エレメント推進を模した 矩形断面の土槽掘削実験

板谷 創平1・富樫 陽太2・仲山 貴司3・岡野 法之4

- ¹正会員 (公財)鉄道総合技術研究所(〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:itaya.sohei.48@rtri.or.jp
- ²正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:togashi.yota.93@rtri.or.jp
- ³正会員 (公財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:nakayama.takashi.61@rtri.or.jp
- ⁴正会員 (公財)鉄道総合技術研究所(〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:okano.noriyuki.41@rtri.or.jp

掘削中の地盤の力学挙動を解明するため、従来、様々な実験が行われてきたが、矩形断面の掘削に関しては、これまで十分に検討されてこなかった.本研究では、非開削工法による線路下横断構造物の施工時の地盤の緩みを実現象に則して評価するため、新しい実験装置を開発した.この実験装置は、約1/5スケールの鋼管と、掘削装置および操作部により構成され、掘削装置のカッターは矩形断面に対応して上下・ 左右・前後それぞれ独立して操作できる.本検討では、小型アクリル土槽内に含水比w = 10 %で豊浦砂を 締め固め、掘削・推進実験を行うことによる地盤の変形特性を調べた.その結果、モーターで回転させた カッターにより安定した掘削が可能であり、掘削時の切羽の様子も小型カメラから安定して観察できるこ とを確認したとともに、矩形断面掘削時の地盤の変形特性を、力学的に解釈可能なデータから実験的に確 認できることがわかった.

Key Words : underpass, tunnel, rectangular shape, excavating test, surface displacement

1. はじめに

トンネル掘削時の地盤の力学挙動を解明するために, これまで様々な実験が行われてきている¹⁾. 例えば, 足 立ら², 菊本ら³により, 降下床実験によるトンネル土圧 に関する検討が、アルミ棒積層体や豊浦砂などを用いて 行われている. Kirsch et al.⁴は,二重管の引き抜き実験に よりトンネル掘削に起因する地盤の緩みについて実験的 に検討を行っている. Loganathan et al. ⁵は、トンネルと杭 の相互作用について、掘削による応力解放を模した装置 を用いた遠心模型実験から実物大の応力レベルの検討を 行っている. このように、既往の検討のほとんどは、円 形断面のトンネル掘削に対するものであり、いくつかの 検討ゆのでは、数値計算も実施され、. また、双設トン ネル掘削のモデリングなど^{8,9},最新の掘削方法に合わ せた検討も行われているものの, 矩形断面の掘削による 地盤の変形特性に関しては十分に検討されているとは言 い難い.

一方,道路や鉄道と立体交差するトンネルの構築に関 しては、近年、防護鋼管を推進あるいはけん引する工法 を用いた非開削施工が多く見られている¹⁰¹¹⁾.これらの 工法では、エレメントと呼ばれる矩形の鋼管を掘削・推 進することから、矩形断面掘削による地盤の力学挙動を 把握することが重要となってくる.このような観点から、 Takahashi et al.¹²は、エレメントの掘削および推進をモデ ル化したFEM解析を行い、地表面に与える影響などを検 討したが、矩形断面の掘削に関する地盤への影響を実験 的に検討した事例はほとんど見当たらない.

本研究では、線路下横断構造物の施工時における地盤 の力学挙動を把握するため、矩形断面を掘削できる新し い実験装置を開発した.当該装置は、カッタービットに 付与された3方向の自由度により、完全な矩形を掘削で きる.本検討では、小型アクリル土槽を用い、開発した 装置による、エレメントの推進施工を模した掘削・推進 実験を行ったので報告する.



写真-1 実験装置の外観



2. 掘削装置の構造

写真-1および,図-1に,矩形断面を掘削する新しい実 験装置を示す.この装置は,図-1に示すように約1/5スケ ールの鋼管と操作装置によって構成されている.切羽を 掘削できるカッターは,矩形断面の形状に応じ,ハンド ルによって直交座標系の3方向に独立して操作可能であ る.図-2に示すように,ハンドルはナックルジョイント によって連結されており,前後,左右および上下方向に 独立して制御できる.図-3に示すように,掘削可能長は 20cm,最大傾斜角は30°である.

この装置を用いて、小型アクリル土槽による矩形断面 の掘削・推進実験を行う.

3. 掘削·推進実験

(1) 実験条件

地山防護のためのエレメントの推進施工では、地盤を 掘削した後にエレメントをジャッキで推進する.この施 工条件をモデル化するため、図-4に示すような掘削・推



ハンドル

鋼管

鋼管

カッタ-

カッタ-

ンドル

(b)

(c)



図-4 掘削推進実験の概要



写真-2 掘削推進実験の外観

表-1 豊浦砂の物性				
最大乾燥密度	最少乾燥密度	最適含水比	含水比	締固め度
ρ _{dmax} (g/cm ³)	ρ _{dmin} (g/cm³)	Wopt(%)	W(%)	<i>D</i> c(%)
1.65	1.337	14.3	10	90

進実験を実施した. 掘削装置は台に固定し, 土槽は台車 により水平方向に可動する条件である. 土槽は, 側面の 一部に20cm四方の開口部を有し, 掘削装置を挿入でき る構造となっている. 実験実施前に開口部からの地盤の 崩壊や乾燥を防ぐため, 掘削前には開口部を蓋で覆った.

実験は開口部の開放直後に切羽と掘削装置の位置合わ せを行い,試料が乾燥しないうちに掘削を行う.1施工 ステップ毎に掘削は20mmずつ行い,掘削終了後に土槽 を20mm掘削装置の方向に水平に移動させることで推進 を模す.掘削後と推進後に地表面の状態を目視で観察し, 地表面の中心の垂直変位をレーザー変位計で測定する. 掘削土は,施工ステップごとに掃除機で吸い出し,排土 量を測定した.なお,小型カメラにより切羽面を常に観 察できる条件で実験を行った.

アクリル土槽に作製した模型地盤は豊浦砂を用いた. 表-1に豊浦砂の特徴を示す.含水比wは、写真-3に示す ように乾燥砂を水とミキサーにより混ぜ合わせて調整し た.写真-4に示すように、土槽の50mmごとにD&=90%の 割合で突き固めを行った.なお、含水比w=10%は最適 含水比よりやや小さく、豊浦砂の最も固い状態が期待で きよう.

(2) 実験結果

図-5に施工ステップと推進長の関係を示す.本実験は、 土槽を最大で200mm推進した.写真-5は、各ステップに おける切羽面の状況を示す.切羽面の状況は、小型カメ ラを通して明確に確認できることから、切羽面の脆性的 な崩壊の挙動が小型カメラによって実験的に記録できる 可能性を確認できたと言えよう.

図-6は、施工ステップごとの排土量および地表面沈下 量の関係を示している.計画排土量は実験結果とほぼ同 じであるため、計画通りの掘削が適切に行われたことが



写真-3 ミキサーによる砂と水の練り混ぜ



写真-4 突き固め(1層当たり50mmで実施)

分かる.一方,締固め度が90%の非常に剛な地盤条件であるため,地表面変位は非常に小さい値である.ステップ5までは沈下が観測され,その後は隆起が観測された. これは,地表面の計測地点から遠い初期の施工ステップにおいては,地盤の緩みにより地表面が沈下するのに対し,ステップが進み推進量が大きくなり,変位計の測定点に近づくことで,剛な地盤がせん断を受け堆積膨張することで地表面が隆起したと考えられる.



凶ら ヘノツノことの推進車





ステップ1

掘削前



ステップ5



ステップ 10





図-6 ステップごとの排土量および地表面沈下量

以上のように、実験装置が地山の矩形断面掘削を適切 に表現できることが確認でき、力学的に解釈可能な土の 変形特性を評価できることも実証できた. 今後は、含水 比を低くし、より実地盤に近い模型地盤の検討を行うと ともに、大型土槽を用いた実験により、より実物スケー ルに近い地盤の挙動を検討して行く予定である.

4. 結論

トンネル掘削時の地盤の力学挙動を明らかにするため、 様々な実験が実施されている.しかしながら、線路下横 断構造物の施工に関する矩形断面掘削については、掘削 時の地山の挙動や地表面に与える影響など、多くの点が いまだ十分に検討されていないようである.

本研究では、線路下横断構造物の施工時におけるの地 山の力学挙動を適切に評価するため、矩形断面を掘削で きる新しい実験装置を開発した.また、同実験装置の適 用性の確認のため、エレメント推進施工を模した掘削・ 推進実験を実施した.実験は十分に締め固めた豊浦砂を 用いて実施した.その結果、掘削による切羽面の状態変 化を明瞭に小型カメラで観察できることを確認するとと もに、矩形断面掘削時の地盤の変形特性を、力学的に解 釈可能なデータから実験的に確認できることがわかった.

今後は、線路下横断構造物の施工時の掘削メカニズム を把握すること、矩形断面掘削中の地盤の力学挙動を解 明するため、より実地盤に近い低い含水比とより実物に 近い大型土槽を用いた実験を進めていく予定である.

謝辞

実験の実施にご協力頂いた(株)ジェイアール総研エ ンジニアリングの川上義輝氏には感謝の意を表す.

参考文献

- Meguid MA, Saada O, Nunes MA, Mattar J: Physical modeling of tunnels in soft ground: A review, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 185–198, 2008.
- 2) 足立紀尚、木村亮、岸田潔、伊藤浩志:降下床実験 によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび 周辺地盤の力学挙動の解明、土木学会論文集, No.694, pp.277-296, 2001.
- 3) 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, pp.145-158, 2003.
- Kirsch A: Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand, *Acta Geotechnica*, Vol. 5, pp. 43 – 62, 2010.

- Loganathan H, Poulos HG, Stewart DP: Centrifuge model testing of tunneling – induced ground and pile deformation, *Geotechnique*, Vol. 50, No. 3, pp. 283 – 294, 2000.
- Davis EH, Gunn MJ, Mair RJ, Seneviratne HN: The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive materials, *Geotechnique*, Vol. 30, No. 4, pp. 397 – 416, 1980.
- Komiya K, Soga K, Akagi H, Hagiwara T, Bolton MD.: Finite element modelling of excavation and advancement processes of a shield tunnelling machine, *Soils and Foundations*, Vol. 39, No.3, pp. 37 – 52, 1999.
- Shin JH, Choi YK, Kwon OY, Lee SD: Model testing for pipe-reinforced tunnel heading in agrabular soil, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 23, pp. 241–250, 2008.
- Champan DN, Ahn SK, Hunt DVL, Chan HC: The use of model tests to investigate the ground displacement associated with multiple tunnel construction in soil, *Tunnelling*

and Underground Space Technology, Vol. 21, No. 3, pp. 1 – 6, 2006.

- Nozawa S: Reduction of the Cost of Construction in the Space Above and Below Rails, *JR EAST Technical Review*, No.4, pp. 23 – 28, 2003.
- 11) Zhang D, Liu B, Qin Y: Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 60, pp. 151–164, 2016.
- 12) Takahashi H, Komiya K, Akagi H, Nakayama T, Ohashi Y: Finite element simulation of construction processes of a mechanized HEP & JES Tunnelling Method, *Proc. EURO:TUN 2009*, pp. 31 – 36, 2009.

(2017.8.11 受付)

EXCAVATE EXPERIMENT WITH RECTANGULAR SECTION SIMULATING ELEMENT PROPULSION

Sohei ITAYA, Yota TOGASHI, Takashi NAKAYAMA and Noriyuki OKANO

For understanding a mechanical behavior of soils during tunnel excavation, various experiments have been conducted. However, the influence of rectangular shape excavation was not sufficiently investigated by previous studies. In this study, in order to evaluate ground relaxation during underpass tunnel construction by non-open cut method, a new testing apparatus to excavate rectangular section is developed. The testing apparatus is configurated by metal lining scaled down by approximately 1 / 5, drilling and its operating devices, and it can be movable corresponding to rectangular tunnel face by three-degree of freedom. For investigate the deformation properties of soils during excavation, jacking and excavation test is conducted by a small sand box using Toyoura soil compacted with water content w = 10%. The results demonstrated that the excavation can be stably conducted using the cutter rotated by a motor and the tunnel face observation can be also stably conducted by a miniature camera.