

# 大規模掘削に伴う盤膨れ挙動とその抑制効果に関する水～土連成解析

名古屋大学工学研究科 国際会員 浅岡顕、野田利弘、山田英司

## 1 はじめに

軟弱地盤で開削工法により大規模な掘削が行われる場合、掘削底面の安定は重要な検討項目になる。しかし底部安定問題は壁面の安定工に比して施工上難点が多い。これは壁面なら掘削前でも土留めが可能なのに対して底面は不可能であることに起因する。また、掘削底面の安定は、ボーリング、ヒーピング、盤膨れの3項目に対して検討するの一般的である<sup>1)</sup>。本論文ではこれらの中で、軟弱粘土層下に被圧砂層がある場合に掘削底面が膨れ上がる「盤膨れ」に着目し、盤膨れの要因とその抑制工法について平面ひずみ条件下での水～土連成有限変形計算<sup>2),3)</sup>によって検討した。粘土と砂の構成式には、構造、過圧密、異方性の概念を取り入れた回転硬化概念を有する上・下負荷面修正カムクレイモデル<sup>4)</sup>を用いた。

## 2 計算条件と地盤の初期状態

盤膨れを生じる地盤として粘土層（層厚 25m）の下部に被圧した砂層（層厚 10m）がある場合を想定した（図 1）。表 1 に解析に用いた粘土層、砂層の材料定数を示す。

地盤の初期状態は、以下の手順によって決定した<sup>5)</sup>。

- ① 自重と表 1 に示す初期値を有する地盤の地表面に 30kPa の等分布荷重を一次元载荷した後に、同じ大きさの荷重を除荷し、その際に発生する過剰水圧が消散するまで放置する。
- ② その後、被圧帯水層左端（図 1 中の辺 ab）から深さ方向に一様に静水圧より 19.6kPa（水位にして 2m 分）の水圧を加えて十分に放置する。

このようにして作成した初期地盤の平均有効応力  $p'$ 、間隙水圧  $u$ 、比体積  $v$ 、過圧密比  $1/R$ 、構造の程度  $1/R^*$  および単位体積重量  $\gamma_t$  は、図 2 に示すように土被り圧に応じて深さ方向に分布する。

初期地盤を作成した後、図 1 に示すように矢板とアンカーを設置する。これらは地盤に比べて十分に堅く変形せずに地盤の変形を束縛するものとして考え、矢板の役割は「長さ不変」と「角度不変」の制約条件を、アンカーの役割は「長さ不変」の制約条件を地盤の変形場に課すことで表現している<sup>6)</sup>。束縛を実現するための束縛力として、Lagrange の未定乗数法を用いて矢板、アンカーに作用する軸力・曲げモーメントも算定できる。

掘削壁面を補強した後に土粒子と水による荷重を一緒に除去する「ドライ掘削」を想定して、図 1 の領域 cdef を瞬時に（1 秒で）掘削し、その後放置する計算を行った。計算では掘削面 cde 上に作用している初期応力を逆向きに作用させることで掘削を再現している。また、掘削面は間隙水圧が常にゼロとなる排水境界とした<sup>5)</sup>。

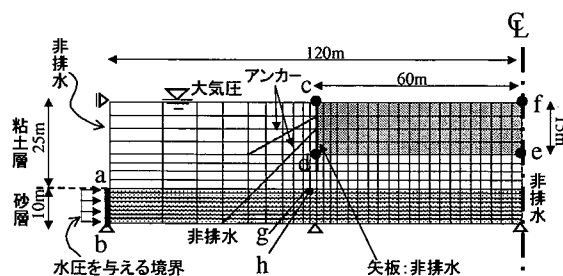


図 1 有限要素メッシュ図と境界条件

表 1 材料定数および初期値

	粘土層	砂層
<弾塑性パラメータ>		
圧縮指数 $\lambda$	0.131	0.042
膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.02	0.012
限界状態定数 M	1.4	1.08
N.C.L. の切片 N	1.96	1.98
( $p' = 98\text{kPa}$ における比体積)		
ポアソン比 $\nu$	0.333	0.3
<発展則パラメータ>		
構造劣化指数 a	0.29	1.39
構造劣化指数 b	1.0	1.0
構造劣化指数 c	1.0	1.0
正規圧密土化指数 m	0.71	0.04
回転硬化指数 $b_r$	$7.1 \times 10^{-5}$	27.8
回転硬化限界定数 $m_b$	1.0	0.5
<初期値>		
初期構造 $1/R_0^*$	5.0	5.0
初期過圧密比 $1/R_0$	1.0	7.5
初期側圧係数 $K_0$	0.7	0.7
初期異方性 $\zeta_0$	0.375	0.375
	$(= \sqrt{3/2} \ \beta_0\ )$	
透水係数 $k(\text{cm}/\text{sec})$	$3.7 \times 10^{-8}$	$4.09 \times 10^{-2}$
土粒子の密度 $\rho_s (\text{t}/\text{m}^3)$	2.6	2.65

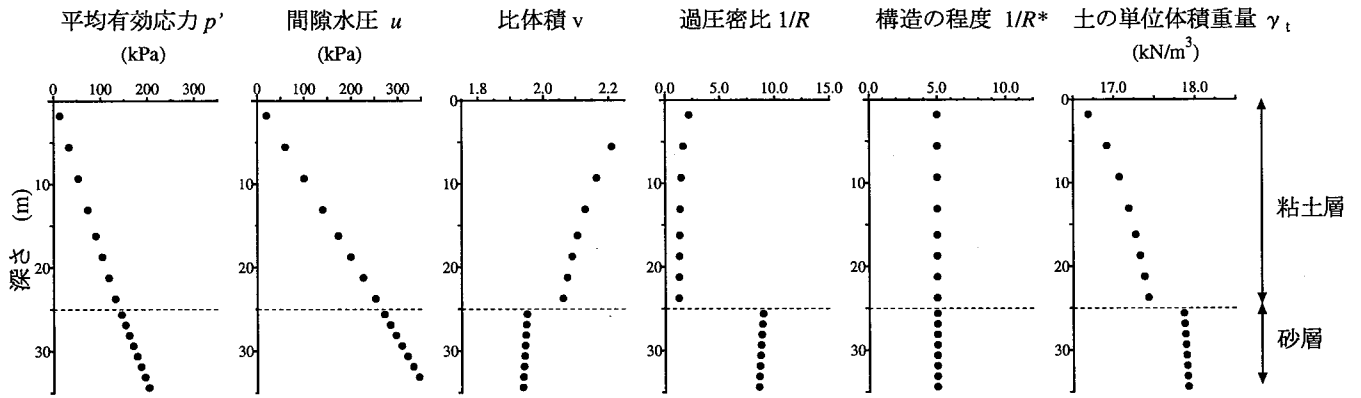


図2 地盤の初期状態

### 3 大規模掘削に伴う地盤の変形挙動

ドライ掘削後における掘削底部中央部（図1中のe点）での鉛直変位～時間関係を図3に示す（鉛直変位は上向きを正としている）。この図から、掘削底部中央部では掘削直後に浮き上がるのではなく、時間が経過するにつれて徐々に浮き上がっていく様子が分かる。図4は掘削後の地盤の変形挙動を示す。掘削直後は矢板が前面にせり出し、矢板付近の掘削底部が盛り上がっている。その後、時間の経過とともに徐々に掘削底部中央部が浮き上がっている。

図5に掘削後の間隙水圧分布の推移を示す。掘削により掘削底部の水圧は減少して負の過剰水圧が発生する。その後、非掘削部と掘削底部間の水頭差によって掘削底部へと間隙水が流入し、掘削底部の被圧層の間隙水圧が非掘削部と等しくなるにつれて徐々に掘削底面が浮き上がった。すなわち、非掘削部と掘削底部との間の水頭差からくる浸透力が、粘土地盤の透水性の低さゆえに揚圧力となって掘削部の粘土層に上向きに作用し、盤膨れが生じた。

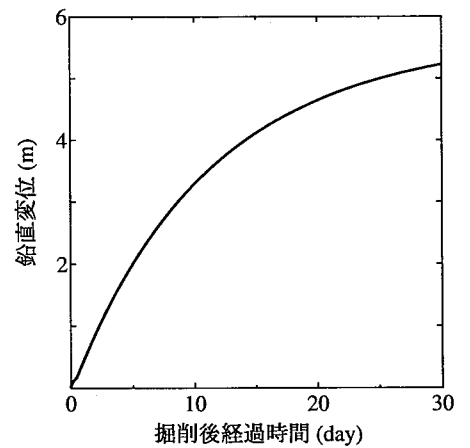


図3 鉛直変位～時間関係

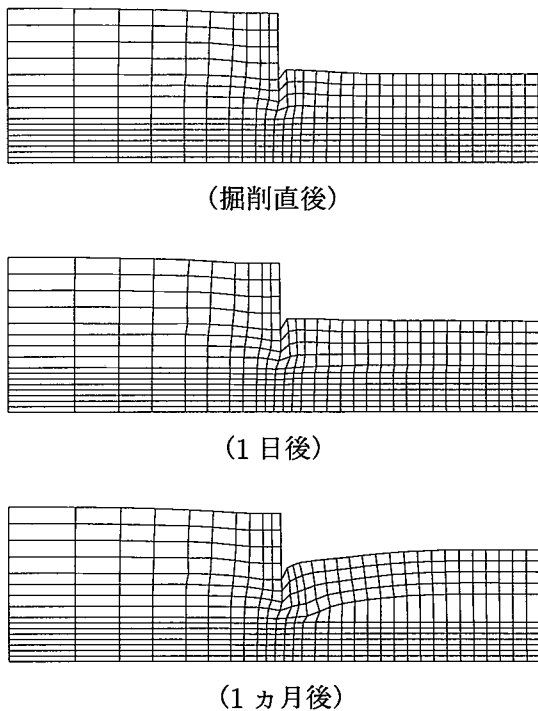


図4 掘削後の地盤の変形

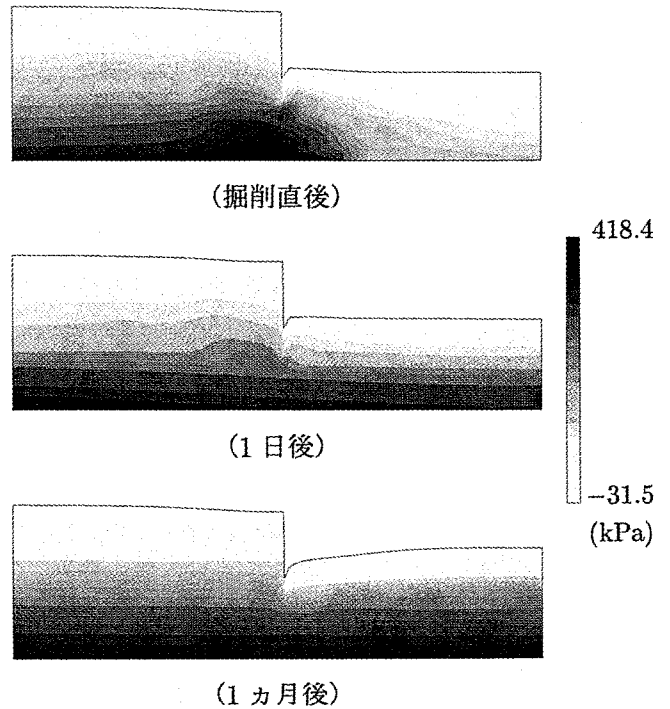


図5 掘削後の間隙水圧分布の推移

#### 4 盤膨れ抑制工法の効果の検討

はじめに、(1) 掘削深さに着目し、掘削深さの違いが盤膨れ挙動に及ぼす影響を調べる。3でも示したように、盤膨れの要因は、非掘削部と掘削底部との間に生じる水頭差なので、盤膨れを抑制するためにはこの水頭差を小さくする必要がある。そこで次に、盤膨れの抑制工法として、「ドライ掘削」に対して、(2) 井戸揚水による地下水位低下工法、(3) 矢板による遮水工法、の2つの工法に着目し、さらに、(4) 「水中掘削」工法にも着目して、各工法の盤膨れ抑制効果を水～土連成計算によって検討する。以下の計算では、掘削底部中央部にあたる図1中のe点での鉛直変位～時間関係を用いて、掘削後の盤膨れ挙動を比較する。

##### (1) 掘削深さの違いによる影響

掘削深さを3.75m, 7.5m, 11.25m, 15m (3の計算と同じ掘削深さ)と変化させたときの掘削後の掘削底部中央部での鉛直変位～時間関係を図6に示す。掘削深さが3.75m, 7.5m, 11.25mのときは、鉛直変位は数cmから20cm程度のオーダーに落ち着いているが、掘削深さが15mになると急激に浮き上がる。本計算での境界条件下では11.25mと15mの間に掘削底部が盤膨れするか否かの敷居線が存在する。

##### (2) 井戸揚水による地下水位低下工法

掘削前の初期地盤で、矢板の非掘削側で砂質地盤までの深さの井戸を設置(図1中の辺gh)し、静水圧から+0.6m, -2.6m, -5.5mの水位まで揚水して十分な時間放置する。その後15mの深さまで掘削した時の図1点eでの鉛直変位～時間関係を図7に示す。静水圧から-2.6m以下まで水位を低下させると盤膨れは抑制できる。

##### (3) 矢板による遮水工法

次に矢板の延伸による遮水工法について検討する。図8に矢板の根入れ長を2.5m, 7.5m, 18.75m, 20mと変化させた時の図1中の点eでの鉛直変位～時間関係を示す。矢板の根入れ長を不透水層まで延伸(20m)すれば、掘削底部側に供給される水が遮断され盤膨れは抑制できた。しかし、遮水が不完全だった場合(18.75m)は、矢板をほとんど入れない場合(2.5m)とほぼ同じように盤膨れが生じる。

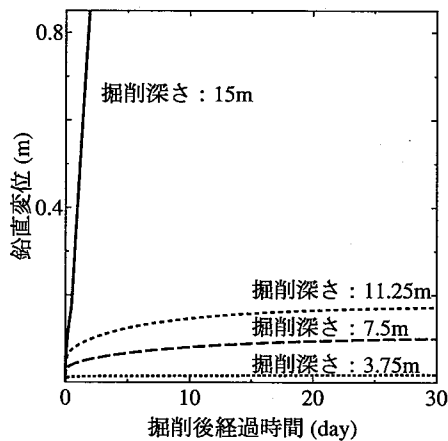


図6 掘削深さによる比較

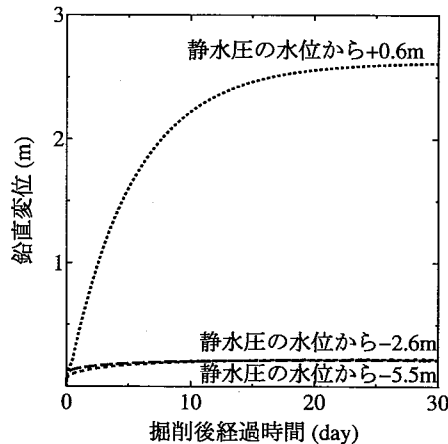


図7 地下水位低下の効果

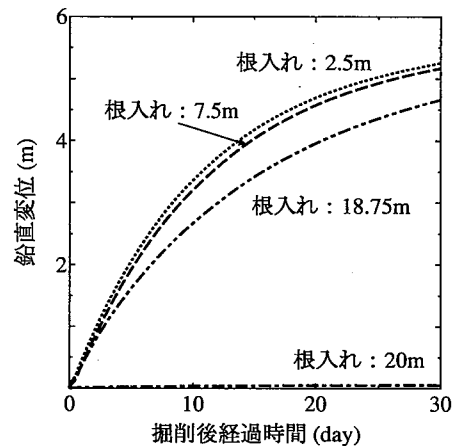


図8 根入れ深さの効果

##### (4) 水中掘削工法による盤膨れの抑制

ここまでは土粒子と水による荷重を一緒に除去する「ドライ掘削」に対して盤膨れ抑制工法を施した場合について検討してきた。そこで次に、掘削時の水位は地表面に一致させたまま土粒子分のみの荷重を除去する「水中掘削」工法による盤膨れ抑制の効果を調べる。

図1点eでの鉛直変位～時間関係を図9に示す。水中掘削時の鉛直変位はほぼ数cmのオーダーで、ドライ掘削による他の工法に比べ盤膨れ抑制の効果が大きいことが分かる。図10に示す水中掘削掘削後の地盤の変形挙動を見ると、掘削直後から1年経過してもほとんど変形が生じていない。図4との比較からこの境界条件において水中掘削工法が掘削底部のみならず、壁面にも安定効果を発揮していることが分かる。

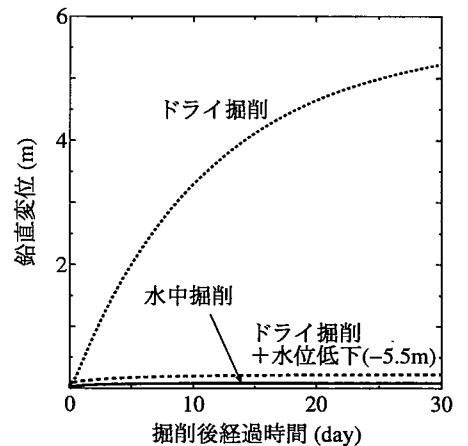


図9 諸条件下での比較

図11にはそれぞれ(a)ドライ掘削時と(b)水中掘削時での矢板に作用する曲げモーメント分布の比較を示す。最大曲げモーメントは、ドライ掘削では約 $2\text{MN}\cdot\text{m}/\text{m}$ に対し、水中掘削工法では掘削完了と同時にモーメントの増加は止まり、ドライ掘削時の半分以下に抑えることができる。

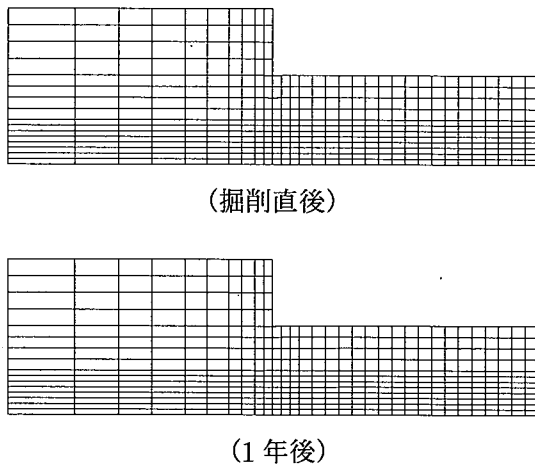


図10 水中掘削後の地盤の変形

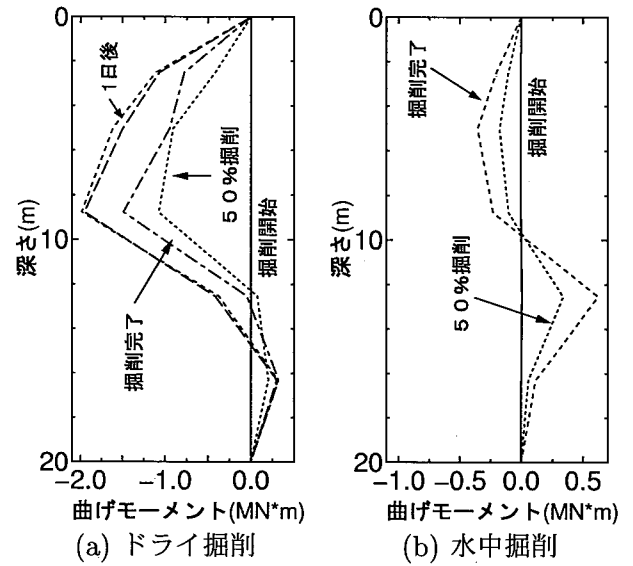


図11 矢板に作用する曲げモーメント

## 5 おわりに

掘削時において、荷重の除去によって生じる非掘削部と掘削部との水頭差からくる浸透力が、粘土地盤の不透水性ゆえに揚圧力となって掘削部の粘土層に上向きに作用し、粘土層が盤膨れする様子を水～土連成計算によって示した。次に、盤膨れを抑制工法として、井戸揚水による地下水位低下、土留め壁による遮水工法、水中掘削工法について検討し、① 井戸からの揚水により掘削部における地下水位をある高さまで低下させると盤膨れは抑制できること、② 矢板の根入れを遮水層まで伸ばせば、盤膨れは抑制できること、③ 水中掘削工法は底盤の安定化効果のみならず壁面の安定化にも効果があること、を示した。各工法を比較した結果、水中掘削工法が盤膨れ対策として最も有効であることが分かった。

## 参考文献

- 1) 中村兵次, 増野正男, 大森壮一郎 (1999): 掘削地盤安定の諸検討式に対する考察, 基礎工, Vo.27, No.8, pp.5-9.
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (1994): Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, S & F, Vol.34, No.1, pp.91-106.
- 3) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (1997): Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, S & F, Vol.37, No.1, pp.13-28.
- 4) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S & F (投稿中).
- 5) 野田利弘, 高稲敏浩, 浅岡頭 (1999): 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.
- 6) Asaoka, A., Noda, T. and Kaneda, K. (1998): Displacement/traction boundary conditions represented by constraint conditions on velocity field of soil, S & F, Vol.38, No.4, pp.173-181.