

[討議・回答]

山崎 剛
大塚正博 共著
日下部治

「軟弱粘性土中シールド建設時における 地盤変形現場計測データの再評価」への討議・回答

(土木学会論文集, No. 680/III-55, 2001年6月掲載)

▶ 討議者 (Discussion)

中廣俊幸 (中央復建コンサルタンツ)

Toshiyuki NAKAHIRO

軟弱粘性土を対象とした数種類のシールド工事における現場計測と模型実験の結果から、掘削時の地盤変形形状を一般化しようとする取り組みは理解できる。ただ、同様の問題に頭を痛めるひとりとして幾つかの疑問と提案を行いたい。まず一つ目の疑問であるが、土層内の鉛直ひずみを層別沈下計の測点間変位差から求めているが、シールド側部の沈下計は側方への移動が生じるため、この方法で求めた鉛直ひずみは誤差が大きいように思われる。傾斜計により地盤の水平移動量を測定し、補正を行うべきではないか。二つ目の疑問は、実測値の多面的な検証結果から変形状は施工条件や地盤条件に支配されないとしている。しかし、対象としている5現場の発生ひずみの量には1オーダー以上の差異が見られ、非常に微小なひずみレベルに対して大胆な割り切りがあるように思われる。もう少し実測例の蓄積が必要ではないか。また、軟弱粘性土の定義が不明確であり、一般化する限りにおいては適用できる強度範囲を設定すべきではないか。

次に提案であるが、シールド掘進過程における地盤変形の発生機構については、既に多くの実測、研究がなされており、それらの中で砂質土、粘性土を問わず、テールボイド解放による沈下、すべり面の形成、引っ張りひずみの発生、テール通過後のせん断変形の発生について、一般論として取り扱われているように思われる。当該研究ではその機構を軟弱粘性土について検証したという点は評価できるが、問題はそれをどう活用するかにあるのではないか。

軟弱な粘土やピート層を対象としたシールド工事では地盤変形をいかに予測し、抑制するかが大きな課題である。当該研究でも示されているように、テールボイド以降の地盤変形を大別すると、(a) 応力解放による変形 (落とし戸的な沈下、せん断変形)、(b) 圧密現象を含む後続沈下、の2種類である。これらの内、特に(b)が問題となるのは粘性土地盤を対象とした場合である。既往の各種研究では、(a)については発生ひずみが弾性領域である場合、掘削に伴う地山応

力の変化割合に着目したパラメータ (応力解放率と称している) を用いる方法が提案されている。一方、(b)については森らが掘削に伴い周辺地盤に発生するせん断ひずみから圧密沈下量を求める方法を提案している。しかし、シールド掘削に伴う圧密現象を解明し、それを定量的に評価することは簡単ではない。その理由は、圧密を生じさせる要因が複数あると考えるからである。一つは当該研究でも指摘されている圧縮ひずみに伴う過剰間隙水圧の発生・消散、二つ目は森らが指摘しているせん断ひずみ (強度低下) による圧密である。前者については我々がやっている研究でも同様の結果が得られている。我々の研究ではピート層と沖積粘性土層を対象とし、テールボイド部における変形が後続沈下にどのような影響を及ぼすかを検証している。結果としてシールド天端から両側45度付近より側壁部にかけて残留する圧縮ひずみに伴う過剰間隙水圧と、すべり面近傍のせん断ひずみにより圧密が生じるものと判断された。ただし、我々の成果ではシールド天端部 (天端部の定義は一義的ではないが、概ね、シールド断面の中心縦軸から左右に45-φ/2の範囲と、Terzaghiのゆるみ高さを重ねた範囲が相当する) の残留ひずみはほとんどなく、過剰間隙水圧も生じていない。この理由はボイド部の応力解放により沈下を生じ、引っ張りひずみが発生するが、その後すべり面に沿った土塊の沈下が加わり、結果として上記ひずみがキャンセルされるものと考えられる。これらの結果から、粘性土を対象としたシールド工事における地盤変形量は次式により表されるものと考える。

$$\delta = \delta_e + \delta_s + \delta_c \quad (1)$$

δ : 全変形量 δ_e : 応力解放による変形量

δ_s : せん断ひずみに関係する圧密沈下量

(例えば、森らの方法に基づく)

δ_c : 残留した圧縮ひずみ (過剰間隙水圧) に関係する圧密沈下量

式(1)の各変形量を当該研究の表-1と比較してみると、 δ_e はフェーズ1と2に、 δ_s はフェーズ2に、

δ_c はフェーズ 3 に、それぞれ相当すると考えられる。

最後に、前段でも述べたが当該研究の成果はどのように活用されるのか、今後の展開も含めて再度お教え頂きたい。地盤変形の問題にする場合、覆工の設計荷重を議論する場合等、取り扱う問題によっては、ここで支配的ではないとしている施工条件や地盤条件毎の議論が必要になるのではないのか。

参考文献

1) 橋本 正他：粘性土地盤における実測値に基づくシールド

掘削時の応力解放率について、第 31 回地盤工学研究発表会、pp. 2191-2192, 1996.

2) 森崎, 赤木寛一：シールド工事に伴う軟弱粘性土の乱れに基づく圧密沈下, トンネルと地下, 第 11 巻, 8 号, pp. 15-19, 1980.

3) Nakahiro, T., Nakano, T., Natukawa, K. and Tateyama, K.: Investigation on the deformation of ground due to shield tunneling in sensitive soft clay, 3rd ICSSE (Hong Kong), pp. 355-360, 2001.

(2001.12.27 受付)

▶回答者 (Closure)———山崎 剛 (東京電力)・大塚 正博 (東京電力)・日下部 治 (東京工業大学)
Takeshi YAMAZAKI, Masahiro OHTSUKA and Osamu KUSAKABE

1. はじめに

最初に、著者らの研究に関して貴重なご指摘をいただいたことに対し、討議者ならびに論文集編集委員会に厚く感謝の意を表する。

今回討議の対象となっている論文¹⁾は、軟弱地盤中をシールド工法で施工する際に発生する地盤変形メカニズムの解明について、一連の研究による成果^{2),3),4)}をもって、過去の現場計測の再評価を行い、提案した地盤変形メカニズムの妥当性を必要条件として検証した補足ノートである。したがって、討議者は一連の研究を読まれた上での討議と理解させていただき下記に討議者の質問に回答させていただく。

まず、本研究の最終目的は、軟弱粘性土地盤中にシールドトンネルを建設する際に発生する地盤変形予測にある。結果として覆工と地盤の境界の現象までを的確に表現できれば覆工土圧にも適用できる可能性はあるものと考えている。

そのためには、まず地盤がどのようなメカニズム(定性的挙動)で挙動するかを究明しなければ、最終的に数値解析を行う際の解析手法、支配方程式、土の構成式および境界条件などを適切に選定できないと考えている。

著者らがまとめた既往の解析手法に関する整理⁵⁾からも、各々の現場での計測結果を分析し、それらに適した解析手法の研究がなされているが、残念ながらすべてを網羅する、統一的な見解は見出せなかった。

そこで著者らは、まず地盤変形を現場計測により裏込め注入を実施しない場合と、実施した場合について分析・評価した^{2),3)}。次に現場計測での限界を補完し、メカニズムの理解を的確なものにするために遠心模型

実験を援用して、メカニズムを提案⁴⁾するに至っている。

以上の背景を持って、個別の討議内容に回答させていただく。

2. 討議者の疑問点に対する回答

先ず一つ目の疑問である。定量的にひずみ量を議論する必要がある場合は、ご意見のとおり補正が必要になってくると考える。著者らの研究³⁾でも、水平変位について分析も行った結果、研究目的である地盤変形メカニズム(定性的な地盤挙動)の必要条件を実証するための方法としては、鉛直ひずみで十分であると判断している。

さらに著者らは水平変位の分析結果から、傾斜角を積分して累積させながら求める現行の水平変位予測手法は、傾斜計間にすべり面が発生した場合の解釈など、精度を含めてまだまだ課題は残っていると考えている。この点については、今回実施した遠心模型実験から目に見える形で、変形、すべり面および土の標点で囲まれた要素の傾斜角などの関係を把握していることから、傾斜計設置位置と水平変位の関係について発展的に研究していこうと考えている。

次に二つ目の疑問である。現場計測結果の鉛直ひずみに対するオーダの差異の点である。これについても著者らは、あくまでメカニズムの解明(定性的挙動の解明)を主眼にしていることから、具体的には圧縮ひずみ、引張ひずみの発生位置の類似性に注目している。なお、量の議論をする場合はご指摘のように地盤の力学特性、シールドの施工方法などが影響してくるもの

と考えている。

著者らは、先ずメカニズム(定性的挙動)を理解し、その後、適切な数値解析モデルや入力物性値などの同定により定量化を行う、これらステップを着実に踏まなければならないと考えており、今回の研究は前者のメカニズムが見えてきた段階にある。

今回の研究で対象としている軟弱地盤は、首都圏で良く見られる、沖積粘土層に当る、有楽町下部粘性土層($N=0\sim 1$)である。ただし、現場によっては有楽町下部粘性土層の下位にある七号層($N=2\sim 3$)も現場計測データとして入っている。これも、変形量のオーダーの違いは、メカニズムさえきちんと理解できれば、変形係数など力学特性で説明ができると考えている。したがって一般化する際にはご指摘のとおり、土の構成則の中に強度、変形特性は織り込まなければならない。

3. 討議者の提案に対する意見

先ず、討議者は発生機構に関しては、既往の多くの研究から既に一般論として取り扱われている認識でおられるようであるが、著者らは、客観的に既往の発生機構を現場計測、模型実験それらに基づく数値解析と体系的に取りまとめられたものは、小林の論文⁹⁾など少ないと理解している。その他に、現場計測から取りまとめて発生機構を推論したもの、模型実験から発生機構を推論したもの、それらに数値解析を加えて発生機構を補完したものがあがるが、見方によっては、それら断片的な情報を既往の知見として観念的に統合し、一般論的な取り扱いが行われているものと考えている。したがって、著者らは、それらを用いて統一的な解釈を行うには客観的に見ても慎重にならざるを得ないと考えている。現に一般論として定着化されているのであれば、著者らがまとめた既往の解析手法に関する整理⁵⁾からは、もう少し共通性が見出せるはずである。

次に、森らが提案しているせん断ひずみから、圧密沈下量を算出する方法(討議者の参考文献2)であるが、著者らも、せん断履歴を考慮した非排水せん断試験後の排水による体積変形量を求める試験を行い、圧密収縮率 α を求め、沈下量を予測する方法の適合性について研究してきている⁷⁾。この中で悩んでいる点を2点挙げる。

一点目は、圧密を発生させる起因となるせん断応力が、テールボイドを埋めるまでの応力解放によって発生するせん断応力によるものと仮定されていることで

ある。

討議者が参考としている文献2によれば、テールボイドを埋めるまでの掘削解放力を掘削面に作用させ、その時に発生するせん断ひずみが圧密に影響すると評価している。この状態でせん断力が発生する段階は著者らのフェイズ1に相当することになる。

しかしながら、著者らが実施した現場計測(裏込め注入無し)、模型実験からは、掘削に伴う応力解放により発生するせん断ひずみによる間隙水圧の上昇は見られず、低下を示す結果となる。このように、現実的には、「応力解放→非排水状態でのせん断ひずみの増加→間隙水圧上昇(全応力一定)→有効応力の減少→乱れの影響が無くなる→間隙水圧低下(復元)→有効応力増加(復元)→初期と同じ有効応力状態でも土粒子骨格の乱れによる圧密沈下の進展」が上手く観察できない悩みがある。

二点目は、現場計測において、(a) 応力解放による変形(討議者が提案している δ_e)と、(b) せん断ひずみに関係する圧密沈下量(討議者が提案している δ_s)について、地中内沈下量と時間の関係上で区分できない悩みである。したがって、討議者が概念的に式(1)を提案されているが、恐らく容易には式中の各沈下区分の分離ができないと察する。このことは、例えば討議者が引用されている文献3で実績から採用している応力解放率20%の信頼性も、 δ_e と δ_s の区分箇所如何んによっては、左右されることになる。

著者らはこの境界を定める方法としてメカニズムを理解しつつ一連の研究の中で提案³⁾している。

また、討議者が記述している残留ひずみの定義が良く理解できないが、著者らが提案するフェイズ2の終了段階におけるひずみと仮定すれば、研究成果からは、天端に発生する残留ひずみおよび間隙水圧は、側壁部に発生するせん断変形および圧密変形の量(応力、地盤性状、時間が要因)によって左右されることが推察される。

さらに天端部分の圧縮ひずみ(=残留ひずみ?)は、著者らが実施した現場計測結果³⁾および大阪市交通局が実施した現場計測結果⁸⁾、共にセグメントの極く近傍で生じており、討議者が残留ひずみ、間隙水圧を測定するために設置した位置如何で評価が異なると考察する。また討議の参考文献3)の計測断面によれば、トンネル側方部において直径の2/3 亘る範囲に砂が堆積しており、側方部分に発生するせん断変形および圧密変形が、継続しなかったことが考えられる。したがって側壁部の長期的沈下があまり大きくなり、結果して天端に発生する圧縮ひずみ(残留ひず

み)も極めて小さくかつセグメントの極近傍であったことから、観察されなかった可能性もあると考えられる。

最後に、討議者が提案された沈下成分の構成を表す式(1)と、著者らが提案したフェイズとの関係について回答する。著者らがフェイズ1, 2を分けた視点は、「テールポイド解放による地盤変形{掘削面の変形が覆工の拘束を受けない範囲}」と「トンネル軸方向の応力解放の影響が付加荷重として作用しているながらも、壁面付近では覆工の拘束を受けて覆工近傍での沈下増分が少なくなる範囲」である。すなわち、掘削解放力がトンネル軸方向に継続する中でも、掘削面における境界条件が異なることを根拠としている。そして、掘削解放に関わる全応力の変化が終了した結果、軟弱地盤の加圧密特性に応じて間隙水圧が変化し過剰間隙水圧が発生した部分について、圧密沈下が進むとしている。

このことから、討議者が提案している応力解放の捉え方として、テールポイドが埋まるまでを δ_0 としているのであればフェイズ1に相当するし、テールポイドが埋まった後も作用するトンネル軸方向の解放による付加荷重が伝わる範囲までを δ_0 としているのであればフェイズ1, 2に相当することになる。但し、フェイズ1と2では地盤変形に関わる覆工周辺地盤の境界条件が異なることに注意しなければならないので、実務上の解析面から見て、一緒にする意味合いを明確にしておく必要がある。

δ_0 は、前述したとおり、既往研究で提案されている考え方と実現象での整合性について慎重な検討が必要であると考えている。著者らの研究の中では、討議者が提案している δ_0 の要因を導入しなくても適正な土の構成則(例えば関口・太田モデル)と入力物性値⁹⁾などを導入すれば、今回提案した一連の地盤変形メカニズムで実現象の再現が可能であると考えている。

δ_0 は、フェイズ3に相当するものと考えている。

4. 研究成果の活用

著者らの研究成果の活用であるが、大別して次に示すものとなる。

① 軟弱地盤中にシールドトンネルを構築する場合の周辺地盤変形予測手法の改善。

② 後続沈下の抑止方策への展開。

①については、研究成果として得られた地盤変メカニズムの再現として、支配方程式をBiot, 土の構成

式を関口・太田モデルで数値解析を実施している。その結果下記の課題が発生している。

- ・フェイズ2で発生する側方部におけるせん断面(すべり面)が上手く再現できないこと。つまり応力が限界状態(M)に達した後の、土の挙動の定式化について課題を残していること。

- ・フェイズ2, 3で、掘削面にある土が覆工のために半径方向変位が拘束された後、側方部におけるせん断面での変形進展の影響により、覆工の接線方向に土が挙動する(タンジェンシャルスリップ)現象が再現できないこと。

- ・以上をまとめると、テールポイド発生による周辺地盤のトンネル半径方向への挙動、次に覆工により拘束を受けた後の、すべり面の発生および覆工と地盤の境界面でのタンジェンシャルスリップ現象を一貫して模擬するには、従来のFEM(オイラー系)では再現が難しいこと。

著者らは、研究を継続して、解析手法の改善を行っている。これらの現象を再現できないと、覆工荷重の予測精度としても不安要素を残すことになると考えている。

②については、フェイズ2の現象によって発生すると考えられる後続沈下を、抑制するための対策の検討に用いる計画である。具体的には、①の解析手法改善の目処を経て、対策工の定量的な効果を確認しようと考えている。従来であれば、天端部に対して補強などを実施している場合もあったが、今回の知見をもってすれば、例えば「トンネル軸方向の掘進に伴って付加作用する荷重により進展する、側壁部のせん断変形を抑制するための対策(側壁部の補強)も重要ではないか?」、今回の現象は示唆していると考えている。

最後に、著者らは、施工条件や地盤条件の変化は、変形メカニズム(定性的挙動)を大きく変えるものではないとの考えである。

地盤変形メカニズムを反映した予測式(骨格)を構築した後に、現場毎に定量的な議論を行う場合において、必然的に入力物性値、境界条件および初期条件を支配する施工条件や地盤条件など、個別の現場環境に応じた的確な評価が必要となる。

参考文献

- 1) 山崎剛, 大塚正博, 日下部治: 軟弱粘性土中シールド建設時における地盤変形現場計測データの再評価, 土木学会論文集, No. 680/III-55, pp. 301-305, 2001.
- 2) 大塚正博, 山崎剛, 日下部治: 軟弱粘性土中シールド施工時における裏込め注入有無によるトンネル直上地盤変位

の差異, 土木学会論文集, No. 624/III-47, pp. 51-64, 1999.

- 3) 山崎剛, 大塚正博, 日下部治: 軟弱粘性土でのシールドテールボイド発生による周辺地盤の変形挙動, 土木学会論文集, No. 631/III-48, pp. 311-328, 1999.
- 4) 山崎剛, 大塚正博, 日下部治, 栗原美津雄, 五十嵐寛昌: 遠心模型実験と現場計測の対比によるシールドテールボイド発生以後の軟弱粘性土地盤変形メカニズム, 土木学会論文集, No. 680/III-55, pp. 29-48, 2001.
- 5) 山崎剛: シールド工法の調査・設計から施工まで, 地盤工学会, 地盤工学・実務シリーズ 3, pp. 424-431, 1997.
- 6) 例えば, 小林健郎: シールド掘削に伴う地盤変位に関する研究, 東京大学学位論文, 1982.
- 7) 山崎剛: 連載講座「シールド掘進に伴う地盤変位入門

(6)」, トンネルと地下, Vol. 34, No. 4, pp. 75~84, 2003.

- 8) 葛野恒男, 鈴木通正, 平田栄司, 橋本正, 早川清: 鋭敏粘性土地盤における土圧シールドの掘進に伴う後続沈下について, 第 25 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1765~1766, 1990.
- 9) 太田秀樹, 成廣明雄, 山崎剛, 後藤政昭: 軟弱粘性土の弾粘塑性パラメタの実験による同定, 第 23 回土質工学研究発表会, pp. 545-548, 1988.

(2002.11.8 受付)