

## 大阪・神戸地域の沖積層の土質特性のモデル化と地盤工学問題への適用

### Modeling of geotechnical characteristics of Alluvial deposit in Osaka and Kobe area and its application to geotechnical problems

地盤工学分野 氏家彰大

本研究は、関西圏地盤情報データベース (DB) を用いて、大阪・神戸地域の沖積層の土質特性を 250m メッシュ毎にモデル化し、液状化問題や地下水位高位化問題の地盤工学問題への適用について検討したものである。モデル化した 250m メッシュ毎の沖積層と沖積粘土層のモデルの土質特性をそれぞれ明らかにした。次に、沖積砂層を対象とした液状化危険度の予測、沖積粘土層を対象とした地下水位低下可能量の予測を行い、地下水位低下による液状化対策への有効性を確認した。

The influence of underground water rising for the liquefaction potential in Osaka and Kobe area was examined using GIS in which a digital data base of underground information provided by Kansai Geoinformatics Database was introduced. The detailed soil properties were calculated and given to soil strata which is representative value in each digital mesh has 250m×250m areas. Then, liquefaction safety assessments were carried out with estimating acceptable amount of lowering of underground water table and considering negative effect of them against consolidation problem will be occurred in Alluvial clay underneath. The efficacy of lowering of underground water table against liquefaction of surface ground was verified.

#### 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って、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、汚染地下水の拡散などの地下水位高位化問題が生じている。

さらに、地下水位以下の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、2011 年の東日本大震災に代表される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・神戸地域での液状化被害が予想される。

そこで本研究では、まず神戸地域に対して、DB と地盤モデル作成システムを用いて、沖積層、および沖積粘土層を対象に 250m メッシュ毎の地層構成 (土質、上下面深度、層厚、密度) と標準貫入試験で得られた  $N$  値の情報を持った電子モデル地盤を作成する。また、沖積砂層の液状化予測を行うためには、その細粒分含有率  $F_c$  も必要であるため、 $N$  値と  $F_c$  値の相関関係か

ら  $F_c$  値を推定した。このようなモデル化で得られた  $N$  値と  $F_c$  値を用いて液状化危険度の予測を行った。

一方、大阪地域に対しては過去の研究で液状化危険度の予測は行われている。ただし、沖積粘土層モデルと沖積層モデルに含まれる沖積粘土層の上・下面深度に整合性の取れていないものが一部あったので、沖積粘土層モデルの上・下面深度を見直す作業を行う。

次に、大阪地域の見直した沖積粘土層モデルと土質特性を求めた選定地区 (図-1 参照)、および本研究で新たに選定した神戸地域の沖積粘土層の土質特性を求めた選定地区 (図-2 参照) を既知メッシュにして、データの無い未知メッシュ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。さらに、その土質特性を基にして、大阪・神戸地域のそれぞれに対して、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沖積砂層・第 1 洪積砂礫層層の地下水位低下可能量を予測する。また、得られた液状化危険度や許容沈下量に留まる水位低下可能量の結果を基に、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、大阪・神戸地域の沖積層および沖積粘土層のモデル化とそれを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。

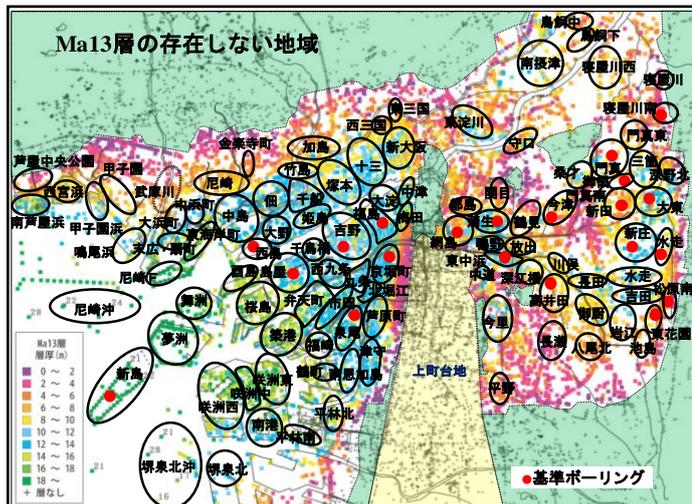


図-1 大阪地域の沖積粘土層の層厚分布と選定地区

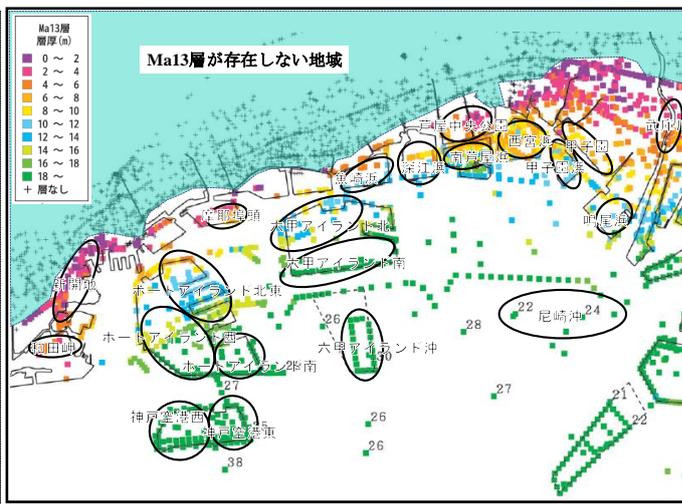
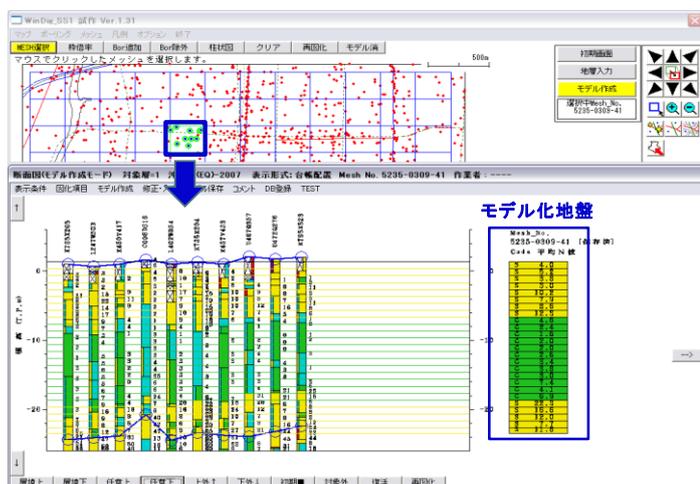


図-2 神戸地域の沖積粘土層の層厚分布と選定地区



メッシュcode	優勢土質	地盤標高	上端	下端	層厚	孔内水位	平均N値	密度(地下水下)	密度(地下水)上
5235-0309-41	S	1.36	0	1	1	2.05	4	1.93	1.83
5235-0309-41	S	1.36	1	2	1	2.05	5.2	1.92	1.82
5235-0309-41	S	1.36	2	3	1	2.05	3.75	1.87	1.77
5235-0309-41	S	1.36	3	4	1	2.05	3	1.89	1.79
5235-0309-41	S	1.36	4	5	1	2.05	10.2	1.89	1.79
5235-0309-41	S	1.36	5	6	1	2.05	7.92	1.88	1.78
5235-0309-41	S	1.36	6	7	1	2.05	8.62	1.85	1.75
5235-0309-41	S	1.36	7	8	1	2.05	12.3	1.85	1.75
5235-0309-41	C	1.36	8	9	1	2.05	4.6	1.71	1.61
5235-0309-41	C	1.36	9	10	1	2.05	2.43	1.66	1.56
5235-0309-41	C	1.36	10	11	1	2.05	1.63	1.6	1.5
5235-0309-41	C	1.36	11	12	1	2.05	2	1.6	1.5
5235-0309-41	C	1.36	12	13	1	2.05	2	1.6	1.5
5235-0309-41	C	1.36	13	14	1	2.05	2.56	1.63	1.53
5235-0309-41	C	1.36	14	15	1	2.05	3.43	1.68	1.58
5235-0309-41	C	1.36	15	16	1	2.05	3.75	1.67	1.57
5235-0309-41	C	1.36	16	17	1	2.05	3	1.63	1.53
5235-0309-41	C	1.36	17	18	1	2.05	7.43	1.6	1.5
5235-0309-41	C	1.36	18	19	1	2.05	4.13	1.6	1.5
5235-0309-41	C	1.36	19	20	1	2.05	6.89	1.62	1.52
5235-0309-41	S	1.36	20	21	1	2.05	22.25	1.88	1.78
5235-0309-41	S	1.36	21	22	1	2.05	16.6	1.86	1.76
5235-0309-41	S	1.36	22	23	1	2.05	12	1.85	1.75
5235-0309-41	S	1.36	23	24	1	2.05	7.67	1.82	1.72
5235-0309-41	S	1.36	24	24.78	0.78	2.05	11.75	1.87	1.77

CSV 形式ファイル

図-3 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. 沖積層と沖積粘土層の 250m メッシュモデル化方法

神戸地域の沖積層・沖積粘土層を 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-3 参照)。DB に登録のボーリングデータを 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、上下面深度なども平均化され、別途 CSV ファイル形式で保存される。

また、後に行う沖積砂層の液状化予測には、細粒分含有率  $F_c$  が必要である。しかし、DB に登録されている粒度試験の数が少ないため、 $F_c$  のデータは少ない。そこで、堆積している環境が同様であれば「 $F_c$  が高いほど N 値は小さい」という相関性が一般的に成立するので、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-4 に示すように堆積環境を考慮した地域に区分した。相関関係と回帰式の代表例を図-5 に示す。

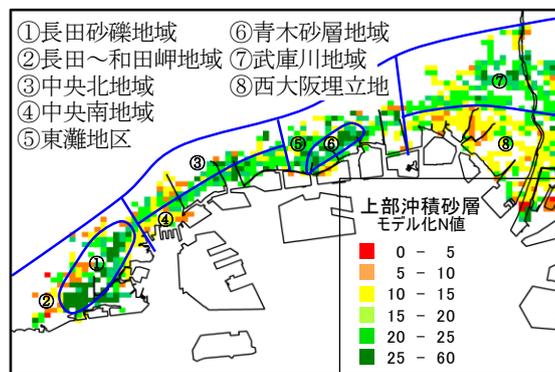


図-4 平均 N 値の分布と地域区分

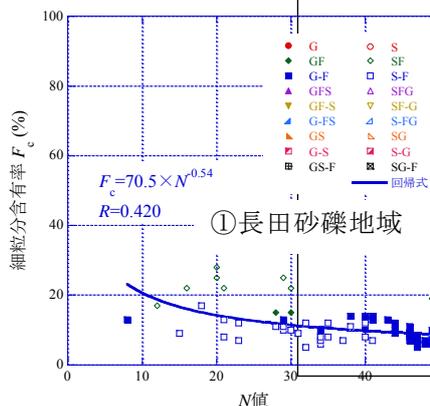


図-5 N -  $F_c$  関係の回帰式の代表例

### 3. 神戸地域の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。

$P_L$  値と液状化程度を表-1 に示す。

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

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

ただし、 $R$ ：動的せん断強度比

$L$ ：地震時せん断応力

$$w(z) = 10 - 0.5z \quad (z: \text{地表面からの深さ})$$

この  $P_L$  値から現況の地下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) と地下水位から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 に神戸地域における海溝型地震動の現況の地下水位での  $P_L$  値の分布を示す。臨海部で全体的に  $P_L$  値が大きく、特に魚崎浜や六甲アイランド北部、ポートアイランド北部では  $P_L$  値が 35 以上で非常に大きな値を示している。この地点は兵庫県南部地震で噴砂の発生が確認された地点と一致しており、今回の予測は再現性が高いことが分かる。また、鳴尾浜周辺では平均  $N$  値が低いため、 $P_L$  値は高い値を示している。

### 4. 大阪・神戸地域の沖積粘土層の土質特性

#### 4.1 沖積粘土層のモデル化方法

大阪地域は過去の研究で沖積粘土層の土質特性は明らかにされてきたが、沖積層と沖積粘土層の上・下面深度の整合性が取れていないメッシュが一部あった。また、神戸地域はまだメッシュモデル化がされておらず、土質特性の面的な分布が明らかにされていない。そこで、DB のデータと本年度大阪地域で新たに追加した連続サンプリングによる基準ボーリングデータ (図-1, 図-2 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。以下にその方法を示す。

##### (1) 圧密特性の求め方

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-7 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  $\rho_s = 2.67 \text{ g/cm}^3$ ,

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

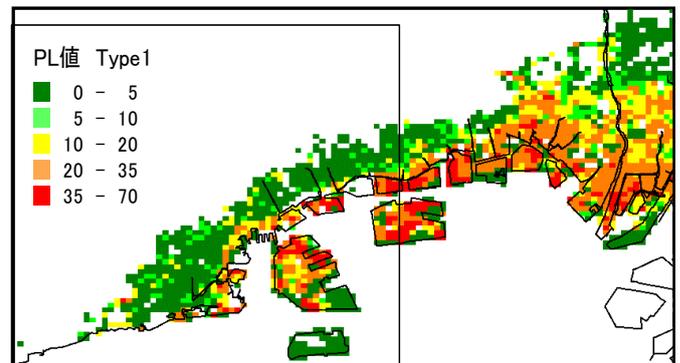


図-6 神戸地域の  $P_L$  値の分布 (海溝型地震動)

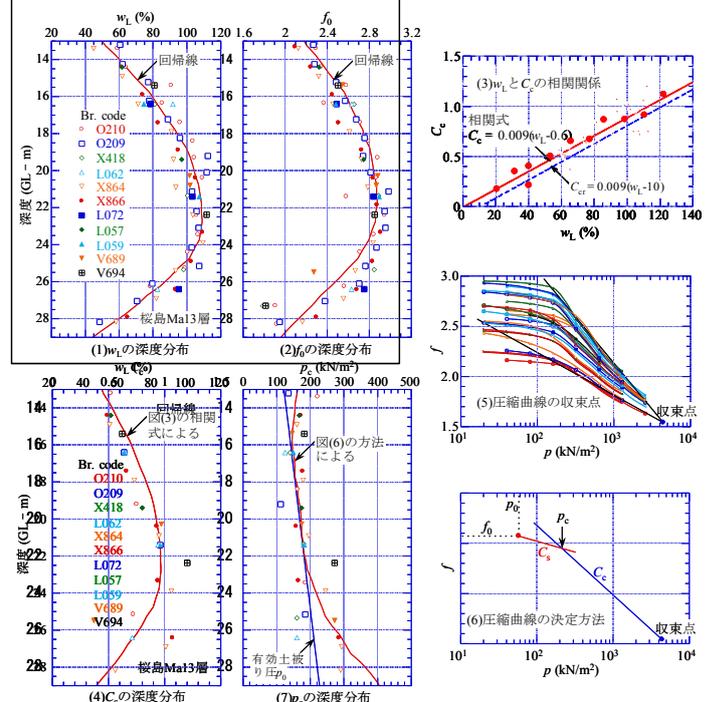


図-7 圧密特性の推定方法

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。

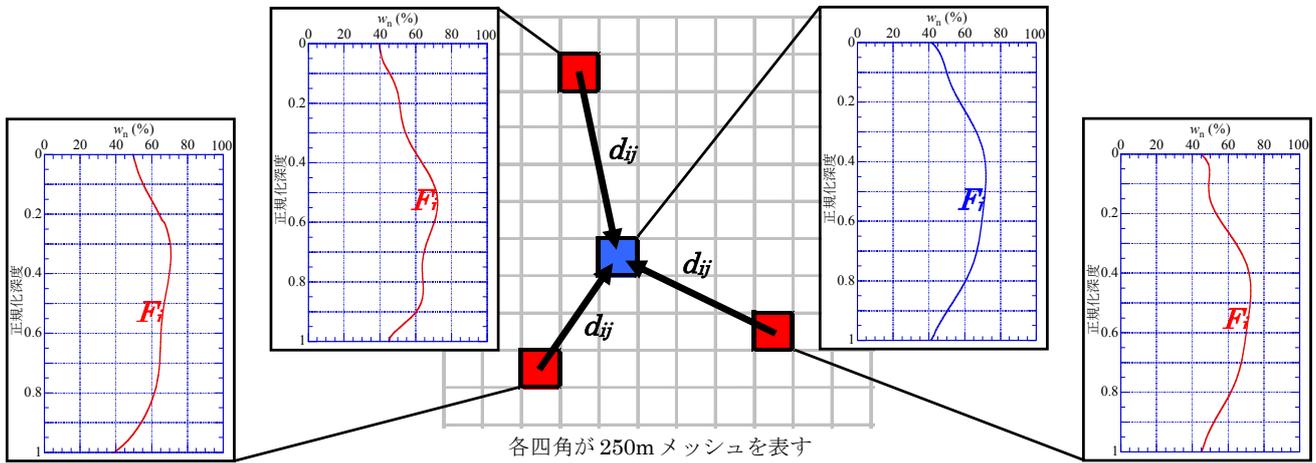


図-8 逆距離加重法による土質特性の補間方法

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および  $C_c$ 、 $p_c$  を決定できる。さらに、本研究では、圧密係数  $c_v$  と液性限界  $w_L$  も相関性が高いことを確認し、 $c_v$  も  $w_L$  からの相関式を用いて深度分布を算出している。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。

## (2) 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。本研究では既往研究の結果  $i=4$ 、 $r=1$  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。
- 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-7 の ■) と既知メッシュ (図-7 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  $I_L$ 、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  $q_u$ 、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。

## 4.2 沖積粘土層の土質特性の分布

大阪・神戸地域の沖積粘土層の土質特性の補間結果の代表例として、図-9、図-10 に  $w_L$  の上部、中部、下部の平均値を示す。

大阪地域の  $w_L$  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弓型分布を示している。概ね、西大阪では上・下部では 60~80% 程度、中部では 100% 程度の値を示す。東大阪地域では上・下部で 50~70%、中部では 70~90% 程度である。神戸地域の  $w_L$  は大阪に近い東側の地域において、西大阪地域の分布と良く類似している分布を示している。西へと行くに従って、深度方向への変化は約 10% 程度と小さくなり、神戸型と呼ばれる神戸地域の特徴的な分布を示している。

## 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

以上の大阪・神戸地域の沖積粘土層の土質特性を用いて、浅層帯水層である沖積砂層、第 1 洪積砂礫層に 1~4m の地下水位低下を与えた場合 (有効応力が 1~4tf/m<sup>2</sup> 増加) の沖積粘土層の沈下量の算定を行った (ここでは紙面の都合で省略)。次に、その結果を基に、最小限の許容沈下量 (建築基礎構造設計指針などから 5cm と仮定) 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。なお、地下水位低下は沖積砂層単独、第 1 洪積砂礫層単独、両層同時の 3 ケースを想定した。

図-11、12 にそれぞれ、大阪地域、神戸地域の地下水位低下可能量を示す。

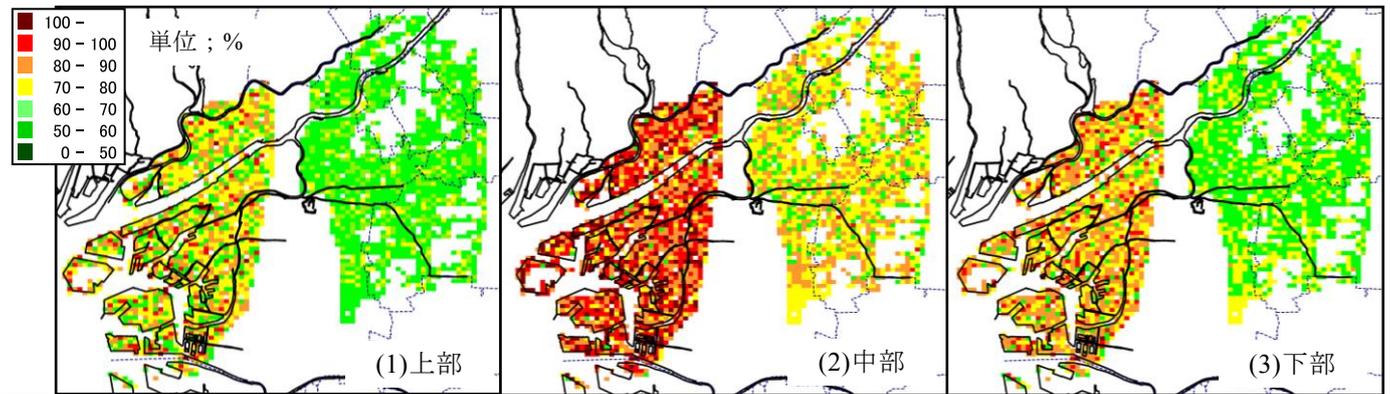


図-9 大阪地域の沖積粘土層の液性限界  $w_L$  の平面分布

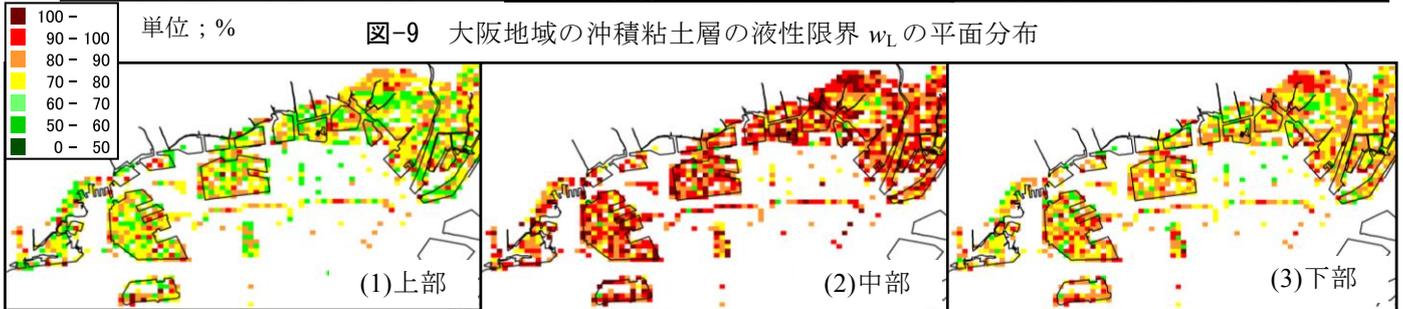


図-10 神戸地域の沖積粘土層の液性限界  $w_L$  の平面分布

## (1) 大阪地域

### (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。

## (2) 神戸地域

### (1) 沖積砂層単独の場合

臨海部と西側の地域では揚水可能量は1~2mであり、東側の地域の北部と東部の揚水可能量は2~3mである。

### (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 洪積砂礫層の方が揚水可能量はやや大きい、全体的な傾向は同様であり、揚水可能量は全域で2~4m程度である。武庫川左岸の地域は4~5mの揚水可能量を示している。

### (3) 沖積砂層・第1 洪積砂礫層同時の場合

他のケースに比べて全体的に揚水可能量が小さい。これは水位低下の際の有効応力の増加率が理由である。全域で揚水可能量は0~1mである。ただし、武庫川左岸では2~3m程度に収まっている。

## 5.2 液状化対策効果

沖積砂層の液状化対策として、地下水位を大阪地域で3m、神戸地域で2m下げた場合の  $P_L$  値の分布をそれぞれ図-13、図-14に示す。大阪地域では  $P_L$  値は小さい値をとり、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。ただし、神戸地域の臨海部では  $P_L$  値がまだ35を超える地点がある。しかし、神戸地域は海拔0m以下の地域はないので、許容沈下量10cmが見込まれ、その場合は、水位低下は4m程度可能である。その結果を図-15に示すが、 $P_L$  値は低下し、液状化対策として有効であることがわかる。

## 6. 結論

以下に、本研究で得られた結論を示す。

- (1) 大阪地域では沖積粘土層、神戸地域では沖積層・沖積粘土層のモデル化を行い、250mメッシュ毎のそれぞれの層の土質特性を明らかにすることができた。
- (2) 神戸地域において、沖積砂層の土質特性を用いて、神戸地域の液状化危険度を把握することができた。
- (3) 大阪・神戸地域の沖積粘土層を対象に、逆距離加重法を用いて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、最小限となる沈下量に留まる沖積砂層、第1 洪積砂礫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検証した。

## 参考文献

- (1) 林佑治(2012): 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, 大阪市立大学大学院修士論文

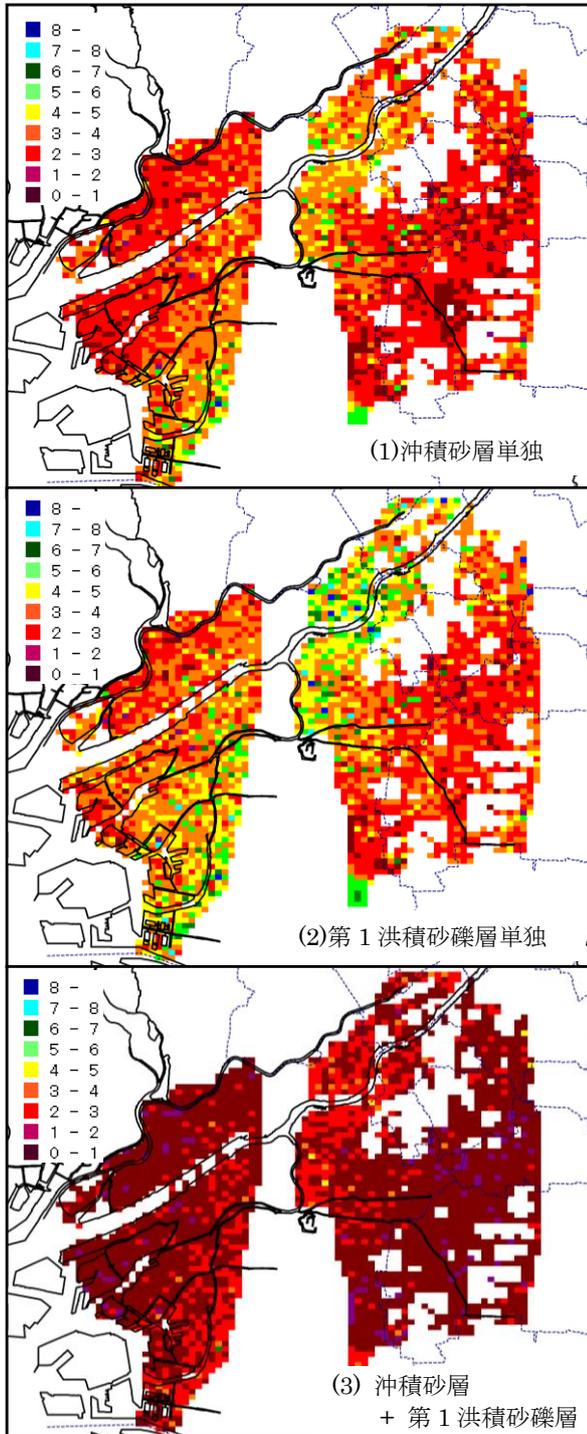


図-11 大阪地域の地下水位低下可能量の分布

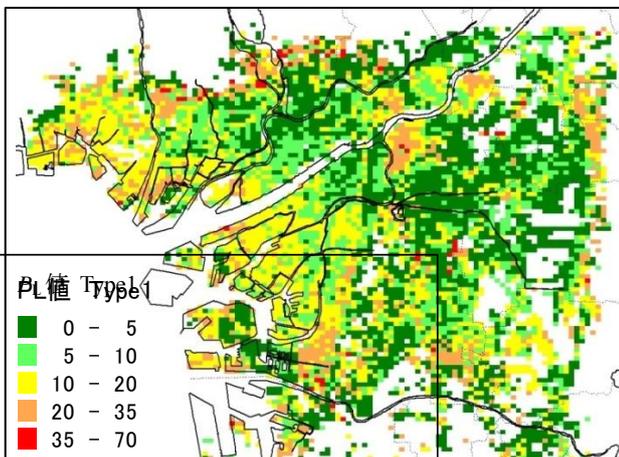


図-13 大阪地域の地下水位 3m 低下時の P<sub>L</sub> 値の分布

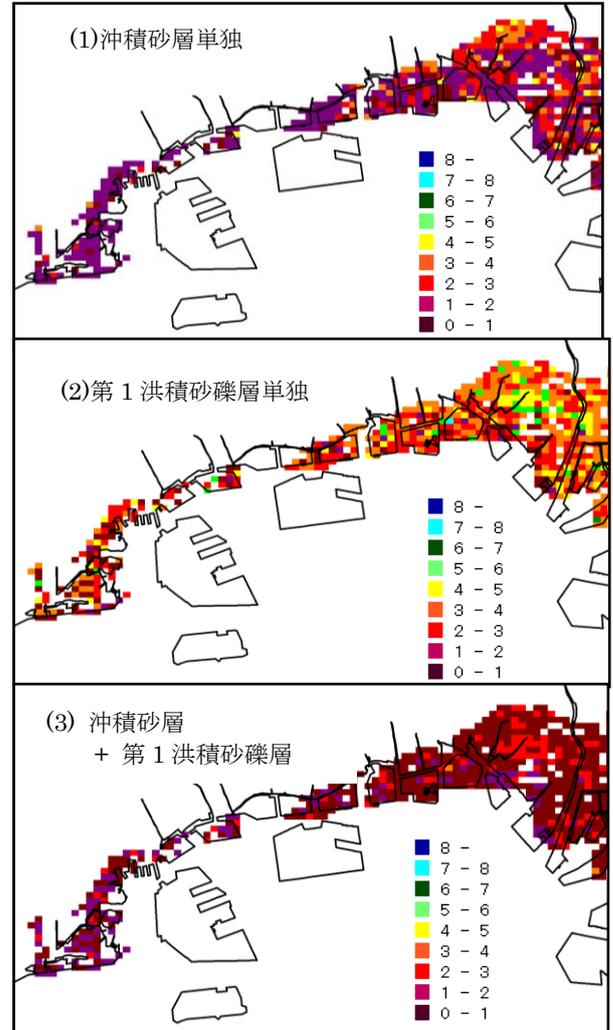


図-12 神戸地域の地下水位低下可能量の分布

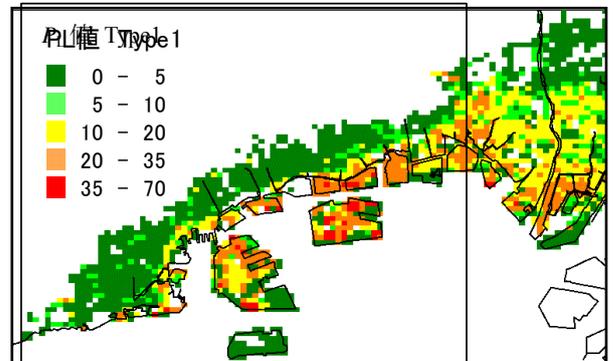


図-14 神戸地域の地下水位 2m 低下時の P<sub>L</sub> 値の分布

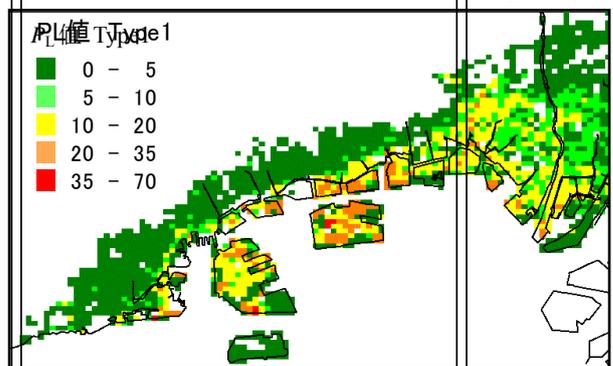


図-15 神戸地域の地下水位 4m 低下時の P<sub>L</sub> 値の分布

## 討議

### 討議[貫上先生]

$N$  値から  $F_c$  を推定する際、平均値をとって算出しているが、この方法は精度的に問題ないのか。一本のラインで平均値として使ってもよいのか。

#### 回答

今回、 $N$  値と  $F_c$  の推定には堆積環境や微地形区分を考慮した地域区分を行なっている。また堆積環境が同様であれば「 $F_c$  が高ければ  $N$  値は小さい」という相関性が成り立つとしており、今回対象とする上部沖積砂層は地盤の表層にあり、堆積環境による  $N$  値の影響が少ないと考えられるため、問題はないと考えられる。

### 討議[中尾先生]

地下水水位低下可能量を求める際に、許容沈下量を 5cm としているが、この値は「建築基礎構造設計指針」に記載されているのか。

#### 回答

「建築基礎構造設計指針」には一律で許容最大沈下量 5cm という明記はないが、基礎形式ごとに許容沈下量の標準値と最大値が記載された表があり、その表から本研究では 5cm, 10cm と仮定した。

### 討議[中尾先生]

地下水水位を低下させた際に、不同沈下は起きないのか。

#### 回答

地下水水位低下を与えた場合の沈下は広範囲で生じるため、不同沈下は起きにくい。

### 討議[中尾先生]

地下水水位を低下させることで液状化危険度は低下するが、地盤沈下のリスクもある。この二つの折り合いをどこでつけるのか。金銭面での考慮はしていないのか。

#### 回答

地下水揚水にかかるコストや、液状化被害の経済的損失などの金銭面での具体的な考慮はしていない。今回はあくまで沈下量を 5cm とした際の液状化危険度の予測を行ったものであり、将来的には金銭的な面も考慮できれば、より研究の厚みが出ると考えられる。

### 討議[山口先生]

逆距離加重法のパラメータである  $r$  の検証は行ったのか。また逆距離加重法の距離に対する適用限界はあるのか。

#### 回答

距離に重みを持たせるパラメータである  $r$  についての検証は既往の研究で行われている。その結果、既知メッシュ数と距離に対するべき乗の 2 つのパラメータによるバラつきは見られなかったため、 $i=4$ ,  $r=1$  という最も単純なパラメータを採用することとなった。距離の適用限界に関しては、逆距離加重法は距離に重みを置くことで、近い地点のデータに類似し、遠い地点のデータの影響は小さくなるので、適用限界は特に設けていない。

### 討議[松村先生]

この研究では、許容沈下量に留まる揚水可能量における液状化危険度の予測を行っているが、逆に、液状化危険度が一定値以内に収まる沈下量の計算は行わないのか。

#### 回答

本研究では許容沈下量に留まる揚水可能量における液状化危険度の予測しか行っておらず、今後、一定値以内に収まる液状化危険度から、そのために必要な揚水量を算出し、沈下量を計算するという検討も視野に入れて進めれば、更に研究として充実したものになると考えられる。