

大阪・和歌山平野の表層地盤のモデル化と地盤工学問題への適用

地盤工学分野 林佑治

本研究は、関西圏地盤情報データベース（DB）を基礎として、大阪・和歌山平野の表層地盤（主として沖積層）の土質特性を250mメッシュ毎にモデル化し、それをを用いた地盤工学問題（砂質土地盤の液状化問題、地下水位高位化問題）への適用について検討したものである。まず、大阪・和歌山平野の沖積砂層を対象に250mメッシュ毎の地層構成および N 値と細粒分含有率 F_c をモデル化して土質特性を明らかにした。この結果を用いて、液状化予測を行い、その危険性を把握した。また、地下水位高位化問題の解決ため、大阪平野の沖積粘土（Ma13）層を対象に、250mメッシュ毎の土質特性を逆距離加重法によってモデル化し、地下水位低下を与えた場合のMa13層の沈下量の算定からMa13層の沈下量を最小限に留めるための地下水位低下可能量の予測を行った。また、地下水位低下による液状化対策への有効性の検討も行った。

1. まえがき

緩い状態にある砂質土地盤は、地震時に液状化が発生する可能性が高い。この液状化現象は1964年の新潟地震や1968年の十勝沖地震で被害が確認されて以来、数々の地震において被害が出ている。そのため、近い将来発生するとされる東南海・南海地震や上町断層系、中央構造線系の地震により、大阪・和歌山平野での大きな液状化被害が予想される。

一方、大阪地域は過去に地下水の過剰揚水により地下水位が低下し、大規模な地盤沈下が発生した。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は回復し、地盤沈下は収束したが、現在、沖積砂層の地下水位は過剰に回復し、地震時の液状化、掘削工事の難航、地下構造物の浮き上がり、汚染地下水の拡散などが問題となっている。

そこで本研究では、まずDBと地盤モデル作成システムを用いて、大阪・和歌山平野の沖積層（沖積砂層、沖積粘土層）を対象に250mメッシュ毎の地層構成と標準貫入試験による N 値のモデル化地盤を作成する。また、液状化予測を行うためには、細粒分含有率 F_c も必要であるが、粒度試験の実施数が少ないため、 F_c のデータ数が少ない。そこで、 N 値と F_c 値の相関性を求め、それから F_c 値を推定した。

次に、先のMa13層のモデル化地盤と昨年度までにまとめられた大阪平野の103地区の沖積粘土層の土質特性データ（図-1参照）を基にして、データのない地区を逆距離加重法により補間することで250mメッシュ毎の土質特性を推定する。次に、その土質特性を基にして、地下水位を低下させた場合の沈下量の算定、沈下量を最小限に留める浅層帯水層の地下水位低下可能量を予測する。また、これらの結果を基に、地下水位低下による液状化対策としての有効性を見出す。以上より、表層地盤のモデル化と地盤工学問題への適用を検討することが本研究の目的である。

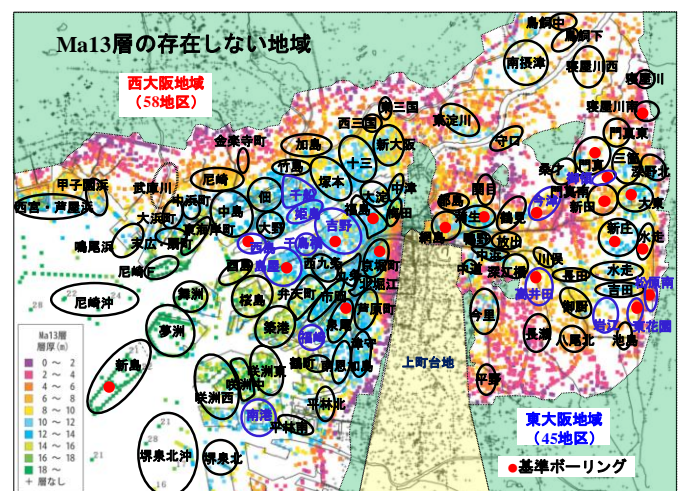


図-1 沖積粘土層の層厚分布と選定地区

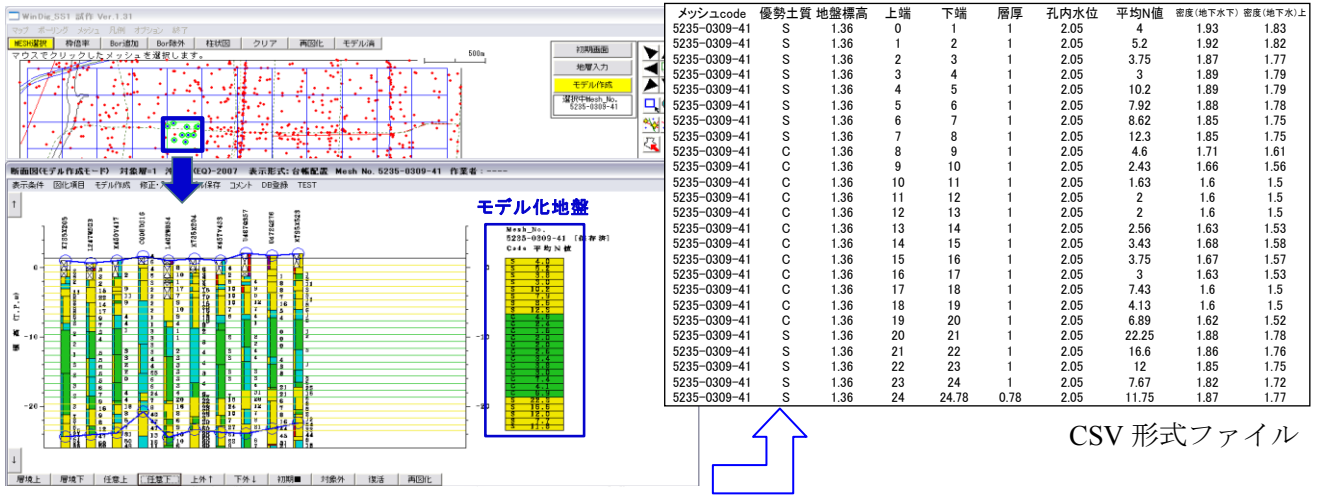


図-2 地盤モデル作成システムによるモデル化地盤の作成方法

2. 表層地盤の250mメッシュモデル

大阪・和歌山平野の沖積層を250mメッシュ(国土地理院の地域標準4分の1地域メッシュ)毎にDBを基にして開発された「地盤モデル作成システム」を用いてモデル化地盤を作成する(図-2参照)。ボーリングの実データを250mメッシュ毎に平均化し、深度1m毎に土質名と標準貫入試験によるN値をモデル化する。この際に、沖積層の孔内水位、密度、上下端深度なども平均化され、別途CSVファイル形式で保存されている。このモデル化は、沖積砂層と沖積粘土(Ma13)層において行っている。

また、後に行う液状化予測には、細粒分含有率 F_c も必要である。しかし、粒度試験は実施数が少ないため、 F_c のデータは少ない。そこで、データ数の多いN値と、ほぼ同深度にある F_c 値の相関関係を求めた。しかし、このN値と F_c の相関関係にも地域性があるので、図-3、4に示すように堆積環境を考慮した地域に区分(大阪地域を14地域、和歌山地域6地域)した。大阪地域に比べて和歌山平野のボーリングデータは少ないため空白域が多い。相関関係と回帰の例を図-5に示す。

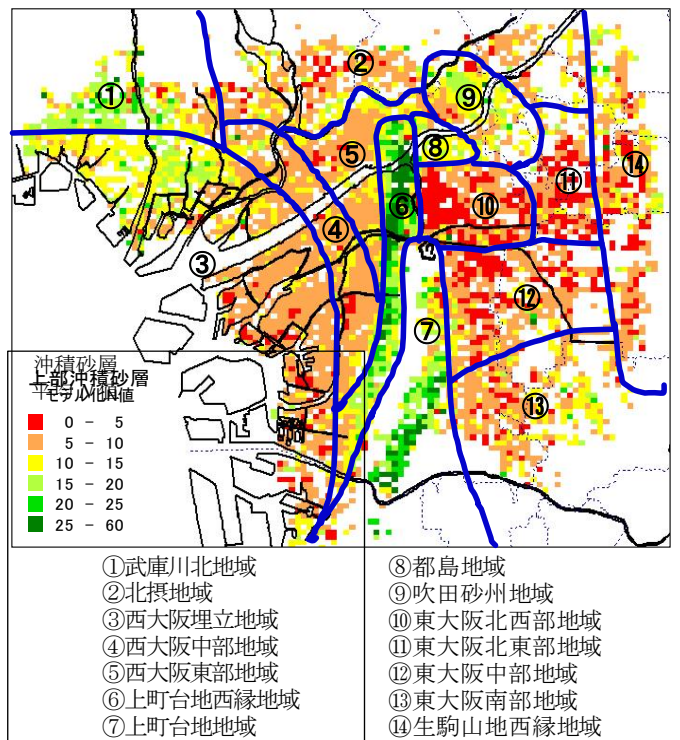


図-3 平均N値の分布と地域区分(大阪平野)¹⁾

3. 液状化危険度の予測

3.1 液状化予測の方法

液状化予測は、モデル化した250mメッシュ毎の沖積砂層の土質特性を用いて行った。本研究では道路橋示方書²⁾の判定式を用い、式(1)で定義される液状化安全率 F_L を250mメッシュ毎に求めた。さらに、 F_L を深さ方向に積分する式(2)から液状化指標 P_L 値を求めた。 P_L 値と液状化程度との関係を表-1に示す。

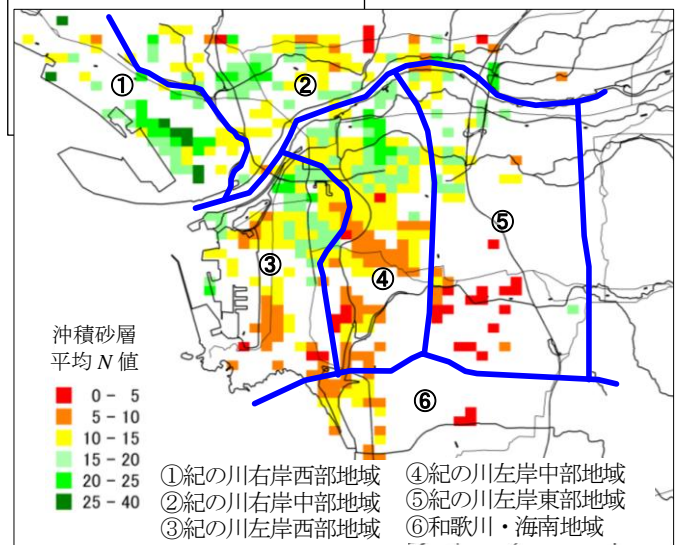


図-4 平均N値の分布と地域区分(和歌山平野)

$$F_L = R/L \quad (1)$$

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L) \cdot w(z) dz \quad (2)$$

ただし、 R ：動的せん断強度比

L ：地震時せん断応力

$w(z)=10-0.5z$ (z :地表面からの深さ)

この P_L 値から現況の水位における液状化危険度の分布を予測した。

3.2 液状化予測の結果

モデル化で得られた土質特性 (N 値、 F_c 値) と地下水位の情報を基に、海溝型地震動と内陸直下型地震動の P_L 値を求めた。図-6, 7にそれぞれ大阪平野、和歌山平野における海溝型地震の、現況の地下水位における P_L 値の分布を示す。大阪平野では、西大阪地域で全体に P_L 値が大きく、特に、住之江区で、 N 値が 10 以下と小さく、砂層の層厚が大きいため P_L 値が大きくなる。また、都島区や東淀川区、生駒山地西縁では、平均 N 値は比較的大きいが、砂層の層厚が非常に大きいため、 P_L 値が大きくなっていると考えられる。また、守口市の周辺地域においても 15m 程度の砂層が分布しており、やや P_L 値が大きくなっている。東大阪地域については、 P_L 値は全体的に小さいが、この地域では砂層の代わりに鋭敏性の高い軟弱な粘性土が厚く堆積しているため、表層の地震動が大きくなるといわれている。

一方、和歌山平野では、平野の全域で P_L 値が高くなっている。特に、紀の川南部の内陸域で P_L 値が大きい。これは、この地域が紀の川の氾濫源に相当し、砂質土や礫質土が発達した地層になっているためだと考えられる。しかし、和歌山平野では、一般にいわれる「砂質土地盤は液状化の可能性が高い」という評価が当てはまらず、紀の川右岸の河口域では、比較的 P_L 値が低い。この地域は砂洲の発達した地域であるにもかかわらず、 N 値が深度によっては 30 以上と非常に高く、よく締まっているためだと考えられる。また、平野南部の一部地域 (和歌川周辺、三田地区) で P_L 値が小さくなっている地域があるが、この地域は砂層の代わりに海成粘土が厚く堆積している地域であるためと考えられる。

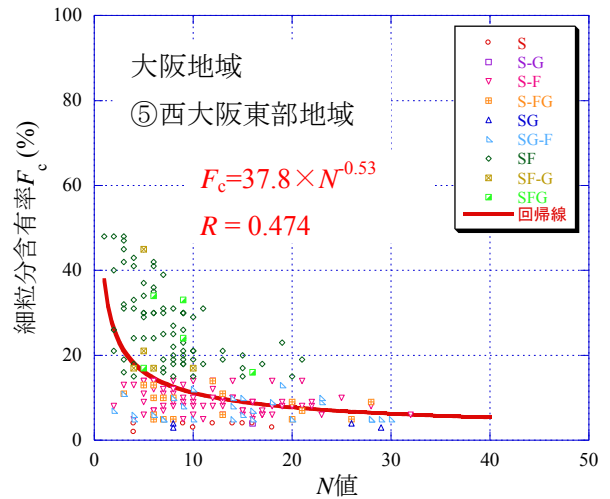


図-5 $N-F_c$ 関係の回帰式の例

表-1 P_L 値と液状化程度の関係

| P_L 値 | 液状化 |
|---------|-----------------------------|
| 0~5 | 液状化はほとんどなし、被害なし |
| 5~10 | 液状化の程度は小さい、構造物への影響はほとんどない |
| 10~20 | 液状化は中程度、構造物によっては影響の出る可能性がある |
| 20~35 | 激しい液状化、噴砂が多く、直接基礎の建物が傾く場合あり |
| 35以上 | 非常に激しい液状化、大規模な噴砂と構造物の被害 |

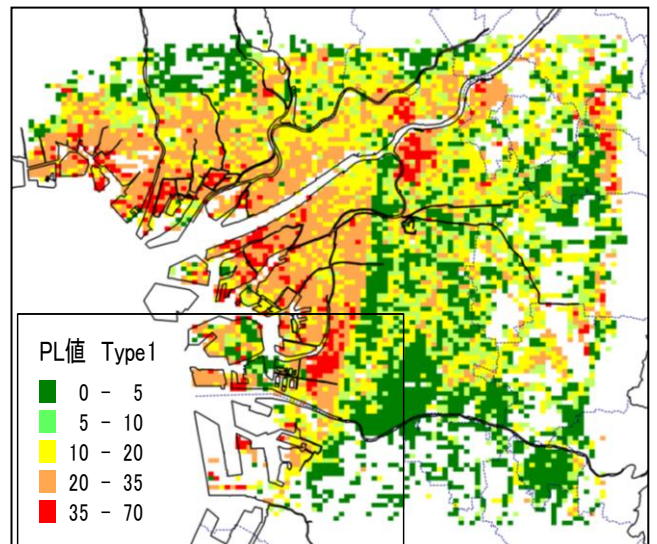


図-6 大阪地域における P_L 値の分布 (海溝型)

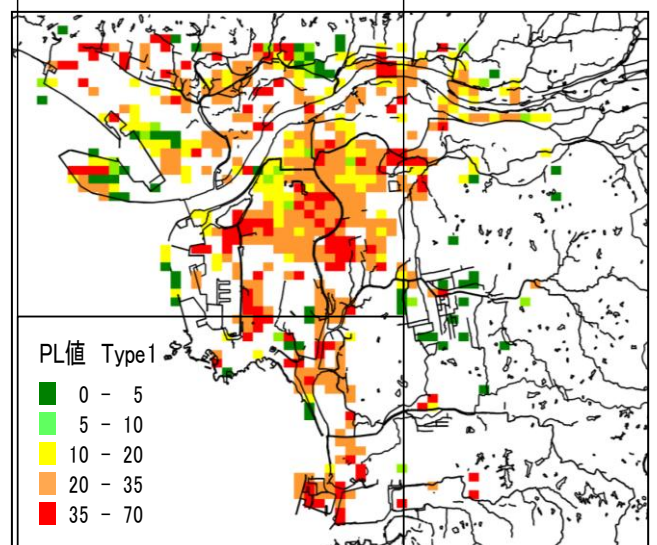


図-7 和歌山地域における P_L 値の分布 (海溝型)

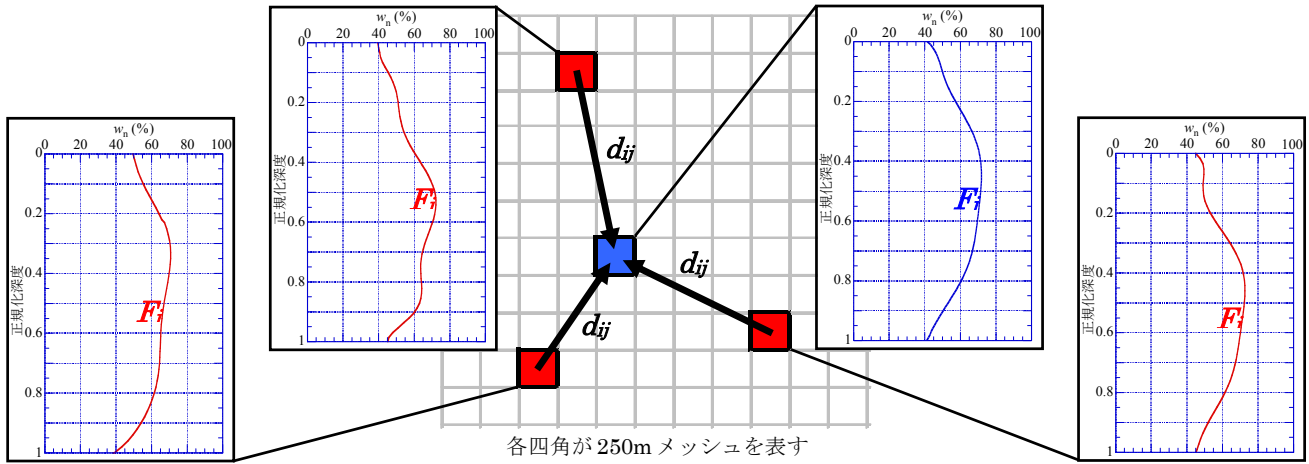


図-8 逆距離加重法による土質特性の補間方法

4. 大阪平野における沖積粘土層の土質特性

4.1 沖積粘土層のモデル化方法

現在、DB に登録されているデータには疎密があり、必ずしも大阪平野全域の土質特性が明らかにされているとはいえない。そこで、DB のデータと、これまでに行った 20 地点の連続サンプリングによる基準ボーリングデータ(図-1 参照)を用いて、250m メッシュ毎の土質特性(物理、圧密、強度特性)を「逆距離加重法」によって補間した。以下にその補間方法を示す。

(1) 補間方法

本研究では、空間を補間する方法として「逆距離加重法」を用いた。この方法は、推定する地点の値は、そこから遠く離れている地点のデータ値より、近くにあるデータ値に類似すると仮定している。この逆距離加重法は次式で示される。

$$F_j = \sum F_i \cdot d_{ij}^{-r} / \sum d_{ij}^{-r} \quad (3)$$

ただし、 F_i はデータが存在する既知メッシュ i ($i=1, 2, 3, \dots$) 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。本研究では予備計算の結果 $i=4$, $r=1$ を採用した。

逆距離加重法の手順を以下に示す(図-8 参照)。

- ① 昨年度までに土質特性がまとめられた地区の重心位置を求め、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。
- 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 : 層厚) し、深度方向に 0.05 刻みの土質データ(式(3)の F_i) の

代表値を回帰式(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(図-8 の■)と既知メッシュ(図-8 の■)との中心距離(式(3)の d_{ij})を求め、正規化したデータを 0.05 ごとに逆距離加重法を用いて補間する。

- ④ 補間したメッシュの沖積粘土層のモデル地盤の層厚を当てはめて深度分布を作成する。

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 L_I 、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 、練り返し強さ q_{ur} 、鋭敏比 S_t など 14 種類の土質特性を補間している。

(2) 圧密特性の補間方法

DB に登録されている圧密特性データは、物理特性に比べて必ずしも多くない。そこで、各既知メッシュの圧縮曲線を次の手法で推定した(図-9 参照)。

図(1): DB による w_L の深度分布を作成し、多少のばらつきを多項式で回帰し、代表値とする。

図(2): DB による w_n を用いて土粒子密度 $\rho_s=2.67 \text{ g/cm}^3$ 、飽和度 $S_r=100\%$ と仮定し、初期体積比 f_0 の深度分布を作成し、多項式で回帰して代表値とする。

図(3): DB による同深度の w_L と圧縮指数 C_c の関係から相関式 ($C_c=a(w_L-b)$) を求める。

図(4): 図(1)の w_L の回帰線と図(3)の相関式から、 C_c の深度分布を決定する。

図(5): DB による圧縮曲線 ($\rho_s=2.67 \text{ g/cm}^3$ で補正) を重ねた図を作成し、高压密圧力域の収束点 (f_2, p_2) を求める。

図(6): 図(5)の収束点から図(4)の C_c の勾配で正規圧密

域の圧縮曲線を，図(2)の f_0 と有効土被り圧 p_0 の点から膨張指数 $C_s (=C_c/3)$ の勾配で過圧密域の圧縮曲線を，過圧密域と正規圧密域の交点から圧密降伏応力 p_c を求める。

図(7)：求めた p_c と DB の p_c との整合性を確認する。

以上から，任意深度の圧縮曲線を決定できる。この手法で求めた p_c を，先の逆距離加重法を適用することで補間する。これにより，任意のメッシュで荷重条件を与えれば，過圧密から正規圧密までの沈下計算が可能となる。

4.2 沖積粘土その土質特性の分布

大阪平野の Ma13 層における土質特性の補間結果の代表例として，図-10, 11 にそれぞれ w_L , p_c を上，中，下部の平均値として示す。

w_L については，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弓形分布が再現されており，概ね，西大阪地域では上・下部で 60～80% 程度，中部で 100% 程度の値を示す。東大阪地域では，上・下部で 50～70%，中部で 70～90% 程度になる。 p_c は，大阪地域全域で深度方向に増加している。特に下部で大きいのは過去の地下水の揚水の影響を受け，過圧密となっているためである。

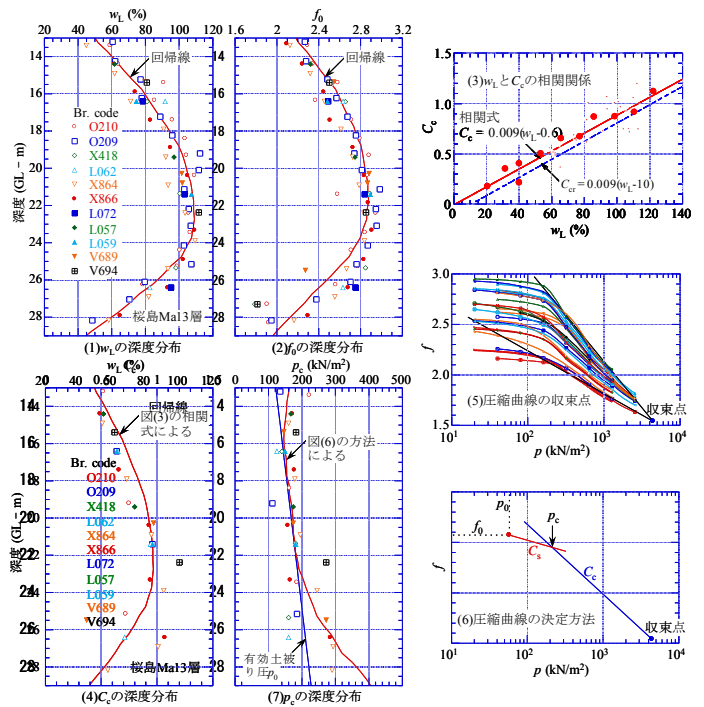


図-9 圧縮曲線の推定方法

5. 浅層帯水層の地下水位低下可能量の予測

5.1 地下水位低下可能量

これらの結果を用いて，浅層帯水層（沖積砂層，第1洪積砂礫層）に 1～3m の地下水位低下を与えた場合の，有効応力が増加することによる Ma13 層の沈下量の算定を行った（ここでは省略）。次に，その結果を

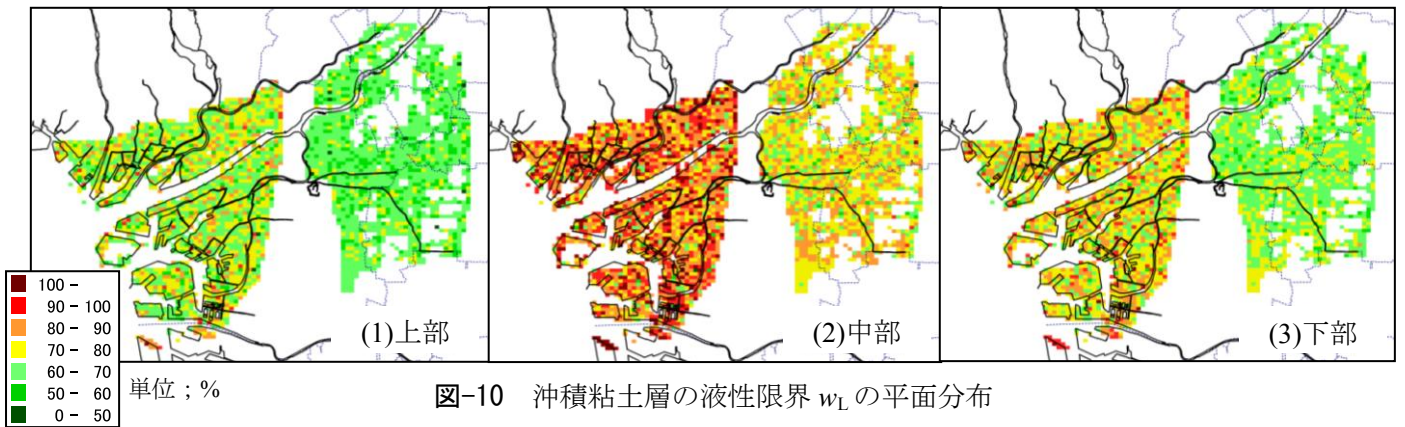


図-10 沖積粘土層の液性限界 w_L の平面分布

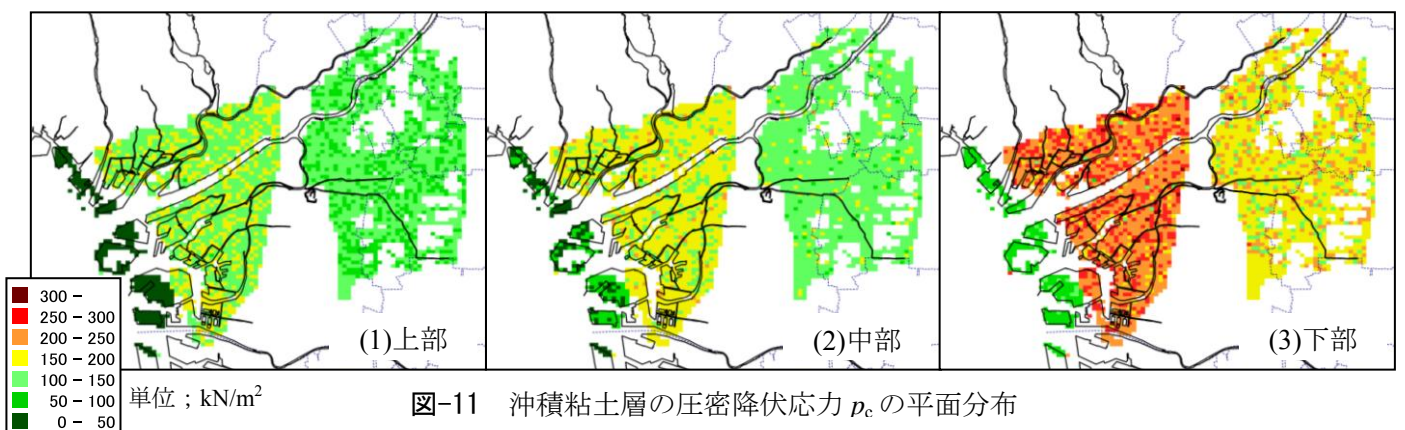


図-11 沖積粘土層の圧密降伏応力 p_c の平面分布

基に、最小限の沈下量に留まる地下水位低下可能量の算定し、地下水位の適正なレベルを予測した。

図-12 に、大阪平野の許容沈下量を建築基礎構造設計指針などから 5cm と仮定し、浅層帯水層に次の 3 ケースを想定した時の地下水位低下可能量を示す。

(1) 沖積砂層単独の場合

西大阪地域では、海側から陸域に向かって水位可能量が増加しており、臨海部で 1~2m、内陸部では 2~4m である。東大阪地域では、東部と南部で小さく、2m 以下であるが、8m 以上可能な地域もある。

(2) 第 1 洪積砂礫層単独の場合

沖積砂層の場合に比べ、第 1 洪積砂礫層の方が水位低下可能量はやや大きくなり、西大阪地域の臨海部で 2~3m、それ以外の広い範囲で 3~4m である。

(3) 沖積砂層・第 1 洪積砂礫層同時の場合

地下水位の低下可能量は、大阪地域全域の広い範囲で 1~2m と非常に小さくなっている。

5.2 液状化対策効果

沖積砂層の液状化対策として、沖積砂層の地下水位を 3m 下げた場合の P_L 値の分布を図-13 に示す。

図-6 と比較して、 P_L 値は小さくなり、地下水位低下が液状化対策として非常に有効であることがわかる。

8. 結論

以下に、本研究で得られた結論を示す。

- (1) 大阪・和歌山平野において表層地盤のモデル化を行い、250m メッシュ毎の沖積層の土質特性を明らかにすることができた。
- (2) 沖積砂層の土質特性を用いて、大阪・和歌山平野の液状化危険度を把握することができた。
- (3) 大阪平野の Ma13 層を対象に、逆距離加重法によって 250m メッシュ毎の詳細な土質特性を求め、その地域性を明らかにすることができた。
- (4) (3)で得られた土質特性を基に、最小限の沈下量に留まる浅層帯水層の地下水位低下可能量を予測し、沖積砂層の地下水位低下が液状化対策として有効であることを見出せた。

参考文献

- (1) 林佑治(2010)：大阪地域の沖積砂層の液状化危険度と地下水位低下の対策効果，大阪市立大学卒業論文
- (2) 社団法人 日本道路協会(2002)：道路橋示方書・同解説，Ⅴ 耐震設計編

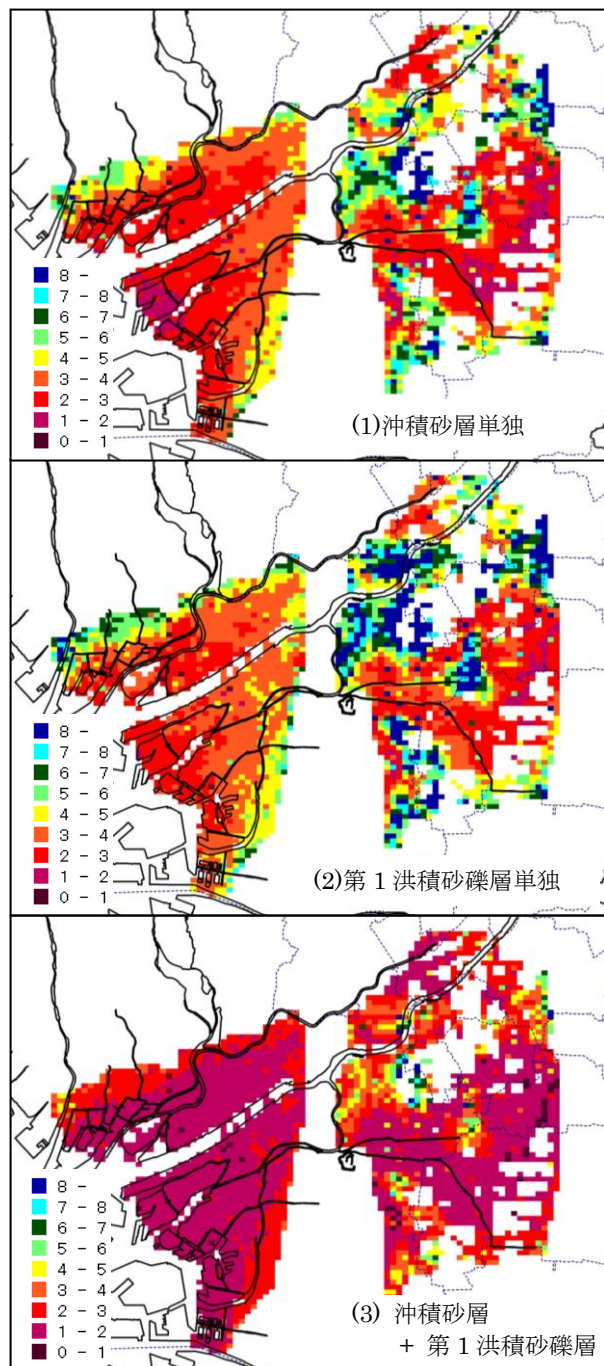


図-12 地下水位低下可能量の分布

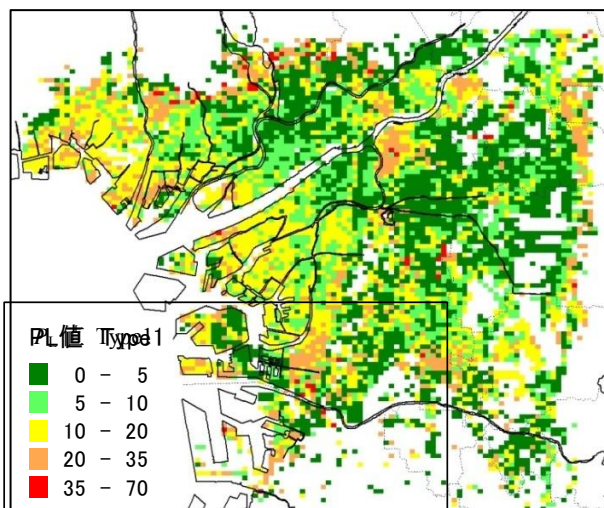


図-13 地下水位3m低下時の P_L 値の分布 (海溝型)

討 議 等

◆討議 [山口先生]

地下水位低下可能量は何を根拠に決定しているか。また、地下水位を下げれば液状化対策になるのは自明のことではないのか。

◆回答：地下水位を適正なレベルにまで低下させる際、無計画に地下水位を低下させると再び大規模な地盤沈下が発生してしまう恐れがあるため、許容できる沈下量を定めておく必要がある。そこで、本研究では建築基礎構造設計指針などから、許容できる沈下量を 5cm として、その時の地下水位低下可能量の予測を行った。また沈下量に幅を持たせるために許容沈下量を 10cm として場合の計算も行っている。

次に、液状化対策についてであるが、地下水位の低下は液状化の発生要因である「飽和地盤」という条件を解消する対策である。地下水を低下させることで P_L 値が小さくなるのは自明であるが、これまでの地震における液状化被害の目安としては $P_L=15$ が設定されており、地下水位を 1~3m 低下させることで P_L 値がどのように変化するかで有効性を判断している。

◆討議 [重松先生]

逆距離加重法による補間は、水平方向のモデル化であるが、鉛直方向の情報はどうなっているのか。

◆回答：逆距離加重法は水平方向に対して補間する方法であるが、既知メッシュの Ma13 層の代表土質特性を決定する際に、正規化深度を計算し、深度方向に 20 等分 (0~1.0 まで 0.05 ピッチ) したデータを作成する。その無次元深度ごとに水平方向に逆距離加重法を適用して補間する。

◆討議 [貫上先生]

過年度までも同様の研究がされていたが、本研究で新しく取り入れたことはなにか。

◆回答：本研究で新たに取り入れたことは、Ma13 層の土質特性を補間する際に、圧密特性に関しては、

単なるデータの回帰ではなく、他の土質特性（主に、物理特性）

を利用してデータの不足を解消したことである。既往の研究でも、この手法は取り入れられていたが、最終的な沈下量の算定や、地下水位低下可能量の予測を行う際に一部のみ適用されており、今回はそれを土質特性の把握という根本から取り入れた形になった。

また、和歌山平野の液状化予測については、私自身の卒業論文で扱った大阪平野の液状化予測で用いた手法を基に、沖積層の境界を入力することに始まり、最終的な P_L 値の計算までの全てを行った。

◆討議 [松村先生]

地下水位は時代により変動するのではないかと、DB の情報等は更新されているのか。

◆回答：メッシュ内にあるボーリングに時代の差があると、地下水位の変動の影響が出てしまう可能性はないとは言いきれない。しかし、250m メッシュ毎の情報（層厚、地下水、上端深度 etc）は、メッシュ内にあるボーリングデータの平均値であること、他のボーリングと比べて明らかに特異な値となる場合には除外して考えていることから、大きな影響はないと考えている。