

遅硬性固化材を用いた深層混合処理工法

Deep Mixing Method
using Moderate Heat Cement and Slag

山田 洋一郎※ (Yoichiro Yamada)

古橋 信也※ (Shinya Furuhashi)

キーワードズ； 深層混合処理／遅硬性固化材 (I,G,C,:K-6)

1、まえがき

深層混合処理工法（以下D,M,Mと略す）は軟弱地盤にセメント系固化材を添加混合して安定固化させ、そのまま上部構造物を支える地盤に改良する工法であるが、D,M,Mによる改良体は、その特性（強度，変形特性）が土というより低品位のコンクリートに近い性質を示すことから、一般に、剛体の地中構造物として取扱われている。このため施工においては、改良体の強度および連続性、特に改良柱体相互間の接合性が重要視され、改良柱体どうしはオーバーラップ施工が要求される。しかしながら、従来固化材として普通ポルトランドセメント、あるいは高炉セメントB種が用いられており、これらの場合、遅延剤を並用しているが強度発現が早いいため、時間の経過と共にオーバーラップ施工が困難となり、気象・海象による荒天待機、機器のトラブルによる休止、等が発生するとオーバーラップ不能となることもある。（通常オーバーラップ時間は24時間までとされている。）

また一方、固化材の吐出方式としては、処理機貫入時に吐出する方式と、引抜時に吐出する方式とがあるが、貫入時吐出の方が既設改良柱体の切削と同時に固化材が供給されるため、改良柱体間に未改良土の介在する率が低く、接合部信頼度が高いとされている。しかし、従来のセメントは反応性が高く、土中へ添加後の粘性増加が著しいため、攪拌抵抗の増大により施工不能となることもあり、特に大深度改良の場合には安全確保のため引抜時吐出方式が採用されている。

これらに対し、最近早期強度の発現を抑制する遅硬性固化材の研究開発がセメントメーカー等において進められ実用に供することのできる製品が数種完成し、長時間経過後のオーバーラップ施工あるいは大深度改良における貫入時吐出方式の採用を可能にする燭光が見えてきた。

本報告は、呉市広地区において実施した、遅硬性固化材を用いたD,M,M現地試験の結果の一部を紹介する。

2、現地試験の概要

2-1 試験目的

本試験は、遅硬性固化材を用いた、大層厚改良地盤を対象としたD,M,Mにおける

- (1) 貫入時吐出方式の施工性確認
- (2) 長時間経過後のオーバーラップ施工性確認
- (3) 改良体の品質（強度，接合性）確認

を目的として実施された。

2-2 試験条件

- (1) 使用固化材

種類：中庸熱系遅硬性固化材（製造・三菱鉱業セメント㈱）

配合；中庸熱ポルトランドセメント：スラグ＝3：7

(2) セメントスラリーの配合

固化材の添加量；改良土 1 m³ 当り 180 kg
 水セメント比；W / C = 0.6 (水は現地海水)

(3) 改良柱体の仕様および配置

表～1に改良柱体の仕様，図～1に平面配置図を示す。

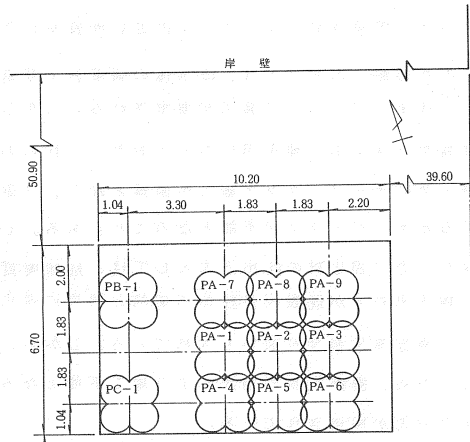
本試験に先立ち、予備試験として空打ちを1本、貫入時吐出方式の単独柱体を1本打設し、処理機の機械的性能および施工性の確認を行った。

施工方法は図～2に標準打設パターン図を示すが、攪拌翼回転数は貫入時、引抜時共40 r.p.m.に設定し、オーバーラップ幅は25 cmとした。(改良柱体1本当りの面積は3.81 m²)

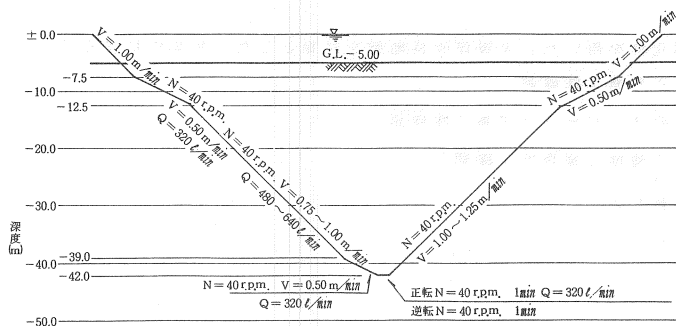
なお、改良柱体PA-2においては、斜ボーリングによる接合面検証を容易にするため、着色料(ベンガラ)を混入している。

表～1 改良柱体の仕様

種別	No	打設順序	接合時間	貫入速度	引抜速度
空打	PB-1	1	-	1.00 m/min	1.00 m/min
単独柱体	PC-1	2	-	1.00	1.00
貫入時吐出	PA-1	3	-	0.75	1.00
	PA-2	4	2.5	1.00	1.00
	PA-3	5	2.5	1.00	max (1.25)
	PA-4	6	24	0.75	1.00
	PA-5	7	24	1.00	1.00
	PA-6	8	24	1.00	max (1.25)
	PA-7	9	48	0.75	1.00
	PA-8	10	48	1.00	max (1.25)
引抜時吐出	PA-9	11	72	1.00	1.00



図～1 改良柱体の平面配置図



図～2 標準打設パターン図(貫入時吐出)

遅硬性固化材を用いた深層混合処理工法

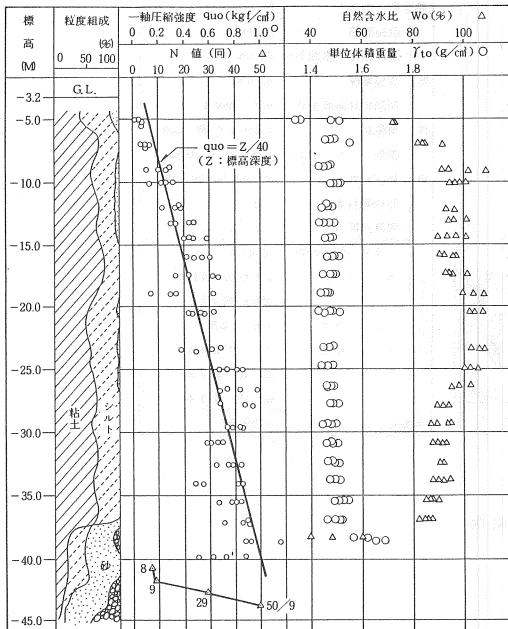
2-3 試験区域の土質

改良対象地盤の地質状況は、おおむね沖積粘土層、沖積砂質土層、洪積砂層の3層に区分される。

沖積粘土層は、層厚が3.5mにもおよぶ超軟弱粘性土であり、表層0.3~0.5mは流動性のあるヘドロ状となつている。表層以下は、沖積層の主体をなす均一な粘土層であり、全体に貝殻片が不均一に混入し、有機物も点在して臭気を感じられる地層である。

沖積砂質土層は、細砂および中砂の薄層を不規則に介在し、N値1~10の地層である。また、支持層となる洪積砂層はレキ混りであり、N値は22~29、D、L、-43m以深では50以上となつている。

図~3に土質柱状図を示す。

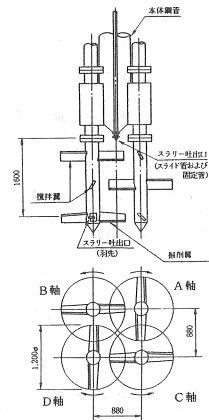


図~3 土質柱状図

2-4 深層混合処理船

本試験に使用した深層混合処理船は4軸タイプ、改良面積381m²であり、図~4に攪拌翼形状、図~5に全体概略図、表~2に主要諸元を示す。

本船は、光波による船位誘導システム、処理機姿勢制御機構および各種施工管理機器、等を装備した新鋭船であり、また、深度管理は自動潮位計を利用して基準面下(D、L_s)管理としている。(通常は海水面下管理)



図~4 攪拌翼形状

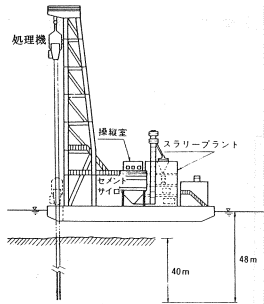


図 2-1 ポコム10号概要

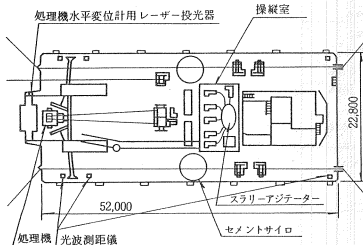


図 5 深層混合処理船概略図

表 2 主要諸元

ボコム10号主要諸元		
船体寸法	52m×22.8m×4m	
満載排水 t	3,200 t	
満載吃水	2.8m	
槽全高 (水面上)	60.5m	
処 理 機	改良面積	3.81m ²
	改良深度 (水面上)	48.0m
	改良層厚	40.0m
	掘削装置装置型式	油圧4軸駆動
	翼形状	1,200φ×2翼×3段
	掘削トルク (最大)	1軸当り 4,200kg・m
	軸回転数	30, 40, 50, 60 rpm
処理機自重	178 t	
昇降速度	0.2～2.8m/分	
ス ラ リ ー プ ラ ン ト	スラリー製造能力	50m ³ /h
	スラリーポンプ	200ℓ/分×4台 450ℓ/分×2台
	セメントサイロ	150 t×2基
	スラリー吐出	スライド管2本, 固定管2本, 軸内管4本
	原動機出力	2,690 ps

3 遅硬化性固材について

3-1 配合および性能

本試験では三菱鉱業セメント㈱が開発した遅硬化性固材「スタビライトDMC」を使用した。本製品は高炉スラグ (S) と中庸熱ポルトランドセメント (M) を S : M = 7 : 3 の割合で配合したものであり、遅硬化性のメカニズムは主に次の3点による。

① 高炉スラグを主材としている。

製鉄所の高炉から産出するスラグは、単独では水和反応を起こさないが、アルカリが存在するとその刺激作用を受けて水和反応する性質を有し、その水和生成物はポルトランドセメントのそれと類似のもので、高い強度を発現する。

② アルカリ刺激剤として中庸熱セメントを用いている。

ポルトランドセメントは、

けい酸3カルシウム (C3S) ; アリット

けい酸2カルシウム (C2S) ; ベリット

アルミン酸3カルシウム (C3A) ; アルミネート相

鉄アルミン酸4カルシウム (C4AF) ; フェライト相

の4つのセメント鉱物を主体とし、アリット、ベリットのけい酸カルシウム鉱物が大部分を占めている。

このけい酸カルシウムは水和反応によつて消石灰 (Ca(OH)₂) を生成してアルカリを呈し、このアルカ

遅硬性固化材を用いた深層混合処理工法

リの刺激によりスラグの水和反応が始まる。フリットとベリットでは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量、発熱量が異なり両者ともベリットの方が小さく、水和反応は緩慢である。

本固化材に使用されている中庸熱セメントは普通ポルトランドセメントより高ベリット型の組成であり、セメント自体の水和反応が遅いと共に、水和により生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ も少ないためスラグへの刺激が遅れ、初期強度は低くなる。

③ 粘土の反応性による遅硬作用

一般に沿岸の沖積粘土は粒子が細かく種々の粘土鉱物を含んでいる。反応性の良い粘土では、セメントの水和によつて生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がイオン交換反応により多量に消費されるため、スラグの水和反応は抑制された状態で進行し、遅硬性が助長される。一方、反応性の悪い粘土では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費量が少なく、余剰の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が早い時期からスラグを刺激するため、初期強度は高くなると考えられている。

広地区の粘土鉱物を X 線回析により同定すると、イライト、カオリナイト、モンモリロナイトが認められる。イライトは反応性の悪い粘土とされるが、モンモリロナイトは反応性が良く、カオリナイトはその中間的な性状を示すことから、広地区の粘土は比較的反応性の鈍い粘土と考えられる。

3-2 固化材添加による処理土の粘性変化

改良対象土中に固化材を添加し混練を開始すると非常に短い時間で粘性の増加する現象が見られる。

これは前述イオン交換反応により、土粒子表面の帯電状態が変化し土粒子どうしが団粒化することによるものであり、このような現象は固化材を処理機の引抜時に吐出する施工法ではさして問題にならなかつたが、本試験のように貫入時吐出方式の場合には、処理機の攪拌混合（または貫入）能力に対して無視できない問題となる。

以上のことから、現地試験に先立ち、粘性増加の度合を把握するために室内試験を実施した。

試験方法は、室内配合試験と同様に作成した供試体を 20°C 一定の恒温養生槽に置き、所定時間経過後、 $\phi 2\text{ cm}$ 、 $h 4\text{ cm}$ の小型ペーンセン断試験機により粘着力を測定するもので、試験結果は以下のとおりであった。

図～6 は広地区の粘土に遅硬性固化材 (RB) を添加量 $C = 180\text{ kg/m}^3$ 、水セメント比 $W/C = 0.6$ で添加混合した試料の粘着力、また、図～7 は同様にして行つた普通ポルトランドセメント (NPC) の結果も合わせて、ピーク粘着力の経時変化を示している。図～7 にはそれぞれのセメントの始発時間を示しているが、それ以前に粘性が増加しているのがわかる。

以上、本室内試験より、遅硬性固化材の粘性増加抑制機能も明らかとなつた。

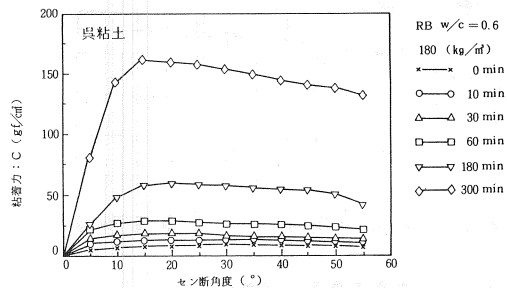


図-6 遅硬セメント添加による粘性変化 (ペーンセン断試験結果)

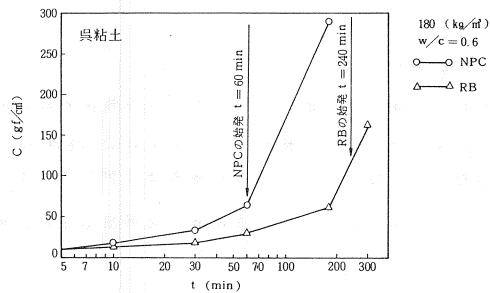


図-7 普通ポルトランドセメントと遅硬セメントの粘性変化の違い

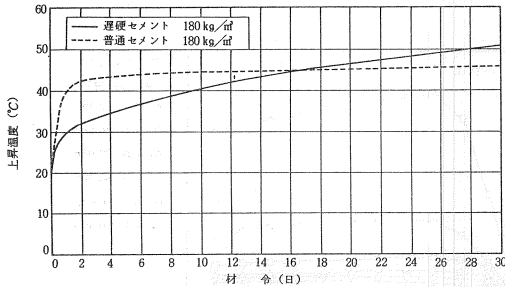
3-3 室内配合強度

(1) 室内配合試験方法

室内配合試験は、現地試験区域のD₁L₁-5m付近より採取した試料土を用い、土質工学会基準 締固めを伴わない安定処理土の試験方法 に準じて作成した供試体を20℃一定の標準養生と、断熱温度上昇パターンによる養生ののち、一軸圧縮試験を行った。

断熱温度上昇パターンは、現場で実際に施工される改良体の多くはマスのブロック状態であるため、反応熱は蓄熱されかなりの高温状態で養生されると考えられる。このため、室内試験においてもコンクリートの断熱温度上昇試験装置を利用して、あらかじめ断熱温度上昇パターンを測定し、その温度パターンに沿った養生を行い現地強度の発現状況を把握する目的で行った。図～8に今回使用した遅硬性固化材の断熱温度上昇パターンを示す。また、表～3は室内配合試験に供した試料土の土性である。

表～3 試料土の土性



図～8 断熱昇温養生試験結果

試験項目		測定値
自然含水比 (%)		75.2
湿潤密度 (g/cm ³)		1.544
土粒子の比重		2.66
コンシス テンシー	液性限界 (%)	64.6
	塑性限界 (%)	29.0
	塑性指数	35.6
粒度組成 (%)	砂 分 (%)	3.7
	シルト 分 (%)	44.3
	粘土 分 (%)	52.0
PH		7.66
有機物含有量 (%)		3.92

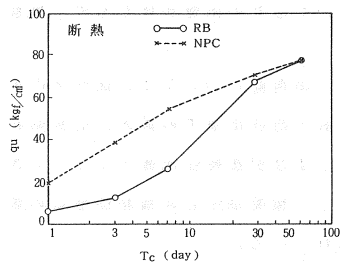
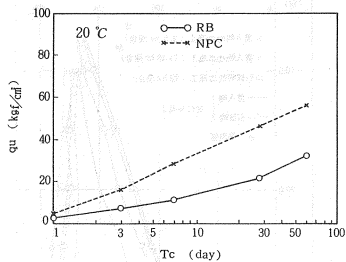
(2) 室内配合強度

表～4および図～9、図～10に、N P Cの強度と対比させて、室内配合強度を示す。

R Bの強度はN P Cと比較して、材令1日で1/2~1/4、3日で1/2~1/3と硬化初期においては十分な遅硬性を示し、長期材令ではN P Cと同等な強度まで伸びている。現地強度の発現状況は改良体のマスの大きさ(放熱の度合)と混合度に応じて、標準養生と昇温養生の中間を示すと思われる。

表～4 室内配合試験結果一覧表

固化材	養生	湿潤密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)				
				材令1日	3日	7日	28日	60日
遅硬セメント	標準	1.570	67.1	2.56	7.48	11.0	21.3	31.8
	昇温	1.554	69.2	5.68	12.4	26.5	67.9	78.2
普通ポルトランドセメント	標準	1.573	67.9	4.48	16.4	28.4	45.8	55.0
	昇温	1.554	67.4	18.9	39.4	54.9	71.3	77.9



図～9 標準養生による室内配合試験結果 図～10 昇温養生による室内配合試験結果

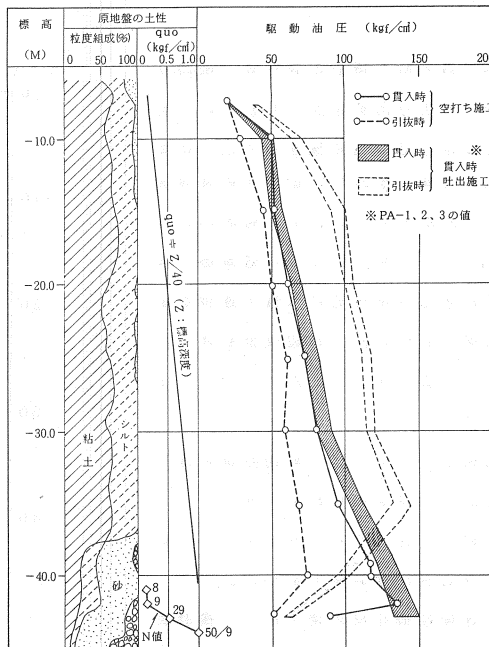
4 現地試験結果

4-1 貫入時吐出方式の施工性

図～11は原地盤の土性と、空打ち施工および貫入時吐出施工の貫入、引抜時の駆動油圧の変化を示したものである。図から空打ち施工の場合、貫入時の駆動油圧は貫入深度にはほぼ比例して増加する傾向を示し、引抜時の駆動油圧は貫入時のそれと比べて減少しているのがわかる。これは貫入時には原地盤の強度（粘着力）、引抜時には練返しによる強度低減を表わしているものと考えられ、駆動油圧は原地盤の土性に対応して敏感な反応を示すことが確認された。

一方、貫入時吐出施工の駆動油圧を見ると、貫入時は空打ち施工のそれと比較しておおむね等しい値を示しているが、引抜時は貫入時に対して、粘土層（D.L.-38mまで）では、40～50%増加している。この駆動油圧の増大は3-2で述べた固化材添加による粘性増加が原因と考えられ、この時点での固化材添加からの経過時間はおおよそ10～120分である。

今回の現地試験では普通ポルトランドセメントを用いた打設は行っていないが、室内試験で遅硬性固化材の2～4倍の粘性増加を示すことから判断して、このような



図～11 貫入、引抜時における駆動油圧の変化

大層厚改良においての普通ポルトランドセメントによる貫入時吐出施工は、粘性増加が著しく、かなりの困難が伴うものと推察される。

また一方吊荷重については、図～12に示すとおり貫入時吐出施工の貫入、引抜抵抗は空打ちおよび引抜時吐出施工よりも大きな値を示し、駆動油圧と同様粘性増加の影響が表われている。

以上、今回の現地試験より遅硬性固化材を使用することにより、大深度改良においても貫入時吐出方式が可能であることが判明した。

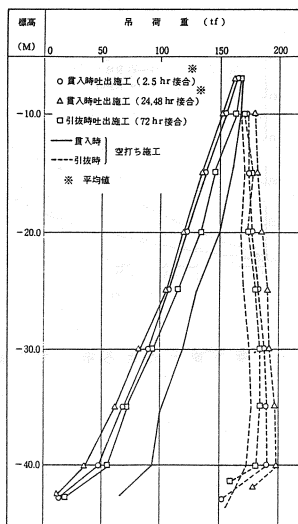
4-3 長時間経過後のオーバーラップ

本現地試験では、長時間経過後のオーバーラップの施工性を把握する目的で経過時間72時間までのオーバーラップ施工を行った。

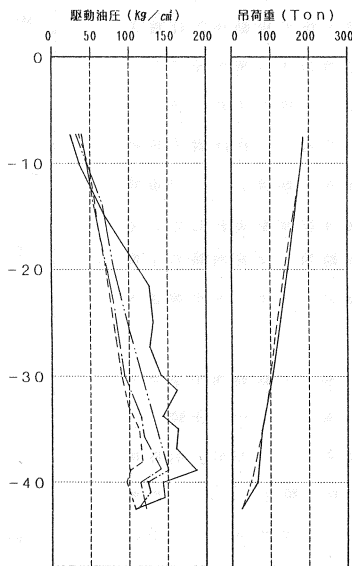
図～13は貫入時（既設改良柱体切削時）の駆動油圧および吊荷重を示したものであるが、駆動油圧は経過時間が長くなるに従って増大する傾向を呈し、改良土の強度発現状況がうかがえる。特に72時間経過後では、D.L.-2.0m付近より本処理機の限界近い値に示し、部分的には貫入速度を低下させる層もあつたが、周辺改良柱体と同等の深度まで貫入することができた。（表～5参照）

一方吊荷重については、経過時間の違いによる有意な差は認められず、またオーバーラップ幅もX方向平均25.8cm、Y方向平均28cmと良好な結果であつた。

以上、遅硬性固化材の使用により攪拌抵抗の点である程度の困難は伴うが、経過時間72時間までのオーバーラップ施工が可能なることが確認された。



図～12 貫入、引抜時の吊荷重



- 2.5 H 接合
- 2.4 H 〃
- 4.8 H 〃
- 7.2 H 〃

図～13 施工状況図

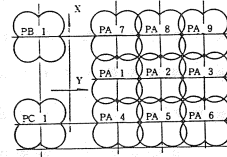
遅硬性固化材を用いた深層混合処理工法

表～5 着底深度

No	着底深度 (m)	応 任 (%)	吊 荷 重 (kn)	既設ボーリングN値 56-2-2	チェックボーリング	
					N 値	深 度
PA-1	-42.8	130	10	N = 15 - 20 (-42m ~ -43m)	-	-
PA-2	-43.1	126	8		-	-43.35
PA-3	-42.5	104	24		-	-
PA-4	-41.76	120	10		-	-
PA-5	-42.0	125	10		-	-
PA-6	-41.9	121	13		-	-
PA-7	-42.2	80	27		-	-
PA-8	-42.6	100	14		-	-
PA-9	-42.3	95	20		30	-42.35

表～6 オーバーラップ幅

X方向		Y方向	
オーバーラップ箇所	オーバーラップ幅 (cm)	オーバーラップ箇所	オーバーラップ幅 (cm)
PA 1-4	25.3	PA 2-1	21.9
PA 1-7	24.7	PA 2-3	27.9
PA 2-5	24.3	PA 5-4	22.8
PA 2-8	24.2	PA 5-6	24.5
PA 3-6	26.4	PA 5-7	25.0
PA 3-9	25.8	PA 5-9	28.0
平均	25.1	平均	25.0



4-3 改良体の品質

1) 改良強度

PA-2においてコアを採取し一軸圧縮試験を行った結果、平均一軸圧縮強度 32.6 kgf/cm^2 (材令38日)、変動係数0.27が得られた。

これを室内配合強度と比較すると、

$$200 \text{ 養生に対して、} \lambda = 32.6 / 26.0 = 1.25$$

断熱養生に対して、 $\lambda = 32.6 / 72.0 = 0.45$ となる。

今回使用した遅硬性固化材はスラグを主体としており発現強度は温度環境に大きく左右されるが、本現地試験は小規模なものであり室内の断熱昇温養生ほどの温度が得られているか疑問である。いずれにしても長期的には断熱養生の値に漸近するものと期待される。

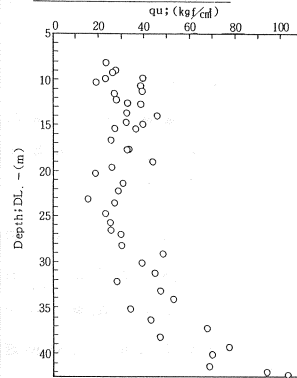
(2) 改良柱体間の接合状況

斜ボーリングにより採取したコアの接合部状況は、完成に密着した状態のものが3箇所、接合部で割れた状態(コア採取時に破断)のものが1箇所観察されたが、いずれの接合面にも未改良土の介在は認められず、接合性は良好であると判断できる。

また接合面の強度を調べるため、接合面が軸圧に対し45になるように $\phi = 25 \text{ mm}$ 、 $h = 50 \text{ mm}$ の供試体を成形し三軸圧縮試験を実施した。

試験はCu条件で、土被りを考慮して包束圧 $3 = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、セン断速度 0.4 \% / 分 で、接合部および比較のためその近傍の一般部について行い、その

No PA-2 ; Tc = 38 day



図～14 改良強度

表～7 接合部の強度

No	(kgf/cm²)		
	PA-2、一般部 (-15.8 m)	PA-2、一般部 (-20.9 m)	PA-2-8、接合部 (-16.5 m)
1	42.0	43.5	33.5
2	44.0	50.0	27.0
3	52.0	-	38.5
平均	46.0	46.8	33.0

(48hrラップ)

試験結果は表～7に示すが、一般部に対する接合面の強度比（B）は $B = 33/46 = 0.7$ となり、48時間経過後の接合にもかかわらず良好な値と云えよう。

5 まとめ

遅硬性固化材を使用した貫入時吐出方式の施工性および改良体品質、等の確認を目的としてD.M.M現地試験を呉市広地区において実施したが、その結果をまとめると以下のとおりである。

① 貫入時吐出方式について

改良層厚35mにもおよぶ大深度改良においても粘性増加に対して抑制効果のある遅硬性固化材を用いることにより貫入時吐出方式の施工が可能である。しかしながら、粘性増加に対する抑制効果は十分とはいえず土質によつては施工速度を低下させた層もあり、今後の課題であろう。

② 長時間経過後のオーバーラップ施工について

経過時間が72時間になると既設改良柱体切削時（貫入時）の攪拌抵抗が今回使用した処理機の限界近くまで達するが、貫入速度の低減、等の対応により72時間までのオーバーラップ施工が可能であることが確認された。

③ 改良体の品質について

チェックボーリングの結果、改良体の平均一軸圧縮強度は32.6kgf/cm²（材令38日）、変動係数0.27が得られた。

一方、改良柱体間の接合部については斜ボーリングで採取したコアの観察結果、接合面は完全に密着した状態であり良好な接合性が確認された。また、接合面のセン断強度は48時間経過後のオーバーラップ施工にもかかわらず一般部と比較して0.7の強度比が得られた。

④ その他

遅硬性固化材は当初、トラブル時や荒天待機、等によりオーバーラップ施工が遅れても確実に既設改良柱体を切削してオーバーラップ施工を可能にする目的で開発されたが現在では更に一歩進め、遅硬性固化材と貫入時吐出方式とを組合せて改良体の品質を向上させ、より経済的な改良断面の実現へと向つている。従つて、今後の固化材に要求される性質は単なる強度遅延性だけでなく、添加後の粘性増加を抑制するものとならう。

なお、広地区においては本現地試験後、中庸熱系および石コウ系遅硬性固化材を使用して約7.5万m³の改良工事が施工されている。

6 謝 辞

本現地試験は運輸省第三港湾建設局、同神戸調査設計事務所および同広島港工事事務所の御指導、御協力を戴き、また遅硬性固化材は三菱鉱業セメント㈱の提供により実施されたものであり、ここに深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) セメント系固化材による地盤改良マニュアル；(株)セメント協会、技報堂 1985年
- 2) 建設技術者のためのセメント・コンクリート化学；W.チエルニン著 徳根吉郎訳 技報堂 昭和45年
- 3) わかりやすいセメントコンクリートの知識；山田順治・有泉昌編 鹿島出版会 昭和51年
- 4) 土壌通論；高井康雄・三好洋著 朝倉書店 1984年