

泥土圧シールドの掘削土量推定での排土含水比の活用

鹿島建設(株) フェロー会員 吉田 輝 正会員 吉迫和生
鹿島建設(株) 串田慎二 正会員 森 嘉一
鹿島建設(株) 正会員 ○佐藤一成 正会員 新本直子
鹿島建設(株) 正会員 高柳 哲 正会員 有賀大峰

1. はじめに

シールドトンネル工事の安全・安心な施工のために、土砂の過剰取込みなどの異常兆候を早期に感知する必要がある。シールドトンネル施工技術検討会ガイドライン¹⁾は、掘削土量の算出精度の維持・向上と目的として、「泥土圧シールドでの逸脱添加材量と過剰取込み土量の計算式」(以下、ガイドライン原式)を示している。ガイドライン原式では「チャンバー内の排土(泥土)の密度 $\rho_{t.c}$ 」が必要であり、 $\rho_{t.c}$ は原典¹⁾では「チャンバー内土圧分布等から求めた値」とされている。これに対して、筆者らは、(a) $\rho_{t.c}$ をチャンバー内で直接測定する方法と、(b) $\rho_{t.c}$ に代えて排土の含水比 w_{out} を用いる方法を検討した。本報では、これらの実工事での試行結果を報告する。なお、含水比は%表記が一般的であるが、本報では、含水比を間隙比のような非%値として数式を表記した(%表記値は100で割って式に代入)。

2. ガイドライン原式および各種の掘削土量推定式

1. で述べた(a)の方法では、ガイドライン原式を用いる。一方、(b)の方法のために、筆者らはガイドライン原式に基づいて「含水比表記ガイドライン式²⁾」を提案した。本章では、これらの2つの式(以下、ガイドライン式と総称)と、さらに他の掘削土量推定式を概観し、各式の特徴を整理する。

(1) ガイドライン原式(E1)

a) 基礎式

ガイドライン式で考慮する排土の構成と基礎式を図-1に示す。ガイドライン式での「排土」は、「計算掘削土と過剰掘削土の合計である実際の掘削土」と「チャンバーに加えた添加材から逸脱添加材を控除した回収添加材」の合計である。この関係を、湿潤状態での①質量バランスおよび②体積バランスとして表したものが、ガイドライン原式の基礎式¹⁾であり、排土の測定値として質量 M_{out} および密度 $\rho_{t.c}$ を用いている。なお、②は排土の含水比 w_{out} が迅速に測定されていない状況に対して導かれている。

b) 留意点

図-1の基礎式は、チャンバー内での物質収支であるため、各物質の体積および密度はチャンバー内の加圧

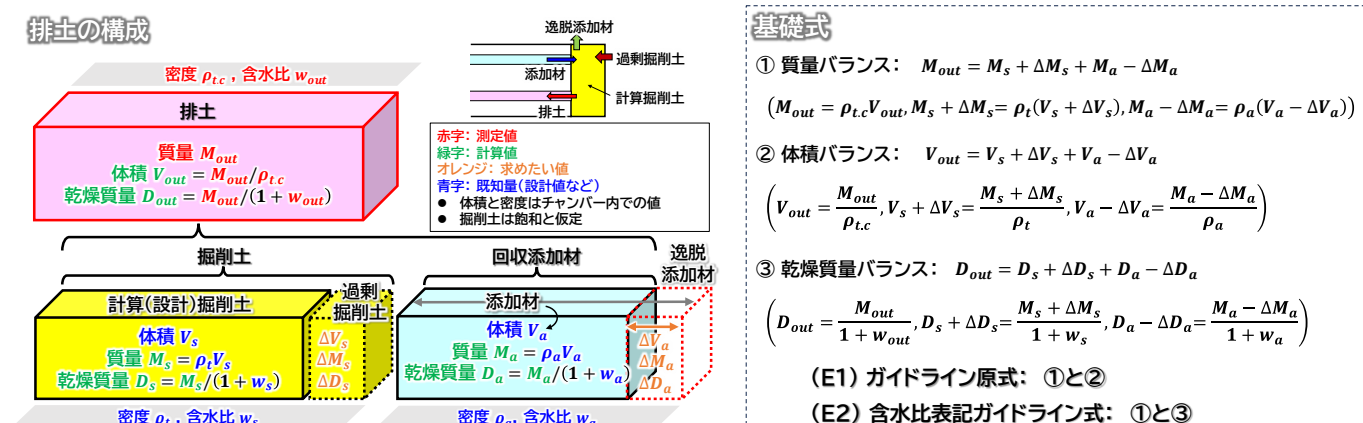


図-1 ガイドライン式(ガイドライン原式・含水比表記ガイドライン式)の基礎式

キーワード 気泡シールド, 排土量管理, 含水比, 乾燥質量, 密度, RI 法

連絡先 〒107-8477 東京都港区元赤坂1丁目3-8 鹿島建設(株) 土木管理本部土木工務部 TEL 080-1265-4396

状態での値である（質量は圧力によらない）。また、添加材は、チャンバーに注入する物質の総和であり、加水も添加材に含める必要がある。添加材として 2 種類以上の材料を併用する場合には、添加材の質量 M_a 、体積 V_a および密度 ρ_a は、各材料の合計体積、合計質量および平均密度になる。一方、掘削土からの逸水（本報では、負の逸水である地下水の流入もこれに含める）は、基礎式で明示的に考慮されていないが、「逸脱添加材」に含まれると考えられる。以上の留意点は次節(1)の含水比表記ガイドラインにも共通する。

c) 計算式

図-1 の基礎式①にカッコ書きで併記する質量と体積の関係を用いて、基礎式①を体積で表記し、基礎式②と連立させて掘削土体積 $V_s + \Delta V_s$ と回収添加材体積 $V_a - \Delta V_a$ について解くと、表-1 に示すガイドライン原式の計算式が得られる。ここに、掘削土に関する基礎式での未知数は ΔV_s であるが、排土率 $(V_s + \Delta V_s)/V_s$ の計算に用いる $V_s + \Delta V_s$ の形のまま示した。なお、「逸水による誤差」については、3. で述べる。

表-1 泥土圧シールドでの掘削土量および回収添加材量の主な推定式

名 称	(E1) ガイドライン原式 ¹⁾	(E2) 含水比表記ガイドライン式 ²⁾	(E2') 含水比表記ガイドライン式(簡易式) ²⁾
タイプ	添加材逸脱考慮	添加材逸脱考慮	添加材逸脱考慮
排土の測定項目	$M_{out}, \rho_{t,c}$	M_{out}, w_{out}	M_{out}, w_{out}
基礎式 (図-1)	①, ②	①, ③	①, ③ ($D_a - \Delta D_a = 0$)
計算式	$V_s + \Delta V_s = \frac{\rho_{t,c} - \rho_a}{\rho_t - \rho_a} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_{t,c}}$	$V_s + \Delta V_s = a_s \cdot \frac{1 + w_s}{1 + w_{out}} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_t}, a_s = \frac{w_a - w_{out}}{w_a - w_s}$	$V_s + \Delta V_s = \frac{1 + w_s}{1 + w_{out}} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_t}$
計算式	$V_a - \Delta V_a = \frac{\rho_t - \rho_{t,c}}{\rho_t - \rho_a} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_{t,c}}$	$V_a - \Delta V_a = a_a \cdot \frac{w_{out} - w_s}{1 + w_{out}} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_a}, a_a = \frac{1 + w_a}{w_a - w_s}$	$V_a - \Delta V_a = \frac{w_{out} - w_s}{1 + w_{out}} \cdot \frac{M_{out}}{\rho_a}$
逸水による誤差※	○	○	◎

名 称	(E2'') 乾燥質量式	(E0) 従来式(質量バランス)	(E0') 従来式(体積バランス)
タイプ	添加材逸脱非考慮(影響なし)	添加材逸脱非考慮	添加材逸脱非考慮
排土の測定項目	M_{out}, w_{out}	M_{out}	V_{out}
基礎式 (図-1)	③ ($D_a - \Delta D_a = 0$)	① ($\Delta M_a = 0$)	② ($\Delta V_a = 0$)
計算式	$D_s + \Delta D_s = \frac{M_{out}}{1 + w_{out}}$	$V_s + \Delta V_s = \frac{M_{out} - \rho_a V_a}{\rho_t}$	$V_s + \Delta V_s = V_{out} - V_a$
計算式			
逸水による誤差 ※	◎	△	△

※ 凡例 ◎:誤差なし ○:誤差を無視または許容できる △:誤差あり

(2) 含水比表記ガイドライン式 (E2)

a) 提案の背景

前節(1)のガイドライン原式の基礎式（①または②）で用いる排土の密度 $\rho_{t,c}$ について、原典¹⁾では、チャンバー内の土圧分布から推定する方法が例示されている。この方法は、塑性流動状態にある泥土による土圧が隔壁に液圧として作用する（土圧係数 $K = 1$ ）と仮定している。しかしながら、泥土の粘性などに起因して $K < 1$ となり、 $\rho_{t,c}$ が実際より小さく得られた場合、掘削土量が過小に推定される可能性がある。また、中口径以下のシールド機では、土圧計の設置数量が限られるなどの制約もある。これらの背景から、筆者らがガイドライン原式に基づいて新たに提案したのが含水比表記ガイドライン式²⁾であり、ガイドライン原式での $\rho_{t,c}$ に代わるものとして、排土の含水比 w_{out} を用いている。すなわち、従来、含水比の測定（炉乾燥法）は時間を要したが、電子レンジ法や RI 法などで w_{out} を迅速に測定して施工管理に用いることができるようになった。

b) 基礎式および計算式

含水比表記ガイドライン式の基礎式では、図-1 に示すように、ガイドライン原式と共通の①質量バランスを用いる一方で、②に代えて③乾燥質量バランスを用いる。③にカッコ書きで併記する乾燥質量と（湿潤）質量の関係を用いて、③を質量で表記し、①と連立させて掘削土質量 $M_s + \Delta M_s$ と回収添加材質量 $M_a - \Delta M_a$ について解くと、表-1 に示す含水比表記ガイドライン式の計算式が得られる。ただし、表-1 では、基礎式①に併記する質量と体積の関係を用いて体積で表記した。

c) ガイドライン原式との関係

飽和条件では、 $\rho_t = (1 + w_s)/(1/\rho_s + w_s/\rho_w)$ (ρ_s : 土粒子密度、 ρ_w : 水の密度) の関係が成り立ち、密度 ρ_t と含水比 w_s は一義的な関係にある。排土の $\rho_{t,c}$ と w_{out} 、添加材での ρ_a と w_a の関係も同様に一義的である。このとき、実質的に、基礎式②と基礎式③は等価であり、ガイドライン原式と含水比表記ガイドライン式は、用いる測定量が $\rho_{t,c}$ と w_{out} と異なるが同じ式になる。一方、気泡シールドや、掘削土が不飽和の場合は、ガイドライン原式と含水比表記ガイドライン式で計算結果に若干の相違が生じる可能性がある。

(3) 含水比表記ガイドライン式 (簡易式) (E2')

a) 基礎式および計算式

図-1 の基礎式③において、回収添加材の乾燥質量 $D_a - \Delta D_a$ は、掘削土の乾燥質量 $D_s + \Delta D_s$ に比べて一般に微量と考えられる。そこで、前節(2)の含水比表記ガイドライン式と同様に基礎式①と基礎式③を用いながら、添加材を近似的に水 ($w_a = \infty$) とみなし、基礎式③で $D_a - \Delta D_a = 0$ と仮定したものが含水比表記ガイドライン式 (簡易式) である。その計算式は、含水比表記ガイドライン式での計算式において、 $w_a \rightarrow \infty$ のときの $a_s = (w_a - w_{out})/(w_a - w_s)$ および $a_a = (1 + w_a)/(w_a - w_s)$ の極限值である $a_s = 1$, $a_a = 1$ とした形である。含水比表記ガイドライン式 (簡易式) での排土率は、次節(4)の乾燥質量式と一致する。

b) 適用範囲

前節(2)の含水比表記ガイドライン式での掘削土体積 $V_s + \Delta V_s$ の計算式での係数 a_s について、鉱物系添加材を想定した試算例を図-2(a)に示す。グラフ横軸値の添加材密度 ρ_a は、各データ点での添加材含水比 w_a (横軸に併記) から、図中に記載の添加材土粒子密度の値を仮定して算出した。図-2(a)では、 a_s の値は0.99~1.01の範囲内であり、 $a_s = 1$ と近似したときの掘削土量 $V_s + \Delta V_s$ の誤差は概ね $\pm 1\%$ 以内と想定される。なお、実工事での鉱物系添加材の含水比 w_a は、一般に図-2(a)に示す値の範囲内にあり、掘削土の含水比 w_s を、試算に用いた値 (図中に記載) から変化させても a_s の値の変化は微少である。同様に、図-2(b)は、回収添加材体積 $V_a - \Delta V_a$ の計算式での係数 a_a の値を、鉱物系添加材を想定して試算したものであり、係数 $a_a = 1$ と近似したときの、回収添加材量 $V_a - \Delta V_a$ の誤差は概ね $+10\%$ 以内と想定される。気泡材や高分子系添加材では、 w_a の範囲が鉱物系添加材より概して高いため、 $a_s = 1$, $a_a = 1$ の近似に起因する誤差はさらに小さくなる。このことから、含水比表記ガイドライン式 (簡易式) は、泥土圧シールド全般において、(2)の含水比表記ガイドライン式の実用的な近似式として適用できる。なお、(2)の式は結果的に不要となるが、当簡易式の導出過程の説明には必要である。

一方、泥水式シールドでは送・排泥水の含水比測定は一般的でないが、敢えて泥水式シールドを想定して、図-2(a), (b)に排土 (排泥水) 含水比 $w_{out} = 1.5, 2.5$ での試算を追加した結果を図-3(a), (b)に示す。図-3(a)では、 w_{out} および横軸の送泥水密度 ρ_a の増加に伴い、係数

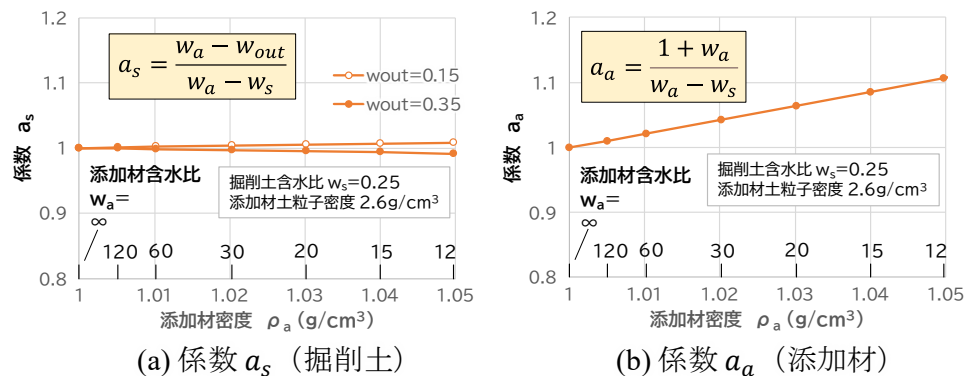


図-2 係数 a_s, a_a の試算例 (鉱物系添加材を想定)

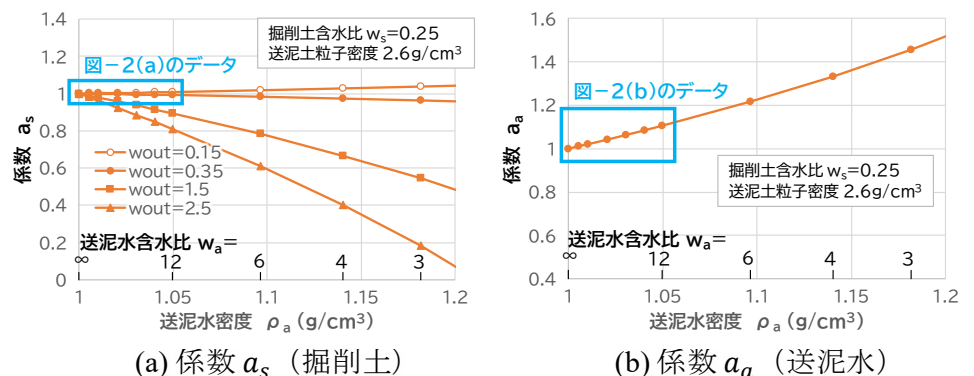


図-3 係数 a_s, a_a の試算例 (泥水式シールドを想定)

a_s の値が著しく低下している。これは、泥水式シールドでは、回収送泥水の乾燥質量が、掘削土の乾燥質量に比べて無視できるほど微少ではないことを示唆する。

(4) 乾燥質量式 (E2')

乾燥質量式では、排土の質量 M_{out} と含水比 w_{out} から求まる排土の乾燥質量 $D_{out} = D_s + \Delta D_s = M_{out}/(1 + w_{out})$ と、理論掘削土の乾燥質量 $D_s = M_s/(1 + w_s) = \rho_t V_s/(1 + w_s)$ の比として、排土率を直接求める。この排土率 $D_{out}/D_s = (D_s + \Delta D_s)/D_s = \{(1 + w_s)/(1 + w_{out})\} \cdot M_{out}/(\rho_t V_s)$ は、前節(3)の含水比表記ガイドライン式(簡易式)での排土率 $(V_s + \Delta V_s)/V_s = [\{(1 + w_s)/(1 + w_{out})\} \cdot M_{out}/\rho_t]/V_s$ と等しい。これは、乾燥質量式が、含水比表記ガイドライン式(簡易式)と同様に「 $D_a - \Delta D_a = 0$ と近似した基礎式③」に基づくためである。乾燥質量式では、添加材の逸脱を考慮していないが、表-1 に示す掘削土乾燥質量 $D_s + \Delta D_s$ の計算式は、添加材の逸脱が考慮された含水比表記ガイドライン式(簡易式)での掘削土体積 $V_s + \Delta V_s$ の計算式と等価(同じ式の変形)であるため、添加材逸脱の影響を受けない。

(5) 従来式 (質量バランス) (E0)

質量バランスに基づく従来式では、添加材の逸脱を考慮せず、チャンバーに加えた添加材質量 M_a が全量回収される(排土質量 M_{out} に含まれる)と仮定する。すなわち、図-1の基礎式①において $\Delta M_a = 0$ としたものを基礎式とする。この方法では、添加材の逸脱時($\Delta M_a > 0$)に掘削土体積 $V_s + \Delta V_s$ が過小に算出され、逆に地下水流入時($\Delta M_a < 0$)に過大に算出される(ガイドライン原式では、これらの不都合が解消された)。

(6) 従来式 (体積バランス) (E0')

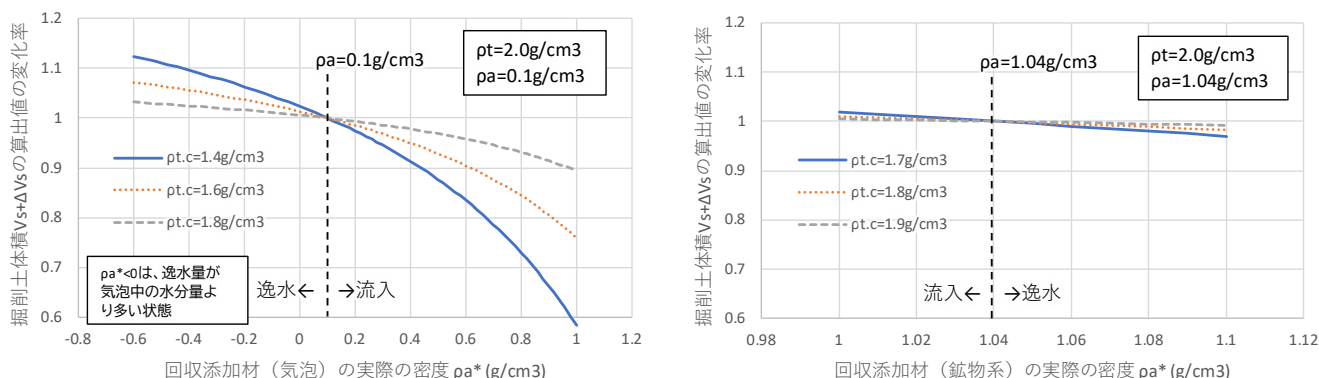
前節での排土質量 M_{out} に代えて、排土体積 V_{out} を直接測定し図-1の基礎式②(ただし $\Delta V_a = 0$)を用いるものである。添加材逸脱や地下水流入の影響は、前節(5)の従来式(質量バランス)と同様である。気泡シールドでは、チャンバーから排出された排土では、減圧による体積膨張とともに消泡による体積収縮が生じるため、たとえ添加材逸脱や地下水流入が生じにくい地盤条件であっても、この式は気泡シールドには適さない。

3. 地下水収支の掘削土量の算出への影響 (補足)

添加材の逸脱を考慮したガイドライン原式、含水比表記ガイドライン式および同簡易式)の基礎式(図-1)では、掘削土からの逸水(負の逸水としての地下水流入を含む)が考慮されていない。このことが各式での掘削土量($V_s + \Delta V_s$ または $D_s + \Delta D_s$)に及ぼす影響を以下に考察する。以下では、ガイドライン式の各式で算出される回収添加材量 $V_a - \Delta V_a$ への逸水の影響については説明を割愛するが、 $V_s + \Delta V_s$ に評価誤差が生じる場合は $V_a - \Delta V_a$ にも誤差が生じる(基礎式②または①により、 $V_s + \Delta V_s$ から $V_a - \Delta V_a$ が一義的に定まるため)。

(1) ガイドライン原式 (E1)

図-1の基礎式②では、回収添加材(体積 $V_a - \Delta V_a$)の密度が、チャンバー注入時の添加材密度 ρ_a と等しいと仮定している。しかしながら、掘削土からの逸水(流入はマイナスで表す)が生じると、添加材と水(密度 $\rho_w = 1.00 \text{ g/cm}^3$)の密度差により、回収添加材の密度が仮定値 ρ_a から変化する可能性がある。回収添加材の実際の



(a) 気泡を想定

(b) 鋳物系添加材を想定

図-4 ガイドライン原式での水の出入りの影響の試算例

密度 ρ_a^* と、仮定値 ρ_a の差が掘削土体積の算出値に及ぼす影響の試算例を図-4に示す。

一例として、 $\rho_a = 0.1 \text{ g/cm}^3$ の気泡 ($\rho_a < \rho_w$) を想定した図-4(a)において、添加材の逸脱がない状態で(正の)逸水が生じた場合、排土中の水分量は減少するが空気量は不変のため、実際の密度 ρ_a^* は添加時の値 $\rho_a = 0.1 \text{ g/cm}^3$ よりも小さくなる。すると、実際の密度 ρ_a^* での実際の掘削土体積 $V_s + \Delta V_s$ は、 $\rho_a = 0.1 \text{ g/cm}^3$ を用いて算出した値より大きくなる。このことは、気泡シールドにおいて、正の逸水によって掘削土量が実施より少なく算出される可能性を示唆する(地下水流入時はその逆)。ただし、現実には、逸水時には気泡の逸脱も同時に生じる可能性が高いため、その状態に対応しているガイドライン原式の従来式に対する優位性が損なわれるとは考えにくい。一方、 $\rho_a = 1.04 \text{ g/cm}^3$ の鉱物系添加材 ($\rho_a > \rho_w$) を想定した図-4(b)では、添加材の逸脱がない条件で逸水すると、排土中の水分量が減少し、鉱物量が不変のため $\rho_a^* > \rho_a$ となる(地下水流入時はその逆)。しかしながら、鉱物系添加材での回収添加材密度の仮定値 ρ_a は、気泡に比べて、水の密度 ρ_w に比較的近いことから、逸水による $V_s + \Delta V_s$ の変化は小さく(図-4(b))、影響を無視できる。

(2) 含水比表記ガイドライン式(E2)

含水比表記ガイドライン式でも、水(含水比 $w_w = \infty$)の逸脱によって、「回収添加材」の含水比の実際の値 w_a^* が、式での仮定値 w_a (チャンバー注入時の値)よりも小さな値となり、これによって掘削土体積の算出誤差が発生する可能性がある。しかしながら、2.(2)で述べたように、密度と含水比の間に一義的な関係がある飽和条件では、ガイドライン原式と含水比表記ガイドライン式は等価であり、掘削土体積の算出値が一致する。したがって、飽和状態とみなせる鉱物系添加材においては、前節(1)のガイドライン原式(図-4(b))と同様に、含水比表記ガイドライン式での、逸水による掘削土体積の算出誤差を考慮する必要性は低いと考えられる。このことは、含水比表記ガイドライン式の実用的な近似式である次節(3)の簡易式が、次節で述べるように掘削土体積 $V_s + \Delta V_s$ が逸水の影響を受けないことと整合する。一方、気泡や高分子系添加材など、鉱物系以外の添加材では、添加材含水比 w_a が、鉱物系添加材よりさらに高い(水での $w_w = \infty$ に近づく)ため、逸水による掘削土体積の算出誤差は、さらに軽微となる。

(3) 含水比表記ガイドライン式(簡易式)(E2')

含水比表記ガイドライン式(簡易式)では、添加材は水、すなわち $w_a^* = w_a = w_w = \infty$ と仮定しており、添加材含水比 w_a を計算に用いない。その上で、図-1に示すように逸水、流入地下水量とは独立である土の乾燥質量が排土と掘削土で等しいとする乾燥質量バランス(基礎式③で $D_a - \Delta D_a = 0$)に基づいている。このため、逸水および地下水流入は掘削土体積 $V_s + \Delta V_s$ の算出式に影響しない。

(4) 乾燥質量式(E2'')

乾燥質量式は、乾燥質量バランス(基礎式③で $D_a - \Delta D_a = 0$)だけを用いているため、逸水および地下水流入は掘削土体積 $V_s + \Delta V_s$ に影響しない。

(5) 従来式(質量バランス)(E0)

従来式(質量バランス)では、質量バランス(基礎式①で $\Delta M_a = 0$)だけを用いている。逸水があると、その質量分だけ、過剰掘削土質量 $\Delta M_s (= \rho_t \Delta V_s)$ が過少評価され、 $V_s + \Delta V_s$ も過少となる(地下水流入はこの逆)。

(6) 従来式(体積バランス)(E0')

従来式(体積バランス)では、体積バランス(基礎式②で $\Delta V_a = 0$)だけを用いている。逸水があると、その体積分だけ、過剰掘削土体積 ΔV_s が過少評価され、 $V_s + \Delta V_s$ も過少となる(地下水流入はこの逆)。

4. 現場試行

(1) 工事概要

NEXCO 東日本が建設中の横浜環状南線公田笠間トンネルは、片道約 1.7km を直径約 15m の気泡シールドで往復施工する併設トンネルである。掘進地層は、往路発進直後・復路到達直前の軟弱な沖積層(粘性土・有機質土)区間を除いて、ほぼ全線で新第三紀鮮新世から第四紀前期更新世の上総層群泥岩である(図-5)。トンネル直上部は閑静な住宅街や主要幹線道路となっており、地表面への変位影響を抑制するために、チャンバー圧

の適切な管理とともに、掘削土量の正確な把握が必要とされる工事である。添加材は、気泡、起泡溶液および水の併用である。

(2) 検討背景

当トンネルの往路掘進（下り線）において、従来式（質量バランス）による管理と並んで、ガイドライン原式を試行したところ、

泥岩区間での排土率が著しく低下する傾向が見られた⁴⁾。これは、泥岩由来の粘性に起因して、チャンバー内での土圧係数 K が1より小さくなり、 $K = 1$ を想定して土圧分布から求めたチャンバー内の排土の密度 $\rho_{t.c}$ が、実際の値よりもかなり低かったためと推察された⁴⁾。

(3) 試行内容

前節の背景から、復路（上り線）において、(a)ガイドライン原式でのチャンバー内で直接測定した $\rho_{t.c}$ の適用と、(b)排土含水比 w_{out} を用いた含水比表記ガイドライン式（簡易式）の適用を試行した。このため、復路の掘進開始に先立って、回転立坑内において、シールド機のカッタースポークに、散乱型 RI 密度計と散乱型 RI 水分計を装着した。装着位置はカッタースポークの背面であり（図-6）、カッターとともに周回しながら、チャンバー内の排土の密度 $\rho_{t.c}$ および単位体積当たりの水の質量 ρ_m を測定する。含水比は $w_{out} = \rho_m / (\rho_{t.c} - \rho_m)$ と求まる。

本報では、表-2 に示す 4 通りの方法で排土率などを算出した結果（本報の執筆時点で施工中のため、497 リングまで）を報告する。ガイドライン原式では、排土の密度 $\rho_{t.c}$ として、土圧分布から評価した値とカッタースポークで測定した値の 2 通りを試行した。排土質量 M_{out} は、シールド機後方の排土ベルトコンベヤーの重量計（ベルトスケール）の値をすべての式で共通に用いた。

(4) 入力データ

a) 質量または体積

図-7(a)に、排土質量 M_{out} （測定値）、計算掘削土質量 M_s および「 M_s と添加材質量 $M_a = \rho_a V_a$ の合計である計算排土質量」を重ねて示す。 M_a は気泡、起泡溶液および水（加水）の合計であり、その体積 V_a の内訳を、図-7(b)に示す。ただし、気泡は空気と起泡溶液に分け、後者を無発泡添加した起泡溶液と合算表示した。

b) 密度

図-7(c)に、ボーリングに基づく掘削土密度 ρ_t 、排土密度 $\rho_{t.c}$ の理論値（ V_s, ρ_t, V_a, ρ_a から計算）とともに、ガイドライン原式の計算に用いた排土密度 $\rho_{t.c}$ の測定値（土圧分布による値、およびカッタースポークでの測定値の全周平均値）を示す。 $\rho_{t.c}$ の后者は、RI 密度計・水分計の本運用を開始した 133R 以降のみ示す。自立性・難透水性の泥岩での掘進のため、取込みの過不足、添加材逸脱、逸水などが比較的起こりにくく、 $\rho_{t.c}$ の実際の値は、理論値に近いと想定された。土圧分布による $\rho_{t.c}$ は、往路（下り線）⁴⁾と同様に、理論値より総じて

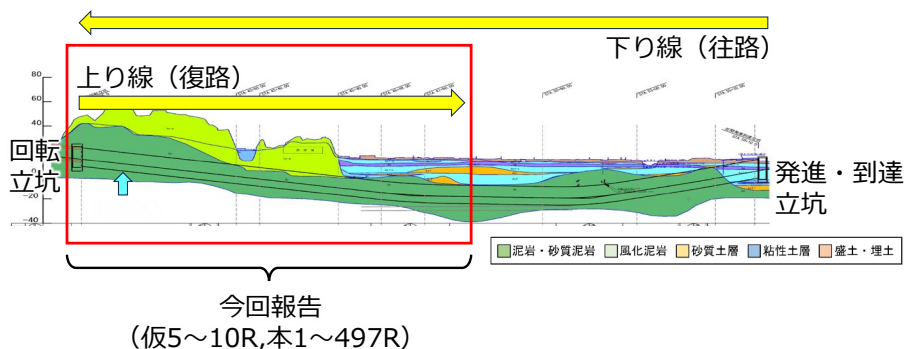


図-5 地質断面図（公田笠間トンネル）

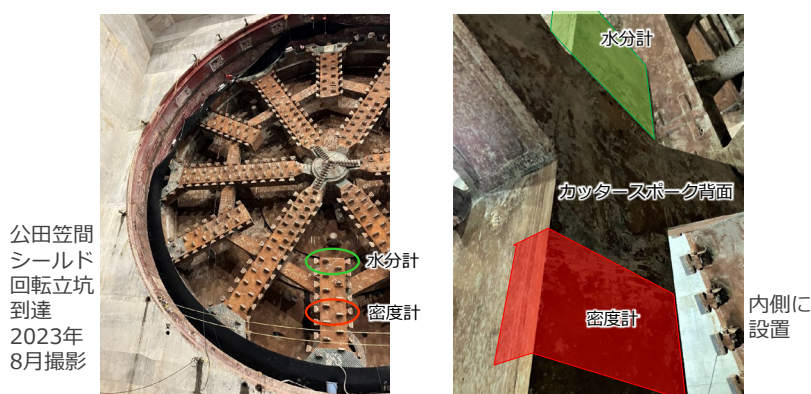


図-6 RI 密度計・水分計装着部位（公田笠間トンネル上り線）

表-2 試行ケース

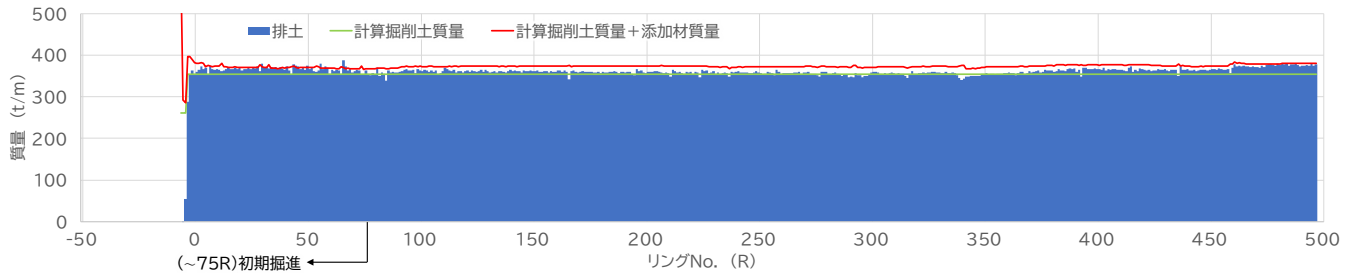
試算ケース	排土の測定項目(方法)
(E0) 従来式(質量バランス)	M_{out} (ベルトスケール)
(E1) ガイドライン(GL)原式 (1)	M_{out} (ベルトスケール)、 $\rho_{t.c}$ (土圧分布)
(E1) ガイドライン(GL)原式 (2)	M_{out} (ベルトスケール)、 $\rho_{t.c}$ (RI密度計)
(E2') 含水比表記GL式(簡易式)	M_{out} (ベルトスケール)、 w_{out} (RI密度計・水分計)

低いうえに変動が大きい、カッタースポークでの $\rho_{t.c}$ は、理論値と概ね一致している。

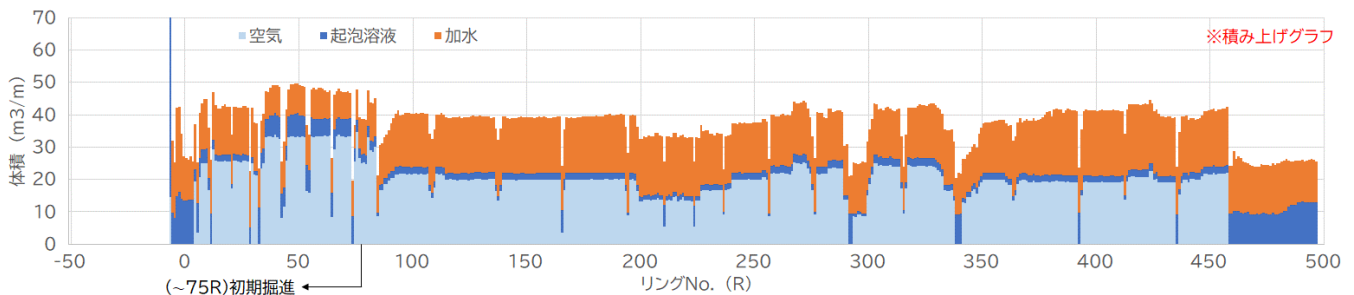
c) 含水比

図-7(d)に、ボーリングに基づく掘削土含水比 w_s 、排土含水比 w_{out} の理論値 ($V_s, \rho_t, w_s, V_a, \rho_a, w_a$ から計算) とともに、含水比表記ガイドライン式の計算に用いたカッタースポークでの排土含水比 w_{out} (全周平均値) を示す (図-7(c)と同様に 133R 以降のみ示す)。図-7(c)の密度 $\rho_{t.c}$ と同様に、カッタースポークでの w_{out} は、想定通り理論値と概ね一致した。

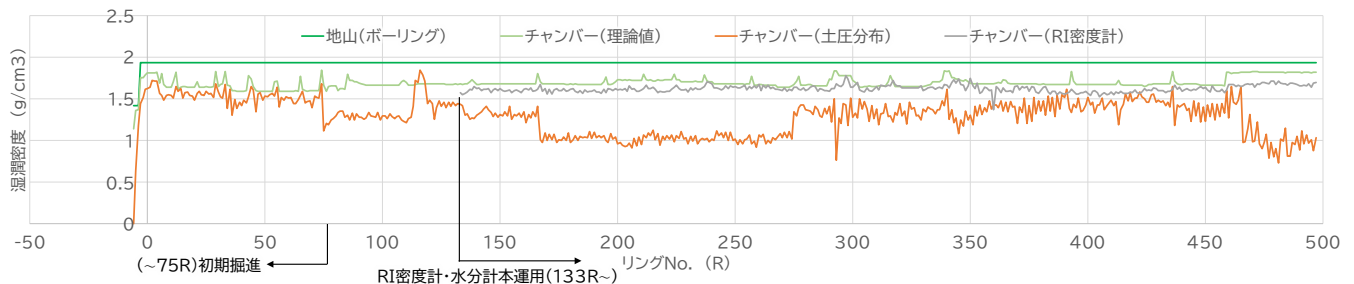
(a) 排土質量(掘進1m当り)



(b) 添加材体積(掘進1m当り)



(c) 密度



(d) 含水比

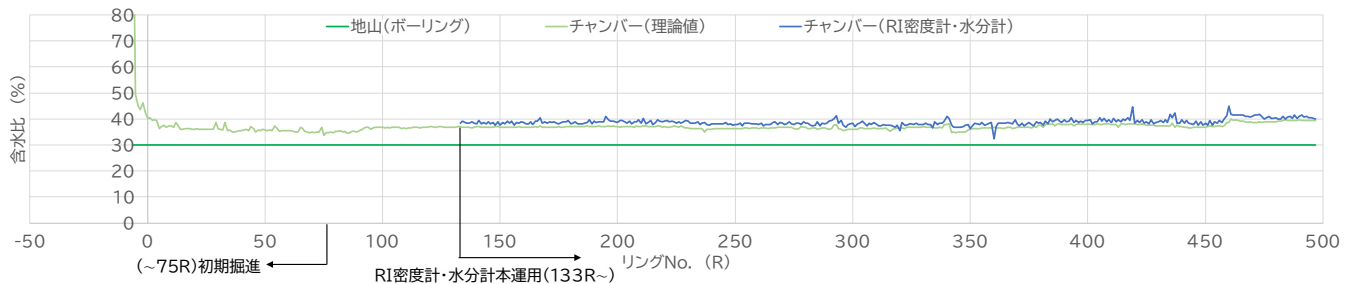


図-7 入力データ (公田笠間トンネル上り線 仮 5~10R・本 1~497R、計 503R)

(5) 計算結果

a) 排土率

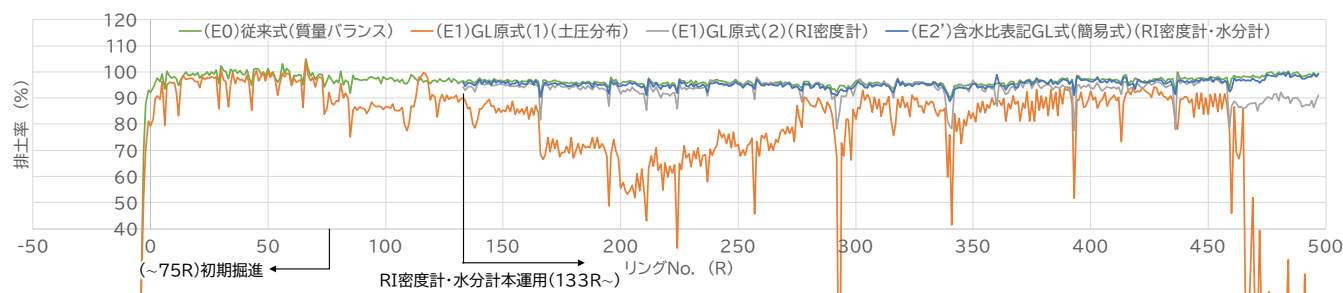
表-2 の各ケースでの排土率 $(V_s + \Delta V_s)/V_s$ の計算結果を図-8(a)に示す。泥岩は難透水性であり、添加材の逸脱や水の出入りが生じにくいと想定され、トンネル直上の地表鉛直変位も管理基準値 ($\pm 25\text{mm}$) 内であったことから、一貫して 100%前後で推移している従来式 (質量バランス) の排土率は、信頼性が高いと考えられる。これに比べて、ガイドライン原式では、土圧分布による $\rho_{t.c}$ を用いた排土率は総じて値が低いうえに変動が大きく、信頼性が低いと判断できるが、カッタースポークでの $\rho_{t.c}$ を用いた排土率では改善した。カッタースポ

ークで測定した w_{out} を用いた含水比表記ガイドライン式の排土率は、さらに改善し、従来式（質量バランス）とほとんど一致している。

b) 添加材回収率

回収添加材体積と計算添加材体積の比で表した添加材回収率 $(V_a - \Delta V_a)/V_a$ の各ケースでの計算結果を図-8(b)に示す。ただし、逸脱添加材体積 ΔV_a が求まらない従来式（質量バランス）は除いた。泥岩は難透水性のため、実際の添加材回収率は100%付近で推移したと考えられる。したがって、ガイドライン原式では土圧分布による $\rho_{t,c}$ より、カッタースポークでの $\rho_{t,c}$ を用いたほうが信頼性の高い添加材回収率が得られ、カッタースポークでの w_{out} を用いた含水比表記ガイドライン式ではさらに改善したと考えられる。

(a) 排土率



(b) 添加材回収率

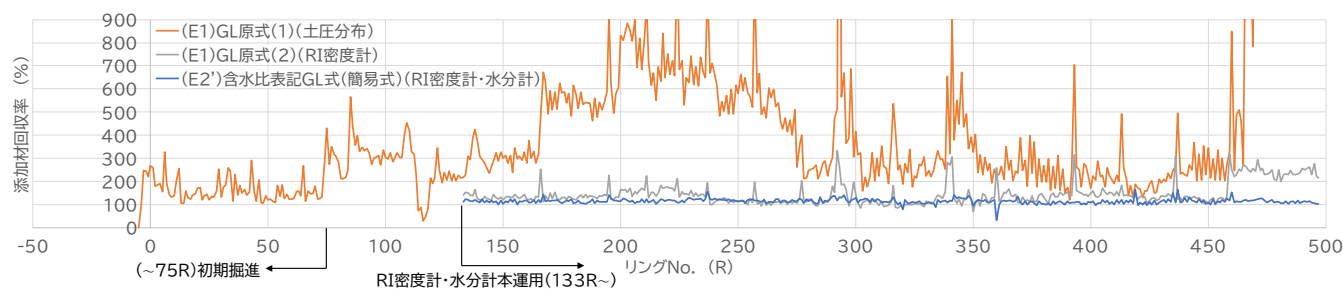


図-8 計算結果（公田笠間トンネル上り線 仮5～10R・本1～497R、計503R）

5. おわりに

排土の密度 $\rho_{t,c}$ を用いるガイドライン原式と排土の含水比 w_{out} を用いる含水比表記ガイドライン式（簡易式）は、添加材の逸脱が想定される泥土圧シールドでの掘削土量の算出精度の維持・向上に資するものである。2つの式は機能的にはほぼ同等であり、現場での $\rho_{t,c}$ や w_{out} の取得上の制約などに応じて使い分けることができる。 $\rho_{t,c}$ と w_{out} の取得において、本報で紹介したチャンバー内での直接測定は有力な手段である。2つの式は、掘削土量だけでなく回収添加材量を算出できるため、添加材配合の妥当性検証などの用途も想定される。すべての掘削土量推定式に共通して、掘削土の密度 ρ_t の精度確保が残された課題である。

謝辞：本検討では、シールドトンネル施工技術検討会 龍岡文夫委員長（東京大学名誉教授・東京理科大学名誉教授）およびNEXCO 東日本 横浜工事事務所のご指導・ご支援を受けた。末筆ながら深く謝意を表する。

参考文献

- 1) シールドトンネル施工技術検討会：シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン、pp.21-23, 38-41、令和3（2021）年12月。
- 2) 吉田輝, 吉迫和生, 中川雅由, 龍岡文夫：添加材逸脱を考慮した乾燥質量に基づく掘削土量の推定、第60回地盤工学研究発表会、22-6-3-04、2025年7月。
- 3) 吉迫和生, 吉田輝, 中川雅由, 龍岡文夫：掘削土量の各種推定式の比較検討、第60回地盤工学研究発表会、22-6-3-05、2025年7月。
- 4) 横浜環状南線 都市型トンネル施工技術検討会：第8回検討会 <公田笠間トンネル>、資料2、p.12、令和4（2022）年8月2日。