

III-627

シールドマシン外周への摩擦低減材注入効果について

大阪市交通局 正員 葛野恒夫

大阪市交通局 正員○仲井信雄

大阪土質試験所 正員 橋本 正

1. はじめに

シールドマシン設計に際して、面盤開口率やジャッキの装備推力等を決定するには、解析的手法を用いることが困難であるため、従来の施工実績を参考にする場合が多い。そこで、シールドマシン設計の一助とするために、大阪市交通局では第7号線鶴見シールド(昭和63年施工)の施工結果から土圧シールド掘進時におけるマシン外周への摩擦低減材注入効果について考察を加えたので、ここで報告する。

2. 摩擦低減材注入の必要性

掘進中、シールドマシンはピッチング、ヨーイング、ローリングするとともに、マシン内の機器の動作に従い細かく揺動している。このために軟弱粘性土地盤ではせん断の繰返しによる攪乱に伴い沈下を生じ、また砂質地盤では肌落ちやせん断に伴う地山の膨張によるマシンの異常拘束圧が発生して推力異常につながる可能性がある。

そこで、以下の目的により、マシン外周への摩擦低減材注入を検討する事にした。

- ① ジャッキ推力の低減：砂質地盤においては異常拘束圧の発生を防ぎ、軟弱粘性土地盤ではスキンプレートと周辺地山との摩擦を低減する。ジャッキ推力を低減すると、推力余裕が大きくなり方向制御性が向上すると共に、セグメントのひずみやクラックも減らすことができる。
- ② 地盤変位の抑制：軟弱粘性土地盤において、マシン外周と地盤との摩擦に起因する時山の覚乱を低減して、後続沈下を抑制する。また、推力が摩擦力を介して周辺地盤に与える過剰圧力を低減し、近接構造物への負荷を抑制する。

3. 従来の摩擦低減材

推進工法においては、装備軽減や姿勢制御にフリクション低減が重要な意味を持つことから泥水や油、黒鉛等の摩擦低減材がもちいられてきたが、それらには以下のような問題点があった。

- ① 拡散性能：吐出口からテールまでスキンプレート上に長く残留するよう粘性を高くすると、粘着力が上がり、摩擦低減効果が小さくなる上に、スキンプレートに皮膜のように広がらず拡散性が悪化する。
- ② 希釈抵抗性：溶液型の材料である場合、地下水により希釈され摩擦低減効果が損なわれる。
- ③ 注入口の閉塞：土砂との置換により注入口の閉塞を生じる事がある。

4. 高吸水性樹脂を用いた摩擦低減材注入

最近、泥土圧シールドにおける添加材等土木材料として高吸水性樹脂の使用実績が増加している。この樹脂が吸水してできるゲル化物は糊状の外観をしており、以下の特徴から摩擦低減材として適切な材料である。

- ① 高粘性低付着性：高粘性のためスキンプレート上から容易に流出しない。しかも付着性が極めて小さい。
- ② 注入口の非閉塞性：ゲル状であるために注入口において土砂と置換せず、注入口が閉塞しない。
- ③ 安価：少量の材料で大量の吸水ゲルを生じるため、材料費が安く、取扱いが容易である。
- ④ 安全：非毒性、無公害である。

5. 摩擦低減効果確認試験

高吸水性樹脂が水を吸収して生成するゲル状物質の摩擦低減効果を事前に確認し仕様を決定するために、現場の粘性土を用いて一面せん断実験および拡散実験をおこなった。その結果、以下のことがわかった。

表一 粘性土の物性

N 値	0~3
圧縮強度 q_u	0.5kgf/cm ²
含水比 w	40~50
鋭敏比 S_r	測定不能

- ① 高吸水性樹脂の50倍吸水ゲルは、粘土と鋼板のすべり摩擦を $0.333(\text{kgf}/\text{cm}^2) \div 0.024(\text{kgf}/\text{cm}^2) = \text{約}7\%$ に低減する。
- ② 吸水倍率が200倍ではほとんど水塗布状態と同じになり、すべり摩擦は $1/3$ 程度にしか低減できない。
- ③ 高吸水性樹脂は鋼板の進行に従って粘土と鋼板の境界面に一様に拡散する。

6. 実機への適用とその効果

上記の実験結果を踏まえて、N値0～2の超軟弱粘性土地盤を掘進する鶴見シールドのシールドマシンの外周上半4ヶ所に装備した摩擦低減材吐出口から、50倍の吸水倍率に調整した高吸水性樹脂を吐出した。

この効果を確認するために、3mの離隔で並行する2本のシールドのうち先行側のシールドの一部区間で摩擦低減材非吐出区間を設けた。比較対照区間の摩擦低減材吐出側シールドの平均推力 $F_A = 665\text{t}$ 、摩擦低減材非吐出側シールドの平均推力 $F_B = 819\text{t}$ であった。

ここで、推力は以下のように表される。

$$F = F_0 + F_1 + (\alpha - \beta) \quad \cdots \cdots (1)$$

F : 推力(tf/m^2)

F_0 : 切羽作用力

F_1 : マシン周面摩擦力

α, β : 推力へ影響を及ぼすその他の要因

$$F_0 = \pi / 4 \cdot R^2 \cdot P \quad \cdots \cdots (2)$$

$$F_1 = L \cdot \pi \cdot R \cdot (q \cdot \mu + C) \quad \cdots \cdots (3)$$

R : シールドマシン外径(5.44m)

P : 切羽作用圧力(tf/m^2)

L : シールドマシン長(6.31m)

q : シールドマシン外周へ加わる土圧

μ : シールドスキンプレートと土との摩擦係数

C : 土の粘着力

切羽作用圧力として静止土圧を用いて算出した切羽作用力を F_0' 、粘着力として「粘土と鋼板の摩擦力(無処理)」を用いて算出したマシン周面摩擦力を F_1' とすると、 $F_0' = 372\text{t}$ 、 $F_1' = 359\text{t}$ となる。

このとき、式(1)より $\alpha - \beta = F_B - F_0' - F_1' = 88\text{t}$ である。

したがって、摩擦低減材吐出時のマシン周面摩擦力 F_{1A} は、 $F_{1A} = F_A - F_0' - (\alpha - \beta) = 665\text{t} - 372\text{t} - 88\text{t} = 205\text{t}$ と推定できる。このようにして推定したマシン周面摩擦力の推移を図-2に示す。

周面摩擦は $205\text{t} \div 359\text{t} = 57\%$ に低減されたと考えられる。前節の実験では7%であったが、摩擦低減材吐出口が上半4ヶ所しかなかったため、摩擦低減材がスキンプレート全周に廻らなかったことが原因と思われる。

7. おわりに

以上の検討結果をまとめると、

- ① 摩擦低減材として大きな効果があるのは、高吸水性樹脂を吸水倍率50倍として用いた時である。
- ② シールドマシン周面に摩擦低減材を4ヶ所から吐出することで周面摩擦を約半分に低減できた。

これより、当局の地下鉄延伸区間の土圧シールドマシンは摩擦低減材吐出口を4～8ヶ所設けることとした。

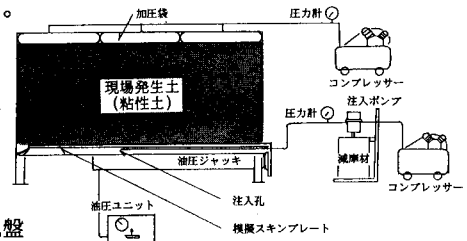


図-1 摩擦減少材拡散実験装置

表-2 実験結果

実験項目	摩擦力測定値 (kgf/cm^2)
粘土と鋼板の摩擦(無処理)	0.333
粘土と鋼板の摩擦(水塗布)	0.120
粘土と鋼板の摩擦 吸水倍率 200倍	0.115
吸水倍率 100倍	0.098
吸水倍率 50倍 (吸水ゲル)	0.024

注：垂直応力 $1.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、せん断速度 $1.5\text{mm}/\text{min}$

α 後台車けん引力、カッターおよび裏込め注入管の貫入力、ピッチング、ヨーイングによるマシンの地山への押しつけによる抵抗力等。
 β 裏込め注入による前方への圧力等。

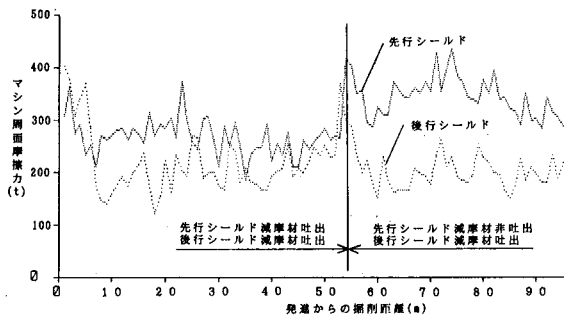


図-2 マシン周面摩擦力