

九州大学生産科学研究所○正員 亀 田 伸 裕
同 上 正員 西 田 正
同 上 正員 江 崎 哲 郎

1. まえがき

重力場における応力分布は、一般に地盤の自重による圧力(土かぶり圧)を鉛直応力とし、水平応力はこれにポアソン比で表わされる側圧係数をかけたものに等しいとされている。これは、地盤が弾性体として挙動する時に成立し、実際の地盤内の応力は、このような層状分布をしていることは極めてまれで、むしろ初期地圧は地下深部では静水圧的であり、一方地下浅部の地表近くでは、水平応力は鉛直応力以上になる場合もある。これは地形、地盤の異方性、不均質性あるいは断層やしゅう曲などの地殻変動によるものである。この様な地盤における構造物の変形、破壊解析にたいして、従来の鉛直応力のみが作用する装置では不十分である。

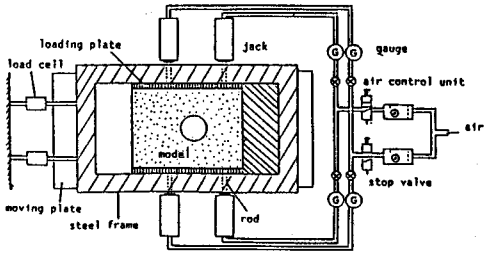
以上の観点から、今回、水平方向にも荷重を付加できる新しい底面摩擦模型装置の開発を行ない、側圧の影響を受けやすい層状岩盤やブロックモデル岩盤中のトンネルの安定性に対し、層厚、トンネル幅、ジョイント充填物、岩盤の力学的特性などの要因を考慮した実験を行ない、合わせて従来からのプーソアはり理論との比較検討を行なったので、ここに紹介する。

2. 側圧付加式底面摩擦模型装置

試料上部に空気圧をかける底面摩擦模型装置の詳細については、既に発表済みであるので¹⁾ ここでは省略する。側圧付加装置の概要を図・1に示す。側圧を与えるジャッキはエアークランピングエレメントを用い、フレームの外側に左右それぞれ2個ずつ取り付けけたものである。ジャッキの仕様は次の通りである。

- 最大外径 56mm
- 長さ 188±0.2mm
- ストローク 9mm
- 最大圧力 850kgf/cm²

今回の実験では、地表面の水平方向荷重を零として、鉛直荷重に側圧係数を掛けた三角形分布荷重を作用させた。



図・1 側圧付加装置

3. 模型試料および実験方法

実験は層状地盤とブロックモデル地盤に対して行なったが、層状地盤の模型材料は2種類、すなわち硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリン(70:21:9)の混合試料(試料1)、石膏、石灰、水(1:3:4)の混合試料(試料2)である。一方、ブロックモデルの材料としては、前述の試料2で作った10×20×25mm(幅×長さ×厚み)のブロックと市販の角砂糖(試料3)を用いた。各試料の力学的特性およびベルトとの摩擦係数 μb は表・1に示される通りである。

表・1 各試料の力学的特性とベルトとの摩擦係数

	単位重量 γ (g/cm ³)	一軸強度 σ_c (kg/cm ²)	弾性係数 E (kg/cm ²)	粘着力 C (kg/cm ²)	内部摩擦角 ϕ°	ベルトとの摩擦係数 μb
試料1	2.24	2.28	780	0.52	37	0.685
試料2	0.79	16.93	11323	3.32	46.5	0.687
試料3	1.00	10.63	3900	—	*38.5	0.787

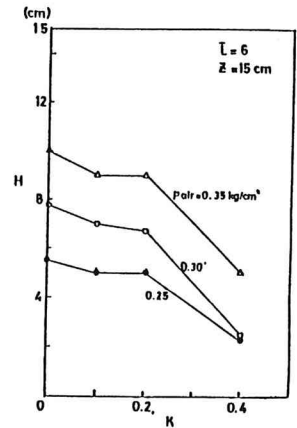
* 試料どうしの摩擦角

実験はジョイント間の厚さDとトンネルスパンLとの比 $\bar{L}=L/D$ を一定にして、側圧係数Kと空気圧Pairを変化させて、天盤の破壊、崩落状況を観察した。

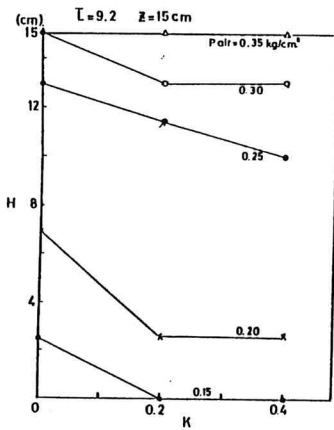
4. 実験結果

4. 1 層状モデル地盤

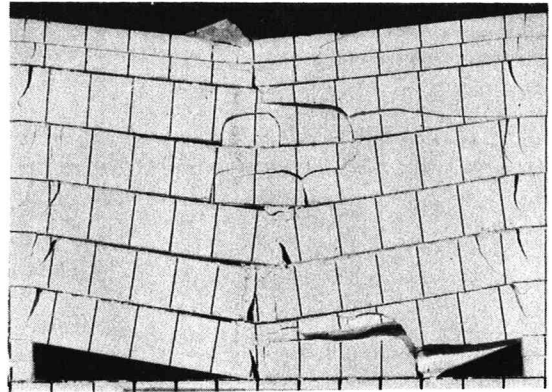
図・2は試料1に対する側圧係数K、ゆるみ高さHおよび空気圧Pairとの関係を示している。 $\bar{L}=6$ の場合、側圧が大きくなるとゆるみ高さは小さくなり、特に側圧係数 $K=0.4$ の場合では、側圧がない場合に比べてゆるみ高さが約1/2に減少している。また、この傾向は空気圧の増加の場合も同じである。同様に、試料2のモデルに対する $\bar{L}=9.2$ の場合の結果を示したのが図・3である。また写真・1は天盤の破壊状況を示しており、破壊はまず天盤隅のほり上部にクラックが入ると同時に中央天盤にもクラックが入り、天盤が崩落する。この場合、試料強度が試料1の8倍以上であるものの、図・2と同様の傾向が見られる。ただし、空気圧が大きい場合は側圧係数が増加しても、ゆるみ高さはあまり減少せず側圧の影響が小さい。



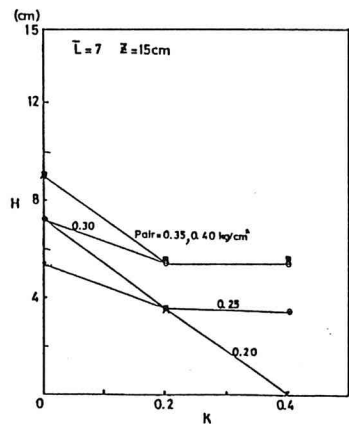
図・2 $\bar{L}=6$ の場合の側圧係数K、ゆるみ高さHおよび空気圧Pairとの関係(試料1)



図・3 $\bar{L}=9.2$ の場合の側圧係数K、ゆるみ高さHおよび空気圧Pairとの関係(試料2)



写真・1 層状地盤の天盤崩落状況



図・4 $\bar{L}=7$ の場合の側圧係数K、ゆるみ高さHおよび空気圧Pairとの関係(試料3)

4. 2 ブロックモデル地盤

ブロックモデルに対する側圧の影響を見るために、まず試料3の角砂糖試料を用いて実験を行なった。実験は千鳥状に配置したブロックモデルのトンネルスパンを変化させ、次にブロック間に何も挿入しない場合、テフロンシートおよびパラフィンを挿入した場合について空気圧、側圧を変化させて、崩落状況を観察した。図・4～図・5は $\bar{L}=7$ の場合のブロック間に何も挿入しない場合とテフロンを挿入した場合のK、HおよびPairとの関係を求めたものである。テフロンが無い場合、側圧、空気圧が増加するにつれて崩落しにくい傾向が見られる。

しかし、この場合の天盤の破壊は天盤中央部にクラックが入った後に、天盤隅のブロックがせん断破壊を生じて崩落する傾向が見られた。一方、テフロンがある場合は側圧が増加すると急激に崩落しにくくなり、 $K=0.4$ の時はPairが増加しても崩落を生じなくなる。

5. プーゾアはり理論による考察

いま、空洞天盤の一部が図・6に示すようにクラックと上盤中の水平面とで分離し、はりを形成しているとすると、このはりが崩落する条件として次の三つが考えられる。

- 1) 支承面の摩擦力不足
- 2) 支承面の圧砕
- 3) 天盤はりの座屈

今、天盤が崩落しないで安定している条件は次式で表わされる。

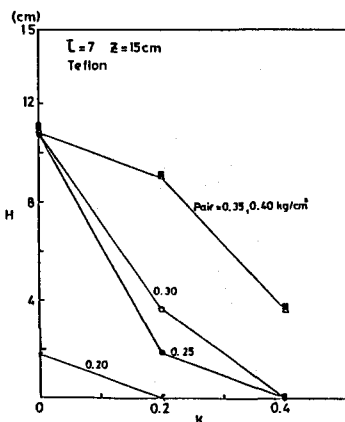
$$T \cos \theta + Q/2 \sin \theta < (T \sin \theta - Q/2 \cos \theta) \mu + cf \quad (1)$$

ここに、 T ははりの端面に働くスラスト、 Q ははりに働く鉛直方向の単位奥行当りの荷重、 θ は支承面のクラックの傾斜角、 μ は摩擦係数、 c は粘着力、 f は支承面の接触面積である。上式において $\theta = 90^\circ$ 、 $c = 0$ と仮定すると(1)式は次のようになる。

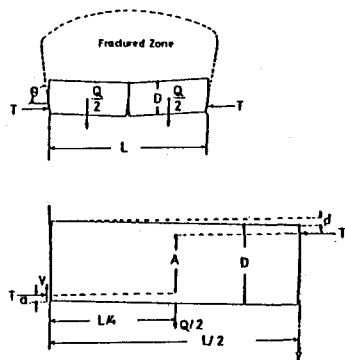
$$Q/2 < T \mu \quad (2)$$

従って、(2)式を満足しない場合は支承面の摩擦力不足で崩落することになる。図・7は $Q/2T$ と L の関係を側圧係数 $K=0, 1, 2, 3$ の場合について求めたものである。ここで Q 、 T はそれぞれ Q 、 T を DE で除した値である (E は弾性係数)。この場合、 L が小さいと $Q/2T$ が大きくなるのが分かる。すなわち、スラスト T は L が小さいと発生しにくくなる。また側圧を大きくすると、 L が2~5の場所に変曲点を持つ曲線となり、側圧が大きくなると、 L が小さい時に側圧の影響が大きいことが分かる。しかし、 L が10以上になると、側圧の影響は見られない。先の層状地盤での試料1の場合の摩擦係数は $\mu = 0.754$ 、試料2の場合は $\mu = 1.150$ でいずれも曲線の上にあるので、この場合は支承面の摩擦力不足による崩落はないことが分かる。また、ブロックモデル地盤のテフロンの $\mu = 0.002$ 、テフロン無しの場合の $\mu = 0.740$ となり、前者の場合は図より支承面の摩擦力不足で崩落することが分かる。しかし、側圧が増加すると、テフロンと試料間の摩擦が増大して、崩落しにくくなるものと推定される。一方、テフロン無しの場合でも、 $L < 4$ で崩落が生じることになる。

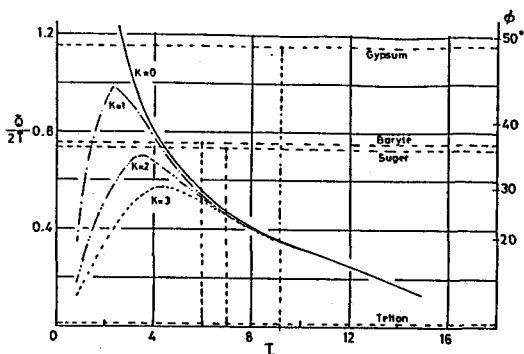
次に、スパンが大きくなると、 T も大きくなり、第1条件の崩落は生じにくくなるが、中央断面および支承面に垂直に働く水平圧縮応力 σ_{max} が増加し、支承面の圧砕で崩落することになる。図・8は σ_{max} 、



図・5 $L=7$ の場合のテフロン挿入時の側圧係数 K 、ゆるみ高さ H および空気圧 P_{air} との関係(試料3)



図・6 クラックのある天盤はりに作用する力(F.D.Wrightによる)



図・7 摩擦力不足で天盤はりが崩落する場合の $Q/2T$ および内部摩擦角 ϕ とスパン L との関係

$\bar{L}$ および K との関係をゆるみ高さ $H=1\text{m}$ 、 $E=10^5\text{kg/cm}^2$ 、 $\gamma=2.5\text{g/cm}^3$ の場合について示したものである。ここで $\bar{\sigma}_{\max}=\sigma_{\max}/E$ である。この場合、 $\bar{L}$ が増加すると支承面の $\bar{\sigma}_{\max}$ が増加して、天盤が崩落しやすい傾向が見られるが、側圧の影響はごく僅かである。しかし、側圧が増加すると $\bar{\sigma}_{\max}$ が減少して、支承面での破壊が生じにくくなることは確かである。一方、モデル実験について $P_{\text{air}}=0.25\text{kg/cm}^2$ 、 $K=0$ の場合について直接天盤のゆるみ高さ H 、 $\bar{\sigma}_{\max}$ および $\bar{L}$ の関係について求めたものが図・9である。この場合、 $\bar{\sigma}_{\max}$ はほぼ $\bar{L}$ の自乗と H に比例して増加することが認められる。一方、試料1の $\sigma_c/E=3.0\times 10^{-3}$ 、試料2のそれは 1.50×10^{-3} となり、この値を越えるゆるみ高さがあれば、やはり崩落することになり、それぞれ実験値では $H=5.4\text{m}$ 、 $H=12.5\text{m}$ となり、これから両者共に支承面の圧砕による崩落であることが認められる。

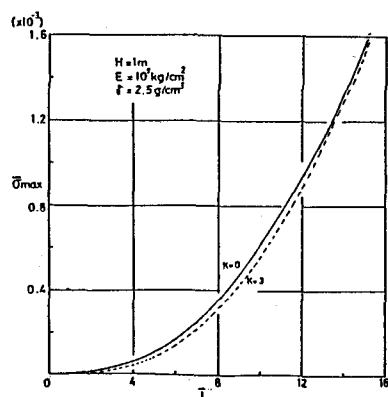
最後に、条件3の座屈による崩落については、天盤はりのスパン L が大きくなると発生する。Wrightによれば天盤のたわみが $d\geq 0.14D$ の時、座屈が生じる。そこでモデル材料に対して $P_{\text{air}}=0.35\text{kg/cm}^2$ のときの $\bar{d}(=d/D)$ 、 H および $\bar{L}$ について関係を求めたのが図・10である。図から、Wrightの条件を満足する場合はゆるみ高さによって異なるが、我々の実験では少なくとも $\bar{L}\geq 15$ 以上でないと座屈は生じないことになる。

6. まとめ

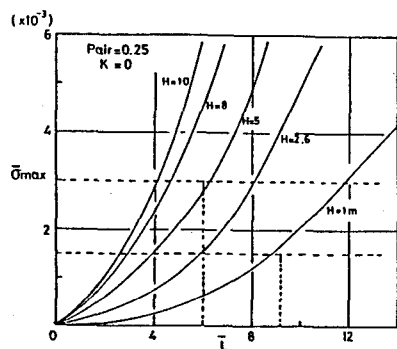
地下浅所の空洞天盤に平行な層状地盤とブロックモデル地盤中のトンネルの天盤安定に対して、側圧の影響を考慮した模型実験および層状地盤に対しブーソアはり理論による解析を試みた。モデル実験では側圧の影響が出てきたが、はり理論による場合には天盤のスパン $\bar{L}$ が2～3以下で側圧の影響が大きく、 $\bar{L}$ が10以上になると、顕著な影響が見られない。これは、ブーソアはり理論に基づいた理論解析にも問題があると考えられ、さらにブロックモデル地盤に対してもジョイント要素あるいは中間要素などを用いた有限要素解析あるいは剛体バネモデルなどによる理論解析などからの考察が必要である。今後、これらの問題について検討する予定である。

参考文献

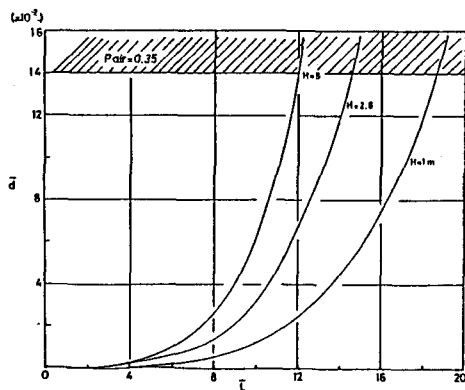
- 1) 西田、江崎、亀田、中川：重力モデル実験のための底面摩擦装置の試作、開発、九州大学生産科学研究所報告、第74号(1983)
- 2) F.D.Wright: Arching Action in Cracked Roof Beams, Fifth International Strata Control Conference, (1972)
- 3) 岡、水田、平松：空洞天盤の崩落挙動について、日本鉱業会秋期大会別刷(1972)



図・8 支承面に働く最大圧縮応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ と側圧係数 K およびスパン $\bar{L}$ との関係



図・9 支承面の圧砕によって天盤はりが崩落する場合の最大圧縮応力 $\bar{\sigma}_{\max}$ とスパン $\bar{L}$ およびゆるみ高さ H との関係



図・10 座屈によって崩落する場合の天盤の変位 $\bar{d}$ とゆるみ高さ H およびスパン $\bar{L}$ との関係

Apparatus with Lateral Loading System

by

Nobuhiro Kameda, Tadashi Nishida and Tetsuro Esaki

Research Institute of Industrial Science, Kyushu University

ABSTRACT

The base friction apparatus which is capable of supplying the compressed air on the surface of the model can provide the application of the similarity between in-situ and the model for the behaviour of practical rock structures.

For the purpose to clarify the effects of horizontal stress for the stability of tunnel roof in discontinuous rock, we have studied experimentally by the base friction apparatus which has lateral loading system. This system is able to providing lateral forces at the both sides of model as triangular or rectangular forces by two pairs of four air jacks. The collapse of tunnel roof in discontinuous bedded and block rock has been studied on the parameters, span of tunnel(L), thickness of bedded rock(D), lateral loadig(P) and mechanical properties of the rock. And the 'voussoir' beam theory would be applied theoretically to predict the stability of tunnel roof in bedded rock.

By this results, it has become clear that the base friction technique is a quite significant method to predict quantitatively the stability of tunnel roof. And horizontal stress affects considerably for the collapse of tunnel roof. Especially, when $\bar{L}(=L/D)$ is under 2 or 3, horizontal stress is very effective for it.