

アクアソイル工法に関する研究 (その6)

—砂質土主体のソイルモルタルの流動性に及ぼす細粒分の効果—

久保 博 漆原 知則
喜田 大三

Studies on Aqua Soil Method (Part 6)

—Effects of Fine Particles on Fluidity of Soil Mortar Mainly Constituted of Sand—

Hiroshi Kubo Kazunori Urushibara
Daizo Kita

Abstract

In the Aqua Soil Method, the fluidities of soil mortars which are placed in water are very important. In this paper, the influence of fine particles in the soil mortar on the fluidity of the mortar of which the main constituents were coarse particles, namely sand, were investigated. Two kinds of clays and cement were used as fine particles, and mountain sand with particles under 0.075 mm removed was used as the coarse material. ① Under the condition of fixed quantities of water, the soil mortar has a peak fluidity at one quantity range of fine particles. ② Quantities of fine particles at a peak fluidity are influenced by the properties and quantity of clay. ③ In soil mortar with a cellulose-type admixture added, the influence of fine particles on the fluidity is comparatively small. ④ Correlations between the results of various test methods are influenced by the fine particles.

概 要

アクアソイル工法において、水中に打設するソイルモルタルの流動性は、非常に重要である。砂質土主体のソイルモルタルの流動性に及ぼす細粒分の影響について調べた。実験に用いた細粒分は2種類の粘土と1種類のセメント、また粗粒分は粒径0.075 mm以下の土粒子を除去した山砂である。結果を以下に要約する。

- ①ソイルモルタルの流動性は、水量一定の条件下で、細粒分含有量がある値のときにピークを示す。
- ②そのピーク時の細粒分含有量は、細粒分中の粘土の基本的性状と量の影響を強く受ける。
- ③セルロース系粘結剤を含むソイルモルタルでは、流動性に及ぼす細粒分の影響が比較的小さい。
- ④流動性の各種試験方法の結果に相関があり、その相関はソイルモルタル中の細粒分に影響される。

1. まえがき

土—セメント—水—粘結剤（必要に応じて添加）からなるソイルモルタルを水中に打設するアクアソイル工法において、ソイルモルタルの固化前の流動性は、固化強度とともに、非常に重要である。ソイルモルタルの流動性は、そのポンプ圧送性、打設時のセルフレベリング性、材料分離抵抗性、さらに固化体の品質に影響する。

ソイルモルタルの流動性は、水量、土の種類と量、セメント量などの影響を受けることが知られている。そして、砂質土主体のソイルモルタルでは、流動性の向上に微細な粒子が必要とされるが、その効果に関しては不明なことが多い。

そこで、砂質土主体のソイルモルタルについて、細粒分が流動性に及ぼす影響を室内実験で調べ、また各種の流動性試験方法を比較した。なお、ここでは、土質工学会²⁾の定義に準じて0.075 mm以下の粒子を「細粒分」、0.075 mm以上の粒子を「粗粒分」と表示した。

2. 使用材料

2.1 土

使用土の物理的性状を表-1、粒度を図-1に示す。

2.1.1 山砂中の粗粒分 千葉県富津の山砂(含水比約8%, <75 μm 粒子を数%含有)を75 μmふるいにのせ、ふるい通過分がほぼ無くなるまで水で洗浄して得られたふるい残留分である。その粒子形状を写真-1に示す。

このように山砂中の粗粒分と細粒分を分けたのは、少量含まれている細粒分の流動性への影響を無視できないことが予備実験で明らかにされたことによる。

2.1.2 山砂中の細粒分 2.1.1項のふるい通過土の懸濁液を遠心分離機で濃縮したものである。図-2のX線回折図に示すように、粘土鉱物としてスメクタイトが認められた。山砂中の細粒分は、2.1.3項のカオリン土に比べて活性度がかなり高かった。

2.1.3 カオリン土 岐阜県産粘土である。図-2のように、主要粘土鉱物はカオリナイトであった。

2.2 セメント、粘結剤および混練水

セメントとして高炉セメント B 種, 粘結剤としてセルローズ系水溶性高分子, また混練水として人工海水 (商品名: アクアマリン, 調製後の比重: 1.023) を用いた。海水を使用したのは, 海域での工事を想定したことによる。

3. 試験方法

3.1 水-粘土-セメント系の分離水率, レオロジー定数の試験

所定の比率で, 海水, 粘土 (カオリン土, 山砂中の細粒分) およびセメントを 200 ml ビーカーに採り, スプーンで 1 分間攪拌して, スラリーを作製した。このスラリー 100 ml を 100 ml メスシリンダーに移し, 振とうして静置し, 1 時間後の分離水量を測定した。全体量に対する分離水量の割合を分離水率として表示した。

また, 上記と同様に作製したスラリーについて, 回転粘度計 (コントラバース社製 LS-30 型) で, ずり速度~応力曲線を描き, 降伏値と塑性粘性係数を求めた。

3.2 ソイルモルタルの流動性の試験

3.2.1 ソイルモルタルの混練 ホバート型ミキサーに山砂中の粗粒分, セメント, 粘土 (カオリン土または山砂中の細粒分) および粘結剤を入れて 3 分間混合し, 海水を加えてさらに 2 分間混合してソイルモルタルを作製した。なお, ホバート型ミキサーは, (株)丸東製作所の SE-20 (容器 4.7 l) を木葉形パドルを用いてパドルの回転速度 140 rpm, 遊星運動速度 62 rpm で使用した。

3.2.2 小型スランプ試験 JIS A 1101 に定めたコーンの縮小率 1/2, すなわち上径 5 cm, 下径 10 cm, 高さ 15 cm のコーンを用いた。これに混練直後の試料を詰めて引き上げた際の試料の広がり直径を「小型スランプフロー」, 高さを「小型スランプ」として表示した。

3.2.3 テーブルフロー試験 JIS R 5201 のフローテーブルを用いて, 混練直後の試料の広がり直径を測定し, これを「テーブルフロー」として表示した。

3.2.4 ベーンせん断試験 混練直後のソイルモルタル試料を $\phi 10$ cm \cdot h10 cm の容器に入れ, ベーンせん断試験機によってせん断強度を測定した。

4. 結果と考察

4.1 水-粘土-セメント系スラリーの分離水率, レオロジー定数

ソイルモルタルの流動性の調査には, まずソイルモルタル中の山砂粗粒分を除いたスラリー部分の性状の把握が必要と考えた。そこで, 水-粘土-セメント系スラリー (以下, 細粒分スラリーという) の分離水率とレオロジー定数を測定した。結果を図-3 と図-4 に示す。

分離水率は, 細粒分スラリー中の粘土・セメント量, すなわち細粒分量の増大に伴って減少した。そして, 分離水率をある値以下に抑えるために必要な細粒分量は, 山砂中の細粒分の場合が最も少なく, カオリン土, セメント, カオリン土+セメントの場合ではかなり多かった。

表-1 使用土の物理的性状

	土粒子密度	w _L (%)	w _p (%)	<2 μ m 含有量(%)	活性度*
カオリン土	2.66	42	12	39	0.77
山砂中の細粒分	2.62	80	25	28	1.97

	土粒子密度	吸水率(%)	最小密度 (g/cm ³)	最大密度 (g/cm ³)	均等係数
山砂中の粗粒分	2.68	2.3	1.326	1.627	2.5

*活性度とは, 塑性指数(= w_L - w_p) を <2 μ m 含有量で除した値である。

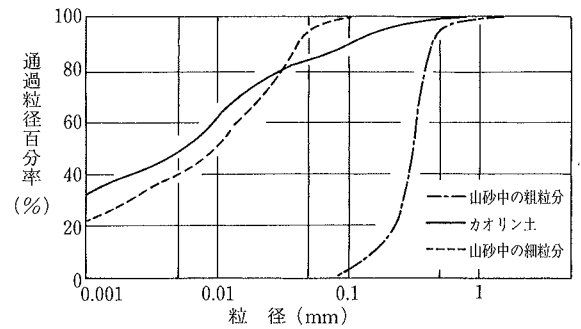


図-1 使用土の粒径加積曲線

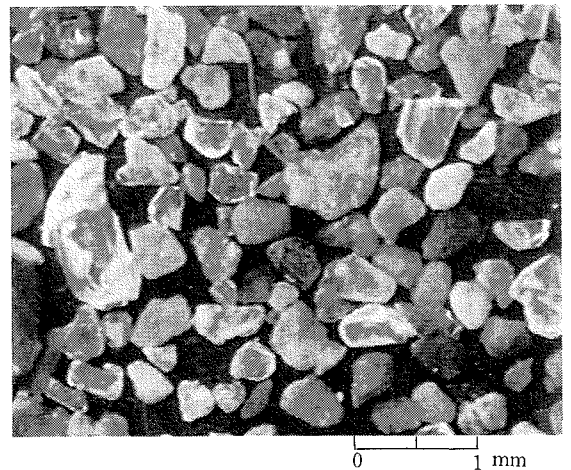


写真-1 山砂中の粗粒分の顕微鏡写真

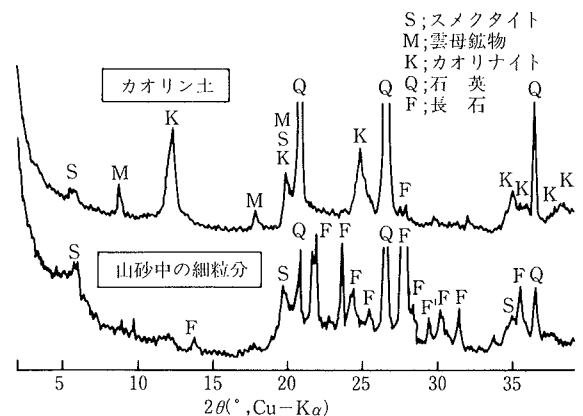


図-2 土の X 線回折図

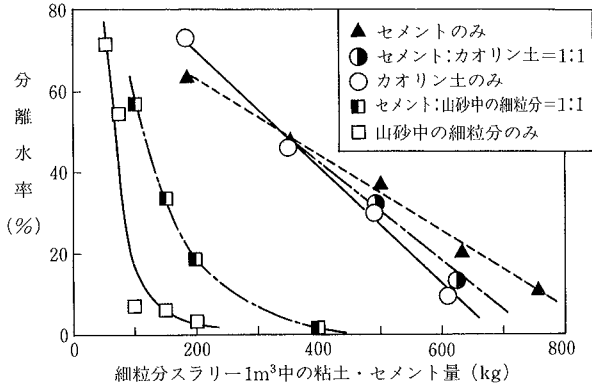


図-3 水-粘土-セメント系スラリーの分離水率

また、図-4のレオロジー定数の結果も分離水率の結果とほぼ対応していた。そして、図-4を図-3と併せてみると、それぞれ分離水率が約10%以下のときの細粒分量を始点として、細粒分量とともに降伏値、塑性粘性係数が顕著に増大することが分かる。

このように同一濃度におけるスラリーの分離水率とレオロジー定数が細粒分の種類で大きく異なるのは、主に細粒分のコロイド化学的性質の相違によると考えられる。山砂中の細粒分がカオリン土に比べて高い活性度を有すること(表-1)、スメクタイトを主体にしていること(図-2)は、上記の結果を支持するものである。

4.2 ソイルモルタルの流動性

4.2.1 水-山砂中の粗粒分-カオリン土-セメント系ソイルモルタルの流動性 この系は、細粒分としてカオリン土とセメントを含む。配合と流動性の関係を図-5に示す。配合の表示方法は、ソイルモルタル1m³中の量とし、この場合には水量一定にしているため、カオリン土量・セメント量の変化に伴って、山砂中の粗粒分の量も変化している。

この系の流動性(テーブルフロー・小型スランプフロー・小型スランプ)は、カオリン土量とセメント量に影響され、次の傾向を示した。流動性は、カオリン土量100~300kg/m³において最大になった。また、流動性が最大になる時のカオリン土量は、セメント量が多いほど少なかった。さらに、カオリン土量約150kg/m³までは、セメント量が多いほど、流動性が大きかった。

これらの結果を以下に考察した。まず、カオリン土・セメントが無添加または少量の場合に流動性が悪い原因は、ソイルモルタルの主体である山砂中の粗粒分の相互摩擦によるもので、粗粒分の角張った形状(写真-1)が摩擦を助長していると考えられる。この場合、水量を増しても水がすぐに分離し、流動性は向上しない。

次に、カオリン土量・セメント量とともに流動性が向上する段階は、山砂中の粗粒分の間隙にある細粒分スラリーが粘性増大によって分離し難く、粗粒分間の潤滑材として流動性向上に寄与している段階と考えられる。

そして、細粒分量がさらに増して流動性が次第に低下す

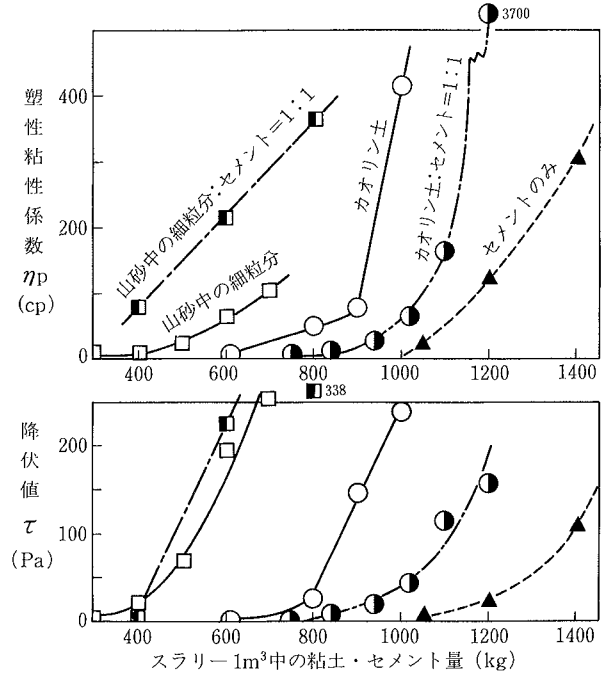


図-4 水-粘土-セメント系スラリーのレオロジー定数

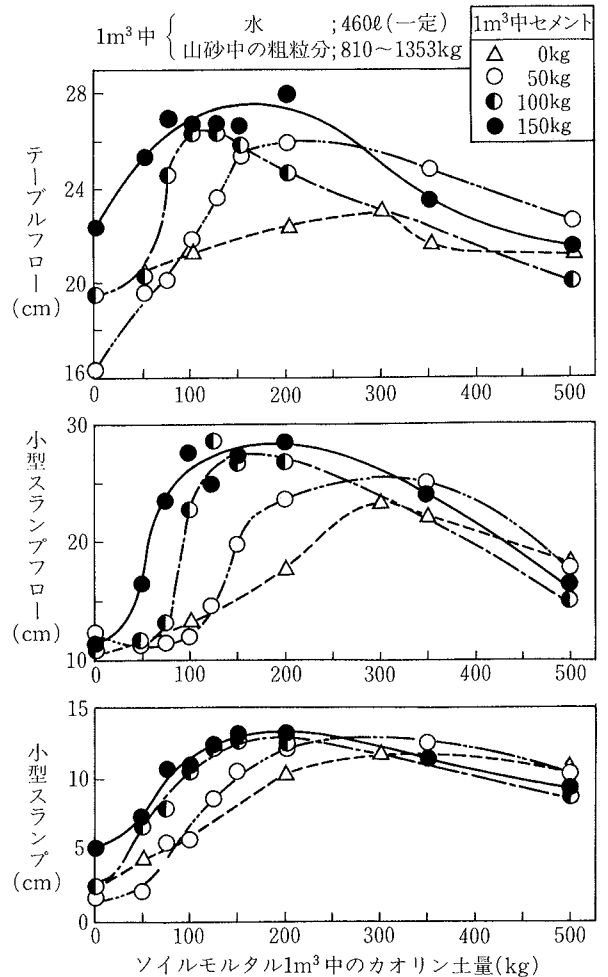


図-5 ソイルモルタルのカオリン土量と流動性の関係

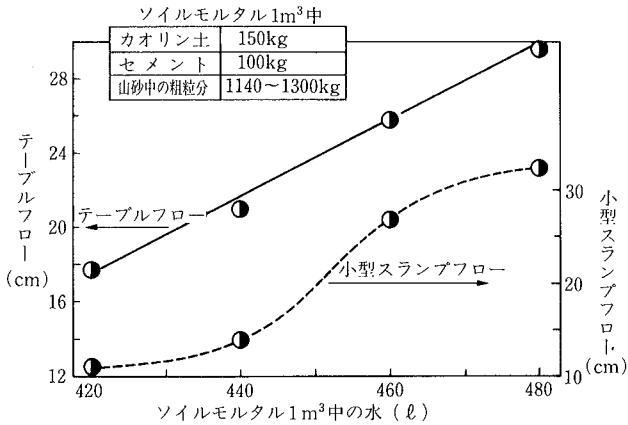


図-6 ソイルモルタルの水量と流動性の関係

る段階は、山砂中の粗粒分間にある細粒分スラリーの粘性が高くなり、粗粒分の動きに対する抵抗が増している段階と考えられる。細粒分がある量以上になると、図-6に例示するように、水量増大によって流動性が向上する。

4.2.2 水-山砂中の粗粒分-山砂中の細粒分-セメント系ソイルモルタルの流動性 この系の細粒分は、山砂中の細粒分とセメントである。流動性の結果を図-7に示す。流動性は、山砂中の細粒分の量がある値のときに最大になり、この点では前述のカオリン土の場合と同様であった。しかし、流動性が最大になるときの山砂中の細粒分の量は、50~100 kg/m³であり、カオリン土に比べて少なかった。このことは、4.1節で述べたように山砂中の細粒分の活性がカオリン土に比べてかなり高いことによると考えられる。

また、図-7の下段に示すように、山砂中の細粒分率(山砂の粗粒分と細粒分の含量に対する細粒分の比率)が5~10%のときに、流動性が最大になった。

4.2.3 水-山砂中の粗粒分-カオリン土-セメント-粘結剤系ソイルモルタルの流動性 この系は、水中分離抵抗性を高めるための粘結剤を含むことが大きな特徴であり、細粒分としてカオリン土とセメントを含む。流動性の結果を図-8に示す。

いずれの試験方法においても、流動性は、カオリン土量50~200 kg/m³のときに最大になり、またセメント量とともに大きくなった。そして、この系では、前述のカオリン土(粘結剤なし)の系および山砂中の細粒分の系に比べて、カオリン土量の増大に伴う流動性の変化が小さかった。このことは、粘結剤が粗粒分間のスラリーの粘性の維持・安定化に寄与するためと考えられる。

4.2.4 ソイルモルタル中の細粒分含有量と流動性の関係

図-5, 7, 8を再整理して、ソイルモルタルの細粒分量(カオリン土・山砂中の細粒分・セメントの含量)と流動性の関係に直したものを図-9に示す。

まず、細粒分がカオリン土・セメント(粘結剤なし)の場合、細粒分量と流動性の間には、同図のように一定の関係がみられた。すなわち、この場合の流動性は、カオリン土とセメントの含量をパラメーターにとることが有効であ

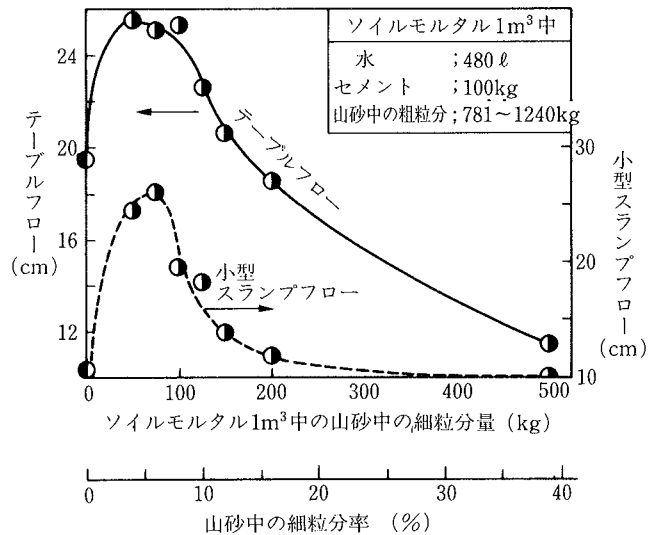


図-7 ソイルモルタルの山砂中の細粒分の量と流動性の関係

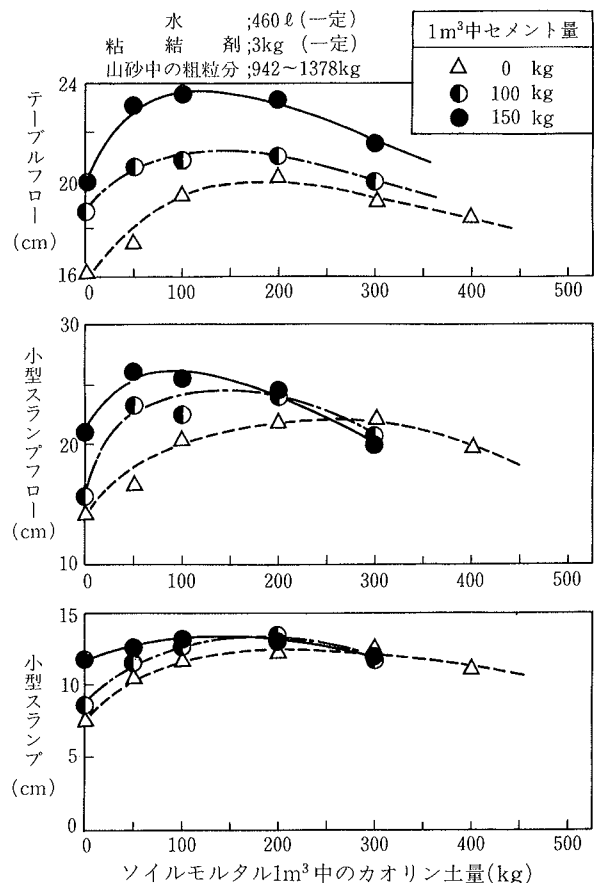


図-8 粘結剤を含むソイルモルタルのカオリン土量と流動性の関係

ること、その含量が250~350 kg/m³の時に最大を示すことが明らかになった。この結果は、流動性に対する効果において、カオリン土とセメントがほぼ同等であることを示唆する。

細粒分が山砂中の細粒分とセメントの場合、上記に比べ

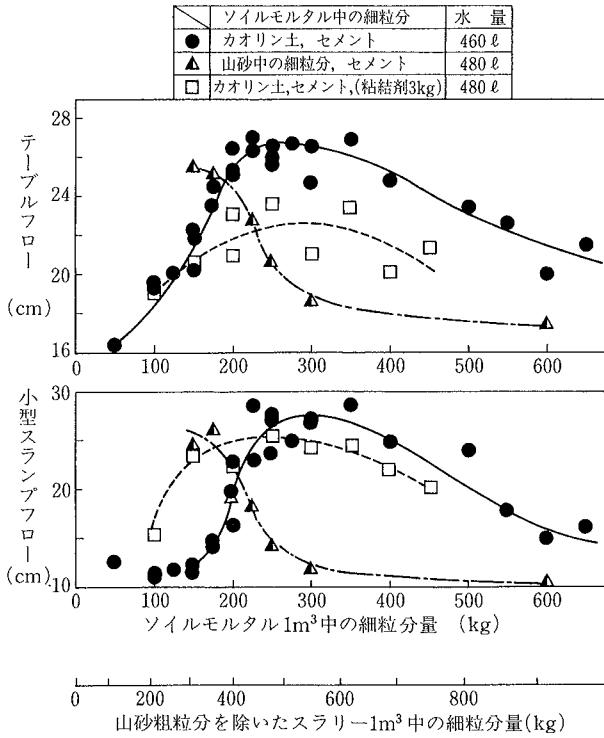


図-9 ソイルモルタルの細粒分量と流動性の関係

て少ない細粒分量で大きな流動性が得られた。図において上記と等価の細粒分量を概略求めると、山砂中の細粒分の流動性に対する効果は、カオリン土やセメントの3~4倍であると推定される。

また、細粒分がカオリン土とセメントでかつ粘結剤を含む場合、流動性に与える細粒分量の影響は、上記の2者に比べて小さかった。

ところで、図-9の下端に「ソイルモルタル中の細粒分スラリー1m³中の細粒分量」の概略スケールを示した。この値は、山砂中の粗粒分の吸水率(表-1)で補正している。これによると、カオリン土+セメント(粘結剤なし)が400~700 kg/m³のときに流動性が最大である。この値を図-3と図-4にあてはめると、分離水率が5~40%、粘性もかなり低いレベルに相当する。データをさらに必要とするが、このように粗粒分主体のソイルモルタルの流動性をよくするには、間隙の細粒分スラリーの粘性をかなり低くする必要があると考えられる。

4.3 ソイルモルタル流動性の各種試験方法の比較

4.3.1 小型スランプフローとテーブルフローの関係

結果を図-10に示す。細粒分量が比較的多い場合、両者の間にかなり明瞭な相関がみられた。そして、細粒分量が比較的少ない場合、テーブルフローがやや大きくなり、かつ、ばらつきも大きくなる。テーブルフローは試料に振動を与えて流動させる試験であるのに対して、スランプ試験は試料を瞬間的に自重で流動させる試験である。このため、細粒分が少なく、粗粒分相互の摩擦が大きい試料では、テーブルフローの方が大きくなりやすいと考えられる。

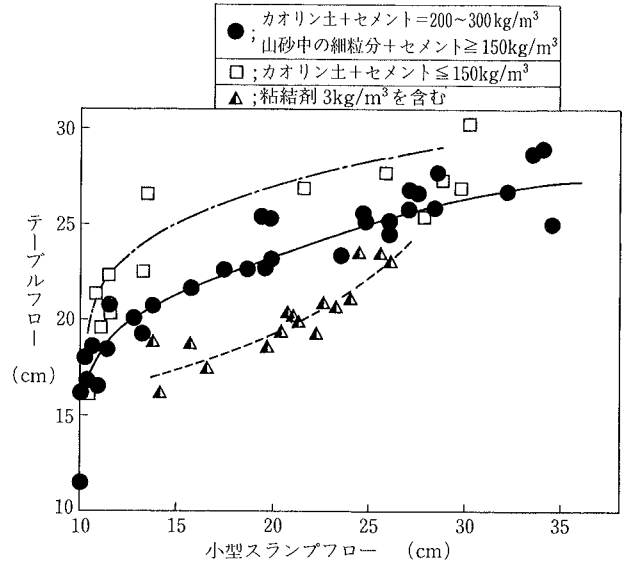


図-10 小型スランプフローとテーブルフローの関係

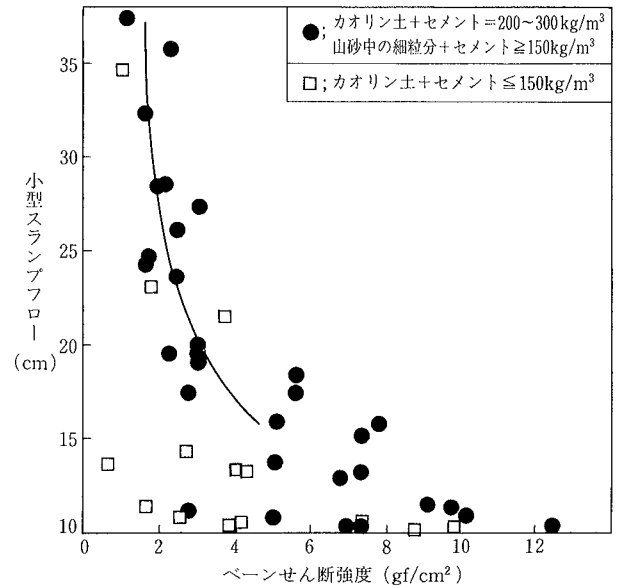


図-11 ベーンせん断強度と小型スランプフローの関係

4.3.2 ベーンせん断強度と小型スランプフローの関係

結果を図-11に示す。小型スランプフローで測定される流動性は、ベーンせん断強度で約10 gf/cm²以下であった。そして、この場合も、両者の関係にソイルモルタル中の細粒分含有量が影響した。

4.3.3 ベーンせん断強度とテーブルフローの関係

結果を図-12に示す。テーブルフローで測定される流動性は、ベーンせん断強度として約15 gf/cm²以下の範囲と推定される。従って、テーブルフローは、前述の小型スランプフローよりも大きなせん断強度領域まで測定できる。なお、この関係においても、ソイルモルタルの細粒分含有量の影響が認められた。

4.3.4 小型スランプフローと標準型スランプフローの関係

小型スランプフローと標準型(JIS法)スランプフロ

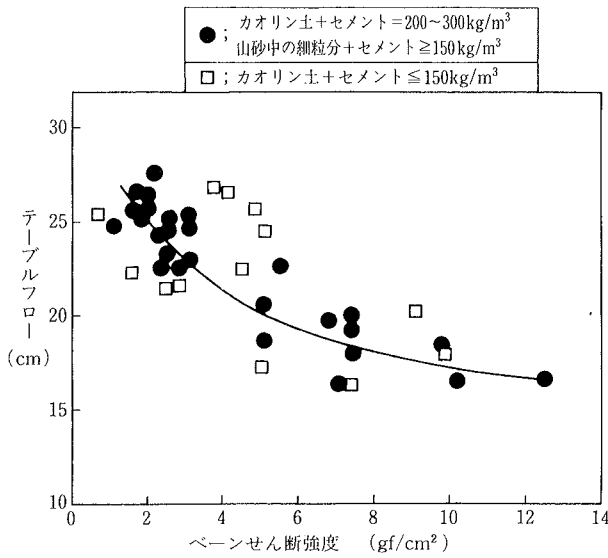


図-12 ベーンせん断強度とテーブルフローの関係

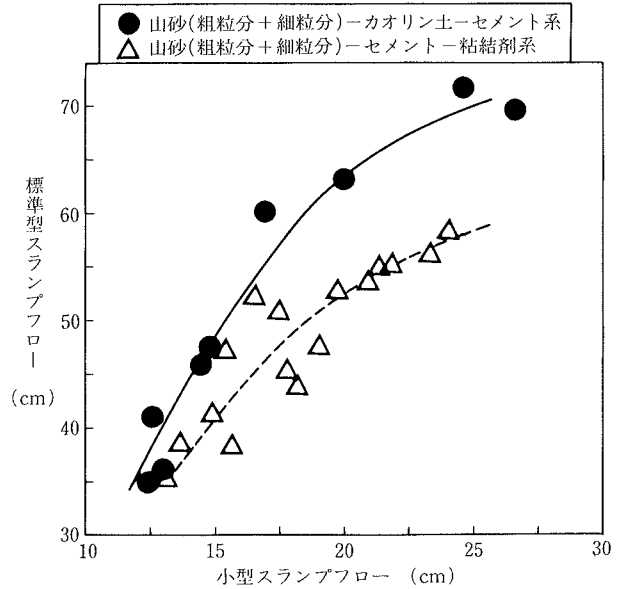


図-13 小型スランプフローと標準型スランプフローの関係

一の関係を図-13に示す。ここでは、細粒分を比較的多く含み、粘結剤を含まないソイルモルタル、および粘結剤を含むソイルモルタルについて示した。それぞれについて明瞭な相関がみられた。従って、両者の関係を求めておくことによって、標準型スランプ試験に替わり小型スランプ試験を採用することが可能と考えられる。

5. まとめ

この報告は、アクアソイル工法において非常に重要なソイルモルタルの流動性に関するものである。ここでは、砂質土主体のソイルモルタルについて、細粒分が流動性に及ぼす影響を調べ、各種の流動性試験方法を比較した。

ソイルモルタルの材料は、粗粒分として粒径0.075~0.6 mm部分の山砂、細粒分としてカオリン土、山砂中の細粒分(<0.075 mm)および高炉セメントB種である。結果を以下に要約する。

① ソイルモルタルの流動性は、水量一定の条件下で、細粒分の量とともに増大し、最大を示した後、さらに細粒分を増やすと次第に減少した。

② 上記①の効果の程度は、細粒分の種類によって異なっていた。カオリン土とセメントは、同程度の効果を示した。山砂中の細粒分は、これらに比べてかなり少ない添加量で同等の効果を示した。このような細粒分の種類による流動性の相違は、別途行なった細粒分のコンシステンシー試験、粘土鉱物試験、沈降実験、レオロジー特性試験などの結果との対応が認められた。

③ セルロース系粘結剤を含むソイルモルタルの流動性は、カオリン土量にわずかしが影響されなかった。

④ 小型スランプフロー、標準型(JIS法)スランプフロー、テーブルフロー、ベーンせん断強度の各値に、かなり明瞭な相関が認められた。そして、これらの相関は、細粒分含有量や粘結剤の有無などに影響された。

参考文献

- 1) 喜田, 久保, 漆原: アクアソイル工法に関する研究 (その3, 中型水槽におけるポンプ打設実験), 大林組技術研究所報, No. 36, p. 30~34, (1988)
- 2) 土質工学会編: 土質試験の方法と解説, p. 183, (1990)