

トンネル天端の傾斜計測による 切羽前方および近傍の地質評価

谷 卓也¹・山上 順民¹・青木 智幸¹・工藤 直矢²・田中 茂³

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター (〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬344-1)

E-mail: takuya.tani@sakura.taisei.co.jp

²正会員 大成建設株式会社 関西支店 (〒542-0081 大阪府大阪市中央区南船場1-14-10)

³正会員 東亜エルメス株式会社 (〒893-0045 鹿児島県鹿屋市田淵町1475-4)

土被りが大きい山岳トンネル工事においては、弾性波探査やボーリング探査といった事前調査の技術的およびコスト的な制約から、施工前に十分な情報を得られないまま工事が開始されることが多い。そのため、安全性の確保や効率的な施工にとって坑内から行う切羽前方探査は重要性が高い。また、不良地山への対応の遅れは、広範囲に及ぶ大きな変形や切羽の不安定化を引き起こし、工程や工費に大きなインパクトを与えることになる。そこで著者らは、トンネル天端に生じる僅かな傾斜を日常の計測管理として一定間隔かつ継続的に観測することにより、切羽前方約20mまでの不良地山の存在を早期かつ確実に捉える手法を開発してきた。本稿では開発した切羽前方の地質変化の評価方法、および評価結果を視覚的な情報としてトンネル技術者に与える方法について報告する。

Key Words : mountain tunnel, field measurement, forward prediction, inclinometer, information-oriented construction

1. はじめに

トンネル切羽前方の地質状況の変化を、坑内で観測された変位から評価する手法については、近年いくつかの研究例がある。Schubert¹⁾は、トンネルの掘削進行に伴うトンネル軸方向の変位(L)と天端沈下(S)の比(L/S)の評価から、切羽前方の地山状況の予測が可能であることを示している。さらに、Vavrovsky²⁾は、トンネルの距離程に沿って坑内変位を連続的にプロットする“たわみ曲線”による切羽前方地山状況の予測方法を開発しており、オーストリアで10年来の実績がある。一方、小泉³⁾は3次元モデルを用いて内空変位計測データを与条件とした逆解析を行い、切羽前方地盤の弾性係数を求める方法を示している。

これらの地山の三次元的変形挙動を考慮した坑内変位計測による切羽前方地山予測方法の内、青木⁴⁾および工藤⁵⁾はオーストリアで発達してきた手法¹⁾²⁾を日本国内のトンネル現場で得られた計測データに適用し、切羽前方地山状況予測の可能性を確認している。しかし、同時にトータルステーションの測定精度の限界から、トンネル軸方向の測定精度が場合によっては十分でなく、天端沈下が小さい場合にはL/Sがばらつく問題点を指摘し

ている。

この問題に対し、工藤⁶⁾は掘削に伴う地山の挙動をより高精度かつ高頻度に計測し、切羽前方の地山状況を予測する方法を示した。これがトンネル天端に傾斜計を設置しトンネル軸方向の微小な傾斜角度の変化を計測し傾斜角度の大小により切羽前方地山の硬軟の変化を予測する方法である。また、数値解析による理論的な裏付けと予測の有効性を実際のトンネル施工現場において確認している⁶⁾。その後も、天端傾斜計による予測を施工現場で行い、切羽前方の不良化の予兆を捉えている⁷⁾⁸⁾。

本報告では、現場運用を通じて改良された現行の傾斜計の仕様および外観を示すとともに、切羽前方の地質を予測する方法について述べる。さらに、切羽前方に存在が予測された不良地山の位置と変形係数の関係についての検討結果と視覚的な情報としての表示例を示す。

2. 傾斜計測による切羽前方地山の評価方法

本章では、傾斜計および計測方法の概要、傾斜角のトレンドから切羽前方の不良地山を評価・予測する方法を述べる。

(1) 傾斜計の仕様と計測方法の概要

表-1に切羽前方の地山状況を評価するために天端に設置する傾斜計の仕様を示す。また、現場での運用を考慮して小型・細径化された傾斜計の外観を図-1に示す。このセンサーは、再利用を考え2重構造となっている。外

表-1 傾斜計の仕様

外径(mm)	42(外管) 34(内管)
長さ(cm)	60(外管) 37(内管)
質量(kg)	0.8
測定範囲(°)	±15
測定分解能(°)	0.001
動作温度(°C)	-10～80
電源	Li-ion 電池
動作電圧(V)	3.1～4.4
メモリ	EEPROM
記録容量	2,000, FIFO
測定インターバル	1, 2, 3, 5, 10, 20, 30min
無線規格	Bluetooth (Class 2)

管の材料は塩ビ管または鋼管である。この傾斜計を図-2に示すように、切羽後方1 mの位置に5 m間隔で設置していく。切羽から離れたセンサーは外管を地山内に残し、センサーやデータロガー等を内蔵する内管を回収し切羽近傍に盛替える。傾斜計測は山岳トンネルで実施される内空変位や天端沈下と同様に、日常管理計測の1つとして実施する。

傾斜角度を観測するセンサーは、取り扱いが容易で小型軽量であるため、数分以内にそれらを設置することができる（図-3参照）。ロックボルトと同径の孔に挿入し、固定も定着用のドライモルタルを使用でき、パターンボルトの施工時にセンサー設置が行える。データは自動的に内蔵メモリーに書き込まれ、適宜Bluetooth 無線システ

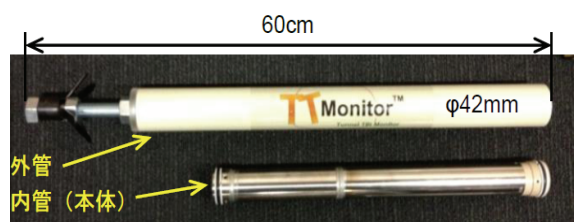


図-1 傾斜計の外観

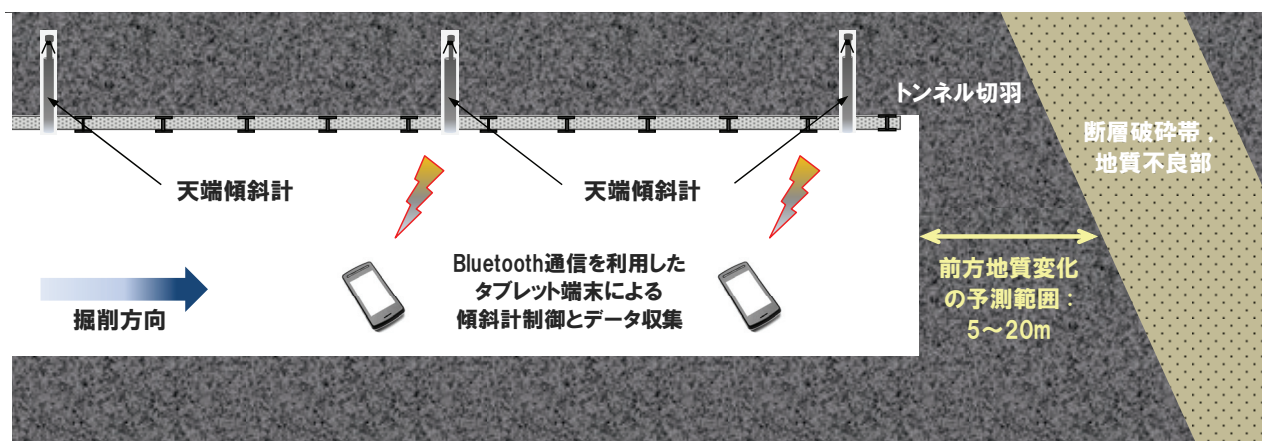
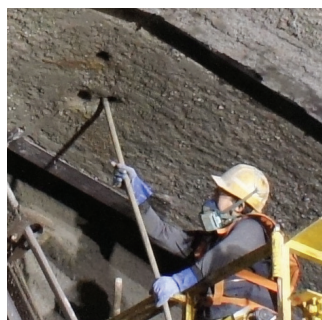


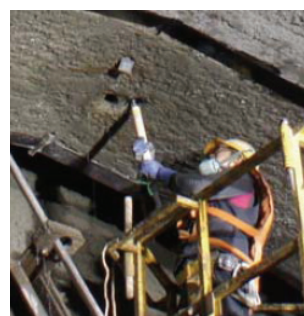
図-2 計測概要



(a) センサー設置孔の削孔



(b) 固定用モルタル注入



(c) センサー挿入

図-3 センサーの設置状況

ムを介して転送・取得できるため配線の養生も要しない。そのため、従来の計測のように切羽を占有することなく、施工サイクルにはほとんど影響を与えることなく地山を予測するための計測を実施することができる。

(2) 切羽前方地山の評価手法

掘削進行に伴ってトンネル天端に微小な傾斜変化が生じるメカニズムと傾斜角のトレンドから切羽前方地山に存在する不良地山の兆候を捉える方法について述べる。

(a) 傾斜変化が生じるメカニズム

傾斜変化が生じるメカニズムについて、図4と図5に示す模式図を用いて説明する。これらの図は円形トンネルの縦断面図であり、トンネル周囲の変位の分布状況を示している。説明のため、図中の変位は誇張されている。

トンネルの掘削が進むと、図4中の矢印の方向に地山がトンネルの内空方向に変形する。図中の切羽位置（断面A）に着目すると、トンネル掘削による全変位量に対し、約30%の変位が切羽到達時に生じている。切羽通過後は掘削の進行とともに急速に変形が進み、図4中の赤点線で示した位置で収束する。

以上のような状況から、切羽付近では、切羽からの距

離差により内空側への坑壁の変位量に差が生じている。図5(a)に示すように、切羽に近づくほど天端の変位が小さく、鉛直方向で考えると天端の沈下が少なく坑壁が高い位置にあることが分かる。図5(a)のB点の断面位置の天端に鉛直に傾斜計を設置し、掘削が進んで切羽が十分に離れると、B点近傍の坑壁の状況は図5(b)に示す状態となり、傾斜計の頭部は切羽側に傾く。

(b) 切羽前方の不良地山の予測方法

傾斜計で観測される傾斜角度は、主に設置した箇所の地山の硬軟に応じて変化する。この傾斜角度の大きさは、掘り進んでいく前方地山の硬軟の影響も受けることが三次元の数値解析検討から明らかになっている。開発した手法は、この性質を利用して切羽前方の地山の硬軟を予測する。

地山の予測に際しては、傾斜角の変化の傾向を評価するためのグラフが必要である。次項で、切羽前方地山の地質状況を予測するためのグラフ（以降「予測グラフ」と称する）の作成方法について述べる。切羽前方の地山状況を予測するためには、傾斜計を設置後、切羽がある程度進んだ時点で計測結果を整理して予測グラフを作成する必要がある。地山の変化予測を迅速に、かつ予測に

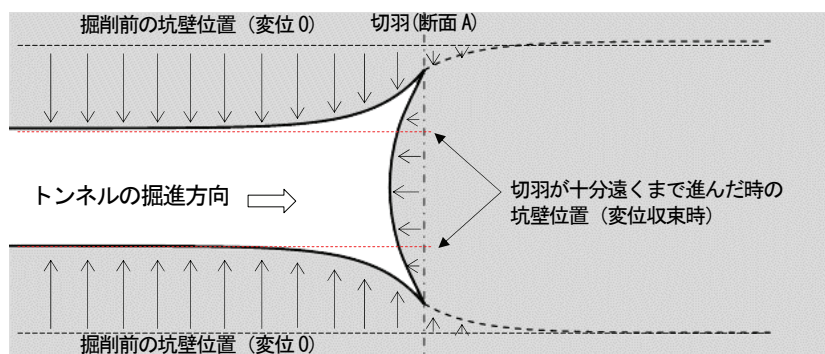


図4 トンネルの縦断面方向変位分布（縦断面図）

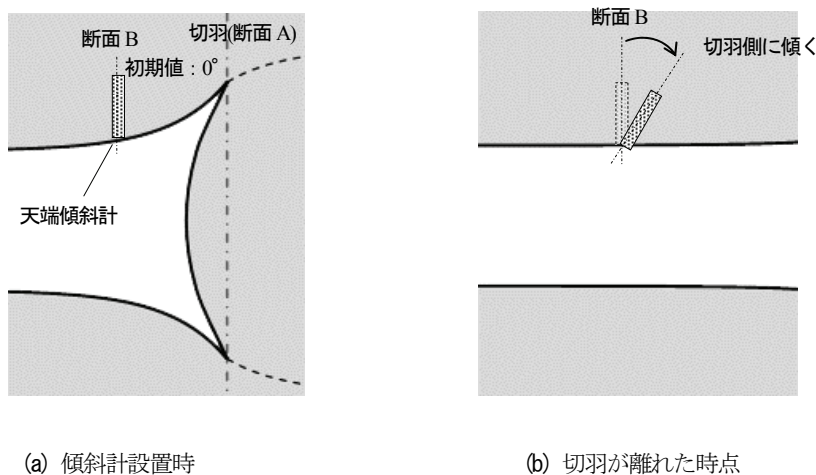


図5 天端に傾斜が生じるメカニズム

必要なデータが取得できるタイミングとして、計測開始より、数掘削分程度で生じる角度変化を計測すれば良い (Kudoh et al., 2012b)。図-6は、傾斜計の設置間隔が5mで、切羽離れ3m時点での傾斜角度をプロットした予測グラフの例である。傾斜計の設置後、傾斜角度は連続かつ自動で計測・取得されているので、データ整理は任意の切羽離れで行うことができる。しかしながら、予測グラフは必ず同じ切羽離れのデータで作成する必要がある。均質な地山が続けば、各計測断面における傾斜角度は同じ値となり、予測グラフは平らになる。計測位置の周囲および切羽前方の地山状況が変化すると、予測グラフの形状に変化が現れる。

3. 現場における前方地質の予測結果

現場における本手法の実証試験を、3つの山岳トンネルプロジェクトの4区間で行った^{6),7),8),9)}。いずれも、中生代の堆積岩を主として構成される地山で、土被りは60から200mであった。最初の3つの実証試験は地山の硬軟が急激に変化する地質境界を有する区間であったが、最新

の試験区間は、地山の硬軟変化は穏やかで、その差も小さかった。初回から3回目までの実証試験では、いずれも地山が不良化する前に傾斜角度の特徴的な変化傾向を確認し、その兆候を捉えることができた。ここでは中生代の非常に脆弱な地山で実施した3回目のテスト結果について予測グラフを示す。この実証試験で、最も明瞭に不良化の予兆を捉えたためである。この試験で得られた予測グラフを図-7に示す⁸⁾。

図-7には予測グラフを赤い実線で示すとともに、坑内変位計測から得られた天端沈下のグラフも点線で示す。また、切羽安定性の指標となる切羽評価点と、採用した支保の区分を合わせて示した。この予測グラフは切羽離れ4mでの傾斜角のトレンドを示している。傾斜計測を始めたTD1390は亀裂が多く乱された地質状況ではあったが、切羽は安定していた。その後切羽評価点が10点を下回るような最も脆弱な地山区間手前のTD1416の計測点において、直前の計測断面のTD1406と比較して傾斜角度の変化量が約 0.2° と突然大きくなり、切羽前方の地山の変化の予兆を鋭敏に捉えていることが分かる。

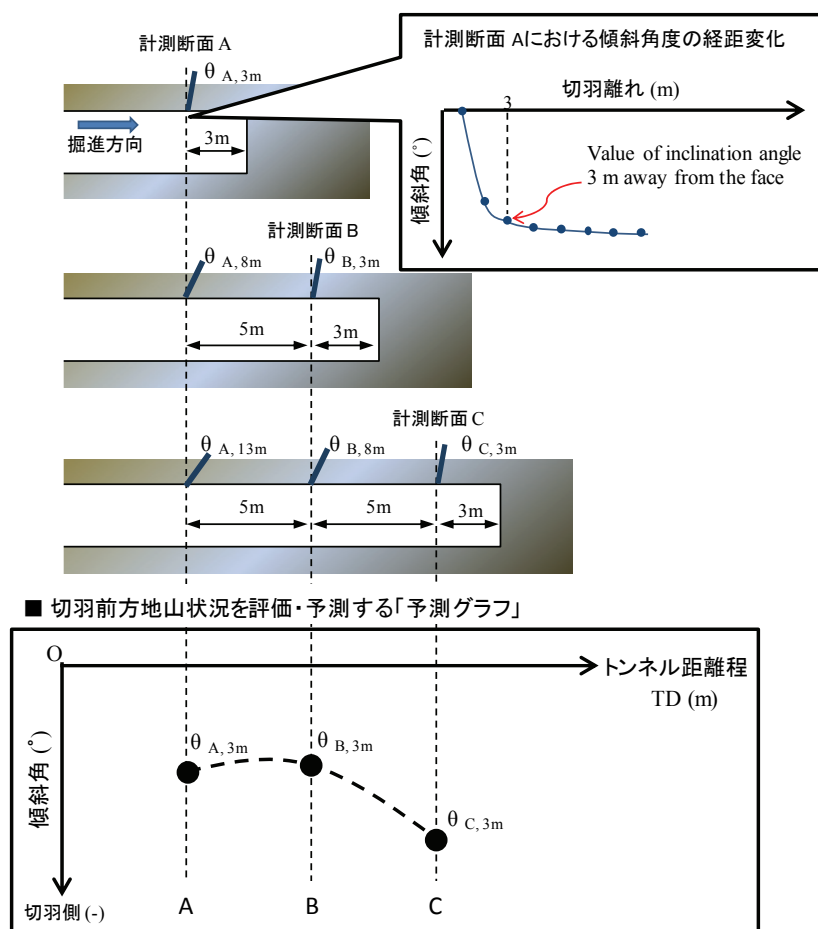


図-6 予測グラフの描き方

4. 切羽前方に予測される不良地山の表示方法の検討

筆者らが提案する切羽前方地山の予測方法では、傾斜角度の変化を捉えた場合、同じ変化量であっても不良化の程度によって切羽前方の不良地山境界の位置が異なる。従って、予測結果は不良地山の程度と距離の関係で表現されることになる。以下、種々の地山条件下における予測範囲を検討した先の3次元数値解析の結果¹⁰⁾を利用して、地山予測図を検討した結果について述べる。

(1) 3次元数値解析結果

検討には有限差分法解析コードFLAC3D¹¹⁾で行った3次元逐次掘削解析の結果の内、側圧係数1.0、土被りが700mで地山等級CI（弾性係数E:2000 MPa相当）から更に脆弱な地盤に変化する3つのケースを利用する（図-8参照）。図-9は、それぞれ地山がCIからCII（E:1000MPa）、

同DI（E:500MPa）、同DII（E:150 MPa）に変化する場合の切羽離れ3 m時の傾斜角をトンネル軸方向に連続してプロットした予測グラフである。現場における運用では、傾斜計を5 m毎に設置するが、解析結果を分析に使用するため1 m毎に傾斜計測断面を設定した結果を示す。

(2) 解析結果による不良地山境界と不良化程度の関係についての検討

前節の3ケースの解析結果について、不良化の度合いと不良地山位置の関係を判定する評価図を作成するために、切羽前方の不良地山が坑口側のトンネル天端に与える影響の程度（傾斜角の大きさ）を図-10にまとめる。図-10は、図-9の各予測グラフの結果を想定縦断地質図上に、地質境界から十分に離れた地質均質区間における一定値からの差分値とその値を示す位置を模式的に表している。図-10中の切羽位置はCIからDIに変化する場合に、その不良化の兆候を開発した傾斜計の分解能0.001°に

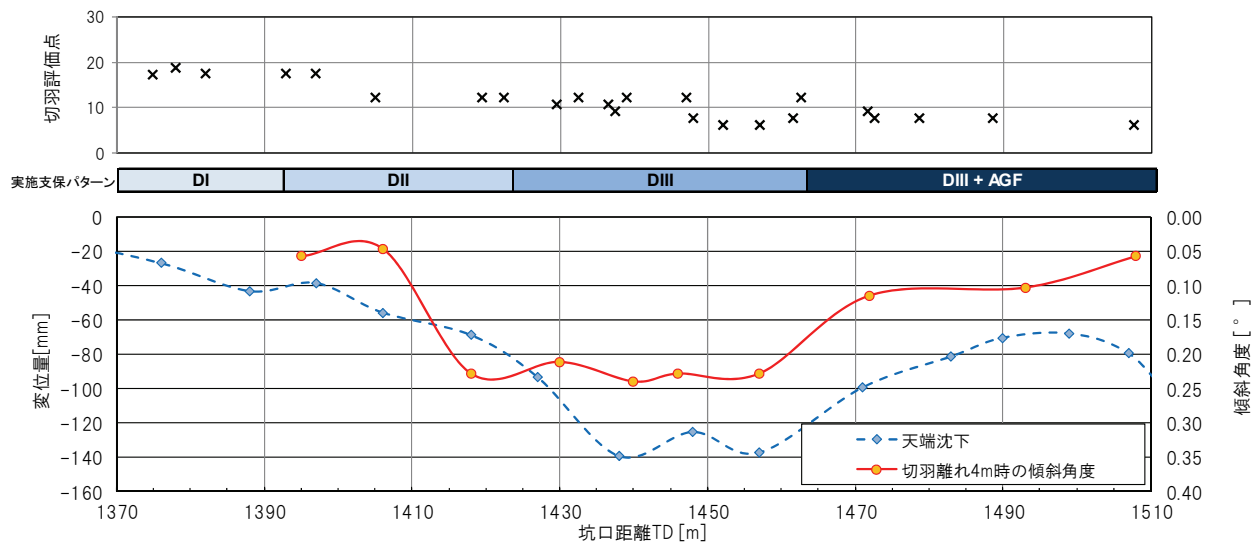


図-7 切羽評価点および坑内変位の最終値と切羽離れ4mにおける傾斜角度のトレンド

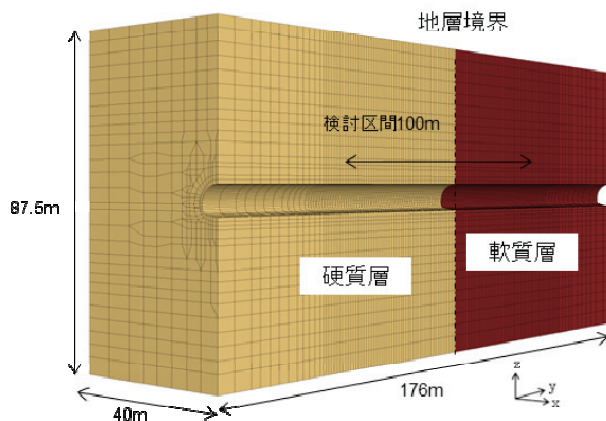


図-8 3次元解析モデル

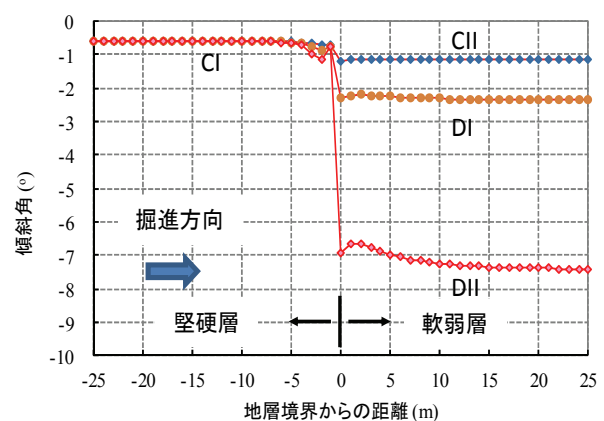


図-9 3次元解析モデル

において最も遠方で検出できる位置（切羽離れ17 m）として設定し描いている。

図-10より、土被り700 m、掘削中有の地山の弾性係数がE：2000 MPa（CI相当）、切羽前方に不良地山が存在する場合、0.01°の精度を有する傾斜計では図中の青丸で示される位置でその予兆を捉えられることが分かる。このときの予測距離を傾斜計の分解能が0.005°、0.001°の場合も合わせて表-2に示す。

(3) 切羽前方の地山状況の予測・評価

2章では、現場で観測した傾斜角による予測グラフが、切羽前方地山の不良化の前兆を捉えられたことを述べ、図7にその一例を示した。また、前節までに土被り700m、

表-2 傾斜計の分解能と予測可能な不良地山境界までの距離

傾斜計の分解能	予測可能な不良地山境界までの距離 (m)		
	CI-->CII	CI-->DI	CI-->DII
0.001°	14	17	17
0.005°	5	7	9
0.01°	3	5	6

側圧係数1.0の場合における傾斜角度の解析結果を示し、不良化の度合いにより前兆を捉えることのできる距離が異なる事を示した。ここでは、現場技術社が切羽前方の地質状況の不良化を具体的にイメージできるよう、ある計測断面で傾斜角度の増分値が観測された時、切羽前方の不良地山の位置と弾性係数の関係を求める。表-3は所定の傾斜角の増分値を示した時の地質変化点までの距離をまとめたものである。距離を求める際は、図-9に示した傾斜角度の距離変化を関数近似し、内挿することにより1m単位以下の距離についても計算して求めた。

表-3に示した結果から、傾斜角（増分値）と地質変化点までの距離の関係をプロットすると、図-11を得る。この図のような傾斜角と地質変化点までの関係図が得られれば、傾斜角の最新値から予測される切羽前方地山の不良化度合いと存在する位置に関する情報を得られる。

5. まとめ

山岳トンネルの施工時に、天端付近の傾斜角を一定間隔で観測することにより、切羽前方地山の不良化の予兆を捉える原理と現場計測における予測例を示した。また、

表-3 各地山条件における傾斜角と地質変化点までの距離

地山変化	各傾斜角を示す場合の地山変化点までの距離(m)				
	0.001°	0.005°	0.01°	0.02°	0.05°
CI-->CII	13.6	8.0	6.4	5.1	3.8
CI-->DI	17.9	10.4	8.3	6.5	4.8
CI-->DII	21.1	12.3	9.7	7.7	5.7

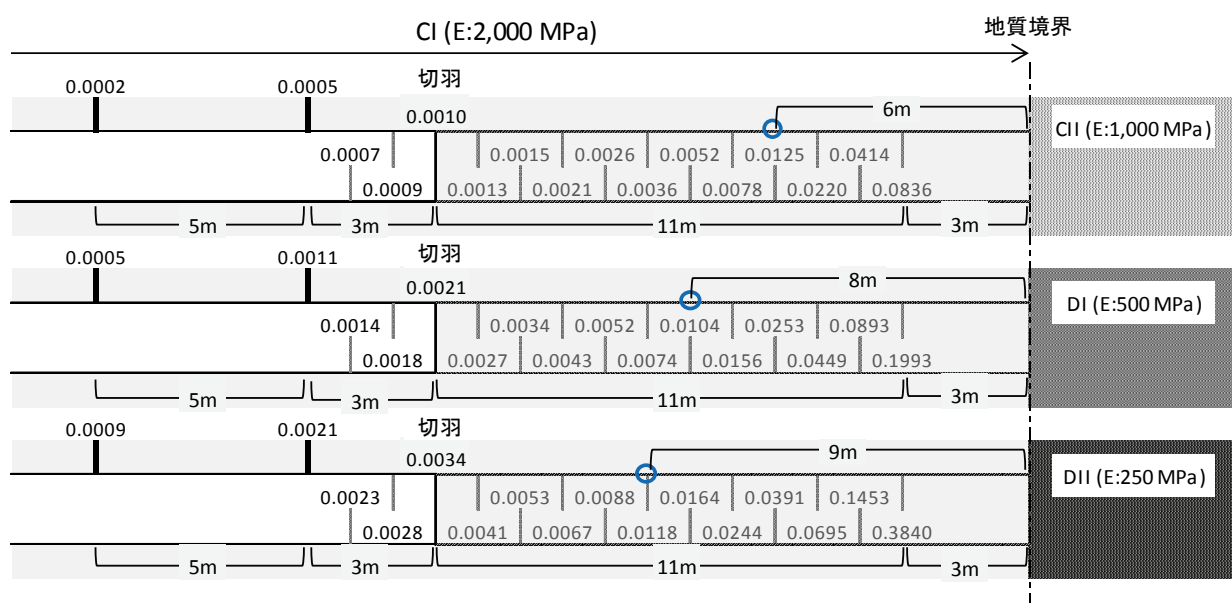


図-10 切羽前方の不良地山境界からの距離と傾斜角（増分値）の分布図

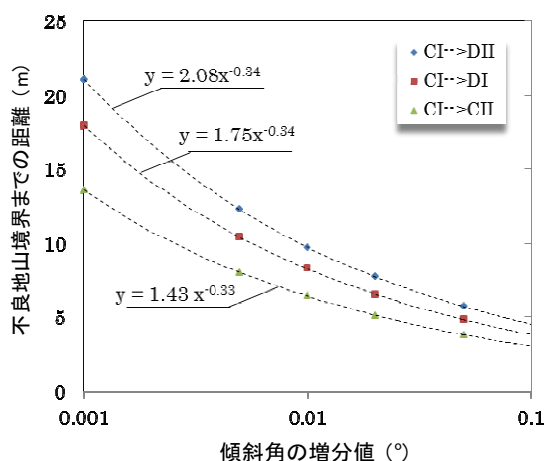


図-11 予測される不良地山までの距離と不良化程度の関係

過去に行った数値解析について3種の地盤の弾性係数が変化するケースを再検討し、観測した傾斜角からどの程度の不良地山が出現するのか、また不良化の度合いと切羽前方の不良地山までの距離の関係について視覚的に把握できる図を得ることができた。これにより、切羽前方地山の評価結果を効果的に施工に反映できるようになったと考える。

今後は、検討対象としていない土被り条件、地山変化パターンの評価結果についてもまとめ、地山警報および地山評価・予測結果の表示装置も含めた切羽前方地質評価システムの運用を行い、本技術を醸成していきたい。

参考文献

- 1) Schubert, W. and Budil, A. : The Importance of Longitudinal Deformation in Tunnel Excavation. *Proc. of 8th Int. Congress on Rock Mechanics (ISRM)*, Tokyo, 3, pp.1411-1414, 1995.
- 2) Vavrovsky, G.-M. and Schubert, P. : Advanced analysis of monitored displacements opens a new field to continuous-

ly understand and control the geotechnical behaviour of tunnels. *Proc. of 8th Int. Congress on Rock Mechanics (ISRM)*, Tokyo, 3, pp.1415-1419, 1995.

- 3) 小泉直人, 川原睦人, 黒田千歳 : トンネル周辺地山の違いによる切羽天端部の軸方向変位の挙動について, トンネル工学報告集, Vol.19, p.211-217, 2009.
- 4) 青木智幸, 今中晶紹, 板垣賢, 領家邦泰, 金尾剣一, 櫻井春輔 : トンネル坑内変位計測による切羽前方地山予測, 大成建設技術センター報, 第43号, No.4, 2010.
- 5) 工藤直矢, 坂井一雄, 青木智幸, 友野雄士, 三谷一貴 : 坑内変位計測結果を用いた切羽前方地山予測, トンネル工学報告集, 第21巻, pp.127-133, 2011.
- 6) 工藤直矢, 坂井一雄, 青木智幸, 友野雄士, 三谷一貴 : トンネル天端傾斜計測による切羽前方地山予測, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.23-28, 2012.
- 7) 工藤直矢, 青木智幸, 中原史晴, 上岡亮一 : 天端傾斜計によるトンネル切羽前方地山予測, 第67回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-095, pp.189-190, 2012.
- 8) 谷卓也, 工藤直矢, 青木智幸, 上岡亮一 : トンネル天端の傾斜計測による切羽前方地山の地質評価, 資源素材学会 2013年春季大会講演集, No.2516, pp.280-281, 2013.
- 9) 谷卓也, 青木智幸, 工藤直矢, 加藤 宏征, 藤本昭弘, 三隅宏明, 山下学 : トンネル切羽前方の地山評価に用いる小型傾斜計の現場運用結果, 第69回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-201, pp.401-402, 2014.
- 10) Tani, T., Kudo, N., Aoki, T. and Sakai, K.: Analytical study on the effectiveness of ground condition prediction ahead of a tunnel face by measuring the inclination at the tunnel crown. The 13th Japan Symposium on Rock Mechanics & The 6th Japan - Korea Joint Symposium, JKJS-13, pp.887-892, 2013.
- 11) Itasca Consulting Group, Inc. : Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D) ver.3.1.2006.

(2014.9.15 受付)

EVALUATION OF GROUND CONDITIONS AHEAD OF TUNNEL FACE BY INCLINATION MONITORING DURING EXCAVATION

Takuya TANI, Masahito YAMAGAMI, Tomoyuki AOKI, Naoya KUDO
and Sigeru TANAKA

The authors have examined effective prediction methods to the ground conditions ahead of a tunnel face under construction of mountain tunnels⁴⁾ in view of the established method¹⁾ in Austria. Though the prediction method of Austria requires the displacement in the direction of tunnel axis, it is difficult to obtain its accurate data by the total station. Then, we have proposed a method that uses tilt sensors installed at the tunnel crown near the face to obtain the slight tilting angles. To measure inclination of the tunnel crown, this inclinometer was originally developed as a daily control measurement, such that the geological condition and its possible change behind the face could be detected early, and a steady advance and construction safety could be ensured. This paper describes the method of forward prediction mechanism and advantages of this suggested method. It then presents the typical results of a field verification test at a tunnel under construction and an example of evaluation of the ground conditions ahead of the face based on the 3D numerical analysis in three types of condition changes of ground deformation moduli.