

アクアソイル工法に関する研究（その8）

——砂質土主体のソイルモルタルの性状と品質管理方法——

久保 博 川地 武

Studies on Aqua Soil Method (Part 8)

——Properties and Quality Control of Soil Mortar Mainly Composed of Sandy Soil——

Hiroshi Kubo Takeshi Kawachi

Abstract

The Aqua-Soil method is a way of making the stable ground by placing soil mortar underwater by pump. The main constituents of the soil mortar are soil, cement and water. However, in order to maintain consistency, segregation resistance, and bleeding resistance at suitable levels when using sandy soil, it is frequently required for addition of clay or polymer to be made. This report describes the test method for soil mortar, and the effects of fine particle content of sandy soil and the dosage of polymer on the properties of soil mortar. The content of fine particles in the sandy soil strongly influenced soil mortar properties. The interaction between fine particles in the sandy soil and polymer was recognized, and the optimum dosage of polymer was found to exist. An example of quality control of the soil mortar in a large-scale project is shown.

概 要

アクアソイル工法は、流動状のソイルモルタルを水中にポンプ打設し固結地盤を造成する工法である。このソイルモルタルは、「土・セメント・水」を基本的な構成材料とするが、土の種類によって、特に砂質土を用いる場合、固化前の流動性・水中分離抵抗性・ブリージング率を目標値に適合させるため、粘土や増粘剤の添加を必要とすることがある。この報告では、砂質土を用いたソイルモルタルに関して、試験方法を検討し、砂質土中の細粒分量の変動、および増粘剤の添加量がソイルモルタルの固化前・後の性状に与える影響を調べた。その結果、山砂中の細粒分量は、ソイルモルタル性状に大きな影響を与え、また増粘剤と細粒分の間には相互反応が存在し、増粘剤には適量が存在することも明らかになった。最後に、ソイルモルタルの大規模工事の品質管理の例を紹介した。

1. はじめに

アクアソイル工法は、水量を比較的多くした流動状のソイルセメント（以下、ソイルモルタルという）を水中にポンプ打設し、築島・水中盛土・締切中詰め・裏込めなどを行う工法である。この工法は、1985～1986年の本州四国連絡橋・児島～坂出ルート¹⁾の北浦港橋梁の橋脚基礎工事における築島工事²⁾、1993年の東京湾横断道路の木更津人工島斜路部の盛土工事³⁾などに適用された。

アクアソイル工法に関して、これまでに配合実験³⁾、水槽実験^{4,5)}などの成果を報告した。アクアソイル工法では、ソイルモルタルに対して、固化強度だけでなく、固化前の流動性・ブリージング防止・水中分離抵抗性など、従来の土質安定処理でほとんど扱われなかった項目まで管理する必要がある。このことがアクアソイル工法の大きな特徴であり、設計・施工・品質管理の重要な課題でもある。その面で、アクアソイル工法は、水中不分離コ

ンクリート⁶⁾と共通する。ところで、ソイルモルタルは、基本的に「土・セメント・水」で構成されるが、使用土によって、特に砂質土の場合、目標の固化前性状を得るため、さらに粘土や増粘剤（粘結剤ともいう）の添加を要することが多い。その際の粘土や増粘剤の作用は、コンクリートなどにはない特有のもので、ソイルモルタルの配合設計に十分配慮される必要がある。また、使用する砂質土の粒度のばらつきの影響も問題になる。

筆者らは、山砂主体のソイルモルタルについて一連の研究を行ってきた。この報告は、同ソイルモルタルの試験方法を総括し、配合設計の資料として重要な山砂の細粒分と増粘剤の効果などをまとめたものである。

2. ソイルモルタルに求められる性状

アクアソイル工法の施工フローとソイルモルタルに求められる性状を図-1に示す。施工フローは、ソイルモルタルの混練・圧送・水中打設からなる。混練では、短

時間で均一な混合を達成するためにソイルモルタルの流動性が高い方が有利である。また、ポンプ圧送では、圧送中断した場合の管閉塞を防ぐために、適度の流動性保持とブリージング抑制が求められる。そして、水中打設では、水中で適度に流動しかつ密実に充填させるために必要な流動性、また水質汚濁防止と均質な固化体を得るために必要な材料分離抵抗性、さらに固化体の均一性を高めるためにブリージング抑制が求められる。

ソイルモルタル構造物は、一般に強度が最も重要で、密度・均一性・耐久性まで問題にされることがある。

3. 砂質土主体のソイルモルタルの特徴

ソイルモルタルとモルタル・コンクリートの大きな相違は、土系材料を用い、固化強度が小さいことである。

ソイルモルタルの土系材料は、品質および供給が安定している必要があり、ソイルモルタルの用途から比較的高い密度が求められる場合、粘性土でなく、吸水量の少ない土すなわち砂質土を主体にする必要がある。砂質土主体の場合、水量調整のみでは、流動性を適度に保ち、かつブリージングや材料分離を抑えることが困難になる。すなわち、水量で流動性を調整できても、そのままではブリージングや材料分離が大きくなり、良好なソイルモルタルにならない。この対策として、増粘剤や粘土（粉碎泥岩もその一つ）などが添加される。増粘剤は、ソイルモルタルの間隙水に溶解してブリージングや材料分離を抑制する。また、粘土は、砂粒子の間に散在し粘土粒子表面に間隙水の一部を拘束する結果、ソイルモルタルの粘性を増し、同様の効果を示す。この研究では、砂質土として山砂を用いたソイルモルタルで、山砂の細粒分および増粘剤がソイルモルタルの固化前・後の性状に与える影響を調べ、それぞれの材料の役割を考察する。

4. ソイルモルタル試料の作製

使用した山砂は、千葉県富津産で図-2の粒度分布であった。ソイルモルタルの材料構成を図-3に示す。山砂を湿式75 μ mふるいで、粗粒分と細粒分に分け、両者を乾燥質量換算で各種比率で配合した。その比率すなわち山砂の細粒分の割合を以下、細粒分率(%)ともいう。ソイルモルタルは、山砂・セメント・増粘剤（または粉碎泥岩）・人工海水をホバート型ミキサーで混合して作製した。山砂の細粒分と粉碎泥岩の性状を表-1に示す。また、セメントとして高炉セメントB種、増粘剤としてセルロース系水溶性高分子を用いた。

配合は、内割表示とし、実験の範囲を図-3に示す。配合計算に用いる各材料の粒子密度（110 $^{\circ}$ C乾燥ベース）は、山砂2.72 g/cm³、セメント3.05 g/cm³、粉碎泥岩2.66 g/cm³で、人工海水の密度は1.03 g/cm³であった。

5. ソイルモルタルの固化前の性状

5.1 流動性

5.1.1 流動性試験方法の比較

モルタルの流動性試験

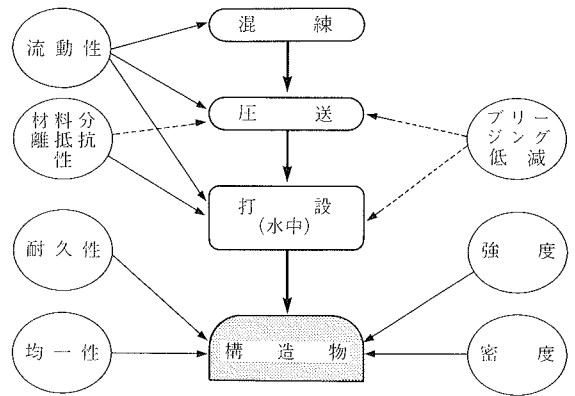


図-1 施工フローとソイルモルタルの必要性状

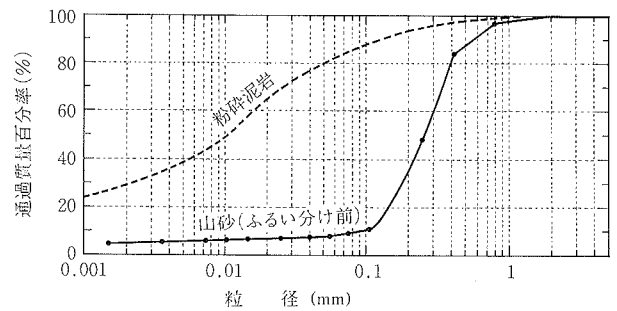


図-2 山砂と粉碎泥岩の粒径加積曲線

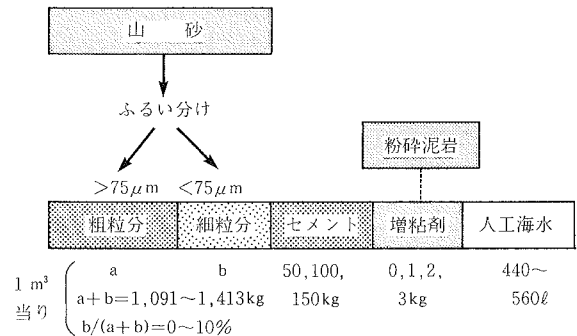


図-3 ソイルモルタルの実験配合

表-1 山砂の細粒分と粉碎泥岩の性状

	含水比 (%)	粒子密度 (g/cm ³)	<2 μ m (%)	<5 μ m (%)	5~75 μ m (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	活性度*
山砂 細粒分	157	2.72	43	63	37	96	20	1.8
泥岩 粉碎物	160	2.66	28	38	46	56	31	0.9

*活性度 = (液性限界 - 塑性限界) / <2 μ m 含有量

験には、スランプ試験(JIS A1101)、フローテーブルによるフロー試験(JIS R5201)、P ロートによるフロー試験(土木学会法)、ベーンせん断試験、回転粘度計や球引上げ粘度計によるレオロジー試験などがある。これらのうちコンクリート分野で最も広く行われるのは、スランプ試験である。スランプ試験は、簡便で、試料の流動性を視覚に比較的好く表すという特長をもつ。ここでもスランプ試験を基本にし、JIS の1/2寸法の容器を用いて試料の広がり直径(以下、小型スランプフローまたは単にス

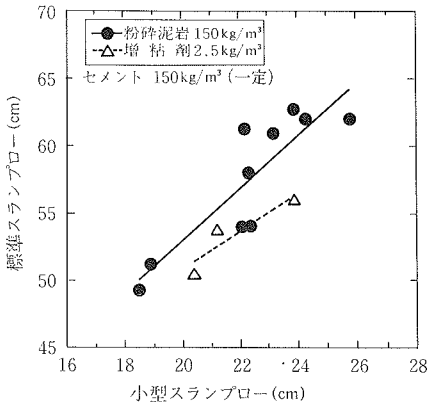


図-4 小型スランプフローと標準スランプフローの関係

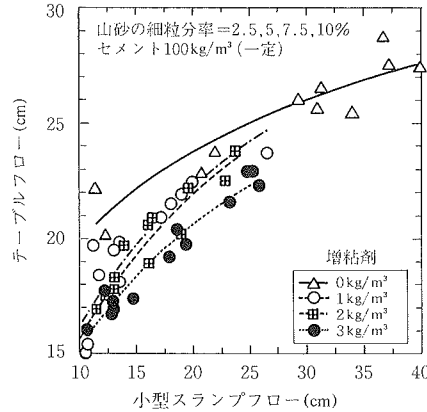


図-5 小型スランプフローとテーブルフローの関係

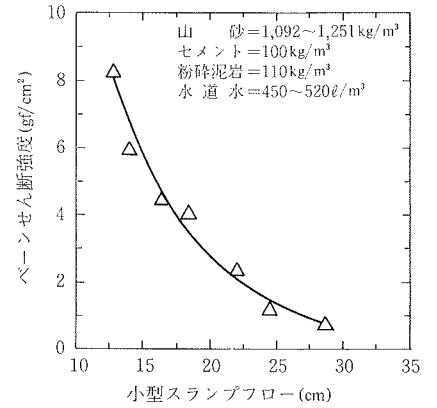


図-6 小型スランプフローとベーンせん断強度の関係

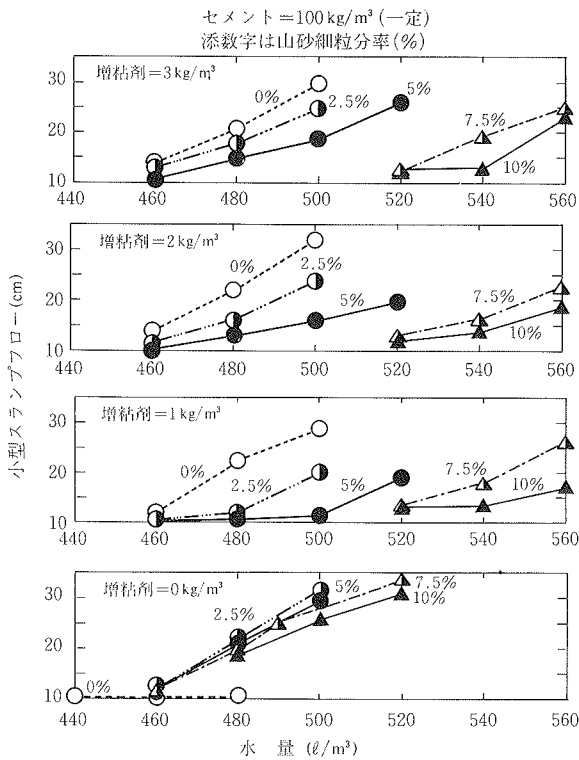


図-7 異なる増粘剤量・細粒分率における水量と小型スランプフローの関係

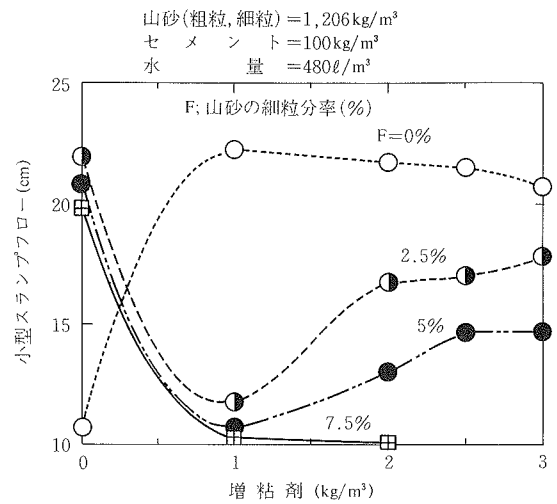


図-8 異なる細粒分率における増粘剤量と小型スランプフローの関係

ランプフローという)の測定を主体にした。

ソイルモルタルの小型スランプフローと標準スランプフロー(JIS)・テーブルフロー・ベーンせん断強度の関係をそれぞれ図-4~6に示す。それぞれに相関が認められ、増粘剤の関与も認められる。特に、図-5では、同じスランプフローにおいて、増粘剤量が多いほどテーブルフローが減少した。テーブルフローが1cm×15回の上下動での流動であることから、増粘剤は振動下の流動に対する抵抗性を高めた。このように、増粘剤は、ソイルモルタルの動的条件下の流動性を変化させる。

5.1.2 配合と流動性の関係 図-7は、「山砂+セメント+増粘剤」からなるソイルモルタルの水量とスラン

プフローの関係を示す。スランプフローは、施工条件で多少異なるが、20~25cmが適切とされる。スランプフローは、水量とともに増大した。そして、一定のスランプフローを得るための水量は、増粘剤0kg/m³の場合、細粒分率にそれほど影響されなかったが、増粘剤1~3kg/m³の場合、細粒分率とともに著しく増大し、増粘剤量にはほとんど影響されなかった。すなわち、一定のセメント量・水量の下で、増粘剤なしで細粒分を増した場合と、細粒分なしで増粘剤を増した場合の流動性は、いずれもほとんど変わらないが、増粘剤の存在下で細粒分を増すと流動性が急激に低下した。このことは、細粒分と増粘剤の相互作用が流動性に影響したことを示唆する。

図-8は、山砂・セメント・水の各量を一定とし、増粘剤量と細粒分率を変えた場合のスランプフローを示す。細粒分率0%の場合、増粘剤なしでは間隙水が分離し流動性に乏しいが、増粘剤1~3kg/m³では良好な流動性を示した。これは、増粘剤が間隙水の粘性を適度に高めたためである。つぎに、細粒分率2.5~5%のスランプフローは、増粘剤1kg/m³で極小を示した。この特異な傾向は、

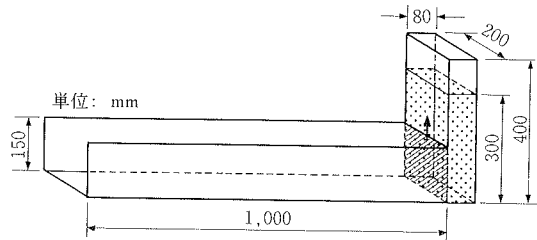


図-9 L形フロー試験器の概要

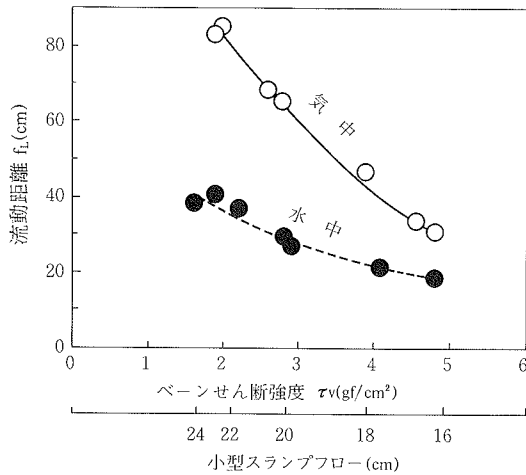


図-10 気中と水中におけるベーンせん断強度と流動距離の関係

コンクリートやモルタルでは報告されておらず、増粘剤と細粒分の相互反応によると考えられる。

5.1.3 気中と水中の流動の比較 アクアソイル工法では、ソイルモルタルを水中に打設するが、水中での機械的な形状仕上げは、汚濁を生ずるため困難である。したがって、ソイルモルタルの打設形状は、それ自体の流動に依存する。このため、ソイルモルタルの水中の流動特性は、非常に重要であり、まず水中と気中の流動の相違を明らかにしておく必要がある。そこで、図-9のようなL型アクリル容器の鉛直部に「山砂+粉碎泥岩+セメント+水」からなるソイルモルタルを高さ30cmまで入れ、速やかに仕切り板を引上げ、試料が水平部を流動し静止した時の流動距離を測定した。これを同一配合で気中と水中で行い、それぞれの流動距離を比較した。

結果を図-10に示す。流動距離は、ベーンせん断強度の増大、スランプフローの減少とともに、減少した。そして、同じベーンせん断強度で、水中の流動距離は、気中のその40~60%であった。すなわち、水中では気中よりも流動しにくく、水中の流動距離は気中の約1/2であった。この一原因として、水中で試料の上部と下部で水圧が異なり、その水圧差だけ試料底部の応力が軽減されるため、より小さな変形で停止すると考えられる。他の原因として、水中では水の粘性抵抗のため流動速度が抑制され、流動時の慣性力が小さくなるため、より小さな変形で停止すると考えられる。このような水中の流動特性を考慮した設計・施工管理が必要である。

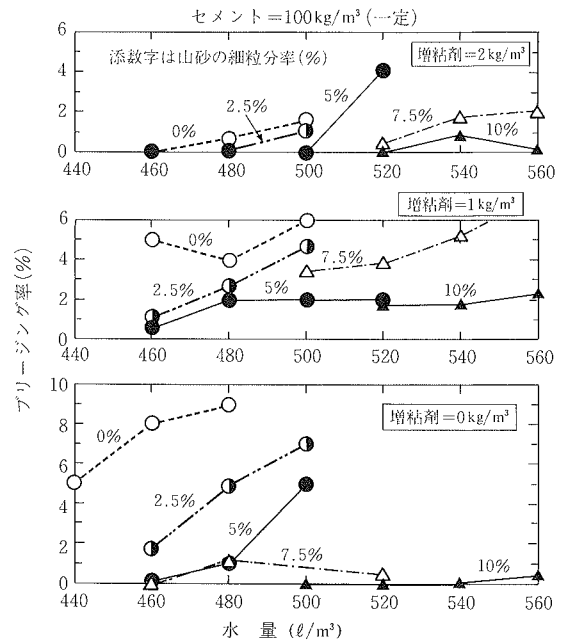


図-11 異なる増粘剤量・細粒分率における水量とブリージング率の関係

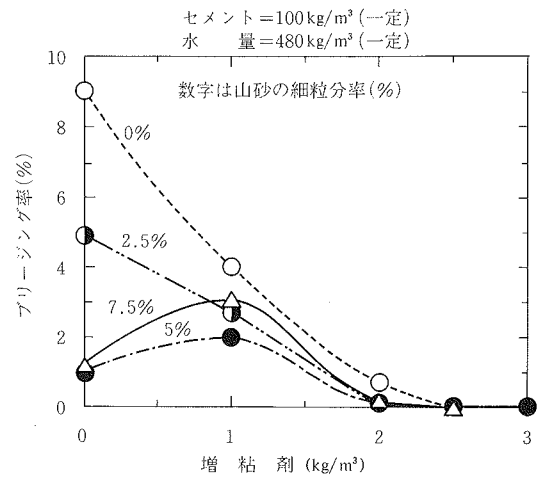


図-12 異なる細粒分量における増粘剤量とブリージング率の関係

5.2 ブリージング率

ブリージングは、ソイルモルタル中の間隙水が粒子の沈降によって上方に集まる現象で、セメントが凝結を始め、粒子相互の接触角が安定するまで続く。ブリージング試験には、JIS A1123にコンクリートの試験方法があるが、ここでは、簡便な方法として試料を $\phi 5 \text{ cm} \cdot h 30 \text{ cm}$ のアクリル円筒に約20cm高さまで入れて試験し、初期の試料量に対する分離水量の割合(%)で表示した。

図-11は、「山砂+セメント+増粘剤+水」からなるソイルモルタルの水量とブリージング率の関係を示す。ブリージングは、すべて数時間で終了した。ブリージング率は、水量とともに増大し、細粒分率・増粘剤量とともに減少した。これらは、増粘剤による間隙水の粘性増大と、細粒分による間隙水の拘束などに起因する。

図-12は、山砂・セメント・水の量を一定とし、細粒

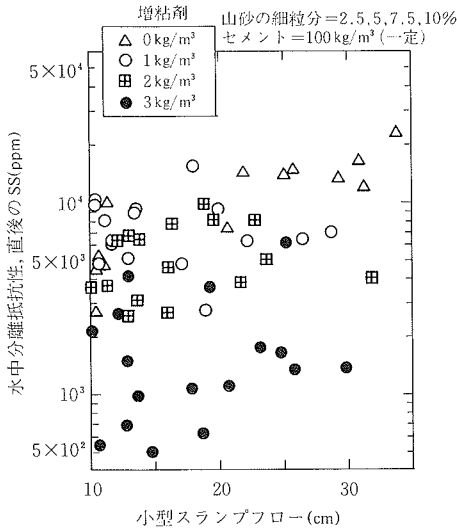


図-13 異なる増粘剤量における小型スランプフローとSSの関係

分率と増粘剤量を変えた場合のブリージング率を示す。ブリージング率は、細粒分率0~2.5%では増粘剤量とともに減少したが、細粒分率5~7.5%では増粘剤1 kg/m³で極大を示した。この極大では、細粒分が凝集剤によって凝集状態にあると考えられる。

5.3 水中投入時の材料分離抵抗性

水中打設するソイルモルタルは、適度の流動性の下で、水中の材料分離抵抗性が大きいほど、水質汚濁が少なく、固化体の品質も向上する。水中分離抵抗性の試験として、水中不分離コンクリートの試験方法(案)⁹⁾がある。その方法は、水800 mlを入れた1 lビーカーに、試料500 gを概ね10等分し10~20秒間で水面から落下させ、3分後にpHとSSを測定するものである。ここでは、3分後だけでなく直後の水質も測定した。

図-13は、「山砂+セメント+増粘剤+水」からなるソイルモルタルで、増粘剤量を変えた場合のスランプフローと水中投入直後の水質(SS)の関係を示す。このように水中分離抵抗性をスランプフローとの関係で評価することも重要である。同図から、SSは、増粘剤0 kg/m³ではスランプフローとともに増大し、すなわち試料が軟かいほど、材料分離が著しくなることがわかる。また、増粘剤1および2 kg/m³のSSは、増粘剤0 kg/m³に比べて、やや小さかったが、大きな差ではなかった。すなわち、増粘剤の水中分離防止の効果は、2 kg/m³以下ではそれほど大きくない。つぎに、増粘剤3 kg/m³のSSは、2 kg/m³以下のSSに比べて、いずれのスランプフローでも大幅に低減された。したがって、ソイルモルタルの水中分離防止のためには、増粘剤を3 kg/m³程度必要である。

6. ソイルモルタルの固化強度

固化後の性状として強度は、最も重要である。ここでは、試料をφ5 cm・h10 cmのモールドに詰めて20℃水中養生し一軸圧縮強度を測定した。以下に28日強度を示す

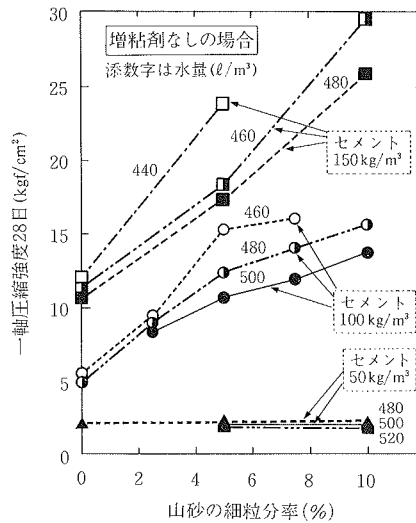


図-14 増粘剤無添加における細粒分率と強度の関係

が、28日強度/7日強度の比は、1.7~4であった。

図-14は、「山砂+セメント+水」からなるソイルモルタルの細粒分率と強度の関係を示す。セメント量100および150 kg/m³の強度は、細粒分率とともに増大し、水量とともに減少した。細粒分率に伴う強度増大は、細粒分による間隙水の拘束とポゾラン反応の増大によると考えられる。なお、細粒分率とともに流動性が低下するので、一定の流動性で比較した強度は、必ずしも細粒分率に伴って増大しない。なお、セメント量50 kg/m³(W/C≒10に相当)では、大きな強度を得られなかった。

図-15は、「山砂+セメント+増粘剤+水」からなるソイルモルタルで、細粒分率5% (一定) の場合の増粘剤量と強度の関係を示す。セメント量100および150 kg/m³の強度は、増粘剤量との間に特異な関係を示した。すなわち、強度は、増粘剤量1 kg/m³で極小を示し、3 kg/m³では0 kg/m³と同等かそれ以上になった。このように増粘剤1 kg/m³は、強度の面からも妥当でない。また、図を省くが、細粒分率が0%の場合、増粘剤1 kg/m³での強度低減はなかった。したがって、増粘剤1 kg/m³での強度低減は、増粘剤と細粒分の反応に起因し、5.1と5.2で述べたように増粘剤が細粒分を凝集させたためと考えられる。細粒分が凝集すると、分散している場合に比べてポーラスな構造になり、強度が低下したと考えられる。

7. 現場におけるソイルモルタル品質管理例

ソイルモルタルの品質管理例として、東京湾横断道路木更津人工島の斜路部の水中盛土工事の例を紹介する。同盛土は、改良盛土と称され、人工島に接続して海面下-31 mからシールドトンネル発進立坑が位置する海面上+3 mまでを4%法面勾配で造成された。盛土は、延長約800 m、幅約80 m、土量約100万m³の大規模なものであった。この改良盛土は、シールド掘進地盤になるため、特に強度と密度(単位体積質量)が重視された。改良盛

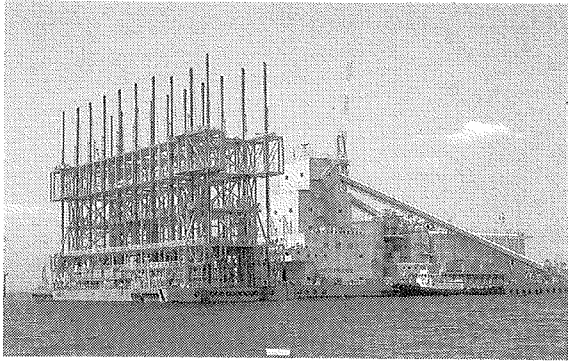


写真-1 東京湾横断道路木更津人工島・斜路部改良盛土A区の施工 (柏練号・柏盛号)

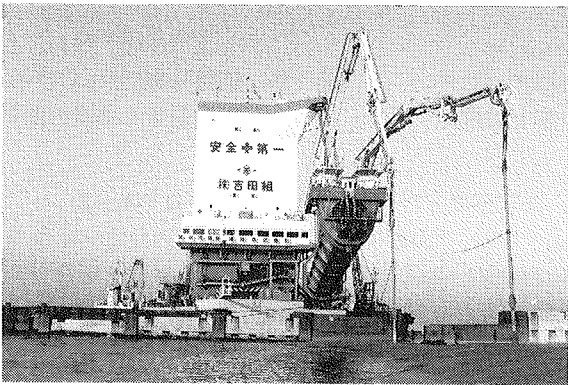


写真-2 東京湾横断道路木更津人工島・斜路部改良盛土B区の施工

土は、上部を除く大部分の範囲のA区と、上部(浅海・陸地)のB区に分け、それぞれ写真-1と2のような船団で施工された。各区の改良盛土の配合を表-2に示す。

改良盛土の品質管理は、表-3のように行われた。各構成材料の品質、ならびに改良盛土の固化前・後の品質の管理が綿密に行われ、所期の成果をおさめた工事として、今後の貴重な資料になると思われる。

8. まとめ

砂質土主体のソイルモルタルについて、品質試験方法を検討し、砂質土中の細粒分量および増粘剤の添加がソイルモルタルの性状に与える影響を調べ、最後にソイルモルタルの大規模工事の品質管理例を紹介した。

① ソイルモルタルの固化前性状のうち、流動性は小型スランプ試験、ブリージング率はφ5cm・h30cmのアクリル円筒試験、水中分離抵抗性は1ℓピーカーを用いる「水中不分離コンクリートの試験方法」が有効である。

② 流動性は、水量に伴い増大する。山砂中の細粒分と増粘剤が共存する場合、流動性が低下し、特に増粘剤1kg/m³で流動性が極小になる。これは、増粘剤による細粒分の凝集のためと考えられる。また、L形フロー試験から、水中の流動距離は、気中のその約1/2である。

表-2 改良盛土(ソイルモルタル)の配合例 (kg/m³)

	セメント	海水	山砂	洗砂	粉碎泥岩	増粘剤
A区	80	520	1,177	—	110	—
B区	130	400	—	1,381	—	3

表-3 改良盛土(ソイルモルタル)の品質管理例

	管理項目	基準値
材料	セメント, 海水	
	山砂	細粒分(<75μm); 10%以下
	粉碎泥岩	細粒分(<75μm); 70%以上
固化前	単位体積質量	1.84 t/m ³ 以上
	流動性	テーブルフロー; 19±2 cm
	ブリージング率	1%以下
固化後	空気量	1%以下
	一軸圧縮強度	σ ₂₈ ; 6~20 kgf/cm ²
	単位体積質量	1.8 t/m ³ 以上
	含水比	特になし

③ ブリージング率は、水量に伴って増大し、山砂細粒分率・増粘剤量に伴って減少する。また、ブリージング率は、細粒分・増粘剤の共存下では増粘剤1kg/m³で極大を示し、これは細粒分の凝集によると考えられる。

④ 水中投入時の分離抵抗性は、流動性ととともに低下する。適度の流動性の下での水中分離抵抗性は、増粘剤約3kg/m³の添加によって顕著に向上する。

⑤ 固化強度は、セメント量・細粒分量に伴って増大する。また、強度は、細粒分・増粘剤の共存下では、増粘剤1kg/m³で極小になる。これは、増粘剤によって細粒分が凝集しポーラスな構造になるためと考えられる。

⑥ 以上のことから、山砂を主体とするソイルモルタルにおいて、固化前・後の性状を良好に保つために増粘剤を添加する場合、約3kg/m³の添加量が適切である。

参考文献

- 1) 松田, 西村, 村田: 大深度地中連続壁基礎の施工, 土木技術, Vol.42, No.10, p.88~94, (1987)
- 2) 飯田, 吉田, 今井: 東京湾横断道路における地盤改良工法, 土木技術, Vol.49, No.8, p.46~55, (1994)
- 3) 久保, 漆原, 川地: アクアソイル工法に関する研究(その7), 大林組技術研究所報, No.43, p.87~92, (1991)
- 4) 喜田, 久保, 漆原: アクアソイル工法に関する研究(その3), 大林組技術研究所報, No.36, p.30~34, (1988)
- 5) 喜田, 芳賀, 久保, 崎本, 漆原: アクアソイル工法に関する研究(その5), 大林組技術研究所報, No.38, p.17~21, (1989)
- 6) 沿岸開発技術研究センター, 漁港漁村建設技術研究所: 特殊水中コンクリート・マニュアル, p.99~100, (1986)