

長尺鏡ボルトによる岩盤補強効果の三次元掘削解析

THREE-DIMENTIONAL EXCAVATION ANALYSES FOR EFFECTS OF ROCK REINFORCEMENT BY MEANS OF LONG FACEBOLTING

大塚勇¹⁾・青木智幸¹⁾・小川哲司²⁾・足達康軌²⁾・田中崇生³⁾

Isamu OTUKA, Tomoyuki AOKI, Satoshi OGAWA, Yasuki ADACHI and Takao TANAKA

In Takadayama-tunnel, the long facebolting by means of the friction anchored rockbolts is adopted as the stabilization measure against face collapse. In order to estimate the effects of rock reinforcement with long facebolts, we measured the axial forces of long facebolts during excavation. Numerical simulation of the measured axial forces was performed by means of three-dimensional excavation analyses; and it successfully expressed the behaviors of measured axial force distributions of the facebolts as well as other tunnel measurements. Furthermore, the numerical analyses with and without facebolts were performed so as to investigate the reinforcing effects.

Key Words: long facebolting, friction anchored rockbolt, axial force distribution, numerical simulation, three-dimentional excavation analysis

1. はじめに

近畿自動車道(紀勢線)南部工事の高田山トンネルは、延長 1,704m の 2 車線高速道路トンネルである。地形は標高 222m の高田山と中心とした丘陵地であり、地質は頁岩を主体とした古第三紀の瓜谷層である。本地質は、付加体堆積物のメランジ帯に属する。事前の弾性波探査では、中硬岩以上の B~C クラスの地山と考えられていたが、施工に入ると不良地山が続き、AGF 工法や上半仮閉合などの補助工法を余儀なくされた。それら補助工法の中で、鏡面の安定化対策として、継ぎ手タイプの鋼管膨張型ロックボルトを使用して、全面摩擦定着式長尺鏡ボルト(以下、長尺鏡ボルト; 最大長 L=24m)を施工した^{1) 2)}。鋼管膨張型ロックボルトは、打設後瞬時に耐荷能力を発揮し、掘削機械で容易に切断できることから、鏡ボルトにも適している。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、著者らは、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について、室内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⁾。次に、室内試験で得られた知見を原位置引抜き試験に適用し、原位置の地山とボルトの付着特性を評価した⁴⁾。また、長尺鏡ボルトの軸力発生機構を調べるために、長尺鏡ボルトの軸力測定を行った⁵⁾。

本報告では、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。また、鏡ボルトの有無による比較解析を実施し、鏡ボルトの補強効果について検討した。

1)正会員 大成建設(株) 技術センター

2)正会員 大成建設(株) 関西支店

3)非会員 日本道路公団 関西支社

2. 鏡ボルト軸力測定シミュレーション解析

(1) 測定概要

長尺鏡ボルトには、連結式鋼管膨張型ロックボルトが使用された。これを用いて軸力計（（株）東亜測器製）を作成し、先端にデータロガーを取り付けて、掘削中の軸力分布を測定した⁵⁾。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。軸力の測定は深度4.5m～11.5mの区間について1mピッチで計8点行った。

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。

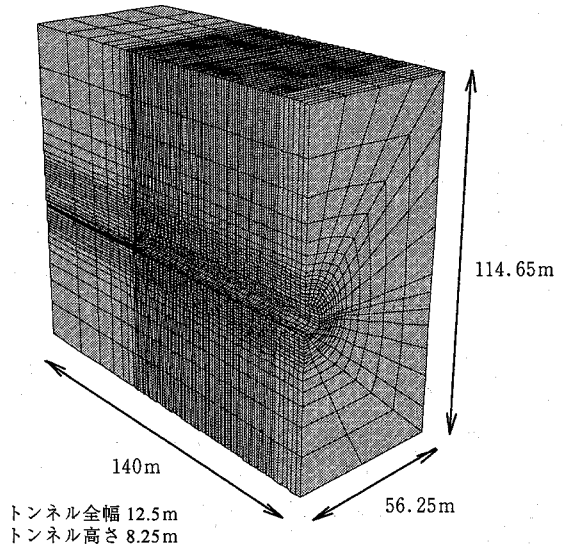


図-1 解析モデル図

表-1 解析用物性値

	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 ⁶ kg/m ³	2.30E-03	
	粘着力	MPa	0.05	
鋼管膨張型 ロックボルト	膨張角	°	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	1.00E-01	
吹付けコンクリート	厚さ	m	0.25	
	密度	10 ⁶ kg/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 ⁶ kg/m ³	7.85E-03	
	弾性係数	GPa	205	
	ポアソン比		0.3	

(2) 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-1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。

A計測、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-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いる。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、地山と密着しないと考え、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。

(3) 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、ケーブル要素⁶⁾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、原位置引抜き試験より決定した⁴⁾。しかし、付着強度*sbond*について、引抜き試験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かなり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) ボルトに発生する軸力が大きいときに、地山とボルトとが分離し、付着強度が低下する特性があり（ケ

ープル要素では付着強度は一定)⁴⁾、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試験で求めた値を約30%に低減したものである。

(4) シミュレーション解析結果と考察

A計測(内空変位、天端沈下)、B計測(支保工応力、地中変位)の測定結果と合うように、地山物性値を決定した。計測結果と解析結果は、概ね一致した⁷⁾。

長尺鏡ボルトのシミュレーション解析結果を図-2に示す。測定された鏡ボルトの軸力は降伏耐力

(220kN)を上回っており、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。切羽が7m以上進んだとき、切羽の約3m先で、ひずみのピークが存在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。

計測では打設切羽から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。これは、切羽観察でも確認した。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。

3. 三次元掘削解析による鏡ボルトの補強効果

(1) 解析手法

高田山トンネルで鏡ボルトをパターンで打設した区間において、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。

この区間の支保パターンは、DⅡ-f-kであり、図-3に支保パターン図を示す。鋼製支保工(H200)、吹付けコンクリート($t=250$)の仕様は、鏡ボルト軸力測定区間と同様であるが、ロックボルトは、

周方向に0.75mピッチと密に打設しており、側壁部には長さ6mのツイストボルトを8本、その他は長さ4mのツイストボルトを上半に17本、下半に4本打設している。また、この区間ではAGF($\phi 114.3$)による注入式長尺先受け工を行っている。先受け工の長さは12.5m、ラップ長は3.5mであり、周方向に0.5mピッチで上半のみに38本打設している。注入材はシリカレジンである。図-3には、長尺鏡ボルトの配置図も示している。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、上半のみに打設している。

この区間についても前章同様に、測定されたA計測、B計測の結果より、地山と支保の物性値を同定した。対象断面は、STA187+27.3であり、土被りは89mである。前章の鏡ボルトの軸力測定区間とは約620m離れており、土被りは約1.6倍となっている。解析手法、解析メッシュは、前章の解析と同様である。計測結果

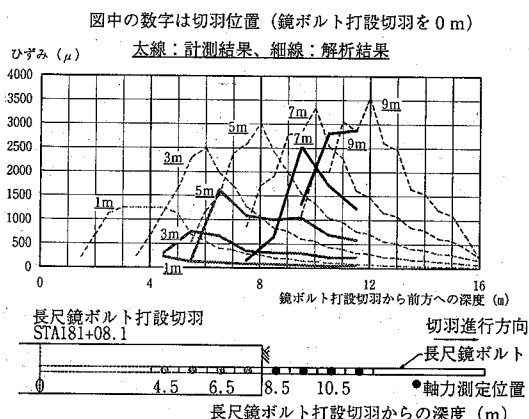


図-2 シミュレーション解析結果
(長尺鏡ボルトの軸ひずみ分布図)

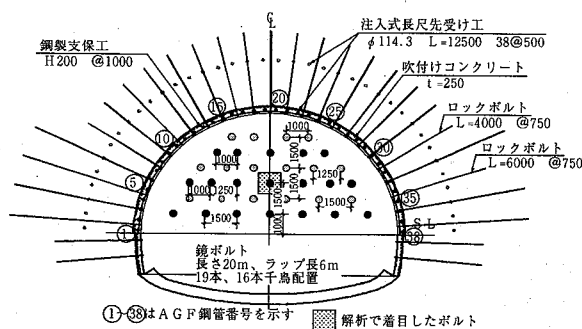


図-3 支保パターン図

表-2 解析用物性値

	名称	単位	入力パラメータ	備考
岩盤	鏡ボルト軸力測定シミュレーションと同様			
鋼管膨張型	断面積	m ²	4.81E-04	軸力計無
ロックボルト	その他は、鏡ボルト軸力測定シミュレーションと同様			
吹付コンクリート	鏡ボルト軸力測定シミュレーションと同様			
鋼製支保工	鏡ボルト軸力測定シミュレーションと同様			
AGF鋼管	断面積	m ²	2.03E-03	
	断面二次モーメント	m ⁴	2.98E-06	
	密度	10 ³ kg/m ³	7.85E-03	
	弾性係数	GPa	205	
	ポアソン比		0.3	

より同定した地山の物性値と解析に用いた支保の物性値を表-2に示す。鋼管膨張型ロックボルトは、軸力計がない通常のボルトのため、断面積はボルト材のみとする。吹付けコンクリートと鋼製支保工は、前章と同様であり、ロックボルトは今回も考慮していない。ただし、B計測でロックボルトの軸力測定を行っているので、天端と脚部に軸力測定用のロックボルトを打設している（ $L=6.0$ m）。AGF鋼管は、ビーム要素でモデル化し、シリカレジンによる地山改良効果は、解析では考慮していない。地山物性値は、同じDⅡ地山の前章と同様となったが、本章の解析では、シリカレジンの改良効果と密に打設したロックボルトの効果が、トンネル周囲の地山の物性に含まれていることを考えると、本章で検討した断面のほうが、地山の状態は悪いと考えられる。実施工でも鏡ボルトなしでは切羽崩落が多発した区間である。

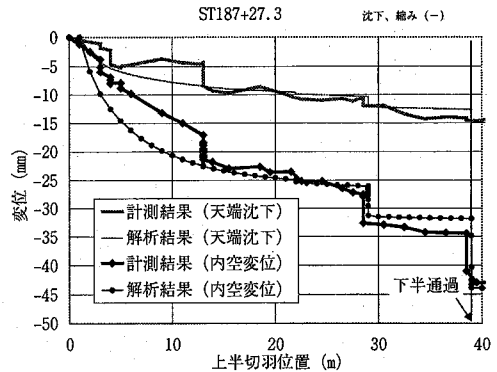
この区間の掘削工法は、ベンチ長30～40m程のショートベンチカット工法であり、解析手順は、実際の施工手順に合わせた。

(2) シミュレーション解析結果と考察

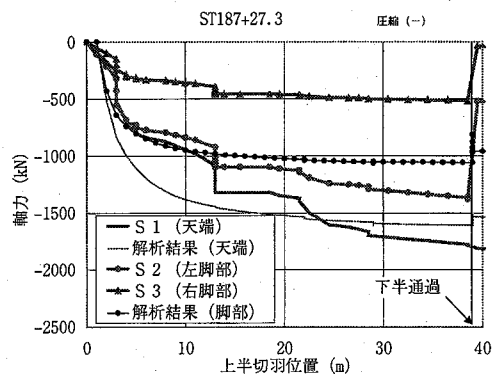
図-4(a)に内空変位、天端沈下の比較を示す。上半切羽の位置が1D程度までは、太線の計測結果が細線の解析結果よりも、小さな値となっているが、両者は概ね良く一致している。

図-4(b)の鋼製支保工の軸力では、脚部については、左脚部（S2）の計測値（太線）と、解析結果（細線）がほぼ一致し、天端部（S1）についても両者は概ね一致している。ただし、計測では、下半切羽が通過すると、両脚部に作用していた軸力が急激に減少してしまうのに対して、解析では、この現象を表現できていない。

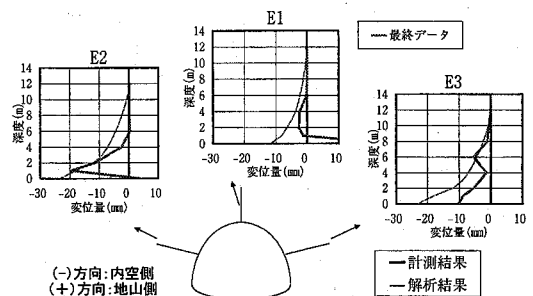
図-4(c)に地中変位の分布図を示す。データは、インバート通過後の収束した最終変位である。全ての測線で、計測結果（太線）と解析結果（細線）は、値・分布形状ともに、概ね一致している。ただし、天端部（E1）と右脚部（E2）の計測結果に見られる坑壁近傍での押し戻し



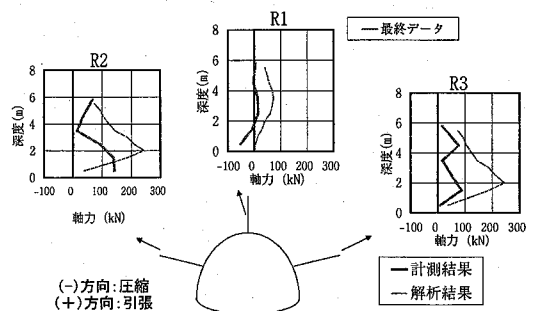
(a) 内空変位、天端沈下の経距変化図



(b) 鋼製支保工軸力の経距変化図



(c) 地中変位分布図



(d) ロックボルト軸力分布図

図-4 シミュレーション解析結果

については、解析では表現できていない。鋼製支保工の計測結果では、天端部と右脚部では、地山側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いると考えられる。

図-4(d)にロックボルトの軸力分布を示す。地中変位と同様に最終データの比較である。天端部(R1)では、両者の分布形状は、ほぼ一致しているが、計測結果のほうが全体的に圧縮側に移動している。地中変位結果と同様に、支保工の押し上げなどが考えられる。両脚部では、深度 3.5m の位置で、軸力が減少しており、部分的に軟弱な層が挟まっていたと考えられる。解析では地山は一樣であり、この現象は表現できない。

(3) 鏡ボルトの補強効果に関する比較解析

以上の解析条件により、鏡ボルトを打設しない場合について解析し、補強効果について比較検討を行った。

トンネルセンターにおける切羽の押し出し変位量を図-5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、オーバーラップ区間では、さらにその効果が大きくなる。

図-6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(5m→4m)。

図-7に鏡面の変位分布図を示す。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。変位ベクトルの向きは、切羽の中央部では、ほぼトンネル進行方向に向いているが、天端や上半盤付近では、上下の成分も含まれている。

図-8に鏡面の最大せん断ひずみ分布図を示す。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(上限値)を求め⁸⁾、限界せん断ひずみを計算すると1.02%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いる。

図-9に鏡ボルトの軸力分布図を示す。オーバー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-10に鏡ボルトの軸力深度分布図を示す。図-3に示す四角で囲んだ切羽中央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。ピークで降伏耐力(220kN)を若干、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

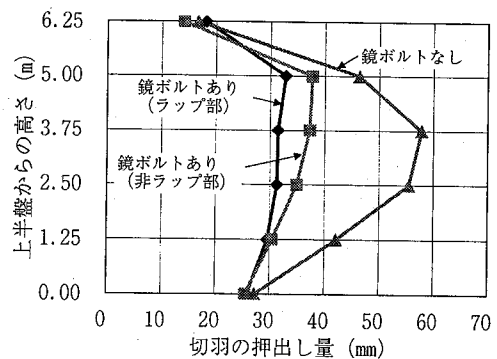


図-5 鏡面の押し出し変位 (トンネル中心)

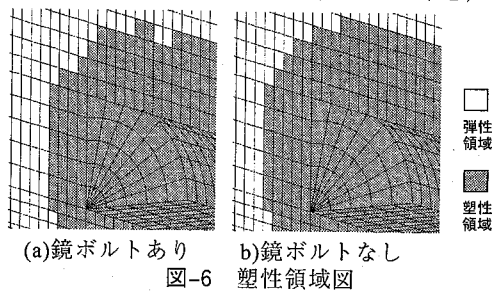


図-6 塑性領域図

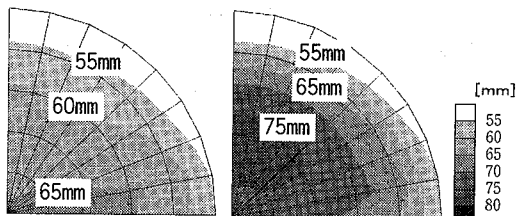


図-7 鏡面の変位分布図

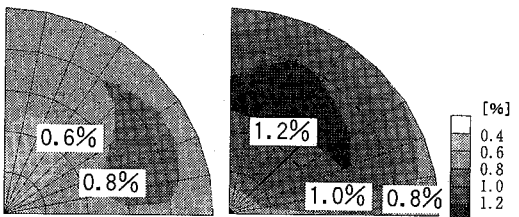


図-8 鏡面の最大せん断ひずみ分布図

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、オーバーラップ長6mは妥当な長さであるといえる。

4. おわりに

本研究では、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、以下に示す4つの内容について、一連の流れで検討し、今回は3,4番目の項目について報告した。

- 1) 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⁴⁾
- 2) 掘削中の長尺鏡ボルトの軸力挙動測定⁵⁾
- 3) 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
- 4) 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。

本報告では、鏡ボルトに、地山との付着切れを考慮でき、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ので、今後は曲げ剛性も考慮できるモデルを使用して、上記の検討手順に従って、その補強効果について検討をすすめる計画である。また、AGF鋼管による補強効果について、本報告では検討していないが、長尺先受け工についても、長尺鏡ボルトと同様な手法による検討の実施を考えている。

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) 村瀬貴巳夫, 田中崇生, 小川哲司, 足達康軌: 付加帯中の先行緩み探索と対策, トンネル工学研究発表会論文・報告集, 第33巻10号, pp.19-30, 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, III-017, pp.33-34, 2003
- 6) Brady, B. and Lorig, L.: Analysis of rock reinforcement using finite difference methods, Computers and Geomechanics, pp.123-149, 1988
- 7) 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岩盤補強効果, 大成建設技術センター報, 第36号, No19, pp.1-8, 2003
- 8) 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

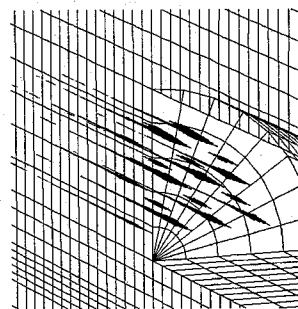


図-9 鏡ボルトの軸力分布図

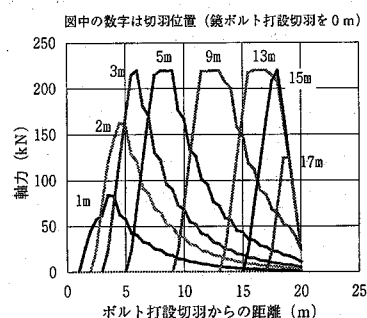


図-10 軸力の深度分布図