

## 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

### PREDICTION OF SITE AMPLIFICATION AND LIQUEFACTION OF SUBSURFACE GROUND IN OSAKA AREA BASED ON NONLINEAR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS USING SCENARIO EARTHQUAKE WAVES FOR UEMACHI FAULTS

地盤工学分野 中村 優孝

Lab. of Geotechnical Engineering Masataka NAKAMURA

本研究では、上町断層地震を対象とし、大阪府による想定地震波を用い、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を予測した。まず、繰返し変形特性試験データを大阪府から収集し、地層毎に繰返し変形特性モデルを作成し、表層地盤モデルに組み込んだ。次に、このモデルを用いて非線形一次元地震応答解析 (SHAKE) を行い、得られた伝達関数の卓越周波数より揺れやすさマップを、最大せん断応力より液状化指数  $P_L$  値を 250m メッシュ毎に求めた。

In this study, intended for Uemachi faults, used conceivable seismic waves and 250m square mesh subsurface ground model in Osaka area indicated for estimation of damage by Osaka prefecture, and performed seismic vulnerability and prediction of liquefaction. At first, borrowed data of cyclic deformation properties test, prepared the cyclic deformation properties model at every kind of formation, to incorporate it into subsurface ground model. And I performed nonlinear seismic response analysis (SHAKE), calculated seismic vulnerability maps from predominant frequency of transfer function that was calculated by “SHAKE” and liquefaction index ( $P_L$  value) from maximum shear stress at every 250m square mesh.

#### 1. まえがき

現在、大阪地域で発生が想定されている直下型地震として上町断層帯地震がある。上町断層帯は図-1 に示す大阪地域を南北に走る断層で、大阪府豊中市から大阪府岸和田市に至る約 42km の断層帯である。政府の地震調査委員会によると、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、断層近傍の地表面では東側が西側に対して相対的に 3m 程度隆起し、撓みが生じる可能性が示唆されている。上町断層直上には高層ビルが建ち並ぶ大阪市の中心部が位置しているため、M7.5 クラスの地震が発生した場合には甚大な被害が想定される。地震による揺れの大きさは、一般に「震源特性」、「伝播経路特性」、「サイト特性」の各特性の組み合わせにより決まる。中でも特にサイト特性が細かい地域ごとの揺れやすさを決める最大の要因となり、表層地盤の硬軟で揺れの大きさが異なる。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。しかし巨大地震は頻発するものではないため、内閣府が公表している強震断層モデルは限られた資料によるもので、そのレベルについても議論すべき点が残っている。

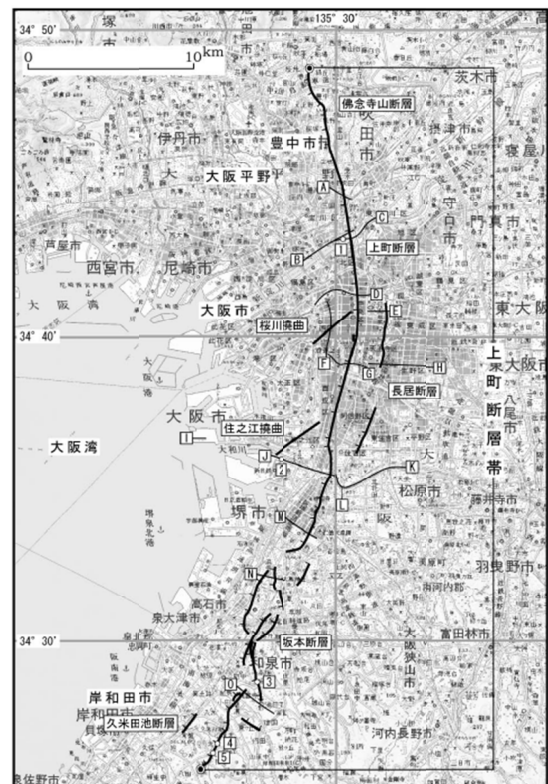


図-1 上町断層帯の位置

この背景の下、本研究では、関西圏地盤情報データベース (DB) と地盤モデル作成支援システムを用いて、沖積層、上部洪積層の地層構成 (土質、上下面深度、層厚、密度) をモデル化し、250m メッシュ表層地盤モデルを構築した。2 年前には、このモデルを用いて、道路橋示方書式<sup>2)</sup>と新関西地盤(2007)式<sup>3)</sup>によって標準貫入試験の  $N$  値から換算したせん断速度  $V_s$  を用いて一次元地震応答解析 (SHAKE) を行い、得られた卓越周波数より揺れやすさマップを作成し、常時微動観測による検証を行った。但し、この時の地震応答解析は常時微動との比較を対象として行ったため、地盤の繰返し変形特性に関しては考慮せず、地層に関わらず一定の値を用いた線形解析であった。

そこで、本研究では平成 19 年の大阪府地震被害想定で地震シナリオとして想定された上町断層帯地震 A (大阪地域の北中部を震源とする地震) を入力地震動として用い、各地層の繰返し変形特性 ( $G/G_0 \sim \gamma$  及び  $h \sim \gamma$  関係) を 250m メッシュ表層地盤モデルに組み込んで土の非線形性を取り入れた地震応答解析を行う。その結果から得られる伝達関数の卓越周波数より揺れやすさマップを作成し、既存の線形解析による揺れやすさマップと比較する。また、この地震応答解析から得られる最大せん断応力より地震時せん断抵抗力  $L$  を算出し、道路橋示方書による動的せん断強度比  $R$  と併せて、大規模地震時の液状化予測も行う。

## 2. 繰返し変形特性のモデル化

### 2.1 繰返し変形特性データの収集

土の繰返し変形特性は、せん断剛性率  $G$  と減衰定数  $h$  がせん断ひずみ  $\gamma$  によって変化する関係として  $G/G_0 \sim \gamma$ ,  $h \sim \gamma$  として表し ( $G$  は微小ひずみ時のせん断弾性定数  $G_0$  で正規化した  $G/G_0$  で表す), 地盤工学会基準に規定されている繰返し変形試験に基づいて求められる。本研究では、はじめに過去に行われたボーリング調査において行われた繰返し変形特性試験データを大阪府より収集した。図-2 に繰返し変形試験が行われている試験の実施位置を示す。このうち、今回借用した報告書にあった試験データを赤丸で、既に DB に登録されている試験データを黒丸で示す。

### 2.2 土の繰返し変形特性のモデル化

#### (1) 粘性土層における地域性の検討

揺れやすさマップ作成範囲を考慮し、西大阪地域と東大阪地域の 2 地域内に存在するデータをそれぞれモデル化対象とした。地域性について検討を行った結果 (紙面の都合で図は省略), 沖積粘土 Ma13 層及び洪積粘土 Ma12 層両粘土層ともに、西大阪地域のデータのバラツキの中に東大阪地域のデータが収まっており、

東大阪地域のデータのみを見てもバラツキは小さいことから、両者の地域性を考慮する必要はないと判断した。したがって、大阪地域両粘土層毎に 1 つの繰返し変形特性を与えることとした。

#### (2) 繰返し変形特性モデルの検討

次に、繰返し変形特性のモデル化で採用するモデルを次の 3 モデルの中から検討した。

- (i) Hardin-Drnevich モデル (以下、H-D モデル)
- (ii) Ramberg-Osgood モデル (以下、R-O モデル)
- (iii) 二重双曲線モデル (以下、DHP モデル)

以上の 3 モデルについて、収集したデータを用いてモデル化を行った結果を図-3 に示す。

図-3 の  $G/G_0 \sim \gamma$  関係を見ると、全ての層で H-D モデルが各収集データのバラツキの中の中心線近くを通っている。 $h \sim \gamma$  の関係では、低ひずみ領域では R-O モデルが、大ひずみ領域では H-D モデルが収集データによく合っている。3 モデルの検討結果より、最も試験データに対するフィッティングが良好であるモデルは H-D モデルであった。しかし、この H-D モデルは、 $G/G_0 \sim \gamma$  関係は試験データに比較的近い関係を示していたが、 $h \sim \gamma$  関係は低ひずみ域において減衰定数  $h$  が過小であることが問題点として挙げられる。そこで、低ひずみ域での最小減衰定数を設定する H-D モデルを作成し、収集した試験データとの関係性を図-4 に示す。これにより、試験データにおける  $\gamma=0.05\%$  以下の  $h$  と H-D モデルの整合性が改善した。したがって、以降の解析では図-4 に示した繰返し変形特性モデル (H-D モデル) を採用した。



図-2 繰返し変形特性試験の実施位置

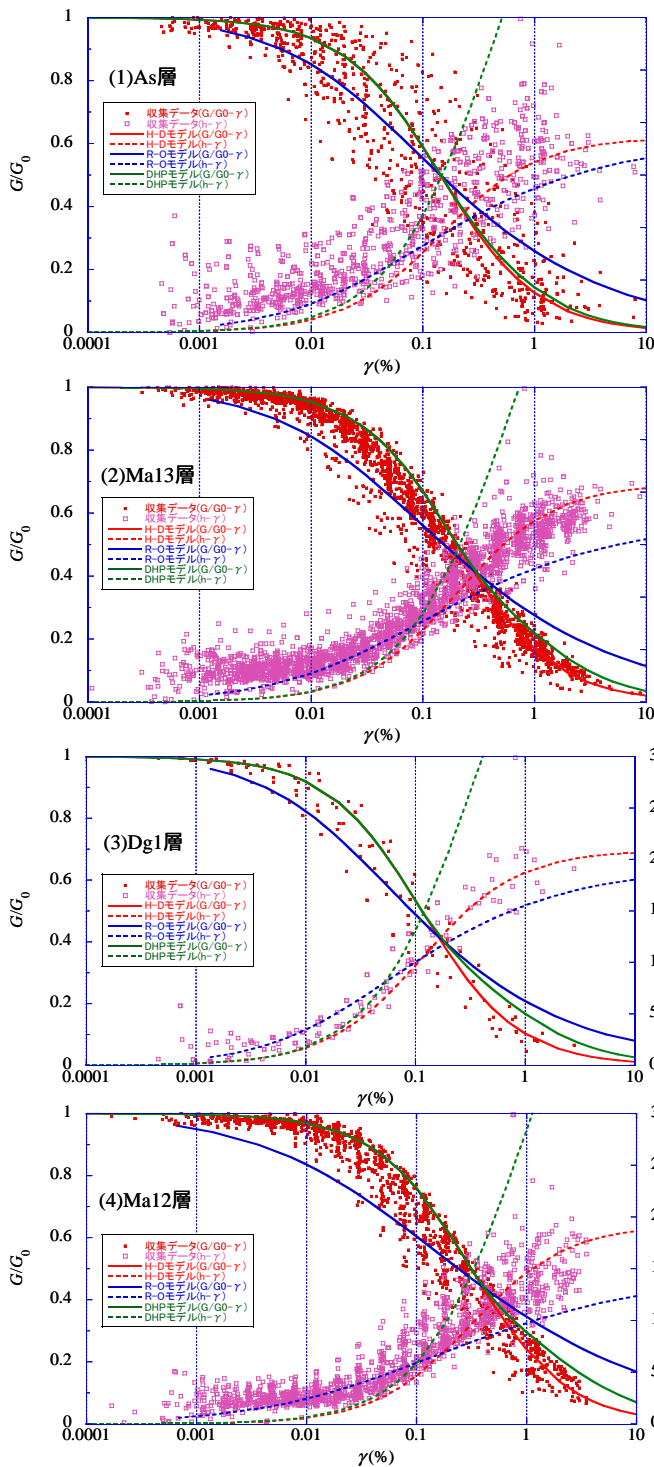


図-3 3つの繰返し変形特性モデル検討結果

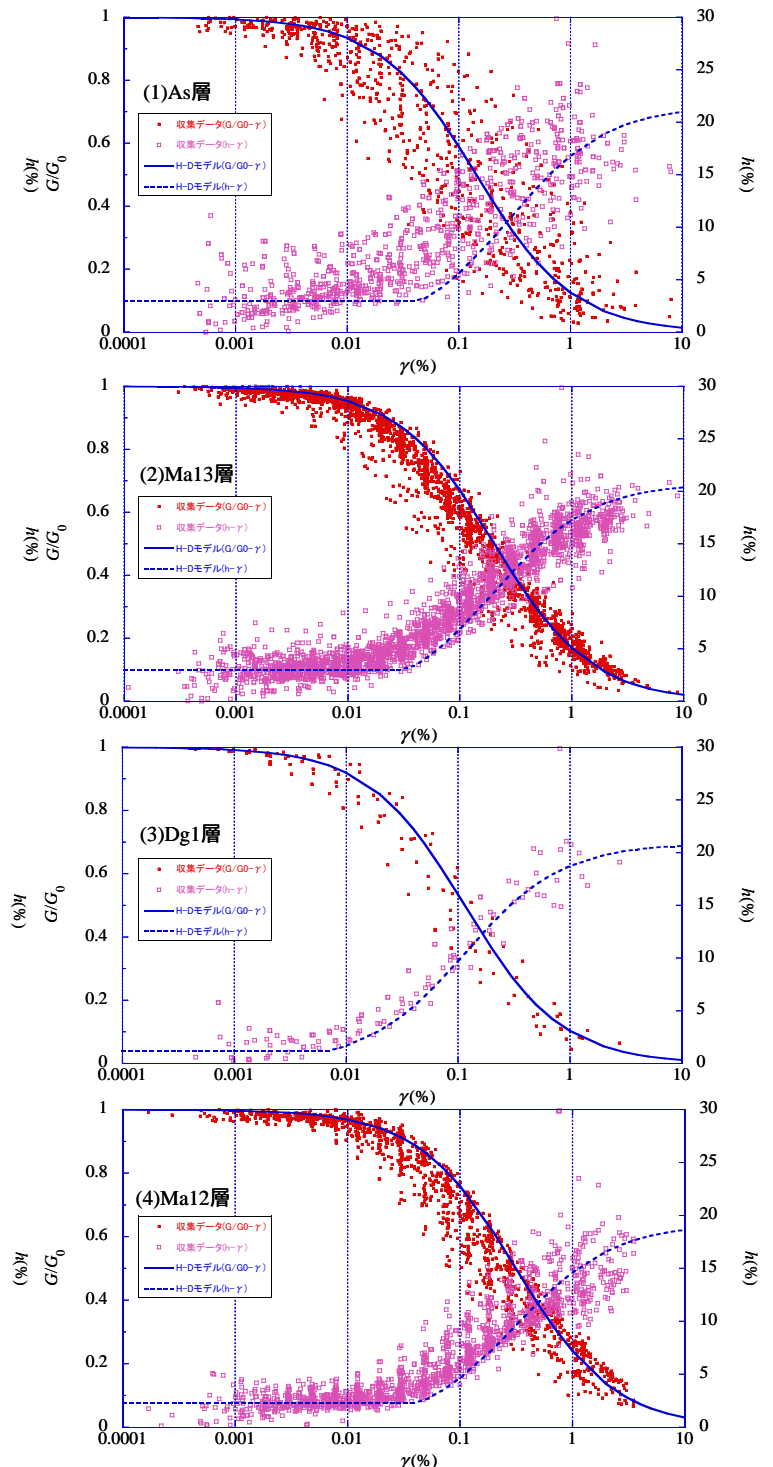


図-4 最小減衰定数を設定した H-D モデル

### 3. 一次元地震応答解析

#### 3.1 うめきた地盤モデルでの解析

図-4 で示した H-D モデルを用いて、2016 年に実施した「うめきた 2 期地区」の地盤調査結果より解析に用いる地盤モデルを作成し、一次元地震応答解析を行った。解析としては、繰返し変形特性を全層一定とした線形解析と Dg2 層を工学的基盤とし、それ以浅に H-D モデルを用いた非線形解析 2 ケースである。地震波には大阪府による上町断層想定地震波のうち、うめきたのもの (図-5) を用いた。

図-6 に解析結果を示す。ここでは紙面の都合上、(1)

最大ひずみ  $\gamma_{max}$ , (2)せん断波速度  $V_s$ , (3)伝達関数について示す。図(1)の  $\gamma_{max}$  を見ると、線形解析では 0.5% 以内に収まっているが、非線形解析では Ma13 層中央部 (GL-13m 付近) で最大 2% 程度のひずみが生じている。図(2)の  $V_s$  は、深度 40m 以浅を見ると、非線形解析の結果は線形解析の約 1/2 となっている。図(3)の地震波入力位置から地表面での伝達関数の卓越周波数は、線形解析では 1.52Hz に対し、非線形解析では 0.71Hz となり、大きく低周波数側にシフトしていることがわかる。これは、地盤の非線形応答によって地震動が低周波数化 (長周期化) することによると考えられる。

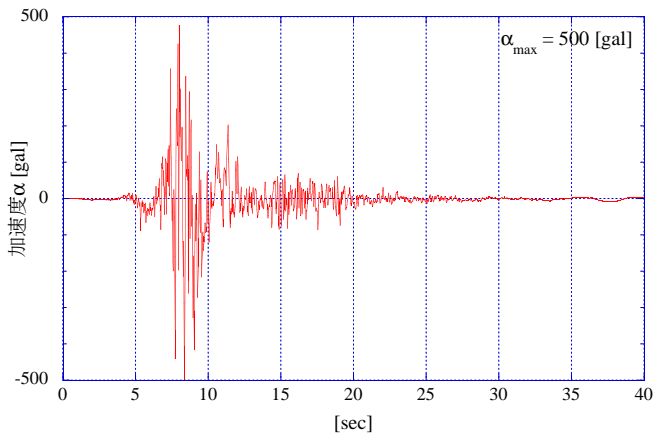


図-5 うめきたにおける想定地震波 (EW 波,  $\alpha=0.5$ )

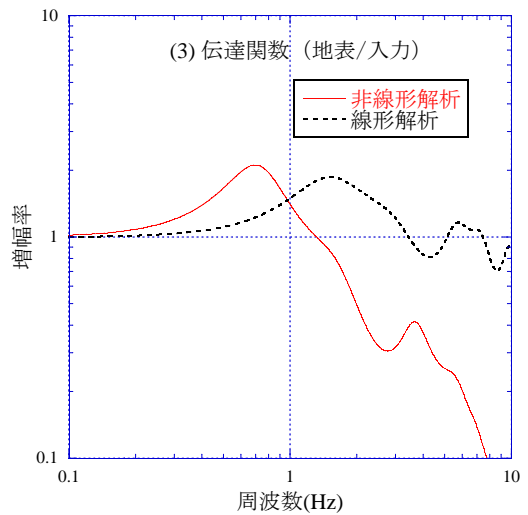


図-6 うめきたの地震応答解析結果

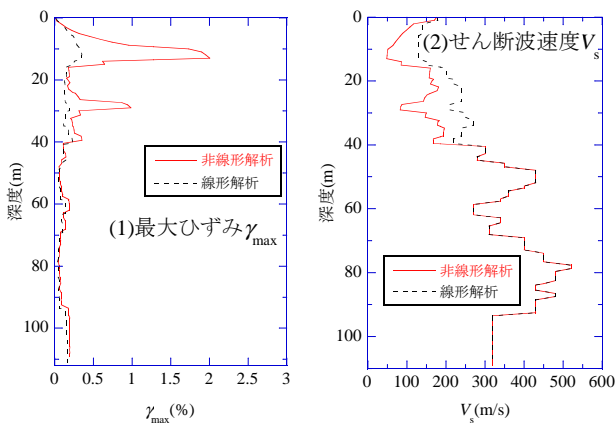


図-6 うめきたの地震応答解析結果

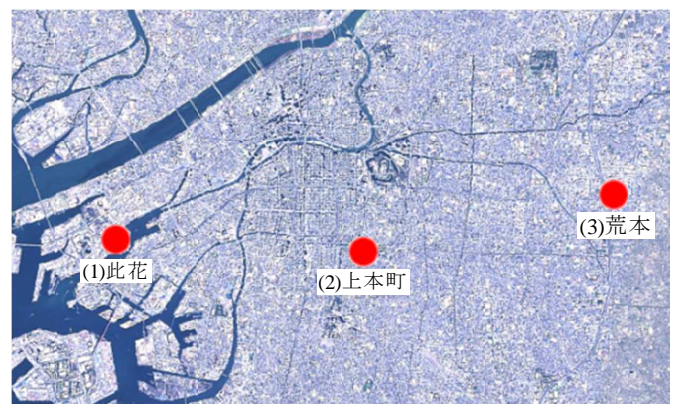


図-7 代表的な3地点

### 3.2 250m メッシュ毎の地震応答解析

今回は上町断層帯地震を想定した揺れやすさマップを作成するために、前述した地震波を与え、2.2 で設定した繰返し変形特性(H-D モデル)を各地層に与え、非線形一次元地震応答解析 (SHAKE) を行う。これにより、より地震時の地盤挙動に近い揺れやすさを評価する揺れやすさマップの作成を試みる。この想定地震波は震源地である上町断層から離れるほどそのエリア直下の地震動の大きさや伝播経路が異なることを表現するために、距離減衰や加速度波形の形が 500m メッシュ毎に異なっている。したがって、各メッシュに与える地震波形は各々で違うものを用いている。

以下では、解析結果として最大加速度分布 (工学的基盤面, 地表面), 卓越周波数による揺れやすさマップ, 液状化危険度  $P_L$  値の分布を示すが、まず西大阪地域, 上町台地, 東大阪地域の3地域から選んだ代表的な3地点 (図-7) についての考察と各地域での解析結果の傾向を示す。

#### (1) 工学的基盤と地表面の加速度分布

図-8 に代表3地点における工学的基盤面加速度と解析結果による地表面加速度波形を示す。ここでは紙面の都合上、EW 波のみを示す。地点(1)の此花では基盤

面での入力加速度に対して地表面では6割ほどに減衰し、地点(2)では2倍ほどに増幅し、地点(3)では半分ほどに減衰している。

西大阪地域の地点(1)及び東大阪地域の地点(3)では、表層に軟弱層が存在することから減衰する結果が得られたと考えられる。上町台地直上の地点(2)では、沖積層下端に Dg2 層よりも古い年代の硬質洪積層が存在していることから増幅する結果が得られたと考えられる。

250m メッシュ毎の工学的基盤面と地表面の最大加速度の分布をそれぞれ図-9, 図-10 に示す。ここで  $\alpha$  は想定地震波の振幅に対する倍率で、本研究では  $\alpha=1.0, 0.5, 0.25$  の3ケース (それぞれ 1000gal (大規模地震), 500gal (中規模地震), 250gal (小規模地震) 程度を想定) で加速度振幅に幅を持たせた解析結果を示す。図-9, 図-10 を見ると、3 ケースともに西大阪地域及び東大阪地域西縁では入力最大加速度に比べ地表面加速度は減衰している。一方、上町台地や東大阪地域東縁では増幅している。これはモデル層厚が西大阪地域や東大阪地域西縁では大きく、上町台地や生駒山地の麓では小さいことより、地震波の伝達過程での減衰機構が異なる点が理由として考えられる。

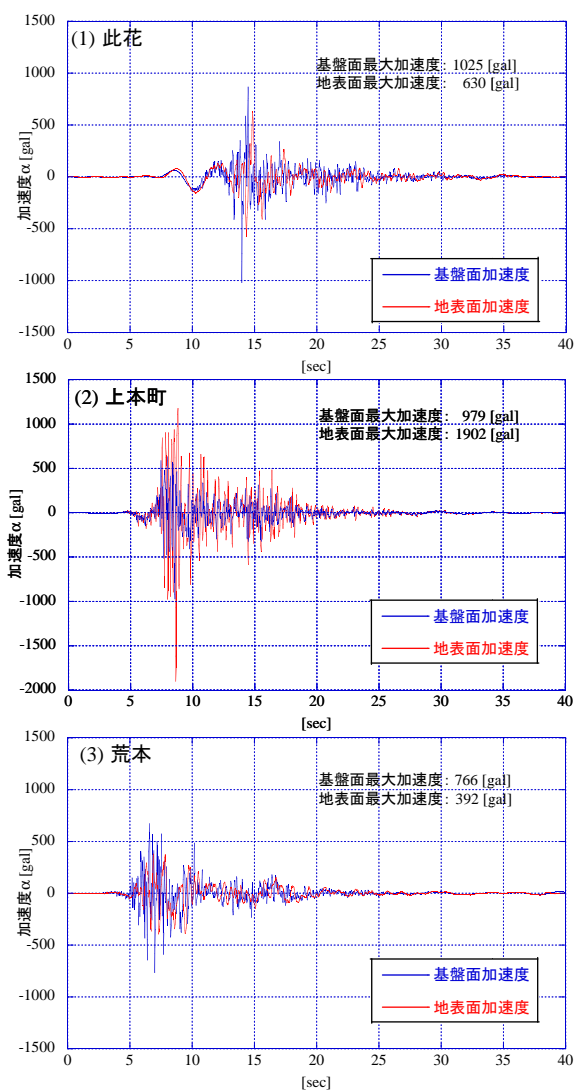


図-8 代表3地点における加速度時刻歴波形

(2) 卓越周波数分布

図-11 に代表3地点のSHAKEによる非線形一次元地震応答解析によって算出された伝達関数を示す。各地点における卓越周波数を見ると、地点(1)の此花では0.62Hz、地点(2)では3.64Hz、地点(3)では0.89Hzである。これと先ほどの加速度分布の関係を見ると、基盤面に対する地表面の加速度が減衰している地点(1),(3)では1Hzより小さい低周波数側となり、増幅している地点(2)では1Hzより大きな高周波数側に卓越周波数が表れている。

250mメッシュ毎の卓越周波数分布を図-12に示す。 $\alpha=1$ の大きい加速度を入力した場合は、上町台地を除く西大阪地域、東大阪地域で低周波数化(長周期化)している。一方、 $\alpha=0.25$ の小さな加速度入力では線形解析に近い分布となった。

4. 液状化危険度の予測

地震応答解析結果を基に、250mメッシュ毎に液状化指数( $P_L$ 値)を算出し、液状化危険度評価を行った。

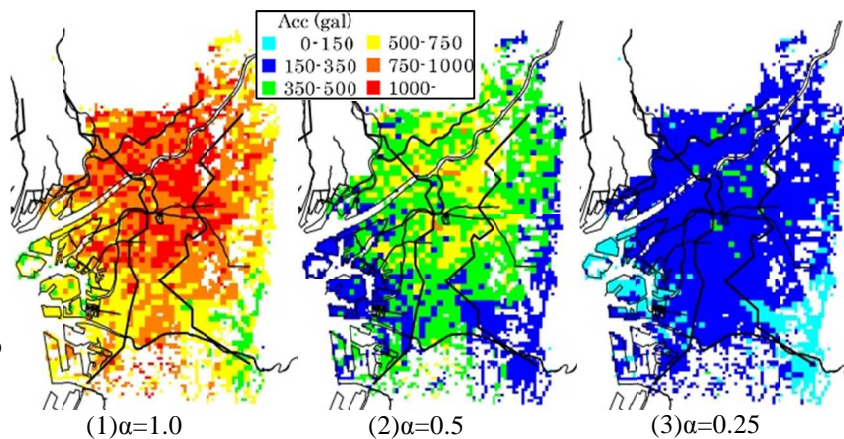


図-9 EW波での工学的基盤面の入力最大加速度

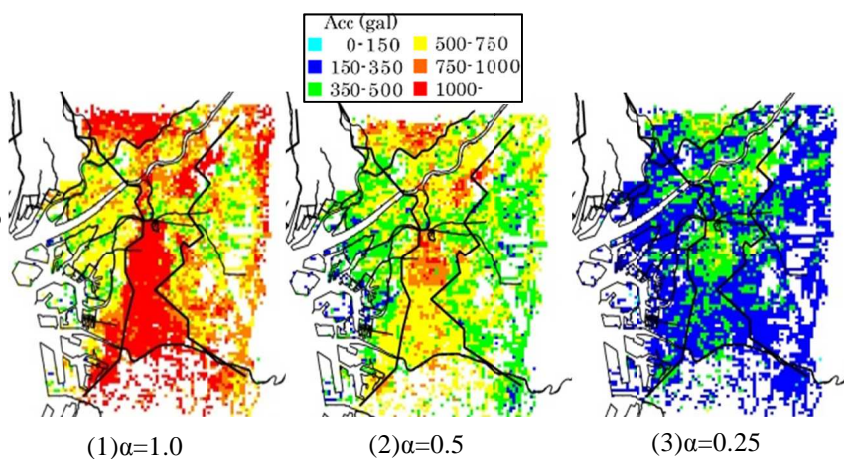


図-10 EW波でのSHAKEによる地表面最大加速度

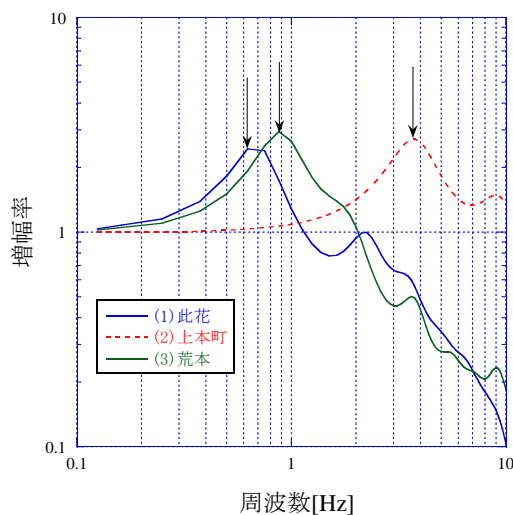


図-11 地震応答解析から求めた伝達関数

$P_L$ 値の算出は以下の手順で行った。

- ① 250mメッシュ毎の地震応答解析より求めた最大せん断応力 $\tau_d$ の深度分布を表層地盤モデルの有効土被り圧 $\sigma'_z$ で除して地震時せん断応力比 $L$ の深度分布(0~20m)を求める。
- ② 道路橋示方書(H29年版)<sup>2)</sup>による方法( $N$ 値, $F_c$ 値による)にて250mメッシュ毎に動的せん断強度比

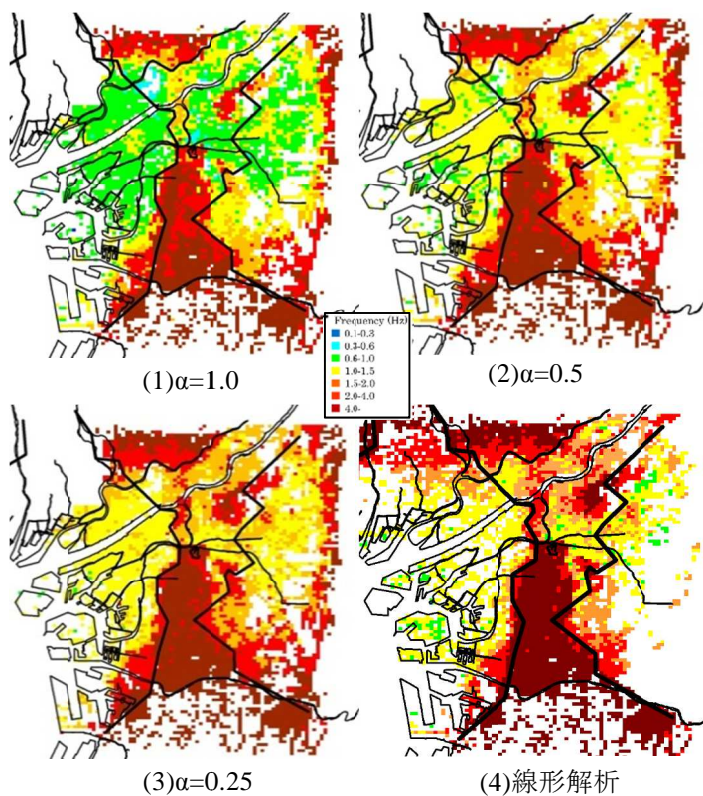


図-12 EW 波での地震応答解析による卓越周波数

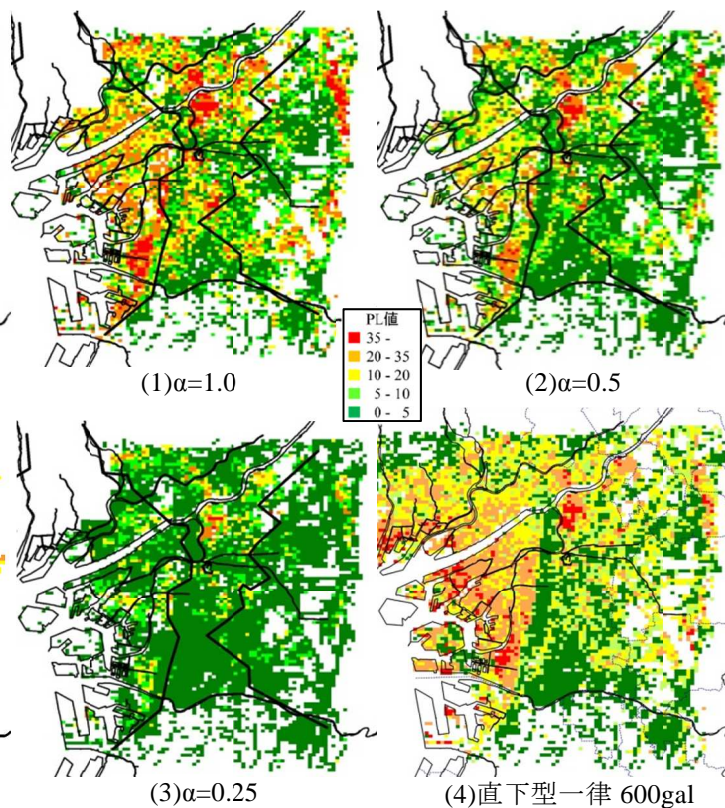


図-13 地震応答解析による液状化危険度  $P_L$  値分布

$R$  の深度分布を求める。

- ③  $R/L$  より液状化安全率  $F_L$  の深度分布を求める。
- ④  $F_L$  を次式より積分して液状化指数  $P_L$  値を求める。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)W(x)dx \quad (4.1)$$

ここに、 $P_L$  : 液状化指数、 $W(x)$  : 深さ方向重み関数  
 $W(x) = 10 - 0.5x$ ,  $x$  : 地表面からの深さ(m)

- ⑤  $P_L$  値の大きさを液状化危険度判定区分<sup>4)</sup>に従ってマッピングを行う。

図-13 に上記の手順で求めた 250m メッシュ毎の  $P_L$  値の平面分布を示す。図(1)の  $\alpha=1.0$  では、 $P_L$  値が 35 を超える非常に激しい液状化の発生が予想される地域は都島区や東大阪地域東縁、住之江区となった。都島区は、 $N$  値の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地盤構成が  $P_L$  値に表れていると考えられる。当然ながら、図(2)の  $\alpha=0.5$ 、図(3)の  $\alpha=0.25$  と小さくすると  $P_L$  値は低くなる。一方、図(4)は一律 600gal の加速度を与えた場合の結果であるが、図(1)~(3)を比較すると、液状化の発生が予想される地域は図(4)では広域で、図(1)~(3)では局所的に見られる。また、西大阪地域及び東大阪地域では表層に一律 600gal を与えた場合に比べ、非線形解析の場合で 1 段階ほど  $P_L$  値が小さくなっている。

以上より、大阪地域における非線形地震応答解析時の液状化危険度  $P_L$  値分布について示すことができた。

## 5. 結論

以下に、本研究で得られた結論を示す。

- ・繰返し変形特性モデルを用いて行ったうめきた地盤モデルでの地震応答解析結果より、線形解析に比べ非線形解析での伝達関数における卓越周波数は低周波側へシフト（長周期化）する傾向が確認できた。
- ・一次元地震応答解析によって求めた 250m メッシュ毎の伝達関数の卓越周波数は、入力地震波が大きいほど低く、小さいほど高い分布を示した。これは前述した卓越周波数の低周波化傾向と整合する。
- ・地震応答解析結果を基に 250m メッシュ毎に液状化指数  $P_L$  値を算出した結果、想定地震波 ( $\alpha=1$ ) において、西大阪地域のほぼ全域で  $P_L$  値が 20 を超えることから、液状化危険度が高いことがわかった。

## 6. 今後の展望

本研究では直下型地震である上町断層帯地震を対象とした検討を行った。今後、海溝型地震である南海トラフ地震についても非線形地震応答解析を行うことで、両タイプの地震に対する揺れやすさ及び液状化危険度の違いを求めたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 小坂慎一(2017):大阪・神戸地域の 250m メッシュ表層地盤モデルの構築と地下水位低下による地盤沈下量の推定
- 2) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編
- 3) 関西圏地盤研究会:新関西地盤-大阪平野から大阪湾-
- 4) 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書(平成 9 年)