

トンネル坑内変位計測による切羽前方地山予測

青木 智幸^{*1}・今中 晶紹^{*2}・板垣 賢^{*2}・領家 邦泰^{*3}・金尾 剣一^{*4}・櫻井 春輔^{*5}

Keywords : convergence, crown settlement, axial displacement, forward prediction

内空変位, 天端沈下, 軸方向変位, 前方予測

1. はじめに

山岳トンネル工事では、日常の施工管理と情報化施工の目的で、トンネルの内空変位や天端沈下などの坑内変位測定が行われている。近年では、その測定にトータルステーションを使用することが一般的となつており、XYZ の三軸方向の変位が計測される。しかし、国内では、トンネル横断面内の二次元的な変位に換算して、断面内の変形挙動の分析を主としているのが現状である。

Schubert と Budil¹⁾は、トンネルの掘削進行に伴うトンネル軸方向の変位を天端沈下など断面方向の変位と組み合わせて評価することにより切羽前方の地山状況の予測が可能であることを示した。一方、Vavrovsky と Schubert²⁾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た。この方法は、オーストリアで 10 年来の実績があり、近年、オーストリア地盤力学会 (ÖGG) の NATM ガイドラインにも取り上げられている³⁾。また、前出の方法と組み合わせて、トンネルの計測評価に使用されている⁴⁾。

本報では、まず、上記の三次元的な坑内変位計測による切羽前方地山予測法の研究事例をレビューし、その原理を整理する。次に、この方法を国内のトンネルに試験的に適用した結果について述べる。

2. 既往の研究のレビュー

2.1 トンネル軸方向変位による切羽前方地山予測

Schubert と Budil¹⁾は、オーストリアの Inntal トンネルにおける坑内変位計測データを分析し、断層破碎帶

* 1 技術センター土木技術研究所地盤・岩盤研究室

* 2 中国支店二川トンネル工事

* 3 土木本部土木技術部

* 4 西日本高速道路(株)中国支社

* 5 (財)建設工学研究所

内でのトンネル軸方向の変位が天端沈下や内空変位と同程度に大きくなる場合があり、距離程に沿ったトンネル軸方向変位の変化傾向が天端沈下や内空変位などの変化傾向と必ずしも一致しないことを見出した。さらに、断層破碎帶に近づくとトンネル軸方向変位が天端沈下の変化と比較して大きく変化する傾向を発見した。そこで、三次元境界要素法によるトンネル掘進の数値解析を行い、その原理を確認した。図-1 に、解析結果を示す。

図-1 a に示したように、天端沈下を S (符号は沈下が負), トンネル軸方向変位を L (符号は切羽方向が正, 坑口方向が負) とすると、その比 L/S は変位ベクトルが切羽側に振れると負、坑口側に振れると正になる。

図-1 b と図-1 c は、解析結果における、各計測断面位置から 1D (D はトンネル幅) だけ切羽が進んだ際の L/S 比の距離程に沿った分布を示したものである。前者は、堅硬層から軟弱層に向かって掘進した場合、後者は、軟弱層から堅硬層に向かって掘進した場合の解析結果である。

図-1 b を見ると、L/S 比は、地層境界から 3D 以上離れた位置では 0.15 程度の値を取って安定しているが、軟弱層との地層境界から 2D 位手前の位置から増加し始め、その後急増して境界位置近傍でピークを示し、軟弱層に入ってからは急減して地層境界から 2D 程度過ぎた位置では元の 0.15 程度の値に戻るような傾向を示している。また、図-1 c は軟弱層から堅硬層に向かって掘進した場合であるが、ちょうど逆に、L/S 比が負に変化する傾向を示している。

Grossauer ほか⁵⁾は、数値解析を行って、このような傾向を生じる原因が地層境界部の応力集中によるこことを示した。すなわち、地層境界の堅硬層側に地圧が集中し軟弱層側で地圧が減少する、地圧の不均質さがこのような現象を引き起こすというのである。また、下記に挙げる知見を示した。

1) 一様な初期応力の均一な弾性係数の地山では、ト

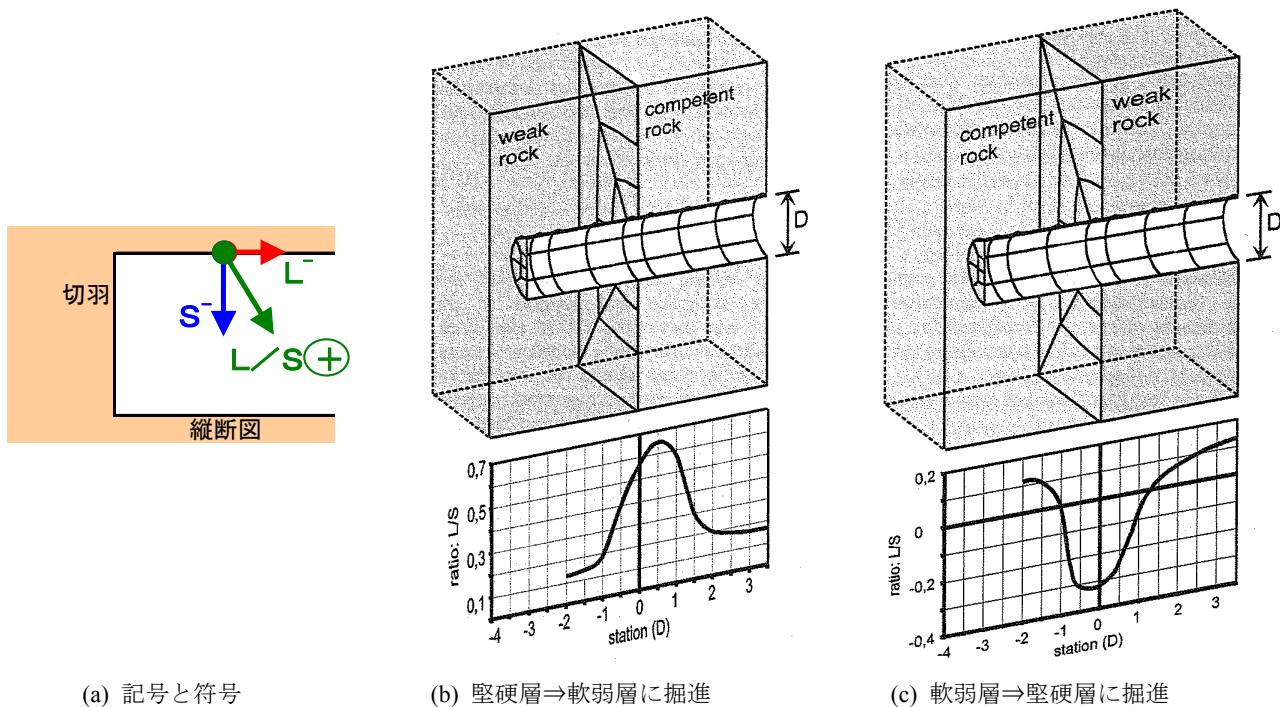


図-1 数値解析による切羽離れ 1D 時の L/S 比の変化¹⁾
Fig.1 Variation of L/S ratio at the section of 1D away from the tunnel face from the numerical analysis¹⁾

トンネル軸方向変位と天端沈下の比 (L/S) は一定の値を示す。弾性係数を変えると変位の絶対値は変わることなく、 L/S 比はほとんど変わらない。この均質な条件での一定の L/S の値をnormal値とする。

- 2) 地盤の弾性係数が変化して不均質な地山に切羽が近づくと、切羽前方の応力状態が変化して、 L/S 比がnormal値から変化する。
- 3) 堅硬層と軟弱層の弾性係数の比が大きいほど、軟弱層の幅が広いほど L/S 比の変化量は大きく、また、境界からより離れた位置から変化が生じる。

2.2 たわみ曲線による切羽前方地山予測

通常、トンネルの坑内計測は予め計画された（例えば20m）間隔の各断面にて行い、断面ごとに変位の経時変化図や切羽離れ図を作成して評価が行われる。しかし、計測断面間の地山の情報は得られない。VavrovskyとSchubert²⁾は、このような断面ごとの評価の欠点を改善し、トンネル距離程に沿う三次元的な変形挙動を評価する方法を考案した。

図-2 aに、均質な地山におけるたわみ曲線の概念³⁾を示す。横軸はトンネルの距離程（坑口からの距離）であり、各曲線は、ある時点における天端沈下のトンネルの距離程に沿った分布をスプライン関数などで曲線状につないだものである。これをたわみ曲線（deflection curve）と呼んでいる。例えば、一番右の曲線は、最新の掘進後の天端沈下のたわみ曲線であり、灰色に塗られた部分が、この掘進による増加分である。

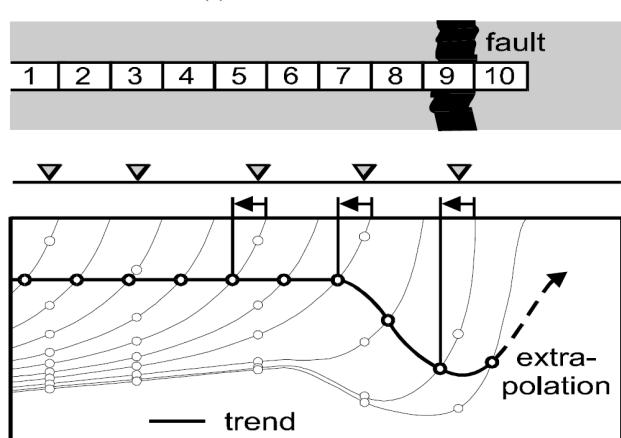
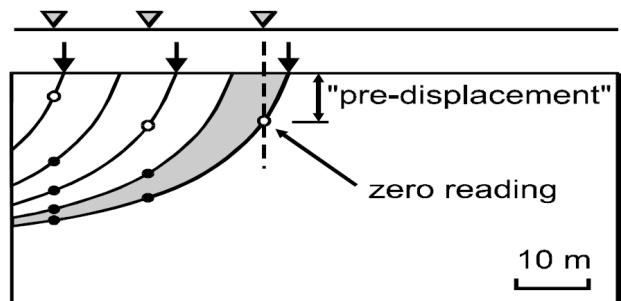


図-2 たわみ曲線による切羽前方予測³⁾
Fig.2 Forward prediction by means of deflection curves of the crown settlement

均質な地山では、図のように曲線を平行移動した、“たまねぎ断面状”（onion-shell-type^{2), 3)}の形になる。▼で示した位置が計測断面であるが、本手法によると、

計測断面間を切羽が移動する時の地山の変形挙動を評価できることが分かる。

この図は、切羽到達時の変位を0として変位の分布を描くものであるが、トンネルの坑内変位計測では、掘削施工時の計測ポイントの防護のために切羽から若干手前の位置に計測点を設置するので、計測開始前に既に生じた変位（pre-displacement：初期変位）が存在する。したがって、図のように初期変位の分を補正して曲線を作成する必要がある。計測開始位置の切羽離れが一定でない場合には、この補正是特に重要となるであろう。ただし、文献^{2),3)}では、この初期変位を曲線の外挿により求めるとしているが、具体的な方法の詳細は不明である。

図-2 bに、切羽前方に断層などの弱層がある部分を掘進する場合のたわみ曲線の概念図を示す。切羽が弱層に近づくと、後方の計測断面で計測される変位の増分が大きくなつてたわみ曲線が膨らみ、その掘進による増加分の面積が大きくなる。したがって、切羽が弱層部に近づいた時点で、次の計測断面で計測が行われる前に弱層部の影響を捉えることができるうことになる。

もう一つの評価法として、トレンド線がある。これは、ある切羽離れ（図の例では0.5D, Dはトンネル幅）における天端沈下を結んだ線である。これを切羽前方へ外挿することにより、地山状況の予測ができるとしている。なお、以上の評価方法は、天端沈下に限らず内空変位や上半支保脚部の沈下など他の計測変位にも適用可能であり、実際に適用されている⁶⁾。

2.3 適用事例

オーストリアのアルプス東部地区における土被りの小さいトンネルの事例⁴⁾を示す。図-3上図は、分析した区間の地質断面図である。左から右方向にトンネルを掘進している。距離程475mまでは、硬質の石灰岩や大理石であり、それ以降は断層部である。断層部は主に千枚岩からなるが、大理石や珪岩のブロックを取り込んでいる。

図-3中図は、天端沈下のたわみ曲線を示したものである。切羽が断層部に近づき、距離程485mになるとたわみ曲線が急に膨らみ、以降、距離程500mまでこの傾向が続く。ところが、さらに掘進すると急激にたわみ曲線が密になり、天端沈下が減少に向かうことが分かる。最終的な天端沈下は、距離程490m近傍が最大で150mmに達した。

トレンド線は、ここでは切羽離れ6mの天端沈下を結んだものである。天端沈下が距離程475m辺りから増加

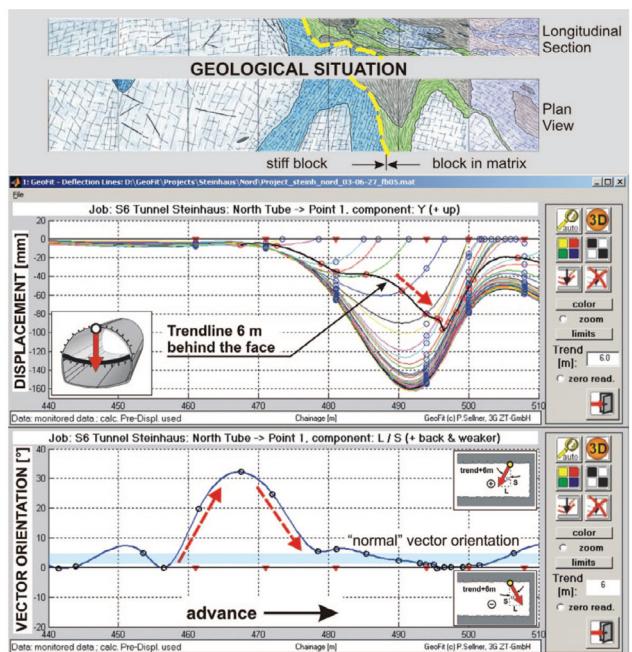


図-3 坑内変位分析と切羽前方予測の事例⁴⁾
(上:地質図、中:天端沈下のたわみ曲線、下:L/S比の分布)

Fig.3 A case example of forward prediction by means of displacement monitoring⁴⁾

し始めて496mまで増加を続けるものの、それ以降、急激に減少している。距離程495～500m間の時点にてトレンド線を前方に外挿して考えると、地山状況が改善に向かうことを予測できた可能性があると考えられる。

図-3下図は、L/S比の変化を示したものである。ここでは、値を変位ベクトルの鉛直からの角度として表している。天端沈下Sとトンネル軸方向変位Lは、切羽離れ6mの値を採用している。この地山では、normal値は0～5°程度と考えられた。掘進に伴い、距離程460m辺りからL/S比が正に増加しており、地山が軟質に変化することが予想できる。L/S比は距離程480mまでに、減少してnormal値に戻っている。実際の天端沈下はそれ以降で増加しているので、この例では、L/S比の変化により切羽前方約20m強程度の地山状況を予測できたと言える。

3. ケーススタディ

前章までに説明した坑内変位計測による切羽前方地山の予測方法を、国内のトンネルに試験的に適用した。対象は、米子自動車道二川トンネルである。南側坑口から掘進を開始するが、坑口から70mの区間を対象区間とし、計測断面を5m間隔で設けた。地質は主に黒色片岩で、坑口から25～55mの区間に断層破碎帯が存在することが、事前の地質調査および追加実施した水

平ボーリングにより分かっていた。

3.1 トンネル軸方向変位による切羽前方地山予測

図-4に、天端沈下Sとトンネル軸方向変位Lの切羽離れ5m時点の値の分布を示す。符号は、図-1aに従う。横軸は距離程（坑口からの距離：TD）である。トンネルは、右から左方向に掘進する。トンネル軸方向変位Lを見ると、トンネルの進行に沿って一旦負に変化した後、正方向に変化し、ほぼ安定する。天端沈下Sは、距離程30m以降で大きくなり、42m地点をピークに減少し始め、55mを過ぎると小さい値で安定する。この比を取ったものがL/S比である。

図-5に、L/S比の分布を示す。同図には、地質断面図も合わせて示した。L/S比は、切羽離れ5m、10m、15mの3ケースの値を示した。トンネル幅Dは約10mなので、それぞれ、0.5、1.0、1.5Dに相当する。どのケースも類似の変化傾向を示していることが分かる。実用上は、より近い切羽離れの値を用いたL/S比で分析できる方が利用価値が高いので、これは望ましい結果である。距離程16mの計測断面の値がばらついたが、これは、坑口に近く土被りが小さく変位（L, S）がともに小さいため、測定誤差の影響が大きく出ていることが原因と考えている。

切羽離れ5mのL/S比を念頭に考察する。本トンネルでは、L/S比の角度、すなわち変位ベクトルの方向が約±70°の範囲で大きく変化した。特に、距離程27mまでに大きく正方向に変化し、その後、距離程35mまでに減少したことが特徴的である。L/S比が正に変化するのは、2章で示した原理によれば、軟弱層に入る兆候である。

地質断面図を見ると、距離程22～54mが断層破碎帯に区分されている。断層の走向は、トンネル軸にほぼ直交している。したがって、L/S比は、断層破碎帯部に入つてから変化したことになる。ただし、図-4を見ると分かるように、L/S比が大きく変化した距離程27mの時点では、天端沈下はまだ小さい。この意味では、予測ができたと言える。

図-6に、トンネル掘削前に坑口部で実施した水平ボーリングのコアを示す。ボーリング口元は坑口から3.5m手前であり、図の上方には、坑口断面位置からの距離（TD）を示した。ボーリングコアを見ると、TD25mまでは風化して褐色に変色している。地質断面図では、坑口から21.8m以深が断層破碎帯と判定されているが、コアを良く見ると、破碎が細粒化して粘土分を含むようになるのは、約27.5m以奥であることが分かる。この変化は、切羽に出現した地山でも観察さ

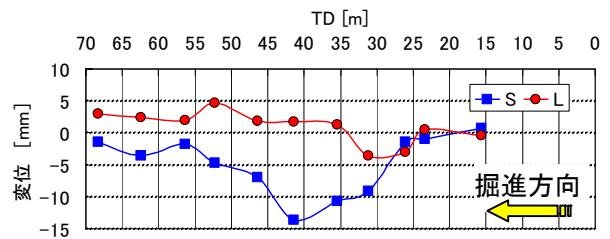


図-4 坑内変位の分布（二川トンネル）
(切羽離れ5m時点、符号は図-1(a)参照)
Fig.4 Distribution of tunnel displacements (Hutakawa Tunnel)

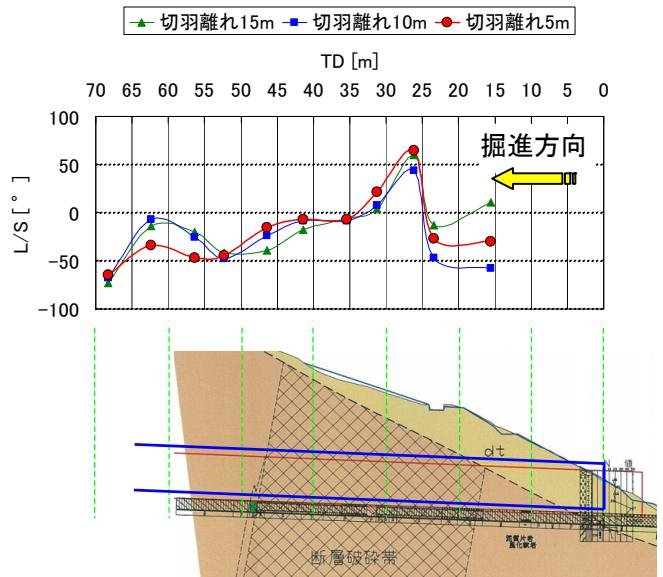


図-5 L/S比の分布（二川トンネル）
(上: L/S比の分布、下: 地質断面図)
Fig. 5 Distribution of L/S ratios (Hutakawa Tunnel)

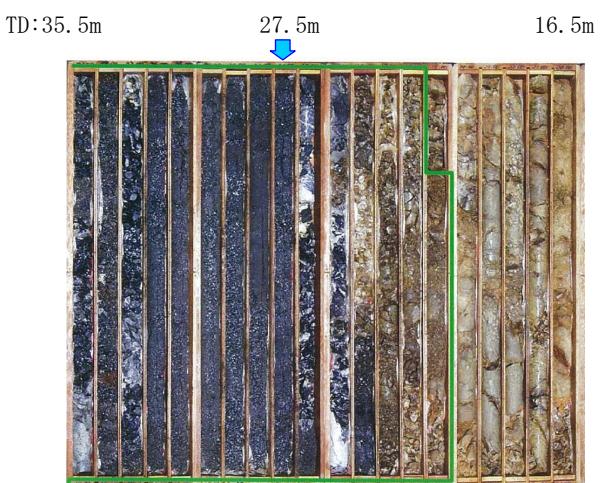


図-6 水平ボーリングコア（二川トンネル）
Fig.6 Cores of a horizontal boring (Hutakawa Tunnel)

れた。TD27.5m以奥が変形係数の小さい領域であると考えると、図-4に示した天端沈下の大きい領域と合致する。このように考えると、L/S比が軟弱層に入る手前の位置で予兆を示したと言える。

距離程45m以降では、L/S比が徐々に低下する傾向を

示した。これは、2章で示した原理によれば地山が硬質に変化する兆候であり、断層破碎帯を抜けて堅岩部に入していくことと整合する。

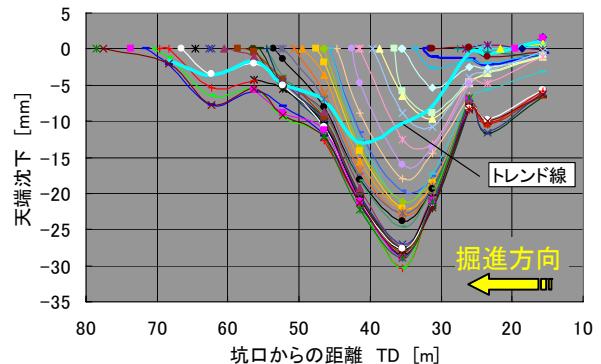
今回は、試験的適用であるため計測断面を5m間隔と細かく設けている。通常のトンネル施工では計測断面は20m間隔程度であり、不良地山部でも10m間隔程度のことが多い。仮に、計測断面が10m間隔であったとすると、図-5に現れたL/S比の変化は捉えられなかつた可能性がある。また、今回は、土被りが非常に小さい坑口部での計測であり、初期地圧が小さいために断層部の影響範囲が非常に狭くなっている可能性がある。今後、より土被りの大きいトンネルにおいても試行し、一般的な傾向を確認する必要がある。

最後に、計測における問題点を指摘する。トータルステーションは、一般に角度の測定精度に比べ距離の測定精度が低い。これは光波を使った距離測定の精度に限界があるためである。トンネルの坑内変位計測に使用されるタイプは非常に高精度であるが、それでも距離の測定精度は仕様で3mm程度である。これは、トンネル軸方向変位の精度に大きく影響を及ぼす。今回の測定では3mmまでばらつくことは無かったが、それでも測定値の変動は大きく、特に変位が小さい時に問題となった。天端沈下が比較的大きくなれば、トンネル軸方向変位のばらつきの影響は相対的に小さくなる。

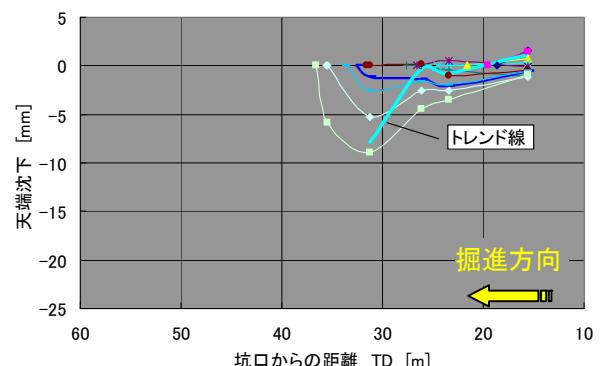
3.2 たわみ曲線による切羽前方地山予測

図-7に、天端沈下のたわみ曲線を示す。ここでは、初期変位の補正を行っておらず、計測した変位をそのままプロットしている。ただし、二川トンネルの今回検討を行った範囲では、概して地山が軟弱でブレーカによる機械掘削を行ったことから、計測ターゲットを切羽に非常に近い位置(1m以内)に設置できた。そのため、初期変位の影響は小さいと言える。発破掘削の場合は計測ターゲットを切羽からもう少し離す必要があるため、初期変位の補正が重要になる可能性がある。

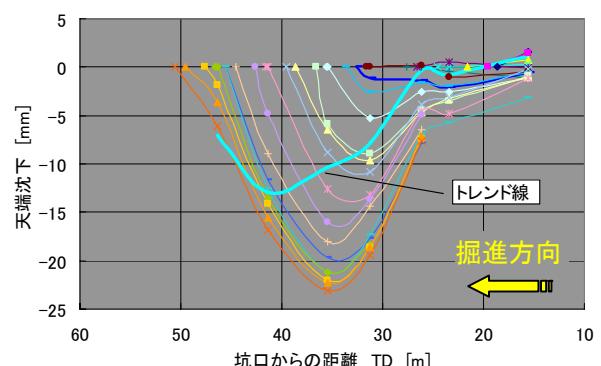
図-7 aは、切羽位置が距離程78mまで掘進した時点までの全計測データをプロットしたものである。この内、まず、断層破碎帯に入っていくときの変化を詳細に見る。図-7 bは、切羽位置が距離程36.6mまでのデータを取り出したグラフである。切羽が距離程32.6mから33.6mに進んだとき(—と水色線)に、たわみ曲線の膨らみが急に大きくなることが分かる。さらに、切羽が距離程35.6m(△と薄青線)、36.6m(□と薄緑線)と進むと、この傾向がより顕著になる。施工時には、まだ天端沈下の値が小さいこの時点で、軟弱層に確実に突入したことに気づくであろう。この意味で、トン



(a) 全データ



(b) 切羽位置 TD36mまでのデータ



(c) 切羽位置 TD51mまでのデータ

図-7 天端沈下のたわみ曲線(二川トンネル)

Fig.7 Deflection curves of the crown settlement (Hutakawa Tunnel)

ネル軸方向の地山の変化をビジュアルに捉えることのできる手法である。

切羽が距離程36.6mまで進んだ時点で、5m後方のデータを用いた31.6mまでのトレンド線を書くことができる。トレンド線は、この時点で急速に増加する傾向を示し、切羽が軟弱な地山を進行していることを示唆している。

図-7 cは、切羽が距離程51mまで進んだ時点までのグラフである。切羽が45mを超えて掘進すると、たわみ曲線の分布が急に密になり、これは、掘進による

切羽後方の変形への影響が小さくなつたことを意味しており、すなわち地山が硬質になつたことを示している。また、切羽離れ5mのトレンド線は距離程42mから46mまでに急速に減少に向かい、上記の傾向をより明瞭に表している。

図-7 aは、すべてのデータを用いたたわみ曲線である。天端沈下の最終量は、距離程30から50mの間で大きく、3.1で議論した断層破碎帯の範囲と一致する。たわみ曲線による評価法は、最終的な変位の分布を捉えるだけでなく、上で議論したように、日々の掘進による計測データを逐次プロットすることによりその変化をビジュアルに表現し、現状の切羽の地山および近傍の前方地山の状況を評価できる点で、優れた方法である。

4. まとめ

本報では、まず、オーストリアで発達してきた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についてレビューし、2種の方法についてその原理をまとめ、事例を示した。次に、二川トンネルにこの予測方法を試験的に適用し、その結果を示した。得られた主な知見を下記に記す。

- 1) トンネル軸方向変位による切羽前方変位予測では、トンネル軸方向変位Lと天端沈下Sの比L/Sが、断層破碎帯の軟弱層の約5m手前で大きく変化し、評価原理と整合する挙動を示した。本評価法による切羽前方地山状況予測の可能性を確認した。
- 2) 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比がばらつく問題点を指摘した。
- 3) 天端沈下のたわみ曲線による切羽前方地山予測では、軟弱層に切羽が近づくとたわみ曲線が膨らみ、硬質層に近づくとたわみ曲線が密になるという典型的な傾向が現れることを確認した。また、切羽離れ5mの

天端沈下を用いたトレンド線により、切羽前方の地山の変位傾向を外挿的に予測できることを確認した。本方法は、計測断面間の地山状況の変化をビジュアルに捉え、現状の切羽の地山および近傍の前方地山の状況を評価できる優れた方法である。

今後は、さらに適用事例を増やし、本方法の実用化を目指さしたい。

謝辞

本研究は、「米子自動車道トンネル施工技術検討委員会」の検討テーマの一つとして実施したものである。委員の方々のご指導に感謝申し上げる。また、本研究の一部を、土木学会第39回岩盤力学に関するシンポジウムに投稿し⁷⁾、優秀講演論文賞を頂いた。ここに記して謝意を表する。

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 monitor 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) Gallar, R. : The New Guidline – NATM – The Austrian Way of Conventional Tunnelling. *Safe Tunnelling for the city and for the environment, Proc. of ITA-AITES World Tunnel Congress*, Budapest, O-06-01, 16p., 2009.
- 4) Moritz, B., Grossauer, K. and Schubert, W. : Short term prediction of system behaviour of shallow tunnels in heterogeneous ground. *FELSBAU*, 22(5), pp.44-52, 2004.
- 5) Grossauer, K., Schubert, W. and Kim, C.Y. : Tunnelling in heterogeneous ground – stresses and displacements. *Technology Roadmap for Rock Mechanics, Proc. of 8th Int. Congress on Rock Mechanics (ISRM 2003)*, Johannesburg, pp.437-440, 2003.
- 6) Moritz, B., Grossauer, K. and Schubert, W. : Application of the observational method in heterogeneous rock mass with low overburden. *FELSBAU*, 24(1), pp.62-72, 2006
- 7) 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, 土木学会, pp.387-392, 2010