

(19) 土被りの薄い双設トンネルの模型実験

東急建設(株)技術研究所 正員 後藤有志

正員 ○壺内達也

正員 西岡 哲

1. はじめに

近接した双設トンネルを施工する際には、2本のトンネルを掘削することによる応力変化の相互干渉がトンネルの安定性に悪影響をおよぼす。そのため、一般には双設トンネルの中心間距離は掘削幅の約3倍以上をとることが推奨されている。しかし、近年、近隣構造物の存在等のため、十分にトンネル間の距離をはなすことができない場合が生じるようになった。また、近接度の高い双設トンネルを施工することができれば用地買収費の点でも安価なトンネルを作ることができる。

本実験は土被りの薄い所で近接した双設トンネルを施工する際に、その2本のトンネル間の距離がトンネルの安定性にどのような影響を与えるかを調べたものである。実験は、重力場における地盤構造物の変形・破壊特性を研究するために、新しく考案された底面摩擦模型実験装置を用いている。

2. 底面摩擦模型実験装置

底面摩擦模型実験装置は、地盤の二次元化モデルを用いて自重の作用下での破壊モードを研究する装置である。この実験装置の原理の概要を示すと図-1のようである。一定速度でゆっくりと作動するプレート上に模型を置き、固定障害で模型の動きを止めることによって生じた摩擦力を模型に作用させ、これを自重と等価な力と見なすものである。本装置はEggerによって考案された模型上にさらに空気圧を作用させることによってより大きな摩擦力を発生させるようにしたタイプのものを用いている。この実験装置の詳細ならびに用いられる相似則についてはいくつかの文献に発表されているのでここでは省略する。

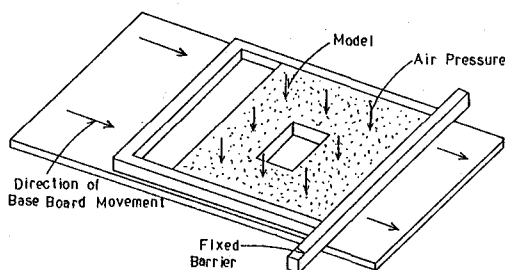


図-1 底面摩擦模型実験装置の原理図

3 実験の概要

本実験で使用している模型材料は川本他¹⁾の用いているものと同じ硫酸バリウム、酸化亜鉛、白色ワセリンを70:21:9に配合したものであり、これを単位体積重量 $\gamma = 1.9 \text{ g/cm}^3$ になるように締固めたものである。川本他¹⁾によるとこの材料の力学特性は表-1のようである。実験は矩形トンネルと半円形トンネルの2種類について行った。

(1) 矩形トンネル

図-2(a)のように高さ9cm、幅 $D = 10 \text{ cm}$ の矩形トンネルで土被り厚 H を20cmとし、トンネル間の距離 L を2, 3, 4, 6cm、すなわち、トンネルの中心間距離で、 $1.2D, 1.3D, 1.4D, 1.6D$ (D :トンネルの掘削幅)の4ケースについて行った。

(2) 半円形トンネル

表-1 材料の力学特性

密度	γ	1.9 g/cm ³
粘着力	C	0.46 kg/cm ²
内部摩擦角	ϕ	37°
弾性係数	E	460 kg/cm ²
一軸圧縮強度	σ_c	1.85 kg/cm ²

図-2(b)のような掘削幅 $D=10\text{ cm}$ の半円形の形状で土被り厚 H を 15 cm , 20 cm , 25 cm , すなわち、 $1.5D$, $2D$, $2.5D$ 、およびトンネル間の距離 L を 2 cm , 4 cm , すなわち、トンネルの中心間距離で $1.2D$, $1.4D$ と変化させた場合の6ケースについて行った。

図-2 実験ケース

なお、このとき模型に載荷する空気圧は $P_{air}=0.3\text{ kg/cm}^2$ で一定であり、プレートと模型との間の摩擦係数は 0.7 である

4. 実験結果

(1) 矩形トンネル

実験後の各ケースのスケッチを図-3(a)~(d)に示す。図からわかるように $1.2D$, $1.3D$, $1.4D$ の各ケースでは、破壊面は2つのトンネルを含むグランドアーチを形成するように生じ、このグランドアーチが形成された後はトンネルは安定する。そして、そのグランドアーチはF. Mohr による半円形アーチやIrving による半円

形アーチではなく、円の中心位置が図のように異なるだけでほぼ同一の半径の円弧をなしている。また、これらのピラー部(2本のトンネル間の地山)はすべてせん断破壊を生じている。

$1.6D$ の場合には、2つのトンネルはまったく独立したグランドアーチを形成し、トンネル間のピラー部はまったく変化していない。また、 $1.4D$ の場合には2つ

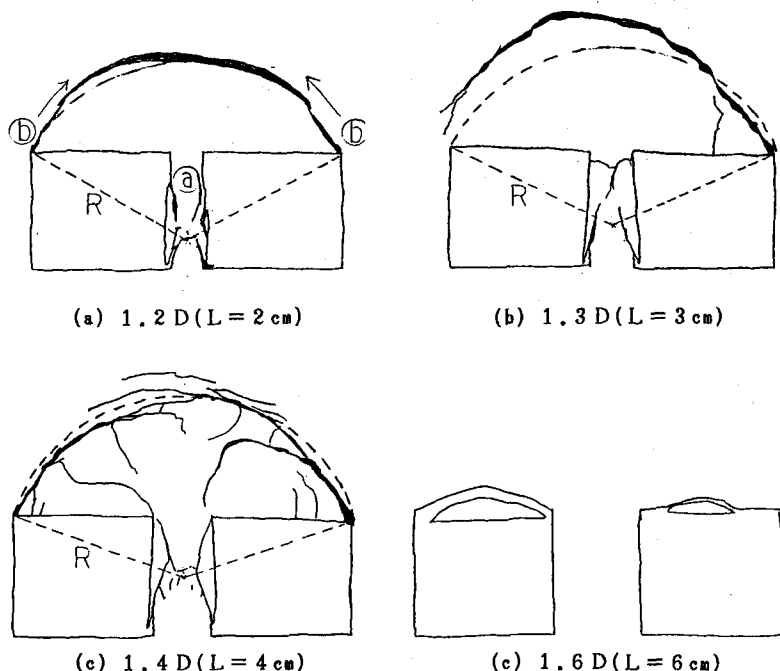
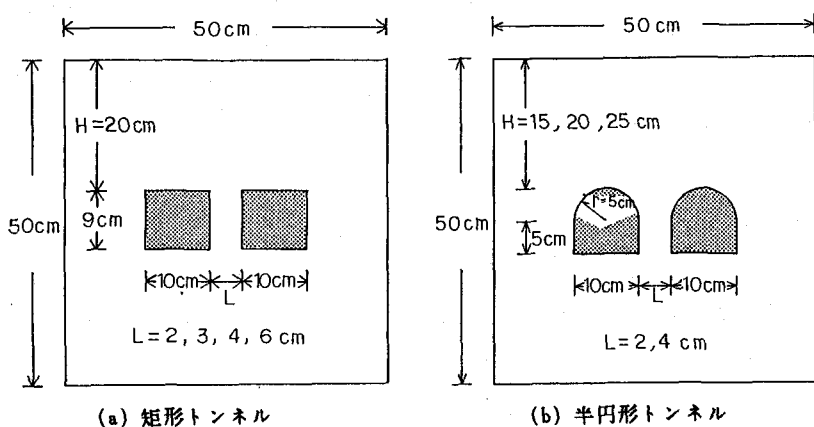


図-3 矩形トンネルの破壊図

のトンネルを含むグラウンドアーチと独立したグラウンドアーチの両者のモードで破壊している。

破壊面の生じる順序を図-3(a)を用いて示すと、はじめピラー部 a とトンネルすぐ上 b に破壊面がほぼ同時に生じ、b 部の破壊面が中心に向かって徐々に広がり、それと同時にピラー部の破壊が大きくなっていった。

(2) 半円形トンネル

トンネルの中心間距離が1.2 Dの場合の実験後のスケッチを図-4(a)~(c)に示す。図に示すように、この場合には土被り厚Hにかかわらずすべての場合に破壊している。ただ、土被り厚Hが1.5 Dと2 Dの場合には破壊面はトンネルの天端の少し外側から生じはじめ新しいアーチを形成しているのに対し、土被り厚Hが2.5 Dの場合には破壊面は側壁底部から生じ、2本のトンネルを包みこむような大きなアーチを形成している。なお、トンネル中心間距離が1.4 Dの場合には土被り厚Hにかかわらず破壊しなかったためここでは示さない。

(3) トンネル形状による違い

矩形トンネルの1.2 D, 1.4 Dの場合と半円形トンネルの土被り厚H=20 cmの場合は、トンネルの断面積がほぼ等しく形状が異なるだけである。この両者を比較すると中心間距離が1.2 Dの時にはどちらも破壊しているが、1.4 Dの時には、矩形トンネルは破壊しているのに対し、半円形トンネルにはまったく変化がない。したがって、双設トンネルの場合でも半円形トンネルの方が安定性が良いことが確認された。

5. 数値解析

5-1. 解析の概要

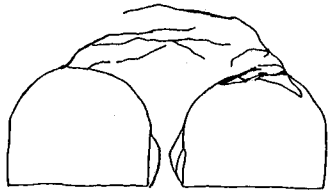
解析は、実験における矩形トンネルの場合の中心間距離が1.2 Dと1.6 DのケースについてFEMによる適合流れ則を用いた弾完全塑性解析を行った。解析に用いた物性値は表-2に示す。なお、解析は二次元平面ひずみ問題として取り扱い、用いた要素はすべて4節点アイソパラメトリック要素である。要素分割図を図-5に示す。

5-2. 解析結果および実験との比較

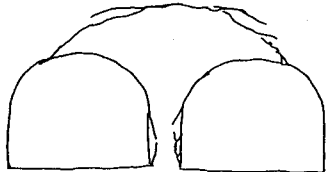
図-6, 7に各ケースにおける塑性領域の分布図を示す。どちらの図も(a)はピラー部にひ

ろがった時、(b)はその後側壁部に塑性域が広がった時の図である。この結果を実験結果と比較すると以下の点で大

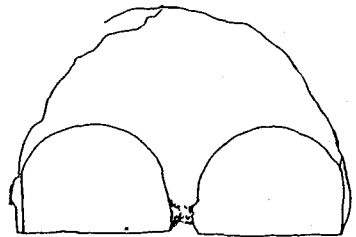
表-2 解析に用いた物性値		
弾性係数	460	kg/cm ²
ポアソン比(仮定)	0.3	
単位体積重量	84	g/cm ³
降伏条件	$F = \alpha I + J_2 - \kappa$ $\alpha = 0.1895$ $\kappa = 0.347 \text{ kg/cm}^2$	



(a) H = 1.5 D (15 cm)



(b) H = 2 D (20 cm)



(c) H = 2.5 D (25 cm)

図-4 半円形トンネルの破壊図

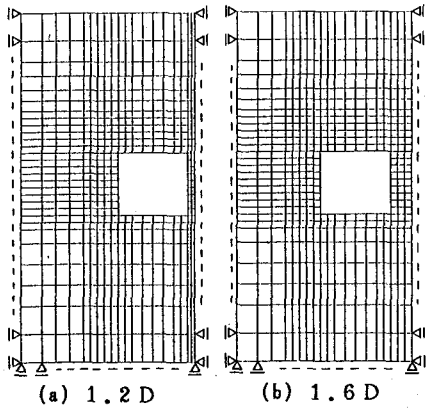


図-5 要素分割図

きく異なる。

1) 実験では、1.2 D の場合には破壊面は2つのトンネルを含むグランドアーチを形成し、1.6 D の場合には独立したグランドアーチを形成しているのに対し、解析ではどちらの場合もピラー部と側壁部に塑性域が広がっているのみであり、トンネル上部には何の変状も見られない。

2) 解析では、実験の約30%程度の荷重で塑性域が大きく広がり、約40%の時にはほぼ全体が塑性化し意味をなさなくなる。

これらの現象の違いが発生する大きな原因として、解析ではテンションカットオフを用いていないため引張領域での強度を高く評価しすぎていること、また、ひずみ軟化を考慮していないこと、および実験模型は上面から空気圧が載荷されている平板であるが、解析では平面ひずみ問題として取り扱っていることが挙げられる。

6. まとめ

以上のことより、次のことが分かった。

1) 矩形トンネルの場合において、その破壊モードはトンネルが非常に近接している状態では2つのトンネルを含むようなグランドアーチになるが、一定以上の距離をおくと2つのトンネルにおいて独立したグランドアーチを形成する。その距離は、本実験では1.6 D である。

2) 半円形トンネルの場合における土被り厚の違いによる破壊モードの違いをみると、土被りの薄い場合には2つのトンネルの天端を結ぶようなアーチを形成して破壊するが、土被りが2.5 D になると2つのトンネルを包みこむような大きなアーチを形成して破壊する。

3) 同一土被り、同一掘削面積の場合には双設トンネルにおいても矩形よりも半円形トンネルのほうが安定性がよい。

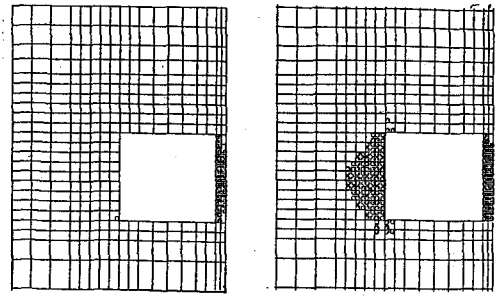
4) これらの実験結果を一般的なFEMによる弾塑性解析により表現することは難しい。

今後は実験数の増加とともに、実験結果を表現できる数値解析手法の開発を行なっていきたい。

最後に、本実験で用いた底面摩擦模型実験装置の製作および実験の実施にあたり、多大な御指導をいただいた名古屋大学川本教授、同市川助手、熊本大学尾原助手に厚く感謝の意を表わします。

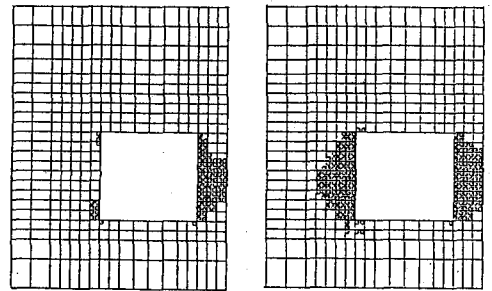
参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書解説、昭和44年
- 2) 川本、尾原他：底面摩擦模型実験装置および模型材料の力学特性、日本鉱業会誌、1983年1月
- 3) Egger, P.: A New Development in the Base-Friction Technique, Colloquium on "Geomechanical Models", 1979
- 4) 西田、江崎他：地下空洞を持つ地盤のシミュレーションのための底面摩擦模型実験装置、第17回岩盤力学シンポジウム、1985
- 5) E. イザクソン：トンネル技術者のための岩盤力学入門、鹿島出版会



(a) 荷重15%載荷時 (b) 荷重27%載荷時

図-6 1.2 Dの塑性領域図



(a) 荷重22%載荷時 (b) 荷重28%載荷時

図-7 1.6 Dの塑性領域図

(19) Model Test on Shallow Adjacent Double Tunnel

Yuji GOTO

Tatsuya TSUBOUCHI

Testu NISHIOKA

Tokyu Construction Co., Ltd.

At construction of double adjacent tunnel, the interaction of the stresses by excavations has bad influence on the tunnel's stability. Then the types of failure are made a difference in the distance between tunnels.

Model simulation of double tunnels are performed using a base friction apparatus in which a two dimensional model is deformed on a moving plate which generates frictional force. This frictional force works in the body of model, so that it is regarded as a kind of body force. And FEM analysis are carried out for the simulation of the experimental results.

From the test results, we can get that a roof collapse makes a grandarch including two tunnels in a very short distance but independent grandarches in a distance more than $1.6D$.