

坑道開さくに伴う岩盤移動に関する二軸模型実験

東北大学工学部資源工学科 正会員 小林 良二
 三井建設株式会社技術研究所 正会員 川巻 修
 三井建設株式会社技術研究所 正会員 平井 正雄
 日本工機株式会社 加藤 敏洋
 東北大学大学院工学研究科学生 ○、小杉 昌幸

坑道周辺の岩盤移動、あるいは緩み領域の問題を解析するため、従来より数多くの模型実験がなされてきた。これらの模型実験は、前もって模型岩盤内にある形状の坑道を設け、その模型岩盤に荷重を加える、という方式によるものである。しかるに、現地における坑道は、ある地圧下における岩盤に開さくするもので、上記の模型実験と条件が異なる。

本研究は、現地坑道開さく条件に似せ、まず、模型岩盤試料を所定二軸荷重下におき、しかる後、坑道を開さくし、開さくに伴う周囲岩盤の移動状況を調べたのである。また、本研究を行うにあたり最も留意した点は、剛性をとつ地圧を模型試験装置に組み込むことである。可なり、坑道に向って岩盤移動をもたらす地圧は、一般に、岩盤を爆発的に破壊させるような極めて弾性の高い荷重ではなく、岩盤に局部的破壊、一時的平衡状態を繰り返したる剛性の高い荷重であると考えられる。最近行なわれるようになった剛性荷重試験で示される Fig.1 に示す Complete stress-strain curve で説明すると、強度破壊点 A 以後において、岩盤内の各所の局部的破壊は、各応力レベルで一時的平衡と破壊を繰り返しつつ進行し、ついには、岩盤の破断に至るものと考えられる。模型岩盤の破壊挙動は、これに似せる必要がある。

Fig.2 は、本研究において製作した二軸剛性荷重模型試験機である。試験機の各部の名称を述べると、①：試験機枠、②：垂直荷重用ラム（最大容量 40 ton）、③：水平荷重用ラム（最大容量 20 ton）、④：試験機本体、⑤：剛性板、⑥：受圧器、⑦：模型試料、⑧：垂直荷重用油圧ポンプ、⑨：水平荷重用油圧ポンプ、である。また、Fig.3 は、試験機本体④の詳細図を示したものである。図において、⑩：剛性板支点、⑪：球座付載荷盤、⑫：試料押え板、⑬：開さく孔、⑭：透明押え板、⑮：押え板固定ネジ、である。

模型試料としては、石膏(p)、石灰岩粉(l)の混合材に水(w)を加えたものを採用し、配合比 p / l / w = 10 / 1.5 / 5.8 とした。模型試料の寸法は、Fig.4 に示すように 225 mm x 225 mm x 50 mm として、流し込みのさい、同配合の石膏モルタルの坑道形状試料を中央に固定した。異方性試料は、Fig.4 に示すように 6 mm 厚さの所定配合の石膏板を 6 mm 間隔に互持し、その間に同配合の石膏モルタルを流し込み作った。

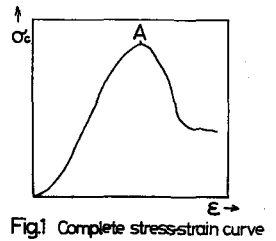


Fig.1 Complete stress-strain curve

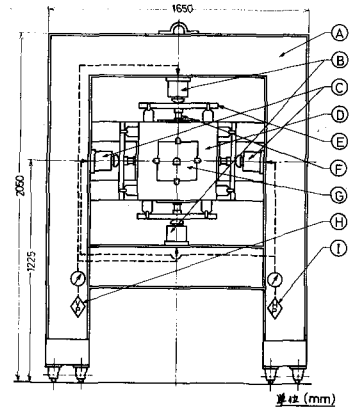


Fig.2 二軸剛性荷重模型試験機

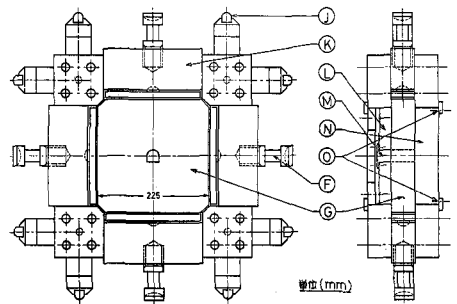


Fig.3 二軸模型試験機的主要部の詳細図

Fig. 5 は、本研究で用いた模型試料の一軸圧縮試験における圧縮力-ひずみ曲線を示したものである。なお、圧縮荷重は異方性の層理面に垂直に加えられた。また、Table. 1 に模型試料の力学的性質を示した。圧縮試験においては、異方性試料の層理面に垂直、および平行方向に荷重を加え、せん断試験においては、せん断面が層理面に垂直、および平行になるように試験した。

本研究における模型トンネルは、断面積 50~65 m² の原型トンネルを対象とし、Fig. 6 に示すような形状、および寸法をもつ。

ここで、長さのスケールファクターを 1/160、原型岩盤の密度を 2.5 g/cm³、模型試料の密度を 1.2 g/cm³ とし、重力加速度のスケールファクターを 1 にすると、次元解析により、模型試験におけるスケールファクターは Table. 2 に示すようになる。研究室実験においては、模型の大きさ、試料の材質の選択に制限され、表に示す値は必ずしも相似率を満足するものではない。しかし、模型坑道開きに伴うき裂の発生、進展、および岩盤移動に関して、定性的ではあるが知る事ができる。

所定厚に整形した模型試料の一面に、黒色の水溶性ビニール塗料を薄く塗り、有限要素法における各要素の節点に相当する箇所を白点をプロットした。

試験にあたっては、Fig. 3 に示すように、模型試料を試験機本体①の中央に置き、試料の前後面を試料押え板②、透明押え板③で密着させた。これにより模型坑道軸方向の変位を極力抑えるようにした。つぎに、模型試料に所定の垂直圧 (P_v)、水平圧 (P_h) を加え、この応力状態を保ちながら試料各部の移動が終了し、安定した時点を最初の測点とする。垂直、水平圧を一定に保った状態で、Fig. 3 の開き孔④より模型坑道を開き、終了直後を次の測点とする。さらに、開き後は、模型坑道周辺の岩盤の移動にしたがって測点とし、多重露光法によって同一フィルム上に撮影し、岩盤の移動を白点の軌跡として求めた。

本研究においては、トンネル開きにおけるサイロット工法をとりあげ、まず、双設坑道における坑道周辺の岩盤移動の傾向を調べ、ついで、その双設坑道を利用したサイロット工法による岩盤移動について調べた。

まず、サイロット工法における双設坑道の開きに伴う岩盤移動について調べた。試験にあたっては、Fig. 6 に示す先進坑道①を開き、この坑道内に 2 方向の変位を計測できる変位計を設置した。この変位計は、Fig. 7 に示すようにワイヤーストレインゲージを貼付けたカン子レバー方式をとっている。所定圧力下において坑道の閉塞が落ち着いた段階で、後進坑道②を開き、この開き後が先進坑道や周辺岩盤に及ぼす影響について調べた。

Fig. 8 は、先進坑道の閉塞量と後進坑道開き後の経過時間との関係を示したものである。この図の縦軸は、後進坑道開き前の所定圧力下における坑道寸法に対する、垂直、水平方向の閉塞量の百分率を示している。Fig. 9 は、多重露光写真であり、図は、多重露光写真に示された坑道周辺岩盤上の白点の

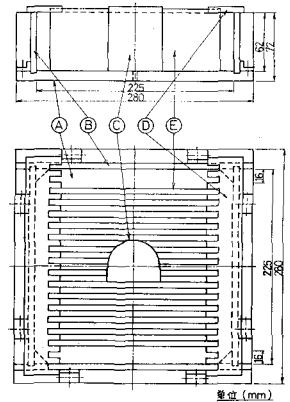


Fig. 4 異方性模型試料の製作法

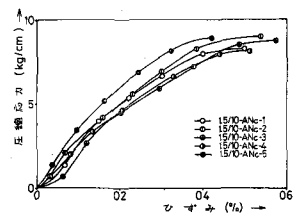


Fig. 5 圧縮力-ひずみ曲線

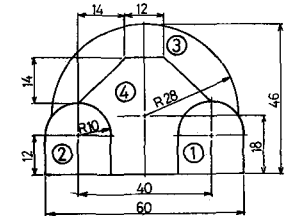


Fig. 6 模型トンネルの形状 単位 (cm)

Table. 1 異方性模型試料の力学的性質

	圧縮強さ (kg/cm ²)	接線ヤング率 ¹⁾ (kg/cm ²)	せん断強さ ²⁾ (kg/cm ²)	密度 (g/cm ³)
層理面に垂直	8.6	2.0 × 10 ³	2.1	1.2
層理面に平行	8.1	2.5 × 10 ³	0.2	1.2

1) 圧縮強さの 50% における接線ヤング率。
2) IBG 規格の一面せん断試験機による。

Table. 2 模型試験におけるスケールファクター

パラメータ	次元	スケールファクター
長さ	[L]	1/160
力	[F]	1/8.5 × 10 ⁶
時間	[T]	1/√160
単位体積質量	[FL ⁻³]	1.2/2.5
応力	[FL ⁻²]	1/333
ヤング率	[FL ⁻²]	1/333
重力加速度	[LT ⁻²]	1

移動軌跡、最終の坑道形状、およびき裂を写しとったものである。

Fig. 8、Fig. 9におけるa)は、垂直圧(P_v) / 水平圧(P_h)が $10 \text{ kg/cm}^2 / 5 \text{ kg/cm}^2$ 、b)は $11 \text{ kg/cm}^2 / 3.7 \text{ kg/cm}^2$ の場合における写真および図である。a)における測点は、後進坑道開さく前、開さく直後、開さく後127分経過の3点であり、b)においては、後進坑道開さく前、開さく直後、開さく後13分、および30分経過の4点である。

Fig. 8をみると、後進坑道の開さく過程、開さく終了後において、先進坑道が閉塞してゆく様子が解る。また、Fig. 9の多電露光写真をみると、先進坑道外側の岩盤の変位量が後進側に比べて小さく、先進坑道外側の隅角部にき裂が発生しているのが特徴的である。さらに、両坑道の破壊の程度を比べると、先進坑道の方がより大きく破壊されている。双設坑道におけるこの現象は、現地のトンネル開さくにおいても見られると聞いている。

つぎに、サイロット工法における模型トンネル開さくに伴う岩盤移動について調べた。試験にあたっては、Fig. 6にしたがい、①先進坑道開さく、②後進坑道開さく、③リングカット、④中背、大背開さく、の順序で進められ、それぞれ

の開さく段階、および開さく後の時間経過における周囲岩盤の移動について調べた。Fig. 10は、垂直圧(P_v) / 水平圧(P_h)が $9 \text{ kg/cm}^2 / 3 \text{ kg/cm}^2$ における多電露光写真と、周囲岩盤の移動軌跡、トンネルの形状、およびき裂を示す図である。図のa)における測点は、i)双設坑道開さく後、ii)リングカット後、iii)全断面開さく後の3点であり、b)においては、iii)、iv)全断面開さく後21分経過の2点、c)においては、iv)、v)全断面開さく後47分経過の2点、d)においては、v)、vi)全断面開さく後75分経過の2点である。それぞれの測点において撮影した多電露光写真を示している。

Fig. 10の多電露光写真をみると、先進坑道外側の岩盤の変位量が小さく、先進側隅角部にき裂が発生し、進展していく特徴的傾向がみられる。これは、先の双設坑道模型試験においてみられた傾向であり、先進側の岩盤がより大きく破壊されている。さらに、踏前下部においては、試料の異質性の層理面に沿ったき裂の発生がみられ、盤ぶくれの現象がみられる。Fig. 10の図に示されたき裂は、表面に表われたものであり、その前段階において岩盤内に微細なき裂が発生し、進展していると思われる。つまり、双設坑道開さくによって影響をうけたと思われるき裂が、模型トンネル全断面開さく後のb)図において踏前下ろにみられる。さらに、所定圧力下の試料全体

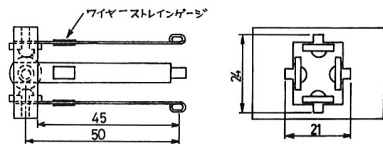


Fig. 7 カンチバー方式変位計 変位(mm)

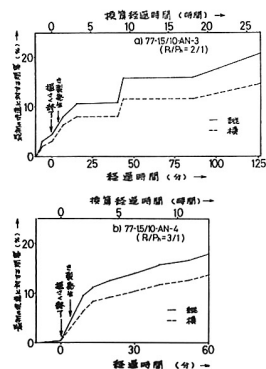
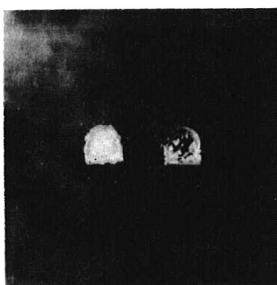
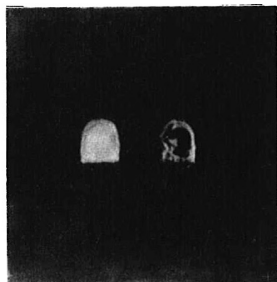
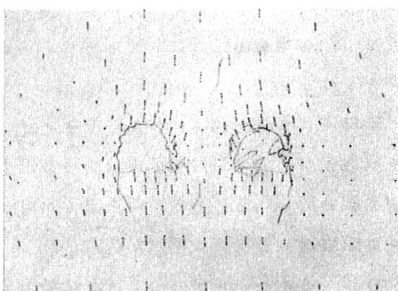


Fig. 8 模型坑道閉塞と経過時間



a) 77-15/10-AN-3 ($P_v/P_h=2/1$)



b) 77-15/10-AN-4 ($P_v/P_h=3/1$)

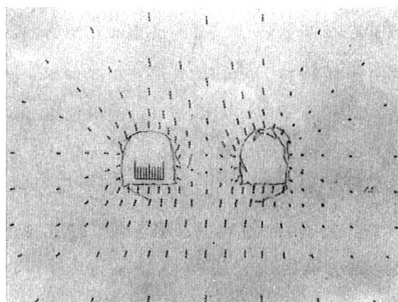
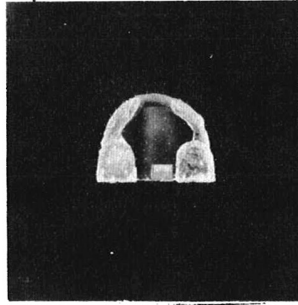


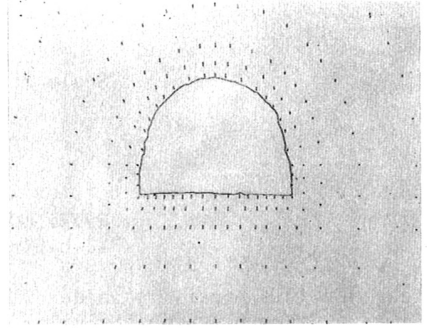
Fig. 9 多電露光写真と模型試料各部の移動軌跡

の変位は段階的に進行している。岩盤全体の挙動としては、局部的な破壊を伴う周囲岩盤の移動の後、一時的な平衡状態を保ち、さらに破壊が進行し、さ裂が進展し、また一時的な平衡状態を保つような段階的過程をたどったものと思われる。

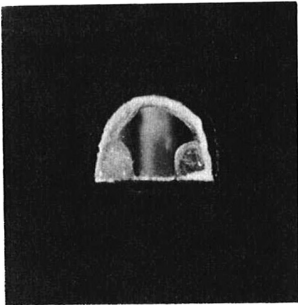
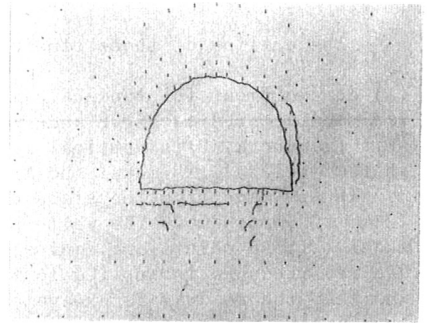
以上、坑道開さくに伴う二軸模型試験について述べたが、これらの試験は素掘り坑道におけるものである。支保工を施した場合の模型試験については、目下計画中である。



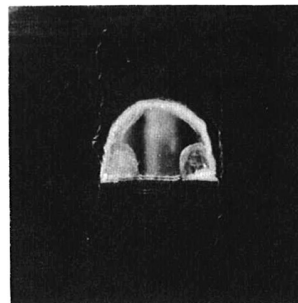
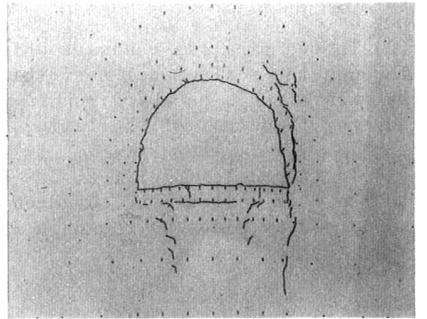
a) i) → ii) → iii)



b) iii) → iv)



c) iv) → v)



d) v) → vi)

77-15/10-ANs-4 ($P_v/P_h = 3/1$)

Fig. 10 多重露光写真と模型試料各部の移動軌跡

Scale Model Tests of Rock Movements Caused by
Excavating Roadway

by

Ryoji KOBAYASHI, Osamu KAWAZUMI, Masao HIRAI,
Toshihiro OKITSU and Masayuki KOSUGI

In this paper, it is described that the rock movements caused by excavating roadway take place in a similar manner of the bi-axial model test using the model material consisted of plaster of Paris and limestone-sand in water.

The outline of those studies is as follows;

- (1) An equipment for the scale model studies of the rock behaviour around a roadway was manufactured as Fig.2 and Fig.3. The main parts of the equipment are as follows; (A) is framework, (B) is vertical rams, (C) is horizontal rams, (E) is stiffening beams, (F) is load cells, (G) is model and (N) is transparent resin-plate. In this test, the models are made from the slabs of plaster-sand material, and have the dimensions of 225mm × 225mm × 50mm. The white points are marked onto the black-painted surface of model. These points are equivalent to the nodal points of F.E.M.analysis. The desired pressure is applied to the model placed on the bi-axial testing machine, and then the roadway is excavated under constant loading condition. The rock movement around the roadway is measured by the multiple-overlap exposure photograph which record the displacements of the white points on the model.
- (2) In two parallel roadways which are closely excavated together, it becomes clear through the scale model test that the rock around an advanced roadway is affected by excavating a backward roadway, and that the degree of failure of the former is severer than that of the latter, as shown in Fig.9.
- (3) In the scale model test of the side pilot tunnelling method, it has a tendency to the rock wall of the advanced roadway side damages more than that of the backward roadway side, as shown in Fig.10.