

特集 長周期地震動 Long-period Ground Motion

Summary

A long-period earthquake ground motion contains long-period components which vibrate structures with long period, such as tall buildings and seismically isolated buildings. These structures resonate with the earthquake and vibrate in large deformation as well as in long duration. Long-period vibration has characteristics of low damping which results in a long duration and long distance transfer. Though, long-period earthquakes have been studied for about half century, Tokachi-oki Earthquake in 2003 was an event that ordinary people recognized this phenomenon. This earthquake shook and fired a large oil tank which is built 250 km far from its epicenter. This fact shocked people in Japan. After the earthquake, study and development about long-period ground motion were accelerated. The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake featured this phenomenon again. This earthquake shakes tall buildings even in Osaka as well as those in Tokyo. Takenaka R&D Report in this year had a special report on the Tohoku earthquake. After four years passed, Takenaka R&D Report planned to feature a long period-ground motion to present new knowledge and technologies which had been studied and developed after the Tohoku Earthquake. To prepare a forthcoming large earthquake that would cause a long-period ground motion, it is desirable that the following subjects will be solved. (i) Precise prediction of a forthcoming earthquake ground motion, (ii) safety design of buildings considering the predicted earthquake ground motion, and (iii) processing and providing of information about the earthquake and building during the earthquake. In this report, current answers to these subjects were presented each by the person in charge. In the section 2, topic (i) was presented. Past studies have revealed that a long-period ground motion mainly consists of surface wave and that a deep ground structure model was necessary to predict it. Recently, a deep ground structure has been modeled officially. Hence, numerical time history simulations of long-period ground motion are becoming popular in designing building structure. However, the accuracy of the simulation is strongly affected by a ground structure model and become an essential subject to be improved. Takenaka has developed a construction method of 3D sedimentary basin model by applying an inference method of deep underground structure, which is based on seismic ground motion records, into multiple sites. A result of simulation analysis by a model constructed by the method for an earthquake with medium magnitude shows that prediction accuracy in long-period become higher than those by existing models. In the section 3, topic (ii) was presented. When a long-period earthquake ground motion occurs, high-rise buildings and seismically isolated buildings give large response. Not only structural safety but also non-structural components, indoor furniture and human perceptions are heavily affected. In isolation buildings, excessive deformation at isolation level and collision with the moat wall may cause severe damage to superstructure and indoor facilities. Hence, anti-seismic technologies for high-rise and isolation buildings are highly needed. Most effective countermeasure is to add supplemental energy dissipation devices. Takenaka has developed Shape Memory Alloy Damper, High-damping Oil Damper and Dual TMD-NT. As for isolation buildings, mainly two types of R&D have been conducted. One is to evaluate precise mechanical properties and durability of isolators and dampers against long-period and long-duration earthquakes. Utilizing E-Defense shake table, dynamic loading tests of isolation devices have been conducted. The other is to apply additional devices to avoid fatal damage at isolation level and superstructure. Takenaka has been applying or developing technologies such as a shock absorber on the moat, Multi (Double) Isolation concept, and Fail-safe system incorporated rubber bearing. In the section 4, topic (iii) was presented. Long-period structures such as high-rise buildings and seismic isolation building should be properly understood their risk against a long-period ground motion. In order to maintain function during and after an earthquake, a BCP (Business Continuity Plan) which properly assess the impact of the long-period ground motion and its practice are required. As a supporting technology to develop a BCP, a loss evaluation system against earthquakes for the super high-rise building which took a long-period ground motion into consideration was introduced. This system can be used as a direct loss evaluation in BCP development. As countermeasure during and after an earthquake, two technologies were introduced. One is an earthquake early warning system that takes into account the long-period ground motion. Another is a health monitoring system of building based on the information of seismometers in the building.

Keywords: long-period ground motion, precise prediction of earthquake ground motion safety design of building, processing of information of earthquake and building during earthquake

1 はじめに Introduction

山本 雅史 Masashi Yamamoto*1

長周期地震動とは何か。震源で発生した地震は地盤を伝搬して、ある場所において地震動として観測される。この地震動は震源、伝搬経路、観測場所のサイト特性により様々な周期成分を含む。地震動に長周期成分を含む場合、もしくは長周期成分の割合が多い場合に、長周期地震動だといえる。しかし、長周期とは何秒くらいの周期なのか、割合が多いとはどの程度なのか、について厳格に定義されているわけではない。また、工学においては地震動自身ではなく、その地震動によって影響を受けるものの範囲の中で周期の長短が意味づけられる、ということも認識しておく必要がある。長周期地震動の具体的な定義づけは各節に譲る。

長周期地震動は構造物にどのような影響を与えるのか。長周期構造物は共振することで大きな揺れ（変位）を生じる。長周期の揺れは減衰しにくいいため、長周期地震動自体が減衰しにくく揺れが長く続く。結果、長周期構造物の揺れは更に長時間に及ぶ。このように、長周期だけではなく長時間であることが特徴（問題）であるということから、長周期・長時間地震動という言い方がなされる場合もあるが、本特集ではこれらを含めて長周期地震動という言葉を使う。建築物について考えれば、このような大きく長時間続く揺れは、建築物の構造躯体、建築物に設置される物（設備機器、天井、カーテンウォール、制振装置、など）、建築物にいる人、などに影響を与える。構造躯体については大変形により部材の許容変形量を超え損傷を受ける可能性があるだけでなく、長時間の繰り返しによる疲労損傷の可能性もある。建築物に設置される物については、層間に設置されるもの（カーテンウォール、制振ダンパーなど）は主に強制変形を繰り返し受け影響、床などに固定されるもの（設備機器など）は設置部の加速度の影響を受ける。その結果、カーテンウォールの脱落や制振ダンパーの性能劣化、設備機器の故障につながる可能性もある。特に、建築物に固定されるものが水槽、エレベータロープ、シャンデリアなど、長周期の振動系を持つ場合、これらの応答は更に増幅、長時間揺れるため注意が必要である。建築物にいる人については、不快、恐怖を感じるなど感覚的な問題だけでなく、揺れにより歩行、移動ができなくなるなど避難行動に支障が出る可能性や、更には転倒、衝突による被災の可能性もある。

長周期の地震動の問題は古くから指摘されていたが、クローズアップされたのが2003年の十勝沖地震である。前述のとおり、長周期の振動は減衰しにくい。これは、揺れが遠くまで伝わることを意味する。この地震では震源から250km離れた苫小牧で大型の石油タンクの火災が発生し、注目を集めた。その後、長周期地震への対策の重要性が社会的にも認識され、様々な検討や対策技術が提案されてきた。そのような中、2011年に東北地方太平洋沖地震が発生し、遠く離れた東京、更には大阪でも大きな建物の揺れが長時間観測され、改めて長周期の地震動が認識された。長周期地震動に関する法整備も進みつつあり、来るべき大地震に対する備えに注目が集まっている。

竹中技術研究報告では東北地方太平洋沖地震を受けて、2011年の特集として当該地震についての報告を行っている。それから4年が経過した今、長周期地震動を特集し、新たに得られた知見や、研究開発成果を加えて、報告を行うこととした。地震に対する備えを行うためには、下記の課題を解決する必要がある。

- ①長周期地震動の高精度予測
- ②建物の安全・安心
- ③地震発生時の建物機能維持

本報告では①～③の順に、それぞれの課題に対する研究開発の担当者が現状と展望について述べる。

2 長周期地震動の高精度予測 Accurate Prediction of Long-period Earthquake Ground Motion

佐藤 吉之 Yoshiyuki Sato*1

2.1 長周期地震動とは何か Definition of Long-period Earthquake Ground Motion

地震学における長周期成分には表面波に見られる周期数十秒の成分あるいは地球の自由振動である周期数時間の成分までもが含まれる。したがって長周期構造物の固有周期に対応する数秒程度以上の領域は地震学的には十分な長周期とはいえず、地震工学の分野では当該周期帯を「やや長周期」と呼ぶようになった。この呼称が用いられるようになったのは1970年頃のものである [長橋 (1990)¹⁾]。この時期は国内初の超高層建築である霞ヶ関ビルの竣工直後で、また1968年十勝沖地震で八戸港湾のSMAC強震計により周期約2.5秒の長周期成分を含む観測波が得られた直後であり、この頃から構造物に対するやや長周期地震動の影響に関する検討が本格的に始まったといえる。本稿で取り上げている「長周期地震動」は基本的にはこの「やや長周期地震動」と同義であり、工学的には「やや長周期地震動」として、その特性と予測手法を論じるのが適切であると考えられる。しかし最近では「長周期地震動」という用語についての社会的な共通認識が出来つつあり、その内容について誤解の可能性は少ないと考えられるため、以下では従来の「やや長周期地震動」を単に「長周期地震動」と称して用いることにする。

まず長周期地震動の周期範囲がどのようになるかについて再確認する。周期境界についての明確な定義は無いものの、概ね周期1~2秒程度から10数秒~20秒の周期帯を指していると考えて良い^{例えば2)}。長周期地震動は前述のように工学分野における必要性から検討が行われてきている。そのため検討周期は構造物の固有周期を反映しており、長周期構造物である高層ビルや長大橋梁、大型の石油タンクの固有周期が数秒~20秒程度であることから、上述のような周期帯を対象とすることになったと考えられる。

長周期地震動に関する研究が本格的に始まったのは、前述の通り1968年十勝沖地震による八戸港湾の記録の検討が契機となっている。その後現在に至るまで観測記録、数値シミュレーションなどによる研究およびその基礎データとなる地盤構造などの研究が精力的に進められてきたおり、その成果についていくつかのレビューが行われている [例えば、座間 (1993)³⁾、座間 (2009)⁴⁾]。それに対して長周期地震動に関する問題が広く社会に認知されるようになったのは2003年十勝沖地震が契機になっている。当地震では震源から約250km離れた北海道苫小牧市における石油貯蔵タンクにおいて火災2基、浮屋根沈没6基などの大きな被害が発生した。特に石油火災については約44時間もの間燃え続けて社会的な関心が集まった。苫小牧市の震度は3であり一般の建物に顕著な被害は見られず、石油タンクの被害の原因は長周期地震動により励起された石油タンク内溶液のスロッシングによるものであった (畑山・他, 2004⁵⁾)。その際に、長周期地震動については通常の地震波に比べて減衰が小さく、遠方まで伝播する地震動であるとの解説が新聞等を通じて報道され、当該用語が社会的にも広く知られるようになった。石油タンクの被害については、当地震以前の1983年日本海中部地震の際にも秋田県内で発生しており、大規模構造物に対する長周期地震動の影響の大きさが実災害を通して広く再認識されることになった。また2011年東北地方太平洋沖地震の際には震源域からやや離れた新潟県、千葉県でも石油タンクの被害が発生している。

高層建築物においてはまだ長周期地震動による重大な被害を受けた事例はないものの、使用性に関連すると思われる被害、居住性に影響を与える揺れは既往地震で確認されている。例えば1983年日本海中部地震、1984年長野県西部地震の際には、東京・新宿区における超高層ビルにおいてエレベーターの管制ケーブルが大きく揺れ、カウンターウェイトに接触して切断される被害が発生した。2011年東北地方太平洋沖地震においても、関東地方を中心として超高層ビルにおける天井の落下、内装材、エレベーターなどの被害が発生した。当該地震については、Mw9.0という地震の規模を考えると長周期地震動のレベルは比較的小さかったともいえるが、震源から700km以上離れた大阪平野内の超高層建物では大きな応答を示して、内装材などの被害が生じており、長周期地震動の広範囲への影響という側面を改めて認識させることとなった。

学協会の動きとしては、2003年十勝沖地震後の2004年に日本建築学会と土木学会との共同で、「巨大地震対応共同研究連絡会」が設立された。その下に設置された「地震動部会」において、長周期地震動記録の収集・検討、数値計算法などの検討を行った上で、長周期地震動を含む広帯域地震動の推計事例の収集を行い、建築・土木構造

*1 技術研究所 地震工学部 地震動グループ長 Group Leader, Research & Development Institute

物の耐震安全性の検討が実施され、提言が出されている〔土木学会・日本建築学会（2006）⁶⁾〕。国土交通省でも設計用長周期地震動に関する検討を進め、全国の多数の実地震記録を用いて周期0.1～10秒の広帯域地震動の回帰式を求め、これに基づいて想定地震による時刻歴波形を作成する方法をまとめている。この手法は「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」として、2010年12月に公開され、翌年2月までの間にパブリックコメントの収集が行われた。

以上のように長周期地震動については数十年前に問題が提起され、実記録や被害事例に基づいた知見と研究の蓄積を経て、建築基準法においてもその成果を取り込む直前の段階に至っている。民間における地震動研究者や構造設計者もこれらの動きを反映しつつ、その時点における最新の知見を用いた長周期地震動の評価を実施し、建物の設計に活用している。本章における以下の節では、長周期地震動の基本的性質と既往の観測事例について述べるとともに、当社における長周期地震動の高精度予測を目指した取り組みについて述べる。

2.2 長周期地震動の発生、伝播の性質および観測事例について

Source / Propagation effects on Long-period Earthquake Ground Motion and Observed Records

長周期地震動が最近注目されてきた背景の一端には、観測点の増加、長周期地震動の影響を受けやすい長周期構造物の増加も挙げられる。前述のように国内において長周期地震動が工学的に着目されたのは1968年十勝沖地震の際であり、当時の運輸省港湾技術研究所による青森県八戸港湾での記録は、周期成分を含む記録として、セルセントロ波、タフト波とともにいわゆる標準3波として超高層建築物設計用の入力地震動として長い間適用されてきた。その後、1995年兵庫県南部地震の発生を契機として、強震観測網の充実が図られ、特に防災科学技術研究所のK-NET, KiK-netの整備により、世界的に見ても非常に高密度の強震観測網が実現され、その後いくつかの地震において長周期地震動の記録が得られている。Fig. 1はその例として2007年中越沖地震でのK-NET記録の波形を示す。震源地に近い新潟県内の観測点から関東平野内に至る観測点を並べている。近距離においては継続時間が短い、伝播とともに継続時間が伸長し、さらに関東平野内になると後続部分に周期が長い地震動が見られ、その位相は観測点によって変化していることがわかる。この記録例から類推されるように、継続時間を伸長させているのは主に地球の表面にエネルギーが拘束されて伝わる表面波と考えられる。したがって長周期地震動の評価・予測においてはまず表面波成分の発生・伝播に着目する必要がある。

観測される地震動の特性は震源、伝播経路、観測点特性で決定され、表面波についてもこれらの各特性が影響している。まず震源特性に着目すると、構造物に影響を及ぼすようなレベルの長周期成分を発生するような震源の条件は限られているといえる。一般に規模の小さい地震においても長周期から短周期に至る地震動成分が発生しているが、震源においてはいわゆるスケール則により、地震の規模が大きいほど、長周期成分の励起が強くなる。また表面波の励起の観点からは、浅い地震ほどより大きな長周期地震動を発生させるといえる。数値シミュレーションなどの理論的手法により想定地震の時刻歴波形の予測を行う場合には、断層モデルの設定が必要となり、標準的には断層面内のすべりの不均質性を特性的化したアスペリティモデルが用いられることが多い。その設定手法としてはいわゆる「強震動予測のためのレシピ」(地震研究推進本部, 2008⁷⁾)が多用されている。本手法では震源断層をアスペリティとそれ以外の領域(背景領域)に分けて断層モデルが設定される。地震動の卓越周期を決める要素の一つはアスペリティの大きさであり、例えばマグニチュード8の地震についてアスペリティ形状を円と仮定すると、その半径は約20kmとなる。断層の破壊伝播速度を3km/sと仮定するとアスペリティの破壊時間は約7秒程度となり、これが地震波の特徴的な周期となる。一方でアスペリティよりも小さなスケールでの不均質すべりが完全に考慮されていないことを考慮すると7秒以下の周期成分の発生が十分でなく、長周期地震動の対象周期を十分にカバーできていない可能性も考えられるが、野津(2006)⁸⁾やKamae and Kawabe(2004)⁹⁾はこのようなアスペリティモデルでも周期0.1秒から10秒程度の成分の長周期地震動の評価が可能であることを観測記録のシミュレーション

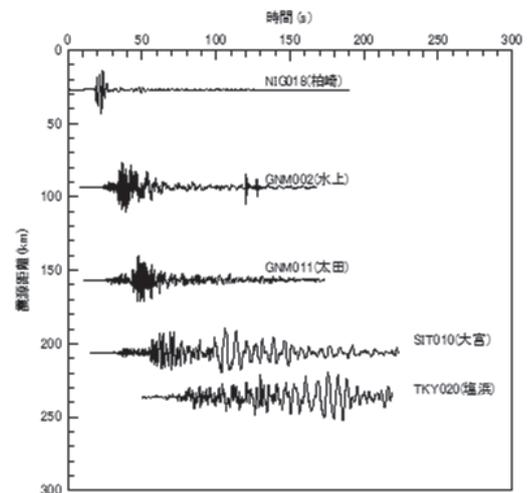


Fig. 1 2007年新潟県中越地震における地震動の伝播
 Propagation of earthquake ground motion of the 2007 Niigata-ken Chuetsu earthquake

に基づいて示している。以上のように大規模地震における広帯域地震動予測のための震源モデルの構築は今後の課題と考えられ、精度の高い震源インバージョン等による広帯域の震源断層モデルの蓄積が必要と考えられる。

伝播経路の特性については、地盤モデルと不可分な部分もあるが、最近の研究成果により海底の軟弱な堆積物が海溝におけるプレートの沈み込みの際に取り残された、いわゆる付加体と呼ばれる部分が長周期地震動の増幅に影響していることがシミュレーション解析などにより確かめられている [例えばFurumura and Saito (2009)¹⁰]。この付加体には地域分布があり、南海トラフ沿いに多く存在するが、日本海溝沿いでは相対的に少なくなると推定されている。東北地方太平洋沖地震において、地震の規模に比して関東平野内で観測された長周期地震動のレベルが大きくならなかった原因の1つとして、伝播経路における付加体の増幅効果が比較的小さかったことが挙げられている。このことを考慮すると、将来想定されている南海トラフ沿いの巨大地震においては、付加体の効果が相対的に大きくなる可能性があり、長周期地震動の予測においては、後述の堆積盆地のモデルとともに、付加体の適切なモデル化も課題になると考えられる。

次に地盤特性に着目する。震源で発生した地震波は観測点周辺の地盤により増幅される。これは短周期成分においても同じであるが、長周期地震動はその周期が長いために、影響を受ける地盤の深度範囲が短周期地震動に比較してより深くなる。また堆積地盤の形状も長周期地震動に影響を及ぼすことから、地盤モデルの精度が長周期地震動の評価に大きく影響する。地盤特性の長周期地震動への影響については次節において詳細に述べる。

2.3 長周期地震動予測への取組み

Studies on Prediction of Long-period Earthquake Ground Motions

前述の通り、長周期地震動は震源、伝播経路、地盤特性の影響で決定される。当社ではこのうち地盤特性に着目し、予測に用いる地盤モデルの高精度化により長周期地震動予測の高精度化を目指している。1968年十勝沖地震の八戸港湾の記録においては前述の通り周期2.5秒程度の成分が卓越しており、観測地点の地盤構造の調査により当該成分は深さ約400mの堆積層の増幅特性に起因していることがわかった。これを契機として、長周期地震動の予測における深部地盤モデルの重要性が確認され、その後、地震工学の分野でも反射法探査、屈折法探査などによる深部地盤の調査、モデル化が精力的に推進された。

既往のこのような調査によっても全国的に見ると地盤調査の密度は十分とは言えず、関東平野のような比較的調査に関する情報が多い地域であっても、領域内で地盤のモデル化に必要なデータを十分な空間密度で得ることは困難である。

この問題を1つの背景としてKobayashi et. al (2000)¹¹は地震観測記録の逆解析により、堆積地盤の速度、減衰構造を推定する手法を提案している。吉田・他 (2007)¹²は関東平野内のK-NET, KiK-net観測点約110地点に同手法を適用して各観測点下における地震基盤までの地盤構造の推定を行い、さらに重力異常のデータを加えた空間補間法により、関東平野の3次元地盤モデルを構築している。地盤モデルにおける地震基盤面の形状をFig. 2に示す。地震基盤面は東京都心部付近で3000mから4000m、東京湾においては5000mの深さを示しており、基本的には盆地構造を示しているが、細部においても基盤深さの変動が見られ、複雑な形状を有していることがわかる。吉田・他 (2010)¹³

はこの3次元堆積地盤モデルに基づいて、差分法による中規模地震の数値シミュレーションを実施し、その結果を既往の他の地盤モデルに基づいたシミュレーション結果と比較している。解析対象地震は2004年紀伊半島南東沖地

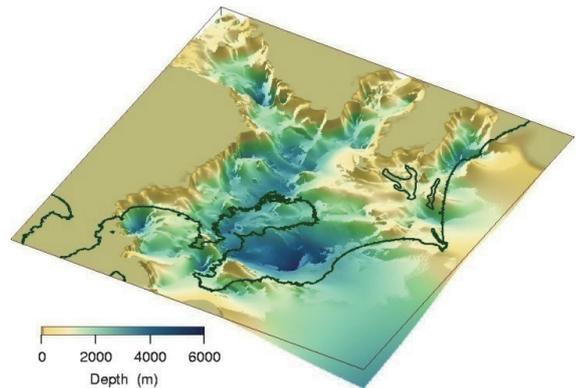


Fig. 2 関東平野における地震基盤面の形状
 Configuration of the bedrock under the Kanto basin

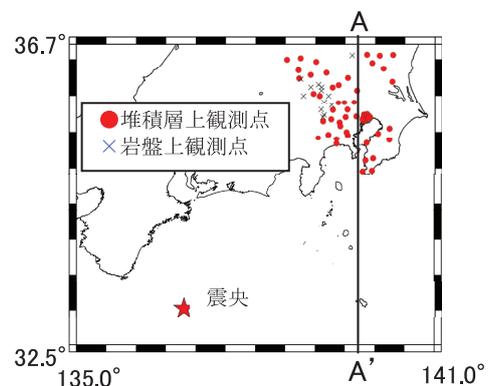


Fig. 3 シミュレーション対象の地震と観測点 (吉田・他¹³)
 Epicenter of the earthquake and the observation points used in the FDM simulation

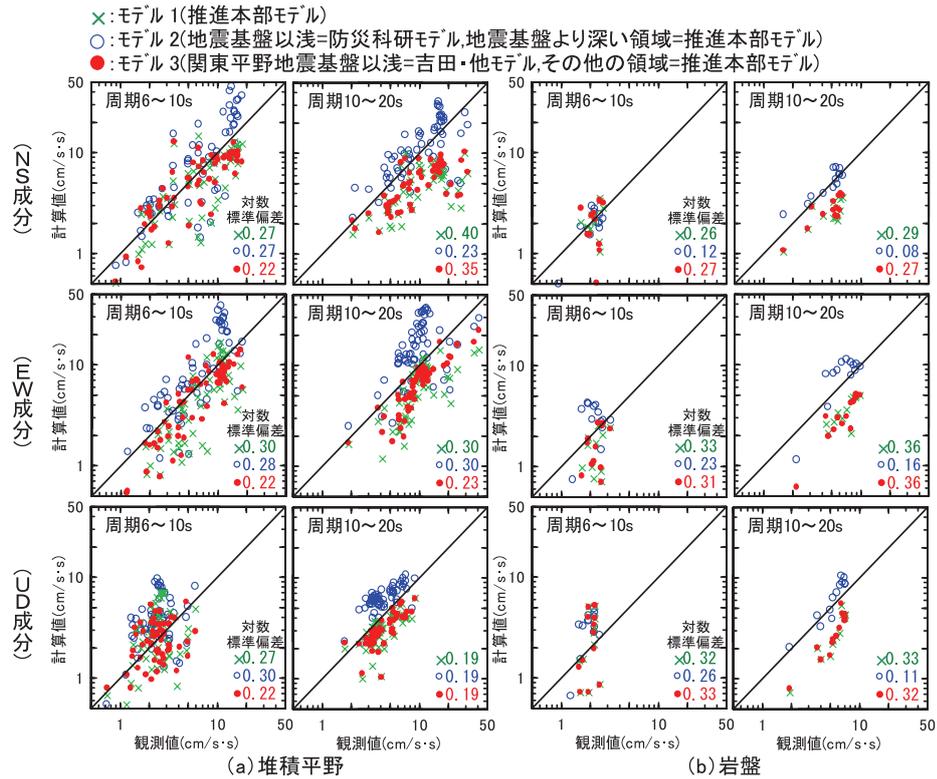


Fig. 4 シミュレーションによる周期2-4秒の応答スペクトル指標と観測値の比較 (吉田・他¹³⁾
 Comparison of the simulation result with the observation value by using the index of period range of 2 to 4 second

震の前震 (Mj6.9) としている。解析地震の震央とシミュレーションによる評価地点の分布をFig. 3に示す。

地盤モデルとしては政府の地震本部によるモデル (モデル1) を基本として、その地震基盤より浅部の堆積層を防災科学技術研究所のモデルで置き換えたモデル (モデル2)、堆積層だけを吉田・他 (2007)¹²⁾ で置き換えたモデル (モデル3) を用いている。結果におけるモデル間の差異をより定量的かつ簡便に比較するため、吉田・他 (2010)¹³⁾ は擬似速度応答スペクトル ($h=0.05$) の面積値を指標とした比較を行った。Fig. 4に観測波形および計算波形から求められた周期6~10秒領域の面積値の比較および周期10~20秒領域の面積値の比較を堆積平野内60地点・岩盤観測点13地点に分けて成分毎に示す。図中の数字は各モデルの予測誤差の対数標準偏差を示す。

まずモデル2の結果をみると、岩盤観測点のNS成分の周期6~10秒、周期10~20秒およびUD成分の周期10~20秒において計算値は観測値とよく対応しているが、堆積平野では全体的に振幅が大きくなっている。次に地震基盤以深の構造が共通で堆積層のモデルだけが異なるモデル1およびモデル3における岩盤の周期10~20秒をみると計算値は全体的に過小評価されており、このような岩盤での系統的なずれが堆積平野での計算結果にも見られる。一方、周期6~10秒の面積値については周期10~20秒に比べて系統的なずれが少なく、平野内での面積値の対応は各堆積平野モデルの精度を表していると思える。そこでそのような影響の少ない平野内の周期6~10秒におけるモデル1~3について対数標準偏差に着目すると、NS成分については0.27, 0.27, 0.22, EW成分については0.30, 0.28, 0.22, UD成分については0.27, 0.30, 0.22となっている。各成分ともモデル3とした吉田・他の関東平野モデルが最小値となっている。堆積平野に着目すると、震源の補正後は補正前と比較して全体的に標準偏差は小さくなっている。補正後のモデル間の標準偏差を比較するとモデル1とモデル3は岩盤ではほぼ同じ標準偏差であるが堆積層においてはモデル3の標準偏差の方が小さくなっている。モデル1~3の堆積平野内での標準偏差を比較すると、周期6~10秒におけるNS成分では0.23, 0.28, 0.20, EW成分では0.25, 0.26, 0.22, UD成分では0.27, 0.22, 0.22を示している。周期10~20秒におけるNS成分では0.22, 0.22, 0.20, EW成分では0.14, 0.19, 0.12, UD成分では0.19, 0.23, 0.19を示している。両周期帯とも全成分でモデル3のばらつきが最小となっている。

以上の関東平野地盤モデルに基づいた地震動の評価例として、1923年関東地震のシミュレーション結果をFig. 5に示す。図では各時刻における水平動における最大速度値の大きさを濃淡で示している。例えば、濃い青色は正の最大値が大きい地点を表しており、その分布は10秒後の図においては震源中心としておおむね円状を呈しているが、伝播とともにその分布は複雑になり、三次元地盤モデルの効果が現れている。

このように地震記録の逆解析に基づいた地盤モデルは長周期地震動予測の高精度化に繋がると考えられ、超高層・免震建物の構造設計への適用を進めている。課題としては観測点密度の増加による地盤モデルの改訂が挙げられ、そのための検討に現在取り組んでいる。吉田・他(2011)¹⁴⁾は首都圏地震観測網MeSO-net [酒井・平田(2009)¹⁵⁾]の利用可能性に着目した。建築物の集積度の面から重要性が高い関東平野中心部において、MeSO-net観測点記録が活用できれば、より高密度の地盤推定が可能になることが期待される。ただしMeSO-net観測点はGL-20mでの1点観測であることから、吉田・他(2011)¹⁴⁾はKobayashi et al.(2000)¹¹⁾の方法による地盤推定手法のMeSO-net観測点への適用性について確認を行っている。

吉田・他(2014)¹⁶⁾は予備的検討として千葉県北東部から東京中心部に設置されているMeSO-net観測点57地点の地盤推定を梅田・小林(2010)¹⁷⁾の手法に基づいて行った。これらの観測点と既往の吉田・他(2010)¹³⁾で地盤推定が実施されているK-NET, KiK-net観測点121地点を加えた計178地点を用いて、小林・他(2006)¹⁸⁾の方法に基づいて堆積平野モデルの再構築を行った。

改訂した関東平野の堆積盆地モデルに地震本部(2009)¹⁹⁾の地殻・マントル構造を接続し、シミュレーション用モデルとした(Fig. 6の“本改訂モデル”)。また比較用として改訂前の堆積盆地モデル [吉田・他(2007)]¹²⁾に同様に地震本部(2009)¹⁹⁾の地殻・マントル構造を接続したモデル(Fig. 6の“吉田・他(2007)”)ならびに堆積盆地、地殻・マントル構造ともに地震本部(2012)²⁰⁾としたモデル(同“地震本部(2012)”)を設定した。解析領域は概ねFig. 2に示した範囲とし、深さ方向は90kmとした。シミュレーションは、2005年4月11日千葉県北東部の地震(Mj6.1, 深さ52km)について行った。シミュレーションは差分法で行い、差分モデルのグリッド間隔は深さ10kmまでは200m, それ以深は600mとした。Q値については地震本部(2012)²⁰⁾を参考に参照周期は $T_0=2s$ とし、参照周期のQ値は $V_s/5$ (V_s の単位: m/s)を目安にして設定した。震源パラメータはF-netを参照して、震源時間関数はライズタイム2秒のsmoothed ramp関数を仮定した。計算刻み時間は0.01秒とし、12000ステップの解析を行った。

観測波と計算波の比較は関東地域で観測記録が得られたK-NET及びKiK-net観測点で実施した。Fig. 6に波形の比較例として、地下構造推定地点を追加した千葉県北部及び東京中心部に位置するCHBH04地点(左)及びTKY020地点(右)の観測波形と計算波形を示す。CHBH04地点のNS成分を見ると吉田・他(2014)¹⁶⁾の改訂モデルでの計算波は後続波も含めて観測波の位相の特徴をよく捉えており、EW成分も主要動から後続波にかけて他のモデルより観測波の位相の特徴をよく表現できている。一方でTKY020地点のEW成分で本改訂モデルは他のモデルより観測波の再現性はよいが、NS成分の観測波に見られる80秒以降の後続波は表現できていない。この後続波は関東平野内を往来する表面波と考えられ、より広範囲のMeSO-net観測点の記録も用いて地盤モデルを改訂することで、計算波による再現性が向上することが期待される。

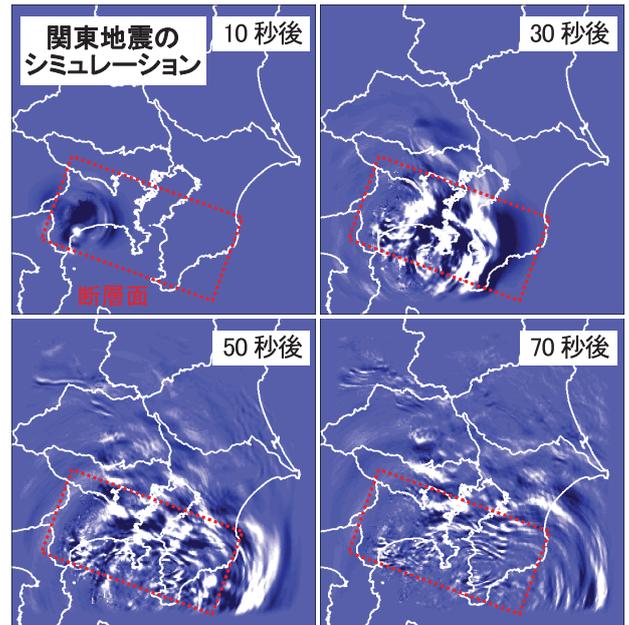


Fig. 5 数値シミュレーションによる1923年関東地震の速度振幅値のスナップショット
 Snapshots of ground velocity from the numerical simulation result of the 1923 Kanto earthquake

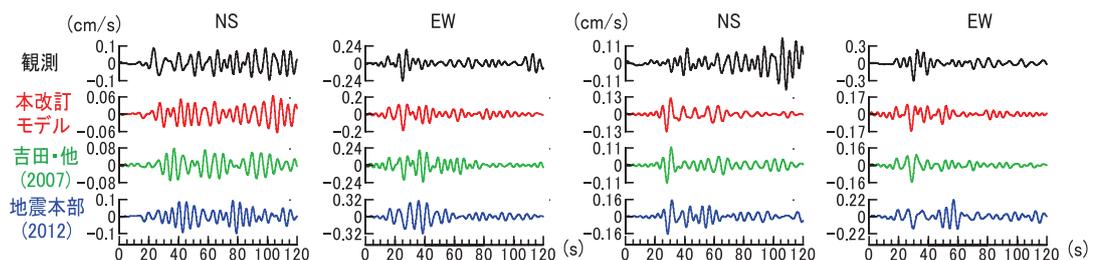


Fig. 6 MeSO-net観測記録を用いて改訂した地盤モデルによる速度波形のシミュレーション結果(吉田・他¹⁷⁾)
 The simulated velocity waves by using the modified Kanto basin model utilizing MeSO-net observation records

謝辞

防災科学技術研究所のK-NET記録を使用しました。差分法の計算には防災科学技術研究所によるGMS²¹⁾を用いました。また一部の図の作成にGMT²²⁾ (Generic Mapping Tool) を使用しました。

参考文献

- 1) 長橋純男：「やや長周期地震動問題の地震工学における新たな展開」, 日本建築学会第18回地盤震動シンポジウム資料集, 1-6, 1990年7月.
- 2) 日本建築学会：「地盤震動研究から見た長周期地震動」, 日本建築学会第37回地盤震動シンポジウム, 2009年11月.
- 3) 座間信作：「やや長周期の地震動」, 地震2, 46, 329-342, 1993.
- 4) 座間信作：「長周期地震動」, 地震2, 61, S443-S440, 2009.
- 5) 畑山健, 座間信作, 西晴樹, 山田實, 廣川幹浩, 井上涼介：「2003年十勝沖地震による周期数秒から十数秒の長周期地震動と石油タンクの被害」, 地震2, 57, 83-103, 2004.
- 6) 土木学会・日本建築学会：「海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言」, 2006.
- 7) 地震研究推進本部：「全国を概観した地震動予測地図2008年版, 付録3, 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシビ」)」, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/08_yosokuchizu/a3.pdf, 2008年4月.
- 8) 野津厚：「長周期地震動は断層面のどこで生じたのか」, 月刊地球号外, 55, 77-84, 2006年.
- 9) Kamae, K. and H. Kawabe: "Source model composed of asperities for the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake ($M_{JMA}=8.0$) estimated by the empirical Green's function method, Earth, Planets and Space, 56, 323-327, 2004.
- 10) Furumura, T. and Saito, T.: "An integrated simulation of ground motion and tsunami for the 1944 Tonankai earthquake using high-performance super computers", Journal of Disaster Research, 4, 2, 118-126, 2009.
- 11) Kobayashi, K., Uetake, T., Mashimo, M. and Kobayashi, H.: Estimation of deep underground velocity structures by inversion of spectral ratio of horizontal to vertical component in P-wave part of earthquake ground motion, Proceeding of 12WCEE, Paper No. 2658, 2000.
- 12) 吉田治雄, 小林喜久二, 植竹富一, 土方勝一郎：「地震観測記録に基づく関東平野の3次元地下構造モデルの構築と地震動シミュレーション3次元モデルの改訂と千葉県北東部の地震のシミュレーション」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, 409-410, 2007.
- 13) 吉田治雄, 小林喜久二, 佐藤吉之：「地下構造モデルの違いによる長周期地震動の予測精度の差異について」, 第13回日本地震工学シンポジウム, 1957-1964, 2010.
- 14) 吉田治雄, 小林喜久二, 佐藤吉之, 酒井慎一, 平田直：「首都圏地震観測網MeSO-netの地震観測記録を用いた深部地下構造推定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, 141-142, 2011.
- 15) 酒井慎一, 平田直：「首都圏地震観測網の設置計画」, 東京大学地震研究所彙報, 84, 57-69, 2009.
- 16) 吉田治雄, 小林喜久二, 佐藤吉之, 梅田尚子, 酒井慎一, 平田直：「MeSO-net 観測記録に基づく関東平野の3次元地下構造モデルの改訂と地震動シミュレーション (その2)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造II, 403-404, 2014.
- 17) 梅田尚子, 小林喜久二：「地震記録の逆解析による地下構造推定手法の適用性に関する検討」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造II, 813-814, 2010.
- 18) 小林喜久二, 吉田治雄, 佐藤吉之, 植竹富一, 土方勝一郎：「地震観測記録に基づく関東平野の3次元地下構造モデルの構築と地震動シミュレーション」, 第12回日本地震工学シンポジウム, 1454-1457, 2006.
- 19) 地震調査研究推進本部: http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/index.htm, 2009.
- 20) 地震調査研究推進本部: http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm, 2012.
- 21) Aoi, S. and Fujiwara, H.: "3-D finite difference method using discontinuous grids", Bull. Seism. Soc. Am., 89, 918-930, 1999.
- 22) Wessel, P. and Smith, W. H. F.: New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Amer. Geophys. U., 79, 579, 1998.

3 建物の安全・安心 Seismic Safety / Reliability of Buildings

濱口 弘樹 Hiroki Hamaguchi*1

建物の安全・安心を考えるに当たって長周期地震動の定義は必ずしも明確ではないが、速度応答スペクトルやエネルギースペクトルにおいて、概ね周期2秒以上の周期帯の最大値が2秒以下の周期帯の値に対して1.5倍から2倍を上回る地震動のことを指すものと考えてよいであろう¹⁾。従って、2秒以上の固有周期を有する超高層建物や免震建物は、中低層建物に比べて長周期地震動による共振の影響を受けやすい。3.1節では長周期地震動が建物の安全・安心に及ぼす影響について概観する。次に3.2節では建物の長周期地震動対策の概念を示し、3.3節、3.4節においてそれぞれ超高層建物および免震建物の対策技術について実例を交えて紹介する。最後に3.5節においてこれらを踏まえた今後の展望について述べる。

3.1 長周期地震動を受ける建物の挙動 Behavior of Buildings Subjected to Long-period Earthquakes

2011年東北地方太平洋沖地震の際、震源域から遠く離れた首都圏や大阪湾岸に建つ超高層建物は10分近くにも渡って揺れ続けた。日本建築学会の調査²⁾によると、東京の超高層建物には補修を必要とする顕著な構造体の被害は見られなかったものの、一部の建物で天井パネルの脱落、家具・什器の転倒や大移動などの被害が生じ、上層階にいた人々は大変な恐怖を強いられたことが明らかとなっている。首都圏における東北地方太平洋沖地震の揺れの大きさは、建築基準法告示に定める「極めて稀に発生する地震動」の1/2程度であったが、近い将来の発生が懸念される南海トラフを震源とする地震動は、告示極稀レベルを大きく上回る恐れがあると考えられている。内閣府が想定するM9クラス超巨大震源に基づいて南海トラフ4連動地震の時刻歴波形を複数作成し、超高層建物と免震建物の応答評価を行った研究³⁾によると、最大応答が告示地震動に対するクライテリアを大きく上回り、構造体が損傷するケースも見られる。この中で、建物が特に大きな応答を示した大阪・此花波の加速度時刻歴、速度応答スペクトルならびにエネルギースペクトルをFig. 1に示す（データ出典⁴⁾）。此花波は気象庁震度5強（計測震度5.1）に相当し、最大加速度は133cm/s²とさほど大きくないが、速度およびエネルギーは周期帯によっては告示レベルの2倍以上の大きさを有している。

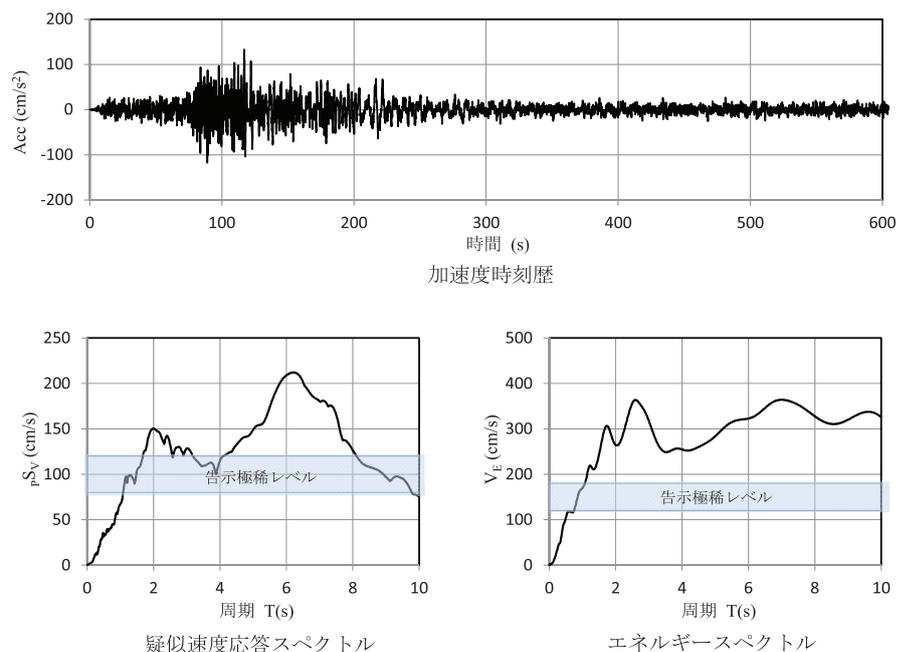


Fig. 1 想定南海トラフ4連動地震動（大阪・此花波）⁴⁾
 An artificial long-period ground motion of Nankai Trough Earthquake (Konohana District, Osaka City)

*1 技術研究所 地震工学部 振動制御グループ長 Group Leader, Research & Development Institute

Fig. 2には此花波を受ける低層（5階建・高さ20m・1次固有周期0.5秒）、超高層（20階・80m・2.0秒）、免震（5階・20m・4.0秒）建物の室内状況を推定⁵⁾した一例を示す。免震建物は低層建物モデルの基礎に免震周期4秒、粘性減衰15%の免震層を付加したものである。各建物の最上階における揺れ性能評価結果、および室内の揺れの状況をキャプチャーした画像より、各建物の挙動の違いを伺い知ることができる。低層建物の居住者は揺れに不安を感じるものの、書棚がガタつく程度で室内に目立った被害は見られない。超高層建物では書棚の転倒など室内に甚大な被害を生じ、居住者は揺れに翻弄されて避難もままならない。免震建物の室内には変化が見られないが、免震層の最大変形は約570mmに達している。これは積層ゴムの水平特性がハードニング領域に達し、免震層の水平クリアランス寸法次第では上部建物が擁壁に衝突するような大変形である。

このように長周期地震動は、中低層建物に目立った被害を与えない一方で、超高層建物や免震建物に大きな被害をもたらすことも考えられ、新築/既存に関わらず揺れを低減する対策技術の確立が急務となっている。

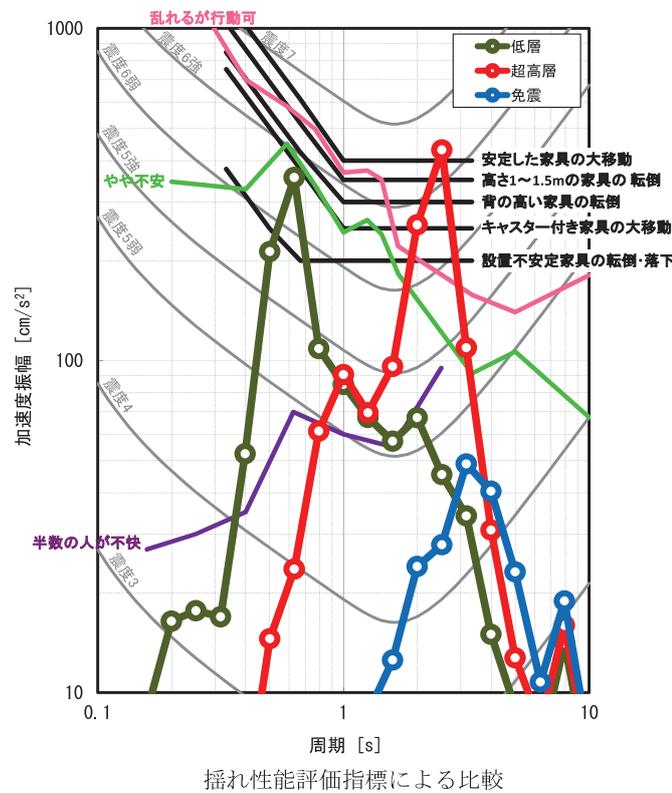


Fig. 2 長周期地震動を受ける低層・超高層・免震建物の室内状況例
 Example of indoor damages caused by a long-period earthquake

3.2 長周期建物の応答低減方法

Methods for Mitigating Seismic Response of Buildings with Long Natural Period

Fig. 3(a)は文献1)で提案された長周期地震動の検証用スペクトルの一つ(特定の周期帯 $T_{c2} - T_{c3}$ で山を作るスペクトル)である。 S_v は速度応答スペクトル, V_E はエネルギースペクトル, T_0 は建物を1質点とみなしたときの固有周期を表している。Fig. 3(b)はこのような検証用スペクトルに基づく建物の地震応答低減の概念図である。この図から, Xで示す長周期建物の長周期地震応答を低減する効果的な方法として, 固有周期の変更(短周期化a, 長周期化b)および減衰性能の向上(c, d)に容易に思い至る。

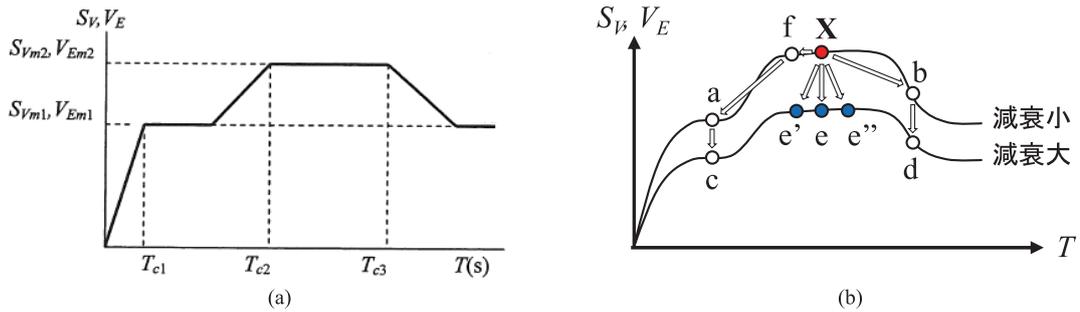


Fig. 3 建物の地震応答低減方法の概念
 Concept of mitigating seismic response of buildings

速度応答およびエネルギー入力低減の観点に立つと, 固有周期を特定の周期帯の外側にずらすこと(a, b)は有効な策であるが, 現実には以下の通り多くの困難を抱えている。

- ・超高層建物では, 固有周期はほぼ建物高さに比例して定まり, 剛性や重量の調整による周期の大幅な変更は不可能に近い。
- ・免震建物の場合, アイソレーターおよびダンパーの剛性調整により固有周期の変更は比較的容易であるが, 免震技術は元来, 地震動の短周期成分による加速度応答の増大を免れるために建物を長周期化する技術として発展してきたものである。従って短周期化は技術の後退と捉えられかねず, より一層の長周期化を目指すこととなる。
- ・短周期化は加速度応答, 長周期化は変位応答の増大を招くため, 減衰性能の向上によりcやdを実現することができたとしても, 総合的に見て有効な応答低減策であるか否かの判断は困難である。また, 長周期化によって1次固有周期を特定の周期帯の外側にずらすことができたとしても, 2次モード以降の固有周期が特定の周期帯の中に入ってくれば, 高次モードの振動が励起されることとなる。さらに免震建物の場合, 長周期化による免震層の応答変位増大は, 3.4節で述べる通り上部建物の擁壁への衝突問題に直結するため, 慎重な判断が必要となる。
- ・地震動特性は震源や伝搬経路, 表層地盤の特性などよるばらつきが大きく, 現状の知見で T_{c2} および T_{c3} を高い精度で予測することは困難である。

従って結局のところ, 長周期地震動に対する応答低減の方法は, 減衰性能の向上(e)またはこれに固有周期の変化が伴うケース(e', e'')に限られる。なお, 例えば建設年代が古く剛性や強度が不足する建物に対し, 変形や損傷を低減する目的で耐震補強を行うことは, 建物の短周期化(f)を行っていることに相当し, 前述の通り加速度応答の増大に対する配慮が必要である。

減衰性能の向上は, 建物の最大応答値の低減に加えて振幅レベルの低減および後揺れ時間の短縮にも有効である。もとより減衰性能の高い免震建物に比べ, 超高層建物では減衰性能の向上によって建物の耐震安全性向上のみならず, 居住者の揺れに対する恐怖感・不安感低減にも大きな効果を発揮するものと考えられる。減衰性能向上の方法としては, ダンパーの設置や増設が最も現実的であろう。ここで注意すべき点は, 長周期地震動に対処するためのダンパー材料には, 長時間に渡って繰り返し変形を受けても大きな性能低下を生じることなく, 安定して振動エネルギーを吸収し続ける性能が要求されることである。従来, 主要なダンパー材料としては, 鋼材や鉛などの金属材料, オイルや粘性体, 粘弾性体などの有機化合物が一般的である。前者は繰り返し塑性変形を受けることによる金属疲労や幾何形状の変化, 後者は温度上昇に伴う粘性や剛性低下などが課題となる。これら喫緊の課題について様々

な調査・開発が行われており、超高層建物、免震建物を対象とした代表的な技術について次節以降に紹介する。

3.3 超高層建物の対策技術 Countermeasures for High-rise Buildings

(1) Fe-Mn-Si系合金制振ダンパー

普通鋼や低降伏点鋼は剛性や降伏強度のばらつきが小さく、かつ低価格で高効率である利点を活かして、制振ダンパーの材料として一般的に用いられている。一方で、大振幅かつ多数回の繰り返し変形に対する疲労特性に難があり、解決策が模索されてきた。

当社が国立研究開発法人物質・材料研究機構、淡路マテリア株式会社と共同で開発したFe-Mn-Si系合金（以下FMS合金）は、鉄Feを主成分としてマンガンMnやケイ素Siを添加した新しい制振鋼材であり、Fig. 4に示す通り低降伏点鋼LY225やLY100などと比較して約10倍の疲労耐久性を有する。また繰り返し変形に伴う最大荷重の変化が非常に緩やかであり、疲労寿命付近まで安定した最大荷重を発揮することも大きな利点である。さらに塑性変形性能に関しても、例えば降伏比42%、伸び76.7%を示し、建築構造用圧延鋼材SN490C（ $6 \leq t \leq 16\text{mm}$ ）の規格値80%以下、17%以上と比較して極めて高い靱性を有する。

FMS合金制振ダンパーは、Fig. 5に示すように板状FMS合金の両面を2重の座屈補剛板で覆ったせん断パネル型のダンパーである。大変形時にもFMS合金の局所に変形が集中しないように曲線状の端部を有する形状となっており、上下端部を躯体にボルトで接合して使用する。

本ダンパーのプロジェクトへの適用事例をFig. 6に示す。本建物は様々な特性を有する地震動に対して構造性能に冗長性を付与するため、複数種類の制振ダンパーを採用している。この中で、階高が6.5~7.8mと高く地震時の層間変形が大きくなる1~4階には、大振幅の繰り返し変形に対して特に高い疲労耐久性を有するダンパーが必要であったため、最大荷重4,000kNを発揮するFMS合金制振ダンパー16基を集中的に配置している。履歴減衰の付与に伴い剛性も増加することから、Fig. 3 (b)における対策e'に相当する。

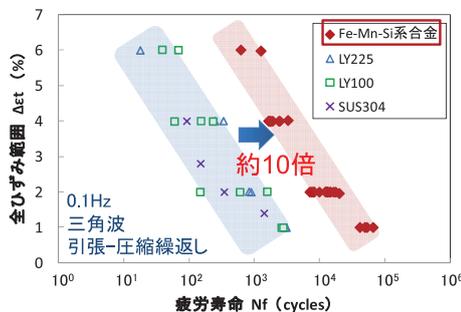


Fig. 4 FMS合金の低サイクル疲労特性
 Low-cycle fatigue characteristics of FMS alloy

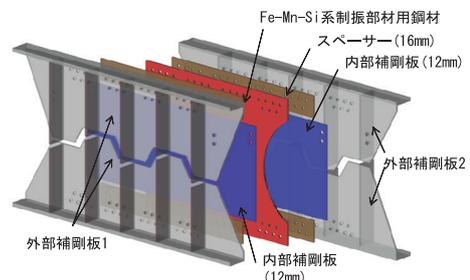


Fig. 5 FMS合金制振ダンパーの構成
 Configuration of FMS alloy damper

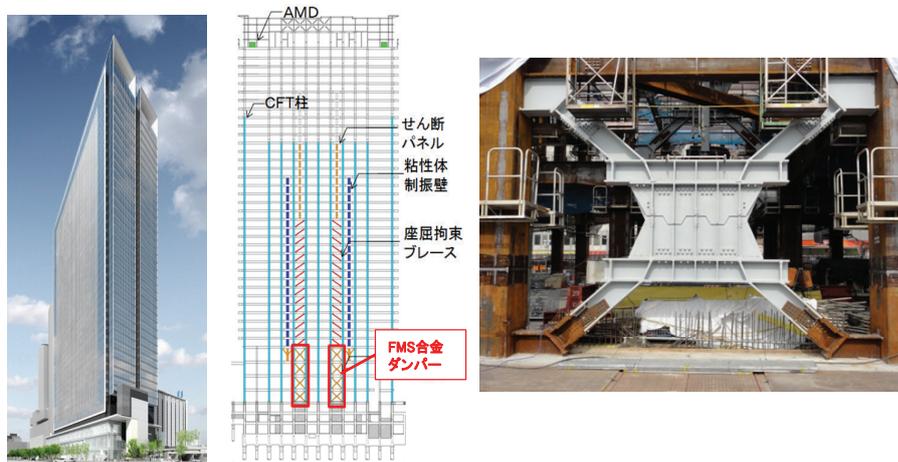


Fig. 6 FMS合金制振ダンパーの適用事例 (JPタワー名古屋)
 Application of FMS alloy dampers to JP Tower Nagoya

(2) 高減衰オイルダンパー

オイルダンパーは振幅に依らず安定した減衰性能を発揮し、かつ繰り返し変形に伴う油温の上昇、すなわち減衰性能の低下が比較的小さいという利点により、風揺れから発生頻度の高い中小地震、さらには大地震まで広範なレベルの建物振動低減に効果を発揮する。ところが、高い減衰力を発揮するためにはダンパー寸法の大径化が避けられない一方で、建物の柱・梁で囲まれた層間に配置することのできるダンパー径には限度があることから、これまで実用に供されるオイルダンパーの最大減衰力は2,000kNに留まっていた。このため、特に大きな減衰力を必要とする超高層建物ではダンパー基数が膨大となり、設置スペースの確保やコストなどの面で難があった。

当社がカヤバシステムマシナリー株式会社と共同で開発した高減衰オイルダンパーは、減衰力2,000kNのオイルダンパー3基を外見上は直列、構造上は並列に配置することにより、従来の設計手法に基づいた場合の想定に対して油室の断面積を1/2程度のスリムな形状に絞り込みながら、世界最大級6,000kNの減衰力を実現している (Fig. 7)。さらに、従来に比べてダンパー本体の熱容量を高める構成を採用し、地震時の油温上昇を大幅に抑制したことにより、長周期地震動による長時間の揺れ対策にも効果を発揮する。

本ダンパーのプロジェクトへの適用事例をFig. 8に示す。本建物は、日常的に使用される建物低層部分を「制振階」として6,000kN高減衰オイルダンパー52基を集中配置し、建物用途に供さない免震層を設けることなく免震構造と同等グレードの耐震性能を確保している。粘性減衰を付与していることから、Fig. 3(b)における対策eに相当、またはダンパー自体がオイルの圧縮剛性などに起因する軸剛性を有することから、eに相当すると考えられる。

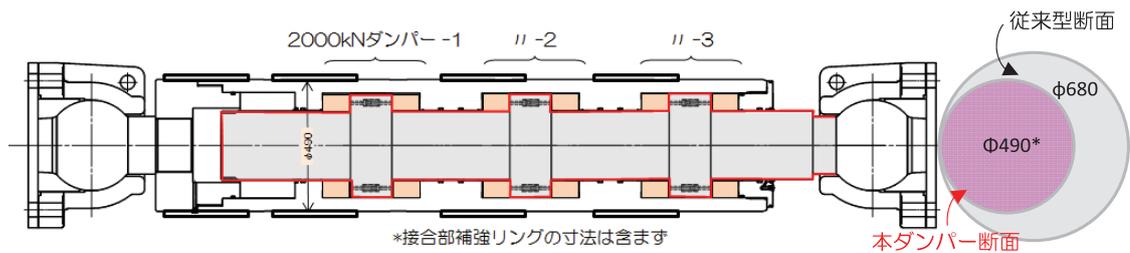


Fig. 7 高減衰オイルダンパーの構成
 Configuration of High-damping oil damper

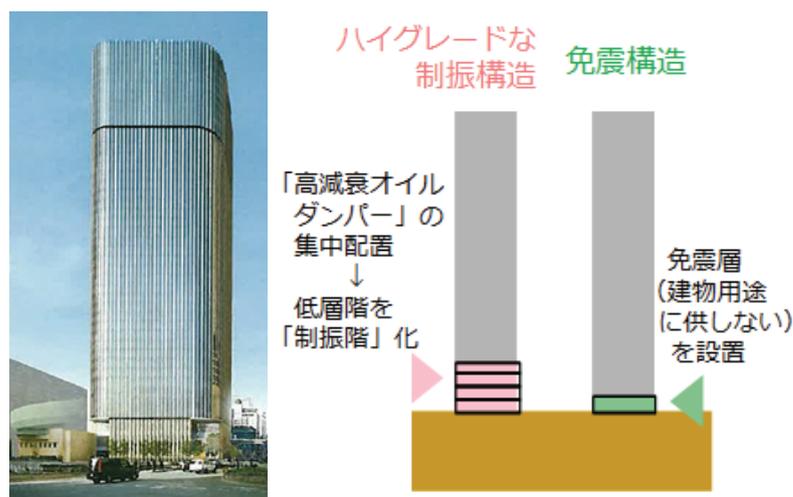


Fig. 8 高減衰ダンパーの適用事例 (中之島フェスティバルタワー・ウエスト)
 Application of High-damping oil dampers to Nakanoshima Festival Tower West

(3) デュアルTMD

既存超高層建物の長周期地震動対策は、新築に比べてより一層の困難を伴う。最も一般的な手法は、新築の場合と同様に層間ダンパーによる減衰の付与である。しかしながら、建物によってはコア周りにダンパー増設が可能なスペースが残されていないこともある。この場合、次善の策は室内空間や建物外周部への層間ダンパー設置となるが、建物内外観の変化、レントブル比の低下や、ダンパー設置工事中のテナント一時退去などに対する建物オーナーの抵抗感は強い。

従来、TMDなどのマスダンパー技術は超高層建物や都心部のいわゆるペンシルビルの強風や中小地震に対する振動低減手法として用いられてきた。設置工事の範囲が建物屋上や上層階のごく限られた箇所に限定されることから、建物の内外観変化や工事中の使用制限を伴わない、または最小限に留めることが可能であり、層間ダンパーの設置が困難な既存超高層建物の長周期地震動対策にも有力な技術として注目されつつある。一方、大地震時にも制振効果を発揮するためには、巨大なマスおよびその大変位機構が必要であり、場合によってはマスの重量増に対応する既存躯体の補強が必要となるなど、適用に際しては慎重な判断と検討が求められる。

当社が新たに開発したデュアルTMDは、Fig. 9に示すように巨大なマスを2段積層ゴムで支持し、オイルダンパーで減衰を付与するものである。本機構にはマスの直下に数mmの上下クリアランスをあけて4基のリニアガイドが併設されている。常時からマス小振幅時においては2段積層ゴムがマスの全重量を支持する。マス振幅の増加とともに2段積層ゴムの圧縮変位が大きくなり、最終的にはマスがリニアガイドに着座することによって2段積層ゴムの座屈を防止する。この機構の採用により、本TMDは強風から大地震まで広範な振動レベルに対して効果を発揮することができるようになっている。

本TMDのプロジェクトへの適用事例をFig. 10に示す。7,000kNマスのデュアルTMD2基を53階の塔屋内に設置することにより、建物外観の変更および工事中の一般階の使用制限をなくすとともに、既存躯体の補強を52階のみに留めている。TMDの各構成要素は既存エレベータでの運搬が可能な寸法・重量に分割して設置階に搬入する。付加マスの制御力による応答低減を行うことから、Fig. 3(b)における対策eに相当、またはマスの重量増により建物の固有周期が長くなることから、e”に相当すると考えられる。

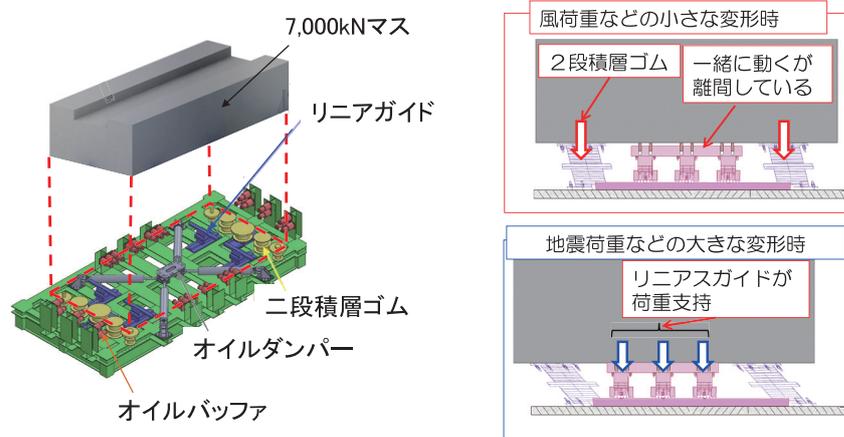


Fig. 9 デュアルTMDの構成と機構
 Configuration and mechanism of Dual TMD

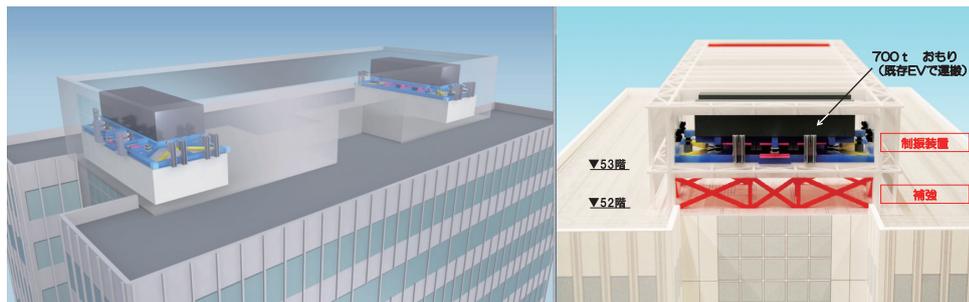


Fig. 10 デュアルTMDの適用事例 (新宿野村ビル)
 Application of Dual TMDs to Shinjuku Nomura Building

3.4 免震建物の対策技術 Countermeasures for Seismically Isolated Buildings

(1) 既存免震部材の性能検証

免震建物の耐震性能を大きく左右する免震部材には、建物の層間に設置される制振ダンパーに比較して圧倒的に高い変形・速度性能が要求される。告示レベルを超える巨大地震動や長周期地震動まで考慮すると、制振ダンパーが数十～100mm程度の層間変形に追従できれば十分であるのに対し、変形が集中する免震層に配置されるアイソレーターおよびダンパーは、1,000mm/sを超える速度で500mmを超える変形性能が必要となる。さらに当然のことながら、アイソレーターは大変形時においても数十N/mm²の高面圧で建物荷重を安定して支持し続けなければならない。このような過酷な条件下で使用される免震部材の特性や限界性能の検証、ならびに詳細な解析モデルの構築は、免震建物の耐震安全性に対する信頼をより確固たるものとする上で非常に重要である。

ほとんど全てのダンパーおよびダンパー機能を併用するアイソレーターに共通する懸念事項として、長周期地震動による多数回の繰り返し大変形を受ける場合の減衰性能の低下が挙げられる。金属系材料は疲労、降伏強度の低下や幾何形状の変化、有機化合物は発熱に伴う粘性の低下がその主な要因である。ダンパー減衰性能の低下は免震層の変形増大を招き、場合によっては新築/既存を問わず次節に述べるような対策が必要となることも考えられる。これまで、免震建物の設計に安全率やばらつきを取り入れることにより、ダンパー減衰性能の低下に配慮した検討は行われていたが、従来想定を凌駕する巨大地震動発生への懸念が高まっている昨今、繰り返し大変形を受ける免震部材の特性について、より詳細な定量評価および解析モデルの構築が望まれている。

一方で、近年まで実大のアイソレーターやダンパーの動的加振実験は一部の例^(例えば6)を除いてほとんど行われたことがなく、準静的な載荷実験や縮小・小型試験体の動的加振実験で代用されてきた。国土交通省は建築基準整備促進事業の一環として2010年度から4年間、建設会社4社を事業者として選定し、長周期地震動に対する免震部材の安全性能検証を支援してきた。世界最大級の震動台E-Defenseを用いて行われた実大免震部材の動的加振実験の成果などにより、長周期地震動に対する免震部材の性能に関する新たな知見が蓄積されつつある^{7), 8)}。当社も本事業に参画し、実大鉛ダンパーの水平2方向加振実験などを担当した (Photo 1)。

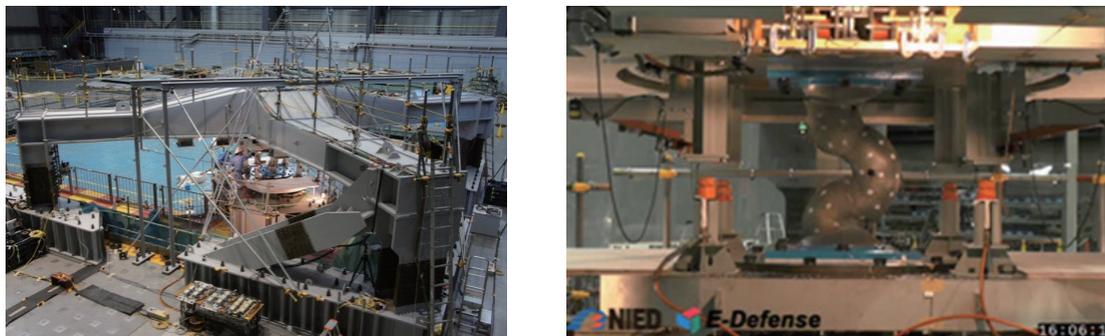


Photo 1 E-Defenseにおける実大鉛ダンパーの加振実験
 Dynamic loading test of actual size of lead dampers at E-Defense

(2) 免震層の過大変形対策

免震層変位の増大に伴って生じる主な事象として、上部建物の擁壁への衝突、ダンパー反力の増加やアイソレーターのハードニングに起因する上部建物の応答増大、アイソレーターの損傷 (座屈、破断など) が想定される。免震構造の特性上、これらすべての事象を回避することは困難であり、Fig. 11に示すようにどの事象の回避を優先するかによって対策方法は異なってくる。

最も現実的な考え方は、擁壁への衝突を許容することであろう。衝突によって上部建物の応答が増大することは自明であるから、上部建物が十分に高い強度を有しているか、あるいは部分的な損傷を許容することが前提となる。衝突時には擁壁の面外剛性などが加わって免震層の等価剛性が高くなり、固有周期は短周期化する。従って、擁壁への衝突許容は受動的な対策ではあるが、Fig. 3(b)における対策f、あるいは埋土の塑性化などに伴う減衰効果を多少なりとも見込めるのであればeとの解釈も可能であろう。なおPhoto 2に示すように、衝突時に上部建物に伝わる衝撃力を和らげる目的で擁壁側面にゴム製の緩衝材を設置した事例もある。緩衝材による応答低減効果の度合いは擁壁裏面の埋土特性などにも大きく依存するものの、アイソレーターの水平変形を抑制して損傷を防止するとい

う面での効果にも期待することができる。

擁壁への衝突は回避するが上部建物の応答増大は許容する場合、ランディング機構やストッパーの設置、ダンパーの増設などが考えられる。ランディング機構とは、アイソレーターが大変形により座屈や破断を生じた場合に、アイソレーターに代わって上部建物の鉛直荷重を支持する機構である。ストッパーとは、擁壁に接触するよりも前に上部建物を衝突させるために、免震層に別途設置する部位・機構のことであり、原理的には擁壁衝突の許容や衝突緩衝材の設置と変わらない。ダンパー増設は免震層の減衰性能向上に直結するため、変位抑制に大きな効果を見込むことができる。一方で、中小地震から建築基準法告示レベルの地震動に対しては剛性や減衰が過多となり、十分な免震効果を得ることができなくなる恐れのあることに注意が必要である。その対策として、増設ダンパーにギャップ機構を組み込み、免震層に過大変形を生じたときのみ剛性や減衰を発揮するようしくみの開発も行われている。これらはいずれもFig. 3(b)における対策f、あるいはeに対応すると位置付けられる。

擁壁への衝突、上部建物の応答増大ともに回避するとすると、解決策は免震層の許容変形を拡大する以外にない。最も単純な方法としては、従来よりも水平クリアランスを大きく取ることが考えられる。上部建物の応答増大を回避するために、ハードニングを生じる積層ゴム支承や、変位に伴って反力が増すダンパーを減らすとともに、すべり支承や転がり支承を多用することとなる。しかしながら、この対策は免震層変位がさらに大きくなることに注意が必要である。多段免震構造は、複数の免震層に変形を分散させる考えに基づくものである。Fig. 12に示すように、上層がセットバックしており上下層で建物用途が異なる建物であれば、免震層による縦動線の分断がさほど不利とならず建築計画的に見ても適用可能と考えられる。フェイルセーフ機構付積層ゴムは、Fig. 13に示すように鉛プラグ入り積層ゴム支承と高摩擦すべり機構を直列に配置したアイソレーターである。上部建物を全てこのアイソレーターのみで支持することにより、通常は上フランジ側が上部建物と摩擦接合された従来型の鉛プラグ入り積層ゴムとして機能し、過大変形時のみ摩擦が切れてすべりを生じる。免震層の変位は増大するが、積層ゴム部の変形が一定以上に進行せず破断を免れるとともに、上部建物の応答は一定値以上に増大しない。これらの対策はいずれもプロジェクト適用実績はないが、Fig. 3(b)において対策e'または広義の意味でb、dに相当すると考えられる。

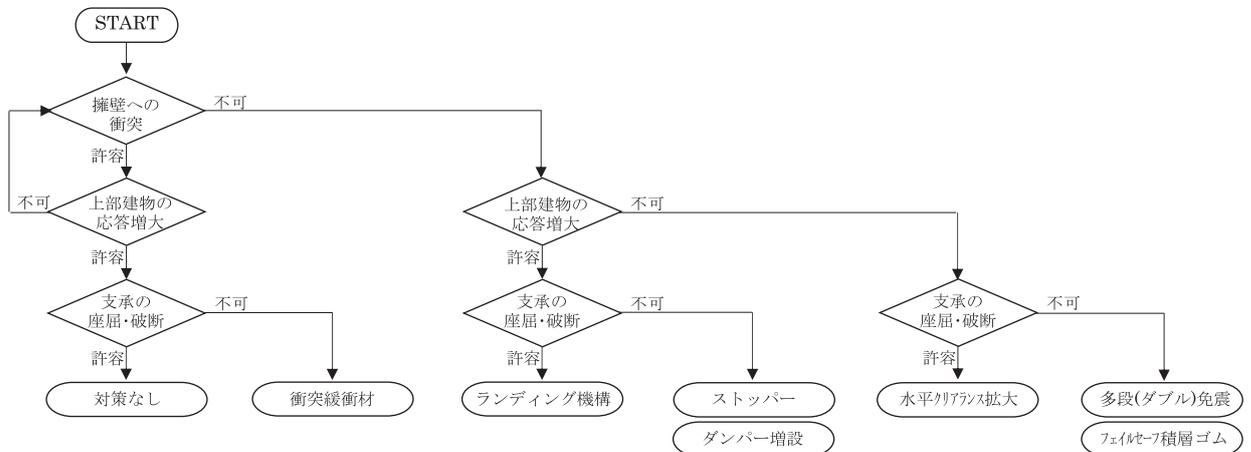


Fig. 11 免震層の過大変形対策
 Countermeasures for excessive deformation at isolation level



Photo 2 衝突緩衝材の適用例 (アイタワー)
 Application of shock absorbers to I Tower



Fig. 12 多段免震（ダブル免震）
 Multi (Double) Isolation

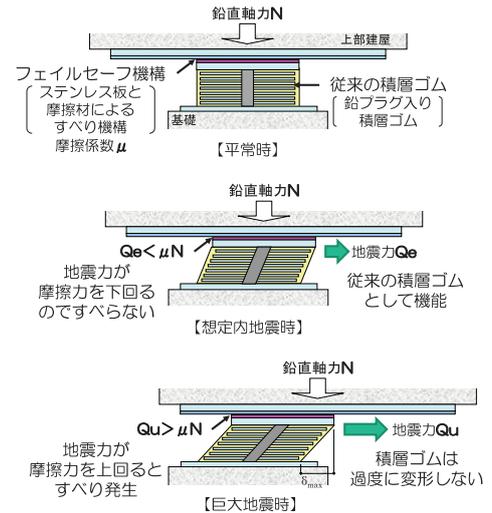


Fig. 13 フェイルセーフ機構付積層ゴム
 Fail-safe system incorporated rubber bearing

3.5 今後の展望

Prospects for the Future

長周期地震動に対する超高層建物および免震建物の安全・安心対策は、これらの建物が実用化された当初から常に検討されてきた課題であり、2011年東北地方太平洋沖地震の発生や南海トラフを震源とする巨大地震発生の懸念が高まっていることなどをきっかけとして、ここ数年より一層の危機感を持って研究・開発が進められている。しかしながら3.2節で述べた通り、長周期地震動を受ける建物の応答低減に劇的な効果を発揮する対策は現在までのところ見出されておらず、今後も超高層建物、免震建物ともに高効率ダンパーの開発およびその適用が基本となるだろう。

建物の構造技術者を悩ませる難題の1つは、次に建物が受ける地震動がどのような特性を有するのか分からないことである。特に免震建物の場合は3.4節で述べた通り、長周期地震動に対して最適な構造特性（周期、減衰など）を付与したところで直下型地震などの異なる特性の地震動に対して最適解とはならない。こうした問題を回避するため、今後は地震動の特性に応じて時々刻々と建物の構造特性を変化させるアクティブ・セミアクティブ機構や、緊急地震速報などとの連動により主要動到来までの僅かな時間で建物の構造特性を最適値に切り替える可変架構システムなどの開発が活発化していくと考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：長周期地震動と建物の耐震性，p.403，2007
- 2) 日本建築学会：長周期地震動と超高層建物の対応策—専門家として知っておきたいこと—，2013
- 3) 大川出，佐藤智美，佐藤俊明，藤堂正喜，北村春幸，鳥井信吾，辻泰一，北村佳久：超高層建築物等への長周期地震動の影響に関する検討—南海トラフ4連動地震による超高層・免震建物の応答解析—，建築研究資料第147号，独立行政法人建築研究所，2013
- 4) 独立行政法人建築研究所ホームページ，http://smo.kenken.go.jp/long/data147/OSKH02_4rsur.txt
- 5) H. Hamaguchi, H. Yoneda and M. Yamamoto : Seismic Performance Evaluation Methods for Non-Engineers, 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Sendai, Japan, 2013
- 6) 嶺脇重雄，山本雅史，東野雅彦，濱口弘樹，米田春美：実大性能試験に基づく超高層免震建物用大型免震支承部材に関する研究，竹中技術研究報告，No.66，2010
- 7) 長島一郎，日比野浩，山本祥江，森川和彦，竹中康雄，米田春美，中村尚弘，飯場正紀：建築基準法等に係る技術基準整備のための事業 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，ビルディングレター2013.10，日本建築センター，2013
- 8) 長島一郎，日比野浩，高岡栄治，近藤明洋，猿田正明，半澤徹也，嶺脇重雄，曾根孝行，飯場正紀：建築基準法等に係る技術基準整備のための事業 長周期地震動に対する減衰材の安全性検証方法に関する検討，ビルディングレター2014.11，日本建築センター，2014

4 地震発生時の建物機能維持 Functional Maintenance of Buildings during Earthquakes

吉澤 睦博 Mutsuhiro Yoshizawa*1

これまで大臣認定で設計される超高層建物や免震建物は、地震に対する性能が高い建築物として認識されてきた。しかしこれらの長周期構造物に対して新たな地震リスクとして、長周期地震動による影響が顕在化してきた。これらの建築物で地震時機能維持を図るためには、建築物の構造的な対策に加えて、長周期地震動の影響を適切に評価した事業継続計画（BCP：Business Continuity Plan）を策定し、BCPに基づく地震時の対応が求められる。4章ではBCP策定に関わる評価技術、およびリアルタイムに観測される地震情報を用いた事業継続支援技術について述べる。

4.1 長周期地震動を考慮した建物損失評価 Building Loss Rate Evaluation Considering Long-period Earthquake Ground Motion

東日本大震災では長周期地震動による高層建物の被害が顕在化した。日本建築学会の小委員会の試算では南海トラフで発生が予測されている地震では、首都圏では東日本大震災の2倍以上の長周期地震動が予想されている¹⁾。このような想定地震に対する建物の被害に備えるためには、新築時なら構造設計に長周期地震動の影響を十分考慮すること、既存であれば長周期地震動に対する十分な耐震改修を行うことが重要である。このとき、何が「十分な」対策なのかを判断するには長周期地震動対策の効果の客観的定量的評価が不可欠である。

予想最大損失率（PML: Probable Maximum Loss）は、J-REIT（不動産投資信託）などの不動産評価の際に用いられる地震リスク評価における評価指標である²⁾。PMLの計算方法は多様化しているが、基本的に想定されるハザード（大地震）により予想される物的損害額の建物の再調達価格に対する割合で示される。PML評価の最大の特徴は建物被害を被害額で算定することである。被害額が評価として現れることで、地震による事業へのインパクトを具体的に考えることができるため、地震対策の客観的定量的評価が可能になる。ところがこれまでのPML評価では地表面最大加速度や地表面最大速度を地震ハザードとして考えて損失評価するため、長周期地震動による影響を考慮した損失評価は行われていなかった。このことは、文献2)においても課題として挙げられていた。

そこで長周期地震動による影響を考慮した損失評価を行うために、国土交通省長周期地震動対策試案の地震動算定に準拠³⁾した地震波を作成し、複数の地震波による三次元地震応答解析を用いて、建物損失率を評価するシステムを開発した⁴⁾。Fig. 1に開発システムの建物損失率算出手順を、手順の概要を以降に示す。



Fig. 1 建物損失率算出手順
Building loss rate evaluation procedure

- ①想定地震を決め、断層の位置と規模（マグニチュード）を中央防災会議や地震調査研究推進本部などの公開データに基づいて設定する。
- ②国土交通省の長周期地震動対策試案に準拠した手法により地震波を生成する。この時、地震動のばらつきを考慮するために水平二方向を1組とした1,000組の地震波を生成する。
- ③②で生成した地震波を水平二方向から同時に入力した、立体骨組モデルの三次元応答解析を1,000ケース行う。
- ④三次元応答解析の結果から建物の各部の損傷度評価を実施する。立体骨組モデルを用いているため、柱、梁などの構造部材については、累積塑性変形倍率により繰り返しの変形による疲労損傷を評価する。そのほかの二次部材などについては、間仕切・外壁・縦配管など変形によって損傷するものは建物各部の変形角で、床・天井・設備機器など加速度によって損傷するものは建物各部の応答加速度により損傷度を評価する。
- ⑤損傷度に応じて補修方法を具体的に想定し、損傷した各部材、各部位を修復するのに必要な復旧費用を建物全体で積算により求める。
- ⑥復旧費用を再調達価格で割り、損失率を計算する。1,000ケースの結果から、所定の確率（PMLでは90%）で生

*1 技術研究所 地震工学部 地震リスクグループ長 Group Leader, Research & Development Institute

ずる最大の損失率を最大損失率と算定する。

本システムの特徴は、立体骨組モデルによる三次元応答解析の結果から部材単位での損傷度評価を行い、部材単位で損傷費用を計上して復旧費用を算出している点である。また部材単位でモデル化しているため、累積塑性変形倍率により長時間長周期地震動による繰り返しの変形による疲労損傷を適切に評価することができる。

Fig. 2に復旧費用と最大損失率を評価した事例の概要を示す。大阪市福島に位置する30階建事務所ビルを対象に、中央防災会議の東海・東南海・南海の三連動地震に対する評価を行った。図中の手順番号は前述の手順①～⑥に該当する。国土交通省対策試案の手法では連動型地震の場合、いくつかの断層に分割して地震波を計算するが、ここではFig. 2の手順①のように5つに分割した。復旧費用は1億円以下から20億円超まで大きくばらつくこと、中でも外装の被害が大きいことがわかる。復旧費用から求めた損失率のヒストグラムと累積分布から90%の確率で発生する最大の損失率は8.2%となった。

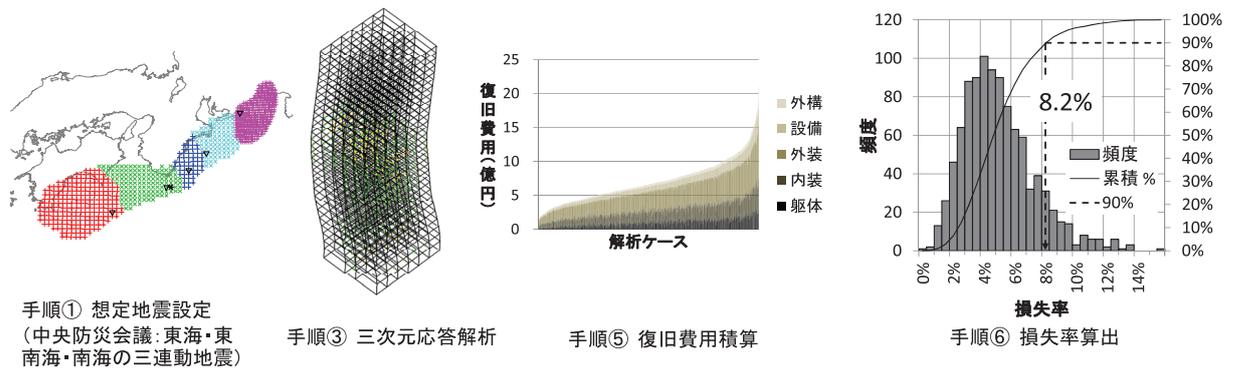


Fig. 2 計算事例
Example of loss rate evaluation

本システムの計算結果により地震対策の効果を客観的定量的評価できるため、地震対策を講じるための意思決定を支援することができる。また計算環境が整えば、実際に建物で観測された地震記録を用いた三次元応答解析をリアルタイムに行うことにより、地震後の被害状況把握を迅速に行うことが困難な超高層建物で、非構造部材、設備も考慮した効率的な被害調査を支援する情報を作成できる。

4.2 超高層建物向け緊急地震速報 Earthquake Early Warning System for High-rise Building

気象庁震度は地震による揺れの強さを総合的に表す指標として防災情報では最も多く利用されており、日本においては地震動の最大加速度や最大速度よりも広く認知された指標である。ところが震度は地表面で定義されているため、例えば超高層建物の居住者は、上層階であろうと下層階であろうと、同じ震度情報を受けて対応することになる。また気象庁震度では長周期地震動で問題となっている地震動の卓越周期が数秒～10秒程度の加速度成分をカットして計測震度を算出しているため、長周期地震動による長周期構造物の被害様相を適切に評価できないことが指摘されている⁵⁾。

2007年より一般への提供が開始された緊急地震速報はテレビ放送や携帯電話でも配信されるようになり、強い揺れの来る前に警報を発報するシステムとして広く認知されている。緊急地震速報でも震度階によって警報レベルを分けて発報しているため、緊急地震速報を建物の防災減災システムとして活用する場合には、前述した2つの課題を内包していると言える。気象庁では緊急地震速報の技術的限界を改善の検討が続けられており、地震動予測手法の改善としてPLUM法 (Propagation

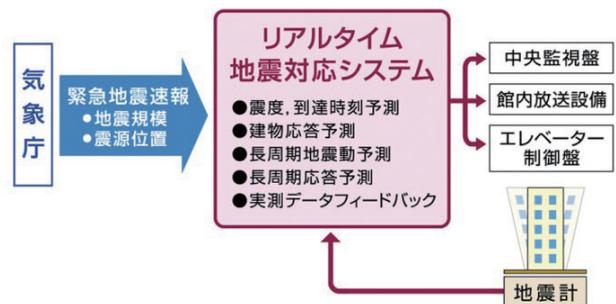


Fig. 3 超高層建物向け 緊急地震速報システムの概要
Outline of the Earthquake Early Warning System for high-rise building

of Local Undamped Motion 法) 等の導入の検討⁶⁾ が進められている。また緊急地震速報では予測できないとして扱われていた長周期地震動に対しても、平成29年度から長周期地震動予報の提供も検討されている。しかし、これらの改善は地表面で提供する地震の揺れの情報の改善であり、建物側の応答を考慮した取り組みは行われていない。

当社では超高層建物における減災システムとして緊急地震速報をより有効に活用するために、上層階での揺れを予測する機能と長周期地震動レベルを予測する機能を有する緊急地震速報システムを開発し、2009年より運用してきた。開発システムの概要をFig. 3に示す。開発システムは東京と大阪の高層建物に導入され、2011年東日本大震災の際にも有効に作動したことが報告されている⁷⁾。ここでは開発システムの技術概要、及びこれまでの地震観測記録の分析をもとに、開発システムの特徴について報告する。

緊急地震速報には一般利用者向けと高度利用者向けがあり、一般利用者向けは日本全国を約200個に区分した領域単位で発報され、どこか1つの領域で震度5弱以上が予測された場合に発報される。一方、高度利用者向けは緊急地震速報で扱う全ての地震に対して震源情報(震源位置、マグニチュード)が配信されるので、1kmメッシュ単位での細かい震度予測が可能となる。テレビ放送や携帯電話で配信される緊急地震速報は一般利用者向けを用いており、個々の建物の減災システムとして緊急地震速報を用いる場合は高度利用者向けを用いることが多い。ただし高度利用者向けを利用しても、建物内での揺れの違いを考慮することはできない。そこで開発システムでは、まず建物上層階と下層階の震度の違いを考慮して評価している。Fig. 4は東京都千代田区(建物A)と大阪市北区(建物B)に設置した地震計の観測記録から算出される計測震度相当値の相関である。横軸に建物最下階の観測記録から算出した値を、縦軸に最上階の観測記録から算出した値を表示している。図中には、上層階の計測震度を最下階の計測震度との差分として回帰した震度増分を示した。気象庁技術基準により算出する震度は建物の最下階の震度相当と考えられるため、上層階の震度を考慮した緊急地震速報を提示する場合には、震度増分を足し合わせれば良い。

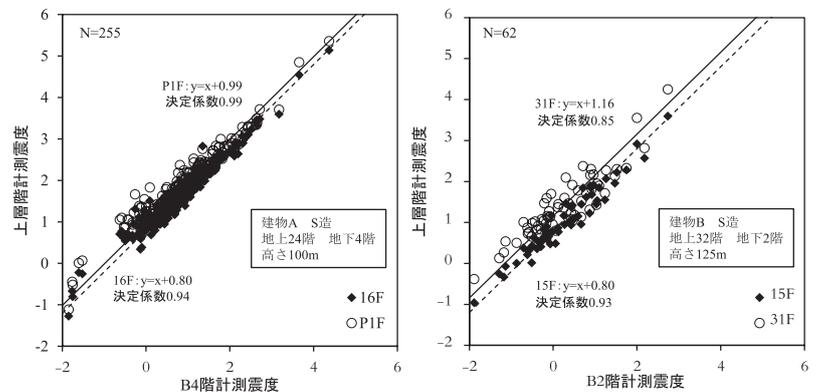


Fig. 4 建物最下階と上層階の計測震度相当値の相関
 Relation of calculated Instrumental seismic intensity between upper and lower floor

さらに開発システムでは、長周期地震動の振幅レベルに対する予測と地震時管制⁸⁾を、高度利用者向けの緊急地震速報で得られる震源情報(震源位置、マグニチュード)を利用して、沖積平野ごとの長周期地震動の卓越周期に対する擬似速度応答スペクトル(h=0.05)の値(R_{pv})を予測する距離減衰式を用いて行っている。地震時管制では、緊急地震速報から算出した擬似速度応答スペクトルの大きさから、エレベーターロープなどの周期の長い長尺物の応答を予測し、地震時の制御に用いている。エレベーター周りの長尺物の固有周期はエレベーターかごの位置による変動があり特定できないため、固有周期をパラメータとして2秒から10秒まで変化させた1質点系の応答解析により設定している。Fig. 5は東京地域

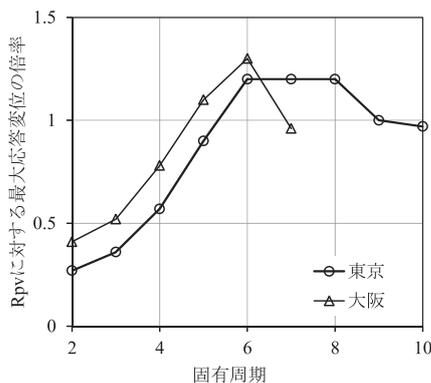


Fig. 5 長周期地震動振幅レベルに対する応答予測
 Seismic response prediction against R_{pv} value

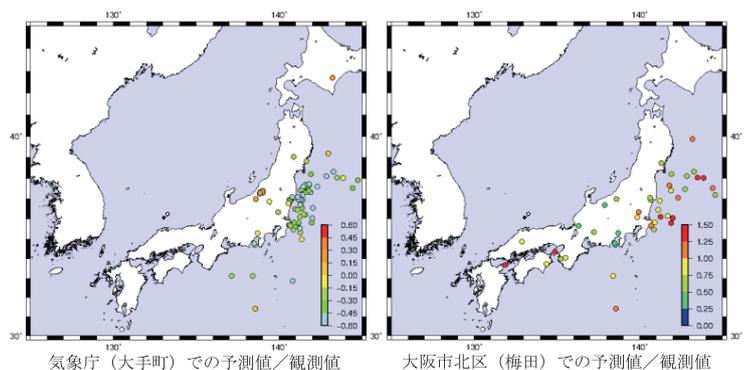


Fig. 6 長周期地震動振幅レベルの予測値と観測値の比較
 Comparison of observed data and predicted R_{pv} value

および大阪地域での計算結果であり、横軸に固有周期、縦軸は擬似速度応答スペクトル値 R_{pv} (cm/s)から予測される応答変位 (cm)の倍率を示している。例えば東京地域の場合には周期6~8秒で R_{pv} の1.2倍の変位量が最大であることから、この予測変位量をエレベータの地震時管制に用いている。

長周期地震動の加速度応答スペクトルや速度応答スペクトルの距離減衰式は複数の研究機関で検討されているが^{9),10),11)}、それらの式と本手法を比較すると、地震動の入射角を考慮することにより予測地点の場所による補正係数が無いことが特徴として挙げられる。そのため、日本全国で適用が可能な形となっている。

Fig. 6は東京と大阪で、とくに長周期地震動が卓越した地震動に対して、本手法の長周期地震動の予測値と観測値を比較したものである。東京の記録は気象庁での観測記録¹²⁾を、大阪の記録は建物Bでの観測記録を整理したものである。なお建物Aは東京都大手町の気象庁の近傍にあり、長周期地震動成分での差異は小さいことを確認している。図中の点は震央位置を示し、予測値を観測値で割った値で色分けしている。東京の記録の分析では、北西を震源とする(新潟県方面)地震の場合には観測と予測はほぼ同レベルである。一方、岩手県沖~茨城県沖を震源とする地震では予測値が大きめの評価となっているが、これは深部地盤構造の観点より長周期地震動の増幅が小さいと言われていることと整合的である。建物で観測された記録の分析をもとに、震源位置による補正係数などを導入すれば、長周期地震動予測精度を向上させた運用も可能と言える。なお、Fig. 6の作成にはGMT¹³⁾を使用した。

気象庁が平成29年度から導入予定である長周期地震動予報⁶⁾では防災科学技術研究所が検討中の絶対速度応答値 Sva の距離減衰式¹¹⁾が用いられることになっており、 Sva の大きさにより長周期地震動階級を設定される。そこで観測された地震記録から R_{pv} の値と Sva の値を計算して比較したものをFig. 7に示す。両者の相関は高いことから、 R_{pv} の予測値でも長周期地震動予報相当を評価できると考えられる。

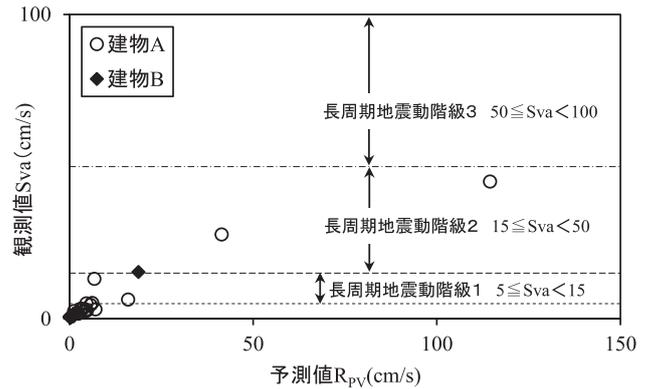


Fig. 7 長周期地震動の階級と擬似速度応答の予測値の関係
Relationship between the class of long-period ground motion and predicted value of the pseudo-velocity response (R_{pv})

4.3 地震後の健全度推定支援システム Structural Health Estimation System for Earthquakes

東日本大震災では、首都圏において鉄道の運行停止とともに、大規模な渋滞が発生しバスやタクシーなどにも支障が生じたため、約515万人(内閣府推計)に及ぶ帰宅困難者が発生した。大量の帰宅困難者が一斉に帰ろうとして道路や歩道が多くの人で埋まり、警察・消防・自衛隊の緊急車両が速やかに現場に到着できず、救助・救命活動に支障をきたした。Table 1は想定される大地震における帰宅困難者数の事例であるが、東日本大震災クラスの帰宅困難者数が想定されている。

Table 1 帰宅困難者数の事例
Stranded commuters number of cases

地震	エリア	帰宅困難者数(万人)
東日本大震災(内閣府推計)	東京都市圏	約515
南海トラフ(内閣府想定)	中京都市圏	約100~110
	京阪神都市圏	約220~270
首都直下(東京都想定)	東京都市圏	約517

そこで、平成24年に都市再生特別措置法の改正が、また平成25年には東京都帰宅困難者対策条例が制定され、来るべき都市を襲う大地震に備えた官民の連携によるハードとソフトの両面にわたる都市の安全確保策が提唱されている。これらの法整備の中で例示された対策として、建築物内残留が可能な仕組みづくり(むやみな退避行動の抑止)が挙げられている。都市再生安全確保計画の作成の手引き(平成24年3月)では建築物健全度判定システムの設置が提案されており、在館者が建築物に残留する(または

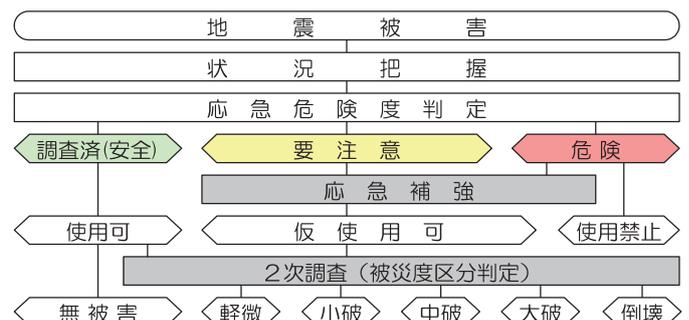


Fig. 8 震災後の一般建築物の復旧のための調査フロー
Survey flow for the restoration of the general building after the earthquake

退避する)判断ができるよう、建築物所有者(管理者)は、建築物に建築物健全度判定システムを整備するとともに、在館者に周知できる設備を整備することと解説されている。首都直下地震帰宅困難者等対策協議会(平成24年9月)の最終報告では、地震後の一斉帰宅抑制対策として、企業が建物の耐震性や周辺の被害状況を勘案し、施設に留まれるか、留まれないかを「地震後3時間後」までに判断することが提案されている。

Fig. 8は一般建築物の震災復旧のための調査に関するフローを整理したものである。地震後の建物の使用継続の判断では、まず被災後の人命に係わる二次的災害を防止することを目的とした応急危険度判定が行われる。そこで要注意または危険と判定された建物に対して被災度区分判定が行われ、恒久的な使用継続の可否や復旧の要否が判定される。応急危険度判定は、基本的に自治体から派遣される応急危険度判定士による無償の判定であり、被災度区分判定は、原則として建物の所有者の依頼により構造技術者が有償で実施する。

Fig. 9は東日本大震災における応急危険度判定の判定件数の推移を文献(14)から引用したものである。発災当日は200件程度実施され、2日目には判定件数は倍増するものの、ピークは7日後に実施されていることが報告されている。大地震発災の当日に応急危険度判定が実施される建物は非常に少ないことが予想されるため、一斉帰宅抑制対策の目標時間である「地震後3時間後」に応急危険度判定を期待することは難しい。

首都圏を中心に数多く存在する超高層建物群は都市社会の中核機能を担っており、大地震による超高層建物での対応は都市社会全体に甚大な影響を与えると予想される。震度5弱以上の揺れを受ける大地震時には、超高層建物のエレベータは地震時管制が作動し運行は停止され、高層階の利用者は建物からの避難困難者になる可能性が高い。在館者への適切な情報提供を行うためにも、情報支援システムは必要であろう。また、日本建築防災協会「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」では、高層・超高層建物は被災度区分判定よりも詳細な検討が必要とのことで対象外とされている。そのため、超高層建物の管理者が施設の健全度を推定し、応急危険度判定レベルの判断を行う情報支援システムが求められている。

そこで超高層建物の地震時の情報支援システムとして、Fig. 10に地震後の超高層建物の健全度推定支援システムのフローを示す。建物には複数の地震計(最下階、中間階、上層階)を設置し、その観測記録を用いて地震後の健全度の推定を行う。高層建物では地震応答解析により設計値を検証しているため、それをベースに推定を行う。イメージをFig. 11

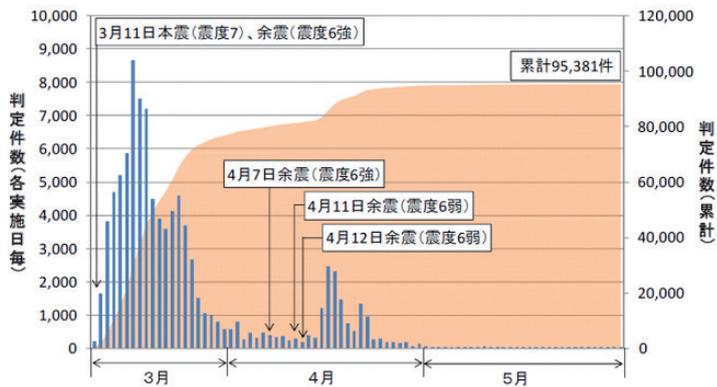


Fig. 9 東日本大震災時の応急危険度判定の推移(文献14)より引用
Changes in emergency risk assessment number at the time of the Great East Japan Earthquake

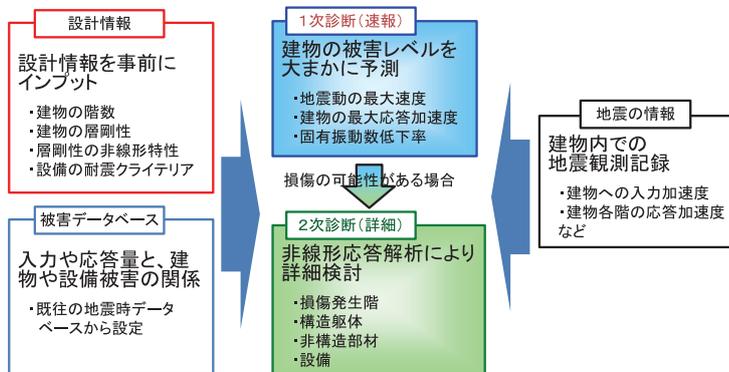


Fig. 10 地震後の超高層建物の健全度推定支援システムのフロー
Flow of structural health estimation system of high-rise buildings after earthquake

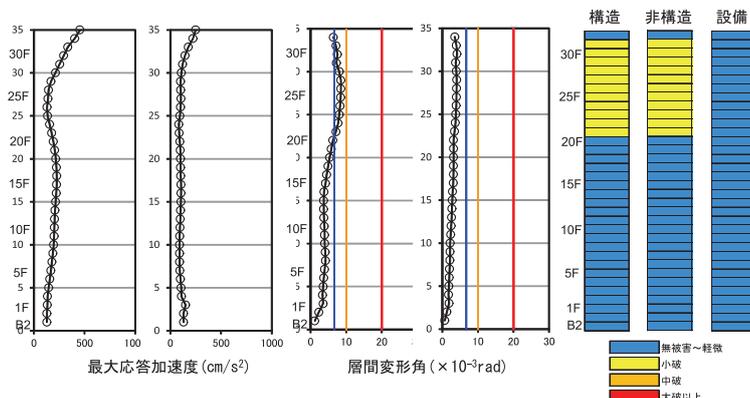


Fig. 11 健全度推定支援システムの画面の事例
Output case of structural health estimation system

に示す。地震応答解析による設計時の検証では建物の損傷レベルを陽に評価することはない。そこで4.1節で紹介した建物損傷度評価技術を応用し、構造躯体の被害に加えて非構造部材や建築設備の被害を、応答解析結果に対する損傷度関数を設定して推測している¹⁵⁾。建物の在館可否の判断は、原則として目視確認の結果によるが、本システムでの推定値をベースに施設内の安全確認を効率的に行うことで、「地震後3時間後」までの判断をサポートできると考えられる。建物の施設管理では建築設備に関するチェックリストを整備していることは多い。そこで健全度推定支援システムを効率的に運用するために、健全度推定支援システムを介して構造設計者と施設管理者が情報を交換し、事前に構造躯体や仕上げなど非構造部材に関するチェックリストを整備する等が求められる。

参考文献

- 1) 日本建築学会構造委員長周期建物地震対応小委員会：長周期地震動対策に関する公開研究集会，2012年3月
- 2) ロングライフビル推進協会，日本ビルディング協会連合会：不動産投資・取引におけるエンジニアリング・レポート作成に係るガイドライン（2011年版），2011年9月
- 3) 国土交通省：「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に関するご意見募集について，平成22年12月
- 4) 恒川裕史，大淵正博，糸井達哉，高田毅士：長周期地震動を考慮したPML評価手法の開発，日本建築学会技術報告集，第21巻，第47号，pp.61-66，2015年2月
- 5) 清野純史，藤江恵悟，太田裕：組合せ震度の提案・定式化とその応用について，土木学会論文集，No.612/I-46，pp.143-151，1999年1月
- 6) 気象庁：緊急地震速報評価・改善検討会（第6回）の概要について，平成27年3月
- 7) 恒川裕史，芝崎良美：緊急地震速報システムと東日本大震災での作動事例，竹中技術研究報告，No.67，2011年
- 8) 吉澤睦博，恒川裕史，小林喜久二：長周期地震動予測を考慮した緊急地震速報システム，日本建築学会 学術講演梗概集 B-2，pp.189-190，2009年
- 9) 佐藤智美，大川出，西川孝夫，佐藤俊明：長周期地震動の経験式の改良と2011年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，日本地震工学会論文集，第12巻，第4号（特集号），2012年
- 10) Nobuyuki Morikawa and Hiroyuki Fujiwara: A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake, Journal of Disaster Research, Vol.8, No.5, 2013
- 11) 気象庁 長周期地震動に関する情報検討会：第7回検討会（平成26年11月11日）資料3，2014年
- 12) 気象庁：強震波形データ 2003年～2013年，平成27年1月改訂
- 13) Wessel, P. and W. H. F. Smith: New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Transactions American Geophysical Union, Vol.79 (47), p.579, 1998
- 14) 日本建築防災協会：被災建築物 応急危険度判定 OQ通信，第15号，平成25年2月
- 15) 恒川裕史，藤村勝：BCP地震応答解析システム TRAIN-BCPの開発，竹中技術研究報告，No.66，2010年

5 おわりに Conclusion

山本 雅史 Masashi Yamamoto*1

特集として長周期地震動に関する研究開発の状況を紹介した。長周期地震動は震源から遠くまで影響を及ぼし、長周期の構造物、さらにその構造物の中にある長周期の設置物に大きな揺れを生じる。また、この揺れは長時間続くという特徴がある。来たるべき大地震の際にはまず間違いなく、この長周期地震動が観測されるであろう。長周期地震動を正しく理解し、その対策を今から打っておく必要がある。長周期地震動は超高層建物や免震建物に影響を与える。特に超高層建物は免震建物に対して減衰が小さいため影響が大きい。既存の建物については本報告で述べたように制振補強を行う例がある。今後、このような事例は増えていくものと思われる。

国も長周期地震動に対する取り組みを積極的に行っており、国土交通省では基準整備促進事業で超高層建物や免震建物への影響を検討してきた。本稿入稿時にはまだ詳細は明らかでないが、これらの検討結果が建築基準法に反映される予定である。国土強靱化に向けて官民一致して取り組んでいく必要がある。

本特集で紹介した技術は新築だけでなく既存の建物にも適用できるものがある。また、多くは長周期地震動に限らず、地震全般に有効な技術である。ただし、現時点での研究開発はまだ十分とは言えず多くの課題が残されている。研究開発は一朝一夕に進むものではないが、危機感を持ち、継続して高度な予測技術、有効な対策技術を研究開発していく。

*1 技術研究所 地震工学部長 博士(工学) General Manager, Research & Development Institute, Dr. Eng.