

模型実験におけるトンネル掘削時の 切羽挙動に関する数値解析的評価

中村 聡一郎¹・澤村 康生²・磯谷 篤実³・岸田 潔⁴

¹学生会員 京都大学大学院修士課程 工学研究科都市社会工学専攻
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: nakamura.soichiro.76x@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: sawamura.yasuo.6c@kyoto-u.ac.jp

³正会員 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北海道新幹線建設局
(〒060-0002 札幌市中央区北2条西1-1 マルイト札幌ビル)

E-mail: isogai.ats-26es@jrtr.go.jp

⁴正会員 京都大学大学院教授 工学研究科都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: kishida.kiyoshi.3r@kyoto-u.ac.jp

トンネル掘削時の切羽安定性について多くの研究がなされているが、多くが全断面掘削を対象としている。そこで、これまでに筆者らは、ベンチカット工法によるトンネル掘削時の地盤挙動を解明することを目的に、切羽の応力解放を模擬する遠心模型実験を実施してきた。本稿では、既往の研究における実験装置を改良し、切羽に作用する土圧のより正確な測定に取り組んだ。その後、三次元弾塑性有限要素解析により切羽挙動をさらに詳細に検討することを目指し、ベンチカット工法に先立って、全断面を同時に掘削した場合の模型実験に対する再現解析を実施した。その結果、数値解析においても、実験で確認された切羽の応力解放および地表面の沈下を再現可能であることを確認した。加えて、切羽の応力解放に伴う周辺地盤への応力再配分を確認することができた。

Key Words: tunnel excavation, face stability, earth pressure, settlement, centrifuge model test

1. はじめに

NATMは地山の保持力を最大限発揮させて周辺地山を安定させた状態でトンネルを掘削する工法であり、周辺地山が支保機能を有し、切羽が自立することが前提となる。そのため、NATMによる掘削は元来岩盤を対象としてきた。しかしながら、他の工法と比較して経済性や施工の柔軟性に優れていることから、土砂地盤や小土被りなどより厳しい条件においてNATMを適用するために、掘削工法や補助工法の開発が進められてきた。掘削工法の一つに切羽を上下に分割して順に掘削するベンチカット工法がある。全断面掘削では切羽が安定しない場合、本工法が一般的に用いられる。

トンネル掘削では、掘削による応力解放で切羽面の地盤は不安定な状態になる。その際の切羽安定性の問題については多くの研究^{1)~6)}がなされているが、ほとんどが全断面掘削を対象としている。したがって、ベンチカッ

ト工法による掘削時の地盤挙動についての議論は十分に なされていないのが現状である。例えば、本工法では、掘削面の減少により切羽土圧が減少し、安定的に掘削が行えることになるが、切羽前方の緩み領域がどの程度減少するのか、メカニズムは十分に解明されていない。本研究では、このことを検討することを目的とする。

これまでに筆者ら⁷⁾は、上半・下半の各切羽位置における応力解放を模擬する機構を有する実験装置(図-1)を製作し、遠心加速度50G場において模型実験を実施してきた。本実験では、模型地盤中に中空のトンネル模型を固定し、その先端で切羽の地盤を押さえているブロックを引抜くことで、掘削時の切羽面の応力解放を模擬した。その結果、トンネル掘削時の切羽前方の地盤挙動や切羽に作用する土圧を確認した。図-2に、切羽ブロックを全断面同時に0.15m(実物大スケール)だけ引抜いたときの地盤変位の画像解析結果を示す。切羽前方からその上方にかけて変位の大きい領域が見られる。この領

域では地盤が緩んでいると考えられ、切羽の応力解放による緩み領域の形成を確認することができた。

一方で、本実験では、図-3に示すように、切羽に作用する土圧を測定するための荷重計に負の値が観測されるといった測定上の課題があった。そこで本稿では、はじめに実験装置を改良し、切羽に作用する土圧のより正確な測定を試みた。

また、実験では、地盤内部の応力・変位の分布を測定することは困難であり、測定箇所には制約がある。さらに、トンネルの変形を考慮することができないなど、模擬できる条件に限られるという課題がある。そこで、実験に加えて数値解析により切羽挙動を詳細に検討することを目指している。手法の確立に向け、ベンチカット工法に先立って、全断面を同時に掘削した場合の模型実験に対する再現解析を実施し、切羽の応力解放を模擬する方法を検討するとともに、地表面沈下量や地盤内の応力再配分について調べた。

2. 遠心模型実験装置の改良

(1) 装置改良

荷重計で負の値が観測される原因として、ブロックとガラス板および外周のカバーとの摩擦力により、ブロック後方に位置する荷重計に引っ張りが生じることが考えられた。そこで、図-4に示すように、切羽ブロックの表面15か所に土圧計を埋め込み、土圧をより直接的に測定できるようにした。土圧計として、東京測器研究所製の小型圧力計 PDB-100KPB を用いた。

(2) 実験結果

改良された装置を用いて、数値解析との比較のために全断面掘削を模擬する切羽引抜き試験を実施した。遠心加速度 50G 場において、切羽ブロックを同時に実物大スケールで 0.05 m 引抜く操作を 3 回連続で行い、計 0.15 m 引抜いた。模型地盤の条件は、既往の実験⁷⁾と同様である。

図-5に、1回目の引抜き時の切羽に埋め込んだ土圧計の測定値の変化を示す。切羽ブロックに作用する土圧が引抜き開始直後に急減し、ゼロに近い値をとったのちに小さく変動している。負の値が解消され、既往の切羽引抜き試験^{2,9)}と同様の結果となり、応力解放をより正確に測定できたと考えられる。また、切羽ブロック表面の複数点で測定していることから、数値解析の結果と併せて切羽に作用する土圧の分布をより詳細に検討することが可能になると考えられる。

加えて本実験では、切羽ブロック引抜き前後にレーザー変位計 (KEYENCE 製センサヘッド IL-100) を土槽

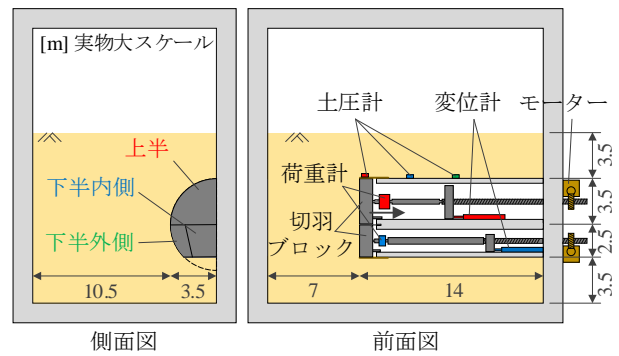


図-1 切羽引抜き試験装置の概要⁷⁾

画像解析ソフト
GeoPIV-RG⁸⁾
を用いた

解析領域

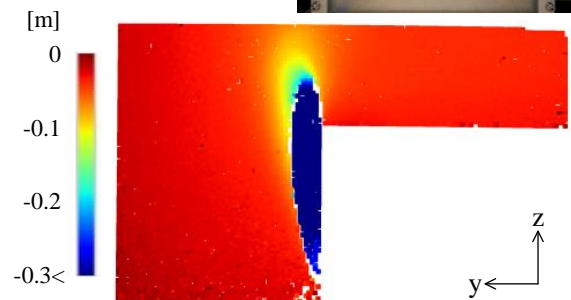


図-2 実験 (全断面掘削) の地盤変位量 (z成分)

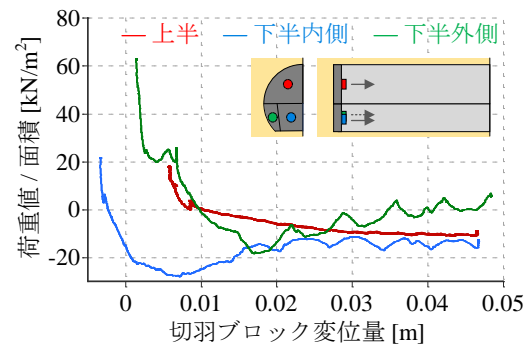


図-3 実験 (全断面掘削) の切羽土圧変化⁷⁾

上部でトンネル軸方向にスライドさせることで連続的に地表面の高さを測定し、地表面の沈下量を算出した。図-6に、0.15 m の引抜き後の地表面沈下量を示す。切羽の前方で地表面の沈下を確認することができた。トンネル断面よりも外側の地盤では沈下は見られなかった。

3. 数値解析の概要

(1) 解析対象

本研究では、筆者ら⁷⁾が行った遠心模型実験のうち、全断面掘削を模擬したケースに対する再現解析を実施し

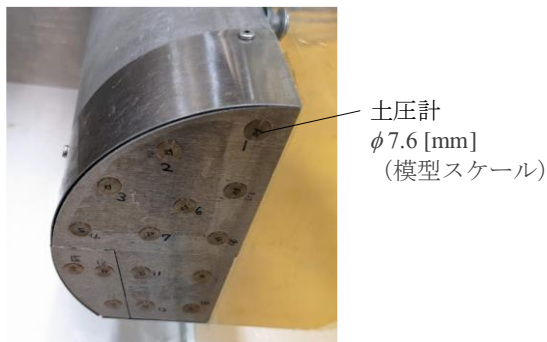


図-4 土圧計を埋め込んだ切羽ブロック

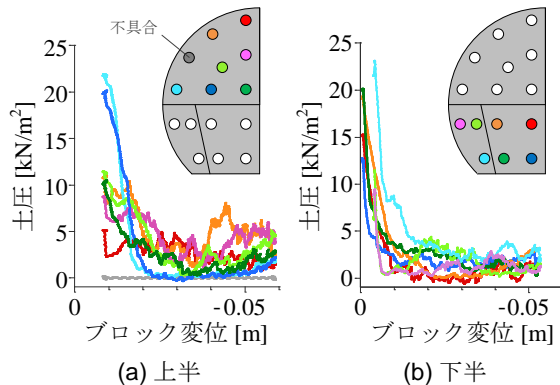


図-5 実験（全断面掘削）の切羽表面の土圧変化

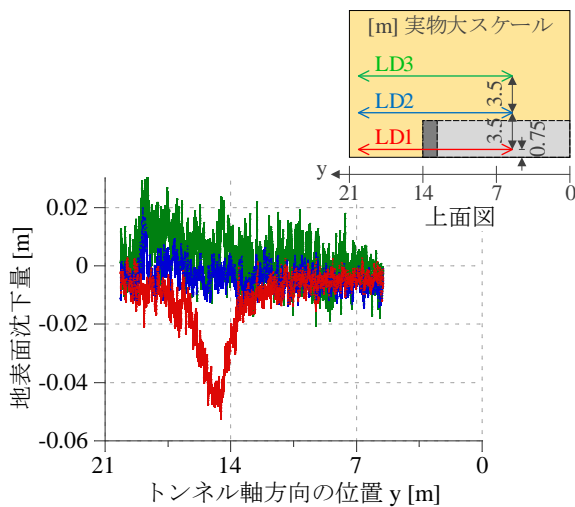


図-6 実験（全断面掘削）の表面沈下量

た。本解析では、解析弾塑性有限要素解析コード DBLEAVES⁹⁾を用いて3次元弾塑性有限要素解析を行った。本解析コードは、トンネルを含む様々な事例^{10,11)}の解析に適用されている。

図-7に解析メッシュを示す。解析領域の大きさおよびトンネルの位置などは、実験土槽に遠心加速度50Gを載荷したときの実物大スケールに一致させている。14m×21m×13mの地盤中にトンネルを模した空洞が設けられている。対称性から、トンネル軸を通る鉛直断面で切断した半断面を対象とした。トンネルは、直径D=7mの円形の底部が切り欠かれた形状をしており、土被りは

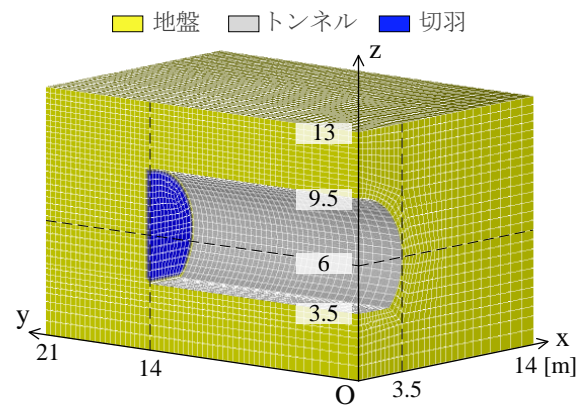


図-7 全断面掘削再現解析 メッシュ

表-1 豊浦砂の物性値^{12,13)}

単位体積重量 γ_1 [kN/m ³]	15.55
大気圧下の間隙比 N	1.1
破壊時主応力比 R_{cs}	3.2
ポアソン比 ν	0.272
静止土圧係数 K_0	0.349
圧密指数 λ	0.07
膨潤指数 κ	0.0045
β (stress-dilatancy parameter)	2.0
a (ANN) parameter	60

表-2 トンネル-地盤境界の Joint 要素物性値¹⁴⁾

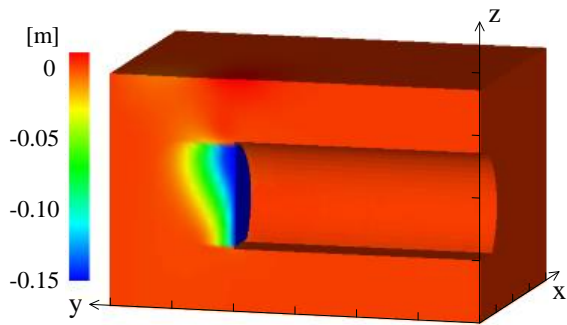
せん断方向剛性率 K_n [kN/m ² /m]	1.55×10^4
垂直方向剛性率 K_n [kN/m ² /m]	1.55×10^4
粘着力 c [kN/m ²]	5.0
内部摩擦角 ϕ [°]	28.0

0.5Dに設定した。地盤の底面および側面は、境界に垂直な方向に変位を拘束する条件とした。

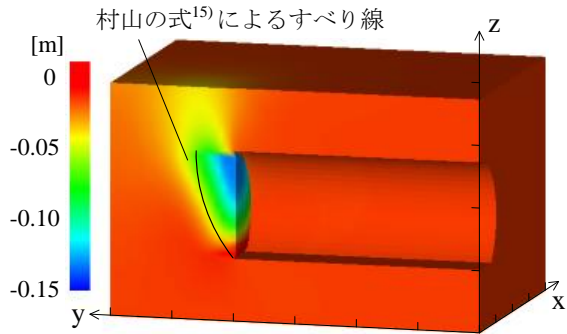
(2) モデル化

地盤の力学特性は、Nakai & Hinokio¹²⁾による subloading η modelを用いて弾塑性体としてモデル化した。本モデルは、中間主応力・密度・拘束圧が変形・強度特性に及ぼす影響や塑性流動方向の応力依存性を考慮できるという特徴を有する。表-1に、本解析で入力値として用いた地盤の材料定数を示す。本定数は、豊浦砂を用いて試験を実施したNakai & Hinokio¹²⁾およびSawamura et al.¹³⁾をもとに決定した。

トンネル外周は、剛で動かないものと仮定した。これは、実験のトンネル模型の製作に十分な厚みのあるアルミ部材を用いたため、それに近い条件としたものである。トンネル外周と周辺地盤の境界部分には Joint 要素を配置して両者の境界における影響を考慮した。表-2に、本解析で用いた Joint 要素の材料定数を示す。この材料定数は、モルタルと豊浦砂の一面せん断試験から算出した Joint 要素の材料定数を用いて数値解析を実施している Sawamura et al.¹⁴⁾をもとに決定した。



(a) 地盤変位 (x 軸成分)



(b) 地盤変位 (y 軸成分)

図-8 切羽強制変位に伴う地盤変位

(3) 解析手順

地盤の初期状態は成層地盤を仮定し、初期土圧は土被り圧と静止土圧係数 K_0 より求めた。トンネル掘削過程は、実験と同様に切羽の引抜きによって表現した。すなわち、図-7において、切羽（青い面）上の節点を y 軸マイナス方向に強制変位させた。強制変位量は実験に合わせて -0.15 m とした。

4. 数値解析結果

(1) 地盤変位

図-8 に、切羽の強制変位に伴う地盤変位を示す。図-2 に示した実験結果と同様に、数値解析においても、実験と同様に切羽前方からその上方にかけての変位の大きい領域が形成されることを確認できた。図-8(b)中には、村山の式¹⁵⁾によるすべり線を示している。これは、2次元の条件において、切羽前方のすべり線内の土塊の力の釣り合いの問題として、掘削時の切羽に作用する土圧を推定する式によるものである。次元の違いはあるものの、本解析においても変位の大きい領域の形状は類似している。

図-9 に地表面沈下量の分布を、図-10 に y 軸に平行な測線上の地表面沈下量を示す。これらの図から、トンネル軸に近いほど沈下量が大きいことが分かる。図-10 中

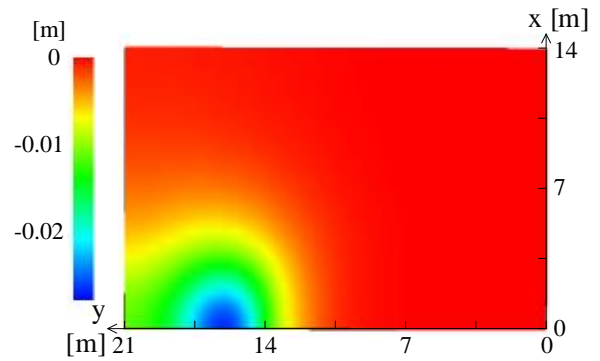


図-9 切羽強制変位に伴う地表面沈下量分布

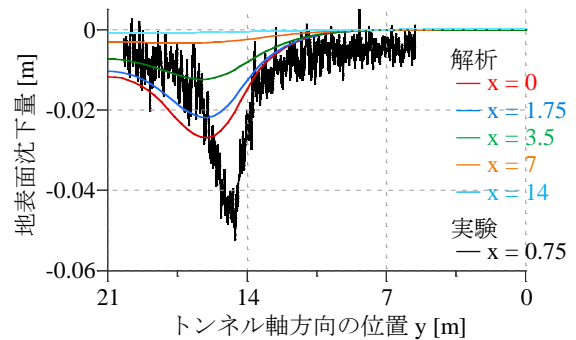


図-10 解析と実験の地表面沈下量

には、実験で測定した地表面沈下量を併せて示している。実験と比較して解析では、沈下の最大量が小さい一方で切羽前方の影響範囲が大きい結果となった。

(2) 応力分布

トンネル軸方向の水平応力について、図-11 に切羽強制変位後の σ_y の分布を、図-12 にトンネル中心を通る水平断面 ($z=6$ 平面) 上の σ_y 分布を、図-13 に切羽に作用する土圧として切羽前方直近の要素に作用する σ_y の変化を示す。鉛直土圧について、図-14 に切羽強制変位後 σ_z の分布を、図-15 にトンネル天端上部の深さの地盤 ($x=0, z=6$) に作用する σ_z を示す。

各図において切羽前方で応力が減少しており、応力解放を模擬できていることを確認できる。特に図-13 では、強制変位の開始直後に切羽に作用する土圧が急減少しており、実験 (図-5) と同様の結果が得られた。また、図-14・15 において切羽前方およびその上方で鉛直応力が小さくなっており、変位の大きい領域が緩み領域となっているといえる。さらに、図-12・15 などにおいて、緩み領域の周囲 (切羽近くのトンネル外周および切羽前方のやや遠方) で応力の増加が見られる。これは、切羽前方で解放された応力が再配分されたのだと考えられる。これは、筆者ら⁷⁾の実験で切羽直近の天端土圧が増加したことと一致する。また、既往の降下床実験及びその解析¹⁶⁾において、降下床に作用する土圧が減少し、周辺に作用する土圧が増加することと類似している。

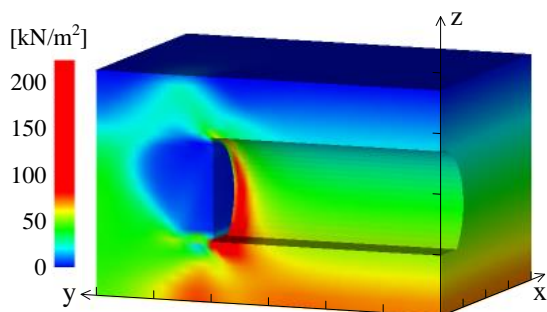


図-11 強制変位後の水平応力 σ_{α} 分布

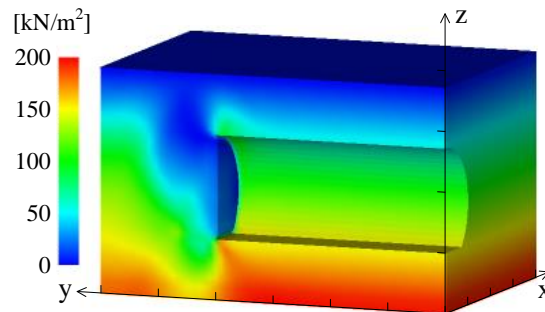


図-14 強制変位後の鉛直応力 σ_{α} 分布

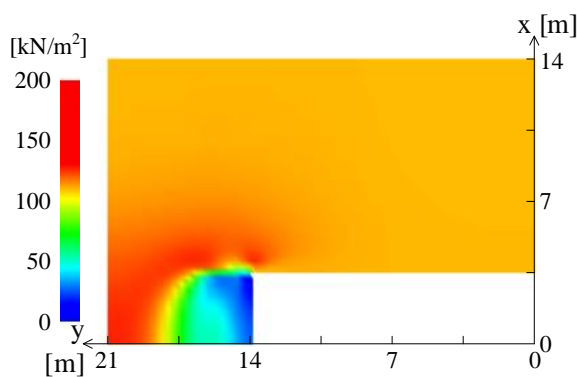


図-12 強制変位後の水平応力 σ_{α} 分布 (z=6平面)

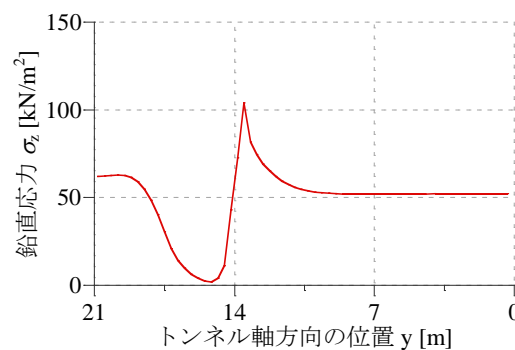


図-15 天端上部の地盤 (x=0, z=6) の鉛直応力 σ_{α}

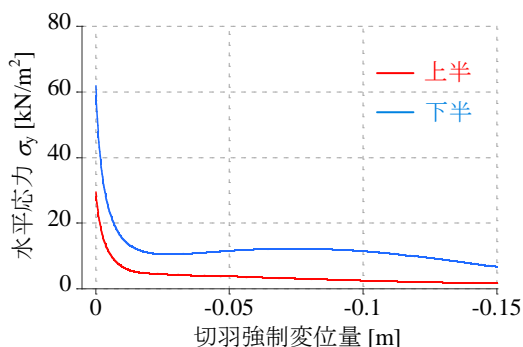


図-13 切羽前方の要素に作用する水平応力 σ_{α} の変化

5. まとめ

本稿ではまず、遠心模型実験における測定上の課題を解消するために、土圧計をブロック表面に複数埋め込むという装置改良を行った。その結果、可動部の摩擦力等の影響を受けずに切羽に作用する土圧の分布・変化を測定することができるようになった。

さらに、ベンチカット工法の掘削過程を模擬する数値解析手法の確立に向け、全断面掘削を模擬した模型実験に対する再現解析を実施した。以下に本解析の成果をまとめる。

- (1) 実験で確認された切羽の応力解放および地表面の沈下を、数値解析においても再現することができた。
 - (2) 実験で測定することが困難な箇所が多い応力について、応力分布の結果から、切羽の応力解放に伴う周辺地盤への応力再配分を確認することができた。
- 今後は、ベンチカット工法を模擬したケースの再現解

析を進めるとともに、トンネルの変形を考慮した条件・地下水の影響を考慮した条件・切羽前方の補助工法の効果を考慮した条件など、実験では模擬することができなかった条件についても数値解析により模擬し、トンネル掘削時の切羽挙動をより詳細に検討する所存である。

謝辞： 本研究は一般財団法人鉄道建設技術研究会からの助成によって進められました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 上野洋, 足立紀尚, 八嶋厚, 湯浅泰則: 砂質地山トンネル掘削に伴う切羽前方の地山挙動について, 第21回土質工学会研究発表会講演集, pp.1683-1686, 1986.
- 2) 久武勝保: トンネル切羽の安定・崩壊挙動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.517, pp.105-115, 1995.
- 3) 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, pp.117-129, 1999.
- 4) 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, pp.51-62, 2000.
- 5) 大谷順, 永谷英基, 高野大樹: X線CTを用いたトンネル切羽崩壊機構の評価, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.4, pp.814-824, 2006.
- 6) Idinger, G., Aklik, P., Wu, W., Borja, R.I.: Centrifuge

- model test on the face stability of shallow tunnel, *Acta Geotechnica*, Vol.6, pp.105–117, 2011.
- 7) 中村聡一郎, 澤村康生, 磯谷篤実, 岸田 潔 : 遠心模型実験によるトンネル切羽土圧の計測と評価, トンネル工学研究発表会講演集, 31, 1-8, 2021.
 - 8) Stanier, S.A., Blaber, J., Take, W.A., White, D.J.: Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.53, No.5, pp.727-739, 2016.
 - 9) Ye, B., Ye, G. L., Zhang, F. and Yashima, A. : Experiment and numerical simulation of repeated liquefaction-consolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.3, pp. 547-558, 2007.
 - 10) Kimura, M. and Zhang, F. : Seismic evaluations of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.113-132, 2000.
 - 11) 崔 瑛, 野々村政一, 井浦智実, 岸田 潔, 木村 亮 : 小土被り土砂地出でのトンネル掘削における事前地山改良工の効果に関する解析的検討, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学) , Vol.68, No. 3 , pp.127-137, 2012.
 - 12) Nakai, T. and Hinokio, M. : A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, *Soils and Foundations*, Vol.44, No. 2, pp.53-70, 2004.
 - 13) Sawamura, Y., Shibata, T., Kimura, M.: Mechanical role of reinforcement in seismic behavior of steel-strip reinforced earth wall, *Soils and Foundations*, Vol.59, Issue.3, pp.710-725, 2019.
 - 14) Sawamura, Y., Kishida, K. and Kimura, M. : Centrifuge Model Test and FEM Analysis of Dynamic Interactive Behavior between Embankments and Installed Culverts in Multiarch Culvert Embankments, *International Journal of geomechanics*, ASCE, Vol. 15, No. 3, 04014050, 2015.
 - 15) 村山朔郎, 松岡元 : 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, No.187, pp.95-108, 1971.
 - 16) 菊本統, 木村亮, 岸田潔, 足立紀尚 : トンネル掘削時の力学挙動に関する 3次元降下床実験とその数値解析, 土木学会論文集, No.750/III-65, pp.145-158, 2003.

(2022. 8. 26 受付)

EVALUATION OF FACE BEHAVIOR BY NUMERICAL SIMULATION OF MODEL EXPERIMENTS DURING TUNNEL EXCAVATION

Soichiro NAKAMURA, Yasuo SAWAMURA,
Atsumi ISOGAI and Kiyoshi KISHIDA

Although many studies have been conducted on face stability during tunnel excavation, most of them have focused on full face excavation method. The authors have therefore conducted centrifuge model experiments to simulate stress release in the face of a tunnel in order to reveal the behavior of the ground during tunnel excavation by the bench cut method. In this paper, first, the experimental apparatus was modified to measure the earth pressure acting on the face more accurately and to measure the settlement. Secondly, to investigate the behavior of the face in more detail by numerical analysis, a replication analysis of the model experiment was conducted for the case of full face excavation method prior to the bench cut method. As a result, the stress release of the face and the settlement confirmed in the experiment were reproduced in the numerical analysis. In addition, stress redistribution to the surrounding ground due to stress release of the face was confirmed.