

山岳トンネルの切羽前方地山予測に関する研究

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

Keywords : convergence, crown settlement, longitudinal 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、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、施工時に情報化施工を行い、既施工区間の一次支保の妥当性や、切羽面の安定性を検証する。

このため、一般的に 10m~30m 間隔で坑内変位計測（いわゆるA計測）を実施する。最近ではトータルステーションを用いて坑内変位計測を実施するのが通例であり、トンネル軸方向を含む三次元的な変位を比較的容易に得ることが出来る。しかし、国内では主として天端沈下や内空変位などのトンネル横断面内の二次元的な変形挙動のみに着目して、既設支保の健全性等を確認しているのが現状である。

一方、オーストリアでは、Schubert らが二次元的な変位にトンネル軸方向変位を加味して分析することにより、既施工区間の検証だけでなく、切羽前方の地山状況を予測することを試みている¹⁾。ただし、掘削に伴う周辺地山の挙動がどのように坑内変位に影響を与えるのかは詳細には示されていない。

Vavrovsky らは、天端沈下をトンネル距離程に沿って連ねた「たわみ曲線(Deflection Curve)」により、切羽前方の地山予測を行う手法を考案した²⁾。この方法については、オーストリア地盤力学学会の NATM ガイドラインにも取り上げられている。

これまでに著者らは、これらの予測手法を、米子自動車道二川トンネルに試験的に適用し、その有効性と実用化の可能性を確認した^{3) 4)}。ただし、二川トンネルでの計測事例は、土被りが浅く、地表の勾配の影響を顕著に受ける坑口部での事例であった。そのため、より土被りの大きいトンネルで一般的な傾向を確認す

る必要があった。

上述のような背景から、本報では、まず上記手法について三次元逐次掘削解析を実施してその原理を確認する。

次に、施工中の椿坂トンネルの土被りが 100m を超える区間で取得した坑内変位を利用して、事後評価として切羽前方地山予測を試みたので、その結果について報告する。

2. Schubert らの切羽前方地山予測手法

2.1 予測手法の概要

Schubert らは天端沈下を S 、トンネル軸方向変位を L とすると、その比 L/S は図-1 の解析結果に示すように、(a) 硬質層から軟弱層に向かって掘進した場合、軟弱層に到達する前に、上に凸となる分布形状になり、(b) 軟弱層から硬質層の場合、硬質層に到達する前に、下に凸の分布形状となることを確認した¹⁾。

このように、 L/S が地層境界の手前で反応を示すことを利用し、切羽前方の地山状況の予測を行うことが、Schubert らが提案する手法である。

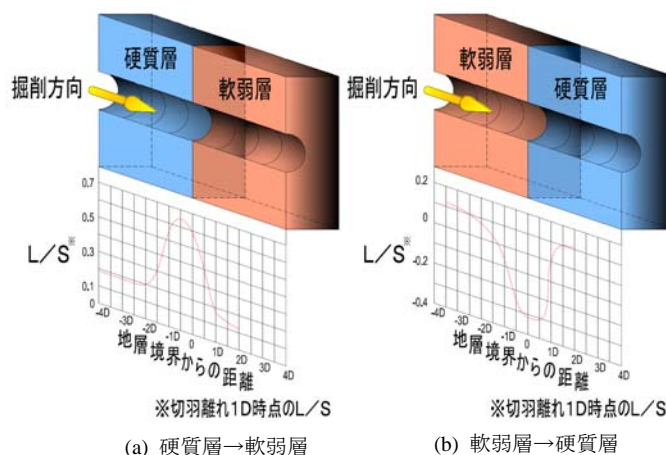


図-1 円形断面モデルを用いた L/S の解析結果¹⁾

Fig. 1 Numerical analysis results of L/S in a circular tunnel¹⁾

*1 技術センター土木技術研究所地盤・岩盤研究室

*2 関西支店椿坂トンネル工事作業所

2.2 三次元逐次掘削解析による原理の確認

2.2.1 目的

前節に示した解析は簡易な円形断面モデルを用いた場合の結果であり、実際の道路トンネルなどの掘削形状を考慮したものではない。

そこで、Schubert らの提案する手法の原理について詳細に検討すること、ならびに実際の馬蹄形断面のトンネルに対する手法の適用性を検討するために三次元逐次掘削解析を実施した⁵⁾。

2.2.2 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、馬蹄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-2に示す。地山の応力-ひずみ関係は線形弾性モデルで表現した。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⁶⁾を参考にして、各地山等級の標準的な物性値とし、表-1のように設定した。また、一次支保はモデル化せず、掘削は全断

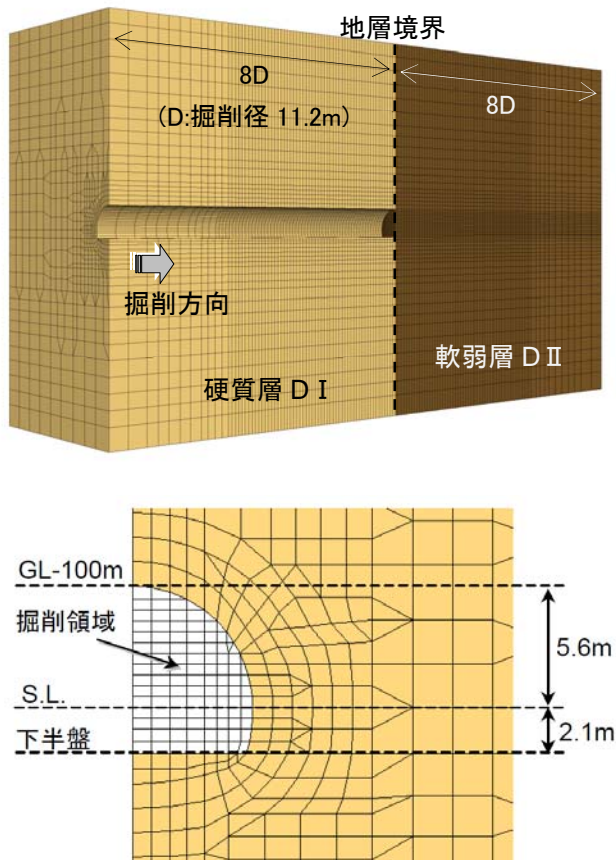


図-2 解析モデル（上：鳥瞰図 下：横断面拡大図）

Fig.2 Numerical analysis model

面で1mずつ行うものとした。

2.2.3 解析結果と考察

図-3に地層境界を中心として-3D（D：トンネル掘削幅11.2m）から3Dの範囲における天端沈下(S)および天端の軸方向変位(L)を示す。横軸が地層境界から変位算出位置までの距離である。両変位は、各算出位置での切羽離れ1D時の値であり、初期値は切羽離れ1mである。図-4に各変位の記号と符号、ならびに切羽離れの概念図を示す。

図-3の天端沈下と軸方向変位を比較すると、天端沈下は-1D（切羽は地層境界に達している）の算出位置ま

表-1 地山物性値⁶⁾

Table 1 Rock properties⁶⁾

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
硬質層(D I)	500	0.35	21
軟弱層(D II)	150	0.35	21

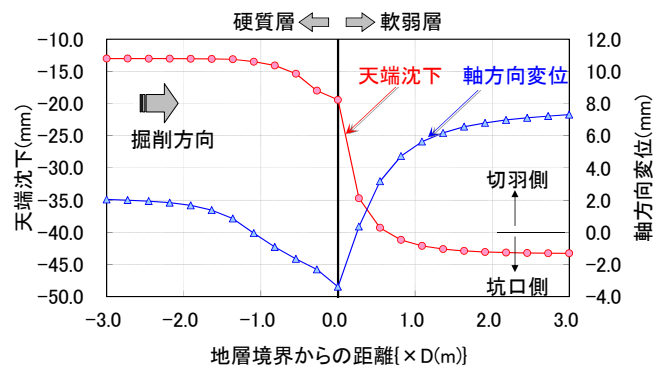


図-3 天端沈下と軸方向変位

Fig. 3 Distributions of crown settlement and longitudinal displacement

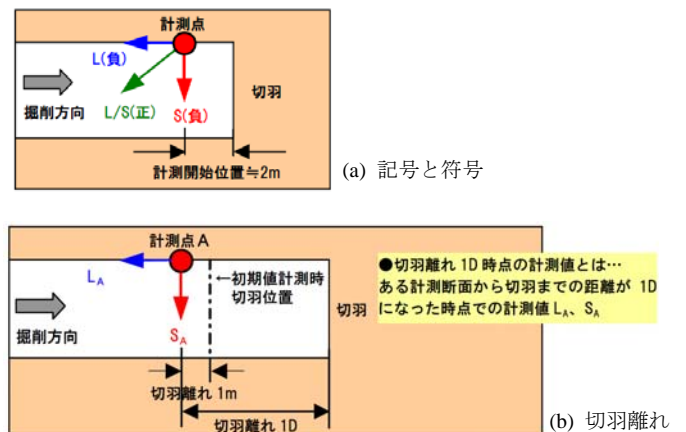


図-4 切羽離れの概念図

Fig.4 Conceptual figure of distance from the tunnel face to the measurement position

で、ほとんど軟弱層の影響を受けないが、軸方向変位は-2D（切羽は-1D）の算出位置から減少することがわかる。地山条件が均質の場合、軸方向変位は一定値となるため、切羽前方に軟弱層が存在することが軸方向変位が減少する原因である。軸方向変位が上述のような挙動をする原因は以下のように考えられる。

切羽の前方に軟弱層が存在する場合、掘削に伴う切羽前方地山での応力集中により坑口側へ向かう地山の変形が大きくなる。例として、図-5に切羽が-0.5Dにある場合の地層境界部の変位と硬質層で均一地山の場合における地山の変位の比較を示す。図のように、硬質層で均一地山の場合と比較して、切羽前方の軟弱層が坑口側に向かって大きく押し出すように変形する影響を受けて、天端での軸方向変位は地層境界手前で負に増大するものと考えられる。

また、図-3より軸方向変位Lは天端沈下Sよりも手前から、すなわち鋭敏に切羽前方の軟弱層の影響を受けていることがわかる。この傾向は天端の変位ベクトルであるL/Sを算出することにより定量的に評価することが可能である。図-6にL/Sの結果を示す。L/Sは-2Dの

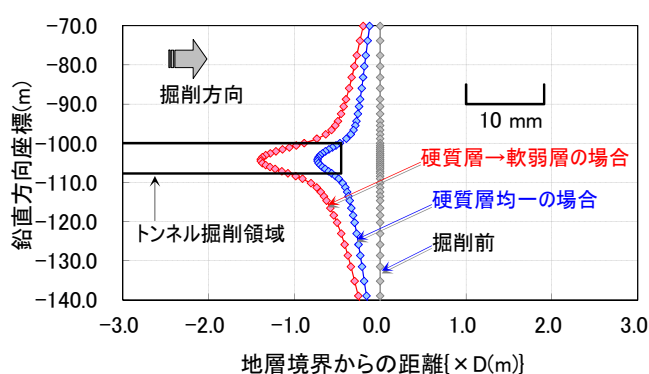


図-5 地層境界部の地山の変位

Fig.5 Rock displacement along the boundary of rock conditions

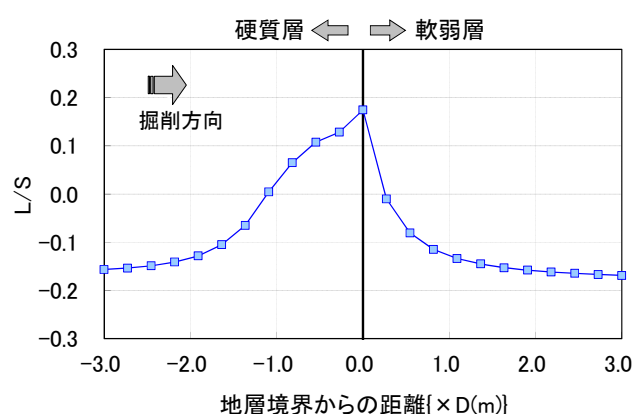


図-6 馬蹄形断面モデルを用いた L/S の解析結果

Fig.6 Numerical analysis result of L/S in a horseshoe-shaped tunnel

位置から徐々に増加し、地層境界部で最大値となった後、軟弱層側に入ると減少し、2D の位置でほぼ一定値となる。このように、切羽が地層境界に達する前から L/S は軟弱層の影響を受けて変化する。このため、L/S を評価することで、切羽前方の地山状況を予測することが可能であると考えられる。この結果は、図-1に示す円形断面モデルを用いた解析結果と同様であり、馬蹄形断面でのトンネル掘削においても、L/Sを評価する切羽前方地山予測手法は適用可能であるといえる。

3. Vavrovsky らの切羽前方地山予測手法

Vavrovsky らは、ある時点における天端沈下を、トンネルの距離程に沿って曲線状につなぎ、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し、切羽前方の地山状況を予測する方法を考案した²⁾。Vavrovsky らはこの曲線をたわみ曲線 (Deflection curve) と呼んでいる。このたわみ曲線を用いた切羽前方地山予測手法について、2 章にて示した三次元逐次掘削解析の結果を用いて説明する。

図-7 に均質な地山（硬質層）を掘削した際のたわみ曲線を示す。たとえば、切羽が横軸のトンネル距離程で 0.0 に到達した時、切羽位置での天端沈下を 0 とし、各計測位置での天端沈下量をスプライン関数などで曲線状につないだものが図中の太線で示したたわみ曲線となる。なお、解析では切羽離れ 1m を初期値として天端沈下量を算出している。このたわみ曲線を掘削毎に描画することにより、図中の斜線部で示すように切羽の進行に伴う天端沈下の増分を視覚的に面積として捉えることができる。

均質な地山条件である場合、理論的には図-7 に示すように一様なたわみ曲線が続くことになる。しかし、切羽の前方に軟弱層がある場合には、図-8 に示すように切羽が地層境界に近づくに連れてたわみ曲線が下方に膨らみ、増分面積が大きくなる。また、図-9 に示すように、更に切羽が軟弱層に入ると、たわみ曲線は大きく下に膨らむことになり、トンネルの変形量が大きいことをビジュアルに捉えることができる。このような傾向を利用して切羽前方の地山状況を予測することができる。

さらに、たわみ曲線を描くことにより、掘削後の初期段階で坑内変位が大きくなる可能性の高い位置を把握できるため、早期に補強対策工などの検討をすべきかどうか判断できるという点において利点がある。

4. 椿坂トンネルへの適用結果

4.1 分析区間の概要⁷⁾

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。

今回の分析対象区間は、図-10 に示すように地山変化点を含む、211m 区間の計 30 測点である。同区間は

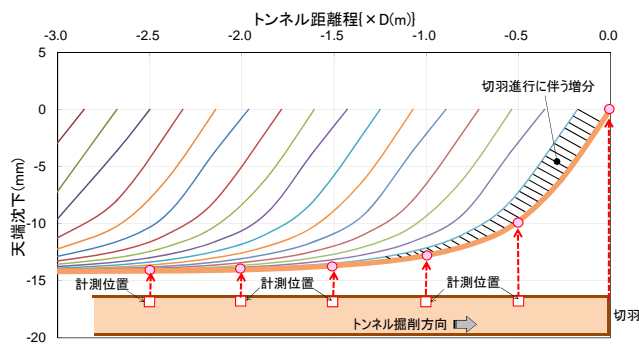


図-7 硬質層 ($E=500\text{MPa}$) で均質な地山のたわみ曲線

Fig.7 Deflection curves in case of stiff and uniform rock

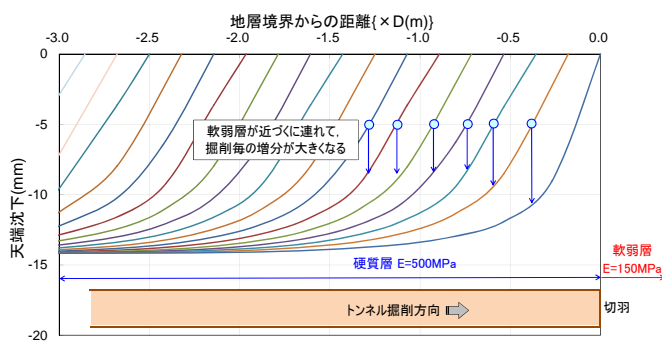


図-8 軟弱層が前方にある場合のたわみ曲線

Fig.8 Deflection curves in case of weak rock ahead of the tunnel face

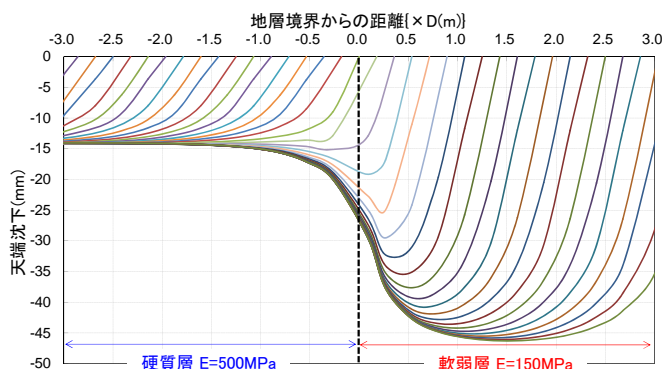


図-9 たわみ曲線 (硬質層から軟弱層への掘削)

Fig.9 Deflection curves in case of excavating from stiff rock to weak rock

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、 $CII \rightarrow DIp \rightarrow DI$ となっている。なお、 DIp とは、 DI の支保に補助工法として注入式フォアポーリングを追加する支保パターンである。

以下に、分析対象区間における特徴的な事項を記す。なお、下記の①～③は図-10 の図中の番号に対応する。

- ① 弾性波探査・比抵抗電気探査等の事前調査では、**TD561m** で断層破碎帯へ遭遇すると予想されていたが、極端に地山条件が悪くなることはなかったため、支保パターン CII を継続した。
- ② **TD609m** において、肩部に小規模な崩落が発生し、**TD615m** でも同規模の崩落が発生したため、支保パターンを $CII \rightarrow DIp$ へ変更した。以下では、 DIp の支保を採用した区間を軟弱層として表記する。
- ③ 注入量が次第に減少し、切羽の状態も良くなったため、**TD710m** で注入式フォアポーリングを中止した ($DIp \rightarrow DI$)。

4.2 軸方向変位と天端沈下⁷⁾

図-11 に天端沈下 S とトンネル軸方向変位 L の切羽離れ 10m 時点、15m 時点および 30m 時点 (収束値) の分布を示す。横軸は坑口からのトンネル距離程 (TD) を示す。

TD615m から 710m は軟弱層であったが、変位の大小

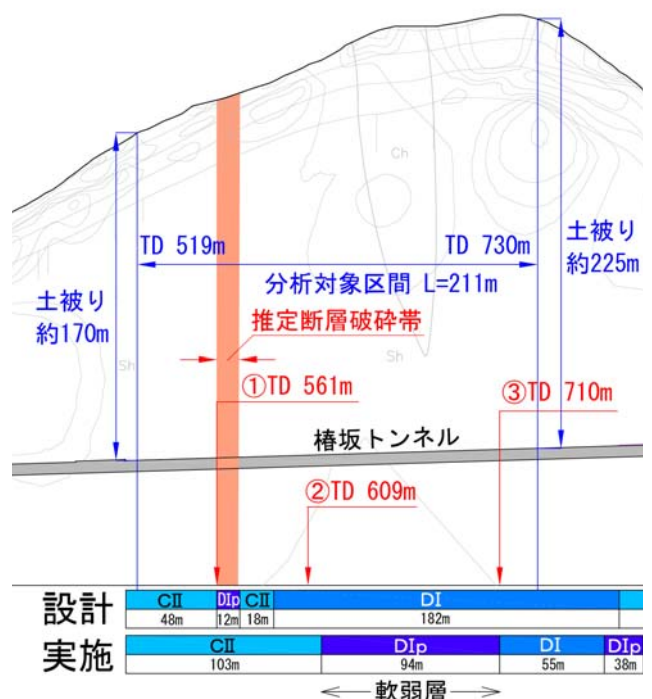


図-10 分析対象区間の地山条件と支保パターン

Fig.10 Rock conditions and support patterns in Tsubakizaka Tunnel

の差が大きい。この区間は、計測点間で地山性状の良否が頻繁に変化した。

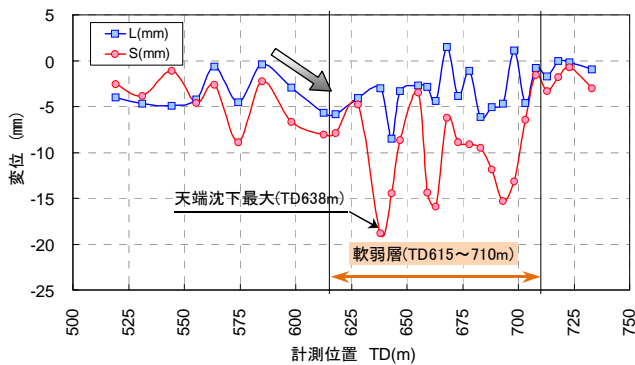
切羽離れ 10m および 15m の分布に着目すると、天端沈下 S は、TD638m 以降で急激に大きくなり、TD700m 以降減少し始める。軸方向変位 L は、図中の矢印で示すように、天端沈下が最大となる TD638m の手前で、坑口側に向かう変位が増加している。TD700m 以降は正の値もしくは 0mm である。

4.3 L/S を用いた分析結果⁷⁾

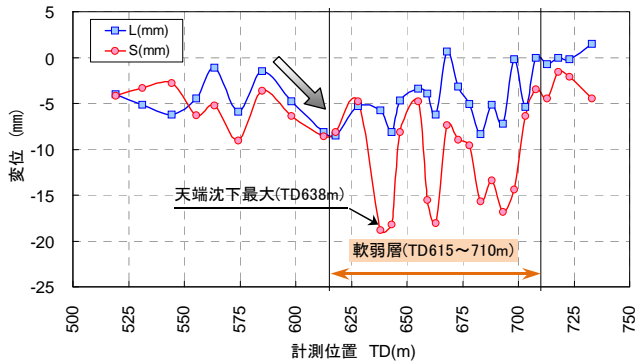
図-12 に L/S の分布を示す。L/S は、切羽離れ 10m, 15m の 2 ケースの値を示した。以下に L/S に関する考

察を示す。

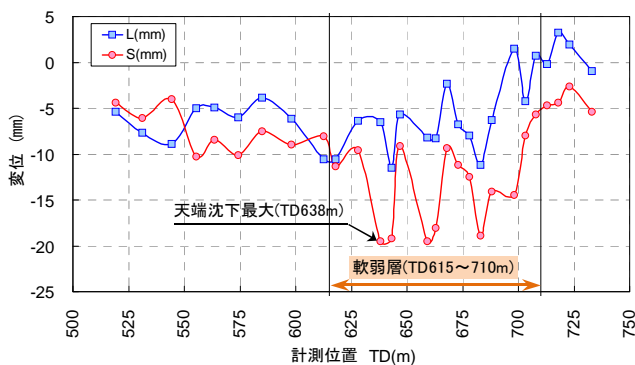
- A 部 (TD544m) では、近傍の計測点と比較して、L/S が大きく変動する。これは、L/S 算出時に分母となる天端沈下の値が非常に小さいことが原因である。たとえば、TD544m での切羽離れ 10m における天端沈下量は 1.1mm である。このように得られる変位の値が極端に小さい場合には、L/S だけでは妥当な評価や予測は難しいという問題があることがわかった。
- B 部 (TD585m~628m 付近) において、図中の矢印で示すように、切羽離れ 10m および 15m の L/S が、天端沈下量が最大となる TD638m の手前で徐々に上昇する傾向を示す。これは、天端の軸方向変位の増加割合が、天端沈下の増加割合に比べ大きいためである。この傾向は、2.2 節の切羽前方に軟弱層が存在するときに見られる傾向と同様である。そのため、実際に L/S を算出することにより、トンネルが大きく変形する区間を事前に把握できた可能性が高い。
- Schubert らは、Galgenberg トンネルの L/S を分析し、軟弱層通過時の L/S の分布は、全体的に下降傾向になることを経験的に示した。また、そのよ



(a) 切羽離れ 10m 時点



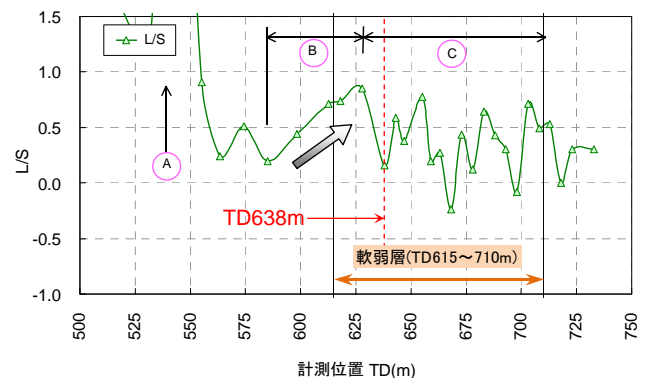
(b) 切羽離れ 15m 時点



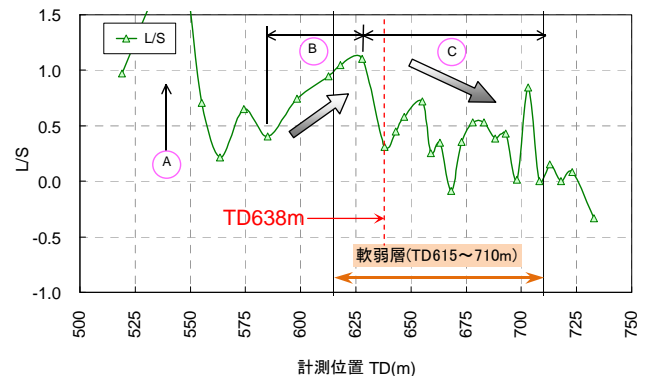
(c) 切羽離れ 30m 時点 (収束値と仮定)

図-11 天端沈下 S と軸方向変位 L

Fig.11 Distributions of crown settlement and longitudinal displacement in Tsubakizaka Tunnel



(a) 切羽離れ 10m 時点



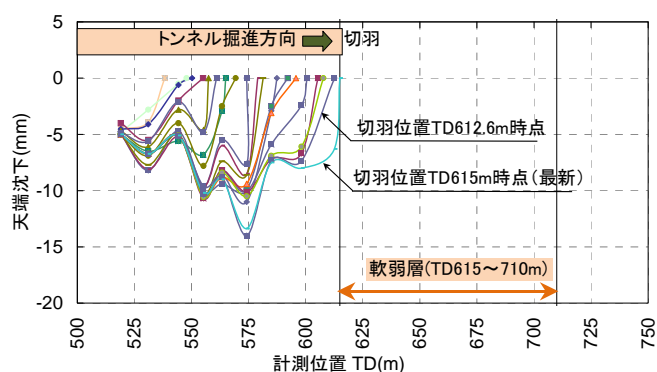
(b) 切羽離れ 15m 時点

図-12 L/S の分布

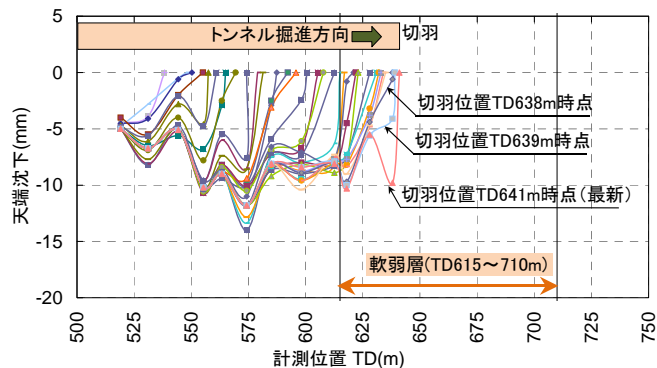
Fig.12 Distributions of L/S in Tsubakizaka tunnel

うな傾向は、切羽離れが大きい場合の L/S の方が、分布形状が滑らかになって、顕著に現れることを示している。この原因は、切羽離れが大きくなると、変位の絶対値が大きくなり、局所的な L/S の急変が緩和されるためであるとしている¹⁾。椿坂トンネルでは、切羽離れ 10m の結果を示した図-12(a)では読み取れないが、切羽離れ 15m の結果を示した図-12(b)に着目すると、比較的地山の軟弱な D I p 区間に該当する C 部 (TD628m 以降) において、各計測点間でばらつきはあるものの全体として L/S が下降する傾向が見られた。

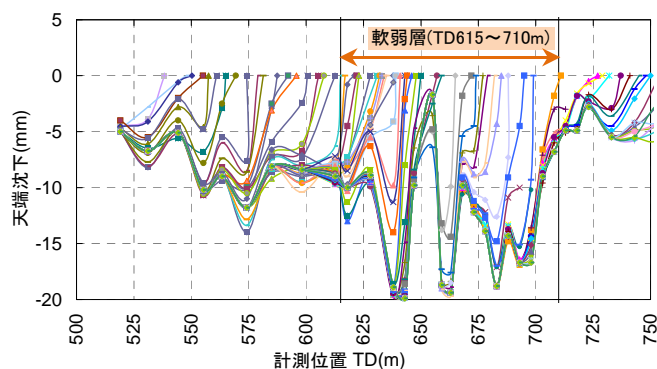
本結果は、事後評価としての分析結果であるが、も



(a) 切羽位置 TD615m



(b) 切羽位置 TD641m



(c) 切羽位置 TD779m (収束値と仮定)

図-13 切羽位置に応じたたわみ曲線の変化

Fig.13 Change of deflection curves according to the face advance

リアルタイムで L/S を用いた分析を実施していれば、事前に軟弱層中でトンネルの変形量が大きくなる区間 (TD638m 以降) を事前に予測することができた可能性がある。

4.4 たわみ曲線を用いた分析結果

図-13 に、椿坂トンネルのデータを用いた、たわみ曲線の分布を示す。切羽が軟弱層への変化点 (TD615m) に位置する時点と、軟弱層通過中の TD641m に位置する時点および TD779m (収束値) の 3 ケースを示した。以下にたわみ曲線に関する考察を示す。

- 図-13(a)に着目すると、切羽が TD615m に到達した時、その手前 (切羽位置 TD612.6m) までと比較して、たわみ曲線が下に膨らむことがわかる。これは図-8 に示したように切羽前方に軟弱層が存在するときのたわみ曲線の傾向である。したがって、地山状況が悪化すると予測できる。実際に TD615m 以降では肩部の崩落を生じ、切羽の状態は悪化した。
- 図-13(b)に着目すると、切羽位置が TD638m から TD641m へ進行する際、天端沈下量の増分が後方の結果と比較して、非常に大きいことがわかる。このように、たわみ曲線を描くことにより、掘削後初期段階での変位増分 (いわゆる初期変位速度) が大きいことを視覚的に理解することができる。したがって、早期に補強対策工の必要性などを判断するツールの一つとして有効に利用できると考えられる。
- 図-13(c)に着目すると、たわみ曲線の全体の分布をみることで、トンネル距離程においてどの区間が軟弱層でトンネルの変形量が大きかった区間であるか明確に把握することができる。

以上の考察から、たわみ曲線を日常の計測管理の一貫として描画することにより、地山条件が悪く坑内変位が大きい区間を事前に (もしくは、早期に) 把握できるため、施工の安全性や効率性の向上を図ることが可能であると考えられる。

なお、たわみ曲線は天端沈下だけでなく、内空変位量や脚部沈下量でも表示することができる。そのため、今後は土被りや初期地圧などの地山条件やトンネル断面形状や構造に応じて、たわみ曲線を描く適当な値を適宜選択し、より有効に活用することを考えている。

5. まとめ

本研究では、L/S およびたわみ曲線を用いた切羽前方地山予測手法について、三次元逐次掘削解析結果を用いて詳細に説明した。また、施工中の椿坂トンネルで取得した坑内変位計測結果を用いて、切羽前方地山予測を事後評価として実施した。

三次元逐次掘削解析の結果から、両手法の原理を明確にした。また、道路トンネルのような馬蹄形断面トンネルでの切羽前方地山予測手法の適用性について確認することができた。

椿坂トンネルでの事後評価結果から、L/S は軟弱層中でトンネルの変形量が大きくなる区間を事前に予測することができた可能性を示した。たわみ曲線は、切羽前方地山予測として有効であるとともに、計測断面間において切羽が移動する際の地山の変形挙動を視覚的に把握することができるという点で利点があることを示した。

ただし、椿坂トンネルでの事例から、L/S を用いた手法について以下の課題があることがわかった。

天端沈下量が小さい場合、L/S が隣接する計測点に比べて極端に大きくなることがある。この場合には単純に L/S の分布形状だけで評価することが難しく、天端沈下や軸方向変位の分布形状も併せて総合的に評価する必要がある。

また、軸方向変位の計測結果に関する課題もある。トータルステーションは、距離の測定精度が約 3mm 程度である。軸方向変位の値が小さい場合には、精度の影響が大きく、L/S の評価結果が不明確になる。

さらに、坑内変位計測は 10m～30m 間隔で実施することが一般的であり、計測頻度も 1 回/日程度である。このような間隔・頻度の場合、計測断面間における地山の変化を見逃してしまう可能性がある。高精度に切羽前方地山予測を行うためには、計測間隔・頻度を簡易に増加できるようにする必要がある。

今後は、上述した課題を解決できる方法を考案したいと考えている。また、施工中のトンネルでリアルタイムに L/S およびたわみ曲線を適用・分析することで、事前に切羽前方の地山状況を予測可能かどうか検証して、実績を積みたいと考えている。

謝辞

本研究に先立って発表した「トンネル坑内変位計測による切羽前方地山予測³⁾」は、第 39 回岩盤力学に関するシンポジウムにおいて優秀講演論文賞を受賞した。ここに記して謝意を表す。

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 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) 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 04, 2010.
- 5) 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.
- 6) 日本道路公団: トンネル数値解析マニュアル, p3-26, 1998.
- 7) 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 (投稿中), 2011.