

上部に粘性土層を有する切羽の安定について

TUNNEL FACE STABILITY OF SANDY GROUND WITH A CLAY LAYER ON THE CROWN

小西真治¹⁾・田村武²⁾・西山達也³⁾

Shinji KONISHI, Takeshi TAMURA and Tatsuya NISHIYAMA

This paper describes influence of a clay layer placed at crown on face stability. To investigate the effect, Model experiments of tunnel collapse with a sand, a clay layer and simulation analyses with two-dimensional rigid plastic finite element method (2D-RPFEM) and 3D-RPFEM. As results, the followings were made clear: 1. Face stability is strongly affected by ground conditions between the crown and a half-diameter over tunnel. 2. A clay layer on the crown transmits loosening in a lower sandy layer to an upper sandy layer widely and weakly. 3. The three-dimensional stress distribution in the ground in front of the face can be made clear by 3D-RPFEM analyses.

Key Words : tunnel face, stability, a clay layer, model experiment, rigid plastic finite element method

1. はじめに

切羽崩壊実験は砂地盤を対象としたものが古くから様々な形で行われているが、互層を取扱った例は少ない。このため著者らは、粘性土層が介在した砂地盤の切羽安定に関する実験、解析を行ってきた。そして、トンネル上部の状態によって切羽の安定が大きく影響を受けることがわかった。この論文では、トンネルの上部に粘性土層を有する切羽の安定について、模型実験結果および二次元・三次元剛塑性有限要素法によるシミュレーション解析結果から述べる。なお、湧水の問題も切羽安定に大きな影響を与える要因の一つであるが、問題が複雑になるため本研究では考慮していない。

2. 模型実験による検討^{1) 2)}

2. 1 実験方法

写真1, 2に模型装置を示す。実験は直径200mmの半円筒形のトンネル模型を用いた。まず切羽面板をトンネル端に固定し豊浦砂(乾燥砂)を実験装置上部85cm高から自由落下させて実験用地盤を作成した(単位体積重量 14.91kN/m^3 , 相対密度約60%, 内部摩擦角 41°)。また、トンネル上部に5cmの軟弱な粘性土層(単位体積重量 13.53kN/m^3)を介在させた。ベントナイト、吸水性ポリマー、水により作成した軟弱粘性土の粘着力は、ミニバーンせん断試験結果より約 0.4kPa であった。地盤完成後、面板を引いて切羽崩壊を模擬した。土破りは $1D(D$:トンネル径)とした。

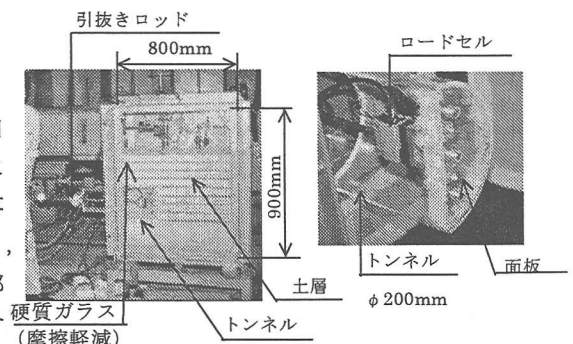


写真1 実験装置 写真2 トンネル模型

1) 正会員 工学博士 財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

2) フェロー 工学博士 京都大学 大学院工学研究科土木工学専攻

3) 正会員 工学修士 財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部

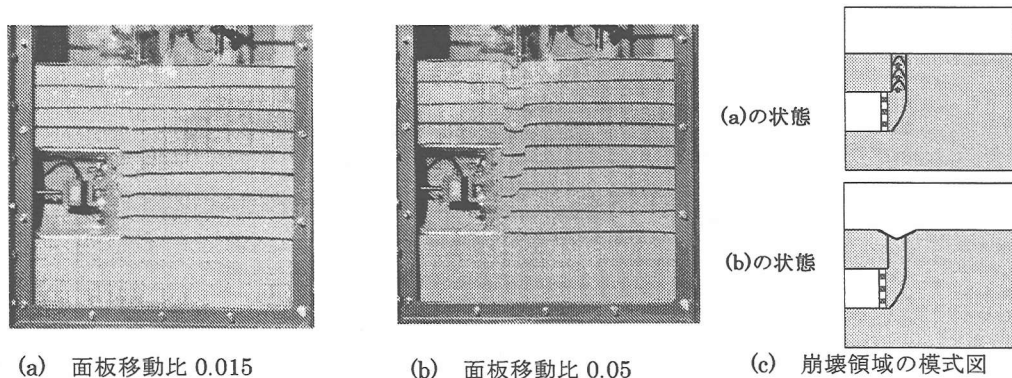


写真3 砂のみ地盤の実験結果

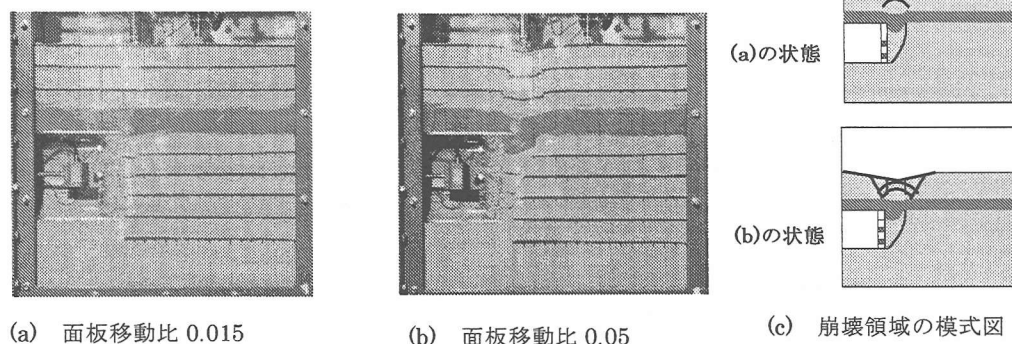


写真4 上部に粘性土層が介在した場合の実験結果

2. 2 実験結果³⁾

砂のみ地盤での実験結果を写真3に示す。実験では、面板移動に伴い、トンネル下端から天端まで緩やかなカーブを描いたすべり線が発達し、トンネル天端からこのすべり線までキャップ状でつながった沈下領域が発生した。その後、ほぼ鉛直方向へ延びるすべり線とトンネル天端からほぼ直上に延びるすべり線が発達し、この2本のすべり線で囲まれた沈下領域はその後直上に進展した。そして、沈下領域が地表面に達した後、すり鉢状の沈下が発生した。これ以降は、面板移動を続けても地表面のすり鉢状の沈下領域が拡大するのみ（地表面での平面的拡がり）であり、地中部分は煙突状の崩壊形状のままであった。

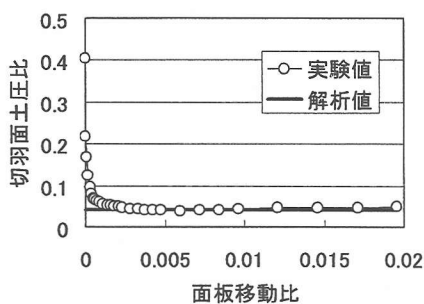
トンネル上部に粘性土層が介在する場合の実験結果を写真4に示す。最初に粘性土層の下面が沈下し始め、粘性土層上面がわずかに沈下した後、粘性土層より上部で沈下領域が拡大した。砂のみ地盤と比べると、地表面で広範囲に渡って沈下が起こることがわかる。

面板移動に伴う切羽面土圧比（切羽面土圧／トンネル中心での初期鉛直土圧）の変化を図1に示す。砂のみ地盤、粘性土の介在した地盤どちらのケースも、切羽面土圧は移動比 0.005 までで急激に減少し、その後安定する。その度合いは粘性土層が介在した場合のほうが若干緩やかであるが、大きな差はない。トンネル断面内に粘性土層が介在する場合はゆっくりとした減少となる結果が報告されている^{1) 2)}が、切羽全面が砂で覆われている今回の場合は、面板移動の影響が時間的に敏感に反応すると考えられる。

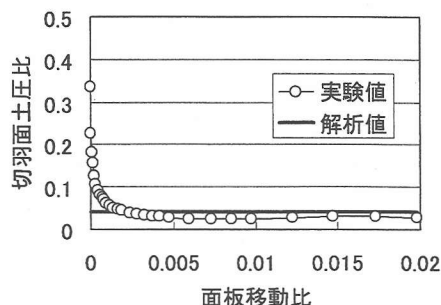
3. 解析による検討

3. 1 剛塑性有限要素法について^{3) 4) 5) 6)}

剛塑性有限要素法（RPFEM）は塑性状態にのみ着目したもので、上界定理を用いている。この手法は極

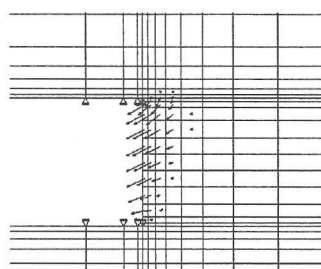


(a) 砂のみ地盤の場合

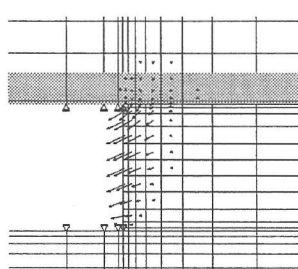


(b) 粘性土層が介在した場合

図1 切羽面土圧比と面板移動比の関係



(a) 砂のみ地盤の場合



(b) 粘性土層が介在した場合

図2 実験のシミュレーション結果（切羽崩壊時の変位速度分布）

限解析を有限要素法（FEM）で定式化したもので、切羽面に任意の変位速度を与え、崩壊時の相対的な速度場を求めたものであり、金属の塑性加工の分野で発達したものである。地盤工学では、斜面の安定、切羽の安定や支持力を評価するのに使うことができ、① 弾性係数が不要、② 塑性流動の表現が可能、③ 初期応力が不要、といった特徴がある。本解析では、Drucker-Prager の降伏基準および関連流れ則を用いて定式化している。なお、解析の定式化については、参考資料 2) , 3) , 4) , 5) を参照のこと。

3. 2 二次元剛塑性有限要素法による検討^{1) 2)}

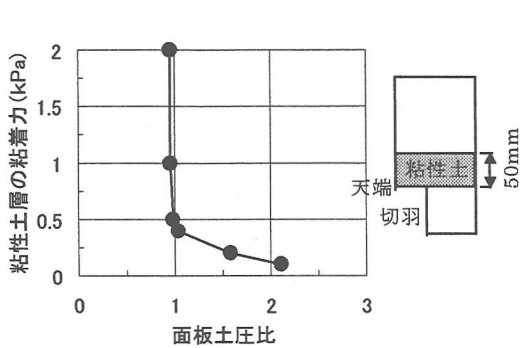
3.2.1 二次元解析による実験のシミュレーション

シミュレーション解析結果を図2に示す。図中の矢印は、塑性ひずみが急激に増大する瞬間の変位速度ベクトルであり、まさに切羽崩壊が始まろうとしている瞬間を示すものである。砂のみ地盤で、キャップのような凸のラインが真上に向かって上がっていきこうとする状態や、粘性土層が介在する場合で、すべり領域が粘性土層で極端に広がり、上の地表面に向かって広がろうとしている様子がわかる。

実験値と解析値の比較結果を図1に示す。砂のみ地盤では、ほぼ実験値に近い値となっている。粘性土層が介在する場合は、解析値が若干大きめの値となっているが、どの時点を崩壊の瞬間ととらえるかといった問題や、粘性土層の粘着力測定値がさほど高い精度を持っていると考えられないことから、オーダー的には満足できる値が得られていると考えられる。

3.2.2 パラメータスタディ

トンネル上部に介在する粘性土層の粘着力、位置、厚みといった特性が切羽安定に与える影響を、解析により検討した。図3は、実験と同じ条件で粘性土層の粘着力を変化させた場合の面板土圧比（粘性土層が介在し



面版土圧比：切羽面土圧を砂のみ地盤の切羽面土圧で正規化

図3 粘性土層の粘着力の影響

た場合の切羽面土圧／砂のみ地盤の切羽面土圧) の変化を示している。0.5kPa 以上になると切羽面土圧はほぼ一定の値となり、粘性土層が支持盤となり上部の荷重を支えてしまうことがわかる。図4は、厚み25mm、粘着力0.4kPaあるいは0.1kPaの粘性土層をトンネル上部の様々な位置に設置した場合の、距離比（粘性土層中心・トンネル天端間距離／トンネル径）と面版土圧比の関係を示す。天端とその上部0.5Dまでの地盤条件が切羽安定に影響を与えることがわかる。もし粘性土層が軟らかければ、崩壊の可能性が高くなり、粘性土が少し硬くなれば、崩壊の可能性は非常に小さくなることをわかる。この

結果から、天端近傍の地盤を、注入や水平パイルのようなもので補強することで、切羽の安定性向上を図ることができるといえる。図5は、トンネル天端の粘性土層の厚みが増加したときの面版土圧比の変化を示している。粘性土層がトンネル径の1/2になるまで、切羽面土圧は増加し、その後、土圧は一定となる。これらのことから、切羽安定はトンネル天端とその上部0.5Dまでの間の地盤の条件に強く影響を受けると考えられる。

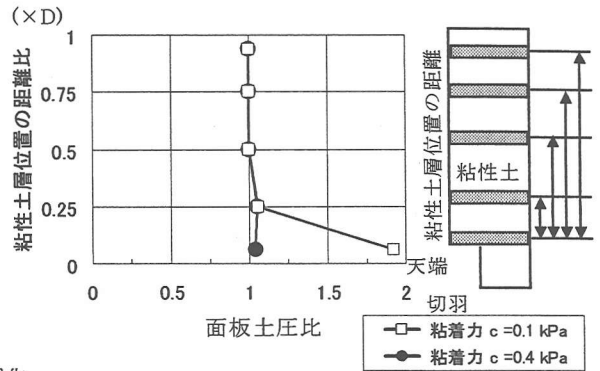


図4 粘性土層の位置の影響

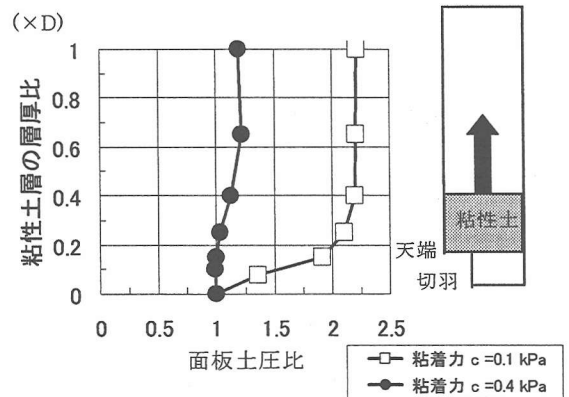


図5 粘性土層の厚みの影響

3. 3 三次元剛塑性有限要素法による検討

3.3.1 三次元解析による実験のシミュレーション

トンネルの切羽安定は、二次元横断面内での覆工や支保工による安定効果と軸方向では切羽前方地山と覆工や支保工による安定効果が組合わさった現象であり、本来三次元的な安定効果を検討するべきものである。しかし、解析においては、その計算量が膨大となり、また結果の整理も煩雑となるため、二次元解析で検討されることが多かった。本研究では、三次元剛塑性有限要素法を用いて実験をシミュレーションし、トンネル上部の粘性土層が切羽安定に与える影響を調べた。図6に3次元解析の地盤モデルを示す（1897 節点、1420 要素）。膨大な計算が必要な三次元剛塑性有限要素法を、この問題の検討に本格的に用いたのはこの研究が初めてである。

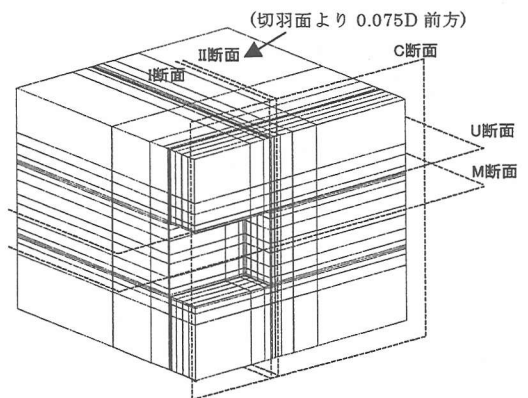


図6 三次元モデルと結果整理断面

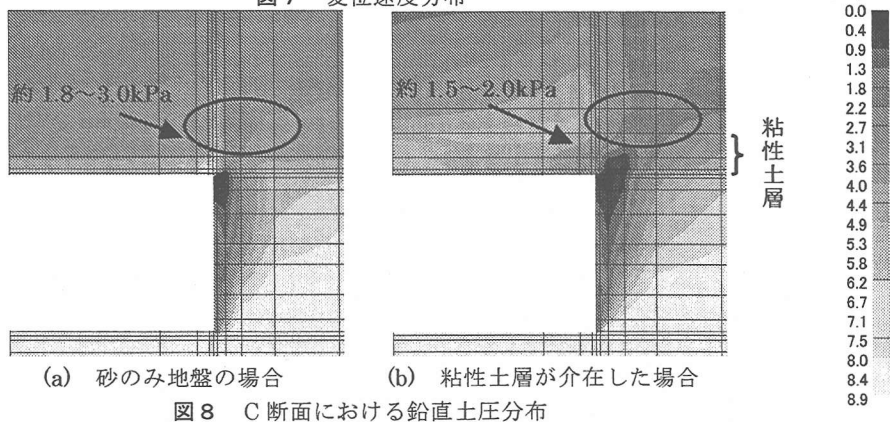
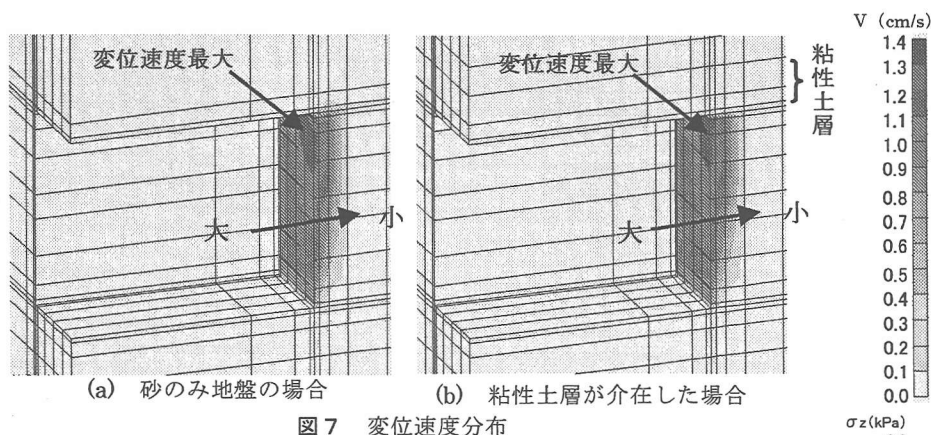
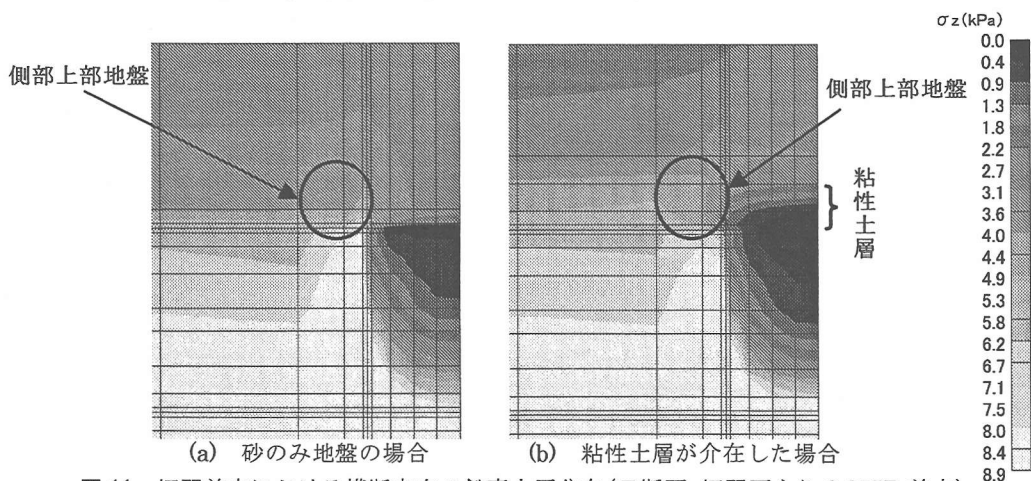
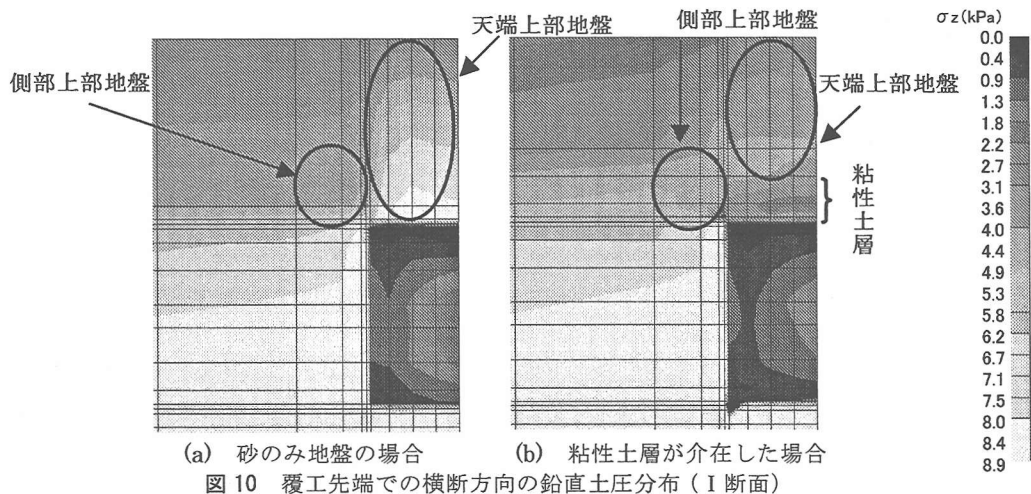
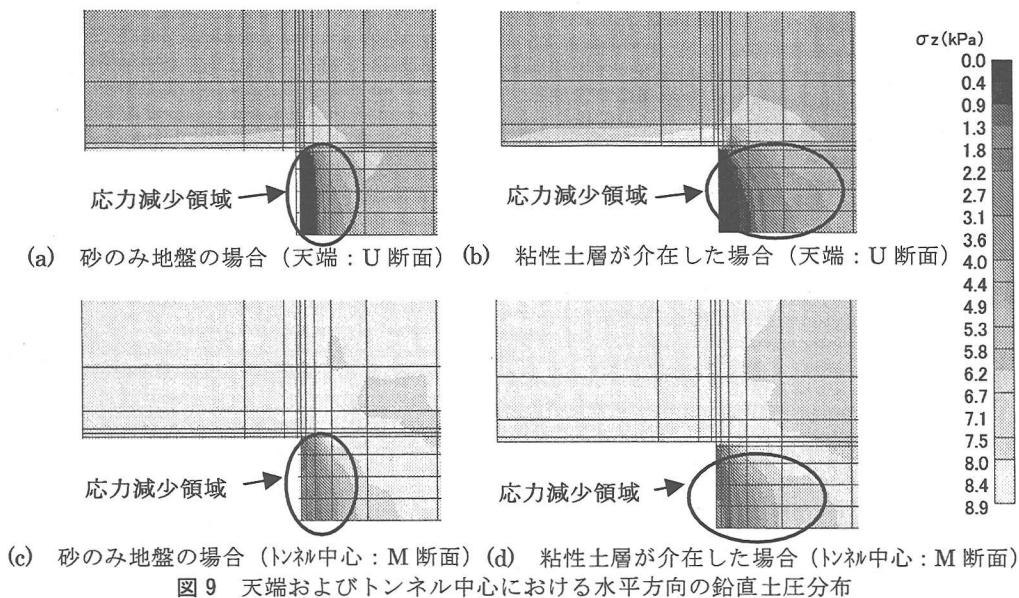


図7は変位速度分布を示している。砂のみ地盤と粘性土層が介在した場合で大きな違いはない。切羽の中心より少し上の部分の速度が最も大きく、横断面で切羽の周辺に近づくほど、そして縦断方向ですべり線に近づくほど速度は小さくなっており、切羽断面の中心より少し上の部分から崩壊してくると考えられる。

図8～図11は、切羽崩壊時の鉛直土圧の分布を示している。図8はC断面における地盤の鉛直土圧分布である。トンネル切羽前面では、両者にさほど違いはないが、トンネル上部では粘性土層がそれより上の砂地盤への鉛直土圧の変化を抑えているのがわかる。

図9はU、M断面での地盤の鉛直土圧分布である。(a)(c)の砂のみ地盤では、図7に示される切羽面前方のすべり領域(沈下領域)の鉛直土圧は減少し、これを囲むようにその周りの地盤の鉛直土圧が増加している。この現象は応力の再配分で起こると考えられ、落し戸実験と似ている。粘性土層を介在する場合は、砂のみ地盤の場合よりすべり領域前方の鉛直土圧の減少範囲が大きく、粘性土層の存在によって応力再配分が緩和されているといえる。この粘性土層は、下位の砂地盤の応力変化を上位の砂地盤に減衰して、広範囲に伝えていると考えられる。

図10はI断面(トンネル切羽先端位置)における地盤の鉛直土圧分布である。両地盤ともに、トンネル側部の上部や天端部の地盤の鉛直応力が応力再配分を受けて増加している。図11に示すII断面(切羽面より0.075D前方)における地盤の鉛直応力分布でも、トンネル側部の上部にあたる位置の地盤の鉛直応力が増加しており、切羽安定のためにはこの位置の土が増加応力に耐えることが出来る必要があることを示している。もし掘削前に地盤を補強するならばすべり領域だけでなく、この位置も補強する必要があることがわかる。なお、粘性土層が介在する場合のほうが、砂のみ地盤の場合と比べ、これらの位置の鉛直応力増加はあまり大きくない。これは、粘性土層が支持盤となっていることを示しており、切羽の安定は粘性土層のみの強度に依存し、アーチ効果は期待できないと考えられる。



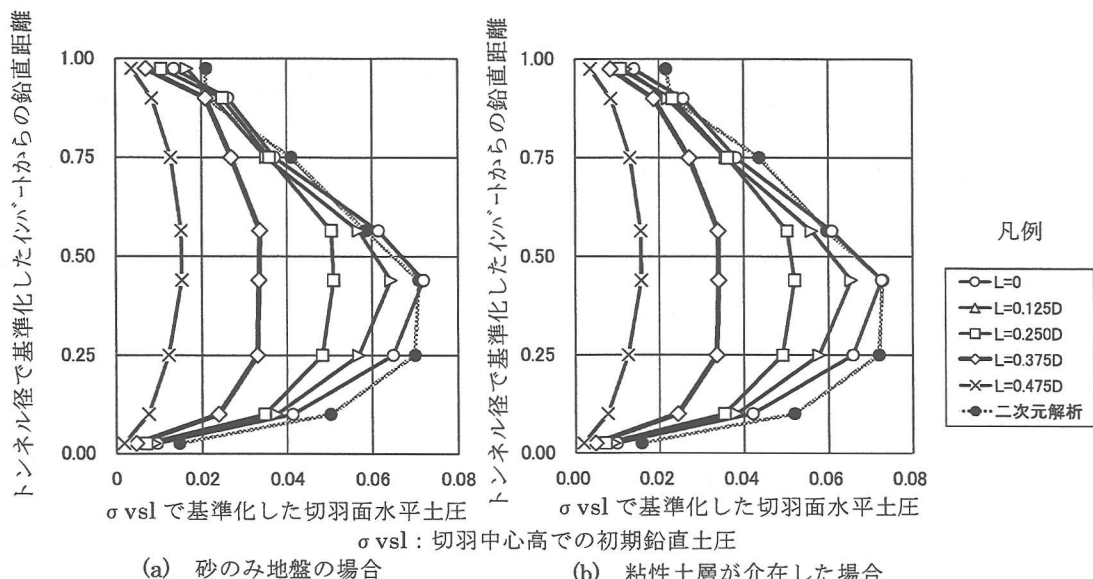
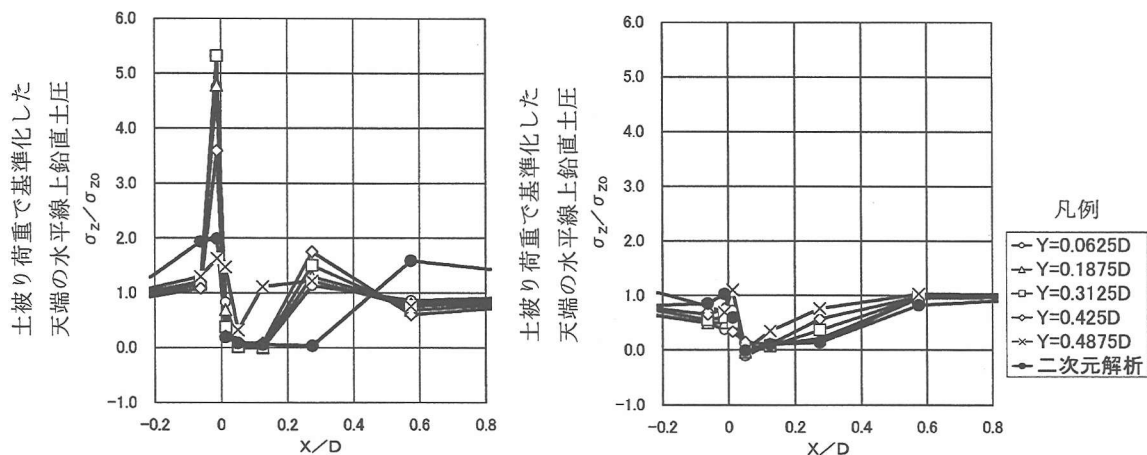


図 12 切羽面水平土圧分布



σ_z : 天端天端の水平線上の鉛直土圧, σ_z0 : 土被り荷重, x : トンネル延長方向距離, D : トンネル幅

(a) 砂のみ地盤の場合 (b) 粘性土層が介在した場合
図 13 トンネル天端高さの水平線上の鉛直土圧分布 (縦断方向)

3.3.2 計算結果についての考察

図 12 に切羽面の水平土圧分布 (鉛直面内) を示す。L はトンネルセンターからの離れで L=0.475D が側壁に最も近い所である。水平土圧分布形状については、砂のみ地盤と粘性土層を介在した場合でそれほど差はなく、トンネルセンター位置の解析結果は、三次元および二次元解析で形状、値ともにほぼ一致した。水平土圧の分布形状は、トンネル中心高さより少し下の位置で最大となり、側壁に近づくに従って値が小さく、滑らかになっている。水平土圧の分布から判断すると、トンネルセンター位置でトンネル中心高さより少し下の位置で最も水平に押出され易いことになる。

図 13 にトンネル天端高さの水平線上の鉛直土圧分布 (縦断方向) を示す。Y はトンネルセンターからの離れである。砂のみ地盤では、黒丸で示される二次元解析結果と比較して三次元解析結果では鉛直土圧が減少する範囲が少なくなっている。しかし、対象とする縦断面がトンネルセンターから離れても、この減少する範囲はあまり変化が

無く、トンネル側壁付近になって急激に減少範囲が少なくなっている。これは解析でトンネルのモデル化が矩形であり、側壁近傍までは鉛直土圧減少範囲がほぼ一様となるためと考えられる。鉛直土圧の増加について、縦断面内で $X/D=0$ のトンネル端部位置では、トンネルセンターで大きな増加値を示すのに対して、切羽前方の増加部分ではトンネル側壁側で大きな増加値を示す。これより、切羽崩壊時にこれらの位置に大きな鉛直土圧が加わると考えることができ、トンネルの構造と切羽前方地盤の補強を検討する際に留意する必要がある。鉛直土圧増加部分の値は、切羽前方地盤では二次元、三次元解析で同じような値となったが、トンネル端部では二次元解析が三次元解析よりかなり小さな値になった。減少領域の差も含めて、このような違いは、トンネル上部地盤での体積膨張による拘束圧の増加が、二次元解析よりも三次元解析の方がより明確に現れるためと考えられる（ダイレイタンスによるアーチ効果）。

粘性土層が介在する場合は、砂のみ地盤の場合と比較して、 $X/D=0$ のトンネル覆工端部位置では、鉛直応力はほとんど増加していない。これは、粘性土層が支持盤のようになっていることを示しており、切羽の安定は粘性土層のみの強度に依存し、アーチ効果は期待できないと考えられる。

4. まとめ

- 1) トンネル上部の軟らかい粘性土層は、その下位の砂地盤の応力変化を上位の砂地盤に減衰して伝える。しかしその伝達範囲は広がり、沈下領域は拡大する。
- 2) トンネル上部 0.5D までの地盤特性が切羽安定に大きな影響を与える。
- 3) 砂のみ地盤では切羽が不安定になった時、切羽前方に円弧状の鉛直応力の減少部分が発生し（すべり領域）、それを囲む外側に鉛直応力の増加部分が発生する。これは、応力再配分が起こっているためと考えられる。特にトンネル側部に近い方がこの傾向が強く、切羽安定を図るには、すべり領域だけでなくこの部分も補強すると効果があると考えられる。
- 4) 粘性土層がトンネル上部に介在する場合は、3) の現象は弱くなる。トンネル上部の地盤のダイレイタンスによるアーチ効果期待できない。
- 5) 三次元剛塑性有限要素法を用いて切羽崩壊時の三次元的な応力分布を把握した。

5. おわりに

本研究では、乾燥状態におけるトンネル矩形断面でのトンネル上部の粘性土層が切羽安定に与える影響について研究した。しかし、トンネル形状は円形、馬蹄形等があり、また現実の切羽安定問題では湧水や地下水の問題は不可欠である。今後、トンネル形状や水が切羽安定に与える影響について検討する予定である。

参考資料

- 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) 小西真治: 砂と粘性土の互層切羽安定評価法の研究, 鉄道総研報告, 特別40号, 2001.
- 3) 小西真治, 新井泰: トンネル上部に粘性土層が介在する砂地盤の切羽崩壊実験について, 第34回地盤工学研究発表会講演集, pp.1733-1734, 1999.
- 4) 田村武, 足立紀尚, 小西真治, 辻鉄也: 剛塑性有限要素法によるトンネル切羽の安定性評価について, 土木学会論文集, No.638/Ⅲ-49, pp.301-310, 1999.
- 5) 田村武: 剛塑性有限要素法の基礎と適用, 昭和61年度土質工学会関西支部講習会テキスト, 地盤力学数値解析, pp.50-77, 1986.
- 6) 小西真治, 辻鉄也, 田村武: 剛塑性有限要素法の切羽安定問題への適用, トンネルと地下, 研究, Vol.31, No.8, 45-52頁, 2000.
- 7) S.KONISHI, T.TAMURA: Analysis of Three-dimensional Effect of Tunnel Face Stability on Sandy Ground with a Clay Layer by the Three-dimensional Rigid Plastic Finite Element Method, Proceedings of the International Symposium of Modern Tunneling Science and Technology (IS-Kyoto), Vol.1, pp121-126, 2001.10.