トンネル天端傾斜計測による切羽前方地山予測

工藤 直矢[1*]・坂井 一雄[1]・青木 智幸[1]・友野 雄士[2]・三谷 一貴[2]

[1]大成建設株式会社　技術センター土木技術研究所（〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1）
[2]大成建設株式会社　関西支店国道365号椿坂トンネル工事（〒529-0536 滋賀県長浜市余呉町新堂200-1）
*E-mail: kdunoy00@pub.taisei.co.jp

土被りの大きい山岳トンネルでは，掘削対象地山の状態を精度良く事前に調査することは難しい．そのため，施工時に切羽前方の地山状況を簡易に知ることができれば，施工の効率性や安全性の向上に大きく貢献できる．これまで，坑内変位計測結果を利用する切羽前方地山予測手法が提案されてきたが，計測頻度や精度の上で課題があった．このような背景から，著者らは，トンネル天端においてトンネル軸方向の傾斜角度の変化を計測し，迅速かつ高精度に地山の硬軟の変化を予測する手法を考案した．本稿では，三次元解析により上記手法の予測可能性について検討した結果を示す．また，施工中の山岳トンネル（国道365号椿坂トンネル）において，現場実証試験を行った結果について報告する．

Key Words : *crown of tunnel, inclination, inclinometer, field measurement, forward prediction*

1. はじめに

山岳トンネル工事では，時に地表面下数百mを掘削することもあり，掘削する地山の条件を事前に詳しく把握することは難しい．そこで，坑内変位計測などによる情報化施工を実施し，これらの結果を設計・施工にフィードバックするのが一般的である．

通常，坑内変位計測は，10m～30m 間隔に設置した計測点の変位を，一日1～2回の頻度で計測する．近年の計測技術の進歩により，この坑内変位計測は，トータルステーションを用いて行われることが通例となり，トンネル軸方向の変位を含む，計測点のXYZの三次元的な挙動を容易に捉えることができる．

オーストリアでは，この坑内変位計測結果を利用して，切羽前方の地山状況を予測する手法が，Schubertら[1)]やVavrovskyら[2)]により提案され，使用されている．

これまでに著者らは，これらの予測手法を，実施工トンネルに試験的に適用した[3), 4), 5)]．その結果，上記手法の有効性や実用化の可能性をある程度確認することができた．しかし，以下の問題点があった．

① トータルステーションは，距離の測定精度が3mm程度である．このため，トンネル軸方向の変位の絶対値が小さい場合，測定誤差の影響を大きく受ける．

② 上述の，一般的な坑内変位計測の計測間隔・頻度では，計測断面間の地山の変化を見逃してしまう可能性がある．

このような背景から，著者らは，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手法を考案した．この手法は，トンネル天端においてトンネル軸方向の傾斜角度の変化を計測するものである．取得した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手法である．

本稿では，まず，事前に実施した三次元逐次掘削解析の結果を示し，上記手法の予測可能性について説明する．次に，本手法の計測システムの概要について示し，施工中の山岳トンネルにおいて，現場実証試験を行った結果について報告する．

2. 三次元逐次掘削解析による予測可能性の検証

(1) 目的

著者らはこれまで，Schubertら[1)]の提案する，坑内変位計測結果を用いた切羽前方地山予測手法について，その原理を詳細に検討した[4), 6)]．この手法では，トンネル天端におけるトンネル軸方向変位(L)と天端沈下(S)の比である，L/Sという値を用いる．このL/Sは，硬質層から軟

弱層に掘削した場合，切羽が軟弱層に達する前から，軟弱層の影響を受けて変化する性質を持つ．

傾斜角度の変化を用いる手法は，上記手法を参考にして開発したものであり，トンネル天端の傾斜角度が軟弱層の手前で変化する性質を利用して，切羽前方地山予測を行うものである．

本章では，本手法の実現可能性を確認するため，事前に実施した三次元逐次掘削解析の結果を示す．

(2) 解析条件

土被りが100mで硬質層の前方に軟弱層が存在する地山条件で，円形断面のトンネル掘削を模擬した三次元逐次掘削解析を実施した．解析には有限差分法解析コードFLAC3D ver3.1 を使用した．

解析モデルを**図-1**に示す．本解析では，地山等級DIからDIIへの掘削を想定し，地山の応力－ひずみ関係は線形弾性モデルで表現した．各地山の物性は旧日本道路公団のトンネル数値解析マニュアル[7]を参考にし，標準的な物性値を設定した．物性値を**表-1**に示す．また，側圧係数はK_0=1.0とし，一次支保はモデル化せず，掘削は全断面で1mずつ行うものとした．

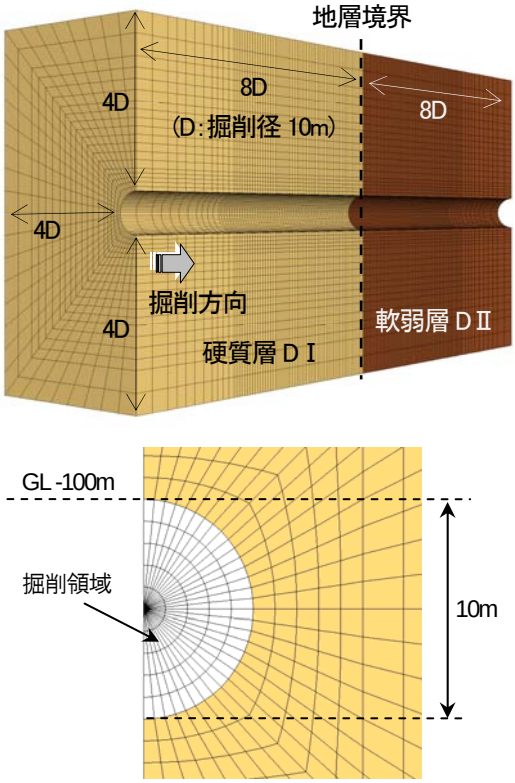


図-1　解析モデル（上：鳥瞰図　下：横断面拡大図）

表-1　地山物性値

地山等級	変形係数 E (MPa)	ポアソン比 ν
ＤＩ	500	0.35
ＤⅡ	150	0.35

次に，天端の傾斜角度の算出方法について述べる．いま，**図-2(A)**の b 点の傾斜を算出することを想定する．まず，**図-2(A)**のように，b 点から見て切羽離れ 1m 時におけるトンネル軸方向の天端部の傾斜を，初期値（傾き 0°）とする．切羽離れ 1m としたのは，実際の傾斜計設置位置を考慮したためである．

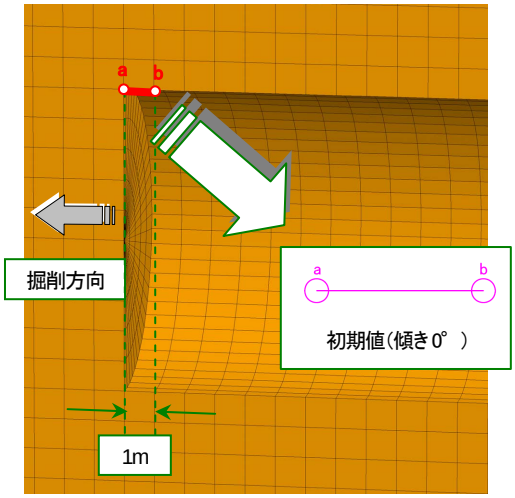
図-2(B)は，**図-2(A)** から切羽が 2m 進んだ状態を示し，その時点での傾斜角度は，図中の式で算出した．なお傾斜角度は，b 点から見て a 点が鉛直方向上向きにある場合を正，下向きの場合を負とする．

(3) 解析結果と考察

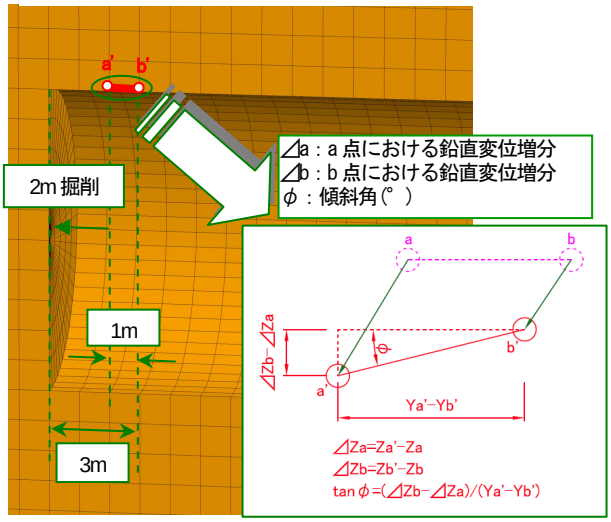
図-3に解析結果を示す．切羽離れ0.5Dおよび1.0D時点での傾斜角度を距離程に沿ってプロットした図である．

以下に考察をまとめる．

- 硬質層および軟弱層ともに，トンネル天端の傾斜角度は負（前方が沈む）となった．これは，例えば前後の地山条件が均一で，切羽離れ1mを初期値とした場合，切羽に近い方（**図-2**ではa点）の天端



(A)　初期値



(B)　切羽離れ 3m 時における傾斜

図-2　天端位置のトンネル軸方向の傾斜算出方法

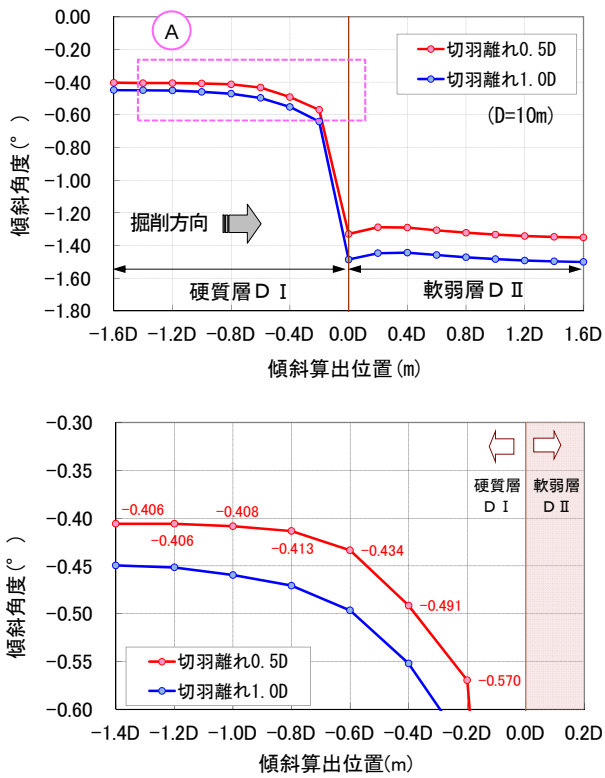


図-3　解析結果（上：全体図　下：A部の拡大図）

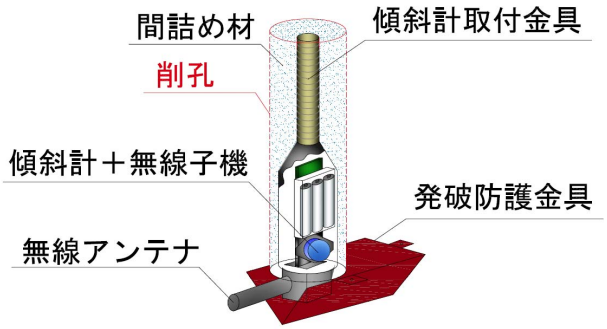


図-4　傾斜計測装置イメージ図

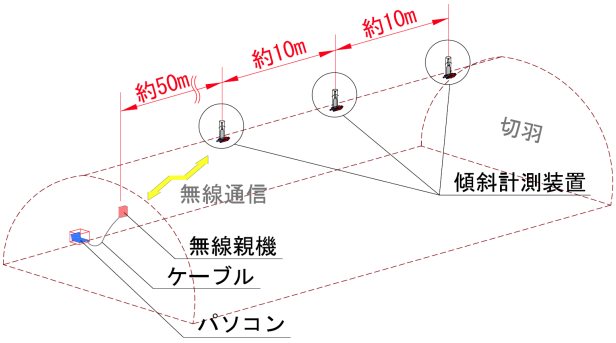


図-5　計測システム概念図

沈下が大きくなることが原因である．

- 硬質層および軟弱層の傾斜を比較すると，軟弱層の方が傾斜角度が大きいことがわかる．これは，軟弱層の方が変形係数が小さいため，天端沈下量が大きくなることに起因する．
- 図-3より，天端の傾斜角度は地層境界から約1.2D程度手前の計測点から前方の軟弱層の影響を受けて，徐々に負の値に大きくなることがわかる．なお，傾斜算出位置-1.2Dから-1.0Dの変化量は，0.002であり，一般的な傾斜計の分解能（0.001°程度）で十分に測定可能である．

したがって，天端の傾斜変化を計測することで，切羽が地層境界に達する前から軟弱層の存在を予測することは可能であることが分かった．

3. 傾斜計測装置の開発

(1) 傾斜計測装置

傾斜計測装置イメージ図を図-4に示す．傾斜計測装置は，傾斜計本体のほかに，無線子機および無線アンテナを備える．本装置で計測したデータは，無線通信によりデータロガーまで逐次送信されるため，通信ケーブルは不要である．したがって，配線やケーブル養生などの掘削を妨げる作業を行わずに，迅速に設置することが可能である．

また，本装置には市販品の傾斜角センサーを搭載したが，その分解能はカタログの仕様で0.001°であり，微小な傾斜角度の変化を精度よくとらえることができる．

なお，飛石による損傷防止のための金具（以下，発破防護金具）を備え付けた．また，本装置は，傾斜計取付金具をネジ構造としており，傾斜計取付金具以外の部分は，すべて回収・転用が可能である．

設置は，下記のような要領で実施した．

① ドリルジャンボに所定のドリルビットを装着し，トンネル天端を鉛直に削孔する．
② 削孔内に傾斜計測装置を挿入し，残った空隙に間詰め材を充填する．
③ 発破防護金具をアンカーで固定する．

(2) 計測システム

計測システム概念図を図-5に示す．本試験では，傾斜計測装置を3台準備し，順次盛替えを行いながら計測を実施した．なお，天端に設置した各傾斜計測装置からは，あらかじめ設定しておいた時間間隔で傾斜計測データが無線で送信される．これを，あらかじめ坑内に設置した無線親機で受信し，ノートパソコンの集録ソフトでデータを取り込む．計測データは，リアルタイムに確認することができる．

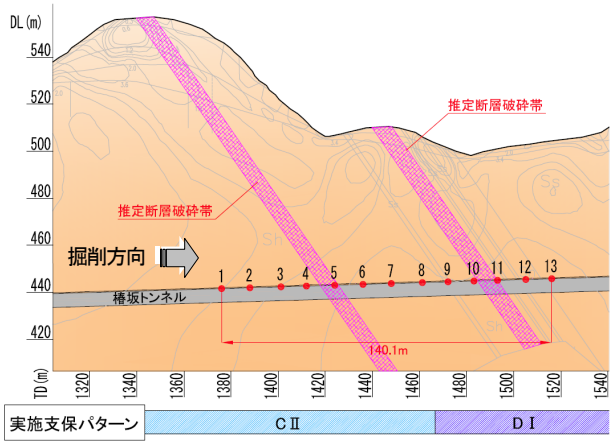


図-6　試験区間縦断図

写真-1　傾斜計測装置設置状況

4. 現場実証試験

(1) 現場概要

椿坂トンネルは，国道365号のうち，滋賀県長浜市余呉町椿坂峠における，全長1842m，掘削外径約10mの山岳トンネル工事であり，NATMにより施工するものである．掘削方法は，概して発破掘削であるが，地山状況に応じて一部機械掘削を実施している．

試験区間縦断図を**図-6**に示す．今回は現場実証試験であるため，事前の地質調査結果より推定された二箇所の断層破砕帯を含む，約140m区間（計13測点）を対象とした．同区間は，主に混在岩（頁岩基質）および砂岩が分布する地質であり，実施支保パターンは坑口側よりCII→DIであった．

(2) 試験実施状況

傾斜計測装置設置状況を**写真-1**に示す．設置に要する時間は，計10分～15分程度であった．

設置箇所は，**図-7**に示すように，切羽から数えて二間目の鋼製支保工間の吹付コンクリート中央部とした．発破防護金具をアンカーで固定するため，吹付コンクリートのある程度の硬化を待って，削孔・設置を行うこととした．

なお，本試験では傾斜計測データの無線送信間隔を5分とした．坑内は重機や車両の往来が多く，無線通信環境は必ずしも良好ではなかったが，無線通信が途切れる

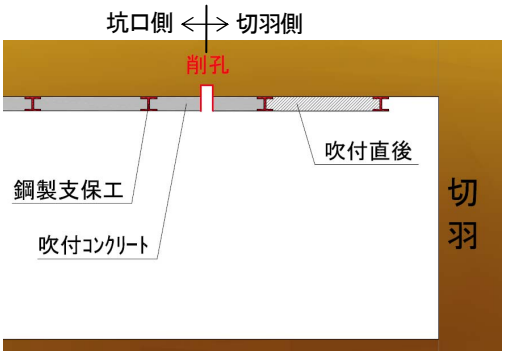


図-7　傾斜計測装置の設置箇所

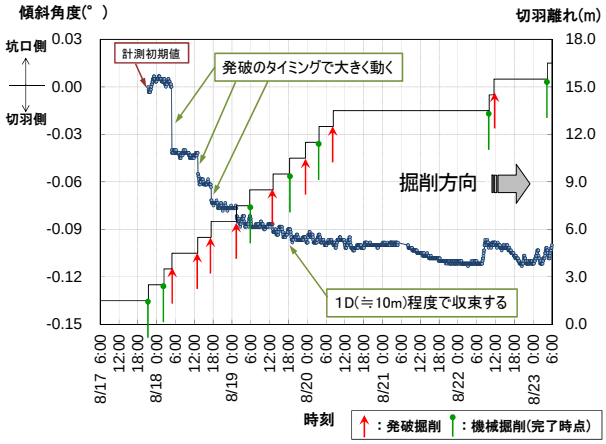


図-8　傾斜角度計測結果（測点 No.11）

等の不具合は発生しなかった．

このように，本装置は設置時間が短く，トンネル掘削の妨げとなる作業が不要である．

5. 傾斜計測結果と考察

(1) 傾斜角度の経時変化

図-8に，測点No.11における，傾斜角度の計測結果を例示する．以下では，全測点で共通に見られた傾向を述べる．まず，発破掘削のタイミング（**図-8**中の↑）で，傾斜角度が急に切羽側へ増加することがわかる．これは，発破掘削により前方地山の応力が瞬時に解放されることに起因するものと考えられる．しかし，傾斜計の設置位置から切羽が離れるにつれて，徐々にその影響が小さくなり，発破時の傾斜角度の変化量が小さくなっている．また，切羽離れ1.0D程度（約10m）になると，傾斜角度の変化はほとんどなくなり，値が収束することが分かる．

このように，従来の坑内変位計測では，測量作業を必要とするため一日1回程度しかできなかった計測が，本装置では連続的にできる．このため，掘削進捗や掘削方式（発破掘削・機械掘削）と，地山の変形量の関係を，明確に把握することが可能となる．今後，施工段階におけるトンネル変形状況の監視や，地山安定対策工の検討に，本データを活用することも期待される．

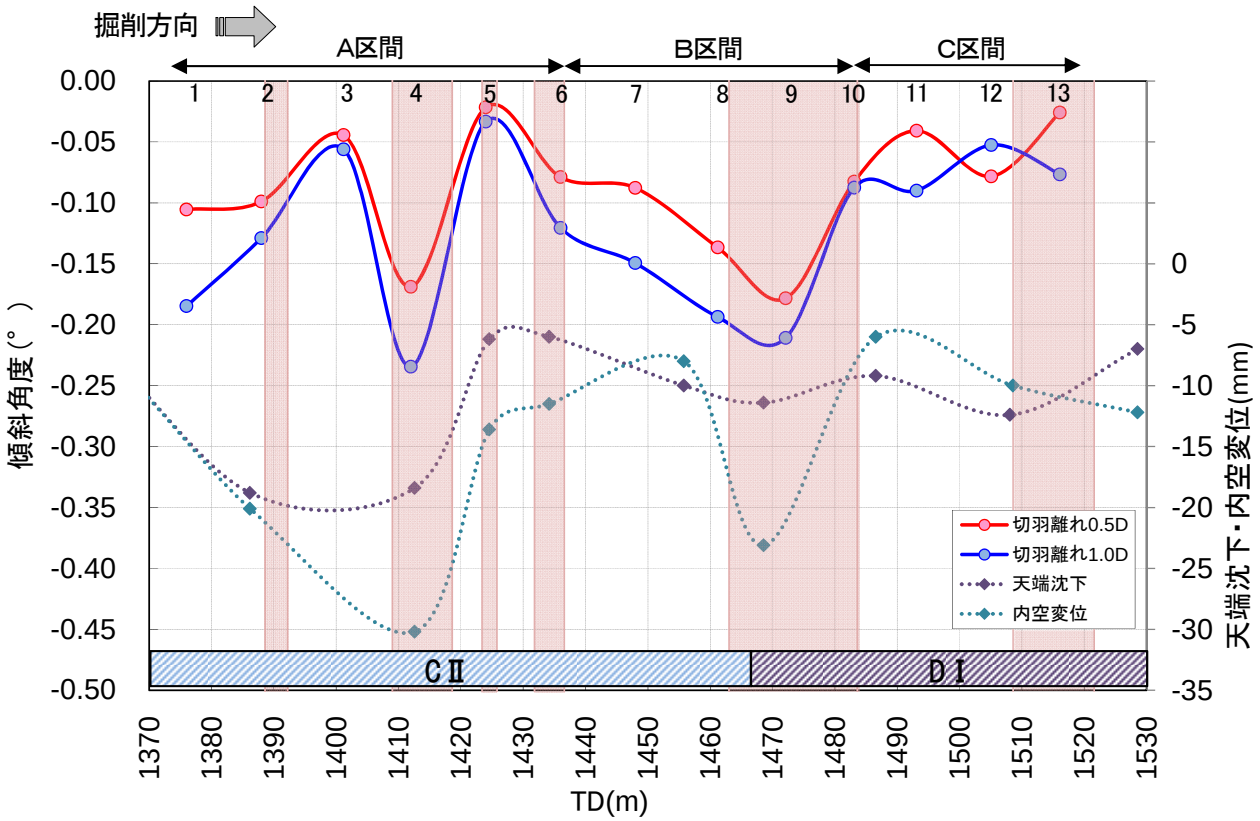


図-9　傾斜角度の分布図

なお，図-8では，傾斜角度の値が0.01°程度の幅で細かく上下を繰り返し，周期的変化をしているように見えるが，これは，坑内の集塵機や送風機のオン・オフに伴って，坑内の気温変化が発生することに起因するものと推察する．

(2) 全測点の傾斜角度の分布

図-9は，全計測点の傾斜角度の分布図である．切羽離れ0.5Dおよび1.0D時点における傾斜角度を距離程に沿ってプロットした．各計測点とも，切羽離れ0.5Dでは，前方地山の掘削による影響を受けて，傾斜角度が変化途中にあるが，切羽離れ1.0Dではほぼ収束値となっている．したがって，以降の考察は特に明示しない場合を除き切羽離れ1.0D時点における傾斜角度に着目して議論する．

図-9の着色部は，試験区間内において，切羽の岩質や湧水状況を観察した中で，地山状況が比較的悪いと判定した箇所である．この着色部は，すべてトンネル横断方向に区切っている．これは，試験区間内に出現した不良地山部は，走向がトンネル軸とほぼ直交し，傾斜が鉛直に近い状態にあったためである．なお，図中の点線は，坑内変位計測結果であり，天端沈下とトンネル上半の内空変位の最終収束値である．以下では便宜上，試験区間を３つに分割し考察を述べるが，各区間名とその範囲は，図-9に図示する．

a)　Ａ区間（TD1376m～1436m）

A区間では，傾斜角度のグラフが凹凸を繰り返していることがわかる．測点No.4では，傾斜角度の収束値が試験区間内で最大となった．一方，内空変位もこの近傍で最大値となっている．ところが，測点No.3とNo.5の傾斜角度はそれに比べると小さい．測点No.3の設置位置の切羽観察結果では岩質が硬く，変形量は小さいと考えられた．また，測点No.5付近では，天端沈下量が約5mmであり，変形は小さかった．

つまり，比較的地山が不良で，坑内変位の大きい箇所では，傾斜角度も大きくなるというように，設置位置における地山状況がそのまま傾斜角度の大小にあらわれているといえる．このため，切羽前方の地山予測というよりも，設置位置直近の地山状況を反映して角度の値が決まっていると考えられる．

この区間では，奥行幅が高々2m程度の不良地山部が出現するなど，岩質や湧水状況が刻々と変化した．このような，硬質層と軟弱層が交互に出現する場合について，本手法による切羽前方地山予測が可能であったのかどうか，今後，事後解析を実施し検討したいと考えている．

b)　Ｂ区間（TD1436m～1483m）

B区間では，比較的良好な地山が20m程度続いたのち，急に地山が不良になり，その後も20mにわたり軟弱な地山が出現した．本試験区間の中では，硬質層と軟弱層の

境界が明瞭な区間であった．この区間の傾斜角度の分布を見ると，不良地山部の手前において，傾斜角度が測点No.6からNo.8にかけて，負に大きくなっていることがわかる．これは，事前の数値解析結果（図-3）と同様の傾向であり，軟弱層出現の兆候をあらわしていると考える．

c） C区間（TD1483m～1515m）

傾斜角度の絶対値は，A区間と比較すると小さいが，切羽離れの違いにより，グラフの形状がばらついていることがわかる．加えて，不良地山部の手前で，傾斜角度が徐々に大きくなる傾向も見られなかった．当該区間では，多量の湧水が発生するなど地山状況は悪かったが，坑内変位は他と比較すると小さい．このため，傾斜角度もさほど変化しなかった可能性が高い．

6. まとめ

本稿では，まず，トンネル天端における傾斜角度の変化を用いた切羽前方地山予測手法を紹介し，三次元解析結果により，その予測可能性を示した．次に，上記手法の実現可能性の確認のために実施した，現場実証試験について説明し，その結果を示した．以下に，得られた知見をまとめる．

① 三次元解析から得た知見
硬質層から軟弱層へ掘削するトンネルを模擬した三次元解析結果によれば，天端の傾斜角度は地層境界から1.2D程度手前から，前方の軟弱層の影響を受けて，徐々に負の値に大きくなる．すなわち，切羽が地層境界に達する前で軟弱層の存在を予測可能であることを確認した．

② 現場実証試験から得た知見
現場実証試験で用いる，傾斜計測装置の概要および計測システムについて示し，設置作業・計測データ取得ともに問題なく，実用性を十分に有することを確認した．

③ 傾斜計測結果から得た知見
硬質層と軟弱層の境界が明確にあらわれた箇所では，境界手前から，軟弱層出現の兆候が認められ，予測可能性があることを確認できた．一方，試験区間は，地山性状が刻々と変化する箇所を含んでいたため，本手法による評価が難しい箇所があった．今後，事後解析を実施して，本手法の適用範囲について検討を行いたい．

今後は，本手法を用いてさらに多くの現場実証試験を実施し，データの蓄積をはかる予定である．

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 monitord displacements opens a new field to continuously understand and control the geotechnical behaviour of tunnels. *Proc. of 8th Int. Congress on Rock Mechanics (ISRM)*, Tokyo,3,pp.1415-1419, 1995.
3) 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，第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.387-392，2010.
4) 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（投稿中），2011.
5) 工藤直矢，坂井一雄，青木智幸，友野雄士，三谷一貴：切羽前方地山予測を目的とした坑内変位計測結果の分析，第 66 回土木学会年次学術講演会概要集，Ⅲ-094，pp.187-188，2011.
6) 坂井一雄，青木智幸，清水賀之，北澤翔平，山中誠一：坑内変位を用いた切羽前方地山予測に関する数値解析，第 65 回土木学会年次学術講演会概要集，Ⅲ-426，pp.851-852，2010.
7) 日本道路公団：トンネル数値解析マニュアル，p3-26，1998.

GROUND PREDICTION AHEAD OF A TUNNEL FACE BY INCLINATION MEASUREMENT AT TUNNEL CROWN

Naoya KUDOH, Kazuo SAKAI, Tomoyuki AOKI, Yuushi TOMONO and Kazuki MITANI

It is difficult to grasp the whole ground condition from geological survey of mountain tunnels large overburden. It is therefore desired to know the ground condition ahead of the tunnel face for efficient and safe tunnel construction. An existing prediction method using 3-D tunnel displacements is often subjected to the problems of measurement resolution and frequency. The authors proposed a simple but quick and accurate prediction method with the use of inclinometers installed at the tunnel crown. This paper presents the results of a 3-D numerical analysis and those of the field verification tests at a tunnel project.