

Epistula

えびすとら



独立行政法人 建築研究所
Building Research Institute
Vol.62 発行：2013.7

特集 長周期地震動と建築物

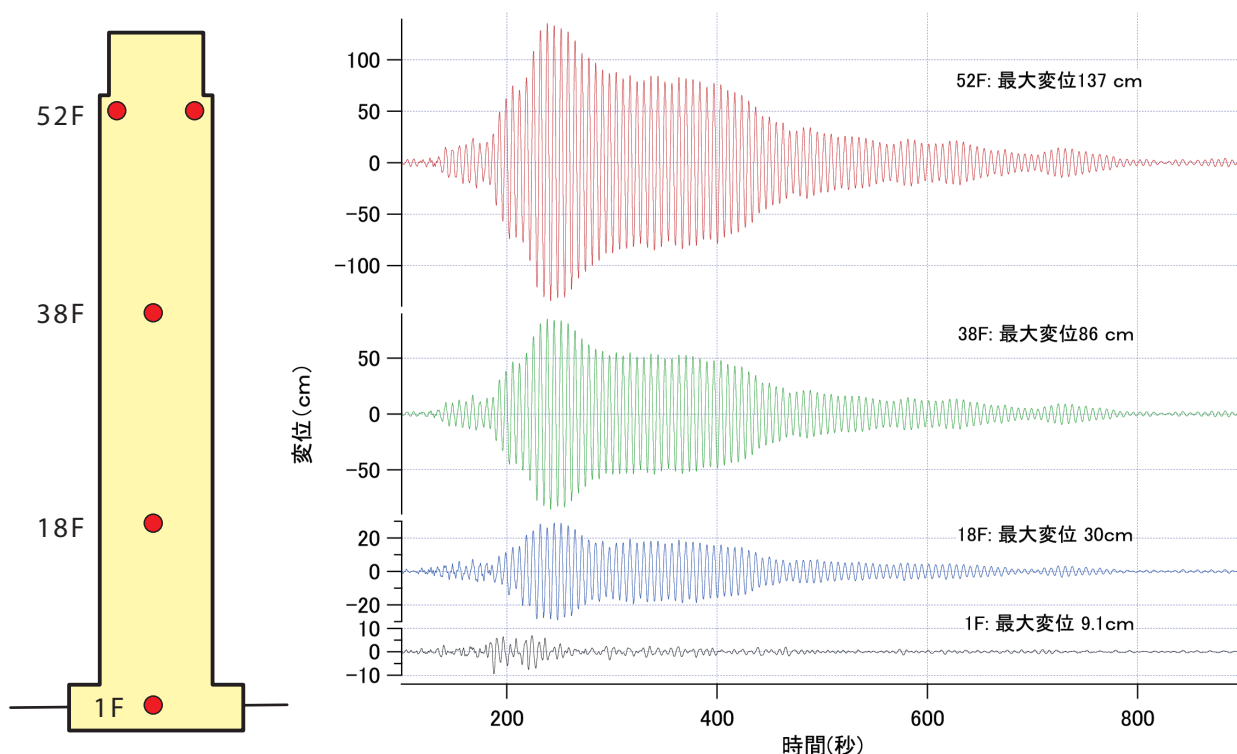
はじめに

日本での超高層ビルの建設は 1960 年代後半に始まりました。超高層ビルは、地震力をうまく受け流して大きな揺れに対してでも有利であるとされてきました。しかしながら、巨大地震では、周期の長い揺れが発生し、さらに東京など超高層ビルが多数建設されている日本の大都市は大規模平野上にあることにより、発生した長周期地震動が大きく増幅する可能性があることがわかりました。これまでに、2003 年十勝沖地震における苫小牧の大型石油備蓄タンクの大規模火災や、2004 年新潟県中越地震における東京の超高層ビルのエレベータのロープの絡みによる損傷など、当初想定していなかつ

た長周期地震動が原因と見られる事故が多数発生しています。さらに 2011 年東北地方太平洋沖地震では首都圏の超高層ビルが大きく揺れたほか、震源から 700km 以上離れた大阪湾岸の超高層ビルが、長周期地震動により頂部が最大で約 2.7m 揺れたほか、エレベータでの閉じ込めや非構造部材の損傷等の被害を生じました。(図 1)

超高層ビルや免震建物は、今後も数多く建設されることが予想されますが、近い将来に発生が想定される巨大海溝地震による長周期地震動に対する構造安全性を確認し、必要な対策を早急に施す必要があります。

本号では、長周期地震動の性質やその影響について考え、最近の成果である、過去の観測データに基づく長周期地震動の検討状況について紹介します。



■ 図 1 2011 年東北地方太平洋沖地震における大阪湾岸超高層ビルの観測波形

長周期地震動、長継続時間、共振現象

近い将来に巨大地震の発生が懸念される中、超高層ビル、免震建物などは地震に強いとされてきましたが、その反面これまで大きな地震に遭遇していません。それらの建築物の構造安全性を確保するため、巨大地震による地震動の強さや継続時間などの特性およびその揺れに対応するためにそれぞれの建物に必要な耐震性能の特定の両面から検討を行っています。その成果は、新築、既存を問わず、各地で予想される激しい揺れに対して、それらの建築物をより安全なものとするために活用されます。

われわれが地震を感じる時、その揺れを特徴付けるものとして、(1) 強さ(振幅)、(2) 速さ(周期)、(3) 時間長さ(継続時間)があります。(1)は揺れの激しさであり、具体的にはたとえば震度の大小などが対応しています。同じ揺れでも、速く激しく揺れる場合もあれば、ゆったりと長く揺れる場合もあります。このような揺れの特徴は、地震の規模やその発生位置、さらには揺れを感じる場所によって変わります。また、建物はその規模、高さ、構造形式や鉄、RCなどの材料の特性によって決まる固有周期と呼ばれる建物自体の振動周期と同じ振動成分に大きく反応します。戸建住宅や低層建物では固有周期は短く1秒以下ですが、超高層ビルなどではその高さなどにより変わり、高さ300m級のものでは6秒から7秒と非常に長くなります。

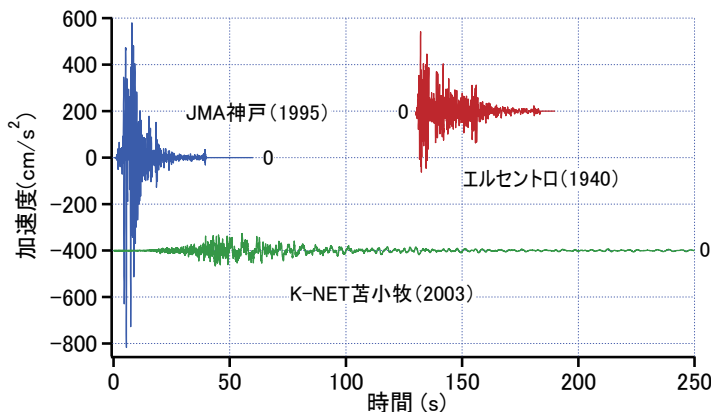
長周期地震動

長周期地震動が強く発生するためには、いくつかの条件を満足する必要があります。一つめは、地震規模が大きく、震源が浅いことです。二つめは、人が揺れを感じる地点まで地震波が伝わる経路に、それを大きく増幅させる要因となる軟らかい地盤があることも条件です。つまり、伝播経路にも影響を受けます。三つめは、当該地を含む平野規模の地盤構造です。日本の大都市圏は、この平野に広く発達しています。関東平野、濃尾平野、大阪平野などの大きな平野は、地殻上面の凹凸のくぼんだ部分に比較的軟らかい地盤が堆積した地形ですが、この堆積地形はその形状、規模に応じて長周期地震動をさらに増大させます。

2011年東北地方太平洋沖地震はマグニチュード9.0でした。地震の規模が極めて大きかった結果として、長周期地震動が発生しましたが、この規模の地震としては、長周期地震動の強さは想像したものほど大きくはありませんでした。その理由として、南海トラフで認められるプレート境界上に堆積した付加体のようなものがなく、二つめの要素の伝播経路における増幅が大きくなかったから、といわれています。

長継続時間

ところで、実際の超高層ビルなどの設計ではどのような揺れを想定するべきなのでしょう。地震動として代表的なものを3つ紹介します。エルセントロ、JMA神戸、2003年十勝沖苦小牧の波形を示しました。(図2)エルセントロ波は、1940年カリフォルニア州インペリアルバレー地震(マグニチュードM=6.4)の時に変電所建物地下で観測された記録ですが、日本でも数多くの建物、例えばほとんどの超高層ビルの設計に使われてきました。JMA神戸は、1995年兵庫県南部地震(M=7.3)のときに気象庁神戸海洋気象台(現在の同気象台とは異なる地点)で観測されたわが国で初めての内陸直下地震による大振幅記録です。苦小牧の記録は、2003年9月26日十勝沖地震(M=8.0)のときのK-NET(独立行政法人防災科学技術研究所が実施する全国強震観測ネットワーク)苦小牧の観測点でのもので、顕著な長周期地震動となっています。図2から、この苦小牧の記録は、他の2つに比べてその継続時間が遙かに長いことがわかります。長周期地震動をもたらす地震はきわめて大きな地震です。そのような地震では震源が大きく、地震動の元となる破壊が始まり完了するまで時間がかかります。その分揺れが長く続くこととなります。地震波の一部はさらに反射屈折を経て到達することになるので、全体としてはより長い継続時間を有するような揺れになります。

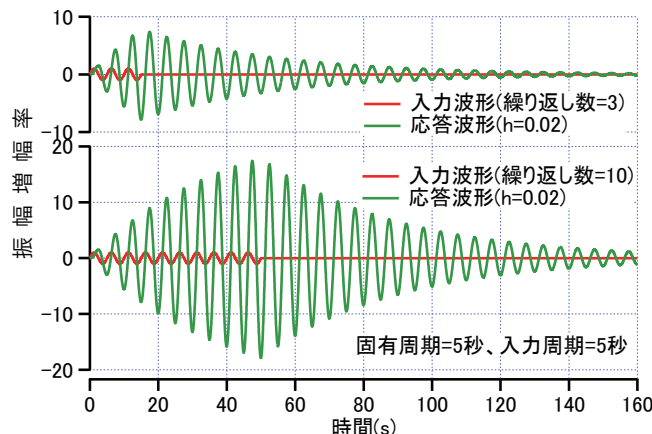


■ 図2 3つの代表的な強震観測波形

共振現象

長周期地震動は継続時間が長く、特定の周期の揺れが何回も繰り返される特徴があります。地震動の周期と建物の固有周期が一致したときに、共振現象が発生します。図3は、そのときの繰り返し回数と最大応答の関係を示したものです。例えばある超高層ビル(減衰定数 h は2%と仮定)にその固有周期と等しい周期の波が作用する場合、繰り返し回数が3回では8倍程度の応答倍率(最大振幅の比率)になります。地震動がそれで終われば、それがほぼ最大応答で、その後振動は減衰していきます。ところが、繰り返し回数が10回に増えると、最大応答倍率は18倍程度に跳ね上がります。つまり共振状態が続く場合には、繰り返し回数が大きいほど応答が大きくなります。

ところで、地震は様々なところで起こりますが、ある地点での揺れには地点特有の共通の周期成分の揺れが含まれています。これはその地点周辺の地下構造によって伝播してきた地震動が影響を受けるからです。つまり、それぞれの地点の地盤にも揺れやすい固有周期があり、地盤の固有周期と建物の固有周期が同じである場合には入力地震動と建物とが共振して、より大きな応答を発生させる原因になります。最初の頁に示した超高層ビルは、まさにそのような現象の結果とみられます。ある地点で建物を建設する場合には、建設地の地盤特性を調査し、このような共振現象を避ける工夫が必要です。



■ 図3 繰り返し回数と最大応答の大きさの関係

*減衰定数：振動に抵抗する能力の度合いを表す指標で、大きい方が能力が高い。超高層ビルは一般中低層建築物よりも小さい。

巨大地震への対応

さて、わが国の超高層ビル（建築基準法上の高さ 60m を超える建築物）の数は現在すでに 2500 棟を超えています。超高層ビルと同様に長い固有周期を有する免震建物もそれを上回るペースで増え続けています。これら超高層ビル、免震建物の耐震設計には過去の観測記録が使われてきました。ところが近年強震観測データが蓄積されてきたこと、強震動予測技術の急速な発展により、特に長周期地震動に対する備えが十分ではないことがわかってきました。

このような事態に対処するため、国土交通省は 2008 年に建築基準整備促進事業の一課題として長周期地震動の評価とその影響に関する検討が開始され、当該成果に基づき 2010 年末に「超高層建築物等への長周期地震動への対策試案」(2010.12) を公表、パブリックコメント（意見募集）を実施しました。その直後の 2011 年3月に東北地方太平洋沖地震が発生したため、対策試案で示された長周期地震動予測手法を同事業において新たな観測記録によって検証し、さらに地震から得た種々の知見を参考にして、改良案が再提案されました。

南海トラフ連動地震への適用

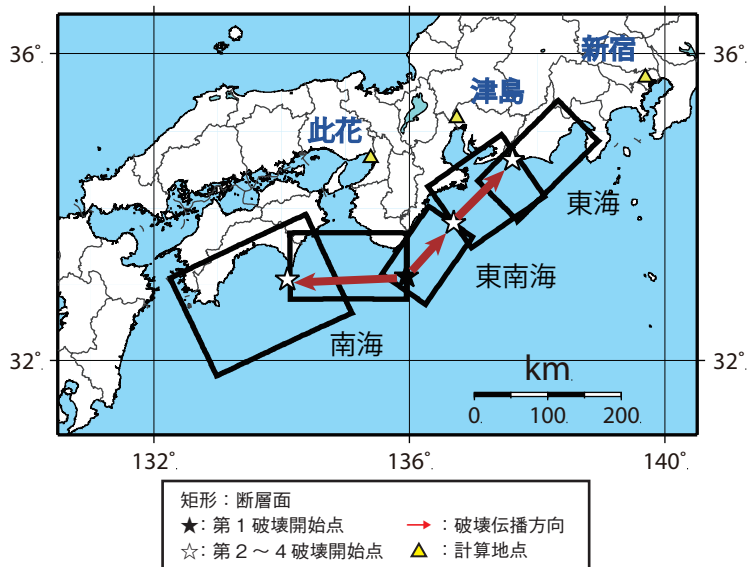
図4は2003年の内閣府提案に基づく南海トラフ3連動地震（南海・東南海・東海）の震源モデルです。この図には四国から伊豆半島に至る領域に5つの四角形が並んでいます。左2つが南海地震の震源、その右の2つが東南海地震の震源、そして最も右が東海地震の震源に対応しています。3連動地震はこの5つの震源の破壊が順次連動して進むことになります。起こる可能性が高いとされる破壊ケースを星印と赤い矢印で示しています。最初の破壊が潮岬沖の黒い星印で始まり、破壊が両方向に進みさらに南海、東南海のもう一方の震源破壊が起こります。さらに、最右側の東海地震の震源破壊が起こり、地震が完了します。それぞれの震源破壊に対応する地震動を波の伝播による時間ずれを考慮して重ね合わせると、各地点の地震動になります。

3大都市圏の3地点すなわち、大阪湾岸の此花、愛知県西部の津島、東京西新宿における地震動を計算しました。それらの地震動が種々の超高層ビルにどのように影響するかを示したものが図5です。図5は、横軸が建築物の固有周期、縦軸が地震動による最大応答値を示していて、応答スペクトルと呼ばれています。青い線が2種類ありますが、実線は平均的な予測地震動によるもの、破線は観測データのばらつき（標準偏差）を含めた予測地震動によるものです。また図中の黒実線は、2000年以降に建設された超高層ビルの設計に共通に使われている地震動に対する最大応答値です。いずれも減衰定数 $h=0.05$ に対するものです。前に超高層ビルの減衰定数は一般建築物より小さく $h=0.02$ 程度と述べましたが、地震動の

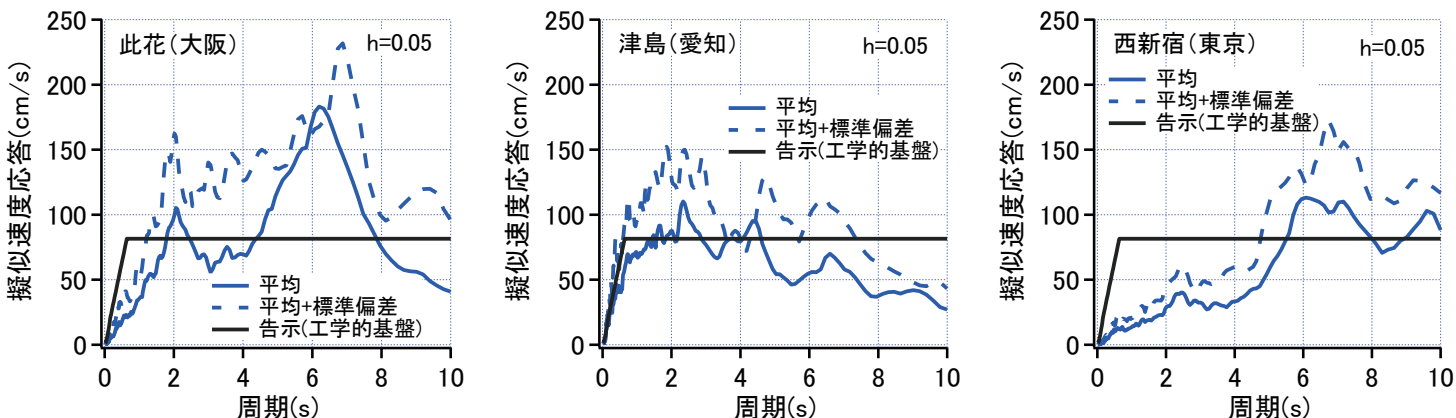
大小を特定の固有周期の最大応答値と比較する場合には、減衰定数 $h=0.05$ が使われることが一般的です。

此花の図では、2秒とか6秒でこの黒実線を大きく上回っています。つまり、此花地点で建てられた固有周期2～6秒の建築物（超高層ビル）では3連動地震に対して設計で考えていた応答値を上回る可能性が高いことを示しています。設計値を上回ると倒壊ということではありませんが、何らかの対策が必要になる場合が考えられます。津島地点では此花に比べてそれほど大きくありませんが、固有周期（建物）によっては設計値を上回っています。新宿では、固有周期6～7秒の建築物（超高層ビル）の応答が大きくなるのがわかります。また新宿では、固有周期3、4秒以下の建築物への影響はほとんどないことがわかります。

大都市圏の3地点以外の多くの地点でこのような計算を行いました。此花や新宿と同様に各地点には特定の周期を卓越させる固有の性質があります。また震源破壊の進み方と地点との関係によって揺れの強さや継続時間も違ってきます。南海トラフの巨大地震の起こり方については、過去の地震の発生間隔や、南海、東南海、東海各地震が単独で起こる場合、連動して起こる場合など過去の経験から様々な可能性が考えられています。ここで取り上げた3連動地震だけでなく、内閣府が2012年に公表した南海トラフ最大級の4連動震源モデルに対しても同様に改良案により地震動を計算しました。さらに、これらの地震動による実際の超高層ビルの地震応答解析を行い、各地震動による超高層ビル等の応答レベルを検討しました。それらの成果は、国土交通省HP、建築研究所の出版物（建築研究資料）、学術論文などとして公表しています。今後、これらの成果を国が実施する建築物の長周期地震動対策へ活用できるように具体的な提案を行っていきます。



■ 図4 南海トラフ3連動（南海・東南海・東海）の地震動シミュレーション



■ 図5 南海トラフ3連動（南海+東南海+東海）地震の地震動による各地点の最大応答値

木造3階建て学校の実大火災実験

人や環境に「優しい」といわれる木造建築物への関心が高くなっています。建築研究所は、国土技術政策総合研究所や早稲田大学などと共同で、現在の建築基準では防火上建設することが制限されている木造3階建て学校を実現するための研究を進めています。

2012年2月に茨城県つくば市で実施した実大火災実験（予備実験）に引き続き、2012年11月に岐阜県下呂市において2回目の実大火災実験（準備実験）を実施しました。予備実験の結果は、えびすトラ59号で紹介しており、建築研究所のウェブサイトでご覧になれます。

準備実験では、予備実験で明らかになった火災安全上の課題をふまえて、壁や天井の内装を不燃性の材料で仕上げ、庇やバルコニーを取り付けたひと回りコンパクトにした建物で実験を行いました（写真1）。

その結果、室内での燃え広がりを遅らせる効果や、上階への延焼を遅らせる効果（写真2）が確認でき、火災安全上の課題を解決できる見通しがつきました。

今後は、火災安全性に配慮しつつ、できるだけ目に見えるかたちで建物に木材を使う方法を具体的に検討し、その効果を2013年の秋に実施予定の実大火災実験（本実験）で検証する予定です。その結果をふまえる必要火災安全性を備えた大規模木造建築物の実現を目指しています。



写真1 準備実験の木造校舎の内部
（壁・天井は不燃材料仕上げ）



写真2 バルコニーによって火炎が
上階に届きにくくなっている状況

Q&Aコーナー

Q：建築環境実験棟とは、どのような実験施設ですか？

A：省資源・省エネルギーを考慮しつつ居住環境水準の改善を図るため、人間の心理や生理に関わる側面、躯体や設備の物理的な側面を並行して研究するための施設で、複合環境シミュレータ、換気システム性能実験室、人体環境実験室、人工空実験室、視環境実験室、熱・湿気常数実験室などが設置されています。

実験施設の貸出も行っていますので、ご利用については下記URLをご覧ください。

<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/rental/index.htm>

人工空実験室（写真）

人工的に天空を再現し、そこに組み込まれた建築模型に当たる、日射の侵入角の影響を検討するための施設



● Q&A コーナーは、読者の方から頂いたご質問にお答えするコーナーです。ご質問は、epistula@kenken.go.jp までお知らせ下さい。

編集後記

超高層建物が数多く建設されている東京、名古屋、大阪は、長周期地震動が増幅され易く、特に東南海地震、南海地震で影響が顕著であると言われています。先の東南海地震は1944年、南海地震は1946年に発生しました。日本で初めて高さ100mを超えた霞が関ビル(147m)は1968年4月に竣工しましたので、当時、長周期地震動の影響を受ける建築物は存在していませんでした。我が国は、1995年兵庫県南部地震の頃より地震活動期に入ったと言われています。また、東海・東南海・南海地震を始めとする巨大地震の発生が切迫していると言われています。超高層建物の地震応答で「想定外」を起こさないために、不断の取り組みが求められます。
(S. K.)

出版のご案内

建築研究資料139号

低炭素建築物認定基準(平成24年12月公布)等関係技術資料
— 一次エネルギー消費量算定プログラム解説(住宅編) —

建築研究資料140号

低炭素建築物認定基準(平成24年12月公布)等関係技術資料
— 一次エネルギー消費量算定プログラム解説(建築物編) —

建築研究資料141号

平成24年(2012年)5月6日に茨城県つくば市で発生した建築物等の竜巻被害調査報告

建築研究資料142号

寄棟屋根、ベランダ手すり及び屋上広告板等の風力係数の提案

建築研究資料143号

鉄骨造建築物の接合部ディテール例示資料集
— 複雑な接合部ディテールの設計・製作の要点 —

建築研究報告147号

鉄筋コンクリート造建築物のかぶり厚さ確保に関する研究

BRI Research Paper No.151

Earthquake Engineering Research Framework toward Research Roadmap Based on the Lessons Learnt from the 2011 Tohoku Earthquake



花蓮
Photo M.Kato

Epistula

えびすトラ



第62号 平成25年7月発行
編集：えびすトラ編集委員会
発行：独立行政法人 建築研究所

〒305-0802 茨城県つくば市立原1
Tel.029-864-2151 Fax.029-879-0627

●えびすトラに関するご意見、ご感想は
epistula@kenken.go.jpまでお願いいたします。
また、バックナンバーは、ホームページでご覧になれます。
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/epistula.html>)