

土と固体表面間の付着特性に関する基礎的研究

Basic Study on Adhesion between Clay and Solid Surfaces

深川良一* 玉井俊行** 松野 進***

Ryoichi Fukagawa, Toshiyuki Tamai, Susumu Matsuno

この論文の目的は粘土と固体表面間の付着メカニズムを解明することである。そのために2種類の試験が実施された。一つ目は粘土といくつかの固体表面間の引張り試験であり、もう一つはガラス板を基板材料とした水と、いくつかの固体材料間の引張り試験である。試験で使用された材料はPTFE (Polytetrafluoroethylene) とステンレス、銅、アルミニウムといった金属材料である。土は飽和したカオリンを使用した。これらの試験により、付着力と材料に付着した土量の関係を明瞭に説明することができた。一方、PTFEを使用して実施された実験で観察された現象は少し複雑であった。

The aim of this paper is to clarify the mechanism of adhesion between clay and a solid surface. Two series of tests were conducted, the first was the tensile tests between clay and the surface of some solids and the other was between some solid materials and a thin-water-film on glass plate structure. The tested solid materials were PTFE (Polytetrafluoroethylene) and some metals, i.e. stainless steel, copper and aluminum. The used clay is saturated Kaoline. As the result of these tests, it was clear that the relationship between the adhesive stresses and the weight of the soil that adhered to the material could be reasonably explained in case of methods. On the other hand, the observed phenomena when using PTFE was slightly complex.

1. はじめに

粘土に顕著に見られる建設機械や農業機械に対する付着は、作業能率の低下の原因となることから重大な問題となっている^{1,2)}。この分野においては従来より多くの研究が行われてきたが、いまだ、付着現象の基本的メカニズムなど分からないことが多い。本研究の最終的な目標は、付着しにくい材料の開発など、土と固体表面間の付着を減少させるための対策を樹立することである。この目標のために、土の付着メカニズムを解明することが非常に重要である。本報告では、粘土といくつかの固体との間の基本的な付着実験を実施し、現象の解明を試みた。

2. ぬれ性

本報告では、付着の実験を行うために4つの固体材料を準備した。付着現象を支配する要因のひとつとして、材料の親水性、疎水性などのぬれ性をあげることができる。まずは、これらの特性について説明する。

2.1 親水性材料と疎水性材料

親水性材料は水にぬれやすく、土と材料の接触面に水が進入しやすい。したがって、毛管水膜が形成されやすく、付着が生じやすい。また、吸湿性があるため、周囲の水素分子の規則性を壊す。そのため、土と材料表面との接触面に存在する水膜は不均等な状態になる³⁾。ステンレス、銅、アルミニウムは親水性材料としてよく知られた材料である。疎水性材料は、親水性材料とは逆の性質をもっており、水にぬれにくく、毛管水膜が形成され

にくいため、付着力は小さい。また、周囲の水素分子の規則性を増加させる傾向がある。そのため、土と材料表面との接触面に存在する水膜は均等な状態である³⁾。テフロンは、よく知られた疎水性材料である。

2.2 接触角

一般的にぬれ性の尺度として、図1に示すような接触角 θ が使われる。 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ のとき親水性を示し、 $90^\circ < \theta < 180^\circ$ のとき疎水性を示す。接触角 θ は、

$$\theta = 2\arctan(h/r) \quad (1)$$

で求める⁴⁾。(1)式において、 h : 液滴の高さ、 r : 液滴の半径とする。

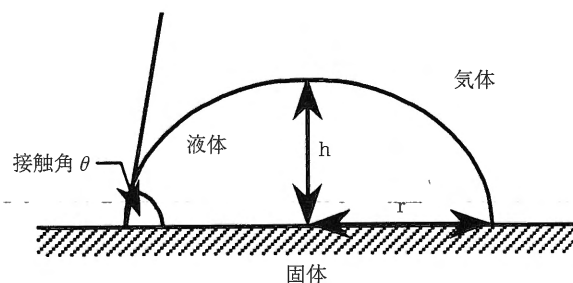


図1 固体表面上の液体の接触角
Fig.1 Contact angle of liquid on solid surface

* 立命館大学 理工学部土木工学科教授 工学博士

** 立命館大学 大学院生

*** 開発室 素形材技術センター

3. 試験方法

粘土と固体表面間の付着特性を調べるために、2種類の試験を行った。一つは、粘土と材料間の付着特性を調べるための試験であり、もう一つは、付着特性に関する水の影響を調べるための試験である。

3.1 粘土と固体材料間の付着試験

3.1.1 土質試料と供試材料

本試験ではカオリンを土質試料として使用した。カオリンは表1に示すような物理的性質を有する粘性土である。供試材料は、ステンレス(SUS304)、銅、アルミニウム、Polytetrafluoroethylene(PTFE)の4種類を使用した。固体材料の表面特性を表2に示す。

表1 カオリンの物理的性質
Table 1 Physical properties of Kaolin

$P_s(g/cm^3)$	土粒子密度	2.64
$D_{30}(mm)$	30%粒径	0.0013
$D_{60}(mm)$	60%粒径	0.0050
$\omega_L(\%)$	液性限界	53.4
$\omega_P(\%)$	塑性限界	30.9

表2 固体材料の表面特性
Table 2 Surface properties of solid materials

	PTFE	ステンレス	銅	アルミニウム
$R_a(\mu m)$	2.30	2.01	2.67	2.36
$\theta(deg)$	97.1	83.0	58.5	79.4

R_a : 算術平均粗さ
 θ : 接触角

3.1.2 試験方法

1) 粘土の準備

土質試料と水を10:7の比で混合攪拌し、15.7kPaの圧密荷重で、およそ1週間水中で予備圧密を行った。

2) 粘土供試体のセット

作成した粘土をカッターリングにより採取し、上端面および下端面においてワイヤソーにより切り取ることで、滑らかな供試体両端面を確保した。供試体の大きさは、直径6cm、高さ2cmである。この供試体を上部せん断箱に移し、一面せん断試験器にセットした。また、各固体材料の表面は汚れなどが付着しているため、ステンレス、銅、アルミニウムにはアセトンを使用し、テフロンには表面の変形防止などを避けるためエタノールを使用して除去した。その後、表面に残留している薬品を除去するために蒸留水で洗浄した。

3) 圧密試験

供試体をセットした後、49、98、147kPaの3種類の圧密荷重で圧密を行った。試験機を3台用意してそれぞれの圧密荷重に相当する分銅を分銅受けにのせ、供試体に衝撃を与えないように注意して圧密を開始した。本試験では供試体の応力条件、応力履歴を明瞭にするために、

一次圧密終了までの圧密を継続することにした。圧密時間は、圧密試験で求めた圧密曲線よりおよそ30分となった。圧密過程で使用した試験機の概要を図2に示す。

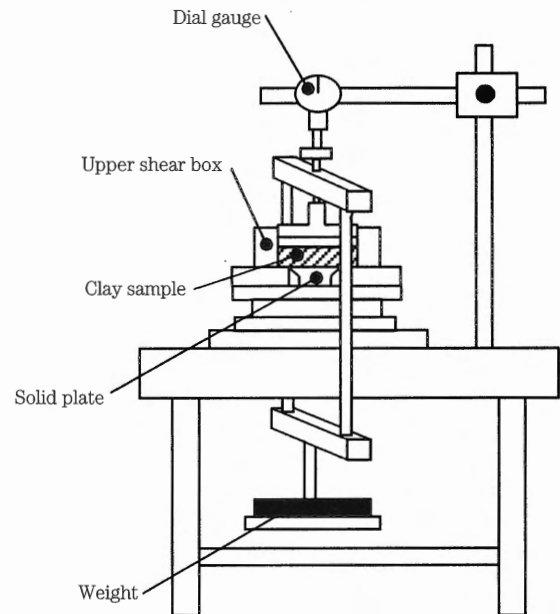


図2 圧密試験のための試験装置
Fig.2 Testing apparatus for consolidation

4) 引張り試験

一次圧密が終了してすぐ、用意した試験機にセットし、付着板を垂直方向に引張った。引張り速度は一定値0.314cm/sに設定し、引張り荷重の最大値から、付着板の重さを差し引いた値を付着力とした。引張り過程で使った試験機を図3に示す。

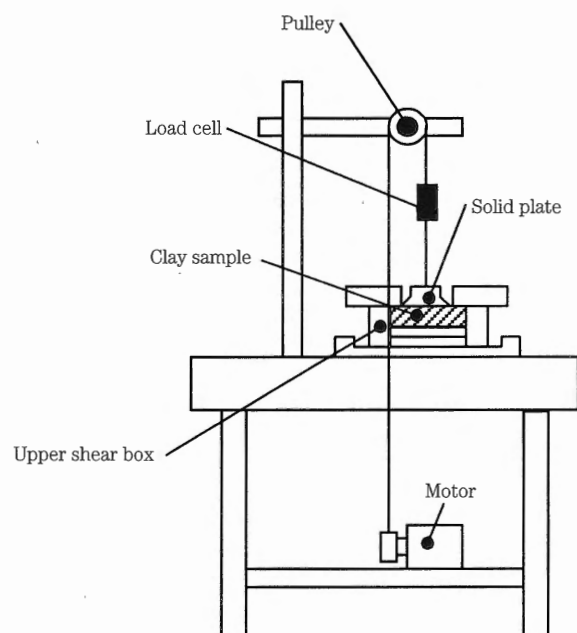


図3 引張り試験のための試験装置
Fig.3 Testing apparatus for tensile test

論文・報告

3.2 水の役割を調べるための付着試験

粘土供試体に含まれた水は、付着現象にとって重要な役割を果たしていることから、水の役割を調べるために、4つの固体材料とガラス板を使用して実験を行った。

3.2.1 供試材料と供試液体

ガラス板を基盤となる固体材料として選んだ。ガラス板の接触角 θ は 43° であった。液体は、蒸留水を使用した。

3.2.2 試験方法

1) 供試材料とガラス板

ガラス板の表面は、アセトンと蒸留水で洗浄した。供試材料は、3.1節と同じ材料を使用し、表面は3.1節で述べた方法で洗浄した。

2) 材料と液体のセット

ガラス板を試験器に固定する。この試験器は、3.1節の実験で使用したもの(図2参照)と同様である。次に、ガラス板上に一定量の液量を置く。液量は、0.05、0.1、0.15、0.2、0.25mlの5種類で行う。液量を正確に測定するために、マイクロピペットを用いた。供試材料をガラス板上の液滴の上に置く。この際、ガラス板と材料間に気泡が入らないように注意し、また、液体が供試材料の全面に広がるようにした。

3) 引張り試験

引張り試験は、0.314、0.942、1.570cm/sの3種類の速度で行い、引張り荷重の最大値から、供試材料の重さを差し引いた値を液体の付着力とした。

4. 試験結果と考察

4.1 固体表面のカオリンの付着

付着応力と間隙比 e の関係を図4に示す。間隙比 e は、土の状態を記述する主要なパラメータのひとつである。各材料ともばらつきが見られるので、それぞれの材料において線形回帰線を示し、その傾向について考察する。ステンレスはほかの材料に比べて付着応力が大きく、またPTFEの付着応力は間隙比 e にあまり依存しないということが分かった。さらに、それぞれの材料において、付着応力は間隙比 e が減少するにつれて増加していることが明瞭である。これは、おそらく土粒子の接触面積の増加が原因であると思われる。土中における粘土粒子は吸着水と呼ばれる水分子層で囲まれている。この水の粘性は、自由水の粘性より大きく、第1の水分子層では100倍ぐらいになっている⁹⁾。よって、吸着水の寄与が増加することによって、付着応力も増加するものと判断できる。

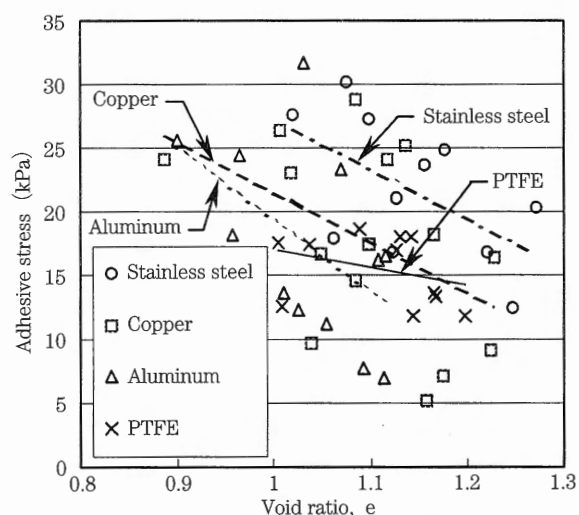
図4 付着応力と間隙比 e の関係

Fig.4 Relationship between adhesive stress and void ratio

図5は、付着応力と圧密応力の関係を示している。付着応力は各々の圧密応力に対するものの平均値である。標準的に圧密された飽和粘土において、ある圧密応力に対する間隙比 e は、本来唯一決まらなければならないものであるから、図4で見られたばらつきは試験条件の違い、計測誤差などによるものと思われる。それぞれの付着板に対する付着応力の大きさは、圧密応力にかかわらず、ほぼステンレス>銅>アルミニウム>PTFEの順になっている。しかし、PTFEの付着力の結果は説明困難である。PTFEは疎水性材料としてよく知られている材料であるので、その付着力は他の金属材料と比較するとかなり小さくなるものと予想していた。PTFEの付着力の原因については、今後検討していく予定である。

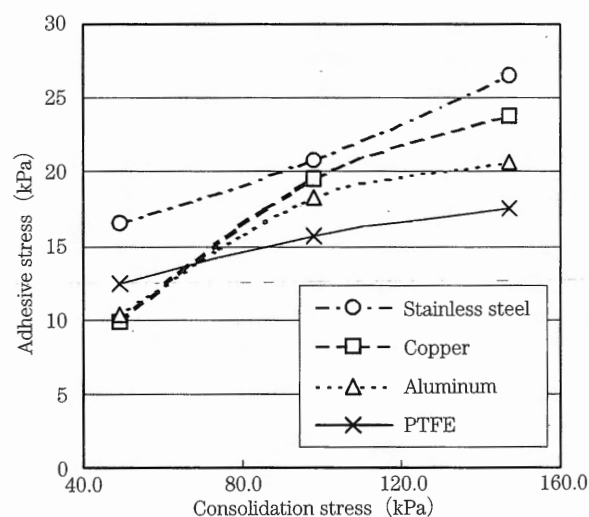


図5 圧密応力と付着応力の関係

Fig.5 Relationship between adhesive stress and consolidation stress

4.2 固体表面の付着土

図6は、固体表面の付着土の質量と間隙比 e の関係を示している。結果は、かなりばらついているが、ステンレス、銅、アルミニウムの線形近似線は、ほぼ同じであった。PTFEの場合、すべてのデータにおいて、付着土は非常に小さい値を示した。付着土量は、粘土—固体表面間の付着力や粘土の引張り力に依存している。図4と図6を比べてみると、図4でのPTFEの付着応力は、「真の付着力」であるが、図4での他の固体材料に対する付着力はおそらく粘土の引張り強度（凝集力）である。図7は、付着土の質量と付着力の関係を示している。金属材料は、ほとんど同様の傾向を示している。付着土量が増大するにつれて、付着力が大きくなっている。しかし、PTFEの傾向は他の材料とは異なり、付着土量は、付着力が大きくなっても、ほぼないという結果になった。

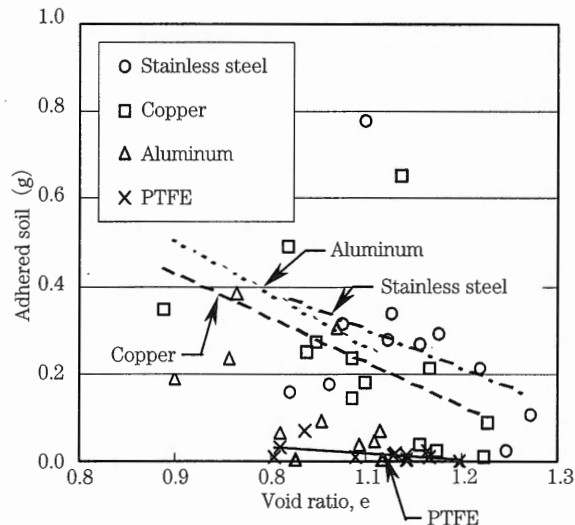


図6 付着土量と間隙比の関係
Fig.6 Relationship between adhered soil and void ratio

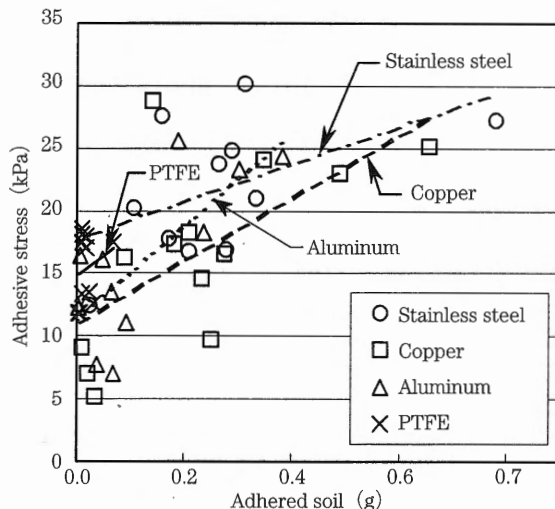


図7 付着応力と付着土の関係
Fig.7 Relationship between adhesive stress and adhered soil

4.3 付着現象における水的作用

この節では、水的作用について、いくつかの追加実験の結果をもとに考察する。この実験は、ガラス板、供試材料、蒸留水を用いて行われた。

図8は、水の付着力と水滴の体積の関係を示している。水滴が十分でないとき、付着力は十分に発揮されず、水滴が、薄い水膜として接触面積全面に広がるとき、付着力は十分に発揮される。そして、付着力の最大値に一致する水量を超える水を加えた場合、水は接触面積内にとどまり始め、厚い水膜が形成される。一方、PTFEの場合、付着力が全くない。この結果は、我々に「図4におけるPTFEの付着力の原因は何なのか？」という疑問を残した。

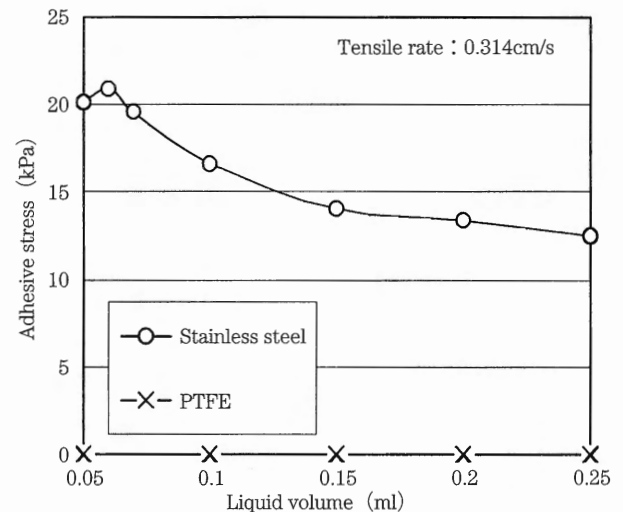


図8 水と固体表面間の付着応力と水滴量の関係
Fig.8 Effect of volume of waterdrop on adhesive stress

図9は水-ステンレス、PTFE間の付着応力に及ぼす引張り速度の影響を示している。ステンレスに対する水の付着応力は引張り速度が大きくなるにつれて増加している。これは速度が大きくなると水の負圧の影響も大きくなることが原因であると思われる。PTFEに対する水の付着応力は、ほぼないという結果になった。

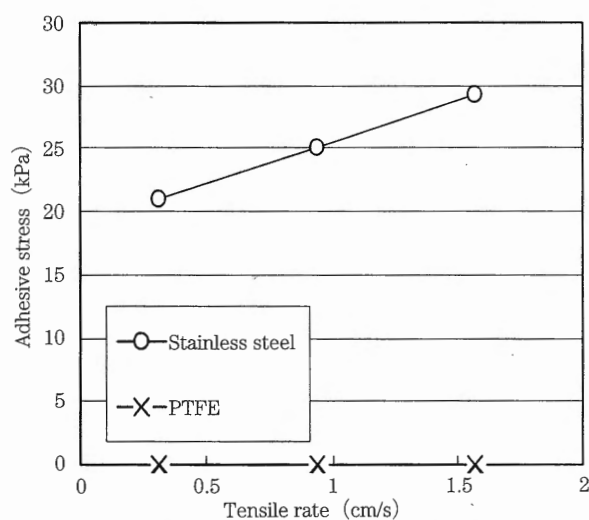


図9 水と固体表面間の付着応力と引張り速度の関係

Fig.9 Effect of tensile rate on adhesive stress

図10は水-固体材料間の付着応力に及ぼす水滴量の影響を示している。引張り速度は0.314cm/sで行った。ステンレス、銅、アルミニウムの3つの金属材料における付着力の最大値は、ほぼ同じであった。

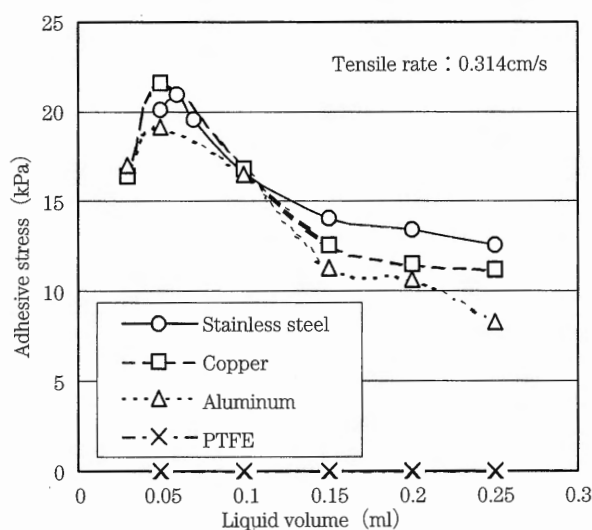


図10 付着応力と水滴量との関係に及ぼす材質の影響

Fig.10 Effect of material on relationship between adhesive stress and volume of waterdrop

図11は、水の付着応力の最大値と接触角との関係を示している。データの数はいくつか少ないが、ステンレス以外は接触角が大きければ付着力が小さくなるという傾向を示している。

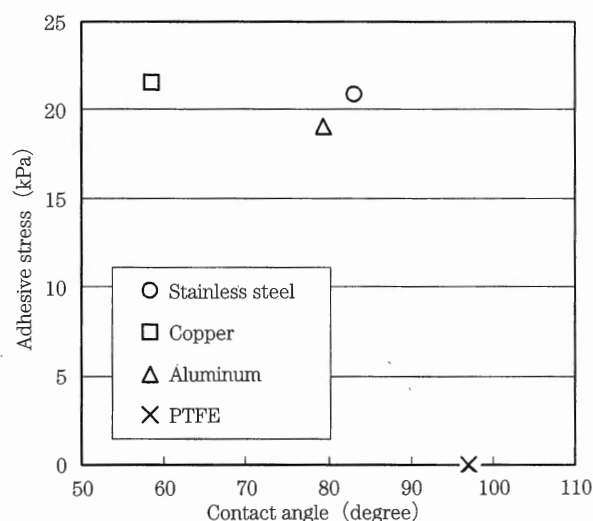


図11 水の付着応力と接触角の関係

Fig.11 Relationship between adhesive stress and contact angle

5. 結論

本研究から得られた主な結論を以下に示す。

1) 付着力

それぞれの固体材料における付着力の大きさは圧密圧力にかかわらず、ほぼステンレス>銅>アルミニウム>PTFEの順になった。ステンレスは他の3つの材料に比べて付着力が大きかった。また、各材料において付着応力は間隙比 e が減少するにつれて増加するという傾向が見られた。PTFEの付着力は金属材料に比べて間隙比にあまり依存しないということが分かった。

2) 付着土

ステンレス、銅、アルミニウムの3種類の固体材料に関する付着土の量は、ほとんど同様程度であった。一方、PTFEに対する付着土は他の材料に比べると無視できる程度であった。金属材料の付着応力と付着土との関係はほぼ同様の傾向を示した。PTFEの付着応力は、付着土の量から評価すると他の材料よりも比較的大きかった。

3) 水と固体材料間との付着力

付着における水の役割を調べるために、ガラス板、いくつかの固体材料、蒸留水を使用する一連の実験を行った。金属材料に対する付着応力の最大値は、引張り速度や材料—ガラス板間の水量などといった多くの要因によって影響を受けることがわかった。一方、水—PTFE間の付着応力はほぼないという結果になった。また接触角が大きければ水の付着応力が小さくなるという結果が得られた。

参考文献

- 1) 能勢行則：締固め機械における付着現象テラメカニックス、14、pp.119-122 (1994)
- 2) 上野正美：圃場機械における土の付着の問題、テラメカニックス、14、pp.123-131 (1994)
- 3) 相賀徹夫：日本大百科全書12、小学館、p.582、1986、および同14、p.164 (1986)
- 4) 北原文雄・早野茂夫・原 一郎：界面活性剤の分析と試験法、講談社、pp.24-26 (1982)
- 5) Yong, R.N. and Warkentin, B.P.: 土質工学の基礎、鹿島出版社、pp.22-26 (1975)

執筆者

深川良一

Ryoichi Fukagawa

立命館大学 理工学部

土木工学科教授 工学博士

玉井俊行

Toshiyuki Tamai

立命館大学 大学院生

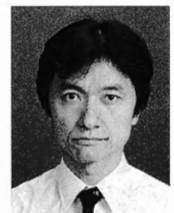
松野 進

Susumu Matsuno

平成2年入社

金属材料の研究に従事

技術士(金属部門)



開 放 特 許

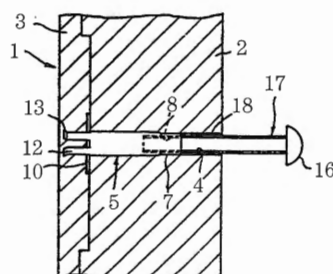
下記の技術は技術提供、技術協力の用意があります。
当社特許部までご連絡ください。

番号	登録番号	発明の名称
1	特許 1 6 2 3 9 3 3	高温ガス管路用スライド弁
2	特許 2 5 0 9 1 1 4	トランスファープレスの金型自動段替装置
3	特許 2 5 7 0 0 4 1	メカニカルハンド
4	特許 2 5 7 0 1 0 9	鍛造プレスの金型スプレーブロー移動装置
5	特許 2 6 0 2 6 2 7	分水栓の取付装置
6	特許 1 6 0 2 1 6 4	断熱複合板

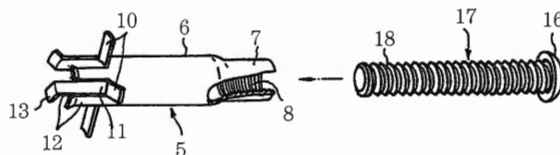
連絡先 (株) 栗本鐵工所開発室特許部 TEL 06-6538-7673

FAX 06-6538-7179

特許1602164は先端縁に爪部を持つ複数の脚片と円周方向に直角に切り起こしたストッパ部とを形成した取付金具を具え、爪部を含む脚片が繊維強化セメント板の中に埋設されていることを特徴とする断熱複合板。



取付部詳細図



取付金具詳細図