

南海トラフ沿いの巨大地震による
長周期地震動に関する報告

平成27年12月

南海トラフの巨大地震モデル検討会
首都直下地震モデル検討会

はじめに	1
1. 長周期地震動とは	3
2. 長周期地震動の検討対象とする地震	5
2-1. 過去地震	5
2-2. 最大クラスの地震	5
3. 長周期地震断層モデル	6
3-1. 東北地方太平洋沖地震等から得られた知見	6
3-2. 南海トラフ沿いの長周期地震断層モデル	8
4. 長周期地震動による地表の揺れの推計手法	9
4-1. 対象とする地震動の周期	9
4-2. 地盤構造モデル	9
(1) 浅い地盤構造モデル	9
(2) 深い地盤構造モデル	10
4-3. 三次元差分法による長周期地震動の計算	11
(1) 統計的グリーン関数法と三次元差分法	11
(2) 長周期地震断層モデルの破壊伝播の揺らぎの導入	12
(3) 長周期地震動の推計結果と観測記録との比較	12
(4) 破壊開始点、強震動生成域の位置の違いの影響	13
5. 長周期地震動による地表の揺れの推計結果	14
6. 超高層建築物への影響	15
6-1. 構造躯体への影響	15
(1) 擬似速度応答スペクトルの推計結果	16
(2) 超高層建築物の耐震性能に関する実証的研究	17
(3) 構造躯体への影響の評価	18
6-2. 室内への影響	19
(1) 各階における揺れの推計手法（モード合成法）	19
(2) 各階における揺れの最大値の推計手法（SRSS法）	19
(3) モード合成法とSRSS法の妥当性の評価	20
(4) 最上階における揺れの推計結果	21
(5) 室内への影響の評価	22
7. 長周期地震動への対策	24
7-1. 超高層建築物の構造躯体の対策	24
7-2. 超高層建築物の室内等の対策	24
(1) 家具類等の固定の推進	25
(2) 身の安全確保	25
(3) エレベーター対策	25

(4) 非構造部材等の対策	26
(5) 災害対応力の向上対策	26
7-3. 石油タンクの対策	29
8. 留意事項と今後の課題	29
8-1. 推計結果を利用する際の留意事項	29
8-2. 今後の課題	30
(1) 長周期地震動の推計手法の高度化	30
(2) 地盤構造モデルの高度化	31
(3) 建築物の挙動・影響の評価機能の充実	31
おわりに	31
(参考) 本両検討会における用語の取り扱い	33
参考文献	36
(参考) 委員名簿	38

はじめに

「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告」（中央防災会議，2011）においては、今世紀前半にも発生する可能性が高いとされている南海トラフ沿いの巨大地震対策として、過去に発生した地震・津波のみでなく、最大クラスの地震・津波についても検討する必要があると指摘している。また、首都直下地震対策では、それまで検討対象とされていなかった相模トラフ沿いの巨大地震、いわゆる関東大震災クラスの地震についても検討すべきであると指摘している。

このため、南海トラフ沿いの巨大地震対策の検討にあたっては「南海トラフの巨大地震モデル検討会」を、首都直下地震対策の検討にあたっては「首都直下地震モデル検討会」を設置し、必要となる地震・津波の震源断層モデル及び、それらに対応する地震動・津波高等の検討を行い、「強震断層モデルと震度分布」及び「津波断層モデルと津波高等」を既に報告書として取り纏め公表した。

この報告書で取り纏めた強震断層モデルによる震度分布は、木造家屋等の被害推定に利用される指標で、統計的グリーン関数法により得られた周期 2～3 秒よりも周期の短い強震波形を用いて推定したものである。

しかし、高さ 60m を超えるような超高層建築物の固有周期は、高さ 100m で 2 秒程度、高さ 300m では 5～6 秒程度となる。また、大型の石油タンクは、タンク内の石油量により異なるが、概ね 4～10 秒程度の固有周期を持つ。このことから、超高層建築物や大型の石油タンク等に被害をもたらす恐れのある 2～10 秒程度のやや長周期の地震動（以下、「長周期地震動」と言う。）については、長周期地震動を推定するための震源断層モデル（以下、「長周期地震断層モデル」と言う。）を含め、別途検討する必要がある、引き続きの検討課題としてきた。

長周期地震動の推計については、「南海トラフの巨大地震モデル検討会」及び「首都直下地震モデル検討会」の両検討会に共通する課題であることから、両検討会（以下、両検討会を合わせて、「本両検討会」と言う。）で共同して検討することとした。本両検討会では、東北地方太平洋沖地震の震源断層モデル等の最近の科学的知見を基に、南海トラフ沿い及び相模トラフ沿いの長周期地震断層モデルや長周期地震動による影響の評価等について、これまで 31 回にわたり検討を重ねてきた。

この検討の結果、南海トラフ沿いで発生する地震等、震源断層域からある程

度以上離れた場所にある長周期地震動については、概ね妥当な長周期地震断層モデルを設定できることが確認された。

これに対し、大正関東地震において震源断層の直上となる神奈川県南部など、相模トラフ沿いの巨大地震における長周期地震動については、その揺れが極めて大きくかつ大きな地殻変動も伴うことから、震源断層の極近傍における長周期地震動を表現するための長周期地震断層モデルの検討と、強い地震動による地盤の塑性化を考慮した地震伝播の計算手法の検討を併せて行う必要がある。

しかしながら、今回の検討では、これら震源断層の極近傍における長周期地震動の推計手法を取り纏めるには至らなかった。この課題については、震源断層に係る理論的な研究や本年4月に発生したネパールの地震等における震源断層の極近傍における観測記録なども参考として、科学的な観点から引き続き早急に検討することが重要となる。

以上のことから、今回、本両検討会として、相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動については引き続きの課題とし、南海トラフ沿いで想定される巨大地震による長周期地震動の検討結果を「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告」として取り纏めることとした。

本検討では、超高層建築物や石油タンク等に及ぼす影響を検討する必要性が高い三大都市圏を中心に、長周期地震断層モデルの設定とこのモデルを用いた長周期地震動の推計を実施した。

また、長周期地震動については、超高層建築物等への影響に関する社会的な関心が極めて高いことから、超高層建築物の構造躯体への影響及び、一般家庭内の家具や事務所内のオフィス家具並びに家電製品等（以下、「家具類等」と言う。）の転倒や移動、人の行動に与える影響に関する注意喚起等を行うため、建築分野の専門家にも参加頂き検討した。

ただし、長周期地震動による超高層建築物等への影響は、個々の建築物の構造特性により大きく異なる。このため、超高層建築物や石油タンク等における具体的な長周期地震動対策については、本報告を参考にして、今後、関係省庁等において、詳細な検討が進められることを期待する。

本報告が南海トラフ沿いの巨大地震の事前の備えの一つとして、今後の長周期地震動対策の充実、強化の契機となることを期待するものである。また、相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動については、引き続きの検討

課題として、早急に検討することが重要である。

なお、今回検討した長周期地震動評価のための長周期地震断層モデルは、あくまでも長周期地震動を検討するために作成した断層モデルであり、震度分布や津波高等を推定に用いる断層モデルとは異なるものである。

1. 長周期地震動とは

地震が起きると様々な周期を持つ揺れ(地震動)が発生する。ここでいう「周期」とは、揺れが1往復するのにかかる時間のことである。南海トラフ沿いの巨大地震のような規模の大きな地震が発生すると、木造家屋に被害を及ぼす短周期の地震動だけでなく、数秒から100秒を超えるような長い周期の地震動も生じる。先に述べたとおり、本報告では、これら周期の長い地震動のうち、超高層建築物や大型の石油タンク等に影響する2~10秒程度のやや長周期の地震動を「長周期地震動」と呼んでいる。

長周期地震動は、マグニチュードが大きくなると振幅が急激に増大する特徴がある。また、長周期地震動の主成分である表面波は、震源が浅いほど卓越する。このため、おおよそマグニチュード7以上の規模で、海溝型地震や内陸の活断層で起きる地震のように震源が浅い地震では、長周期地震動による被害の発生が懸念される。また、長周期地震動は、周期の短い波に比べて減衰しにくく遠くまで伝わり、厚い堆積層がある大規模平野では、長周期地震動による揺れが大きくなる。長周期地震動の主な特徴を図1に示す。

一方、建物には固有の揺れやすい周期(固有周期)があり、図2に示すとおり、超高層建築物の固有周期は、建物の高さが高くなるにつれて長くなる。この関係を用いて、個々の超高層建築物の高さからその建築物の大まかな固有周期を把握することができる。例えば、高さ100m程度の建物で固有周期が2秒程度、日本で最も高いビルの高さ300m程度になるとその固有周期は5~6秒程度である。

建物の固有周期が地震動の卓越周期と近い場合には建物は揺れやすく、地震動に揺すられ続けることで建物の揺れは次第に大きくなる。これを共振という。長周期地震動は、短周期の地震動に比べて揺れの継続時間が長いため、振幅が小さくても、建築物の固有周期に近い卓越周期の長周期地震動が入力すると、その建築物は共振によって大きく揺れることとなる。なお、超高層建

建築物の揺れは、低層階よりも高層階が大きくなる。

近年、大規模平野に立地する首都圏や中部圏、近畿圏などの地域では、近代的な超高層建築物が多く建てられている。これら近代的な超高層建築物は、未だ南海トラフ沿いの巨大地震に見舞われていないが、1944年昭和東南海地震では四日市市の高さ185mの煙突が倒壊した事例もあり、想定される南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動の揺れによる影響が懸念されている。

長周期地震動による被害は、以前から知られている。1964年新潟地震(M7.5)は、液状化による建物倒壊の被害が社会的にも注目された地震であるが、石油タンク内の石油が共振して溢れ、火災被害が発生しており、長周期地震動による被害に関心が持たれた地震でもあった。1983年日本海中部地震(M7.7)や1984年長野県西部地震(M6.8)では、震源から遠く離れた新宿の超高層建築物において、長周期地震動によると考えられるエレベーターの管制ケーブルの破断事故が発生している(木下・大竹, 2000)。

最近では、2003年十勝沖地震(M8.0)において、震源から約250km離れた苫小牧で発生した石油タンク火災が記憶に新しい。この被害は、長周期地震動とタンク内の石油が共振し、液面が大きく揺動(スロッシング)した結果、タンクから石油が溢れる等により発生したものである。なお、石油で満たされた石油タンクの固有周期(スロッシング固有周期)は、タンク内の石油量により異なるが、4~10秒程度のものがほとんどである。2004年新潟県中越地震(M6.8)では、東京は震度3程度の揺れであったが、長周期地震動によるエレベーターロープの揺れによると考えられる引掛りの被害が報告されている(エレベーター協会, 2009)。

2011年東北地方太平洋沖地震(M9.0)では、地震の規模が大きいことから、広範囲で震度5弱以上の揺れとなり、エレベーターの停止や閉じ込め、家具の転倒などの被害が発生した。さらに、この地震は、日本海溝沿いのやや深い場所で発生した地震であったことや、その周辺の地下構造の特色により、地震規模に比べて長周期地震動を強く励起した地震ではなかったが、首都圏の超高層建築物の滞在者が「船に乗っているような揺れが長く続きとても怖かった」と感じる等、長周期地震動による特徴的な建物の揺れが報告されている(気象庁, 2011)。また、震源から遠く離れた大阪でも、長周期地震動による特徴的な揺れが報告されており、長周期地震動が社会的に注目された。

今回検討対象とした南海トラフ沿いの巨大地震は、地震規模がM8~9クラ

スと大きく、東北地方太平洋沖地震が発生した日本海溝沿いの地震に比べて震源域が浅い上に陸地に近いため、長周期地震動が強く発生する可能性が高い。このため、高層ビルや石油タンク等が多く立地している三大都市圏の平野部では、長周期地震動による被害が懸念されている。

2. 長周期地震動の検討対象とする地震

2-1. 過去地震

図3に示すとおり、過去1000年程度の間には南海トラフ沿いで発生した地震の履歴を見ると、M8~9クラスの巨大地震が約100~150年の間隔で発生している。

中央防災会議(2003)による南海トラフ沿いの地震・津波対策で検討対象とした過去地震は、歴史資料等がある程度整っている地震としてきた。本検討においても、実際に発生した過去地震に対する検討を具体的に進める観点から、中央防災会議(2003)と同じく、過去地震については、1707年宝永地震(M8.6)、1854年安政東海地震(M8.4)、1854年安政南海地震(M8.4)、1944年昭和東南海地震(M7.9)、1946年昭和南海地震(M8.0)の5地震を今回長周期地震動を検討する対象とした。

なお、地震調査研究推進本部(2015)によると、南海トラフ沿いでM8~9クラスの地震が発生する確率は、今後30年以内に70パーセント程度としている。

2-2. 最大クラスの地震

「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告」(中央防災会議, 2011)では、今後想定する地震・津波の考え方として、「あらゆる可能性を考慮した最大クラスの巨大な地震・津波を検討すべきである」と指摘している。この趣旨を踏まえ、本検討では、南海トラフ沿いにおける過去地震に加え、最大クラスの地震についても検討対象として長周期地震動の推計を行うこととした。

南海トラフ沿いの最大クラスの地震における長周期地震断層モデルは、最大クラスの地震に相当するM9クラスの東北地方太平洋沖地震の震源過程解析から得られた科学的知見を基に、後述するとおり、検討対象とした5つの過

去地震で強震動を生成した領域を包絡する形で設定した。

「南海トラフの巨大地震モデル検討会(第二次報告)」(内閣府, 2012)では、最大クラスの地震の発生頻度は、領域の津波堆積物調査による津波の発生履歴からみると、千年に一度あるいはそれよりもっと低いと整理されたものである。今回、長周期地震動の発生を検討する最大クラスの地震の発生頻度については、津波堆積物等の資料が十分でなく、直接的な評価はできないが、一般的には、地震規模が大きいほど頻度が低くなるため、検討対象とした 5 つの過去地震に比べて発生頻度は更に低いと考えられる。

なお、日本海溝沿いの巨大地震について見ると、地震調査研究推進本部(2011)は、869年の貞観地震や15世紀頃にも東北地方太平洋沖地震と同程度の規模の地震が発生したと考えられることから、東北地方太平洋沖地震と同程度の規模の地震の発生間隔を約600年程度としている。

建造物の耐震対策における検討で対象とする地震は、一般的に、その使用期間や使用目的等を踏まえて検討される。この際、最大クラスの地震による長周期地震動を対象とすることは、それぞれの建造物の建築主及び設計者の判断に委ねられている。本検討における最大クラスの地震による長周期地震動の推計結果については、建造物の使用期間や使用目的等を踏まえて参考とされたい。

3. 長周期地震断層モデル

3-1. 東北地方太平洋沖地震等から得られた知見

複雑な断層の破壊過程によって生じる強震動や津波、長周期地震動を统一的に表現する震源断層モデルを構築することは困難である。このため、本検討では、これまでに構築した南海トラフ沿いの巨大地震における「強震断層モデル」、「津波断層モデル」とは別に、長周期地震動を推計するために用いる「長周期地震断層モデル」を構築した。長周期地震断層モデルの検討にあたっては、最大クラスの地震に相当する東北地方太平洋沖地震など、過去地震における断層の破壊過程に関する解析結果を収集・整理し、その特徴等を以下のとおり整理した。

- ① 東北地方太平洋沖地震の津波断層モデルでは、海溝に近い側に大きな津

波を発生させた断層すべり量の大きな領域（大すべり域及び超大すべり域）が存在する。また、広範囲で観測される周期 20 秒から数百秒以上の地震動は、概ね大すべり域、超大すべり域に対応する領域から発生している。「南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高等について（第一次報告）」（内閣府，2012）で整理した既往研究における東北地方太平洋沖地震の断層すべり量分布の解析結果を図 4 に示す。

- ② 一方、日本国内で観測された強震動地震波形を用いた解析により、周期 10 秒程度或いはそれより短い周期の地震動は、津波断層モデルの大すべり域、超大すべり域よりも陸域側の領域で発生すると考えられる。このような強震動を発生する領域は、強震動生成域（SMGA：Strong Motion Generation Areas）と呼ばれている。断層運動により地震動と津波を生成する領域である強震動生成域及び大すべり域・超大すべり域の模式図を図 5 に示す。
- ③ 川辺・他（2012）、Kurahashi&Irikura（2013）等による東北地方太平洋沖地震の解析では、周期 2～10 秒程度までの長周期地震動は、大すべり域や超大すべり域等を含む震源断層全体を表現する断層モデルではなく、強震動生成域のみから長周期地震動が生成されるとする断層モデルにより観測記録を再現できることを示した（図 6）。
- ④ なお、周期の長い地震動ほど断層の変位が大きな領域からも発生していると考えられることから、本検討において、10 秒程度までの長周期地震動が、超大すべり域から発生しているか否かを確認した。その結果、図 7 に示すとおり、超大すべり域を含む津波断層モデルでは、周期 10 秒の長周期地震動の推計が広範囲にわたり過大評価になった。さらに、超大すべり域を除外した津波断層モデルでも、震源域から離れたところの再現性は改善するが近い場所では過小評価となる。このため、本検討における周期 10 秒程度までの長周期地震動の断層モデルは、超大すべり域を含むことは適切でなく、強震動生成域のみを用いた断層モデルにより推計することが妥当であることが確認された。
- ⑤ 東北地方太平洋沖地震の強震動生成域の解析結果は、図 8 に示すとおり、過去に同じ領域で発生した M7～8 クラスの地震の強い強震動を発生させる領域（過去の検討で「アスペリティ」と整理した領域）の解析結果と、

概ね近い領域にある。このことから、南海トラフ沿いにおける最大クラスの地震による長周期地震動の検討においても、検討対象とした過去地震の強震動生成域を基に検討することが適切と考えられる。

- ⑥ 地震の規模を表す地震モーメントと断層面積の間には、図 9 に示すとおり相似則（スケーリング則）が成立することが知られている（例えば室谷・他（2012））。一方、東北地方太平洋沖地震の解析結果を整理すると、図 10 に示すとおり、強震動生成域毎の地震モーメントと面積の間にも同様のスケーリング則が成立している（横田・他, 2012）。このことから、長周期地震断層モデルの各強震動生成域の地震モーメントは、このスケーリング則を用いて設定こととする。
- ⑦ 地震断層に蓄えられた応力は、地震の発生によって解放される。この蓄えられた応力の解放量を「応力降下量」という。東北地方太平洋沖地震による 2～10 秒程度の長周期地震動の既往研究による解析（表 1 及び図 11）によれば、強震動生成域の応力降下量は、その面積等の大小によらず、多少のバラつきはあるものの概ね 15～30MPa の範囲にある。
- ⑧ 強震動生成域の応力降下量の解析結果を踏まえ、南海トラフ沿いの過去地震の再現に用いる強震動生成域の応力降下量については、15～30MPa の範囲に設定して検討することが適切と考える。また、最大クラスの長周期地震断層モデルに用いる強震動生成域の応力降下量においても、最大でも 30MPa とすることが適切と考えられる。

3-2. 南海トラフ沿いの長周期地震断層モデル

本検討では、先に述べた震源断層モデルの特徴等を踏まえ、南海トラフ沿いの地震による長周期地震動を推計する長周期地震断層モデルを構築した。

周期 10 秒までの長周期地震動については、強震動生成域のみのモデルで表現できることから、今回検討する長周期地震断層モデルは、震源断層域全体ではなく、強震動生成域のみのモデルを用いることとした。

過去地震の長周期地震断層モデルとして設定する強震動生成域は、統計的グリーン関数法で震度分布を再現する強震動生成域と同じとした。また、応力降下量についても、震度分布を再現した際と同様に、全ての強震動生成域で 30MPa とした。なお、南海トラフ沿いの過去地震について、それぞれの震度分布を再現する強震断層モデル及び津波を再現する津波断層モデルを、別冊①

「南海トラフ沿いの過去地震の強震断層モデル及び津波断層モデル」に取り纏めた。

さらに、最大クラスに相当する東北地方太平洋沖地震の強震動生成域が過去に同じ領域で発生した地震の強震動生成域と概ね一致した場所にあることを踏まえ、南海トラフ沿いの最大クラスの地震による長周期地震動を推計するための長周期地震断層モデルに用いる強震動生成域は、検討対象とした5つの過去地震の強震動生成域を全て包絡するように設定した。なお、5つの過去地震の強震動生成域は、同様の位置にあっても面積が異なる場合がある。この場合、最大クラスの長周期地震断層モデルにおける強震動生成域は、面積が最大のもので採用した。また、応力降下量は、最大クラスに相当する東北地方太平洋沖地震の解析結果から 30MPa とした。

本検討で構築した長周期地震断層モデルの強震動生成域を図 1 2 に、断層パラメータを表 2 に示す。

4. 長周期地震動による地表の揺れの推計手法

4-1. 対象とする地震動の周期

本両検討会においては、既に短周期の地震動を推計する手法である統計的グリーン関数法を用いて概ね周期 2~3 秒以下の短周期の地震動を推計し、南海トラフ沿いの地震による震度分布の検討を終えている。

先に述べたとおり、長周期地震動により被害が懸念される超高層建築物の固有周期は長いもので 6 秒程度、貯蔵されている石油を含む石油タンクのスロッシング固有周期は 4~10 秒程度のものがほとんどであることから、今回の長周期地震動の検討は、周期 2~10 秒程度の地震動を対象とする。

4-2. 地盤構造モデル

本検討では、長周期地震動の推計に用いる地盤構造モデルについて、最近の科学的知見を踏まえ、S 波速度が 350m/s~700m/s の工学的基盤を境として、浅い地盤構造と深い地盤構造を以下のとおり整理した。

(1) 浅い地盤構造モデル

短周期の地震動の強さを示す震度の推計では、工学的基盤から上の浅い地盤のモデル化を行い、深さ 30m までの S 波平均速度 (AVS30) から表層地盤による震度の増幅分を求め、これを工学的基盤における震度の推計結果に加える

ことで、地表での震度を推計した。

一方、浅い地盤における長周期地震動の震幅の増幅を調査するため、東北地方太平洋沖地震における KiK-net 地震計の観測記録から、浅い地盤に相当する深さ 105m 未満孔中地震計を抽出し、孔中と地表の地震観測記録を比較した。図 1 3 に結果を示すとおり、ほとんどの地点において、周期 2 秒以上の長周期地震動は震幅の増幅が小さいことが確認できた。

以上のことから、本検討における長周期地震動の推計に用いる地盤構造モデルは、浅い地盤構造を含まず、工学的基盤が地表を構成しているとした。

ただし、図 1 4 に示すとおり、沿岸部など柔らかい地盤の地域では、固い地盤の地域に比べ、わずかではあるが長周期地震動も増幅しやすい傾向にあることも確認している。本検討結果の活用にあたっては、このことに留意するとともに、東京湾沿岸部や濃尾平野の一部など堆積層が厚いところでは、塑性化により地盤の固有周期が長くなる可能性についても留意する必要がある。

(2) 深い地盤構造モデル

地震動の水平動と上下動の観測記録を比較すると、堅固な地盤では水平動と上下動が同程度であるのに対し、柔らかい地盤では水平動が上下動に比べて大きくなる。これは、深い地盤の固有周期に対応する周期の表面波が増幅する特性によるものと考えられる。

本両検討会における震度分布及び津波高等のこれまでの検討では、上記の考えを踏まえ、地震調査研究推進本部から公開されている「全国一次地下構造モデル（暫定版）」(2012)を基にして、水平動(H)と上下動(V)の周期ごとの振幅比(H/Vスペクトル)の観測値に合致するよう首都圏及び中部圏の地盤構造モデルを修正している。

本検討においても、これまでの修正方法を用いて、四国及び東海地域など図 1 5 に示す地域の観測データを点検し、深部地盤モデルの修正を行った。主な地点の H/V スペクトルによる地盤モデルの修正結果を図 1 6 に示す。図 1 7 には、観測記録の H/V スペクトルと地盤モデルから計算される H/V スペクトルそれぞれの卓越周期の相関図を地盤モデルの修正前と修正後について示す。修正後の地盤モデルは、概ね観測記録の卓越周期を説明することが分かる。また、地盤構造モデル修正前後の速度層上面深度分布を図 1 8 に、中央防災会議 2007 年モデルからの変更履歴を比較した断面図を図 1 9 に示す。

なお、地域毎に観測される地震波形の卓越周期は、地盤の一次固有周期と相関が高いことが中央防災会議のこれまでの検討で確認されている（例えば、中央防災会議（2006））。本検討で用いる地盤構造モデルから計算した地盤の一次固有周期は、図 20 に示すとおりであり、地域毎に卓越しやすい地震動の周期を把握することができる。

なお、短周期の地震動（震度）は浅い地盤構造による増幅が大きく、地域毎の増幅量については、震度の「ゆれやすさマップ」（図 21）として、「首都直下の M7 クラスの地震及び相模トラフ沿いの M8 クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書」（平成 25 年 12 月）で公表している。

図 20 と図 21 を比較することで、周期が長い地震動が卓越しやすい地域と震度が大きくなる地域が必ずしも一致しないことが分かる。

4-3. 三次元差分法による長周期地震動の計算

（1）統計的グリーン関数法と三次元差分法

本両検討会において震度の推計に用いた統計的グリーン関数法は、小地震による S 波の振幅特性及び経時特性が統計的に得られることを利用して、小断層毎に推計した地表の波を重ね合わせることで各地点の震度を求める手法である。この手法の詳細を別冊②「統計的グリーン関数法を用いた震度分布の推計手法」に示す。

一方で、本検討では、厚い堆積層などで増幅する表面波を含めた長周期地震動を推計するため、弾性体の運動方程式を逐次数値計算的に解くことで地震動を求める三次元差分法を用いることとした。統計的グリーン関数法と三次元差分法の推計手法の特徴を図 22 に示す。

三次元差分法においては、地盤構造モデルを格子の集合体のモデルに置き換え、各格子の粒子速度と応力を逐次計算する。この際、格子のサイズは、計算する地震動の波長と比べ十分に小さくする必要がある。なお、本検討で設定した格子サイズは、周期 2 秒の波長の 5 分の 1 よりも小さくなるよう設定することとし、最も格子サイズが小さな浅部で 140m である。

本検討で用いた手法の詳細については、別冊③「三次元差分法を用いた長周期地震動の推計手法」に示す。

三次元差分法を用いた長周期地震動の計算は、複雑な地盤構造や伝播過程

を反映した計算が可能となる一方で、メッシュ数を増やすと多くの計算資源が必要となる。また、本検討では、多数の地震を検討対象とすることや長周期地震動の影響範囲が広範囲に及ぶこと、断層の破壊過程の揺らぎ等を変えた多くのパターンの計算を行うことなど、膨大な計算資源を必要とした。このため、本検討における長周期地震動の計算には、文部科学省が政策的に重要かつ緊急な課題に対し割り当てる重点化促進枠により、世界トップレベルのスーパーコンピュータ「京」を利用して実施した。

(2) 長周期地震断層モデルの破壊伝播の揺らぎの導入

実際の地震における断層の破壊は、断層面の不均質性等により、一様に破壊するのではなく、破壊の伝播速度や破壊の大きさが場所により異なる複雑な破壊過程であると考えられる。

本検討では、この複雑な破壊過程を表現するため、乱数を用いて、断層の破壊伝播速度に揺らぎを与えた場合と、断層のすべり量に揺らぎを与えた場合について検討した。

結果、断層のすべり量に揺らぎを与える方式よりも破壊伝播速度に揺らぎを与える方式の方が効果的に複雑な破壊過程を表現できることが確認できた(図23及び図24)。このことから、今回の検討では、破壊伝播速度に揺らぎを与える方式を用いることとした。

なお、この揺らぎは、乱数による方式を用いているが、同じ分散を持つ乱数系列であっても、乱数系列により長周期地震動の推計結果が異なることも確認された。このため、乱数系列の差による影響を少なくするため、断層の破壊伝播速度に揺らぎを与えた60通りの推計を実施し、各地点における長周期地震動の推計値及び推計値のばらつきが、周期2~10秒のいずれの結果においても平均的な範囲に収まる5通りを妥当性が高いケースと判断して、この5通りの推計結果を平均化した値を長周期地震動の推計結果として採用することとした。

(3) 長周期地震動の推計結果と観測記録との比較

検討対象とした過去地震のうち、長周期地震動の計算結果と観測記録を比較できる地震は少ない。本検討では、比較的記録が残っている昭和東南海地震と大正関東地震(横田・他,1989)を対象として、長周期地震動の観測記録と

推計結果を時刻歴波形とスペクトルで比較し、三次元差分法による推計手法の妥当性を評価した。

昭和東南海地震の観測記録との比較（図 2 5）では、東京や横浜、千葉など震源断層域からある程度以上離れたところでの観測記録を概ね再現することができた。なお、昭和東南海地震の再現計算に用いた強震動生成域の応力降下量は 30MPa である。

また、大正関東地震の観測記録との比較（図 2 6）では、震源から少し離れた東京の観測データを概ね再現することができた。しかしながら、震源断層の極近傍における長周期地震動については、その評価手法に関する科学的知見の蓄積や観測記録が不足していることなどから、その妥当性を評価できなかった。このことから、相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動については、引き続きの検討課題とした。なお、大正関東地震の再現計算に用いた強震動生成域の応力降下量は 25MPa である。

（４）破壊開始点、強震動生成域の位置の違いの影響

過去の地震の観測波形との比較により、設定した長周期地震断層モデルと破壊伝播速度の揺らぎの妥当性に加え、破壊開始点や強震動生成域の設定についても、概ね妥当であることが確認できた。

しかし、断層の破壊開始点が異なると、長周期地震動の伝播の様子が異なる。また、強震動生成域の位置は、過去地震の震度分布を再現したものをを用いているが、今後の過去資料の一層の充実により、強震動生成域の位置も異なる可能性がある。

本検討では、これら破壊開始点や強震動生成域の位置が異なった場合の例についても試算した。長周期地震動の活用にあたっては、これらの試算結果にも留意する必要がある。

① 破壊開始点の違いの影響

紀伊半島沖にある強震動生成域から破壊が開始し、東西方向に破壊が伝播するケースと最も西側の強震動生成域から破壊が開始し、東側へ破壊が伝播するケースで長周期地震動を推計した結果、図 2 7 に示すとおり、破壊が一方向に伝播するケースの方が長周期地震動の推計値が大きくなる地点があることが分かった。

② 強震動生成域の位置の違いの影響

検討対象とした過去地震の震度分布を再現する強震動生成域の位置を基本ケースとして、強震動生成域を東側・西側・陸側・沖側へ約 10km 移動させた 4 つのケースについて、長周期地震動を推計し、強震動生成域の位置の揺らぎに対する推計結果への影響を評価した。

図 28 に結果を示すとおり、推計値の最大値が大きくなる地点がある場合や新たに推計値が大きな地域ができる場合があることが確認できる。

5. 長周期地震動による地表の揺れの推計結果

本検討では、南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際に想定される長周期地震動を概観するために、検討対象とした過去地震及び最大クラスの地震について、長周期地震動による地表の揺れを推計した。この際、先に述べたとおり、工学的基盤の揺れを地表の揺れと見なして推計している。また、破壊開始点は、震度分布を再現した際と同様に、紀伊半島沖に設定した。

本検討で推計した長周期地震動の波形及び最大速度、最大変位、継続時間の推計結果については、別冊④「長周期地震動の推計結果 ～長周期地震動による地表の揺れ～」に取り纏めた。

ここでは、検討対象とした過去地震のうち、マグニチュードが大きく影響範囲が広い宝永地震と安政東海地震及び最大クラスの地震による推計結果から、長周期地震動による影響が大きな地域を概観する。

まず、長周期地震動の計算波形を図 29 に示す。関東平野や濃尾平野、大阪平野などの大規模平野などで長周期地震動が励起されている様子が確認できる。また、長周期地震動の強さとして、最大速度の推計結果を図 30 に、最大変位の推計結果を図 31 に示す。最大速度及び最大変位のいずれにおいても、強震動生成域付近で震度と同様に大きくなる。さらに、強震動生成域から離れた場所でも宝永地震では中部圏及び近畿圏で、安政東海地震では首都圏及び中部圏でやや大きな値が推計されている。また、最大クラスの地震では、三大都市圏の全てでやや大きな値となっている。なお、比較のため、短周期の地震動の強さを示す指標である震度分布を図 32 に示す。

続いて、長周期地震動による揺れの継続時間に関する推計結果を図 33 に示す。いずれの地震においても、三大都市圏で揺れの継続時間が長く推計され

ている。これは、三大都市圏が立地する柔らかな地盤の堆積層では、長周期地震動が励起されやすく、継続時間が長くなりやすいためである。

以上の推計結果から、南海トラフ沿いの巨大地震が発生した場合には、三大都市圏において長周期地震動が卓越することが想定される。

また、気象庁では、周期 1.5 秒から 8 秒までの地震動を対象として、減衰率 5% の絶対速度応答スペクトルの最大値を基に「長周期地震動階級」を定めている。本検討における長周期地震動の推計結果をこの階級に適用すると、長周期地震動が卓越している三大都市圏に加え、震度が大きな地域でも長周期地震動階級が大きく推計されている。この結果については、別冊④に掲載している。

なお、本検討においては、強震動生成域のみから成る長周期地震断層モデルを用いて継続時間を推計しているが、実際の地震では強震動生成域を除く震源断層領域からも微弱ではあるが地震動が発生している。このため、実際の地震では、長周期地震動の継続時間がより長くなる可能性があることに留意が必要である。また、首都圏における長周期地震動の影響については、本検討で今後の検討課題とした相模トラフ沿いの巨大地震による影響についても考慮する必要がある。相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動の推計については、別途検討を行うこととしている。

6. 超高層建築物への影響

6-1. 構造躯体への影響

南海トラフ沿いの巨大地震が発生すると、地域の地盤構造に応じて、長周期地震動が発生し、震源から一定程度離れた地域においても、固有周期が長い超高層建築物や免震建築物が共振し、長い時間繰り返し大きく揺れる場合がある。

超高層建築物を設計するにあたっては、建設時期によりその内容に違いはあるものの、これまで一定の長周期成分を含む地震動に対して、建築物の各部分に生じる力及び変形を時々刻々と連続的に把握するなど、個別に詳細な検討が行われてきた。また、免震建築物については、超高層建築物と同様の検討を行うか、又は、別途定められた計算基準により耐震安全性を確保することが必要とされてきた。

具体的には、極めてまれに発生する地震動に対して、超高層建築物については、原則として、各階の層間変形角を 1/100 以内とすること、各階の層全体や柱やはり等の部材の塑性率を一定以下とすること、免震建築物については、上部構造の柱やはり等の部材に損傷が生じないこと、免震層の変形により擁壁に衝突しないことなど、建築物の倒壊・崩壊に対して、余裕のある設計が求められてきた。

建築物の構造躯体への影響の評価においては、「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（平成 12 年建告第 1461 号）」では減衰率 5%の加速度応答スペクトル（ S_a ）で振幅が定められた波形を構造設計に用いるとしているほか、工学の分野では、加速度応答スペクトルから換算する擬似速度応答スペクトル（ pS_v ）が地震動の大きさを評価する指標として用いられることが多い。また、建築物の層間変形角と速度応答スペクトルには、図 3 4 に示すとおり相関がある。

本検討では、1 質点系にモデル化した超高層建築物に今回推計した長周期地震動を地面の揺れとして入力させ、減衰率 5%で推計した加速度応答スペクトルから擬似速度応答スペクトルを算出した。さらに、この計算結果と超高層建築物の耐震性能に関する研究を参照することで、南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際に三大都市圏における超高層建築物の構造躯体への影響を概観した。

（1）擬似速度応答スペクトルの推計結果

宝永地震、安政東海地震及び最大クラスの地震による長周期地震動について、三大都市圏における減衰率 5%の擬似速度応答スペクトルの推計結果（周期 2、3、4、5、6 秒）を図 3 5～3 7 に示す。なお、三大都市圏の拡大図では、地盤構造モデルによる推計結果の局所的なばらつきを少なくするため、各格子の推計値として周辺にある格子（9×9 領域）の推計値を参照し、その中央値を推計値に採用する空間的なフィルター（メディアンフィルター）をかけることにより平滑化した結果を掲載している。

この推計結果を概観すると、三大都市圏では、いずれの地域でも平野部を中心とする広い範囲で概ね 150cm/s 以下となっているが、沿岸部や内陸部の一部に局所的に最大 250cm/s 程度の値が見られる。また、地盤の持つ固有周期の違いによって、増幅される長周期地震動の周期帯が異なることから、擬似速

度応答スペクトルの値の地域差も周期毎に異なっている。

検討対象とした地震毎に比較すると、首都圏に最も影響が大きな過去地震は安政東海地震である。一方、中部圏及び近畿圏に最も影響が大きな過去地震は宝永地震である。なお、最大クラスの地震では、首都圏で安政東海地震と同程度、中部圏及び近畿圏で宝永地震と同程度の値となっている。

なお、本検討で推計した擬似速度応答スペクトルについては、別冊⑤「長周期地震動の推計結果 ～擬似速度応答スペクトル～」に取り纏めた。

(2) 超高層建築物の耐震性能に関する実証的研究

長周期地震動に対する超高層建築物の損傷の評価については、まだ十分な科学的知見が蓄積されていない。本検討では、数少ない科学的知見として、これまでに実施された長周期地震動に対する既存の超高層建築物の耐震性能の確認を目的とする実証的研究である文部科学省の「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」における「鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化」(以下、「実証的研究」と言う。)を参照した。この研究から得られた主な知見は、以下のとおりである。なお、この実証的研究の詳細を参考1に示す。

○文部科学省「都市の脆弱性が引き起こす激甚災害の軽減化プロジェクト」 ～鉄骨造高層建物の崩壊余裕度の定量化～

この実証的研究では、1980年代から1990年代に建設された鉄骨造高層建物を念頭に、18階建てを想定した縮尺1/3の試験体を震動台に置いた震動実験を行っている。震動台の揺れを次第に大きくして、試験体の損傷がどのように進むかを調査した結果、参考1の参図5に示す層せん断力-層間変形角関係のとおり、擬似速度応答スペクトル180cm/sまでは、梁端に塑性化が見られるものの、履歴は安定していた。擬似速度応答スペクトルが180cm/sを越えた220、250cm/sでは、梁端の破断が確認されるが、層せん断力-層間変形角関係では、まだ耐力に明瞭な劣化は見られていない。更に入力地震動を大きくしていくと、擬似速度応答スペクトル300cm/sで、層せん断力-層間変形角関係に明瞭な劣化が始まり、300cm/sを越えると劣化がより進行することが確認された。このことから、擬似速度応答スペクトル300cm/sの時点では、建物は倒壊していないが、地震後に人が建物の中にい

ることは適切ではない状況に達したと判断されている。その後も、更に入力地震動を大きくした実験を行い、さらに擬似速度応答スペクトルの値を上げた実験を続け、最大値が 420cm/s となる揺れを 3 回被った時点で、梁端破断が広く進み、1 階の柱脚が破断して倒壊に至った。

この実証的研究で用いた高層建物のモデルは、溶接を含め、高い品質管理の下で建造されており、例えば古い時代の超高層建築物では、溶接棒や鋼材の品質にもばらつきがあり、変形能力が低い可能性がある。その他、実験時の梁の長期応力が縮小試験体のため小さくなっているなどの課題がある。したがって、この実験結果から一般的な超高層建築物の倒壊挙動を論ずることは適切ではないとの指摘もある。

小鹿・他（2015）は、この実証的研究を踏まえ、古い時代の超高層建築物に即した評価が可能となるよう、溶接性能や鋼材の品質等の性能を一部引き下げたシミュレーションを行った。その結果、実証的研究の条件から各種性能を低下させた場合、より小さな擬似応答スペクトル値でも地震後に人が建物の中にいることは適切ではない状況となる可能性を示唆していることに留意する必要がある。

（3）構造躯体への影響の評価

今回推計した過去地震及び最大クラスの地震における擬似速度応答スペクトルの値は、いずれの地震の場合も、実証的研究の結果から導き出された、地震後に人が建物の中にいることは適切ではない状況とされた値には至っていない。実証的実験では、地震後に人が建物の中にいることは適切ではない状況に到達した時点で直ちに建物が倒壊していないことから、実際の高層建物においても、倒壊・崩壊するまでには強度的に一定の余裕があるのではないかと推察される。

ただし、この評価については、品質管理がされた建造物による実験結果によるものであり、古い時代の超高層建築物を対象としたシミュレーションによると、より小さな擬似速度応答スペクトル値でも地震後に人が建物の中にいることは適切ではない状況となる可能性があるとの指摘されている。このことから、個別の超高層建築物の構造躯体への影響については、想定すべき長周期地震動を用いて、改めて構造安全性の検証を行い、その検証結果に応じて、改修等の措置を講じることが望ましい。

また、超高層建築物に限らず、免震建築物においても、倒壊・崩壊に対して、余裕のある設計が求められてきており、倒壊・崩壊に対して一定の余裕があると考えられるものの、建設された年代や使用されている免震装置等が異なる各種の免震建築物に対し、長周期地震動に十分な余裕を有しているかについて、現時点では判断できないものも存在することに留意が必要である。

6-2. 室内への影響

本検討では、長周期地震動の地表の揺れの推計結果から、超高層建築物の揺れの大きさを推計し、室内の影響を概観した。この際、超高層建築物の各階の揺れは、実際の建物の階層で観測された記録をもとにして推定した。

(1) 各階における揺れの推計手法（モード合成法）

超高層建築物の各階の揺れの推計手法として「モード合成法」を用いた。この手法は、建物を多質点系にモデル化し、さらに1質点系でモード展開することで、建築物の揺れ（建物応答）を1質点系の応答の線形和で求めるものである。

まず、建築物を多質点系にモデル化した模式図を図38に示す。続いて、ある階の応答波形に着目する。この波形は、図39に示すように、刺激関数を介して各モードの応答波形に分解することができる。刺激関数は、建物の揺れを各モードで分解した際における各モードにおける揺れの寄与を示す重みである。さらに、これら各モードの応答波形は、同じ固有周期の1自由度系の応答波形と置き換えることができる。このことから、地表の長周期地震動による1質点系の応答計算の重ね合わせによって、建物の各階における揺れの大きさを推計することができる。この手法は、モード合成法と呼ばれている。

このモード合成法を用いた超高層建築物の最上階における揺れの推計結果と観測記録との比較を、図40に示す。この図から、減衰率2%とすることにより観測記録を概ね再現できることが確認される。このことから、本検討で超高層建築物の最上階の揺れの推計に用いる減衰率は、2%とした。

なお、大宮・久田（2014）による刺激関数を用いて高層建築物の各階における揺れを推定する場合、上層階では概ね観測記録と一致した揺れとなるが、中層階では過小評価となる場合があることに留意が必要である（図41）。

(2) 各階における揺れの最大値の推計手法（SRSS法）

建物応答の最大値を推計する手法として、モード合成法による各 1 質点系の最大応答値（応答スペクトル）の自乗和平方を用いて評価する「応答スペクトル法」がある。この手法では、いくつか推計式が提案されており、本検討では、各次モードにおける刺激関数と最大応答値の自乗和平方根から応答の最大値を求める「自乗和平方根法（SRSS 法）」を用いた。

一般的な高層建築物の揺れの推定では、その建物の 3 次モードまでの揺れを考慮すれば十分とされていることから、本検討においても、1～3 次モードまでを用いた SRSS 法により超高層建築物の揺れを推定することとした。

また、今回の三次元差分法による長周期地震動の有効周期は 2～10 秒としていることから、高次モード（例えば、1 次固有周期が 3 秒の場合、2 次固有周期は 1 秒程度、3 次固有周期は 0.6 秒程度）の揺れが含まれていない。しかし、家具類等の転倒や移動、人の行動への影響を評価するにあたっては、短周期の地震動による応答を無視することができない。このため、周期が 2 秒以下となる 2 次、3 次モードの揺れは震度の再現を行った統計的グリーン関数法による応答値を用いることとした。なお、最大クラスの地震については、推計した長周期地震動との振幅の大きさに対する整合性を保つため、長周期地震断層モデルと同様の強震動生成域と応力降下量 30MPa として推計した強震動を用いて 2～3 次モードの応答値を求めた。

なお、推計に用いた刺激関数については、建物の構造や階数にあまり依存しないことが知られており、大宮・久田（2014）他は、刺激関数の近似式を求め、応答スペクトル法を用いて建物の応答を簡易的に推計している。今回の検討では、刺激関数に大宮・久田（2014）の値を用いた。

（3）モード合成法と SRSS 法の妥当性の評価

東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いて、モード合成法と SRSS 法を用いた超高層建築物の揺れの推計結果を比較して、本検討における推計手法の妥当性を評価した。

具体的には、東北地方太平洋沖地震における 6 棟の超高層建築物の最上階における観測波形について、地表の観測波形からモード合成法を用いて推計した応答波形を比較した。その結果を図 4 2 に示す。

さらに、最上階の揺れ（加速度・変位）の最大値について、観測値、モード合成法のみ推計値及びモード合成法と SRSS 法による推計値を比較した。こ

の結果を表 3 に、観測値と推計値の相関を図 4 3 に示すとおり、SRSS 法による推計の妥当性が確認できた。

(4) 最上階における揺れの推計結果

超高層建築物の揺れは、低層階よりも高層階の揺れが大きくなる。このため、本検討では、室内への影響が最も大きくなると考えられる最上階の揺れを推計した。この推計には、本検討における長周期地震動による地表の揺れの推計結果を入力波として、モード合成法及び SRSS 法を用いた。

超高層建築物の各階における揺れは、個々の建築物により異なるため、それぞれの構造モデルを用いて外力に対する応答を計算する必要があるが、ここでは平均的な減衰率や固有周期を持つ仮想的な建物の最上階の揺れを推計することとした。なお、最上階より下の階における揺れの大きさの程度については、モード合成法で求めた各階の揺れの大きさの関係を示した図 4 1 から把握することができる。

宝永地震、安政東海地震及び最大クラスの地震による長周期地震動に伴う超高層建築物の最上階の揺れについて、三大都市圏における最大加速度と最大変位の推計結果（周期 2、3、4、5、6 秒）を図 4 4～4 6 に示す。最大加速度は、家具類等の転倒や人の行動難度を評価する指標として、最大変位は、固定されていないキャスター付きの家具類等が室内を移動する距離や、室内にいる人が感じる揺れの大きさの指標として参考となる。なお、図中に示す数値は全て片振幅の大きさである。

最大加速度の推計結果を概観すると、三大都市圏の広い範囲で 250cm/s^2 以上が推計されている。特に、宝永地震では、中部圏及び近畿圏においては、沿岸部を中心とする地域で 500 cm/s^2 程度若しくはそれ以上の加速度が推計されている。安政東海地震では、首都圏でも 500 cm/s^2 程度の加速度が推計される地域がある。最大クラスの地震では、最大加速度が首都圏で安政東海地震と同程度、中部圏及び近畿圏で宝永地震と同程度となっている。

最大変位については、いずれの地震でも、三大都市圏の沿岸部を中心とする地域において、 $100\text{cm}\sim 200\text{cm}$ 程度が推計されている。さらに、超高層建築物の固有周期別にみると、中部圏及び近畿圏の一部地域において、固有周期 5～6 秒の建物で 300cm 以上の変位も推計されている。首都圏においては、固有周期が長い建物ほど変位は大きくなり、固有周期 5～6 秒の建物で 200cm 程度の

変位となっている。

なお、本検討で推計を行った長周期地震動による建物最上階の揺れ（最大加速度、最大変位）については、別冊⑥「長周期地震動の推計結果 ～超高層建築物における最上階の揺れ～」として取り纏めた。

（５）室内への影響の評価

①家具類等の転倒

家具類等の転倒については、背の高いものほど、揺れが小さくても転倒する可能性が高くなる。金子（2002）によれば、周期 2 秒程度以上の揺れに対しては、家具の転倒の有無は、加速度と相関があることから、今回の検討では、加速度の指標を用いて家具の転倒を評価した。

また、日本建築学会（2013）による加速度と家具の転倒に関する簡易評価式を用いて、家具の形状別に長周期地震動による家具の転倒可能性を整理すると図 4 7 のとおりとなる。これによれば、奥行 40cm の家具では、加速度応答が 200cm/s^2 以下であれば、高さ 180cm 程度までの家具は転倒の可能性が低い。一方で、加速度が 400cm/s^2 程度以上になると高さ 100cm 程度までの家具が、加速度が 800cm/s^2 以上になると高さ 50cm 程度までの家具が転倒の可能性が高くなる。

超高層建築物における最上階の揺れの推計結果と家具の転倒可能性に関する簡易評価式から、南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際の三大都市圏における影響を概観すると、背の高い家具類等については、広い範囲で転倒する可能性が高いと考えられる。また、一部地域では、背の低い家具類等であっても、転倒を引き起こす程度の揺れが発生することが想定される。

超高層建築物においては、図 4 1 に示すとおり、上層階ほど揺れが大きくなるが、中層階においても最上階の半分或いはそれ以上の揺れとなることから、家具転倒について注意する必要がある。なお、周期が長くなると、加速度が大きくなるとも家具類等が転倒する可能性が高まることに留意する必要がある。

②家具類等の移動

長周期地震動で超高層建築物が大きく揺れると、キャスター付きの滑りやすい家具類等は、建物の揺れの変位量と同程度もしくはそれ以上に移動

する可能性がある。本検討で推計した変位量は、揺れの振幅の最大値（片振幅）であり、例えば、揺れの変位が 2m 程度ある場合には、滑りやすい家具類等も 2m 程度、往復で 4m 程度若しくはそれ以上も移動することになり、極めて危険な凶器となる。また、移動した家具類等が衝突することで、更なる移動や転倒を引き起こし、被害の拡大を招く可能性もあることにも留意が必要である。

③非構造部材等の被害

2011 年東北地方太平洋沖地震では、超高層建築物を含む多くの建物で、間仕切り壁や天井材、スプリンクラーなどの非構造部材や設備機器（以下、「非構造部材等」と言う。）にも様々な被害が発生した。

日本建築学会（2013）では、非構造部材等の被害として、加速度 $100\sim 350\text{cm/s}^2$ の揺れが生じた建物で間仕切り壁の割れや天井落下、スプリンクラーの破損、防火戸の開閉障害などの発生が確認されている。これより小さな加速度 $50\sim 150\text{cm/s}^2$ の揺れが生じた建物でも、階段室の壁の亀裂やはがれ、壁パネルの脱落、集合住宅の玄関脇の壁モルタルの軽微な剥離などが発生したとしている。

本検討における超高層建築物の最上階の揺れの推計結果から、南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際には、東北地方太平洋沖地震に発生した非構造部材等の被害と同等かそれ以上の被害が、三大都市圏を中心に広範囲で発生する可能性がある。

④人の行動への影響

肥田・永野（2012）は、東北地方太平洋沖地震の発生時に超高層建築物内にいた人へのアンケート調査を基に、加速度及び速度と人の行動難度に関する関係を整理している（表 4 及び図 4 8）。

本検討における人の行動への影響については、家具類等の転倒に関する影響の評価と同様に、加速度をその指標として評価した。

肥田・永野（2012）による超高層建築物の加速度と人の行動難度の関係式によると、最大加速度が 100cm/s^2 程度で歩いたり動いたりすることにやや支障があり、 200cm/s^2 程度で立っていることができなくなる、としている。

今回の最大加速度の推計結果を見ると、一見小さな値のように思われる

かもしれないが、家具類等の移動と同じく、揺れの周期が長くなると、揺れの変位量と同じだけ人も部屋の中を何回も移動させられるような状況となる可能性がある。

南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際の三大都市圏における影響を概観すると、広い範囲で、「船に乗っているような揺れが長く続き」歩いたり動いたりすることにやや支障が生じ、一部地域では、立っていることが困難になる。さらに、揺れに翻弄され、自分の意志で何も行動できないような状況が生じることも想定される。

超高層建築物内で長周期地震動を感じた場合には、部屋の中で振り回されないよう、身の安全を確保するとともに、体が移動しないよう手すり等に掴まることが重要となる。

7. 長周期地震動への対策

7-1. 超高層建築物の構造躯体の対策

既存の超高層建築物においては、現時点では長周期地震動による影響が十分に解明されていない点も多い。また、一般に高い耐震性を有するとされる免震建築物においても同様に、擁壁に衝突した場合や設計時に想定した地震動、使用材料及び接合部の種類、平面・立面の形状等により、想定すべき長周期地震動に対し、強度的に必ずしも十分な余裕を有しているとは判断できないものも存在する可能性がある。このことから、超高層建築物や免震建築物の長周期地震動対策については、個別の建築物ごとに、想定すべき長周期地震動を用いて、改めて構造安全性の検証を行い、その検証結果に応じて、改修等の措置を講じることが望ましい。

なお、超高層建築物や免震建築物の管理者は、大規模地震によりビルが大きく揺れた場合は、継続利用や改修の要否の判断を行うに当たり、当該建築物の設計者等の専門家に調査を依頼することが望ましい。

7-2. 超高層建築物の室内等の対策

多くの人滞る超高層建築物では、長周期地震動による大きな揺れが生じた場合、火災や負傷者の発生、建物内への閉じ込めなど、様々な被害が同時発生することが懸念される。また場合によっては、通信の輻輳により電話が

使えず、空調・電気・上下水などのライフラインが停止することも考えられる。

エレベーターは、地震発生時の管制運転により長時間停止することが予想され、低層階に位置する「防災センター」や管理人室の職員が高層階の被害状況を速やかに把握して駆けつけることができない場合も想定される。また、同じような状況が周辺の超高層建築物でも発生することで、外部からの迅速な救援も期待できない状況に陥ることを前提に対策を講じる必要がある。

(1) 家具類等の固定の推進

超高層建築物が長周期地震動によって共振すると、上層階になるほど揺れが大きくなる。今回の超高層建築物の揺れの推計結果では、多くの固定していない家具類等が転倒する可能性が高く、キャスター付きの家具類等が大きく移動することで人的な被害が発生することが懸念される。

家具類等の転倒や移動、落下の防止対策は、短周期の揺れへの対策だけでなく長周期地震動対策としても非常に重要である。このため、転倒防止器具や移動防止器具により、家具類等の固定を推進する必要がある。

特に、巨大地震が発生した場合には、家具類等を十分に固定できず、転倒により扉がふさがれたり、コピー機などの重い機器が窓際にあるとガラスに衝突して地上に落下したりする可能性がある。このことから、家具類等の設置位置にも配慮が必要である。

(2) 身の安全確保

今回の推計結果では超高層建築物において、立つことができない程の揺れになる場所が多くあると想定される。揺れを感じたら、ヘルメット等により頭部を保護し、廊下や部屋の出入口など足や手を伸ばすことで体を固定できる場所で、体勢を低くし、揺れにより飛ばされないようにすることが重要である。

また、室内の照明などの設備機器が落下することも想定されることから、丈夫なテーブルの下など安全な場所に避難することも重要となる。

(3) エレベーター対策

2004年新潟県中越地震(M6.8)では、東京の震度は3程度であったが、長周期地震動によるエレベーターロープの揺れによると考えられる引掛りの被害が報告されている(エレベーター協会,2009)。

地震調査研究推進本部の長周期地震動予測地図作成等支援事業（2012）では、地震によるエレベーター被害の特徴を以下のとおり取り纏めている。

- ・マグニチュード7クラス以上の規模の地震であれば、震央から遠く離れても厚い堆積層に立地する超高層ビルでは被害が発生する可能性がある。
- ・超高層ビルのエレベーターロープは、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にひっかかることによって被害を起こすことが多い。

以上を踏まえ、すでに国としては、地震時管制運転装置の導入やエレベーターロープの昇降路突出物への絡まり防止対策を求めているところである。また、エレベーター内の閉じ込めが発生した際に、エレベーター保守会社のみならず、消防や建物管理者等が、安全に配慮しつつ救出できるよう、関係団体とも協力して、訓練に取り組んでいるところであり、引き続きこれらの対策を推進する必要がある。

（４）非構造部材等の対策

南海トラフ沿いの巨大地震が発生した際には、三大都市圏を中心に広範囲で非構造部材等の被害が発生する可能性がある。これらの被害は、建物の居住者や建物周辺の人に危害を与える可能性があることに加え、地震後の生活継続や事業継続に支障が生じることも想定される。

このため、超高層建築物における長周期地震動対策については、構造躯体への対策のみでなく、非構造部材や設備機器についても、長周期地震動による影響を受けないよう対処することが重要である。

特に、人に危害を与える可能性が高い天井材等の落下については、接合金物に耐震性の高いものを用いることや壁や設備との間に適切な空間を設けること、部材を軽量化することなどの対策が考えられる。

（５）災害対応力の向上対策

①緊急地震速報等の情報の活用

長周期地震動はゆっくりとした速度で伝わる表面波が主成分であるため、南海トラフ沿いの地震のように遠方の海溝型地震の場合、長周期地震動が

到達するまでにある程度の時間的な余裕がある。さらに、超高層建築物が長周期地震動と共振して、揺れが次第に大きくなり、揺れがピークになるまでには地震発生から数十秒～数分程度の猶予があると考えられる。

このため、緊急地震速報等の大きな地震の発生を知らせる情報を活用することにより、長周期地震動による揺れが大きくなる前に地震の発生を知ることができ、ある程度の余裕をもって身の安全の確保を行うことが可能になる。超高層建築物の滞在時に大きな地震が発生したことを知らせる緊急地震速報等を見聞きした場合や、長周期地震動による揺れを感じた場合には、大きな揺れに備えて体が移動しないように身の安全を図ることが重要である。なお、長周期地震動による揺れが大きくなる前に、短周期の地震動による大きな揺れが発生する可能性があることにも留意が必要である。

緊急地震速報等の情報は、短周期の地震動による揺れに対応するためのもので長周期地震動を直接的に予測する情報ではない。今後、長周期地震動の発生を予測し、超高層建築物の在館者へ事前に情報提供を行う新たな仕組みについて検討することが望まれる。

②被害状況を把握する手段の改善

超高層建築物等で火災等の監視と消防設備等の制御を行う「防災センター」は、通常は地上階に位置するため、地震時の高層階の揺れや被害状況を把握することは困難である。このため、「防災センター」では、緊急地震速報の活用に加え、建物内の揺れや震度のリアルタイムでのモニターなどにより被害状況を早期に把握することで、速やかな警戒態勢の構築や適切な館内放送などの対応が可能となる。

③初動対応体制の改善

巨大地震の発生時には、超高層建築物等の建物内外で災害が同時発生するため、「誰も助けに来られない」ことを前提に災害対応力を向上させる必要がある。

具体的には、各自でオフィスビル等の「自衛消防組織」やマンション等の「自主防災組織」などの災害対応組織を確認し、地震発生時の対応や自身の役割を予め確認することが重要である。また、地震による火災発生時には、スプリンクラーが作動しないことを前提に、各自で速やかに消火器が使える

ることや、周辺の住民・事業者等と協働して消火活動が行える必要がある。続いて、近隣の安否確認と傷病者対応を行う。家具等の下敷きになるだけでなく、ドアが開かなくなる可能性があり、各階でバールや救急箱・担架等を準備しておくことも有効である。

④避難・待機方法の改善

地震発生時に超高層建築物の在館者が一斉に避難しようとする、非常階段等の避難経路に在館者が集中し、かえって避難に時間を要することとなる。また、超高層建築物から在館者が退避した場合には、建築物の周辺に退避した人が溢れることとなり、周辺地域にも大混乱を誘発する可能性がある。

超高層建築物は、一般的には高い耐震性を有していることから、火災の発生や構造躯体に大きな損傷がなければ、慌てて避難せず、各階の安全な場所に待機することが、超高層建築物における地震時の基本的な考え方となる。

ただし、超高層建築物内で火災が発生した場合や構造躯体に大きな損傷が発生した場合には、速やかに屋外へ避難する必要があるため、在館者の一斉避難による渋滞や混乱が生じないように、「防災センター」等の指示に従い順次避難することが重要となる。

東京などの大都市では、延焼火災や大群集によるパニックなどのリスクが高いことから、危険な周辺状況が無いことが明らかになるまで、帰宅や屋外への避難を控え、滞在していた建物内で待機することが重要となる。

このため、超高層建築物では、一週間程度の水・食糧等を備蓄しておくことが望ましい。また、余裕がある場合には共用スペースなどを一時滞在場所として提供することも望まれる。

⑤防災訓練の改善

超高層建築物等では、地震発生時に火災やエレベーター停止、室内の被害や傷病者の発生など、さまざまな被害が同時発生する。この状況に適切に対応するには、「発災対応型訓練」を実施すべきである。具体的には、「防災センター」の職員（自衛消防組織などの本部隊など）に頼るのではなく、各階の事業者・住民（同組織の地区隊）の役割が非常に重要になることを認識し、本部隊・地区隊との連携方法、及び、各自の災害対応能力の向上を目的とす

る実践的な防災訓練（初期消火に加え、初動対応体制と各自の役割・情報連絡方法の確認、各階の安否確認、傷病者の救急救護や担架搬送、閉じ込め者の救出など）を実施すべきである。

7-3. 石油タンクの対策

工業地帯における長周期地震動による被害としては、石油タンクにおける被害が特に知られている。

長周期地震動により石油タンクに被害が生じる原因は、石油タンクの内容物である石油が共振して大きく揺動する「スロッシング」という現象にある。ポンツーンと呼ばれる浮きが付いた屋根をもつ浮き屋根式の石油タンクにスロッシングが生じると、それに伴って浮き屋根も上下動し、浮き屋根が破損、沈下したり、浮き屋根と他の設備の衝突による火花により火災が生じたりするなどの大きな被害が発生することがある。

2003年十勝沖地震では、北海道苫小牧市の石油タンクでスロッシングが起こり、タンク2基で火災が発生した。うち一基（直径42.7m、許可容量32,779kL）では、浮き屋根が沈没し、その後全面火災に至った。この教訓を踏まえ、一定規模以上の浮き屋根式のタンクについては、長周期地震動に対する耐震基準を強化しており、平成28年度末までに現行基準に適合することとされている。

また、東北地方太平洋沖地震では、川崎市の石油タンク（直径38.74m、許可容量19,365kL）で、現行基準に適合していない浮き屋根がスロッシングにより沈没した事例があるが、現行基準に適合している浮き屋根については、ポンツーンの破損に伴う浮き屋根の沈下・傾斜といった浮き性能を損なうような被害はなかった。

このことから、浮き屋根の現行基準への適合を着実に進めることにより、石油タンクの耐震安全性を確保するとともに、本検討における長周期地震動の推計結果を踏まえて、石油タンクへの影響を精査し、長周期地震動への対策についての調査検討を進めることが重要である。

8. 留意事項と今後の課題

8-1. 推計結果を利用する際の留意事項

本報告で推計を行った長周期地震動の分布図や波形等は、南海トラフ沿いの巨大地震として想定される地震発生パターンの一例に基づく結果であり、必ずしも次に発生する地震を特定したものではない。各地点の揺れについて

も、三大都市圏を含む関東から九州にかけての領域（日本海側を除く）について地盤構造モデルを点検し、必要な修正を行った地盤構造モデルを用いて、その地域の概ねの揺れの程度を推定したものであって、特定の場所の揺れを詳細に表現したものではない。

長周期地震動を推計する際の注意点として、地震動の干渉によって強い場所と弱い場所が交互に現れることがあげられ、その場所や範囲については、推計に用いる地盤構造モデルによって大きく変わる。このため、場所ごとの揺れの違いを表現したものと誤解を与えないよう、長周期地震動の推計結果は、空間的に平滑化したものとしている。

本検討では工学的基盤を地表面と想定して長周期地震動を推定しているが、実際に個別の建築物への影響を評価する場合には、建築物の構造や立地場所の地下構造など、更なる詳細なデータに基づき評価することが必要となる。

また、本検討における長周期地震動の推計は、強震動生成域のみを用いて実施しているが、実際の地震では強震動生成域を除く震源断層領域からも微弱ではあるが地震動が発生しており、長周期地震動の継続時間がより長くなることも考えられる。

本報告の活用にあたっては、以上のことに留意されたい。

8-2. 今後の課題

(1) 長周期地震動の推計手法の高度化

地震動の大きさは、通常、震源近傍ほど大きくなる。しかし、マグニチュード 8 を超える地震になると、震源近傍の地震動の強さは頭打ちになることが知られている。

このため、中央防災会議における統計的グリーン関数法による強震動の推計では、震源域からの距離が小さいところの地震動の振幅は、 $1/(R+C)$ [R: 断層最短距離、C: 定数]で減衰するとして強震波形を計算し、地震動が震源断層の極近傍で飽和するようにしている。また、柔らかい地盤に強い地震動が入射した場合には、地盤が塑性化し、弱い地震動に比べ地盤による地震動の増幅が小さくなる特性を持つ。震度分布の推計にあたっては、この効果もある程度考慮したものとしている。

三次元差分法による長周期地震動の推計においても、これらと同様の効果を検討する必要があるが、その推計手法を取り纏めるには至らなかった。

このことから、震源断層の極近傍に影響地域がある相模トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動の推計については、引き続きの課題とした。

首都圏等においては、南海トラフ沿いの巨大地震に加え、相模トラフ沿いの巨大地震など首都圏周辺で起こる地震による長周期地震動についても、その影響が懸念される。このため、今後、首都圏における超高層建築物等への適切な対策が検討できるよう、相模トラフ沿いの巨大地震等による長周期地震動を検討するための新たな検討会を設置し、早期に推計結果が取り纏められることを要望する。

(2) 地盤構造モデルの高度化

長周期地震動の場所ごとにおける違いを評価し、個々の建築物への影響を正確に評価するには、留意事項で述べたとおり、地盤構造の精度を上げることが重要となる。長周期地震動の推計結果について、地盤構造の違いによる例を図49に示す。

今後、地盤構造の確定には、研究機関に加え、多様な主体が参加し、地震の観測等により地盤構造の推定精度の向上に取り組むことが望まれる。

(3) 建築物の挙動・影響の評価機能の充実

地震動による建物等への影響を評価するには、地震時における建物の揺れの状況がモニターできる機能を個々の建築物が有することが望ましい。今後、地震時の建築物における挙動や影響を評価する上でも、より多くの建築物に地震計による挙動や影響をモニターする機能が整備されることが望まれる。

おわりに

本検討では、南海トラフ沿いで想定される巨大地震による長周期地震動対策を推進するため、南海トラフ沿いで発生したM8~9クラスの過去地震及び想定される最大クラスの長周期地震動の推計を行った。さらに、これらの推計結果から、超高層建築物の構造躯体への影響や、室内への影響として家具類等の転倒や移動、人の行動への影響を概観した。

長周期地震動の推計は、発展途上の技術であり、震源や強震動生成域の場所、

地盤構造モデル等の計算条件により、推計結果は大きく変わる場合がある。また、地震は自然現象で不確実性を伴うものであり、今回の想定とは異なる事象が発生する可能性があることにも留意する必要がある。

今回の検討は、あくまでも現時点の科学的知見に基づいたものであり、今後の科学的知見の蓄積を踏まえ検証し、必要に応じて修正していくべきものである。

本検討における長周期地震動の推計結果は、地表や超高層建築物の揺れの大きさ等について全体像を俯瞰することを目的としたものであり、超高層建築物や石油タンク等における長周期地震動対策については、上記の留意事項を踏まえ、関係省庁等において別途検討されることが望まれるものであり、それら検討結果に基づき、適切に対処されることを切望するものである。

また、今後の課題にも述べたとおり、本両検討会では引き続きの課題とした相模トラフ沿いの巨大地震など首都圏周辺で起こる地震による長周期地震動についても、早期に検討会を設置し、検討が進められることを強く望むものである。

(参考) 本両検討会における用語の取り扱い

本両検討会の報告は、国や地方公共団体の防災担当者に加えて、防災に関係する地震や津波の専門家、超高層建築物の管理者等にも幅広く活用されることが想定される。このため、この報告で用いる用語については、一般の方々に分かり易いものとするのと併せて、専門家にも誤解なく理解されるものとする必要がある。

このことから、本報告で用いた用語については、誤解を与えることがないように、以下のとおり整理して使用した。

(1) アスペリティに替わる用語

「アスペリティ」は、強い強震動を発生させる領域と、断層すべりの大きな領域の両方を示す用語として使用されてきたが、2011年東北地方太平洋沖地震の詳細な解析の結果、両者は必ずしも一致するものでなく、領域的にも異なる場合があることが明らかとなった。

このため、本報告では「アスペリティ」に替わる用語として、以下を用いた。

① 強震動生成域 (SMGA)

震度分布を評価するための断層モデルに使用する用語で、断層面のなかで特に強い地震動(強震動)を発生させる領域を言う。この用語は、強震動の研究分野において用いられている用語である。

② 大すべり域、超大すべり域

大(おお)すべり域は、津波を評価するための断層モデルに使用する用語で、断層面のなかで大きく滑る領域を言う。その中でも特に大きく滑る領域を、超大(ちょうおお)すべり域と言う。

(2) 「断層モデル」等の呼称

地震時に動いた断層を震源断層といい、この断層モデルを震源断層モデルと言う。しかし、強震動、津波高等、長周期地震動の全てを統一的に表現できる震源断層モデルの構築は困難であることから、強震動、津波高等、長周期地震動のそれぞれに対し、観測データ等をより近似表現できる断層モデルを、それぞれ個別に設定している。本報告で用いる断層モデルに関する呼称は以下のとおりである。

① 震源断層モデル

地震時に動いた断層が震源断層と呼ばれ、地震動や津波を発生させ

るこの断層運動をモデル化したものを震源断層モデルと言う。

② 強震断層モデル

震源断層モデルのうち、強震動（強震波形、震度）を評価するためのモデルを強震断層モデルと言う。

③ 津波断層モデル

震源断層モデルのうち、津波を評価するための地殻変動を評価するためのモデルを津波断層モデルと言う。

④ 長周期地震断層モデル

震源断層モデルのうち、長周期地震動を評価するためのモデルを長周期地震断層モデルと言う。

⑤ 震源断層域

地震時に動いた断層の領域であり、強震断層モデル、津波断層モデル、長周期地震断層モデルを包絡する領域である。なお、強震断層モデル、津波断層モデル、長周期地震断層モデルに対応する領域を、それぞれ強震断層域、津波断層域、長周期地震断層域と言う。

(3) 「応答スペクトル」等の用語

① 応答スペクトル

構造物を、さまざまな固有周期と減衰定数を持ち、質点が1つで、その質点の運動を記述するための座標軸が1つだけの系（1質点・1自由度系）と考える。このモデル化した質点が地震動で揺すられたときの最大応答値を固有周期の関数として表したものを応答スペクトルという。

なお、応答値が加速度の場合を加速度応答スペクトル、速度の場合を速度応答スペクトル、変位の場合を変位応答スペクトルという。

② 擬似速度応答スペクトル（pSv）

加速度応答スペクトルに $T/2\pi$ をかけて求められるスペクトル。速度応答スペクトルと厳密には一致しないが、設計用の応答スペクトルとして一般的に広く用いられている。

③ 層間変形角

建物各階での床と真上の床との水平変位の差を各階の高さで割った値で、各階での変形の度合いを示し、建物の被害の程度を評価する指標として用いられる。

(4) その他の用語

①家具類等

一般家庭内のタンス・本棚・食器棚などの家具、事務所内のキャビネット・ロッカーなどのオフィス家具、テレビ・冷蔵庫・電子レンジなどの家電製品を言う。

②防災センター

消防法施行規則に基づき、超高層建築物等の防火対象物において、消防用設備などを管理するために設置されている。

③自衛消防組織

火災及び地震等の災害時の初期活動や応急対策を円滑に行い、建築物の利用者の安全を確保するため、消防法に基づき設置されている。

④自主防災組織

地域住民が自主的に結成する組織であり、災害による被害を予防し、軽減するための活動を行う組織である。

参考文献

- 日本エレベーター協会・日本建築設備・昇降機センター（2009）：建築基準法及び同法関連法令、昇降機技術基準の解説，2009年版
- 大宮憲司・久田嘉章（2014）：応答スペクトルを用いた超高層建築の簡易応答評価に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp1011-1012.
- 金子美香（2002）：地震時における家具の転倒率推定方法，日本建築学会構造系論文集，第551号，61-68.
- 川辺秀憲・釜江克宏・上林宏敏（2012）：2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）の長周期地震動シミュレーション，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造系，pp69-70
- 気象庁（2011）：東北地方太平洋沖地震時における長周期地震動による揺れの実態調査結果，長周期地震動に関する情報のあり方検討会（第1回），資料1，p.13.
- 気象庁：長周期地震動について，
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/choshuki/index.html>
- 木下繁夫・大竹政和（2000）：強震動の基礎ウェブテキスト2000版，
<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/gk/publication>
- 小鹿紀英・高橋元美・鈴木芳隆・吹田啓一郎（2015）：鉄骨造高層建物の崩壊余裕度定量化に関する研究開発（その12）実験条件の詳細と倒壊挙動の分析方針，日本建築学会大会学術講演梗概集，p.1215.
- 地震調査研究推進本部（2011）：三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価（第二版）について，
http://jishin.go.jp/main/chousa/kaikou_pdf/sanriku_boso_4.pdf
- 地震調査研究推進本部（2012）：「長周期地震動予測地図」2012年試作版，全国1次地下構造モデル，http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/
- 地震調査研究推進本部（2015）：「活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧」，
http://www.jishin.go.jp/evaluation/long_term_evaluation/lte_summary/
- 中央防災会議（2003）：「東南海、南海地震等に関する専門調査会」（第16回）報告書.
- 中央防災会議（2006）：「東南海、南海地震等に関する専門調査会」（第26回）

報告書.

- 中央防災会議 (2011) : 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会報告. 内閣府 (2012) : 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・津波高等について (第一次報告). 内閣府 (2012) : 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).
- 日本建築学会 (2013) : 長周期地震動と超高層建物の対応策, 家具被害の簡易予測手法, 254-255.
- 日本建築学会 (2013) 「長周期地震動と超高層建物の対応策」, 超高層ビルの被害状況, pp114-119.
- 久田嘉章 : 第 4 回「超高層建築の震災対策」, 耐震の入り口と出口の話, 構造設計ポータル, SEINWEB, NTT DATA,
- 肥田剛典・永野正行 (2012) : アンケート調査と強震記録に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震時における超高層集合住宅の室内被害, 日本建築学会構造系論文集, 第 77 巻, 第 677 号, pp1065-1072.
- 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 23 年度長周期地震動予測地図作成等支援事業成果報告書」2012, 超高層ビルのエレベーター被害, p100
- 横田崇・上野寛・下山利浩・元山知範・増田徹・室谷智子・甲斐田康弘 (2012) : 海溝型地震の強震動生成域における相似則, 日本地震学会 2012 年秋季大会講演予稿集, B22-10.
- 横田治彦・片岡俊一・田中貞二・吉沢静代 (1989) : 1923 年関東地震のやや長周期地震動, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 401 号, pp35-45.
<https://www.sein21.jp/NewSeinWeb/TechnicalContents/Hisada/Hisada0104.aspx>
- Kurahashi, S and K. Irikura (2013) : Short-Period Source Model of the 2011 Mw 9.0 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 103, No. 2B, pp1373-1393.

南海トラフの巨大地震モデル検討会 委員名簿

座長	阿部 勝征	東京大学名誉教授
	今村 文彦	東北大学災害科学国際研究所副所長・教授
	入倉 孝次郎	愛知工業大学客員教授
	岡村 眞	高知大学総合研究センター防災部門特任教授
	岡村 行信	国立研究開発法人産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 首席研究員
	金田 義行	名古屋大学減災連携研究センター特任教授
座長代理	佐竹 健治	東京大学地震研究所教授
	橋本 学	京都大学防災研究所教授
	平川 一臣	北海道大学名誉教授
	平原 和朗	京都大学大学院理学研究科教授
	福和 伸夫	名古屋大学減災連携研究センター長・教授
	古村 孝志	東京大学地震研究所災害科学系研究部門教授
	翠川 三郎	東京工業大学大学院総合理工学研究科教授
	室崎 益輝	ひょうご震災記念 21 世紀研究機構研究調査本部長
	山岡 耕春	名古屋大学大学院環境学研究科教授
	山崎 文雄	千葉大学大学院工学研究科教授

首都直下地震モデル検討会

委員名簿

座長	阿部 勝征	東京大学名誉教授
	今村 文彦	東北大学災害科学国際研究所所長・教授
	入倉 孝次郎	愛知工業大学客員教授
	岩田 知孝	京都大学防災研究所教授
	大原 美保	国立研究開発法人 土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際研究センター 水災害研究グループ主任研究員
	岡村 行信	国立研究開発法人産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 首席研究員
	佐竹 健治	東京大学地震研究所教授
	武村 雅之	名古屋大学減災連携研究センター教授
座長代理	平田 直	東京大学地震研究所教授
	福和 伸夫	名古屋大学減災連携研究センター長・教授
	古村 孝志	東京大学地震研究所災害科学系研究部門教授
	翠川 三郎	東京工業大学大学院総合理工学研究科教授
	山崎 文雄	千葉大学大学院工学研究科教授

建築分野の専門家

	北村 春幸	東京理科大学理工学部建築学科教授
	小鹿 紀英	株式会社小堀鐸二研究所副所長
	久田 嘉章	工学院大学建築学部まちづくり学科長・教授