

港湾技研資料

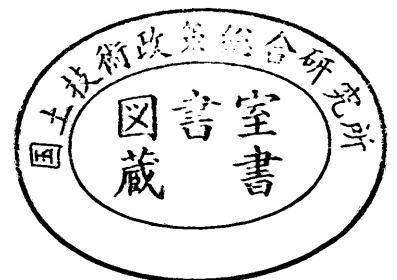
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 884 Dec. 1997

軽量混合処理土の水中打設時における
材料分離抵抗性の評価

土	田	孝
輪	湖	雄
松	下	建
吉	原	弘
		正
		志
		博

運輸省港湾技術研究所



目 次

要旨	3
1. 本研究の目的と既往の研究	4
2. 実験に用いた気泡混合土の配合特性	4
2.1 配合試験の方法	4
2.2 配合試験の結果	5
3. 水中打設時の材料分離抵抗性の評価方法	8
3.1 Jロートによる材料分離抵抗性試験による評価	8
3.2 打設速度制御式分離抵抗性試験による評価	10
4. 気中フロー値と打設速度に着目した気泡混合土の水槽打設実験	14
4.1 水槽打設実験	14
4.2 水槽打設実験と分離抵抗性試験の対応	16
4.3 実施工における材料分離抵抗性試験結果の指標値	17
5. 打設管の形状の効果に関する水槽打設実験	18
5.1 実験方法	18
5.2 気泡混合土の打設実験結果	18
5.3 ビーズ混合土の打設実験結果	21
6. 結論	22
参考文献	23
謝辞	24

Evaluation of Washout Resistance of Light-weight Treated Soil Casted Underwater

Takashi TSUCHIDA*
Tatsuo WAKO**
Hiroshi MATSUSHITA***
Masahiro YOSHIWARA****

Synopsis

The washout resistance of foamed treated which was made of dredged slurry and casted underwater is studied. The washout resistance test was newly developed in this research, and the following conclusions are obtained by a series of tests:

- 1) In a washout resistance test of 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) As guideline of the washout resistance test, following values are given:
 - SS <100 parts per million
 - pH<10.5
 - Strength ratio of sample casted in water to that casted in air >0.5
 - Water content increase of sample casted in water < 10 %
- 3) The results of the washout resistant test shows that, as for the light weight treated soil used in this study, the flow value of 180~290 mm and casting velocity less than 100 cm/sec were recommended.

Key words: Light-Weight Soil, Dredging, Density, Underwater Construction, Port, Quaywall

* Head, Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

** Ex-Director, Geotechnical Engineering Division

*** Penta Ocean Corporation Ltd.

**** Sumitomo Osaka Cement Corporation Ltd.

Port and Harbour Research Institute, Ministry of Transport, 3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239 Japan

Phone : +81-468-445021 Fax : +81-468-444577 e-mail:tsuchida@phri.go.jp

軽量混合処理土の水中打設時における材料分離抵抗性の評価

土 田 孝 *
輪 湖 建 雄 **
松 下 弘 志 ***
吉 原 正 博 ****

要 旨

浚渫粘土を用いた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、打設流速、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結果、次のようなことがわかった。

- 1) Jロートを使用した材料分離抵抗性試験によると、気泡混合処理土の場合、打設後における海水のSSとpH、水中打設時の密度、含水比、強度と気中打設時の値との比較が材料分離の影響を表している。しかし、Jロートによる分離抵抗性試験は、試験中に流下速度が変化し気中フロー値が低い場合に自然流下しないなどの問題点がある。
- 2) 打設流速制御型の分離抵抗性試験は、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、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。
- 3) 打設速度制御型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。
- 4) 水中打設に適した気泡混合処理土のフロー値と打設速度を決定するためには、分離抵抗性試験における以下の指標値が適用できると考えられる。
 - ・ SS<100ppm, 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強度比が0.5以上
 - ・ 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
- 5) 今回使用した原料土に関しては、気泡混合土の気中フロー値が180~290mmの範囲で、100cm/sec以下の打設速度の場合に良好な水中打設ができると考えられる。
- 6) 打設管の吐出部の形状を3種類の方法で拡幅し打設速度を管内速度の1/10の15cm/secとすることによって良好な打設ができることが、水中打設実験の結果、確認された。

キーワード：軽量土、気泡混合処理土、浚渫土、密度、一軸圧縮強度、港湾、岸壁

*土質部土性研究室長 **前土質部長 ***五洋建設(株) ****住友大阪セメント(株)

〒239 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

電話：0468-44-5021 Fax：0468-44-4577 e-mail:tsuchida@phri.go.jp

1. 本研究の目的と既往の研究

筆者らは、港湾地域における新しい地盤材料として、浚渫粘土を用いた軽量混合処理土（以下軽量混合土と呼ぶ）の開発研究を行ってきた。気泡混合処理土（以下、気泡混合土と呼ぶ）は、スラリー状の浚渫粘土にセメント系固化材と気泡を混合して固化する軽量混合土であり、発泡ビーズ混合処理土（以下、ビーズ混合土と呼ぶ）は、浚渫粘土にセメント系固化材とEPSなどの発泡ビーズを混合して固化する軽量混合土である。これまでに基本的な材料特性や強度変形特性^{1), 2), 3), 6)}、経年後の特性変化^{4), 5)}、水中施工時の特性⁷⁾について調べ報告したが、本報告では軽量混合土を水中に打設したときの分離抵抗性の評価について検討した。

軽量混合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筆者らの研究を含めいくつかの報告がある^{7)~11)}。これらの結果を、打設時の軽量混合土の流動特性、材料特性、分離に着目してまとめると、以下のようになる。

- 1) 打設速度が大きい場合、流動距離の増加に対して密度が大きくなり、強度が低下する傾向がある。
- 2) 打設管の径が小さい場合、気泡混合土の密度は増加する傾向がある。また、筒先を上昇させながら打設すると筒先位置を固定した場合よりも密度や強度が均一な地盤が打設できる。
- 3) 打設時には濁りや浮上試料が発生する場合があります、その防止策が必要である。
- 4) 発泡ビーズ混合土は、水中の流動性が乏しいために地盤の一部に空洞が形成される場合がある。また、濁りは小さく浮上する試料は無いが、打設されたビーズ量の1.8~8.0%が分離して浮上する。施工時に分離したビーズを回収し再利用する工夫が必要である。

以上の結果から、軽量混合土を水中に直接打設して造成できることが確認されたが、施工にあたっては軽量混合土の流動性や打設方法（打設速度、打設管の制御方法など）について、濁りや分離が少なく均一な地盤が形成できる条件を選択する必要がある。本研究は、これらの

成果に引き続き、軽量混合土を水中打設する上での適切な配合や施工条件、水中不分離性の試験方法を明らかにすることを目的とした。

構造物の設計上から気泡混合土に必要な材料特性として密度と強度が設定されるが、これを満足する配合条件は、原料土の含水比、固化材量、気泡量の組み合わせによっていろいろと考えられ、施工性によってこの中から適切な配合を選択する必要がある。水中打設の実験によると、試料の流動性は材料の不分離性に影響し、施工中に水と接触することによって濁りの発生やpHの上昇、強度の低下、密度の変化などの問題が生じる。それぞれの工事において原料土を用いて水槽打設実験を行うならば適切な流動性や施工方法を把握できるが、時間とコストの観点から、簡便な方法で施工条件を決定することが望ましい。

そこで水中時の材料分離抵抗性を評価できる試験法を考案し、一連の試験を実施した。次に水槽打設実験を行って分離抵抗性試験結果との対応について検証し、水中打設のための適切な配合条件と施工条件を示した。さらに、打設管先端部の拡幅による効果を水槽打設実験で確認した。

2. 実験に用いた気泡混合土の配合特性

2.1 配合試験の方法

一連の実験に先立って2種類の原料土を用いて配合実験を行い、それぞれについて含水比とフロー値の関係、含水比と強度の関係、固化材量と強度の関係を把握した。原料土の物理的性質を表-1に示した。表-2は原料土と実施した試験の関係である。神戸浚渫土の物理特性は、後に示す。

気泡は、界面活性剤系起泡剤を水で25倍に希釈し、発泡機で25倍に発泡したものをを使用した。また、発泡ビーズは、φ2.0mm程度（真密度0.04g/cm³、見かけ密度0.032g/cm³）の粒を使用した。固化材は、B種高炉セメントを使用した。水は、配合試験、材料分離抵抗性試験、

表-1 原料土の物理的性質（広野、有明浚渫土）

原料土	土粒子の密度 (g/cm ³)	粒度組成 (%)				液性限界 (%)	塑性限界 (%)
		礫分	砂分	シルト分	粘土分		
広野浚渫土	2.561	9.1	36.7	40.7	13.5	67.2	40.3
有明浚渫土	2.712	2.9	16.4	35.1	45.6	81.3	32.2

表-2 各原料土を使用した試験および実験名

	配合試験	材料分離 抵抗性試験	水槽打設実験 (気泡混合土)
広野浚渫土	○	○	○
有明浚渫土	○	○	
神戸浚渫土1			○
神戸浚渫土2			○

水槽打設実験1では人工海水を使用し、水槽打設実験2では東京湾から採取した海水を使用した。

気泡混合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）、打設流速、打設方法などであると考えられる⁷⁾ので、配合試験では、流動特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 1.1g/cm^3 とし原料土の調整含水比を $2.0\sim 3.5W_L$ (W_L は土の液性限界)。固化材量は軽量混合土 1m^3 当り 100kg 、 150kg 、 200kg の3種とした。

気泡混合土の作製は、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、混合土を作製する。
- ③重量計量した気泡と混合土を、ハンドミキサーを用いて1分間混練し、気泡混合土を作製する。

それぞれの配合条件により作製した混合土に対し、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度の関係を求めた。なお、フロー試験は、気中およ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 40cm 四方の亚克力板の中央に、内径 8cm ×高さ 8cm の円筒状の容器を置き、その中に気泡混合土を流し込み上面を均した後に静かに容器を上方に引き上げて、広がった混合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 40cm ×幅 40cm ×深さ 15cm の亚克力容器の中央に、気中フロー試験と同じ円筒状の容器を置き、気泡混合土を流し込み上面を均した後に、水面が円筒容器の上面 1cm 程度になるまで人工海水を亚克力容器に満たし、気中フロー試験と同じ要領でフロー値を測定した。

一軸圧縮試験の供試体は、配合1ケース当り9本作製した。直径 5cm ×高さ 10cm の簡易モールドの内側に高さ 16cm までフィルムを巻き付け、 12cm の高さまで混合土を充填し、 20°C の湿空養生を行い、 $\phi 5\times 10\text{cm}$ に成形

して供試体を作製した。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。

2.2 配合試験の結果

広野浚渫土、有明浚渫土を用いた配合試験の結果をそれぞれ表-3(a),(b)に示した。図表中の W_L は液性限界(%)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、一軸圧縮強度に着目してまとめている。

図-1(a),(b)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混合土の流動性に

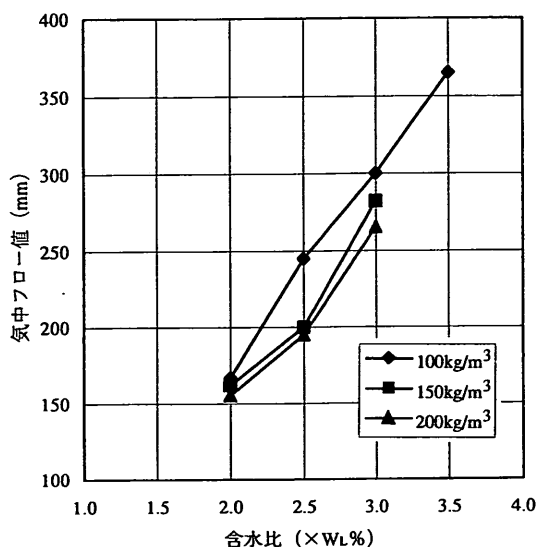


図-1(a) 含水比と気中フロー値の関係 (広野浚渫土)

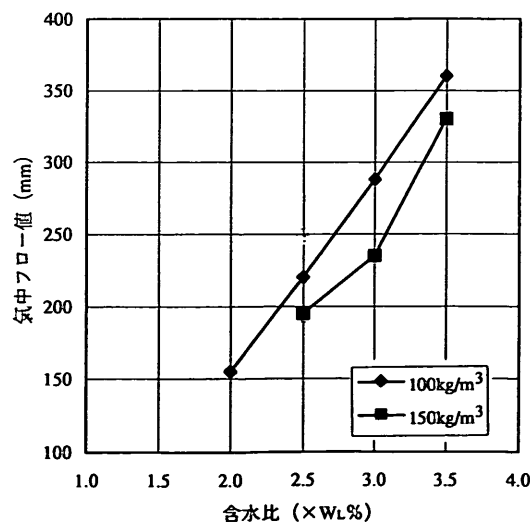


図-1(b) 含水比と気中フロー値の関係 (有明浚渫土)

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。なお、水中でのフロー値は、表-3(a),(b)に示したように80~95mmであり、含水比による変化はわずかであった。これは、浮力によって軽量土の自重が軽減され気中フロー値が250mm以下の場合、水中ではほぼ自立した状態を保ったためである。本研究では軽量混合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(a),(b)は含水比と一軸圧縮強度の関係である。図のように、いずれの原料土とも、固化材量一定の場合は、原料土の含水比の増加に伴って強度が低下する。これはセメント水比が増加するためと考えられる。

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1.5~3.0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⁴⁾。ただし、現場に打

設された気泡混合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³⁾。

図-3(a),(b)は、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である。図のように、固化材量を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といえる。

図-4(a),(b)は固化材量と一軸圧縮強度の関係であり、固化材量の増加とともに一軸圧縮強度は増加する。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みられない。したがって、通常の浚渫粘土を原料土とした場合、室内配合で材令28日の一軸圧縮強度を4~6 kgf/cm²とするには、気泡混合土できあがり1 m³あたり80~120kgの固化材量が必要であるといえる。

表-3(a) 配合試験結果 (広野浚渫土)

調整土 含水比 (×WL) (%)	単位配合			混合土 密度 (g/cm ³)	フロー値 (mm)		一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)		
	調整土 (kg/m ³)	固化材 (kg/m ³)	気泡 (%/m ³)		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

表-3(b) 配合試験結果 (有明浚渫土)

調整土 含水比 (×WL) (%)	単位配合			混合土 密度 (g/cm ³)	フロー値 (mm)		一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)		
	調整土 (kg/m ³)	固化材 (kg/m ³)	気泡 (%/m ³)		気中	水中	3日	7日	28日
2.0	990	100	206	1.094	155	80	1.54	4.78	7.76
2.5	991	100	174	1.092	220	80	1.00	3.06	6.93
	944	150	118	1.097	195	80	1.73	5.67	10.90
3.0	993	100	149	1.109	288	85	0.76	2.70	5.36
	945	150	105	1.097	235	80	1.24	4.36	9.60
3.5	994	100	129	1.100	360	90	0.40	1.56	3.98
	946	150	92	1.098	330	88	0.89	3.32	8.65

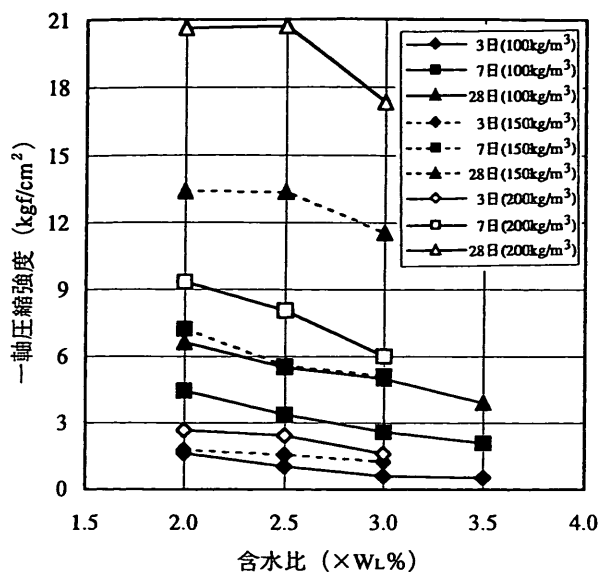


図-2(a) 含水比と一軸圧縮強度の関係 (広野浚渫土)

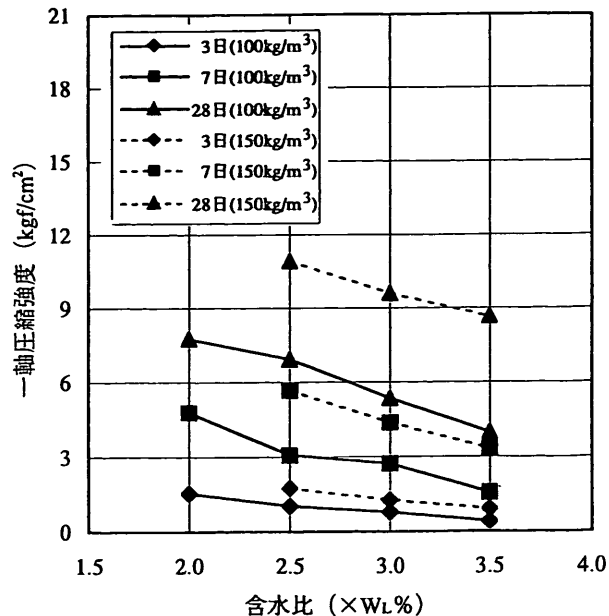


図-2(b) 含水比と一軸圧縮強度の関係 (有明浚渫土)

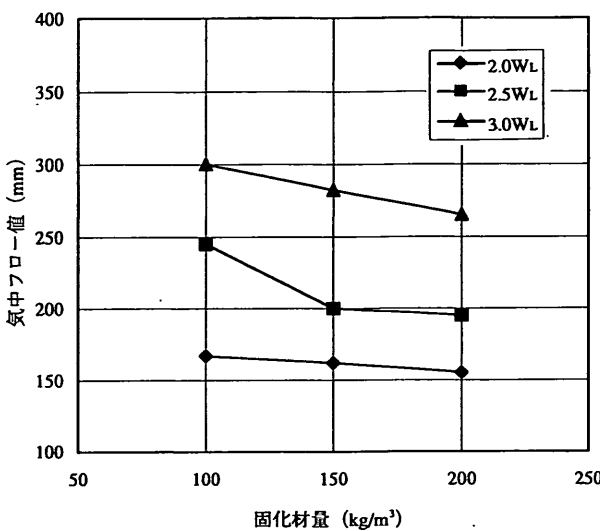


図-3(a) 固化材量と気中フロー値の関係 (広野浚渫土)

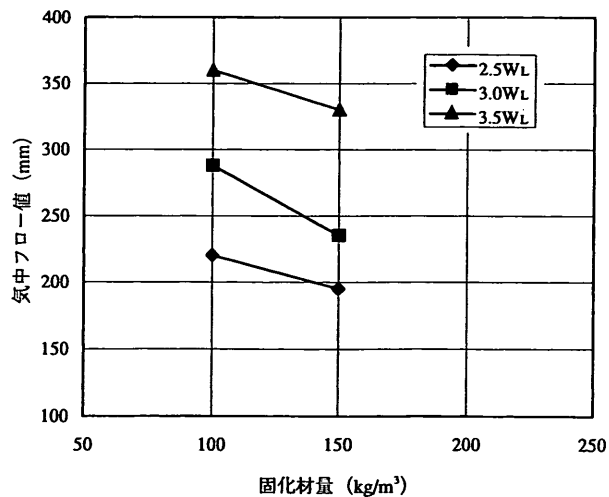


図-3(b) 固化材量と気中フロー値の関係 (有明浚渫土)

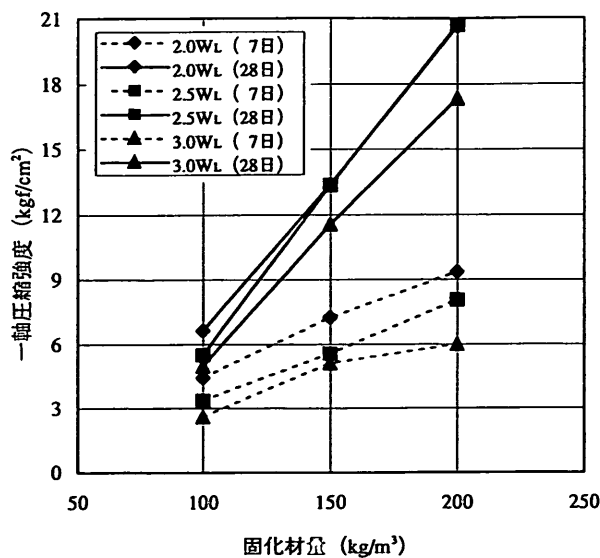


図-4(a) 固化材量と一軸圧縮強度の関係 (広野浚渫土)

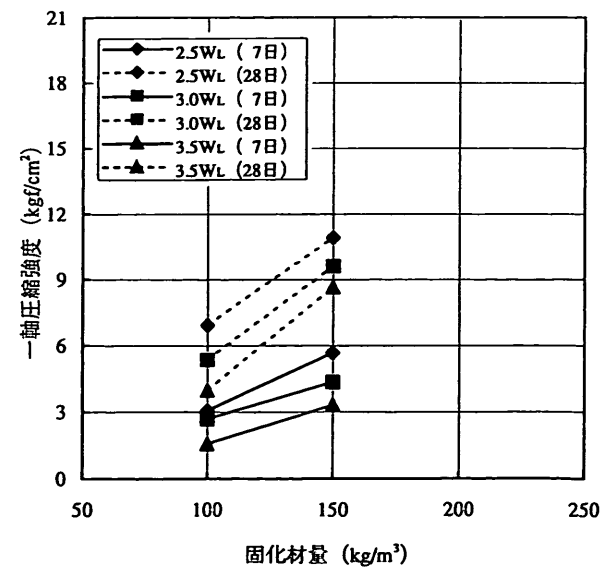


図-4(b) 固化材量と一軸圧縮強度の関係 (有明浚渫土)

3. 水中打設時の材料分離抵抗性の評価方法

軽量混合土を水中に打設した場合、配合条件、打設流速、打設方式によっては、空気や水の巻き込みや海水の粘性抵抗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⁷⁾。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方法である。

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

3.1 Jロートによる材料分離抵抗性試験による評価

高流動コンクリートなど高流動性材料の流動性を評価する試験法として、Jロート法がよく用いられている。同様のJロートを用いて水中に気泡混合土を吐き出す試験を行い、簡便に材料分離抵抗性を評価する方法を検討した。

図-5は試験機の概略図である。試験機はJロート（高さ40cm、天端の内径15cm、吐出口の内径3cm、内容積2,920cc）と、受け容器（高さ20cm、内径20cm、内容積6,280cc）で構成され、Jロートは手動で高さを変えることができる。

試験方法は、受け容器に10cmの高さまで人工海水を入れ、次にJロートの吐出口に内側から栓をしてその中に1800ccの気泡混合土を投入し、次に受け容器の底面から3cmの高さに吐出口を固定し、栓を引き抜いて容器内

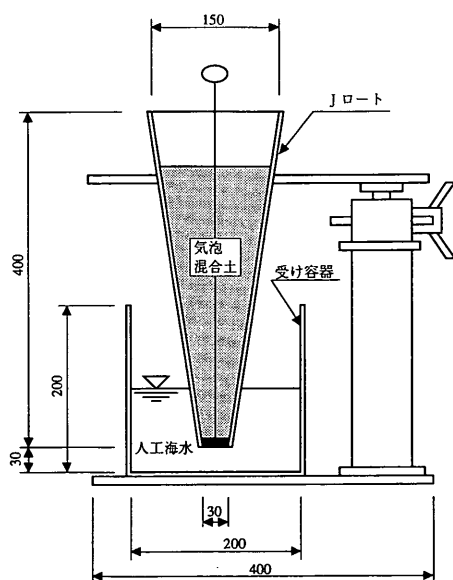


図-5 ロート式材料分離抵抗性試験機

水中に打設する。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、水中打設した試料と同時に気中で簡易モールド内に打設した試料の7日養生後の密度、含水比、一軸圧縮強度である。なお、気中打設試料は20℃で湿空養生し、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、成形している。

配合の条件としては、材令7日において一軸圧縮強度が気中で3~5kgf/cm²、密度が1.2g/cm³となるようにした。施工時の材料特性は流動性によって支配されるので、気泡混合土の気中フロー値をパラメータとし、水中打設時のSS、pH、水中打設試料の密度、含水比、強度の気中打設試料との比あるいは差、を指標とした。試験結果の一覧を表-4(a),(b)に示す。

図-6は打設後のSSである。図のように、気中フロー値が大きくなると容器内の人工海水のSSも大きくなっている。特に気中フロー値が300mm以上になるとSSは急激に増加しており、材料の分離が激しいことを示している。一方、気中フロー値230mm以下の場合のSSは500ppm未満であり材料分離の割合は小さい。このように、SSを指標とした場合、適切な気中フロー値の範囲は250~300mmの間にあると考えられる。

図-7は気中フロー値とpHの関係である。図のように気中フロー値が260mmを越えると容器内の人工海水のpHも大きくなり、SSと同様の傾向を示している。pHの増大は気泡混合土中のカルシウム分が分離して人工海水に混入したと考えられる。

図-8は水中に打設した試料とモールド内に気中打設した試料の密度差である。図のように、気中フロー値の大小に関わらず、水中に打設した場合の密度増加は僅かであった。

図-9は水中打設した試料とモールド内に気中打設した試料の含水比の比率である。水中に打設する過程で気泡が消滅したり分離して浮上すると固化後の試料の含水比が増加する。また、流動性が悪い場合には軽量混合土内に水を巻き込んで含水比が増加する。図をみると気中フロー値が200~250mmのときに水中に打設した気泡混合土の含水比の増加が最も小さく、気中フロー値が200mm未満および300mm以上の場合は含水比が増加している。

図-10に気中フロー値と水中打設と気中打設の一軸圧縮強度比の関係を示した。図のように、気中フロー値が200~250mmのときに、水中に打設した気泡混合土の一軸圧縮強度が気中養生した場合の50%程度で最も大きくなっている。気中フロー値が300mm以上の場合は、材

表-4(a) 材料分離抵抗性試験結果 (材令 7 日)
(広野浚渫土)

調整土 含水比 (×W _L) (%)	固化材 (kg/m ³)	フロー 値 (mm)	SS (ppm)	pH	密度 (g/cm ³)		一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)		含水比 (%)	
					気中	水中	気中	水中	気中	水中
2.0	100	170	346	9.1	1.122	1.123	4.74	1.18	107.7	127.6
2.5	100	218	286	9.4	1.119	1.114	3.89	1.67	125.8	132.9
3.0	150	298	3,685	10.1	1.121	1.128	4.75	1.57	126.8	152.2
3.5	150	330	69,596	11.3	1.106	1.130	3.45	0.35	139.0	194.9

表-4(b) 材料分離抵抗性試験結果 (材令 7 日)
(有明浚渫土)

調整土 含水比 (×W _L) (%)	固化材 (kg/m ³)	フロー 値 (mm)	SS (ppm)	pH	密度 (g/cm ³)		一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)		含水比 (%)	
					気中	水中	気中	水中	気中	水中
2.0	100	150	435	9.3	1.089	1.107	3.80	0.44	124.4	143.8
2.5	100	230	99	8.8	1.098	1.114	4.16	2.11	148.8	155.7
3.0	150	310	4,630	10.5	1.102	1.097	4.78	1.08	141.4	181.0
3.5	150	390	44,667	12.0	1.095	1.098	3.20	0.09	165.4	299.9

料の分離とともに人工海水の混入が起こり、水中での強度が低下したものと考えられる。気中フロー値が200mm未満の場合は、気泡混合土が自然流下しないため、Jロートを引き上げる過程で水中に打設された。このため、気泡混合土は容器内で人工海水に接しながらとぐるを巻いたように重なる状態となり、部分的に気泡混合土が充填されず人工海水を巻き込んだことが予想される。このような水の巻き込みが強度の低下と図-9に示した含水比の増加になったと考えられる。

以上の結果をみると、打設時のSSとpH、水中打設時

と気中打設時の含水比および強度比が比較的明瞭に材料分離の影響を表しているようである。しかし、今回使用した試験機は、下端に向かって徐々に細くなる形状の中を気泡混合土が自然流下するものであるため、流下速度が次第に小さくなるうえ、気中フロー値の小さい混合土の場合は流下しない場合があった。また、受け容器が小さいため、気中フロー値の大きい混合土の場合、打設した混合土が受け容器の側面に当たり、渦状になって人工海水を巻き込むという問題点があった。これらに対処するため、①混合土の気中フロー値に関係なく打設速度を

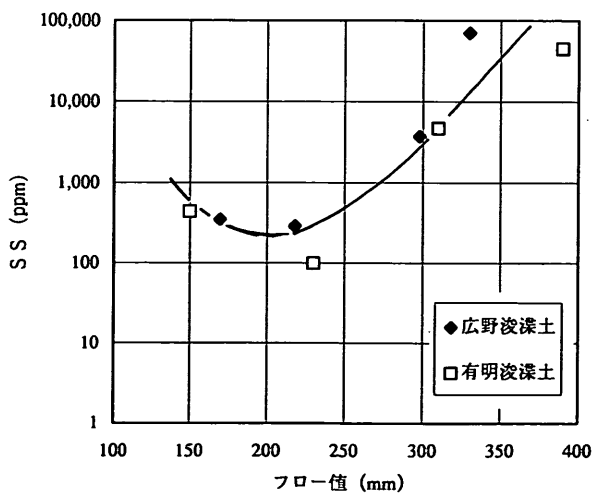


図-6 SS

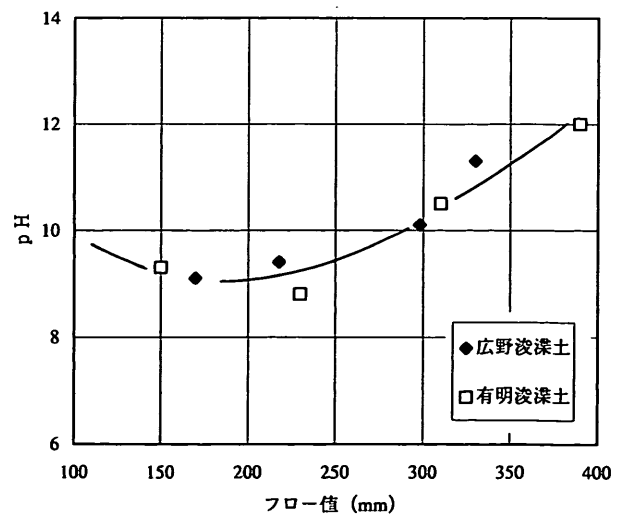


図-7 pH

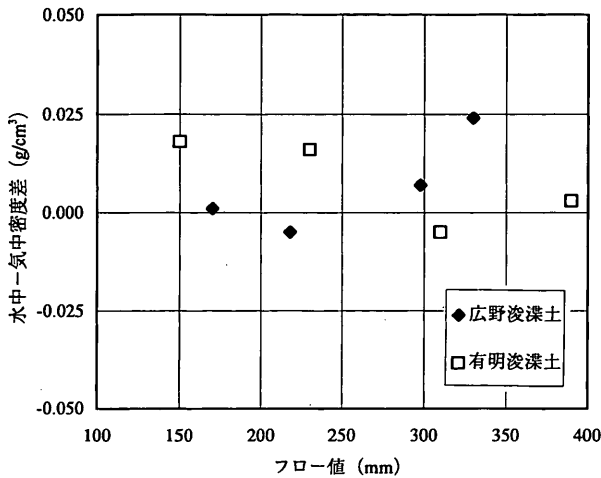


図-8 水中打設試料と気中打設試料の密度差

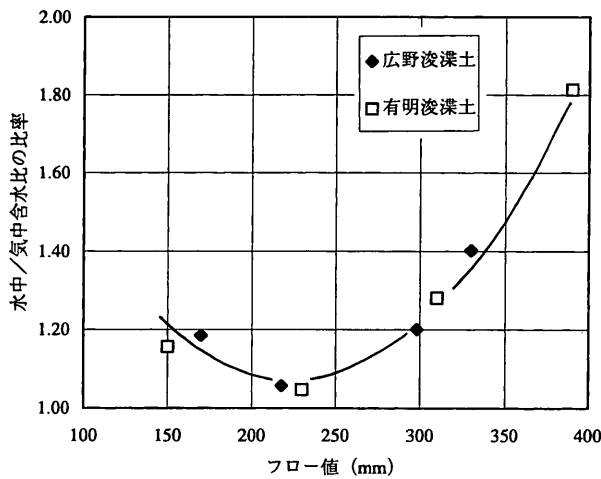


図-9 水中打設試料と気中打設試料の含水比比率

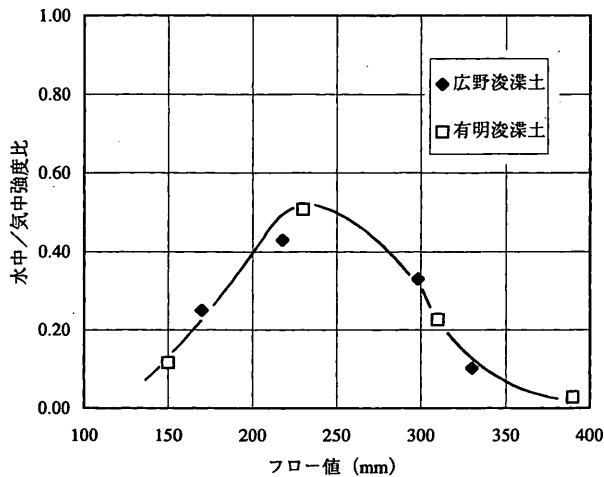


図-10 水中打設試料と気中打設試料の強度比

一定(可変)にする, ②受け容器を混合土に影響しない形状寸法にする, という試験機の改良を行ったのが次節で述べる打設速度制御型分離抵抗性試験である。

3.2 打設速度制御型分離抵抗性試験による評価

打設速度を制御する分離抵抗性試験機(以下に速度制御型分離抵抗性試験と呼ぶ)の概略図と写真を図-11, 写真-1に示した。ここで打設速度とは, 打設管の筒先から気泡混合土が排出する速度のことをいう。図のように, 試験機はシリンダー(高さ44cm, 内径10cm, 内容積3,455cc), 電動モータ及びピストン, 受け容器(高さ20cm, 内径20cm, 内容積6,283cc), 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3,000ccの人工海水を入れ, 受け容器の底面から12mm(=1D)の高さに先端ノズルの吐出口を固定し, 次にシリンダーの中に3,000ccの気泡混合土を投入してピストンを作動させることにより

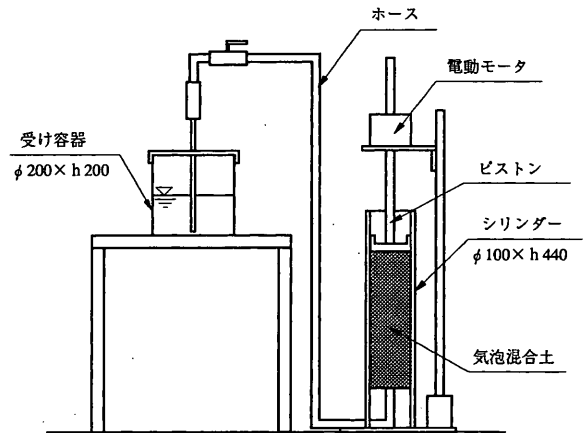


図-11 打設流速制御型の分離抵抗性試験機

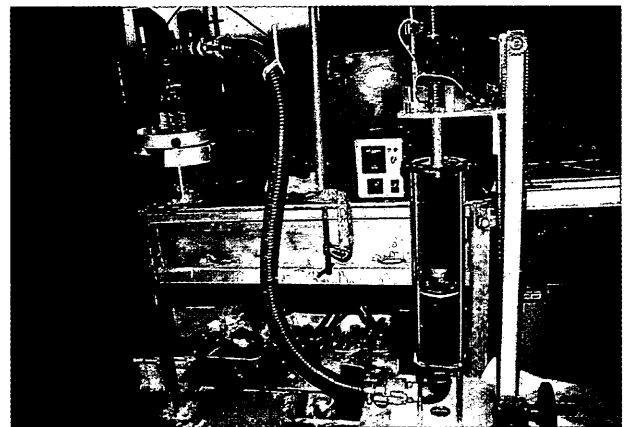


写真-1 打設速度制御型の分離抵抗性試験機

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。試験中の測定項目はロート式と同じであるが、速度制御型分離抵抗試験の場合には気中フロー値のほかに打設速度が施工条件を示すパラメータとなる。写真-2 (a),(b),(c)は軽量土試料の打設開始から終了までの状況である。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。

表-5に試験に用いた気泡混合土の物性値を示す。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_L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、この間に気泡混合土の気中フロー値が減少した。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-12(a)は水中打設後のSSを気中フロー値に対して示しており図-12(b)は同様の値を打設速度に関して示した。全体的な傾向としては、気中フロー値が大ききまた打設速度が大ききほどSSも大きくなり、流動性の高い気泡混合土を速い流速で打設するほど、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、気中フロー値が最少の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広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するため、この間の打設された気泡混合土どうしの練り返しによる攪乱が大きく影響していると考えられる。

図-13(a)、図-13(b)は打設後の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、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-14(a)、図-14(b)は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である。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土の密度の方が大きくなった。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、セメントが分離した場合は密度の低下となる。また、フロー値が小さい場合に



写真-2(a) 水中打設時の状況 1

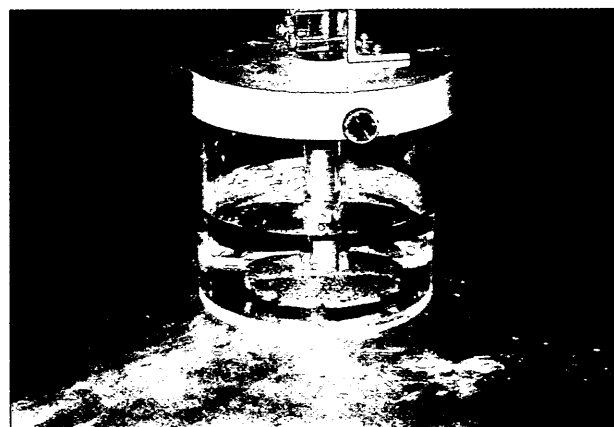


写真-2(b) 水中打設時の状況 2

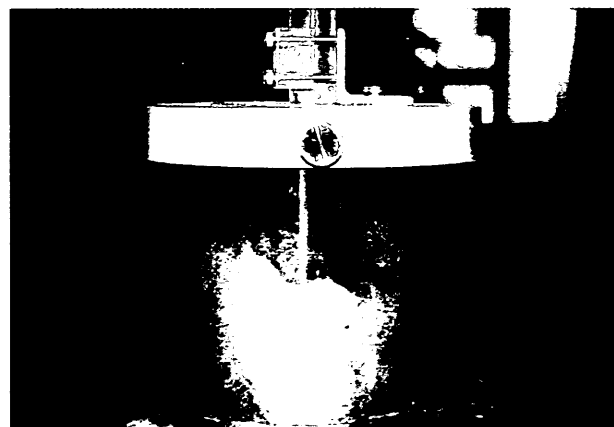


写真-2(c) 打設終了時の状況

表-5 気泡混合土の物性値 (広野浚渫土)

調整土 含水比 (×W _L) (%)	単位配合			混合土密度 (g/cm ³)		フロー値 (mm)		
	調整土 (kg/m ³)	固化材 (kg/m ³)	気泡 (l/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

は、打設中に混合土内の空隙に水の巻き込みによる密度低下がおこる。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-15(a), 図-15(b)は水中打設試料と気中打設試料の含水比の比率である。水中に打設した場合、含水比は全て気中養生供試体より増加しており、増加率は5%～

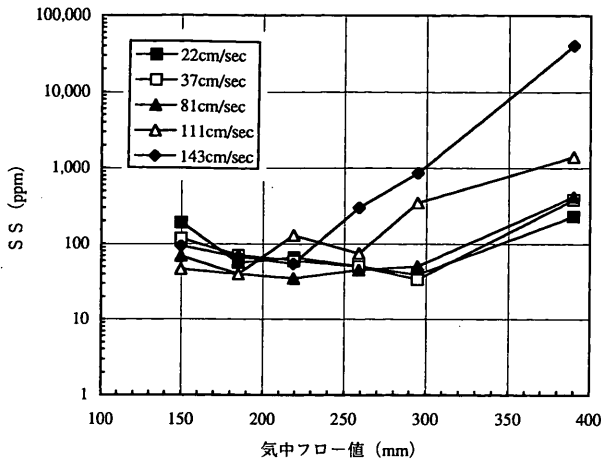


図-12(a) 気中フロー値とSS

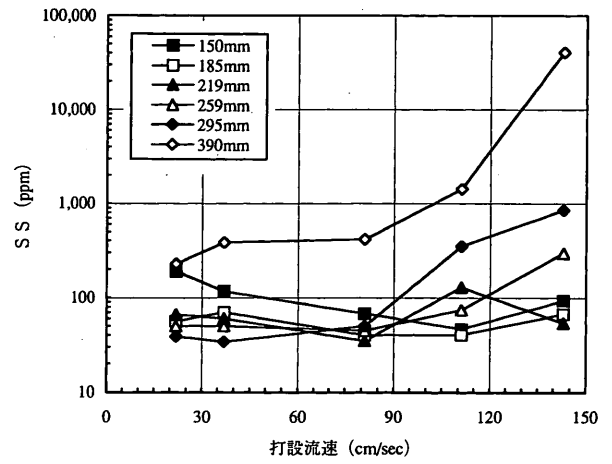


図-12(b) 打設流速とSS

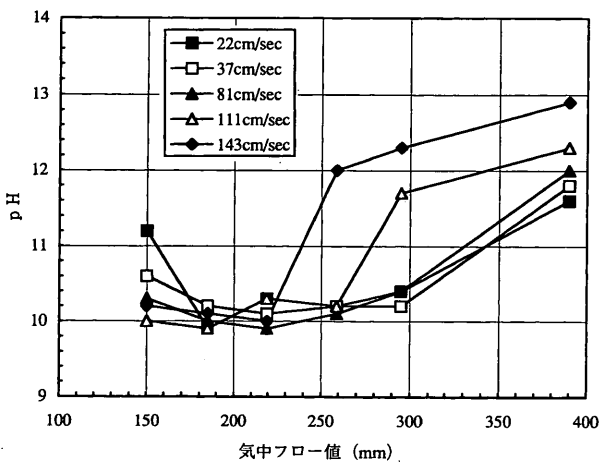


図-13(a) 気中フロー値とpH

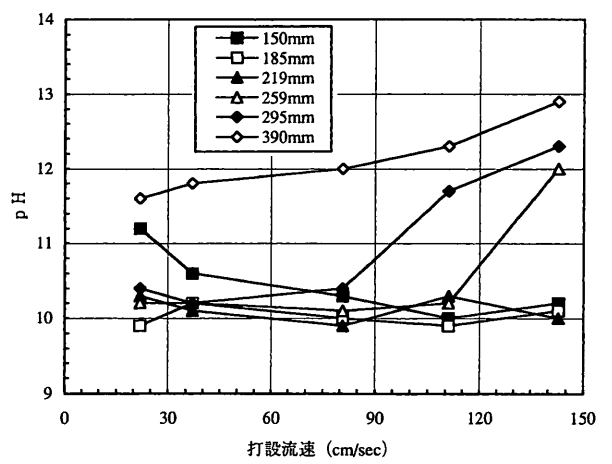


図-13(b) 打設流速とpH

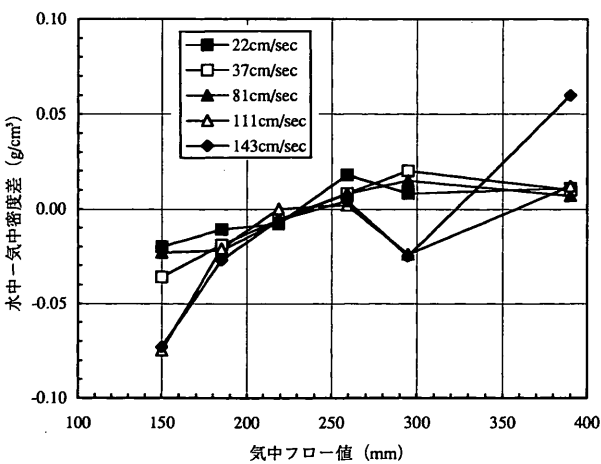


図-14(a) 気中フロー値と水中/気中密度差

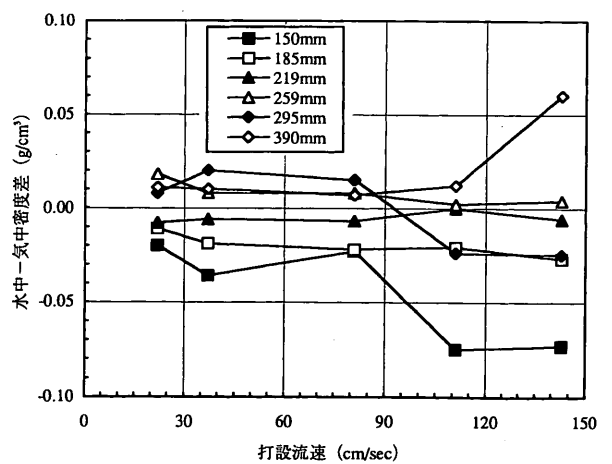


図-14(b) 打設流速と水中/気中密度差

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、およ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おり、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度の比を図-16(a)、図-16(b)に示した。水中に打設した気泡混合土の強度は、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。フロー値が小さい場合には、打設管付近で打設された軽量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軽量土の強度(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すばやく打設した方がよい。一方、フロー値が大きくなると流動中に水と接触面において分離が起こりやすいため、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。

打設速度を制御した試験法によって気泡混合土の水中打設における材料分離抵抗性を調べた結果をまとめると以下ようになる。

- ①気中フロー値と各指標値との関係は、Jロートをを用いた試験結果とほぼ同様の傾向を示しており、打設速度ごとに安定した結果が得られた。
- ②流動性の低い気泡混合土は速い速度で、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。
- ③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、周囲の軽量土を押し出すことによる乱れや空隙の形成がSS、pHの上昇と強度低

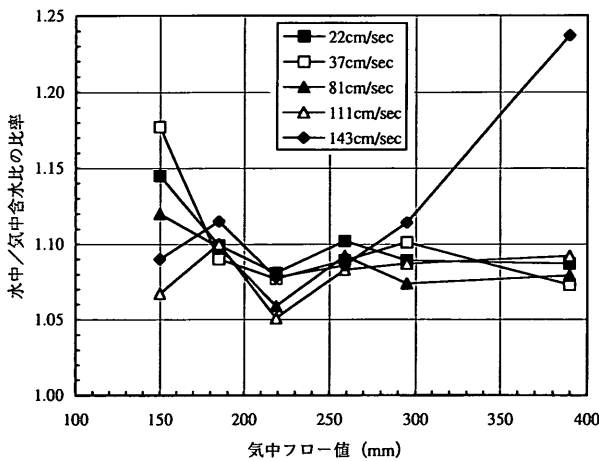


図-15(a) 気中フロー値と水中/気中含水比の比率の関係

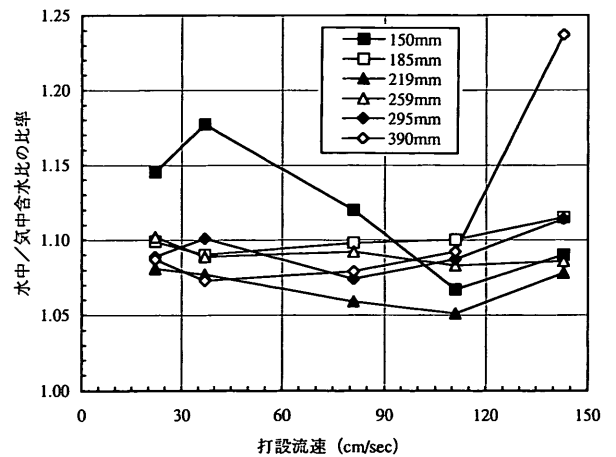


図-15(b) 打設速度と水中/気中含水比の比率の関係

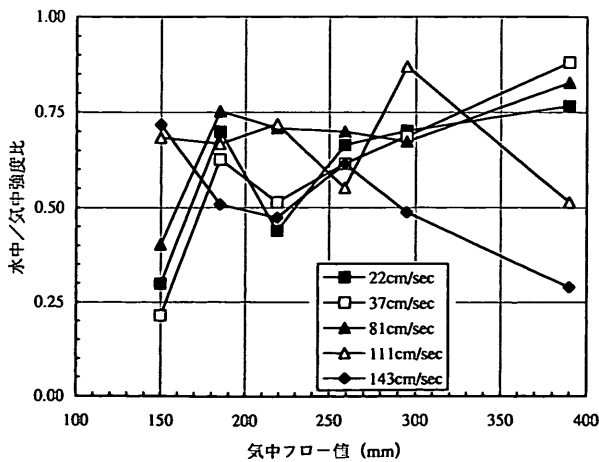


図-16(a) 気中フロー値と水中/気中強度比

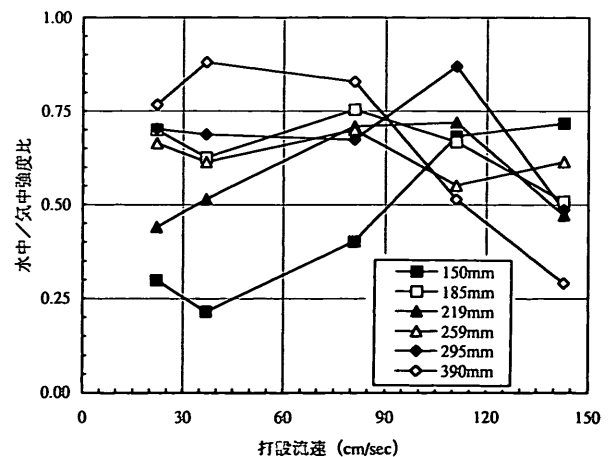


図-16(b) 打設速度と水中/気中強度比

下を起こした要因であると考えられる。

以上の速度制御型材料分離抵抗性試験の結果から判断すると、打設速度22~111cm/secに対して気中フロー値180~290mm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150mm程度の流動性の低い軽量混合土を打設する場合は、打設管付近の練り返しによる攪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. 気中フロー値と打設速度に着目した気泡混合土の水槽打設実験

材料分離抵抗性試験は、300ℓの小さな容器内に気泡混合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の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。

4.1 水槽打設実験

(1) 実験方法

実験には図-17に示す長さ2.0m×幅0.5m×高さ1.0m、内容積1.0m³の片面ガラス張り鋼製水槽を使用した。気泡混合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インチとした。吐出口は水槽の一端の底面から5cm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40m³/hであり、径4インチの打設管が用いられている。実験では径1インチの打設管を使用したので同じ管内速度とすると2.5m³/h（1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2.6m³/hであったため、管内流速の最大値は2.6m³/hに対応する147cm/secとした。打設速度の変更はスクイズポンプのギヤの変更と吐出口の形状により行い、147cm/sec、73cm/sec、36cm/secの3種類で打設した。

打設管の筒先で流速を低減させるため図-18に示すような吐出口を使用した。図のように、1インチ管1本で流入した気泡混合土を4本の1インチ管から吐出させ、1本当りの打設速度を1/4に低減させている。また、吐出口の内側にはφ10mmの穴を多数空けた2枚の整流板を取り付け、4本の1インチ管から気泡混合土が均等に吐出するようにした。

(2) 実験結果

水槽打設実験の実験条件を表-6に示す。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った気中フロー値となるように計8ケースの実験条件を設定した。このうち、実験No.1~6は原料土に広野浚渫土を、実験No.7~8は神戸港浚渫土1（神戸港メリケン波止場沖で浚渫）を用いた。神戸港浚渫粘土1の物性値は表-7に示すとおりである。表のように原料土の物性値の違いが実験結果に影響することが予想されるがここでは2つの粘土を区別せずに整理した。SS、pHの計測と供試体の採取は図-17に示す位置で実施した。表-8はSSとpHの測定結果である。

図-19に気中フロー値とSSの関係を示した。図のように、打設速度が36cm/secと73cm/secの場合には、気中フロー値が大きくなるとともに濁りが大きくなっている。打設速度が147cm/secの場合、気中フロー値が160mmの場合でもSSは比較的大きく、また、気中フロー値が265mmの場合に非常に大きな濁りが発生した。

図-20は気中フロー値とpHの関係である。図のように、打設速度36cm/sec、73cm/secでは、気中フロー値が大きくなるとpHも徐々に大きくなっており、含水比、SSと対応した傾向を示す。打設速度147cm/secの場合を除けばpHの値はほぼ9であり、もともとの海水のpH8.2よりも0.8程度上昇している。

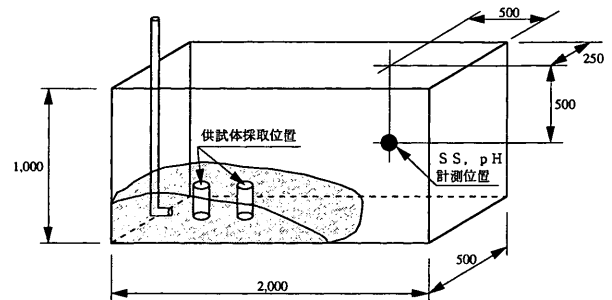


図-17 水中打設実験

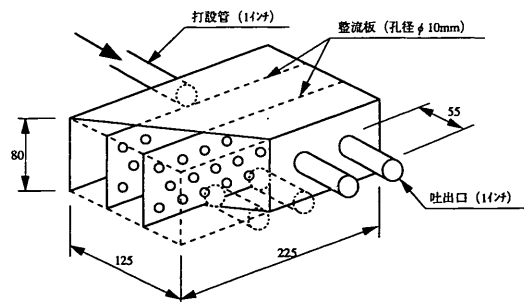


図-18 改良した吐出口モデルの形状

図-21は気中フロー値と水中打設時と気中打設時の密度差の関係である。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/cm³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160mmの場合は水の巻き込みが、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。

図-22は、水中打設試料とモールド内に気中打設した試料との含水比の比である。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-23は水中打設した試料と気中でモールド内に打設した試料の強度比である。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℃の室内で湿空養生に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℃と5℃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℃水中養生の強度に補正し

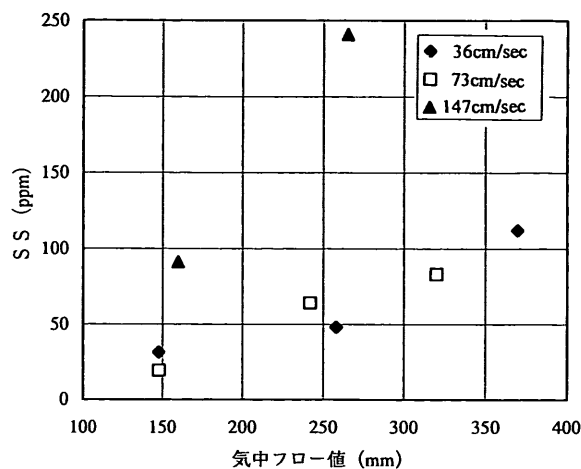


図-19 SS

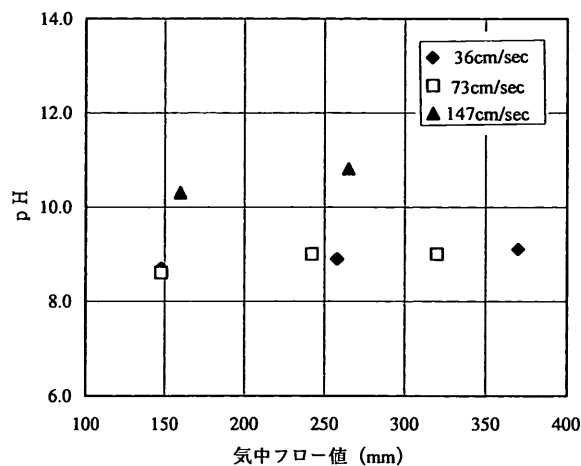


図-20 pH

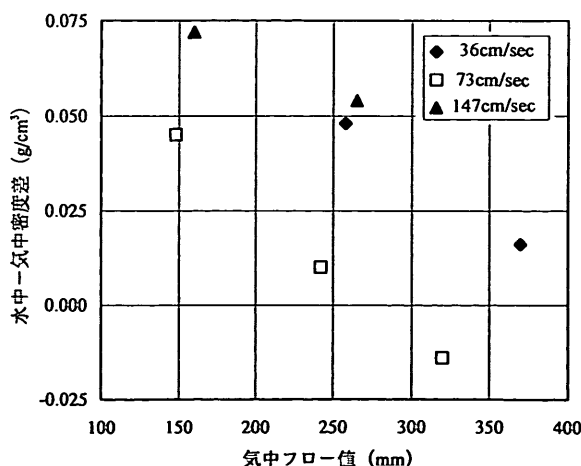


図-21 水中打設試料と気中打設試料の密度差

表-6 小型水槽打設実験の実験条件

実験No.	調整土含水比 (×Wt) (%)	固化材量 (kg/m ³)	混合土密度 (g/cm ³)	気中フロー値 (mm)	打設流量 (m ³ /hr)	打設流速 (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		140	1.082	148	1.3	73.5
8		140	1.116	160	2.6	147.1

表-7 原料土の物理的性質 (神戸港浚渫土1)

土粒子の密度 (g/cm ³)	粒度組成 (%)				液性限界 (%)	塑性限界 (%)
	礫分	砂分	シルト分	粘土分		
2.740	12.3	13.1	49.0	26.5	106.3	41.0

表-8 SSとpHの計測結果

実験No.	SS (ppm)	pH
1	31	8.7
2	48	8.9
3	112	9.1
4	241	10.8
5	64	9.0
6	83	9.0
7	19	8.6
8	91	10.3

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加に伴うSS、pHの増大と対応しており、水中打設時の材料分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、SS、pH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。

4.2 水槽打設実験と分離抵抗性試験の対応

速度制御型分離抵抗性試験と水槽打設実験結果との対応を検討する。速度制御型分離抵抗性試験では打設速度を5段階に変化させて実施したが、水槽打設実験における打設速度は36～147cm/secであった。このため、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

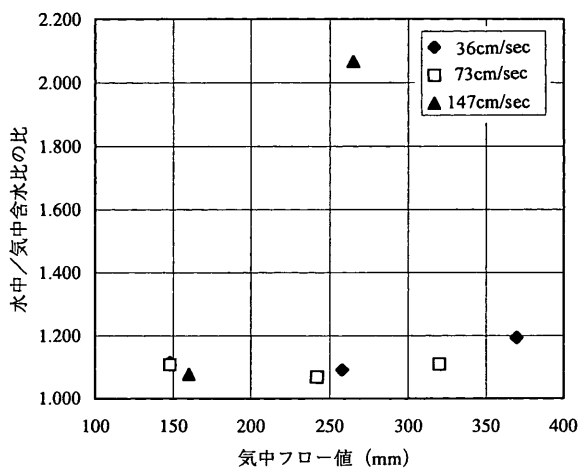


図-22 水中打設試料と気中打設試料の含水比の比率

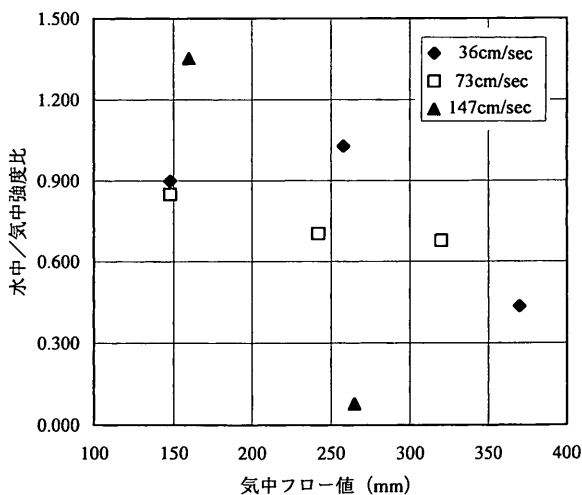


図-23 水中打設試料と気中打設試料の強度比の関係

る比較を行った。

水槽打設実験と速度制御型分離抵抗性試験では打設した気泡混合土の量と水槽内の水量が以下のように異なっている。

分離抵抗性試験 打設量 3ℓ, 水量 3ℓ
水槽打設実験 〃 200ℓ, 水量800ℓ

また、両試験では打設位置に対するSSとpHの測定位置も異なっている。分離抵抗性試験では容器内に鉛直方向に打設し、打設位置のすぐ上で測定している。一方、水槽打設試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、分離抵抗性試験は打設管の近傍のSSやpHの上昇に対応しており、水槽打設試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-24は水槽打設実験と分離抵抗性試験のSS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SSの測定値が100ppm以下になっている。気中フロー値が350mm以上と150mm以下の濁りやすい場合については、水槽打設試験に比べ分離抵抗性試験で大きなSSが測定される。これは両者の試験の水量と計測位置の違いによるとみられる。

図-25は水槽打設実験と分離抵抗性試験のpH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pHが8.6～9.1であるのに対して、分離抵抗性試験のpHは9.9～10.4と大きい。pH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、軽量混合土の打設量に対する水量が4倍であり、打設した混合土の形状を球体

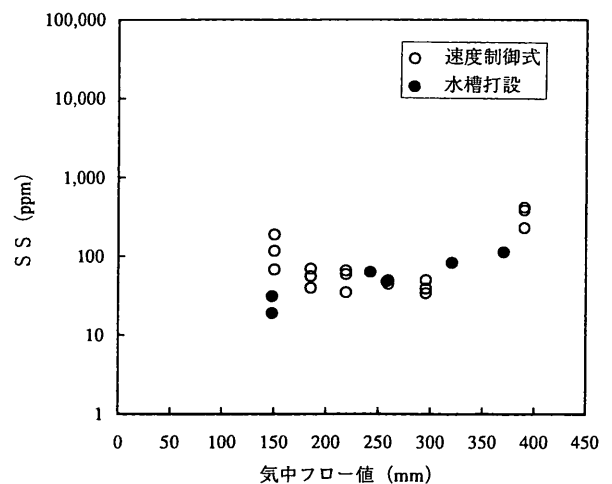


図-24 分離抵抗性試験と水槽打設実験の対応 (SS)

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-26は水中打設試料と気中打設試料の含水比の比率に関する比較である。水槽打設実験、分離抵抗性試験とも、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傾向を示しており、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。2つの試験結果の傾向は、全体としてよく一致しているといえる。

図-27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、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、密度差に関しては水槽打設実験と分離抵抗性試験の相関性が乏しい。

図-28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試験の強度比が0.70～1.03であり、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、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軽量混合土の動きの相違に関係すると考えられる。

4.3 実施工における材料分離抵抗性試験結果の指標値

前節において速度制御型分離抵抗性試験結果と水中打設試験の結果の対応が得られた。ここでは水槽打設試験

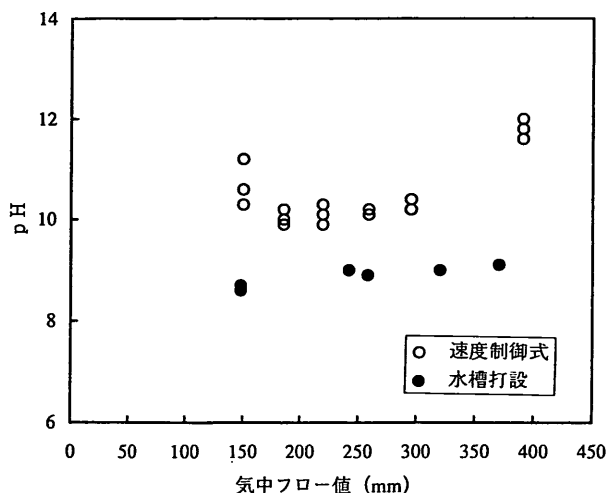


図-25 材料分離試験と水中打設試験の対応 (pH)

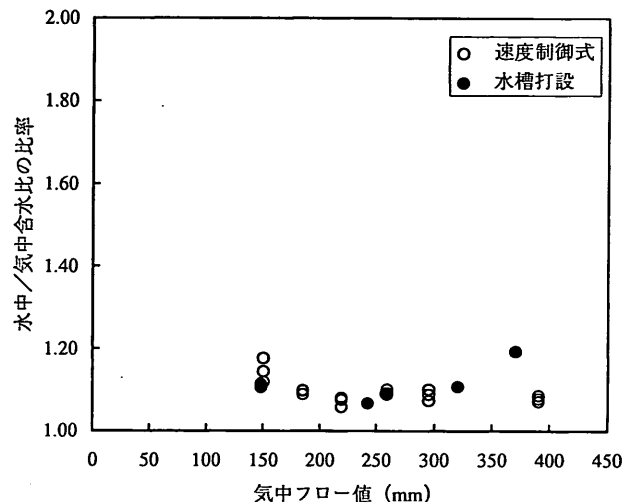


図-26 材料分離試験と水中打設試験の対応 (含水比)

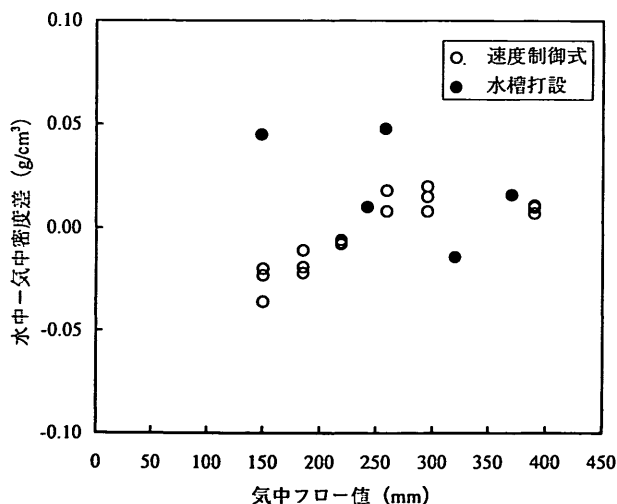


図-27 材料分離試験と水中打設試験の対応 (密度)

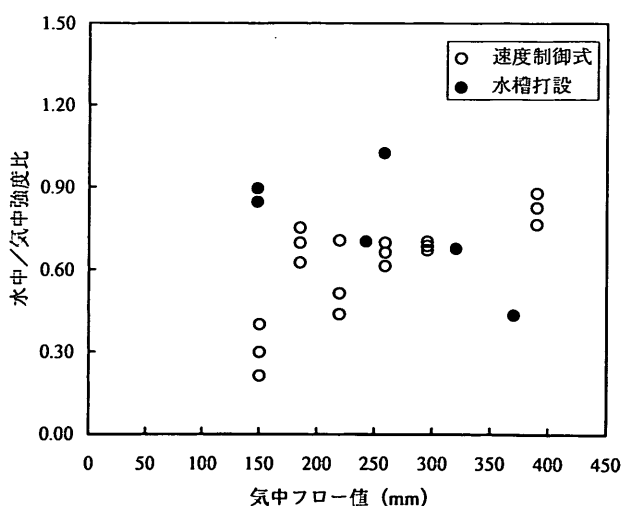


図-28 材料分離試験と水中打設試験の対応 (強度)

の結果をもとに実際の水中打設の施工における気泡混合土の品質の目標値について検討する。

海域における施工では環境に対する影響を発生させないことが必要である。水槽打設試験の測定値は軽量土の打設箇所から2mの距離である。軽量土の打設を締め切った水域で実施することを基本とすれば、外の海域への影響は内部の水域よりもさらに1オーダー程度は低減すると予想される。そこで、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（打設水域内において）以下の条件を満足することを考える。

「水槽打設実験における SS<100ppm, pH<9.3」

次に水中打設後の軽量混合土の満足すべき材料特性としては、気中でモールドに打設した試料に対する比あるいは差として以下の指標が考えられる。

「水槽打設試験の試料において、

密度 : 気中試料の密度の $\pm 0.05\text{g/cm}^3$

含水比 : 気中試料に対する含水比増加量10%以下。

強度 : 気中試料の材令7日における一軸圧縮強度の70%以上」

これらの値は水槽打設実験の結果に対する指標であるが、次に速度制御型分離抵抗性試験における同様の指標について検討する。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、上記の指標値に対応する値を今回の実験結果から設定すると以下ようになる。

「速度制御型分離抵抗性試験において、

SS : SS<100ppm

pH : pH<10.5

密度 : 気中試料の密度の $\pm 0.05\text{g/cm}^3$

含水比 : 気中試料に対する含水比増加量10%以下。

強度 : 気中試料の材令7日における一軸圧縮強度の50%以上」

これらの指標値から、今回実験に用いた原料土について、実施工において適用すべき気中フロー値と打設速度の組合わせを求めると、以下ようになる。

- ・気中フロー値 180mm~290mmの場合
打設速度 80cm/sec以下
- ・気中フロー値 150mm~180mmの場合
打設速度 100cm/sec程度

5. 打設管の形状の効果に関する水槽打設実験

これまでに行っている水中打設実験の結果によると、濁りを少なくし均一な地盤を形成するためには、以下の

条件を満足する必要がある⁷⁾。

- ・打設速度（筒先での流速）を適切に設定する。
- ・打設管周りの渦の発生を防止する。
- ・打設管筒先を適切に移動する。
- ・軽量混合土が流動する距離を短くする。

適切な打設速度は前章で述べた分離抵抗性試験の結果から求めることができるが、打設管の筒先に至る管内流速は施工において必要となる施工速度から決定されるので、管から出るときの打設速度は打設管の筒先形状の工夫によって調節することが必要になってくる。ここでは、筒先による打設速度の低減を行ったときの効果を水槽打設実験により確認する。実験は気泡混合土とビーズ混合土について行った。

5.1 実験方法

実験は、神戸ポートアイランド地先の泊地浚渫土（神戸港浚渫土2）を原料土とした軽量混合土の配合試験を行って配合を決定し、次に3種類の打設方式で連続して水槽内に打設した。実験に用いた水槽は、長さ4.8m×幅1.5m×高さ0.65mで、仕切板によって水槽内を3区画に仕切り、それぞれの区画に異なった打設方式で打設した。

実験装置の概略図を図-29に示す。考案した打設方式はトレミー管方式、カーテン方式、ラップ管方式の3種類であり、その概略図と特徴を図-30に示した。トレミー管方式とラップ管方式は筒先形状を拡大することによって打設速度を低減した方法である。また、カーテン方式は水槽壁面との間をシートで仕切ったエリアに打設土を充填し、下部からシートを押し広げながら打設する方式である。シートの下端から広がる流速は打設管の吐出速度よりも大幅に低減される。

実験の管内流速は、実施工（40m³/h）を想定して147cm/secとし、トレミー管方式、ラップ管方式の筒先における打設速度は1/10になるようにした。

原料土として用いた神戸浚渫土2の物理的性質を表-9に示す。原料土は、東京都晴海埠頭で採取した海水を用いて、液性限界の2.5倍（2.5W_L）および3.0倍（3.0W_L）に含水比を調整した。

5.2 気泡混合土の打設実験結果

配合は、目標密度を1.1g/cm³、目標一軸圧縮強度を6.0kgf/cm²（気中養生）として設定した。配合条件および混練直後の密度、気中フロー値を表-10に、材令7日と28日の密度、一軸圧縮強度を表-11(a)に示す。配合試験結果から3.0W_Lを基準に水中打設用の配合を決定する

ことにしたが、表-11(b)に示すように、原料土の有機分含有率が6.9%と高いため気泡が消泡することが判明し、気泡量を割増した。この結果、表-12のような配合で打設した。

気泡混合土は、バッチ式で600ℓを製造し、トレミー管

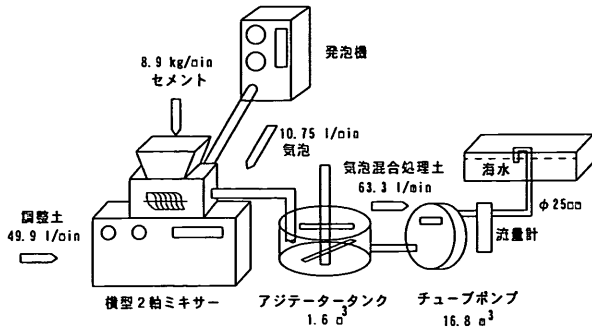


図-29 水中打設実験装置

方式、カーテン方式、ラップ管方式の順で順次打設した。混練直後のミキサー内および打設後のアジテータ内の混合土は、直接モールドに採取し20℃の湿空養生を行っている。また、水中打設した混合土は、5日間水槽中（屋外、平均気温5℃）で養生したあと、ブロック状に切り出してトリマー加工（ $\phi 5 \times h10\text{cm}$ ）を行い、加工後の供試体は20℃の湿空養生を行った。表-13は打設時の気泡混合土の密度、フロー値と打設後材令7日、28日の密度、強度、含水比の測定結果をまとめたものである。

打設時の密度はトレミー管方式の場合は混練直後であったため $1.09\text{g}/\text{cm}^3$ であったが、カーテン方式（混練後15分）、ラップ管方式（混練後30分）の打設時および打設終了後（混練後60分）の密度は、 $1.23 \sim 1.24\text{g}/\text{cm}^3$ と増加しており、配合で想定した以上の消泡が起こった。消泡の原因としては、原料土の有機物による影響の他、混合土の製造量に対して今回使用した機械の能力が過大

打設方式	概略図	打設流速	特徴
トレミー管方式		0.15 m/sec	打設管の下端に、吐出面積が約10倍の上向きの拡大キャップを取り付け、管内流速の約1/10の流速で溢れだすようにして打設する方式。 打設初期は水と接触する部分が多いが、混合土が山状になってくると混合土の中に打設することができる。 一つの場所にある程度打設すると、筒先を移動させて別の場所に打設する。
カーテン方式		1.47 m/sec	不透水性のシートを壁面に密着させ、上端からシートと壁面の間に混合土を充填し、その重量でカーテン状のシートを押し広げながら打設する方式。 打設管からの吐出流速が速い場合でも、水との接触による混合土の乱れは少ない。 ある程度打設すると、シートの下端から徐々に混合土が流出するが、吐出速度に比べ流速は非常に小さい。
ラップ管方式		0.15 m/sec	打設管の下端に、吐出面積が約10倍となるような60°に開いた拡幅管を取り付け、吐出速度を管内流速の約1/10にして打設する方式。 吐出速度と同じ速度で筒先を移動させ、混合土を置いていくようにして打設する。 筒先を移動させることにより、水と混合土の接触面での摩擦による混合土の乱れは少ない。

図-30 3種類の打設方式

表-9 原料土の物理的性質（神戸港浚渫土2）

土粒子の密度 (g/cm ³)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	有機物含有量 (%)
2.740	106.3	41.0	6.9

表-10 配合条件および混練直後の密度とフロー値

調整土含水比 (×WL) (%)	単位配合 (kg/m ³)			混合土密度 (g/cm ³)	気中フロー値 (mm)
	調整土	固化材	起泡剤		
2.5	973	120	7.17	1.12	152
3.0	954	120	5.74	1.12	195
	974	140	6.15	1.13	189

表-11(a) 気泡混合土の配合試験結果

調整土含水比 (×WL) (%)	固化材量 (kg/m ³)	材令7日		材令28日	
		密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)
2.5	120	1.14	6.34	1.13	10.20
3.0	120	1.14	4.14	1.14	6.39
	140	1.14	5.60	1.14	7.95

表-11(b) 気泡混合土の混練後の密度変化

調整土含水比 (×WL) (%)	固化材量 (kg/m ³)	混合土密度 (g/cm ³)				
		混練直後	15分経過後	30分経過後	45分経過後	60分経過後
2.5	120	1.12	1.20	1.24	1.24	1.27
3.0	120	1.12	1.17	1.18	1.22	1.23
	140	1.13	1.17	1.18	1.21	1.23

であったこと、製造後から打設するまでの間のアジータ内の攪拌の影響が考えられる。

材令7日および28日での密度をみると、トレミー管方式で打設したものが養生中に0.12g/cm³と増加したが、他の方式で打設したものは変化しなかった。水中打設後材令28日の密度は1.16g/cm³~1.24g/cm³であるが、この値は気中でモールドに打設して湿空養生した試料の値とほぼ等しく、打設管の吐出速度の調整によって打設前の密度が維持できたといえる。

水中に打設した混合土の一軸圧縮強度については、材令28日の強度に比べ材令7日の強度は非常に小さくなっている。打設した混合土は、5日間水槽内で5℃の水中養生を行った後に20℃湿空養生を行っているため、強度発現が遅れたものと考えられる。また、材令28日の強度は目標強度6.0kgf/cm²に比べて大きな値を示している

が、これは消泡による密度増加が関係しているものと考えられる。しかし、打設速度を十分低減させて行うことにより所要の強度の確保は可能であった。また、打設方式の相違による一軸圧縮強度の差はみられなかった。

表-14は打設時の水槽内のSSであるが、どの打設方式においてもSSの増加はわずかであり、材料分離はほとんどなかったと考えられる。

本実験は、神戸港ポートアイランド2期地区の震災復旧工事における水中打設の方法を検討する目的で実施さ

表-12 気泡混合土の水中打設実験用の配合

調整土含水比 (×WL) (%)	単位配合 (kg/m ³)			混合土密度 (g/cm ³)
	調整土	固化材	起泡剤	
2.8	954	140	7.72	1.10

表-13 気泡混合土の水中打設実験結果

打設方式	混練後経過時間	混合土密度 (g/cm ³)	混合土フロー値 (mm)	材令7日			材令28日			備考
				密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	含水比 (%)	密度 (g/cm ³)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	含水比 (%)	
気中モールド採取	0分後	1.09	230	1.11	3.32	168.1	1.11	6.17	181.2	
トレミー管方式	0分後	1.09	230	1.16	3.34	135.4	1.21	12.6	146.1	材令5日まで水中養生
カーテン方式	15分後	1.23	199	1.21	2.62	134.5	1.21	10.2	147.2	
ラッパ管方式	30分後	1.24	173	1.24	2.82	149.5	1.24	10.8	145.4	
気中モールド採取	60分後	1.24	173	1.24	8.34	128.5	1.23	17.2	147.5	

れた。本実験の結果、打設管筒先による打設速度の低減の有効性が確認されたので、実際の施工ではラップ管方式による図-31のような打設管が採用された。

5.3 ビーズ混合土の打設実験結果¹⁷⁾

ビーズ混合土の水中打設に関しては、松井ら¹³⁾によって水槽打設実験の報告がされているが、気泡混合土に比べると既往の知見はまだ少ない。今回、気泡混合土と同じ実験装置を使用してビーズ混合土の水槽打設実験を行った。

配合条件は、単位セメント量を気泡混合土と同じ $140\text{kg}/\text{m}^3$ とし、原料土は液性限界の3.0倍 ($3.0W_L$)、3.5倍 ($3.5W_L$) および4.0倍 ($4.0W_L$) に含水比を調整した(表-15)。水槽打設実験に用いる配合は、混練直後の密度、気中フロー値および樹脂製の箱 ($600\text{L} \times 350\text{B} \times 140\text{H}$) に10ℓずつトレミー方式で水中打設したときの状況から決定した。表-16にその結果を示すが、試験結果より水槽打設実験用の配合を表-17のように決定した。なお、ビーズの分離を防止するため固化材量を当初の値より10kg増量している。

打設後のビーズ混合土の性質を表-18にまとめて示す。混練直後に気中でモールド打設した試料はそのまま 20°C の湿空養生を行い、水中打設した試料は6日間平均気温 5°C の屋外で水中養生したあとブロック採取し、成形後に 20°C 湿空養生を行った。

堆積の状況はトレミー管方式とラップ管方式では吐出口から盛り上がり次に押し出しながら堆積する。カーテ

表-14 打設時のSSの測定値 (吐出口の上部30cmで測定)

打設方式	打設開始からの経過時間(秒)				
	0	30	60	90	600
トレミー管	45	55	60	60	60
カーテン	45	60	66	63	65
ラップ管	45	45	45	42	45

ン方式ではカーテンの下部から押し出して堆積する。打設したビーズ混合土は、トレミー管方式の場合に混合土が一部塊状で分離浮上し、また他の方式の場合にも発泡ビーズが若干分離して浮上した。浮上したビーズは金網で全量を捕集し、その量を計測した。表-18に分離して浮上したビーズの割合を示すが $0.9\% \sim 2.6\%$ であり、これは先に報告した小型水槽打設試験の結果⁷⁾と同様であった。

打設時の汚濁発生はトレミー管方式で大きく、SSの測定が不可能であった。カーテン方式は拡幅しない打設管を直接水中に打設するが、カーテンの内側では汚濁と

表-15 ビーズ混合土の配合条件

調整土含水比 ($\times W_L$) (%)	単位配合 (kg/m^3)			目標密度 (g/cm^3)
	調整土	固化材	発泡ビーズ	
3.5	1,036	150	7.8	1.10

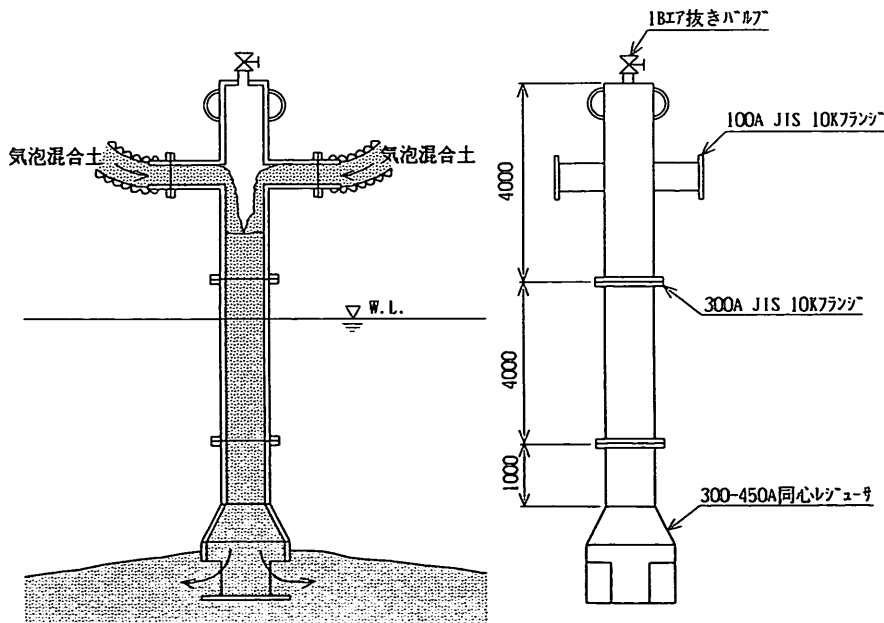


図-31 神戸港PI工事における打設管の形状

表-16 ビーズ混合土の水中打設状況

調整土 含水比 (×W _L) (%)	混合土 密度 (g/cm ³)	混合土 F ₀ -値 (mm)	観察状況
3.0	1.20	138	①流動性が悪く、自然流下せず、水中打設困難 ②圧力をかけて管から流出させるとビーズが分離した
3.5	1.14	176	①流動性良好 ②ビーズの浮上分離は僅かであった
4.0	1.13	247	①流動性良好 ②ビーズの浮上分離はやや多かった

分離が発生したがカーテンの外ではビーズ混合土が安定して吐出しSSは45ppmであり使用した海水のSS(30ppm~40ppm)からの増加は非常に小さかった。また、ラップ管方式では濁りがほとんどなく、SSの増加は認められなかった。

水中打設したビーズ混合土の密度、一軸圧縮強度、含水比をモールドに気中打設した試料と比較すると、密度、含水比とも大きな変化はなかったが、ラップ管方式の場合に若干密度が増加した。水中打設した試料の一軸圧縮強度(材令28日)は気中打設の強度の40%前後であるが、これは養生の初期に温度が小さいことなどの影響により強度発現が遅れたことが考えられる。表-19に水中打設した試料の各部位における密度をまとめたが、全体に均一な打設が行われたと判断できる。

ビーズ混合土は、作製時のビーズの均一な混合が気泡混合土に比べるとやや難しく2%程度のビーズが分離して浮上する。吐出口で打設速度を調整させて水中打設を行えば、所要の品質を確保することが可能である。3種

表-17 水槽打設実験に用いた配合

調整土含水比	設計密度	調整土	高炉セメントB	発泡ビーズ
3.5W _L	1.10g/cm ³	1036kg/m ³	150kg/m ³	195g

表-18 水中打設実験結果のまとめ

打設方式	混合土 密度 (g/cm ³)	混合土 F ₀ -値 (mm)	材令7日			材令28日			備考
			密度 (g/cm ³)	一軸圧縮 強度 (kgf/cm ²)	含水比 (%)	密度 (g/cm ³)	一軸圧縮 強度 (kgf/cm ²)	含水比 (%)	
気中 モールド採取	1.12	159	1.11	6.04	162	1.11	10.1	158	
トレミ管 方式			1.14	-	-	1.11	4.46	160	分離ビーズ 0.9%
カーテン 方式			1.13	0.57	173	1.09	3.88	164	分離ビーズ 2.6%
ラップ管 方式			1.21	1.06	164	1.19	4.33	162	分離ビーズ 2.3%

類の打設方式の中では、打設時の状況からラップ管方式が最も効果的であったといえる。

表-19 各部位における密度

打設方式	吐出口 付近	吐出口と打設先端の間			打設土の 最先端
		上端	中間	下端	
トレミ管方式	1.14	1.13	1.15	1.14	1.15
カーテン方式	1.18	1.15	1.15	1.18	1.19
ラップ管方式	1.17	1.18	1.16	1.16	1.16

6. 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ような結果を得た。

- 1) Jロートを使用した材料分離抵抗性試験によると、気泡混合土の場合、打設後における海水のSSとpH、水中打設時の密度、含水比、強度と気中打設時の値との比較が材料分離の影響を表している。しかし、Jロー

トによる分離抵抗性試験は、試験中に流下速度が変化する、気中フローが低い場合に自然流下しないなどの問題点がある。

- 2) 打設流速制御型の分離抵抗性試験は、広範囲の含水状態における気泡混合土を一定の速度で水中に打設する試験が可能であり、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。
- 3) 速度制御型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。
- 4) 分離抵抗性試験により水中打設に適した軽量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る。
 - ・ SS<100ppm
 - ・ 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強度比が0.5以上
 - ・ 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
- 5) 今回使用した浚渫土を原料土とする場合は、気泡混合土の気中フロー値が180~290mmの範囲で、100cm/sec以下の打設速度の場合に良好な水中打設ができる。
- 6) 気泡混合土の水中打設時の気中フロー値としては300mmが上限と考えらる。気中フロー値が150mm程度の場合には打設速度が150cm/sec以上の場合に良好な打設が可能である。
- 7) 水中打設実験の結果、打設管の吐出部の形状を3種類の方法で拡張し打設速度を15cm/secとすることによって良好な打設ができることが確認された。

参考文献

- 1) 奥村樹郎・土田孝・岸田隆夫・長坂勇二・古屋俊明(1994)：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，pp.2399-2402.
- 2) T.Tsuchida (1995) :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.
- 3) 土田孝・横山裕司・水上純一・清水和也・笠井寿太郎(1996)：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.

- 4) 土田孝・笠井寿太郎・水上純一・横山裕司・植田和徳(1996)：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.
- 5) 土田孝・長井興治・湯川雅之・岸田隆夫・山本実(1996)：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.
- 6) 湯怡新・土田孝・竹内大輔・鏡田昌孝・西田登(1996)：軽量混合土の三軸試験結果と考察，港湾技研資料，No.888.
- 7) 土田孝・輪湖建雄・菊池喜昭・東俊夫・新舎博(1997)：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.
- 8) 櫻井裕一・安藤憲一・吉原正博(1991)：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，pp.2207-2210.
- 9) 吉川元清・香取匡貴(1995)：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，pp.2509-2510.
- 10) 深井大二郎・黒山英伸(1994)：気泡混合土の水中打設(その1)，第49回土木学会年次学術講演会，pp.1522-1523.
- 11) 黒山英伸・深井大二郎(1994)：気泡混合土の水中打設(その2)，第49回土木学会年次学術講演会，pp.1520-1521.
- 12) 土田孝・奥村樹郎・井上茂・橋詰文伯・高橋但・八木英樹(1994)：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，pp.2413-2414
- 13) 松井創・湯川雅之・掛橋隆晴・塩坂健・森晴夫(1994)：発泡ビーズ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，pp.2387-2388.
- 14) 田中政典・佐藤正一・井上茂・堀隆・石谷和宏(1995)：気泡混合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，pp.2485-2488.
- 15) 石塚浩次・佐藤正一・長谷川博・古谷俊明・別所友宏(1995)：気泡混合処理土の小型水槽打設実験(その2)，pp.2489-2492.
- 16) 土田孝・稲垣紘史・今井友宏・長谷川博・北森一郎・稲葉清美(1996)：三種類の打設方式による気泡混合処理土の水槽打設実験，第31回土質工学研究発表会，pp.2487-2488.
- 17) 菊池喜昭・佐藤正一・内山正美・長坂勇二・堀隆・

掛橋隆晴(1996)：三種類の打設方式による発泡ビーズ混合処理土の水槽打設実験，第31回土質工学研究発表会，pp.2489-2490.

- 18) 田中政典・竹内大輔・新舎博・佐々木宏二・吉原正博(1996)：気泡混合処理土の密度調整に関する検討，第31回土質工学研究発表会，pp.2491-2492.

謝 辞

本資料は，港湾技術研究所と(財)沿岸開発技術研究センターを代表とする共同研究グループによる共同研究の成果の一部である。本資料のとりまとめにおいては，著者以外の共同研究のメンバー，特に施工ワーキンググループの方々の検討や討議を参考にさせていただいた。また，本研究で述べた実験の一部は神戸港震災復興事業における軽量土の適用検討を直接の目的として実施されており，実験条件の設定や粘土試料の採取，結果の解釈において及川研前設計部長をはじめとする運輸省第三港湾建設局神戸港震災復興事業本部の方々の多大なご協力を得た。また，本成果は(財)沿岸開発技術研究センターによる「軽量土の活用検討技術委員会」において討議していただき，特に座長の奥村樹郎岡山大学教授には研究の進め方について丁寧なご指導をいただいた。以上の，協力をいただいた方々に深く感謝の意を表します。

(1997年9月30日受付)

港湾・海洋環境を対象とした軽量混合地盤材料の開発に関する共同研究参加者：

運輸省港湾技術研究所，(財)沿岸開発技術研究センター，(株)エス・エル・エス，(株)大本組，クボタ建設(株)，国土総合開発(株)，五洋建設(株)，佐伯建設工業(株)，清水建設(株)，住友・大阪セメント(株)，積水化成品工業(株)，大都工業(株)，大日本インキ化学工業(株)，秩父・小野田セメント(株)，東亜建設工業(株)，東洋建設(株)，西松建設(株)，日本国土開発(株)，日本セメント(株)，不動建設(株)，(株)本間組，三井不動産建設(株)，三菱油化(株)，りんかい建設(株)，若築建設(株)

港湾技研資料 No.884

1997・12

編集兼発行人	運輸省港湾技術研究所
発行所	運輸省港湾技術研究所 横須賀市長瀬3丁目1番1号
印刷所	横浜ハイテクプリンティング株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1997) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所所長の文書による承認を得ずしてこれを行なってはならない。