

CDM-LODIC 工法効率化のための実証実験

清水建設(株) 正会員 ○近江 健吾 遠西 幸男
 (株)不動テトラ 正会員 深田 久 今井 優輝
 (株)テノックス 正会員 又吉 直哉 河井 拓也
 あおみ建設(株) 高橋 強 正会員 大古利 勝己

1. はじめに

変位低減型深層混合処理工法（CDM-LODIC 工法、以下 LODIC 工法）は、軟弱地盤にセメントスラリーを吐出し、攪拌翼を回転させて原位置土と攪拌混合しながら固化改良体を造成する深層混合処理工法（CDM 工法）の一つであり、地盤の変位を発生させる主要因である挿入機械体積とセメントスラリー投入量に相当する地盤中の土を排出して、変位低減を図る工法である¹⁾。ここでは、LODIC 工法の更なる効率化を図るために実施した実証実験について報告する。

3軸(φ1,000) 2軸(φ1,600)

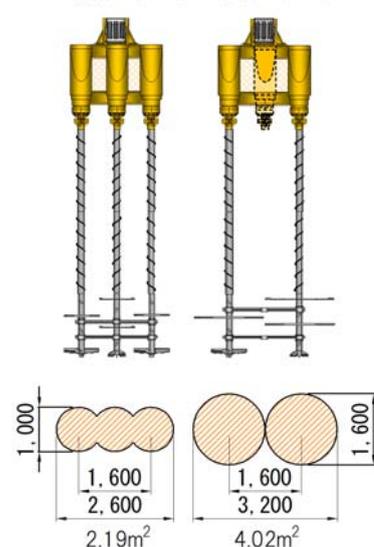


図-1 3軸および2軸施工機械

2. 実証実験の実験内容

(1) 開発背景と実証実験の目的

LODIC 工法は、近年の施工機械の大型化に伴い、従来の 2 軸φ1,000mm（改良面積 1.50m²）から 2 軸φ1,300mm（改良面積 2.56m²）、単軸φ1,600mm（2.01m²）等が開発され、効率化されてきた²⁾。

今回、更なる施工効率化による生産性向上を目指し、図-1 に示す 3 軸φ1,000mm（2.19m²）と 2 軸φ1,600mm（4.02m²）の施工機械を開発した。3 軸攪拌の実証施工実験では、2 軸吐出となるセメントスラリーが 3 軸攪拌で均等混合されることの確認、2 軸大径の実証施工実験では貫入抵抗を低減する補助水での施工管理技術の確立をそれぞれ目的とする。

(2) 実験概要

実証実験ケースは、3 軸φ1,000mm が 3 ケース、2 軸φ1,600mm が 2 ケースの合計 5 ケース実施した。改良対象層は、B 層（盛土：N 値 2～11）、As1 層（シルト質細砂・細砂：N 値 2～12）、Ac1 層（砂質シルト：N 値 0～2）、As2 層（細砂：N 値 7～18）であり、改良長は 3 軸で 9.5m、2 軸で 9.0m である。なお、各土層の N 値は、図-2 に示すボーリング B1-1 の他、近傍のボーリング結果を含んでいる。図-3 に、事前に実施した配合試験結果を示す。配合試験は各土質に対して、70 kg/m³、170 kg/m³、270 kg/m³ のセメント添加量で実施した。

(3) 排土式 3 軸工法の実験ケース

表-1 に、3 軸改良方式の実験ケースを示す。実験ケースは、引抜速度を変化させた 3 ケースとした。図-4 に、改良体造成時の施工パターンを示す。3 軸施工機械の排土装置スクリューは、中軸のみ逆方向としており、貫入時は、変位低減のため、3 軸とも排土回転とする。引

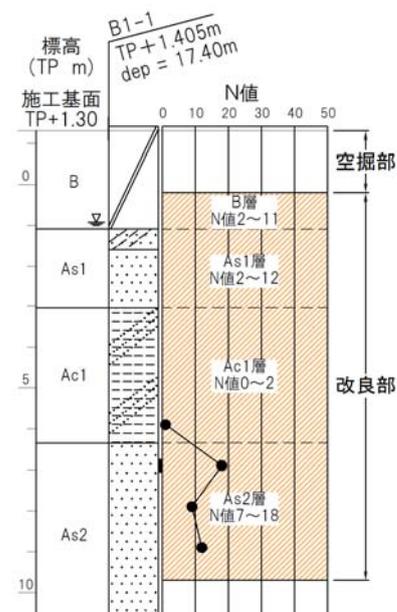


図-2 改良対象地盤と改良深度

キーワード 排土式 CDM 深層混合処理工法 実証実験 変位低減 効率化

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設(株)土木技術本部 TEL 03-3561-3916

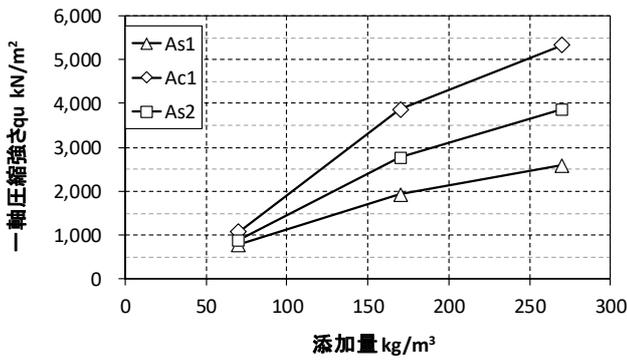


図-3 配合試験結果

抜時は、中軸のみ排土回転、両外軸を押し込み回転とし、深度方向でセメントスラリーの流れを発生させ改良体の攪拌を行う。なお、セメントスラリーは外側2軸から吐出される。

実験では、施工機械を従来の2軸φ1,000mm LODIC から3軸φ1,000mm に改造した場合での、排土方式による周辺変位抑制効果を排土量と周辺変位計測から評価する。加えて、改良体の品質に関して、2軸吐出3軸攪拌で中軸改良体が均一に改良されているか、引抜速度をパラメータとし、改良体強度へ与える羽根切り回数（攪拌翼が改良対象地盤の任意の1m 区間を通過した回転数の総数の値）の影響についての2点を確認する。

(4) 排土式2軸工法の実験ケース

表-2 に、2軸改良方式の実験ケースを示す。実験ケースは、補助水量および引抜速度を変化させた2ケースとした。図-5 に、改良体造成時の施工パターンを示す。2軸の施工機械は、φ1,600mm の接円とし、従来 LODIC 工法と同様に貫入時、引抜時ともに排土回転とする。大径化した分の貫入時抵抗の増加が考えられたため、補助水を用い、貫入速度を確保するように設定した。

実験では、3軸同様に、排土方式による周辺変位抑制効果を排土量と周辺変位計測から評価する。加えて、補助水によって貫入速度を確保できるかを確認する。改良体の品質に関しては、改良体強度に与える補助水および羽根切り回数の影響について確認する。

3. 排土式3軸工法の実験結果と考察

(1) 施工性

本実験では、攪拌翼の貫入速度 1.0m/分、引抜速度を目標 0.7、0.5、1.0m/分の3 ケースで計画したが、いずれも目標通りの施工が行えた。3軸式の施工性は特に問題がないと考えられる。

表-1 3軸改良方式の実験ケース

ケース	目標 貫入速度	引抜速度	貫入時 補助水	軸回転方向※) (貫入時/引抜時)
1	1.0 m/分	0.7 m/分	なし	正・正・正 /逆・正・逆
2		0.5 m/分		
3		1.0 m/分		

※) 正：排土する方向、逆：土を押し込む方向

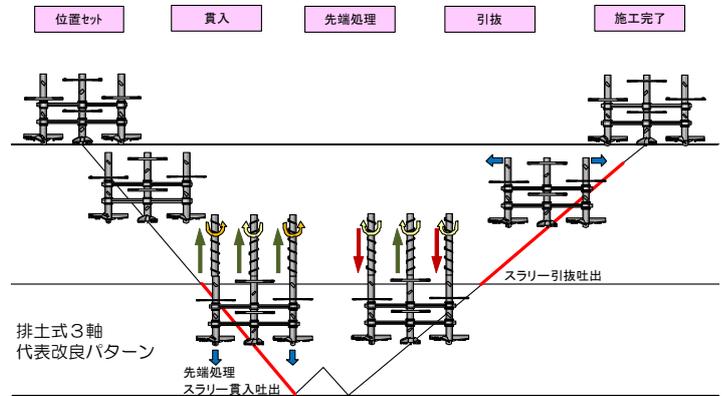


図-4 3軸改良方式の代表改良パターン

表-2 2軸改良方式の実験ケース

ケース	目標 貫入速度	引抜速度	貫入時 補助水	補助水量
4	0.7 m/分	0.7 m/分	あり	400 l/分 (143 l/m³)
5	0.7 m/分	0.8 m/分		200 l/分 (71.5 l/m³)

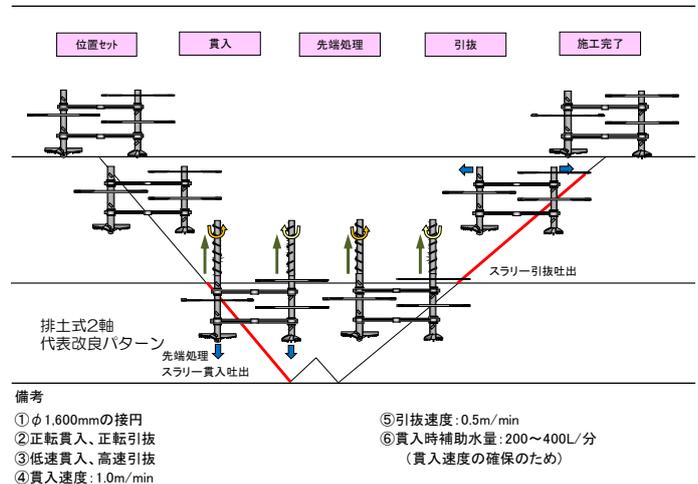


図-5 2軸改良方式の代表改良パターン

(2) 周辺変位と排土量

本実験での排出土量は、図-6 に示すように、各改良体の施工終了時にベッセルで計測した。図-7 に、改良断面と変位計測位置を示す。改良体から 2m および 5m の離隔で変位杭を設置し、施工前後の変位量を計測した。表-3 に、排土率（排土量とセメントスラリー注入量の比）と水平変位量を示す。同図より、排土率は 70~80% を示し、従来の LODIC 工法と同程度の排土が行えたと考えている。一方、地表面変位は 1mm 程度と測定誤差の範囲であった。LODIC 工法は、注入したセメントスラリー量に相当する土量を排出することで低変位施工となるため、排土率が 70~80% では少量の変位を予想していたがほとんど生じていない。これは、改良対象土層の 6 割が細粒分 10% 程度の砂質土であったことと、地表面が表層改良により固化されていたことが理由と考えている。

(3) 各軸の改良体品質

図-8 に、3 軸引抜き時の攪拌翼の回転を示す。引抜き時に中央軸と左右軸で回転方向を逆（中央軸：排土方向、左右軸：押し込み方向）にすることで、セメントスラリー吐出した左右軸から中央軸に土が移動するようにスパイラルを制御した。中央軸と左軸の 2 箇所までコアをボーリング採取し、土の移動の効果を検証した。図-9 に、一軸圧縮強さ q_u の深度分布を示す。貫入時に誤って 60 l/m³ ほど加水してしまったケース 3 の Ac1 層の一部（深さ 6~7m 付近）を除くと、中央軸と左軸に大きな違いは見られず、3 軸全体で均一に攪拌されていると考えられる。

(4) 羽根切り回数と改良体品質

本実験では、3 ケースの施工で異なる引抜き速度とすることで、羽根切り回数をケース 1 は 457 回/m、ケース 2 は 640 回/m、ケース 3 は 320 回/m としている。

図-9 より、羽根切り回数の多いケース 2 は全体的に他ケースより強度が大きく均一で、特に Ac1 層では顕著な違いが見られる。そこで、羽根切り回数と品質の関係を調べる目的で、As1 層、Ac1 層、As2 層の 3 層それぞれの変動係数と、現場強度と室内配合試験の一軸圧縮強さの比を整理した。なお、中央軸と左軸のサンプルを合わせて集計することで、左軸と中央軸の双方を含んだ改良体全体としての品質検証を試みた。

図-10 に、室内強度 \bar{q}_{ul} と平均現場強度 \bar{q}_{uf} の関係を示す。いずれも現場室内強度比が 1/1~1/2 で深層混合処理工法として一般的な比である。なお、砂層の As1、As2 は羽根切り回数に依らず室内と現場はほぼ同等であるが、粘性土層の Ac1 は羽根切り回数に応じて平均現場強度が増加していることが分かる。

図-11 に、羽根切り回数と変動係数の関係を示す。いずれの土層も羽根切り回数に応じて変動係数が小さくなっており、特に粘性土層 Ac1 では影響が大きい。CDM 工法で一般的な変動係数 40% になるには羽根切



図-6 ベッセルへの排土投入状況

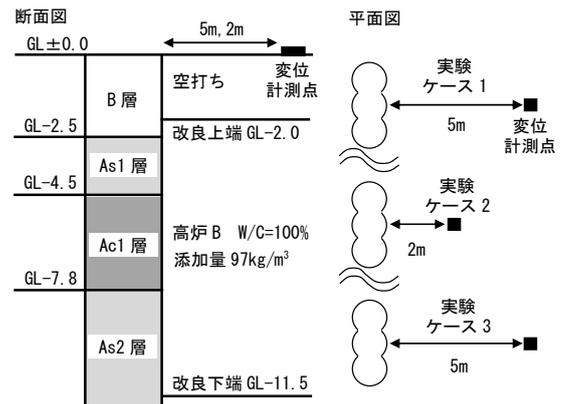


図-7 改良断面と変位計測位置

表-3 水平変位と排土率

ケース	セメントスラリー量 m ³	排土量 m ³	排土率 %	水平変位 mm
1	2.93	2.40	82	1
2	2.93	2.22	76	1
3	2.91	2.14	74	2

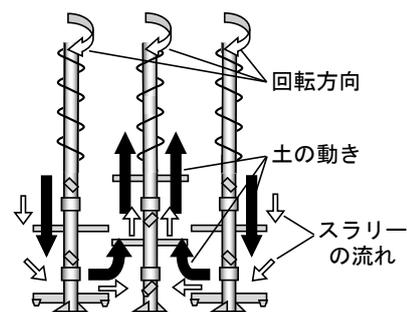


図-8 引抜き時の攪拌翼の回転

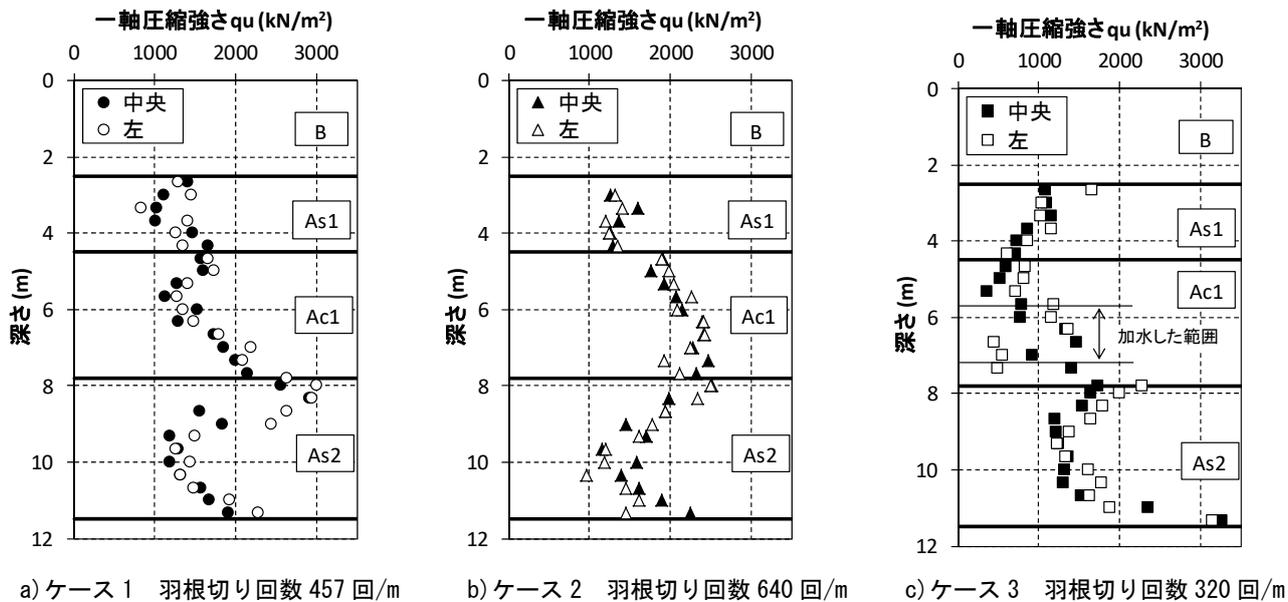


図-9 一軸圧縮強さ q_u の深度分布

り回数 300 回/m 程度が必要と言え、これまで報告した 2 軸式での傾向³⁾と同様である。しかし、Ac1 層の変動係数は、貫入時に加水してしまったケース 3 のサンプルも含んだ値のため、品質評価にはさらなるデータ収集と検証が必要である。

(5) まとめ

排土式 3 軸工法の実証実験を行った。造成時に計測された周辺変位は計測誤差程度で、十分な変位低減効果が確認された。セメントスラリーを吐出している左右軸と吐出していない中央軸で発現強度に明確な違いはなく、3 軸方式の攪拌性能が確認された。現場室内強度比は砂質土ではほぼ 1/1、粘性土では 1/1~1/2 であった。強度のバラツキは羽根切り回数に応じて変化し、CDM 工法で一般的な変動係数 40% となるには羽根切り回数 300 回/m 程度が必要と言え、粘土層ではさらなるデータ収集が必要である。

4. 排土式 2 軸工法の実験結果と考察

(1) 施工性

表-4 に、2 軸大径の実験ケースを示す。本実験では、貫入長 11.0m (空打長 2.0m、実改良長 9.0m) の改良体を 2 ケース実施した。また、攪拌翼の抵抗増加に伴う貫入速度の低下が考えられたため、貫入時に補助水を使用し、地盤の流動化を促進することで貫入速度を確保するように計画している。いずれのケースも所定の貫入、引抜き速度で実施できたため、施工性については特に問題ないと考えられる。

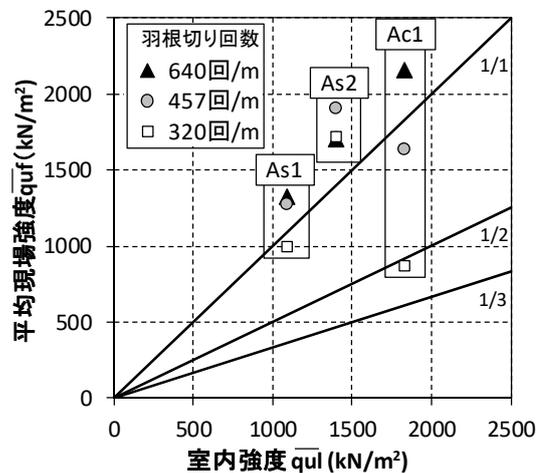


図-10 室内強度と現場強度の関係

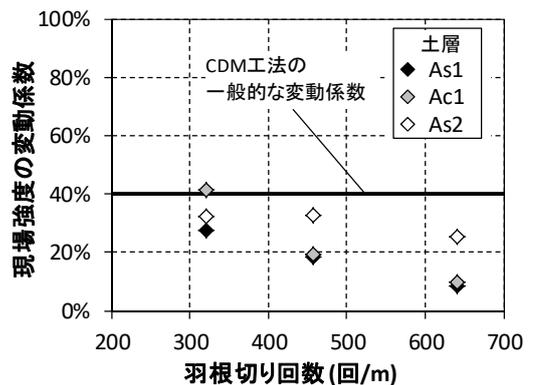


図-11 羽根切り回数と変動係数の関係

表-4 2 軸大径の実験ケース

ケース	貫入速度	引抜き速度	貫入時補助水	補助水量
4	0.7 m/分	0.7 m/分	あり	143 ℓ/m ³
5	0.7 m/分	0.8 m/分		71.5 ℓ/m ³

(2) 周辺変位と排土量

改良断面と変位計測位置を図-12、水平変位と排土率の関係を表-5 に示す。変位杭は改良体から 5m 離れた位置に設置している。なお、改良体の打設距離は芯間隔で 10m とした。注入量（補助水量+セメントスラリー一量）に対する排土率は 101~107% であり、注入量に相当する排土処理が実施できたため、地表面での水平変位は 1mm 程度と測定誤差の範囲（3 軸同様に表層固化の影響等も受けている。）であった。

(3) 改良体の品質

一軸圧縮強さ及び補助水量の深度分布を図-13 に、土層毎に見た一軸圧縮強さの平均値と変動係数の関係を表-6 に示す。ここで、図-13 の一軸圧縮強さの深度分布のうち、深度 6~6.5m 付近のサンプルが欠乏しているのは、何れのケースもセメントスラリーの吐出が所定の量を確保できなかったため、除外している。また、表-6 では B 層の判定を行っていない。これは、B 層に含まれる礫等の混入割合のばらつきが大きく、強度発現が著しく高い部分があったためである。

a) 一軸圧縮強さの深度分布

① B 層を除いて、いずれのケースも深度方向の圧縮強さは、概ね漸増する傾向にある。

② As1 層、Ac1 層上部において、補助水を多く使用しているケース 4 の圧縮強さがケース 5 に比べて高い傾向にある。この傾向は、補助水をほとんど使用していない As2 層においても同様である。

b) 圧縮強さの平均値と変動係数

① 土層毎に見た一軸圧縮強さは、両ケースともに深度方向の層順（As1 層<Ac1 層<As2 層）に高い値を示している。その平均値は、ケース 4 を 100 とした場合、ケース 5 は 73~97 の範囲にある。

② 土層毎の変動係数は、ケース 4 で 32.6~35.4% と安定しているが、ケース 5 は 13.7~57.3% とばらついている。ここで、ケース 5 の Ac1 層は、図-13 に示した圧縮強さの深度分布でも分かるように、Ac1 層の中間部分（深度 6~6.5m 付近）が欠乏し、判定に供するサンプル数が少なかったため、変動係数に大きく影響したと考えられる。

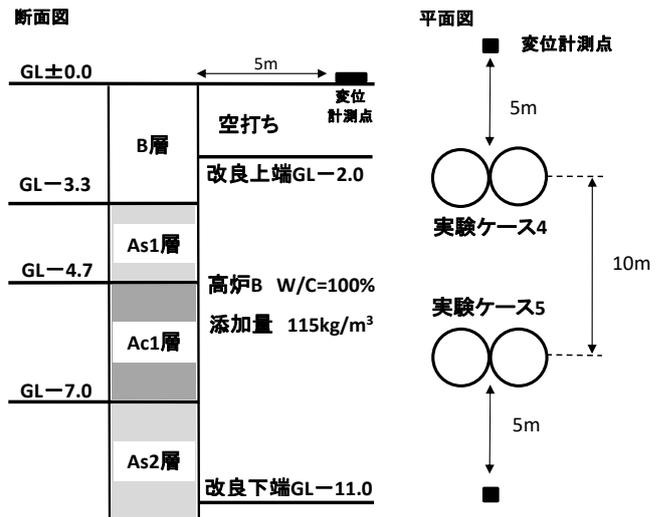


図-12 改良断面と変位計測位置

表-5 水平変位と排土率

ケース	注入量 (m ³)	排土量 (m ³)	排土率 (%)	水平変位 (mm)
4	8.69	9.29	107	1
5	7.98	8.03	101	1

注) 注入量は補助水量とセメントスラリー量の合計値を示す。

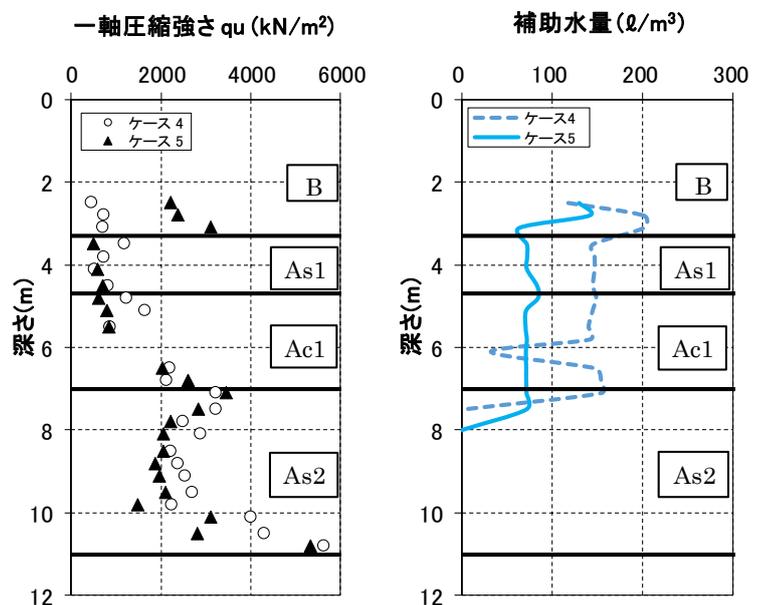


図-13 一軸圧縮強さ及び補助水量の深度分布

表-6 土層毎に見た一軸圧縮強さの平均値と変動係数

土層	平均値 (kN/m ²)		強度比	変動係数 (%)	
	ケース 4	ケース 5		ケース 4	ケース 5
As1	813	593	73	34.8	13.7
Ac1	1,615	1,564	97	35.4	57.3
As2	3,154	2,603	83	32.6	39.6

羽根切り回数 ケース 4 (457 回/m)、ケース 5 (400 回/m)

(4) 羽根切り回数と改良体の品質

羽根切り回数の多いケース 4 がケース 5 に比べて一軸圧縮強さは大きく、変動係数も安定する傾向を示している。

図-14 に、室内強度 \bar{q}_{ul} と現場強度 \bar{q}_{uf} の関係を示す。現場室内強度比は As2 層が 1/1 を超えており、As1 層と Ac1 層は 1/2~1/3 程度と低いレベルにあるが、深層混合処理工法としては一般的な比である。ここで、As1 層と Ac1 層の現場室内強度比が低いのは、現場強度が補助水の影響により抑えられたためと考えられる。

本実験で強度発現や変動係数に与えた主要因は、補助水の使用と羽根切り回数であり、それらが複合的に影響していると考えられる。なお、補助水を使用したことによって地盤の流動化が促進され、結果的に攪拌効率に寄与してきたとも考えている。

(5) まとめ

排土式 2 軸工法の実証実験を行った。2 軸大径による施工性は、補助水を使用することによって問題なく施工できることが確認された。さらに、本実験での大径施工にともなう周辺変位は測定誤差の範囲にあり、十分な変位低減効果も確認することができた。羽根切り回数および補助水の使用は、現場強度や変動係数に影響することが確認された。

本実験では一定の成果を得ることができた。その一方で、大径施工にともなう補助水の影響を考慮した室内配合試験など、従来と異なる品質管理手法を検討する必要があると考えている。

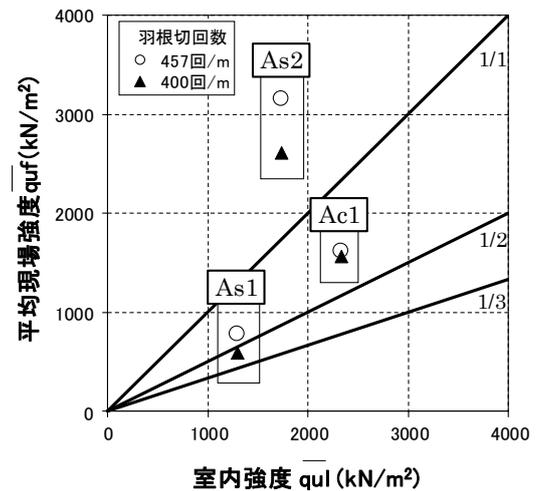


図-14 室内強度と現場強度の関係

【方法Ⅰ】

【方法Ⅱ】

セメントスラリー

換算水セメント比

C:セメント
W:配合水

C:セメント
W:配合水



W:補助水

含水比調整土



W:補助水

S:試料土

S:試料土

図-15 改良土供試体作成方法

5. 2 軸大径工法の配合試験

(1) 配合試験方法

排土式 2 軸工法の実証実験では、補助水を用いるため、事前に実施した通常の室内配合試験とは W/C が異なると考えられる。そのため、追加の配合試験を行い、補助水の供給が改良効果に及ぼす影響について検討した。補助水を考慮する試験方法には、図-15 に示すように、2 種類の試験方法が考えられる。「方法Ⅰ」は、規定量の試料土と補助水を合わせて一次攪拌を行い、含水比調整試料土を作成する。次に、含水比調整試料土とセメントスラリーを二次攪拌する方法であり、「方法Ⅱ」は、規定量の補助水および規定配合の配合水量から水セメント比を見直した換算水セメント比のセメントスラリーを、規定量の試料土と混合攪拌することで改良土供試体を作成する方法である。

しかしながら、JGS 0821-2000 (安定処理土の締固めをしない供試体作製方法) に準じて行う配合試験方法では、試料土とセメントスラリーの

表-7 追加配合試験結果

No.	W/C	対象層	セメント 添加量 kg/m³	補助水量		換算 W/C	一軸圧縮強さ kN/m²
				ℓ/分	ℓ/m³		
1	1.00	As1	115	0	0	1.00	1,950
2				300	107	1.93	1,050
3				400	143	2.24	889
4		Ac1		0	0	1.00	3,340
5				200	71.5	1.62	2,350
6				400	143	2.24	1,910

表-8 実測データと換算 W/C

a) As1 層					b) Ac1 層				
ケース	一軸圧縮強さ kN/m ²	補助水 kg/m ³	セメント添加量 kg/m ³	換算 W/C	ケース	一軸圧縮強さ kN/m ²	補助水 kg/m ³	セメント添加量 kg/m ³	換算 W/C
4	1,192	145	118	2.23	4	1,233	149	120	2.25
	727	148	118	2.26		1,651	145	119	2.22
	515	148	117	2.27		866	141	120	2.18
	817	146	140	2.05		2,196	148	118	2.26
5	492	73	117	1.63		2,126	127	117	2.09
	583	73	116	1.63		5	791	72	116
	689	84	116	1.73	836		72	116	1.63
609	85	117	1.73	2,033	72		116	1.63	
				2,595	72		133	1.55	

練混ぜ時間の基準はあるが、試料土と補助水の練混ぜ基準はないので、今回は試料土と換算水セメント比のセメントスラリーを練混ぜる「方法Ⅱ」で改良土供試体を作成し、配合試験を行った。

(2) 配合試験結果

実証実験では、貫入時の施工速度は 0.7 m/分を、補助水供給量はケース 4 で 143 ℓ/m³、ケース 5 で 71.5 ℓ/m³ で施工したので、追加配合試験では補助水の添加量を 143 ℓ/m³ を最大とし、107 ℓ/m³、71.5 ℓ/m³、補助水無しの 4 種類を比較対象とした。また、セメント添加量は各層ともに実証実験の添加量 115 kg/m³ に合わせ、規定配合の配合水量に補助水量を加えたセメントスラリーを作成し、追加の室内配合試験を行った。なお、As2 層は先端処理区間となり貫入時にセメントスラリーを供給し、補助水を供給してないので対象から除外した。

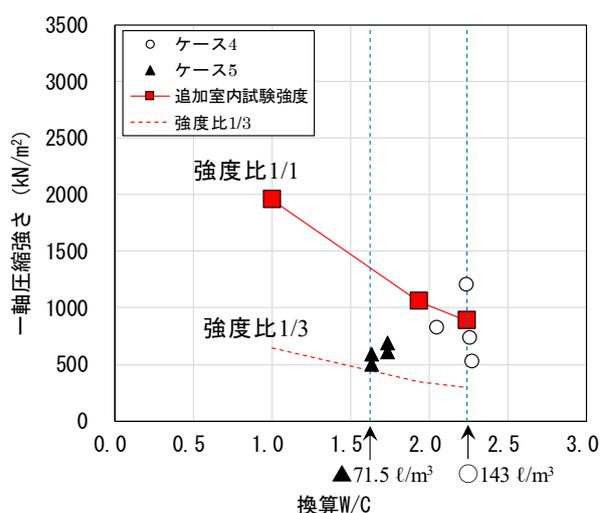
表-7 に、追加配合試験結果を示す。As1 層、Ac1 層ともに補助水量が増加し、セメントスラリーの W/C が大きくなると一軸圧縮強さは減少する結果となった。

(3) 配合試験結果

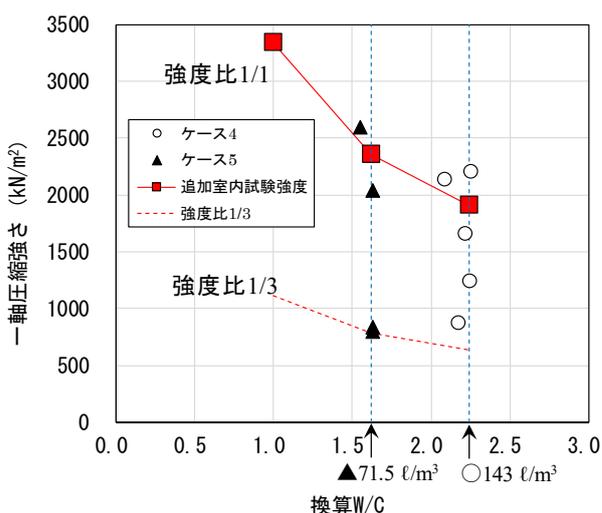
表-8 に、実証実験での実測データと換算 W/C を示す。補助水とセメント量は、各杭の実際の貫入引抜き速度および流量計から計測した貫入時の補助水量と引抜き時のセメントスラリー注入量より算出し、W/C に換算した。

図-16 に、一軸圧縮強さと換算 W/C の関係を示す。

現場目標強度は現場/室内比(1/3)より、追加室内配合強度の 1/3 とした。ケース 4 は 143 ℓ/m³ (換算 W/C 2.24)、ケース 5 は 71.5 ℓ/m³ (換算 W/C 1.62) が補助水の目標値である。今回の実証実験では、補助水供給量を一定で管理したため、貫入速度の増減により供給量にも多少の増減はあるが、As1 層と Ac1 層ともに目標付近



a) As1 層



b) Ac1 層

図-16 強度と換算 W/C の関係

で補助水が供給されていて、強度比はおおむね 1/1～1/3 の範囲であった。

ケース 4 と比較してケース 5 では、一軸圧縮強さのばらつきが大きい結果となった。ケース 5 はケース 4 よりも供給する補助水量は少ないが、引抜き速度を上げたため、羽根切り回数が少なくなっている。

貫入時に供給された補助水は、攪拌翼により原地盤と混合され流動化される。引抜き時には、流動化した状態にセメントスラリーが注入されることとなり、補助水を供給することが攪拌効率に寄与したとも考えられる。また、Ac1 下層で、追加配合試験の一軸圧縮強さよりも高い結果があるのは補助水と羽根切り回数の影響の可能性も考えられる。

(4) まとめ

今回は、事前配合試験結果の添加量と、実際に供給した貫入補助水量の実証実験結果を踏まえた追加配合試験を行うことで強度と換算 W/C の関係を整理した。

現場強度は、W/C を高く設定した追加配合試験結果のおおむね 1/1～1/3 の範囲になっていることから、室内配合試験で補助水を考慮した試験を追加することで品質管理を行うことが可能と考えている。しかしながら、今回の試験では、補助水供給層によってはばらつきが大きい箇所もあった。現段階では、このばらつきを評価するには試料数が不足しているので、さらなる検討が必要である。

6. おわりに

LODIC 工法の更なる効率化を目的として実施した 3 軸化、2 軸大径化の実証実験の概要について報告した。排土式 3 軸工法および排土式 2 軸工法ともに、施工性に問題がないことが確認され、周辺地盤変位も誤差程度しか発生していないことが確認された。3 軸化により、同径 2 軸と比較して施工性が 50%程度向上することが期待される。さらに、2 軸大径化により、改良面積が 2.56m² (2 軸 φ1,300mm 接円) から 4.02 m² (2 軸 φ1,600mm 接円) と約 50%大きくなった。

参考文献

- 1) 変位低減型深層混合処理工法 (CDM-LODIC 工法) 技術積算資料, CDM 研究会, 2006.
- 2) 上村他: 変位低減型深層混合処理工法 (LODIC 工法) の大径化, 基礎工, Vol.32, No.7, pp.84-86, 2004.
- 3) 土屋他: 排土式変位低減型深層混合処理工法の効率化(攪拌混合効率と開発動向), 基礎工, Vol.45, No.6, pp.34-36, 2017.