

垂直縫地ボルトを利用した 地表面沈下の抑止に関する実験結果の評価と考察

奥田 康¹・阿部 敏夫²

¹正会員 日本鉄道建設公団 新幹線部新幹線第二課長 (〒100 東京都千代田区永田町2-14-2)

²正会員 日本鉄道建設公団 計画部積算課係長 (〒100 東京都千代田区永田町2-14-2)

都市域における土被りの小さい未固結地山を、NATMで施工する場合の最大の課題である地表面沈下の抑止に地上から垂直縫地ボルトを設計し施工した。

本論文は地表、地中、トンネル天端の各変位とボルト軸力の経時変化を整理解説したものであり、ボルトが無い場合と有る場合との計測値と挙動の相違から垂直縫地ボルトの効果を論証しているが、掘削加背割の各段階での掘削断面外の側方に配置されたボルトの地表面沈下に対する有効性を分析し、トンネル上方地山に梁とグランドアーチの形成を促す垂直縫地ボルトの適切な配置を提唱したうえ、計測、解析結果を通じて有効性を論理的に評価、検証している。

Key Words: vertical anchor bolts, ground surface settlement, beam, ground arch, experimental result, analysis

1. まえがき

都市域においてトンネルを建設する場合、対象地の土地利用状況の高度化等に起因して、従来、トンネル掘削には不適切と考えられたような地質や施工環境での工事を余儀なくされる例が多く見うけられるようになり、これらを克服する積極的な技術開発が必要になっている。

一方、このような状況の変化を受け、掘削工法も従来、都市トンネルに多く採用されてきたシールド工法、開削工法のほか、経済性に優れ、断面変化の対応に比較的の自由度が高い、NATMに代表される山岳工法を採用する例がふえている。また、これらは、積極的な現場計測および数値解析の活用により、その適用範囲を広げており、そのニーズは年々増大する傾向にある。都市域ではビルや住宅等の建物の他、重要なライフラインが埋設された幹線道路や鉄道が密に立地していることから、既存の工作物や施設物とトンネルとが近接したり交差することはむしろ通例ともいえるもので、これらの施設物の機能に支障を与えた場合の社会的影響の大きさを勘案するとトンネル掘削による地表面沈下は、極力抑止する必要がある。このように、地表面沈下を抑止する問題は、都市トンネルの重要な研究テーマであり、この点に主眼をおい

た研究および工法の開発は少なくない。

地表面沈下を取り扱った研究のうち、降下床実験によるものでは、村山ら¹⁾はアルミ棒積層体、桜井ら²⁾は、更に土圧計を中心に設置して、変位とともに圧力を測定し、地山のアーチ作用について考察している。疑似トンネルを用いた実験では、足立ら³⁾は同様のアルミ棒積層体を用い、変位を境界条件とし、桜井ら⁴⁾は圧力を境界条件として、土被りの違いによる変位挙動をシミュレートしている。また、上野ら⁵⁾は砂中に埋めた実験装置を用い、3次元状態における土被りの違いによる変位挙動をシミュレートしている。さらに、現場計測で横山ら⁶⁾は、NATMの場合においても地表面沈下の横断分布が正規分布によって評価出来ることを示しており、筆者ら⁷⁾も、工法の比較実験から地山にグランドアーチを形成することにより、地表面沈下量を抑止できることを示した。しかし、何れの研究も、対象地山として砂質土を念頭に置いたものが多く、本文で扱うような圧縮性を伴う造成盛土等を対象としたものは見あたらない。また、本文では地表面沈下の抑止方法として垂直縫地ボルトを用いているが、これを対象とした研究は極めて少ない。進士ら⁸⁾は、散弾の集合体で疑似地山を形成し、ボールチェーンを垂直縫地ボルトに見たてた実験装置を用い、土被りを変化させた場合の沈下抑止効果について実験結果および数値解析から

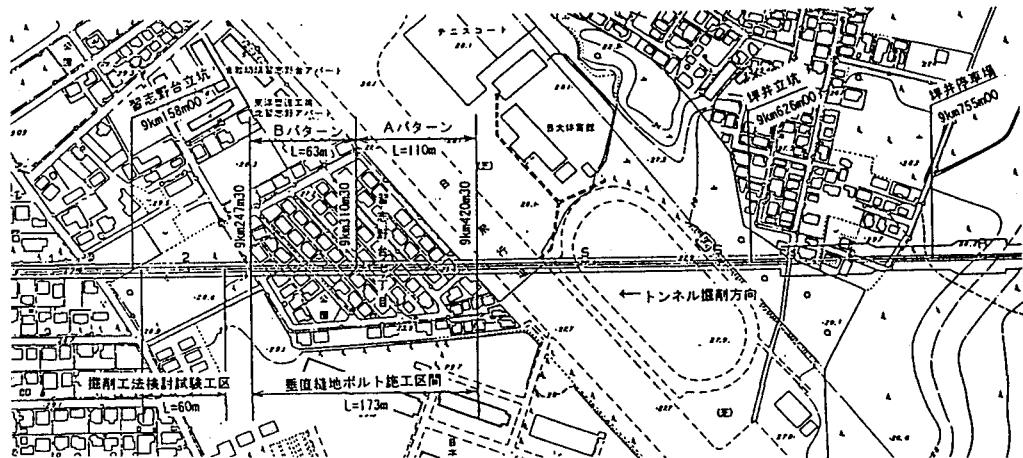


図-1 実験に供したトンネルの位置平面図

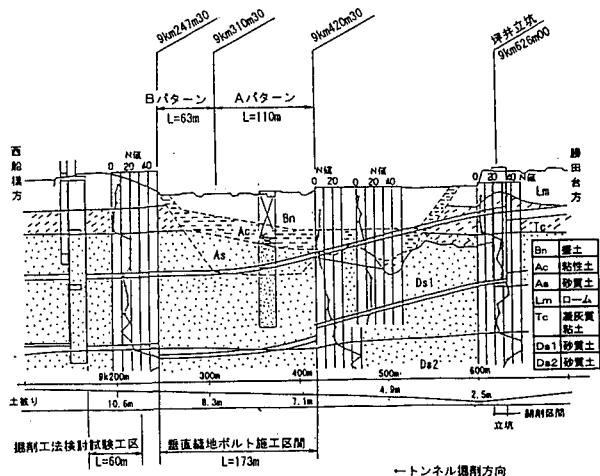


図-2 地質縦断面図

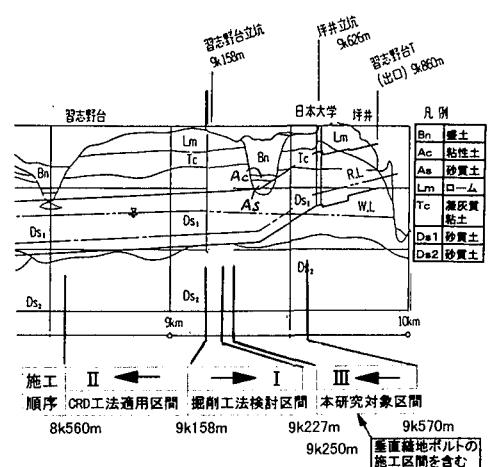


図-3 全体地質概要図および掘削順序、掘進方向解説図

総合的に評価している。

本論文は、土被りの小さいトンネルにおける地表面沈下の特性と、垂直縫地ボルトの配置による地表面沈下量、地中変位量及びボルト軸力の計測値を通して、垂直縫地ボルトの地表面沈下に対する抑止効果を定量的に評価するとともに、逆解析によって地中ひずみの分布を定量化し分析を加えたものである。

2. 地質および物理的性質等

垂直縫地ボルトを用いて実験を行った区間は、図-1の「垂直縫地ボルト施工区間」であり、同区間の地質縦断図を図-2に示す。

筆者らは垂直縫地ボルトの効果を検証するために8km

560m付近から9km570m付近までの地表面沈下量やトンネル天端沈下量を用いていることから、図-3に上記区間全体の地質縦断概要図とトンネルの施工順序および掘進方向等を解説図として示している。

本トンネル(延長2,360m)では、施工に先立ち新たに合理的な掘削工法を開発する必要性があったため、図-3に示す「掘削工法検討区間」を設け、施工順序Ⅰ区間でCRD工法と新たに開発したCRD工法の実物大実験を実施したうえ、CRD工法を標準掘削工法として以降の施工を行った。施工順序Ⅱ区間は、Ⅰ区間の結果を基に、CRD工法を適用して掘削した、いわゆる標準的な区間であり、Ⅰの区間と同様、おおむねフラットな台地地形で、図-3のとおり表層からローム層と凝灰質粘土が各3m程度被覆し、以深は成田層の洪積砂層が厚く分布する。

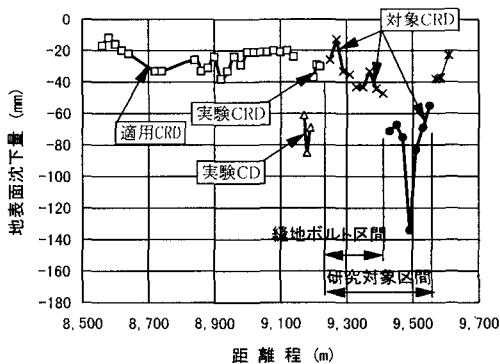


図-4 トンネルセンターの地表面沈下量

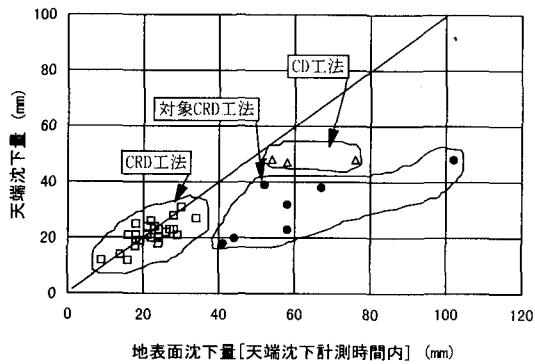


図-5 トンネル天端沈下量と地表面沈下量の関係

施工順序Ⅲの区間は垂直縫地ボルトを施工した区間を含む本研究の主たる対象区間であるが、図-2及び図-3に示すとおり地質的には他の区間とかなり様相を異にしており、基盤となる洪積砂層の成田層から表層側に向かって、沖積砂層、沖積粘土層と続く開析谷上に、ルーズな盛土が存在する宅地造成地である。トンネルは、この区間に土被り比 (H/D) が1を下まわる、きわめて小さな土被りで通過している。本区間を中心に各層別の地質と力学的な特性を示すと、以下のとおりである。

ア、盛土 (B n) : N値が5程度の砂およびロームを主体とした層で、コンクリートがら、木片等を混入した、全体的に見て、間隙を有するルーズな層である。

イ、沖積粘土層 (A c) : 開析谷斜面部および底部に分布する黒色のルーズな層で、多量の草木根が混在する、いわゆる腐植土層と凝灰質粘土により構成されている。この層の変形係数は極めて小さく、凝灰質粘土部で 40 kgf/cm^2 (3.9 MN/m^2) 程度、腐植土部分では $15 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ ($1.5 \sim 2.0 \text{ MN/m}^2$) 程度となっている。

ウ、沖積砂層 (A s) : 含水比が高く、粘性土分の多い緩い層でN値は5程度であり、変形係数も 40 kgf/cm^2 (3.9 MN/m^2) 程度にとどまる。

エ、洪積砂層 (D s1) : 基盤層である第四紀洪積世の成田砂層の上部層であり、開析谷底部では上載土荷重が小さいため、起点方の台地地形区間に比し固結度が低く変形係数も 180 kgf/cm^2 (17.6 MN/m^2) と小さい。

3. 対象地山の地表面沈下特性

未固結地山にトンネルを掘削した場合、土被り比が小さくなると掘削に伴う応力の再配分過程でトンネルの上部にせん断領域（緩み領域）が広がり、地山の弾性体としての連続性が失われることに起因して地表面沈下量が

急激に増大する傾向がある。このことは既往の研究^{1)~5), 8)}および現場計測^{6)~7), 9)}からも確かめられる。図-4は8km560mから9km610mまでのトンネル施工に伴う地表面沈下量を示したものである。図中「実験CD」および「実験CRD」は図-3に示す施工順序Iの区間の値であり、「適用CRD」は同じくII区間のものを意味している。また、「対象CRD」と記述したものはIII区間のものであるが、本論文の主たる研究対象であるところから「対象CRD」と記載した。

9km227mから起点方はほぼ同等の地山条件であるにもかかわらず「実験CRD」や「適用CRD」の地表面沈下量は「実験CD」の値の1/2~1/3程度にとどまっており、CRD工法の地表面沈下に対する十分な抑止効果が確認される。これは筆者らが検証⁷⁾したように、採用される掘削工法によってグランドアーチの形成に有意な差が生ずるためと考えられる。

しかし、9km250mから終点方の「対象CRD」のうち、垂直縫地が施工されている区間と発進立坑付近のパイプループ工の影響範囲区間を除いたもの(図-4中●で表示)では、このような優位性を有するCRD工法による施工にも関わらず、最大沈下量で134mm、平均でも79mm前後の値を示し、洪積砂層の「実験CRD」や「適用CRD」の値に比べて、かなり大きな地表面沈下量が計測されており、トンネル掘削断面の一部を含むトンネル上方の地山が沖積砂層、沖積粘土層及び造成盛土から構成されるという特質を有する区間であるという、主として地質上の要因から、地表面沈下の抑止に有効なCRD工法を採用しても地表面への大きな影響が避けられなかつたものと考えられる。

図-5は、トンネルの天端沈下量と、地表面沈下量との相関を示したものであり、「対象CRD」としては前述のとおり、図-4の●印のものを抽出しているが、トンネ

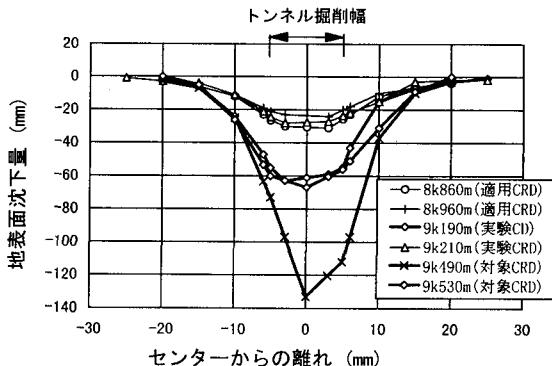


図-6 横断方向の地表面沈下量の分布

ルの天端沈下量と地表面沈下量とが有意な関係である必要性に着目し、地表面沈下量は天端沈下の計測開始時期以降の計測値としている。この結果をCD工法とCRD工法という掘削工法の相違を念頭に置きつつ区分すると、以下の3グループに区分される。

第1群(△印)はCD工法によるグループで、天端沈下量に対する地表面沈下量の比率は1を上回っており、トンネルと地表面との間で軽度の圧縮現象を呈している。

第2群(□印)は「実験CRD」と「適用CRD」を一括したグループで、地表面沈下量が比較的小さく、トンネルの天端と地表面の沈下量がほぼ等量となる、いわゆる「共下がり」現象をしており、桜井らのトンネル疑似モデルによる実験結果⁴⁾とも一致する。

第3群(●印)は、本論文が研究の対象とする地山の計測値のうち、垂直縫地ボルトの施工区間とパイプルーフ工の影響範囲区間のデータを除外したグループで、天端沈下量に対する地表面沈下量の比率が大きく、トンネルの天端と地表面との間で明らかな圧縮現象が認められる。同じCRD工法によって掘削をした△印の第2群と比較すると、トンネルの天端沈下量があまり増大していないのにもかかわらず、地表面沈下量が大幅に増大していることが大きな特徴となっている。

図-6は、トンネル横断方向の地表面沈下量の分布を示したもので「対象CRD」の2断面を含め、いずれも垂直縫地ボルトを施工していない。本図に示されるとおり、地表面沈下はおしなべてトンネルセンターから15m程度離れた位置から始まり、ほぼセンター直上付近で最大となるような正規分布型に似た形状特性を示しているが、既に述べてきたように、各測定位置ではかなりの地質的相違があるにもかかわらず、横断方向の影響範囲の総幅に殆ど差異が無いという特徴を呈している。このことから、トンネル直上部の地表面沈下量の値の大小は、トンネル掘削幅とそのごく近傍の地山物性に支配される

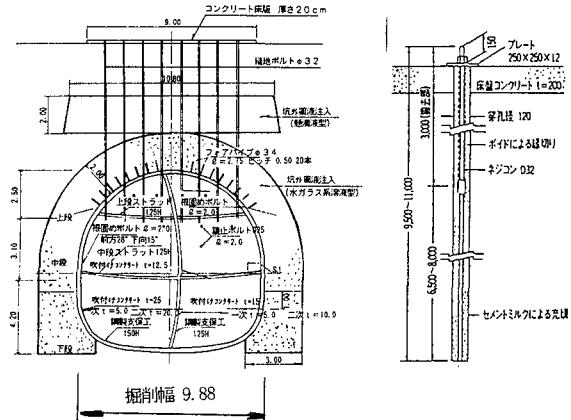


図-7 垂直縫地ボルト配置 (Aパターン)

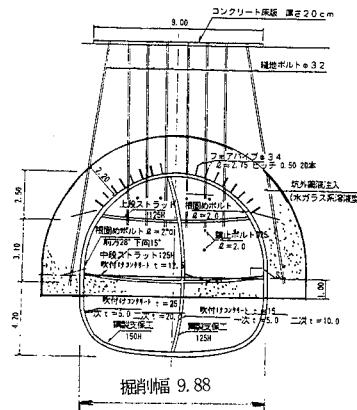


図-8 垂直縫地ボルト配置 (Bパターン)

ものであると考えられる。

4. 垂直縫地ボルトの配置とその設計

垂直縫地ボルトは、掘削に先行してトンネル掘削幅の内方の地山を改良する効果的な補助工法として、当初、図-7に示すAパターンの配置を考えた。ボルトは図-7に示す構造で、D32(断面積7.94cm²)を縦断方向、横断方向とともに1m間隔に平面配置して建て込んだ。これは、被り7.5mのトンネル上方の地山(単位体積重量1.45tf/m³[14.21KN/m³])の全土荷重(11tf/本[108kN/本])が、下方に吊り下がるように作用すると考えたもので、ボルトの引張応力度から見ると鉄筋の許容応力度(2,100kgf/cm²[206 MPa])に比し、約1.5の安全率を見込んだものとなっている。なお、ボルトは図-11に示す左右両側

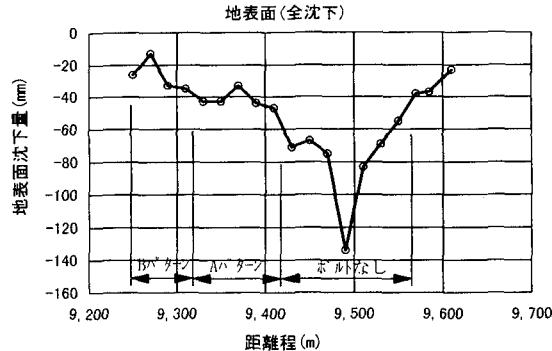


図-9 トンネル縦断方向の地表面沈下量の分布

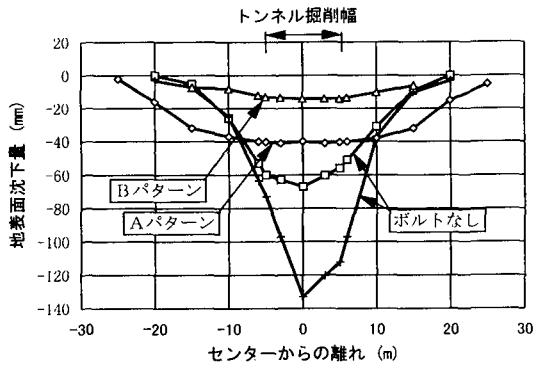


図-10 トンネル横断方向の地表面沈下分布

の上段掘削盤の下端まで挿入し、切羽到達前の鏡面の押し出し変形の防止にも有効に機能することを併せて期待することとした。

図-8のBパターンは、Aパターンを改良したもので、地表の限定された幅の範囲が占用可能となっている状況下において、施工可能な限度まで縫地boltによる補強範囲を広げたものであり、最外方の斜めboltは掘削断面の外方に配置したことから、鉛直に配置したboltと異なり、掘削に支障せず切断を要しないことが大きな特徴となっている。

5. 実験の結果

垂直縫地boltの実験に供した工区の掘削は、終点方9k618mの立坑壁面から開始し、掘削工法は全区間CRD工法による施工となっている。しかし、立坑からの発進部分には、立坑壁体や立坑壁面からトンネルの上方地山を補剛、補強したパイプルーフが存在するため、これらの影響範囲は検討対象のデータから除くこととした。従つて、掘削施工順序別に検討対象区間を区分すると、9k570mから9k420mの間が垂直縫地boltの無い区間、9k420mから9k310mの間が図-7のAパターンの区間、9k310mから9k250mの間が洞Bパターンの区間となっている。

(1) 地表面沈下量

図-9は、トンネルセンタ一直上部の縦断方向の地表面沈下量の分布を示したものであり、垂直縫地boltによる地表面沈下量の抑止効果が確認できる。boltの無い区間では、平均79mm、最大では134mmにも及ぶ地表面沈下量となっているのに比し、Aパターン区間での地表面沈下量は平均で42mmとかなりの低減となっている。さらに最外方のboltを斜材として配置したBパターンでは地表面沈下量は24mmと、一層の低減が確認される結果となっている。

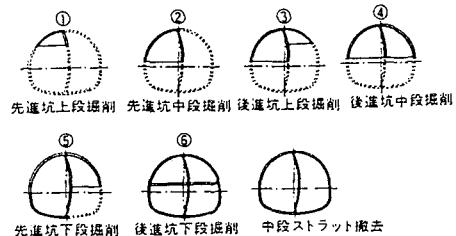


図-11 CRD工法の掘削順序

このように、垂直縫地boltは地表面沈下の抑止に効果を有し、boltの配置によっても抑止効果に有意な差が生じるものと考えられる。

図-10に横断方向の地表面沈下量の分布を示すが、垂直縫地boltが無い場合には、図-6にも示すとおり、トンネルセンターから、ほぼ15m程度離れた位置を影響範囲の始端とする沈下がみられ、トンネル直上部で急激に量が増大する性状が確認される。一方、A、Bの両パターンでは、これらの傾向と大きく異なりトンネル直上近傍の範囲では沈下の進行が殆ど認めらず、トンネル直上の地山があたかも剛性の高い梁のように連続体として挙動しているような挙動を示している。一般的に、沈下が進行する支配的要因は、せん断破壊による地山の不連続的な挙動と考えられることから、垂直縫地boltは、このような現象を未然に防ぎ、沈下を抑止しているものと考えられる。ここで、A、B両パターンの沈下性状に着目すると、Aパターンの場合、一体化された垂直縫地boltの施工ブロックの外方のゾーンでの沈下量が増大しており、結果的にはboltの施工が無い場合に比べて横断方向の影響範囲が拡大するという特徴的な傾向が見られる。これは、Aパターンの場合の垂直縫地boltの横断方向の施工範囲が不足していたため、boltにより補強され

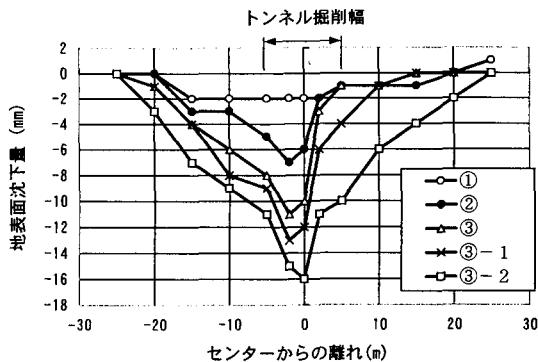


図-1 2 地表面沈下量の横断分布[A° ターン]

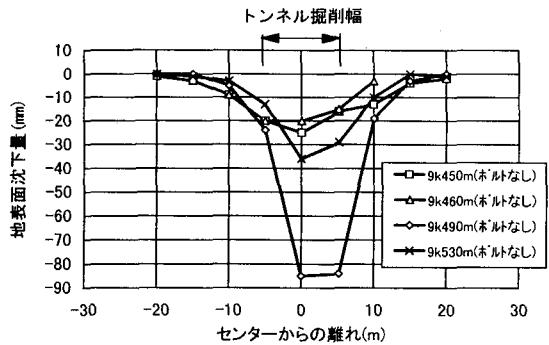


図-1 3 垂直縫地ボルトを施工していない場合の掘削③段階の地表面沈下量の横断分布

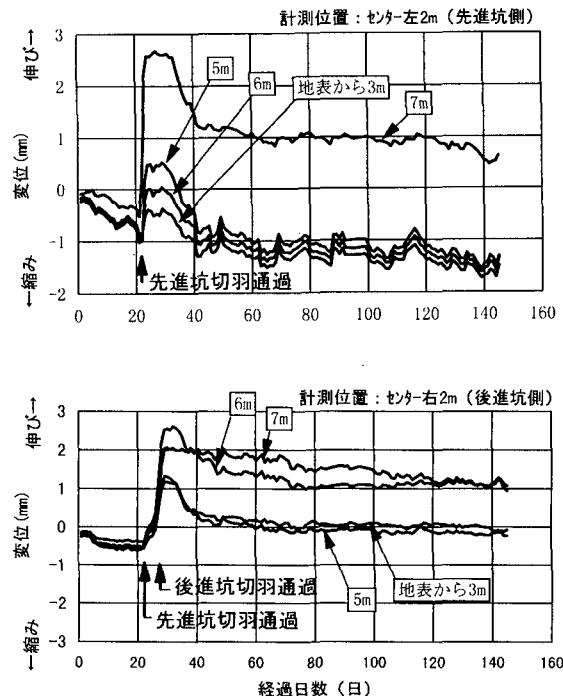


図-1 4 地中変位の経時変化[A° ターン]

た連続体として挙動する地山ブロックの外方にせん断破壊域が発生したことによるものと考えられる。

図-1 1はCRD工法の掘削順序を示し、図-1 2は後進坑の上段掘削完了時点までの地表面沈下量の分布を示したものである。図中(-○- ①)に掘削に支障する部分の垂直縫地ボルトが切断される直前の状態での先進坑上段掘削段階の沈下状況を示しているが、沈下量が2mm程度と小さく、さらに先進坑、後進坑両側の沈下量分布には未だ有意な差が生じていない。その後、先進坑上段①を掘削し、支障する部分の垂直縫地ボルトを切断の後、

鋼製支保工および吹付けコンクリートによって支保を施して、先進坑側中段②の掘削へと移行している。この段階の値を(-●- ②)として図中に示しているが、ボルトを切断した先進坑側の地表面沈下量だけが大きく進行し、垂直縫地ボルトが地山内に挿入されたままの状態となっている後進坑側への拡散が阻止されている。この傾向は、後進坑上段③の掘削時点で掘削に支障するボルトを切断する直前の段階(-△- ③)でピークに達する。その後、後進坑側の垂直縫地ボルトを切断することによって、時間の経過とともに(-×- ③-1), (-□- ③-2)へと移行

し、後進坑側の地表面沈下量が急激に増大しつつある過程が示されている。さらに、掘削を後進坑中段④、最終段階である下段⑤、⑥へと進めるに従って、図-10に示すとおり、先進坑側と後進坑側の沈下量がほぼ対称に近い形の分布へと移行し収束状態に至っている。

これに対して、垂直縫地ボルトを施工していない区間での後進坑上段③掘削終了時の地表面沈下量の横断方向分布を図-13に示しているが、左右ほぼ対象の形を呈し、図-12のAパターンの状況とは、大幅に異なったものとなっている。これらのことから、掘削断面外のごく近傍に設置された垂直縫地ボルトが、地表面沈下の拡散の抑止に大きく寄与しているものと考えられる。

このような結果をふまえ、新たにBパターンを設定し、図-8に示すように先進および後進のいずれの掘削断面にも支障しない掘削断面外の部分にボルトを設置することとした。このボルトはトンネル直上部の土地占用上の理由からやむを得ず斜めボルトとなつたが、さらに外方への地表面沈下の拡散を抑止する効果を期待することとしたもので、結果的に図-10に示すように、横断方向の地表面沈下の拡散を抑止し、トンネルセンタ一直上部付近の地表面沈下量の最大値をも低減する十分な効果があつたものと考えられる。

(2) 地中変位測定

Aパターン区間である9k354m80で行った地中変位計測の経時変化を図-14に示す。掘削に伴うトンネル上方の地中変位の挙動に着目すると、トンネル上方の地山は切羽が近づくにつれ圧縮性状を呈し徐々に増大するが、切羽の通過を境に急変し、トンネル近傍の測点間では一時的にかなりの「伸び」が計測されている。対象地山は、その後時間の経過とともに、再び圧縮性状を呈しつつ徐々に収束する結果となっている。このように、トンネル上方の地山の地中ひずみは、切羽が通過する際に一時的に「縮み」から「伸び」へと急転するが、この時点でトンネル近傍と、地表に近い部分の両ゾーンにおいて著しく異なる相対変位量が計測されている。この相対変位量の差から、地山内の変位が不連続となっている地表からの深度はきわめて明瞭で、後進坑側は地表面から5~6mの間、トンネルセンターおよびセンターから先進坑側へ2m離れた測点では、同じく6~7mの間であるところから、後進坑側の地山上方から先進坑の坑壁側に向って変位の不連続面が斜めに発生しているものと考えられ、後進坑側のボルトが先進坑側のボルトに比し有効に機能しているものと考えられるものの、変位抑止方策としてはなお改良の余地が残っている。

(3) ロックボルト軸力

垂直縫地ボルトの軸力は、Aパターン区間である

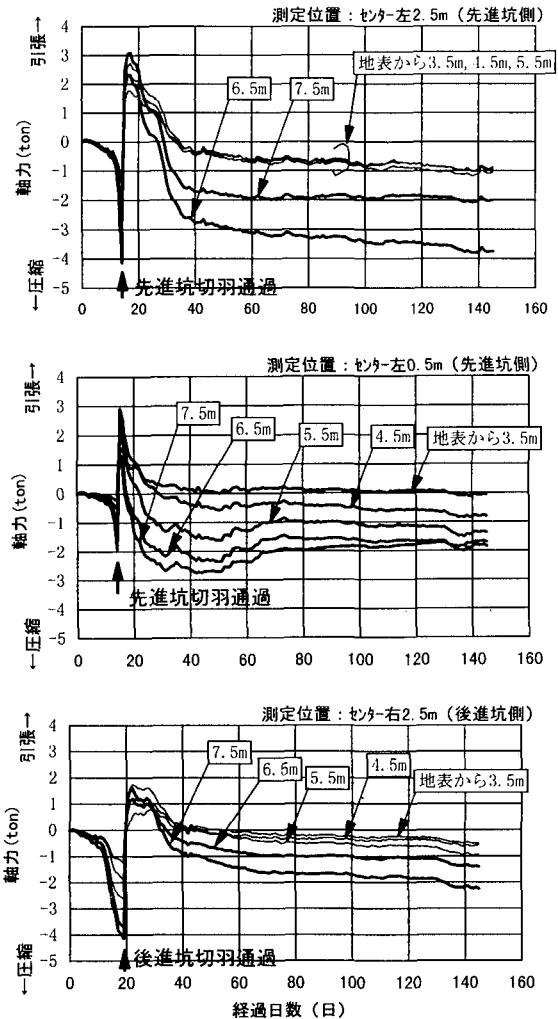


図-15 縫地ボルトの経時軸力変化[Aパターン]

9k359m80およびBパターン区間の9k278m80で測定されており、図-15はAパターンでの軸力測定の経時変化を示したものである。

垂直縫地ボルトの軸力は、図-15に示すように切羽の接近とともに急激に圧縮力を増し、切羽鏡面に近い範囲での先行沈下の進行を抑えているものと考えられる。また、図-16に先進坑掘削の際、支障する垂直縫地ボルトを切断する直前の軸力を示しているが、トンネル近傍ほど圧縮力が強く、掘削による応力再配分の影響を受けているものと考えられる。これらの結果から、掘削盤の底面まで打ち込まれた垂直縫地ボルトが、鏡面の押し出し変位と地中変位の双方に対し、十分な低減抑止効果を発揮することにより、鏡面の押し出し崩壊と掘削断面上方の地山への緩みの拡散を防いでいるものと考えられる。また、トンネル上方に配置された垂直縫地ボルトに

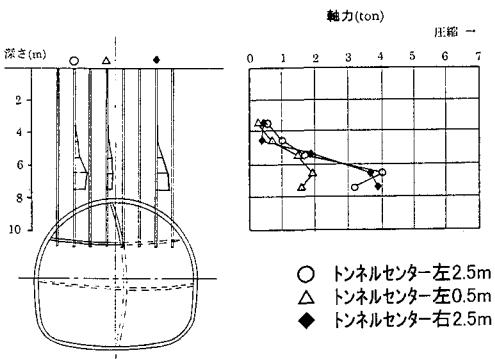


図-16 先進坑上段掘削時点での切断直前の縫地ボルト軸力[Aパターン]

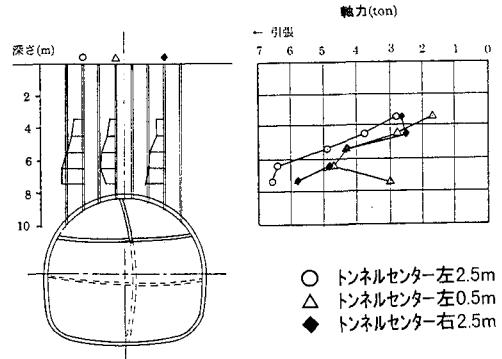


図-17 先進坑上段掘削時の切削前後の縫地ボルトの軸力変化量[Aパターン]

より、横断方向と同様に縦断方向にも剛性の高い梁のような連続領域を形成することによって、地表面沈下を抑制するものと考えられる。さらに、垂直縫地ボルトが「緩もう」とするトンネル上方の地山の荷を受け、結果的に地表面の沈下を抑制しうる「支持杭」に類似した効果も併せ発揮しているものと考えられる。

図-15に示されるとおり、垂直縫地ボルトの軸力は、掘削が進行し切羽が測定点を通過する時点できわめて引張側に反転する。この軸力の変化を詳細に見ると、切羽鏡面到達までの変化に比し、ボルトの切断時点での急激な変化がきわめて特徴的である。

図-17に先進坑側の垂直縫地ボルトの切削前後の軸力の変化量を示す。トンネル近傍でかなり大きな量の引張力が作用しており、図-14に示す地中変位の変化と併せ考えると、垂直縫地ボルトを切断する以前に地中変位の増大に抵抗していた杭体としての効果が、ボルトの切断とともに地山へ再分配されることを示しているものと考えられる。

図-15に示すとおり、切羽が通過しボルトを切断して軸力が引張側に反転した後、垂直縫地ボルトの軸力は漸次再び圧縮側へと移行する。この傾向は、地山の物性に依存するところが大きく、当該地山の場合にはトンネル上方の地山が造成盛土であることに起因して長期間にわたり経時的に圧縮沈下が継続するものと考えられる。

図-18は、ボルト切断以降、定常状態に収束するまでの間の軸力の変化量を示したものであるが、トンネル近傍での軸力の増大が顕著である。これは、支保工施工後に進行するトンネル上方地山の圧縮変位が、トンネルの支保工や覆工の剛性に起因する拘束抑止効果を受けていることによるものと考えられる。このように、垂直縫地ボルトは、安定した潜在ひずみ状態から掘削および支保工の施工という一連の変化に対応して、圧縮、引張の方

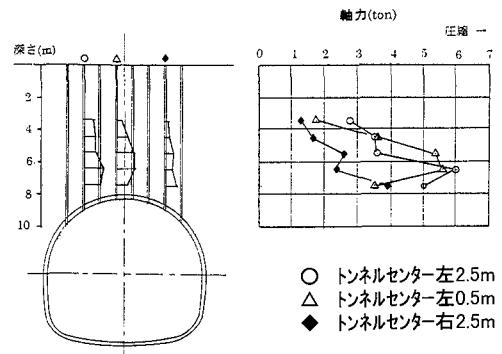


図-18 切断後の縫地ボルトの軸力変化量[Aパターン]

向性に係わりなく、地山の変位を安定側に保持しようとしているものであり、この作用がトンネル上部の地山の連続性を保持し、地表面沈下の抑制に有効に機能しているものと考えられる。

図-19はBパターンによる垂直縫地ボルトの軸力の経時変化を示したものであるが、図-15のAパターンの場合と比較すると「最外方」の斜めボルトを除き、両パターンのボルト軸力の経時変化は、定性的にも定量的にも類似の測定結果が得られ、両パターンには大きな差異が認められない。従って、垂直縫地ボルトの横断方向の施工ブロック内では、A、B両パターンとも同程度の地表面沈下の抑制効果が期待出来ると考えられる。A、B両パターンの垂直縫地ボルトの配置の大きな違いは、図-7、8に示すように、Bパターンの最外方に配置された斜めボルトにあり、このボルトがAパターンにおいて発生する横断方向への拡散を抑制する重要な役割を果たしているものと考えられる。

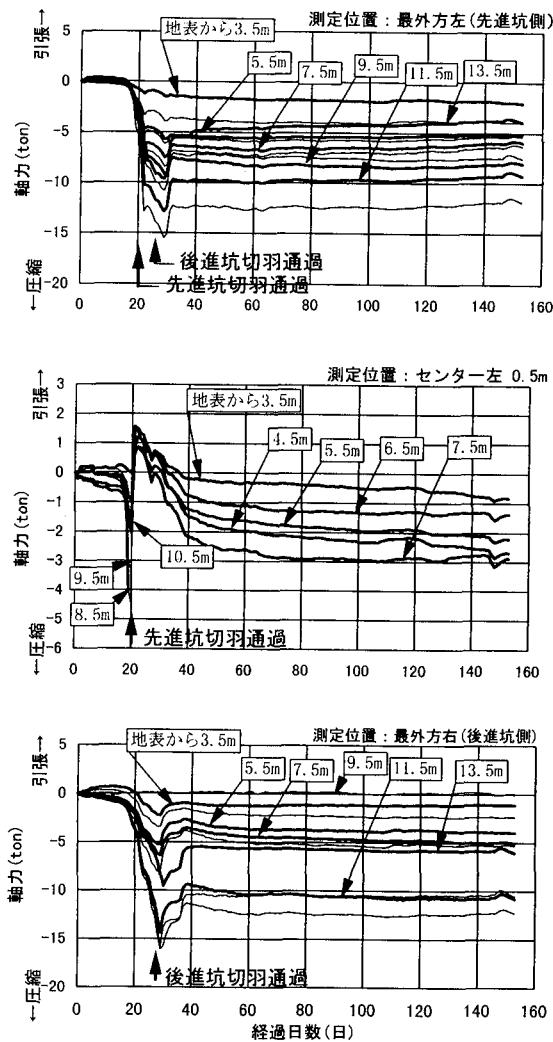


図-19 縫地ボルトの経時軸力変化[Bパターン]

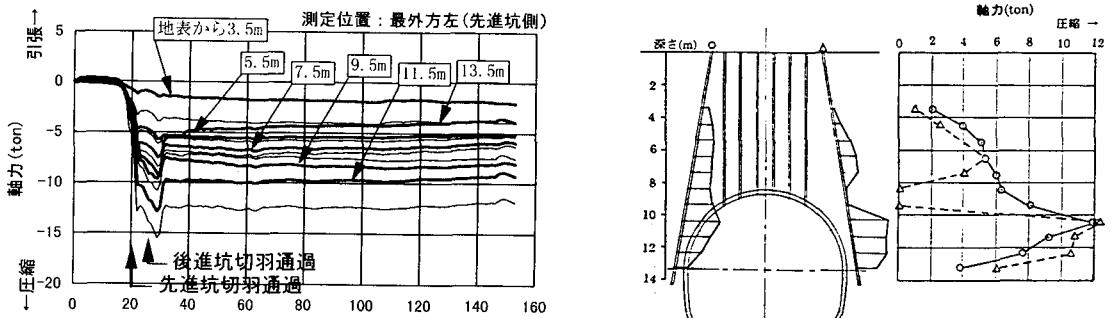


図-20 斜めボルトの最終収束軸力[Bパターン]

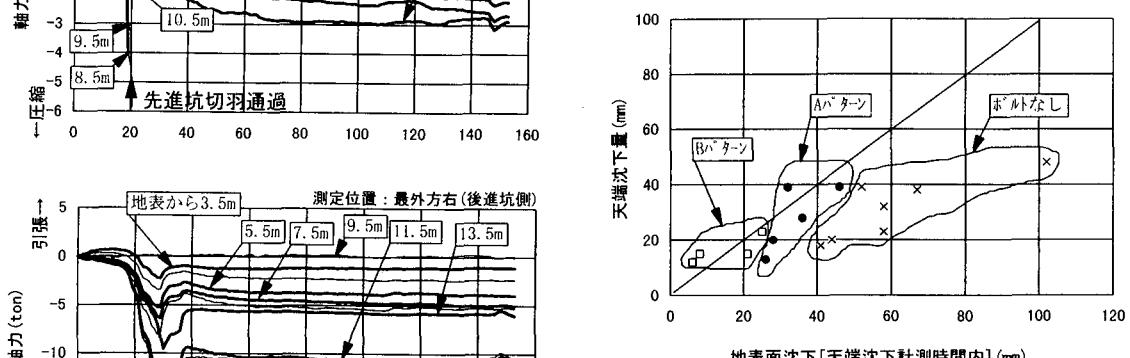


図-21 垂直縫地ボルトの施工パターンによる
トンネル天端沈下量と地表面沈下量の関係

めボルトは、トンネル直上の地山に配置された垂直縫地ボルト群によって形成される「梁」からの力を受け、地山にスムーズに伝達する「支承点」的な役割を果たしているものと考えられる。

(4) 計測による地山挙動の評価

これまでの一連の計測結果から、地山の緩みの増大と拡散を抑えることにより、効率的に地表面沈下が抑制できることが判った。

図-20は、斜めボルトの最終収束状態での軸力分布を深度別に示したものである。図-15、図-20から判るとおり斜めボルトの軸力は、終始、圧縮側で推移し、後続各坑の通過時点で若干引張側に反応する程度にとどまっている。特に、先進坑の通過時点で、トンネル直上の垂直縫地ボルトが、切断とともに大きく引張側に転じるのに対して、斜めボルトの場合は逆に圧縮側に大きく増加している。しかも、最終軸力を見ると、トンネルセンターでは最大で3t程度の圧縮力であるのに対して、斜めボルトの軸力は、トンネル上方のみに限ってみても2倍の約6t、側方部では4倍の12tを超える大きな圧縮力が計測されている。このような軸力挙動から、斜

めボルトは、トンネル直上の地山に配置された垂直縫地ボルト群によって形成される「梁」からの力を受け、地山にスムーズに伝達する「支承点」的な役割を果たしているものと考えられる。

図-21は、図-5と同様の目的で「天端沈下量」と、「天端沈下の計測時間内で発生した地表面沈下量」の関係を示したものであるが、図から判るように、地山は垂直縫地ボルトなしの状態では、大きな圧縮性を示す。これに対して、垂直縫地ボルトを配置したパターンA、Bの区間では、この点が大幅に改良され、天端沈下量の低減とともに、天端と地表面の沈下比率が、ほぼ等しくな

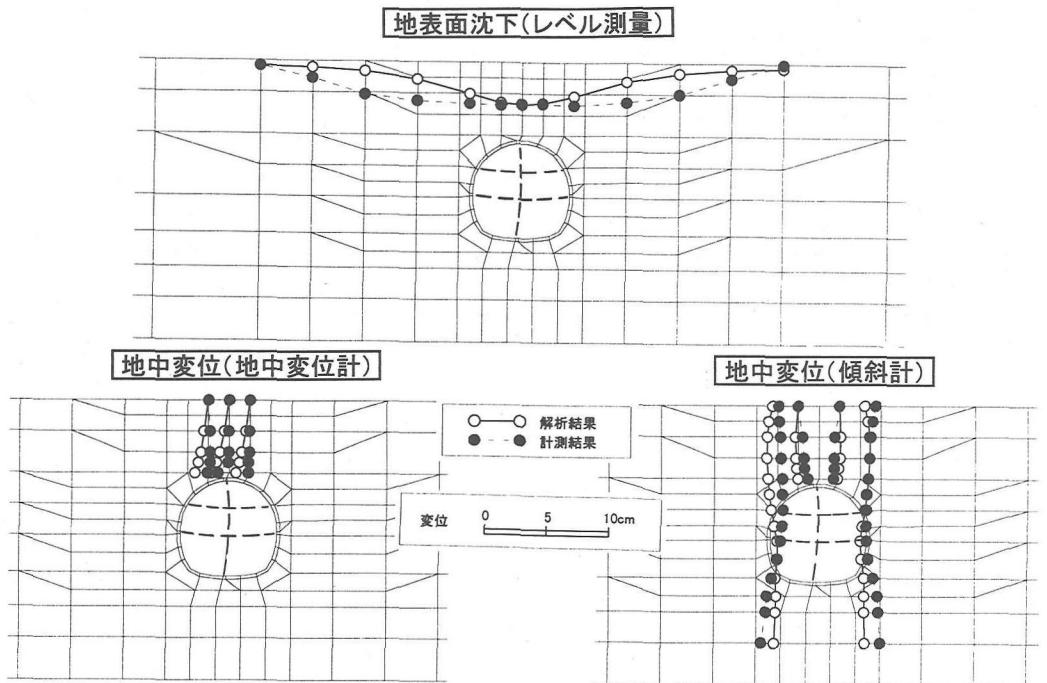


図-2-2 弾性逆解析による解析変位と計測変位[Aパターン]

る程度にまで至っており、地山の改良とともに、地表面沈下の抑制に際だった効果が確認される。A、B両パターンを比較した場合、天端と地表面の沈下比率には、特に有意な差は認められないが、トンネル上方の圧縮性の地山の層厚の違いを考慮したとしても地表面沈下量には、有意な差異が生じているものと考えられる。これは前述したように、Bパターンの斜めボルトを持つ沈下の拡散防止効果と支承効果によるものであり、図-2-1に示す値等からトンネル上部にグランドアーチが形成されたものと十分考えられる結果となっている。

6. 逆解析による地山の地中ひずみ分布と縫地ボルトの効果の分析

(1) 評価手法

計測結果を評価するのに逆解析法は、最も有効な手法の一つである。しかし通常、計測によって得られる現象は複雑で単に弾性論で評価出来るものは少ない。特に、土被りの小さいトンネルの掘削では、上方に不連続面あるいはゆるみ等の領域が発達し非線形的な挙動を示す場合が多い。このため、この点を考慮する解析法が必要であり、異方性パラメーター¹⁰⁾あるいはジョイント要素³⁾を用いる解析法が採られてきた。しかし、地質の弱線、

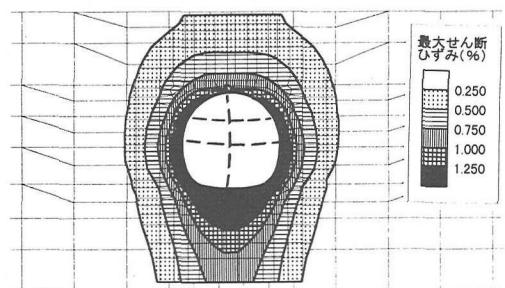


図-2-3 弾性逆解析による
最大せん断ひずみ分布[Aパターン]

位置及び方向、本論文で扱うような圧縮性を呈する特異な地山の情報等を正確に把握する事は難しく、簡便化に問題があった。そこで、桜井らは地山のモデル化を必要しない方法として非弾性ひずみを未知パラメータとした逆解析法^{11) 12)}を提案している。本実験結果の評価には、この逆解析方法を適用することとした。

地山に生ずるひずみ{ ε }は、弾性ひずみ成分{ ε_e }とそれ以外の不連続な挙動あるいはゆるみ等による全ての非弾性ひずみ成分{ ε_p }との和として次のように表される。

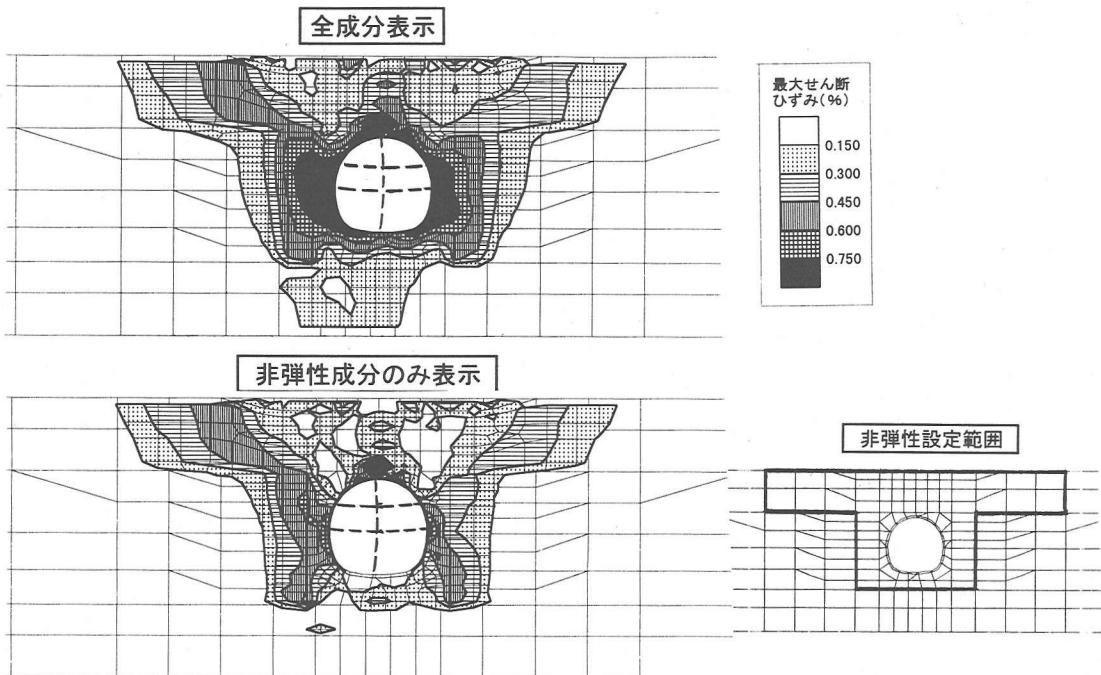


図-24 非弾性逆解析による最大せん断ひずみ分布[Aパターン]

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_e\} + \{\varepsilon_p\} \quad (1)$$

これに、Hookの法則を適用し有限要素法の定式化を行うことにより次式を得る。

$$[K]\{u\} = \{P_\rho\} + \{P_{\sigma_0}\} + \{P_{\varepsilon_p}\} \quad (2)$$

ここで、 $[K]$ は弾性体の剛性マトリックス、 $\{u\}$ は変位、右辺の外力項の内 $\{P_\rho\}$ は既知の重力、 $\{P_{\sigma_0}\}$ は未知パラメータの初期応力、 $\{P_{\varepsilon_p}\}$ は同様に未知パラメーターの非弾性ひずみによるものと表している。さらに、式(2)から未知パラメーターの成分を各々1とすることより得られる変位と未知パラメーター $\{x\}$ の関係式(3)から計測変位 $\{u_m\}$ に関するものは、式(4)のように求めることができる。

$$\{u\} = [A]\{x\} \quad (3)$$

$$\{u_m\} = [A_m]\{x\} \quad (4)$$

ここで、 $[A]$ 、 $[A_m]$ は、全体および計測部分に係る変位マトリックスである。

未知パラメータの決定は、式(4)から未知パラメータが計測変位の数より少ない場合は、最小二乗法で、逆に多い場合にはノルム最小化法により求めることができる。本論文では、地山の最大せん断ひずみの分布から垂

直縫地ボルトの効果を検討することを目的としているため後者によることとした。また、未知パラメーターは線形性が確保されているため、式(3)から弾性成分変位 $\{u_e\}$ および非弾性成分変位 $\{u_p\}$ を分離し次のように表される。

$$\{u_e\} = [A_e]\{x_e\} \quad (5)$$

$$\{u_p\} = [A_p]\{x_p\} \quad (6)$$

ここに、 $\{x_e\}$ 、 $\{x_p\}$ は、それぞれ弾性および非弾性成分の未知パラメーター、 $[A_e]$ 、 $[A_p]$ は、これに対応する変位マトリックスを表す。

(2) 逆解析結果

逆解析は、Aパターンは9k355m、Bパターンは9k270mのデータを用いて実施した。

解析に用いた鉛直成分の解放応力(σ_y)は、地山の比重($\gamma=1.45$)と地表面からの深さ(H)の関係から $\sigma_y=\gamma H$ と仮定している。また、支保工は、地山の弾性係数の増加として取扱うこととして特にモデル化をしていない。非弾性範囲は、トンネル周辺の応力集中および上部に対するゆるみの広がりを考慮し図-24、25に示す範囲とした。

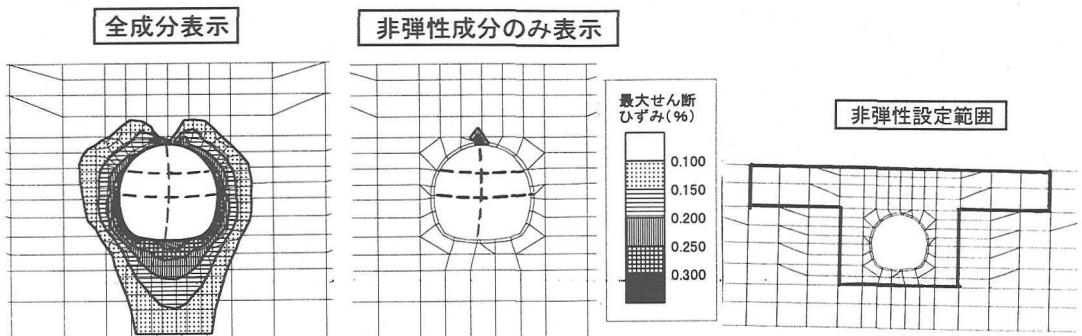


図-25 非弾性逆解析による最大せん断ひずみ分布[Bパターン]

a) 弹性逆解析

図-22に、Aパターンの弾性逆解析による解析変位と計測変位の比較を示す。両者の変位分布には明らかな相違があり、特に、地表面沈下量の解析結果をみるとトンネル中央部が最大となる、いわゆる正規分布型の曲線を示すのに対し、計測値はトンネル掘削幅の全幅にわたって一様な最大値を示すいわゆる鍋底型の性状となっており、垂直縫地ボルトの施工範囲内ではブロックマスとして沈下挙動を示すという特徴を有している。

地中変位について、傾斜計のデータと解析値を比較すると、トンネル掘削断面から上方では、後進坑側に比し、先進坑側の部分で計測値のほうがより大きな変位となっており、先進する導坑側の地山が地山物性値の低下というダメージをより強く受けているものと考えられる。また、地中変位計のデータから地表面と掘削天端の相対変位を比較すると、弾性解析では「伸び」なっているのに対し、計測結果は「縮み」となっている等の相違がみられる等、総じて解析値と計測値の相違は大きく弾性モデルでは現象を説明し得ないものと考えられる。

なお、非弾性解析との比較のため図-23に最大せん断ひずみ分布を示す。

b) 非弾性逆解析

Aパターンの非弾性逆解析による最大せん断ひずみ分布を図-24に示す。この図のなかで、逆解析結果の全成分を表示したものと、図-23に示す弾性逆解析結果とを比較すると、弾性解析では最大せん断ひずみがトンネル周辺に集中するのに対して非弾性解析では上方に広がる傾向にある。非弾性解析の結果による0.3%以上の最大せん断ひずみが発生している領域から考察すると、緩みはトンネル周辺から両肩および天端の3方向に伸び、先進坑側と後進坑側のひずみの拡散の程度にはかなりの

差があることが判る。

図-24には、非弾性成分のみを表示した図をあわせ示している。この図は弾性範囲を上回った領域の分布を示しているところから、緩み（不連続）領域そのものの分布を表わしているものと考えられる。本図から、非弾性成分の最大せん断ひずみ分布を見ると、垂直縫地ボルトの設置範囲を外れた先進坑側で、0.3%以上の領域が形成され、部分的に0.4%以上の領域が生じているのに対し、後進坑側の地山では最大でも0.3%未満の領域が確認されるにとどまっている。この緩み領域の形成が垂直縫地ボルトを施工した範囲の外方で沈下が進行するという特徴ある沈下特性を生じる原因となっており、垂直縫地ボルトの設置範囲外で緩みが発生し、沈下が進行していることから、垂直縫地ボルトの設置幅が不足していた証左と考えられる。

図-25は、Bパターンによる非弾性解析結果を示したものである。図から判るように、全成分の最大せん断ひずみはトンネル周辺に集中し、図-23に示す弾性解析のパターンと良く似た分布となっている。しかも、非弾性成分は、天端の近傍に点在するのみであり、緩みの発達がほとんど認められない。従って、Bパターンでは地山がほぼ弾性的な挙動を示しており、グランドアーチの形成を傍証しているものと考えられる。

これらの解析から、垂直縫地ボルトの評価には、ボルト自体の挙動を把握することも重要であるが、地山の緩みを的確に把握することが最も重要なとの認識を得た。また、現象を評価し現場にフィードバックする方法として、本文で採用したノルム最小化法に基づく非弾性解析は有効であり、特に、非弾性成分のみによる最大せん断ひずみの分布から判断する方法は、ボルトの設置範囲および増しボルト等の変更に対する重要な判断資料になるものと考えられる。

7. まとめ

土被りの小さい未固結地山のトンネルで、垂直縫地ボルトによる地表面沈下の抑止効果を、一連の現場実験から述べてきた。以下、得られた結論をまとめると次のとおりである。

- ① 対象とした造成盛土および砂層の沈下に対する性質をトンネルの天端沈下量と地表面沈下量の比で表すと、砂層では天端と地表面がいわゆる「共下がり」現象を呈するのに対し、造成盛土では圧縮性地山に起因する挙動が加わることが判った。また、地表面沈下量の横断分布から、地表面沈下量の大小は、横断方向の広がりではなくトンネル直上部分の沈下性状の差異によって生じていることが判る。
- ② 地表面沈下の測定結果から、トンネル上方地山の物性上の相違を考慮したとしても、垂直縫地ボルトを施すことにより、地表面沈下量を大幅に低減することができる。
- ③ Aパターンの地表面沈下の測定結果から、垂直縫地ボルトを施工することにより、施工された地山ブロックの範囲はあたかも横断方向の梁のように剛性の高い連続体として挙動することが判る。また、垂直縫地ボルトの設置範囲が十分では無い場合、地山のせん断領域は、設置範囲外へと移行し、このゾーンで地表面沈下が進行する。
- ④ Bパターンのように最外方のボルトを斜めに配置することにより、トンネル上部には、垂直縫地ボルト群の効果によるグランドアーチが形成されるものと考えられ、地表面沈下量を効果的に抑止できることが判った。また、この配置方法を探ることにより、ボルトの設置幅と設置に必要な用地並びにボルト本数を削減することができる。
- ⑤ 地中変位の測定結果から、土被りが小さい未固結地山では、切羽近傍付近のトンネル上方の地山内に不連続面が発生し沈下進行の原因となる。
- ⑥ 垂直縫地ボルトは、前記⑤に記す不連続面の発生を未然に防ぎ、地山を連続体として挙動させることができとなる。従って、垂直縫地ボルトを施工することによって、横断的にはグランドアーチ、縦断的には梁構造を形成することにより、地表面沈下を効果的に抑止できるものと考えられる。
- ⑦ 垂直縫地ボルトを、掘削盤の底面まで設置することによって、地中変位を直接的に抑止しようとする杭効果が発揮される他、鏡面およびトンネル上方の地山の緩みを大幅に低減することによって、切羽鏡面を三次元の拘束状態とし、地山変位を効果的に抑止できるものと考えられる。

⑧ 切羽鏡面周辺は、掘削によって緩みを生じることが多いが、垂直縫地ボルトを掘削盤の底面まで設置することにより、緩みの発生時期を掘削段階からボルトの切断段階まで遅延移行制御できることが判った。これにより、ボルトの切断前、緩みの発生以前に適切な支保工を施工することが可能である。

⑨ 非弾性解析による最大せん断ひずみ分布から、特に非弾性成分に着目したが、垂直縫地ボルトの施工範囲の外方部分で非弾性成分が大きく生じる結果となっており、これを抑止する方策として採用した「斜めボルト」の有効性を解析面からも検証することができた。

また、この解析手法は垂直縫地ボルトの設置範囲の決定等の設計や結果の検証に有効であると考えられる。

一連の計測結果から、土被りの小さい未固結地山のトンネルの地表面沈下量を効率よく抑止しようとする場合、トンネル上方の地山内に連続帶として挙動するグランドアーチを形成させ、地山本来の力を発揮させることがきわめて重要であるという基本的な見解を改めて認識することとなり、垂直縫地ボルトの採用にあたっても、このような観点からより定量的な検討が必要であると考えている。

参考文献

- 1) 村山朔朗、松岡 元：粒状土地盤の局部沈下現象、土木学会論文集、第172号、pp. 151-160、1987.
- 2) 桜井春輔、清水則一、板坂浩二：土被りの浅いトンネル周辺地山におけるアーチ作用に関する実験的研究、平成年度関西支部年次学術講演会講演概要集、pp. III-6-1-III-6-2、1991.
- 3) 足立紀尚、田村 武、八島 厚、上野 洋：砂質地山 トンネルの挙動と解析に関する研究、土木学会論文集、第358号/III-3、pp. 129-136、1985.
- 4) 桜井春輔、川嶋幾夫、川端康祝、皿海章雄：土被りの浅いトンネルの力学挙動に関するモデル実験、土木学会論文集、No. 487/III-26、pp. 271-274、1994.3.
- 5) 上野 洋、足立紀尚、八島 厚、湯浅泰則：砂質地山トンネル掘削に伴う切羽前方の地山挙動について、第21回土質工学会研究発表会講演集、Vol. 2、1986.
- 6) 横山 章、堀内義郎、木村 宏：被りの浅い砂質地山におけるトンネル周辺の沈下挙動、土木学会論文集、第388号/III-8、pp. 151-160、1987.
- 7) 藤井 浩、奥田 庸、登坂敏雄、阿部敏夫：洪積層における地表面沈下量を抑止した山岳トンネル工法の開発・適用に関する実験的検証、土木学会論文集、No. 462、VI-18、pp. 63-72、1993.3.
- 8) 嘉指登志也、西村和夫、進士正人：逆解析手法に基づく垂直縫地工法の補強効果に関する研究、第9回岩の力学国際シンポジウム講演論文集、pp. 665-670、1994.

- 9) Hansmire, W. H. and Cording, E. J. : Soil tunnel test section, Case history summary, J. Geotech. Engng. Asce, Vol. 111, No. 11, pp. 1301-1320, 1985.
- 10) Sakurai, S. and Iue, T. : Strain analysis of jointed rockmasses for monitoring the stability of underground openings, Proc. Of the Int. Sympo. On Computer and Physical Modelling in Geotechnical Engineering, Bangkok, pp. 221-228, 1986.
- 11) 桜井春輔, 川嶋幾夫, 皿海章雄, 芥川真一: 地盤の非弾性挙動の解析, 土木学会論文集, No. 505/III-29, pp. 133-140, 1994. 12.
- 12) 桜井春輔, 芥川真一, 徳留修: ノルム最小化法に基づく非弾性ひずみの逆解析, 土木学会論文集, No. 517/III-31, pp. 197-202, 1995. 6.

(1996. 9. 20受付)

EVALUATION OF EXPERIMENTAL RESULTS ON PREVENTION OF GROUND SURFACE SETTLEMENT BY USE OF VERTICAL ANCHOR BOLTS

Mitsugi OKUDA and Toshio ABE

A special vertical anchor bolt has been designed and conducted to prevent ground surface settlement which is the biggest problem for application of the NATM to thinly covered unconsolidated ground in urban areas. This paper analyses the changes with time of the displacement of the ground surface, mid-ground and crown of a tunnel and of the axial force of the bolt, demonstrating the positive effects of the vertical anchor bolt based on different measurement results as well as behavior between cases with and without such anchor bolts. Having analysed the positive effects of vertical anchor bolts placed outside the cutting cross-section at each stage of division of excavating section, the paper proposes an appropriate distribution of vertical anchor bolts to facilitate the formation of the beam and ground arch in the ground above a tunnel. The effects of the bolts are logically evaluated and validated by the actual measurement and analysis results.