

添加材の逸脱を考慮した泥土圧シールドの排土量計算の粘性土・堆積軟岩地盤への適用
—その1：計算方法—

鹿島建設(株) 正会員 ○吉田 輝 中川雅由

東京大学・東京理科大学名誉教授 フェロー会員 龍岡文夫

1. はじめに

シールドトンネル施工技術検討会ガイドライン¹⁾に掲載されている「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、原 GL (ガイドライン) 式と記す) は、泥土圧シールド (特に気泡シールド) における排土量管理の信頼性確保の目的で現在、広く採用されている。今回、原 GL 式を、粘性土および堆積軟岩層 (主に泥岩層) を主な掘進地盤とする直径約 15m の泥土圧 (気泡) シールド工事に試適用した。原 GL 式において、「チャンバー内の泥土の密度 $\rho_{t,c}$ 」は「チャンバー内土圧分布等から求めた値」とされているが、側圧係数 $K=1.0$ と仮定してチャンバー内土圧分布から推定した $\rho_{t,c}$ を用いたところ、堆積軟岩において排土率が著しく過小に算出された。現状では、 $\rho_{t,c}$ の迅速な評価手段として、他に有力な手段が確立されていないことから、原 GL 式の適用においてチャンバー内土圧分布から $\rho_{t,c}$ を適切に評価することが困難な場合を対象に、チャンバー内の泥土の含水比 (チャンバー含水比) w_c も用いることで排土率等の算出精度の低下を抑制する方法 (詳細化 GL 式) を検討した。

2. 排土の構成

図-1に排土の構成を模式的に示す。①：排土、①'：設計地山掘削土、②：添加材および②'：逸脱添加材の定義は原 GL 式の原典¹⁾に従う。原 GL 式では、①'の算出精度を高めるために②'が新たに考慮され、排土質量 M_{out} とチャンバー内の泥土の密度 $\rho_{t.c}$ の2つを入力値として、未知量である①'と②'を同定する。詳細化 GL 式では、 $\rho_{t.c}$ の適切な評価が困難な場合を対象に、3つ目の入力値としてチャンバー含水比 w_c を導入した。 w_c は測定の迅速性が M_{out} や「チャンバー内土圧分布から求めた $\rho_{t.c}$ 」より劣るが、1リング毎の排土量管理には十分に適用可能と考えられる。入力値の追加 (w_c) に伴い未知量を1つ追加可能なため③'：逸水を考慮し、当工事で実施している③：加水を併せて考慮する。③'は「取込み土 (①および①') が地山状態で保有する間隙水の逸水」、「加水した水 (③) の逸水」、「周辺からの地下水流入」の合計であり、マイナスの値は流入を表す。逸脱添加材に含まれる水は②'と重複しないように③'に含めない。排土質量および排土含水比は、①での M_{out} および w_c に④：改質剤 (噴発防止用の増粘剤) が加わった状態 (①*) での $M_{out.b}$ および $w_{out.b}$ を測定しているが、①の M_{out} および $\rho_{t.c}$ を「測定値、既知量」としている原 GL 式の原典¹⁾に倣い、3章では、①での M_{out} 、 $\rho_{t.c}$ および w_c を既知量として基礎式 (式(1)～(3)) を記述し、①'、②'および③'の計算式 (式(4)) を導く。

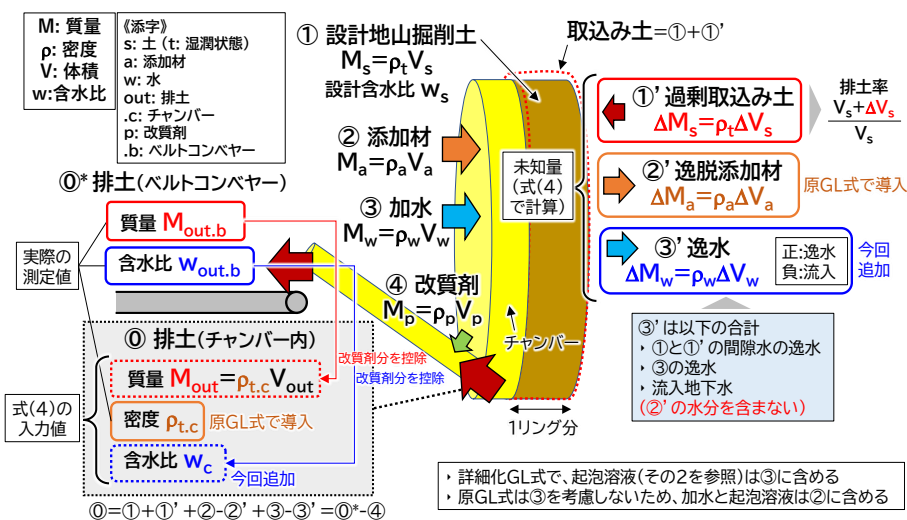


図-1 排土の構成（詳細化 GL 式）

キーワード 泥土圧シールド、気泡シールド、排土量管理、添加材、排土率、堆積軟岩

連絡先 〒107-8477 東京都港区元赤坂 1-3-8 鹿島建設(株)土木管理本部 TEL 03-5544-1111

3. 詳細化 GL 式

図-1 を参照して、式(1)、(2)の質量収支および体積収支、さらに式(3)の水の質量収支を考慮する。

$$M_{out} = M_s + \Delta M_s + M_a - \Delta M_a + M_w - \Delta M_w \quad (1)$$

$$V_{out} = V_s + \Delta V_s + V_a - \Delta V_a + V_w - \Delta V_w \quad \text{すなわち} \quad \frac{M_{out}}{\rho_{t.c}} = \frac{M_s + \Delta M_s}{\rho_t} + \frac{M_a - \Delta M_a}{\rho_a} + \frac{M_w - \Delta M_w}{\rho_w} \quad (2)$$

$$M_{out} \cdot \frac{w_c}{1 + w_c} = (M_s + \Delta M_s) \frac{w_s}{1 + w_s} + (M_a - \Delta M_a) \frac{w_a}{1 + w_a} + M_w - \Delta M_w \quad (3)$$

式(1)、(2)は、原 GL 式¹⁾における質量収支式および体積収支式において水（図-1 の③、③'）の項を追加している。式(3)は原 GL 式に追加した式であり、式(1)の水分に着目したものである。含水比 w は非百分率表示（小数）とする。水の密度を ρ_w とし、 $A = 1 - \frac{\rho_w}{\rho_t}$, $B = 1 - \frac{\rho_w}{\rho_a}$, $C = \frac{1}{1 + w_s}$, $D = \frac{1}{1 + w_a}$, $E = 1 - \frac{\rho_w}{\rho_{t.c}}$, $F = \frac{1}{1 + w_c}$ と置くと、式(1)～(3)から式(4)が導かれ ΔM_s 、 ΔM_a および ΔM_w が得られる。

$$\Delta M_s = \frac{DE - BF}{AD - BC} M_{out} - M_s, \quad \Delta M_a = \frac{CE - AF}{AD - BC} M_{out} + M_a, \quad \Delta M_w = M_s + \Delta M_s + M_a - \Delta M_a + M_w - M_{out} \quad (4)$$

添加材が気泡材や起泡溶液（その 2 を参照）など、 $w_a = \infty$ とみなせる場合（鉱物系添加材は該当しない）は $D=0$ となり、式(4)の ΔM_s と ΔM_a を式(5)のように簡略化できる。

$$\Delta M_s = \frac{F}{C} M_{out} - M_s = \frac{1 + w_s}{1 + w_c} M_{out} - M_s, \quad \Delta M_a = \frac{AF - CE}{BC} M_{out} + M_a \quad (5)$$

式(5)の ΔM_s から、添加材が気泡材や起泡溶液の場合の排土率は式(6)で算出できる。

$$VR = \frac{V_s + \Delta V_s}{V_s} = \frac{\rho_t M_s + \rho_t \Delta M_s}{\rho_t M_s} = \frac{M_s + \Delta M_s}{M_s} = \frac{M_s + \left(\frac{1 + w_s}{1 + w_c} M_{out} - M_s \right)}{M_s} = \frac{1 + w_s}{1 + w_c} \cdot \frac{M_{out}}{M_s} \quad (6)$$

式(6)の排土率は、質量 M_{out} の排土の乾燥質量（内部の土粒子の質量） $M_{out.d} = M_{out} / (1 + w_c)$ と、質量 M_s の設計地山掘削土の乾燥質量 $M_d = M_s / (1 + w_s)$ の比（ $M_{out.d} / M_d$ ）を表し、泥水式シールドの乾砂量（体積）の概念に基づく式(7)の排土率 VR_d に一致する。ここに、添字 d は乾燥状態の意で、 $V_{out.d}$ 、 V_d はそれぞれ体積 V_{out} （チャンパー内での体積）の排土、および体積 V_s の地山の、内部の土粒子の体積を表す。 ρ_s は土粒子の密度である。

$$VR_d = \frac{V_{out.d}}{V_d} = \frac{M_{out.d} / \rho_s}{M_d / \rho_s} = \frac{M_{out.d}}{M_d} \quad (7)$$

以上の計算における主な入力値（測定値）は排土質量 M_{out} 、チャンパー内密度 $\rho_{t.c}$ およびチャンパー内含水比 w_c の 3 つであるが、排土率 VR の計算式(6)は、 $\rho_{t.c}$ を用いないので、 $\rho_{t.c}$ をチャンパー内土圧分布から十分な精度で推定することが困難な場合にも適用できる。なお、 M_{out} および w_c は、排土ベルトコンベヤーにおいて測定された $M_{out.b}$ および $w_{out.b}$ から、それぞれ式(8)、(9)により改質剤分を控除して得られる。

$$M_{out} = M_{out.b} - M_p = M_{out.b} - \rho_p V_p \quad (8)$$

$$w_c = \left(M_{out.b} \cdot \frac{w_{out.b}}{1 + w_{out.b}} - M_p \frac{w_p}{1 + w_p} \right) / \left(M_{out.b} \cdot \frac{1}{1 + w_{out.b}} - M_p \frac{1}{1 + w_p} \right) \quad (9)$$

ただし、一般に M_p は M_s に比べて微量であり、通常は $M_{out.b} = M_{out}$ 、 $w_{out.b} = w_c$ としても差支えないと考えられる。

4. まとめ

詳細化 GL 式は、原 GL 式の適用においてチャンパー密度 $\rho_{t.c}$ の適切な評価が困難な場合に、チャンパー含水比 w_c を追加して用いることで、 $\rho_{t.c}$ の不確かさの影響を軽減することを主眼としている。添加材が気泡材の場合、詳細化 GL 式に基づく排土率は、 $\rho_{t.c}$ を用いないで求めることができる。この排土率は乾砂量（体積）に基づく排土率と一致し、式(6)で算出される。排土質量 M_{out} および $\rho_{t.c}$ を入力値として過剰取込み土量 ΔM_s および逸脱添加材量 ΔM_a を同定する原 GL 式に対し、詳細化 GL 式では入力値に w_c を追加したことで、さらに逸水量 ΔM_w が同定可能となった。原 GL 式は水の出入りが無い条件（ $\Delta M_w = 0$ ）で ΔM_s と ΔM_a を算出するため、この条件が現実には成立しない場合、 ΔM_s と ΔM_a に誤差が生じるが、詳細化 GL 式ではこの問題が解消される。

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、令和 3（2021）年 12 月。