

(44)トンネルの変形と支保荷重の関係に関する模型実験

建設省土木研究所 正会員 ○ 角湯 克典

〃 〃 猪熊 明

東亜建設工業(株) 山本 隆洋

A Experiment of Relationship between Convergence and Load of Tunnel Construction

katsunori KADOYU and akira INOKUMA

Public Works Research Institute, Ministry of Construction

takahiro YAMAMOTO, Toa Corporation

Abstract

Tunnel is a underground space that is supported by original strength of bedrock itself and supporting structure of tunnel. The load of tunnel depends on bedrock movement accompanying tunnel excavation. Therefore, it is necessary to utilize the deformation characteristics to design and execution so that the structure become rational and economical. The concept of this relationship is shown in Fig.-1. Here, characteristic curve A is determined by physical properties of the bedrock and initial bedrock stress. As the displacement becomes bigger, it moves to curve B from a certain point. But this relationship is not known quantitatively yet. Therefore, experiments were made under field of 80G(gravity) centrifugal force so that we can obtain the basic information of the characteristic curve and the relationship between convergence and load of tunnel.

1. はじめに

トンネルは地山自体及びトンネル支保工の両者の支持機能により地下空間を保持する構造物であり、トンネルの合理的な設計・施工を行うには、支保工に作用する荷重がトンネルの変形とともに変化するという地山の挙動特性を有効に活用しなければならない。この関係を概念的に示したものが図-1であり、Fenner-Pacher曲線と言われるもので、特性曲線Aは、弾塑性的性質を持つ地山において、支保荷重 P_i と変形量 u_a の関係を示したもので、特性曲線Bは、ゆるみ領域が大きくなると、塑性化した部分の地山の自重が荷重として作用して支保荷重が大きくなることを示したものである。しかし、これらは未だ定量化されておらず、現実のトンネル施工は、この概念を念頭に経験的に行われているのが実情である。そこで、トンネルの変形と支保に作用する荷重との関係、及び地山条件(土盛り厚や水)がどの様にそうした関係に影響を与えるのか明らかにするとともに、地山特性曲線に関する基礎的な知見を得ることを目的として、トンネル天端が降下する落し戸装置を使って遠心力場で実験を行った。

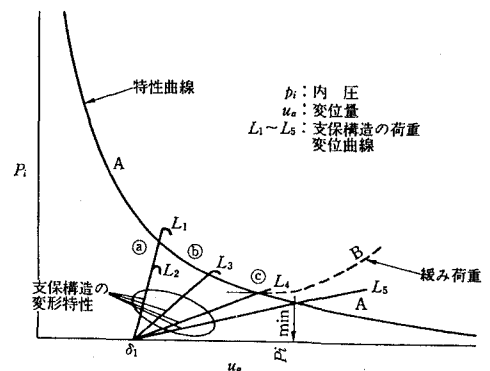
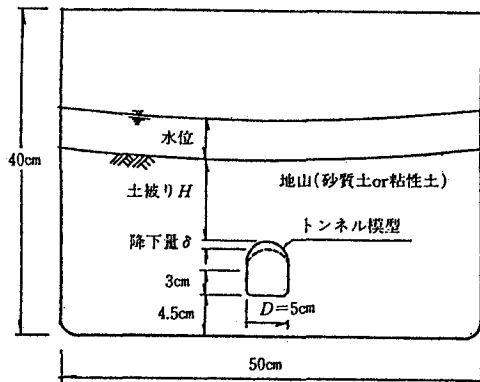


図-1 支保に作用する荷重と掘削面変位の関係

豊浦標準砂		乾燥地山	水位下地山
比 重 G_s		2.642	
単位体積重量 γ (gf/cm ³)		1.485	1.947
含 水 比 ω (%)		0.07	22.69
粘 着 力 c		0.00	0.00
内部摩擦角 ϕ (°)		37.23	40.45

石 粉		乾燥地山	水位下地山
比 重 G_s		2.667	
単位体積重量 γ (gf/cm ³)		1.408	2.032
含 水 比 ω (%)		0.43	23.30
粘 着 力 c		0.00	0.06
内部摩擦角 ϕ (°)		36.19	9.55

表－1 模型地山の物性値



正面図

2. 実験方法

実験装置は、図－2に示すような幅50cm×高さ40cm×奥行き14cm、前面が透明なアクリル板から成る試験容器と、厚さ1.5mmのゴムスリーブをかぶせた計測用トンネル模型（上部と下部からなり上部を10mm程度降下することが出来る）、トンネル模型昇降装置及び荷重の測定装置からなっている。

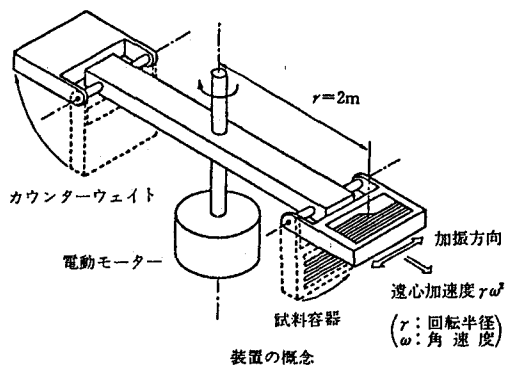
実験は、トンネル模型を試験容器にセット後地山を作製し、所定の重力加速度（80G）まで遠心载荷した後、トンネル模型上部を降下しトンネル掘削をシミュレートした。なお、実験はトンネル模型上部の降下量 δ が約10mm（トンネル径Dに対する比率つまり変形率

$\epsilon = \delta / D \cdot 100 \approx 20\%$ ）となった段階で終了とした。地山材料としては、砂質土地山の試料として豊浦標準砂を使用し、粘性土地山の試料として石粉を使用した。この2種類の地山について、自然乾燥状態で用いる乾燥地山を想定した実験と、水位下の地山を想定した実験の合計4種類についてトンネルクラウンから地表面までの距離（土被り厚）Hとトンネル径Dとの比H/Dを1、2、4と変化させた。この地山の物性値を表－1に示す。

3. 実験結果

3.1 砂質土地山の場合

乾燥砂質土地山における変形率と天端支保に作用する荷重（以下、支保荷重という）の関係を示すと図－3のようになる。全水頭を差し引いた水位下の砂質土地山の同関係を図－4に示す。図－3、4より判るようにいずれの場合でもトンネル上部を降下させることにより天端支保荷重は減少していき、ある変形率のところで最小値に達している。水位下地山の土被り比1.0の場合にその後の増加傾向がみられた（図－5参照）。これは、前述した特性曲線Bが現れているものと判断される。又、最小値に達するまでの天端支保荷重の減少スピードは水位下地山の方が、乾燥地山の2倍程度速くなっている。最小支保荷重時の変形率は、乾燥地山の方が水位下地山の場合より大きい変形率で最小支保荷重を示しているが、いずれの状態でも、土被り比による大きな変化はみられなかった。



図－2 実験装置概要図

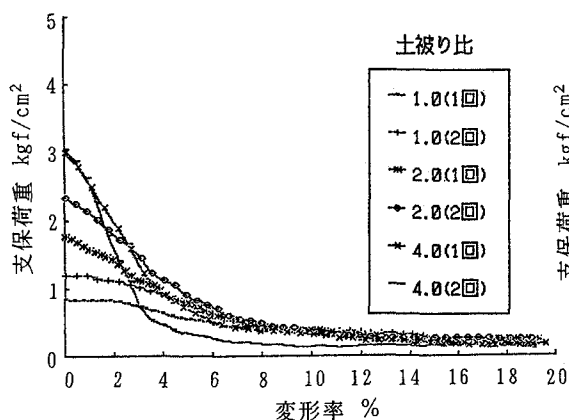


図-3 変形率と支保荷重の関係
(砂質土、乾燥地山)

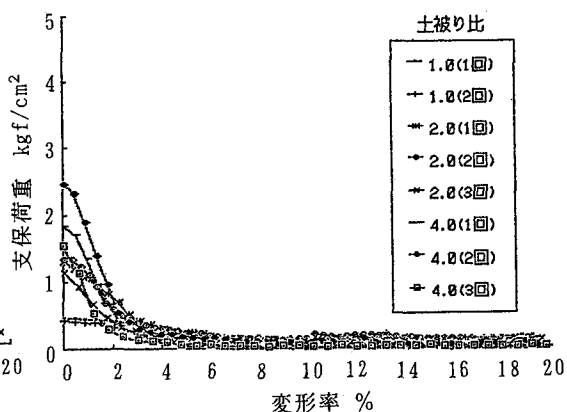


図-4 変形率と支保荷重の関係
(砂質土、水位下地山、全水頭を除く水中重量)

3.2 粘性土地山

乾燥粘性土地山における変形率と天端支保荷重の関係を示すと図-6のようになる。全水頭を差し引いた水位下の粘性土地山の同関係を図-7に示している。図-6、7より乾燥地山の土被り比1.0と水位下地山の土被り比2.0を除いてトンネル上部を降下させることにより天端支保荷重は減少していき、ある変形率のところで最小値に達し、その後の増加傾向はみられなかった。水位下地山の土被り比2.0 (図-8参照) の場合、増加傾向がみられた。又、最小値に達するまでの天端支保荷重の減少スピードは水位下の地山の方が、乾燥地山の2倍程度速くなっている。最小支

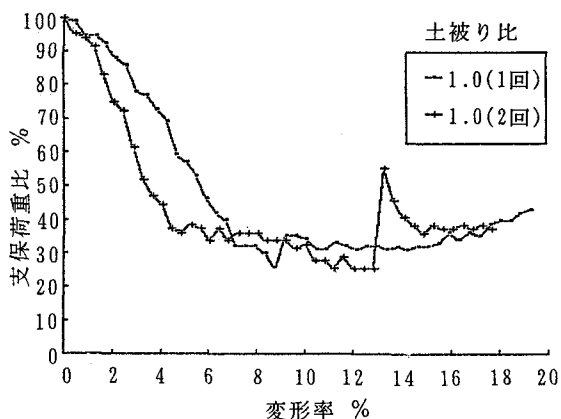


図-5 変形率と支保荷重比の関係
(砂質土、水位下地山、全水頭を除く)

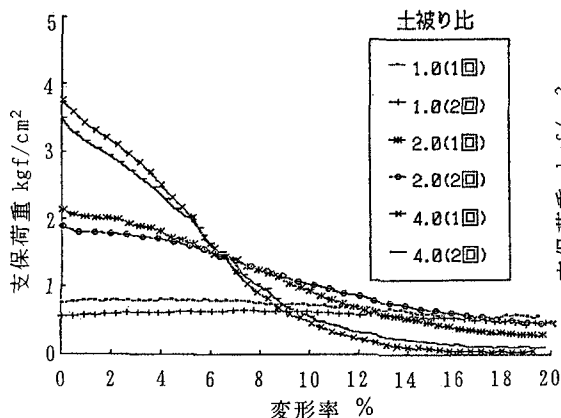


図-6 変形率と支保荷重の関係
(粘性土、乾燥地山)

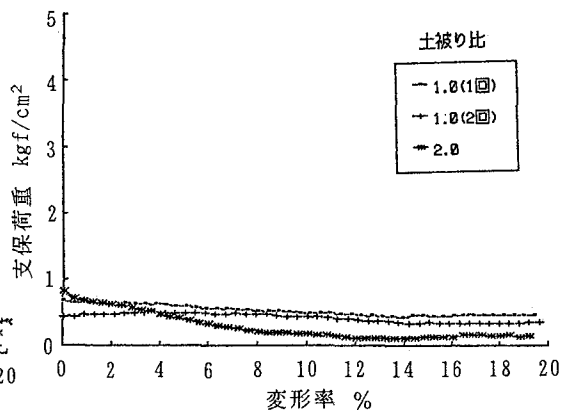


図-7 変形率と支保荷重比の関係
(粘性土、水位下地山、全水頭を除く水中重量)

保荷重時の変形率をみると乾燥地山の方が、水位下地山の場合より大きい変形率で最小支保荷重を示している。又、いずれの状態でも土被り比が大きくなると最小支保荷重は、小さくなっている。

3.3 変形率と周辺土圧の関係

トンネル上部を降下させることにより、トンネル上部にかかる荷重の減少した荷重分の周辺地山への伝達状況を図-9～13に示す。砂質土の場合、トンネル近傍に荷重の増加が集中しており、トンネルから離れたところではほとんど荷重の増加は生じていない。水位下地山の場合はこの傾向つまりトンネル近傍に荷重の増加の集中がおこる傾向が顕著になる。乾燥砂質土地山の土被り比（粘性土、水位下地山、土被り比2.0、全水頭を除く）

4.0の場合、トンネルに最も近い土圧計④は、変形が増大するにつれ急激に増加するものの、途中より減少し、再度増加している。二番目に近い土圧計⑤が大きな増加傾向を示している（図-11参照）。つまり、降下初期の段階ではトンネル近傍に荷重の増加が集中しているが、土圧の集中が大きいいため、降伏し、残留強度分を受け持つようになり、この差分はその外側の地山でうけ持つようになるのではないかと考えられる。

粘性土の場合は、水位下の土被り比2.0（図-12、13参照）を除いて、トンネル近傍に荷重の増加が集中しており、離れるにしたがって減少している傾向がみられている。水位下の土被り比2.0では、砂質土の乾燥地山の土被り比4.0と同様の傾向がみられる。

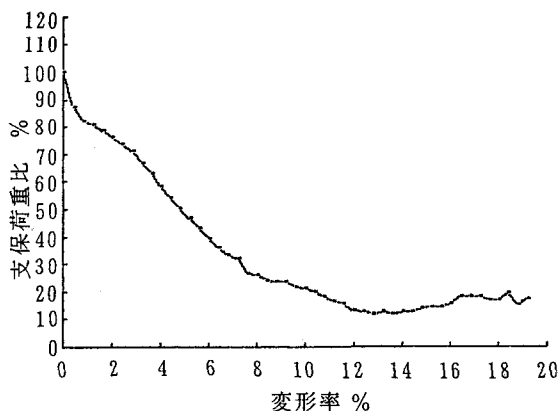


図-8 変形率と支保荷重比の関係

（粘性土、水位下地山、土被り比2.0、全水頭を除く）

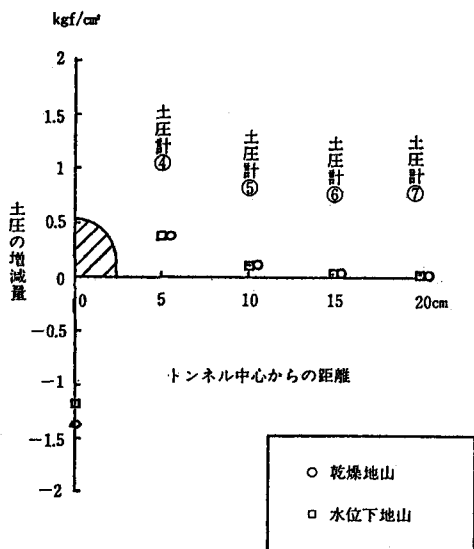


図-9 荷重分布状況

（変形率10%、砂質土、土被り比2.0）

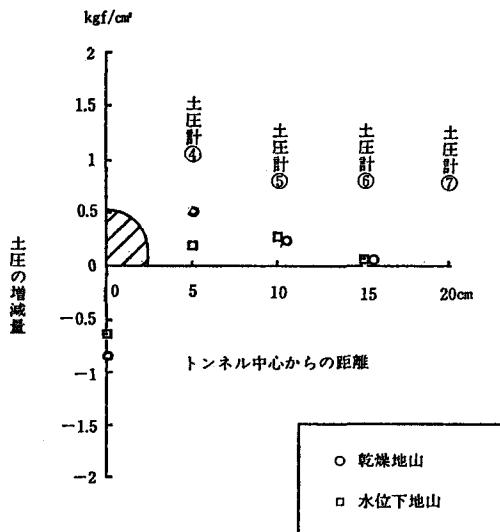


図-10 荷重分布状況

（変形率10%、粘性土、土被り比2.0）

4. まとめ

砂質土に関する実験の結果以下の点が明らかとなった。

1) 今回の実験より得られた地山特性曲線において荷重の増加（特性曲線B）の発生は水位下地山の土被り

比1.0の場合だけにみられた。

2) 土被り比による最小支保荷重時のトンネル変形率の大きな違いはみられず、水の有無による違いがみられた。

3) トンネル変形に伴う支保荷重の減少に対する周辺地盤内の応力の増加はトンネル近傍に集中する。

粘性土に関する実験では、以下のことが明らかとなった。

1) 今回の実験より得られた地山特性曲線において荷重の増加（特性曲線B）の発生は水位下地山で土被り比2.0についてのみみられた。

2) 土被り比による最小支保荷重時のトンネル変形率の大きな違いはみられず、水の有無による違いがみられた。

3) トンネル変形に伴う支保荷重の減少に対する周辺地盤内の応力の増加は、乾燥地山の場合は砂質土に比べると広く周囲へ分散する。しかし、水位下地山の場合は、トンネル近傍に集中する。

5. おわりに

今回の実験では、天端支保荷重の測定から直接判断出来るほどの荷重の増加（特性曲線B）の顕著な発生はみられなかった。この原因としてトンネル天端部の変形だけで側壁部の変形等は固定されているので、真のトンネル掘削をシュミレートしていないのではないかと考えられる。よって、今後は側壁部のゆるみが天端支保荷重の増加（特性曲線B）の発生とどのような関係にあるのか装置の改良を含めた検討が必要と思われる。また、各種の地山条件（土被り比、地山の物性値（ c 、 ϕ ）及び地山の内部の土粒子の動きなどに対応させて取りまとめ、実験結果の検討を行っていく必要がある。

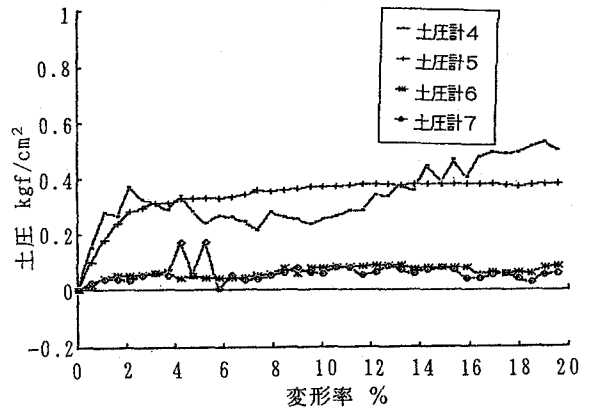


図-1 1 変形率と周辺土圧の関係
(砂質土、乾燥地山、土被り比4.0)

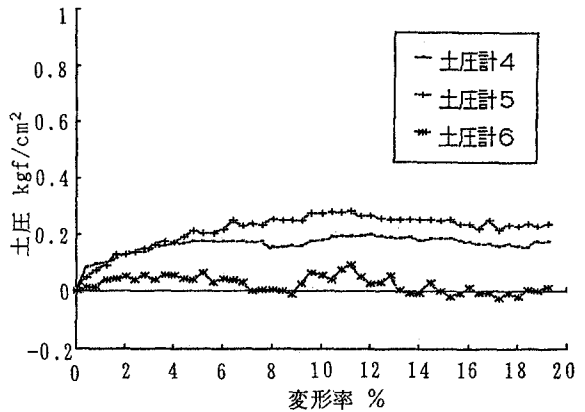


図-1 2 変形率と周辺土圧の関係
(粘性土、水位下地山、土被り比2.0)

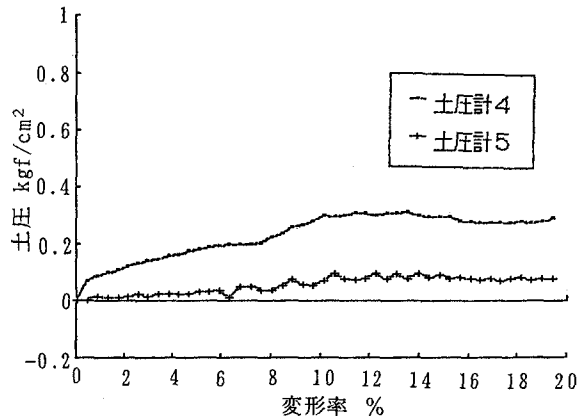


図-1 3 変形率と周辺土圧の関係
(粘性土、水位下地山、土被り比1.0)