

現場計測データを用いた テールボイド厚さ分布の算定手法

Calculation method on tail void thickness distribution by using in-situ data

陳劍¹・松本貴士²・杉本光隆³

Chen Jian, Atsushi Matsumoto and Mitsutaka Sugimoto

¹工修 長岡技術科学大学 環境・建設系博士課程 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

²学生会員 工修 長岡技術科学大学 環境・建設系博士課程 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

³正会員 工博 長岡技術科学大学環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

E-mail:sugimo@vos.nagaokaut.ac.jp

To establish a more precise inspection method on backfill grouting thickness distribution especially at a sharp curve, the calculation method on tail void thickness distribution was developed, based on the examination on the characteristics of in-situ measured data concerning with tail void. Furthermore, its performance was validated by applying this method to the in-situ data. As a result, the followings were made clear: 1) even if copy cutter range is same, overcutting area and tail void thickness distribution depend on the cutter face rotation direction and its speed; 2) tail void distribution can be calculated by using deviation from cutter face center to segment center.

Key Words : shield tunnelling, back fill grouting, tail void thickness distribution, sharp curve, in-situ data

1. はじめに

一般に曲線半径 50m 程度以下のシールドトンネルの急曲線部では、鋼製セグメントが用いられる。鋼製セグメントを用いて構築されたトンネル覆工は、トンネル内側から、防水、防食、防錆等を目的にした二次覆工、鋼製セグメント、裏込め注入層から構成される。こうした急曲線区間で、シールドトンネルの長期耐久性を確保するためには、鋼製セグメントのスキンプレーットの腐食に対する保証が必要になる。これに対し、二次覆工の品質は竣工検査で、鋼製セグメントの品質は施工中の施工管理で直接確認できるが、裏込め注入層は鋼製セグメント構築後にその背面に施工され、直接目視できないので、裏込め注入層の検査確認方法がないのが現状である。

裏込め注入は、通常、注入量と注入圧で管理されている^{1,2)}が、裏込め注入はテールボイドに充填され、最終的な裏込め注入層の厚さは、有効な裏込め注入率

とテールボイドの厚さによって規定されることから、図-1に示すように、急曲線部で、セグメントが掘削断面の中心から偏心する場合には、裏込め注入層の厚さは一様とならず、裏込め注入層の一部が薄くなり、長期耐久性に影響を与える可能性がある。このような状況を踏まえ、本研究では、特に急曲線部に

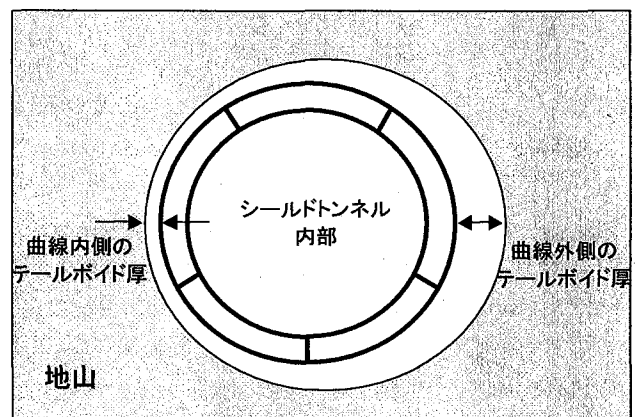
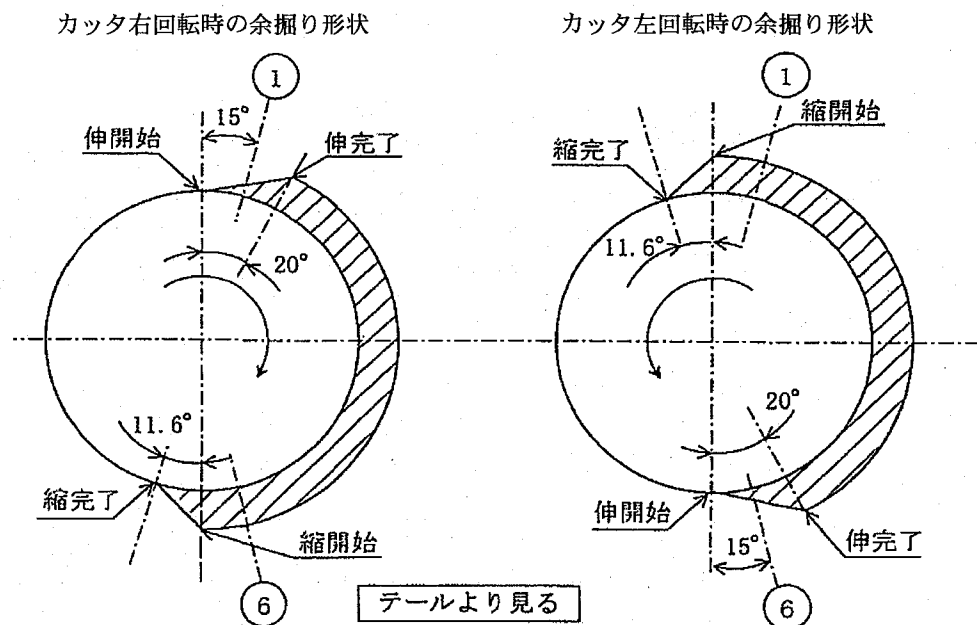


図-1 急曲線部のテールボイド厚さ



※ 押ボタンと伸・縮開始の位置は①伸～⑥縮の場合、⑫①の中間点から伸開始、⑥⑦の中間点から縮開始となる。

図-2 コピーカッターの掘削範囲の定義

おける裏込め注入層の検査確認方法の一つとして、裏込め注入層の厚さ分布を推定する方法を確立することを目的として、急曲線部のテールボイド厚さ分布を算定する手法を開発するとともに、その手法を現場計測データに適用して、同手法の合理性を検討した。

2. 現場計測データの特徴

テールボイド厚さ分布の算定手法を検討するにあたり、これらに関連する現場計測データの特徴について述べる。

(1) 余掘り量

余掘り量は、カッターフェイスによる全周余掘り量とコピーカッターによる余掘り量の大きい方の値となる。ここで、「カッターフェイスによる全周余掘り量」は、カッターフェイス外周ビットによる掘削半径からシールド半径を引いた値で、通常 5-10mm 程度である。一方、「コピーカッターによる余掘り量」は、コピーカッターの長さで与えられる。コピーカッターの長さは、シールド半径を 0 として表示されるので、コピーカッターの長さが 0 であっても、通常必ず余掘りが行われている。

(2) コピーカッターの挙動

コピーカッターによる掘削範囲の定義を図-2 に示す。この図から以下のことがわかる。

- ①コピーカッターによる掘削範囲は、通常、任意に選択できるのではなく、ある一定間隔でしか選択できない。
- ②コピーカッターによる掘削範囲は、カッターフェイスの回転方向によって異なる。
- ③コピーカッターの伸縮は油量制御なので、無負荷時の伸縮速度で規定されていることが多い。また、油圧シリンダーの断面積の違いや、負荷の違いにより、伸張速度より収縮速度の方が速い。コピーカッターの伸縮は伸縮速度によって規定されていることから、コピーカッターによる掘削範囲はカッターフェイスの回転速度に依存する。
- ④さらに、コピーカッターによる掘削範囲の土砂は取り残しがあること、掘削面から余掘り範囲に土砂の剥落があることから、コピーカッターによる掘削範囲は 100%有効とはならない。

(3) シールド位置の測量

シールド位置は、自動追尾型トータルステーションを積載し、連続的に計測するのが理想であるが、通常、片番に 1 回、掘進終了直後に、手動測量で計測されることが多い。シールドが停止している時には、シールドジャッキ力が変化していることから、

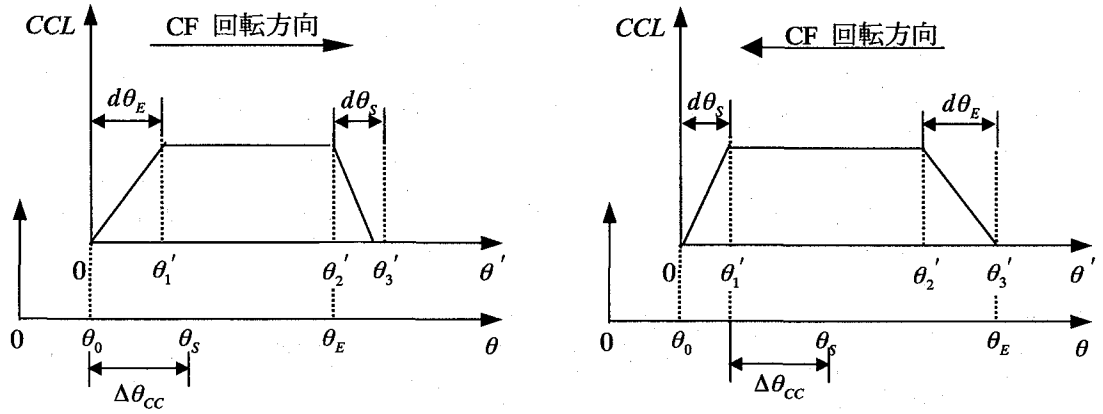


図-3 コピーカッターの長さの周方向分布

停止時と掘進中のシールド位置は異なる可能性がある。特に、掘削面による幾何学的拘束が緩い直線部や、大きなジャッキモーメントを使用している場合には、その影響が大きくなる。

3. テールボイド厚さ分布の算定手法

(1) コピーカッターの長さ

a) コピーカッターの伸縮範囲

コピーカッターの伸張速度 CCV_E 、コピーカッターの収縮速度 CCV_S に対して、コピーカッターの伸縮範囲 $d\theta_i$ (rad) は、次式で与えられる。

$$d\theta_i = \frac{CCL}{CCV_i} \times 2\pi f \quad (i = E, S) \quad (1)$$

ここで、

CCV_i : コピーカッターの伸張/収縮速度(m/min)

CCL : コピーカッターの長さ(m)

f : カッターフェイスの回転速度(rpm)

である。

b) コピーカッターの長さの周方向分布

「2. 現場計測データの特徴」を考慮すると、コピーカッターの長さの周方向分布は図-3 のように表される。ここで、

θ : コピーカッターの位置 (0: インポート, +: テールより見て時計回り)

$\Delta\theta_{cc}$: コピーカッター位置の指定間隔

θ_0 : コピーカッターの使用開始角度 (テールより見て時計回り)

θ_s : コピーカッターの使用開始指定角度 (テールより見て時計回り)

θ_E : コピーカッターの使用終了指定角度 (テールより見て時計回り)

$d\theta_E$: コピーカッターの伸張範囲

$d\theta_S$: コピーカッターの収縮範囲

θ' : コピーカッターの位置 (0: θ_0 , +: テールより見て時計回り)

である。なお、角度はすべて rad 表示で、テールより見て時計回りを正とする。さらに、図中の θ_0 , θ'_1 , θ'_2 , θ'_3 は以下のように求められる。

①カッターフェイスの回転方向：テールより見て時計回りの場合

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \theta_s - \Delta\theta_{cc} \\ \theta'_1 &= d\theta_E \\ \theta'_2 &= \theta_E - \theta_0 \\ \theta'_3 &= \theta'_2 + d\theta_S \end{aligned} \quad (2)$$

②カッターフェイスの回転方向：テールより見て反時計回りの場合

$$\begin{aligned} \theta_0 &= \theta_s - \Delta\theta_{cc} - d\theta_S \\ \theta'_1 &= d\theta_S \\ \theta'_2 &= (\theta_E - d\theta_E) - \theta_0 \\ \theta'_3 &= \theta'_2 + d\theta_E \end{aligned} \quad (3)$$

c) コピーカッターの長さ

コピーカッターの状態による分類と、その分類に対応するコピーカッターの使用条件を表-1 に示す。ここで、 θ' はコピーカッターのシールド周方向位置である。また、 β_1, β_2 は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{\theta'}{\theta'_1} > 0 \\ \beta_2 &= \frac{\theta' - \theta'_3}{\theta'_2 - \theta'_3} > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

表-1 コピーカッターの状態の分類

ケース	状態	コピーカッターの長さ	コピーカッターの使用条件
0	未使用	0	$\theta_s = \theta_e, CCL = 0, \theta'_3 < \theta'$
1	伸張/収縮	$\beta_1 CCL$	$0 \leq \theta' < \theta'_1$
2	使用	CCL	$\theta_s + 2\pi = \theta_e, \theta'_1 \leq \theta' \leq \theta'_2$
3	収縮/伸張	$\beta_2 CCL$	$\theta'_2 < \theta' \leq \theta'_3$

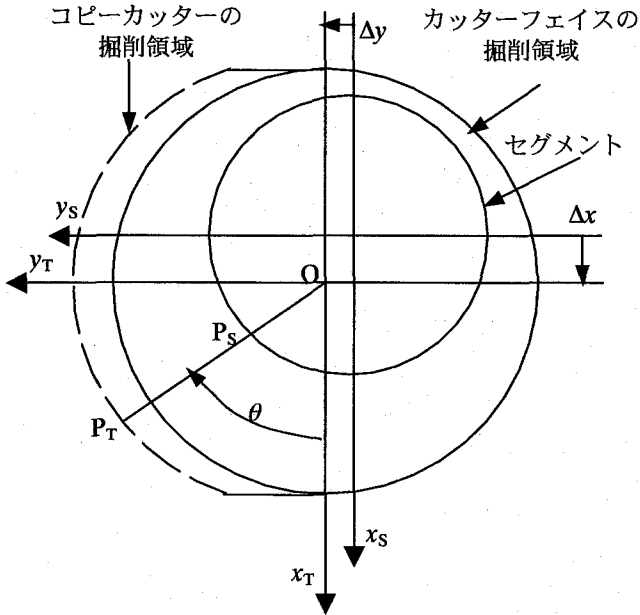


図-4 セグメントと掘削領域の位置関係

上記によって、任意のシールド周方向位置でのコピーカッターの長さを求めることができる。

(2) テールボイドの分布

a) セグメントと掘削領域の位置関係

セグメントと掘削領域の位置関係を図-4 に示す。ここで、以下の2つの座標系を用いている。

① x_T - y_T 座標系

原点をカッターフェイスの掘削領域の中心とする座標系で、 x 軸は鉛直下向きを正とし、 y 軸はテールより見て左側を正とする。

② x_S - y_S 座標系

原点をセグメントの中心とする座標系で、 x 軸は鉛直下向きを正とし、 y 軸はテールより見て左側を正とする。

両座標系の関係は、次式で表される。

$$\begin{aligned} x_T &= x_S - \Delta x \\ y_T &= y_S - \Delta y \end{aligned} \quad (5)$$

b) テールボイドの厚さ

まず、図-4 の P_T 、 P_S を考える。 P_T は掘削領域上の

点で、その位置ベクトル r_{PT} は、 x_T - y_T 座標系表示で以下ようになる。

$$r_{PT} = \begin{bmatrix} x_T \\ y_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_M + CCL) \cos \theta \\ (R_M + CCL) \sin \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

一方、 P_S はセグメント外周面と線分 $\overline{OP_T}$ の交点で、その位置ベクトル r_{PS} は、 x_S - y_S 座標系表示で以下ようになる。

$$r_{PS} = \begin{bmatrix} x_S \\ y_S \end{bmatrix} \quad (7)$$

また、 P_S はセグメント外周面上にあるので、

$$x_S^2 + y_S^2 = R_S^2 \quad (8)$$

となる。ここで、 R_M はシールド半径、 CCL はコピーカッターの長さ、 R_S はセグメント半径である。

次に、位置ベクトル r_{PS} を x_T - y_T 座標系表示で表すこととする。線分 $\overline{OP_T}$ は、次式で表される。

$$\begin{aligned} y_T &= x_T \tan \theta & \text{for } \theta \neq \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \\ x_T &= 0 & \text{for } \theta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

式(5)、(9)を式(8)に代入して解くことにより、2つの r_{PS} が求まる。ここで、 r_{PS} は r_{PT} と同じ側にあることから、以下の条件を満たす r_{PS} が解となる。

$$r_{PT} \cdot r_{PS} \geq 0 \quad (10)$$

したがって、テールボイドの厚さ d は次式で与えられる。

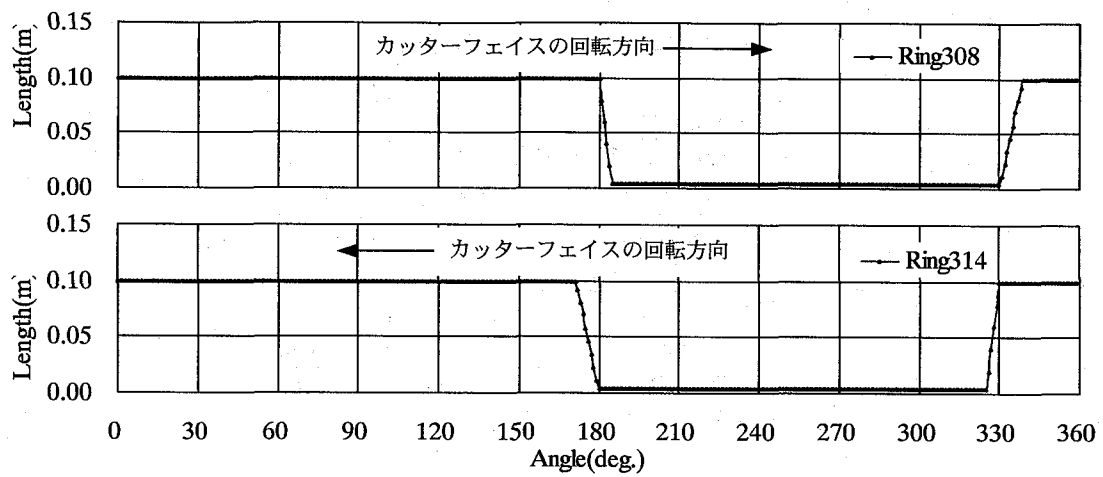
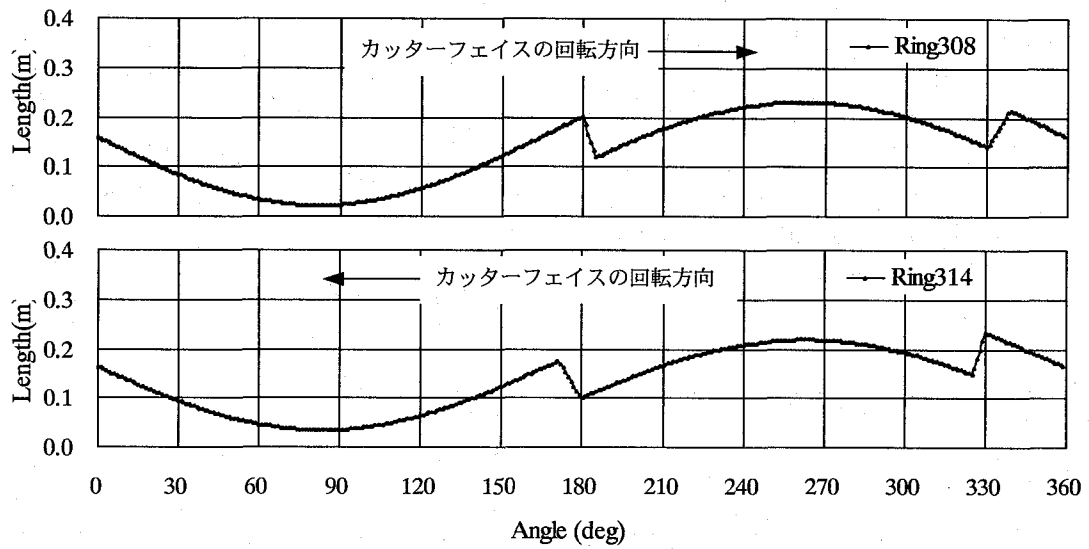
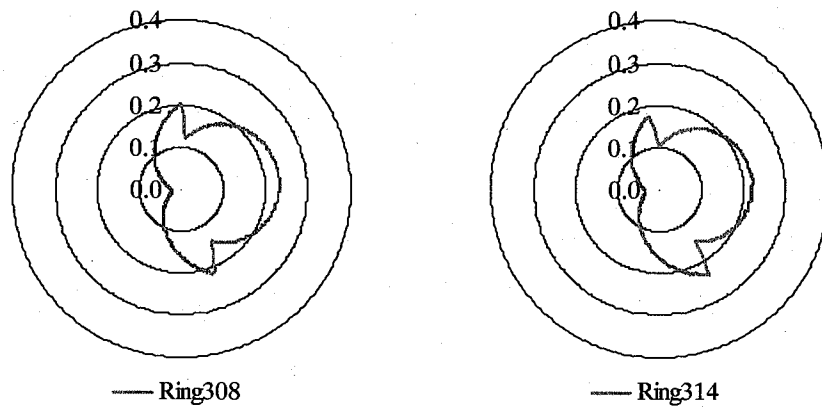


図-5 余掘り量の分布



a) 折れ線表示



b) レーダーチャート

図-6 テールボイド厚さの周方向分布

$$d = |r_{PT} - r_{PS}|$$

$$= \max(R_E, R_M + CCL) - |r_{PS}|$$

ここで、 R_E は掘削半径である。

(11) (3) 解析に必要なデータ

上記の解析を行うために必要なデータは、以下のとおりである。

① シールド施工管理の実測データ：コピーカッター

表-2 コピーカッターの使用状況

項目	Ring308	Ring314
コピーカッターの長さ CCL (m)	0.100	
コピーカッターの使用開始指定角度 θ_s (deg.)	0	
コピーカッターの使用終了指定角度 θ_E (deg.)	180	
カッターフェイス回転方向(テールより見て)	右回転	左回転
カッターフェイス回転速度 f (rpm)	1.4	
コピーカッターの伸張速度 CCV_E (m/min)	5.859	
コピーカッターの収縮速度 CCV_S (m/min)	10.067	
コピーカッター位置の指定間隔 $\Delta\theta_{CC}$ (deg.) *1	30	

*1 角度の指定方法による指定角度の区間

- の長さ、コピーカッターの使用範囲（指定角度）、カッターフェイスの回転方向、および、回転速度
- ②シールド位置の測量結果：カッターフェイスの中心位置の三次元座標
- ③セグメントの出来形：セグメントの切羽側中心の三次元座標（蛇行量）
- ④シールド仕様：コピーカッターの伸張／収縮速度、コピーカッター位置の指定間隔、シールド外径、掘削外径、セグメント外径

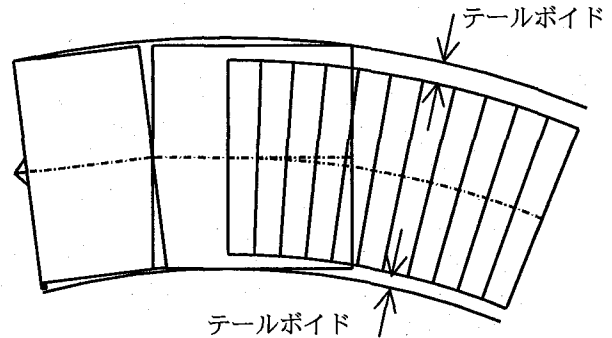


図-7 曲線部でのシールドと掘削領域の位置関係

4. 現場計測データへの適用

(1) 現場概要

本研究で解析に用いた現場は、地下水位 G.L.-1～-3 m の三角州地帯の沖積低地に位置し、土被り約 29.2～31.8m のシールドトンネルであり、その掘削対象地層は、洪積砂質土層（N値 ≥ 50 ）である。本トンネルは、最小曲線半径 R 20 m（左曲線）、上り勾配 0.2%の線形を有し、シールドの掘削外径 3960mm、シールド外径 3950mm、シールド機長 5765mm の中折れ機構をもつ泥水式シールドで掘削され、直線部は RC セグメント（外径 3800 mm）、曲線部は鋼製セグメント（外径 3800 mm）を用いて構築された。

(2) 解析条件

解析にあたっては、以下の仮定を用いた。

- ①セグメントの断面形状は真円である。
- ②コピーカッターの伸張／収縮速度は、それぞれ一定である。
- ③カッターフェイスの外周ビット、および、コピーカッターによる余掘りは、100%有効である。
- ④カッターフェイスの中心位置は、シールド位置の測量結果の座標で表される。

(3) 余掘り量の分布

例として、Ring308、Ring314 の急曲線部における余掘り量の分布を図-5 に示す。また、Ring308、Ring314でのコピーカッター使用状況を表-2に示す。ここで、角度は、インバートを 0 度とし、テールより見て時計回りで表示している。この図より、Ring308 も Ring314 もコピーカッターの使用範囲は同じであるが、Ring308 ではカッターフェイスがテールより見て時計回り、Ring314 ではカッターフェイスがテールより見て反時計回りとなっていること、コピーカッターの使用範囲が同じであっても、カッターフェイスの回転方向により、余掘り量の分布が異なることがわかる。これは、「3. テールボイド厚さ分布の算定手法」で述べたとおりである。

(4) テールボイドの分布

同じ位置でのテールボイドの厚さの周方向分布を図-6 に示す。ここで、角度は、インバートを 0 度とし、テールより見て時計回りに表示している。この図より、以下のことがわかる。

- ①前述したように、コピーカッターの使用範囲が同じであっても、カッターフェイスの回転方向により、余掘り量の分布が異なる。この影響は、テールボイド厚さの分布にも現れている。
- ②曲線内側、左スプリングライン位置（90 度近傍）

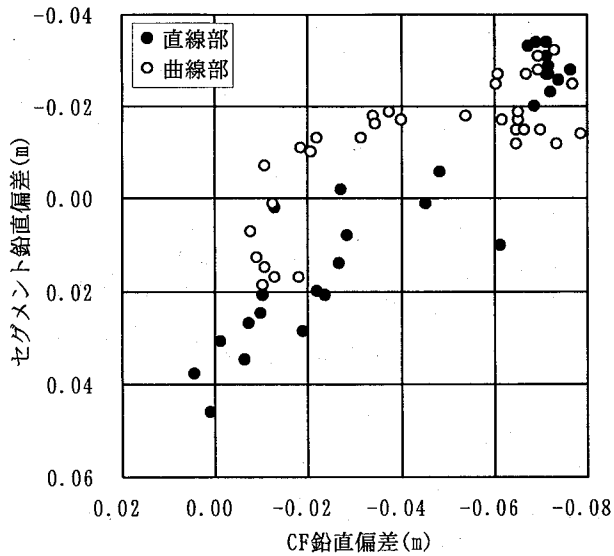


図-8 CF 鉛直偏差とセグメント鉛直偏差の関係

で、テールボイドは最小となり、曲線外側、右スプリングライン位置（270 度近傍）で、テールボイドは最大となる。

- ③左右のテールボイドの合計は、約 26cm である。これらは以下のように考えられる。
- ①カッターフェイスの回転方向の影響は、「3. テールボイド厚さ分布の算定手法」で述べたとおりである。
- ②半径 20m の左曲線部なので、図-7 に示すように曲線内側、左スプリングライン位置で、スキンプレートが地盤に接し、曲線外側、右スプリングライン位置で、スキンプレートと地盤の間に隙間が生じている。これは幾何学的に合理的である。
- ③コピーカッターを 10cm 使用している所である。左右のテールボイドの合計が、シールドの掘削外径とセグメント外径の差 16cm に、コピーカッターの長さ 10cm を加えた約 26cm となるのは、幾何学的に合理的である。

(5) セグメントの偏差、CF の偏差、テールボイドの関係

「セグメント偏差」は、セグメント出来形の測量で得られた、計画線形からのセグメント蛇行量で、「CF 偏差」は、シールド位置の測量で得られた、計画線形からカッターフェイス（CF）の中心位置への偏差で、「CF-セグメント偏差」は、セグメントの切羽側中心を結んで得られる実際のセグメント中心線から、シールド位置測量で得られたカッターフェイスの中心位置への偏差であり、鉛直偏差の正は下向きを、水平偏差の正はテールより見て左向きを意味している。

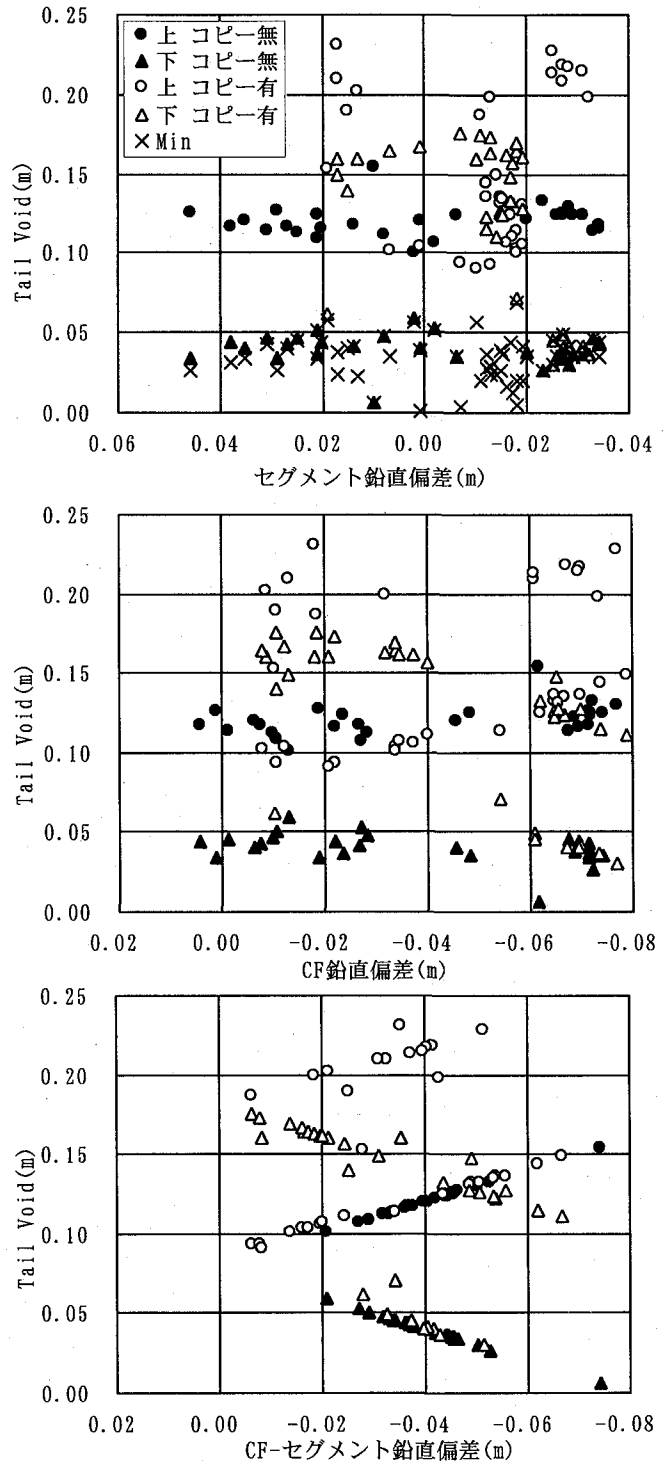


図-9 鉛直偏差とテールボイド厚さの関係

a) 鉛直方向

CF 鉛直偏差とセグメント鉛直偏差の関係を図-8 に示す。この図より、以下のことがわかる。

- ①CF 鉛直偏差とセグメント鉛直偏差は、正の相関がある。
- ②セグメント中心は、CF 中心より、約 4cm 下にシフトしている。

これらは、以下のように考えられる。

- ①セグメントは、CF で掘削された領域（掘削領域）

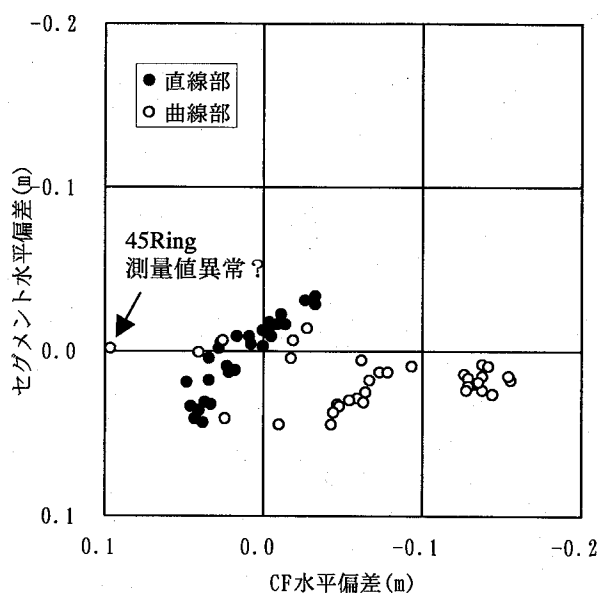


図-10 CF 水平偏差とセグメント水平偏差の関係

内に設置されるため、セグメントの位置は掘削領域で定まる。

- ②セグメントがテールクリアランス内で、下側にシフトして設置されている。なお、本現場では、シールドのピッチング角は、トンネルの計画縦断線形とほぼ一致していた。

次に、セグメント鉛直偏差とテールボイド（上，下，最小値）の関係，CF 鉛直偏差とテールボイド（上，下）の関係，CF-セグメント鉛直偏差とテールボイド（上，下）の関係を，図-9 に示す。この図より以下のことがわかる。

- ①セグメント鉛直偏差・CF 鉛直偏差とテールボイド（上，下，最小値）は，無相関である。
- ②CF-セグメント鉛直偏差とテールボイド（上，下）は，相関が高い。CF-セグメント鉛直偏差 <0 ，すなわち，セグメント中心より CF の中心が上になるほど，上端のテールボイドは大きくなり，下端のテールボイドは小さくなる。
- ③上端と下端がコピーカッターの使用範囲に入っていない場合，上端と下端のテールボイドの合計は，約 16cm であり，この値は，シールドの掘削外径とセグメント外径の差に一致する。一方，上端と下端がコピーカッターの使用範囲に入っている場合，上端と下端のテールボイドの合計は，16cm より大きくなり，この値は，シールドの掘削外径とセグメント外径の差に，コピーカッターの長さを加えた値になる。なお，これらが完全に一致しないのは，セグメントの中心軸と，CF の中心を含むシールドの中心軸が，完全に平行ではなく，三次元的によじれた位置関係になっているためである。

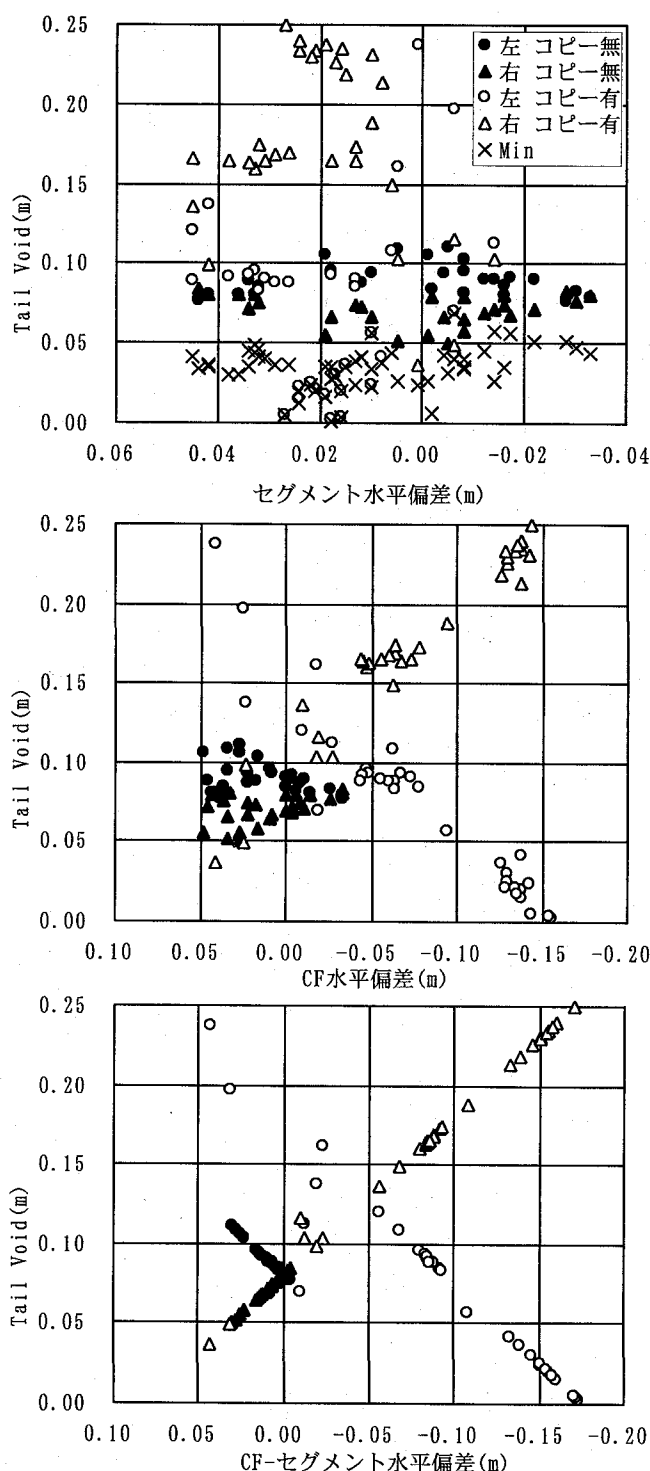


図-11 水平偏差とテールボイド厚さの関係

また，実際には，セグメントの変形も考慮する必要がある。

これらは，幾何学的に合理的である。

したがって，セグメント鉛直偏差や CF 鉛直偏差から，上端と下端のテールボイドを直接推定することはできないが，セグメント鉛直偏差と CF 鉛直偏差から求まる「CF-セグメント鉛直偏差」を用いることにより，上端と下端のテールボイドを推定できると考えられる。

b) 水平方向

CF 水平偏差とセグメント水平偏差の関係を図-10に示す。この図より以下のことがわかる。

- ①CF 水平偏差とセグメント水平偏差は、無相関である。
- ②CF 水平偏差は、直線部で左右約 5cm の範囲に、曲線部では約 5~20cm 右の範囲にある。一方、セグメント水平偏差は、直線部、曲線部ともに左右約 5cm の範囲にある。

これらは、以下のように考えられる。

- ①セグメント組立時のシールドの蛇行や、隣接セグメントとの接続等により、テールクリアランス内で、セグメントの位置が定まる。

- ②曲線部では、通常曲線内側でコピーカッターを使用するため、CF の中心は曲線外側を通過する。

次に、セグメント水平偏差とテールボイド（左、右、最小値）の関係、CF 水平偏差とテールボイド（左、右）の関係、CF-セグメント水平偏差とテールボイド（左、右）の関係を、図-11 に示す。この図より以下のことがわかる。

- ①セグメント水平偏差とテールボイド（左、右、最小値）は、無相関である。

- ②直線部の CF 水平偏差とテールボイド（左、右）には、相関がないが、曲線部の CF 水平偏差とテールボイド（左、右）には、相関がある。CF 水平偏差 <0 、すなわち、トンネルの計画平面線形より CF の中心が右になるほど、右側のテールボイドは大きくなり、左側のテールボイドは小さくなる。

- ③CF-セグメント水平偏差とテールボイド（左、右）は、直線部、曲線部ともに、相関が高い。CF-セグメント水平偏差 <0 、すなわち、セグメント中心より CF 中心が右になるほど、右側のテールボイドは大きくなり、左側のテールボイドは小さくなる。

- ④直線部で、コピーカッターの使用範囲に入っていない場合、左側と右側のテールボイドの合計は、約 16cm であり、この値は、シールドの掘削外径とセグメント外径の差に一致する。一方、曲線部等で、コピーカッターの使用範囲に入っている場合、左側と右側のテールボイドの合計は、16cm より大きくなり、この値は、シールドの掘削外径とセグメント外径の差に、コピーカッターの長さを加えた値になる。なお、これらが完全に一致しないのは、セグメントの中心軸と、CF の中心を含むシールドの中心軸が、完全に平行ではなく、三次元的によじれた位置関係になっているためである。また、実際には、セグメントの変形も考慮する必

要がある。

これらは、幾何学的に合理的である。

したがって、セグメント水平偏差や CF 水平偏差から、左側と右側のテールボイドを直接推定することはできないが、セグメント水平偏差と CF 水平偏差から求まる「CF-セグメント水平偏差」を用いることにより、左側と右側のテールボイドを推定できると考えられる。

5. まとめ

本論文では、テールボイド厚さ分布に関連する現場計測データの特徴を詳細に検討し、急曲線部のテールボイド厚さ分布を算定する手法を開発するとともに、その手法を現場計測データに適用して、同手法の合理性を検討した。得られた結論を列記する。

- ①余掘り量の分布、テールボイド厚さ分布は、コピーカッターの使用範囲が同じであっても、カッターフェイス回転方向、カッターフェイスの回転速度によって異なる。

- ②上端のテールボイドより、下端のテールボイドは小さくなる。これは、セグメントの中心が CF の中心より下にシフトしているためである。

- ③直線部では、左右のテールボイドはある一定の範囲に分布するが、曲線部では曲線内側でテールボイドは最小となり、曲線外側でテールボイドは最大となる。これは、曲線部では、通常曲線内側でコピーカッターを使用するため、CF の中心位置は曲線外側を通過すること、円筒形状のシールドが曲線を描く掘削領域に位置するため、曲線内側でスキンプレートが地盤に接し、曲線外側でスキンプレートと地盤の間に隙間が生ずること、セグメントは、テールクリアランス内で、隣接セグメントと連続的に組み立てられることのためであると考えられる。

- ④セグメント偏差や CF 偏差から、テールボイドを直接推定することはできないが、「CF-セグメント偏差」を用いることにより、テールボイド厚さ分布を推定できる。

また、急曲線部における裏込め注入層のより精度の高い検査確認手法を開発するための今後の課題は、以下のとおりである。

- ①本算定手法では、シールド位置を測量した位置でしか、テールボイドの厚さ分布を算定できない。そこで、シールド挙動シミュレーション³⁾を用いて、経時的なシールド位置を推定することにより、

任意の位置での、テールボイドの厚さ分布を算定する手法を開発する。

- ②本研究で得られたテールボイド厚さ分布をもとに、より精度の高い裏込注入率の算定手法を開発する。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、貴重な現場データを提供して下さった関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三木五三郎，斎藤孝夫，下田一雄，木村昌義：裏込め

注入工法の設計と施工，山海堂，1990。

- 2) 三木五三郎，下田一雄：可塑状グラウト注入工法，日刊工業新聞社，2001。
3) 杉本光隆, Sramoon, A.：施工実績に基づくシールド機動力学モデルの開発，土木学会論文集，No.673/III-53, pp. 163-182, 2001。