

地震防災対策のための地下構造データベースと強震動予測の高度化 Database of Underground Structures for Earthquake Disaster Mitigation and Development of Advanced Strong Motion Prediction

入倉孝次郎¹⁾, 川辺秀憲²⁾
Kojiro Irikura, Hidenori Kawabe

1) 京都大学, 名誉教授

愛知工業大学 地域防災研究センター, 客員教授 (愛知県豊田市八草町八千草 1247, irikura@geor.or.jp)

Professor Emeritus, Kyoto University

Aichi Institute of Technology Disaster Prevention Research Center, Adjunct Professor

2) 京都大学 原子炉実験所, 助手 (大阪府泉南郡熊取町朝代西 2 丁目, kawabe@rri.kyoto-u.ac.jp)

Kyoto University Research Reactor Institute, Assistant Professors

地下構造データベースは地震災害軽減対策のための強震動予測を行う上で最も重要な情報である。1995 年兵庫県南部地震による大災害を契機として防災科学研究所による強震動観測網 (K-NET, KiK-net) の構築, 気象庁や都府県による震度計の設置により, 全国的な高密度強震観測網が整備された。それと同時に深部堆積地盤構造の調査が南関東, 中部, 近畿などの主要都市で行われているが, 全国的に見ると一部の地域にとどまっている。堆積盆地および周辺域で観測された強震動記録は地震動シミュレーションとの比較による堆積盆地構造の推定精度の検証にきわめて重要である。大阪盆地を例にとると, これまで推定された堆積地盤構造に基づく地震動シミュレーション結果は観測記録の主要動ではよく一致するが後続波を説明できないなどの問題がある。東南海・南海地震を対象として大阪盆地の長周期地震動予測を行い, 長周期構造物 (高層・超高層ビルや免震構造物) の耐震性能を評価し, 被害予測マップを作成した。これらの被害予測や被害軽減対策の信頼性を高めるには地下構造モデルの高精度化が不可欠となる。

強震動予測, 3次元地下構造モデル, 長周期構造物, 地震防災対策, 被害予測

strong motion prediction, 3-D basin structure model, long-period structure, earthquake disaster mitigation, damage prediction

1. はじめに

地球の地殻の最上部を構成する堆積地盤を含む地下構造は地球物理学, 地質学, 地理学を含む地球科学の最も重要な研究対象で, 地下構造がわかることは, 地震や火山等の地下で生じている現象のメカニズム, プレート運動に関係する地殻変動の解明, など種々の地球科学研究の推進のみならず, 地震防災など災害科学, 地球工学, 都市計画, 土地利用など人間の社会的活動に関係する幅広い分野の研究の推進に波及効果をもつ。ここでは, これらの多くの研究課題の中で地震災害の軽減対策上キーとなる強震動予測について, 地下構造の重要性について議論する。

地震のときの揺れの大きさは堆積盆地の形状など地下構造に依存していることはよく知られている。例えば, 1923 年関東地震のときに震度 6 強や震度 7 の地域は関東平野およびその周辺域のなかでも完新世や後期更新世に堆積した地盤に集中していた (諸井・武村, 2002)。1995 年兵庫県南部地震のとき, 震源に近い阪神地域から淡路島にかけて現れた「震災の帯」は地下の断層面での破壊の進行と盆地端部付近の地下構造による波動伝播の相乗効果により帯状に強い揺れが生じたことによることが明らかになった (入倉, 2002)。また, 2003 年十勝沖地震は新たな課題を突きつけている。この地震では, 長周期

地震動により震源域から約 200 km も離れた苫小牧で石油タンクが破損して大火災が発生するなど, これまでの被害予測では想定されていなかった災害が引き起こされた (畑山・他, 2004)。このような被害の元となった長周期地震動は, 巨大地震によって生成され, 大規模堆積盆地によって強められ, 長い継続時間の強震動となった。巨大地震のときの長周期地震動が生成されることは地震学的にはよく知られたことではあるが, それによる直接的な被害はこれまで極めて少数の例しか報告されてなかったために, 地震防災の対策では殆ど考慮されてこなかった。長周期地震動の定量的な予測のために不可欠な地殻構造および浅部・深部地盤の地下構造の調査は未だ殆ど行われていない, という事実は, 日本の震災対策の問題点を如実に示すものといえる。

将来の大地震の災害軽減のための強震動予測を行なうには, 図 1 に示されるような枠組みによる震源情報収集, 強震動観測, それに地下構造調査が不可欠である。すなわち, 活断層や地震活動の調査に基づく活断層毎の地震危険度評価, これまでの地震動記録のインバージョン解析に基づく震源のモデル化, さらに震源域から都市域への波動伝播を評価するための信頼性ある地下構造調査が必要とされる。なかでも地下構造の情報は震源のメカニズムや強震動記録の知見に密接に関連するもので, 強震

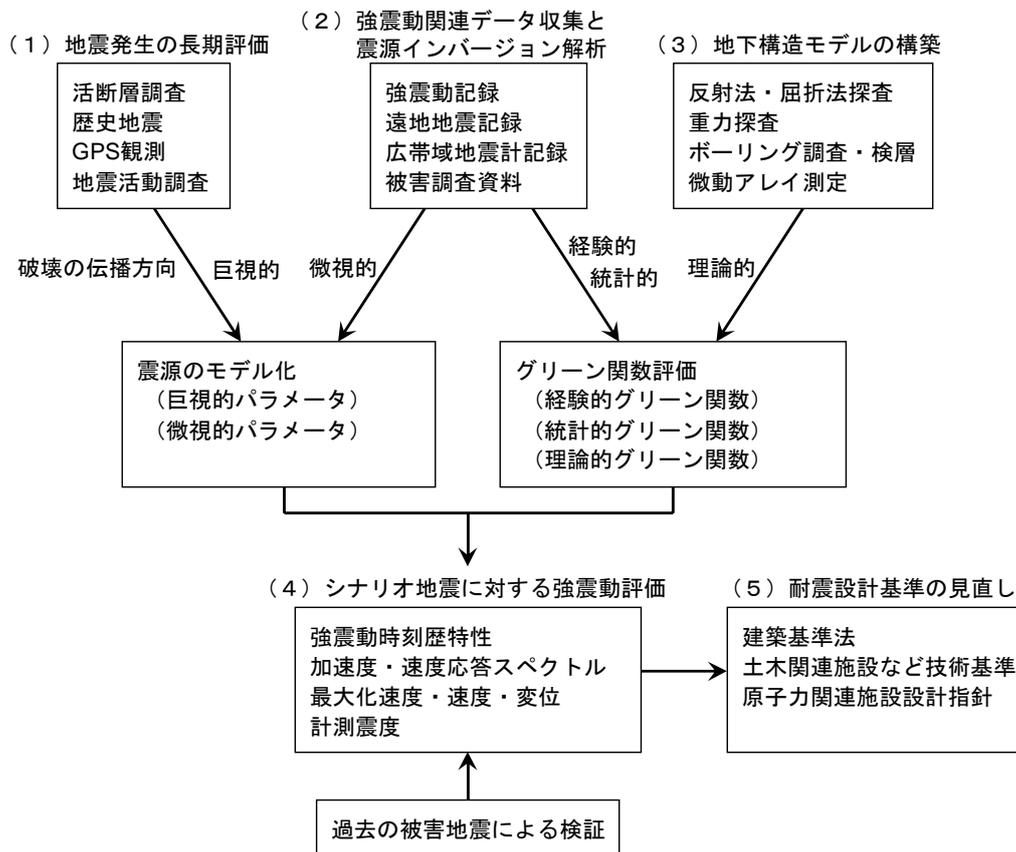


図1 強震動予測の枠組み

動予測のための最も基礎的なものである。地震動計算のための震源のモデル化や震源から観測点までのグリーン関数の評価の信頼性は地下構造の情報の精度に依存している。過去の大地震の被害分布は将来の地震の震源特性の推定や強震動の推定方法の有効性の検証に重要データであるが、地下構造の情報がなければその価値は半減してしまうことになる。

本報告では、近年充実してきた強震動観測網で得られたデータに基づいて強震動予測のための地下構造研究の現状を概括し、今後の展望を述べる。

わが国の大都市（東京、大阪、名古屋など）が位置する平野の直下は、厚い堆積層に覆われていることが知られている。厚い堆積層は、地震動を増幅させることから、大都市の都市機能の地震リスクを評価する上で、盆地構造を把握することは重要となる。これまで関東、大阪、濃尾平野などでは地震動シミュレーションのための堆積盆地の3次元地下構造モデルがいくつか提案されているが、これらの地下構造モデルに基づく長周期地震動シミュレーションの精度は、まだ十分とはいえず、新たな地下構造探査や地震記録を用いたチューニングなどによりこれら3次元地下構造モデルの精度を上げていく必要がある。近年、地方自治体等により堆積層の構造調査や地震観測が精力的に実施され、地下構造に関するデータが蓄積されつつあり、それらを導入したより高精度な

3次元地下構造モデルに基づく長周期地震動の予測が望まれている。

2. 強震動観測と記録の特徴

日本における強震動観測は、1995年兵庫県南部地震以前には国立研究機関、大学の研究室、民間研究機関がそれぞれの研究目的のため独自に強震動観測を行っていたため、それぞれのデータを他機関が利用することは容易ではなかった。気象庁は国の防災の責任機関として公共の使用を目的として強震動観測を行っていたが、各都道府県に1地点程度の極めて少数の観測点しか配置していなかった。兵庫県南部地震は強震動観測が構造物の被害のメカニズムの解明のみならず、断層破壊過程や波動伝播特性の研究に重要な役割を果たしていることを改めて認識させた。

この地震の後、防災科学研究所によるK-NETやKiK-netの高密度強震観測網の全国的な展開、気象庁による強震波形・震度計網の整備・充実、さらに都道府県による震度観測網の整備等がなされた。K-NETやKiK-netによる強震動記録は地震発生直後からインターネットなどから入手できるようになっており、地震が発生すると、震源の位置だけでなく、地震のメカニズムや地震モーメントといった情報が直ちに公表され、多くの研究者や技術者などに利用されるようになった。

高密度な強震動観測網が構築されたため、2003年十勝沖地震など大地震時に広範囲での強震記録が得られるようになり、日本全国がほぼ一定の密度で、地盤増幅や卓越周期など地震動の特性が明らかになってきた。例えば、2004年9月5日の東海道沖地震 (M7.4)は規模が大きく日本列島からやや離れたところで起こったため、生成された長周期地震動が太平洋岸を中心として広域の観測点で記録された。震源から観測点までの距離の違いを考慮

して、幾何学的減衰と伝播媒質のQ値による減衰を取り除くと、図2に示されるような長周期地震動の揺れやすさマップができる(入倉・他,2004)。図から大阪平野では3秒~6秒、濃尾平野では3秒~4秒、関東平野では6秒~10秒の周期で揺れやすいことがわかる。

次に、大阪盆地を例にとり堆積盆地内と堆積盆地外及び震源位置の違いによる観測波形の違いを比較する。図3に示されるように2000年10月31日に三重県南部で発

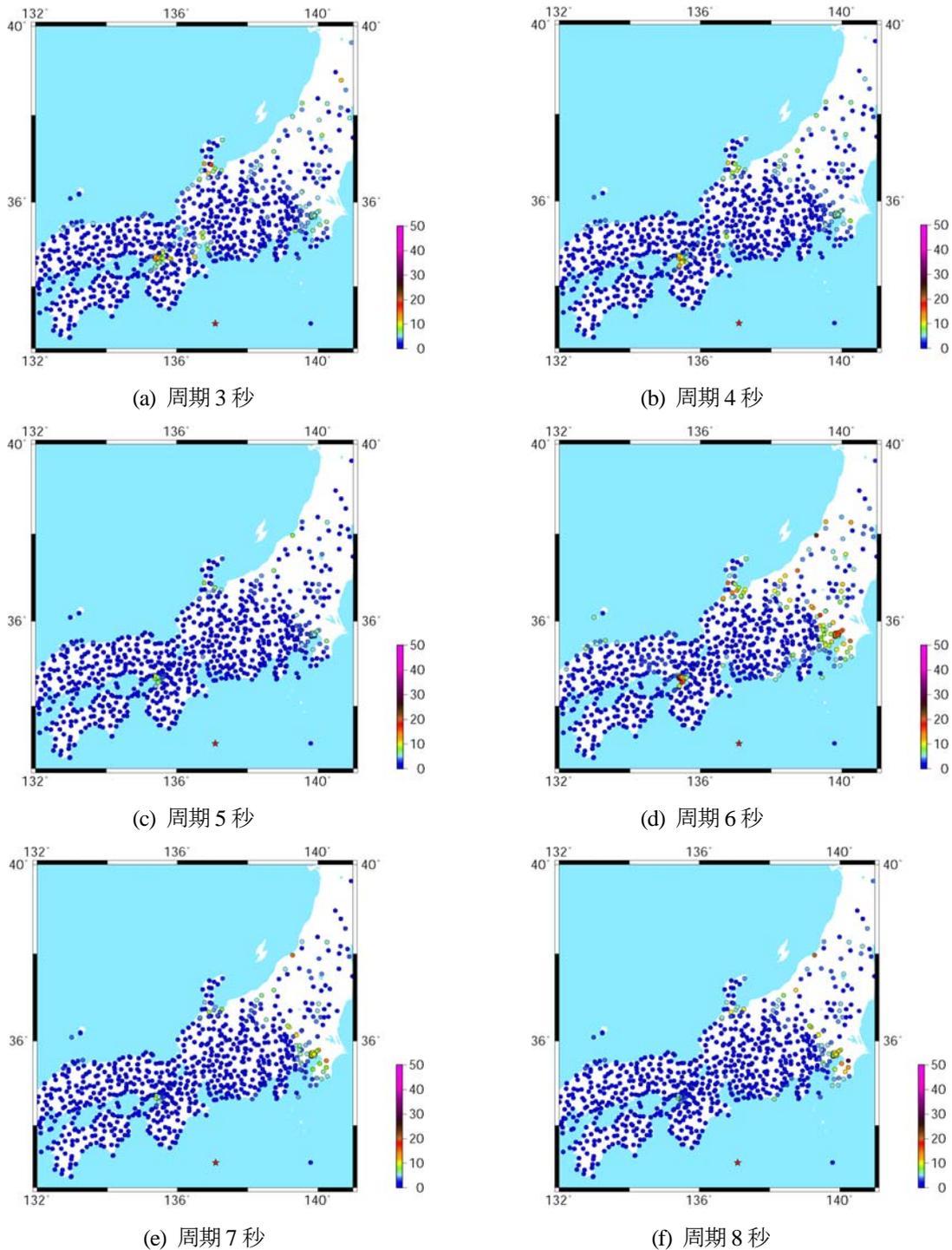
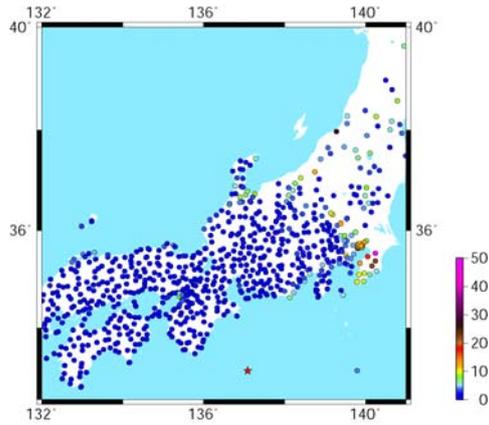
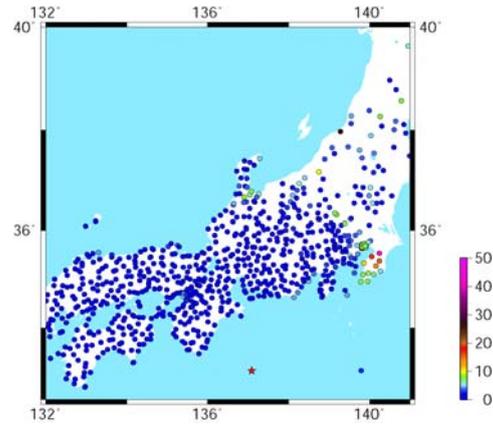


図2 2004年9月5日の東海道沖地震 (M7.4)時の長周期地震動の周期ごとの揺れやすさマップ



(g) 周期 9 秒



(h) 周期 10 秒

図2 続き

生じた地震 (M5.7) は大阪盆地に近いところ (盆地中央までの距離が約 90km) で発生し、2004 年 9 月 5 日の東海道沖地震 (M7.4) はやや離れたところ (盆地中央までの距離が約 230km) で起こっている。これらの地震について、堆積盆地 (大阪平野) 内の観測点 FKS 及び堆積盆地外の観測点 HSD の観測波形が図 4 に示される。震源が大阪盆地に近い三重県南部で発生した地震 (M5.7) の場合、堆積盆地外の観測点 HSD では、S 波到達後の波形の振幅はすぐに減衰し継続時間の短い波形となっている。一方、堆積盆地 (大阪平野) 内の観測点 FKS では、継続時間が長く、後続波部分では、長周期成分が卓越していることが分かる。震源が遠い東海道沖の地震では、継続時間が長く、波形の後半部分は長周期成分の卓越する波形となっている。

3. 地下構造の特徴及びモデル化

ここでは、大阪盆地を例にとり堆積盆地構造の特徴及びそのモデル化の現状について述べる。大阪盆地は近畿圏最大の堆積盆地であり、堆積層の最も厚いところは大坂湾内で 3000m を超える。陸域の堆積層は最も厚いところでも 2000m 程度である。

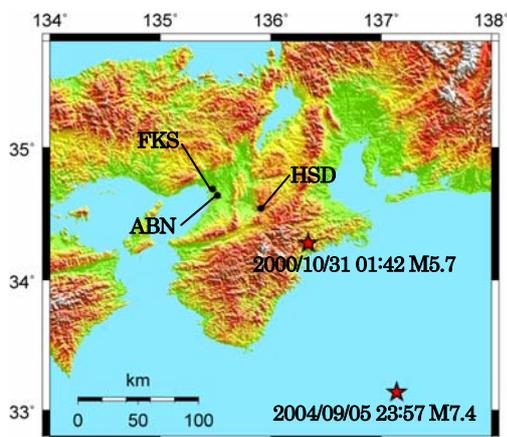
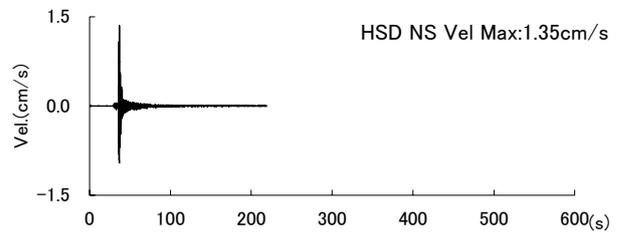
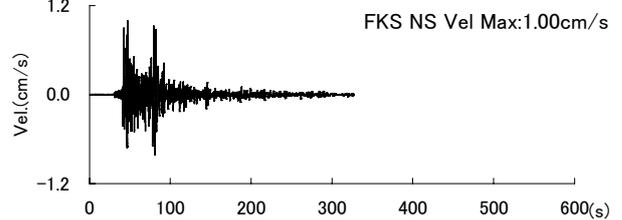


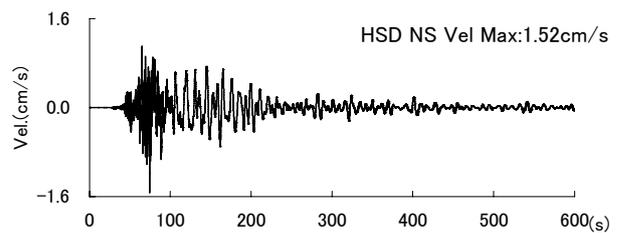
図3 震央位置と観測点位置



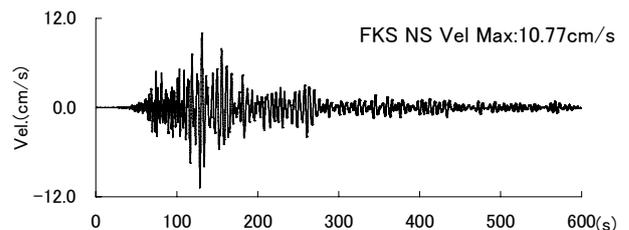
(a) 三重県南部の地震の HSD での観測波形



(b) 三重県南部の地震の FKS での観測波形



(c) 東海道沖地震の HSD での観測波形



(d) 東海道沖地震の FKS での観測波形

図4 観測波形の比較

平野の中央には大阪府豊中市から大阪市を経て岸和田市に至る上町断層帯、大阪湾には大阪湾断層帯、平野周辺には六甲・淡路断層帯、有馬-高槻断層帯、生駒断層帯などがあり、基盤岩と堆積層の境界面形状は複雑に変化している。厚い堆積層により平野内の地震動は大きく増幅され、複雑に変化する地下構造により地震動の卓越周期や継続時間は場所ごとに複雑に変化する。地震防災対策や構造物の耐震性の評価などには、これら地下構造の特徴を反映した精度の高い地震動予測が必要となる。

大阪盆地の堆積地盤構造の調査は、1960年代に地盤沈下の対策調査を主な目的として OD1~OD9 の深層ボーリングが行われ、点の情報に基づいて堆積盆地の形状の推定がなされた(Ikebe *et al.*(1970)など)。1995年兵庫県南部地震以後に活断層や堆積地盤構造の調査を目的としてボーリングだけでなく面的調査が初めて行われるようになった。主な調査方法は、深層ボーリング調査、反射法地震探査、屈折法探査、微動アレイ探査、重力探査などである。それと同時に計算機の大メモリー化・高速化と数値計算手法の発達により、地震動の3次元シミュレーションが可能となり、香川・他(1993)は大阪平野の次元地下構造モデルを提案し、地下構造調査の情報の増加とともにモデルの改良を行った(Kagawa *et al.*, 2004)。堀川・他(2003)は、急激に増加した地下構造の情報を忠実に反映した3次元地下構造モデルを作成した。このモデルは、その後の大阪府による反射法地震探査結果を反映し改良がなされている(大阪府, 2004)。堀川・他(2003)の大阪平野地下構造モデルの基盤岩深度を図5に示す。このモデルでは、反射法地震探査などから明らかになっている大阪平野東側の生駒断層、平野中央の上町断層など、断層位置での基盤岩深度の急激な変化が忠実に再現されている。

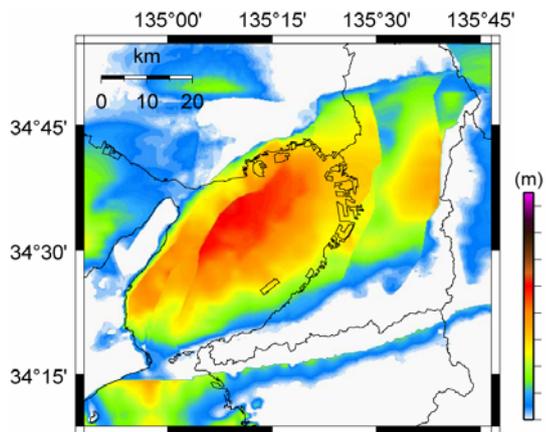


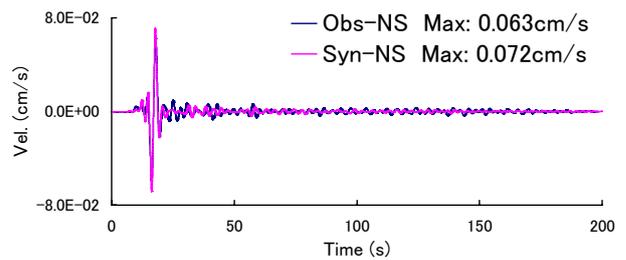
図5 大阪平野地下構造モデルの基盤岩深度 (堀川・他, 2003)

4. 地震動のシミュレーション及び地下構造モデルの高精度化

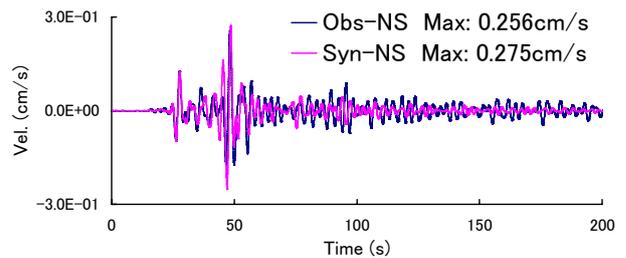
図3に示された三重県南部の地震について、大阪盆地

およびその周辺域における長周期地震動シミュレーション結果(川辺・他, 2004)が図6に示される。解析には、前述の堀川・他(2003)の地下構造モデルを用い、3次元差分法により地震動の計算を行った。堆積盆地外の観測点 HSD (図6a 参照)では、観測波形をほぼ再現できている。堆積盆地内の ABN (図6b)では観測波形全体を、FKS (図6c)では、S波部分の振幅及び位相をよく再現できているが、FKSの観測波形の60秒から70秒に見られるようなS波部分よりも大きな振幅を持つ後続波を再現できていない地点もある。この特徴的な後続波の卓越周期は3秒から5秒であり、大阪平野内に建設されている高層建築物の1次固有周期と一致する周期帯である。したがって高層建築物など長周期構造物の耐震設計及び耐震評価、ならびに長周期構造物に対する地震防災対策のためには、図6(c)に示される特徴的な後続波を含めた再現が可能となるように新たな地下構造調査や地震記録を用いた地下構造モデルの改良が必要である。

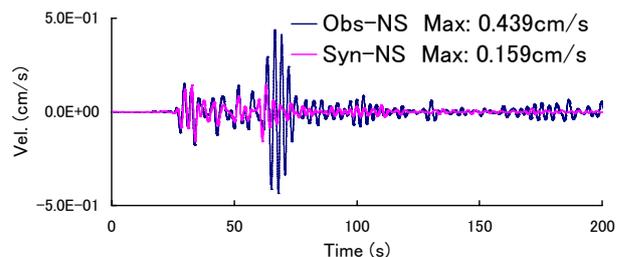
地震記録を用いた改良には、川辺・他(2002)が大阪平野北部地域を対象として行ったフォーワードモデリングによる試行錯誤的な方法の他、逆問題として地下構造の



(a) HSD (堆積盆地外)



(b) ABN (堆積盆地内)



(c) FKS (堆積盆地内)

図6 三重県南部の地震の観測波形と計算波形の比較 (バンドパスフィルター: 0.05-0.4Hz)

推定を行う波形インバージョン手法がある。Aoi *et al.* (1997)は2次元地下構造に対して波形インバージョンにより速度構造の境界面を決定する手法を提案している。Aoi (2002)は3次元地下構造に対して、波形インバージョンにより速度構造を求める手法を提案している。今後、新たな地下構造探査及び、これらの手法による地下構造モデルの高精度化が期待される。

5. 長周期地震動と長周期構造物被害予測マップ

大阪盆地の地震防災対策に影響を及ぼす地震のうち、最も発生確率の高い地震は東海沖から四国沖にかけての南海トラフ沿いに発生する地震である。この南海トラフ地震は、歴史的には、紀伊半島沖から駿河湾までの震源とする安政型の東海地震と紀伊半島沖から四国西端沖を震源域とする安政型の南海地震が短時日に連続して起こる場合と駿河湾から四国沖まで広領域が同時に動く宝永型の地震が繰り返し起こっている。前回の昭和東南海地震の震源域は紀伊半島から浜松沖までとされ、安政の東海地震に比べて短かったため、浜松沖から駿河湾に至る領域が割れ残っていると考えられ、この領域を震源とする東海地震が発生する可能性が高いことが警告されている。

内閣府の中央防災会議では、東海・東南海・南海地震の強震動予測を行い、日本各地の震度分布を計算している(図7)。しかしながら、この強震動予測は、震度に大きく影響する地震動の短周期成分を主なターゲットとして計算されたものであり、平野内での長周期地震動を適切に表現しているとは言いがたい。川辺・他(2005)は想定東南海・南海地震に対して、大阪平野や濃尾平野の3次元堆積盆地構造を考慮して長周期地震動を理論的に評価した。一例として想定南海地震時の大阪平野の最大速度分布を図8に示す。有効周期は2.5秒~20秒である。予測地震動の最大速度分布は図5に示す地下構造の影響によって複雑なものとなる。

入倉・他(2006)では、これら的大阪や名古屋における長周期地震動予測結果に基づき、長周期構造物の1次固有周期、減衰、構造種別(RC, 鉄骨)ごとに耐震性能(最大変位, 最大層間変形角, 累積塑性変形倍率など)を評価し、長周期構造物の被害予測マップを作成している(図9及び図10)。この図では、1次固有周期3秒・4秒の構造物では、神戸や大阪平野南部において、周期5秒・6秒の構造物では平野の中央部において最大変位が片振幅で約2m, 最大層間変形角が1/100を上回る結果となっている。

ここでは、地震動の再現精度が十分でない地下構造を用いて強震動予測、被害予測マップの提案を行っているが、地下構造モデルの構築・高精度化ができれば、高い精度の強震動予測が可能となり、このような被害予測や被害軽減化対策に供する精度の高い資料の作成が可能となる。

6. まとめ

1995年兵庫県南部地震による大災害を契機として防災科学研究所による強震動観測網(K-NET, KiK-net)の構築, 気象庁や都府県による震度計の設置により, 全国的な高密度強震動観測網が整備された。それと同時に深部堆積地盤構造の調査が南関東, 中部, 近畿などの主要都市で行われているが, 全国的に見ると一部の地域にとどまっている。堆積盆地および周辺域で観測された強震動記録は, 堆積盆地内の地震動特性の把握及び, 地震動シミュレーションとの比較による堆積盆地構造の推定精度の検証にきわめて重要である。厚い堆積層により盆地内の地震動は大きく増幅され, 複雑に変化する地下構造により地震動の卓越周期や継続時間は場所ごとに複雑に変化する。推定された大阪盆地の地下構造モデルに基づく地震動シミュレーション結果は, 観測記録の主要動ではよく一致するが後続波を精度よく説明できない。地下構造の調査・モデル化は, 強震動予測の高度化の鍵であり, 現存する地下構造に関するデータの収集し, 地下構造の情報不足している地域での新たな地下構造調査を実施し, 地下構造モデルの高精度化を図ることが不可欠である。また, 被害予測や被害軽減対策の信頼性を高めるために, 高精度な堆積層の3次元地下構造モデルに基づく長周期地震動の予測が望まれる。

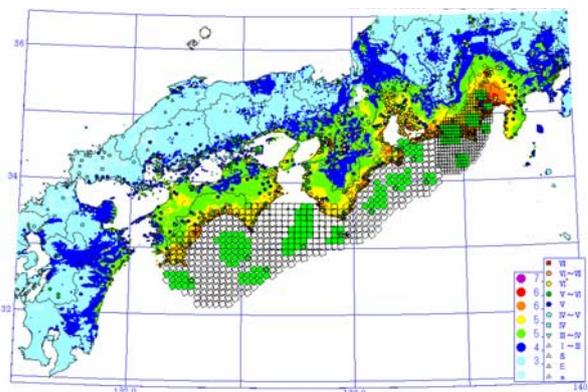


図7 中央防災会議による東海・東南海・南海地震の予測震度分布

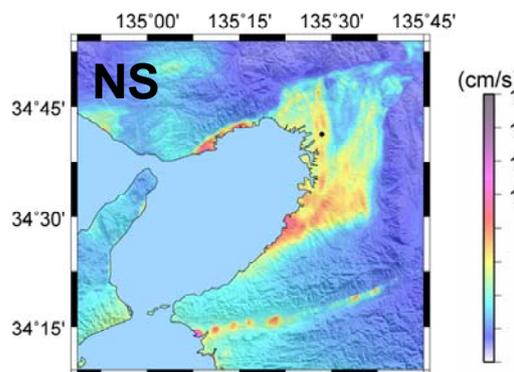


図8 想定南海地震時の大阪平野の最大速度分布

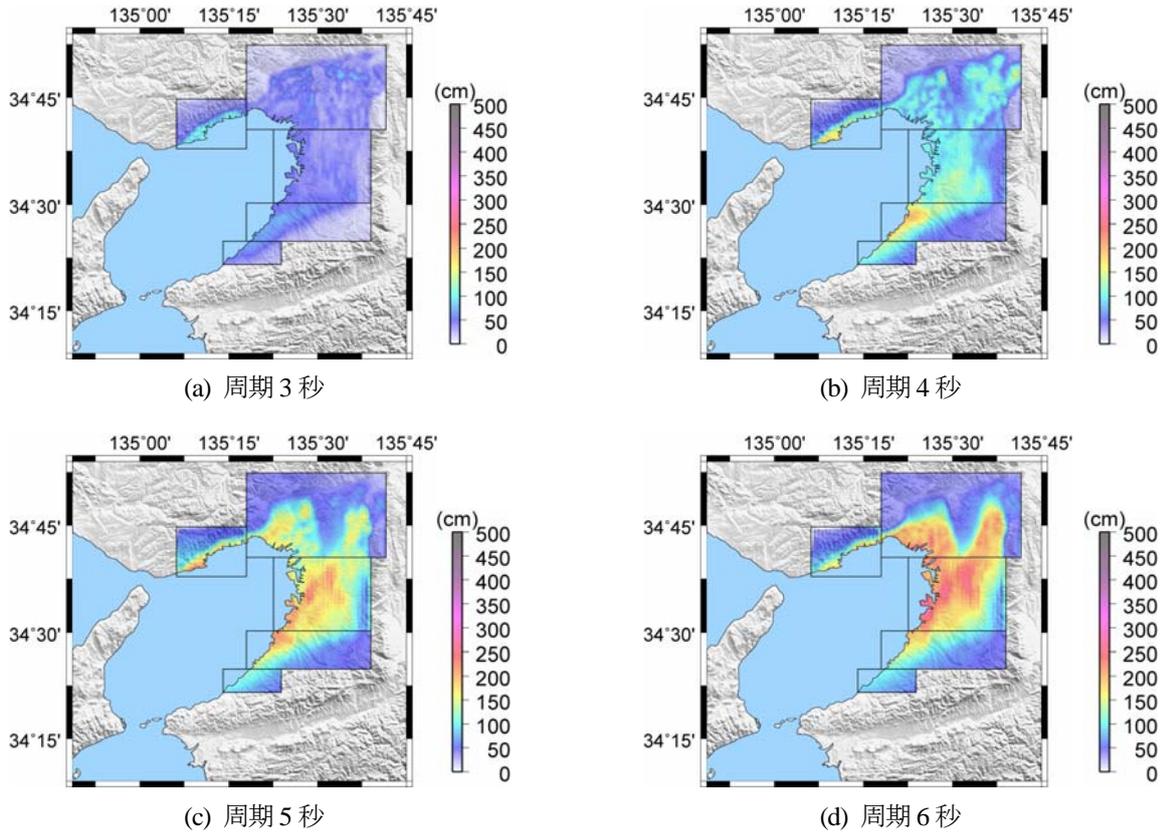


図9 大阪平野における想定南海地震時の周期ごと構造物の最大変位（鉄骨構造，減衰2%，NS方向）

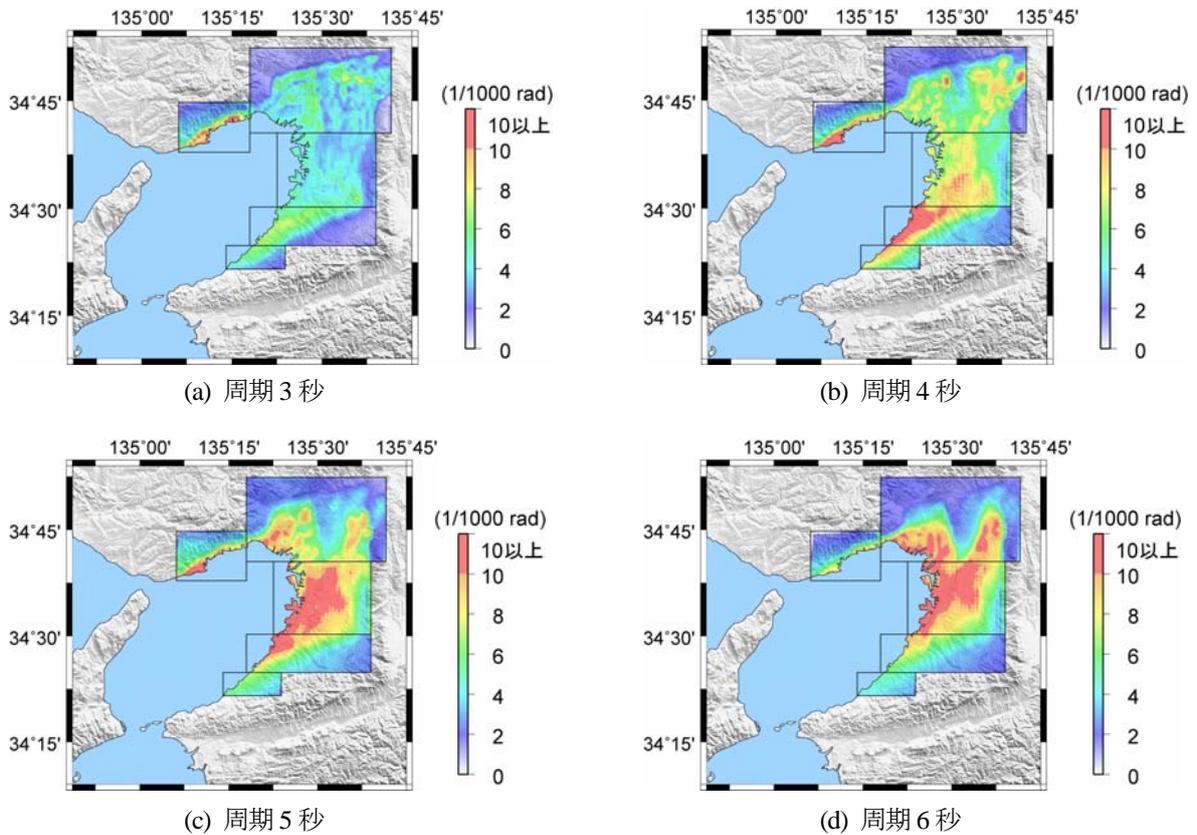


図10 大阪平野における想定南海地震時の周期ごと構造物の最大層間変形角（鉄骨構造，減衰2%，NS方向）

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net 及び、関西地震観測研究協議会の観測記録を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- Aoi, S., T. Iwata, H. Fujiwara, and K. Irikura : Boundary Shape Waveform inversion for Two- Dimensional Basin Structure Using Three-Component Array Data with Obliquely Azimuthal Plane Incident Wave, *Bull. Seism. Soc. Am.* 87, 222-233, 1997.
- Aoi, S. : Boundary Shape Waveform Inversion for Estimating the Depth of Three Dimensional Basin Structures, *Bull. Seism. Soc. Am.* 92, 2410-2418, 2002.
- Ikebe, N., J. Iwata, and J. Takenaka : Quaternary geology of Osaka with special reference to land subsidence. *J. Geosci. Osaka City Univ.*, 13, 39-98, 1970.
- 入倉孝次郎 : 阪神・淡路大震災を起こしたものは何であったのか, *岩波科学*, 70-1, 42-50, 2000.
- 入倉孝次郎: キラーパルス波が引き起こした「震災の帯」, *AERA Mook 「地震がわかる」*, 朝日新聞社, 114-118, 2002.
- 入倉孝次郎, 釜江克宏, 川辺秀憲: 巨大地震による長周期地震動予測の重要性について, *日本地震学会 2004 年秋季大会*, P049, 2004.
- 入倉孝次郎, 釜江克宏, 川辺秀憲, 佐藤俊明, 壇一男, 中川佳久, 斉藤賢二, 土肥博 : 巨大地震時における長周期構造物の被害予測と被害軽減化対策, *日本地震学会 2006 年秋季大会*, 2006.
- 大阪府 : 平成 16 年度地震関係基礎調査交付金「大阪平野の地下構造調査」成果報告書, 2004.
- 香川敬生, 澤田純夫, 岩崎好規, 南荘淳 : 大阪平野の深部地盤構造のモデル化について, *地震学会講演予稿集*, No.2, pp.112, 1993.
- Kagawa, T., B. Zhao, K. Miyakoshi, and K. Irikura : Modeling of 3D Basin Structures for Seismic Wave Simulations Based on Available Information on the Target Area: Case Study of the Osaka Basin, Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 94, 1353-1368, 2004.
- 川辺秀憲, 堀家正則, 日下部馨: 震源インバージョンと地震動有限差分シミュレーションを用いた大阪平野北部地域の三次元地下構造モデル, *日本建築学会構造系論文集*, 552, 93-100, 2002.
- 川辺秀憲, 釜江克宏 : 大阪平野における 3 次元地下構造モデルの Q_s 値の推定, *地球惑星科学関連学会 2004 年合同大会予稿集*, S046-030, 2004.
- 川辺秀憲, 釜江克宏 : 想定南海地震による大阪堆積盆地での地震動の予測, *日本地震学会 2005 年秋季大会*, 2005.
- 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数十秒の長周期地震動と石油タンクの被害, *地震* 2, 57, 83-103, 2004.
- 堀川晴央, 水野清秀, 石山達也, 佐竹健治, 関口春子, 加瀬祐子, 杉山雄一, 横田 裕, 末廣匡基, 横倉隆伸, 岩淵 洋, 北田奈緒子, Arben Pitarka : 断層による不連続構造を考慮した大阪堆積盆地の 3 次元地盤構造モデル, *活断層・古地震研究報告*, No. 3, 225-259, 2003.
- 諸井孝文, 武村雅之 : 関東地震 (1923 年 9 月 1 日) による木造被害データの詳細と震度分布の推定, *日本地震工学会論文集*, 第 2 巻, 第 3 号, 35-71, 2002.