

3 次元 2 層砂地盤における泥水掘削溝の安定性

中央大学大学院	学生会員	○岡田 亮平
中央大学	学生会員	安藤 健介
中央大学	学生会員	橋本 拓樹
中央大学	正会員	齋藤 邦夫
中央大学	正会員	石井 武司
中央大学	正会員	金澤 伸一

1．はじめに

既往の泥水掘削溝の安定性に関する研究は、その多くが一様砂地盤のような単純地盤を対象としていた。しかしながら、現実の地盤は層状に堆積しており、砂地盤であっても地盤性状の異なる多層構造になっている。このため、各層の厚さや性状の違いが掘削時の安定性に影響を及ぼすことが考えられる。そこで、下層が密で上層が緩い二層砂地盤を用いた 3 次元模型実験とせん断強度低減 FEM(SSR-FEM)解析を行い、層厚比の変化が掘削溝の安定性に与える影響の把握を試みた。

2．研究方法

2 層砂地盤の安定機構に関する要因は溝形状や地盤の物性、層構造などが考えられる、そこで本研究では層構造に着目し、数値解析によって上下層の層厚比および内部摩擦角差が安定性に与える影響を調べた上で、模型実験を行い詳細な挙動を確認した。数値解析にはせん断強度低減有限要素法(SSR-FEM)を用いた。この手法は弾塑性 FEM にせん断強度低減法を組み込み、すべり面を仮定することなく、すべり面と系全体の安全率が算定できる³⁾⁴⁾。模型実験では、掘削溝と同寸のビニール袋を用いて模した掘削溝を再現した。また、二層地盤の幾何学的特性を表すため、上層地盤と下層地盤の層厚比 β を式(1)のように定義した。

$$\text{層厚比 } \beta = \frac{\text{下層地盤の厚さ}}{\text{溝深さ}(=\text{上層地盤の厚さ}+\text{下層地盤の厚さ})} \quad \dots(1)$$

3．模型実験

3.1 模型地盤材料

本研究における模型地盤材料にはクロマイトサンドを用いる。このクロマイトサンドは酸化クロム鉄(CrO_2)を 46.5%以上含む材料であり、土粒子密度は豊浦砂と比べ約 1.7 倍の $\rho_s = 4.531\text{g/cm}^3$ であることから、大きな自重効果を発揮できる。¹⁾

3.2 実験方法

3 次元模型実験システムの概要を図-1 に示す。模型地盤の作製手順は次の通りである。まずビニールの泥膜を土槽内に設置し地盤を作製した。その際、模型地盤表面部での崩壊を防ぐために掘削溝と地盤の間にガイドウォールを設け地盤の溝側への変位を抑制した。内部摩擦角の異なる二層地盤はクロマイトサンドをホッパーから落下させる高さならびに流量を調整して作成した。地盤の崩壊挙動を把握するため、図-1 に設置した水圧計、変位計で掘削溝内の安定液水位、地盤内水位、地表面沈下量を観測した。地盤の崩壊形状については観測窓に貼り付けた

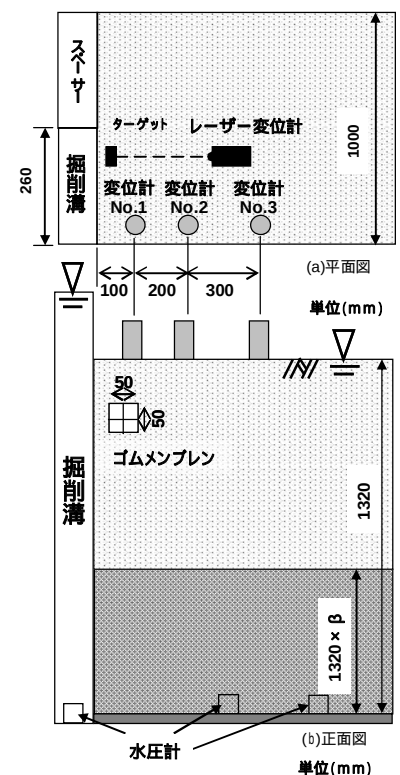


図-1 実験装置概要

キーワード 泥水掘削溝 SSR-FEM

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 都市環境学科 地盤環境研究室

03-3817-1812

50mm×50mm のゴムメンブレンに十字線を書き込み，変位ベクトル観測用マーカーとして使用した．
なお，メンブレンにはグリースを塗布してガラス面に貼り付け，模型地盤との摩擦を極力軽減するように努めた．模型地盤作製後，一定の水頭差を保ちながら底面から水を浸透させ，地盤を飽和させた．その後，安定液を一定流量で排出させて地盤を崩壊させた²⁾．より詳細な実験方法は既往の文献を参照されたい．

3.3 実験ケース

表-1 は，後述の数値解析結果よりすべり線形状が特徴的だった3ケースから選定した模型地盤の層厚比 β と工学的性質を示している．飽和単位体積重量は，模型土槽に投入した試料重量と体積から求め，これより相対密度，内部摩擦角，ダイレイタンシー角を算出した¹⁾．

表-1 実験ケース

実験ケース	層	層厚比 β	層厚 (mm)	相対密度 Dr(%)	内部摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	ダイレイタンシー角 $\psi(^{\circ})$	弾性係数 E(kN/m ²)
No.1	単層	0	1100	55.2	31.5	5.79	1600
No.2	上	0.25	990	56.1	31.6	6.01	1600
	下		330	99.1	37.6	20.8	5000
No.3	上	0.5	660	61.2	32.1	7.34	1600
	下		660	98.9	37.6	20.8	5000

4. 数値解析結果

4.1 解析モデルと事前解析の実験ケース

解析対象は上記の模型地盤とし，図-2 は模型地盤を模した解析モデルである．解析領域は，X 軸方向に地盤崩壊に影響がでない程度の値として掘削長さの2倍，Y 方向は掘削長さ，Z 軸方向は掘削深さとした．メッシュ分割は，X 軸方向は溝壁近傍から少しずつ間隔を広げて10分割，Y 軸方向に10分割，Z 軸方向に10分割とした．また，ガイドウォールが接する部分の地盤には粘着力を与えて変位を拘束した．解析に用いた地盤ならびに安定液の物性を表-2 に実験ケースを表-3 に示す．

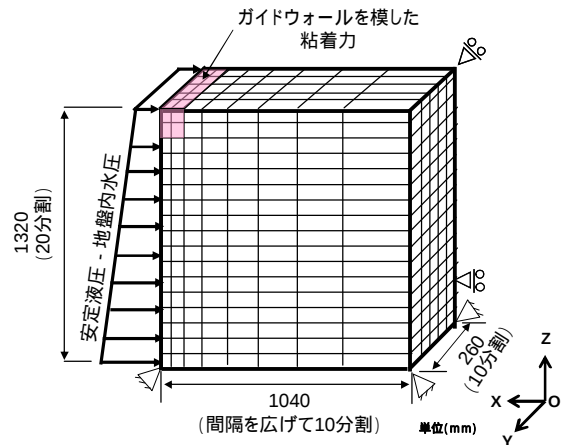


図-2 解析モデル

表 - 2 数値実験条件

内部摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	ダイレイタンシー角 $\psi(^{\circ})$	弾性係数 E(kN/m ²)	ポアソン比
30	2.37	1300	0.3
33	9.3	1600	
35	14.3	3700	
37	19.5	5000	

表-3 実験ケース

		series1	series2	series3
内部摩擦角 $\phi'(^{\circ})$	上層地盤	30	30	30
	下層地盤	33	35	37
内部摩擦角差 $\phi'(^{\circ})$		3	5	7
層厚比 β		0, 0.25, 0.5, 0.75, 1		
安定液比重		1.09		

図-3 は数値実験から得られた各内部摩擦角差 ϕ' における層厚比および $F_s = 1.00$ での水位差のグラフである．すべての内部摩擦角差において層厚比が増加し下層地盤の割合が大きくなるにしたがって $\beta = 1$ の水位差に漸近する．また， $\phi' = 5^{\circ}$ および 7° は $\beta > 0.5$ から水位差の低下量が小さい．図-4 は $\beta = 0 \sim 1$ でのひずみ増分図であり，ひずみ増分の大きい箇所から土塊のすべり線が推測できる．まず，全ての ϕ' において $\beta = 0$ ，0.75，1 では底部からすべり線が発生している．同様に， $\phi' = 3^{\circ}$ における $\beta = 0.5$ も底部から発生するすべり線が確認できる．しかしながら， $\beta = 0.25$ における $\phi' = 5^{\circ}$ ， 7° は層境界からすべり線が発生しており $\phi' = 3^{\circ}$ は底部からと層境界からの2箇所からすべり線が発生していることが確認できる．また， $\beta = 0.5$ における， $\phi' = 7^{\circ}$ は層境界から発生するすべり線， $\phi' = 5^{\circ}$ は層境界から発生するものと底

部に向う2箇所のすべり線が発生している．この層厚比による崩壊形状の変化が， $\phi'=5^\circ$ ， 7° の水位差低下量が $\beta > 0.5$ から減少することに影響していると考えられる．

5 模型実験結果と事後解析結果

上記の内部摩擦角差と層厚比の違いがすべり線の発生位置および地盤の安定性に与える影響を詳細に検証するために模型実験を行った．実験ケースは上記の数値実験において，すべり線が層境界から発生した $\phi'=5^\circ$ で $\beta=0.25$ のとき，すべり線が層境界から発生するものと底部に向う2箇所発生した $\phi'=5^\circ$ で $\beta=0.5$ のとき，さらに $\phi'=30^\circ$ の単層地盤の3ケースである．図-5は $\beta=0.5$ のときの安定液水位と地盤内水位の水位差 H および地表面沈下の時間変化である．開始直後 H は時間に対し一定の速さで低下し，地表面に設置した水平変位計が動き出す，その時の水位差 $H=250\text{mm}$ を動き出しの水位差とした．その後 $H < 182\text{mm}$ になると H/t は線形性を失う．同時に，地表面沈下が発生しているのが認められる．これは，地盤が降伏し溝壁側に変位を始め，安定液を押し出しているためである．そこで $H=182\text{mm}$ を降伏点と定義した．その後，水位差は最低値 $H=83\text{mm}$ を示した後，上昇を始める．これは地盤が塑性崩壊を始めし，地盤が溝壁側にはらみ出す量と安定液排出量が一致することを意味している．この $H=83\text{mm}$ となる点を崩壊点と定義する．図-6は上記で定義した水位差に加え，実験条件で

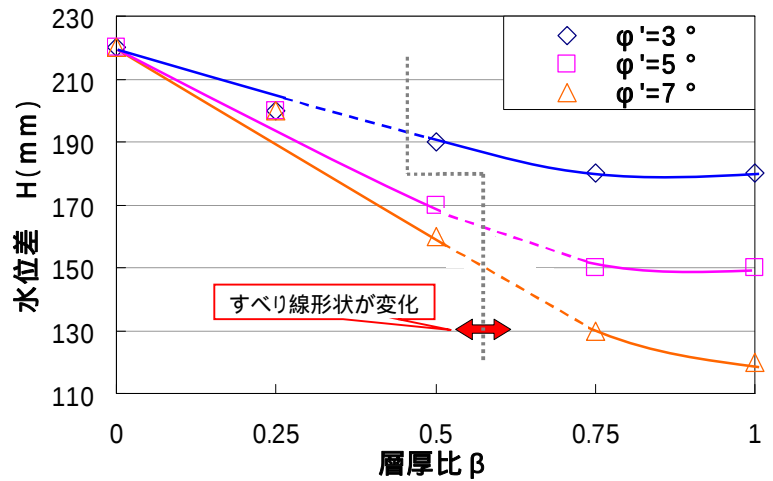


図-3 層厚比と $F_s=1.00$ での水位差関係

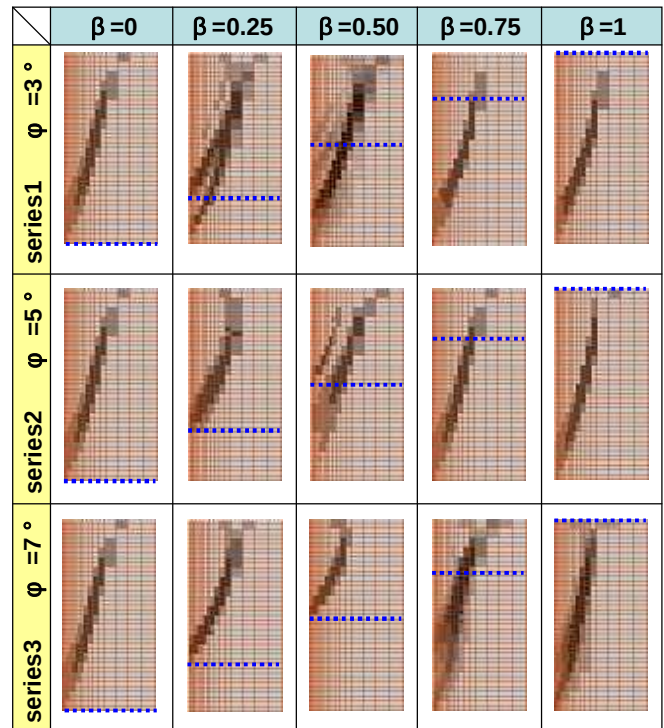


図-4 SSR-FEM から得たひずみ増分図

SSR-FEM 解析を行い安全率 $F_s=1.00$ となる水位差，目標とした $\phi'=5^\circ$ の条件で SSR-FEM 解析を行い安全率 $F_s=1.00$ となる水位差を上層地盤層厚比 β ごとに示したグラフである．まず，目標とした $\phi'=5^\circ$ の SSR-FEM と実験条件 SSR-FEM の水位差傾向は一致していることから，地盤作製時における ϕ' の誤差は許容できるものとする．また降伏点と実験条件 SSR-FEM も同様に一致していることからクロマイト投入量から推測した地盤条件の精度の高さも確認できる．層厚比 β の違いに着目すると，動き出しの水位差は $\beta=0 \sim 0.25$ にかけて僅かに増加し， β

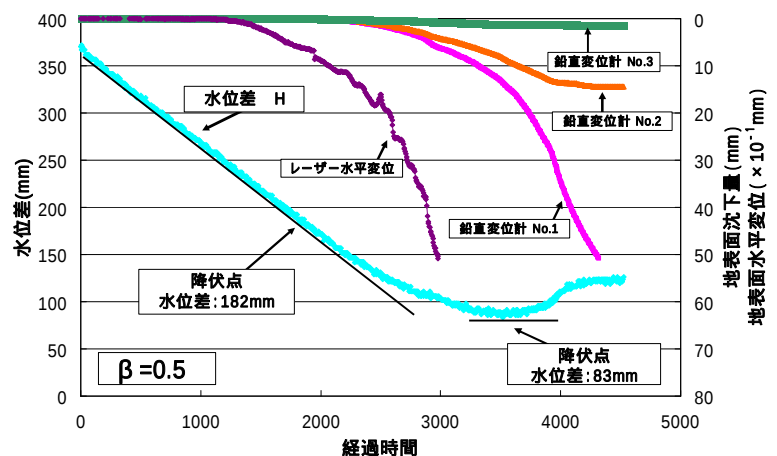


図-5 経過時間と水位差および地表面沈下量関係 ($\beta=0.5$)

$\beta=0.25 \sim 0.5$ にかけて大きく低下している．降伏点の水位差は $\beta=0 \sim 0.25$ にかけて僅かに減少し， $\beta=0.25 \sim 0.5$ にかけては動き出しと同様に大きく低下している．しかしながら，崩壊点は $\beta=0 \sim 0.25$ にかけて大きく減少している．これは崩壊時のすべり土塊形状が関係していると考えられる．図-7 は模型実験から得た地盤崩壊後の変位ベクトル図である． $\beta=0.25, 0.5$ は $\beta=0$ に比べすべり土塊が小さいことがわかる．そのため $\beta=0.25, 0.5$ は安定液を押し出す面積も減少し崩壊点は他の水位差と異なる傾向を示したと考察できる．また， $\beta=0.25$ の変位ベクトル図は数値実験のひずみ増分図と同様に上層地盤から発生することが確認できた．しかし，変位ベクトル図のすべり線の幅は，ひずみ増分図と異なり大きく広がっている．そこで，変位ベクトル図の変位量の絶対値から算出した変位量分布と増分図を比較すると概ね一致した．つまり，地盤崩壊時にすべり土塊に追従して周辺地盤も変位したと推測される． $\beta=0.5$ の変位ベクトル図から求めたすべり線は，数値実験から得たひずみ増分図の層境界を通過するひずみ増分の小さいすべり線とよく対応している．さらに変位量分布においては層境界付近から大きく変位し始めていることから，同様に地盤内ではひずみ増分図と同様に二つのすべりが発生したと考えられる．これにより層厚比の違いがすべり線発生位置に影響を与えることが確認できた．

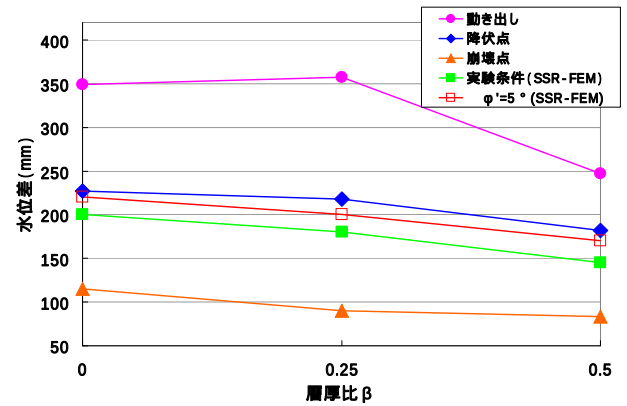


図-6 水位差関係

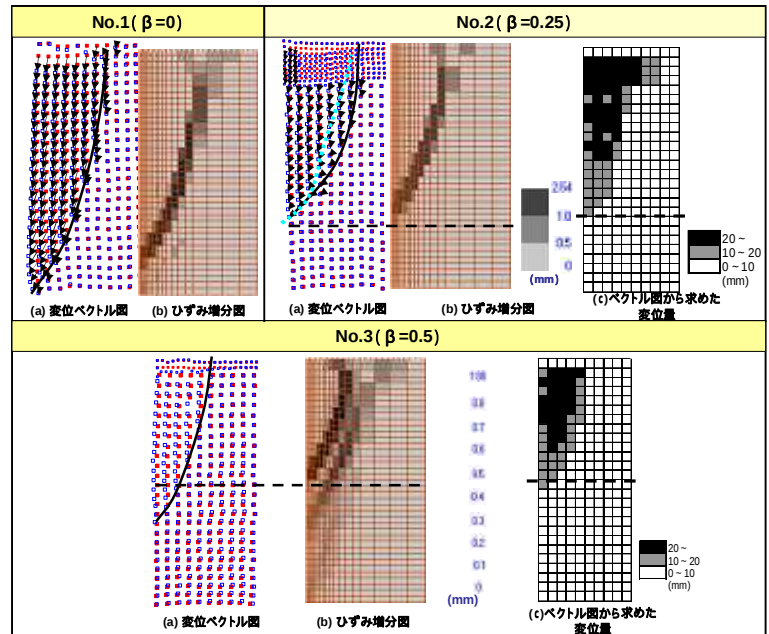


図-7 各実験条件でのすべり土塊形状

また，岡田ら⁵⁾が行った2次元模型実験では $\beta < 0.15$ からすべり線の発生位置が変化するのにに対して，今回の3次元では $\beta < 0.5$ から変化することがわかった．

6. まとめ

今回までの数値実験から以下の知見を得た．

- (1) 層厚比は土塊の崩壊形状に影響を与える．
- (2) ひずみ増分図から推測される，すべり線の発生位置は2層地盤の安定性に影響を与える．
また，模型実験から以下の知見を得た．
- (3) 数値実験結果から得た $F_s=1$ の水位差と降伏点水位差の変化傾向は良い対応を示した．
- (4) 変位ベクトル図から推測されたすべり線は，数値実験で得たひずみ増分図と概ね一致した．
- (5) 3次元の掘削溝は2次元の掘削溝に比べ，すべり線発生位置が変化する β が大きい．

今後の課題として $\beta=0.75$ 以上の模型実験を行い数値実験結果と比較していく必要がある．

参考文献: 1) 齋藤正幸: クロマイトサンドを用いた泥水掘削溝模型実験の有用性, 第36回土木学会関東支部技術研究発表会(2008)

2) 渡辺曉大: 二層の砂地盤における泥水掘削溝壁の崩壊挙動, 第37回土木学会関東支部技術研究発表会(2009) 3) 石井武司:

三次元弾塑性FEMによる泥水掘削溝壁の安定性評価に関する研究, 群馬大学学位論文(2004) 4) 橋本拓樹: 2層砂地盤における

泥掘削溝の安定性に関する数値実験, 第38回土木学会関東支部技術研究発表会(2010) 5) 岡田亮平: 二層砂地盤における泥

水掘削溝の層厚比が安定性に与える影響について, 第65回年次学術講演会(2010)