한국토목섬유학회논문집 제12권 1호 2013년 3월 pp. 21 ~ 28
J. Korean Geosynthetics Society Vol.12 No.1 March. 2013 pp. 21 ~ 28
DOI: http://dx.doi.org/10.12814/jkgss.2013.12.1.021

점성토 지반 개량을 위한 최적 생석회 첨가량 결정 및 이에 따른 소성 및 강도 특성 분석

The Study of Optimum Lime Content for Ground Improvement of Clayey Soils and Its Effects on Plasticity and Strength Characteristics

구정민[1], 최창호[2]*
Jeong-Min Goo[1], Changho Choi[2]*

[1]*Member, Manager, Research Dept., Dong Myeong Engineering, 501 Cheonggyecheon-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, 130-823, Republic of Korea*
[2]*Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology, (Daehwa-Dong)283, Goyangdae-Ro, ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea*

ABSTRACT

This study proposed optimum lime contents for clayey soils consisting of representative clay minerals, Kaolinite and Na-Bentonite, according to optimum lime content method (ASTM C 977-22) by means of ground improvement method of clayey soils. As geotechnical properties, the variations of atterberg limits and unconfined compressive strength were analyzed and Ca-ion and micro-structure along elapsed time were observed for lime-added clayey specimens. The test results show that optimum lime content method provides an appropriate methodology for ground improvement of clayey soils and the variation of Ca^{2+} might be a good index to predict the rate of ground improvement for clayey soils with lime addition.

요 지

본 연구에서는 점성토 지반의 지반공학적 특성의 개량을 목적으로 OO지역에서 채집한 점성토와 이에 대한 대표적 점토광물인 Kaolinite 및 Na-Bentonite에 대하여 최적 생석회 첨가량 결정법(ASTM C 977-22) 방법에 의거하여 각 시료에 대하여 생석회 첨가량을 결정하였다. 이에 대한 지반공학적 특성인 아터버그한계, 일축압축강도의 변화에 대하여 분석하였으며, 시간경과에 따른 Ca 이온 변화 및 점토입자의 미세결정구조 변화를 관찰, 분석하였다. 본 실험 결과 점성토 지반의 지반공학적 특성 개선을 위하여 첨가되는 생석회 첨가량은 최적 생석회 첨가량 결정법에 의해 효과적으로 결정할 수 있고, 시간에 따른 Ca^{2+} 이온 변화 측정치는 점성토 지반의 지반공학적 개선효과 추정에 활용 가능함을 확인하였다.

Keywords **:** Clayey soils, Optimum lime contents, Ca-ion concentration

1. 서 론

우리나라는 1960년대 초부터 서해안과 남해안의 간척사업이 활발히 진행되어 도로축조, 주택단지 및 공단조성에 이용됨으로써 농지활성을 꾸준히 진행하였음에도 불구하고 상대적으로 열악한 지역에 대한 개발이 불가피하게 되었다(Lee and Bae, 2007). 또한 최근 들어 서남해안 연안에 위치한 새만금 개발사업과 해상풍력 배후단지 조성을 위해 점성토 지반의 효과적인 개량 방법 개발이 필요한 실정이다. 이러한 점성토 지반의 개량을 위하여 지반개량재로 많이 활용하고 있는 생석회를 주입재로 사용하면 탈수 및 팽창으로 인한 지지력 증대를 촉진시킬 수 있으며, 이 방법은 침하량이 비교적 큰 점성토 지반의 개량촉진을 위해 유용하게 사용될 수 있을 것이다(Boardman et al., 2001).

생석회와 점성토가 혼합되면 간극수와 반응하여 수화반응, 이온교환반응 및 포졸란반응 등의 물리화학적 반응

Received *20 Feb. 2013,* ***Revised*** *11 Mar. 2013,* ***Accepted*** *13 Mar. 2013*
****Corresponding author***
Tel: +82-31-910-0785; Fax: +82-31-910-0211
E-mail address: chchoi@kict.re.kr (C. Choi)

이 발생되는데, 이러한 반응들을 이용한 공법들이 지반공학적 문제점을 내포하고 있는 지반의 개선 및 안정화에 적용되어 왔다(Chun, 2001). 지금까지 알려진 생석회를 이용한 지반안정화 공법들은 노반의 흙과 생석회를 혼합하여 처리하는 표층처리공법과 파일 및 말뚝 형태로 연약점성토 지반에 관입하여 처리하는 심층처리공법으로 크게 구분할 수 있다(Kwon and Goo, 2006).

생석회 원료인 석회석의 국내 매장량은 2010년을 기준으로 45억톤에 달하고, 2012년도 생산량은 35,373천톤(KOSIS, 2013)으로 보고되어, 그 매장량은 비교적 풍부한 것으로 판단된다. 이러한 석회석은 생산원가가 저렴하고 우수한 공학적 성질을 보유하고 있는 것으로 보고된 바 있어, 생석회의 여러 물리화학적 반응을 지반공학적 문제점을 내포하고 있는 지반의 안정화에 적절히 이용한다면 자원 활용 측면에서 유리할 것으로 예상된다(Koh, 2000).

Boardman(1999)은 Pb^{2+}과 Fe^{3+}으로 오염된 2종류의 점성토에 생석회를 첨가한 후, 복원특성에 관한 연구결과를 발표하였다. 연구결과들 중 단기간에 걸친 비배수전단강도 증가 및 아터버그한계 변화는 이온교환현상이 지배하고, 장기간에 걸쳐 비배수전단강도가 크게 증가하는 것은 Si^{+}, Ca^{2+}및 Al^{3+}간의 복합적인 반응에 따라 발생된 고결화에 의한 것이라고 보고하였다.

Rogers et. al.(2000)은 english china clay와 wyoming bentonite를 이용하여 생석회와 점토광물 간의 경시적인 화학반응에 관한 실험을 수행하였으며, 점성토의 안정화 및 고결화에 필요한 최적 생석회량 결정 방법 및 원리를 설명하였다. 또한 실험에서 제안한 방법으로 결정된 최적 생석회량 이상으로 첨가할 경우, 단기반응인 점성토의 소성 증가에는 큰 효과가 없으나, 장기반응인 포졸란반응에는 효과가 있으며, 포졸란반응의 발생 및 진행을 추정할 수 있는 방법으로는 혼합물의 침출액 내 Al^{3+} 및 Ca^{2+}농도 변화를 측정함으로써 가능하다고 보고하였다. 또한 혼합물에서 추출한 침출수의 전기전도도를 측정하는 비파괴적인 방법으로 지반 안정화 현상을 관측가능하다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 국내산 생석회를 사용하여 점성토의 경시적인 지반공학적 개선 여부를 확인하고자 3종류의 점성토 시료에 대하여 생석회 최적 첨가량 결정법(ASTM C 977-22)에 따라 생석회 첨가량을 결정하였으며, 이에 대한 경시적인 지반공학적 개선특성을 분석하였다. 또한 시간에 따른 생석회-점성토 혼합물의 Ca^{2+} 이온농도 변화를 측정하였으며, Ca^{2+} 이온농도 변화가 연약 점성토의 지반공학적 개선여부 추정에 활용 가능한지를 검토하였다.

2. 생석회-점토 광물의 반응 원리

생석회에 의한 점성토의 개량 정도는 입도 및 함유 점토광물의 종류에 따라 차이가 난다. 점성토가 생석회와 반응을 하게 되면 점성토의 구조가 단립화되어 흙의 구조가 변화되고, 소성한계가 크게 증가하여 소성지수가 감소되며 이로 인해 흙의 비배수전단강도가 증가하는 등 점성토의 공학적 성질이 개선된다(Rogers et. al., 2000).

일반적으로 생석회는 흙에 포함된 간극수와 반응하여 물을 흡수하고 열을 발생시켜 함수비가 감소되는데, 이 과정에서 생석회의 체적이 약 1.5～1.9배 증가되는 수화반응이 발생한다. 또한 점토 입자 표면은 동형치환이나 점토 입자 모서리에서 입자 구조 연속성이 단절되어 음전하 상태로 존재하는데, 건조한 점토 입자 표면에는 음전화와 Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} 및 K^{+} 등과 같은 양이온들이 전기적으로 평형을 이루고 있으나, 물을 첨가하면 점토 입자 표면에는 해리된 음이온(OH^{-})과 Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}등과 같은 양이온들이 표면 주위를 떠다니며 확산이중층을 형성하게 되는데, 이때 이중층 내의 양이온과 음이온 농도는 점토 입자 표면에서 멀어질수록 한 점으로 수렴하는 특징을 가진다.

점토 입자 표면에서는 K^{+}와 Ca^{2+} 또는 Mg^{2+}이나 Fe^{2+}가 Al^{3+}등으로 양이온들 간의 교환현상이 발생하게 되는데 이온반지름이 작을수록, 원자가가 높을수록 이온들은 더 가까이 밀착해서 더 강하게 흡착된다. 이 반응으로 점토 입자 표면은 음전하 상태가 되고, 전기적으로 평형을 이루기 위해 양이온들이 접근하여 점토 입자 표면에 흡착 또는 결합되며, 이로 인해 확산이중층 또는 흡착수층 두께가 변화하고 소성 및 강도, 팽창 등 물리적 특성이 변화하게 된다.

점성토에 생석회를 첨가하면 생석회에 다량으로 포함된 Ca^{2+}가 점토 입자 표면에서 상대적으로 점토 입자와 결속이 약한 K^{+}, Na^{+}과 교환현상이 발생되고, 점토 입자 표면에 흡착된 Ca^{2+}은 확산이중층 및 흡착수층의 두께를 감소시키고 점토 입자를 응집화하여 강도 증가 및 액성한계 감소, 소성한계 증가 등 소성도를 변화시키고 팽창성을 감소시킨다. 이온교환과정은 점토표면의 결합력이 약한 이온을 금속성이온이 대체하게 되는데, 점토광물 중 몬모릴로나이트가 가장 높은 이온교환능력을 가지고 카올리나이트는 가장 낮은 이온 교환능력을 가진다(Koh, 2000).

또한 흙 속에 점토광물이나 콜로이드를 형성하고 있는 실리카성분(SiO_2)과 알루미나성분(Al_2O_3)이 화학적으로 결합하여 규산석회수화물과 알루민산석회수화물을 형성하여 강도를 증가시키는데 이를 포졸란 반응이라 한다. 경과시간에 따라 규산석회수화물과 알루민산석회수화물의 고결화가 진행됨으로써 점성토의 소성 및 전단강도가 증가되어 장기적으로 지반강도 및 지지력 개선이 장기적으로 진행되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 점토-생석회 혼합물의 포졸란 반응이 진행됨에 따라 Ca^{2+} 이온 농도는 감소할 것인데, 이는 점토-생석회 혼합물의 지반공학적 강도 및 지지력 개선 여부의 발생을 추정할 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다.

3. 실험방법

본 실험에서는 OO지역에서 채취한 점성토와 이에 대한 대조시료로 이온교환특성 및 포졸란 반응이 극단적으로 반대현상을 보이는 카올리나이트 및 Na-벤토나이트를 선정하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 시료의 지반공학적 특성을 나타내고 있으며, Table 2는 순수점토광물의 화학적 조성 분석 결과를 나타내고 있다. Table 1에서 카올리나이트 및 Na-벤토나이트의 경우 점토광물이므로 비중시험 절차가 규정되어 있지 않으므로 비중시험은 수행하지 못하였다. 생석회는 충북 단양 지역에서 생산된 것으로 공업용으로 가공한 제품을 본 실험에 이용하였으며, 생석회의 화학적 조성은 Table 3과 같고, 한국공업규정(KS L 9501)의 공업용 생석회 분류기준인 CaO함량에 따라 1급 공업용 생석회로 분류되어 우수한 물리화학적 특성을 보유하는 것으로 판단된다.

본 실험에서는 점성토 및 대조시료인 카올리나이트와 Na-벤토나이트의 최적 생석회 첨가량을 결정하고, 이 값에 대하여 각 시료별로 최적첨가량±3%로 생석회를 첨가한 공시체에 대하여 경과시간에 따라 아터버그한계, Ca^{2+} 농도, 일축압축강도, SEM촬영 등의 실험을 수행하였다.

Table 1. Geotechnical properties of samples

Item \ Sample	Clay	Kaolinite	Na-bentonite
ω_{opt}(%)	28.0	18.50	–
LL(%)	48.4	57.0	320.0
PL(%)	25.2	32.0	47.0
Gs	2.71	–	–
pH	6.11	7.16	10.23

※ In case of Na-Bentonite, the compaction test was not able to be performed due to the adhesion of specimen to a rod.

Table 2. Chemical properties of Kaolinite and Na-bentonite

Chemical \ Clay mineral	Kaolinite	Na-bentonite
SiO_2	73.20	58.8
Al_2O_3	16.20	14.8
Fe_2O_3	0.95	2.85
CaO	Not Detected	2.94
MgO	1.52	2.99
Na_2O	1.73	3.66
K_2O	4.64	0.79
Others	1.76	13.17

Table 3. Chemical components of quicklime

Quicklime	CaO(%)	SiO_2	MgO	CO_2	Others※
	92.2	2.0	1.8	–	4

※Loss of ignition

4. 실험결과 및 분석방법

4.1 생석회 최적첨가량 결정

일반적으로 점성토 지반의 안정처리에 이용되는 석회의 양은 보통 개량대상이 되는 흙의 건조중량의 5~10%로, 이 범위 안에서 생석회 첨가량이 증가할수록 장기강도증가에 유리한 것으로 알려져 있다(Das, 2000). 그러나 경제적인 측면에서 보면 지반 안정처리과정에서 개선목표에 대한 적합한 생석회량 결정이 중요하다. 점성토에 소석회 또는 생석회를 첨가하면 액성한계는 감소하고 소성한계는 증가하게 되나, 어느 일정점 이상을 첨가하게 되면 소성한계가 더 이상 증가하지 않는 첨가량이 존재하는데, 이때의 첨가량이 점성토의 소석회 또는 생석회 최적 첨가량이다. 이때의 pH농도는 12.4이며, 이온교환현상이 최대로 발생하는데 필요한 포화이온농도를 나타내는데, 이 첨가량은 생석회 또는 소석회 첨가에 따른 점성토의 초기안정화를 발생시키는데 충분한 양이다. 이러한 점성토와 생석회 간의 초기 개선반응으로 이온교환현상이 발생하여 흙의 소성도와 작업성을 개선시키게 되는데, 이 과정 또는 과정종결 후 포졸란 반응을 발생시키거나 촉진시키기 위한 생석회첨가량 결정법은 ASTM규정(ASTM C 977-92 quicklime and hydrated lime for soil stabilization)에 명시되어 있다.

Table 4. Lime requirements of stabilization for each sample

Sample	Lime requirement for pH=12.4 (%)
Clay	3.0
Kaolinite	3.0
Na-bentonite	5.0

Table 5. Symbols of each sample in laboratory test

Clay		Kaolinte		Na-bentonite	
Lime addition (%)	Symbol	Lime addition (%)	Symbol	Lime addition (%)	Symbol
0.0	CL0.0	0.0	KL0.0	0.0	ML0.0
0.5	CL0.5	0.5	KL0.5	2.0	ML2.0
3.0	CL3.0	3.0	KL3.0	5.0	ML5.0
6.0	CL6.0	6.0	KL6.0	8.0	ML8.0

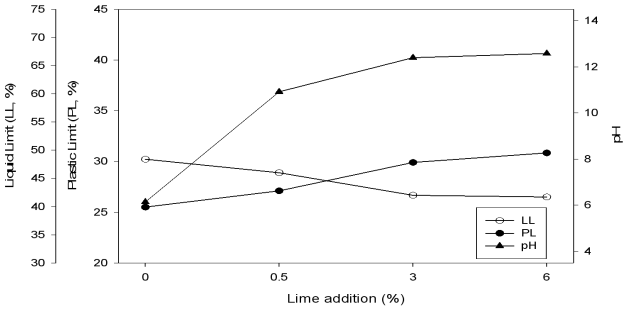
Table 4는 본 실험에서 사용된 각 시료의 최적 생석회 첨가량을 정리한 것이며, 이 결과에 따라 공시체를 제작하여 28일간 양생하며 지반공학적 거동특성을 분석하였다.

Table 5는 본 실험에서 사용된 각 시료별 생석회 첨가량에 대하여 제작된 공시체의 표기를 정리한 것이며, 경시별로 수행된 실험결과들은 본 표기에 따라 작성하였다.

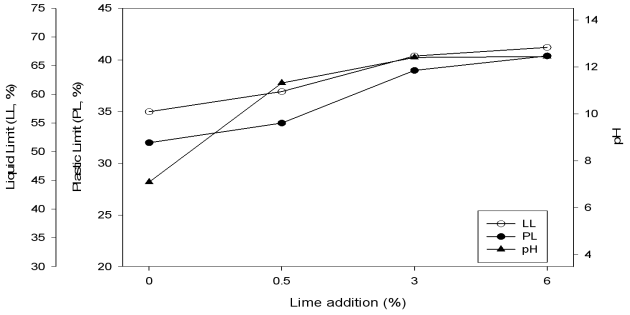
4.2 시료별 아터버그 한계 및 일축압축강도 변화 특성

각 생석회 첨가 시료에 대한 아터버그시험 결과는 Fig. 1과 같으며 최적 생석회 첨가량 부근에서 pH변화폭이 완만해지고 소성한계값이 큰 폭으로 상승하는 경향을 나타내고 있다. 생석회 첨가량이 증가함에 따라 점성토 시료의 액성한계는 최적 첨가량 이상 첨가시 감소하는 경향을 나타내고 있다. 카올리나이트는 지속적으로 증가하는 현상을, Na-벤토나이트는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

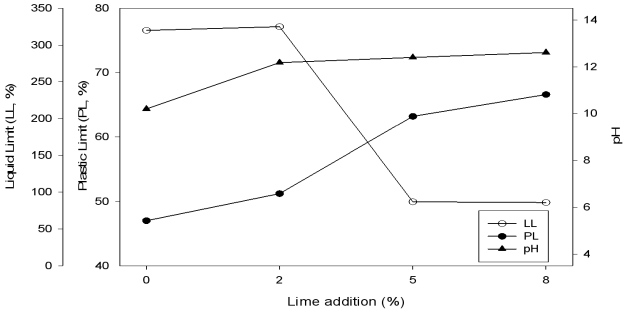
Das(2000)는 점성토에 생석회를 첨가하면 점성토 입자가 큰 입자로 뭉쳐져 덩어리를 형성하는 면모-집적화(flocculation-agglomeration) 현상을 일으켜 액성한계의 감소와 소성한계의 증가로 점성토의 소성이 감소된다고 보고하였다. 이러한 사실과 Fig. 1(a)의 점성토 시료의 아터버그한계값을 비교해 보면 생석회 첨가량이 증가할수록 액성한계는 감소하고 소성한계는 증가하는 것을 알 수 있으며, 점성토 입자 간에 면모-집적화 현상이 발생되어 소성이 증가되고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 카올리나이트의 경우 생석회 첨가에 따른 액성한계가 소폭 증가하는 경향을 보이는데 이는 1:1 기본구조로 이루어져 있으며, 기본구조와 기본구조 사이가 수소결합으로 이루어진 단위



(a) Clay



(b) Kaolinite



(c) Na-bentonite

Fig. 1. Atterberg limits variations of each sample by lime addition

질량당 표면적이 아주 작은 안정된 구조이기 때문에 생석회 첨가에 따른 이온교환현상이 활발하지 않음에 따른 것으로 판단된다. 따라서 점성토의 안정화에 필요한 최적생석회 첨가량을 결정하는 과정에서 소성한계값이 급격하게 증가하는 점의 생석회량이 점성토 안정화에 요구되는 생석회 첨가량 결정시 보조적 데이터로 사용가능하다는 것으로 보고한 Boardman et. al.(2001)의 연구결과와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

실험결과 CL6.0을 제외한 생석회가 첨가된 모든 시료들은 Table 6 ~ Table 8에 제시된 바와 같이 양생기간이 증가함에 따라 강도가 증가되는 경향을 나타내고 있으며, 7일 이후에는 증가경향이 크게 감소됨을 알 수 있다.

각 시료에 생석회가 최적으로 첨가된 샘플의 경우 양생기간에 따라 강도증가현상은 우수한 것으로 나타났으며, 최적 첨가량 이상 또는 이하로 생석회를 투입할 경우 액성

Table 6. Unconfined compressive strength of clay with lime addition

Sample \ Item	$\frac{(qu-qu_{CL0.01day})}{qu_{CL0.01day}}\times100(\%)$		
	1	7	28
CL0.0	0.0	1.0	22.5
CL0.5	12.7	39.2	53.9
CL3.0	18.6	81.4	125.5
CL6.0	7.8	47.1	115.7

Table 7. Unconfined compressive strength of kaolinite with lime addition

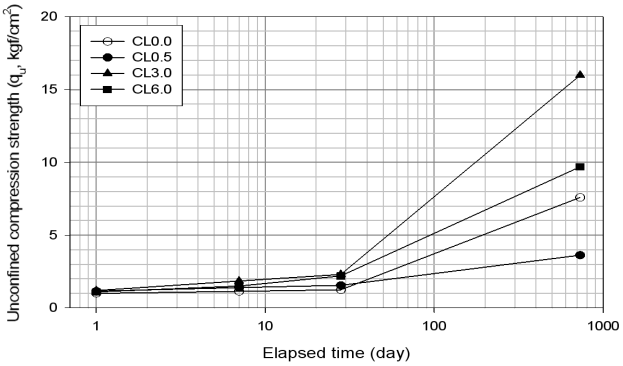
Sample \ Item	$\frac{(qu-qu_{KL0.01day})}{qu_{KL0.01day}}\times100(\%)$		
	1	7	28
KL0.0	0.0	25.0	47.6
KL0.5	1.2	31.0	54.8
KL3.0	1.2	66.7	102.4
KL6.0	3.6	31.0	54.8

Table 8. Unconfined compressive strength of Na-bentonite with lime addition

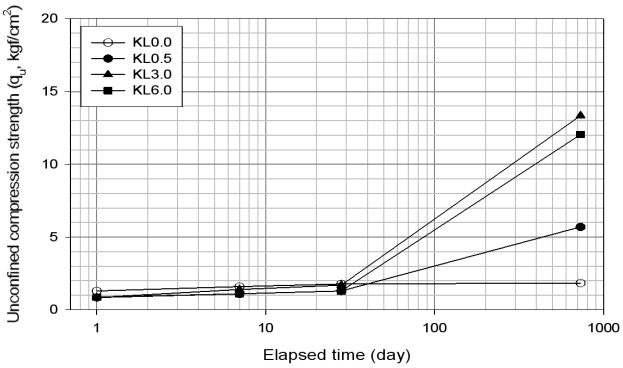
Sample \ Item	$\frac{(qu-qu_{ML0.01day})}{qu_{ML0.01day}}\times100(\%)$		
	1	7	28
ML0.0	0.0	3.8	53.2
ML2.0	51.9	229.1	305.1
ML5.0	58.2	306.2	438.0
ML8.0	58.6	330.4	495.0

한계가 높은 Na-벤토나이트를 제외하고는 양생기간에 따라 강도증가 현상은 발생되었으나 그 효과는 크지 않는 것으로 나타났다. 따라서 Na-벤토나이트를 제외한 경우 최적량 이상으로 생석회를 첨가하는 것은 단기강도증가에 효과적이지 못한 것으로 판단된다.

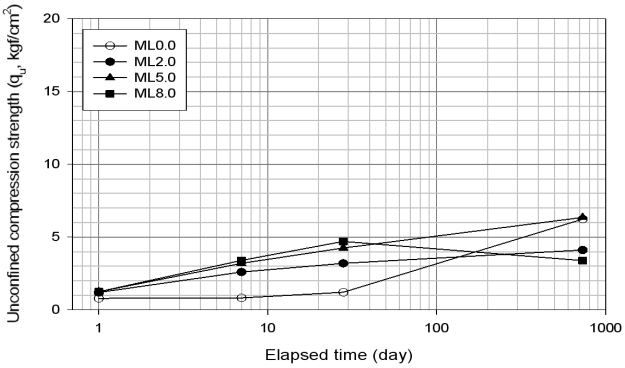
생석회 첨가량이 장기강도증가에 미치는 영향을 파악하고자 2년 동안 비닐팩으로 밀봉한 상태로 양생한 각 샘플에 대하여 일축압축강도시험을 실시하였으며 실험결과는 Fig. 2와 같다. 모든 시료들은 ASTM 규정에 따라 결정된 생석회 첨가량으로 제작한 공시체에서 최대강도를 가지는 것으로 나타났으며 28일 강도 측정시 가장 큰 값을 보였던 Na-벤토나이트의 경우 강도증가가 크게 나타나지 않았다. Na-벤토나이트를 제외한 다른 시료들은 최적 생석회 첨가량에서 2년이 경과한 후 q_u는 1.5MPa을 전후한 큰 값으로 나타나 우수한 강도증가현상을 보였다. 또한 현장점성토는 최적 생석회 첨가량에 3%를 더한 시료에서 2



(a) Clay



(b) Kaolinite



(c) Na-bentonite

Fig. 2. q_u variations along elapsed time

년이 경과 후 최적첨가량보다는 값은 작으나 강도증가가 발생한 것으로 보아 생석회 파일 주변 반응영역의 강도증가는 2년이 경과하여도 계속 발생될 것으로 예상된다.

본 시험 결과만을 고려해 본다면 생석회 첨가량이 많을수록 장기강도 증가에 효과적이라는 사실과는 일치하지 않는 것으로 나타났다. 모래-벤토나이트-생석회 혼합물에 대한 강도 및 투수특성에 관한 연구(Goo et. al., 2001)에 따르면 적정 생석회 첨가량 이상으로 혼입된 경우 수화반응에 과다한 수분이 소비되어 벤토나이트의 점착력이 충분히 발현되지 않았으며, 이 과정에서 발생된 소석회가 공시체의 미세 입자간 결합을 떨어뜨린 것으로 보고된 바 있으며 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Table 9. Variations of Ca^{2+} concentration with elapsed time and lime addition (unit :cmol/kg)

Time(day) \ Sample	CL0.0	CL3.0
1	3.164	61.65
7	3.164	17.43
28	3.164	0.712

4.3 Ca^{2+} 농도와 소성한계 및 일축압축강도의 관계

점성토가 생석회와 반응하면 이온교환 및 포졸란 반응이 발생되어 소성 및 강도가 증가하는 사실을 앞서 논의한 내용에서 잘 확인할 수 있으며, 이에 대해 추가적으로 생석회에 포함된 Ca^{2+} 영향이 단기강도 증가에 미치는 영향을 파악하고자 기간에 따라 일축압축강도시험을 실시한 후 시료를 채취하여 Ca^{2+}농도를 분석하였고 그 결과는 Table 9와 같다.

생석회를 포함하지 않은 CL0.0의 Ca^{2+}농도는 3.164 cmole/kg으로 일반 점성토에 포함되어 있는 범위에 있으나 생석회를 첨가함에 따라 급격히 농도가 증가하였다. 이는 생석회에 많은 Ca^{2+}이 포함된 것을 의미하며, 경과시간에 따라 급속하게 감소하는 경향을 보이고 있는데, CL3.0의 7일째 농도는 큰 값으로 감소하였고 28일이 경과한 후 생석회를 첨가하지 않은 원상태의 농도보다 더 낮은 수치로 나타났다. Ca^{2+}이 흙의 초기강도 증가에 지배적인 역할을 하는 이온교환현상과 포졸란 반응에 관여한다는 사실을 염두하면 7일을 전후하여 급속한 강도 증가가 발생되지 않더라도 Ca^{2+}와 결합하여 장기강도증가에 관여하는 규산석회수화물이나 알루민산석회수화물이 완전히 굳어지거나 흙 입자와 결합되지 않고 유동적인 상태로 흙의 내부에 존재하고 있는 것으로 판단된다. 특히 생석회 최적 소비량 실험 결과에서 흙의 포졸란 반응이 가장 촉진되는 상태는 pH=12.4일 때의 생석회 첨가량이고, 이 값이 최적량임을 고려해 본다면 1일째 많은 양의 Ca^{2+}이 흙 입자 내부에 포함된 다른 이온들과 활발한 반응을 일으켜 흙 입자표면 또는 흙 입자 간에 흡착된 것으로 추측된다.

Fig. 3은 점성토 시료에 생석회를 첨가한 후 기간에 따른 Ca^{2+}농도의 변화와 일축압축강도 및 소성한계의 변화를 나타낸 것이다. 1일과 28일 간의 Ca^{2+}가 초기값 이하로 감소하는 동안 PL과 q_u는 모두 증가하는 경향으로 나타났고 1일과 7일간의 Ca^{2+}농도의 감소추세와 7일에서 28일 사이의 감소추세를 비교해 볼 때 1일과 7일 사이에 감소량

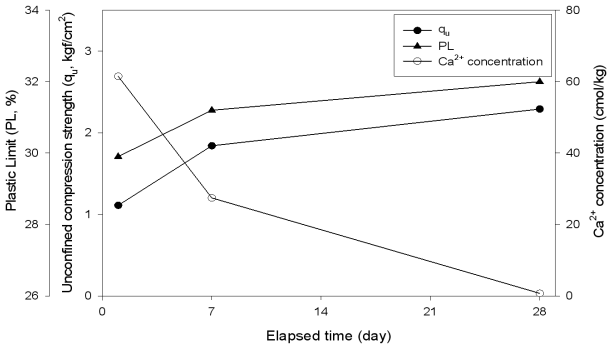


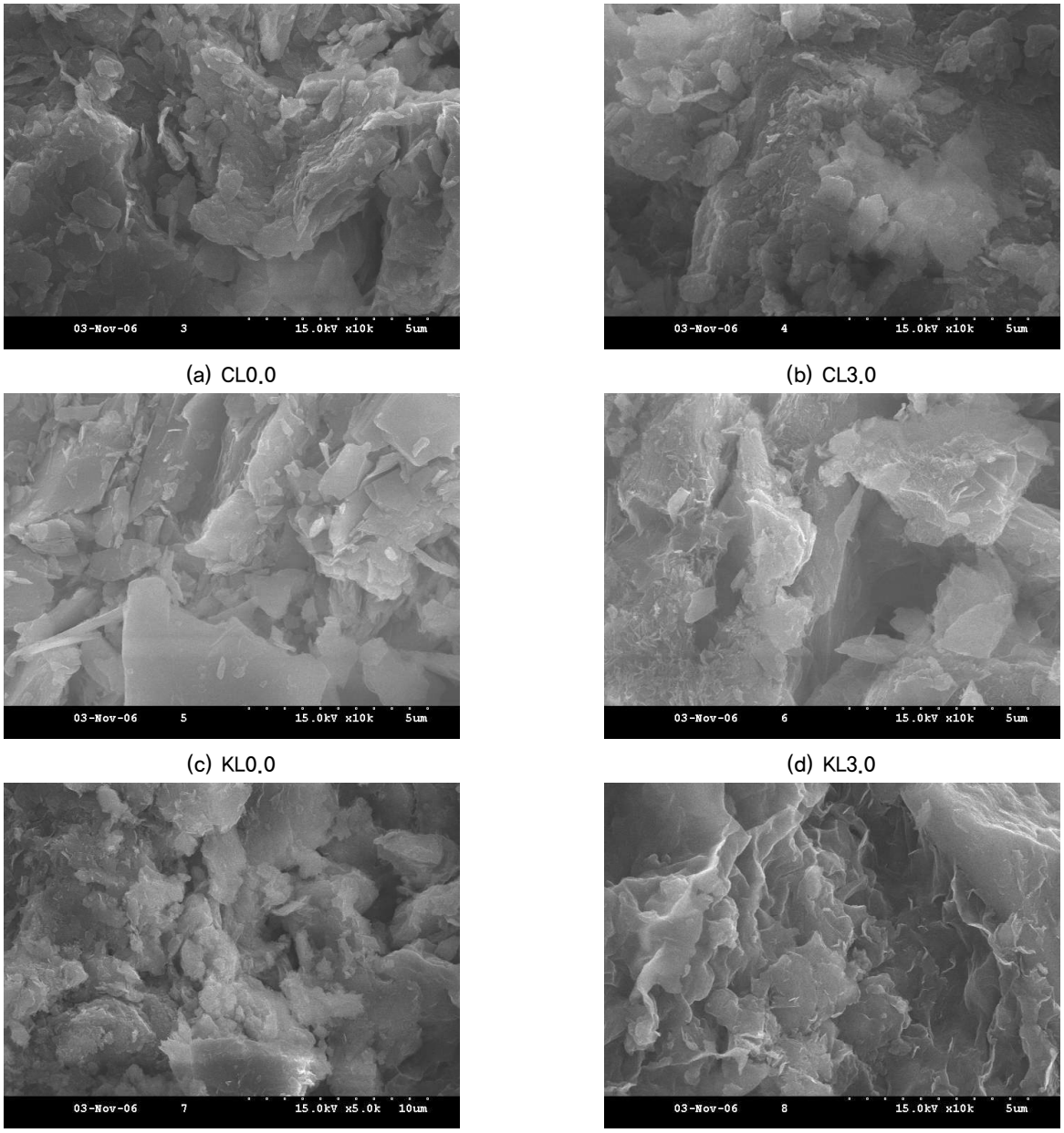
Fig. 3. Relationship between PL, q_u and Ca^{2+} of CL3.0 with elapsed time

이 더 많은 것으로 나타나 Ca^{2+}는 초기에 많은 양이 소비됨을 알 수 있다. 또한 강도와 소성한계가 증가하는 것으로 보아 초기에 소비되는 Ca^{2+}들은 흙입자 또는 입자간의 구조를 변화시키는데 큰 역할을 하는 것으로 판단된다. 따라서 Ca^{2+}농도가 높은 것은 즉시 또는 잠재적으로 흙 내부 또는 흙 입자간의 결합관계 또는 구조를 변화시킬 수 있다는 것도 잘 알 수 있으며 지반 내의 Ca^{2+}농도 변화는 외부로부터 유입 또는 유출되지 않은 상태이면 지반의 소성 또는 강도 변화를 추정하는데 활용 가능할 것으로 보인다.

4.4 미세입자 구조

생석회가 점성토에 적정량으로 투입될 경우, 단기적으로는 흙의 소성도를 증가시키고 장기강도의 발현에 효과적인 것을 앞선 시험결과에서 알 수 있었다. 따라서 생석회가 점성토의 입자구조를 어떻게 변화시키는지를 확인하고자 SEM촬영을 실시하였다. 샘플들은 일축압축강도시험이 종료된 직후 공시체 내부에 포함된 입자들이 불순물에 노출되지 않도록 조심스럽게 채집하여 자연 건조한 뒤 전처리를 거쳐 1만배로 확대 촬영하였다.

CL0.0, KL0.0 및 ML0.0은 전형적인 점토광물입자형태인 판상형태로 공시체로 제작한 후 2년이 경과된 상태이기 때문에 간극수와 반응하여 어느 정도의 결합이 진행된 상태이다. CL3.0은 입자 표면에 흙 입자간의 결합에 관계할 것으로 여겨지는 물질들이 부착되어 굳어진 상태인 것을 확인할 수 있다. KL3.0은 KL0.0보다 입자들이 흩어진 상태이나 입자 간에 흙입자와는 다른 형태의 물질이 경화되어 입자를 결합시키고 있는 형태인 것을 알 수 있다. ML5.0은 ML0.0에 비하여 원래의 입자가 아닌 다른 물질이 입자를 얇은 막의 형태로 완전히 감싸고 있으나 쉽게 부스러질 것 같은 형태이다.



(a) CL0.0 (b) CL3.0

(c) KL0.0 (d) KL3.0

(e) ML0.0 (e) ML5.0

Fig. 4. Micro-structure change of each sample after 2year

5. 결 론

점토광물로 구성된 3가지 시료에 대하여 최적 생석회 첨가량을 결정하였으며, 각 시료별로 생석회 첨가에 따른 지반공학적 거동특성을 분석하고자 아터버그 한계, 일축압축강도 및 Ca^{2+} 농도를 시간경과에 따라 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 각 시료에 생석회 첨가량이 증가할수록 소성한계 및 pH는 증가하였으며, 최적 첨가량을 전후하여 그 증가 경향은 안정되었다. 따라서 소성한계의 변화경향을 점성토의 지반공학적 개량 정도에 대한 간접적인 평가방법으로 활용가능할 것으로 판단된다.

(2) 생석회 최적 첨가량을 투입한 모든 샘플에서 28일이 경과한 경우 아터버그한계 및 일축압축강도 등 지반공학적 개량특성이 가장 우수한 것으로 나타났으며, 각 시료별로 생석회를 최적 첨가량 이상으로 투입할 경우 Na-벤토나이트를 제외하고는 개선정도는 투입량에 비례하지 않는 것으로 것으로 나타났다. 점성토의 경우 소성한계 및 일축압축강도는 7일 경과를 기준으로 급

격하게 증가하는 경향을 보였으며, Ca^{2+} 농도는 급격하게 감소하는 경향을 보였다.

(3) 생석회 첨가량을 변화시켜 2년간 양생한 공시체에 대하여 일축압축강도 실험을 수행한 결과, 최적 생석회 첨가량이 투입된 공시체에서 강도특성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

(4) 점성토 지반의 개선을 위하여 투입되는 생석회량은 pH시험으로 간단하게 결정할 수 있고, 개선여부는 소성한계 및 Ca^{2+} 농도 변화로 추정가능한 것으로 본 실험 결과 나타났다.

Acknowledgement

This study was financially supported by grants from the "Development of pre-loading method for reinforcement piles of apartment remodeling," a project of the Korea Institute of Construction Technology.

References

1. Boardman D. I.(1999), *Lime stabilisation : clay/lime interaction*, Ph.D Thesis, Univ. of Loughborough.
2. Boardman D. I., Glendinning S. and Rogers C. D. F. (2001), "Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes", *Geotechnique*, Vol.50, No.6, pp.533-543.
3. Chun, B. S. (2001), "Improvement Effectiveness of Soft Ground Using Hardening Agent", *Journal of Korean Geo-environmental Society*, Vol.2, No.2, pp.59-64.
4. Das, B. M. (2000), *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, Brooks/Cole, pp.5-21.
5. Goo, J. M., Kwon M. N. and Kim, H. K. (2001), "Strength and Permeability of Sand-Bentonite-Lime mixtures", *Journal of Korean Agricultural Civil Engineering*, Vol.43, No.2, pp.122-131.
6. Koh, G-S. (2000), *A study on engineering characteristics and applicability of Korean quick lime*, Ph.D Thesis, Hanyang University.
7. KOSIS (2013), "Mining and manufacturing industry/energyt", *Korean Statistical Information Service*, http://kosis.kr.
8. Kown, M. N. and Goo, J. (2006), "Fundamental Studies on Stabilization of Shallow Slope Failure Using Lime Pile -Change of Clayey with Lime Addition-", *Journal of Korean Geo-environmental Society*, Vol.7, No.5, pp.49-55.
9. Lee, J. D. and Bae, W. S. (2007), "Characteristics of Compressive Strength Corresponding to the Time Lapse of Quicklime Injected Clay", *Journal of Korean Geo-environmental Society*, Vol.8, No.4, pp.13-17.
10. Rogers, C. D. F., Glendinning S. and Troughton V. M. (2000), *The use of additives to enhance the performance of lime piles*, Geosystems, Helsinki, Finland, published by Badding information Ltd. Helsinki, pp.127-134.