

30. 連続地中壁施工時における隅角部の安定性

中央大学 研究開発機構
中央大学 理工学部

○ 石井 武司
齋藤 邦夫

1. はじめに

連続地中壁の施工においては、掘削壁面や周辺地盤の変形を抑制するために、泥水（安定液とも言う）を掘削溝に満たしながら所定の深さまで掘削する。その後、鋼製連壁部材を挿入してからコンクリートを注入して泥水と置換させる。この施工は他の山留め工事や基礎工事に比べて振動や地盤変形が少ないことから、周囲に近接構造物や重要施設が密接する都市部で多く採用される。それゆえ、このような場所において溝壁が崩壊すれば周囲に多大な被害を及ぼすので、溝壁の安定確保は重要事項である。

掘削時の安定性を評価する手法としては、半円形すべり法¹⁾、三次元円筒すべり法²⁾、プロトジャコノフ法³⁾、および指数関数法⁴⁾が我が国で従来から主に使用されてきた。これらはそれぞれ特有のすべり面形状を仮定し、極限平衡法によって安全率を算定している。そのため、すべり面形状の妥当性を含めて様々な問題点を抱えている⁵⁾。

山留め壁などに適用される一般的な連続地中壁の平面配列は図-1のような矩形で、直線部分と隅角部分で構成されるのが一般的である。前述の安定性評価手法は全て直線部を対象として開発されており、隅角部を対象としたものはない。

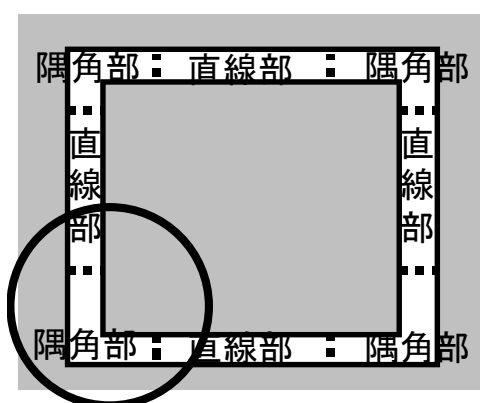


図-1 連続地中壁の平面配列

しかしながら、砂質土地盤における隅角部は崩壊しやすく、掘削は可能な限り直線にすることが望ましいと言われている⁶⁾。そのため、隅角部の安定性評価にあたっては、直線部を対象に開発された手法を隅角部にあてはめて評価を行う方法が

提案されている⁷⁾。ただし、その手法に関する妥当性は明示されていない。また、隅角部のすべり面形状に関するデータもないため、その検証も難しい。このように隅角部に関しては、未解明な点が数多いため、施工に際しては技術者の経験的判断により行われてきたと考えられる。

本研究では、このように隅角部の安定性に関しては不明確な点が多いこと、それにも拘わらず施工実績が築かれてきたことから、まず、既往の施工事例を収集・分析し、施工現場における安定性の経験則を明らかにする。

また、筆者等は既存の安定性評価手法が信頼性を欠いていたことから、遠心模型実験を実施してその安定性を調べてきた⁸⁾。その結果、泥水掘削溝壁の安定機構は、図-2の概念図に示すように、安定液によって溝壁面に形成された不透水性の泥膜を挟み、安定液の液圧が地盤の土圧を支えることで成立することがわかった。その結果に基づき、力学的挙動を合理的に説明できる手法として、三次元弾塑性有限要素法にせん断強度低減法を組み込んだ三次元せん断強度低減有限要素法で安全率を算定する手法を提案し⁹⁾、実務でも採用された¹⁰⁾。この手法は三次元の有限要素法であることから、隅角の形状を適切に扱うことが可能である。そこで、模型実験を行って、その手法の妥当性も検討する。

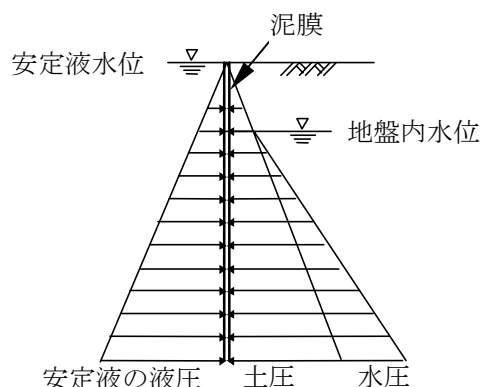


図-2 溝壁安定の概念図

2. 隅角部の形状

連続地中壁の平面形状は、図-3のように、長方形の直線部およびL字型、T字型、十字型、ある

いはコ字型の隅角部から構成される。

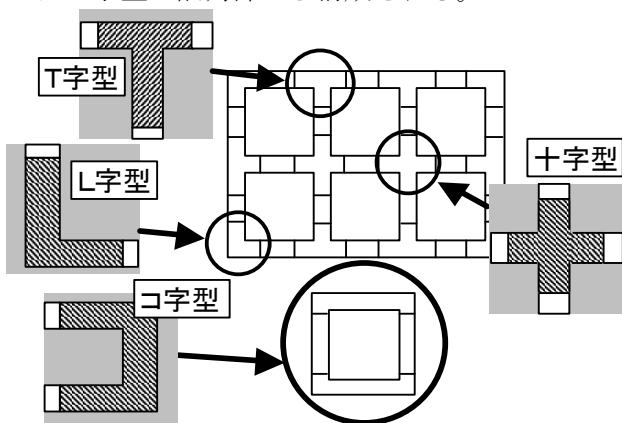


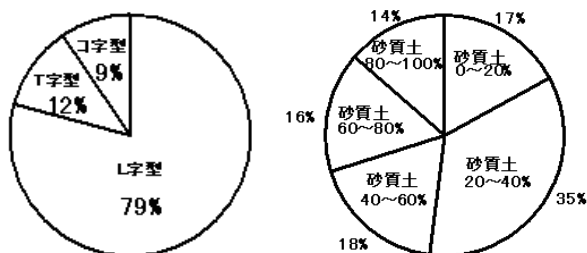
図-3 連続地中壁の平面配列における隅角部の種類

3. 事例分析¹¹⁾

「基礎工」,「土木技術」,「土木施工」の雑誌や地中連続壁実例集などから施工事例を収集した。

3.1 収集事例の特徴

収集した事例の隅角部形状をL字型, T字型, コ字型で分類すると, その割合は図-4(a)のようになる。L字型が全体の79%占め, T字型とコ字型は約10%前後である。一般に, L字型は平面形状が矩形の山留め壁や連壁基礎の四隅に適用される。T字型やコ字型は連壁基礎で多く見られる。このことから, 収集した事例は山留め壁が大半である。



(a) 隅角部の形状

(b) 対象土層

図-4 収集事例における隅角部形状と構成地盤の比率

連続地中壁は基盤層に根入れされることが多く, 掘削溝の掘削は一般に表層から基盤層中まで及ぶ。基盤層における溝壁は地盤のせん断強度が大きいので, 溝全体の崩壊につながるようなすべり破壊を生じにくい。そこで, 構成地盤のうちN値が50以上の続く層を基盤層とみなし, それで浅い地盤がすべり破壊を生じる可能性がある対象層とする。基盤層で浅く砂質土の占める割合を0~20%, 20~40%, 40~60%, 60~80%, 80~100%の5つに分類した。その結果を図-4(b)に示す。収集事例は砂質土が60%以上を占める砂質土主体の地盤が30%で, 過半数は砂質土が40%以下, すなわち粘性土が60%以上を占める粘性土地盤である。

3.2 整理方法

安定性に関与するものを大きく分けると, 溝の形状, 地盤条件, 施工条件の3つとなる。それぞれの要素は次のとおりである。

溝形状 : 掘削長さ, 掘削深さ, 掘削幅

地盤条件 : 土層構成, 地下水位, 単位体積重量, せん断強度など

施工条件 : 安定液の密度と水位, 補助工法の採否と採用工法, 上載荷重(近接構造物, 施工機械など)など

ここでは整理の指標に溝形状における掘削長さ, 掘削深さ及び掘削幅とした。隅角部の溝長さに関しては, 図-5に示すように, 隅角部の掘削長を長辺掘削長さ L_1 と短辺掘削長さ L_2 に分けた。隅角部の形状は短辺掘削長さ L_2 /長辺掘削長さ L_1 の比率で特徴づけることができるので, 以下ではその比率 L_2/L_1 を溝長さ比と称す。また直線部の掘削長さを区別するために, 直線部の掘削長さを直線部掘削長さ L とした。地盤条件に関しては, 基盤層で浅い地盤を粘性土と砂質土に区分し, それぞれに対して層厚の重みで平均N値を求めた。施工条件に関しては補助工法の採否を対象とした。補助工法は溝壁の安定性を向上させるので, その採否は重要な要素である。

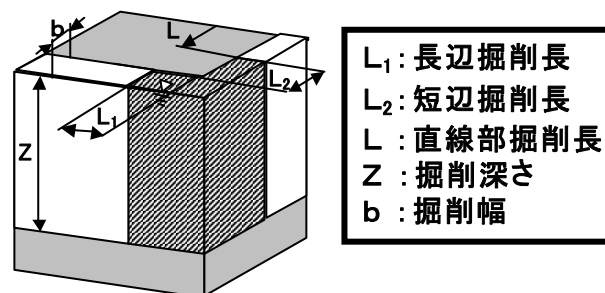


図-5 溝壁概念図

3.3 隅角部の事例分析

(1)「溝長さ比(L_2/L_1)」と平均N値の関係

隅角部の形状を特徴づける溝長さ比と平均N値の関係を図-6に示す。隅角部形状ごとの違いは分布状況に認められない。補助工法採否に着目すると, 補助工法ありとなしが溝長さ比1/3~1の範囲に不規則に分布する。よって, 溝長さ比と平均N値との間には関係が無いと判断できる。

(2)「溝長さ比(L_2/L_1)」と総延長掘削長さ(L_1+L_2)の関係

溝壁の安定性は掘削溝の長さに関与することから, 隅角部における2辺の掘削長さを加えた掘削総延長(L_1+L_2)を指標にとれば, 溝長さ比(L_2/L_1)との関係は図-7のようになる。補助工法採否に関する分布は掘削総延長が8mを境界として2つに分類さ

れる。掘削総延長が8m以下では補助工法有無が混在する。掘削総延長が8m以上の場合は、溝長さ比を0.5以下とした上に補助工も適用して慎重な施工が行われていることが指摘できる。

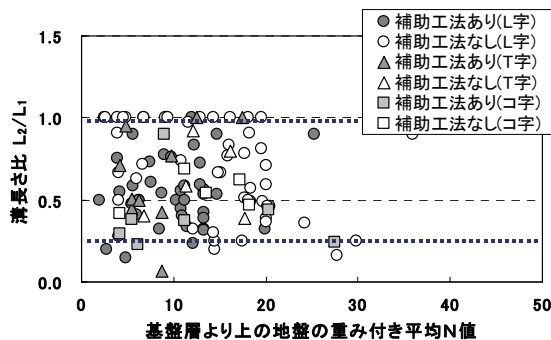


図-6 平均N値と溝長さ比の関係

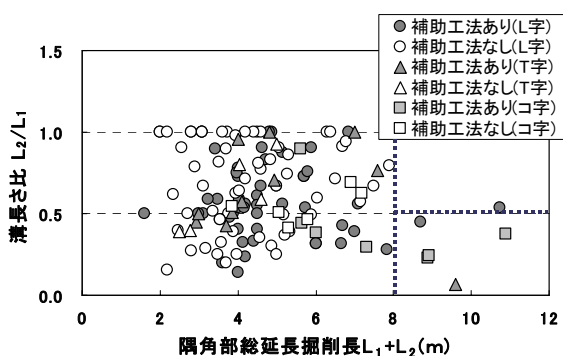


図-7 溝長さ比と総延長掘削長の関係

(3) 「溝長さ比(L_2/L_1)」と溝深さZの関係

溝の掘削深さと溝長さ(L_2/L_1)の関係を図-8に示す。この関係においても、隅角部形状の分布状況に明瞭な違いが認められない。溝深さに関しては20m～50mの事例が一般的に多い。その中で溝深さ50m以上の事例では、その多くが補助工法を用いている。溝長さ比に対する関係については明確な特徴がなく、相関性がないと判断できる。

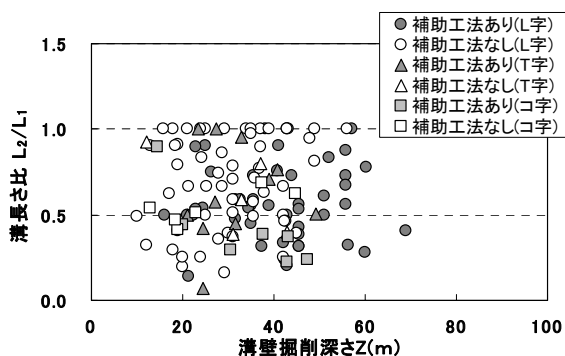


図-8 溝長さ比と溝深さの関係

3.4 隅角部と直線部の事例比較

直線部の溝に対しては安定計算手法や判定図などがあることから、直線部の溝長さはこれらに基

づいて安全性が確保されていると判断できる。そこで、直線部に対する隅角部の溝長さの関係が明確になれば、設計が容易になる。そこで、隅角部の安定性の特徴づけることができる経験則の抽出を試みた。

(1) 直線部掘削長Lと総延長掘削長(L_1+L_2)の関係

直線部掘削長と掘削総延長の関係を図-9に示す。両者の間には特徴的な関係が認められない。

(2) 直線部掘削長Lと隅角部長辺掘削長 L_1 の関係

直線部掘削長と隅角部長辺掘削長の関係を図-10に示す。大半の施工事例は隅角部長辺掘削長が直線部掘削長よりも短い。そこで、図中に直線 $L=2 \times L_1$ を加える。補助工法の有無に拘わらず、多くの事例がその直線付近に分布する。このことから、隅角部長辺掘削長は直線部掘削長の約半分で施工されることが多いと判断できる。

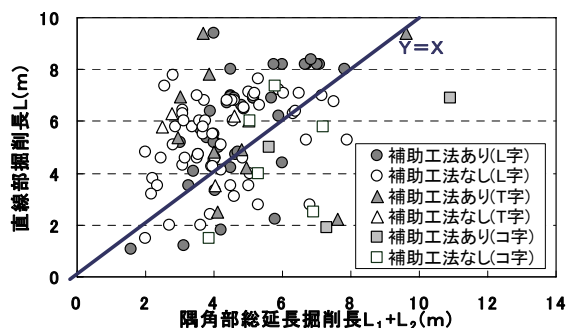


図-9 直線部掘削長と総延長掘削長の関係

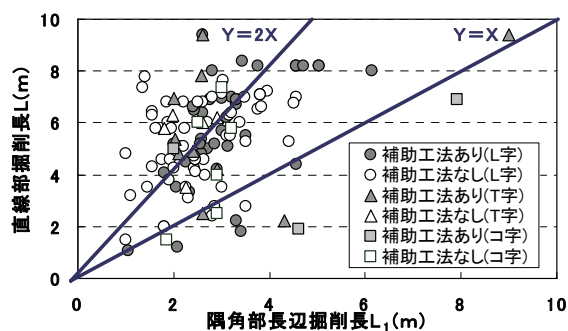


図-10 直線部掘削長と隅角部長辺掘削長の関係

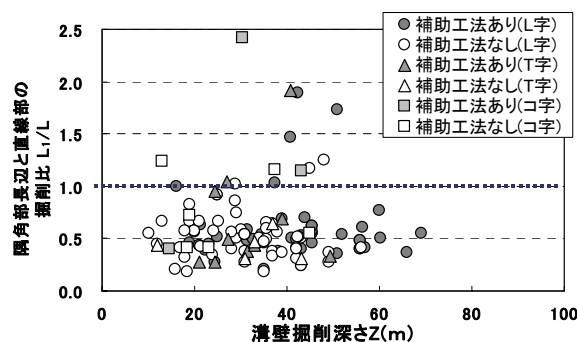


図-11 長辺掘削長/直線部掘削長 L_1/L と溝深さの関係

(3) 隅角部長辺掘削長/直線部(L_1/L)と掘削深さ Z の関係

図-10 から隅角部長辺掘削長/直線部掘削長の比率 L_1/L (以下、隅角部長辺と直線部の掘削長比と称す) が 0.5 前後にあることがわかった。そこで、その比率に影響を与える要因として掘削深さ Z に着目し、両者の関係を図-11 に示す。隅角部長辺と直線部の掘削長比は掘削深さに関係なく、ほぼ 0.5 付近にある。

4. 数値解析を用いた隅角部の安定性評価¹¹⁾

事例分析により得られた隅角部の施工に関する経験則「隅角部長辺と直線部の掘削長比は概ね 0.5」の力学的背景を明らかにするために、数値計算を行った。

4.1 数値計算手法

安全率および変形を求めるために、三次元弾塑性有限要素法にせん断強度低減法を組み込んだせん断強度低減有限要素法 (以下、SSRFEM) を適用した。この計算方法は、地盤を弾完全塑性体と仮定し、そのせん断強度定数の c' と ϕ' を、仮想的にそれぞれ次のようにせん断強度低減係数 F_r で c'_r と ϕ'_r に低減する。

$$c'_r = \frac{c'}{F_r}, \quad \phi'_r = \arctan\left(\frac{\tan \phi'}{F_r}\right) \quad (1)$$

F_r 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。その後、 F_r を段階的に大きくするたびに、弾塑性計算を行う。すると、ある F_r に達すると、弾塑性計算が発散する。計算の発散は地盤のすべり破壊を意味するので、この直前の F_r を系全体の安全率と定義する。すなわち、この手法は強度安全率の考え方に立脚すると言える。また、 $F_r=1.0$ は本来の強度定数を与えるので、地盤の変位はこの低減係数の弾塑性計算結果を用いれば良い。

4.2 数値計算の条件とケース

解析の対象範囲を図-12 に示す。解析対象は、隅角部の溝壁掘削時に隣接の直線部が連続地中壁として構築されている状態とする。よって、解析モデルは図-13 のようになる。隅角部の泥水掘削部は泥水で満たされているので、溝壁に泥水圧を作用させることで泥水掘削溝をモデル化する。地盤は一樣な砂地盤を想定し、地下水位は地表面下 2m とした。そこに溝深さ 12m、溝幅 1.2m の連続地中壁を想定した。溝壁掘削の際の安定液は地表面位置まで満たしていると仮定した。表-1 に地盤と安定液の物性値を示す。

計算ケースは事例の分析結果を参考にして設定した。事例分析によれば、隅角部の長編掘削長は直線部のおよそ半分で施工され、短辺掘削長と長

辺掘削長の比率は 1/3~1 のものが多い。そこで、直線部掘削長 L を 12m、隅角部長辺掘削長 L_1 を 6m とし、隅角部短辺掘削長 L_2 を 3m、4.5m、6m の 3 通りを設定した。また、比較のために直線部の掘削長 L は隅角部の長辺掘削長と同じ 6m とその 2 倍の 12m とした。計算ケースを表-2 に示す。

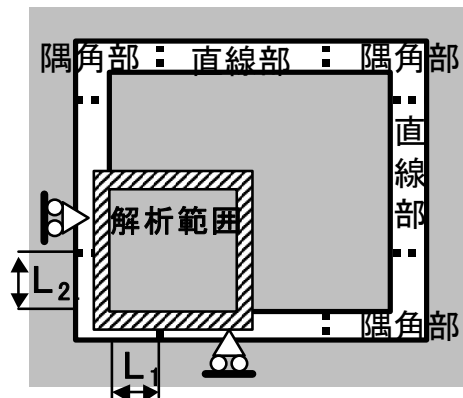


図-12 解析範囲

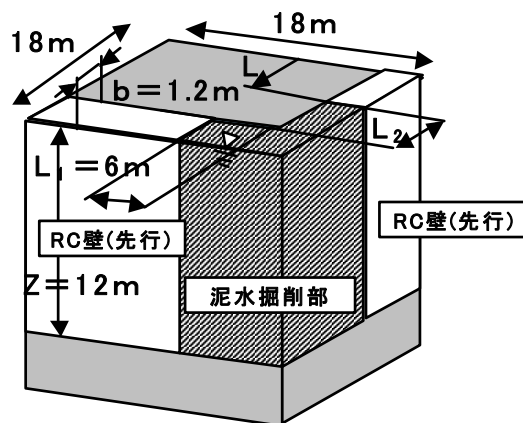


図-13 隅角部の安定解析モデル

表-1 解析に使用した地盤と安定液の物性値

材料	物性	設定値
砂地盤	単位体積重量 : γ_s	18.0kN/m ³
	ヤング係数 : E_{50}	6,7500kN/m ²
	ポアソン比 : ν	0.333
	非排水せん断強度 : S_u	0kN/m ²
	せん断抵抗角 : ϕ	35°
	ダイレイタンシー角 : ψ	35°
安定液	単位体積重量 : γ_m	10.3kN/m ³

表-2 計算ケースおよび結果

CASE	長辺掘削長: L_1	短辺掘削長: L_2	直線部掘削長: L	F_s
1	6m	6m		1.25
2	6m	4.5m		1.30
3	6m	3m		1.42
4			6m	1.96
5			12m	1.51

4.3 数値実験結果

長辺掘削長 6m に対して短辺掘削長を変えた計算結果を溝長さ比 L_2/L_1 との関係で隅角部の安全率

を図-14 に示す。縦軸は、隅角部の安全率と直線部の安全率の比率である。

隅角部の安定性は、溝長さ比が大きくなると、すなわち短辺の溝が長くなると単調に低下する。このことは、直線部に対して直角方向に掘削すれば安定性が容易に損なわれることを意味する。

次に直線部の安全率と比較する。直線部掘削長6mの場合は、隅角部の安全率は直線部より約28～37%低下する。直線部掘削長が隅角部長辺掘削長の2倍の12mでは、隅角部の安全率は直線部より約6～18%の低下である。数値解析で設定した条件下ではやや隅角部の安全率は低いものの、事例分析から得られた「隅角部長辺と直線部の掘削長比は0.5程度」は概ね妥当なものと判断できる。また、掘削長比が0.5を越える事例は、施工現場の地盤条件や地下水位条件などによって最適な掘削長比が異なる、あるいは数値解析結果のように直線部よりも安定性が低い状態で施工されていることを意味する。今後、計算条件を増やして安定性に寄与する要因を明確にしたいと考えている。

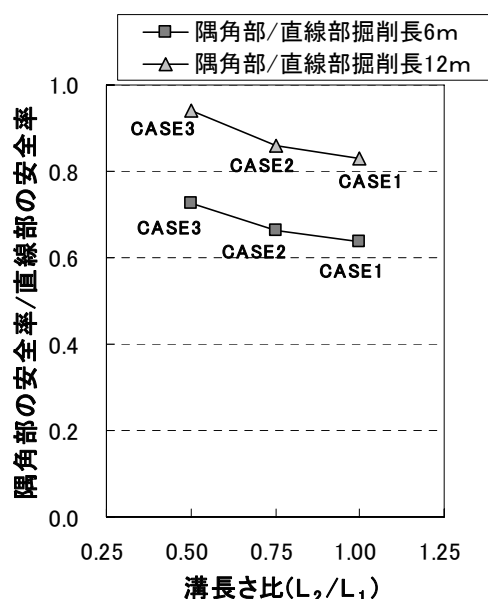


図-14 隅角部安全率に対する直線部の安全率との比較

5. 模型実験¹²⁾

5.1 実験の概要

模型実験の地盤材料にクロマイトサンドを用いる。砂質土地盤の安定問題に関する模型実験においては、模型の規模が小さいと、模型地盤内の残存する空気などの影響によって本来の変形挙動が現れにくい。本研究では地盤材料にクロマイトサンドを採用する。この材料は一般的な砂と類似のせん断特性を有し、さらに粒子密度が約1.7倍である¹³⁾。水中単位体積重量は約2.5倍に及ぶから、飽和地盤の実験では1400mmの土槽を用いても深さ3250mm規模の実験を実施したことに相当する。

模型実験の概要を図-15 に示す。溝形状をL字型とし、短辺掘削長 L_1 /長辺掘削長 L_2 の比を0.5とする。模型地盤の作製手順は、まず泥膜を模したビニールシートを土槽内に設置した後に、空中落下法によりクロマイトサンドの地盤を作成した。次に、地盤を乱さないように微小な水頭差を保ちながら地盤の底面から水を徐々に浸透することで、模型地盤を飽和させた。泥水掘削溝の崩壊実験は、安定液を毎秒10mmで低下させることで行った。その間、安定液水位と地盤内水位を水圧計で、 L_1 【1】、 L_2 【2】、交点【3】の地表面沈下量を変位計で測定した。

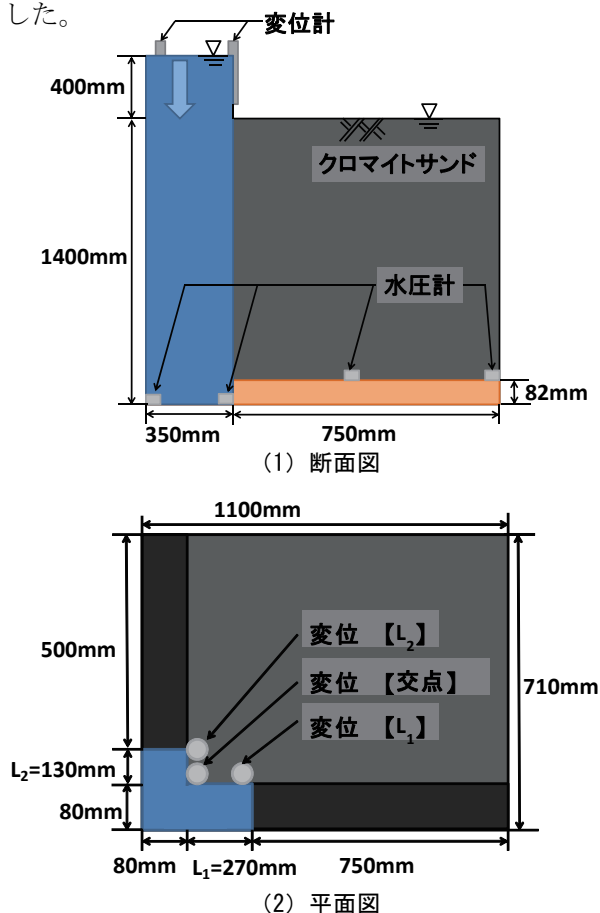


図-15 模型実験の概要図

5.2 実験結果

安定液水位と地盤内水位の差(水位差)および地表面沈下量の経時変化を図-16 に示す。地表面の沈下は、まず交点【3】から、次いで短辺 L_1 【1】、長辺 L_2 【2】の順序で生じる。最終的な沈下量は隅角部が最も大きく、長辺が最も小さい。隅角部は実験開始直後から明確な沈下が発生するが、短辺はそれに比べてその増加が小さい。長辺はある水位差を超えると沈下が急増し、ほぼ短辺と同じになる。実験終了後に観察された地表面の崩壊を図-17 に示す。隅角部の陥没とともに、先行壁の側面まで地盤が崩れた。地表面における崩壊範囲は先行壁と地盤の摩擦も重要な要因であると言える。

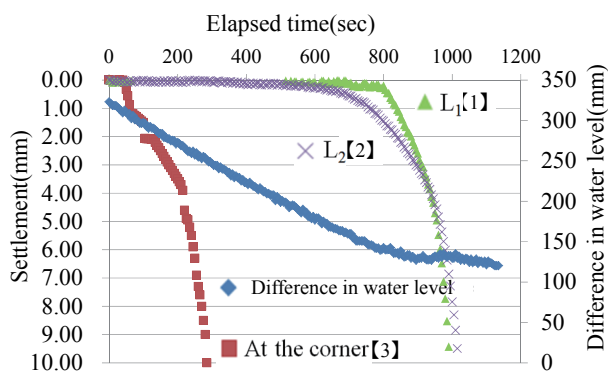


図-16 水位差と地表面沈下量の経時変化

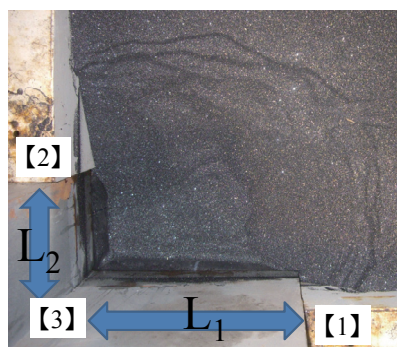


図-17 実験終了後に観察された地表面の崩壊

5.3 数値解析

安全率および変形を求めるために、三次元弾塑性有限要素法にせん断強度低減法を組み込んだせん断強度低減有限要素法（SSRFEM）を適用した。表-1 に解析に用いた地盤と安定液の物性値を示す。

解析で得られた水位差と地表面沈下量の関係を模型実験の結果と合わせて図-18 に示す。両者の差は約 10% 程度である。このことから適用した数値解析手法は概ね模型実験を良く再現していると判断できる。

表-1 解析に用いた地盤と安定液の物性値

材料	物性	設定値
砂地盤	単位体積重量: γ_s	30.0kN/m ³
	ヤング係数: E_{50}	67,500kN/m ²
	ポアソン比: ν'	0.3
	せん断抵抗角: ϕ	32.1°
安定液	単位体積重量: γ_m	12.26kN/m ³

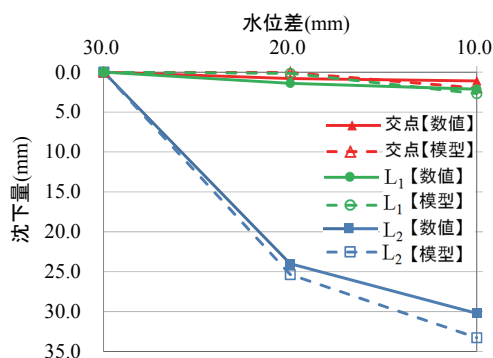


図-18 模型実験と数値解析の沈下量と水位差の関係

6. まとめ

これまであまり研究されていなかった隅角部の安定機構と評価方法を検討するために、事例を収集して分析を行い、経験則を見いだした。そして、三次元弾塑性 FEM を基本とする SSRFEM の数値解析および模型実験により、経験則に対して力学的な妥当性を検討した。その成果を以下にまとめる。

- ① 事例の収集分析より、隅角部の安定性に関する施工現場の経験則として、「隅角部長辺と直線部の掘削長比が概ね 0.5」を見いだした。
- ② 数値解析の結果、「隅角部長辺と直線部の掘削長比」は隅角部の安定性を表現する指標になり得ることを確認した。
- ③ 数値解析手法は模型実験の結果を再現できたことから妥当な手法と判断できる。

参考文献

- 1) 佐藤寛・秋野矩之：泥水掘削溝壁面の安定計算法, 第10回土質工学研究発表会, pp1023-1026, 1975
- 2) 内田博・田中邦熙・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), 鹿島建設技術研究所年報, No.18, pp.95-105, 1971
- 3) 大塚義之：吉田泰治(非粘性土地盤における掘削泥壁面の安定について)へのディスカッション, 土質工学会論文報告集, Vol.26, No.4, pp.205-507, 1986
- 4) 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安定計算法, 土と基礎, Vol.42, No.3, pp.7-12, 1994
- 5) 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
- 6) 岡原美知夫・大志万和也・多田浩彦：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, pp56-75, 1991
- 7) 地中連続壁基礎協会：地中連続壁工法 Q&A 集, pp75-76
- 8) 片桐雅明, 石井武司, 齋藤邦夫, 他2名：泥水掘削溝の新しい安定検討手法の一提案, 第44回地盤工学シンポジウム平成11年度論文集, pp.305-312, 1999
- 9) Takeshi Ishii, Kunio Saitoh, et al. : Estimation of global safety factor of slurry trenches by 3-D FEM, Proceedings of the 9th Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, pp.2513-2518, 1997
- 10) 東日本旅客鉄道編：地下連続壁の溝壁安定性の設計施工の手引, 日本鉄道施設協会, 2003
- 11) 本田敦久・齋藤邦夫・石井武司・永田晋介：隅角部を有する泥水掘削溝壁における安定性の検討, 第32回土木学会関東支部技術研究発表会, 2005
- 12) 田沼憲一・金澤伸一・石井武司・齋藤邦夫：泥水掘削溝壁の隅角部安定性に関する検討, 第39回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, 2012
- 13) 高橋彬・齋藤正幸・齋藤邦夫・石井武司：クロマイトサンドのせん断特性, 第35回土木学会関東支部技術研究発表会, 2008