

長周期地震動と建物応答

構造研究グループ 主席研究監 大川 出

目次

- I はじめに
 - 1) 長周期地震動について
 - 2) 超高層建築物等の設計用地震動（時刻歴）の現状
 - 3) 長周期地震動提案手法と東北地方太平洋沖地震による観測地震動の検証
 - II 東北地方太平洋沖地震における長周期地震動と建物応答
 - 1) 各地の観測記録の地震動特性（スペクトル、継続時間など）
 - 2) 被災地域（宮城、岩手、福島など）における長周期地震動
 - 3) 首都圏における長周期地震動
 - 4) その他の地域における長周期地震動
 - 5) 建物応答事例について
 - III 長周期地震動に関する提案評価手法の検証
 - 1) 提案手法による地震動の特徴
 - 2) 東北地方太平洋沖地震での観測データによる長周期地震動の評価
 - IV 今後の課題
- 謝辞
- 参考文献

I はじめに

2003（平成15）年9月の十勝沖地震の際に、北海道苫小牧の石油基地の大型石油タンクで大規模火災が生じた。この地震により発生した長周期地震動が当地直下の地下構造の影響でさらに増幅を受け、石油タンク敷地まで伝播入力し、タンク内の液面の過大な揺れ（スロッシング）と共振が生じ、その結果タンク外に石油が溢れ、それに引火したことが原因とされた。

長周期地震動は、一般により大規模な地震により強く発生するとされ、さらに構造物立地地点直下の深い地下構造によって増幅を受けながら遠くまで伝わる。地震動の卓越周期が超高層建築物などの固有周期に近いと、いわゆる共振現象が起き、長い継続時間と相まって、応答が繰り返され、超高層建築物などの減衰が比較的小さい構造物ではゆれが成長して、過大な応答を生じることが知られている。

ここ数年来、このような巨大地震に伴う長周期地震動による構造被害の発生が懸念されている。

建築構造物を対象とする長周期地震動対策については、国土交通省建築基準整備促進補助事業により課題「超高層建築物等の安全対策に関する検討」（2008年-2010年）が実施され、建築研究所と選定事業者との共同研究の成果として、長周期地震動の作成手法に関する提案をとりまとめた建築研究資料が2010年12月に刊行され、同時に国土交通省がパブリックコメント募集「超高層建築物における長周期地震動への対策試案について」を実施した。この意見募集期間が完了してのちすぐにマグニチュード（Mw）9.0の東北地方太平洋沖地震が発生したため、地震被害等の情報収集が実施された。

本稿では、2011年東北地方太平洋沖地震による長周期地震動とその建築物への影響についてまず概観する。さらに、長周期地震

動により大きな影響を受けるとされる超高層建築物等の観測結果とそれに基づく検討を踏まえて、明らかになった事項について整理する。さらに現在実施中の建築物を対象とした設計用長周期地震動の作成手法に関する検討の現状について報告する。

1) 長周期地震動について

まずここで議論の対象とする長周期地震動とは概略以下の通りである。

現存する建築物の振動特性を勘案すれば、地震動に含まれる周期十数秒以下の成分が建築物の耐震問題の対象となる。ここで長周期地震動として注目しようとしているのは、このうち周期2秒程度以上の成分である。図1に、規模と地震動スペクトル特性の関係を概略的に示す。

同図からわかるように、地震規模が大きいと、スペクトルの振幅が大きくなると共に、卓越部分はより低振動数（長周期）域に移る。また図2には、典型的な長周期地震動と見なされる2004年伊半島沖地震における大阪湾岸KiK-net 此花観測点における観測波形を示す。同図は縦軸が成分周期、横軸が時間となるグラフに成分の強度を等高線で示したものである。卓越成分が最初は短周期であるが次第に長周期に変化していることがわかる。規模が大きくなるとさらに継続時間が長くなることもある。

2) 超高層建築物等の設計用地震動（時刻歴）の現状

わが国では、法令上高さ60メートルを超えるいわゆる超高層建築物については、地震動時刻歴を用いた動的解析による耐震設計が義務づけられている。超高層建築物の建設はわが国では1960

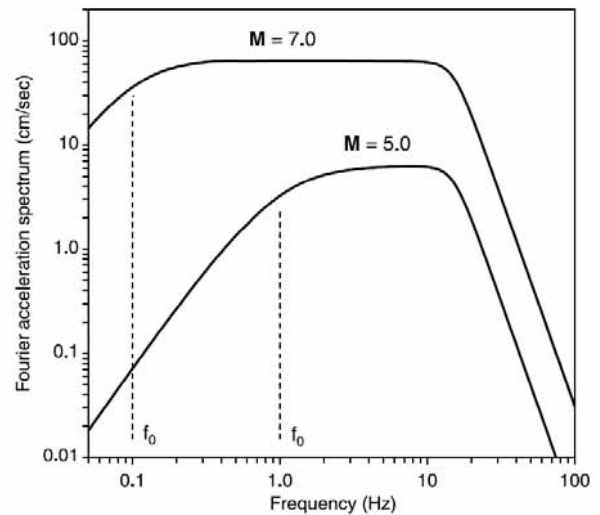


図1 地震規模とスペクトル特性 (Boore, 2003)

年代のおわりに始まった。初期には設計用の観測波として米国の強震記録、エルセントロ、タフトに加えて、日本各地（超高層建築物のほとんどは、大都市に建設されたので、東京、大阪、名古屋、仙台など）の地域の代表的な強震記録という位置づけで、それぞれの地域での特定の記録が設計に用いられていた。しかしながら、設計に適した観測記録がほとんどないため、比較的小振幅観測記録を振幅などとして使われていた。地震動強さの生起頻度などを勘案し、弾性設計用としては、200ガル～300ガル、弾塑性設計用では300ガル～500ガル程度の最大加速度になるようにスケールリングを施し、地震応答解析に利用された。その後、速度振幅レベルの強さが超高層建築物の応答には影響が大きいとして、先行的にいくつかの超高層事例では最大速度振幅で規準化した観測記録が利用されるようになった。さらに、(財)日本建築センターから、弾性用で25cm/s、弾塑性用で50cm/sという、現在でも使われている標準的な速度振幅レベルが示され、その振幅で規準化された観測記録が入力地震動として広く用いられるようになった。(文献8) また、その際に標準的に使われるべき波形として、1940年エルセントロNS成分、1952年タフトEW成分、および長周期成分を含むものとして1968年十勝沖地震の八戸港湾で観測した強震記録の計3波が用いられるようになった。その後、1994年に「設計用入力地震動作成手法技術指針(案)」(以下センター指針)が、超高層建築物や免震建築物の時刻歴解析に、いわゆるセンター波(BCJ-L2波)として用いられることもあった。

現在、超高層建築物や免震建築物の耐震計算にあつては、国土交通省平成13年告示1461号の記述に基づき、各評価機関はその業務方法書の中で、以下の3種類の地震動を規定し、耐震計算に

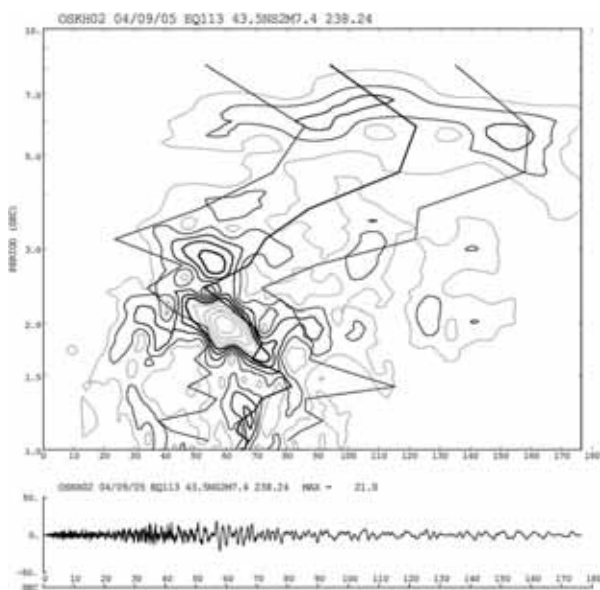


図2 長周期地震動における周期成分の時間変動

用いることが運用上行われている。そのひとつは前記告示1461号に示される工学的基盤における加速度応答スペクトルに適合する模擬地震動時刻歴で、その継続時間は60秒以上とされている。これは告示波といわれる。工学的基盤と与えられるので、それ以後の表層地盤の増幅を加味した地震動も、同様に告示波といわれることがある。図3に工学的基盤の告示波のスペクトルとサンプル波形例を示す。

ふたつめとして、先のエルセントロ、タフト、八戸の3波について最大速度を25cm/s、50cm/sとした波形も使われる。これは標準(観測)波と呼ばれる。長期間にわたって共通の入力地震動として使われている波形である。図4に標準波のスペクトルを示す。

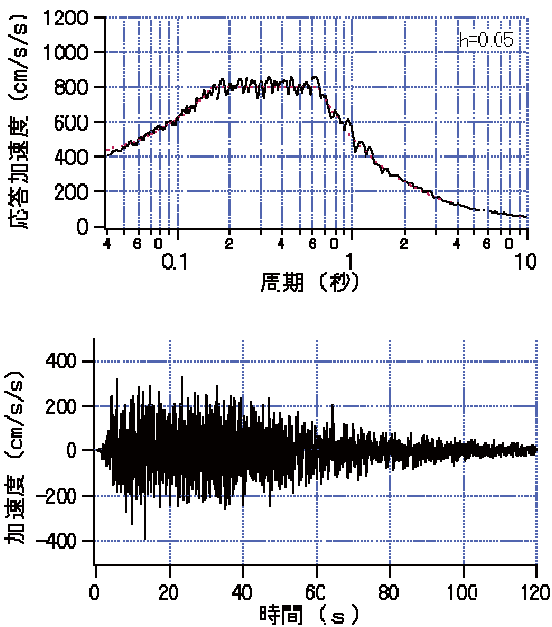


図3 告示波の波形(下)と告示スペクトル(上)

3つめが、サイト波と呼ばれるもので、建設地点周辺に将来起こる可能性が高い地震による地震動のうち影響の大きいものこと。設計者によるサイト波の選定は、審査の対象にはなっているが、実際に利用する作成方法は、簡便なものから、かなり高度な知識が必要な手法まで非常に大きなバリエーションがある。近年、強震動予測手法が急速に発展してきているものの、巨大地震による長周期地震動の予測では、地表に近い表層地盤だけでなく、震源位置や、地震基盤以浅の3次元地下構造の影響による地震動レベルの増大や、地震動継続時間の長大化の影響の重要性も指摘され、個別の評価においては、特に地域ごとの広い地理的範囲における深い地下構造の特定も、重要な課題となっている。

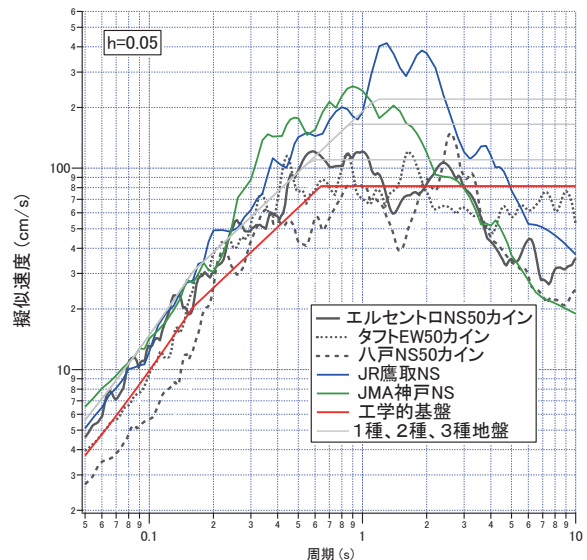


図4 標準3波および鷹取駅とJMA神戸のスペクトル

このように、設計者にとってサイト波の評価・作成は、高度な専門的知識も要求される事項である。また、適切にサイト波を作成することだけでなく、設計に使用するサイト波が妥当なものであるかどうかの判断が審査側にも求められることになる。

3) 長周期地震動提案手法と東北地方太平洋沖地震による観測地震動の検証

建築研究所は、国土交通省建築基準整備促進事業を通して当該事業者との共同研究の成果として、一昨年(2010年)12月に長周期地震動の算定手法を提案し、建築研究資料127号にて公表した。また、その手法に基づく「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」が国土交通省から公表され、意見募集(パブリックコメント)が行われた。

建築研究所は、その直後に発生した東北地方太平洋沖地震で多数得られた地震観測記録など多くの地震情報を収集し、提案した経験的手法を検証・改良し、さらに、その妥当性について検討しているところである。

本方法は、長周期地震動をスペクトル特性と時刻歴特性の両面から、建設サイト位置および地震規模、発生位置に基づいて算定していく方法である。地震動の作成については、以下に示すような加速度応答スペクトルに適合し、振動数成分ごとにその振幅の時間変動を考慮して重ね合わせる方法を用いている、最終的には現在の性能評価で求められる時刻歴を用いた動的解析に適用されることを目指すものである。詳細は平成21年度建研講演会の資料(<http://www.kenken.go.jp/japanese/research/lecture/h21/index.html>)に記述されている。具体的に応答スペクトルについては、

以下の実験式を既往の強震観測記録から求めている。

$$\log Sa(T) = a(T)M_w + b(T)R - \log(R^{p(T)} + d(T)10^{0.5M_w}) + c(T) + c_j(T)$$

ここで、 $a(T), b(T), d(T), p(T), c(T), c_j(T)$ は回帰係数として

既往の地震記録から求められる。そのほか、 M_w はモーメントマグニチュード、 R は断層最短距離、 $c(T)$ は基準サイトのサイト増幅係数、 $c_j(T)$ は、 j サイトのサイト増幅率、また、 T は周期である。

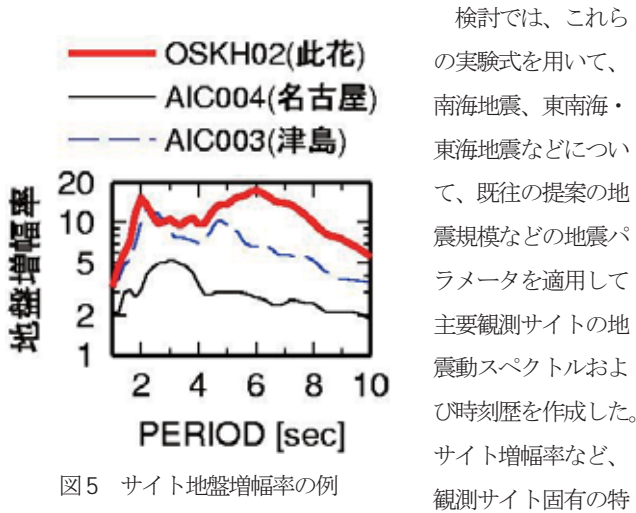


図5 サイト地盤増幅率の例

検討では、これらの実験式を用いて、南海地震、東南海・東海地震などについて、既往の提案の地震規模などの地震パラメータを適用して主要観測サイトの地震動スペクトルおよび時刻歴を作成した。サイト増幅率など、観測サイト固有の特

性についても、周期や振動数についてデジタル値を公表している。サイト増幅率の例を図5に示す。実験式は観測データに依存して、予測誤差を含んでいるため、それらのばらつきについても示し、平均的、および平均+標準偏差の特性を持つ地震動も作成している。これらの地震動は超高層建築物、免震建築物の代表解析モデルに入力し、それぞれの応答のレベルやそのばらつき具合を確認している。詳細は、参考文献7を参照されたい。

実験式は、設計用という位置づけであるので、大規模地震にも適用することを想定しているが、使用データには大規模地震は含まれていない。東北地方太平洋沖地震の観測データを用いた、その適用性の検討については、次章で説明している。

II. 東北地方太平洋沖地震における長周期地震動と建物応答

1) 各地の観測記録の地震動特性 (スペクトル、継続時間など)

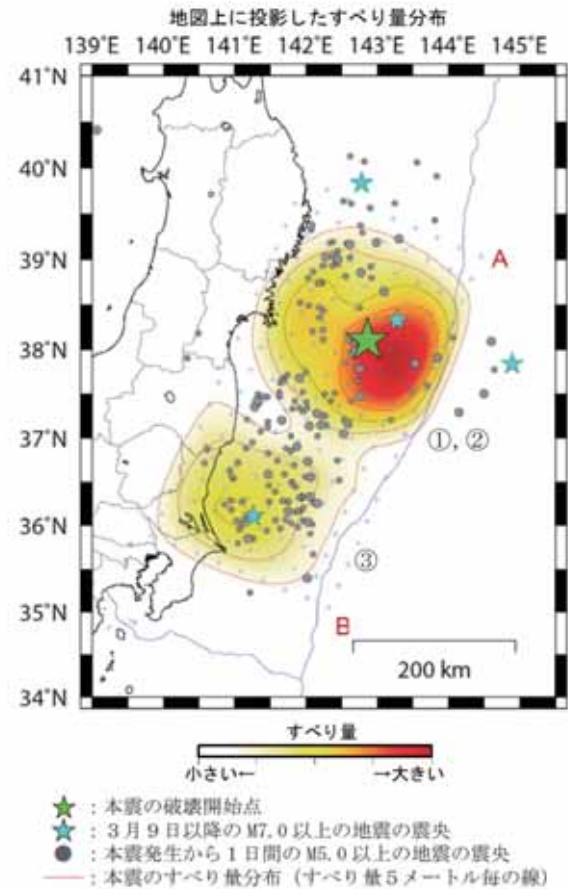


図6 東北地方太平洋沖地震本震のすべり量分布 (気象庁, 2011)

表1 東北地方太平洋沖地震の前震、本震、大規模余震

	日時	震央	深さ	M
前震	3月09日 11時45分12.9秒	三陸沖 (38° 19.7'N, 143° 16.7'E)	8 km	Mj 7.3
本震	3月11日 14時46分18.1秒	三陸沖 (38° 06.2'N, 142° 51.6'E)	24 km	Mw 9.0
余震	3月11日 15時08分53.5秒	岩手県沖 (39° 50.3'N, 142° 46.8'E)	32 km	Mj 7.4
	3月11日 15時15分34.4秒	茨城県沖 (36° 06.5'N, 141° 15.9'E)	43 km	Mj 7.7
	3月11日 15時25分44.4秒	三陸沖 (37° 50.2'N, 144° 53.6'E)	34 km	Mj 7.5
	4月07日 23時32分43.4秒	宮城県沖 (38° 12.2'N, 141° 55.2'E)	66 km	Mj 7.1
	4月11日 17時16分12秒	福島県浜通り (36° 56.7'N, 140° 40.3'E)	6 km	Mj 7.0

Mj: 気象庁マグニチュード、Mw: モーメントマグニチュード

東北地方太平洋沖地震では余震も含めて多くの強震記録が得られた。それらの強震記録の特徴について、被災地、首都圏、それ以外の大都市圏に分けて検討した。

全国的な強震動観測網によるデータから、宮城県、福島県を中心とする被災地では、大きな揺れではあるものの、既往の強震記録を大きく上回るものではないことがわかっている。

ただし、大振幅を記録した地点の地理的範囲が広く、いずれの地点の記録にも共通して継続時間が非常に長いことが認められる。これは、規模が大きく破壊が広域に及び、断層破壊が完了するまでに長い時間を要したことによるものと見られている。

観測地震動については、防災科学技術研究の K-NET、KiK-netをはじめとして、気象庁、大学、自治体などの観測実施機関により、膨大な観測記録が得られ公表されている。建築研究所では、主たる研究対象の建築部およびその周辺地盤での強震観測事業により、やはり多数の大振幅強震記録を得ている。

まず、図6には気象庁が公表した強震記録に基づいて特定された震源域における破壊プロセスを示す。震源の破壊は緑色の☆印で始まり、震源域のすべり量分布はその大きさに応じて色分けされている。すべり量は発表時点においては赤い領域で最大30m程度に達したと推定された。表1に前震、本震、大規模余震の発生日時と場所を示す。図6のうち本震に最も近い青☆印は、本震2日前の3月9日の前震の震源位置(破壊開始地点)である。さらに本震の30分後には、図6の茨城県沿岸部に近い青☆印部分で示す地点に最大余震(Mw=7.7)が発生している。

マグニチュードが7を超える大規模余震は現時点で2011年4月11日までに5回発生している。さらに、本震時における各地の震度分布を図7に示す。本震においては、宮城県栗原市築館で震度7を記録したほか、宮城県、岩手県福島県、茨城県、栃木県で大きな加速度記録を得ている。

建築研究所の建築物の観測地点について図8に示した。より密に観測点が存在する首都圏については同図下にその観測位置を示した。以下、K-NET や建築研究所が実施する建物強震観測結果についてまとめる。

2) 被災地域(宮城、岩手、福島など)における長周期地震動

被災地域では、地震動による被害と沿岸地方における津波被害があり、特に沿岸地域の建築物については津波による被害が支配的であり、同地域での地震動被害については、よく分かっていな

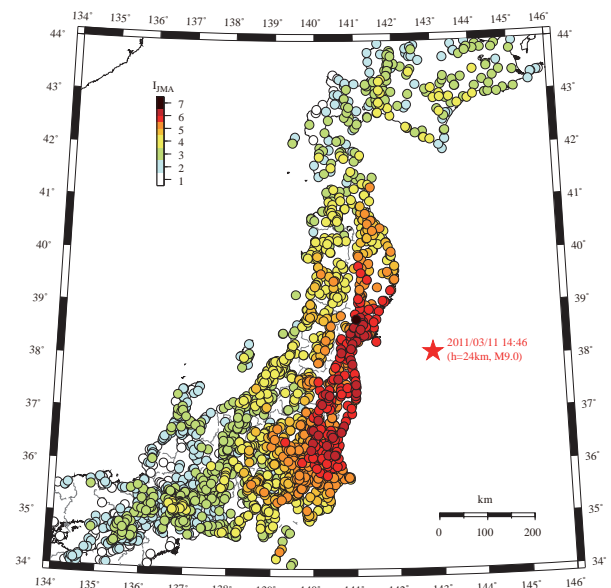


図7 東北地方太平洋沖地震の震度分布

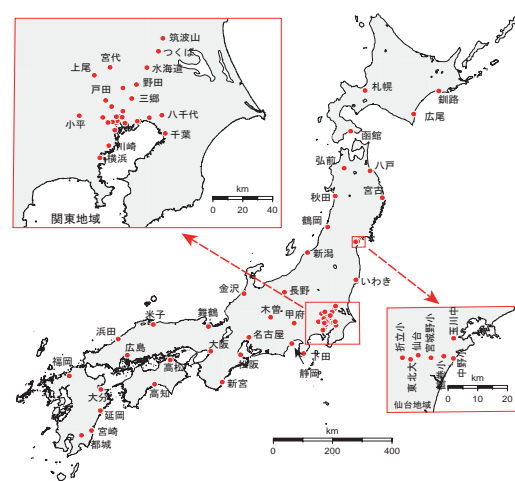


図8 建築研究所の強震観測地点

い。被災地域の宮城県を中心とする東北地域の代表的な観測記録の5%減衰数値速度応答スペクトルを図9に示す。図9(a)は地盤上のK-NET観測点、同図(b)は建築研究所が実施する観測建物の基部(1階、地階、地表)のもの比較である。同じ色の2本の線は水平2成分を表している。長周期成分の卓越をみるため周期10秒程度までの応答スペクトルを重ね書きしているが、K-NET観測記録は地盤上の記録で、周期2秒以下で200cm/sを上回る地点がいくつかある。

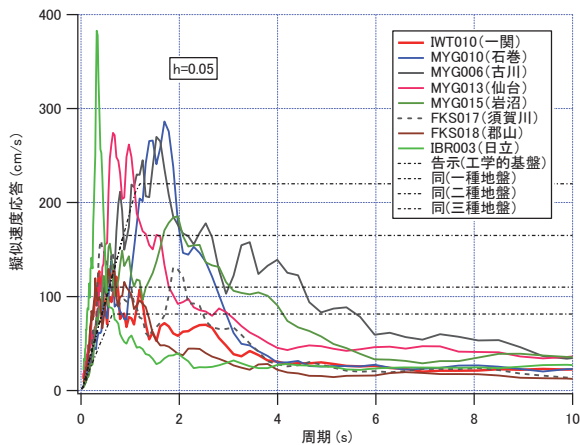


図 9(a) 被災地の K-NET 観測点での擬似速度スペクトル

震源に近い地域であっても、周期 4 秒を超える長周期成分については、特段大きなレベルではない。

図 9(b) は、東北各地中心部における建物 1 階、地下階あるいは地表位置での観測記録の擬似速度応答スペクトル (減衰 5%) の比較である。仙台や八戸、秋田、宮古、いわきなどの記録の長周期成分のレベルを見たものであるが、仙台やいわきなどは周期 2~3 秒の地震動スペクトルレベルが告示スペクトルを少し上回った程度であるが、地震動レベルは比較的大きい。しかしながら、周期 4 秒以上では、それほど大きくなく、距離が遠い新潟の方がかえってスペクトルレベルが上回るほどである。

地震規模 (M_w) が 9.0 と大きく、その分長周期成分が卓越することが予想されたが、これらの地点では長周期成分の大きな増幅はみられない。擬似速度応答スペクトルだけでなく、累積塑性変形などの長継続時間や非線形応答の程度をみるため、エネルギースペクトル (減衰 10%) についても同じ地震動を図 10 で比較した。

エネルギースペクトルの比較の基準として、告示スペクトル (工学的基盤) に適合する継続時間 120 秒、ランダム位相の模擬地震動 10 波によるエネルギースペクトル平均値を加えて各観測点でのエネルギースペクトルと比較した。ここでも周期 4 秒程度以上においては、新潟の記録が大きいものの、その他の観測点における地震動のエネルギースペクトルレベルはそれほど大きくないことがわかる。

一方、本震による揺れの継続時間が非常に長いのが、今回の地震の特徴となっている。

長周期地震動の場合には、特定の卓越周期成分が支配的で選択性の高い、いわゆる後揺れが長時間続くことが特徴であることが

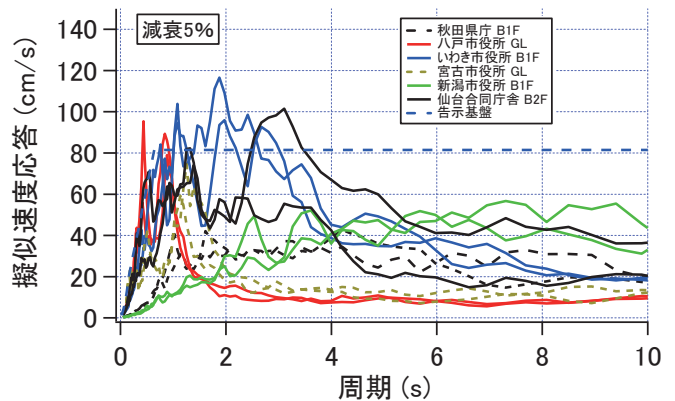


図 9(b) 被災地の BRI 観測点での擬似速度スペクトル

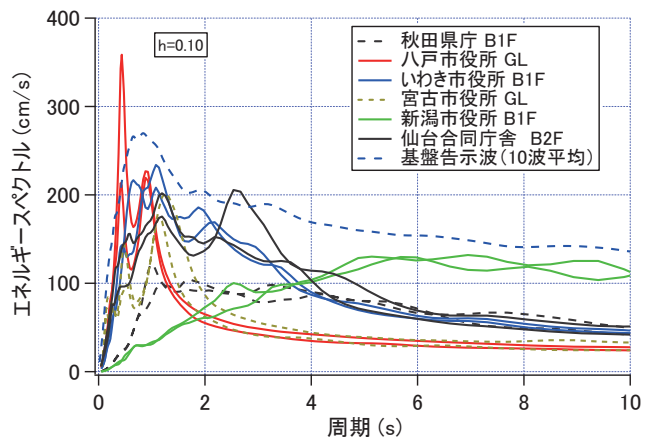


図 10 被災地の BRI 観測点でのエネルギースペクトル

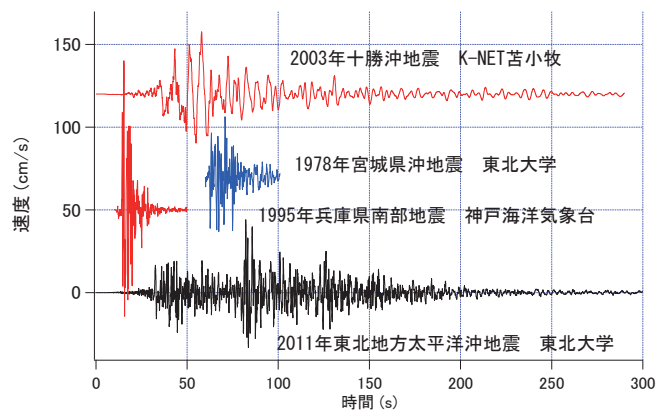


図 11 主要地震動の時刻歴の時間長さの比較

多いが、今回の地震の記録では、震源域が広く、震源の破壊が完了するまでの時間が長かったため、短周期成分も長く継続しており、長周期まで含めた広い周期帯域で、同等な地震動レベルとなっているのが特徴である。

1978 年 6 月の宮城県沖地震で、上層階で 1G を超える加速度を

記録した東北大学の校舎建物でも、今回強震記録が得られている。図 11 に、1978 年宮城県沖地震と今回の記録の波形を比較した。今回の地震における継続時間の長さがよくわかる。

3) 首都圏における長周期地震動

図 12(a)は、東京都北部から埼玉県での地震動スペクトルを比較したものであるが、擬似速度応答スペクトルでは周期6~8秒の成分がやや卓越していることがわかる。しかし、スペクトルレベルとしてはせいぜい80カインであり、過大な建物応答を生じるレベルではない。また、同様に図 12(b)にエネルギースペクトルも示したが、告示波平均レベルを下まわっている。

東京東部から千葉、湾岸における同様の地震動スペクトルレベルは、図 13(a), (b)に示した。擬似速度、エネルギー両方について、市川で周期3.5秒と6~8秒あたりでやや大きくなっているが、それ以外の地点では、告示レベルのほぼ半分程度である。さらに図 14(a), (b)で東京山手から同西部について見てみると、両スペクトル共に告示レベルの半分程度であり、長周期における明瞭な卓越はなくほぼ様なレベルとなっていることがわかる。

4) その他の地域における長周期地震動

その他の地域での、長周期地震動を見てみると、2003年十勝沖地震で、スロッシングによる大型石油タンクの火災が発生したK-NET 苫小牧地点、また大阪の湾岸地域でも、長周期地震動により、高層ビルに被害が発生している。

東北地方太平洋沖地震では、大阪湾岸は震源からの距離が750kmを超えていたにもかかわらず、西日本最大級の超高層建築物の上層階で大きなゆれが観測され、エレベーターでの閉じ込めや防火扉、スプリンクラーの損傷など、非構造における被害が生じた。

これらの被災地以外の地点での今回の地震における地震動レベルを見たのが図 15 である。それぞれの観測地点で、地震動の卓越する周期成分があり、地点により異なっていることがわかる。

わが国の最大級の超高層建築物の一次固有周期が約6秒強である。図 15 でその周期帯域を眺めると、同じ大阪でも湾岸(此花)と内陸部(柴島)とでは、そのレベルに非常に大きな差があることがわかる。また、今回の地震では、振幅の大きさに関しては震源からの距離を考える必要があるが、今後国内で観測される多くのデータを分析して、地域固有の長周期地震動の特性を明らかにしていく必要がある。また東京、大阪、名古屋の大都市圏では、懸念されている巨大海溝地震による長周期地震動の予測に向けて、観測データによる各地点固有の揺れやすさの程度を検証する必要がある。

首都圏(東京)においても、それほど高レベルの長周期地震動となっていないが、地域内では長周期成分の表れ方にサイト固有の性質が現れている。長周期地震動は、その周期に応じて厚い堆積層が存在する各平野内で大きく増幅するものと考えられている。

今回の地震における代表的な強震記録と過去の同様の記録及び告示波など設計に用いられる地震動との比較を図 16 に示した。宮城県内の振幅レベルが大きい記録を4個選んだ。長周期領域においては、2003年9月の十勝沖地震のK-NET 苫小牧地点の記録が周期6~8秒で、過去最大のものとなっている。今回の地震では同周期帯域のスペクトルでこれを上回る記録は観測されていない。

5) 建物応答事例について

長周期地震動に対する応答では、いわゆる共振状態に入ることが大きな応答を生じる主要因となる。

最初に示したように、大規模地震では強いレベルの長周期地震動が震源に生じる。その地震動が四方へ伝播するが、長周期地震動は、短周期のものに比べて相対的に減衰しないで遠くまで到達する。対象構造物直下の深い地盤面に届いた長周期成分を多く含んだ地震動は、地盤に入射し地表の構造物に届くまでに地盤の増幅作用を受ける。地震動は構造物に作用するまでに地盤増幅により地盤の卓越周期成分を多く含む地震動となって、構造物に入射する。仮に地盤の卓越周期が構造物の固有周期に近いと共振状態に近い状況が生まれることになる。

超高層建築物は中低層建築物に比べて一般に減衰定数が小さい。大規模地震で発生する地震動は一般に継続時間が長いので、建築物の固有周期に近い地震動が長時間にわたり建築物に作用する。

低減衰系の応答での共振現象は以下のような簡単な式で表すことができる。入力が単純な正弦波 $A_0 \sin \omega t$ である場合、応答は近似的に、 $(1/2h)A_0(1 - e^{-h\omega t}) \sin \omega t$ となる。ここで、 h は減衰定数である。ここでは、減衰定数が小さく、系の固有振動数と入力の振動数が等しいと仮定している。 $A_0 = 1$ として、時間の経過による応答の変化は、図 17 に示すようになる。したがって、入力が続く限り応答は増大し、減衰定数が小さいと、定常状態に達するまでの必要サイクル(繰り返し)数が大きくなるが、長周期であれば時間を要するとともに、応答倍率も大きくなる。

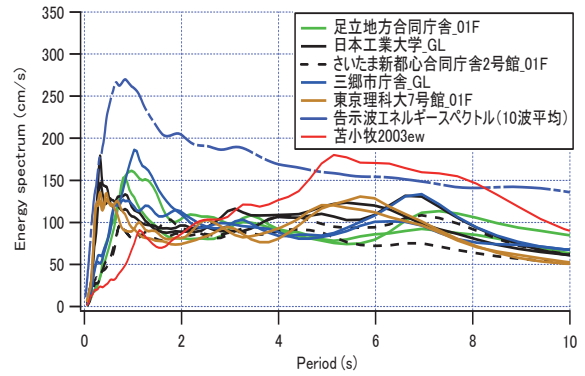
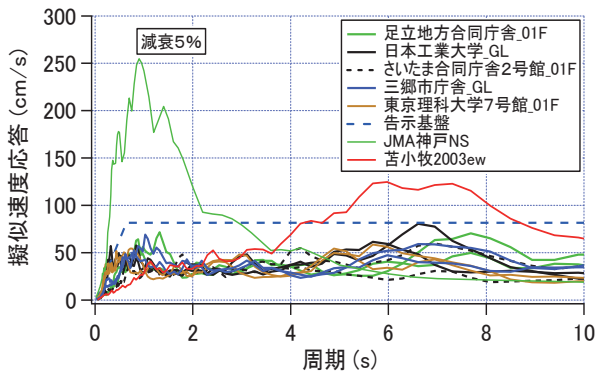


図 12 東京北部から埼玉における左図(a)擬似速度と、右図(b)エネルギースペクトルの観測点間の比較

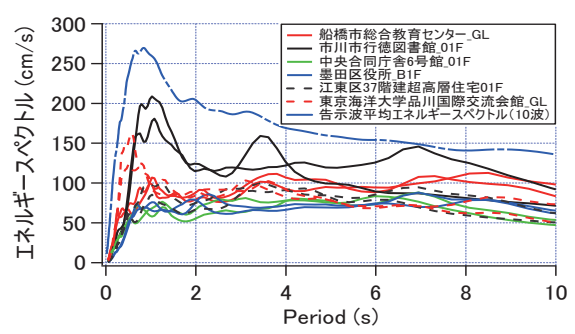
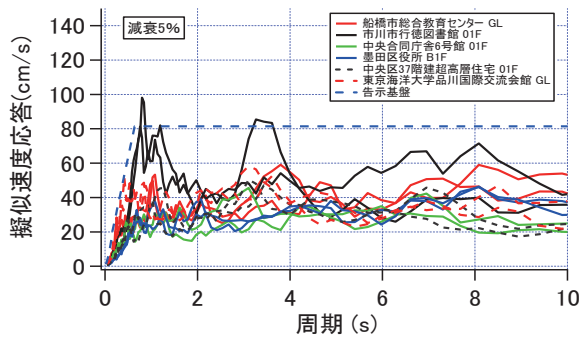


図 13 東京東部から千葉、東京湾岸における左図(a)擬似速度と、右図(b)エネルギースペクトルの観測点間の比較

図 18 は、大阪湾岸の 55 階建て庁舎の S 造超高層建築物(高さ 256 メートル)内で観測された強震記録である。立地地点は震源から 770km の距離にある。この事例では、震源からは遠いが、地震規模が大きかったことから、遠くまで到達した地震動が建物敷地直下の深部地盤の増幅を受け、かつその地盤周期が建物の固有周期に近かったため共振現象が生じたものと考えられる。また、さらに地震動の継続時間が長く、応答振幅の成長が顕著であったことなども大きな応答の原因として考えられる。

図 19 は大阪府が実施する震度観測データを用いて、東北地方太平洋沖地震時の大阪府下の揺れの分布を観測記録の周期 6.4 秒での擬似速度応答スペクトル値から推定したものである。同図から、湾岸地区と東部にも長周期を強く励起する地域があることがわかった。近年観測点が増加したが、自治体震度計のような高い設置密度による観測データを利用して地域ごとの地盤周期の分布を予め把握しておくことも重要と考えられる。

建築研究所は、そのほか全国で、9 棟の超高層建築物と 6 棟の免震建築物で強震観測を実施している。それらの観測された振幅について最後の表 2 に示す。免震建築物の事例の一つを紹介する。つくば市に立地する地上 7 階建て庁舎建築物で、免震装置としては、天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、そして鋼材ダンパー—体型積層ゴムの併用している。本震では、免震装置を挟んで加速度が 1/3 程度に低減され、免震装置の効果が確認されて

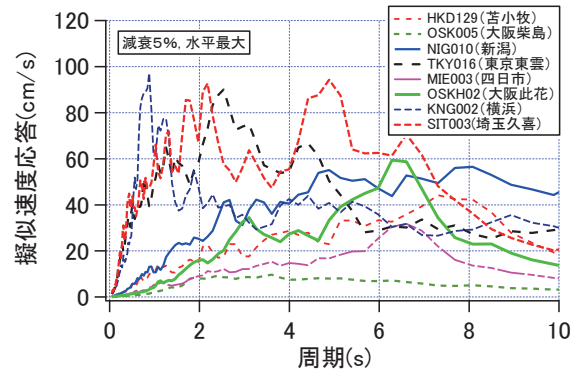


図 15 全国主要地点における擬似速度スペクトルの比較 (水平各成分の応答スペクトルのうち大きい方の値を採った)

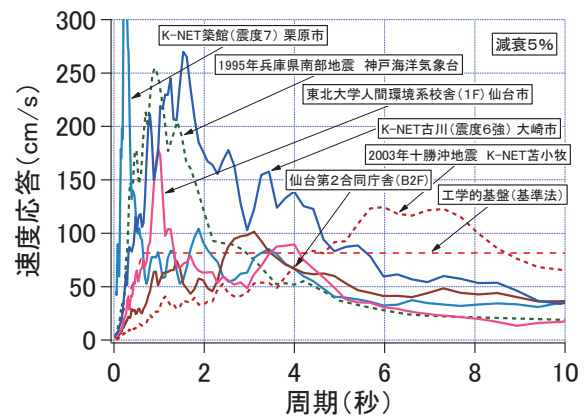


図 16 東北地方太平洋沖地震と既往強震記録の比較

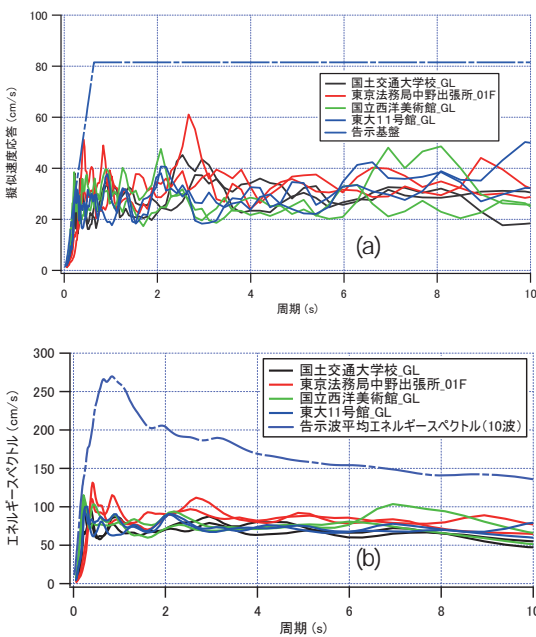


図 14 東京山手及び西部における(a)擬似速度と、(b)エネルギースペクトルの観測点間の比較

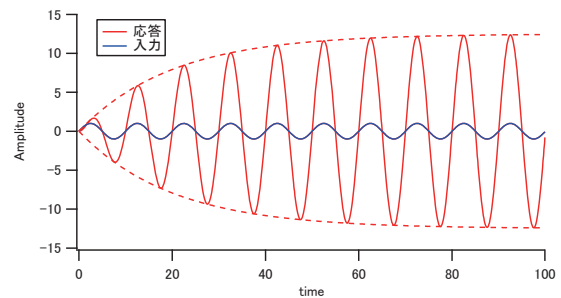


図 17 低減衰系構造物の共振における過渡応答現象

いる。(図 20)

前述の大阪湾岸の超高層庁舎以外では、建物への入力と見られる基部周辺の観測波形には長周期の地震動はあまり含まれておらず、長周期地震動の作用を受けた場合の挙動という状況にはなっていない。

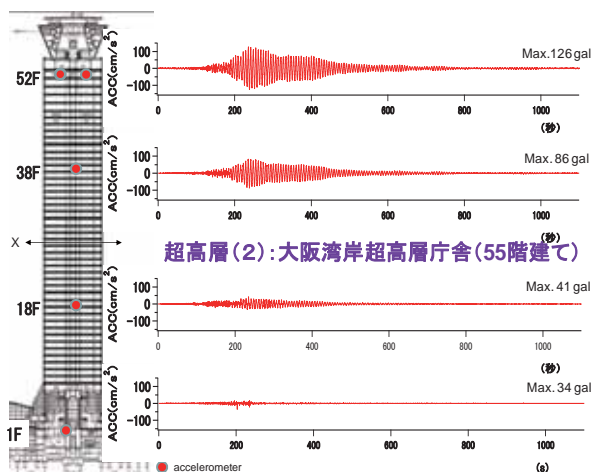


図 18 大阪府咲洲庁舎における観測記録

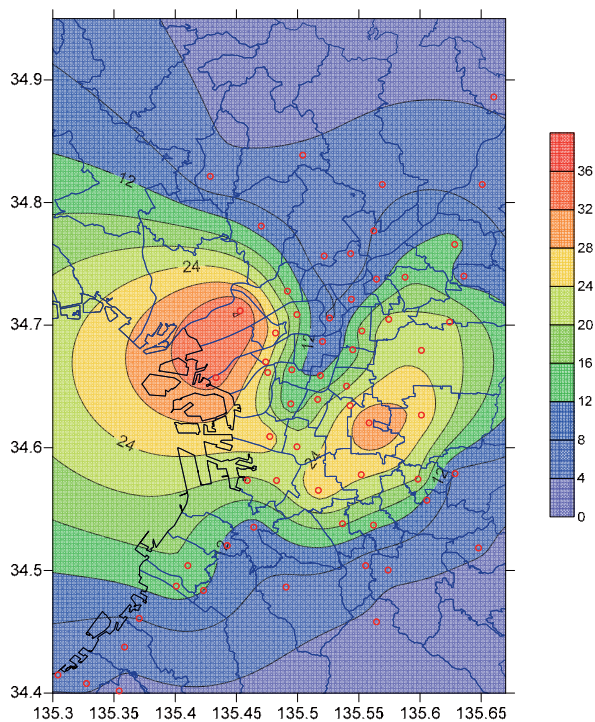


図 19 東北地方太平洋沖地震における大阪地域の揺れ分布
(数字は、周期 6.4 秒の 5%減衰の擬似速度応答スペクトル値)

III 長周期地震動に関する提案評価手法の検証

1) 提案手法による地震動の特徴

過去の地震データに基づいて、個別の震源と観測地点固有の増幅特性により、地震動スペクトルを算定し、震源距離を伝播するのに要する時間が波動の周期によって異なるものと仮定し、群遅延時間を考えて周期成分の重ね合わせを行う方法を提案してきた。

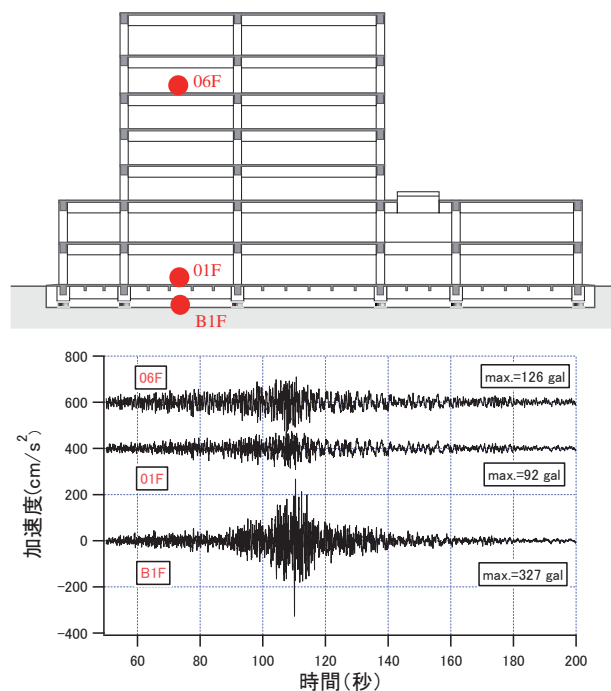


図 20 免震化されたつくば市役所庁舎

この方法は、震源が大きく、震源近接地の観測点である場合には、震源域をいくつかに再分割して個々の断層からの波動を重ね合わせる手法を適用している。例えば、図 21 は 3 連動地震に適用するために震源をいくつかに分割したものであるが、分割した震源の

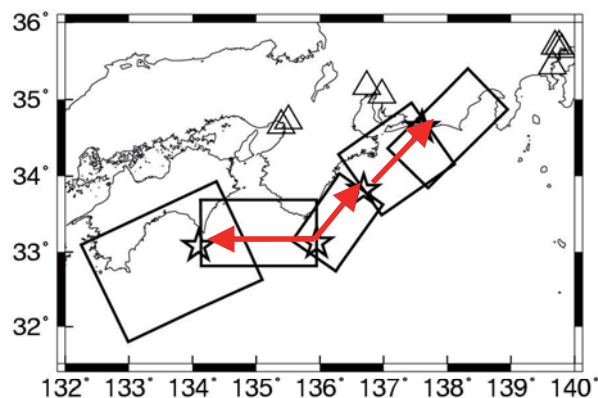


図 21 南海・東南南海・東海・三連動地震の設定破壊プロセス

破壊が進展する順序は何らかの地震学の専門家の判断が必要である。また、それぞれの分割断層から発生伝播する地震動を時間遅れを考慮しながら観測点で重ね合わせて全体の地震動時刻歴を作成する。この場合に、それぞれの構成断層からの波形の重ね合わせに加味されるランダム性のために波形そのものだけでなく応答特性にもばらつきが生ずる。(図 22) このばらつきは、結構大きくなる場合があり、工学的判断とでもいべき何らかの手だてが必

要と考えられる。

2) 東北地方太平洋沖地震での観測データによる長周期地震動の評価

前述のように、大川他(2010)による提案方法について東北地方

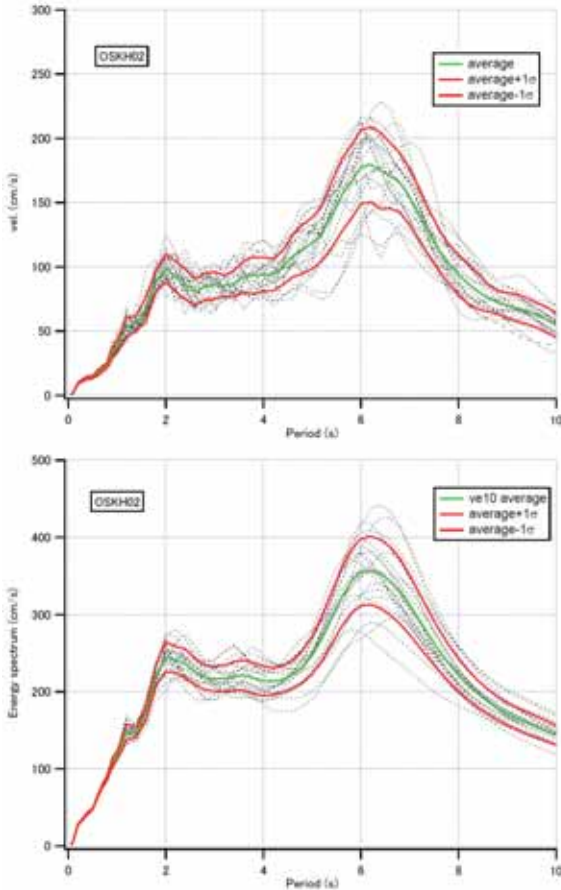


図22 3連動地震模擬波形のばらつき (OSKH02)

太平洋沖地震でその有効性について検証を行っている。

気象庁(2011a)から公表された震源モデルを参考に、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)を3つの巨視的断層面から成る連動型地震と考え、超高層建築物等における長周期地震動への対策試案(2010)において長周期地震動の作成に用いられた経験式に基づき長周期地震動のシミュレーションを実施した結果、以下のことがわかった。

- (1) 周期5秒以下では東北地方太平洋沖地震に対するシミュレーション結果は観測結果をほぼ説明できる。
- (2) 周期5秒以上では提案手法によるシミュレーション波形はやや過大評価となる。

特に関東平野では周期1秒以上で過大評価となっていることがわかった。

図23には今回の地震での揺れの分布を示すものとして5%減衰の擬似速度応答スペクトル振幅の分布を見たものである。

この原因として、以下の可能性が考えられている。

- ① 経験式がモーメントマグニチュードMw8.2以下のデータセットに基づいて作成されているため、連動型の震源モデルを考へてもMwが外挿となる。一方、応答スペクトルの経験式がMwの一次項のみでモデル化されているため、 ω^2 モデルが成り立つとすると長周期領域で過大評価となる。
- ② 関東平野では、太平洋プレートの地震とフィリピン海プレー

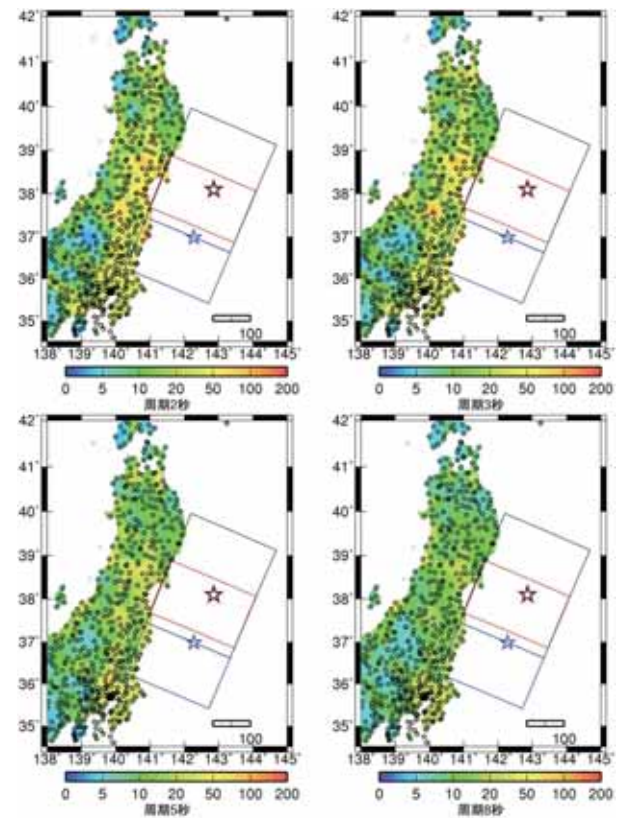


図23 東北地方太平洋沖地震で各地で観測された地震動の5%減衰擬似速度応答スペクトルの周期別の分布(佐藤他)

この地震で、長周期の励起特性が異なる傾向がある。

- ③ 震源モデルが適切でなく修正が必要であることが考えられる。
- ④ 震源位置や震源タイプ(海溝型、内陸型)の違いとサイト特性についても検討が必要である。

上記事項を解決すべく、回帰式モデルの改良やサイト特性の再評価などを今年度実施し、その結果を整理して改良手法を提案することにしている。

さらに、改良手法を適用しながら、東北地方太平洋沖地震で発生した各地の地震動特性を踏まえて、今後発生が懸念されている

南海トラフにおける巨大地震における地震動について主要地点での予測を行うことにしている。

それらの地震動を受けた場合の既存超高層建築物や、免震建築物について地震応答解析を行い、応答レベルの予測を行う必要がある。

さらに、オリジナルの手法でも実施したと同じように作成地震動の特性のばらつき(単独、連動型それぞれについてスペクトル、継続時間のばらつき)や、応答特性のばらつき(スペクトル、減衰、継続時間)について検討も必要と考えている。

IV 今後の課題

東北地方太平洋沖地震で、長周期地震動が明瞭に出た地域は多くなかった。超高層建築物等では、巨大地震による長周期地震動の影響で共振に近い状態になることは避けなければならない。

東北地方太平洋沖地震ののち、各地震の長期評価や震源モデルの見直し作業が行われている。個々の地震のみならず2連動、3連動の場合についてもより現実味を帯びて議論されている。

地震調査研究推進本部や内閣府では、南海トラフなどに発生する巨大地震の震源モデルの見直し作業を開始している。最終的には、そのような従来よりも厳しい条件下での地震動の検討が今後必要となると考えられる。

謝 辞

本稿では、独立行政法人防災科学技術研究所が実施している全国強震観測ネットワークのK-NET、KiK-netの平成23年東北地方太平洋沖地震における観測記録を利用させていただいた。また、図19の作成に当たっては、大阪府設置の地震計のデータを利用させていただいた。

参考文献

- 1) David M. Boore, "Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method", Pure and Applied Geophysics, Vol. 160, pp. 635-676, 2003
- 2) 気象庁報道発表資料「平成23年(2011)東北地方太平洋沖地震」について(第28報)別紙1-遠地実体波による震源過程解析(暫定)- 2011.3.25
- 3) 佐藤智美他、「経験式に基づく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」、日本地震工学会年次大会、2011

- 4) 佐藤智美他、「応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成」、日本建築学会構造系論文報告集、第75巻、第649号、pp. 521-530、2010
- 5) 佐藤智美他、「長周期応答スペクトルの地盤増幅率の経験的予測式とその理論的解釈」日本建築学会構造系論文報告集、第76巻、第669号、pp. 1905-1914、2011
- 6) 国土交通省、「超高層建築物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
- 7) 大川出他、「長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討」、建築研究所研究資料第127号、平成22年12月
- 8) (財)日本建築センター、ビルディングレター、1986.6
- 9) 建設省建築研究所、(財)日本建築センター、「設計用入力地震動作成手法技術指針(案)本文解説編、平成4年3月
- 10) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報)(東日本大震災)、2011.5、国土技術政策総合研究所資料No.636/建築研究資料No.132 (<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/20110311/0311quickreport.html>)

表2 建築研究所で得られた超高層・免震建築物の強震記録一覧

記号	観測地点	Δ(km)	I _{JMA}	設置方位	位置	最大加速度 (cm/s ²)			備考
						H1	H2	V	
SND	仙台第2合同庁舎(超高層)	175	5.2	074°	B2F*	163	259	147	
					15F	361	346	543	
HCN2	八戸市庁舎別館(免震)	292	5.2	164°	GL*	286	210	61	
					G30	86	89	49	地中 30 m
					G105	36	46	32	地中 105 m
					10F	120	123	206	
					01F	91	122	73	
					B1F	100	104	58	
TKC	つくば市庁舎(免震)	334	5.2	004°	B1F*	327	233	122	
					01F	92	76	198	
					06F	126	91	243	
SIT2	さいたま新都心合同庁舎 2号館(超高層)	378	4.4	340°	B3F*	74	63	42	
					10FS	119	138	62	
					27FS	248	503	107	
SITA	さいたま新都心合同庁舎厚生棟	378	4.5	313°	01F*	90	105	47	
SMD	墨田区庁舎(超高層)	380	4.3	000°	20F	385	290	81	
					08F	263	197	46	
					B1F*	69	66	34	
NMW	国立西洋美術館(免震)	382	4.8	218°	GL*	265	194	150	
					B1FW	100	79	84	
					01FW	76	89	87	
					04F	100	77	90	
TKD	コーシャタワー佃(超高層)	385	4.4	180°	01F*	87	98	41	
					18F	118	141	64	
					37F	162	198	108	
CGC	中央合同庁舎 6号館(超高層)	386	4.4	208°	01F*	90	86	45	
					20B	208	148	173	B棟 20F
					19C	179	133	130	C棟 19F
CG2	中央合同庁舎 2号館(超高層)	386	4.2	208°	B4F*	75	71	49	
					13F	137	113	72	
					21F	121	131	104	
CG3	中央合同庁舎 3号館(免震)	386	4.5	208°	B2F*	104	91	58	
					B1F	55	41	62	
					12F	94	82	104	
YMN	山梨県庁(免震)	468	3.9	006°	B1F	47	39	18	
					GL*	51	44	20	
					01F	37	52	20	
					08F	41	51	25	
KGC	釧路合同庁舎(免震)	558	2.6	167°	GL*	12	14	6	
					G10	10	10	4	
					G34	5	5	3	
					B1F	8	12	4	
					01F	10	16	6	
					09F	16	19	12	
OSK	大阪合同庁舎 3号館(超高層)	759	2.9	189°	18F	65	38	7	
					B3F*	11	9	5	
SKS	大阪府咲洲庁舎(超高層)	770	3.0	229°	01F*	35	33	80	
					18F	41	38	61	
					38F	85	57	18	
					52FN	127	88	13	
					52FS	129	85	12	

注) Δ: 震央距離、I_{JMA}: 計測震度(*印のセンサーの3成分の加速度記録から気象庁の方法で算出。なお、地盤上の記録からの算定でない場合はアンダーラインを付している。)、設置方位: 北から東回りに測った方位、H1, H2, V: 水平1(設置方位)、水平2(設置方位に直交)及び鉛直方向の最大加速度

上下(V)成分のセンサー異常(無信号)のため、水平2成分の加速度記録から算出