

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
STUDY OF ACTING LOAD ON SHIELD MACHINE BASED ON IN-SITU MEASUREMENTS

杉本光隆*・玉村公児**

Mitsutaka SUGIMOTO and Kouji TAMAMURA

This paper aims to make clear the acting loads on shield machine based on in-situ measurements. A developed model of acting load in account of a shield machine behavior is in use to investigate the effect of shield machine behavior on the balance of force on shield machine. Furthermore, skin friction and soil reaction are calculated by reverse analysis method. As conclusions, the followings are made clear: 1) the validity of this model is inspected, and the shield machine behavior is important to investigate the acting load on shield machine, and 2) coefficient of skin friction and that of soil reaction in this site are made clear.

Keywords: shield tunnelling, acting load on shield machine, skin friction, soil reaction

1. はじめに

現在、都市トンネルの大部分は密閉型シールド工法により施工されている。近年においてはエキスパートやAIを利用した自動掘進システムが採用され、これに伴い多くの実測データも得られるようになってきている。しかし、シールドマシンに作用する外力やシールドマシンの挙動については未だ未解明な点が多い。こうした点を明らかにするためには、実測データを基にした解析が必要^{1,2)}であり、さらに、シールドマシンに作用する力が力学的釣合条件を満たすためには、シールドマシンの挙動・掘進条件を考慮に入れた解析が必要¹⁾である。そこで、本研究は、シールドマシンの挙動を考慮にいれたシールドマシン作用力解析モデルを実測データに適用することにより、周面動摩擦係数・地盤反力係数を把握するとともに、シールドマシン作用力を解明することを目的とする。

2. 解析方法

図1に解析手順を、図2にマシン作用力のモデルを示す。解析にあたっては以下のように考えた。

① シールドマシンは剛体とみなす。

* 正会員 工博 長岡技術科学大学 助教授 建設系

** 学生会員 長岡技術科学大学 大学院 建設工学専攻

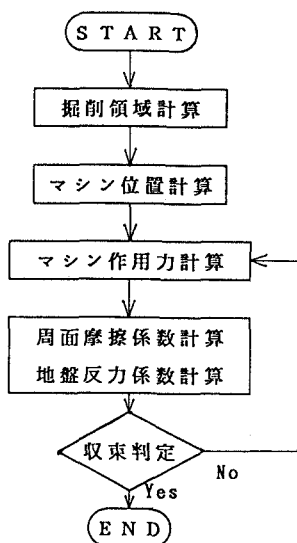
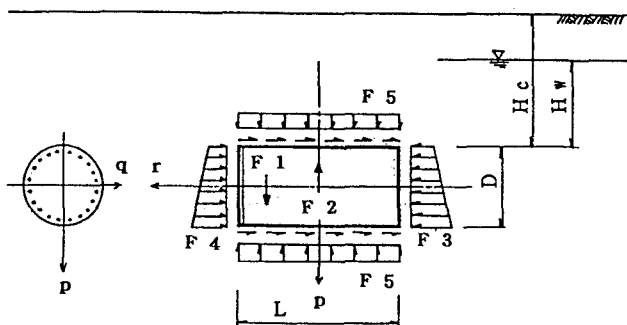


図1 解析手順



(凡例)

- F 1 : シールドマシン自重
- F 2 : “
- F 3 : “
- F 4 : 切羽土圧
- F 5 : 側方土圧

図2 マシン作用力のモデル

②掘削領域・マシン位置は、シールドトンネル計画位置・シールドマシン位置誤差・シールドマシン回転角を基に計算する。

③マシン作用力としては、シールドマシン自重・シールドマシン浮力（砂質土地盤）・ジャッキ推力・切羽土水圧・側方土圧（シールドマシン法線方向地盤反力・シールドマシン軸方向及び軸直角方向周面摩擦力）を用い、各作用力毎にマシン座標系表示の力の6成分（ $F_p \cdot F_q \cdot F_r \cdot M_p \cdot M_q \cdot M_r$ ）を計算する。ここで、マシン座標系とは、ジャッキ反力面位置中心を原点とし、ローリング角0での鉛直下向きをp軸とし、マシン軸方向をr軸とした座標系（p, q, r）である。

④切羽土圧は静止時水平土圧とし、静止土圧係数はJakyの式で与える。

⑤シールドマシン法線方向地盤反力 F_{51} は、地盤反力係数³⁾の考え方を基に、次式で表わされるとした。

$$F_{51} = S \times \sigma_{n0} \times KR(u_1) \quad (1)$$

S : 作用面積	KR : 土圧倍率
σ_{n0} : シールドマシン法線方向静止土圧	u_1 : シールドマシン法線方向地盤変形量

ここで、地盤変形量は、シールドマシン外周面上の点から掘削領域までの変位である。また、土圧倍率は、地盤変形量の関数で与えられるシールドマシン法線方向土圧を、静止時法線方向土圧で除した無次元量であって、Logistic曲線⁴⁾で表わした。これは、側方土圧の主働・受働状態を考慮に入れるためである。地盤変形量と土圧倍率（地盤反力係数を基にした土圧倍率と式(2)で与えられるLogistic曲線で表わした土圧倍率）の関係を図3に示す。

$$KR(u_1) = (SP - SA) / \left(1 - \frac{1 - SP}{1 - SA} \exp(-a u_1)\right) + SA \quad (2)$$

$SP = \sigma_p / \sigma_0$	σ_0 : 静止土圧
$SA = \sigma_a / \sigma_0$	σ_p : 受働土圧

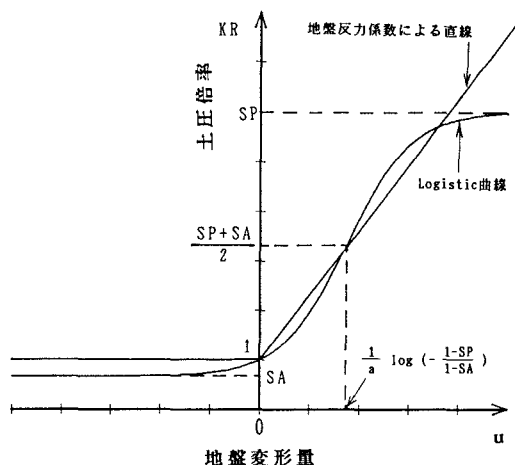


図3 地盤変形量と土圧倍率の関係

表1 トンネル形状・シールドマシン・周辺地盤の諸元

トンネル	延長 (m)	1106.835
	半径 (m)	3.350
	切り欠き幅 (m)	1.000
シールドマシン	半径 (m)	3.420
	全長 (m)	6.665
	自重 (tf)	276.700
	掘削半径 (m)	3.425
ジャッキ	常用推力 (tf/本)	200
	数量 (本)	24
	総推力 (tf)	4800
	ジャッキ位置半径 (m)	3.200
地山	地盤高 (m)	-4.975 ~ 2.717
	土被り (m)	16.120 ~ 22.788
	単位体積重 (tf/m ³)	1.66 ~ 2.00
	粘着力 (tf/m ²)	0 ~ 4.375
	内部摩擦角 (°)	6.5 ~ 42.5

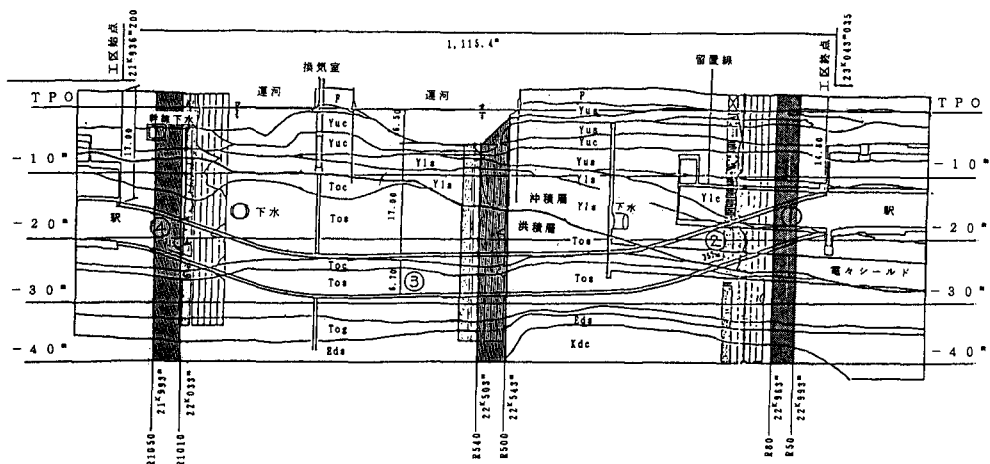


図4 地質縦断図

〔a : 地盤反力係数に対応するパラメータ σ_a : 主働土圧

⑥ シールドマシン軸方向周面摩擦力 F_{52} ・シールドマシン軸直角方向周面摩擦力 F_{53} は、次式で表わされる。

$$F_{52} = S(\mu \times \sigma_{n0} \times KR(u_1) + C) \quad (3)$$

$$F_{53} = \begin{cases} S(\mu \times \sigma_{n0} \times KR(u_1) + C) \times \text{Sgn}(-u_2) & (\text{粘性土地盤}) \\ 0 & (\text{砂質土地盤}) \end{cases} \quad (4)$$

〔 μ : シールドマシンと周辺地盤の動摩擦係数 u_2 : シールドマシン周方向変形量
C : 粘着力

⑦ マシン座標系 r 軸方向力 F_r 、p・q 軸回りモーメント M_p ・ M_q の力学的釣合条件に最小二乗法を適用

することにより、マシンと周辺地盤との動摩擦係数・地盤反力係数を求める。ここで、マシン座標系 $p \cdot q$ 軸方向力 $F_p \cdot F_q$ 、 r 軸回りモーメント M_r の力学的釣合条件を用いないのは、シールドマシン周方向応力及び、ジャッキ反力面トンネル軸直角方向力が、他の力成分に対応して発生し、力学的釣合条件は自動的に満たされると考えたからである。

3. 解析結果と考察

3. 1 解析データ

解析に用いたデータは、東京海浜部に、泥水式シールド工法を用いて施工された単線鉄道トンネルのデータである。同トンネルの形状・シールドマシン・周辺地盤の諸元を表1に、また、同トンネルの地質縦断面図を図4に示す。

3. 2 解析結果

沖積砂質シルト層 (N 値=0~3、 $\phi=6.5^\circ$ 、 $C=4.375 \text{ tf/m}^2$ 、 $\gamma=1.66 \text{ tf/m}^3$) における周面動摩擦係数・地盤反力係数の逆解析結果は、それぞれ0.11、 0.28 kgf/cm^2 となった。また、同地層部内70Ring (土被り17.0m、地下水位14.4m、縦断勾配：上り35%、平面曲線半径：右へ $R=1000\text{m}$) 施工時のシールドマシン作用力を表2に、掘削領域とシールドマシンとの位置関係、及び、シールドマシン法線方向応力分布を図5に示す。一方、洪積砂層 (N 値=25~40、 $\phi=40^\circ$ 、 $C=0 \text{ tf/m}^2$ 、 $\gamma=2.0 \text{ tf/m}^3$) における周面動摩擦係数・地盤反力係数の逆解析結果は、それぞれ0.65、 0.42 kgf/cm^2 となった。また、同地層部内1037Ring (土被り18.8m、地下水位16.2m、縦断勾配：下り35%、直線部) 施工時のシールドマシン作用力を表3に、掘削領域とシールドマシンとの位置関係、及び、シールドマシン法線方向応力分布を図6に、地盤変形量と土圧の関係を図7に示す。なお、本解析では、周方向を18分割・シールドマシン軸方向を6分割し、側方土圧を求めた。

これより、以下のことがわかる。

- ① シールドマシン法線方向土圧は、地盤変形量に大きく影響されていること。
- ② 上記影響を考慮にいれた側方土圧の各成分は無視できないこと。
- ③ マシン作用力の残差は、 $F_r \cdot M_p \cdot M_q$ 成分で小さく、 $F_p \cdot F_q \cdot M_r$ 成分で大きいこと。
- ④ 粘性土地盤では、粘着力 C によるシールドマシン軸方向摩擦力が、周面動摩擦係数によるシールドマシン軸方向摩擦力より卓越すること。
- ⑤ 本解析で得られた粘性土地盤での地盤反力係数は、既往の研究^{2,3)}と整合しているが、一方、本解析で得られた砂質土地盤での地盤反力係数は、既往の研究³⁾よりかなり小さく、同周面動摩擦係数は、既往の研究

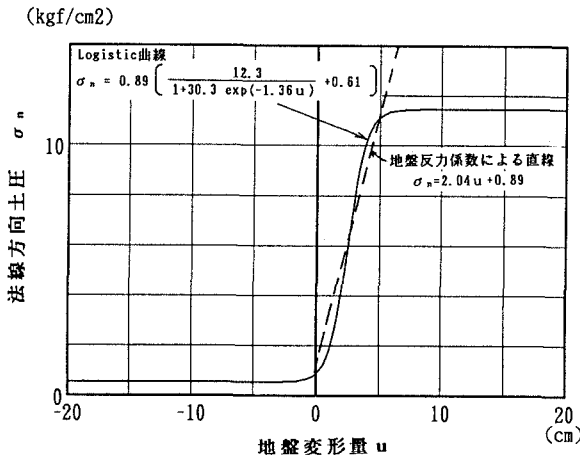
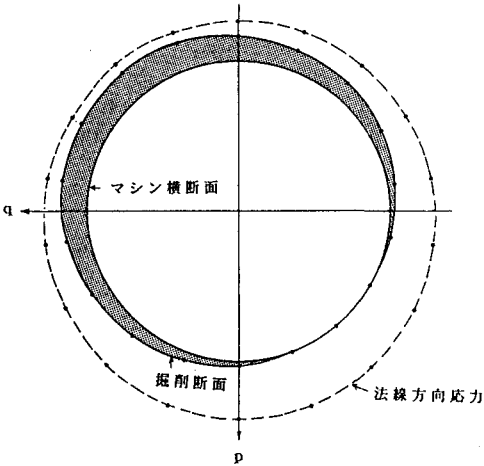


図7 地盤変形量と土圧の関係 (1037 Ring)

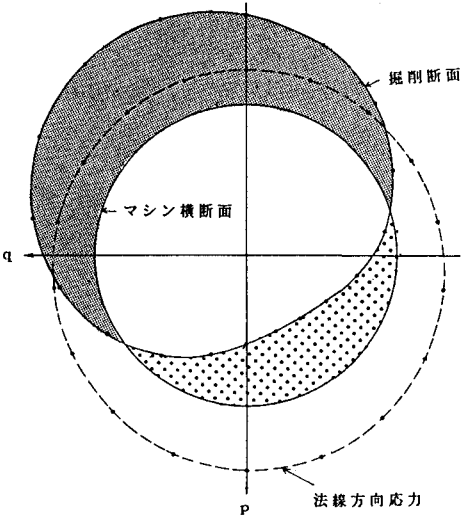
表 2 シールドマシン作用力一覧表
(70 Ring)

	Fp	Fq	Fr	Mp	Mq	Mr
F1:自重	277	0	8	0	3	0
F2:浮力	0	0	0	0	0	0
F3:推力	0	0	2143	-357	-1429	0
F4:切羽土圧	0	0	-1106	0	159	80
F5:側方土圧	-470	-13	-1045	347	1272	-66
合 計	-193	-13	0	-10	5	14

(単位: t f, m系)



カッターフェイス後方0.56m



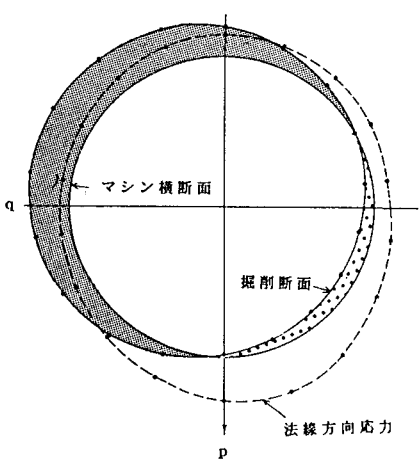
カッターフェイス後方6.11m

図 5 掘削領域とシールドマシンとの位置関係・
シールドマシン法線方向応力 (70 Ring)

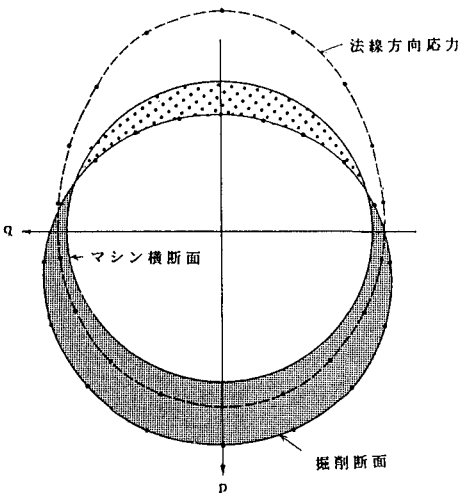
表 3 シールドマシン作用力一覧表
(1037 Ring)

	Fp	Fq	Fr	Mp	Mq	Mr
F1:自重	277	0	-8	0	2	0
F2:浮力	-208	0	6	0	392	0
F3:推力	0	0	2792	-385	51	0
F4:切羽土圧	0	0	-1052	0	147	70
F5:側方土圧	-158	120	-1749	327	-600	0
合 計	-89	120	-11	-58	-8	70

(単位: t f, m系)



カッターフェイス後方0.56m



カッターフェイス後方6.11m

■ 周辺地盤主働状態
□ 周辺地盤受働状態
地盤変位 0 1 2 cm
応 力 0 20 40 tf/m²

図 6 掘削領域とシールドマシンとの位置関係・
シールドマシン法線方向応力 (1037 Ring)

²⁾と整合しているものの、シールドマシン設計時に通常用いられる値よりは、かなり大きくなっていること。

3. 3 考察

これらは、以下のように考えられる。

- ① シールドマシン作用力を解析するには、掘削領域とシールドマシンとの位置関係を考慮する必要があること。
- ② シールドマシン作用力 $F_p \cdot F_q \cdot M_r$ 成分の残差が大きいのは、シールドマシン周方向摩擦力を、粘性土地盤では最大値を与えると想定される、砂質土地盤では最小値を与えると想定される式(2)で与えたためであって、実際には、シールドマシン周方向摩擦力は、両者の間の値を取ると考えられる。
- ③ 粘性土地盤と比較して、砂質土地盤の周面動摩擦係数が大きくなっているのは、切羽土圧が静止土圧より大きくなっていること、及び、実際の地盤では粘着力が0ではないこと等のためであるとも考えられる。また、砂質土地盤の地盤反力係数が、粘性土地盤よりは大きくなっているが、既往の研究よりかなり小さくなっていることについては、今後の課題としたい。

4. まとめ

掘削領域とシールドマシンとの位置関係を考慮に入れたシールドマシン作用力解析モデルを実測データに適用して、シールドマシン作用力を解析することにより、同モデルの妥当性を検証した。この結果、得られた知見を以下に列記する。

- ① シールドマシン作用力を解析するには、掘削領域とシールドマシンとの位置関係を考慮する必要がある。
- ② 本解析の対象となった粘性土地盤の周面動摩擦係数・地盤反力係数は、 0.11 、 0.28 kgf/cm^3 であり、同砂質土地盤の周面動摩擦係数・地盤反力係数は、 0.65 、 0.42 kgf/cm^3 である。

最後に、本研究にあたり、貴重な現場の実測データを提供して下さいました関係各位に深謝の意を表します。

5. 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) 吉田保, 山田孝治: 泥土圧シールド掘進時の切羽土圧と周面摩擦力について, 土木学会論文集, No. 445/Ⅲ-18, pp. 75-82, 1992. 3.
- 3) 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.
- 4) 八十島義之助, 花岡利幸: 交通計画, 技報堂, pp. 136-138, 1971.