遠心模型実験による
トンネル切羽土圧の計測と評価

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　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　関東甲信工事局
（〒460-0003 名古屋市中区錦 1-13-26 名古屋伏見スクエアビル 5F）
E-mail: isogai.ats-26es@jrtt.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．そこで本研究では，ベンチカット工法におけるトンネル下半掘削時の地盤挙動を解明することを目的に，分割された各切羽面の応力解放を模擬する機構を有する実験装置を製作した．この装置を用いて遠心模型実験を行い，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．まず，全断面掘削を模擬した実験で，切羽前方に形成される緩み領域・すべり線の形状を確認するとともに，測定された切羽土圧を理論値と比較した．続いてベンチカット工法を模擬した実験で，下半中央部に設けられる工事車両用の斜路の掘削幅がトンネル安定性に与える影響を検討した．さらに，切羽土圧測定上の課題の原因を検討し，装置改良の展望を示した．

Key Words: *bench cut method, NATM, face stability, earth pressure, centrifuge model test*

1.　はじめに

NATM は地山の耐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，他の工法に比べて経済性や施工の柔軟性に優れていることから，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 2 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，ベンチカット工法の下半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．また，本工法では，工事車両が上半切羽に移動するために，上半盤と下半盤をつなぐ斜路が下半中央部に掘削される．この斜路掘削部の上部の地山が不安定化し崩壊した事例が報告されており[7)]，斜路の掘削幅が大きくなるとトンネル安定性が損なわれる可能性がある．したがって，斜路の掘削幅がトンネル安定性に与える影響を理解することが重要である．

下半を掘削する際は，上半を掘削したことによるトンネル軸方向の力が支保脚部に作用した状態で掘削するため，3 次元的な土圧の推移を検討する必要がある．そこで本研究では，ベンチカット工法の掘削過程を 3 次元的に模擬することを試みた．3 次元的に切羽安定性を検討する方法として切羽引抜き試験がある[2),4)-6)]．切羽引抜き試験とは，模型地盤中にトンネル模型を固定し，切羽面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する実験である．既往の研究[2),4)-6)]は全断面掘削を対象としているが，本研究では下半中央部に斜路を設けるベンチカット工法による掘削を模

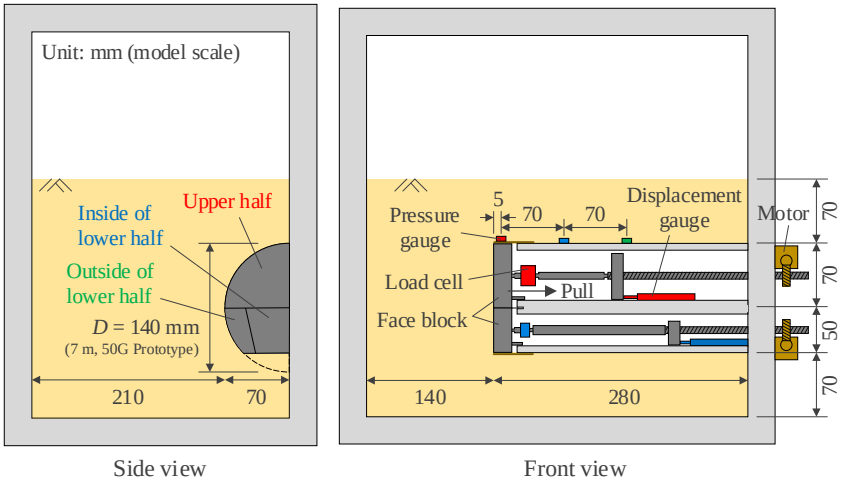

図-1　切羽引抜き試験装置の概要

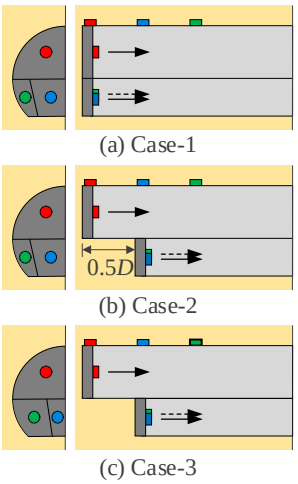

図-2　実験ケースの概要

擬する装置を製作した．この装置を用いて遠心模型実験を実施し，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について議論を行った．

2.　実験概要

(1)　実験装置

本研究では，京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用いた．有効半径 0.25 m のアーム型装置である．スリップリングを介して制御室のコンピュータとアーム上の機器が接続されており，制御室から実験模型の制御および測定値の記録を行うことができる．

切羽引抜き試験装置を製作し，遠心力載荷装置に設置した．**図-1** に切羽引抜き試験装置の概要を示す．本装置では底面が切り欠かれた円形のトンネルを想定し，断面形状の対称性から，トンネル軸を通る鉛直面で半分に分割されたトンネル模型が土槽内部に取り付けられている．半断面を対象としたのは，土槽前面のガラス板を通してトンネル軸を通る鉛直断面の地盤挙動を観察するためである．分割面はガラス板に固定されている．土槽の寸法は横 420 mm，縦 280 mm，高さ 420 mm，トンネル径は模型寸法で D=140 mm である．トンネル模型先端には，軸方向の変位を制御できるブロックが取り付けられており，静止時は水平応力に抗して切羽面の地盤を支持している．このブロックを後方に引き抜くことで，切羽面の応力開放を表現する．本装置では，モーターを遠隔操作することにより，遠心力を載荷した状態でブロックを操作することができる．ブロックに側方から土圧が作用するのを防ぐため，ブロックの外周を覆うカバーが取り付けられている．従来の切羽引抜き試験の装置 [2), 4)-6)] と比較して，本装置は以下のような特徴を有する．

a)　ブロックが上半・下半内側・下半外側に 3 分割されており，引抜き操作を個別に行うことができる．特に，下半内側を斜路に見立てることで斜路掘削を模擬できる．

a)　上半切羽と下半切羽の距離 (ベンチ長) を 0 および 0.5D に設定することができ，全断面掘削とベンチカット工法の切羽位置を模擬できる．

b)　下半のブロックを内側と外側の面積比が異なる組に取り換えることができ，斜路の掘削幅の違いを表現可能である．

それぞれの切羽ブロックの後方には，変位計および荷重計が取り付けられている．また，トンネル模型の上端部には，上半切羽の直近から 70 mm おきに土圧計を 3 か所貼付し，トンネル天端に作用する鉛直土圧を測定した．

表-1　豊浦砂の物性値 [8)]

土粒子荷重 G_s	2.64
平均粒径 D_{50} [mm]	0.20
内部摩擦角 [deg]	40.6
粘着力 c [kPa]	0.0
最大間隙比 e_{max}	0.975
最小間隙比 e_{min}	0.585

(2)　模型地盤

乾燥豊浦砂を用いて．相対密度 D_r = 80%，トンネル模型の土被り 70 mm (= 0.5D) の模型地盤を突き固め法により作製した．**表-1** に豊浦砂の物性値を示す．なお，トンネル模型下部にも均一な地盤を作製するために，土槽後面の壁板を取り外して土槽を前方に倒し，もともと後面だった面から砂を投入した．このとき，もとの開口部である上面には，一時的に押さえ板を取り付けた．地盤作製の最初に，豊浦砂と色砂を質量比およそ 3 : 1 で混合した砂を土槽前面のガラス板の近傍に薄く敷いた．これは

後述の画像解析のためである．色砂として，青色に着色された粒径 0.425～0.600 mm の珪砂を用いた．

(3) 実験ケース

3 ケースの実験を実施した．**図-2** に各ケースの概要を示す．いずれのケースでも遠心加速度 50G を載荷し，トンネル径 7 m，土被り 7 m の応力状態を再現した．

a) Case-1

Case-1 は全断面掘削を模擬したケースである．既往の研究 [2),5)] と比較し，本実験装置を遠心場で操作したときの地盤挙動を確認する．ベンチ長はゼロに設定し，ブロックを同時に 1 mm/min (模型スケール) で 1 分間引抜く操作を 3 回繰り返す．下半ブロックは面積比が (内側) : (外側) = 2 : 1 のものを取り付ける．

b) Case-2

Case-2 は，ベンチカット工法において斜路の掘削幅が広い場合の掘削過程を模擬するケースである．ベンチ長は 70 mm (= 0.5D) に設定する．下半ブロックは分割比が (内側) : (外側) = 2 : 1 のものを取り付ける．上半，下半内側，下半外側の順に切羽ブロックを引き抜く．それぞれのブロックの引抜きは，1 mm/min で 1 分間引抜く操作を 3 回繰り返す．

c) Case-3

Case-3 は，ベンチカット工法において斜路の掘削幅が狭いケースで，Case-2 との比較により斜路の掘削幅の違いが地盤挙動に与える影響を検討する． 下半ブロックは分割比が (内側) : (外側) = 1 : 2 のものを取り付ける．ベンチ長および引抜き操作の手順は Case-2 と同様である．

(3) 画像解析

土槽前方にデジタルカメラを設置し，ガラス板を通して，トンネル軸を通る鉛直断面の地盤の画像を自動で一定時間おきに撮影した．既往の切羽引抜き試験 [2),5)] では，色砂を格子状または水平の層状に敷き詰めた地盤を用いているが，色砂の格子や層の付近の変形しか分からないという制約がある．そこで本実験では，ガラス板に接する地盤に色砂を混ぜ込み，ランダムな斑点模様が入った模型地盤を撮影することで，地盤の変形を面的に明らかにすることを試みた．**図-3** に，作製した模型地盤をガラス板を通して撮影した画像の例を示す．

画像解析には，MATLAB 上で動作する画像解析ソフト GeoPIV-RG [9)] を用いた．このソフトでは，変形前と変形後の画像を用いて地盤粒子の変形量を求める [10)]．まず，

図-3 色砂を混ぜ込んだ模型地盤（例として Case-3）

画像データの各ピクセルの輝度 (0~256) の行列を L×L [px] の均等なグリッド状の区画に分割する． u を画像の横方向の座標 [px]，v を縦方向の座標 [px] とすると，各区画内の輝度分布は $\boldsymbol{U}=(u,v)$ を用いて行列 $\boldsymbol{I}(\boldsymbol{U})$ で表すことができる．ここで，基準の画像中の区画の輝度分布を $\boldsymbol{I}_{\mathrm{search}}(\boldsymbol{U})$，解析対象の画像中の区画の輝度分布を $\boldsymbol{I}_{\mathrm{test}}(\boldsymbol{U})$ とおき，区画が $\boldsymbol{s}=(m,n)$ だけ変位したと仮定して $\boldsymbol{I}_{\mathrm{search}}(\boldsymbol{U}+\boldsymbol{s})$ と $\boldsymbol{I}_{\mathrm{test}}(\boldsymbol{U})$ の ZNCC (zero-mean normalised cross correlation = 零平均正規化相互相関) を式 (1) [11)] で求める．この値は，基準画像中の区画と解析対象の画像中で $\boldsymbol{s}$ だけ変位した位置にある区画の輝度分布の整合性を表している．$\boldsymbol{s}$ を変化させたときの $\boldsymbol{s}$ と ZNCC の関係を 3 次元座標にプロットし，$\boldsymbol{s}$ と ZNCC の分布を bicubic interpolation でフィットした曲面上で ZNCC が最大になるときの $\boldsymbol{s}$ を，画像間での当該区画の変位とする．

3. 実験結果

全断面掘削を模擬した Case-1 と，ベンチカット工法を模擬した Case-2・3 に分けて結果を整理する．時間・変位は模型スケールで示す．切羽土圧は水平荷重を各ブロックの面積で除して算出した．

(1) Case-1（全断面）

図-4 に全断面引抜き 1 回目から 3 回目の切羽変位・切羽土圧・天端土圧の時間変化を示す．

a) 切羽土圧

切羽土圧は，1 回目の引抜き開始直後に急減してからやや増加して一定の値に収束する傾向がある．その後，2・3 回目の引抜きでは若干の変動が観測された．久武 [2)] や大谷ら [5)] は，本ケースと同様に全断面掘削を模擬した

$$\mathrm{ZNCC}\,(m,n)=\frac{\sum_{\mathrm{i}=0}^{L-1}\sum_{\mathrm{j}=0}^{L-1}\left[I_{test}(\mathrm{i},\mathrm{j})-\overline{I_{\mathrm{test}}}\right]\left[I_{\mathrm{search}}(\mathrm{i}+\mathrm{m},\mathrm{j}+\mathrm{n})-\overline{I_{\mathrm{search}}}\right]}{\sqrt{\sum_{\mathrm{i}=0}^{L-1}\sum_{\mathrm{j}=0}^{L-1}\left[I_{\mathrm{test}}(\mathrm{i},\mathrm{j})-\overline{I_{\mathrm{test}}}\right]^2\sum_{\mathrm{i}=0}^{L-1}\sum_{\mathrm{j}=0}^{L-1}\left[I_{\mathrm{search}}(\mathrm{i}+\mathrm{m},\mathrm{j}+\mathrm{n})-\overline{I_{\mathrm{search}}}\right]^2}}\qquad(1)$$

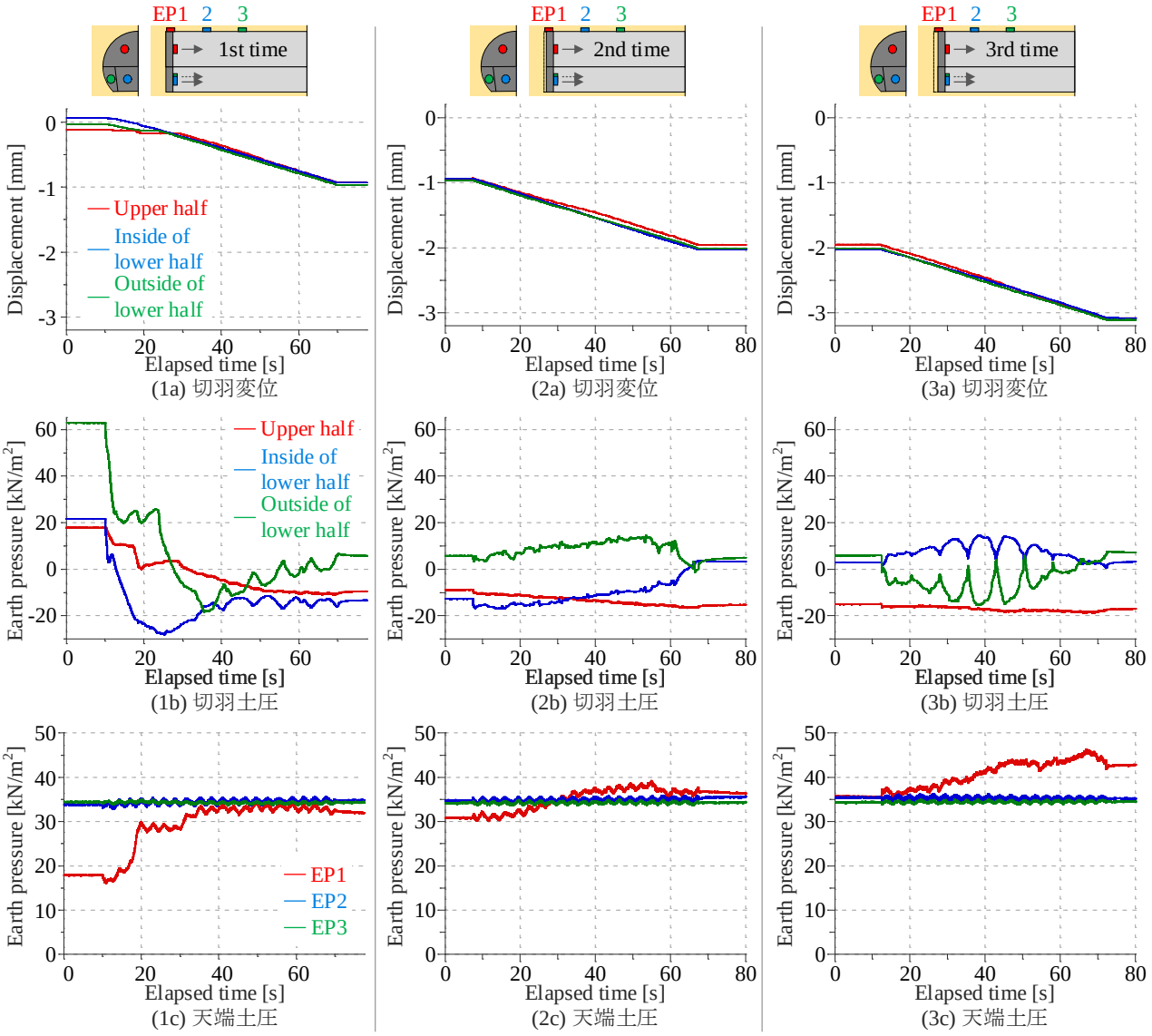

図-4　Case-1 切羽変位・切羽土圧・天端土圧 時間変化

切羽引抜き試験を実施し，引抜き直後に切羽土圧が急減してゼロに近くなり，その後やや増加することを報告している．本実験でも土圧減少後の土圧が負になったとことを除けば同様の挙動が見られ，ブロック引抜きによる切羽面の応力解放は 1 回目の引抜き開始直後に起きているといえる．そこで，以下では 1 回目の引抜きに注目して考察を進めた．また．負の切羽土圧が観測された原因を検討するための実験を追加で実施したので後述する．

本実験においても既往の実験 [2),5)] と同様の現象が起きているとの考えから，1 回目の引抜きの間の土圧の最小値をゼロとみなし，最小値との差で土圧を表し，**図-5** に示す．この補正値の全断面平均は，引抜き前が 43.0 kN/m^2，引抜き後が 9.26 kN/m^2 となり， 引抜きに伴い 21.5%に減少した．

引抜き前のブロックには静止土圧が作用していると考えられる．静止土圧の理論値を Jaky の式 $K_0 = 1 - \sin\phi$ による静止土圧係数 K_0 を用いて算出する．豊浦砂

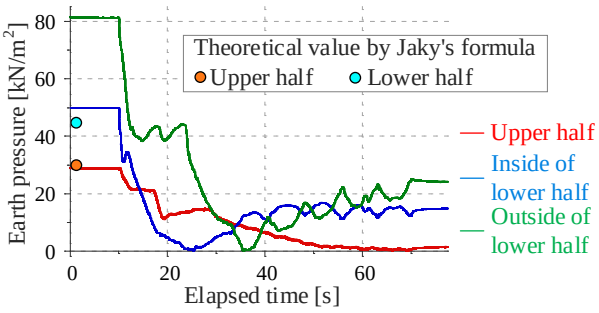

図-5　Case-1 引抜き 1 回目 切羽土圧補正値 時間変化

の内部摩擦角 $\phi = 40.6°$ から $K_0 = 0.349$ と推定され，各ブロックに作用する静止土圧の平均の理論値は上半 30.0 kN/m^2，下半 44.6 kN/m^2，全断面で 36.5 kN/m^2 である．測定結果の補正値と比較すると，上半・下半内側は近い値となったが，下半外側は測定結果の補正値のほうが大きかった．

b)　天端土圧

1 回目の引抜き開始直後に切羽直近の EP1 の値が増加している(図-4(1c))．これは，降下床実験[12),13)]において，降下床降下後に降下床周辺の固定床に作用する鉛直土圧が大きくなる現象と類似している．切羽面で解放された応力が周辺地盤に再配分され，天端に応力が集中していると考えられる．EP2・EP3 の土圧はほとんど変動していないことから，応力再配分は切羽の近傍のみで起きていることが分かる．

c)　画像解析

図-6 に，3 回の引抜きに伴う地盤の変位量の画像解析結果を示す． 解析対象はトンネル模型下端よりも上側の領域とした．なお，解析には，引抜き前後に遠心加速度を増加・減少させる過程で約 20G になった時の画像を用いた．これは，引抜き操作の直前直後の 50G 下では，カメラのレンズカバーが閉じてしまい，画像に影が映りこんだためである．本研究の画像解析の結果では変位の有無の差は明瞭であるので，20G から 50G まで遠心加速度が上昇する過程に生じる，地盤の自重によるごくわずかな沈下は無視できるものとした．

図-6 から，切羽前方地盤において切羽方向に変位する領域が確認できる．この領域がトンネル掘削による緩み領域であるといえる．緩み領域とその他の領域の境界に現れるすべり線の形状は，前方への幅が狭いものの，村山らの仮定[12)]と同様に対数らせん形である．緩み領域の幅は天端の高さで最大になり，地表面に近づくにつれて縮小している．このことから，切羽前方上部では村山・松岡[10)]が示したようにアーチ状に応力が伝達され，周囲の地山に再配分されていると考えられる．これは，引抜きに伴って切羽直近の天端に作用する土圧が大きくなったこと(図-4(1c))と整合している．

d)　緩み土圧の理論値

切羽ブロックを引抜いた後，ブロックには緩み土圧が作用すると考えられる．シールドトンネルの切羽安定性の検討に用いられる村山らの式[14)]を用いて切羽に作用する緩み土圧を推定する．今回の研究は山岳工法を対象としているが，支保工が変形しない条件で実験を行っており，シールドトンネルを対象とした本式を適用可能だと考えた．

村山ら[14)]は図-7 のように，天端を通る水平面より上部の地山による土圧を Terzaghi の緩み土圧 q で置き換え，上部より土圧 q が作用している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，掘削時の切羽面に作用する土圧を考察している．すべり線の形状は切羽下端を通り天端の高さで鉛直となる対数らせんを考えている．この対数らせんは，曲線上の任意の点の動径と法線のなす角が内部摩擦角ϕであるような曲線である．すべり線は式(2) で示される． 以下， 図-7 中の文字を用いて記述する．

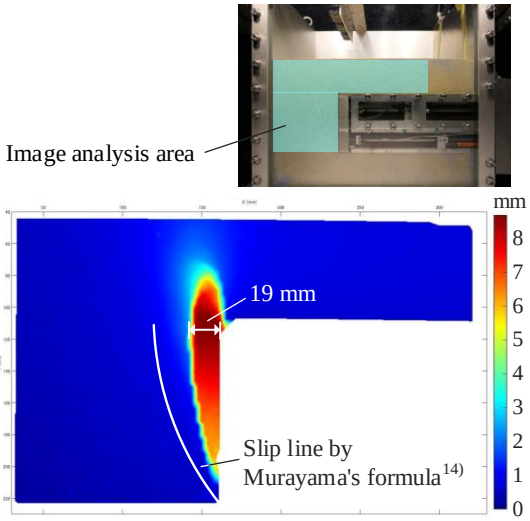

図-6　Case-1 地盤変位量

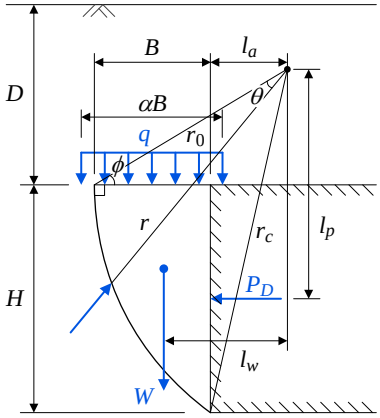

図-7　切羽土圧推定モデル

$$r = r_0\, e^{\theta \tan\phi} \tag{2}$$

ここに，ϕ : 砂の内部摩擦角 .

天端の高さにおける緩み土圧 q は式(3)で表される．

$$q = \frac{\alpha B\,(\gamma - 2c/\alpha B)}{2K\tan\phi}\,[\,1 - \exp\{-2K\,(D/\alpha B)\tan\phi\}\,] \tag{3}$$

ここに，γ : 地盤の単位体積重量

K : 係数で一般的に $K \fallingdotseq 1$

α : 係数で村山らの実験から $\alpha \fallingdotseq 1.8$.

対数らせんの中心Oの周りのモーメントの釣り合いから，切羽に作用する力 P_Dは式(4)で求められる．

$$P_D = \frac{1}{l_P}\left\{ W l_W + qB\,(l_a + B/2) - \frac{c}{2\tan\phi} \times (r_c^2 - r_0^2) \right\} \tag{4}$$

ここに，W : すべり面内の地盤の自重の合力.

式 (4)で B を動かしたときの P_Dの最大値が単位奥行きあたりの切羽面に作用する土圧合力である．奥行方向に

足し合わせてることで全土圧合力が求まり，切羽の面積で除して切羽面に作用する土圧を推定できる．

本ケースで奥行き 10mm ごとに分割して村山らの式を適用し足し合わせると，引抜き後の切羽土圧の全断面平均の理論値は 14.1 kN/m^2 と推定される．前述のように補正した引抜き後の切羽土圧測定値の全断面平均 9.26 kN/m^2 であり，理論値のほうが大きくなった．これは，**図-5** で示したように村山の式により推定される緩み領域の幅が，実験で形成された緩み領域の幅よりも大きいためだと考えられる．そこで，P_D が最大になる緩み領域の幅を探す代わりに，実験の画像解析結果から読み取られる緩み領域の幅 19mm を所与として切羽土圧を計算すると，7.62 kN/m^2 となる．このように推定した土圧の全断面平均の理論値では，切羽土圧は静止土圧 36.5 kN/m^2 から緩み土圧 7.62 kN/m^2 へと，20.9%に減少することになる．先述のように補正した測定値は引抜きに伴って 21.5%に減少しており，実験で観測された緩み領域の幅を用いることで理論値と測定値はよく一致した．

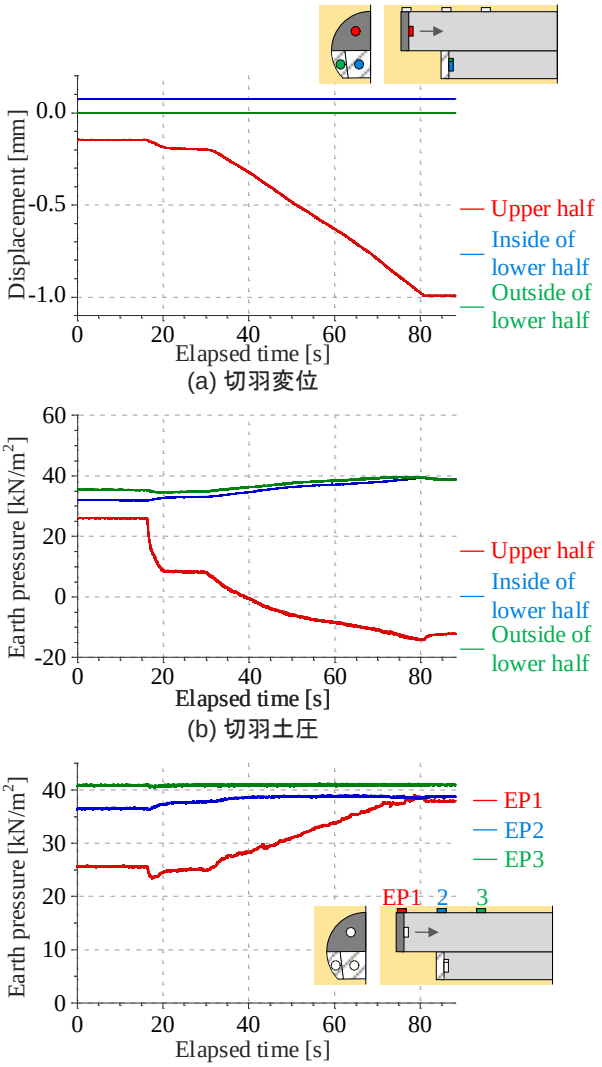

図-8　Case-2 上半引抜き 1 回目 時間変化

(2)　Case-2・3（ベンチカット工法）

a)　上半掘削

図-8 に，ベンチカット工法の掘削過程を模擬した Case-2 の上半引抜き 1 回目の切羽変位・切羽土圧・天端土圧を示す．引抜き開始直後に，上半切羽土圧が急減し，上半切羽直近の天端に作用する土圧に加えて下半の切羽土圧が増加した．このことから，上半掘削時に切羽面で解放された応力は，下半切羽前方を含む周辺地盤に再配分されているといえる．Case-3 でも同様の結果が得られた．

b)　下半斜路掘削

図-9 に Case-2 と Case-3 の下半内側引抜き 1 回目の切羽土圧の時間変化を示す．いずれのケースでも引抜き開始直後に下半内側土圧が急減し，下半外側土圧が増加している．このことから，斜路掘削の切羽面で解放された応力が周辺地盤に再配分され，下半外側に残された地盤にトンネル軸方向の応力が集中すると考えられる．さらに，増加量を引抜き開始後の最大値と引抜き前の値の差をとって比較すると，Case-2 は 16.5 kN/m^2，Case-3 は 4.1 kN/m^2 であり，Case-2 のほうが大きい．したがって，斜路掘削に伴う側方地盤の応力集中は斜路の掘削幅が広いほうが大きく，トンネル安定性を損なう可能性があると考えられる．

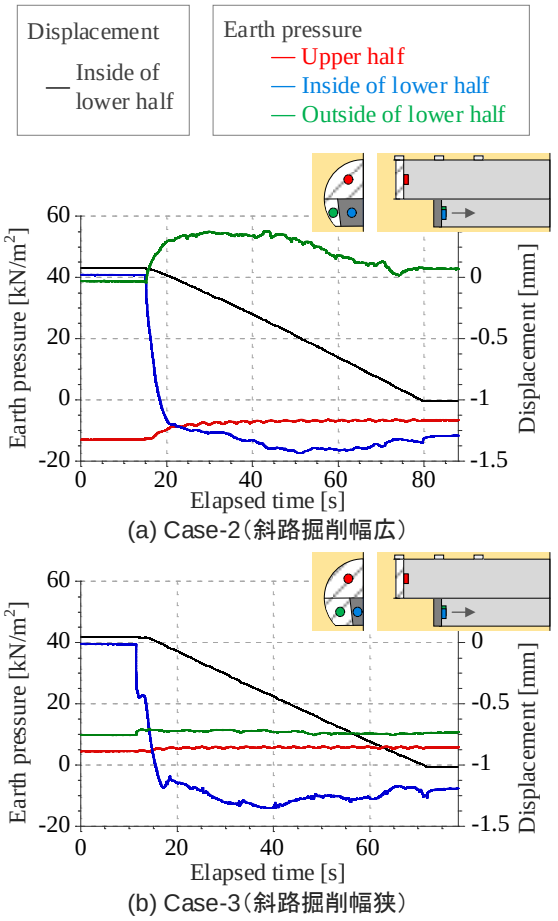

図-9　Case-2・3 下半内側引抜き 1 回目 切羽土圧 時間変化

4. トンネル模型の改良

負の切羽土圧が観測された原因を明らかにするために，砂を入れずに空の状態で全断面引抜きを行うケース（Case-4）を実施した．砂をトンネル模型下端部までしか入れないこと以外は Case-1 と同じ条件である．従来の方法での切羽変位・荷重の測定に加えて，**図-10** に示すように切羽前方にレーザー変位計を設置し，上半ブロックの変位を上下 2 か所で測定した．

図-11 に，遠心力を載荷する過程にレーザー変位計により測定された上半ブロックの変位を示す．遠心加速度が大きくなるにつれて，ブロック上側は前方に，下側は後方に変位した．つまり，引抜き操作をしていない段階で，遠心力によりブロックが前方に傾いていた．**図-12** に本ケースの全断面引抜き 1 回目の切羽圧力の時間変化を示す．切羽前方に砂はないため本来であれば圧力は常にゼロであることが想定されるが，引抜き開始前（約 10 秒後まで）の時点で荷重が観測されている．この原因としてブロックの傾きが考えられる．さらに，引抜き開始に伴い下半の圧力が減少し，3 ブロックとも負の荷重が観測された．この圧力減少の原因として，ブロックとガラス板および外周のカバーとの摩擦力が挙げられ，この力が遠心加速度により想定外に大きくなった可能性がある．

図-13 に，Case-4 の結果を用いて，Case-1 の切羽土圧と Case-4 の切羽圧力の差をとって補正した値を示す．この補正により Case-1 の負値がおおむね解消された．このことから，負の切羽土圧が観測された原因は模型そのものにあると考えられる．また，空のケースの結果を用いた補正により地盤による土圧のみを正確に取り出すことができる可能性がある．さらに，模型の改良によりブロックの傾きや摩擦力を低減することで，切羽土圧測定の正確性向上が可能であると考えられる．

5. まとめ

本研究では，ベンチカット工法の分割された切羽面の応力解放機構を有する装置を製作し，遠心模型実験を行った．以下に得られた知見をまとめる．

(1) 切羽引抜きに伴って，切羽土圧が急激に減少し，その後やや増加して一定の値に収束する傾向を確認した．切羽土圧の測定に課題が残ったものの，全断面掘削およびベンチカット工法における切羽面の応力解放を模擬できたといえる．

(2) 村山らの式[14]を用いて切羽土圧を推定すると，実験で得られた緩み領域の幅を所与として計算した場合に，実験における土圧の残留率と近い結果が得られた．切羽面の応力解放によって切羽前方地盤内に緩み領域が形成され，対数らせん形状のすべり線が発生することを確認した．この緩み領域の前方への幅は天端の高さで最大になり，地表面に近づくにつれて縮小していた．このことから，切羽前方上部ではアーチ形状に応力が伝達され，周囲の地山に再配分

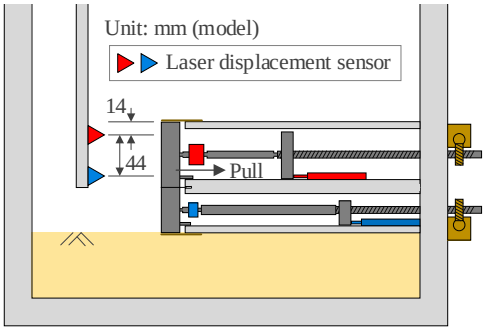

図-10 Case-4 レーザー変位計設置位置

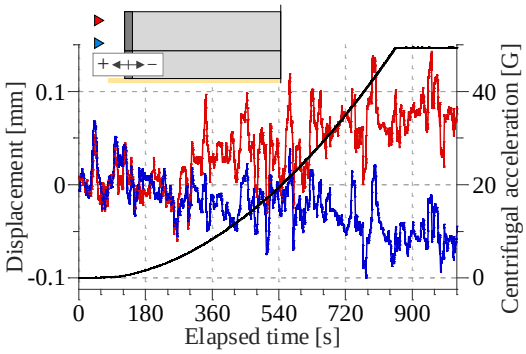

図-11 Case-4 遠心力載荷過程 上半切羽変位時間変化

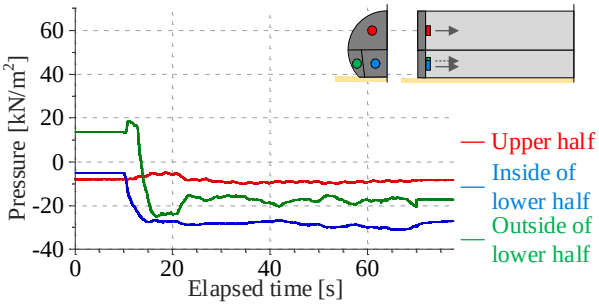

図-12 Case-4 引抜き 1 回目 切羽圧力時間変化

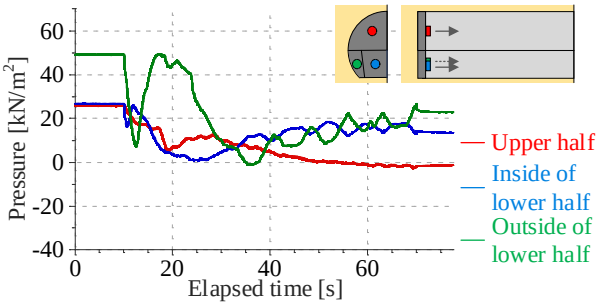

図-13 Case-4 を用いて補正した
Case-1 引抜き 1 回目 切羽圧力時間変化

されていると考えられる．

(3) ベンチカット工法における上半掘削時に切羽面で解放された応力は，下半切羽前方およびトンネル天端を含む周辺地盤に再配分される．

(4) ベンチカット工法における下半斜路掘削時に側方地盤に再配分される応力は，斜路の掘削幅が広いほうが大きく，トンネル安定性を損なう可能性がある．

(5) 本研究で製作した装置の切羽土圧測定上の課題の原因は，遠心力がトンネル模型そのものに与える影響が原因であると考えられ，模型の改良により切羽土圧測定の正確性向上が可能であると考えられる．

今後は，トンネル模型の改良を行うとともに，実験で再現することが難しい条件についても数値解析により検討を広げる所存である．

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) 鉄道・運輸機構：北陸新幹線、柿原トンネル陥没事故について，<https://www.jrtt.go.jp/corporate/public_relations/pdf/pressh290908.pdf> (2021/07/11 閲覧).

8) 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.

9) 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.

10) White, D.J., Take, W., Bolton, M.: Soil deformation measurement using Particle Image Velocimetry (PIV) and photogrammetry, *geotechnique*, Vol.53, No.7, pp.619-631, 2003.

11) Chen, Z., Iskander, M., Li, K., Omidvar, M.: Guidelines for DIC in geotechnical engineering research, *International jornal of Physical Modelling in Geotechnics*, Vol.17 Issue1, 2016.

12) 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.

13) 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.

14) 村山朔郎，遠藤正明，橋場友則：機械化シールドの掘削性能に関する土質力学的考察，第 1 回土質工学会研究発表会講演集，pp.75-79, 1966.

(2021. 8. 6. 受付)

MEASUREMENT AND EVALUATION OF EARTH PRESSURE ON TUNNEL FACE BY CENTRIFUGE MODEL TEST

Soichiro NAKAMURA, Yasuo SAWAMURA,
Atsumi ISOGAI, and Kiyoshi KISHIDA

An experimental device with a mechanism that simulates stress release on each divided face was fabricated to confirm the ground behavior in front of the face and the earth pressure acting on the face during excavation of the lower half of a tunnel in the bench cut method. First, in an experiment simulating full-section excavation, the shape of the loosening area and slip line formed in front of the face was confirmed, and the measured face earth pressure was compared with the theoretical value. Then, in an experiment simulating the bench-cut method, the effect of the excavation width of the slope for construction vehicles in the center of the lower half of the tunnel on tunnel stability was investigated. In addition, the causes of problems in measuring the face earth pressure were investigated, and prospects for improving the device were presented.