

# 吸水性高分子摩擦低減剤（FRC）による ケーソン沈設時における摩擦低減効果

## Friction-reducing Effect of Absorbent Polymer for Pneumatic Caisson Method

中村 哲世士<sup>\*1</sup>  
Noriyoshi Nakamura

本田 省吾<sup>\*2</sup>  
Shougo Honda

梅崎 健夫<sup>\*3</sup>  
Takeo Umezaki

### 【要旨】

ニューマチックケーソン工法における周面摩擦力低減対策の一つとして、吸水性高分子摩擦低減剤（FRC）を躯体周面に直接塗布する工法（以下、FRC工法）が実施されている。FRC工法における摩擦低減効果を定量評価し、躯体の沈下関係を定量的に検討することを目的として、実物大のコンクリート版を用いた大型摩擦実験を行い、躯体面の粗度による影響、砂層と礫層におけるFRCの摩擦低減効果（摩擦応力、摩擦角）の比較、周面摩擦力および摩擦角に及ぼす変位速度と変位量の影響、および、FRCの塗布面積と摩擦低減効果の関係について検討した。

本稿は、地盤工学会第57回地盤工学研究発表会および土木学会第77回年次学術講演会で発表した、一連の実験結果から得られたFRC工法における摩擦低減効果に関する知見をまとめたものである。

【キーワード】 ニューマチックケーソン 周面摩擦 吸水性高分子摩擦低減剤 砂 礫 摩擦低減

## 1. はじめに

近年、地下構造物の大規模化・大深度化に伴い、工期や工費の面で有利なニューマチックケーソン工法（以下、潜函工法）の採用が増加している。潜函工法では、地上で構築した構造物をその自重で地中に沈下させるため、沈下力（躯体自重  $W_c$  + 載荷重  $W_w$ ）が沈下抵抗力（揚圧力  $U$  + 周面摩擦力  $F$ ）以上となる沈下条件を確保することが必須となる。

沈下条件の確保のために、沈下促進対策として載荷重  $W_w$  の増加対策や周面摩擦力  $F$  の低減対策を講じる場合が多い。周面摩擦力  $F$  の低減対策の一つとして、吸水性高分子摩擦低減剤（FRC）<sup>1,2)</sup> を躯体周面に直接塗布する工法（以下、FRC工法）が実施されている。FRC工法の実績では、十分な摩擦低減効果が確認されているが、現状では、定量的な摩擦低減率（周面摩擦力、摩擦角）が明確でないため、FRC工法を適用する場合の沈下条件の詳細な検討には至っていない。

そこで、FRC工法における摩擦低減効果を定量評価することを目的として、実物大の供試体（コンクリート版）と土層モデル（土槽装置を用いた地盤モデル）を用いた大型摩擦実験を行った。実験結果から得られたFRC工法の摩擦低減効果に関する知見として、(1)躯体面の粗度による影響、(2)砂層と礫層における影響の比較、(3)変位速度と変位量の影響、および、(4)FRCの塗布面積と摩擦低減効果の関係について報告する。

## 2. 大型摩擦実験の概要

一面せん断試験を参考にして、施工時に躯体面に垂直に作用する有効土圧  $\sigma$  と躯体沈下時に生じる摩擦応力  $\tau$  を再現するための実験装置を作製した（図-1）。粗度が異なる2種類の型枠材（化粧ベニヤ：粗度P、粗ベニヤ：粗度B）により作製したコンクリート版（RC版：幅600×長さ1500×厚さ200mm）を、土層（内寸法：幅1000×長さ1000×深さ300mm）内に充填した地盤モデル（砂層または礫層）の上面に設置し、2列のリニアールを介してコンクリート版上から油圧ジャッキにより土圧相当の垂直荷重を載荷しながら、横方向の油圧ジャッキでコンクリート版を水平移動させる大型の摩擦実験を実施した（写真-1）。

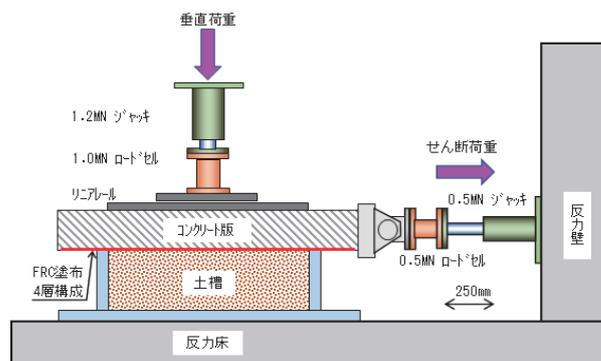


図-1 実験装置の概要

1. 大阪支店 名神園田耐震作業所 2. 土木本部 土木技術部 3. 信州大学工学部

## 2.1 躯体面の粗度

化粧ベニヤ（粗度P）と粗ベニヤ（粗度B）を型枠材として作製したコンクリート版（RC版：幅600×長さ1500×厚さ200mm）を用いて、躯体面の粗度による影響を検討した。

## 2.2 砂層と礫層

砂層（写真-2）は、土槽（深さ30cm）内に珪砂6号を4層（15, 5, 5, 5cm厚）に分けて締固め度97%以上で締固めた後に注水し飽和させた。礫層（写真-3）は、土槽内に雨花石40-20mmを2段階（15, 15cm厚）に分けて振動パイプレータで締固めた後に注水し飽和させた。

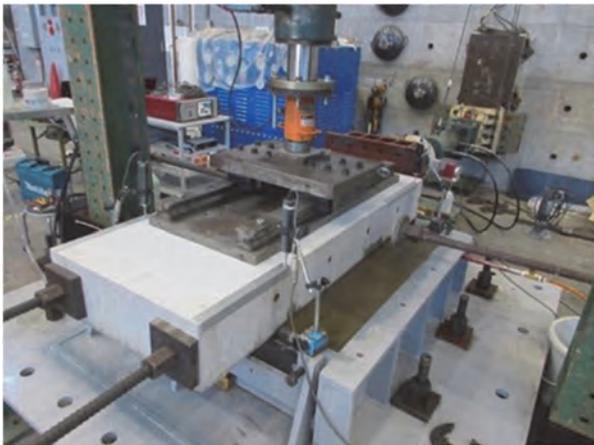


写真-1 摩擦実験の状況



写真-2 締固め後の砂層上面の状況

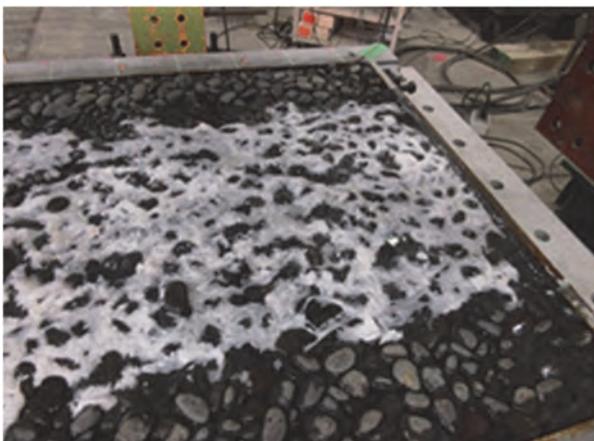


写真-3 実験後の礫層上面の状況

## 2.3 FRCの塗布

コンクリート版の下面には、施工時と同じ仕様の4層構成の摩擦低減層（1層目：プライマー、2層目：コート剤、3層目：FRC、4層目：コート剤）を塗布し、24時間以上乾燥させた後に土層上面に設置した。

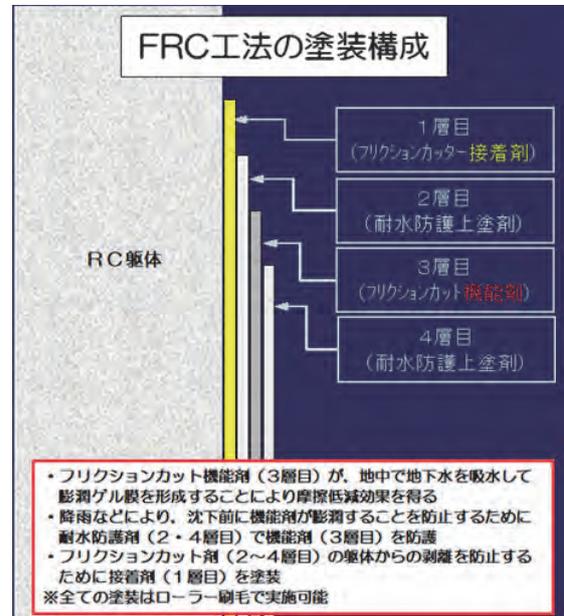


図-2 FRC工法の塗装構成

## 2.4 摩擦実験

実験条件を表-1に示す。

実験装置は、実験中のコンクリート版と砂層との接触面積（ $A=0.600\text{m}^2$ ）が一定となるようにした。垂直荷重は最初に最大載荷重を載荷して実験中の圧密変位を低減させた。ロードセルにより垂直荷重 $P$ とせん断荷重 $S$ を測定し、また、ダイヤルゲージを用いて実験中のコンクリート版の垂直変位量と水平変位量（水平移動量）を測定した。そして、垂直応力 $\sigma'$ 、摩擦応力 $\tau$ および摩擦角 $\delta'$ は、 $\sigma'=P/A$ （ $P$ はコンクリート版の自重を含む）、 $\tau=S/A$ および $\tau=\sigma'\cdot\tan\delta'$ 式を用いて算定した。

また、実験Dにおいて、塗布率100%、0%の摩擦角をそれぞれ $\delta_{100}$ 、 $\delta_0$ とした場合、それぞれ面積比の和になるとすれば、塗布率 $a\%$ における摩擦応力 $\tau(a)$ 、摩擦角 $\delta'(a)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned}\tau(a) &= \sigma' \cdot \tan(\delta'_{100}) \times (a/100) + \sigma' \cdot \tan(\delta'_0) \times (1-a/100) \\ &= \sigma' \{ \tan(\delta'_{100}) \times (a/100) + \tan(\delta'_0) \times (1-a/100) \} \quad (1)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta'(a) &= \tan^{-1} \{ \tau(a) / \sigma' \} \\ &= \tan^{-1} \{ \tan(\delta'_{100}) \times (a/100) + \tan(\delta'_0) \times (1-a/100) \} \quad (2)\end{aligned}$$

表-1 摩擦実験条件

(1) 実験A：躯体面の粗度の影響に関する実験条件

地盤	粗度	塗布率 (%)	移動速度 (mm/min)	垂直荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	移動量 (mm)
砂層	P	0	1.0	80→240→ 400→500	各20
		100			
	B	0			
		100			

(2) 実験B：砂層と礫層の比較に関する実験条件

地盤	粗度	塗布率 (%)	移動速度 (mm/min)	垂直荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	移動量 (mm)
砂層	B	0	1.0	80→240→ 400→500	各20
		100		100	
		0		250	
礫層		100		100,200,400	各250

(3) 実験C：変位量による影響に関する実験条件

地盤	粗度	塗布率 (%)	移動速度 (mm/min)	垂直荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	移動量 (mm)
砂層	B	100	100	100	250×6往復 =3000

(4) 実験C：変位速度による影響に関する実験条件

地盤	粗度	塗布率 (%)	移動速度 (mm/min)	垂直荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	移動量 (mm)
礫層	B	0	1,8,19,74	100	計250
		100	1,7,36,67	100	計250
		100	1,101	200	計250
		100	1,66	400	計250
	砂層		100	96	100

(5) 実験D：塗布面積の影響に関する実験条件

地盤	粗度	塗布率 (%)	移動速度 (mm/min)	垂直荷重 (kN/m <sup>2</sup> )	移動量 (mm)
砂層	B	25	1.0	80→200→ 400→500→ 600	各10~20
		50			
		75			
	P	25			
		50			
		75			

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 実験A：躯体面の粗度による影響

図-3に、粗度Pのコンクリート版、塗布率0%における実験結果を示す。大型の摩擦試験においても垂直応力 $\sigma$ は各段階荷重においてほぼ一定値を保持している。摩擦応力 $\tau$ は段階荷重の切り替え直後に、 $\sigma$ の変化に対して少し小さい値を示した後、遅れてほぼ一定に安定する傾向を示す。そのため、 $\tau$ の関数である摩擦角 $\delta$ もため、同様の推移を示す。なお、 $\tau$ の安定が遅れる要因としては、垂直荷重の増加に伴い飽和砂層内で一時的に過剰間隙水圧が生じている可能性が考えられる。

図-4に、粗度Pのコンクリート版における塗布率0%と100%における垂直応力 $\sigma'$ と摩擦応力 $\tau$ の関係を示す。両者ともに原点を通る直線(粘着力 $c=0$ )として評価できる。直線の傾きである摩擦角 $\delta'$ 値は、FRC塗布率0%の場合 $\delta'=30.8^\circ$ 、FRC塗布率100%の場合 $\delta'=3.2^\circ$ である。

図-5に、粗度Bのコンクリート版における塗布率0%と100%における垂直応力 $\sigma'$ と摩擦応力 $\tau$ の関係を示す。

この場合も両者ともに原点を通る直線(粘着力 $c=0$ )として評価できる。摩擦角 $\delta'$ 値は、塗布率0%のとき $\delta'=31.0^\circ$ 、塗布率100%のとき $\delta'=1.8^\circ$ である。

塗布率0%の場合では、コンクリート版表面の粗度の違いは摩擦応力 $\tau$ および摩擦角 $\delta'$ に有意な影響を及ぼさない。一方、塗布率100%の場合では、摩擦応力 $\tau$ 、摩擦角 $\delta'$ ともに粗度Pより粗度Bの方が小さい値となった。 $\delta'=1.8^\circ$ はFRCの吸水膨潤ゲル層のせん断抵抗角にはほぼ等しい値である<sup>3)</sup>。表面の粗度が粗い方がFRCの吸水膨潤ゲル層がコンクリート版表面に確実に付着し、FRCの吸水膨潤ゲル層内でせん断が生じたと推測される。また、表面が滑らかな方はFRCの吸水膨潤ゲルが変位量の増加とともに漏出していることも考えられる。

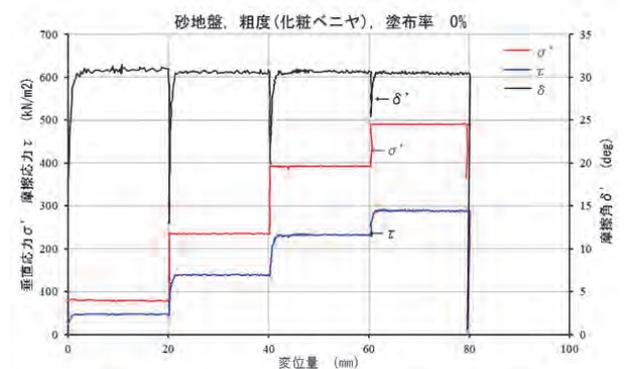


図-3 砂層、粗度P、塗布率0%の実験結果

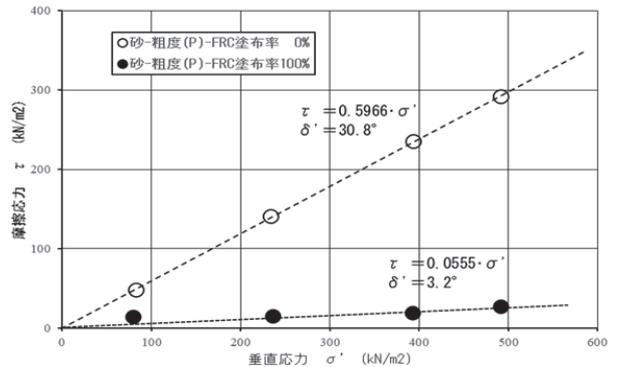


図-4 砂層、粗度P、塗布率0%、100%の実験結果

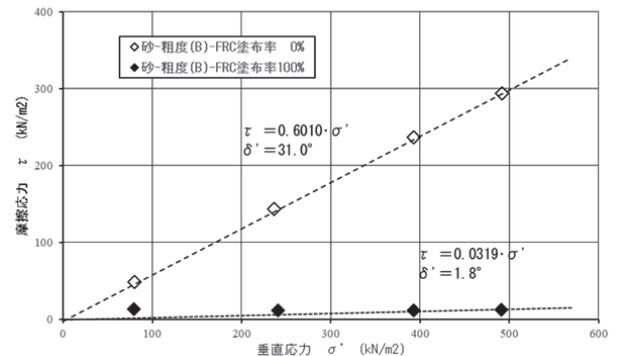


図-5 砂層、粗度B、塗布率0%、100%の実験結果

### 3.2 実験B：砂層と礫層の比較

図-6に、礫層、粗度Bのコンクリート版、塗布率0%における $\sigma' = 100 \text{ kN/m}^2$ の実験結果を示す。垂直応力 $\sigma'$ はほぼ一定値を保持できているが、水平変位量の増加に伴い鋸の刃のように少し変動する。摩擦応力 $\tau$ は、水平変位量25mm程度まではやや小さく、その後、変動しながらその平均値は一定値に収束する傾向を示す。これらの要因は、コンクリート版に接触する玉石が摩擦により土槽内で微動しているものと推測する。摩擦角 $\delta'$ は $\sigma'$ と $\tau$ の変動に対応して変動するものの、 $\delta' = 22 \sim 24^\circ$ の値である。

図-7に礫層、粗度Bにおける塗布率0%および塗布率100%の場合の垂直応力 $\sigma'$ と摩擦応力 $\tau$ の関係を示す。塗布率0%の場合には摩擦角 $\delta' = 21.8^\circ$ である。一方、塗布率100%の場合においても、垂直応力 $\sigma'$ と摩擦応力 $\tau$ の関係は原点を通る直線で近似できる。この場合の摩擦角は $\delta' = 9.0^\circ$ である。礫層において、粗度Bのコンクリート版にFRCを全面塗布することにより摩擦角は約1/2.5に低減される。

図-5に砂層、粗度Bにおける塗布率0%および塗布率100%の場合の垂直応力 $\sigma'$ と摩擦応力 $\tau$ の関係は図-5に示した。いずれの場合も垂直応力 $\sigma'$ と摩擦応力 $\tau$ の関係は原点を通る直線で近似でき、摩擦角 $\delta'$ は、塗布率0%の場合 $\delta' = 31.0^\circ$ 、塗布率100%の場合 $\delta' = 1.8^\circ$ であった。砂層において、粗度Bのコンクリート版にFRCを全面塗布することにより摩擦角は約1/15に低減される。

FRC全面塗布において礫層の場合の摩擦角が砂層の場合よりも大きいことの要因は、一般的な礫層では礫の間隙に砂や粘土が存在し間隙が小さい状態であるのに対して、実験では玉砂利（雨花石40-20mm）の単粒地盤としたため、比較的大きい間隙に、FRCが漏出したためと推測する（写真-3）。

### 3.3 実験C：変位速度と変位量による影響

#### (1) 変位量の影響

図-8は、砂層においてストローク250mmで6往復した変位量と垂直応力 $\sigma'$ 、摩擦応力 $\tau$ および摩擦角 $\delta'$ の関係である。 $\tau$ 値、 $\delta'$ 値は実験開始時に上昇した後に下降し、変位量500mm程度ではほぼ一定値となる。ただし、実験開始直後の変位量25~125mm区間においては、コンクリート版と土槽装置が干渉したために摩擦応力 $\tau$ が過度に計測され、摩擦角も過大に算定されている。実際には内挿した破線であると考えられる。

図-9に、累計変位量 $S$ と250mm区間毎の $\tau$ 値、 $\delta'$ 値および垂直変位 $\Delta h$ の関係を示す。累計変位量 $S = 500 \sim 3000 \text{ mm}$ においては、 $\tau$ 値、 $\delta'$ 値ともにほぼ一定値を示している。この間の摩擦角の平均値は $\delta'_{\text{ave}} = 3.26^\circ$ である。一方、垂直変位 $\Delta h$ 値は、実験開始から多少の増減を繰り返しながら、 $\Delta h = 1.5 \text{ mm}$ まで比例的に増加している。 $\Delta h$ 値の

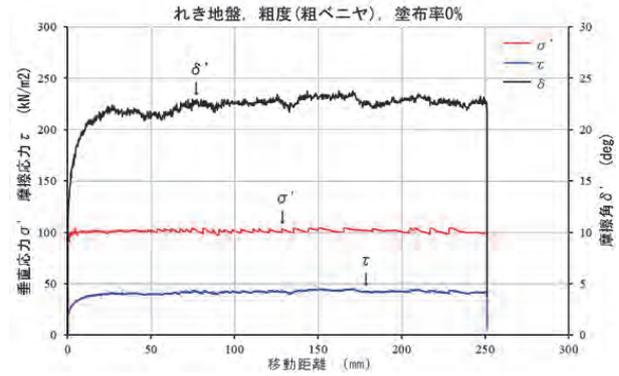


図-6 礫層、粗度B、塗布率0%の実験結果

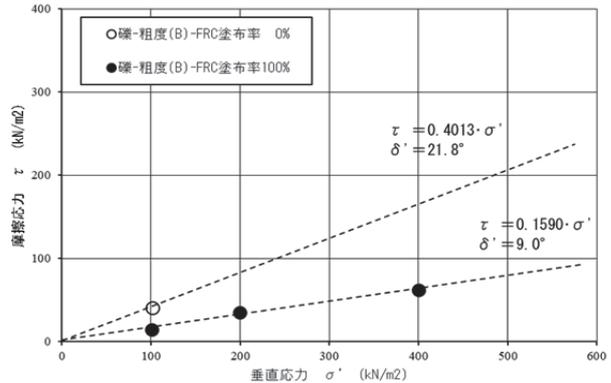


図-7 礫層、粗度B、塗布率0%、100%の実験結果

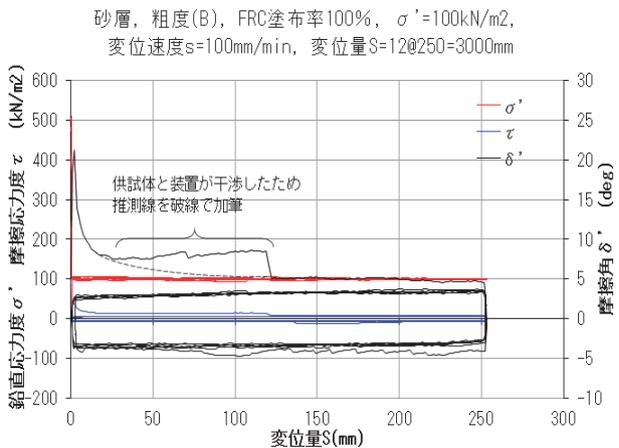


図-8 変位量（往復変位）との関係

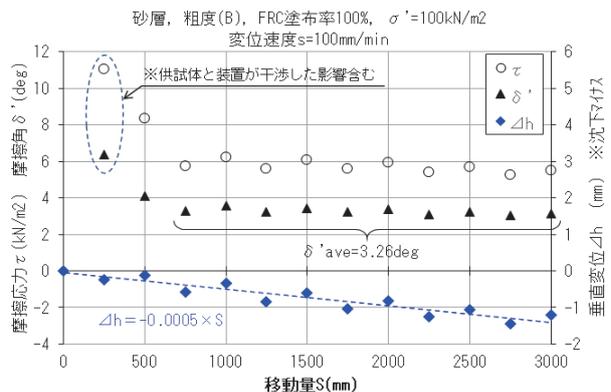


図-9 累計変位量の影響

量はそれほど大きくないが、変位量の増加に伴いFRCの膨潤ゲル層が砂層の間隙やコンクリート版の外側に漏出したためと考えられる。S=3000 mmにおいて、 $\Delta h=1.3$  mmであり、この時の体積ひずみは $\alpha_h = \Delta h/h = 1.3/300 = 0.004$ である。FRC工法における躯体沈設時の周辺地盤へ影響は小さいことが示唆される。

## (2) 変位速度の影響

図-10に、変位速度 $s$ と摩擦角 $\delta'$ の関係を示す。礫層において、塗布率0%の場合、変位速度の増大に伴い摩擦角 $\delta'$ が減少する傾向を示している。変位速度の増大により玉砂利(雨花石40-20 mm)が間隙へ移動していると推測される。一方、塗布率100%の場合、礫層、砂層ともに変位速度の増大に伴い摩擦角 $\delta'$ はやや増加傾向を示している。礫層の場合の摩擦角は $\delta'=7\sim 11^\circ$ であり、砂層の場合には $\delta'=2\sim 6^\circ$ である。摩擦低減効果は、礫層の場合では1/1.5~1/3である。また、砂層の場合には、実験Aおよび実験Bにおいて1/10~1/15であることを示している。

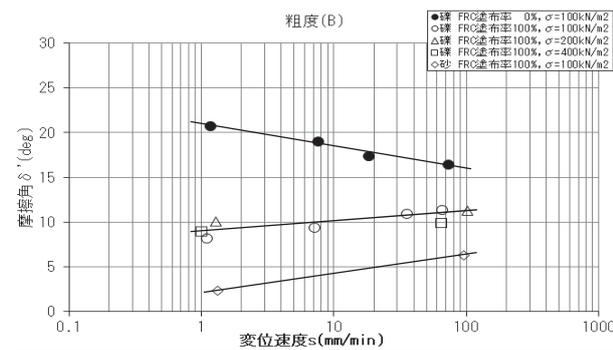


図-10 摩擦角に及ぼす変位速度の影響

## 3.3 実験D：塗布面積による影響

図-11~図-13に、砂地盤に対するコンクリート版(粗度B)における塗布率25~75%の場合の結果を示す。また、図-14~図-16に砂地盤に対するコンクリート版(粗度P)における塗布率25~75%の場合の結果を示す。これらの結果に塗布率0%、100%の場合の結果を追加して、 $\sigma'$ - $\tau$ 関係を整理したものが図-17である。

図-17における $\sigma'$ - $\tau$ 関係は、塗布率ごとに異なる原点を通る直線として近似できる。粗ベニヤで作製したコンクリート版(粗度B)の摩擦応力が化粧ベニヤでのコンクリート版(粗度P)のそれよりも少し小さいが、ここでは安全側の近似値として同一の直線で評価する。

図-18に、図-17の近似直線より得られた摩擦角とFRCの塗布率 $\alpha$ の関係を示す。両者の関係は、 $\delta'_0$ (無処理)から $\delta'_{100}$ (全面塗布： $\alpha=100\%$ )の摩擦角の間で比例して減少するのではない。塗布率 $\alpha=0\sim 20\%$ ま

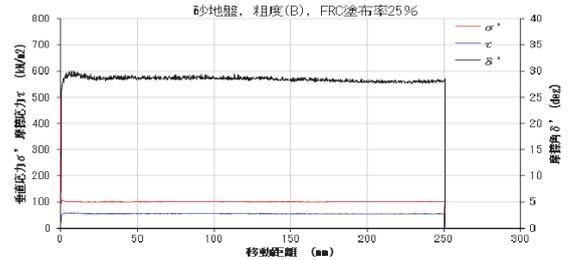


図-11 砂層、粗度B、塗布率25%の実験結果

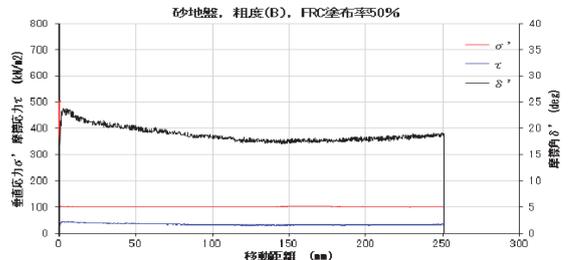


図-12 砂層、粗度B、塗布率50%の実験結果

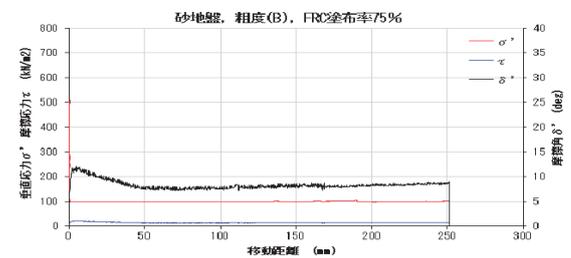


図-13 砂層、粗度B、塗布率75%の実験結果

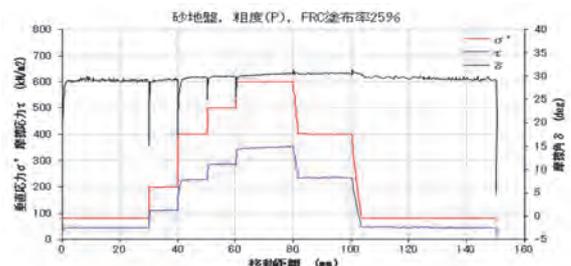


図-14 砂層、粗度P、塗布率25%の実験結果

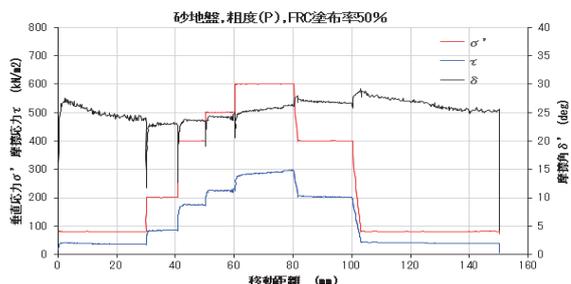


図-15 砂層、粗度P、塗布率50%の実験結果

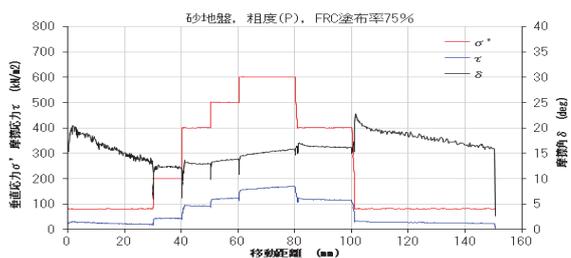


図-16 砂層、粗度P、塗布率75%の実験結果

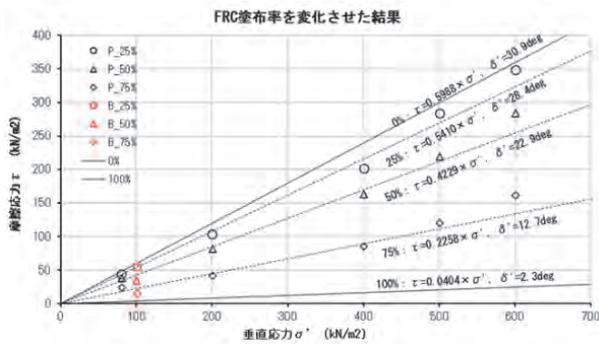


図-17  $\sigma'$ - $\tau$ に及ぼす塗布率の影響(砂層)

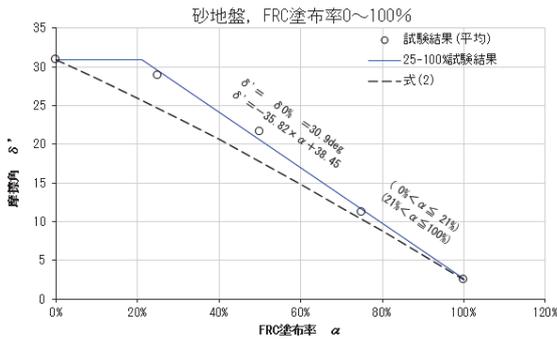


図-18 FRC 塗布率と摩擦角  $\delta'$  の関係(砂層)

での区間では摩擦低減効果がほとんどなく、摩擦角  $\delta'(\alpha)$  は、塗布率  $\alpha=20\sim 100\%$  (全面塗布) の区間で比例して減少する。実験前は、それぞれの面積比の和となると予測した(式(2), 破線)が、実験結果では塗布率が小さい範囲では予測より摩擦低減効果が小さい傾向であった。全面塗布  $\alpha=100\%$  以外の条件においては非塗装の範囲に吸水膨潤ゲルが漏出するためと推測される。

#### 4. まとめ

FRC 工法における摩擦低減効果を定量評価することを目的として、実物大のコンクリート版を用いた大型摩擦実験を行った結果より得られた知見を以下にまとめる。

##### (1) 躯体面の粗度による影響

- 1) 砂層とコンクリート版における摩擦角は、無処理(塗布率 0%) の場合、コンクリート版表面の粗度(粗度 P, 粗度 B) に関係なく、摩擦角  $\delta'=31^\circ$  である。
- 2) 砂層において、全面塗布(塗布率 100%) の場合には、摩擦角  $\delta'=2\sim 3^\circ$  であり、摩擦角は無処理(塗布率 0%) の場合の  $1/10\sim 1/15$  であり、摩擦低減効果は非常に大きい。
- 3) 砂層において、全面塗布(塗布率 100%) の場合には、ある程度粗度が大きい方が FRC の吸水膨潤ゲル層を確実に保持できることが示唆される。
- 4) 砂層(珪砂 6 号) における摩擦応力と摩擦角は以下のとおりである。

##### (a) 粗度 P のコンクリート版

<塗布率 0%>

摩擦応力:  $\tau=0.5966 \cdot \sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), 摩擦角:  $\delta'=30.8^\circ$

<塗布率 100%>

摩擦応力:  $\tau=0.0555 \cdot \sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), 摩擦角:  $\delta'=3.2^\circ$

##### (b) 粗度 B のコンクリート版

<塗布率 0%>

摩擦応力:  $\tau=0.6010 \cdot \sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), 摩擦角:  $\delta'=31.0^\circ$

<塗布率 100%>

摩擦応力:  $\tau=0.0319 \cdot \sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), 摩擦角:  $\delta'=1.8^\circ$

##### (2) 砂層と礫層の比較

1) 礫層(単粒モデル)において、粗度 B のコンクリート版に FRC を全面塗布することにより摩擦角は約  $1/2.5$  に低減される。ただし、一般的な礫層の間隙は砂や粘土で補間されるため、実験に用いた玉砂利(雨花石 40-20mm, 単粒モデル)の間隙よりも小さく、FRC の漏出が抑制されるとすれば、摩擦低減効果はもう少し大きくなるものと推測する。

2) 一方、砂層において、粗度 B のコンクリート版に FRC を全面塗布することにより摩擦角は約  $1/15$  に低減される。

3) 砂層および礫層に対する粗度 B のコンクリート版の摩擦応力と摩擦角は以下のとおりである。

##### (a) 礫層(玉砂利: 雨花石 40-20mm, 単粒)

<塗布率 0%>

摩擦応力:  $\tau=0.4013 \cdot \sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), 摩擦角:  $\delta'=21.8^\circ$

<塗布率 100%>

摩擦応力:  $\tau=0.1590 \cdot \sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), 摩擦角:  $\delta'=9.0^\circ$

##### (b) 砂層(珪砂 6 号)

<塗布率 0%>

摩擦応力:  $\tau=0.6010 \cdot \sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), 摩擦角:  $\delta'=31.0^\circ$

<塗布率 100%>

摩擦応力:  $\tau=0.0319 \cdot \sigma'$  (kN/m<sup>2</sup>), 摩擦角:  $\delta'=1.8^\circ$

##### (3) 変位速度と変位量による影響

- 1) 砂層における塗布率 100%, 変位速度 100mm/min の場合、累計変位量  $S \leq 3000$ mm まで、FRC の摩擦低減効果が安定して確保されることが確認された。
- 2) 塗布率 100%, 変位速度 1~100mm/min の場合、礫層、砂層ともに変位速度の増大に伴い摩擦角  $\delta'$  はやや増加するが、礫層の場合の摩擦角は  $\delta'=7\sim 11^\circ$  であり、砂層の場合には  $\delta'=2\sim 6^\circ$  である。
- 3) 変位速度が増加した場合においても FRC の摩擦低減効果が確保されることが確認された。

##### (4) 塗布面積による影響

- 1) 砂層に対して、無処理(塗布率  $\alpha=0\%$ ) から FRC の全面塗布 ( $\alpha=100\%$ ) における摩擦角  $\delta'$  の実用的な関係を

明らかにした。この関係を用いて、塗布面積を調整することにより、周面摩擦力を制御できる可能性がある。

**謝辞：** 本研究において、実験装置の製作および摩擦実験の実施では、(有)TNS の田口勝男氏、染谷昇氏、野口和幸氏には多大なるご協力をいただきました。紙面を借りて感謝の意を表します。

#### 【参考文献】

- 1) 土木用摩擦低減材フリクションカッター，(株)日本触媒，2012.
- 2) 岡本功一，梅崎健夫，服部晃：地中埋設体の付着力および周面摩擦力を低減する吸水性高分子材料の開発，土木学会論文集C（地圏工学），Vol.67，No.4，pp.407-421，2011.
- 3) 梅崎健夫，河村 隆，松林達也，服部 晃，岡本功一：吸水性高分子摩擦低減剤の内部摩擦角に及ぼす間隙水の影響(その1)，第54回地盤工学研究発表会，pp.1519-1520，2019.

**Summary** The construction method of directly applying a water absorptive polymer friction reduction agent (FRC) to the peripheral surface of a framework (hereafter FRC construction method) is implemented as one of the measures for reducing the peripheral surface frictional force in the pneumatic caisson construction method. In order to quantitatively evaluate the effect of friction reduction in the FRC construction method and to quantitatively study the relationship to subsidence of the framework, large-size friction experiments were conducted using full-scale concrete matter to study the influence of roughness on the framework surface, the comparison of friction reduction effects (frictional stress and friction angle) of FRC in sand and gravel layers, the influence of displacement speed and displacement on the peripheral surface frictional force and friction angle, and the relationship between the area of FRC application and the friction reduction effect. This paper summarized the knowledge of friction reduction effects in the FRC construction method obtained from a series of experimental results.

**Key Words :** *Pneumatic caisson, peripheral surface friction, water absorptive polymer friction reduction agent, sand, gravel, friction reduction*

