

ロックボルトで支保された低強度地山トンネルの 二軸応力場における挙動について

The Behavior of Weak Rock Tunnel Supported by Rockbolts under Biaxial Stress Field

土門 剛¹・泉尾英文²・西村和夫³

Tsuyoshi DOMON, Hidefumi IZUO and Kazuo NISHIMURA

¹正会員 首都大学東京 研究員 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: dom@ecomp.metro-u.ac.jp

²正会員 工修 (社)セメント協会 (〒104-0032 東京都中央区八丁堀4-5-4)

³正会員 工博 首都大学東京 教授 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

In weak rock tunnels, we often estimate a dimension of support system using design methods based on similar conditions of the past or by numerical analysis. So the methods are imperfect to simulate a tunnel behavior, it is necessary to examine some basic mechanical model of how a tunnel behaves and how the support system acts to control this behavior.

In order to clarify the behavior of weak rock tunnel supported by rockbolts under biaxial stress field, we have performed loading tests with an artificial ground modeled on soft and squeezing rock tunnel. As a result of testing, it was mainly clarified that: i) the support effect increases with the decrease of bolt spacing rather than bolt length when bolts are in the elastic zone; ii) the axial force of bolt near the crown is not appear under vertical/horizontal pressure ratio = 0.5.

Key Words : weak rock tunnel, rockbolt, support effect, model test, biaxial stress field

1. はじめに

ロックボルトの作用効果には5つの概念があるとされている¹⁾。このうち、本研究で対象とする軟岩のような連続体的に挙動すると考えられる低強度地山では、その効果は次のように主に2つあると考えられる。ひとつは、ボルト頭部軸力がベアリングプレートなどを介してトンネル壁面に支保内圧を与えるとする支保内圧効果²⁾と、もうひとつは、地山とボルトとの境界面に発生するせん断応力によって地山の变形を抑止するというせん断応力効果³⁾である。両者の効果は、別の解釈もできることから、それぞれ別称としてアーチ形成効果や地山改良効果¹⁾と表現されることもある。

著者らは先の論文で、こうした低強度地山トンネルのロックボルトの作用効果は、両者を包含した効果であるとの認識のもとに、トンネル軸方向に対して荷重およびロックボルト打設パターンが軸対称である円形トンネルの簡便力学モデルを提案した⁴⁾。この中で、まずはベアリングプレートを有する場合

のロックボルト作用メカニズムの概念を提案し、その概念の正当性をロックボルト頭部にベアリングプレートを設置した模型実験によって実証した。同時に、ボルトの効果は地山が塑性に達して発揮されることも示した。この概念に基づくトンネルの簡便モデルを構築し、トンネル変形問題に至るまで統一的に扱っている。

さらに著者らは、先の論文で提案したモデル、すなわち軸対称荷重条件下の地山にロックボルトを打設したトンネルの力学モデルを、さらに一般的な初期地山応力におけるトンネル力学モデルへと展開するため、鉛直応力と水平応力が同一でない荷重条件下として、側圧係数が0.5の二軸応力場におけるトンネル模型載荷実験を試みた。

本研究では、ロックボルトの打設パターンをパラメータにした実験結果として、二軸応力場におけるトンネル壁面崩壊モード、載荷圧にともなうロックボルトの軸力分布形状の変化、そしてトンネル壁面変位抑制効果がパターン毎に異なることを明らかにした。また、実験結果を検証することを目的として、

ロックボルト効果のひとつとしてトンネル周辺の塑性領域の拡大を抑制することに着目し、無支保トンネルの理論解の適用やロックボルトを有するトンネルの三次元数値解析を実施し比較検討を試みた。

2. トンネル模型載荷実験の概要

(1) 実験モデルの考え方

連続的な挙動を呈すと考えられる軟岩のような低強度地山において、ロックボルトを軸対称に打設したトンネルをモデル化する。ただし、地山応力については、鉛直方向と水平方向の初期地山応力の比が1でない条件を再現するため、地山の外側から図-1の上下方向（鉛直応力）と左右方向（水平応力）の載荷荷重との比を1:0.5（側圧係数0.5）で載荷することで再現した。

相似則については、少なくとも強度 π ナンバーに関しては q_u/p_0 （一軸圧縮強度／土被り圧）と $\tan\phi$ （内部摩擦角）の2種類を、変位ナンバーに関して d/D （変形量／トンネル直径）をそれぞれ一致させなければならないとされている³⁾。しかし、本研究で用いた実験方法および使用材料では強度 π ナンバーを一致させることが困難である。したがって、強度ナンバー $\tan\phi$ と変位ナンバー d/D のみを実トンネルとあわせることとした。

(2) 実験装置

a) 実験土槽および載荷装置

二軸応力場であつ平面ひずみ条件を再現するため、図-1のような鋼製の矩形土槽を用いた。載荷圧は、サーボコントローラによって吐出される水を実験槽内壁に設置したゴム製圧力バッグに供給することにより、模型地山の外周に与える。なお、同図の上下および左右の土槽内壁に設置された圧力バッグは、それぞれの圧力を一定に保てるように上と下のバッグ、左と右のバッグは水供給パイプで連結されている。

b) トンネルモデル

トンネルモデルは直径100mmの円形とし、図-2に示すように肌落ち防止を兼ねた厚さ0.5mmのアルミ製ベアリングプレートと、アクリル製のロックボルトから構成される。ベアリングプレート中央部には縦長の穴が設けられており、所定のトンネル軸方向ピッチでボルトを配置できるようにしている。ベアリングプレートを設置する際には、特に半径方向ピッチの密なケースでは、隣接するプレート同士がト

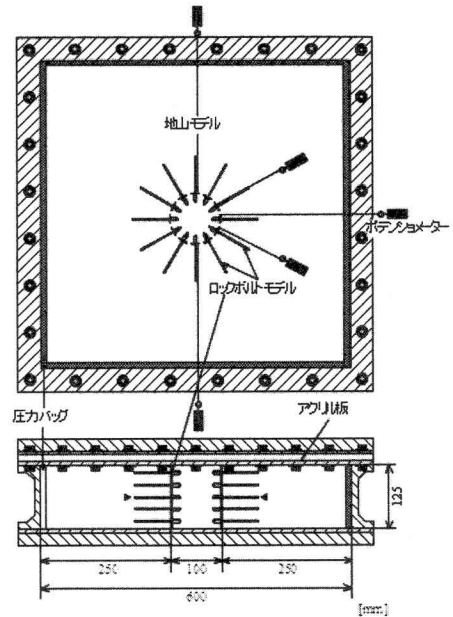


図-1 矩形実験土槽とトンネルモデル

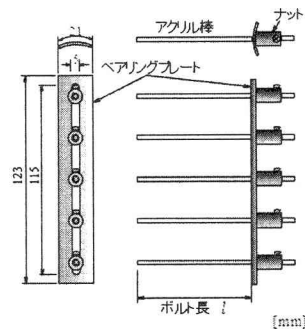


図-2 ベアリングプレートとボルトの設置例

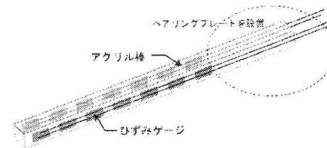


図-3 計測用ロックボルト概念図

ンネルの内空側への変形に伴って接触しないよう若干隙間を空けて設置する。

c) ロックボルトモデル

ボルトモデルは地山と十分な付着強度を発揮するとともに、載荷にともなって発生する軸力が有意な値として計測されるものでなければならない。したがって本実験では、ボルトモデルの断面積を大きく

表-1 実験ケース

実験ケース	ボルト打設間隔		一断面 ボルト本数	ボルト長 (cm)
	軸方向 (cm)	円周方向 (deg.)		
b036040	4.0	60	6	3.0
b036025	2.5	60	6	
b033040	4.0	30	12	
b033025	2.5	30	12	
b056040	4.0	60	6	5.0
b056025	2.5	60	6	
b053040	4.0	30	12	
b053025	2.5	30	12	

※実験ケースにおいて、左2桁:ボルト長(cm)、中2桁:周方向間隔(deg.)、下2桁:軸方向間隔(×10cm)を表す。

(一辺3mmの正方形断面)することによってこの条件を満足させる。軸力計測用のロックボルトには、実験槽上蓋と底版の摩擦の影響が少ない中央1断面に配置されたボルトのうち、トンネル1/4円のみに配置した。すなわち、天端から側壁までの90°区間内で、半径方向打設間隔が30°のケースでは、天端から時計回りに0°(天端)、30°、60°、90°(側壁)の4本となり、その間隔が60°のケースでは、天端とそこから時計回りに60°の2本となる。また、載荷荷重がトンネルに対して軸対称ではないため、ロックボルトモデルには曲げが作用することが十分考えられる。ここでは、図-3のように、ボルトの相対する一組の両面にひずみゲージを添付することにより、曲げによる応力と軸応力を分離した。

d) 地山モデル

地山材料には、硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンを70:21:9の重量比で練り混ぜた人工材料を使用する。硫酸バリウム系材料を用いた理由には、1) 地山にある程度粘着力を持たせることができる、2) 締め固め圧によって所定の強度を発現させることができる、3) 水を使用しないため実験中に地山物性がほとんど変化しない、ことによる。

(3) 実験手順

実験の都合上、地山モデル完成後にロックボルトを挿入することが困難である。そこで、地山打設と同時にボルトを埋設していく手法をとった⁹⁾。すなわち、ボルトのトンネル軸方向打設間隔に応じて地山材料を打設していき、一層打設後に所定の載荷圧で締め固めた後、一断面分のボルトを設置して二層目の地山を打設していく。これを繰り返すことによってロックボルトで支保されたトンネルを含む地山モデルを作成する。最終的に、トンネル内空に突出したボルトにベアリングプレートを設置し、さらにナットを取り付けてモデルの完成に至る。

載荷実験は、側圧係数を0.5に設定していることから、上下方向の圧力バッグに対しては載荷速度10kPa/minで最大載荷圧を300kPaとし、左右方向の圧力バッグに対しては載荷速度5kPa/minで最大載荷圧を150kPaに設定して圧力サーボコントローラにより制御した。

(4) 計測概要

トンネル壁面変位計測については、図-1で示したように、上下左右に1個ずつの4個と天端から時計回りに60°および120°の合計6個のポテンシオメータを設置し、トンネル内壁とポテンシオメータをつなぐ

表-2 地山・ロックボルト物性の諸元

	材料	硫酸バリウム系
	単位体積重量	15 N/mm ³
地山モデル	弾性係数	5 MPa
	一軸圧縮強度	64 kPa
	粘着力	19 kPa
	内部摩擦角	30 deg.
	ポアソン比	0.4
ロックボルトモデル	材料	アクリル
	弾性係数	4,000 MPa
地山-ボルト間	粘着力	5.9 kPa
	摩擦角	24 deg.

針金の移動量から変位を計測する。

ボルト軸力については、前述の通り計測用ボルトに添付されたひずみゲージで計測されたひずみの値に、あらかじめ引張り試験によって求めた校正値を乗じて軸力を求める。これらの値は載荷開始と同時に10秒間隔で静ひずみ計測器を介して取り込む。

載荷荷重は、上下および左右それぞれ一つずつの水供給弁の口元に水圧計を設置して計測した。

(5) 実験ケースおよびモデル物性

実験ケースは表-1に示されているように、ボルト長、およびトンネル軸方向と円周方向の打設間隔をパラメータとして8ケース実施した。

地山モデル、ロックボルトモデルおよび地山-ボルト間の地山物性は表-2の通りである。地山モデルの弾性係数、粘着力および内部摩擦角は、当機関において実施された梨本ら⁶⁾の試験方法を適用して求めた。トンネル軸方向のボルト段数に依存して締め固めに要する回数が異なるため、厳密には実験ケースすべて同一の地山物性とはならないが、すべて同一の物性として扱った。地山-ボルト間の物性は、本実験に先立って実施されたボルト引抜き実験⁷⁾の結果から得た値である。

3. 実験結果および考察

(1) 載荷後のトンネル壁面の破壊状況

載荷実験は、圧力バッグの耐荷力を考慮しながら、崩壊挙動を観察する目的で最大載荷圧300kPaまで載荷した。このとき、次のような崩壊現象が見られた。

一断面当たりのボルト本数の少ない6本のケースでは、側壁部にくさび形の崩落が生じた（写真-1(a)）。同じ6本のケースでもボルト長の最も短いケースでは、写真-1(b)のように天端付近でも広い範囲で壁面の崩落が生じている。なお、本実験に先立って実施された無支保のケースでは、載荷直後から壁面変位が急増し、最大載荷圧の半分程度（150kPa）で広範囲にわたって壁面が崩壊してしまった。

一方、一断面当たりのボルト本数は6本であるが、ボルト長の長い5cmのケースでは、写真-2(a)のように側壁部での崩落は生じているものの、天端部では写真-2(b)のようにほとんど崩落は見られない。また、写真からは詳細には判らないが、実験状況から同じ側壁部の崩落でもボルト長3cmの方がその規模が大きいことが確認されている。このことから、今回の実験ではボルト長3cmの方が崩壊を抑制するには不十分だったといえる。

左右方向よりも上下方向の荷重が大きい今回の条件では、天端部よりも側壁部の緩みが大きくなり、最悪の場合には地山が押し出して崩壊する。このことが実証された。

(2) 載荷にともなうトンネル壁面変位の増加パターン

載荷にともなうトンネル壁面変位が増加していくが、その増加パターンはロックボルトの打設パターンに依存するものと考えられる。

そこで本節では、ロックボルト打設パターンによって天端や側壁などのトンネル壁面の変位がどのように増加していくかを検討する。

a) 天端部における壁面変位増加パターン

図-4(a)に一断面あたり6本のボルトを打設した4ケースの載荷に伴う壁面変位の増加の様子を、同図(b)に12本の4ケースの壁面変位の増加の様子を示す。

一断面あたり12本打設することにより、6本打設に比して曲線の傾きは緩やかになり、最終変位量もb033040を除いて小さい結果となっている。打設パターンによる差違も多少現れており、ロックボルトの効果が発現していることもわずかながら確認でき



(a) 側壁部

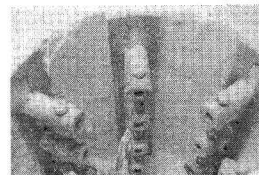


(b) 天端部

写真-1 載荷後のトンネル壁面の状況 (b036025)



(a) 側壁部



(b) 天端部

写真-2 載荷後のトンネル壁面の状況 (b056025)

る。ただし、一断面あたり12本と密に打設しても、ボルトの長さが3cmのb033040では、軸方向打設間隔が疎であることから変位抑制効果が見られない。逆に、一断面6本であるが長いボルトを使用しているb056025では、軸方向打設間隔が密であることから比較的変位抑制効果が見出せる。

しかしながら、天端部以外の後述の壁面変位と比較すると天端部でのこうした壁面変位増加パターンは、打設間隔やボルト長による差違が明確には現れていない。側圧係数0.5の条件では、天端部のボルト打設はこの結果から判断すればそれほど有効ではないと言える。

b) 天端から30°における壁面変位増加パターン

図-5に天端から30°におけるトンネル壁面の載荷にともなう変位の増加を示す。なお、 $\theta = 30^\circ$ における計測は、一断面12本のケース（半径方向打設間隔30°）のみで実施した。

最終変位量を見ると、ボルト長を長くするほど、また打設間隔を密にするほどその値が小さいことがわかる。載荷にともなう変位の増加は、ボルト長によって曲線の傾きに差が生じている。天端部（ $\theta = 0^\circ$ ）でも考察したが、長いボルトを疎に打設（b053040）すると、載荷初期段階において他のケースよりも大きな変位が生じる。ただし、同じ打設間隔でボルト長の短いb033040よりも最終変位量は小さい。これは、長いボルトを打設することにより、載荷に伴って拡大する塑性領域あるいは緩み領域に対して、より効果を発揮したためと推察される。先

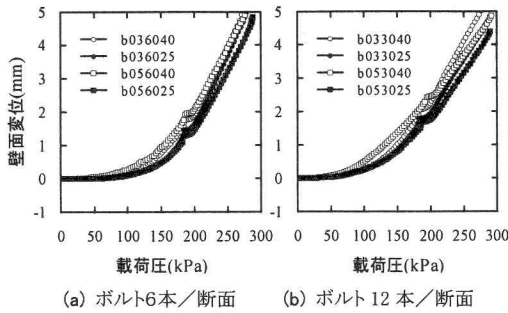


図-4 載荷圧一壁面変位(天端: $\theta=0^\circ$)

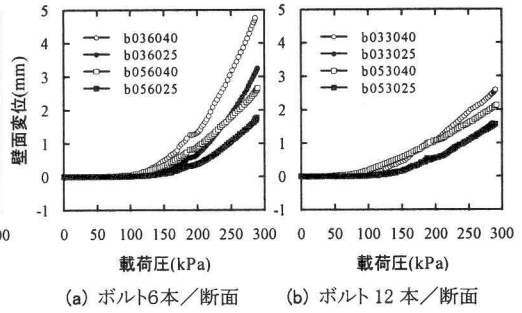


図-6 載荷圧一壁面変位(天端: $\theta=60^\circ$)

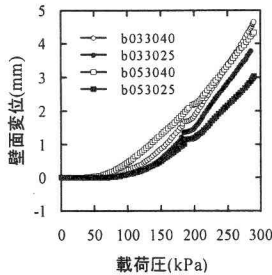


図-5 載荷圧一壁面変位(天端: $\theta=30^\circ$)

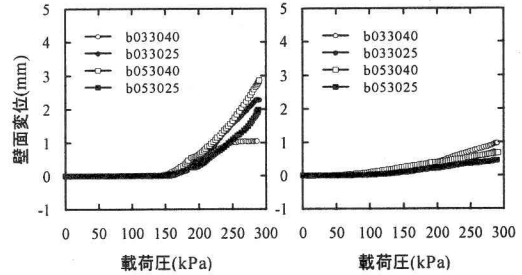


図-7 載荷圧一壁面変位(天端: $\theta=90^\circ$)

の論文で仮定したように、ロックボルトの効果は地山が塑性状態に達したあとに発揮されるとする見解の証左であると考えられる。

c) 天端から 60° における壁面変位増加パターン

図-6(a)に一断面あたり6本のボルトを打設した4ケースの載荷に伴う壁面変位の増加の様子を、同図(b)に12本の4ケースの壁面変位の増加の様子を示す。

曲線の形状および最終変位量とともに、ボルト打設パターンの差が天端部のそれに比して顕著に表れている。一断面6本の同図(a)においても、天端部では見られなかった打設パターンの差が大きく、その程度は12本のケース(b)よりも著しい。ロックボルトの効果は $\theta = 60^\circ$ では大きく影響していることがわかる。

一断面6本のケースでは、壁面変位増加の傾向が2種類のボルト長に応じてほぼ2種類に分類することができる。一方、12本のケースでは、トンネル軸方向の打設間隔によって壁面変位の増加傾向が変化しており、変位量に関しては、載荷圧200kPaまではボルト長が同一であればほぼ同じ傾向を示している。しかし、載荷圧200kPa以降は、軸方向打設間隔4cmのケースではボルトが長い方が勾配が緩やかにすなわち変位抑制効果が発揮されるようになる。

こうした違いは、ボルト一本が負担する地山の範囲と、載荷に伴う緩み領域の拡大範囲との相関によるものと推察される。また、一断面あたりの本数による変位増加パターンの差については、疎な場合にはボルトの一本一本が単独で作用効果を発揮しているのに対し、密なケースでは各ボルトが互いに影響し合って一体的に作用効果を発揮しているため、このような差違が生じたものと推察される。

d) 側壁における壁面変位増加パターン

側壁 ($\theta = 90^\circ$) における壁面変位について、図-7(a)に一断面あたり6本のボルトを打設した4ケースの載荷に伴う壁面変位の増加の様子を、同図(b)に12本の4ケースの壁面変位の増加の様子を示す。

一断面あたり6本のケースでは、側壁部にはロックボルトおよびベアリングプレートが存在せず、また、側圧係数0.5であることも考え合わせれば崩落する可能性が最も高い位置である。このため、打設密度が最も疎でかつボルト長の短いb036040では、急激な変位増加と側壁面の崩落により載荷圧220kPaで計測不能となった。

一断面12本のケースでは、壁面変位の増加率がロックボルト長によって、また最終変位量がトンネル軸方向の打設間隔によって傾向が分類されることがわかる。このような傾向は、 $\theta = 60^\circ$ におけるケース

と類似している。すなわち、220kPa程度までボルトの長さによらず同じような変位の増加率で推移していき、その後200kPa以降はボルト長による差が現れはじめる。

(3) 載荷にともなうロックボルト軸力分布の変化

a) 天端部 ($\theta = 0^\circ$) における軸力分布

図-8 に天端部に打設したロックボルトの載荷にともなう軸力分布の変化を示している。同図(a)は最も疎に打設した短いボルト長のケース b036040、同図(b)は最も密に打設した長いボルト長のケース b053025 である。

今回実験したケースでは両者は互いに両極端のケースであるが、両図から天端部ではほとんど軸力が発生していないことがわかる。引張力よりむしろマイナスで表示されている圧縮力が卓越しており、ほとんどボルトの作用効果が発揮されていないといえる。この事実と先の図-4 で示された結果とを踏まえると、打設パターンによる壁面変位抑制効果の差違は、少なくとも天端部のボルトとは無関係であると思われる。

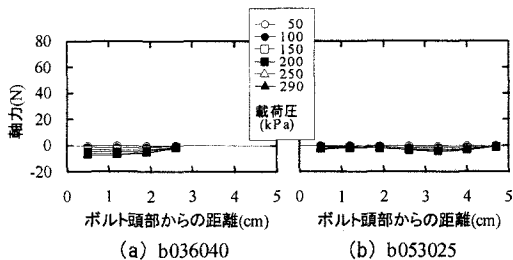


図-8 ロックボルト軸力分布の変化(天端: $\theta = 0^\circ$)

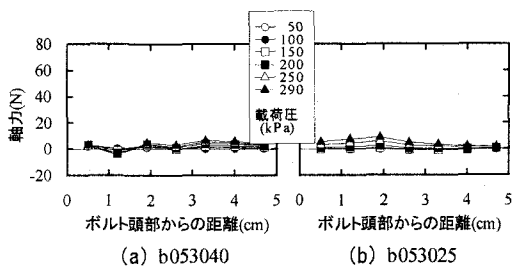


図-9 ロックボルト軸力分布の変化($\theta = 30^\circ$)

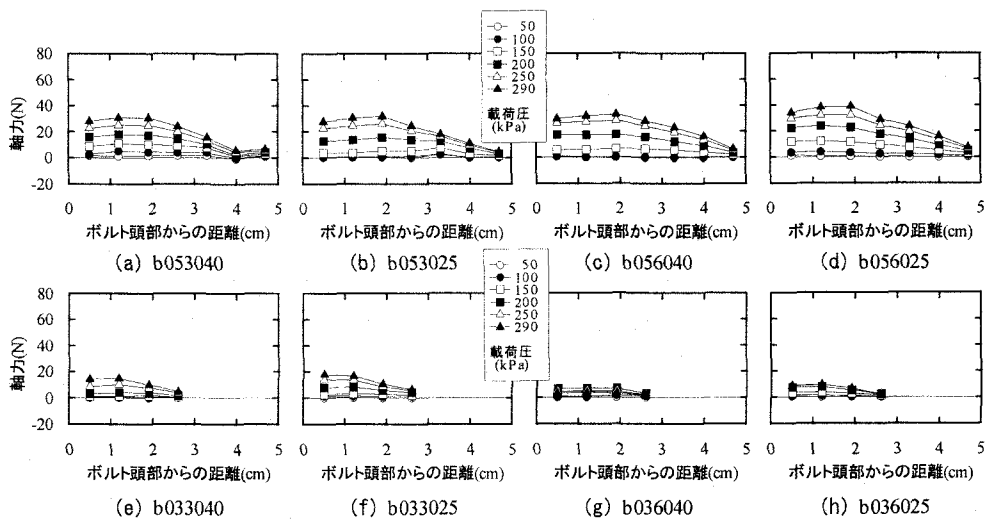


図-10 ロックボルト軸力分布の変化($\theta = 60^\circ$)

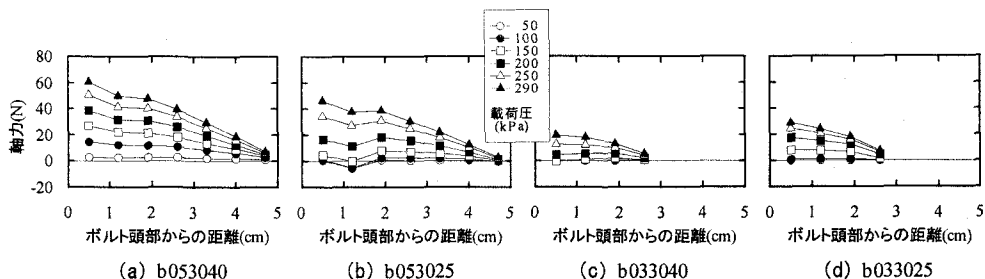


図-11 ロックボルト軸力分布の変化(側壁: $\theta = 90^\circ$)

b) $\theta = 30^\circ$ における軸力分布

天端から $\theta = 30^\circ$ に打設したボルトは半径方向打設間隔が 30° のみであるので、ここではボルト長 5cm のケースにおいて軸方向打設間隔の差による分布形状の変化について図-9 に示す。

打設間隔が疎な (a) では載荷圧が増しても軸力分布にはそれほど変動がみられず、軸力分布も明確ではない。一方、打設間隔が密な (b) では載荷圧の増加にともなって引張りの軸力が発現していき、その最大値はボルト頭部すなわちトンネル壁面側にある。この傾向はボルト長 3cm でも同様であった。このことから、同じボルト長では、打設間隔を密にしたケースの方がロックボルトの作用効果を期待することができると思われる。

c) $\theta = 60^\circ$ における軸力分布

図-10 に $\theta = 60^\circ$ に打設したボルトのすべての実験ケースにおける軸力分布を示す。すべてのケースを概観すると、おおむね載荷圧増加に伴ってボルト軸力が発現し、その最大値はボルト頭部よりやや地山奥側にある。およそ上に凸の緩やかな軸力分布形状といえる。

ボルト長 5cm で一断面 12 本打設したケースにおいて、軸方向打設間隔の差を比較する (同図 (a) および (b))。両者とも打設間隔によらず同じような軸力分布形状であり、各所の軸力の値もほぼ同じである。これに対して、同じボルト長で軸方向打設間隔を疎にしたケースでは (同図 (c) および (d))、軸応力の値に若干の差が現れている。ただし、分布形状が類似していることから、作用効果に多大な影響を及ぼすものではなく、ボルト長 5cm のケースでは、ボルトの半径方向打設間隔よりも軸方向のそれに応じてボルト頭部の軸力値に差があると解釈した方が適切であると思われる。

同図 (e) から (h) はボルト長 3cm の各打設間隔における軸力分布である。軸方向打設間隔の差だけで比較すると、その結論はボルト長 5cm と同じように分布形状および各所の値が類似している。但しここで注目すべきは、1 断面あたりのボルト本数が少ない (g) および (h) の方が、本数の多い (e) および (f) よりもボルト一本の負担する軸力が小さいことである。理論的に考えれば、同じ外圧に対してボルト本数の多い方がボルト一本が負担する軸力が小さくなるはずである。この理由は不明であるが、図-6 (a) の壁面変位図で示されたように、実験ケース b036040 や b036025 は極端な下に凸の曲線を呈していることから変位増大が著しい。すなわち、ボルト軸力が発現したときには、既にボルトと地山との間

の相互作用が発揮されなくなったか、あるいはボルトが地山の変位に追従して剛体移動してしまったためと推察される。

d) 側壁 ($\theta = 90^\circ$) における軸力分布

天端から $\theta = 90^\circ$ に打設したボルトは半径方向打設間隔が 30° のみの 4 ケースであり、図-11 に示す通りである。

ボルト長 5cm に関しては、トンネル軸方向打設間隔が疎な (a) の方が、一方、ボルト長 3cm ではその間隔が密な (d) の方がボルト頭部軸力が大きい。前述のようにボルト密度の疎な方がボルト軸力が大きくなるはずだが、ボルト長 3cm のこうした現象は、側壁部のくさび状の崩壊が生じやすくなる箇所で押し出してくる地山の範囲とボルト長の関係からこうした結果となるものと思われる。換言すると、ボルト長も短くかつ打設密度も疎なボルトでは、側壁部の地山の押し出しが顕著になり、ボルトでは変位の増加を抑止することが不能になったためであると考えられる。

軸力分布形状について、総じて頭部軸力が最大値を示し地山奥側にいくにしたがって減少する分布である。この軸力分布は、先の論文で示した軸対称荷重条件のボルト軸力分布の形状とよく似ている。

4. 理論解／数値解析による実験結果の検証 — 塑性領域拡大抑制の観点から —

(1) 二軸応力場における円孔の弾塑性問題

均質等方性の半無限地山中の円孔における二軸応力場の弾性解は Kirsch によって与えられている⁸⁾。Kirsch の解では、鉛直方向地山応力 p_v 、水平方向地山応力 p_h ($p_v > p_h$) では、側壁近傍の応力が最も大きくなることから、側壁から降伏してさらに荷重が作用すれば降伏範囲が拡大することが想像できる。このことは、写真-1 (a) で示したように、側壁部にくさび形の崩落が生じたことから裏付けられる。

では、降伏後の挙動の理論的な解釈、すなわち二軸応力場における弾塑性問題であるが、本研究の対象としているような条件を満足する厳密解は見当たらない。トンネル問題として適用されている近似解としては Kastner⁹⁾ の解がよく知られている。また、弾塑性境界を楕円形と仮定するなどして定式化を試みている例もある。たとえば Galin¹⁰⁾ は、降伏条件として von Mises (内部摩擦角はゼロ) を適用して二軸応力場の弾塑性解の誘導をはじめて試みている。その後、この解に対して修正が試みられている。

Tokar¹¹⁾はGaliniの式の誘導過程に誤りがあることを指摘して修正式を提示し、さらにMohr-Coulombの降伏基準を用いた解析解を導いている。この解析解では、鉛直方向および水平方向応力が非等分布荷重（水平荷重を台形分布としている）として与えた場合の解析解も与えている。その他、Detournay & Fairhurst¹²⁾や菅原らのグループ^{13), 14)}も近似解を与えている。

いずれの弾塑性解も一長一短はあるが、ここでは本研究で得られた実験を検証する上で最も簡便な解を与えているKastnerの求めた塑性領域の解を援用する。

(2) 弾塑性境界とロックボルト打設パターンとの関係

Kastnerによれば、鉛直方向および水平方向の無限遠方にそれぞれ p_v および p_h の応力（側圧係数 λ を p_h/p_v ）を受ける無支保円孔の弾塑性境界は、近似的に次の関係式で表されるとした。

$$\begin{aligned} & \cos^2 2\theta + 2\cos 2\theta \frac{1+\lambda}{1-\lambda} \frac{1-2\alpha^2+3\alpha^4}{4(2-3\alpha^2)} \\ & - \left(\frac{1+\lambda}{1-\lambda} \right)^2 \frac{\alpha^2}{4(2-3\alpha^2)} \frac{1+2\alpha^2-3\alpha^4}{4\alpha^2(2-3\alpha^2)} \\ & + \frac{k^2}{(1-\lambda)^2 + \alpha^2(2-3\alpha^2)} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{cases} \alpha = r/a & a: \text{トンネル半径} \\ k = q_u/p_v & q_u: \text{一軸圧縮強度} \\ \theta: \text{天端からの角度 (rad.)} \end{cases} \quad (2)$$

である。

図-12は、式(1)に基づいて求めた弾塑性境界を描画したものである。なお、先の著者らの論文⁴⁾では、外圧荷重に伴う地山のポアソン効果により地山の上下面に摩擦が発生するなどして、外圧の値がそのまま地山には作用せず一軸圧縮強度程度少なく作用していることを指摘している。したがって、たとえば図中の数値100kPaは、実験においては一軸圧縮強度分（64kPa）少なくなっていることを考慮し、 $100+64=164\text{kPa}$ 時の境界とほぼ同等と考えられる。

鉛直応力が100kPaで側壁部に塑性域が発生し、150kPaまで上昇するとその範囲は拡大し天端近くにまで至っている。ただし、この段階ではまだ、天端部には塑性域が発生しておらず、200kPaでわずかに発生するようになる。

実験では、天端に打設されたロックボルトにはほとんど軸力が発生していないこと、また、Kastner

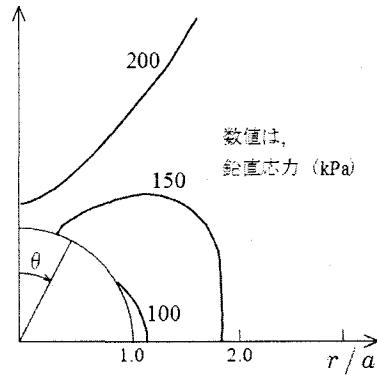


図-12 弾塑性境界 ($\lambda=0.5$)

解では200kPaにおいても塑性領域がわずかであることを考えると、全面接着式のボルトの作用効果はボルトを含む地山が塑性に達してからであるという仮説を実証しているといえる。ただし、天端における塑性領域はわずかであるとはいえ、そこを除けば塑性領域がかなりの範囲に達している。しかし、実験では側壁部から $\theta=30\sim 60^\circ$ 程度でボルト長5cmであれば壁面変位抑制効果が発揮されている。このことは、塑性領域が広範であっても、ボルト長や打設間隔が適切であればボルト頭部に発生する頭部軸力がベアリングプレートを介してそのままトンネル壁面に支保内圧として変位増加を抑えることができる。

(3) ロックボルトによる塑性領域拡大抑制効果に関する数値解析

前節での検討は無支保のケースであったため、ベアリングプレートを有するロックボルトの支保内圧発現に伴う効果を明らかにすることはできない。そこで本節では、その効果を判断する一つとして塑性領域の広がり抑制に着目し、三次元有限差分解析（FLAC3D）により検討する。なお、地山、ボルト物性は実験値をそのまま適用し、ボルトモデルはケーブル要素とし、ベアリングプレートをモデル化するため、トンネル壁面付近にあるケーブル要素の節点を地山の節点と剛結合した（図-13）。

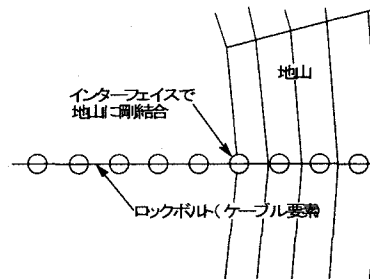


図-13 ベアリングプレートのモデル化

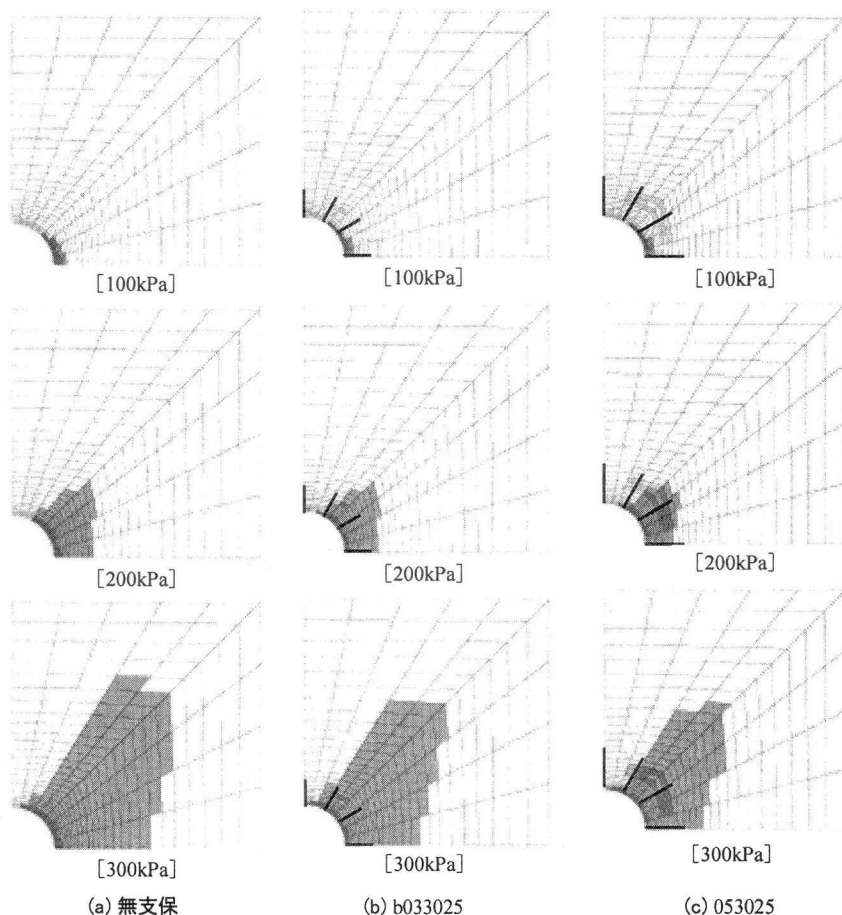


図-14 無支保を含む各打設パターンの塑性領域図の計算例

地山はMohr-Coulomb基準に基づく完全弾塑性、またボルト-地山間のせん断特性も完全弾塑性とした。解析モデルは模型実験と同じ寸法で三次元モデルとし、载荷も事件と同様にモデル外周から与えた。

図-14は無支保（同図(a)）、b03025（同図(b)）およびb05025(c)の载荷圧毎の塑性領域の進展の様子を示している。

まず、無支保のケースについて、Kastner解（図-12）と比べる。前述の通り図-12の境界に示された値は実験においては64kPa加算して評価すると、数値解析結果はほぼKastner解で得られる塑性領域と一致していることがわかる。また、いずれのケースも側壁部から塑性領域が進展し、载荷圧が増す毎に右上方に広がっている。

ボルトを配置したケースについて、(b)のボルト長3cmでは、無支保に比べて同じ载荷圧における塑性領域の範囲は多少縮小している程度である。これに対し、(c)のボルト長5cmでは、全体的に塑性領域の進展が抑制されており、特に側壁部直近（ $\theta =$

90°）で顕著である。

このように、簡便な近似解による無支保における塑性領域の範囲あるいは形状を想定し、そこにボルトを打設することによって塑性領域の拡大を抑制することができることが示された。特にボルト長5cmでは、その抑制効果が高く中でも側壁近傍の抑制に卓越していることが検証された。

ただし、このようなベアリングプレートを簡単にモデル化した計算では、塑性領域拡大抑制効果がベアリングプレートによるものかあるいはボルト長によるものか、または両者が包含したものなのかは特定できないことに留意されたい。

5. おわりに

本研究では、ロックボルトによって支保された低強度地山トンネルを対象に、先に提案した軸対称荷重条件下の簡便トンネル力学モデルを、さらに一般

的な荷重条件下である二軸応力場に拡張するため、モデル化の根拠となるトンネル挙動を実験により明らかにした。本研究により得られた知見は主に次の通りである。

- ① 全面接着式ロックボルトの作用効果は、地山が塑性域に達してから発揮される。
- ② 側圧係数0.5の荷重条件では側壁部の崩落が懸念されるが、適切なボルト長および打設間隔であればむしろ支保内圧が有効に発揮され、側壁部近辺の壁面変位を抑えることができる。
- ③ 側圧係数0.5の荷重条件の天端部付近では理論的にも塑性領域がそれほど発達しないため、ボルトの効果が発揮されにくい。そのため、天端における壁面変位抑制効果は低い。

ただし、③についてはあくまでも実験結果であり、実トンネルにおいては天端部付近の突発的な崩壊を未然に防ぐためにも天端部のボルトは欠くことができない。

以上のような挙動を考慮して、力学モデルを構築しなければならない。

- 9) カスナー, H. 原著 (金原弘訳) : トンネルの力学, 森北出版, 1974.
- 10) Galin, L.A.: Plane Elast-Plastic Problem Plastic Zones in the Vicinity of Circular Apertures, *Prikladnaia Matematika i Mekhanika*, Vol.10, 1946.
- 11) Tokar, G.: Generalization of Galin's Problem to Frictional Materials and Discontinuous Stress Fields, *Int. J. Solids Structures*, Vol.26, No.2, pp.129-147, 1990.
- 12) Detournay, E. and Fairhurst, C.: Two-dimensional elastoplastic analysis of a long, cylindrical cavity under non-hydrostatic loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 4, pp.197-211, 1987.
- 13) 菅原勝彦・青木俊朗・鈴木康正: 2 軸応力下の空洞まわりの弾塑性応力解析—境界要素-特性曲線結合法による岩盤空洞の弾塑性解析 (第 1 報) —, 日本鉱業会誌, 104, 1203, pp.261-266, 1988.
- 14) 青木俊朗・菅原勝彦・尾原祐三・鈴木康正: 2 軸応力下の円形空洞の弾塑性変形—境界要素-特性曲線結合法による岩盤空洞の弾塑性解析 (第 2 報) —, 日本鉱業会誌, 104, 1206, pp.489-494, 1988.

参考文献

- 1) 土木学会: トンネル標準示方書 (山岳工法編)・同解説, p.79-80, 1996.
- 2) Hoek, E & Brown, E.T.: *Underground Excavations in Rock*, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980.
- 3) Farmer, I.W.: Stress Distribution along a Resin Grouted Rock Anchor, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 12, pp.347-351, 1975.
- 3) 土木学会: トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, 平成 8 年版, p.79, 1996.
- 4) 土門 剛・今田 徹・西村和夫: ロックボルトによる支保内圧効果を考慮した低強度地山トンネルの簡便モデル, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.149-167, 2002.12.
- 5) 猪熊明: トンネルの土圧現象と支保構造に関する研究, 東京大学博士学位論文, 1990.
- 6) 梨本 裕: 最小掘削設計法による低強度地山におけるトンネルの合理化に関する研究, 東京都立大学博士学位論文, 1993.
- 7) 藤原多聞・土門 剛・西村和夫: 二軸応力条件下でのロックボルト作用効果の研究, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, Vol.59, 3-092, CD-ROM, 2004.
- 8) たとえば, 福島啓一: わかりやすいトンネルの力学, 土木工学社, 1994.