

泥水掘削溝壁の極限平衡法と 3 次元弾塑性 FEM による崩壊形状比較

中央大学 学生会員 ○古賀 裕一

中央大学 学生会員 安佐伊 弘貴

中央大学研究開発機構 正会員 石井 武司

中央大学 正会員 斎藤 邦夫

1. はじめに

連続地中壁の構築では、泥水圧を利用した泥水掘削工法が用いられる。同工法における溝壁の安定性評価には FEM による方法もあるが、極限平衡法 (LEM) を適応するのが一般的である。代表的な LEM 法として 4 つの方法¹⁾がある。いずれも予めすべり形状を仮定する点が共通している。しかしながら、溝壁の崩壊により周辺地盤に生じたすべり形状を捉え、これと仮定した形状を比較した例はほとんど無い。

そこで本研究では、一様な密度に調整した砂地盤を対象に泥水掘削模型実験を実施し、泥水の降下に伴う地盤挙動と、実験終了後に地盤を切り出して地盤の崩壊形状を観測した。

2. 模型実験について

2.1 試料

模型実験の地盤材料には通常の砂より約 1.7 倍の比重を持つクロマイトサンドを用いて、自重効果を高めた。クロマイトサンドとは鋳物の剥離剤の一つで、酸化クロム鉄(FeCr_2O_4)を 46.5%以上含む材料である。そのクロマイトサンドの物性値を図-1 に示す。また、地盤内部の崩壊挙動を把握するために、マーカーとしてジルコンサンドを用いた。ジルコンサンドは比重および粒径がクロマイトサンドとよく似た物性値を有する特殊砂である。

2.2 模型実験方法

図-1 のように本実験では泥水掘削溝の対称性から 1/4 モデルを採用し、崩壊実験を行った。模型地盤概要を図-2 に、実験ケースを表-2 に示す。模型地盤の作成手順を述べる。まず泥膜を模した掘削溝と同寸のビニール袋を土槽内に設置し、地盤を作成する。掘削溝と地盤との間に、ガイドウォールを地盤表面部の崩壊を防ぐために設け、地盤の溝側への変位を制御した。ガイドウォールは十分な剛性を必要とするため、厚さ 3mm のアルミを溶接したものを使用した。すべり面が目視できるよう、観測窓に十字線を書き込んだ 50mm×50mm のゴムメンブレンを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軽減するようにした。土槽底部に水圧計を設置後、クロマイトサンドの落下高さ、流量が一定となるように調整したホッパーより相対密度約 75%(通水

表-1 試料物性値

使用材料	クロマイトサンド
土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	4.488
平均粒径 $D_{50}(\text{mm})$	0.172
飽和単位体積重量 $\gamma_{\text{sat}}(\text{kN}/\text{m}^3)$	31.7

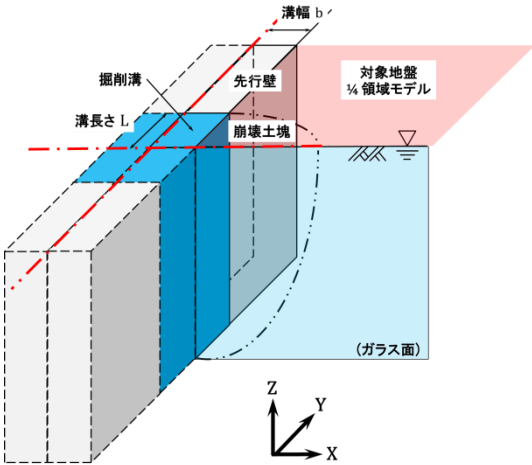


図-1 対象地盤

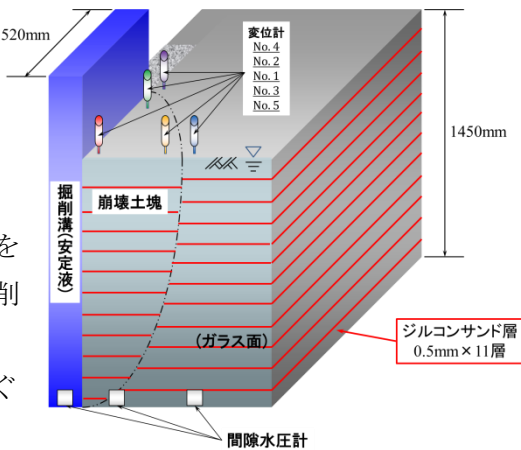


図-2 模型実験概要図

表-2 実験ケース

	掘削長 $L/2(\text{mm})$	溝幅 $b(\text{mm})$	初期水位差 $\angle H(\text{mm})$	地盤内水位 $GL(\text{mm})$	先行壁
No.1	520	80	675	1450	有
No.2	520	80	675	1450	有
No.3	520	80	675	1450	無

後 80%程度)になるようにクロマイトサンドを空中落下させた。地盤作成において、地盤内部を計測するマーカーとして層厚 0.5mm 程度のジルコンサンドを地盤底面部の $Z=0\text{mm}$ の地点から 70mm の地点に 1 層敷き、その後に $Z=140\text{mm}$ 地点から 140mm おきに 10 層を敷いて、計 11 層のジルコンサンド層を設けた。模型地盤完成後、図-2 に示すように水圧計および変位計を設置した。次に、一定の水頭差を保ちながら水を浸透させ、地盤を飽和させた。その後、泥水を一定流量で排水させて地盤を崩壊させた。

3. 実験結果及び計測

3.1 安定液水位と時間の関係

図-3 に実験 No.1 における安定液と地盤内の水位差および地表面沈下の時間変化を示す。t=500s 付近でそれまで一定（直線）であった水位差の時間に変化がみられ、この直線性を失った点を降伏点とした。その後、水位差は t=2450s 付近で崩壊点となる水位差の最低値に至り、その後に水位は上昇した。よって、降伏点および崩壊点の水位差はそれぞれ 437mm と 205mm である。また同図において溝壁に近い点の変位が大きいことが分かる。一方、No.3 と No.5 の変位計はその変位量から崩壊面の外側であろうことが予測される。

3.2 計測方法

実験後、模型地盤を切り出し、ジルコンサンド層におけるすべり形状を計測した。計測方法は、図-4 のように θ を 5° ずつ変化させ、 r を計測することにより (x,y)座標を求めた。z 座標はナイロン製の糸に重りをつけ、糸がたわんでいないことを確認しながら糸の長さから計測した。

3.3 掘削時の地盤条件

計測は降伏点を過ぎ、完全に崩壊している状態の地盤を対象とした。また地盤を切り出す際、不必要な崩壊を防ぐよう十分留意した。

3.4 崩壊形状

3.4.1 x-z 断面

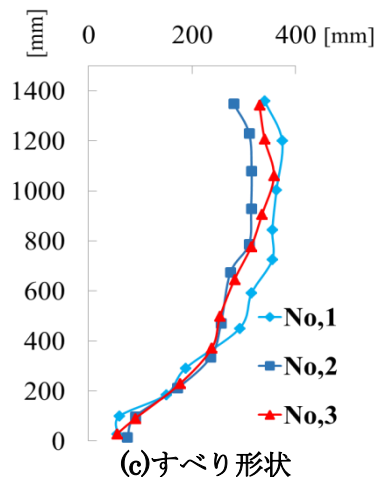
図-5(a)はガラス面 (x-y 断面) のメンブレンから観察されるすべり面形状である。図-5(b)は、メンブレンの実験開始前と開始後を直線で結んだ変位ベクトル図である。図-5(c)は実験後に実際に計測した地盤内部の x-z 断面におけるすべり面形状である。3 回の実験で得られるすべり形状はほぼ同じである。



(a)観測窓でのすべり形状



(b)変位ベクトル



(c)すべり形状

図-5 実験終了後における x-z 断面のすべり面

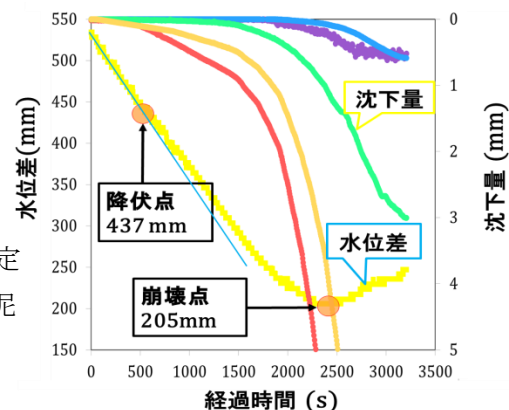


図-3 安定液水位差と経過時間の関係

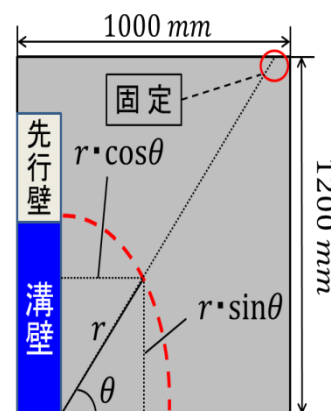


図-4 座標位置の計測方法

3.4.2 x-y 断面

図-6(a),(b)および(c)に実験 No. 1～3 で得られた各層 (x-y 断面) のすべり面に位置を示す。どのケースにおいても 1 層目より 2 層目、そして 3 層目の崩壊形状が大きい。掘削深度が深くなるにつれて崩壊形状が小さくなる。図-7(a),(b)および(c)は、実験 No.1 の 1 層目($Z=1400\text{mm}$)、4 層目($Z=980\text{mm}$)、および 8 層目($Z=420\text{mm}$)を同じ位置から撮影したものである。図-8(a),(b),および(c)は、図-7 のそれぞれの面で計測されたすべり面の位置である。いずれの面においても 3 つの実験結果のすべり面形状はほぼ同じである。 $Z=1400\text{mm}, 980\text{mm}, 420\text{mm}$ 地点でのそれぞれの実験ケースにおける x-y 断面における形状比較図である。

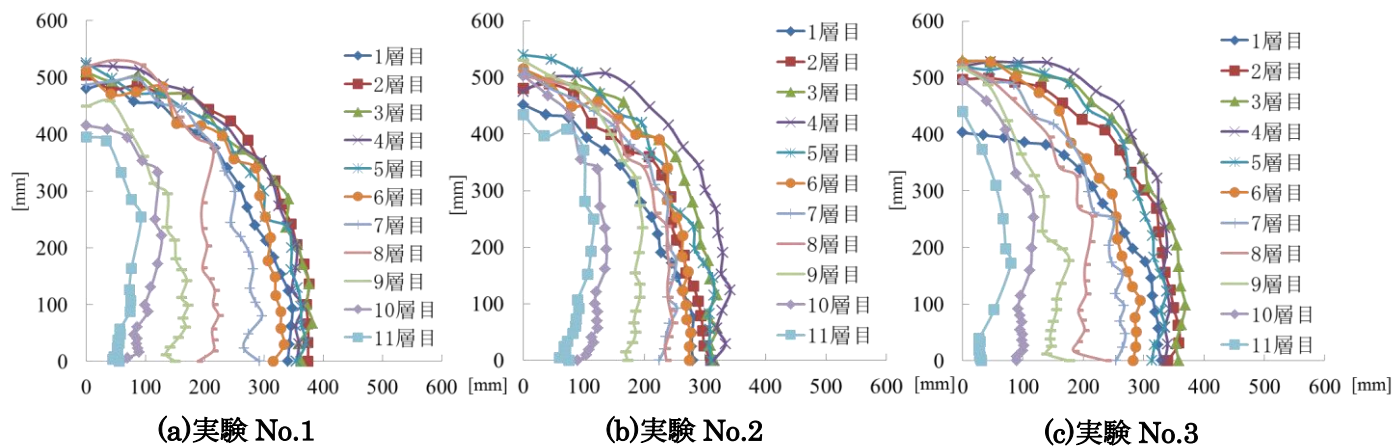
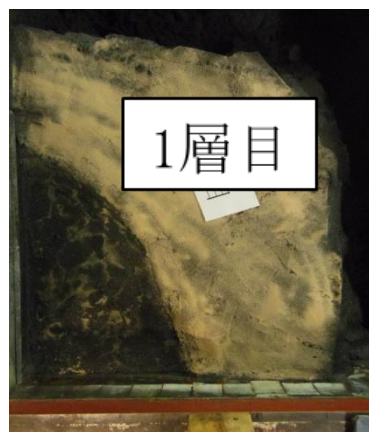


図-6 各実験ケースの深さに伴う断面形状の変化



(a) $Z=1400\text{mm}$



(b) $Z=980\text{mm}$



(c) $Z=420\text{mm}$

図-7 実験 No.1 の 1 層目、4 層目、及び 8 層目における崩壊断面形状

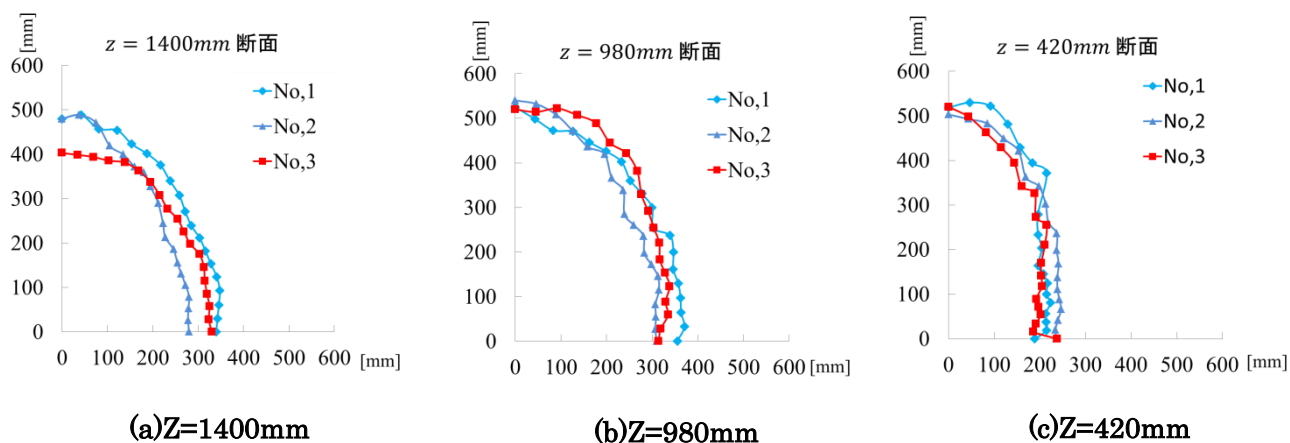


図-8 各実験ケースで得られた同一深さにおける崩壊断面形状図

4. LEM および FEM との比較

4.1 x-z 断面における LEM との形状比較

4つの代表的な LEM のうち、プロトジャコノフの方法を取り上げて、すべり面形状を実験結果と比較する。

図-9 は、プロトジャコノフのアーチ理論²⁾予測求まる崩壊形状である。溝壁での崩壊幅 B は溝壁の長さを用いて $B/2=520\text{mm}$ とした。模型地盤は Dr が 80%程度であることから、かなり密な地盤であると言える。このことからプロトジャコノフ係数 f を $f=1.0$ とした。これより、崩壊幅 H は、 $H=520\text{mm}$ となった。図-10 に、計測された崩壊形状と LEM の形状を示す。地盤上部に違いが認められる。

4.2 x-y 断面における LEM との形状比較

図-11 に、実験 No.1 で計測された崩壊形状と LEM の形状の比較を示す。溝端部付近のすべり面形状は両者ともほぼ一致する。しかし、中央部においては LEM のすべり面が大きい。

4.3 計測結果と FEM との比較

図-12 に、計測データと FEM による Z 方向の変位増分との比較を示す。x-z 断面においては、FEM で得られるすべり面は LEM よりも良い一致が認められた。特に LEM では一致しない上部および中央の形状は FEM がよく再現している。また同図には $Z=980\text{mm}$ 断面と $Z=420\text{mm}$ 断面におけるすべり形状を示す。x-y 断面でも掘削深度が深くなればなるほど崩壊形状が小さくなる傾向を再現できている。

5. まとめ

一様砂地盤中に構築された溝壁の安定性を評価するため模型実験を行い、崩壊形状を観察した。その結果次のことが分かった。

- 1) 先行壁の有無によるすべり形状に差がない。
- 2) 地表面付近の崩壊形状より地盤内部の崩壊範囲形状の方が大きいと確認できた。
- 3) LEM で得られるすべり形状は、溝の上部および中央部が実験結果より大きい。
- 4) FEM で得られるすべり面形状は模型実験の結果を良く再現している。

参考文献

- 1) 石井武司(2004)：三次元弾塑性 FEM による泥水掘削溝壁の安定評価に関する研究、群馬大学学位論文
- 2) 大塚義之(1986)：非粘性土地盤における掘削泥壁面の安定性について土質工学会論文報告集, Vol26, No.4, pp.206～207

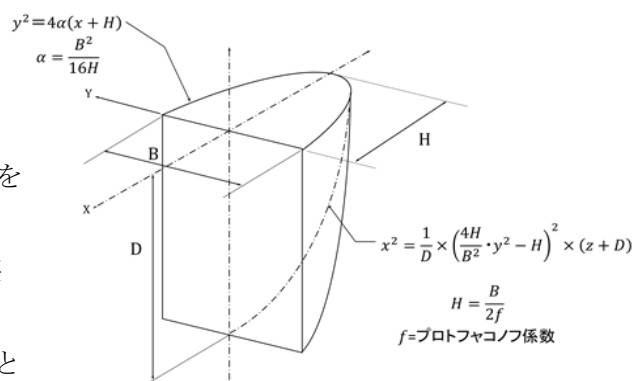


図-9 プロトジャコノフ法のすべり形状

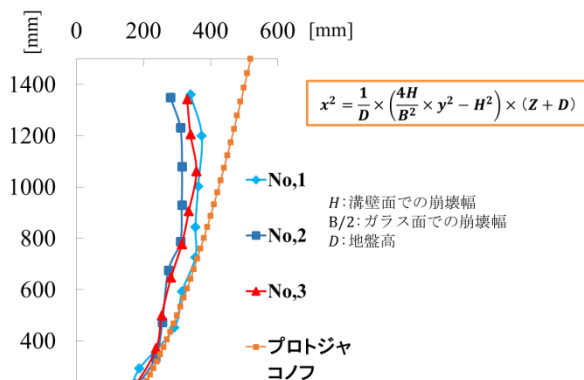


図-10 (x-z 断面)すべり形状比較

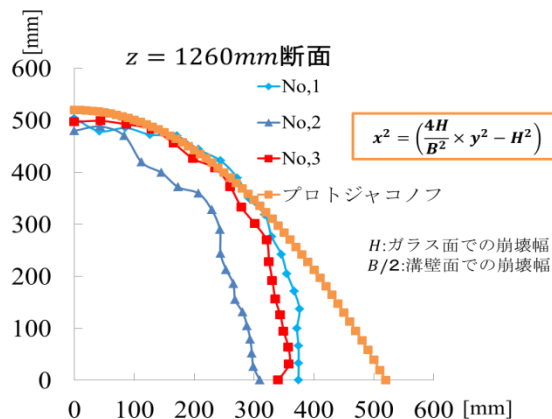


図-11 (x-y 断面)すべり形状比較

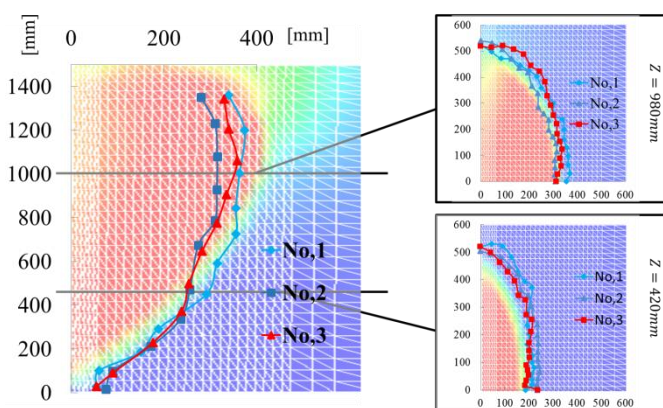


図-12 実測した崩壊形状と FEM 解析結果の比較