

側圧付加型フリクシオンテーブルによる不連続岩盤内トンネルの安定に関する考察

京都大学工学部 谷 本 親 伯

〃 大 西 有 三

〃 ○山 本 卓 也

〃 吉 岡 淳

1. まえがき

原位置岩盤の不連続性は、それに関連する構造物に対して大きな影響をおよぼす。そこで不連続性岩盤の変形挙動を説明するために、底面摩擦模型装置（フリクシオンテーブル）がR.E. Goodmanらによって開発された。この装置は平板上に置いた模型材料に層理あるいは節理を想定した切断線を入れ、模型材料を固定したまま底面を移動させることによって重力場を発生させるものである。本研究では従来のフリクシオンテーブルに側圧を付加できるように改良を加え、模型材料として角砂糖を用いた実験によりトンネルの安定と不連続面の性状との関連性を考察した。今回製作した装置（TY式側圧付加型フリクシオンテーブル）の大きな特徴は次の2点である。

- ① 材料に側方圧を付加できること。また前後のおもりを調節することによって等分布、台形分布などの種々の側圧分布が得られること。
- ② 固定障壁の部分を片持ち梁に置き換え、両面にひずみゲージを貼って片持ち梁部分にかかる力を測定できること。これにより模型材料に作用する荷重の大きさを知ることができる。

この装置に角砂糖を使用し、不連続岩盤内のトンネルを想定したモデル実験を行った。さらにD.E.M. (Distinct Element Method) を用いて数値解析を行い、実験結果との比較検討を試みた。

2. 実験装置および実験方法

2-1 実験装置

今回製作した側圧付加型フリクシオンテーブルの外枠は縦540×横455×高さ38 (mm) である。片持ち梁部分は外枠の端に位置し、その高さは232 mm であり縦212×横50×厚さ1 (mm) のバネ鋼6枚から成っている。バネ鋼は降伏点近辺までは弾性変形をするので両面にひずみゲージを貼付し、増幅器によってそのひずみをビジュアルに出力させた。

模型材料を載せるフリクシオンシートは幅400×周長1525 (mm) のエンドレス砂紙ベルトである。またこのシートは外径97×幅410 (mm) のドラム2本によって外側に引張られた状態にあり、ドラム的一方を三相交流220 V の電動機（可変速）にチェーンで連結してあるので2.27 %分の等速で移動する。側方圧は模型材料を2つのL型鋼で両側からはさむような形式で与えられる。それぞれのL型鋼は外枠の両側に取り付けられた2組の滑車を通しておもりを釣るした2本のピアノ線によって水平方向に引張られる。装置の概略を図1に示す。

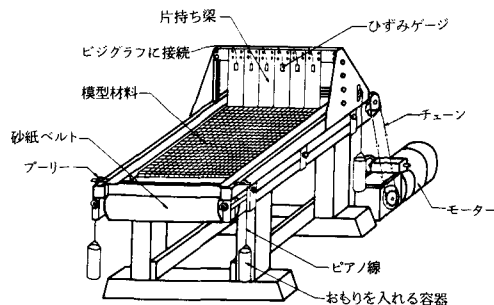


図1 TY式側圧付加型フリクシオンテーブル

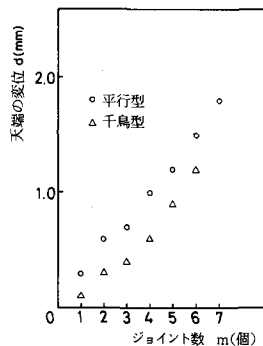


図2 並形四角トンネル

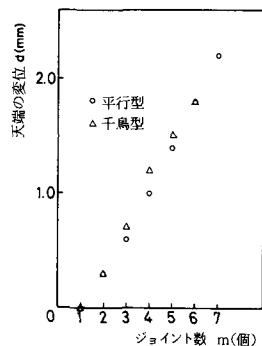


図3 小形四角トンネル

2-2 実験方法

今回模型材料として用いた角砂糖は並形と小形の2種類で並形は縦20×横18個、小形は縦26×横23個をフリクションシート上に並べて使用した。角砂糖を用いた理由は安価で多量に入手でき、整形が容易なことである。その中の幾つかを抜き取ることによって不連続岩盤内に掘削したトンネルを想定し、フリクションシートを一定時間(30秒)だけ移動させた後のトンネルの変形状態および天端付近のゆるみ域を観察した。なお角砂糖の諸元は次の通りである。

並形角砂糖：寸法 18×18×19(mm)、重量 6.320g、想定き裂頻度 55.6 $\frac{\%}{m}$ 、角砂糖どうしの摩擦係数 0.74(摩擦角36.5°)、角砂糖とシートの摩擦係数 0.88(摩擦角41.3°)。小形角砂糖：寸法 14×14×15(mm)、重量 3.376g、想定き裂頻度 71.4 $\frac{\%}{m}$ 、角砂糖どうしの摩擦係数 0.69(摩擦角34.6°)、角砂糖とシートの摩擦係数 0.91(摩擦角42.3°)。

またジョイント数 m を次のように定義した。

$m = l/a$ (l : トンネルのスパン, a : 個々のブロックの傾斜角 θ の場合の水平方向の長さ)ここに m はトンネルのスパンに着目したときのジョイント数である。

3. 実験結果

3-1 ジョイント数と天端の変位との関係

角砂糖の配列方法を「平行型」および1辺の半分だけずらして並べる「千鳥型」とし、また角砂糖のサイズを並形および小形として四角および円形トンネルについてそれぞれジョイント数 m と天端の変位 d との関係を調べた。側圧は鉛直応力との比が1:1になるように400gのおもりを釣り下げ、30秒間フリクションシートを移動させた後の天端の中央のブロックの変位を測定した。円形トンネルの場合円の中心はブロックの中心に一致させ、構造・荷重ともに左右対称となるようにした。以下断わらない限りこの条件で実験を進めた。実験結果を図2～5に示す。また平行型と千鳥型の破壊モードの相違を図6,7に示す。

3-2 き裂頻度と天端の変位との関係

i) 水平方向、鉛直方向ともにき裂頻度を変えた場合

今回模型材料として用いた角砂糖は並形と小形の2種類で、そのき裂頻度はそれぞれ55.6, 71.4 $\frac{\%}{m}$ である。同一スパンのトンネルについてき裂頻度と天端の変位との関係を示したものが図8,9である。

ii) 水平方向のき裂頻度のみ変えた場合

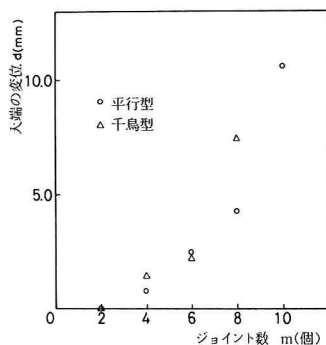


図4 並形円形トンネル

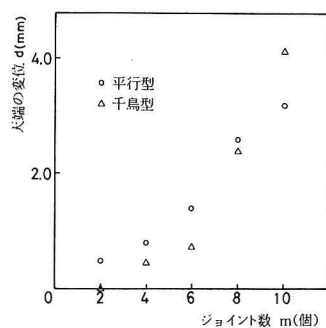


図5 小形円形トンネル

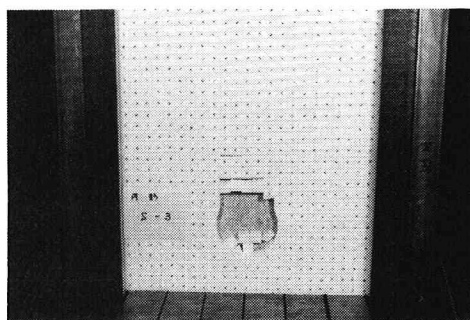


図6 破壊モードの相違(平行型)



図7 破壊モードの相違(千鳥型)

図10は直交する2方向のき裂頻度が異なることを想定し、ブロックの大きさを変えるために角砂糖と接着剤で2個、3個とつないだときのジョイント数と天端の変位との関係を示したものである。ブロックの並べ方は平行型で傾斜角は0°とした。一例として $\delta_2 = 3\delta_1$ (δ_1, δ_2 はそれぞれ傾斜角 $\theta = 0^\circ$ のときのブロックの鉛直、水平方向の長さ)の場合の図13を示す。

3-3 側圧と天端の変位との関係

3-1の側圧状態を荷重比1.0として荷重比を0.5, 1.5, 2.0と変えた場合のジョイント数と天端の変位との関係を並形円形トンネルについて考察した。その結果を図11に示す。側圧を大きくすると天端の変位が小さくなるのがわかる。

3-4 薄肉覆工(ショットクリート)の効果

近年国内ではロックボルトと吹付けコンクリート(ショットクリート)を主要な支保部材とするNATMによる施工例が増えている。そこで覆工のモデルとして厚紙(厚さ0.8mm)およびタイプ用紙(厚さ0.1mm)をそれぞれ並形円形トンネル($l = 108\text{mm}$, 平行型)の内側に挿入し、トンネルの直径を変化させたときの天端の変位を測定した。測定結果を図12に示す。トンネル内に紙を挿入することによって天端の変位が小さくなるのがわかる。

3-5 傾斜したブロック岩盤におけるトンネルの安定

3-2 ii) で説明したブロックを用いて水平方向に対する傾斜角 θ を30°, 45°, 60°と変化させたときの並形円形トンネル($l = 108\text{mm}$, 平行型)の安定性を合計9ケース観察した。その結果の一部を図14, 15に示す。図15ではトンネル側面のゆるみが顕著である。

4 結果に関する考察

(1) き裂頻度が一定の場合、天端の変位はジョイント数が増加するにつれて四角トンネルについてはほぼ直線的に、円形トンネルについては放物線的に増加する。これはジョイントの数が原位置岩盤の変形性に関して重要なパラメータであることを示し、実際には同じき裂状態であっても大断面のトンネルの方が不安定になることを意味する。

(2) トンネルの天端付近のゆるみ域は図6, 7からわかるように平行

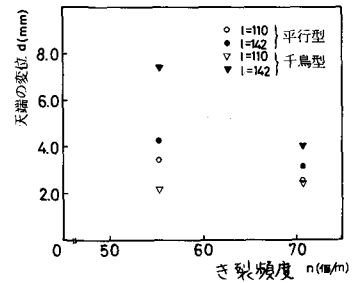


図8 き裂頻度と天端の変位との関係 (円形トンネル)

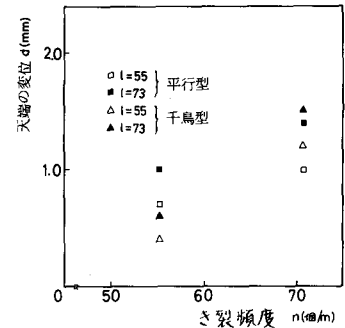


図9 き裂頻度と天端の変位との関係 (四角トンネル)

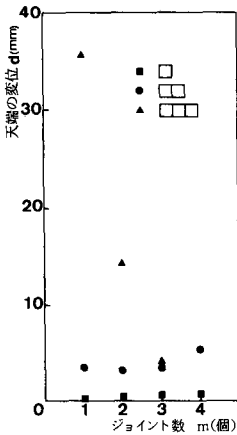


図10 ブロックの大きさと天端の変位との関係

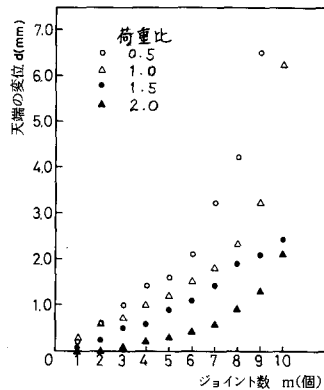


図11 側圧と天端の変位との関係

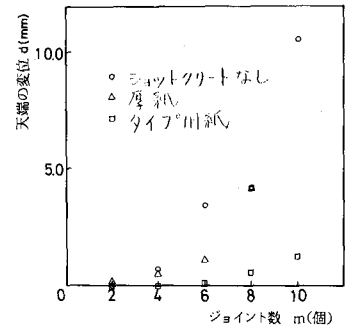


図12 薄肉覆工(ショットクリート)の効果

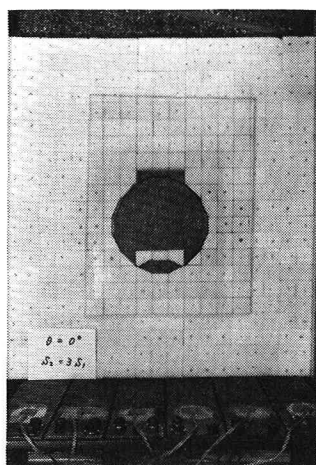


図13 円形トンネルの例①

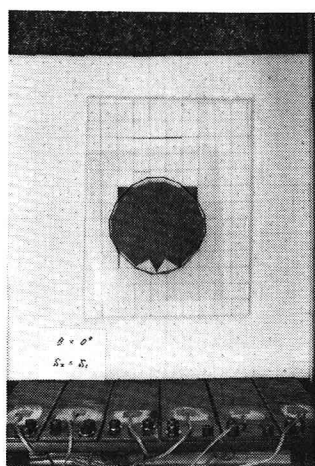


図14 円形トンネルの例②

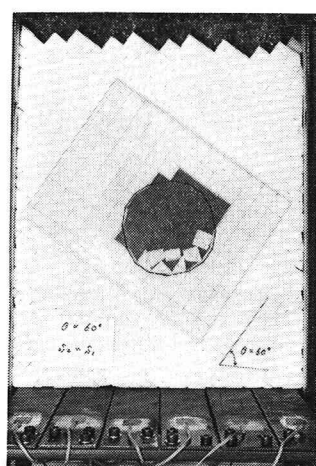


図15 円形トンネルの例③

型の場合は矩形形状に、また千鳥型の場合は三角形形状となり、その幅および高さはトンネルの直径にほぼ等しい。また円形トンネルの方がアーチ作用がはたきやすく、応力の分配が行われやすいと考えられる。

(3) 図6,7からわかるように千鳥型の方が平行型に比べて天端のゆるみ域が小さくなっている。これはダイレイタンスの概念を使って次のように説明できる。平行型をダイレイタンスが発生しない状態であるとすれば千鳥型は角砂糖の1辺の長さの半分だけずらして並べてあるのでダイレイタンスが最大の状態である。千鳥型では1つのブロックがすぐ下側のブロックを乗り越えて移動するには大きなせん断力と時間を要するので天端の変位は平行型より小さな値になるものと思われる。結局ダイレイタンスの大きな地盤ほどゆるみ域が小さい。

(4) 側圧を増加させれば天端の変位は減少する。特に図11からわかるように重力の1.5倍程度以上の側圧を与えると天端は安定する。

(5) 天端の変位とき裂頻度との関係はある一定のき裂頻度のところで極値を持つような曲線、すなわちあるスパンに対して一番不安定な状態を呈するき裂頻度が存在すると考えられる。

(6) 一定のスパンに対してはジョイント数の大きい方が安定する。それは図10において $\delta_2 = 3\delta_1$ の場合、ジョイント数の小さいときは1個のブロックが偏平であるため形成するアーチが不安定になるからであろう。

(7) 薄肉覆工の効果について厚紙の方が変位が大きき出ているのはタイプ用紙がショットクリートのようにトンネル内壁と密着し、一体化しているのに対し厚紙の場合は鋼製支保工と地山のようにトンネル内壁との間にわずかな隙間があったためにゆるみが生じたものと考えられる。

(8) 傾斜角 θ の増加に伴いトンネル側面がゆるみ、 $\theta = 0^\circ$ のときに最も不安定であった $\delta_2 = 3\delta_1$ のケースは θ が増加するとダイレイタンスの影響で安定し、かえって $\delta_2 = \delta_1$ のケースが不安定なアーチを形成する。

(9) トンネルの天端において形成されるアーチにはキーとなるブロックが存在し、そのブロックが崩れ落ちれば天端全体が崩壊してしまう。実際の施工ではこのキーブロックをロックボルトでリンクしてやればトンネルの天端は安定するものと思われる。

5. D.E.M.による解析

今回のモデル実験をD.E.M.によって解析した。その結果は現在検討中であるので当日のH.P.にて発表する。

6. あとがき

今回は模型材料として角砂糖を用いたが、以後摩擦角の異なった材料(アルミ屑、石コウ等)を用いてさらに研究を進め、また相似律を考慮し現場測定の結果と対比してゆく方針である。

NEWLY DEVELOPED FRICTION TABLE DEVICE APPLIED TO TUNNEL STABILITY

by Chikaosa TANIMOTO, Yuzo OHNISHI
Takuya YAMAMOTO, Atsushi YOSHIOKA

Dept. of Civil Engineering, Kyoto University

SUMMARY

The friction table devices, which can mobilize gravitational field, have been conveniently employed for the analysis of geotechnical problems, but through the application of conventional device, whose prototype was proposed by R.E. Goodman. We found that introducing lateral pressure to gravitational field gave very stable results, which are much more realistic in the analysis of underground opening in jointed rock. The magnitudes of gravitational and lateral load to be applied can be known by monitoring load acting to cantilevers, attached strain gauges on and by adjusting counter weights acting to both ends of movable frames. The dimensions and mechanism are described.

The following cases were discussed :

- (1) Rectangular and circular openings : in the ground whose direction of predominant joint orientation is horizontal, with various span lengths.
- (2) Rectangular and circular openings whose direction of joint orientation is at the inclination of 30° , 45° , 60° from the horizontal direction.

Two sizes of sugar cube were employed as model units whose dimensions are $18 \times 18 \times 19$ and $14 \times 14 \times 15$ in mm respectively and composing these units correspond to the states for joint frequencies of 55.6 and 71.4 per meter. Two formations are available in the forms of grid and zig-zag.

Through the model study by the improved device, which can give stable and visual solution, we conclude as follows :

(1) The relation between tunnel span length and the settlement of tunnel crown is proportional in case of a rectangular tunnel and parabolic in case of a circular opening to the tunnel span. And it was confirmed clearly that a circular tunnel is more stable than a rectangular one because of arching effect. Under the condition of fixing constant diameter there exists a certain specific joint spacing where an opening forms uniform arch action, judging from the concave curve showing the relation between settlement of crown and joint numbers. Consequently, the ratio of joint spacing to tunnel span length should be one of the important parameters determining deformability and stability of rock mass.

(2) The loosened zone near the tunnel crown is apt to show rectangular shape for the case of grid formation and triangular for the case of zig-zag one. A height of loosening is nearly equal to the tunnel span when a ratio of lateral pressure to gravity field is less than 1.5. In general the loosened zone in the case of zig-zag formation is smaller than in the case of grid formation, approximately one third. The difference between various formations comes from the magnitude of dilation along joints. The former should be subjected to highest dilation and the latter should be lowest.

(3) Correlationship between crown settlement and lateral pressure is clearly recognized through our model study, and the lateral load should be considered one of the important parameters in analyzing tunnel stability in jointed rock.

(4) A key stone plays an important role in mobilizing confinement effect and in the model test the existence of some key stones at the crown and at spring line was confirmed. Thus, this model test should be also carried out for the purpose of finding the location of key blocks along the surface of an opening and of discussing appropriate size of blocks linked together with rockbolts in support recommendation.