

大阪地域の沖積粘土層の土質特性の分布と浅層帯水層の揚水可能量の予測

地盤工学分野 市村仁志

大阪地域では、地下水の過剰揚水によって生じた地盤沈下を止めるため、地下水揚水規制を実施したが、地下水位が過大に回復したことで様々な問題が発生している。これを解決するためには、地下水位を適正なレベルに下げることが必要があるので、現在の粘土層が過去の地下水位低下によって、どの程度圧密を受けたかを明らかにし、その結果から地下水の揚水可能量を推定する必要がある。そこで本研究では、まず昨年度までにまとめられた大阪地域の沖積粘土(Ma13)層の土質データを基にして、データのない地域を補間することで250mメッシュ毎の土質特性の分布を明らかにした。次に、その土質特性を基にして浅層帯水層の揚水可能量を予測し、沖積砂層で2~3m、第1洪積砂礫層で2~4m、沖積砂層・第1洪積砂礫層同時では1~2m揚水可能であるという結論を得た。さらに、地下水は容易に得られる良質な水資源であるので、非常用水などに有効に利用できる。

1. 研究の背景と目的

昭和20~30年代にかけて、大阪地域では地下水の過剰揚水によって地盤沈下が生じた。その後、地下水揚水規制により地盤沈下は収束したが、現在では、地下水位が過大に回復したことで、地下水位が設計・施工時よりも高くなることによって地下構造物(地下鉄や地下街)に揚圧力(浮力)が作用して、浮き上がりが発生したり、盤膨れによって地下掘削工事の施工を困難にしている。さらに、沖積砂層が飽和することによる地震発生時の砂地盤の液化化発生、地盤汚染物質拡散による地下水汚染などの問題を引き起こしている。

これらの問題を解決するには、地下水位を適正なレベルに下げることが必要だと考えられる。しかし、無計画に地下水位を下げると再び地盤沈下を引き起こすため、現在の粘土層が過去の水位低下によって、どの程度圧密を受けたかを明らかにし、その性状を基にして沈下量を最小限に留める地下水揚水可能量を推定する必要がある。

そこで本研究では、まず昨年度までに関西圏地盤情報データベース(以下、DB)を用いてまとめられた大阪地域の89地区の沖積粘土層の土質特性データ(図-1参照)¹⁾を基にして、データのない地区を補間することによって250mメッシュ毎の土質特性の分布を示す。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計算を行い、浅層帯水層の揚水可能量を予測する。



図-1 沖積粘土層厚分布と昨年度の選定地区¹⁾

2. 土質特性の補間方法

(1) 補間方法

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。逆距離加重法は次式で示される。

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

ただし、 F_i はデータが存在する地点*i*($i=1, 2, 3, \dots$)でのデータ値、 F_j はデータがなく空間補間しようとしている地点*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。 r は距離に対するべき乗であり、1, 2, 3, 4の値をとる。べき乗が大きくなるほど、距離の影響が強

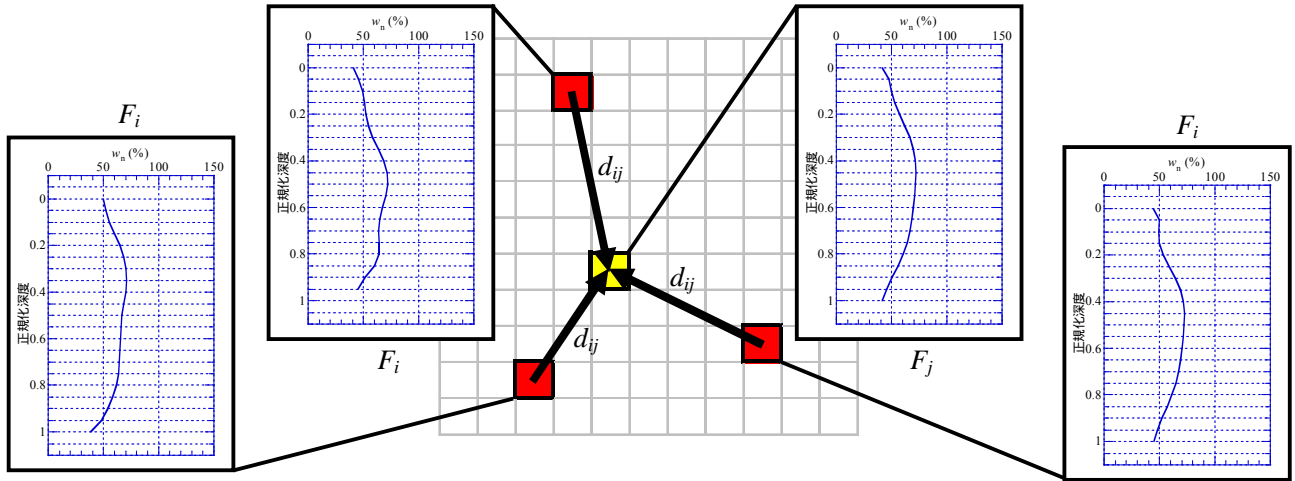


図-2 逆距離加重法による補間方法の一例

くなり、推定地点の近くのデータ値は考慮されるが、遠くのデータ値は考慮されなくなることを意味している。この方法を用いた補間手順を以下に示す(図-2 参照)。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「核メッシュ」と名付ける。

核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(1)の F_i)を求め、データを補間するメッシュ(図-2 の)と核メッシュ(図-2 の)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 ごとに逆距離加重法を用いて補間する。

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。

(2) 逆距離加重法の検証

まず、逆距離加重法に用いる核メッシュの数を 3, 4, 5 (三角形, 四角形, 五角形でデータを補間するメッシュを囲む)とし、距離に対するべき乗 r (式(1)参照)を 1, 2, 3, 4 とした場合に、最適と思われる値を検証した。図-3 にその結果を示すが、どのパターンにおいてもそれほど大きな違いは見られなかった。この結果から、核メッシュの数は間を取って 4 地点とし、べき乗は簡単のため 1 とした。

次に、逆距離加重法により補間したデータが実際の地盤のデータを再現できているかを検証した。DB を用いて新たに選定した地区の土質特性の深度分布を求め、その選定地区の中心と基準ボーリングが位置するメッシュの土質特性の深度分布を、核メッシュの深度分布から逆距離加重法により補間して求めた。これらの生データ

による土質特性の深度分布と、補間データによる土質特性の深度分布を重ねて比較した。図-4 に一例を示すが、任意に選んだ 6 地点と新たな基準ボーリングの 2 地点で整合性が見られた。この結果から、本研究で採用した逆距離加重法による補間結果を用いて揚水可能量を予測することが可能であると判断した。

(3) 補間範囲

補間範囲は選定地区内の端部のボーリング位置と沖積粘土層の層厚が変化する位置を参考に決定した。なお、臨海域では埋立前の自然地盤のみのデータを用いているので、一次性質(物理特性)と二次性質(力学特性)で求める範囲を分けた。

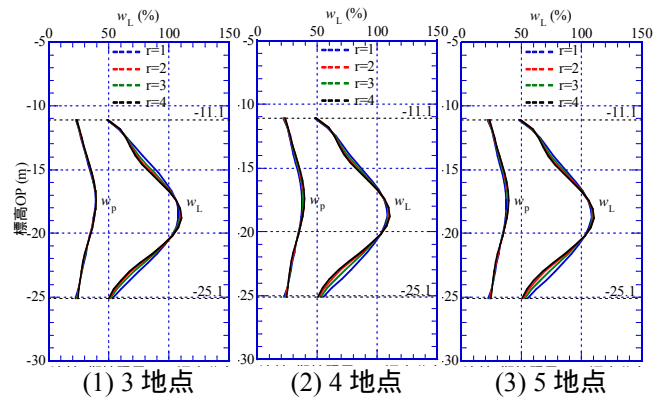


図-3 補間結果の比較

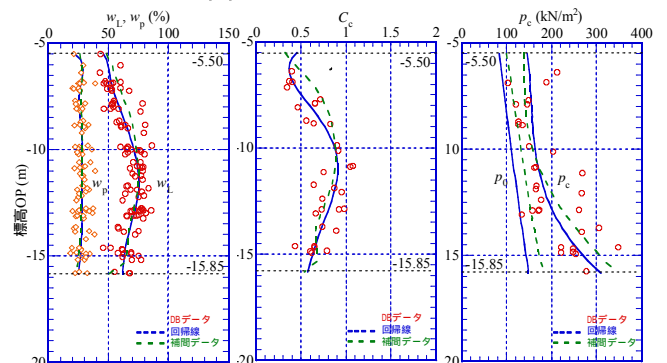


図-4 DB との比較例

3. 沖積粘土層の土質特性

逆距離加重法を用いて求めた土質特性を上部($Z=0 \sim 0.3$)、中部($Z=0.35 \sim 0.65$)、下部($Z=0.7 \sim 1.0$)と3つに区分し、それらの平均値を平面分布として示すことによって沖積粘土層の深度方向への変化と分布を捉える。

(1) 液性限界 w_L

図-5に液性限界 w_L の平面分布を示す。上下部で低く、中部で高い(深度分布は図-3,4のように弓型分布である)。これは海進・海退の堆積環境の変化によるもので、下部は海退期の、上部は海進期の海が浅い時期に低塑性の粘土が、中央部は海進最盛期の海が深い時期に高塑性の粘土が堆積したものと考えられる。また、東大阪地域より西大阪地域の w_L が高い。

(2) 自然含水比 w_n

図-6に自然含水比 w_n の平面分布を示す。 w_L の影響を受けて w_n と同様に上下部で低く、中部で高い。ただし、臨海部は埋立前の自然地盤であり、土被り圧がないため w_n は非常に高い。東大阪地域は、西大阪地域と比べると相対的に高い w_n を示しているのが特徴的である。

(3) 塑性指数 I_L

図-7に液性指数 I_L の平面分布を示す。臨海部は自然地盤であるので、上部の I_L は非常に高い。また、東大阪地域では、 I_L が1を超える地区が多く、鋭敏性が高く、非常に不安定な地盤といえる。

(4) 圧縮指数 C_c

図-8に圧縮指数 C_c の平面分布を示す。 w_L との相関性が高いため、上下部で低く、中部で高くなっている。しかし、 w_L は西大阪地域の方が大きかったが、 C_c ではあまり違いが見られない。したがって、東大阪地域の C_c が相対的に大きい(圧縮性が高い)ことが伺える。

(5) 圧密降伏応力 p_c

図-9に圧密降伏応力 p_c の平面分布を示す。深度方向に増加しているのがわかる。これは臨海部・内陸部ともに同じ傾向であるが、東大阪地域よりも西大阪地域の方が大きい。また、下部で特に大きくなっているが、過去の地下水位低下による圧密の影響と考えられる。

(6) 過圧密比 OCR

図-10に過圧密比 OCR の平面分布を示す。陸域の上部、中部では正規圧密($OCR=1$)に近いが、下部で過圧密性が特に高い。

(7) 一軸圧縮強さ q_u

図-11に一軸圧縮強さ q_u の平面分布を示す。 p_c と同様に深度方向に増加し、東大阪地域よりも西大阪地域の方が大きい。やはり、過去の地下水位低下による圧密の影響により、下部で大きい。

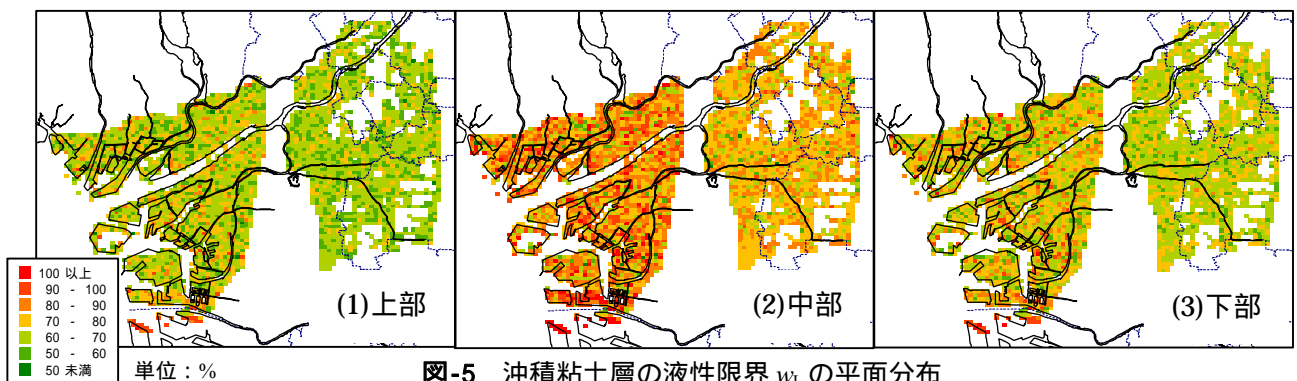


図-5 沖積粘土層の液性限界 w_L の平面分布

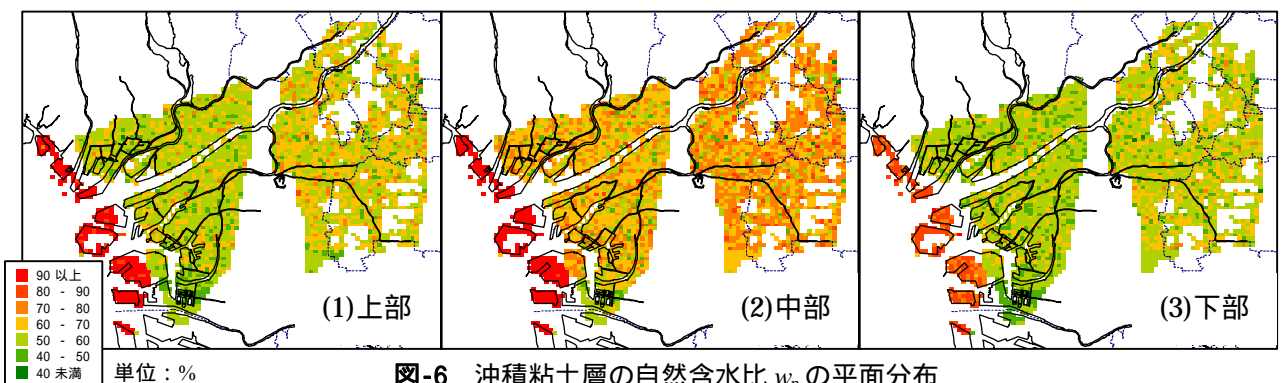


図-6 沖積粘土層の自然含水比 w_n の平面分布

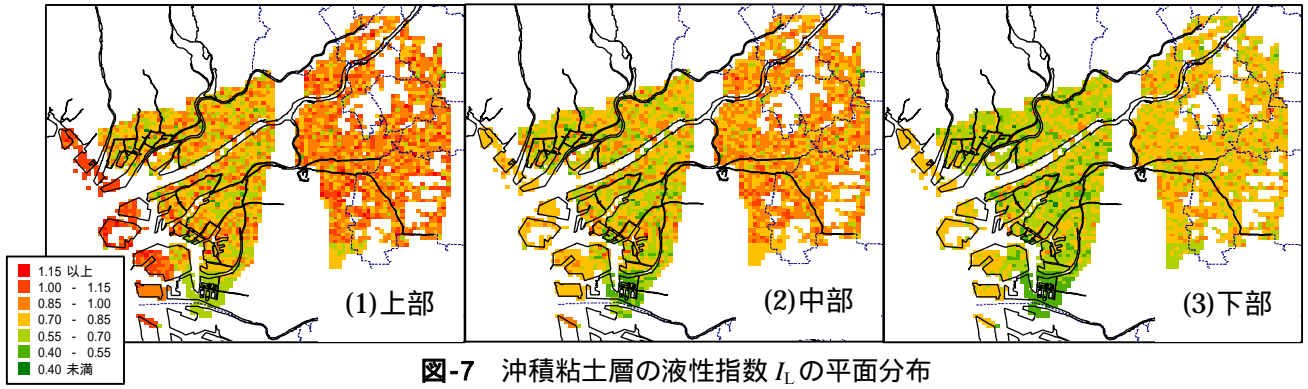


図-7 沖積粘土層の液性指数 I_L の平面分布

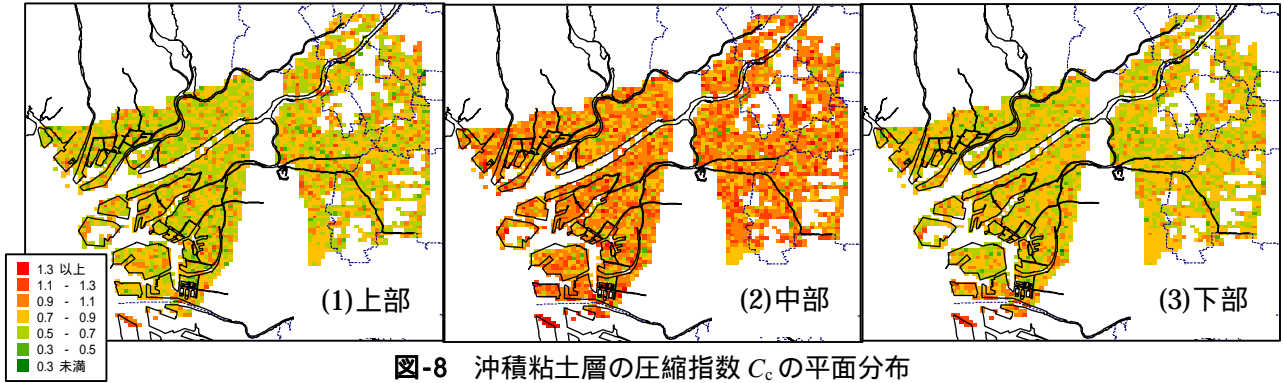


図-8 沖積粘土層の圧縮指数 C_c の平面分布

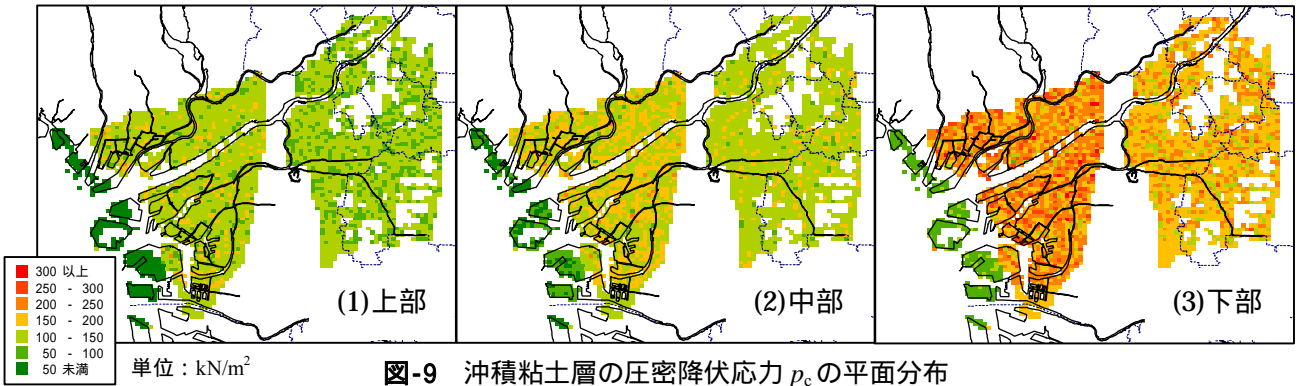


図-9 沖積粘土層の圧密降伏応力 p_c の平面分布

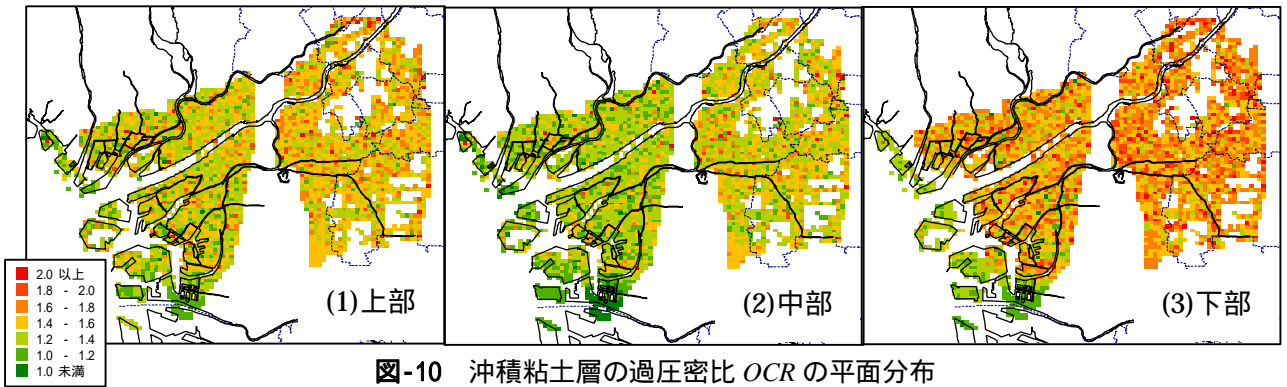


図-10 沖積粘土層の過圧密比 OCR の平面分布

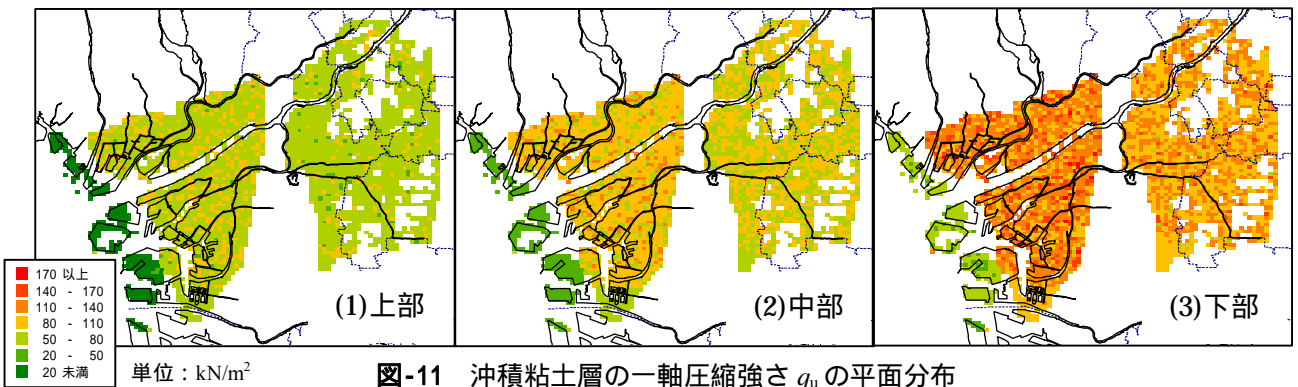


図-11 沖積粘土層の一軸圧縮強さ q_u の平面分布

4. 揚水可能量の予測方法

(1)核メッシュにおける沈下量の計算方法

DBに登録されている深度方向の圧密特性データは、物理特性に比べて必ずしも多くないので、各核メッシュの圧縮曲線は次のように推定した(図-12参照)。

図(1): DBによる液性限界 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て、代表値とする。

図(2): DBによる自然含水比 w_0 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。

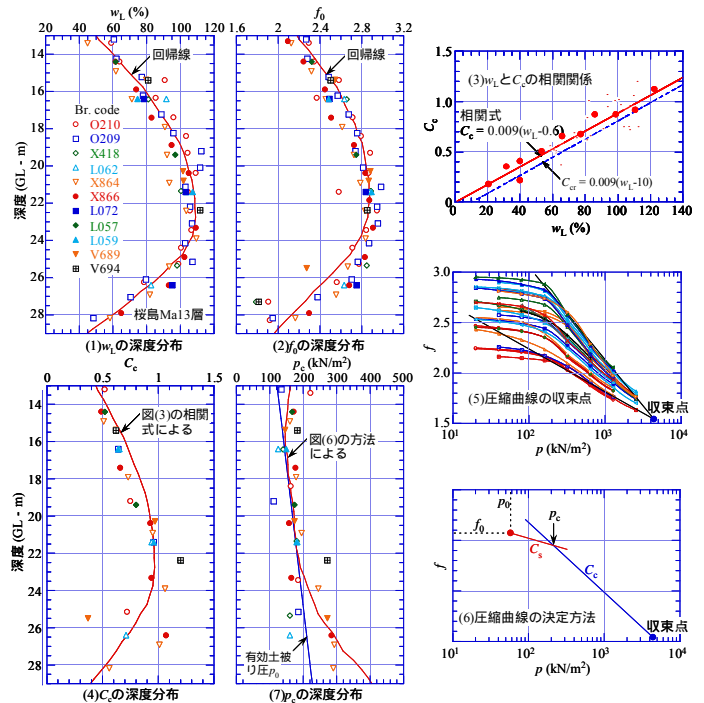
図(6): 図(5)の収束点から図(4)の C_c の勾配で正規圧密域の圧縮曲線を、図(2)の f_0 と有効土被り圧 p_0 の点から膨張指数 $C_s (=C_c/3)$ の勾配で過圧密域の圧縮曲線を、過圧密域と正規圧密域の交点から圧密降伏応力 p_c を求める。

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ので、粘土層を20個に分割し、地下水位を低下させた場合の有効応力増加を与えて沈下量を計算する。水位低下は、上面(沖積砂層)単独、下面(第1洪積砂礫層)単独、上・下面同時の3ケースを行っている。得られた水位低下量-沈下量の関係から、各ケースの揚水可能量を予測する。

(2)補間メッシュにおける沈下量の予測方法

逆距離加重法を用いて核メッシュのデータ(自然含水比 w_0 , 圧縮指数 C_c , 圧密降伏応力 p_c , 有効土被り圧 p_0) からそれぞれの250mメッシュのデータを補間する。しかし、逆距離加重法では圧縮曲線を推定できないので、重ねて高压密圧力域の収束点 (f_2, p_2) を求めることができない。ここで、全ての核メッシュの f_2 と p_2 の関係に着目してみると、これらには相関性が見られた。そこで、 f_2 と p_2 においても、逆距離加重法を用いて核メッシュのデータからそれぞれの250mメッシュのデータを補間し、4.(1)と同様に沈下量を計算することとする。



5. 浅層帯水層の揚水可能量の予測

浅層帯水層の揚水可能量とは、最小限の許容沈下量以下に留まる地下水位低下量である。ここで、許容沈下量は建築学会の建築基礎構造設計指針などから5cmと仮定した。ただし、水位低下による沈下は広範囲で生じるため、不同沈下は起こしにくいので、少し沈下量に幅を持たせた10cmの場合も求めている(ここでは省略)。

図-13~15に、大阪地域の許容沈下量を5cmとした場合のそれぞれ沖積砂層単独、第1洪積砂礫層単独、沖積砂層・第1洪積砂礫層同時の場合の揚水可能量を示す(なお、埋立地である西大阪の沖合・沿岸地域は埋立前の自然地盤の土質特性データであるため、沈下計算の対象外とした)。

(1)沖積砂層単独の揚水可能量(図-13)

西大阪地域では、海側から陸域に向かって揚水可能量が増している。東大阪地域では、揚水可能量の差が激しく、東部と南部で特に揚水可能量が小さい。揚水可能量は、西大阪地域の臨海部で1~2m、それ以外の地域で2~4mである。東大阪地域の東部と南部で2m以下であるが、それ以外で8m以上の地域もある。

(2)第1洪積砂礫層単独の揚水可能量(図-14)

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る。揚水可能量は、西大阪地域の臨海部で2~3m、それ以外の広範囲で3~4mである。東大阪地域の東部と南部で3m以下である。

(3) 沖積砂層・第1 洪積砂礫層同時の揚水可能量(図-15)

他のケースに比べて全体的に揚水可能量が小さく、1/2 程度である。揚水可能量は、西大阪地域，東大阪地域ともに広範囲で揚水可能量が1~2m である。

6. 結論

本研究では、まず昨年度までの研究成果を基にして、土質データのない地域を逆距離加重法を用いて補間して大阪地域全体の沖積粘土層の土質特性の分布を明らかにし、以下の結論を得た。

逆距離加重法を用いて補間した土質特性の深度分布とDB データ(生データ)による土質特性の深度分布には整合性が見られた。これは沖積粘土層が浸食等を受けておらず、連続した堆積環境が保たれているためであり、逆距離加重法はデータの補間方法として有効な手段である。

液性限界 w_L は上下部で低く、中央部で高い「大阪型」と呼ばれる弓型分布を示す。このことから海進・海退の堆積環境の変化が伺える。また、塑性限界 w_p , 自然含水比 w_n においても同様の分布を示している。

東大阪地域の沖積粘土層は液性指数 I_L が1 を超え、非常に鋭敏性が高い。

圧縮指数 C_c と圧密係数 c_v は、粘土塑性と高い相関性がある。

大阪地域の沖積粘土層の圧密降伏応力 p_c と一軸圧縮強さ q_u は、下部で特に大きくなっており、過去の地下水位低下による圧密の影響を受けている。ただし、東大阪地域では、その程度は小さい。

次に、こ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計算を行い、浅層帯水層の揚水可能量を予測し、以下の結論を得た。

沖積砂層は西大阪地域の臨海部，東大阪地域の東・南部を除けば2~3m の揚水が可能であり、液状化対策として非常に有効である²⁾。また、揚水した地下水は有効に利用することができる。

第1 洪積砂礫層も2~4m の揚水が可能であり、その地下水は有効に利用することができる。

ただし、沖積砂層・第1 洪積砂礫層同時に揚水する場合は1~2m 程度に限定される。

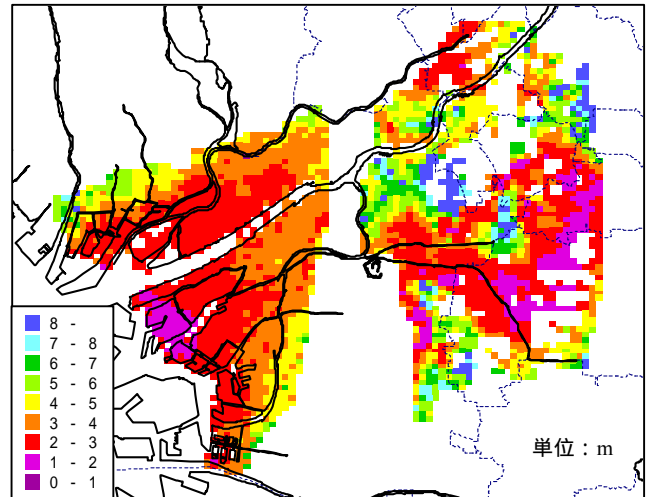


図-13 沖積砂層単独の揚水可能量

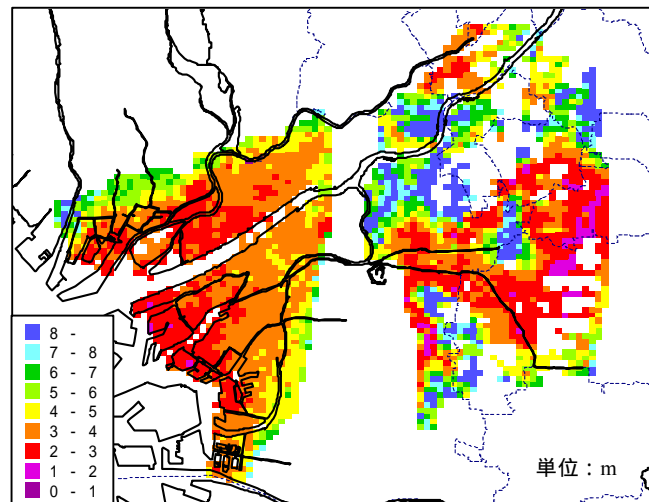


図-14 第1 洪積砂礫層の揚水可能量

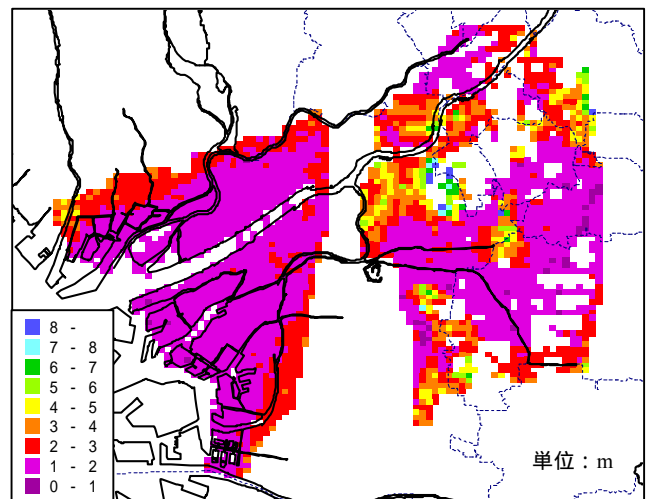


図-15 沖積砂層・第1 洪積砂礫層同時の揚水可能

参考文献

- 1) 福本哲也(2009)：大阪地域の沖積粘土(Ma13)層・洪積粘土(Ma12)層の土質特性と浅層帯水層の揚水可能量の予測
- 2) 春日井麻里(2009)：大阪地域の沖積砂層の土質特性の分布と液状化危険度の予測

討 議 等

討議 [谷口先生]

地下水位上昇による問題は何か。また、どの地点で揚水すれば効果的か。

回答：地下水位上昇によって、既存の構造物が浮力増加の影響で不安定化、盤膨れ対策のため地下掘削工事が難航、地下水位が高いことにより、地震発生時に砂地盤の液状化、地盤汚染物質拡散による地下水汚染などの問題が発生しているが、これらの問題を解決するためには、重要構造物付近や都市部の地下水を優先して揚水することが効果的だと考えられる。

討議 [貫上先生]

逆距離加重法による補間は、ポイントからの距離が関連すると思うが、核メッシュの数ではなく、距離で規定した方が良いのではないか。

回答：逆距離加重法のポイントの取り方には、以下の2つの方法がある。

- ・可変検索：対象ポイントから最も近いポイントを指定された分だけ利用
- ・固定検索：対象ポイントから指定された半径内に入るポイントを利用

本研究では、核メッシュが密なところと疎なところがあるため、可変検索を採用している。固定検索の場合、半径をどの程度にするかによって違うが、最も近いポイントに影響される逆距離加重法では大差はないと考えられる。

討議 [大内先生]

地下水位を下げる際のポイント、注意すべき点は何か。

回答：地下水位を下げる際に注意すべきは、急激な低下を起こさないようにすることである。そのためには、地下水位をリアルタイムで計測し、1日の地下水採取量の基準量を設ける必要があると考えられる。

討議 [山口先生]

圧密によって他のメッシュの圧密に影響はあるのか。

また、メッシュの大きさを変えると揚水量等は変化するのか。

回答：まず、圧密計算はメッシュ毎に独立させて行っているため、他のメッシュへの影響は考慮していない。水位低下による沈下は広範囲で起こるので、他のメッシュへの影響を考慮した圧密計算は今後の課題である。次に、メッシュの大きさが変われば、土質特性・層厚が変化するため揚水量等は変化する。

討議 [木内先生]

図-4の整合性はどのように判断しているのか。

回答：整合性の判断は数値的に範囲を設けるなどはしておらず、目視による判断によって行っている。

討議 [木内先生]

図-4のように補間した全メッシュを確認したのか。

回答：生データと補間データの比較は、任意に選んだ6地点（新しく選定した地区）と新たな基準ボーリングの2地点の計8地点で行っており、全メッシュにおいて行っているわけではない。