

縦2連シールドの掘進制御に関する研究

A STUDY ON POSTURE CONTROL OF VERTICALLY DOUBLY-FACED SHIELD TUNNEL

笹倉 剛* ・ 五十嵐寛昌* ・ 藤崎勝利* ・ 吉村宗男**

Takeshi SASAKURA, Hiromasa IGARASHI, Katsutoshi FUJISAKI and Muneo YOSHIMURA

Multi-faced shield tunnel method can construct plural tunnels at a time and therefore it has an advantage of enhancing safety and shortening delivery. However, its posture control is complicated because of the unbalance in cutting torque caused by the existence of plural cutter faces and of the relatively highly situated gravity centre of the shield machine. To cope with these problems, a vertically doubly-faced shield machine with articulate mechanism was manufactured on trial and the real ground excavation was carried out at field. It revealed the characteristics of its posture change as well as the effectiveness of proposed evaluating method of reaction force at the cutter face and rolling characteristics.

Keywords : shield tunnel, shield machine, articulate mechanism, posture control,
cutting resistance

1. はじめに

複断面シールド工法は、複数の面板を2連及び3連などに組み合わせることによって、使用目的に合った任意断面形状のトンネル構築を可能にするものである。本工法によれば補助工法を用いることなく、限られた地下空間内に大きな有効断面を確保できることから安全性、信頼性に優れ、同時に工期短縮及び工費低減も図ることができ、過密化した都市部における地下空間の有効利用の可能性を拓ける工法として注目されている。一方、その施工性については、複数の面板を有することによって生じる不釣り合い力や、縦型として掘進する場合のマシン重心位置が単円に比べ高いことによるローリング発生傾向などが生じ、掘進中の姿勢制御が非常に複雑になり、これらは現状において十分に明らかにされているとはいえない。

以上の背景のもと、複断面シールドの掘進制御方法の開発の一環として、前胴部の上下に独立した中折機構を有する縦2連シールド工法を取り上げ、掘進時の反力及びローリング角度変化特性についての理論的評価法を提案した。さらに、新たに製作した実験用シールド機を用いた実地盤掘進実験を行い掘進特性を評価するとともに提案手法の妥当性の検証を行った。本検討のフローは図-1に示すとおりで、ここでは一連の検討から得られた知見について報告する。

* 正会員 鹿島建設(株)技術研究所

** 正会員 鹿島建設(株)土木技術本部

2. シールド機の姿勢変化特性に関する理論的検討

2. 1 掘進反力評価式の検討¹⁾

シールド機の姿勢変化への影響要因の1つとして面板に生じる掘進反力が挙げられる。これは、フィッシュテール及びカッタービットが地盤を切削することなどによって生じるもので、回転軸回りのトルク、回転軸方向の力（スラスト力）及び回転軸に直交する2方向の力（垂直及び水平ラジアル力）の4成分で表すことができる。これらの力を評価する上で、カッタービットによる地盤の切削反力についてはこれまでに確立された評価方法はなかった。そこで、金属加工分野の二次元切削理論²⁾を参考に、カッタービットに作用する力の釣り合いから面板に作用する切削反力の評価方法を採用することにした。

ある1つのビットについての力の釣り合いを考えると、図-2に示すように地盤が受ける切削力 F_A と、ビットが受ける切削反力 F_B に関して次の釣り合い式が成り立つ。

$$\begin{aligned} F_A &= F_B \\ F_A &= \frac{\tau_s t \cos \theta / \sin \phi}{\cos(\phi - \theta + \beta - \alpha)} \dots\dots\dots (1) \\ F_B &= \tau_B l_B / \sin \beta \end{aligned}$$

ここで、

- τ_s : 地盤せん断面の平均せん断応力
- t : 切り込み深さ (=掘進速度/面板回転数)
- θ : 掘削面の角度 (= $\tan^{-1}(t/\text{掘削円周長})$)
- ϕ : 地盤がビットにせん断される角度
- β : $\tan^{-1}(T/N)$
- T, N : F_B のビットすくい面への分力
- α : ビットのすくい角
- τ_B : ビットと地盤の摩擦抵抗
- l_B : ビットと地盤の接触長さ

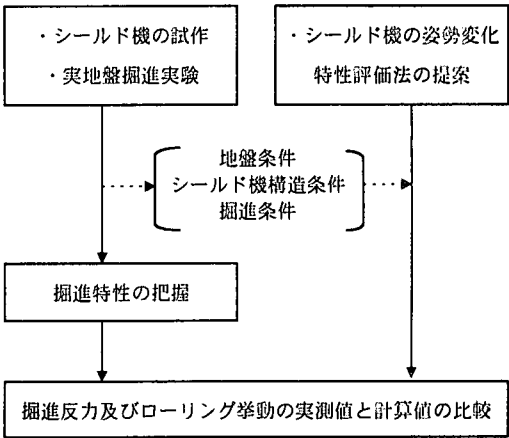


図-1 検討フロー

上式から F_A 、 F_B 及び β が求められ、 F_B を用いて各ビットが受けるラジアル力 F_1 （ビット進行（面板回転）方向の反力）及びスラスト力 F_2 （回転軸方向の反力）が、 $F_1 = F_B \cos(\beta - \alpha)$ 、 $F_2 = F_B \sin(\beta - \alpha)$ としてそれぞれ求められる。

従って、すべてのビットによる切削反力は、次式のように各ビットの切削反力を力の向き、作用位置を考慮して全てのビットについて合成することで求めることができる。

$$\begin{aligned} T_b &= \sum (F_1 \times r) & F_{xb} &= \sum F_{1,x} \\ F_{yb} &= \sum F_2 & F_{zb} &= \sum F_{1,z} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

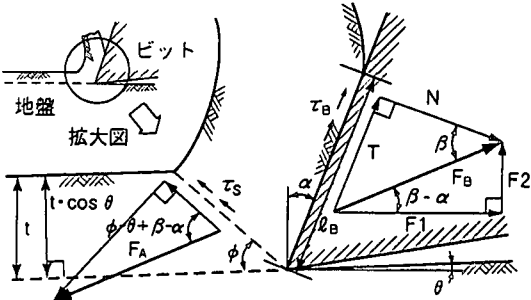


図-2 カッタービットに作用する力の釣り合い

ただし、 T_b : トルク、 F_{yb} : 回転軸方向の力（スラスト力）、 F_{xb} : 水平ラジアル力、 F_{zb} : 鉛直ラジアル力、 $F_{1,x}$ 、 $F_{1,z}$: F_1 の水平（ x ）成分及び鉛直（ z ）成分、 r : 回転中心からビットまでの距離である。

さらに、同様の方法によって、フィッシュテール部の反力、並びに逆向きビット（反対回転時に掘削するビット）の反力を評価し、これらの合計として総反力を求めることができる。

2. 2 ローリング角度変化評価式の検討³⁾

シールド機の姿勢変化は掘進状態にあるシールド機に作用する力によって生じることから、姿勢変化によって生じる作用外力を含んだ形で力及びモーメントの釣り合いの定式化を行うことによって、姿勢変化量を求めることができる。ここでは、ローリング角度が小さく、定常（等速度）掘進状態にあるシールド機に作用する力（ F ）とモーメント（ M ）を5つに分類し、各方向の釣り合い式を次のように考える。定式化に用いた座標軸は図-3に示すとおりである。

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ k_6 \end{Bmatrix} v + \begin{bmatrix} 0 & k_{15} & k_{16} \\ 0 & 0 & 0 \\ k_{34} & k_{35} & 0 \\ k_{44} & 0 & 0 \\ 0 & k_{55} & 0 \\ 0 & 0 & k_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\theta_x}{dt} \\ \frac{d\theta_y}{dt} \\ \frac{d\theta_z}{dt} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ F_{yi} \\ F_{zi} \\ M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{x0} \\ F_{y0} \\ F_{z0} \\ M_{x0} \\ M_{y0} \\ M_{z0} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ F_{yj} \\ 0 \\ M_{xj} \\ 0 \\ M_{zj} \end{Bmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、

- 第1項：面板において地山の切削によって生じる力及びモーメント
- 第2項：シールド機の姿勢変化によって地山から受ける力及びモーメント
- 第3項：シールド機の姿勢によって変化する力及びモーメント
(中折効果及びテールシール反力などによる力及びモーメント)
- 第4項：シールド機の姿勢及び姿勢変化に無関係な力及びモーメント（自重、浮力など）
- 第5項：ジャッキによって生じる力及びモーメント

F_i : i 軸方向の力

M_i : i 軸回りのモーメント

k_i : 掘進速度の係数

v : 掘進速度

k_{ij} : 単位時間当りの角度変化量の係数

(地盤反力係数、 x 、 z 方向へのシールド機投影面積などの関数)

$d\theta_x/dt$: 単位時間当りのピッチング角度変化量

$d\theta_y/dt$: 単位時間当りのローリング角度変化量

$d\theta_z/dt$: 単位時間当りのヨーイング角度変化量

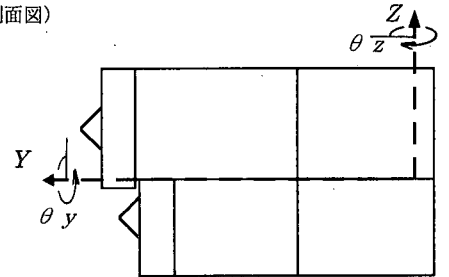
これから、ローリングのみに関する力及びモーメントの釣り合い式は、自重及び浮力の影響がないと考え、と次式のように簡略化される。

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ M_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_1 \\ k_5 \end{Bmatrix} v + \begin{bmatrix} k_{15} & k_{16} \\ k_{55} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\theta_y}{dt} \\ \frac{d\theta_z}{dt} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} F_{xi} \\ M_{yi} \end{Bmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ローリング角度変化量は上式を用いて、以下の手順に従って算定することができる。

- 1) 第1項を先に提案した(2)式から求める。
- 2) 第2項を姿勢変化によって生じ、姿勢変化を妨げる方向に作用する地盤反力（地盤反力係数×姿勢変化によって生じる地盤変形体積）及び摩擦（地盤の粘着力×摩擦発生面積）の和として求める。

(側面図)



(上面図)

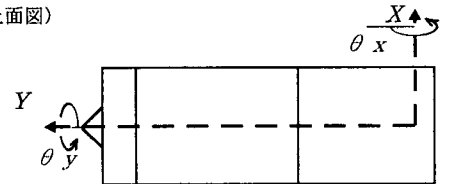


図-3 定式化に用いた座標軸

3) 第3項を前胴部中折れによって生じ姿勢変化を生じさせる方向に作用する地盤反力（地盤反力係数、受圧面積、掘進長及び中折角度の関数の積）として求める。

4) (4)式の釣り合い式から $d\theta_y/dt$ を求め、掘進時間で積分してローリング角度変化量を求める。

なお、ここでは対象とするローリング角度が小さいことから、テールシールドからの反力は考慮していない。

3. 実地盤掘進実験 3), 4), 5)

3. 1 実験概要

今回試作した実験機は、写真-1に示すようにφ1,341mm、高さ2,361mm、機長3,730mmの泥水式で、上下面板は異なる面に配置され、それぞれの回転数を個別に0～4.8rpmまで変えられる。また、上下に分割された前胴部は、掘進時の姿勢をアクティブにコントロールするため、上下独立して左右に2.5°まで中折れするように上下一体構造の後胴部とピン接合されている。

実験では、まず面板が受ける掘進反力を把握するため、本掘進に先立ち図-4に示す様に発進立坑のエントランス部に打設した強度の異なる模擬地盤の掘進を行った。模擬地盤は、φ1,900mm×縦3,000mm×奥行800mmの型枠内に一軸圧縮強さが、100、700、1,000及び2,000kN/m²になるように配合した4種類のセメントポットナイトモルタルを用いて作成し、掘進速度及び回転数などの掘進条件を変化させた。また、掘進中は上下面板それぞれの軸にセットしたロードセルにより各面板のスラスト力及びラジアル力、油圧計測に基づくトルク及び総推力などの計測を行った。テールシールドとセグメントの摩擦による拘束力及びシールド機と架台との摩擦力は、事前のセグメントの押し出し試験及びシールド機の空押し試験などからそれぞれ評価した。

次に、掘進実験では、深度3～5m付近のN値2～3、一軸圧縮強度40～60kN/m²程度の粘性土地盤を、直線部及びR50mの曲線部からなる計画線に沿って約22m掘進して線形制御性を確認した。また、ローリング制御性を確認するため強制的にローリングを生じさせた後に、中折れ機構を積極的に利用した姿勢の修正も併せて試みた。掘進の間、シールド機に作用

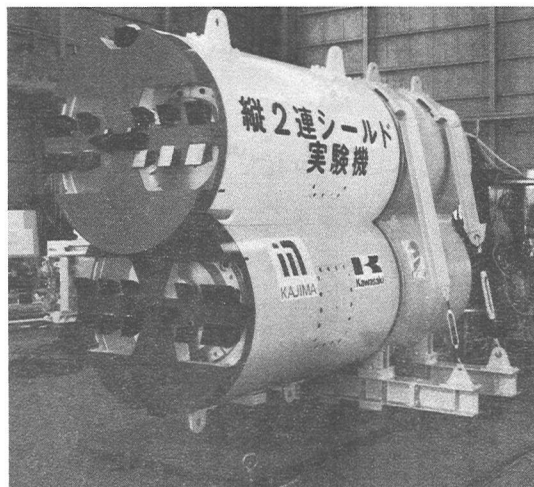


写真-1 縦2連シールド実験機

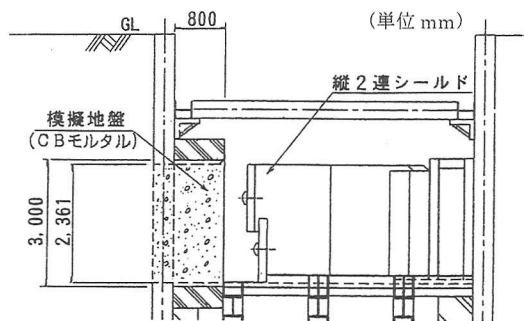


図-4 発進立坑内縦断面図

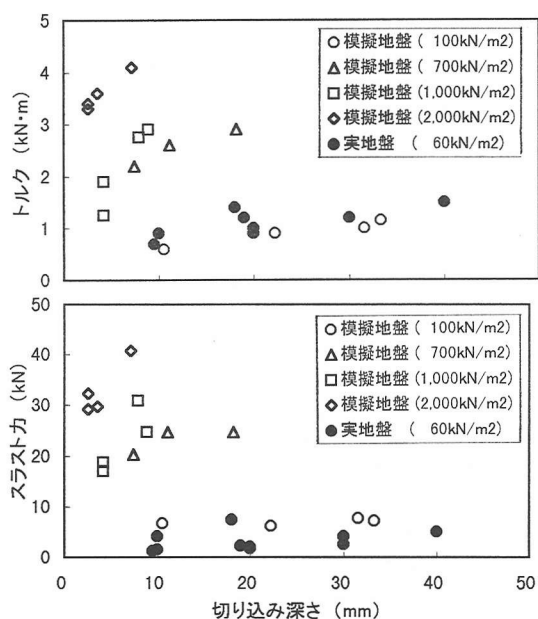


図-5 上面板のトルク及びスラスト力の計測結果

する掘進反力及びローリングについての姿勢変化などを計測した。

3. 2 実験結果

(a) 掘進反力計測結果

模擬地盤及び実地盤掘進時の上面板のトルク及びスラスト力の測定結果を図-5に示す。図中の各点は、各実験条件に対する掘進中の計測値の平均値である。これによれば、切り込み深さ(=掘進速度/面板回転数)を大きくすると、地盤の強度によらずトルク及びスラスト力のいずれも増加することがわかる。図-6に一軸圧縮強度1000kN/m²の模擬地盤掘進時のジャッキ推力と掘進長の関係を示す。図中には、カッタービットの切り込み深さ、並びに予備実験から求めたテールシール拘束力(27kN)及び架台摩擦力(113kN)を併記した。この図からも切り込み深さが大きくなると、ジャッキ推力が増加する傾向があることがわかる。

一方、図-5から、切り込み深さが同じ場合には、地盤強度が大きい場合ほどトルク及びスラスト力が大きく、この傾向は模擬地盤、実地盤などの地盤条件によらないことがわかる。以上から、掘進反力は、粘着性の地盤に対しては一軸圧縮強度及び切り込み深さと正の相関関係があることがわかった。

さらに、上下面板のトルクの関係を示した図-7から、下面板のトルクは上面板のトルクに比べ平均で約89%と若干小さくなっていることがわかる。実験機の下面板の一部が上面板に隠れていることによる下面板の上面板に対する切削面積比は約87%であり、トルクと切削面積の相関性がうかがえる

(b) 曲線部施工性

No. 29~37リングの曲線部施工時の掘進条件及びシールド機後胴部の方位変化を表-1及び図-8にそれぞれ示す。これから前胴部上下の平均中折角度を約-1.3°に設定することによって、1リング当り約-0.6°の後胴方位変化が生じていることがわかる。従って、縦2連シールドの場合にも、前胴部上下の平均中折角度を制御することによって、単円シールドの場合と同様に曲線施工を行うことが可能と考えられる。

(c) ローリング制御性

No. 8~15リングの直線部施工時の掘進条件を表-2に、ローリング角度測定結果を図-9に

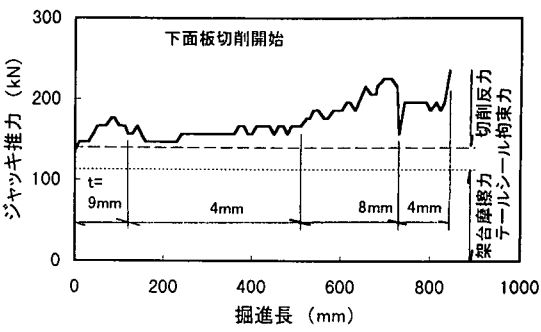


図-6 ジャッキ推力の計測結果

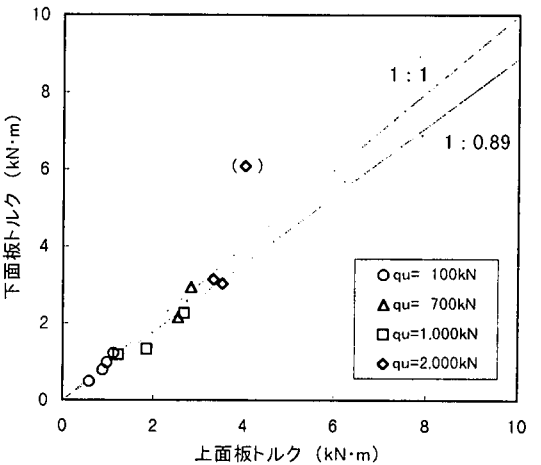


図-7 上下面板のトルク計測結果の比較

表-1 曲線施工部の掘進条件

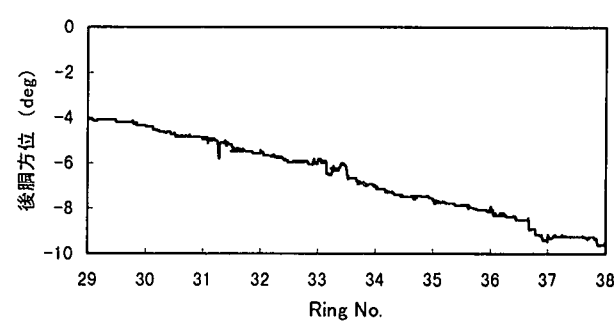
Ring No.	29	30	31	32	33	34	35	36	37
掘進速度 (mm/分)	30	30	40	40	40	40	40	40	40 ↓ 20
カッター 回転 数 (rpm)	上	左	左	左	左	右	右	右	右
	下	左	左	左	左	右	右	右	右
中折 角度* (deg)	上	-1.3	-1.0	-0.3	-0.3	-0.3 ↓ -0.5	-0.5 ↓ -2.3	-2.3 ↓ -0.5	-0.5 ↓ 0
	下	-1.3	-1.5	-2.3	-2.3	-2.3 ↓ -1.5	-1.5 ↓ -0.3	-0.3 ↓ 0	0

* 正負は図-3のヨーイング角の定義に準じる

示す。ここでは前胴部上下の中折角度差（上部中折角度－下部中折角度）を制御することによって、前半のNo. 8～10リングで強制的にローリングを生じさせ、後半のNo. 11～15リングでその修正を試みた。図－9から、ローリング角度は上述の計画どおり前半に正のローリングが生じ、後半にはそれが修正されている。従って、掘進によって生じたローリングは、前胴部上下の中折角度差を適切に設定することで修正することができると考えられる。なお、前胴部上下の平均中折角度差を4.5°と設定したNo. 13～14リングに対する平均ローリング修正角度は約－1°/リングであった。

次に、No. 29～37リングの曲線部施工時に、強制的にローリングを生じさせた後、中折機構を用いてその修正を試みた結果を図－10に示す。この間の掘進条件は表－1に示したとおりである。これによれば、全般的にはNo. 33リングまでに生じたローリングはNo. 37リングまでに修正されていることがわかる。ただし、前胴部上下の中折角度差が－2°とほぼ一定のNo. 31～32リング及び＋2°のNo. 35～36リングでの平均ローリング角度変化量の絶対値はいずれも約0.3°/リングであり、直線施工時のローリング角度変化量に比べ小さい。これは、曲線施工のために1.3°の平均中折角度を既に使用し、残り1.2°の自由度の範囲内でローリングを修正したため、中折角度差が直線部施工時に比べ小さいことによると考えられる。従って、シールド機の設計時には曲線施工に必要な中折角度以上の中折角を装備しておくことが重要であり、施工時には前胴部上下の中折角度差を適切に制御することによって、曲線施工時にもローリングの制御を行うことができると判断できる。

また、中折角度は同じで上面板の回転方向のみが異なる直線部施工時のNo. 8及び9リングでは、面板の回転方向によらずローリング角度が正の方向にほぼ一定の割合で増加していることから、今回の実験条件下ではローリングに及ぼす影響は面板の回転方向よりも中折れによるものの方が大きいことがわかる。

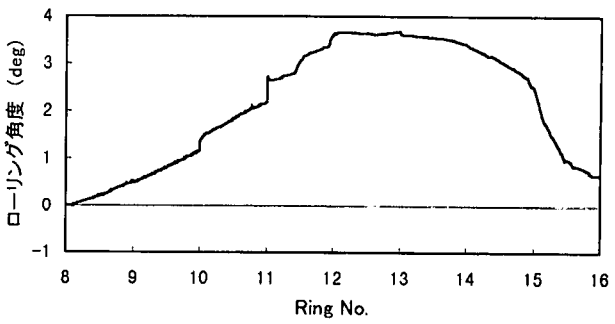


図－8 シールド機後胴方位の計測結果

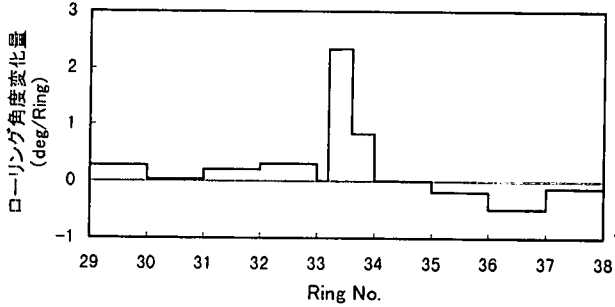
表－2 直線施工部の掘進条件

Ring No.	8	9	10	11	12	13	14	15
掘進速度 (mm/分)	20	20	20	20	20	30	40	40
カッター 回転数 (rpm)	上 右 2.0	左 2.0	左 2.0	左 2.0	左 2.0	右 2.0	右 1.0	右 1.0
	下 右 1.0	右 1.0	右 1.0	右 1.0	右 1.0	右 1.0	右 1.0	右 1.0
中折 角度* (deg)	上 +1.0	+1.0	+1.0	-1.0 ↓ -2.0	-2.0	-2.5	-2.5	-2.5 ↓ 0
	下 -1.0	-1.0	0	0	+1.0	+2.0	+2.5	+2.5 ↓ 0

* 正負は図－3のヨーイング角の定義に準じる



図－9 直線部でのローリング角度計測結果



図－10 曲線部でのローリング角度変化量計測結果

4. 考察

4. 1 掘進反力評価式の検証^{1), 4)}

先に提案した掘進反力評価式の妥当性を検証するため、モルタルによる模擬地盤の切削反力実測値と計算値の比較を行う。

前述の方法で切削反力を求めるためには、 ϕ 、 τ_s 、 τ_B 、 l_B などの値を事前に設定する必要がある。ここでは、ビットによる切削を地盤の受働破壊現象と考え、 $\phi = 45^\circ$ - $\phi_s = 45^\circ$ (ϕ_s : モルタルの内部摩擦角 ≈ 0)、 $\tau_s = q_u/2$ ($\phi_s \approx 0$ と考えたため)、 $\tau_B = \tau_s/2$ 並びに $l_B = 2t/\cos \alpha$ と仮定して切削反力を算定した。図-11に掘進時のトルクとスラスト力の計算結果と実測値を合わせて示す。ここで、計算値は切り込み深さ10mmに対するもので、実測値は切り込み深さ10mmの時の値に換算したものである。これから、今回の実験条件の範囲内においては、計算値は実測値と比較的良く一致しているといえる。計算値と実測値の差は、ビットでの力の釣り合いを二次元で考えたことや、切削の軌跡を直線としたこと等の計算上の仮定の他に、面板側面と地盤の摩擦を考慮していないこと並びにモルタルの強度のばらつきなどによるものと考えられる。

次に、同様の方法で、一軸圧縮強度1,000kN/m²の模擬地盤を立坑内で掘進した場合のジャッキ推力を算定した結果を図-12に示す。計算では、シールド機と架台との摩擦力及びテールシールによる拘束力は予備実験で求めた値を用い、通常的地盤掘進中に生じるスキンプレートと地盤の摩擦は実験条件を考慮して無視した。実測結果を示した図-6と比較すると、今回の掘進条件に対しては提案手法によってジャッキ推力を概ね評価できることがわかる。

4. 2 ローリング角度変化評価式の検証³⁾

前述の姿勢変化予測手法の妥当性を検証するため、(4)式に示したローリングに関する力の釣り合い式を用いて、掘進実験と同一の掘進条件に対して1リング当たりのローリング角度変化量を算定し、実測結果との比較を行う。

表-3に示す計算条件は、図-9に示した直線部施工時のローリング計測結果から、シールド機の挙動が定常と見なされるNo. 9、13及び14リングの掘進条件から設定した。

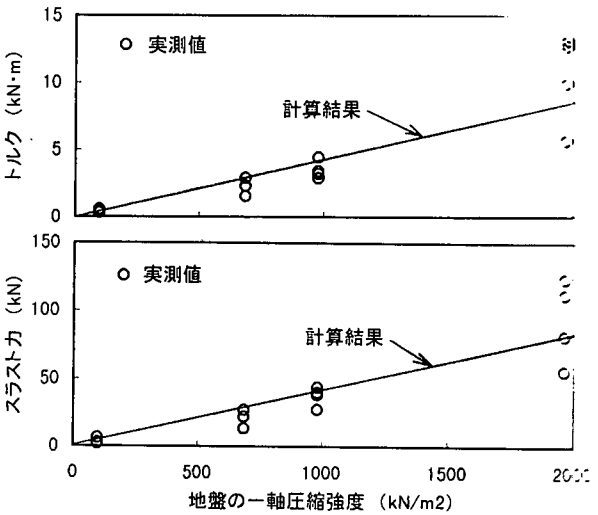


図-11 切削反力の計算値と実測値の比較

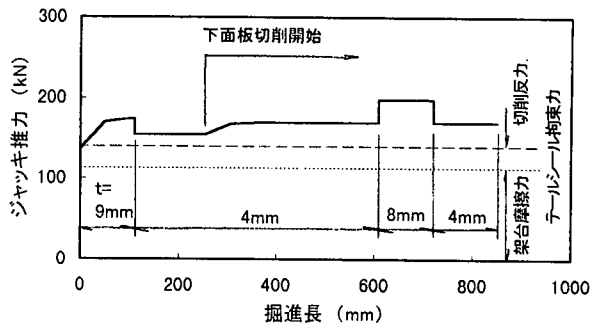


図-12 ジャッキ推力の計算結果

表-3 ローリング角度変化量計算条件

計算 ケース	対応 リング No.	掘進 速度 (mm/分)	カッター回転数 (rpm)		中折角度* (deg)	
			上部	下部	上部	下部
Case1	9	20	左 2.0	右 1.0	+1.0	-1.0
Case2	13	30	右 2.0	右 1.0	-2.5	+2.0
Case3	14	40	右 1.0	右 1.0	-2.5	+2.5

* 正負は図-3のヨーイング角の定義に準じる

地盤反力係数は孔内水平載荷試験結果をもとに $20\text{MN}/\text{m}^3$ と設定した。また、施工時にはローリングを促進するため、コピーカッターによる余堀りを行った。従って、これによる(4)式第2項のローリング抵抗力の低減を考慮する必要があるが、現状ではこれを理論的に評価することは困難である。そこで今回はローリング抵抗力を便宜的に $1/8$ に低減して計算を行った。図-13に計算結果と実測値を合わせて示す。比較に用いた実測値は、計算対象部分の実測ローリング角度変化量を1リング当たりの値に換算して求めた。これから、提案したローリング角度変化量の評価方法は、前胴部上下の中折角度差のローリング角度変化量への影響をほぼ表現できることがわかる。計算値と実測値の違いは、コピーカッターによる余堀りの影響を含めた地盤反力の評価方法の不十分さ、及びテールシールからの反力を考慮していないなどの評価式の簡略化に起因するものと考えられる。

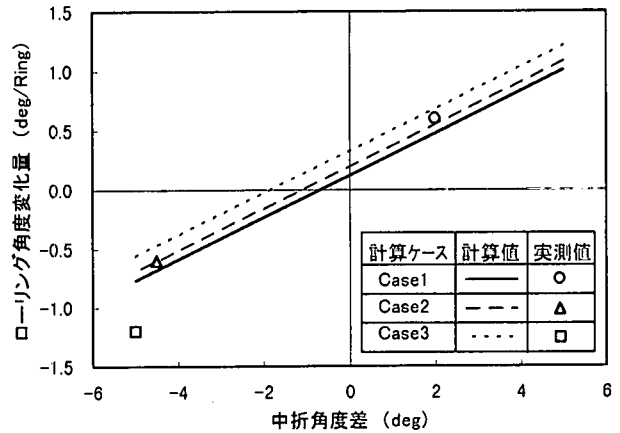


図-13 ローリング角度変化量の計算値と実測値の比較

ローリング角度変化量の評価方法は、前胴部上下の中折角度差のローリング角度変化量への影響をほぼ表現できることがわかる。計算値と実測値の違いは、コピーカッターによる余堀りの影響を含めた地盤反力の評価方法の不十分さ、及びテールシールからの反力を考慮していないなどの評価式の簡略化に起因するものと考えられる。

5. おわりに

本報では、縦2連シールドを取り上げて、掘進時の反力及びローリング特性について理論的評価法を提案した。さらに、前胴部上下独立中折機構を有する実験用シールド機を用いた実地盤掘進実験を実施し、掘進特性を把握するとともに提案手法の検証を行った。得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- 1) 面板において生じる掘進反力は、カッタービットの切り込み深さ及び地盤強度と正の相関関係がある。また、これらによって生じるモーメント、スラスト力、ラジアル力並びにシールド機の所要掘進推力は、カッタービットに作用する力の釣り合いを考えることによってほぼ評価することができる。
- 2) 縦2連型のシールド機においても、前胴と後胴の間に中折機構を設け、前胴部上下の平均中折角度を制御することで所定の曲線施工を行うことが可能である。
- 3) 掘進中に生じたローリングは、前胴部上下に中折角度差をつけることによって修正することができる。また、この方法により強制的にローリングを生じさせることも可能である。さらに、これらの場合のローリング角度変化量は、シールド機に作用する力及びモーメントの釣り合い式を用いてほぼ評価することができる。

今後は、地盤反力評価法の検討を行い、ピッチング及びヨーイング角度変化の評価も含めた複断面シールドの姿勢制御方法のシステム化を進めたいと考えている。

6. 参考文献

- 1) 五十嵐他：縦2連シールド工法の実用化（その2）、第31回地盤工学研究発表会、1996.7.
- 2) 日本機械学会編：機械工学便覧、1987及び1977.
- 3) 藤崎他：縦2連シールドの姿勢変化特性に関する研究（その2）、土木学会第51回年次学術講演会、1996.9.
- 4) 上木他：縦2連シールド工法の実用化（その1）、第31回地盤工学研究発表会、1996.7.
- 5) 上木他：縦2連シールドの姿勢変化特性に関する研究（その1）、土木学会第51回年次学術講演会、1996.9.