

**滞水砂礫地盤における
泥土圧シールド掘削土の塑性流動性の研究**
STUDY ON A PLASTIC FLOWABILITY OF AN EXCAVATED SOIL IN A PRESSURIZED SLURRY SHIELD
TUNNELLING METHOD INTO A SATURATED GRAVEL LAYER

阿部和毅*・石田喜久雄**
Kazutake ABE, Kikuo ISHIDA

The required condition for an excavated soil in a pressurized slurry shield tunnelling method to stabilize the excavated face can be expressed as its plastic flowability. However, its quantitative appraisal methodology has not been established. For the time being, it is not easy to sustain the excavated face in case of the excavation into a saturated gravel layer which gives a difficulty to obtain a proper plastic flowability.

This research describes the quantitative appraisals of the plastic flowability in a saturated gravel layer through studying the interaction between the results of penetration resistance tests for the excavated soil from earth controlled tunnels, and the past accomplishments of the controlled pressures in the excavated faces and the excavating speeds.

Keywords: *plastic flowability, pressurized slurry shield, earth pressure controlling, reactive pressure, plastic flowability modulus*

1. はじめに

切羽の安定保持を目的にした、泥土圧シールドの掘削土に必要とされる性状は、推力から負荷される有効拘束圧を保持し、加圧状態においてチャンバー内を充満させ、滞留することなく移動し、スクリーコンベア内を過流動しないで排出される性状である。このような性状を一般に、「塑性流動性」と称している。

泥土圧シールドは、従来施工困難とされてきた地盤にも適用されつつある。しかし、滞水砂礫地盤等の掘進では、掘削土に塑性流動性が得られにくいため、切羽を安定保持することは容易ではないのが現状である。今後、予想される高水圧下の砂礫地盤等、施工条件がより過酷となる地盤に適用範囲を拡大するには、塑性流動性を確実に得られる施工管理技術の確立が急務である。この技術の確立を図るには、塑性流動性の評価が必要と考えられる。

掘削土の塑性流動性を評価するため、従来から、多くの実験がなされてきた。特に、動的な状態における評価が重要と考えられ、スクリーコンベア取り込み口の流動状況を模した貫入抵抗実験¹⁾²⁾やチャンバー

* 正会員 三井建設(株)技術研究所

** 正会員 三井建設(株)技術研究所

内の攪拌状況を模したミキサー攪拌抵抗実験^{3) 4)}等による評価が試みられている。しかし、これらの実験においても、塑性流動性の評価は定性的なものに留まり、定量的な評価には至っていない。

そこで、筆者らは、滞水砂礫地盤の掘進に着目して、実態調査と貫入抵抗実験を実施した。その結果、両者の関連性を検討することで、塑性流動性の得られる掘削土の性状を定量的に評価できる可能性のあることが分かった。以下にその概要を述べる。

2. 塑性流動性の得られる性状

現場では、施工状態を総合的に判断し、添加材の配合や添加率等を変化させて、泥土圧シールドの土圧制御ができるように、掘削土の性状を変化させている。よって、泥土圧シールドを土圧制御できる、加圧状態にある掘削土の性状が、塑性流動性の得られる性状であるといえる。

そこで、筆者らは、土圧制御の条件を予め設定し、実態調査でその条件に適合する現場の排出土を採取し、それらの貫入抵抗実験結果と、採取時期における施工管理計測値との関連性を検討することにした。設定した土圧制御の条件は、次の4点である。

- 条件1：切羽管理圧の標準偏差は、0.2kgf/cm²以下であること。
- 条件2：掘進速度は、30mm/min以上であること。
- 条件3：排土ゲートは、掘進中常時オープンであること。
- 条件4：排土状態は、噴発、閉塞がなく、連続的であること。

ここでは、チャンバー内の加圧状態にある地山から切削され添加材と混合された土砂を「掘削土」、排土ゲート口より大気圧下に排出された掘削土を「排出土」と称して、両者を区別する。

3. 実態調査

3・1 調査内容

今回の調査対象は、滞水砂礫地盤での施工現場である。さらに、掘削土の性状と施工状態の関連性を確認する上で、機械的な圧力保持機構等の施工状態に対する影響をできるだけ避けるため、排土ゲート部に、ロータリーフィーダー等特殊な圧力保持機構がない施工現場を対象とした。

今回の調査内容は、以下の3点である。

- ①シールド外径、土質等の施工条件
- ②切羽管理圧、掘進速度の施工管理実績
- ③採取した排出土の粒度組成

3・2 調査結果

実態調査で排出土を採取した3現場の施工条件を表-1に、排出土の粒度組成等を表-2に示す。

3現場は、玉石混り滞水砂礫地盤での掘進のため、排土機構にリボンスクリュウコンベアを採用していた。調査時期には噴発・閉塞等がまったく発生せず、排土ゲートを掘進中常時オープンにし

表-1 現場施工条件一覧表

	項 目	A現場	B現場	C現場
シールド機構造条件	シールド掘削外径 (mm)	4,180	2,130	2,130
	カッターヘッド形状	面板型	ドーム型	ドーム型
	開口率 (%)	29	31	30
	チャンバーの長さ (mm)	865	785	755
	スクリュウコンベア形式	リボン型	リボン型	リボン型
	スクリュウ羽根径 (mm)	512	465	415
掘削土層条件	掘削主要土層	砂礫層	砂礫層	砂礫層
	最大礫径 (mm)	300	900	1,200
	N値	15~50	50以上	5~20
	土被り (m)	19.0	9.0	5.0
	地下水位 (m)	GL-11.0	GL-4.0	GL-1.0
添加材の実績	添加材配合 ()内は水1000kg当たりの使用重量	吸水性樹脂 (5)	粉末高分子 (25)	液体高分子 (1) ベントナイト (100)
	添加率 (%)	3~5	25~30	10~15

ており、掘削土は連続的に排出されている状況であった。

施工時の切羽管理圧の目標値は、3現場とも路面変状がなく排出土量が安定する場合のシールドセンター付近の土圧計値である。計測された切羽管理圧と掘進速度、それぞれの平均値と標準偏差、地下水圧を表-3に示す。一例として、B現場の排出土採取時前後の切羽管理圧と掘進速度の経時記録を図-1に示す。表-3より、以下のことが分かる。

- ①切羽管理圧の平均値は、地下水圧+ (0.1~0.2) kgf/cm² であること。
- ②切羽管理圧の標準偏差は、0.1kgf/cm²以下であること。
- ③掘進速度の平均値は、36~77mm/minとばらつくこと。
- ④掘進速度の標準偏差は、5.5mm/min以下であること。

掘進速度が大きく違うものの、非常に安定した土圧制御ができたことから、これらの現場のチャンパー内の掘削土の性状は、塑性流動性の得られる性状であると判断できる。

表-2 排出土の粒土組成

項 目	A現場	B現場	C現場
れき分 (%)	57.0	72.0	46.0
砂分 (%)	38.0	24.0	44.0
シルト粘土分 (%)	5.0	4.0	10.0
均等係数	47.0	100.0	68.0
最大粒径 (mm)	88.0	88.0	120.0
含水比 (%)	13.1	13.8	29.5
間隙率 (%)	29.4	24.1	38.5

表-3 地下水圧・切羽管理圧と掘進速度の実績

項 目		A現場	B現場	C現場
地下水圧	(kgf/cm ²)	0.80	0.50	0.40
切羽管理圧 (kgf/cm ²)	平均値	0.98	0.61	0.51
	標準偏差	0.10	0.09	0.06
掘進速度 (mm/min)	平均値	51.00	36.00	77.00
	標準偏差	5.40	4.90	3.80

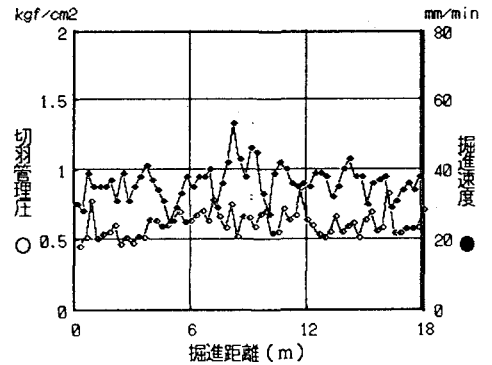


図-1 B現場の切羽管理圧・掘進速度経時記録

4. 貫入抵抗実験

4・1 実験の基本概念

設定した土圧制御の条件に適合する場合、図-2に示すように、掘削土が掘進速度とバランスしながら、チャンパーから排土ゲートまで移動する過程で、掘削土に生じる土圧は、チャンパー内で切羽管理圧を示し、徐々に減少し、排土ゲート口で大気圧を示す。

調査現場では、リボンスクリューコンベアを採用していることから、機械構造の影響が少なく、施工状態を保持する要因は、主にチャンパー内の掘削土の性状であると考えられる。

このような掘削土の性状を、排出土による貫入抵抗実験で評価するには、実験と施工状態とを関連づける必要がある。そこで、図-3に示すように、シールド機隔壁と切羽

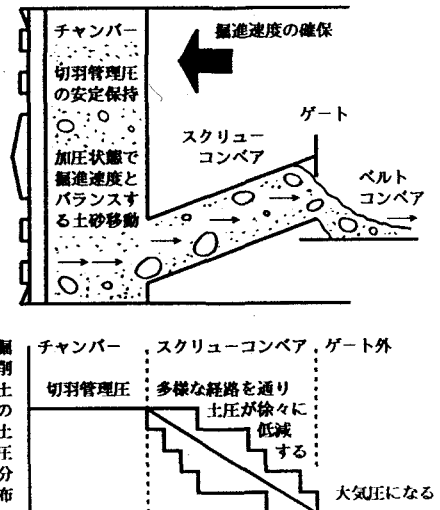
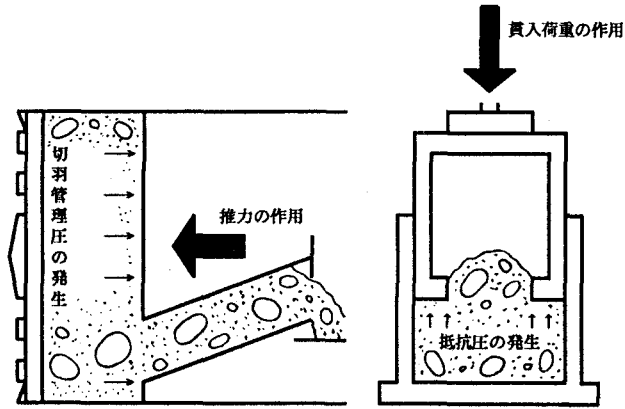


図-2 土圧制御の条件に適合する施工状態

管理圧の関係を、貫入抵抗実験における円筒貫入器の加圧面と貫入抵抗荷重を加圧面積で除した値の関係として捕らえることを考えた。さらに、この実験により評価できる性状は、主に推力の作用反対方向に移動すると推測できる、スクリーコンベア取り込み口付近の性状であると考えた。

以後、貫入抵抗荷重を円筒貫入器の加圧面積で除した値を「抵抗圧」と称する。この抵抗圧と貫入変位量の関係で実験結果を整理することにした。



(a) 施工状態 (b) 実験状態
図－3 施工状態と実験状態の関係

4・2 実験装置

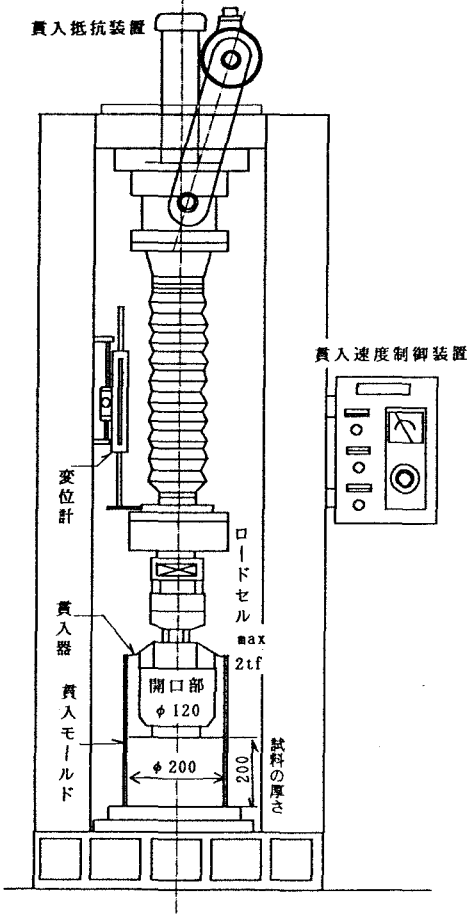
今回の実験では、表－4 に示す施工状態との比較表に基づき、実験モールドの形状および試料土の最大礫径を、施工状態の約1/4に想定した。実験モールドの形状および試料土の最大礫径を表－5に、実験装置全体構成を図－4に示す。

表－4 施工状態と実験状態の比較表

調査現場の施工状態		実験状態
項目	相互関係	項目
排出土の最大礫径 (G)	(表－2 参照)	試料土の最大礫径
スクリー羽根径 (d)	$d = G \cdot (0.2 \sim 0.3)$	貫入開口径
チャンパー長さ (L)	$L = d \cdot (1.7 \sim 1.8)$	試料厚さ
スクリー取り込み口付近の評価で (D) ける範囲	チャンパー長さと同距離と推定した $D = L$	貫入モールド径

表－5 実験モールドの形状および試料土の最大礫径

項目	寸法
試料土の最大礫径 (mm)	38
貫入開口径 (mm)	120
試料厚さ (mm)	200
貫入モールド径 (mm)	200



図－4 実験装置全体構成図

4・3 実験方法

実験は以下の方法で行う。

- ① 排出土からφ38mmより大きな礫を取り除き、実験試料とする。
- ② 内径φ200mm×深さ380mmの貫入モールドに試料を厚さ200mmまで詰める。
- ③ 貫入面に開口径φ120mmを持つ円筒貫入器を試料表面に設置し、その位置で変位計の初期設定を行う。
- ④ 貫入速度を30mm/minに固定した速度制御による連続貫入を行う。
- ⑤ 計測値は、ロードセルによる貫入中の荷重と変位計による初期位置からの貫入変位置であり、データロガーに1秒間に約2回採録される。
- ⑥ 実験中は、パソコン画面に抵抗圧と貫入変位置の経時記録を表示し、貫入状況を確認しながら、最大抵抗圧10kgf/cm²まで実施する。抵抗圧は、貫入中の荷重を加圧面積(=200cm²)で除した値である。

4・4 実験結果

実験に使用した試料の粒径加積曲線を図-5に示し、参考としてスランプ値を表-6に示す。図中のA、B、C試料は、それぞれA、B、C現場の排出土を示している。

貫入抵抗実験結果を図-6に示す。縦軸を抵抗圧とし、横軸を貫入変位置とした。貫入変位置の増加に伴う抵抗圧の変化は、次に示す結果であった。

- ① A試料の抵抗圧は、開始直後から二次曲線的傾向を示す。
- ② B試料の抵抗圧は、貫入変位置4cmを越えたところで急激な増加を示す。
- ③ C試料の抵抗圧は、貫入変位置4cm～10cmでほぼ一定値を示す。

以上より、今回の実験による3試料の貫入抵抗は異なる性状を示し、試料の礫分が多い程急激に増加する傾向があり、スランプ値との関連性が明確でないことが分かった。

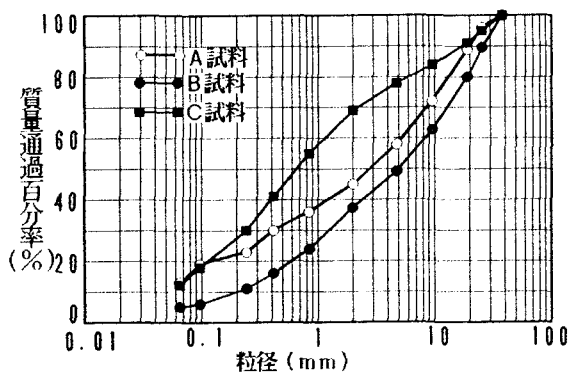


図-5 試料土の粒径加積曲線

表-6 試料土のスランプ値

	A試料	B試料	C試料
スランプ値 (cm)	0.0	17.1	10.0

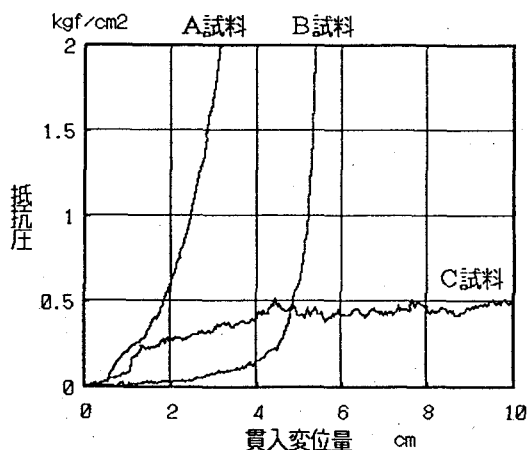


図-6 抵抗圧と貫入変位置の関係

5. 考察

5・1 抵抗圧と切羽管理圧の関係

図-6の抵抗圧と表-3の切羽管理圧を比較すると、

①A、B試料の抵抗圧は、貫入変位量が増加すると切羽管理圧以上になること、

②C試料の抵抗圧は、貫入変位量が増加すると、切羽管理圧以上に増加しないこと

が分かる。これより、土圧制御できた場合の排出土は、切羽管理圧以上の抵抗圧を発生することができる性状を有するといえる。以後、切羽管理圧と同じ値の抵抗圧を「抵抗圧 R_c 」と称する。

5・2 塑性流動係数の導入

土圧制御の条件に適合した場合の掘削土は、切羽管理圧を保持した状態で、掘進速度とバランスしながら移動する性状を有する。この性状は、加圧状態での移動しやすさと考えられ、図-7の抵抗圧と貫入変位量の関係で考えると、抵抗圧発生時の貫入抵抗変化量、すなわち、貫入変位量増分に対する抵抗圧増分の値により表現できる。貫入抵抗変化量を「塑性流動係数 $K_{pf}(R)$ 」と称して、(1)式で定義する。

$$K_{pf}(R) = \Delta R(R) / \Delta \delta(R) \cdots (1)$$

ここに、 $\Delta R(R)$ は抵抗圧 R 発生時の抵抗圧増分量、 $\Delta \delta(R)$ は抵抗圧 R 発生時の貫入変位量増分量である。塑性流動係数 $K_{pf}(R)$ を算出する場合、乱れによる影響を少なくするため、抵抗圧 R の前後10点の生データによる計算後、平均化した値を抵抗圧 R の塑性流動係数 $K_{pf}(R)$ とした。塑性流動係数が大きい程、抵抗圧を保持する状態で、排出土は貫入または移動しにくいことを示している。

貫入抵抗実験結果を塑性流動係数と抵抗圧の関係で示したのが図-8である。図-8より読みとった抵抗圧 R_c 発生時の塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ を、各々の試料採取現場の切羽管理圧、掘進速度とともに表-7に示す。

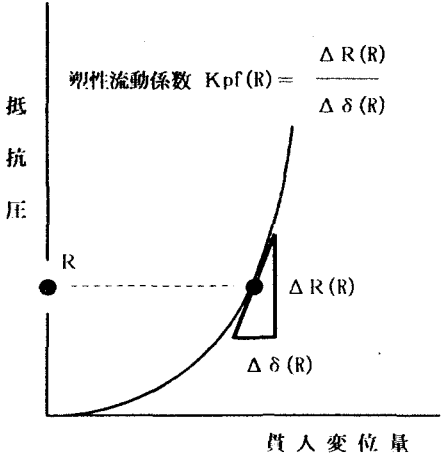


図-7 塑性流動係数の定義

表-7 切羽管理圧・掘進速度と塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$

項 目	A試料	B試料	C試料
採取現場の切羽管理圧 (kgf/cm ²)	0.98	0.61	0.51
採取現場の掘進速度 (mm/min)	51.0	36.0	77.0
塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ (kgf/cm ³)	1.0	1.5	0.0

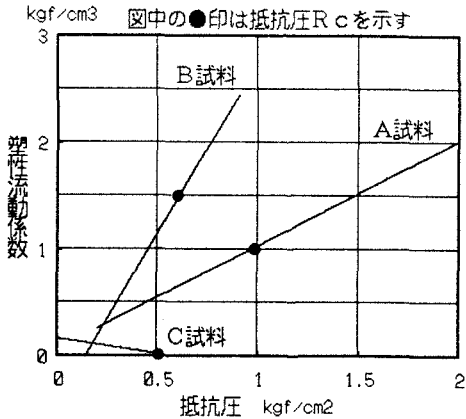


図-8 塑性流動係数と抵抗圧の関係

掘進速度と $K_{pf}(R_c)$ との関係を図-9に示す。図-9より、以下のことが分かる。

- ①掘進速度の速い現場排出土の塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ は小さいこと。
- ②掘進速度の遅い現場排出土の塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ は大きいこと。
- ③掘進速度と塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ の関係は、ほぼ直線関係にあること。

以上より、土圧制御の条件に適合した場合の今回の排出土では、抵抗圧 R_c 発生時の塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ により、切羽管理圧を保持する状態で、掘進速度とバランスしながら、チャンバー内を移動する性状を表現できることが分かった。

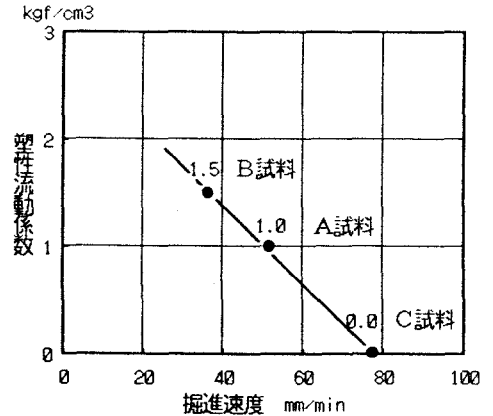


図-9 塑性流動係数と掘進速度の関係

5・3 塑性流動係数の施工管理への活用

今回の結果より、塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ が1.5であり、3現場の中で最も貫入または移動しにくい排出土の性状であると評価できたB現場で、土圧制御の条件に適合することを確認できたことから、排出土に要求される性状は、

$$\text{塑性流動係数 } K_{pf}(R_c) \leq 1.5 \cdots (2)$$

を少なくとも満足する性状であると考えられる。逆に、図-10に示すように(2)式を満足する排出土は、抵抗圧 R_c と同じ切羽管理圧を目標とする施工条件の現場で、土圧制御の条件を満足できる可能性のある性状であるといえる。

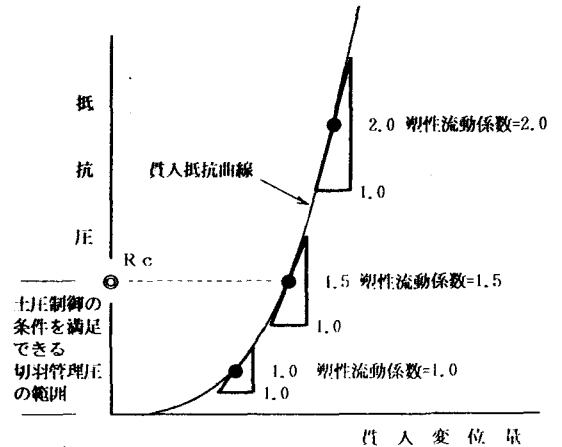


図-10 土圧制御の条件を満足する切羽管理圧の範囲

以下で現場の施工管理に活用することを考える。

(a) 排出土の塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ が1.5を越える場合の施工管理

チャンバー内の掘削土は、掘進速度30mm/minでバランスしながら移動することが困難で、掘進速度が低下している施工状態であることが推測される。この場合、添加材により掘削土の性状を変化させ、排出土の塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ を1.5以下とする等の対処が必要となる。

(b) 排出土の塑性流動係数 $K_{pf}(R_c)$ が1.5より小さい場合の施工管理

チャンバー内の掘削土は、移動抵抗が少なく、掘進速度30mm/minより速い掘進速度にバランスするため、掘進速度がより速い施工状態であることが推測される。但し、掘進速度が30mm/min以上とするとカッターおよび推力の負荷が大きくなり、掘進速度を速くできない場合には、チャンバーで目標とする切羽管理圧を保持しようとする、チャンバー内を過流動する可能性がある。この場合、添加材により掘削土の性状を変化させるか、排土ゲート部に何らかの圧力保持機構を設置する等の対処が必要となる。

(c) 掘進前の塑性流動係数の活用

シールド掘進前に、立坑の残土等と添加材の混合土による貫入抵抗実験で、目標とする切羽管理圧に対して、得られた塑性流動係数が(2)式を満足するか否かにより、土圧制御の条件に適合する性状が得られる可能性を評価できる。さらに、添加材の種類、配合、添加率の事前選定、排土ゲート部の圧力保持機構追加の設置判断等にも活用できる可能性はあると考えられる。

6. まとめ

滞水砂礫地盤を泥土圧シールドにより掘進している現場の実態調査と、採取した排出土による貫入抵抗実験を実施した。貫入抵抗実験結果を現場の切羽管理圧および掘進速度と関連づけて検討することで、以下のことが分かった。

- ①泥土圧シールドで、排土ゲートを常時オープンで掘進しながら、土圧制御できるチャンバー内加圧状態の掘削土の塑性流動性を得られる性状は、排出土の貫入抵抗実験から得られる抵抗圧と塑性流動係数で定量的に評価できる可能性があること。
- ②排出土に必要な性状は、抵抗圧が切羽管理圧以上になることが可能で、切羽管理圧と同じ値の抵抗圧発生時での塑性流動係数が1.5以下であること。

7. おわりに

今回の土圧制御の条件に適合した現場は、シールドマシン構造による影響や、スクリーコンベアによる影響が比較的少なく、良好な施工状態を確保できた要因として、掘削土の性状が支配的であることから、塑性流動性を検討する上で実に適していたと考えられる。

しかし、今回の実験で使用した排出土の数が少ないため、得られた塑性流動性の評価方法の信頼性は、必ずしも高いとは考えていない。排出土による貫入抵抗実験を今後も続け、より信頼性を高めていきたい。また、排出土投入後、貫入モールド内を目標とする切羽管理圧と同じ圧力状態に保持し、排出土に間隙水圧を発生させながら、施工状態により近い状況で貫入させる実験を予定している。

最後に本論文をまとめるにあたり、御協力いただいた現場の方々に感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 1) 栗原宏武・中尾 努・長井孝夫：土圧シールドでの掘削土砂への潤滑材添加に関する基礎実験（1）
第15回土質工学発表会，pp1573～1576，1980
- 2) 西尾誠高・氣仙哲夫：加泥型土圧シールド工法における添加材の配合と効果
間組研究年報，pp65～78，1985
- 3) 三島享介・増田正和・畑山栄一・中永清次郎：ポリマー系加泥材の研究
奥村組技術研究所報N0.16，pp55～59，1990
- 4) 羽生田吉也・藤原紀夫：気泡シールド工法の開発
大林組技術研究所報N0.45，pp29～32，1992