

(74) 近接トンネルにおけるロックボルトの 補強効果に関する研究

九州大学工学部	正 員 江崎哲郎
九州大学工学部	正 員 蔣 宇静
九州大学大学院	学生員○阿部浩二
住友建設(株)	正 員 大久保達也

Study on the Reinforcement Effect of Rockbolts in the Adjacent Tunnels

Tetsuro ESAKI, Yujing JIANG and Koji ABE
Kyushu University
Tatsuya OKUBO
Sumitomo Construction Co., Ltd.

Abstract

It is experimentally clarified that the stability of adjacent tunnels is improved by the anchored rockbolts, after examining the mutual influence and stability of tunnels excavated adjacently using the base friction model test. The rockbolts in the experiment are modeled with the consideration of their mechanical properties and similarity laws. First, in the case of excavating a single tunnel, the optimum density of bolts which can stabilize the rock mass around the tunnel is experimentally decided. Second, in the case of the adjacent tunnel be excavated parallel to the existed tunnel reinforced by the same density of bolts, the behavior of surrounding rock mass and the pillar between the both tunnels are clarified and the adaptation to the density of rockbolt in the adjacent tunnel is verified. Moreover, by changing the distance between the centers of double tunnels, the optimum anchored densities of bolts are clarified quantitatively.

1. はじめに

近年、トンネルや備蓄貯蔵、電力施設など、地下空間の開発利用が大きな注目を集めている。今後の地下開発利用では、複数のトンネルが立体的に錯綜する場合が多くなることが想定され、従来のように単一のトンネルとしての検討ではなく、近接する複数のトンネルの相互影響を考慮した上、安定性と支保設計を検討する必要がある。しかも、トンネル相互の位置関係や、各トンネルを掘削する順序により、既設トンネルおよび新設トンネルにおよぶ影響に差異が現れることも予想される。しかし現在のところ、理論的実験的にまだ十分には解明されておらず、近接施工の新規の掘削が既設トンネルに及ぼす影響、その場合の設計、施工方法や監視方法が問題となる事例が多数報告されている。

トンネルを近接して施工する場合は、相互に力学的に悪影響を及ぼさない十分な距離を持たせるのが一般的であるが、①トンネル周辺の用地取得、②設計上の制約、③工事費、維持管理費の増大の点で、近接した

配置にせざるを得ないことがある。しかし、近接してトンネルを掘削する場合は、周辺地盤、既設構造物と新たに設けられるトンネルとの三者の相互作用であり、さらに、それらに様々な不確定要素が含まれているため、その相互の影響を定量的に評価することは困難である。また、近接トンネルの間に設けられるピラー部の安定性を向上させるために打設されるロックボルトの力学的効果の解明や、その力学的効果を十分に考慮した、適切な設計法はまだ確立されていない。

本論文は、並行して近接されるトンネルにおいて、ロックボルト打設による近接トンネルの安定性の向上効果を模型実験的に明らかにし、合理的な近接施工法を提案検討するものである。模型実験では、まず、単一トンネルにおける最適なロックボルトの打設パターンを求めて、それを近接した2本のトンネルに適用する実験を行い、近接施工によって周辺岩盤の補強効果に対する影響を調べ、さらに、ピラー部のロックボルトの打設密度を変化させることによる安定性の変化や

中心間距離を変化させることによる相互の影響度合いを評価し、合理的な中心間距離およびロックボルトの打設パターンを定量的に明らかにする。

2. 模型実験方法

模型実験は、江崎らによって開発された底面摩擦模型実験装置を用いて行う¹⁾。模型材料には、硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンを重量比で、70:24:9の割合で配合し、単位体積重量が 1.9g/cm^3 になるように、材料を 4.5kgf/cm^2 の空気圧で締め固める。締め固める際に、あらかじめトンネルを掘削する位置に外形が模型トンネル形と同じ円形のスチール製の枠を入れておき、その枠を抜き取る。また、材料の力学的特性は、一軸圧縮強度 1.53kgf/cm^2 、ヤング率 500kgf/cm^2 、粘着力 0.92kgf/cm^2 、内部摩擦角 32.8° であった。幾何学的スケールを100~150、力学的スケールを2.87としたため、一軸圧縮強度 4.54kgf/cm^2 、ヤング率 1485kgf/cm^2 、粘着力 2.73kgf/cm^2 、内部摩擦角 32.8° の現時盤が想定される。また、力学的スケールから決定される所定の空気圧を模型材料の表面にかけ、模型の両側から側圧係数が0.5になるように側圧をかける。

3. ロックボルトのモデル化

(1) モデル材料

一般に、ロックボルトの補強効果は、ボルトと岩盤の相互作用による軸力に支配されていると考えられる。このことから、ロックボルトをモデル化するには、軸力を模型内で忠実に再現するために、ヤング率と引張強度に着目する必要がある。本模型実験の力学的スケールでは、原型のロックボルトを異形鉄筋（ヤング率 $2.1 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、引張強度 49kgf/mm^2 ）とすると、アルミ（ヤング率 $7.0 \times 10^6\text{kgf/cm}^2$ 、引張強度 20kgf/mm^2 ）が適当なモデルの材質であることが分かる。

(2) 模型実験におけるボルトの打設方法

ロックボルトの模型への打設については、トンネル掘削後、壁面から打設する方法が実際の現場での打設と同じとなるが、ロックボルトをさし込む際に模型材料に亀裂が入りやすいこと、また、ロックボルトと模型材料との定着力を十分に確保して、補強効果を発揮するための軸力の発生は期待できないことといった問題がある。これらを考慮して、筆者らはこれまで、模型材料表面に市販のアルミ箔を貼るという方法を用いてロックボルトの補強効果を実験的に明らかにしてきた。ところが、この方法もボルトの支保面積や接着力

など、岩盤中に打設する円形断面のロックボルトを忠実にモデル化しているとはいえない。そこで、両者の問題点を解決するために、今回の実験ではアルミ箔の代わりにアルミ棒を用い、そのアルミ棒をトンネル掘削後に打設するのではなく、事前に模型材料内部の所定のトンネル周りの位置に埋設するように模型材料を作成し、トンネル掘削と同時にロックボルトとして作用するようにした。アルミ棒は、模型材料との間に十分な定着力を発生させるために、その表面にエポキシ系接着剤で標準砂を均一に接着させたものを用いた。

(3) ロックボルトの打設密度

径 $20\text{mm} \sim 30\text{mm}$ のボルトを幾何学的スケール100でモデル化すると、 $0.2\text{mm} \sim 0.3\text{mm}$ になり、模型実験において加工や打設が困難となるので、直径 1mm のものを用いることにした。したがって、模型実験におけるロックボルトの幾何学的相似則については、ロックボルトと岩盤との間の接着面積と支保面積（一本のロックボルトが受け持つ面積）に対する比を一定として考えて、以下の換算式を導出した。この式を用いれば、模型実験における打設密度を決めることができる。

$$L_c L_d = (D/d) l_c l_d \Lambda \quad (1)$$

ここで、 L_c 、 L_d 、 D は実際のロックボルトのトンネル周方向および進行方向の打設間隔、ロックボルトの径であり、 l_c 、 l_d 、 d は、模型実験での周方向および延長方向の打設間隔、ロックボルトの径である。また、 Λ は、模型実験の幾何学的スケールである。

4. 単一トンネルにおけるロックボルトの補強効果

(1) 実験モデルの設定

地山岩盤が均質で、直径 10m の円形トンネルが深度 50m のところに掘削された場合を想定している。本実験条件下での最適なボルトの打設密度を求めるために、長さ 4m のロックボルトを放射状に等間隔で12本、15本、18本を打設した場合（配置をFig. 1に示す）の実験を行うことにした。式(1)より実際に換算すれば、ロックボルト径が $D=28.6\text{mm}$ の場合、一本当たりの支保面積は、それぞれ 1.86m^2 、 1.5m^2 、 1.2m^2 である。なお、18本の場合はトンネル標準示方書²⁾に定められた標準支保パターンに相当する。また、補強効果を比較するために無ロックボルト補強での実験も行った。

(2) 打設密度と実験的挙動

Fig. 2に、トンネルの変形状態と周辺岩盤に観察された亀裂の状況を示す。また、亀裂の進展状況および

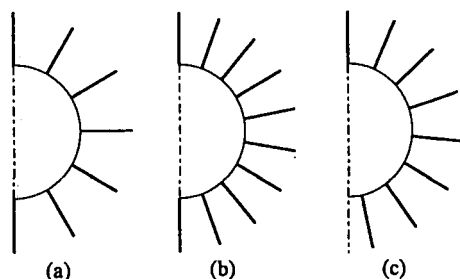


Fig. 1 Bolting patterns in the single tunnel,
(a) 12 bolts, (b) 15 bolts and (c) 18 bolts,
the length of bolts is 4m.

せん断ひずみ分布よりトンネル周辺の塑性領域を推測し併せて示す。無補強の場合(Fig. 2(a))には、次のような挙動が見られた。トンネルの側壁面には円弧状の亀裂が生じ、下方に進展していくにしたがい、剥離してくる現象が見られた。そのために、天盤部も大きく沈下し、トンネルの断面形状は楕円形となった。ロックボルトを12本打設した場合の結果を示すが、無補強の場合と同様に、トンネル壁面には亀裂が入ったあと、剥離現象が見られた。15本および18本を打設した場合(Fig. 2(c), 2(d))は、トンネル壁面上の亀裂なく、トンネルは安定であった。

無補強の場合とロックボルトを打設した場合の実験的挙動を比較すると、ロックボルトを12本打設しても補強効果は見られず、トンネルが不安定となったのに対し、15本および18本を打設することによって、塑性領域の発生やトンネルの変形は効果的に抑制されたため、トンネルの安定性においてロックボルトの補強効果が発揮され、つまり、本実験条件下では、単一トンネルを安定させるためのロックボルトの最適な打設密度は15本程度であると考えて以下の検討を進める。

5. 近接トンネルにおけるロックボルトの補強効果

(1) 実験モデルの設定

モデルは、深度50mに位置する直径10mの既設の円形トンネルの横に、並行して同じ大きさのトンネルを近接する場合を想定する。近接施工における単一トンネルの最適打設パターンの適用性を検証するために、前章の実験で得られた最適打設パターンを近接施工に用いる場合(パターン1)の実験を行った。また、ピラー部に対して、ロックボルトの打設本数を変化させることで新旧トンネルとその周辺岩盤およびピラー部の安定性に対する影響を検討した。Fig. 3には、ロックボ

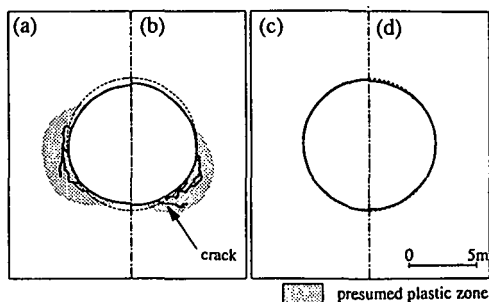


Fig. 2 Propagation of crack and plastic zone,
(a) without bolting, (b) with 12 bolts,
(c) with 15 bolts and (d) with 18 bolts.

トの打設位置を示す。ここで、トンネル水平面から上下方向45°の範囲におけるロックボルトの打設をピラー部に対する補強と定義し、打設本数をパターン1より25%(パターン2)、または50%(パターン3)増加させた実験も行った。この場合、ピラー部では現場でのロックボルト一本当たりの支保面積が、式(1)よりそれぞれ1.12m²、0.94m²を想定していることになる。

近接トンネルの中心間距離に関しては、筆者らが中心間距離を2.0D(Dはトンネル直径)以上離すと、新旧トンネルの相互影響がほとんどなくなり安定することを明らかにしてきた³⁾。そこで、中心間距離を2.0Dより接近させた1.8D、1.6Dの場合について実験を行い、それぞれの最適な打設パターンの実験的解明を試みる。

(2) 実験的挙動

Fig. 4に、中心間距離が1.8Dのときのトンネルの変形形態とその周辺に観察された亀裂の進展状況を示す。また、推定された塑性領域も併せて示す。打設パターン1では、Fig. 4(a)に見られるように、近接してトンネルを掘削することにより2つのトンネルの側壁面には、円弧状の亀裂が入り、トンネル天盤が大きな沈下を生じた。さらに、ピラー部には、トンネルの壁面に生じた亀裂がつながるように水平方向に進展し全体が破壊してしまった。次に、ピラー部に対して打設パターン1よりボルトを25%増加した場合(パターン2)には、亀裂の進展は抑制されトンネルが安定した。

Fig. 5に中心間距離を1.6Dに接近させた場合の実験結果を示す。中心間距離が1.8Dで安定した打設パターン2の場合は、Fig. 5(a)に見られるように、新旧の2つのトンネルともに側壁面に亀裂が生じ、ピラー部には、それらの亀裂がつながるような水平方向の亀裂が進展していく様子が観察された。ピラー部に対する

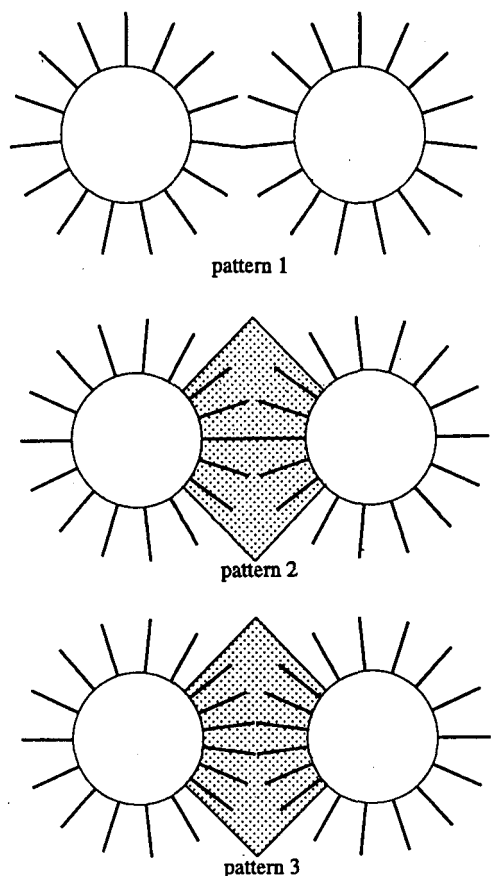


Fig. 3 Bolting pattern in the adjacent tunnels, the length of bolts is 4m.

ロックボルトの打設を打設パターン 1より50%増加させた場合（パターン3）には、Fig. 5(b)のように、既設トンネル側壁面に亀裂が生じたものの、新設トンネルには亀裂が観察されず、ピラー部においても、水平方向に進展する亀裂は生じなかった。

(3) 影響範囲

Fig. 6, Fig. 7にピラー部の中心とトンネルの中心およびその中心から側方の1.0D, 1.5Dの位置における垂直方向測線の各測点の垂直変位をプロットしたものである。なお、この垂直変位は、新設トンネルの掘削による垂直変位のみを示している。また、実線は打設パターン1に、Fig. 6, Fig. 7の波線は打設パターン2および打設パターン3に対応している。ここでは、中心間距離が1.8Dの場合、ピラー部にボルトを増設しない打設パターン1（Fig. 6の波線）の場合、各測線の変位は、トンネル天盤からトンネル直径の2倍程度の位置

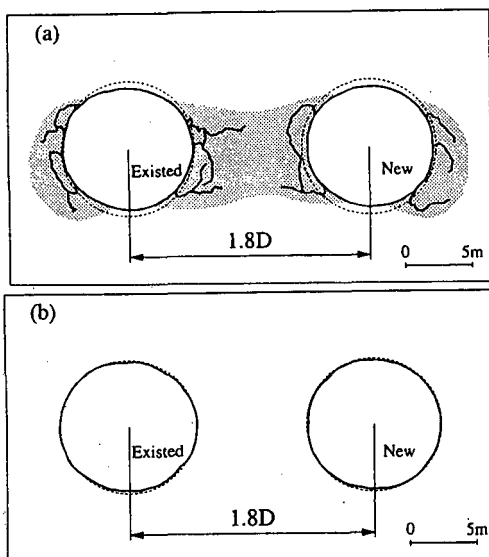


Fig. 4 Propagation of crack and plastic zone, (a) pattern 1 and (b) pattern 2.

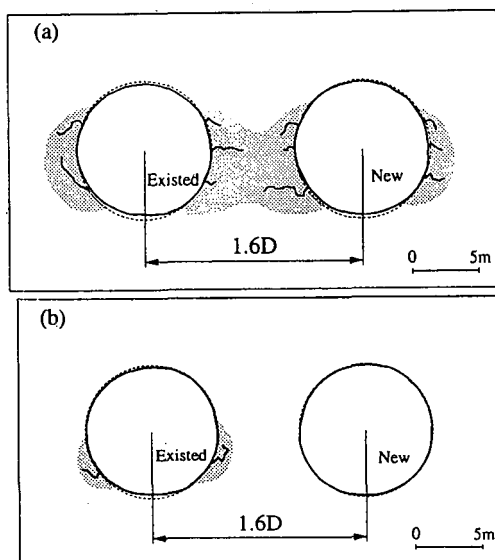


Fig. 5 Propagation of crack and plastic zone, (a) pattern 2 and (b) pattern 3.

にも大きな変位が見られ、横方向上の影響範囲もトンネル中心から1.5D以上に達している。また、新設トンネル側と既設トンネル側の3つの測線を比較すると、新設トンネル側の変位が大きくなっていることが分かる。既設トンネルの掘削によって地山がすでに変形を生じていたためと考えられる。近接施工においては、既設トンネルが再び近接掘削による影響を受けるが、新設トンネルでは、既設トンネルよりもその周辺岩盤が大

きく変形するため、その点を踏まえたトンネル設計が必要であると考えられる。

一方、ピラー部に対するロックボルトの打設を打設パターン1より20%増加させた場合 (Fig. 6の実線) には、ほとんど変位を生じず安定している。また、中心間距離を1.6Dに縮めると、打設パターン2では大きな変位を生じているが、打設パターン1より50%増加させた場合 (パターン3) には、若干の変位は生じているが、かなりの変位を抑制している。これらのことから、単一トンネルにおける最適打設パターンは、近接トンネルに対して適応することは難しく、ピラー部に対するロックボルトの打設を適切に増やすことで中心間距離を縮めることができ、新たにロックボルトの打設パターンを設計する必要があることが明らかである。

6. おわりに

本研究では、トンネルの近接施工におけるロックボルトの補強効果を底面摩擦模型装置を用いて実験的な検討を行った。それによると、単一トンネルの掘削におけるロックボルト補強法については、標準示方書に定められた標準パターンが、地山に対してやや過剰となり、地山条件によって、適切に減らせることがわかる。また、単一トンネルに対するロックボルトの最適打設パターンは、近接トンネルに対して直接的に適応できない。新旧トンネルおよびピラー部の安定性を評価する新たな設計が必要である。とくにピラー部に対するロックボルトの補強効

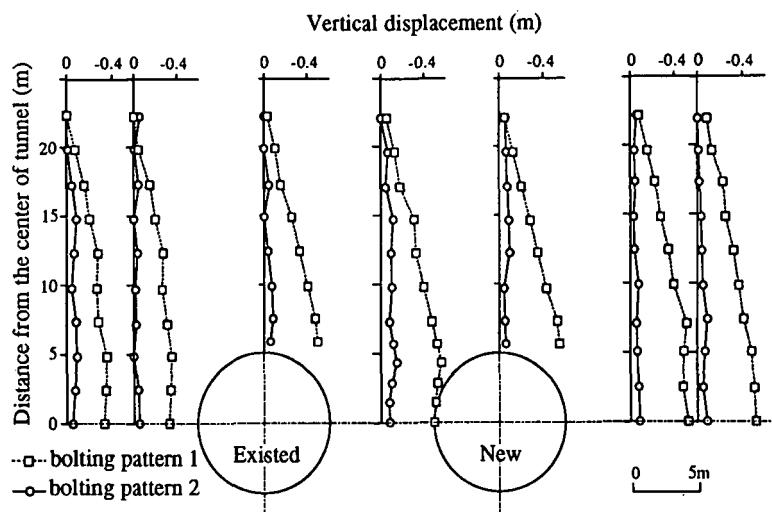


Fig. 6 Vertical displacement on each measuring line, the distance between the centers of adjacent tunnel is 1.8D.

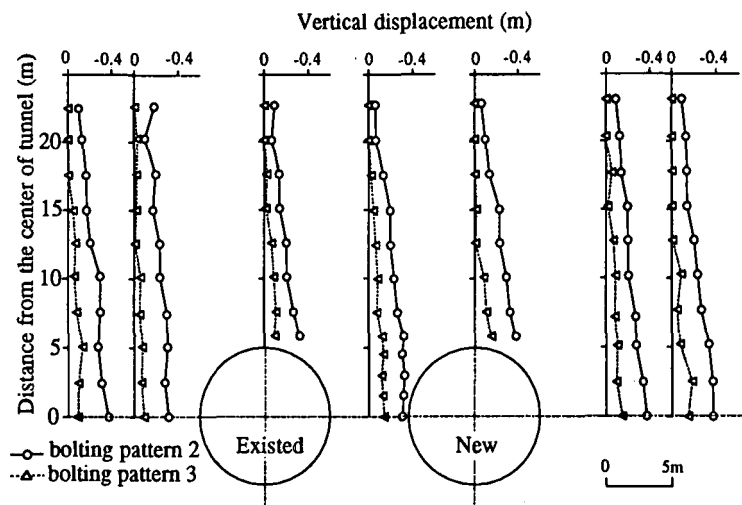


Fig. 7 Vertical displacement on each measuring line, the distance between the centers of adjacent tunnel is 1.6D.

果が大きく異なるため、ピラー部に対する打設本数を適切に設計すれば、中心間距離を縮められるが明らかになった。

参考文献

- 1) 江崎他：大深度地下利用のための定量的模型実験装置の開発，第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 186-190，1990。
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編），1986。
- 3) 江崎他：近接トンネルの安定性の評価と設計に関する研究，土木学会西部支部，pp. 474-475，1994。