

砂地盤に構築された泥水掘削溝壁の 三次元弾塑性FEMによる安定性評価

石井 武司¹・斎藤 邦夫²・桑原 清³・鶴飼 恵三⁴

¹正会員 工修 株式会社日建設計土木事務所 設計室 (〒112-8565 東京都文京区後楽2-1-3)

²正会員 工博 株式会社日建設計 中瀬土質研究所 (〒212-0055 神奈川県川崎市幸区南加瀬4-11-1)

³正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 工事管理室 (〒151-8512 東京都渋谷区代々木2-2-6)

⁴正会員 工博 群馬大学教授 工学部建設工学科 (〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1)

砂地盤に構築された泥水掘削溝壁の安定性評価には、極限平衡法に基づく各種の方法が提案されている。いずれもすべり形状の仮定や側方拘束圧の考慮などに問題がある。そこで、すべり形状が自ずと得られ、かつ極限平衡法に基づく安全率の概念と矛盾しない全体安全率が算定できる手法として、三次元弾塑性FEMにせん断強度低減法を組んだせん断強度低減FEM(SSR-FEM)を遠心模型実験の結果に適用して、その妥当性を検証した。また、実用的な精度で安全率を得るためのモデル化や有限要素分割および計算手順を提案した。

Key Words : slurry trench, sandy ground, stability, elasto-plastic FEM, centrifuge model test.

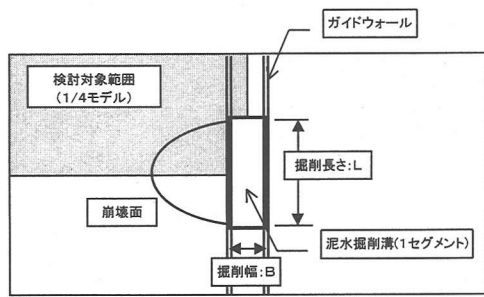
1. まえがき

比較的大規模な掘削工事では、地盤の変状、騒音、振動などを抑制する必要があることから、連続地中壁工法の採用が多い。地中壁の築造にあたっては、安定液に泥水を用いて、それで掘削溝を満たすことによって溝壁の安定性を確保しながら掘削する。しかしながら、砂質地盤においては溝壁の崩壊や壁面の押し出しなどを原因とする周辺地盤の変形がいくつも報告されている。このため、掘削した壁面の安定性を精度良く評価する方法が求められる。

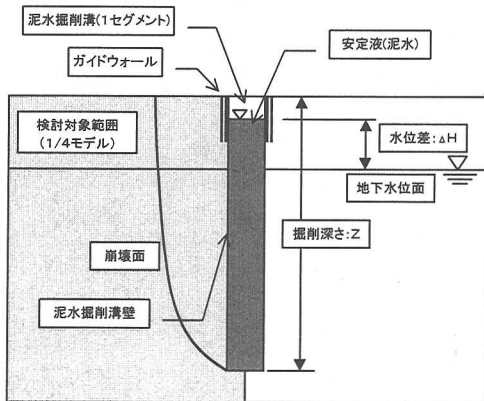
これまで泥水掘削溝壁の安定機構は様々な面から研究されてきたが、現在では、安定液の泥水が掘削壁面に不透水性の泥膜を形成し、その膜を介して液圧が地盤の土圧を支えることで成り立つと考えられている¹⁾。既往の主な評価方法^{2)~6)}はいずれもこの考え方にに基づき、すべり面を仮定して極限平衡法で安全率を算定している。しかし、すべり形状は評価方法ごとに異なり、計算される安全率に差が生じる。そのため、安定性の評価をそれぞれ独自の施工経験で行っているのが実状である。このようにさまざまなすべり形状が提案されているにもかかわらず、実際にそれらの評価方法が使われているのは、未だ泥

水掘削溝壁のすべり形状が不明であるために他ならない。また、いずれの方法も砂あるいは粘性土の一種な地盤を対象として提案されている。実際の地盤は粘性土と砂質土の互層を成すことが多く、このような地盤に対しても仮定したすべり面形状が適用できるのか、すなわち妥当性が問われる。さらに、すべり土塊に作用する拘束圧も十分に考慮されているとは言えない。

このように、既往の評価方法は問題点を抱えている。そこで、泥水掘削溝壁の安定性に関する問題を斜面安定の一種と捉え、斜面の安定性評価方法として鶴飼が提案しているせん断強度低減法を弾塑性FEMに組み込んだせん断強度低減FEM(SSR-FEM)の適用を試みる⁷⁾。本方法はすべり面を仮定せずに、かつ極限平衡法に基づく安全率の概念と矛盾しない全体安全率が算定できるという特徴を持つ。また、弾塑性FEMを基本にしているので、複雑な地盤条件や荷重載荷などの境界条件に対処できることやすべり土塊部に作用する拘束圧の効果が自ずと考慮されているなどの利点がある。その反面、要素分割が粗いと安全率を大きく評価したり、要素分割を細かくすると三次元解析では多大な計算時間を要し、利便性が損なうなどの課題がある。



(a) 平面図



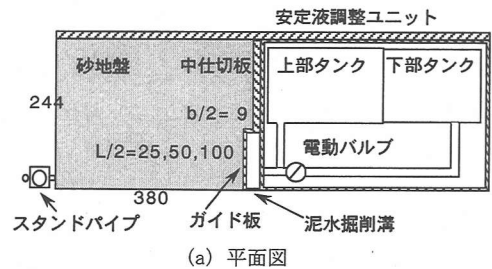
(b) 正面図

図-1 泥水掘削溝の概略とその検討対象の領域

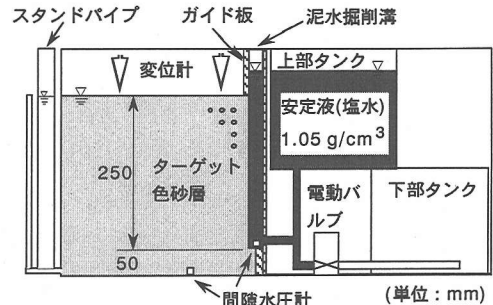
そこで本研究では、せん断強度低減FEMの適用性を検討するにあたり、図-1に示すような均質な砂地盤に構築された二次元および三次元泥水掘削溝壁を対象として、安全率に及ぼす有限要素分割と解析領域の影響を数値実験で検討した。また、誤差が少なく、かつ計算時間が短い計算方法の提案を試みる。さらに、相似則を考慮した遠心模型実験結果を根拠とし、せん断強度低減FEMで算定される安全率の意味を吟味し、本計算方法の妥当性を検証する。

2. 遠心模型実験の概要⁸⁾

新たな数値解析手法の適用に関する妥当性の評価は、破壊の形状、地盤の物性や地下水面の位置などが明確なくつかの事例で、崩壊の要因を分析しながら解析モデルを検討するのが望ましい。しかし、泥水掘削溝壁の崩壊は地下連続壁の施工における小さなトラブルとして現場で処理されて公開されることがほとんどない。また、崩壊を地表から直接観察



(a) 平面図



(b) 正面図

図-2 模型の概要 (数値は模型寸法, 単位: mm)

することができず、さらに現場の多様な条件もあって、その現象を正確に把握することも困難である。重力場における小型の模型実験も、崩壊現象の主因である土の自重が実物に比べてかなり小さく、その挙動を再現することが困難である。そこで、地盤内に実物相当の応力状態を再現できる遠心模型実験を実施し、これを数値解析手法の適用に関する妥当性を評価する際の根拠に用いた。

(1) 実験方法

実験で対象とした泥水掘削溝の形状は、掘削深さ $z=15\text{m}$ 、掘削幅 $b=1\text{m}$ で、掘削長さ $L=6\text{m}$ を基本に、 $L=3\text{m}$ 、 12m とし、さらに比較のため二次元状態 ($L=\infty$) を加えた。このうち、三次元の掘削溝については、図-1からもわかるように、平面形状の対称性より1/4領域モデルで検討した。模型地盤の材料にはけい砂7号 ($D_{50}=0.178\text{mm}$) を使用し、相対密度が50%となるように空中落下法で地盤を作製した。その地盤の物性値を表-1に示す。なお、強度定数はCD三軸圧縮試験で求めた。

泥水掘削溝では、膜自体が安定性にほとんど寄与しないことから、泥膜を薄いゴム膜でモデル化し、これに安定液を満たすことで再現した。安定液は一般的な泥水と同じ密度 1.05g/cm^3 の塩水とした。その初期水位は地表面よりも約8cm(実物換算で約5m)高

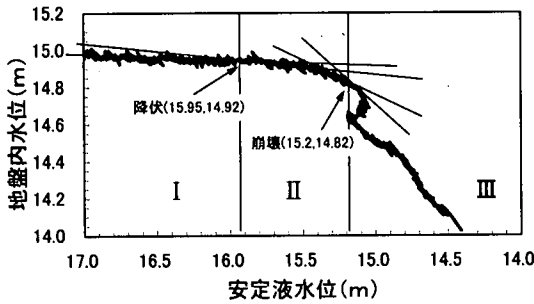


図-3 安定液降下時における地盤内水位の挙動

表-1 模型地盤の物性

飽和密度 ρ_{sat}	1.876 g/cm ³
粘着力 c'	0 kN/m ²
せん断抵抗角 ϕ'	39°

表-2 降伏時の安定液水位と地盤内水位

掘削長さL	安定液水位	地盤内水位	水位差 ΔH
二次元(∞)	15.95 m	14.92 m	1.03 m
12 m	15.90 m	14.98 m	0.92 m
6 m	15.52 m	14.98 m	0.54 m
3 m	15.15 m	14.97 m	0.18 m

注記 1) 数値は全て実物換算
2) 水位の基準は溝底

くした。図-2に模型の概要を示す。模型の縮尺は1/60とした。これを60Gの遠心加速度場に置いて、溝壁が破壊するまで安定液を降下させた。安定液の降下時には、変位計で地盤面の沈下量を、間隙水圧計で安定液の水位と地盤内水位をそれぞれ計測した。さらに模型側面に配置したターゲットの座標を写真から読みとって地盤内の変位を求めた。

(2) 実験結果

泥水掘削溝壁の安定条件は安定液水位～地盤内水位の関係から定めた。図-3に二次元泥水掘削溝壁の実験で得られた安定液降下時の地盤内水位の変化を示す。安定液の降下に対して、①地盤内水位がわずかながら低下する領域Ⅰ (>安定液水位15.95m)と、②それよりもやや低下が大きな領域Ⅱ (15.95～15.20m)、そして③大きく低下する領域Ⅲ (<15.20m)の3つに分かれる。なお、三次元泥水掘削溝壁の場合は、図中の領域Ⅱが狭く、変化も小さい。

地盤内水位の低下は、溝壁背面地盤の断面が水平方向に増加したこと、すなわち、溝壁面のはらみだしによって生じる。ゆえに、地盤内水位の変化は溝

壁面の平均的な水平変位とみなせる。そこで、安定液水位と地盤内水位の関係において、地盤内水位が徐々に低下し始める領域Ⅰから領域Ⅱの遷移点を溝壁の降伏点、そして急激に低下する領域Ⅱから領域Ⅲの遷移点を崩壊点と定義した。安定条件の指標として降伏時の地盤内水位と安定液水位の水位差 ΔH を用いた。実験で得られた降伏時の地盤内水位と安定液水位を表-2に示す。

3. 弾塑性FEMによる安全率の算定手法

FEM解析では各要素の応力状態が求まるので、要素の局所安全率は得られるが、系全体の安全率はそれだけでは求まらない。系全体の安全率を評価するために、極限平衡法と同様にすべり面形状を仮定し、要素の応力状態からその面上で働くせん断力とせん断抵抗力をそれぞれ算定して、安全率を求める手法がある⁹⁾。これはすべり面に沿ったせん断力が精度良く計算できるという点で従来の極限平衡法よりも優れている。しかし、この手法もすべり面形状の仮定という極限平衡法と同じ問題を抱えるため、すべり面形状に不明な点が多い泥水掘削溝壁の安定性を高い精度で評価するには無理がある。これに対して、鶴飼が提案するせん断強度低減法を弾塑性FEMに組込んだせん断強度低減FEM(SSR-FEM)は、すべり面と系全体の安全率が自ずと算定できるという特徴を有する。

弾塑性FEMにおいては、地盤は弾完全塑性体で、その降伏規準をMohr-Coulomb式とする。この式のせん断抵抗角 ϕ をダイレイタンシー角 ϕ に置換して塑性ポテンシャルに適用すると、 π 平面上に特異点が存在するために収束性が極端に悪くなる。そこで、塑性ポテンシャルには特異点のないDrucker-Prager式を用いた混合モデルを採用した。このモデルは砂地盤において有効性が確かめられている¹⁰⁾。二次元の要素は8節点四角形要素で4点、三次元が20節点六面体要素である。要素剛性マトリックスの求積に用いたガウス積分の点数は、二次元が 2×2 の4点、三次元が $2 \times 2 \times 2$ の8点である。弾塑性計算には修正Newton-Raphson法を用いた。

せん断強度低減法では、地盤のせん断強度パラメータの c' と ϕ' を、それぞれ次のようにせん断強度低減係数 Fr で c_r' と ϕ_r' に低減する。

$$c_r' = c' / Fr \quad (1)$$

$$\phi_r' = \arctan(\tan \phi' / Fr) \quad (2)$$

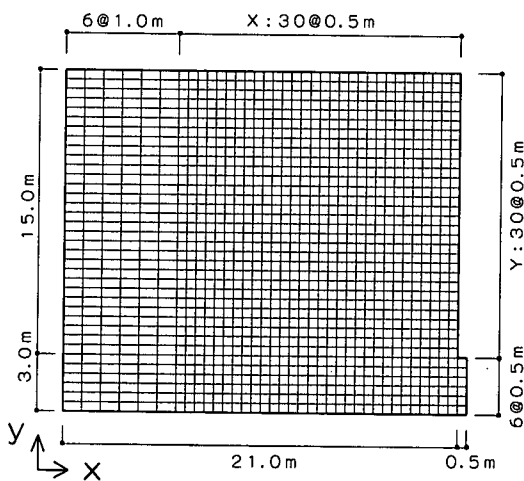


図-4 二次元泥水掘削溝壁の有限要素分割(基本)

表-3 地盤と安定液の設定値

	物性	設定値
地盤	飽和単位体積重量 γ_{sat}	18.4 kN/m ³
	弾性係数 E_{50}'	23,500 kN/m ²
	ポアソン比 ν'	0.333
	粘着力 c'	0 kN/m ²
	せん断抵抗角 ϕ'	39°
	ダイレイタンスー角 ψ'	39°
安定液	単位体積重量 γ_m	10.3 kN/m ³

Frの初期値は地盤内の応力状態がほぼ弾性体となるような小さな値とする。そして、修正 Newton-Raphson法による弾塑性計算が発散するまで、Frを徐々に増加させる。ここでは弾塑性計算が1ステップ終了する毎にFrを0.01づつ増加させて、計算が発散するまで繰り返した。発散した時点では、降伏領域が境界から境界の間を連続して分布し、すべり面を形成する。そこで、破壊直前のせん断強度低減係数Frを系全体の安全率とする。弾塑性計算の収束判定は次式で定義するERRを指標にして行った。

$$ERR = (\text{変位増分のノルム}) / (\text{全変位のノルム}) \quad (3)$$

各種の斜面安定問題における実績より、ERRが 1.0×10^{-5} に達した時点で収束と判断した。また、反復回数が500を越えた時点が発散、すなわち系全体の破壊とした¹⁰⁾。

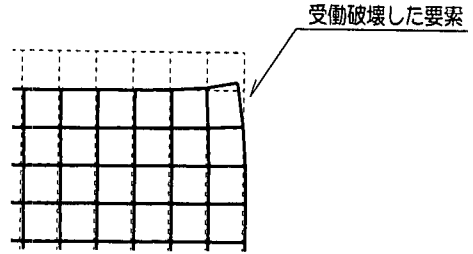


図-5 隅角部が受働破壊した計算例の変形図

4. 二次元泥水掘削溝壁に対する解析

遠心模型実験で得られた安定条件(降伏時の地盤内水位と安定液水位の水位差 ΔH)に対して、せん断強度低減FEMでその安全率を算定した。以下に、計算モデル、計算における溝壁上部隅角部の取り扱い方法、実験結果との比較、さらに、要素分割が安全率に与える影響を述べる。

(1) 計算モデル

安全率の算定に用いた有限要素分割を図-4に、解析に用いた地盤と安定液の物性値を表-3に示す。

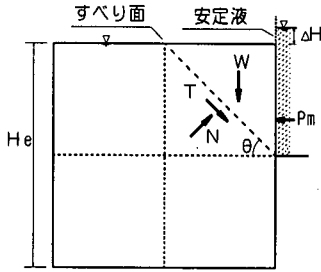
安定液については、溝壁面における安定液の液圧と地盤内の水圧の差をその面に作用させることでモデル化した。そのため、地盤の単位体積重量に関しては、地盤内水位より下では水中重量を、その上では全重量を用いることになる。

遠心模型実験では、安定液の降下に伴い背面地盤内の水位低下が計測された。その低下はわかずかであったので、その水位変化に対応した要素の分割を行わず、要素の単位体積重量を水位に応じて再調整した。

地盤の弾性係数 E' は、模型地盤と同じ相対密度を有する供試体に対してCD三軸圧縮試験を実施し、その結果から平均土被り圧に相当する拘束圧の割線弾性係数 E_{50}' を与えた。砂の弾性係数は、本来、拘束圧に依存し、深さ方向に増大する。そこで、弾性係数が一様であると評価したことが安全率に影響を与えないかを調べるために、その試験結果より拘束圧を考慮した次式で弾性係数 E_{50}' を近似し、この値を用いて安全率を算定した。

$$E_{50}' = 204 \cdot Pa \cdot (\sigma_3/Pa)^{0.692} \quad (4)$$

ここで、Paは大気圧である。計算の結果、安全率は弾性係数を一様としたケースと変わらないことが確



W: すべり土塊の重量
 P_m: 安定液の液圧と地盤内の水圧の差の合力
 N: すべり面に作用する垂直合力
 T: すべり面のせん断抵抗力

図-6 上部隅角部の要素が受働破壊しないための考え方

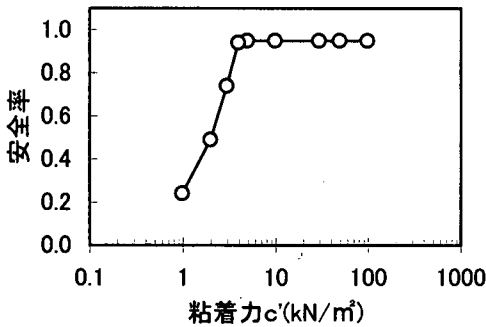


図-7 上部隅角部の粘着力と安全率の関係

認められた。よって、以降では弾性係数を一様とした。砂のポアソン比 ν は、CD三軸圧縮試験における K_0 圧密過程において K_0 が0.5であったので、0.333とした。

(2) 泥水掘削溝壁上部隅角部の取り扱い

地盤の材料が砂質土の場合、安定液水位が地盤よりもかなり高いと、図-5に示すように溝壁上部隅角部の要素が直ちに受働破壊を生じて、著しく低い安全率となる。

実験では隅角部の受働破壊によって生じる水平変位を抑制するために地表面直上近く(模型寸法で地表面より2mm上)までゴム膜の水平変位を拘束するガイドを設けた。実際の工事においては、溝壁上部はガイドウォールで保護されており、この部分の破壊は考えられない。そこで、上部隅角部が受働破壊しないようにするため、その隅角部の1要素に粘着力を与えることにした。

必要となる粘着力 c' の設定方法を考える。ここで用いたFEM要素は8節点四角形要素で、面積分にはガウスの4点積分を用いている。要素に関する応力と降伏の判定はガウスの積分点で評価されるので、

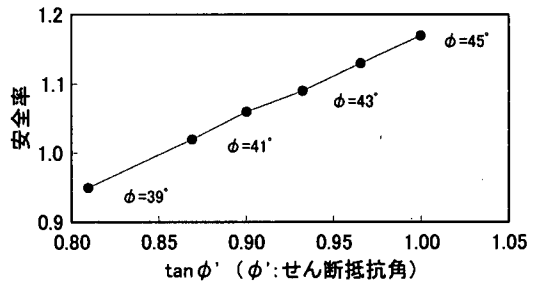


図-8 せん断抵抗角 ϕ' と安全率の関係

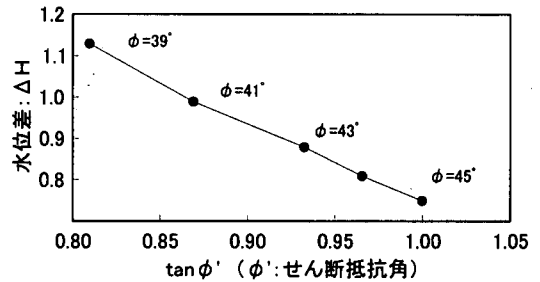


図-9 せん断抵抗角 ϕ' と水位差 ΔH の関係

図-6のように要素の高さ h_e の上半分(上部隅各部にかかわるガウス点の領域)が破壊しないための条件を求めればよい。すべり線を直線と仮定すれば、力のつりあい条件から破壊しないための粘着力 c' が次のように得られる。

$$c' > \gamma_s \cdot \frac{h_e}{8} \left\{ \frac{\gamma_m}{\gamma_s} \left(1 + 4 \cdot \frac{\Delta H}{h_e} \right) - 1 \right\} \quad (5)$$

ここで、 h_e は隅角部の要素の高さ、 ΔH は安定液水位と地盤内水位の差、 γ_s は地盤の湿潤単位体積重量、 γ_m は安定液の単位体積重量である。

今、水位差 ΔH が1.03m、有限要素の高さ h_e が0.5mの場合を考える。上式にこれらを代入すると $c' > 4.8$ kN/m²が得られる。上部隅角部の c' と安全率の関係は図-7のようになり、 c' が4.9kN/m²以上では、例えコンクリート並みの強度を有しても安全率は同じである。それに対して、 c' が4.9kN/m²未満では安全率が著しく低下する。したがって、隅角部上部の要素に対しては十分に大きな粘着力 c' を与えれば良いことがわかる。

(3) 遠心模型実験の結果に対する安全率の算定

遠心模型実験では二次元泥水掘削溝壁の安定条件

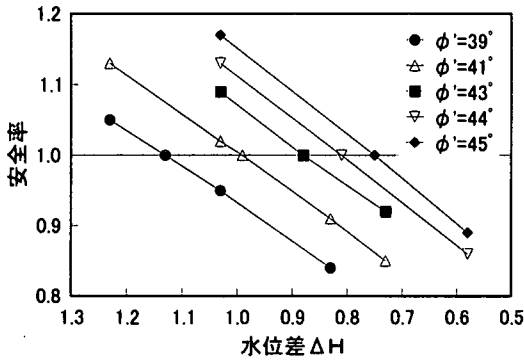


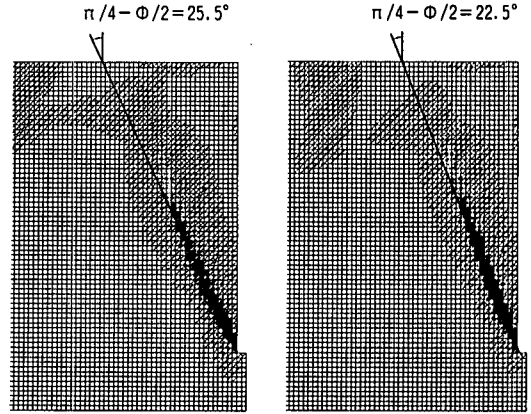
図-10 水位差 ΔH と安全率の関係

が $\Delta H=1.03\text{m}$ であった。表-3の地盤条件を用いてせん断強度低減FEMで安全率を算定すると、 $F_s=0.95$ となり、安全率が1以下となる。実験結果は降伏時の水位差であるので、計算で得られる安全率は1.0よりも大きくなければならない。後に示す三次元泥水掘削溝壁では、いずれのケースとも実験の安定条件に対する安全率はほぼ1.15である。

この原因の一つは、地盤のせん断抵抗角 ϕ' の測定方法にあると考えられる。一般に、平面ひずみ状態で測定された ϕ' は三軸状態よりも $4\sim 6^\circ$ 程度高いと言われている¹¹⁾。そこで、 ϕ' を変えて安全率を算定した。その結果を $\tan \phi'$ と安全率の関係で図-8に示す。 $\tan \phi'$ と安全率はほぼ線形関係にある。これより、後述する三次元泥水掘削溝壁と同程度の安全率(1.15前後)となるためには、せん断抵抗角 ϕ' が 44° 程度でなければならないことがわかる。これはCD三軸圧縮試験で得られたせん断抵抗角より 5° も大きい。二次元泥水掘削溝壁の安定性評価に、CD三軸圧縮試験から求めたせん断特性を適用すると、安全率を小さく評価する可能性があると思われる。さらに、 $\tan \phi'$ を水位差 ΔH の関係で整理すると図-9のようになる。 $\tan \phi'$ が大きくなれば、それに対応して水位差は小さくなる。両者の関係もほぼ線形関係であることがわかる。

安定液水位と地盤内水位の差 ΔH と安全率の関係を図-10に示す。いずれのせん断抵抗角についても水位差 ΔH と安全率は線形関係にあり、それらの勾配は水位差 ΔH が0.1m増加すると、安全率が0.06増える。

次に、せん断抵抗角 ϕ' が 39° と 45° について、すべり面形状を比較する。図-11に、安全率1.0を与える安定条件に対して求められた破壊直前の最大せん断ひずみ増分の分布を示す。最大せん断ひずみ増分は、破壊直前のステップとさらに一つ前のステップの間、すなわちせん断強度低減係数 F_r の増分0.01に対する



(a) $\phi'=39^\circ$, $\Delta H=1.13\text{m}$ (b) $\phi'=45^\circ$, $\Delta H=0.75\text{m}$

図-11 安全率が1.0となる安定条件における破壊直前の最大せん断ひずみ増分の分布

表-4 解析領域による安全率の違い

せん断抵抗角	安全率		低下率
	基本ケース	解析領域縮小	
39°	0.95	0.94	1.1 %
41°	1.02	1.01	1.0 %
43°	1.09	1.09	0.0 %

最大せん断ひずみ増分の分布である。図の分布はこれをガウス積分点毎(4点ガウス積分を用いているので、1要素につき縦横2点ずつの計4つ)に表示したもので、増分が大きい箇所ほど濃くハッチした。すべりはせん断ひずみ増分が大きい箇所から生じると考分がすべり面と見なせる。その形状は溝壁底部から溝深さの半分まではほぼ直線、そこからすべり溝壁側に曲がって地表面へ延びる。また、すべり面の傾斜角は、いずれも壁面に対してほぼ $(\pi/4 - \phi'/2)$ で、主働崩壊角に一致する。

(4) 要素分割数と安全率の関係

FEMでは変形が集中する領域を細分化すると、変形や応力の精度が向上する。せん断強度低減FEMにおいても、すべり線が生じるような領域で要素の分割を粗くすると、その領域内で応力が平均化されて、降伏の規準線よりも離れる。すなわち安全率が大きくなる。これは危険側の解析である。一方、分割数を多くすると解析時間が多大となる。特に三次元解析ではその影響が著しい。したがって、図-4を基本ケースとし、これより分割数を減らしながら、安全率に及ぼす有限要素分割の影響を調べた。計算に用いた水位の条件は水位差 ΔH が1.03mである。

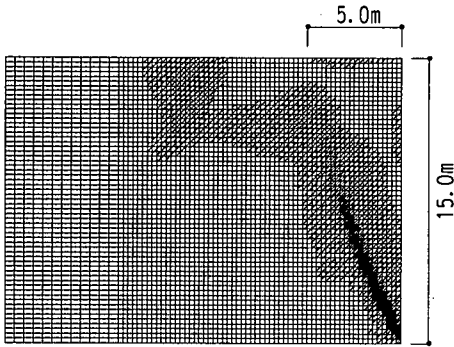


図-12 破壊直前の最大せん断ひずみ増分の分布
(X方向のピッチ0.5m, Y方向のピッチ0.5m)

表-5 有限要素分割数の影響

Y方向の ピッチ(m)	X方向のピッチ(m)					
	0.375 (40)	0.50 (30)	0.75 (20)	1.00 (15)	1.50 (10)	2.50 (6)
0.375(40)	0.94	-	-	-	-	-
0.50(30)	-	0.94	0.95	0.96	0.98	1.00
0.75(20)	-	0.95	0.96	0.96	0.98	-
1.00(15)	-	0.96	0.96	0.97	0.98	-
1.25(12)	-	0.97	0.97	0.97	0.99	-
1.50(10)	-	0.97	0.98	0.98	0.99	-
2.50(6)	-	0.98	-	-	-	1.02

注記：() 内は分割数

a) 溝壁底部の領域

せん断強度低減FEMで得られた図-11の最大せん断ひずみ増分の分布をみると、掘削底部におけるひずみが小さい。そこで、この部分を解析領域に含めない有限要素モデルで安全率を算定した。その結果を表-4に示す。この結果によると、掘削部底面より下をモデル化しなくても、安全率にほとんど影響しないことがわかる。

b) 鉛直・水平方向の有限要素分割数

泥水掘削溝壁の安定性評価においては、解析領域を掘削部底面より上部の範囲に限定しても良いことがわかったので、図-4の基本モデルで掘削部底面より下の部分を削除して、有限要素分割の影響を検討する。

さて、図-4の有限要素分割(ただし、掘削部底面より下の部分を削除されたものとする)は、鉛直方向に掘削部底面より上部15mの範囲(「Y : 30@0.5m」と記された範囲)を0.5mの等間隔で30等分、溝壁面から水平方向に15m離れた位置までの範囲(「X : 30@0.5m」と記された範囲)を0.5mの等間隔で30等分、それ以上を1.0mの等間隔で6等分した格子である。こ

こでは、「X : 30@0.5m」および「Y : 30@0.5m」とす法に記された領域を対象に、水平方向(X方向)および鉛直方向(Y方向)のそれぞれに対して等分割するという条件下で、格子の間隔を変化させて安全率を算定する。なお、図-4のような有限要素分割を、X方向のピッチ0.5m(溝壁に平行な鉛直方向の格子線の間隔が0.5m)、Y方向のピッチ0.5m(水平方向の格子線の間隔が0.5m)と呼ぶことにする。

地盤のせん断抵抗角 ϕ' を 39° と仮定し、様々なピッチの有限要素分割で求めた安全率を表-5に示す。また、基本モデルの有限要素分割(X方向のピッチ0.5m, Y方向のピッチ0.5m)で得られる破壊直前の最大せん断ひずみ増分を図-12に示す。

基本モデルの安全率は要素分割を細かくするにつれて小さくなるのがわかる。しかし、安全率が0.94になると、これよりも要素を細分化しても同じ値が得られるので、この値が設定された水位差 ΔH に対する正解と考えられる。

次に、有限要素分割数により安全率がどのように変わるかを調べた。まず、X方向のピッチおよびY方向のピッチを大きくすると、安全率は増加する。安全率に与える影響は、ピッチが小さいときにはX方向とY方向とも同程度であるが、広くなるとX方向の方が大きくなる。すべり線の形状は、図-12からわかるように、Y軸に対して立っている。そのため、Y方向の分割を粗くしても、すべり線が通過する要素内のせん断応力は平均化によってあまり小さくならない。一方、X方向で要素を粗くすると、その要素の中ですべり線が占める割合が相対的に低下し、応力が平均化により小さく評価されるので、安全率は大きくなる。よって、すべり線の形状と発生位置を考慮すると、溝壁の下端隅角部付近を細かくすることが精度の上で効果的である。

このように安全率はすべり土塊の分割に依存する。すべり線の位置は図-12より溝壁面から5mの範囲内を通るので、安全率0.94を得るためにはすべり土塊をX方向に10程度に分割し、Y方向のピッチを0.5m(30分割)にすれば良いことがわかる。しかし、この分割は非常に細かく、後に述べる三次元の問題に適用した場合には多大な計算容量と計算時間を要することになる。そこで、すべり土塊をX方向に10分割した条件で、Y方向の分割数を粗くすることによって生じる安全率の誤差に着目する。安全率の正解を0.94とすると、20分割の誤差は1%、15分割が2%、10分割が3%、そして6分割が4%である。このように、分割数を10程度以上にすれば、安全率の誤差は3%で収まる。また、X方向の分割が5~6程度であれば、

誤差を3%程度以内にするには、Y方向の分割を15分割すれば良いこともわかる。

c) 有限要素分割の目安

解析領域の範囲設定および有限要素分割の検討結果より、二次元泥水掘削溝壁の安定性をせん断強度低減FEMで計算する場合には、次の事項に注意して要素分割を行うことが望まれる。

- ① すべり線の範囲外は解析領域から削除しても系全体の安全率にほとんど影響が及ばない。
- ② X方向における分割は溝壁付近で細かくすることが必要となる。すべり土塊の領域が概ね5~10程度に分割されていれば精度の良い安全率を得ることができる。
- ③ Y方向については、X方向における分割が十分に細かければ、比較的粗い分割が可能である。X方向が10程度に分割されていれば、安全率の誤差を3%程度以内にするには、Y方向を10程度以上に分割すれば良い。X方向が5程度の分割では、Y方向を15程度以上の分割が必要となる。なお、粗い場合には、掘削底部付近の分割を細かくすることが高い精度を確保する上で重要になる。

5. 三次元泥水掘削溝壁に対する解析

三次元FEM解析は二次元FEM解析に比べて飛躍的に計算時間が増大するので、実用的には計算時間と計算される安全率の精度をバランスさせることが必須となる。そこで、二次元泥水掘削溝壁の解析で検討した解析領域の範囲設定および有限要素分割の成果を利用して、三次元泥水掘削溝壁の安定性評価に用いる有限要素分割を検討した。

また、三次元泥水掘削溝壁も、二次元の場合と同様に安定液の水位によっては溝壁上端の隅角部で受働破壊を生じることがある。そこで、二次元で提案した手法が三次元へ流用することの妥当性を確かめた。

(1) 基本モデルの有限要素分割

遠心模型実験のモデルに対する解析に用いた有限要素分割を図-13に示す。図中のA~Fは底面の頂点で、A'~F'はその直上の頂点である。面BCC'B'および面CDD'C'にはそれぞれ安定液の液圧が作用する。溝壁の掘削長さは基本の6mである。

三次元泥水掘削溝壁の場合は、溝壁の掘削長さが短くなるとすべり面の位置が浅くなる¹²⁾ことから、

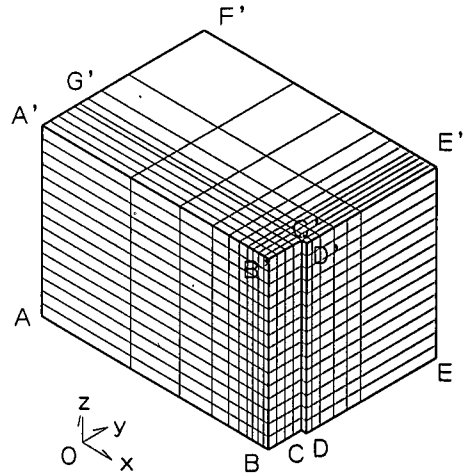


図-13 三次元泥水掘削溝壁の有限要素分割(基本)

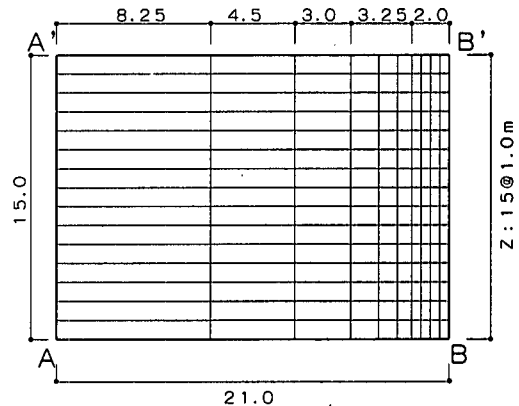


図-14 面ABB'A'の有限要素分割(単位:m)

面ABB'A'の分割に関しては、Z方向の分割を細かく、X方向の分割を粗くした。Z方向の分割数は二次元泥水掘削溝壁の検討結果を踏まえて、1.0mピッチの15とした。X方向の分割については、三次元泥水掘削溝壁のすべり土塊が二次元泥水掘削溝壁のものよりも幅が狭い¹²⁾ので、図-12に示した二次元泥水掘削溝壁のすべり土塊を7分割した。ただし、X方向の分割数は少ないので、溝壁近傍の分割を細かくした。図-14に面ABB'A'の要素分割を示す。この要素分割に対して表-3と同じ条件(水位差 $\Delta H = 1.03\text{m}$)を与えて、安全率を二次元解析で求めると、安全率は0.96となった。この値を表-5でみると、X方向の分割が0.5mピッチ、Z方向の分割が1.0mピッチの安全率と同じであることがわかる。図-12の有限要素分割はこれよりも粗いので、計算効率の良い分割方法である。

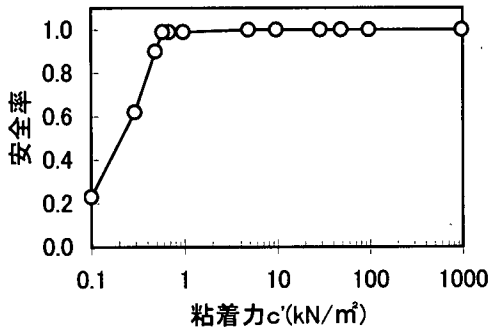


図-15 上部隅角部の粘着力と安全率の関係

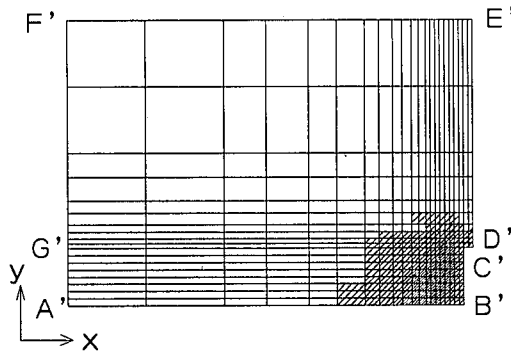


図-16 八面体せん断ひずみ増分の分布
(A'B'C'D'E'F'G'面)

(2) 泥水掘削溝壁上部隅角部の取り扱い

地盤の材料が砂質土の場合、二次元泥水掘削溝壁と同じく、溝壁上部隅角部の要素が受働破壊を生じて、著しく低い安全率となることがある。三次元泥水掘削溝壁においても、上部隅角の縁を形成する要素を粘性土に置き換えて粘着力 c' を付与する。 c' の設定に式(5)の利用を試みる。

今、溝壁の掘削長さが6m、水位差 ΔH が0.30m、有限要素の高さ h_e が1.0mの条件で、溝壁上部隅角部の取り扱いを考える。式(5)にこれらを代入すると、 $c' > 0.63 \text{ kN/m}^2$ が得られる。上部隅角部の c' を変えて安全率の関係を求めると、図-15のようになる。 c' が約 0.6 kN/m^2 より小さくなると、安全率は著しく低下する。一方、それより上の領域では安全率は変わらない。二次元解析と同様に、隅角部上部の要素に対しては十分に大きな粘着力 c' を与えれば良いことがわかる。

(3) 有限要素分割と安全率の関係

三次元解析では分割数により解析時間が多大となる。そこで、図-13を基本ケースとし、これより分割

表-6 解析領域による安全率の違い

掘削長さ	安全率		低下率
	基本ケース	解析領域縮小	
6m	1.00	0.99	1.0%

表-7 有限要素分割数の影響

BB'(Z方向)のピッチ(m)	BC(Y方向)のピッチ(m)				
	0.20 (15)	0.25 (12)	0.25/0.375 (10)	0.50 (6)	0.75 (4)
0.75(20)	-	-	0.96	-	-
1.00(15)	0.96	0.96	0.96	0.98	0.99
1.25(12)	-	-	0.96	-	-
1.50(10)	-	-	0.97	-	-

注記：()内は分割数

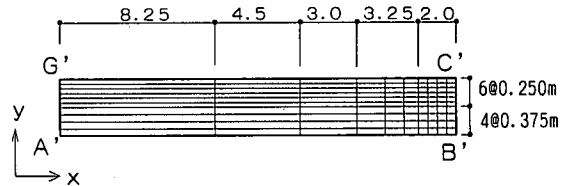


図-17 面A'B'C'G'の有限要素分割 (単位:m)

数を減らしながら、安全率に及ぼす要素分割の影響を掘削長さ6mについて調べた。

a) 解析領域

基本ケースで水位差 $\Delta H=0.32\text{m}$ の場合における破壊直前の面A'B'C'D'E'F'G'の八面体せん断ひずみ増分を図-16に示す。同図の分布はガウス積分点に対して表示した。すなわち、積分点は $2 \times 2 \times 2$ 点であるので、1つの要素に対して鉛直断面では 2×2 の4点、同様に水平断面でも 2×2 の4点を表示する必要があるため、1つの要素を4つに分割して八面体せん断ひずみ増分をハッチで表示した。ハッチの密度は計算ケース毎に発生した最大値を基準に設定しており、密で濃く見えるものほどひずみ増分が大きいことを表わす。

大きなひずみは隅角部C'からA'B'側に分布する。一方、D'E'F'G'の領域ではひずみが小さい。そこで、この部分を解析領域に含めない有限要素モデルで安全率を算定した。その結果を表-6に示す。二次元の場合と同様に、安全率の低下は0.01で、安全率に与える影響は小さいことがわかる。

b) 有限要素分割数

解析領域を縮小したモデル、すなわちABCG-A'B'C'G'の直方体において、BC(Y方向)とBB'(Z方

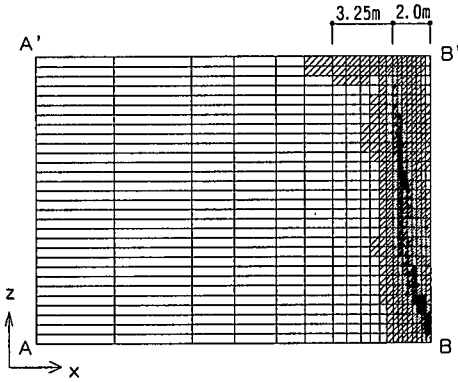


図-18 掘削長さ6mの八面体せん断ひずみ増分の分布
(安全率0.96, 水位差0.32m)

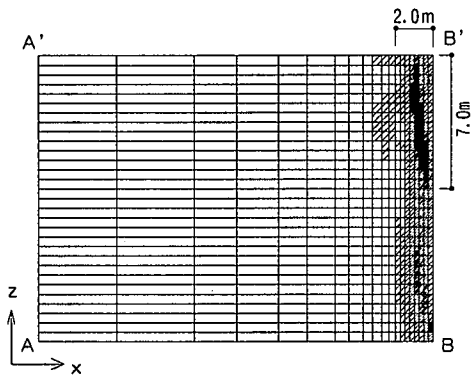


図-19 掘削長さ3mの八面体せん断ひずみ増分の分布
(安全率1.00, 水位差0.115m)

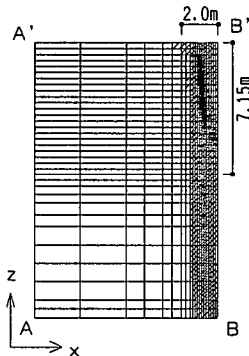


図-20 掘削長さ3mの八面体せん断ひずみ増分の分布
(細要素分割, 安全率1.00, 水位差0.155m)

方向)の有限要素分割を表-7のようなピッチに変えて安全率を計算した。同表のピッチで「0.25/0.375」は、図-17のように、0.25mで6分割、残りを0.375m

で4分割した有限要素モデルである。

BCの分割ピッチを細かくすると安全率は小さくなるが、分割数が10程度以上になると安全率は変わらなくなる。次に、BCの分割数を10に固定して、BB'の分割数を変えて安全率を求めた。安全率は、分割数が10~12で0.97、15~20で0.96となり、ほとんど差が認められなかった。

このように、要素分割を細かくすると安全率は小さくなり、0.96に収束する。よって、この値は正解とみなせる。これを与える最小の分割数はBCが10分割、BB'が15分割である。この分割で得られた面ABB'A'広くの八面体せん断ひずみ増分を図-18に示す。すべり土塊は二次元泥水掘削溝壁よりも狭くなるが、その土塊にはX方向に5分割、Z方向に15分割相当の要素が含まれており、この面に関しては二次元泥水掘削溝壁の安定性評価に必要な分割数を満たしている。

c) 溝壁の掘削長さとは有限要素分割数

掘削長さが短くなると、すべり土塊が狭く、また浅くなることから¹²⁾、図-14と図-17で組み合わせた有限要素分割は、掘削長さが6m以上の溝壁に対して適用することができるが、それより短い溝壁ではすべり土塊の分割数が不足して、十分な精度が得られないことが予想される。そこで、掘削長さ3mの泥水掘削溝壁で、有限要素分割数による安全率の誤差を調べる。

まず、図-14と図-17の有限要素モデルで安全率が1.0となる水位差 ΔH を与えて、八面体せん断ひずみ増分を求めた。その結果を図-19に示す。すべり土塊は掘削長さ6mよりも浅く、小さくなった。そのため、すべり土塊の分割数はX方向が3程度、Z方向が7程度である。したがって、求められた安全率の精度は、分割数が少ないことから掘削長さ6mよりも低いと考えられる。そこで、上部隅角部からX方向に2.0m、Z方向に少し広くして7.15mの領域を横に6分割、縦に11分割(すべり土塊よりも少し広く)した要素分割モデルで算定したところ、安全率は0.91に低下した。図-20にその分割で得られた八面体せん断ひずみ増分を示す。すべり土塊の形状および位置は図-19とほぼ同じである。

この結果から、泥水掘削溝壁の安全率をせん断強度低減FEMで計算する場合には、有限要素分割をすべり土塊の位置と大きさに合わせて行わないと、設計において危険側の安全率を与えることがわかった。したがって、溝壁近傍を十分に細かく有限要素分割を行っても、計算で得られたすべり土塊に対して十分な分割がなされているかを確認する必要がある。

表-8 安定条件に対する安全率および
安全率が1となる水位差 ΔH

溝壁の掘削長さ	3m	6m	12m
安定条件に対する安全率	1.04	1.15	1.14
安全率が1となる水位差 ΔH	0.16m	0.36m	0.71m

注記 1) 数値は全て実物換算

2) (水位差)=(安定液水位)-(地盤内水位)

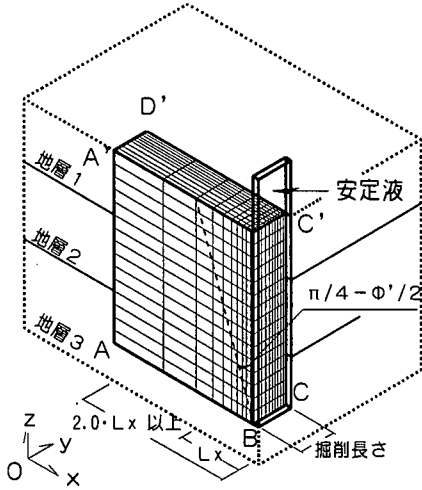


図-21 三次元泥水掘削溝壁の安定性評価に用いる
解析領域と有限要素分割

る。もし、分割が不十分であれば、再び有限要素分割を行って計算しなければならない。このように最初から細かな分割を行っても信用できる安全率が必ず得られるという保証はない。一方、すべり土塊の形状と位置は安全率に比べると分割数に対しては鈍感である。よって、最初は粗い有限要素分割ですべり土塊の形状と位置を概略的に求めて、それを基にすべり土塊を細かく分割して計算するのが実用的な手順と考えられる。

(4) 計算手順と有限要素分割の目安

これまでの検討結果より、せん断強度低減FEMで泥水掘削溝壁の安全率を求める計算手順と有限要素分割の目安を整理する。

安全率はすべり土塊を十分に分割しなければ過大評価される。それを防ぐために、すべり土塊の形状と位置を把握するための計算と安定性を評価するための計算という2つの計算を行うことを提案する。

しかし、その場合でも、最初の計算ですべり土塊をある程度の数で分割しなければ、形状と位置を把握することができなくなる。そこで、すべり土塊の形状と位置を概略的に検討する。

すべり土塊の形状と位置に関しては、二次元泥水掘削溝壁、および掘削長さが6mと3mの泥水掘削溝壁に対する安全率の算定結果から、次のことがわかっている。

- ・すべり土塊は二次元泥水掘削溝壁が最も大きい。
- ・そのすべり面形状はほぼ直線で、溝壁面となす

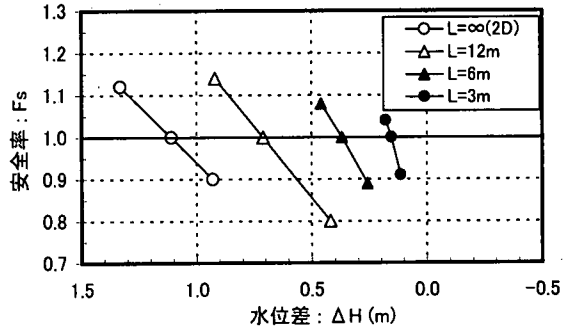


図-22 水位差 ΔH と安全率の関係

角はほぼ主働崩壊角に相当する。

- ・溝壁の掘削長さが短くなると、すべり土塊が狭くなり、またある長さ以下では浅くなる。
- ・溝壁の底部より下部や溝壁の側方を除いてもすべり土塊の形状への影響は小さい。

これらより、解析領域を図-21のように設定する。そして、この解析領域を踏まえて、安全率の計算手順と有限要素分割の目安を次のように提案する。

- ① X方向の解析領域は、X-Z平面で二次元状態を考えてその主働崩壊領域の2倍程度とする。溝底面より下の地盤と溝壁側面より以遠の地盤を解析領域から除く。(図-21参照)
- ② 有限要素分割を3方向とも概ね10程度以上で行わない、安全率を算定する。
- ③ 破壊直前のせん断ひずみ増分からすべり土塊の予想される形状を求める。
- ④ すべり土塊部分の要素を細分して、再度安全率を算定する。その分割数は、溝壁深さが15m程度の場合、X方向に5程度、Y方向に10程度、Z方向に15程度あれば十分な精度が得られると考えられる。

(5) 遠心模型実験の結果に対する安全率の算定

掘削長さが異なる3つの泥水掘削溝壁に対する遠心模型実験で得られた表-2の安定条件で、それぞれ

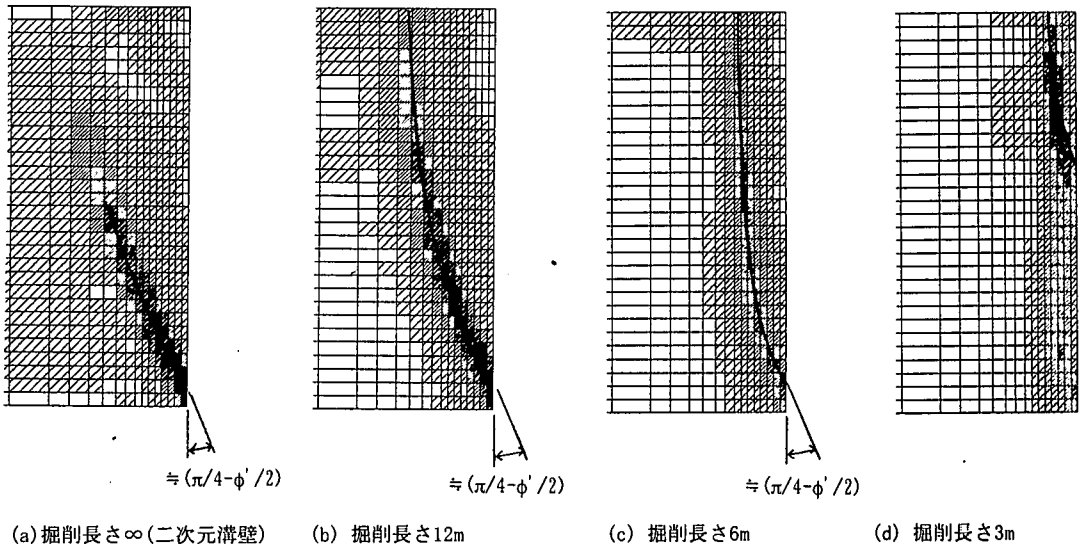


図-23 安全率が1.0となる水位差 ΔH を与えた場合における破壊直前のせん断ひずみ増分の分布

の安全率を算定した。また、地盤内水位を一定にして、安定液の水位を変化させて安全率が1.0となる時点の安定液水位と地盤内水位の水位差 ΔH も求めた。それらの結果を表-8に示す。さらに、比較のため二次元泥水掘削溝壁も含めて、水位差 ΔH と安全率の関係を図-22に示す。

安定条件に対する安全率は掘削長さが6mと12mがほぼ1.15である。掘削長さが3mの安全率は1.04で、それらよりも小さい。安全率が1.0となる水位差 ΔH は溝壁の掘削長さが短くなるにつれて小さくなる。掘削長さが短い溝壁はその形状効果により小さい水位差でも溝壁面が安定すると考えられる。

水位差 ΔH と安全率 F_s の関係は、溝壁の掘削長さにかかわらず、いずれも線形である。 ΔH の変化率に対する F_s の変化率は、二次元泥水掘削溝壁が0.55、掘削長さ12mが0.68、6mが0.95、そして3mが2.02である。溝壁の長さが短くなるにつれて変化率は大きくなり、安全率はわずかな水位差 ΔH で大きく変わる。特に、掘削長さ3mの溝壁に関しては、変化率が他の掘削長さ比べて非常に大きく、5cmの水位差で安全率が0.1も異なる。

(6) すべり面の形状

溝壁の掘削長さと破壊形状の関係を調べるために、三次元溝壁および二次元溝壁について、安全率が1.0となる水位差 ΔH を与えた場合における破壊直前のせん断ひずみ増分の分布を図-23に示す。二次元溝壁の

すべり面形状はせん断抵抗角 $\phi' = 39^\circ$ の結果を用いた。

二次元溝壁では、溝壁底部でひずみ増分が大きく、そこからおよそ $(\pi/4 - \phi'/2)$ の角度、すなわち主働崩壊角で地表面へ延びている。溝壁底部で破壊が生じ、そこから破壊が地表面へ発達したことが伺える。溝壁の掘削長さが12mのすべり面形状は二次元溝壁と似ており、溝壁底部付近の崩壊角はほぼ $(\pi/4 - \phi'/2)$ となる。この角度で直線状に延びたすべり面は約10mの深さの位置で壁面側に曲がるため、すべり土塊はやや狭い。掘削長さが6mのすべり面形状も同様に溝壁底部からほぼ $(\pi/4 - \phi'/2)$ の角度で地表面に延びているが、そのすべり土塊はさらに狭い。掘削長さが3mでは、せん断ひずみ増分は溝壁底部よりも壁面中央付近が大きく、すべり面は溝壁面中央から地表面に延びると考えられる。

6. 解析結果と実験結果の比較

せん断強度低減FEMで得られた安全率が1.0となる破壊時の水位差を、2.(2)で述べた実験結果の崩壊時および降伏時の水位差と比較する。二次元泥水掘削溝壁については ϕ' が 44° として計算した。これは、4.(3)で述べたように平面ひずみ状態のせん断抵抗角は三軸状態で測定された値より $4 \sim 6^\circ$ 程度高いためである。図-24にその結果を示す。破壊時の水位差はいずれも実験結果の崩壊時よりも大きく、安全側

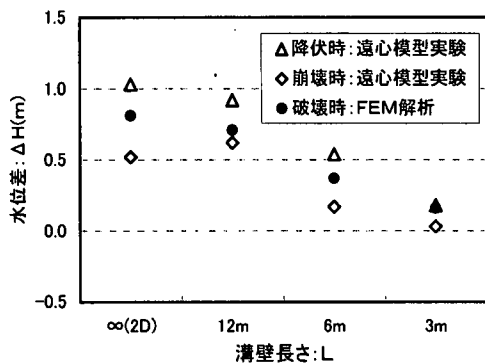


図-24 安全率1.0の水位差 ΔH (実験と解析結果の比較)

の結果を与える。一方、降伏時の水位差と比較すると、解析結果は小さい。このことから、降伏時に対する安全率が1.0より大きくなることがわかる。

次に、遠心模型実験で得られた溝壁の安定条件である降伏時の水位差に対してせん断強度低減FEMで求めた表-8の安全率をみる。三次元泥水掘削溝壁では、掘削長さ6mと12mの安全率は概ね1.15で、1.0よりも大きい。掘削長さ3mの安全率は1.04で、それらよりも小さい。数値解析結果によると、掘削長さが短い泥水掘削溝壁は、わずかな水位差で安全率が大きく変化する。掘削長さ3mの場合、遠心模型実験における水位測定で0.83mm(実物換算で5cm)の誤差があれば、安全率が0.1変化する。したがって、水位測定の誤差が影響した可能性が考えられる。また、二次元泥水掘削溝壁の場合については、平面状態のせん断抵抗角 ϕ' がCD三軸圧縮試験の結果よりも大きいことを考慮して、 ϕ' を44°とすれば、安全率は三次元泥水掘削溝壁とほぼ同程度の1.13が得られる。二次元および掘削長さ3mの溝壁の結果をこのように解釈すれば、せん断強度低減FEMは、実験における降伏時の水位差に対して概ね1.15の安全率を与えることが判断できる。

せん断強度低減FEMは実験結果の降伏時の水位差に対して1.0よりも大きな安全率を与えるものの、両者の間にはほぼ一定の対応関係が認められる。また、実験結果の崩壊に対してはその計算手法は安全側の結果を与える。したがって、せん断強度低減FEMは、有限要素分割を適切に行なうことができれば、砂地盤に構築されて泥水掘削溝壁の安定性評価に対して有効な手法であると言える。

7. 結論

従来から提案されてきた極限平衡法に基づく泥水掘削溝壁の安定性評価手法はすべり面形状の仮定や側方拘束圧などに課題があった。それらを克服する解析手法は、地盤のモデルと境界条件を与えると、すべり面形状や側方拘束圧が自ずと定まり、そして系全体の安全率が求まるものである。本研究では、そのような手法としてせん断強度低減FEMを適用し、砂地盤に構築された泥水掘削溝壁の遠心模型実験の結果に適用して妥当性を検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) せん断強度低減FEMは、適切に有限要素分割を行なえば、砂地盤に構築された泥水掘削溝壁の安定性を精度良く評価できることがわかった。
- (2) 泥水掘削溝壁の上部隅角部が受働破壊して、系全体の安全率を算定できないことがある。そのような場合には、上部隅角部の縁を構成する要素を粘性土に置き換えて、大きな粘着力を与えれば良い。
- (3) CD三軸圧縮試験の結果から求められたせん断抵抗角 ϕ' を用いて二次元泥水掘削溝壁の安定性を評価すると、安全率が過小に評価する可能性がある。
- (4) 安全率に及ぼす解析領域と有限要素分割の影響を検討し、精度を低下させることなく計算時間を短くするための計算手順と分割数の目安を提案した。
- (5) 安全率 F_s と水位差 ΔH はほぼ線形関係にある。 ΔH に対する F_s の変化部分は溝壁の掘削長さが短くなるにつれて大きくなる。また、降伏時の水位差は形状効果により、掘削長さが短くなるほど小さくなる。すなわち、安定性が向上する。
- (6) 二次元の泥水掘削溝壁に関して、安全率と水位差 ΔH の関係はせん断抵抗角 ϕ' が異なってもその勾配がほぼ同じである。また、破壊時の水位差 ΔH は $\tan \phi'$ と線形関係にあることがわかった。

参考文献

- 1) 連続地中壁工法編集委員会編：連続地中壁工法，土質工学会，pp. 30-37，1988。
- 2) 佐藤寛，秋野矩之：泥水掘削壁面の安定計算法，第10回土質工学研究発表会，pp. 1023-1026，1975。
- 3) 金谷祐二，秋野矩之：泥水掘削溝における溝壁安定の実大実験，土質工学会論文報告集，Vol. 24，No. 4，pp. 171-182，1984。
- 4) 内田博，田中邦照，水谷仁：ベントナイト泥水による掘削壁面の安定性について（その2），鹿島建設技術研

- 究年報第18号, pp. 96-106, 1971.
- 5) 樋口雄一, 東田淳, 名倉克博, 川崎宏二: 砂地盤に築造される泥水掘削溝の新しい計算法, 土と基礎, Vol. 42, No. 8, pp. 7-12, 1994.
 - 6) 地中連続壁基礎協会編: 地中連続壁基礎工法ハンドブック-施工編-, 総合土木研究所, 1991.
 - 7) 鶴飼恵三: 安定解析におけるせん断強度低減法の有用性, 土と基礎, Vol. 38, No. 1, pp. 67-72, 1990
 - 8) 片桐雅明, 齋藤邦夫, 増田達, 相沢文也, 鶴飼恵三: 地下連続壁の溝壁の安定性に関する模型実験, 土と基礎, Vol. 45, No. 10, pp. 13-16, 1997.
 - 9) 土木学会: 動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法, pp. 240-241, 1989. 7
 - 10) Ugai, K. and Leshchinsky, D.: Three-dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a comparison of results, Soils and Foundations, Vol.35, No.4, pp.1-7, 1995.
 - 11) 地盤工学会: 入門シリーズ13, 土の強さと地盤の破壊入門, pp. 82-103, 1987
 - 12) Ishii, T., Katagiri, M., Saitoh, K., Masuda, T., Kuwabara, K., Aizawa, F. and Ugai, K.: Estimation of global safety factor of slurry trenches by 3-D FEM, Proc. of 9th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, pp.2513-2518, 1997.11
 - 13) 若井明彦, 鶴飼恵三: 単杭の水平挙動解析に用いる砂の3次元構成則の検討, 土木学会論文集, No. 589/III-42, pp. 369-374, 1998.

(1999. 9. 17受付)

STABILITY ANALYSIS BY 3-D ELASTO-PLASTIC FINITE ELEMENT METHOD FOR SLURRY TRENCHES CONSTRUCTED IN SANDY GROUND

Takeshi ISHII, Kunio SAITOH, Kiyoshi KUWABARA and Keizo UGAI

The stability of slurry trenches constructed in sandy ground has been estimated by a few methods based on the limit equilibrium method. They are, however, insufficiently considered on an assumed shape of failure plane and lateral confining forces acting on a sliding soil mass. The 3-D elasto-plastic FEM that combines a shear strength reduction method to estimate a global safety factor and the shape of failure surface was applied to the stability of the slurry trenches. The applicability of this method was verified by comparing the results obtained from the centrifuge model tests on the slurry trenches with several lengths. In addition, the relationship between mesh size and precision of the safety factor was investigated for actual use.