

リングせん断試験によるスキンプレート周りの 動摩擦特性に関する研究

Study on Dynamic Friction Characteristic around Skinplate by Ring Shear Test

杉本光隆¹・徳山英之²・豊田浩史³・中村公一⁴

Mitsutaka Sugimoto, Hideyuki Tokuyama, Hirofumi Toyota and Kouichi Nakamura

¹正会員 工博 長岡技術科学大学教授 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

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

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

⁴正会員 工博 長岡技術科学大学研究生 環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

In shield tunnelling, the frictional resistance of ground against the shield skinplate is a major factor of jack thrust. However, there are few laboratory test results on the dynamic friction characteristics concerned with shield. Therefore, this research investigates the above dynamic friction characteristics by the ring shear test, where the surface roughness, the soil type, the inclusion, the shear speed and the confining pressure are taken as test parameters. Furthermore, the influence of those test parameters on the dynamic friction characteristics are discussed.

Key Words : shield tunnelling, dynamic friction of ground, skinplate, ring shear test

1. はじめに

近年、シールド機の挙動を理論的に表現するための力学モデルの開発^{1),2),3),4)}が行われてきている。これらのモデルに含まれる物性値の中には未解明な値もあり、シールド機挙動の解析精度を高めるためには、こうした未解明な物性値を明らかにしていく必要がある。これらの物性値の内、シールドジャッキ推力に関する摩擦特性としては、①スキンプレートと地盤の摩擦特性、②ワイヤブラシとセグメントの摩擦特性、③グリースとセグメントの摩擦特性がある。さらに、摩擦特性には、シールド機が掘進を開始する時に発生する静止摩擦応力と、シールド機が掘進している時に発生している動摩擦応力がある。前者は最大摩擦力、ピーク強度等と呼ばれ、後者は残留強度等とも呼ばれる。また、摩擦応力 τ は一般に次式で表されるので、摩擦係数 μ と着力 c が、摩擦特性を表す指標となる。

$$\tau = \sigma_n \tan \phi + c$$

ここで、

σ_n : 法線方向応力

ϕ : 摩擦角

$\tan \phi$: 摩擦係数 (μ)

である。以後、上記の定義を用いて記述する。

シールドジャッキ推力に関する摩擦特性の内、スキンプレートと地盤の摩擦特性に関連する研究としては、杭の周面摩擦力の研究、シールド工法のスキンプレート周面摩擦力の研究、推進工法の推進管周面摩擦力の研究等がある。杭の周面摩擦力の研究^{5),6),7)}では、リングせん断試験、一面せん断試験、原位置周面摩擦測定試験により、杭と地盤との間に隙間がない状態での、主として静止摩擦応力を求め、砂質土、粘性土ともに、これを静止摩擦係数(静止摩擦角)で表わし、静止摩擦係数は杭の表面粗さに大きく影響されること、表面粗さの静止摩擦係数への影響は粘性土より砂質土の方が大きいこと、表面の最大高さ R_{max} ⁸⁾が $14\mu\text{m}$ 以下では静止摩擦角は粒子間摩擦角より小さくなり、表面が滑らかな場合の静止摩擦角は粒子間摩擦角の約半分に、表面が粗い場合の静止摩擦角は粒子間摩擦角と内部摩擦角の関

(1)

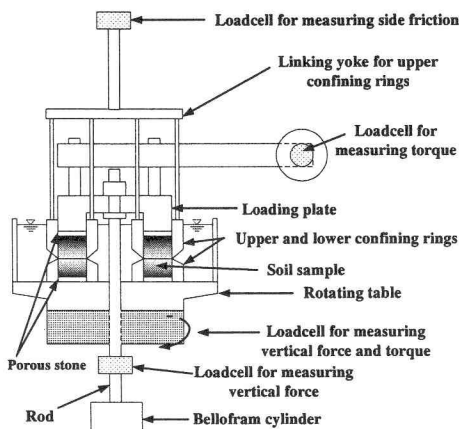


図-1 リングせん断試験装置

数になることを結論として述べている。また、シールド工法のスキンプレート周面摩擦力の研究では、吉田ら⁹⁾は、シールドジャッキ推力からチャンパー泥土圧相当の力を差し引いた値をスキンプレート周面摩擦力とし、スキンプレートには静止土圧が作用していると仮定して、現場計測データからシールド掘進時のスキンプレート周りの動摩擦応力を求め、砂質土の動摩擦応力を動摩擦係数で、粘性土の動摩擦応力を動的付着力（周面摩擦力）で表わし、密な砂質土では動摩擦係数が急増すること、粘性土の場合には、地盤が硬質な程、シールド径が小さい程、地山の自立性がよいので、動的付着力が地盤の粘着力より小さくなることを結論として述べている。また、小笠原ら¹⁰⁾は、一面せん断試験、模型実験により、スキンプレートと砂質土との間に隙間がない状態での動摩擦応力を求め、これを動摩擦係数で表わし、動摩擦係数はスキンプレートの表面粗さに大きく影響されると述べている。また、推進工法の推進管周面摩擦力の研究¹¹⁾では、現場計測データから推進管に作用する静止摩擦応力を求め、砂質土の静止摩擦応力を静止摩擦係数で、粘性土の静止摩擦応力を静的付着力で表わし、粘性土の場合には、硬質な程、静的付着力が小さくすると述べている。

一般に、摩擦特性は、摩擦面両側の材料、摩擦面の介在物、および、その表面粗さによって規定される。したがって、摩擦特性を求めるためには、上記の材料条件を考慮しなければならない。さらに、シールド機掘進時の動摩擦特性を把握するためには、掘進速度、法線方向作用土圧といった施工条件を考慮する必要がある。また、動摩擦特性を把握するためには、大きなせん断変位が必要で、このような場合には、一般にリングせん断試験を行うことが多い。

表-1 実験因子

摩擦特性	材料1		材料2	介在物	せん断速度 V_s mm/min	鉛直応力 σ_a kPa
	材料	表面粗さ				
スキンプレート と 地盤	鉄	滑らか 普通 粗い	粘土 砂	無し 水 泥水	0.02	100
					0.2	300
					5	500
					50	500
					76	500

そこで、本論文では、上記の材料条件・施工条件を実験因子として、リングせん断試験を行い、シールドジャッキ推力に関係する摩擦特性の内、スキンプレートと地盤の動摩擦特性を明らかにすることを目的とする。

2. 試験方法

(1) リングせん断試験

リングせん断試験は、残留強度¹²⁾を求めるために使われる唯一の大変位せん断試験¹³⁾である。本研究で使用したリングせん断試験装置の概要を図-1に示す。拘束リングの外径・内径はそれぞれ15cm、10cmである。試料の圧密や漏れを考慮し、上部には鉄の供試体を、下部には高さ1cmの土の供試体を設置した。また、従来のピシヨップ型装置¹³⁾に対して、以下の改良を行った¹⁴⁾。

- ①回転盤の下に鉛直力・トルク兼用ロードセルを設置した。この改良により、せん断面に作用する鉛直力とせん断力を直接測定することができる。
- ②摩擦軽減のため内外拘束リングにテフロンコーティングを施した。
- ③実際のシールド機掘進速度に相当する高速せん断（最大せん断速度76mm/min）ができるようにした。

試験条件は、鉛直応力を一定に保つ定圧試験で、初期せん断試験と残留せん断試験の2通りの方法で行った。初期せん断試験は試料にせん断変位を全く与えていない状態からせん断する試験で、残留せん断試験は一旦残留状態までせん断を行った状態からせん断する試験である。初期せん断試験により粘土を高速せん断した場合のピーク強度近傍では、粘土は非排水状態で、間隙水圧が発生することから、全応力で静止摩擦応力を評価することになる。その他の場合には、間隙水圧が消散していることから、有効応力で摩擦応力を評価することになる。

(2) 実験因子

前述したように、材料条件として摩擦面両側の材料・摩擦面の介在物・表面粗さ、施工条件としてせ

表-2 材料の表面粗さ

測定時期	材料	表面粗さ	$R_z(\mu m)$	$R_a(\mu m)$	$R_{JIS}(\mu m)$
使用前	鉄	滑らか	4.21	0.65	2.98
		普通	7.81	1.22	5.16
		粗い	27.96	4.39	18.59
使用后	鉄	滑らか	4.86	0.61	3.13
		普通	5.51	0.77	3.59
		粗い	23.11	4.20	15.11
—	鋼材	旋盤仕上げ	12.73	2.22	9.06
		L字鋼	18.15	3.58	14.18
		ペンキ塗布	22.28	3.91	14.83

表-3 カオリン粘土の物性

ρ_s g/cm ³	WL %	WP %	IP	含水比 %	ϕ' deg
2.70	47.0	29.8	17.2	40.0	29.5

表-4 ベントナイトの物性

銘柄	石符
膨潤度 Jec 法	超微粉
膨潤度 acc 法	7±0.5
水分	20~22
見掛比重	10%以下
真比重	0.30~0.40
砂質分	0.5%以下
PH	9.5±1

ん断速度・鉛直応力に着目し、これらを実験因子とした。実験因子を表-1に示す。

材料1は表面粗さを有する材料で、鉄はスキンプレートに対応している。また、鉄は、2種類の表面仕上げを行った供試体(表-1の「滑らか」、「普通」)と、表面を紙ヤスリで傷つけた供試体(表-1の「粗い」)を用いた。これらの表面粗さを表-2に示す。ここで、 R_z は最大高さを、 R_a は算術平均粗さを、 R_{JIS} は十点平均粗さである¹⁵⁾。この表から、スキンプレートの表面粗さは、本実験の表面粗さが普通~粗い場合に相当していること、実験前後で表面粗さが普通~粗い場合、表面粗さが若干滑らかになっていることがわかる。

材料2は地盤試料で、市販の豊浦砂とカオリン粘土を使用した。それぞれの粒度分布を図-2に示す。豊浦砂($\rho_s=2.65$, $e_{max}=0.990$, $e_{min}=0.597$)は、気乾状態のものを下拘束リング内に堆積させ、振動により高さ1cm、相対密度 $Dr=70\%$ (有効内部摩擦角 $\phi'=36.4$ 度)に調整した。カオリン粘土については、含水比100%のスラリーを脱気し、鉛直応力100kPaを載荷する場合には90kPaで、それ以上の鉛直応力を載荷する場合には150kPaで、24時間一次元予圧密を行った飽和度100%の土塊を高さ3cmに成形し、拘束リング内に設置し、さらに、所定の鉛直応力で圧密した。圧密打ち切り時間は3 τ 法に従った。その後、下拘束リングに合わせて高さ1cmで切断した。また、残留せ

表-5 実験ケース一覧

着目点	No.	材料1 材料 表面粗さ	材料2 材料 介在物	せん断速度 V_s mm/min	鉛直応力 σ_v kPa
せん断速度	1~3	鉄 普通	粘土 無し	0.02	100
	4~6			0.2	300
	7~9			5	500
	10~12			50	
	13~15			76	
	16~18		砂 無し	5	
	19~21			50	
	22~24		粘土 水		
	25~27				
	28~30		砂 水		
	31~33				
表面粗さ	34~36	滑らか	粘土 無し		
	37~39			水	
	40~42			泥水	
	43~45			水	
	46~48			泥水	
	49~51	粗い	粘土 無し		
	52~54			水	
	55~57			泥水	
	58~60			水	
	61~63		砂 無し		
	64~66			水	
	67~69			泥水	
初期せん断	7~9'	鉄 普通	粘土 無し	5	100,300,500
	12'			50	500
	16'~18'			5	100,300,500

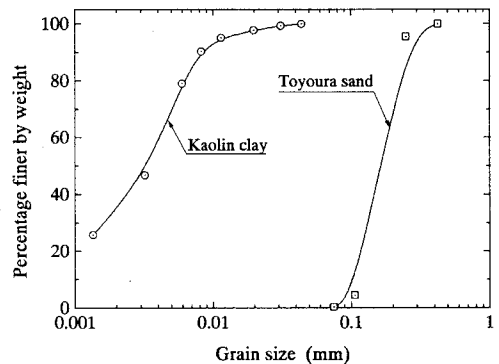


図-2 粒径加積曲線

ん断試験を行う場合には、鉛直応力を繰り返し減少させながら試験を行った。使用したカオリン粘土の物性を表-3に示す。

介在物としては、介在物が無い場合、水がある場合、切羽泥水がスキンプレート周辺に回り込んだ状況を想定した泥水がある場合を実験条件とした。泥水は市販のベントナイトをスラリー密度 1.10g/cm^3 に調整して用いた。使用したベントナイトの物性を表-4に示す。

せん断速度 V_s の摩擦特性への影響を把握するため、 V_s を 0.02, 0.2, 5, 50, 76mm/min とした。0.02mm/min は標準的なリングせん断試験のせん断速度で、50mm/min はシールド機のやや速めの掘進速度で、

76mm/min は本リングせん断試験機の最大せん断速度である。

また、鉛直応力 σ_n は、実際のシールド機に作用する法線方向土圧を考慮して、100, 300, 500kPaとした。

実験ケースの一覧を表-5に示す。

3. スキンプレートと粘土地盤の摩擦特性

カオリン粘土を用いて行ったリングせん断試験結果を表-6、表-7に示す。ここで、下サフィックス s, d は静止摩擦、動摩擦で、下サフィックス 95min, 95max は t 分布による有意水準 95%の最小、最大推定値である。

(1) 静止摩擦応力と動摩擦応力の関係

図-3は、鉄の表面粗さ：普通、介在物：無し、鉛直応力 $\sigma_n=500\text{kPa}$ 、せん断速度 $V_s=5\text{mm/min}$ 、 50mm/min で行った初期せん断試験の結果である。この図より、せん断速度 $V_s=50\text{mm/min}$ の静止摩擦応力（ピーク値）は $V_s=5\text{mm/min}$ の静止摩擦応力より小さいことがわかる。これは、計測時間間隔 10 秒に対して、 $V_s=50\text{mm/min}$ は速すぎて、ピーク値を捉えることができなかったためと考えられる。したがって、初期せん断試験を行う場合には、せん断速度 5mm/min で行うこととした。

図-4は、鉄の表面粗さ：普通、介在物：無し、鉛直応力 $\sigma_n=500\text{kPa}$ 、せん断速度 $V_s=5\text{mm/min}$ で行った初期せん断試験と残留せん断試験の結果である。この図から、初期せん断試験から得られる動摩擦応力と残留せん断試験から得られる動摩擦応力は、ほぼ同じであることがわかる。したがって、残留せん断試験で、鉛直応力を繰り返し減少させながら、動摩擦応力を求めることとした。

図-5は、鉄の表面粗さ：普通、介在物：無し、せん断速度 $V_s=5\text{mm/min}$ で行った初期せん断試験の結果である。動摩擦角 $\phi_d=13.2$ 度、静止摩擦角 $\phi_s=22.8$ 度となった。したがって、各摩擦角と有効内部摩擦角 ϕ' との比は $\phi_d/\phi'=0.77$ 、 $\phi_s/\phi'=0.45$ で、両摩擦角の比は $\phi_d/\phi_s=0.58$ となった。

(2) せん断速度の動摩擦特性への影響

図-6は、鉄の表面粗さ：普通、介在物：無しで、せん断速度 V_s を0.02, 0.2, 5, 50, 76mm/minと変化させた場合の残留せん断試験の結果である。この図から、どのせん断速度でも動摩擦角（ $\phi_d=13.2$ 度）

表-6 カオリン粘土と鉄の静止摩擦特性

粗さ	介在物	V_s mm/min	動摩擦応力(kPa)			μ_s	$\phi_{s95\text{min}}$ deg	ϕ_s deg	$\phi_{s95\text{max}}$ deg
			100*	300*	500*				
普通	無し	5	50.6	132.6	204.1	0.420	19.6	22.8	25.8
		50	—	—	178.3	—	—	—	—

*: 鉛直応力(kPa)

表-7 カオリン粘土と鉄の動摩擦特性

粗さ	介在物	V_s mm/min	動摩擦応力(kPa)			μ_d	$\phi_{d95\text{min}}$ deg	ϕ_d deg	$\phi_{d95\text{max}}$ deg
			100*	300*	500*				
普通	無し	0.02	24.5	79.0	109.0	0.230	9.6	13.0	16.2
		0.2	26.8	73.1	109.7	0.227	10.7	12.8	14.9
		5	24.8	77.1	112.6	0.234	10.8	13.2	15.5
		50	27.1	76.1	113.0	0.234	10.9	13.2	15.4
		76	26.4	73.1	112.3	0.231	11.3	13.0	14.6
		水	50	30.1	72.8	0.229	10.3	12.9	15.4
滑らか	無し	50	24.8	67.9	97.0	0.204	8.8	11.5	14.2
		水	50	24.5	69.9	0.235	12.9	13.2	13.6
		泥水	50	24.5	75.4	0.234	11.5	13.2	14.9
粗い	無し	50	23.8	62.4	92.4	0.192	8.7	10.9	13.0
		水	50	37.9	109	0.340	16.2	18.8	21.2
		泥水	50	34.3	101.9	0.271	7.8	15.1	22.0
		50	33.6	81.3	116.2	0.245	10.0	13.8	17.5

*: 鉛直応力(kPa)

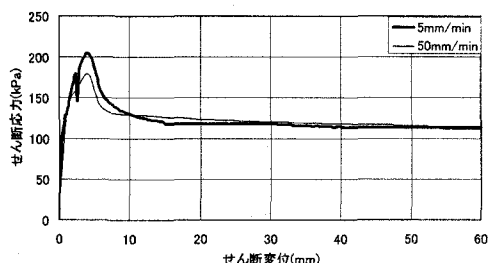


図-3 せん断速度の摩擦応力への影響

(カオリン粘土、粗さ：普通、介在物：無し、 $\sigma_n=500\text{kPa}$)

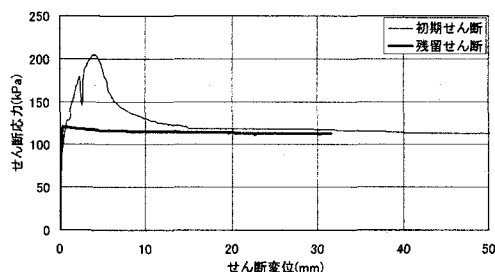


図-4 初期せん断試験と残留せん断試験の比較

(カオリン粘土、粗さ：普通、介在物：無し、 $V_s=5\text{mm/min}$ 、 $\sigma_n=500\text{kPa}$)

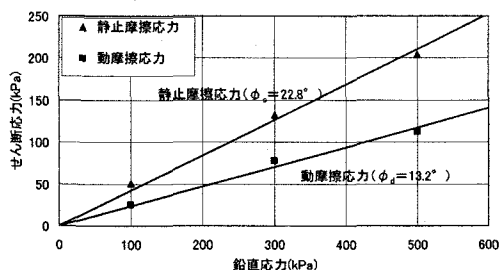


図-5 静止摩擦応力と動摩擦応力の比較

(カオリン粘土、粗さ：普通、介在物：無し、 $V_s=5\text{mm/min}$)

はほぼ同じとなることがわかる。これは、カオリン粘土の場合、せん断速度は動摩擦応力に影響しないことを示している。したがって、残留せん断試験を行う場合には、せん断速度 50mm/min で行うこととした。

(3) 表面粗さの動摩擦特性への影響

図-7 は、介在物：無し、せん断速度 $V_s = 50\text{mm/min}$ で、鉄の表面粗さ：滑らか、滑らか、粗い場合の残留せん断試験の結果である。この図より、鉄の表面粗さが滑らか ($R_z = 4.21\mu\text{m}$) と普通 ($R_z = 7.81\mu\text{m}$) の場合には動摩擦角はほぼ同じ値 ($\phi_d = 13.2^\circ$) となること、鉄の表面粗さが粗い ($R_z = 27.96\mu\text{m}$) 場合にはそれより動摩擦角が大きくなること ($\phi_d = 18.8^\circ$) がわかる。これは、鉄の表面粗さがある一定以上に粗くなると、動摩擦応力が増加することを示していて、岸田らの研究結果⁹⁾と整合している。

(4) 介在物の動摩擦特性への影響

図-8 は、せん断速度 $V_s = 50\text{mm/min}$ 、介在物：無し、水、泥水の場合、鉄の表面粗さ：滑らか、普通、粗い毎の残留せん断試験の結果である。これらの図より以下のことがわかる。

①鉄の表面粗さが滑らかな場合、介在物無し ($\phi_d = 13.2^\circ$) と摩擦面に水がある場合 ($\phi_d = 13.2^\circ$) の動摩擦角はほぼ同じとなる。また、摩擦面に泥水がある場合 ($\phi_d = 10.9^\circ$) には、それより動摩擦角が小さくなる。

②鉄の表面粗さが普通の場合、介在物無し ($\phi_d = 13.2^\circ$) と摩擦面に水がある場合 ($\phi_d = 12.9^\circ$) の動摩擦角はほぼ同じとなる。また、摩擦面に泥水がある場合 ($\phi_d = 11.5^\circ$) には、それより動摩擦角が小さくなる。

③鉄の表面粗さが粗い場合、介在物無しの動摩擦角 ϕ_d は 18.8° で、摩擦面に水がある場合の動摩擦角 ($\phi_d = 15.2^\circ$) は、摩擦面に泥水がある場合の動摩擦角 ($\phi_d = 13.8^\circ$) に近くなる。

これらは以下のように考えられる。

①鉄の表面粗さが滑らか、普通の場合には、カオリン粘土の透水性が低いため、摩擦面にある水は排水されて介在物無しと同じ状態になった。また、摩擦面にある泥水は鉄の表面に一部残り、摩擦を低減した。

②鉄の表面粗さが粗い場合には、鉄の表面の凸凹が大きいために、水が摩擦面に一部残り、摩擦を低減した。

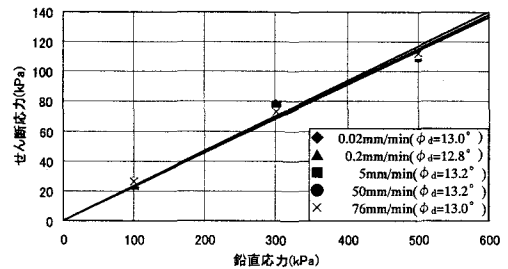


図-6 せん断速度の動摩擦応力への影響

(カオリン粘土、粗さ：普通、介在物：無し)

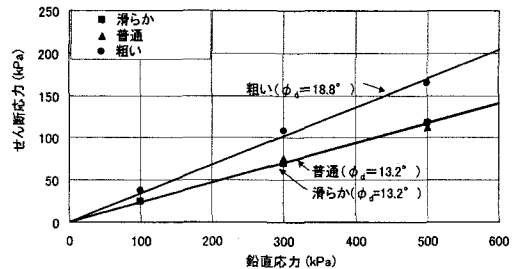


図-7 表面粗さの動摩擦応力への影響

(カオリン粘土、介在物：無し、 $V_s = 50\text{mm/min}$)

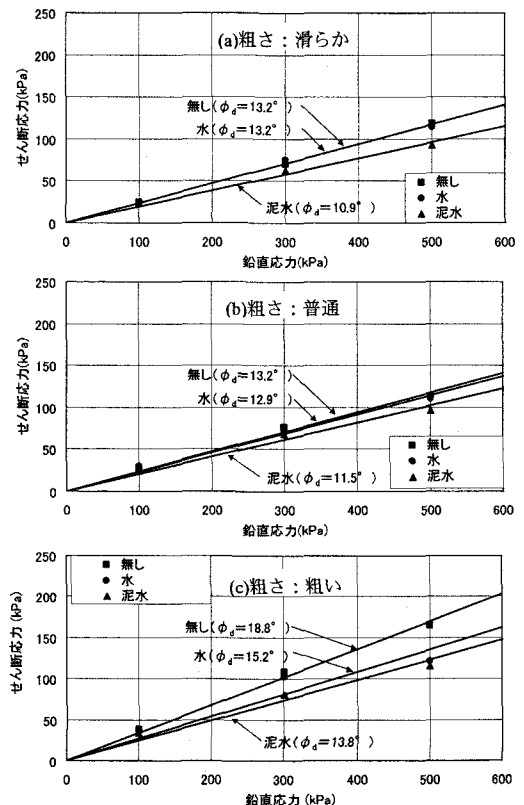


図-8 介在物の動摩擦応力への影響

(カオリン粘土、 $V_s = 50\text{mm/min}$)

表-8 豊浦砂と鉄の動摩擦特性

粗さ	介在物	V_s mm/min	動摩擦応力(kPa)			μ_d	ϕ_{d95min} deg	ϕ_d deg	ϕ_{d95max} deg
			100*	300*	500*				
普通	無し	5	43.1	124.4	208.3	0.417	22.2	22.6	23.0
		50	41.5	126.4	205.1	0.413	21.7	22.5	23.2
	水	50	40.5	155.4	240.0	0.488	22.8	26.0	29.0
		50	57.5	163.2	270.0	0.542	27.7	28.5	29.2
滑らか	無し	50	35.3	96.6	138.4	0.291	12.5	16.2	19.7
		50	56.0	130.0	215.0	0.435	20.3	23.5	26.6
	水	50	61.7	164.0	240.0	0.501	21.5	26.6	31.3
		50	71.5	204.1	325.8	0.661	31.5	33.5	35.3
粗い	無し	50	68.6	184.1	282.1	0.580	26.3	30.1	33.7
		50	60.4	171.7	279.5	0.564	28.2	29.4	30.6

*: 鉛直応力(kPa)

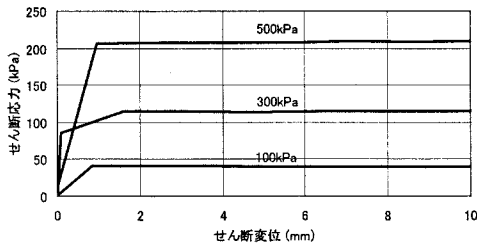


図-9 初期せん断による摩擦応力

(豊浦砂, 粗さ: 普通, 介在物: 無し,
 $V_s = 5\text{mm/min}$)

4. スキンプレートと砂質地盤の摩擦特性

豊浦砂を用いて行ったリングせん断試験結果と t 分布による有意水準 95%の動摩擦角推定値 ϕ_{d95min} , ϕ_{d95max} を表-8 に示す。

(1) 初期せん断試験結果

図-9 は, 鉄の表面粗さ: 普通, 介在物: 無し, せん断速度 $V_s = 5\text{mm/min}$ で行った初期せん断試験の結果である。この図では, 静止摩擦応力に相当するピーク値は存在しなかったが, 粘土より砂の方が, 小さいせん断変位でシャープなピーク値が発生する可能性があり, 今後, 小さいせん断速度で初期せん断試験を行い, 静止摩擦応力を確認する必要があると考える。また, 今回の初期せん断試験では明確な静止摩擦応力を捉えられなかったこと, 安定した残留せん断試験で, 鉛直応力を繰り返し減少させながら, 動摩擦応力を求めることとする。

(2) せん断速度の動摩擦特性への影響

図-10 は, 鉄の表面粗さ: 普通, 介在物: 無しで, せん断速度 V_s を 5, 50mm/min と変化させた場合の残留せん断試験の結果である。この図から, どのせん断速度でも動摩擦角 ($\phi_d = 22.5$ 度) はほぼ同じとなることがわかる。これは, 豊浦砂の場合, せん断速度は動摩擦応力に影響しないことを示している。したがって, 残留せん断試験を行う場合には, せん断速

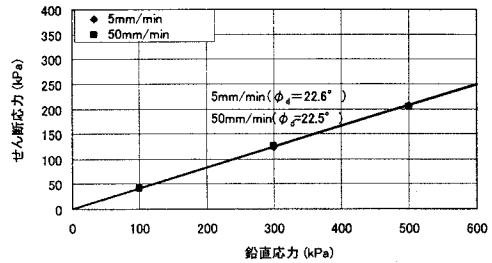


図-10 せん断速度の動摩擦応力への影響

(豊浦砂, 粗さ: 普通, 介在物: 無し)

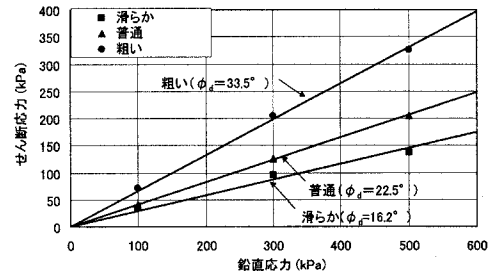


図-11 表面粗さの動摩擦応力への影響

(豊浦砂, 介在物: 無し, $V_s = 50\text{mm/min}$)

度 50mm/min で行うこととした。

また, 動摩擦角と有効内部摩擦角の比は $\phi_d / \phi' = 0.62$ となった。

(3) 表面粗さの動摩擦特性への影響

図-11 は, 介在物: 無し, せん断速度 $V_s = 50\text{mm/min}$ で, 鉄の表面粗さ: 普通, 滑らか, 粗い場合の残留せん断試験の結果である。この図より, 鉄の表面粗さが滑らか ($R_z = 4.21\mu\text{m}$, $\phi_d = 16.2$ 度), 普通 ($R_z = 7.81\mu\text{m}$, $\phi_d = 22.5$ 度), 粗い ($R_z = 27.96\mu\text{m}$, $\phi_d = 33.5$ 度) の順に動摩擦角が大きくなること, 滑らかから普通への動摩擦応力の増加より, 普通から粗いへの動摩擦応力の増加が大きいのことがわかる。これらは, 粘土より砂の方が, 鉄の表面粗さの動摩擦応力への影響が大きいことを示していて, 岸田らの研究結果⁹⁾と整合している。

(4) 介在物の動摩擦特性への影響

図-12 は, せん断速度 $V_s = 50\text{mm/min}$, 介在物: 無し, 水, 泥水の場合の, 鉄の表面粗さ: 滑らか, 普通, 粗い毎の残留せん断試験の結果である。これらの図より以下のことがわかる。

①鉄の表面粗さが滑らかな場合, 介在物無し ($\phi_d = 16.2$ 度), 摩擦面に水がある場合 ($\phi_d = 23.5$ 度), 摩擦面に泥水がある場合 ($\phi_d = 26.6$ 度) の順に, 動摩擦角が大きくなる。

②鉄の表面粗さが普通の場合、介在物無し ($\phi_d=22.5$ 度)、摩擦面に水がある場合 ($\phi_d=26.0$ 度)、摩擦面に泥水がある場合 ($\phi_d=28.5$ 度)の順に、動摩擦角が大きくなる。

③鉄の表面粗さが粗い場合、傾向が異なり、摩擦面に泥水がある場合 ($\phi_d=29.4$ 度)と摩擦面に水がある場合 ($\phi_d=30.1$ 度)の動摩擦角はほぼ等しく、介在物無し ($\phi_d=33.5$ 度)の動摩擦角が大きくなる。

④鉄の表面粗さが滑らか、普通、粗いに変化するにつれて、いずれの動摩擦角も増加するが、その増加の度合いは、摩擦面に泥水がある場合、摩擦面に水がある場合、介在物無しの順に大きくなる。

⑤表-8 から、摩擦面に水がある場合と摩擦面に泥水がある場合の動摩擦角に有意な差はないが、介在物無しの動摩擦角とは有意な差がある。

これらは以下のように考えられる。

①摩擦面に泥水がある場合には、ベントナイトが鉄の表面の凸凹を埋めて、鉄の表面粗さの変化を軽減した。また、摩擦面に水がある場合も同様に、鉄の表面粗さの動摩擦角への影響を軽減した。

②鉄の表面粗さが滑らか、普通の場合、介在物無しより摩擦面に泥水がある場合の動摩擦角が大きくなったのは、ベントナイトが砂の間隙に入り込んで、脱水され、ベントナイトのスラリー密度が増加したためである。

③鉄の表面粗さが滑らか、普通の場合、介在物無しより摩擦面に水がある場合の動摩擦角が大きくなったのは、今後の検討課題としたい。

5. まとめ

本論文では、材料条件として摩擦面両側の材料・摩擦面の介在物・表面粗さ、施工条件としてせん断速度・鉛直応力に着目し、これらを実験因子としてリングせん断試験を実施し、スキンプレートと地盤の動摩擦特性を求めた。得られた結論を以下に列記する。

①静止摩擦力：計測時間間隔に対して、せん断速度が速すぎると、静止摩擦応力（ピーク値）を捉えられないことがある。本研究では、表面粗さ：普通、介在物：無し、せん断速度 $V_s = 5\text{mm/min}$ で実験を行い、カオリン粘土の静止摩擦角 ϕ_s は 22.8 度となったが、豊浦砂の静止摩擦応力（ピーク値）を捉えることは出来なかった。

②動摩擦力：カオリン粘土・豊浦砂ともに、初期せん断試験と残留せん断試験による動摩擦応力はほぼ等しくなった。表面粗さ：普通、介在物：無し、せ

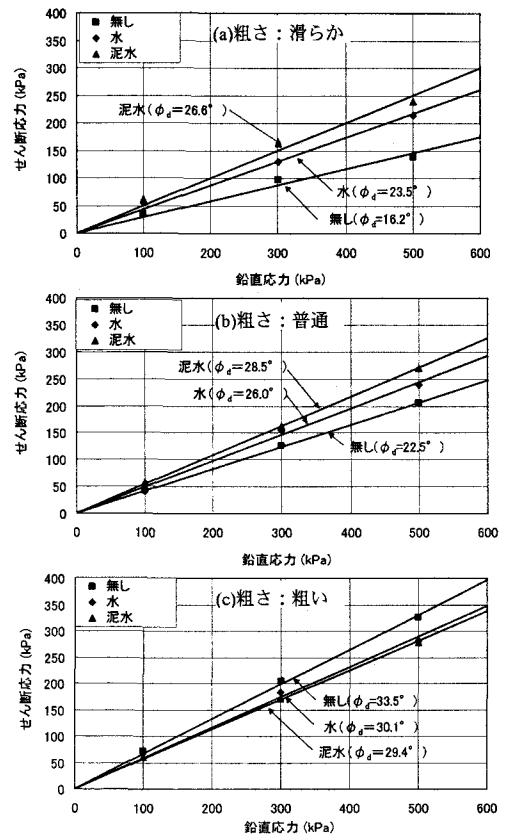


図-12 介在物の動摩擦応力への影響
(豊浦砂, $V_s = 50\text{mm/min}$)

ん断速度 $V_s = 50\text{mm/min}$ の場合、カオリン粘土の動摩擦角 ϕ_d は 13.2 度で、各摩擦角の比は、 $\phi_d/\phi' = 0.77$ 、 $\phi_d/\phi_s = 0.45$ 、 $\phi_d/\phi_s = 0.58$ となった。また、豊浦砂の動摩擦角 ϕ_d は 22.5 度で、動摩擦角と有効内部摩擦角の比は $\phi_d/\phi' = 0.62$ となった。

③せん断速度：カオリン粘土・豊浦砂ともに、せん断速度 $V_s = 50\text{mm/min}$ 以下では、せん断速度は動摩擦応力に影響しない。

④鉄の表面粗さ：カオリン粘土では、鉄の表面粗さがある一定以上に粗くなると、動摩擦角が増加する。一方、豊浦砂では、鉄の表面粗さが増加するとともに動摩擦角が増加する。また、カオリン粘土より豊浦砂は、鉄の表面粗さの動摩擦応力への影響が大きい。

⑤介在物：カオリン粘土では、鉄の表面粗さが一定以下の場合、介在物無しと摩擦面に水がある場合の動摩擦角はほぼ等しくなり、摩擦面に泥水がある場合の動摩擦角はそれより小さくなる。鉄の表面粗さが粗い場合、摩擦面に水がある場合の動摩擦角は、摩擦面に泥水がある場合の動摩擦角に近づく。これ

らは、カオリン粘土の透水性が低いため、摩擦面にある水が排水されたこと、摩擦面にある泥水が鉄の表面に残り、摩擦を低減したことのためであると考えられる。一方、豊浦砂では、鉄の表面粗さが滑らか、普通、粗いに変化するにつれて、いずれの動摩擦角も増加するが、その増加の度合いは、摩擦面に泥水がある場合、摩擦面に水がある場合、介在物無しの順に大きくなる。これらは、摩擦面に泥水がある場合には、ベントナイトが鉄の表面の凸凹を埋めて、鉄の表面粗さの変化を軽減していること、摩擦面に水がある場合も同様に、鉄の表面粗さの動摩擦角への影響を軽減しているためであると考えられる。

本論文で得られたスキンプレートと地盤の動摩擦特性を用いて、掘進中のスキンプレートと地盤の間に発生する動摩擦力を求めれば、シールド機の挙動をより高い精度で求めることができるようになると考えられる。

今後の課題は、以下のとおりである。

- ①小さいせん断速度で初期せん断試験を行い、豊浦砂の静止摩擦応力を確認する。
- ②豊浦砂で、鉄の表面粗さが滑らか・普通の場合で、介在物無し・摩擦面に水がある場合の動摩擦角について検討する。

謝辞：本研究は、科研費「リングせん断試験による地盤と鋼の動摩擦把握による急曲線シールド機モデルの高精度化」によって行ったものである。

参考文献

- 1) 赤木寛一、小宮一仁：有限要素法によるシールド工事の施工過程を考慮した地盤挙動解析，土木学会論文集，No.481/Ⅲ-25，pp.59-68，1993。
- 2) 武田洋，草深守人，吉田保，田中弘，黒川信子：有限要素法による接触問題の数値解法とシールドトンネルへの適用，土木学会論文集，No.603/Ⅲ-44，pp.1-10，1998。
- 3) 伊達健介，五十嵐寛昌，笹倉剛，建山和由：複円形シールド機の姿勢変化予測に関する研究，土木学会論文集，No.630/Ⅵ-44，pp.39-53，1999。
- 4) 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。
- 5) Yoshimi, Y. and Kishida, T.: Friction between sand and metal surface, *Proc. of 10th ICSMFE*, Vol.1, pp.831-834, 1981。
- 6) Yoshimi, Y. and Kishida, T.: A ring torsion apparatus for evaluating friction between sand and metal surface, *Geotechnical testing journal*, Vol.4, No.4, pp.145-152, 1981。
- 7) 東亜建設工業技術研究所：杭の新しい調査・設計法－フリクションメータによる杭の周面摩擦力の評価，TOTAL ENGINEERING SERIES S-2, 1994.7。
- 8) JIS：表面粗さ一定義および表示，JIS B0601-1982, 1982。
- 9) 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。
- 10) 小笠原政文，松下雅行，大泉英俊，白井孝典：シールドマシンと地山の摩擦に関する研究，構造工学論文集，Vol.43A, pp.1439-1448, 1997.3。
- 11) 南野輝久：推進工法の設計と施工，pp.77-93，森北出版，1981。
- 12) Skempton, A. W.: Residual strength of clays in landslide, folded strata and the laboratory. *Geotechnique*, 35(1), 3-18, 1985。
- 13) Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K. Anderson, A. and Brown, J. D.: A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength. *Geotechnique*, 21(4), 273-328, 1971。
- 14) 酒井直樹，豊田浩史，中村公一，杉本光隆：リングせん断試験による残留状態の評価と残留強度測定法に関する検討，土木学会論文集，No.743/Ⅲ-64，pp.223-228，2003。
- 15) JIS：表面粗さ一定義および表示，JIS B0601-2001, 2001。