

16. シールド工事のテールボイドに伴う 地盤変形に関する実験的研究

溝口 義弘
浅田 毅

要 旨

シールド工事に伴って生じる周辺地盤の変形には、主として掘削機の掘進中に起こる切羽での土圧バランスの変化によって起きたものと、掘進時の機械後部に発生したテールボイドによる地盤面への応力解放によって起きたものとの2つの要因が考えられる。これら2つの要因によるものが周辺地盤の変形量の中でその大半を占めている。

本報告は、テールボイド部の応力解放によって起こる地盤の変形特性を調べるために行った模型実験について、その概要と結果を報告する。

キーワード

シールド／地盤変形／テールボイド／応力解放

目 次

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果と考察
4. ま と め
5. あとがき

16. AN EXPERIMENTAL STUDY ON GROUND DEFORMATION RESULTING FROM THE TAIL VOID LEFT BY A SHIELD MACHINE DURING SHIELD TUNNELING

Yoshihiro Mizoguchi
Tsuyoshi Asada

Abstract

The main factors affecting the deformation of the surrounding ground during shield tunneling are changes in the earth pressure at the cutting face caused by a shield machine as the shield machine advances and the release of stress resulting from the tail void left by the advance of the shield machine. These factors contribute to the major portion of ground deformation.

This report gives an outline of model testing carried out to elucidate deformation characteristics, paying attention to ground deformation caused by the release of stress at the tail void. The results obtained from the testing are also outlined.

1. はじめに

近年、都市部においては地下空間の利用が進み、既設構造物に近接してシールド工事を施工する事例が多くなっている。したがって、シールド工事に伴って生じる地盤変形を低減させることが、工事を行う上において今まで以上に重要な課題となってきた。

橋本ら¹⁾は、シールド工事における地盤の変形を調査した多くの事例から、以下のような要因によって変形が発生するものと述べている。

- (1) シールド切羽での土圧バランスの変化
- (2) テールボイド部での応力解放
- (3) シールドマシンの通過に伴って発生するせん断力
- (4) 地下水位の低下、攪乱による圧密、セグメントの圧縮

このうち(1)と(2)の要因によるものが地盤の変形量の大半を占めていると指摘している。

したがって、シールド工事において地盤の変形量を予測する場合、(1)切羽での土圧バランスの変化によるもの、および(2)テールボイド部での応力解放によるものの2つの要因について、その変形特性を施工性と合わせて検討することが必要である。

前回の報告では、(1)について模型地盤を製作してその実験結果について述べた。

今回、(2)のテールボイド部での変形について、前回と同様に模型地盤を製作し実験を行ったので、その概要と結果について報告する。

2. 実験概要

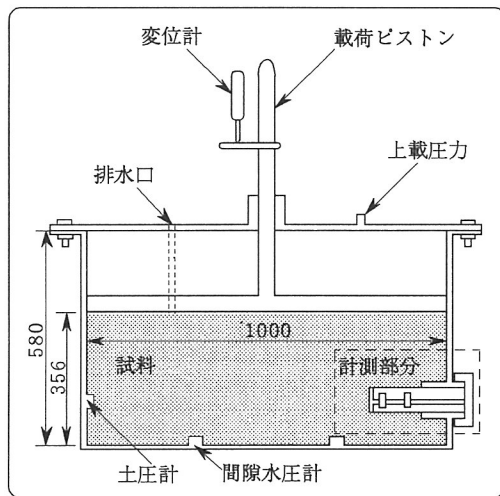
2.1 実験装置

実験装置の模式図を、図-1に示す。装置の直径および深さは、それぞれ $\phi 100\text{cm}$ 、 58cm である。空気圧によって試料に一定の上載荷重を載荷し、それによって生じる地盤の変形量とテールボイドの変形量を同時に計測する仕組みになっている。

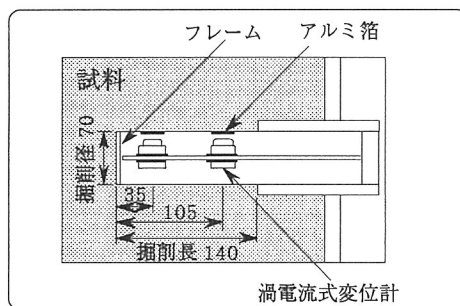
テールボイドの削孔には写真-1に示すような装置を用いて、その掘削面をできるだけ乱さないように慎重に削孔する。

写真-2は、テールボイドの変形量を計測するための渦電流式の変位計を取り付ける器具を示す。その器具の先端にはプレートがあり、切羽面に変形が生じないようにになっている。

写真-3は、地盤の動きと連動するアルミ箔をテ-



模型装置の全体図



渦電流式変位計

テールボイド拡大図

図-1 模型装置

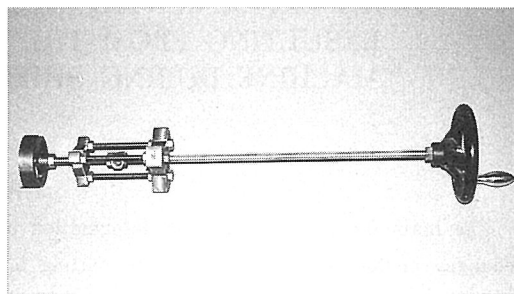


写真-1 掘削機

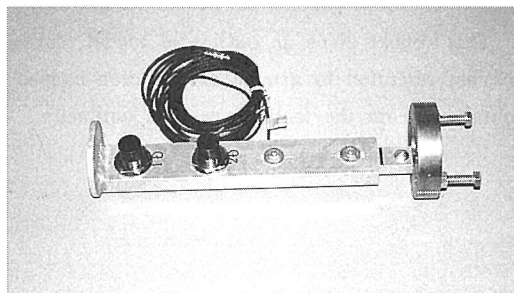


写真-2 渦電流式変位計取り付け器具

ルボイド部の計測箇所に取り付けるための器具を示す。そのアルミ箔の取り付けは削孔と同様に慎重に行う。

2.2 実験方法

実験に用いた試料は東大阪市高井田で採取したシルト質の砂で、土粒子の密度 ρ_s は 2.785 g/cm^3 で、液性限界 ω_L 、塑性限界 ω_P はそれぞれ49.0、22.4%である。

試料を水浸して十分脱気を行った後に実験土槽に入れ、圧密圧力 $\sigma_{vc}=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ を載荷して、その試料の予備圧密を行う。

試料の予備圧密が終了すると、削孔装置を使って所定の長さ L まで掘削する。掘削の完了と同時に変位計を取り付けた器具を、その孔に設置する。

実験条件を表-1に示す。掘削径 D は70mmで、掘削長 L は70、140、210mmの3種類とする。各掘削孔について上載圧力 σ_v を $0.2 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の間で5段階に分けて載荷して、地盤の変形量を計測する。

実験が終了した後、実験土槽から不攪乱試料を採取し三軸圧縮UU試験を行います。その結果、模型地盤の非排水せん断強度 C_u は 0.30 kgf/cm^2 であった。

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果

横軸に時間 t を、縦軸にテールボイドの変位 δt を掘削径 D で除した無次元量 $\delta t/D$ をとって、上載圧力 σ_v が 0.2 kgf/cm^2 のときの計測結果をプロットしたものを、図-2に示す。この図から、テールボイドの変形は載荷後2～3分以内で急激に起こり、1時間程度まで緩やかに進行して、それ以降一定値に収束していることがわかる。また変形量は掘削長が長いほど大きく、掘削孔の中央部分が最も大きく変形していることもわかる。

他の上載圧力の場合についても同様な傾向になっている。

最大変位 $\delta t_{\max}$ を掘削径 D で割った無次元量を縦軸に、掘削長 L を掘削径 D で割った無次元量を横軸にとって実験結果をプロットしたものを、図-3に示す。図中に示す安定数 N_s は、テールボイドの安定性を評価するために示した係数である。もともと安定数 N_s は、Bromusの論文³⁾の中で切羽の安定性を評価する際に提案された係数である。次式にテールボイドの安定数 N_s を示す。

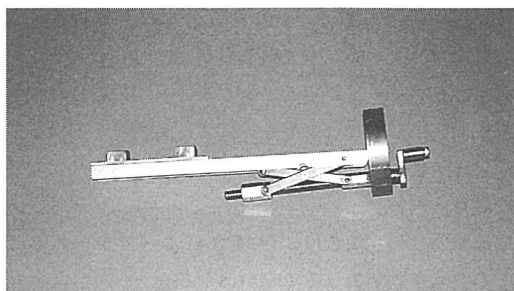


写真-3 アルミ箔取付器具

表-1 実験条件

掘削径 D (mm)	掘削長 L (mm)	渦電流式変位計の取付位置 (切羽からの距離) (mm)	上載圧力 σ_v (kgf/cm^2)
70	70 (1D)	0.5D	0.2→0.4→ 0.6→0.8→ 1.0
	140 (2D)	0.5D 1.5D	
	210 (3D)	0.5D 1.5D 2.5D	

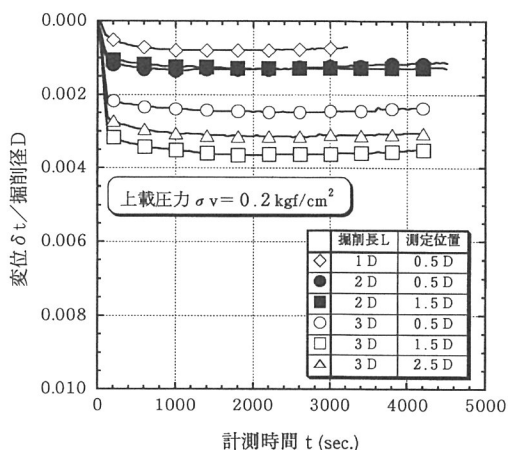


図-2 変位 δt /掘削径 D と計測時間 t の関係

$$\text{安定数 } N_s = \frac{(\sigma_v - \sigma_t)}{C_u}$$

ここに σ_v : 上載圧力 (kgf/cm^2)

σ_t : 掘削孔の内圧 (kgf/cm^2)

C_u : 土の非排水強度 (kgf/cm^2)

この図から、 N_s が大きくなる（この場合は、上載圧力 σ_v が大きくなるのと同じ）につれて、変形が大きくなっていることがわかる。また、 L/D が大きくなるほど曲線勾配は緩やかになることもわかる。

図-4は、安定数 N_s と最大変位 $\delta t_{\max}$ を掘削径 D で割った無次元量をそれぞれ縦軸と横軸にとって、計測結果をプロットしたものを示す。この図から、 N_s が1以下の場合は、変形は非常に小さなものであるが、

N_s がそれ以上になると変形は大きくなり非線形的な動きになっている。また掘削長が長くなるほどその傾向は顕著になっていることがわかる。このことは、掘削長が掘削径に比べて小さい間は、掘削孔の三次元的なアーチ作用などによって、変形が小さなものになると考えられる。

このように安定数 N_s の大きさによってテールボイドの変形挙動が異なることがわかる。

3.2 考察

図-5は、橋本ら¹⁾がシールド工事によって生じる地盤変形の予測解析方法として提案したもので、切羽およびテールボイド部での応力解放度 α を、シールドの内径 D とテールボイド長さ L の比 L/D に対してFEMの軸対象モデルを用いた逐次掘削解析によって求めたものである。この応力解放度 α は、次式で表される。

$$\text{応力解放度 } \alpha = \frac{(\sigma_i - \sigma)}{\sigma_i}$$

ここに σ_i : 初期の地山の応力 (kgf/cm²)

σ : 応力解放後の応力 (kgf/cm²)

この予測解析方法は、(1)切羽およびテールボイド部での応力の解放を考慮できる、(2)羽の土圧バランスの状態やテールボイドの長さをパラメータとすることにより施工性を考慮できる、(3)テールボイドの長さとシールドの内径の比 L/D と応力解放度 α の関係をを用いることにより、地盤変形を平面二次元解析にて容易に取り扱えるなどの特徴を有している。

シールド工事において掘進に伴って切羽およびテールボイド部と順に応力の解放が生じて、地盤の変形を引き起こします。模型実験でのテールボイドの変形から逆に応力解放度 α を求め、図-5の予測解析方法を検証することとする。

たとえば、 L/D が1の場合、図-5のテールボイド解放のみの曲線において、横軸の L/D が1のとき、縦軸の応力解放度 α は0.55になる。さらにこの曲線を外挿すると、 $L/D \approx 3$ で応力解放度 α は1に漸近する。そこで、 $L/D = 3$ のときの変位 $\delta t_{\max}$ に対する、 $L/D = 1$ のときの変位 $\delta t_{\max}$ の比を応力解放度 α とすると、図-3より、安定数 N_s が0.7では応力解放度 α は0.35に、安定数 N_s が2.7では応力解放度 α は0.5となる。

今回の模型実験から推定した応力解放度 $\alpha = 0.35 \sim$

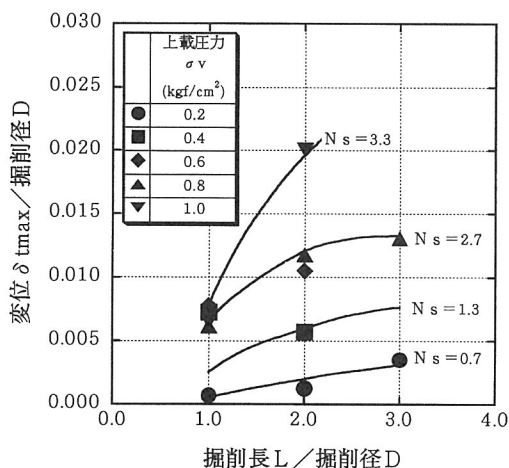


図-3 $\delta t_{\max}/D$ と L/D の関係

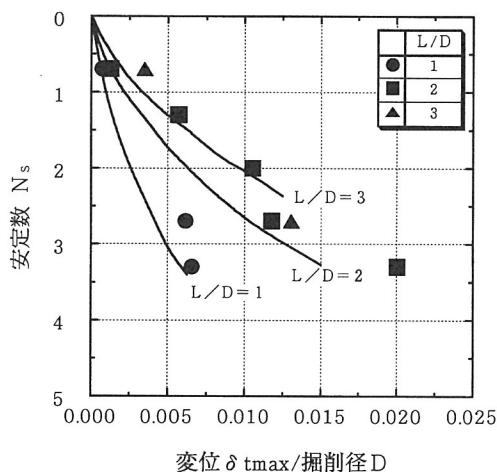


図-4 N_s と $\delta t_{\max}/D$ の関係

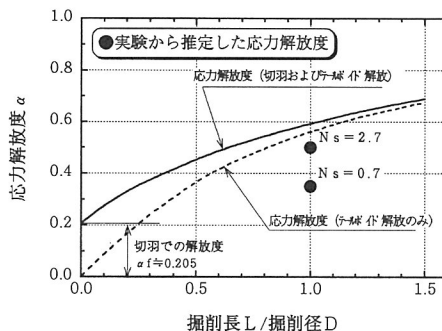


図-5 応力解放度と L/D の関係

0.5は、図-5から得られた応力解放度 $\alpha = 0.55$ より小さな値を示している。このことは実験および解析上の精度・誤差等の影響によるものと思われる。さらにこの予測解析方法について検証していく必要があるも

のと考える。

4. まとめ

今回の模型実験によってテールボイド部における応力解放によって発生する地盤変形に関して、以下のことがわかった。

- ① テールボイド長が長いほど、また、上載圧力が大きくなる（安定数 N_s が大きい）ほど地盤変形は大きくなる。
- ② 応力の解放時間が長いほど変形は増大するが、時間とともにその増加率は小さくなる。
- ③ 安定数 N_s と、掘削径 D に対する最大変位 δ_{tmax} の比との関係は非線形であり、 $N_s \geq 1$ で非線形の度合いが大きくなる。
- ④ 実験値から推定した $L/D = 1$ のときの応力解放度 α は0.35～0.5である。

5. あとがき

今回行った模型実験の結果から、シールド工事におけるテールボイド部での応力解放によって生じる地盤変形の特性を定性的に捉えることができたと考える。

今回と前回の実験では、地盤変形を起こす発生要因のうち、その変形量の大半を占める切羽の土圧バランスの変化による変形とテールボイド部の応力解放に伴う変形を調べるために行った模型実験であるが、今後この結果を総合的にまとめ、シールド工事によって引き起こされる周辺地盤への変形量を低減させる方法を解明していきたいと考えている。

最後に、本実験を進めるにあたり貴重なご意見とご協力をいただいた(株)大阪土質試験所の橋本副所長はじめ関係者各位に謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 橋本、高見、中廣、八谷：切羽およびテールボイドの影響を考慮したシールドトンネルの地盤変形解析について、第23回土質工学会
- 2) 橋本、坂元、溝口、浅田：シールド切羽の土圧管理に関する実験的研究、第29回土質工学会
- 3) Clough A W et al: Design and performance of excavations and tunnels in soft clay、Bankok、1977