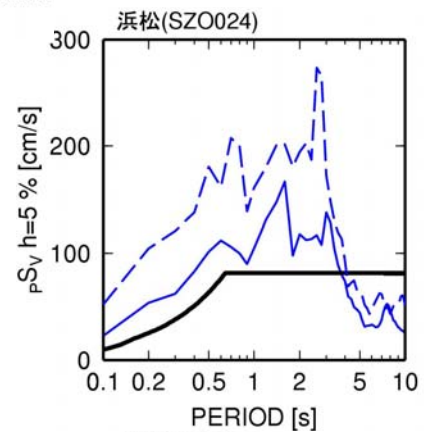
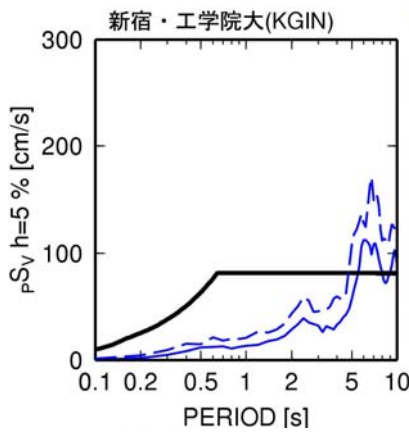


矩形:断層面
 ★:第1破壊開始点
 ☆:第2~4破壊開始点
 →:破壊伝播方向
 △:計算地点

改良経験式で地表の波を計算

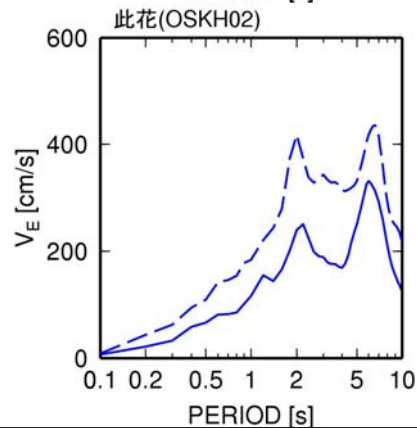
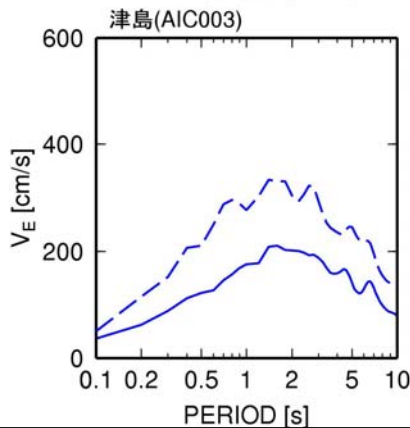
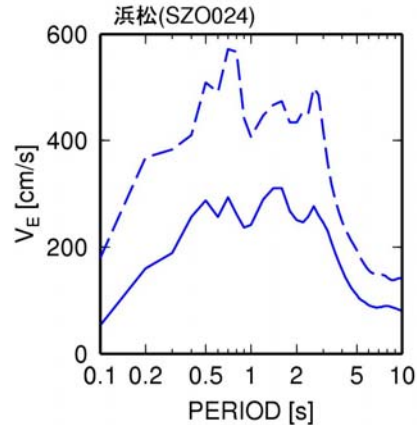
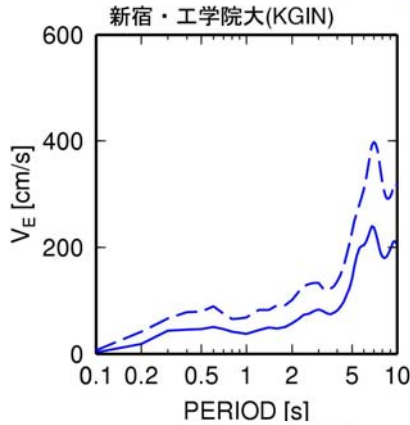
建物応答計算用波形の擬似速度応答スペクトル

— 告示スペクトル
 - - - 平均+標準偏差に近い予測波
 — 平均に近い予測波



建物応答計算用波形のエネルギースペクトル

--- 平均+標準偏差に近い予測波
 ——— 平均に近い予測波



13

検討用超高層S造モデル建物

S造	高さ	階	架構形式	平面形状 代表スパン	一次固有周期	柱代表断面(最大厚) 梁代表断面(最大厚)	鋼材種	特徴他
100m級	102m	25	純ラーメン構造	43.2m×43.2m 3.6m, 16.8m	X方向: 2.3sec Y方向: 2.8sec	□-700×700(50) H-800×350(40)	SM490 SM520	センターコアー 外周 X@3600Y@4200 チューブ型
120m級	120m	26	制振部材付ラーメン構造	56.0m×27.0m 6.4m, 15.8m	X方向: 2.6sec Y方向: 2.9sec	□-700x700(60) H-900x350(40)	SN490	片コアー 低降伏点鋼壁パネル・H型間柱
140m級	142m	35	ブレース付きラーメン構造	36.0m×72.0m 7.2m, 14.4m	X方向: 3.7sec Y方向: 3.8sec	□-700x700(70) H-800x300(28)	SM490 SM490	センターコア コア・外壁面に連層 K型ブレース
200m級	200m	46	制振部材付ラーメン構造	53.5m×68.0m 7.2m, 17.5m	X方向: 5.7sec Y方向: 5.1sec	□-800×800.CFT (60) H-900×400(40)	HBL355 SN490	センターコアー (コの字型プラン) 座屈拘束ブレース, 粘性系ダンパー
230m級	240m	53	制振部材付ラーメン構造	54.0m×75.6m 7.2m, 19.8m	X方向: 6.5sec Y方向: 5.5sec	□-800×800.CFT (80) H-1000×400(36)	SN490 SM520	センターコアー (コの字型プラン) アンボンドブレース, 粘性系ダンパー
250m級	256m	55	X: 純ラーメン構造 Y: ブレース付きラーメン構造	35.0m×70.0m 3.2m, 9.6m	X方向: 5.8sec Y方向: 5.3sec	□-650×800 (70) H-900×400(40)	SM490 SM520	センターコアー 一部に大組的な架構
80m級	81m	21	純ラーメン構造 制振部材付ラーメン構造	30.0m×24.0m 6.0m, 9.0m	耐震: 2.41sec 制振: 1.75sec	□-600x600(40) H-800x200(32)	SM490	耐震、制振架構の検討用建物 座屈拘束ブレース

14

検討用超高層RC造モデル建物

RC造	高さ	階	架構形式	平面形状 代表スパン	一次固有周期	柱代表断面 梁代表断面	Fc	主筋強度 せん断補強筋強度	特 徴 他
90m級	93.1m	30	チューブ構造	27.6m×31.8m 6.1m, 6.4m	X方向: 1.99sec Y方向: 1.86sec	1000×1000~1100×1100 900×900~1000×650	Fc30~Fc60	SD345~SD685 SD390~SPR785	センターコア
115m級	114.5m	36	ラーメン構造	30.0m×30.0m 6.0m	X方向: 2.16sec Y方向: 2.16sec	900×900~1000×1000 550×800~550×900	Fc30~Fc60	SD490 SD295~KSS785	検討建物
130m級	132.0m	43	ラーメン構造	32.5m×32.5m 3.25m, 6.5m	X方向: 3.12sec Y方向: 3.04sec	750×850~1200×1200 440×850~680×1200	Fc30~Fc70	SD345~SD685 SD295~KSS785	中ボイド
150m級 (その1)	150.5m	47	ラーメン構造	22.6m×62.0m 5.7m, 5.1m	X方向: 2.37sec Y方向: 3.48sec	1000×1000 700×1100, 700×850	Fc30~Fc100	SD345~SD685 SD295~SD785	中廊下 タワー、
150m級 (その2)	151.5m	44	ラーメン構造 一部耐震壁	31.2m×45.0m 6.5m, 6.1m, 9.5m	X方向: 2.92sec Y方向: 3.28sec	1000×1000~1200×1200 700×900~650×1200	Fc30~Fc80	SD390~SD490 SD295~KSS785	センターコア
180m級	180.8m	54	ラーメン構造	44.0m×42.4m 6.0m, 8.4m, 10.0m	X方向: 4.23sec Y方向: 4.31sec	900×900~1000×1000 650×750~650×1400	Fc30~Fc160	SD390, SD490, USD685A SBPD1275/1420	中ボイド
240m級	242.3m	70	チューブ構造	48.0m×48.0m 4.0m, 5.0m	X方向: 5.44sec Y方向: 5.44sec	900×900 600×850~600×1000	Fc48~Fc120	SD490, SD685 SD390~SPR785	中ボイド 試験設計建物

15

S造建物の最大層間変形

	方向	周期 (s)	平均波				平均+σ波			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
S100m級	X	2.30	1/137	1/125	1/120	1/276	1/121	1/96	1/82	1/249
	Y	2.75	1/159	1/115	1/106	1/333	1/87	1/87	1/69	1/186
S120m級	X	2.6	1/247	1/220	1/153	1/475	1/147	1/138	1/93	1/318
	Y	2.9	1/264	1/220	1/147	1/414	1/132	1/147	1/114	1/311
S140m級	X	3.69	1/135	1/125	1/119	1/341	1/73	1/118	1/75	1/171
	Y	3.79	1/136	1/113	1/104	1/291	1/68	1/101	1/75	1/176
S200m級	X	5.74	1/81	1/155	1/156	1/115	1/78	1/111	1/100	1/97
	Y	5.08	1/92	1/155	1/148	1/170	1/56	1/88	1/104	1/122
S230m級	X	6.5	1/69	1/185	1/144	1/135	1/69	1/104	1/122	1/72
	Y	5.5	1/66	1/123	1/141	1/97	1/62	1/101	1/83	1/74
S250m級	X	5.8	1/65	1/148	1/180	1/84	1/52	1/100	1/104	1/69
	Y	5.3	1/70	1/127	1/127	1/122	1/64	1/79	1/81	1/83

※網掛け：クライテリアを満足しない応答値

16

RC造建物の最大層間変形

	方向	周期 (s)	平均波				平均+ σ 波			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
RC90m 級	X	2.0	1/231	1/215	1/151	1/649	1/121	1/115	1/79	1/347
	Y	1.9	1/247	1/221	1/159	1/745	1/142	1/136	1/89	1/386
RC115m 級	X,Y	2.16	1/191	1/193	1/138	1/450	1/64	1/127	1/68	1/323
RC130m 級	X	3.1	1/101	1/101	1/141	1/244	1/48	1/53	1/99	1/161
RC150m 級 (1)	X	2.37	1/213	1/183	1/183	1/559	1/63	1/164	1/94	1/303
	Y	3.48	1/104	1/164	1/142	1/375	1/59	1/92	1/125	1/167
RC150m 級 (2)	X	2.9	1/93	1/158	1/140	1/444	1/51	1/77	1/97	1/208
	Y	3.3	1/99	1/125	1/128	1/455	1/62	1/99	1/96	1/192
RC180m 級	X	4.23	1/67	1/199	1/179	1/101	1/48	1/101	1/91	1/51
	Y	4.31	1/68	1/195	1/172	1/95	1/53	1/104	1/84	1/51
RC240m 級	X,Y	5.44	1/133	1/199	1/163	1/123	1/91	1/142	1/106	1/77

※網掛け：クライテリアを満足しない応答値

S造建物の最大塑性率

表 S造建物の最大塑性率一覧

	方向	周期 (s)	平均波				平均+ σ 波			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
S100m 級	X	2.30	1.09	1.30	1.38	0.60	1.38	1.72	2.09	0.66
	Y	2.75	0.96	1.32	1.43	0.46	1.76	1.77	2.29	0.82
S120m 級	X	2.6	0.92	1.03	1.45	0.49	1.55	1.64	2.58	0.70
	Y	2.9	0.71	0.84	1.27	0.44	1.36	1.49	1.79	0.58
S140m 級	X	3.69	1.62	1.74	1.82	0.62	3.04	1.83	2.98	1.24
	Y	3.79	1.38	1.72	1.90	0.63	3.06	1.97	2.76	1.03
S200m 級	X	5.74	2.16	1.13	1.13	1.65	2.42	1.58	1.77	1.95
	Y	5.08	2.47	1.14	1.20	1.22	4.07	1.99	1.62	1.82
S230m 級	X	6.5	3.1	1.1	1.5	1.5	3.0	2.1	1.8	2.8
	Y	5.5	2.7	1.3	1.3	1.7	2.9	1.7	2.4	2.4
S250m 級	X	5.8	2.54	0.85	0.68	1.94	3.17	1.63	1.16	2.38
	Y	5.3	1.61	0.87	0.95	0.83	1.84	1.47	1.40	1.28

※網掛け：クライテリアを満足しない応答値

RC造建物の最大塑性率

	方向	周期 (s)	平均波				平均+σ波			
			此花	津島	浜松	新宿	此花	津島	浜松	新宿
RC90m 級	X	2.0	0.78	0.82	1.19	0.24	1.65	1.74	2.93	0.48
	Y	1.9	0.89	0.95	1.69	0.31	2.24	2.36	5.07	0.55
RC115m 級	X,Y	2.16	0.57	0.58	0.79	0.24	2.00	0.94	1.90	0.33
RC130m 級	X	3.1	1.52	1.56	1.15	0.56	3.34	3.16	1.51	1.02
RC150m 級 (1)	X	2.37	0.71	0.82	0.87	0.25	2.36	0.93	1.57	0.51
	Y	3.48	0.99	0.60	0.87	0.27	2.10	1.19	1.13	0.62
RC150m 級 (2)	X	2.9	1.7	1.0	1.3	0.4	3.0	2.0	1.8	0.9
	Y	3.3	2.0	1.0	1.2	0.4	3.0	1.9	1.7	0.9
RC180m 級	X	4.23	2.00	0.69	0.88	1.34	2.80	1.21	1.83	2.82
	Y	4.31	1.92	0.70	0.89	1.42	2.52	1.23	1.98	2.71
RC240m 級	X,Y	5.44	1.10	0.75	0.93	1.22	1.90	1.04	1.86	2.29

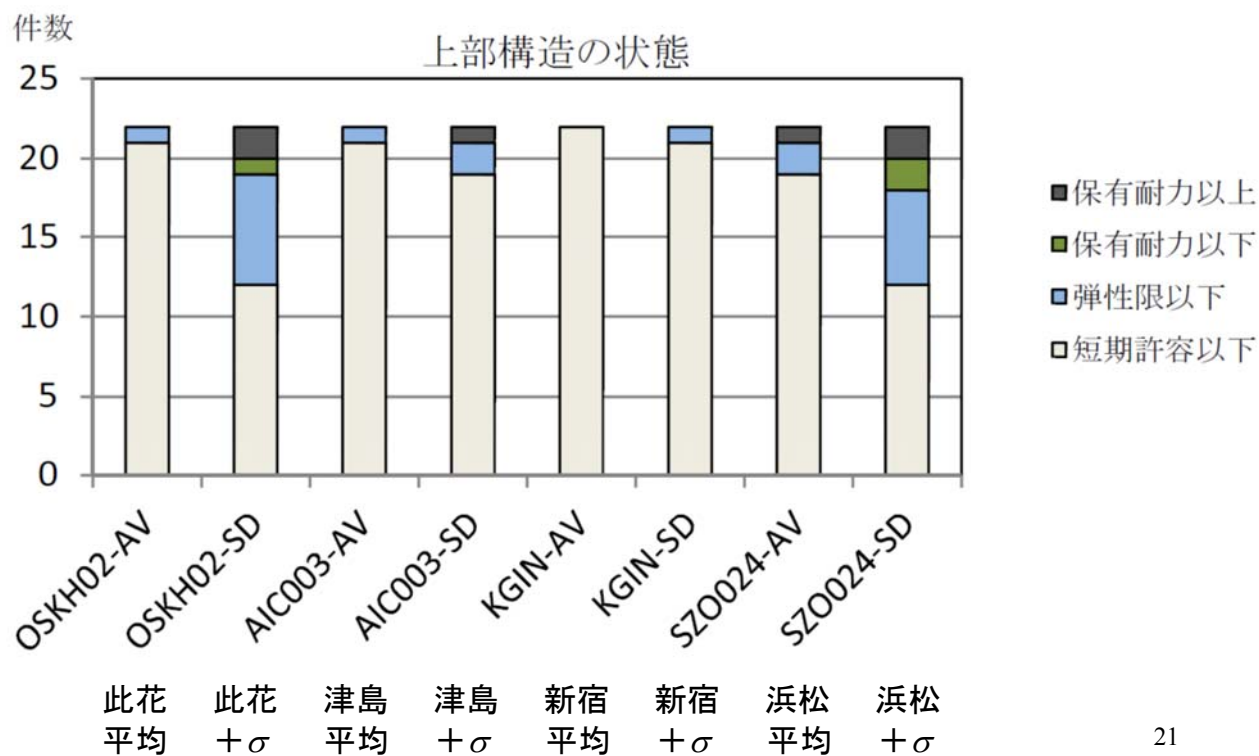
※網掛け：クライテリアを満足しない応答値

17

検討用免震モデル建物

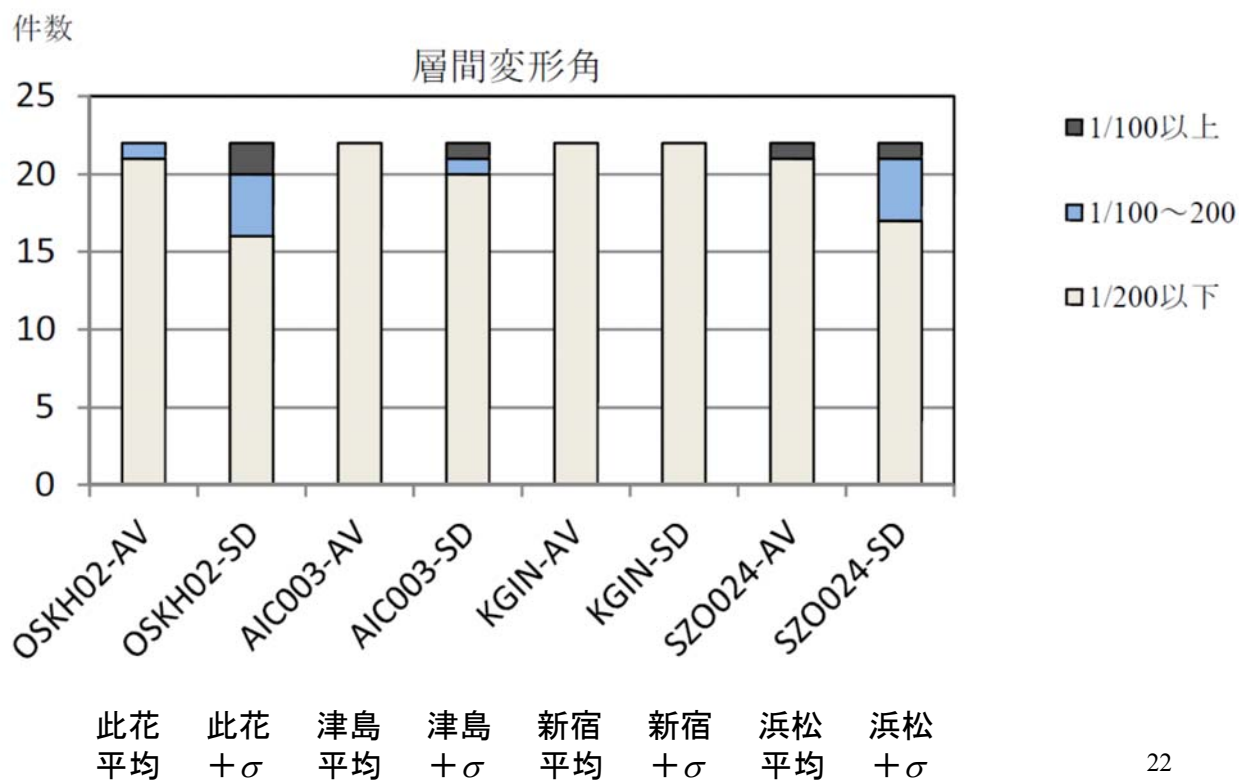
記号	分類	軒高 (m)	設計年	構造種別	免震システム	固有周期(s)	
						基礎固定	200%ひずみ時
A-1	低層第1世代	13.4	1987	RC	LRB+NR	0.41	1.77
A-3	中高層第3世代	34.6	2003	RC	HDR+NR	0.73	3.25
B-3	低層第3世代	13.1	2000	RC	NR+SL+OD	0.217	3.36
B-4	超高層第3世代	120.9	2006	RC	NR+SL+OD	3.16	6.19
C-2	中高層第1世代	36.1	1994	SRC,S	LRB	0.82	2.99
C-4	超高層第3世代	88.5	2008	R C	LRB+NR	2.27	4.93
D-2	中高層第3世代	29.9	2007	RC	LRB+NR	0.863	3.45
D-4	超高層第3世代	144.0	2006	RC	LRB+CLB+OD	3.45	6.43
E-1	中高層第2世代	30.6	1996	RC	LRB+NR	0.79	3.4
E-2	中高層第2世代	26.1	1996	RC	NR+鉛D+鋼棒D	0.68	2.56
E-3	超高層第3世代	67.4	2004	RC	LRB+CLB	1.78	5.24
E-4	中高層第3世代	34.0	2004	RC	LRB	0.87	3.87
F-3	中高層第3世代	31.0	2006	S	NR+SL	1.81	4.3
F-4	超高層第3世代	140.0	2006	RC	NR+SL	3.49	5.55
G-3	中高層第2世代	28.7	1997	CFT+S	NR+OD	1.32	4.027
G-4	中高層第3世代	24.2	2001	S	NR+OD	1.039	3.573
H-1	低層第1世代	11.9	1990	RC	NR+鉛D	0.27	2.23
H-4	超高層第3世代	60.4	2002	S	NR+鉛D+鋼D	1.82	4.02
I-1	中高層第2世代	31.3	1996	RC	HDR	1.1	4.27
I-2	中高層第3世代	41.2	2000	RC	NR+SL+鉛D+鋼D	1.57	5.09
J-1	中高層第2世代	44.3	1999	RC	NR+CLB+鋼D+OD	0.5	3.04
J-3	中高層第2世代	29.2	1998	RC	LRB+SL	0.095	2.75

免震建物の上部構造の状態



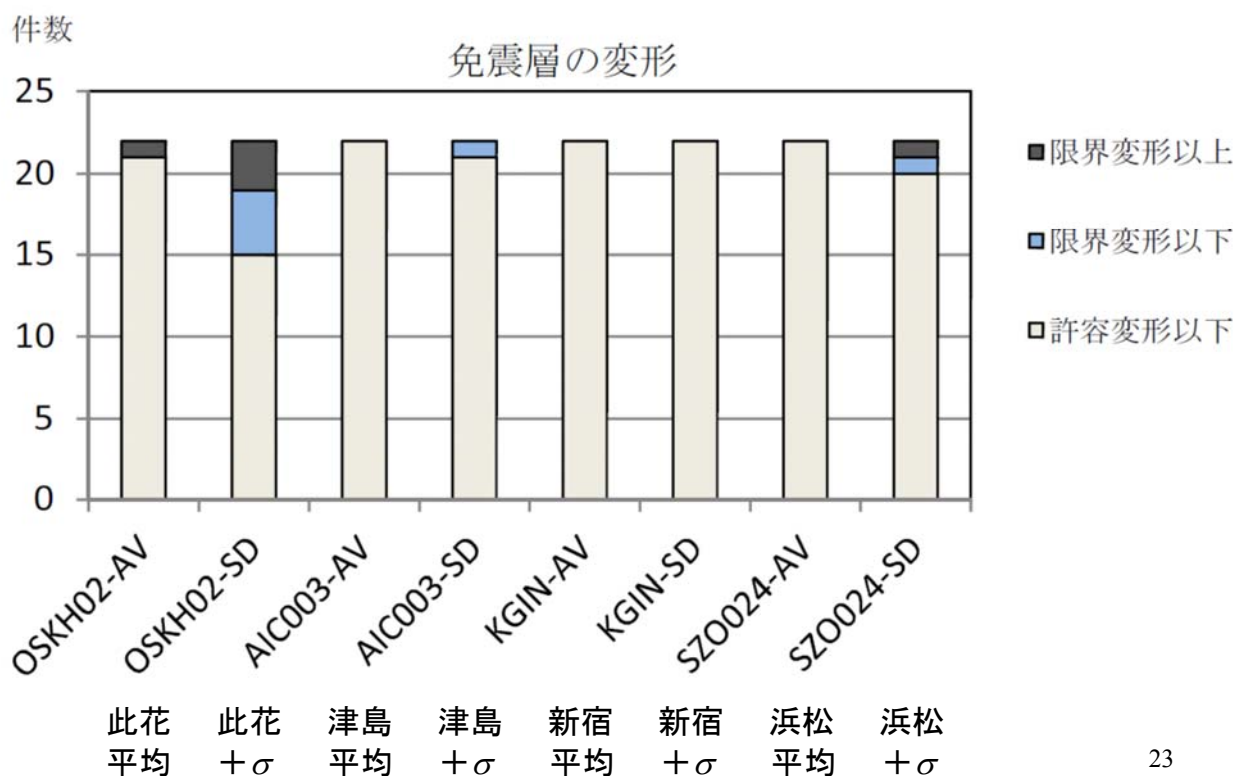
21

免震建物の層間変形角



22

免震層の変形



23

アンケートの対象とした建物

番号	建物所在地	構造	構造種別	建物規模	建物高さ	竣工年	位置	最大加速度 (cm/s ²)		
								H1	H2	V
1	宮城県	耐震	S造	地上15階 地下2階	62.7m	S48	B2F	163	259	147
							15F	361	346	543
2	埼玉県	制振	S造	地上26階 塔屋2階	139m	H12	B3F	74	63	42
							10FS	119	138	62
							10FN	118	155	66
3	東京都	免震 (改修)	SRC造	地上11階 地下2階	53.63m	S48 (H15)	B2F	104	91	58
							B1F	55	55	55
							P1F	94	82	104
4	東京都	耐震	S造	地上20階 地下4階 塔屋1階	86.52m	H6	01F	91	85	45
							20B	210	150	173
							19C	177	135	130
5	東京都	制振	S造	地上21階 地下4階	99.5m	H12	B4F	75	71	49
							13F	137	113	72
							21F	121	131	104
6	東京都	耐震	S造	地上18階	75.4m	S57	-	-	-	-
7	東京都	耐震	SRC造	地上26階 地下3階	111.2m	S57	-	-	-	-
8	神奈川県	耐震	S造	地上23階 地下3階 塔屋1階	96m	H6	B2F	60	-	30
							23F	162	-	72
9	大阪府	耐震	S造	地上15階 塔屋3階	76m	S48	B3F	11	9	5
							P3F	65	38	24

H1, H2: 建物の主要直交方向の水平加速度成分、V: 鉛直加速度成分

まとめ:(イ), (ロ)長周期地震動に関して

- ★ 以下の特徴をもつ、 $h=5\%$ の加速度応答スペクトルと群遅延時間の平均値・分散に対する改良経験式を作成した。
 - ・ M_w^2 項を考慮(応答スペクトルのみ)
 - ・太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震の距離減衰特性の違いの考慮
 - ・関東平野の地盤の固有周期の長い観測点で、太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震の地盤増幅率・サイト係数の違いを考慮
 - ・ $M_w 8.4$ で頭打ち
- ★ 東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーション(3連動)により改良経験式の検証を行った。
- ★ 地震本部の長周期地震動との比較(南海地震、東南海地震、東海地震、それぞれの単独地震)や、復元記録との比較から改良経験式の南海トラフ沿いの地震に対する検証を行った。
- ★ 東海・東南海・南海地震(3連動)の長周期地震動を作成した。

25

まとめ:(ハ)超高層建物の応答に関して

従来のレベル2のクライテリアである 1/100と 2.0に対する結果

- ★ 大阪地区の此花については、平均波では 150m以上建物で、平均 $+\sigma$ 波ではほとんどの建物で、クライテリアを満足できない状況になっている。なお、平均 $+\sigma$ 波の応答結果は、制振補強をしてもクライテリアを満足できないおそれがある。
- ★ 名古屋地区の津島については、平均波ではクライテリアを満足しており、平均 $+\sigma$ 波については 100m級建物だけが、わずかにクライテリアを満足しない結果となっている。
- ★ 東京地区の新宿については、平均波では 200mを越える建物を除きほとんどの建物でクライテリアを満足する結果となった、なおかつその数値も 1/200程度の小さな値にとどまった。
- ★ 震源に近い浜松では、平均波では全ての建物がクライテリアを満足しているが、平均 $+\sigma$ 波では多くの建物でクライテリアを満足できず、特にその程度は 100m級建物で大きくなっている。 26

まとめ:(ハ)免震建物の応答に関して

- ★ 平均の波ではモデル建物の上部構造の状態はほとんどが短期許容応力度以下であり、短期許容応力度を超えるものも、弾性限耐力以下であり損傷はほとんどないと考えられる。免震層の変形も、建設年度が古い1棟を除き、すべて許容変形以下であった。
- ★ 平均+標準偏差の波では、此花や浜松で上部構造の状態が保有水平耐力を超えているものが5~8%程度あった。弾性限耐力を超えているものもやや多く、保有水平耐力を超えているものも含めて、全体の15%が弾性限耐力を超えていた。免震層の変形では、此花で固有周期の長いもので限界変形を超えているものが多くみられ、全体の15%程度であった。
- ★ 今回の検討では、免震部材の品質変動や製造時のばらつきは考慮しておらず、それを考慮するともう少し応答が大きくなると思われる、建物の状態はもう少し悪くなると思われる。
- ★ 戸建住宅に関しては、浜松の地震動で周期が短い場合に応答が非常に大きくなるが、それ以外は概ね許容値以下となっている。