

14. シールド切羽の土圧管理に関する実験的研究（その１）

溝口 義弘
浅田 毅

要 旨

近年、都市部でのシールド工事は、地下空間の輻輳化に伴い既設構造物に近接して施工することが多くなっており、そのためシールド掘進による周辺地盤に及ぼす影響を低減させることがますます重要になってきている。

密閉式シールドにおいては、切羽土圧を適正に管理して周辺地盤の変形を低減させる方法が行われている。そこで、切羽の応力変動によって切羽がどのように変化するかを調べるためにシールドの模型実験を行ったが、その結果、切羽圧力が静止土圧を基準として土の非排水せん断強さの2～3倍程度の減少を生じても切羽の変形は極めて小さいことがわかった。

キーワード

密閉式シールド／切羽／圧力管理／地盤損失

目 次

1. はじめに
2. プロムスの安定限界
3. 実験概要
4. 実験結果および考察
5. おわりに

14. EXPERIMENTAL STUDY ON EARTH PRESSURE CONTROL OF CUTTING FACE (1)

Yoshihiro Mizoguchi
Tsuyoshi Asada

Abstract

Due to overcrowded underground space, an increasing number of urban tunnels constructed by shield driving have recently been build in the immediate vicinity of existing structures. In view of the situation, minimizing the effects of shield driving on the surrounding ground has become of even greater importance.

In closed face type shield, attempts and efforts have been made to minimize the deformation in the surrounding ground through appropriate control of the earth pressure at the cutting face. Model experiments were conducted to investigate the mechanism of the deformation in the cutting face resulting from the fluctuations in stress in the cutting face. The results showed that the deformation in the cutting face was extremely small even when the pressure at the cutting face decreased below the earth pressure at rest by two to three times of the undrained shear strength.

1. はじめに

シールド工事に伴って生じる周辺地盤の変形は、近年の施工技術の進歩によって格段に小さくなってきているとはいえ、既設構造物に近接して施工することが多くなっているシールド工事では、周辺地盤に及ぼす影響を低減させることがますます重要になってきている。

これまで、シールドトンネルの掘進に伴う地盤変形に関する研究開発は多方面で数多く行われているが、なかでも泥水加圧式シールドまたは土圧式シールドのような密閉式シールドにおいては、シールド切羽での切羽圧力を適正に管理して切羽での応力解放を少なくし、周辺地盤の変形を低減させる方法¹⁾が行われている。

ここでは、ブロムスが行った粘性土を対象としたシールド切羽の安定限界の研究に基づいて、切羽での圧力変動による切羽の変形挙動を模型実験によって調べ、密閉式シールドにおける切羽の圧力管理方法について検討し、その結果を報告するものである。

2. ブロムスの安定限界

Bengt B. Broms & Hans Bennermark (1967)²⁾は、軟弱な粘性土に関して鉛直土留め面のある深さに設けられた開口部に作用する土圧とシールド切羽の安定について、室内実験および約15例のシールド工事の現場実績から、次のようなきわめて重要な事実を指摘している。

(1) 鉛直土留め面の開口部における土圧と安定

鉛直面の開口部に作用する土圧は次式のように表される。

$$\sigma_a = \gamma h - (6 \sim 8) C_u \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_p = \gamma h + (6 \sim 8) C_u \dots\dots\dots (2)$$

ここに σ_a : 主働土圧

σ_p : 受働土圧

h : 土留め面開口部の中心深さ

C_u : 土の非排水せん断強さ

γ : 土の単位体積重量

式(1)、(2)の第2項の(6～8)の係数は、土質に関係なく鉛直土留め背面の摩擦係数、開口部の形状などに関係するものである。

σ_a が負の場合、開口部は安定を失い坑内にすべりが生じ、また坑内から σ_p より大きい力が作用する場

合、地表面は隆起することになる。

(2) シールド切羽の安定

前記(1)の考え方を基本にして、工事実績から、鉛直土圧と圧気圧の差と土の非排水せん断強さとの比よりシールド切羽の安定、すなわち切羽から坑内への土の流入の有無について論じている。

トンネルの地山が粘性土の場合、シールド切羽での体積力(鉛直土圧) γh 、圧気圧 P_0 、地山の非排水せん断強さ(粘着力) C_u との間に

$$\gamma h - P_0 \leq 6 C_u \dots\dots\dots (3)$$

が成立する場合には、その切羽はほぼ安定な状態で作業を行うことができるとしている。

以上のことから、図-1に示すようにシールド切羽に内圧 σ_v および外圧 σ_{ah} が作用する場合、切羽の安定は

$$\sigma_v - \sigma_{ah} = N_s C_u \dots\dots\dots (4)$$

と表わせる。ここに、 N_s は安定係数を示し、Clough等³⁾によると安定係数 N_s の大きさにより切羽の変形挙動は以下になると述べている。① $N_s \geq 6$ では地盤破壊が生じる。② $4 < N_s < 6$ では降伏域の拡大あるいは大変形が発生する。③ $2 < N_s \leq 4$ では塑性降伏限界である。④ $N_s \leq 2$ では弾性的挙動の小さな変形しか発生しない。

そして、式(4)の左辺をシールド切羽前後の土圧の不均衡量と考えると切羽土圧と静止土圧の差に相当し、その圧力差によって切羽に変形が生じるものと考えられる。

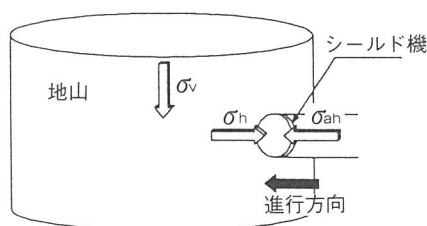


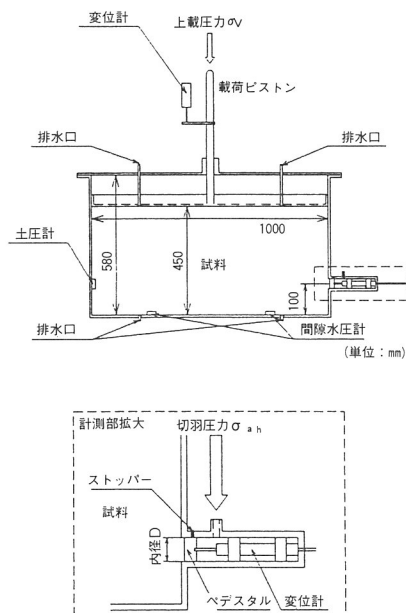
図-1 シールド切羽に作用する応力

3. 実験概要

3.1 模型装置

図-2に示す模型装置は、シールド切羽部分をモデル化したもので、点線で囲った部分がシールド機に相当する。この装置は、シールド部分の圧力注入部から

任意の切羽圧力を設定して切羽部分に圧力差をつけながら、切羽の水平変位をベDESTALを介して計測する仕組みとなっている。上載圧力 σ_v は油圧ジャッキにより、切羽圧力 σ_{ah} はコンプレッサーによってそれぞれ制御する。間隙水圧計、土圧計によって実験中の試料の状況を計測する。なお、模型装置のシールド内径Dは $\phi 20, 40, 60\text{mm}$ の3種類とし、水平変位計測部にはグリースを塗り、ベDESTALにはテフロン加工を施し計測時の摩擦の影響を極力小さくするように処理している。



図－2 シールド切羽の模型装置

3.2 実験方法

模型装置に試料を入れ、鉛直圧力 σ_v で試料を圧密し、圧密が終了してから排水バルブを閉じる。実験は、鉛直圧力 σ_v を所定の値に保ちながら切羽圧力 σ_{ah} を所定の値に変化させたときの水平変位等を一定時間 t で計測する。なお、そのときの実験条件を表－1に示す。表中の σ_{ah} は静止土圧相当の σ_h （約 0.75kgf/cm^2 ）を基準にして数段階に分けて減圧する。そして、計測（放置）時間 t は実施工でのセグメント組立時間、シールド機の一時的停止時間等の応力解放時間を考慮して実物と模型の相似則⁴⁾から決定する。この実験は土中の水の流れから見て定常層流浸透状態と仮定できるので、

実施工での放置時間を t_p とすれば、模型実験での計測時間は $t_m = t_p / N$ となる。ただし、添字 m, p はそれぞれ模型の値、実物の値を表し、長さ L については L_m, L_p で、縮尺比は $N = L_p / L_m$ である。たとえば、実物のシールドマシン径が $\phi 4000\text{mm}$ 、模型の内径Dが $\phi 40\text{mm}$ とすると、 $t_m = 1$ 分が $t_p = 100$ 分、 $t_m = 10$ 分が $t_p = 1000$ 分になる。

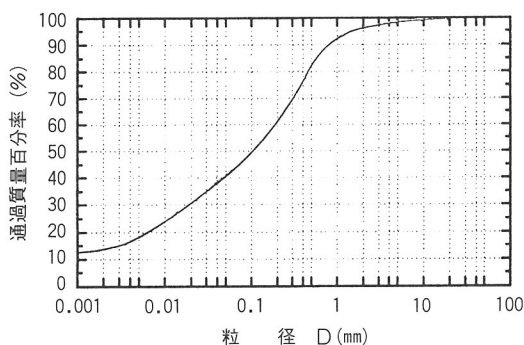
実験に用いた試料は、東大阪市高井田で採取したシルト質砂で、その試料の粒径加積曲線を図－3に、その材料特性を表－2に示す。

この模型実験における安定係数 N_s は、式(4)から以下ようになる。

$$N_s = \frac{\sigma_v}{C_u} = \frac{1.0}{0.125} = 8$$

表－1 実験条件

σ_{vc} (kgf/cm^2)	σ_v (kgf/cm^2)	σ_{ah} (kgf/cm^2)	内径 D (mm)	計測時間 t (min.)
0.5	1.0	0.75 → 0.0	40	1, 10, 60
			20	10
			60	1



図－3 粒径加積曲線

表－2 材料特性

土粒子の密度	ρ_s (g/cm^3)	2.785
初期含水比	W (%)	38.2
液性限界	W_L (%)	49.0
塑性限界	W_P (%)	22.4
一軸圧縮強さ	q_u (kgf/cm^2)	0.25

4. 実験結果および考察

図-4は、内径D40mm、計測時間 $t=1$ 分、切羽圧力 $\sigma_{ah}=0.12\text{kgf/cm}^2$ の時の計測データである。同図より、切羽の水平変形は時間とともに大きくなっているが、間隙水圧、土圧はほとんど変化していない。このことから、この模型実験は非排水状態であったと考えられる。他の場合の計測データも同様の傾向を示している。

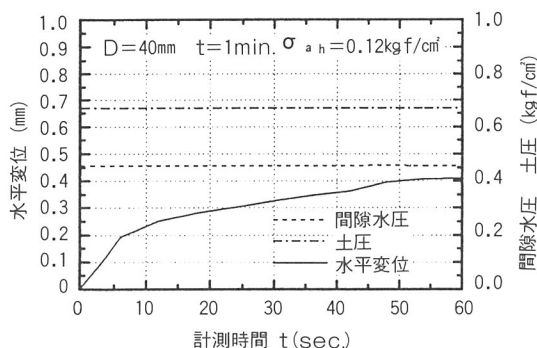


図-4 実験結果の一例

図-5-1, 2, 3は、内径D40,20,60mmの場合の水平変位 δs と切羽圧力 σ_{ah} の関係である。なお、水平変位 δs は計測時間 t での切羽の相対的変位量を表し、正の水平変位は地山（試料）の呼込みに相当する。また、図の右縦軸に安定係数 N_s を示す。図-5より、 $\sigma_{ah} < \sigma_h$ では水平変位は正の値を示し地山の呼込みが生じ、 $\sigma_{ah} > \sigma_h$ では水平変位は負の値を示し地山の押込みが生じており、水平変位 δs がゼロであるつり合い圧力はほぼ静止土圧相当の σ_h に等しいと思われる。また、計測時間 t が同じであれば内径Dが大きくなるほど水平変位は大きくなっている。これは、浅い基礎の沈下量を評価する場合、基礎幅が大きくなるほど同一応力下では沈下量が大きくなることと同じであると考えられる。図-5-1では、切羽圧力 σ_{ah} が $0.45 \sim 0.55\text{kgf/cm}^2$ 以上、すなわち安定係数 N_s が2～3以下では水平変位は非常に小さくそれを越えると水平変位は増大する。また、水平変位が急に大きく変化するときの N_s は計測時間 t が長いほど小さくなる。

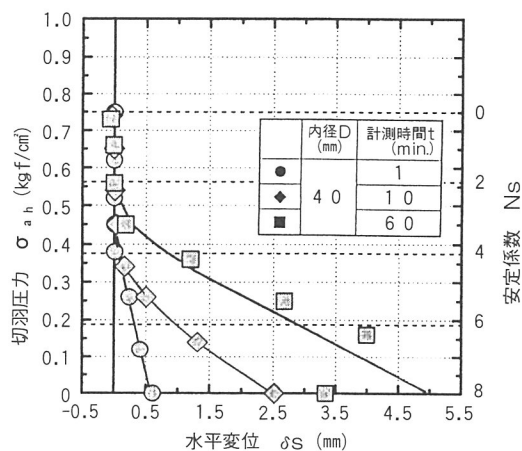


図-5-1 水平変位と切羽圧力の関係

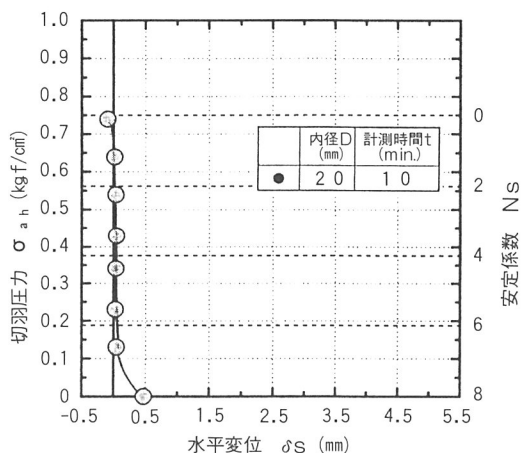


図-5-2 水平変位と切羽圧力の関係

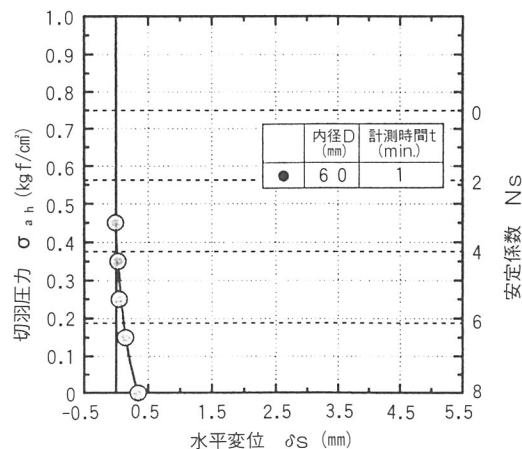


図-5-3 水平変位と切羽圧力の関係

この実験での切羽の水平変位の測定は、原理的には平板載荷試験での沈下量の測定と同じものと考えられ、地盤が砂質土の場合、この平板載荷試験での載荷板の沈下量と基礎幅Bの比 $(2B/(B+0.3))$ の2乗で浅い基礎の沈下量を評価している。そこで、実験での水平変位を切羽の断面積で規準化した値 $[\delta s/(\pi D^2/4)]$ を横軸に、静止土圧に対する応力比 $[(\sigma_h - \sigma_{ah})/\sigma_{ah}]$ を縦軸にとり、水平変位に及ぼす内径の大きさの影響を検討したものが図-6である。同図より、断面積で規準化した値 $[\delta s/(\pi D^2/4)]$ は、計測時間tが同じであれば内径Dの大きさに関わらずほぼ同一曲線上にプロットされ、計測時間tが長くなるほど大きくなる傾向を示している。

土圧系シールドでは掘削土量を切羽圧力と対応させながらシールドを推進するために、掘削土量に見合うだけの排土を行わなければならないが、実際には、掘削土量と排出土量とは一致せず、シールド切羽前後の土圧のバランスがくずれ地盤変形を引き起こすことがある。そこで、この土量差の掘削土量に対する比を地盤損失とし、その地盤損失と切羽の水平変位との関係について考えてみる。

Deere et al. (1969)³⁾によると、地盤が弾性状態の場合、地盤損失 V_ℓ は

$$V_\ell = \frac{\Delta V}{V_0} = (1+K) P_z \frac{1+\nu}{E} \quad \text{..... (5)}$$

ここに V_0 : トンネルの理論体積 (掘削土量)
 ΔV : 体積減少
 K : 静止土圧係数
 E : 弾性係数
 ν : ポアソン比
 P_z : 土被り圧

と表されている。

一般に、土が非排水状態のもとでは非圧縮性とみなされるので、軟弱な粘土地盤において $\nu=0.5, K=1$ と仮定すると、式(5)は次のようになる。

$$V_\ell = 3 \frac{P_z}{E} \quad \text{..... (6)}$$

一方、地盤が非弾性状態の場合、 $K=1$ と仮定すれば、地盤損失は

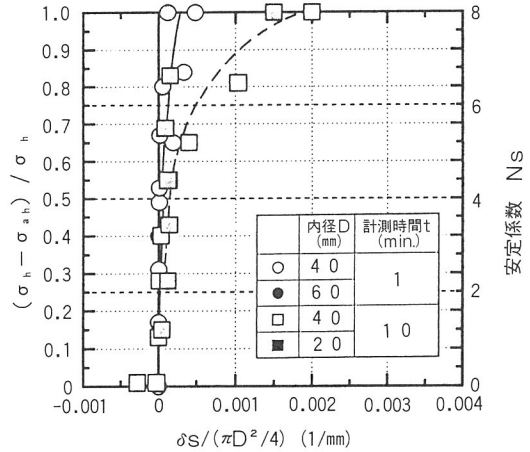


図-6 $[\delta s/(\pi D^2/4)]$ と $[(\sigma_h - \sigma_{ah})/\sigma_{ah}]$ の関係

$$V_\ell = 2C \frac{1+\nu}{E} \exp\left(\frac{P_z}{C} - 1\right) \quad \text{..... (7)}$$

ここに C : 非排水せん断強さ
となる。

特に地盤が低塑性粘土の場合、式(5),(7)の地盤損失は式(8)のような関係になる。

$$\left. \begin{aligned} P_z/C \geq 1 \quad V_\ell &= m \cdot \exp\left(\frac{P_z}{C} - 1\right) \\ (N_s \geq 1) \\ P_z/C < 1 \quad V_\ell &= m \cdot \frac{P_z}{C} \\ (N_s < 1) \end{aligned} \right\} \quad \text{..... (8)}$$

ただし、 $m = 0.002 \sim 0.006$ である。

また、Ghaboussi & Ranke(1975)³⁾によると、弾塑性領域においてトンネル軸方向の切羽の水平変位を δs とすると、地盤損失はおおよそ次のようになるとしている。

$$V_\ell = \frac{2 \delta s}{a} \quad \text{..... (9)}$$

ここに、 a : トンネル半径

図-7 は実験での水平変位を式(9)に代入して求めた地盤損失 V_ℓ と安定係数 N_s の関係である。図中の曲線は、式(8)の低塑性粘土の地盤損失と安定係数の関係を示したものであるが、文献3)によると、実施工で得られた地盤損失は、 $N_s > 2.5$ の場合理論曲線(8)より下側に位置し、 $N_s < 2.5$ の場合しばしば曲線(8)より上側に位置することがあると述べている。模型実験での地盤

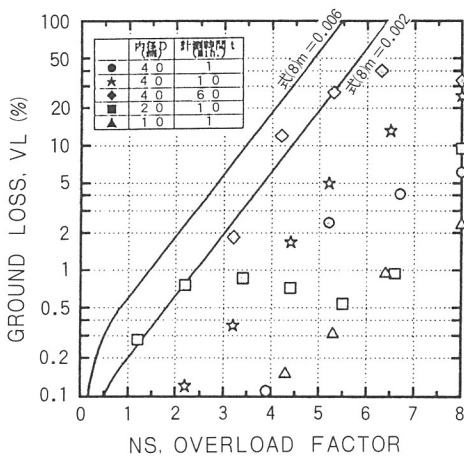


図-7 地盤損失と安定係数の関係

損失は、理論曲線(8)より下側に位置し、計測時間 t が長いほど大きくなる傾向が見られた。3. 2. 実験方法で示した相似則の例において、実施工での放置時間 t_p を1時間程度とすれば、模型実験の放置時間 t_m はおよそ1分(●印)に相当し、地盤損失は理論曲線(8)の地盤損失の1/10以下になっている。

今回行った実験結果から以下のことが確認された。

- ① 静止土圧を基準として切羽圧力が、土の非排水せん断強さの2～3倍程度の減少を生じても、切羽の変形は小さく地盤損失も小さく抑えられる。また、放置時間が長くなるほど切羽圧力の管理範囲は狭くなる。
- ② 切羽の水平変位を切羽の断面積で規準化すれば、水平変位に及ぼす内径の影響を考慮しなくてよい。

5. おわりに

密閉式シールドにおいて、切羽での切羽圧力を地山の強度と静止土圧および放置時間を考慮しながら適正に管理することにより、切羽の水平変位は小さくなり周辺地盤への影響を低減できることがわかった。

今後、シールド切羽付近の地山の鉛直方向等の変形挙動についても模型実験を行い、数値解析結果・実施工のデータ等も加味しながら、シールド切羽の圧力管理方法についてさらに検討を加えていきたい。

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戴いた(財)大阪土質試験所の橋本正副所長、坂元稔副所長はじめ関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐野、太田、橋本、高見；軟弱粘土地盤中の密閉式シールドにおける切羽土圧管理について、第25回土質工学研究発表会
- 2) Bengt B.Broms and Hans Bennermark ; Stability of clay at vertical openings、Proc ASCE 1967. SM1 PP.71～94.
- 3) Clough A.W. et al. ; Design and performance of excavations and tunnels in soft clay、Int.symposium on soft clay、Bangkok、1977.
- 4) 最近の土質・基礎に関する諸問題講習会講演資料、土質工学会