

(48) トンネル周辺での地山挙動における砂質地山と泥質地山の違いに関する落し戸実験

国鉄 鉄道技術研究所 ○正員 北川修三

同 上 正員 川上義輝

同 上 正員 小野田滋

1. まえがき

昭和54年以降、鉄道技術研究所地質研究室で進められたトンネルの模型実験によると、砂質地山と泥質地山では坑壁の変位量ならびに地山の破壊機構に大きな違いがあることが認められた。すなわち砂質地山においては、ある応力以上になるとトンネル周辺にせん断クラックが発生するが、坑壁の変位量は比較的小さいのに対し、泥質地山においては、トンネル周辺の地山に塑性的な変状が生じるとともに坑壁は著しく大きな変位を示した。

一方、軟岩地山での実際のトンネル掘さくにおいても、砂質地山と泥質地山では坑壁の変位量が大きく異なっていることが認められる。

これらの現象は、単に地山の变形係数や破壊強度等の違いのみでは説明しきれない問題であり、地山内の応力の伝播機構そのものにも根本的な違いがあるように思われる。そこで、今回この点に着目し、トンネルの土圧や坑壁の変位量に対して地山物性、とりわけ内部摩擦角がどのように影響するかについて落し戸実験を行なった。

2. 実験方法

実験装置は図-1に示すように試験槽、落し戸、沈下装置および土圧・変位の測定器からなっている。試験槽は内法寸法90cm×55cm×8cmおよび90cm×55cm×30cmの2種であり、その前面は目盛つきガラスがはめこまれ、地山の動きが観察できるようになっている。試験槽の底盤は10cm×8cm角の穴が設けられ、この部分に挿入された落し戸を沈下させることができる。荷重計は落し戸下部と、落し戸周辺の底盤に5cm間隔に配置した載荷板に取り付けた。

試験種類ならびに地山材料は表-1、図-2に示す通りである。なお、 c 、 ϕ の値は一面せん断試験により求めた。

試験は各地山材料について土被りを3~50cmまで変化させ、それぞれについて落し戸の沈下による落し戸および周辺底盤にかかる荷重変化を調べた。なお、地山材料を積んだ時の荷重状況から壁面の影響を考慮して、石英砂および硅砂6号では実験装

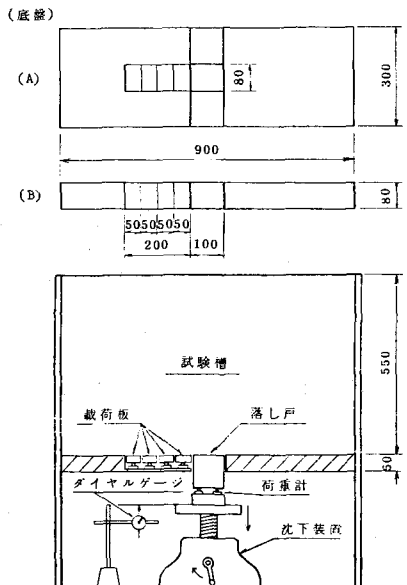


図1 実験装置

表1 試験種類

地山材料	地山材料物性値			土被り高さ (cm)						
	粘着力 C (kg/cm ²)	内部摩擦角 φ (°)	単位体積重量 γ (g/cm ³)	3	5	10	20	30	40	50
石英砂	0	45.0	1.50	○	○	○	○	○	○	○
硅砂6号	0	39.5	1.32		○	○	○		○	
石 粉	0.028	16.5	1.50		○	○	○		○	
ベントナイト	0.043	11.0	0.90		○	○	○	○	○	

(注) ○および◇は圧密荷重0.4kgf/cm²での値である。

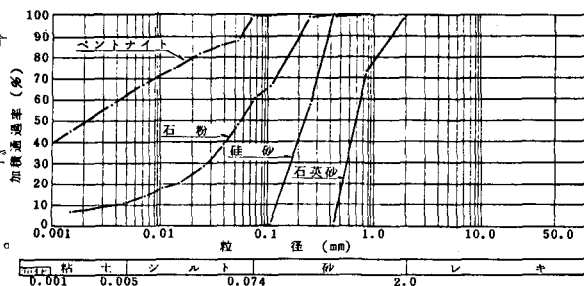


図2 地山材料の粒度分布

置 (B) を用い、石粉およびベントナイトでは実験装置 (A) を用いた。

また、落とし戸沈下時の地山の動きを観察するために、石英砂と石粉において着色砂を4cm間隔に挟み、写真撮影により記録した。

3. 実験結果

3.1 沈下量と荷重

落とし戸の沈下量と落とし戸にかかる荷重の関係を図-3、4に示す。なお、珪砂6号については石英砂と、ベントナイトについては石粉と、それぞれ似た傾向を示している。

落とし戸を沈下させることにより、落とし戸にかかる荷重は減少してゆき、最小値に達して安定している。最小値に達するまでの沈下量は、石英砂が最小で珪砂6号、石粉、ベントナイトの順に大きくなっている。特に石粉とベントナイトについては、沈下量に伴う荷重の減少は非常にゆるやかである。

落とし戸の沈下に伴う最小荷重を土被り40cmについて比較してみると、石英砂・珪砂6号・石粉・ベントナイトとも初期荷重の10~15%で比較的似た値となっている。

3.2 落とし戸周辺の荷重分布

落とし戸を沈下することにより減少した荷重の周辺載荷板への伝達状況を図-5、6に示す。なお、ここでも石英砂と珪砂6号、石粉とベントナイトはそれぞれ似た傾向を示した。

石粉およびベントナイトでは、比較的落とし戸近傍に荷重が集中しているのに対し、珪砂および石英砂では、落とし戸周辺の荷重増の分布は概ね平均化している。

4. 考 察

4.1 テルツァギ土圧論にせん断ひずみを考慮した理論

テルツァギは落とし戸にかかる荷重を求めるにあたって、図-7に示すような厚さ dZ 土層のつりあい条件を次のように提案している。

$$\gamma B dZ + B \sigma_v = B (\sigma_v + d\sigma_v) + 2\tau dZ \quad (1)$$

ここで γ : 土の単位体積重量 B : 落とし戸幅 σ_v : 鉛直応力
 τ : 土のせん断強度 $= c + \sigma_h \tan \phi$ (σ_h : 水平応力 c : 粘着力、 ϕ : 内部摩擦角)

しかし、せん断応力 τ はいきなりせん断強度とはならず、せん断ひずみ量によって変化するべきものである。

$$\text{そこで } \tau = (c + \sigma \tan \phi) F(u) \quad (2)$$

$$F(u) = 1 - e^{-\beta u}$$

u : せん断ひずみ

と仮定し、せん断応力はせん断ひずみ量の関数として0からせん断強度まで徐々に変化するものとした。

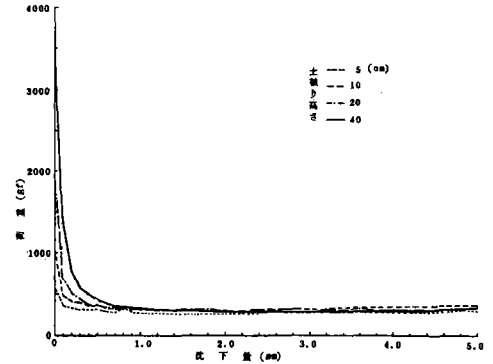


図3 沈下量と荷重 (石英砂)

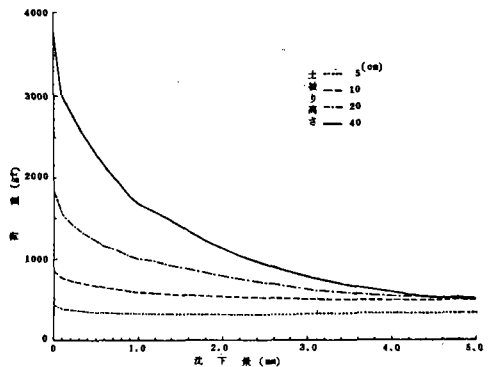


図4 沈下量と荷重 (石粉)

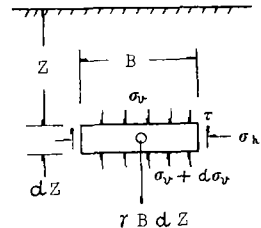


図7 土層にかかる応力

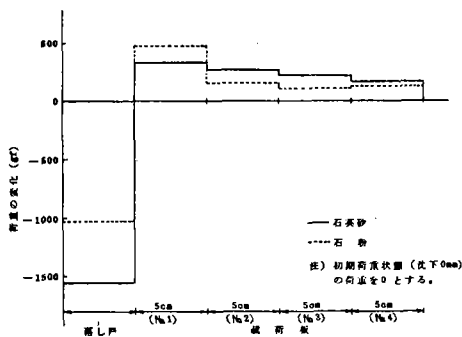


図5 1mm沈下時における各載荷板の荷重変化
(土被り40cm)

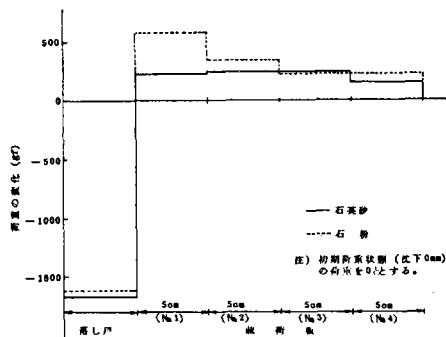


図6 5mm沈下時における各載荷板の荷重変化
(土被り40cm)

そして境界条件 $z=0$ で $\sigma=0$ として(1)式を解けば、次式が得られる。

$$\sigma_v = \frac{B \left\{ \gamma - \frac{2c}{B} (1 - e^{-\beta u}) \right\}}{2 (1 - e^{-\beta u}) \tan \phi} \left\{ 1 - e^{-2 (1 - e^{-\beta u}) \frac{z}{B} \tan \phi} \right\} \quad (3)$$

なお側壁係数 $K=1$ としている。

(3)式は、 z を落し戸までの土被りとすれば、落し戸の沈下量 u と落し戸にかかる応力 σ との関係を示す。なお u を十分大きくとった場合にはテルツァギ式と一致する。

4.2 落し戸実験への土圧論の適用

(3)式における各定数は実験条件や土質試験結果によって決まるものであるが、その際考慮した点を以下に示す。

- ・ γ は実験での初期荷重から求めているが、壁面の影響を受けているため土質試験結果よりもかなり小さい。
- ・ c は、一面せん断試験での荷重条件が落し戸実験とは異なっており、そのまま適用できないため、落し戸の沈下量を十分大きくとった時の σ の実測値から逆算して求めた。
- ・ β は、一面せん断試験のせん断応力—ひずみ曲線から2倍時変位法によって求めたものの平均値とした。

図-8 に沈下量—荷重曲線の実験値と計算値を示す。荷重は初期荷重を100%として百分率で示してある。なお今回の実験では、ベントナイトの場合土被りを変化させると圧密による地山材料の物性変化が著しく、検討の対象からはずした。

図-8 によれば、石英砂および珪砂においては、計算値と実験値は非常に良く合うが、石粉では明らかに異なった曲線を描いていることがよくわかる。

一方、図-9 は土被りと落し戸にかかる荷重の関係を沈下量

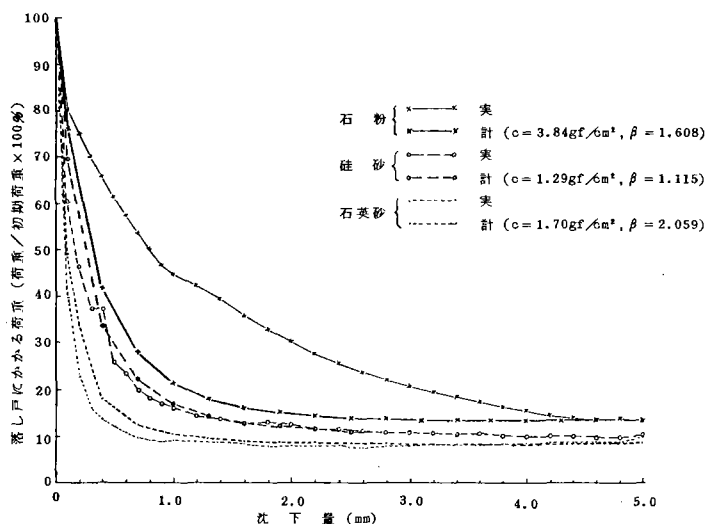


図8 沈下量と荷重 (計算値と実験値)

別に示したものであるが、初期荷重については、いずれの地山材料でも土被りにほぼ比例して荷重が増加している。一方落し戸を沈下した後の二次応力については、石英砂の場合、計算値と実験値は比較的良好に合っており、いずれも落し戸にかかる荷重は土被りが落し戸幅以上になると土被りの影響を受けない。ところが石粉では、土被りの影響が大きく、特に沈下量が小さい場合にはその傾向が著し

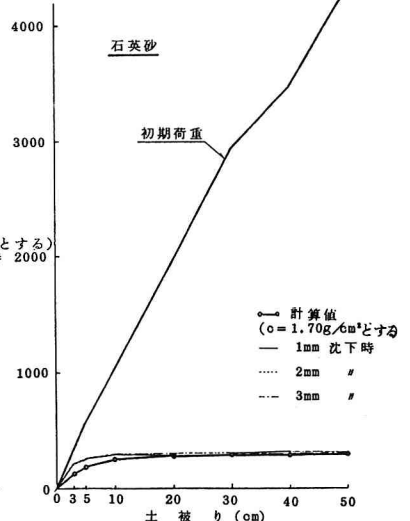
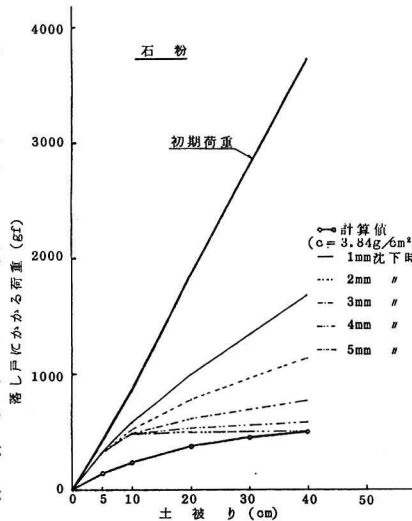


図9 土被りと土圧の関係

い。また計算値とも明らかに異なった傾向も示しており、石英砂ときわだった違いを見せている。

4.3 地山の挙動特性

図一10に石英砂および石粉における落し戸沈下時の地山の挙動

を示す。両者を比較した場合、もっとも大きな違いは、石英砂では落し戸直上の地山のみがほぼ一律に沈下し、その周辺の地山がほとんど変形していないのに対し、石粉では周辺地山にも変形やせん断破壊が及んでいることである。このことは、落し戸周辺の応力分布に関する両者の違いのほか、地山材料の圧密特性に大きく依存しているように思われる。すなわち、石英砂の場合、落し戸周辺の応力分布が平均化している上に、地山材料もほとんど圧密を生じないため、落し戸周辺地山の変形・破壊がみられないのに対し、石粉では、落し戸近傍に増加応力が片寄っている上に、地山材料も圧密を起しやすいため、(地山材料の積上げ時に大き

な圧密現象がみられた。)落し戸周辺の地山にも大きな変形・破壊が生じたものと考えられるからである。

いずれにしても、石英砂の場合の地山挙動はテルツアギが想定したものと同じで、落し戸周辺の地山が落し戸直上の地山に対して十分堅固な支持物となっているのに対し、石粉では周辺の地山自身が変形し、落し戸直上の地山に対して支持物としての役目を十分果たしていない。そして石英砂等にもみられるような落し戸周辺の地山の作用を、テルツアギはアーチアクションとよんでいるが、粒径のこまかいベントナイトや石粉ではそれがよく発達しないということではないかと考えられる。

5. まとめ

以上のように、ベントナイト・石粉と石英砂・珪砂6号では地山の挙動が大きく異なっていることが判明したが、これらの原因は地山物性ととりわけ内部摩擦角の違いの他、地山の圧密特性の違いによって、地山内の二次応力の再配分機構が異なっていることに起因していると考えられる。今後、現地トンネルでの実績の解析を行ない、現象の裏付けを進めていきたいと考えている。

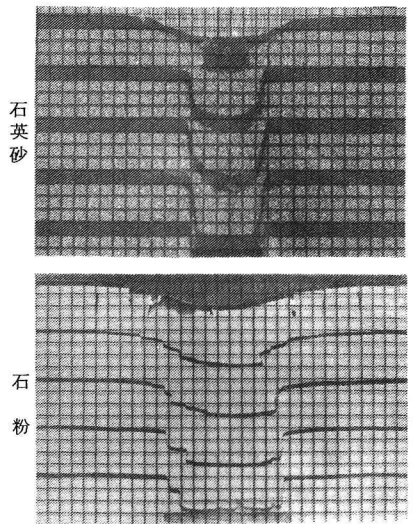


図10 地山の挙動

(48) Trap door experiments to study the difference between
sandy ground and clayey ground in tunnelling

Railway Technical Research Institute, JNR

Shuzo Kitagawa

Yoshiteru Kawakami

Shigeru Onoda

Abstract

We have recognized the difference between sandy ground and clayey ground in regard to behavior of ground around tunnel through our experience. In order to study this problem we made trap door experiments. In these experiments we measured sinking of the trap door and pressure on the bottom of the experimental box. And we used standard quartz sand, fine quartz sand, rock powder, and bentonite for ground model.

As a result, we can separate them to two groups by the behavior of ground, one of which is composed of standard quartz sand and fine quartz sand, the other is composed of rock powder and bentonite. We temporarily name the former sandy group and the later clayey group.

Sandy group is suitable for modified Terzaghi's theory on earth pressure, which is considered about shear strain. So, earth pressure decreases rapidly with slightly sinking of the trap door, and if overburden is more than about width of the trap door, earth pressure is almost as same. On the other hand, clayey group is not suitable for that theory. Earth pressure depends on sinking of the trap door and the overburden. In sandy group the behavior of ground is as same as what Terzaghi thought, so the ground beside the trap door surely supports it on the trap door. On the other hand, in clayey group the ground beside the trap door is consolidated and deformed, so it can not surely support the ground on the trap door.