

3. 5 長周期地震動予測地図やその成果物の効果的な活用に関する検討等

(1) 研究の内容

(a) 研究の題目

長周期地震動予測地図やその成果物の効果的な活用に関する検討等

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
独立行政法人 防災科学技術研究所	研究領域長	藤原 広行
独立行政法人 防災科学技術研究所	主任研究員	森川 信之
独立行政法人 防災科学技術研究所	主任研究員	河合 伸一
独立行政法人 防災科学技術研究所	契約研究員	東 宏樹

(c) 研究の目的

①解説のためのウェブページの試作

長周期地震動の性質や、それらがもたらす被害、その対策について分かりやすく説明したウェブページを試作し、長周期地震動予測地図の利活用を促進する上で必要な方策を提示する。

②携帯端末等への情報提供アプリケーションの高度化

ユーザーが今いる場所あるいは必要とする任意の場所での長周期地震動に関する情報をインターネットやモバイルネットワークを通して入手でき、かつわかりやすく可視化するためのアプリケーションを高度化して試行し、必要な方策を提示する。

(2) 平成 24 年度の成果

(a) 研究の要約

①解説のためのウェブページの試作

長周期地震動予測地図の利活用に向けて、サブテーマ（3）および（4）の地震動シミュレーション結果をもとに高層ビルの応答計算を行い、どのような被害が生じる得るかを検討した。また、平成 23 年度の「長周期地震動予測地図作成等支援事業」の成果とあわせ、長周期地震動の性質や、それらがもたらす被害、その対策について説明したウェブページを試作した。

②携帯端末等への情報提供アプリケーションの高度化

ユーザーが今いる場所あるいは必要とする任意の場所での長周期地震動に関する詳細な情報を携帯端末（スマートフォン）アプリの機能を追加し高度化した。また、長周期地震動に関する理解を促進するため、複数の地点で地盤構造の違いによる揺れの違いを可視化するアプリを作成した。

(b) 研究の成果

1) ウェブページのコンテンツに関する検討

長周期地震動により生じる被害の解説に資するため、サブテーマ（3）および（4）で実施した地震動シミュレーション結果に基づいた高層ビルの応答計算を実施するとともに、長周期地震

動に関して提案されている指標と被害との関係について検討した。

(A) 南海トラフの地震の長周期地震動による超高層ビルの応答

「3.3 南海トラフの地震の震源モデル化手法の検討等」および平成23年度の長周期地震動予測地図作成等支援事業において実施された、南海トラフの地震を対象とした長周期地震動シミュレーション結果について、地震動の発生パターンごとに重みづけを設定し、それらの平均あるいはばらつきを考慮することにより、当該地点での「平均」、「平均+ σ 」の地震動を設定する。このとき、地震の発生パターン（震源域）の違いによる重みについては、地震調査研究推進本部による南海トラフの地震の長期評価（地震調査委員会、2001）や地震動ハザード評価（確率論的地震動予測地図の作成）を参考に、過去に実際に発生したと考えられるパターンに大きな重みをおくように設定した（表3.5-1）。一方、同一の震源域で震源パラメータが異なる複数ケースの重みは均等とした。

表3.5-1に示す重みを考慮して計算した多数のシミュレーション結果の擬似速度応答スペクトルの平均、平均+ σ のスペクトルに最も近い地震動を、「平均」、「平均+ σ 」の地震動として設定する。この時、誤差を計算する区間は、3秒～8秒とする。代表例として図3.5-1に東京の長周期地震動シミュレーション結果による地震動のスペクトルと、平均、平均+ σ のスペクトルを示す。また、平均及び平均+ σ のスペクトルに最も近い地震動のスペクトルを図3.5-2に示す。

表 3.5-1 地震動の発生パターン毎の重み係数*1。

ケース名称		日向灘	南海	東南海	東海	トラフ沿い	重み	計算数*2
①	最大級						0.0172	6
②							0.0172	19
③	3連動						0.1293	6
④							0.1293	18
⑤	2連動						0.0345	6
⑥							0.2586	4
⑦	単独						0.2931	4
⑧							0.0690	4
⑨							0.0517	2

*1：網掛け部分が震源域の範囲を示す。

*2：同一の震源域で震源パラメータが異なる計算数。それらの重みは均等とする。

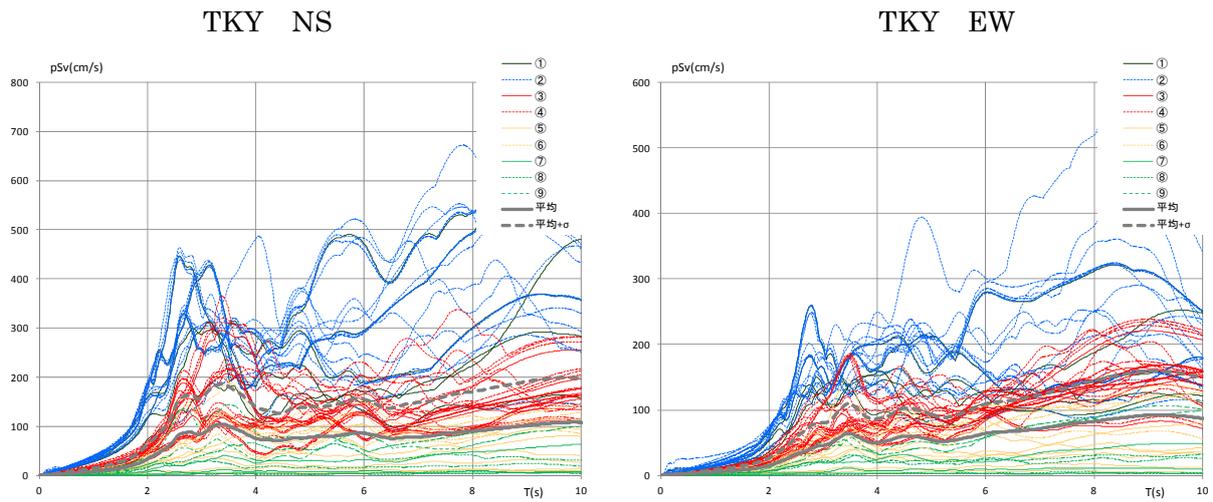


図 3.5-1 東京 (TKY) における全計算ケースのスペクトル。

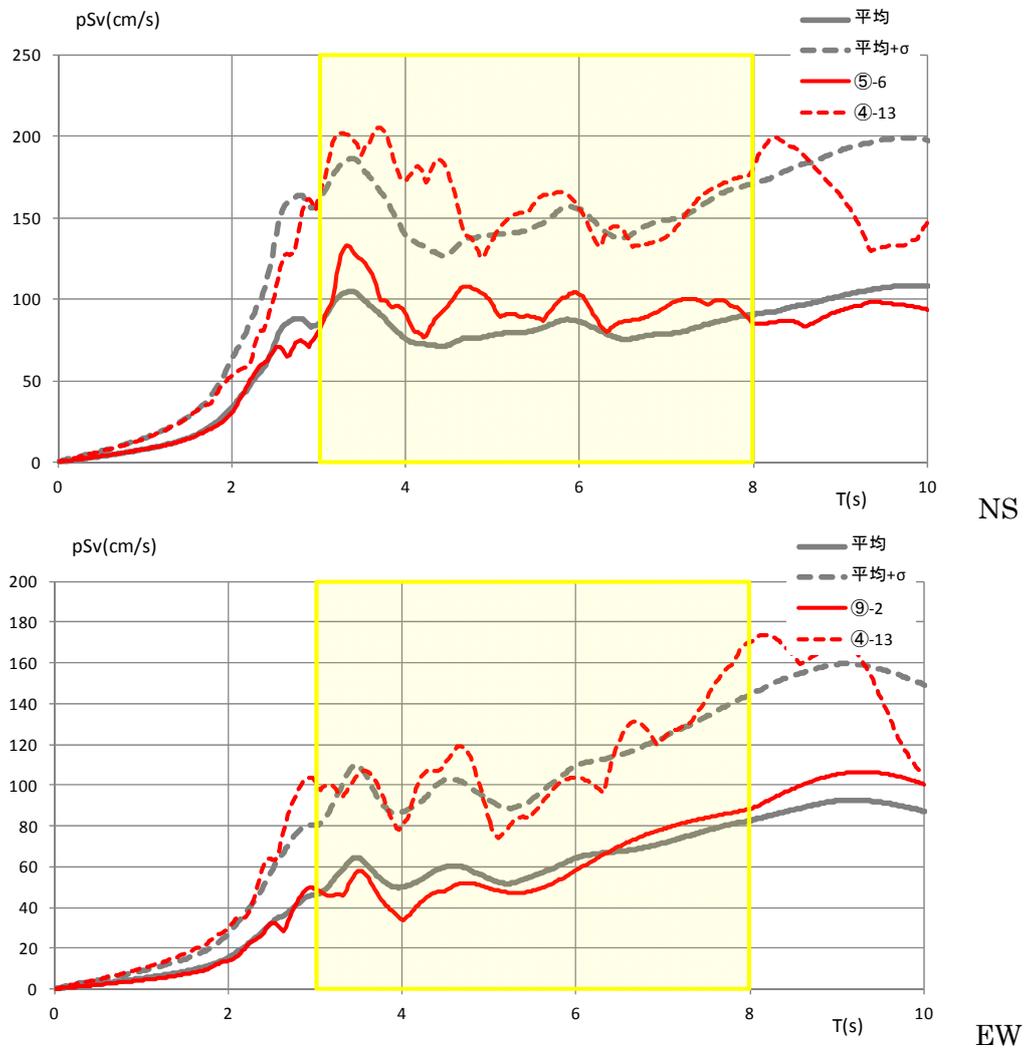


図 3.5-2 東京 (TKY) におけるスペクトル平均及び平均+ σ と選択した地震動のスペクトル。

平成23年度の長周期地震動予測地図作成等支援事業において応答計算が実施された7地点のうち、平均及び平均+ σ の地震動を想定して地震応答解析を実施した以下の4地点について、応答の傾向と特徴を示す。

(1) 愛知 (図 3.5-3)

平均の地震動を想定した場合には層間変形角は概ね 1/200 程度であり、部材はほぼ弾性範囲に留まり損傷はない。平均+ σ の地震動を想定した場合には、30階建のみ 1/100 程度の最大層間変形角が予想されるが、45階建、60階建では 1/200 程度である。従って、平均+ σ の地震動でかつ 30階建程度の場合にのみ建物に損傷が想定される。

(2) 大阪 (図 3.5-4)

平均の地震動を想定した場合には層間変形角は概ね 1/200 程度であり、部材はほぼ弾性範囲に留まり損傷はない。平均+ σ の地震動を想定した場合には 30階建及び 45階建で 1/100 の層間変形角が予想される。その時には部材が塑性化して損傷が予想される。

(3) 大阪舞洲 (図 3.5-5)

平均の地震動を想定した場合には、最大層間変形角は建物高さによらず概ね 1/100 程度であり、その応答は過大ではない。しかし、平均+ σ の地震動を想定した場合、1/50 を越える層間変形角が予想され、部材の塑性化も大きく進展し、大きな損傷が予想される。当該地点は上記大阪と近いが、地震動の違いに応じて応答も大きく異なっていることが分かる。

(4) 東京 (図 3.5-6)

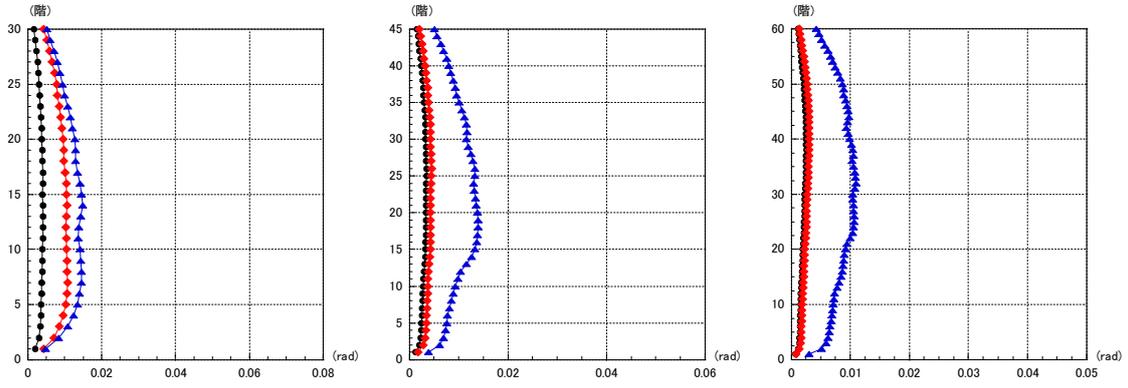
平均の地震動を想定した場合には層間変形角は概ね 1/100 程度であり、部材は塑性化をして損傷が予想される。平均+ σ の地震動を想定した場合は、最大で 1/60 程度の大きな最大層間変形角が予想される。その場合には塑性率も大きい。

あわせて想定される最大級の地震動として、各地点での速度応答スペクトルの 3秒~8秒の平均が最大となるものを選択し、時刻歴応答解析による応答評価を試みた。その結果、想定される最大級の地震動を考慮した場合には、最大層間変形角が 1/50 を大きく超える応答が想定される。そのような大変形では、P- Δ 効果による変形の増大や、柱や梁等の部材の劣化が想定される。それらを取り込んでいない現状の解析はそのような大変形域での信頼性に問題があるものと考えられる。

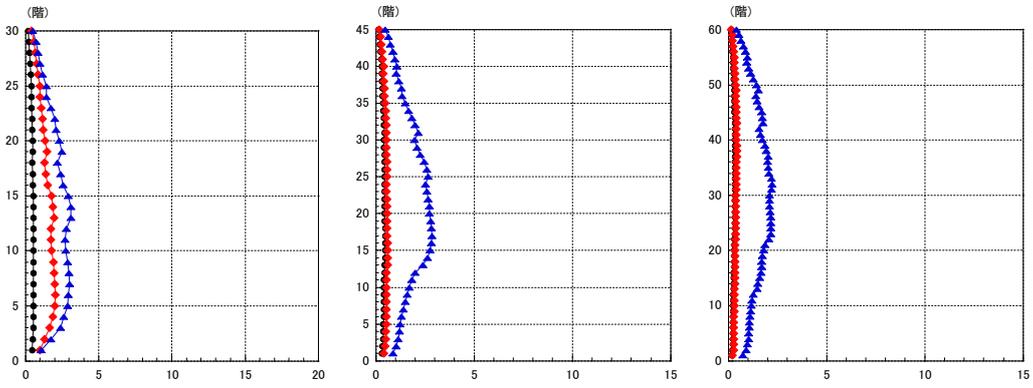
次に応答解析に基づく超高層建物の被害想定を行った。ここでは「被害」として、「建物機能」と、「構造部材」に関する損傷を想定し、それぞれについて損傷判定を行う。

● AIC NS 平均 ◆ AIC NS 平均+ σ ▲ AIC NS 最大

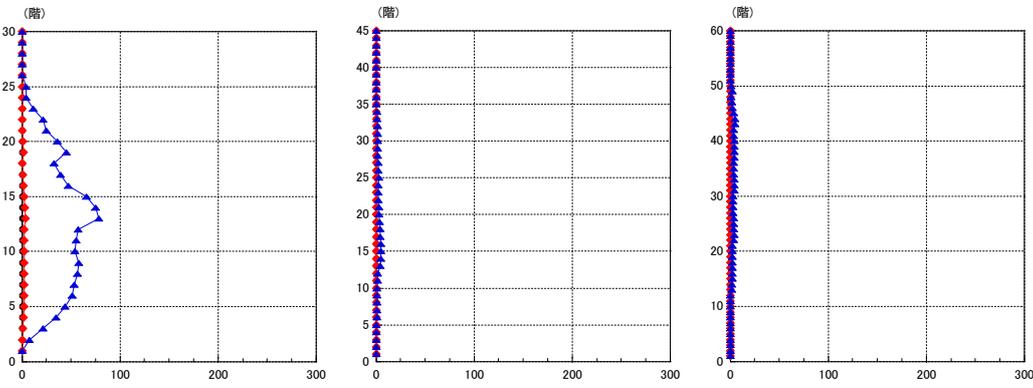
(a) 最大層間変形角



(b) 最大梁塑性率



(c) 最大梁累積塑性変形倍率



(d) 速度応答スペクトル

(e) 速度エネルギースペクトル

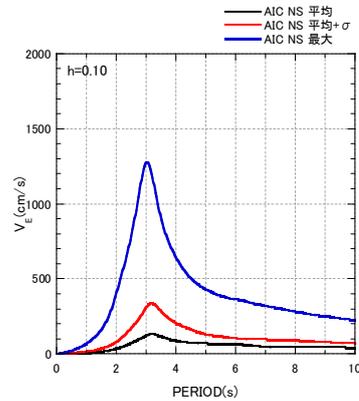
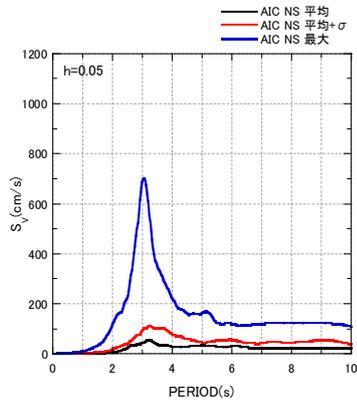
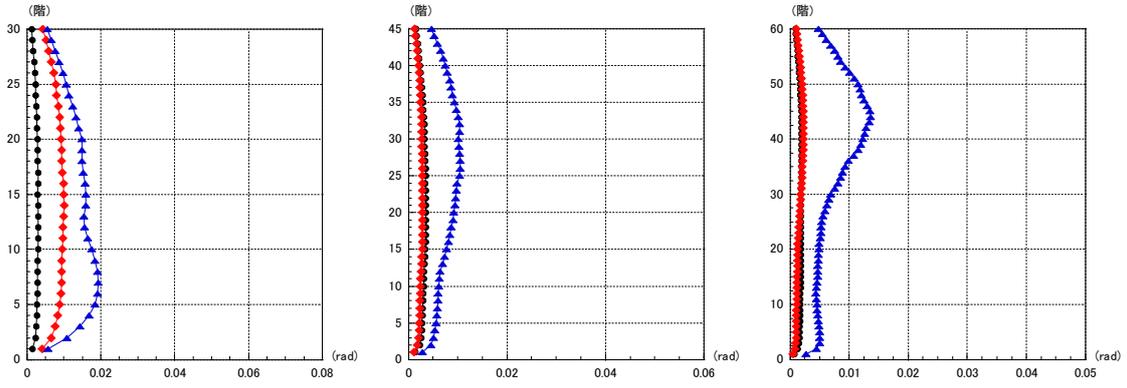


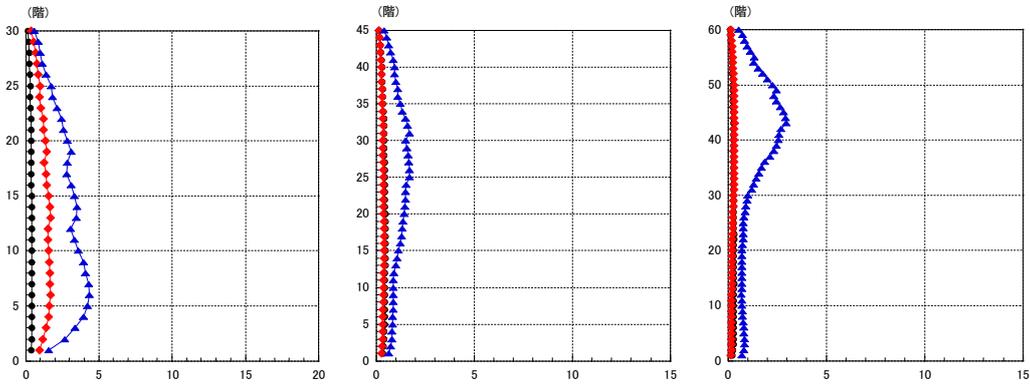
図 3.5-3(1) 応答最大値と地震動の特性 (愛知 NS) 左 30 階、中 45 階、右 60 階。

—●— AIC EW 平均 —◆— AIC EW 平均+ σ —▲— AIC EW 最大

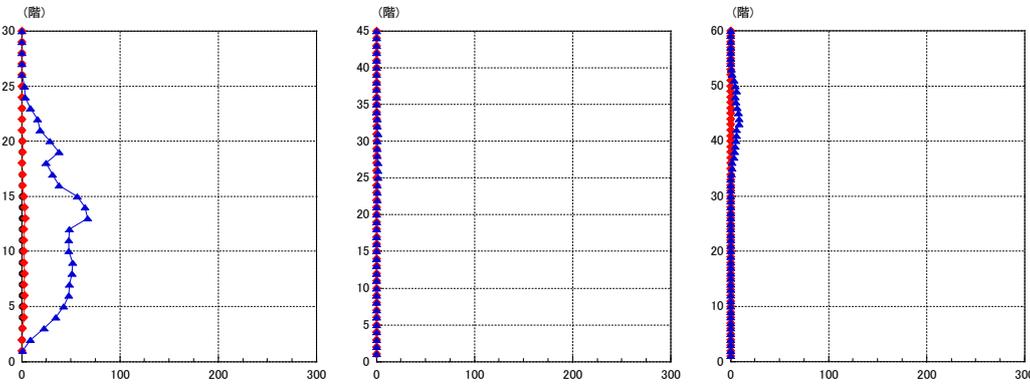
(a) 最大層間変形角



(b) 最大梁塑性率



(c) 最大梁累積塑性変形倍率



(d) 速度応答スペクトル

(e) 速度エネルギースペクトル

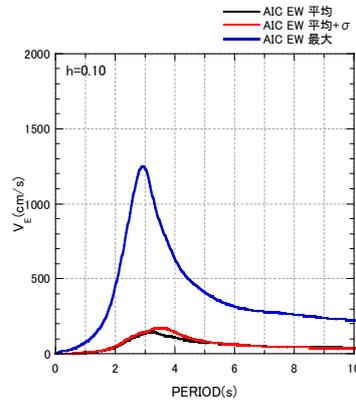
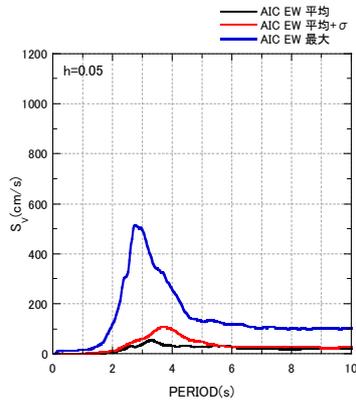
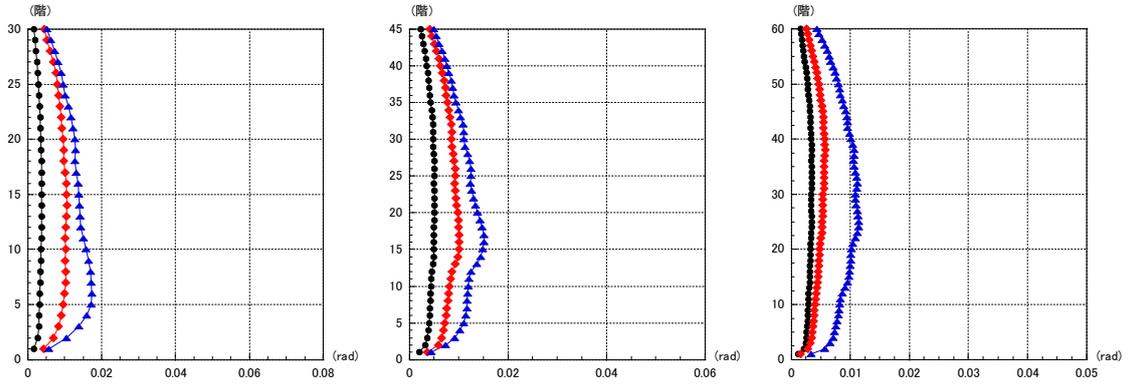


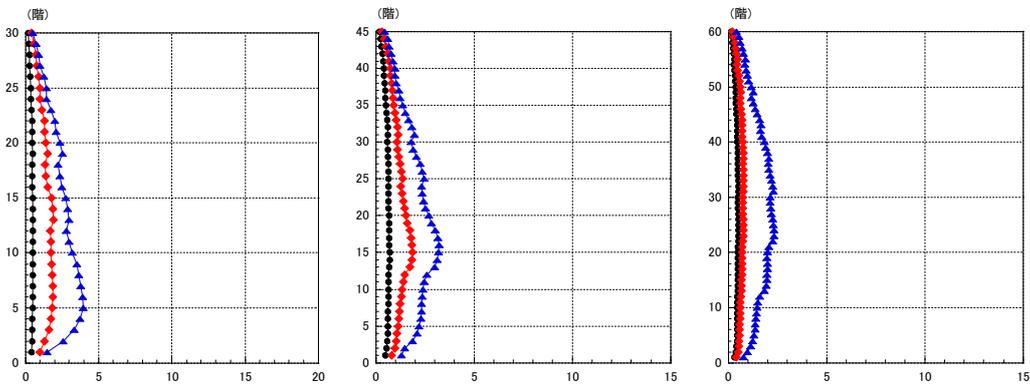
図 3.5-3(2) 応答最大値と地震動の特性 (愛知 EW) 左 30 階、中 45 階、右 60 階。

—●— OSK NS 平均 —◆— OSK NS 平均+ σ —▲— OSK NS 最大

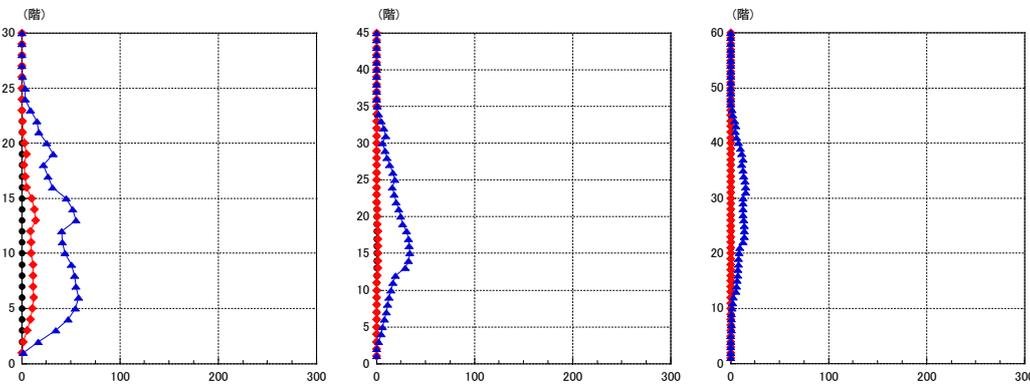
(a) 最大層間変形角



(b) 最大梁塑性率



(c) 最大梁累積塑性変形倍率



(d) 速度応答スペクトル

(e) 速度エネルギースペクトル

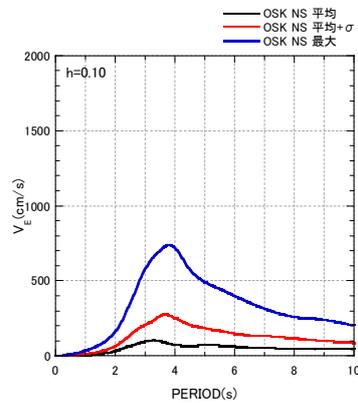
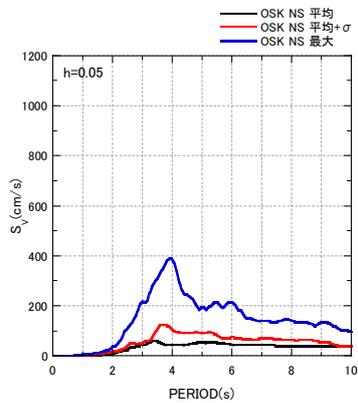
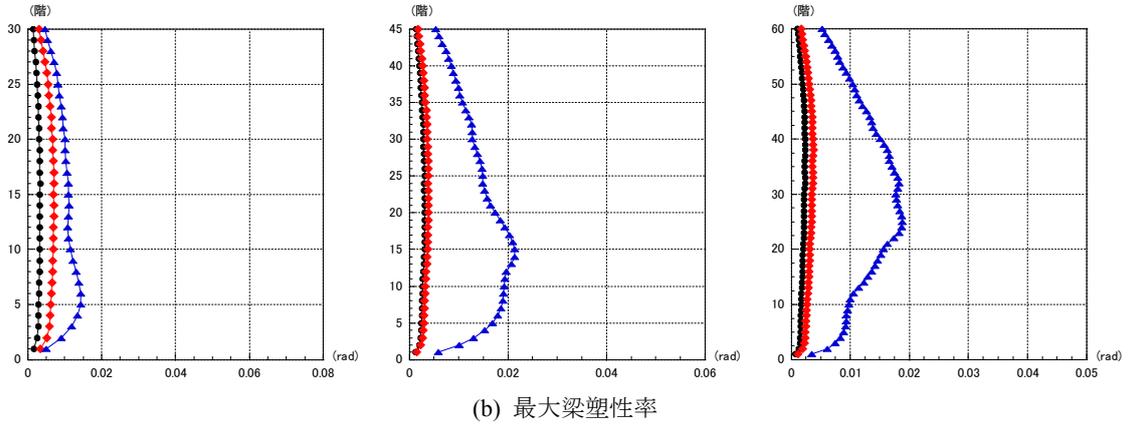


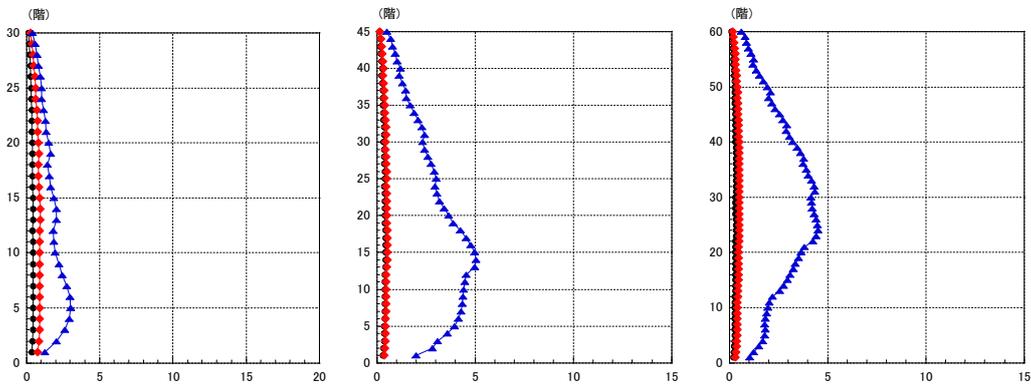
図 3.5-4(1) 応答最大値と地震動の特性 (大阪 NS) 左 30 階、中 45 階、右 60 階。

—●— OSK EW 平均 —◆— OSK EW 平均+ σ —▲— OSK EW 最大

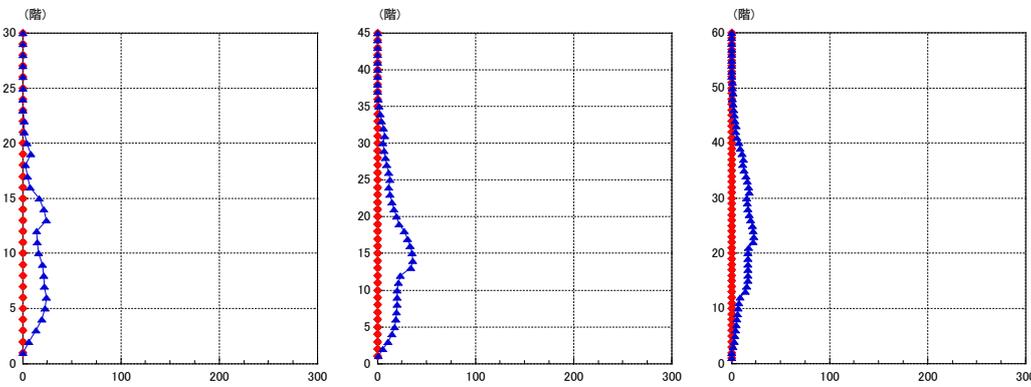
(a) 最大層間変形角



(b) 最大梁塑性率



(c) 最大梁累積塑性変形倍率



(d) 速度応答スペクトル

(e) 速度エネルギースペクトル

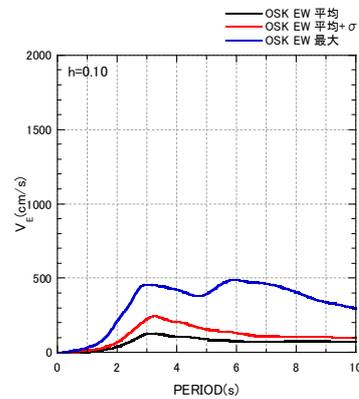
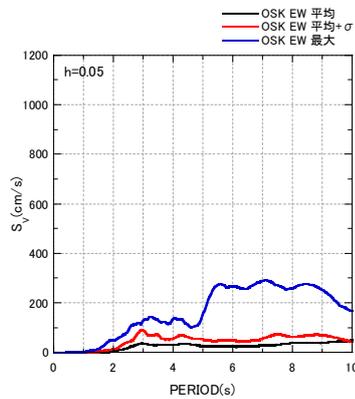
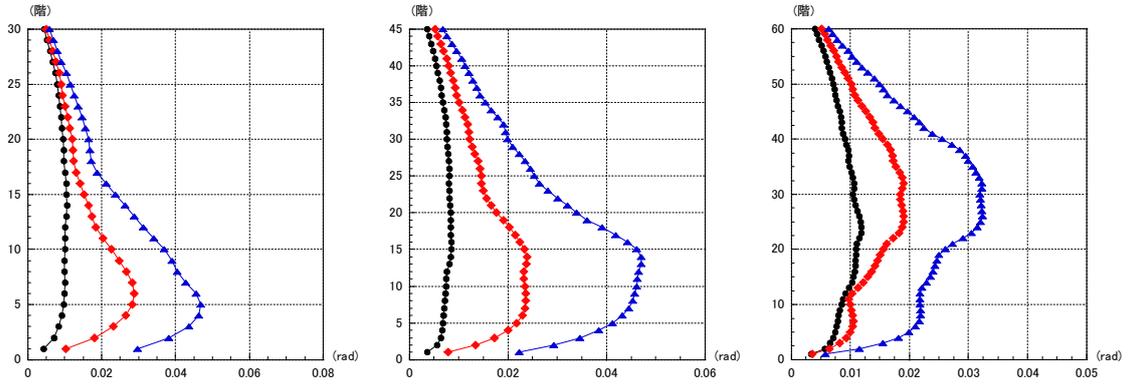


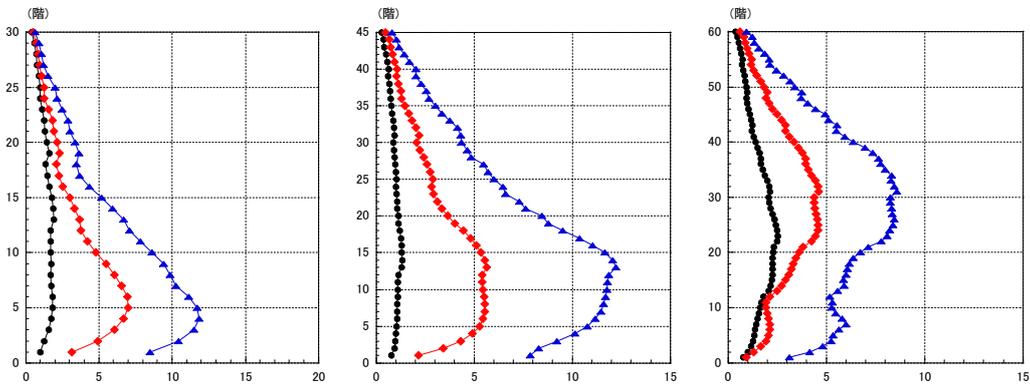
図 3.5-4(2) 応答最大値と地震動の特性 (大阪 EW) 左 30階、中 45階、右 60階。

● OMS NS 平均 ◆ OMS NS 平均+ σ ▲ OMS NS 最大

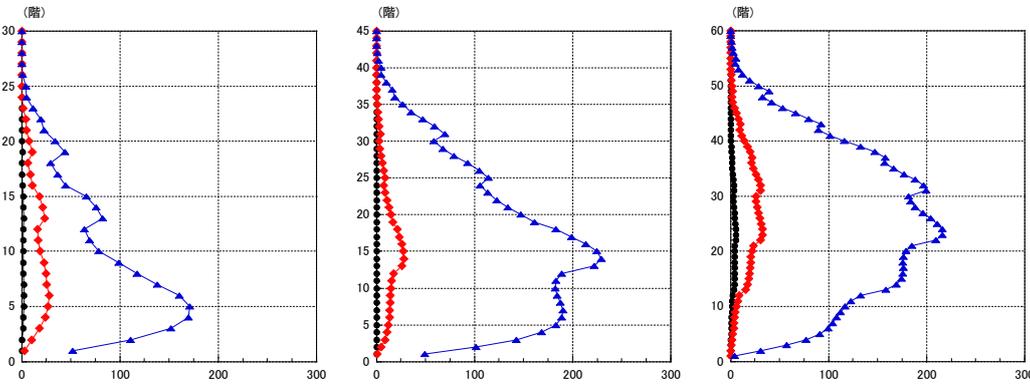
(a) 最大層間変形角



(b) 最大梁塑性率



(c) 最大梁累積塑性変形倍率



(d) 速度応答スペクトル

(e) 速度エネルギースペクトル

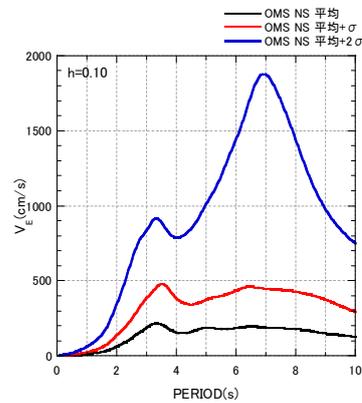
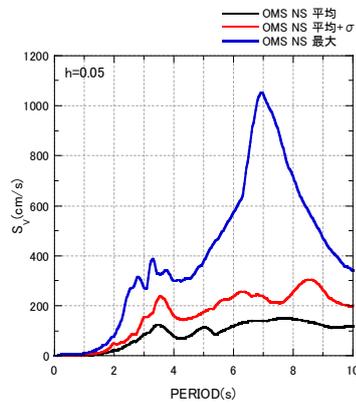
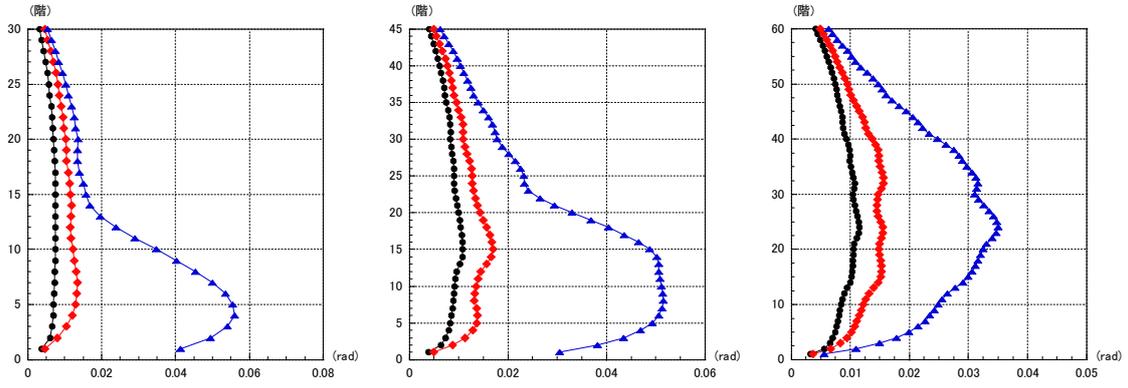


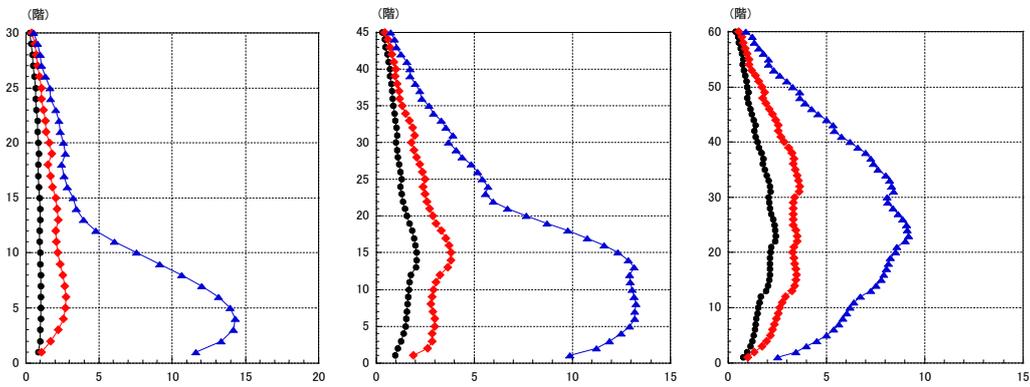
図 3.5-5(1) 応答最大値と地震動の特性 (大阪舞洲 NS) 左 30 階、中 45 階、右 60 階。

—●— OMS EW 平均 —◆— OMS EW 平均+ σ —▲— OMS EW 最大

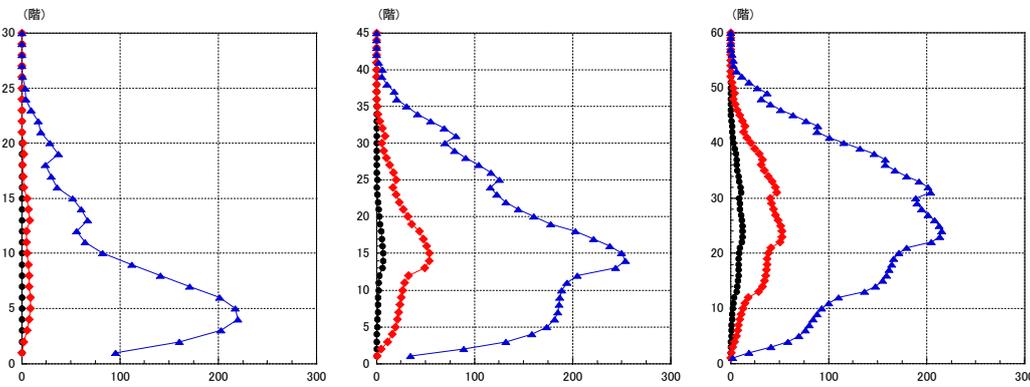
(a) 最大層間変形角



(b) 最大梁塑性率



(c) 最大梁累積塑性変形倍率



(d) 速度応答スペクトル

(e) 速度エネルギースペクトル

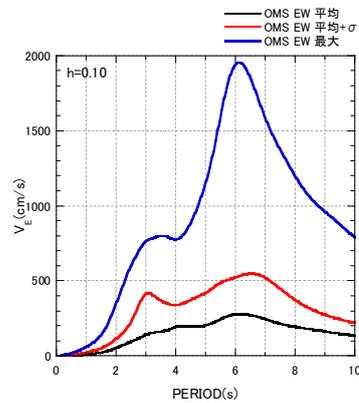
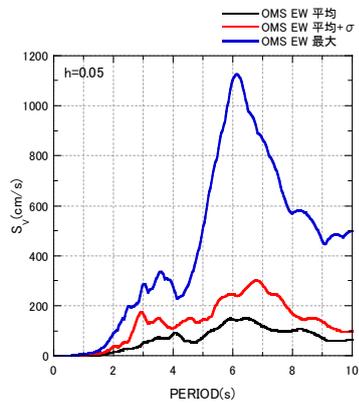
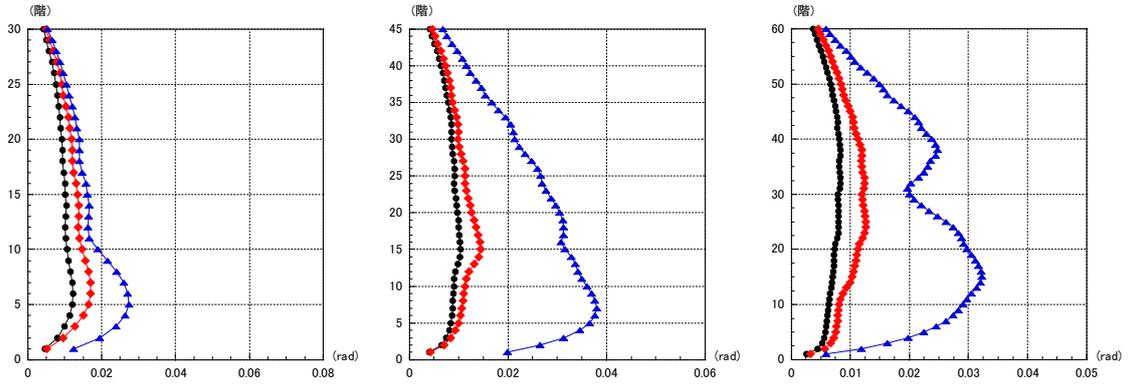


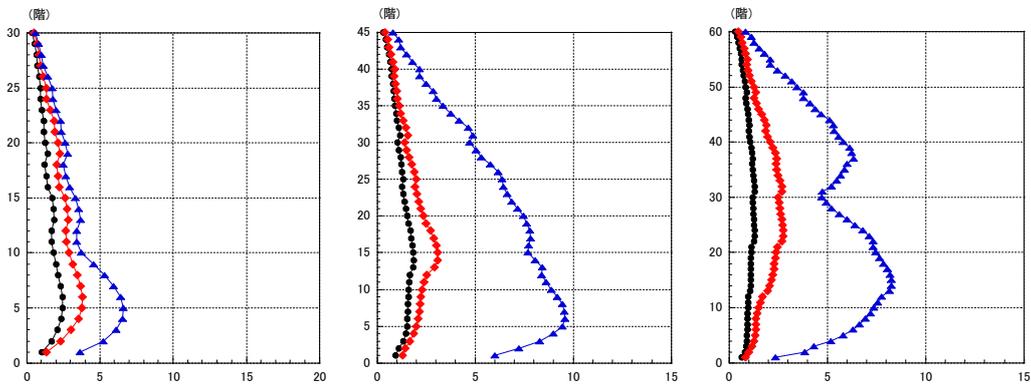
図 3.5-5(2) 応答最大値と地震動の特性 (大阪舞洲 EW) 左 30 階、中 45 階、右 60 階。

—●— TKY NS 平均 —◆— TKY NS 平均+ σ —▲— TKY NS 最大

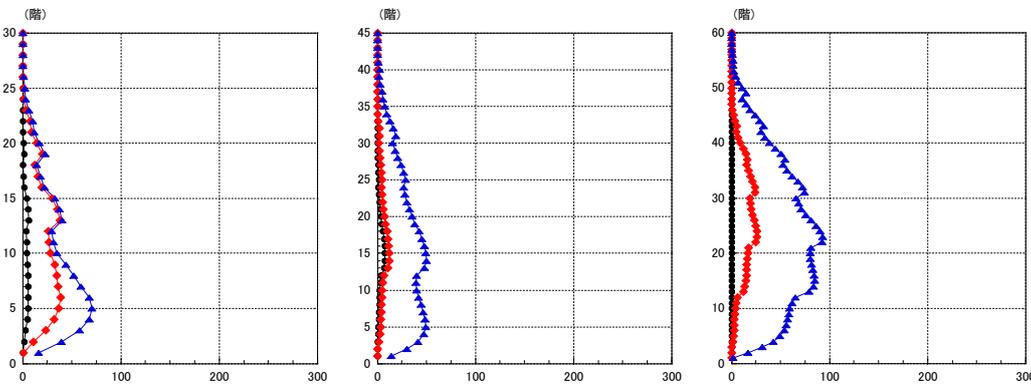
(a) 最大層間変形角



(b) 最大梁塑性率



(c) 最大梁積塑性変形倍率



(d) 速度応答スペクトル

(e) 速度エネルギースペクトル

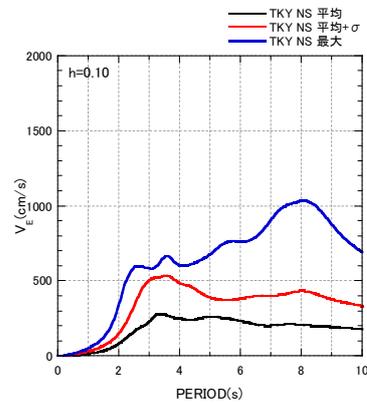
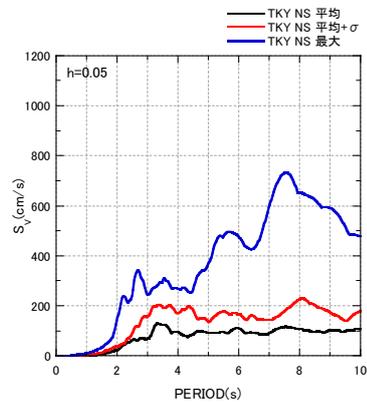
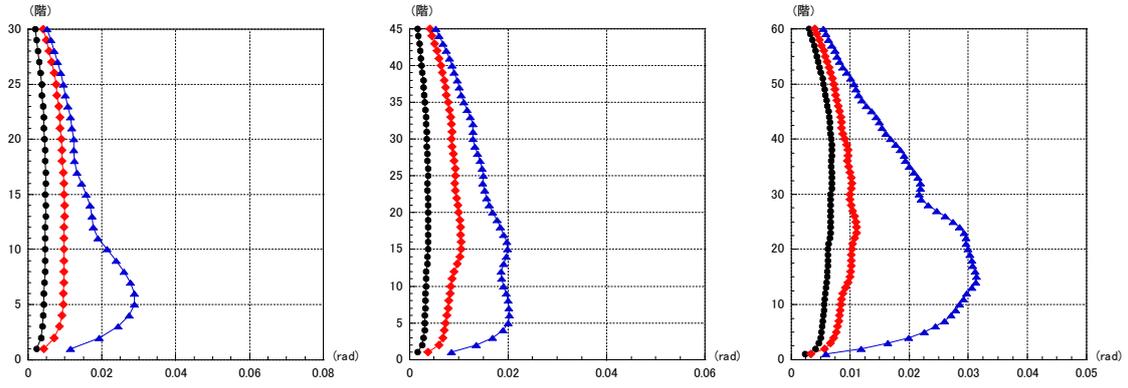


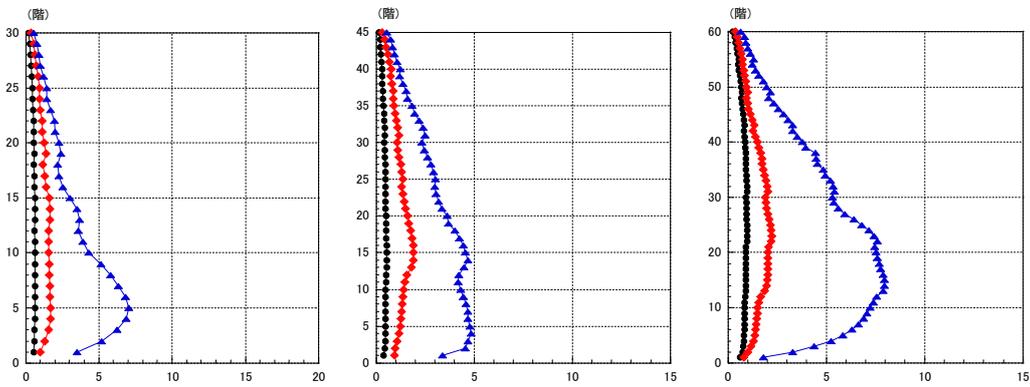
図 3.5-6(1) 応答最大値と地震動の特性 (東京 NS) 左 30 階、中 45 階、右 60 階。

—●— TKY EW 平均 —◆— TKY EW 平均+ σ —▲— TKY EW 最大

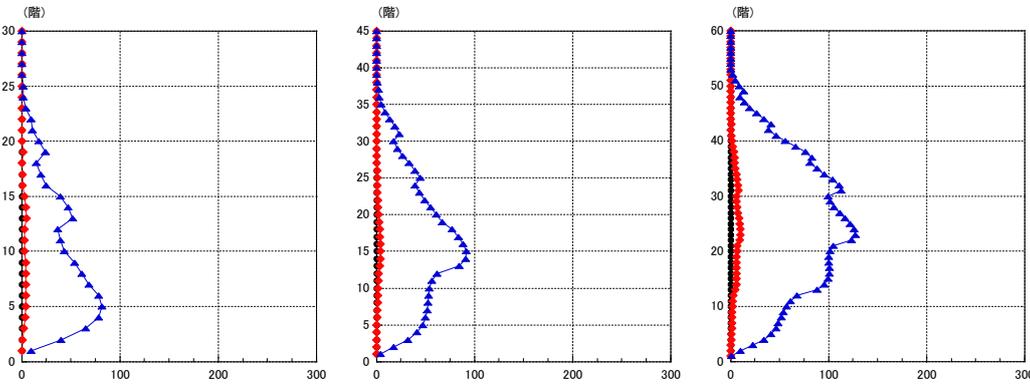
(a) 最大層間変形角



(b) 最大梁塑性率



(c) 最大梁累積塑性変形倍率



(d) 速度応答スペクトル

(e) 速度エネルギースペクトル

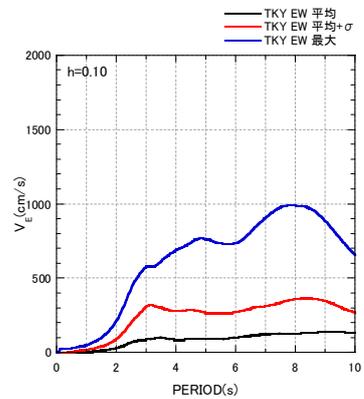
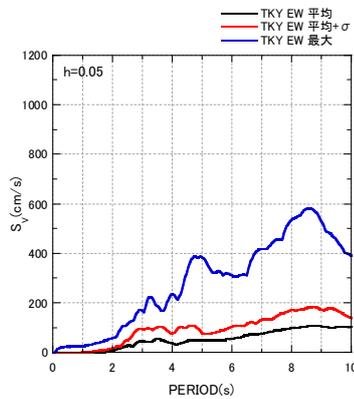


図 3.5-6(2) 応答最大値と地震動の特性 (東京 EW) 左 30 階、中 45 階、右 60 階。

損傷判定は、北村・他（2006）の性能判断基準値表による。同表を表 3.5-2 に転載する。

この性能判断基準値表は、2002 年に刊行された日本建築構造技術者協会の JSCA 建築構造性能設計指針の性能メニュー（日本建築構造技術者協会編、2002）の中でその概念が定義されたもので、その後実際に性能評価に使える形にするために、性能判断基準値を定める作業が行われ、北村・他（2004）として公表された。さらに過去の種々の被害データや実験データなどを分析することにより、性能判断基準値を見直し、改良を加えたものが北村・他（2006）の性能判断基準値表で、現状において最も信頼性の高い判定基準であると考えられるため、ここではこれに準じて損傷判定することとした。

この表の中の各応答値は以下のものに対応する。

- ・建物挙動：層間変形角、応答加速度 → 建物の機能に関する指標
- ・構造骨組：層塑性率、塑性ヒンジ発生率 → 建物の損傷度に関する指標
- ・構造部材：部材塑性率、累積塑性変形倍率 → 建物の損傷度に関する指標

ここで、建物の機能に関する指標とは、設備機器・配管、外壁などの非構造部材、収容物への影響を念頭においたもの、また建物の損傷度に関する指標とは、構造体の損傷の程度を念頭においたもので、特に累積部材塑性変形倍率の $\lambda=1$ と 0 の境界値は、梁端接合部が破断に至る累積部材塑性変形倍率の平均値に対応している。ただし、これらの応答値の中で、層の塑性率については、今回の解析がすべて部材レベルの立体精算解析モデルでの応答解析であり、層の塑性率は直接出力されないため、判定には用いない。

この表の中で、現行の新築超高層ビルの耐震クライテリアは、 $\lambda=2$ すなわち安全限界余裕度 II（指定機能確保、小破、小規模修復）に対応していると考えられるため、これが長周期地震動に対する既存超高層ビルの耐震性確保の 1 つの目安になる。平均の地震動の場合の結果を表 3.5-3 に、平均+ σ の地震動の場合の結果を表 3.5-4 に示す。

表 3.5-2 耐震性能判断基準値表。

	性能評価項目	損傷限界	安全限界 余裕度 I	安全限界 余裕度 II	安全限界	安全限界 超過	
	判定値 λ	4	3	2	1	0	
建物 機能	機能	機能維持	主要機能確保	指定機能確保	限定機能確保	機能確保困難	
	層間変形角 R (rad)	1/200 以下	1/200-1/150	1/150-1/100	1/100-1/75	1/75 以上	
	床加速度 a (cm/s^2)	—	250 以下	250-500	500-1000	1000 以上	
構造 部材	部材損傷度	無損傷	軽微	小損	中損～大損	大損以上	
	部材塑性率 μ_m	1.0 以下	1.0-2.5	2.5-3.75	3.75-5.0	5.0 以上	
	累積塑 性変形 倍率 η_m	JASS6 型	0	0-5.4	5.4-12.0	12.0-21.5	21.5 以上
		ノスカラップ	0	0-9.0	9.0-20.5	20.5-36.5	36.5 以上
	梁端混用	0	0-3.5	3.5-7.5	7.5-13.5	13.5 以上	

表 3.5-3 (1) 平均の長周期地震動に対する損傷判定 (30 階建モデル)。

		AIC		OSK		OMS		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/242	1/327	1/259	1/298	1/94	1/131	1/82	1/206
	最大加速度(gal)	124	91	121	100	352	222	328	147
	判定値 λ	4	4	4	4	1	2	1	4
	機能確保	機能維持	機能維持	機能維持	機能維持	限定機能確保	指定機能確保	限定機能確保	機能維持
構造部材	部材塑性率	0.56	0.43	0.52	0.47	1.92	1.04	2.48	0.65
	部材累積塑性変形倍率	0	0	0	0	2	0	6	0
	判定値 λ	4	4	4	4	3	3	2~3	4
	構造部材損傷度	無損傷	無損傷	無損傷	無損傷	軽微	軽微	小損	無損傷

表 3.5-3 (2) 平均の長周期地震動に対する損傷判定 (45 階建モデル)。

		AIC		OSK		OMS		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/288	1/285	1/284	1/323	1/117	1/92	1/96	1/265
	最大加速度(gal)	82	77	73	66	176	207	222	81
	判定値 λ	4	4	4	4	2	1	1	4
	機能確保	機能維持	機能維持	機能維持	機能維持	指定機能確保	限定機能確保	限定機能確保	機能維持
構造部材	部材塑性率	0.47	0.50	0.52	0.45	1.33	2.08	1.87	0.54
	部材累積塑性変形倍率	0	0	0	0	0	7	8	0
	判定値 λ	4	4	4	4	3	2~3	2~3	4
	構造部材損傷度	無損傷	無損傷	無損傷	無損傷	軽微	小損	小損	無損傷

表 3.5-3 (3) 平均の長周期地震動に対する損傷判定 (60 階建モデル)。

		AIC		OSK		OMS		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/393	1/502	1/195	1/419	1/85	1/87	1/120	1/144
	最大加速度(gal)	58	46	117	52	183	211	177	138
	判定値 λ	4	4	3	4	1	1	2	2
	機能確保	機能維持	機能維持	主要機構確保	機能維持	限定機能確保	限定機能確保	指定機能確保	指定機能確保
構造部材	部材塑性率	0.37	0.30	0.70	0.35	2.53	2.42	1.32	0.97
	部材累積塑性変形倍率	0	0	0	0	6	13	0	0
	判定値 λ	4	4	4	4	2	1~2	3	4
	構造部材損傷度	無損傷	無損傷	無損傷	無損傷	小損	中損	軽微	無損傷

表 3.5-4 (1) 平均+ σ の長周期地震動に対する損傷判定 (30 階建モデル)。

		AIC		OSK		OMS		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/92	1/99	1/94	1/139	1/35	1/74	1/58	1/99
	最大加速度(gal)	344	342	356	218	429	358	428	321
	判定値 λ	1	1	1	2	0	0	0	1
	機能確保	限定機能確保	限定機能確保	限定機能確保	指定機能確保	機能確保困難	機能確保困難	機能確保困難	限定機能確保
構造部材	部材塑性率	2.07	1.70	1.92	0.94	6.98	2.75	3.83	1.70
	部材累積塑性変形倍率	3	3	14	0	28	9	39	5
	判定値 λ	3	3	1~3	4	0	2	0~1	3
	構造部材損傷度	軽微	軽微	小~中損	無損傷	大損	小損	大損	軽微

表 3.5-4 (2) 平均+ σ の長周期地震動に対する損傷判定 (45 階建モデル)。

		AIC		OSK		OMS		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/221	1/345	1/98	1/256	1/42	1/59	1/69	1/95
	最大加速度(gal)	113	74	213	89	307	286	279	218
	判定値 λ	4	4	1	4	0	0	0	1
	機能確保	機能維持	機能維持	限定機能確保	機能維持	機能確保困難	機能確保困難	機能確保困難	限定機能確保
構造部材	部材塑性率	0.60	0.41	1.86	0.54	5.63	3.83	3.10	1.91
	部材累積塑性変形倍率	0	0	2	0	28	54	13	4
	判定値 λ	4	4	3	4	0	0~1	1~2	3
	構造部材損傷度	無損傷	無損傷	軽微	無損傷	大損	大損	中損	軽微

表 3.5-4 (3) 平均+ σ の長周期地震動に対する損傷判定 (60 階建モデル)。

		AIC		OSK		OMS		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/326	1/439	1/174	1/265	1/53	1/64	1/79	1/90
	最大加速度(gal)	81	63	123	82	279	295	240	194
	判定値 λ	4	4	3	4	0	0	1	1
	機能確保	機能維持	機能維持	主要機構確保	機能維持	機能確保困難	機能確保困難	限定機能確保	限定機能確保
構造部材	部材塑性率	0.44	0.34	0.79	0.53	4.61	3.66	2.76	2.23
	部材累積塑性変形倍率	0	0	0	0	33	53	26	10
	判定値 λ	4	4	4	4	0~1	0~2	0~2	2~3
	構造部材損傷度	無損傷	無損傷	無損傷	無損傷	大損	大損	大損	小損

(B) 相模トラフ地震に対する超高層ビルの応答

「3.4 相模トラフの地震の震源モデル化手法の検討等」で実施した相模トラフの地震の長周期地震動の計算結果のうち、1703年元禄地震タイプの震源域を破壊させるケース(ケース CS12、破壊開始点 W ; $M_w=8.3$)を用いた。各地(千葉 CHB、神奈川 KNG、埼玉 SIT、東京 TKY)の長周期地震動のスペクトルを図 3.5-7 (a) に示す。また、参考として、破壊開始点を震源域の中央部とした場合(破壊開始点 C)のスペクトルを図 3.5-7 (b) に示す。以下にその応答結果をまとめる(図 3.5-8~図 3.5-10)。

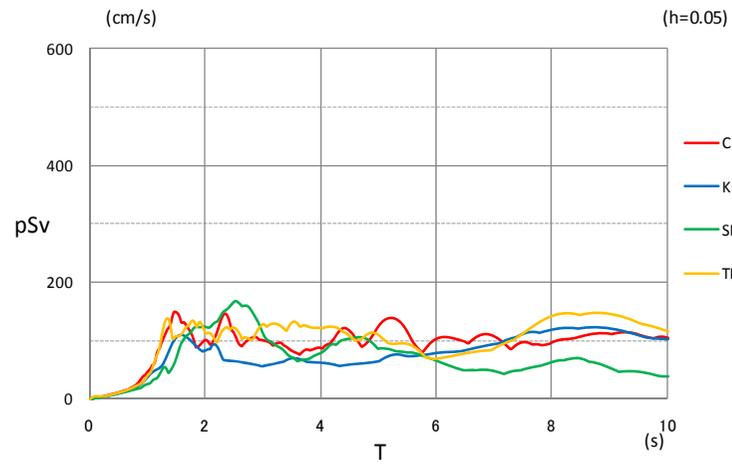
- ・ 最大層間変形角は最大でも 1/100 を少し超過する程度で過大ではない。
- ・ 部材塑性率は最大でも 2~3 程度で過大ではない。
- ・ 累積塑性変形倍率は千葉地点の 45 階建のみ 10 を超過し、損傷が予想される。
- ・ いずれの応答指標についても、(上述の 45 階建累積塑性変形倍率を除き)建物の階数には依存せず、概ね同程度の応答となっている。

なお、東京を中心とした大都市圏にとって地震動が大きくなると想定される破壊開始点を設定したケース(CS12、破壊開始点 C)の場合、応答スペクトルの振幅が W に比べて 2 倍以上であることから、各地点での最大層間変形角は 1/50 を大きく超える応答が想定される。実際に試算した結果、神奈川、東京、埼玉では解析結果は 1/30 程度となった(表 3.5-5)。ただし、そのような大変形では、P- Δ 効果による変形の増大や、柱や梁等の部材の劣化が想定される。それらを取り込んでいない現状の解析はそのような大変形域での信頼性に問題があるものと考えられる。従って、ここでは応答最大値を示すにとどめ、それ以上の考察は加えていない。

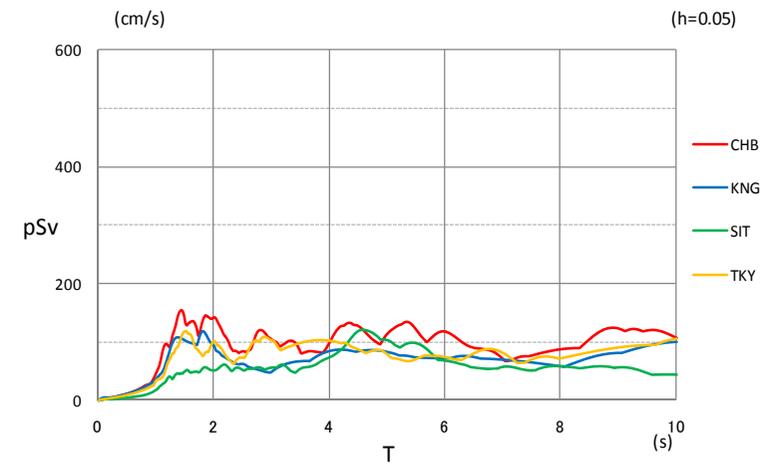
また、南海トラフの地震の検討と同様に応答解析結果を用い、各地の超高層建物の被害想定を実施した。被害想定は、表 3.5-2 の耐震性能判定基準地表に基づいて行った結果を表 3.5-6 に示す。

(a) 破壊開始点 W

NS

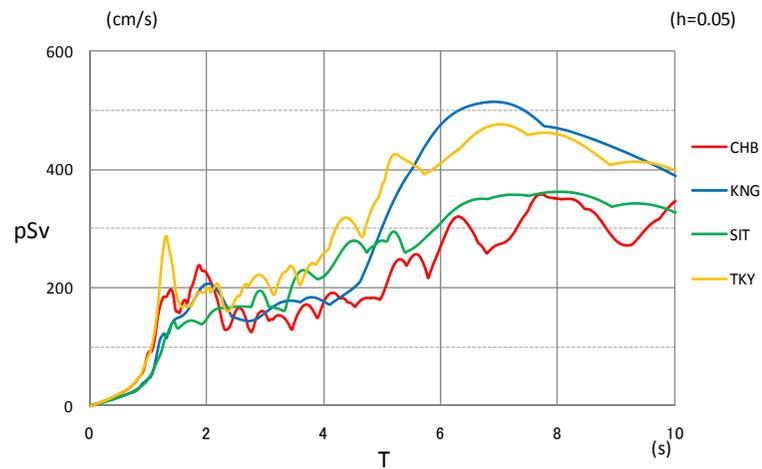


EW



(b) 破壊開始点 C

NS



EW

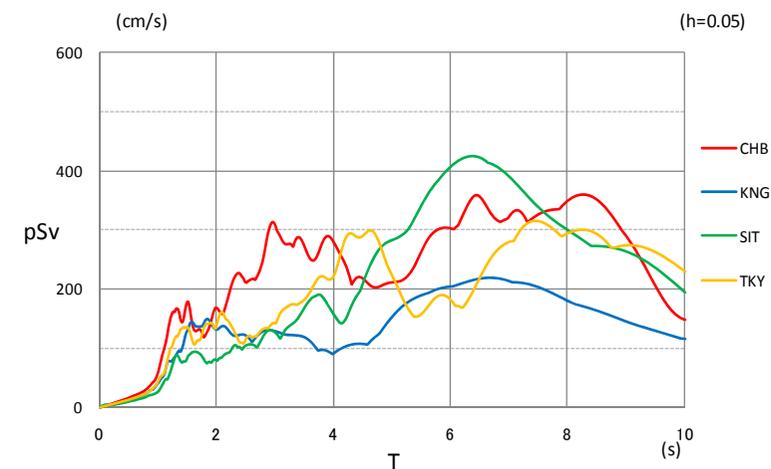
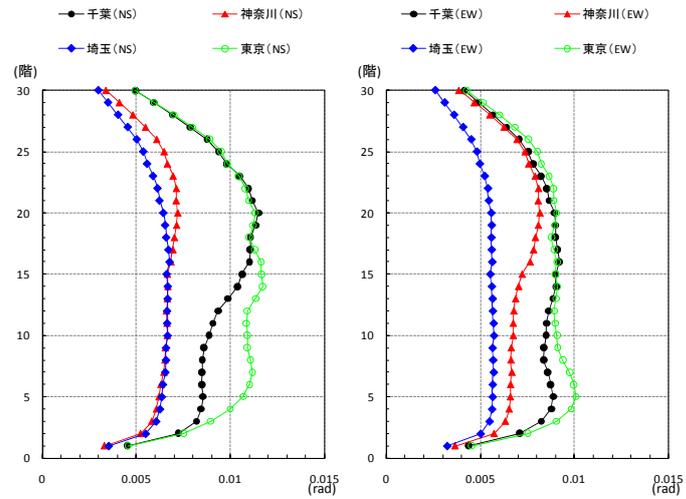
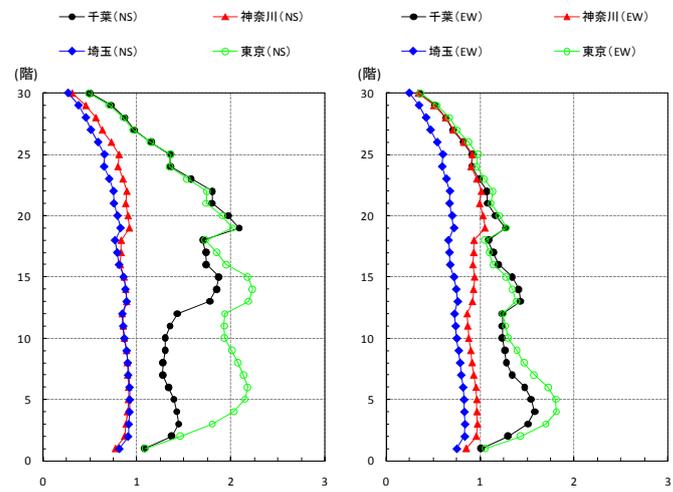


図 3.5-7 相模トラフの長周期地震動 (擬似速度応答スペクトル)。

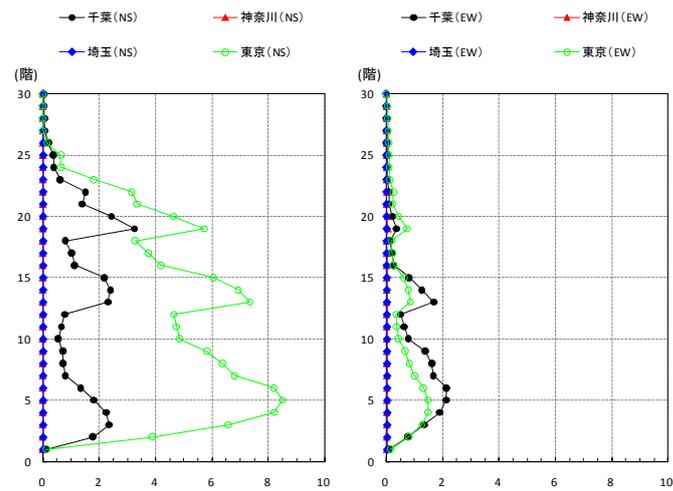
最大層間変形角



最大部材塑性率



最大部材累積塑性変形倍率

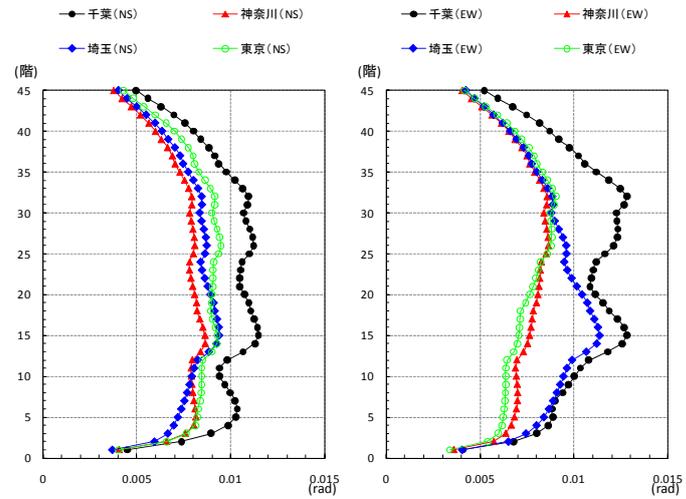


左：NS、右：EW

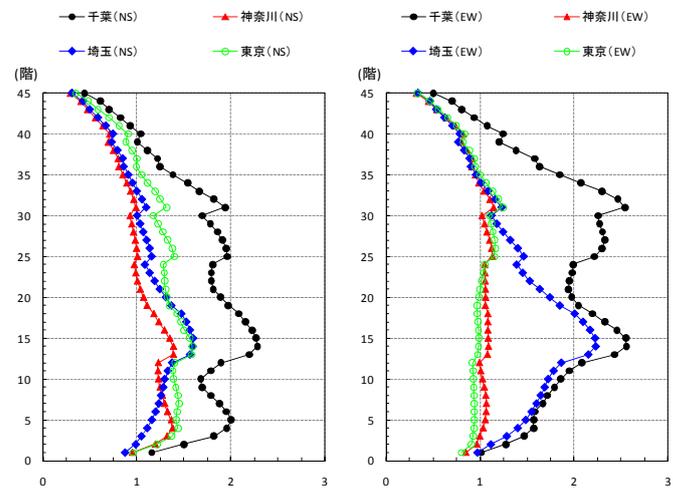
黒：千葉、赤：神奈川、青：埼玉、緑：東京

図 3.5-8 相模トラフの地震動による応答 (30 階建、破壊開始点 W)。

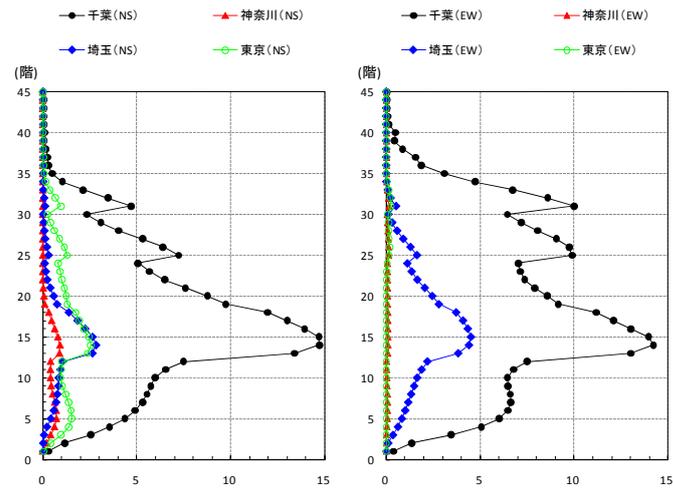
最大層間変形角



最大部材塑性率



最大部材累積塑性変形倍率

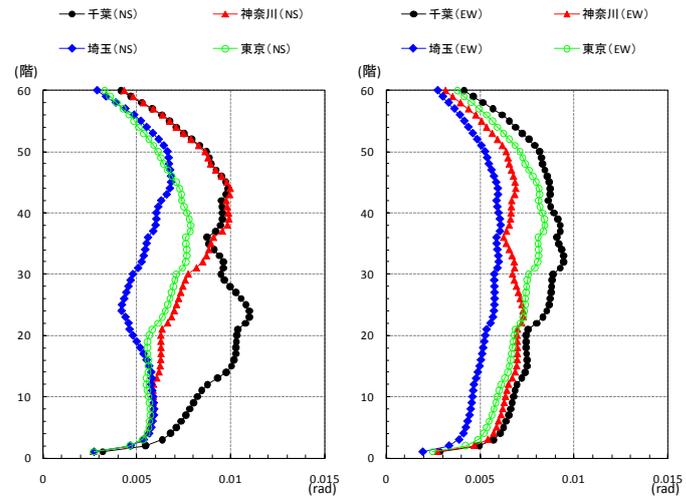


左：NS、右：EW

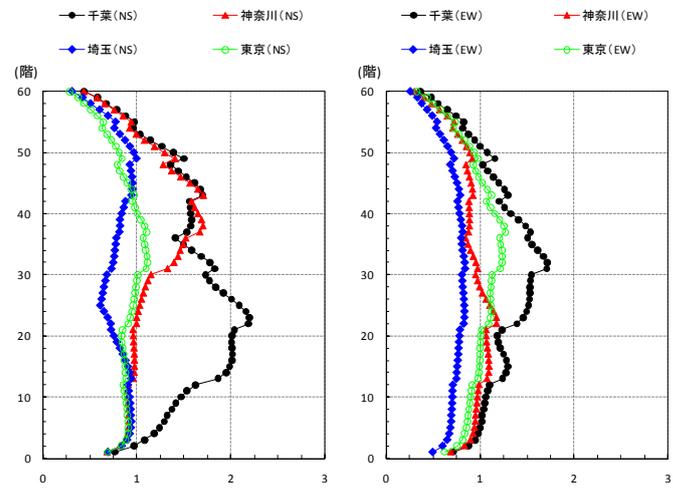
黒：千葉、赤：神奈川、青：埼玉、緑：東京

図 3.5-9 相模トラフの地震動による応答 (45 階建、破壊開始点 W)。

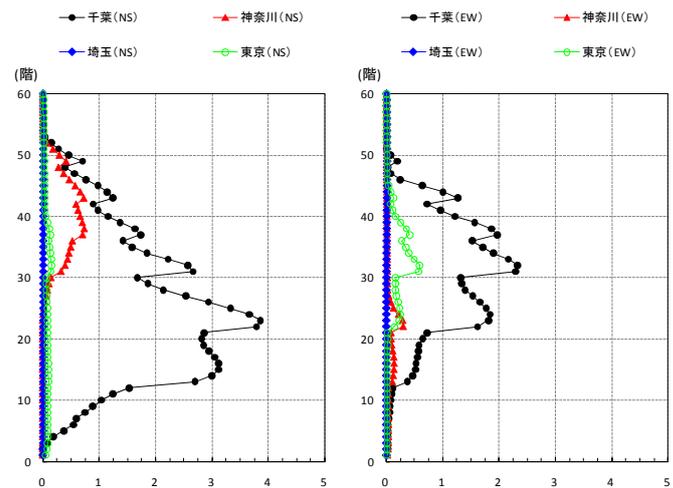
最大層間変形角



最大部材塑性率



最大部材累積塑性変形倍率



左：NS、右：EW

黒：千葉、赤：神奈川、青：埼玉、緑：東京

図 3.5-10 相模トラフの地震動による応答 (60 階建、破壊開始点 W)。

表 3.5-5 (1) 30 階建モデルの長周期地震動に対する応答値 (破壊開始点 C)。

	CHB		KNG		SIT		TKY	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
最大層間変形角(rad)	1/54	1/38	1/32	1/81	1/36	1/53	1/34	1/40
最大加速度(Gal)	567	557	481	366	520	432	637	443
部材塑性率	4.25	6.29	7.66	2.50	6.68	4.23	7.15	5.95
部材累積塑性変形倍率	26	57	24	2	27	25	67	40

表 3.5-5 (2) 45 階建モデルの長周期地震動に対する応答値 (破壊開始点 C)。

	CHB		KNG		SIT		TKY	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
最大層間変形角(rad)	1/53	1/41	1/22	1/67	1/33	1/41	1/23	1/50
最大加速度(Gal)	462	381	328	426	360	365	391	344
部材塑性率	4.27	5.72	11.50	3.33	7.47	5.93	11.25	4.53
部材累積塑性変形倍率	64	51	30	9	84	36	88	31

表 3.5-5 (3) 60 階建モデルの長周期地震動に対する応答値 (破壊開始点 C)。

	CHB		KNG		SIT		TKY	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
最大層間変形角(rad)	1/53	1/44	1/29	1/71	1/42	1/49	1/31	1/55
最大加速度(Gal)	385	358	354	289	343	297	359	358
部材塑性率	4.53	5.68	8.93	3.16	6.03	4.95	8.42	4.42
部材累積塑性変形倍率	69	64	24	9	40	24	76	48

表 3.5-6 (1) 30 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定 (破壊開始点 W)。

		CHB		KNG		SIT		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/87	1/109	1/139	1/123	1/148	1/175	1/85	1/99
	最大加速度(gal)	438	338	310	357	225	216	481	381
	判定値 λ	1	2	2	2	2	3	1	1
	機能確保	限定機能確保	指定機能確保	指定機能確保	指定機能確保	指定機能確保	主要機能確保	限定機能確保	限定機能確保
構造部材	部材塑性率	2.09	1.58	0.92	1.05	0.93	0.84	2.23	1.81
	部材累積塑性変形倍率	3	2	0	0	0	0	8	1
	判定値 λ	3	3	4	3	4	4	2~3	3
	構造部材損傷度	軽微	軽微	無損傷	軽微	無損傷	無損傷	小損	軽微

表 3.5-6 (2) 45 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定 (破壊開始点 W)。

		CHB		KNG		SIT		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/87	1/78	1/116	1/116	1/107	1/88	1/106	1/111
	最大加速度(gal)	323	369	257	283	266	248	327	270
	判定値 λ	1	1	2	2	2	1	2	2
	機能確保	限定機能確保	限定機能確保	指定機能確保	指定機能確保	指定機能確保	限定機能確保	指定機能確保	指定機能確保
構造部材	部材塑性率	2.28	2.56	1.39	1.14	1.60	2.23	1.59	1.24
	部材累積塑性変形倍率	15	14	1	0	3	5	3	0
	判定値 λ	1~3	1~2	3	3	3	3	3	3
	構造部材損傷度	小損	中損	軽微	軽微	軽微	軽微	軽微	軽微

表 3.5-6 (3) 60 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定 (破壊開始点 W)。

		CHB		KNG		SIT		TKY	
		NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
建物機能	最大層間変形角(rad)	1/91	1/106	1/101	1/137	1/147	1/165	1/127	1/118
	最大加速度(gal)	304	274	277	251	274	154	206	225
	判定値 λ	1	2	2	2	2	3	2	2
	機能確保	限定機能確保	指定機能確保	指定機能確保	指定機能確保	指定機能確保	主要機能確保	指定機能確保	指定機能確保
構造部材	部材塑性率	2.20	1.71	1.71	1.17	1.00	0.84	1.11	1.27
	部材累積塑性変形倍率	4	2	1	0	0	0	0	1
	判定値 λ	3	3	3	3	3	4	3	3
	構造部材損傷度	軽微	軽微	軽微	軽微	軽微	無損傷	軽微	軽微

(C) 長周期地震動に対する被害と指標の検討

長周期地震動の揺れに対する尺度としては、タンクのスロッシングなどのように固有周期で揺れる構造物については、速度応答スペクトルのように周期ごとの揺れの尺度を用いることが合理的である。しかし、特定の構造物ではなく様々な超高層ビルや免震構造物が建っている都市部のある地域での長周期地震動による揺れを一般的に示す尺度としては、低層の建物や地上にいる住民に対する尺度である通常の震度のように周期に対して包括的で分かりやすいものが望ましい。そのような指標として神田・他（2012）は「長周期震度」を提案している。そこで、2011年東北地方太平洋沖地震において長周期地震動と関係していると考えられる免震構造物、タンクおよび超高層ビルの被害や揺れの報告を調査し、その場所を特定できた場合について「長周期震度」との関係进行分析した。ここで、「長周期震度」については、フィルター特性が長周期側で異なる3種類を考慮した（図3.5-11）。

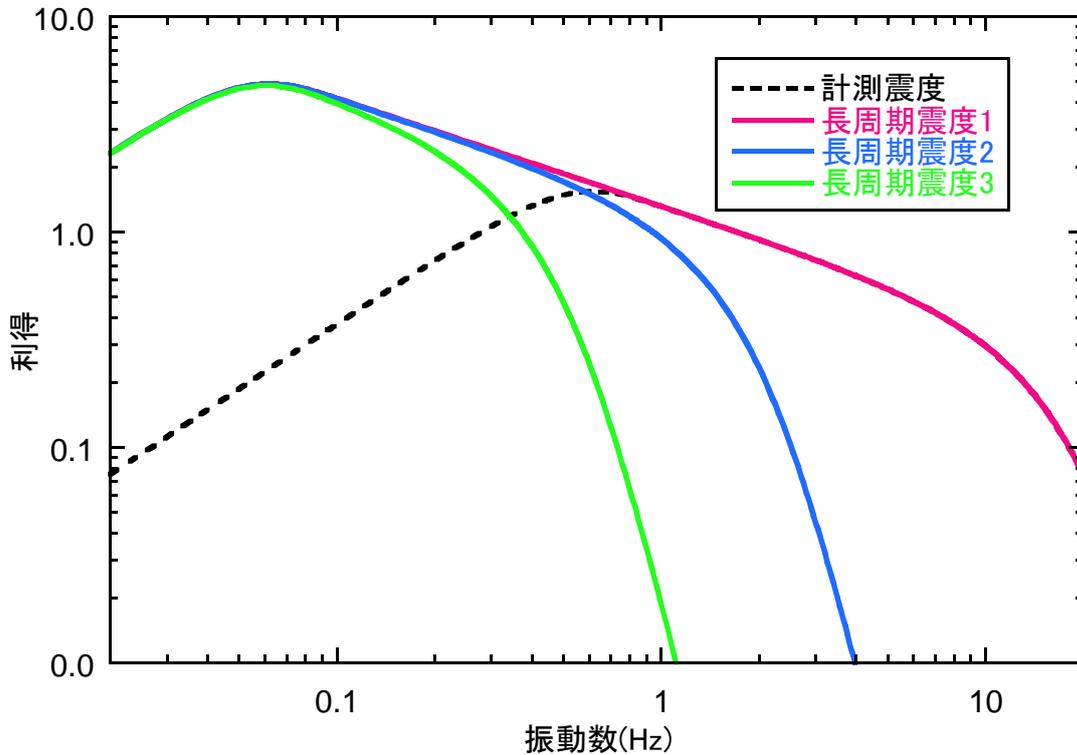


図 3.5-11 検討に用いる3つの長周期震度のフィルタ特性。

○免震層の最大変位

免震構造物については、2011年東北地方太平洋沖地震における被害としては、免震と非免震の境界部のエキスパンション部分の損傷や鉛ダンパの亀裂など軽微なものが報告されているが、免震装置自体は目立った被害は報告されていない。長周期地震動の揺れが大きくなると免震層で大きな変形が生じ、免震装置の損傷や擁壁との衝突など被害が発生する可能性が高くなる。そこで、建築研究所の調査報告書および日本建築学会の公開研究集会資料に記載された免震層の変形を尺度として指標との関係を検討した。震度はK-NETおよびKiK-netの記録を分析して求め、平面的に単純補間した値を用いた。

建築研究所のデータのみによる免震層の最大変位と各震度の関係を図3.5-12に示す。なお、震度は振幅の対数に比例するので横軸は対数軸で表示する。最大変位が40cmだった建物L（登米市消防本部）だけが特性が異なる。これは免震の罫書き式変位計で記録されたもので記録誤差とは考え難い。図3.5-13に防災科学技術研究所の地震ハザードステーション（J-SHIS）による登米市の免震建物周辺の地盤増幅率分布を示す。免震建物とK-NETおよびKiK-netの観測点位置を加筆している。建物Lは河川のそばで、地盤増幅率が大きい沖積地盤に位置している。それに対して近傍のK-NETおよびKiK-netの観測点は沖積地盤の淵に位置している。沖積平野で表面波などの長周期地震動が増幅し、実際の長周期震度は周辺の観測点から評価した値よりも大きかった可能性は高いことが分かる。

建築研究所（建物Lを除く）のデータに日本建築学会の資料のデータを加えて、図3.5-14に免震層の最大変位と震度の関係を示す。最大変位の対数と震度の相関係数を表3.5-7に示す。長周期震度1が相関が一番よいことが分かる。ただし、変位が大きくなると長周期震度2や3の方が、相関はよい傾向がみられる。

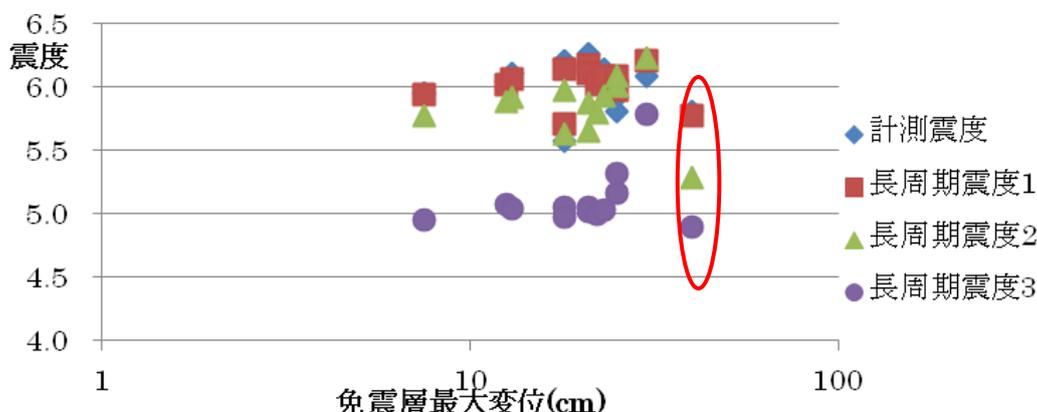


図 3.5-12 免震層の最大変位（建築研究所, 2011）と震度の関係。
（赤楕円で囲んだものは登米市消防本部の記録）

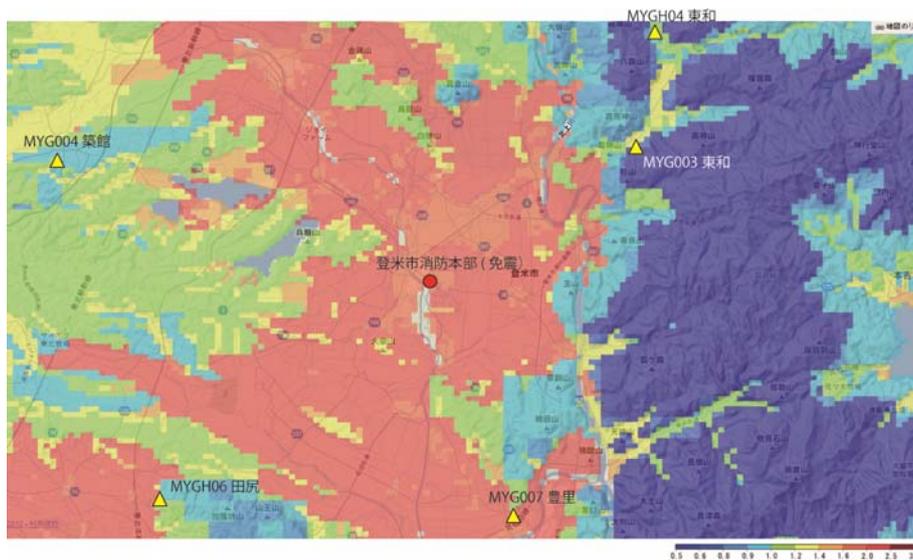


図 3.5-13 登米市消防本部（免震）と J-SHIS 表層地盤増幅率分布および周りの K-NET、KiK-net 観測点（防災科研 HP の図に加筆）。

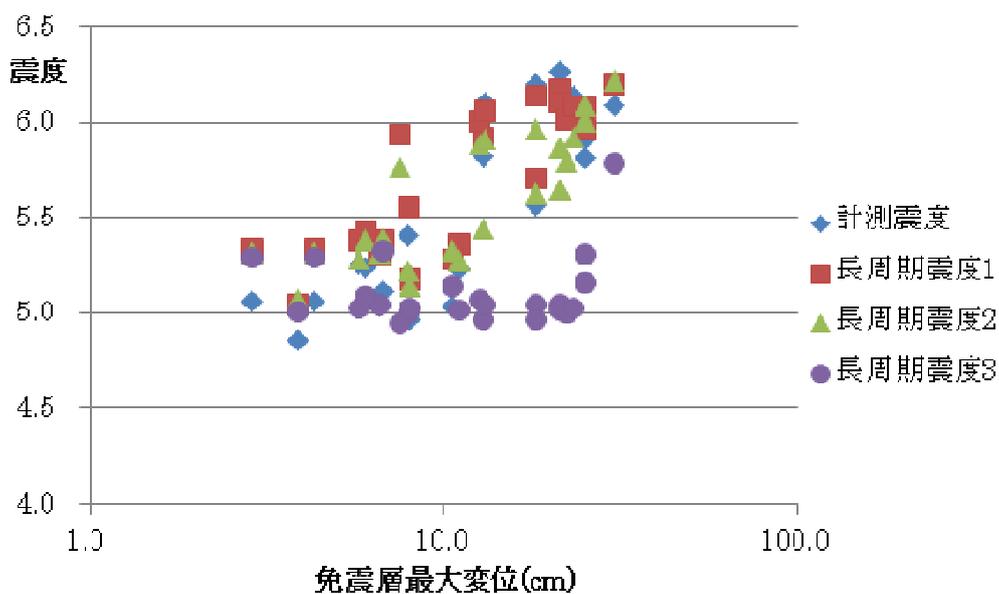


図 3.5-14 2011 年東北地方太平洋沖地震の免震層の最大変位と長周期指標。
（建築研究所（登米市建物を除く）+ 日本建築学会）

表 3.5-7 免震層最大変位の対数と震度の相関係数（登米市建物を除く）。

	計測震度	長周期震度 1	長周期震度 2	長周期震度 3
相関係数	0.807	0.830	0.814	0.112

○石油タンクのスロッシング

石油タンクの長周期地震動被害を対象として、2011年東北地方太平洋沖地震でスロッシングによって浮屋根等の被害が生じたものを調査し、その地点での長周期震度との関係を考察した。

図 3.5-15 にスロッシング被害が生じたサイトの長周期震度を示す。酒田市が一番大きな長周期震度が観測され、スロッシング波高も 2m で一番高い。また、各サイトともに最も長周期側のフィルタを用いている長周期震度 3 が一番大きい。長周期震度 2 および 3 が 5.0 以上でスロッシングの被害が生じている。また、スロッシングの波高が一番高かった酒田が一番大きいのは、長周期震度 2 および 3 であった。タンクのスロッシングは 5 秒以上の周期で共振するので振動数フィルタ特性を考えれば、長周期震度 2 または 3 が一番相関がよいと考えられる。

2003 年十勝沖地震では苫小牧の製油所で浮屋根が破損しタンク火災が発生した。長周期地震動でスロッシングが発生し、被害が発生したと注目された。苫小牧の製油所は勇払平野の海岸沿いにある。破損したタンクのスロッシング固有周期は 7 秒以上であったので、長周期地震動③（4 秒～20 秒）を用いて東北地方太平洋沖地震と比較する。図 3.5-16 に示すように被害が発生した苫小牧の製油所地点における補間して得られた長周期震度③は 5.78 であった。これは、図 3.5-17 に示すように東北地方太平洋沖地震においてスロッシングによるタンク被害が発生した地点よりも大きく、スロッシング波高も高い。

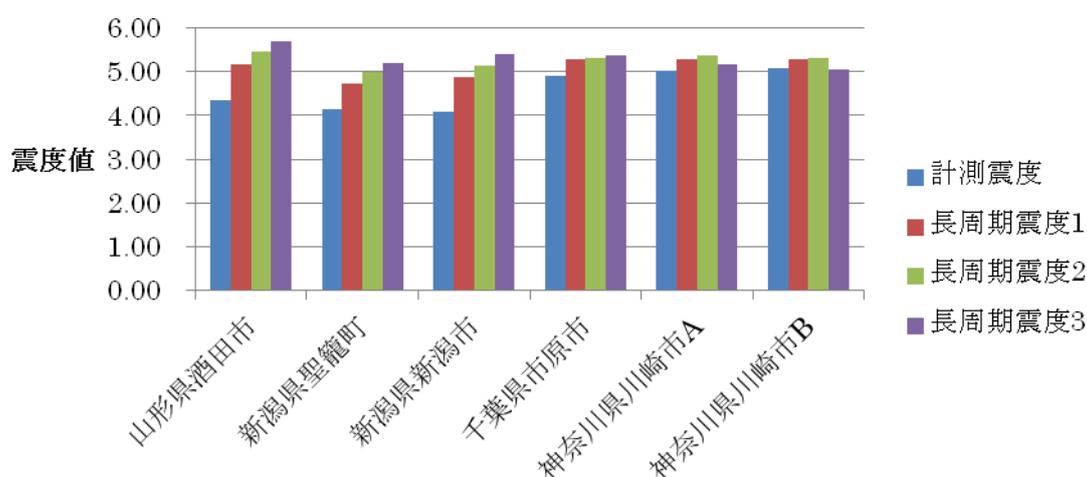


図 3.5-15 2011 年東北地方太平洋沖地震でスロッシング被害の生じた長周期震度。

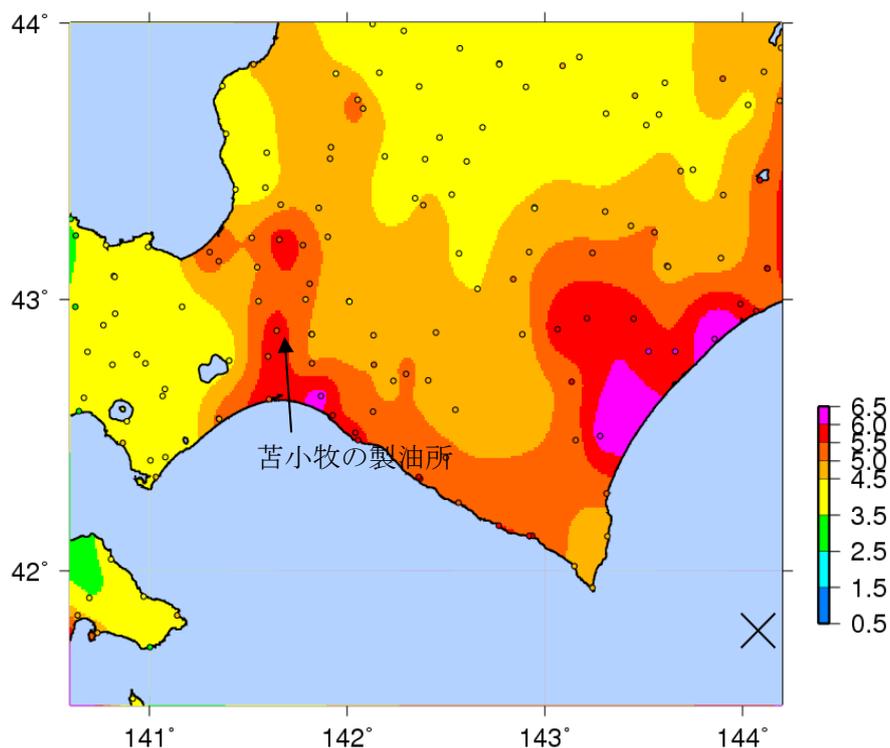


図 3.5-16 2003 年十勝沖地震における長周期震度③（4～20 秒）の分布。

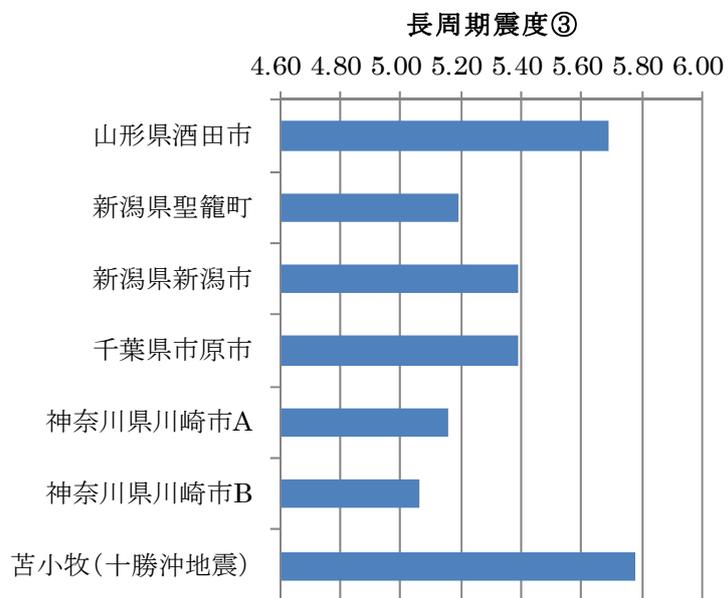


図 3.5-17 タンク被害地点の長周期震度③（東北地方太平洋沖地震との比較）。

○超高層ビルの変形と長周期震度

資料「日本建築学会構造委員会長周期建物対応小委員会：長周期地震動対策に関する公開研究集会、2012年3月16日」に記載されたデータに基づいて、東北地方太平洋沖地震の際の関東や関西における超高層ビルの応答と長周期震度の関係の分析を行った。震度の値はK-NETおよびKiK-netの観測記録から評価し、平面的に線形補間して求めた。

計測震度および長周期震度と超高層ビルの層間変形角の関係を図3.5-18に示す。長周期震度のほうが変形角との相関が高い。特に大阪府咲洲庁舎は計測震度では被害が過小評価される。これは、遠方大阪では短周期成分が減衰し長周期成分が卓越するためである。東京では長周期震度でもバラツキがみられる。これは、長周期成分だけでなく短周期成分による高次振動モードの影響や、登米市の免震建物と同じように立地地点の局所的な地盤条件の影響もあると考えられる。

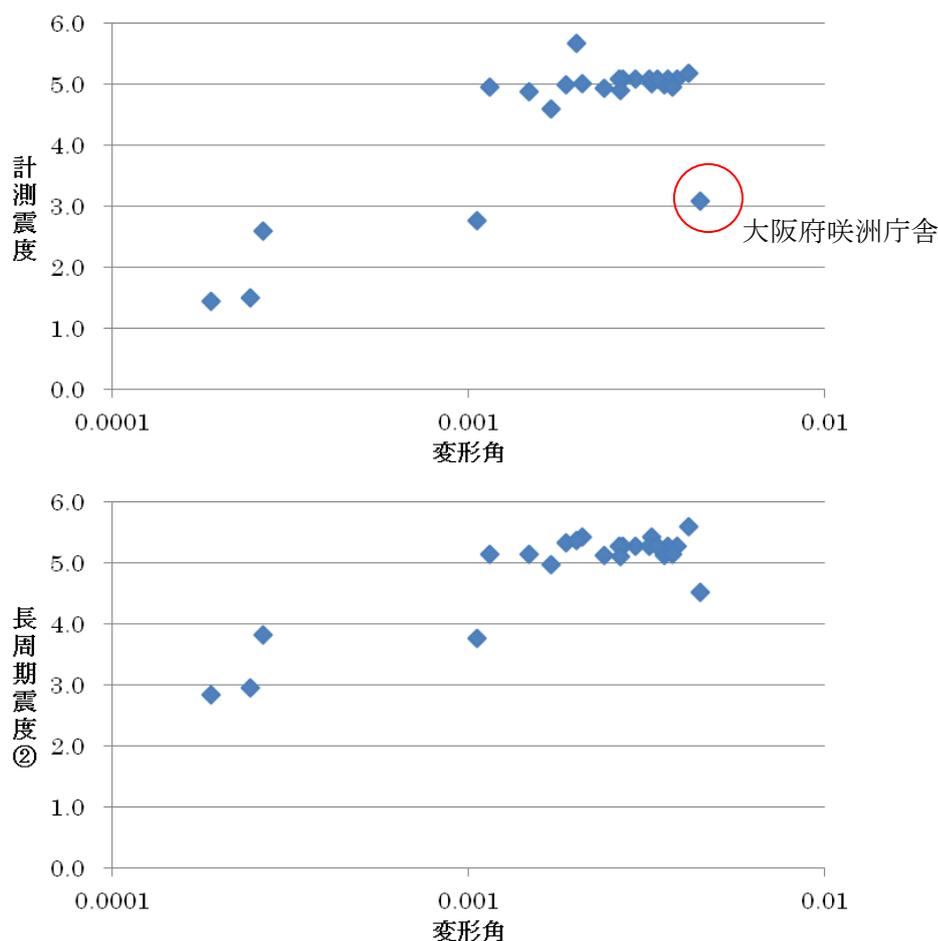


図 3.5-18 変形角と長周期震度の関係（関西および関東の超高層ビル）。
（変形角は最大値、一部平均）

2) ウェブページの試作

長周期地震動の性質や被害などについて、1) の検討内容および平成 23 年度の長周期地震動予測地図作成等支援事業において作成された解説書に基づいて、事例や解説を表示するウェブページを試作した。内容については、図 3.5-19 に示すように、大きく 4 つの項目を設定した。図中の各項目について、それぞれ HTML 形式のファイルを作成した。

トップページは目次が表示され、各項目のページに移動することができる (図 3.5-20)。また、それぞれの項目のページにも目次を入れ、任意のページに移動することを可能とした (図 3.5-21)。また、各ページに含まれている図表については、クリックすることで拡大表示するようにした (図 3.5-22)。以上の機能について、Internet Explorer 9 および Firefox 15 上で正常に動作 (表示) することを確認した。

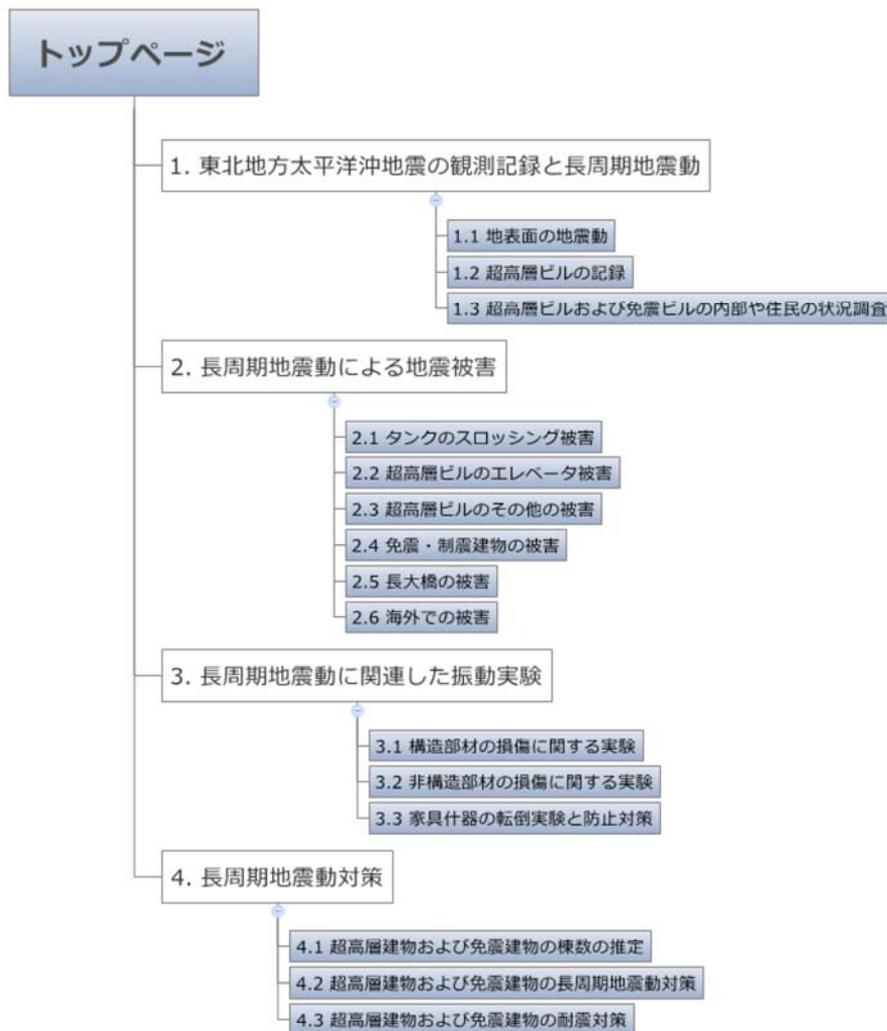


図 3.5-19 ウェブを作成した項目とサイト構成。



図 3.5-20 ウェブブラウザ（Internet Explorer 9）上で表示したトップページ。

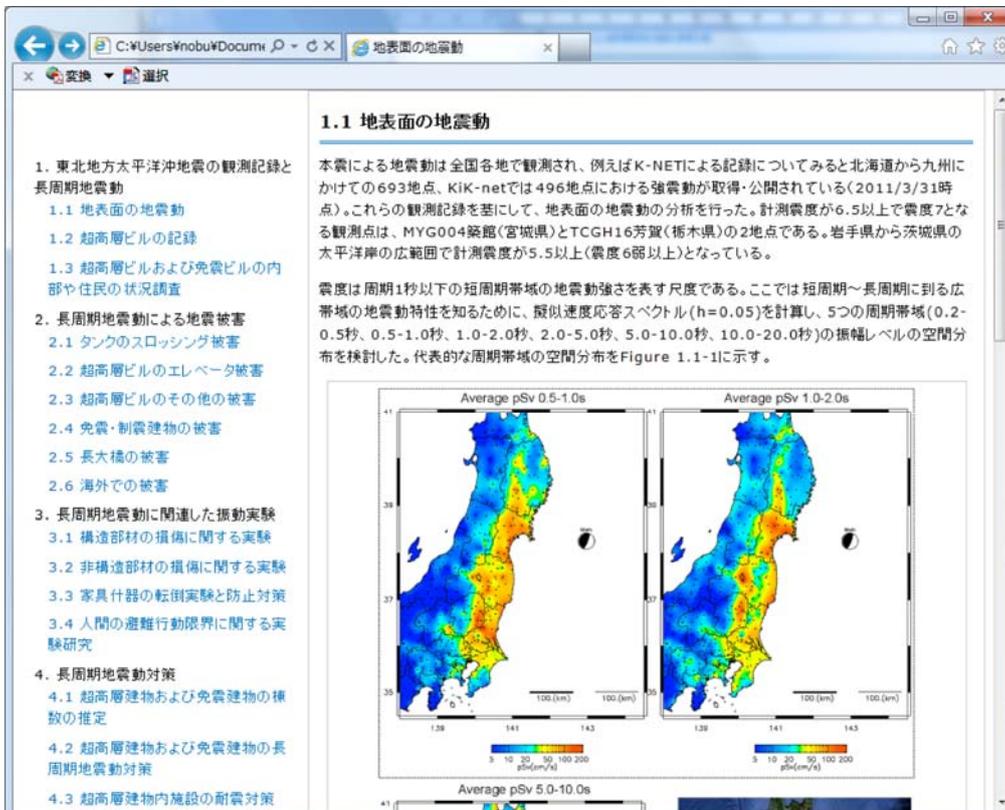


図 3.5-21 各項目ページの例。

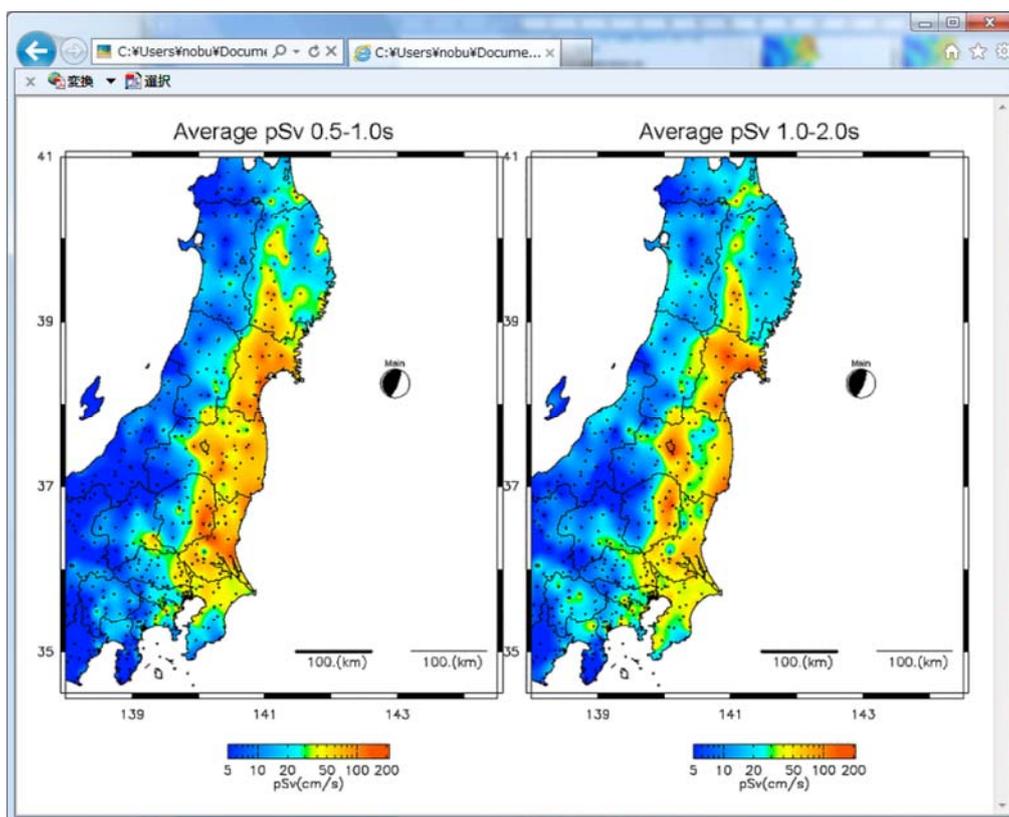


図 3.5-22 図表の拡大表示例。

3) 携帯端末等への情報提供アプリケーションの高度化

スマートフォンに関連する技術の発展は近年めざましいものであるとともに、利用者（ユーザー）も急速に増加している。このようなスマートフォンを用いて長周期地震動に関するためのアプリケーションを開発することにより、広く一般にその情報や知識を提供することが可能になると考えられる。このような状況から、平成 23 年度の長周期地震動予測地図作成等支援事業において、長周期地震動に関する情報や知識をより広くかつ分かりやすく伝えるためのスマートフォンアプリケーションが開発された。ここでは、長周期地震動に関する理解を深めるための新たな機能を追加することによりアプリケーションを高度化した。これらのアプリケーションは、スマートフォンなどの携帯端末を用いてユーザーが必要とする任意の場所にける長周期地震動に関する情報を得ることができるものである。

(A) 長周期地震動予測地図閲覧アプリの機能追加

平成 23 年度の長周期地震動予測地図作成等支援事業において、スマートフォンアプリケーション「J-SHIS」をベースとして、地震調査研究推進本部より公表されている「長周期地震動予測地図」試作版に関するアプリケーションが開発されている。これは、長周期地震動予測地図をスマートフォン上で閲覧できるだけでなく、特定の地点における最大速度

などの詳細な情報を表の形式で入手することもできるものである（図 3.5-23）。スマートフォンに搭載されている GPS 機能を使用することにより、任意の地点検索機能だけでなく、ユーザーが現在いる地点の情報を入手することも可能である。

本検討では、さらに長周期地震動に関する理解を促進することを目的として、以下の機能を追加した。

- ・ 地点情報として、表形式で数値のみ表示していたものに、速度応答スペクトルの図（グラフ）を表示する機能を追加し、対象地点において、地図で表示されている周期（5 秒、7 秒、10 秒）以外の周期の応答振幅の大きさや、どの周期が揺れやすいかを分かりやすく可視化した（図 3.5-24）。
- ・ 長周期地震動によりどのような被害が生じるかという被害事例を知ることができるように、2) で作成したウェブページを閲覧する機能を追加した（図 3.5-25）。

これらの機能追加とあわせて、現在普及している Android 及び iPhone いずれのスマートフォンや携帯タブレット端末においても多くのユーザーが利用できるように、アプリケーションは Android OS 2.3～4.0 または iOS5.1 以上に対応するようにした。



図 3.5-23 長周期地震動予測地図の表示例（平成 23 年度に開発されたもの）。

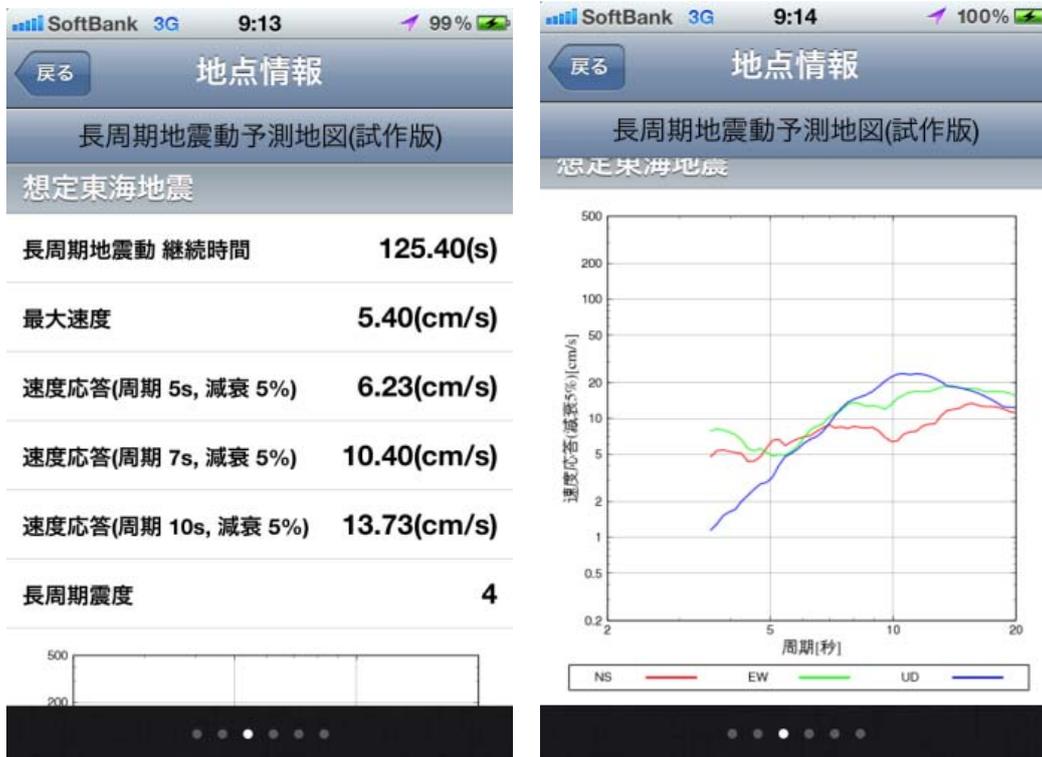


図 3.5-24 新たに追加した対象地点における速度応答スペクトル表示機能 (右)。

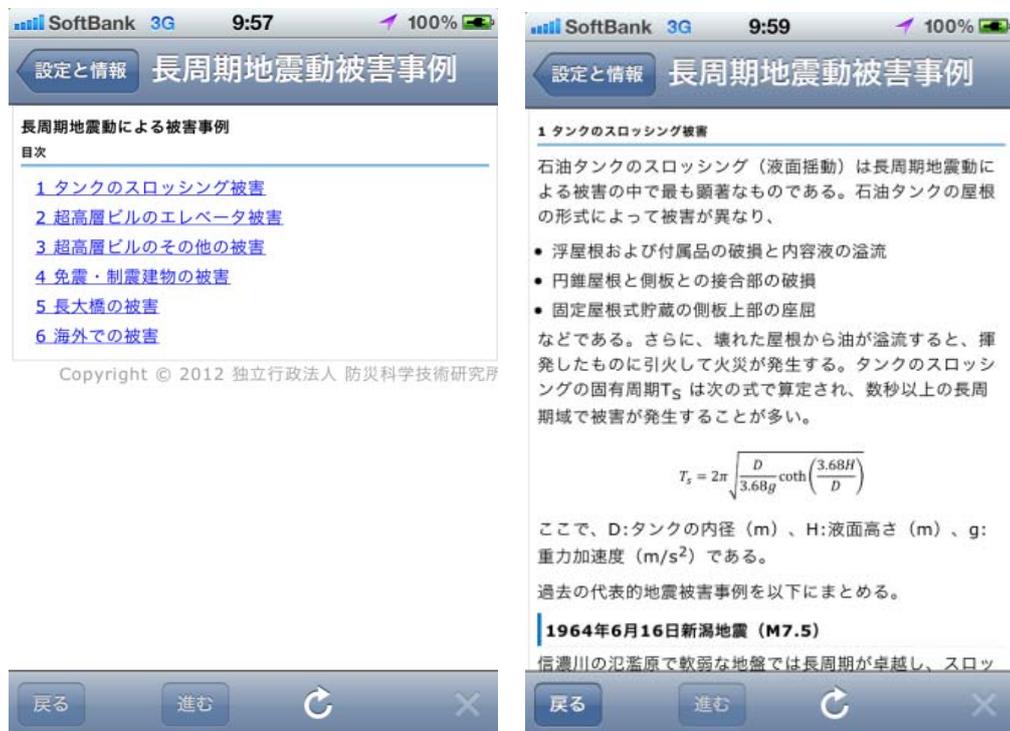


図 3.5-25 新たに追加した長周期地震動の被害事例に関するウェブ閲覧機能。

(B) ゆれビルへの機能追加

これまでに、長周期地震動による高層ビルの最上階での揺れを表示する「ゆれビル」、長周期地震動による揺れのシミュレーション動画を見ることができる「ゆれの伝わり方」、防災科学技術研究所が YouTube へ登録している長周期地震動に関する実験等の動画を見ることができる「防災科研チャンネル」が開発されている。このうち、「ゆれビル」に対して、以下の機能を追加した。

○南海地震（昭和型）によるゆれビルの再生機能。

「長周期地震動予測地図 2012 年試作版」（地震調査委員会、2012）による南海地震（昭和型）の長周期地震動予測地図データを用いて、対象とした地点は、地震調査研究推進本部で速度波形が公開されている 18 地点（図 3.5-26 の赤丸および緑丸）とした。

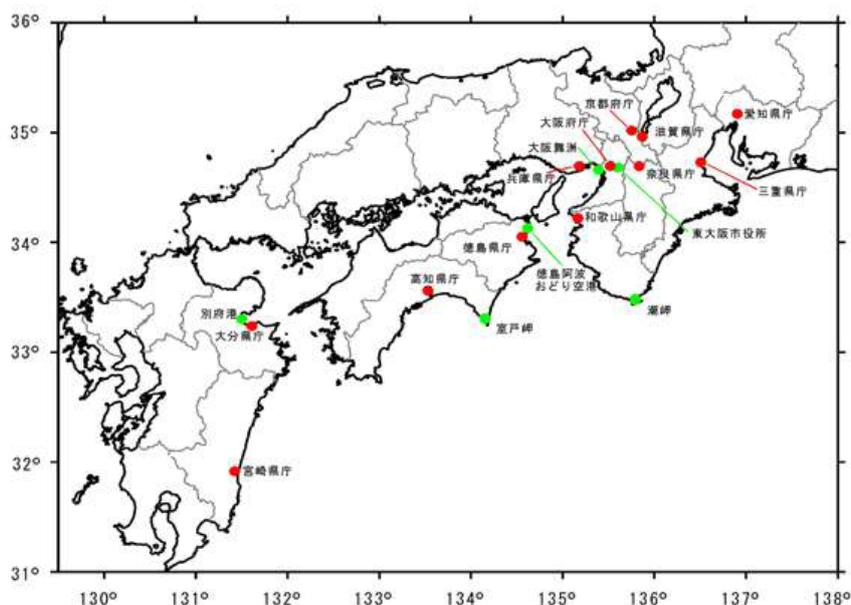


図 3.5-26 南海地震（昭和型）の長周期地震動予測地図データを追加した地点。
(地震調査委員会、2012 より)

○深部地盤構造による揺れやすさ推定機能

長周期地震動の大きさは、深部地盤構造に大きく影響を受ける。従って、深部地盤構造と長周期地震動を関連付けて示すことは非常に重要である。そこで、地震調査研究推進本部の「全国地震動予測地図」の作成に用いられ、防災科学技術研究所の J-SHIS より公開されている深部地盤構造モデルの情報を取得し、対象地点における周期ごとの地盤応答（増幅）特性を推定し、数値データまたはグラフを出力する機能（図 3.5-27）を追加した。地

盤応答特性については、対象地点直下の一次元構造を仮定した SH 波の鉛直入射の応答を計算することとした。なお、長周期地震動の揺れやすさに関しては、表面波が卓越する場合が多く、実体波である SH 波の鉛直入射による応答で表現することは厳密さを欠くが、卓越周期やおおよその振幅特性は再現できることと計算の簡便さを考慮して採用した。

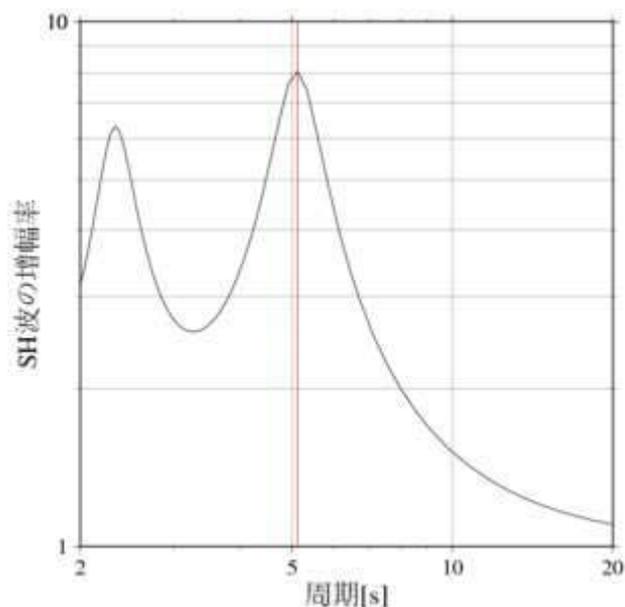


図 3.5-27 深部地盤構造による揺れやすさ推定結果の出力例。

○指定した構造による建物の揺れやすさ推定機能

これまでの「ゆれビル」では、減衰定数を 1%として応答計算を行っている。これは、特定の地点における階数（高さ）の違いによる揺れ（応答）の違い比較する分には問題ないものの、建物（ビル）すべての減衰定数が 1%であるわけではない。また、地震調査研究推進本部より公表されている長周期地震動予測地図における減衰定数は 5%が採用されている。そこで、減衰定数の違いによる応答の違いを見ることができるようになるため、減衰定数を 1～10%まで、1%刻みの 10 通りの中から指定した値で応答計算を行い、結果を表示する機能を追加した。

○地図上に配置した建物の揺れやすさ可視化機能

先に述べた通り、これまでの「ゆれビル」では、階数（高さ）の違いによる揺れ（応答）の違いを見ることができたが、異なる地点で地盤の違いや建物の違いによる長周期地震動の違いを把握することが困難であった。そこで、日本国内の任意の地点に 4 種類の建物構

造の一つまたは複数配置し、揺れの違いを見ることができる機能を追加した。このとき、携帯端末そのものを揺らし、その揺れを地震基盤に対する入力とみなして、「深部地盤構造による揺れやすさ推定機能」と同様に選択した地点の深部地盤による増幅特性を考慮することで、地点ごとに異なる揺れを生じさせる。選択できる 4 種類の建物構造について、応答計算のために設定した固有周期等を表 3.5-8 に示す。揺れの様子は、設定したそれぞれの建物位置および構造種別に異なるピンで表現した（図 3.5-28）。

表 3.5-8 選択できる建物の種類と応答計算等のために設定したパラメータ。

	建物種類	減衰定数	固有周期	表示のピンの色
1	平屋	5%	0.5 秒	緑
2	高層建物	5%	3 秒	黄色
3	超高層建物	5%	5 秒	オレンジ
4	長大橋	5%	10 秒	赤



図 3.5-28 地図上に配置した建物の揺れやすさ可視化画面。

(c) 結論ならびに今後の課題

長周期地震動予測地図の利活用に向けて、長周期地震動シミュレーション結果に基づいてどのような被害が生じ得るかについて検討し、これまでに収集した被害事例とあわせて長周期地震動に関する解説のウェブページを試作した。また、長周期地震動に関する携帯端末アプリケーションに機能追加したことにより、長周期地震動に関する知識等の普及や長周期地震動予測地図の利活用を促進するためのツールが充実してきた。さらに多くの人を対象として広く知識等を普及するための方策を進める上では、情報を一方的に発信するだけでなく、利用者側から意見等を反映して機能の改良や追加といった高度化を行うことで、さらに利用や理解が深まると考えられる。その一つとして、予測された長周期地震動に基づいて高層ビル等の被害の有無を簡易に診断するツールの開発が挙げられる。

一方で、長周期地震動シミュレーションの結果からはこれまでに経験したことがない、極めて大きな揺れが示され、高層ビルなどに大きな被害を生じさせる可能性も示されている。しかしながら、現時点においてこのような極めて大きな地震動が生じる可能性を否定はできないものの、発生する確率は極めて低い現象であると考えられる。今後、このような極めて稀な頻度で発生すると考えられる事象をどのように扱うかを判断するかが防災対策を進める上で必要であり、その判断材料としての長周期地震動のハザード評価を実施していくことは重要である。

(d) 引用文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会，南海トラフの地震の長期評価について，2001.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会，「長周期地震動予測地図」2012年試作版－南海地震（昭和型）－，2012.
- 3) 神田克久・小鹿紀英・武村雅之・藤原広行，長周期地震動の尺度の検討，日本建築学会学術講演梗概集，2012.
- 4) 北村春幸・宮内洋二・福島順一・深田良雄・森伸之，性能設計における性能判断基準値に関する研究－時刻歴応答解析に基づく JSCA 耐震性能メニューの検証－，日本建築学会構造系論文集，576，47-54，2004年.
- 5) 北村春幸・宮内洋二・浦本弥樹，性能設計における耐震性能判断基準地に関する研究，日本建築学会構造系論文集，604，183-191，2006.
- 6) 日本建築構造技術者協会編，建築の構造設計，第4編目標性能と性能メニュー，オーム社，2002.