

土砂地山における双設トンネル掘削時の挙動

足立 紀尚・木村 亮・山口 直宏・長田 文博

BEHAVIOR OF TUNNELS IN SANDY GROUND

By *Toshihisa ADACHI, Makoto KIMURA,*
Naohiro YAMAGUCHI and Humihiro OSADA

Synopsis

To obtain basic data served to the design methods of sandy ground twin tunnels, a series of laboratory two-dimensional model tests were performed by using a device which was designed to simulate tunnel excavation and at the same time to be able to measure the earth pressure acting on tunnel linings. From the test results, it is found out that the mechanical interaction of two tunnels depends not only on the spacing between two tunnels but also on the overburden.

1. はじめに

近年、環境保全、建設中の交通阻害の排除等の観点からも、都市郊外部での鉄道も開削工法によらないで、地下に建設されることが要求されるようになってきている。この際、地下鉄道は建設費の削減、開業後の旅客の利便、排水、換気、防災等の維持管理費の削減から、できるだけ土かぶりを小さくすることが望ましい。また、周知のように、わが国の都市トンネルは地下水位の高い軟弱な沖積、洪積層を対象地山とし、各種既設構造物に近接して建設することになるから、既設構造物への影響を極力抑えかつ安全に施工することが大切である。

これまで、かぶりの小さい土砂山に単断面トンネルを掘削する際の地山挙動を中心として研究を実施してきたが¹⁾²⁾³⁾、土砂山に双設トンネルを建設する場合もあり、トンネル間の相互作用の的確な把握も解明を要する課題の一つであると考えられる。本研究では、既設トンネルに隣接して新たにトンネル掘削を行ったときの、トンネル横断方向の地山の変位挙動およびトンネル覆工に作用する土圧に着目して、アルミ棒積層体により地山をモデル化したトンネル掘削のシミュレーション実験を行った。モデル実験を行うに当たり、以下のように問題の理想化および単純化を行っている。

- 1) 実地盤は、不均質で異方性をもち三次元に広がっているが、これを均質な二次元問題として扱っている。
- 2) 地山材料は通常粘着力を有するが、粘着力のないアルミ棒積層体を用い、砂質地盤を対象としている。
- 3) 実地盤は様々な形状および大きさの粒子の集合体であるが、実験ではアルミ棒断面は円形で、2種類の直径のものを混合したものである。
- 4) トンネル掘削は、覆工を強制的に内側に収縮することで表現している。

実地盤の種々の要因が複雑に絡み合った現実の問題を、そのまま解明しようとするのは必ずしも容易なことではない。そこで、いくつかの要因を取り除いて単純化したモデル実験により基礎的な現象を把握し、その結果を解析に反映させ、トンネル掘削工事における設計規範の確立を目ざそうとするのが本研究の立場である。

2. 実験概要

地山材料には、これまでの研究²⁾³⁾と同様、長さ5cm、直径1.6mmおよび3mmのアルミ棒を重量比3:2で混合したアルミ棒積層体 ($\gamma = 2.1 \text{ gf/cm}^3$, $\phi = 30^\circ$, $c = 0 \text{ kgf/cm}^2$) を用いた。すなわち、アルミ棒を実験装置(幅100cm)の左右の仕切り壁面間に積み上げて地山を形成する。本実験に用いたトンネル掘削のシミュレーション装置を Fig. 1, Photo. 1 に示す。トンネル断面は円形で、直径Dは13cmである。本装置は Fig. 1(a) に示すように、ハンドルを回転させることで径を半径方向に一様に縮めることができ、これによりトンネル掘削をシミュレートする。また、トンネル掘削装置の外周(以下覆工と呼ぶ)は均等に16等分され、それ自体は Fig. 1(b) に示すように、アルミ板に板ばね(厚さ1mmのステレス製)をはさんだ上圧計として機能する。すなわち、各面に垂直な上圧は、板ばねの両端に計4枚貼った曲げゲージのひずみより求まる。また、トンネル収縮時に上圧計間からアルミ棒が落ち込まないように、アルミ板には特殊な加工が施されている。この実験装置を2個用いることによって、双設トンネル掘削をシミュレートした。

本研究で行った実験は、Fig. 2 に示すように上かぶりZと双設トンネル間距離Bをパラメータとし、地表面はすべて水平とした。二つのトンネルがレベルを異にして建設されることもあるが、本研究では両

トンネルのレベルは同一として実験を行った。なお、図中の①、④等は土圧計の番号を示す。また、Fig. 2 に示すように左側のトンネルを既設トンネルとし、右側のトンネルは既設トンネルに隣接して新たに掘削するトンネルを表す。実験の種類は、Table 1 に示すように実験I、II、IIIの3種類実施した。実験Iは、従来の研究²⁾結果との比較を目的とし、覆工土圧および地山の変位挙動を測定した、単一トンネルの掘削シミュレーション実験である。実験II、実験IIIは、双設トンネルの掘削シミュレーション実験である。実験IIは、新設トンネルのみを縮める実験である。また、実際の掘削工事においては既設トンネル掘削による地盤の緩みが生じ、その後新設トンネルが掘削されているはずである。実験IIIはその緩みを表現するために、既設トンネルを縮めたのち新設トンネルを縮める実験である。なお、新設トンネルの掘削は半径方向に最大5mm収縮させることでシミュレートしたが、実験IIIの既設トンネルにあらかじ

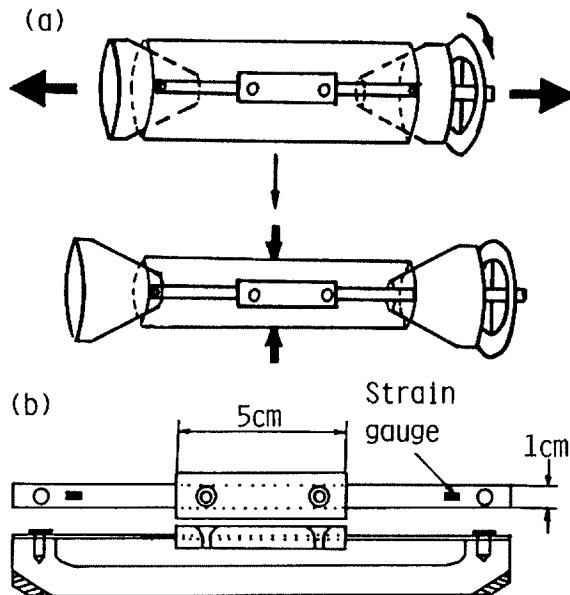


Fig. 1. Schematic diagrams of tunnel simulating device and earth pressure gauge.

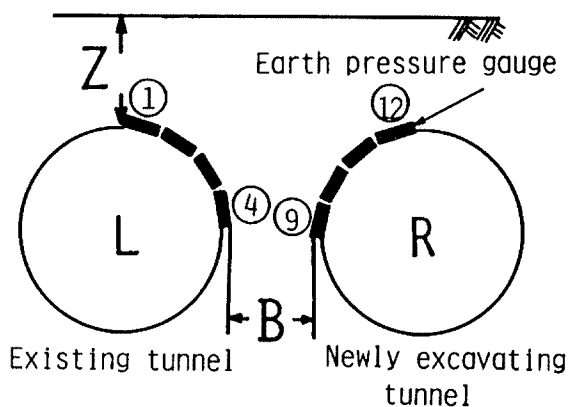


Fig. 2. Experimental conditions.



Photo. 1. Tunnel simulating device.

Table 1. Kinds of model tests

Kinds of model tests	Overburden height (Z)	Spacing between twin tunnels (B)	Tunnel measuring earth pressure
• Experiment I • Single tunnel	0.5D, 1.0D, 2.0D, 4.0D		Newly excavating tunnel
• Experiment II • Twin tunnels	0.5D, 1.0D, 2.0D, 4.0D	0.5D, 1.0D, 2.0D	Existing tunnel
• Experiment III • Twin tunnels	0.5D, 1.0D, 2.0D, 4.0D	0.5D, 1.0D, 2.0D	• Newly excavating tunnel, • Existing tunnel



Photo. 2. Test arrangement for twin tunnels.

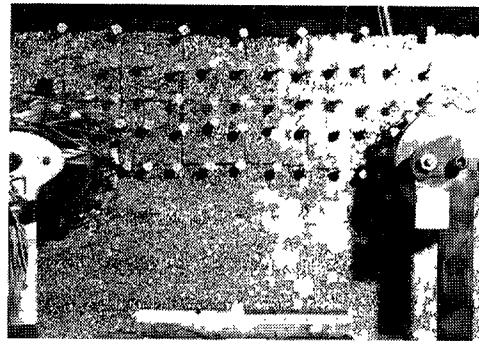


Photo. 3. Test setup for twin tunnels.

め与える収縮量 δ は2mmとした。また実験Ⅱでは既設トンネルの土圧を、実験Ⅲでは既設・新設両トンネルの土圧を計測した。さらに各実験とも、アルミ棒地山に埋め込んだ標点を写真撮影することにより、トンネル周辺地山の変位も測定している。

実験の手順を以下に説明する。

- 1) **Photo. 2**に示すように、実験フレームにトンネル掘削シミュレーション装置をセットし、上圧計のキャリブレーションを行った後、所定の上かぶりZまでアルミ棒を積み上げる。
- 2) 積み上げた積層体にマジックで標線をいれ、**Photo. 3**のように地山変位計測のための標点を埋め込む。
- 3) 初期状態およびトンネル収縮量 $\delta=3$ mmまでは、0.2mm間隔で各土圧計に作用する土圧を測定する。
- 4) 3)の作業と平行し、 $\delta=0, 1, 2, 3, 4, 5$ mmでトンネル周辺地山の動きを、地上に固定したカメラで記録する。
- 5) 引き延ばした写真から、周辺地山の変位をデジタイザーを用いて計測する。

以上のような手順で、同一条件下の実験を3回づつ行うが、実験の再現性は良好であったので、以下の議論における土圧の計測値は3回の実験結果の平均値を用いた。

なお、本実験では通常のトンネル掘削と違い、地山内に予め剛性の高いトンネル覆工を設けていることに相当するため、応力集中により初期にかぶり圧以上の値をとるなど、定量的に実際のトンネルと一致するものではないことに留意する必要がある。

3. 実験結果および考察

3.1 実験Ⅰ：単一トンネルの掘削シミュレーション実験

Fig. 3はトンネル収縮による、土かぶり $Z=1.0D$ のトンネル上半の土圧変化を示している。図から、収縮量 $\delta=1$ mmまでに、全土圧計の土圧(P)が初期土圧の約50%に減少するが、それ以降土圧は徐々に減少しながら一定値に収束し、スプリングラインから45°以上の天端付近に土圧が集中することが分かる。

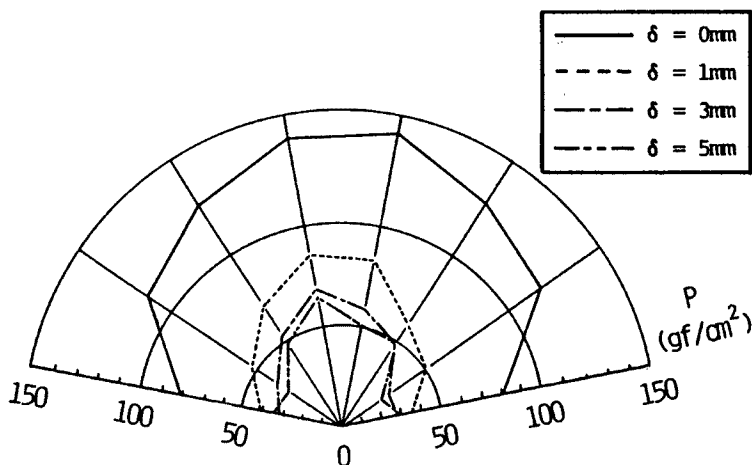


Fig. 3. Earth pressure distribution on tunnel lining (experiment I, $Z=4.0D$).

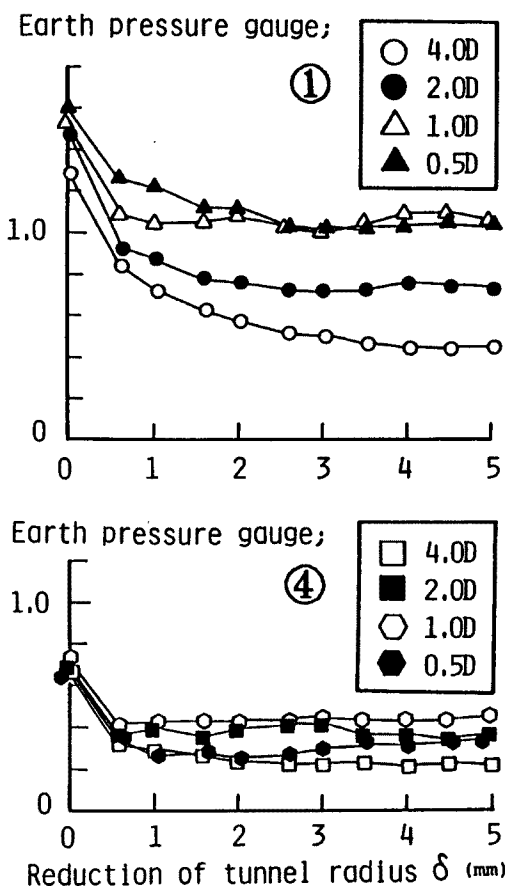


Fig. 4. Relation between normalized earth pressure on tunnel crown and springline and reduction of tunnel radius (experiment I).

次に Fig. 4 は、天端とスプリングラインの土圧計①、④ (Fig. 2 参照) に着目し、土圧 P をその位置での計算かぶり圧で規準化した値を縦軸に、収缩量 δ を横軸にプロットしたものである。図から、土かぶりが大きいほど土圧計①、④ともに規準化した値が小さく、その減少量は大きいことが分かる。規準化した天端の土圧が土かぶりによって差が生ずるのは、土かぶりが大きいとグランドアーチが形成されるが、土かぶりが小さいとアーチ効果が発揮されない

ためであり、トンネル周辺地盤の変位挙動からの結果²⁾と一致する。さらに、土圧計④の初期状態は静止土圧係数を示すが、土かぶりによらず 0.7 と一定で、 $\delta=3\text{mm}$ まで減少しその後一定値をとることから、トンネルを掘削することでスプリングライン付近は主動状態になることを示している。

3.2 実験Ⅱ：新設トンネルのみを縮小した双設トンネルの掘削シミュレーション実験

実験Ⅱでは、既に施工が完了しているトンネルに隣接して新たにトンネルを掘削したとき、新設トンネルが既設トンネルに及ぼす影響を、既設トンネルの覆工土圧で検討した。Fig. 5 は、トンネル間距離 $B=1.0D$ を一定とし、土かぶり $Z=0.5D, 1.0D, 2.0D$ と変化させた場合の、新設トンネル掘削による既設トンネルの上半部の土圧変化量の分布を示している。図では初期土圧からの変化量を初期土圧に対する比として規準化し、新設トンネルの収缩量 $\delta=1, 3, 5\text{mm}$ における分布を表している。すなわち、図中の 0% として描かれている円のライン上にあれば、初期土圧からの変化がない状態で、その外側が増加、内側が減少した状態を示している。土かぶり $Z=0.5D$ の場合は、新設トンネル側の覆工で土圧の減少が観察される。また、 $Z=1.0D, 2.0D$ の場合は、天端から新設トンネル方向に約 30° の範囲で土圧が上昇する傾向にある。

Fig. 6 は、土かぶり $Z=1.0D$ を一定とし、トンネル間距離 $B=0.5D, 1.0D, 2.0D$ と変化させた場合の、上半部の土圧変化量の分布を示している。 $B=2.0D$ で

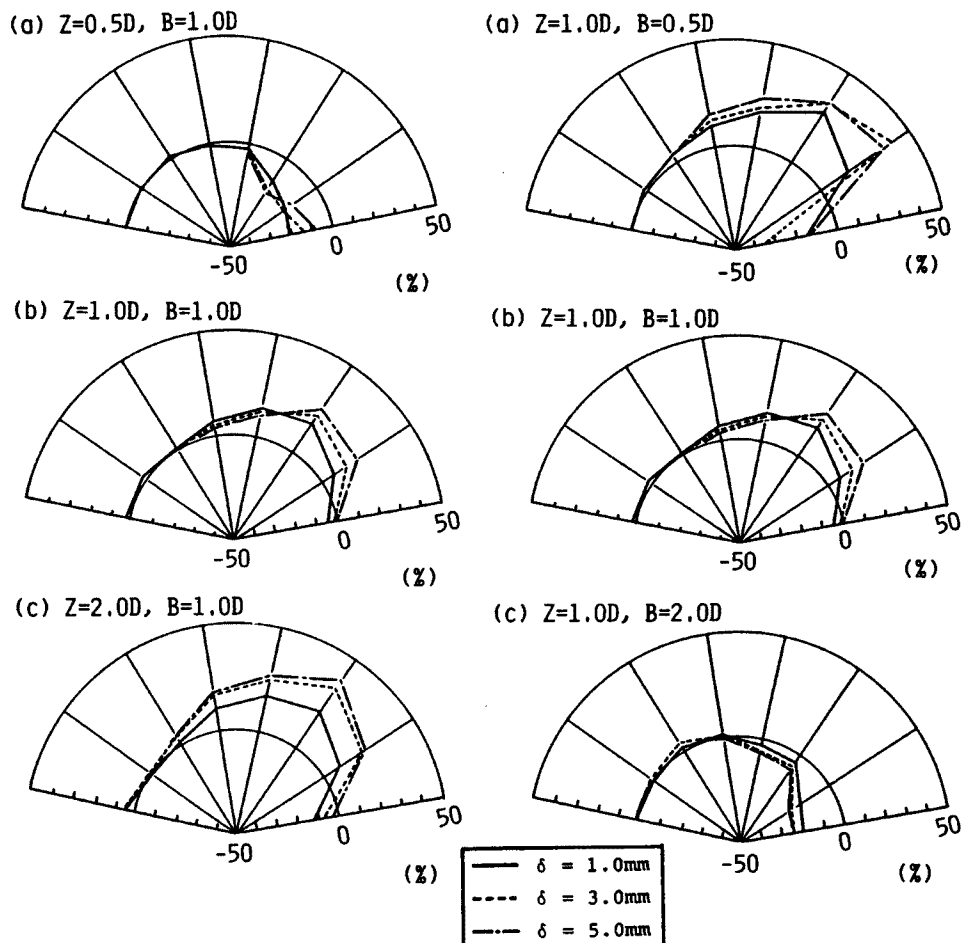


Fig. 5. Earth pressure distribution on lining. (experiment II, tunnel spacing $B=1.0D$).

Fig. 6. Earth pressure distribution on lining. (experiment II, overburden $Z=1.0D$).

は側壁部で土圧が減少し、 $B=0.5D$, $1.0D$ では天端から新設トンネル方向に約 30° の範囲で土圧の上昇が観測された。

Fig. 7 は、新設トンネル収縮量 $\delta=3\text{mm}$ の場合の既設トンネルの土圧分布を、概略図として示したものである。図中のハッチ部は、初期土圧に対する比、すなわち標準化した土圧を表しており、実線の円は Fig. 5 の 0% の円に相当する。図から、土かぶりが多いほど既設トンネルの土圧の変化が大きくなり、逆にトンネル間距離が多いほど土圧の変化は小さくなるという結果を得る。ここで、土かぶり Z をトンネル間距離 B で割った値 Z/B をパラメータとして、各場合の土圧の変化状態を見ると、 $Z/B>1$; 天端の土圧が増加する。

$Z/B=1$; 肩部の土圧が増加する。

$Z/B=1/2$; 側壁から約 40° 間の土圧が減少する

という傾向がみられ、 Z/B 値が等しい実験では類似した土圧分布形状を示す。しかし、土かぶりが大きいほど同一の Z/B であっても、新設トンネルの反対側の覆工にまで土圧変化が生じている。

3.3 実験Ⅲ：既設トンネル、新設トンネルとも収縮した双設トンネルの掘削シミュレーション実験

実際に既設トンネルの近傍に新たにトンネルを掘削する場合、既設トンネル掘削によって既にトンネル

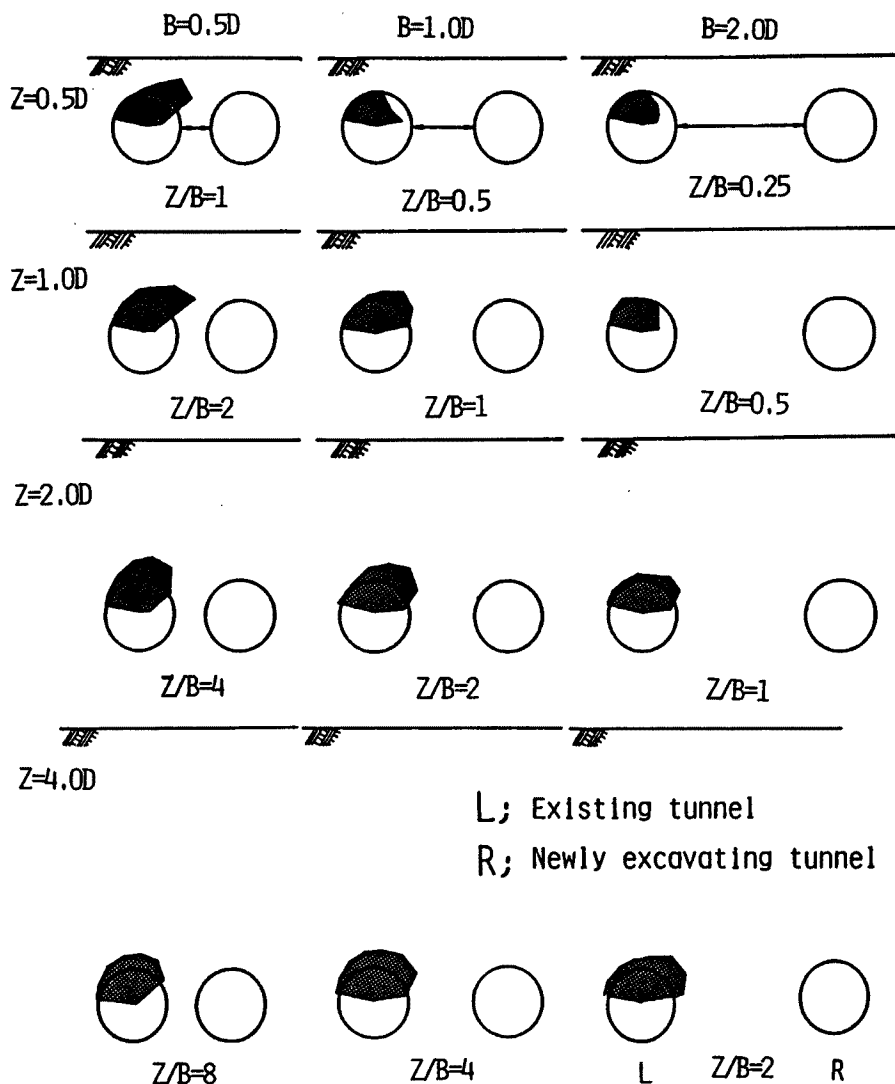


Fig. 7. Earth pressure distribution on existing tunnel lining (experiment II).

周辺地山に緩みが生じている。それを表現するために、実験Ⅲでは既設トンネルを収縮し地山を緩ませた後、新設トンネルを収縮させた。覆工土圧は、既設、新設両トンネルで測定した。

Fig. 8(a)は $Z = 2.0D$, $B = 1.0D$ ($Z/B > 1$) の場合における、既設トンネルの上半部の土圧変化量の分布を示している。 $\delta = 2.0 \text{ mm}$ (L: Left, 既設トンネル) は、既設トンネルを 2 mm 収縮させた状態で、 $\delta = 2.0 \text{ mm}$ (R: Right, 新設トンネル), 3.0 mm (R) は、既設トンネルの収縮量 $\delta = 2.0 \text{ mm}$ (L) を固定したまま、新設トンネルを 2.0 mm および 3.0 mm 収縮させた状態を表している。 $\delta = 2.0 \text{ mm}$ (L) までは覆工土圧は上半部全周面で約 50% 減少するが、 $\delta = 2.0 \text{ mm}$ (R), 3.0 mm (R) では、実験Ⅱと同様に天端から新設トンネル方向に約 30° の範囲で、土圧の上昇が卓越している。Fig. 8(b)は Fig. 8(a)と等しい条件下での、新設トンネルの土圧変化量を示している。 $\delta = 2.0 \text{ mm}$ (L) までは、天端から既設トンネル方向に約 30° の範囲で土圧の上昇が卓越している。しかし、 $\delta = 2.0 \text{ mm}$ (R), 3.0 mm (R) では、覆工土圧は全周面で約 50% 減少し、既設トンネルと新設トンネルでは対照的な土圧の変化を示す。 $\delta = 2.0 \text{ mm}$ (R), 3.0 mm (R) の場合が、既設トンネルと新設トンネルの実際に生ずる相互作用を表しており、他の土かぶりおよびトン

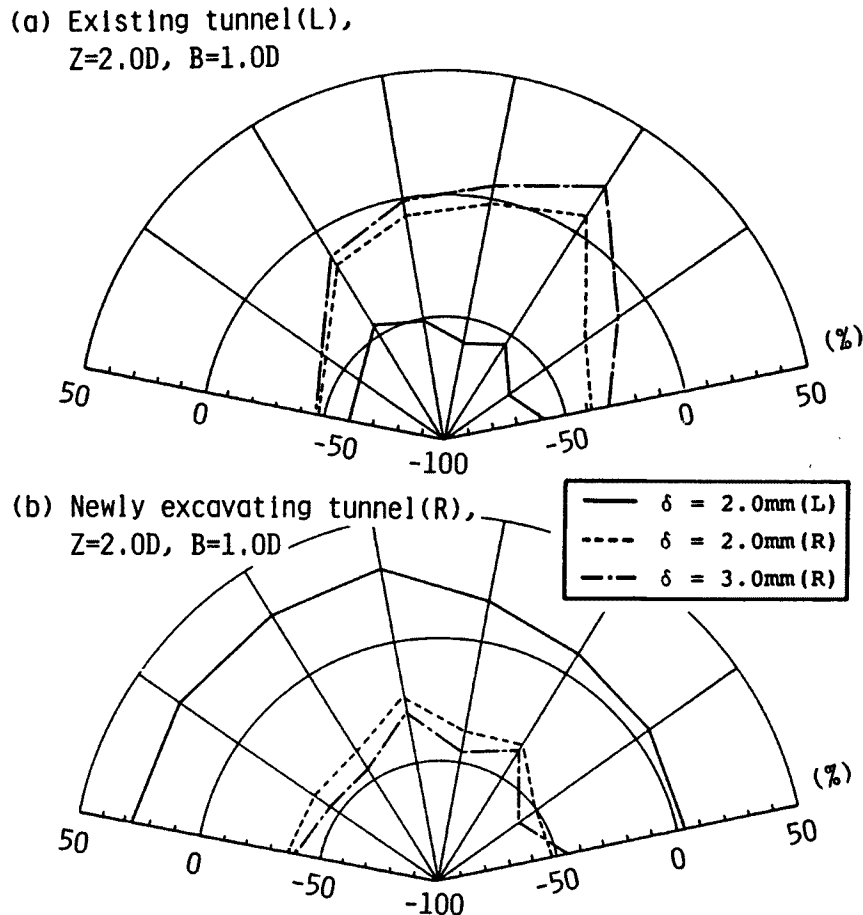


Fig. 8. Difference in earth pressure distributions for two tunnels.
(a) existing tunnel, (b) newly excavating tunnel
(experiment III).

ネル間距離においても同様な傾向が観測された。

他のケースの結果をまとめて、Fig. 9に実験Ⅲから得られた天端と側壁の土圧計①、④、⑨、⑫の変化を、簡略化した形で示した。Fig. 9(a)は、同じトンネル間距離で土かぶりの異なる場合に着目し、またFig. 9(b)は、同じ土かぶりでトンネル間距離の異なる場合に着目したものである。両図において、縦軸には測定された土圧を初期土圧(γZ)で除し規準化した値をとり、横軸の上段の $\delta=0\sim 2\text{mm}$ は既設トンネルの収縮量を示し、下段の $\delta=(0)\sim(5)\text{mm}$ は新設トンネルの収縮量を示す。両図から以下のことが読み取れる。

1) 土かぶりの違いに着目した場合 (Fig. 9(a))

Fig. 9(a)はトンネル間距離 B は $1.0D$ で、土かぶり Z を $0.5D$, $1.0D$, $2.0D$ と変化させた結果である。図中の①は既設トンネルの天端付近の土圧、⑫は新設トンネルの天端付近の土圧変化を示している。 $\delta=2.0\text{mm}$ (L) (0.0mm (R))を境界とし、①は減少傾向から転じ増加傾向へ、⑫は増加傾向から減少傾向へと変化する対照的といえる。①、⑫とも土かぶりが大きいほどそれらの減少量、増加量ともに大きくなることがわかる。つまり、土かぶりが大きいほど変動量は大きく、隣接トンネルに与える影響が大きいということがいえる。④、⑨はそれぞれ、既設トンネルおよび新設トンネルの側壁付近の土圧変化を示しているが、総じて両場合とも最終的には土圧は減少している。

2) トンネル間距離に着目した場合 (Fig. 9(b))

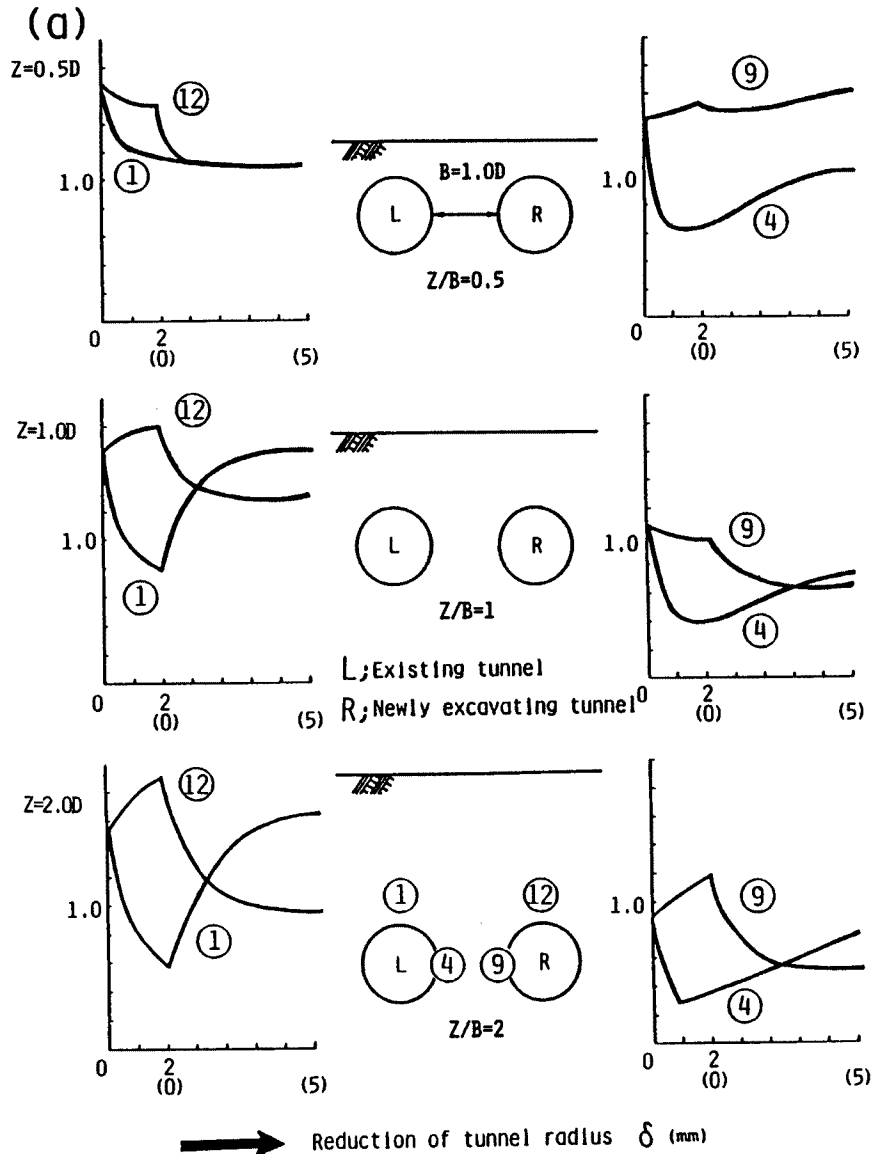


Fig.9. Relation between normalized earth pressure on tunnel crown and springline and reduction of tunnel radius
(a) $B=1.0D$ (experiment III).

Fig. 9 (b)は土かぶり Z を $1.0D$ とし、トンネル間距離を $0.5D$, $1.0D$, $2.0D$ と変化させた結果である。土圧計①, ②とも、トンネル間距離が小さいほど変化量は大きくなる。特に、トンネル間距離 $B=0.5D$ においては新設トンネルは $\delta=2.0\text{ mm}$ (R) 以降で土圧は上昇している。また、トンネル間距離 $B=2.0D$ では $\delta=2.0\text{ mm}$ (R) 以降で土圧は、既設トンネル、新設トンネルともに計算初期土圧 (γZ) に収束する。全般にトンネル間距離が大きいほど変動量は小さく、隣接トンネルに余り影響を与えないが、トンネル間距離が小さいと変動量は大きく、隣接トンネルに与える影響が大きい。

以上より、既設トンネルと新設トンネルは対照的な土圧挙動を示し、土かぶりが大きいほど、またトンネル間距離が小さいほど、土圧変化が顕著となることが明らかになった。特に、土かぶりが大きい $Z=4.0D$ の場合、トンネル掘削に伴い新設トンネル周辺にグラウンドアーチが生じる²⁾。その時、ある程度ト

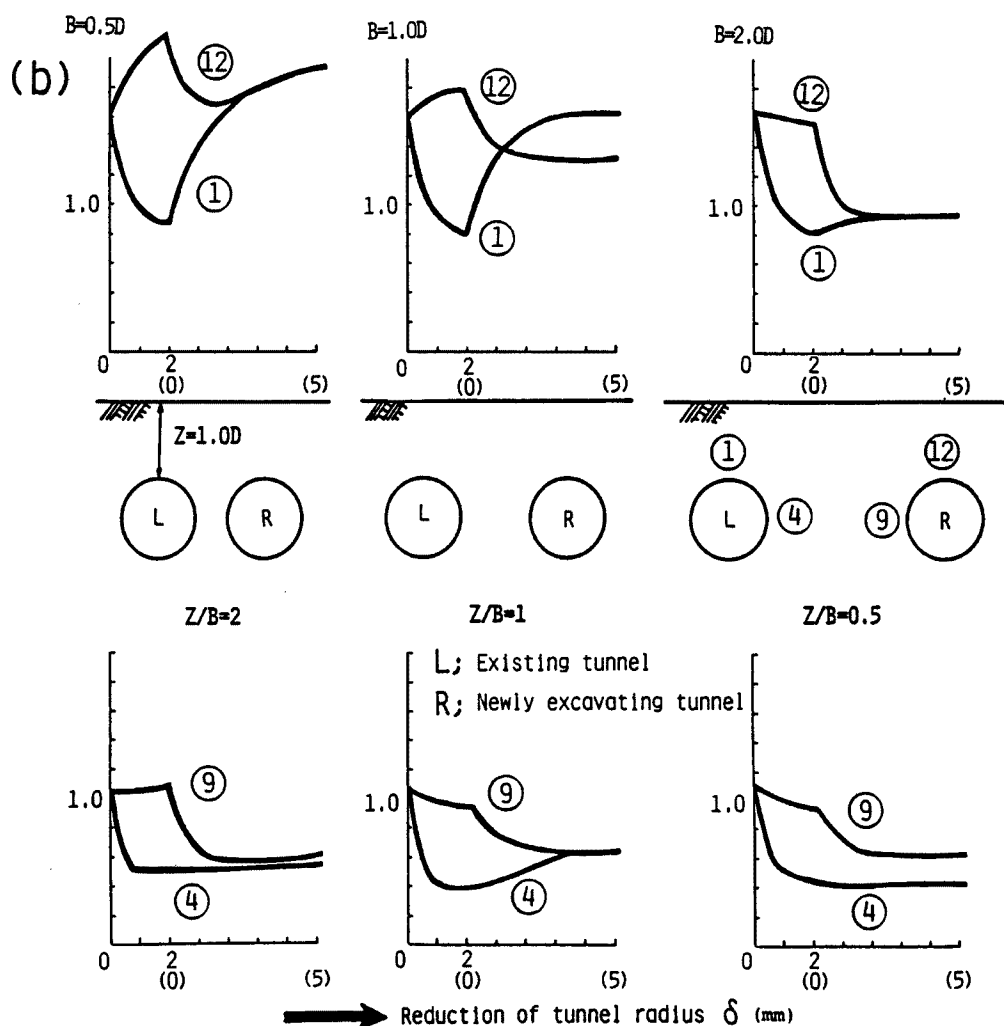


Fig. 9. Relation between normalized earth pressure on tunnel crown and springline and reduction of tunnel radius
(b) $Z=1.0D$ (experiment III).

トンネル間距離が小さい場合は、グランドアーチによる応力集中帯が隣接トンネルの天端付近に達し、新設トンネル掘削の影響が顕著となる。したがって、既設トンネルに隣接して新たにトンネルを掘削する場合には、既設トンネルの土圧が著しく上昇するので、トンネル掘削の施工上注意をさねねばならないことが分かる。特に、土かぶりが大きく、トンネル間隔が小さい場仕は危険性が高まる。

最後に、Fig. 10 は実験Ⅲにおける、トンネルを掘削したときのアルミ棒地山の等変位線および変位ベクトルの一例を示している。各図中の 90, 50, 25% とは、各標点の全変位量をトンネル収縮量で割った値を示している。これらの図より以下の結果を得る。

- 1) 収縮量 50% 以上変位する領域 (A 領域と略称) は、どの場合も地表面にまで達し、その境界は地表面に対してほぼ垂直である。
- 2) 土かぶりが大きいほど A 領域は増大する。
- 3) A 領域は土かぶりと同じならば、トンネル間距離によらず一定である。

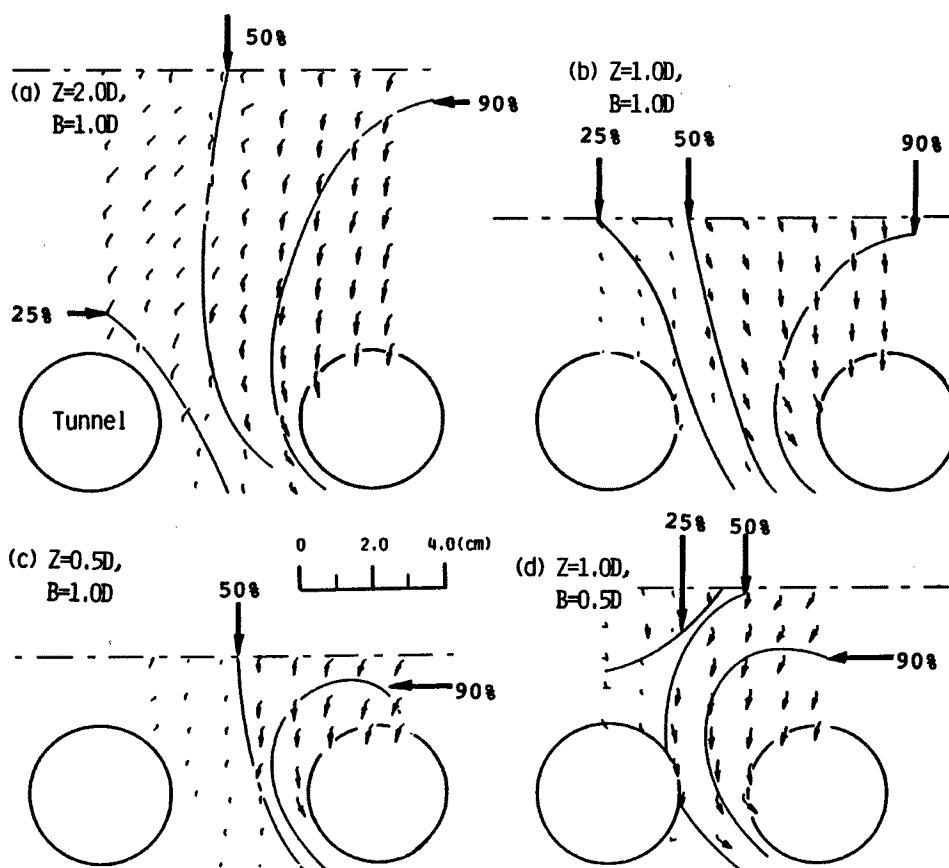


Fig. 10. Displacement vectors and equi-displacement contour lines in surrounding ground (experiment III).

4) A領域の境界線の位置は、土かぶりおよびトンネル間距離によらず、掘削トンネルの側壁より既設トンネル方向へ、ほぼ1.0Dの位置にある。

4. おわりに

本研究では、地山の挙動およびトンネル覆工に作用する土圧の挙動を検討し、土かぶりの浅い土砂地山における、トンネル掘削時のメカニズムを解明することを目的とした。既設トンネルが同一レベルとした実験を行ったが、今後は双方のトンネルのレベルが異なる場合について実験を行い、また既設トンネルの鉛直上方もしくは下方にトンネルを掘削した場合の挙動に関して同様な実験を行うことと、単一断面に適用した解析手法²⁾を用いて本実験結果を解析する予定である。

参考文献

- 1) 足立紀尚・田村武・八嶋厚: 薄肉柔支保構造 (吹付けコンクリート, ロックボルト) の支保機構に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第358号, 1985, pp. 47-52
- 2) 足立紀尚・田村武・八嶋厚・上野洋: 砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究, 土木学会論文集, 第385号, 1985, pp. 129-136
- 3) 上野洋・足立紀尚・八嶋厚・湯浅泰則: 砂質地山トンネル掘削に伴う切羽前方の地山挙動について, 第21回土質工学研究発表講演集, 1986, pp. 1683-1686