

# 地山のせん断抵抗角と土被りが 切羽安定性に及ぼす影響の実験的検討

川之上 諒<sup>1</sup>・八木橋 辰紀<sup>2</sup>・富樫 陽太<sup>3</sup>・長田 昌彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 埼玉大学大学院 理工学研究科環境システム工学系専攻 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保255)

<sup>2</sup> 埼玉大学 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保255)

<sup>3</sup> 埼玉大学 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保255)

<sup>3</sup> 埼玉大学 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市下大久保255)

E-mail:r.kawanoue.821@ms.saitama-u.ac.jp

近年、トンネルの掘削が原因とみられる落盤事故が生じている。これは掘削に伴う地山の緩みが原因と考えられるが、切羽における地山の挙動は大変複雑であり、支保や覆工の有無などに依存して変化するため通説がない。特に切羽を解放する工法が用いられる場合には緩み範囲が相対的に大きく、これは地山で受け持つ摩擦抵抗に大きく依存するであろう。そこで本研究では、摩擦抵抗の程度を変化させ、切羽崩壊や緩み領域に与える影響を把握することを目的として、二次元トンネル引き抜き実験を実施した。粒度の異なる複数の乾燥珪砂で模型地山を作製して、せん断抵抗角が切羽崩壊に与える影響を観察するとともに、土被りの大小による摩擦抵抗の変化が切羽挙動に与える影響についても検討した。

**Key Words:** tunnel face, stability, failure, earth covering, shear resistance angle

## 1. 研究の背景と目的

近年、トンネル掘削が原因とみられる陥没事故が数多く起きている。これは掘削に伴う地山の緩みが原因と考えられるが、切羽の応力解放や地山強度のばらつきによって、切羽における地山の挙動は大変複雑になっており、支保や覆工の有無などに依存して変化するため通説がない。特に山岳工法のような切羽を解放する工法が用いられる場合には緩み範囲が相対的に大きく、これは地山で受け持つ摩擦抵抗に大きく依存するであろう。そのためこのような物理特性を用いて、切羽の安定性を定量的に評価できるような方法の確立が望まれている。

切羽の安定性に関する従来の研究において、地山の物理特性に着目したものは数多く存在する。例えば、小西ら<sup>1)</sup>は、砂質土地盤に粘性土層が存在することで切羽崩壊現象に与える影響を調べるとともに、このような互層地盤において切羽の自立に必要な内部摩擦角と粘着力に着目して切羽安定の評価を行っている。また、真下ら<sup>2)</sup>は、土被りが比較的浅い土砂地山トンネルを対象として、切羽の安定に必要な地山の粘着力とトンネル径の関係を明

らかにしている。一方で、蔵田ら<sup>3)</sup>は細粒分含有率と含水比が切羽自立性の有効な指標であることを示している。しかしながら、比較的土被りの大きな砂質土地盤を対象にして、せん断抵抗角と土被りが切羽安定性に及ぼす影響に関する研究は近年あまり行われていない。

そこで本研究では、摩擦抵抗の程度を変化させ、切羽崩壊や緩み領域に与える影響を把握することを目的として、二次元トンネル引き抜き実験を実施した。粒度の異なる複数の乾燥珪砂で模型地山を作製して、せん断抵抗角が切羽崩壊に与える影響を観察するとともに、土被りの大小による摩擦抵抗の変化が切羽挙動に与える影響についても検討した。

## 2. 実験概要

本研究では、トンネル引き抜き実験を行い、地山の土被り比、せん断抵抗角が切羽崩壊に与える影響を検討する。この実験は、模型地山からトンネル模型を引き抜くことで、掘削時の応力解放を模擬する実験である。実験

装置を写真-1に示す。模型地盤は、乾燥状態の珪砂3号、珪砂5号、豊浦砂を用い、砂を2.5cm敷き詰めるたびにバイブレーターで締固めして、すべり線を観察するために黒砂を敷いた。実験に用いた試料について、最大・最小間隙比などの物理特性は全く同じ材料を用いた井澤ら<sup>4)</sup>の値を使った。物性値を表-1に示す。なお、トンネル模型は直方体で、その寸法は10×20×5(cm)である。トンネル径に相当する高さ5cmをD(=一定値)、土被り厚をHとしてH/Dが1~5の模型地盤を製作し、それぞれ実験を行った。珪砂3号、珪砂5号、豊浦砂についてH/D=1~5をそれぞれケース1~5、ケース6~10、ケース11~15として、計15ケースの実験を行った。全実験ケースを表-2に示す。乾燥密度、相対密度はケース1~5でそれぞれ1.551~1.596g/cm<sup>3</sup>、70.29~85.52%、ケース6~10では1.482~1.522g/cm<sup>3</sup>、51.49~70.54%、ケース11~15では1.543~1.586g/cm<sup>3</sup>、74.02~78.64%である。各ケース概ね同程度の相対密度を設定したが、ケース7と10だけは相対密度がやや小さい。実験手順は、トンネル模型を2mm引き抜くごとに、レーザー変位計とロードセルで地表面変位と切羽前方土圧(トンネル模型の切羽にかかる荷重を掘削断面の面積で除した値)をそれぞれ測定する。また、トンネル模型の引き抜きは、崩壊に伴う砂の流入が停止する時点まで行い、これを最終的な崩壊状態とした。

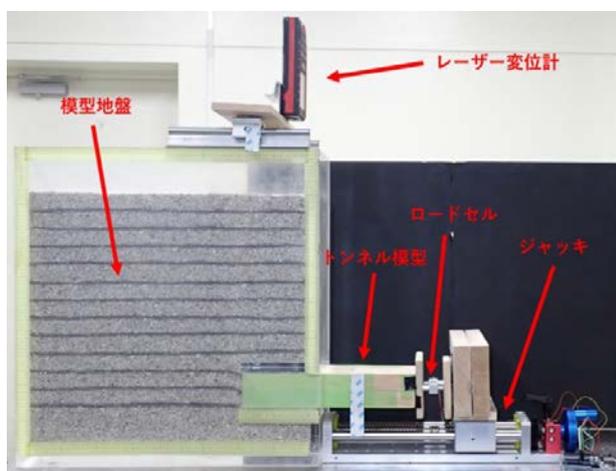


写真-1 二次元トンネル引き抜き実験装置

表-1 実験に使用した試料と物性値

	珪砂3号	珪砂5号	豊浦砂
平均粒径(mm)	1.40	0.52	0.19
せん断抵抗角(deg.)	55.8	46.4	43.0

表-2 全実験ケースの相対密度

ケース		乾燥密度 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	相対密度Dr (%)	締まり具合	
1	珪砂3号	H/D=5	1.551	72.78	密な
2		H/D=4	1.543	70.29	密な
3		H/D=3	1.553	73.34	密な
4		H/D=2	1.596	85.52	大変密な
5		H/D=1	1.568	77.64	密な
6	珪砂5号	H/D=5	1.541	69.68	密な
7		H/D=4	1.493	55.10	中位
8		H/D=3	1.544	70.54	密な
9		H/D=2	1.522	64.01	中位
10		H/D=1	1.482	51.49	中位
11	豊浦砂	H/D=5	1.570	78.11	密な
12		H/D=4	1.543	70.39	密な
13		H/D=3	1.571	78.64	密な
14		H/D=2	1.555	74.02	密な
15		H/D=1	1.556	74.05	密な

### 3. 実験結果及び考察

トンネル模型の引き抜きに伴うすべり線の進展の様子を砂ごとに比較したものが写真-2である。トンネル模型の引き抜き量を写真の下に示している。全ケースとも地盤内部にすべり線が発生し、それに囲まれた領域は変形せずほぼ一体として挙動した。観察されたすべり線は、切羽近傍では緩やかなカーブを描きその後ほぼ鉛直方向に延びるすべり線と、トンネル天端からほぼ直上に延びるように発達した。豊浦砂H/D=1~5、珪砂5号H/D=1~4、珪砂3号H/D=1, 2の11ケースでは、このすべり線で囲まれた領域はその後も直上に進展していき、地表面に達した後、すり鉢状の沈下が発生した。豊浦砂を例に沈下領域の進展の様子を写真-3に示す。トンネル模型の引き抜き量を写真の下に示している。一方で、珪砂5号H/D=5や珪砂3号H/D=3~5の4ケースのように沈下が発生しないケースもあった。

豊浦砂、珪砂5号、珪砂3号の地表面変位をそれぞれ図-1、図-2、図-3に示す。ここで、縦軸は地表面変位、横軸は土槽右端からの距離を示す。地表面に沈下が生じたケースでは、トンネル切羽直上(土槽右端から10cmの位置)の位置で変位が最大となった。また、せん断抵抗角や土被り比H/Dが大きくなるほど、最大変位は小さくなり、珪砂5号(せん断抵抗角 $\phi=46.4^\circ$ )では土被り比H/D=4、珪砂3号( $\phi=55.8^\circ$ )ではH/D=2を境にそれより大きな土被り比の地盤で変位が生じない。これは、せん断抵抗角と土被り比に起因する摩擦抵抗に応じたアーチ効果が生じたためだと考えられる。

各砂質地盤において、トンネル模型の引き抜きに伴って地表面に達したすべり線の幅の変化を図-4に示す。これは、土槽右端から1cm間隔で地表面変位の測定を行った結果である。すべり線の幅が徐々に広がるということは、トンネルの引き抜きに伴う切羽崩壊が進行性破壊で

あることを示唆する。どのグラフも引抜き量の増加に伴って、すべり線幅が一定値に収束しており、上に凸な対数関数に近い形状である。H/Dが小さいほど引抜き初期からすべり線幅が拡大し、最大値も大きい。また、同じ土被り比でもせん断抵抗角が小さいほど地表面の沈下が早い段階から生じている。このことから、摩擦抵抗が大きいほど、崩壊の進行性が小さいことを表している。

各砂質地盤において、トンネル模型の引き抜きに伴う切羽前方土圧の変化を図-5に示す。ここで、横軸は、トンネル模型の引き抜き量を示しており、縦軸は、切羽前方土圧を示している。初期切羽前方土圧の値がそれぞれの土被り厚に応じた全土被り土圧 $\gamma H$  ( $\gamma$ : 模型地盤の単

位体積重量) に概ね近い。これは、トンネル引き抜き量が非常に小さい初期段階では、土被りに応じた土圧が生じたためと考えられる。その後、切羽前方土圧は急激に減少し、引き抜き量が6mm~10mmになると初期切羽前方土圧に比べて非常に小さな土圧値となり、緩やかに一定値に収束していくが、切羽が進行的に崩壊するとともに、すべり線で囲まれる領域が増加することで、地山の摩擦抵抗が増加したためと考えられる。

著者ら<sup>9)</sup>は、このような状況を表現できる切羽安定性理論をすでに構築している。ここで観察されたアーチ効果の影響を理論に取り込む予定でいる。

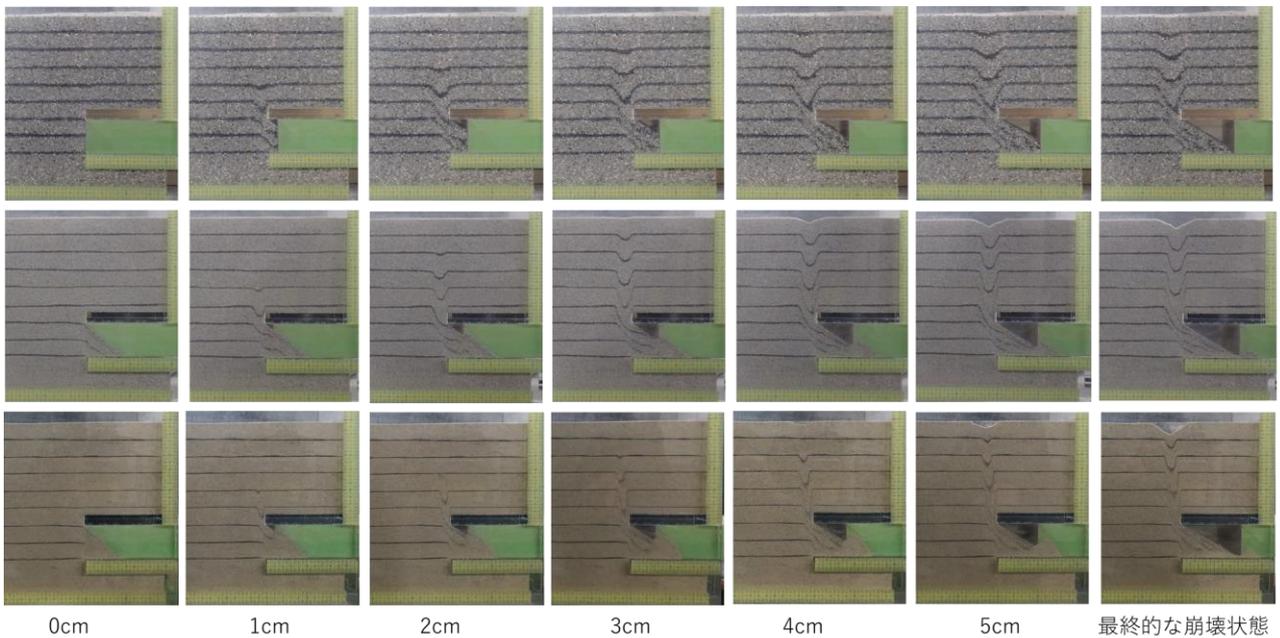


写真-2 すべり線の進展の様子(上段：珪砂3号，中段：珪砂5号，下段：豊浦砂)

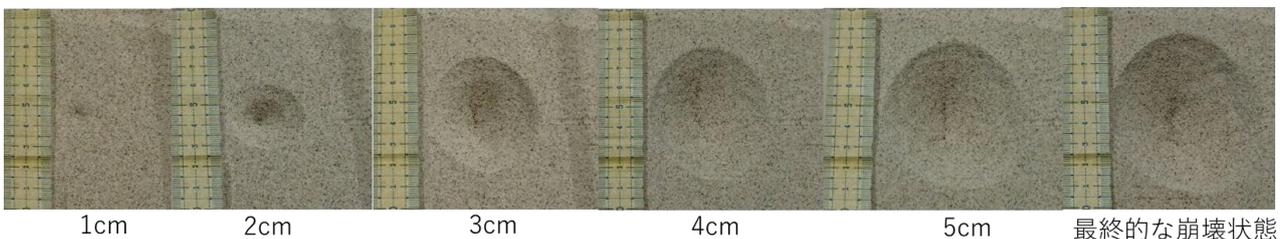


写真-3 沈下領域の進展の様子(豊浦砂)

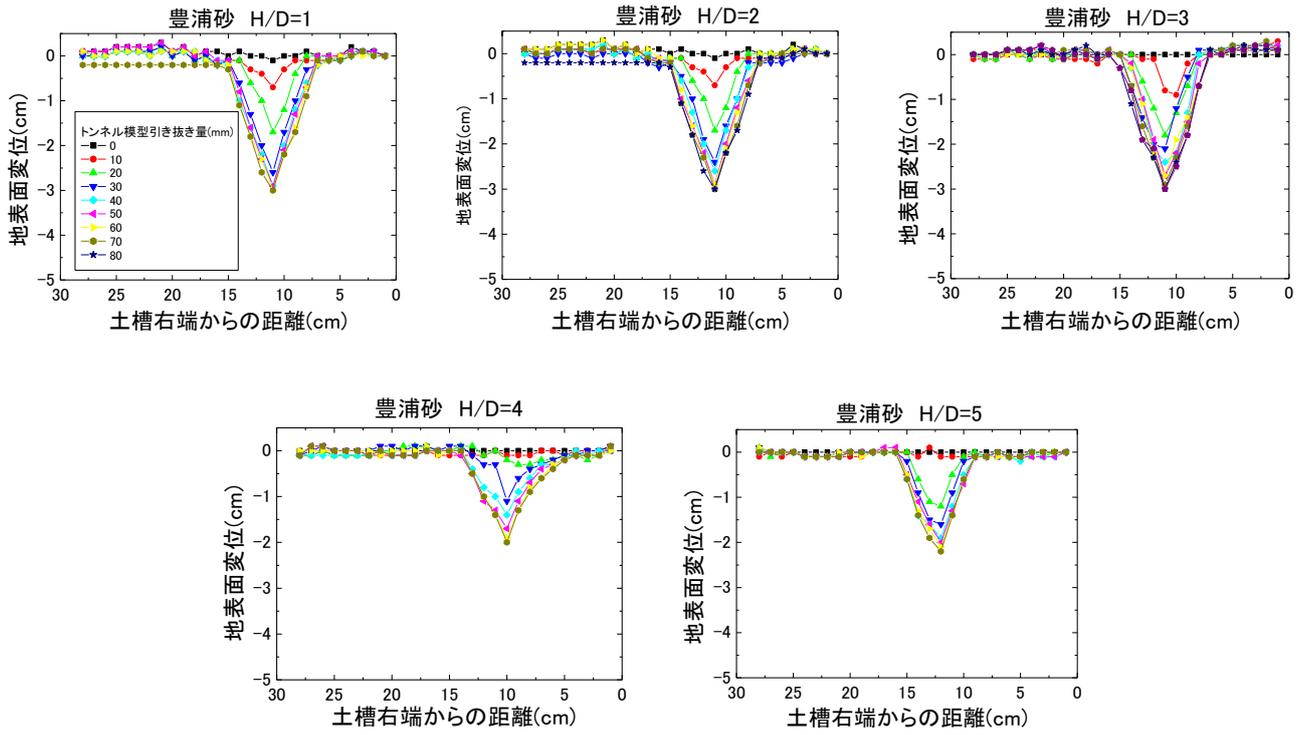


図-1 豊浦砂の地表面変位履歴

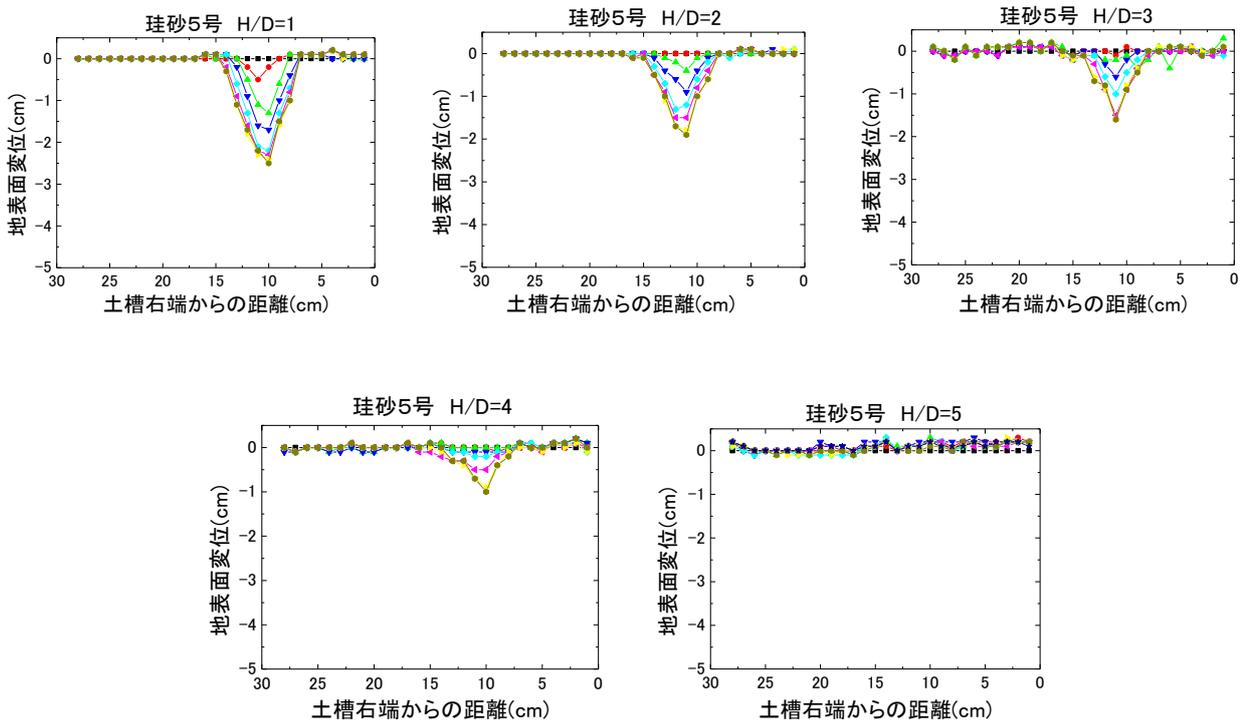


図-2 珪砂5号の地表面変位履歴

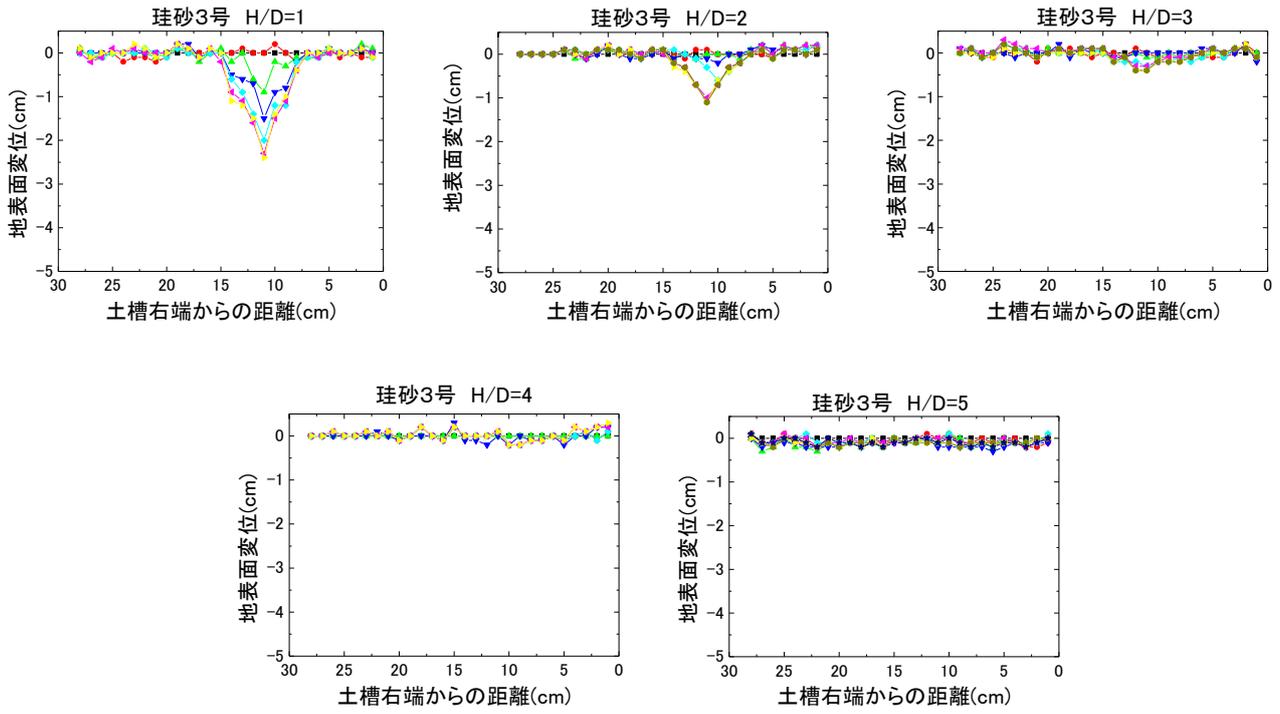


図-3 珪砂3号の地表面変位履歴

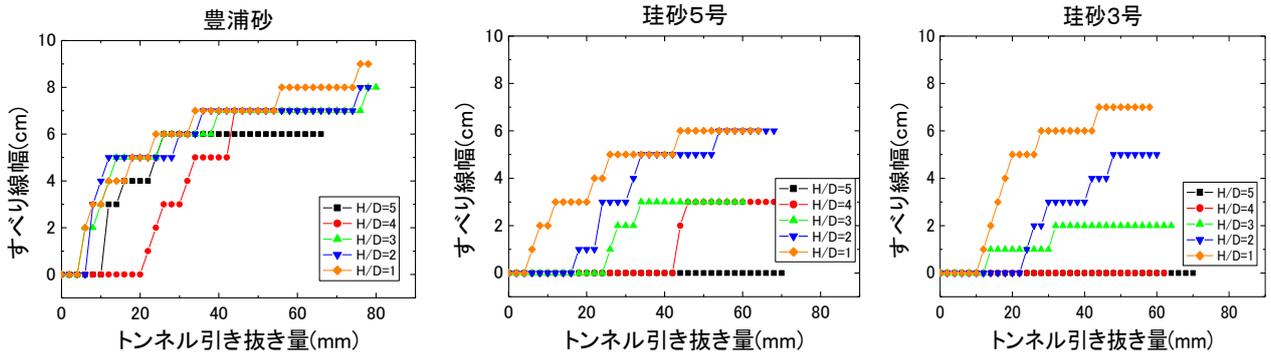


図-4 すべり線幅の推移

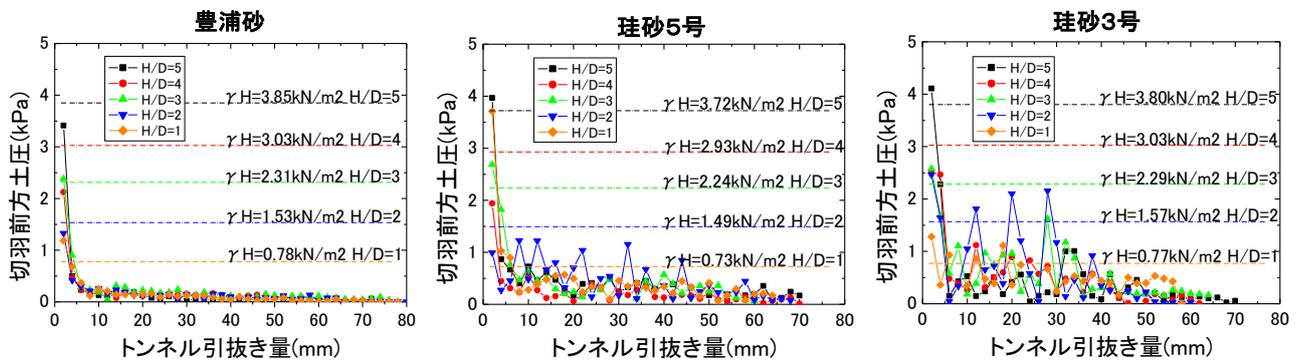


図-5 切羽前方土圧の推移

#### 4. まとめ

本研究では、土被り比1~5の比較的浅い砂質地盤を対象に、地盤のせん断抵抗角を3種類変化させて、トンネル掘削時における切羽安定性に地山の摩擦抵抗が及ぼす影響を実験的に検討した。得られた主要な結果をまとめると、以下のようになる。

(1) せん断抵抗角や土被り比と最大変位は反比例し、せん断抵抗角 $\phi=46.4^\circ$ では土被り比 $H/D=5$ 以上、 $\phi=55.8^\circ$ では $H/D=3$ 以上の土被り比の地盤で崩壊領域が地表に達しず、変位が生じない。これは、せん断抵抗角と土被り比に起因する摩擦抵抗に応じたアーチ効果が生じたためだと考えられる。

(2) トンネル引抜きに伴い、すべり線の幅が徐々に広がることから、トンネルの引き抜きに伴う切羽崩壊は進行性破壊である。また、同じ土被り比でもせん断抵抗角が小さいほど地表面の沈下が早い段階から生じたことから、摩擦抵抗が大きいほど、崩壊の進行性が小さいといえる。

(3) 初期切羽前方土圧の値は、土被り厚に応じた全土被り土圧 $\gamma H$ に概ね近くなる。これは、トンネル引抜き量が非常に小さい初期段階では、土被りに応じた土圧が生じたためと考えられる。ゆえに切羽崩壊を抑止するためには全土被り土圧以上の圧力を切羽に作用させる必要がある。

今後の展開として地表面に鉛直変位が生じなかった実験ケースに着目し、アーチ効果によってどれほどの荷重を支持するのかについて考察する。また、筆者らがすでに構築した切羽安定理論にこれを取り込む。さらに切羽の安定・崩壊挙動に大きく影響する粘着力についても研究を進めていく所存である。

#### 参考文献

- 1) 小西真治, 朝倉俊弘, 田村武, 辻鉄也: 粘性土層が介在する砂地盤の切羽安定評価について, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.51-62, 2000.
- 2) 真下英人, 鈴木正彦, 猪熊明: トンネル切羽安定性の簡易評価法の提案, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.117-129, 1999.
- 3) 蔵田忠廣, 宮本武司: 未固結砂層におけるトンネル切羽自立性の判定基準の提案, 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.245-254, 1987.
- 4) 井澤淳: 補強土擁壁の地震変形予測に用いる補強土のせん断剛性に関する研究, 科学研究費補助金研究成果発表, 2010.
- 5) 井口翔太, 富樫陽太, 長田昌彦, 川之上諒: 崩壊の進行性を考慮した切羽前方土圧理論と実験的検証. 第15回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 2021.
- 6) Togashi Y, Iguchi S, Osada M & Kawanoue R: Numerical method of tunnel face pressure estimation considering progressive failure due to excavation, Proc. EUROCK2021, 2021

## INFLUENCE OF THE EARTH COVERINGS AND SHEAR RESISTANCE ANGLE ON THE STABILITY OF TUNNEL FACE

Ryo KAWANOUE, Tatsunori YAGIHASHI, Yota TOGASHI and Masahiko OSADA

In recent years, there are several ground surface collapse due to tunnel excavation in Japan. Although such accident is caused by the ground loosening and tunnel face collapse due to excavation, there are no accepted theory for estimating face stability because the phenomenon is quite complicated depending on supports and linings types. In this study, 2D tunnel pull-out tests conducted to observe the influence of frictional resistance on tunnel face failure and loosed area by frictional angle changes using three kinds particle size of dry silica sand and earth covering changes. The result demonstrated that failure region doesn't reach the ground surface when shear resistance angle and earth coverings are either  $46.6^\circ$  and over 5 or  $55.8^\circ$  and over 3.