

三次元内空変位計測データの有効な活用方法

小松原 渉^{1*}・進士 正人²

¹山口大学大学院理工学研究科 社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

²山口大学大学院理工学研究科教授 社会建設工学専攻 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

* E-mail: komatsubara@rock.civil.yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネル施工時には、測距儀による三次元絶対変位計測が実施されている。それにも関わらず、NATMが導入されて以降、内空変位計測は2点の計測点間の相対変位計測であったため、内空変位方向成分以外の三次元絶対変位に対する評価は行われていないのが現状である。

本研究では三次元数値シミュレーションを実施し、トンネル掘削時の、内空変位計測位置での三次元変位挙動のトンネル掘削による変化を求めた。あわせて、数値解析結果と実際の現場変位計測データを比較した。その結果前方地山の弾性係数の違いによりトンネル天端位置の縦断方向の変位発生量が強く影響を受けることがわかった。

Key Words : three dimension, displacement, rock mass classification, longitudinal direction,

1. はじめに

わが国の地質状況は脆弱でかつ複雑である。そのような地質状況においてトンネルなど地中構造物を安全かつ経済的に構築するには、地質状況の入念な事前調査が欠かせない。しかし、現在の調査技術では地山状況の完全な把握はほとんど不可能である。そのため、トンネル施工中に現場計測を合わせて実施し、トンネル施工時の地山挙動を計測しながら施工を進める「情報化施工」が実施されている。山岳トンネル施工の標準工法であるNATMが昭和50年代前半に日本に導入されると、切羽観察ならびに現場計測の重要性がより注目されるようになった。これはNATMでは、吹付けコンクリート、ロックボルトや鋼製支保工が主たる支保部材として地山を支持することにより、地山自身もつ支保機能を最大限に働かせるという理念に立っている。また近年では、これまで経験が少ない掘削断面積が200m²以上の大断面トンネルの施工も多くなり、不連続面や地山強度などの影響をより強く受けるため、施工の安全性・経済性を確保するための切羽観察や現場計測による情報化設計施工の重要性がますます高まっている¹⁾。従来トンネル施工中の現場計測としては、A計測と称される内空変位計測、天端沈下計測がよく実施されている。これら従来の内空変位・天端沈下計測は主にスチールテープ型の計測システムにより計測が行われている。内空変位計の最小読取値は1/100mmといわれている。

近年では現場計測人員の合理化などの影響も受け、光波測量を応用した三次元計測が主流である。光波測量による精度は、光波測距儀の原発信器によりその正確さが決まり、使用温度範囲内および使用電子回路の条件内で、1~3ppm(1ppm=1/1000000)程度とされており、光波測距による誤差は距離により依存していることが分かるが、従来の内空変位計測と比較すると10m当り0.03mmから0.01mmとなりほぼ同様の精度といえる²⁾。

それにも関わらず、その結果の整理は、従来スタイルの内空変位、天端沈下計測といった整理方向と踏襲しており、従来のスチールテープ型の計測器を用いた計測と変わりがない。

著者らは、三次元数値シミュレーションを実施し、前方地山の物性が変化した場合の天端沈下および内空変位計測を含む三次元の計測シミュレーションを行った。そして、三次元計測データの中に特に前方地山の物性変化の影響を受けやすい方向があることを把握した³⁾。本研究ではこの結果に基づき新しい内空変位計測の計測結果の整理方法を提案し、実際のその成果を現場計測結果に適用した事例を示す。

2. 解析モデルおよび定義事項

本研究では三次元差分法解析プログラムである「FLAC3D」を利用し、弾塑性モデルで解析を行った。

本論文では、特に地層の変化や断層をシミュレートするために、弾性係数を低下させた領域やその厚さの違うモデルに設定し、トンネル掘削に伴う壁面の三次元変位挙動の変化について整理した。図-1 に使用した解析モデルおよび計測点、ならびに表-1 に解析物性値を示す。図-2 にトンネル断面と計測点位置を示す。

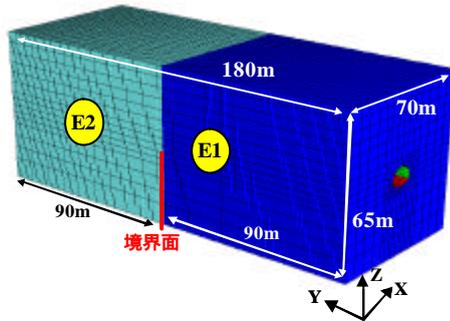


図-1 (a)地層の物性の違いモデル

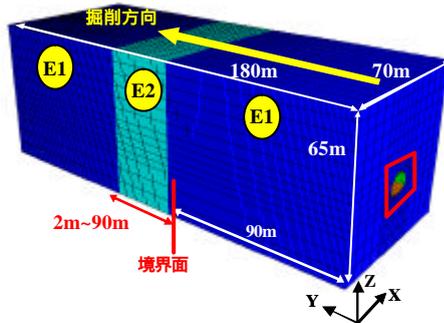


図-1 (b)断層の厚さの違いモデル

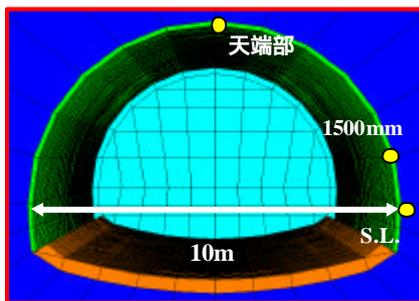


図-2 トンネル断面の拡大図および計測点の位置

表-1 (a) 解析に使用した物性値 (地層の物性の違い)

地山モデル		単位体積重量 (N/m ³)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	内部摩擦角 (°)	粘着力 (MPa)
E1	(1.0E) C	22560	1000	0.30	40	1.00
E2	(0.1E) D	22560	100	0.30	40	1.00
	(0.5E) D	22560	500	0.30	40	1.00
	(1.0E) C	22560	1000	0.30	40	1.00
	(5.0E) B	22560	5000	0.30	40	1.00

表-1 (b) 解析に使用した物性値 (断層の厚さの違い)

地山モデル		単位体積重量 (N/m ³)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	内部摩擦角 (°)	粘着力 (MPa)
E1	(1.0E) C	22560	1000	0.30	40	1.00
E2	(0.1E)	22560	100	0.30	40	1.00
	(10E)	22560	10000	0.30	40	1.00

解析上の掘削シミュレーションでは、1mずつの全断面掘削が行われ、支保部材は切羽手前1mの地点まで施工する。計測点は、図-2に示すように実際の現場で計測されている位置を参考に、天端部およびS.L.より1500mm上方 (以下1500mmと定義) の側面およびS.L.部の3箇所とする。また、地山弾性係数が変化する地点 (奥行き90mの地点) つまりE1とE2の境目を「境界面」と呼び、縦断方向における計測点の位置は、この境界面より「手前」(0~90m) および「奥」(90~180m) という表現を使用した。

前述のように本研究では、(1)地層の物性の違いによる壁面変位挙動の変化と(2)断層の厚さの違いによる変位挙動への影響に着目する。まず、(1)に関しては入力物性値の弾性係数のみを手前側と奥側で変化させ解析を行った。具体的には手前領域の弾性係数E1を地山等級C地山相当を想定した1GPaと固定し、奥側領域の弾性係数E2をその比率で変化させた0.1倍、0.5倍、1.0倍 (変化なし)、5.0倍の4パターンの解析を行った。

次に(2)に関しては、断層部分の領域の弾性係数E2とE1との比を0.1Eと10Eの2パターン用いて、E2における断層の厚さを2m、10m、20m、50m、90mの5パターンに変化させ、計10パターンの解析をおこない、断層の厚さの違いと物性値の違いによる影響を調べた。

どちらの解析においても、それぞれの領域における入力物性値の違いは弾性係数のみである。この理由としては、トンネル掘削時の変形に直接的に影響するパラメータとしてまず弾性係数の変化に着目し、今後、それ以外のパラメータ (例 粘着力、内部摩擦角など) にも検討範囲を広げる予定である。

3.数値シミュレーション結果

事前解析の結果、物性値が変化した場合数値シミュレーションでは、トンネル天端の縦断方向変位が最も影響を強く受けることが分かったため、シミュレーション結果では、この点の結果に着目し整理を行う³⁾。

(1)地層の物性値の違いによるトンネル掘削時の壁面変位挙動の違い

図-3に境界部より手前40mの計測位置における天端部

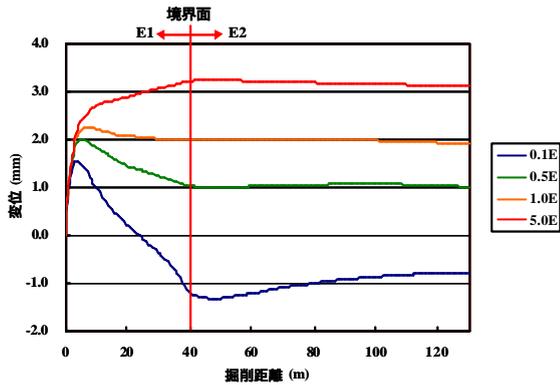


図-3 掘削に伴う境界面より手前40mの計測点における天端部縦断方向の変位挙動図

縦断方向の変位挙動を示す。図から明らかなように、まず切羽面が計測断面(0m)から5m程度進んだ地点までの変位挙動に着目すると、40m奥の地山物性値に関わらず、縦断方向の変位は正の方向すなわち掘削方向側に挙動することがわかる。この原因としては、トンネル掘削による応力解放による挙動が主たる影響であると考えられる。

次に、掘削が約5mの地点から境界位置である40mに到達するまでの変位の発生状況について考察する。図-3から分かるように、奥側領域の物性値(E2の物性値)が低下するほど、負の方向すなわち掘削方向とは逆の方向に挙動することがわかる。また、この傾向は切羽が境界面に到達するまで変わらない。さらに、この区間の変位で示される傾きは、奥側領域の物性値が低下するほど急になることがわかる。逆に、奥側領域の物性値が高くなる場合(5.0E)、この区間における傾きは正の方向すなわち掘削方向側に挙動することを示しており、前方の弾性係数が小さくなる場合(0.5E, 0.1E)はその傾向が強くなる事が分かる。そこで、その傾きに着目し境界面から計測点の距離の違いと、傾き(掘削距離5mから切羽が境界面に到達するまでの区間)の関係を整理した結果を図-4に示す。

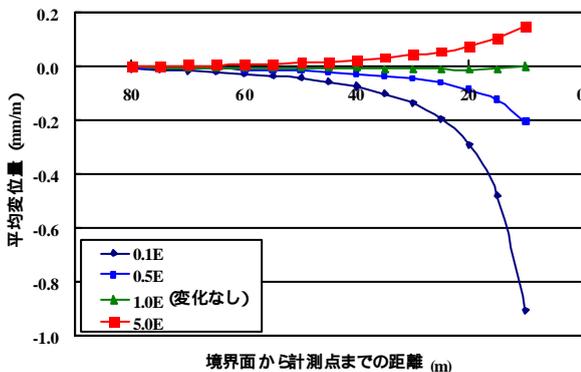


図-4 境界面から計測断面の位置と平均変位量の関係

図中、変位量を切羽距離で除した傾きを本文では「平均変位量(mm/m)」と定義する。図-4から分かるように、境界面より50m程度はなれた位置においても、前方の物性値が小さい場合には、徐々に平均変位量(mm/m)が負の値として表され、前方の物性値の変化による影響が出始めていることがわかる。そして、計測点断面が30m程度から、平均変位量(mm/m)が0.1mm/n程度表れており、前方の物性値の変化による変位挙動の違いが平均変位量(mm/m)の正負に表れる。すなわち前方の物性が高くなる場合、平均変位量は正の方向の挙動を示し、逆に前方の物性が下がる場合は負の傾向の挙動を示す。この傾向は計測点と境界との距離が近いほど、弾性係数の変化が大きいほど強く表れることが分かる。

平均変位量(mm/m)の算出はトンネル掘削5m以降の変位計測データから算出する。内空変位の計測点を設置し、内空変位のデータが取得されるようになるには、どうしても5m程度は切羽位置から遅れることが十分想定されるため、現場計測結果の適用に際しても、計測結果から直接平均変位量を算出しても問題が少ない。

(2)断層の厚さの違いによるトンネル掘削時の壁面変位挙動の違い

断層を想定する物性値としては、手前の弾性係数に対して悪い事例0.1倍(0.1E)と良い事例10倍(10E)の物性値を仮定し解析を行った。なお、断層の厚さとして2m, 10m, 20m, 50mの4パターンを想定した。図-5に境界より40m手前の計測断面における、(a)奥側の領域の弾性係数が高い場合と(b)低い場合における断層の厚さの違いによる天端部の縦断方向の変位挙動の比較を示す。

図-5(a)から明らかなように、断層の弾性係数が高い場合、掘削5m以降から境界面までの区間の変位の発生状況に着目すると、断層の厚さが20mおよび50mのように厚い場合は正の方向の変位挙動を示すことが分かる。

一方、断層の厚さが10mや2mのように薄い場合は、ほとんど変化見られず図-4で示した前方の物性値が1.0Eの場合(物性値に変化なし)とほぼ同様の変位挙動を示す。

次に、図-5(b)から明らかなように、断層の弾性係数が低い場合は、断層の厚さに関わらず変位の現象は顕著に現れる結果となる。図-6に、断層の弾性係数の高低別の各計測点における断層の厚さの違いによる平均変位量(mm/m)の図を示す。

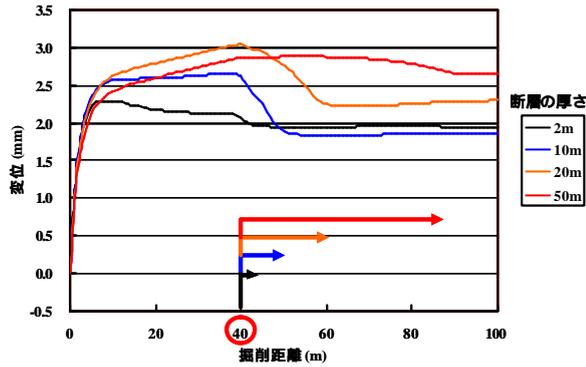


図-5 (a) 断層の弾性係数が高い場合

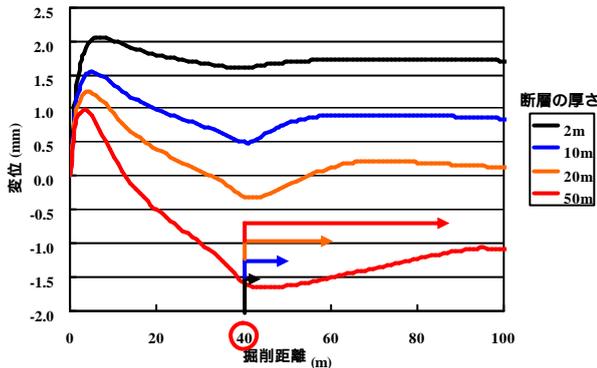


図-5 (b) 断層の弾性係数が低い場合

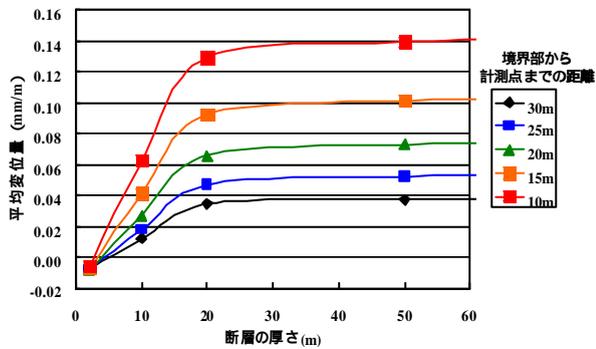


図-6 (a) 断層の弾性係数が高い場合

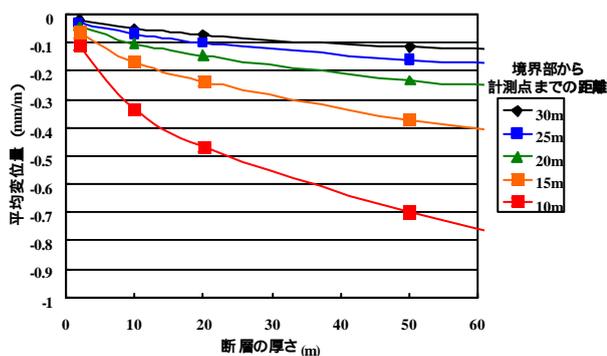


図-6 (b) 断層の弾性係数が低い場合

図-6 (a)から分かるように、断層の厚さが20mを超えると平均変位量(mm/m)は一定となることが分かる。つまり断層の弾性係数が低い場合は平均変位量に顕著に示されることが分かる。このことは、図-6(a)および(b)の縦軸の値からもわかるように約10倍の違いがあり奥の領域の弾性係数が低い場合のほうが大きく変形することからもいえる。

4. 現場計測データへの適用

実際のAトンネルにおける三次元現場計測結果を整理し、地山の良否を判断する指標として切羽観察記録を利用し、内空変位と比較した。図-7および8に、その一例として計測断面38 (Sta.39+13.5) における切羽が進行するごとの天端部の縦断方向変位の発生状況と計測断面38 (Sta.39+13.5) 以降の切羽評価点の変化状況を比較した図を示す。

ここに示すように、縦断方向変位は一旦負側すなわち掘削方向に対して逆方向に変位するものの、その後、正

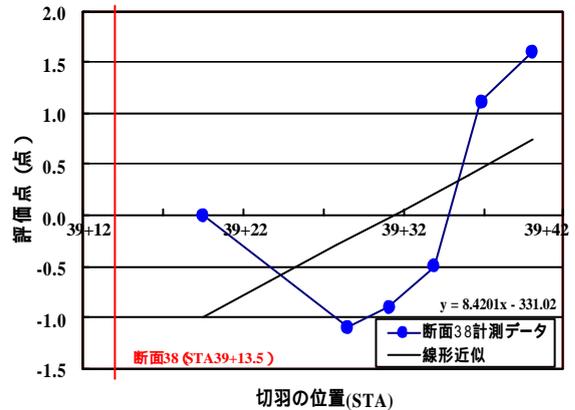


図-7 断面38の掘削に伴う天端部の縦断方向変位

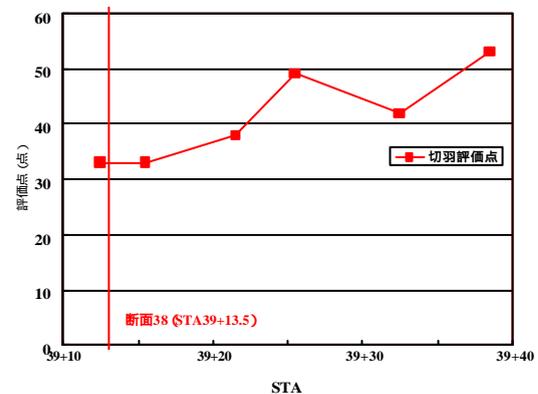


図-8 断面38以降の切羽評価点分布

側すなわち掘削方向側に変位する．この変位挙動は図-3に示す前方地山が良好となるケースと同様とする．図-4に計測断面以降の切羽評価点を示すが，現場変位計測値の評価としては計測断面38からの前方地山は良くなる傾向となり内空変位の傾向と切羽評価点の傾向が一致することを示す．次に，最小二乗法を用いてこれらのデータの線形近似直線を作成し，その傾きを前章で示すとおり平均変位量(mm/m)と定義し，それぞれの計測断面の変化傾向の変化を把握した．

(1)各計測断面ごとの平均変位量と評価点について

Aトンネルにおける現場変位計測データの平均変位量(mm/m)と実際に施工された支保工パターンとの関係を図-9に示す．この図に示すように計測断面29(STA36+93.5) から34(STA38+33.5) までに着目する．この間の平均変位量(mm/m)はおおむね負を示しており，図-4から判断すると，前方の地質状況は悪くなると予想ができる．実際に計測断面34(STA38+33.5) から38(STA39+13.5) にかけてD 相当の支保パターンが施工されており，地質状況は悪くなってきたと考えられる．そして計測断面34から計測断面37にかけて平均変位量(mm/m)は急激に正の値を示し，平均変位量(mm/m)が-0.05から+0.35に増加していることが分かる．同時に支保パターンを見てみると計測断面38(STA39+13.5) から計測断面39(STA39+33.1) の区間においてC 相当の支保パターンが施工されており，地質状況としてはこの断面の区間では良くなったものと考えられる．これと同じ挙動は計測断面41(STA39+73.6) から計測断面42(STA39+93.6) においても見られ，前章で明らかとなった，平均変位量(mm/m)が負を示す場合は前方の地質状況が悪くなり，平均変位量が正を示す場合は前方の地質状況がよくなるという結果とほぼ一致する．つまり，大まかにではあるが天端部の縦断方向変位の現場計測データは前方の地質状況を捉えているといえる．

次に，この天端部における縦断方向の現場計測データの平均変位量(mm/m)と切羽評価点との関連性を検討する．

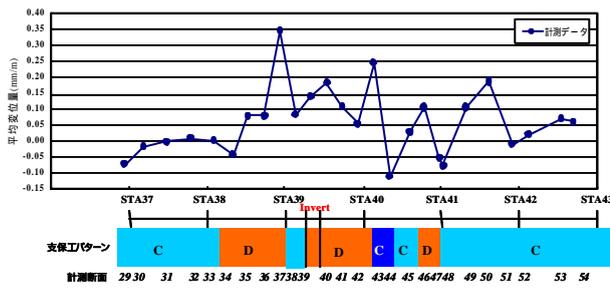


図-9 各断面の平均変位量と実際に施工された支保パターン

(2)変位計測データと切羽評価点との相関性

次に切羽評価点とこの平均変位量(mm/m)との関連性を調べた．図-10にその結果を示す．

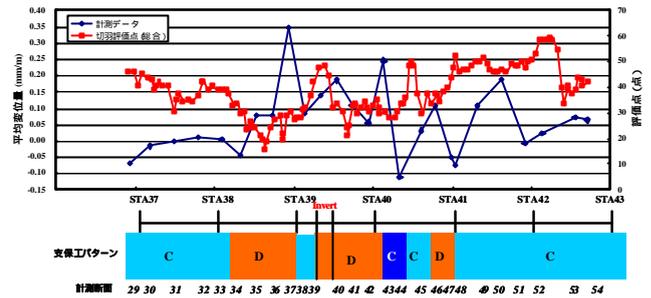


図-10 各断面における天端部縦断方向の平均変位量と切羽評価点の関係

図からわかるように，STA36+93.5からSTA38+33.5において平均変位量(mm/m)が負を示している部分では，STA38付近から切羽評価点が徐々に低下することが分かる．また，STA38+20からSTA39+0の平均変位量(mm/m)が急激に正を示している部分においても，切羽評価点はSTA38+55からSTA39+40付近にかけて急激に高くなっていることが分かる．以降順にSTA42+50まで見てみると，平均変位量(mm/m)が負を示すと切羽評価点は低くなり，平均変位量(mm/m)が正を示す場合は，その大きさに従って切羽評価点も高く変化していくことが分かる．以上の結果から，天端部縦断方向の平均変位量(mm/m)と切羽評価点とも十分に相関があるといえる．

(3)平均変位量と切羽評価点の変化との関係に関する検討

STA38+50からSTA39+50の区間やSTA40+0からSTA41+0，STA41+50からSTA42+50の区間で，切羽評価点のほうが平均変位量より若干遅れて同じ挙動を示していることがわかる．ここでは，代表的な部分としてSTA38+50からSTA39+50の区間に着目し検討を行う．図-11に図-10中のSTA38+50からSTA39+50までの拡大図を示す．

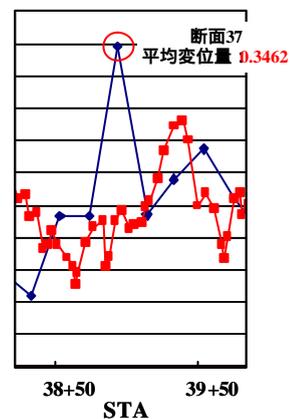


図-11(a) STA38+50からSTA39+50までの詳細図

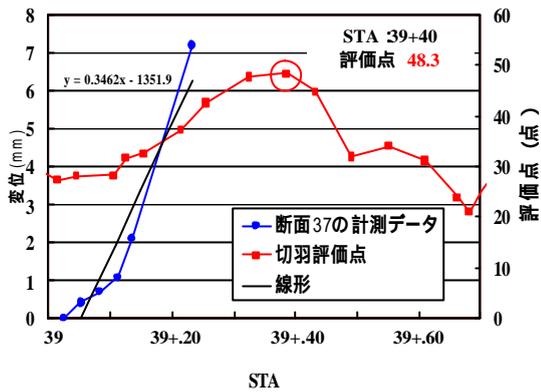


図-11 (b)計測断面37の6回の現場計測データと切羽の位置関係

まず赤印で示される切羽評価点は、その地点（横断面）の地山の状況を評価していると考えられる。次に、青印の線形近似直線の傾きで示される平均変位量（mm/m）は掘削に伴い6回の計測データから求められた値である。この6回の計測の間に切羽は平均15mから20m程度進む。そのため図-11(b)に示した図は、計測断面37の平均変位量（mm/m）を計算するに当たり使用した6回の変位計測データと計測されたときの切羽の位置関係を示している。

この図からわかるように、計測断面37の平均変位量（mm/m）からは、地山状況が極めてよくなることが予想される。しかし、切羽評価点からは、計測断面37(STA39+05)から徐々に切羽評価点はよくなるものの、STA39+40以降は切羽評価点が下がってくるのが分かる。この結果から地山状況の予想として利用できる範囲はたかだか40m程度ではないかと考えられる。従って、この結果からは内空変位から前方の地山状況を予測するには20m間隔程度の計測間隔が必要と考えられる。

5. まとめ

天端部の縦断方向の変位に着目することにより、前方の物性値の違いが事前に影響することがわかった。その変位挙動は、前方の物性値が軟らかい場合は平均変位量として負の値を示し、前方の物性値が硬い場合は正を示すことがわかった。また、前方が硬い場合よりも軟らかい場合のほうがより変位挙動に大きな影響を及ぼすことも分かった。

また平均変位量を利用し現場データに適用した場合には、極所的ではあるが、現場計測データの平均変位量（mm/m）と切羽評価点の挙動がよく一致する部分があった。特に一致した場所は前方の地山状況が、現在より悪くなる部分においてははっきりと見られる結果となった。これは、解析において示されたように、前方が柔らかい場合のほうが変位挙動に影響を及ぼすという点で一致しているといえる。

謝辞：本研究に当たり、膨大な現場データの提供ならびにアドバイスを頂きました西日本高速道路株式会社高知工事事務所の関係各位に厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日比野敏：岩盤構造物の情報化設計施工，pp.7-16，社団法人地盤工学会，2003。
- 2) 日本測量機器工業会編：最新測量機器便覧，pp110-118，山海堂，2003。
- 3) 小松原渉，進士正人：三次元内空変位計測結果のより有効な活用方法について，トンネル工学報告集，第17巻，pp.183-186，2007。

EVALUATION AND EFFECTIVE UTILIZATION METHOD OF THREE DIMENSIONAL CONVERGENCE MEASUREMENT DATA

Wataru KOMATSUBARA and Masato SHINJI

Recently, it became general that the convergence measurement is replaced to an optic instrument from the conventional convergence steel tape. By using optical instrument, three-dimensional deformation behavior on the tunnel wall would be able to be simply measured. However, three-dimensional deformation behavior in the tunneling is hardly utilized in time. In this study, three-dimension numerical analysis was used and author focused on the incliment which is indiceted by behavior of displacement of longitudinal direction. This slope and slope obtained by on-situ data were compared. It was found out placement of longitudinal direction indicates ground condition behind a tunnel face.