

## 粘性土地山のシールド覆工設計用土圧に関する基礎的実験

Experimental Study of Earth Pressure for shield tunnel lining in Cohesive Ground

土門 剛\*・早崎 篤史\*\*・西村 和夫\*\*\*

Tsuyoshi DOMON, Atsushi HAYAZAKI and Kazuo NISHIMURA

Current methods to estimate the earth pressure of shield tunnel lining are classified into two methods. One method is in established sandy soil deposit. Another method is established in clayey soil deposit and intermediate soil deposit. The latter treats the earth pressure which contains water pressure, because the behavior of earth pressure and water pressure are very complex and difficult to quantify in such deposits.

In this study, loading-unloading test by hydraulic pressure was carried out to clarify the behavior of these pressure in five kinds of model ground (Kaoline : Toyoura sand=10 : 0, 8 : 2, 7 : 3; 6 : 4, 0 : 10 by weight ratio). we measured vertical and horizontal earth pressure and pore water pressure in model grounds. Based on the coefficient of lateral earth pressure calculated backward by using measured values, the behaviour of earth pressure and pore water pressure was made clear qualitatively in each ground.

Keywords: shield tunnel, earth pressure, pore water pressure, coefficient of lateral earth pressure

### 1. はじめに

シールド覆工の設計用土圧は、掘削の対象となる地山が砂質土か粘性土かによってそれぞれ土水分離、土水一体の考え方で算定されている<sup>1)</sup>。掘削対象領域がすべて砂あるいは粘土である場合には、この算定方法で算出された土圧（あるいは水圧）が妥当であると考えられるが、砂質土と粘性土の中間的な性状を示す地山（以下、中間土地山とする）や、粘性土を含んでいても比較的透水性の良い地山ではどちらの考え方を適用するべきかの判断が非常に難しいのが現状である。特に、水圧の卓越する地山で土水一体の考え方を採用すれば水圧に対しても結果として側方土圧係数を乗ずることになり、合理的な設計土圧とはならない場合も考えられる。

このことから著者らは、完全に粘土分だけの粘性土地山から砂と粘土を混合した中間土地山までの多種にわたる地山モデルに対して水圧載荷実験を行うことにより、広範囲の粘性土地山の土圧・水圧の力学挙動についての研究を進めてきた<sup>2) 3)</sup>。そこで本報告では、砂と粘土の配合比（重量比）を変えた3種類の混合土地山モデルを中心として、さらに粘性土地山モデル、および砂質土地山モデルを含めた5種類の地山モデルの水圧載荷実験で計測される鉛直・水平全土圧および間隙水圧の経時変化を示すとともに、これらの実測値から逆算して得られる側方土圧係数（以下、真の側方土圧係数ではなく計測値から逆算されたという意味で「みかけの側方土圧係数」と定義する）から、各地山モデルの土圧・水圧の力学挙動の解明を試みた。さらに、中間土地山や粘性土地山の

\* 正会員 東京都立大学助手 工学部土木工学科

\*\* 学生会員 東京都立大学大学院 工学研究科

\*\*\* 正会員 工博 東京都立大学講師 工学部土木工学科

土水分離の考え方の適用性についても、時間依存性および水圧依存性の観点から考察した。

2. 水圧载荷実験

2-1 地山モデル

広範囲の粘性土を対象としているため、完全に粘土分だけの粘性土を1種類と粘土と砂を混合した中間土を3種類設定した(表-1)。これらの地山モデルの作成方法は、まず、粘性土Aについては乾燥したカオリン粉末を、中間土B、C、およびDについては乾燥した豊浦産標準砂とカオリン粉末を軽く手練りした後、水を少量ずつ加えながらハンドミキサーで攪拌する。なお、中間土モデルについては比較的粘性土に近い分類の地山となるようにカオリン粘土の配合比を多くした材料を用いた。また、これら粘性土および中間土との比較のため、過去に実施された砂質土を用いた空気圧実験についても示している。

表-1 地山材料および実験ケース

| 実験ケース | 地山種別 | 材料配合比<br>(カオリン：標準砂) | 単位体積重量<br>(gf/cm <sup>3</sup> ) | 含水比<br>(%) |
|-------|------|---------------------|---------------------------------|------------|
| A     | 粘性土  | 10：0                | 1.66                            | 56.1       |
| B     | 中間土  | 8：2                 | 1.70                            | 50.5       |
| C     |      | 7：3                 | 1.77                            | 42.8       |
| D     |      | 6：4                 | 1.88                            | 45.0       |
| E     | 砂質土  | 0：10                | 1.96                            | —          |

注1)単位体積重量および含水比は、実験前・後の地山モデル上部・下部の平均値である。  
注2)配合比は重量比である。

2-2 実験装置

実験槽はアクリル製の外箱と内箱の二重構造になっている(図-1)。外箱は連結管を介してスタンドパイプと接続されており、このスタンドパイプ内の水位を上下させることで内箱内に打設された地山モデルに対して水圧载荷・除荷させることができる。二重構造とした理由は、圧力変化による内箱壁面の変位を抑止するためである。過去に用いられた実験槽の内箱は、この内箱の約8倍の容積であったため打設作業性が非常に悪かった。したがって、今回のように内箱を小型化したことを注記しておく。

図-2に計測器の設置状況を示す。鉛直全土圧計、水平全土圧計および間隙水圧計の中心が内箱底板から75mmの位置に各2個ずつ設置する。なお、鉛直全土圧計については打設している地山の厚さが75mmになったと同時に、受圧面が水平になるように水準器を用いながら慎重に設置する。水平全土圧計については、鉛直土圧計と同一の地中土圧計を受圧面を垂直にしてあらかじめ内箱の相対する2側面に埋め込まれている。間隙水圧計については、内箱を小型化した今回の実験から、地山中の間隙水圧測定の精度向上を図る目的で、従来用いていたひずみゲージ式間隙水圧計から高性能半導体センサーを改良した間隙水圧計を用いている。

2-3 実験方法

地山材料の打設完了後、地山モデルの飽和度を高めると

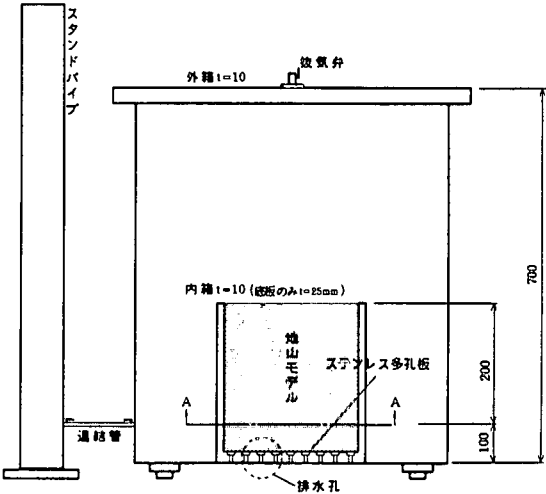


図-1 実験装置概略図

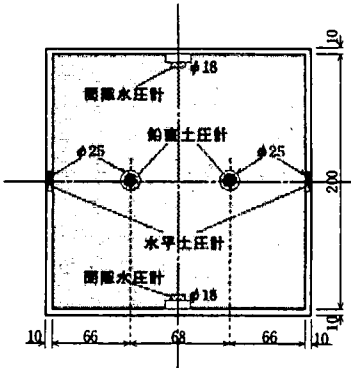


図-2 A-A断面(計測器設置断面)

ともに、打設によって残留した過剰な圧力を消散させる目的で内箱底面に設けられた排水孔より排水させ養生する。排水養生時間は、材料配合比および土被りによって異なる（表-2）。

排水養生後、図-3のステップで水圧による載荷・除荷を実施する。図-3(a)は粘性土および中間土の載荷ステップを、図-3(b)は砂質土の載荷ステップを示している。各地山モデルとも、最大水位は計測器中心から土被りの2倍（計測器センターからでは3倍）に設定し（□-1および□-3）、最低水位は地表面と水位面を一致させている（□-2および□-4）。また、粘性土および中間土は載荷・除荷後の土水圧挙動を追うため、各載荷ステップの水位に到達後、その水位をホールドして一定期間の土水圧を計測している。一方、砂質土については、所定の空気圧（10gf/cm<sup>2</sup>ずつ）に達したと同時に水平全土圧のみ計測した。

表-3に計測項目と各実験ケースでの計測状態についてのコメントを示す。

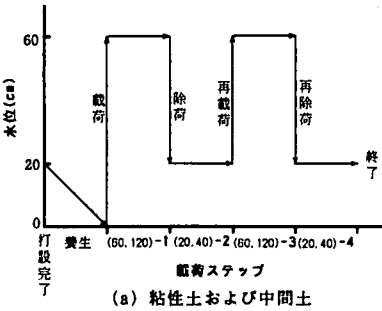


表-2 載荷ステップおよび載荷時間

| 実験ケース | 土被り<br>(cm) | 載荷ステップ名 |      |       |      | 養生時間 | 各ステップ<br>ホールド時間 |
|-------|-------------|---------|------|-------|------|------|-----------------|
|       |             | 載荷      | 除荷   | 再載荷   | 再除荷  |      |                 |
| A     | 20          | 60-1    | 20-2 | 60-3  | 20-4 | 72   | 48              |
| B     | 20          | 60-1    | 20-2 | 60-3  | 20-4 | 48   | 48              |
| C     | 40          | 120-1   | 40-2 | 120-3 | 40-4 | 72   | 48              |
| D     | 20          | 60-1    | 20-2 | 60-3  | 20-4 | 48   | 48              |
| E     | 25          | 75-1    | 25-2 | 75-3  | 25-4 | 0    | 0               |

時間の単位: hour

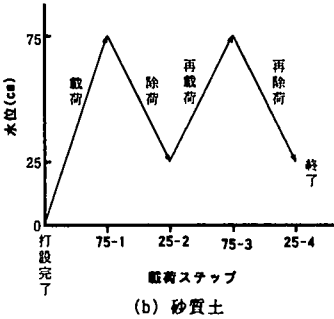


表-3 計測項目

| 実験ケース | 計 測 項 目 |       |         | 備 考                    |
|-------|---------|-------|---------|------------------------|
|       | 鉛直全土圧   | 水平全土圧 | 間 隙 水 圧 |                        |
| A     | ○       | ○     | △       | 最終ステップのみ水圧計測値に乱れ       |
| B     | △       | ○     | ○       | 鉛直土圧計設置に不備、水圧値若干乱れ     |
| C     | ○       | ○     | ○       | 良好                     |
| D     | ○       | ○     | ○       | 60-1および-3で+10cmの過剰水位載荷 |
| E     | ×       | ○     | ×       | 水平全土圧のみ計測              |

図-3 各地山モデルの載荷ステップ

3. 実験結果および考察

3. 1 鉛直全土圧、水平全土圧、および間隙水圧の経時変化（図-4）

各実験ケースで計測された鉛直全土圧、水平全土圧、および間隙水圧の経時変化を以下に示す。なお、ケースEについては前述の通り水平全土圧のみの計測で、鉛直全土圧は理論土被り圧を、間隙水圧については理論静水圧を示している。以下では、主にケースAからDについて言及する。

まず鉛直全土圧の経時変化であるが、実験ケースDの載荷ステップ60-1、-3において、過剰な水位を与えてしまったことにともなう応力緩和現象がそれぞれのステップ初期に見られるものの、他のケースのいずれのステップでも載荷時の浸透現象および除荷時の過剰間隙水圧消散現象が明瞭にあらわれている。また、水位差分に相当する鉛直全土圧の圧力差がどのケースでもあらわれている。理論土被り圧より若干の差異が見られるケースもあるが、計測器の許容誤差から考えると比較的良好に土被り圧が再現できたといえる。

次に水平全土圧の経時変化をみる。後述の間隙水圧の挙動ほどではないが載荷あるいは除荷直後の初期の段階で時間依存性挙動が各ケースでみられる。ただし、その挙動も初期の極わずかにみられるだけで間隙水圧が静水圧に達する前に土圧が安定している。安定時には鉛直全土圧と同様に水位差分の圧力差が明瞭にあらわれている。

最後に間隙水圧の経時変化について、表-4の「静水圧に達した時間」の項を参照しながら検討する。同一実験ケースでもステップによって差はあるが、大体的にみると粘土配合が多くなるほど静水圧に到達するまでの時間がかかっている。ただし、本報ではこのような間隙水圧の時間依存性挙動について定量的に把握するまでには至っていない。

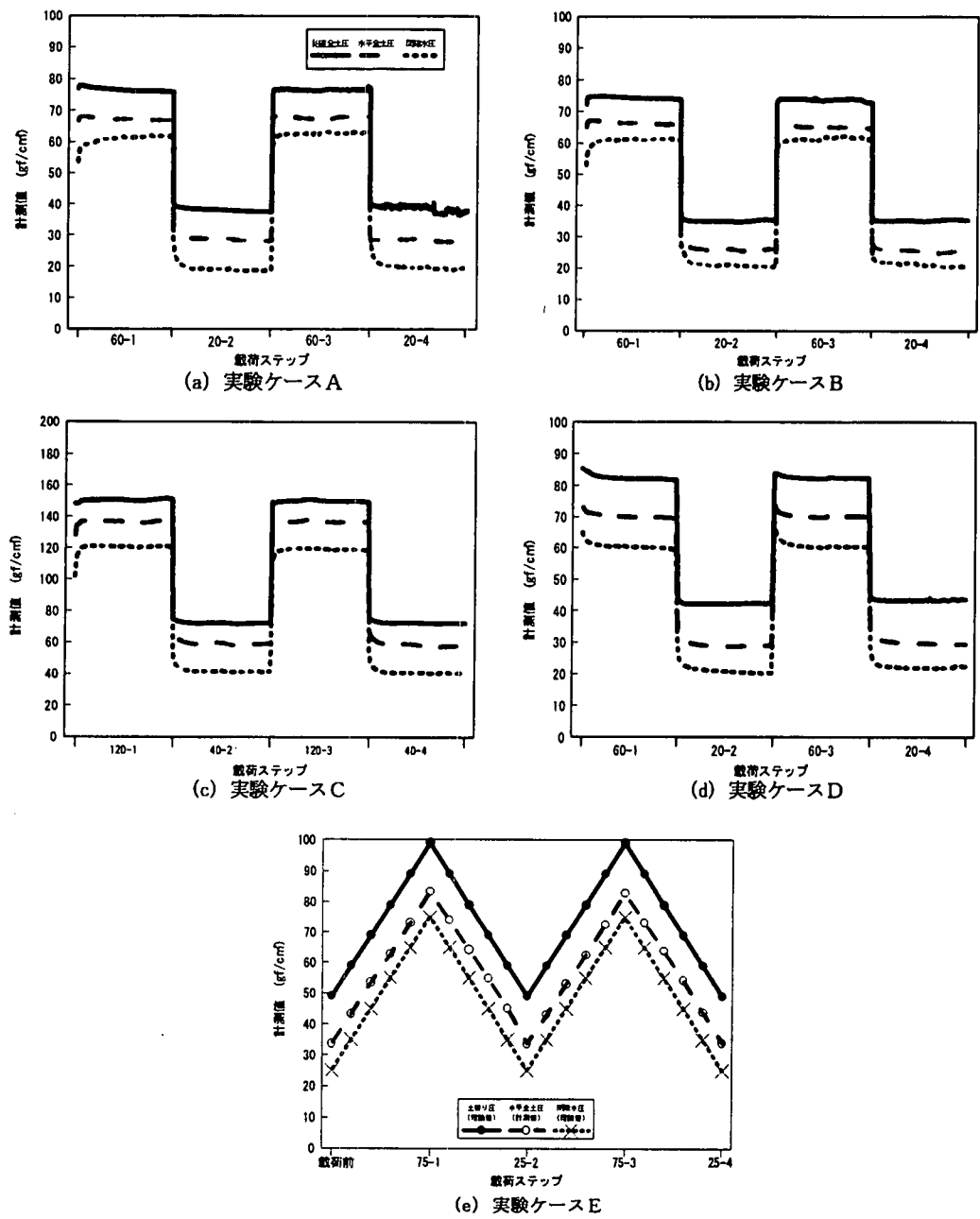


図-4 鉛直全土圧、水平全土圧、および間隙水圧の経時変化

### 3. 2 みかけの側方土圧係数

土水分離の考え方によるみかけの側方土圧係数を $\lambda_{sep}$ 、土水一体の考え方によるみかけの側方土圧係数を

$\lambda_{con}$  とすると、それぞれ次式から計算される。

$$\lambda_{sep} = \frac{p_h - u}{p_v - u} \dots\dots\dots (1)$$

$$\lambda_{con} = \frac{p_h}{p_v} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $p_v$ は鉛直全土圧、 $p_h$ は水平全土圧、 $u$  は間隙水圧で、いずれも実験で得られた実測値である。また、比較のために砂質土空気圧実験で得られた水平全土圧の結果から得られた側方土圧係数（ただし、鉛直全土圧については理論土被り圧、間隙水圧については理論静水圧を用いる）についても示している。これらの側方土圧係数を比較することによって、第一に水圧依存性の観点から、そして第二に時間依存性の観点から各ケースの土水圧の力学挙動について以下に考察する。

まず図-5により、水圧依存性について検討する。同図は、間隙水圧が静水圧に到達後の安定期間内に計測された土水圧をもとに計算された各側方土圧係数の平均値を示している。同図(a)は(1)式によって計算された各ケースの側方土圧係数であり、同図(b)は(2)式によって計算された側方土圧係数である。まず、土水分離の考え方によるみかけの側方土圧係数をみると、一見してわかるとおりケースAだけが水位によって、すなわち水圧によって係数の値に約0.2の差がある。この差についてみると、水位（水圧）の高いときに値が小さく、水位（水圧）が低いときにその値が大きくなっている。詳細はここでは述べないが、土水分離と土水一体の中間的な地山にあるものとして仮に水の側方土圧係数が1未満であるとした場合の側方土圧係数を試算すると、この結果のように、水位（水圧）が高くなればなるほど $\lambda_{sep}$  が小さくなることが確認された。したがって、ケースAは分離の考え方を適用するには難しい地山であるといえる。ケースA以外は、水位（水圧）に依存せずにはほぼ一定の側方土圧係数を示しているとともに、その値もケースE（砂質土）の係数の値に近くなっている。これらの結果から判断すると、ケースBからDの中間土は水圧によらず一義的に係数の値を決定できることから、水圧安定時には土水分離の考え方のできる地山に分類できるものと判断できる。

一方、同図(b)により、土水一体の考え方で計算されたみかけの側方土圧係数についてみると、全ケースとも水位（水圧）によって係数の値に差があり、グラフの形状が非常に類似している。また定量的にみても各ステップで側圧係数の値が近接しており、特に水位（水圧）の高いステップでは、ほぼ同じ値となっている。以上のことから判断すると、全ケースとも水圧によって $\lambda_{con}$  の値が異なるという理由で土水一体の考え方が適用できない。前述の分離での考察と考えあわせると、ケースA（粘性土）はどちらの考え方にも分類できない地山となるが、より長期の計測をすれば他のケースのように、分離の考え方においても水圧依存の結果とはならないことも十分考えられる。

最後に、時間依存性の観点から考察する。

表-4は、式(1)および(2)から計算された側方土圧係数の荷重・除荷直後の値と、間隙水圧が静水圧に達した時点の値をまとめたものである。なお、表中に静水圧に達した時間も明記した。間隙水圧の経時変化の考察でも述べたが、粘土配合が多くなるにともない静水圧に至る時間に多くを要している。また、 $\lambda_{sep}$  では粘土配合が増すにしたがい荷重直後と安定後との間の変動幅が大きくなっている。このことから、 $\lambda_{sep}$  の値は水圧の変動の影響をかなり受けているといえる。

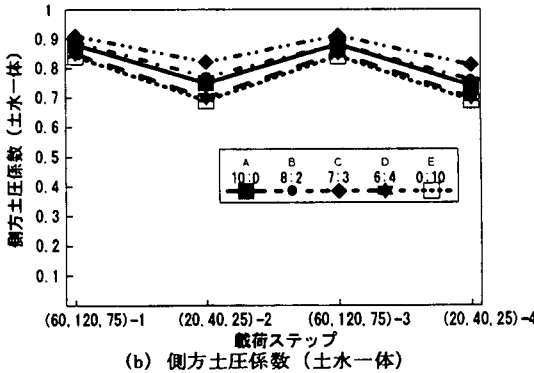
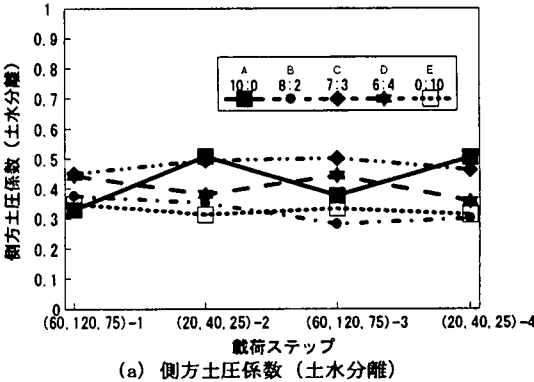


図-5 安定時のみかけの側方土圧係数

表-4 みかけの側方土圧係数の載荷・除荷直後および静水圧到達後の値

| 実験ケース | 載荷ステップ | 静水圧に達した時間 | 側方土圧係数（土水分離） |        | 側方土圧係数（土水一体） |        |
|-------|--------|-----------|--------------|--------|--------------|--------|
|       |        |           | 載荷除荷直後       | 静水圧到達後 | 載荷除荷直後       | 静水圧到達後 |
| A     | 60-1   | 35        | 0.54         | 0.37   | 0.86         | 0.88   |
|       | 20-2   | 7         | 0.13         | 0.51   | 0.76         | 0.75   |
|       | 60-3   | 12        | 0.52         | 0.38   | 0.89         | 0.88   |
|       | 20-4   | 32        | 0.10         | 0.50   | 0.71         | 0.74   |
| B     | 60-1   | 32        | 0.61         | 0.38   | 0.89         | 0.89   |
|       | 20-2   | 3         | 0.01         | 0.35   | 0.77         | 0.77   |
|       | 60-3   | 24        | 0.53         | 0.28   | 0.89         | 0.88   |
|       | 20-4   | 1         | 0.05         | 0.30   | 0.77         | 0.76   |
| C     | 120-1  | 12        | 0.50         | 0.45   | 0.85         | 0.91   |
|       | 40-2   | 8         | 0.51         | 0.49   | 0.89         | 0.82   |
|       | 120-3  | 1         | 0.50         | 0.50   | 0.87         | 0.90   |
|       | 40-4   | 27        | 0.45         | 0.46   | 0.91         | 0.80   |
| D     | 60-1   | 3         | 0.40         | 0.44   | 0.86         | 0.85   |
|       | 20-2   | 4         | 0.32         | 0.38   | 0.77         | 0.70   |
|       | 60-3   | 6         | 0.39         | 0.44   | 0.89         | 0.85   |
|       | 20-4   | 15        | 0.32         | 0.36   | 0.74         | 0.70   |
| E     | 75-1   | —         | 0.35         | —      | 0.84         | —      |
|       | 25-2   | —         | 0.31         | —      | 0.69         | —      |
|       | 75-3   | —         | 0.33         | —      | 0.84         | —      |
|       | 25-4   | —         | 0.31         | —      | 0.69         | —      |

#### 4. まとめ

本実験結果から以下のことが明らかとなった。

- 1) ケースBからDの中間土はごく短期間に間隙水圧が静水圧に達し、また分離の考え方による係数の値を検証した結果、水圧依存性もないことから土水分離的な考え方ができるものと判断できる。
- 2) ケースAでは、分離の考え方による係数の値に水圧依存性があるのに加え、一体の考え方においても水圧の依存性があらわれていることから両者の考え方の中間的な位置にある地山であると考えられる。

#### 5. おわりに

今回使用した地山モデルは、みかけの側方土圧係数からみた場合に、定量的に明確な違いを見いだせるに至らなかった。この理由のひとつとして、各ケースの透水係数を透水試験により求めたところどれもほぼ同じ約 $10^{-6}$ 前後の比較的透水性のよい材料であったためと考えられる。現在、カオリンとベントナイトを混合した地山の予備実験を実施しているが、この透水係数は $10^{-7}$ となっている。したがって、この材料を用いた載荷実験の結果も含めて考察するとともに、実在の粘性土地山に近い非常に透水性の悪い地山（ $10^{-8}$ 程度）を再現するための地山材料の選定も同時に進めていこうと考えている。

最後に、本研究は平成6年度東京都立大学奨励寄付金の援助を受けて進められたことを報告する。

#### 6. 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準設計方書（シールド編）・同解説、昭和61年6月
- 2) 土門 剛・早崎篤史・西村和夫：砂・粘土混合地山におけるシールド土圧に関する基礎的実験、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部(B)、pp. 1358～1359、1994.9
- 3) 土門 剛・早崎篤史・西村和夫：砂・粘土混合地山におけるシールド土圧に関する基礎的実験(2)、土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第3部(B)、pp. 1336～1337、1995.9