天端軸方向変位による前方地山予測法の 改良を目指した基礎的検討

辻岡 高志1・武内 秀頼2・竹村 いずみ3・進士 正人4

¹学生会員 山口大学大学院理工学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1) E-mail:s021vf@yamaguchi-u.ac.jp

2防衛省沖縄防衛局 調達部 土木科(〒904-0295沖縄県中頭群嘉手納町字嘉手納290番地9) 3正会員 西松建設株式会社 土木設計部(〒105-8401東京都港区虎ノ門1-20-10) 4正会員 山口大学大学院理工学研究科(〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1)

山岳工法により施工されたトンネルの内空変位は、光波測距儀による3次元での絶対変位計測が主流で ある.しかし、従来は変位計測結果のうち、トンネル断面内に生じる内空変位データ以外(たとえば、坑 内の変位)は、ほとんど活用されていない.そこで、既往研究において、天端部の軸方向変位が切羽前方 の地山状況により変化することに着目した前方地山状況の予測法を提案している.

本研究では,既往研究での数値解析を補完することで,軸方向変位が地山物性にどのように影響しているかを明確にし,それらを考慮し従来の前方地山状況予測法(PS-Tad)を改良する.さらに,改良した予測法を施工現場へ適用し,適用性の検討を行う.

Key Words : PS-Tad, NATM, Numerical analysis, Tunnel axial displacement, Foreground estimation

1. はじめに

山岳トンネルでは、施工時の地山状況の観察・計測の ために切羽観察や内空変位計測および天端沈下計測が主 に実施されている.これらの計測は日本に山岳トンネル 工法が導入されて以来、トンネル掘削によるトンネル断 面内変形挙動を測定するものである.近年、主として経 費節減を目的として内空変位計測には光波測距儀が使用 され、3次元での絶対変位計測が主流になっている.し かし、従来の内空変位に対応するために3次元での絶対 変位は断面内の相対変位量に換算され、一部脚部沈下と して絶対変位を議論する場合もあるものの、断面外の変 位はほとんど見過ごされ、活用されていなかった.

それに対し、SchubertとBudil¹⁾は、天端の断面外変位で ある軸方向変位と天端沈下を組み合わせることで切羽前 方の地山性状の予測が可能であることを提案した.

また、小松原ら²は天端部の軸方向変位が切羽前方の 地山状況により変化することを数値シミュレーションよ り明らかにした.

そして、竹村ら³は小松原らの数値シミュレーション を基礎にして、より現場での適用を考慮した前方地山の 予測手法(PS-Tad)を提案した. PS-Tadは、トンネル施工 時の3次元絶対変位データの内トンネル軸方向変位の切 羽進行における軸方向変位の変化を数値解析により提案 された検討図(Tad-Chart:図-1)中にプロットすることに より、プロットされた領域から前方地山の強度変化を簡 易に予測する予測法である.ここで、図-1より、計測断 面から切羽までの距離0~10m区間の軸方向変位は、こ れまでの数値解析の結果では切羽の応力解放の影響を受 けるため、前方地山の変化に関わらず、掘削方向と逆方 向に生じることが明らかなので、その間の計測データは、 前方地山状況の予測法に利用しないこととしている.

しかし、PS-Tadをより一般的に利用するために、トン ネル直径や切羽の応力解放の影響範囲、初期応力状態な どのトンネル軸方向変位が発生する条件に関する検討は まだ不十分であった.そこで本研究では、数値シミュレ ーションによるトンネル掘削の基本的な解析を追加し、 軸方向変位がどのような力学条件に影響を受けるかを明 確にすると同時に、PS-Tadで使用する図表Tad-Chartをよ り現場適用性に考慮したものに改良する.そして、竹村 が以前使用した現場計測データに改良したTad-Chartを適 用し、解析条件を十分に吟味した時の、前方地山状況の 予測法を適用性改善状況について検討する. PS-Tadでは、前方地山の硬軟の違いにより、計測断面における軸方向変位の発生状況が変化する.そこで、図-2に示すような馬蹄形トンネルを模擬した数値シミュレーションモデルを用い、前方地山の弾性係数の変化に対応した採用した軸方向変位の発生傾向を調べた.前方地山の硬軟の違いを再現するために用いた物性値の一覧を表-1に示す.

図-3にその結果を示す.この図からわかるように,前 方地山の弾性係数が大きくなる(以下,"前方地山が硬 くなる"と呼ぶ)場合は,軸方向変位はほとんど変化し ないか,掘削進行側に若干増加する.それに対し,前方 地山が変化しない場合は,軸方向変位は坑口側に徐々に 増加していく.一方,前方地山の弾性係数が小さくなる (以下,"前方地山が軟らかくなる"と呼ぶ)場合は,坑 口側に大きく増加し,物性の変化する位置が近くなれば なるほど,軸方向変位は大きくなる.すなわち図-1は,

図-3の挙動をもとに前方地山の状況により、計測断面から10m以降の軸方向変位がどのように変化するかを領域で表したものである. つまり、計測点から10m掘削した地点の天端の軸方向変位をゼロとして、その後の軸方向変位を図-1にプロットしていくと、その変位挙動が図-1の3領域の範囲内にプロットされることから、前方地山の変化を予測することができる.

しかし、PS-Tadでは、現場ごとに異なる掘削径や初期 応力、前方の弾性係数との比などの解析条件が変化した 場合の軸方向変位に与える影響は詳細に調べられていな い.そこで、異なる物性値のモデルで数値シミュレーシ ョンを再度行い、物性値の変化が軸方向変位の発生挙動 にどのように影響しているのかを検討する.数値シミュ レーションは、トンネル形状にも配慮して図-4に示す3 次元解析モデルを使用し、トンネルは円形断面とした上 で、解析条件として、等方初期応力状態での解析を行っ た.

(1) 掘削径の大きさによる影響の検討

表-2に、数値シミュレーションで用いた物性値の一覧 を示す.表から明らかなように、掘削径を変化させた場 合に軸方向変位に与える影響を検討する.前方地山の弾 性係数が変化しない場合の解析結果を図-5に示す.変位 量は掘削径により異なる挙動を示したが、挙動は類似し ている.掘削径ごとに変位の値が異なるのは、掘削相当 外力が掘削径により異なることが原因である.そこで、 計測の開始位置を計測点から切羽が1D進行した地点と し、さらに、軸方向変位を掘削径で割ることで図-6に示 すように、掘削径の異なるモデルでも同様の変形挙動を 示すことがわかった.



図-2 既往研究で使用した解析モデル

表-1 解析物性値(前方地山の弾性係数の違いによる影響)

0 4	トンネル直径	弾性係数	(E(MPa)	ポアソン比	単位体積重量		
Case	D (m)	領域A E _A	領域B E _B	v	γ (kN/m³)		
case I			150				
case I	10	150	15	0.35	21		
case 🎞			1500				
備考							
	一部万回変位の挙動かとのように変化するかを検討。						



図-4 本研究で用いる解析モデル

表-2 解析物性値(掘削径の影響検討)

Casa A	トンネル直径	弾性係数 E (MPa)		ポアソン比	単位体積重量	初期応力
Case	D (m)	領域A E _A	領域B E _B	v	γ (kN/m³)	σ ₀ (MPa)
Case-A	10	150	15			
			150			
			1500			
Case-B	20	150	15			
			150	0.35	21	5
			1500			
case-C	5	150	15			
			150			
			1500			
備考	掘削径を変更することで、掘削径が軸方向変位に影響を及ぼすのかを検討。					



(2) 弾性係数の影響検討

計測断面の弾性係数の大きさを変化させた場合に軸方 向変位に与える影響を検討する.表-3に、数値シミュレ ーションで用いた物性値の一覧を示す.図-7に、前方地 山の弾性係数が小さくなる場合の解析結果を示す.軸方 向変位の値は、計測地点の弾性係数に比例し、また、挙 動は類似している.そこで、軸方向変位に計測地点の弾 性係数を掛けることで図-8に示すように弾性係数の異な るモデルでも同じ挙動を示した.

表-3 解析物性値(計測地点の弾性係数の影響)

Case名	トンネル直径	弾性係数 E(MPa)		ポアソン比	単位体積重量	初期応力
	D (m)	領域A E _A	領域B E _B	V	γ (kN∕m°)	σ ₀ (MPa)
case-D case-E 10		150	1.5	0.35	21	5
			15000			
	10	1500	15			
	10	1500	150000			
case-F		15	0.15			
			1500			
備考	計測地点の弾性係数を変更することで、 弾性係数が軸方向変位に影響を及ぼすのかを検討。					



(3) 初期応力の影響検討

初期応力の大きさを変化させた場合に軸方向変位に与 える影響を検討する. 表-4に,数値シミュレーションで 用いた物性値の一覧を示す. 図-9に,前方地山の弾性係 数が変化しない場合の解析結果を示す.軸方向変位の値 は初期応力の値に比例し,挙動は類似している.そこで, 軸方向変位を初期応力で割ることで,図-10に示すよう に軸方向変位は同じ挙動を示した.

このことから,軸方向変位に現場の初期応力を乗ずる ことで,そのトンネルの土かぶり高さに応じた軸方向変 位として表すことができる.

(4) 地山物性を考慮したTad-Chartの作成

(1)~(3)より,解析条件が変わることで,軸方向変位 はどのように変化するかを明確にした.従って,Tad-Chartの縦軸に表記される軸方向変位に係数を乗ずるこ とで,地山状況を考慮した予測法の提案が可能であると 考える.

係数=[弾性係数/(掘削径×初期応力)]

また、切羽の応力解放力が掘削円の大きさにより異な るため、計測の開始位置を切羽離れ1Dとすることで、 この影響を考慮できると考える.

3. 実測データによる予測法の適用性検討

本研究において提案する前方地山状況の予測法につい て、山岳工法により施工したトンネル現場での適用性を 検討するため、先に竹村らが適応したNトンネルの軸方 向変位データを用いて改良効果を検討した.

(1) 適用現場概要

石川県七尾市で施工された N トンネル坑内にて計測さ れた軸方向変位データを使用し、検討を行った.

Nトンネルは全長1760mのトンネルで、礫岩や砂岩、 泥岩や頁岩といった比較的な脆弱な岩盤で構成されてい る。適用区間については、坑口より0~1760m区間の全 区間を対象とした.Nトンネルの地質縦断図を図-11に 示す.

(2) 前方地山の硬軟の判断指標

数値シミュレーションでは、弾性係数を変化させることで地山の硬軟をモデル化したが、地山の弾性係数は不明である.そこで、トンネル内の弾性係数を施工中に軸方向変位と合わせて測定される天端沈下量と土被りを用いて円形理論解から逆算し、弾性係数を前方地山状況の判断材料とした.図-12に算出した弾性係数を地山縦断図に重ねて表示させた図を示す.本研究では、弾性係数が大きいほど地山は硬く、逆に弾性係数が小さいほど地山は軟らかいものとし、弾性係数の増減に着目して予測法の適用性を検討した.

(3) 検討結果

従来のTad-Chart, 改良したTad-Chartともに予測が可能 であった一例を図-13(a)に,従来のTad-Chartでは予測で きなかったが,改良したTad-Chartでは予測が可能であっ た一例を図-13(b)に示す.

図-13(a)は、計測位置1 609mの軸方向変位である. 図 からわかるように、軸方向変位は、改良したTad-Chartも

従来のTad-Chartも「前方地山が硬くなる領域」に分布し ており地山状況は改善されることが予測される.実際で は、図-12に示すように、計測位置1609mの弾性係数は 150MPaから550MPaへと増加しており前方地山は硬くな り、予測と一致した.改良したTad-Chartおよび従来の Tad-Chartとも、前方地山の予測が可能であることが分か る.

図-13(b)は、計測位置835.3mの軸方向変位である.図 からわかるように、従来のTad-Chartでは、軸方向変位は 坑口側に徐々に増加しているため、地山状況はあまり変 化しないことが予測される.一方、改良したTad-Chartで 軸方向変位は坑口側に大きく増加しているため、地山状 況は軟らかくなっていると予測できる.実際では、図-12に示すように、計測位置835.3mの弾性係数は1450

表-4 解析物性値(初期応力の影響検討)



図-10 初期応力の影響検討(60m計測点の挙動)





MPaから450MPaへと減少しており前方地山の弾性係数が 小さくなる.このように、従来のTad-Chartに地山物性の 影響を考慮したことで従来では予測できなかった地点に ついての整合がとれた計測点もみられた.

4. まとめ

施工中のトンネル坑内にて計測される変位データのう ち,活用されていない坑内の軸方向変位を用いて前方地 山状況の予測法が既往研究として提案された.しかし, 既往研究で提案された予測法は,現場ごとで異なる地山 物性や掘削径の影響を考慮はされていなかった.そこで, 本研究ではトンネル掘削径や初期応力,地山の物性値が 軸方向変位にどのように影響するのかを明確にし,それ らの影響を考慮した前方地山状況予測法を提案した.本 研究で提案した予測法を既往研究と同様の現場計測デー タに適用したところ,従来の予測法と比べ適用率が向上 した. したがって、前方地山の予測法の精度を向上させるためには、地山の物性値を考慮する必要があることが明らかになった。今後は、本研究で提案した掘削径、初期応力、地山の物性値を考慮したTad-Chartを数多くのトンネル建設現場に適用することで、さらに有用性を検討していきたい。

参考文献

- W.Shubert, A.Budil : The importance of longitudinal deformation in tunnel excavation, Proc. of 8th Int. Congress on Rock Mechanics, Tokyo, 3, pp.1411-1414, 1995
- 2) 小松原渉,進士正人:三次元内空変位計測の有効な活用 方法,土木学会第38回岩盤力学に関するシンポジウム講 演論文集,論文番号40, pp.225-230,2009
- 3) 竹村いずみ,進士正人,鬼頭夏樹,千々和辰訓,石山宏 二:坑内の軸方向変位を用いた前方地山状況の予測法の 提案,トンネル工学報告集,第21巻, pp.1-7,2011

(2013.9.2 受付)

THE FORWARD GROUND PREDICTION METHOD BASED ON THE AXIAL DISPLACEMENT DEPENDING ON DIFFERENT GROUND.

Takashi TSUJIOKA, Hideyori TAKEUCHI, Izumi TAKEMURA and Masato SHINJI

In this study, the three dimensional numerical analysis of tunnel excavation had done to evaluate the effect of the axial displacements on the tunnel wall which depends on elastic modulus changed vertically at the middle of model. This result indicates that the axial deformation behavior of measuring section which was disregarded in the convergence measurement was strongly affected for the changing of elastic modulus in front of the tunnel face. The authors make it clear how axial displacement influences tunnel properties of matter. And the authors suggest the forward ground prediction method in consideration of tunnel properties.