

早期閉合採用時の トンネル縦断方向地表面沈下曲線に関する考察

鈴木 健¹・森本 真吾²・林 久資³・進士 正人⁴

¹正会員 西松建設株式会社 土木設計部設計2課 (〒105-6301 東京都港区虎ノ門一丁目23-1)
E-mail: takesi_suzuki@nishimatsu.co.jp

²正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail: charlie@dobocreate.co.jp

³正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

⁴正会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1)
E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネル工事の坑口部では、地表面に民家等の構造物が存在する場合は、近年においては長尺先受け工法等の補助工法と早期閉合を併用したトンネル掘削を行う事例が増加している。この時、トンネル掘削時に予想される地表面沈下量が沈下の管理値に対して余裕が少ない場合は、トンネル縦断方法の地表面沈下曲線を用いた沈下管理をする必要がある。本報文では、この補助工法と早期閉合を併用した場合の地表面沈下の実績から沈下曲線を構築した。その結果、M.Panetの式から得られるトンネル縦断方向の地表面沈下曲線と近似することが分かった。また掘削区間と未掘削区間の地山弾性係数をパラメータとした数値解析を実施して、補助工法と早期閉合を併用した場合の地山改良効果と沈下曲線の関係や、初期計測結果から最終沈下量の関係について言及した。

Key Words: ground settlement curve of vertical, early section closer, three dimensional analysis

1. 概要

山岳トンネル工事の坑口部は、小土被りであり、かつ地山性状が土砂地山等で脆弱なことが多い。また、当該部の地表面には民家等の構造物が存在する場合がある。このような場合は、トンネル掘削時の地表面沈下量に対して管理値を設定し、計測管理しながら掘削し、地表面沈下量が管理値を超過しないよう管理する必要がある。近年においては、このような条件下においても、掘削開始前には数値解析を実施し、トンネル掘削時の地表面沈下量を予測した上で、長尺先受け工法等の補助工法と早期閉合を併用した全断面掘削工法が採用されることが多い¹⁾。

トンネル掘削時の構造物の地表面沈下量の管理値は、既往文献から設定する場合²⁾や、構造物の管理者と協議して設定することが多い。掘削開始前に実施した数値解析結果が、この管理値に対して余裕が少ない場合は、地

表面沈下の開始位置、トンネル掘削に伴う地表面沈下の発生傾向（以下、地表面沈下曲線と称す）および地表面沈下量の収束値を予測し、この予測値と実測値を確認しながら管理する必要があると考えている(図-1)。

そこで、小土被り脆弱地山におけるトンネル掘削を対象としたトンネル縦断方向の地表面沈下曲線や、早期閉合採用時等の地表面沈下量を解明を目的とした研究は、種々行われているので、近年施工実績の多い脆弱小土被り地山における補助工法と早期閉合を併用したトンネル

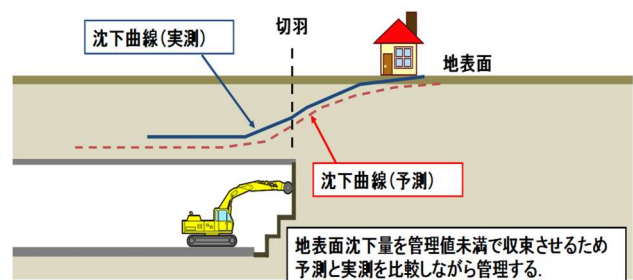


図-1 縦断方向地表面沈下量の管理方法概念図

施工を対象に、トンネル掘削時の縦断方向の地表面沈下傾向を明らかにした。

例えば鈴木ら³⁾は、地山特性曲線および応力解放曲線を用いてトンネル縦断方向の地表面沈下を予測する方法を提案している。また、横山ら⁴⁾は、トンネル掘削時の地山のせん断状態を考慮して縦断方向の地表面沈下予測式を構築している。しかしながらこれらの研究は、近年小土被り未固結地山におけるトンネル施工で多用される早期閉合における地表面沈下予測ではなく、ショートベンチカット工法などの地山を早期に閉合しない工法での研究である。また宮野前ら⁹⁾は、補助工法として鏡ボルトを採用した場合の地表面沈下予測について数値解析と実際の計測結果を比較して地表面沈下量の予測について検討している。しかしながら、この研究もショートベンチカット工法などの地山を早期に閉合しない工法を対象としている。

早期閉合採用時における地表面沈下に関する研究は、例えば、森崎ら⁷⁾は、早期閉合について、閉合距離と地表面沈下収束値の関係について計測結果を示しているが、収束沈下量には言及しているものの、沈下履歴曲線については言及されていない。真下ら⁸⁾は、早期閉合を2次元で解析する場合の応力解放率について論じているが、二次元的検討では地表面沈下予測曲線は得られない。

以上のことから、補助工法と早期閉合を併用した場合のトンネル縦断方向の地表面沈下曲線に関する研究は、解明されているとはいえない。

よって著者らは、上記のような条件下でトンネルを掘削した時の縦断方向の地表面沈下曲線を考察することは、今後の同等な条件下でトンネルを掘削する際の計測管理や施工管理に対して有効となると考えた。そこで本報文では、土砂地山等の脆弱地山を掘削時に長尺先受け工法等の補助工法と早期閉合を併用して掘削した場合の計測された地表面沈下量を整理して、トンネル縦断方向の地表面沈下曲線を構築するとともに、構築した地表面沈下曲線の適用範囲について考察する。

2. 縦断方向地表面沈下曲線の解明

(1) 計測データの整理

掘削した地山が脆弱で、長尺先受け工法や鏡ボルト等の補助工法と早期閉合を併用したトンネル掘削時の地表面沈下計測結果について収集整理し、トンネル縦断方向の地表面沈下曲線を構築する。計測データを収集したトンネルは、表-1の通り3トンネルである。対象とした計測点は、トンネルセンター直上の地表面であり、計測は、トータルステーションによる自動計測または手動計測、もしくはレベル測量による手動計測したものである。計

測点の合計は、44 測点である。閉合距離とは、切羽から一次インバート施工による断面閉合までの距離であり、表-1に示す通り5mもしくは6mである。

計測結果のデータ整理は、以下の手順で実施した。まず最初に、各計測点の計測結果について、経距変位図（横軸：切羽離れ、縦軸：地表面沈下量として整理）にて整理する。次に、トンネルの施工条件を除外するため、各計測点の計測結果について、沈下量 δ を沈下量収束値 δ_{max} で除して無次元化（ δ/δ_{max} ）する。また切羽離れ L についても、掘削幅 D で除し無次元化（ L/D ）する。最後に、各 L/D 位置で計測された計測結果の平均値を代表値として抽出する。上記の整理分析について、A トンネルで行った結果を図-2に示す。

この処理を他2トンネルでも行い、図-3に示すように各トンネルにおいて計測された計測結果の平均値を3ト

表-1 地表面沈下計測結果を収集したトンネル

トンネル	主な補助工法	掘削した地山	変形係数 E (MPa)	閉合距離 (m)	掘削幅 D (m)	土被り H (m)	計測点数
A	注入式フォアボーリングと鏡ボルトの併用	砂質シルト	73	5.0	10.4	14	24
B	長尺先受け工と鏡ボルトの併用	人工盛土	11	6.0	12.1	15	13
C	長尺先受け工	火山噴出物	27	6.0	11.7	34	7*

※計測点数は、上下線の合計

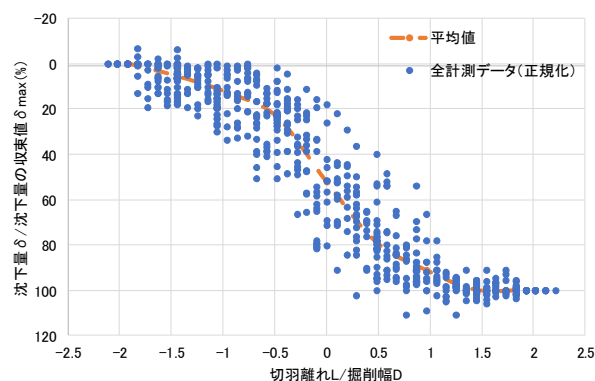


図-2 データ整理結果 (A トンネル)

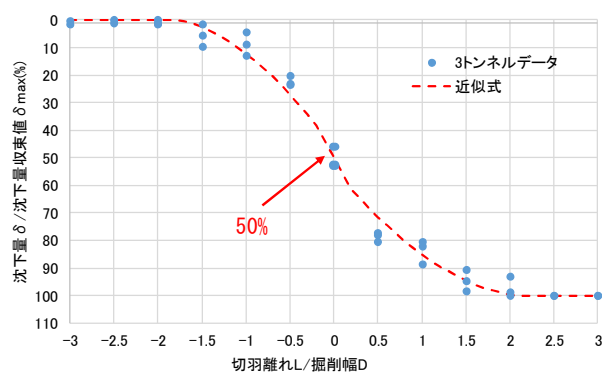


図-3 3 トンネルデータ整理結果

ンネル分プロットし、そのプロットの近似曲線を描き、近似曲線より近似式を導出した。

得られた近似式を下式(1)および(2)に記載する。

$$-2 \leq L/D < 0 : \delta / \delta_{\max} = 0.101(L/D)^2 + 0.445(L/D) + 0.502 \quad (1)$$

($\delta / \delta_{\max} < 0$ の場合は、 $\delta / \delta_{\max} = 0$ とする)

$$0 \leq L/D < 2 : \delta / \delta_{\max} = -0.084(L/D)^2 + 0.398(L/D) + 0.502 \quad (2)$$

($\delta / \delta_{\max} \geq 1.0$ の場合は、 $\delta / \delta_{\max} = 1$ とする)

これらの式より、切羽前方 2D より前方の地表面には、トンネル掘削の影響が及んでいない。また切羽通過後 2D を過ぎると、地表面沈下は収束に至ることがわかる。さらに、トンネル切羽が計測点直下を通過($L/D=0$)した際の沈下量は、沈下量の収束値の約 50% となることが得られた。早期閉合による施工が主流になる以前の切羽通過時の地表面沈下量は、沈下傾向が応力解放率と同等と考えれば、一般的に収束値の約 30%⁹⁾や 40%¹⁰⁾であると示されている。よって早期閉合を採用したトンネル施工では、切羽通過時の沈下量と沈下量の収束値に対する割合が、例えば上半先進工法掘削時とは異なることが示唆されていると考える。

(2) M.Panet の応力解放曲線と近似式との比較

本報文で提案するトンネル縦断方向地表面沈下曲線は、地山が土砂地山等で、かつ小土被り地山(表-1)を対象としている。このような条件下での地表面沈下の傾向は、トンネル掘削時のトンネル縦断方向の応力解放曲線と同等であるか否かを解明するために、トンネル縦断方向の応力解放曲線を導出することができる M.Panet の式¹¹⁾と前節で求めた近似式を比較することとした。M.Panet の式は、下式(3)および(4)の通りである。ここで、切羽通過時の応力解放率は、前節で得られた結果を考慮して 50%とした。実施工における計測値から得られた近似式と M.Panet の式の比較結果を図-4 に示す。図-4 より、両曲線は、概ね一致していることが確認できた。

以上より、掘削する地山が脆弱で長尺先受け工法等の補助工法と早期閉合を併用したトンネル掘削時の縦断方向の地表面沈下曲線は、M.Panet の式から得られる応力解放曲線(応力解放率 50%)に近似することが分かった。つまり、M.Panet の式よりトンネル縦断方向の地表面沈下を予測することが可能であることが示唆された。

$$Z \geq 0 (\text{切羽後方}) : U_R / U_{R_{\max}} = c_0 + c_1 (1 - e^{-Z/(0.7r)}) \quad (3)$$

$$Z < 0 (\text{切羽前方}) : U_R / U_{R_{\max}} = c_0 - c_1 (1 - e^{-Z/(0.7r)}) \quad (4)$$

ここで、 $U_R / U_{R_{\max}}$: 壁面変位率(掘削開放率)で、ここでは地表面沈下量の収束値に対する各位置での沈下量の割合とする。

Z : 切羽距離(m)

r : トンネル半径(=10m と仮定)

c_0 : 応力解放率(=0.5), $c_1 : c_1 = 1 - c_0$

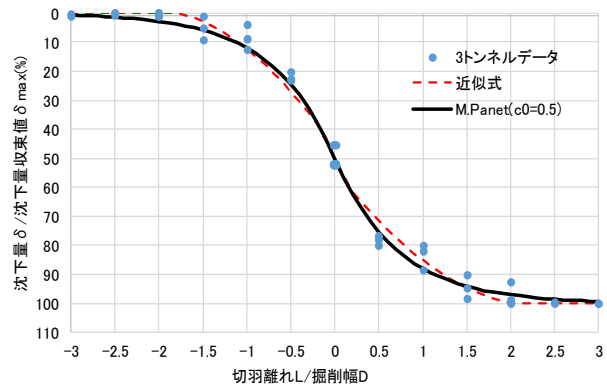


図4 近似式と M.Panet 式との比較

3. 縦断方向地表面沈下曲線の適用範囲に関する考察

前章では、脆弱かつ小土被り地山におけるトンネル施工で、長尺先受け工法等の補助工法と早期閉合を併用したトンネル掘削時の縦断方向の地表面沈下曲線は、M.Panet の式を用い、応力解放率を 50%と仮定することでトンネル縦断方向の地表面沈下を予測することが可能となることが示唆された。しかしながら、前章で扱った実施工での計測結果は、地山条件が限定的であることから本章では M.Panet の式での縦断方向地表面沈下曲線の適用範囲を解明する。

(1) C トンネルの事例

坑口部の掘削で上半先進工法と早期閉合の両方を施工した C トンネルの計測結果を用いて、縦断方向の地表面沈下曲線に M.Panet の式を適用できる範囲を検討する。

表-1 に示した C トンネル¹²⁾は、上下線(トンネル中心間距離: 3D, トンネル掘削幅 $D=11.7\text{m}$)のトンネルであり、掘削する地山は、未固結な火山噴出物であった。当初設計では、坑口部から長尺先受け工法と早期閉合を併用することとなっていた。早期閉合を実施する区間長は、先行掘削する下り線は、坑口から 174m, 後行掘削する上り線は 169m とされていた。しかしながら、掘削する地山が未固結な火山噴出物であったことから、坑口から土被り 2D 未満の区間は上半先進工法(下り線, 上り線ともに $TD=73\text{m}$)にて掘削し、それ以降は、早期閉合を採用することを計画した。ただし、地表面沈下量が急激に増加した場合は、上半先進工法から早期閉合に変更することとした。

当該部の計測結果を図-5 および図-6 に示す。下り線の地表面沈下量は、数値解析から得られた予測値より小さな値で収束し、当初計画の坑口から73m位置で早期閉合に変更した。一方、上り線は、坑口から20m付近にて地表面沈下量が増加したことから、TD=30m 付近で上半先進掘削を一旦停止し、下半および一次インバートを切羽に追いつけ、早期閉合とした。

地表面沈下が大きくなった原因としては、上り線坑口部付近には、地表面の一部の箇所地すべりが発生した跡が確認されていたことから、当該部の地山の性状は、下り線に比べて悪かったためと考察している。

上下線の地表面沈下量について、掘削工法を変更した境界付近の地表面沈下量の計測結果として、下り線は、TD=60m位置（上半先進工法）とTD=80m位置（早期閉合）の計測結果（図-7、図-9），上り線は、TD=20m位置（上半先進工法）とTD=40m位置（早期閉合）の計測

結果（図-8、図-10）を示す。計測結果は、横軸は、これまでと同様に切羽離れL/掘削幅Dとし、縦軸は、計測値での比較と、沈下量収束値を100%とした場合の割合で整理した。

まず沈下発生位置を確認すると、上下線ともに $L/D=0.5$ 程度から沈下の開始が確認され、掘削工法の違いによる沈下量発生位置の差は確認されなかった。このことから、 $L/D<0.5$ 区間は、掘削工法に関わらず、沈下量は微小でほとんど発生しないことが分かった。地表面沈下は、 $L/D>0.5$ から増加し、かつ掘削方法の違いによって沈下量収束値に差が発生している。このことから掘削工法の違いによる影響は、 $L/D>0.5$ から発生すると考察できる。

下り線の計測結果(図-7)を確認すると、早期閉合掘削時には沈下量の収束値が-6.9mm、切羽通過時が-3.1mmとなり切羽通過時の先行変位率は44.9%となった。これ

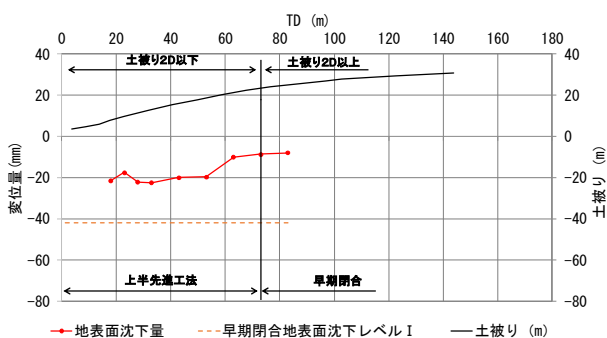


図-5 下り線 計測結果（収束値） 12)に加筆

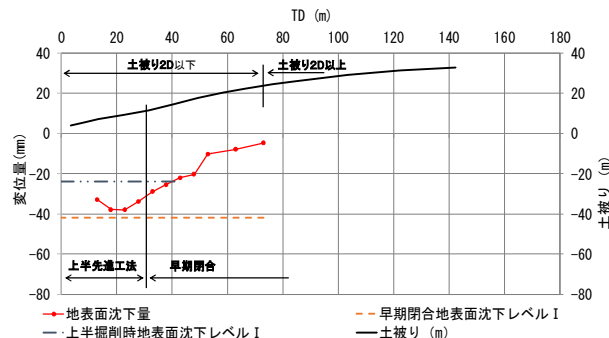


図-6 上り線 計測結果（収束値） 12)に加筆

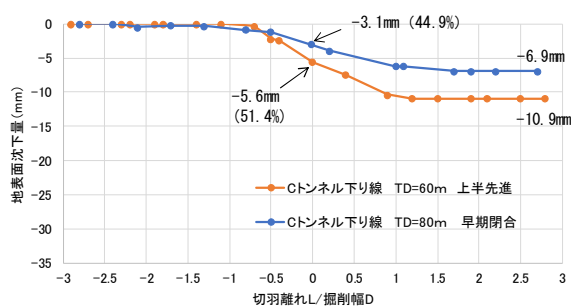


図-7 下り線 上半先進と早期閉合比較（収束値）

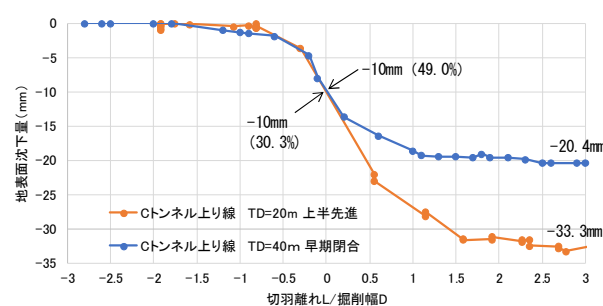


図-8 上り線 上半先進と早期閉合比較（収束値）

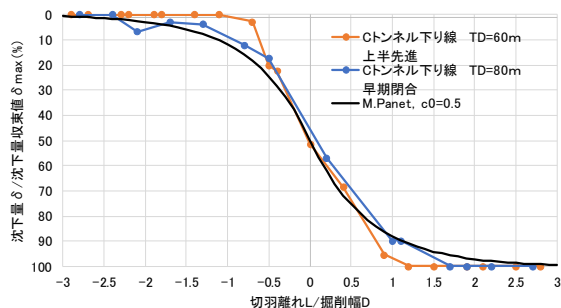


図-9 下り線 上半先進と早期閉合比較（ δ/δ_{max} ）

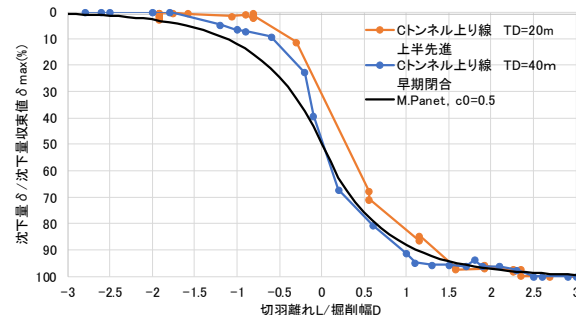


図-10 上り線 上半先進と早期閉合比較（ δ/δ_{max} ）

に対して、上半先進工法掘削時は収束値が-10.9mmであり、切羽通過時が-5.6mmとなり、切羽通過時の先行変位率は51.4%となった。沈下量収束値を比較すると、早期閉合時の収束値は、上半先進工法時の収束値の63%に低減した。これは早期閉合による沈下抑制効果と考えられる(図-7)。

次に、上り線の計測結果(図-8)を確認すると、早期閉合掘削時には沈下量の収束値が-0.4mm、切羽通過時が-10mmとなり、切羽通過時の先行変位率は49.0%となった。これに対して、上半先進工法掘削時は、収束値が-33.3mmであり、切羽通過時が-10mmとなり、切羽通過時の先行変位率は30.3%となった。沈下量収束値を比較すると、早期閉合時の収束値は、上半先進工法時の収束値の61%に低減した。これは下り線と同様に、早期閉合による沈下抑制効果と考えられる(図-8)。

下り線の計測結果を図-9に示すように $\delta/\delta_{\max}$ とL/Dの関係で整理すると、縦断方向沈下曲線は、上半先進工法での掘削時よりも早期閉合掘削時の方が、M.Panetの式($\alpha=0.5$)に近似した傾向となった。

同様に、上り線の計測結果を図-10に示すように $\delta/\delta_{\max}$ とL/Dの関係で整理すると、縦断方向沈下曲線は、下り線と同様に、早期閉合掘削時の方が、M.Panetの式($\alpha=0.5$)に近似した傾向となった。

以上より、早期閉合掘削時と上半先進工法掘削時では、沈下量は、早期閉合においては、上半先進工法の約60%に抑制されることが分かった。また沈下量の割合で整理すると、上半先進工法は、M.Panetの式と乖離することが分かった。

(2) 数値解析による沈下曲線の適用範囲に関する考察

前節で提示した上半先進工法掘削時と補助工法と早期閉合併用時の沈下割合の差の原因を推定するため、数値解析を実施して考察することとした。沈下割合に差が発生した原因の一つとして、未掘削部区間と掘削済区間の地山の弾性係数の差が影響しているのではないかと仮定した。

そこで解析では、掘削済領域(以下、A領域、弾性係数 E_A)の地山の弾性係数と、未掘削領域(以下、B領域、弾性係数 E_B)の地山の弾性係数をパラメータとして、表-2に示す9ケースについて掘削解析を実施し、トンネルセンター上の地表面沈下量を取得した。ここで、 $E_A/E_B < 1.0$ は、掘削済部の地山の弾性係数が、未掘削部の弾性係数より小さいことから補助工法や断面閉合の効果が小さいことを意味し、 $E_A/E_B \geq 1.0$ は、補助工法や断面閉合の効果が大きいことを意味する。

解析モデルは、図-11、図-12の通り、小土被り地山を模擬した土被り20mの地山に、掘削幅10mの円形トンネルを奥行き1mずつ逐次掘削した。本解析では切羽前後

の地山強度を変化させることで補助工法や断面閉合の効果を模擬するため、トンネルには支保工等を設定しない素掘り掘削とした。また解析では、A領域となる掘削済領域を50m掘削した場合の地表面沈下を取得(TD=50m位置が、L/D=0)した。なお解析コードは、三次元有限差分コードのFLAC^{3D}を用いた。

解析結果について、沈下量の比較と沈下量 δ /沈下量収束値 $\delta_{\max}$ の比較を行い、その傾向について整理分析した。最終沈下量の比較を表-3および図-13に示す。図-13に示すすべてのケースにおいて、切羽離れ3D地点

表-2 解析ケース

解析Case	B領域のE(MPa) (未掘削領域)	A領域のE(MPa) (掘削済領域)	E_A/E_B
case1	1000	1000	1.00
case2	1000	900	0.90
case3	1000	800	0.80
case4	1000	700	0.70
case5	1000	600	0.60
case6	900	1000	1.11
case7	800	1000	1.25
case8	700	1000	1.43
case9	600	1000	1.67

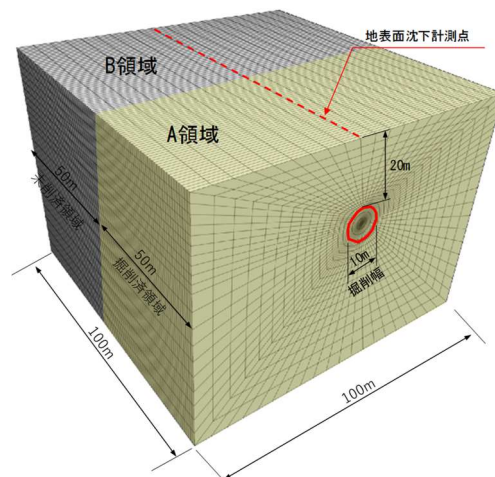


図-11 解析モデル(鳥瞰図)

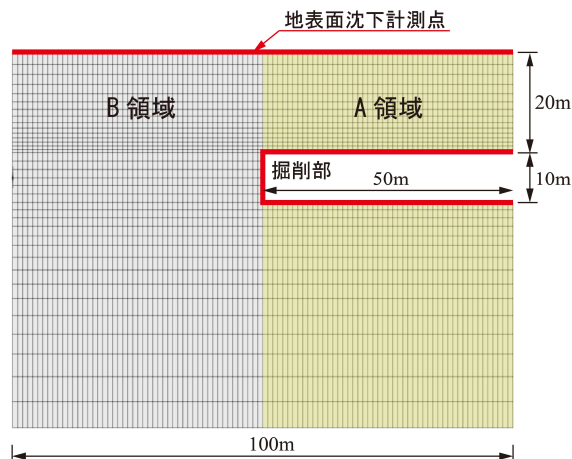


図-12 解析モデル(縦断図)

における地表面沈下量はほぼ収束に至っていると判断できるため、切羽離れ 3D 地点における地表面沈下量を最終沈下量とした。

数値解析結果を確認すると、表-3、図-13 の通り case5 ($E_A/E_B=0.60$) が最も大きな沈下が発生した。このことから、未掘削区間に対して掘削済区間の弾性係数が大幅に低い条件、つまり補助工法や早期閉合を実施したとしても、その効果が小さい場合は、最終沈下量が卓越することが分かった。また、トンネル掘削に伴う沈下量の発生傾向を確認すると、どのケースも $L/D=0.5$ 程度までは沈下量に大きな差は発生しておらず、沈下の差が明確になるのは、 $L/D>0.5$ となり、図-7、図-8 と同じ傾向を確認することができた。

一方、最終沈下量が最も小さくなったのは、case9 ($E_A/E_B=1.67$) であり、補助工法や断面閉合によって掘削周辺地山の弾性係数が見かけ上増加したことによる効果を再現できていると考えられる。このことを示す根拠として、 E_A/E_B が大きいほど沈下量は小さくなることも表-3 より確認できている。

ここで、 $L/D=0.5$, $L/D=0$, $L/D=0.5$ の沈下量について、横軸を E_A/E_B で整理したものを図-14 に示す。 $L/D=0.5$ は、 E_A/E_B に関わらず概ね等しい沈下量であり、上述した通り実際の計測結果と等しい傾向が確認できた。 $E_A/E_B<1.0$ の区間は、沈下量と E_A/E_B は線形関係があり、 E_A/E_B が小さいほど沈下量が多い。これは補助工法や早期閉合を実施したとしても、その効果が小さいほど、沈下量が増大することを意味している。一方、 $E_A/E_B>1.0$ になると、どの位置でも沈下量に大きな差がないことが分かった。これは弾性係数が小さい地山でも、補助工法と早期閉合を併用して見かけの弾性係数を向上すれば沈下抑制効果が確保できることを意味する。ただし、例えば閉合時期が遅くなり閉合効果が小さくなった場合は、沈下量の抑制効果は小さくなることも想定できると考えられる。

以上より、掘削による地表面沈下量を増大させないためには、掘削によって地山を劣化させ弾性係数を低下させないことが重要であると考察できる。

次に、 $\delta/\delta_{\max}$ の比較を表-4 および図-15 に示す。 $L/D=0$ 位置で $\delta/\delta_{\max}$ が最も小さくなったのは case5 であり $\delta/\delta_{\max}=27.1\%$ だった。これは、掘削後も沈下が続いて増加したため、 $L/D=0$ 位置の沈下割合が収束値に比べて小さな値となったためである。

一方、 $L/D=0$ 位置での $\delta/\delta_{\max}$ が最も大きくなったのは case9 であり $\delta/\delta_{\max}=44.3\%$ となった。これは掘削済区間の地山の弾性係数が未掘削区間の弾性係数より大きくなったことで沈下量の収束値が小さくなり、切羽通過後の沈下量の増分が少なくなったためである。

これは実施工での補助工法と早期閉合を併用した場合の計測結果(図-7 から図-10)と同等な傾向であり、補助

工法と早期閉合の効果を解析にて簡便な手法で再現できたと考えられる。言い換えると、2 章で得られたトンネル切羽が計測点直下を通過($L/D=0$)するときの沈下量は、沈下量の収束値の約 50%となる条件は、補助工法および早期閉合による地山改良効果が高い場合に得られることが分かった。

表-3 解析結果 (沈下量比較)

解析Case	B領域のE(MPa) (未掘削領域)	A領域のE(MPa) (掘削済領域)	E_A/E_B	最終沈下量 $\delta_{\max}(\text{mm})$	case1の沈下量 を1とした場合
case1	1000	1000	1.00	-0.56	1.00
case2	1000	900	0.90	-0.63	1.13
case3	1000	800	0.80	-0.73	1.30
case4	1000	700	0.70	-0.85	1.52
case5	1000	600	0.60	-1.02	1.82
case6	900	1000	1.11	-0.55	0.98
case7	800	1000	1.25	-0.53	0.95
case8	700	1000	1.43	-0.51	0.91
case9	600	1000	1.67	-0.49	0.88

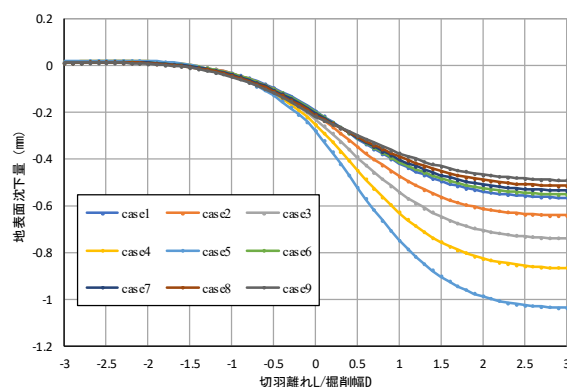


図-13 解析結果 (沈下量比較)

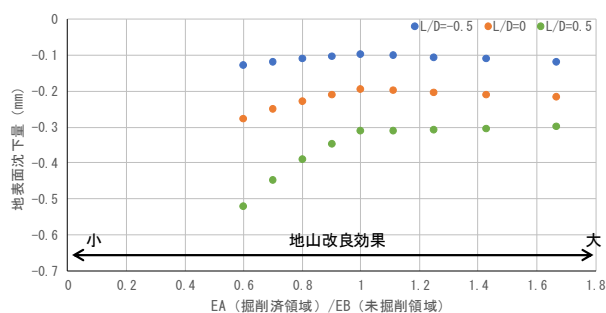


図-14 $L/D=0.5, 0, 0.5$ の沈下量と E_A/E_B の関係

表-4 解析結果 ($L/D=0$ 位置の $\delta/\delta_{\max}$ 比較)

解析Case	B領域のE(MPa) (未掘削領域)	A領域のE(MPa) (掘削済領域)	E_A/E_B	$L/D=0$ 位置での $\delta/\delta_{\max}(\%)$
case1	1000	1000	1.00	34.6
case2	1000	900	0.90	32.9
case3	1000	800	0.80	31.1
case4	1000	700	0.70	29.2
case5	1000	600	0.60	27.1
case6	900	1000	1.11	36.4
case7	800	1000	1.25	38.4
case8	700	1000	1.43	41.0
case9	600	1000	1.67	44.3

以上より、C トンネル上り線の早期閉合実施時の縦断方向の地表面沈下曲線が、M.Panet 式と乖離した原因は、上り線の地山の弾性係数が、下り線に比べて小さかったこと、上り線の補助工法と早期閉合によるみかけの地山弾性係数の向上効果が、下り線に比べて小さかったためと考えられる。このことから、長尺先受け工法と早期閉合を併用した掘削を実施しても、地山弾性係数の向上効果が見られない場合は、縦断方向地表面沈下曲線は、特に $L/D < 0$ の区間で本論文で提案した沈下曲線に近似せず、適用できないと考えられる。

(3) 切羽近傍の沈下量から地山改良効果や最終沈下量予測に関する考察

切羽近傍の数値解析結果を分析して、実施工における補助工法と早期閉合採用時の地山改良効果や、最終沈下量の予測方法について検討した。

まず、地山改良効果の推定について検討した。ここで、 $L/D = -0.5$, $L/D = 0$, $L/D = 0.5$ の $\delta / \delta_{\max}$ について、横軸を E_A/E_B で整理したものを図-16 に示す。図-16 より、 E_A/E_B と $\delta / \delta_{\max}$ の関係は、線形関係にあることが分かった。このことから、実施工において、切羽通過時 ($L/D = 0$ 位置) の沈下量 δ と沈下量収束値 $\delta_{\max}$ が得られ、 $\delta / \delta_{\max}$ がわかれば、掘削時の地山改良効果の程度が概ね推定できると考えられる。

ここで、C トンネルの計測結果と、数値解析結果の $L/D = 0$ 位置の $\delta / \delta_{\max}$ と E_A/E_B の関係を図-17 に示す。上り線の上半先進時の $L/D = 0$ 位置の $\delta / \delta_{\max}$ は 30.3% であり、 $E_A/E_B < 1.0$ であることから、掘削済区間の地山改良効果は小さいと判断でき、実際の計測結果においても、沈下量収束値が大きな値となっている。一方、上り線早期閉合および下り線の早期閉合時は、 $\delta / \delta_{\max}$ から得られる E_A/E_B は、1.0 以上であり、地山改良効果が発現していると判定できる。よって上り線の沈下量が下り線に比べて大きかった原因の一つは、地山弾性係数が小さかったためと考えられる。

また、M.Panet の式の $L/D = -0.5$, $L/D = 0$, $L/D = 0.5$ における $\delta / \delta_{\max}$ を図-16 に示す。これを確認すると、 $L/D = 0.5$ の時の E_A/E_B は、 $E_A/E_B \approx 1.7$ であった。これは実施工で実施している長尺先受け工法と早期閉合の地山改良効果が高いことを意味する。また $L/D = 0$ および $L/D = 0.5$ は、 $E_A/E_B > 1.7$ 以上となり、数値解析から得られた E_A/E_B と $\delta / \delta_{\max}$ の関係と一致しなかった。一致しなかった原因は、実施工では、 $L/D > 0$ 区間は、吹付けコンクリートの硬化等に伴う地山改良効果の増加が考えられることや、今回実施した数値解析は弾性解析であり、実際の施工条件と一致していないこと等と考えている。

以上より、実施工では、計測結果から地山改良効果が想定より小さいと判断できる場合は、縦断方向の沈下曲

線を適用することができないと考えられ、沈下量収束値も想定より大きく発生する可能性がある。これを抑制するためには、早期に補助工法の追加等を実施して、地山改良効果を増大させる必要があると考えられる。なお、実施工計測結果と数値解析値の乖離を小さくすることは、今後の課題としたい。

次に、切羽近傍の増分沈下量と沈下量収束値の関係について考察する。

本報文では、地表面沈下量の開始位置は、 $L/D = -0.5$ からであることがわかった。実施工では、沈下が始まってから早期に沈下量収束値を推定できれば、沈下量と管理値の関係を確認でき施工管理に有効であると考えられる。

そこで、 $L/D = -0.5$ から $L/D = 0.5$ (区間長: 1D) の増分沈下量と沈下量収束値の関係を整理して分析することとした。

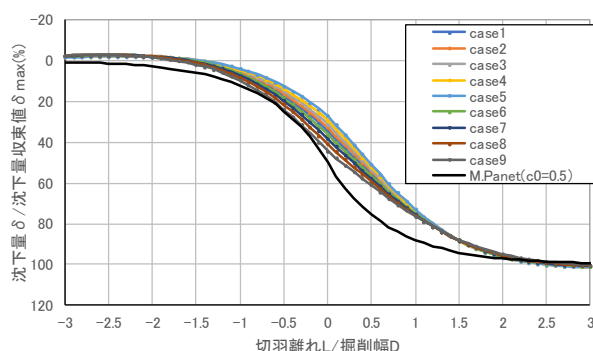


図-15 解析結果 ($\delta / \delta_{\max}$ 比較)

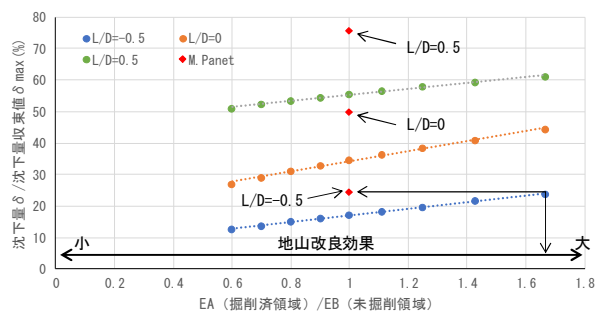


図-16 $L/D = -0.5, 0, 0.5$ の $\delta / \delta_{\max}$ と E_A/E_B の関係

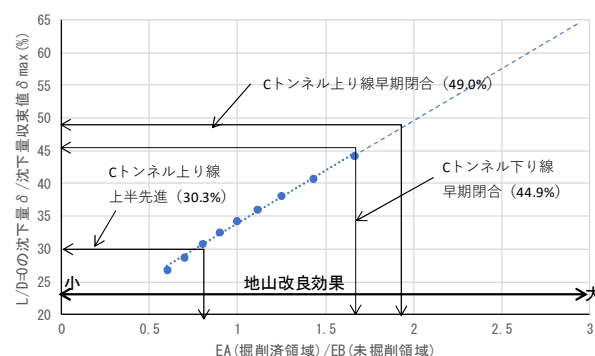


図-17 C のトンネルの $L/D = 0$ の $\delta / \delta_{\max}$ と E_A/E_B の関係

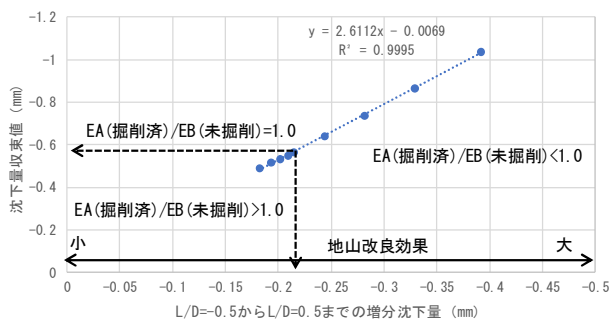


図-18 L/D=-0.5～0.5の増分沈下量と最終沈下量の関係

表-5 C トンネルの増分沈下量と最終沈下量

	L/D=-0.5 沈下量 $\delta 1$ (mm)	L/D=0.5 沈下量 $\delta 2$ (mm)	増分沈下量 $\delta 2 - \delta 1$ (mm)	沈下量収束値 $\delta 3$ (mm)	$\delta 3 / \delta 2$
下り線 早期閉合	-2.0	-16.5	-14.5	-20.4	1.41
上り線 早期閉合	-1.2	-5.0	-3.8	-6.9	1.82

数値解析の各ケースの $L/D=-0.5$ から $L/D=0.5$ までの増分沈下量と沈下量収束値の関係を図-18 に示す。整理した結果、両者には線形の関係が分かり、沈下量収束値は増分沈下量の約 2.6 倍であることが分かった。

ここで、C トンネル早期閉合時の同位置の増分沈下量と沈下量収束値の関係を表-5 に示す。沈下量収束値は、増分沈下量の 1.4 倍および 1.8 倍であり、数値解析結果の 2.6 倍より小さな値となった。両者に差が発生した原因は、吹付けコンクリートの硬化等に伴う地山改良効果の増加が考えられる。両者の乖離を小さくすることは、今後の課題としたい。

4. まとめ

トンネル掘削において、小土被りで、掘削する地山が土砂地山等の脆弱な場合で、かつ地表面に民家等の重要構造物がある場合は、トンネル縦断方向の地表面沈下曲線と実際の沈下量を比較しながら計測管理することが重要である。

本報文では、長尺先受け工法と早期閉合を併用して掘削したトンネルの地表面沈下の実測値を収集整理し、縦断方向の地表面沈下曲線について整理・分析した。その結果、縦断方向地表面沈下曲線は、M.Panet 式の応力解放曲線（応力解放率 50%）で近似できることを確認した。ただし、掘削した地山の状況や早期閉合等の効果が小さく、地山改良効果が適正に発生しなかった場合は、上述した沈下曲線と乖離することも分かった。また、地山弾性係数をパラメータとした数値解析を実施することで

補助工法と早期閉合によって地表面沈下量が小さくなることは、これらの対策によって、掘削済区間の見かけの地山弾性係数が増加したためであることと考察することができ、実施工と現象が一致していることを確認した。

今後は、今回提示した沈下曲線の信頼性向上のために、より多くの地表面沈下計測結果による分析を行うことや、沈下曲線を施工管理に適用した場合に対する検証等を実施していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 例えば、多田浩治，津野和宏，石丸潔，亀谷英樹：構造物直下の双設トンネルを早期閉合により施工，トンネルと地下，第 43 巻 7 号，pp.23-33，2012。
- 2) 公益社団法人土木学会：実務者のための山岳トンネルにおける地表面沈下の予測評価と合理的対策工の選定，pp.91-94，2016。
- 3) 鈴木健之，土門剛，西村和夫，徐景源：地山特性曲線および応力解放曲線を用いたトンネル掘削時の地山挙動予測，トンネル工学論文・報告集，第 13 巻，pp.129-134，2003。
- 4) 鈴木健之，土門剛，西村和夫：地山特性曲線法を用いた先行変位予測，トンネル工学論文集，第 14 巻，pp.45-52，2004。
- 5) 横山章，木村宏，高瀬昭雄：NATM による掘削時の現場計測に基づく施工管理手法，トンネルと地下，第 15 巻 4 号，pp.7-17，1984。
- 6) 宮野前俊一，森田篤，酒井照夫，松井幹雄，梨本裕，大久保誠介：長尺鏡ボルト工の地山補強効果に関する簡易評価モデルの提案，土木学会論文 F，Vol.62No.2，pp.258-267，2006。
- 7) 森崎泰隆，御手洗良夫，蔣宇静：一次インバートの閉合距離が地表面沈下に与える影響に関する解析的検討と適用事例，土木学会論文集 F Vol.64 No3，pp.227-236，2008。
- 8) 真下英人，水川雅之，日下敦：トンネル早期閉合効果に関する解析的検討，トンネル工学論文集・報告集，第 17 巻，pp.35-41，2007。
- 9) 独立行政法人 鉄道施設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，p.319，2008。
- 10) 株式会社 高速道路総合技術研究所：トンネル数値解析マニュアル（2017 年度版），p3-25，2017。
- 11) M.Panet: Time-dependent deformation in underground works, *Proceedings International Congress on Rock Mechanics 4th 790902* Vol.3, pp.279-289, 1979。
- 12) 岡田謙吾，奈良聡，原島大，鈴木健，丸山大輔：三次元解析を用いた坑口部の情報化施工，土木学会第 73 回年次学術講演会，VI-005，2018

(2019. 8. 9 受付)

STUDY OF LONGITUDINAL GROUND SETTLEMENT CURVE LINE OF EXCAVATION BY EARLY SECTION CLOSER METHOD

Takeshi SUZUKI,Shingo MORIMOTO,Hisashi HAYASHI and Masato SHINJI

There are houses on the ground surface at the excavation of entrance of tunnel construction, there are increasing cases tunnel excavation applying supplementary construction method and early section closer method.

At this time, it is necessary to manage settlement using longitudinal ground settlement curve line. We constructed a longitudinal ground settlement curve line by measuring results when tunnel excavate by auxiliary construction method and early section closer method. As a result, it was found that it is similar to longitudinal ground settlement curve line from the equation of M. Panet.

In addition, three dimensional analysis is performed using the ground elastic modulus of the excavated area and the unexcavated area as parameter. As a result, we mentioned the relationship between the ground improvement effect and longitudinal ground settlement curve line when tunnel excavate by auxiliary construction method and early section closer method and the relationship between initial measurement results and the final settlement displacement applied.