

鉄塩を主成分とした凝集沈澱剤の凝集沈降特性について

車田 佳範* 小久保 裕**

新舎 博* 藤原 敏光*

要 旨

2価または3価の鉄塩およびアルカリ希土類を主成分とした凝集沈澱促進剤は、従来浚渫埋立工事においてよく用いられているアルミニウム塩を主成分とした凝集剤と比較して凝集性、沈降速度に優れると報告されている。そこで、鉄塩を主成分とした凝集剤を利用した埋立においては、土の圧密特性が改善されることによる投入土量の増大、さらには造成地盤の早期利用が考えられたため、それを確認するために一連の室内試験およびケーススタディを行った。

その結果、鉄塩を主成分とした凝集剤は、凝集沈澱促進剤としては有効であるが、土の圧密特性を変化させ投入土量を著しく増加するまでの効果は有しないことがわかった。

1. まえがき

ポンプ船による浚渫埋立工事においては、埋立地内に堆積するスラリー泥土の沈降促進および余水の清浄化を目的に凝集沈澱促進剤が使用される。従来より、凝集剤としてはアルミニウム塩を主成分とするもの(以下、ACとする)がよく利用されているが、近年、アルミニウムの人体への悪影響が指摘されており¹⁾、それに代わり鉄塩を主成分とした凝集剤(以下、FCとする)が使用されることも多くなってきている。

FCは、2価または3価の鉄塩およびアルカリ希土類を主成分とした凝集沈澱促進剤であり、従来のACと比較して、初期沈降速度が大きい、透水係数が大きく圧密性に優れる、と報告されている²⁾。そこで、FCを凝集剤として利用した埋立においては、沈降速度の改善に伴う投入土量の増大、さらには土の圧密特性が改善されることによる造成地盤の早期利用が考えられたため、一連の室内試験および泥土投入から自重圧密までのケーススタディを実施し、その効果を検証したので結果をここに報告する。

2. 研究概要

研究の主な流れは、図-1に示すようである。

ジャーテスト

FCおよびACの最適添加率を決定するとともに、沈降特性を確認する。

大型沈降試験

沈降試験においては、シリンダー側面の摩擦力の影響は容器寸法が小さくなるほど顕著であるため、大型のシリンダーを用いてジャーテストの結果を再確認する。

圧密試験

凝集剤を添加した粘土試料について標準圧密試験および浸透圧密試験を実施し、圧密特性の改善効果を確認する。

ケーススタディ

試験結果より得られた圧密定数をもとに、埋立地条件、浚渫土の投入条件を仮定して、一次元自重圧密解析より投入土量の変化を比較する。

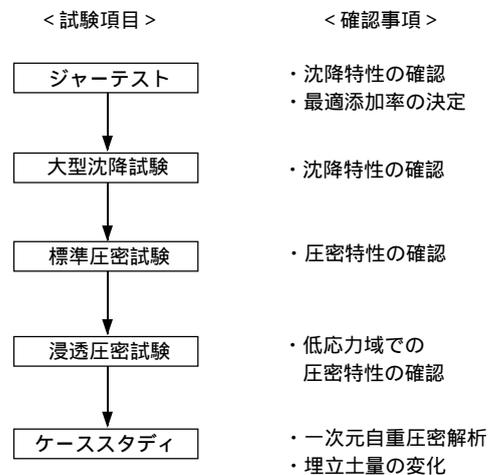


図-1 試験項目と確認事項のフロー

3. ジャーテスト

3.1 試験方法

(1) 試料

実験に用いた試料は、東京湾海成粘土である。試料は2mmふるいで雑物を除去し、自然海水で所定の含水比($w_0 = 1,000\%$)に調整して使用した。

表-1に、物理試験の結果を示す。

* 技術研究所 ** 土木設計部

表 - 1 東京湾粘土の物理試験結果

項目	数 値	単 位	備 考
自然含水比 W_n	123.0	%	JGS T 121-1990
土粒子密度 s	2.694	gf/cm ³	JGS T 111-1990
粒度組成 砂分	11.3	%	JGS T 131-1990
シルト分	36.0	%	"
粘土分	52.7	%	"
液性限界 W_L	90.0	%	JGS T 141-1990
塑性限界 W_p	44.7	%	"
塑性指数 I_p	45.3	%	"

(2) 凝集剤の種類

試験に用いた凝集剤の一覧を、表 - 2 に示す。

表 - 2 凝集剤の種類と濃度

	無機凝集剤	中和剤	有機高分子凝集剤
鉄塩系凝集剤 F.C.		消石灰 Ca(OH) ₂	アニオン系凝集剤 K剤
原液*)		14.5% 溶液	0.1% 溶液
アルミカム塩系凝集剤 A.C.		消石灰 Ca(OH) ₂	アニオン系凝集剤 K剤
原液		14.5% 溶液	0.1% 溶液

*) 濃縮液の4倍希釈溶液を原液とする

(3) 試験ケース

表 - 3 にジャーテストの試験ケースを示す。

実験は表中の同ケースをFC、ACの2種類の凝集剤について行った。

ここで、無機凝集剤 0.01 cc/乾土g は、w=1,000% 泥水 1リットル中に無機凝集剤を 1cc 添加するのに相当する。

また高分子凝集剤 0.01 cc/乾土g は、w=1,000% 泥水 1リットル中に0.1%溶液の高分子凝集剤を1cc添加するのに相当する。

表 - 3 ジャーテスト試験ケース一覧表

		有機高分子凝集剤添加量 (cc/乾土g)						
		0.00	0.02	0.04	0.08	0.16	0.24	0.32
無機凝集剤添加量 (cc/乾土g)	0.000							
	0.002							
	0.004							
	0.008							
	0.016							
	0.032							
	0.080						-	
	0.160						-	
	0.240						-	

(4) 試験方法

図 - 2 に、試験方法のフローを示す。

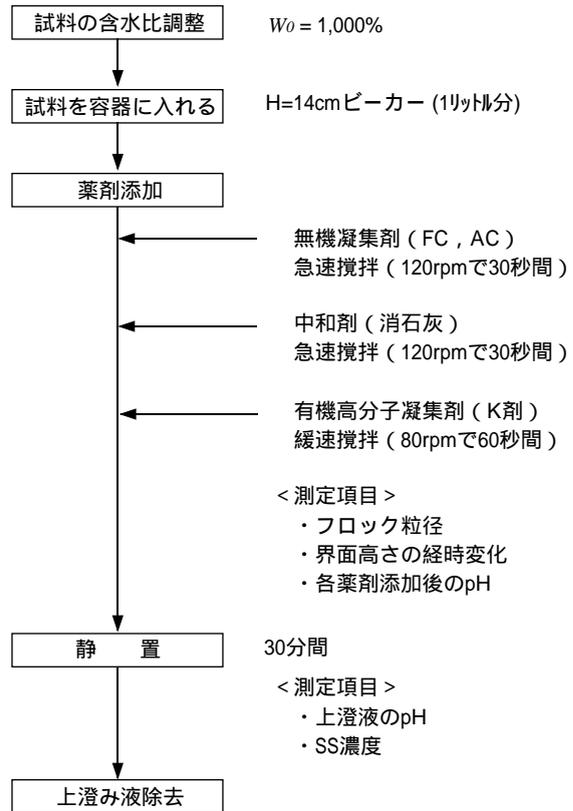


図 - 2 ジャーテスト試験フロー

3. 2 試験結果

(1) フロック粒径

各薬剤添加後のフロック粒径を表 - 4 に示す。

表 - 4 に示すように、有機高分子を添加しない場合でも、無機凝集剤の添加量が多くなるにつれてフロックがわずかではあるが、大きくなっていくのが認められる。ただしいずれも1mm以下であり、FC、ACともに、無機凝集剤単独ではフロックは大きく成長しないといえる。

無機凝集剤の添加量が0~0.032cc/乾土gの範囲においては、フロックは、無機凝集剤の増加につれ、また高分子凝集剤の添加量の増加につれ大きくなっていく。ここで高分子凝集剤の添加量が同じ場合、無機凝集剤の添加量によるフロック径の相違はわずかであり、フロック粒径は高分子凝集剤の添加量に大きく依存するといえる。

無機凝集剤の添加量に関わらず、高分子凝集剤の添加量が0.08cc/乾土g以上になると1mm以上の大きなフロックが形成されはじめる。フロック径が1mm以上になると、攪拌終了と同時に沈降が始まり、界面が沈下していく様子が目に見えて分かるようになる。さらにフロックが大きくなると、沈下は攪拌終了直後~数分で終了するようになるが、界面は凸凹が多く試料はダンゴ状

になる。

一方、無機凝集剤の添加量が 0.080cc/ 乾土 g 以上になると、高分子凝集剤の量を増やしてもフロックが巨大化しなくなる。

表 - 4 フロック粒径一覧表

		高分子凝集剤K剤添加量 (cc/乾土g)						
		0.00	0.02	0.04	0.08	0.16	0.24	0.32
FC添加量 (cc/乾土g)	0.000	d1	d1	d2	d2-d3	d4-d5	-	d6
	0.002	d1	d2	d2	d2	d4	-	d6
	0.004	d1	d2	d2	d2	d4	-	d6
	0.008	d2	d2	d2	d3	d5	-	d6
	0.016	d2	d2	d2	d4	d5	-	d6
	0.032	d2	d2	d2	d4	d5	-	d6
	0.080	d2	d2	d2	d2	d3	d3	-
	0.160	d2	d2	d2	d2	d2	d3	-
	0.240	d2	-	d2	d2	d2	d3	-

(a) FC

		高分子凝集剤K剤添加量 (cc/乾土g)						
		0.00	0.02	0.04	0.08	0.16	0.24	0.32
AC添加量 (cc/乾土g)	0.000	d1	d1	d2	d2-d3	d4-d5	d6	d6
	0.002	d1	-	d2	d3	d4	d6	d6
	0.004	d1	-	d2	d3	d4	d6	d6
	0.008	d2	-	d2	d4	d5	d6	d6
	0.016	d2	-	d2	d4	d5	d6	d6
	0.032	d2	-	d2	d4	d5	d6	d6
	0.080	d2	d2	d2	d2	d3	d4	-
	0.160	d2	d2	d3	d2	d2	d2	-
	0.240	d2	d2	d2	d2	d2	d2	-

(b) AC

*) d1: 0.3 ~ 0.5mm, d2: 0.35 ~ 0.75mm, d3: 0.75 ~ 1.0mm, d4: 1.0 ~ 1.5mm, d5: 1.50 ~ 2.25mm, d6: 2.25 ~ 3.0mm

*) 網掛部は、1mm以上の大きなフロックのできるもの

(2) 界面高さ

図 - 3 ~ 4 に、各ケースの時間 ~ 沈下曲線を示す。

(a) 高分子凝集剤無添加

図の(a)は、高分子凝集剤無添加で無機凝集剤の添加量を変化させた場合の沈下曲線を示したものである。

沈降の状況について詳しく観察すると、無添加の場合は、沈降を始めてからしばらくすると表面にシワのような亀裂が入り始め、それがつぶれるような形で沈下が一気に進行していく(経過時間 60 ~ 70 分頃から)。

逆に FC を多く添加した場合は、同様の現象が生じずに沈下が一定の速度で進んでいき、FC無添加の場合と比較して沈下に遅れが生じるようになる。これは AC についても同様なことがいえ、添加量が 0.004cc/ 乾土 g においてすでに沈下に遅れが生じている。しかも、添加量の増加につれ沈下量が小さくなっている。この傾向は FC にも認められるが、AC の場合に目に見えて顕著であり、1 日経過後の堆積土の体積は、無添加試料を 1.0 とした場合、0.080cc/ 乾土 g 添加試料では 1.46 にもなる。

FC と AC とを比較した場合、添加量が少ない場合は両者の沈下特性に変化はあまりなく、最終沈下量もほぼ等しくなるが、添加量が多くなるにつれて、上記の理由により AC の最終沈下量は小さくなっていく。

(b) 高分子凝集剤添加

図の (b) ~ (e) は、無機凝集剤と有機高分子凝集剤の添加量を変化させた際の界面の沈下の様子を FC と AC とで比較して示したものである。

まず FC についてみた場合、高分子凝集剤の添加量の増加に連れて沈降速度が次第に速くなっていく状況がみてとれる。ただし、前項においても述べたように、無機凝集剤の添加量が 0.008cc/ 乾土 g より増えると沈下速度および沈下量は小さくなっていく。また同図には示していないが、無機凝集剤の添加量をさらに 0.080, 0.160, 0.320cc/ 乾土 g まで増加して実験を行ったが、沈下量は徐々に小さくなる傾向にある。

高分子凝集剤の添加量でみた場合、高分子が 0.16cc/ 乾土 g 以上になると大きなフロックが形成され始め、沈下が短時間で終了するようになる。この時、最も沈下が速いのが FC = 0.008cc/ 乾土 g の場合であり、30 分後には沈下がほぼ終了している。さらに、高分子の量が 0.32cc/ 乾土 g 以上になると、FC 無添加試料についても粒径分布 d5 ~ d6 の大きなフロックが形成され、沈下は攪拌終了と同時にほぼ終了するようになる。

ただしいずれの場合も、沈下量が最大となるのは FC=0.008cc/ 乾土 g の場合であり、それ以上 FC を投入しても沈下についていけば効果はないといえる。

次に AC についてみると、全体的な傾向については FC の場合の挙動とほぼ一致する。ただ FC と比較した場合、高分子の添加量が 0.16cc/ 乾土 g までは、AC のほうが沈下速度は速いようである。この傾向は、図の (c) で顕著であり、FC が 0.008cc/ 乾土 g から効き始めるのに対して、AC では 0.004cc/ 乾土 g においても沈下がかなり進行するようになっている。

ただし図の (e) をみた場合、AC の添加量の増加とともに沈下量が小さくなっていく現象が明らかにみてとれる。FC については、沈下の遅れは認められるものの、その差はわずかであり、最終沈下量もそれほど変わらない。一方 AC は、沈下は 10 分後には終了しているが、その沈下量は無添加試料と比較してみるとかなり小さくなっている。これは浚渫土の早期大量処分を考える際には、大きな課題であり、適用にあたっては事前に同様のジャーテストを実施し、最適配合を決定する必要がある。

(3) 最適配合

ジャーテストの結果より、FC および AC の最適配合を表 - 5 のように決定する。

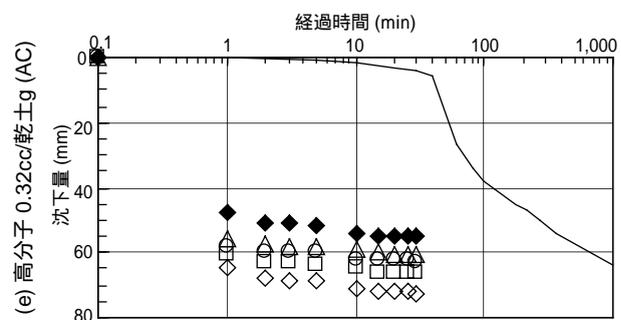
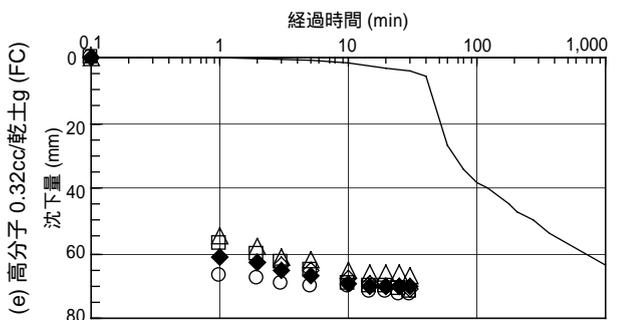
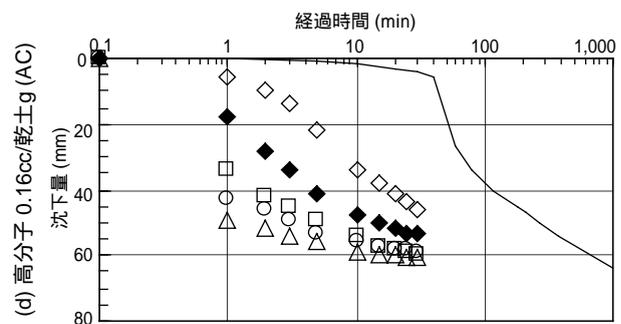
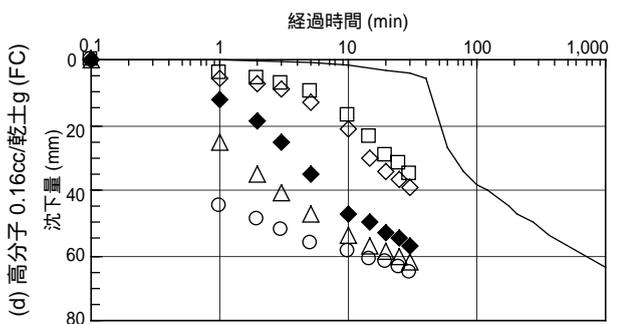
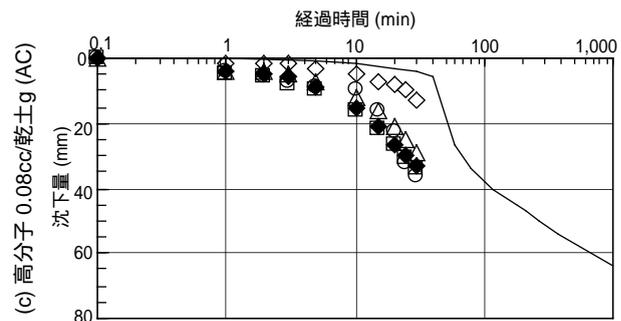
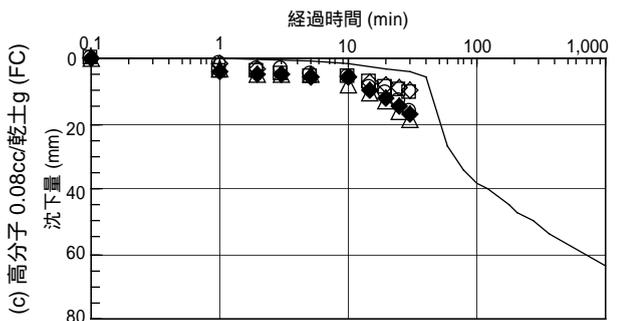
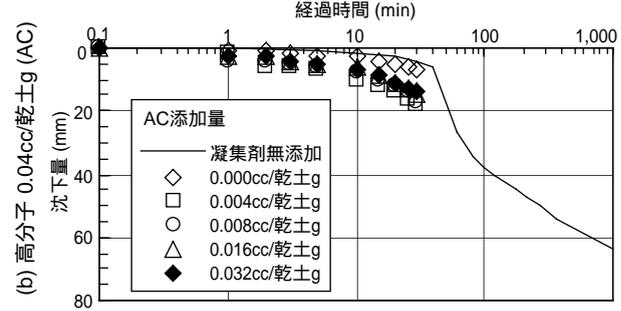
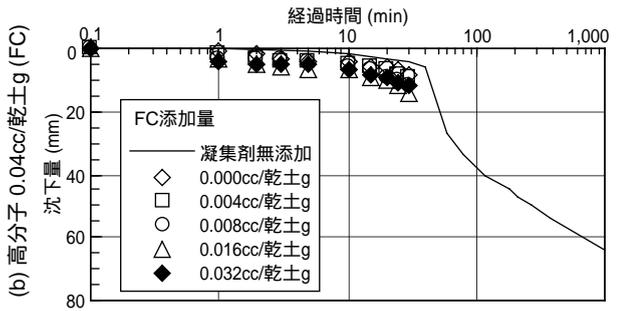
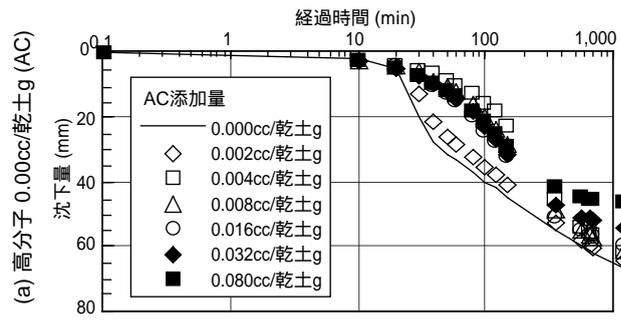
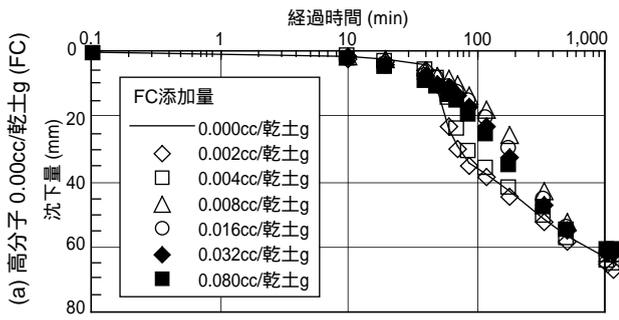


図 - 3 界面高さの経時変化 (FC)

図 - 4 界面高さの経時変化 (AC)

表 - 5 凝集剤の最適配合

無機凝集剤 (cc/乾土g)	中和剤 (cc/乾土g)	高分子凝集剤 (cc/乾土g)	備考
FC	消石灰	K剤	pH=8~9
0.008	0.000	0.08~0.16	無機剤添加によるpHの変化が生じないため中和剤は無添加
AC	消石灰	K剤	
0.008	0.000	0.08~0.16	

4. 大型沈降試験

4.1 試験の目的

1リットルピーカーで実施したジャーテストの結果を大型のシリンダー沈降試験で確認する。沈降試験においては、シリンダー側面の摩擦力の影響は容器寸法が小さくなるほど顕著であり、沈降容器の径が大きいほど現場の状態をよく再現できるといわれている。

4.2 試験方法

(1) 試験ケース

「3. ジャーテスト」の結果より、大型沈降試験の実験ケースを表-6のように決定する。

ここで、ケース2およびケース4は、ジャーテストにおいて最も結果のよかったいわゆる最適配合であり、ケース3、ケース5はそれぞれ比較のために無機凝集剤を沈降特性が極端に悪くならない程度に増加させたものである。

表 - 6 大型沈降試験ケース

無機凝集剤 (cc/乾土g)	中和剤 (cc/乾土g)	高分子凝集剤 (cc/乾土g)	備考
-	-	-	薬剤無添加
FC 0.008	-	K剤 0.016	FC最適配合
FC 0.032	0.020	K剤 0.016	
AC 0.008	-	K剤 0.016	AC最適配合
AC 0.032	0.020	K剤 0.016	
-	-	K剤 0.016	高分子添加

(2) 試験方法

試験に用いた容器は 150mmの亚克力製の円筒であり、 $W_0 = 1,000\%$ の試料を初期高さ $H_0 = 120\text{cm}$ まで投入し、凝集沈降の様子を観察した。

薬剤の添加方法および測定項目は、ジャーテストと同様である。大型沈降試験の概要フローを図-5に示す。

4.3 試験結果

(1) 界面高さの経時変化

図-6に、各ケースにおける泥土界面の時間～沈下曲線を示す。

ジャーテストの結果と同様に、ケース2のFCの最適配合が最も沈下速度が速く、凝集剤の添加量を増やすと沈

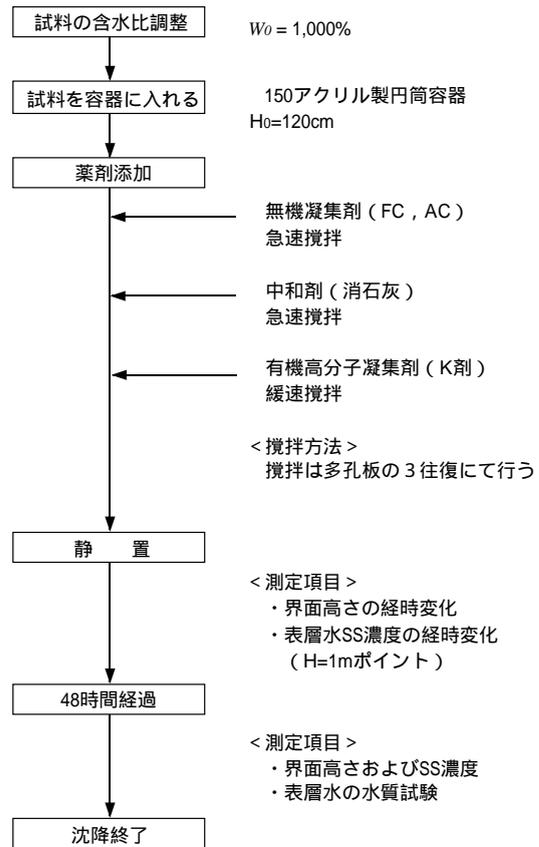


図 - 5 大型沈降試験フロー

下に遅れが生じるようになる。また AC については、初期の沈下量は大きいですが、時間とともに他ケースより沈下に遅れを生じるようになる。

沈降状況を観察すると、FCの場合、凝集したフロックがすぐに下部まで沈降し、上部の土粒子がフロックをつぶすように沈下していくのに対し、ACの場合は、凝集したフロックが上部に堆積し、その状態のまま沈降していく様子がみられた。これは主材料である鉄とアルミニウムによるフロック重量の相違によるものと思われる。

ジャーテストの場合、試験時間が短いこと、試験容器が小さいことなどから沈下の最終状態に格差が見られたが、大型の沈降容器で試験を行った場合、最終的な沈下量は各ケースとも一定値に落ちつく傾向にある。

(2) 上澄み液の SS 濃度の経時変化

上澄み液の採取は、試料下部より 1 m の地点に排水ホースを設置し、サイフォンの原理で水を吸い上げることにより行った。

図-7に、各ケースにおける上澄水の水質試験の結果を示す。

高分子凝集剤を多く添加したケースほど SS 濃度は早

期に小さくなり、各ケースともに2時間経過後にはSS濃度は100mg/l以下まで低下した。

沈降の初期段階(0~100分程度まで)においては、最適配合についてもSS濃度が多少大きめとなっているが、これは形成されたフロックが急激に沈降するため、容器内で流れが生じ、これに伴い粘土粒子が捲き上がるためである。

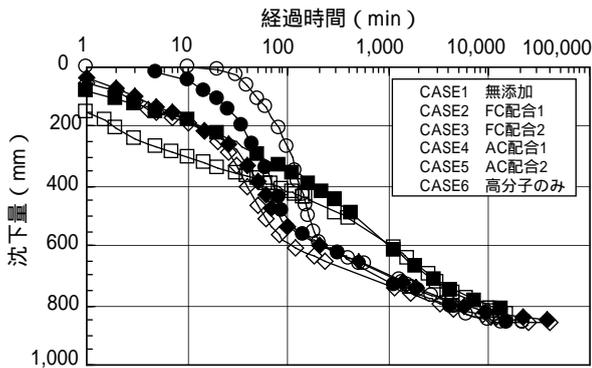


図 - 6 泥土界面の時間～沈下曲線

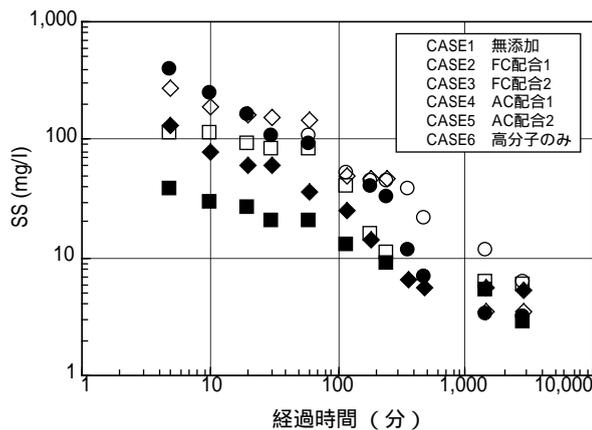


図 - 7 上澄水のSS濃度の経時変化

5. 圧密試験

5.1 試験の目的

凝集剤を添加した埋立地においては、土粒子の凝集効果により透水性および圧密係数が改善されるのではないかと考えられたため、標準圧密試験および浸透圧密試験を実施し凝集剤添加試料の圧密特性を確認した。

5.2 試験方法

標準圧密試験供試体は、 $W_o = 1,000\%$ 試料に凝集剤を所定量添加しそれを凝集沈殿させたうえで、 $p = 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ の予圧密を実施してから作成した。

試験方法は、「JGS T 411-1990 土の圧密試験方法」に基づく。

5.3 試験結果

(1) $e \sim \log p$ 関係

図 - 8 に、各ケースの間隙比 $e \sim \log p$ 関係を浸透圧密試験から標準圧密試験結果へと重ねて示す。

凝集剤を多く添加した試料ほど初期の間隙比 e は大きくなっており、これは先に述べたジャーテストの結果と同様である。ただし、圧密圧力 p が 0.1 kgf/cm^2 以上になると、各ケースの差異は次第に認められなくなってくる。

(2) 圧密係数 C_v

図 - 9 に、各ケースの圧密係数 $C_v \sim \log p$ 関係を示す。

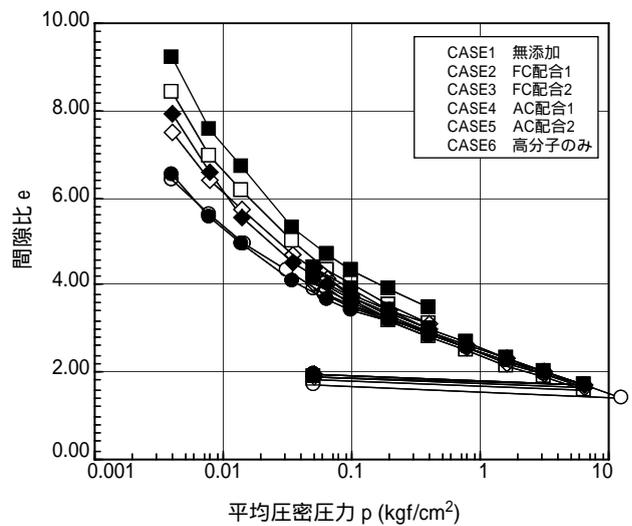


図 - 8 $e \sim \log p$ 関係

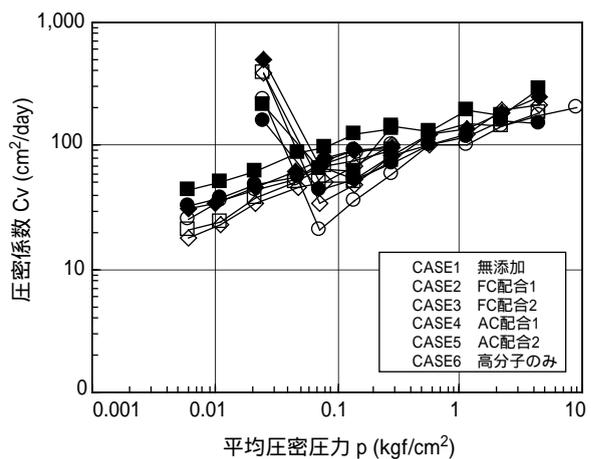


図 - 9 圧密係数 $C_v \sim \log p$ 関係

全体的に凝集剤を多く入れた試料ほど圧密係数 C_v は大きくなっており、大小で約2~3倍の相違が認められる。これは、初期の間隙比 e の影響によるものと思われる。

(3) 体積圧縮係数 m_v

図 - 10 に、各ケースの体積圧縮係数 $m_v \sim \log p$ 関係を示す。

各ケースともに体積圧縮係数 m_v はほぼ一致しており凝集剤添加試料と無添加試料の明らかな相違は認められない。

(4) 透水係数 k

図 - 11 に、各ケースの透水係数 $k \sim \log p$ 関係を示す。

圧密係数 C_v の結果と同様に、凝集剤無添加試料の透水係数 k がもっとも小さく、凝集剤を添加するほど透水係数 k は大きくなっている。

以上、標準圧密および浸透圧密試験の結果より、凝集剤を多く入れた試料ほど最終的な沈下量が小さくなるた

め初期の間隙比 e が大きくなり、それに伴うかたちで圧密係数 C_v および透水係数 k が大きくなることがわかった。また FC と AC の間には圧密特性に関して明らかな相違は認められなかった。

6. 凝集剤を添加した浚渫土による埋立工法の検討

6.1 検討ケース

(1) 目的

沈降試験および圧密試験の結果より、凝集剤添加試料は無添加試料に比べて圧密係数および透水係数が大きくなること判明した。ただしこれらの増大の原因は最終沈下量の減少による初期間隙比の増加によるものであり、また大きくなるといってもおよそ数倍のオーダーであり、この結果がすなわち圧密特性の改善とはいえない。

そこで、今回の試験結果を基に、地山の堆積状態や埋立地の条件、浚渫土の投入条件などを仮定して一次元自重圧密解析を実施し、凝集剤を添加することによりどのような効果があるのかケーススタディを実施した。

(2) 検討条件

検討にあたっての諸条件を表 - 7 のように仮定する。

表 - 7 解析条件

項目	数値	単位	備考
地山条件			
比重 s	2.694		
液性限界 WL	90	%	
地山含水比 W_n	90	%	
地山間隙比 e_n	2.425		
埋立地条件			
面積	500,000	m ²	1,000m × 500m
平均水深	-10.0	m	両面排水条件
投入限界	+3.0	m	
潮位	0.0	m	
埋立地容積	6,500,000	m ³	
浚渫条件			
浚渫能力	1,200	地山m ³ /hr	地山相当量
稼働時間	16	h/day	1日当たりの稼働時間
稼働日	20	day/mth	1月あたりの稼働日数
投入速度 v	384,000	地山m ³ /mth	地山含水比換算
および投入速度 v/A	0.768	地山m/mth	地山含水比換算
投入速度 hs	0.224	実質高m/mth	実質高さ換算
堆積含水比 W_0	180	%	
堆積間隙比 e_0	4.849		
堆積速度 h_0	1.312	m/mth	

6.2 検討結果

(1) 圧密定数の決定

標準圧密試験および浸透圧密試験の結果より、FC最適添加(ケース3)、無添加試料の圧密特性を図 - 12、図 - 13 のように決定する。

標準圧密 ~ 浸透圧密試験の結果を整理すると、FC添加試料の透水係数 k は無添加試料の透水係数の約1.3倍になる。また、自重圧密のような低い応力レベルにおいては ($p=0.01 \text{ tf/m}^2$)、同じ有効応力について、FC添加試料の間隙比 e は無添加試料に対して約1.0ほど大きくなる。

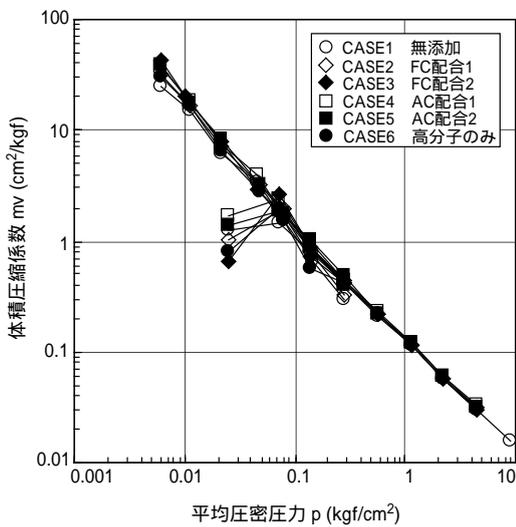


図 - 10 体積圧縮係数 $m_v \sim \log p$ 関係

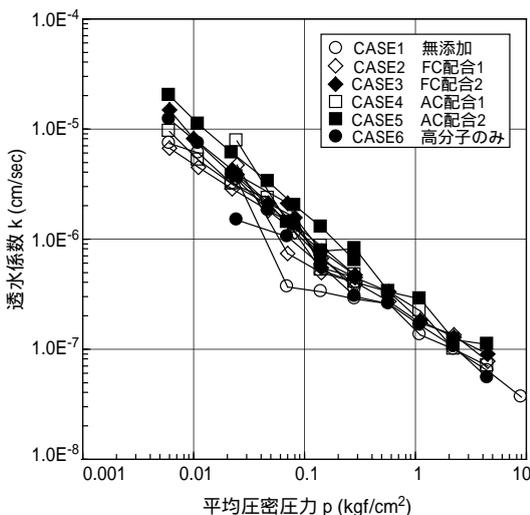


図 - 11 透水係数 $k \sim \log p$ 関係

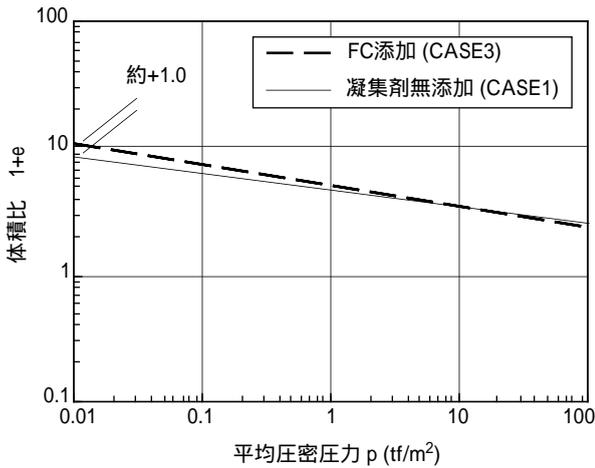


図 - 1 2 圧密特性の比較 (log f ~ log p 関係)

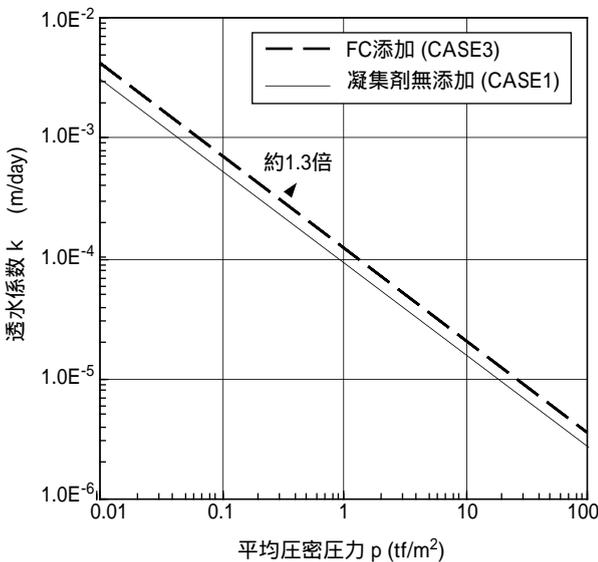


図 - 1 3 圧密特性の比較 (log k ~ log p 関係)

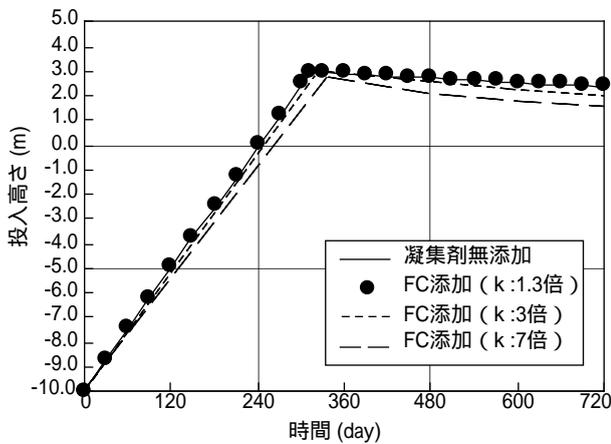


図 - 1 4 界面上昇の時間変化

(2) 界面上昇の時間変化

図 - 1 4 は、浚渫土を -10m ~ +3m まで投入する際の界面上昇の時間的変化を、一次元自重圧密解析により、無添加試料と FC 添加試料とで比較したものである。また同図中には、試験から得られた透水係数 k の他に、3倍、7倍に増加したと仮定した場合の結果も示してある。

一次元自重圧密解析の結果によると、FC を添加することによる投入土量の増大はほとんど認められず、たとえ透水係数が 7 倍になったと仮定した場合でも、投入土量の増加分は約 8% であり、FC を添加することによる投入土量の増加は著しい増加は見込めないと考えられる。

7. まとめ

FC を凝集剤として利用した埋立地においては、土の圧密特性の変化による投入土量の増大、早期利用が考えられたため、それらの確認を目的に一連の試験および解析を実施した。

結果をまとめると以下のようである。

界面の沈降速度は、FC および高分子凝集剤の添加量の増加につれて速くなる。ただし、最適配合を超えた FC の添加はむしろ沈下量の減少の原因となる。

高分子凝集剤を多く添加するほど SS 濃度は早期に小さくなる。

低応力レベルの場合、凝集剤を添加した試料の間隙比 e は無添加試料と比べて最大で 1.0 程度大きくなる。

体積圧縮係数 mv は、添加試料、無添加試料とも変わらない。

透水係数 k は、添加試料のほうが約 1.3 倍大きくなる。

以上より、圧密係数 Cv は添加試料のほうが大きくなる。

凝集剤の添加によって透水係数 k および圧密係数 Cv は大きくなるが、同時に初期間隙比 e も大きくなるため効果が相殺され、投入土量は無添加試料とほぼ変わらない結果となる。仮に凝集剤の添加により透水係数が 7 倍になったとしても、投入土量の増加は 8% にとどまる。

以上の結果より、FC は凝集沈降促進剤としては AC と同等またはそれ以上の効果を有するが、土の圧密特性を変化させ投入土量を著しく増加するまでの効果はないと考えられる。

参考文献

- 1) 黒田洋一郎：ボケの原因を探る、1996
- 2) 畑山栄：ヘドロクリンによるしゅんせつ底泥の疎水化脱水処理、PPM、Vol.21、pp.43 ~ 48、1990