

巨大地震による 長周期地震動とその対策

入倉孝次郎¹

愛知工業大学地域防災研究センター(〒470-0392 豊田市八草町八千草1247)
E-mail:irikura@geor.or.jp

今世紀の前半にも発生の可能性の高い南海トラフ地震はマグニチュード 8.0~8.4 の巨大地震で、南関東から九州に至る広い地域が強い長周期の地震動に襲われることになる。強震動域となる名古屋、大阪、東京などの巨大都市およびその周辺域には、未だ巨大地震の地震動では験されていない超高層建築物、免震構造物、長大橋、石油タンクなどの長周期構造物が存在する。震源域近傍では長周期のみならず短周期を含む広帯域の強震動が予測されるがそこには新幹線や高速道路など我が国の基幹交通網が走っている。しかしながら、このような巨大地震が発生したときの大都市の堆積盆地における長周期を含む広帯域地震動の特性について、これまで地震防災の観点から殆ど検討がされてこなかった。予測される広帯域地震動に対して既存の都市構造物が十分な耐震性を有しているかどうかの照査は緊急の課題といえる。構造物の耐震診断や補強に不可欠な巨大地震の地震動の予測に関する調査研究の到達点と今後の展望について報告する。

Key Words : *devastating great earthquake, broad-band ground motion, Nankai-trough earthquake, , strong motion prediction*

1. はじめに

東海から四国沖にある南海トラフで巨大地震の高い発生確率は 2005 年 1 月を起点として今後 30 年以内に東南海タイプ地震が 61%であることが地震調査委員会より報告された(地震調査委員会, 2005)。これらの南海トラフ地震は 2003 年十勝沖地震の直前の発生確率とほぼ同じになっており、その意味ではいつ起こっても可笑しくない段階になってきた。しかしながら、地震の発生確率が高いというだけでは被害を軽減するための対策は立てられない。将来の大地震による被害をできるだけ少なくするは、地震発生の高い地震が実際に起こったとき構造物の被害の元となる地面の強い揺れ、強震動、がどの程度かの情報が不可欠となる。

南海トラフ沿いに発生する東海地震や南海地震は 2003 年十勝沖地震と同じプレート境界に発生する海溝型の巨大地震である。これらの地震による揺れは内陸の活断層に起こった 1995 年兵庫県地震とは異なった性質をもつ。内陸地震による被害は震源となる断層付近に酋長するが、海溝型地震による被害は震源域から遙か離れた地域に及ぶことがある。2003 年十勝沖地震の時、特に大きな被害の出た苫小牧西港は震源域から 200 km も

離れていた。

海溝型の巨大地震による揺れは震源近傍の地域では短周期も長周期ももつ広帯域強震動を引き起こす。長周期の地震動は、図 1 の十勝沖地震の例で示されるように、殆ど減衰しないで伝わり堆積盆地地域で大きく増幅される性質がある(岩田, 2003)。2005 年紀伊半島南東沖地震でも図 2 に示されるように大阪湾沿岸域、伊勢湾沿岸域、東京湾沿岸域など長周期の大きな揺れが観測された(古村, 2004)。幸い紀伊半島南東沖地震は 2003 年十勝沖地震に比べかなり小さく震源域も沿岸から遠く離れていたため被害を引き起こすほど強さはなかった。想定されている東海地震や南海地震は今回の地震より規模が一回り大きく震源域も沿岸にきわめて近いところに発生する。

ここでは、確実にやってくる巨大地震やその前後の内陸の活断層地震に対する「揺れの予測」の現状と問題点を総括して、我々がどのような備えをすべきか考えてみたい。とくに、南海トラフ地震の震源域に近い地域では、想定する震源モデルや地下構造に依存して予測結果が大きく変わること、さらに震源からかなり離れた地域でも長周期の揺れにより被害が引き起こされる可能性があること、など巨大地震特有の性質に注意すべきであろう。

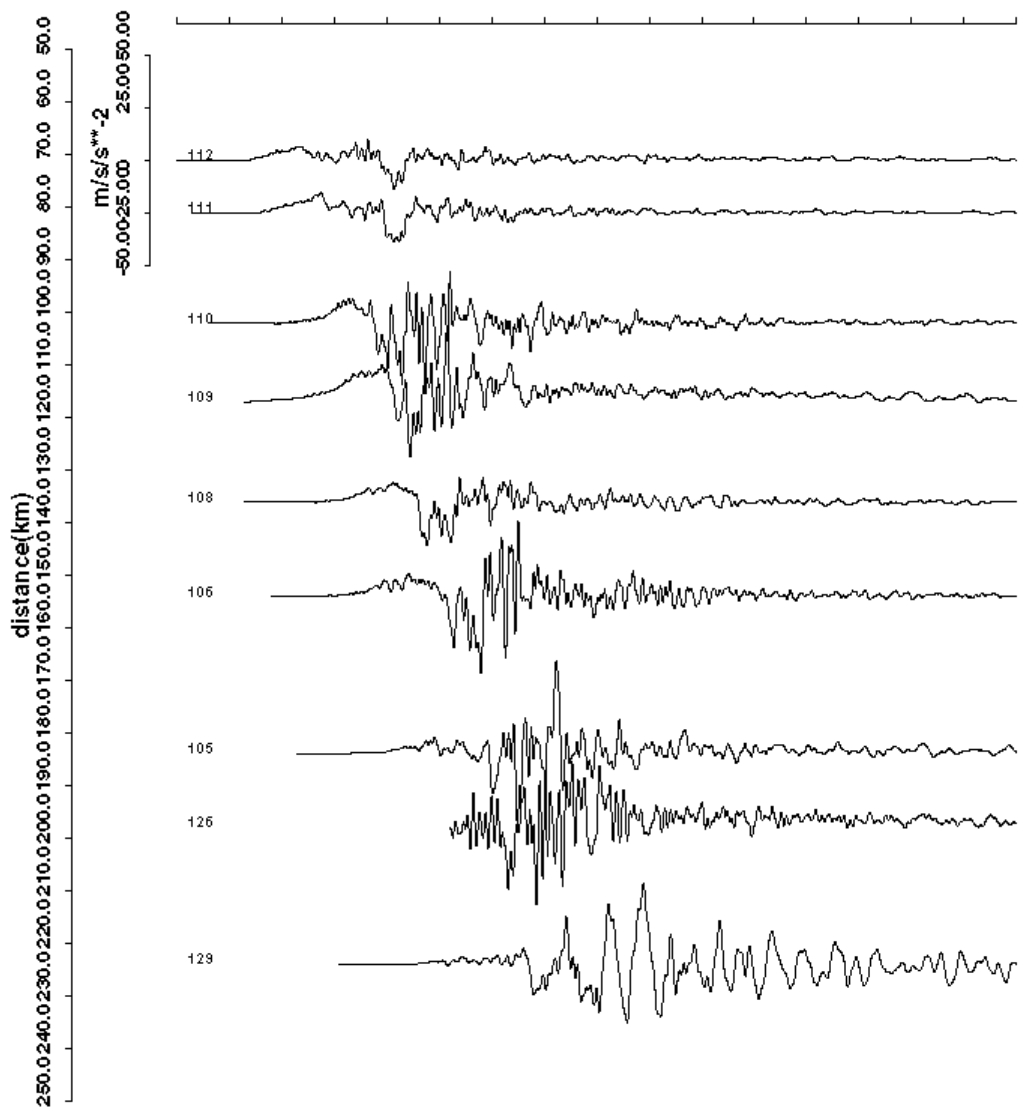
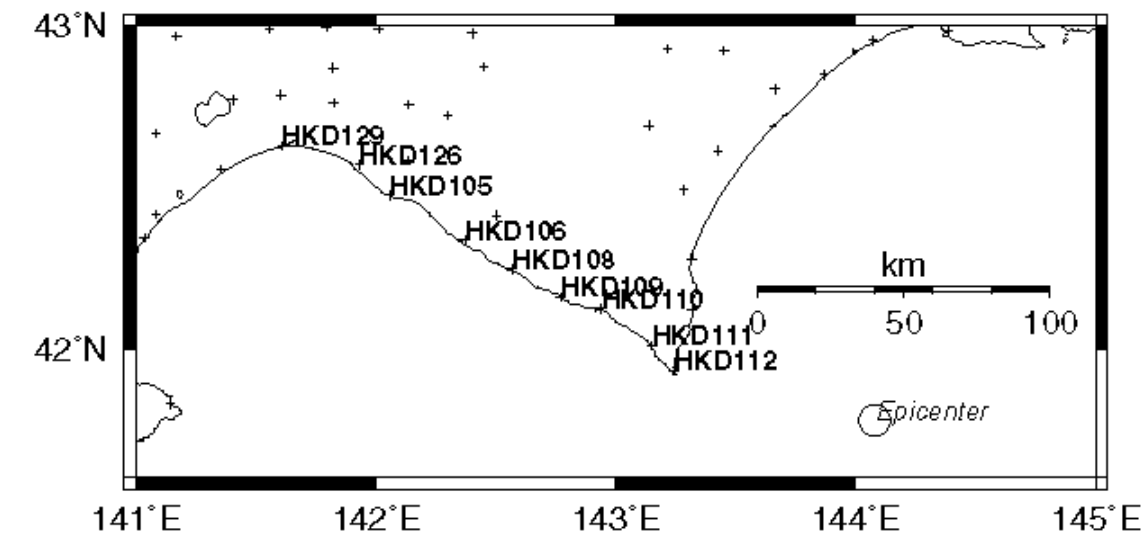


図1. 2003年十勝沖地震により生成された長周期地震動。
 上：震源から苫小牧方面に向かう K-NET 観測点。下：東西動速度記録
 (一秒でLPF)。震央距離で並べている。(岩田、2003)

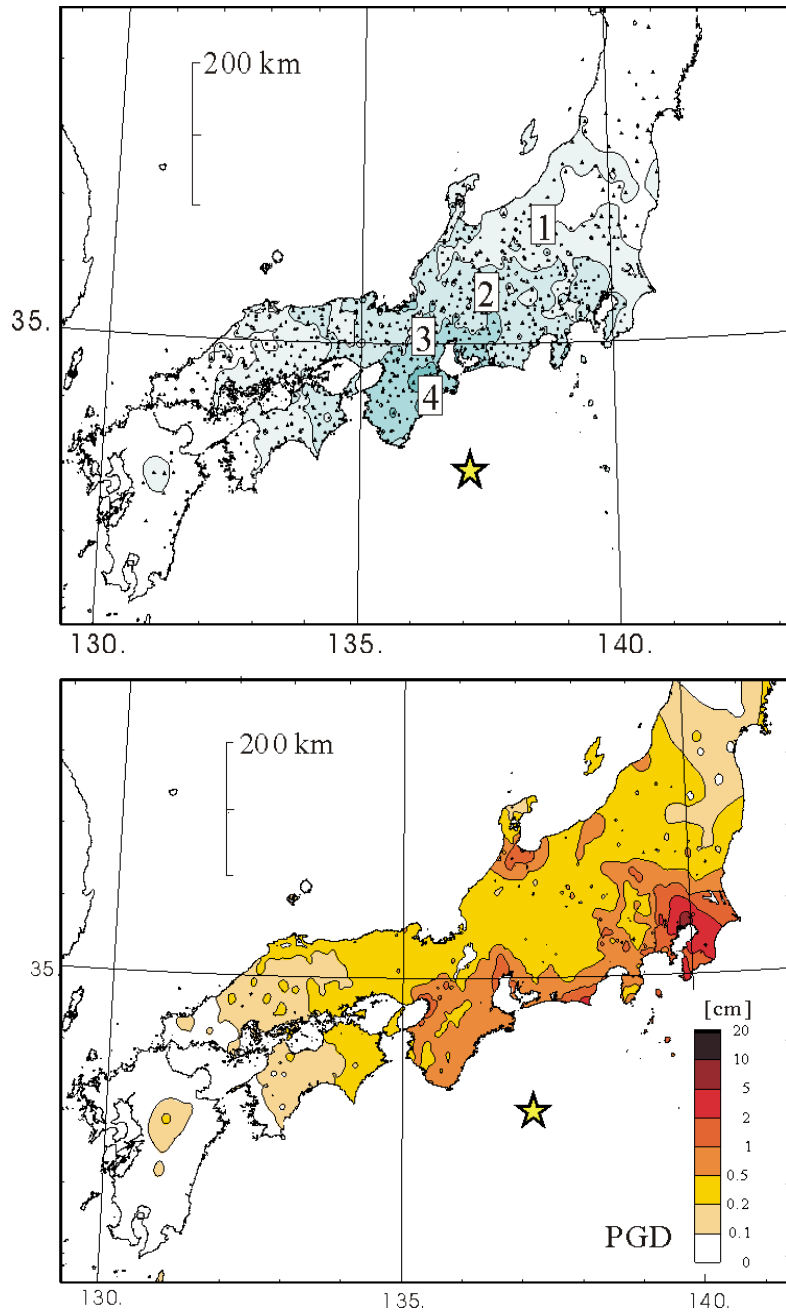


図2 2004年9月5日紀伊半島南東沖の地震 (M7.4) と長周期地震動

上 震度 震度は同心円上に弱まり、関東の揺れは最大震度2程度

下 最大変位—長周期地震動 千葉県姉崎石油コンビナートでは液面変動
23cmが記録された。(古村、2004)

2. 巨大地震からの長周期地震動

繰り返し発生する「南海トラフ地震」は、1944年と1946年の昭和東南海、南海地震、1854年安政東海、南海地震、1704年宝永地震のように震源域の大きさやそこからの揺れの強さがいつも同じというわけでは

ない。最近の強震動の研究から、地震のときの揺れの強さは震源域の大きさというよりむしろ震源域のなかのすべりの不均質性によることがわかってきた(入倉・三宅, 2001)。震源域はそこでのすべりの不均質性からいくつかの断層セグメントに分けられる。断層セグメントの組み合わせでいくつかの異なったシナリオ

の地震が発生する、と考えられる。

それではどうしてすべりの不均質性は生じるのだろうか。巨大地震の“巣”となっている四国沖の海底の南海トラフでは、日本列島の陸側のプレートの下に、海側のプレートが沈み込もうとしている。南海地震は陸のプレートの“跳ね上がり”で起こると考えられている。陸と海の2つのプレートの接触面が凸凹しており、プレートが強くくっついている固着域と弱くくっついているところがあり、その結果として地震のときすべりの不均質が生じる。プレートが強くくっついているところがアスペリティと呼ばれ、そこから強い揺れが生成される。したがって、将来の地震の震源域の中で固着域とそうでないところがわかればつぎの地震の強震動予測の重要な情報となる。

最近のGPS（全地球測位システム）による地殻の動きの精密な測定、高密度地震観測網による微小地震の活動の不均質性や震源メカニズムの変化、さらに反射波を用いたプレートの境界の詳細な形状や反射強度の測定などにより、2つのプレートの凸凹具合、それに伴う固着の程度、などの研究が進みつつある。例えば、菊地・山中(2001)は、1968年十勝沖地震のときの2つのアスペリティのうち南側のアスペリティが1994年三陸はるか沖地震のときのアスペリティとほぼ同じところに位置することから、アスペリティは繰り返す可能性が高いことを指摘している。このことは、地震の前にアスペリティがどこにあるかがわかれば、次の地震がどのような震源域でどの程度の規模となるか、さらにどこに強い揺れを生じるかが予測可能となることを示すもの、と考えられる。

強震動を予測する上で重要なのは震源の性質のみならず地下構造や表層地盤の地震動への影響である。1995年兵庫県南部地震のとき震源となったのは野島、須磨、諏訪山断層など六甲断層系を構成する断層群と推定されているが、大きな被害は震源断層の直上ではなく断層線から南に1~2 km離れた軟らかい表層地質をもつ堆積盆地側に分布したことが知られている。これらの被害の集中域は帯状に連なっていることから「震災の帯」と呼ばれた。その後の研究でなぜこのような現象が起きたかが明らかになってきた(入倉, 2002)。この地震の被害分布の特徴として、震源となった断層帯の北側に位置する六甲の丘陵地域は表層地質が岩盤や硬質地盤のため震源近傍にもかかわらず殆ど被害を受けなかったことがあげられる。またもう1つの特徴として、震源断層は阪神側だけでなく淡路側も延びているのに阪神側の方が被害が大きかったことがあげられる。これは阪神側のほうが人口密度が高く家屋が密中央防災会議も想定東海地震および東南海、南海地震

集していたことにもよるがそれだけでは説明は不十分である。

これらの被害の分布は強震動予測する上での問題点を教えてくれている。「震災の帯」の生成原因は、①断層破壊が明石海峡から阪神方向に伝播したことにより阪神側には破壊伝播の指向性効果によりパルス状の衝撃的地震動が生じ、②さらにこの地震動は、盆地端部付近で速度の遅い堆積層内を下からゆっくり上昇してくる波と速度の速い岩盤側から回りこみ堆積層内を水平方向に伝わる波とが重なりあって、断層から1~2 km離れたところで大きく増幅された、ことによると考えられている³⁾。大きな被害が生じたもう1つの原因は、地震動と構造物の周期特性の関係があげられる。「震災の帯」付近で観測された地震動は周期約1秒の2つのパルス状の波形からなっていた。このパルス状波形は阪神側の震源断層に存在した2つのアスペリティからの地震動によるものである。この1秒付近の卓越周期は中低層構造物や木造家屋の強震動時の揺れやすい周期と一致しているため、構造物が大きく揺れて大破壊に至った、と考えられている。

このように強震動の性質は震源の大きさ・破壊伝播方向や震源から対象地域までの地下構造、さらに地盤条件によって大きく変わる。兵庫県南部地震のような直下地震では木造家屋や中低層の構造物が大きな被害を受けたが、巨大地震ではその地震動の周期特性も異なるため兵庫県南部地震では被害を受けなかった構造物に被害が起こる懸念もある。

予想される南海トラフの巨大地震の震源域は1995年兵庫県南部地震に比べると50倍以上の面積にもなり、そこから生成される地震動は兵庫県南部地震の時のような10数秒という短い時間の揺れではなく、大振幅で継続時間の長い強震動がきわめて広域を襲うと考えられる。巨大地震に対して予測される強震動により関西地域の家屋や構造物がどのような被害を受けるかの研究が極めて重要となっている。

3. 強震動評価とそれによる被害の予測

国の地震調査委員会や中央防災会議では最近の地震学の成果を取り入れて、近い将来発生が予測されている「南海トラフ地震」や内陸活断層地震による被害を軽減するための強震動の定量的評価を試みている。地震調査委員会はこれまでに糸魚川・静岡構造線断層地震をはじめとする内陸活断層地震や東南海、南海地震などの海溝型地震の強震動評価を行い発表している。中央防災会議も想定東海地震および東南海、南海地震

の震度および津波高の予測を行いこれらの地震に対する被害予測を行っている。

想定される地震に対してその強震動を予測するには、巨視的震源パラメータとしての断層面積と地震モーメント、地震規模（マグニチュード）のみならず微視的震源パラメータとしてのアスペリティの位置、サイズ、そこでの応力降下量の設定が必要となる。例えば、「南海トラフ地震」を例にとると、巨視的パラメータは以下のように設定される。

震源域は、微小地震の震源分布と速度構造調査などからプレート境界面を推定し、過去の地震の地殻変動、津波、震度分布などから水平方向の広がり、さらに温度分布から深さ約 10 km ~ 30 km の地震発生層の幅を推定することにより総断層面積が想定される。過去の地震から震源域での平均応力降下量を仮定すると、断層面積から地震モーメント、そして地震マグニチュードが計算される。微視的パラメータについては、過去の地震（ここでは 1944 年昭和東南海地震および 1946 年昭和南海地震）の震源すべり分布に対するインバージョン結果を参考にアスペリティの位置を決め、アスペリティの面積とそこでの応力降下量はこれまでの海溝型地震の加速度震源スペクトルレベルから推定される。

次におこる東南海・南海地震が昭和タイプか安政タイプかあるいは宝永タイプとなるかはわからない。

必ずやってくる巨大地震による被害を出来る限り小さくするには安政タイプや宝永タイプなど異なる地震シナリオを想定して揺れや津波を予測して、それに応じた防災対策の検討が必要である。

上記の考えに基づいて、中央防災会議「東南海・南海地震等に関する専門調査会」は「東南海、南海地震についての強震動、津波の分布及び揺れによる建物被害等について」の報告を公表している（中央防災会議、2003）。同会議の強震動予測はこれまでの東南海地震と南海地震の震源域が同時に破壊される場合を想定し、経験的な距離減衰式を用いた最大速度の評価と同時に震源域にアスペリティを想定して統計的グリーン関数法を用いたシミュレーションによるものである。経験的手法もシミュレーションもどちらも、はじめに工学的基盤までの最大速度の推定を行い、つぎに表層における増幅を国土数値情報に基づく方法（翠川・松岡、1995）やボーリングデータなどにより推定して地表の最大速度を推定し、最大速度と気象庁震度の経験的関係式から震度を評価している。シミュレーションの方法は強震動評価部会のレシピをほぼ踏襲しているが、震源域やアスペリティの設定について過去の地震の震度分布にできるだけ適合するように調整を行っている。強震動予測の結果としては経験的な方法とシミュレーション結果を合わせてそれらの大きい方の震度値を図3のように地図で示している。

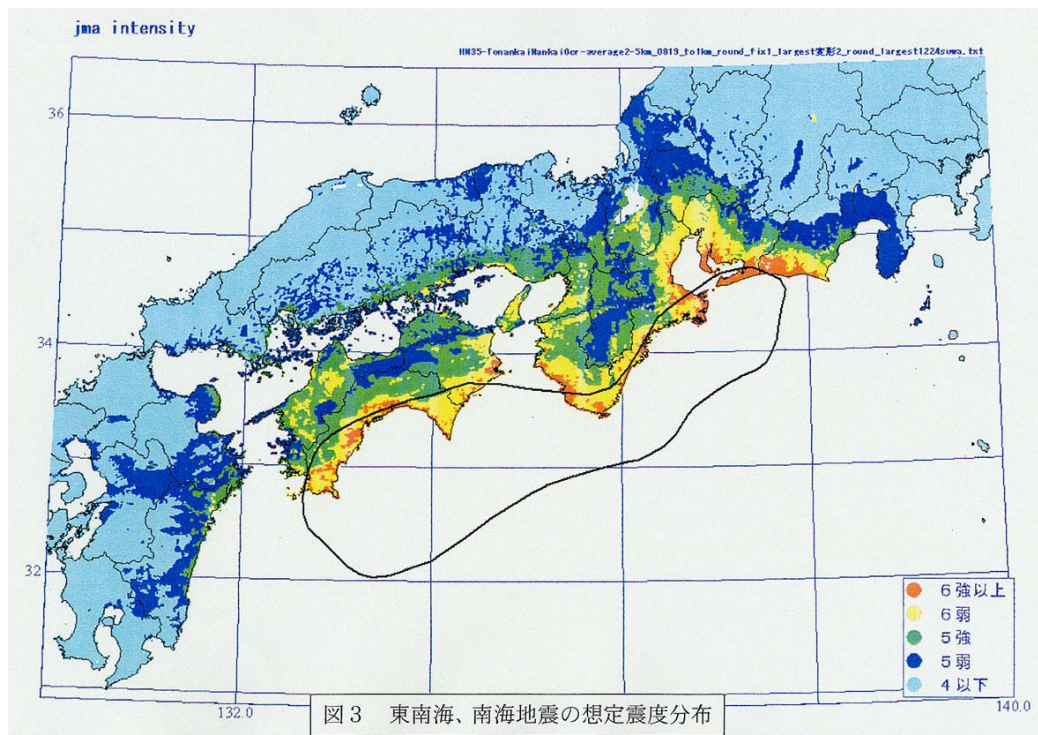


図3. 東南海地震と南海地震が同時に発生したときの震度分布（中央防災会議, 2003）

中央防災会議の報告で示される震度分布は、宝永タイプの名古屋以西の震度分布および昭和東南海の静岡以東の震度分布とほぼよく一致している。ただし、大阪、奈良盆地など一部の地域では一致しない点もみられる。この理由としては、過去の震度分布の精度の問題以外に、地下構造の影響評価、アスペリティの設定位置などが考えられる。

中央防災会議の強震動予測は震度分布を目的としているため周期1秒以下の短周期地震動の推定に有効な統計的グリーン関数法を用いているが、この方法は一般に実体波（S波）部分のみ評価しかできないので表面波の影響の大きいより長周期の地震動の推定には適していない。長周期地震動を含む地震動の評価を行うには適切な小地震の記録をグリーン関数として用いる経験的グリーン関数法、あるいは長周期地震動を有限差分法などで数値的に評価するハイブリッド法などを用いる必要がある。

前者の経験的グリーン関数法は地下構造の情報を必要としないという大きな利点はあるが、想定震源域付近に発生した小地震の記録が必要なためきわめて限定的な地点にしか適用できない。釜江・他(2003)は大阪の上町台地にある管区気象台で速度型強震計で得られた記録を用いて経験的グリーン関数法による東南海、

南海地震、さらに東南海と南海地震の同時発生に対する地震動のシミュレーションを行っている。震源モデルは図4(a)に示されるように地震調査委員会によるモデルを採用している。東から想定東海地震、東南海地震、南海地震の3つのセグメントを考え、各セグメントにおけるアスペリティのサイズと実効応力は1854年安政東海、南海地震に対応させて設定している。次の南海トラフ地震はこれらのセグメントの種々の組み合わせにより異なった地震動が生成されることになる。個々のセグメントが別々に或いは同時に破壊した場合に大阪の上町台地で推定される地震動波形が図4(b)に、それらの速度応答スペクトルが図4(c)に示される。南海地震や東南海・南海地震が起こると、上町台地の地震動は殆どすべての周期で損傷限界は超えるが、5秒付近を除いてほぼ安全限界内に収まっている。問題は5秒付近では大幅に安全限界を超えていることにある。これは大阪盆地の堆積層により地震動が大きく増幅されることによるもので、実際には大阪地域では堆積層の厚さの違いで卓越周期は3～6秒に変化する。上町台地は比較的硬質の地盤にあるため、予測された地震動は相対的に小さく評価される傾向がある。一般的に大阪周辺ではこれより大きい揺れとなる可能性が高いと考えられる。

東南海・南海地震の同時発生を想定した強震動予測

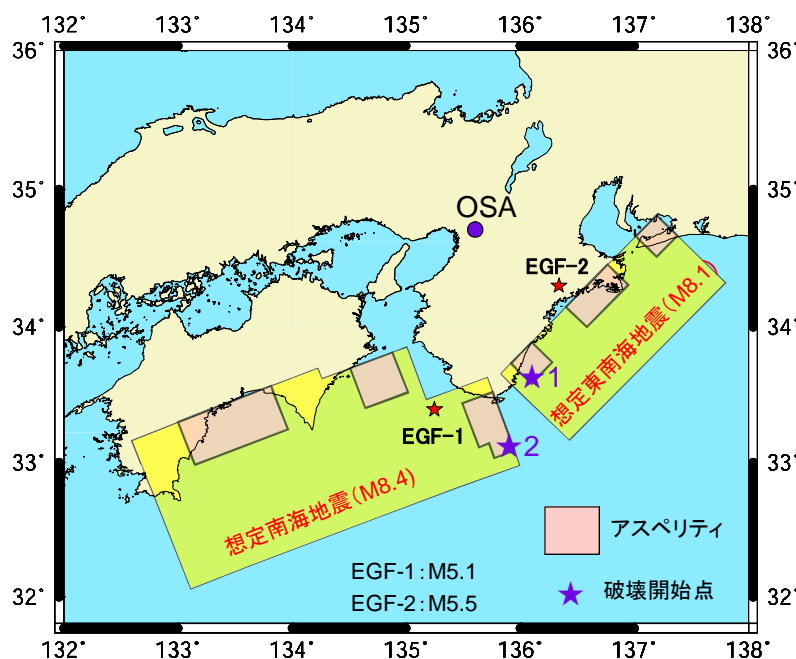
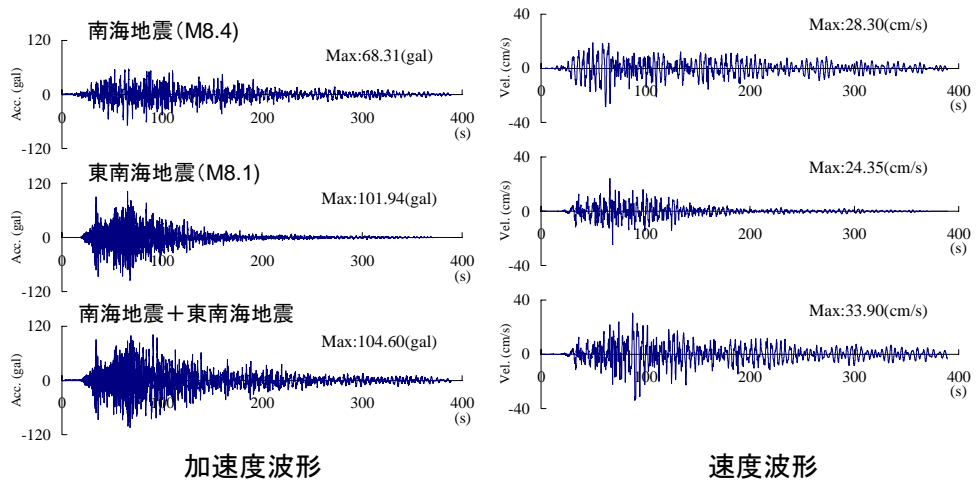


図4(a)

東南海・南海地震の同時発生を想定した強震動予測結果

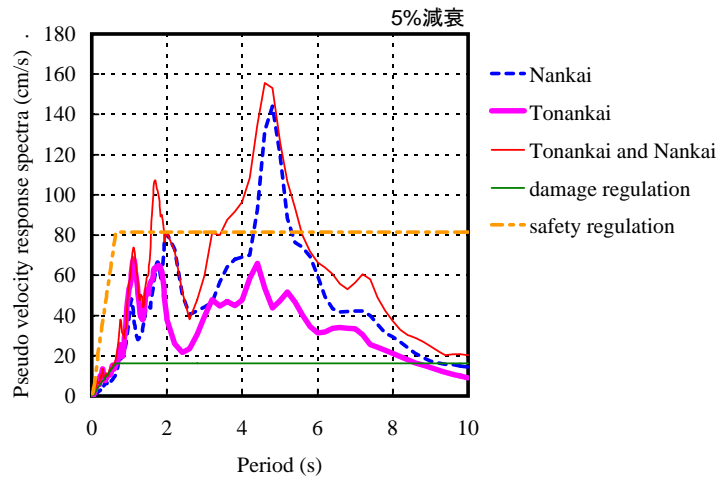
予測地点: 大阪市内上町台地上 (OSA)



(b)

東南海・南海地震の同時発生を想定した強震動予測結果

予測地点: 大阪市内上町台地上 (OSA)



(c)

図4 南海トラフ地震（東南海、南海、および2つの地震の同時発生）で生成される大阪上町台地における地震動(釜江・他, 2003)。

4. おわりに

21世紀の中頃までには確実に発生すると考えられる南海トラフ地震が起こると、2003年十勝沖地震よりも広い領域がより大きな長周期地震動に襲われることになる。震源域に近い大阪平野、濃尾平野などの大規模堆積盆地では、人口の集中だけでなく多数の長大構造物があり、長周期地震動により大被害を引き起こされる可能性がある。南海トラフ地震の時に生成される地震動の性質を知ることが長大構造物の被害を最小限に食い止めるために不可欠な緊急の課題である。

この巨大地震による揺れは震源近傍の地域では短周期も長周期ももつ衝撃的震動となり1995年兵庫県南部地震と似た被害を引き起こされる可能性がある。一方、長周期の地震動は殆ど減衰しないで伝わり堆積盆地地域で大きく増幅される性質があるため、震源域から離れた地域でも長周期の大きな揺れに襲われる可能性がある。特に2005年紀伊半島南東沖地震で大きな長周期の揺れが観測された大阪湾沿岸域、伊勢湾沿岸域、東京湾沿岸域などで対策が必要とされる。2004年紀伊半島南東沖地震は幸い規模も小さく震源域も沿岸から遠く離れていたため被害を引き起こすほど強さはなかったが、想定されている東海地震や南海地震はそれよりも規模が一回り大きく震源域も沿岸にきわめて近いところに発生することに注意すべきである。迫り来る南海トラフ地震に対する防災対策を考える上で強震動性状や津波高の予測精度の向上はキーとなるものである。中央防災会議の中間報告は地下構造の調査がまだ十分になされていないことや長周期の地震動については全く考慮されていないなど多くの問題点が残されている。とくに、長周期地震動により被害を受

ける可能性のある大型構造物は過去の地震の時には存在していなかった。巨大地震に対応した強震動や津波の評価方法の確立や予測精度の向上と同時にそれに対応する防災対策の検討が急がれる。

参考文献

- 入倉孝次郎：震災の帯、アエラムック、朝日新聞社、2002。
- 入倉孝次郎、三宅弘恵：シナリオ地震の強震動予測、地学雑誌、特集号「地震災害を考える—予測と対策」、Vol.110, No.6, pp.849-875, 2001。
- 岩田知孝：2003年十勝沖地震、強震アレイを用いた地震動特性の分析、京都大学防災研究所ホームページ、2003。
- Kamae, K., H. Kawabe and K. Irikura : Strong ground motion prediction for huge subduction earthquakes using a characterized source model and several simulation techniques, 13WCCEE, Vancouver, Paper No, 655 (CD-ROM), 2004.
- 菊地正幸、山中佳子：既往大地震の破壊過程＝アスペリティの同定、サイスモ、Vol.5, No.7, pp.6-7, 2001。
- 地震調査委員会：全国を概観した地震動予測地図報告書 分冊1：確率論的地震動予測地図の説明 2.2.2 海溝型地震、pp.53-59, 2005。
- 中央防災会議「東南海・南海地震等に関する専門調査会」：第14回会合（2003.9.17）資料1、内閣府中央防災会議ホームページ、, 2003。
- 古村孝志：2004年紀伊半島南東沖地震(M7.4)と長周期地震動、東京大学地震研究所ホームページ、2004。
- 翠川 三郎・松岡 昌志：国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価、物理探査 Vol.48, No.6, pp.519-529, 1995。

(2005年10月1日)