

泥水シールド工法における掘削管理についての研究

藤原 紀夫 吉岡 尚也
羽生田 吉也

Study on Excavation for Slurry Shield Tunneling Method

Toshio Fujiwara Hisaya Yoshioka
Yoshinari Hanyuda

Abstract

Generally, in slurry shield tunneling, the work should proceed while maintaining a balance between two pressures, i. e., earth pressure and slurry pressure being let in at the bulkhead of the shield machine. As the very existence of the bulkhead obstructs observation of the situation at the excavation face, concentrated control is necessary for this type of tunneling by means of remote monitoring equipment using densimeters, flow meters, etc. By chance, the authors had the opportunity of examining the performance of a new type of densimeter on a slurry shield tunneling job, and investigations were made on how to control tunneling in the field. The results of the experiments which were valuable additions to the authors' research are reported in this paper.

概 要

泥水シールド工法では、切羽における自然水圧・土圧と坑外から送り込まれた泥水の圧力とを均衡させて、切羽面の安定をはかりつつ掘削が進められる。したがって、切羽の掘削状況、地山の状態などを直接目でみることはできないため、切羽の泥水圧や泥水濃度等を計測することによって間接的に切羽を監視しながら、シールド機械、スラリーポンプの制御を行なう。しかし、この掘削管理の具体的な方法には多くの問題点が残されている。この報告は、新しい泥水濃度計の開発と、掘削管理方法をさぐるために行なった現場実験に関するものである。実験の結果、 $100 \mu\text{Ci}$ (^{60}Co) の線源を用いた r 線密度計は泥水濃度を精度よく計測できることがわかり、また、現場の掘削時の種々の計測値を分析することによって、掘削管理方法の問題点を明らかにすることができた。

1. はじめに

シールドの掘削では、いかに切羽を崩壊することなく作業を進めていくかが重要な課題の一つで、泥水シールド工法では切羽の自然水圧と坑外から送り込まれる泥水の圧力とをバランスさせて切羽の安定を保持しつつおこなわれる。すなわち、泥水をシールド掘進機内の隔壁で仕切られた加圧室に送り込み、同室内の泥水圧を切羽面の自然水圧より若干高く保持して掘削をすすめる。この際にカッターで切削されたずりは、泥水流に載せて坑外に搬出される。

従来の圧気シールド工法とは異なり、この工法では切羽面を目視できないので、計測機器を使ってこれを監視し、管理していく方法が重要な問題となる。

筆者らは、兼ねてより泥水シールドの掘削管理方法についてその研究の必要性を痛感していた。幸いにして名

古屋市下水道局発注の下水道幹線の工事現場で約一週間にわたる実験調査をおこなう機会を得た。

本報告は実験調査のうち、新たに開発して現地に取付けた小型線源容量の r 線密度計の性能試験、さらに差圧式濃度計¹⁾などの現場計測設備を使用した各掘削リング毎の地山性状についての推定をおこなうなど掘削管理の一方法をまとめたものである。

2. 現場の概要

工事の内容は次のとおりである。シールド機の通過層が主として透水係数 $3.5 \times 10^{-2} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ と高く湧水も多量な厚い礫層であるので、技術的、経済的な面および作業環境を考慮して泥水シールド工法が採られた²⁾。

工事内容: トンネル築造工
仕上り内径: 1,800 mm

延 長：768 mm
セグメント：外径 2,550 mm, 幅 900 mm, スチールセグメント

2.1. 地質概要

施工位置は守山面と呼ばれる洪積台地にあり、その基盤層は砂礫固結シルト等からなる矢田川累層である。またこの層を不整合に熱田層が覆っている。シールドが通過するのは、矢田川累層内でこの礫層の粒度組成は礫分約 50~60%, 砂分約 30~45% シルト分約 5~10% である。またN値は50以上で、礫径が 50 mm 前後であるが、場所によっては 130, 280 mm φ の礫も試掘されている。土被りは 7.5~14.5 m, 地下水位はシールド機の天端より 5.0~7.0 m 上部にある²⁾。

2.2. 設備の状況

泥水シールド掘進機は図-1のような形状を有し、この後方には泥水輸送設備として、送泥側に 8^B, 排泥側に 6^B の配管がなされている。泥水比重1.08内外のものを加圧室内に送り込む一方、アクアパクラッシャ³⁾により 50 mm 以下に破碎された礫等のずりを泥水に載せてポンプにより坑外へ圧送している。

このように完全なスラリ輸送システムをひいているので、坑内では切羽を目視できないばかりか、泥水や掘削されたずりを見ることもできない。

泥水圧の管理には切羽水圧調整装置を、掘削土量の管理には、差圧式濃度計と電磁流量計をそれぞれ駆使しておこなっている。また各リング毎の掘進作業もこれらの計器信号を中央制御室の監視盤に集中させて、制御室内の係員が状況を判断しつつ、切羽作業員等と適格な交信をおこないながら進められる。

このような状況の中で、実験調査のために新たに二つの泥水濃度計を現場立坑付近に取付けて性能試験をおこない、また現場の所有設備を利用して掘削管理方法の研究調査をすすめた(図-2参照)。

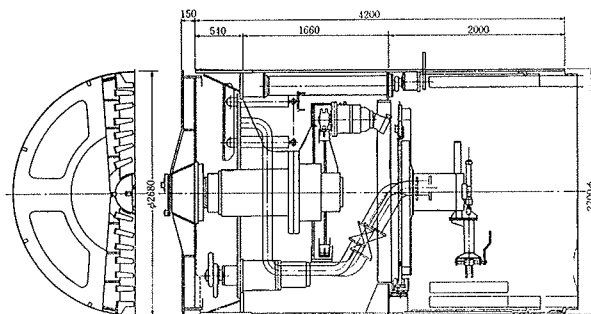


図-1 泥水シールド掘進機全体図と仕様

3. 泥水濃度計と性能試験

放射線源容量が小さい新型のγ線密度計(写真-1)と水平取付型の重力式比重計を排泥側に取り付けて性能試験をおこなった。後者の計器については別の報告に譲るとして、ここではγ線密度計の測定原理、構造および性能試験結果について述べる。

3.1. γ線密度計

このγ線密度計を端的に言うなら、従来のものは線源容量を大きくとって測定精度を上げていたのに対して、γ線の受感部であるG.M.チューブの本数を多くしてそれを果たそうとするものである。この結果、線源は⁶⁰Coの100 μCiで済むため取扱い上の法的な手続きが一切不要という画期的なものである。また形状的にもコンパクトなものとなる。



写真-1 γ線密度計

3.1.1. 構造と測定原理 ⁶⁰Coから放出されるγ線は、管内を流れる泥水を構成する原子核に衝突するものと、管を挟んで配列されたG.M.チューブに到達するものとに分れる。泥水濃度が大きくなる程、後者の数は少なくなる。また同時に時間の経過に従って線源容量が小さくなるのでこれを補償しなければならないが泥水検出パイプに対して線源と同一側に置かれた数本のG.M.チューブによっておこなう(図-3参照)。

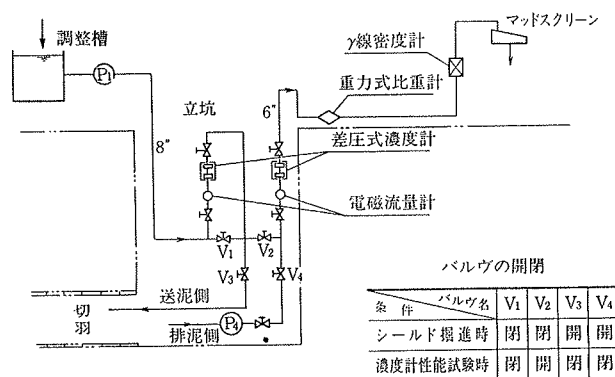


図-2 泥水濃度計の配置と立坑付近フローシート

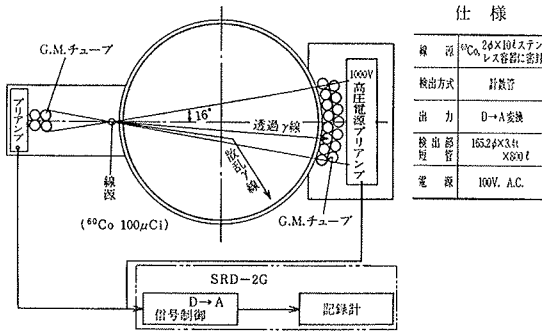


図-3 γ 線密度計の検出機構

このようにすると、泥水比重 γ_1 と計数 N_r, N_0 との間に一般に次式が成立つ。

$$R_\gamma = N_r/N_0 = Ae^{-B\gamma_1} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、A, B: 定数

N_r : 高圧プリアンプ側の G.M. チューブによる計数

N_0 : プリアンプ側の G.M. チューブによる計数

R_γ は計数率比と称される値で、ここで使用した計器では γ_1 と直線関係に近似した。すなわち、

$$R_\gamma = a\gamma_1 + b \quad \dots\dots\dots(2)$$

それは、予め R_γ と γ_1 との関係を較正試験によって求めた結果から(2)式のほうが、相関性の高いことがわかったためである。同式を演算処理部にプログラムとして入れた。a, b の各値はそれぞれ 3.766, -1.079 を使用している。

3.2. γ 線密度計の性能試験結果

主として礫を含まない泥水を循環させて、泥水濃度を数段階に変え、その際にマッドバランスで計測された泥水比重 $\gamma_{M.D.}$ と γ 線密度計による値 $\gamma_{R.I.}$ とを比較し(図-4参照)、次に $\gamma_{M.D.} = 1.080$ の一定濃度の循環泥水について、 γ 線密度計のサンプリングタイム t_s を変えて得られるそれぞれの $\gamma_{R.I.}$ のバラツキの様相を調べた(図-5参照)。

まず、図-4について、これら6点の値はサンプリングタイム $t_s = 60 \text{ sec}$ のときに得られたもので、各点とも10回の計測値の平均をプロットした。この相関図によると $\gamma_{R.I.} = \gamma_{M.D.}$ の直線からほぼ一様に偏った値を検出していることが認められる。また各点は最小自乗法で求めると、次式で近似される。

$$\gamma_{M.D.} = 1.128 \gamma_{R.I.} - 0.099 \quad \dots\dots\dots(3)$$

この結果から式(2)の a, b にそれぞれ 3.339, -0.7485 を用いると $\gamma_{M.D.} = \gamma_{R.I.}$ の関係が成り立つ。これは逆にマッドバランス等のサンプリング装置を用いて現場で較正試験をおこなって a, b を決めれば、この γ 線密度計を使用できることを意味している。但し、この推論には、

仕様

線源	^{60}Co 24×19×11ステンレス容器に密封
検出方式	片検出
出力	D→A変換
検出器管	15.2×3.8×8.0 t
電源	100V. A.C.

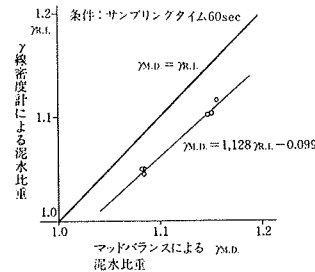


図-4 $\gamma_{R.I.}$ と $\gamma_{M.D.}$ 相関図

項目 No.	流量	マッドバランス $\gamma_{M.D.}$	77mmφ×500mm 吐出時間 (温度)	添付式濃度計による比重	γ 線密度計 $\gamma_{R.I.}$	備考
1	4.0 th m ³ /h	1.155	30.5 ^{sec} (16.5°C)	—	1.116	$\gamma_{R.I.}$ は掘削機内の泥水のサンプリング値
2	4.5 th m ³ /h	1.150	30.7 ^{sec} (17.0°C)	—	1.104	"
3	3.0 th m ³ /h	1.146	30.9 ^{sec} (16.3°C)	—	1.102	"
4	3.5 th m ³ /h	1.082	26.7 ^{sec}	1.062	1.050	$\gamma_{R.I.}$ はマッドバランス計下の泥水のサンプリング値
5	4.0 th m ³ /h	1.084	26.9 ^{sec}	1.065	1.045	"
6	4.5 th m ³ /h	1.084	26.6 ^{sec}	1.081	1.050	"

表-1 性能試験条件

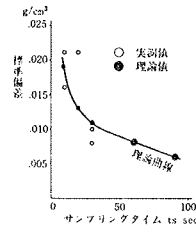


図-5 t_s と標準偏差

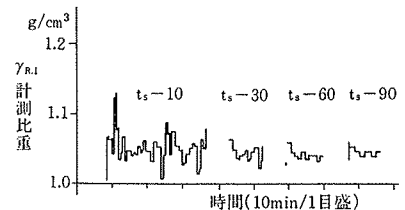


図-6 記録計からの抜粋

計測された6点以外の泥水濃度でも式(3)にほぼのるといふ仮定をつけなければならない。

次にサンプリングタイムと偏差の関係についてみると、 t_s が 30 sec, 60 sec では偏差 0.008 程度となり泥水濃度の変動を考慮して判断すると 30 sec~60 sec に設定すれば測定上は充分と考えられる。

なお表-1に性能試験条件を、図-6には t_s と標準偏差を調べた際の記録をしめた。

4. 泥水シールド掘削管理の方法と現場実験調査

切羽の状態を目視できないこの工法では、送排泥濃度とこれらの流量、およびシールド掘進速度等を常時計測することにより地山の状態を把握できることから、以下のような推論のもとに現場実験調査をした。

4.1. 地山状態の推定方法

図-7のごとく、加圧室直後に泥水濃度計と流量計との2組を、送泥管および排泥管に取付けた理想的な状態を仮定しよう。

泥水シールド機の隔壁と切羽面で囲まれた部分の泥水体積を Vm^3 、ずりを混入したこの泥水が掘進開始後 $tmin$ に平均比重量 γ_{Rton}/m^3 であったとすると次式が成立つ。

$$Vd\gamma_R = Q_i\gamma_i dt + Q_r\gamma_r dt - Q_0\gamma_0 dt \quad \dots\dots\dots(4)$$

アジテータ、環流作用が十分であると、 $\gamma_0 = \gamma_R$ が近似的に成立し、連続の式 $Q_0 = Q_i + Q_r$ を(4)式に代入して、

$$Vd\gamma_0 = Q_i\gamma_i dt + Q_r\gamma_r dt - (Q_i + Q_r)\gamma_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

が求められる。但し、(4), (5)式内の各記号は、

- Q_i : 送泥流量 (m³/min)
- Q_0 : 排泥流量 (/)
- γ_i : 送泥比重量 (ton/m³)

γ_D : 排泥比重量 (%)
 γ : 地山比重量 (%)
 Q : 地山掘削量 (m^3/min)

を表わすものとする。初期条件として $t=0$ のとき $\gamma_0 = \gamma_R = \gamma_{00}$ とすると(5)式を積分して γ_0 について求めると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \gamma_0 = & (Q\gamma + Q_i\gamma_i) / (Q + Q_i) \\ & + \{ \gamma_{00} - (Q\gamma + Q_i\gamma_i) / (Q + Q_i) \} \\ & \times \exp \{ -t(Q_i + Q) / V \} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(6)$$

上式の第 2 項は、掘進後の一定時間経過後には省略できるものである。すなわち、

$$\gamma_0 = (Q\gamma + Q_i\gamma_i) / (Q + Q_i) \quad \dots\dots\dots(6')$$

さらに(6')を地山比重量について変形すると、

$$\gamma = (Q_0\gamma_0 - Q_i\gamma_i) / (Q_0 - Q_i) \quad \dots\dots\dots(7)$$

になる。

さて、泥水シールド工法を用いる所では、地下水水位が高く、少なくとも切羽上端以下の土中間隙は水で満たされた飽和状態と想定できよう。すなわち $V_v = V_w$ になり、(7)式で求めた γ を用いて、地山の含水比 w を次式によって求めることができる。

$$w = (G_s\gamma_w - \gamma) / G_s \cdot (\gamma - \gamma_w) \quad \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 G_s : 土粒子の比重、約 2.65

γ_w : 水の比重量 1 ton/m^3

次に切羽崩壊、余掘の量を反映する地山掘削量 Q について、設計上の掘削量 $A \cdot v$ と対比させることによりそれら状態を見ることが可能と推定する。すなわち、

$$\xi = Q / A \cdot v = Q_i(\gamma_0 - \gamma_i) / A \cdot v(\gamma - \gamma_0) \quad \dots\dots\dots(9)$$

ここで、 A : 設計上の掘削断面 (m^2)

v : シールド掘進速度 (m/min)

ξ : ずり通過率

その値が 1 前後をどのように変動しているのかそのパターンを調査し、異常時を察知する。

以上、かなり定常的なものを頼りに、異常時を含んだ事態に対処しようとするもので、若干の矛盾を含んでいることは否めない。

4.2. 実験調査の結果

さて、泥水シールド研究のうち対象としたのは 727~750 リングで約 21.6 m 区間である。短距離間にもかわらず対象地山が粘土層、平均粒径 30~40 mm 程度の小石からなる礫層、木質繊維を混入した“ザラ目状小石”からなる礫層、さらにザラ目状小石のみからなる礫層と

次々に変化していた。740 リングから 743 リングまでは所々に 300 mm 前後の玉石があり加圧室内に閉塞して故障の原因になっていた(表-2 参照)。

各リング毎の掘削方法は、まず掘進開始前に 3~4 分間程バイパス運転をおこない、設定排泥流量 $Q_0 = 4.20 m^3/min$ が保持できる状態になったとき初めて掘進に移る。バイパス運転時には泥水流が加圧室手前の回路を通った循環流となる。これは掘進終了後の“さらい運転”と呼んでいるバイパス運転時も同様である。さて、掘進時には、 Q_0 に対する送泥流量が $Q_i \doteq 4.0 m^3/min$ 程度となり、切羽水圧 0.5 kg/cm^2 を保持させるが、シールド掘進速度の変化等の影響による掘削量の増減に対しては送泥側のポンプ回転数を応答させて Q_i を調整することにより切羽水圧を一定に保っている。

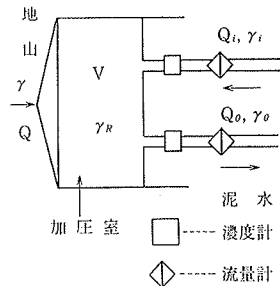


図-7 濃度等算出用モデル

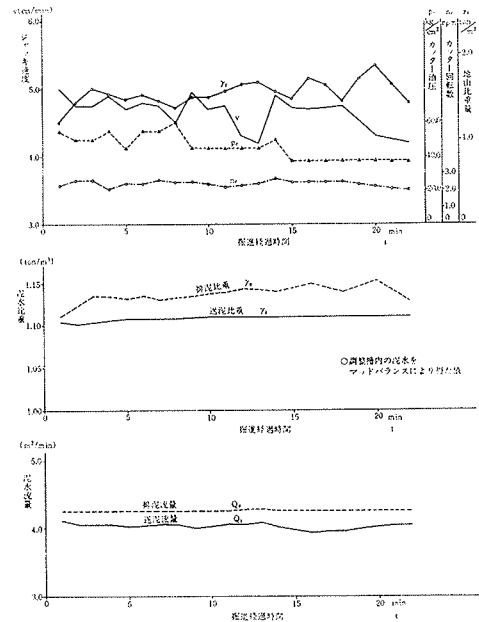


図-8 粘土層掘進時における計測(733リング)

図-8は、粘性土層を掘削中の733リングについての計測値をしめたもので、 Q_i とシールド速度 v の変化がほぼ逆相であることが認められる。また図中の地山比重量 γ の値は式(7)の分母である $Q_0 - Q_i$ の代りに $Q = Av$ を用いて算出した値をプロットしたもので、掘進後の経過時間 t で 7~8 min 以降の値の平均をもってそのリングの平均地山比重量 $\bar{\gamma}$ を求めるのが良いと思われた。その理由として、式(6)内に、この現場条件を仮定してあてはめて、 t について解くと約 8 min となり、また他のリングにおける γ_i の変化を調査した結果 7~8 min 後から、平均値 $\bar{\gamma}$ とおぼしき点を中心とした変動になる傾向があったからである。

4.2.1. 地山の状態 比較的掘削が順調におこなわれたリング 733 R, 741 R, 744 R, 745 R について地山比重量 γ_i , 含水比 w , 間隙比 e を算出している(表-3 参

項目 リング名	所要掘削 時間(min)	送泥流量 $\bar{Q}_s(\text{m}^3/\text{min})$	排泥流量 $\bar{Q}_e(\text{m}^3/\text{min})$	シールド掘削速度 $\bar{V}(\text{cm}/\text{min})$	送泥比重 γ_s (差圧式濃度計)	排泥比重 γ_e (差圧式濃度計)	特記事項
727 ^R	20	4.25	4.50	3.0~4.0	—	~1.125	粘土層
728 ^R	26	4.25	4.40	4.0~5.0	—	1.12	
729 ^R	39	4.05	4.25	4.0~	1.112	1.13~1.15	
732 ^R	43	4.12	4.20	3.0~	1.104	1.12~1.13	パルクヘッドに 玉石が詰まる
733 ^R	20	4.00	4.20	4.5~5.0	1.110	1.13~1.15	
740 ^R	21	4.00	4.25	~5.0	1.087	1.103~1.104	レキ層に合突
741 ^R	17	3.95	4.25	~6.0	1.091	1.12~1.13	
742 ^R	—	4.00	4.25	~6.0	1.086	1.12~1.13	クラッシュに大 型レキ混入
743 ^R	—	4.20	4.25	4.0~5.0	1.088	—	
744 ^R	17	3.95	4.25	4.0~6.0	1.086	~1.125	木質片の混入の ザラ目状レキ層
745 ^R	15	3.90	4.25	4.0~6.0	1.104	1.13~1.15	"
749 ^R	73	3.90	4.20	~6.0	1.102	1.14~1.15	ザラ目状レキ層
750 ^R	—	4.00	4.25	4.0~5.0	1.104	—	"

表-2 各リング毎の掘削状況

項目	リング名	733 ^R	741 ^R	744 ^R	745 ^R
地山比重 γ	平均値	1.531	1.500	1.441	1.516
	測定数	10	9	18	8
	標準偏差	0.091	0.126	0.157	0.141
含水比 w		80%	87%	103%	83%
間げき比 e		2.11	2.30	2.74	2.19
掘削対象土*		粘性土	レキ層	ザラ目状小石に木質繊維物が混入したもの。	

表-3 泥水濃度等から試算した地山性状

照)。

γ_0, γ_1 は差圧式濃度計により計測された値であり、この計測器の演算部では、 $G_s \approx 2.65$ という土粒子のみにしか適用できない定数を使用しているため、744^R、745^R などの木質片混入量が大きい条件で得られた γ_0, γ_1 を用いた結果は信頼性に乏しいものとする。特に 744^R では、同質のずりの発生が観られた 745^R の性状と較べてかなり違ったものになったことで、差圧濃度計の計測原理に依るもの以外の誤差要因が働いたと考えられる。

4.2.2. ずり通過率 ξ 733^R、741^R、744^R、745^R についての計測データおよび表-3の平均地山比重 $\bar{\gamma}$ を式(9)に代入してずり通過率を求めた。掘削開始直後の部分がblankになっているが、アクアパッククラッシュの冷却水が同シールド部位から排泥管内に流入して、 $\gamma_0 > \gamma_1$ の現象が起きていたことによる。その結果(9)式が成立しない。

744^R、745^R では掘削し易い層であったところから、最初からジャッキ速度 v を上げて短期間で作業を終らせていることから、ずり排出の比重は作業の後半にくる。また 741^R では、初め速度 v を上げ、中間で落とし、さらに後半で上昇させているため、ずり排出は作業中間時に集中している。これは送・排泥水の流量の差および濃度の差をみてわかる事である。10 min 以後のその変動は 0.6~1.3 程であった。

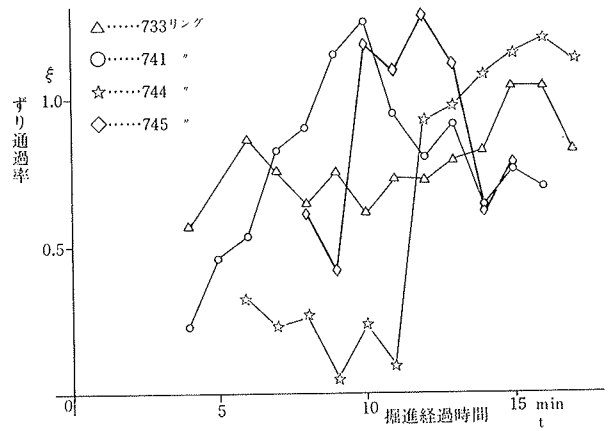


図-9 掘進経過とずり通過率 ξ

5. まとめ

従来の γ 線密度計がもつ法的な制約を受けるなどの欠点を排除するべく試作した新型の γ 線密度計の実験結果から、演算に用いる回帰式は対象泥水をサンプリングして較正試験から求めた定数を代入すれば良いと推定された。また構造的にも小さなもので保守、管理が容易であることも大きな利点である。一方、サンプリングタイムが 30~60 sec とタイムラグが大きいことは、切羽の監視用として考える場合は問題があるものと考えられる。

各リングの掘削に沿った掘削周辺状況を示すデータから地山性状を算出することができた。掘削管理で特に切羽の崩壊などを監視する目的であれば、加圧室のごく近くに泥水測定用計器を据え付け、加圧室内の土の出入のバランス等を管理する必要がある。これには、現在の垂直取付型の密度計ではシールド内径に制約される。また切羽の安定を企るのに、切羽水圧の他に、掘進時の諸条件について、かなり検討すべき余地があるものと考えられる。

最後に、現場実験に際し、計測器の取付、工事データの提供などで守山幹線工事事務所の方々には大変お世話になった。記して深い謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 津田：泥水用差圧式濃度測定装置について、トンネルと地下、(1977.4)
- 2) 内藤：礫地盤における泥水シールド工事、第5巻シールドトンネル工法の設計と施工技術、日本プロジェクト・リサーチ、(1977)
- 3) 斎藤、藤原、羽生田、吉岡：泥水シールド工法における大径れき処理輸送システムの開発、大林組技術研究所報、No. 14、(1977)