

膨圧性地山における長尺鏡ボルトの 切羽補強効果の検討

Investigation on Effects of Face Reinforcement by Long Facebolting in Squeezing Rocks

大塚勇¹・青木智幸²・谷卓也¹・竹津英二³・小杉勝之⁴

Isamu OHTSUKA, Tomoyuki AOKI, Takuya TANI, Eiji TAKETSU
and Katsuyuki KOSUGI

¹正会員 工修 大成建設(株) 技術センター(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)
E-mail:ohtsuka@ce.taisei.co.jp

²正会員 PhD 大成建設(株) 技術センター(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

³正会員 鉄道・運輸機構 北陸新幹線建設局(〒380-0936 長野県長野市大字中御所字岡田45-1)

⁴正会員 大成建設(株) 飯山トンネル作業所(〒944-0333 新潟県新井市大字大沢新田347)

At Iiyama Tunnel, the long facebolting by means of GFRP tube bolt has been adopted for the face stabilization of squeezing rocks. In-situ pull tests of GFRP tube bolts with different injection materials were performed in order to determine the cohesive parameters of a numerical bolt model. The axial forces of a long facebolt and the extrusive displacements of a tunnel face during excavation were measured. Results of three-dimensional excavation analyses successfully explained the behaviors of the facebolt and the tunnel face. Numerical analyses with different injection materials indicated that the reinforcing effects by facebolting were significantly influenced by the cohesive parameters of the bolt model.

Key Words : long facebolting, squeezing rock, face reinforcement, numerical simulation,
three-dimensional excavation analysis

1. はじめに

北陸新幹線飯山トンネル木成工区では、膨圧により450mmを超える大変形が生じ、鋼製支保工や吹付けコンクリートに変状が発生したため、多重支保工法を採用している。また、切羽の安定対策として、継ぎ手タイプの中空GFRPボルト(以後GFRP管ボルト;外径76mm,内径60mm)を長尺鏡ボルト(長さ12.5m)として使用している。切羽の押し出しを伴う膨圧性地山に対して、GFRP管ボルトによる切羽の補強効果について、原位置試験および三次元掘削解析によって検討する。

GFRP管ボルトは自穿孔タイプであるため、孔壁が自立しない地山でも長尺施工ができ、近年施工事例が増えている。打設後に行う注入は、地山の改良効果やボルトの定着効果などの目的に合わせて、レジン系やセメント系などの多種の注入材がある。このような各種注入材に対して、GFRP管ボルトと地

山との付着特性について調べた例はなく、明らかではない。また、GFRP管による鏡ボルトの軸力測定を行った事例が少なく、鏡ボルトの軸力作用機構についても十分に説明されていない。そこで、著者らは注入材を変えてGFRP管ボルトの引抜き試験を行い、各種注入材による付着特性について検討した¹⁾。また、軸力計を取付けたGFRP管ボルトを切羽面に打設し、掘削中の鏡ボルトに発生する軸力を計測した²⁾。さらに、地中変位計を切羽前方に設置し、掘削による切羽の押し出し変位を計測し、前方地山の挙動を調べた²⁾。

今回は、有限差分法³⁾を使用して、施工手順に準じた三次元掘削解析を行い、鏡ボルトの軸力計測結果および切羽前方の押し出し変位計測結果のシミュレーションを実施した。また、引抜き試験から求めた各種注入材による付着定数を使って、注入材が異なる場合の予測解析を行い、長尺鏡ボルトの切羽補強効果について比較・検討を行った。

2. 原位置試験

原位置試験は、前述したように GFRP 管ボルトの引抜き試験、GFRP 管による長尺鏡ボルトの軸力計測、切羽前方の押し変位計測の 3 種類である。各試験を行った場所は異なり、表-1 に示す位置にて実施した。引抜き試験と軸力測定箇所は約 150m 離れており、軸力測定と変位計測箇所は約 120m 離れている。土被りは引抜き試験の位置で浅くなっているが、軸力計測と変位計測は等しい土被りである。地質は全ての試験位置にて同様であり、切羽観察記録による評価点もほぼ等しい。支保の仕様は、変位計測位置でロックボルトの仕様がやや重くなっているが、鋼製支保工と吹付けコンクリートについては同様である。坑内変位は引抜き試験箇所と若干大きくなっており、特に天端沈下が大きい。よって、土被りが浅く坑内変位の大きい引抜き試験箇所と若干地山が軟弱であると考えられるが、軸力測定と変位計測を行った位置での地山条件はほぼ等しいと考えられる。なお、今回の全ての試験箇所では多重支保工法は採用していない。長尺鏡ボルトもパターンで打設せず、軸力計測用ボルトのみを打設している。

掘削 (N・A) の支保パターン図を図-1 に示す。

(1) 引抜き試験¹⁾

引抜き試験は、口元の荷重と変位計測に加えて、軸力測定用ひずみゲージを GFRP 管ボルトに取付けて、ボルト内部の軸力分布を測定した。注入材はウレタン (LV-60)、シリカレジン (RBS-SR)、モルタル (IBO モルタル) とした。

ボルトのモデルとしては、図-2 に示す Brady ら⁴⁾ が提案したモデルを採用し、著者らが提案した方法⁵⁾によって引抜き試験結果から付着定数 (せん断剛性, 付着強度) を求めた。算出された付着定数を数値解析に取り入れ、引抜き試験の数値シミュレーションを行った結果、ボルトの挙動を良く再現することができた。算出した各種注入材の付着定数を表-2 に示す。せん断剛性 ($kbond$) および付着強度 ($sbond$) とともにウレタン、シリカレジン、モルタルの順番に大きくなっている。

(2) 長尺鏡ボルトの軸力測定²⁾

図-3 に示すように、ひずみゲージを貼り付けたセンサー管 (PET 製) を、切羽に打設した長尺鏡ボルト (GFRP 管ボルト) の中空部に挿入し、注入材で固めて間接的に鏡ボルトの軸力測定を行った。センサー管と GFRP 管ボルトの追従性については、前

表-1 試験位置の比較

	引抜き試験	鏡ボルト軸力計測	前方切羽変位計測
打設位置	163k717m~711m	163k870m	163k993m
土被り (m)	140	180	180
地質	新第三紀中新世の稚谷層で泥岩主体		
支保パターン	掘削 (N・A)	掘削 (N・A)	特B
支保仕様	鋼製支保工 200H@1.0m		
	吹付けコンクリート 25cm		
	ロックボルト D22, L=4.0m×10本, L=4.5m×8本	T024 L=4.0m×10本 L=4.5m×16本	
坑内変位	内空変位 (mm)	200~250	140~200
	天端沈下 (mm)	120~130	60~70

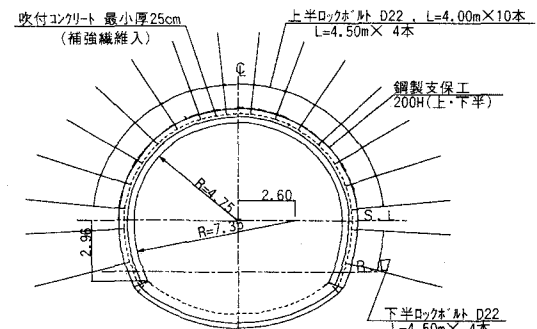


図-1 支保パターン図 (掘削 (N・A))

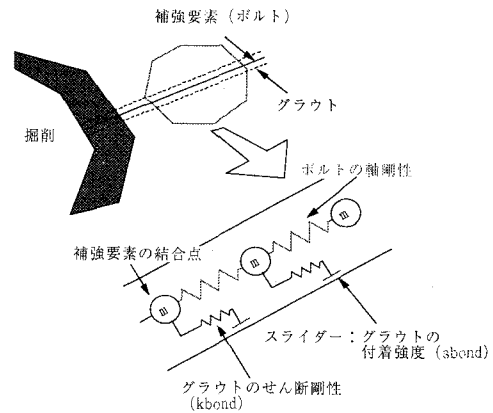


図-2 ボルトのモデル

表-2 各種注入材の付着定数

注入材	せん断剛性 $kbond$ (N/m^2)	付着強度 $sbond$ (N/m)
ウレタン	7.16×10^7	5.05×10^4
シリカレジン	2.11×10^8	6.00×10^4
モルタル	9.36×10^9	2.16×10^5

述した引抜き試験結果より、両者は同様な挙動を示すことが確認された¹⁾。注入材はウレタン (LV-60) とした。

軸力計付長尺鏡ボルトの長さは 12.5m であり、測点は深度 3m から 10m まで 1m ピッチに計 8 点で計測を行った。ボルトは切羽のセンターで、上半から約 1.5m 上がりの位置に水平に打設した。計測データはセンサー管の先端に取り付けられているデータロガーにより自動計測を行い、切羽がデータロガーに到達した時に回収した。



図-3 軸力計測定用長尺鏡ボルト

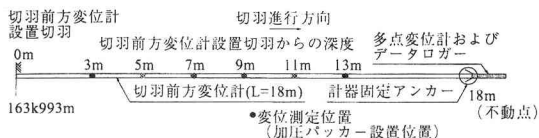


図-4 切羽前方変位計測

(3) 切羽前方押し変位計測²⁾

膨圧性地山における切羽前方の押し変位分布を調べるために、切羽から前方に地中変位計を設置し、切羽前方の押し変位計測を行った (図-4)。切羽前方に約 20m 削孔し地中変位計を挿入した。地中変位計はトンネルセンターから約 1.5m 左で、上半から約 1.5m 上がりの位置に水平に設置した。深度 18m の地点を不動点として、深度 3m から 13m までを 2m ピッチで計 6 点の測点を加圧パッカーで孔壁に固定し、不動点との相対変位を多点変位計で計測した。データは鏡ボルトの軸力計測と同様に、自動計測として、切羽がデータロガーに到達した時に回収した。

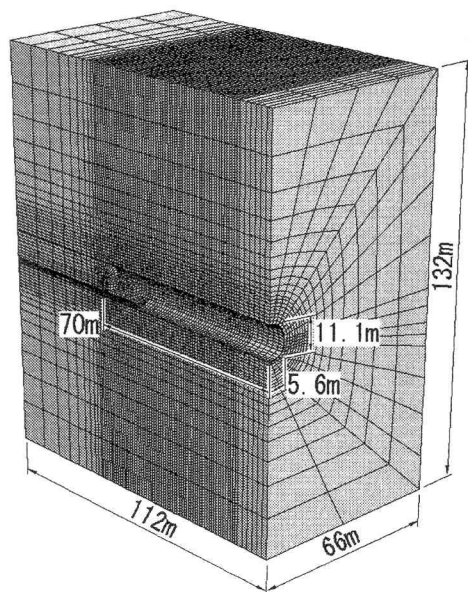


図-5 解析モデル図

3. 計測結果の数値シミュレーション

長尺鏡ボルトの軸力計測と切羽前方の押し変位計測の数値シミュレーションを行う。

(1) 解析方法

解析は三次元有限差分法³⁾によって行った。解析モデル図を図-5 に示す。対称性を考慮して半断面とした。表-1 に示すように、測定箇所の上被りは 180m であり、側圧係数を 1.0 として、各要素に土被り相当圧の自重を初期応力として作用させた。解析ステップは実際の施工手順を再現し、上半切羽が 70m 進むまで解析を行った。

施工手順はベンチ長を 11m とし、上半を 1m ずつ 4m 掘削した後に下半を同じく 1m ずつ 4m 掘削する。その後、下半の切羽後方 5m までを 4m まとめてインバート掘削し、インバートストラットと吹付けコンクリートによりリング閉合する。

(2) 地山と支保のモデル化と物性値

前報⁶⁾では、トンネルの大変形や吹付けコンクリ

ートの圧壊、鋼製支保工の座屈・破断などの支保変状に着目して、地山と支保のモデル化を行っている。地山は Mohr-Coulomb の破壊規準に従う完全弾塑性体モデルとした。吹付けコンクリートは、弾塑性体のソリッド要素とし、一軸圧縮強度に達したら降伏するものと設定した。鋼製支保工は軸降伏する一軸棒要素としてモデル化した。支保の剛性は地山と支保の馴染みを考慮して 1/5 に低減した結果、地山と支保の挙動を良く再現することができ、A、B 計測結果と良く一致した⁶⁾。

今回の検討では、前報⁶⁾と土被りなどの条件が異なるが、同様なモデル化を行い、物性値についても同様に設定した。解析に使用した地山と支保の物性値を表-3 に示す。

表-3 解析に使用した地山と支保の物性値

	仕様	ヤング率 [GPa]	ポアソン比	粘着力 [MPa]	内部摩擦角 [°]	単位体積重量 [kN/m ³]	降伏応力 [N/mm ²]
地山	完全弾塑性体	0.3	0.3	0.4	20	20.5	—
吹付けコンクリート	厚さ 250mm	0.68	0.2	9.0	0	—	(18.0)
鋼製支保工	H200	40	—	—	—	—	235

表-4 解析に使用した長尺鏡ボルトの物性値

名称	単位	入力パラメータ
断面積	m ²	1.71×10^{-3}
弾性係数	GPa	38
ポアソン比		0.3
kbond	N/m ²	7.16×10^{-7}
sbond	N/m	1.01×10^{-5}
断面二次モーメント	m ⁴	1.00×10^{-6}
破断荷重(母材部)	kN	1,000
破断荷重(継ぎ手部)	kN	200

(3) 長尺鏡ボルトのモデル化と物性値

ボルトは図-2 に示す付着特性を考慮でき、曲げ抵抗するモデルとした(パイル要素³⁾)。GFRP 管ボルトは母材の軸耐力は約 1,000kN と高耐力であるが、継ぎ手部の耐力は母材部の約 1/5 となり約 200kN と大幅に低下する。ボルト 1 本は 3m であり、それを継いで長尺化するため、3m 毎に弱部となる継ぎ手がある。軸力の計測結果では、継ぎ手で破断する現象が見られた。そこで、その現象を再現するために、継ぎ手は 200kN で破断するようにモデル化した。

表-4 に長尺鏡ボルトの物性値を示す。軸力測定用ボルトにはウレタンを注入材として使用したため、付着定数は引抜き試験のウレタンの値を用いた。しかし、付着強度(sbond)を引抜き試験より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は小さく測定結果と合わないため、付着強度(sbond)を引抜き試験結果の 2 倍の値とした。2 章で述べたように、引抜き試験を行った場所は軸力測定箇所より地山が軟弱であり、地山が比較的硬質の場合には付着強度が増すと考えて、付着強度を 2 倍とした。

(4) 解析結果と計測結果の比較

a) A 計測

図-6 に A 計測の経距変化を比較した結果を示す。計測結果には、鏡ボルト軸力計測位置と切羽前方変位計測位置の両方で計測された結果を示している。天端沈下は解析結果と計測結果は良く一致している。上半内空変位は解析結果のほうが大きな値を示している。解析では上半切羽が進行せず下半掘削の影響によって階段的な変化を示しているのに対して、計測結果では下半掘削による影響はほとんど見られない。

b) 長尺鏡ボルトの軸力測定

図-7 に長尺鏡ボルトの軸力深度分布図の結果を示す。(a)図が計測結果であり、(b)図が解析結果である。横軸に軸力計設置切羽からの深度を、縦軸に鏡ボルトに発生する軸力を示す。図中の四角で囲まれた数字は軸力計設置切羽を 0m とした時の掘削切

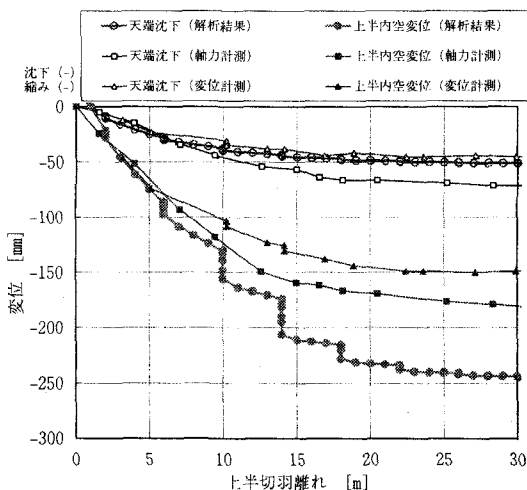
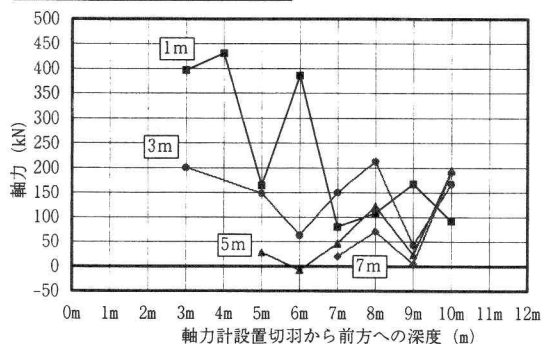


図-6 A 計測結果比較図

羽位置を表している。切羽が 1m 進んだ時に、上図の計測結果ではボルト全長に大きな軸力が作用しており、深度 3m と 6m の継ぎ手部は破断耐力 200kN を超えている。その後、継ぎ手部である 6m、9m の測点ではボルトが破断したため、軸力が低下している。

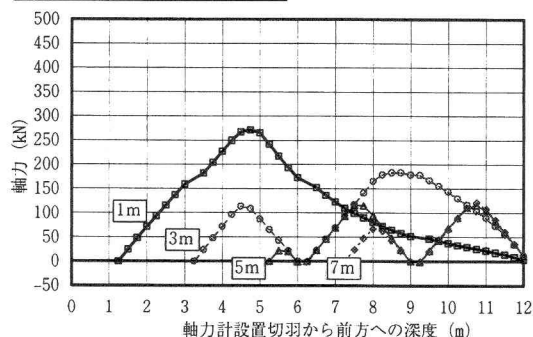
一方、下図の解析結果では切羽が 1m 進んだ時に計測結果と同様に、ボルト全長に大きな軸力が作用している。この時点では、ボルト継ぎ手部に作用する荷重は破断耐力以下であり、ボルト全長で抵抗している。その後、切羽が進み 3m 掘削した時は、ボルトに作用する軸力が増大し、6m の継ぎ手部が破断して軸力が低下する。9m の継ぎ手は 180kN 程度の大きな軸力が作用しているが、破断耐力に達し

切羽位置（設置切羽を0mとする）



(a) 計測結果

切羽位置（設置切羽を0mとする）



(b) 解析結果

図-7 長尺鏡ボルトのシミュレーション結果
（軸力の深度分布図）

ておらず健全であるため、計測結果と異なる。さらに切羽が進むと、9m の継ぎ手部は破断し、計測結果と良く一致する。

c) 切羽前方押し変位計測

図-8 に切羽前方の押し変位のシミュレーション解析結果を示す。実線が計測結果、破線が解析結果である。横軸に掘削切羽からの深度を、縦軸に押し変位量を示す。図中の四角で囲まれた数字は軸

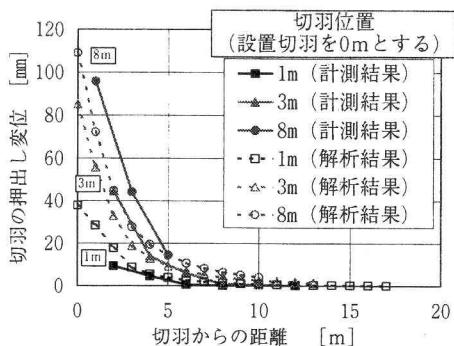


図-8 切羽前方変位のシミュレーション結果
（掘削切羽を基準とした押し変位深度分布図）

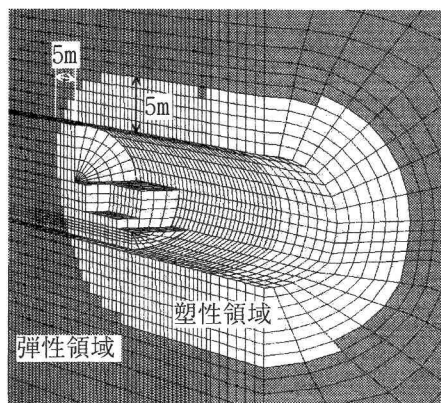


図-9 塑性領域図

力計測結果と同様に計器設置切羽を 0m とした時の掘削切羽位置を表している。切羽の進行とともに押し変位量が大きくなり、深度 7～10m の位置より変位が現れはじめ、深度 4, 5m 付近から急激に増大している。計測と解析ともに同様な変位分布を示しており、両者は良く一致している。

図-9 にトンネル周辺地山の塑性領域図を示す。トンネル周辺に約 5m の塑性領域が広がっている。切羽前方にも 5m の塑性領域が見られ、塑性領域と弾性領域の境で、切羽前方変位が急激に増大している。

4. 異なる注入材による長尺鏡ボルトの補強効果の差異

三次元逐次掘削解析によって、注入材をウレタン、シリカレジ、モルタルの 3 種類の場合について検討を行った。引抜き試験から求めた付着定数を解析に取り入れて、各種注入材の違いによる岩盤補強効

果の差異について検討を行った。

(1) 解析条件

前章のシュミレーション解析と同じ解析方法で解析した。地山および支保のモデル化や物性値も同様とした。シミュレーション解析では、長尺鏡ボルトは計測用の1本のみであったが、本章では図-10に示すように、飯山トンネルで実際に打設していたパターンで解析を行った。現場で施工した鏡ボルトの長さは12.5mでラップ長は3mであるが、今回はボルト長やラップ長の検討には主眼を置いていないため、解析では上半切羽が20m進んだステップで、長さ50mのボルトを掘削部全長に一度で打設した。

解析ケースは、鏡ボルトの注入材をウレタン、シリカレジン、モルタルとした場合の3ケースである。

鏡ボルトの付着定数は、注入材によって異なり、引抜き試験から求めた表-2の値を採用した。モルタルの付着定数が最も大きく、シリカレジン、ウレタンの順に小さくなるが、シリカレジンとウレタンはほぼ同程度の値である。

(2) 解析結果

図-11に各種注入材における長尺鏡ボルトの軸力深度分布図を示す。

ウレタンとシリカレジンでは付着定数が同程度であるために大差はなく、若干シリカレジンのほうが軸力が大きくなっている。深度3mと6mの継ぎ手は破断せずに、深度9mの継ぎ手部だけが破断する結果となる。

注入材がウレタンの場合、長さ12.5mのボルトであれば、深度9mの位置では残長が短くなるため軸力が低下し、ボルト全長に渡って破断しない。ウレタンのように付着定数が小さい場合には、軸力が低下せず継ぎ手部が破断しない利点がある。

注入材がモルタルの場合には付着定数が大きいため、1m掘削した時点で鏡ボルトには大きな軸力が作用し、深度3mの継ぎ手部が破断している。切羽位置が3mの場合、深度6mの継ぎ手部は破断しているが、それ以深で大きな軸力が作用しており、深度8mでは300kNを超える大きな軸力が発生している。切羽近傍の継ぎ手部が破断しても、切羽の奥で鏡ボルトが効果を発揮していることがわかる。

図-12に各種注入材による切羽の押し出し変位分布図を示す。深度9mの継ぎ手部における切羽の分布であり、最も切羽の押し出し量が大きくなる位置である。注入材がウレタンとシリカレジンの場合はほぼ同様な分布形状を示し、モルタルの場合が最も押し

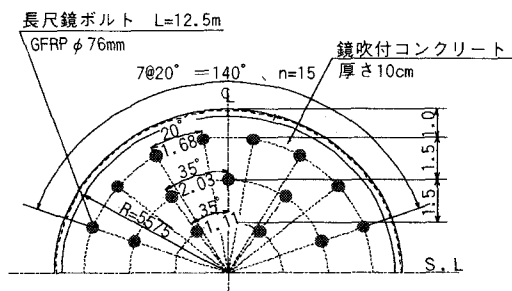
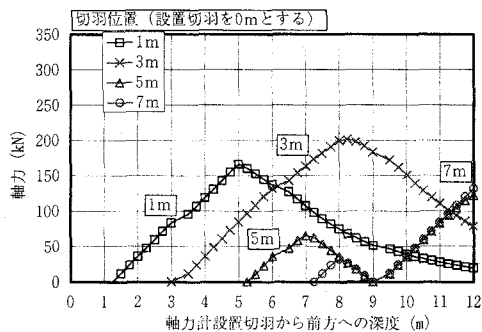
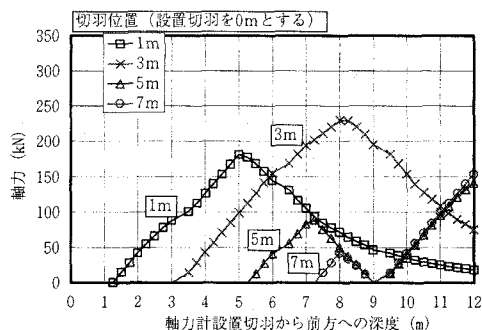


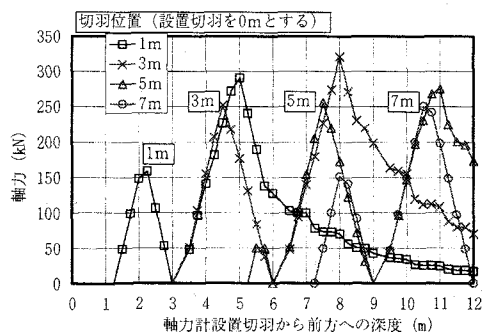
図-10 長尺鏡ボルトのパターン図



(a)ウレタン



(b)シリカレジン



(c)モルタル

図-11 各種注入材による長尺鏡ボルトの軸力深度分布図

し変位量を抑制していることがわかる。

図-13 にトンネルセンターにおける切羽の押出し変位量を示す。図-12 の押出し変位分布図と同様に、モルタルが最も変位の抑制効果がある。注入材がモルタルの場合には、切羽中央でウレタンやシリカレジンよりも約6mmの変位を抑制している。

5. まとめ

以上、引抜き試験から3種類の注入材の付着定数を求めて、各種注入材による補強効果の違いを三次元逐次掘削解析によって求めた結果、以下のことがわかった。

1) 鏡ボルトの付着特性を引抜き試験から求めることにより、実際の現象に近いモデル化をすることができた。

2) 長尺鏡ボルトおよび切羽押出し変位の測定結果と解析結果を比較することにより、解析結果を実証し、計測結果を再現することができた。

3) 軸力測定では、鏡ボルト継ぎ手部に耐力以上の荷重が作用し継ぎ手部が破断した。継ぎ手部が破断するボルトモデルによって解析を行った結果、計測結果と同様な傾向を示すことがわかった。

4) 変位計測では、切羽から約7m前方より変位が発生しはじめ、切羽近傍で大きな区間ひずみが発生し、三次元掘削解析によるゆるみ領域範囲とよく一致する結果となった。

5) 長尺鏡ボルトを打設することによって、切羽の押出し変位を抑制することがわかった。モルタルが最も効果が大きく、ウレタンとシリカレジンとは同様な結果となった。

鏡ボルトには、切羽の押出し変位を抑制する効果や切羽の崩落を防止する効果などがある。施工時の安全面から、切羽崩落防止に重点を置くことも考えられるが、今回の検討では切羽の押出し変位抑制効果に着目した。

今回の解析では、切羽の押出し変位抑制効果に着目すると、注入材をモルタルとした場合が適していることが分かった。ただし、ウレタンやシリカレジンは、亀裂や空洞に浸透しやすく地盤改良効果を見込めるため、崩落防止といった観点からは効果が期待できる。それぞれの注入材の特徴を生かして、目的に適したものを採用する必要がある。

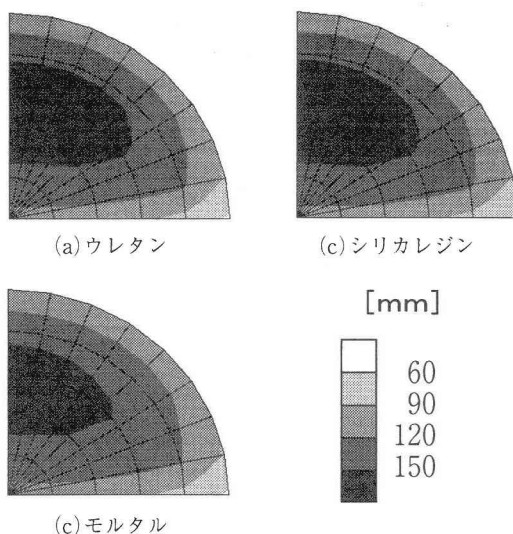


図-12 各種注入材による切羽押出し変位分布図

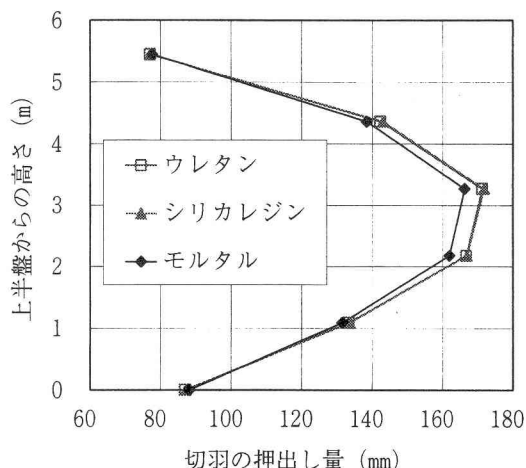


図-13 切羽押出し変位図

参考文献

- 1) 大塚勇, 谷卓也, 小杉勝之, 竹津英二, 小島隆: 各種注入材によるボルトの付着特性について, 土木学会, 第58回土木学会年次学術講演会, 3-095, pp.189-190, 2004.
- 2) 大塚勇, 青木智幸, 谷卓也, 竹津英二, 小島隆, 小杉勝之, 林成浩: 長尺ボルトの軸力計測および切羽前方変位計測, 第39回地盤工学研究発表会, 847, pp. 1691-1692, 2004.
- 3) Itasca Consulting Group. 2002. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D). ver. 2.1.

- 4) Brady,B. and Lorig,L. : Analysis of rock reinforcement using finite difference methods , Computers and Geomechanics, pp.123-149, 1988
- 5) 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.
- 6) 剣持三平, 竹津英二, 青木智幸, 亀村勝美, 森田隆三

郎: 膨張性地山トンネルの変形挙動に関する三次元解析, 第33回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 9-16, 2004.