

모형토조실험에 의한 초연약지반의 표층개량에 관한 연구

Research on the Surface Improvement of High Soft Ground Using Calibration Chamber Test

방 성 태¹⁾ · 연 용 흙[†]

Seongtaek Bang · Yongheum Yeon

Received: April 1st, 2019; Revised: April 9th, 2019; Accepted: April 23rd, 2019

ABSTRACT : Most of the soil used for reclamation is marine clay generated from dredging construction. The soft ground made of dredged clay has high water content and high compressibility, so the bearing capacity of the ground is very weak and it is difficult to enter the ground improvement equipment. Therefore, surface hardening treatment method is used to enter equipment prior to full-scale civil engineering work, and stabilizer is mainly used for cement series. Cement-based stabilizers have the advantage of improving the ground in a short period of time and have excellent economic efficiency, but they are disadvantageous in that they cause environmental problems due to leaching of heavy metals such as hexavalent chromium. In this study, environmental effects evaluation of dredged clay mixed with normal portland cement and environmentally friendly stabilizer was evaluated, and uniaxial compressive strength test and indoor model test were conducted to confirm the bearing capacity characteristics of the solidified layer.

Keywords : Soft ground, Soil binder, Surface hardening treatment

요 지 : 준설풀토를 활용한 연약지반은 장비주행성 및 진입로의 확보를 위해 시멘트 계 고화재 및 무기질 고화재 등을 활용한 표층고화처리공법이 사용되고 있으나 환경에 유해한 물질의 용출로 인한 문제가 제기되고 있어 환경과 기능성을 모두 만족하는 표층고화처리 공법의 개발이 필요하다. 표층처리 공법으로는 조기강도와 장기적인 안정 등을 고려하여 시멘트계 고화재를 이용한 표층고화처리공법이 많이 활용되고 있으며, 지반개량 효과가 크고 경제적 효율성으로 인해 국·내외에서는 시멘트계 고화재를 이용한 표층개량에 대한 연구와 수행되어 지고 있다. 그러나 최근 환경과 기능성의 문제가 제기되어 시멘트에서 발생하는 6가크롬(Cr6+), 수은(Hg) 등의 유해물질로 인해 지반오염과 환경문제가 발생되어 다양한 친환경적인 공법의 개발이 요구되고 있는 실정이다. 따라서 이 연구에서는 자연함수비의 준설풀토를 시멘트와 친토양고화재를 혼합한 혼합토를 대상으로 동일한 배합조건 및 양생 조건에 따른 일축압축강도를 분석하고 이 결과를 기준으로 표층개량범위 적용 및 실내모형토조시험을 수행하여 초연약지반의 강도 특성 및 지지력 특성을 검토하고자 한다.

주요어 : 연약지반, 친토양 고화재, 표층개량

1. 서 론

우리나라는 1960년대부터 해안 연안지역을 효과적으로 활용하기 위해 서해안과 남해안지역에 매립을 통한 간척사업이 현재까지도 활발히 이루어지고 있다.

해안개발에서 발생하는 준설풀토의 특성으로는 높은 함수비를 가지며, 응력이 작고 압축성이 크며 매립 후 장기적인 압밀이 진행되므로 지반안정에 많은 시간이 소요되어 연약지반으로 분류된다. 이러한 연약지반은 지지력이 부족하여 지반개량에 필요한 인력 및 장비진입 시 장비가 전도되거나 침하된다는 문제점이 발생된다. 따라서 원활한 지반개량을 위해서 표층처리공법이 적용되고 있다. 표층처리 공법

으로는 조기강도와 장기적인 안정 등을 고려하여 시멘트계 고화재를 이용한 표층고화처리공법이 많이 활용되고 있으며, 지반개량 효과가 크고 경제적 효율성으로 인해 시멘트계 고화재를 이용한 표층개량에 대한 연구와 꾸준히 이루어지고 있다. Chun et al.(2012)은 국산 생석회 혼합처리에 의한 지반개량연구를 통하여 국내에서 생산되는 생석회의 물리적·화학적 분석을 수행하고 해성 점토 및 사질토를 생석회와 혼합개량 함으로써 지반개량 정도의 효율성을 분석 검토하였으며, Nam(2012)은 해안지역에 준설풀토된 해성점토지반에서 포틀랜드시멘트보다 개량효과가 우수한 시멘트계 고화재를 이용하여 표층안정처리 된 지반의 개량효과 및 강도특성을 분석하였다. Kwon & Lee(2011)은 준설풀토의

1) Lecturer, Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

† Ph.D, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : bst91@knu.ac.kr)

유용한 활용과 친환경적 접근이라는 두 가지 문제를 극복하기 위해 시멘트를 최소화할 수 있는 최적의 설계방안과 각 고화재 배합조건에 따른 혼합토의 물리적·역학적 특성을 평가하였다. Kim et al.(2001)은 준설점토지반의 전단강도 예측 및 장비투입시기 결정에 관한 연구에서 함수비, 단위중량 및 비배수전단강도 등을 서로 비교 분석하여 표층의 비배수전단강도 변화를 예측하기 위한 해석적 접근을 수행하였다.

Lee(2015)는 연약지반에서 장비진입을 위한 표층고화처리공법 사례연구를 통해 실내시험 및 현장시험을 통해 품질에 대한 안정성을 확인하고 기존 공사의 문제점 및 개선된 시공방법을 제안하였다. 이 연구에서는 매립에 활용되는 준설점토를 활용하여 보통 포트랜드 시멘트 및 시멘트계 고화재가 가지고 있는 유해성을 개선할 수 있고 친토양(환경친화적인) 고화재를 동일한 배합조건에서 일축압축강도 특성을 분석하고 실내모형실험을 통해 고화 처리된 표층부의 지지력특성을 분석하여 지반개량효과 및 강도특성을 고찰하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 시료의 공학적 특성

2.1.1 준설점토의 물리적 특성 및 고화재의 특성

이 연구에 사용된 시료는 부산 지역에서 교란된 상태로 채취하였으며, 평균입경 0.01mm 이하의 미세입자가 대부분을 차지하고 있다. Table 1은 이 연구에 사용된 준설점토의 물리적 특성을 나타내고 있다. 고화재의 성분은 CaCO₃, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃, MgO, K₂O, Na₂O, TiO₂로 구성되어있으며, 시멘트의 성분과 유사하게 분석되었다. 물리 화학적 특성 실험 결과 친토양 고화재의 경우 수화열 및 응결 시간에서 보통포트랜드시멘트 대비 빠른 것으로 나타났다.

Table 1. Physical properties of dredged clay

Physical properties	Symbol	Unit	Dredged clay
Initial moisture content	w_o	%	40
Unit weight	$\gamma_{d\max}$	kN/m ³	15.5
Liquid limit	W_L	%	42.0
Plastic index	I_P	-	16.0
Initial void ratio	e_o	-	1.78
Specific gravity	G_s	-	2.65
Degree of saturation	S_r	%	98.5
Cc	-	-	-
USCS	-	-	CL

이는 친토양 고화재의 초기강도의 발현이 우수하다고 판단된다(Oh et al., 2013). 또한, pH시험결과 시멘트의 경우 9.8 이상으로 강알칼리성을 나타내고 있으나 친토양 고화재는 7.0으로 중성을 나타내고 있다. 따라서, 시멘트 혼합토는 혼합물의 종류와 혼합비율에 따라 2차 오염을 유발시킬 수 있고 흡과 인접한 구조물을 부식시키거나 식생에 영향을 미칠 수 있는데 반해 친토양 고화재는 2차 오염의 우려가 없어 지반개량 및 공해 저감을 위한 시공이 가능하다는 것을 알 수 있다. Table 2는 친토양 고화재 및 시멘트의 용출시험 결과를 나타내고 있다.

Table 2. Elution test result of stabilizer and cement

Content	Criteria of concern (mg/kg)	Criteria of measure (mg/kg)	S.B	N.P.C
Cd	12	30	1	5
Pb	400	1,000	9	217
Cu	200	500	-	132
Hg	16	40	0.005	0.02
Cn	120	300	-	-
C _r ⁶⁺	12	30	0.05	13
As	20	50	5	23

2.1.2 혼합점토의 공학적 특성

준설점토와 시멘트 및 친토양 고화재를 사용한 혼합점토의 전단정수를 파악하기 위해 이 연구에서 수행한 일축압축 강도시험결과를 참고하여 강도증가율이 최대가 되는 양생 기간인 7일과 14일의 조건에서 직접전단시험을 수행하였다. Fig. 1은 고화재 혼합비율에 따른 내부마찰각의 변화를 보여주고 있으며, Table 3은 직접전단시험 결과를 보여주고 있다. 시험 결과 고화재의 종류에 상관없이 평균 200kPa의 점착력이 발생한 것으로 나타났으며, 혼합비율별 점착력의

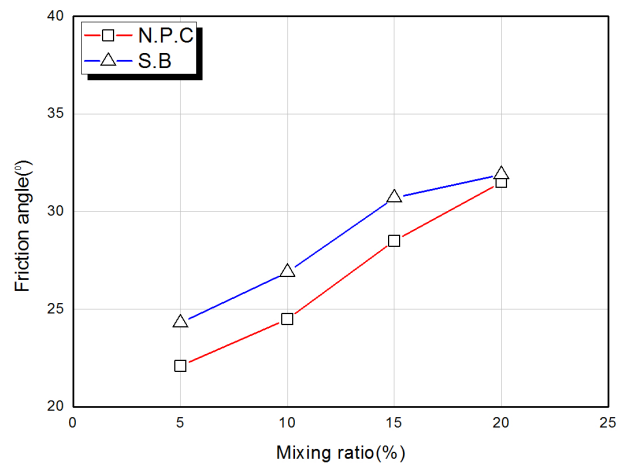


Fig. 1. Friction angle according to mixing ratio

Table 3. Direct shear test result

Stabilizer	5%		10%		15%		20%	
	C (MPa)	Ø (°)	C (MPa)	Ø (°)	C (MPa)	Ø (°)	C (MPa)	Ø (°)
S.B	20	24.3	20	26.9	20	30.7	20	31.5
N.P.C	20	22.1	20	24.5	20	28.5	20	31.9

* S.B : Soil binder * N.P.C : Normal portland cement

증가는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 내부 마찰각은 고화재 혼합비율 10~15% 사이에서 급격하게 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 혼합비 15%까지는 친토양 고화재 혼합토의 전단강도가 큰 것으로 나타났으나 고화재 혼합비 20%에서는 거의 같은 값을 보이고 있어 혼합비를 증가하더라도 지속적인 강도증가 경향은 둔화되는 것을 알 수 있다.

2.2 실험조건 및 방법

일축압축강도시험에 사용된 공시체 물드는 내경 50mm, 높이 10mm로 제작하였으며, 표층고화처리공법은 개량된 지반의 대부분이 물의 유동이 없는 상태에서 시공 및 양생되므로 현장의 기후와 동일한 기건 양생을 수행하였다. 일축압축시험 조건은 Table 4와 같다. 이 연구에서는 표층고화처리 지반의 인력 진입 및 장비 주행성을 확보하기 위해 계산된 접지압을 토대로 500kPa을 목표강도로 설정하였다.

Table 4. Mixing condition of manufactured specimen

Stabilizer	Mixing ratio (%)	Water content (%)	Curing period (day)	
N.P.C	S.B	40%	1, 7, 14, 21, 28	
				5
				10
				20

2.3 실내모형시험

표층고화처리공법을 적용하여 개량된 지반은 원지반과 다른 특성으로 인해 2층 지반으로 분리된다. 표층고화처리층의 상부에 연직하중을 가하게 되는 경우 발생하는 지반변형 거동 및 하중침하 특성을 분석하기 위해 실제 현장의 원지반의 조건과 동일하게 재현하고자 일정비율로 축소하여 실내모형시험을 수행하였다. 시험장치는 모형토조, 변위계, 간극수압계, 하중재하장치, 데이터계측장치 등으로 구성되어 있다. 모형토조는 길이 1,000mm, 높이 600mm, 폭 150mm의 크기로 제작하였으며, 점토지반의 원활한 배수성을 위해 상하부에서 배수가 가능하도록 배수구를 설치하였다. 하중재하에 따라 표층고화처리에 따른 원지반의 간극수압의 변

화를 분석하기 위해 원지반의 상부로부터 10cm의 간격으로 용량 500kPa의 간극수압계를 설치하였다.

하중재하 장치는 공기압을 이용한 실린더와 공기압 공급을 위한 에어 콤프레셔로 구성되어있으며, 최대 1,000kPa의 하중을 재하 시킬 수 있다. 하중재하 시 사용된 기초는 길이 60mm, 높이 50mm, 폭 150mm의 강재로 제작되었으며, 배수구를 설치하여 재하 판의 변형을 방지하고 배수를 허용하도록 제작하였다. Fig. 2~3은 모형시험 장치의 구성 및 시험장비를 보여주고 있다.

준설점토로 매립된 원지반의 현장조건과 동일한 지반을 조성하기 위해 교란시료를 재 성형하여 사용하였으며, 시료의 균질성확보를 위해 #200번의 체를 통과하는 시료만 사용하였고 액성한계의 2배가 되도록 하여 균질하게 교반을

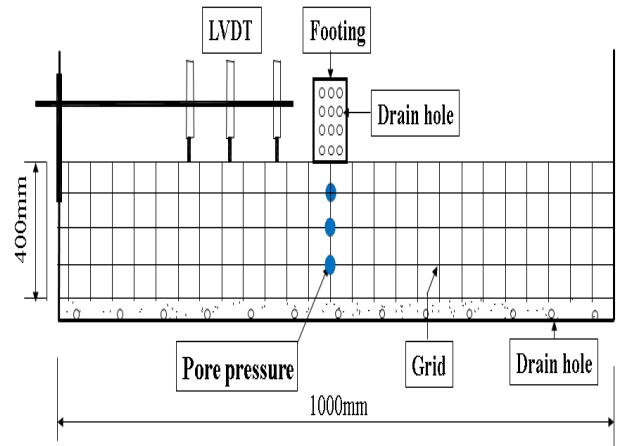


Fig. 2. Model test device design

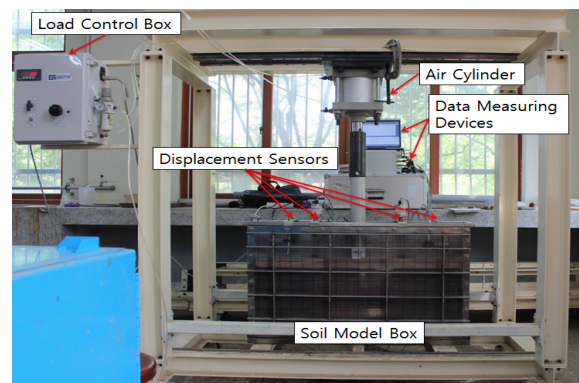


Fig. 3. Model test equipment

하였다. 평균 선행압밀하중은 약 50kPa로써 하중 재하 시 증가비가 1이 되도록 12.5kPa의 하중을 단계적으로 증가시켜 하중을 재하하였다. 선행압밀 과정이 종료된 후 원지반의 최종 깊이는 400mm로 조성하였고 일축압축시험결과에서 분석된 16%의 고화재 혼합비율과 40%의 함수비를 사용하여 표층고화처리를 수행하였으며, 지지력시험 시 지반거동의 변화를 면밀히 관찰하고자 2cm 간격의 표점을 설치하였다. 진입되는 시공 장비의 하중에 따른 접지압을 계산하여 500kPa의 목표 강도를 만족하고 표층고화처리 층의 개량크기에 따른 침하 및 지지력특성을 분석하기 위해 개량범위는 조성된 원지반 깊이의 1:10 비율로 축소하여 시험을 수행하였다.

표층고화처리 층의 크기는 하중재하에 사용된 기초의 길이(60mm) 대비 2L(120mm), 3L(180mm), 4L(240mm)의 길이와 원지반의 깊이(400mm) 대비 0.1D(4cm), 0.15D(6cm), 0.2D(8cm)의 두께로 조성하였다. Table 5는 고화처리층의 개량범위를 나타내고 있다.

Table 5. Improvement surface layer range

Original ground size (mm)	Footing size (mm)	Mixing ratio (%)	Water content (%)	Improvement surface length (I.S.L)	Improvement surface depth (I.S.D)
L=1,000	L=60	15	40	2L (12cm)	0.1D (4cm)
B=150	B=150			3L (18cm)	0.15D (6cm)
D=400	D=50			4L (24cm)	0.2D (8cm)

표층고화처리 후 조성된 지반의 지지력시험은 평판재하 시험(KS F 2310)의 방법을 응용하여 정하중 재하방법으로 수행하였다. 실내모형시험은 현장의 조건을 축소하여 수행된 시험이므로 실제 현장에서 적용되는 하중을 1/10 크기로 축소한 10kPa로 매 단계별 점진적으로 증가시켰으며, 표층의 상부에 거치된 기초의 침하량이 1분에 1/100mm 이하가 되면 다음 단계의 하중을 재하 하였다. 또한 기초길이 대비 10%의 침하량이 발생하였을 때 시험을 종료할 수 있으나 하중증가에 따른 침하량을 더욱 면밀히 관찰하고자 최대 20%의 침하량이 발생될 때 시험을 종료하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 시멘트 혼합점토의 일축압축강도 특성

준설점토 중량 대비 시멘트를 5%, 10%, 15%, 20% 혼합하고 자연함수비인 40%를 적용하여 1일, 7일, 14일, 21일, 28일의 양생기간에 따른 일축압축강도를 분석하였으며, 그

Table 6. N,P,C Mixed uniaxial compressive strength

Soil stabilizer		Unconfined compressive strength (Kpa)				
		1days	7days	14days	21days	28days
N.P.C	5%	98	168	210	266	364
	10%	161	238	336	420	504
	15%	217	378	651	777	896
	20%	315	560	1001	1246	1421

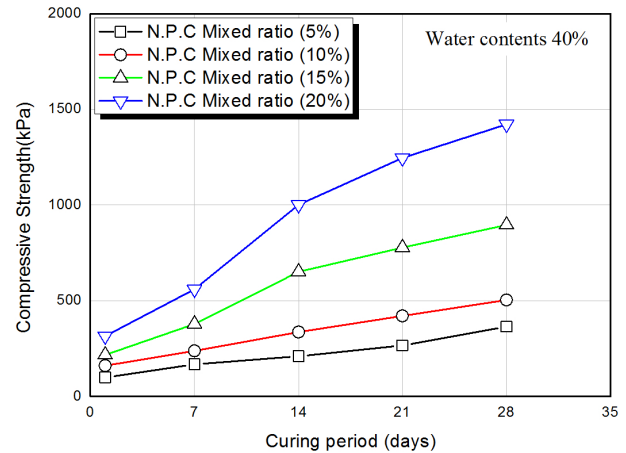


Fig. 4. N,P,C mixed uniaxial compressive strength

결과를 Table 6에 나타내었다.

Fig. 4는 시멘트 혼합점토의 양생기간 및 혼합비율에 따른 시멘트 혼합 점토의 일축압축강도를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 시멘트의 혼합비율과 양생기간이 증가할수록 강도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 증가양상은 시멘트의 혼합비율이 15% 이상일 때 더욱 뚜렷한 것을 알 수 있었다. 또한, 시멘트의 혼합비율 15% 이상, 양생기간 14일 이상일 때 목표강도에 만족되며, 혼합비율이 20%인 경우 양생기간 7일 이상인 경우에도 목표강도에 만족하는 것으로 분석되었다.

3.2 친토양 고화재 혼합점토의 일축압축강도 특성

준설점토 중량 대비 친토양 고화재를 5%, 10%, 15%, 20% 혼합하고 자연함수비인 40%를 적용하여 1일, 7일, 14일, 21일, 28일의 양생기간에 따른 일축압축강도를 분석하였으며, 그 결과를 Table 7에 나타내었다.

Table 7. S,B mixed uniaxial compressive strength

Sstabilizer		Unconfined compressive strength (Kpa)				
		1days	7days	14days	21days	28days
S.B	5%	175	280	336	420	448
	10%	231	462	616	679	735
	15%	294	595	1155	1295	1610
	20%	385	784	1680	2016	2660

Fig. 5는 친토양 고화재 혼합점토의 양생기간 및 혼합비율에 따른 일축압축강도를 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 친토양 고화재의 혼합비율과 양생기간이 증가할수록 강도가 증가하는 것을 알 수 있으며, 증가양상은 친토양 고화재의 혼합비율이 10% 이하에서는 뚜렷하지 않지만 15% 이상일 때의 28일 강도는 7일 강도의 300% 이상으로 강도 증가양상이 뚜렷함을 알 수 있었다. 친토양 고화재의 혼합비율 10% 이상, 양생기간 14일 이상 일 때 목표강도에 만족되며, 혼합비율이 15% 이상인 경우 양생기간 7일 이상에서도 목표강도에 만족하는 것으로 분석되어 초기강도 발현이 우수한 것을 알 수 있었다. 또한, 시멘트를 혼합하였을 경우와 비교하여 보면 양생기간 7일에서 1.40~1.9배, 28일 양생기간에서 1.20~1.87배로 친토양 고화재를 혼합한 경우의 일축압축 강도가 우수하다는 것을 알 수 있었다.

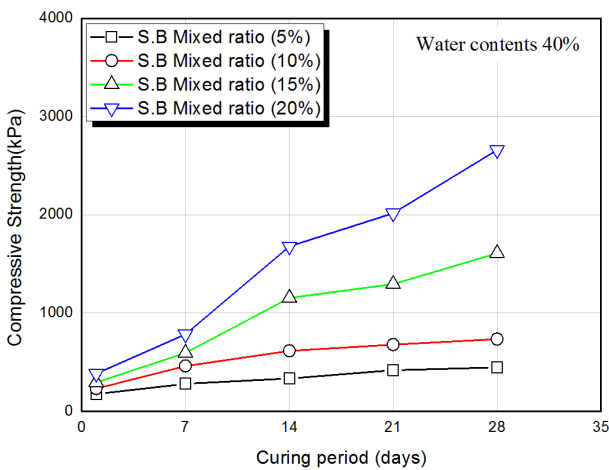


Fig. 5. S.B mixed uniaxial compressive strength

3.3 강도비 분석결과

시멘트와 친토양 고화재 혼합점토의 일축압축강도를 목표강도와 비교하여 강도비(Uniaxial Compressive strength Ratio, UCR)로 나타내었다.

$$UCR = \frac{\text{공시체 일축압축강도}}{\text{목표강도 (500 kPa)}}$$

Fig. 6~7은 시멘트 및 친토양 고화재 혼합점토의 양생기간 및 혼합비율에 따른 목표강도에 대한 일축압축강도변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 시멘트 및 친토양 고화재의 혼합비율 및 양생기간이 증가할수록 강도비도 증가하는 것을 알 수 있었으며, 시멘트를 혼합하였을 경우 혼합비율 15% 이상, 양생기간 14일에서 목표강도를 만족하였으며, 친토양 고화재를 혼합한 경우는 혼합비율 10% 이상,

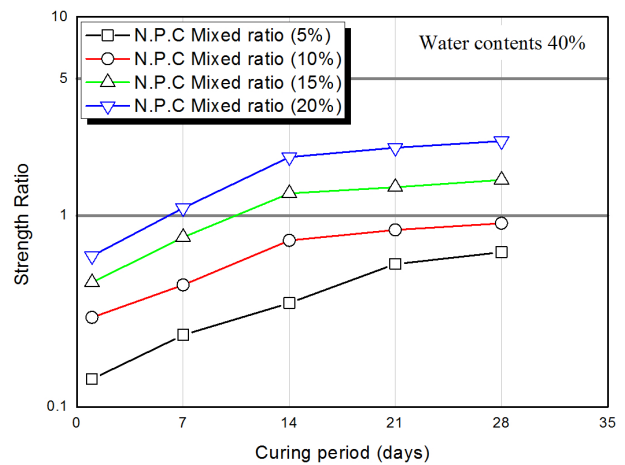


Fig. 6. Uniaxial compressive strength ratio (N,PC)

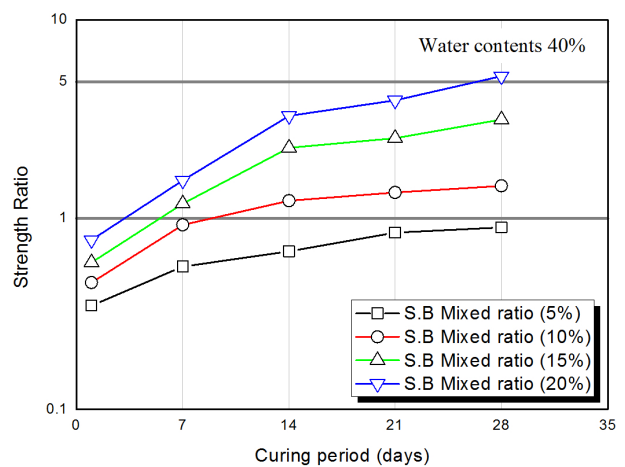


Fig. 7. Uniaxial compressive strength ratio (S,B)

양생기간 7일 이상에서 목표강도를 만족하였다. 따라서 친토양 고화재를 혼합한 경우가 시멘트를 혼합한 경우보다 초기강도 발현율이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

3.4 실내모형실험 분석결과

일축압축강도시험을 통해 선정된 최적의 배합조건을 토대로 준설점토지반에 친토양 고화재를 15% 혼합하고 14일 양생시킨 후 표층고화처리지반의 지지력특성을 분석하였다.

3.4.1 표층고화처리지반의 하중-변위 특성

모형실험결과 기초의 허용침하량(12mm)에 대한 표층고화처리지반의 지지력은 고화처리층의 개랑크기에 비례하여 증가하고 있으며, Fig. 8~10과 같다. Fig. 8은 고화처리층의 길이 2B에 대한 하중 침하곡선을 보여주고 있으며, 시멘트의 경우 목표강도에 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 친토양 고화재의 경우 두께 0.2D 이상에서 목표강도에 만족하는 것으로 분석되었다. Fig. 9는 고화처리층의

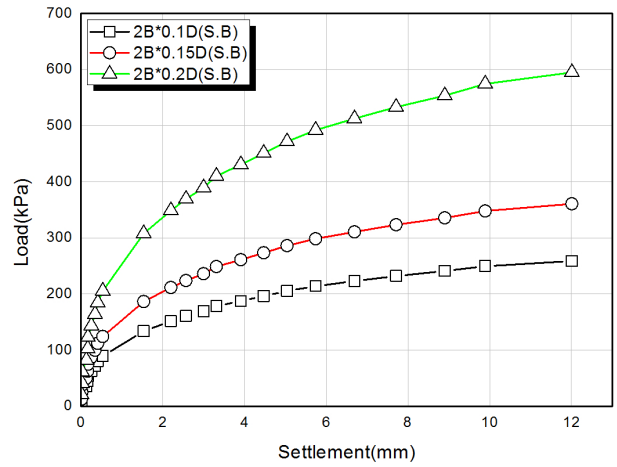
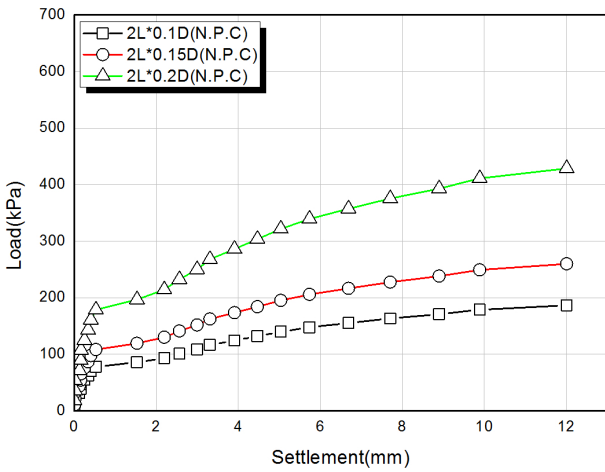


Fig. 8. Improved load surface layer (2B)

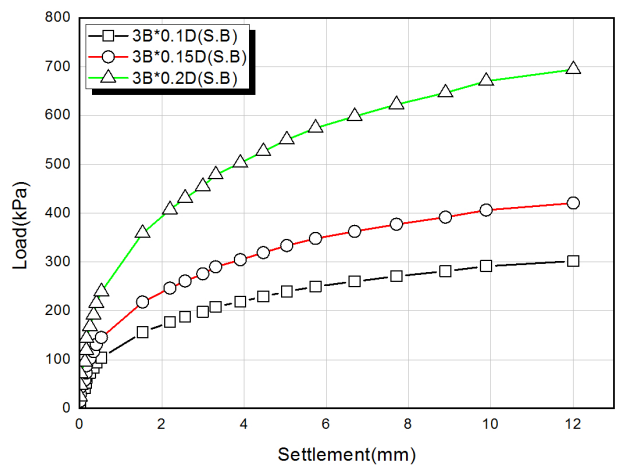
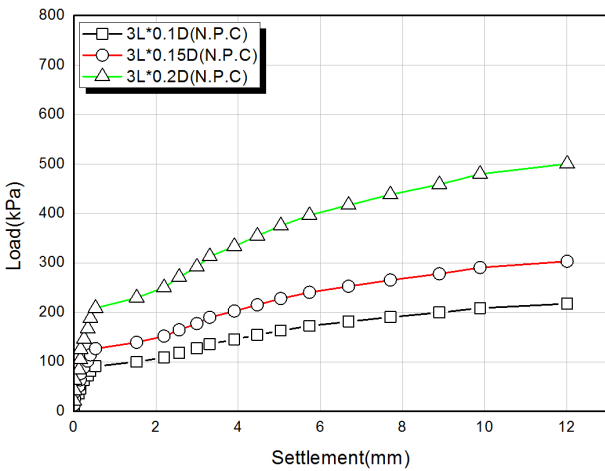


Fig. 9. Improved load surface layer (3B)

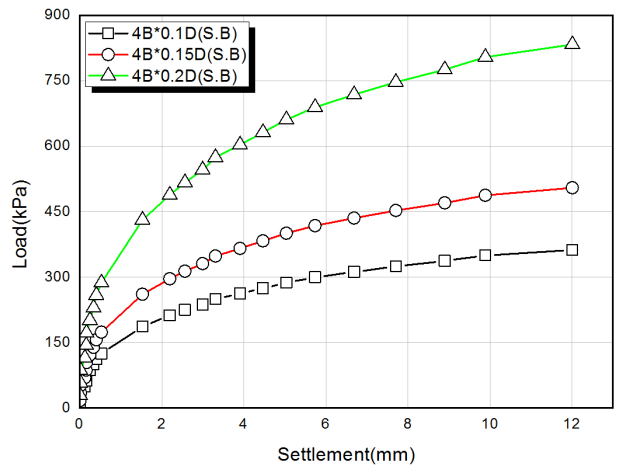
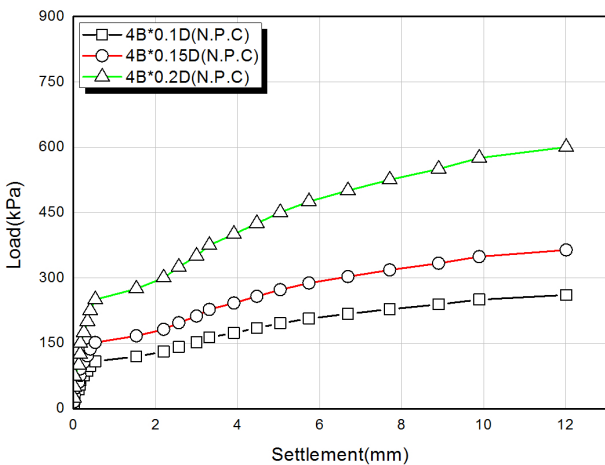


Fig. 10. Improved load surface layer (4B)

길이 3B에 대한 하중 침하곡선을 보여주고 있으며, 시멘트와 친토양 고화재 두 가지 모두 두께 0.2D 이상에서 목표강도에 만족하는 것으로 분석되었다. 또한 고화처리층의 길이 4B의 경우 3B의 크기와 마찬가지로 시멘트와 친토양 고화

재 두 가지 모두 두께 0.2D 이상에서 목표강도에 만족하였으며, 두께 0.15D에서도 목표강도에 만족되는 것으로 분석되었다.

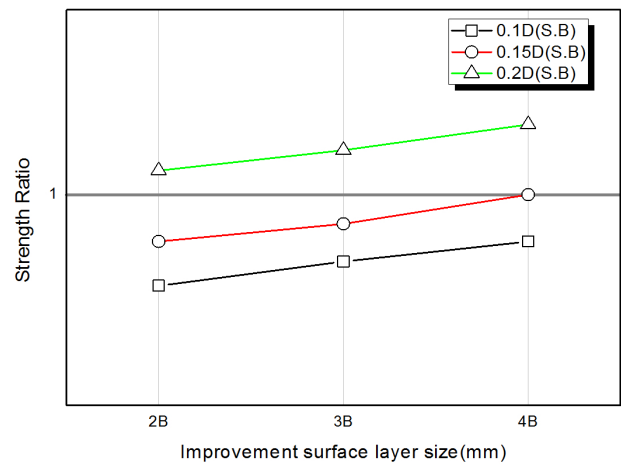
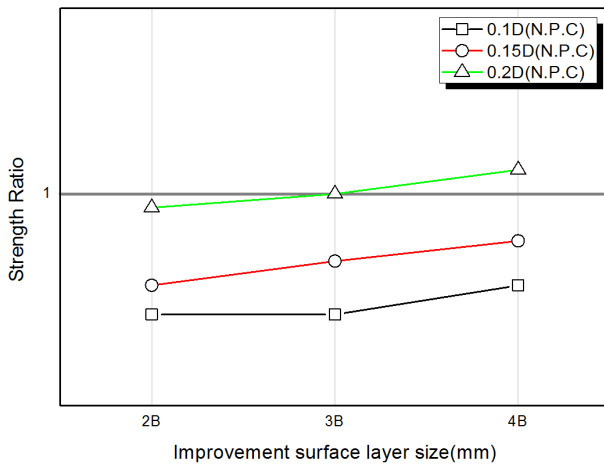


Fig. 11. Improved surface strength ratio

3.4.2 강도비 분석결과

Fig. 11은 표층고화처리지반의 최종 침하량에 따른 하중 강도에 대한 목표강도를 강도비로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 시멘트 고화처리층의 경우 두께 0.2D와 길이 3B, 4B의 크기로 개량되었을 때 목표 강도에 만족하는 것으로 분석되었다. 그러나 친토양 고화재로 처리된 표층지반의 경우 길이에 상관없이 두께 0.2D에서 목표 강도에 만족되었으며, 두께 0.15D, 길이 4B의 경우에도 목표 강도에 만족하는 것으로 분석되었다. 또한 표층고화처리지반의 지지력은 고화처리층의 길이보다 두께에 의한 영향이 더욱 큰 것으로 분석되었다. 따라서 목표 강도에 만족하는 고화처리층의 크기는 안전을 및 시공성 등을 고려하여 산정한 결과, 시멘트를 혼합할 경우 두께 0.2D, 길이 4B 이상의 크기에서 개량되어야 하며, 친토양 고화재의 경우 길이와 상관없이 표층두께 0.2D 이상의 크기에서 개량되어야 한다고 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 준설편토지반의 개량 시 투입되는 인력 및 장비의 진입성 확보를 위한 표층고화처리공법에 관한 연구를 수행하기 위하여 보통포틀랜드시멘트 및 친토양 고화재를 이용하여 일축압축시험, 실내모형시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 시멘트 혼합점토의 일축압축강도시험 결과 혼합비율 15% 이상, 양생기간 14일 이상일 때, 목표강도에 만족하였으며, 혼합비율이 20% 이상인 경우에는 양생기간이 7일인 경우에도 목표강도에 만족하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 친토양 고화재 혼합점토의 일축압축강도시험 결과 혼합비율 10% 이상, 양생기간 14일 이상일 때 목표강도

에 만족되었으며, 혼합비율이 15% 이상인 경우에는 양생기간 7일에서도 목표강도에 만족하는 것으로 나타나 보통포틀랜드시멘트를 혼합한 경우보다 약 2배 이상 강도가 우수한 것을 알 수 있었다.

- (3) 일축압축시험에 의한 강도비 분석과 자연함수비 조건에서 친토양 고화재의 경우 보통포틀랜드시멘트 대비 목표 강도에 도달되는 시간이 빠른 것으로 나타났으며, 이는 친토양 고화재의 초기강도의 발현율이 우수한 것으로 판단된다.
- (4) 실내모형시험 결과 친토양 고화재를 혼합한 경우가 보통포틀랜드시멘트가 혼합된 고화처리층의 지지력에 비해 약 1.5배 높게 측정되었으며, 친토양 고화재는 15% 이상, 보통포틀랜드시멘트는 20%의 혼합비율에서 목표 강도에 도달되는 것으로 나타났다. 따라서 준설편토 현장의 표층고화처리 시 친토양 고화재를 사용할 경우 보통포틀랜드시멘트 대비 지반의 안정성, 내구성 등 기능적 측면에서 더욱 우수할 것이라 판단된다.
- (5) 고화처리층의 크기에 따른 지지력 분석결과 두께의 증가 따른 지지력은 길이 증가에 의한 지지력보다 더욱 큰 것을 알 수 있었으며, 두께 및 강도 두 가지 요소를 적절히 조절하여 최적의 배합으로 설계가 이루어져야 한다고 판단된다.

References

1. Chun, B. S., Kang, J. Y., Jung, H. S., Cho, S. D., Kim, J. H. and Hyun, J. H. (2012), Evaluation on field application of controlled low-strength materials made of coal ash in reclamation site, Journal of Korean Geo-Environmental Society, Vol. 282, No. 12, pp. 27~39 (In Korean).
2. Kim, H. T., Kim, S. Y., Kang, I. K. and Kim, S. W. (2001),

- A study on the prediction of shear strength and determination of the embarkation time of equipment in dredged clay fills, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 2, No. 3, pp. 47~56 (In Korean).
3. Kwon, Y. C. and Lee, B. J. (2011), Mechanical properties of lean-mixed cement-treated soil for effective reuse of dredged clay, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 12, No. 9, pp. 71~78 (In Korean).
 4. Lee, Y. S. (2015), A case study on surface hardening treatment for the machinery entrance in the soft ground, Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology, pp. 16~27 (In Korean).
 5. Nam, S. G. (2012), Characteristics of unconfined compressive strength of soil mixed stiffnes for recycling of dredged clay, Master's thesis, Kyungpook National University, pp. 24~42 (In Korean).
 6. Oh, S. W., Lee, G. H. and Kim, D. G. (2013), Basic study on development of forest road pavement using eco-friendly method, *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 6, pp. 31~38 (In Korean).