

拡底部を有する大成式連続地中壁構築工法 「拡底 TUD[®]工法」の開発

溝壁安定評価法の検討

加藤 雅樹*¹・渡邊 康司*²・渡邊 徹*¹・岩田 暁洋*³・秋月 通孝*³

Keywords : diaphragm wall, under-ream, trench wall stability, centrifuge model testing, Shear Strength Reduction-FEM
地中連続壁, 拡底部, 溝壁安定, 遠心模型実験, せん断強度低減法

1. はじめに

近年、建築物の高層化・高重量化が顕著であるとともに、柱間隔が大きくなり柱 1 本あたりに作用する荷重が増大する傾向にある。また、設計地震力が大きくなることにより、塔状比が大きい建築物や連層耐震壁の直下では杭に大きな引抜き力が作用するケースも増えている。このため、杭に求められる支持力や引抜き抵抗は増加する傾向にあり、従来の場所打ち杭では対処できないケースでは連続地中壁が用いられることがある。上述の課題を解決するため、拡底部を有する連続地中壁「拡底 TUD」の研究開発に着手し、これまでに実大の施工試験を実施している¹⁾。

連続地中壁の構築では、コンクリート打設前の掘削過程において設計で想定する寸法および形状を確保することが重要となる。掘削過程における地盤・溝壁の安定性は、原位置の地盤条件や連続地中壁の条件を考慮して解析的に評価する。しかしながら、拡底部を有する連続地中壁の溝壁安定に関しては研究事例が無い現状にある。

本報では、拡底 TUD の溝壁安定を評価することを目的として、遠心模型実験および有限要素法による数値解析を実施したため、その結果を報告する。

2. 既往の溝壁安定検討法の概要と課題

連続地中壁の溝壁安定に関する研究事例は、重力場や遠心場における実験的研究²⁾や極限平衡法や有限要

素法に基づく数値解析的研究³⁾などがある。

実務における連続地中壁の溝壁安定は、極限平衡法に基づく方法が用いられることが多く、主として半円形すべりの方法⁴⁾、三次元円筒すべりの方法⁵⁾、プロトジャコノフの方法⁶⁾、指数曲面すべりの方法⁷⁾の 4 つの方法が用いられている。いずれの評価方法も正当に側方拘束圧を考慮しておらず、評価方法に統一性がない。また、溝壁安定を評価する方法として、上述の極限平衡法が広く用いられているが、十分に信頼がある結果が得られない。そこで、4 つの方法で並列して検討し、それぞれの結果を比較して溝壁安定や対策の必要性を判断しているのが実状である。それらの問題点を解決する解析的手法として、3 次元弾塑性 FEM にせん断強度低減法を導入した手法（以下、Shear Strength Reduction-FEM Method, SSR-FEM）がある。この手法は、すべり面を仮定せずに極限平衡法に基づく安全率に矛盾しない全体安全率が算定できるという特徴を有する。本報では、SSR-FEM を導入した有限要素法に基づく評価方法を確立することにより、現状では多くの条件を仮定し複数の方法で評価してきた溝壁安定を実状に即した条件で精度よく評価するとともに、検討事例が無い拡底部を有する連続地中壁「拡底 TUD」の溝壁安定の評価を行う。

3. 遠心模型実験

3.1 実験装置

遠心模型実験は愛知工業大学所有のビーム型遠心模

* 1 技術センター 都市基盤技術研究部 構造研究室
* 2 愛知工業大学
* 3 建築本部 技術部



写真-1 遠心模型実験装置
Photo.1 AIT-Centrifuge

表-1 遠心模型実験装置の仕様
Table 1 Specifications of AIT-Centrifuge

Outer diameter of arm	2.72m
Height of arm	1.00m
Effective radius of platform	1.36m
Maximum payload	15G-t
Payload weight	0.2t (75G)
Platform space	0.6m*0.5m
Test model height	600mm

型実験装置 (AIT-Centrifuge) を用いて実施した。AIT-Centrifuge およびその仕様を写真-1 および表-1 に示す。

3.2 実験方法

遠心模型実験は砂地盤を対象として実施した。使用した地盤材料は珪砂 7 号 ($\rho_s=2.645\text{g/cm}^3$, $e_{max}=1.158$, $e_{min}=0.692$) で、三軸圧縮試験結果 (主応力差-軸ひずみ関係) を図-1 に示す。同図中には外部変位計と局所変位計 LDT による主応力差-軸ひずみ関係を示している。図-1 に示す三軸圧縮試験結果を用いて遠心模型実験の崩壊角を考察するとともに、SSR-FEM に用いる解析パラメータを算出した。

遠心模型実験の実験条件を図-2 に示す。検討した掘削溝の形状は、1/4 対称性を考慮して幅 15mm (0.75m)、奥行き 45, 90, 200mm (2.25, 4.5, 10.0m) 深さ 300mm (15.0m) であり、2次元および3次元の掘削溝を想定した。また、最大突出幅は、23mm (1.15m) である。なお遠心模型実験は 50G の遠心加速度場にて実施しているため、上記のカッコ内の数値は実スケール換算した値を示した。掘削溝は剛土槽の亚克力面に一致するように設置するため、崩壊に至るまでの地盤の変形挙動を観察することが可能となる。

実施工における掘削溝の安定は、溝壁内部に形成される泥膜と泥膜を介して地盤に作用される安定液の液圧により保持されるが、本実験では厚さ 0.1mm 程度のビニールパックを用いて泥膜を模擬するとともに、溝壁の形状を再現した。さらに、模型溝壁の内部には安

定液の比重 (1.05) を模擬した塩水を模擬安定液として満たした。

模型地盤は、模型溝壁をスパーサーとともに剛土槽内に設置した状態、相対密度 $Dr=60\%$ となるように空中落下法により作製した。その際、模型地盤の崩壊状況を観察するために、着色した珪砂 7 号の薄層を 20mm 間隔で模型砂地盤内に敷設した。さらに、実験後に模型溝壁の周辺地盤が崩壊に至るまでの変形状況を把握するための画像解析を実施するために、亚克力面に沿ってターゲットを 20mm 格子となるように設置した。模型地盤を作成後、模型溝壁内部に模擬安定

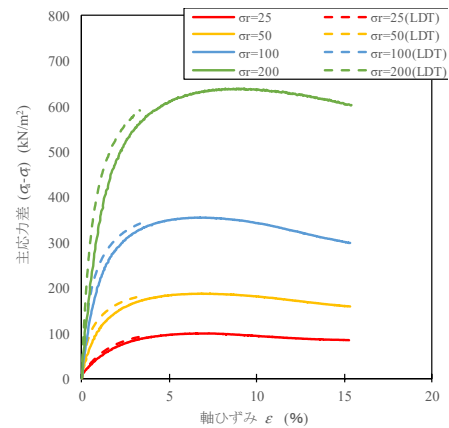
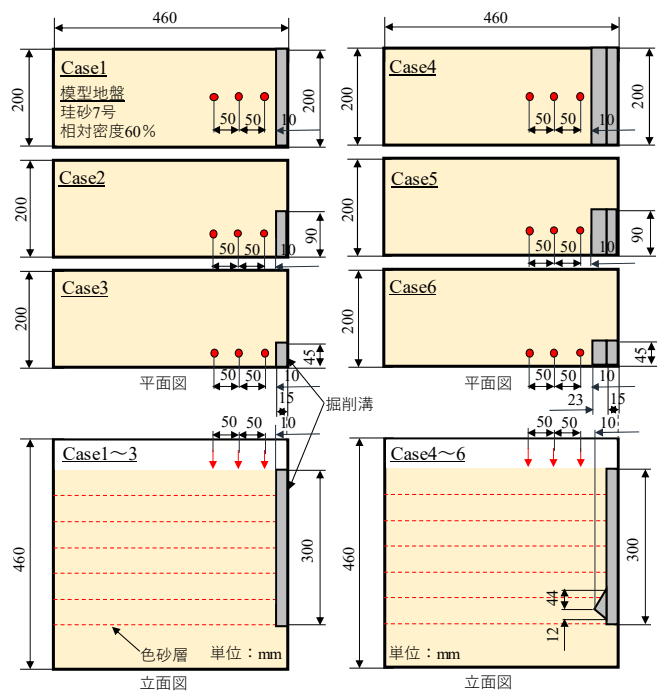


図-1 主応力差-軸ひずみ関係 (珪砂 7 号)

Fig.1 Relationships between main stress difference and axial strain (Silica sand No.7)



※ ● : 地表面沈下量の測定位置

図-2 遠心模型実験の実験条件

Fig.2 Schematic view of centrifuge model test apparatus

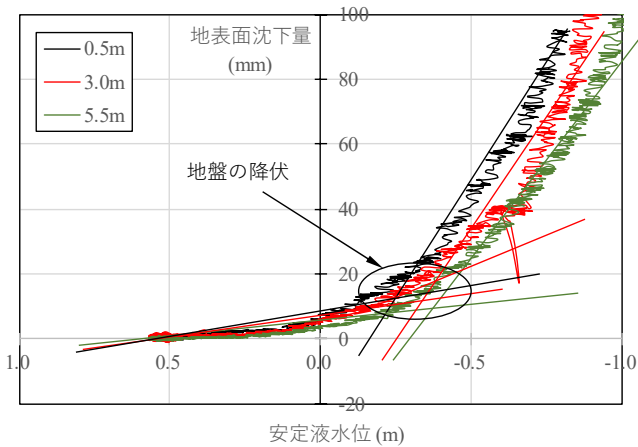
液を地表面から 10mm 程度の高さとなるように注水し、その模擬安定液水位を保持した状態で剛土槽底部より注水し模型地盤を飽和した後、模型地盤内のスペーサーを引き抜いた。所定の遠心加速度 (50G) 到達後に模型溝壁内部の模擬安定液を徐々に低下させて、その際の模型溝壁の安定性および模型溝壁周辺地盤の変形状況を確認した。ここで、模型溝壁内の模擬安定液は、模型溝壁底部から電磁弁を制御することで排水される構造となっている。模型溝壁内の模擬安定液の水位変化は間隙水圧計で、地表面沈下量はレーザー変位計でそれぞれ測定した。

3.3 実験結果

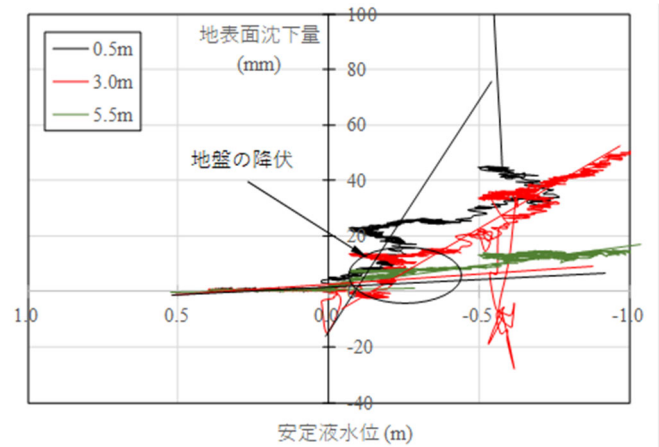
3.3.1 地盤面沈下量と安定液推移差

遠心模型実験で得られた地表面沈下量 S - 模擬安定液水位差 ΔH 関係を図-3 および図-4 に示す。ここで、図-3 および図-4 の凡例は、模型溝壁側面からの地表面沈下量の測定位置を実スケールで示している。なお、3

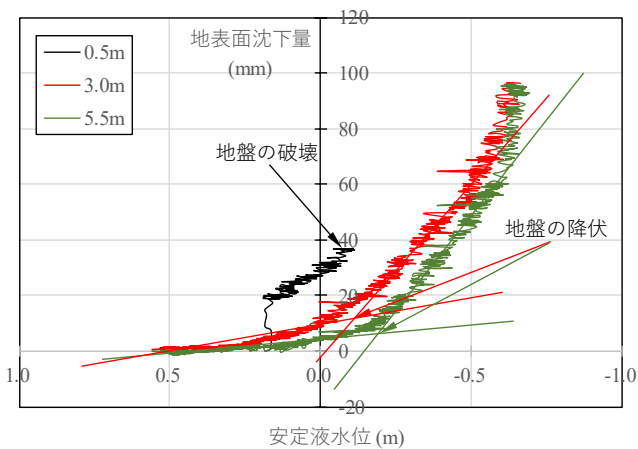
次元の掘削溝に対する実験結果に関しては紙面の都合上、奥行き長さが 90mm である Case 2 および Case 5 のみを示した。図-3 より、模擬安定液水位が GL-0m (地表面) 程度になると地表面沈下が徐々に増加することがわかる。地表面沈下の増加傾向は、模型溝壁に近い測点から進行していくと考えられる。また、 $S - \Delta H$ 曲線の勾配が変化する点を地盤の降伏とみなした場合、地盤の降伏が生じる模擬安定液水位差は、拡底部の有無に関わらず、GL-0.25m 程度となった。これは、模擬安定液による液圧と地盤から作用する土水圧のバランスが崩れたことに起因すると考えられる。図-4 に示すように 3 次元掘削溝に対して同様の評価を行った結果、地表面変位の進行は、2次元掘削溝と同様に溝壁に近い測点から生じることがわかった。地盤の降伏が生じる水位差は、地表面以下であり、2次元溝壁と同様に崩壊が進行すると考えられる。また、同一の奥行き長さで比較した際の地盤の降伏が生じる模擬安定液水位差は、



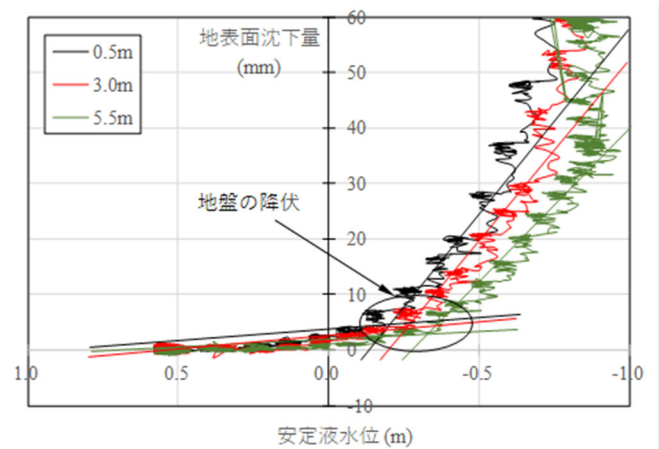
(a) Case 1 (拡底なし)



(a) Case 2 (拡底なし)



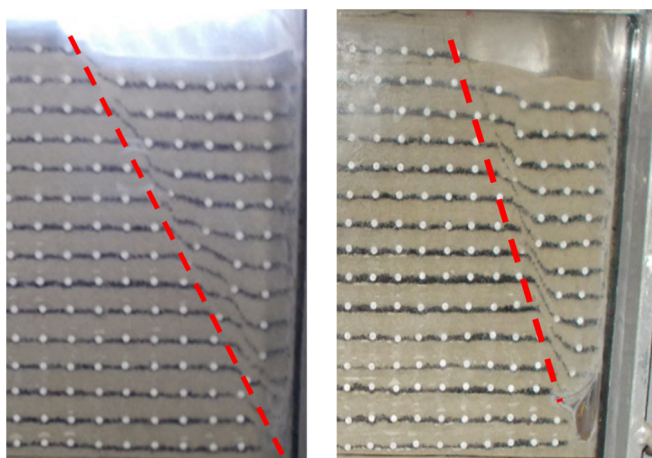
(b) Case 4 (拡底あり)



(b) Case 5 (拡底あり)

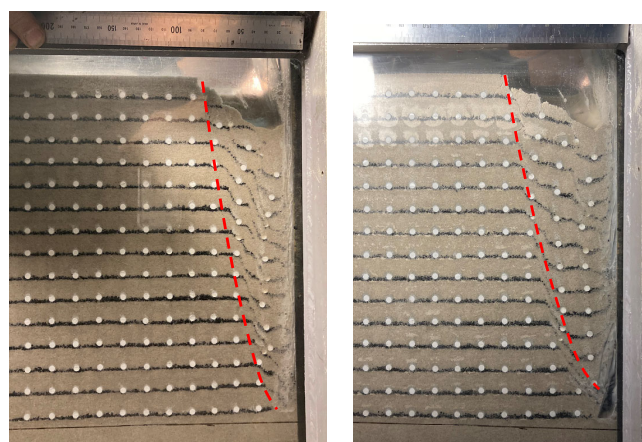
図-3 地表面沈下量 S -模擬安定液水位差 ΔH 関係 (2次元)
Fig.3 Relationships between settlement of model ground and water level of support fluid (two dimension)

図-4 地表面沈下量 S -模擬安定液水位差 ΔH 関係 (3次元)
Fig.4 Relationships between settlement of model ground and water level of support fluid (three dimension)



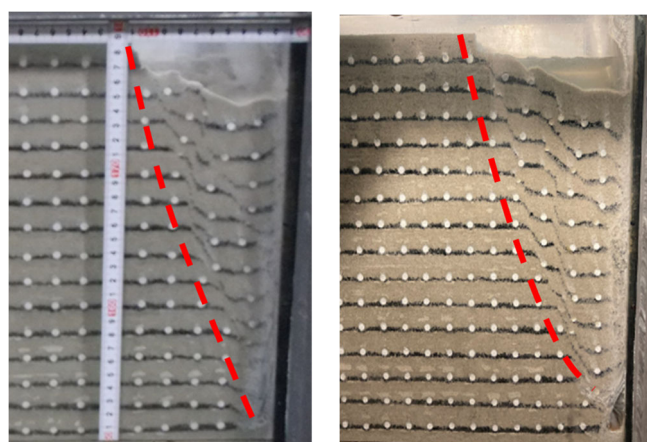
(a) Case 1 : 拡底部無し (b) Case 4 : 拡底部有り
図-5 崩壊形状 (2次元)

Fig.5 Failure mode of centrifuge model tests (two dimension)



(a) Case 3 : 拡底部無し (b) Case 6 : 拡底部有り
図-7 崩壊形状 (3次元, 奥行45mm)

Fig.7 Failure mode of centrifuge model tests
(three dimension, length is 45mm)



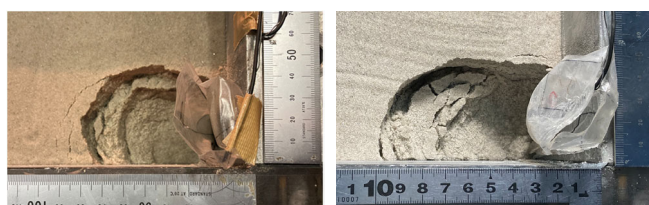
(a) Case 2 : 拡底部無し (b) Case 5 : 拡底部有り
図-6 崩壊形状 (3次元, 奥行き90mm)

Fig.6 Failure mode of centrifuge model tests
(three dimension, length is 90mm)



(a) Case 2 : 拡底部無し (b) Case 5 : 拡底部有り
図-8 地表面崩壊形状 (3次元, 奥行き90mm)

Fig.8 Failure mode of centrifuge model tests at ground surface
(three dimension, length is 90mm)



(a) Case 3 : 拡底部無し (b) Case 6 : 拡底部有り
図-9 地表面崩壊形状 (3次元, 奥行き45mm)

Fig.9 Failure mode of centrifuge model tests at ground surface
(three dimension, length is 45mm)

拡底部の有無に関わらず、同程度の水位となる。さらに、紙面には示していないが、地盤の降伏が生じる模擬安定液水位差は、奥行き長さが大きい場合に高い位置となることが確認できた。3次元溝壁の場合には拡底部で崩壊に差が生じにくい結果が得られた。

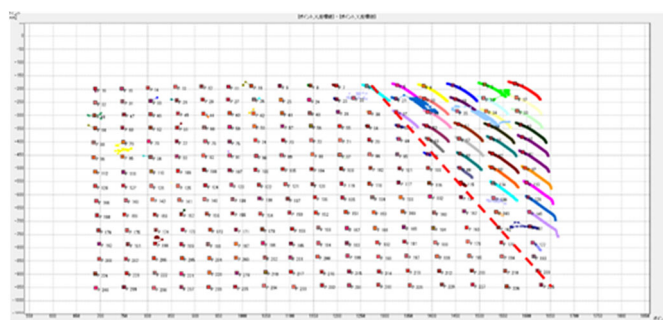
3.3.2 地盤の変形挙動

遠心模型実験から得られた崩壊土塊の形状を図-5～図-7に示す。図-5に示す2次元掘削溝で生じたすべり線の形状を比較すると、拡底部の有無によらずすべり線形状は直線的に発生していることが確認できた。遠心模型実験により発生するすべり線の崩壊角と理論式により求まる主働崩壊角を比較すると、実験値は64.0度、理論式による値は63.4度となり、ほぼ同程度の値となることがわかった。なお、理論式で求まる崩壊角の計算に用いた内部摩擦角 ϕ は、珪砂7号に対して実施

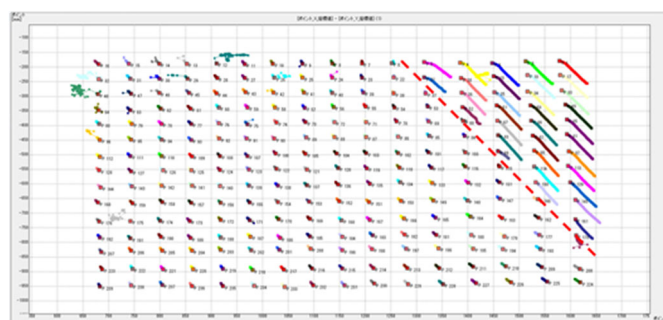
した三軸圧縮試験により評価した。

図-6および図-7に示す3次元掘削溝の場合に生じたすべり線の形状は、拡底部の有無によらず曲線的なすべり線形状を示した。また、3次元掘削溝における拡底部の有無によるすべり線の発生位置は、拡底部がない場合には掘削溝先端から、拡底部を有する場合には拡底部の最大突出部先端から発生することがわかった。さらに、拡底部を有する場合に拡底部の突出幅に相当するすべり領域の拡大が生じると考えられる。

地表面における崩壊形状を図-8および図-9に示す。図-8および図-9から、地表面における崩壊形状は、奥行き長さの違いによらず楕円に近い円弧状の形状を示



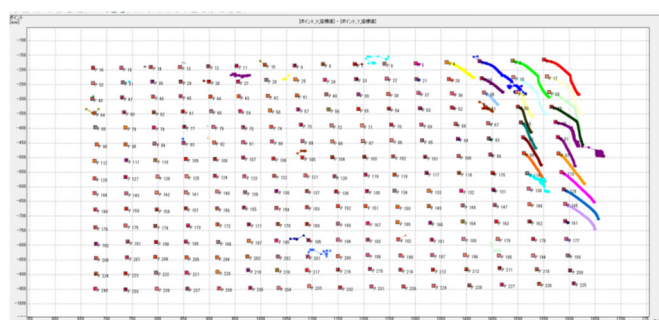
(a) 拡底部無し



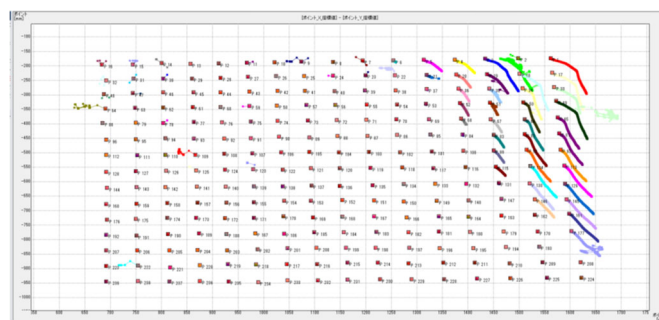
(b) 拡底部有り

図-10 画像解析結果 (2次元)

Fig.10 Result of image analysis (two dimension)



(a) 拡底部無し



(b) 拡底部有り

図-11 画像解析結果 (3次元, 奥行き 90mm)

Fig.11 Result of image analysis (three dimension, length is 90mm)

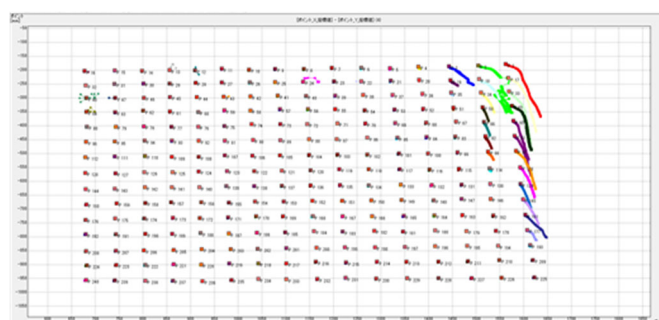
すことがわかった。また、奥行き方向には崩壊領域が発達しないことが確認された。拡底部の有無による崩壊領域に着目すると、拡底部を有する場合に拡底部の突出幅に相当する崩壊領域の拡大が生じる傾向にあると推察できる。

各実験ケースに対して実施した画像解析により得られた崩壊形状を図-10～図-12 に示す。画像解析は、土槽前面の亚克力面に沿って設置したターゲットを追尾することにより行った。図-10 に示す 2 次元掘削溝における画像解析結果より、すべり線形状は直線的に生じることがわかる。一方、3次元掘削溝に対する画像解析結果(図-11 および図-12)より、すべり線形状は曲線的な形状となることが確認された。また、拡底部を有する場合に拡底部の突出幅相当のすべり領域の拡大を生じることが確認された。

4. シミュレーション解析

4.1 解析概要

遠心模型実験結果を評価するためにせん断強度低減 FEM (Shear Strength Reduction, SSR-FEM)⁸⁾を用いた数値解析を実施した。シミュレーション解析に用いたプログラムは、GTS-NX (Midas 社) である。SSR-FEM において、地盤は弾完全塑性体とし、その降伏基準に



(a) 拡底部無し



(b) 拡底部有り

図-12 画像解析結果 (3次元, 奥行き 45mm)

Fig.12 Result of image analysis (three dimension, length is 45mm)

Mohr-Coulomb 式を適用する。また、SSR-FEM では式(1)および式(2)に示すように、地盤のせん断強度パラメータである c' と ϕ' をせん断強度低減係数 F_r で cr' と ϕ_r' に低減する。

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

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

c', ϕ' : 有効応力に関する粘着力およびせん断抵抗角

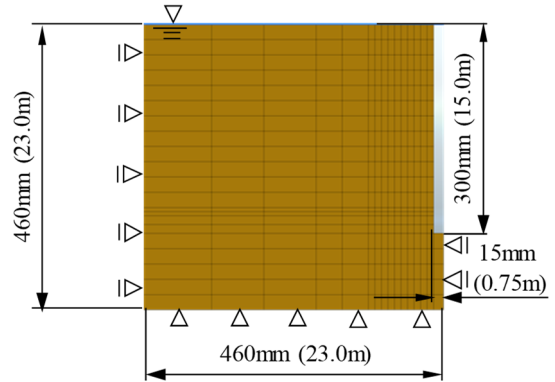
せん断強度低減係数 Fr の初期値は、地盤内の応力状態が弾性体となるような小さな値とし、弾塑性計算が発散するまで Fr を徐々に増加させる。ここで、 Fr の初期値は既往の研究成果に基づき 0.01 とした⁸⁾。系全体の安全率は、破壊直前のせん断強度低減係数として評価する。なお、収束計算の反復回数は 500 回とした。解析モデルを図-13 に示す。図-13 に示すように、遠心模型実験の試験体を実スケールに換算してモデル化した。また、地盤の地下水位は遠心模型実験と同様に地表面に設定した。従って、安定液水位が地表面より上部に位置する場合には水位差がプラスとなる。

解析に用いたパラメータを表-2 に示す。解析パラメータ（粘着力、せん断抵抗角、変形係数）は、遠心模型実験の模型地盤と同じ相対密度 $Dr=60\%$ に調整した供試体に対して、CD 三軸圧縮試験を実施することにより評価した。また、地盤のポアソン比 ν は、CD 三軸圧縮試験と同様に相対密度 $Dr=60\%$ に調整した供試体を用いた K_0 圧密試験により評価した。

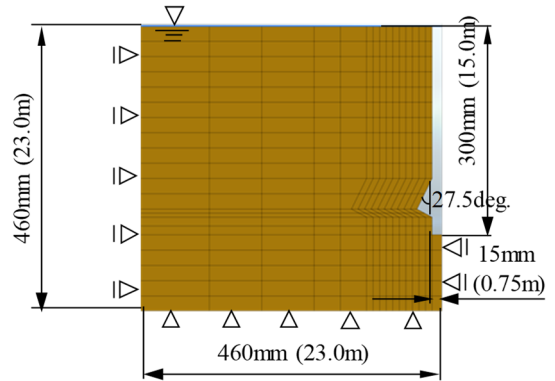
解析では、遠心模型実験と対応させるために、溝壁内部の模擬安定液水位を徐々に低下させた際の模型溝壁の安定性、すなわち全体安全率および模型溝壁周辺地盤の変形状況を確認した。ここで、解析における模擬安定液の液圧は、溝壁内部に作用する静水圧分布となるように関数として与えて再現した⁹⁾。解析を実施した模擬安定液水位は、GL-1.0m~+1.0m の範囲で模擬安定液水位を 0.5m 間隔で変化させた 5 ケースである。

4.2 解析結果

2次元溝壁である Case 1 および Case 4 に対する解析を行った。Case 1 および Case 4 で得られた安全率-水位差関係を図-14 に示す。図-14 より、安全率が 1.0 以上となる水位差は、拡底部がない場合で $\Delta H=+0.5m$ 程度、拡底部を有する場合で $\Delta H=+1.0m$ 程度となり、上記の水位差を確保することで連続地中壁の安定性を保持していることがわかった。従って、拡底部を有する場合には拡底部がない場合に比較して、溝壁を安定させるための安定液水位を大きくする必要があることを示唆している。また、図-14 で示した安全率と図-3 で示した地盤の降伏を比較すると、地盤の降伏は安定液水位が G.L. 0~0.2m 程度に位置する場合に生じると考えられるため、シミュレーション解析では安全率をやや過小評価する傾向となった。拡底の有無による最大せん断ひ



(a) Case 1 : 拡底無し



(b) Case 4 : 拡底有り

図-13 解析モデル (2次元)

Fig.13 Schematic view of FEM analysis model (two dimension)

表-2 解析パラメータ

Table 2 Analytical parameters

	物性	設定値
地盤	飽和単位体積重量: γ_{sat}	18.3 kN/m ³
	変形係数: E_{50}	4470 kN/m ²
	ポアソン比: ν	0.28 -
	粘着力: c	6.5 kN/m ²
	せん断抵抗角: ϕ	37.3 °
	ダイレンタンシー角: ψ	37.3 °
安定液	単位体積重量: γ_s	10.3 kN/m ³

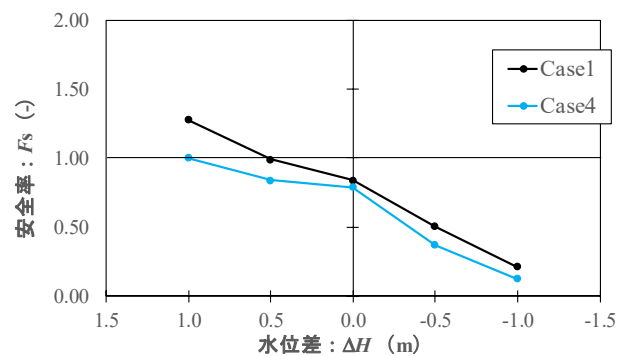
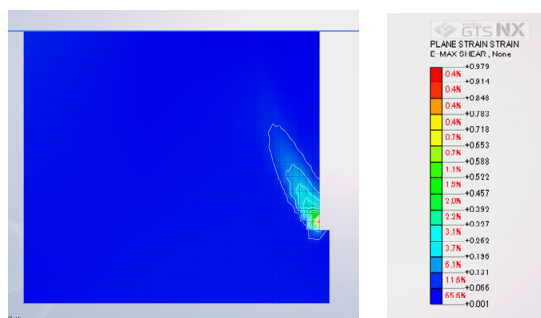
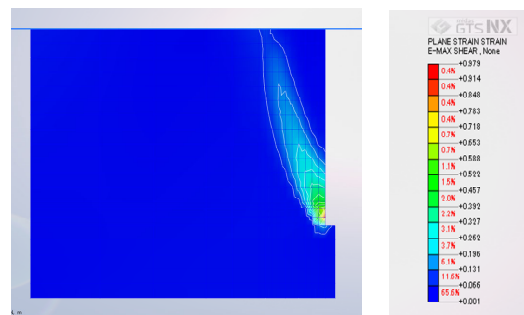


図-14 全体安全率-安定液水位差関係

Fig.14 Relationships between safety factor and water level of support fluid

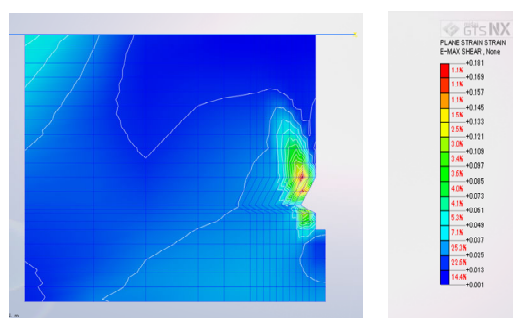


(a) 水位差 : +0.5m (最大値 : 0.373, 最小値 : 0.001)

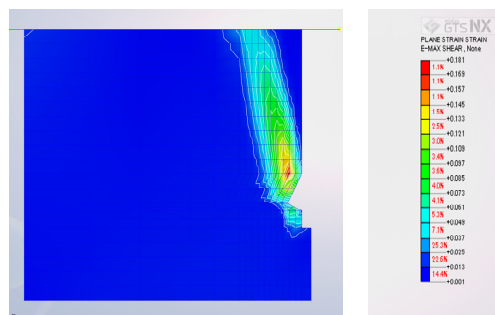


(b) 水位差 : 0m (最大値 : 0.373, 最小値 : 0.001)

図-15 最大せん断ひずみ分布 (Case 1 : 拡底無し)
Fig.15 Maximum shear strain (Case 1)



(a) 水位差 : +0.5m (最大値 : 0.181, 最小値 : 0.001)



(b) 水位差 : 0m (最大値 : 0.181, 最小値 : 0.001)

図-16 最大せん断ひずみ分布 (Case 4 : 拡底有り)
Fig.16 Maximum shear strain (Case 4)

ずみの分布を図-15および図-16に示す。なお、図-15および図-16には水位差が+0.5mと0mの場合のせん断ひずみ分布を示す。図-15から、拡底部がない場合にはせん断ひずみが溝壁先端部から直線的に発生しており、遠心模型実験と同様の変形挙動となった。また、拡底部がない場合の2次元掘削溝における変形挙動は、既往の研究⁸⁾と対応する結果となった。一方、図-16に示す拡底部を有する場合には、拡底部近傍にせん断ひずみの分布が大きく発生しており、拡底部近傍の変形が卓越していることがわかる。また、せん断ひずみの分布は、拡底部近傍から直線的な分布で地表面に向かって生じており、遠心模型実験と対応する変形挙動となった。

5. まとめ

拡底 TUD の溝壁安定を評価することを目的として、遠心模型実験および有限要素法による数値解析を実施した。その結果、遠心模型実験により地盤の崩壊形状および地盤の降伏が生じる安定液水位を把握するとともに、SSR-FEMにより2次元溝壁の遠心模型実験に対応する変形挙動を得た。

今後、3次元溝壁や現場施工実験¹⁾のシミュレーション解析を実施し、SSR-FEMを用いた溝壁安定評価方法

を確立することで、超高層建物を中心に実建物への適用を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 加藤 雅樹, 渡邊 徹, 岩田 暁洋, 秋月 通孝: 拡底部を有する大成式連続地中壁構築工法「拡底 TUD 工法」の開発, 大成建設技術センター報, 第 54 号, 21, 2021.
- 2) Watanabe, K. et al.: Centrifuge Model Test on Trench Stability of Diaphragm Wall, Proceedings of International Conference on Soft Ground Engineering, pp. 727-737, 2015.
- 3) 片桐ほか: 砂地盤中の泥水掘削溝壁の破壊メカニズムとその解釈, 土木学会論文集, No. 666, III-53, pp128-129, 2000.
- 4) 佐藤ほか: 泥水掘削壁面の安定計算方法, 第 10 回土質工学研究発表会, pp.1023-1026, 1975.
- 5) 内田ほか: 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. 95-105, 1971.
- 6) Pisakowaki, P. G. et al.: Application of thixotropic clay suspensions for stability of vertical slides of deep trenches without strutting, Proceedings of 6th ICSMFE, Vol. 2, pp. 526-529, 1965.
- 7) 樋口ほか: 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. 3, pp. 7-12, 1994.
- 8) 片桐ほか: 砂地盤中の泥水掘削溝壁の破壊メカニズムとその解釈, 土木学会論文集, No. 666, III-53, pp128-129, 2000.
- 9) Midas 社: GTS-NX ユーザーズマニュアル