

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

(c) 研究の目的

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解説書を作成し、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。また、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、かつ分かりやすく可視化するためのアプリケーションを開発する。

(2) 平成 23 年度の成果

(a) 研究の要約

過去の地震により観測された長周期地震動及びそれより被害が生じたと考えられる事例について収集・整理した。「3. 4 長周期・広帯域地震動予測のための時刻歴計算の検討等」で実施した長周期地震動シミュレーション結果を基に超高層ビルの応答解析を実施し、予想される被害などに基づいて、構造物の長周期地震動による影響を表すための揺れの尺度を提案した。以上の長周期地震動そのものの性質やそれにより生じ得る被害に加えて、具体的な対策例を挙げることにより、長周期地震動予測地図の利活用を促進するための解説書を作成した。

「長周期地震動予測地図」2012年試作版のデータに基づき、地震波伝播の動画を作成し、提供するシステムを開発した。多様な機種の手持端末（スマートフォン）で利用できる、ユーザーが今いる場所での地震動に関する情報を入手でき、かつ、分かりやすく可視化するアプリケーションを開発した。また、スマートフォン用のアプリケーション J-SHIS において長周期地震動伝播の動画を再生する機能を開発した。

(b) 研究の成果

1) 解説書の作成

長周期地震動の性質やそれによる被害に関して、

- ・ 地表面や超高層ビル内の長周期地震動
- ・ 長周期地震動による地震被害
- ・ 長周期地震動に関連した振動実験
- ・ 長周期地震動シミュレーション結果に基づく超高層ビルへの影響の検討
- ・ 長周期地震動を表す尺度の検討
- ・ 耐震診断システムの検討
- ・ 長周期地震動対策

の項目について、事例の収集・整理や記録の分析などの検討を実施し、それらをまとめた解説書を作成した。以下では上記各項目に関する検討等の概要について述べる。

(A) 地表面や超高層ビル内の長周期地震動

長周期地震動の性質について、2011年東北地方太平洋沖地震の本震により得られた観測記録に基づく分析結果により示す。

はじめに、K-NET及びKiK-netにより得られた観測記録について、短周期～長周期に到る広帯域の地表面での地震動特性を見るために、擬似速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.05$ ）を計算し、5つの周期帯域（0.2-0.5秒、0.5-1.0秒、1.0-2.0秒、2.0-5.0秒、5.0-10.0秒、10.0-20.0秒）の振幅レベルの空間分布を検討した（図3.5-1）。代表的な周期帯域の空間分布を図3.5-1に示す。周期約1.0秒以下の応答スペクトル振幅の空間分布は、震源に近い太平洋側の海岸沿い一帯で大きな振幅を示しているのに対して、周期1秒以上は短周期帯域と異なる傾向を示しており、宮城県や関東平野でスペクトル振幅が大きくなっている。さらに5秒以上の帯域では、日本海側の新潟や庄内平野付近でも振幅が大きくなっている。これらの長周期帯域で振幅の大きい地域は東日本の平野部と概ね対応している。すなわち、長周期地震動は、震源から遠く離れていても平野部において振幅が大きくなる性質がある。

次に、建築研究所（2011）の情報による高層・免震建物の最大応答加速度の分布について、建物の振動特性としての増幅倍率を抽出するために、建物頂部の応答の卓越周期における建物頂部と基礎の擬似速度応答を図から読み取って、応答倍率を評価した。図3.5-2に図から読み取った応答倍率を示す。応答倍率は、10倍前後の値を示す建物が多く、最大加速度の応答倍率に比べると、良く揃っている。

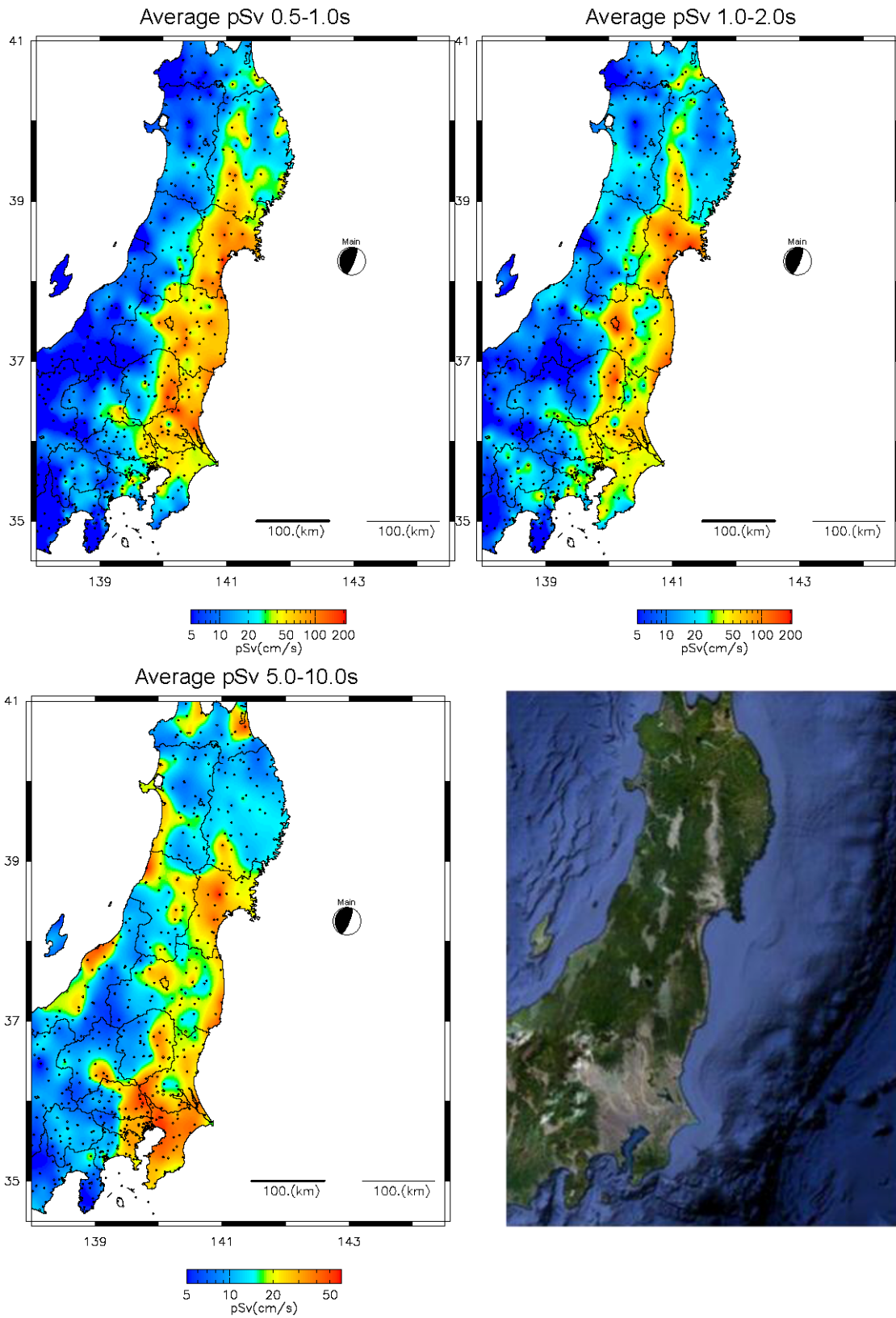


図 3.5-1 各周期帯域の擬似速度応答($h=0.05$)の空間分布。左上： $T=0.5\sim 1.0s$ 、右上： $T=1.0\sim 2.0s$ 、左下： $T=5.0\sim 10.0s$ 、右下：東日本の地形 (Google Earth より引用)。

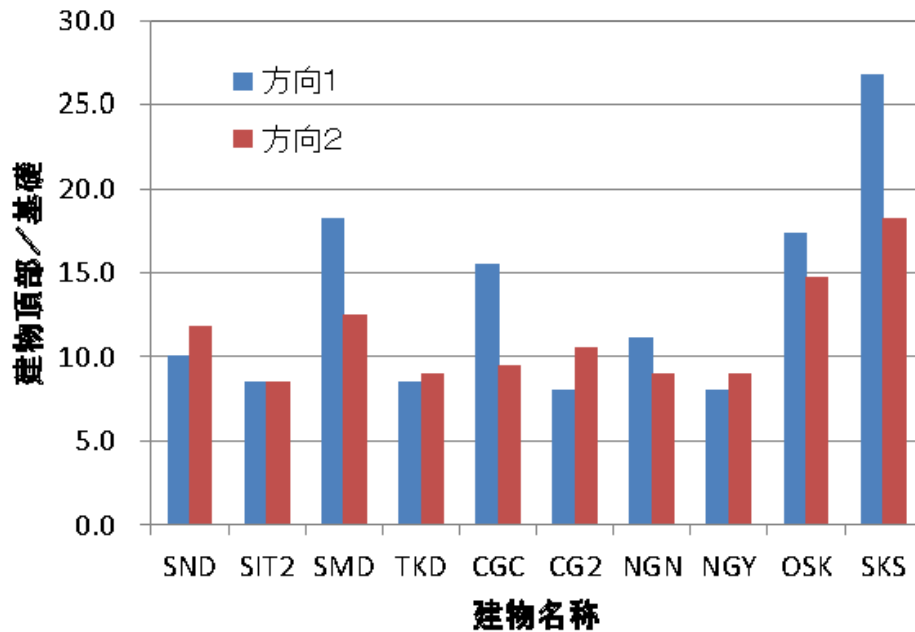


図 3.5-2 高層建物の応答の卓越周期における擬似速度応答の増幅倍率。

(B) 長周期地震動による地震被害

長周期地震動による過去の被害について、

- ・タンクのスロッシング（液面揺動）
- ・超高層ビルのエレベータ被害
- ・免震・制震建物の被害
- ・長大橋の被害
- ・その他の被害

について調査した。以下、2011年東北地方太平洋沖地震までの長周期地震動による被害について事例を示す。

1) タンクのスロッシング

タンクのスロッシングは長周期地震動による被害の中で最も顕著なものである。石油タンクの屋根の形式によって被害が異なり、①浮屋根および付属品の破損と内容液の溢流、②円錐屋根と側板との接合部の破損、③固定屋根式貯蔵の側板上部の座屈などである（堀・

川端、2004)。さらに、壊れた屋根から油が溢流すると、揮発したものに引火して火災が発生する。タンクのスロッシングの固有周期 T_s は (3.5-1) 式で算定され、数秒以上の長周期域で被害が発生することが多い。

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3.68g} \coth\left(\frac{3.68H}{D}\right)} \quad (3.5-1)$$

ここで、 D はタンクの内径 (m)、 H は液面高さ (m)、 g は重力加速度 (m/s^2) である。

過去の地震被害事例については、太田・座間 (2005) および座間・他 (2005) で多くまとめられているが、1964 年新潟地震 (M7.5) における新潟をはじめとして、1978 年宮城県沖地震 (M7.4)、1983 年日本海中部地震 (M7.7)、1993 年北海道南西沖地震 (M7.8)、2003 年十勝沖地震 (M8.0)、2011 年東北地方太平洋沖地震 (M9.0) で発生しているほか、海外の地震においても 1933 年のロングビーチ地震 (M6.3) をはじめとして多く被害が生じている。

2) 超高層ビルのエレベータ被害

M7 クラス以上の地震では遠く離れた場所でも沖積平野などでは表面波などにより長周期地震動が卓越し、固有周期の長い超高層ビルの上部で揺れが大きくなる。例えば、2004 年新潟県中越地震 (M6.8) では、東京地区での震度は 3 程度であったため機器の転倒等の被害は報告されていないが、長周期地震動によるエレベータ・ロープの振れによると考えられる引掛り事故の被害が多数報告されている (エレベーター協会, 2007)。過去に起きた地震によるエレベータの被害事例について、太田・座間 (2005)、鈴木・他 (2010) などをまとめて表 3.5-1 に示す。

エレベータ被害の特徴は以下のようにまとめられる。

- ・マグニチュード 7 クラス以上の規模の大きな地震であれば、震央から遠く離れても沖積平野の超高層ビルでは被害が発生する可能性がある。
- ・1983 年日本海中部地震や 2000 年鳥取県西部地震のように地上の震度は無感でも被害が発生する可能性がある。
- ・超高層ビルのエレベータのロープは、長周期地震動で共振して大きく揺れ、昇降路内の機器ブラケットなどで引っかかることによって被害を起こすことが多い。

表 3.5-1 長周期地震動によるエレベータの事故例。

発生日	地震名	M	深さ (km)	事故の 場所	震央距離	震度	事故内容
1983/05/26	1983年日本 海中部地震	7.7	14	東京 (新宿)	約 520km	0	ロープの引掛り
2000/10/06	2000年鳥取 県西部地震	7.3	9	東京 (恵比寿)	約 580km	0	ロープの引掛り
2003/09/26	2003年十勝 沖地震	8.0	42	札幌	約 240km	4	ロープの引掛り 破断
2004/10/23	2004年新潟 県中越地震	6.8	13	東京 (六本木)	約 190km	3	ロープの引掛り 破断
2011/03/11	2011年東北 地方太平洋 沖地震	9.0	24	東京 (新宿)	約 390km	5弱	ロープの引掛り アングル等損傷 エレベータシャフト の内壁の落下など
				大阪 (咲洲)	約 760km	3	エレベータ内での 閉じ込め

3) 免震・制震建物の被害

日本免震構造協会では、2011年東北地方太平洋沖地震の後、免震建物の被害調査をアンケート形式で行っており、

- ① 免震エキスパンションジョイントの不作動とそれに伴う損傷
- ② 鋼材ダンパの取付けボルトの緩みと塑性化に伴う形状の変状
- ③ 鉛ダンパの亀裂の発生やエネルギー吸収に伴う形状の変状

といった被害があったことが報告されている。また、制震建物については、制震部材の変状は、鋼材ダンパの残留変形 1 件、塗装の剥離が 3 件あったと報告されている。ただし、ダンパは容易に目視確認できない場所に設置されているものが多く、「目視確認できていない」という回答が多いことから、実数はもっと多かった可能性がある。

4) 長大橋の被害

多くの橋梁の被害は、①短周期地震動レベルの大きさ、②液状化、③津波、④地盤の強制変形、が主な原因として考えられる。ただし、横浜ベイブリッジでは、2011年東北地方太平洋沖地震時に図 3.5-3 に示すように桁の接続部であるフィンガージョイント（伸縮装置）と高欄伸縮継ぎ手が損傷した。これは、長周期地震動で長大橋の桁の大きな変形を生じたためと考えられる。

被災の状況



伸縮装置の損傷



高層伸縮継ぎ手の損傷

図 3.5-3 横浜ベイブリッジの損傷した床版の伸縮継ぎ手の様子（写真：国交省横浜国道事務所 HP より）。

5) その他の被害

日本においては、長周期地震動により構造物被害が発生した事例はこれまでに報告されていない。ただし、1985年メキシコ地震（M8.1）では、震源から約350km離れたメキシコ市で（太田・座間、2005）、また、2010年チリ・マウレ地震（M8.8）では、震源から約330km離れたサンチアゴ市およびその周辺地域で構造物被害が発生している（日本地震工学会・日本建築学会、2010）。一方、2011年東北地方太平洋沖地震においては、長周期地震動で揺れたと考えられる東京（約390km）や大阪（約760km）での超高層ビルでの2次部材や什器・設備関係の被害が報告されている。日本建築学会（2011）などの調査報告に基づいてエレベータ被害を除いた主なものを表3.5-2に示す。

表 3.5-2 2011 年東北地方太平洋沖地震での超高層ビルの主な被害(エレベータを除く)。

建物	被害
工学院大学新宿校舎	天井板の落下 固定をしていなかった重い本棚の転倒 コピー機などキャスター付きの什器類の移動 書類等の落下と散乱 間仕切り壁の変形及びそれに伴うドアの開閉障害 低層棟とのエキス番ジョイント部での内部材の剥落
東京都庁本庁舎	第二本庁舎 33 階体育室のスプリンクラー 議会棟 6 階空調機械室内暖房用温水の配管 第一本庁舎 8 階北側機械室内冷水系熱交換器 一部の天井ボードや壁パネルの脱落、防火戸の破損
新宿西口地区の 超高層ビル (アンケート調査)	天井の一部落下：7 件 外線電話の障害：5 件 内壁などのはがれ：4 件 防火戸の開閉障害：2 件 電気・ガス・水道の支障：2 件 パーティションの倒れ：1 件 スプリンクラーの破損：1 件 防災垂れ壁の損傷：1 件 外壁の一部落下：1 件
大阪府咲洲庁舎	内装材や防火戸の一部で破損

最後に、中低層ビルの 2 次部材の被害事例として多く見られたものであるが、超高層ビルにおいても発生する可能性があるものを以下にまとめる。

① 外装材の被害

- a) 押出成形セメント板 (ECP 板) の破損、脱落
- b) 石貼りのひびわれ、剥離・脱落
- c) タイルのひびわれ、剥離・脱落

② 内装材の被害

- a) 乾式壁 (軽量鉄骨下地ボード貼り壁が多い) の破損
- b) 天井の脱落

(C) 長周期地震動に関連した振動実験

長周期地震動を受ける超高層ビルの挙動に関連した過去の実験について、①長周期地震動による多数繰り返し荷重に対する構造部材の挙動と変形性能の評価を目的とした静的加力実験、②長周期地震動を入力とした非構造部材を対象とした振動台実験、の観点から調査した。

構造部材の損傷に関する実験としては、長谷川・他（2011）による静的繰り返し実験や鍾・他（2008）の E-ディフェンスによる実験があり、これらでは、鉄骨造の建物における梁端部分の破断に関する知見が得られている。また、出水・他（2009）、田邊・他（2011）などでは、鉄筋コンクリート造の建物における梁や柱の剛性劣化性状を把握されている。

一方、非構造部材を対象とした実験としては、関松・他（2008）や平山・他（2008）の E-ディフェンスによる実験では、それぞれ間仕切り壁や設備配管の損傷に関する知見が得られているほか、城戸・他（2009）では、E-ディフェンスによる長周期地震動の実験により家具の転倒に関する知見が得られている。また、家具の転倒防止に関する実験等については、斉藤・他（2006）、酒入・他（2007）や金子・中村（2005）もあり、個別の対策の効果の大小とともに、複数組み合わせることにより効果が上がることも示されている。

また、鈴木・他（2009）は、人間の避難行動限界に関する行動難度や不安度に関する実験により、評価曲線を提示している。

(D) 長周期地震動シミュレーション結果に基づく超高層ビルへの影響の検討

長周期地震動予測地図の利活用に資するため、「3.4 長周期・広帯域地震動予測のための時刻歴計算の検討等」で実施した南海トラフの地震の長周期地震動のシミュレーション結果を基に、超高層ビルを対象とした応答解析を実施し、生じ得る被害の推定を行った。建物の振動解析モデルにはいくつかあるが、本検討では、強非線形領域の挙動を適切に評価する必要があること、超高層ビルで生ずる柱の伸縮による全体曲げ変形がする必要があることと計算時間を勘案して、平面フレームモデルを用いることとした。また、地震動シミュレーション結果の有効周期が 2 秒以上であること、実存する超高層ビルの階数の上限を考慮して、想定超高層ビルの階数は 30 階、45 階、60 階とした。設定した 3 種の応答解析モデルの概要を図 3.5-4 に示す。

ここで用いる入力地震動は、それぞれの地点において 2 波とする。1 波は標準ケースとしてケース 3-d-c、加えてもう 1 波は、Q 値を無限大としたものを除く全ケースのうち、その地点・方向において周期 3 秒から 8 秒の擬似速度応答スペクトルの平均が最大となるケースを選択して用いることとする。入力に用いた地震動の一覧を表 3.5-3 に示す。

大阪舞洲を例に、建物階数毎の最大層間変形角を、地震動の擬似速度応答スペクトルとともに示す（図 3.5-5）。大阪舞洲の地震動は、周期 3 秒から周期 6~7 秒に向かって周期とともに増大する特性を示しているが、地震動の最大ケース（図 3.5-5 右上図）では、建物が高くなるにつれて層間変形角が小さくなっている。これは、最大ケースの地震動が大きい

ため、非線形化による長周期化が起り、建物の高さによらず 6～8 秒の地震動の卓越成分で応答変形が決まるためと考えられる。すなわち、建物の高さによらず建物頂部の応答変形はほぼ同一で、これを高さで基準化した平均的な層間変形角は、建物が高いほど小さくなるためと考えられる。このように、建物の応答は、建物の固有周期の地震動成分と、常に正の相関関係にあるとは限らず、地震動の強さによって、負の相関関係を示す場合もあることに注意する必要がある。

以上の結果を基に、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った。損傷判定は、北村・他（2006）による性能判断基準値表（表 3.5-4）によることとした。この表の中の各応答値は以下のものに対応する。

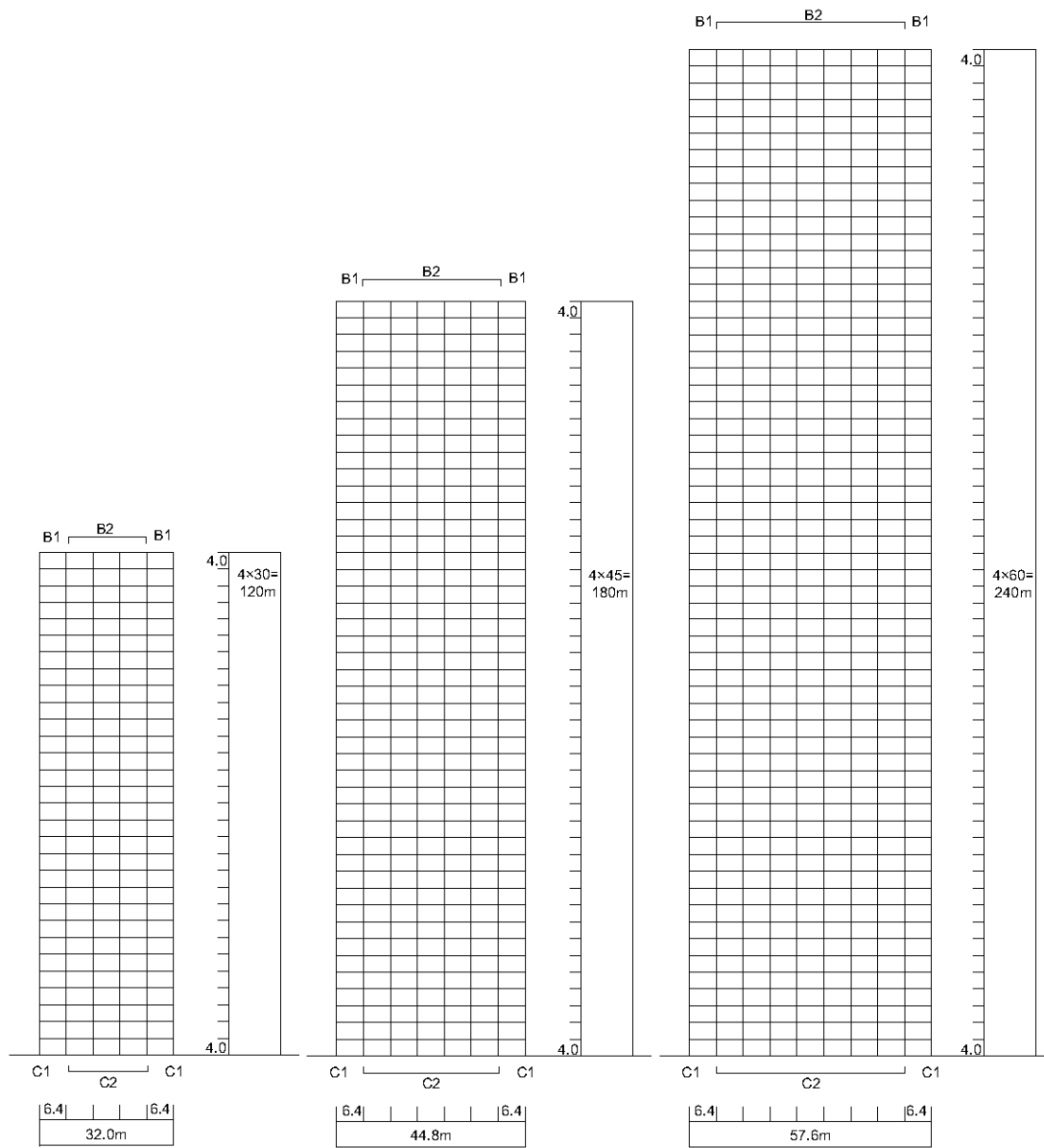
- ・建物挙動：層間変形角、応答加速度 → 建物の機能に関する指標
- ・構造骨組：層塑性率、塑性ヒンジ発生率 → 建物の損傷度に関する指標
- ・構造部材：部材塑性率、累積塑性変形倍率 → 建物の損傷度に関する指標

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。

以下では、NS 方向の評価結果について述べる。

表 3.5-5 から表 3.5-7 に、標準的な地震動に対する建物階数毎の損傷度の判定結果を示す。標準的な地震動に対しては、大阪舞洲、大分県庁などの地点で、安全限界を超える可能性があるが、多くの地点では、安全限界余裕度Ⅱ以下と評価されており、被害の拵りは限定的と考えられる。表 3.5-8 から表 3.5-10 に最大ケースの地震動に対する建物階数毎の損傷度の判定結果を示す。建物の階数に係わらず、多くの地点で安全限界を超えており、広い範囲で深刻な被害が発生する可能性がある。



(1) 30階建モデル

(2) 45階建モデル

(3) 60階建モデル

図 3.5-4 応答解析モデル概念図

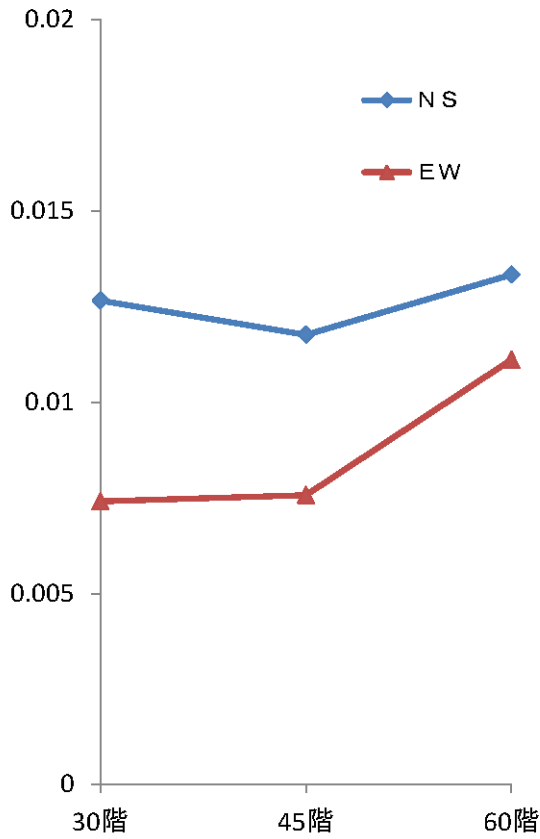
表 3.5-3 入力地震動の一覧。ケース名は表 3.4-2 を参照。

地点	表記	方向	標準ケース	最大ケース
愛知県庁県庁	AIC	NS	ANNI3-d-c	ANNI4c-s-c
		EW		ANNI4c-s-c
大分県庁	OIT	NS		ANNI4a-d-c
		EW		ANNI4a-d-c
大阪舞洲	OMS	NS		ANNI4a-s-w
		EW		ANNI4a-s-w
大阪府庁	OSK	NS		ANNI4a-s-w
		EW		ANNI4a-s-w
静岡県庁	SZO	NS		ANNI4c-s-w
		EW		ANNI4c-s-w
東京都庁	TKY	NS		ANNI4c-s-w
		EW		ANNI4c-s-w
四日市市役所	YKI	NS		ANNI4a-s-w
		EW		ANNI4a-s-w

表 3.5-4 耐震性能判断基準値表

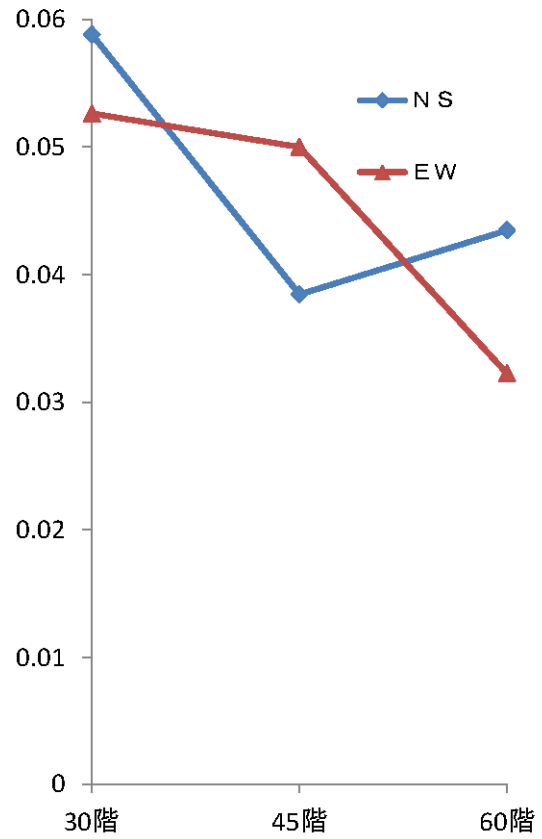
	性能評価項目	損傷限界	安全限界 余裕度 I	安全限界 余裕度 II	安全限界	安全限界 超過	
	判断値 λ	4	3	2	1	0	
建物機能	機能	機能維持	主要機能確保	指定機能確保	限定機能確保	機能確保困難	
	層間変形角 R (rad)	1/200 以下	1/200-1/150	1/150-1/100	1/100-1/75	1/75 以上	
	床加速度 a (cm/s ²)	—	250 以下	250-500	500-1000	1000 以上	
構造部材	部材損傷度	無損傷	軽微	小損	中損～大損	大損以上	
	部材塑性率 μ_m	1.0 以下	1.0-2.5	2.5-3.75	3.75-5.0	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
		ノンスラップ ^o	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	

層間変形角

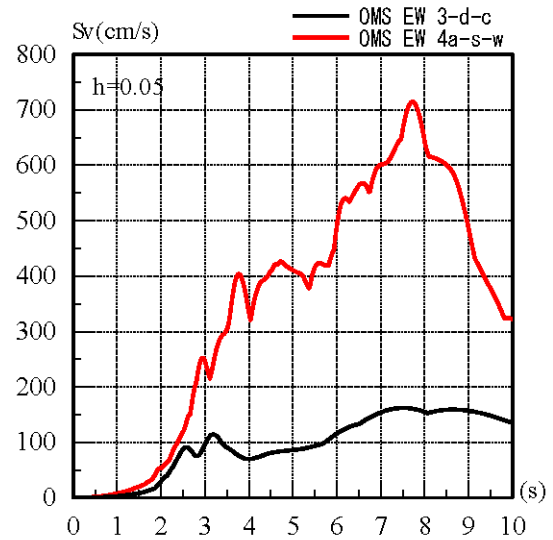
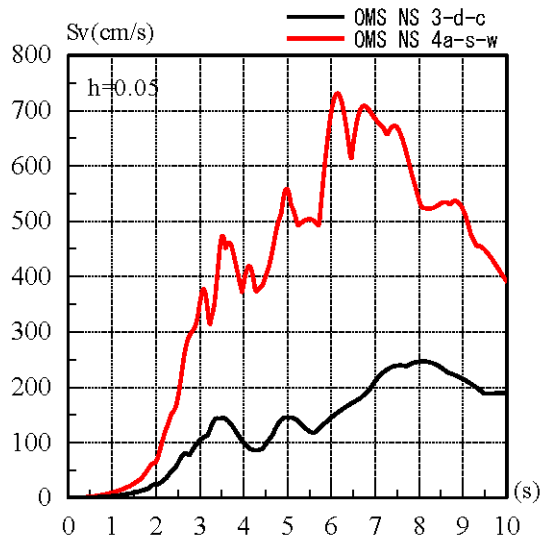


標準ケース

層間変形角



最大ケース



NS (黒：標準ケース、赤：最大ケース)

EW (黒：標準ケース、赤：最大ケース)

図 3.5-5 最大層間変形角と地震動特性 (大阪舞洲の例)。

表 3.5-5 30 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（標準、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/410	1/161	1/79	1/246	1/177	1/100	1/234
	最大加速度(Gal)	73	168	389	128	171	336	133
	判定値 λ	4	3	1	4	3	2	4
	機能確保	機能維持	主要機能確保	限定機能確保	機能維持	主要機能確保	指定機能確保	機能維持
構造部材	部材塑性率	0.35	0.87	2.64	0.55	0.75	1.70	0.58
	累積塑性変形倍率	0	0	5	0	0	5	0
	判定値 λ	4	4	2	4	4	3	4
	構造部材損傷度	無損傷	無損傷	小損	無損傷	無損傷	軽微	無損傷

表 3.5-6 45 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（標準、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/583	1/67	1/85	1/169	1/183	1/94	1/104
	最大加速度(Gal)	39	262	242	135	119	250	206
	判定値 λ	4	0	1	3	3	1	2
	機能確保	機能維持	機能確保困難	限定機能確保	主要機能確保	主要機能確保	限定機能確保	指定機能確保
構造部材	部材塑性率	0.26	3.97	2.34	0.79	0.75	2.01	1.71
	累積塑性変形倍率	0	6	6	0	0	4	3
	判定値 λ	4	1	3	4	4	3	3
	構造部材損傷度	無損傷	中～大損	軽微	無損傷	無損傷	軽微	軽微

表 3.5-7 60 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（標準、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/627	1/78	1/75	1/236	1/206	1/125	1/132
	最大加速度(Gal)	39	227	237	83	115	141	150
	判定値 λ	4	1	0	4	4	2	2
	機能確保	機能維持	限定機能確保	機能確保困難	機能維持	機能維持	指定機能確保	指定機能確保
構造部材	部材塑性率	0.25	2.83	2.95	0.62	0.68	1.32	1.09
	累積塑性変形倍率	0	10	16	0	0	1	0
	判定値 λ	4	2	1～2	4	4	3	3
	構造部材損傷度	無損傷	小損	中損	無損傷	無損傷	軽微	軽微

表 3.5-8 30 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（最大、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/73	1/118	1/17	1/57	1/104	1/47	1/30
	最大加速度(Gal)	440	246	541	476	315	473	415
	判定値 λ	0	2	0	0	2	0	0
	機能確保	機能確保困難	指定機能確保	機能確保困難	機能確保困難	指定機能確保	機能確保困難	機能確保困難
構造部材	部材塑性率	2.87	1.38	19.42	3.93	1.71	6.19	8.34
	累積塑性変形倍率	18	1	235	58	6	62	75
	判定値 λ	1~2	3	0	0~1	2~3	0	0
	構造部材損傷度	中損	軽微	大損以上	大損	小損	大損以上	大損以上

表 3.5-9 45 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（最大、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/115	1/51	1/26	1/65	1/91	1/49	1/32
	最大加速度(Gal)	218	278	429	287	231	310	369
	判定値 λ	2	0	0	0	1	0	0
	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	機能確保困難	機能確保困難
構造部材	部材塑性率	1.15	8.36	9.58	3.26	2.13	6.98	14.65
	累積塑性変形倍率	0	33	174	34	16	44	99
	判定値 λ	3	0	0	0~1	1~3	0	0
	構造部材損傷度	軽微	大損以上	大損以上	大損	小損	大損以上	大損以上

表 3.5-10 60 階建モデルの長周期地震動に対する損傷判定（最大、NS）

		AIC	OIT	OMS	OSK	SZO	TKY	YKI
建物機能	最大層間変形角 (rad)	1/169	1/69	1/23	1/88	1/98	1/50	1/39
	最大加速度(Gal)	170	251	420	232	204	288	317
	判定値 λ	3	0	0	1	1	0	0
	機能確保	主要機能確保	機能確保困難	機能確保困難	限定機能確保	限定機能確保	機能確保困難	機能確保困難
構造部材	部材塑性率	0.81	3.24	11.22	2.33	2.02	4.97	6.46
	累積塑性変形倍率	0	31	149	16	1	44	96
	判定値 λ	4	0~1	0	1~2	3	0~1	0
	構造部材損傷度	無損傷	大損	大損以上	中損	軽微	大損	大損以上

(E) 長周期地震動を表す尺度の検討

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の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。そこで、長周期帯域の人間の体感（行動難度、不安度）の周期特性（高橋・他、2007）などを参考に、計測震度を算定する際に用いられるフィルタの振動数帯域を長周期側に変更した、神田・他（2012）による以下の尺度を示す。

計測震度は、時刻歴波形各成分の加速度フーリエスペクトルに対して、以下の三種類のフィルター

$$(k/f)^{1/2} \tag{3.5-2}$$

$$(1+0.694X^2+0.241X^4+0.0557X^6+0.009664X^8+0.00134X^{10}+0.000155X^{12})^{-1/2} \tag{3.5-3}$$

$$[1-\exp\{-(f/f_0)^3\}]^{1/2} \tag{3.5-4}$$

ただし、 $X=ff_c$

を通した後にフーリエ逆変換する。ベクトル合成波形の振幅があるレベル a 以上となる時間を $\tau(a)$ とすると、ちょうど $\tau(a_0)=\tau_0$ となる a_0 を求め、

$$I=2\cdot\log a_0+c \tag{3.5-5}$$

により求める。長周期震度は、パラメータ f_c 、 f_0 、 τ_0 および c を変えることによって定められる。ここでは、 $f_c=1$ (Hz)、 $f_0=0.05$ (Hz)、 $\tau_0=3.0$ (秒)、 $c=1.5$ として、南海トラフの地震のシミュレーション結果に対して求めたものを表 3.5-11 に示す。先に示した応答解析結果において、被害が生じる可能性が高いとされた地点（大阪舞洲など）で大きな値となっていることがわかる。なお、 c の値は、震度 4 以上の領域面積がほぼ同じになるように調整されている。

表 3.5-11 南海トラフの地震のシミュレーション結果に対して求められた長周期地震動の尺度（長周期震度）。ケース名については、表 3.4-2 を参照。

領域	トラフ 沿い	深さ	破壊		大分県庁	大阪舞洲	大阪府庁	四日市市 役所	愛知県庁	静岡県庁	東京都庁
ANNI1		s	c	cas	4.9	5.2	4.5	4.8	4.3	4.4	4.7
		s	e	cas	4.8	5.4	4.5	4.9	3.5	2.5	3.4
ANNI2		s	c	cas	2.5	4.3	3.7	4.5	4.3	4.9	5.4
ANNI3		d	w		3.6	6.1	5.3	5.8	5.3	5.6	5.8
		s	w		4.1	6.4	5.7	6.3	5.3	5.5	6.0
		s	w	cas	3.8	6.1	5.4	6.0	5.1	5.2	5.4
		d	c		5.8	6.0	5.2	5.1	4.8	5.5	5.5
		s	c		5.2	5.5	4.8	5.2	4.6	5.2	5.7
		s	c	cas	4.9	5.2	4.5	4.9	4.3	4.9	5.4
		d	e		6.0	5.4	4.7	5.4	4.6	5.5	5.7
		s	e		5.2	5.7	4.8	5.3	4.2	5.1	5.8
ANNI4		s	e	cas	4.8	5.3	4.5	4.9	3.8	4.7	5.5
	a	s	w		4.6	6.9	6.2	6.6	5.6	5.5	6.1
	b	s	w		4.4	6.4	5.8	6.4	5.4	5.5	6.1
	c	s	w		4.2	6.4	5.8	6.4	5.9	5.9	6.3
	a	d	c		5.9	6.0	5.2	5.2	4.9	5.6	5.6
	b	d	c		5.8	6.0	5.2	5.3	5.1	5.6	5.5
	c	d	c		5.8	6.0	5.3	5.9	6.0	5.7	6.0
	a	s	c		5.9	5.6	4.9	5.3	4.7	5.3	5.8
	a	s	c	cas	5.1	5.3	4.5	4.9	4.3	4.9	5.4
	a	s	c	box	5.3	5.5	4.8	5.3	4.7	5.3	5.8
	b	s	c		5.4	5.8	5.0	5.5	5.2	5.3	5.8
	c	s	c		5.2	5.7	5.0	6.0	6.0	5.7	6.1
	c	s	c	cas	4.9	5.3	4.5	5.3	5.4	5.1	5.5
	c	s	c	box	5.2	5.5	4.9	5.3	5.1	5.3	5.8
	c	s	c	qi	5.6	6.2	5.5	6.6	6.4	5.9	6.5
	b	d	e		6.0	5.8	5.1	5.4	4.6	5.6	5.7
a	s	e		5.7	5.8	4.9	5.3	4.3	5.1	5.9	

7
6強
6弱
5強
5弱

(F) 耐震診断システムの検討

長周期地震動予測地図の成果は、地図のほか、最大速度や応答スペクトル、時刻歴波形として提示されているが、これらの情報をより一般に活用できるようにするため、長周期地震動予測結果に基づく耐震診断システムの概念に関する検討を実施した。

ここでは、住所、階数、居住階、構造種別などの簡単を入力データとして、標準的な建物を想定して、構造的損傷、家具転倒率、エレベータの運転状況、強い揺れの継続時間な

どを判定するものとした。耐震診断システムのフローチャートを図 3.5-6 に示す。

上述の評価項目の中には、既存の方法だけでは評価が難しい項目が含まれており、具体化するにあたっては技術的な検討が必要である。

(G) 長周期地震動対策

長周期地震動による被害の低減のために、まず、構造物被害の観点からは、長周期地震動を受ける超高層建物の揺れの振幅を低減しつつ、揺れの継続時間を短縮する、オイルダンパーや粘性系の制震装置が有効と思われる。

一方、超高層建物内の施設の耐震対策としては、エレベータの耐震性向上や閉じ込め対策の整備が必須となる。

また、必ずしも長周期地震動によって生じる被害ではない場合もあるものの、超高層ビルにおける耐震対策として、スプリンクラーや水槽等の耐震性の向上、ライフライン設備の多重化・分散化、非構造部材である壁や天井の落下の防止、ガラスの飛散防止フィルムを施すなどのハード的な対策が挙げられる。さらに、家具の転倒防止のための固定方法については、東京消防庁（2010）によりまとめられている「家具類の転倒・落下防止対策ハンドブックー室内の地震対策ー」が参考になる。

一方で、避難に関わる事前対策（避難誘導マニュアルの整備や訓練の実施）や不安心理軽減に関わる事前対策（事前の揺れの周知や被害情報の発信）といったソフト的な対策もきわめて有効である。

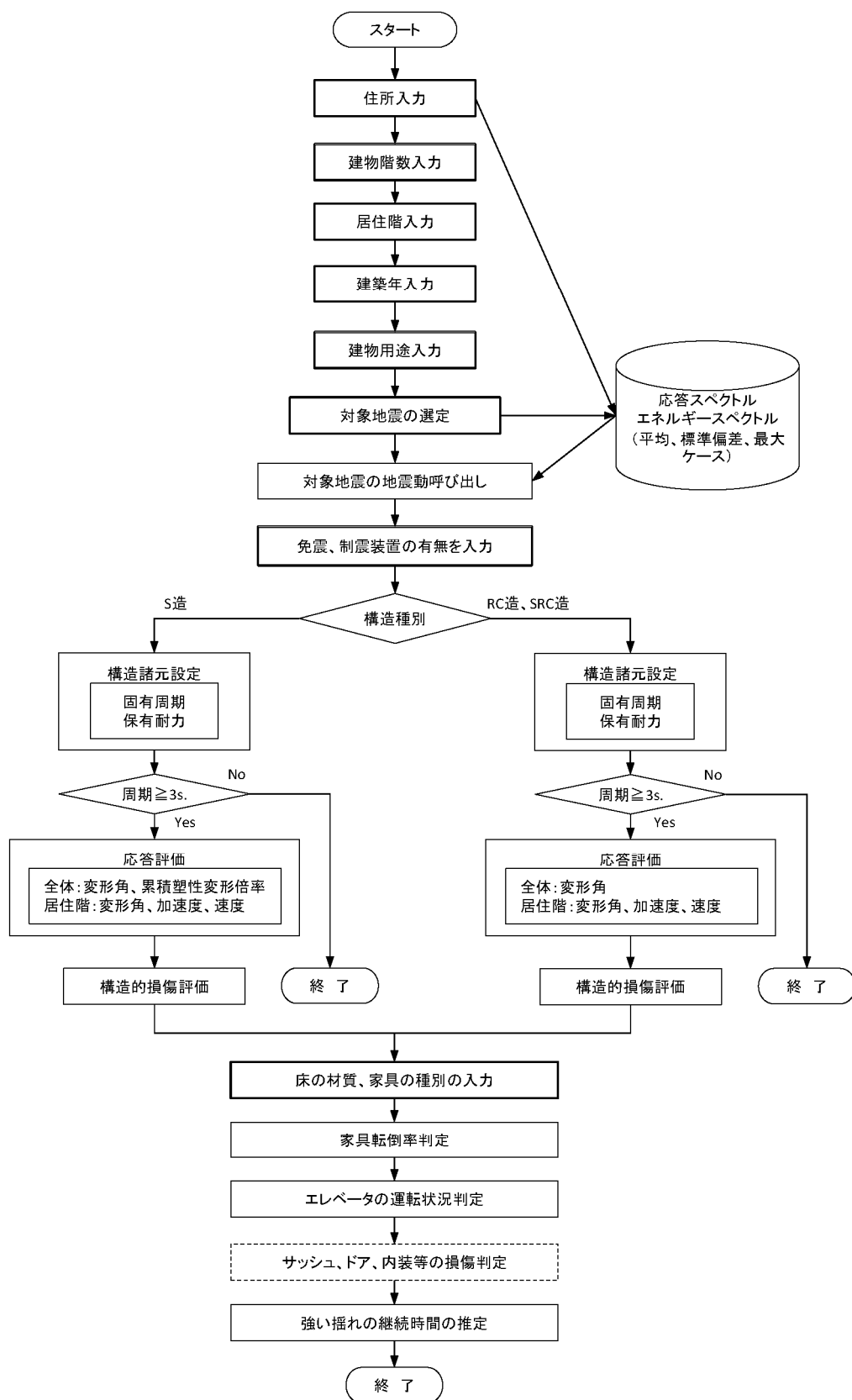


図 3.5-6 耐震診断システムの概念のフローチャート。

2) アプリケーションの開発

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、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の提供方法について検討した。また、長周期地震動の伝播の様子を伝える動画を作成するとともに、近年急速に普及が進んでいるスマートフォンを用いたアプリケーションを開発した。

(A) 長周期伝播動画の作成

ユーザーが必要とする任意の地点における長周期地震動に関する情報を提供する手段として、「全国地震動予測地図」の公開システムとして開発されてきた地震ハザードステーション（藤原・他、2009）に、「長周期地震動予測地図」2012年試作版（地震調査委員会、2012）のコンテンツを追加する検討を実施した。これにより、Google Map 上での地図の拡大・縮小や地点検索機能を用いて任意の地点の長周期地震動予測結果などの情報を取得することが可能となる。

一方、震源から遠方の平野部においても長時間継続する長周期地震動によりどのような揺れに見舞われるかを視覚的に理解するためには、単純な最大振幅による地図の表示だけでなく震源からのどのくらいの時間で到達するのかや揺れがどれくらいの時間続くのかといった時間軸を含む可視化が重要である。そのためには、長周期地震動が伝播する様子を動画で伝えることは有効である。ここでは、「長周期地震動予測地図」2012年試作版の長周期地震動シミュレーション波形データを用いて、長周期地震動伝播の動画を作成した（図 3.5-7）。これらの動画データは、Windows 及び Mac いずれのコンピュータでも再生可能な形式で保存するとともに、YouTube にアップロードすることにより、スマートフォン等のアプリケーションを用いて閲覧することもできるようにした。

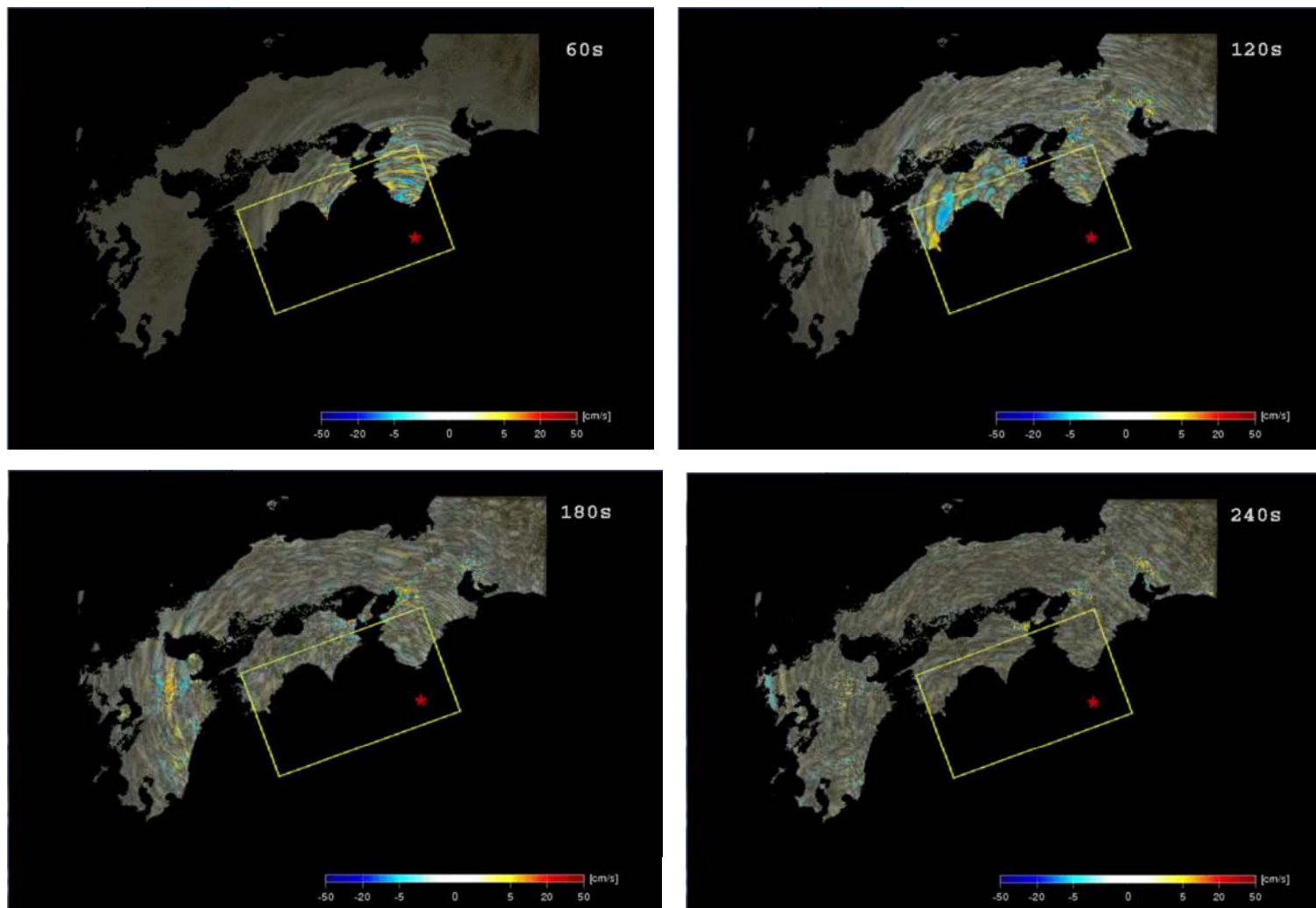


図 3.5-7 長周期地震動予測地図 2012 年試作版－南海地震（昭和型）－の動画。

(B) スマートフォン用アプリケーションの開発

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。ここでは、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」を開発した。これらのアプリケーションは、長周期地震動予測地図試作版（地震調査委員会、2009、2012）のデータをもとに作成した。なお、各アプリケーション Android OS 2.1 または iOS4.0 に対応しており、現在普及している Android 及び iPhone いずれのスマートフォンにおいても多くのユーザーが利用できるものとなっている。

「ゆれビル」は、地震の種類と都道府県庁所在地などの地点を選択する（図 3.5-8 左）ことにより、選択地点におけるビルの中での揺れの様子を人の動きと波形で表示する。ここで、「長周期地震動予測地図」試作版の選択地点に最も近い波形データをもとに、100 階建てまでのビルの応答を減衰定数及び固有周期を仮定することにより簡便に評価して再現している（図 3.5-8 右）。また、震源から遠い地点では揺れはじめるまで時間がかかることから、早送りの機能を付けている。

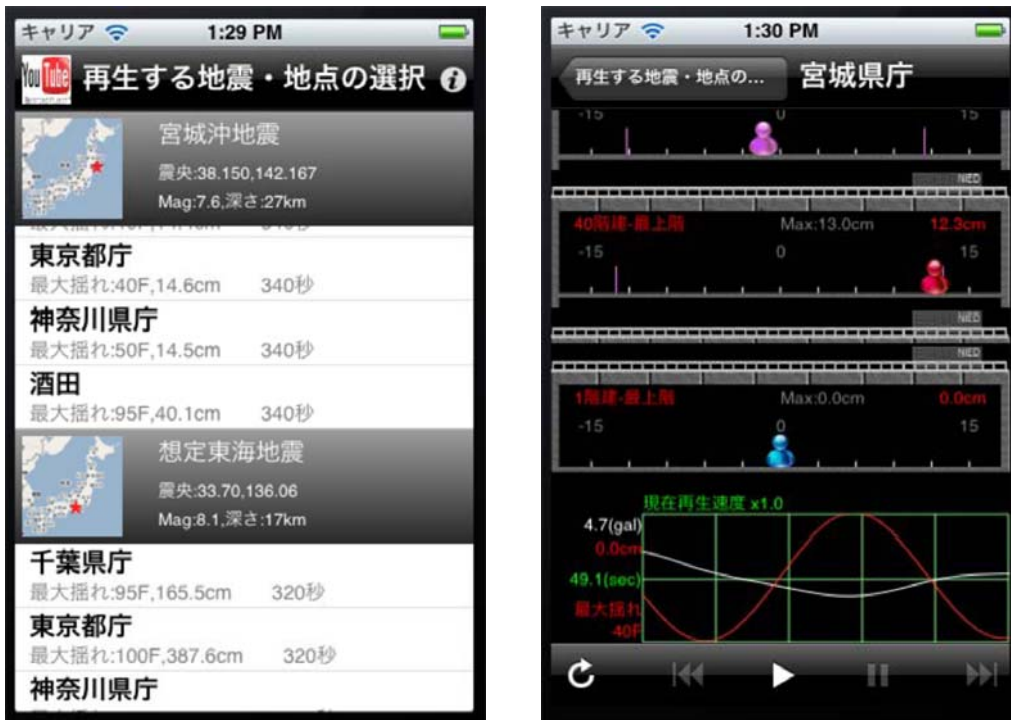


図 3.5-8 「ゆれビル」の画面の例。

「ゆれの伝わり方」(図 3.5-9) は、(A) で作成した南海地震(昭和型)をはじめとした長周期地震動シミュレーション結果の動画の閲覧を YouTube にアップロードしたファイルに対して、動画を再生するアプリケーションを起動することにより実現している。

「波形の達人」は、スマートフォンに内蔵されている加速度センサーを利用して、地震及び地点を選択し、画面に表示された長周期地震動の波形に合わせて動かす(揺らす)ことにより、長周期地震動を体感することができる。三通りの難易度があり、波形の一致度に応じて得点が設定されており、ゲーム感覚で長周期地震動を知ることができる。



図 3.5-9 「ゆれの伝わり方」の地震選択画面の例。

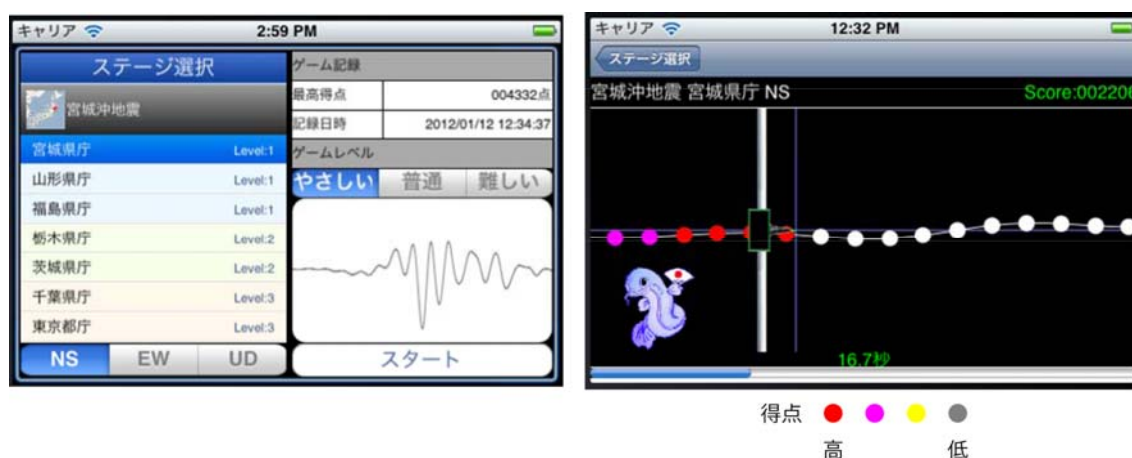


図 3.5-10 「波形の達人」の画面の例。左：波形、難易度選択画面、右：実行中画面。

さらに、スマートフォンアプリケーション「J-SHIS」に、「長周期地震動予測地図」試作版のコンテンツを追加した（図 3.5-11）。これにより、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、特定の地点に対する詳細な情報を入手することもできる（図 3.5-12、3.5-13）。スマートフォンのアプリケーションにおいては、地点検索機能だけでなく、web 版にはない GPS 機能を使用することにより、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。

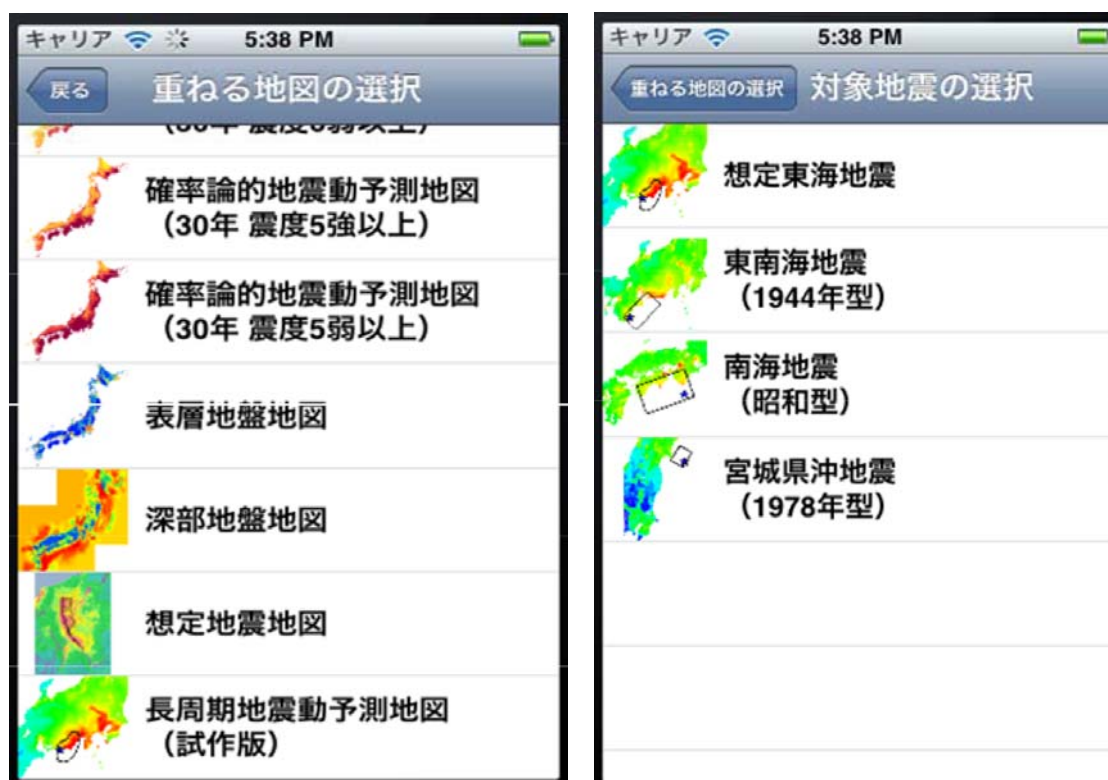
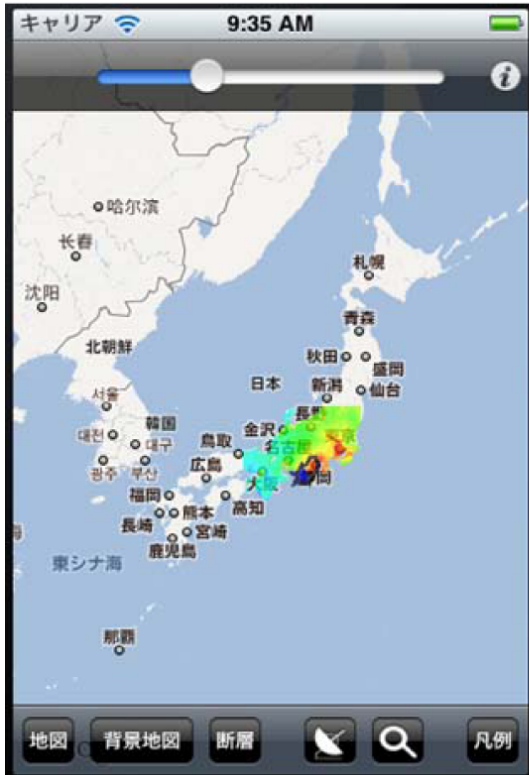
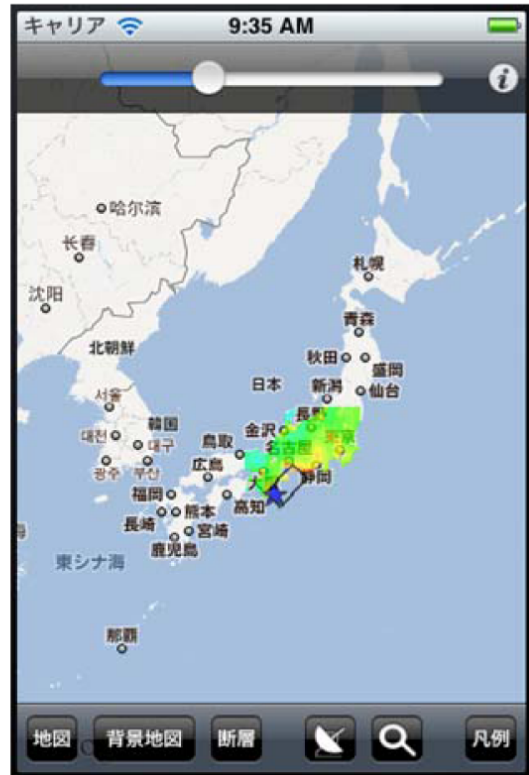


図 3.5-11 アプリケーション「J-SHIS」に追加された長周期地震動に関するコンテンツ。

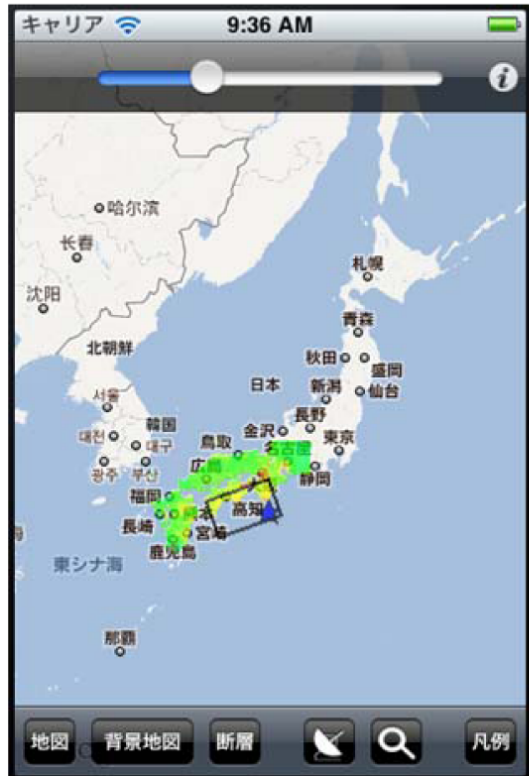
想定東海地震



東南海地震 (1944 年型)



南海地震 (昭和中型)



宮城県沖地震 (1978 年型)

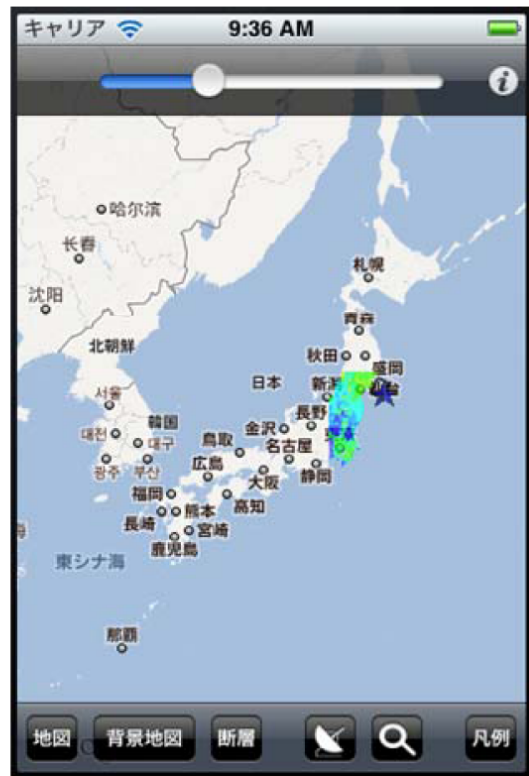


図 3.5-12 長周期地震動予測地図の表示例。

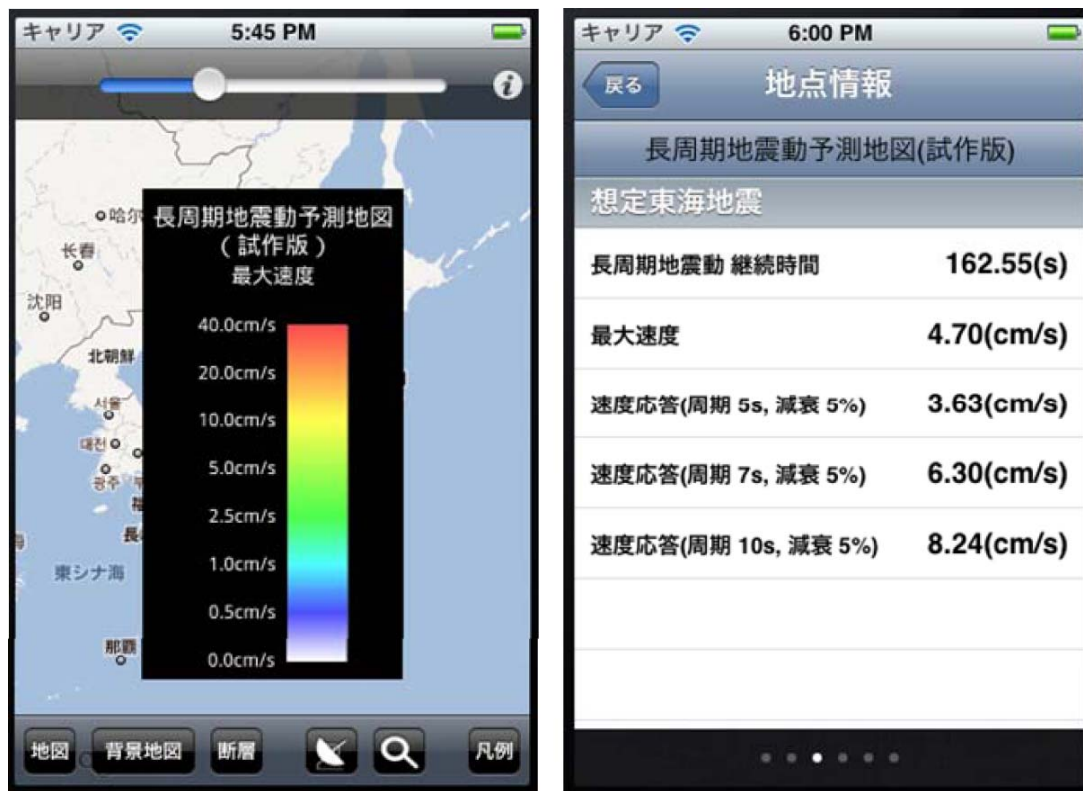


図 3.5-13 長周期地震動予測地図の凡例と地点情報の表示例

(c) 結論ならびに今後の課題

長周期地震動に関する解説書の作成を試みるとともに、様々な機種で利用できるスマートフォンアプリケーションを開発したことにより、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揃ってきた。また、J-SHIS とあわせて、長周期地震動予測地図だけでなく、全国地震動予測地図をはじめとした地震ハザードに関する網羅的な情報の提供が可能となる。今後は、解説書をウェブページ等においても閲覧できるようにするなどにより、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ことも必要である。また、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、防災意識の向上につながることを期待される。

(d) 引用文献

- 1) 藤原広行・河合伸一・青井真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・若松加寿江・石川裕・奥村俊彦・石井透・松島信一・早川穰・遠山信彦・成田章, 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第 336 号, 2009.
- 2) 長谷川隆・福元敏之・時野谷浩良・寺田岳彦・成原弘之・金子洋文・小鹿紀英, 長周期

- 地震動に対する鉄骨造超高層建築物の安全性検証方法の検討 その 1 全体研究計画，日本建築学会学術講演梗概集 C-1，1013-1014，2011，
- 3) 平山昌宏・斉藤大樹・長江拓也・森田高市，排水と配水管系の耐震性 高層建物の耐震性評価に関する E-ディフェンス実験—その 8，日本建築学会学術講演梗概集 C-1，877-878，2008.
 - 4) 堀郁夫・川端鋭憲，地震による石油タンク火災の技術的考察と社会問題，社会技術研究論文集，2，414-424，2004.
 - 5) 出水俊彦・斉藤大樹・福山洋・森田高市・向井智久・濱田真・菊田繁美・金川基・薬研地彰・佐々木仁，長周期地震動を受ける RC 造超高層建築物の構造性能 その 1 地震応答性状，日本建築学会学術講演梗概集 C-2，499-500，2009.
 - 6) 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」2009 年試作版，2009.
 - 7) 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）の検討—，2012.
 - 8) 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（投稿中）.
 - 9) 金子美香・中村豊，家具転倒防止器具の振動台実験，日本建築学会学術講演梗概集 B-2，437-438，2005.
 - 10) 城戸史郎・石塚悠伍・藤谷秀雄・長江拓也，長周期地震動を受ける超高層建築物のオフィス空間の家具等の挙動，日本建築学会学術講演梗概集 B-2，263-264，2009.
 - 11) 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に関する研究，日本建築学会構造系論文集，604，185-191，2006.
 - 12) 日本地震工学会・日本建築学会，2010 年 2 月 27 日チリ・マウレ地震被害調査報告書，2010.
 - 13) 太田外気晴・座間信作，巨大地震と大規模構造物—長周期地震動による被害と対策，共立出版，2005.
 - 14) 斉藤大樹・高橋徹・小豆畑達哉・野口和也・箕輪親宏，大振幅の揺れを再現可能とする大ストローク振動台の開発とその性能検証実験，日本建築学会学術講演梗概集 B-2，473-474，2006.
 - 15) 酒入行男・山岸秀之・中田信治・花井勉・福和伸夫・鶴田庸介・鈴木章弘・飛田潤，家具転倒防止対策促進のための振動実験・シミュレータウェブの作成，日本建築学会技術報告集，第 13 巻第 26 号，463-468，2007.
 - 16) 関松太郎・長江拓也・鍾育霖・福山國夫・梶原浩一・井上貴仁・中島正愛・斉藤大樹，非構造間仕切り壁の損傷過程 高層建物の耐震性評価に関する E-ディフェンス実験その 7，日本建築学会学術講演大会梗概集 C-1，875-876，2008.
 - 17) 鍾育霖・長江拓也・梶原浩一・福山國夫・井上貴仁・中島正愛・北村春幸・日高桃子，鋼構造架構の破壊形式と保有性能 高層建物の耐震性評価に関する E-ディフェンス実

- 験—その6, 日本建築学会学術講演梗概集 C-1, 873-874, 2008.
- 18) 鈴木稔子・鈴木典子・高橋徹・斉藤大樹・森田高市・野口和也・小豆畑達哉・箕輪親宏, 避難行動限界の周波数特性に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, 809-810, 2009.
- 19) 鈴木芳隆・那須正・福島出・小鹿紀英・渡部裕一, エレベータ・ロープの震動と長尺物振れ管制運転に関する研究, 構造工学論文集, 56B, 2010.
- 20) 田邊祐介・石川裕次・木村秀樹・前田匡樹・福山洋・壁谷沢寿一・宮内靖昌, 多数繰り返し外力を受ける鉄筋コンクリート造柱の耐震性能 その3 長周期地震動に対する検討, 日本建築学会学術講演梗概集 C-2, 171-172, 2011.
- 21) 高橋徹・貞弘雅晴・斉藤大樹・小豆畑達哉・森田高市・野口和也・箕輪親宏, 長周期地震動を考慮した人間の避難行動限界評価曲線の提案, 日本建築学会学術講演梗概集 B-2, 497-498, 2007.
- 22) 東京消防庁, 家具類の転倒・落下防止対策ハンドブック—室内の地震対策—, 2010.
- 23) 座間信作・西晴樹・畑山健・山田實・廣川幹浩・井上涼介・柳沢大樹, 屋や長周期地震動と石油タンクのスロッシング, 月刊地球, 号外 49, 197-203, 2005.