

現場計測に基づく垂直縫地ボルトの トンネル周辺地山補強に関する一考察

城間 博通¹・益田 光雄²・進士 正人³・松井 幹雄⁴・西村 和夫⁵

¹正会員 西日本高速道路(株) 四国支社 高知工事事務所所長 (〒780-0088 高知市北久保17-1)

²正会員 (株)熊谷組 土木本部トンネル技術部担当部長 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2-1)

³正会員 学博 山口大学助教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

⁴正会員 工博 前田建設工業(株) 土木技術部副部長 (〒179-8903 東京都練馬区高松5-8 J.CITY)

⁵正会員 工博 首都大学東京教授 都市環境学部都市基盤環境コース (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

垂直縫地ボルトの地山補強機構を解明するため、地表面傾斜がゆるく、土被りの小さいトンネル坑口部で施工された垂直縫地ボルトの計測結果を詳細に分析し考察した。その結果、緩傾斜で土被りの小さい地形条件下における垂直縫地ボルトは、主にボルト軸方向の引張りや圧縮ひずみに抵抗する補強材として機能し、トンネル掘削による応力再配分によって生じた荷重を、地山を破壊することなく切羽前方やトンネル側部に伝える。また、トンネル側部では、縫地ボルトの根入れ先端部付近で、地表面沈下量を増加させる鉛直方向の地中変位が発生していることから、縫地ボルトの根入れ深さについて注意が必要であることがわかった。本研究では、トンネル周辺地山の挙動計測結果から新しい地山補強モデルを提案する。

Key Words : vertical pre-reinforced bolt, shallow tunnel, surface settlement, ground arch

1. はじめに

トンネル坑口部あるいは土被りの小さい箇所では、グラウンドアーチが形成され難いことからトンネル掘削に伴う地山の応力再配分によって、切羽の不安定化、トンネル支保に作用する土圧の増加、地表面沈下などが懸念される。加えて、地表面の傾斜が急な箇所では斜面の不安定化など一連の問題が生じやすい。これらの現象に対する対策工の一つとして、トンネル掘削前に、地山に対して鉛直に削孔して鋼棒等の補強材を挿入し、モルタルやセメントミルク等で定着する垂直縫地ボルト工法がある。この工法は、地表からトンネル断面内やその周辺地山内に規則的に補強材を配置して地山を補強し、トンネル掘削に伴う前記現象を抑制しようとするものである。垂直縫地ボルト（以下、簡単のため「縫地ボルト」と称する）は、トンネル掘削前にトンネル上部の地表面から施工ができることから、トンネル坑内から実施する対策に比べてトンネル掘削サイクルに与える影響が少ない利点がある。

縫地ボルトは、これまでの施工実績から、地すべりに対するせん断抵抗の増加などに有効性があると経験的にいわれ¹⁾、また、地表面沈下の抑制やトンネルに作用す

る土圧の軽減に効果があると現場計測や模型実験等では確認されている^{8,9,14,15,16,17)}。しかし、これまで現場で施工された縫地ボルトの計測の結果からは、計測は行われていても縫地ボルトの効果を考察するに足る系統的な計測事例は少なかった。そのため、縫地ボルトの地山補強機構の解明は進まず、経験や概念的な補強の考えの基に、補強材を地表面からある間隔で打設することにより地山を補強し、トンネル掘削に伴う前記諸現象を抑制・防止するという経験的な手法に止まっている。たとえば、斜面安定を主目的とする場合には打設した鋼棒を直接的なせん断力に対する補強材料として考え、補強材の強度、たとえば補強材のせん断強度が地山内のすべり面でのせん断抵抗力として機能するとしている例^{2,6)}などや、地表面沈下や切羽安定を目的とする場合にはボルトの摩擦抵抗による吊下げや杭として機能するとしている例などである^{2,8)}など。

筆者らは、縫地ボルトの実際の補強効果はどのようなものか解明するために、過去に、比較的緩やかな地表面傾斜で土被りの小さいトンネル坑口において、系統的に計測した縫地ボルトの計測結果から、トンネル切羽位置とボルト軸力、地表面沈下量の発生等基礎的な整理を行った¹³⁾。本論文では、ボルトの発生応力とトンネル周辺

地山の挙動等についてより詳細に解明し、縫地ボルトの補強効果について考察する。さらに、数値実験や模型実験を実施するにあたり縫地ボルトの補強領域や各部位での役割など新しい地山補強モデルを現場計測事例に基づいて提案する。

2. 既往の現場計測と研究による補強効果

本章では、従来の計測事例報告から縫地ボルトの挙動に関する考え方および従来の研究論文に示された補強効果について整理し、縫地ボルトの補強機構解明における課題について整理する。

(1) 計測事例による縫地ボルトの挙動

坑口部や低土被り部において、縫地ボルトによる補強で地山の安定を期待した現場では、その効果確認のためにボルトの軸力計測や地中変位計測が行われることがある。その計測事例によると、各施工現場の地形や地質条件が異なるため局所的には違いがあるものの、縫地ボルトの挙動は、比較的土被りの小さいトンネル（1~2D程度：Dはトンネルの径（幅））で計測された事例では以下のとおり報告されている。

- ① トンネル上部にあって、根入れ深さがトンネル天端に達しない短いボルト軸力は、計測断面に切羽が近づくとつれて引張り力が作用する。その値は、トンネル天端に近い位置が大きく、切羽が計測断面を通過しても変わらない²⁴⁾
- ② 地表からトンネル断面内まで打ち込んだトンネル上部のボルト軸力は、計測断面に切羽が近づくとつれて、天端付近や断面内で圧縮力が作用し、切羽通過後（ボルト切断後）は、天端付近が引張り力に転じる²⁴⁾
- ③ トンネル断面側部のボルト軸力は、計測断面への切羽の接近によりトンネル断面付近の深さで圧縮力を示し、計測断面通過後も引張りに転じず圧縮力が増加する⁹⁾

これらの計測事例では、縫地ボルトは切羽通過前には地山のゆるみ防止、切羽通過後はトンネル上部土塊を吊下げる機能があると述べられている。また、側部の挙動について述べられている事例は少ないが、側部のボルトはトンネル掘削により再配分された応力やゆるみ荷重を圧縮で負担する補強材としての機能が認められる。

(2) 垂直縫地ボルトの現場実験による奥田らの研究

奥田らは、造成された盛土直下を土被り比（HD：Hはトンネル天端から地表面までの土被り高さ、Dはトン

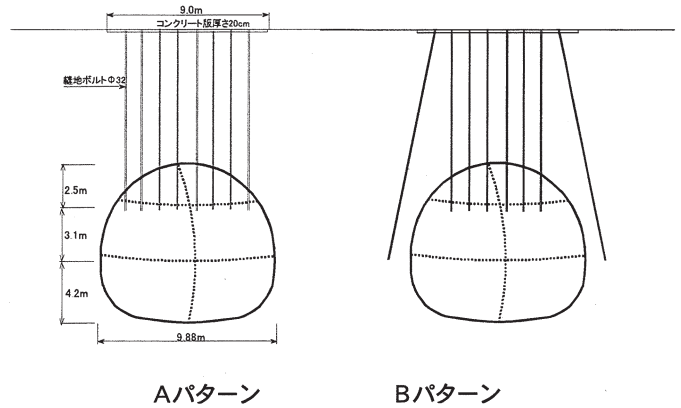


図-1 奥田らの現場実験パターン

ネルの掘削径（幅）1以下で通過するトンネルで、垂直縫地ボルトの地表面沈下抑制効果に関する実験的研究を実施している^{24),10),11)}。縫地ボルトの配置は、使用できる用地幅がトンネル幅程度に制約されたことから、図-1に示すようにトンネル幅の上部のみを補強する「Aパターン」とそのパターンの最外側のボルトをトンネル側部に斜めに配置した「Bパターン」が試行された。

試行結果では、トンネル上部に施工された縫地ボルトは、地山のせん断破壊による不連続面の発生を防ぎ連続体として挙動させることにより、横断的にはグラウンドアーチ、縦断的には梁構造を形成し、それによって、地表面沈下を効果的に抑制するとしている。しかし、横断方向の補強範囲が不足する場合には補強範囲外にせん断破壊域が発生し横断方向の沈下範囲が拡大することがあることを示した。また、「Bパターン」で最外側部に配置されたボルトはトンネル上部の縫地で補強された横断方向の梁から荷重を受け、地山にスムーズに伝達する「支支点」の機能を果たすとし、根入れ深さについては、トンネル掘削盤の底面まで根入れすることで、より地山変位を効果的に抑制できるものと考察している。

(3) 現場計測事例と既往の研究により明らかとなった課題

前述の施工事例報告や研究論文から、縫地ボルトには、トンネル上部ではせん断破壊による不連続面の発生防止やゆるんだ地山の吊下げ効果、側部では上部補強体の機能として発揮される吊下げやグラウンドアーチにより伝えられた荷重の支持効果があるものと推察されている。

しかしながら、これらの計測結果は軸力計測を主体としており、縫地ボルトで補強されたトンネル上部や側部など各部位のボルトの詳細な応力状態については不明であった。また、根入れ深さについて言及している事例は奥田らの論文¹⁰⁾のみで少なく、どの深さまで補強すべきかの考察についても不十分であった。

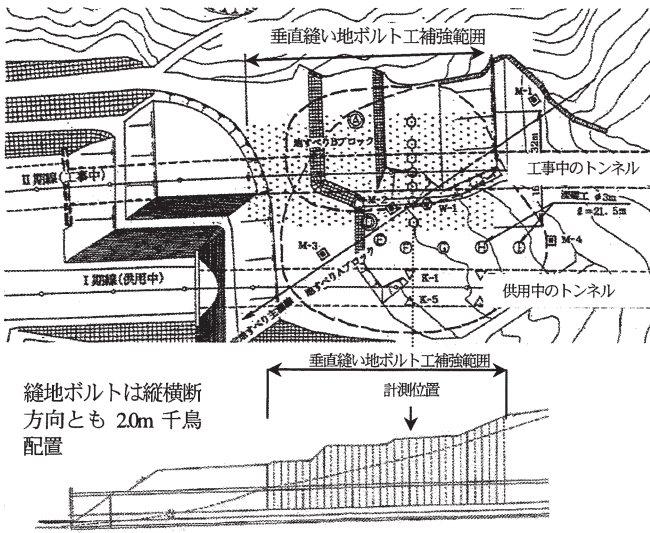


図-2 垂直縫地施工箇所平面・縦断図

表-1 地山物性値の一覧

図中記号	N値	水平載荷試験による地山の变形係数 (MN/m ²)	岩種
Icg	30~50	102	シルト質砂礫
Im	30~50	44.9~138.7	シルト岩
Is-g	50以上	36.5~48.5	砂岩~礫岩
K	50以上	142.3~619.0	砂質泥岩, 砂岩

表-2 計測機器と目的

計測項目	計測機器	計測数量	図中記号
ボルト発生力	ひずみゲージ	7本のボルト (トンネル中心1本, 左右3本, 深さ2.5m間隔)	B-1~B-7
地山地中変位 (水平, 鉛直)	挿入式地中傾斜計・地中変位計	3箇所 (トンネル中心と左右2箇所, 左右の深さGL-30m)	E-1~E-3
地表面沈下	水平傾斜計	トンネルを中心に24m間 (2mセンサ×12本)	EL-1~EL-12

そのため、合理的に縫地ボルトを設計するためには、地山に対する縫地ボルトの補強機構を解明し、それに基づいた設計手法の構築が必要である。

本論文では、設計手法構築の基礎資料として部材としての縫地ボルトに生じる応力の把握と、地山を含めた構造系としての縫地ボルトの役割の把握に焦点を絞り、次の課題について整理検討することとした。

- ① トンネル周辺で縫地ボルトにより補強されて、あたかも連続的に挙動している地山の各部位では、どのようなボルト軸応力・曲げ応力が発生するのか？
- ② トンネル周辺地山と縫地ボルトはトンネル掘削による応力再配分に対して、どのような機能を果たして

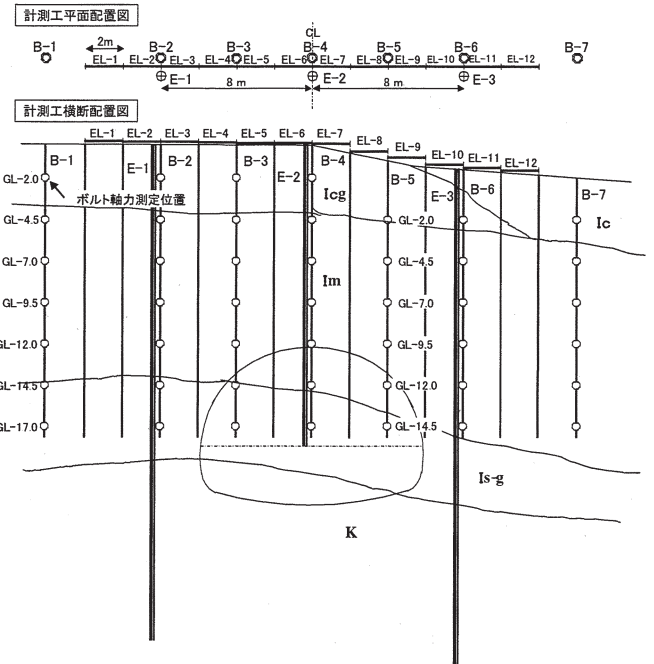


図-3 垂直縫地ボルトの横断配置と計測配置図

いるか？

3. 現場計測による地山挙動の詳細分析

(1) 現場条件

ここでは、トンネル掘削による地山の安定確保を目的として地表面の傾斜が比較的緩やかな坑口部で施工された縫地ボルトの計測事例を述べる。図-2に、縫地ボルトが施工された坑口部の平面と縦断図を示す。

本トンネルにおける縫地ボルトの設計は、過去の施工実績を参考とする経験的手法で実施され、根入れ深さはトンネル上半盤まで、補強幅は下半盤からのゆるみ範囲を考慮してトンネルの両側壁から1Dの範囲である。また、ボルトはSD25(SD345)を使用し縦・横断方向2.0mの千鳥配置となっている。ボルトは、削孔径100mmの打設孔にボルトを挿入しモルタル($\sigma_{\text{容}}=20\text{N/mm}^2$)にて定着した。

坑口部の地質は、地表部を表土・粘性土(Ic)、シルト質砂礫(Icg)が覆い、その下層は新生代第四紀の固結度の低い軟質シルト岩(Im)および新第三紀中新世のほぼ均質で比較的締まった泥岩・砂岩の互層(K)からなり、2つの地層間には握りこぶし大のチャートの円礫~亜円礫を50~60%程度含む厚さ4~5mの礫質土層(Is-g)を挟んでいる。表-1に計測箇所の地質調査結果による地山物性値の一覧を示す。

(2) 計測項目

図-3に縫地ボルトと計測機器の配置図および地質横断面図を示す。計測項目は、ボルト発生力、地中変位、地表面沈下であり、トンネルを中心に左右対称に配置した。地山中変位は、トンネル底盤より1D程度の深度を不動点と仮定し、多点式3成分地中変位計（地中傾斜計により水平方向2成分、各深さにおける鉛直方向1m間の伸縮量により地山内鉛直変位を計測する機器）により水平変位と鉛直変位を計測した。

ボルトの計測では発生する軸力と曲げが計測できるようにボルトの両側面にひずみゲージを配置した。曲げ方向は、地すべりの主方向と地中変位計との配置計画から、すべり面付近でどの方向にも曲げが計測できるようにトンネルセンターのボルトB-4が横断方向、それ以外のボルトは縦断方向の曲げを測定した。表-2に計測項目を示す。

なお、トンネルは、上半先進のショートベンチカット工法で掘削された。

(3) ボルトに発生する曲げモーメントと軸力の分析

縫地ボルトのひずみの計測結果からボルトに作用する曲げモーメントと軸力の発生状況を検討した。検討にあたって、曲げモーメントと軸力では次元が異なることから、計測結果を軸応力と曲げ応力に分解し応力表示で両者を比較することとした。

軸力Nと曲げモーメントMは、ボルトの相対する面のひずみから求める。図-4に示すように相対するひずみを ϵ_a, ϵ_b とすると軸力Nと曲げモーメントMを求める式は(1), (2)のとおりである。

$$N = A \cdot E (\epsilon_a + \epsilon_b) / 2 \tag{1}$$

$$M = I \cdot E (\epsilon_b - \epsilon_a) / 2r = I \cdot E (\epsilon_b - \epsilon_a) / d \tag{2}$$

ここに、N：軸力、M：曲げモーメント、A：ボルト断面積、E：ボルトの弾性係数、I：ボルトの断面二次モーメント、 ϵ_a, ϵ_b ：ボルトの縁ひずみ、d：ボルトの直径(2r)である。

$\epsilon_b = \epsilon_a + \Delta \epsilon$ とすると、式(1), (2)は

$$N = A \cdot E (2\epsilon_a + \Delta \epsilon) / 2 = A \cdot E \cdot \epsilon_n \tag{3}$$

$$M = I \cdot E \cdot \Delta \epsilon / d = I \cdot E \cdot 2\epsilon_m / d \tag{4}$$

ここに、 $\epsilon_n = (2\epsilon_a + \Delta \epsilon) / 2$ は平均軸ひずみで、 $\epsilon_m = (\Delta \epsilon / 2)$ は曲げひずみである。

これらの式を応力で表現すると

$E \cdot \epsilon = \sigma, A = \pi \cdot d^2 / 4, I = \pi \cdot d^4 / 64$ であるから

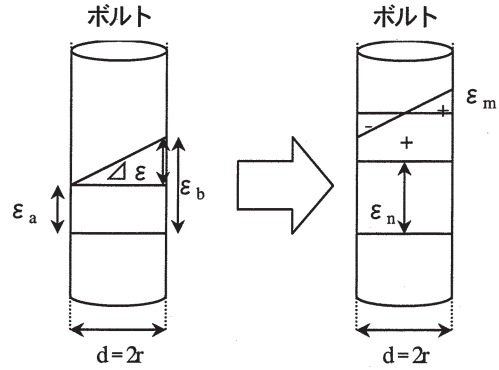


図-4 ボルトに発生するひずみの解説

$$N = \pi \cdot d^2 (2\sigma_a + \Delta \sigma) / 2 = \pi \cdot d^2 \cdot \sigma_n / 4 \tag{5}$$

$$M = \pi \cdot d^3 \cdot \Delta \sigma / 64 = \pi \cdot d^3 \cdot 2\sigma_m / 64 \tag{6}$$

$$\sigma_n = 4N / (\pi \cdot d^2) = E \cdot \epsilon_n \tag{7}$$

$$\sigma_m = \pi \cdot M / d^3 = E \cdot \epsilon_m \tag{8}$$

ここに、 $\sigma_n = (2\sigma_a + \Delta \sigma) / 2$ は平均軸応力、 $\sigma_m = \Delta \sigma / 2$ は曲げ応力である。

計測されたひずみよりそれぞれの応力を求め、そして、ボルト計測位置毎の平均軸応力 σ_n と曲げ応力 σ_m の切羽進行による発生状況を図示し比較した。

図-5にトンネル側部(B-2, 6)とトンネル断面幅内(B-3, 4, 5)のボルトの曲げ応力 σ_m と平均軸応力 σ_n の関係図を示す。図中の凡例は、各切羽位置と計測断面との位置関係の記号を示し、たとえば、○(白抜き丸)は上半0D(Dはトンネル幅約10m)すなわち上半切羽通過時のそれぞれの応力である。なお、ハッチングされた図は、トンネル断面内に現れるボルト計測位置を表している。

トンネル断面内のボルトは、切羽通過時に切断されるため、上半到達(上半0D)で計測は終了する。

図-5の結果を、ボルトの曲げおよび軸応力の発生状況から整理すると、ボルトの応力発生状況によりその挙動は「Ⅰ：軸力卓越タイプ」「Ⅱ：曲げ卓越タイプ」「Ⅲ：軸力・曲げ増加タイプ」の3タイプに分類することが可能となる。

なお、軸応力の正負は、正が引張りで負が圧縮である。また、曲げの正負は、トンネル中央ボルト(B-4)では横断方向を計測し、ボルト左側の縁ひずみを基準に増減を示している。それ以外のボルトは縦断方向を計測し、坑奥の縁ひずみを基準に増減を示す。したがって、曲げ応力(σ_m)が圧縮(-)の場合には中央ボルトB-4ではその位置で左側に曲げられ、その他のボルトでは坑奥側に曲げられていることを示す。

図-5の発生傾向を整理すると以下の特徴的な挙動が認められる。

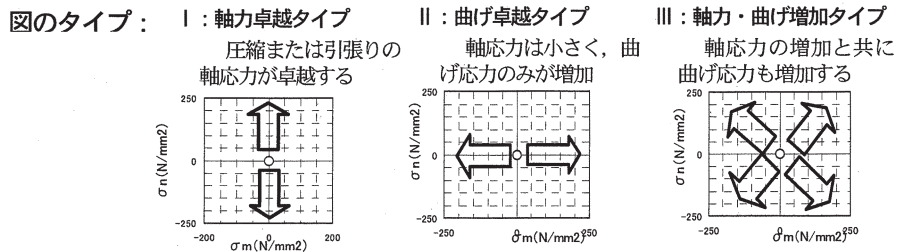
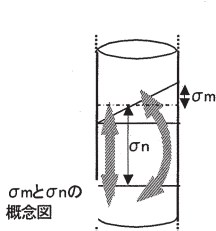
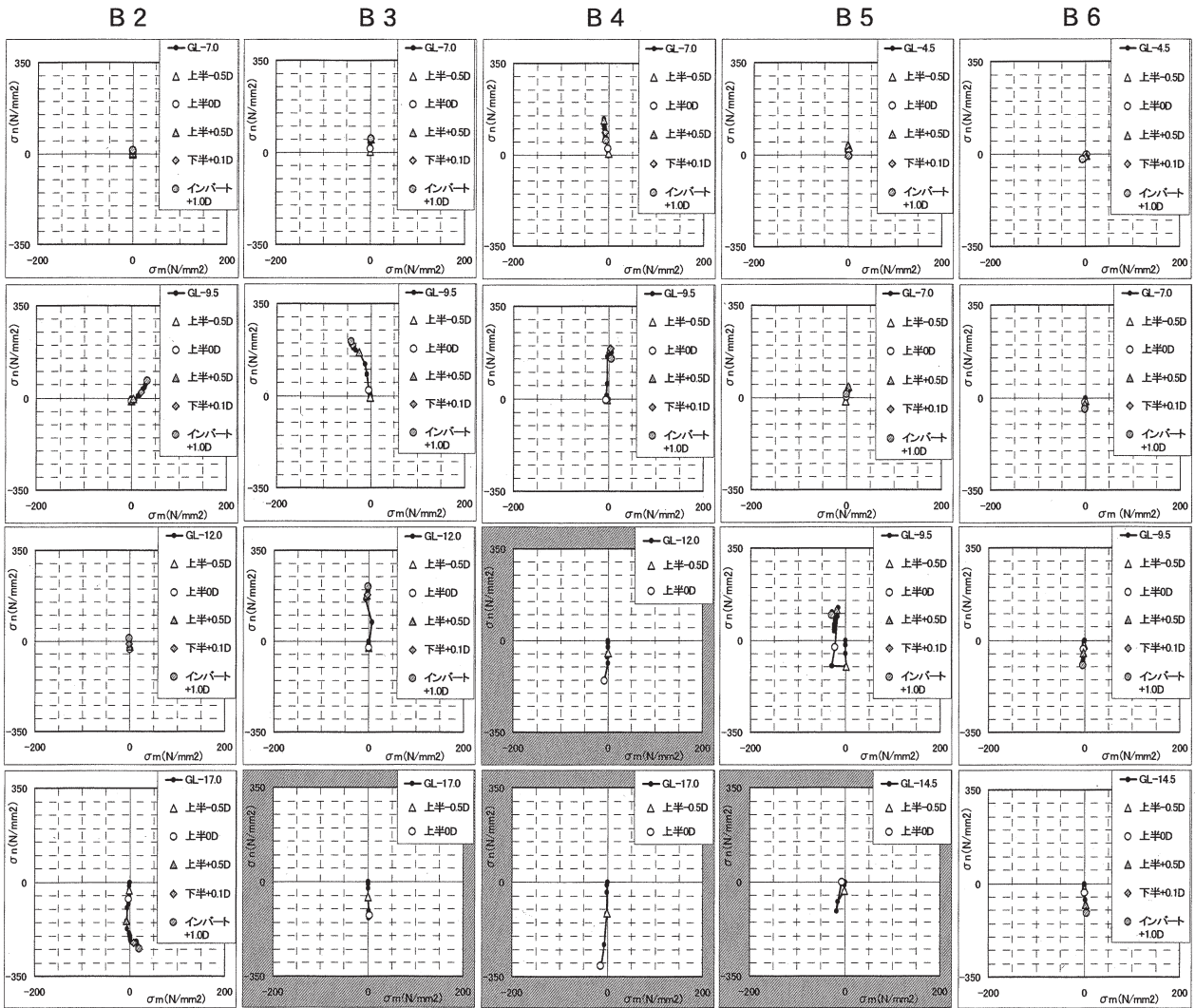


図-5 ボルトに発生した軸応力 σ_m と曲げ応力 σ_n

- ① どの計測点のボルト発生応力もIの軸力卓越型が主体であり、タイプIIやIIIに分類される曲げ応力が発生することは少ない
- ② トンネル断面幅内（ハッチングされた図の）上部のボルトの軸応力は引張りを示し、その値はトンネル断面に近いほど、トンネル断面中心のボルトほど大きい
- ③ トンネル断面幅内上部のボルトで断面直上のボルトの軸応力は、上半通過直前あるいは直後に急激に引張りへと転ずる（B-5のGL-95m）
- ④ トンネル側部とトンネル断面内のトンネルと同じ深さ付近のボルトは、切羽位置に関係なく圧縮の軸応

力が発生する

③④の結果については、前述の既往の計測事例や研究などでも認められており、垂直縫い地ボルトの一般的な傾向ではないかと考えられる。また、今回の計測結果から、今回施工された縫地ボルトの応力発生挙動は、タイプIに分類される軸力卓越タイプであることや、縫地ボルトの発生応力はトンネル切羽前方と側部の圧縮、切羽進行による断面直上部の圧縮から引張りへの転換、断面上部の引張りなどが確認され、トンネル周辺の各部位別に特徴が見られる。

(4) 切羽位置とボルト軸力

軸力に着目し、縫地ボルト計測位置からの上半切羽の離れと発生軸力との関係を図-6に示す。当現場ではトンネルを中心に左右対称に計測を行っていることから、変動の大きいトンネルセンターのB-4、トンネル断面端のB-3、トンネル側部のB-1, 2について分類し説明する。

なお、B-5はB-3, B-6, 7はB-2, 1とほぼ同様の傾向を示し、左右対称の挙動を示したためここではこれらの結果を省略する。

図からわかるように、ボルト軸力は、上半切羽が通過するまでは圧縮傾向を示す。上半切羽通過後の軸力の発生挙動の違いに着目すると、トンネル断面幅内に位置するボルト(B-3, 4)と断面側部に位置するボルト(B-1, 2)に、また、深さ方向では地表に近い「表層部」、浅部とトンネル断面間の「トンネル上部」、トンネル断面と同じ深さの「深部」に分けることができる。すなわち、トンネル断面側部(B-2)では、上半切羽が近づくにつれて深部(GL-17.0, -14.5)のボルト軸力は一様に圧縮傾向を示し、上半切羽通過後最深部(GL-17.0)で増大する。表層部(GL-2.0, -4.5)のボルト軸力はわずかに引張り傾向であり、上半切羽通過後も大きな変化はない。

一方、トンネルの断面幅内に位置するボルト(B-4)では、深部(B-4のGL-17.0, -14.5, -12.0やB-3のGL-17.0, -14.5など)で上半切羽が近づくにつれ圧縮軸力が発生し切羽到達直前で最大値を示す。そして、切羽到達後に切断される。トンネル断面直上の軸力(B-4のGL-9.5や-7.0, B-3のGL-12.0, -9.5など)は、切羽到達前まではやや圧縮傾向を示し、切羽通過後は引張りに転ずる。表層部は小さな引張り傾向を示している。

これらの計測と図-7, 8に示す地中鉛直変位計測結果から、上半切羽の進行による縫地ボルトの軸力発生機構を考察すると、次のように整理できる。

- ① 図-6のB-2, B-3, B-4からあきらかなように、トンネル側部と切羽前方ボルトにおける圧縮力の発生は、掘削対象地山が支持していた土圧がトンネル掘削により切羽前方と側部に再配分され、ボルトが鉛直方向の圧縮力を部材として支持する結果であると考えられる。発生する圧縮力の値は、掘削盤である上半盤近傍が最も大きく、横断方向ではトンネル中心に位置するボルトほど大きい。図-7では切羽通過前に前方地山の鉛直変位が大きく、通過後は側部の鉛直変位が急激に増加していることから土圧の配分がうかがえる。
- ② トンネル断面幅内トンネル直上のボルトは、切羽通過前には若干圧縮状況になるが、切羽通過後はトンネル近傍地山のトンネル内空側への変形により急激に引張りへと転ずる。これは、既往の計測事例や研

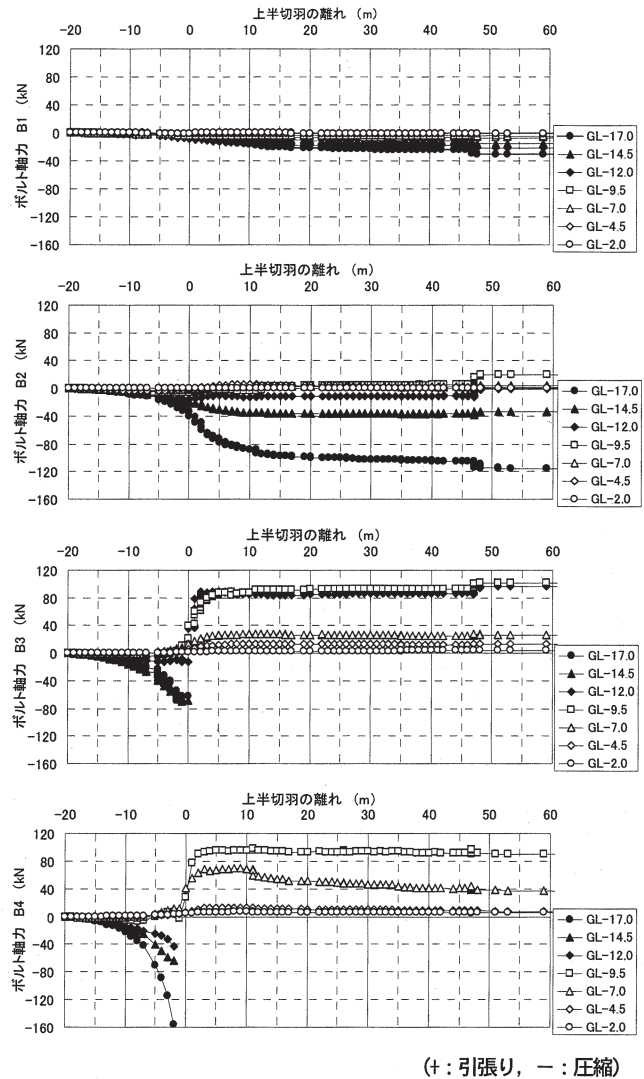


図-6 切羽位置とボルトに発生する軸力

究などでも認められており、トンネル上部から表層部の地山に定着支持されているボルトが、トンネル近傍地山の内空側への変形を抑制する結果であると推察される。

- ③ トンネル断面幅上部地山の表層部のボルトは、上半切羽が近づくにつれて引張り力が発生するが、その値はきわめて小さく、切羽通過後も大きな変化はなく安定している。これは、表層部付近の地山ひずみが小さい結果であると考えられ、このひずみの小さい領域はトンネル中心のB-4の結果から、GL-7.0より浅い位置に、やや側部のB-3ではGL-9.5より浅い位置に生じていることがうかがえる。

(5) 地山内鉛直変位と地表面沈下との関係

縫地ボルトを施工した地山の沈下性状を地山内鉛直変位と地表面沈下の計測により分析した。図-7に各切羽位置での地山内各深度の区間鉛直変位と図-8に不動点からのその累積変位を、また図-9に地表面沈下量を示

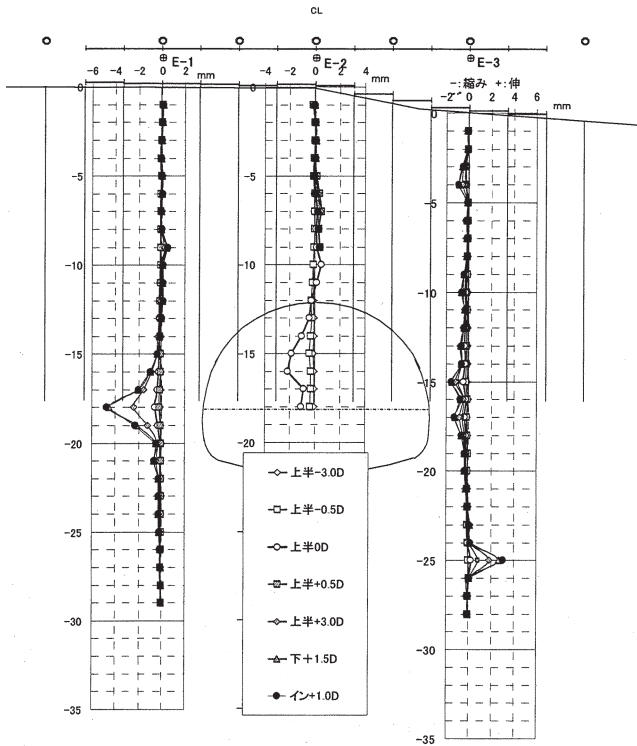


図-7 地中鉛直変位 (区間変位量)

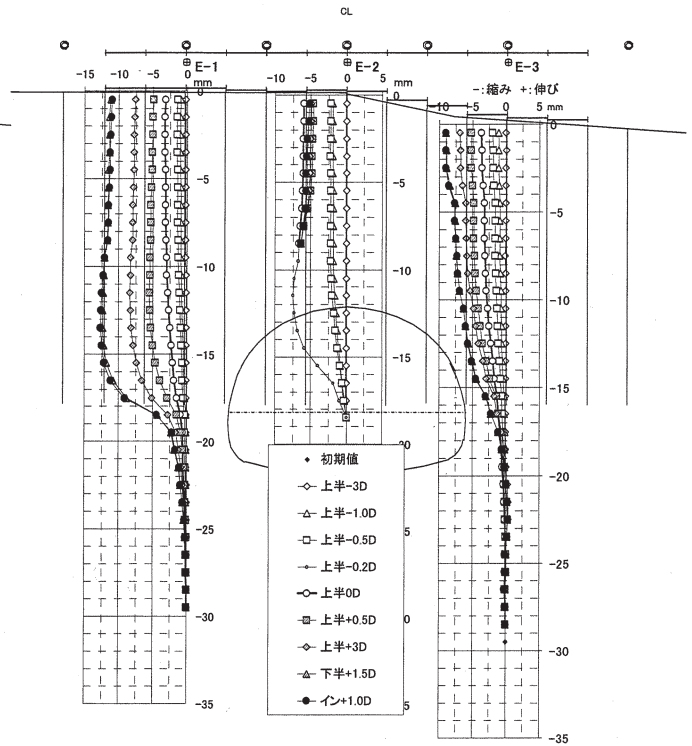


図-8 地中鉛直変位 (累積量)

す。なお、図-7の区間変位量の中でE-3のGL-25では局所的な区間変位の乱れが計測されたため、図-8の累積変位では計測誤差(変位ゼロ)として補正している。

図-7に示す鉛直方向区間変位は、一部トンネル上部で若干小さな伸び(+)が見られるが、地山全体では縮み(-)方向の変位を示す。中央のE-2の変位は、切羽前方で切羽通過直前に地山は縮みを示し、通過後のトンネル上部ではわずかな伸びを示すが値は小さい。また、側部のE-1の変位は、上半盤と同じ深さ付近(縫地ボルトの根入れ先端部付近)に集中し、切羽通過前は小さく、通過後から大きく発生している。縫地ボルトの根入れ先端部付近より上部では、E-2と同様に大きな変位はない。E-3の変位は、E-1の区間変位分布と若干異なるが、縫地ボルトの根入れ先端部付近に集中して発生していることと補強領域の変位が小さい傾向は同様である。

地表面沈下量と地表部での地中鉛直変位累積量を比較すると、E-1付近では地表面沈下量14mmに対して地中鉛直変位では11mmであり、変位分布から沈下量のほぼ全てが縫地ボルトの根入れ先端部付近に集中していることがわかる。また、E-3でも地表面沈下量12mmに対して約9mmであり同様に縫地ボルト根入れ先端部付近での沈下量が大きく影響している。E-2では、上半通過直前で地表面沈下量6mmに対して地中鉛直変位量は5mmである。これらから、ボルトにより補強された領域の地山全体が一体的に挙動していることが読み取れる。

図-10は計測位置からの切羽距離とトンネル内空変位

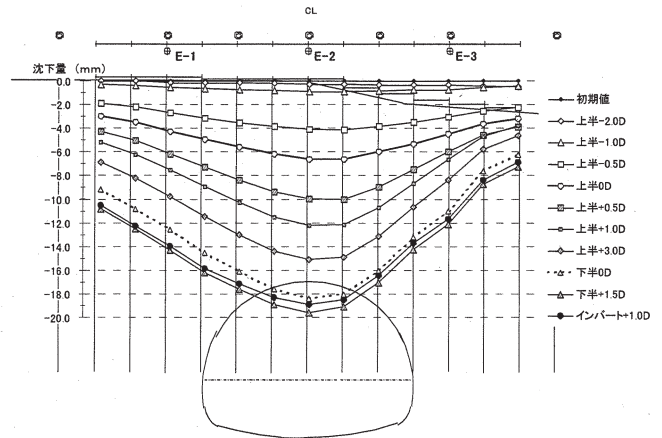


図-9 地表面沈下量

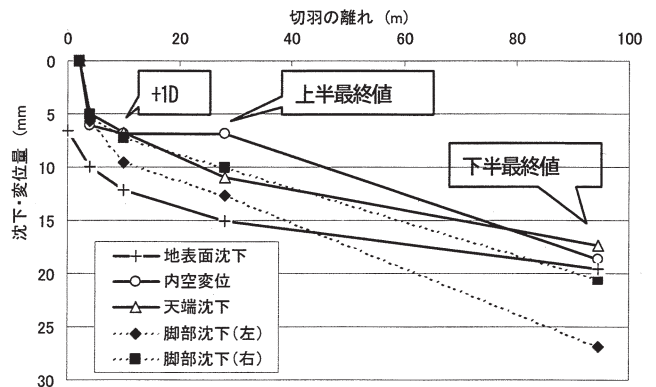


図-10 トンネル内空変位と表面沈下

量と地表面沈下量を示したものである。図-10からわかるように、天端沈下量と地表面沈下量はほぼ並行に推移しており、トンネル上部の地表面沈下はトンネルの沈下に起因するものと考えられる。また、切羽通過後のトンネル上部の地中鉛直変位量には変化が少ないことから、縫地で補強された地山とトンネルとの共下がりにより地表面沈下が進んだものと考えられる。

また、図-10で内空変位と上半支保脚部の沈下は下半掘削時（上半最終値から下半最終値まで）に大きく増加している。これは、図-8と合わせて考えれば、上半盤付近で拘束されていた縫地ボルト根入れ先端部付近に伝達されたひずみ（圧縮ひずみ）が、下半掘削にともなって解放され、内空変位と上半脚部沈下の急激な増加をもたらしたと考えられる。また、内空変位は増加しているが、天端沈下が上半支保脚部の沈下ほど生じていないのは、側壁の内空側への変形により支保工が天端部を突き上げる挙動によるものと考えられる。

(6) 縫地ボルトと地山挙動の分析

多賀らは、坑口斜面を模擬した鉛散弾粒状地盤でトンネル形状の三次元落し戸実験で、トンネル掘削を模擬した荷重の三次元再配分挙動として「落し戸の降下により落し戸が支えていた荷重の一部は落し戸の両側地山に分散し、一部は前後の落し戸の荷重増加となる」との結果¹⁰⁾を得ている。

今回の縫地ボルトの挙動計測結果では、この再配分挙動は、切羽通過前には切羽前方地山の鉛直変位やボルトの圧縮応力として計測され、切羽通過後は側部の鉛直変位やボルトの圧縮応力として計測されたものと推定される。

したがって、今回の共下がりの沈下量は、配分された増加荷重に対して縫地ボルトの先端部付近の地耐力が十分でなかったため発生したものと推察される。よって、垂直縫地ボルトの側部ボルトについては下半盤付近まで根入れし、側部に再配分された荷重をトンネル下部の地盤に確実に伝達し、変形を生じさせないことが必要である。

4. 垂直縫地ボルトの補強メカニズムの推定と補強モデルの提案

(1) 補強メカニズムの推定

今回計測した垂直縫地ボルトと補強断面での種々の計測結果から、トンネル掘進によるトンネル周辺地山の挙動（ひずみ変化量）を切羽の位置関係で模式的に整理すると図-11のように示すことができる。

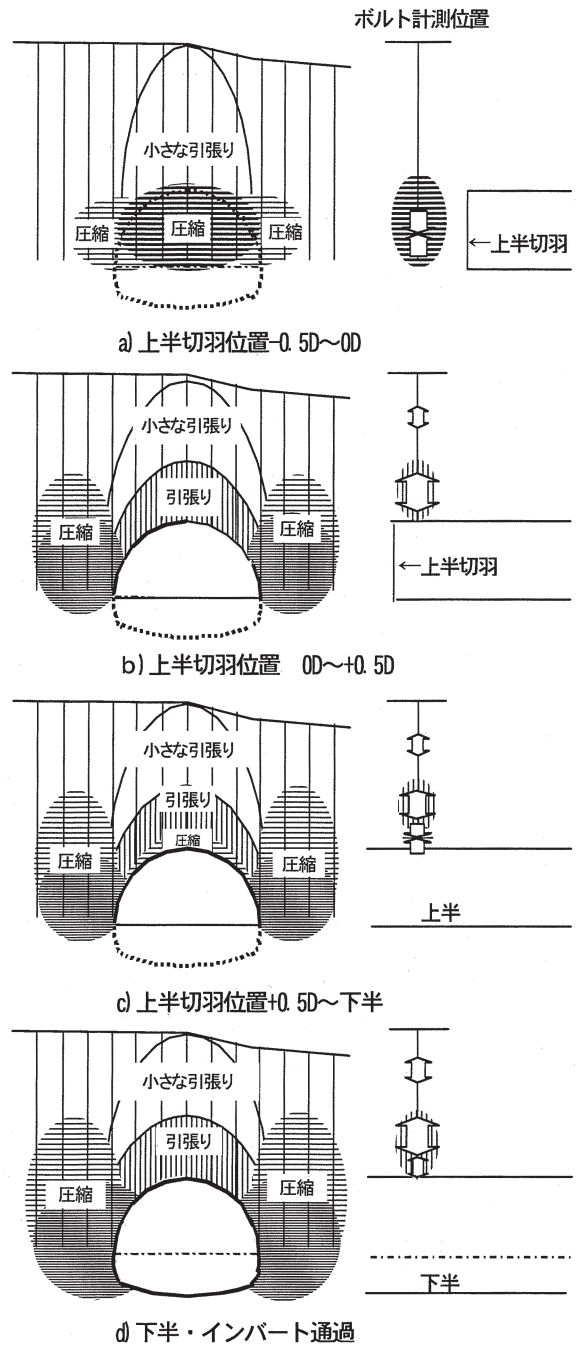


図-11 ボルト計測から推定される切羽の進行とトンネル周辺地山の挙動の概念図

各段階の垂直縫地ボルトの補強メカニズムは以下のとおり推定される。

① 切羽位置-0.5Dまで

掘削による応力再配分により、切羽前方地山にわずかな圧縮ひずみ帯が発生する。地山の圧縮変形と切羽へ向かう変形により地表面沈下が発生し始める。縫地ボルトは、それらの挙動に対して地表付近では引張りで、切羽前面は圧縮で抵抗し地山の変形を抑制する。

② -0.5Dから0Dまで

さらに切羽が近づくと切羽前方と側部への再配分応

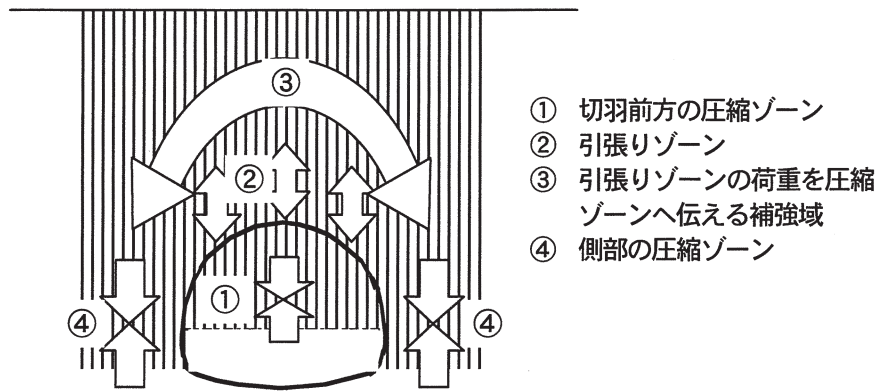


図-12 比較的地表傾斜の緩やかな土被りの小さい場所での垂直縫地ボルトの補強モデル

力はさらに大きくなる。トンネル上部のボルトの引張り応力は極めてわずかであるが、地表付近からトンネル天端付近まで発生する。縫地ボルトは、トンネル上部での地山の引張りひずみを抑制し天端付近の安定に寄与する。また、切羽前方や側部では地山の圧縮ひずみを抑制し、切羽への押出し変形や内空への変形を抑制するものと考えられる。

③ ODから+0.5Dまで

切羽が計測断面を通過することにより、トンネル上部の地山は引張りひずみが大きくなり、その値はトンネルに近いほど大きくなる。また、トンネル天端部近傍では、切羽通過前は圧縮ひずみを呈していたが、通過後は急激に引張りへと転換する。側部は、圧縮ひずみが徐々に大きくなっていく。

縫地ボルトは、トンネル上部地山の引張りひずみの抑制と上部地山を拘束して補強体として地山を一体化し擬似的な連続体とすることにより側部へ応力を伝達する。すなわち、トンネル上部では引張り破壊による不連続面の発生を、圧縮ゾーンと引張りゾーンの境界付近ではせん断ひずみによる不連続面の発生を抑制することにより、トンネル上部のいわゆるアーチアクションを効果的に発揮させていると考えられる。その結果として、トンネル側部では圧縮応力が大きくなり、縫地補強により安定的に形成された地山アーチを支えるための重要な部位となっていると考えられる。

④ +0.5Dから下半掘削前まで

切羽が進行するにつれて、切羽が支えていた地山応力が切羽前方や後方あるいは側部に配分される。その結果、切羽通過後はトンネル天端部近傍地山では、設置された支保の効果により変形が拘束され引張りから徐々に圧縮へと変化する。また、側部の圧縮ひずみは徐々に増加する。図-7, 8の鉛直変位で見ると、特に縫地ボルトの先端部付近の鉛直変位が大きくなっている。これは、補強領域の地山は補強体として一体となって挙動してお

り、その補強体を支えている根入れ先端部に変形が集中したものと考えられる。

⑤ 下半・インバート通過時

縫地ボルトの計測値はトンネル近傍がやや引張り傾向を呈し、トンネル沈下に対して周辺地山を吊下げるような挙動を示した。このことから、根入れ深さが上半盤までの従来の補強パターンでは地山の支持力が十分でない場合に、下半掘削時の補強が不十分になることがうかがえる。そのため、下半通過前後に天端沈下や脚部沈下等のトンネル内の変位が増加している(図-10)。

(2) 補強モデルの提案

垂直縫地ボルトの従来の設計の考え方は、1章で述べたように補強材のせん断力で地山内のすべり面を補強する考え方やボルトや定着材であるモルタル等が杭などとしてトンネル上部の地山を支える考え方が採用されてきた。

しかし、今回の現場計測からもわかるように、ボルトは軸力優勢で応力が発生していることやボルト補強により群となった補強領域は連続体的に挙動していることが推定される。これらは、ボルトのせん断補強よりもある適正間隔で地山に打ち込まれたボルトが地山を拘束することと地山の圧縮や引張りひずみを抑制することによる一体化によるものと考えられる。

一方、同じすべりを抑止する切土補強土工法でも、補強材のすべり面での変位に対するせん断補強力の影響は小さいこと¹⁸⁾ やせん断や曲げあるいは軸力等々考えられる断面力のうち、引張り力にのみ考慮した設計がなされる事例¹⁹⁾ もある。今回の計測や既往の研究を踏まえれば垂直縫地ボルトの設計は、せん断力で補強するモデルとするより圧縮や引張り力で抵抗する軸補強モデルで設定すべきであることがわかる。

また、縫地ボルトの補強メカニズムの推定からトンネル掘削による周辺地山の挙動は、図-12のように、次

の4つのゾーンに分けることができる。

そして、各部位の役割から、比較的傾斜がゆるく土かぶりの浅いトンネルでの垂直縫地ボルトの基本補強パターンとして、図-12に示す門型にすることが地山変形の抑制と応力のスムーズな伝達には重要であると結論づけることができる。

門型の補強幅や深さについては、実験や解析によりさらに検討することが必要であるが、今回の計測事例では補強幅1Dより外のボルト軸力の発生が極めて小さいことから、補強幅は両側0.5D (Dはトンネル幅)程度、根入れ深さは下半盤程度までは必要であると考えられる。また、垂直縫地ボルトにより補強された門型の領域は、トンネル掘削によりトンネル周辺で発生するゆるみ²⁰⁾や地中のせん断帯の形成²¹⁾を防止することより、周辺地山の安定化を図り、トンネル支保に作用する荷重の軽減、地表面沈下の抑制等に寄与するものと考えられる。

5. 結論

土被りが浅く比較的傾斜のゆるいトンネル坑口部に施工された垂直縫地ボルトのトンネル施工に伴う現場計測結果を考察し、垂直縫地ボルトの補強機構と効果について整理した。その結果、下記の事項が明らかとなった。

① 垂直縫地ボルトに発生する応力

今回の現場計測から、平均軸応力 σ_n と曲げ応力 σ_m との比較では軸応力が卓越していることが明らかとなった。この結果からは、垂直縫地ボルトは曲げやせん断により抵抗するのではなく、軸抵抗による補強効果が優勢であると考えられる。

② トンネル掘進と補強効果の関係

切羽進行による地山や縫地ボルトの挙動から、垂直縫地ボルトは、トンネル上部の地山崩壊につながるような局所的な引張りひずみやせん断ひずみの発生を抑制し、その荷重をトンネル側部に伝達する機能を持つものと考えられる。

③ 垂直縫地ボルトのボルト群としての支保効果

地中鉛直変位計測結果から、垂直縫地ボルトで補強された領域はあたかも一体となって挙動しており、垂直縫地ボルトは単独で作用するのではなく群として作用する。この結果から、縫地ボルト補強領域は等価連続体モデルを念頭に置いた設計モデルで検討することが可能である。また、トンネル周辺各部位の補強効果とこれまでの研究等を考慮すると縫地ボルト補強パターンは門型が合理的である。

今回の事例では根入れ深さが上半盤までであるため、下半掘削時に安定性が重要となるトンネル側部に位置す

るボルト先端部付近の地山にひずみが集中している。この結果からは、トンネル側部の補強材の深さは地耐力によってはトンネル下部(底盤付近)まで根入れを行い、トンネル下部まで荷重を確実に伝達するモデルが必要である。

本研究は、垂直縫地ボルトの設計手法の提案を目的に、比較的地表面傾斜の緩やかな場所での補強機構について考察した。今後、模型実験や数値解析等を活用してこの補強モデルについて検証する予定である。

参考文献

- 1) 村上良丸, 瀬崎満弘, 横田高良: 縫地RCボルト工の地山安定に及ぼす効果, 土木学会論文集, No.367/VI-4, pp. 71-80, 1986.3.
- 2) 種池信好, 松橋貞雄, 水原憲三, 五十嵐勉: 地表面沈下対策としての縫地ボルトを併用したトンネル掘削, 土木学会論文集, No.486/VI-22, pp.45-54, 1994.3.
- 3) 平山嘉一, 柵木正男, 中尾祐: JR北陸本線直近に双設トンネルを掘る 北陸自動車道風波トンネル, トンネルと地下, Vol.19, No.5, pp.25-33, 1988.5.
- 4) 田中裕治, 菊地晋, 岡本達郎, 佐藤寛: 東名に新たに生まれる3車線トンネル 東名改築新都夫良野トンネル, トンネルと地下, Vol.20, No.4, pp.7-19, 1989.4.
- 5) 鈴木隆一, 折井英夫: 崖斜面の地すべり地形を垂直縫地工法で坑口突破 福井川西線足羽山トンネル, トンネルと地下, Vol.21, No.11, pp.25-29, 1990.11.
- 6) 井上勝人, 香月廣志, 田中康弘: 地すべり地形の坑口を垂直縫地工法で施工 松山自動車道石鎚トンネル, トンネルと地下, Vol.24, No.9, pp.17-24, 1993.9.
- 7) 磯部峰雄, 赤堀勝昭, 斎藤小弥太郎, 田部井雅弘: 土被りの小さい偏圧急斜面にメガネトンネルを掘る 臨海道路4号線 御前崎みなとトンネル, トンネルと地下, Vol.25, No.10, pp.55-61, 1994.10.
- 8) 奥田庸, 阿部敏夫: 垂直縫地ボルトによる地表面沈下対策の研究, トンネルと地下, Vol.31, No.6, pp.41-50, 2000.6.
- 9) 奥田庸, 阿部敏夫: 垂直縫地ボルトを利用した地表面沈下抑制に関する実験結果の評価と考察, 土木学会論文集, No.588/VI-38, pp.61-74, 1998.3.
- 10) 奥田庸, 阿部敏夫, 桜井春輔: 土被りの浅い未固結地山トンネルの非線形逆解析, 土木学会論文集, No.638/III-49, pp.383-388, 1999.12.
- 11) 奥田庸, 阿部敏夫, 進士正人: 土被りの浅い未固結地山トンネルの地表面沈下抑制に関する評価, 土木学会論文集, No.637/VI-45, pp.79-92, 1999.12.
- 12) 鶴田五八男, 吉原和美, 辰巳正太郎: 山梨リニア実験線トンネル工事における垂直縫地工法による建物防護, トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol.4, pp.383-388, 1994.11.

- 13) 中田雅博, 三谷浩二, 城間博通, 西村和夫, 進士正人: 現場計測による垂直縫地ボルトの補強効果に関する基礎的研究, トンネル工学研究発表会論文・報告集, Vol.6, pp.163-168, 1996.11.
- 14) 中田雅博, 佐野信夫, 嘉指登志也: 垂直縫地補強工の支保効果に関する実験的考察, 日本道路公団試験研究所報告, Vol.30, pp.137-149, 1993.
- 15) 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回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.665-670, 1994.1.
- 16) 多賀直人, 嘉指登志也, 西村和夫, 進士正人: 垂直縫地補強工の支保効果に関する実験的考察, 第25岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.211-215, 1993.2.
- 17) 進士正人, 嘉指登志也, 西村和夫: トンネル坑口部における垂直縫地ボルトの作用効果に関する一考察, 第14回西日本岩盤工学シンポジウム講演論文集, pp.121-126, 1993.7.
- 18) 中村浩之, 正野光範: 鉄筋補強土工法による斜面補強効果の理論的研究, 新砂防, vol.48, No.4(201), pp.3-10, 1995.11.
- 19) 切土補強土工法設計・施工指針, JH日本道路公団, 2002.7.
- 20) 村山塑郎, 松岡元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.187, pp.95-108, 1971.3.
- 21) 垂水尚志, 山本征彦, 太田弘, 野口利雄: 砂地盤中のトンネル掘削に伴う荷重の再配分, トンネル工学研究発表会論文・報告集, vol.2, pp.27-34, 1992.10.

(2005. 3. 14 受付)

A STUDY ON BEHAVIOR OF VERTICAL PRE-REINFORCED BOLT BASES ON FIELD MEASUREMENT IN THE SHALLOW TUNNEL

Hiromichi SHIROMA, Mitsuo MASUDA, Masato SHINJI, Mikio MATSUI and Kazuo NISHIMURA

The vertical pre-reinforced method has widely been applied to prevention of the surface settlement in the shallow depth tunnel and landslide prevention at the portal area. However, the design of vertical pre-reinforced method based on the experience in respect of the equivalence force between ground movement and rock bolt. It is not a method for sufficiently evaluating the stiffening effect to protect a ground settlement a land slide. The authors carried out the detailed field measurement at the tunneling site applied the vertical pre-reinforced method during construction to estimate the support mechanism by the vertical pre-reinforced method. As the result, the vertical pre-reinforced bolt behaved an axis reinforcement model to assist the ground arch of the ground by tunnel excavation. As the result, the load of tunnel excavation is effectively distribute in the front and side of the tunnel face by its reinforcement. This ground reinforcement model by using vertical pre-reinforced bolt has established by evaluating the result of field measurements.