

# ロックボルトのトンネル補強効果と最適設計パターンに関する実験的研究

土屋 敬\*

2.4 m 立方の模型地山に 60 cm のトンネルを設け、ロックボルトパターンを種々変えて荷重試験を行い、ボルトのトンネル補強効果と最適パターンの研究を行った。荷重は側圧係数 1.0 と 0.5 の二通りで行った。模型地山には一軸強度 1.0 MPa、内部摩擦角 30 の砂質低強度モルタルを用いた。ボルトは長さ 40~10 cm、本数は 8 cm 間隔の 1 断面に 12~48 本とした。この実験の範囲では、短いボルトを数多く用いることの有効性が明らかとなった。

**Keywords :** tunnel, support, rock-bolt

## 1. まえがき

筆者は 1976 年より鉄道技術研究所にあってロックボルト・吹付けコンクリートトンネル工法の導入に努め、基礎的なブロック実験から始め、大型のトンネル実験に進み、併行して解析手法の開発を行い設計手法の確立に努めてきた。本報告はそれらのうち、トンネル試験装置による模型試験の外圧試験方式によるものである。

本試験の目的は以下の通りである。

- a) ロックボルトによるトンネル補強の有効な条件(範囲)を明らかにする。
- b) トンネルの安定に最も有効なロックボルトの長さとお本数の組合せを追求する。
- c) 側圧係数に代表される荷重形態に応じたロックボルトの最適配置を求める

外圧方式ではトンネルの開口によるひずみの他に、加圧による様なひずみ加わり、完全なトンネルのシミュレーションとはならないが、ボルト軸力は主として前者により生ずるので、ボルトの効果はこの実験でも十分判定できるものと考えた。

## 2. 試験方法

### (1) トンネル試験装置

トンネル試験装置は基本的には載荷板・加圧装置、反力フレームから構成される。トンネル直径は 60 cm としたが、これは鉄道トンネルとして考えた場合新幹線断面の 1/15、在来線単線断面の 1/10 に当たる。トンネル壁面から載荷板までの離れを半径の 3 倍の 90 cm に取ると、試験体の一辺は 2.4 m となる。トンネル軸直角拘束面の摩擦の影響を軽減するため、トンネル軸方向にも断面方向と同じ長さを持たせた立方体とした。この場

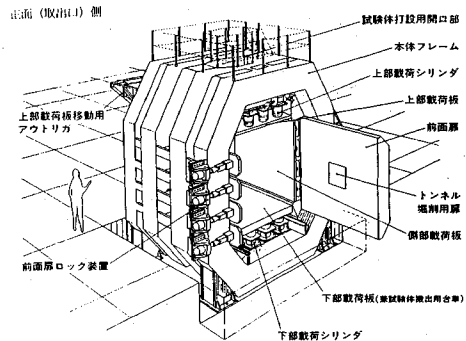


図-1 トンネル試験装置

合トンネル延長はトンネル直径の 4 倍となる。

載荷応力は軟岩程度は試験可能な様に 2.7 MPa とした。この結果一面当たりの必要な加圧力は 16 MN となり、1 MN ジャッキを 4 行 4 列に配列した。トンネル軸は水平方向とし前後面の反力壁にはトンネルのための開口部を設けた。載荷面は平面ひずみ状態を仮定し、上下左右の 4 面とし、載荷板は変形が生じないように十分な剛性を持たせた。反力フレームと載荷板を貫いて地山内変位等の計測用の穴を設けている。ただし上部には不動点を取ることが不可能であり設けていない。反力フレームの外側に、独立して計測用フレームを設けている。装置の全景を図-1 に示す。

### (2) 供試体の材料

#### a) 地山材料

地山材料は、低強度モルタルとし、載荷板との空隙をなくすために試験装置の中に直打ちすることとした。強度は試験機の載荷能力に余裕をもたせ 1 (±0.2) MPa とすることとした。内部摩擦角は  $\phi = 25^\circ$  (±3°) を目標とし、配合は多くの予備試験の結果表-1 の様に定めた。

#### b) ロックボルト材料

\* 正会員 工博 金沢工業大学教授 土木工学科  
(〒921 石川県石川郡野々市町厨ヶ丘 7-1)

表—1 地山材料の配合

| 水セメント比<br>W/C(%) | セメント砂比<br>(C:S) | 単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |      |            |         | 減水材     | 分離<br>防止材 |
|------------------|-----------------|----------------------------|------|------|------------|---------|---------|-----------|
|                  |                 | 水                          | セメント | 細骨材  | ペント<br>ナイト |         |         |           |
| 300              | 1:7.19          | 479                        | 160  | 1150 | 53         | 9.25% C | 0.15% C |           |

表—2 供試体の種類

| 側圧<br>係数 | 試験体<br>番号 | ボルト<br>パターン | 長さ l<br>(cm) | 本数<br>N | l×N<br>(cm) | 1軸強度<br>q <sub>u</sub> (MPa) | 粘着力<br>c(MPa) | 摩擦角<br>φ° |
|----------|-----------|-------------|--------------|---------|-------------|------------------------------|---------------|-----------|
| 1.0      | S-1       | NB          | —            | —       | —           | 0.83                         | 0.24          | 25        |
|          | S-2       | B4012       | 40           | 12      | 480         | 0.91                         | 0.32          | 21        |
|          |           | B2024       | 20           | 24      | 480         |                              |               |           |
|          | S-3       | B2012       | 20           | 12      | 240         | 1.02                         | 0.31          | 26        |
|          |           | B2024       | 20           | 24      | 480         |                              |               |           |
|          | S-4       | B1048       | 10           | 48      | 480         | 0.96                         | 0.32          | 22        |
|          |           | B4012       | 40           | 12      | 480         |                              |               |           |
|          | 0.5       | S-5         | NB           | —       | —           | —                            | 1.01          | 0.25      |
| S-6      |           | B4012       | 40           | 12      | 480         | 1.02                         | 0.28          | 24        |
|          |           | B2024       | 20           | 24      | 480         |                              |               |           |
| S-7      |           | B2012       | 20           | 12      | 240         | 1.07                         | 0.35          | 24        |
|          |           | B2024       | 20           | 24      | 480         |                              |               |           |
| S-8      |           | B1048       | 10           | 48      | 480         | 1.20                         | 0.30          | 26        |
|          |           | B2024       | 20           | 24      | 480         |                              |               |           |
| 平均       |           |             |              |         |             | 1.00                         | 0.30          | 24        |

(軸方向ピッチ: 8cm)

相似律の検討によれば構造物の変形、変位は、 $1/\alpha$  ( $\alpha$ :幾何倍率)に、応力は1:1に対応することが分かる。トンネル径は約1/10であるからボルトも約1/10とし、ISO規格ネジM4(呼び径4mm,内径3.242mm)を用いる。材質は普通鋼を用いた、この模擬ボルトの引張強度は5.36kNであった。現場で実際に用いられている4回ねじり鋼棒の別におこなった試験によれば破断強度は、345kNであり模擬ボルトの強度5.36kNは幾何倍率 $1/64=(1/8)^2$ に等しく相似律を満足する。長さは現場で用いられている2~4mを対象に20~40cmとしたが、試験の結果短いものが効果的なことから10cmを加えた。ボルトの標準ピッチは密な場合を想定し、現場で80cm,模型でトンネル軸方向に8cm,円周方向には24分割7.8cmを標準とした。

(3) 試験体の種類

供試体は中央で仕切り一供試体2パターンを基本として実施した。これは試験体強度を試験結果に影響のない範囲にそろえることは困難なこと、ボルトのある場合パターン間の変位の差はそれほど小さくなくまた外周部の地山は三軸状態のため弾性状態を保ち相互干渉を及ぼすとは考えられなかったためである。ただしNB(ボルトなしのパターン)については単独で試験した。

実施した8種類のボルトパターンを表—2に示す。ボルトパターン記号は、前の2桁の数字はボルト長(cm)を、あとの2桁の数字は一断面当りのボルト本数を表わす。

ボルトはトンネル1断面当りの設置総延長を原則として一定、すなわちボルト長 $l \times$ 設置本数 $N=480$ cm/断面とし(軸方向ピッチは一定)とし、ボルトの長さおよび設置密度の相違がトンネルの補強効果に与える影響を実験的に検討することとした。ただしB2012はボルト

表—3 計測項目および数量一覧

| 計測項目<br>(計測精度)  | 計 測 点                                      |   |   |   |
|-----------------|--|---|---|---|
|                 | 供試体番号S-1                                   | S-2, 3                                      | S-5   | S-4, 6, 7, 8  |
| 地山内変位<br>(0.1%) | 5点×2測線=10点<br>(2.5, 5, 10,<br>20, 40cm)    | 6点×2測線×2断面=24点<br>(1.2, 4, 10,<br>20, 40cm) | 5点×2測線<br>=10点<br>(1.2, 3,<br>5, 20cm)      | 5点×2測線×2断面=20点<br>S-4, 6, 7(1.2, 3, 5, 20cm)<br>S-8<br>(2.4, 6, 10, 20cm) |
| 地山内ひずみ<br>(1%)  | 5点×2方向=10点<br>(5, 10, 20,<br>30, 40cm)     |   | 5点×2測線×2断面=20点<br>(2.5, 5, 10,<br>20, 40cm) | 5点×2方向×2測線<br>×2断面=40点<br>(10, 20, 40cm)                                  |
| 地山内応力<br>(2%)   | 6点×2方向=12点<br>(5, 10, 20,<br>30, 40, 60cm) |   | 5点×2測線×2断面=20点<br>(2.5, 5, 10,<br>20, 40cm) | 5点×2方向×2測線<br>(2.5, 5, 10,<br>20, 40cm)                                   |
| ボルト軸力<br>(2%)   | 5点×3本=15点                                  | 5点×3本×2断面=30点                               |   | 5点×3本×2断面=30点   |
| 内空変位<br>(0.1%)  |  | 8点×2面=16点                                   | 16点   | 16点   |
| 載荷板変位<br>(1%)   | 4点×4面=16点                                  |   | 16点   | 16点   |
| 合計点数            | 78点  | 88点   | 82点   | 162点  |

注: 2測線……水平、鉛直 2方向……r, θ

総延長を半減させた比較試験とした。ボルトのあるケースについては必ず試験ケースをオーバーラップさせ、全体的な相対比較が行えるようにした。B1048のボルトパターンはボルト本数が非常に多いが、これは試験の過程においてボルトの長さよりも本数が有効である傾向が出たため追加したパターンである。

(4) 試験体の製作方法

試験体は次の手順で製作した。

- a) 載荷板の位置決め
- b) トンネルの型枠(芯材)のセット
- c) シーリング, コーキング
- d) 中央仕切板のセット
- e) ロックボルトの設置
- f) 埋設ゲージ類の取り付け
- g) 載荷板摩擦低減工
- h) 地山材料の打設
- i) 試験体の養生および強度の把握
- j) 芯材の脱型
- k) キャッピング

(5) 計測機器の種類および装置

計測項目は表—3に示す通りであり、設置位置により地山内埋め込みゲージと外部取り付けゲージに大別できる。

地山埋め込みゲージ

a) 地山内変位

地山内変位は地中に埋設されたアンカーの移動量を重錘約10Nの張力を与えられたステンレスワイヤーにより伝達し、変位計により計測した。

b) 地山内ひずみ

埋込型ひずみゲージを使用し、トンネル半径方向( $\epsilon_r$ )と接線方向( $\epsilon_\theta$ )の2方向について測定した。

c) 地山内応力

トンネル半径方向および接線方向における地山内応力を測定するため土圧計を埋設した。

d) ロックボルト軸力

ISO規格5mmネジ棒に溝切り加工を行い、有効断面

積を通常のロックボルトと同様の約0.1 cm<sup>2</sup>とした後、溝内の5カ所にひずみゲージを接着した。

外部取り付けゲージ類

e) 内空変位

トンネル内空に装填できるように設計製作された計測用ポストおよびディスクプレートにロッドタイプの変位計を周方向に45°ピッチで8台取り付け、内空変位を測定した。

f) 荷板変位

荷重試験の際の荷板4面の移動量を検出するため、各面に4台、計16台のロッドタイプ変位計を取り付けた。

(6) 荷重方法

荷重条件は等圧圧縮(側圧係数  $K=1.0$ )と不等圧圧縮( $K=0.5$ )の2種類とした。荷重は両者とも1ステップ鉛直方向応力  $p_v=0.05$  MPa ごとの段階荷重とし、各ステップでは10分間同一荷重を持続した。この結果試験の所用時間は200分~400分となった(以下  $p_v$  を  $p$  と記す)。

3. 等圧下(側圧係数  $K=1.0$ )でのロックボルトの補強効果と最適パターン

$K=1.0$ の時はほぼ一様な変位、応力、破壊を示した。

(1) 内空変位(8測点の平均)に見られる効果

試験体毎の強度差を生じないように十分配慮したが、なお差が生じたため、各試験の直接の比較は不可能であり、次の方法によって修正を行い比較する。すなわちS-2を基本とし、S-3, S-4のボルトパターンB2012, B1048をS-2との共通なパターンであるB2024, B4012の各荷重段階での比率で修正する。NBの場合は、単独パターンの試験であり、比較試験を行っていないので上記と同様な修正ができない。そのため地山が弾性体と見なし得る領域( $p=0.4\sim 0.5$  MPa 付近)での変形比率で修正する。これにより、各設計パターンの支保効果の比較を行ったものが図-2である。これによると、ボルトの効果が明確に分かる。まず  $p=0.5$  MPaまではボルトの有無にかかわらず、内空変位の差が生じていない。この時の内空変位率は、約0.3% 模型トンネルで1.8 mm, 実物トンネルで18 mm~27 mmであった。以後、荷重応力が増大するに従いボルトの有無による内空変位の差が徐々に現れ、 $p=0.9$  MPa 付近では、ボルトのない場合は、ある場合に比べ約2倍の内空変位となった。次にトンネル壁面に大きなクラックが生じ崩落に至る。パターンの違いによる内空変位率の比較をすると、ボルトを多く用いたB1048が最も内空変化率が小さくなった。また応力が地山強度を越えた場合でも、内空変位は増加しトンネル壁面にクラックは発生するものの、ボルトの存在により大きな崩落を生じずトンネルは全体的に

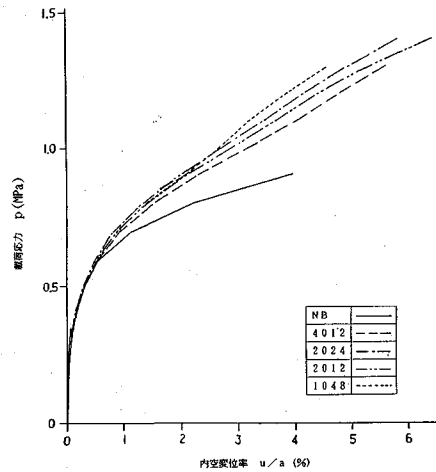


図-2 荷重応力と内空変位率との関係

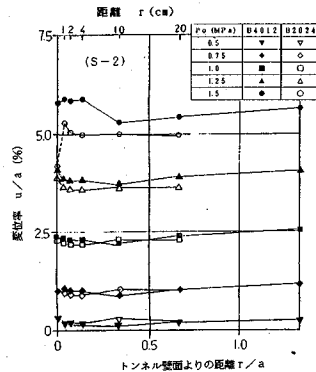


図-3 地山内変位率の分布 ( $K=1.0$ )

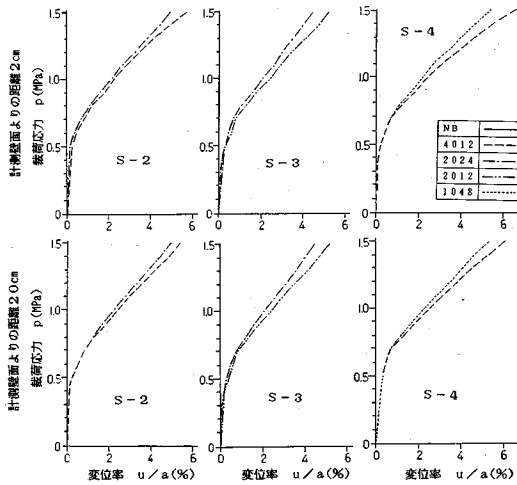
は安定している。さらに  $p=1.3$  MPa 付近で支保の違いによる内空変位を比較すると、最も変位の大きくなったB4012は  $u/a=5.7\%$ 、最も変位の小さくなったB1048は  $u/a=4.6\%$  であり、B4012はB1048の1.24倍となった。ボルトの長さによる支保効果をボルト本数が同じであるB2012とB4012により比較するが、B2012の方が内空変化率が小さくなった。

(2) 地山内変位に見られる効果

ボルトの効果は変位量の位置についての分布の勾配と、変位量の絶対値の比較より判定される。

a) 変位量の分布の勾配からみたボルトの効果

地山内変位量分布の代表例としてS-2試験について圧力段階毎に図-3に示しボルトの効果を考察する。図において  $r/a=0$ 、すなわち壁面における変位は内空変位計によって得られたものを示す。計測値にはトンネル変形による変位の他に模型地山全体の変位が含まれる。内空変位は8方向の平均であり供試体中心の移動誤差は消去されるが、地山内変位は一方向であるため平行移動分を含む。そのためこの両者の関係は、正しくないものもあり点線で結ぶ。位置による変位量の差、すなわち変



図—4 荷重応力と地山内変位率の分布 ( $K=1.0$ )

位勾配が小さいほど健全な状態にあると言える。1.0 MPa 以下では変位勾配はほとんどないが、1.2 MPa 付近から壁面との差が生じ始め、地山内で変位勾配が生じるのは荷重応力が 1.5 MPa で顕著である。B4012 は 4 cm 位置と 10 cm 位置の間で大きな変位勾配が生じ、B2024 では 1 cm と 2 cm の間でやや大きな変位勾配が生じている。この結果は、短いボルトを数多く用いた B2024 では、破壊が壁面のごく近傍にとどまっているのに対し、長いボルトを数少なく用いた B4012 ではやや深部まで及んでいることを示している。

b) 変位の絶対量から見られる効果

同一試験体におけるボルトパターンの相違による変位の絶対量を図—4 に比較する。S-2 試験においては、20 cm ボルトを 1 断面 24 本用いたものが、40 cm のボルトを 12 本用いたものに比べ変位量が小さい。S-4 試験では、同様の傾向がさらに明確になり、10 cm の短いボルトを 48 本用いたものはさらに変位量が少なく、効果的であると言える。

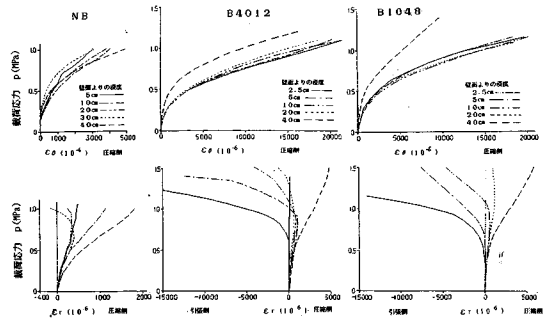
なお、壁面より 2 cm でも 20 cm でも変位率がほぼ同じとなっているのは外圧方式によるためである。

ロックボルト長が同一で本数の異なる場合の比較は S-3 試験で行っているが、その差は明瞭であり、B2012 の変位量は B2024 の約 1.17 倍である。

(3) 地山内ひずみに見られる効果

地山内のひずみの計測結果をボルトなしの S-1 と、ボルト有りの S-4 の B4012 と B1048 について図—5 に示す。

ボルトのない場合、接線方向ひずみ  $\epsilon_\theta$  は圧縮ひずみが生じた。位置がトンネル壁面に近づくに従い  $\epsilon_\theta$  は、次第に大きくなる。しかし荷重がある程度上がったところでトンネル壁面に近いひずみが減少する不安定な動き



図—5 荷重応力と地山内ひずみの関係 ( $K=1.0$ )

を示した。これは、他の位置でクラックが発生したため、当該位置でのひずみが減少したものと考えられる。

半径方向ひずみ  $\epsilon_r$  は荷重応力の低い段階では圧縮ひずみであり、 $p$  の増加に伴い次第に増加する。しかし、 $p$  が 0.7~0.8 MPa 以降では、壁面に近い 5 cm、10 cm と最も遠い 40 cm の位置では、圧縮ひずみがなお増加するが、中間位置の 20 cm、30 cm 位置での  $\epsilon_r$  が低下あるいは、引張側の挙動を示し、この付近で徐々に地山の破壊が進行している様子が伺われる。

次にボルトのある場合について、まず  $\epsilon_\theta$  については、パターン B4012、B1048 とも圧縮ひずみを生ずる。深さ位置の相違による差は、B4012 のでは、トンネル壁面に近い程ひずみが大きくなる傾向を示した。量的には大きくないがこの傾向は明確に現れている。B1048 のでは、深さ 10 cm のひずみが最大を示したが、2.5 から 20 cm の範囲は、ほとんど同じであり、深さ 40 cm とは、大きく違っている。そして全体としてひずみの量は、B1048 の方が小さい。このことは、ボルトが密に打設してあると、ボルトによって補強された領域が出来上がり、アーチ作用を行っていることが推定される。

次に  $\epsilon_r$  を見ると、B4012、B1048 とも、深さ位置によるひずみの相違が明確にみられる。深さ 40 cm でのひずみは、 $p$  の増加に伴い圧縮側の増加を示したのに対し、深さ 2.5、5、10、20 cm のひずみは、 $p$  が 0.4~0.5 MPa 付近より壁面に近いものから順次引張側に転じた。これらの結果は、 $p$  の増加に伴ってトンネル内空への押し出し変位を生ずる領域が徐々に、トンネル壁面より内奥部へと拡大していく状況を示している。

また、パターンによる比較をすると、B4012 では、1.25 MPa を越えると壁面より 20 cm 範囲は、すべて引張に転じているが、B1048 では、ほぼ同じ荷重の 1.10 MPa で 10 cm 範囲内は引張となるが、20 cm 位置は図の範囲内で圧縮性を保っている。

(4) 地山内応力に見られる効果

図—6 に地山内応力計測結果の内、代表的な 3 例を示す。ボルトなしの場合接線方向応力  $\sigma_\theta$  は、 $p$  の増加

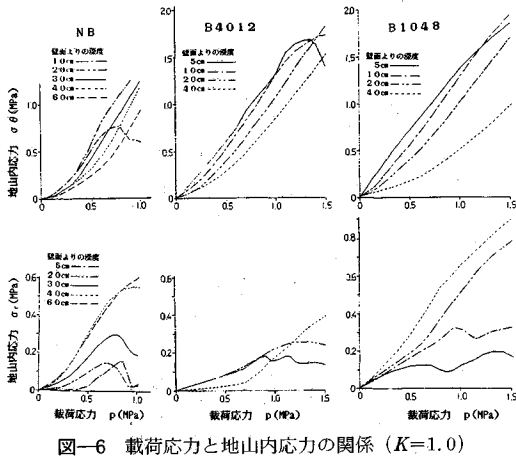


図-6 載荷応力と地山内応力の関係 (K=1.0)

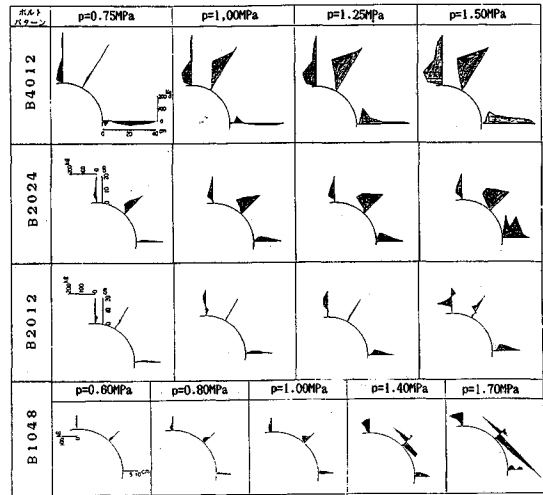


図-7 ロックボルトの軸力分布 (K=1.0)

に伴って大きくなっており、その増加割合は、深さの浅い測点ほど全般に大きい値を示した。しかし  $p=0.5$  MPa を越えたあたりから深さ 5 cm の増加率が徐々に減少し、 $p=0.7\sim 0.8$  MPa に達した時点でピークに達した後、急激な低下を示した。また半径方向応力  $\sigma_r$  は  $p$  の増加に伴って増大し、深い測点ほど全般に大きな値を示した。しかし深さ 30 cm では  $p=0.7\sim 0.8$  MPa に達した時点でピークを示し、それ以降は  $\sigma_\theta$  と同様に低下の方向に転じ、 $p=1.0$  MPa 付近で約  $0.1\sim 0.2$  MPa となった。これらの挙動については、トンネル周辺地山の破壊が影響していると考えられる。

ボルトのある場合について、まず  $\sigma_\theta$  に着目すると、B4012 では  $p$  の増大に伴い  $\sigma_\theta$  が増加するが、深さ 5 cm での  $\sigma_\theta$  は、 $p=1.35$  MPa でピークを示し、その後は急激に減少する。また深さ 10 cm の  $\sigma_\theta$  も  $p=1.5$  MPa 付近でピークを示した。しかし、深さ 20, 30 cm の  $\sigma_\theta$  はまだまだ増加傾向にある。これに対し、B1048 では、地山内のどの位置の  $\sigma_\theta$  も増加の傾向を示している。

次に  $\sigma_r$  を見ると、B4012 では深さ 5 cm の  $\sigma_r$  は  $p=0.9$  MPa 付近でピークを示しその後徐々に低下する傾向を示した。深さ 20 cm の  $\sigma_r$  も  $p=1.3$  MPa 付近でピークを示し、以後低下の傾向を示した。B1048 では、深さ 5 cm の  $\sigma_r$  は  $p=0.6$  MPa 付近でピークを示し、その後やや減少するが、0.85 MPa 付近より再び増加に転じ、 $p=1.35$  MPa 付近で 1 回目より大きなピークを示した。深さ 10 cm の  $\sigma_r$  も 0.95 MPa で 1 回目のピークを示し、いったん減少に向かうが 1.15 MPa 付近より増加に転じ、1.5 MPa 付近で 2 回目のピークを示した。このように短いボルトでは長いボルトに比べ低い載荷応力で地山内応力の減少が始まるが、その後再び増加し長いボルトより大きな応力を示した。深さ 20 cm では、B4012 ではピークを示したが、B1048 の場合は応力は増加し続け、1.5 MPa では前者の約 4 倍を示した。このよう

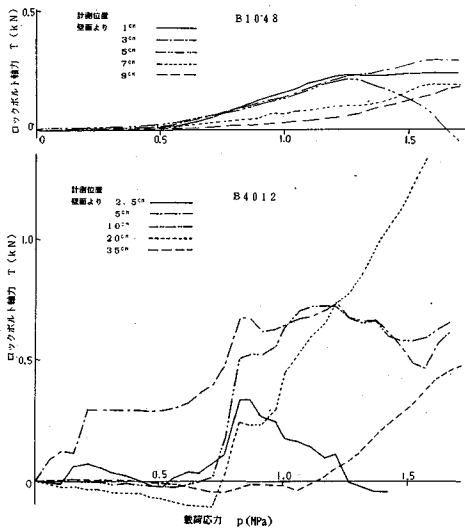
な地山内応力の挙動からボルトのトンネル支保効果が説明できる。すなわち載荷荷重の増大に伴い、地山内応力は増加するが、あるレベルに達すると地山の破壊が生じ減少する。ボルトがないと破壊はこのまま進行するが、ボルトがあるとボルトに引張力が生じ、反力として地山に圧縮力が与えられるため、3 次元的な応力状態が保持され、地山は安定を保つことができる。

(5) ロックボルト軸力に見られる効果

図-7 に代表的な荷重段階の 0.75, 1.00, 1.25, 1.5 MPa についてのボルト軸力の分布を示す。  $p=0.50$  MPa については図を示していないが、全パターンについてまだほとんど軸力を発生しておらず、それ以降において軸力を発生する。0.5 MPa 以下は、内空変位等からみても弾性領域であり、この領域では、ボルトの効果は発揮されていないと考えられる。  $p=1.25$  MPa 付近になると大きな軸力を発生しているが、それ以後の軸力の増加は顕著ではなく減少するものもある。これは、軸力が大きくなり、定着力がとれなくなったためと推測される。

軸力のピークはボルト中央あるいは若干トンネル寄りにある。  $p=1.5$  MPa ではトンネル壁面付近で軸力が 0 になっているのが見られるが、これは崩落のためである。

ボルト発生軸力の大きいことはボルトが有効に働いていることを意味するが、必ずしも絶対的なものではない。ボルト軸力は、地山のひずみに比例するが、もし補強効果が非常に大きければひずみは小さくなるからである。そのため単に大きさだけでなく、応力の発達過程などについても見るべきである。図-8 は B4012 と B1048 のボルト軸力の発達過程を見たものであるが、両者を比較して先ず分かることは、B4012 では、軸力の軸方向の



図—8 载荷応力とロックボルト軸力との関係 (S-4)

分布に変化が大きく不安定であるが、B1048は変化が滑らかで安定していることである。このことは、ボルト発生軸力は小さいがボルトが有効に働いているものと解釈できる。

(6) 破壊状況に見られる効果

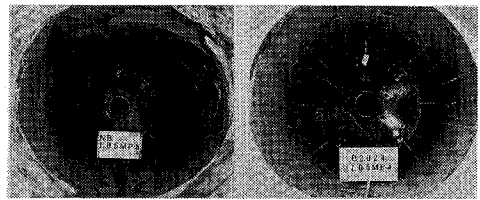
$p=1.05\text{ MPa}$ におけるトンネル壁面の状態をボルトなしのNBとありのB2024について図—9に示す。NBでは完全に破壊しているが、B2024ではわずかに鱗片状の剝離が見られる程度である。その後の $p$ の増加に伴う変化をB4012について図—10に示す。1.2 MPaでは剝離が顕著になり、ボルトのベアリングプレートが地山にめり込みよく支えて状態が観察される。実験終了の直前の2.0 MPaでは剝離はすべて崩落し、ボルトヘッドとヘッドを結んだトンネル軸に平行なV型の欠落部が生じる。しかしこの状態でもトンネルは完全な崩壊には至らず、ボルトのある場合は非常に粘りのあることが分かる。また剝離がほとんど隣接するボルト間で発生することからしてもボルト本数を多くすることの有利性が窺われる。

载荷試験後の試験体の観察結果によれば、周辺地山の崩落部の深さおよびひび割れ領域の深さは表—4の通りであった。最大载荷応力はボルトのない場合 $p=1.05\text{ MPa}$ 、ある場合 $p=2.0\text{ MPa}$ である。

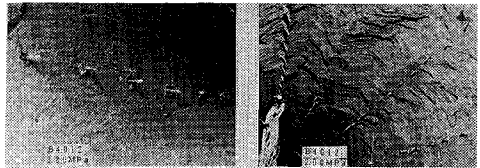
4. 不等圧条件下 ( $K=0.5$ ) でのロックボルトの補強効果と最適パターン

$K=0.5$ では $K=1.0$ と異なった挙動を示した。変形は鉛直方向が水平方向より大きい、破壊は側壁部に生ずる。

(1) 内空変位に見られる効果



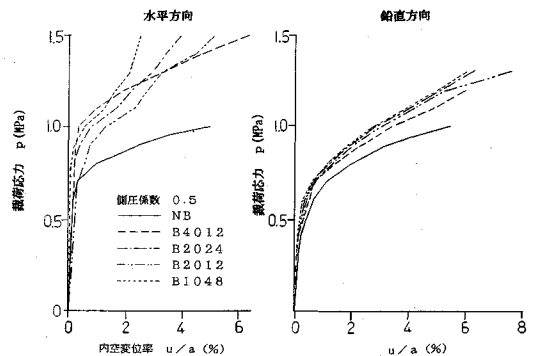
図—9 壁面の変状状況 ( $K=1.0$ ,  $p=1.05\text{ MPa}$ )



図—10 壁面変状の進行状況 ( $K=1.0$ , B4012)

表—4 崩落とひび割れの深さ ( $K=1.0$ )

| パターン          | NB    | B4012 | B2024 | B2012 | B1048 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 崩落部の深さ(cm)    | 10    | 5     | 2-3   | 2-4   | なし    |
| ひび割れ領域の深さ(Cm) | 20-25 | 10-15 | 5-10  | 5-20  | 1-2   |



図—11 载荷応力と内空変位率の関係 (支保パターンでの比較)

内空変位率の比較を、 $K=1.0$ の場合と同様の手法で修正したものについて図—11に示す。すなわち、S-6試験体のB2024とS-7、S-8試験体のB2024との変化率によりB2012、B1048を修正したものである。

まず、全体的に水平変位と鉛直変位を比較する。鉛直変位は载荷応力の小さい段階から漸増し常に水平変位より大きい変位を示したが、安定している。水平変位は $p=0.7\text{ MPa}$ 付近までほとんど生じていないで、その後発生し、 $p=1.0\text{ MPa}$ 付近から急増し不安定な動きを示した。

次にパターン別の比較を行う。 $K=0.5$ の場合も、ロックボルト総量を同じくした比較において短いロックボルトを数多く用いたものの変位が小さい。また同じボルト長の場合の本数の差による変位の差も明らかである。なおこれらの差は水平変位に関してより明確である。

(2) 地山内変位にみられる効果

試験体 S-5～S-8のトンネル壁面よりの深さ2 cm、

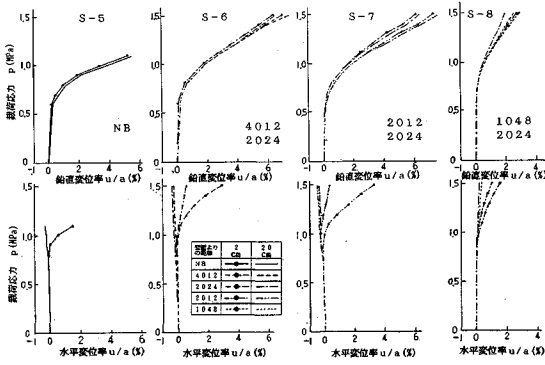


図-12 载荷応力と地山内変位率の関係 (K=0.5)

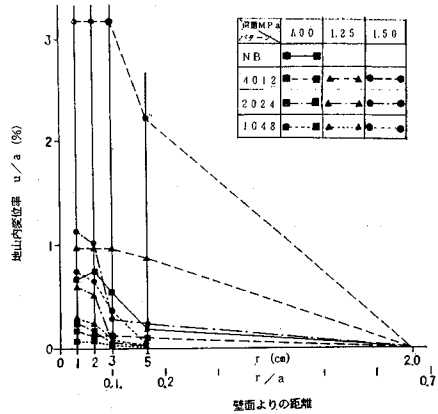


図-13 地山内変位分布図 (S-8)

20 cm での载荷応力  $p$  と地山内変位との関係を図-12 に示す。

鉛直方向変位を見ると各試験体とも深さの違いによる変位の差はほとんどなく地山は一体となってトンネル内空側への移動が生じている。ボルトパターンの違いによる比較をすると、無支保の場合荷重が地山強度付近 ( $p = 1.0$  MPa) になると急激な変位の増大がみられるが、ボルトのある場合はボルトパターンに関わりなくお安定した増加を示した。一方、水平相対変位を見ると、各試験体とも  $p = 0.8 \sim 0.9$  MPa までは、深さ 2 cm、20 cm ともほとんど変位しない。逆に S-5 ~ S-7 試験の結果では若干地山内に押し込まれており、これは鉛直・水平の荷重比から弾性的な拳動として十分考えられる。载荷応力が 1.0 MPa 以上になると、トンネル周辺地山の破壊により深さ 2 cm 位置の地山内変位は内空側への変位を示した。

ボルトパターンの違いによるトンネル支保効果は、試験体 S-6 で B2024 と B4012、S-7 で B2024 と B2012、S-8 で B2024 と B1048 が比較できる。壁面より 2 cm 位置での変位を  $p = 1.5$  MPa において比較する。ボルト総延長を同じくする B4012、B2024、B1048 を B2024 を基準として比較すると変位比率は、5.0 : 1.0 : 0.64 でありここでも短いボルトが有効との結果となった。B2024 と B2012 すなわちボルト長を同じくし本数を 1/2 とした場合の比較は、S-7 によって行っており、内空変位については、大きな差とは、ならなかったが、水平方向、地山内変位については、深さ 2 cm 位置では 9.4 倍となり、ボルト本数の増えた効果を十分に表している。倍率については確かではないが効果のあったのは確かである。深さ 20 cm 位置で比較すると地山がまだ破壊されていないため、ボルトパターンによる差はほとんど認められない。

地山内変位の分布を深さ 20 cm 位置を基点として修正し図-13 に比較する。この図の  $p = 1.0$  MPa のデータよりボルトありの効果が十分認められる。B4012、

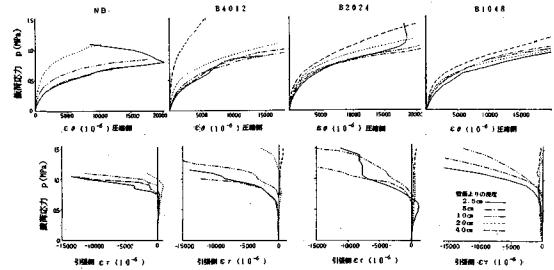


図-14 载荷応力と地山内ひずみの関係 (K=0.5)

B2024、B1048 の比較では、B4012 の地山内変位が著しく大きく、効果が劣ることを示している。B2024 と B1048 の比較では大差はないものの B1048 の変位が小さく効果的であることを示している。

(3) 地山内ひずみに見られる効果

試験体 S-5、6、8 の側壁部での  $p$  と  $\epsilon_\theta$ 、 $\epsilon_r$  の関係を図-14 に示す。まず、ボルトのない場合の NB について見ると  $\epsilon_\theta$  は  $p$  の増加に伴い、全般的に圧縮側のひずみが増大する。深さ 2.5 cm では  $p = 0.8$  MPa でピーク値を示し、その後減少に転ずる。 $\epsilon_r$  は  $p = 0.65$  MPa 付近より壁面に近い位置より順に急激に引張ひずみが発生する。深さ 20 cm でも  $p = 0.9$  MPa で圧縮ひずみのピーク値を示し、以後ひずみの方向が反転した。これはゲージの近傍の他の位置においてクラックが発生しひずみを吸収するため、ゲージ位置でひずみが減少する現象であろう。これより  $p = 0.9 \sim 1.0$  MPa 付近では地山の破壊が深さ 20 cm 位置まで達したことが分かる。

次にボルトのある場合で B4012 について見ると、 $\epsilon_\theta$  は、NB と同様、 $p$  の増加に伴い圧縮側のひずみが増大する。深さ 2.5 cm では  $p = 0.6$  MPa 付近より一度増加率が減ずるが、 $p = 0.85$  MPa 付近より急激に増大する。これは、ゲージが直接ひび割れ現象を捉えたものである。 $\epsilon_r$  は深さ 2.5 cm、5 cm で引張ひずみとなり、 $p$  の増加に伴い引張ひずみが増大する。深さ 10 cm、20 cm 位置

のひずみも同様の傾向であるが引張ひずみとなる荷重点は10 cmでは $p=0.7$  MPa, 20 cmでは $p=1.15$  MPaである。深さ40 cmのひずみは, $p=1.5$  MPaでも圧縮ひずみである。

B2024では, $\epsilon_\theta$ はB4012とはほぼ同様の安定な挙動を示した。深さ2.5 cmのひずみは, $p=0.9$  MPaまでは5 cm, 10 cmのひずみと同様の動きを示したが, 0.95 MPa以降は, 異なった動きとなり, 1.15 MPa以降は, 減少に転じ破壊現象を示した。 $\epsilon_r$ は浅い位置より順に引張ひずみとなる。深さ2.5 cmでは, $p=0.55$  MPa付近で一度圧縮ひずみのピークを示し, その後引張ひずみの方向に転じた。5 cmでは $p=0.55$  MPa, 10 cmでは $p=0.75$  MPa付近より引張ひずみとなった。しかし深さ20 cm, 40 cmのひずみは, $p=1.5$  MPaでも圧縮ひずみのままであった。

B1048では, $\epsilon_\theta$ は前2ケースと同様安定な挙動を示した。 $\epsilon_r$ は全領域で引張ひずみを示しているが初期応力段階および20 cm, 40 cmについては全段階でそれは微小であり0と考えるべきであろう。深さ2.5 cmでは $p=0.7$  MPa付近から, 5 cm, 10 cmでは $p=0.8$  MPa付近から引張ひずみとなった。

以上のように $\epsilon_\theta$ ,  $\epsilon_r$ は, ボルトの有無およびパターンにより変化し, ボルトによる補強効果は十分認められる。

ボルトの使用総延長を同じくする場合, 短いボルトを数多く用いたパターンで, 引張ひずみを生ずる領域の深度が浅くなり, ここでも短いボルトが有効となった。

(4) 地山内応力に見られる効果

試験体S-5, 6, 8の側壁部における $p$ と $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_r$ の関係を図-15に示す。

ボルトのない場合のNBについては, $\sigma_\theta$ は $p$ の増加に伴い $p=0.7$  MPaまでは全測点とも増加するが, $p=0.7\sim 0.9$  MPaの範囲で深さ2.5から10 cmの $\sigma_\theta$ は順次ピークを示し以後急激に低下する。20, 40 cmではそのまま増加している。一方, $\sigma_r$ は $p=0.5\sim 0.55$  MPaで深さ2.5, 5, 10 cmにおいてピークを示し, その後急激に低下する。 $p=1.0$  MPa付近になって深さ20 cmの $\sigma_r$ も低下の方向に転じたが, 深さ40 cmの $\sigma_r$ は $p=1.0$  MPa以上でも増加傾向は変わらない。これらの地山内応力の挙動は, NBでは, $p=0.55$  MPaで深さ20 cmまで地山の破壊が進行したことを示している。

ボルトのある場合, まずB4012については $p$ の増加に伴い $\sigma_\theta$ は増大し, $p=0.55$  MPa付近で深さ2.5 cm, 5 cmの $\sigma_\theta$ は第1回目のピークを示したが, 急激には低下せず, その後再び増加の傾向となり $p=0.9$  MPaで第2回目のピークを示し, 以後が低下の傾向となった。深さ10 cm位置の $\sigma_\theta$ は $p=1.1$  MPa付近でピークを示したが深さ20 cm, 40 cmの $\sigma_\theta$ は増加傾向が変わらな

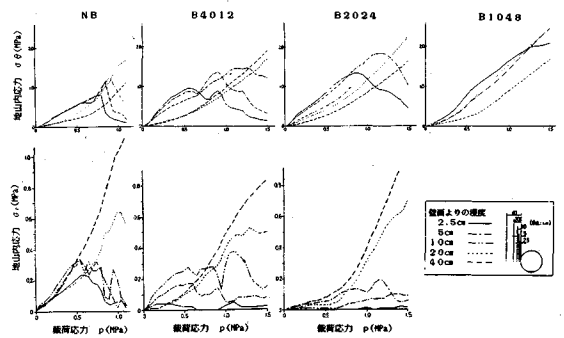


図-15 載荷応力と地山内応力の関係 (K=0.5)

かった。 $\sigma_r$ も深さ2.5 cmの $\sigma_r$ の値が小さいものの, 全般的には $\sigma_\theta$ とほぼ同一の挙動を示した。NBと異なり, ピークが二度生ずるのは, 一度地山は破壊するが, ボルトの効果により再び一体化され応力は増加を示し, $p$ が0.9 MPa付近になるとボルトの付着力が低下しボルトが滑り始めるため破壊が再び進行し応力が低下するものと考えられる。深さ5 cmでの応力のピーク値を見ると, 第2回目は第1回目の約1.4倍となる。

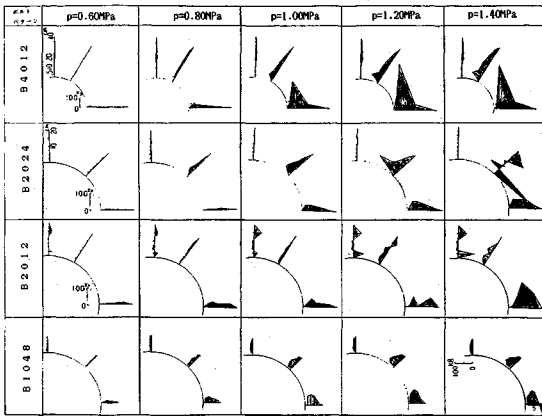
次にB2024はB4012とは, 明らかに異なった挙動を示した。 $\sigma_\theta$ はNB, B4012でピークが見られた $p=0.55$  MPaを越えて増加し続けるが, $p=0.85$  MPa付近で深さ2.5 cmの $\sigma_\theta$ がピークを示し, 以後徐々に低下した。 $p=1.15$  MPa付近になり深さ5 cmの $\sigma_\theta$ もピークを示し, 以後低下の方向に転じた。深さ10 cmの $\sigma_\theta$ は $p=0.8$  MPaで土圧計不良となったが, 深さ20, 40 cmの $\sigma_\theta$ は $p=1.5$  MPaまで増加傾向が変わらなかつた。 $\sigma_r$ は, $p$ の増加に伴い増加傾向を示したが, 深さ10 cmまでは, かなり小さな値を示した。

パターンB4012とB2024を比較すると, 深さ2.5 cmで $\sigma_\theta$ がピークを示したのは, B4012で $p=0.55$  MPa, B2024で $p=0.85$  MPa, 深さ5.0 cmでB4012で1回目が $p=0.55$  MPa, 第2回目が0.9 MPa, B2024では $p=1.15$  MPaとなり, 明らかにB2024すなわちボルト本数を多く用いた方がトンネル支保効果が大きいといえる。 $\sigma_\theta$ のピーク値を比較すると, 深さ2.5 cmで $\sigma_\theta$ の値がB2024はB4012の約1.5倍, 深さ5.0 cmで同じく約1.3倍となった。

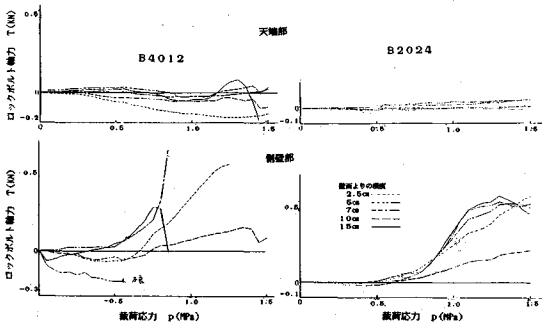
B1048については, $\sigma_\theta$ のみしかデータは得られていないが, 前2者とさらに異なった挙動を示した。すなわち載荷応力 $p=1.5$  MPaまでの全荷重域にわたり全測点の地山内応力が安定して増加傾向を示した。深さ2.5 cmの $\sigma_\theta$ についても1.25 MPa以降は増加率は減少するものの, またピークは示していない, 最大値を見ると深さ2.5 cmでB1048の最大値がB2024のピーク値の約1.6倍になった。

このように地山内応力のデータからも最短の10 cm





図—16 ロックボルトの軸力分布 ( $K=0.5$ )



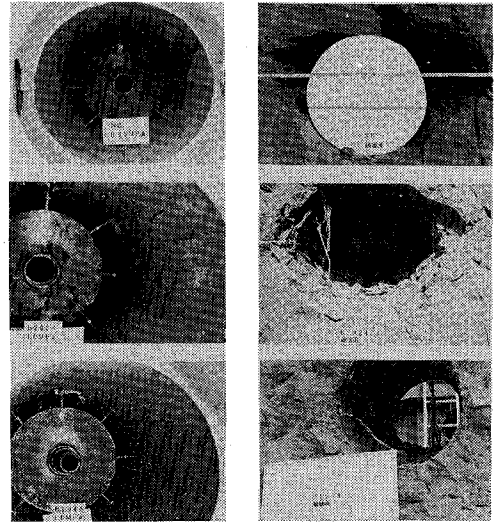
図—17 荷重応力とロックボルト軸力との関係

のボルトを数多く用いるパターンが有効であるとの結果が得られた。

(5) ボルトの軸力にみられる効果

図—16に全ボルトパターンにたいする軸力分布図を示す。

全パターンを通して見られることは、まず等圧下試験と同様に  $p=0.6$  MPa ではほとんど軸力を発生していないことである。次に側圧係数 0.5 の場合の特徴的なこととして、天端のボルトはほとんど軸力を発生しないか、逆に圧縮力を生じる傾向にあることである。図—17に  $p$  とボルト軸力との関係を示すが、この図において上記の事柄はより明かである。図—17により B4012 と B2024 について個々の動きをさらに詳細に見る。まず B4012 については、側壁部のボルトの軸力は、 $p=0.6$  MPa 付近より急激に増大し、そのピーク値は、 $p=0.75$  MPa で深さ 2.5 cm に発生し 0.29 kN、 $p=1.0$  MPa で計器不良による不明な点があるが、深さ 20 cm 位置でも 0.31 kN あり、かなり大きな引張力が働いている。これに対し天端部のボルト軸力は  $p$  の全領域ではほとんど 0 であり、むしろ圧縮側になっている。次に B2024 について見ると発生軸力の傾向は B4012 と同様であるが、全般に B4012 より小さい。 $p=0.75$  MPa で引張軸力のピー



図—18 壁面状態 ( $K=0.5, 1$  MPa)

図—19 試験終了後の破壊状態 ( $K=0.5$ )

表—5 崩落とひび割れの深さ ( $K=0.5$ )

| パターン          | NB  | B4012 | B2024 | B2012 | B1048 |       |
|---------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 崩落部の深さ(cm)側壁部 | 20  | 5     | 2-3   | 6-8   | なし    |       |
| ひび割れ領域の深さ(cm) | 側壁部 | 25    | 20    | 12-14 | 16-20 | 10-11 |
|               | 天端部 | 10    | なし    | なし    | なし    | なし    |

ク値は深さ 10 cm 位置に発生し 0.01 kN、 $p=1.0$  MPa で深さ 2.5 cm 位置に発生し 0.35 kN となった。

等圧試験の時にも見られたが、両者を比較すると B4012 では、軸力の軸方向分布に大きな変動があり不安定であるが、B2024 では滑らかであり安定している。これは地山の破壊状態を反映するものと考えられる。側圧係数  $K=0.5$  の場合、側壁部ボルトには大きな引張力が発生し、天端部ボルトには逆に圧縮力が発生する。次節における破壊の観察と対比すると、側壁部は破壊してクラックが発生しているが、天端部はほぼ健全な状態で推移している。これらの現象から側圧係数が小さい場合、天端部のボルトは省略し得るものと考えられる。

(6) 破壊状況に見られる効果

図—18にNB破壊時の  $p=1$  MPa 付近のトンネル壁面の状態を示す。NBでは側壁部のくさび型破壊による押し出し変形が発生している。ボルトがこれを拘束しようとしていることがよく分かるが、B2024 ではかなり変形が目だつものに対し、B1048ではまだ少ない。図—19は破壊 ( $p=2.0$  MPa) 後の状態を示す。NBでは深くさび型破壊が発生しているのに対し、B1048ではこのような破壊は全く観察できずわずかに表面が剥落している程度である。

破壊後の観察による崩落とひび割れの深さを表—5に示す。 $K=0.5$  の場合は側壁部と天端部の変状状態が全く異なるのが特徴である。天端部の崩落は発生してい

い。

## 5. ま と め

ロックボルトによるトンネル補強の有効範囲を明らかにし、地圧状態に応じた有効なロックボルトのパターン(長さ、本数、位置)を明らかにするため、2.5×2.5×2.4 mの模擬地山の中心に設けられた径60 cmのトンネルを各種のロックボルトパターンで補強し、載荷試験を行った。側圧係数は $K=1.0, 0.5$ の2種類について行った。模擬地山は $q_u=1.0$  MPaの等方等質材料である。完全に破壊したと看做せるところまで載荷し、無補強の場合約1.0 MPa、補強された場合は、1.5~2.0 MPaとなった。ボルト長は40, 20, 10 cmの3種類とし、ボルト本数は基本的には総ボルト延長が同じになる様に選んだ。

得られた主な結果は次の通りである。

### (1) ボルトの有効な地圧条件

ボルトの有無により内空変位に差の出始める載荷応力レベルおよびボルトに軸力が発生がみられる載荷応力レベルはほぼ同じで、次の通りである。

$K=1.0$ では $p>0.4$  MPa、 $K=0.5$ では $p>0.5$  MPa  
地山強度比で見ると

$K=1.0$ では $q_u/p<2.0$ 、 $K=0.5$ では $q_u/p<2.5$

この範囲でボルトは有効である。逆に $q_u/p>2.0\sim 2.5$ では、ボルトは一般的には効果がない。

この時の内空変位率 $u/a$ は

$K=1.0$ では  $u/a=0.3\%$

$K=0.5$ では 天端 $u/a=0.1\%$  側壁 $u/a=0.05\%$

(2) ボルトパターンにより有意差の生じた地圧条件  
変形等に有意差の現れた地圧条件は、次の通りである。

$K=1.0$ では $p>0.4$  MPa、 $K=0.5$ では $p>0.5$  MPa  
地山強度比で見ると

$K=1.0$ では $q_u/p<1.43$ 、 $K=0.5$ では $q_u/p<1.67$

このときの内空変位率 $u/a$ は

$K=1.0$ では  $u/a=0.5\%$

$K=0.5$ では 天端 $u/a=0.2\%$  側壁 $u/a=0.1\%$

### (3) 破壊形態

$K=1.0$ の時は全周にわたり薄片状にせん断破壊する。 $K=0.5$ では、側壁部に深くくさび型のせん断破壊領域が生ずるが、天端はほとんど破壊しない。せん断クラックはほとんどボルトの頭部よりはじまり頭部に終わる。このためボルトが少なく、間隔の大きいものでは、クラックの深度が深くなっている。一般的にボルトにより補強されると完全な崩壊は $p=2q_u$ でも生ぜず、非常に粘りのある構造となる。

### (4) 破壊域の深さ

NBとB4012では、破壊域が10 cmを越え20 cm付近まで及んだが、ボルトにより有効に補強されたB2024, B1048では10 cm~12 cm、半径の40%以内におさまった。

### (5) 側圧係数0.5の場合の特異な挙動

a) 水平内空変位は $p<0.6$  MPaでほとんど0であるが、これを越えると急激に増加する。

b) 天端部のロックボルト軸力はほとんど発生しない。

c) 破壊の形態は側壁部のくさび型の押し出し変形であり、天端部にはほとんどクラックの発生はない。

### (6) 合理的な設計パターンの提言

a) 1.0~1.5 mの短いボルトを数多く用いるパターンの採用

b) 側圧係数が小さい場合、天端部のボルトの省略

上記の結果は不連続面を含まない連続性岩盤についてのものであり、不連続性岩盤の場合にはその方向規模に応じてパターンを修正すべきことを付言する。

本試験についての解析値との比較、またトンネル掘削方式試験について今後引き続き発表して行く予定である。

(1990.4.23 受付)

## THE EXPERIMENTAL STUDY ON THE REINFORCING EFFECT OF ROCK-BOLT AND ITS OPTIMUM DESIGN AS TUNNEL SUPPORT

Takashi TUCHIYA

Loading tests are performed using various patterns of rock bolts in a 60 cm diameter tunnel bored through 2.4 m model ground to study the tunnel-reinforcing effect of rock bolts and establish an optimum pattern of rock bolts. Two forms of loading are implemented using side pressure coefficient of 1.0 and 0.5.

The model ground consists of low-strength sandy mortar with uniaxial strength of about 1.0 MPa and internal friction angle of about 25°. the rock bolts in length 10~40 cm are placed at 8 cm intervals with 12~48 bolts per a face.

Within the extent of the above-mentioned experiments, it is proved that the rock bolts pattern using large numbers of short bolt are effective on the condition that the total length of bolts are same.