

かぶりの小さい土砂トンネルの遠心模型実験

京都大学 工学部 正会員 足立紀尚, 木村 亮
 京都大学 大学院 学生員 ○荒巻 智

1. はじめに

交通渋滞、環境悪化などの問題を抱える大都市では、近年、地下空間の有効利用が注目されている。しかし、施工コスト、地下水の処理、非常時における安全性、アクセスなどの観点から考慮する場合、できるだけかぶりを小さくする方が有利である。ところが東京、大阪をはじめとする大都市圏は沖積平野に位置するため、対象地盤は軟弱粘土あるいはローム、未固結な砂などで形成されている。したがって、土かぶり小さい場合には単に掘削するだけでも多くの困難を伴う上に、掘削部分が既設構造物に近接している場合には、地表面沈下を抑さえ周囲の地盤への影響を最小限にとどめることが必要であり、安全性、耐久性をも十分考慮したトンネルでなければならない。

従来、土かぶりの小さいトンネルの建設方法は開削工法やシールド工法であったが、近年、山岳トンネル工法が適用されるようになり、大幅な工費削減が可能となっている。このような土砂地山に山岳工法を適用する場合に考慮すべき項目として、

- 1) トンネル周辺地山の挙動の把握にもとづく掘削面の自立性の確保のための対策
 - 2) 地下水の影響評価とその処理法
 - 3) トンネル掘削による隣接構造物、地下埋設物等への影響評価とその軽減対策
 - 4) 施工中の安全性の客観的評価と施工管理技術の確立
 - 5) 地震動、交通荷重、近接開発の影響などのトンネルに対する影響評価を考慮したトンネルの長期安定性
- などが挙げられる。

以上のようなことから、早急にかぶりの小さい土砂トンネルの設計規範を確立することが重要である。すなわち、地下鉄道、地下道路の建設に当たり、山岳トンネル工法を適用する場合には、建設時の安定性、および建設後の長期安定性を考慮して設計法を研究する必要がある。その基礎として、かぶりの小さい土砂トンネル建設時および建設後の周辺地山の変位挙動の把握が要求される。

従来、筆者らはかぶりの小さい土砂トンネルの力学挙動に関するさまざまな研究を1g下で行ってきた^{1),2)}。本研究では砂質地山を念頭においてアルミ棒積層体を地山に用いて、1g下での実験を再度実施すると共に、実寸法に近いトンネル掘削シミュレーション実験を、30g、50g、60gの遠心力場で実施した。遠心力載荷装置を用いて実験を行う利点は、1g下の模型実験では、実際のトンネルに応用するために相似則を一致させることが困難であるので、定性的な結果を示すにすぎないが、遠心模型実験では、模型の応力状態を実物と同じレベルにできるために、実物と同じ挙動を生じさせることが期待できる。そこで、重力場と遠心力場の両方でトンネル掘削シミュレーション実験を実施し、2つの実験結果を比較しながら、トンネル周辺地山の変位挙動について検討を行なった。

2. 実験概要

本研究ではトンネル直径 $D=6.5\text{cm}$ のトンネル掘削シミュレーション装置を用いて、重力場と遠心力場で同一の実験を実施し、周辺地山の変位挙動を考察した。実験は、土かぶり Z 、遠心加速度を変化させて、表-1のように合計9種類行った。遠心力載荷実験は、京都大学防災研究所の、有効回転半径 2.5m の遠心載荷力装置を用いた。

地山材料には長さ 5cm 直径 1.6mm および 3mm の2種類のアルミ棒を重量比 $3:2$ で混合したアルミ棒積層体 ($\gamma = 2.1\text{gf/cm}^3$ 、 $\phi = 30^\circ$ 、 $c = 0\text{kgf/cm}^2$)

表-1 実験の種類

	土かぶり			
	0.5D	1.0D	1.5D	2.0D
遠心力				
重力場 (1g)	○	○	○	○
30g	○	○		○
50g		○		
60g		○		

CENTRIFUGE MODEL TESTS OF SHALLOW SANDY GROUND TUNNEL:
 T. ADACHI, M. KIMURA and S. ARAMAKI (KYOTO UNIV.)

を用いた。このアルミ棒を左右の壁面間に積み上げて地山を形成する。壁面間の距離は40cmである。本実験に用いたトンネル掘削のシミュレーション装置を図-1、写真-1に示す。本装置は図に示すようにモーターを回転させることによってトンネルを半径方向に一様に収縮することができ、これによりトンネル掘削をシミュレートする。モーターの回転数を出力するが、あらかじめ回転数とトンネル直径収缩量との関係を1g下でキャリブレーションした。

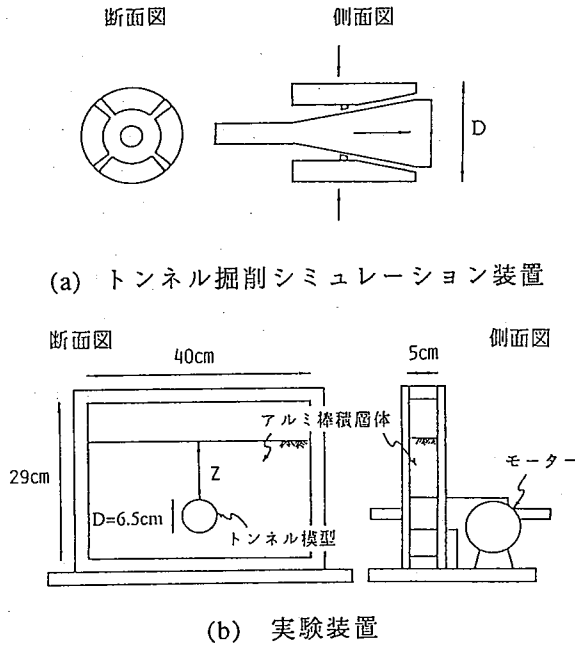


図-1 実験装置

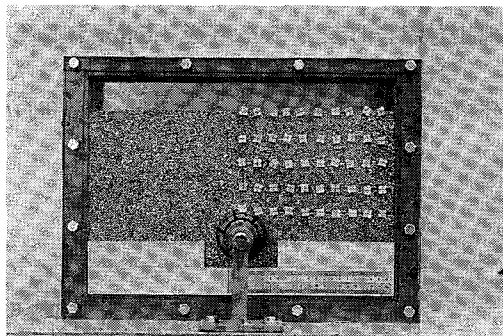


写真-1 実験装置

実験の手順は、重力場における実験と遠心力場における実験で概ね同一で、以下のようである。

- 1) アルミ棒を所定の土かぶりまで積み上げる。
- 2) 積み上げたアルミ棒積層体にマジックで土かぶりZが0、0.5D、1.0D、1.5D、2.0Dの位置及び

天端から鉛直に標線を入れる。

- 3) 標線上に水平方向は2cm間隔、鉛直方向は必要に応じ標点を入れる。標点は直径1.6mm、長さ5cmのアルミ棒の先端に1cm×1cmの方眼紙を貼り付けたものを用いた。
- 4) 写真の縮尺の計算及び水平補正を行うために、長さ10cmの直線定規を実験装置の下に置く。
- 5) 重力場における実験では、モーターを回転させてトンネル径を収縮させ、トンネル直径収缩量 $\delta_T=0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0\text{mm}$ の6段階でトンネル周辺地山の動きを地上に固定したカメラで記録する。遠心力場での実験では、模型装置を遠心力載荷実験装置のプラットフォームに設置し(写真-2)、所定の加速度まで加速度を上げた後、5分間遠心加速度を与え続ける。遠心加速度を30g、50g、60gの各々に保ったまま、トンネル直径を収縮させ、トンネル直径収缩量 $\delta_T=0, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0\text{mm}$ の6段階で写真撮影を行う。アームの回転に対し発光時間 $1\mu\text{sec}$ のフラッシュを同期させることによって、写真撮影を行う。
- 6) 引き伸ばした写真から周辺地山の変位をデジタイザーにより読み取る。

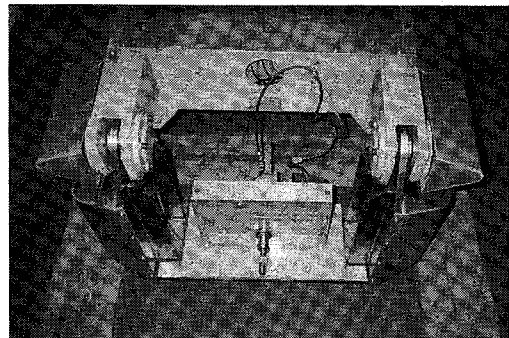


写真-2 プラットホームに設置した実験装置 (上方より撮影)

3. 実験結果と考察

以下の実験結果はすべて直径収缩量 δ_T が5mmの時のものである。本実験で得られた結果に対して、1g下における実験と遠心実験との比較を通して、考察を加える。

3-1 地表面の横断沈下形状

図-2は1g下の実験結果と遠心実験の結果を、縦軸に地表面沈下量 δ をトンネル天端沈下量 δ_0 で

基準化した値、横軸にトンネル中心軸からの水平距離 H をトンネル直径 D で基準化した値をプロットしたものである。ここで δ_c はトンネル掘削装置の天端直上 2mm の位置における標点の変位を表し、掘削装置表面の半径方向変位 $\delta_T/2$ よりも若干大きな値である ($\delta_c \geq \delta_T/2$)。図中の曲線は沈下形状を容易に比較できるように引いたものである。以下に 1g と遠心場の違いについて比較し考察を行う。

- 1) 天端直上における δ/δ_c の値は、遠心実験 (30g) の方が小さく、土かぶり 0.5D、1.0D ではあまり差は見られないが、2.0D だけは他より小さい値になっている。さらに、土かぶりが 1.0D の場合

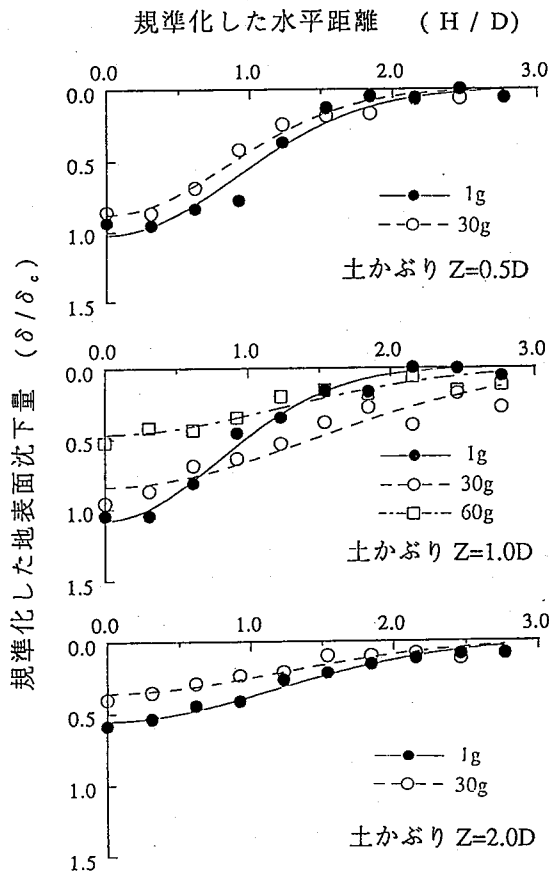
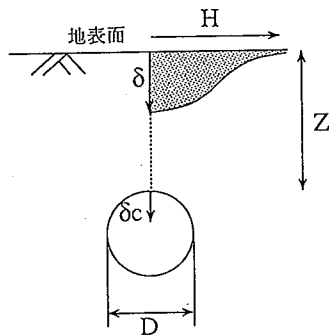


図-2 横断方向の地表面沈下形状

で比較を行うと遠心加速度が大きくなるにつれて、天端直上における δ/δ_c の値は、小さくなっている。

- 2) 沈下形状は、1g と 30g で比較すると、0.5D と 2.0D の場合、その傾向はよく似ている。しかし、1.0D では H/D の値が大きい領域で沈下量が 1g の実験と比較して大きくなっている。また、土かぶりが 1.0D の場合、遠心力が大きくなるほど形状は緩やかになる。
- 3) 沈下の影響範囲は、土かぶり 0.5D と 1.0D の 1g の場合は、実験装置の幅の中で地表面沈下量がゼロの位置が確定できるが、それ以外の場合は確定できない。しかし、沈下の影響範囲は土かぶりが大きくなるにつれて、広がる傾向にある。以上のことから、地表面の沈下に対しては、土かぶりが 1.0D の場合を除いて定性的には”土かぶり大きいほど沈下量が減少し、沈下形状は緩やかになる”という同じ傾向を示す。

3-2 天端直上の地表面沈下量と土かぶりの関係

ここでは、トンネル天端の沈下が地表面に与える影響がどの程度かを考察するために、トンネル天端沈下量 δ_c と天端直上の地表面沈下量 δ の関係について検討する。

Atkinson et al.³⁾ は、土かぶりの小さいトンネルのモデル実験を行い、トンネル天端沈下量 δ_c と天端直上の地表面沈下量 δ の比と土かぶりの比の関係を次式で与えている。

$$\frac{\delta}{\delta_c} = 1.0 - \alpha \frac{Z}{D} \quad (\alpha: \text{パラメーター}) \quad (1)$$

彼らの実験の概要を述べる。実験では図-3 に示すような直径 $D=6\text{cm}$ のトンネル掘削シミュレーション装置を用いている。この模型はトンネル内部の圧力 σ_T を空気圧によって調節することができ、これによりトンネル内部の圧力を減じてトンネル掘削をシミュレートする。地山材料は、過圧密粘土、密に詰めた砂および緩く詰めた砂の 3 種類である。上載圧 σ_s を付加することができ、その影響をも考察している。また、1g 下で実験を行うだけでなく、密な砂を地山に用いて、75g の遠心場でも実験を行っている。

その結果を図-4 (a)~(c) に示す。また、本実験の結果を図-5 に示す。この図は天端直上の地表面沈下量 δ を天端沈下量 δ_c で基準化した値と土かぶり比の関係を表している。図中の直線は式(1)を表したもので、直線の傾き α は、基本的に地山材料の特性に依存し、ダイレイタンスーと関連がある。 α の

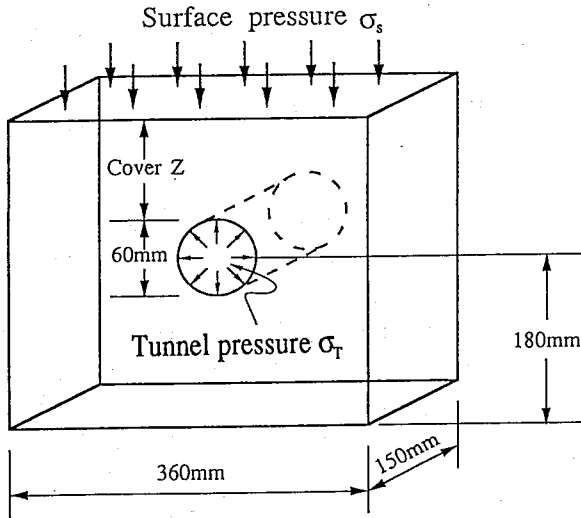
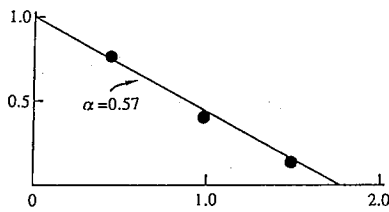
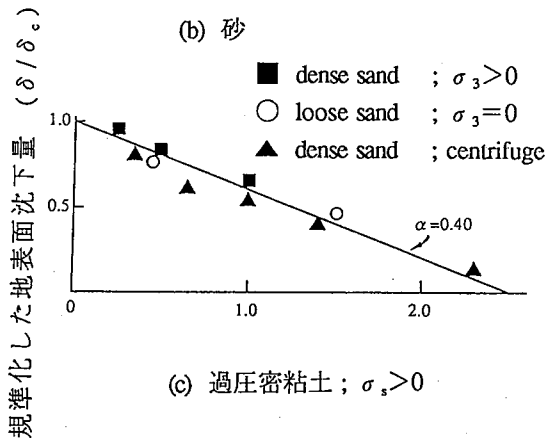


図-3 Atkinson et al. のトンネル掘削シミュレーション装置

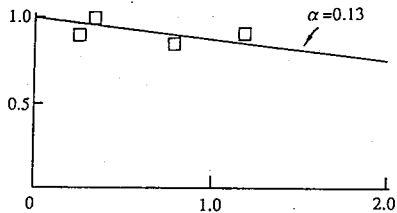
(a) 密な砂; $\sigma_s = 0$



(b) 砂



(c) 過圧密粘土; $\sigma_s > 0$



土かぶり比 (Z/D)

図-4 天端直上の地表面沈下量と土かぶりの関係
(a)~(c) Atkinson et al. の実験結果³⁾

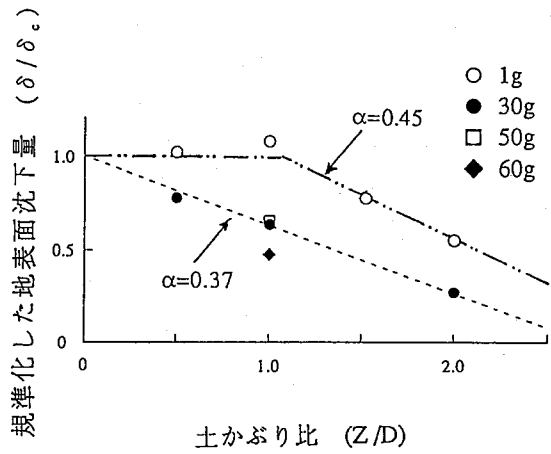


図-5 天端直上の地表面沈下量と土かぶりの関係

値が大きいほどアーチ効果が卓越することを示すが、上載圧 σ_s が無い場合は、緩い砂と密な砂では緩い砂の方が α の値は小さい。直線の傾き α は 30g のデータより 0.37 と求まった。この直線を 1g と比較すると以下のことが考察できる。

図-4 と図-5 の比較から遠心実験の結果は Atkinson et al. の実験結果に非常によく合っている。これに対して、1g の実験結果は Atkinson et al. の式(1)で 0.5D から 2.0D までのすべての土かぶりの実験結果を表現することはできないことを示唆している。つまり、土かぶりが 1.0D までは δ/δ_0 は 1.0 で、トンネル天端上の地山が天端と地表面で相対変位量がなくそのまま沈下することを示すが、土かぶりが 1.0D を越えると、アーチ効果が発揮され α が 0.45 となり Atkinson et al. の上載圧のない砂の実験結果と一致する。

アルミ棒積層体の間隙比 e は、1g 下の実験の場合、0.20 でかなり緩詰め状態である。一般に、砂の粒子の形状は複雑で粒子間摩擦があるのに対し、アルミ棒は円形の滑り易い材料(2種類の径の粒子だけを配合した不安定な材料)であるため、緩く詰めた状態では十分なアーチ効果が得られない。また、遠心場での間隙比 e は、写真による計測結果より 0.18 であった。これは、遠心力をかけた状態ではアルミ棒積層体は、1g 下の初期状態よりも若干密になることを示している。したがって、1g 下ではアルミ棒が緩く詰まった状態のためにトンネル天端の沈下の影響が地表面の沈下に直接及んだのに対して、遠心力場ではアルミ棒が密な状態になったために 1g 下の結果に比べて、アーチ効果を発揮したと考えられる。

3-3 変曲点の位置と土かぶりの関係

Schmidt⁴⁾は、トンネル掘削による地表面の横断沈下形状を正規分布曲線で近似できるとした。図-6に示すとおり、トンネル中心軸から沈下曲線の変曲点までの距離を*i*とすると、この変曲点における沈下量は $0.61 \delta_{max}$ で与えられる。ここに、 δ_{max} は天端直上の地表面沈下量である。地表面沈下形状を考察する際には、この*i*つまり変曲点の位置が重要な問題となる。その理由は、変曲点では沈下曲線の接線勾配が最大となり、隣接構造物がある場合、沈下による影響が大きくなることが考えられる。

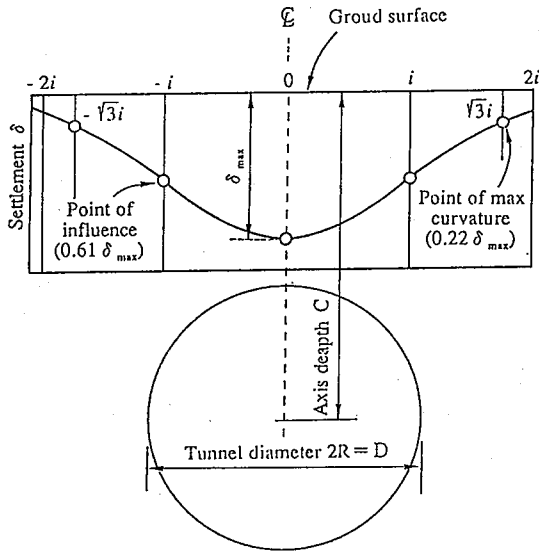


図-6 横断方向の地表面沈下形状⁴⁾

さらに、Peck⁵⁾は、3種類の地山条件に対して、土かぶり C/D と変曲点までの距離 i/R の関係を与えている。ここで、 C はトンネル中心から地表面までの距離で、 D はトンネル直径、 R はトンネル半径である。この関係を図-7に示し、図中の破線は、それぞれの地山条件を表している。また図中の○印は、沈下曲線より求めた*i*から計算してプロットした点である。この図から次のようなことがわかる。

- 1) 土かぶり比 C/D が 1.5 ($Z/D=1.0$ に相当) で、30g、50g、60g における i/R の値を比較するとあまり差はない。土かぶりが大きくなれば i/R の値も大きくなっている。
- 2) 1g と遠心の i/R の値を比較すると遠心の方が大きい。

3-4 横断方向層別沈下形状

図-8は、土かぶり 1.0D の実験結果であり、地

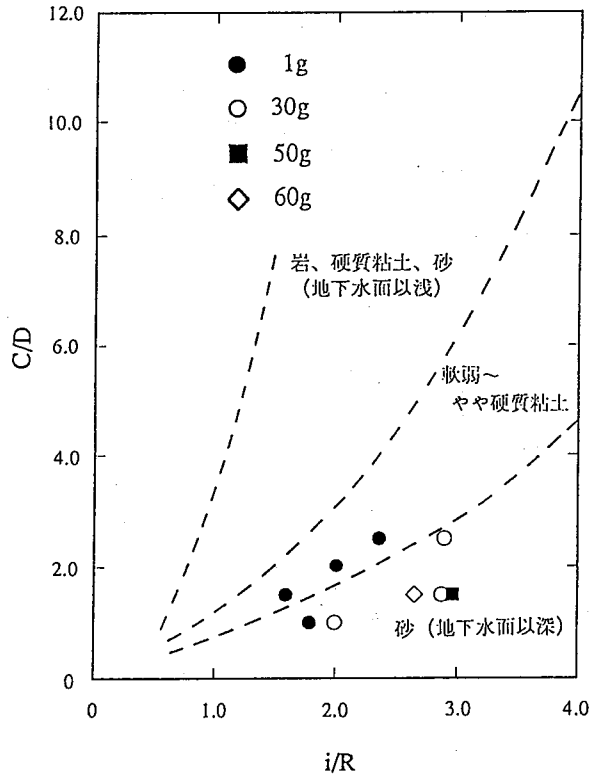


図-7 C/D と i/R の関係

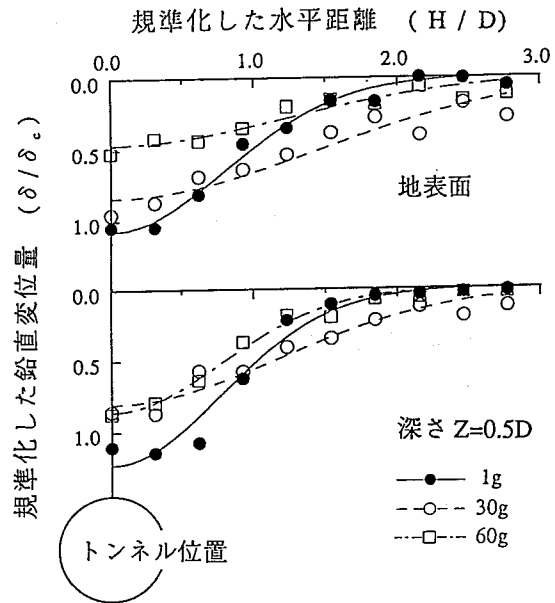


図-8 横断方向層別沈下形状
(1,30,60g,土かぶり $Z=1.0D$)

表面と深さ 0.5D の地山の鉛直変位を表したものである。また、図-9は、土かぶりが 2.0D の実験結果であり、地表面、深さ 0.5D、深さ 1.0D および深さ 1.5D の地山の鉛直変位を表したもので、ともに

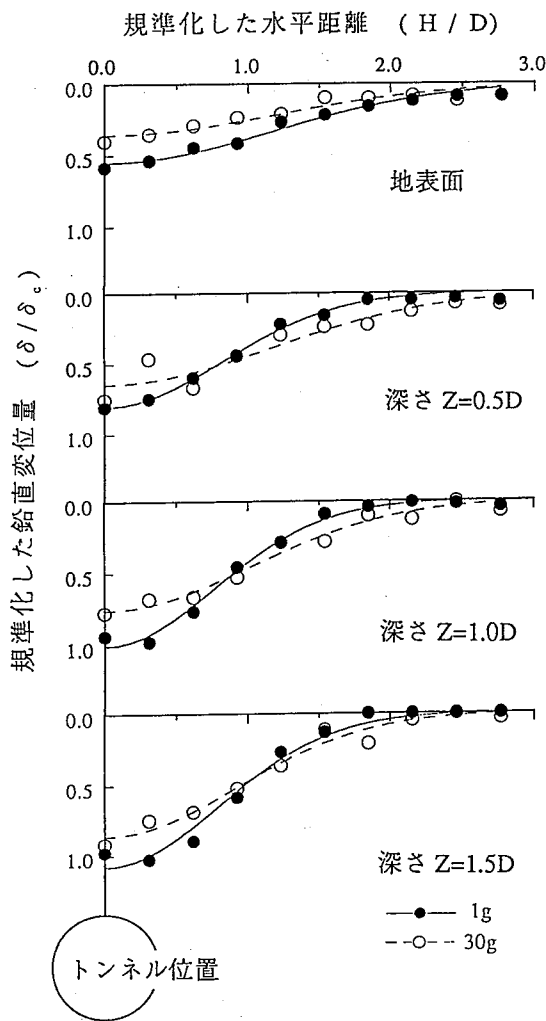


図-9 横断方向層別沈下形状
(1,30g,土かぶりZ=2.0D)

1g 下の実験と遠心実験の結果を示している。3-1の”地表面の横断沈下形状”で述べたように、層別の沈下形状も遠心実験の方が沈下形状が緩やかで天端直上の沈下量が小さいことがわかる。地表面の沈下形状と比較して天端に近い領域では同じような沈下形状を示している。

3-5 天端直上地盤の鉛直変位

図-10~12は、縦軸に天端からの高さをトンネル径で規準化したもの、横軸に天端直上部の地盤の鉛直変位を天端沈下量で規準化したものを表した図である。これらの図から以下のような知見が得られる。

1) 図-10、図-11より 1g、30gともに天端直上からの高さが高くなるにつれて、 δ/δ_0 の値は減少し、土かぶりにかかわらず各高さでの δ/δ_0 の値

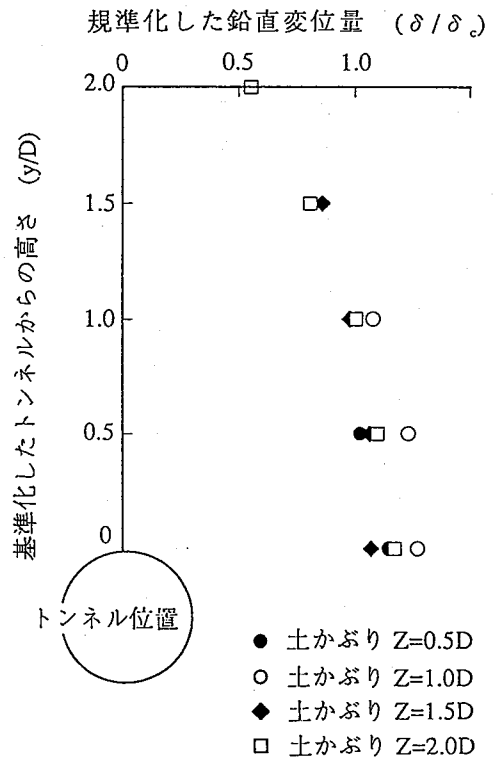


図-10 地盤内の鉛直変位分布
(トンネル天端沈下量 δ_0 で規準化) (1g)

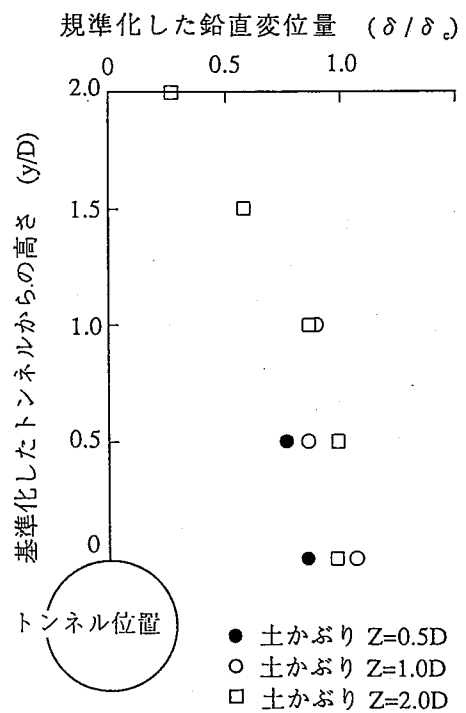


図-11 地盤内の鉛直変位分布
(トンネル天端沈下量 δ_0 で規準化) (30g)

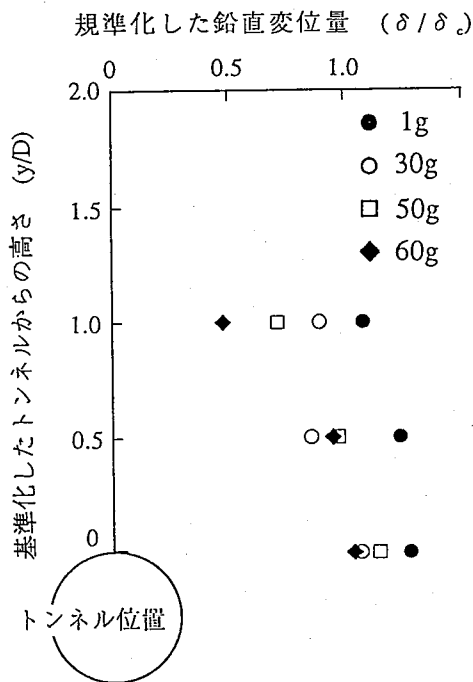


図-12 地盤内の鉛直変位分布
(トンネル天端沈下量 δ_0 で規準化)
(土かぶり $Z=1.0D$)

は一致していることがわかる。

- 2) 図-11 は土かぶりを 1.0D に固定して遠心力を変化させて行った実験結果である。これより、遠心力が大きくなると沈下量は減少する。さらに、天端に近づくにつれ、遠心力の違いが低減される。
- 3) 図-10 ~12の3つの図より天端から高さ 1.0D までの層では、 δ/δ_0 の値はほぼ一定値を示している。したがって、重力場、遠心力場にかかわらず、土かぶり 1.0D を境界にして沈下状態が変化するといえる。

3-6 トンネル周辺地山の変位挙動

図-13、図-14は、1g下と30g下におけるトンネル周辺地山の変位ベクトルをそれぞれ描いたものである。これらの図から地山には変位する領域と変位しない領域が存在することがわかる。1gでは、土かぶりが 0.5D、1.0D の場合、グランドアーチが形成されず、天端の沈下が直接、地表面に影響している。2.0D では、天端沈下の地表面沈下に対する影響が、かぶりが小さい場合に比べて軽減されており、グランドアーチの形成が確認される。これに対して、30g の場合も 1g と同様の傾向がみられる。

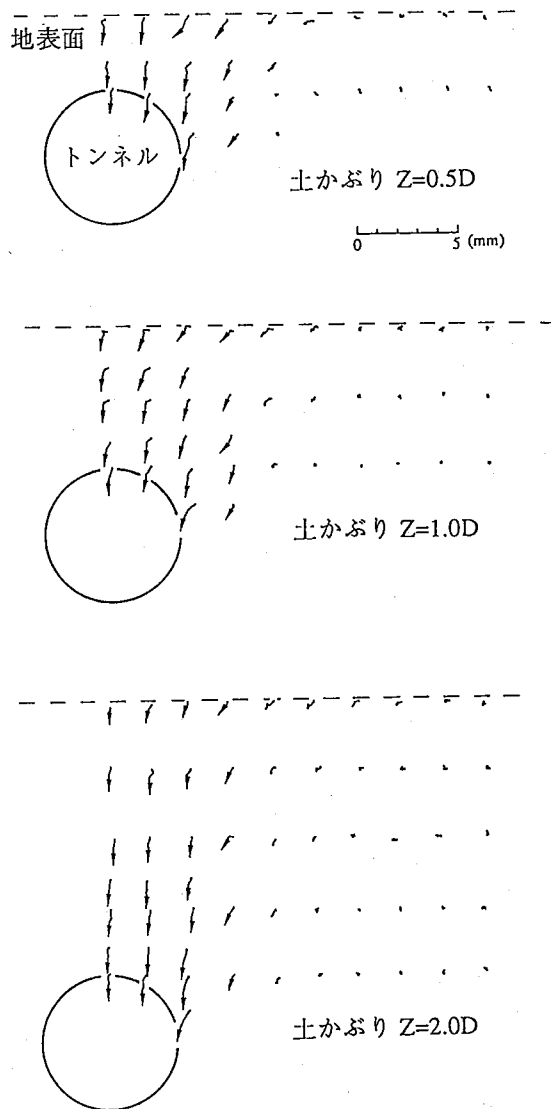


図-13 トンネル周辺地山の変位ベクトル (1g)

しかし、1g に比べて、変位を示す箇所が拡大しており、ベクトルの向きも不安定になっている。

4. おわりに

本研究では、遠心載荷力装置を用いて、トンネル掘削シミュレーション実験を行い、以下のような結果を得た。

- 1) 重力場、遠心力場にかかわらず、土かぶりが大きくなるに従い、地表面沈下の影響範囲は広くなり、沈下形状は緩やかになる。
- 2) 土かぶりに関係なく、遠心力が大きくなるにつ

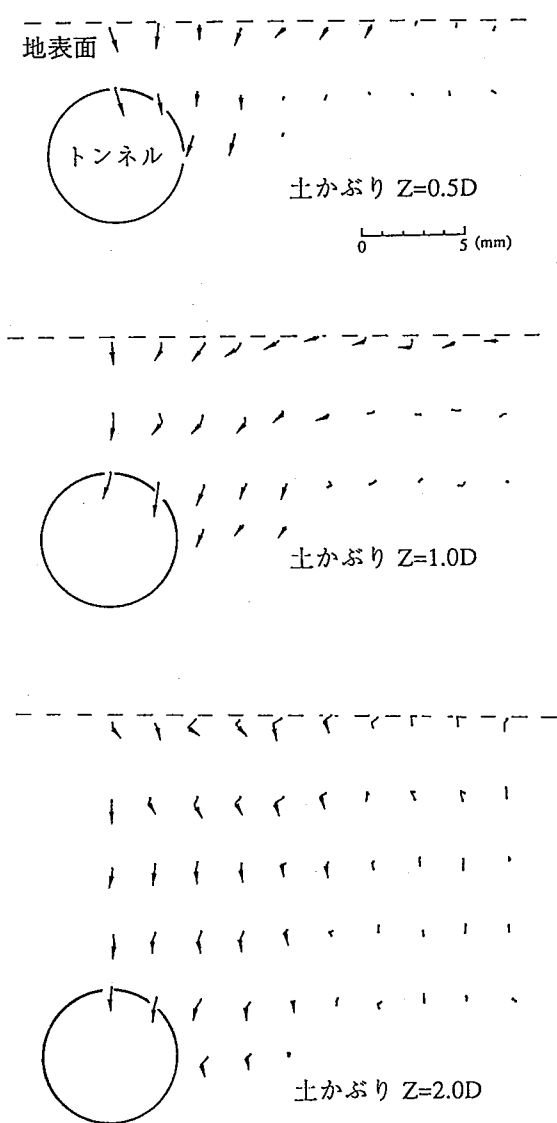


図-14 トンネル周辺地盤の変位ベクトル (30g)

れて、地表面沈下曲線は、緩やかになり、地表面沈下量は減少する。

- 3) トンネル天端付近の領域では、土かぶり、遠心力に関係なく同じような沈下形状を示す。
- 4) 1g 下での模型試験に比べ遠心模型試験においては、かぶりが小さい範囲からアーチング現象が生じる。

本研究では、実際のトンネルの挙動に近い模型実験を遠心場で行い、周辺地山の挙動の把握を試みた。しかし、種々の問題点があり、再現性を確認するほど十分な実験結果が得られなかった。今後は実験結果を蓄積するとともに、現場計測結果との対比を行う予定である。以下の点に留意して、さらに詳細な

トンネル周辺地山の変位挙動を把握していく必要がある。

- 1) トンネル収縮に伴う体積の減少と地山内での体積減少の比較
- 2) 地表面沈下の影響範囲の正確な把握
- 3) 写真撮影による計測以外の測定法の確立
- 4) 遠心力場でのアルミ棒積層体の鉛直方向の密度分布の変化の計測
- 5) トンネル覆工に作用する土圧の計測および双設トンネルの挙動の把握

*参考文献

- 1) 足立紀尚・田村 武・八嶋 厚・上野 洋：砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究、土木学会論文集、第358号、1985、pp.129-136.
- 2) 足立紀尚・木村 亮・山口直宏・長田文博：土砂地山における双設トンネル掘削時の挙動、京都大学防災研究所年報 第32号 B-2、1989.
- 3) Atkinson, J.H. and Potts, D.M.:Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground, Proc. ASCE, GT4,1977, pp.307-325.
- 4) Schmidt, B.:Settlements and Ground Movements Associated with Tunnelling in Soil,PhD Thesis, Univ. of Illinois, Urbana, 1969.
- 5) Peck, R.B.:Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground, Proc. 7th ICSMFE, 1969, pp.225-290.