

コピーカッター効果の定量的評価

Quantitative Evaluation of Copy Cutter Effects

杉本 光隆¹⁾・吉保 範明²⁾・Dinesh Raj Shiwakoti³⁾

Mitsutaka SUGIMOTO, Noriaki YOSHIHO and Dinesh Raj Shiwakoti

This research aims to confirm the function of the newly developed model on acting load on shield with copy cutter and to evaluate the copy cutter effects quantitatively. In the evaluation of the copy cutter effects, the shield behavior during excavation obtained by the developed shield simulator was in use. The validity of this model was discussed by the comparison between the shield behavior with copy cutter and that without copy cutter. Furthermore, the optimum control parameters on copy cutter, such as length, location, and range, were obtained, based on the radius of curvature in horizontal and vertical direction of tunnel. As conclusions, the followings were made clear: 1) the obtained results have similar tendency with the experimental law; and 2) this model can represent the copy cutter effects quantitatively.

Keywords : Closed Shield, Copy Cutter, Simulator

1. はじめに

現在、シールドマシン制御は、エキスパートシステムやAIを利用した自動掘削システムで行われることが多い。しかし、シールド掘削に関連する地盤物性値やシールドマシンに作用する外力、および、その挙動については未だ未解明な点が多く、これらのシステムはいくつかの経験的な関係を基にし、理論的な背景を持たない。現在の自動制御は、シールドマシンの蛇行を防ぐのではなく、蛇行するシールドマシンを修正するという概念に基づいて行われているのが現状であり、複雑な地質構造を持つ地盤の中でシールドマシンの挙動を予測・制御することは困難となることがある。

さらに、急曲線施工では通常コピーカッターが使用されるが、地表面沈下抑制の観点からは、コピーカッターの使用範囲と長さを小さくすることが望ましく、一方、急曲線施工に必要なジャッキ力を抑制する観点からは、コピーカッターの使用範囲と長さを大きくすることが望ましい。したがって、コピーカッター制御に関するパラメータ(長さ・使用位置・使用範囲)には、各掘削条件毎に最適値が必ず存在する。

こうした状況を踏まえ、本研究では、コピーカッターの効果を表現できるように拡張した、地盤とシールドマシンとの相互作用を考慮に入れたシールドマシン作用力モデル¹⁻³⁾を用いて、シールドマシン挙動をシミュレートすることにより、コピーカッターの効果を定量的に評価すると共に、新たに開発した作用力モデルの合理性を検証することを目的とする。

2. 解析モデル³⁾

図1にシールドマシンに作用する外力(以後作用力と呼ぶ)のモデルを示す。ここで、 $f_1 \sim f_9$ は主要な作用力を要因別に分類したものである。これを記述するに当たり、以下に示す3つの右手系座標系を用いた。

1) 正会員 長岡技術科学大学

2) 正会員 五洋建設(株)

3) 学生会員 横浜国立大学

①全体座標系 (x,y,z) (以後 C^T と表示する。)

鉛直下向きを x 軸とし、地盤に固定された直交座標系。

②マシン座標系 (p,q,r) (以後 C^M と表示する。)

ジャッキ作用面の中心を原点とし、シールドマシンがピッチング・ローリングをしていない状態で鉛直下向きを p 軸としマシン軸進行方向を r 軸とする、シールドマシンに固定された直交座標系。

③マシン回転座標系 (p_R, q_R, r_R) (以後 C^{MR} と表示する。)

検討対象点の半径方向外側が p_R 軸となるように、 C^M を r 軸回りに回転することによって得られる直交座標系。

以下に、要因別に作用力を示す。作用力に上記間での座標変換を行えば各座標系表示の作用力が得られ、位置ベクトルと作用力ベクトルとのベクトル外積を取れば作用モーメントを得ることができる。なお、本節では F, M はそれぞれ作用力ベクトル、作用モーメントベクトルを示し、上サフィックス T, M, MR はそれぞれ使用した座標系を示している。また、下サフィックス 1~5 は作用力の要因 $f_1 \sim f_5$ に対応している。また、引張力を正にとった。

2. 1. 自重、浮力、ジャッキ推力による作用力

シールドマシンの自重、浮力、ジャッキ推力による作用力はそれぞれ、次式で与えられる。ジャッキ推力は各ジャッキの推力を合計することにより与えられる。

$$F_1^T = \begin{bmatrix} W \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F_2^T = \begin{bmatrix} -\gamma_w V_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F_3^M = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ A p s_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 W はシールドマシンの自重、 γ_w, V_s は、それぞれ水の密度、シールドマシン体積である。また、下サフィックス i はジャッキ No. で、 A はジャッキ断面積、 p はジャッキ圧力、 s_i はジャッキ稼働状況 (on:1 off:0) である。上式はジャッキ推力から F_r, M_p, M_q 成分が発生することを示している。

2. 2. 切羽作用力

切羽の作用力を計算するに当たっては、切羽作用力を以下の3つに分類した。

f_{41} : カッターフェイス(以後 CF と呼ぶ)前面にかかる作用力

f_{42} : CF 側面にかかる作用力

f_{43} : CF 背面にかかる作用力

f_{41} による作用力は、次式に示す CF 面要素にかかる作用力を合計することにより与えられる。

$$F_{41ij}^{MR} = A_{41ij} \begin{bmatrix} 0 \\ -[(\mu_{ms} \sigma_{CFij}) + 2\{(1 - \alpha_0)(\mu_{ms} \sigma_{mudj} - c_{ms}) + \alpha_0(\mu_m \sigma_{mudj} - c_m)\} \text{sign}(CT)] \\ \sigma_{CFij} + \sigma_{mudj} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、下サフィックス ij は、半径方向・周方向要素 No. で、 A_{41ij} は要素面積、 α_0 は CF 開口率、 μ_{ms} は鉄と地盤の動摩擦係数、 c_{ms} は鉄と地盤の動的付着力、 μ_m は泥水と土の動摩擦係数、 c_m は泥水と土の動的付着力、 σ_{mudj} は泥水圧/掘削土土圧、 σ_{CFij} は CF 分担土圧、 CT はカッタートルク(+:時計回り)である。なお、 σ_{CFij} はシールドマシンの速度とカッターフェイスの回転速度の関数で与えられる。 f_{42} による作用力は、次式に示す CF 外

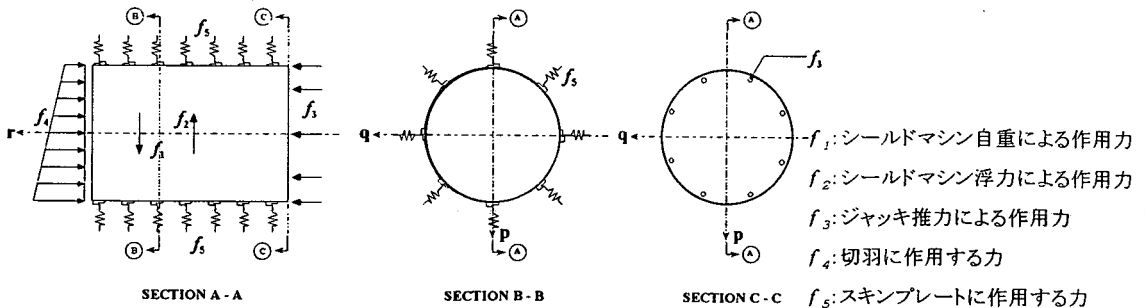


図1 マシンの作用力モデル

周面要素にかかる作用力を合計することにより、また、 f_{43} による作用力は次式で与えられる。

$$F_{42j}^{AR} = A_{42j} \begin{bmatrix} \sigma_{sidej} \\ -(\mu_{ms}\sigma_{sidej} - c_{ms})\text{sign}(CT) \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F_{43}^T = \begin{bmatrix} \gamma_{mud}V_c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3}$$

ここで、下サフィックス j は周方向要素数 No. で、 A_{42j} は要素面積、 σ_{sidej} は CF 側面への作用土圧、 γ_{mud} はチェンバー内の泥水の密度、 V_c はチェンバー体積である。

2. 3. スキンプレート作用力

f_3 による作用力は、次式に示すスキンプレート面要素にかかる作用力を合計することにより与えられる。

$$F_{5ij}^{AR} = A_{ij} \begin{bmatrix} \sigma_{mpij} \\ \alpha(\mu_{ms}\sigma_{mpij} - c_{ms}) \times \text{sign}(CT) \\ \mu_{ms}\sigma_{mpij} - c_{ms} \end{bmatrix}, \quad \sigma_{mpij} = K_{ij}\sigma_{voij} \tag{4}$$

ここで、下サフィックス ij は軸方向・周方向要素 No. で、 A_{ij} は要素面積、 σ_{voij} は静止時鉛直土圧、 K_{ij} は法線方向土圧係数である。また、 α は、カッタートルクによってシールドマシンがローリングするのに抵抗するために発生するスキンプレート周りトルクを、周方向動的摩擦係数により発生するスキンプレート周りトルクで除した値で、カッタートルクによって発生するローリング力に抵抗するために発揮されるスキンプレート周方向動的摩擦力の度合いを示す(以後カッタートルク抵抗係数と呼ぶ)。なお、 K_{ij} は、図 2 に示す地盤変位の関数で与えられる水平方向土圧係数 K_H と鉛直方向土圧係数 K_V 、および、計算点位置を用いた線形補間で与えられる。また、ここで、コピーカッターによる掘削は、カッターフェイスによる掘削領域にコピーカッターによる掘削領域を加えることで表現した⁴⁾。

3. 解析方法

3. 1. 未知パラメータ

シールドマシン挙動の予測とは、時系列でシールドマシンの位置と回転角を求めることである。さらに、ローリング角(ϕ_r)はほとんど発生しないことを考慮し、ローリング角のかわりに、カッタートルク抵抗係数(α)を未知パラメータとした。したがって、未知パラメータは以下の6つとなる。

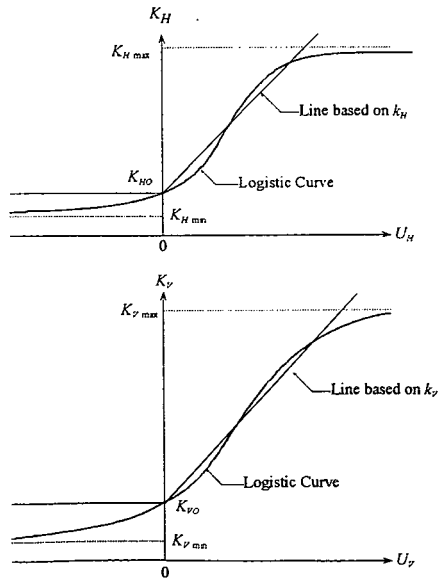


図 2 地盤変位と土圧係数の関係

表 1 シールドマシン・地山の諸元

シールドマシン	本体	半径	2.000 m
		全長	4.000 m
		掘削半径	2.000 m
		自重	100 tf
		重心位置	(0.000, 0.000, 0.000) m
		エレクトアー中心位置	(0.000, 0.000, -1.600) m
		CF厚	0.300 m
	ジャッキ	回転速度	0.9 rpm
		開口率	10%
		CF厚	0.300 m
地山	地形	ジャッキ断面積	314.159 cm ²
		数量	12 本
		ジャッキ位置半径	1.750 m
		ジャッキ作用面	Tailより2.800 m
	物性値	土被り	20.000 m
		地下水位	G.L. 0.000 m
		内部摩擦角	30 deg
		単位体積重量	2.00 tf/m ³
		地盤反力係数(k_H, k_V)	5000 tf/m ³
		動摩擦係数(μ_{ms})	0.1
		動的付着力(C_{ms})	0 tf/m ²

Δx : x 方向の移動距離の増分

ϕ_y : ヨーイング角

Δy : y 方向の移動距離の増分

ϕ_p : ピッチング角

Δz : z 方向の移動距離の増分

α : カッタートルク抵抗係数

3. 2. 解析手順

上記 6 つの未知パラメータを未知数として、以下に示す力の釣り合い条件式を解くことにより、掘削中のシールドマシン挙動をシミュレートした。

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^5 F_i^M \\ \sum_{i=1}^5 M_i^M \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

本論文では、直線部から曲線部への移行を想定し、掘削距離 15m までは、コピーカッターを使用せず、水平・直線の縦断線形・平面線形が得られるジャッキ力を与え、その後、コピーカッター使用条件・ジャッキ力を変化させた。なお、前者のジャッキ力は上記解析モデルを基にしたシールドコントローラーで求めた値を用い、後者のジャッキ力は既往の施工実績を考慮して決定した。

3. 3. 解析条件

シールドマシンの諸元は過去の施工実績を参考に、また、地盤物性値は既往の研究⁵⁾から表 1 のように決定した。その他の入力データを以下に示す。また、シミュレーション時間間隔は 10 分とした。

地盤関係: $K_{Hmin}=K_{Vmin}=0, K_{Hmax}=K_{Vmax}=5, K_{H0}=0.5, K_{V0}=1$

チェンバー関係: 内径=1.950m, 幅=0.400m, 泥水圧=2.0kgf/cm², 泥水密度=1.2tf/m³

4. 解析結果

4. 1. シールドマシン挙動のシミュレーション

掘削距離 15m の地点から、ジャッキ力を $F_{3r}=500.0tf$ 、 $M_{3p}=-159.0 tf\cdot m$ (75%ジャッキ使用時の最大モーメント)、 $M_{3q}=-124.7 tf\cdot m$ とし、コピーカッターを使用しない場合 (Case A) とコピーカッターをスプリングラインを中心に $\pm 67.5 deg.$ の範囲で 4.0 cm 使用する場合 (Case B) について、60 時間 (360step) のシールドマシン挙動のシミュレーションを行った。

シールドマシンの水平面内軌跡・未知パラメータの時系列変化を、それぞれ図 3、図 4 に示す。図 4 で κ_H 、 κ_V はシールド軌跡の水平・鉛直方向曲率、 V はシールドマシン掘進速度で、シールド軌跡を示す未知パラメータ Δx 、 Δy 、 Δz より求まる値である。また、 ϕ_y 、 ϕ_p 、 α は未知パラメータそのものである。さらに、 θ_{xT} 、 θ_{yT} はシールド軌跡からシールドマシン軸への水平・鉛直方向偏差角度で、シールドマシンの横滑り・縦滑り状態を表している。これらの図より、以下のことがわかる。

①図 3 より、本モデルは、直線部・曲線部におけるシールドマシンの挙動、および、コピーカッター効果を表現できる。

②掘削距離 15m 付近で、 ϕ_y 、 ϕ_p 、 α を除く他の値が大きく変動している。これはジャッキ力を変化させたこと、および、 ϕ_y 、 ϕ_p 、 α がシールドマシン挙動を表すマクロの指標であるのに対して、その他の値がシールドマシン挙動を表すミクロの指標であるためである。また、CaseB では、定常状態に到達するまでにより長い掘削距離を要している。これは、図 3 からわかるように、コピーカッターを用いた CaseB では平面線形が急曲線となり、直線から定常状態に至るまでに多く

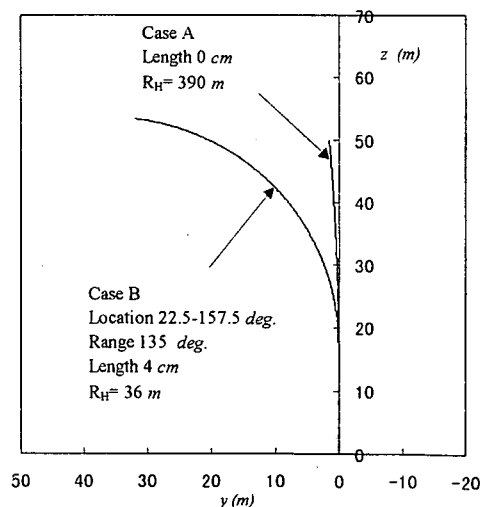


図 3 シールドマシンの軌跡

の掘削距離を要するためである。

③マシン軸方向ジャッキ力が同一にもかかわらず、掘進速度 V は、直線部、CaseB、CaseA の順に遅くなっている。これは、曲線部ではスキンプレートが周辺地盤を押し込むことにより、法線方向土圧が増大し、スキンプレートと地盤との動的摩擦が増大すること、および、CaseB ではコピーカッターを用いているため、スキンプレートと地盤との動的摩擦が減少することのためである。この結果、CaseA と CaseB で掘削距離に差が生じている。

④シールド軌跡からシールドマシン軸への水平方向偏差角度 θ_{xT} は、直線部では 0 に近いが、曲線部では $\theta_{xT} < 0$ となり、曲線半径が小さいほど 0 から離れることがわかる。これはいいかえれば、曲線半径が小さい程、シールドマシン軸はトンネル平面線形よりも曲線内向きとなって、シールドマシンは横滑りをしながら、地山を掘削することを意味していて、既往の経験則に対応している。

⑤シールド軌跡からのシールドマシン軸の鉛直方向偏差角度 θ_{yT} は、直線部では $\theta_{yT} < 0$ であるが、曲線部では $\theta_{yT} > 0$ となり、曲線半径が小さいほど 0 から離れることがわかる。これはいいかえれば、直線部ではシールドマシン軸がトンネル縦断線形よりもやや上向き、曲線部では曲線半径が小さい程、シールドマシン軸がトンネル縦断線形よりもやや下向きとなって、シールドマシンは縦滑りをしながら、地山を掘削することを意味している。本解析では、シールド重心を前方（シールドジャッキ作用面中心）にしたこと、ジャッキ力一定でシミュレートしたために得られた縦断線形がやや下向きであること等のために、力の釣り合いの結果

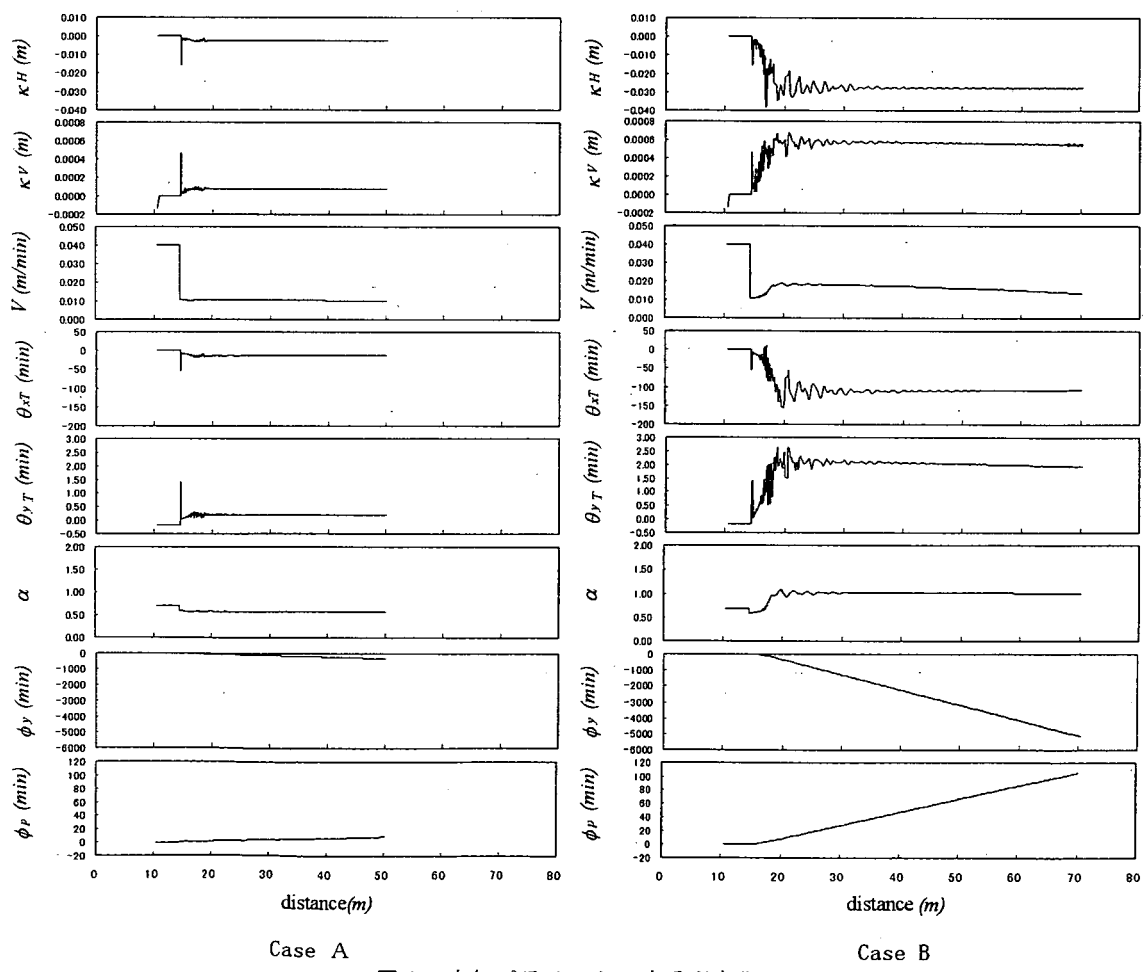


図 4 未知パラメータの時系列変化

として、このようになったと考えられる。

⑥カッタートルク抵抗係数 α は、CaseB、直線部、CaseA の順に小さくなっている。これは、③で述べたスキンプレートと地盤との動的摩擦力、掘進速度の変化に伴うカッタートルクの変化の相互作用のためである。なお、 $\alpha=1$ となった場合には、カッタートルクに比較し、スキンプレートと地盤との動的摩擦力が不足し、シールドマシンがローリングすると考えられる。

シールドマシンの挙動が定常状態に達していると考えられる 100step 目におけるシールドマシン周辺の法線方向地盤変位分布と法線方向土圧分布、推定作用力を、それぞれ図 5、表 2 に示す。これより以下のことがわかる。なお、本解析ではシールドマシンは左旋回している。

①地盤変位分布より、曲線部では、ややCFよりの曲線内側のスプリングライン周辺で地盤が受働状態となり、その反対側で地盤が主働状態となっていること、コピーカッターを使用した場合には、主働状態の領域が増大していることがわかる。これらは、幾何学的に合理的である。

②土圧分布より、複雑な土圧分布となっていること、コピーカッターを使用した場合には、ほとんどの領域で土圧が軽減されているが、曲線内側のスプリングライン周辺で大きな土圧が発生していることがわかる。スキンプレート法線方向土圧分布は、地盤変位分布と法線方向土圧係数の影響を受け、複雑な分布となったと考えられる。なお、ここでは、CaseA と CaseB で、コンターの間隔・曲線半径が異なることに留意する必要がある。

表 2 推定作用力

Case A	source	$F_p(tf)$	$F_q(tf)$	$F_r(tf)$	$M_p(tf\cdot m)$	$M_q(tf\cdot m)$	$M_r(tf\cdot m)$
	f_1 : Self weight	100.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
	f_2 : Buoyancy	-50.3	0.0	-0.1	0.0	40.2	0.0
	f_3 : Jack thrust	0.0	0.0	500.0	-159.0	-124.7	0.0
	f_4 : Force acting on the cutter face	3.9	2.5	-420.5	-2.9	20.4	91.6
	f_5 : Force acting on the skin plate	-53.6	-2.5	-79.6	161.9	64.1	-91.6
	summation	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Case B	source	$F_p(tf)$	$F_q(tf)$	$F_r(tf)$	$M_p(tf\cdot m)$	$M_q(tf\cdot m)$	$M_r(tf\cdot m)$
	f_1 : Self weight	100.0	0.0	1.9	0.0	0.0	0.0
	f_2 : Buoyancy	-50.3	0.0	-1.0	0.0	40.2	0.0
	f_3 : Jack thrust	0.0	0.0	500.0	-159.0	-124.7	0.0
	f_4 : Force acting on the cutter face	4.0	2.5	-453.4	-1.8	21.3	95.3
	f_5 : Force acting on the skin plate	-53.7	-2.5	-47.4	160.8	63.2	-95.3
	summation	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0

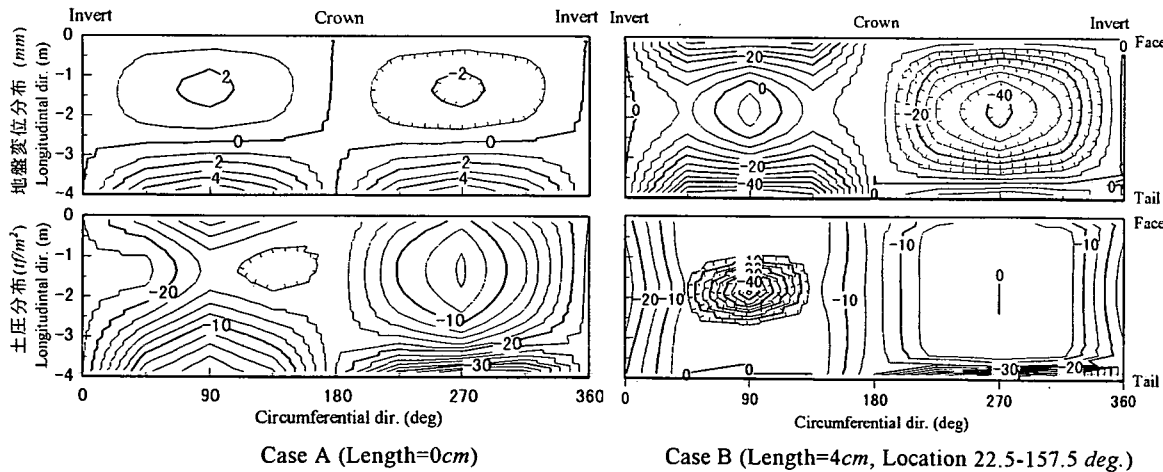


図 5 法線方向地盤変位分布と法線方向土圧分布

4. 2. コピーカッター効果の定量的評価

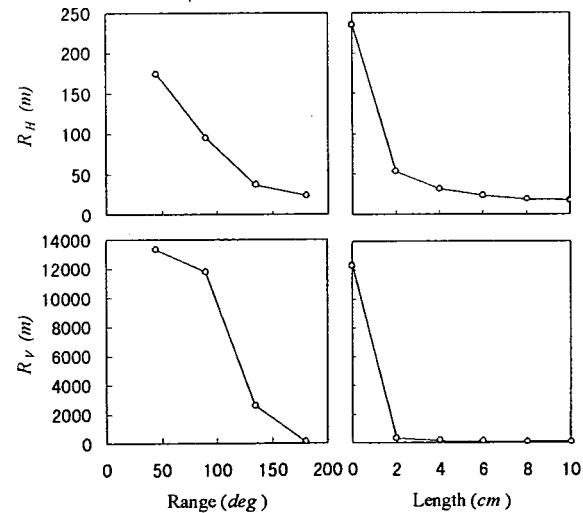
掘削距離 15m の地点から、ジャッキ力を $F_{3r}=500.0tf$ 、 $M_{3p}=-265.0\ tf\cdot m$ (最大モーメント)、 $M_{3q}=-129.2\ tf\cdot m$ とし、表 3 に示すようにコピーカッターの長さ・使用位置・使用範囲を制御パラメータとして、シールドマシン挙動のシミュレーションを行い、シールドマシンの挙動が定常状態に達していると考えられる 100step 目における平面線形・縦断線形で、コピーカッター効果を評価した。コピーカッター使用位置・使用範囲を図 6 に、各解析条件で得られた平面曲線半径 R_H ・縦断曲線半径 R_V を表 3 に示す。図 7 は、スプリングラインを中心としたコピーカッター使用範囲とコピーカッター使用範囲 180deg. でのコピーカッター長さのトンネル線形への影響を図化したものである。これより以下のことがわかる。なお、本解析ではシールドマシンは左旋回している。

①使用範囲 180deg. で使用位置を変化させた場合には、円曲線の内側(case31)を掘削すると最も効果的で、イ

表 3 コピーカッター使用条件と計算結果

copy cutter				R_H (m)	R_V (m)	case No.
Length (cm)	Start (deg)	End (deg)	Range (deg)			
0	0	0	0	235	12348	case30
6	0	180	180	24	111	case31 *
6	90	270	180	53	201	case32 *
6	180	0	180	73	342	case33
6	270	90	180	35	27	case34 *
6	0	90	90	78	102	case35 *
6	45	135	90	95	11823	case36
6	90	180	90	104	179	case37 *
6	67.5	112.5	45	174	13342	case38
6	22.5	157.5	135	37	2607	case39
2	0	180	180	53	336	case41
4	0	180	180	32	158	case42
8	0	180	180	19	84	case43 *
10	0	180	180	18	84	case44 *

* : 0 ≠ residual square sum < 0.01.



使用位置中心 : SL 使用位置中心 : SL

コピーカッター長さ : 6cm 使用範囲 : 180deg.

図 7 コピーカッター使用範囲と長さのトンネル線形への影響

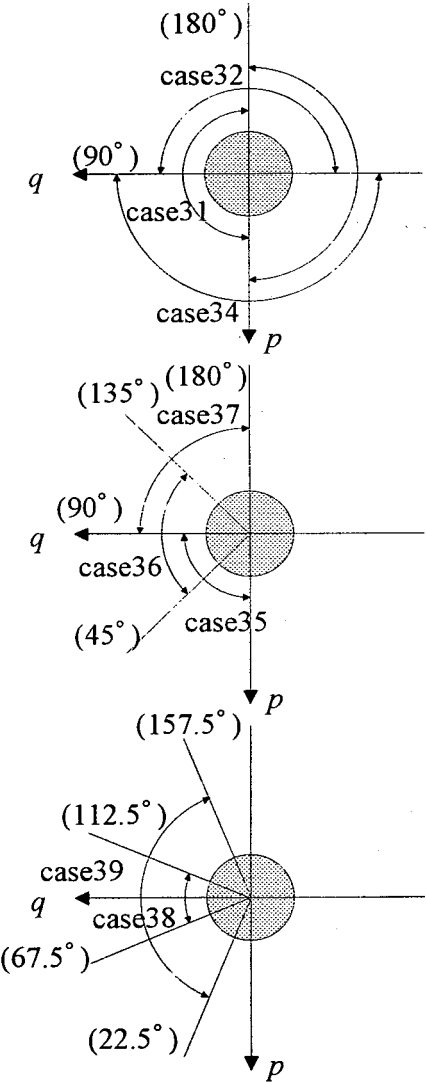


図 6 コピーカッターの使用範囲

ンパート部(case34)を掘削してもかなりの効果が期待できることがわかる。これはいいかえれば、同一のジャッキ力で、より小さな曲線半径を持つトンネルを掘削できることを意味する。これは、図5に示したように、コピーカッターを使用しない場合、スプリングライン近傍で土圧の集中が生じているからである。しかし、インパート部を掘削するとシールドマシンは下方に向かって急カーブを描くことに留意する必要がある。

②使用範囲 $90deg.$ で使用位置を変化させた場合には、下半部(case35)を掘削すると最も効果的で、側壁部(case36)を掘削してもかなりの効果が期待できることがわかる。これは、①と同様に説明できる。また、下半部を掘削するとシールドマシンは下方に向かって急カーブを描くことに留意する必要がある。

③スプリングラインを中心に使用範囲を変化させた場合には、図7に示すように、使用範囲が増加するに伴い、 $R_H \cdot R_V$ は減少するが、頭打ちとなる。したがって、使用範囲は、 $90deg.$ (Case36) または、 $135deg.$ (Case39) が妥当であると考えられる。

④使用位置中心をスプリングラインとし、使用範囲 $180deg.$ でコピーカッター長さを変化させた場合には、長さ $4cm$ までは R_H を減少できるが、長さをそれ以上にしても効果は期待できない。したがって、長さは、 $4cm$ (Case42) が妥当であると考えられる。

上記の結果は、本論文で用いた解析条件にのみ適用できる。しかし、本モデルを用いれば、種々の地山・シールドマシン・掘削条件の下で、コピーカッター効果を定量的に評価できることがわかる。

5. おわりに

本論文では、コピーカッター機能を含めた作用力モデルを提案すると共に、同モデルを用いてシールドシミュレータを開発し、コピーカッター効果の定量的評価を試みた。以上より得られた結論を以下に列記する。

①コピーカッター機能を含めた作用力モデルは、直線部・曲線部でのシールドマシン挙動、および、コピーカッターの効果をシミュレートすることが可能である。

②本論文で用いた解析条件では、コピーカッターは、スプリングラインを中心として、使用範囲： $90deg.$ 又は $135deg.$ 、コピーカッター長さ： $4cm$ での使用が最も効果的である。

今後、実測データを用いて本モデルの検証を行いたい。

参考文献

- 1) 肥田憲明、Ramdani、杉本光隆、飯田威夫、大石善啓、実機データに基づくシールドトンネル切羽断面力の検討、第46回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ、Ⅲ-68、1991.9.
- 2) 杉本光隆、玉村公児、実測データに基づくシールドマシンに作用する外力の検討、第2回トンネル工学研究発表会講演論文集、pp.83-88、1992.10.
- 3) 杉本光隆、講座「地盤工学における逆解析」第12章シールドトンネル、土と基礎、Vol.44、No.4、pp.57-62、1996.4.
- 4) M.Sugimoto and R.Shiwakoti, Analysis of acting loads in closed shield tunneling at curved alignment, 第30回土質工学研究発表会平成7年度発表講演集、No.773、1995.7.
- 5) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド編)・同解説、土木学会、p.36、1986.