

長周期・多数回繰り返し地震動の地域特性

構造研究グループ 上席研究員 小山 信

目次

- I はじめに
- II 長周期地震動と設計用地震動
 - 1) 長周期地震動の特徴
 - 2) 設計用地震動と長周期建築物
- III 長周期地震動に対する各機関の取り組み
 - 1) 地震調査研究推進本部の取り組み
 - 2) 内閣府の取り組み
- IV 建築研究所の取り組み
 - 1) 強震観測
 - 2) 長周期地震動に係る研究課題
 - ① 長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法
 - ② 過大な長周期地震動に対する上部構造の挙動
- V 長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法の適用例
 - 1) 振幅レベルの特徴
 - 2) 位相特性の特徴
- VI おわりに
 - 謝辞
 - 参考文献

I はじめに

2003年十勝沖地震の際に、震央から約250km離れた苫小牧市内で石油タンクがスロッシング(液面揺動)を起こし火災が発生した原因の一つとして、長周期地震動が注目された。2011年東北地方太平洋沖地震では、東京や大阪臨海部に建つ超高層建築物が長時間継続した長周期地震動に共振して大きな応答を示した。超高層建築物や免震建築物が数多く建設されている東京、名古屋、大阪の3大都市圏は大規模平野に立地しており、長周期地震動が増幅され易い。特にM(マグニチュード)8～9規模の地震の発生確率が30年以内に70%程度と推計されている南海トラフでの地震¹⁾では、地震波の伝播経路特性の影響も加わり

応答が顕著になると言われている。これらの地震で発生が想定される長周期地震動に対して、超高層建築物や免震建築物がどのような状況(地震応答)を示すのかを把握することは、安全・安心な住宅・建築・都市の実現に向けて避けて通ることが出来ない課題である。

II 長周期地震動と設計用地震動

1) 長周期地震動の特徴

石油タンクのスロッシングによる石油溢流で大規模火災が生じた2003年9月の十勝沖地震の苫小牧での地震記録には7、8秒の周期の卓越が見られ、その振幅レベルも現状の設計用地震

動のレベルを上回るものであった。スロッシングによる同様の火災は、1964年新潟地震、1983年日本海中部地震でも生じていたが²⁾、充分の精度のある地震記録が得られなかった。また長周期地震動による建築物へ影響は、2011年東北地方太平洋沖地震において、超高層建築物が長周期・長時間地震動に揺すられて大きな応答を示したことが、得られた強震記録から確認された³⁾。東京の超高層建築物が長周期地震動に揺すられる現象は、2011年東北地方太平洋沖地震ほどの大振幅ではないものの、遡ること1983年日本海中部地震、1984年長野県西部地震の際にも生じており、高層ビルのエレベータの管制ケーブルが大きく揺れて切断される被害が生じていた⁴⁾。

これらの応答や被害の原因となった長周期地震動の主成分は、地表面に沿ってエネルギーが伝わる表面波であると考えられている。表面波は、震源が浅く規模が大きな地震の場合に震源からたくさん放出され、長周期地震動が生成されることになる。さらに、長周期地震動の伝播経路において表面波が減衰することなく、周期数秒に固有周期を有する超高層建築物や免震建築物が多数建つ大都市が立地する関東平野、濃尾平野、大阪平野などの大きな平野に伝えられると、長周期地震動が長時間継続することになる。それは、長周期地震動は工学的基盤以浅の数

十メートル厚の表層地盤による増幅ではなく、数キロに及ぶ深部地下構造が影響することに起因する。そして都市が立地する関東平野、濃尾平野、大阪平野などの大きな平野には厚さ2kmを超える堆積層が存在し⁵⁾、それらが長周期地震動の振幅を増幅、継続時間を増大させ、そこに建つ超高層建築物や免震建築物などの長周期建築物は長時間にわたって揺すられることになる。

これらの事項が近年に顕在化している理由としては、地震観測技術や装置の発展により得られる記録数が急速に増えたこと、図1に示す南海トラフでの過去の地震の発生状況より分かるように、100から200年の間隔で発生している南海トラフの地震で直近に発生したものは1944年東南海地震、1946年南海地震で、超高層建築物が数多く建設されるようになった1970年代以降しばらくは顕著な長周期地震動が生成されるような地震が発生していなかったこと、等があげられる。

2) 設計用地震動と長周期建築物

超高層建築物のための設計用地震動を整理して、図2に示す。わが国では、1963年の建築基準法改正により建物高さの制限(31m)が撤廃され、高層建築物の建設が可能となった。特に高さ45m(1981年より60m)を超える超高層建築物を設計、建設する場合、地震動時刻歴を入力地震動とした動的解析により安全性を確認する耐震設計が義務づけられている。初期における動的解析では、米国加州で得られた強震記録の1940年エルセントロ、1952年タフトに加えて、当時、超高層建築物が建設された東京、大阪、名古屋、仙台などで観測された特定の記録(東京101、大阪205、等)が設計に用いられていた。これら地震記録の振幅は概して小さく、振幅を調整(弾塑性設計の加速度振幅は300~500cm/s/s、速度振幅は50cm/s)して用いていた。さらに、長周期成分(周期2~3秒)を含むものとして1968年十勝沖地震の際に運輸省港湾技術研究所(当時)が八戸港湾で観測した強震記録が加わり、1940年エルセントロ、1952年タフトそれと1968年八戸の3波が標準的に使われるべき波形(標準波)として設計で用いられるようになった。ただし標準波のような特定の波では、各建設サイトの表層地盤に起因する震動特性が考慮されていないことから、建設敷地の震動特性を反映したサイト波(模擬地震動)の必要性が指摘された。その後、1990年代には「BCJ-L2波」と呼ばれる工学的基盤(せん断波速度400m/s程度の地盤面)上面で定められる模擬地震波を用いて、それぞれの建設地における工学的基盤以浅の表層地盤による増

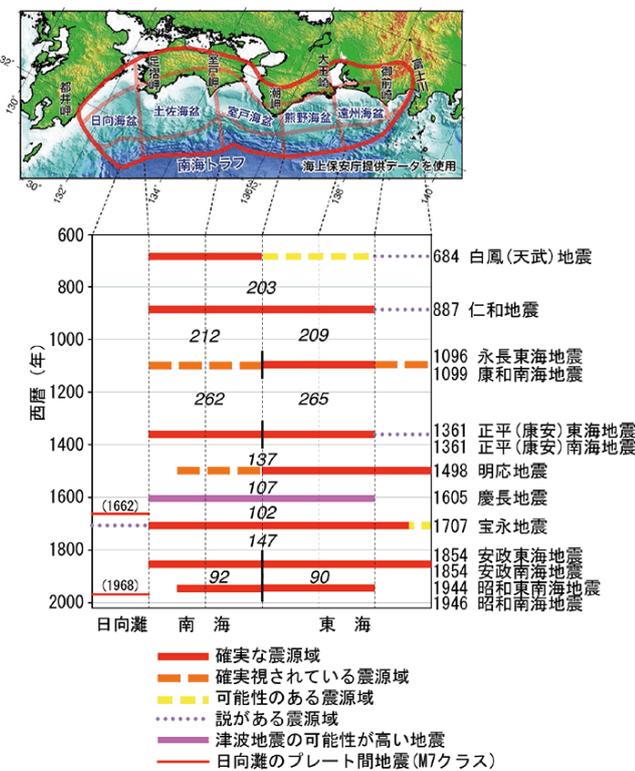


図1 過去の地震の発生状況¹⁾

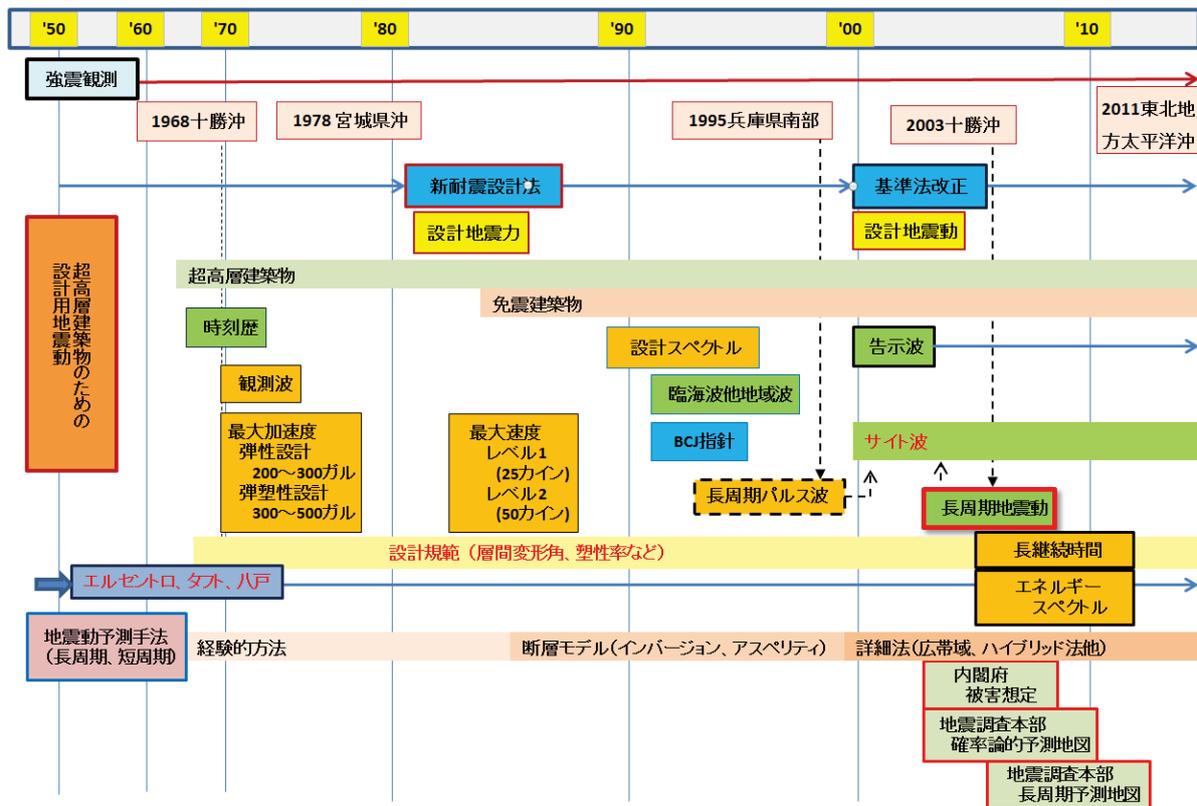


図2 建築物のための設計用地震動の変遷

幅特性を考慮して、入力地震動を設定するようになった。2000年には建築基準法が改正され、平成12年建設省告示第1461号「超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件」が制定され、超高層建築物及び免震建築物は規定された地震動（告示スペクトル⁶⁾）による安全性の検証が義務づけられた。この告示スペクトルとは別に、建設地周辺における活断層分布、断層破壊モデル、過去の地震活動、地盤構造等に基づいて設定される模擬地震動波形（サイト波）

が、設計用入力地震動として用いられるようになった。

一方、長周期地震動の影響を受ける長周期建築物の棟数は、近年増加の一途をたどっている。図3、4は、(一社)建築性能基準推進協会より提供された情報を基に、1966年から2013年までに評定(性能評価)を受けた超高層建築物、免震建築物の棟数を整理したものである。日本で初めて高さ100mを超えた霞が関ビル(147m)は1968年4月に竣工し、その後、超高層建築物への社会のニーズや高層鉄筋コンクリート造建築物を可能とし

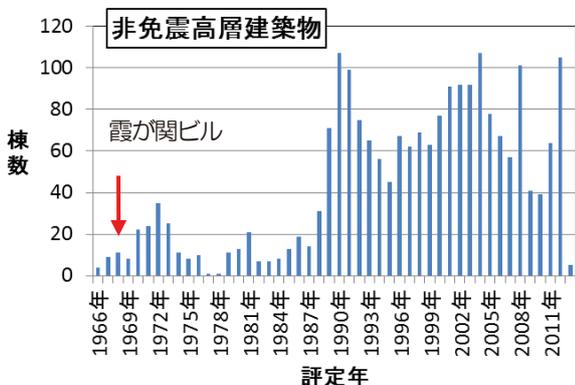


図3 非免震超高層建築物の評定棟数(合計2,108棟)

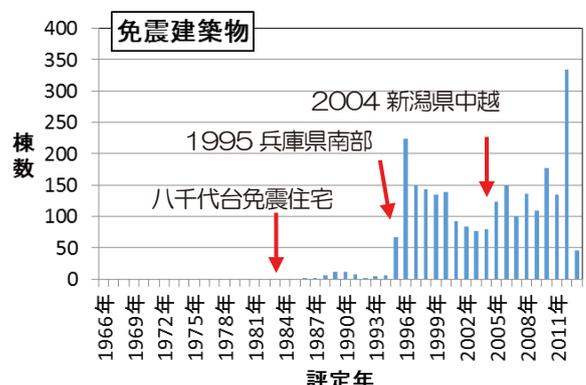


図4 免震建築物の評定棟数(合計2,561棟)

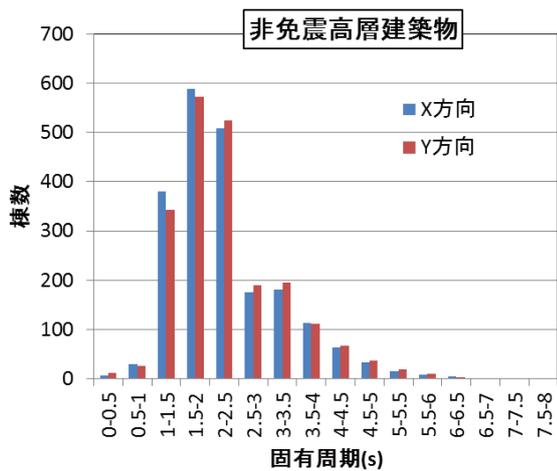


図5 非免震超高層建築物の1次固有周期

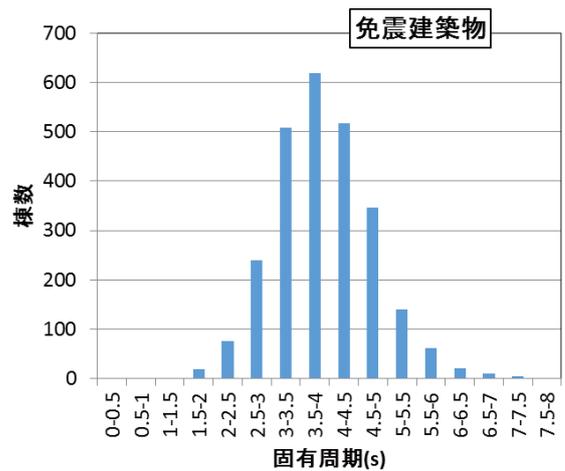


図6 免震建築物の1次固有周期

た技術開発等⁷⁾により、1988年頃より超高層建築物の棟数は増大した。一方、図4より免震建築物の評定を受けた棟数は、免震建築第一号の「八千代台免震住宅」が1983年に完成した後⁸⁾は年10棟前後であったが、1995年兵庫県南部地震に代表される被害地震を経験して免震建築物の機能が評価され、超高層建築物や戸建住宅へ適用するための技術開発が進められ、評定数が飛躍的に増大した。図5、6は、これら建物の1次固有周期と棟数を整理したものである。非免震超高層建物の場合、1次固有周期は高さや構造種別によって変化するが、図5より周期1.5～2.5秒の建築物が全体の50%を占めていることが分かる。一方免震建築物の1次固有周期は、図6より周期3.5～4.0秒を中

心に分布しており、非免震超高層建築物のそれよりも長い値となっている。図7、8は、これら建築物の建設地点の分布図を示している。図7より、非免震超高層建築物は大都市圏や道府県庁所在地を中心に分布しているが、免震建築物の建設地点は、図8の分布図によると3大都市圏に加えて全国に広範囲に分布している。設計で用いられている標準波等の地震動特性が、非免震超高層建築物や免震建築物の1次固有周期や建設地点の長周期地震動特性に対して適正であることが重要である。

III. 長周期地震動に対する各機関の取り組み

2011年東北地方太平洋沖地震で改めて影響の大きさが認識

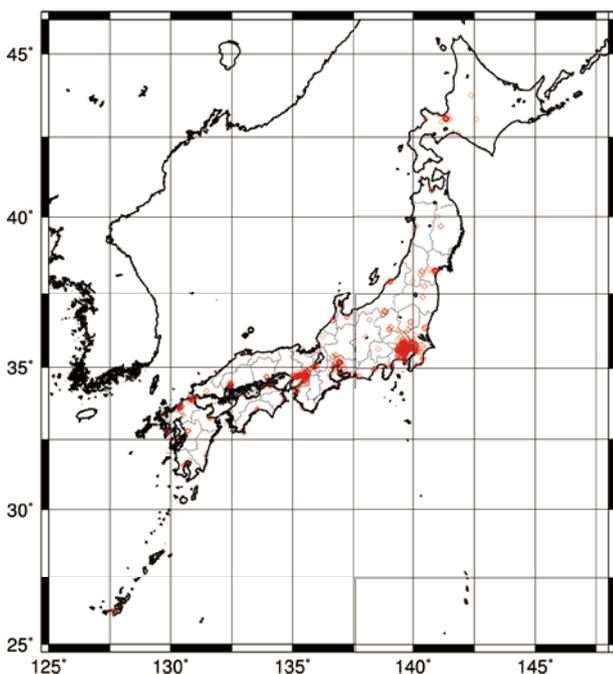


図7 非免震超高層建築物の分布

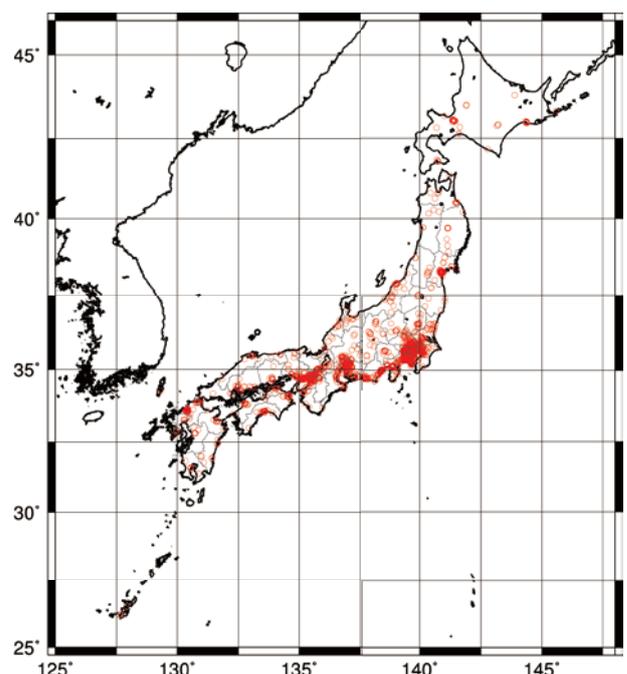


図8 免震建築物の分布

された長周期地震動に対して、我が国の地震調査研究を一元的に推進する地震調査研究推進本部や我が国の防災基本計画や地域防災計画を司る内閣府の対応は以下ようになる。

1) 地震調査研究推進本部の取り組み

平成15年十勝沖地震(M=8.0)において、震源から遠く離れた苫小牧地域で長周期地震動による石油タンクの火災が発生したことを踏まえ、平成19年度から長周期地震動を予測する手法の研究に着手し、「長周期地震動予測地図」2009年試作版⁹⁾、「長周期地震動予測地図」2012年試作版¹⁰⁾を作成、公表している。また、2011年東北地方太平洋沖地震の後、M9クラスの超巨大地震の発生や海溝型地震の連動発生等の可能性評価を含めた地震発生子測の精度向上に取り組むよう、海溝型巨大地震の強震動予測を見直している¹¹⁾。長周期地震動予測地図の高度化と普及を目指した長周期地震動予測地図作成支援事業では、巨大地震発生の切迫性が指摘されている南海トラフの地震や人口が集中する首都圏に大きな影響を及ぼす相模トラフの地震について、マグニチュード8～9級の地震を対象として長周期地震動ハザードの評価に必要な時刻歴波形の計算を行い、震源モデル、地下構造モデル、計算手法の妥当性について検討し、結果を公表している¹²⁾。それによると、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ている¹³⁾。

2) 内閣府の取り組み

中央防災会議防災対策推進検討会議の下に平成24年4月に設置された「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」において、南海トラフ巨大地震を対象として具体的な対策を進め、南海トラフ巨大地震の被害想定第1次報告が平成24年8月29日に、第2次報告が平成25年3月18日に公表されている。想定する地震は最大クラスの物で、被害想定に用いた地震動は、工学分野での活用も念頭におき、工学的基盤($V_s=350\sim700\text{m/s}$)までは、地震学的に想定される振幅スペクトルに確率的な位相を与えて作成した小地震波形をグリーン関数とし、設定された断層モデルに従い波形合成を行う、いわゆる統計的グリーン関数法で求めている¹⁴⁾。揺れによる被害が最大となると想定される、強震動生成域が内陸直下になる「陸

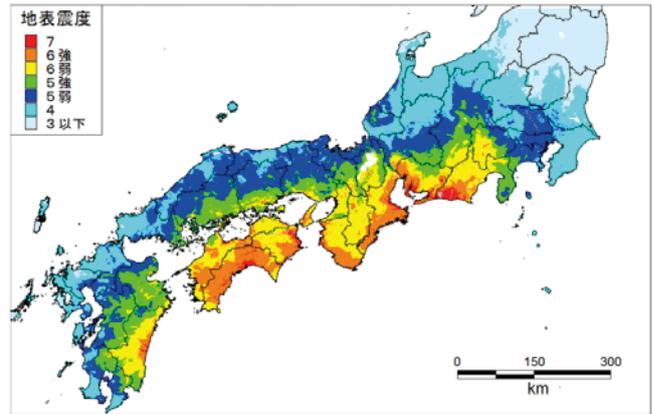


図9 内閣府が公表した南海トラフ地震の震度（陸側ケース 地表震度）¹⁴⁾

側ケース」の場合には全体的に震度が大きくなり、図9に示すように震度7が想定される地域は静岡県、愛知県、三重県、兵庫県、和歌山県、徳島県、香川県、愛媛県、高知県、宮崎県に広がっている¹⁵⁾。長周期地震動による被害様相として、高層ビル上階における揺れの増幅が指摘されている¹⁶⁾。ただし、対象としている地震動が概ね3秒より短い周期の地震を対象として推計されたものであり、超高層ビルや大型石油備蓄タンクと共振して被害をもたらす恐れのある周期3秒以上のゆったりとした地震動、いわゆる長周期地震動についても別途検討する必要があるとしている。

IV 建築研究所の取り組み

独立行政法人建築研究所（以下「建築研究所」という。）は、国土交通大臣から示された中期目標に基づき、公正・中立の立場で、所内の高度な実験施設等を活用し、住宅・建築・都市計画技術に関する研究開発、地震工学に関する研修等を総合的、組織的、継続的に実施する機関である。平成23年4月1日から平成28年3月31日の5年間では、以下に示す各項目に対応する研究開発を重点的研究開発として位置付けている¹⁷⁾。

- ア) グリーンイノベーションによる持続可能な住宅・建築・都市の実現
 - イ) 安全・安心な住宅・建築・都市の実現
 - ウ) 人口減少・高齢化に対応した住宅・建築・都市ストックの維持・再生
 - エ) 建築・都市計画技術による国際貢献と情報化への対応
- 長周期・長時間地震動に係る研究開発は、イ)に対応する。

1) 強震観測

建物の耐震安全性の向上を図るためには、地震動特性や建物の地震時挙動を正確に知り、耐震設計の一層の合理化を図る必要がある。しかし、地震動や地震時の建物の挙動は非常に複雑なため、実際の現象を観測して分析することが極めて効果的である。このような背景から、建築研究所は1957年以来、主に建物を対象とした強震観測を行っている。現在は、日本中の主要都市に80余の強震観測地点を設置している。これまでの半世紀余の間に、貴重な記録が収集され、我が国の耐震建築基準の基礎となる研究成果を挙げている。例えば、古くは1964年新潟地震では、砂地盤の液状化で大きく傾いた信濃川河口域に建っていた川岸町アパートの近傍で記録が得られた(図10)。また1978年宮城県沖地震では、東北大学の建物頂部で重力加速度(1g)を超える揺れを記録し、適切に設計されていればそのような大きな揺れにも建物が耐えることができることが実証された。そして2011年東北地方太平洋沖地震では、その1gを記録した建物が大きな損傷を受けていく状況を記録する強震記録が得られ、損傷過程を詳細に検討することができた(図11)。また、震源から770kmと遠く離れた大阪府咲洲庁舎(高さ256.0m、地上55階・地下3階)では、地表の地震動レベルは小さかったものの超高層建築物が共振して大きく長く揺すられる現象を克明に記録

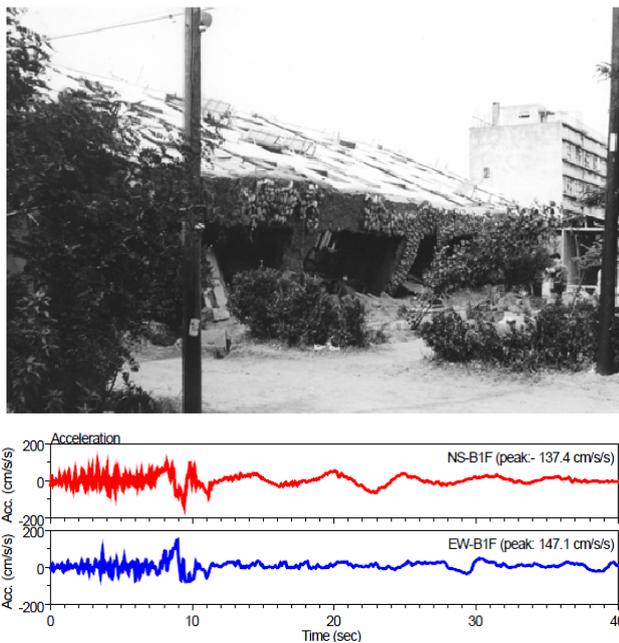


図10 1964年新潟地震で転倒したアパートと隣の建物で得られた強震記録

した(図12)。この2011年東北地方太平洋沖地震の記録は、地震から2日後の3月13日に「強震観測速報第1報」としてウェブで公開された。これは被災地の強震記録としては最も早く公開されたもので、多くの注目を集めた。

以上のような強震観測を通じて得られた成果は、建物の健全性評価の実用化や耐震安全性評価の精度向上に重要な役割を果たし、また長周期構造物の安全対策など今後の地震防災対策の面からも極めて有用なものである。建築研究所の強震観測で得られた強震記録や強震観測記録を用いた研究成果は、ウェブサイト(図13)²⁰⁾や報告書、学術論文等を通じて紹介している。また、得られた強震記録の数値データは、各強震観測地点の地表の計測点で得られた強震記録の数値データは無条件で、建物の上部のセンサーで得られた強震記録の数値データの大部分は、利用申請(図14)を行うことにより入手することができる²¹⁾。建物の強震観測は、建築研究所などの公的な研究機関、大学、建設会社や設計事務所等の民間機関などが行っているが、全国規模の観測網の観測記録が公開され、利用できるのは、建築研究所だけである。



妻壁両端隅柱の柱脚部の被害状況¹⁸⁾

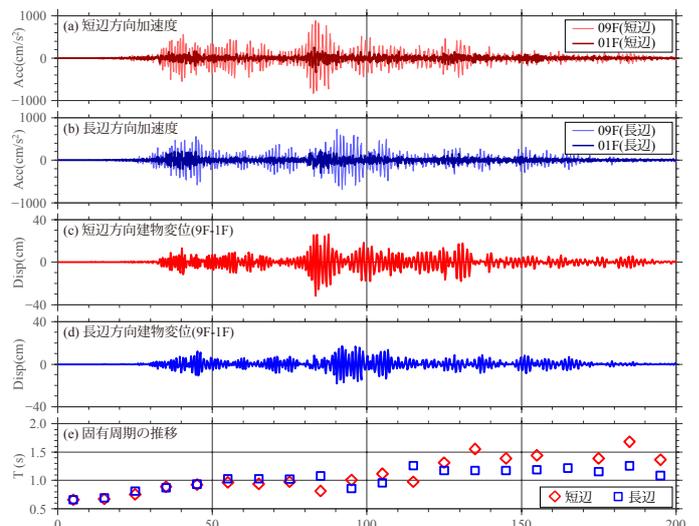


図11 1階と9階で得られた加速度記録、9階の1階に対する相対変位、及び10秒毎に同定した固有周期¹⁹⁾

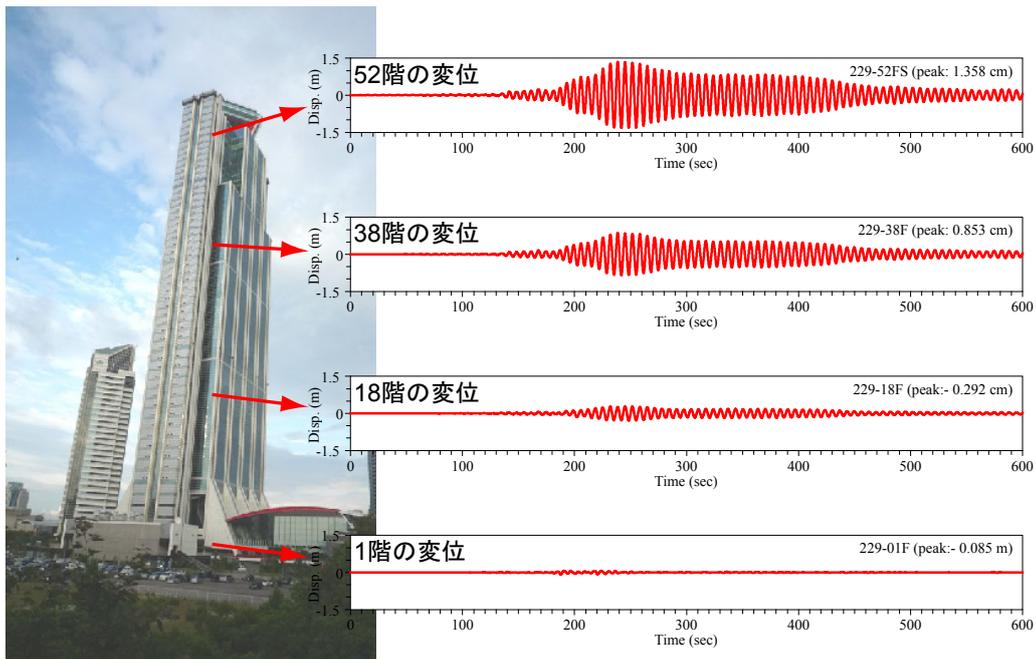


図 12 東北地方太平洋沖地震における大阪府咲洲庁舎の強震記録
(加速度記録を変位に変換。建物の 52 階では両振幅で 2.7m に及ぶ揺れが継続し、エレベータなどの設備や内装・仕上げ材の破損が生じた。)

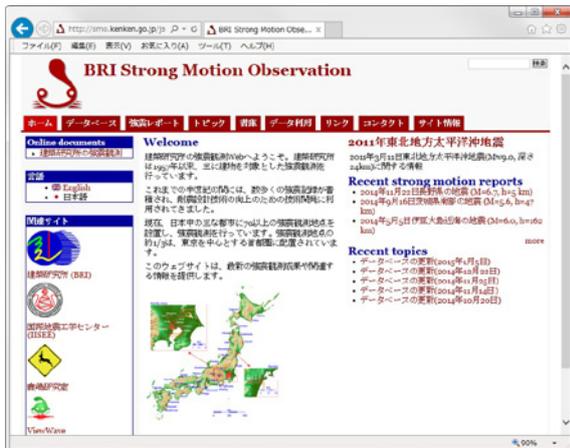


図 13 建築研究所の強震観測ウェブサイト



図 14 建築研究所の強震観測ウェブサイト、数値データの利用について

2) 長周期地震動に係る研究課題

建築研究所では重点的研究開発課題「長周期建築物の耐震安全性対策技術の開発 (H21-22)」、「長周期地震動に対する超高層建築物等の応答評価技術の高度化 (H23-24)」を実施して、内閣府や地震調査研究推進本部から出される震源や地下構造に関するデータに基づいて長周期地震動を算定する手法「長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法」を開発すると共に、長周期建築物の限界性能の明確化と応答予測技術の高度化に取り組んだ。そして、構造種別や使用される部材の違いによって建

築物が有する保有水平耐力は既往の設計慣習による予測値より向上する場合や低下する可能性があることを、構造実験で確認した。

①長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法

開発した長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法は、想定する地震の規模(モーメントマグニチュード M_w)、伝播経路(断層最短距離)をパラメータとした回帰式により、周期 0.1 秒から 10 秒の広帯域地震動の振幅レベルを表す減衰定数 5%の加速度応答スペクトルと長時間継続する特徴を表す位相特性を定

める群遅延時間の平均値や分散を推定し、これに基づき想定地震による時刻歴波形を作成する手法である。減衰定数 5% の加速度応答スペクトルの値を推定する回帰式は

$$\log_{10} S_A(T) = a_1(T) M_w + a_2(T) M_w^2 + b_e(T) R + b_w(T) R - \log_{10}(R^{\alpha(T)} + d(T) 10^{0.5 M_w}) + c_0(T) + c_f(T) + c_w_f(T) \quad (i)$$

位相特性を定める群遅延時間の平均値と分散を推定する回帰式は

$$\mu_{igr}(f) = A_{igr1}(f) M_0^{1/3} + B e_1(f) X + B w_1(f) X + C_{1f}(f) + C w_{1f}(f) \quad (ii)$$

$$\sigma_{igr}^2(f) = A_{igr2}(f) M_0^{1/3} + B e_2(f) X + B w_2(f) X + C_{2f}(f) + C w_{2f}(f) \quad (iii)$$

で表現される。ここで、

$S_A(T)$: 推定対象である特定地点の地表面での減衰定数 5% 加速度応答スペクトル

$\mu_{igr}(f)$: 群遅延時間の平均値

$\sigma_{igr}^2(f)$: 群遅延時間の分散

で、これらの値を推定するための右辺の係数には、(a) 全国共通の回帰係数、と (b) 観測地点固有の各種サイト係数、がある。これらの係数は、全国で得られている多数の強震記録を用いた回帰分析により定めている。従って、(b) 観測地点固有の各種サイト係数が得られている、回帰に用いられた地震記録が得られている観測点では、評価対象とする地震の規模 (M_w)、断層位置を定めると、当該地点の特性を考慮した長周期地震動の評価が可能となる。観測地点固有の各種サイト係数が得られていない観測点と観測点の間の任意地点での長周期地震動を計算する

ために、地震調査研究推進本部が公開している深部三次元地下構造モデル²²⁾を用いて、関東平野、濃尾平野、大阪平野の三平野において面的評価が可能となる回帰式も開発した。この方法は、地震基盤上面から工学的基盤面までの堆積層伝播時間 $Tz(s)$ を変数として、上記 (i) 式の $c_f(T)$ や $c_w_f(T)$ を推定する回帰式と、上記 (ii) 式の $C_{1f}(f)$ や $C w_{1f}(f)$ や上記 (iii) 式の $C_{2f}(f)$ や $C w_{2f}(f)$ を推定する回帰式により構成される。ここで $Tz(s)$ は、地震調査研究推進本部が公開している約 1 km 間隔の三次元地下構造モデル²²⁾に基づいて、対象地点直下の地下構造モデルより算出される地震基盤上面から工学的基盤面までを鉛直伝播する S 波の伝播時間で、堆積層のせん断波速度を用いて

$$Tz(s) = \sum_{i=1}^n (H_i / V_{si}) \quad (iv)$$

で定義されており、地盤の固有周期の 1/4 に相当する指標である。図 15 に、三平野の $Tz(s)$ 分布を示す。 $Tz(s)$ が大きな値となっている赤～濃紫の地点は、関東平野では東京湾周辺から埼玉県、群馬県に分布し、濃尾平野では木曾三川の流域に、大阪平野では大阪湾岸とそれより東側の内陸部分に存在している。 $Tz(s)$ が大きい地点は、地震基盤が深くなっていることを意味している。この $Tz(s)$ の値を適用することにより、三平野内では任意地点の固有の長周期地震動特性を反映したサイト波を作成することが可能になる。以上に示した手法は、平成 20～22 年度の建築基準整備促進事業 1「超高層建築物等の安全対策に関する検討」、平成 23～24 年度の建築基準整

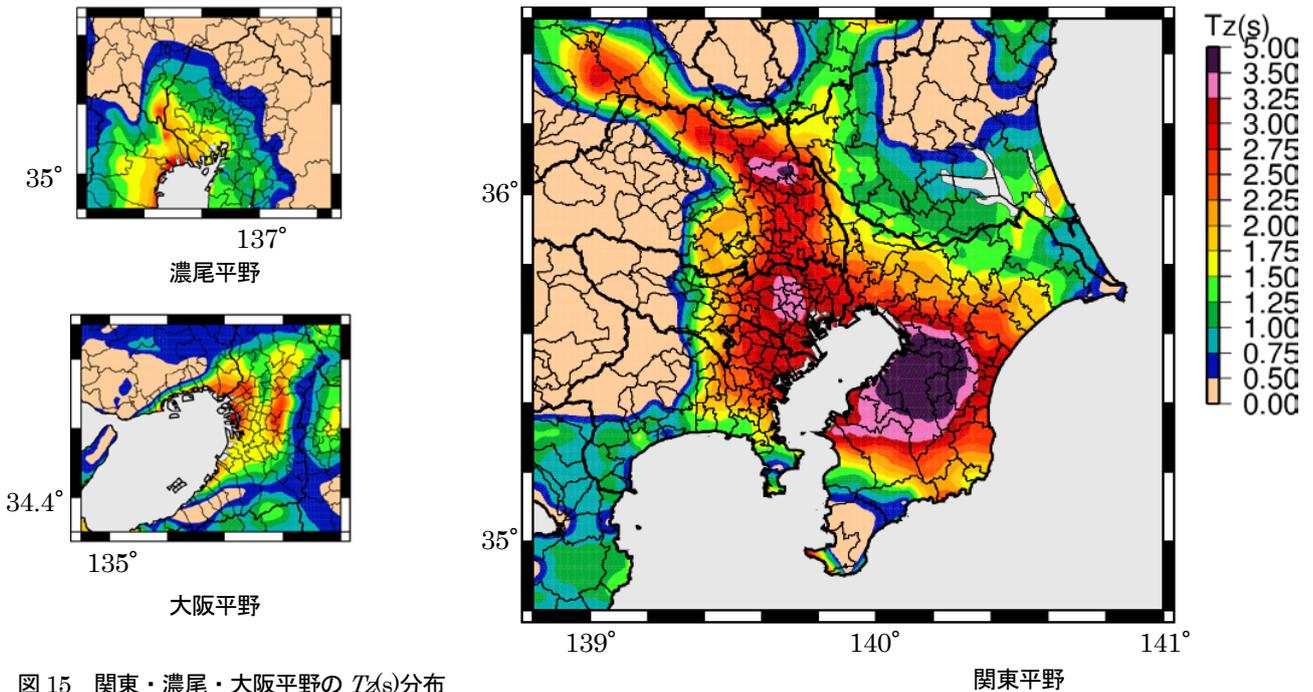


図 15 関東・濃尾・大阪平野の $Tz(s)$ 分布

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」を通じて(株)大崎総合研究所等事業担当者を行った検討によって開発された。本手法についての詳細は、建築研究資料の第144号²³⁾、147号²⁴⁾に記載されている。また、同予測手法を適用する際に必要な、全国共通の回帰係数や観測地点固有の各種サイト係数と、同作成手法を南海トラフで発生が予測されている3連動、4連動地震に適用して得られた主要な地点の地震動波形は、図16に示すように(独)建築研究所のウェブサイト²⁵⁾で公開され、入手が可能である。

② 過大な長周期地震動に対する上部構造の挙動

上記①の長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法を南海トラフで発生が予測されている3連動、4連動地震に適用して得られた主要な地点の地震動を入力地震動として、さまざまな高さ(固有周期)や種類の超高層建築物の応答を計算したところ、予想された最も大きな層間変形角は1/48radに達した。このような一般的な設計クライテリアを超える建物応答が予測されることに対して、超高層建築物の限界性能を把握し、構造安全性を検証する手法を確立しておくことが求められる。そこで限界値に関する検討が、建築基準整備促進事業27-1「長周期地震動に対する鉄筋コンクリート造建築物の安全性検証方法に関する検討」、27-2「長周期地震動に対する鉄骨造建築物の安全性検証方法に関する検討」、27-3「長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討」において行われ、構造部材の多数回繰り返し荷重実験や、大型架構の震動実験等により実施された²⁶⁾、²⁷⁾。

そこでの検討は、鉄筋コンクリート造については、柱・梁・柱梁接合部を含む立体および平面部分架構の多数回静的繰り返し

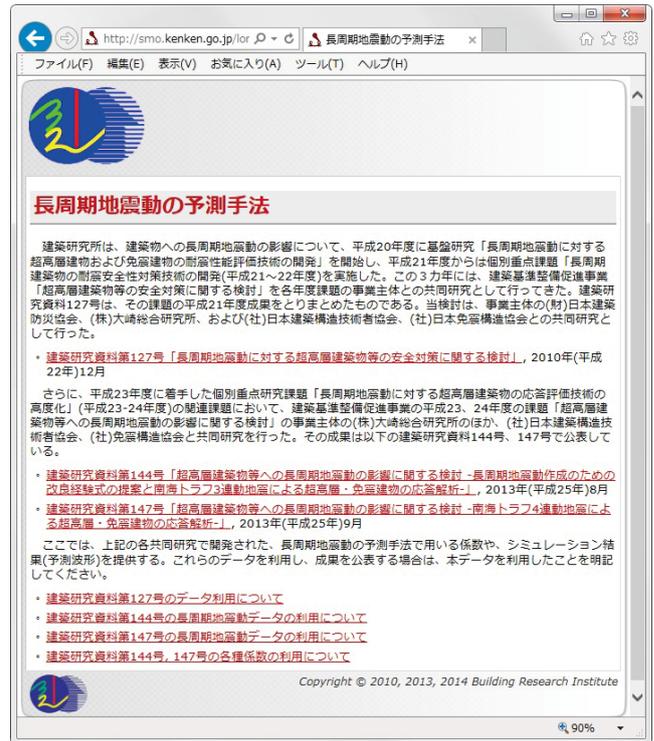


図16 「長周期地震動の予測手法」のウェブサイト

し荷重実験に加え、1990年代後半の設計手法に準拠して設計された20階建てRC造超高層モデル建築物を実大の1/4に縮小した高さ15mの試験体の振動実験を実施した(図17)。用いた入力地震波は、一般的な設計クライテリアである最大応答層間変形角1/200(L1レベル)、1/100(L2レベル)と、建築物が終局状態に達する1/50以上(L3レベル)の3段階を目標とした。振動実験の結果は、L1およびL2レベルの応答値は通常の設計クライテリアよりやや大きめであったが試験体は安定した応答性状を示し、L3レベルでは著しい損傷は発生せず最後まで崩壊に至

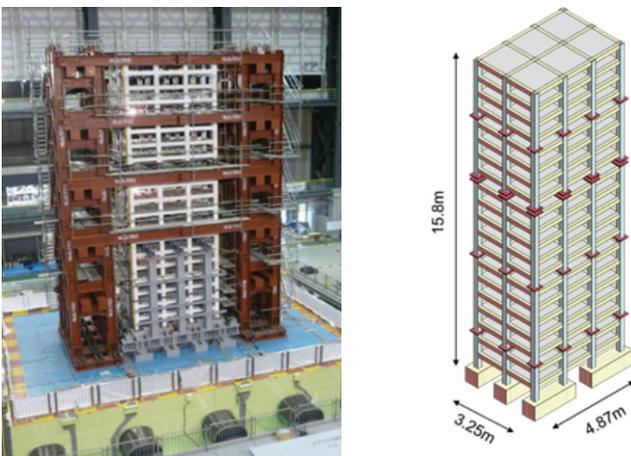


図17 RC造超高層建築物縮小模型の震動台実験



図18 RC造部分架構実験

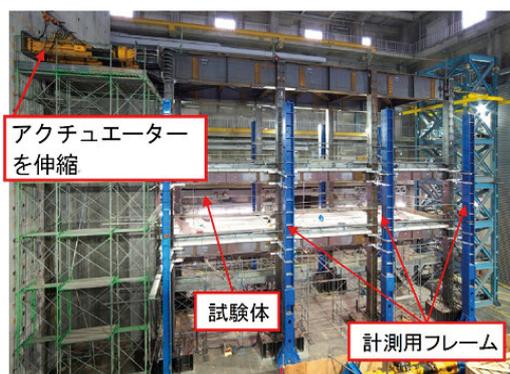


図 19 鉄骨造 3 層実大架構試験体の多数回繰り返し荷重実験

ることはなかったが、最大応答層間変形角は約 1/35 に達し予測を大きく上回る結果となった。さらに、試験体をモデル化して弾塑性地震応答解析を実施し、実験時の挙動をどの程度正確に再現できるか検証したところ、大地震を想定した設計レベルである L2 レベルまでは長周期地震動に対しても通常の解析手法で地震応答をほぼ精度よく評価できることが明らかとなったが、それを越える大変形領域(L3)においては現状の解析手法では評価が難しいことが示された。このような実験と解析で差が生じる要因を特定するべく、柱、梁、床スラブからなる部分架構試験体の静的加力実験を実施したところ(図 18)、強度に寄与するスラブ筋の効果は慣行の設計で考慮している範囲(1m 程度)より大きく、層間変形角が 1/100 に達する時点には全幅が有効に寄与していた。

鉄骨造については、鉄骨造超高層建築物の梁、柱、柱梁接合部パネル、柱梁部分架構を対象とした多数回繰り返し荷重実験に加え、3 層実大架構試験体を用いた多数回繰り返し荷重実験(図 19、20)を実施し、梁端部の破断に至るまでの挙動を再現した。これらの実験結果に基づいて、梁端部の疲労特性を明らかにし、梁端ディテールに応じた 3 種類(スカラップ[切欠き]付、スカラップ無、高性能仕口)の設計用疲労曲線を提示した。



図 21 実大免震装置の多数回繰り返し荷重実験

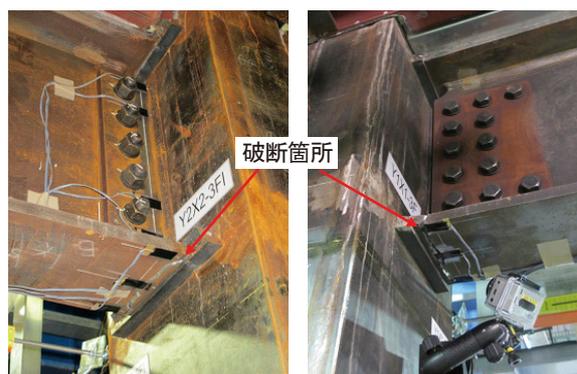


図 20 鉄骨造 3 層実大架構試験体の実験後の梁端部下フランジの破断状況

また、この疲労曲線を用いた長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性評価法を提案した。

免震構造については、縮小および実大免震部材の多数回繰り返し加力実験(図 21、22)により、免震部材の温度上昇・疲労等の要因による履歴特性の変化(性能低下特性)と限界性能に関するデータの獲得と定量化を行った。定量化した免震部材の特性変化を組み込んだ、免震建築物の応答評価に関する手法を提案した。

以上に示したような長周期、長時間地震動によってもたらされる大きな応答に対する検証結果は、大変形応答に対する建築物の設計法の構築に活用される。

V 長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法の適用例

上記IV.2).①の長周期地震動を考慮した設計用地震動作成手法を適用し、日本全国で長周期地震動が卓越する地点の特定を試みた。対象とした地震は、南海トラフで過去に発生した地震のうち、歴史上最大規模の地震である 1707 年宝永地震と関東地方への影響が大きいと考えられる 1854 年安政東海地震である。地震動を評価する際に必要な、これらの地震の震源規模や断層位置の情報は、内閣府等の設定を参照した。



図 22 鉛ダンパーの二方向加振実験(長時間加振による破断)

1) 振幅レベルの特徴

上記IV.2.)①の手法では、長周期地震動の特性は振幅レベルと位相特性によって表現される。振幅レベルが大きくなる地域を特定するために、図 23 に青三角(Δ)で示される、設計用地震動の作成手法を適用するための各種係数が得られている約 1900 地点の観測地点を対象に長周期地震動を評価した。周期 3 秒と 6 秒の pSv 分布 (擬似速度応答スペクトル分布) を図 24、25 に示す。超高層建築物等の設計用入力地震動として用いられている告示スペクトルは、速度振幅に換算すると周期 0.64 秒以上で 81.5cm/s の一定値となるが、この値を上回る黄色～赤色の地点は、周期 3 秒では震源域直上の御前崎半島、高知県安芸平野、震源域に近い濃尾平野、大阪平野、徳島平野、大分平野等に分布し、周期 6 秒では周期 3 秒と同じ御前崎半島、濃尾平野、大阪平野、大分平野に加えて関東平野に分布している。これらの地点や地域で振幅が大きいのは、震源域からの距離が近いことに加えて、深部地下構造が長周期地震動の増幅に寄与しているためと考えられる。長周期地震動が卓越する地域のうち、長周期地震動の影響を受ける超高層建築物や免震建築物が多数建っている 3 大都市圏 (関東平野、濃尾平野、大阪平野) と宝永地震、安政東海地震の震源断層直上の静岡県について、詳細な検討を行った。

3 大都市圏のある三平野では、 $Tz(s)$ を活用して任意地点の長周期地震動評価が可能であるので、 $Tz(s)$ に基づいて 3~4km 程度の間隔で長周期地震動を求め、それらの値を内挿して約 200m のメッシュポイントごとの値を評価した。また、三平野内でも $Tz(s)$ を活用できない地点と静岡県は、観測地点固有の各種係数が得られている地震観測点について評価し、それら観測点の値から内挿してメッシュポイントごとの値を求めた。図 26 は、三平野と静岡県において内挿してメッシュポイントごとに求めた pSv を、町丁目ごとに平均したものを重ね書きして示している。図 26 では、4 地域それぞれでスペクトルの形状とレベルが大き

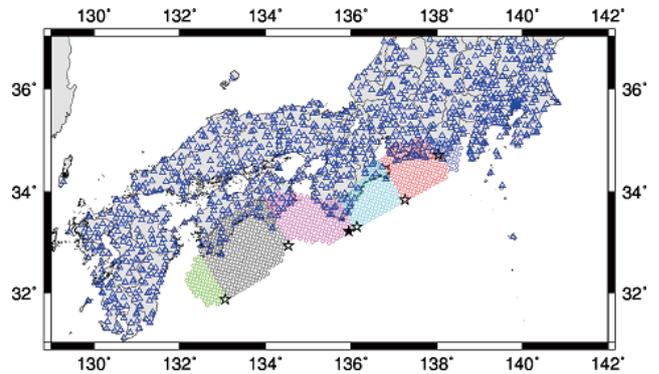


図 23 基整促の方法を適用した全国の観測点(Δ)と計算で仮定した宝永地震の震源域

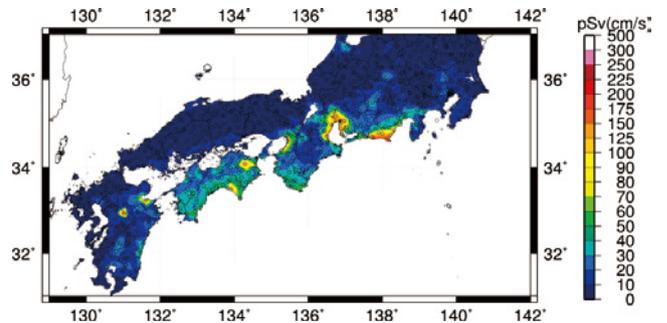


図 24 周期 3 秒の pSv 分布(宝永地震)

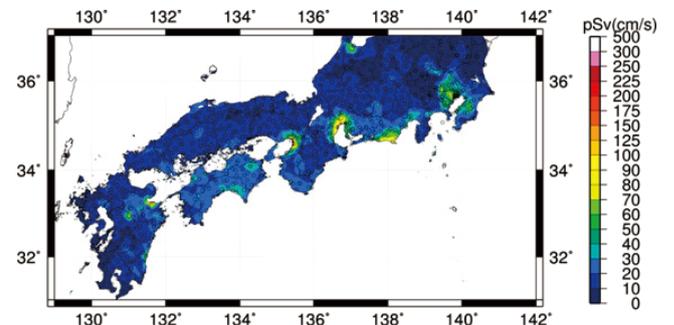


図 25 周期 6 秒の pSv 分布(宝永地震)

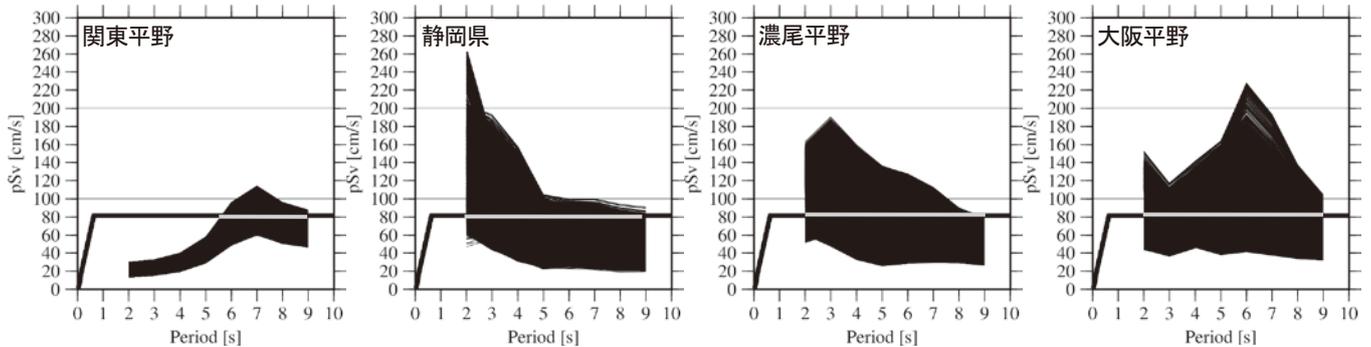


図 26 $Tz(s)$ を用いて計算された長周期地震動(黒太線[一部白線]は、告示スペクトル)

く異なっている。関東平野は、震源に近い安政東海地震の長周期地震動が支配的であるが、震源断層からの距離が離れているため（例えば東京都心部は約 100 km）、卓越する周期 7 秒においても最大で 110cm/s 程度である。また、周期 5 秒程度以下の周期帯域の振幅は、告示スペクトルを下回っている。静岡県は、震源断層直上に位置していることから短周期成分も大きなレベルとなっている。また卓越する周期 2 秒の値は 60cm/s から 260cm/s 程度で、違いは 4 倍以上に達している。濃尾平野は周期 3 秒が卓越しており、その値は 60cm/s から 190cm/s で違いは 3 倍に達している。図 24 より判断すると、伊勢湾周辺に振幅が大きな地点が分布している。大阪平野では、宝永地震が支配的である。卓越する周期 6 秒の値は 40cm/s から 230cm/s であり、違いは 6 倍近い違いが生じている。図 25 より判断すると、大阪湾岸に振幅の大きな地点が分布している。このような平野ごとに現れる pSv 値の差異は、影響が強い震源断層からの距離と各平野、各地点の深部地下構造に起因する長周期地震動特性の差によって生じている。

pSv のレベルの違いが時刻歴波形の特徴に与える影響について確認するため、大阪平野で卓越する周期 6 秒の振幅が異なる(大中小)3地点の pSv(大中小)をターゲットスペクトルとして、当該地点の位相特性を定める群遅延時間で表現される特性を取り込んで、長周期地震動の振幅特性と位相特性の両方を反映させた時刻歴波形を作成した。図 27 上に示す加速度波形では、70 秒と 130 秒を中心に 2 つの位相が到達しており、震源断層上の異なったセグメントで発生、伝播した波群の影響と考えられる。また最大値の比は、最大の「pSv(小)」と最小の「pSv(中)」の比(小/中)で 1.15 倍である。一方、図 27 下図の速度波形では加速度波形より長周期成分が強調され、振幅の大きな時間が長くなる。特に「pSv(大)」で顕著である。最大値の比も、大/小で 1.56 倍に達する。

2) 位相特性の特徴

長周期地震動の継続時間や継続時間の影響を受けるエネルギー Spektral Ve は、深部地下構造や震源からの伝播の影響を受ける位相特性によって異なる。図 26 に示す関東平野の pSv の平均的なレベルをターゲットスペクトルに設定して、 $T_d(s)$ に基づいた新宿、大手町、千葉、さいたま、横浜の位相特性を適用して時刻歴波形を求めた。図 28 に示す加速度波形では最大加速度値は 42~51cm/s/s と同程度で、これらを積分した速度波形の振幅も 20cm/s 程度で同程度である。図 29 は、これらの加速度

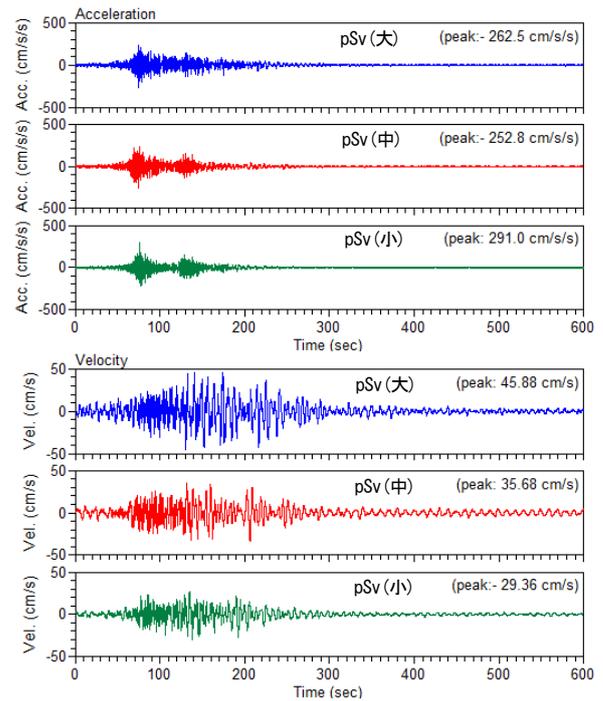


図 27 推定された pSv が大中小レベルの加速度波形(上)と速度波形(下)

波形の 5%減衰の pSv(左図)と 10%減衰の Ve(右図)である。pSv は、ターゲットスペクトルスペクトルが同一であるのでよく一致しているが、Ve は新宿と大手町は他の 3 地点より周期 3 秒以上の振幅が上回っている。これは、上記 IV.2)①の設計用地震動の作成手法において、安政東海地震の様にフィリピン海プレートで発生する地震による東京 23 区内の増幅特性を反映していることが理由である²⁰⁾。

VI おわりに

30 年以内の発生確率が 70%程度と推計されている南海トラフに発生する巨大地震のうち、歴史上最大規模の地震である 1707 年宝永地震と関東地方への影響が大きいと考えられる 1854 年安政東海地震を対象に、基準整備促進事業で開発した長周期地震動を考慮した設計用地震動の作成手法を適用して長周期地震動の地域特性について検討を行った。検討の結果、震源域に近く、厚い堆積層が存在し長周期地震動が卓越する 3 大都市圏のある関東平野、濃尾平野、大阪平野、震源断層直上の静岡県、等で pSv が大きくなることが確認された。また、静岡県、濃尾平野、大阪平野は、震源断層からの距離や深部地盤構造の違いによって振幅レベルや卓越周期が大きく異なっていた。関東平野、濃尾平野、大阪平野、静岡県には、長周期帯域に固有周期を有する超高層建築物や免震建築物が多数建設されている。

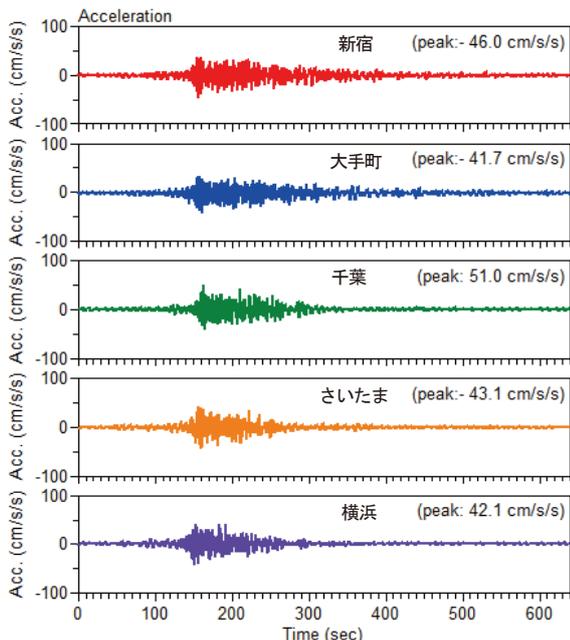


図 28 推定された各地の加速度波形

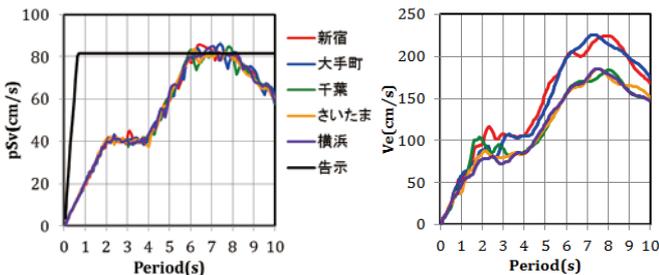


図 29 推定された各地の pSv(左)と Ve(右)

これらの建築物が長周期地震動に共振して過大な応答を生じることが無いよう、サイト固有の長周期地震動特性を評価し、設計クライテリアを上回る過大な応答が想定される場合は、減衰機構の付加などの適切な対策が取られることが望まれる。

謝辞

本原稿の作成にあたり、建築研究所構造研究グループ、国際地震工学センターの各研究員より長周期地震動に係る研究課題の情報を提供いただきました。長周期建築物である非免震超高層建築物と免震建築物の棟数等に関して、(一社)建築性能基準推進協会より情報をご提供いただきました。記して謝意を表します。

参考文献

1) 地震調査研究推進本部：南海トラフで発生する地震、http://www.jishin.go.jp/main/yosokuchizu/kaiko/k_nankai.

htm

- 2) 座間信作：巨大地震と石油タンクのスロッシング、Safety and tomorrow、第 154 号、2014.3
- 3) 鹿嶋俊英他、小山信、大川出：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震における建物の強震観測記録、建築研究資料 No.135 号、2012.3
- 4) 村松郁栄：強震動の基礎(第 I 部：地震の基礎知識、8.4.1 制御用震度計とその問題点強震動の基礎)、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/gk/publication/1/I-8.4.1.html> (参照 2015-01-10)
- 5) 防災科学技術研究所、地震ハザードステーション、<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (参照 2015-01-10)
- 6) 建設省告示第千四百六十一号、超高層建築物の構造耐力上の安全性を確かめるための構造計算の基準を定める件、<http://www.kt.mlit.go.jp/notice/detailsAction.do>
- 7) 室田達郎他、青山博之、平石久廣：New RC プロジェクトの経緯および概要、コンクリート工学、32(10)、1994 https://www.jstage.jst.go.jp/article/coj1975/32/10/32_6/_pdf (参照 2015-01-10)
- 8) JIA：JIA 建築家 architects CPD 技術編、免震住宅の計画、2002.12、<http://www.jssi.or.jp/menshin/doc/keikaku.pdf> (参照 2015-01-10)
- 9) 地震調査研究推進本部：長周期地震動予測地図 2009 年試作版、2009.9、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/index.htm (参照 2015-01-10)
- 10) 地震調査研究推進本部：長周期地震動予測地図 2012 年試作版、2012.1、http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm (参照 2015-01-10)
- 11) 地震調査研究推進本部：新たな地震調査研究の推進について、http://www.jishin.go.jp/main/p_sesaku.htm (参照 2015-01-10)
- 12) 地震調査研究推進本部：長周期地震動予測地図作成等支援事業、http://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/choshuki_shien/ (参照 2015-01-10)
- 13) 文部科学省研究開発局：独立行政法人防災科学技術研究所、平成 24 年度長周期地震動予測地図作成等支援事業成果報告書、http://www.jishin.go.jp/main/chousakenkyuu/choshuki_shien/h24/3_5.pdf (参照 2015-01-10)
- 14) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告）、平成 24

- 年 3 月 31 日、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/1st_report.pdf (参照 2015-01-10)
- 15) 南海トラフの巨大地震モデル検討会：南海トラフの巨大地震モデル検討会（第二次報告）、強震断層モデル編－強震断層モデルと震度分布について－、2012.8
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/pdf/20120829_2nd_report05.pdf (参照 2015-01-10)
- 16) 中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：南海トラフ巨大地震の被害想定について（第二次報告）～施設等の被害～【被害の様相】、2013.3
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku_wg/pdf/20130318_shiryo2_1.pdf (参照 2015-01-10)
- 17) 独立行政法人建築研究所の中期目標を達成するための計画、中期目標期間中の重点的研究開発課題、
<http://www.kenken.go.jp/japanese/information/announcement/plan/20110301b.pdf> (参照 2015-01-10)
- 18) 源栄正人、三辻和弥、田中匠子、鹿嶋俊英、大野晋：2011 年東北地方太平洋沖地震における被害建物の地震前後の振動特性の変化、日本建築学会 2011 年度大会(関東)学術講演梗概集、2011.8
- 19) 鹿嶋俊英：建築及び地震動、建築防災、No.403、pp.6-9、2011.8
- 20) BRI Strong Motion Observation、
<http://smo.kenken.go.jp/ja> (参照 2015-01-10)
- 21) BRI Strong Motion Observation、数値データの利用について、<http://smo.kenken.go.jp/ja/useofdata> (参照 2015-01-10)
- 22) 地震調査研究推進本部：全国 1 次地下構造モデル（暫定版）、「長周期地震動予測地図」2012 年試作版、2012.01、
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/dat/index.htm (参照 2015-01-10)
- 23) <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/144/index.html> (参照 2015-01-10)
- 24) <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/147/index.html> (参照 2015-01-10)
- 25) <http://smo.kenken.go.jp/long/> (参照 2015-01-10)
- 26) 国土交通省「平成 22 年度建築基準整備促進事業 成果概要一覧」、2011.4、http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/jutakukentiku_house_fr_000024_1.html (参照 2015-01-10)
- 27) 国土交通省「平成 23 年度建築基準整備促進事業 成果概要一覧」、2012.4、http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/house/jutakukentiku_house_fr_000047.html (参照 2015-01-10)