

トンネルの変形と支保荷重の関係に関する研究

A Research of Relationship between Convergence and Load of Tunnel Construction

角湯 克典*・猪熊 明**・正木 建美***

Katsunori KADOYU, Akira INOKUMA and Tatemi MASAKI

Tunnel is a underground space that is supported by both original strength of bedrock itself and support of tunnel. The load acting on tunnel depends on bedrock movement accompanying tunnel excavation. Therefore, it is necessary to utilize deformation characteristics for design and execution so that the tunnel support become rational and economical. This relationship is shown in Fig.1. But this relationship has not been known quantitatively yet. Therefore, Two different centrifugal model tests were examined under field of 80G (gravity) centrifugal force so that the authors can obtain basic informations of the characteristic curve (Fenner-Pacher curve).

Keyword:centrifugal model test, characteristic curve, simulation of tunnel excavation

1. まえがき

最近のトンネル施工技術の進歩はめざましく、都市内の未固結な含水地山においても、NATMでトンネルが掘削できるようになってきた。トンネルは本来、地山自体およ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 曲線または地山特性曲線といわれている。この曲線は、変形量が小さい範囲の特性曲線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 の関係を示しており、変形率が大きくなる範囲の特性曲線Bは、ゆるみ領域が大きくなると

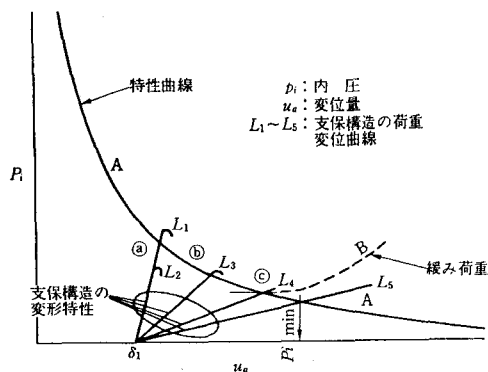


図-1 支保に作用する荷重と掘削面変位

* 正会員 建設省土木研究所 トンネル研究室
** 正会員 工博 建設省土木研究所 トンネル研究室長
*** 東亜建設工業(株)

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ているものである。

しかし、これらの関係は定性的には理解され、この概念を念頭に現実のトンネル施工が行われているが、未だ定量化されてはいない。そこで、本研究では、トンネルの変形と支保荷重との関係に、地山条件（土被り厚や水）およびトンネル掘削のシミュレート方法がどの様に影響を与えるのかを明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

実験は、トンネル掘削のシミュレート方法が異なる2種類の模型装置を使って遠心力場で模型実験を行った。第一の実験に用いた模型装置（以後、上半降下式と呼ぶ）は、図-2に示すような幅50cm×高さ40cm×奥行き14cm、全面が透明なアクリル板からなる試験容器と、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程度降下することによりトンネル掘削をシミュレートする）、トンネル模型昇降装置および荷重の測定装置からなっている。実験は各地山材料について土被り比および水位を変えて地山を作成し、地山作成終了後試験容器を遠心力載荷装置に設置し所定の遠心加速度まで遠心載荷し、トンネル上部を降下させトンネル掘削をシミュレートした。トンネルに作用する荷重および周辺地盤に作用する荷重の変化は、土圧計を用いて測定した。

第二の実験に用いた模型装置（以後、ゴムチューブ式と呼ぶ）は、図-3に示すような幅50cm×高さ40cm×奥行き12.8cm、前面が透明なアクリル板から成る試験容器と、厚さ0.2mmのゴムチューブの中に水を充填し直径5cmの円形としたトンネル模型（ゴムチューブ内の水を抜き出すことによりトンネル掘削をシミュレートする¹⁾）、トンネル内の水を抜く排水装置および荷重の測定装置からなっている。実験は、第一の実験と同じの地山材料について土被り比および水位を同じ条件とし、水が充填されて外径が5cmまで膨張したゴムチューブを地山作成時にあらかじめ地山内に埋め込んでおき、地山作成終了後、試験容器を遠心力載荷装置に設置して所定の遠心加速度まで遠心載荷し、ゴムチューブ内の水を排水させトンネル掘削をシミュレートした。トンネルに作用する荷重および周辺地盤に作用する荷重の変化は土圧計を用い、ゴムチューブ内の圧力は水圧計を用いて測定した。

トンネルの変形率は、上半降下式の場合、上半トン

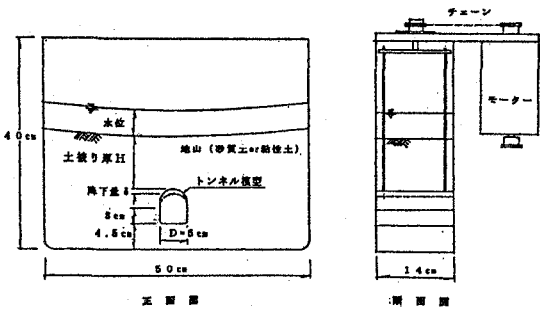


図-2 実験装置概要図（第一の実験）

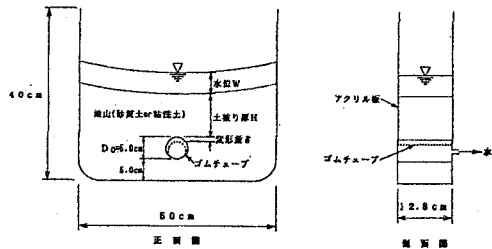


図-3 実験装置概要図（第二の実験）

表-1 模型地山の物性値（第一の実験）

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 (kgf/cm ²)	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 (kgf/cm ²)	0.00	0.06	
内部摩擦角 ϕ (°)	36.19	9.55	

* UU試験による

ネル部の降下量をトンネル初期径（トンネル幅）で除したものであるとした。またゴムチューブ式の場合、トンネル初期径とゴムチューブからの排水量を計測しゴムチューブ内に残っている水の量からトンネル外径を計算したものの差を、トンネル初期径で除したものであるとした。

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。第一の実験に用いた地山の物性値を表－１、第二の実験に用いた地山の物性値を表－２に示す。ここで第一の実験に用いた水位下の石粉の内部摩擦角が他の試料のものと比較して小さな値となっているが、これは三軸試験にUU試験を用いたためである。

実験条件としては、両実験ともにこの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ものと、水位下の地山を想定したものの合計４種類について、土被り比を１，２，４と変化させ、水位については地表面より上に砂質土は５cm、粘性土は１０cmとした。

３．第一の実験の実験結果

第一の実験での砂質土乾燥地山について、変形率とトンネル天端の作用荷重の関係を図－４に示す。天端の作用荷重はトンネル模型の天端部分に土圧計を張りつけ作用荷重を計測した。図－５は、図－４の縦軸の作用荷重を、変形率０％の作用荷重で除した値を作用荷重比として用いたものである。これらより、砂質土乾燥地山では全ての場合においてトンネル天端の作用荷重は変形率が増大するにつれて単調に減少し、増加することはないことがわかる。この傾向は、砂質土乾燥地山以外の地山材料による実験でも全く同様にみられた。このことは、第一の実験に用いた模型装置では地山特性曲線の極小点以降の増加を再現出来ないことを示している。なおここでは第一の実験の実験結果の詳細については筆者らにより以前報告された論文²⁾に譲り、ここではこれ以上特に述べないこととする。

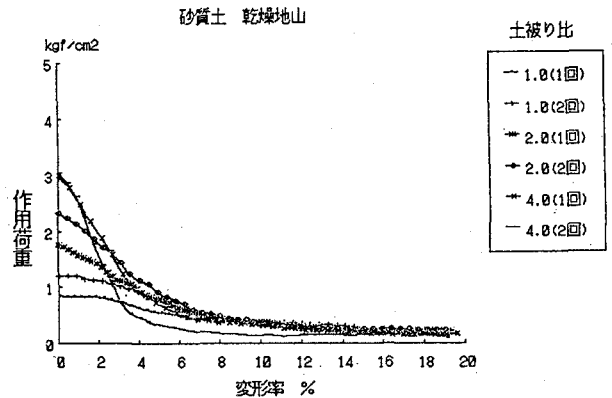
４．第二の実験の実験結果

４．１ 変形率と天端の作用荷重の関係

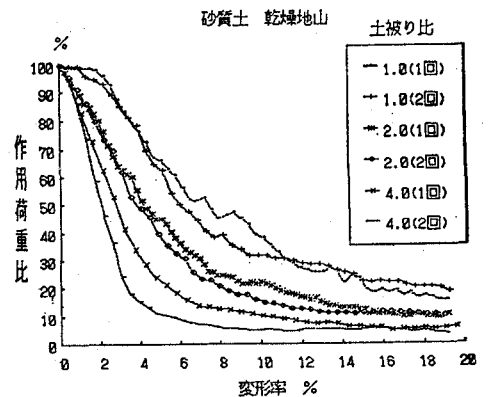
表－２ 模型地山の物性値（第二の実験）

豊浦標準砂		乾燥地山	水位下地山
比 重 G_s	2.637		
単位体積重量 γ (gf/cm ³)	1.452	1.917	
含 水 比 ω (%)	0.0	27.78	
粘 着 力 c (kgf/cm ²)	0.00	0.07	
内部摩擦角 ϕ (°)	36.43	32.67	

石 粉		乾燥地山	水位下地山
比 重 G_s	2.671		
単位体積重量 γ (gf/cm ³)	1.374	2.045	
含 水 比 ω (%)	0.0	19.87	
粘 着 力 c (kgf/cm ²)	0.00	0.28	
内部摩擦角 ϕ (°)	35.06	33.44	



図－４ 変形率と作用荷重の関係（砂質土乾燥地山）



図－５ 変形率と作用荷重比の関係

4.1.1 砂質土地山の場合

乾燥地山での変形率とトンネル天端の作用荷重の関係を図-6に示す。ここで天端の作用荷重はトンネル模型の天端部分に土圧計を張りつけ作用荷重を計測した。図-7は、図-6の縦軸の作用荷重を、変形率0%の作用荷重で除した値を作用荷重比として用いたものである。これらより、全ての場合において天端作用荷重は変形開始直後に急激に減少し、その後増加する傾向を示している。また作用荷重の最小値は土被り比にかかわりなく、ほぼ一定の値になっている。最小の支保荷重を示した後

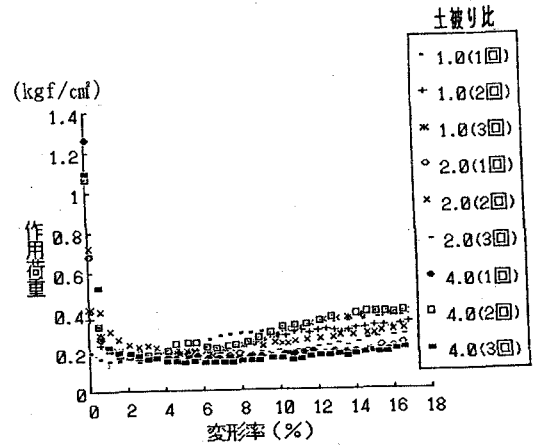


図-6 変形率と作用荷重の関係 (砂質土 乾燥地山)

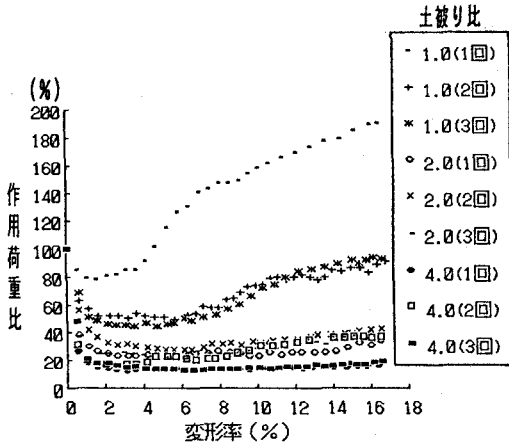


図-7 変形率と作用荷重比の関係 (砂質土 乾燥地山)

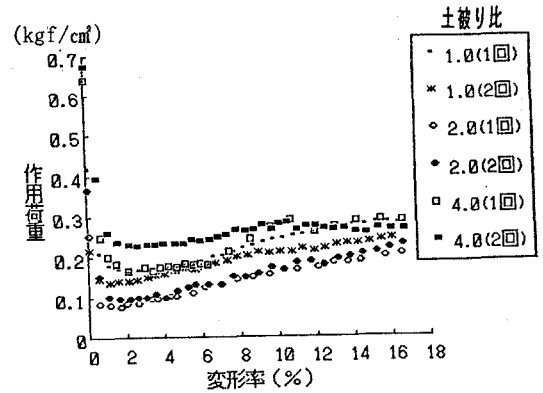


図-8 変形率と作用荷重の関係 (砂質土 水位下地山)

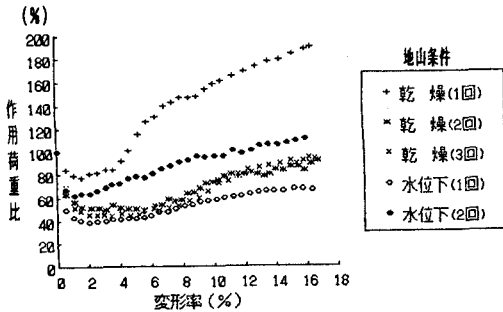


図-9 変形率と作用荷重比の関係 (砂質土 土被り比1.0)

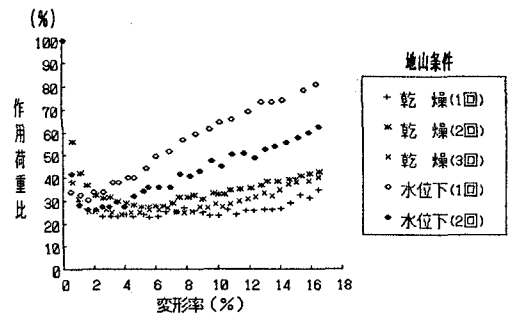


図-10 変形率と作用荷重比の関係 (砂質土 土被り比2.0)

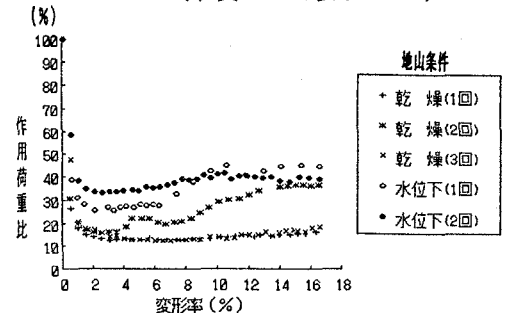


図-11 変形率と作用荷重比の関係 (砂質土 土被り比4.0)

の作用荷重比の増加は土被り比により多少異なり、土被り比が1.0の場合が最大で、2.0と4.0の場合はほぼ同じ結果となっている。水位下の地山を想定した実験では、既往の研究成果より、トンネルに作用する天端荷重は土水分離で取り扱うこととする。測定値から全水頭分の水圧を差し引けば、図-8に示すようになる。また図-9～11は、図-8の縦軸の作用荷重を土圧と水圧を分離した初期作用荷重で正規化したものを乾燥地山の作用荷重比と土被り比ごとに比較したものである。図-9より土被

り比1.0では乾燥、水位下とも同じような傾向となっていることがわかる。図-10より土被り比2.0では作用荷重比の値が最小となったあとの増加勾配が、水位下地山のほうが大きくなっていることがわかる。また図-11より土被り比4.0では作用荷重比の値の最小値が水位下地山のほうが乾燥地山より大きくなっていることがわかる。

4. 1. 2 粘性土地山の場合

乾燥地山での変形率と作用荷重の関係を図-12に示す。図-12より、変形初期の作用荷重は減少傾向を示し、その傾きは土被り比が増すにつれてやや大きくなっている。土被り比1.0と2.0では最小作用荷重を示した後、変形率の増加とともに作用荷重は増加している。また作用荷重は変形率8%程度から、各土被り比とも概ね同じ値に収束している。図-12の縦軸を作用荷重比にとると、図-13となる。図-13より、土被り比1.0の場合のみ最小作用荷重比が50~70%となっており、土被り比2.0、4.0の場合では最小作用荷重比が20~40%の範囲となっている。

水位下地山について砂質土地山と同様、土水分離で考えることとする。測定値から全水頭分の水圧を分離すれば、図-14に示すようになる。この図から水位下地山では、結果がかなりばらつき、傾向がみられない。結果にこのようなばらつきが生じた原因としては、地山の作成方法が他の場合と大きく異なりあらかじめ石粉に水を混ぜてだんご状にした試料を手作業で試料容器内につめたこと、含水比が実験ケース毎に一定ではなくそのために地山の物性値が変化したことが考えられる。このため粘性土の水位下地山については参考値として扱い、考察の対象からは除くこととする。

4. 2 Terzaghiの土圧理論との比較

土砂地山におけるトンネルに作用する荷重の算定方法の一つに以下に示すTerzaghiの式がある。

$$p_v = \frac{B \left(\gamma - \frac{2c}{B} \right)}{2k \tan \phi} \left(1 - e^{-\frac{2k \tan \phi \cdot z}{B}} \right)$$

ただし、上載荷重は0として考えている。

p_v : トンネル上部にかかる荷重 B : トンネル径

γ : 地山の単位体積重量 k : 側圧係数 (1.0を使用)

ϕ : 内部摩擦角

c : 粘着力

z : 土被り厚

本研究ではTerzaghiの緩み土圧と砂質土、粘性土の最小作用荷重の実測値との比較を行い、Terzaghiの土圧理論の検証を行う。ここでTerzaghiの土圧理論では、 B はすべり面の幅であるが、ここではトンネル径が掘

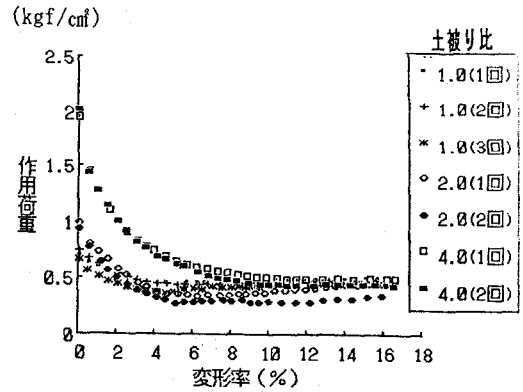


図-12 変形率と作用荷重の関係 (粘性土 乾燥地山)

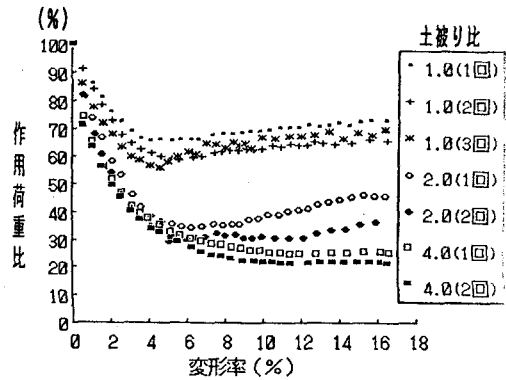


図-13 変形率と作用荷重比の関係 (粘性土 乾燥地山)

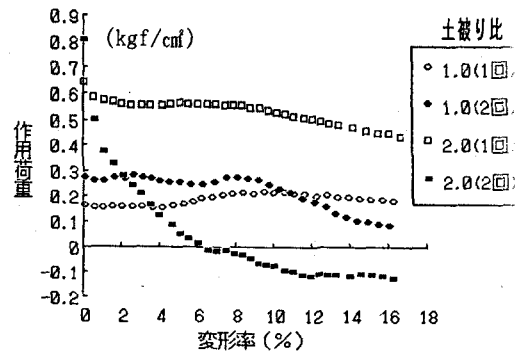


図-14 変形率と作用荷重比の関係 (粘性土 水位下地山)

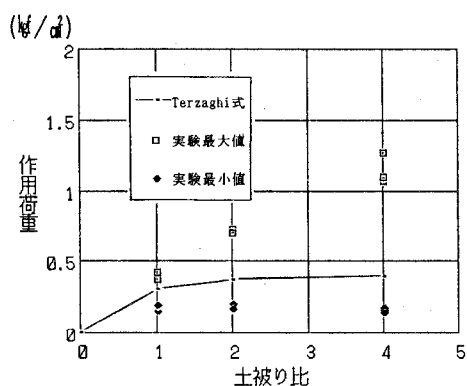


図-15 Terzaghiの土圧と実験値の比較
(砂質土 乾燥地山)

削をシミュレートすることにより減少するため、初期のトンネル径を用いた。砂質土の場合、図-15より乾燥状態の地山では最小作用荷重の実測値は計算値よりやや小さい値を示している、水位下の地山においては図-16（土水分離を行う意味で、実験値から全水頭を引いて示している）より最小作用荷重の実測値は計算値と比較的一致していることを示している。

粘性土の場合、図-17より乾燥地山では、最小作用荷重の実測値は計算値と比較的一致している。これらより、支保に作用する荷重はTerzaghiの緩み荷重式を用いて算定できることを示唆しているものと考えられる。

4.3 変形率～作用荷重比曲線の勾配と変化点

各実験ケースの変形率と作用荷重比の関係を表す曲線(図-18)において次の項目について比較検討を行う。

- 1) 変形初期(A点)の勾配
- 2) 変形率10%(E点)における勾配
- 3) 極小点(C点)における変形率の値: X_c 。
- 4) 極小点(C点)における作用荷重比の値: Y_c 。

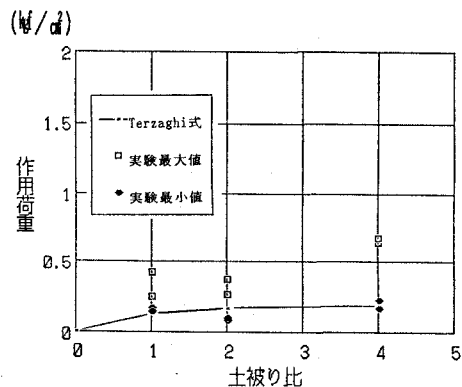


図-16 Terzaghiの土圧と実験値の比較
(砂質土 水位下地山)

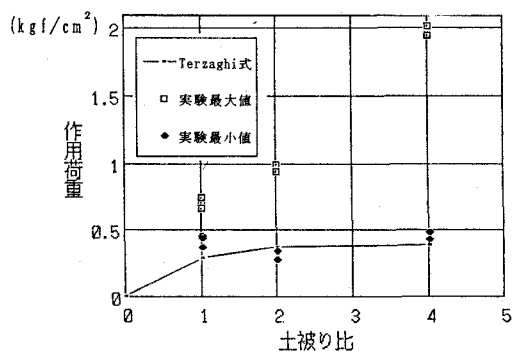


図-17 Terzaghiの土圧と実験値の比較
(粘性土 乾燥地山)

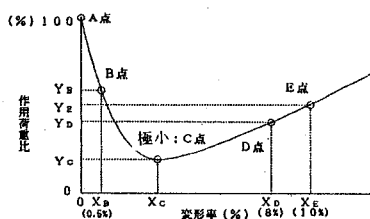


図-18 変形率～作用荷重比曲線の概略図

ここで変化点は変形率作用荷重曲線の各点間の勾配を計算し、勾配が減少(-)から水平(0)または増加(+)に変化する点とした。また作用荷重変化率とは、作用荷重比の増分と変形率の増分の比であり図-18の曲線の接線にあたるものである。1)～4)の検討結果を図-19～22に示す。

1) 変形初期の勾配

図-19より、砂質土と粘性土を比較すると砂質土の方が作用荷重比の変化率が大きく、乾燥地山の場合、砂質土・粘性土とも土被り比が大きくなると作用荷重比の変化率が大きくなる。

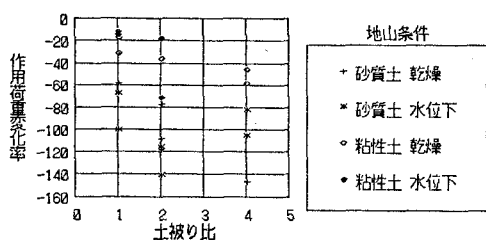


図-19 変形初期の勾配

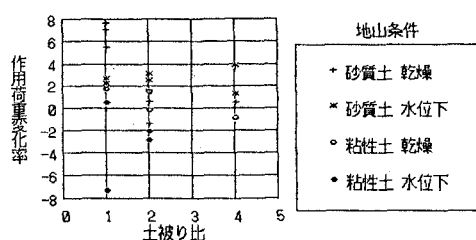


図-20 変形率10%における勾配

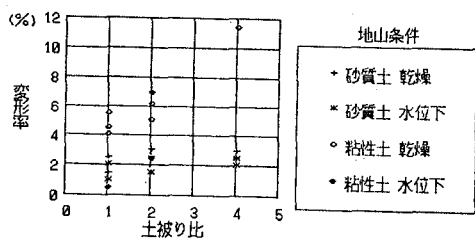


図-21 変化点における変形率

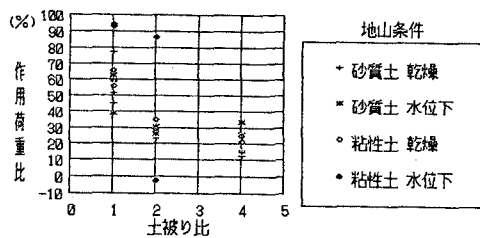


図-22 変化点における作用荷重比

2) 変形率10%における勾配

図-20より、粘性土水位下地山を除いて、作用荷重変化率は正の値を示している。これは変形率が増加すれば、緩み領域が拡大し作用荷重が増加するという傾向がゴムチューブ式模型装置を用いた実験結果から得られたということを示している。

3) 極小点における変形率

図-21より、砂質土地山においては、土被り比によらず乾燥地山・水位下地山とも変形率2%前後が極小点となっている。粘性土乾燥地山の場合、土被り比が大きくなるにしたがって極小点における変形率が大きくなっている。これは、砂質土地山においては変形率の小さな段階で最小作用荷重比が得られたということを示している。

4) 極小点における作用荷重比

図-22より、砂質土地山においては、乾燥地山・水位下地山とも土被り比が増すにつれ作用荷重比の値は小さくなっている。粘性土乾燥地山の場合、土被り比が増すにつれ作用荷重比の値は小さくなっている。水位下地山の場合、データにばらつきがありこれからは土被り比による差は判断できない。

5. 両実験結果の比較

第一の実験つまり上半降下式トンネル模型による遠心力载荷模型実験の結果と第二の実験の実験結果との比較を行う。両実験における模型装置の最大の違いは、トンネル掘削のシミュレート方法であり、第一の実験の上半降下式は模型の上半部が鉛直に降下し側方の緩みを全く許さずにトンネルの掘削をシミュレートしているのに対し、第二の実験に用いた模型装置ではゴムチューブがほぼ真円を保ちながら収縮し側方の緩みを許しトンネルの掘削をシミュレートしている点にある。

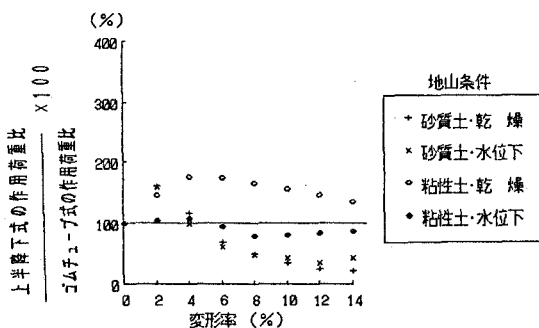


図-23 地山特性曲線の模型装置の違いによる比較

両者の実験結果の比較は、変形率2%毎に、上半降下式の場合の作用荷重比をゴムチューブ式の場合の作用荷重比で除したもので行った。このような規準化を行えば、両者の作用荷重比が全く同じになるとき、縦軸の値は100%となる。結果を図-23に示す。この図より変形率が小さいところでは、ゴムチューブ式の初期の作用荷重減少が、上半降下式の場合と比較して大きい。縦軸の値が100%以上となり、変形が進むにつれ上半降下式は作用荷重がほぼ一定の値となるのに対し、ゴムチューブ式では作用荷重の増加がみられるため縦軸の値が100%以下の値となる。この結果は、トンネル掘削のシミュレート方法に起因すると考えられ、側方のゆるみを許さなければ地山特性曲線の特性曲線B、つまり変形量が大きくなるにしたがって支保に作用する荷重が大きくなるという曲線、は得られないことがわかった。

6. 結論

ゴムチューブ式と上半降下式の両者の実験結果より側方をゆるませるかどうかで地山特性曲線の形状が著しく変わることがわかった。このことから、地山特性曲線の特性曲線Bの部分、つまり変形量が大きくなるにしたがって支保に作用する荷重が大きくなるという部分は、側方のゆるみを前提として考えられているものと推定される。よってこのような曲線つまり特性曲線Bは、この前提条件を満たさないような地山条件や施工条件の現場にはこの概念が適用できないことを示唆しているものと考えられる。

また、天端に作用する最小作用荷重は両模型装置を用いた実験でも、Terzaghiのゆるみ土圧式による良好な一致がみられた。これは、支保荷重はTerzaghiのゆるみ土圧式を用いて算定できることを示唆しているものと考えられる。

ゴムチューブ式の模型実験を用いた第二の実験の結果より、変形初期の地山特性曲線の勾配は土被り比が大きくなると大きくなる。これは、地山の強度に拘束圧依存性があることと、地山特性曲線が地山の応力～ひずみ関係に大きく影響をうけるという2つのことから説明出来る。またこれから、初期地山応力の小さな地山では地山剛性が小さいので支保を建て込まなければ変形量がおおきくなるため、支保を建て込むことが重要であることを示唆しているものとおもわれる。

7. 参考文献

- 1) 真下、石村：斜面下トンネルにおける縫地ボルト効果に関する模型実験、第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.229～pp.233、1988
- 2) 角湯、猪熊、山本：トンネルの変形と支保荷重の関係に関する模型実験、第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.206～pp.210、1993