

생석회 파일을 이용한 얇은 사면 파괴의 안정화에 대한 기초 연구

- 생석회 첨가에 따른 점성토의 특성 변화 중심으로 -

Fundamental Studies on Stabilization of Shallow Slope Failure Using Lime Pile

- Changes of Clayey Properties with Lime Addition -

권무남* · 구정민†

Kwon, Moonam* · Goo, Jeungmin†

Abstract

Quick lime made from limestone that are deposited abundantly in Korea has excellent potentials for stabilization of clayey soils. If Korea is able to take advantage of its abundant supply, economical efficiency could be achieved through mass production as well as being able to take advantage of utilization of natural resources. For stabilizing of clayey soil with lime, it is necessary to determine the required quantities of lime firstly and to evaluate the degree of stabilization with lime content. In this test, the quantity of lime required for 2 clayey soils which located in Seunggok and Bugok province respectively, and for 2 clay minerals—kaolinite and montmorillonite—were determined by ASTM C 977-92 and were evaluated for solidification of each samples with changing lime contents by Atterberg limit test and pH test. It was also evaluated for the improvement of each sample with lime content and curing time. The sample which added lime content determined by ASTM C 977-92 increased plastic limit, unconfined compression strength, and decreased pH in increasing trend.

Keywords Solidification, pH, Lime, Atterberg limit, Unconfined strength

요 지

국내 풍부하게 매장된 석회석에서 생산되는 생석회는 점성토의 안정화에 뛰어난 잠재성을 가지는데 생석회를 점성토의 안정화에 이용할 수 있다면 천연자원 이용측면에서도 장점을 가질 수 있다. 점성토의 안정화에 생석회를 이용하는 공법은 안정화에 필요한 생석회요구량의 결정과 생석회 함량에 따른 안정화의 정도가 우선적으로 평가되어야 한다. 본 실험에서는 성곡 및 부곡 지역의 점성토와 2종류의 점토광물- 카올리나이트계 및 몬모릴로나이트계 -에 대하여 ASTM C 977-92에 따라 안정화에 필요한 생석회요구량을 결정하였으며 아터버그시험 및 pH시험을 통하여 각 시료에 대하여 생석회첨가량을 변화시켜 고결화 정도를 평가하였다. 각 시료에 대하여 생석회첨가량과 양생기간을 변화시켜 개선여부도 평가하였다. 각 시료는 ASTM C 977-92에 따라 결정된 생석회량을 첨가함으로써 소성한계, 일축압축강도는 개선되었으며 pH값은 증가경향은 감소하였다.

주요어 : 고결화, pH, 생석회, 아터버그한계, 일축압축강도

* 정회원, 경북대학교 농업토목공학과 교수

† 정회원, 경북대학교 대학원 농업토목공학과 박사과정(E-mail : spencer8789@hotmail.com)

1. 서론

생석회와 점성토가 혼합되면 간극수와 반응하여 수화반응, 이온교환반응 및 포졸란반응 등의 물리화학적 반응을 발생시키고 이러한 반응들은 연약 및 문제성 지반의 개선 및 안정화에 적용되고 있다. 지금까지 알려진 생석회를 이용한 공법들은 노반의 흙과 생석회를 혼합하여 처리하는 표층처리공법과 파일 및 말뚝형태로 연약점성토 지반에 관입하여 처리하는 심층처리공법으로 크게 구분할 수 있다.

지하자원이 부족한 우리나라에서 생석회의 원료인 석회석 매장량은 2002년을 기준으로 4,465백만톤에 달하고 2005년도 예상생산량은 95,000천톤(통계청 2004)으로 비교적 풍부하고 생산원가가 저렴하며 우수한 공학적 성질을 보유하고 있는 것으로 보고된 바 있는데(고갑수, 2000), 이러한 생석회의 여러 물리화학적 반응을 연약 및 문제성 지반의 안정화에 적절히 이용한다면 자원활용면에서 유리할 것으로 예상된다.

국내 생석회를 이용한 지반안정화공법들은 얇은 심도의 초연약해양성 지반개량공법인 생석회말뚝공법에 연구가 집중되어 왔다(천병식 등, 2001). 그러나 외국의 경우 생석회를 이용한 지반안정화공법은 높은 함수비를 가지는 초연약지반개량 뿐만 아니라 점성토로 구성된 사면안정화에 대한 연구도 병행하여 수행하고 있는 실정이며, Roger 등(1997)에 의하면 점성토 사면 안정화에 생석회를 파일 형태로 시공하여 그 이용가능성에 대한 성공적인 연구결과를 발표한 바 있다.

점토 성분이 많이 포함된 점성토로 사면을 성토할 경우 투수성이 낮기 때문에 단기간의 집중호우시에는 낮은 투수계수의 영향으로 지반 내 수분침투량이 크지 않으나 장기강우에 노출될 경우 점진적으로 지반 내로 침투된 간극수가 원활하게 배출되지 않아 파괴에 이르게 된다. 따라서 장기강우에 대하여 점성토로 구성된 성토사면은 잠재적인 파괴가능성을 가진다고 볼 수 있다. 이러한 점성토 사면의 경우 파괴 형태는 대부분 1~3m 깊이의 천층파괴로 나타나고 간극수압 변화에 의한 전단강도저하가 가장 큰 원인으로 알려져 있다.

점성토사면에 핸드오거 등으로 천공한 후 건조한 상태의 생석회를 투입하는 생석회 파일공법은 주변 점토에서 수분을 흡수하여 형성된 생석회 자체의 파일 뿐만 아니라 주변 점토와 반응으로 발생하는 영향원으로 사면의 안정성을 증가시킬 수 있을 것으로 판단이 된다. 생석회 파일의 현장적용을 위한 설계에 앞서 먼저 생석회 파일 주변에 발생하는 영향원의 크기, 강도 증가의 정도가 평가되어야 할 것이다. 포졸란 반응 및 이온교환 반응은 생석회 파일 주변 점성토의 pH 및 아터버그한계값 및 일축압축강도 등을 변화시키는데 이러한 특성 간의 관계를 규명할 수 있다면 생석회 파일 시공 후 시간에 따른 강도개선 여부를 효과적으로 평가할 수 있을 것으로 예상된다.

이에 본 실험에서는 ASTM규정에 따라 점성토에 생석회를 첨가한 후 안정화에 요구되는 생석회 첨가량을 결정하고, 단기양생을 통한 점성토의 물리화학적 특성 변화를 연구하고자 아터버그한계, pH 및 일축압축강도 시험을 실시하였다.

2. 실험재료 및 방법

점성토에 생석회가 투입되면 단기적으로는 팽창 및 발열반응과 함께 점토광물 조직의 (-)전하층에 존재하는 양이온과 생석회의 풍부한 칼슘이온간의 교환현상이 발생되는데, 이러한 반응으로 수산기이온이 해리되어 pH값을 상승시킨다. 이에 따라 이온교환현상이 더욱 활발해져 점토광물의 흡착현상이 촉진되고 흙의 소성도가 변화되는 고결화가 진행된다. 장기적으로는 지속적인 이온교환현상과 이에 따라 생성된 이차반응물 질인 규산석회수화물과 알루미늄석회수화물에 의해 포졸란반응이 진행되어 강도증가가 발생된다.

점토와 생석회 간의 반응을 보다 명확하게 연구하고자 이온교환능의 차이가 심하며 거동특성이 극단적인 카올리나이트와 몬모릴로나이트를 대조시료로 선정하고 점토성분이 비교적 많이 포함되어 있는 경남 부곡지역과 경북 성곡지역의 점성토를 채취하여 본 실험을 수행하였다. 모든 시험들은 한국공업규정(KSF) 또는 ASTM에 준하여 실시하였다.

2.1 실험재료

2.1.1 점성토 및 기본점토광물

본 실험에 이용된 점성토는 경남 부곡지역의 성토공사현장과 경북 성곡지역의 저수지 공사현장의 성토재를 채취한 것이다. 부곡지역 점성토의 경우 #200체 통과율은 68%로 점토성분이 많이 포함된 것으로 통일분류법에 의해 CL로 분류되었다. 한편 성곡지역 점성토는 #200체 통과율이 53%로 성곡지역 점성토에 비해 점토함량은 적으나 통일분류법에 의해 역시 CL로 분류되었다. 두 점성토 모두 액성한계가 30%이상이고 소성지수가 10이상으로서 plastic chart의 A라인과 U라인 사이에 위치하여 소성이 중간정도인 무기질 점토인 것으로 판단된다.

카올리나이트 및 몬모릴로나이트는 경북 포항지역에 위치한 광산에서 채취하여 기성제품으로 판매되는 고령토 및 Na-벤토나이트를 이용하였다. 각 시료의 아터버그한계, 비중 및 pH값은 표 1로 정리하였으며, 표 2는 카올리나이트 및 Na-벤토나이트의 화학성분분석결과이다.

카올리나이트 및 Na-벤토나이트는 Si_2O 와 Al_2O_3 의 함량차이를 보이고 있으며 이는 생석회 첨가에 따른 이온교환 및 포졸란반응에 의한 점성토의 물리화학적 거동특성에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

2.1.2 생석회

한국공업규정(KS L 9501)에 따르면 공업용 생석회를

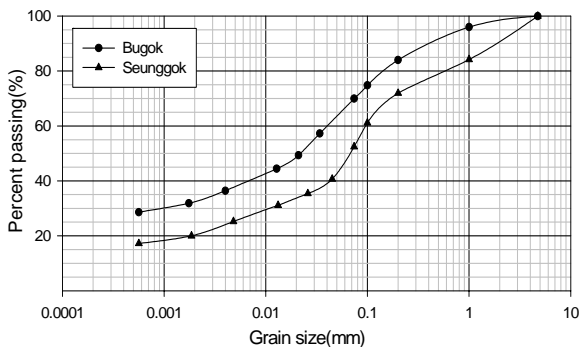


그림 1. 각 시료의 입도분포곡선

CaO함량에 따라 표 3과 같이 분류하고 있다. 본 실험에 사용된 생석회는 단양지역에서 생산된 것으로 화학성분은 표 4와 같으며 표 3에 의하여 1급공업용 생석회로 분류되었고, 우수한 물리화학적 특성을 보유하는 것으로 판단된다. 생석회는 보관과정에서 수분에 매우 민감하게 반응하여 생석회의 품질저하가 우려된다. 따라서 본 실험에서는 단양지역에서 생산된 것을 즉시 2중밀폐백에 담아 운반 및 보관하였으며 실험과정에서 수분흡수에 따른 품질저하의 원인들을 최소화하였다.

표 1. 각 시료들의 아터버그한계값, 비중 및 pH값

시료	성곡	부곡	카올리나이트	Na-벤토나이트
액성한계(%)	39.6	41.0	57.0	320.0
소성한계(%)	23.1	20.1	32.0	47.0
비중	2.71	2.56	-	-
pH	7.32	6.11	7.16	10.23

표 2. Na-벤토나이트 및 카올리나이트의 화학적 조성

점토광물	Na-벤토나이트	카올리나이트
SiO ₂	58.8	73.20
Al ₂ O ₃	14.8	16.20
Fe ₂ O ₃	2.85	0.95
CaO	2.94	D.L.* >
MgO	2.99	1.52
Na ₂ O	3.66	1.73
K ₂ O	0.79	4.64
기타	13.17	1.76

* D.L. : Detection Limit.

표 3. 한국공업규격(KS L 9501)에 따른 산업용 석회의 분류

분류	등급	CaO(%)	CO ₂	기타 불순물*	체기름 후 잔류량	
					600 μ m	150 μ m
생석회	특급	≥93.0	≤2.0	≤3.2	-	-
	1급	≥90.0	-	-	-	-
	2급	≥80.0	-	-	-	-
소석회	특급	≥72.5	≤1.5	≤3.0	0	≤5.0
	1급	≥70.0	-	-	0	-
	2급	≥65.0	-	-	0	-

* 여기서 불순물이란 이산화규소, 산화알루미늄, 산화제이철 및 산화마그네슘의 합계량이다.

표 4. 실험에 사용된 생석회의 화학적 조성

생석회	CaO(%)	SiO ₂	MgO	CO ₂	기타 불순물*
	92.2	2.0	1.8	-	4

2.2 실험방법

ASTM규정(ASTM C 977-92 quicklime and hydrated lime for soil stabilization)에 따르면 흙의 안정화에 필요한 생석회 첨가량은 40체를 통과한 기건상태인 시료의 건조중량 1, 2, 3, 4, 5, 6 및 7%에 해당하는 생석회를 첨가한 후 증류수에 1시간 이상 교반시켜 용해시킨 후 측정된 pH가 12.40을 나타내는 점의 첨가량이며 이온교환이 최대로 발생하는데 필요한 포화이온 농도를 나타낸다. 따라서 4종류의 시료에 대하여 생석회를 첨가 후 pH를 측정하여 안정화에 필요한 생석회량을 결정하였다.

상대적으로 단기간인 28일간의 양생기간동안 최적 생석회 첨가량에 따른 고결화 및 강도 증가 등을 평가하기 위하여 일축압축시험, 아터버그한계시험 및 pH값을 측정하였다. 또한 안정화에 필요한 생석회량 이상/이하로 첨가될 경우의 영향을 연구하고자 최적 생석회 첨가량에 $\pm 3\%$ 의 생석회를 첨가한 샘플에 대하여도 동일한 시험들을 수행하였다.

아터버그한계값 중 액성한계는 정적인 요소임에도 불구하고 동적인 아터버그기구로 시험하는 것은 원칙적으로 모순이므로 낙하추식(fall cone) 방법을 채택하여 실시하였다. 각 시료들은 배합 후 다짐시험으로 얻어진 최적함수비에 해당하는 수분을 공급한 후 밀폐용기에 담아 상온에서 보관하였다.

각 샘플에 대하여 다짐시험을 실시한 후 얻어진 최적함수비의 2%습윤층에서 일축압축공시체를 제작한 후 비닐로 밀봉하여 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 일정한 온도로 양생하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 생석회 첨가에 따른 pH변화 및 생석회 최적첨가량 결정

pH값은 유리전극식 지시계를 사용하여 측정하였으며 각 시료의 생석회 첨가에 따른 pH변화는 그림 2와 같다. Na-벤토나이트에 0~2%의 생석회가 첨가된 샘플들은 Na-벤토나이트의 팽창특성에 의하여 ASTM에서 규정한 20g의 기건상태의 시료에 증류수 100ml 첨가시 슬러리 상

태가 되어 pH측정이 불가능하였으며 500ml의 증류수를 첨가 후 측정된 값이다. 이는 pH 측정값에 영향을 미치지 않는 pH 상승이 발생되지 않는 안정된 부근의 점이 흙의 안정화에 필요한 생석회 첨가량인 사실에 기초해 볼 때 큰 영향은 없는 것으로 판단된다(Boardman 등, 2001).

모든 시료들은 1%정도의 생석회 첨가에도 민감한 pH값의 변화경향을 나타내었고, pH=12.4인 최적값 근처에서는 변화경향이 완만하였다. 따라서 최적 첨가량 이상으로 생석회를 첨가하는 것은 pH값 상승에 큰 영향을 미치지 못하는 것을 잘 알 수 있다. 표 5는 각 시료에 대한 최적생석회 첨가량을 정리한 것이다.

성곡 및 부곡지역에서 채취한 시료의 경우 그 값이 4% 및 3%로 나타났는데 실트질 점토에 대하여 석회첨가량을 변화시켜 28일간 양생한 결과 6%첨가량에서 최대의 강도가 발생된다는 전경수(1988)와 200체 통과량이 20% 정도인 점성토의 최대강도값이 10%인 것으로 보고한 여재호 등(2000)의 연구결과들과 비교해 볼 때 첨가량이 상대적으로 낮은 값을 알 수 있다. 액성한계가 66%, 소성한계가 26%인 점성토에 CaO함량이 93%이상인 생석회의 단기고결화에 필요한 첨가량을 2~3%인 것으로 보고한 Rogers와 Glendinning(1996)의

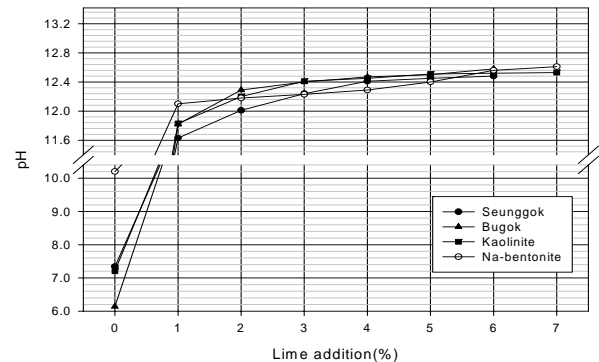


그림 2. 생석회 첨가량에 따른 각 시료의 pH 변화

표 5. 각 시료의 안정화에 필요한 생석회 요구량

시료	항목	pH=12.4에 필요한 생석회첨가량(%)
성곡		4.0
부곡		3.0
카올리나이트		3.0
Na-벤토나이트		5.0

표 6. 생석회 첨가량의 변화에 따른 각 시료의 표기

성곡		부곡		카올리 나이트		Na-벤토 나이트	
생석회 첨가량 (%)	표기	생석회 첨가량 (%)	표기	생석회 첨가량 (%)	표기	생석회 첨가량 (%)	표기
0.0	SL0.0	0.0	BL0.0	0.0	KL0.0	0.0	ML0.0
1.0	SL1.0	0.5	BL0.5	0.5	KL0.5	2.0	ML2.0
4.0	SL4.0	3.0	BL3.0	3.0	KL3.0	5.0	ML5.0
7.0	SL7.0	6.0	BL6.0	6.0	KL6.0	8.0	ML8.0

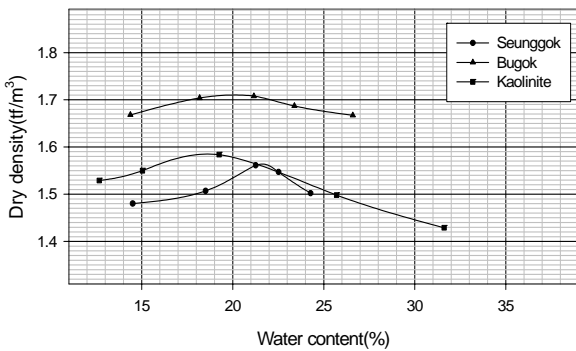


그림 3. 각 시료들의 다짐곡선

연구결과와는 비교적 잘 일치하고 있다. Kaolinite는 Na-Bentonite에 비교해 볼 때 적은 양의 생석회 첨가로도 pH=12.40에 도달됨을 알 수 있다.

표기의 간단화를 위하여 생석회 첨가량에 대한 각 시험에 사용되는 샘플은 표 6과 같이 한다.

3.2 다짐실험

생석회를 첨가하지 않은 성곡 및 부곡지역 점성토와 카올리나이트의 다짐시험결과는 그림 3과 같고, 안정화에 필요한 생석회량 및 ±3% 샘플에 대한 결과값은 표 7에 정리하였다. Na-벤토나이트의 경우, 수분과 반응할 때 높은 팽창특성과 점착성 등으로 인해 다짐시험이 불가능하였다. 표 7에 따르면 모든 시료는 생석회 첨가에 따라 최적함수비는 증가하고 최대건조밀도는 감소하는 경향을 보이는데 이는 생석회에 수분이 공급됨에 따라 즉시 팽창 및 수분흡수를 일으키는 초기작용에 의한 영향으로 판단된다.

표 7. 생석회 첨가량에 따른 각 시료의 다짐실험 결과값

시료	항목	최적함수비(%)	
		최적함수비(%)	최대건조단위중량(tf/m³)
SL1.0		22.5	1.560
SL4.0		24.0	1.550
SL7.0		26.5	1.535
BL0.5		20.5	1.650
BL3.0		21.5	1.615
BL6.0		23.5	1.595
KL0.5		21.0	1.575
KL3.0		23.5	1.565
KL6.0		27.5	1.545

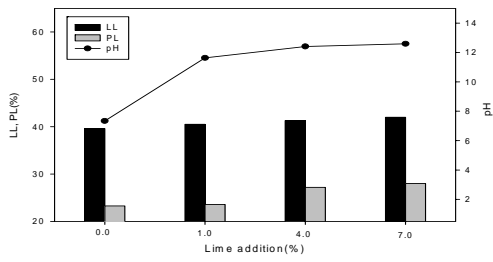
3.3 아터버그한계

각 생석회 첨가 샘플에 대하여 아터버그시험을 한 결과는 그림 4와 같으며 최적생석회 첨가량 부근에서 pH변화폭이 완만해지고 소성한계값이 큰 폭으로 상승하는 경향을 나타내고 있다. 액성한계값의 경우 부곡 및 Na-벤토나이트는 생석회 첨가량이 증가함에 따라 감소하며 성곡 및 카올리나이트는 증가하는 경향을 보인다.

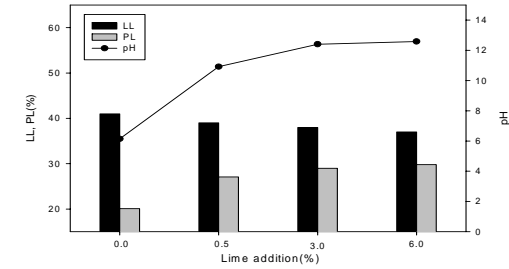
이는 점성토의 안정화에 필요한 최적생석회 첨가량을 결정하는 과정에서 소성한계값이 급격하게 증가하는 점의 생석회량이 점성토 안정화에 요구되는 생석회 첨가량 결정시 보조적 데이터로 사용가능하다는 것으로 보고한 Boardman 등(2001)의 연구결과와 잘 일치하고 있다. 따라서 점성토로 이루어진 현장의 고결화에 필요한 생석회량 결정시 비교적 단순한 소성한계시험 방법으로 고결화 정도를 효과적으로 판단할 수 있을 것으로 예상된다.

3.4 일축압축강도

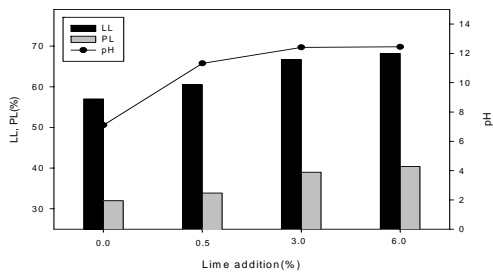
생석회가 첨가된 모든 시료들은 그림 5와 같이 양생기간이 증가함에 따라 포졸란반응에 의한 것으로 판단되는 강도증가 경향을 보이고 있으며 7일 이후에는 증가경향이 크게 감소됨을 알 수 있다. 따라서 점성토 안정화 또는 고결화를 위해 생석회를 첨가하는 것은 신속한 강도증가 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.



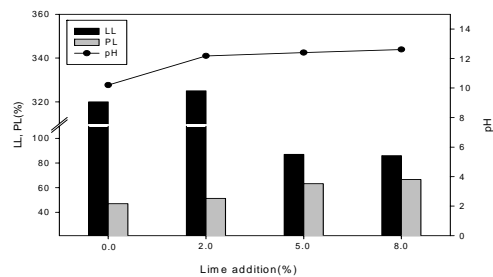
(a) 성곡



(b) 부곡



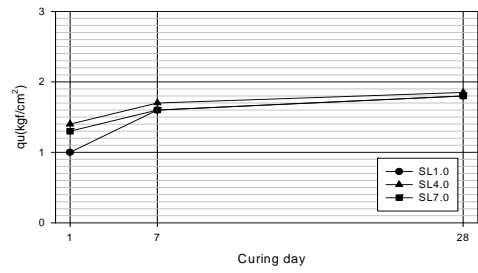
(c) 카울리나이트



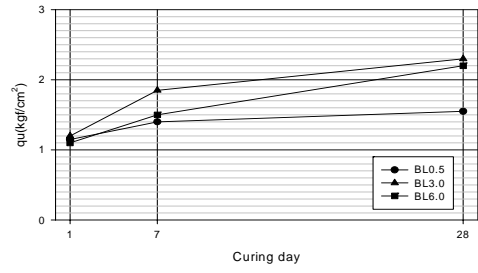
(d) Na-벤토나이트

그림 4. 각 시료의 생석회 첨가에 따른 아터버그한계값

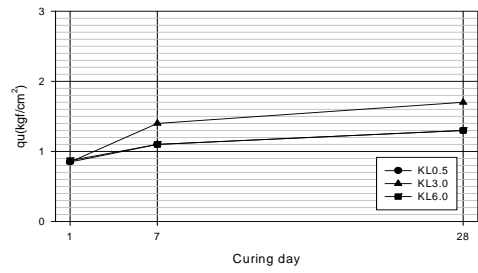
각 시료에 생석회가 최적으로 첨가된 샘플의 경우 양생기간에 따라 강도증가현상은 우수한 것으로 나타났으며, 첨가량 이상 또는 이하로 생석회를 투입할 경우 액성한계가 높은 Na-벤토나이트를 제외하고는 양생기간에 따라 강도증가 현상은 발생되었으나 그 효과는 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 Na-벤토나이트를 제외한 경우 최적량 이상으로 생석회를 첨가하는 것은



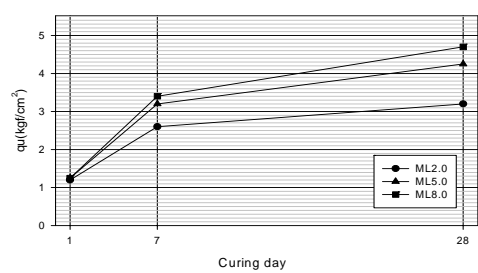
(a) 성곡



(b) 부곡



(c) 카울리나이트



(d) Na-벤토나이트

그림 5. 생석회 첨가량 및 양생기간 변화에 따른 일축압축강도의 변화

단기강도증가에 효과적이지 못한 것으로 판단된다

4. 결론

1. 흙의 안정화에 요구되는 생석회량 이하로 첨가한 경우 pH값은 급격하게 상승되었고, 안정화에 요구되는 생석회량 이상 첨가된 경우 증가경향은 거의 나타나

지 않거나 소폭 증가하였다.

2. pH=12.4를 만족시키는 생석회 첨가량에서 소성한계 값이 큰 폭으로 상승하였고 일축압축강도도 기간에 따라 증가되었다. 따라서 소성한계 및 일축압축강도 시험은 단기간의 고결화 평가에 보조적 시험방법이 될 수 있다.
3. 최적값 이상으로 생석회를 첨가할 경우 기간에 따라 강도는 계속적으로 증가되나 단기간의 경우 큰 효과는 없는 것으로 나타났다.

4. 점성토의 안정화에 요구되는 생석회 첨가될 경우 아터버그한계, 강도 및 pH 변화값이 명백하게 변화되었다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 경북대학교의 연구비에 의하여 연구되었음

(접수일 : 2006. 7. 3 심사일 : 2006. 7. 5 심사완료일 : 2006. 8. 24)

참고 문헌

1. 고갑수(2000), 한국산 생석회의 공학적 특성 및 현장 적용성에 관한 연구, *박사학위논문*, 한양대학교 대학원.
2. 여재호, 권무남, 구정민(2000), 석회 혼입 점토의 강도 특성, *경북대학교 농학지*, Vol. 18, pp. 61~69.
3. 전경수(1988), 석회혼합토의 전단강도특성에 관한 연구, *석사학위논문*, 한양대학교 대학원.
4. 천병식, 고갑수(2001), 생석회 말뚝에 의한 연약지반의 개량효과, *한국지반환경공학회지*, Vol. 2, No. 1, pp. 91~101.
5. 통계청 홈페이지(2004), <http://www.stat.go.kr/statcms/main.jsp>, Accessed 10 June.
6. 한국공업규격(*Korean Standard L 9501*)(1994) 공업용 석회, pp. 1~2.
7. *American Standard Test Material C977-92 Standard Specification for Quicklime and Hydrated Lime for Soil Stabilization*, pp. 432~433.
8. Boardman D.I., and 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.
9. Rogers C. D. F. and Bruce C.J.(1997), Slope Stabilization Using Lime Piles, *Proc. International Conference on Slope Stability Engineering ; Development and Applications*, Thomas Telford, Isle of Wight pp. 395~402.
10. Rogers C. D. F. and Glendinning S.(1996), Modification of Clay Soils Using Lime, *Lime Stabilisation East Midlands Geotechnical Group The Institution of Civil Engineers., Proc., of The Seminar held at Loughbrough University Civil & Buildings Engineering Department*, pp. 99~114.
11. Rogers C.D.F, and Glendinning, S.(2000), Lime requirement for stabilisation, *Transportation research record 1721*, paper No. 00-0604, p. 9~18.