

관중혼합공법의 적용을 위한 개질처리 준설토의 실내실험 특성 및 적정 규격 결정

Determination of Characteristics of Laboratory Test and Proper Specification of Reformed Dredging Soil for Applying Pipe Mixing Method

전 상 옥¹⁾ · 강 병 윤²⁾ · 백 승 철[†]

Sangok Jeon · Byungyoon Kang · Seungcheol Baek

Received: January 27th, 2022; Revised: February 8th, 2022; Accepted: March 7th, 2022

ABSTRACT : In order to improve dredged area, long time and high cost is needed because of bad engineering and physical conditions. And there is no suitable example of pipe mixing method at domestic site. Moreover, applicability and effectiveness of this method is uncertain and shows different results between site and laboratory test. In order to solve these problems, we determined proper grain size distribution and water content range using dredged soil and reformed material (standard sand & material controlling grain size distribution) in the laboratory test. As a result, we confirmed that coefficient of sediment consolidation is increased and there is an improvement about separation sedimentation. Undrained shear strength was derived by water content of reformed dredging soil through regression analysis of test results. We suggest the correlation equation for determining mixing ratio.

Keywords : Pipe mixing method, Dredging soil, Reforming material (R.M.), Correlation equation

요 지 : 준설토 매립지반의 경우 공학적, 물리적 조건이 열악하여 매립현장에서 이를 개량하기 위한 시간과 비용이 많이 든다. 또한 국내 실정에 적합한 관중혼합 이송처리 공법의 적용사례가 없고 공법 적용성 및 효과에 관하여 불확실할 뿐 아니라 실제 현장과 실내실험 간의 차이가 발생할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 개질재(표준사+입도조절재)가 혼합된 준설토를 대상으로 실내 특성실험을 통해 개질재의 적정한 입도분포 및 함수비 범위를 결정하였다. 그 결과 단계투기 시 침강압밀계수가 증가하고 분리침강에 대한 개선효과가 있는 것으로 확인되었다. 실험결과 회귀분석을 통해 개질 처리토의 함수비에 따른 비배수전단강도를 도출하고, 이를 활용하여 배합비를 결정할 수 있는 상관식을 제시하였다.

주요어 : 관중혼합공법, 준설토, 개질재, 상관식

1. 서 론

관중혼합 처리공법은 불량한 준설토의 관내 이송 중에 고화재 및 개질재를 첨가하여 관내에서 준설토의 토질을 개선하는 공법이다. 따라서 준설토 이송이 완료된 후 매립지에서 별도로 개량을 실시하는 기존의 방법과 비교하여 시공관리가 용이하고, 표층처리 또는 장기방치가 불필요하여 공사기간을 단축하고 공사비용을 감소시켜줄 수 있다는 장점이 있다.

현재 관중혼합공법이 가장 활발하게 적용되고 있는 나라는 일본으로 많은 건설회사에서 다양한 관중혼합공법을

보유하고 있다. 그러나 대부분 압송 중인 준설토 슬러리에 고화재 슬러리를 혼합하여 고화처리하는 방식이다(Han et al., 2015, Uezono et al., 2000). 현재 국내에서는 준설토에 시멘트계열의 고화재 혼합이 아닌 개질재를 첨가하는 것에 대한 선행사례는 없는 것으로 판단된다. 본 연구에서는 불량한 준설토에 고화재 대신 개질재를 첨가하였을 때 나타나는 물리적 및 역학적 특징에 대해서 실내배합실험을 실시하였고, 이 결과를 바탕으로 적정한 배합비를 산정하였으며 배합비 결정식을 제시하였다.

1) Director, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

2) Principal Researcher, Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation

† Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University (Corresponding Author : civilb@anu.ac.kr)

2. 실내실험

2.1 개요

본 연구는 준설토의 관내 이송 중 개질 처리하는 관중혼합 이송처리공법의 국내 현장 적용을 위한 것으로 침강, 강도, 유동성 등의 실험을 통해 개질 처리토의 특성을 파악하고 실내실험 결과를 토대로 개질 처리토에 대하여 최적 배합비 산정 방법을 도출하였다.

실내실험 수행 시 사용한 준설토 시료는 특정 지역의 현장 준설토가 아닌 표준시료로서 점토의 경우 카올리나이트, 개질재는 주문진 표준사와 입도조절을 위한 인조규사(이하 입도조절재)를 일정비율로 혼합하여 사용하였다(Chae et al., 2015).

토질의 물리적 특성시험은 흙의 분류(KS F 2324), 흙의 입도분석(KS F 2309), 액·소성한계시험(KS F 2303, 2304), 비중시험(KS F 2308), 함수비시험(KS F 2306) 등이 수행되었고, 관중혼합개질처리토의 특성을 규명하기 위해 유동성 시험, 침강자중압밀시험, 부유입자농도 및 실내 배인시험을 실시하였다. 또한 국내의 현장 조건 및 관중혼합 이송처리 공법에 가장 적합한 배합비를 선정하기 위해 여러 가지 조건에서의 배합비 결정 시험을 실시하였다.

시험종류는 개질재 첨가에 따른 특성분석 실험, 개질재(입도조절재 첨가) 입도분포 결정 및 함수영역선정 실험, 준설토 투기방법(투기속도 10cm/day, 20cm/day)에 따른 특성 분석 실험을 실시하였다.

2.2 실내실험 결과

2.2.1 개질재(표준사 100%) 첨가 시 특성

관중혼합 이송개질처리토의 특성분석시험에 앞서 예비시험을 수행하여, 이송 준설토의 함수비(300~1,000%)와 개질재

Table 1. Test condition (Standard sand 100%)

Sample	w.c. of dredged soil (%)	Amount ratio by weight of R.M.		
		Dredged soil	R.M.	
			Standard sand	GSD
Clay + R.M.	300	100	0	0
		80	20	0
		60	40	0
	500	100	0	0
		80	20	0
		60	40	0
	1,000	100	0	0
		80	20	0
		60	40	0

첨가량(0~40%)에 따른 침강, 입도, 강도 및 부유입자농도 등의 특성을 분석하였으며 실험조건을 Table 1과 같이 정리하였다.

침강시험 결과 개질재 첨가량 및 이송준설토의 함수비는 침강속도와 비례하며, 침강압밀계수와는 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 또한 침강특성에 미치는 영향은 개질재 첨가량에 비해 준설토 함수비가 큰 것으로 나타났으며, 준설토 함수비에 따라 침강속도는 약 1.39~4.23배, 침강압밀계수(Cs)는 약 1.06~1.60배의 개선효과가 있는 것으로 분석되었다(Table 2).

입도(No.200체 통과량) 분석결과 개질재 첨가량에 따라 배합조건에 따른 하부 입도차이가 크며, 따라서 상/하부의 입도차이가 큰 것으로 확인되었다(Fig. 1). 이는 개질재 첨가에 따른 분리침강 때문으로 판단된다(Park et al., 2011).

배인시험 결과 이송 준설토의 함수비 및 개질재 첨가량에 따라 강도가 감소하였으며, 두 영향인자가 강도특성에 미치는 영향은 유사한 것으로 확인되었다(Table 3).

부유입자농도의 허용기준 만족 시점(250mg/L) 도달시간은 개질재 첨가량 및 이송 준설토의 함수비에 따라 대체로 감소하는 경향을 나타내었다(Table 4).

Table 2. Increasing ratio based on result of sediment self weight consolidation test and water content (w.c.) ratio

Sample	w.c.* of dredging soil (%)	Mix ratio (weight)		Sediment velocity (cm/min)	Increasing ratio
		Dredging soil	Reforming material		
Dredging soil + Reforming material	300%	100	0	0.13	1.0
		80	20	0.13	1.0
		60	40	0.17	1.0
	500%	100	0	0.18	1.39
		80	20	0.20	1.54
		60	40	0.31	1.82
	1,000%	100	0	0.43	3.31
		80	20	0.55	4.23
		60	40	0.68	4.0
Sample	w.c. of dredging soil (%)	Mix ratio (weight)		Sediment consolidation coefficient (cm/min)	Increasing ratio
		Dredging soil	Reforming material		
Dredging soil + Reforming material	300%	100	0	0.15	1.0
		80	20	0.16	1.0
		60	40	0.17	1.0
	500%	100	0	0.19	1.27
		80	20	0.24	1.50
		60	40	0.18	1.06
	1,000%	100	0	0.24	1.60
		80	20	0.23	1.44
		60	40	0.27	1.59

* w.c : water content

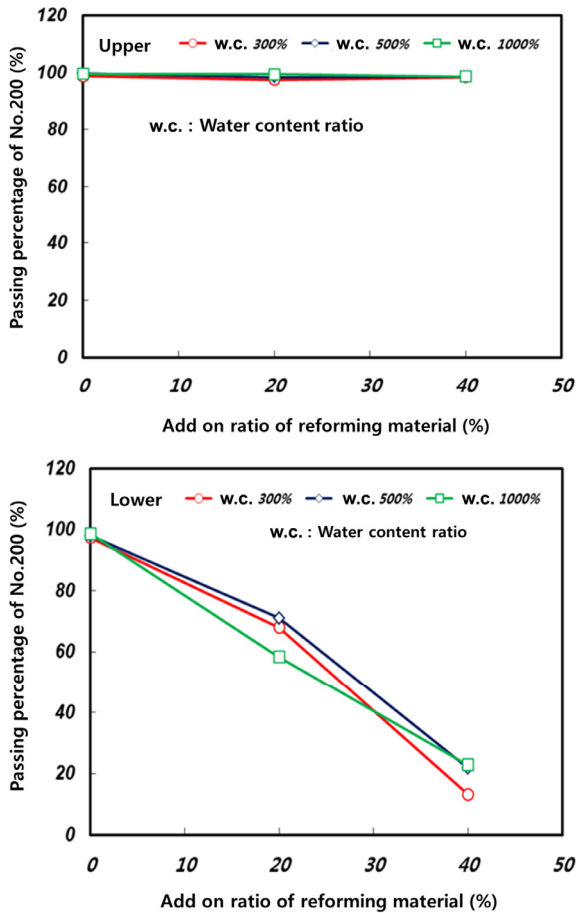


Fig. 1. Passing percentage of No.200 sieve based on adding of reforming material

Table 3. Results of vane test

Sample	Water content (%)	Torque reading	Su (kPa)
Clay 100%	300	0.85	4.17
	500	0.70	3.43
	1,000	0.40	1.96
Clay 80 : Sand 20	300	0.65	3.19
	500	0.60	2.94
	1,000	0.45	2.21
Clay 60 : Sand 40	300	0.42	2.06
	500	0.38	1.86
	1,000	0.35	1.72

Table 4. Passage hour of allowable suspended particle concentration by water content (w.c.) and mixing ratio of reforming material

Mixing ratio	w.c.	Passage hour of allowable suspended particle concentration (hr)		
		300%	500%	1,000%
Clay 100%		23.7	7.2	4.1
Clay 80 : Sand 20		5.9	6.5	0.7
Clay 60 : Sand 40		2.1	1.6	0.3

점토 100%의 부유입자농도 허용기준 도달시간은 함수비 증가에 따라 감소하는 경향을 보였다. 하지만 개질재를 첨가할 경우는 점토 100%에 비해서 수치적으로는 상당히 감소하였으나 준설토 함수비 대비 500%까지는 부유입자농도 허용기준 도달시간에 대한 개선효과가 거의 나타나지 않고 함수비 1,000%에서는 다시 상당한 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 함수비 보다는 개질재의 첨가량이 허용농도 도달시간을 단축시키는데 더 효과적인 것으로 판단된다.

따라서 개질재 첨가 시 침강속도는 증가하나 상/하부의 입도차이가 크고, 비배수전단강도의 변화는 미미하거나 감소하므로 분리침강이 발생한 것으로 판단된다. 또한 빈입도 개질재의 입도 개선이 필요한 것으로 판단된다.

2.2.2 개질재에 입도조절재 첨가 시 입도분포 결정

표준사만 개질재로 사용하는 경우 분리침강이 발생하므로 개질재 및 입도조절재 첨가량에 따른 침강, 입도, 강도, 부유입자농도 등의 특성을 분석하였다. 이에 대한 실험조건은 Table 5와 같다.

침강시험 결과 침강압밀계수는 개질재 및 입도조절재 첨가량에 반비례하나 큰 차이는 없는 것으로 확인되었으며, 두 영향인자에 따른 침강속도 개선비는 0.73~1.0배, 침강압밀계수 개선비는 0.68~0.98배로 확인되어 침강특성에 미치는 영향은 미미한 것으로 분석되었다(Table 4). 이는 혼합토 내 세립분이 많아져 모래성분의 개질재가 초기에 침강되지 못하고 부유하는 현상으로 인해 침강압밀이 방해를 받기 때문인 것으로 판단된다.

개질재로서 표준사만 100% 첨가 시 분리침강이 27.2~85.1%로 크게 발생하였으나(Table 7(a)) 입도조절재를 추가하였을 경우 분리침강이 4.7~27.2%로 개선되었다(Table 7(b)).

베인시험 결과 개질재로서 표준사만을 사용하였을 경우에는 점토 100%와 비교하여 비배수전단강도가 최소 1.23배가 증가하였고(Fig. 2), 입도조절재(규사)를 추가로 첨가하였을

Table 5. Test condition (mixing reforming material and GSD)

Sample	w.c. of dredged soil (%)	Amount ratio by weight of R.M. (Sand+GSD)		GSD ratio in R.M.
		Dredged soil	R.M.	
Clay + R.M.	500	80	20	40
				60
				80
		70	30	40
				60
				80
	60	40	40	
			60	
			80	

Table 6. Result of sediment self-weight consolidation test

Sample	Weight ratio of R.M.*		Mix ratio of controlling material of GSD*	Sediment velocity (cm/min)	Increasing ratio
	Clay	R.M.			
Clay + R.M.	80	20	40	0.087	1.0
			60	0.088	1.0
			80	0.087	1.0
	70	30	40	0.087	1.0
			60	0.074	0.84
			80	0.064	0.73
	60	40	40	0.077	0.89
			60	0.077	0.88
			80	0.069	0.79
Sample	Weight ratio of R.M.*		Mix ratio of controlling material of GSD*	Sediment consolidation coefficient (cm/min)	Increasing ratio
	Clay	R.M.			
Clay + R.M.	80	20	40	0.207	1.0
			60	0.183	1.0
			80	0.192	1.0
	70	30	40	0.172	0.83
			60	0.157	0.86
			80	0.148	0.77
	60	40	40	0.140	0.68
			60	0.137	0.98
			80	0.132	0.97

* R.M. : Reforming material, GSD : Grain Size Distribution

경우에는 개질재로 표준사를 사용한 것에 비하여 최대 2.95 배의 강도 증진효과가 있는 것으로 확인되었다. 또한 입도 조절재 첨가 시 분리침강이 개선됨에 따라 표층강도가 증진 되는 것으로 확인되었다(Fig. 3).

점토에 개질재를 첨가할 경우 점토 100%인 경우에 비해 비배수전단강도가 전반적으로 커지는 경향을 보였으나 입도 조절재 비율을 40, 60, 80%로 추가로 첨가하였을 경우에는

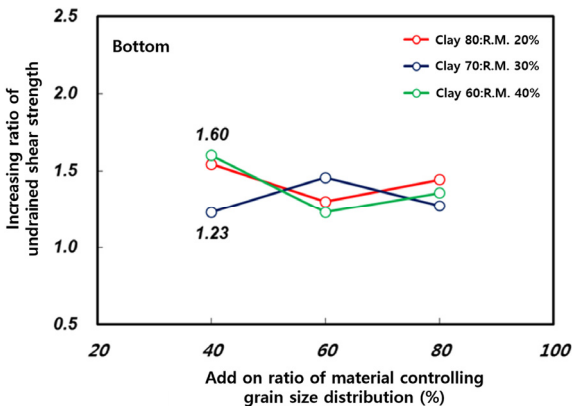


Fig. 2. Increasing ratio of undrained shear strength based on adding reforming material (compared with 100% clay)

Table 7. Result of sieve analysis test

(a) 100% standard sand as reforming material

Mixing case	Depth (m)	Grain size distribution (%), Finer than			
		No.200	Grain size distribution difference of top and bottom (%)	0.005 mm	0.002 mm
300% (8:2)	Top	97.4	29.3	32.1	21.3
	Bottom	68.1		20.9	15.3
500% (8:2)	Top	98.3	27.2 (Min)	34.0	24.3
	Bottom	71.1		23.3	14.5
1,000% (8:2)	Top	99.4	41.1	29.2	18.8
	Bottom	58.3		10.5	7.2
300% (6:4)	Top	98.4	85.1 (Max)	38.1	25.6
	Bottom	13.3		-	-
500% (6:4)	Top	98.5	76.7	38.4	27.6
	Bottom	21.8		-	-
1,000% (6:4)	Top	98.6	76.6	36.4	24.1
	Bottom	22.9		-	-

(b) Adding on material controlling grain size distribution to 100% standard sand as reforming material

Mixing case	Depth (m)	Grain size distribution (%), Finer than			
		No.200	Grain size distribution difference of top and bottom (%)	0.005 mm	0.002 mm
300% (8:2)	Top	100.0	27.2 (Max)	42.5	27.9
	Bottom	72.8		21.3	14.6
500% (8:2)	Top	100.0	26.2	37.6	30.4
	Bottom	73.8		30.5	22.6
1,000% (8:2)	Top	100.0	12.3	43.9	34.1
	Bottom	87.7		21.0	14.9
300% (6:4)	Top	100.0	16.5	38.6	29.0
	Bottom	83.5		19.6	13.9
500% (6:4)	Top	100.0	4.7 (Min)	34.8	27.4
	Bottom	95.3		31.1	22.6
1,000% (6:4)	Top	100.0	24.5	41.2	38.3
	Bottom	75.5		41.0	38.1

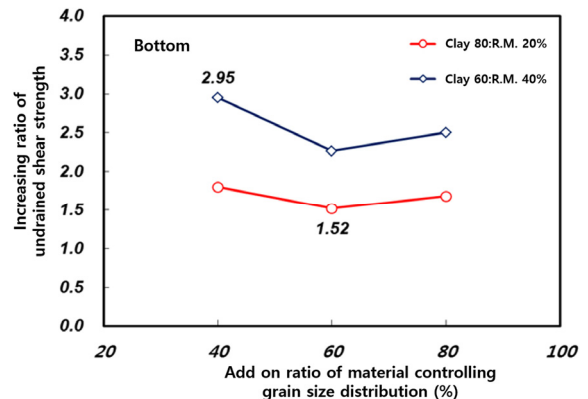


Fig. 3. Increasing ratio of undrained shear strength based on adding on material controlling grain size distribution (compared with mixing clay and reforming material)

특별한 경향을 보이지는 않아 입도조절재로 인한 강도증가 효과는 없는 것으로 판단된다.

개질재 첨가량이 증가하고, 입도조절재 첨가량이 적을수록 부유입자농도 허용기준 만족시점이 단축되는 경향을 나타내었으며, 점토 100% 첨가 시에 비하여 약 1.17~2.02배 침강축진효과가 있는 것으로 확인되었다(Fig. 4).

따라서 입도조절재를 혼합한 개질재 첨가 시 표준사 100% 대비 침강축진효과는 다소 감소하나, 상/하부의 입도차이가 적어 분리침강이 개선되고 강도가 증가되는 것으로 확인되었다. 표준사와 입도조절재의 중량비를 3단계(60:40, 40:60, 20:80)로 구분하여 침강, 입도분포, 강도 등의 시험결과를 토대로 최대입경, 중요입경의 통과량 범위 및 첨가중량비 등의 개질재의 규격을 Fig. 5와 Table 8로 결정하였다.

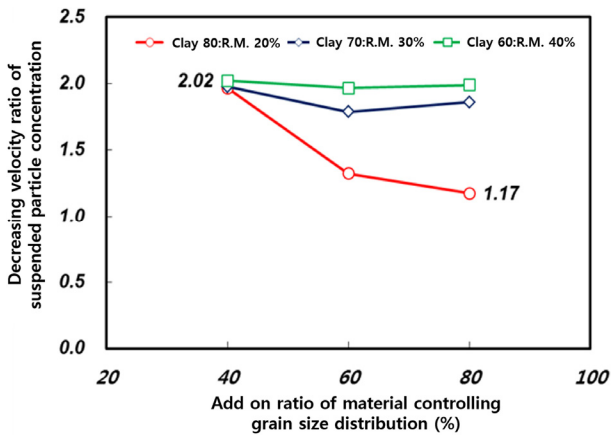


Fig. 4. Ratio of decreasing velocity of suspended particle concentration based on adding material controlling grain size (compared with 100% clay)

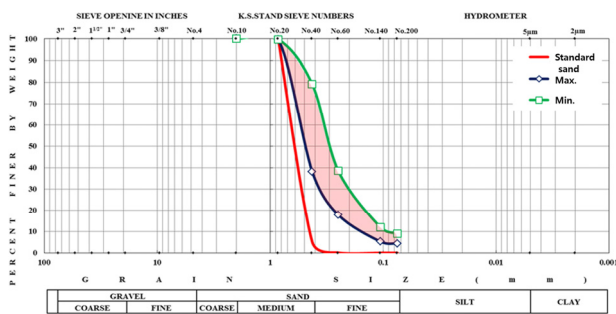


Fig. 5. Selection on specification of reforming material

Table 8. Specification of reforming material

Item	Max diameter	Passing percentage (%)				Adding amount (weight)
		No.40	No.60	No.160	No.200	
Reforming material (incl. controlling GSD)	0.85mm	40~80	20~40	5~10	Under 10	30~40%

2.2.3 개질재에 입도조절재 첨가 시 함수비 영역선정시험

개질재 입도분포 결정시험을 통해 결정된 개질재의 입도 및 첨가량 범위 내에서 개질재 및 이송준설토의 함수비, 개질재 첨가량에 따른 관중혼합 이송개질처리토의 침강, 입도, 강도, 부유입자농도, 유동성 등의 특성을 분석하였고 실험 조건은 Table 6과 같다.

침강시험 결과 침강속도는 이송준설토의 개질재 첨가량에 비례하였으나 함수비와는 상관성이 없는 것으로 나타났다(Fig. 6).

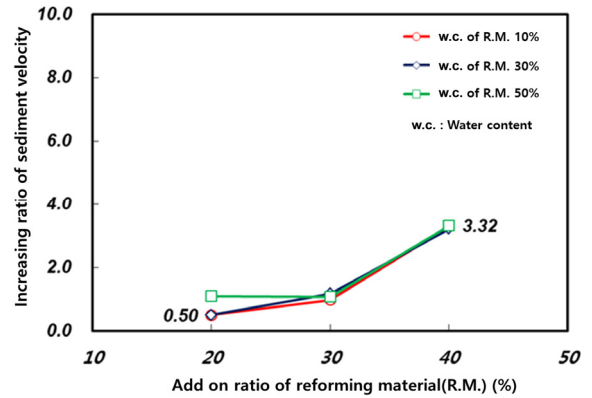


Fig. 6. Reforming ratio of sediment velocity based on adding reforming material (compared with 100% clay)

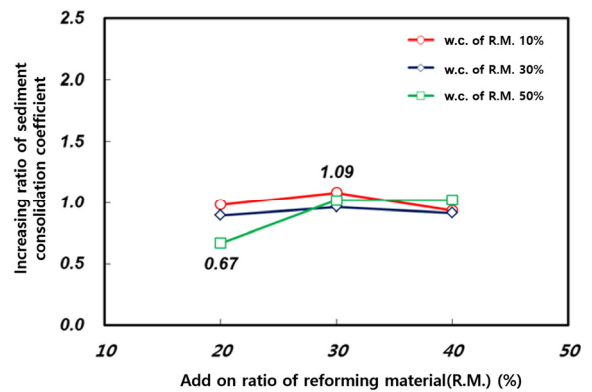


Fig. 7. Reforming ratio of sediment consolidation coefficient based on adding reforming material (compared with 100% clay)

Table 9. Test condition (Selection of water content range of R.M.)

Sample	w.c. of dredged soil (%)	Amount ratio by weight of R.M. (Sand+GSD)		w.c. of R.M. (%)
		Dredged soil	R.M.	
Clay + R.M.	300	80	20	10
				30
				50
	500	70	30	10
				30
				50
	1,000	60	40	10
				30
				50

* 40% GSD ratio in reforming material

개질재의 침강압밀계수는 개질재 함수비와 첨가량에 상관성을 보이지 않았다(Fig. 7).

입도(No.200체 통과량) 분석결과 상/하부의 입도차이가 6.3~20.8%로 확인되어 표준사 100%(27.2~85.1%) 대비 분리침강이 개선되는 것으로 확인되었다(Table 10).

베인시험 결과 비배수 전단강도는 개질재 첨가량 및 이송

Table 10. Result of sieve analysis test (In case of adding material reforming and controlling grain size distribution)

Mixing case	Depth (m)	Grain size distribution (%), Finer than			
		No.200	Gran size Distribution difference of top and bottom (%)	0.005	0.002
		0.075 mm		mm	mm
Clay 80 : R.M. 20 w.c. 300 (Clay) 30 (R.M.)	Top	100.0		48.2	29.9
	Mid	100.0		38.5	27.4
	Bottom	88.4		23.3	17.9
Clay 80 : R.M. 20 w.c. 300 (Clay) 50 (R.M.)	Top	100.0	20.8	43.4	28.2
	Mid	100.0		42.1	27.4
	Bottom	79.2		21.1	17.2
Clay 70 : R.M. 30 w.c. 500 (Clay) 10 (R.M.)	Top	100.0		38.6	27.0
	Mid	100.0		40.1	28.4
	Bottom	79.7		25.1	20.3
Clay 70 : R.M. 30 w.c. 500 (Clay) 30 (R.M.)	Top	100.0		38.0	27.8
	Mid	100.0		37.2	26.2
	Bottom	80.6		26.6	20.5
Clay 70 : R.M. 30 w.c. 500 (Clay) 50 (R.M.)	Top	100.0		41.0	31.4
	Mid	100.0		33.7	26.1
	Bottom	87.7		24.8	18.0
Clay 60 : R.M. 40 w.c. 1,000 (Clay) 10 (R.M.)	Top	100.0	6.3	43.4	34.2
	Bottom	93.7		30.0	21.5
Clay 60 : R.M. 40 w.c. 1,000 (Clay) 30 (R.M.)	Top	100.0		40.7	28.2
	Bottom	91.6		28.3	18.1
Clay 60 : R.M. 40 w.c. 1,000 (Clay) 50 (R.M.)	Top	100.0		41.4	30.4
	Bottom	93.6		28.8	20.0

준설토 함수비에 반비례하며, 준설토 함수비 500% 초과 시 개질재 함수비에 따른 강도 차이는 미미한 것으로 확인되었다(Fig. 8, Fig. 9). 또한 점토 100% 대비 1.09~1.90배의 강도증진 효과가 있는 것으로 확인되었다(Fig. 10).

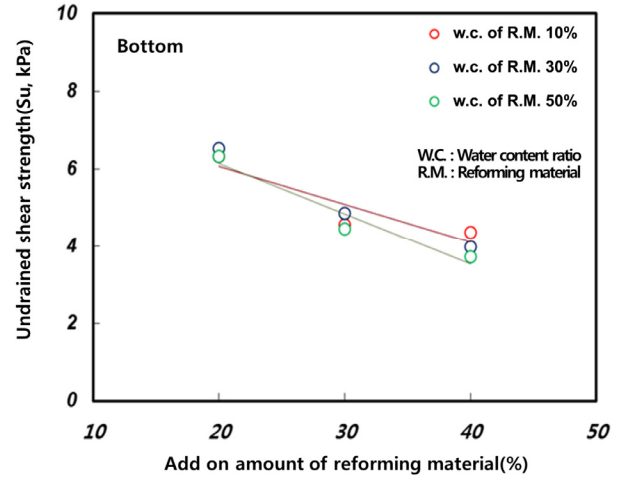


Fig. 8. Undrained shear strength based on add on amount of reforming material

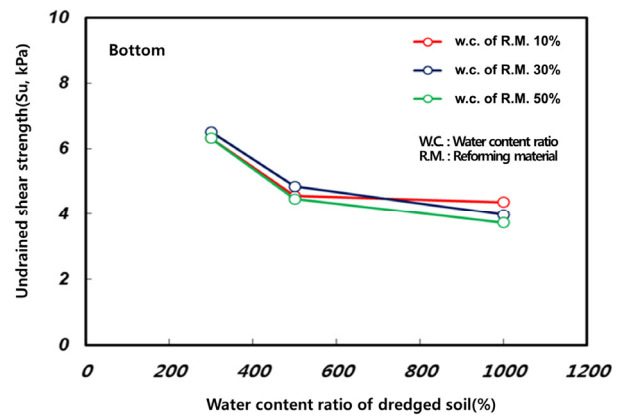


Fig. 9. Undrained shear strength based on water content ratio of dredged soil and reforming material

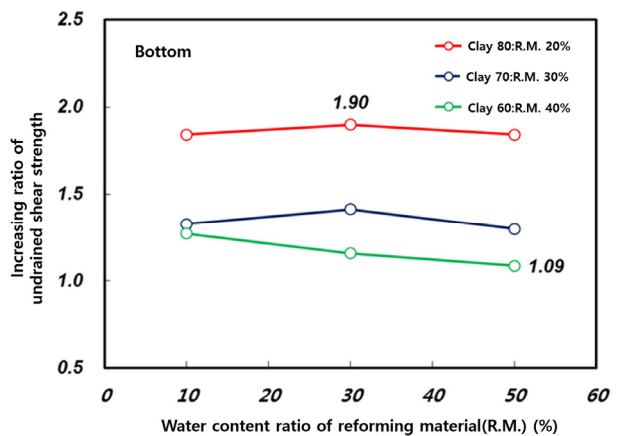


Fig. 10. Increasing ratio of undrained shear strength based on adding reforming material (compared with 100% clay)

부유입자농도 허용기준 만족시점을 검토한 결과 이송 준설토 및 개질재 함수비, 입도조절재 첨가량에 따라 감소하는 경향을 나타내었으나, 준설토 함수비 500% 이상에서는 개질재 함수비에 따른 차이가 미미하고 입도조절재를 첨가한 개질재를 30% 이상 첨가 시 침강축진 효과가 발현되는 것으로 확인되었다(Table 11). 또한 점토 100% 대비 부유입자농도 감소속도가 약 0.78~3.31배 증가하였다(Fig. 11).

관내에서 개질재 혼합 시 관내 부하 감소 및 유속확보를 위해 유동성 시험을 수행한 결과 Table 12와 같이 개질재 함수비 50% 이상인 조건에서 흐름값(Flow value)이 급격히 커져서 유동성이 확보되는 것으로 확인되었다.

이상의 결과를 종합한 결과 입도조절재를 혼합한 개질재 첨가 시 입도개선 및 침강축진 효과가 있으며, 이에 따라 강도가 증가되는 것으로 확인되었다. 따라서 관중혼합 이송개질 처리 시 개질재의 함수비는 50% 이상을 확보해야

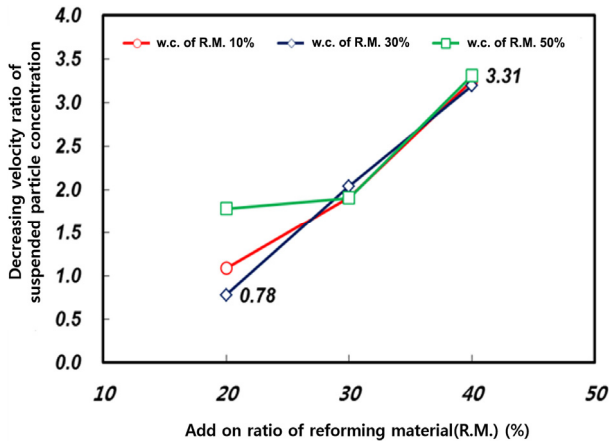


Fig. 11. Increasing ratio of decrease velocity of suspended particle concentration based on adding reforming material (compared with 100% clay)

Table 11. Measurement result of suspended particle concentration

Case	w.c. of dredged soil (%)	Add on amount of R.M. (%)	w.c. of R.M. (%)	Acceptable limit of suspended particle concentration (mg/L)	Elapsed time of acceptable limit (hr)
Clay 80 : R.M. 20	300	20	10	250	6.66
			30		9.29
			50		4.06
Clay 70 : R.M. 30	500	30	10		3.78
			30		3.55
			50		3.80
Clay 60 : R.M. 40	1,000	40	10	2.23	
			30	2.27	
			50	2.19	

하며, 개질재(입도조절재 포함) 첨가량 30~40%로 결정하였다(Table 13).

2.2.4 준설토 투기방법에 따른 특성

실제 현장에서 준설토는 단계투기방법을 적용한다. 그러나 앞서 수행한 시험에서는 일시투기조건으로 실험하였으므로 투기속도에 따른 영향을 검토하였고 그 조건은 Table 14와 같다.

침강시험 결과 침강속도는 투기속도에 반비례하였으며, 침강압밀계수는 투기속도에 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 또한 일시투기 시에 비하여 침강속도는 감소한 반면, 침강압밀계수는 준설토 100%(함수비 500%) 조건의 0.19cm/min에 비해 약 2.46~2.48배 증가한 것으로 검토되었다(Table 15).

Table 12. Result of flow test

Sample	Amount ratio by weight of R.M.		w.c. of reforming material (%)	Flow value (mm)
	Standard sand	Reforming material		
Reforming material + GSD controlling material	60	40	10	0.0
			20	3.4
			30	12.0
			40	22.0
			50	122.0
	40	60	10	0.0
			20	0.0
			30	7.4
			40	20.0
			50	44.0
20	80	10	0.0	
		20	0.0	
		30	4.5	
		40	17.0	
		50	72.0	

Table 13. Specification of reforming material

Classification	Water content ratio	Mix ratio (weight)
Reforming material (Including controlling material of grain size distribution)	Above 50% (In case of securing liquidity, alteration is possible)	30~40%

Table 14. Test condition (Dumping method of dredged soil)

Sample	w.c. of dredged soil (%)	Amount ratio by weight of R.M. (Sand+GSD)		Dumping velocity (cm/day)
		Dredged soil	R.M.	
Clay + R.M.	500%	60	40	10
				20

입도(No.200체 통과량) 분석 결과 상/하부의 입도 차이가 0.3~1.6%로 나타나 전 심도에서 입도분포가 유사하고, 일시 투기 시에 비하여 분리침강 개선효과가 있는 것으로 확인되었다(Table 16).

베인시험결과 심도에 따라 강도가 증가하였으나, 투기속도 및 방법에 따른 강도 개선 효과는 미미한 것으로 확인되었다(Fig. 12).

이를 종합적으로 비교하였을 때, 단계투기 시에는 일시투기 대비 침강속도는 감소하고, 침강압밀계수는 증가하며 분리침강 개선효과가 있는 것으로 확인되었다. 그러나 대상시료가 점토 100%입에 따라 강도개선효과는 미미한 것으로 확인되었다.

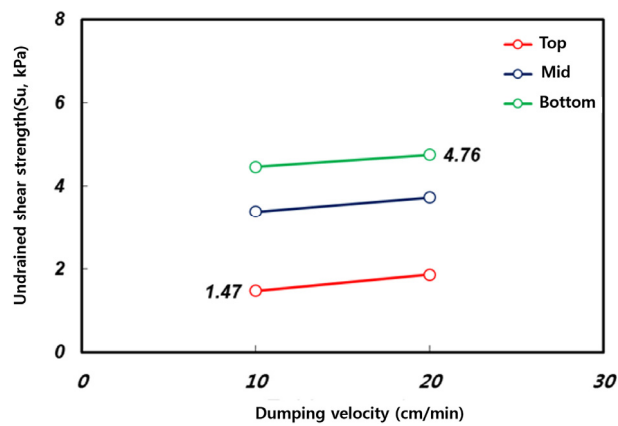


Fig. 12. Undrained shear strength based on dumping velocity

Table 15. Result on self weight consolidation test

Sample case	Dumping velocity (cm/day)	Sediment velocity (cm/min)	Sediment consolidation Coefficient (cm/min)	Increasing ratio of consolidation coefficient
Dredging soil (100%)	10	0.057	0.468	2.46
	20	0.018	0.471	2.48

Table 16. Result of grain size distribution based on dumping velocity

Sample case	Depth (m)	Grain size distribution (%), Finer than			
		No.200	Gran size distribution difference of top and bottom (%)	0.005 mm	0.002 mm
		0.075 mm			
Dumping velocity 10cm/min	Top	91.6	0.3	30.1	19.9
	Mid	89.0		24.4	17.6
	Bottom	91.3		31.2	20.4
Dumping velocity 20cm/min	Top	98.7	1.6	40.4	28.9
	Mid	97.7		38.5	27.4
	Bottom	97.1		34.9	25.3

2.3 배합비 산정기법 제시

간편법은 고화처리 방법과 마찬가지로 배합 시험에서 선정된 결과를 바탕으로 상관분석 분석을 통해 함수비, 개질재 함량 및 전단강도 간의 관계를 구하고 이를 활용하여 개략적인 배합비를 산정하는 방법이다.

기존 배합 시험결과 비배수전단강도는 개질재 함수비 보다는 개질재 함량 및 준설토의 함수비에 영향을 받는 있으며 특히, 개질재의 첨가율에 비례하여 최소 48%~최대 65%의 상당한 비배수전단강도 증가율을 보이고 있다(Fig. 13). 입도조절재 비율에 따른 비배수전단강도도 큰 변화를 보이지 않을 것으로 예상할 수 있다.

$$s_u = a \times \ln w(\%) + b \quad (1)$$

여기서, s_u : 비배수전단강도

a, b : 개질재 함량에 따른 계수

w : 준설토 함수비

개질재 함량별 함수비와 일축압축 강도의 회귀분석 결과를 통해 관중혼합 개질처리토 함수비에 따른 비배수전단강도의 식은 Fig. 14와 같이 $s_u = a \cdot \ln w(\%) + b$ 형태로 나타낼 수 있다.

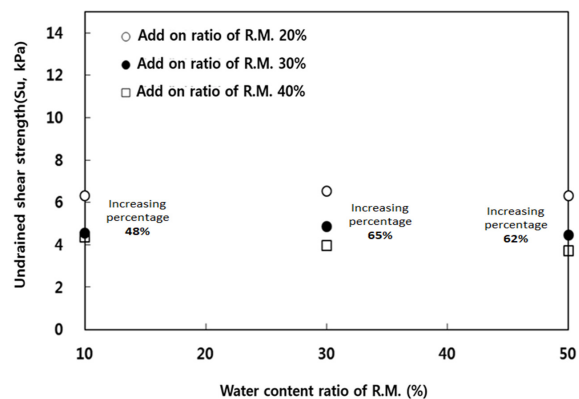


Fig. 13. Relationship between water content ratio of reforming material and undrained shear strength

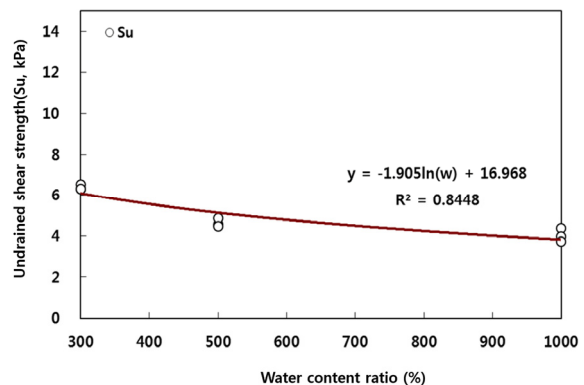


Fig. 14. Relationship between water content ratio and undrained shear strength

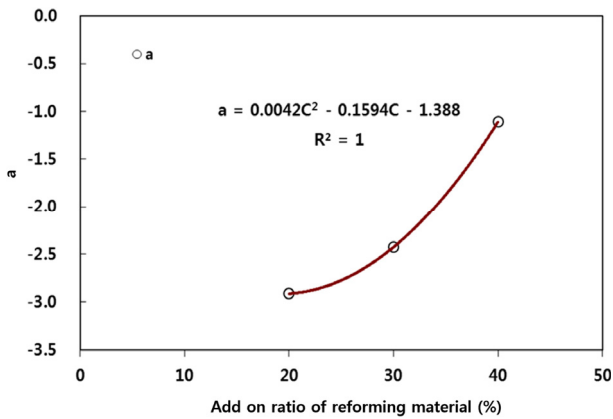


Fig. 15. Calculation of coefficient a based on content of reforming material

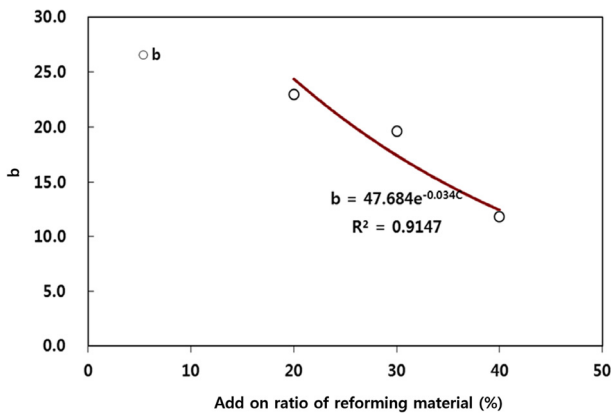


Fig. 16. Calculation of coefficient b based on content of reforming material

계수 a 와 b 는 개질재 함량별로 회귀분석을 실시하여 상관식을 도출하였다. 각 특성별 상관식을 Fig. 15와 Fig. 16에 제시하였으며 배합비 산정에 활용하였다.

이상의 예측결과는 기존 배합실험 결과에 따른 상관식 도출 예시로 배합실험 결과의 신뢰성 향상을 위해서는 배합비와 함수비 조건을 3~5가지로 달리하여 배합 상관식을 재산정할 필요가 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 기존 불량한 준설패립토의 활용성을 증대시키기 위해 준설토와 개질재(표준사+입도조절재)의 여러 가지 관중혼합 조건을 가정하여 실내실험(유동성, 침강, 입도분포, 강도, 단위중량, 부유입자농도 등)을 통해 관중 개질처리가 가능한 함수비 영역을 선정하였고, 함수비에 따른 배합비 산정식을 제시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 침강속도는 개질재(표준사 100%) 첨가량 및 이송준설토의 함수비에 비례하였으며, 점토 100% 대비 약 1.39~4.23배의 개선효과가 있는 것으로 나타났다. 부유입자농도의 허용기준 만족시점 또한 비례하는 경향을 나타내었으며, 약 1.12~14.63배의 침강축진 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 심도별 입도(No.200체 통과량) 차이가 크고 혼합토의 강도가 일부 감소하며, 준설토의 품질개선 효과는 낮은 것으로 나타났다. 이를 해결하기 위해 침강속도는 일부 감소하나 품질개선이 가능하도록 표준사보다 입경이 작은 입도조절재를 일정비율로 혼합하였다.

(2) 개질재(표준사+입도조절재)를 첨가함에 따라 침강속도 및 침강압밀계수는 반비례하는 것으로 확인되었으나, 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 부유입자농도 허용기준 만족시점은 개질재 첨가량이 증가하거나, 개질재 중 입도조절재 첨가량이 적을수록 단축되었다. 또한 심도별 입도(No.200체 통과량) 차이가 표준사 100% 첨가 시 대비 감소하였으며, 비배수전단강도는 약 1.23~2.95배의 증진효과가 있는 것으로 확인되었다. 따라서 입도조절재 첨가 시 침강속도는 다소 지연되나 분리침강이 개선되어 강도 증진효과가 있는 것으로 확인되었다. 이와 같은 결과를 종합하여 다음과 같이 개질재의 규격을 선정하였다.

Classification	Max. Dia.	Passing No.40	Passing No.60	Passing No.160	Passing No.200	Mix ratio (weight)
R.M. (Standard sand + Material controlling G.S.D.)	0.85 mm	40~80%	20~40%	5~10%	Under 10%	30~40%

(3) 준설토의 함수비 및 개질재 첨가량에 따른 침강속도는 비례하였으며, 점토 100% 대비 최대 3.32배 개선효과가 있는 것으로 확인되었다. 부유입자농도 허용기준 만족시점은 준설토 및 개질재의 함수비, 입도조절재 첨가량이 증가함에 따라 단축되는 것으로 확인되었다. 특히 개질재 30% 이상 첨가 시 부유입자농도 감소속도가 확연히 빨라지는 것으로 확인되었다. 심도별 입도(No.200체 통과량) 차이는 표준사 100% 대비 감소하였으며, 비배수전단강도는 점토 100% 대비 1.09~1.90배의 강도증진 효과가 있는 것으로 확인되었다. 또한 개질재 함수비 50% 이상에서 관내 유동성이 확보되었으며, 다음과 같이 배합조건을 선정하였다.

Classification	Water content ratio	Mix ratio (weight)
Reforming material (Including controlling material of grain size distribution)	Above 50% (In case of securing liquidity, alteration is possible)	30~40%

- (4) 실제 현장에서는 단계투기 방법을 적용함에 따라 투기 방법에 따른 특성분석시험을 수행하였다. 단계투기 시 일시투기 대비 침강속도는 감소하였으나, 침강압밀계수는 약 2.46~2.48배 증가하였다. 또한 분리침강 개선 효과가 있는 것으로 확인되었으나, 대상시료가 점토 100%임에 따라 강도개선 효과는 미미한 것으로 확인되었다.
- (5) 배합실험 결과를 토대로 간편법을 이용한 배합비 산정 기법을 제시하였고 개질재 함량, 준설토 함수비에 따른 비배수전단강도를 예측하는 데에 활용하도록 하였다.

Acknowledgement

The research in this paper was conducted with funding by Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) as part of the “Research on Eco-friendly Procurement, Reclamation and Transferring Technology of Transport Distance more than 30 km of Dredged Materials” research project.

References

- Han, S. J., Kim, B. I., Hong, K. H. and Kang, B. Y. (2015), Study on engineering characteristics of mixed material and mix ratio design to develop pipe mixing method, Journal of Korean Geosynthetics Society, Vol. 14, No. 1, pp. 33~41 (In Korean).
- Chae, D. H., Yoon, C. Y., Kim, K. O. and Cho, W. J. (2015), Consolidation characteristics of clay and pond ash soil Mixture, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 10, pp. 45~54 (In Korean).
- Park, M. C., Lee, J. K., Shin H. H. and Lee, S. (2011), Characteristics of the segregation sedimentation for dredged soil depending on fines content, Journal of Korean Geoenvironmental Society, Vol. 12, No. 6, pp. 25~34 (In Korean).
- Uezono, A., Takezawa, K., Tsukada, S., and Takahash, K. (2000), Long distance discharging works of dredged soil by plug flow mixing method in pipe lines, Journal of Japanese Civil Engineering Society, Vol. 2000, No. 651, pp. 37~45 (In Japanese).