

各種ボルト材による鏡ボルトの岩盤補強効果について

EFFECTS OF ROCK REINFORCEMENT BY FACEBOLTING WITH SOME KINDS OF BOLTS

大塚 勇*・青木智幸**・小川哲司***・足達康軌***・田中崇生****

Isamu OHTSUKA, Tomoyuki AOKI, Satoshi OGAWA, Yasuki ADACHI, Takao TANAKA

Long facebolting has been applied for improving the stability of tunnel faces. We have reported the in-situ measurement and simulation analyses on the face stability at Takadayama Tunnel where connectable friction-anchored rockbolts are used for the facebolts. In-situ pull tests of GFRP bolts are performed in addition to those of friction-anchored rockbolts in order to determine the cohesive parameters of the numerical bolt model with the procedure that we have proposed. It is found that the reinforcing effects by facebolting is significantly influenced by the cohesive parameters of the bolt model and hence, the in-situ pull tests of the bolts are essential for the qualitative evaluation of the reinforcing effects.

Key Words: facebolting, rock reinforcement, pull test, glass fiber bolt, face stability

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、切羽安定対策や地表面沈下対策として、長尺の鏡ボルトの施工事例が増加している。近畿自動車道(紀勢線)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。鏡面の押出し測定を行った結果、切羽面の変位抑制に対して長尺鏡ボルトが効果的であることがわかった¹⁾。さらに、鏡ボルトによる岩盤補強効果のより定量的な評価のために、著者らは以下の研究を行ってきた。

まず、鋼管膨張型ロックボルトの原位置引抜き試験を実施し、ボルトと地山との付着特性について検討した²⁾。また、引抜き試験を行った近傍で、軸力計を取り付けた鋼管膨張型ロックボルトを切羽に打設して、掘削中の軸力分布を測定した³⁾。次に、軸力測定区間における A 計測、B 計測の結果から、地山の物性値を同定し、三次元掘削解析によって、鏡ボルトの軸力測定結果の数値シミュレーションを行った⁴⁾。さらに、鏡ボルトの岩盤補強効果を調べるために、鏡ボルトをパターンで打設した場合と鏡ボルトがない場合の比較解析を行った⁵⁾。以上の一連の流れで、鋼管膨張型ロックボルトの岩盤補強効果について検討してきたが、さらに、実績の多い⁶⁾ グラスファイバーボルトなどの種類の違うボルトについても同様な手法で定量的な評価を行い、比較する。

本研究では、まず、高田山トンネルにおいて実施したグラスファイバーボルト(以後、GFRP ボルト)の引抜き試験について述べる。引抜き試験結果から GFRP ボルトと地山との付着特性について検討を行い、鋼管膨張型ロックボルトの付着特性と比較した。また、GFRP ボルトの引抜き試験結果から、同じ材質(グラスファイバー)であり、二重管方式で穿孔するグラスファイバー管(以後、GFRP 管)の付着定数を算定した。付着定数が求められた GFRP ボルトと GFRP 管を鏡ボルトとして打設した場合の岩盤補強効果について、三次元掘削解析によってシミュ

* 正会員 工修 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所

**正会員 PhD 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所

*** 正会員 大成建設(株) 関西支店

****日本道路公団 関西支社田辺工事事務所

レーションを行い、文献⁴⁾で検討した鋼管膨張型ロックボルトによる補強効果と比較してボルトの種類の違いによる鏡ボルトの岩盤補強効果の違いについて検討した。

2. ボルトの引抜き試験

(1) 試験概要

引抜き試験用のボルトには、図一1に示すように、GFRP ボルトの表面を若干削って平面を作り、ひずみゲージを断面内に対称に2箇所貼付して、エポキシ系充填材で被覆した。ひずみゲージ貼付部は、切削により断面が若干小さくなっているが、切削部の軸方向長さは、ひずみゲージの長さ分（20mm 程度）だけであり、断面欠損は、ないものとする。ボルトには直径 30.5mm の CGR32（KFC 製）を用いた。平均引張強度は 180kN、断面積は 452.2mm²である。引抜き試験は、下半側壁で1本行った。試験位置は、鋼管膨張型ロックボルト引抜き試験の隣の支保工間 STA181+03.1 であり、同じ地山条件と考えられる。支保パターンは DII（支保工サイズ H200）で、インバートの早期閉合を実施している区間である。

図一2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φ54とした。注入材は、IBO モルタルを使用し、ボルト打設後、後注入で充填した。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と縁切りした。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、図一2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。

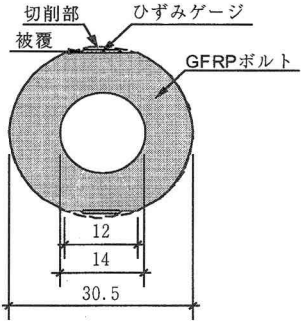
引抜き試験は、モルタル打設後24時間で行った。試験は、はじめにボルトと孔壁の馴染みをとるために5kNの初期荷重を加えて変位の初期値とした。続いて、5kN毎に荷重を増加させて、約200kNまで荷重を加え、その後除荷して試験を終了した。

図一3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。

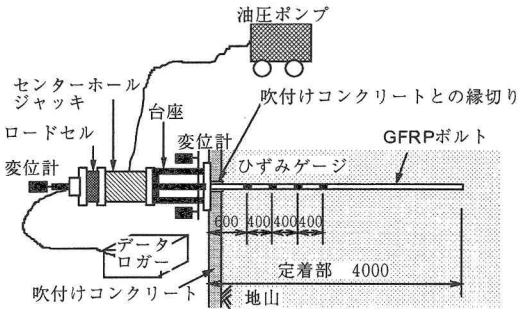
(2) 引抜き試験のシミュレーション

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、A 計測、B 計測結果から同定した値を使用し、弾性係数 500MPa、ポアソン比 0.35とした³⁾。

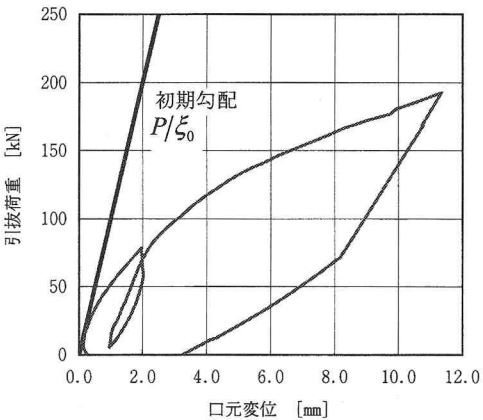
ボルトのモデルとしては、Brady らにより提案されたモデ



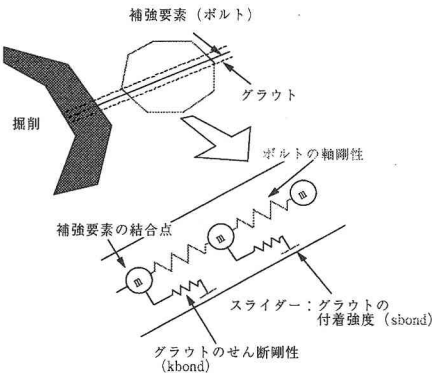
図一1 ひずみゲージ付ボルト



図一2 引抜き試験レイアウト図



図一3 引抜き試験結果（荷重－変位関係）



図一4 ボルトモデル

ルを採用し、筆者らが提案した方法⁷⁾により引抜き試験結果からそのパラメータを決定する。このモデルは図-4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-3) 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⁸⁾ ($kbond=4.92 \times 10^8 \text{ N/m}^2$)。

図-5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。口元部20cmは、吹付けコンクリートと縁を切っており、その部分では、口元の荷重が直接内部に伝わるものとしている。 $sbond$ は、引抜き荷重200kNの場合の最大勾配として決定した ($sbond=1.68 \times 10^5 \text{ N/m}$)。

シミュレーション解析結果 (引抜き荷重-内部軸力関係) を図-6に示す。口元から60cmの測点では、引抜き荷重が約130kNで、断線により測定不能となった。口元から140cmの測点で、計測結果よりも解析結果のほうが、内部への伝わり方が若干大きくなっているものの、他の測点 (口元から60、100、180cm) では両者は良く一致している。

(3) 各種ボルトの付着定数について

表-1に鋼管膨張型ロックボルト²⁾とGFRPボルトの物性値および引抜き試験シミュレーションから算定された付着定数を示す。付着定数を比較すると、せん断剛性 ($kbond$)、付着強度 ($sbond$) とともに鋼管膨張型ロックボルトよりもGFRPボルトのほうが小さい値となっており、 $kbond$ は約1/5、 $sbond$ は約1/2である。GFRPボルトの弾性係数は、鋼管膨張型ロックボルトの約1/10であり、同じ荷重レベルでは、GFRPボルトの方が、軸方向の伸びが大きい。このため、断面方向の縮小が起り、ボルトとグラウトの付着が切れやすいために、GFRPボルトの付着定数が小さくなるものと考えられる。

高田山トンネルでの鋼管膨張型ロックボルトによる鏡ボルトの補強効果の解析^{4) 5)}では、原位置引抜き試験のシミュレーションから求めた付着強度 ($sbond$) を使用してトンネル掘削解析を行うと、鏡ボルトに発生する軸力が、実際に計測された軸力値をはるかに上回る結果となった。その原因として、引抜き試験を行った側壁の地山と軸力測定を行った切羽地山の状態が異なることを考え、付着強度を約30%に低減 (表中の「低減付着強度」欄) して解析を行った結果、計測結果を良好に表現することができた。そこで、ここではGFRPボルトについても、同様に約30%に低減してトンネル掘削解析を行い、比較することにした。

表-1には、 $\Phi 76\text{mm}$ (内径60) のGFRP管 (FIT管; KFC製) の物性値と付着定数も示している。GFRP管については、引抜き試験を行っていないので付着定数は求められないが、同じ材質であるGFRPボルトの試験結果をもとに推定した。すなわち、付着定数 ($kbond$ 、 $sbond$) は孔壁の周長に比例すると考え、GFRPボルトの結果に周長の比を掛けて算定した。

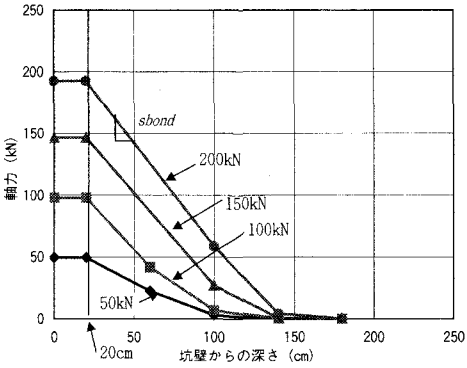


図-5 軸力の深度分布

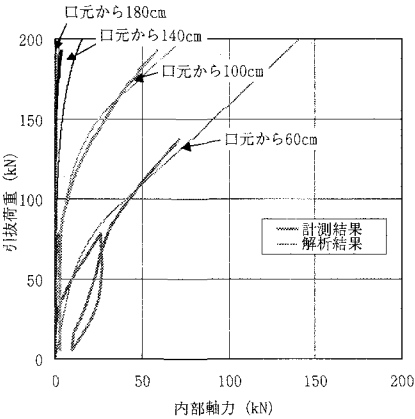


図-6 引抜き荷重と内部軸力の関係

表-1 ボルト物性値の比較

	記号	単位	鋼管膨張型 ロックボルト	GFRPボルト	GFRP管	備考
断面積	A	m ²	4.81E-04	4.52E-04	1.71E-03	
孔壁周長	l	m	1.70E-01	1.70E-01	2.83E-01	
弾性係数	E	GPa	205	20	20	
引張耐力	F	kN	220	180	200	
せん断剛性	kbond	MN/m ²	2.26E+03	4.92E+02	8.19E+02	
付着強度	sbond	MN/m	3.68E-01	1.68E-01	2.80E-01	引抜き試験
低減付着強度	低減sbond	MN/m	1.00E-01	4.57E-02	7.60E-02	軸力測定

表－２ 解析用物性値

	名称	単位	入力パラメータ
岩盤	弾性係数	MPa	500
	ポアソン比		0.35
	G	MPa	185
	K	MPa	556
	密度	10^6kg/m^3	2.30E-03
	粘着力	MPa	0.05
	摩擦角	°	30
吹付けコンクリート	厚さ	m	0.25
	密度	10^6kg/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	10^6kg/m^3	7.85E-03
	弾性係数	GPa	205
	ポアソン比		0.3

3. 三次元掘削解析

(1) 解析条件

各種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、鏡ボルトの効果を調べる。

解析には有限差分法コード FLAC3Dver2.1 (ITASCA 社製) を使用した。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。

A計測およびB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－2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。

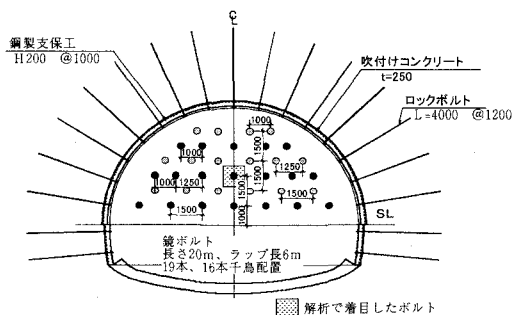
吹付けコンクリートはシェル要素で、鋼製支保工はビーム要素でモデル化した。吹付けコンクリートおよび鋼製支保工は掘削ごとに設置しているが、吹付けコンクリートの強度が十分発現されるまでは、地山となじまないと考え、一掘削間遅れて付加している。

各種鏡ボルトには、2章で示したボルトモデルを使用した。物性値を表－1に示す(付着強度は「低減付着強度」を使用)。GFRP管の引張耐力は、最も耐力の低い継ぎ手部の耐力とした。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－7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。

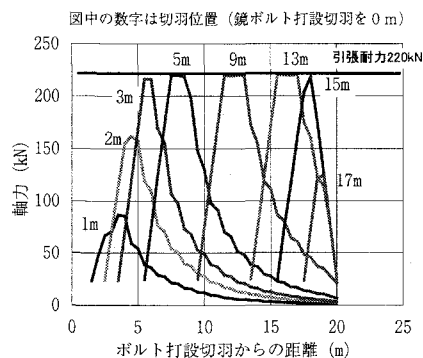
解析手順は、実際の施工サイクルを再現しており、上半先進工法である。トンネル半径方向のロックボルトは、解析では考慮していない。

(2) 解析結果

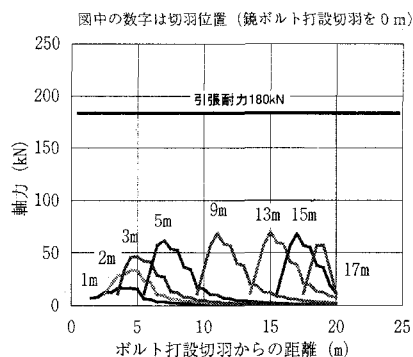
図－8に各種鏡ボルトの軸力深度分布図を示す。ここでは、鏡の



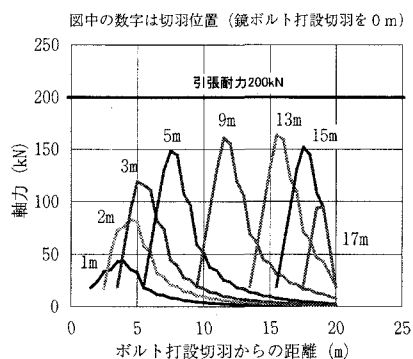
図－7 支保パターンおよび鏡ボルト配置図



(a) 鋼管膨張型ロックボルト



(b) GFRPボルト



(c) GFRP管

図－8 軸力の深度分布図

押し出しが大きい鏡面中央（図－7の四角で囲んだ位置）のボルトに着目した。図中の数字は、鏡ボルト打設切羽を基準（0 m）とした場合の切羽位置であり、図中には各種ボルトの引張耐力を示している。

発生軸力は、鋼管膨張型ロックボルトはで、ピーク軸力が若干、引張耐力を上回る程度となった。ボルト耐力を最大限に生かしており、打設密度が適切であるといえる。GFRP ボルトでは、ピーク軸力で、引張耐力の約 1/3 の軸力しか発生していない。今回の解析条件では、GFRP ボルトは、鋼管膨張型ロックボルトよりも付着定数が小さかったために、地山とボルトの間にせん断すべりが生じやすく、ボルトに大きな荷重が作用しない。GFRP 管では、引張耐力に対して、約 8 割の軸力が発生しているが、まだボルトの耐力に余裕がある。

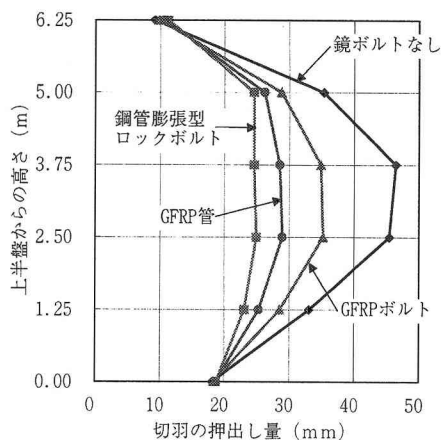
すべてのボルトで、切羽から約 3m奥で、軸力がピークとなっており、ボルトの種類によらず、同様の傾向を示す。

ボルト打設直後は、切羽から数mの区間で先行変位が既が発生しているため、打設切羽から 5m まではピーク軸力が低くなる。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。すべてのボルトに対して、このような傾向となった。

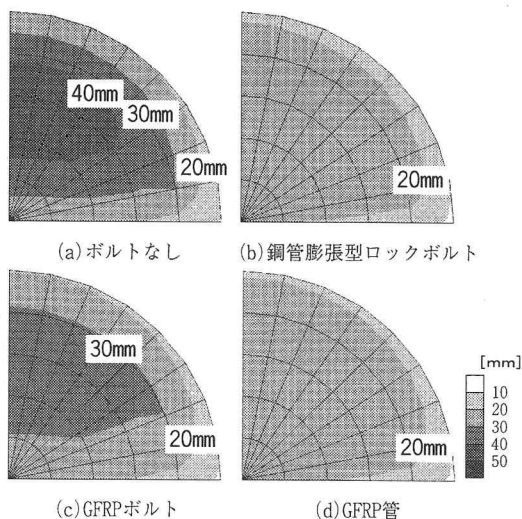
ボルトの軸剛性（EA）に着目する（表－1 参照）と、鋼管膨張型ロックボルトが最も大きく、GFRP ボルトでは、鋼管膨張型ロックボルトの約 1/10、GFRP 管では約 1/3 である。軸剛性が大きいほど、ボルトに発生する軸力が大きくなることわかる。

トンネルセンターにおける切羽の押し出し変位量を図－9に示す。縦軸は上半盤からの高さであり、0mがSLで 6.25 m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。軸剛性の大きなボルトほど、切羽の変位を抑える効果があり、鋼管膨張型ロックボルトが最も有効であり、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る。GFRP ボルトでは、鋼管膨張型ロックボルトの約半分の変位抑制効果がある。GFRP 管では、鋼管膨張型ロックボルトと比較すると、若干押し出し量が多い程度である。

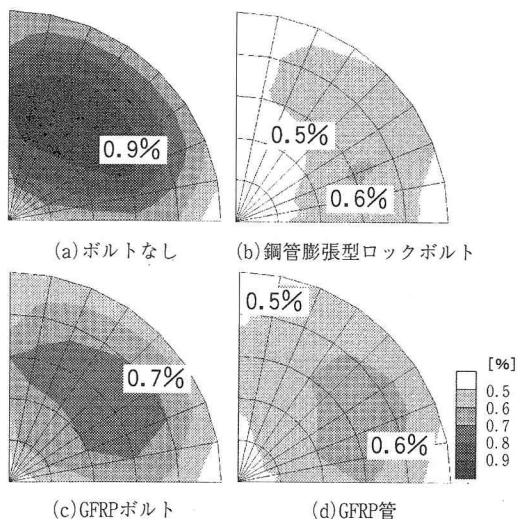
図－10に変位の分布図を示す。鏡ボルトがないケース



図－9 鏡面の押し出し変位（トンネル中心）



図－10 変位分布図



図－11 最大せん断ひずみ分布図

では、切羽の中央に変位の大きな領域がある。鋼管膨張型ロックボルトと GFRP 管では、ほぼ同じ分布となり、切羽全体の変位を抑制していることが分かる。GFRP ボルトでは、ボルトがない場合に比べて、40mm 以上の押出し変位量の領域を抑えていることが分かる。

図-11 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⁹⁾、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おり、限界せん断ひずみに達していない。

4. おわりに

本報告では、グラスファイバーボルトの引抜き試験と数値シミュレーションによりボルトと地山との付着定数を決定した。次に、その付着定数を用いて、三次元掘削解析により、トンネル長尺鏡ボルトによる切羽の補強効果について検討した。前報の鋼管膨張型ロックボルトの研究成果と比較したところ、今回の引抜き試験結果、数値解析結果によれば、鋼管膨張型ロックボルトが鏡ボルトとして最も効果的であった。しかし、すべての地山に対して、鋼管膨張型ロックボルトが有効なわけではなく、地山条件が違えば、各種鏡ボルトによる岩盤補強効果も異なってくる。

今回の結果では、付着定数の違いが、解析結果に大きな影響を及ぼした。付着定数が小さいと、鏡ボルトに荷重が作用せず、地山の押出しに対して、ボルトの耐力が発揮されない。付着定数は、ボルトの材質、ボルトの径、地山条件などによって異なるので、代表的な値はない。補強効果を定量的に評価するためには、原位置で引抜き試験により付着定数を決定するのが望ましいと思われる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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, III-017, pp.33-34, 2003
- 4) 大塚勇, 青木智幸, 柴田勝実, 小川哲司, 足達康軌, 田中崇生: トンネル長尺鏡ボルトの三次元的岩盤補強効果, 大成建設センター報 No.36, pp.19_1-19_8, 2003
- 5) 大塚勇, 青木智幸, 柴田勝実, 小川哲司, 足達康軌, 田中崇生: 長尺鏡ボルトによる岩盤補強効果の三次元的掘削解析, 第 13 回トンネル工学研究発表会, 報-5, 2003 (投稿中)
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 斎藤敏明, 天野悟: ロックボルト支保の設計に関する基礎的考察, 第 14 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.76-79, 1984
- 9) 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