

Title	大阪・神戸地域の地震時の揺れやすさと液状化危険度の予測
Author	大島 昭彦
Citation	都市防災研究論文集. 3 巻, p.19-24.
Issue Date	2016-11
ISSN	2189-0536
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Publisher
Publisher	大阪市立大学都市防災教育研究センター
Description	
DOI	10.24544/ocu.20191220-003

Placed on: Osaka City University

大阪・神戸地域の地震時の揺れやすさと液状化危険度の予測

大島 昭彦¹⁾

1) 大阪市立大学 大学院工学研究科 e-mail: oshima@civil.eng.osaka-cu.ac.jp

これまでに大阪・神戸地域を対象に、沖積層（As, Ma13）及び上部洪積層（Dg1, Ma12）の地盤特性をモデル化した「250m メッシュ地盤モデル」を構築した。これを基にして地震時の地表面の揺れやすさと液状化危険度を予測した。地震応答解析による卓越周波数に基づく揺れやすさマップを作成し、それを常時微動観測によって検証した。また、各種技術基準による液状化予測の比較、及び継続時間の長い地震動による補正係数 c_w の液状化危険度への影響についても検討した。

Key words : 沖積層, 洪積層, 地盤情報データベース, 揺れやすさ, 液状化

1. はじめに

南海トラフを震源域とする巨大地震は、100年から200年程度の間隔で発生していることが知られており、近年では1944年に昭和東南海地震が、1946年に昭和南海地震が発生している。これらの地震はその前の1854年の安政の東海地震・南海地震や1707年の宝永地震と比べてマグニチュードが小さかった¹⁾ため、次の大地震までの発生間隔が短く、いつ起きてもおかしくない状態にあるといわれている²⁾。南海トラフを震源域とする巨大地震が発生した場合には、大阪・神戸地域では地震動による揺れ、液状化、津波などによる大きな被害に見舞われると想定される。

筆者は、大阪・神戸地域を対象に関西圏地盤情報データベース（以下、DB）と基準ボーリング調査を基にして、沖積層（As, Ma13）及び上部洪積層（Dg1, Ma12）の地盤特性をモデル化した「250m メッシュ地盤モデル」を構築し、これを用いて、メッシュごとに次元地震応答解析（SHAKE）を行い、算定した地盤の卓越周波数に基づいた「揺れやすさマップ」を作成した³⁾。しかし、このモデルでモデル化されるのは、層厚、 N 値、密度及び細粒分含有率などであり、地震応答解析に必要なせん断波速度 V_s は N 値から推定しているため、揺れやすさマップの信頼性の検証が必要と考えられる。そこで本稿では、常時微動観測による H/V スペクトル比との比較や PS 検層によって V_s を実測している地点での地震応答解析結果との比較により、揺れやすさマップの妥当性を検証した。

さらに、南海トラフ巨大地震では、継続時間の長い地震動が発生すると考えられている。大阪・神戸地域では、表層に沖積砂層が緩く堆積しており、過去に行われた地下水の揚水規制によって地下水位が高位化しているため、地震時の液状化発生の危険性が高いといわれている。そこで、先の250mメッシュ地盤モデルを用いて各種技術基準による液状化予測の比較、及び継続時間の長い地震動による補正係数 c_w （道路橋示方書により規定）の液状化危険度への影響についても検討した。

2. 揺れやすさマップの検証

(1) 常時微動観測と地震応答解析の方法

常時微動とは、遠くの振動源から地面を伝わってくる揺れであり、人間には感じないほどの微小な振動である。このような波はおおむね表面波によると言われ、地盤の特性に応じて振動しているため、計測された常時微動は付近の地盤の特性を反映したものとなる。よって、ある地点において250mメッシュ地盤モデルを用いて地震応答解析得られる卓越周波数と常時微動 H/V スペクトル比（水平（NS, EW）方向加速度波形

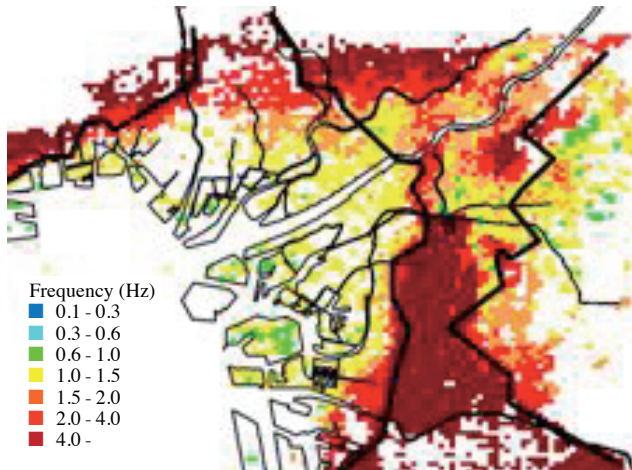


図1 卓越周波数による揺れやすさマップ

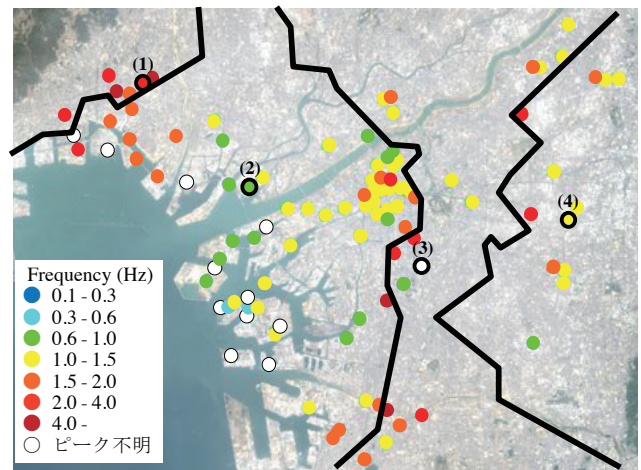


図2 常時微動観測地点と卓越周波数の分布

のフーリエ振幅スペクトルの相乗平均と鉛直方向加速度波形のフーリエ振幅スペクトルの比)の卓越周波数を比較することにより、揺れやすさマップの妥当性を評価できる。今回常時微動を観測したのは、図2に示すPS検層を実施している110地点である。振動計は白山工業(株)製JU210を用いた。サンプリング周波数を100Hzで23分間観測した。H/Vスペクトル比の求め方は文献4)を参照されたい。

一方、一次元地震応答解析(SHAKE)は、揺れやすさマップを作成した250mメッシュ地盤モデルの1mごとのN値から道路橋示方書⁵⁾による式(1)で推定した V_s を用いた場合とPS検層による実測 V_s を用いた場合で計算し、卓越周波数を求め、常時微動観測によるものと比較した。

$$\begin{aligned} \text{砂質土の場合：} & V_s = 80 \times N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 50) \\ \text{粘性土の場合：} & V_s = 100 \times N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 25) \end{aligned} \quad (1)$$

(2) 常時微動観測と地震応答解析の比較

図1に上記方法で求めた卓越周波数による「揺れやすさマップ」³⁾を示す。西大阪，東大阪地域はMa12層下端の第2洪積砂礫(Dg2)層を工学的基盤に、図の中央部の上町台地部と阪神地域の北側(太線で囲まれた領域)はMa12層が存在しないので、沖積層下端(Dg1)層又はより古い地層)を工学的基盤にしてものである。卓越周波数は大阪湾沿岸部が最も低く(0.6~1.0Hzも見られる)、揺れやすいと言える。平野部はほとんど1.0~1.5Hz程度であり、山側にいくほど卓越周波数が高くなっていき、上町台地や山地など硬い地盤では4.0Hz以上となり、揺れにくいことがわかる。

図2に110地点の常時微動観測によるH/Vスペクトル比による卓越周波数の分布を示す。図1と同様に海側と東大阪側で周波数が低く、中央部の上町台地や西大阪の山側で周波数が高い傾向が読み取れる。ただし、周波数のピークが不明となった地点(特に海側)が10数点あった。

図3に常時微動観測によるH/Vスペクトル比と地震応答解析による伝達関数による地盤の周波数ごとの増幅特性の比較の代表例を示す。ここでは、図2に示した(1)西宮市両度町(西大阪山側)、(2)大阪市西淀川区中島(西大阪海側)、(3)大阪市天王寺区上本町(上町台地)、(4)東大阪市荒本北(東大阪)の4地点の結果を示す。なお、(2)地点は2015年に詳細な地盤調査を行い、Dg2層までPS検層を行っている⁶⁾。いずれの地点でも常時微動H/Vスペクトル比は周波数0.2Hz前後に大きなピークがあるが、これは大阪地盤深部の固有周波数であり、表層の地盤特性を表すものではない。

図3(1)の西宮(西大阪山側)の卓越周波数は、基盤深度が浅いため3Hzと高く、常時微動とPS検層の実測 V_s による応答解析の値はほぼ一致しているが、地盤モデルの推定 V_s による応答解析の値はさらに高い。図3(2)の中島(西大阪海側)の卓越周波数は、基盤深度が深いため0.9Hzと低く、常時微動と実測 V_s による応答解析の値はほぼ一致しているが、推定 V_s による応答解析の値はやや高い。図3(3)の上本町(上町台地)は、硬質な

洪積地盤であることから，常時微動ではフラットとなり卓越周波数は不明となっているが，応答解析では5～6Hzの高い周波数となっている。図3(4)の東大阪市荒本北（東大阪）の卓越周波数は，基盤深度がまた深くなるため1.5 Hz前後となり，常時微動と推定 V_s による応答解析の値はほぼ一致しているが，実測 V_s による応答解析の値はやや高い。

図4に250mメッシュ地盤モデルの推定 V_s による地震応答解析の検証として，110地点の常時微動H/Vスペクトル比とPS検層の実測 V_s による地震応答解析の卓越周波数の比較を示す。図4(1)の常時微動H/Vスペクトル比との比較では，ややばらつきが大きい。これは今回の常時微動H/Vでは，特に臨海部の埋立地では周波数に明確なピークが現れず，読み取り誤差が大きく，必ずしも応答解析による卓越周波数と一致しないケースがあったためである。臨海部では粘土と砂礫の互層が繰り返しく厚く堆積しており，地盤の物性値の変化が小さい（インピーダンスコントラストが低い）ため，明確なピークが出にくいと考えられる。一方，図4(2)の実測 V_s による地震応答解析との比較では，ばらつきも少なく，ほぼ両者は整合している。

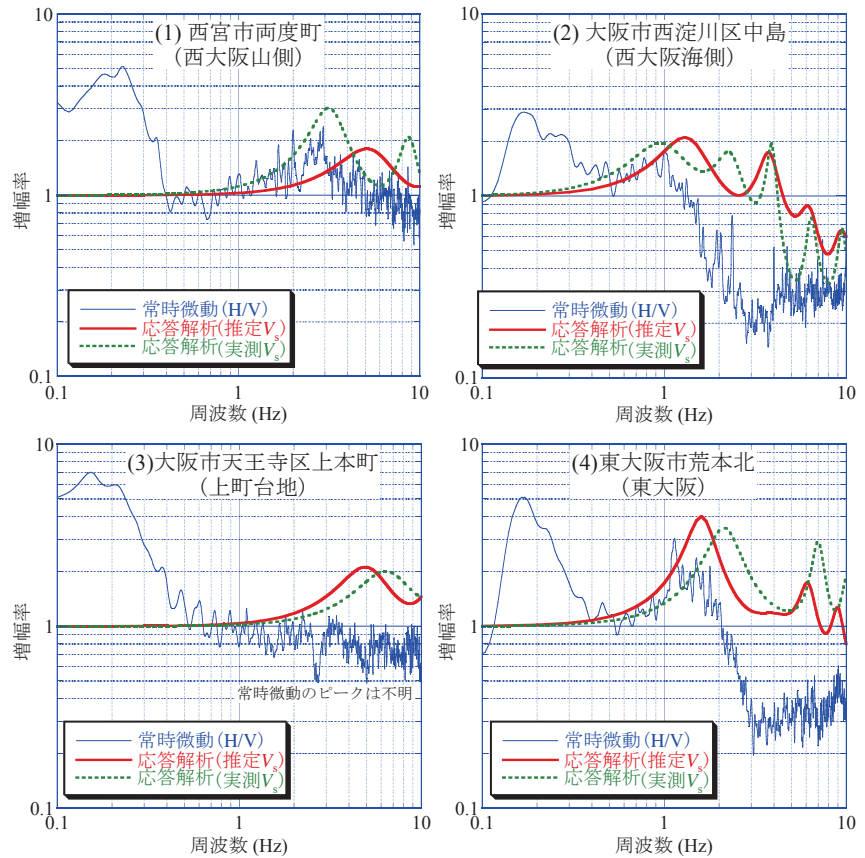


図3 常時微動観測と地震応答解析の結果の代表例

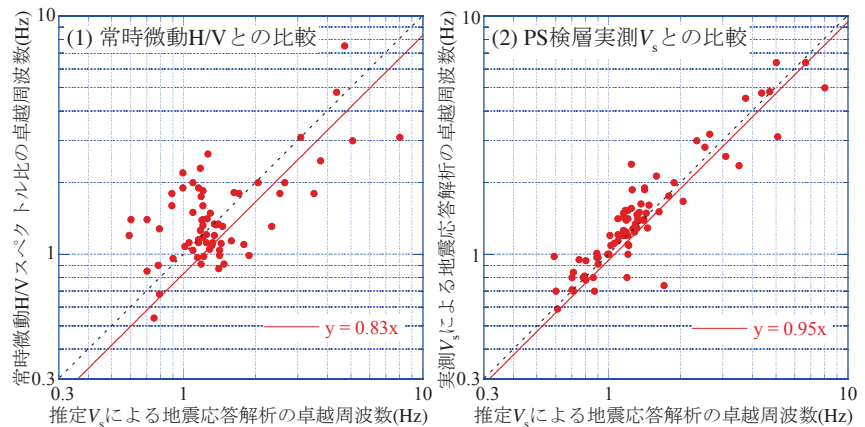


図4 250mメッシュ地盤モデルの推定 V_s による地震応答解析の検証

3. 液状化危険度の予測

(1) 液状化予測の方法

2.と同様に250mメッシュ地盤モデルを用いて，各種技術基準による液状化予測を行った。液状化判定式は，道路橋示方書⁵⁾，東京ガス式⁷⁾，建築基礎構造設計指針⁸⁾を用いた。液状化安全率 F_L を250mメッシュ毎に深度1m刻みで求め， $F_L < 1$ を深さ方向に積分し，液状化指標 P_L を算出した。

地震動は海溝型地震タイプを想定し，地震動特性による補正係数 c_w は1.0，0.8の2ケースとした。設計地震動は200gal，350gal (M=9.0)を与えた。また，図5に示す地下水位は，各ボーリングの孔内水位(W.L.)より250mメッシュの平均水位を求めた結果を用い，値が不明な場合は微地形条件毎の平均水位を与えた。

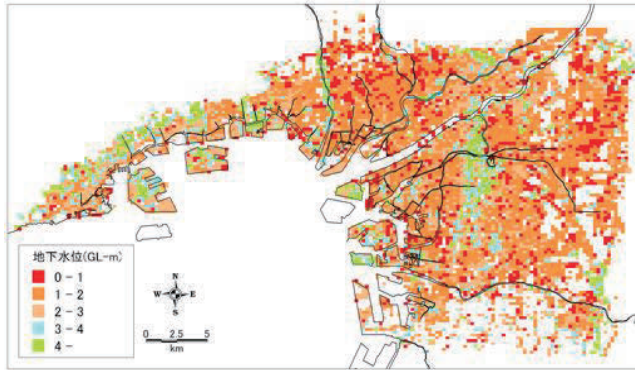


図5 地下水位の平面分布

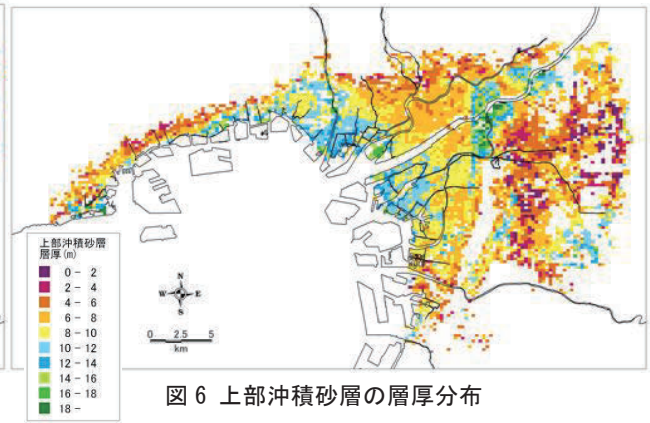
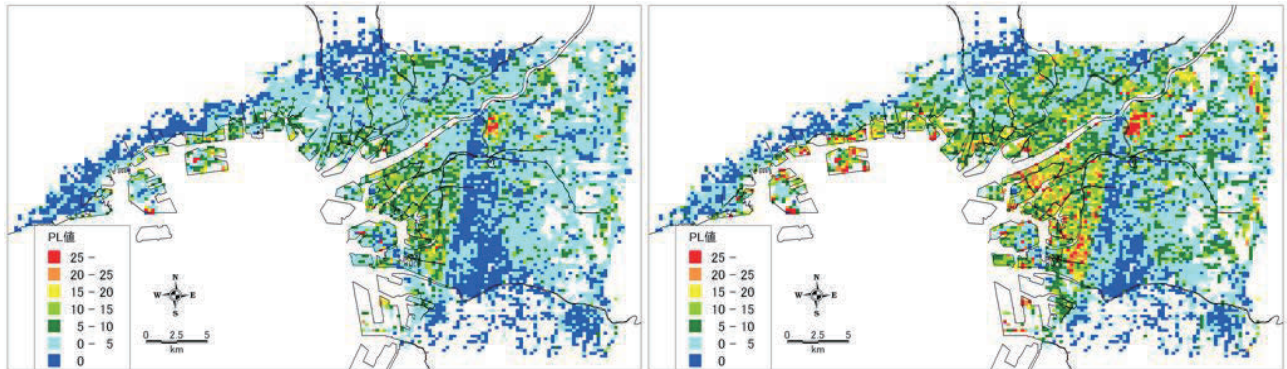


図6 上部沖積砂層の層厚分布

図6に大阪・神戸地域における上部沖積砂層（液状化可能層）の250mメッシュ毎の層厚の平面分布を示す。上部沖積砂層は沿岸部，上町台地西縁地域北部の天満砂堆地域，上町台地地域の東部，都島地域，吹田砂州地域，東大阪南部地域の南東部で10m以上と厚く堆積している。なお，西大阪地域において沿岸部ほど層厚が増加しているのは，表層の盛土層が沿岸部ほど厚く存在するためである。

(2) 液状化危険度の予測結果

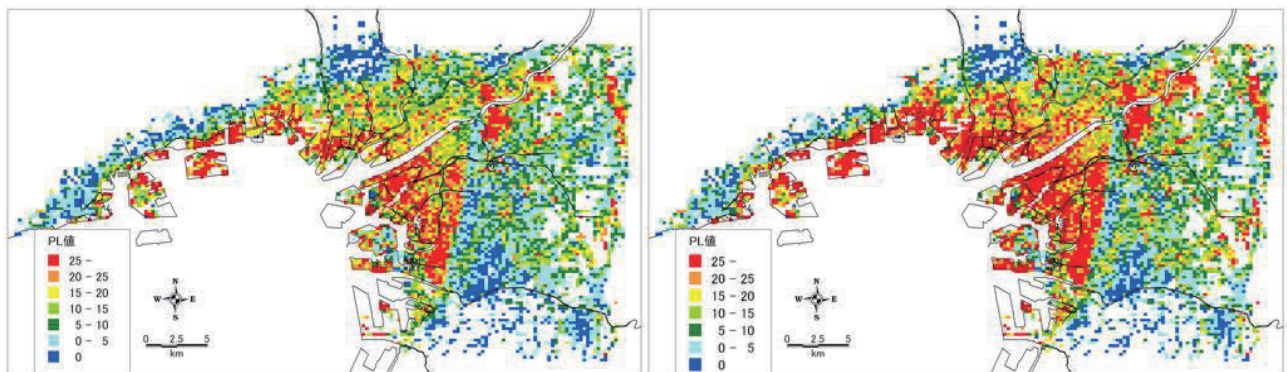
道路橋示方書の判定式を用い， c_w の値を1.0及び0.8としたときの P_L 値の平面分布を図7（200gal），図8（350gal）に示す。設計地震動を200galから350galにすることで， P_L 値が15以上の液状化危険度の高い地域が大幅に増えている。また c_w の値を1.0から0.8にすることで，全体的に液状化危険度が高くなり，設計地震動が350galの時には大阪・神戸地域の沿岸部を中心として P_L 値が25以上の地域が広がっている。 c_w は液状化強度 R を求めるときに液状化強度比 R_L に乗じる係数（ $R=c_w \times R_L$ ）であり， c_w を小さくすることで R



(1) $c_w=1.0$

(2) $c_w=0.8$

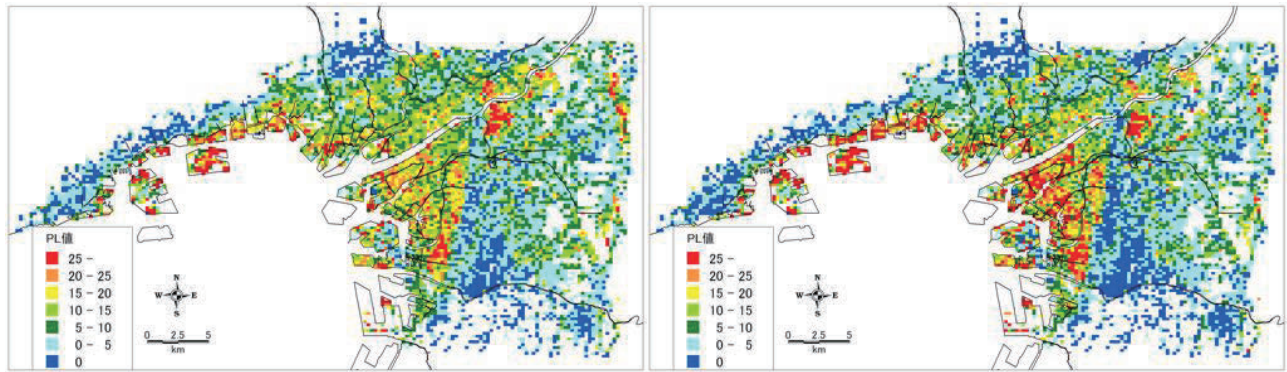
図7 P_L 値の平面分布（道路橋示方書：200gal）



(1) $c_w=1.0$

(2) $c_w=0.8$

図8 P_L 値の平面分布（道路橋示方書：350gal）

図9 P_L 値の平面分布（東京ガス式：350gal, $c_w=1.0$ ）図10 P_L 値の平面分布（建築基礎構造設計指針：350gal）

が小さくなり、液状化安全率 $F_L (=R/L)$ が小さくなる。現行の道路橋示方書では、海溝型地震では $c_w=1.0$ を設定することになっているが、継続時間の長い海溝型地震動における液状化予測を行う場合、 c_w を低減させる必要があると考えられる。

図9、図10に東京ガス式、建築基礎構造設計指針の判定式を用い、設計地震動350gal, $c_w=1.0$ としたときの P_L 値の平面分布を示す。今回用いた3つの判定式による結果を比べると、道路橋示方書による結果（図8(1)）が最も P_L 値が高く、液状化危険度が高くなる結果となった。

ただし、液状化危険度の高い地域は、いずれの判定式においてもほぼ同様となっており、大阪・神戸地域における沿岸部の埋立地および西大阪地域で液状化危険度が高くなっている。ただし、埋立地は人工材料等を含めた埋立を行っていることも多く、 F_s 値や単位体積重量を適切に評価できていない可能性もあるため、注意が必要である。なお、舞洲や咲洲では浚渫粘土による埋立が行われている区画があるため、液状化危険度が低くなっている。東大阪地域は西大阪地域に比べて液状化危険度は低くなっているが、東大阪地域の粘性土は鋭敏比が大きいいため、地震で地盤が乱されると極度に強度が低下するため注意が必要である。また、都島地域、生駒山地西縁地域等でも一部液状化危険度が高くなっている地域がある。これらの地域は表層に N 値の小さい砂層が比較的厚く堆積している土質構成となっている。なお、これら液状化危険度の高い地域は過去に発生した地震の際に液状化被害のあった地点⁹⁾とよく対応している。

4. まとめ

構築した250mメッシュ地盤モデルを用いて、地震時の揺れやすさと液状化危険度を予測した。本論文で得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 大阪・神戸地域においてPS検層実施の110地点で常時微動観測を行い、一次元地震応答解析と比較したところ、250mメッシュ地盤モデルの推定 V_s による地震応答解析の卓越周波数は、常時微動のH/Vスペクトル比及びPS検層による実測 V_s を用いた地震応答解析による卓越周波数に概ね一致したことから、揺れやすさマップの信頼性がある程度検証できた。
- 2) ただし、大阪湾臨海部の埋立地では常時微動のH/Vスペクトル比に必ずしも明確な卓越周波数は見られなかったため、地震応答解析結果との整合性に問題を残した。
- 3) 250mメッシュ地盤モデルを用い、3種類の判定式（道路橋示方書、東京ガス式、建築基礎構造設計指針）を用いた液状化予測を行ったところ、液状化危険度の高い地域はいずれの判定式においてもほぼ同様であるが、道路橋示方書を用いた場合が最も液状化危険度が高くなる結果となった。
- 4) 地震動特性による補正係数 c_w の値を道路橋示方書で示されている1.0より小さくすることで、全体的に液状化危険度が高くなり、 $c_w=0.8$ 、設計地震動が350galの時には大阪・神戸地域の沿岸部を中心として P_L 値が25以上となった。

なお、250m メッシュ地盤モデルの N 値は最大 50 で打ち切ってモデル化しているため、推定 V_s が過小である可能性もある。今後、地盤モデルを見直し、改めて N 値と V_s の相関性及び推定 V_s 式の検討を行い、揺れやすさマップをより精度の高いものに更新したいと考えている。また、互層地盤などの複雑な地層構成の場合、250m メッシュにおけるモデル化が実際の地盤構成を上手く反映できない場合があるので、細粒分含有率 F_c の算出方法も含めて今後の課題としたい。さらに、今回は地震時の地盤の揺れやすさと液状化の予測を別々に行ったが、今後は両者を合体させ、地域毎の揺れやすさ（震度、加速度）に基づく液状化予測を実施したいと考えている。

最後に、250m メッシュ地盤モデルの土質特性データは、今後、関西圏地盤情報ライブラリー¹⁰⁾として Web 上で公開する予定であることを付記する（沖積層モデルの土質特性データは既に公開済み）。

謝辞：本研究は、KG-NET・関西圏地盤研究会の関西広域地盤研究部会と地盤工学会関西支部「南海トラフ巨大地震に関する被害予測と防災対策研究委員会」の部会1（地盤特性と被害予測）の研究活動として行ったものであることを付記し、関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子：日本被害地震総覧 599-2012，2013.
- 2) 京都大学防災研究所編：防災学講座2 地震災害論，2003.
- 3) 大島昭彦：大阪地域の表層地盤の 250 m メッシュモデルと地震時揺れやすさマップの作成，都市防災研究論文集，大阪市立大学都市防災研究プロジェクト，第2巻，pp.13-18，2015.
- 4) 平井俊之・大島昭彦・新井瞬・堤杏紗：浦安市における常時微動観測結果と表層地盤構造との関係，第50回地盤工学研究発表会，No.1014，pp.2027-2028，2015.
- 5) 公益社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V耐震設計編），2012.
- 6) 京矢侑樹・大島昭彦・張林松・小坂慎一・久保田耕司・平田茂良・山口伸治：大阪市西淀川区中島における地盤調査（その1：サウンディング試験結果），第51回地盤工学研究発表会，No.97，pp.193-194，2016.
- 7) 亀井祐聡・森本巖・安田進・清水善久・小金丸健一・石田栄介：東京低地における沖積砂土の粒度特性と細粒分が液状化強度に及ぼす影響，地盤工学会論文報告集，Vol.42，No.4，pp.101-110，2002.
- 8) 一般社団法人 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.
- 9) KG-NET・関西圏地盤研究会：新関西地盤-大阪平野から大阪湾-，口絵 32-1，2007.
- 10) 関西圏地盤情報ライブラリー：<http://www.geo-library.jp/>