

名古屋市西郊における広域地盤沈下の土質力学的諸特徴と 当該地域の防災力低下に及ぼした影響の一考察

名古屋大学工学部 (正) 金田一広・山田英司・中野正樹・野田利弘・浅岡顕
名古屋大学大学院 (学) 山田正太郎
浅沼組 (正) 高稲敏浩

1 はじめに

本稿は「東海水害の教訓」(平成13年地盤工学会中部支部)¹⁾に掲載したものであるが、内容の重要性を鑑みて改めてここに報告し、討議いただくことを期待するものである。

東海豪雨での内水災害域は地下水揚水に起因して発生した名古屋の広域地盤沈下域と概ねよく重なる。地盤沈下と洪水災害との直接的な関係はまだ明らかではないが、地盤沈下がこの地域の防災力を減じこそすれ、高めていないことは明らかである。

沖・洪積粘土層などの自然堆積粘土地盤は、構造の卓越したいわゆる「乱さない粘土」からなり、構造破壊による2次圧密を起こすことが知られている。本研究では、この「2次圧密」の観点から、地下水位低下に伴う地盤沈下の特徴を調べる。最初に粘土層が1層の場合、ついで名古屋のように多層系の場合を考察する。地盤の層厚や沈下量、それに要する時間などは名古屋の地盤沈下に概ね合わせたが、計算はあくまで「架空の地盤」についてのものである。このため、得られた結論が直ちに名古屋地盤に当てはまることを主張するものではない。しかしわざわざこの断り書きを書かねばならぬほど、地盤沈下は恐ろしい公害の側面を持つ。

2 名古屋市西郊で起きた地盤沈下の特徴

図1²⁾は名古屋市西郊における地盤沈下と地下水揚水量の経年変動を示している。1950年代半ばからのデータに着目すると次の4つの特徴が挙げられる。1) 初期のうちは揚水量の増加に比例するほどには沈下量は増加しない。2) その後も揚水量が増加し続けたが、ある頃より沈下は急激に速度を増し大沈下を起こしている。3) 1974年から本格的に始まる揚水規制後も数年間にわたって沈下は進行している。4) 揚水規制からおおよそ10年後には揚水量は最も揚水の激しかった頃のおよそ半分にまで減じている、沈下した地盤は元へは戻っていない。

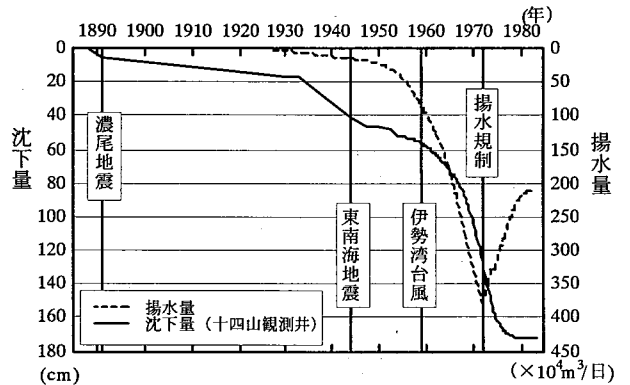


図1 沈下量と揚水量の経年変

3 解析方法

はじめに地盤沈下のメカニズムを調べるため、最も簡単な1層系地盤を仮定する。構成式に上負荷面カムクレイモデル³⁾を用い、1次元圧密沈下挙動を、水～土連成有限変形解析によって調べる。図2に有限要素メッシュと境

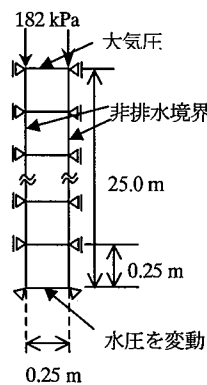


図2 境界条件

表1 材料定数および初期値

圧縮指数 λ	0.131
膨潤指数 κ	0.0754
限界状態定数 M	1.53
$p' = 98 \text{ kPa}$ の時の比体積 N	1.974
ポアソン比 ν	0.3
正規圧密土化指数 m	10
構造劣化指数 m^*	1.5
初期化圧密比 $1/R_0$	1.25
初期構造 $1/R_0^*$	10
初期側圧係数 K_1	0.595
透水係数 $k(\text{m/sec})$	2.0×10^{-9}
土粒子の密度 $\rho_s(\text{t/m}^3)$	2.6

界条件を示す。材料定数および初期値は、初期に構造の卓越した若干過圧密な粘土を想定して表1に示すように与え、これらの値を地盤内で一定としている。初期の間隙水圧分布は静水圧分布とし、初期の比体積は土被り圧に応じて深さ方向に分布させている。粘土層下部の帯水砂礫層からの地下水揚水は粘土層下部の水位低下をもたらすが、簡単のために、この地下水位変動の時間経過は、図1に示す1925年からの揚水量のカーブに比例するとした。地下水位の変動量そのものは、表1図2の計算対象地盤の沈下量が、図1の名古屋での沈下量1.5mとほぼ等しくなるように決めた。

4 2次圧密を伴う地盤沈下のメカニズム

図3は沈下量および地下水位と時間の関係であり、図4は間隙水圧の等時曲線である。およそ37年が経過したころから沈下曲線は急激にその傾きを変え大沈下へと転じている。傾きを変えた直後のb時点では地盤の深部から間隙水圧が湧き出していることがわかる。cやd時点においてもその湧き出しは起こっている。水圧の「湧き出し」は、構造の破壊によって生じる「塑性圧縮を伴う軟化」のために起こるが、この軟化域は図4に見るように、下部から上部へゆっくりと移動して行く。ここではつぎの2点が重要である。①構造の破壊は有効応力レベルがある敷居値を越えると起こるが、地下水位低下に起因する圧密沈下の場合では、地下水位低下量がある敷居値を超えたときにはじめて構造破壊による沈下（2次圧密）が見られる。②水圧の湧き出しは間隙水圧の消散を遅らせるから、構造破壊による大沈下は長い時間がかかって進行する。また図3では、水位回復過程においても沈下はしばらく続いていることもわかる。

5 2次圧密の痕跡

名古屋の地盤の中に「2次圧密」が起きた痕跡を探す。解析地盤から、数値解析により、サンプリングによる応力開放をした後の標準圧密試験と一軸圧縮試験を行い、名古屋市内で沈下の激しかった地域（名古屋市港区南陽町）の実地盤の土質試験結果と比較をする。実地盤、解析地盤いずれも揚水規制の施行された年に試験を行っている。これらの結果を深さ方向に並べたのが図5である。実地盤の結果は4点しかないものの、計算結果と同様の傾向を示している。この図から、名古屋市西郊で起こった地盤沈下も構造破壊による「2次圧密」を引き起こしていた可能性が高いことが伺われる。

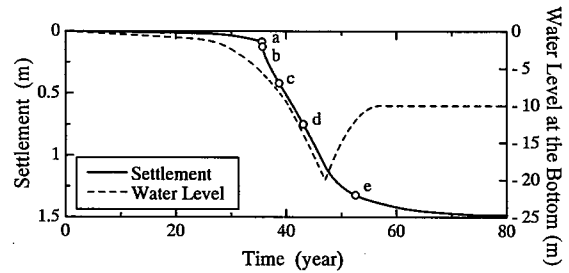


図3 沈下量と地下水位の経年変動

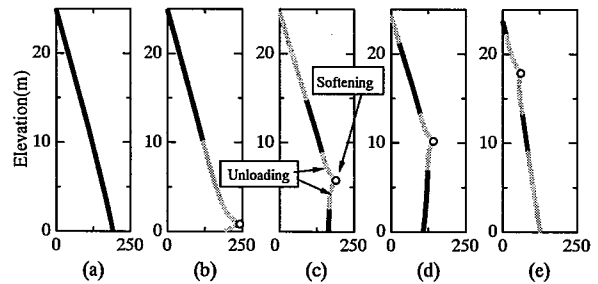


図4 間隙水圧の等時曲線

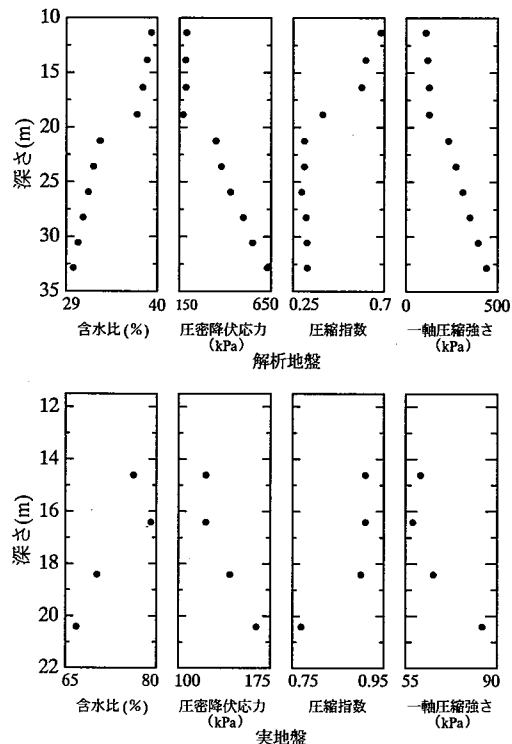


図5 解析地盤と実地盤の諸物性の分布

6 地盤沈下後の地盤の状態

「地盤沈下は圧密であり、さらに水位を元に戻せば地盤を過圧密な状態にするのためプレロードをかけたことに等しい。よって地盤改良が行われた」と考えられることもある。そこで4と同様に水位を一旦低下させ、その後水位を完全に元に戻した地盤に対して、再度、今度は地表面から、飛行場のように幅広い1次元荷重をおこなう。荷重の大きさは19.6kPaの鉛直荷重で、2階建てコンクリートビルほどの重さである。そのときの沈下曲線を図6に示す。一旦終息しかけた沈下が、再び沈下速度を増し、まさに「2次圧密」沈下が継続して起こっている。荷重載荷後の沈下量は42.6cmである。比較のために地下水位低下の履歴を受けていない元の地盤にも同量の荷重を載荷した。このときの沈下量は7.8cmにしか過ぎない。地盤沈下は決してプレロード圧密による地盤改良などにはなっていないが、これはもちろん、粘土が構造破壊、すなわち乱されてしまったためである。

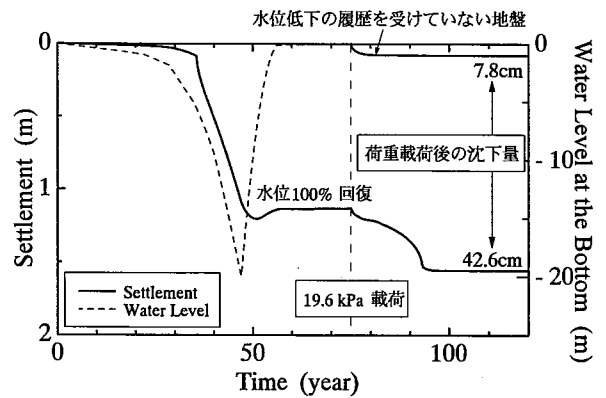


図6 荷重載荷による沈下挙動

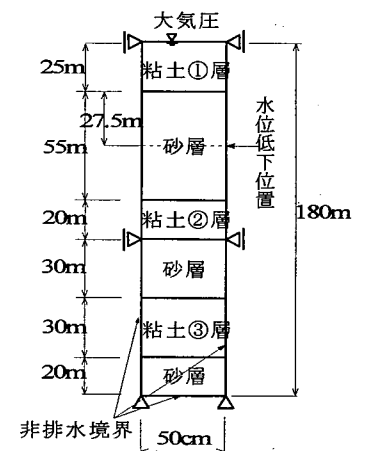
一旦終息しかけた沈下が、再び沈下速度を増し、まさに「2次圧密」沈下が継続して起こっている。荷重載荷後の沈下量は42.6cmである。比較のために地下水位低下の履歴を受けていない元の地盤にも同量の荷重を載荷した。このときの沈下量は7.8cmにしか過ぎない。地盤沈下は決してプレロード圧密による地盤改良などにはなっていないが、これはもちろん、粘土が構造破壊、すなわち乱されてしまったためである。

7 多層系1次元地盤の計算条件

実際の地盤は多層系であることが多く、実際名古屋西郊の地盤も沖・洪積粘土層が3層積み重なった地盤である。そこで次に、多層系地盤の場合を計算してみる。図7は計算で用いる1次元多層系地盤の境界条件であるが、名古屋の地盤沈下域を参考に層厚などを決定した。実際には粘土①層の上に砂層が10m堆積しているが、簡単のため上載荷重182kPaに置き直している。地盤内応力、比体積などは、上載荷重および自重から決定し、深さ方向に分布している。なお、初期過圧密比と初期の構造は層内では一様とした。材料定数を表2に示す。図7に示す砂層中間箇所からの揚水を想定し、この深さでの水位低下を、最初の47年間で-20m低下させ、その後10年間で-10mまで50%回復するものとしている。これは図1を参考にした図3と同様である。

表2 材料定数(多層系地盤)

	粘性土			砂質土
	①	②	③	
圧縮指数λ		0.131		0.042
膨潤指数κ		0.0754		0.016
限界状態定数M		1.53		1.24
$p' = 98 \text{ kPa}$ の時の比体積 N		1.974		1.968
ポアソン比ν		0.3		0.3
正規圧密土化指数 m		10		0.04
構造劣化指数 m^*		1.5		1.8
初期化圧密比 $1/R_0$	1.35,	1.3,	1.14	10
初期構造 $1/R_0^*$	10.0,	8.0,	6	1
透水係数 $k(\text{m/sec})$	2.0×10^{-9}	1.0×10^{-9} ,	5.0×10^{-8}	4.1×10^{-4}
土粒子の密度 $\rho_s(\text{t/m}^3)$		2.6		2.65



*粘土1要素のサイズは、50cm×50cm
砂1要素のサイズは、50cm×500cm

図7 境界条件多層系1次元

8 多層系1次元地盤の計算結果

①水位低下に伴う地盤沈下：図8は各粘土層と地表面の沈下量と水位の変化を示したものであるが、水位50%回復後ほぼ沈静化していた沈下が約50年後に大きくなり、200年以上も続くことがわかる。この原因は、粘土③層で構造劣化による塑性圧縮を伴った軟化により過剰水圧が上昇したためであるが(図9参照、図中白丸が軟化している要素)、粘土地盤の透水係数が小さいために、粘土③層が構造破壊と軟化を起こすのに必要な間隙水圧の低下までに約50年必要であったことになる。沈下が鎮静化していたはずの約50年の間に、数値上で確認すれば、実際には平均して年間0.9ミリ程度は沈下しており、これが粘土③層の遅れ大沈下を招いたのである。現在の名古屋の地盤沈下は毎年1.2ミリ程度である

が、決して「沈静化」しているとは安心は出来ない。

②水位低下地盤にせん断力が作用した場合:水位低下開始75年後に地盤全体にせん断力を作用させた場合の地盤の挙動を調べる。せん断力は地盤全体を側方に4秒で5mm押し、4秒で引き放すという簡単な条件を与えた。そのときの沈下～時間曲線を図10に示す。このわずかなせん断変形の付与は、もちろん地震による刺激を想定してのものであるが、この刺激により地盤全体は再度沈下を開始し始める。そして長い時間(2世紀半)かけて3mもの大沈下となる。図11に図10中A,B,Cの時点での地盤の比体積の深度分布を示す。構造破壊による比体積分布の不連続は、最初のうちは粘土①、②層に見られるが、やがて長い時間の後、最下層の粘土③層にも及ぶことが分かる。

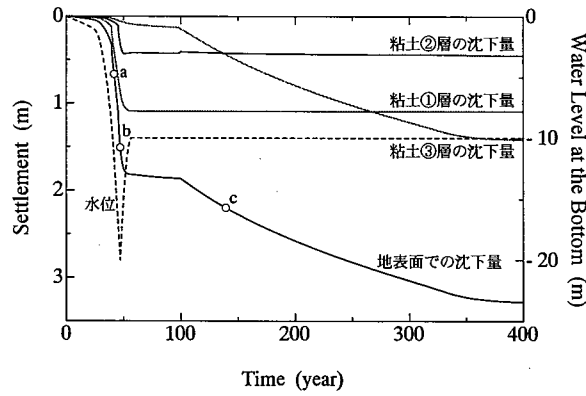


図8 沈下量～時間関係

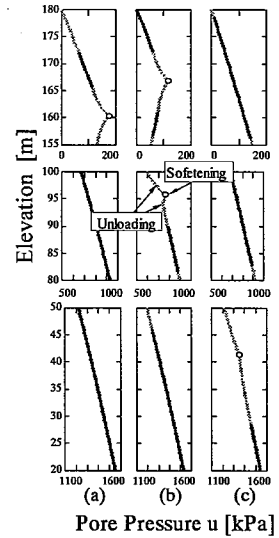


図9 間隙水圧の等時曲線

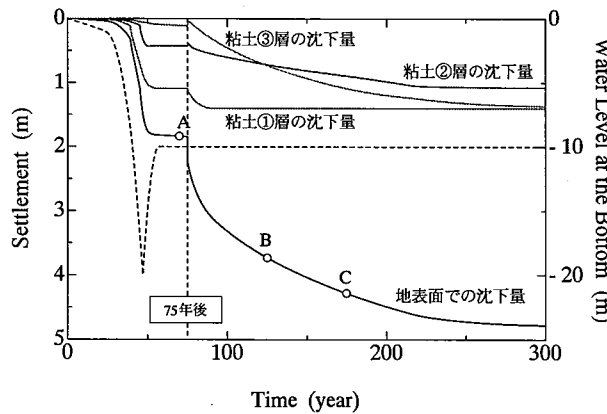


図10 沈下量～時間関係

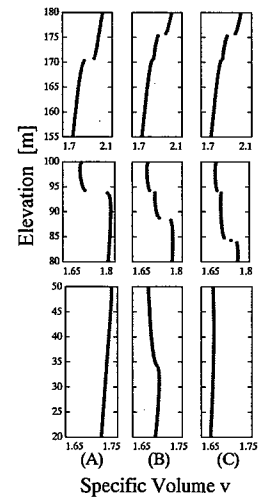


図11 比体積の等時曲線

9 おわりに

地盤沈下のメカニズムが構造劣化に起因する「2次圧密」で説明される場合の諸特徴をまとめた。地下水位を一旦回復させたとしても、粘土地盤の「乱れ」のために、その地盤は元の地盤に比べ脆弱になっている。地盤が多層系の場合は、揚水規制のために、「年間1ミリ程度」と沈下が沈静化しているように見えても、このわずかの地盤沈下の進行がやがて将来最下層の粘土層に影響を及ぼし、再度大沈下を引き起こす可能性がある。もっとも、この大沈下は何十年、何百年とかがかかって起こるから、突発的な災害には見えない。しかし、当該地域の防災力を確実に減じてゆくから、注意が大切である。

参考文献:

- 1) 地下水位低下に起因する地盤沈下現象のメカニズム, 地盤工学会中部支部編「東海水害の教訓」, pp.47~pp.50, 2001.
- 2) 植下 協: 濃尾平野の広域地盤沈下と地下水問題, 土質工学会(現地盤工学会)中部支部第2回地盤工学シンポジウム論文集, pp.93~98, 1990.
- 3) Asaoka, A. et al.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, 40(2), 2000.
- 4) Asaoka, A. et al.: Delayed compression/consolidation of natural clay due to degradation of soil structure, *Soils and Foundations*, 40(6), 2000.
- 5) 浅岡ら: 地下水位低下に起因する地盤沈下現象のメカニズム, 第35回地盤工学研究発表会講演集, Vol.1, pp.997~998, 2001.
- 6) 浅岡ら: 地下水位低下による多層系地盤の地盤沈下の特徴, 第35回地盤工学研究発表会講演集, Vol.1, pp.997~998, 2001.