

16. 上負荷面カムクレイモデルを用いた水位低下による 自然堆積地盤の沈下解析

Simulation of Ground Subsidence due to Drawing Down Ground Water Level

高稲 敏浩*

要 旨

地下水の揚水によって東京、大阪、名古屋などでは地盤沈下が起きていることはよく知られている。沈下する地盤は沖積層、洪積層などで、構造を持った過圧密な土と考えられる。本報では、「構造」を持った土の挙動を表現できる弾塑性構成式、上負荷面カムクレイモデルを用いて水～土連成計算を行い、「構造」を有する土の特徴的な挙動である「2次圧密」が起きている可能性を示唆した。また、2次元平面ひずみ条件を仮定して、「構造」を有する多層系地盤を対象に、地下水位を低下させることによって引き起こされる地盤沈下の計算から、その沈下挙動の特徴（「2次圧密」）を明らかにした。

キーワード：土の構造／2次圧密／地盤沈下／有限要素法／弾塑性構成式

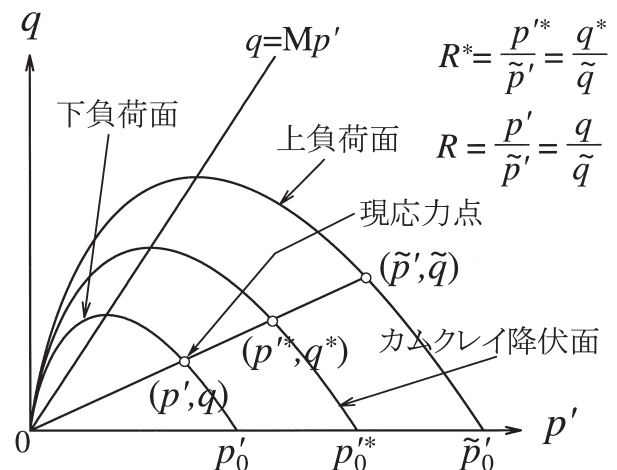
1. はじめに

これまで土の過圧密状態に着目して、オリジナルカムクレイモデルに「下負荷面」¹⁾の概念を導入した下負荷面カムクレイモデル²⁾を用いた水～土連成解析により過圧密土の挙動について考察^{3), 4), 5)}を行ってきた。しかし、飽和した自然堆積地盤の土は、大抵は「構造」が発達した状態で過圧密状態にある。「構造」を有する土の力学的挙動の特徴としては、①土の乱れや低い応力レベルでの軟化などいわゆる「構造」に由来する特徴、②2次圧密などの時間依存性（速度効果）、③異方性が挙げられる。これらの挙動は、下負荷面カムクレイモデルでは表現できない。そこで、本報ではこれら①、②の挙動を表すための土の弾塑性モデルとして提案されている上負荷面カムクレイモデル⁶⁾の概要を説明し、次に上負荷面カムクレイモデルの実際の適用例として、いわゆる「2次圧密」^{7), 8)}現象を示す地下水位低下による地盤沈下解析について述べる。

2. 上負荷面カムクレイモデルの概要

上負荷面カムクレイモデル^{6), 9)}について、その概要を述べる。

オリジナルカムクレイモデルは、正規圧密状態にある繰り返し粘土の負荷時の挙動を表すものであり、「構造」を有する自然堆積粘土は、カムクレイモデルにとって「不可能領域」(Impossible State)に存在している。この状



図－1 3つの負荷面の関係図

態を表現するためにカムクレイ降伏面の外側に $p'=0, q=0$ を中心としたカムクレイ降伏面と相似形の上負荷面をとる(図－1参照)。カムクレイ降伏面と上負荷面の相似率 R^* は「構造の程度」を表す指標で、塑性変形が生じ構造の程度が小さくなると1に近づき、完全に構造が消失すると R^* は1となる。

構造が消失し R^* が1となった時には、もちろんカムクレイ降伏面と上負荷面は一致しておりこの状態を「正規圧密土」と呼ぶ。

上負荷面上にあった土が弾性除荷を受ける時、その土を「過圧密土」と呼ぶ。この土の過圧密状態を表すため

*土木構造研究室

表－１ 土の状態

	構造のある土	構造のない土
正規圧密土	(A)	(B)
過圧密土	(C)	(D)

表－２ 材料定数

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 $m^{(7)}$	10.0
構造劣化指数 $m^{*(7)}$	0.5
初期過圧密比 $1/R_0$	1.0
初期構造 $1/R_0^*$	0.1, 0.2, 1.0

に、橋口¹⁾にならい現応力点を通り $p'=0, q=0$ を中心とした上負荷面に相似形の下負荷面を導入し、再負荷時の弾塑性挙動を定める。上負荷面に対する下負荷面の相似率 R は過圧密比の逆数を表し、塑性変形が生じると R は増加して 1 に近づき（下負荷面と上負荷面が近づき）、ついには正規圧密土となる。以上から土は表－１に示す 4 つのいずれかの状態にあり、塑性変形がすすめばどの土も (B) になることがわかる。

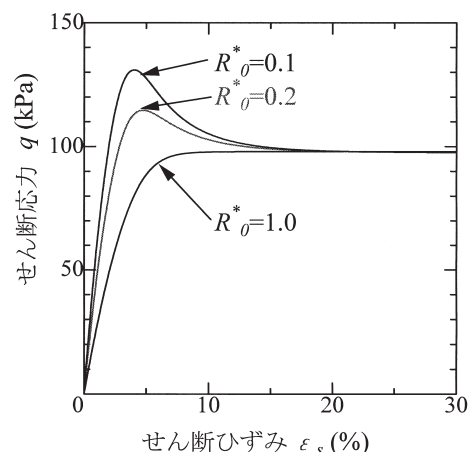
図－２は、初期間隙比が同じで初期「構造の程度」 R_0^* の違いによる 1 軸圧縮試験の上負荷面カムクレイモデルを用いた計算結果を軸差応力～せん断ひずみ関係で示したものである。材料定数は、表－２に示す。構造が卓越している（ R_0^* が小さい）ほど強度が大きく、初期剛性が高く、ピークが早く現れることがわかる。これは、自然堆積粘土の挙動、あるいは、試料の乱れの程度の違いによる挙動そのもので、上負荷面カムクレイモデルを用いれば「構造」を有する土の力学的挙動の構造に由来する特徴を表現出来ることがわかる。

3. 地下水位低下に伴う地盤沈下の計算

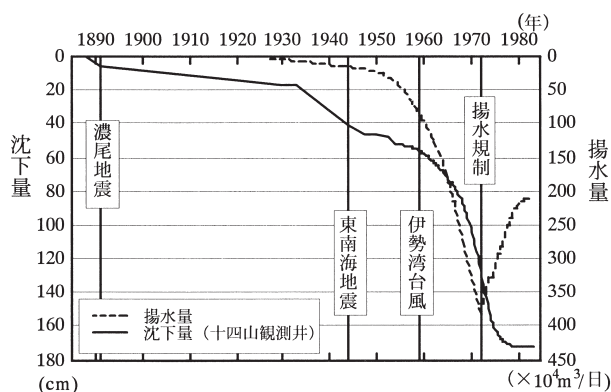
3.1 地盤沈下の特徴と 2 次圧密¹⁰⁾

図－３¹¹⁾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) 1960年頃までは、揚水量は増加しているが沈下量は、ほとんど増加していない。
- (2) その後も揚水量は増加し続け、1965年頃より沈下は



図－２ 初期「構造」の異なる土の軸差応力～せん断ひずみ関係

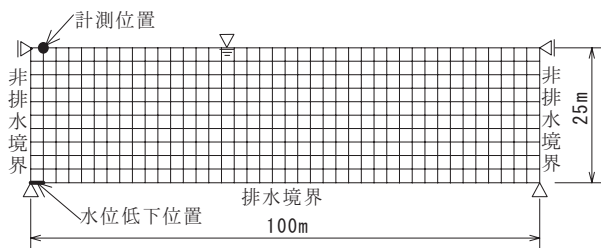


図－３ 沈下量と揚水量の経年変動

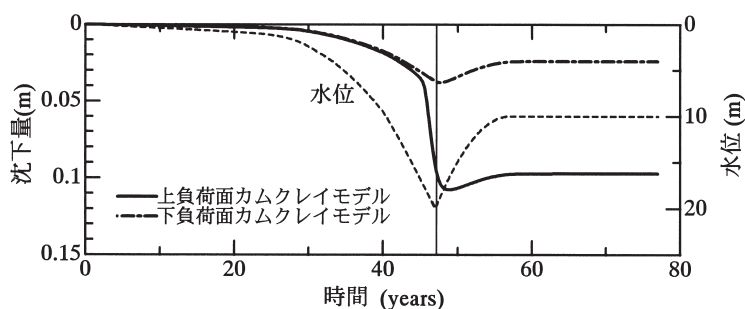
急激に速度を増し大沈下を起こしている。

- (3) 1974年から本格的な揚水規制が始まるが、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年後に揚水量は最大揚水量のおおよそ半分にまで減っているが、沈下量は一定でほとんど回復しない。

地下水の揚水は、地盤への荷重載荷と同じであることを考えると、上記の特徴は、「2 次圧密」によるもの（土の時間依存的特徴）とみることが出来る。そこで、図－４に示す簡単な境界条件を用いて下負荷面カムクレイモデルと上負荷面カムクレイモデルを用いて地下水位低下による地盤沈下の様子を比べる。材料定数については、地盤内で一様とし、表－３に示したものをを用いている。ただし、初期の地盤内応力、比体積などは自重から決定し深さ方向に分布している。初期状態は、両モデルによる計算において等しくなるように設定している。水



図－４ 境界条件と有限要素メッシュ



図－５ 沈下量～時間関係

位は、47年間で－20mまで低下しその後10年間で－10mまで回復するものとした。

図－４に示した計測位置における沈下量の経時変化を図－５に示す。上負荷面モデルを用いた場合に、①ある時点からの急激な沈下、②水位低下停止後も沈下が進行する、③水位回復後も沈下はほとんど回復しないなど、先述の地下水位低下に伴う地盤沈下の特徴を良く表現でき、下負荷面モデル（地盤の過圧密状態）だけではそれら特徴を表現できないことがわかる。なお、本論文では、塑性圧縮軟化により過剰間隙水圧の湧き出しを伴う遅れ圧密沈下を「２次圧密」^{7), 8)}と呼んでいる。

3.2 地下水位低下に起因する地盤沈下の「２次圧密」

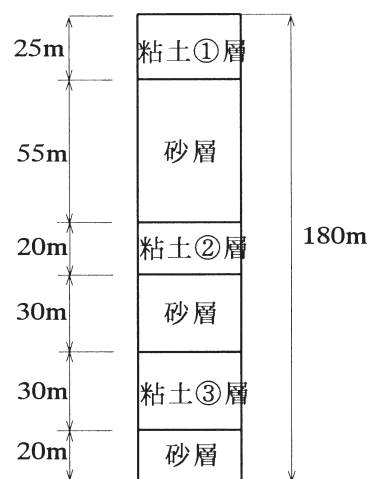
本節では、より実地盤に近い２次元多層系地盤を想定し地盤沈下の特徴について述べる。

図－６、図－７は計算で用いる多層系地盤の地層区分と境界条件である。有限要素メッシュは、深さ180m、幅は1000mで、砂層右端を排水条件とし常に静水圧状態が保たれているものとしている。層厚などは濃尾平野を参考に決定している。また、実際には粘土層①の上に砂層が10m堆積しているが、簡単のため荷重182kPaを載荷することで考慮している。材料定数を表－４に示すが、地盤内応力、比体積などは、上載荷重および自重から決

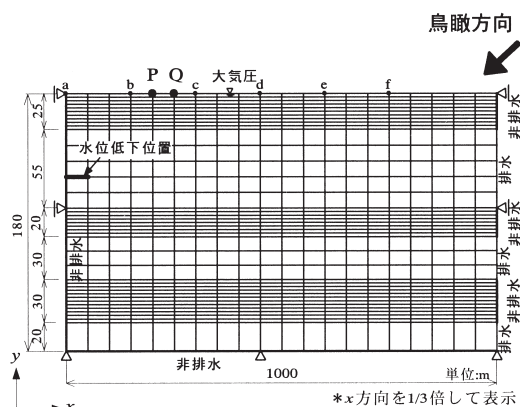
表－３ 材料定数

圧縮指数 λ	0.131
膨潤指数 κ	0.0754
限界状態数 M	1.53
$p' = 98\text{kPa}$ の時の比体積 N	1.974(2.102)
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^*	0.5
初期過圧密比 $1/R_0$	1.25
初期構造 $1/R_0^*$	0.1(1.0)
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

* ()内は、下負荷面モデル適用時



図－６ 地層区分



図－７ 境界条件

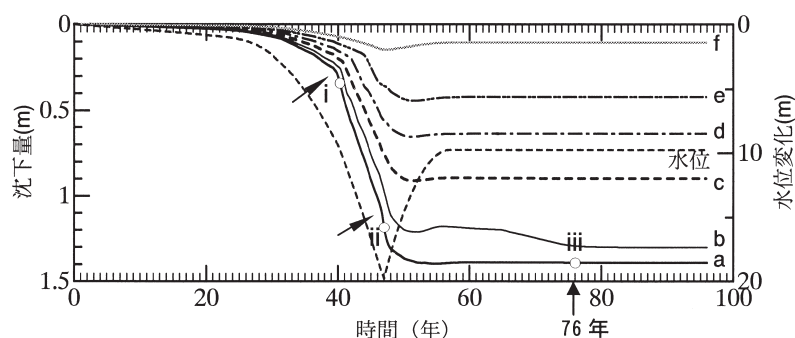
定し、深さ方向に分布している。なお、初期過圧密比と初期の構造は層内では一様としている。また、水位低下は、最終沈下量が図－３の沈下量とほぼ等しくなるように、図－３に示した揚水カーブと同様の割合で変化させ、47年間で－20m低下しその後10年間で－10mまで回復するものとした。水位を変化させる位置を図－７に示す。図－８は図－７に示している点a～点gにおける地表面沈下の様子を示したものである。水位低下箇所に近い点a

表－４ 材料定数

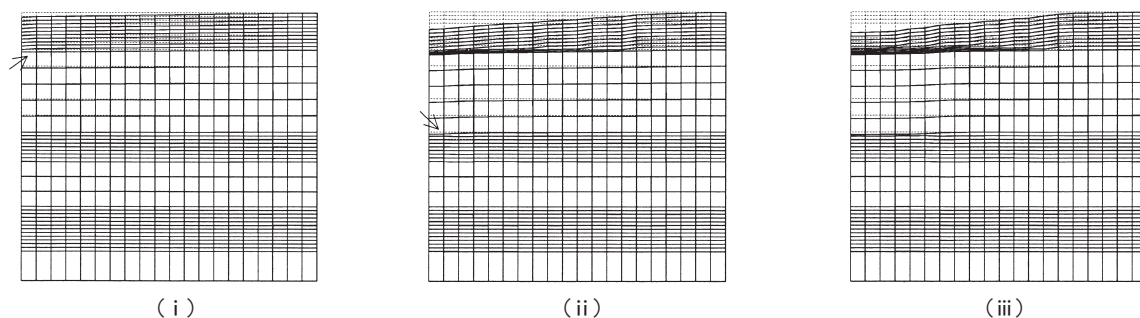
		粘性土		砂質土
	①	②	③	
圧縮指数 λ		0.131		0.042
膨潤指数 κ		0.0754		0.016
限界状態定数 M		1.53		1.24
$p' = 98\text{kPa}$ の時の比体積 N		0.974		1.968
ポアソン比 ν		0.3		0.3
正規圧密土化指数 m		10		0.04
構造劣化指数 m^*		1.5		1.8
初期過圧密比 $1/R_0$	1.35	1.3	1.14	10
初期構造 $1/R_0^*$	10.0	8.0	6.0	1.0
透水係数 $k(\text{m/sec})$	2.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}	5.0×10^{-8}	4.1×10^{-4}
土粒子の密度 $\rho_s(\text{t/m}^3)$		2.6		2.65

から次第に点eへ、沈下速度を次第に増すような「2次圧密」が起きていることがわかる。また、点aでは、水位低下開始約40年後(図－8 矢印の時点)に2次圧密沈下が発生し沈下速度を増し、47年後(図－8 矢印の時点)に再び沈下速度が増している。また、点bでは、水位回復後ほぼ沈下が収まっていたものが、水位低下開始約65年後に再び沈下が起きている。これは、多層系地盤のため1、2層目の粘土層が順次2次圧密を起こしたためである。図－9は、図－8中のi、ii、iiiの時点における変形図(変形量を10倍して作図)を示すが、2次圧密を起こした土要素(図では、厚さが薄くなっている要素)が次第に伸展していく様子からも理解できる。また、図－

10は変形図と同時期の過剰間隙水圧の分布鳥瞰図(図－7の矢印の方向から鳥瞰したもの)であり、また、そのときの軟化、硬化、除荷の様子を図－11に示す。水位低下位置に近い要素で間隙水圧の低下による塑性圧縮軟化が起き、過剰間隙水圧が湧き出し(矢印の指す高くなった所)、その後、排水が進んで構造が喪失し圧密が進む。さらなる水位低下に伴い徐々に側方に順次軟化域が進むと同時に、図－10(ii)から分かるように下層の粘土②層でも間隙水圧が湧き出し、2次圧密が起き沈下速度の増大が生じている。その後、②層でも側方に軟化域が伸展している。しかし、最後にはそれらの要素も硬化域になり、通常の排水硬化となって沈下は収束する。



図－8 沈下量～時間関係



図－9 変形図

* 変形量を10倍、x方向を1/5倍して表示

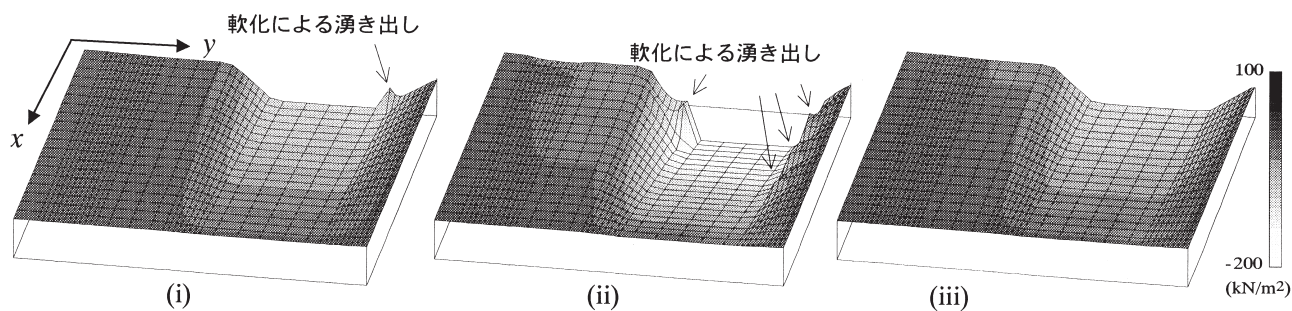


図-10 過剰間隙水圧分布

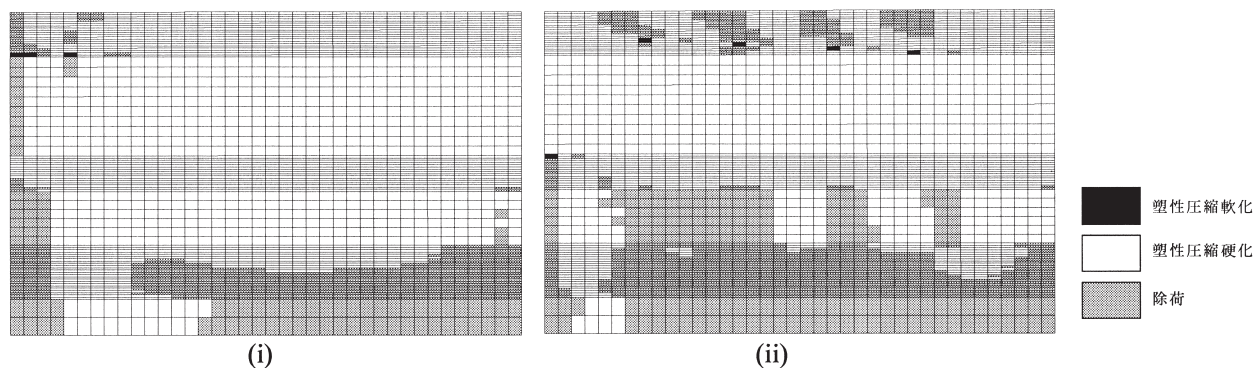


図-11 荷、硬化除、軟化の領域

3.3 「2次圧密」後の地盤

図-11からも分かるように、水位低下は土を塑性圧縮硬化させているので、地盤の圧密を促進させる地盤改良と見なすこともできる。そこで、水位低下開始76年後(図-8参照)の地盤に 60.0kN/m^2 荷重を点P、Q(図-7参照)に $0.4\text{kN/m}^2/\text{日}$ の速さで载荷し、水位低下前の地盤と沈下挙動について比較した。図-12にそれらの沈下の様子を示すが、揚水前の地盤では25cmであった沈下が地下水低下後は90cmと大きく沈下している。また、図-13に図-12中の○の時点における変形図を示す。通常、地盤に载荷した場合は、排水面に近い地表面から沈下するが、水位低下地盤では地盤内部から沈下しており、地盤を内部から不均質に弱くし、地盤改良ではないといえる。土の「構造」の程度を考慮した結果である。

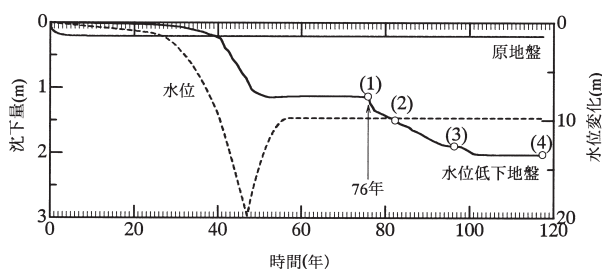


図-12 沈下量～時間関係

4. まとめ

自然堆積地盤の構造が塑性変形の進展とともに喪失していく挙動を上負荷面カムクレイモデルを用いて表現できることを示した。特に、自然堆積地盤の示す時間依存的挙動(2次圧密)については、水位低下による地盤沈下を例に取りその特徴について詳しく述べた。水位低下

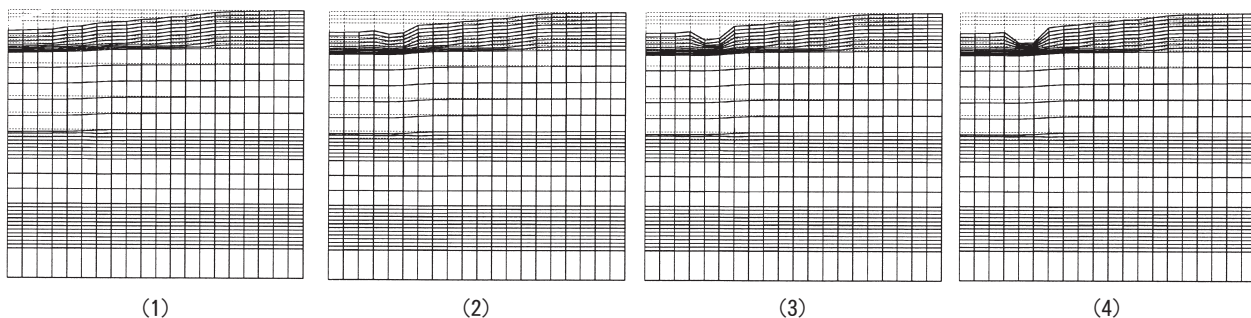


図-13 変形図

による地盤沈下は、2次元的な遅れ沈下挙動を示し、また、深さ方向あるいは側方方向にも不均質で弱い地盤を内部から作った可能性があることを示した。

最後に、論文作成に当たりご指導を頂いた名古屋大学浅岡顕教授、野田利弘助教授、金田一広助手に対し、感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) Hashiguchi, K.: Subloading surface model in unconventional plasticity, *Int. J. of Solids and Structures*, Vol.25, pp. 917-945, 1989.
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.1, pp.13-28, 1997.
- 3) 野田利弘、高稲敏浩、浅岡顕：水～土連成計算による土留めに作用する力の時間依存性挙動の解析、土木学会論文集、No.617/III-46、pp.125-138、1999.
- 4) 山田英司、高稲敏浩、水野和憲、大野雅幸、野田利弘：パイルド・ラフト基礎が設置された地盤の水～土連成弾塑性解析、土木学会論文集、No.659/III-52、pp.113-128、2000.
- 5) 野田 利弘、高稲 敏浩、高木 健次、野津 光夫：水～土連成計算を用いた砂杭拡張による砂地盤の締めメカニズムの一考察、土木学会論文集、No.679/IV-51、pp.111-122、2001.
- 6) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110, 2000.
- 7) Asaoka, A., Nakano, M., Noda, T. and Kaneda, K.: Delayed compression/consolidation of natural clay due to degradation of soil structure, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.3, pp.75-85, 2000.
- 8) 浅岡顕、中野正樹、野田利弘、金田一広、柴田匡善：構造を有する粘土の1次元遅れ沈下挙動、第34回地盤工学研究発表会、pp.81-82、1999.
- 9) 浅岡顕、中野正樹、野田利弘：「構造」を有した土の弾塑性モデルの一考え方、第33回地盤工学研究発表会、pp.627-628、1998.
- 10) 金田一広、山田英司、中野正樹、野田利弘、浅岡顕、山田正太郎、高稲敏浩：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、2001.
- 11) 植下協：濃尾平野の広域地盤沈下と地下水問題、土質工学会中部支部 第2回地盤工学シンポジウム論文集、pp93-98、1990.