

近接トンネルの相互影響の評価について ASSESSMENT OF MUTUAL INFLUENCE IN THE ADJACENT TUNNELS

蒋 宇静¹⁾・江崎哲郎²⁾・末松史朗³⁾・阿部浩二⁴⁾・大久保達也⁵⁾
Yujing JIANG, Tetsuro ESAKI, Siro SUEMATSU, Koji ABE and Tatsuya OKUBO

This study is to quantitatively clarify the mutual influence due to the adjacent excavation near to the existed tunnel by using the base friction model test and the finite deformation difference method. The varied factors included the mechanical character of the ground, the nearness and depth of tunnels. In order to reduce the influence to the existed tunnel, the reinforcement method of pillar between double tunnels is suggested through systematic bolting, and the supporting and stabilizing effect on the extent of failure zone and deformational behavior of surrounding rock mass and pillar is investigated in detail, by changing the pattern and length of grouted rockbolts, according to the distance of adjacent tunnel centers and the competency factor of ground.

Keywords : *adjacent tunnels, distance of adjacent tunnel centers, the competency factor of ground, bolting, mutual influence, pillar stability*

1. はじめに

近年、地下の開発利用が大きな注目を浴びている。これからの地下開発は、既設空間に近接して施工するケースが益々増えてくるであろう。この場合、既設空間は供用されていることが多く、もし工事によって既設空間に変状が発生すると、社会的にも大きな影響を与える。したがって、相互影響を最小限にするための近接施工の設計法の検討は、地下開発利用を有効に進める上でも重要な課題となっている。

トンネルを2本以上併設する場合、あるいは他の構造物と近接する場合、原則として、相互に有害な影響を与えないような中心間距離を持たせるのが一般的である。即ち「地山状況におうじて中心間距離（または中心間隔）を掘削幅の2倍から5倍以上を確保すればほとんど相互に影響がない」とされている^{1), 2)}。しかし、トンネル周辺の用地取得や設計上の制約、工費の節約などの点で、これまで以上に近接した配置にせざるを得ないことがあり、その場合において、既設と新設トンネルの相互影響を正しく評価した上で、設計・施工を行う必要がある。

本研究は、近接トンネルの相互影響とそれらの間のピラー部の変形挙動を模型実験によって基礎的に調べ、つづいて、トンネル相互の位置関係や掘削順序による既設と新設トンネルの受けた影響の違いと、それを低減するためにピラー部に対するロックボルトの補強効果を模型実験と比較しながら大変形解析法によって定量的に解明する。

-
- 1) 正会員 博(工) 九州大学助教授 工学部環境システム工学研究センター
 - 2) 正会員 工博 九州大学教授 工学部環境システム工学研究センター
 - 3) 学生会員 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻
 - 4) 正会員 工修 西松建設(株)
 - 5) 正会員 住友建設(株) 研究所

2. 近接トンネルにおける相互影響の実験的考察

ここでは、並行して施工した2本のトンネルの相互影響について、著者らが開発した底面摩擦模型実験装置³⁾を用いて調べる。

2.1 実験概要

模型実験では、軟岩地山を対象とする模型材料として、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 になるように締め固める。材料の力学的特性は、一軸圧縮強度(σ_c) 0.153MPa 、ヤング率(E) 50MPa 、粘着力(C) 0.092MPa 、摩擦角(ϕ) 32.8° 、ダイレーション角(ϕ^*) 19° である。幾何学的スケールを150、力学的スケールを3.5とした。実験モデルの設定については文献⁴⁾を参照されたい。

トンネルの断面形状は、本研究の対象としている道路トンネルの標準断面形は2心円²⁾であるが、ここでは、同断面積の円形で近似することにし、トンネルの直径(D)は、実際の2車線道路に相当する10mである。深さは50mとする。トンネルを近接して掘削する場合、それぞれのトンネルの安定性の違いを評価するために、初期応力場としての垂直荷重と水平荷重をトンネルの深さに応じて設定した状態で既設トンネル(Existed tunnel)を掘削した後に、これと平行に同じ大きさの新設トンネル(New tunnel)を近接して掘削する場合を想定し、2つのトンネルの中心間距離を $1.6D$ (Case 1)、 $1.8D$ (Case 2)、 $2.0D$ (Case 3)とし、中心間距離による相互の影響を調べる。

2.2 実験結果と考察

Fig. 1は、各ケースについての新設トンネルを掘削した場合の周辺の破壊状況を示す。いずれも、既設トンネルを掘削した時には、周辺地山の破壊に伴うトンネルの天盤の沈下のため、トンネルの断面形状が楕円形となった。トンネルの両側壁面には、円弧状の亀裂が観察された。また、この図から分かるように、トンネルの中心間距離によって新設トンネルの掘削による相互の影響度合いが大きく異なる。Case 1では、既設トンネルの両側面の破壊はさらに進み、新設トンネルにも同様の亀裂が生じた。ピラー部

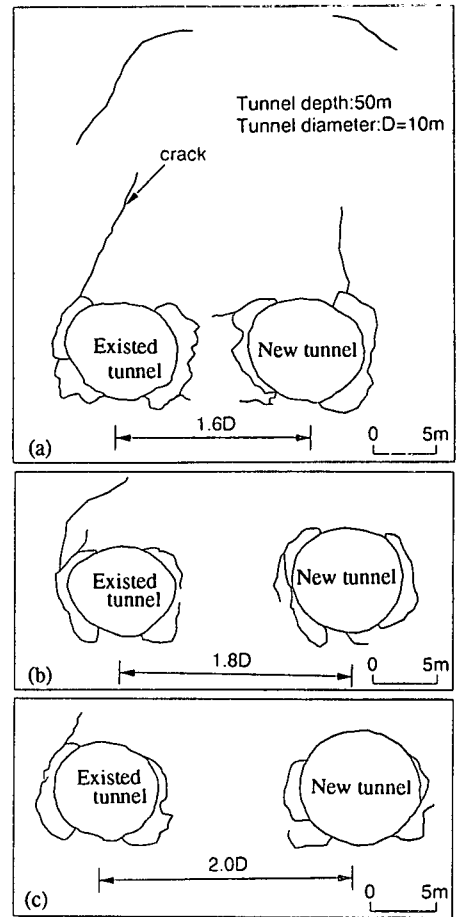


Fig. 1 Propagation of crack, without bolting and the distance between adjacent tunnel centers is (a) $1.6D$, (b) $1.8D$, (c) $2.0D$, respectively.

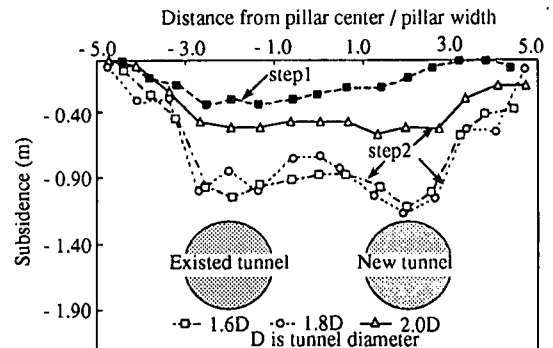


Fig. 2 Subsidence of immediate roof level without bolting (step 1: after excavating Existed tunnel, step 2: after excavating New tunnel).

は、新旧トンネルに生じた亀裂がつながるように水平方向の亀裂が進展し、完全に破壊した。そのために、2つのトンネル全体を覆うように大きなアーチ状の亀裂が観察された。Case 2 の場合は、Case 1 と同様にトンネルの両側面の破壊と天盤部の沈下がみられたが、大きなアーチ状の亀裂は見られなかった。既設トンネルの方が新設トンネルより大きな破壊を生じ、天盤全体が大きく沈下した。Case 3 の場合には、相互の影響がほとんどなくなるため、破壊や亀裂はほとんど進展しなかった、また、ピラー部には亀裂の発生が見られず安定であった。

Fig. 2 は、トンネル天端の高さの水平線上の地山の変位について、新設トンネルの掘削 (step 2) による沈下量と、既設トンネルを掘削した時 (step 1) の沈下量を、併せて示す図である。既設トンネルの掘削により沈下が新設トンネル側までにやや広がったが、新設トンネルを掘削したときには、いずれのケースでも既設トンネルの天盤の沈下量がさらに大きくなり、また、Case 1 よりは Case 2 が、Case 2 よりは Case 3 の方が、ピラー部とトンネル付近の沈下量の差が小さくなっていることがわかる。特に、Case 1 と 2 では、ピラー部の破壊のために垂直方向の支持力をほとんど失い、2つのトンネルがつながったような大きな沈下が見られた。

以上より、ピラー部に対して、特別に補強しない場合には、中心間距離が $1.8D$ より小さくなると、トンネルが相互に大きく影響することがわかる。また、トンネル周辺の地盤が安定となり、過大な沈下を生じない中心間距離は、 $1.8D$ 以上であることがわかる。この模型実験の結果を踏まえ、近接トンネルの相互影響に対する地山条件の影響や、ピラー部の変形挙動に対するロックボルトの補強効果を詳細に解明するために、以下は、大変形解析手法を用いた検討をおこなう。

3. 相互影響の定量的評価

軟岩地山の挙動を数値解析により評価する場合、大変形理論に基づく手法を用いることが必要であると考えられている⁵⁾。しかしながら、岩盤工学分野における既往の研究は、ほとんどが微小変形理論の枠内にあり、これら微小変形理論に基づく従来の解析手法では、軟岩における破壊後のダイレーションやひずみ軟化、塑性流動といった材料非線形性およびそれらに起因する幾何学的な非線形性を明確に表現することは困難である。したがって、本研究では、材料非線形性および幾何学的な非線形性を考慮に入れ、軟岩にも適用できる陽解析法による大変形差分解析コードFLAC⁶⁾を用いることにした。掘削はトンネル壁面上の相当外力を解放させることで表現した。切羽面付近に先行変位が生じたことと切羽面から打設するまでの時間遅れを考えると、ロックボルトはトンネル壁面上の相当外力を 30% 解放させてから打設することにした。

3.1 検討ケース

近接トンネルの相互影響を及ぼす要因として、地山条件のうち、一軸圧縮強度 (σ_c) と初期地山応力 (P_0) の比で定義される地山強度比 (S_p)、近接トンネルの中心間距離 (B_c) およびトンネル深さ (H) が挙げられる。対象とする地山が軟岩であることを考慮して、 σ_c を $1 \sim 10\text{MPa}$ の範囲として、 S_p を $0.5 \sim 3.0$ の範囲で変化させる。他の物性値は、 $E = 500\text{MPa}$ 、ポアソン比 $\mu = 0.3$ 、 $\phi = 35^\circ$ と一定で、また、密度 $\rho = 20\text{kN/m}^3$ 、引張強度 (σ_t) は σ_c の $1/10$ とする。地山の物性値の入力では、まずトンネル深さを設定し、地山強度比に応じて σ_c を決定し、その上で粘着力を求める。トンネル深さは、地表面の影響を受けない深さを考え、 $H/D = 5, 10, 15$ とする。側圧係数はいずれの場合も 0.5 とした。近接トンネルの中心間距離 (B_c) は、最大を $3.0D$ とし、接近させた $2.0D$ 、 $1.8D$ 、 $1.6D$ の 4 ケースについて、相互影響の度合いを評価する。

3.2 地山挙動モデル

軟岩地山の挙動としては、ピーク強度以降においてひずみ軟化およびダイレーションを呈するものとし、Mohr-Coulombの破壊規準に従う。ひずみ軟化が終了して塑性流動状態に入る時の塑性せん断ひずみを 5.0% 、そのときの残留強度は、ピーク強度の 50% とする。ピーク強度後の応力の低下は、内部摩擦角が一定で、粘着力のみを低下させることで表現した。なお、内部摩擦角の低下による効果は今後の解析課題とする。ダイレーション角 (ϕ^*) は軟岩で 25° を用いる。

3.3 相互影響の評価と考察

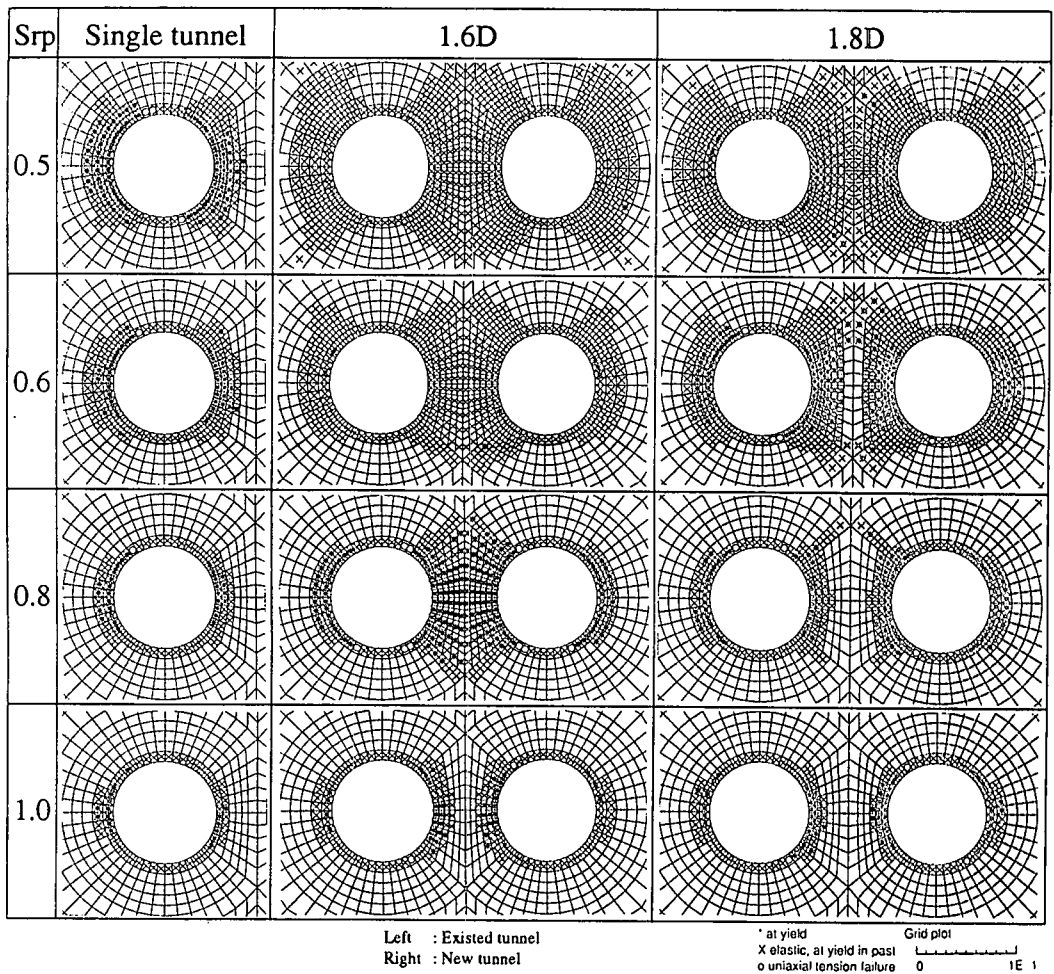


Fig. 3 Plastic zones around tunnels according to the distance of adjacent tunnel centers and the competency factor of ground, S_{rp} , $H/D = 15$.

Fig. 3に $H/D = 15$ における新設トンネル掘削後のトンネル周辺の塑性領域の発生状況を、中心間距離 $1.8D$ 以下の分について示す。比較のために、単一トンネルのみが掘削された場合の状況も合わせて示す。地山強度比が小さくなるに従い、また、中心間距離が接近するに従い、塑性領域はピラー部全体に広がり、さらに近接トンネルの両側方にも進展していく。特に、中心間距離が $1.8D$ 以下に接近し、 $S_{rp} < 0.8$ の場合では、塑性領域がピラー部全体に広がっていることが分かる。また、ピラー部に発生する塑性領域は、スプリングラインを中心とした上下約 50° の範囲に集中している。

ここで、ピラー部に発生する塑性領域の規模を定量的に検討するために、ピラー部での、スプリングライン上に沿って生じた塑性領域の幅のピラー幅に対する割合を塑性領域比 P_b と定義する。つまり、 $P_b = 1$ になればピラー部全体に塑性領域が広がることになる。

Fig. 4 には、各 H/D での P_b と S_{rp} , B_c の関係を示す。 $S_{rp} > 1.5$ と $H/D \leq 10$ の場合には、いずれの深さの場

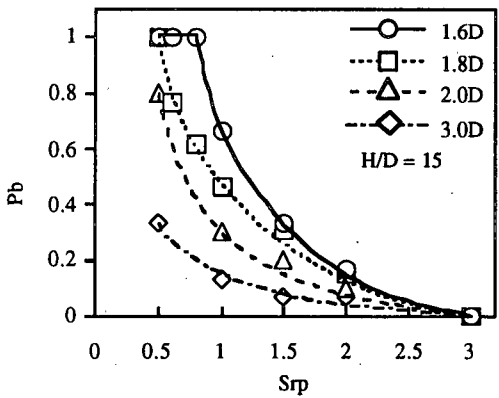
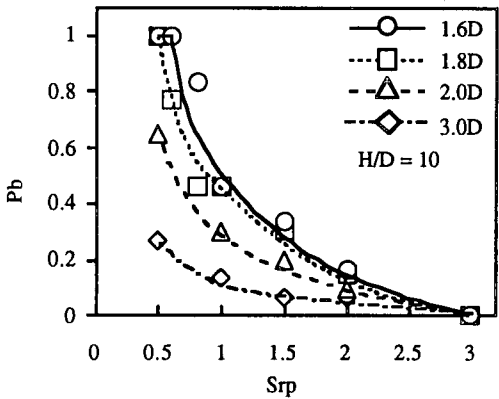
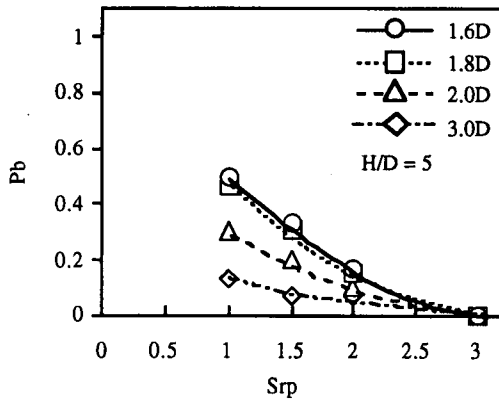


Fig. 4 Relationship between the ratio of maximum width of plastic zone to pillar width, P_b and the competency factor of ground, S_{rp} .

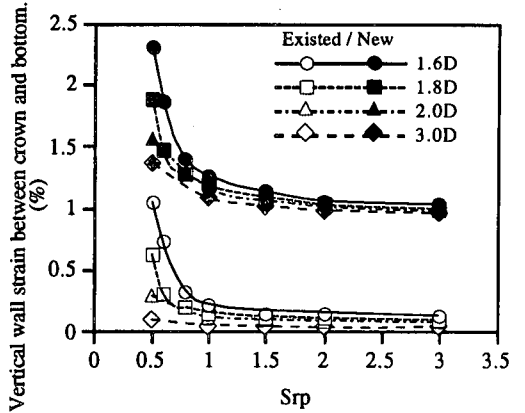
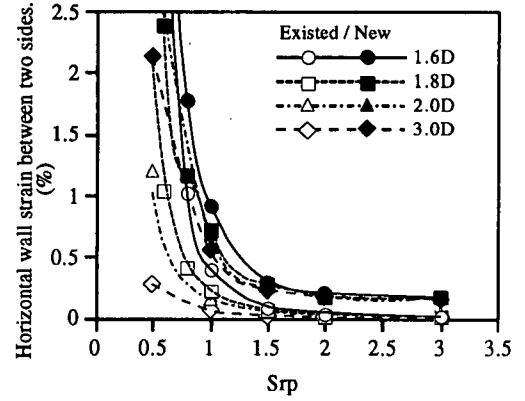


Fig. 5 Relationship between the tunnel wall strains and the competency factor of ground, S_{rp} .

合でも、塑性領域比の値に大きな差はなく、地山強度比が大きくなるに従って、 P_b は減少し、 $S_{rp} > 3.0$ では $P_b = 0$ となる。しかし一方、 $H/D > 10$ では、同じ地山強度比に対しても中心間距離が短くなるほど、また、 $S_{rp} < 1.5$ となると、塑性領域比が著しく大きくなり、ピラー部が不安定になることが分かる。とくに、 $S_{rp} < 0.8$ 、 $H/D > 10$ で、中心間距離が1.6Dと接近すると、ピラー部が完全に塑性化する。さらに、 $S_{rp} = 0.5$ となると、中心間距離を2.0Dと設けても、ピラー部の幅範囲には6割以上が塑性破壊を生ずる。これらの結果から、ピラー部の安定性と相互影響には、中心間距離と地山強度比に大きく支配され、また、トンネルの深さによって影響度合いが変わることが分かる。

Fig. 5は、 $H/D = 15$ について、既設と新設トンネルの両サイド間壁面ひずみおよび天盤下盤間壁面ひずみと地山強度比との関係を示す。ここでのひずみは、新設トンネルの掘削によって生じた壁面ひずみの増加量を示している。塑性領域比と同様に、 $S_{rp} < 1.5$ ではひずみが急激に増加し、特に、中心間距離が接近しているほどその増加は大きくなっている。このことから、既設トンネルが新設トンネルの掘削の影響で、地山強度が弱いほどダメージを受けやすいことが分かる。逆に、 $S_{rp} > 1.5$ の場合では、既設トンネルのひずみ増加量がほぼゼロに近づき、また、新設トンネルのひずみはどのケースもほぼ一定値に近づく。また、既設ト

ンネルにおいて生じるひずみと新設トンネルにおけるひずみを比較すると、新設トンネルの方が既設トンネルの方よりも両方向ともに大きく、また、壁面ひずみが大きくなったケースでは、天盤下盤間のひずみよりも両サイド壁面間のひずみが多い。これは、近接トンネルが相互に影響し、ピラー部が塑性破壊を生じ壁面の押し出しが顕著となるためであり、その押し出しを抑制することが近接トンネルの相互影響の低減と安定性の向上につながると言える。

4. 近接トンネルの安定性におけるロックボルトの補強効果

4.1 検討ケース

近接トンネルの支保設計を行う上で最も重要となるのは、近接トンネルの安定性に対して直接的に影響するピラー部に対する補強であると考えられる。とくに、ダイレーションに伴う内空への押し出しを抑制するためにピラー部に対してロックボルト支保工による補強を考え、地山条件に応じるロックボルトの打設パターンと長さの効果について検討する。

ここでは、 $H/D = 15$ について、中心間距離は、相互影響が顕著に現れる中心間距離 $1.8D$ と $1.6D$ の2ケースについて、地山強度比は特に $S_p \leq 0.8$ の場合に注目した。ピラー部の補強に用いたロックボルトの打設パターンとしては、スプリングラインを中心に上下 45° の範囲に打設するとし、基本パターンのパターン1は既設と新設トンネルの円周に等間隔で長さ4mのロックボルトを20本打設し、これよりはピラー部においてロックボルトの本数を40% (パターン2)、60% (パターン3)、80% (パターン4)、100% (パターン5) 増設した合計5ケースである。また、ロックボルトの長さの効果と比較するために、パターン1での長さ4mを50%延ばして6mとするパターン1-aも考える (Fig. 6)。なお、ロックボルトのモデル化では、異形鉄筋SD30-D29を想定している。

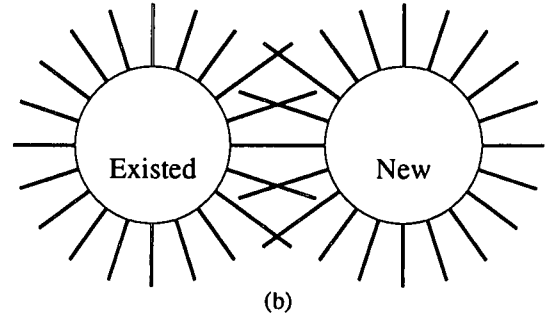
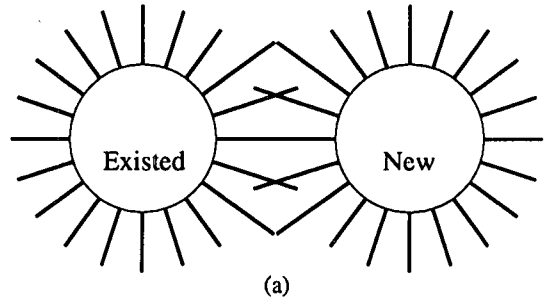


Fig. 6 Bolting pattern 1-a at adjacent tunnels, length of rockbolt at pillar is 6m, distance of adjacent tunnel centers is (a) $1.8D$, (b) $1.6D$ (D is the tunnel diameter).

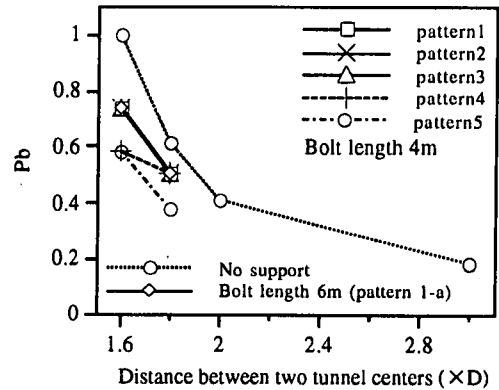


Fig. 7 Relationship between P_b and distance of adjacent tunnel centers according bolting patterns at pillar, $S_p = 0.8$, $H/D = 15$.

4.2 解析的挙動とピラー部の補強効果について

Fig. 7は、ロックボルトを用いたピラー部への補強による相互影響の低減効果を示す。まず、塑性領域比は、パターン1とパターン1-aを比較して分かるように、

ロックボルトの長さを長くしても変化しない。つまり、この解析条件では、ピラー部に発生する塑性領域の幅は、ロックボルトの長さあまり影響されないと考えられる。また、ロックボルトの打設パターン (打設密度) の影響を見ると、中心間距離が $1.8D$ の場合には、無支保の場合より減少したが、パターン1～パターン4では塑性領域比がほとんど変化せず、パターン5の場合でやっと $P_b = 0.4$ と減少している。また、中心間距離 $1.6D$ の場合にも、ピラー部のロックボルトの本数の増加による効果はあまり見られない。特に、パターン4とパターン5については全く同じ値になっている。したがって、ロックボルトによるピラー部の安定性に対する補強効果は、各中心間距離において限界が存在すると考えられる。

一方、ロックボルト自体の補強効果は、打設密度や打設長さによらず、周辺地山との間の付着強度にも大きく支配されるものである。解析ではロックボルトと岩盤との間の付着せん断強度を周辺岩盤の一軸圧縮強度の1/2とし、せん断破壊後は、せん断強度が低下せず一定とする。Fig. 8に示したように、ロックボルトと岩盤との境界面にせん断破壊が生じた。図中の放射状の線はロックボルトの打設位置を示し、ロックボルトと岩盤との付着が破壊している場所をその線上に×印をプロットしている。付着破壊は、おもにトンネル壁面付近とロックボルト端で発生し、天端・下盤付近で著しい。地山～ロックボルト間の付着破壊が発生すると、ロックボルトによる地山変位の抑制効果が弱まる。このことから、地山強度比が低い場合、地山との境界面にせん断破壊が生じやすくなり、ロックボルトのみでピラー部の塑性破壊や大変形挙動を抑制する効果あまりに期待できないため、他の補助工法（薬液注入による地山強度改良など）との併用を考えると考えられる。

4.3 ロックボルト補強効果の模型実験による検証

大変形解析法によって得られた結果の検証と実験的挙動との比較を行うために、先の2章で述べた模型実験を実施した。一例として、深度50mに位置するトンネルを中心間距離1.8Dに近接して施工しピラー部に対してロックボルト補強を行った場合を想定している。

模型材料は2章と同じであるが、幾何学的スケールを150、力学的スケールを2.87としたため、 $\sigma_c = 0.454\text{MPa}$ 、 $E = 148.5\text{MPa}$ 、 $C = 0.273\text{MPa}$ 、 $\phi = 32.8^\circ$ の原地盤が想定される。ロックボルトのモデル化では、原型のロックボルトを異形鉄筋SD30-D29 ($E = 210\text{GPa}$ 、 $\sigma_t = 490\text{MPa}$)とすると、アルミニウム ($E = 70\text{GPa}$ 、 $\sigma_t = 200\text{MPa}$)が比較的相似則を満足するモデルの材質である。原型との相似性と加工性を考慮して直径1mmの棒材を用い、その表面に均一に標準砂を接着し模型材料に打設し、せん断試験によってボルトと模型との付着せん断強度が現型との間に近似的に相似則を満足している。ロックボルトの打設パターンは先に述べたパターン1とする。また、模型実験と同じ条件での解析も行なう。

Fig. 9の上段に、模型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、図中には示していないが、トンネル壁面付近においてボルトと模型の接着面が破壊していることも観察された。一方、Fig. 9の下段に、解析計算によって得られた塑性領域の分布状況を示す。塑性領域はトンネル壁面付近に広がり、ピラー部での塑性領域の発生はその全体に広がっておらず、塑性領域比は $P_b \approx 0.34$ で、ロックボルトの補強効果が得られた。両者を比較してみれば、模型実験では、トンネルの周辺地山、とくにピラー部での破壊領域が亀裂の進展により連続体ではなくなってしまうため、解析よりやや広がっているが、近接トンネル

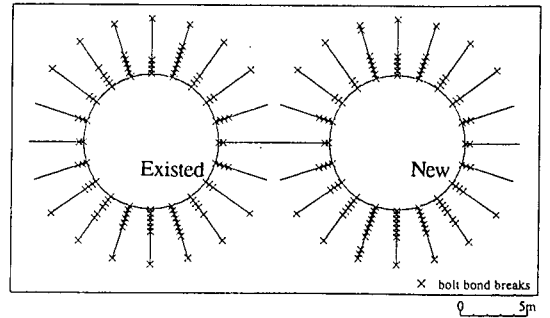


Fig. 8 Shear-failure on the interface of bolt-bond with bolting pattern 1 (Distance of adjacent tunnel centers is 1.8D and depth of tunnel is 150m).

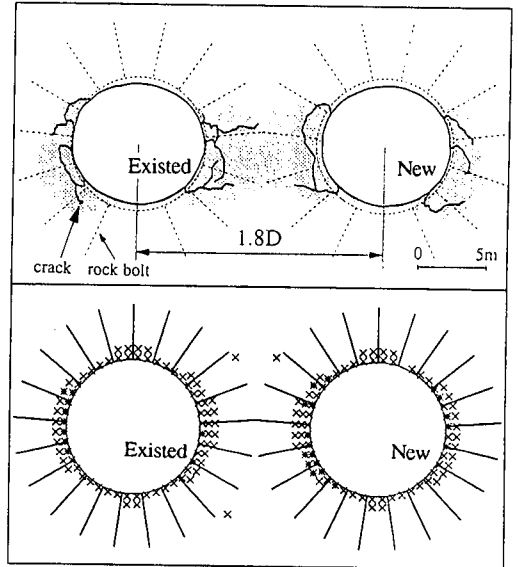


Fig. 9 Comparison of propagation of crack and plastic zone with bolting pattern 1, distance of adjacent tunnel centers 1.8D, with the base friction method (the upper frame) and FLAC analysis (the lower frame).

の相互影響の評価に関して、両者が全体的にはほぼ一致していると思われる。

5. おわりに

本研究では、模型実験および大変形差分解析法を用いて、軟岩地山における近接トンネルの相互影響を及ぼす要因とそれらの影響度合いを定量的に評価し、ロックボルトを用いてピラー部を補強することによる相互影響の低減効果を考察した。

近接トンネル間のピラー部の変形挙動が既設および新設トンネルに直接に影響を及ぼし、とくに地山強度比 $S_p < 0.6 - 0.8$ 、トンネル深さ $H/D > 10$ では、中心間距離が $1.8D$ 以内であると、ピラー部がほぼ完全に塑性化し、大変形を生じるため、相互に大きく影響することを明らかにした。これについて、ピラー部に対してロックボルトなどを用いて補強することにより、近接トンネルの間の相互影響を低減させることができた。ただし、その低減効果には地山強度比に応じて中心間距離毎に限界が存在することが分かった。一方、地山強度比が1より低い場合やトンネルの中心間距離を $1.6D$ 以下に接近させなければならない場合では、ロックボルトと周辺岩盤との境界面でのせん断破壊が生じやすくなり、補強効果が低下するため、他の補助工法との併用を必要とする。今後は、近接トンネルの相互影響におけるロックボルトと周辺地山との付着せん断強度や地山改良の効果などについて、さらに検討を深めていく所存である。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、(株)住友建設には多大なる援助を頂いた。ここに記して厚く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 日本鉄道技術協会：双設隧道の離間距離に関する研究報告書，日本鉄道技術協会，1959-1961.
- 2) 日本道路公団：設計要領第三集第9編トンネル，1985.
- 3) 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，186-190，1990.
- 4) 江崎・蔭・阿部：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，第26回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，46-50，1995.
- 5) 中川他：軟岩トンネルにおける大変形解析法の適用について，第26回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，515-519，1995.
- 6) Cundall, P. & Board, M.: A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problem, *Proc. 6th Int. Conf. on Numerical Methods Geomechanics*, Austria, 1988.