

鋼材に塗布した吸水性高分子摩擦低減剤の摩擦特性(その1)

梅崎健夫¹, 河村 隆¹, 古久根晋太郎¹, 小林優太², 岡本功一³, 服部 晃³
¹信州大学工学部, ²信州大学大学院, ³(株)日本触媒

Shear resistance of absorbent polymer coated on underground structures (Part 1)

T. Umezaki¹, T. Kawamura¹, S. Kogune¹, Y. Kobayashi², K. Okamoto³ & A. Hattori³
¹Faculty of Engineering, Shinshu University, ²Graduate School, Shinshu University,
³Nippon Shokubai Co., Ltd.

キーワード：吸水性高分子，鋼矢板，周面摩擦，一面せん断試験，摩擦角，粗度

Keywords: Absorbent polymer, Sheet pile, Skin friction, Box shear test, Friction angle, Roughness

1. はじめに

鋼矢板等の地中埋設体の引抜き撤去において，地盤と埋設体との間の付着力や摩擦力が原因となり，付着した土塊が排出されて(写真-1(a))，地盤変状を引き起こす問題が生じている．その対策として，吸水性高分子摩擦低減剤(吸水性高分子(粉末)と接着性高分子を混合した吸水性高分子基材を有機溶剤に分散させたもの(写真-2))を塗布する工法が開発されている^{1), 2)}．吸水性高分子摩擦低減剤は，打設後，地盤中の間隙水との接触により吸水膨潤(ゲル化)して，土と埋設体間に分離層を形成することで土の付着を抑制する(写真-1(b))^{1), 2)}．

本文では，まず，吸水性高分子基剤の摩擦特性について検討した．さらに，土の種類と鋼材表面の粗度を影響要因とした場合の土と吸水性高分子基材の接触面における摩擦特性についても検討した．

2. 試験概要

(1) 試料

写真-3 に示すように，鋼材を金属製の容器内に設置し，所定枚数重ねた布製のガムテープ(1枚の厚さ約 0.15mm)を容器の上面に貼付した．吸水性高分子(粉末，平均粒径 50 μ m)，接着性高分子および有機溶剤を質量比 10 : 8.4 : 15.6 で十分に混合したものを鋼材の上に垂らし(写真-3(a))，ガラス棒をガムテープ上面に沿わせて移動することにより(写真-3(b))，均一な厚さで表面を平らに均した．24時間以上乾燥(有機溶剤を気化)させて供試体とした．乾燥後の吸水性高分子基材(FC)の塗布厚さは， $t_0=0.1\sim 0.5$ mmである．

鋼材には，表面を防錆処理された滑らかな鋼材



(a)無処理



(b)吸水性高分子摩擦低減剤を塗布処理



(c)塗布処理した鋼矢板の引抜き跡

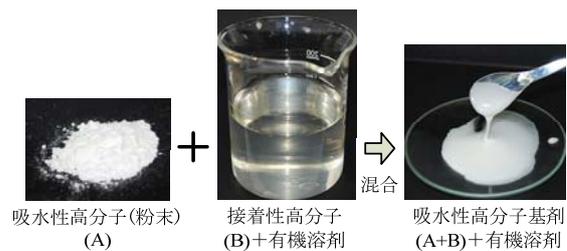
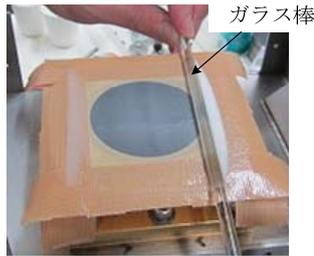
写真-1 鋼矢板の引抜き状況の一例²⁾

写真-2 吸水性高分子摩擦低減剤

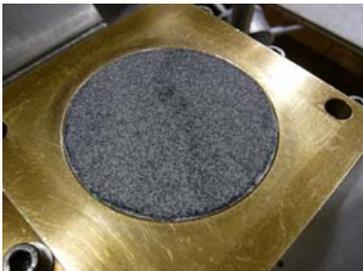
(SS400，厚さ約 9mm)を用いた．施工現場において埋設体表面が錆び等で大きな粗度を有している場合があることを想定して，表面粗さの異なる 2 種類の耐水サンドペーパー(SP : 320, 100番)を鋼材の表面に接着して，鋼材の粗度を模擬した．表面粗さの測定結果(JIS B 0633, JIS B 0601)を表-1 に示す．ここで， R_z : 最大高さ， R_c : 平均高さである．なお，土質試験に用いられるポーラスストーンおよびポーラスメタルの表面粗



(a) 吸水性高分子基材の鋼材への塗布状況 (その1)



(b) 吸水性高分子基材の鋼材への塗布状況 (その2)



(c) 吸水高分子基材を塗布した鋼材の下せん断箱内への設置

写真-3 鋼材への吸水性高分子基材の塗布と下せん断箱への設置

表-1 鋼材およびサンドペーパーの表面粗さ

	R_z (μm)	R_c (μm)
鋼材	3.35	0.970
サンドペーパー320番	97.3	38.9
サンドペーパー100番	330	168

さはそれぞれ $R_z=388\mu\text{m}$ および $148\mu\text{m}$, $R_c=201\mu\text{m}$ および $74.1\mu\text{m}$ であった。

土試料は、笠岡粘土 (土粒子密度 $\rho_s=2.705\text{g/cm}^3$, 液性限界 $w_L=55.2\%$, 塑性限界 $w_P=14.9\%$, 塑性指数 $I_P=40.3$) と豊浦砂 ($\rho_s=2.702\text{g/cm}^3$, 最大密度 $\rho_{dmax}=1.634\text{g/cm}^3$, 最小密度 $\rho_{dmin}=1.341\text{g/cm}^3$, 50% 粒径 $D_{50}=0.162\text{mm}$) である。笠岡粘土は、 $2w_L$ で練返して圧密圧力 $\sigma_c=98\text{kN/m}^2$ で予圧密した試料を直径 60mm, 高さ 10mm に成形して供試体とし

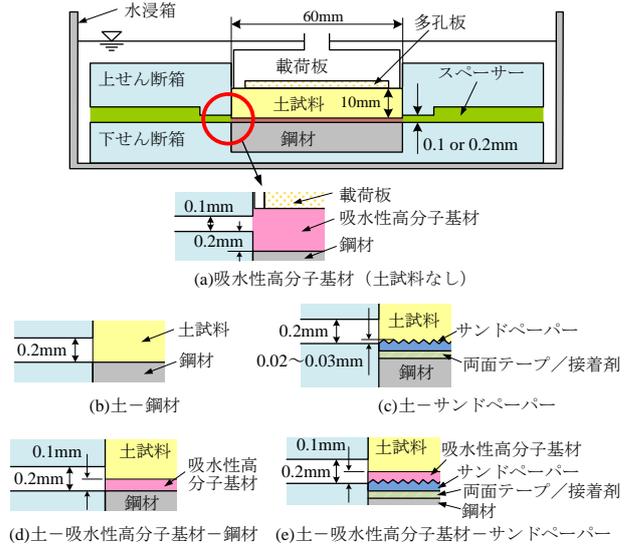
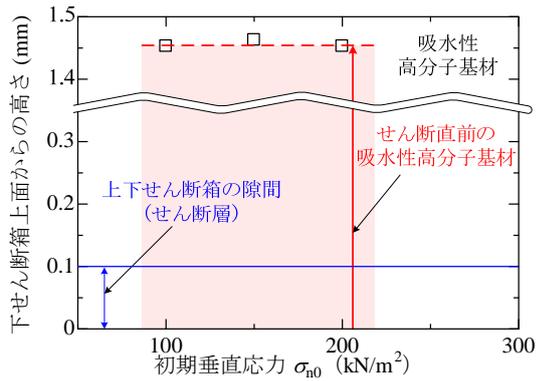


図-1 試験の概略

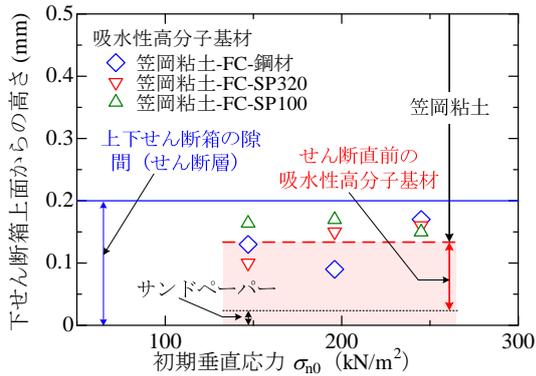
た。豊浦砂は、気乾状態のものを空中落下法により供試体 (直径 60mm, 高さ 10mm) を作製し, 相対密度 $D_r \approx 80\%$ とした。

(2) せん断試験

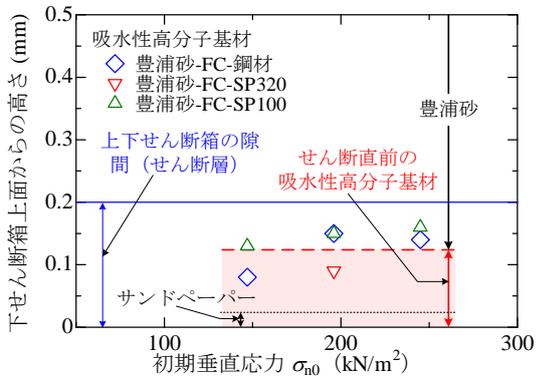
土質試験法 (JIS 0560-2000, JIS 0561-2000) に準拠した一面せん断試験を実施した。図-1 に試験の概要を示す。吸水性高分子基材を塗布した鋼材を下せん断箱内に設置し (写真-3(c)), 吸水性高分子基材のみに対する試験 (図-1(a)) と土との接触面に対する試験 (図-1(b)~(e)) を実施した。前者の場合は, 図-1(a) に示すように, 塗布厚さを上下せん断箱の隙間 ($t=0.1\text{mm}$) よりも大きく $t_0 \approx 0.5\text{mm}$ とした。鋼材の上面が下せん断箱の上面よりも 0.2mm 低くなるように鋼材を設置し, 所定の初期垂直応力 $\sigma_{n0}=147, 196, 245\text{ kN/m}^2$ を負荷した。すき間設定用スペーサー³⁾を引抜くことにより上下せん断箱のすき間を $t=0.1\text{mm}$ に設定し, 水浸箱に純水を十分に注水して 1 時間程度水浸した。そして, 定載荷圧条件を手動で制御しながらせん断変位速度 0.2mm/min (せん断時間約 35 分間) で水平変位 $D=7\text{mm}$ までせん断を行った。また, せん断応力 τ の最大値 τ_{max} が発揮された後に, $D=0.5\text{mm}$ 毎に $\sigma_n=10\text{kN/m}^2$ ずつ減少させる試験も実施した。一方, 土との接触面に対する試験の場合は, 図-1(b)~(e) に示した位置関係となるように, 真ちゅう製のスペーサーおよびステンレス薄板 (厚さ $0.01, 0.02\text{mm}$) を用いて鋼材の高さを調整した。サンドペーパーを使用した試験の場合には, サンドペーパーの上端が下せん断箱の上面



(a) 吸水性高分子基材 (土試料なし)



(b) 笠岡粘土-吸水性高分子基材



(c) 豊浦砂-吸水性高分子基材

図-2 吸水膨潤後 (せん断前) の吸水性高分子基材の厚さ

よりも 0.02~0.03 mm 高くなるように調整した。すべての試験において、圧密圧力 $\sigma_c=147, 196, 245\text{kN/m}^2$ で 3t 時間圧密した後、上下せん断箱のすき間を $t=0.2\text{mm}$ に設定し、水浸箱に純水を十分に注水して 1 時間程度水浸した。そして、笠岡粘土では定体積条件、豊浦砂では定載荷圧条件を、それぞれ手動で制御しながらせん断変位速度 0.2 mm/min (せん断時間約 35 分間) で $D=7\text{mm}$ までせん断を行った。比較のため、吸水性高分子基材

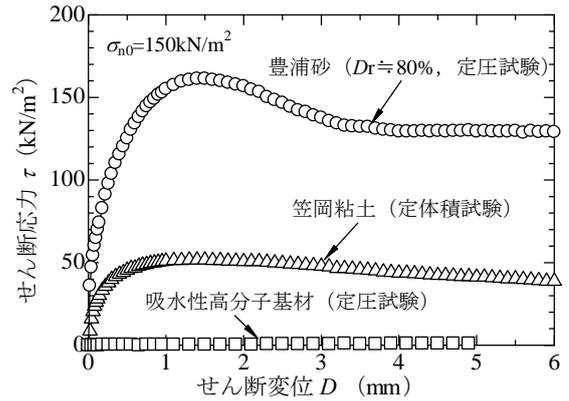


図-3 試験結果の一例

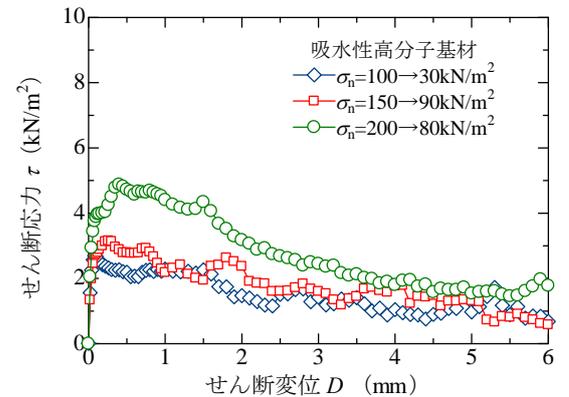


図-4 試験結果 (σ_n 減少)

を塗布しない試験も実施した (図-1(b), (c)).

図-2 に、すべての試験における吸水膨潤後 (せん断前) における吸水性高分子基材の厚さを示す。図-2(a) に示すように、吸水性高分子基剤の試験 (図-1(a)) では、せん断層はすべて吸水膨潤 (ゲル化) した吸水性高分子基剤で満たされている。図-2(b), (c) に示すように、土との接触面に対する試験 (図-1(d), (e)) では、せん断層の 1/3 程度は土で満たされている。

3. 試験結果および考察

(1) 吸水性高分子基材の摩擦特性

図-3 に試験結果の一例として、せん断応力 τ とせん断変位 D の関係を示す。別途実施した笠岡粘土の定体積一面せん断試験と気乾状態の豊浦砂の定圧一面せん断試験の結果も併せて示した。笠岡粘土と豊浦砂に対して、吸水性高分子基材の最大せん断応力 τ_{\max} は極めて小さい値である。

図-4 に吸水性高分子基材の $\tau \sim D$ 関係を示す。 τ_{\max} 後に σ_n を減少させると、それに伴っていずれの場合においても τ が減少する。最大値 τ_{\max} まで

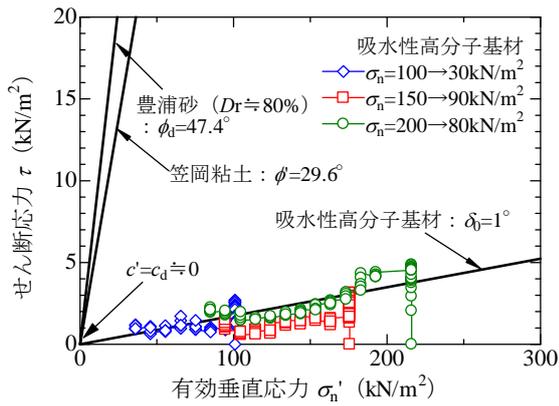


図-5 笠岡粘土と豊浦砂および吸水性高分子基材の内部摩擦角および摩擦角

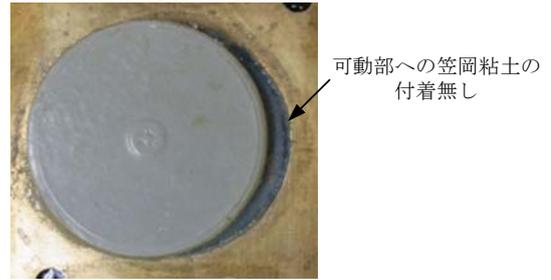
は、ほとんど鉛直変位（ダイレイタンス）が生じず、結果として、垂直応力 σ_n ＝一定において、定体積条件が満たされている。そのため、 σ_n は有効垂直応力 σ'_n と評価する。

図-5に図-3, 4の結果から得られた土の内部摩擦角および吸水性高分子基材の摩擦角を示す。一連の結果から、笠岡粘土の内部摩擦角は $\phi=29.6^\circ$ ($c'=0$)、豊浦砂 ($D_r \approx 80\%$) の内部摩擦角は $\phi_d=47.4^\circ$ ($c_d=0$)である。吸水性高分子基材の場合、いずれの σ_{n0} においても、 σ_n を減少させると τ も比例して減少し、原点を通る摩擦角 $\delta_0 \approx 1^\circ$ の直線で評価することができる。すなわち、吸水性高分子基材を塗布した鋼矢板の引抜き時のせん断抵抗は、摩擦角のみ ($\tau_{max} = \sigma'_n \tan \delta_0$) で評価することができる。また、吸水性高分子基材の摩擦角は土の内部摩擦角の1/30～1/50程度であり、鋼矢板の引抜き時に分離層として機能する。

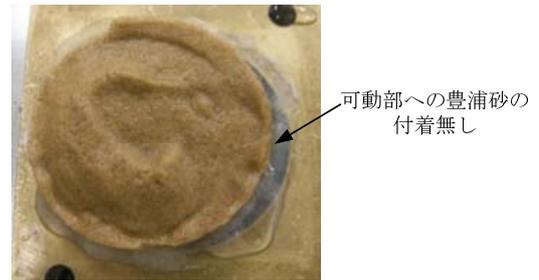
(2) 土との接触面における摩擦特性

写真-4に、土-吸水性高分子基材-サンドペーパーの試験における試験後のサンドペーパーの表面の一例を示す。笠岡粘土および豊浦砂のいずれの場合も、下せん断箱（可動側）の鋼材に接着されたサンドペーパーの表面には、土の付着は見られない。すなわち、吸水性高分子基材のせん断が支配的であり、土のせん断はほとんど生じていない。

図-6および図-7に試験結果の例を示す。ここで、 ε_{vol} ：体積ひずみ（圧縮：正）である。比較のため、吸水性高分子基材に対する定圧試験の結果も合わせて示した。図-6(a)に示すように、笠岡粘土-サンドペーパー（SP320, SP100）の $\tau \sim D$ 関係は、笠岡粘土の一面せん断試験とピーク値も



(a)笠岡粘土-FC-SP320 ($\sigma_{n0}=196\text{kN/m}^2$)



(b)豊浦砂-FC-SP320 ($\sigma_{n0}=196\text{kN/m}^2$)

写真-4 試験後の鋼材の表面（土-FC-SP）

曲線形状もほぼ同じである。しかし、滑らかな鋼材と笠岡粘土の $\tau \sim D$ 関係は、上記の結果と異なり、せん断の開始とともにせん断応力が急激に増加し、笠岡粘土のせん断強度よりも若干小さいピーク値を発揮した後、せん断応力は急激に減少して一定値に収束する。鋼材表面で滑っていると考えられる。一方、笠岡粘土-吸水性高分子基材-SP320, SP100 および笠岡粘土-吸水性高分子基材-滑らかな鋼材の $\tau \sim D$ 関係は、いずれも吸水性高分子基材の場合よりも若干大きい値でほぼ一定となり、土のせん断はほとんど生じていない。また、図-7(a)に示すように、豊浦砂-SP320, SP100では、豊浦砂のせん断強度よりも小さいピーク値を発揮した後、せん断応力は減少し一定値に収束する。しかし、豊浦砂-滑らかな鋼材においては、明確なピークは見られず、豊浦砂のせん断強度の1/2強のせん断応力でほぼ一定となる。一方、豊浦砂-吸水性高分子基材-SP320, SP100 および豊浦砂-吸水性高分子基材-滑らかな鋼材の $\tau \sim D$ 関係は、いずれも吸水性高分子基材の場合よりも若干大きい値でほぼ一定となり、この場合も土のせん断はほとんど生じていない。吸水性高分子基材を塗布した場合には、図-6(b)および図-7(b)に示すように、せん断中の σ_n および ε_{vol} の変化は非常に小さく、ダイレイタンスはほとんど発生しない。そのため、この場合も σ_n は有効垂直応力 σ'_n として評価する。

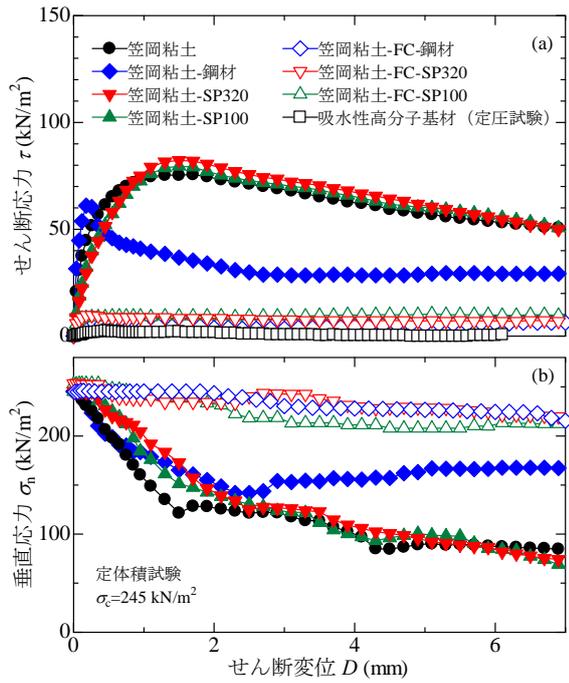


図-6 試験結果の例（笠岡粘土， $\sigma_{n0}=245\text{kN/m}^2$ ）

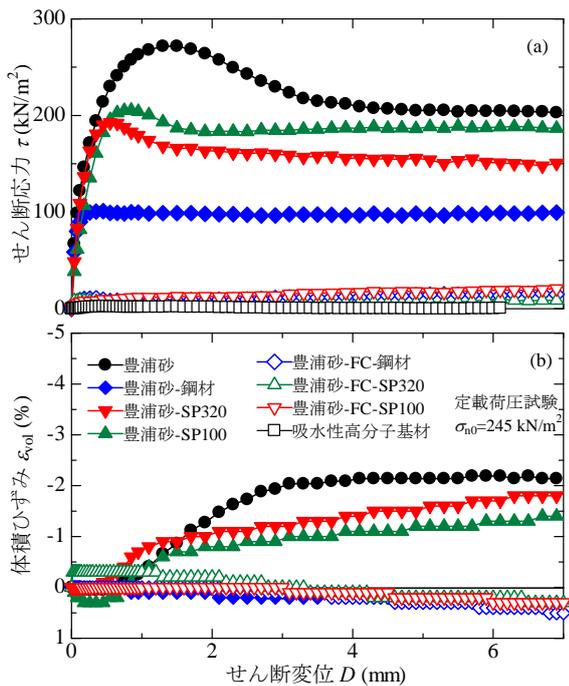
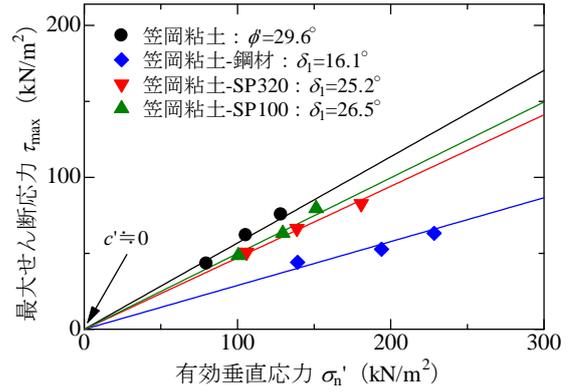
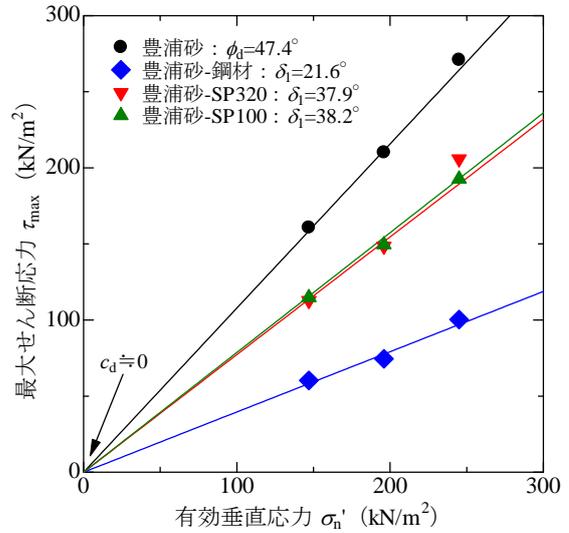


図-7 試験結果の例（豊浦砂， $\sigma_{n0}=245\text{kN/m}^2$ ）

図-8 に一連の試験から得られた吸水性高分子基材を塗布していないサンドペーパーおよび滑らかな鋼材の試験における最大せん断応力 τ_{max} と有効垂直応力 σ_n' の関係を示す。いずれも原点を通る摩擦角 δ_1 の直線として評価することができる。すなわち、土と鋼材および土とサンドペーパーの場合においても、せん断抵抗を摩擦角のみ



(a)笠岡粘土



(b)豊浦砂

図-8 最大せん断応力と有効垂直応力の関係
(土-滑らかな鋼材，土-SP)

($\tau_{max} = \sigma_n' \tan \delta_1$) で評価することができる。滑らかな鋼材においても、笠岡粘土および豊浦砂との接触面における摩擦角は、それぞれ $\delta_1 = 16.1^\circ$ および $\delta_1 = 21.6^\circ$ であり、いずれも内部摩擦角の 1/2 程度である。すなわち、土の付着を抑制できない。SP320, SP100 の場合の摩擦角は、笠岡粘土 ($\phi_1 = 29.6^\circ$) および豊浦砂 ($\phi_d = 47.4^\circ$) の内部摩擦角よりも少し小さく、それぞれ $\delta_1 = 25.2, 26.5^\circ$ および $\delta_1 = 37.9, 38.2^\circ$ である。

図-9(a), (b)に一連の試験から得られた吸水性高分子基材を用いた場合の $\tau_{max} \sim \sigma_n'$ 関係を示す。この場合も原点を通る摩擦角 δ_1 の直線として評価することができる。すなわち、吸水性高分子基材と土とが接触する場合においても、せん断抵抗を摩擦角のみ ($\tau_{max} = \sigma_n' \tan \delta_1$) で評価することができる。このときの摩擦角は、笠岡粘土および豊

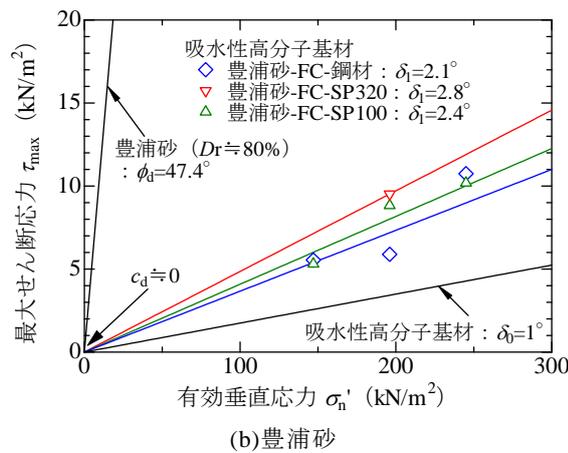
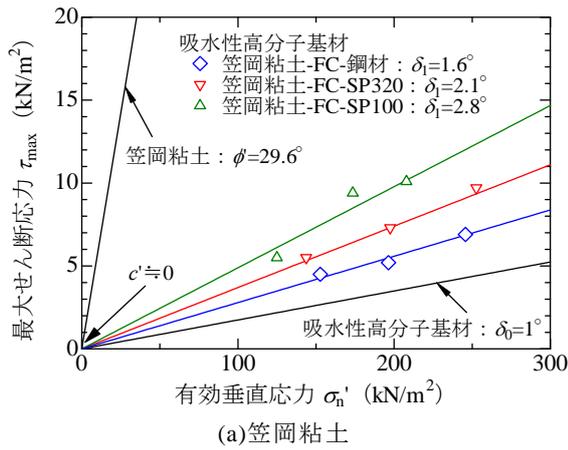


図-9 最大せん断応力と有効垂直応力の関係
(土-FC-滑らかな鋼材, 土-FC-SP)

浦砂において、それぞれ $\delta_1=1.6\sim 2.8^\circ$ および $\delta_1=2.1\sim 2.8^\circ$ である。いずれの試験においても摩擦角は $2\sim 3^\circ$ と極めて小さく、吸水性高分子基材の摩擦角 $\delta_0=1^\circ$ よりも若干大きい程度である。

図-10 は、図-8, 9 における摩擦角 δ_0 , δ_1 と表-1 に示した鋼材の表面粗さ R_z の関係を整理して示したものである。 $R_z=3\mu\text{m}$ の滑らかな鋼材における摩擦角は、笠岡粘土、豊浦砂のいずれにおいてもそれぞれの内部摩擦角の $1/2$ 程度である。 $R_z>100\mu\text{m}$ の粗さの場合は、 R_z の値に関わらず、それぞれの内部摩擦角の 0.9 倍、 0.8 倍程度でほぼ一定となり、土のせん断が支配的である。一方、吸水性高分子基材を塗布した場合の摩擦角は、土試料および鋼材の表面粗さに関わらず極めて小さく、内部摩擦角の $1/10\sim 1/25$ 程度である。Uesugi ら⁴⁾ は、単純せん断試験装置を用いた鋼材 ($R_z=1.4\sim 33.0\mu\text{m}$) と数種類の砂 ($D_{50}=0.15\sim 0.62\text{mm}$) とのせん断試験において、 $R_z<20\sim 30\mu\text{m}$ においては、接触面に沿ってすべりが生じ、表面粗さが大きく

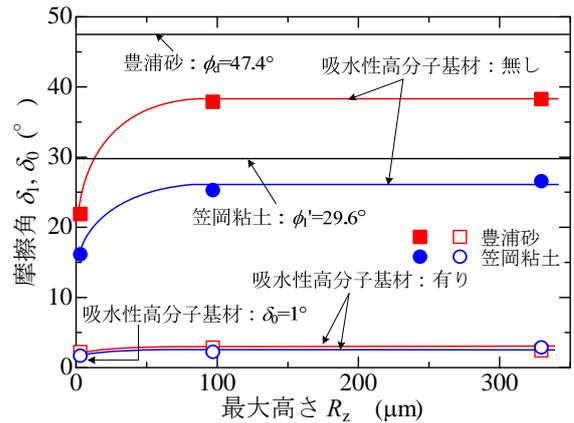


図 10 鋼材の表面粗さと摩擦角の関係

なると摩擦角も大きくなる。一方、 $R_z>20\sim 30\mu\text{m}$ においては、砂のせん断破壊が生じて、摩擦角は砂の単純せん断試験における内部摩擦角が上限となることを報告している。

4. まとめ

得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 吸水性高分子基材は、粘着性材料ではなく、摩擦性材料 ($\tau_{\text{max}}=\sigma'_n \tan \delta_0$) として評価できる。さらに、土との接触した場合も原点を通る同様の式 ($\tau_{\text{max}}=\sigma'_n \tan \delta_1$) で評価することができる。また、これらのせん断においては、ダイレイタンスはほとんど生じない。
- (2) 吸水性高分子基材の摩擦角は $\delta_0=1.0^\circ$ であり、土の摩擦角の $1/30\sim 1/50$ 程度である。
- (3) $R_z=3\mu\text{m}$ の滑らかな鋼材においても、笠岡粘土および豊浦砂との接触面における摩擦角は、それぞれ $\delta_1=16.1^\circ$ および $\delta_1=21.6^\circ$ であり、いずれも内部摩擦角の $1/2$ 程度である。すなわち、土の付着を抑制できない。
- (4) 吸水性高分子基材を鋼材に塗布した場合の土との接触面におけるせん断試験において、鋼材の表面粗さや土の種類に関わらず、鋼材表面への土の付着はほとんど生じない。摩擦角は、 $\delta_1=2\sim 3^\circ$ と極めて小さく、土の内部摩擦角の $1/10\sim 1/25$ 程度であり、分離層として十分に機能する。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費(基盤研究(C), No.25420499)の援助を受けた。ここに付記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) フリクションカッター施工編, 株式会社日本触媒, 2005.
- 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, 土木学会論集C (地圏工学), Vol.67, No.4, pp.407-421, 2011.
- 3) 梅崎健夫, 河村 隆, 伊藤美由紀, 本郷五十鈴: 低垂直応力域における粘土の一面せん断試験方法の検討, 第37回地盤工学研究発表会, pp.217-218, 2002.
- 4) Uesugi, M. & Kishida, H. : Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sand, SOILS AND FOUNDATIONS Vol.26, No.2, 33-46, 1986.

(原稿受付 2015. 3. 25)