

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

竹村 いずみ^{1*}・進士 正人¹・鬼頭 夏樹²・千々和 辰訓³・石山 宏二⁴

¹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)

²西松建設株式会社 関東土木支社 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

³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西松建設株式会社 技術研究所 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

*E-mail:p017vf@yamaguchi-u.ac.jp

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変位データ以外（たとえば、坑内の軸方向変位）はほとんど活用されていない。そこで、既往研究では、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に着目した前方地山状況の予測法を提案した。

本研究では、その検討成果を基に、より施工現場での計測状況に則した数値解析シミュレーションを実施し、施工現場での適用性に配慮した新たな前方地山状況の予測法を提案する。さらに、予測法を施工現場へ適用し、適用性の検討を行う。

Key Words : NATM, total station, numerical analysis, tunnel axial displacement, rock mass classification

1. はじめに

山岳工法で施工されるトンネルでは、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NATM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、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となっている。しかし、従前の内空変位に対応するため3次元での絶対変位は断面内の相対変位量に換算されてしまい、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、活用されていないのが現状である。

SchubertとBudilは、坑内の軸方向変位と天端沈下等の断面内の変位と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明らかにした¹⁾。また、著者らは天端部の断面外変位である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解析シミュレーションより明らかにした。そして、その挙動特性に着目した前方地山状況の予測手法を提案した²⁾。

本研究では既往研究の成果を発展させ、数値解析シミュレーションにおける変位計測において、施工現場での計測間隔を再現した。そして、そこから軸方向変位を活

用した図表を提案し、方向変位の計測結果に基づく前方地山状況の予測法を提案する。さらに、提案した予測法を実際の山岳トンネル施工現場の計測データに適用することでその適用性について検討する。

2. 既往研究²⁾

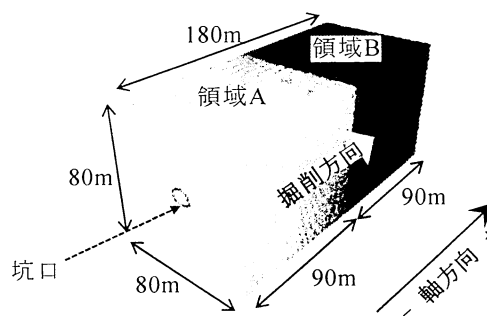


図-1 3次元解析モデル

表-1 解析物性値

モデル名	弾性係数(MPa)		単位体積重量(t/m ³)	ポアソン比	前方地山状況のイメージ
	領域A	領域B			
model I	150	150	21	0.35	変化しない
model II		15			軟らかくなる
model III		1500			硬くなる

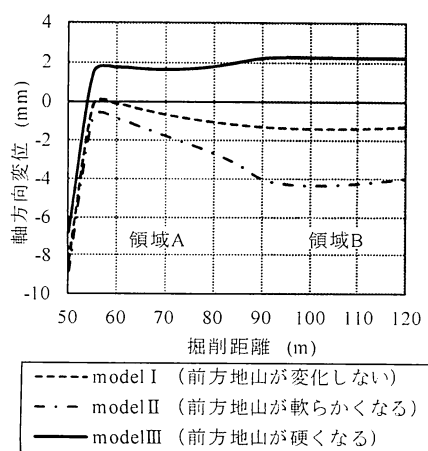


図-2 計測点の軸方向変位挙動

(1) 解析手法

既往研究では、山岳トンネルにおける逐次掘削にともなう軸方向変位の挙動を把握するために有限差分法による数値解析シミュレーションを実施した。3次元解析モデルを図-1に示す。一般的な2車線道路を想定したトンネル形状（トンネル直径:11.4m）とし、モデル奥行きは180m、中央部90mより弾性係数が変化するモデルとした。また、便宜上、0mをトンネルの状況に対応し坑口と呼ぶ。軸方向手前側の領域Aに対し、表-1に示すように領域Bの物性値がそれぞれ、変化しない場合（model I）、より弾性係数が小さく（十分の1）なる場合（model II）、より大きく（十倍）なる場合（model III）の3パターンについて数値解析シミュレーションを行った。以降、本文では、弾性係数が小さくなる場合を「前方地山が軟らかくなる場合」、逆に、弾性係数が大きくなる場合を「前方地山が硬くなる場合」と呼ぶこととする。掘削は領域Aより1mごとの逐次掘削を行い、物性値の変化する断面より40m手前である切羽位置が坑口から50mの地点のトンネル天端部に計測点を設置した。そして、切羽が1m離れるごとに計測点の軸方向変位を求めた。

(2) 坑内の軸方向変位挙動

解析結果を図-2に示す。どのモデルにおいても切羽が計測点を通過直後、計測点のトンネル天端部の軸方向変位は8mm程度坑口側へ発生する。その後、切羽の位置が計測点より約7mまで進行する間に軸方向変位は徐々に小さくなり、掘削進行側へ0～2mm程度となる。これは、トンネル掘削による切羽付近の地山応力解放の影響と考えられる。

計測点から切羽までの距離が約7m以降では、前方地山が変化しない場合（model I）の軸方向変位はほぼ0で変わらず、その後若干坑口側に変形する。前方地山がより軟らかくなる場合（model II）は坑口側に再度大きく変位する。それに対して、前方地山がより硬くなる場合（model III）、軸方向変位はほぼ一定となるが、

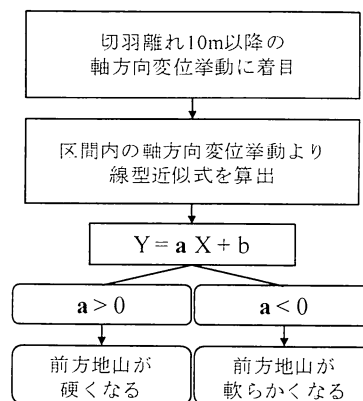


図-3 既往研究における予測法のフローチャート

その後掘削進行側に変位することがわかる。このような現在のトンネル施工時において、内空変位計測として現場計測されているものの見過ごされている天端部の軸方向変位は、前方地山状況の変化により異なる変位挙動を示すことが明らかとなった。

そこで既往研究では、これを利用した前方地山状況の予測法を考案した。図-3に既往研究における予測法のフローチャートを示す。既往研究では、初めに、計測点から切羽までの距離10m以降の軸方向変位の挙動に着目する。10m以降の変位挙動を線形に近似し、直線近似式を算出する。算出した直線式の傾きに着目し、それぞれ傾きの値が負の値を示す場合には前方地山が軟らかくなり、対して、傾きが正の値を示す場合には前方地山が硬くなると判定する。

3. 施工現場での計測状況を考慮した数値解析

既往研究では数値解析シミュレーションを主とし、トンネル施工現場での具体的な軸方向変位の活用については、あまり考慮されていなかった。そこで、本研究ではトンネル施工現場での計測状況を考慮した数値解析シミュレーションを再度行った。その上で、得られた解析結果をもとに施工現場への適用性を考慮した新たな前方地山状況の予測法を提案する。

(1) 変位計測位置の選定

3次元解析モデルおよび解析物性値は既往研究と同様とした（図-1、表-1）。掘削方法も、既往研究と同様に1mごとの逐次掘削とした。

しかし、3次元解析モデルに設置した計測点の設置間隔、計測間隔は図-4に示すとおりとした。すなわち、トンネル施工では計測点はおおむね20m間隔に設置されることから、坑口よりそれぞれ10m、30m、50m地点のトンネル天端部に計測点を設置した。本文中それらを

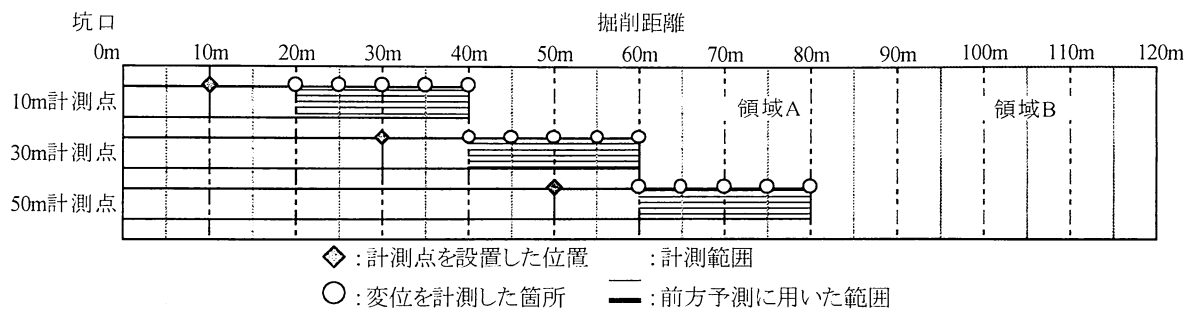


図-4 数値解析における計測点の設置位置および計測間隔

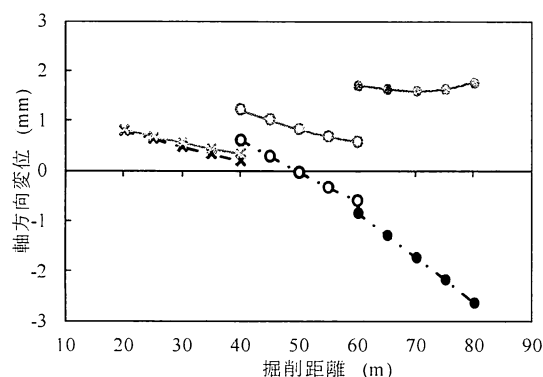


図-5 各計測点の軸方向変位挙動

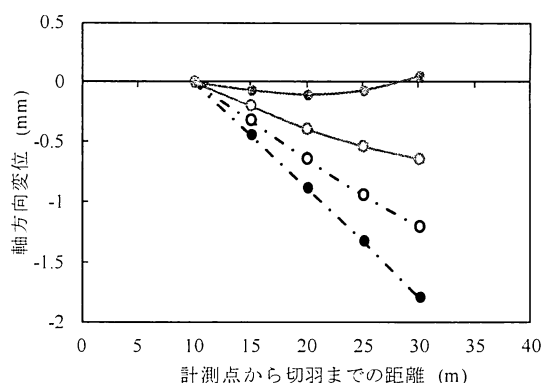


図-6 30m計測点、50m計測点の軸方向変位の相対変位量

10m計測点、30m計測点、50m計測点と呼ぶ。また、山岳トンネル施工現場における変位の計測は通常1日に1～2回実施され、地山状況にもよるものの、切羽は通常3m～6m進行する。これらの状況を考慮して、切羽が計測点を通りしてから、切羽が5m進行するごとに計測点の軸方向変位を計測することとした。加えて、トンネル施工現場における計測点の設置は、通常、切羽が計測点を通り直後に計測ポイントが設置され、その後5m進行ごとに計測されるが、図-2からも明らかのように、計測点から切羽までの距離が約7mまでは、前方地山とかわりなく、軸方向変位は坑口方向に変位するので、計測点から切羽までの距離0～10m区間の計測データは、前方地山状況の予測法に利用しないこととした。

(2) 解析結果

解析結果を図-5に示す。10m計測点では領域A、Bの境界より離れているので、いずれのモデルでも同様の軸方向変位挙動を示す。しかし30m計測点では、model IIIの変位挙動が他の2つのモデルと若干の違いが見られ、50m計測点では、前方が変化しない場合（model I）は坑口より30m計測点と同様の挙動を示している。すなわち、前方がより軟らかい場合（model II）は30m計測点よりもより大きく坑口側に変位していることがわかる。

一方、前方地山が硬くなる場合（model III）には、30m地点の計測点よりも掘削進行側に大きく変位していることがわかる。これらの結果から、図-2と同様に軸方向変位の挙動は前方地山状況の硬軟の変化により異なる挙動を示すこと、さらに物性が変化する断面との距離が短いほどその変化量が大きくなることがわかる。

(3) 天端部の軸方向変位による予測法の提案

図-5に示した軸方向挙動に基づく新たな前方地山状況の予測法を提案する。図-5の結果はあくまでも計測点からの絶対的な軸方向変位をプロットしたものであり、このままでは計測結果との対比が難しい。そこで、計測点から10m離れた位置での軸方向変位をゼロとした時の30mおよび50m計測点の相対変位量を計測点からの距離で整理した結果を図-6に示す。図からわかるように、前方地山の弾性係数の違いにより、軸方向変位の発生状況が変化すること、加えて領域A、Bの境界が近くなればなるほど軸方向変位が増加することがわかる。

そこで、計測点位置を20m、40m、60mと追加し同様の解析を行い、領域A、Bの弾性係数に対応したそれぞれの相対軸方向変位の発生傾向を調べた。図-7にその結果を示す。図中の3色の領域は、図-5の同色系統

のモデルに合わせ着色したものである。この図からわかるように、前方地山が硬くなる場合は、軸方向変位はほとんど変化しないが、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、軸方向変位は若干坑口側に徐々に増加していく。一方、前方地山が軟らかくなる場合は、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、この図は、前方地山の状況が変わると、計測点から10m以降の軸方向変位がどのように変化するかを表したものである。したがって、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この図にプロットしていくと、その変位挙動が図に示した3領域のいずれかの範囲内にプロットされることから、前方地山の硬軟を予測することができる。

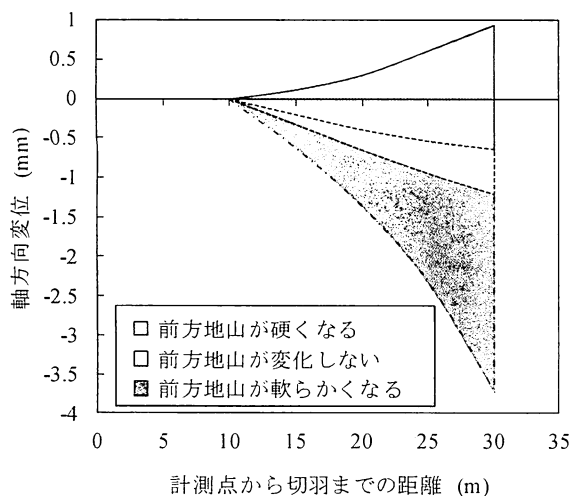


図-7 軸方向変位の挙動領域を利用した
前方地山状況の予測法

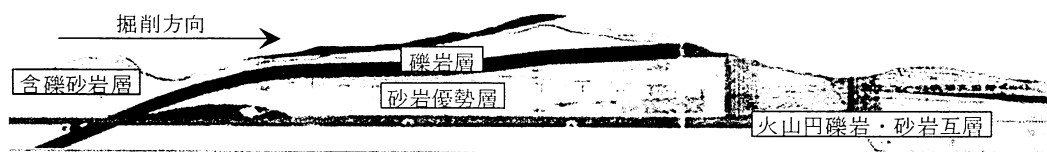


図-8 七尾トンネルの地質縦断面図

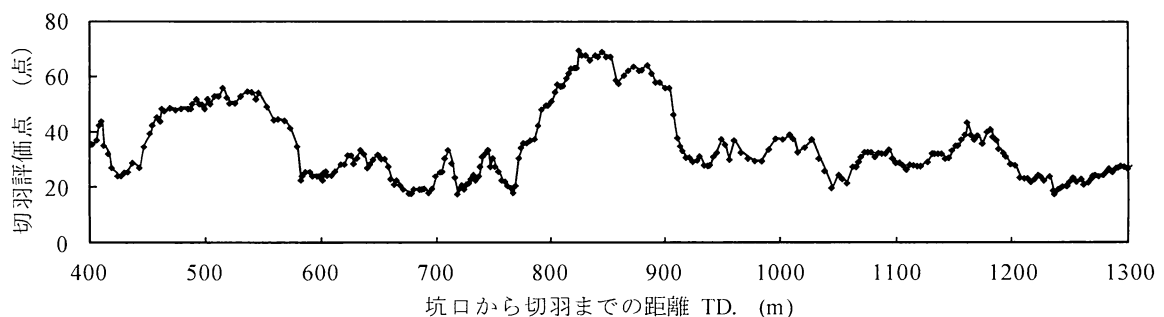


図-9 検討に用いた区間の切羽評価点

4. 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、実際に施工中に計測された変位データを使用し、検討を行った。

(1) 現場概要

石川県七尾市で施工された七尾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、検討を行う。

七尾トンネルの地質縦断面図を図-8に示す。トンネル延長は1,760mであり、適用性の検討には起点側および終点側の約400m区間を除く起点より400～1,300m区間の計測データを対象とした。検討区間内の地質は新第三紀であり、大まかに分類すると、トンネル起点側では含礫砂岩層、中間部は砂岩優勢層、終点側には火山円礫岩・砂岩互層がトンネルの上部を占めている。

検討区間内の計測点は約20m間隔でトンネル天端部および両側面部に配置されている。適用性の検討には、トンネル天端部の計測点でトータルステーションを用いて計測された軸方向変位データを使用した。

(2) 前方地山の硬軟の把握指標

数値解析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、トンネル現場では地山の硬軟を表す指標として施工中に連続的に記録される切羽評価点³⁾を利用することとした。一般に、切羽の評価は点数が高いほど切羽周辺の地山状況は良く、低いほど地山状況は悪いとされる。そこで本研究では、切羽評価点が高いほど地山は硬く、逆に切羽評価点が高いほど地山は軟らかいものとし、切羽評価点の増減に着目して予測法の適用性を検討した。

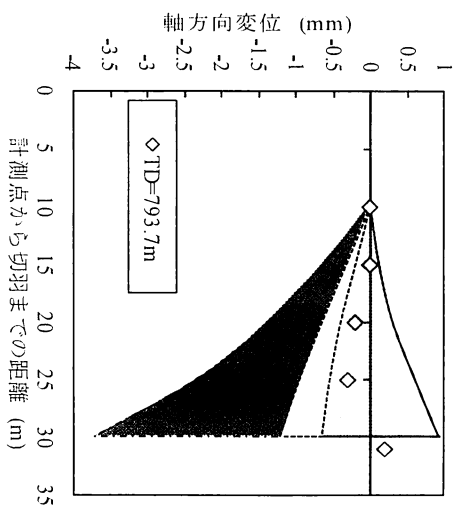
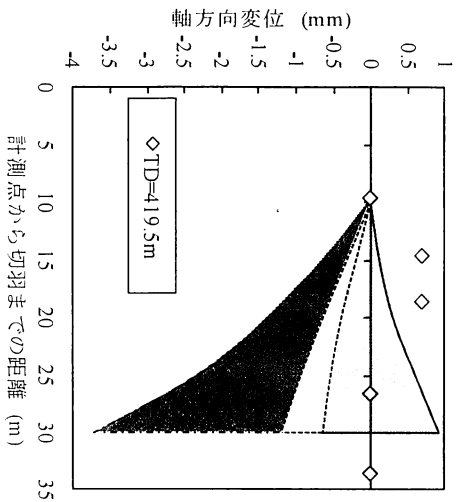


図-10(a)

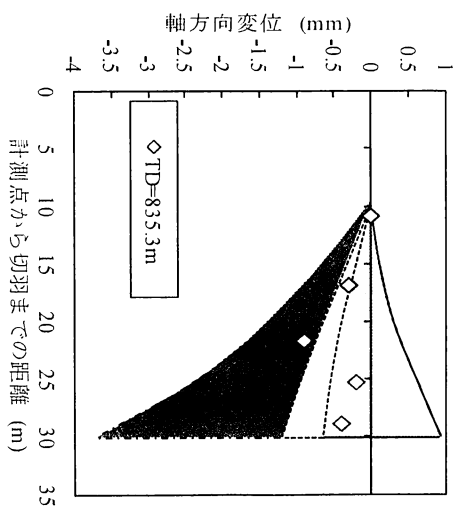
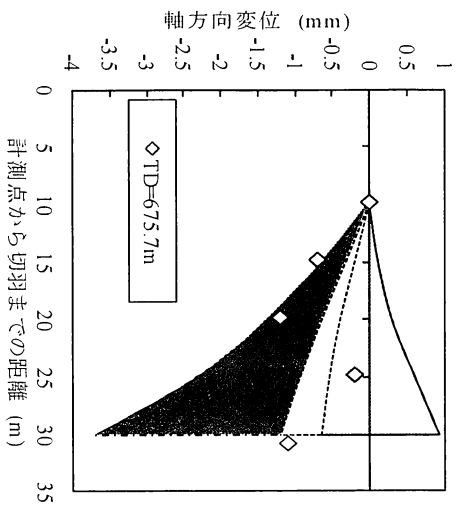


図-10(b)

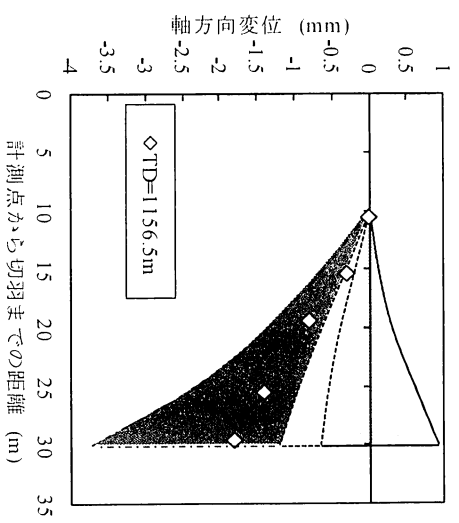
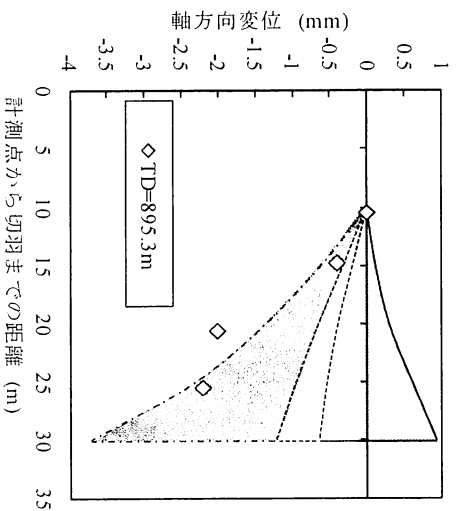


図-10(c)

図-10 予測法とヒ尾トンネルの軸方向変位の一致状況

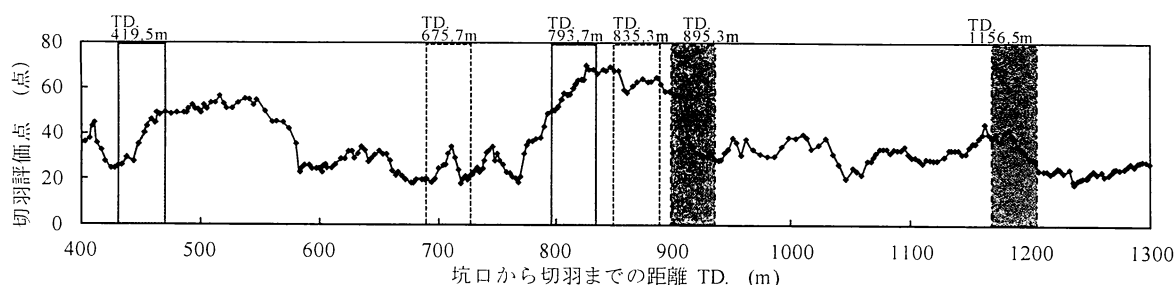


図-11 計測点位置と切羽評価点挙動の推移

七尾トンネルにおける切羽評価点の分布図を図-9に示す。TD.440～580m区間の切羽評価点はおおむね50点、TD.780～900m区間ではおおむね60点を示している。また、TD.590～770m区間およびTD.910～1,300区間では、切羽評価点はおおむね30点を示しており、良好な地山と軟弱な地山が交互に出現する地山状況であったことがこれらの図から読み取れる。

(3) 検討結果

本研究において提案した予測法を七尾トンネルにおいて計測された軸方向変位データに適用させた。検討結果の一例を図-10に示す。

図-10 (a) は、計測点TD.419.5mおよびTD.793.7mの軸方向変位である。図からわかるように、計測された軸方向変位は赤色の領域内にほぼ分布し、掘削進行側に変位しており、計測変位から前方地山は良くなると予想される。図-11に示すように、これらの計測点は、TD.419.5mの切羽評価点は27.5点から最終的には49.25点へと増加し、その差21.75点程度前方地山の状況が良くなっている。また、計測点TD.793.7mにて計測された変位データにおいても、それに対する切羽評価点は49.13点から67.75点へと増加し、18.63点程度良くなり軸方向変位による予測とよく一致する。

図-10 (b) は、計測点TD.675.7mおよびTD.835.3mの軸方向変位である。図からわかるように、計測された変位データは緑色の領域を挟むようにしながら全体に坑口側に増加しており、計測変位から地山状況はあまり変化しないことが予想される。図-11に示すように、これらの計測点は、計測点TD.675.7mの切羽評価点は18.55点から19.75点とその変動はわずかに1.2点程度である。また、計測点TD.835.3mの切羽評価点は66.5点から64.75点とわずかに1.75点の変化であり切羽が進行しても切羽評価点にあまり変化が見られない。

図-10 (c) は、計測点TD.895.3mおよびTD.1156.5mの軸方向変位である。図からわかるように、計測された変位データは青色の領域内に分布し、急激に軸方向変位が坑口側に増加しており、計測変位から前方地山が悪化することが予想される。図-11に示すように、これらの計測点は、TD.895.3mの切羽評価点は58.5点から

33点へと減少し、その差25.5点程度低下している。また、計測点TD.1156.5mの切羽評価点は38点から24点へと減少し14点程度も低下し、切羽進行とともに切羽評価点により悪くなり軸方向変位による予測とよく一致する。

これらの結果から、3次元数値解析シミュレーションに基づき、軸方向変位の発現状況により地山状況の変化を推定する予測法は切羽評価点の変遷とよく適合する結果を得ることができた。したがって、本研究で提案した軸方向変位を用いた予測法は、施工中のトンネルにおいて適用性が高いと考えられる。今後、現場データを収集し、その適用性の評価を行っていきたい。

5. 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は前方地山状況の変化の影響を受けた挙動を示すことは既往研究により明らかであった。そこで、より現場計測データを活用するため、施工時における計測状況を考慮した数値解析シミュレーションを行った結果、前方地山の硬軟により、軸方向変位挙動が変化すること、そして、軸方向変位は物性値の変化する断面に近づくほど、その変化特性は大きくなることがわかった。この特性を活用した新たな前方地山状況の予測法を考案し、施工中のトンネルで計測された軸方向の変位データを用いて適用性の検討を行った結果、本研究において考案した予測法は、施工中のトンネルにおいて適用性が高いことが明らかとなった。

今回提案している軸方向変位は、現在の3次元光波測距儀では必ず取得されている情報であり、その活用には何の新たな費用負担も生じない。したがって、今後は、軸方向変位から切羽前方の地山状況の悪化が予測される場合は、先進ボーリング等を合わせて実施し、悪化する地点を事前に把握する⁴⁾などの、前方探査実施への判断資料への適用などの活用が期待される。

謝辞：トンネル現場への適用に際して、快く坑内変位の計測データを提供いただき、研究にご協力下さいました西松建設株式会社七尾トンネル出張所の皆様、また、研究の進展に対し、様々な助言をいただきました同社土木設計部大谷達彦氏に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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) 赤木渉, 佐野理, 進士正人, 西琢郎, 中川浩二 : 山岳トンネル施工支援のための切羽評価法の適用性に関する研究, 土木学会論文集, No.686/VI-52, pp.132-134, 2001
- 4) 山下雅之, 石山宏二, 木村哲, 福井勝則, 大久保誠介 : 長尺さく孔データと岩盤強度の関係に関する検討, 土木学会第 61 回年次学術講演会, 論文番号 3-333, pp.661-662, 2006

THE FORWARD GROUND PREDICTION BASED ON THE AXIAL DISPLACEMENT BEHAVIOR OF THREE DIMENSIONAL CONVERGENCE MEASUREMENTS

Izum TAKEMURA, Masato SHINJI,
Natsuki KITO, Tatsunori CHIJIWA and Koji ISHIYAMA

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. According this result, the authors propose the forward ground prediction method based on the axial displacement of the three dimensional convergence measurements. And the authors also applied this method to the Nanao Tunnel's field measurement data to verify its applicability.