

隅角部が存在する溝掘削工事の安全性に関する研究†

伊藤和也*1 Timpong S.*2 豊澤康男*3

一般的に溝掘削工事は長手方向の2次元断面であるが、曲部やマンホール施工箇所および管路の布設換え工事では、隅角部を有するような溝掘削形状となる場合がある。このような隅角部を持つ溝形状による安全性の定量的な判断については、検討されていないのが現状である。そこで、隅部を有する溝掘削に関して、遠心模型実験および3次元有限要素解析によって安全性を検討した。その結果、隅部の角度が90度までは安定係数が高くなるが、90度よりも大きな場合には安定係数に差が見られないことが分かった。すなわち、隅部が90度以下の隅角部が存在する場合には溝の安全性は通常よりも低減することが示された。

キーワード: 溝掘削工事, 隅角, 3次元有限要素解析, 遠心模型実験, 労働安全

1 はじめに

土砂崩壊による労働災害は毎年繰り返して発生し、それらの中には一時に3人以上の死傷者を出す重大災害が多く含まれる。土砂崩壊による労働災害は、(1)溝掘削工事、(2)切土掘削工事、(3)トンネル工事、(4)土石流などで発生し、死亡災害の大半は(1)溝掘削工事と(2)切土掘削工事が占めている。図1は、建設業全体および土砂崩壊に関する労働災害による死亡者の年度別推移を示したものである。建設業全体としては、1980年代まで1000人前後で横ばいだったものが1996年から減少傾向となり、2005年には初めて500人以下となった。土砂崩壊災害においても建設業全体の災害と同様な傾向が見られる。これは、公共投資削減により需給バランスが崩れ、受注量が減少したことにより工事件数が少なくなったことも一因として考えられる。ここで、土砂崩壊を詳細に見ると、溝掘削工事の中の土砂崩壊による死亡者数は、1980年代までは50人前後だったものが近年では半減している。一方、切土掘削工事の中の斜面崩壊による死亡者数は10~20人前後と微減であった。溝掘削工事では、新設工事に関して労働者が溝内に立ち入ることなしに土止め支保工を設置する「土止め先行工法」の普及が促進されており²⁾、災害件数の減少に貢献しているものと思われる。

上下水道網・電力網といった社会インフラは、戦後の高度経済成長期に多く新設されてきた。しかし、今後20年間には一斉に老齢期を迎え、修繕や大規模な維持補修工事が大量に必要となると言われている³⁾。このような中、溝掘削工事においても写真1に示すような、管路布設換え工事などが多く行われるようになった。このような工事の溝掘削形状は、長手方向に直線ではなく、隅部を有するような形状となる場合が多々見られる。さらに、

新潟県中越地震など近年発生した大規模地震によって、水道施設の耐震化の推進事業が各自治体にて実施されている。この事業では、既設管路を再掘削しセメント改良土などによって管路網を埋め戻して耐震化を図ることが多い⁴⁾。このような施工中にも隅部を有する溝形状となる場合があり、労働災害事例が報告されている。現在の溝掘削工事では、溝形状についての検討は行われておらず、隅部の存在が従来の溝掘削工事と比較した場合にどのような問題点があるのかは未解明である。本論文では、遠心模型実験ならびに3次元有限要素解析により隅部を有する溝掘削形状が安定性に与える影響について検証を

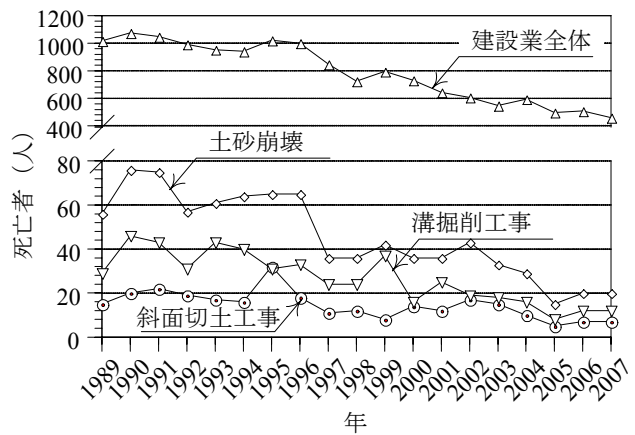
図1 労働災害の年度別推移¹⁾

写真1 管路布設換え工事の作業状況

† 原稿受付 2009年08月14日

† 原稿受理 2009年09月14日

*1 労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ。

*2 Geotechnical & Foundation Engineering Co. Ltd.

(元 労働安全衛生総合研究所)

*3 労働安全衛生総合研究所 研究企画調整部。

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ 伊藤和也¹⁾

E-mail: k-ito@s.jniosh.go.jp

行った。

2 遠心模型実験による崩壊シミュレーション

遠心模型実験手法は、重力の n 倍の遠心加速度を付与させることにより、実物の $1/n$ 縮尺の小型土槽で実地盤の応力状態を再現できる実験手法であり、地盤の崩壊現象を再現するには最適な手法として多くの研究機関にて行われている。特に掘削時の安定性に関しては多くの実績を有している⁴⁾。本研究では、隅部を様々な角度とした溝掘削形状の地盤を作成し、遠心加速度を増加させて崩壊させる実験から、隅部角度の違いが溝掘削の安定性に与える影響について検討した。

1) 遠心模型実験装置の概要

遠心模型実験装置は、(独)労働安全衛生総合研究所が所有する JNIOSSH NIIS Mark II Centrifuge を使用した。本装置の諸元を表 1、外観を写真 2 に示す。なお、本装置の詳細については文献⁵⁾に詳しく記載されている。

2) 実験方法および実験ケース

実験ケースを表 2 に示す。実験に使用した地盤材料は、粘性土系地盤として藤の森粘土、砂質系地盤として成田砂である。これらの物理・力学特性を表 3 に示す。表中の力学特性について、藤の森粘土は圧密非排水三軸圧縮試験、成田砂は定体積一面せん断試験からそれぞれ求めたものである。模型地盤は、それぞれ所定の圧力にて一次元圧密(藤の森粘土)又は圧縮(成田砂)した試料を、様々な隅部角度となるように成型し作製した。ケース 3~4 については、左右の隅部角度の間に長手方向に直線的な面を作製した。幅による影響があるが、これを(180)として表 3 に記載している。この模型地盤に遠心加速度を徐々に付与させることにより自重を増加させて地盤を崩壊させた。遠心加速度を増加して地盤を破壊させる方法は、安全率が 1 である実物の規模が、破壊時の加速度比(=重力加速度/遠心加速度)を縮尺とする模型で表されるものであり、過去に多くの研究者によって斜面の安定性評価に利用されている手法である⁴⁾。

計測は、隅部近傍に接触型変位計を設置することで崩壊までの経時変化を計測した。また、正面から CCD カメラおよび静止画撮影システム(100 万画素)により、崩壊までの溝掘削形状の変形状態を観察した。ここで、限界高さ H_c は CCD カメラおよび接触型変位計のデータから判断した。

3) 実験結果および考察

a) 藤の森粘土地盤

藤の森粘土を使用した地盤での崩壊形状を写真 3 に、沈下量と遠心加速度の関係を図 2 にそれぞれ示す。写真 3 内には変位計の設置 No を示した。遠心加速度が増加するにつれて沈下量が大きくなり、急激に増加する箇所が見られる。本研究ではこの急激な沈下量の変化点を限界高さ H_c とした。隅部角度が 90 度と 120 度であるケース 1 は、遠心加速度がそれぞれ 40G、42G にて崩壊に至った。一方、隅部角度が 50 度、75 度、90 度であるケース 2 では、遠心加速度がそれぞれ 34G、35G、36G にて

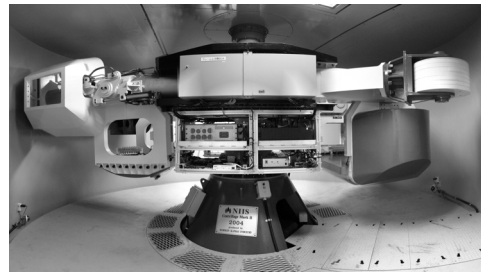


写真 2 遠心模型実験装置⁵⁾

表 1 遠心模型実験装置諸元

項目	内容	
回転半径	2.38 m	
最大遠心加速度	100 G(194rpm)	
搭載質量	500 kg	
遠心場能力	50 G-ton	
主電動機	電力容量	直流 90 kW
	電圧	440 V
減速機	潤滑方式	オイルバス潤滑

表 2 実験ケース

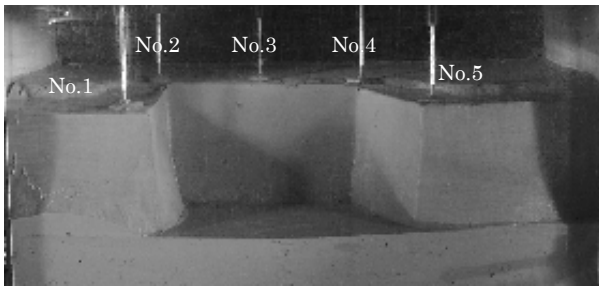
ケース	1	2	3	4	5
試料	藤の森粘土		成田砂		
隅部角度	90	75	75	50	120
	120	50	120 (180)	90 (180)	90

表 3 使用試料の物理力学特性

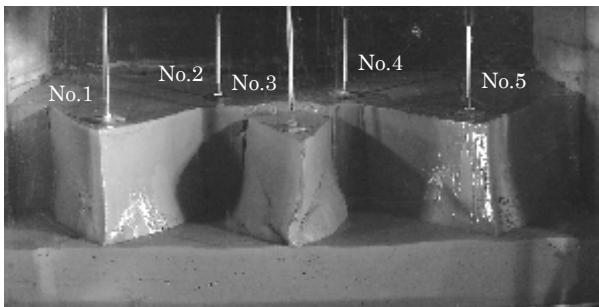
試料名		藤の森粘土	成田砂
物理特性	土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.72	2.66
	最大粒径(mm)	0.25	2
	均等係数, U_c	-	40.7
	曲率係数, U_c'	-	13.9
	液性限界, w_L (%)	62.7	-
	塑性限界, w_P (%)	27.8	-
力学特性	塑性指数, I_p	34.9	-
	単位体積重量(kN/m ³)	17.9	16.2
	粘着力, c (kN/m ²)	17.7	2.5
	内部摩擦角, ϕ (deg)	0	35
	強度増加率, c_u/p_0	0.46	-

※力学特性は本実験での条件における値を示している

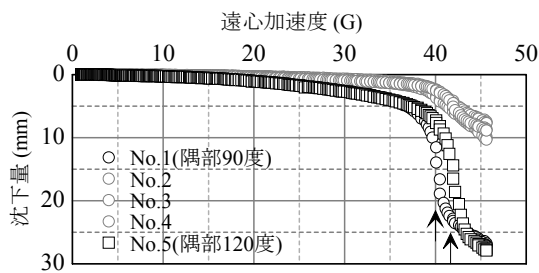
崩壊に至っており、両ケースで共通した隅部角度である 90 度にて 4G の差が生じた。各ケースの平均含水比はケース 1 が 35.1%、ケース 2 が 37.2%であった。このことから、両ケースは地盤作成時の圧密応力に若干の違いがあったものと考えられる。図 3 は安定係数 N_s と隅部角度の関係を示したものである。ここで安定係数 N_s とは斜面の安定性に用いられる係数であり以下のように表される。



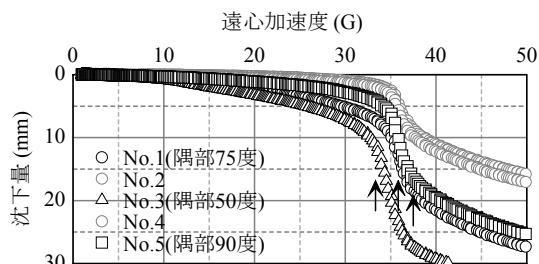
(1) ケース 1 (左:90度, 右:120度)



(2) ケース 2 (左:75度, 中:50度, 右:90度)
写真 3 藤の森粘土を使用した地盤の崩壊形状



(1) ケース 1 (左:90度, 右:120度)



(2) ケース 2 (左:75度, 中:50度, 右:90度)
図 2 沈下量～遠心加速度の関係

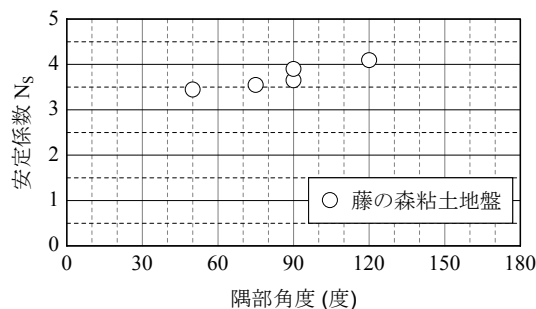


図 3 安定係数 N_s と隅部角度の関係

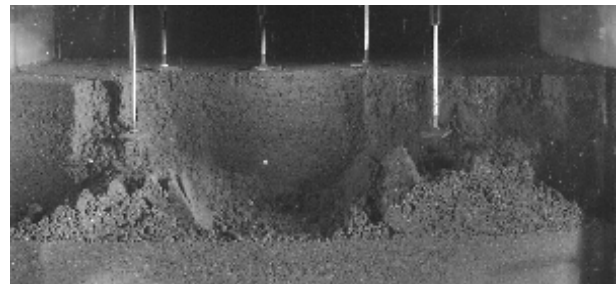
$$N_s = H_c \cdot \frac{\gamma}{c} \quad (1)$$

ここで、 c : 粘着力, γ : 単位体積重量, H_c : 斜面の限界高さ.

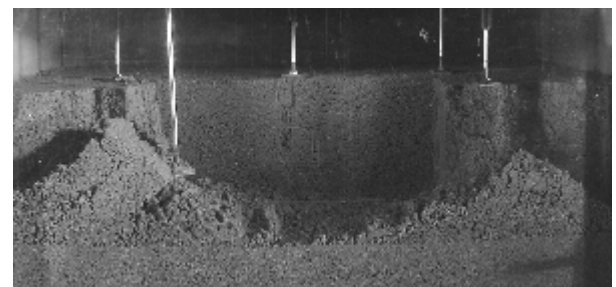
図 3 を見ると, ケースによる差はあるが, 隅部が鈍角 (大きな角度) になるほど, 安定係数の値が増加する傾向, すなわち安定性が高くなることを示している.

b) 成田砂地盤

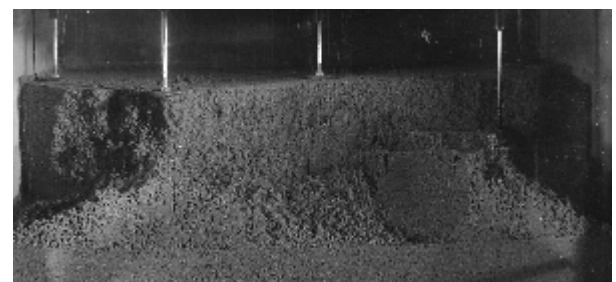
成田砂を使用した地盤での崩壊形状を写真 4 に, 沈下量と遠心加速度の関係を図 4 にそれぞれ示す. 成田砂地盤では, 藤の森粘土地盤と比べて, 沈下量が小さい段階で突然崩壊に至っている. また, その崩壊も隅部先端から徐々に崩壊しており, 藤の森粘土地盤のそれとは大きく異なる. 成田砂地盤では, 異なるケースにおいて同じ隅部角度を有する溝形状を作成しているが, 試料の不均一性や作成した地盤の局所的な弱部の存在などによって同じ隅部角度であっても崩壊する遠心加速度が異なった. 図 5 は, 全てのケースの結果について, 安定係数 N_s と隅部角度の関係を示したものである. 内部摩擦角が発現する成田砂地盤での安定係数の方が藤の森粘土地盤に比べて大きな値となっている. また, 成田砂についてはケース 3~4 で得られた 180 度の結果も示してある. 180 度の結果において安定係数が他の角度に比べて大きくなっ



(1) ケース 3 (左:75度, 中:180度, 右:120度)

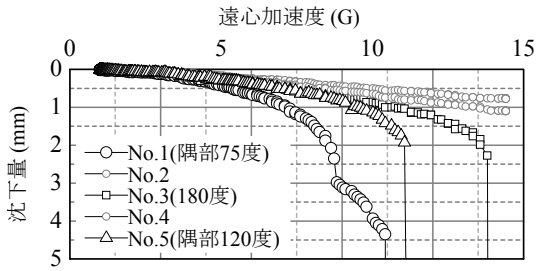


(2) ケース 4 (左:50度, 中:180度, 右:90度)

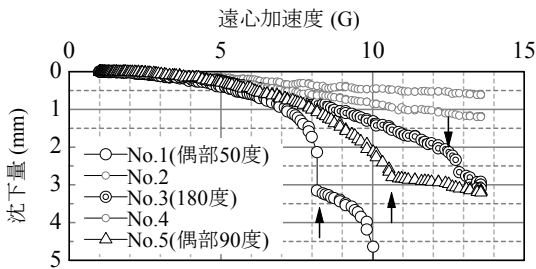


(3) ケース 5 (左:120度, 右:90度)

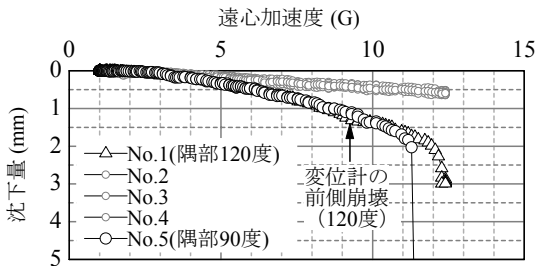
写真 4 成田砂を使用した地盤の崩壊形状



(1) ケース 3 (左:75度, 中:180度, 右:120度)



(2) ケース 4 (左:50度, 中:180度, 右:90度)



(3) ケース 5 (左:120度, 右:90度)

図 4 沈下量～遠心加速度の関係

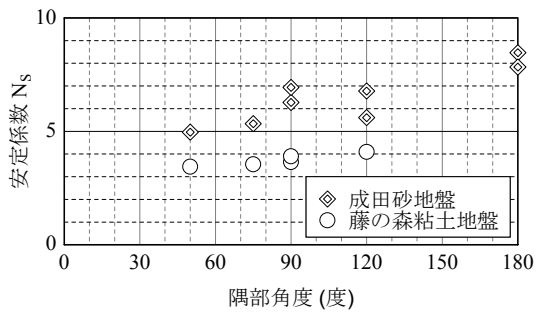
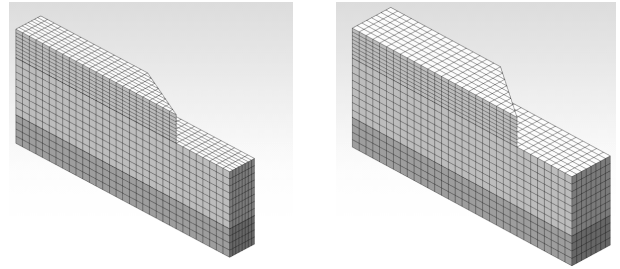


図 5 安定係数 N_s と隅部角度の関係

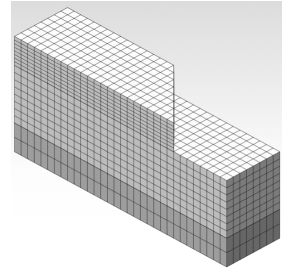
ているのは、幅の影響も考えられる。隅部角度と安定係数の関係では、バラツキが大きい。隅部が鈍角になるほど、安定係数の値が増加する傾向については、成田砂地盤でも同様の傾向を示している。

地盤材料が異なる 2 種類の地盤について様々な隅部角度となる溝形状を作成し、遠心模型実験を実施した。その結果、隅部が鈍角になるほど、安定性が高くなる傾向が得られた。しかし、様々な要因によって同じ隅部角度でもケース毎に異なる遠心加速度で崩壊するなど明確に分からない部分がある。そこで、3次元有限要素解析によるパラメータスタディーを実施し、これらの傾向をより正確に把握することとした。

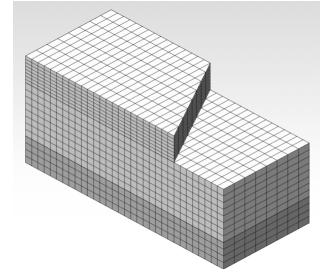


(1) 50度

(2) 70度



(3) 90度



(4) 120度

図 6 メッシュ図

3 3次元有限要素解析による崩壊シミュレーション

1) せん断強度低減有限要素解析法の概要

有限要素法により斜面の安定性を評価する方法の一つに Zienkiewicz らが提案したせん断強度低減有限要素法 (以下 SSR-FEM) がある⁶⁾。SSR-FEM は様々な斜面安定問題に適用され、解析結果より、精度の高い安全率が得られることがわかっている⁷⁾。この SSR-FEM では、極限平衡法の分割法などのようにあらかじめすべり面の形状や場所を仮定することなく、自動的に臨界すべり面が探索される利点も有している。一方、斜面が破壊したと判断する明確な基準がないことやすべり面を指定することができないという短所も持ち合わせている⁷⁾。さらに、鉛直溝の場合には地表面に発生する引張亀裂が安定性に大きく影響を与えることが知られている⁸⁾。しかしながら、SSR-FEM では引張亀裂の発生については再現することができない点にも注意が必要である。本研究では、解析ソフト「midas GTS (MIDAS IT 社製)」を使用し、解析を行った。

2) 解析条件

隅部角度を 50 度、70 度、90 度、120 度、180 度に変化させたメッシュを作成し、解析を行った。解析に使用したメッシュを図 6 に示す。なお、メッシュは左右対称であることを考慮し、1/2 対称モデルとした。使用した地盤パラメータについて、単位体積重量 γ と粘着力 c は、それぞれ $\gamma = 17.64 \text{ kN/m}^3$, $c = 8.82 \text{ kN/m}^2$ と固定し、内部摩擦角 ϕ を 0 度から 15 度まで 5 度刻みで変化させた。なお、内部摩擦角 20 度以上のケースについては、今回の解析メッシュおよび収束条件では安定解を得ることが難しかったため、今回は対象としなかった。これら全てのケースについて SSR-FEM を実施し、安全率を求めた。

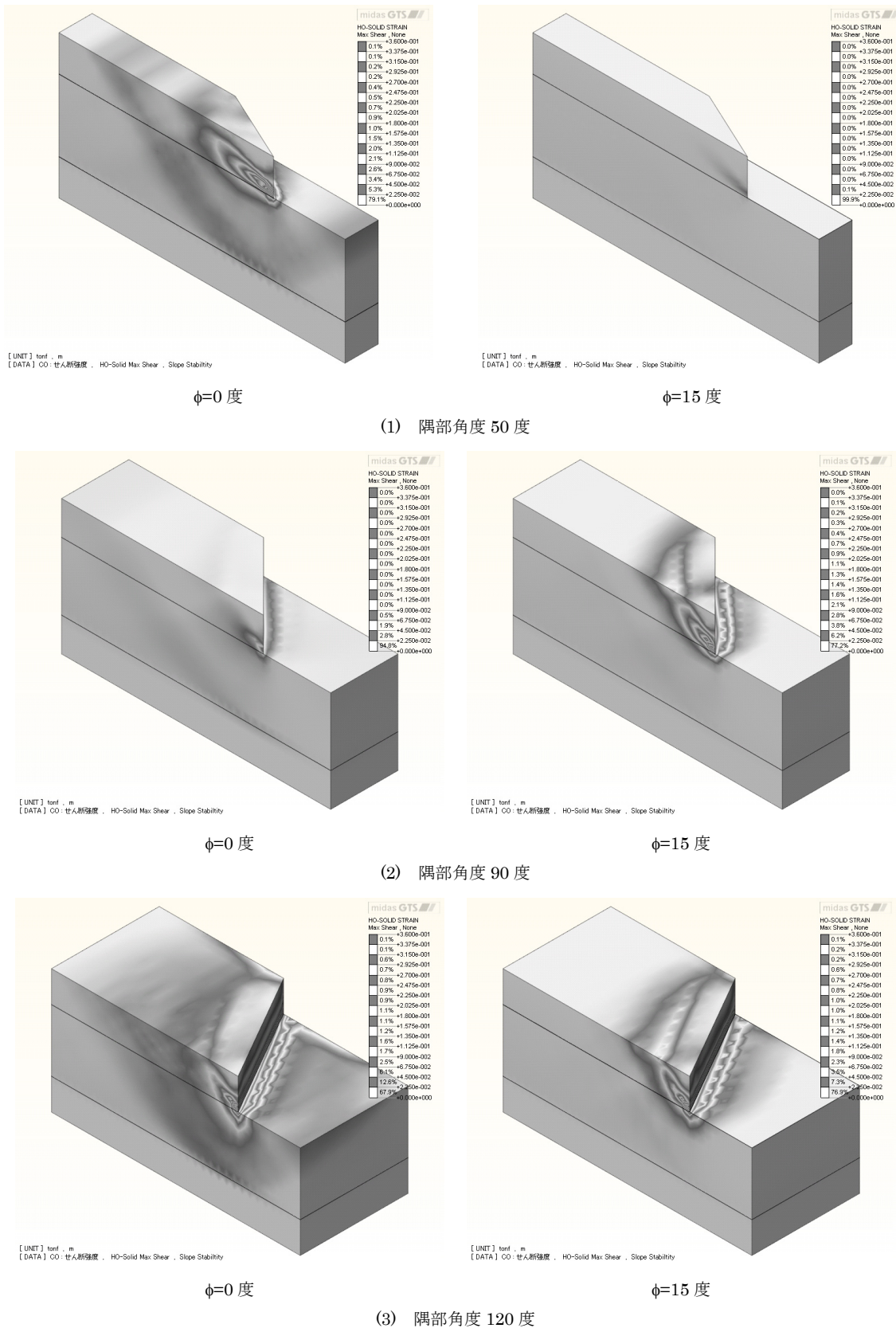


図 7 最大せん断ひずみ分布

3) 解析結果

SSR-FEM では、最大せん断ひずみ分布の増分から臨界すべり面を推定することができる。解析結果の一例として、隅部角度が 50 度、90 度、120 度の溝形状における、内部摩擦角 $\phi=0$ 度および 15 度のケースの最大せん

断ひずみ分布を図 7 にそれぞれ示す。ここで最大せん断ひずみ分布を見ると、内部摩擦角 ϕ の違いによりそのすべり面の発現に若干の違いが見られる。すなわち、内部摩擦角 $\phi=0$ 度のケースでは、掘削面よりも深部での最大せん断ひずみ分布が見られる。一方、内部摩擦角 $\phi=15$

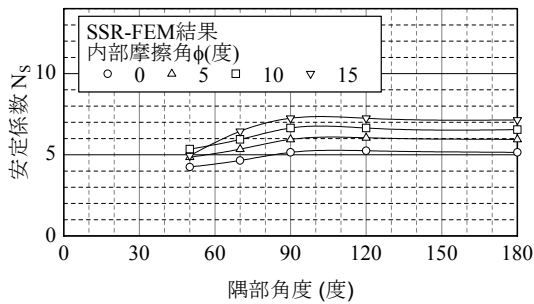


図8 安定係数 N_s と隅部角度の関係

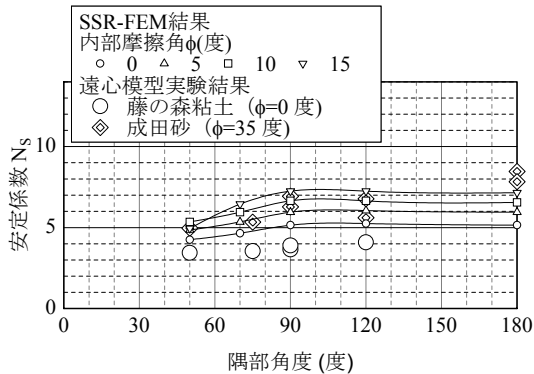


図9 遠心模型実験結果と SSR-FEM 結果の比較

度のケースでは掘削面上方での最大せん断ひずみ分布が卓越する傾向が見られる。これは、遠心模型実験での崩壊形態とも整合する結果といえる。

これら全ての解析ケースから得られた安全率 F_s から安定係数 N_s を算出し、隅部角度の違いによる安定性について検証した。ここで、SSR-FEM での安定係数 N_s は以下のように求めた。すなわち、

$$N_s = F_s \cdot H \cdot \frac{\gamma}{c} \quad (2)$$

ここで、 H : 溝深さ (2m)

図8は隅部の角度と安定係数 N_s を内部摩擦角毎に示したものである。隅部の角度が鋭角ほど安定係数が小さい。また、隅部の角度が90度より大きい場合には安定係数の値に変化があまり見られないことが示された。すなわち、新設工事のような長手方向に直線的な溝掘削と比較して、隅部角度が90度以上の場合には安定性に変化は見られないが、隅部角度が90度以下の「隅角部」の場合には、通常の溝形状より安定性が低下するものと言える。

4) 遠心模型実験との比較

図9は隅部角度と安定係数の関係について遠心模型実験結果と SSR-FEM の結果を比較したものである。内部摩擦角 $\phi=0$ 度と藤の森粘土地盤の遠心模型実験結果の安定係数に差が見られる。これは、今回採用した破壊の判断基準(収束条件)が緩いことが一因として考えられる。しかし、隅部の角度による安定係数の違いについては、遠心模型実験結果も SSR-FEM 結果も同様な傾向を示し

ており、90度以下の「隅角部」の存在が溝の安定性に影響を与えるものと言える。

4 おわりに

本研究は、隅部を有する溝掘削に関して遠心模型実験および3次元有限要素解析を実施し、その安定性を検証した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 遠心模型実験から、粘性土地盤・砂質土地盤ともに隅部の角度が鈍角なほど安定性が上昇した。
- 2) 内部摩擦角を0度から15度まで変化させた3次元有限要素解析から、隅部が90度までは安定係数が増加するが、それ以降は安定係数に差が見られなかった。

すなわち、隅部が90度以下の「隅角部」が存在する場合には、溝の安定性は通常より低減することが示され、曲部やマンホール施工箇所および管路の布設換え工事などでは、通常の掘削工事よりも安全に配慮した施工が必要なことを示している。

文 献

- 1) 建設業災害防止協会. 平成19年度版建設業安全衛生年鑑. 2007; 216.
- 2) 厚生労働省労働基準局安全衛生部安全課建設安全対策室 監修: 土止め先行工法に関する指針とその解説. 建設業労働災害防止協会. 2004; 202
- 3) 国土交通省編: 平成17年度版国土交通白書, ぎょうせい, 2005.
- 4) 地盤工学における模型実験入門編集委員会. 掘削過程の再現, 入門シリーズ19「地盤工学における模型実験入門」. 1994; 120-122.
- 5) 伊藤和也, 玉手聡, 豊澤康男, 堀井宣幸. 新遠心模型実験装置 (NIIS-Mark II Centrifuge) の開発. 産業安全研究所研究報告. NIIS-RR-2005 (2006). 2006; 57-74.
- 6) Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C., and Lewis, R. W. Using limit equilibrium concepts in finite element slope stability analysis, Proc. International Symposium on Slope Stability Engineering. 1999; 1: 31-48.
- 7) 鶴飼恵三. 弾塑性FEMによる斜面の全体安全率の計算法. 土質工学会論文報告集. 1989; 29, 2: 190-195.
- 8) 山口柏樹. 土質力学 (全改訂). 1984; 415.

Study on safety of trench excavation in relation to corner angle †

by

Kazuya ITOH^{*1}, Sahapol TIMPONG^{*2}, and Yasuo TOYOSAWA^{*3}

Trench collapses have caused loss of life and injuries to workers during construction. Due to the constrained space of the construction site, especially in urban areas, the angle of the trench corner has to be increased or decreased from the standard trench corner of 90 degrees, which might make the trench more prone to collapse. In order to investigate the effects of the trench corner angle quantitatively, a series of centrifuge model tests and 3D-FEM analyses were carried out in this study. The results showed that the stability factor, N_s , was constant where the angle of the corner was more than 90 degrees. In contrast, the stability factor decreased when the angle of the corner was less than 90 degrees.

Key Words: trench collapse, centrifuge model test, 3D-FEM, occupational safety, stability number

*1 Construction Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan.

*2 Geotechnical & Foundation Engineering Co. Ltd.

*3 Department of Research Planning and Coordination, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan.