

地下水位低下に起因する広域地盤沈下の数値シミュレーション

名古屋大学 国際会員 金田一広 浅岡顕 中野正樹 野田利弘

1 はじめに

濃尾平野に見られる長期かつ広域に亘る地盤沈下は地下水の過剰揚水によって引き起こされていることはよく知られている。図1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¹⁾を示している。1950年代半ばからの特徴として次の4点が挙げられる。1)初期のうちは揚水量の増加にみあう沈下量の増加が見られない。2)揚水量があるレベルを超えると急激に速度を増して大沈下を起す。3)1972年からの揚水規制にもかかわらず、数年は沈下が進行する。4)揚水規制により揚水量が最も揚水の激しかったころの半分にまで減じているが沈下はもとには戻っていない。

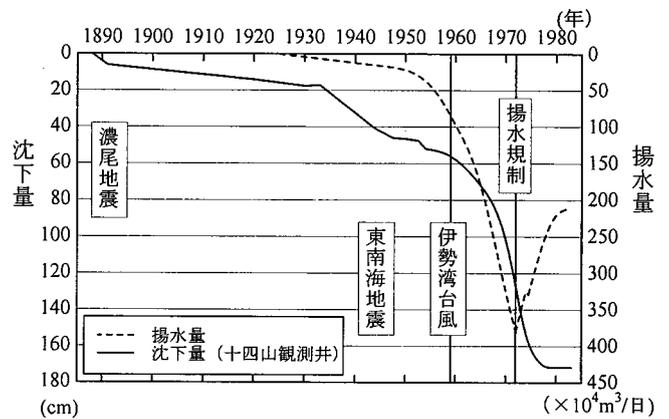


図1 沈下量と揚水量の経年変動

第13回中部支部地盤工学シンポジウム²⁾では、構造および過圧密を有する地盤で1次元を仮定し、上述の特徴を水～土連成計算によって示し、地盤沈下のメカニズムを報告した。本報告では構造・過圧密さらに異方性を有する地盤を仮定し、1次元および2次元平面ひずみの有限変形計算を行い、地下水位低下による構造の劣化による進行性破壊を調べた。構成式には回転硬化上・下負荷面修正カムクレイモデルを用いている。このモデルの詳細は参考文献^{3),4)}を参照されたい。

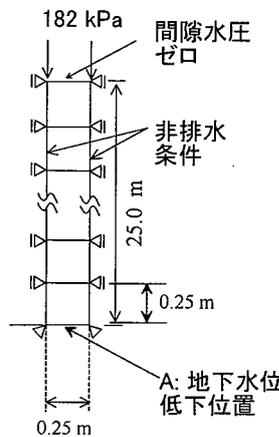


図2 1次元1層系の境界条件

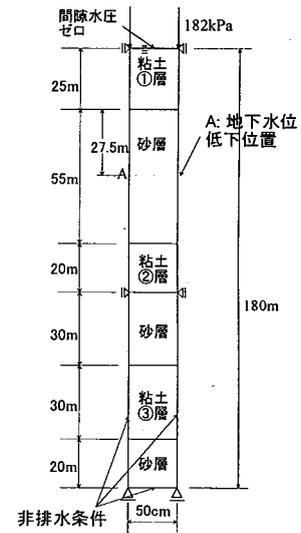


図3 1次元多層系の境界条件

2 境界条件と初期条件

計算で用いた有限要素メッシュと境界条件を図2,3,4に示す。計算条件は1次元1層系(粘土層)、1次元多層系(砂、粘土各3層の互層地盤)および2次元平面ひずみ条件である。1要素サイズ(縦×横)は、1次元では、粘土:50cm×50cm、砂:50cm×250cm、平面ひずみでは粘土:2.5m×5.0m、砂:5.0m×

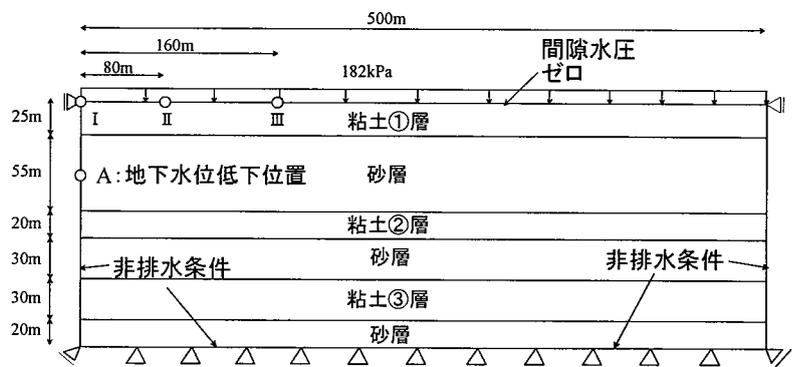


図4 平面ひずみ計算の境界条件

A Numerical simulation of low land subsidence due to dewatering:
Kaneda, K., Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (Nagoya Univ.)

5.0m としている。すべての地盤に対して、上部に砂層が 10m 堆積しているとして、上載荷重 182kPa をかけている。各メッシュの上端は間隙水圧ゼロの条件で、メッシュの最下部は非排水条件にしている。表 1 に砂および粘土の弾塑性パラメータと発展則パラメータを示す。初期の地盤内の水圧は静水圧とし、表 2,3 で示すが、初期の構造の程度、過圧密比、異方性は粘土・砂層で一定としている。また、初期間隙比は上載荷重と、構造の程度、過圧密比、異方性および粘土・砂の自重より計算している。揚水は地下水位低下と密接な関係があるため、計算では地盤の地下水位を低下させる。地下水位を低下させる位置は図 2,3,4 の図中に示した A 点である。なお、表 1 の発展則パラメータは典型的な砂と粘土のものを用いている。

3 1 次元 1 層系粘土地盤の数値計算

表 2 に地盤の初期状態、粘土の透水係数を示す。構造・異方性を有する若干過圧密な地盤である。地下水位の低下の仕方は図 1 の 1950 年以降の揚水量変動と同じカーブになるようにした。地下水位低下量は地盤の最終沈下量が約 1.5m になるように、47 年間で -20m 低下させ、その後 10 年間で -10m まで回復させた。図 5 に沈下量（実線）および地下水位低下（点線）の経年変動を示す。(b)点を越えるあたりから大沈下を起こしている。図 6 に間隙水圧の等時曲線を示す。図中に示す記号(a)~(e)は図 5 に対応する。黒の実線は土エレメントが硬化、灰色は除荷、大きい丸は軟化していることを示している。(b)点以降、地盤深部から塑性圧縮を伴う軟化が生じ、それに伴い過剰間隙水圧の上昇が発生し、遅れ圧縮が見られる。遅れ圧縮のメカニズムは次の通り。構造を有する土が塑性変形を受けると、塑性圧縮を伴う軟化域に応力状態をとることができる。土エレメントが軟化して平均有効応力が減ずると、それを補う形で、過剰間隙水圧が上昇する。この水圧の上昇が圧密を遅らせ、また、同時に構造の喪失も伴うため、大圧縮が起こる。土エレメントの過剰間隙水圧が上昇すると、周りの土エレメントは除荷を受ける。このように土エレメントが負荷、軟化、除荷、再負荷を受け有効応力経路が地盤全体で異なってくるため、図 7 に示すように、地盤沈下後の地盤物性は深さ方向に不均質となる⁵⁾。また、地下水位低下量を半分に減じてもしばらく沈下が進むが、それは、土エレメントが塑性圧縮を伴う軟化域に達しているためしばらく圧縮が進むからである ((d)点)。さ

表 1 弾塑性パラメータと発展則パラメータ

	粘土	砂
[弾塑性パラメータ]		
圧縮指数 $\bar{\epsilon}_c$	0.131	0.042
膨潤指数 $\bar{\epsilon}_e$	0.065	0.012
限界状態定数 M	1.2	1.08
$\rho' = 98\text{kPa}$ の時の比体積 N	1.974	1.994
ポアソン比 ν	0.2	0.3
土粒子の密度 $\rho_s(\text{t/m}^3)$	2.6	2.65
[発展則パラメータ]		
正規圧密土化指数 m	7.0	0.04
構造劣化指数 a	1.5	2.0
構造劣化指数 b	1.0	1.0
構造劣化指数 c	1.0	1.0
回転硬化指数 b_r	0.001	10.0
回転硬化限界定数 m_b	1.0	0.5

表 2 初期条件と粘土の透水係数

	粘土
[初期条件]	
初期過圧密比 $1/R_0$	1.32
初期構造の程度 R^*	0.057
初期応力比 η_0	0.8
初期異方性の程度 ζ_0	0.8
透水係数 $k(\text{cm/sec})$	2.0×10^{-7}

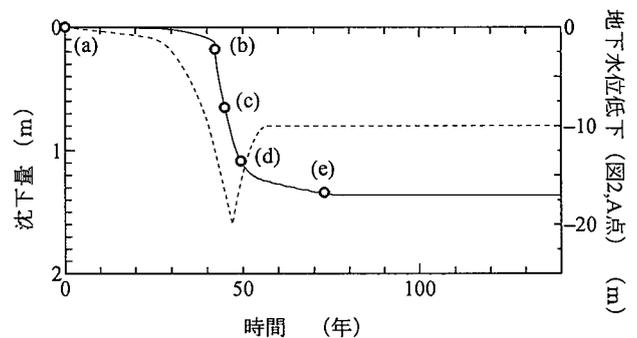


図 5 沈下量・地下水位低下の経年変化

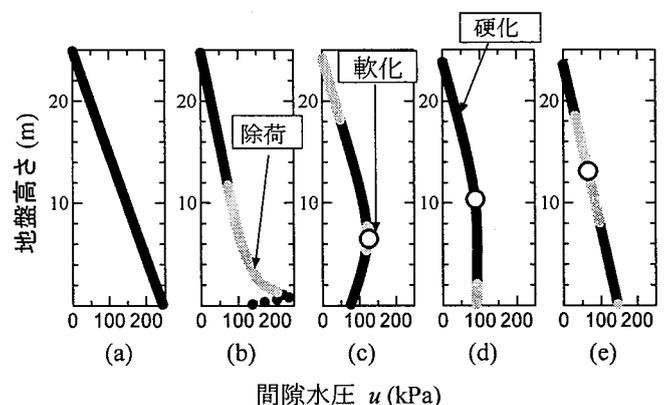


図 6 間隙水圧の等時曲線

らに、地盤沈下は回復していないことが分かる。

4 1次元多層系地盤の数値計算

表3に粘土・砂互層地盤の初期状態、透水係数を示す。簡単のために砂層は同じパラメータとし、初期過圧密比を10であたえ、十分締固まった砂とした。図8に沈下量・地下水位低下の経年変動を示す。図中、実線は地表面、1点鎖線は粘土①層、2点鎖線は粘土②層、太い実線は粘土③層および点線は地下水位低下を示す。地下水位ははじめの47年間で-25m低下させ、その後10年間で-12.5mに回復させ、一定に保つことにした。図9に図8で示した記号(a)~(d)の間隙水圧の等時曲線を示す。上から粘土①,②,③層である。図6と同様に黒の実線は土エレメントが硬化、灰色は除荷、大きい丸は軟化していることを示している。地下水位を低下させた時は粘土①,②

層での沈下が顕著で、これらの層で過剰間隙水圧の上昇が見られる。地下水位を-12.5mに一定にした後は粘土②層の沈下がわずかながら進み、約80年後に粘土③層が沈下し始め、その後250年に亘って沈下している。有効応力の増加が地盤深部にわずかながら進み、粘土③層の上端の土エレメントが塑性圧縮を伴う軟化域に入ったため遅れ圧縮が起こっている。この3.4.章は先報²⁾でも示したが、異方性を考慮した地盤でも同じ傾向が得られた。

5 多次元多層系地盤の数値計算

地盤の初期状態、透水係数などは表3と同じである。図10に地表面の沈下量・地下水位の経年変化を示す。地表面の位置は、図4の図中に示した記号(I)~(III)で、(I)が地下水位を低下させた位置での地表面を示す。実線が

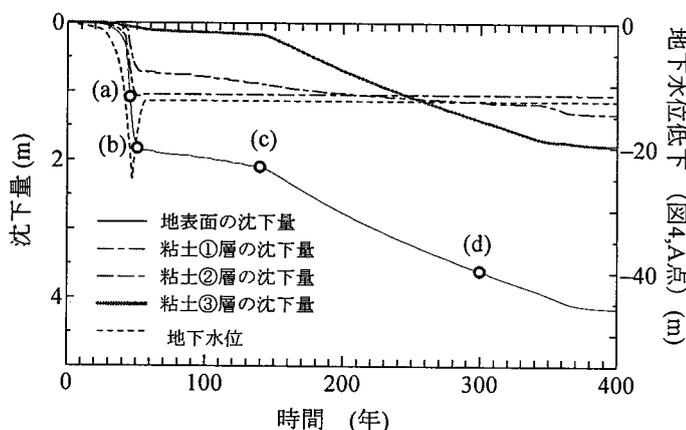


図8 沈下量・地下水位低下の経年変化

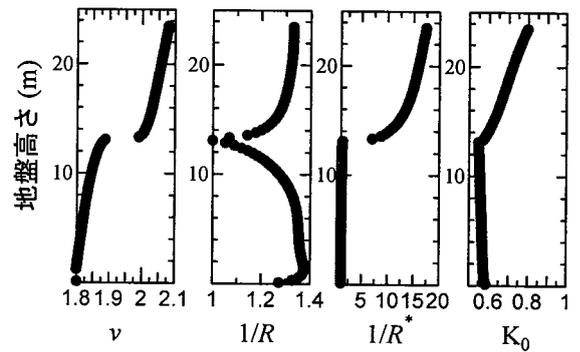


図7 地盤の不均質性

表3 初期条件と透水係数

	粘土①層	粘土②層	粘土③層	砂
[初期条件]				
初期過圧密比 $1/R_0$	1.32	1.11	1.01	10
初期構造の程度 R^*	9	8.3	7.8	1
初期応力比 η_0	0.8	0.8	0.8	0.85
初期異方性の程度 ζ_0	0.8	0.8	0.8	0.85
透水係数 k (cm/sec)	2.0×10^{-7}	1.2×10^{-7}	1.0×10^{-7}	4.09×10^{-2}

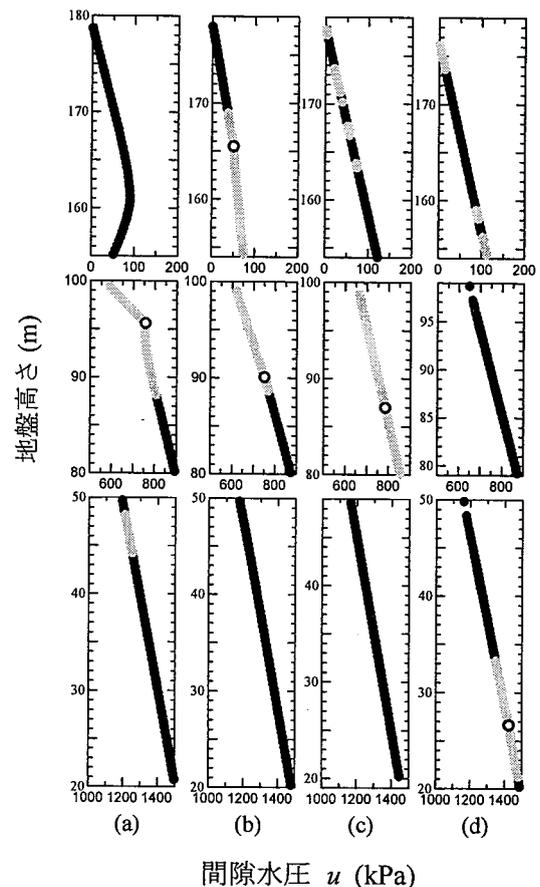


図9 間隙水圧の等時曲線

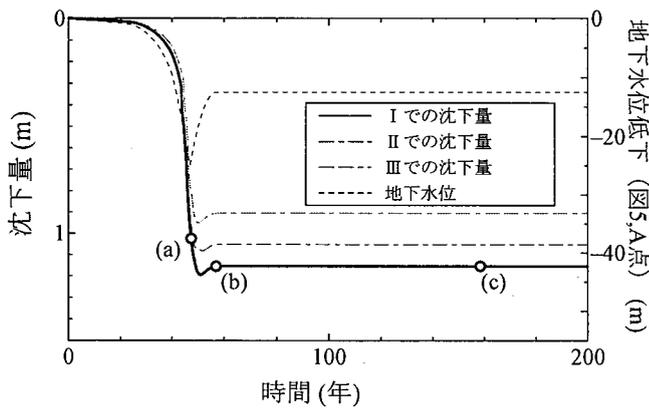


図10 沈下量・地下水位低下の経年変化

(I)、1点鎖線が(II)、2点鎖線が(III)および点線が地下水位低下を示している。地下水位低下を最も激しい時より半分に減じた後、わずかではあるが地盤のリバウンドが見られる。図11に $1/R^*$ と間隙水圧の分布を示す。図中の記号(a)~(c)は図10に対応する。地下水位を低下させた後、(b)点以降構造の喪失($1/R^* \rightarrow 1$)が見られ、それが時間とともに拡大していく。間隙水圧も上昇や消散が見られ、進行性破壊の様子が観測されている。

6 まとめ

本報告では、構造、過圧密さらに異方性を有している地盤の地下水位低下に起因する地盤沈下について、水～土連成計算を行ない、次の知見を得られた。(1)地下水位低下があるレベルを超えると遅れ大沈下が見られる。これは構造の喪失に起因する塑性圧縮軟化による過剰間隙水圧の上昇による。(2)1次元多層系地盤では、地盤深部の粘土層にも遅れ大沈下を引き起こし、数百年に亘る可能性がある。(3)2次元平面ひずみ条件では構造劣化が時間とともに側方に生じていく(進行性破壊)様子が見られ、地下水位低下による地盤沈下が広範囲に及ぶことを示した。

参考文献

- 1) 植下 協(1990): 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.
- 2) 金田他(2001): 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, 地盤工学会中部支部第13回地盤工学シンポジウム論文集, pp.25-28.
- 3) Asaoka, A. et. al.(2000): Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, 40(2).
- 4) Asaoka, A. et.al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), pp.47-57.
- 5) Asaoka, A. et .al.(2000): Delayed compression/consolidation of natural clay due to degradation of soil structure, *Soils and Foundations*, 40(6).

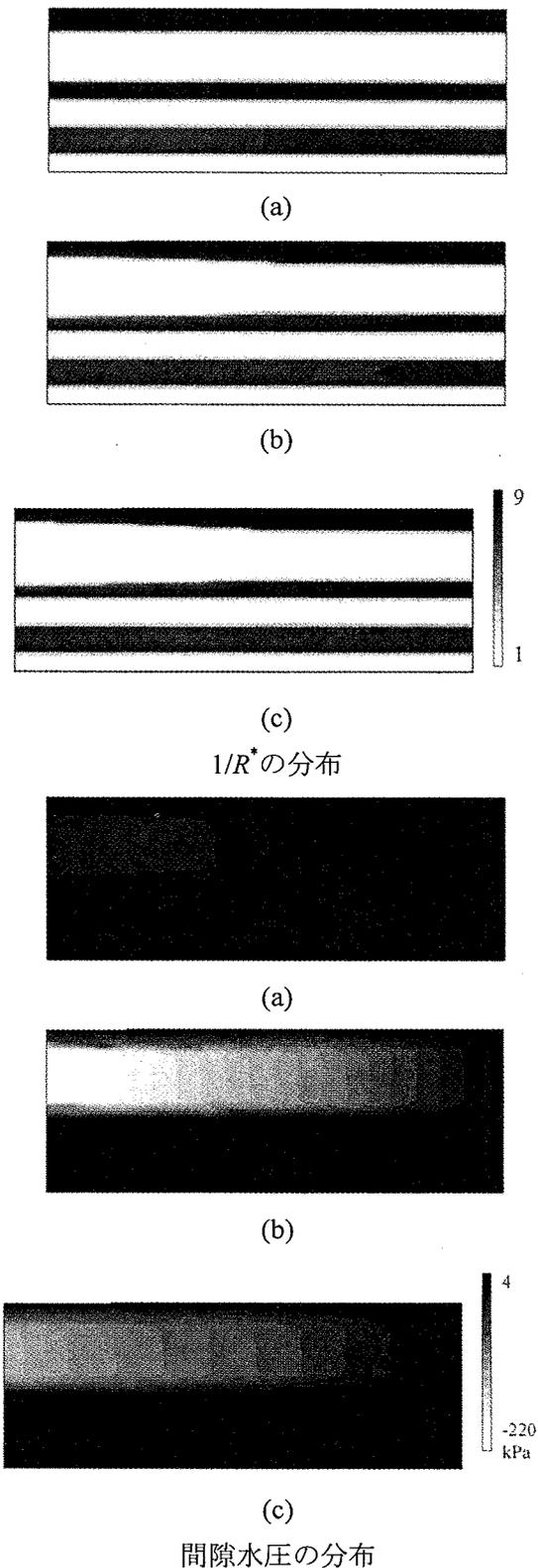


図11 $1/R^*$, 間隙水圧の分布