

トンネル長尺鏡ボルトの三次元的岩盤補強効果

—現場試験と数値解析—

大塚 勇・青木智幸・柴田勝実^{*1}・小川哲司^{*2}・足達康軌^{*2}・田中崇生^{*3}

Keywords: long face bolting, friction anchored rockbolt, pull-out test, measurement of axial force, three-dimensional excavation analysis

長尺鏡ボルト, 鋼管膨張型ロックボルト, 引抜き試験, 軸力測定, 三次元解析

1. はじめに

近年、切羽の自立が困難な脆弱地山でのトンネル工事や低土被りで未固結地山の都市 NATM トンネルの施工が増えてきており、解放自由面である切羽の補強が重要な問題となってきている。一方、切羽安定対策を目的とした補助工法の技術進歩も著しく、切羽を自立させたり、低土被りトンネルでの地表面沈下を抑えるために、長尺の鏡ボルトの施工事例が増加している¹⁾。

近畿自動車道(紀勢線)南部工事高田山トンネルでは、切羽の安定対策として、継ぎ手タイプの鋼管膨張型ロックボルトを長尺鏡ボルトに採用した。切羽鏡面の押出し測定結果より、長尺鏡ボルトが、切羽押出し変位の抑制や切羽前方の先行ゆるみの抑制に対して効果的であることが分かった²⁾。しかしながら、長尺鏡ボルトが岩盤に及ぼす補強効果については、定量的な評価は行われていない。特に、原位置のボルトの付着特性や軸力発生挙動については十分に解明されていない。

そこで、筆者らは、通常の充填式ロックボルトと付着メカニズムの異なる鋼管膨張型ロックボルトを、室

内で引抜き試験を実施し、ボルトと模擬岩盤の付着特性について調べた³⁾。

本報告では、まず室内試験で得られた知見を原位置引抜き試験に適用し、実際の地山とボルトの付着特性について調べた⁴⁾。また、長尺鏡ボルトの軸力発生機構を調べるために、高田山トンネルで掘削中の計測とともに長尺鏡ボルトの軸力測定を行った⁵⁾。さらに、三次元掘削解析により、トンネル計測結果を表現できる地山、支保の物性値を同定し、長尺鏡ボルトの軸力測定結果のシミュレーションを行った。最後に、鏡ボルトを複数本、規則的に打設した場合と鏡ボルトの無い場合で三次元掘削解析を行い、鏡ボルトの補強効果を調べた。

2. ロックボルトの引抜き試験

2.1 試験概要

鋼管膨張型ロックボルト用に開発された軸力計付ロックボルト(東亜測器製)は、ボルトに貼付されたひずみゲージが破壊しないように、ゲージを挟むように細径のガス管2本をボルトに沿って溶接し、エポキシ系充填材で被覆したものである³⁾。ロックボルトにはスーパースエレクトス(KFC 製)を用いた。ボルトの材質は SS1232 で、平均引張強度は 220kN、断面積は



写真-1 引抜き試験状況
Pull-out Test

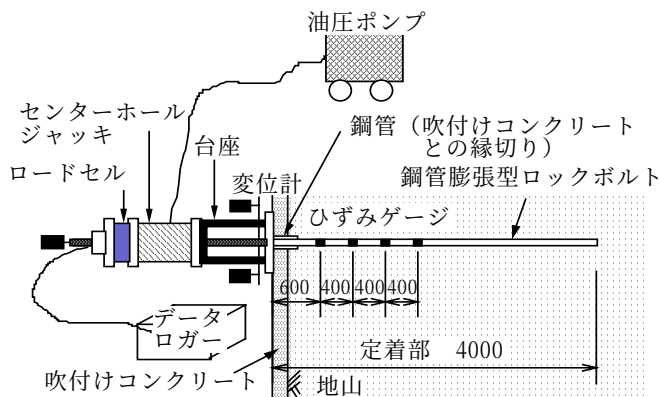


図-1 引抜き試験レイアウト図
Layout of Pull-out Test

*1 現 国際支店インド・プルリア揚水発電所建設工事
*2 関西支店南部工事
*3 日本道路公団関西支社

ガス管を含めて 539mm^2 である。引抜き試験は、写真-1 に示すように同じトンネル断面内の下半側壁で2本行い、お互いが干渉しないように上下に約 50cm 離れた。試験位置は、STA181+04.1 であり、支保パターンは DII で、インバートの早期閉合を実施している区間である。

図-1 に、引抜き試験のレイアウト図を示す。ボルト長は 4m であり、孔径は $\phi 54$ とした。吹付けコンクリートによる口元部での拘束を取り除くため、吹付けコンクリート部分は $\phi 65$ で削孔し、外径 60.5mm 、長さ 300mm の鋼管を口元部に挿入した。変位測定は、ボルト口元で左右2箇所と、ボルト頭部で行い、またロードセルにより引抜き荷重を測定した。さらに、図-1 に示した位置で、地山内部のボルトのひずみ変化を測定し、軸力に換算した。

引抜き試験では、はじめにボルトと孔壁の馴染みをとるために 5kN の初期荷重を加えて変位の初期値とした。続いて、 5kN 毎に荷重を増加させて、約 200kN まで荷重を加え、その後除荷して試験を終了した。

図-2 に、引抜き試験結果の荷重—変位（口元変位の平均値）関係を示す。2本の試験結果（ボルト1、ボルト2）は良好に一致しており、再現性が良い。次章のシミュレーションでは、ボルト1について検討する。

2.2 引抜き試験のシミュレーション

解析には有限差分法コード FLACver4.0（ITASCA 社製）を使用した。地山の物性値は、弾性係数 500MPa 、ポアソン比 0.35 とした。

ロックボルトのモデルとしては、Brady らにより提案されたモデルを採用し、筆者らが提案した方法により引抜き試験結果からそのパラメータを決定する³⁾。このモデルは図-3 に示すように、ボルトの軸剛性を節点間の降伏するバネで表現するほか、グラウトと孔壁間のせん断剛性 ($kbond$) と付着強度 ($sbond$) をそれぞれバネとスライダーで表現するものである。

$kbond$ の値は、引抜き試験により得られた荷重—変位曲線（図-2）の初期勾配 P/ξ_0 を用いて、斎藤と天野により提案された評価式により算定した³⁾ ($kbond = 2.26 \times 10^9 \text{ N/m}^2$)。

図-4 に、ボルト1の引抜き試験の引抜き荷重が 50 、 100 、 150 、 200kN の場合の軸力深度分布を示す。 $sbond$ は、引抜き荷重 200kN の場合の最大勾配として決定した ($sbond = 3.68 \times 10^5 \text{ N/m}$)。

シミュレーション解析結果（荷重—内部軸力関係）を図-5 に示す。引抜き荷重 150kN 程度までは、実験結果と良く一致することが分かった。しかし、高い荷重レベルで、引抜き荷重が急速に内部に伝わる現象は表現できていない。そこで、筆者らはボルトと孔壁間のせん断変位が増加すると、付着強度 ($sbond$) が低下する非線形モデルを取り入れることによって、高い荷重レベルまで試験結果を良好に表現できることを確認した⁴⁾。

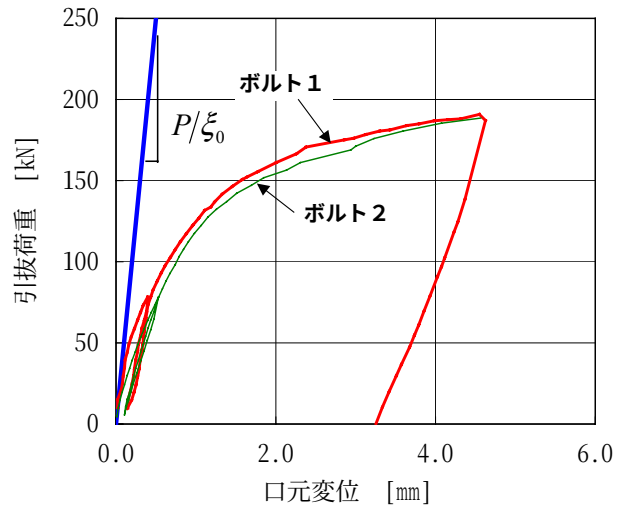


図-2 引抜き試験結果（荷重—変位関係）
Result of Pull-out Test
(Load-Displacement Relationship)

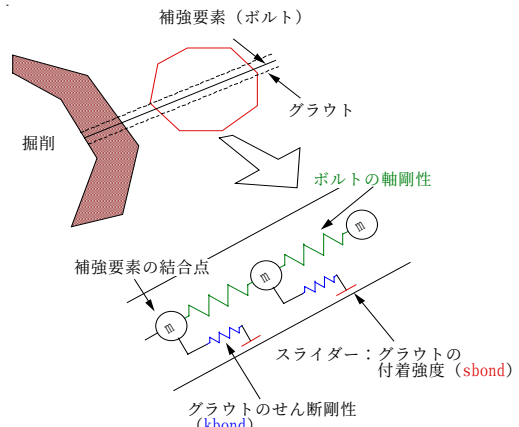


図-3 ケーブルグラウトモデル
Cable Bolt Model

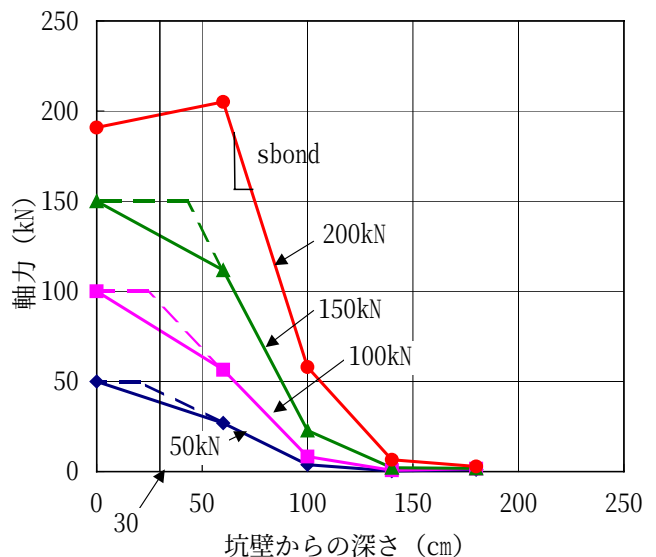


図-4 軸力の深度分布（ボルト1）
Distribution of Axial Force along Depth (Bolt1)

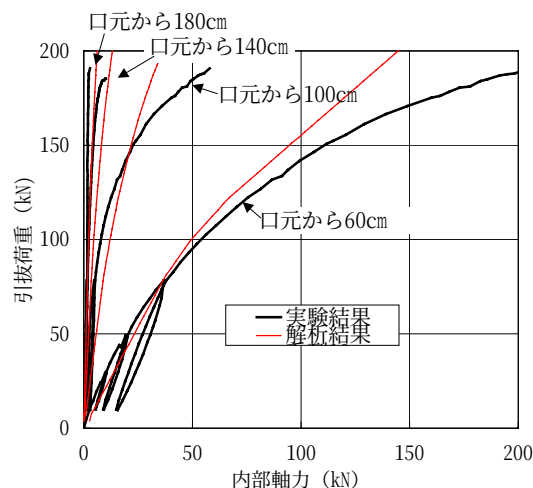


図-5 引抜き荷重と内部軸力の関係（ボルト1）
Relation between Pull-out Load and Inner Axial Forces
of Bolt1



写真-2 ボルト挿入状況
Overview of Bolt Installation

3. 長尺鏡ボルトの軸力測定

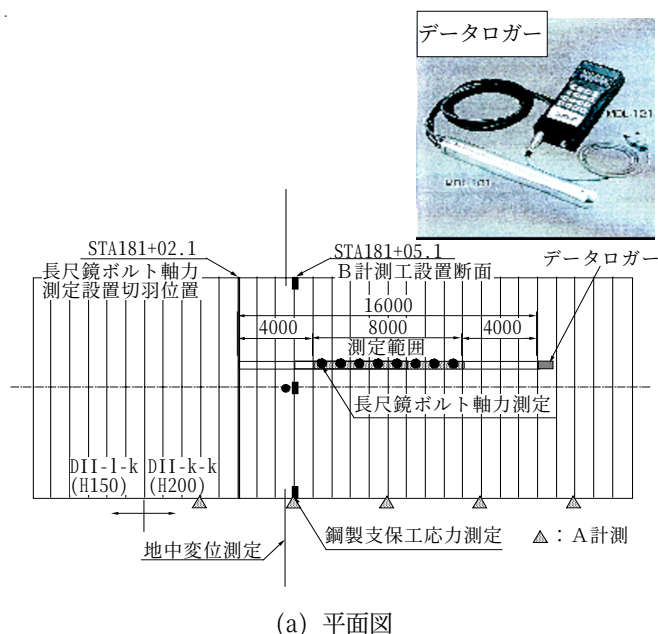
3.1 測定概要

引抜き試験と同様に、鋼管膨張型ロックボルト用の軸力計付ロックボルト（（株）東亜測器製）を連結して、長尺鏡ボルトとして切羽に打設し、軸力を測定した。ボルトの挿入状況を写真-2 に示す。ロックボルトにはコネクタブルスーパースエックス（（株）KFC 製）を用いた。ボルトの長さは、1 本 4m のボルトを 4 本継いで全長 16m とした。ボルトは、STA181+02.1 の切羽から打設し、軸力の測定は深度 4.5m～11.5m までを 1m ピッチで計 8 点行った（図-6）。軸力測定の断面位置は、上半盤から 1m 上で、トンネルセンターから切羽に向かって 1.6m 左側である。掘削中の計測データは、自動計測で 30 分毎に、ボルト先端に取り付けたデータロガーに蓄積させ、切羽がデータロガーに到達した時に回収した。

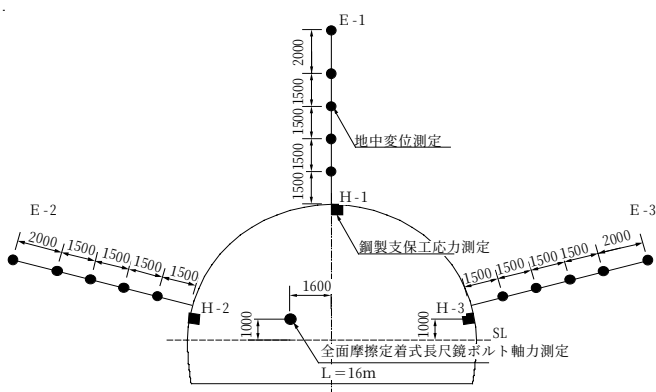
三次元弾塑性逐次掘削解析による長尺鏡ボルト軸力の事前予測解析では、長尺鏡ボルトの軸力は、打設後、ある程度切羽が進行してから大きな軸力を発生するようになることが分かった。これは長尺であるが故に地山の先行変位に反応して地山を拘束できるからである。この解析の知見に基づき、図-6 に示すように長尺鏡ボルトの軸力の変化を最も効率的に捉えるように、軸力測定位置を設定した。

また、図-6 には、トンネル計測を行った位置も示している。

計測を行った区間は、DII-k-k の支保パターンで、支保工サイズは H200、吹付けコンクリートの厚さは 250mm、ロックボルトは長さ 4m のツイストボルトを周方向に 1.2m ピッチで、1 断面に上半 15 本、下半 4 本



(a) 平面図



(b) 断面図

図-6 計測位置図
Layout of Measurements

打設した。鏡ボルトは打設しておらず、計測用の1本のみである。1掘進長は1.0mで、上半先進工法で施工した。

3.2 測定結果と考察

図-7 に長尺鏡ボルト軸力の深度分布を示す。軸力は、掘削切羽から1.5m～3.5m奥の範囲でピークを示し、それより切羽側では低下している。このことから、ゆるみ領域は切羽から2、3m奥まで広がっており、ゆるみ領域ではボルトとの付着切れが生じて、軸力が低下していると考えられる。図-8 に長尺鏡ボルト軸力の経時変化を示す。各測点において、切羽の進行に伴い、軸力が増加していくが、切羽と測点の距離が、ある間隔よりも近づくと、軸力が抜け始めている。

長尺鏡ボルトに発生するピークの軸力は300kNを超えており、ボルトの引張強度220kNを上回っている。実際にはボルトは降伏している。切羽の押出しに対して、長尺鏡ボルトが最大限の力を発揮し、抵抗していると言える。

鏡ボルトには、通常のロックボルトのように6m以下の短尺のものと、10mを越える長尺ボルトとが使用されている。本研究で対象とした長尺ボルトは、掘削に伴い切羽前方で発生する先行変位に反応して軸力を発生し、切羽の変形を抑制する効果が期待できると言える。一方、短尺ボルトは、切羽近傍に既に発生した緩み領域に打設することになり、上記の効果は期待できず、切羽からの岩塊の肌落ちを防止する効果を主に期待するものであることが分かる。

図-7では、打設切羽から7～9mで、ボルトに発生する軸力が低下している領域が見られる。この位置の切羽観察記録を見ると、ボルト打設位置近傍に「人力にて掘削可能な軟弱な土砂層」が現れたと記されている。その部分では、地山が軟弱なために、ボルトと地山が十分に付着せず軸力があまり増加しなかったものと考えられる。

同時に実施した内空変位・天端沈下では、内空変位で80mmを超え、天端・脚部沈下は50mmを超える結果となった。また、地中変位測定より、ゆるみ領域がトンネル外周6mまで及んでいることが推測できた。鋼製支保工に発生する応力は、天端部が最も大きく、降伏応力(240N/mm²)を超える応力が発生している。トンネル計測の計測結果図は4章の解析結果と合わせて示す。

4. 計測結果のシミュレーション解析

4.1 解析方法

解析には有限差分法コードFLAC3Dver2.1(ITASCA社製)を使用した。解析モデル図を図-9に示す。境界条件は、地表面はフリーとし、その他はローラー境界とし、対象性を考慮して半断面とした。土被りは55mである。

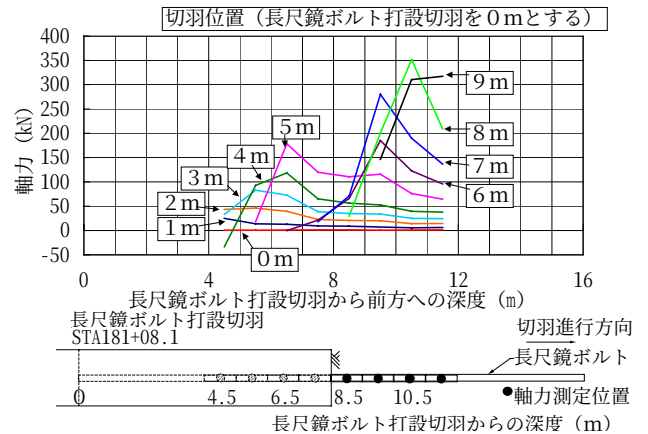


図-7 軸力の深度分布図
Distribution of Axial Force
along Face Position

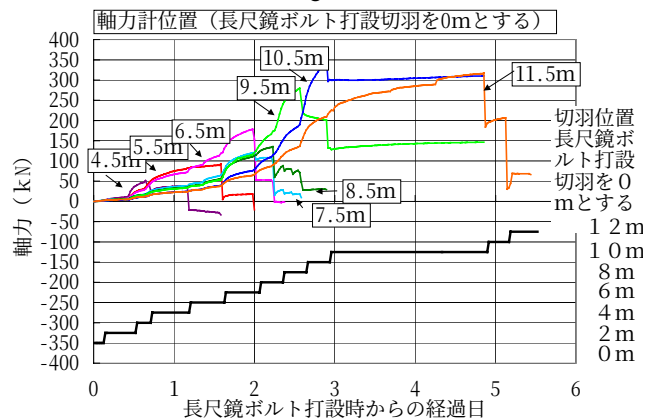


図-8 軸力の経時変化図
Axial Force History

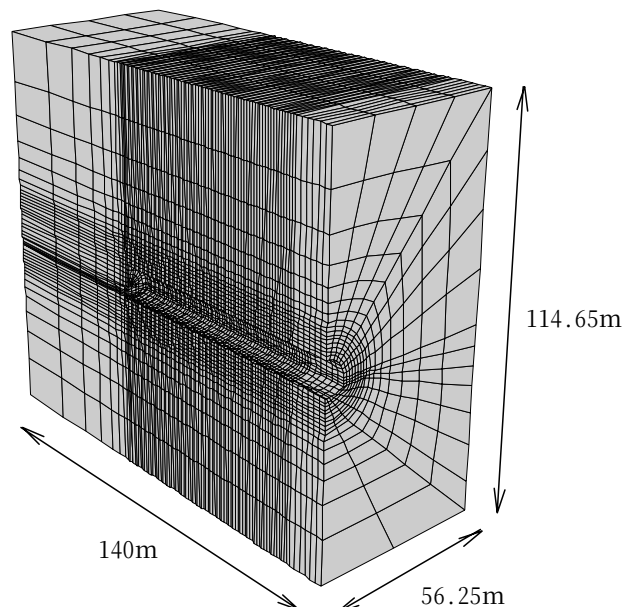


図-9 解析モデル図
Analysis Model

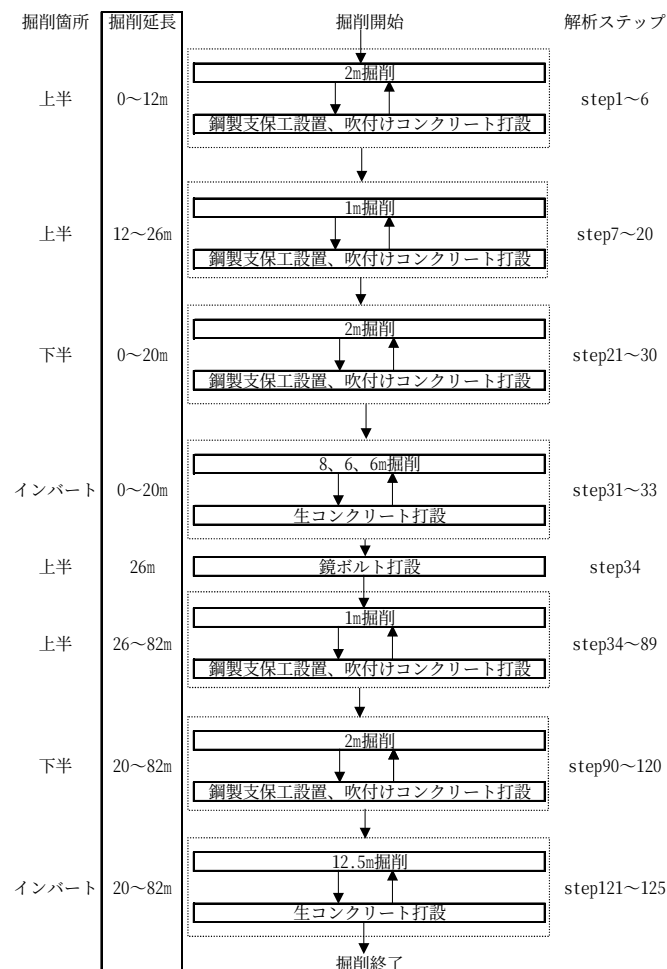
トンネル計測結果と解析結果が合うように、地山と支保の物性値を同定した。得られた物性値を表-1 に示す。地山は Mohr-Coulomb の降伏規準に従う完全弾塑性体としてモデル化した。

吹付けコンクリートはシェル要素で、鋼製支保工は

表-1 解析用物性値

Parameters for Analysis

	名称	単位	入力パラメータ	備考
岩盤	弾性係数	MPa	500	
	ポアソン比		0.35	
	G	MPa	185	
	K	MPa	556	
	密度	10^3kg/m^3	2.30E-03	
	粘着力	MPa	0.05	
鋼管膨張型 ロックボルト	摩擦角	°	30	
	断面積	m^2	5.39E-04	軸力計付
	弾性係数	GPa	205	
	引張降伏荷重	kN	220	
	kbond	MN/m^2	2.26E+03	
	sbond	MN/m^2	1.00E-01	
吹付コンクリート	厚さ	m	0.25	
	密度	10^3kg/m^3	2.30E-03	
	弾性係数	GPa	4	
	ポアソン比		0.2	
鋼製支保工	断面積	m^2	6.35E-03	
	断面二次モーメント(強)	m^4	4.72E-05	
	断面二次モーメント(弱)	m^4	1.60E-05	
	密度	10^3kg/m^3	7.85E-03	
	弾性係数	GPa	205	
	ポアソン比		0.3	

図-10 解析手順図
Steps of Analysis

ビーム要素でモデル化した。

解析手順は、実際の施工サイクルを再現しており、図-10 に解析手順図を示す。図の左側に掘削延長を示し、図の右側には掘削手順を示している。掘削は最初の 12m 区間は 2m とし、12m～60m は掘進長を 1m としている。上半切羽位置 26m で $L=16\text{m}$ の鏡ボルトを 1 本打設する。上半切羽位置 29m でトンネル計測を行った。吹付けコンクリートおよび鋼製支保工は掘削ごとに設置しているが、吹付けコンクリートの強度が十分発現されるまでは、地山となじまないと考え、一掘削間遅れて付加している。トンネル半径方向のロックボルトは考慮していない。

4.2 ボルトの付着パラメータについて

鋼管膨張型ロックボルトは、引抜き試験のシミュレーション解析と同様に、ケーブル要素とした。このモデルの付着強度 ($sbond$) とせん断剛性 ($kbond$) の 2 つの特性パラメータは、2 章で述べた原位置引抜き試験よりその値を決定した。しかし、付着強度 $sbond$ について、引抜き試験のシミュレーションから求めた値を使用してトンネル掘削解析を行うと、ボルトに発生する軸力が計測値をはるかに上回る結果となった。その原因として考えられることを以下に示す。

1) 引抜き試験を行った側壁の地山に比べ、ボルトの軸力測定を行った切羽の地山が軟弱であり、付着強度が小さかった可能性がある。

2) 2 章で述べたように、高荷重レベルで付着強度が低下する特性があり、この特性による影響が顕著であった。

本報では、原因 1) に主眼を置き、付着強度を低減して解析を行った。使用した付着強度は約 30% に低減したものである。設計的には安全側の値となっている。

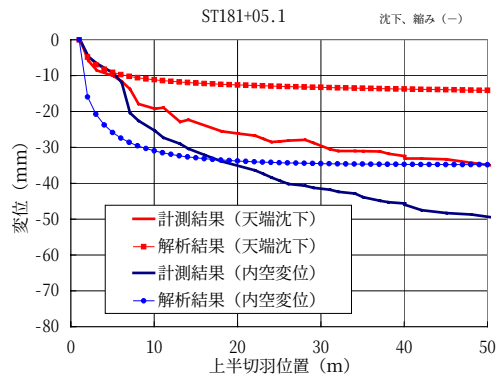
4.3 シミュレーション解析結果と考察

シミュレーション解析結果を図-11 に示す。

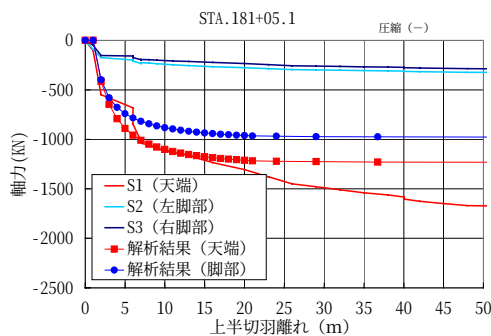
図-11(a)に内空変位、天端沈下の比較を示す。赤線为天端沈下は、切羽の位置が約 5m までは計測値とほぼ一致しているが、5m を超えると解析ではほぼ収束しているのに対して、計測ではクリープ的な変位増加が見られ、切羽位置 50m では計測値が解析値の約 3 倍の変位量となる。青線の上半内空変位は、解析で初期の変位増加が大きいが、上半切羽位置が 2D (20m) で一致し、その後、解析結果ではほぼ収束しているが、天端沈下と同様に計測結果ではクリープ的な変位増加が見られる。切羽位置 50m では、計測値が解析値の約 1.5 倍となる。

図-11(b)の鋼製支保工の軸力では、青線の両脚部で計測値よりも解析値が大きくなっている。また、赤線为天端部では上半切羽が 20m までは、ほぼ一致している。20m を超えると、解析値が収束しているのに対して、計測では徐々に軸力が増加している。

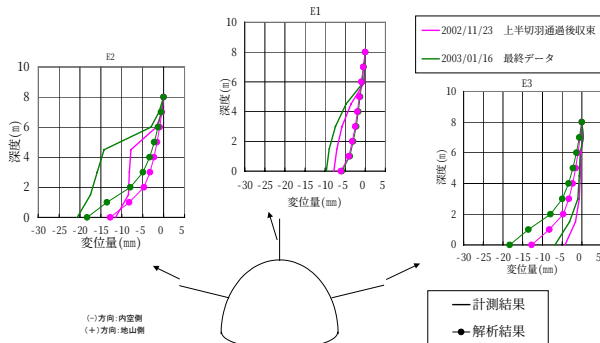
トンネル計測の経距変化では、切羽が 50m 離れても計測結果は収束することなく、増加し続けている。掘



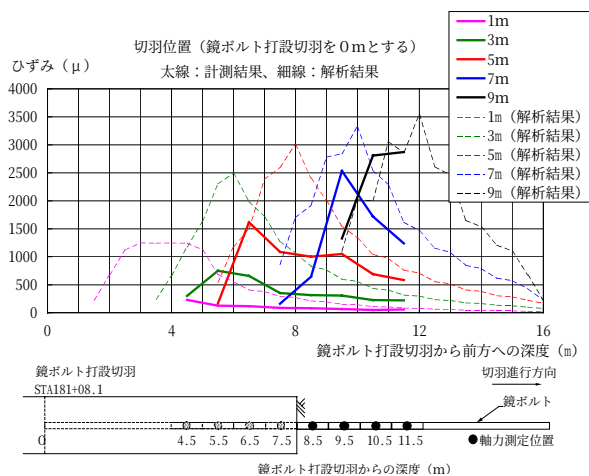
(a) 内空変位、天端沈下



(b) 鋼製支保工軸力



(c) 地中変位計測



(d) 長尺鏡ボルトの軸ひずみ分布図

図-11 シミュレーション解析結果
Result of Simulation analysis

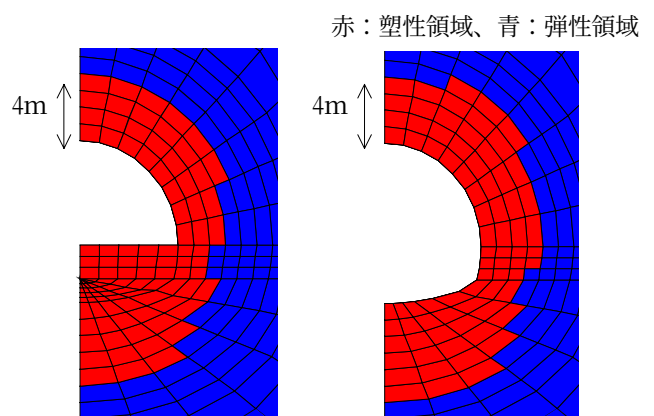
削解放力による影響は、トンネル軸方向に掘削切羽から前後 2D 程度と言われており、このような現象は、時間に依存した地山のクリープ的な変形と考えられる。より忠実に計測結果を表現するためには、このクリープ現象を取り入れた解析を実施する必要があるが、今回実施した通常の弾塑性解析では、切羽近傍の挙動に着目しているため、この現象まで考慮していない。

鋼製支保工脚部の軸力が、計測結果では小さな値となっている。実際、支保工の脚部では局所的な地山の変状により支持力が不足して、支保工の軸力が低下したものと考えられる。解析では、一様に軸力が発生し、天端と脚部でほぼ等しい結果となっている。解析で、支保工脚元の地山メッシュを細かくすれば、実際の現象に近づいてくるが、鏡ボルトの補強効果という今回の目的から外れ、計算が煩雑になるため割愛した。

図-11(c)の地中変位の比較では、天端部で、深度 0 m と 6m の変位量はほぼ等しいが、分布形状の凹凸が反転している。上半脚部では、左側の深度 0m の変位は、両者でほぼ等しくなるが、計測では深度 4m~6m で変位が急激に大きくなっているのに対して、解析では深度 8m から徐々に変位が増大しており、深度 2m で変位増加の勾配が大きくなっている。右側の計測結果がその傾向を示しているが、変位量は解析結果と比較すると約 1/3 である。

通常、地中変位の分布は深度が浅くなる（坑壁に近づく）につれて、変位増加の割合が大きくなり、解析結果のような分布となる。計測結果をみると、天端では逆の傾向になっている。鋼製支保工の計測結果では、天端部で上に凸となるような曲げが作用しており、支保工が地山を押し上げて、坑壁近傍の変位が抑えられていると考えられる。

図-11(d)に鏡ボルトの軸ひずみ分布を示す。3章で述べたように、測定された鏡ボルトの軸力は降伏耐力を上回っており、解析結果でも同様である。軸力では、降伏耐力以上の比較ができないため、軸ひずみで比較を行った。切羽の約 2m 先で、ひずみのピークが存在



(a) 上半掘削完了時

(b) 掘削完了時

図-12 塑性領域図

Plasticity Region

することに関しては、両者ともに同じ傾向を示している。打設切羽から 5m までは、点線で示した解析結果が、実線で示した計測結果よりも大きなひずみとなっているが、打設切羽から 7m、9m と進行するにつれて、軸ひずみの大きさ、分布形状ともに両者は良く一致している。

3 章でも述べたように、計測では打設切羽から 7～9 m で、ボルトに発生する軸力が低下している領域があり、その区間に脆弱な地山の層が存在していたと推測した。脆弱な層では、ボルト孔壁まわりの地山がゆるみやすく、ボルトとの付着強度が低下すると考えられる。今回の解析では、地山は一様としているため、鏡ボルトの軸ひずみも一様に大きな値となったが、脆弱な層を超えてからは、両者は良く一致している。

図-12 に解析結果の塑性領域図を示す。この断面はトンネル計測を行っている断面である。赤い領域が塑性化した要素である。トンネル周辺のメッシュサイズはトンネル半径方向に 1m であるので、上半掘削完了時に、天端で 4m、側壁で 3m である。掘削完了時には肩部から側壁の部分で 1m 塑性領域が広がっている。地中変位計測結果からゆるみ領域はトンネル壁面から 4m～6m と推測され、解析結果の塑性領域の厚さとはほぼ一致する。

5. 三次元掘削解析による鏡ボルトの効果

5.1 解析方法

長尺鏡ボルトを打設した場合と鏡ボルトの無い場合で三次元掘削解析を行い、長尺鏡ボルトの効果を調べる。鏡ボルトの長さ、ラップ長、配置は、実際に高田山トンネルで実施されたものに合わせた。

長尺鏡ボルトの配置図を図-13 に示す。鏡ボルトは長さ 20m で、19 本と 16 本の千鳥配置で 6m のラップ長であり、上半のみに打設する。

解析手法、解析メッシュ、入力物性値は、4 章と同じである。鏡ボルトは step34 (図-10 参照) から打設し、19 本の配置からはじめた。

5.2 解析結果と考察

トンネルセンターにおける切羽の押し出し変位量を図-14 に示す。縦軸は上半盤からの高さであり、0m が SL で 6.25m が天端となる。鏡ボルトのないケースでは、大きくはらみ出す分布をしている。鏡ボルトを打設したケースでは、ボルトのないケースと比較して、約半分の変位量に抑えることができ、ラップ区間では、さらにその効果が大きくなる。

図-15 に塑性領域図を示す。鏡ボルトの効果により切羽前方の塑性領域が 1 メッシュ (1m) 減少している。

図-16 に変位の分布図を示す。鏡ボルトがないケースでは、切羽の中央に変位の大きな領域がある。鏡ボルトを打設することによって、切羽全体の変位を抑制していることが分かる。また、図-16 に切羽の変位ベ

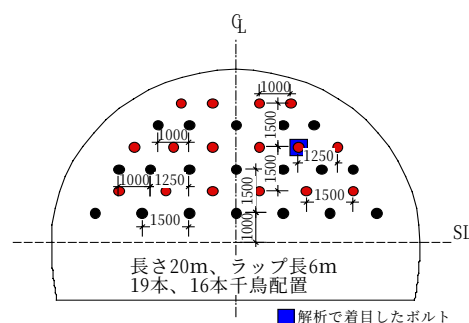


図-13 長尺鏡ボルトの配置図

Pattern of Long Face Bolting

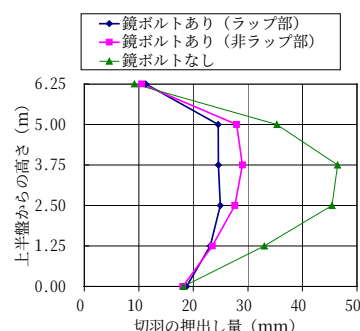
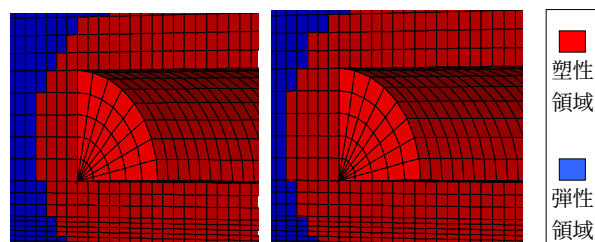


図-14 鏡面の押し出し変位 (トンネル中心)

Face Displacement at Center of Tunnel

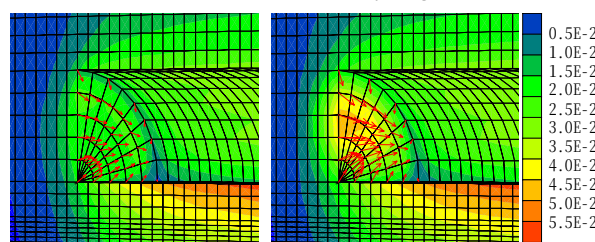


(a)鏡ボルトあり

(b)鏡ボルトなし

図-15 塑性領域図

Plasticity Region [m]

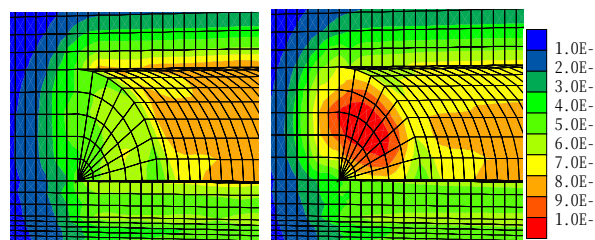


(a)鏡ボルトあり

(b)鏡ボルトなし

図-16 変位分布図

Contour of Displacement



(a)鏡ボルトあり

(b)鏡ボルトなし

図-17 最大せん断ひずみ分布図

Contour of Maximum Shear Strain

クトルも表示している。切羽の中央部では、ほぼトンネル進行方向に変位ベクトルは向いているが、天端や上半盤付近では、上下の成分も含まれている。

図-17 に最大せん断ひずみの分布図を示す。変位分布と同様に、鏡ボルトがないケースでは、切羽の中央部にひずみの大きい領域がある。地山の弾性係数から限界ひずみを求め⁶⁾、限界せん断ひずみを計算すると、0.82%となる。鏡ボルトがないケースで、限界せん断ひずみを超える橙色、赤色の領域は切羽全域に広がっており、切羽が崩落する危険性があるのに対して、鏡ボルトを打設した場合では、ひずみが大幅に減少している。

図-18 に鏡ボルトの軸力分布図を示す。ラップ区間を掘削している部分であり、先に打設していたボルトは定着長が短くなり、ボルトに発生している軸力が、後で打設した長いボルトと比較すると小さくなっている。

図-19 に鏡ボルトの軸力深度分布図を示す。ボルトがない場合にせん断ひずみが大きかった図-13 の青い四角で囲んだ位置のボルトに着目した。軸力測定結果と同様に、切羽から約 3m奥で、軸力がピークとなっている。軸力測定では、測定用のボルト 1 本だけしか打設されていなかったため、発生軸力は降伏耐力 220kN をはるかに超えていた。同じ地山条件の下で、複数本を規則的に打設した今回のケースでは、ピークで若干、降伏耐力を上回る程度である。ボルト耐力を最大限に生かしており、今回の解析の打設密度が適切であったことが分かる。

ボルト打設直後は、切羽から数mの区間で先行変位が既に発生しているため、打設切羽から 5m までは最大軸力が低くなる。また、掘削が進み定着長が短くなってくると、発生軸力が低下する。切羽位置が打設切羽から 15mより奥で、その傾向が見られる。したがって、全長 20mのボルトの両端部 5mは、軸力低下区間と考えられ、ラップ長 6mは妥当な長さであるといえる。

おわりに

本報告では、鋼管膨張型ロックボルトを用いたトンネル長尺鏡ボルトによる切羽の補強効果について、次の内容について検討した。

- ・ボルトの特性パラメータを決定するための現場引抜き試験
- ・掘削中の長尺鏡ボルトの軸力挙動測定
- ・三次元弾塑性逐次掘削解析による計測結果のシミュレーション
- ・長尺鏡ボルトの補強効果に関する比較解析

比較解析では、限られた検討ケースではあるが、切羽の補強効果を良好に表現することができた。

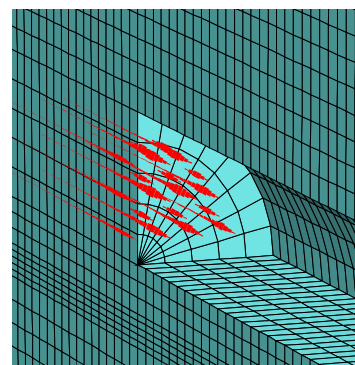


図-18 鏡ボルトの軸力分布図
Axial Force of Face Bolting

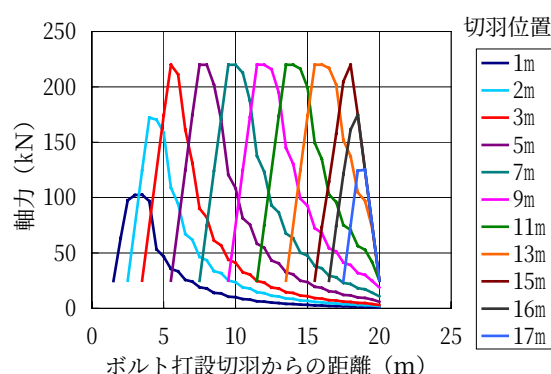


図-19 軸力の深度分布図
Distribution of Axial Force
by Face Position

また、本報告では、鏡ボルトには軸力のみを負担するモデルを使用した。近年では、より大径の曲げ剛性を期待できる補強ボルトも開発されている。今後、類似する長尺先受け工と合わせて、その補強効果について検討をすすめる計画である。

参考文献

- 1)西崎昌士, 羽馬徹, 岡部正: 長尺鏡ボルトの施工動向と挙動特性の解析的研究, トンネル工学研究論文報告集第 12 巻, pp.131-136, 2002
- 2)足達康軌, 小川哲司: 軟弱地山における先行緩み測定結果と長尺鏡ボルトの効果について, 土木学会第 57 回年次学術講演会, III-269, pp.537-538, 2002
- 3)青木智幸, 柴田勝実, 大塚勇, 吉富幸雄: 鋼管膨張型ロックボルトの引抜き実験と付着特性について, 第 32 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.293-298, 2003
- 4)大塚勇, 青木智幸, 田中崇生, 小川哲司, 足達康軌: 鋼管膨張型ロックボルトの原位置引抜き試験とシミュレーション解析結果, 第 38 回地盤工学研究発表会, pp.1737-1738, 2003
- 5)足達康軌, 田中崇生, 小川哲司, 青木智幸, 大塚勇: トンネル掘削時の長尺鏡ボルトの軸力発生・分布挙動, 第 58 回土木学会年次学術講演会, 2003 (投稿中)
- 6)櫻井春輔: 都市トンネルへの NATM の適用, 土木学会関西支部講習会テキスト, 1987