

水中打設するソイルセメント工法に関する研究(その4)

—— 大型水槽を用いたポンプ打設実験 ——

株式会社 大林組 技術研究所 正会員 喜田 大三
同 上 正会員 久保 博
同 上 正会員 漆原 知則

1. まえがき

近年、海洋空間の有効利用が進むにつれて、各種の用途、形状の人工島が建設されている。その1つとして、海洋における橋梁、トンネルなどの工事に際して建設される人工島がある。そのような人工島では、安定な地盤を早期に必要とすることが多い。このための従来の代表的な工法は、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工法などによって改良する工法である。

「水中打設するソイルセメント工法」とは、従来工法のように土砂を埋立てたのち地盤改良するのはでなく、あらかじめ土砂にセメントなどを混合して流動状にしたソイルセメントを水中に打設し、そのまま固化させる新しい工法である。この工法では、水中打設時にソイルセメント中の微細粒子の分離を抑えることが特に重要であり、分離低減などの効果をもつ添加剤（ここでは、粘結剤という）を通常、使用する。本工法を開発した目的は、以下のようなことにあった。

- ① 均一な埋立て固化地盤を造成し、トンネルや地下連続壁の掘削などを行なう場合の作業性を向上させる。
- ② 固化強度を任意にコントロールし、掘削や撤去などに適した強度の地盤にする。
- ③ 埋立て後の締固めやセメント深層混合などの地盤改良工事を不要とし、工期を短縮させる。
- ④ 用途に応じた各種の形状、面積の固化地盤を造成できるようにする。
- ⑤ 埋立て材料として自硬性のものを用いて、締切り壁にかかる土圧を低減し、締切り構造を簡易化する。
- ⑥ 現地で発生する土砂などの材料を最大限に利用できるようにする。
- ⑦ 埋立て時の水質汚濁を最小限に抑える。

本工法の施工例として、本四架橋児島～坂出ルートの北浦橋梁の海中基礎3基を地下連続壁基礎によって施工するのに先立って行なわれた築島工事において、昭和60年12月～61年2月に約7000m²のソイルセメントをコンクリートポンプ車で水中打設した工事がある。この工事で使用した土砂は、現地のまき土であった。ソイルセメントは、目標の強度（ $qu_{28日} = 10 \text{ kgf/cm}^2$ 以上）に硬化し、地下連続壁を短期間で確実に施工し、また基礎完成後に築島を撤去するのに所期の機能を発揮できた。

本工法について、その後も種々の実験を行なった結果、本工法は各種の土砂やそれに代る材料の使用が可能であり、より厳しい条件下にも適用可能であることを見出した。ここに報告する水槽打設実験は、山砂を主材とするソイルセメントを海中に打設する際のソイルセメントの配合や打設条件が、打設時の水質、打設面形状および固化体の密度・強度などに与える影響を調査したものである。

2. 供試材料と実験方法

2.1 供試材料

(1) 土砂 千葉県富津市の山砂を使用した。その含水比は、8.5～10.2%であった。また、粒度試験結果を図-1に示すように、平均粒径（ D_{50} ）が0.31mmであり、均等係数が2.4と非常に小さく、粒度がよくそろっていることが特徴的である。土粒子の比重は、2.65であった。

(2) セメント 普通ポルトランドセメントを使用した。

(3) 粘結剤 主剤（セルロースエーテル系）と副剤を配合して使用した。いずれも毒性はない。粘結剤を水に溶解すると、高粘性の液体が得られる。

(4) 混練水 ソイルセメントの混練水として、人工海水を用いた。人工海水は、天然海水中の主要塩類と同じ濃度になるように水道水に4種類の塩類それぞれ溶解して作製した（表-1参照）。

(5) 打設水槽内の水 混練水と同じく人工海水を用いた。

2.2 実験ケース

実験ケースとして、表-2に示す計12ケースを設定した。これらのケースの

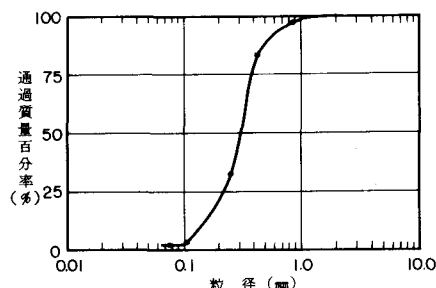


図-1 土砂の粒径加積曲線

塩 類	添加量(kg/m ³)
NaCl	27.7
MgCl ₂	3.4
MgSO ₄	2.2
CaSO ₄	1.4

表-1 人工海水の組成

実験 No	1 m ² 当りの 配合				目 標		吐出口 高 ぎ (cm)	打継ぎ *4
	山砂 ^{*1} (kg)	セメント (kg)	粘結剤 ^{*2} (kg)	水 ^{*3} (ℓ)	スランブ (cm)	高 ぎ (cm)		
1	1,340	200	4.5	435	22	50		
2	1,310	200	4.5	445	25	50		
3	1,270	200	4.5	460	27	50		
4	1,270	200	9.5	460	25	50		
5	1,330	200	1.5	440	25	50		
6	1,310	200	4.5	445	25	25		
7	1,310	200	4.5	445	25	75		
8	1,310	200	2.0	445	25	25		
9	1,310	200	2.0	445	25	50		
10	1,310	200	2.0	445	25	75		
11	1,320	150	4.5	460	25	50	○	
12	1,340	150	2.0	450	25	50	○	

*1 乾土で表示 *2 主剤+副剤 *3 土砂中の水+添加海水
*4 No.2とNo.11 にNo.12 を打継ぎ

表-2 実験ケース

組合せによって、打設時の水質、打設面形状、固化体の性状などに対する下記の要因の影響を調査した。

- ① 打設前のソイルセメントの流動性（スランブ）
・・・No.1、2、3
- ② 粘結剤の添加量。セメント200kg/m²の場合
・・・No.5、9、2、4、
- ③ 粘結剤の添加量。セメント150kg/m²の場合
・・・No.12、11、
- ④ 打設管の吐出口の高さ。粘結剤4.5kg/m²の場合
・・・No.8、2、7
- ⑤ 打設管の吐出口の高さ。粘結剤2kg/m²の場合
・・・No.8、9、10
- ⑥ 打継ぎ・・・ No.11、12

なお、打設管の吐出口の高さとは、吐出口と水槽底面との間隔であり、吐出口の高さは各ケースで打設中を通じて固定した。

2.3 混練・打設方法

ソイルセメントの混練・打設方法を図-2に示す。同図のように、27m²角水槽に対して1ケース当たり約2m²のソイルセメントをコンクリートポンプ車によって打設した。このように本工法では、コンクリートやモルタルに用いる機械を使用でき、特殊な機械を必要としない。

なお、打設管は、打継ぎの場合を除き、図-3のように水槽のコーナー部に固定した。そして、ソイルセメント打設後に水質を調査し、試料採取用塩ビ管を建て込み、2～3日後に海水を回収し、塩ビ管を引き抜いた。回収した海水は、次の実験に転用した。

2.4 調査項目と方法

調査項目と方法を表-3に示す。調査は、打設

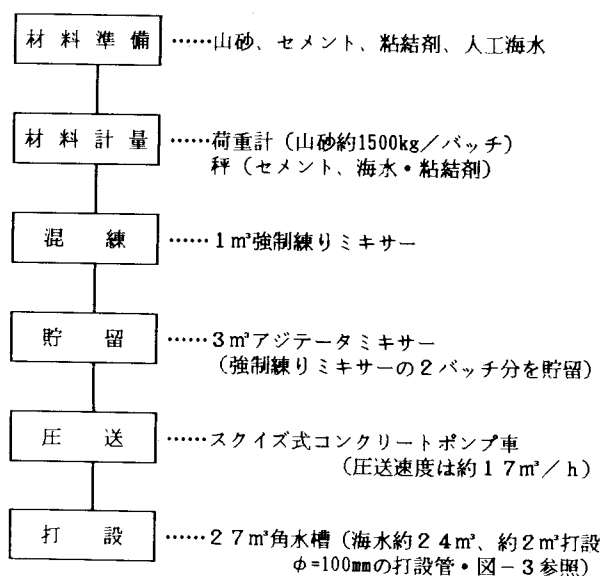


図-2 ソイルセメントの混練・打設方法

調査項目	試 料	方 法 な ど
打設前の性状	スランブ	アジテータミキサーから採取 JIS A 1101
	密度	同上 500cm ³ 容器に詰めて質量測定
	含水比	同上 JIS A 1209
	一軸圧縮強度 (室内養生後)	同上 φ50×h100モールドに詰めて20℃水中養生、材令28日
水質	pH	打設前：1箇所 打設後：5箇所×2深度* ガラス電極式pH計
	濁 度	上記試料を利用 濁度計
打設後の性状	湿潤密度	水質調査後、図-3に示すような位置に塩ビ管(φ=10cm)を建て込み、硬化後に引き抜き、20℃水中で材令28日まで養生 高さ約20cmに成形し、体積と質量から算出
	一軸圧縮強度	同上 上記試料の両端面を石膏キャッピングして試験
	含水比	同上 一軸圧縮試験後の供試体の一部で試験
	打設形状	水槽内のソイルセメント固化体 ソイルセメント面の高さを50cmメッシュで測定
打継ぎ面		ソイルセメント断面を観察

* 打設管位置から水槽の対角線上に0.7, 2.1, 3.5, 4.9, 6.3mの5箇所。各地点における1/4水深 3/4水深の2水深。

表-3 調査項目と方法

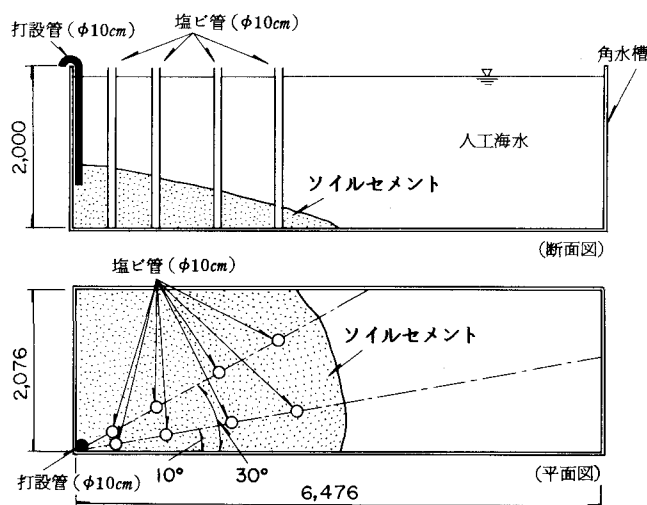


図-3 打設管および塩ビ管の位置

前ソイルセメントの性状に関する事、打設直後の水質に関する事、水槽に打設されたソイルセメントの性状に関する事からなる。なお、ここで、打設前のソイルセメントをモールドに詰めて水中養生した場合の強度を水中打設強度、

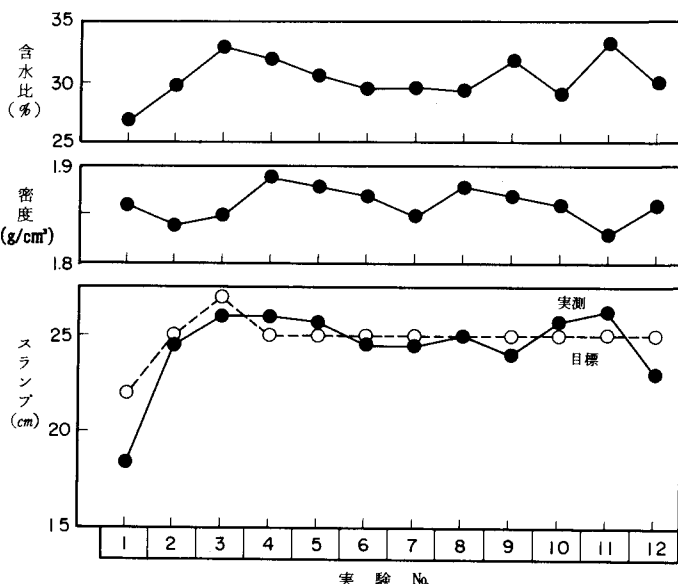


図-4 打設前のソイルセメントの性状

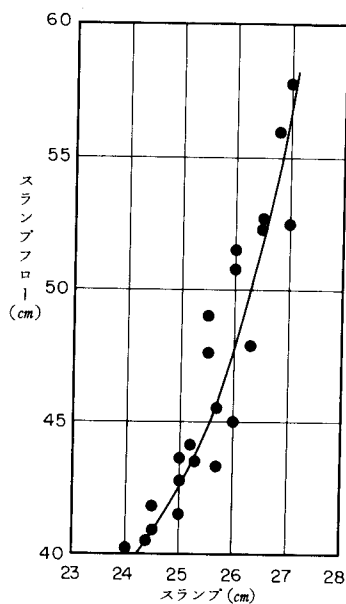


図-5 ソイルセメントのスランプとフローの関係

また水槽内から塩ビ管で採取し養生した場合の強度を水中打設強度という。

3. 結果と考察

3.1 打設前のソイルセメントの性状

打設前のソイルセメントの性状を図-4に示す。同図のように、スランプは、目標の値にかなり近似した値が得られた。そして、スランプとスランプフロー（スランプ試験で広がったソイルセメントの円の直径）との間には、図-5のような関係が認められた。

また、ソイルセメントの含水比は、配合によって異なり、28～32%の範囲にあった。さらに、ソイルセメントの湿潤密度は、1.84～1.89 g/cm³の範囲にあった。

3.2 打設直後の水質

(1) pH この実験では、海水量約24m³に対してソイルセメント約2m³を打設しており、体積比として約8%であった。そして、この実験では、水槽内の海水を転用したため、実験ケース間で打設前のpHが大きく異なる場合があり、そのようなケース間ではpHの上昇程度を比較困難であった。したがって、打設前のpHが類似しているケース間で比較した。

結果の一部として、粘結剤量の異なる4ケースのpHを図-6に示す。pHは、水槽内の10か所で調べたが、場所による差が小さかったので平均値で示した。図中のNo.5とNo.4、またNo.9とNo.2を比較すると、pHの上昇は粘結剤を増すと軽減されることが認められた。このことは、粘結剤が打設時のセメント分の水中への分離を抑制することによると考えられる。なお、pHの上昇程度に対する吐出口高さ、スランプ、セメント量などの影響は、明瞭でなかった。

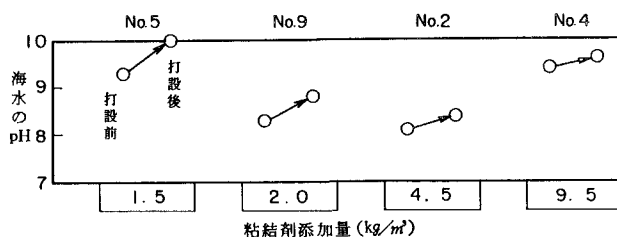


図-6 打設前・後のpHの例

(2) 濁度 打設に伴う濁度の増加分、すなわち打設後の濁度から打設前の濁度を差引いた値（各ケースそれぞれ平均値）を図-7に示す。なお、打設前の濁度は、20～80度であった。

打設による濁度の増加は、全体を通じて約10～30度の範囲にあり、濁りとしてかなり低いレベルにあった。

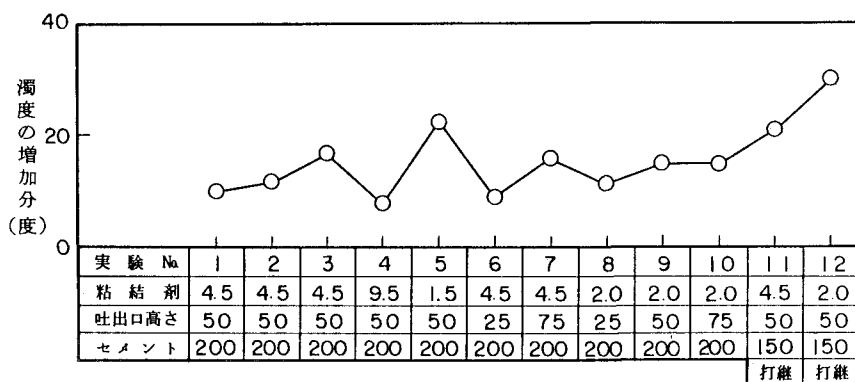


図-7 打設に伴う濁度の増加

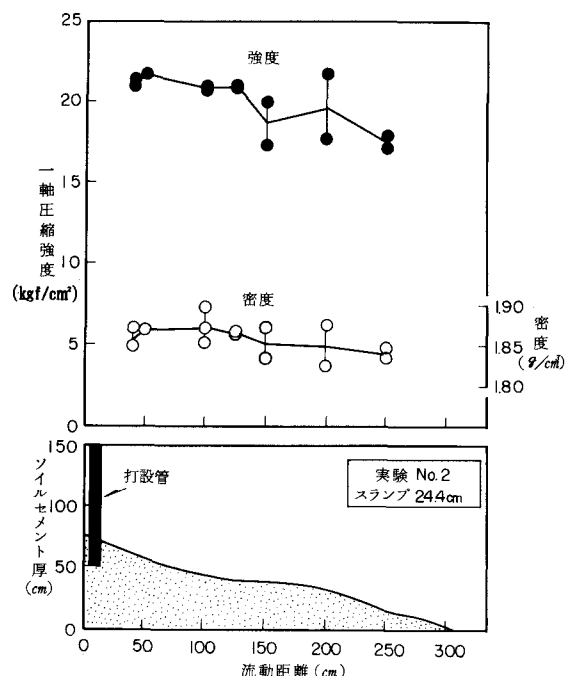
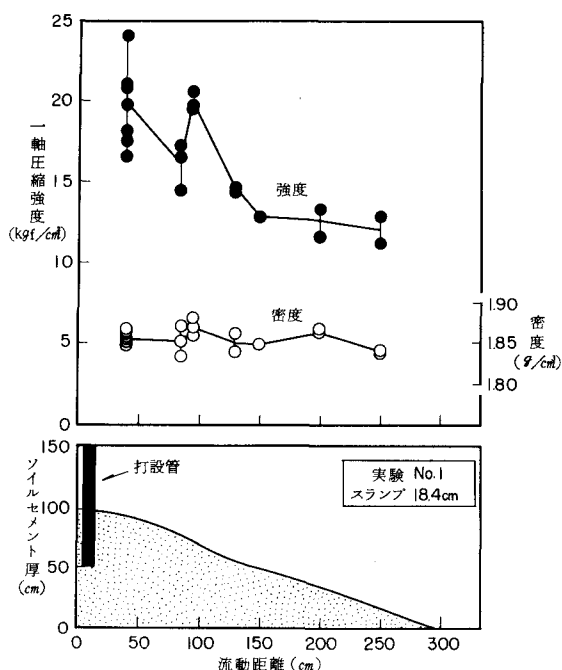


図-8 水中打設ソイルセメントの形状と性状(No.1) 図-9 水中打設ソイルセメントの形状と性状(No.2)

そして、詳細に比較すると、稠度の増加は粘結剤を多く添加するほど(No.5,9,2,4の順)、また吐出口の高さを低くするほど(No.7,2,8の順)、やや抑制された。

3.3 ソイルセメント打設面の形状

打設面形状(図-3における30°線の断面)の例として、No.1,2,3のケースの形状をそれぞれ図-8、9、10に示す。これらの図では、吐出管からの各位置の一軸圧縮強度、湿潤密度も併記しており、各位置における多数の点は10°線、30°線での異なる試料深さの値を示している。強度、密度については次項に述べる。

ケースNo.1,2,3は、セメント量や粘結剤量などが同じで、スランプ(水量で調製)のみ異なる。図-8~10に見られるように、打設面の勾配は、スランプの増大に伴って緩やかになった。すなわち、スランプ18.4cmのNo.1では18°の勾配であったが、スランプ24.4cmのNo.2では12°の勾配に減少し、さらにスランプ26.0cmのNo.3では7°の勾配まで減少して流動距離が4mまで達した。

また、図-11には、全ケースを通じてみたスランプと打設面形状の関係を示す。セメント150~200kg/m³・粘結剤4.5kg/m³のケース(No.1,2,3,6,7,11)では、勾配は、スランプの増大とともに明瞭に緩やかになった。そして、同一スランプであっても、粘結剤が2kg/m³(No.8,10)、1.5kg/m³(No.5)と減少するのに伴って、勾配が急に

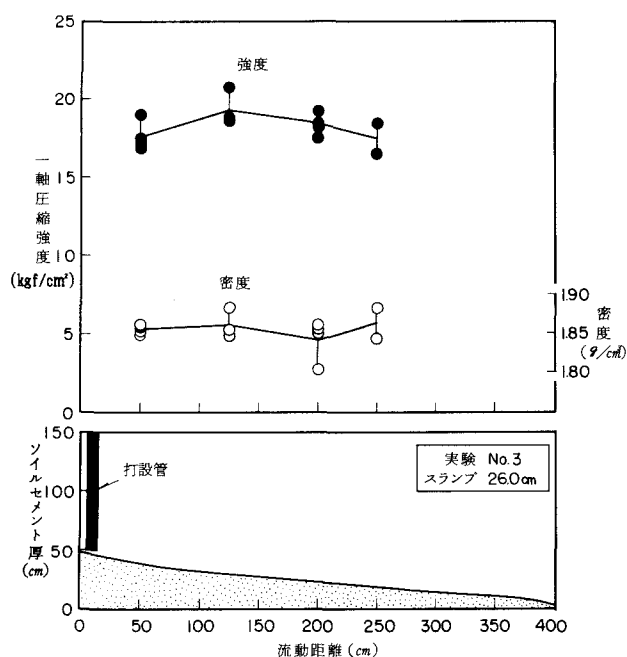


図-10 水中打設ソイルセメントの形状と性状(No.3)

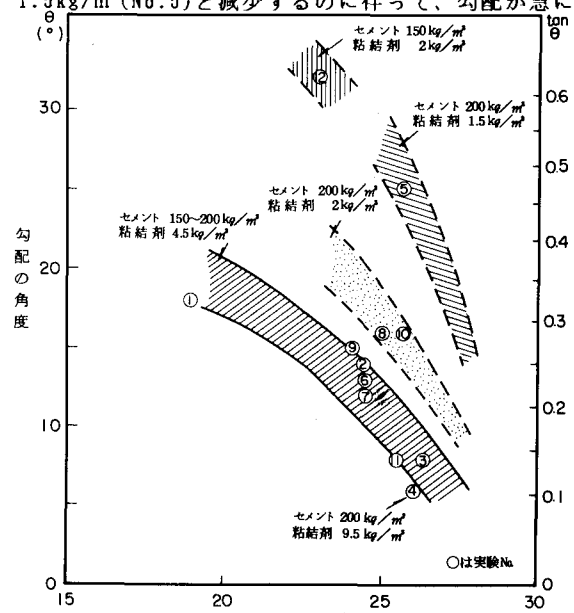


図-11 スランプと打設面勾配の関係

なることが認められた。このように、実施工において打設要領を決める際に重要である打設面形状は、スランプが大きいほど、また粘結剤が多いほど緩やかになることが判明した。

さらに、実験数が少なく詳細は不明であるが、セメント 150kg/m^3 ・粘結剤 2kg/m^3 のNo.12はセメント 200kg/m^3 ・粘結剤 2kg/m^3 のNo.8,10に比べて急勾配であることから打設面の勾配にセメント量も関与する可能性が示唆された。

3.4 水中打設ソイルセメントの強度

ケースNo.1～3の水中打設強度を図-8～10に示した。No.1およびNo.2の強度は、吐出管の付近では大きく、吐出管から離れるのに伴って減少しており、その傾向はNo.2よりもNo.1の方が著しかった。一方、No.3の強度は、吐出管からの距離にほとんど影響されなかった。また、これらの強度のばらつきを変動係数によって表わすと、No.1で21%、No.2で8%、No.3で6%であった。これらのことは、打設面の形状と大いに関係がある。すなわち、水中打設強度は、打設面の勾配が最も緩やかなNo.3、次いでNo.2、No.1の順に、打設管からの距離に伴う強度低下が少なくなり、強度のばらつきも小さくなることが判明した。

また、ケースNo.1～10における打設面のモデル化した勾配と吐出管からの距離ごとの平均強度を図-12に示す。同図にみられるように、No.1～3だけでなく、全ケースを通じて、打設面の勾配が緩やかであるほど、打設管からの距離に伴う強度低下が少なかった。また、例えば、No.5とNo.2の比較から、粘結剤が多いほど、打設管からの距離に伴う強度低下が少ないことが示唆された。流動距離に伴う強度低下は、水中コンクリートでもみられる現象であるが、上述のようにソイルセメントに適量の粘結剤を添加し、適度の流動性を与えた配合で打設すれば、それを問題にならない程度に抑制できると考えられる。

なお、結果の詳細を示さないが、水中打設されたソイルセメントの各位置における深さ方向の強度は、大差がなく、ほぼ一定であると認められた。

また、セメント添加量と強度の関係を図-13に示す。水中打設強度(q_u 28日)は、セメント量とともに増大し、セメント 150kg/m^3 では $9\sim 10\text{ kgf/cm}^2$ 、セメント 200kg/m^3 では $17\sim 18\text{ kgf/cm}^2$ であった。同図には、気中打

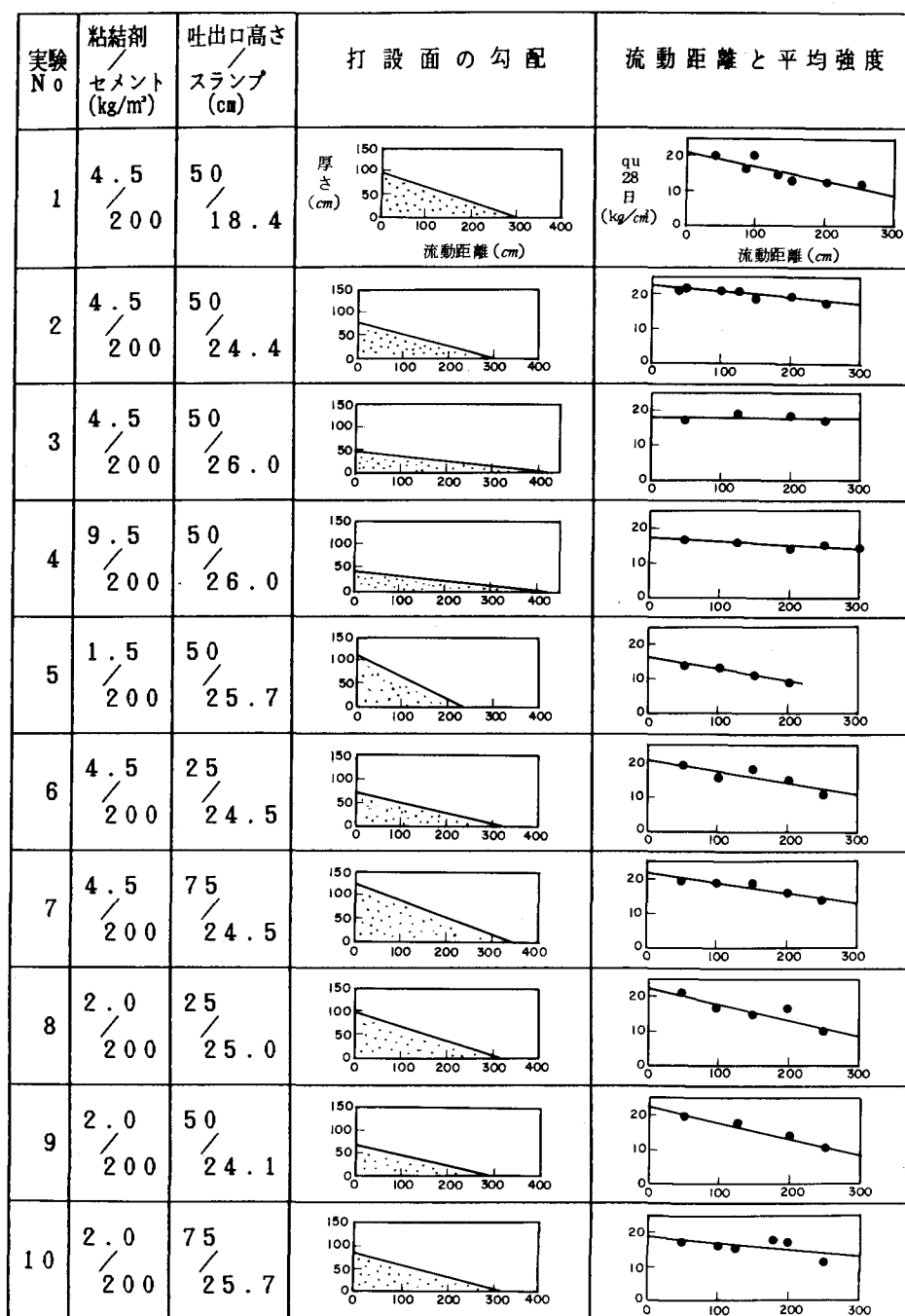


図-12 各ケースにおける水中打設ソイルセメントの勾配と強度

設強度も併記しているが、水中打設強度は、気中打設強度よりもやや小さい値を示した。

図-14には、粘結剤添加量と強度の関係を示す。水中打設強度(q_u 28日)は、粘結剤 2kg/m^3 と 4.5kg/m^3 で類似しており、粘結剤 1.5kg/m^3 でやや小さかった。一方、同図に併記した気中打設強度は、粘結剤量によってほとんど影響されなかった。このように粘結剤が少ない場合、水中打設時の分離などのため、水中打設強度がやや低下した。

また、結果を省略するが、この実験の範囲では水中打設強度に対する吐出口高さやスランプの影響は大きくなかった。

3.5 水中打設ソイルセメントの密度・含水比

No.1~12のソイルセメントの湿潤密度および含水比は、それぞれ $1.82\sim 1.91\text{ g/cm}^3$ および $24\sim 31\%$ で、気中打設した固化体とほぼ類似していた。また、湿潤密度および含水比は、流動方向や深さ方向において大きな差異はみられず、ほぼ一定であった。

3.6 打継ぎ面の性状

No.2の上にNo.11、さらにその上にNo.12を打継いだ部分の断面を切って観察した結果、打継ぎ面はよく密着していた。また、No.11の表面にV字型の溝を掘っておき、その溝部の密着を調べた結果、ソイルセメントは溝にもよく充填されていた。

4 まとめ

大型水槽へのポンプ打設実験によって、山砂を主材とするソイルセメントを水中打設する際の配合や打設条件が水質、打設面形状および固化体の性状に及ぼす影響などを調査した。

(1) ソイルセメントの圧送、打設を考慮して、スランプを設定し、実験ではスランプを $18\sim 26\text{cm}$ にした。その密度は $1.84\sim 1.89\text{ g/cm}^3$ 、また含水比は $28\sim 32\%$ であった。

(2) 打設によるpHの上昇および濁度の増大は、いずれのケースでも比較的小さく、粘結剤の多いケースでは特に小さかった。

(3) ソイルセメントの打設面の勾配は、スランプが大きいほど、また粘結剤量を増すほど緩やかになった。

(4) 打設したソイルセメントの密度や含水比は、深さ方向および打設管からの距離方向にほぼ一定であった。また、強度は、深さ方向にほぼ一定であった。そして、強度と打設管からの距離との関係には、打設面勾配が関与し、打設面勾配が緩やかな場合、打設管からの距離による強度低下はほとんどなかった。

(5) 水中でのソイルセメント打継ぎ面の断面を観察した結果、よく密着していた。

以上、ソイルセメントに粘結剤を使用し、適切な配合にすることによって、ほとんど分離することなく、緩やかな勾配で水中に打設でき、密度や強度の均一な固化地盤の早期造成が十分に可能と考えられる。

参考文献

- 1) 喜田、久保、漆原：水中打設するソイルセメント工法の研究（その1）、分離低減用としての粘結剤の比較検討、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集、第3部、PP.225~226、1986
- 2) 喜田、久保、漆原：水中打設するソイルセメント工法の研究（その2）、ソイルセメントの配合と性状の関係、土木学会第41回年次学術講演会講演概要集、第3部、PP.227~228、1986
- 3) 喜田、久保、漆原：水中打設するソイルセメント工法の研究（その3）、小型水槽におけるポンプ打設実験、第22回土質工学研究発表会、1987、（投稿中）

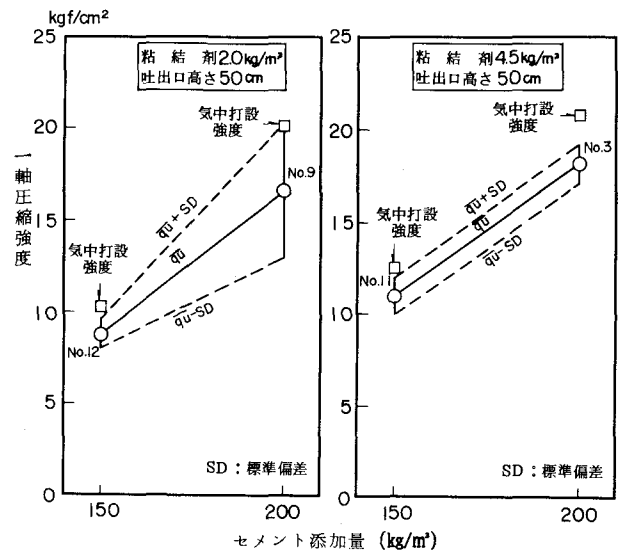


図-13 セメント添加量と強度の関係

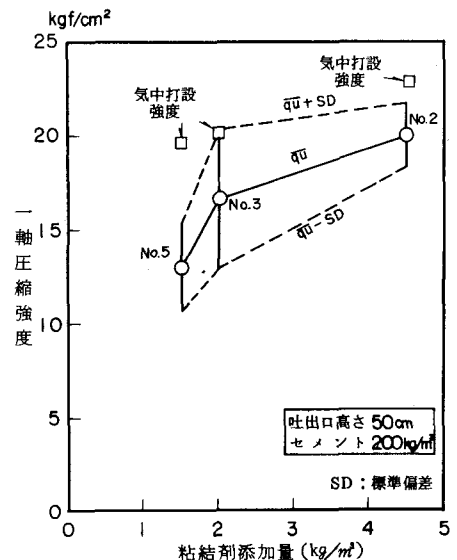


図-14 粘結剤添加量と強度の関係