

# 水中打設時における気泡混合処理土の 材料分離抵抗性の評価

土田 孝<sup>1</sup>・松下弘志<sup>2</sup>・吉原正博<sup>3</sup>・輪湖建雄<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

<sup>2</sup>工修 五洋建設(株) 南九州支店 (〒892-0844 鹿児島市山之口町2-1 安田火災海上ビル6F)

<sup>3</sup>正会員 住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所 (〒274-8601 千葉県船橋市豊富町585)

<sup>4</sup>正会員 工修 (株)日本港湾コンサルタント神戸事務所 (〒651-0086 神戸市中央区磯上通7-1-5)

スラリー状の粘性土を原料土とし増粘剤を加えない気泡混合処理土の水中部への施工性について、新たに考案した材料分離抵抗性試験と水槽打設実験により検討した。配合条件、打設速度、打設方法を変えて気泡混合処理土を水中に打設し、海水への影響と材料特性を調べたが、材料分離抵抗性試験の結果は、水槽打設試験における打設時の濁りやpH、固化後の材料特性とはほぼ対応していることがわかった。これらの結果にもとづいて、実工事における施工時の配合を決定し、打設速度を低下させて気泡混合処理土の水中打設を行った結果、材料分離のない均一な地盤を造成することができた。

**Key Words :** light-weight soil, dredging, foam treated soil, density, underwater construction

## 1. はじめに

筆者らは、港湾および空港の工事において水中で使用できる軽量地盤材料として、スラリー状の浚渫土、建設残土にセメント系固化材と気泡を混合して固化する気泡混合処理土の研究開発を行ってきた<sup>1)~6)</sup>。気泡混合処理土を水中に打設する場合の施工性や材料特性に関してはすでに報告されているが<sup>7)~11)</sup>、筆者らの研究の特徴は増粘剤を用いず原料土の粘性を利用して水中に打設することである。

気泡混合処理土を小型土槽に水中打設する実験を行ったところ以下のことがわかった<sup>1), 2), 13)</sup>。

- ①打設時の材料特性によって、浮上する試料が発生したり、非常に大きな濁りが発生する場合がある。
- ②打設速度が大きいと、流動距離の増加とともに分離が起こり、密度が増加し強度が低下する傾向がある。
- ③打設管の径が小さいと密度が増加する傾向がある。また、打ち上がりとともに筒先を上昇させると、筒先を固定した場合より良好な打設ができる。

以上の結果は、増粘剤を加えない気泡混合処理土を水中に打設するには、分離が少なく濁りが発生しないように、適切な材料の流動性と施工方法を選択する必要があることを示している。それぞれの工事において、対象となる原料土を用い、気泡混合処理土の水中での

打設試験を行うならば、適切な配合条件や施工方法を選択できるが、時間とコストの観点から簡便な方法でこれらをおおよそ決定することが望まれる。そこで、水中打設時の材料分離抵抗性を評価するための試験方法を考案し気泡混合処理土に関する一連の試験を実施した。さらに、水槽打設実験を行って材料分離抵抗性試験結果との対応関係を検討した。最後に、これらの試験結果をもとに海水中に打設するときの配合条件と施工条件を決定し、実施工を行った事例について、報告する。

## 2. 実験に用いた気泡混合処理土の配合特性

### (1) 配合試験の方法

一連の試験、実験に先立って、気泡混合処理土の配合試験を行い、含水比とフロー値の関係、含水比と一軸圧縮強さの関係、固化材量と一軸圧縮強さの関係を把握した。原料土の土質特性を表-1に示す。

気泡は、界面活性剤系起泡剤を水で25倍に希釀し、発泡機で25倍に発泡したものを使用した。固化材はB種高炉セメントを使用した。水は人工海水を使用した。

気泡混合処理土の水中打設において材料特性に影響する要因としては、流動性(フロー値)、打設速度、打設方法などであると考えられる<sup>13)</sup>。ここで打設速度とは、打設管の筒先から気泡混合処理土を排出する速度

表-1 原料土の土質特性

	土粒子の密度 (g/cm³)	粒度構成 (%)				液性限界 (%)	塑性限界 (%)
		砾分	砂分	シルト分	粘土分		
淡濁粘土	2.561	9.1	36.7	40.7	13.5	67.2	40.3

表-2 配合試験結果

固形土 含水比 (× w <sub>L</sub> ) (%)	単位配合			密 度 (g/cm³)	フロー値 (mm)		一軸圧縮強さ (kgf/cm²)		
	固形土 (kg/m³)	固化材 (kg/m³)	気泡 (m³)		気中	水中	3日	7日	28日
2.0	991	100	232	1.094	167	80	1.62	4.44	6.64
	940	150	252	1.088	162	80	1.76	7.24	13.38
	891	200	236	1.077	155	80	2.66	9.34	20.64
2.5	992	100	200	1.092	245	80	1.02	3.37	5.50
	941	150	222	1.089	200	80	1.54	5.57	13.36
	892	200	205	1.085	195	80	2.42	8.05	20.71
3.0	993	100	174	1.109	300	90	0.59	2.60	4.98
	942	150	198	1.089	282	88	1.23	5.11	11.53
	943	200	180	1.095	265	85	1.60	5.99	17.34
3.5	994	100	153	1.100	365	95	0.50	2.08	3.89

のことである。以上のことから配合試験は、流動性と強度特性を把握することを目的として実施した。配合条件は、目標密度を  $1.1 \text{ g/cm}^3$  とし、原料土の含水比を  $2.0 \sim 3.5 \text{ w}_L$  ( $\text{w}_L$  は土の液性限界) に調整し、固化材量は気泡混合処理土  $1 \text{ m}^3$  当り  $100\text{kg}$ ,  $150\text{kg}$ ,  $200\text{kg}$  の 3 種とした。

- 気泡混合処理土の作製は、以下の方法により行った。
- ①原料土に人工海水を加え、往復攪拌ミキサーで攪拌し、泥水を作製する。所定の含水比になるように、泥水密度を調整する。
  - ②密度調整した泥水と B 種高炉セメントを往復攪拌ミキサーで 3 分間混練し、固化材混合土を作製する。
  - ③重量計量した気泡と固化材混合土を、ハンドミキサーを用いて 1 分間混練し、気泡混合処理土を作製する。

それぞれの配合条件により作製した気泡混合処理土に対し、密度試験、フロー試験、一軸圧縮試験を行い、含水比とフロー値の関係、含水比と一軸圧縮強さの関係を求めた。なお、フロー試験は、気中及び水中について実施している。気中フロー試験では、水平な  $40\text{cm}$  四方のアクリル板の中央に内径  $8\text{cm}$  × 高さ  $8\text{cm}$  の円筒状の容器を置き、その中に気泡混合処理土を流しこみ上面を均した後に、静かに容器を上方に引き上げて、抜がった気泡混合処理土の最大径とその直角方向の径を測定し、その平均値をフロー値 (mm) とした。水中フロー試験では、長さ  $40\text{cm}$  × 幅  $40\text{cm}$  × 深さ  $15\text{cm}$  のアクリル容器の中央に、気中フロー試験と同じ円筒状の容器を置き、気泡混合処理土を流しこみ上面を均した後に、水面が円筒容器の上面  $1\text{ cm}$  程度になるまで人工海水をアクリル容器に満たし、気中フロー試験と同じ要

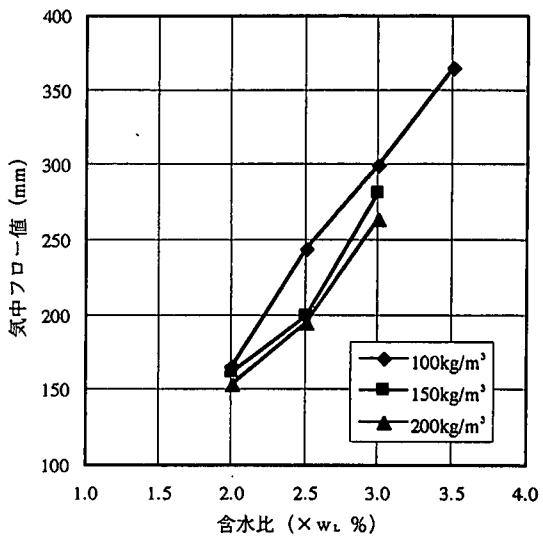


図-1 含水比と気中フロー値の関係

領でフロー値を測定した。

一軸圧縮試験の供試体は、直径  $5\text{cm}$  × 高さ  $10\text{cm}$  の簡易モールドを用いて配合 1 ケース当たり 9 本作製し、 $20^\circ\text{C}$  の湿空養生を行った。一軸圧縮試験は、材令 3 日、7 日および 28 日 (各 3 本) で実施した。

## (2) 配合試験の結果

配合試験の結果を表-2 に示す。表中の  $w_L$  は、原料土の液性限界である。配合試験では原料土の含水比、固化材量をパラメータとして気中フロー値、一軸圧縮強さに着目してまとめた。

図-1 は、原料土の含水比と気中フロー値の関係である。図のように、固化材量を一定にした場合、原料土の含水比の増加に伴って気中フロー値はほぼ直線的に増加している。このように、含水比が気泡混合処理土の流動性に与える影響は非常に大きく、他の粘性土を原料とした場合でも同様の傾向を示している<sup>5)</sup>。なお、水中でのフロー値は、表-2 に示したように  $80 \sim 95\text{mm}$  であり、含水比による変化はわずかであった。これは浮力によって気泡混合処理土の自重が小さくなるため、高さ  $80\text{mm}$  の供試体では水中ではほぼ自立した状態を保つためである。したがって、本研究では軽量混合処理土の流動性を示す指標として、気中フロー値を用いることとした。

図-2 に、含水比と一軸圧縮強さの関係を示す。図のように、固化材量が一定の場合は、原料土の含水比の増加に伴って強度が低下する。材令による強度増加をみると、材令 28 日の強度は材令 7 日の強度の  $1.5 \sim 3.0$  倍程度となり、すでに報告した川崎粘土試料の場合と同様であった<sup>5)</sup>。ただし、現場に打設された気泡混合処理

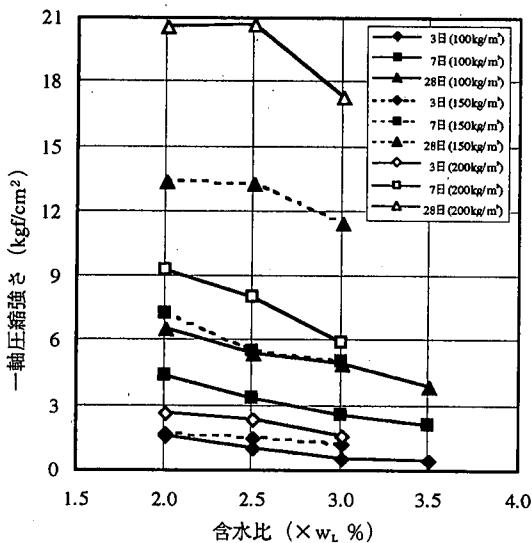


図-2 含水比と一軸圧縮強さの関係

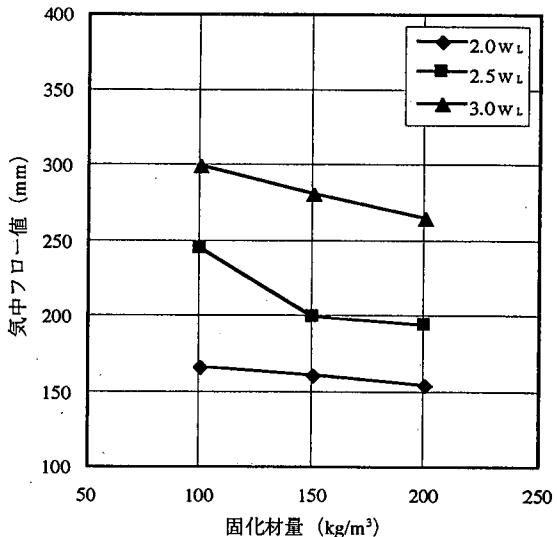


図-3 固化材量と気中フロー値の関係

土地盤から採取したコアの強度では、強度増加の割合が小さかった事例が報告されている<sup>3)</sup>。

図-3に、原料土の含水比を一定とした場合の固化材量と気中フロー値の関係を示す。図のように、固化材量が増加すると処理土の粘性が大きくなるので、気中フロー値は小さくなり流動性は低下するが、固化材量のフロー値への影響は含水比ほど顕著ではない。

図-4は固化材量と一軸圧縮強さの関係であり、固化材量の増加とともに一軸圧縮強さは増加する。川崎粘土など既往の他の浚渫土に関する両者の関係をみても粘土の種類によって大きな差は見られず<sup>5)</sup>、通常の浚渫粘土を原料土とした場合には、室内配合で材令28日の一軸圧縮強さを4~6kgf/cm<sup>2</sup> (392~588kN/m<sup>2</sup>) とするには、気泡混合処理土できあがり1m<sup>3</sup>当たり80~120kg程度の固化材量が必要である。

### 3. 水中打設時の材料分離抵抗性の評価方法

軽量混合処理土を水中に打設した場合、配合条件、打設速度、打設方式によっては、空気や水の巻き込み、海水の粘性抵抗などによって材料が分離し、密度の増加や強度低下、濁り、pHの上昇が起こる<sup>13)</sup>。材料分離抵抗性試験とは、軽量混合処理土を水中に打設したときの材料分離に対する抵抗性を定量的に把握し、水中打設が可能な配合を決定するための試験である。

ここでは軽量混合処理土の材料分離特性を、水槽打設実験を行うことなく評価できる指標を得る試験として開発することを目標とした。

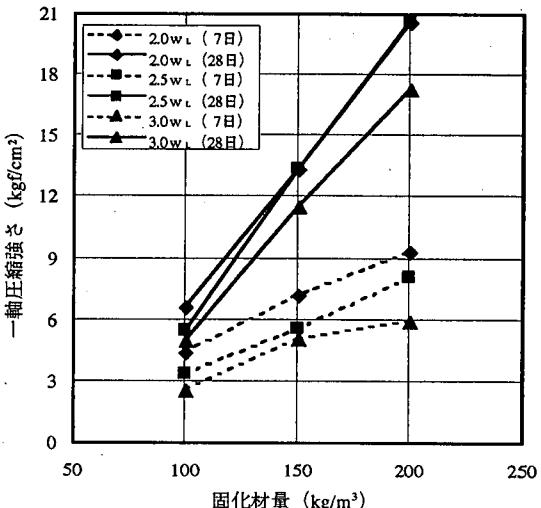


図-4 固化材量と一軸圧縮強さの関係

#### (1) 試験方法<sup>14)</sup>

材料分離抵抗性試験機の概略図を図-5に示す。この試験機は、気泡混合処理土の気中フロー値に関係なく打設速度を一定(可変)にして打設するものである。図のように、試験機はシリンドラー(高さ44cm、内径10cm、内容積3,455cm<sup>3</sup>)、電動モータ及びピストン、受け容器(高さ20cm、内径20cm、内容積6,283cm<sup>3</sup>)、先端ノズル(内径12mm)などで構成されており、電動モータの回転数により打設速度を制御することができるようになっている。

試験方法は、受け容器に3,000mlの人工海水を入れ、受け容器の底面から12mm (= 1 D) の高さに先端ノズルの吐出口を固定し、次にシリンドラーの中に3,000mlの

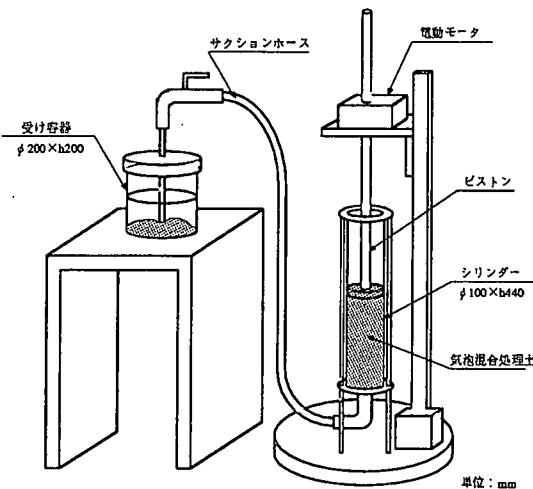


図-5 材料分離抵抗性試験機の概要図

気泡混合処理土を投入してピストンを作動させることにより水中に打設する。打設速度は22~143cm/secの範囲で調整可能である。試験における測定項目は、材料の気中フロー値、受け容器内のSS(懸濁物濃度)とpH、水中打設した試料の7日養生後の密度、含水比、一軸圧縮強さである。SSとpHは、受け容器の上蓋に設置した濁度計とpH計で測定した。なお、水中打設試料は打設後受け容器の中で20℃の恒温水中養生して試験時に供試体を採取、成形した。また、比較のため、同じ試料を同時に気中で簡易モールド内に打設し、20℃で7日間湿空養生した後の密度、含水比、一軸圧縮強さを測定した。

配合の条件としては、材令7日において一軸圧縮強さが気中で $3 \sim 5 \text{kgf/cm}^2$  ( $294 \sim 490 \text{kN/m}^2$ )、密度が $1.1 \text{g/cm}^3$ となるようにした。施工時の材料特性は流動性と打設速度によって支配されるので、試験結果は、打設時の水のSSとpH、試料の密度、含水比、強度を、気中フロー値および打設速度に関してまとめた。

## (2) 試験結果

表-3に試験に用いた気泡混合処理土の物性値を示すが、使用した原料土は配合試験に用いたものと同じである。本試験では、1種類の配合に対して5種類の打設速度(2.25w<sub>u</sub>は10ケース)で試験を行ったが、試験開始から終了までに約30分の時間を要したため、この間に気泡混合処理土の気中フロー値が減少した。したがって、試験結果の整理には、試験前後の平均の気中フロー値を用いている。

図-6に水中打設後の水のSSを示す。全体的な傾向としては、気中フロー値が大きく、また、打設速度が大

表-3 気泡混合処理土の物性値

調整土 含水比 ( $\times w_u$ ) (%)	単位配合			密度 ( $\text{g/cm}^3$ )		フロー値 (mm)		
	調整土 ( $\text{kg/m}^3$ )	固化材 ( $\text{kg/m}^3$ )	気泡 ( $\text{dm}^3/\text{m}^3$ )	開始時	終了時	開始時	終了時	平均
2.0	940	150	248	1.081	1.108	165	135	150
2.25	941	150	231	1.098	1.154	205	165	185
2.5	941	150	216	1.080	1.104	235	203	219
3.0	891	200	217	1.084	1.108	268	250	259
3.5	892	200	198	1.083	1.098	315	275	295
4.0	893	200	183	1.082	1.098	395	385	390

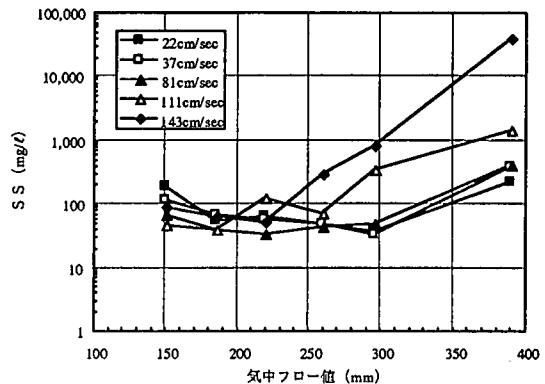


図-6 気中フロー値とSSの関係

きいほどSSも大きくなっている。流動性の高い気泡混合処理土を速い速度で打設するほど、材料が分離しやすくなることがわかる。特に気中フロー値295mm及び390mmの場合は、打設速度の影響が顕著にあらわれている。なお、気中フロー値が最小の150mmの場合は、打設速度が遅くなるほどSSは大きくなる傾向を示した。これは、水中での流動性が低いため、打設速度が小さいほど水平に拡がらず吐出口付近にとどまって押し出されるようにして移動したため、この間に打設された気泡混合処理土どうしの練り返しによる搅乱が大きく影響していると考えられる。

図-7は打設後の水のpHである。全体的にSSの測定結果と同様の傾向を示しており、気中フロー値が150mm以下および300mm以上の場合にセメント分が分離し、pH値が上昇したことを示している。

図-8に水中打設試料とモールド内に気中打設した試料の密度差(固化後)を示す。気中フロー値250mm前後を境にして、気中フロー値が小さい場合は水中に打設した気泡混合処理土の密度が気中養生した供試体密度より小さく、気中フロー値が大きい場合は、水中に打設した気泡混合処理土の密度の方が大きくなっている。全体に気中フロー値が大きくなるほど水中の密度は大きくなる傾向がある。気泡が分離すると密度の増加に、セメント分が分離した場合は密度の低下となる。また、気

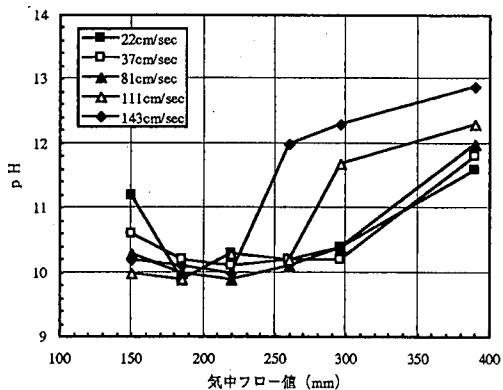


図-7 気中フロー値とpHの関係

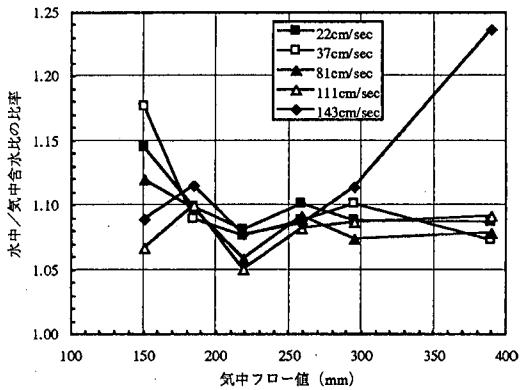


図-9 気中フロー値と水中／気中含水比の比率の関係

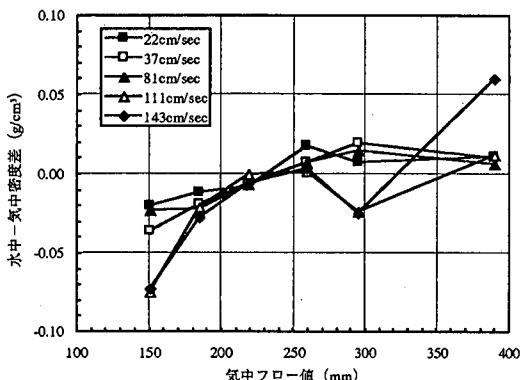


図-8 気中フロー値と水中一気中密度差の関係

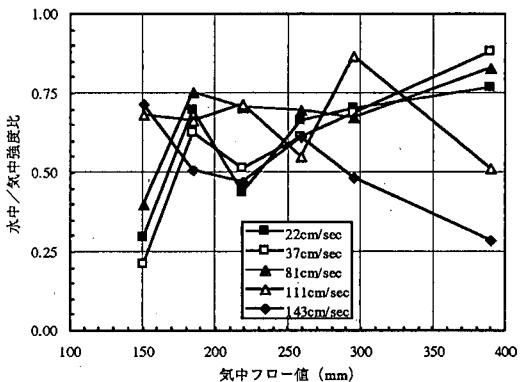


図-10 気中フロー値と水中／気中強度比の関係

中フロー値が小さい場合には、打設中に気泡混合処理土内の空隙に水を巻き込み密度低下が起こる。このため、一般に密度変化の量自体は材料分離の指標となりがたいと考えられる。

図-9は水中打設試料と気中打設試料の含水比の比である。水中に打設した場合、含水比は全て気中打設試料より増加しており、増加率は5%～10%である。図をみると流動性の低いものを遅い速度で打設した場合、及び流動性の高いものを速い速度で打設した場合は増加の割合が大きくなっている。前者の場合は打設中の水の巻き込みが、後者の場合には分離が主な原因と考えられる。

水中打設試料と気中打設試料の一軸圧縮強さの比を図-10に示した。水中に打設した気泡混合処理土の強度は、気中フロー値150mmの場合は打設速度が大きいほど高くなり、逆に気中フロー値390mmの場合は打設速度が大きいほど低くなっている。これらの傾向は含水比と同様である。気中フロー値が小さい場合には、打設管付近で打設された気泡混合処理土どうしの練り返しや水の巻き込みが起こるが、この影響は打設中の処理

土の強度(粘性抵抗)が発現するほどあらわれやすくなるので、打設中の強度発現を抑えるため素早く打設した方がよいと考えられる。一方、気中フロー値が大きくなると、流動中に水との接触面において分離が起こりやすいので、ゆっくりと打設する方が良好な水中打設になると考えられる。全体に、気中フロー値が185mm～295mmの範囲にあれば打設速度によらずほぼ安定した強度が得られている。

材料分離抵抗性試験の結果をまとめると以下のようになる。

- ①流動性の低い気泡混合処理土は速い速度で、流動性の高いものは遅い速度で打設したほうが、良好な結果が得られる。
  - ②流動性の高いものを速い速度で打設した場合には、水との摩擦による乱れによって材料分離が起こる。また、流動性の低いものをゆっくり打設した場合は、水平方向へ拡がらず、周囲の気泡混合処理土を押し出すことによる乱れや空隙の形成がS S, pHの上昇と強度低下を起こした要因であると考えられる。
- 以上の材料分離抵抗性試験の結果から判断すると、

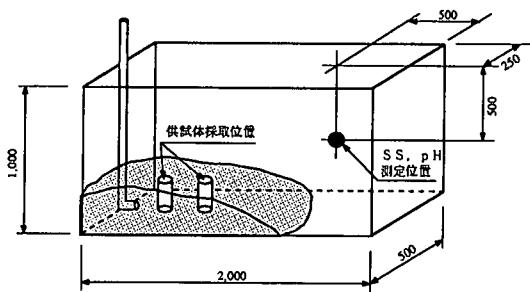


図-11 水槽打設実験概要

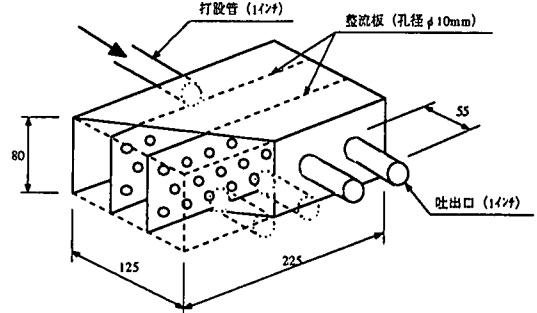


図-12 改良した吐出口モデルの形状

打設速度  $22 \sim 111\text{cm/sec}$  に対して気中フロー値  $180 \sim 290\text{mm}$  程度の打設条件の場合に、相対的には良好な水中打設ができていると判断される。気中フロー値が  $150\text{mm}$  程度の流動性の低い気泡混合処理土を打設する場合は、打設管付近の練り返しによる搅乱や水の巻き込みを防止するため、打設管の筒先をきめ細かく移動するなど流動性の不足を補う工夫が必要であると推定される。

#### 4. 気泡混合処理土の水槽打設実験

材料分離抵抗性試験は、小さな容器内に  $3\ell$  の気泡混合処理土を打設するものであった。この結果を実際の施工に適用するには、より規模が大きく実施工に近い条件で水中打設を行った場合との関連性を確認する必要がある。このような観点から、水槽打設実験を実施した<sup>15), 16)</sup>。

##### (1) 実験方法

実験には図-11に示す長さ  $2.0\text{ m} \times$  幅  $0.5\text{ m} \times$  高さ  $1.0\text{ m}$ 、内容積  $1.0\text{m}^3$  の片面ガラス張り鋼製水槽を使用した。気泡混合処理土の打設はスクイズポンプを用いて行い、打設管の径は  $1\text{ インチ}$ とした。吐出口は水槽の一端の底面から  $5\text{ cm}$  の位置に設置し、水槽の反対側の端に向かって水平方向に打設した。

実験における管内流速は次のように設定した。現在軽量混合処理土のミキサーとして使用されている施工機械の能力は、約  $40\text{m}^3/\text{hr}$  であり、径  $4\text{ インチ}$  の打設管が用いられている。実験では径  $1\text{ インチ}$  の打設管を使用したので、同じ管内流速とすると  $2.5\text{m}^3/\text{hr}$  ( $1\text{ インチ管}$ )となる。実験に使用するスクイズポンプの能力が最大  $2.6\text{m}^3/\text{hr}$  であったため、管内流速の最大値は  $2.6\text{m}^3/\text{hr}$  に対応する  $147\text{cm/sec}$  とした。打設速度の変更はスクイズポンプのギアの変更と吐出口の形状により行

い、 $147\text{cm/sec}$ ,  $73\text{cm/sec}$ ,  $36\text{cm/sec}$  の 3 種類で各回  $200\ell$  を打設した。

打設管の筒先で流速を低減させるため図-12に示すような吐出口を使用した。図のように、 $1\text{ インチ管}$  1 本で流入した気泡混合処理土を 4 本の  $1\text{ インチ管}$  から吐出させ、1 本当たりの打設速度を  $1/4$  に低減させている。また、吐出口の内側には  $\phi 10\text{mm}$  の穴を多数空けた 2 枚の整流板を取り付け、4 本の  $1\text{ インチ管}$  から気泡混合処理土が均等に吐出するようにした。吐出口を用いるにあたっては、吐出口内での分離が起きないよう、あらかじめ吐出口を気泡混合処理土で満たしておいてから吐出した。

##### (2) 実験結果

水槽打設実験の実験条件を表-4に示した。配合は材料分離抵抗性試験に用いた配合をもとに決定し、3種類の打設速度に対して異なる気中フロー値となるよう、計 8 ケースの実験条件を設定した。このうち、実験 No.1 ~ 6 の原料土は材料分離抵抗性試験に用いた広野浚渫土であるが、実験 No.7 ~ 8 は神戸港の浚渫粘土を用いている。神戸港の浚渫粘土の土質特性は表-5に示すが、ここでは 2 つの粘土を区別せずに整理した。一回の打説に要した時間は  $5 \sim 20$  分であり、表-4 には打設直前と打設直後に測定した気中フロー値の平均を示している。

S S, pH の測定と供試体の採取は図-11に示す位置で実施した。打設開始とともに S S と pH は徐々に上昇するが、ここでは全量の打設が終了し、測定値が一定になったときの値について検討する。

図-13に気中フロー値と S S の関係を示す。図のよう、打設速度が  $36\text{cm/sec}$  と  $73\text{cm/sec}$  の場合には、気中フロー値が大きくなるとともに S S が大きくなっている。打設速度が  $147\text{cm/sec}$  の場合、気中フロー値が  $160\text{mm}$  の場合でも S S は比較的大きく、また、気中フロー値が

表-4 水槽打設実験の実験条件

実験No.	調整土 含水比 (×w.) (%)	固化材量 (kg/m <sup>3</sup> )	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	気中 フロー値 (mm)	打設流量 (m <sup>3</sup> /hr)	打設速度 (cm/sec)
1	1.85	100	1.090	148	2.6	36.7
2	2.5	100	1.082	258	2.6	36.7
3	3.5	150	1.097	370	2.6	36.7
4	2.5	100	1.105	265	2.6	147.1
5	2.5	100	1.104	242	1.3	73.5
6	3.0	150	1.098	320	1.3	73.5
7	1.65	140	1.082	148	1.3	73.5
8	1.65	140	1.116	160	2.6	147.1

表-5 原料土の土質特性（実験No.7～8）

土粒子の 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粒度構成 (%)				液性 限界 (%)	塑性 限界 (%)
	砾分	砂分	シルト分	粘土分		
2.740	12.3	13.1	49.0	26.5	106.3	41.0

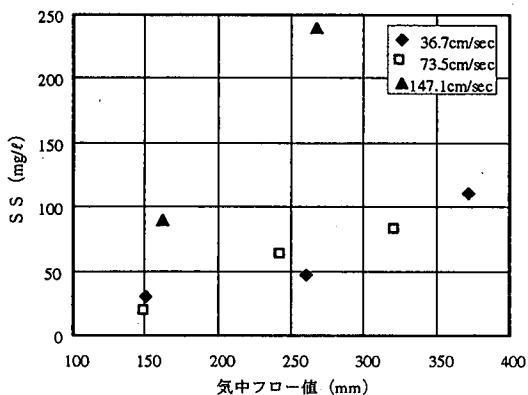


図-13 気中フロー値とSSの関係

265mmの場合に非常に大きなSSが発生した。

図-14は気中フロー値とpHの関係である。打設速度が147cm/secのときにはSSが上昇したが、その影響はpHにおいてもはっきりと現れている。打設速度が36cm/sec, 73cm/secのときは、気中フロー値が大きくなるとともにpHも少しずつ上昇しており、この傾向もSSの値と対応している。

図-15に水中打設試料と気中打設試料の密度差を示す。打設速度が36cm/secと73cm/secの場合、気中フロー値の大小に関わらず、密度差は±0.05g/cm<sup>3</sup>の範囲内にあり、材料分離抵抗性試験と同様に密度増加は僅かであった。打設速度が147cm/secで気中フロー値が265mmの場合は、気泡の消散が密度増加の主たる要因と考えられるが、気中フロー値が160mmの場合は材料分離抵

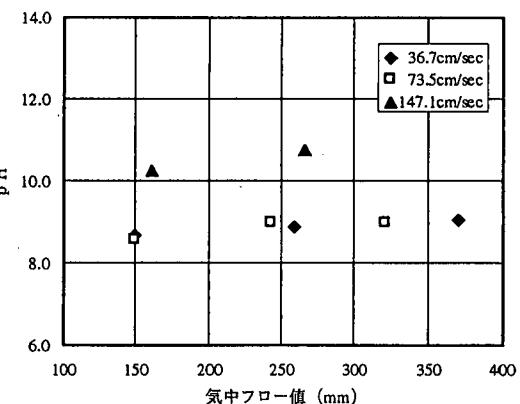


図-14 気中フロー値とpHの関係

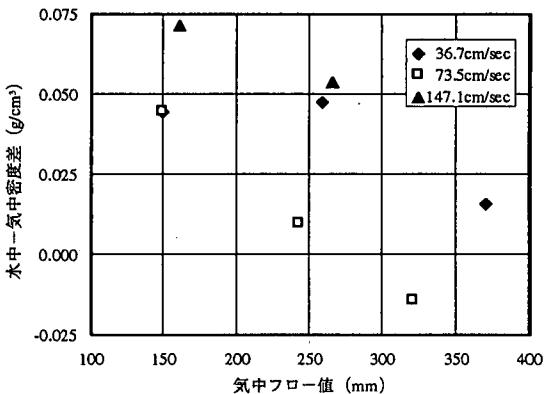


図-15 気中フロー値と水中-気中密度差の関係

抗性試験とは逆の結果となっている。

図-16は水中打設試料と気中打設試料の含水比の比率である。図のように、含水比は打設速度の大小に関わらず増加しているが、特に気中フロー値が250mm以上の範囲では、気中フロー値の増大に伴って含水比が増加しており、材料分離抵抗性試験と同様の傾向を示している。

図-17に水中打設試料と気中打設試料の一軸圧縮強さの比を示す。打設実験は水槽を屋外に設置して秋と冬に実施したため、養生温度が低く、20°Cの室内で湿空養生した気中打設試料の強度と直接比較できない。このため、実験No.3とNo.4において20°Cと5°Cでそれぞれ養生した気中打設供試体の強度比を用いて、水槽から採取した供試体強度を20°C水中養生の強度に補正している。図のように、打設速度が36cm/secと73cm/secの場合、気中フロー値が大きくなると水中/気中強度比は徐々に小さくなる。これは気中フローの増大に伴うSS, pHの増大と対応しており、水中打設時の材料分

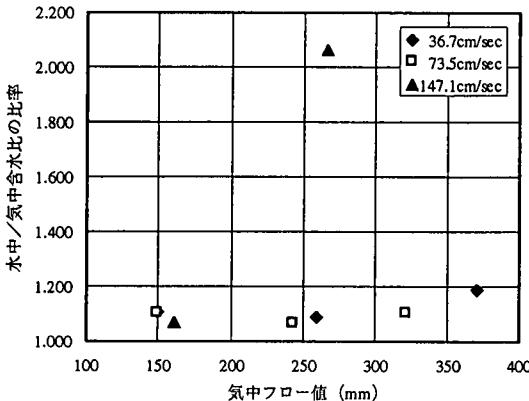


図-16 気中フロー値と水中／気中含水比の比率の関係

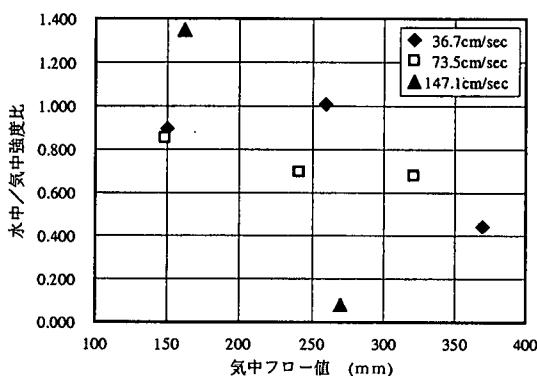


図-17 気中フロー値と水中／気中強度比の関係

離によって強度は低下したと解釈できる。打設速度が147cm/secで気中フロー値が265mmの場合は、含水比、S S、p Hからも材料分離が大きかったことがわかるが、この影響は強度の大幅な低下としても明瞭にあらわれている。

## 5. 材料分離抵抗性試験と水槽打設実験の対応

材料分離抵抗性試験と水槽打設実験結果の対応について、ここでは打設速度100cm/sec未満の条件での試験結果に関する比較を行った。

材料分離抵抗性試験と水槽打設実験では、打設した気泡混合処理土の量と水槽内の水量が以下のように異なっている。

材料分離抵抗性試験 打設量 3ℓ、水量 3ℓ

水槽打設実験 打設量 200ℓ、水量 800ℓ

また、両者では打設位置に対するS Sとp Hの測定位置も異なっている。材料分離抵抗性試験では容器内に鉛直方向に打設し、打設位置の直上で測定している。

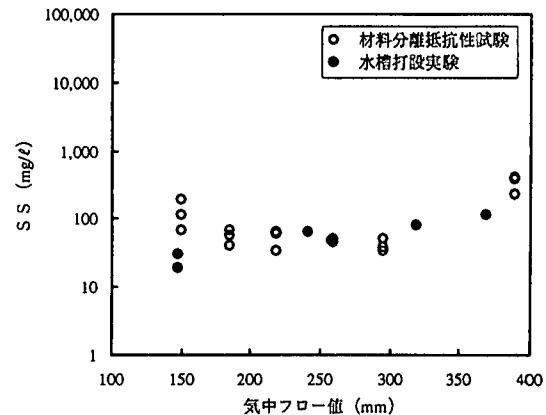


図-18 S S の比較

一方、水槽打設実験では水槽に片側から横方向に打設し、打設管からの水平距離が1.5m、鉛直距離が0.5mの位置で測定している。このように、打設位置と測定位置の関係から考えると、材料分離抵抗性試験は打設管の近傍のS Sやp Hの上昇に対応しており、水槽打設実験の場合のように現場全体の環境の測定値に比べかなり厳しい測定結果が得られることが予想される。

図-18は材料分離抵抗性試験と水槽打設実験のS Sの比較である。図をみると気中フロー値180～250mmの範囲では両者のS Sの測定値が100mg/l以下になっている。気中フロー値が350mm以上と150mm以下の渦りやすい場合については、水槽打設実験に比べ材料分離抵抗性試験で大きなS Sが測定される。これは両者の水量と測定位置の違いによるとみられる。

図-19は材料分離抵抗性試験と水槽打設実験のp Hの比較である。気中フロー値180mm～300mmの範囲に着目すると、水槽打設実験におけるp Hが8.6～9.1であるのに対して、材料分離抵抗性試験のp Hは9.9～10.4と大きい。p H値は常用対数なので水素イオン濃度が20～30倍であることを意味するが、水槽打設実験では、気泡混合処理土の打設量に対する水量が4倍であり、打設した処理土の形状を球体と仮定した場合の表面積に対する水量が約20倍であることを考えると、ほぼ妥当な差であるともいえる。

図-20は水中打設試料と気中打設試料の密度差の比較である。水槽打設実験では気中フロー値の増大に伴って密度差は減少する傾向にあるが、材料分離抵抗性試験では気中フロー値の増大にともなって密度差も増大する傾向にある。このように、密度差に関しては分離抵抗性試験と水槽打設実験の相関性が乏しい。

図-21に水中打設試料と気中打設試料の含水比の比に関する比較を示した。水槽打設実験では、気中フロー値が大きく、打設速度が大きい場合に含水比が増加する

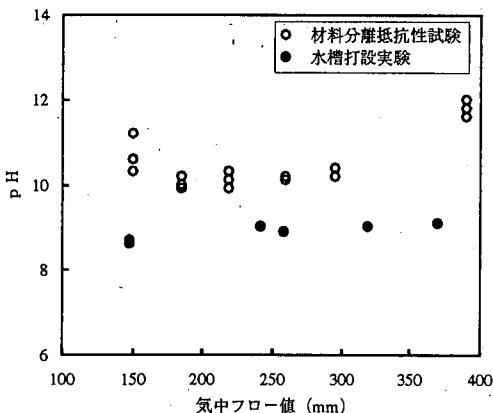


図-19 pHの比較

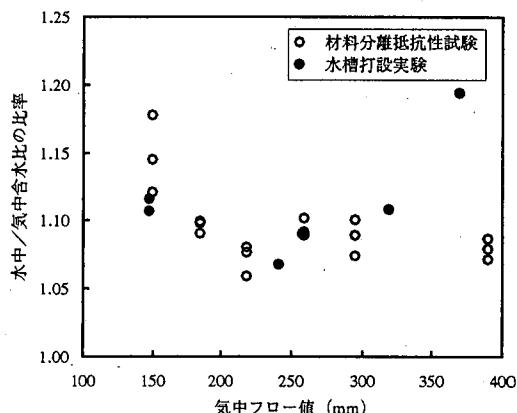


図-21 含水比の比率の比較

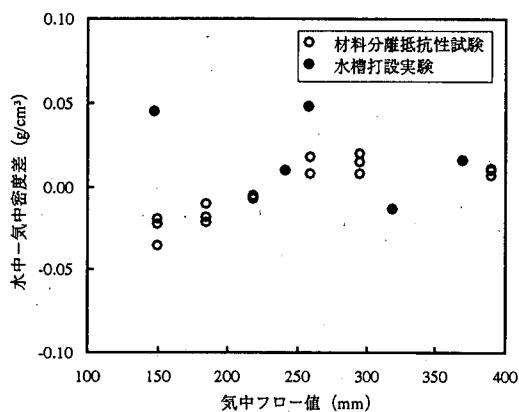


図-20 密度差の比較

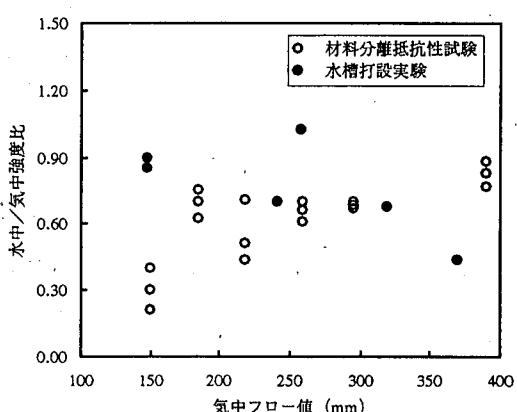


図-22 強度比の比較

## 6. 実施工における材料分離抵抗性試験結果の適用

傾向を示しているが、気中フロー値150mm～300mmの範囲では水中打設による含水比の増加は5%から10%である。両者の傾向は、全体としてよく一致しているといえる。

図-22は水中打設試料と気中打設試料の強度比の比較である。気中フロー値が150mm～300mmの範囲では水槽打設実験の強度比が0.70～1.03であり、材料分離抵抗性試験に比べ水中打設による強度低下は小さかった。これは材料分離抵抗性試験では打設管まわりの動きが激しいことが強度発現に影響していると考えられる。両者とも気中フロー値と強度比の関係は明確ではないが、水槽打設実験では気中フロー値の増大に伴って強度比が減少する傾向にあり、材料分離抵抗性試験では気中フロー値の増大とともに強度比がやや増加する傾向にある。これらの差も打設時の気泡混合処理土の動きの相違に関係すると考えられる。

増粘剤を用いない気泡混合処理土を海域で打設するためには、材料分離によって海域環境に影響が発生させない施工が求められる。ここでは、材料分離抵抗性試験の結果と水槽打設試験の比較検討結果より実施工の配合と施工条件を決定し施工した事例を紹介する。

水槽打設試験におけるSS, pHは気泡混合処理土の打設位置から1.5mの距離で測定している。実海域では矢板あるいはケーン等で締めきった水域で打設することを前提とし、外部の海域への影響は内部の水域よりも1オーダー小さいと仮定する。この場合には、外部の海域に影響が発生しない目安として、水槽打設実験において以下の条件を満足すれば十分であると考えられる。

$$SS : SS < 100 \text{ mg/l}$$

$$pH : pH < 9.3$$

次に水中打設後の気中混合処理土の満足すべき材料特性として、気中でモールドに打設した試料に対する

差あるいは比として以下の条件を考える。

密度：気中打設試料の密度の±0.05g/cm<sup>3</sup>

含水比：気中打設試料に対する含水比増加量10%以下。

強度：気中打設試料の材令7日における一軸圧縮強さの70%以上

これらの値は水槽打設実験の結果に対する条件であるが、次に材料分離抵抗性試験における同様の条件について検討する。材料分離抵抗性試験は、受け容器の容積が小さいなど試験方法が水槽打設実験とは異なっているので、上記の値に対応する値を今回の実験結果から設定すると以下のようになる。

材料分離抵抗性試験において、

S S : S S < 10mg/l

p H : p H < 10.5

密度：気中打設試料の密度の±0.05g/cm<sup>3</sup>

含水比：気中打設試料に対する含水比増加量10%以下。

強度：気中打設試料の材令7日における一軸圧縮強さの50%以上

図-18～図-22よりこれらの指標値から気中フロー値と打設速度を求めると、材料分離抵抗性試験と水槽打設試験の両者からは気中フロー値180mm～290mm、打設速度80cm/s以下が適切であると判断できる。また、フロー値がこの範囲よりも小さい150mm～180mmの場合、容器の小さい材料分離抵抗性試験では各指標とも悪化しているが水槽打設試験ではフロー値250mmの場合と大きな違いがない。このことから、水槽打設試験に近い実施工では打設管の位置を短い単位で移動させて流動性の不足を補うならば、フロー値150mm～180mmの範囲でも良好な打設が可能と推定した。

阪神大震災で被災した岸壁（ポートアイランド二期地区岸壁）の復旧に際し、土圧を低減するため岸壁背後に気泡混合処理土の施工を行った<sup>17)</sup>。図-23に復旧断面図を示すが、施工延長183mにおいて22,000m<sup>3</sup>の気泡混合処理土（施工時目標密度は水中打設分1.1g/cm<sup>3</sup>、気中打設分1.0g/cm<sup>3</sup>）を打設した。そのうち約60%が海水中での打設である。上記の指標を参考にして、気中フロー値の管理値を150mm～200mmに設定し、施工時の打設速度は打設管の底部を拡幅構造として、打設時の気泡混合処理土の速度を10～15cm/sに低下させた。また、1回当たりの打設厚さを50cm～100cmとし、打設管の位置を5mピッチで移動させた。施工中に図-23に示す観測点で水質を調査した結果、S Sは10mg/l以下でp Hは神戸港のバックグラウンドと一致しており、環境に影響を及ぼすような濁りは発生しなかった。図-

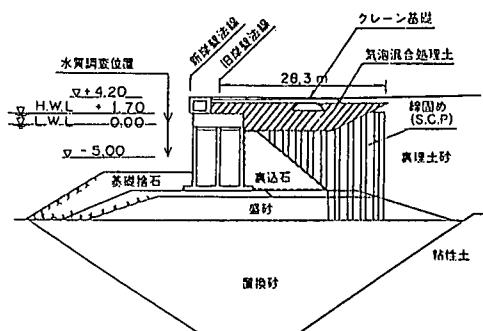


図-23 復旧断面図

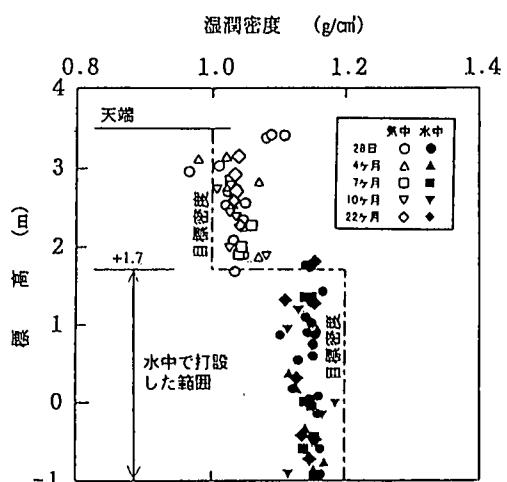


図-24 コア採取した試料の湿润密度

24は施工終了後1～22ヶ月にコアを採取して求めた湿润密度の深度分布であるが、深さ方向に一様な密度を示している。なお、全体に施工時の目標密度から0.05 g/cm<sup>3</sup>程度増加しているが、これは固化に伴う収縮によるもので、固化後の密度は安定している。施工後の強度も22ヶ月経過後の平均値として当初の室内配合試験の強度に近い値が発現しており、これらの結果から材料分離のない均一な気泡混合処理土地盤を造成できたことを確認した。

## 7. 結論

海水中での軽量混合処理土の材料分離特性と水中打設方法に関して、一連の実験により以下の結果を得た。

(1) 材料分離抵抗性試験は、広範囲の含水状態における気泡混合処理土を一定の速度で水中に打設する試験

が可能であり、材料分離抵抗性を評価する指標としてはSS, pH, 水中打設試料と気中打設試料の強度比が適している。

(2) 材料分離抵抗性試験の結果は、水槽打設実験における打設時の濁りやpH, 打設後の地盤の材料特性とほぼ対応している。

(3) 今回検討した範囲では、材料分離抵抗性試験により水中打設に適した気泡混合処理土のフロー値や打設速度を決定する際の指標値として、以下の値が使用できると考えられた。

- ・ SS < 100 mg/l
  - ・ pH < 10.5
  - ・ 材令7日における水中打設試料と気中打設試料の密度差が±0.05g/cm<sup>3</sup>
  - ・ 材令7日における水中打設試料と気中打設試料の含水比の比が1.1以下
  - ・ 材令7日における水中打設試料と気中打設試料の強度比が0.5以上
- (4) 今回使用した浚渫土を原料土とする場合、気泡混合処理土の気中フロー値が150～290mmの範囲で、80 cm/sec以下の打設速度が、良好な水中打設に適していると考えられる。
- (5) 神戸港の岸壁工事において、材料分離抵抗性試験と水槽打設実験の結果より施工時の配合を決定し打設速度を低下させて気泡混合処理土の水中打設を行った結果、材料分離のない均一な地盤を造成することができた。

## 参考文献

- 1) 奥村樹郎, 土田孝, 岸田隆夫, 長坂勇二, 古屋俊明: 港湾空港建設事業における軽量混合地盤材料の用途と課題, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp.2399-2402, 1994.
- 2) Tsuchida,T : Super geo-material project in coastal zone, development of high quality geo-material by recycling bulky urban waste , proceedings of International symposium on coastal ocean space utilization, Yokohama, pp.391-401, 1995.
- 3) 土田孝, 横山裕司, 水上純一, 清水和也, 笠井寿太郎: 港湾・海洋環境における軽量混合処理土の用途と現地打設実験, 港湾技研資料, No.833, 1996.
- 4) 湯怡新, 土田孝, 竹内大輔, 鏡田昌孝, 西田登: 軽量混合処理土の三軸試験結果と考察, 港湾技研資料, No.888, 1996.
- 5) 土田孝, 笠井寿太郎, 水上純一, 横山裕司, 梶田和徳: 軽量混合処理土に及ぼす養生条件の影響, 港湾技研資料, No.834, 1996.
- 6) 土田孝, 長井興治, 湯川雅之, 岸田隆夫, 山本実: 岸壁の裏込材として打設された軽量混合処理土の土質特性, 港湾技研資料, No.835, 1996.
- 7) 櫻井裕一, 安藤憲一, 吉原正博: 水中施工用軽量埋め戻し材の現場試験報告, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp.2207-2210, 1991.
- 8) 吉川元清, 香取匡貴: 水中気泡ソイルの設計に関する一考察, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp.2509-2510, 1995.
- 9) 吉川元清, 谷口利久, 高橋秀夫: 掘削による発生土を利用した水中軽量盛土工事, 土木学会第15回施工体験発表会講演概要—環境に配慮した施工事例—, 1992.
- 10) 深井大二郎, 黒山英伸: 気泡混合処理土の水中打設(その1), 第49回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.1522-1523, 1994.
- 11) 黒山英伸, 深井大二郎: 気泡混合処理土の水中打設(その2), 第49回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp.1520-1521, 1994.
- 12) 土田孝, 奥村樹郎, 井上茂, 橋詰文伯, 高橋但, 八木英樹: 気泡混合処理土の水中打設実験—流動特性と強度—, 第29回土質工学研究発表会講演集, pp.2413-2414, 1994.
- 13) 土田孝, 輪湖建雄, 菊池喜昭, 東俊夫, 新舎博: 軽量混合処理土の水中打設時の流動特性と材料特性, 港湾技研資料, No.900, 1997.
- 14) 土田孝, 輪湖建雄, 松下弘志, 吉原正博: 軽量混合処理土の水中打設における材料分離抵抗性の評価, 港湾技研資料, No.884, 1997.
- 15) 田中政典, 佐藤正一, 井上茂, 堀隆, 石谷和宏: 気泡混合土処理土の小型水槽打設実験(その1)—水中打設土の密度と強度—, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp.2485-2488, 1995.
- 16) 石塚浩次, 佐藤正一, 長谷川博, 古谷俊明, 別所友宏: 気泡混合処理土の小型水槽打設実験(その2)—打設方法の相違が材料特性に及ぼす影響—, pp.2489-2492, 1995.
- 17) 輪湖建雄, 土田孝, 松永康男, 濱本晃一, 岸田隆夫, 深沢健: 軽量混合処理工法の港湾施設への適用, 土木学会論文集, No.602, IV-40, pp.35-52, 1998.

(1999.3.12 受付)

# EVALUATION OF WASHOUT RESISTANCE OF LIGHT-WEIGHT TREATED SOIL CASTED UNDERWATER

Takashi TSUCHIDA, Hiroshi MATSUSHITA,  
Masahiro YOSHIHARA and Tatsuo WAKO

The washout resistance of foamed treated soil which is made of dredged slurry and is cast underwater is studied. The washout resistance test is newly developed and the following conclusions are obtained by a series of the test.

- 1) In a washout resistance test of the casting velocity control type, the density of suspended solid (SS) of water, pH value of water and the strength of soil after curing can be indexes of the washout resistance.
- 2) The results of the washout resistance test shows that, as for the foam treated soil used in this study, the mixing proportion of 180~290 mm flow value and the casting velocity less than 80cm/sec are recommended to prevent the washout.
- 2) Foam treated soil of 15,000 m<sup>3</sup> were cast underwater for backfilling of quaywall in Kobe Port. By using the result of washout resistance test, the observed values of SS and pH were small and the properties of the ground was uniform.