

アクアソイル工法に関する研究（その1）

—アクアソイルの性状と現場施工例—

喜田大三 久保博
漆原知則 増田龍彦
(北浦WF工事事務所)

Studies on Aqua Soil Method (Part 1)

—Properties of Aqua Soil and Example of Execution—

Daizo Kita Hiroshi Kubo
Kazunori Urushibara Tatsuhiko Masuda

Abstract

A method for underwater placement of a flowable soil cement (called Aqua Soil) has been developed. This method, called Aqua Soil Method, consists of mixing soil, cement, water, and an admixture for controlling segregation, and placing the mix in water. This paper describes the properties of Aqua Soil and an example of execution.

(1) As the segregation controlling admixture, a polymer whose main component is methyl cellulose and which forms a viscous slurry with cement but does not disturb hardening of the cement was selected.

(2) In a laboratory test using decomposed granite soil and sand, Aqua Soil containing more than 1 to 2 kg/m³ of the segregation controlling admixture was placed underwater with less segregation and hardened to a higher strength underwater.

(3) This method was applied to a man-made island for constructing bridge piers with caisson-type wall foundations. The Aqua Soil volume was 6,800m³. High-quality solidified ground was made in a short period of time, and construction of the wall foundation progressed smoothly.

概 要

アクアソイル工法と称し、土砂、セメント、水、分離低減用の粘結剤を混合し流動状にしたソイルセメント（アクアソイルという）を水中打設する工法を開発した。アクアソイルの性状と同工法の施工例について述べる。

(1) 粘結剤として、セメントと安定な粘稠液を形成し、セメントの硬化を妨害しない主成分MCからなる材料を選定した。

(2) まさ土と山砂による室内試験の結果、粘結剤を1～2 kg/m³以上添加することによって、アクアソイルを水中打設した際の分離は、大幅に低減され、水中打設固化体の強度も増大した。また、セメント添加量とともに強度は増大した。

(3) 海上における橋梁基礎を連壁剛体基礎で構築する工事において、あらかじめ必要となる築島工事にアクアソイル工法が適用され、計6,800m³を打設した。同工法によって均一な固化地盤を早期に造成し、地下連続壁を安全・確実に施工できた。

1. まえがき

近年、海洋空間の有効利用が進むにつれて、人工島の建設が増大している。その一部として、海洋における橋梁、道路トンネルなどの工事に際して建設される人工島がある。これらの人工島建設において、安定な地盤を早

期に造成する従来の工法として、締切った内部に土砂を埋立てたのち、その軟弱な地盤をセメント深層混合法などによって改良する工法がある。

当社では、人工島建設などの際、土砂埋立て後に地盤改良するのではなく、あらかじめセメントなどを混合して自硬性とした土砂材料を埋立てる工法を開発し実用化

した。この工法を“アクアソイル工法”と称する。

この報告では、アクアソイル工法の概要を述べ、同工法で用いる材料に関する室内試験結果、さらに同工法による施工例について述べる。

2. アクアソイル工法の概要

2.1. アクアソイル工法とは

アクアソイル工法とは、土砂材料に水、セメント、分離低減用の粘結剤などを混合した流動状ソイルセメント（これをアクアソイルとよぶ）を水中に打設することによって、水域に固化地盤を造成する工法である。

ここで、土砂材料には、砂質土、粘性土だけでなく、スラグ、石炭灰、赤泥なども利用できる。なお、分離低減用の粘結剤は、土砂材料の性状、工事条件などによって使用しないこともある。

2.2. システム

アクアソイル工法のシステムは、材料供給→混練→輸送→打設の各工程からなっている。

まず、ミキサーを用いて土砂、水、セメント、粘結剤などを混合する。その際、通常、粘結剤をあらかじめ水に溶解させておく。このようにして混練されたアクアソイルは、ベルトコンベア、コンクリートポンプ、コンクリートミキサー車などによって、打設場所まで輸送する。水中への打設は、コンクリートポンプ、トレミー管などによって行なう。

2.3. アクアソイルに要求される性状

アクアソイルは、輸送時、打設時、さらに固化後において、所定の条件を満足したものでなければならない。その際に問題になる性状の主な項目を図-1に示す。

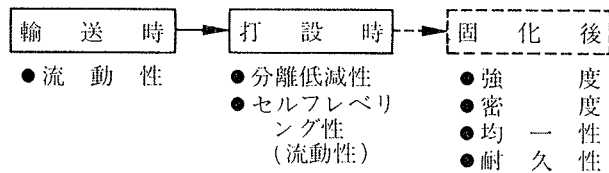


図-1 アクアソイルに要求される主な性状項目

2.4. 特 長

アクアソイル工法の特長を以下に列挙する。

- (1) 埋立て後の地盤改良工事が不要である。
- (2) 固化強度を任意にコントロールでき、かつ均一性に優れた地盤を造成できる。そのため、埋立て地盤に地下連続壁やトンネルなどを安全かつ確実に掘削でき、また撤去が必要な場合、容易に撤去できる。
- (3) 締切り壁にかかる土水圧を低減できるので、二重締切りなどの大がかりな締切りを必要としない。

(4) 埋立て時の水質汚濁を低減できる。

(5) 土砂材料として、現地発生土など各種の材料を利用可能である。

(6) 全体の工期を短縮できる。

3. 粘結剤の選定に関する室内試験

3.1. 目 的

アクアソイルには、通常、粘結剤を添加する。粘結剤は、アクアソイルに適度の流動性を与え、また水中打設時の分離を低減させるために用いる。従って、粘結剤は、アクアソイルに含まれている水の分離を防止し、またセメント粒子や土粒子の相互の接着力を増大させ、セメントの水和硬化反応を妨害しないものでなければならない。

そこで、粘結剤としての利用が考えられる高分子材料のうちの4種類の材料について、アクアソイルに適用する際に最も重要となるセメントとの反応性を比較した。

3.2. 供試材料と試験方法

粘結剤として、表-1のP-1~P-4を用いた。また、セメントとして普通ポルトランドセメント、水として水道水を用いた。

まず、濃度1%の粘結剤液を作製し、その粘度をB型回転粘度計によって測定した。そして、この粘結剤液にセメントを濃度60%になるように添加混合し、再び粘度を測定した。また、このセメントミルクのブリージング率を土木学会法によって測定し、併せて20℃水中に7日養生後の一軸圧縮強度を測定した。

3.3. 結果と考察

結果を表-1に示す。P-1は、非常に大きな吸水性を示すが、セメントを添加すると、吸水能を急速に失って水が分離した。P-2は、水に溶解させると非常に高い粘度を発現するが、セメントを添加すると著しくゲル化し変質した。P-3も、セメント添加によって、かなり変質した。これらのことは、P-1~P-3のブリージング率が大きいこととも対応している。

一方、P-4は、水溶液の粘度が比較的高く、しかもセメントを添加した際にまったくゲル化することなく、安

(記号) (分類・主成分など)	1%水溶液の粘度 (CP)		1%液にセメントを60%添加		
	粘 度 (CP)	ブリージ ング率 (%)	強 度 (kgf/cm ²)		
P-1 合成高分子 ポリアクリル酸 高吸水性樹脂	ゲル化して 測定不能	-	43	16	
P-2 天然高分子 グアガム	9,500	2,100	28	17	
P-3 半合成高分子 CMC	460	2,200	26	18	
P-4 " MC	1,900	3,500	12	16	
水 道 水	(1)	160	55	43	

表-1 各種粘結剤とセメントとの混合液の性状

定な粘糊液を形成し、ブリージングが少なかった。なお、水道水によるセメントミルクが大きな固化強度を示したのは、そのブリージングが著しく、セメント分が濃縮されたためである。P-4のセメントミルクは、ブリージングが少なく、その固化体のW/C比が他に比べて大きかったことを考慮すると、十分に硬化したと判断される。

以上のことから、アクアソイルに用いる粘結剤として、MC(メチルセルロース)を主成分とする高分子材料を選定した。

4. アクアソイルの配合に関する室内試験

4.1. 目的

アクアソイルは、2章で述べたように、多くの項目において現場の要求を満たす性状でなければならない。従って、アクアソイルの配合と性状の関係を把握しておくことは、重要である。そこで、アクアソイルの流動性、分離低減性、固化強度に着目し、それらと配合の関係を調べた。

4.2. 供試材料と試験方法

土砂として、千葉県の上野原と香川県のまき土を用いた。粒径加積曲線を図-2に示す。なお、まき土は、10mmふるいを通して用いた。山砂は、含水比7%、比重2.67であり、まき土は、含水比6.5%、比重2.67であった。また、セメントとして普通ポルトランドセメント、粘結剤としてMC主体のP-4(表-1)を用いた。

試験方法の概略は、以下のようである。約1%までの各種濃度の粘結剤液を作製しておき、土砂3,000gに所定量のセメントと粘結剤液を加えて、ホバート型ミキサーで混練した。その際の粘結剤液量は、混練直後のアクアソイルの流動性が所定値を確保できるまでとした。流動性は、上面直径5cm、下面直径10cm、高さ15cmのスランブコーンによって測定した。これを以下、小型スランブという。小型スランブ(S₂)とJIS法によるスランブ(S₁)の間には、次の関係があった。

$$S_1 = 1.68 S_2 + (5 \sim 6)$$

つぎに、混練直後のアクアソイルの一部をφ5cm×h10cmのモールドに詰め、これを気中打設試料とした。また、混練直

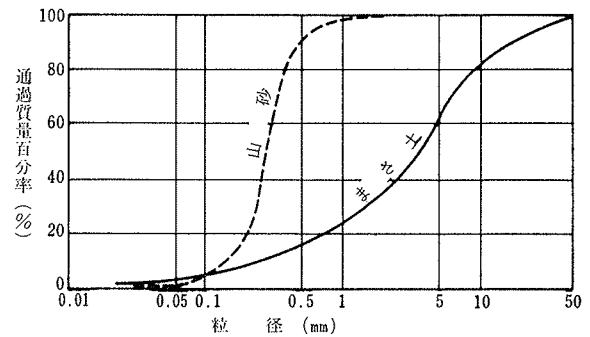


図-2 土砂の粒径加積曲線

後のアクアソイルの一部を、人工海水を満たしたアクリル円筒φ10cm×h40cmに、h20cmまで水面から投入した。その際のオーバーフロー水中の固形分濃度を測定した。そして、円筒内の試料をφ5cm×h10cmのモールドに詰め、これを水中打設試料とした。気中打設試料と水中打設試料は、それぞれ20℃水中に所定期間養生したのち一軸圧縮強度を測定した。

4.3. 結果と考察

混練直後のアクアソイルの流動性は、ポンプ圧送性と水中でのセルフレベリング性を確保するため、小型スランブで9.5~11cm(JIS法によるスランブで21~25cmに相当)になるように調整した。

アクアソイル中の粘結剤量と気中打設・水中打設強度の関係を図-3に示す。気中打設強度(quA)は、粘結

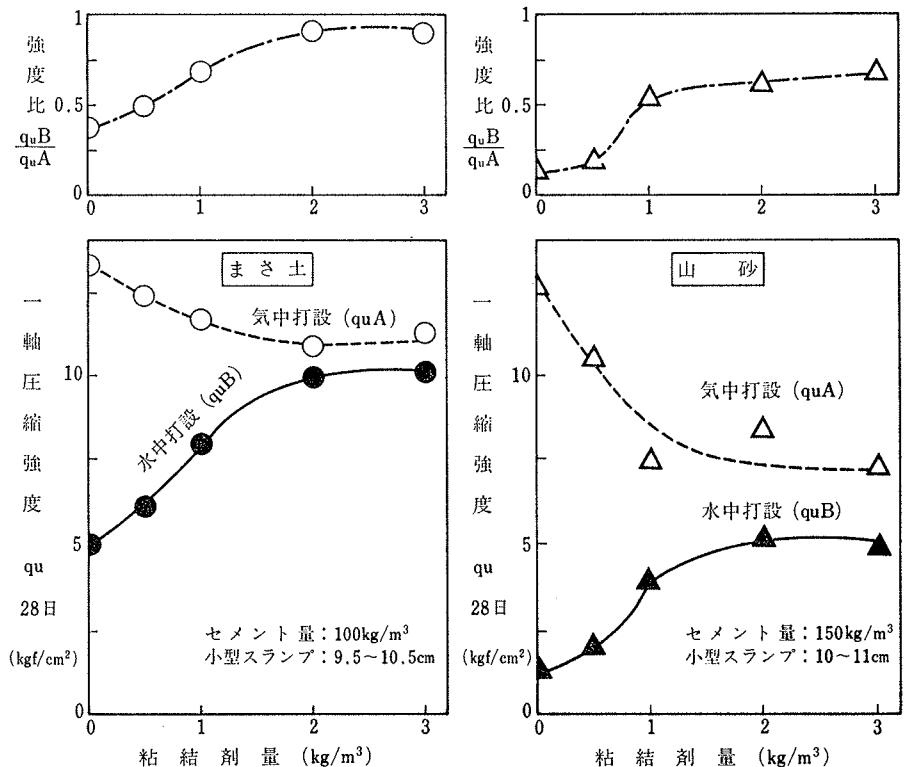


図-3 粘結剤量と気中打設・水中打設固化強度の関係

剤を2~3kg/m³添加すると、まさ土で約15%、山砂で約40%低下した。この主要原因として、粘結剤0~0.5 kg/m³の試料、特に山砂の場合には、著しくブリージングしたことが認められたので、その分、セメント含有量が相対的に増大したことが挙げられる。また、

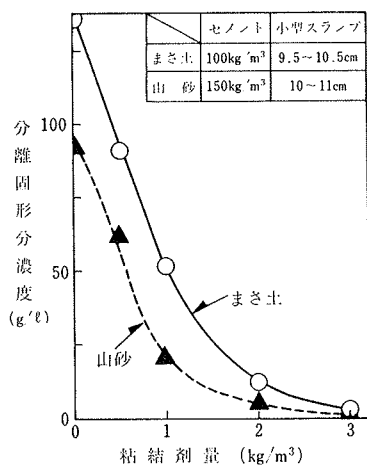


図-4 粘結剤量と水中打設時の分離固形分濃度の関係

水中打設強度 (quB) は、粘結剤 0~0.5 kg/m³ では小さかったが、粘結剤を 1~2 kg/m³ 以上添加することによって急激に増大した。このことは、図-3 の上段に示す quB/quA 比においても同様の傾向として認められた。

つぎに、粘結剤量と水中打設時のオーバーフロー水中の固形分濃度の関係を図-4 に示す。いずれの土砂においても、分離固形分量は、粘結剤量とともに減少した。なお、結果の詳細は省くが、この分離固形分の大部分は、セメントであった。

このように、粘結剤は、砂質土を主体とするアクアソイルを水中打設する際に、セメントおよび土粒子の分離を低減し、水中打設固化体の強度を増大させるのに有効に働いた。そして、粘結剤によって分離を低減したアクアソイルは、固体化の性状のばらつきも少ないと考えられる。

アクアソイル中のセメント量と固化強度の関係を図-5 に示す。ここで、粘結剤量は、まさ土で 2 kg/m³、山砂で 1 kg/m³ とした。強度は、セメント量とともに増大した。なお、同一セメント量において、山砂の方がまさ

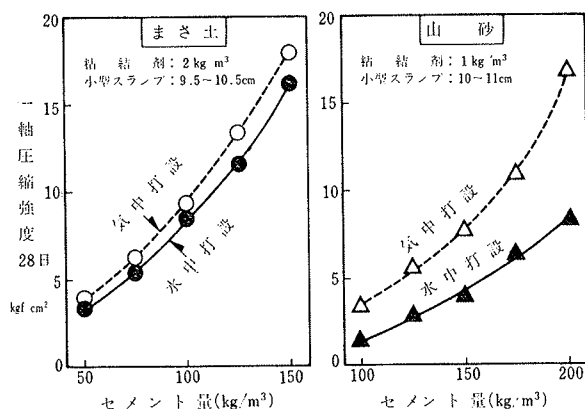


図-5 セメント量と固化強度の関係

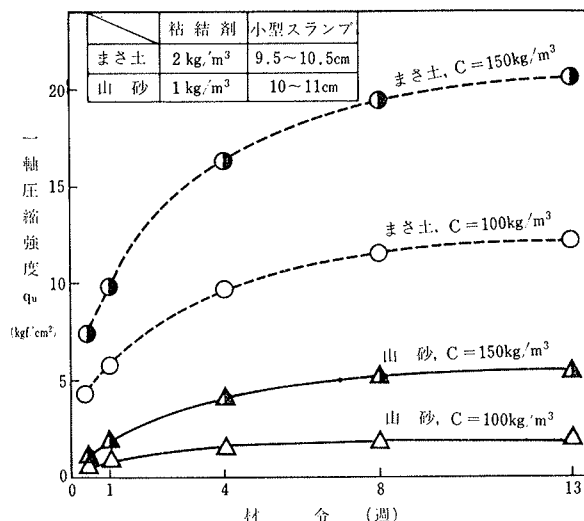


図-6 水中打設固化体の材令と強度の関係 (20°C)

土に比べて低強度であったのは、山砂の方がスランプをやや大きくしたので、水量が増大したこと、山砂はセメントとのポゾラン反応性が少ないことなどによると考えられる。

さらに、水中打設固化体の材令と強度の関係の例を図-6 に示す。強度は、4 週までの増大が特に大きく、4 週以降も徐々に増大した。そして、4 週強度は 1 週強度の 1.6~2.3 倍、また 13 週強度は 4 週強度の約 1.3 倍であった。

5. アクアソイル工法の施工例

5.1. 工事の概要

本州四国連絡橋の備讃線 (児島~坂出ルート) の坂出側最終部に位置する北浦橋梁 (橋長 450 m) では、海中の橋脚 3 基を連壁剛体基礎によって構築した。その連壁剛体基礎の工事に先立って必要な築島工事にアクアソイル工法が採用された。図-7 のように、水深約 10 m の

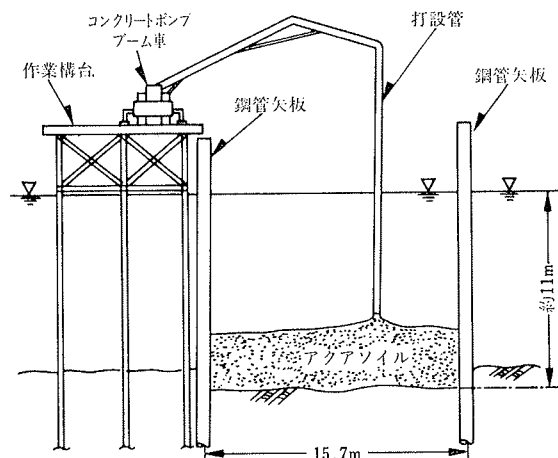


図-7 アクアソイル水中打設状況の概略

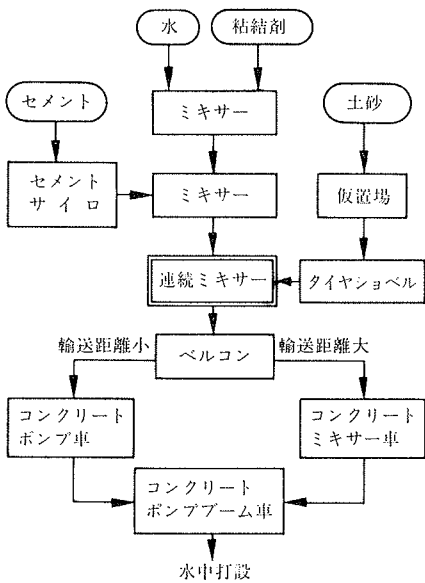


図-8 施工機械フロー

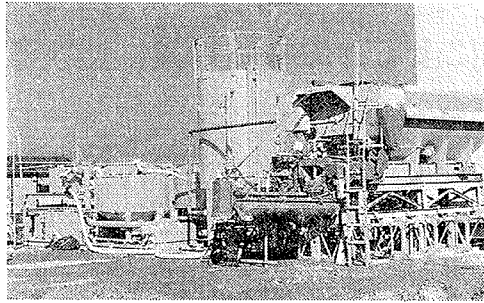


写真-1 材料供給・混練プラント

φ10 cm×h 20 cm のモールドに詰めて水中養生した試料によって管理した。その結果、28日後の一軸圧縮強度は、目標の 10 kgf/cm² を上回っていた。そして、海水面以上の部分には、セメントを混合したまさ土を埋立てて転圧し、ソイルセメント地盤を造成した。

築島が完了後、連壁剛体基礎として従来になく大規模な壁厚 1.5 m、壁深 60 m、平面外側寸法 9 m×10 m の連壁剛体基礎工事を行なった。泥水循環方式のハイドロフレーズ掘削機で掘削したのち、鉄筋かごを挿入し、コンクリートを打設した。その際、築島地盤は掘削機やクレーンの荷重を負担し、築島の締切りは一重であったが、掘削溝壁面は十分保持された。また、連壁剛体基礎の頂版施工のため築島地盤の大部分を撤去した際、アクアソイルが均一な固化体を形成していることが認められた。

以上、アクアソイル工法によって所定強度の均一な地盤を短期間に造成し、海上での地下連続壁工事を安全かつ確実に施工できた。

6. まとめ

人工島などを建設する際、早期に固化地盤を造成する工法として、土砂に水、セメント、分離低減用の粘結剤などを混合して水中打設する“アクアソイル工法”を開発した。その室内試験結果と施工例について述べた。

(1) 粘結剤として、セメントを混合しても変質せず、安定な粘稠液を形成し、セメントの硬化を阻害しない主成分メチルセルロースからなる材料が優れていた。

(2) まさ土、山砂を用いた室内試験において、粘結剤を 1~2 kg/m³ 以上添加することによって、水中打設時の分離は大幅に減少し、水中打設試料の強度も著しく増大した。そして、同一粘結剤量では、セメント量とともに強度が増大した。

(3) 海上における橋梁基礎を連壁剛体基礎で構築する工事において、あらかじめ必要となる築島工事にアクアソイル工法が適用され、計 6,800 m³ を打設した。同工法によって均質な固化地盤を短期間で造成し、地下連続壁工事を安全かつ確実に施工できた。

最後に、現場調査に際し、御協力を頂いた当社北浦 WF 工事事務所の戸梶 章主任、古川淳一主任、柴山孝幸主任、鈴木 功職員に感謝します。

海中を鋼管矢板（φ800 mm）で約 16 m 角に締切り、海底の表層軟弱土を除去後、昭和60年12月~61年2月にアクアソイルを計 6,800 m³ 打設した。

5.2. 配合と施工方法

土砂としてまさ土、セメントとして普通ポルトランドセメント、また粘結剤として MC を主成分とする高分子材料を用いた。目標強度 q_u 28日 = 10 kgf/cm² を得るため、セメントを 116 kg/m³、粘結剤を 2 kg/m³ 用いた。施工機械フローを図-8 に示す。粘結剤を水に溶解させ、これにセメントを混合してセメントミルクを作製した。このセメントミルクと土砂を連続ミキサーによって混練した。これらのプラントを写真-1 に示す。

混練されたアクアソイルは、築島場所までの距離が短い場合にはコンクリートポンプ車で圧送、距離が長い場合にはコンクリートミキサー車で輸送した。水中打設には、図-7 のようにコンクリートポンプブーム車を用いた。

5.3. 施工状況と結果

工事は、3 基とも順調に行なわれ、300~400 m³/日の速度で打設された。混練直後のアクアソイルのスランプは 20 cm 前後であった。このような流動性において、ポンプ圧送性は確保された。また、打設の際に、コンクリートポンプブーム車のブームを適宜移動させ、アクアソイル打設面のレベリング性も良好であった。

そして、打設時の締切り内の海水は、打設量とともに次第に濁ったので、陸上の沈殿池に回収した。しかし、その濁りの固形分量は、打設量に対して極めてわずかであった。また、固化強度は、混練直後のアクアソイルを