

大阪・神戸地域の表層地盤の土質特性のモデル化と地盤工学問題への適用

Representative Modeling of Geotechnical Characteristics of Surface Subsoil in Osaka and Kobe and its application to Geotechnical problems

地盤工学分野 新井 瞬

本研究では 250m メッシュを用い、地下水位高位化問題と南海トラフ巨大地震の地盤工学問題への適用について検討した。まず、洪積層 (Dg1, Ma12) の 250m メッシュ毎の地盤性状を明らかにした。そして、過去に上面の削剥を受けている Ma12 層に仮想上面標高をもたせ、土質特性を求め、Ma12 層の沈下を考慮した地下水位の低下可能量を求めた。また、Ma12 層の下面を工学的基盤面とし、地震動を入力することで応答解析を行い、常時微動観測と比較し、震動特性を明らかにした。

The application to geotechnical problems of the underground water rising and the Nankai trough giant earthquake was examined using 250m mesh in this study. At first the detail soil properties were calculated and given to soil strata which are representative value in each digital mesh has 250m * 250m area. Acceptable amount of lowering of underground water table and considering negative effect of them against consolidation problem was estimated using soil characteristics with virtual top surface altitude to the Ma12 layer which caught the erosion of the top surface for a past. In addition, ground vibration characteristic was clarified by inputting earthquake vibration from the undersurface of the Ma12 layer with a base side of the engineering and was compared with regular fine shakes.

1. まえがき

大阪地域では、過去に過剰な地下水揚水による地下水位の低下を受け、大規模な地盤沈下が生じた。その対策として昭和 37 年に制定された地下水揚水規制により、地下水位が回復し、地盤沈下は収束したが、現在では、沖積砂層の地下水位は過剰に回復したため、地下構造物の浮き上がり、掘削工事の難航、汚染地下水の拡散等の地下水位高位化問題が生じている。また、現在閉ざされている地下水の有効利用も必要である。

一方、近年、南海トラフ巨大地震が懸念されており、震度 6 強～7 に至る非常に大きな揺れが想定されている。揺れの大きさは地域の地盤特性に依存するので、地域の地盤特性を詳細に表現できる地盤モデルが必要とされる。これまでに、沖積層モデルは作成しているが、地震の揺れが鉛直に入射すると考えられる工学的基盤面までの地盤モデルが必要とされている。工学的基盤面は、第 2 洪積砂礫 (Dg2) 層の上面と考えることができ、沖積層のモデル化だけでは、十分とは言えない。そこで、過去に多くのボーリングデータ (以下、BD) が集積されている「関西圏地盤情報データベース」

(以下、DB) を用い、大阪・神戸地域の表層地盤の地盤特性を電子モデル化する必要がある。これまでの研

究から、基準ボーリング地点の連続サンプリング試料による土質試験結果及び DB を用いて、大阪・神戸地域の沖積層・沖積粘土層の土質特性の電子モデルを作成することができ、昨年度のモデルの修正により、さらに精密な電子モデルが完成した。

本研究では、まず、沖積層モデル作成方法を踏襲して、沖積層より下の上部洪積層 (第 1 洪積砂礫 (Dg1) 層、洪積粘土 (Ma12) 層) の土質特性をモデル化することによって、大阪・神戸地域の表層地盤 (沖積層、Dg1 層、Ma12 層) の土質特性を明らかにする。この地盤モデルを用いて、沖積粘土 (Ma13) 層と洪積粘土 (Ma12) 層を対象とした、大阪・神戸地域の地下水位低下による地盤沈下量を予測する。さらに、大阪地域を対象に地震による震動特性として「揺れやすさマップ」を作成する。その精度を検証するために、常時微動観測から得られる卓越周波数と比較する。

以上から、大阪・神戸地域の表層地盤の土質特性のモデルを用いて、地盤工学問題 (地下水位低下による地盤沈下と表層地盤の震動特性) に適用することが、本研究の目的である。最終的には、それらの成果を関西圏地盤情報ライブラリー (Web) で公開し、一般の人々にも検証する予定である。

2. 洪積層の電子モデル化

2.1 250m メッシュモデル化

本研究では、図-1 に示す国土地理院の国土数値情報で採用されている「標準地域メッシュ」(1km メッシュ)を4等分した250mメッシュ(1/4 地域メッシュ)を用いる。

図-2 に示す「地盤モデル作成支援システム」を用いて、250mメッシュごとにDg1層、Ma12層の土質特性(N値、密度)と深度(上・下面深度)、層厚の平均モデルを作成する。その結果の例として、図-3、4 にそれぞれDg1層、Ma12層の平均N値の平面分布を示す。図-3のDg1層では、西大阪に礫層が広く分布し、N値が50以上である。東大阪や神戸地域では砂層が主で、粘性土もいくらか含まれている地域が存在する。図-4のMa12層では、全体的に東大阪よりも西大阪・神戸地域のMa12層のN値が大きいことがわかる。

2.2 Ma12層の土質特性のモデル化

(1) Ma12層の削剥地域の抽出

過去の文献より、西大阪地域の加島、佃まではMa12層は古大阪川によって削剥され、泉尾は削剥されておらず、夢洲、咲洲西に削剥範囲の境界があることがわかっている(削剥範囲を図-5の青線で示す)。そこで、図-6のMa13/Ma12層厚比のコンター図より、削剥されていない部分はある程度、一定の層厚比を保ったままMa13とMa12層は堆積していたことがわかった。そして、図-7のMa13/Ma12の層厚比より、層厚比が1.2を超えている範囲が図-5の削剥範囲とほぼ一致したので、その範囲を削剥地域と見なした。

(2) Ma12層の削剥量の算出

Ma12層の削剥量を求めるために、削剥される前の仮想上面標高を求める。図-6をみると、海側から同心円状上にMa13層とMa12層は層厚比がおおよそ同じとなっており、Ma13層の層厚分布は大阪湾を中心に同心円状になっているため、Ma12層も海側から同様に堆積していたと仮定できる。図-8に示すように削剥地域内のBDに仮想上面標高を与えることにより、削剥量が算出できる。図-9は標高-3mピッチで引いたMa12層の仮想上面標高である。このようにして求めた250mメッシュの仮想上面標高を図-10に、削剥量を図-11に示す。

(3) Ma12層の土質特性の補間方法

Ma12層の土質特性の補間には図-12に示す逆距離加重法(IDW: Inverse Distance Weighting)を用いる。層厚を無次元化したものを20等分し、IDWを用いる。

$$F_j = \sum F_i \cdot d_{ij}^{-r} / \sum d_{ij}^{-r} \quad (1)$$

ここに、 F_i はデータが存在する既知メッシュ i ($i=1,2,3,\dots$)

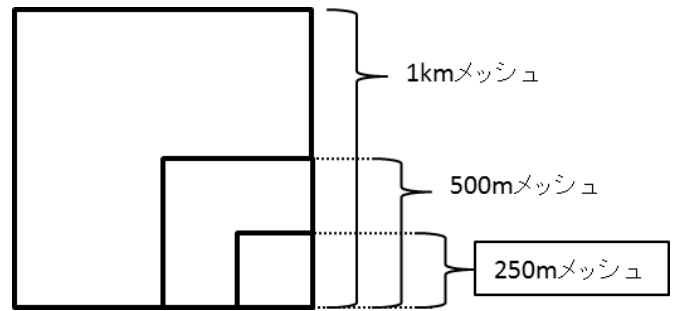


図-1 標準地域メッシュ

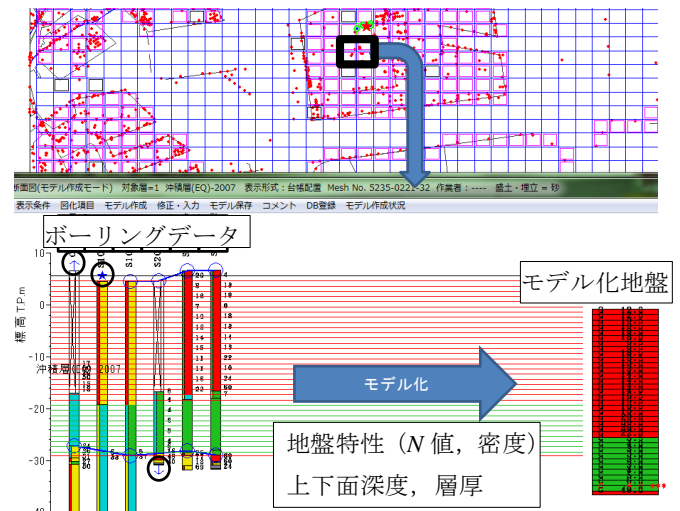


図-2 モデル地盤の作成方法

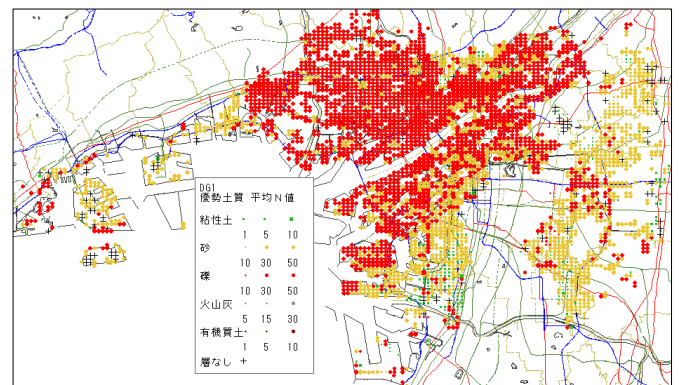


図-3 Dg1層モデルによる平均N値分布

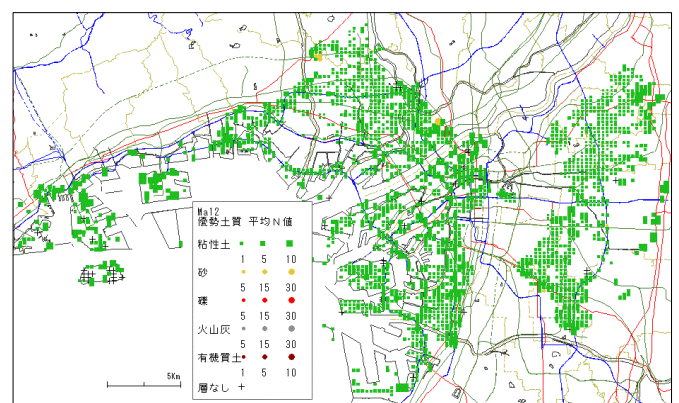


図-4 Ma12層モデルによる平均N値分布

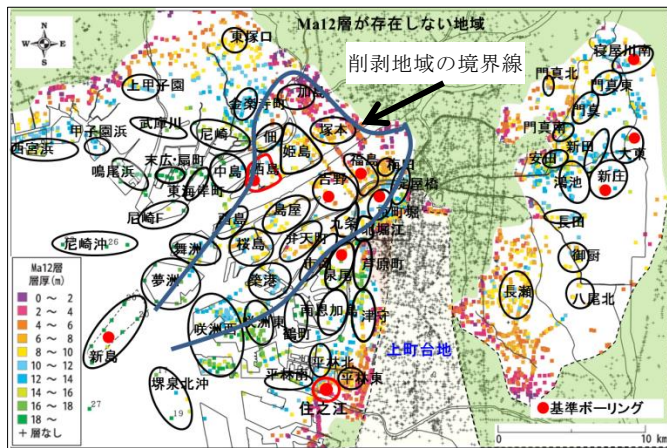


図-5 Ma12層の選定地区と削剥地域

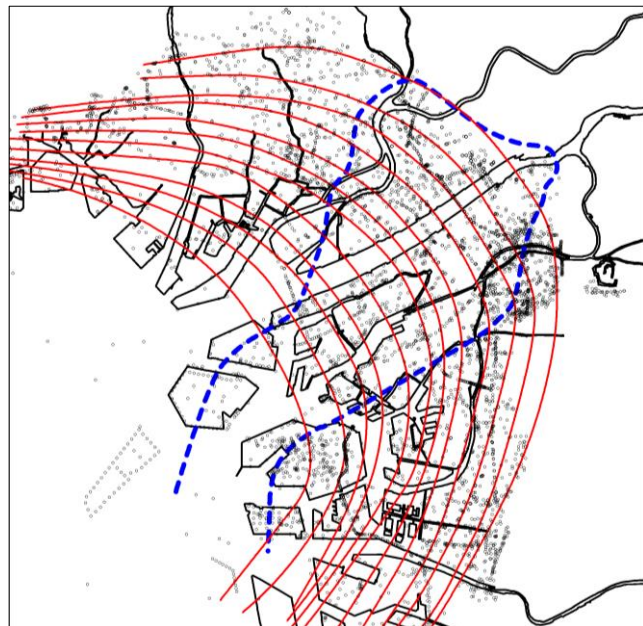


図-9 Ma12層の仮想上面標高を表すコンター

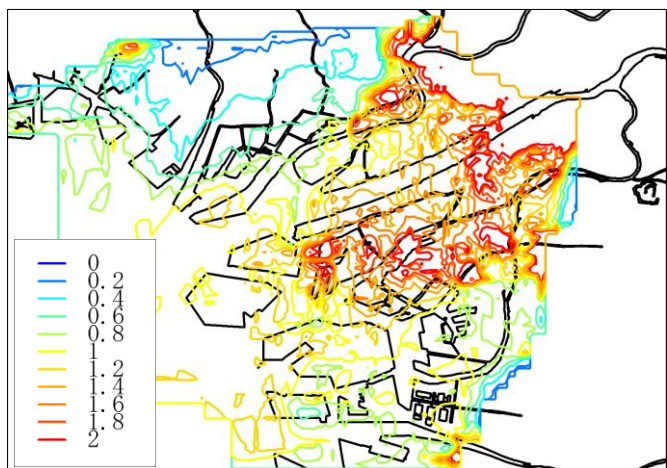


図-6 BDでのMa13/12層厚比のコンター図

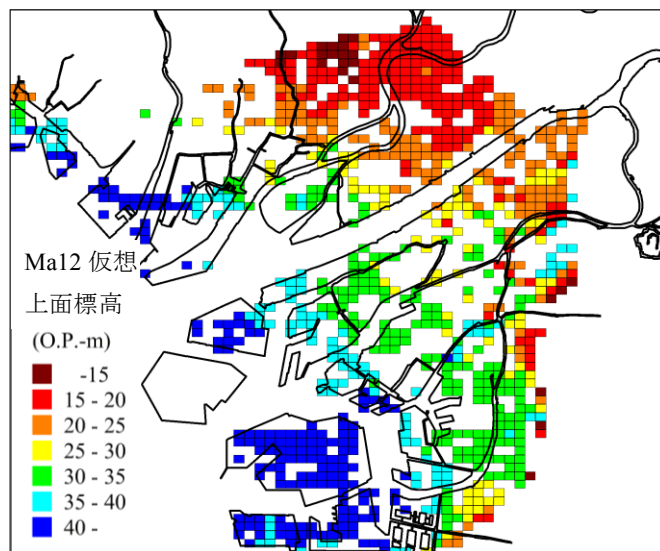


図-10 250mメッシュの仮想上面標高分布

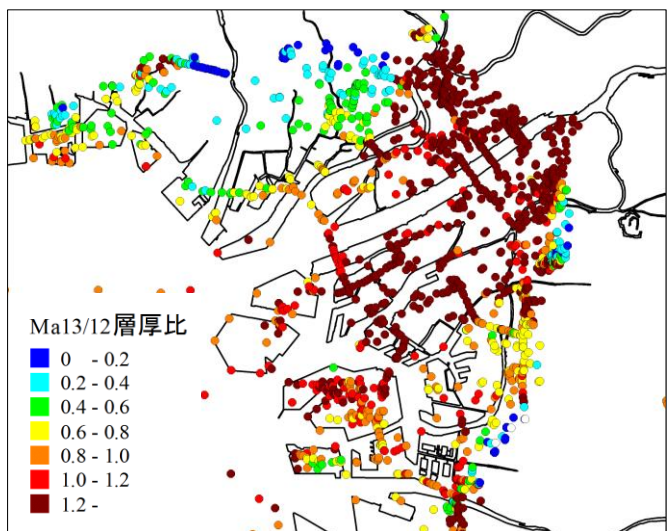


図-7 BDでのMa13/12層厚比の分布

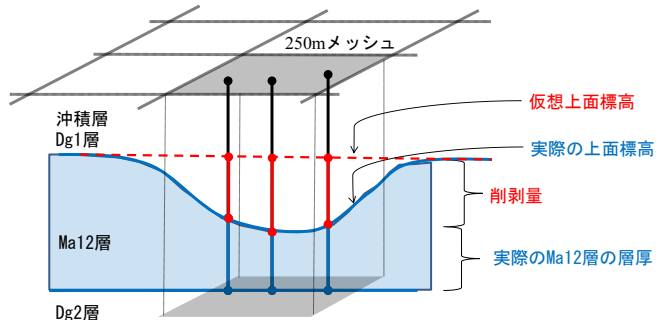


図-8 Ma12層の削剥量の求め方の概念

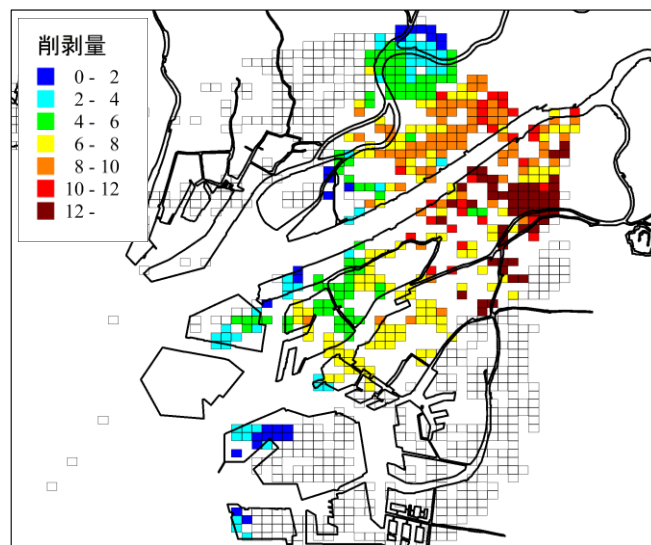


図-11 250mメッシュのMa12層の削剥量

でのデータ値、 F_j はデータがなく空間する未知メッシュ j での推定値を示している。 d_{ij} は地点 i と j 間の距離である。本研究では $i=4$ 、 $r=1$ とした。IDWの手順を以下に示す。

- ①昨年度までに土質特性がまとめられた地区の中心位置を求め、それを含む 250m メッシュを定める。このメッシュを「既知メッシュ」と名付ける (図-12 の■)。そのメッシュ以外はすべて、データを持たない「未知メッシュ (図-12 の□)」である。
- ②既知メッシュの各土質データの深度分布を正規化 (無次元深度 $Z=z/H$, z : 深度 $0\sim H$, H : Ma12 層の仮想層厚) し、深度方向に 0.05 刻みの土質データ (式 (1)の F_i) を回帰式 (7~9 次式) により決定する。
- ③データを補間する未知メッシュ (□) と既知メッシュ (■) との中心距離 (式(1)の d_{ij}) を求め、正規化したデータを 0.05 ごとに IDW を用いて補間する。
- ④補間したメッシュの Ma12 層のモデル地盤の実際の層厚を当てはめて深度分布を作成する。

先に求めた Ma12 層の削剥地域では、補間する際、深度ごとに用いるデータ数が異なる。例えば、図-12 のように、既知メッシュ①、②は削剥されていないが、③、④は削剥されていれば、求める未知メッシュの深度分布の上部は①、②の IDW の結果であり、中部は①~③、下部は①~④のすべての既知メッシュの深度分布の IDW の結果となる。この方法を用いて、液性限界 w_L 、塑性限界 w_p 、自然含水比 w_n 、液性指数 I_L 、粒度特性、圧縮指数 C_c 、圧密係数 c_v 、有効土被り圧 p_0 、圧密降伏応力 p_c 、過圧密比 OCR、一軸圧縮強さ q_u の計 12 種類の土質特性を補間した。

(4) Ma12 層の土質特性の分布

大阪地域の Ma12 層の土質特性の補間結果の代表例として w_L 、 p_c の無次元深度の上部、中部、下部のそれぞれの平均値を平面分布図-13 に示す。図(1)の w_L は大阪地域で一般的に見られる上・下部で低く、中部で高い値を示す深度方向に弓型分布を示している。東大阪の w_L は全体的に低い値をとる。なお、上部の淀川近傍の空白部分は削剥地域である。図(2)の p_c は深度方向に大きくなり、下部では、西大阪、東大阪ともに 600kN/m^2 を超え、過圧密となっていることがわかる。

3. 大阪地域の地下水位の低下可能量

大阪地域の Ma13 層、Ma12 層の土質特性を用いて、浅層帯水層である沖積砂層、Dg1 層に 1~4m の地下水位低下を与えた場合 (有効応力が $1\sim 4\text{tf/m}^2$ 増加) の両層の沈下量の算定を行った。地下水位低下は沖積砂層単独、Dg1 層単独、両層同時の 3 ケースを想定した。ここでは、Dg1 層の地下水位を 2m 下げたときの Ma13 層と Ma12 層の沈下予測を行った結果を図-14 に示す。

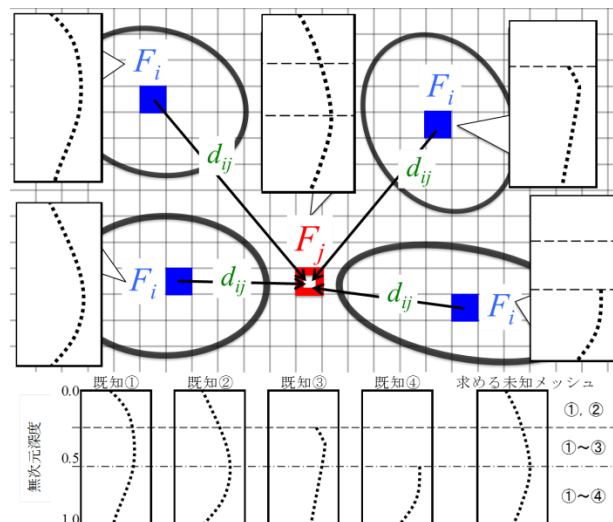


図-12 逆距離加重法による土質特性の補間方法

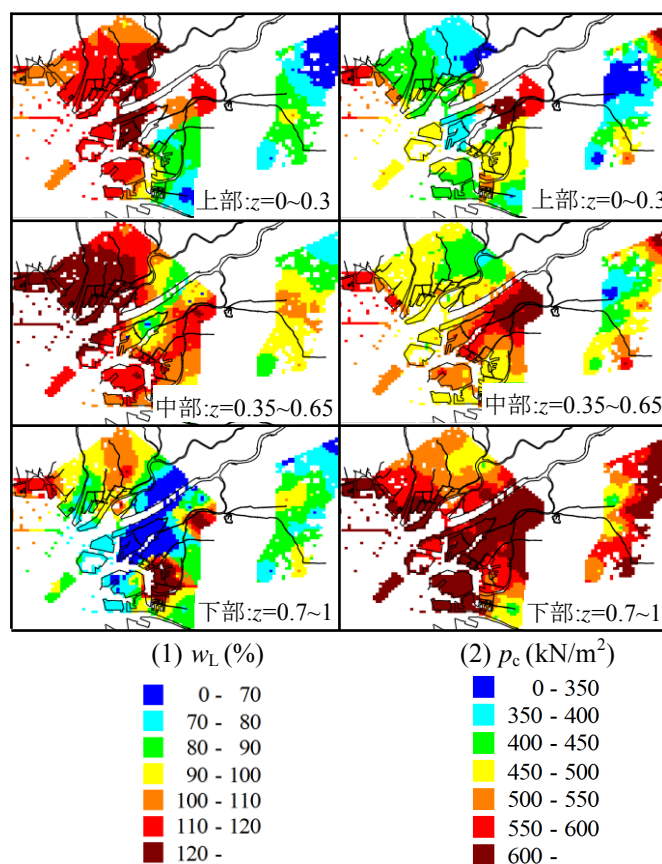


図-13 大阪地域の Ma12 層の w_L 、 p_c の平面分布

図(1)の Ma13 層のみの沈下は大阪地域で地下水位 2m 低下によって、2~4cm 生じることがわかる。図(2)の Ma12 層のみの沈下は 2cm 程度であり、図(3)の両層の沈下量は 4~6cm であるが、局所的に大きい範囲がある。

次に、この結果を基に、最小限の許容沈下量 (5cm, 10cm) に留まる地下水位低下可能量を算定し、地下水位の適正なレベルを予測した。一例として、Dg1 層の地下水位低下可能量を図-15 に示す。許容沈下量を 10cm とすれば、大阪地域では、3~4m の低下、5cm とすれば、1~2m の地下水位低下が可能と言える。

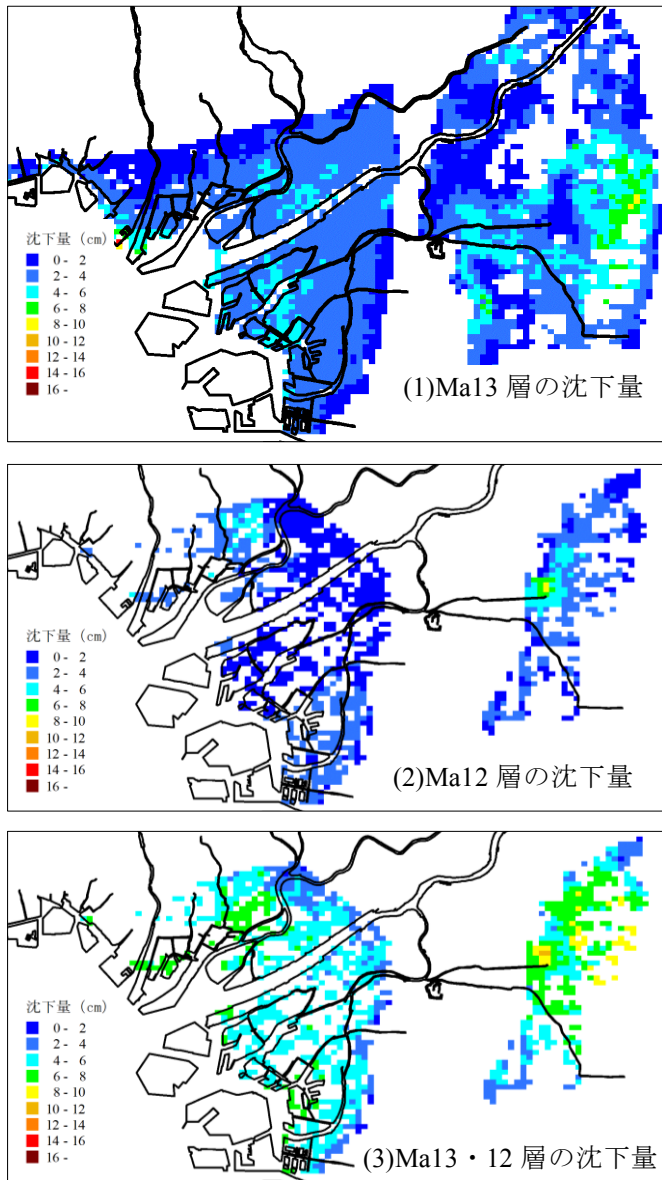


図-14 Dg1層の水位を2m下げた時の沈下量

4. 大阪地域の表層地盤の震動特性

4.1 250mメッシュの地震応答解析

地震応答解析は強震を対象として行われることが多く、その場合は非線形解析として、用いる地盤物性値を細かく設定しなければいけない。しかし、今回は地盤の「ゆれやすさ」を求めることが主眼であり、かつ常時微動観測との比較を行うため、線形解析とし、せん断剛性の低下率 $G/G_{max}=1.0$ 、減衰定数 $h=3\%$ を一定とした。また、250mメッシュモデルで1mピッチごとに土質、 N 値が得られているため、式(2)の道路橋示方書に基づいて層ごとの V_s を算出した。

$$\begin{aligned} \text{砂地盤: } & V_s = 80 \times N^{1/3} \text{ (m/s)} \\ \text{粘土地盤: } & V_s = 100 \times N^{1/3} \text{ (m/s)} \end{aligned} \quad (2)$$

また、卓越周波数（揺れやすい周波数）を把握するため、入力する地震波に特に制限はないので、1968年十勝沖地震における八戸港地震波形を用いて、メッシュごとに一次元地震応答解析(Shake)を行った。

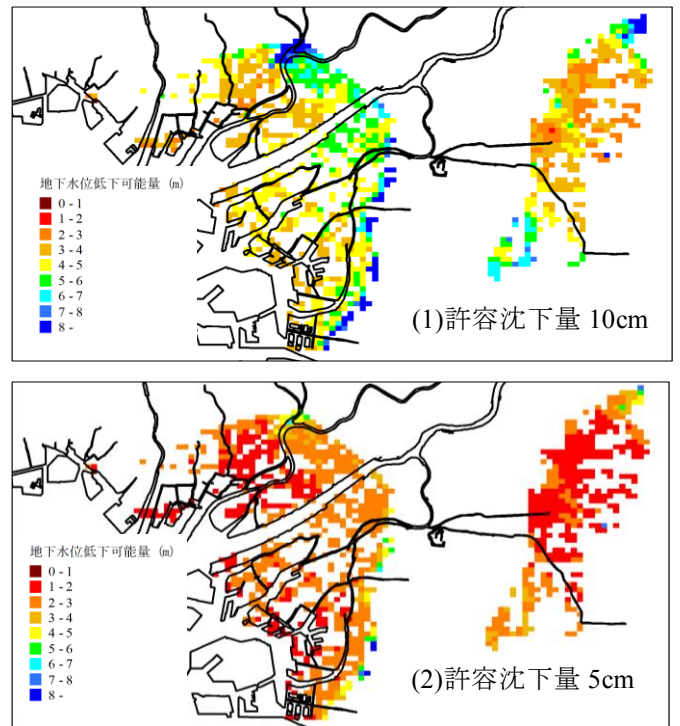


図-15 Dg1層の水位低下可能量

図-16に250mメッシュごとの解析による地表面での第1卓越周波数の平面分布を示す。黒線内のメッシュはMa12層が存在しないので沖積層下面から地震動を入力して求めている。応答解析の結果である伝達関数の第1ピークを地盤の卓越周期とみなしている。大阪地域では平野部で卓越周波数が低く、上町台地の縁やMa13層が存在しない範囲で卓越周波数が高くなっている。神戸地域では、海側の粘土層が堆積している範囲で低周波数、陸域では高周波数が卓越していることがわかる。

4.2 常時微動観測

(1) 常時微動について

常時微動とは、交通振動や工場振動などの人間活動や自然現象に伴い、発生している振動のことで、一般には感じることでできない波である。表面波は上下動を伴うレイリー(Rayleigh)波と水平成分のみのラブ(Love)波を含むが、それらの両方が含まれるスペクトル比をとることで、地盤に固有な震動特性を抽出できる。それがH/Vスペクトルであり、単点観測により、地盤の卓越周波数を求める際に用いられる。本研究でもこの微動水平成分と上下成分のスペクトル比をとったH/Vスペクトルで地盤の卓越周波数を評価した。一般的な周波数(周期)特性は、岩盤のような硬質地盤では、H/Vスペクトル比の形状がフラットで卓越周波数が見えにくく、卓越周波数の値も小さくなることが知られている。厚い軟弱地盤が堆積している地域では、H/Vスペクトル比の卓越周波数が顕著に見え、また卓越周波数の値も大きくなる傾向にある。また、一般に

基盤深度の値が大きくなると、常時微動 H/V スペクトル比の卓越周波数は小さくなる。

(2) 観測地点と結果

常時微動観測を大阪地域の 26 地点で行った。一例として、**図-17** に①東大阪の門真、②上町台地上の森之宮西、③西大阪の弁天町、④臨海部の鶴町の常時微動観測結果を示す。①の門真は低周波数側、高周期側で卓越周波数がみられ、他の東大阪の地点と傾向が一致した。第 1 ピーク（約 0.2Hz）は大阪地域の深層地盤の構造を反映している。②の森之宮西は 1Hz 以上にピークがみられず、硬い地盤構造を反映していることがわかる。③の弁天町は①と同じ分布形状を示し、両地点とも平野部であるという共通点がある。④の鶴町は 1Hz 前後で明瞭なピークが見られなかった。通常、臨海部の軟弱地盤であれば、卓越周波数が顕著にみられるはずであるが、そうはならなかった。

4.3 常時微動観測と地震応答解析

図-17 の①～④の地点の H/V スペクトルと Shake による増幅率を比較したものを**図-18** に示す。各地点とも H/V スペクトルと伝達関数のピークが合わないという結果になった。H/V スペクトルのピークと伝達関数のピークが最も合うのは地震動を Dg1 層から入力したときであった。大阪地域では、過去の海退・海進により砂と粘土の互層である複雑な地盤となっており、これが理由となり、**図-17** の④の結果も含め、このような結果になったと考えられる。今後、さらに常時微動観測を行い、大阪地域での H/V スペクトルの評価を与えることが課題である。

5. 結論

以下に、本研究で得られた結論を示す。

- ・大阪・神戸地域の Dg1 層と Ma12 層の 250m メッシュモデルを作成し、各々の地盤性状を明らかにした。
- ・Ma12 層に関しては、仮想上面標高を設定して削剥量を求め、逆距離加重法を用いて 250m メッシュごとに 12 種類の土質特性を求めた。
- ・既往の Ma13 層と今回求めた Ma12 層の土質特性を用いて、大阪地域における粘土層の沈下が最小限に留まる地下水位低下量を予測し、両層の沈下を考慮すると、Dg1 層については、1~2m の地下水位低下が可能であることを示した。沖積層の地下水位低下可能量は 2~3m であり、液状化対策にも有効である。
- ・250m メッシュモデルの N 値、層厚を用い、地震応答解析を行い、揺れやすさマップとして、大阪・神戸地域における地盤の卓越周波数を示した。
- ・常時微動観測を行うことで、大阪地域の卓越周波数を調査し、H/V スペクトルと伝達関数の結果を比較したが、予想の結果が得られず、今後の課題である。

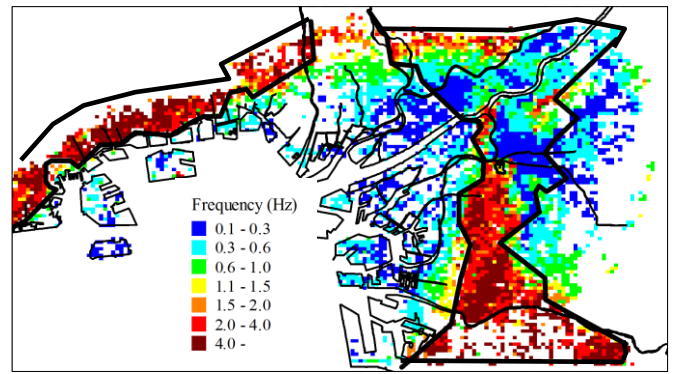


図-16 大阪・神戸地域の地盤の卓越周波数の分布

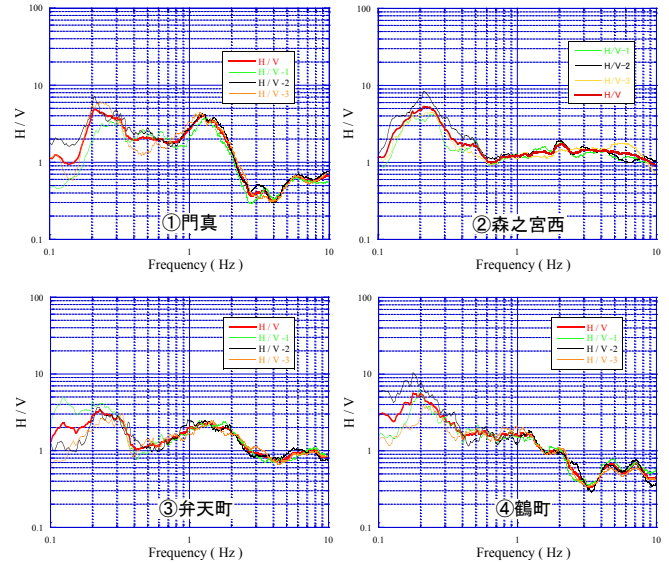


図-17 大阪地域での常時微動観測結果

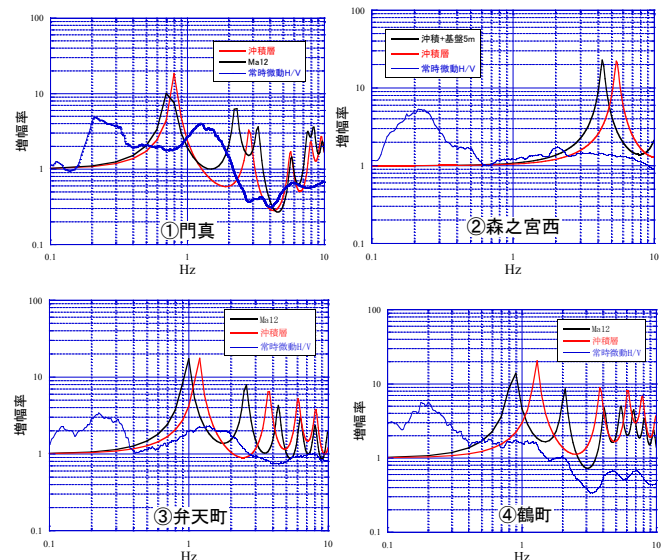


図-18 H/V スペクトルと伝達関数の比較

参考文献

- 1) 氏家彰大(2013):大阪・神戸地域の土質特性のモデル化と地盤工学問題への適用
- 2) 新関西地盤 - 大阪平野から大阪湾 - (2007)
- 3) バイエリアの地盤と建設 - 大阪湾を例にして - (2002)
- 4) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門

質疑応答

・谷口先生

H/V スペクトルは何を求めているのか。

H/V スペクトルは地盤に地震波を入力したとき、その地震波が卓越する周波数を求めている。具体的には、地盤中を進む地震波は縦波（鉛直方向）と横波（水平方向）であるが、横波だけが増幅されるという考えに基づいて、水平/鉛直を求めることで増幅した周波数帯の値が取り出せるという考えに基づいている。

・西岡先生

250m メッシュを選択した理由は？

現在のボーリングの数からメッシュの大きさを考えると最も妥当なのが 250m であるからである。地盤モデルを作成する際、地盤状況をくみ取るにはやはり、メッシュは小さい方がよいと考える。しかし、250m メッシュの現状はボーリング1本から作られているメッシュは約40%にもおよび、250m メッシュより細分化しても地盤状況を再現する制度は向上しないと考えている。よって、250m メッシュを用いるのが現段階では最も妥当である。

・鬼頭先生

メッシュの密度が粗いところと密なところがあるがどう違うのか？

図を作る際にMa12層のメッシュモデルを用いるならば粗く、Ma13層のデータだけでよければ、密になっている。250m メッシュを作成する際、Ma12層まで達しているボーリングデータは数が少なく、メッシュモデルが作成できていない範囲が多いことが現状である。それに対して、Ma13層が含まれるボーリングデータはほぼすべてであり、250m メッシュを作ることができる。よって、作成する図により、250m メッシュの密度が異なるのはそのためである。

・角掛先生

十勝沖地震の地震波を使用した理由は？

この地震波を使用しなければならないという理由はない。今回注目しているのは地盤の卓越周波数であるので、そのような地震波を入力しても同じ結果が得られる。ためしに、全周波数を含むホワイトノイズを試した結果、同じ結果が得られたことを確認している。

大阪府内の地震計と常時微動観測による周波数は比較しているのか？

大阪府内の地震計の観測波形と常時微動の H/V スペクトルは卓越周波数を比較している。その結果、両者はほぼ同じ卓越周波数を得ることができており、H/V スペクトルの確認にも今後使用できると考えている。

・山田先生

大阪の防災は今後どうあるべきであると考えているか。

大阪に住む全市民に防災の意識を上げてほしいと考えている。今回、地下水位低下可能量、揺れやすさ、二つのハザードマップを示し、これは災害に対する一例にしか過ぎない。しかし、これらのように今後人々にわかりやすく、防災に対する関心を持ってもらえるマップを作成することで、ハードな防災の効果と同等のソフト面での効果を発揮できると期待している。

地下水位を下げると卓越周波数も変わるが、それはどう考えているか。

地下水位を下げると密度は大きくなるので、 V_s も大きくなり、卓越周波数は高周波数側になると考えられる。今後、実際に地下水位を下げた時の地盤の卓越周波数を求めると研究が一貫したものとなり、充実すると考える。