

非線形地震応答解析による大阪表層地盤の揺れやすさと液状化危険度の予測

PREDICTION OF SITE AMPLIFICATION AND LIQUEFACTION POTENTIAL OF SUBSURFACE GROUND IN OSAKA AREA BASED ON NONLINEAR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS

地盤工学分野 末吉 拳一

Geotechnical Engineering Kenichi SUEYOSHI

本研究では、上町断層地震と南海トラフ地震を対象とした想定地震波を用い、大阪地域の 250m メッシュ表層地盤モデルを用いて揺れやすさと液状化危険度を予測した。まず、250m メッシュ表層地盤モデルの上町台地周辺について、工学的基盤面相当となる地層境界を設定した。次に、このモデルを用いて非線形次元地震応答解析 (SHAKE) を行い、地盤の伝達関数の卓越周波数より揺れやすさマップを、地表面最大加速度より液状化指数 P_L を 250m メッシュごとに求めた。

This study predicted seismic vulnerability and liquefaction potential on the 250m square mesh subsurface ground model in Osaka area with the scenario earthquake waves of the Uemachi Fault Earthquake and the Nankai Trough Earthquake. At first, the seismic bedrock in earthquake engineering around the Uemachi Plateau on 250m square mesh subsurface ground model was decided. Secondly, nonlinear seismic response analysis (SHAKE) was conducted with the ground model. Finally, the seismic vulnerability maps from predominant frequency of transfer function and the liquefaction index (P_L) maps was created on the SHAKE results.

1. 研究背景・研究目的

近い将来、大阪地域に甚大な被害を与えると予想される巨大地震として、海溝型の南海トラフ地震と内陸直下型の上町断層帯地震が挙げられる。南海トラフとは、西南日本太平洋岸沿いに伸びる延長約 700km の海盆のことであり、今後 30 年間に M8 超級の大地震が発生する確率は 70~80% 程度 (2018 年 1 月 1 日現在) と考えられている¹⁾。一方、上町断層帯は大阪地域を南北に走る延長約 42km の活断層帯である。上町断層帯では断層全体が一つの区間として活動をした場合、M7.5 程度の地震が発生すると推定されている²⁾。

地震の揺れの大きさ (震度) を決定するのは、一般に「震源特性」、「伝播経路特性」、「サイト特性」の 3 点である。特に、細かい地域ごとの震度を決定する最大の要因はサイト特性であり、これは、地域の地盤特性に依存するものと考えられている。しかし、内閣府による「表層地盤の揺れやすさ全国マップ」は限られたデータによる粗いマップとなっている。

本研究室では、これまでに関西圏地盤情報データベース (DB) を用いて、沖積層、第 1 洪積砂礫 (Dg1) 層、洪積粘土 (Ma12) 層の地盤特性の 250m 浅層地盤

メッシュモデルを作成した。2017 年度の中村³⁾は、このモデルで上町断層帯地震 A を対象とする非線形次元地震応答解析 (SHAKE) を行い、伝達関数の卓越周波数から揺れやすさマップの作成と液状化危険度の予測を行った。このとき、中村は繰返し変形試験データから、土の繰返し変形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$ 及び $h \sim \gamma$) を沖積砂 As、沖積粘土 Ma13、Dg1、Ma12 の土層毎に H-D モデルで表現した。一方で、上町台地周辺では、洪積層のモデル化が十分ではなく、このような地域では便宜上沖積層の下端以深を地震動の入力面としていた。

以上から、本研究の目的は主に以下の 2 点とした。

- ① 「電子地盤図作成支援システム (DIG_EX)」により、250m 浅層地盤メッシュモデルにおいて上町台地周辺の工学的基盤を設定すること。このとき、沖積層または Dg1 層と工学的基盤の間の地層を洪積上町 (DU) 層と定義し、既存の 250m メッシュ浅層地盤モデルに組み込む。
- ② 南海トラフ地震と上町断層地震想定地震波の地震応答解析を行い、揺れやすさを予測し、それに基づく液状化危険度を予測すること。また、異なる 2 つの地震について、これらの結果を比較すること。

2. 洪積上町層 (DU) を取り入れた 250m メッシュ浅層地盤モデルの作成

西大阪地域の地盤は一般的に、表層から沖積層（上部砂 (As_U) 層, Ma13 層, 下部砂 (As_L) 層から成る), Dg1 層, Ma12 層, Dg2 層となっている。西大阪, 東大阪地域の大半のメッシュで工学的基盤となる Dg2 層の深度が決まっているが, 上町台地周辺は明快な地層層序をしておらず, 工学的基盤が決まっていない。

そこで, 上町台地周辺では堆積年代を問わず「砂礫層の場合は $N \geq 50$, 粘性土層の場合は $N \geq 30$ となる連続した層厚 3m 以上の層」を工学的基盤と仮定し, それと沖積層, Dg1 層に挟まれる層を, 洪積上町 (DU)

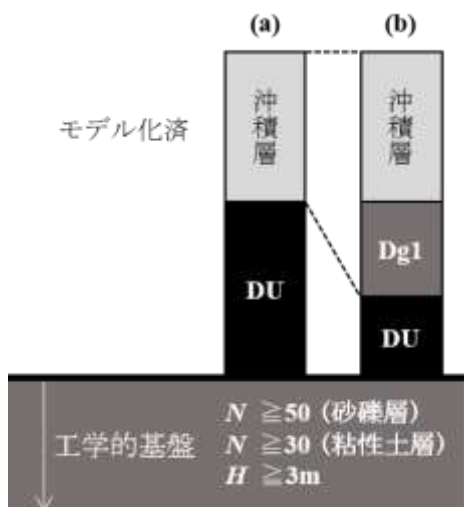


図-1 BD の DU 層境界設定方法の概略図

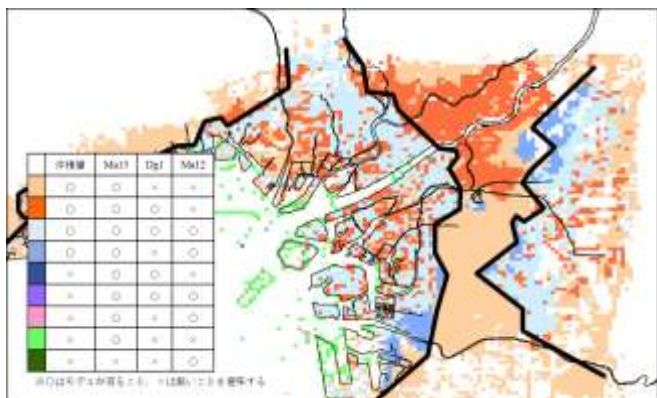


図-2 旧モデルでの各地層モデル作成状況

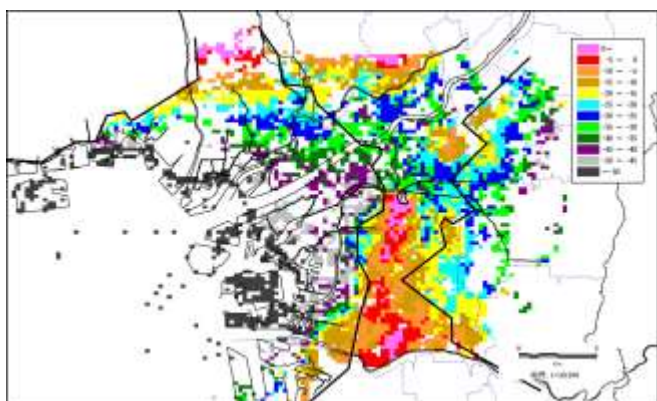


図-3 工学的基盤面の標高分布

層としてモデル化した。DU 層の上端については現在のモデル化の状況によって異なり, 沖積層だけがモデル化されている場合と沖積層と Dg1 層がモデル化されている場合でそれぞれ, 沖積層の下端, Dg1 層の下端を DU 層の上端とした (図-1)。ただし, DU 層の下端は周辺との連続性を考えて適宜修正を行った。このような作業をボーリングデータ (BD) に対して行い, DIG_EX によってメッシュモデルを作成した。図-2 は中村³⁾が用いた旧モデルでの各地層モデルの作成状況である。DU 層の設定範囲は大阪市内を走る 2 本の黒線に挟まれた地域とし, 北限を江坂・千里丘陵周辺, 南限を大和川とした。この範囲には上町台地, 上町台地北端~千里丘陵周辺, 東大阪地域西部が含まれる。

図-3 に完成後のメッシュモデルから工学的基盤面の標高分布を示す。中央の黒線の内側が DU 層を設定した領域であり, DU 層の下面標高と等しい。他の領域は Ma12 層の下面標高と等しい。DU 層と Ma12 層の下面標高は調和的な分布となっている。

3. 弁天町を対象とした地震応答解析による検討

2018 年 6 月実施した大阪市港区 JR 弁天町駅東側の地盤調査結果をもとに, 一次元地震応答解析を行った。Dg2 層を工学的基盤とし, 繰返し変形特性は中村による H-D モデルによる大阪地域の繰返し変形特性モデル³⁾を用いた。また, 入力地震波には, 地盤調査地点から最も近い地点の上町断層地震 A⁴⁾, 南海トラフ地震基本ケース, 同陸側ケース⁵⁾の 3 波を用いた。

図-4~図-6 にそれぞれ上町断層地震 A, 南海トラフ地震基本ケース, 陸側ケースの解析結果を示す。ここでは紙面の都合上, (1)最大せん断応力 τ_{max} , (2)伝達関数の周波数特性, (3)地表面加速度の時刻歴 (非線形解析のみ, 入力地震波を併記) を示す。

図-4 の上町台地地震 A の解析結果について, 図(1)より, τ_{max} は深度方向に増加傾向が認められた。また, 非線形解析は線形解析と比べて 4~5 割程度減少することが分かった。図(2)より, 伝達関数の卓越周波数は非線形解析の方が小さくなった (卓越周期が長周期化した)。ピークは周波数 0.528Hz の時で, 増幅率は約 2.43 であった。図(3)より, 地表面の最大加速度は入力 of 最大加速度と比べておよそ 28%減少した。

図-5 の南海トラフ地震基本ケースについて, 図(1)より, τ_{max} は深度方向に増加傾向が認められた。しかし, 上町断層地震 A のケースのように非線形解析によって τ_{max} が大きく減少することはなかった。図(2)より, 伝達関数の卓越周波数は非線形解析の方が小さくなった (卓越周期が長周期化した) が, その程度は上町断層地震 A のケースと比べて小さかった。ピークは周波数 0.8438Hz の時で, 増幅率は約 2.49 であった。図(3)よ

り、地表面の最大加速度は入力と比べておよそ 18% 増加した。

図-6 の南海トラフ地震陸側ケースについて、図(1)より、 τ_{max} は深度方向に増加傾向が認められた。しかし、非線形解析によって τ_{max} が減少することはなかった。図(2)より、伝達関数の卓越周波数は非線形解析により

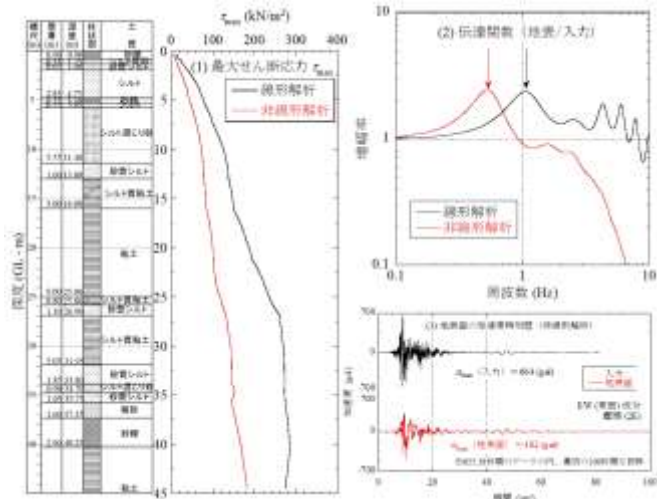


図-4 上町断層地震 A の解析結果

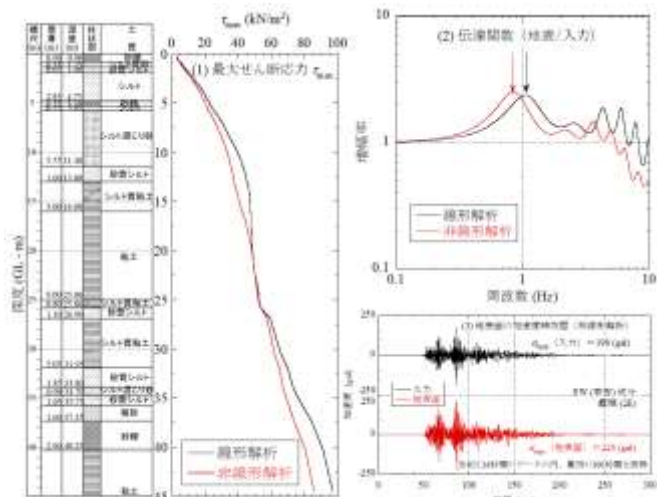


図-5 南海トラフ地震基本ケースの解析結果

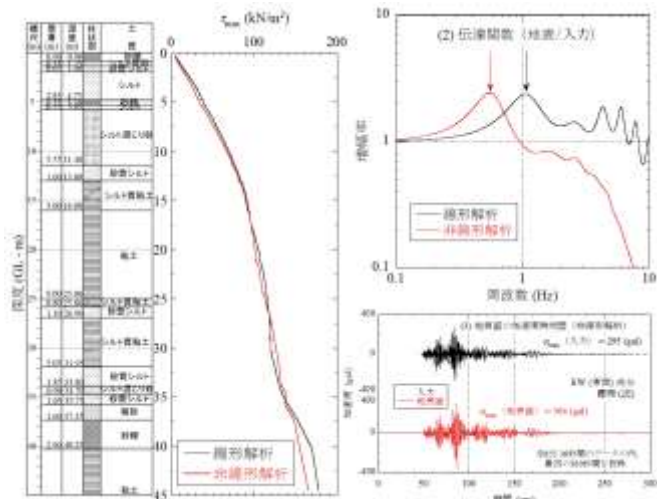


図-6 南海トラフ地震陸側ケースの解析結果

小さくなった(卓越周期が長周期化した)。ピークは周波数 0.5508Hz の時で、増幅率は約 2.42 であった。図(3)より、地表面の最大加速度は入力と比べておよそ 23% 増加した。

地震応答解析結果より、弁天町の液状化検討を行った。方法は以下に示す通りである。

- 1) 道路橋示方書⁹⁾に従い、液状化判定を行う層を決めた。
- 2) 同様に、動的せん断強度比 R を求めた。
- 3) 地震時せん断応力比 L は次の 2 種類で求めた。
 - ① 地震応答解析による地表面最大加速度 α_{max} を用いて式(1)によって求める方法。
 - ② 地震応答解析による深度方向の最大せん断応力 τ_{max} を有効応力 σ' で除して求める方法(式(3))。

$$L = r_d (\alpha_{max}/980) \sigma_v / \sigma'_v \quad (1)$$

$$r_d = 1.0 - 0.015x \quad (2)$$

ここに、 r_d : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数
 α_{max} : 地震応答解析結果より地表面最大加速度 (gal)
 σ_v : 深度 x における全上載圧 (kN/m²)
 σ'_v : 深度 x における有効上載圧 (kN/m²)
 x : 地表面からの深さ (m)

$$L = \tau_{max}(x) / \sigma'_v(x) \quad (3)$$

ここに、 $\tau_{max}(x)$: 深度 x における最大せん断応力 (kN/m²)
 $\sigma'_v(x)$: 深度 x における有効上載圧 (kN/m²)
 x : 深度 (m)

- 4) R を L で除し、液状化に対する抵抗率 F_L を求めた。
- 5) 式(4)より、液状化指数 P_L を求めた。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) w(x) dx \quad (4)$$

$$w(x) = 10 - 0.5x \quad (5)$$

ただし、 $F_L \geq 1.0$ のときは、 $F_L = 0$ とする。

図-7 に F_L の深度分布と P_L の計算結果を示す。 P_L は南海トラフ地震陸側ケース > 上町断層地震 A > 南海トラフ地震基本ケースとなった。南海トラフ地震陸側ケースでは、地表面加速度が 364gal とやや大きかったので、 P_L が大きくなったと考えられる。一方、南海トラフ地震基本ケースは地表面加速度がレベル 1 程度の小さな揺れ(225gal)であったことから P_L が小さくなったと考えられる。 L の求め方の違いによる F_L の分布および P_L の差はほとんど認められなかった。

4. 250m 浅層地盤モデルデータを用いた液状化検討方法の比較

液状化検討における地震時せん断応力比 L の計算方法の違いによる、液状化指数 P_L の変化についてさらに検討するために、3. に示した方法に従い、250m メッシュ浅層地盤モデルの 9 地点データを用いた液状化検討を行った。図-8 に液状化検討を行った地点の位置図

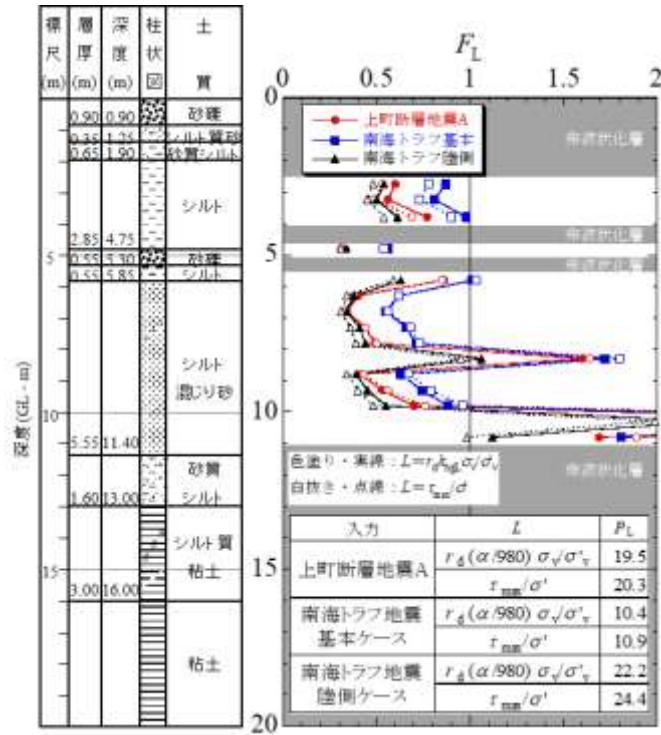


図-7 弁天町の FL の深度分布と PL の計算結果

を示す。また、入力地震波は、各地点の海溝型地震の南海トラフ地震陸側ケースと直下型地震の上町断層地震 A を用いた。

図-9 に各地点の地震時せん断応力比 L の深度分布を示す。ただし、紙面の都合上、(1)うめきた、(2)長瀬、(3)都島のみを示す。海溝型の L ではわずかに $\tau_{max}/\sigma' > r_d(\alpha/980)\sigma_v/\sigma'_v$ の傾向が見られたが、大きな差は無かった。一方、直下型の L では海溝型よりも明らかに $\tau_{max}/\sigma' > r_d(\alpha/980)\sigma_v/\sigma'_v$ の傾向を示した。ただし、常にこの傾向を示すわけではなく、深度方向に深いところでは逆転する場合も多くあった (図(2))。

表-1 に各地点の液状化指数 PL の計算結果を示す。ほぼ全ての場合で $P_L(L = \tau_{max}/\sigma') > P_L(L = r_d(\alpha/980)\sigma_v/\sigma'_v)$ となった。海溝型、直下型の $P_L(L = \tau_{max}/\sigma')$ 、 $P_L(L = r_d(\alpha/980)\sigma_v/\sigma'_v)$ をそれぞれ A、B、C、D とすると、A/B の平均は 1.10 (和田岬を除くと 0.86)、C/D の平均は 0.93 となった。よって、地震の型に関わらず、 $L = r_d(\alpha/980)\sigma_v/\sigma'_v$ による PL は $L = \tau_{max}/\sigma'$ による PL より 1 割程度小さくなるのが分かった。ただし、これは PL の値にしておよそ 1~4 程度の小さな差に収まるので、L の計算方法の違いが PL 及び液状化危険度の予測に対して与える影響は小さいと考えられる。

以上から、メッシュモデルによる液状化危険度の計算は、計算が簡易な式(1)、(2)の方法を採用することにした。

5. 大阪表層地盤の揺れやすさ及び液状化予測

解析に用いるメッシュモデルは DU 層を設定した 2019 年 1 月現在最新のモデルを用いた。また、N 値が



図-8 液状化検討を行った地点の位置図

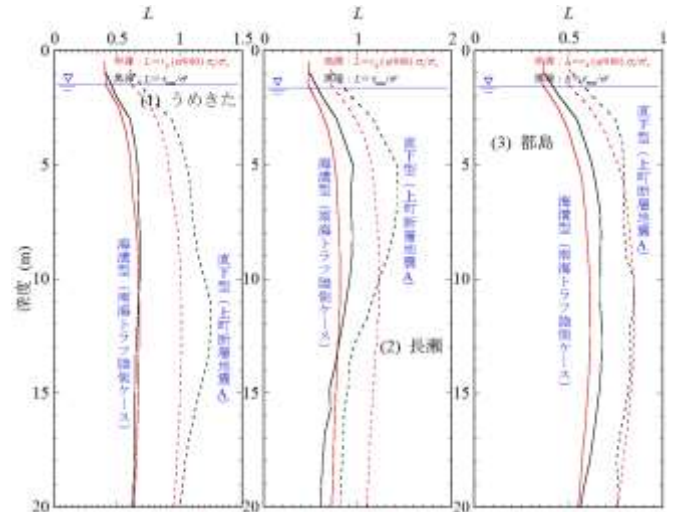


図-9 各地点の地震時せん断応力比 L の深度分布

表-1 各地点の液状化指数 PL の計算結果

地震	海溝型		A/B	直下型		C/D
	A	B		C	D	
L	$r_d(\alpha/980)\sigma_v/\sigma'_v$	τ_{max}/σ'		$r_d(\alpha/980)\sigma_v/\sigma'_v$	τ_{max}/σ'	
住之江	36.9	37.3	0.99	38.6	36.8	1.05
うめきた	32.3	33.7	0.96	29.4	34.3	0.86
天王寺	9.7	12.4	0.78	9.3	9.9	0.94
大阪城南	19.1	30.2	0.63	25.5	30.7	0.83
都島	45.1	49.4	0.91	41.8	42.9	0.97
長瀬	32.7	34.9	0.94	31.5	32.6	0.97
加島	33.9	36.8	0.92	43.6	46.4	0.94
芦屋	19.7	25.0	0.79			
和田岬	0.4	0.1	3.07			
弁天町	19.5	20.3	0.96	24.6	27.2	0.90
平均			1.10			0.93

らせん断波速度 V_s を算出し、繰返し変形特性は中村³⁾による大阪地域の H-D モデルを用いた。

図-10、図-11 にそれぞれ上町断層地震 A と南海トラフ地震の工学的基盤への入力最大加速度分布を示す。ここで、前者の凡例は後者の約 2 倍としている。図-10 より、上町断層地震 A は 500gal 以上が優勢で、所により 1000gal を上回る。図-11 (1)より、南海トラフ地震基本ケースは全体的に加速度が小さく、大きくても 300gal 以下である。図(2)より、陸側ケースでも 300gal 以下が優勢であるが、上町台地中部~南部、及び解析域の北東部では 300~400gal の地域もある。

図-12、図-13 に解析結果によるそれぞれ上町断層地震 A と南海トラフ地震の地表面最大加速度分布を示す。図-12 より、上町断層地震 A では上町台地上の加速度が大きく、1000gal を超え、加速度が増幅している。

一方で、西大阪・東大阪の平野部では入力と比べて減衰している。また、図(1)の旧メッシュ (DU層設定前) と(2) の新メッシュ (DU層設定後) を比較すると、新メッシュの方が上町台地上でわずかに加速度が小さくなった。図-13 (1)より、南海トラフ地震基本ケースではほぼ全ての地域で加速度が増幅している。図(2)より、南海トラフ地震陸側ケースでは上町台地周辺、淀川流域周辺と千里丘陵で大きく増幅する傾向が見られた。また、神戸市兵庫区、長田区でも増幅する傾向が見られた。

図-14、図-15 にそれぞれ上町断層地震 A と南海トラフ地震入力時の地盤の伝達関数の卓越周波数分布を示す。これが地盤の揺れやすさマップとなり、周波数が低いほど揺れやすいと言える。図-14 より、上町断層地震 A では地表面加速度の大きい地域では卓越周波数が高く、加速度の小さい地域では卓越周波数が低い傾向が見られる。また、旧メッシュと新メッシュを比較すると、新メッシュの卓越周波数はごくわずかに低い傾向が認められる。図-14 (2)と図-15 を比較すると、南海トラフ地震の場合の卓越周波数は、上町断層地震 A の場合と比べて高い傾向があるが、上町台地周辺の卓越周波数は大きく変化しなかった。上町台地の他に、神戸地域の山側は、硬質な地盤であるため卓越周波数

が高くなっていると考えられる。図-15 (1), (2)を比較すると、西大阪地域の大阪湾臨海地域は陸側ケースで周波数が低く、長周期化の傾向が見られる。

図-16、図-17 にそれぞれ上町断層地震 A と南海トラフ地震入力時の液状化指数 P_L の分布 (液状化危険度マップ) を示す。 P_L 算出の手順は 3. に従ったが、 L は式(1)によって求めた。図-16 より、上町断層地震 A では、西大阪地域の広範囲で P_L が 20 を上回り、西大阪地域の液状化の危険度は高いと言える。また、 P_L が 35 を超える地域は大阪市住之江区及び都島区である。都島区は N 値が低い上部沖積砂層が厚く堆積している地域で、液状化が起こりやすいことが P_L に表れていると考えられる。旧メッシュと新メッシュでは、新メッシュの方でごくわずかに P_L が小さい傾向にあった。図-17 (1)より、南海トラフ地震基本ケースでは入力波の加速度が小さいこともあり、 P_L は 10 以下が優勢である。 P_L が 20 以上となるメッシュの密度が高い地域は、やはり大阪市住之江区、都島区、及び西宮市であった。西宮市の P_L が大きい理由は、地表面から浅い部分での砂層が厚く堆積しているためであると考えられる。図-17 (2)より、南海トラフ地震陸側ケースでは、大阪地域における地表面加速度が上町断層地震 A と比べて非常に小さいにも関わらず、 P_L はほぼ同等な値と傾向

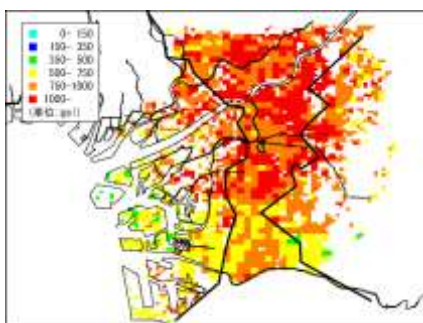


図-10 上町断層地震 A の入力最大加速度分布

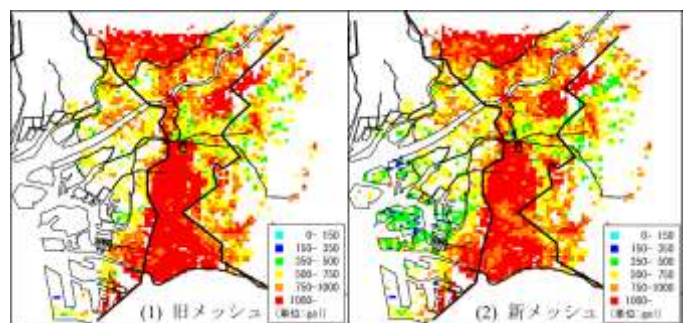


図-12 上町断層地震 A の地表面最大加速度分布

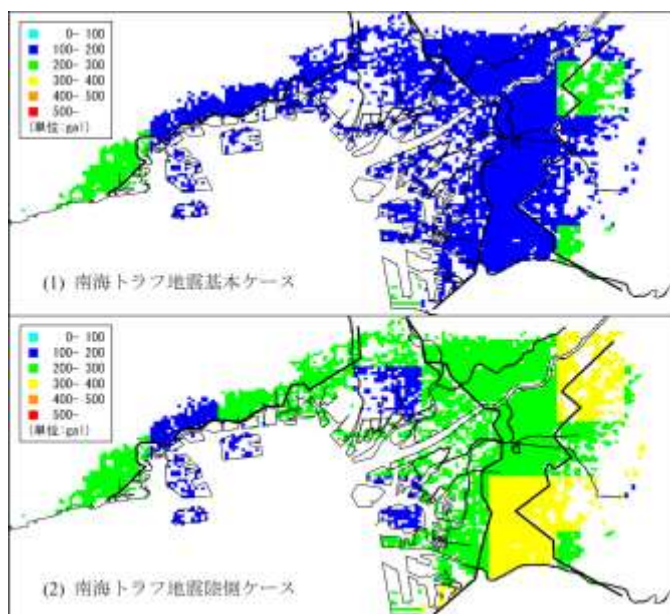


図-11 南海トラフ地震の入力最大加速度分布

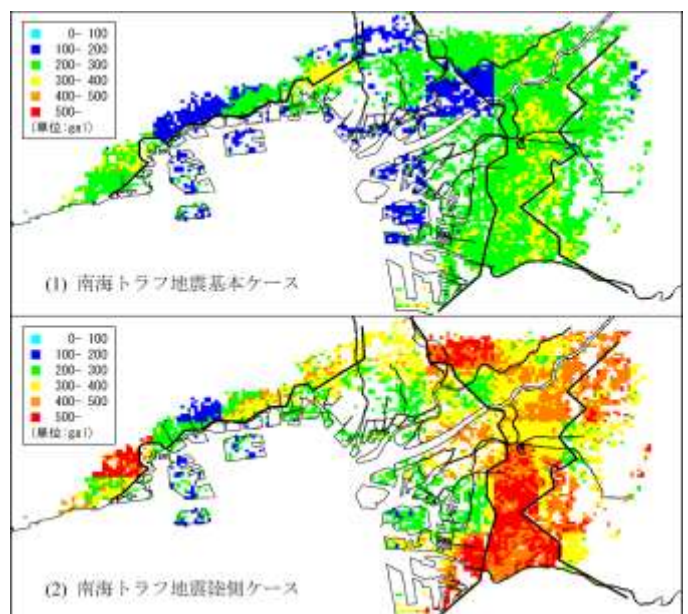


図-13 南海トラフ地震の地表面最大加速度分布

を示している。これは、南海トラフ地震が海溝型地震であるため、 R が小さいためと考えられる。

6. 結論

以下に、本研究で得られた主な結論を示す。

- 洪積上町 (DU) 層を設けることで上町台地周辺及び千里丘陵周辺の工学的基盤を設定することができた。また、DU 層によって、上町断層地震 A を入力した場合の上町台地周辺における地表面加速度はやや小さくなり、卓越周波数はやや高くなり、液状化指数 P_L はごくわずかに小さくなる傾向が得られた。
- 上町断層地震 A、南海トラフ地震基本ケース、陸側ケースについて、揺れやすさマップと液状化危険度マップを作成し、それぞれの特徴について捉えることができた。特に、地表面加速度の違いに関わらず、大阪市域において南海トラフ地震陸側ケースと上町断層地震 A の P_L 分布がほぼ等しくなった。ただし、海溝型地震の計測時間の影響は、考慮されていない。

7. 今後の課題

西大阪地域臨海部、東大阪地域では 250m メッシュ

浅層地盤モデルの空白域が残るので、これらを補間し、より充実した揺れやすさマップ・液状化危険度マップを作成することが今後の課題である。

また、海溝型地震の継続時間の長さの影響は、今後、液状化予測に取り入れられるべきと考えられる。

参考文献

- 1) 地震本部地震調査委員会：活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧（2018年1月1日での算定）、平成30年2月。
- 2) 地震本部地震調査委員会 HP：上町断層帯，https://www.jishin.go.jp/regional_seismicity/rs_katsudanso/f080_uemachi/，2019.1.19 閲覧。
- 3) 中村優孝 (2018)：上町断層想定地震波を用いた非線形地震応答解析による大阪表層地盤の揺れやすさと液状化の予測。
- 4) 大阪府 HP：大阪府地震被害想定 (平成 19 年 3 月)，http://www.pref.osaka.lg.jp/kikikanri/keikaku_higaisoutei/chokkagata_soutei.html，2018.12.24 閲覧。
- 5) 内閣府 HP：南海トラフの巨大地震モデル検討会，<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html>，2018.12.24 閲覧。
- 6) (公社) 日本道路協会：『道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編』，2017。

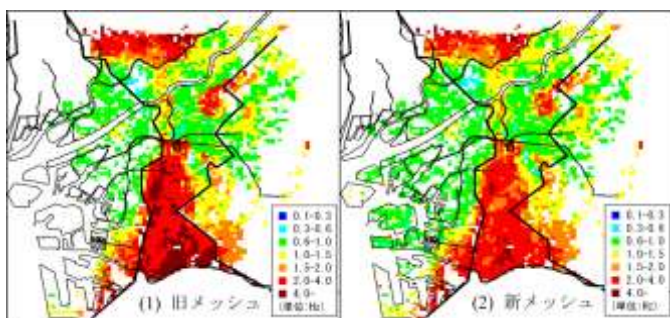


図-14 上町断層地震 A の卓越周波数分布

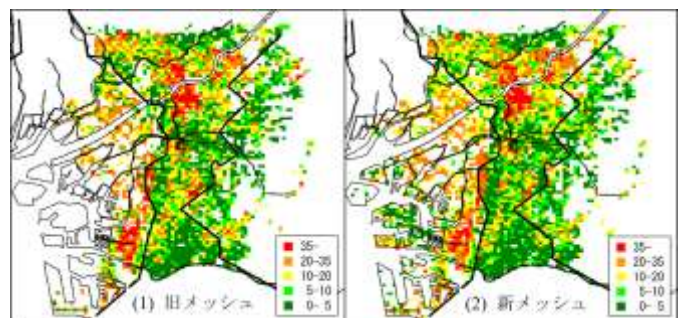


図-16 上町断層地震 A の液状化指数 P_L 分布

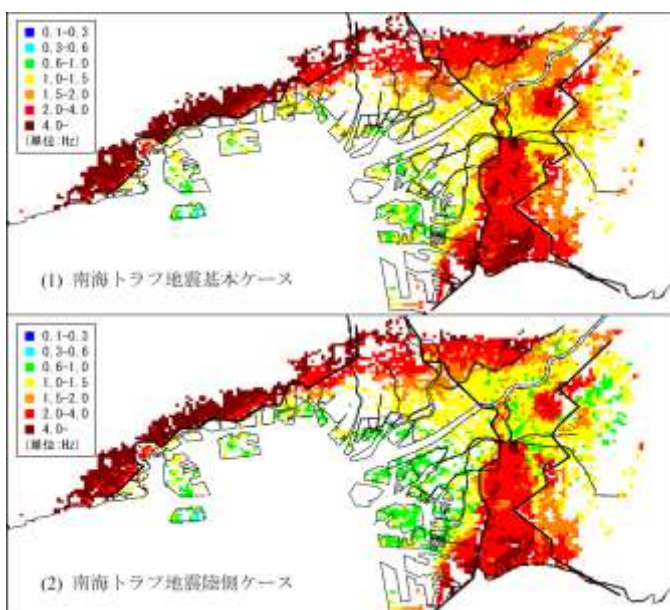


図-15 南海トラフ地震の卓越周波数分布

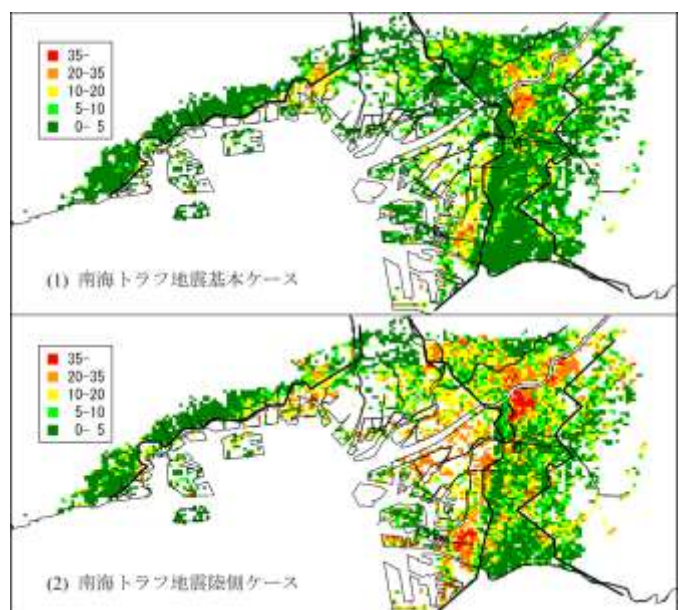


図-17 南海トラフ地震の液状化指数 P_L 分布