

석회 혼입 점토의 강도 특성

여재호* · 권무남** · 구정민*** · 김현기****

* (주) 가 성 · **경북대학교 농업토목공학과 교수
경북대학교 농업토목공학과 대학원 · *경북대학교 농업토목공학과

Strength properties of lime-clay mixtures

Jae Ho Yur*, Moo Nam Kwon**, Jung Min Goo*** and Hyun Ki Kim****

*Engineer, Gyasung Eng. Co., **Professor, Dept. of Agricultural Civil Eng., Univ. of Kyung-pook
Graduated-student, Univ. of Kyung-pook, *Dept. of Agricultural Civil Eng., Univ. of Kyung-pook

Abstract

This study was conducted to investigate most effective the optimum lime content for lime-clay modification. To achieve the aim, characteristics of compaction and compressive strength were tested by adding of 0, 5, 10, 15 and 20% lime (Hydrated lime) of dry weight of the clay. Distilled water was added 10, 15, 20 and 25% of dry weight of lime-clay mixture. In this test, the compressive strength of the specimens was measured according to the following curing period : 7, 21, 28, 35 and 49 days. The results are as follows. (1) As lime additive increased, the optimum moisture content of lime-clay mixture was increased and the maximum dry density was decreased. (2) The soil mixture of 20% of the moisture content and 10% of lime additive was shown the maximum compressive strength. (3) As curing period longer, the compressive strength was increased but after 21 curing days, the increasing rate of compressive strength was low as compared with earlier its value. (4) In the range of 20% of the moisture content, compressive strength of mixture of 10% lime additive increased twice compared with that of mixture of 0% lime additive. (5) All of the lime-clay are possible to use for an sub-base material and 20% of moisture content of lime-clay mixture is possible to use for a base material.

Key words : clay, lime, compressive strength, curing period, water content

서 언

나, 점토로 된 연약토의 안정 처리 방법에는 여러 가지 안정 처리 공법이 이용되어 왔다.

자연 상태에 있는 지반의 강도를 증진시키거 과거에 비해 그 개량법이 다양해진 것은 사

실이나 토목 공사의 특성상 기초 개량 방법에 있어서 공기의 지연이나 주위 환경에 피해를 최소화하면서 소규모적으로 적용할 수 있는 방안 등이 실질적인 문제로 대두되어 왔다. 석회 안정 처리는 흙에 석회를 3~20% 첨가시켜, 흙의 안정성과 내구성을 증대시키는 방법이며, 석회가 흙의 안정 처리 재료로서 적용성이 인정되어 공사에 적용한 것은 Egypt의 pyramid가 최초이며, 도로에의 이용은 Rome나 Greece시대부터였으며, 동양에서는 중국의 만리장성 축조와 인도의 댐을 건설하는데 석회가 이용되었다는 기록이 있다.

석회 안정 처리의 원리는 분산되어 있는 토립자에 칼슘이온이 가해지면 작은 점토 입자가 결합하여 고결화되는 이온 교환 작용과 포졸란 반응 등의 화학적 반응이며, 이로 인하여 함수비의 저하, consistency의 개선, 강도의 증가 등으로 흙의 공학적 성질이 개선된다.

석회 안정 처리는 현지의 연약토를 최대한 이용하여 양질 토사의 반입을 최소화함으로써 토공량의 이동을 적게 할 수 있다는 것을 큰 장점으로 들 수 있다. 그런데 실제로 이와 같은 목적에 활용 가능한 석회는 전국적으로 500만톤 이상 매장된 것으로 보고되었으며⁴⁾, 그 이용 방법의 연구가 절실히 요구되고 있다.

석회 안정 처리의 적용 범위는 시멘트에 비해 큰 강도 증가를 기대할 수 없기 때문에 도로의 노상과 노반의 보강, 높은 함수비를 가지는 점토를 노상 및 노반 재료로의 개량, 그리고 동상 방지를 위한 차단층으로의 이용 및 석회 pile에 의한 연약한 기초 지반의 개량 등을 들 수 있다.

이에 본 실험에서는 점토의 함수량별, 석회 함량별, 그리고 양생 기간별 압축 강도를 측정하여 각 조건별 강도 특성을 분석하였다.

실험 재료 및 실험 방법

1. 실험 재료

본 실험에 사용된 재료는 점토와 석회이며, 사용된 점토의 물리적 성질은 표 1과 같고, 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 그리고 석회의 화학성분은 표 2와 같다.

Table 2. Physical properties of clay

Item	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Passing percentage			Specific gravity
				# 4	# 40	# 200	
Clay	35.41	22.60	12.81	100	50.0	20.0	2.575

Table 3. Chemical properties of lime

Chemical component	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	AlO ₂	H ₂ SO ₄	Mg
content (%)	14~16	51~53	5~6	1~10	5~6	5~6

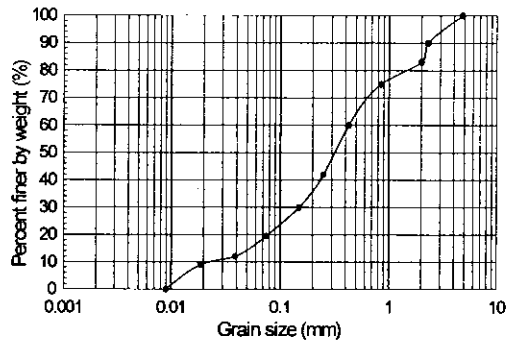


Fig. 1. Grain size distribution curve of clay

흙의 입도는 균등계수인 C_u 로써 입도분포의 상태를, 곡률계수인 C_g 로써 입도분포의 상태를 정량적으로 파악하는데, $C_u > 4$ 또는 $6, 1 < C_g < 3$ 일 때 입도분포가 양호하다가 분류한다. 본 실험에서 사용된 점토는 2~2.5mm 사이에 부분적으로 빈 입도가 나타나지만, C_u 는 22.6, C_g 는 2.75이기 때문에 비교적 입도분포가 양호한 흙으로 보여진다.

2. 실험 방법

1) 다짐 시험

점토시료의 다짐특성과 석회함량별 최적함수비, 그리고 최대건조밀도를 구하기 위하여 KSF 2321 A-1 방법에 의한 다짐시험을 실시하였다. 다짐시험에 사용된 몰드는 직경 10cm, 체적 944cm³, 래머의 중량은 2.5kg이며 낙하고는 30cm로 하였다.

2) 압축강도 시험

(1) 공시체 제작

석회의 함량은 5%, 10%, 15%, 20%로 하고, 함수비를 10%, 15%, 20%, 25%로 변화시켜, 양생기간 7일, 21일, 28일, 35일, 49일에 대한 공시체를 총 80개를 제작하였다. 공시체의 규격은 직경 5cm, 높이 10cm로 하였고, 공시체 제작은 KSF 2312 A-1 규정에 준하였으며, 다짐에너지는 5.96 kg/cm²가 되도록 강도제작 래머의 무게는 식(1)에 의하여 520g으로 하였다. 이때 다짐에너지는 식(1) 및 식(2)를 사용하여 산출한다.

$$E_C = \frac{W_R \times H_R \times N_L \times N_B}{V} \text{----- (1)}$$

$$W_R = \frac{5958 \times \frac{196.35}{(30 \times 3 \times 25)}}{1} = 519.9g \approx 520g \text{----- (2)}$$

W_R : 다짐에너지 (5.96 kg/cm²)

H_R : 래머 낙하고 (30cm)

V : 공시체 용적 (196.35cm³)

N_B : 매층당 다짐 횟수 (25회)

(2) 압축강도 측정 실험

공시체의 압축강도 측정에 사용한 압축시험기는 응력 제어형인 만능재료 시험기를 사용하였으며, 석회 함량별, 함수비별로 제작한 공시체들을 각각 7일, 21일, 28일, 35일, 49일간 실온에서 공기 양생 후 압축강도를 측정하였다.

3. 점토와 석회의 상호작용

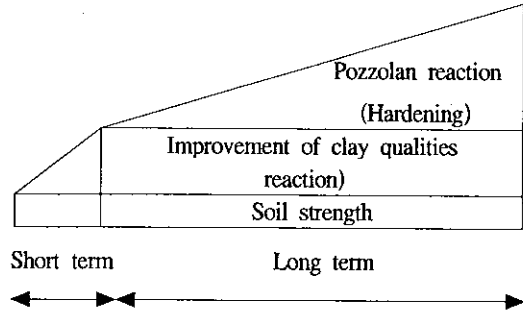
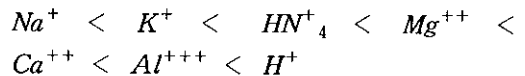


Fig. 2. The interaction between lime and clay

석회의 화학적 반응은 흡수·발열 반응, 이온교환 작용, 포졸란 반응, 탄산화 반응 등이 있다. 그림 2는 점토와 석회의 상호작용효과를 도시하였다.

1) 이온교환 반응

이온교환 반응은 물에 분산되어 있는 토립자에 Ca^{++} 가 가해지면, 토립자의 표면에 흡착되어 있는 Na^+ , K^+ , H^+ , Mg^{++} 등이 Ca^{++} 에 의해 추방되어 치환되는 반응이다. 토립자에는 전기적인 인력에 의하여 Na^+ , K^+ , Mg^{++} 등이 흡착되어 있다. 이 전기적인 인력을 친화력이라 하며, Ca^{++} 의 친화력이 Na^+ , K^+ , Mg^{++} 등의 친화력보다 크면 Ca^{++} 가 흡착되는데 이온교환 배열은 다음과 같다.



이때 교환될 수 있는 양이온의 총량을 양이온교환용량이라 하며, 이것은 점토광물의 종류에 따라 다르다. 양이온교환용량이 큰 흙, 즉 몬모릴나이트를 많이 함유한 흙은 안정처리체를 많이 필요로 하므로 안정처리 효과를 예측하는데

중요한 역할을 하는 경우가 많다. $Ca(OH)_2$ 를 양이온교환용량 이상으로 첨가하면 수산이온 (OH^-) 이 증가하여 물은 알칼리성이 되고, 다량의 Ca^{++} 가 점토 표면에 흡착되어 서로 반발하고 있던 토립자가 접근할 수 있게 되므로 작은 점토입자가 결합하여 큰 덩어리로 형성되는데, 이를 고결화라고 한다.

이 현상에 의하여 흙의 Consistency가 변화하며, 이로 인하여 액성한계가 감소하고 소성한계는 증가하게 되므로 결국 소성지수는 낮아지게 된다. 그 결과 점토는 사질토의 성상과 유사하게 된다.

2) 포졸란 반응

석회 첨가량을 증가시키면 소성한계가 증가되는데, 석회를 일정량 이상 첨가시키면 소성한계의 증가가 한계에 도달하게 된다. 이 한계점을 그 흙의 석회정착점이라 정의하며 일반적으로 점토량의 3~6%에 해당하고, 석회정착점까지의 개량효과를 흙의 물성적 개량효과라 부른다. 석회정착점 이상으로 석회가 첨가되면 점토에서 녹아 수중으로 용출된 콜로이드실리카와 콜로이드알루미늄이 증가하고, Ca^{++} 와 반응하여 새로운 화합물인 $Ca-Si$ 계 화합물, $Ca-A$ 계 화합물, $Ca-Si-A$ 계 화합물이 생기는, 포졸란 반응이 일어난다.

결과 및 고찰

1. 다짐실험

그림 3은 석회 함량에 따른 점토의 최적함수비와 최대건조밀도에 미치는 영향을 분석한 다짐곡선의 결과를 나타낸 것으로, 석회 함량이 증가할수록 최적함수비는 증가하고, 최대건조밀도는 감소하는 경향을 보였다. 이는 비중이 2.40인

석회의 첨가량이 증가함에 따라 그 보다 비중이 큰 점토입자가 상대적으로 밀려나게 되어 비중이 큰 점토의 양이 감소되므로 최대건조밀도가 작아지는 것으로 판단된다.

표 3은 그림 3에서 구한 석회함량별 최적함수비와 최대건조밀도를 수치로 표시한 것이다.

Table 3. The optimum moisture content and maximum dry density of lime-clay mixture

Lime content (%)	ω_{opt} (%)	γ_{dmax} (g/cm ³)
0	16.51	1.716
5	19.14	1.677
10	20.05	1.650
15	22.02	1.615
20	23.13	1.573

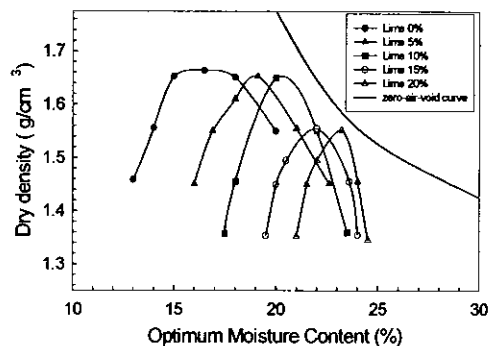


Fig. 3. Compaction curves of lime-clay mixture

2. 압축강도실험

각각의 함수비와 석회함량으로 제작된 공시체를 7일, 21일, 28일, 35일, 49일 간 양생시킨 후의 압축강도 결과치는 함수비 별로 다음과 같이 나타났다.

1) 석회 함량에 따른 압축강도변화

그림 4는 석회함량의 증가에 따른 압축강도의 변화를 양생 기간별로 나타낸 것으로, 함수비가 10%, 15%에서는 압축강도의 변화가 거의 나타

나지 않았으나, 함수비 20%와 25%에서는 석회 함량 10%부근에서 압축강도의 최대치가 발생하였고, 그 이상의 석회함량에서는 압축강도가 감소하는 경향을 보였다. 따라서 석회를 점토에 혼입할때는 석회량이 10%인 것이 가장 효과적이라고 판단된다. Metcalf⁽²⁾의 연구에서 흙 내부의 점토입자의 함유량에 따라 조금씩은 차이가 있으나, 일반적으로 점토질 흙에 있어서의 석회 최적혼입량은 흙의 건조중량의 10%정도라고 발표한 바 있고, 석회 안정처리 후 보조기층재료로서 요구되는 설계기준강도 10 kgf/cm²를 만족함을 알 수 있었다. 또한 Texas Highway Department⁽¹⁶⁾의 보고서에서 점토의 함유량에 따라 약간의 차이가 있으나, 실내실험이나 현장실험에서의 적정 석회함량이 2~10%, 심한 동결융해가 발생하는 곳의 적정 석회함량을 8~12%라고 발표한 결과와도 일치함을 알 수 있었다.

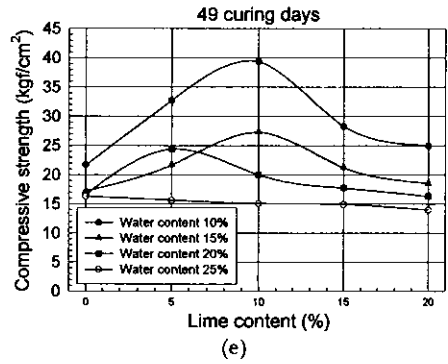
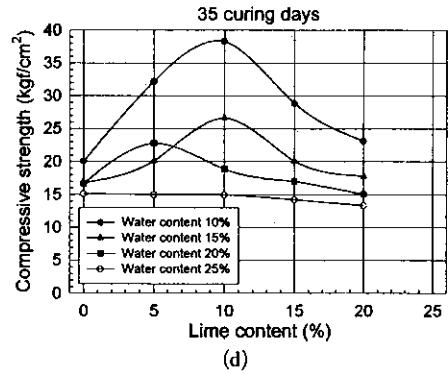
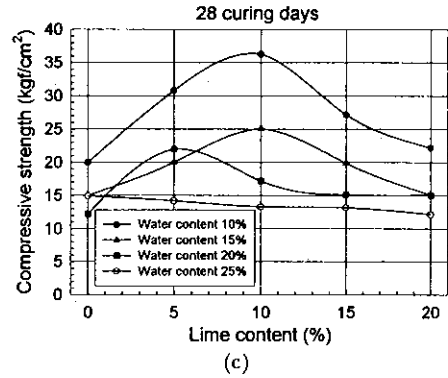
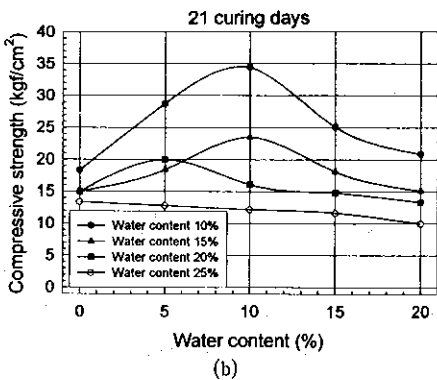
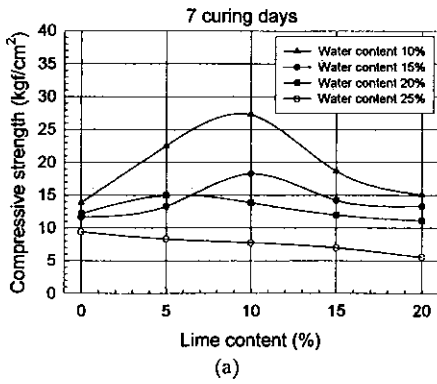


Fig. 4. Relations between lime content and compressive strength of clay according to various curing periods

국내의 경우, 이⁽³⁾의 연구결과에서 점토지반의 석회안정처리시 석회함량은 10%를 기준으로 사용하고 있다고 하였고, 이 내용과 잘 일치됨을 알 수 있다. 그러나 함수비가 10%, 15%에서 석회함량이 10%에서 압축강도의 최대치가 발생하

지 않는 것은 석회와 물과 화합하여 발열반응을 일으키는 과정에서 증발하는 것으로 추정된다. 석회 5%일 때 다른 석회함량에 비하여 함수비 15%가 함수비 25%보다 압축강도가 더 크게 나타났는데, 이는 다짐곡선의 최적함수비 건조측에서 최대강도가 나타나는 것을 보여주고 있다. 본 실험에서는 석회 10%에서 각 함수비별로 뚜렷한 강도차가 발생하였으며 최대의 압축강도가 나타났다.

2) 양생기간에 따른 압축강도의 변화

그림 5는 양생기간에 따른 함수비별 공시체의 압축강도 변화를 나타낸 것으로, 양생기간이 길어질수록 대체로 압축강도가 증가하는 현상을 보이고 있으며, 양생기간 35일 이상에서는 강도 증가 현상이 완만하였다.

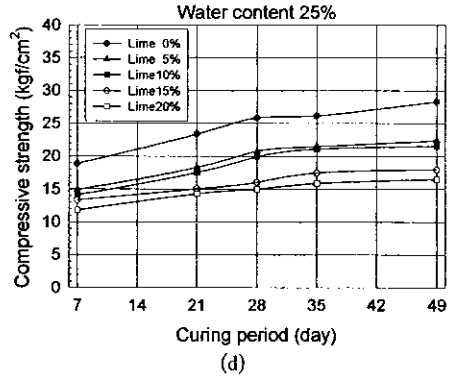
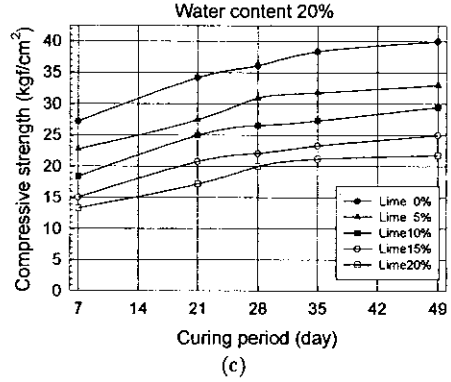
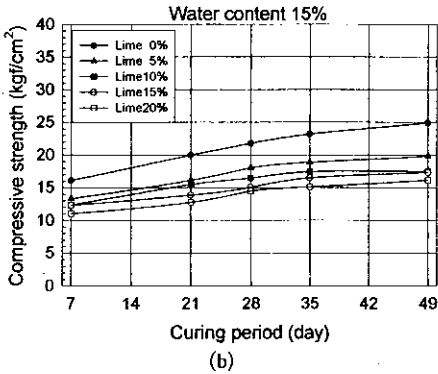
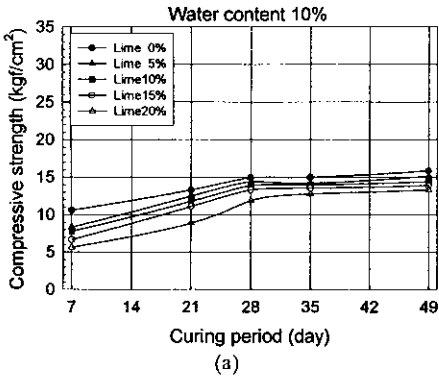


Fig. 5. Relation between curing period and compressive strength of clay according to various moisture contents

함수비 10%의 경우, 석회를 첨가하지 않은 공시체가 석회를 첨가한 시료보다 압축강도가 더 크게 나타났다. 이는 점토속에 혼합된 석회의 이온교환작용에 필요한 수분의 부족과 석회첨가로 시료가 사질화 되어 점토의 수화작용으로 인한 강도증가보다 압축강도가 작게 나타났고, 석회함량의 변화에 따른 압축강도의 변화가 다른 함수비에 비해 비교적 적은 것으로 나타났다.

함수비 20%의 경우, 석회 함량별 강도의 변화가 매우 뚜렷하게 나타났는데, 석회를 첨가하지 않은 시료의 압축강도와 석회함량 10% 공시체와 비교해 볼 때, 양생일수 7일의 경우 13.79 kgf/cm²와 27.60 kgf/cm²로 압축강도의 차이가 약 2배정도 나타났다. 그러나 석회함량을 더 증가시

켰을 경우, 오히려 석회함량 5%일때보다 압축강도가 작게 나타났다. 본 실험에서는 함수비 20%에서 최대의 압축강도가 나타났고, 석회함량 5%, 10%의 경우에는 기층재료에 필요한 강도 20 kgf/cm² 이상을 얻을 수 있었다. 하지만 함수비를 더 증가시켰을 경우, 오히려 함수량 20%일때보다 압축강도가 작게 나타났는데 이것은 함수비 25%일때의 건조밀도가 최대건조밀도보다 작은 상태에서의 다짐과 양생으로 인한 것으로 판단된다. 본 실험에서는 석회를 점토에 혼합할 때, 점토의 함수비가 최적함수비인 20% 이상이 되어야 강도증가를 얻을 수 있었다. 이것으로 보아 점토에 석회를 첨가할 때는 점토의 최적함수비 값을 알아낸 후 석회함량을 결정해야 할 것으로 판단된다.

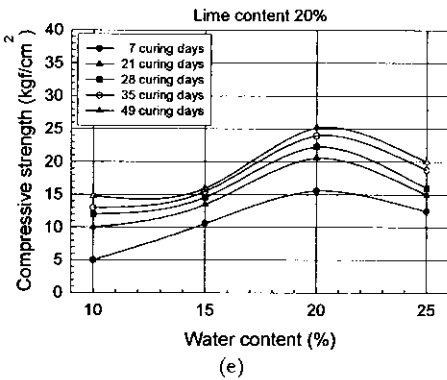
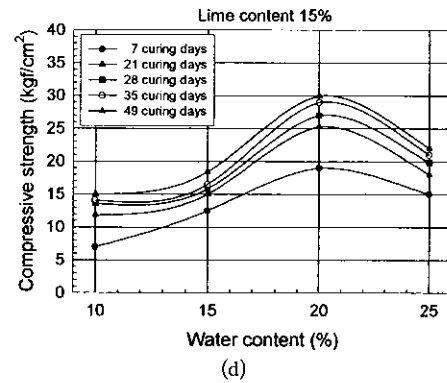
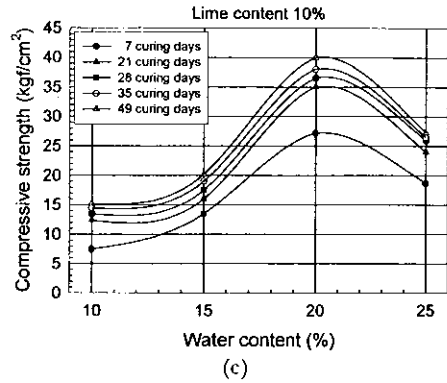
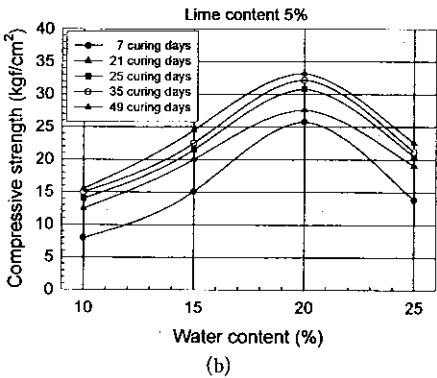
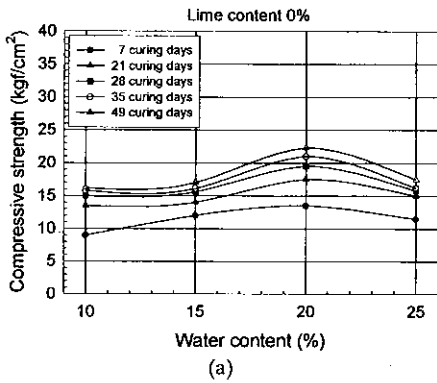


Fig. 6. Relations between moisture content and compressive strength of clay according to various lime contents

3) 함수비에 변화에 따른 압축강도 변화

그림 6은 함수비의 증가에 따른 압축강도 변화를 석회함량별로 나타낸 것으로 그림에서 보는 바와 같이 모든 석회 함량에 대해 함수비 2

0%까지는 함수비의 증가에 따라 강도가 증가하고 있다.

함수비 20%에서 압축강도가 최대치를 나타내었으며, 함수비가 20%이상이 되면 압축강도가 감소함을 알 수 있었다. 또한 양생기간이 경과함에 따라 강도증가율은 둔화됨을 알 수 있었다.

함수비 25%에서는 함수비 15%에서보다 대체로 압축강도가 크게 나타났지만, 함수비 20%의 강도에는 미치지 못하였다. 본 실험에서는 최대 건조밀도 부근의 함수비 20%에서 최대압축강도가 나타났다.

결 론

본 실험에서는 점토의 안정처리에 각 함수비 별에 대하여 효과가 가장 좋은 석회 첨가량을 구하기 위하여 점토에 0, 5, 10, 15, 20%의 석회를 첨가하여 다짐시험, 양생기간별 압축강도시험을 실시하였다. 점토에 석회를 첨가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 석회혼입량이 증가할수록 최적함수비는 증가하였고, 최대건조밀도는 감소하였다.
2. 압축강도시험 결과, 점토에 있어서 함수비는 20%, 석회함량은 10%일 때 최대압축강도가 나타났다.
3. 석회혼입점토의 강도는 양생기간이 경과함에 따라 증가하였으나, 21일 양생이후의 강도증가율은 초기 21일 이전보다 적음을 알 수 있었다.
4. 함수비 20%에서 석회함량의 유무에 따라 강도가 100%정도 증가하는 것으로 나타났다.
5. 보조기층재료로써 석회혼입 점토가 사용 가능하였고, 함수비 20%에서는 기층재료로도 사용가능한 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 권 무남 외, 토질역학, 건국대출판부, 1992, pp.346~347.
2. 김 영수, 생석회pile에 의한 심층연약 점토의 지반개량에 대한 연구, 고려대, 1977.
3. 박 성재, 기초공학, 도서출판 사론, 1987, pp.556~560.
4. 박 언상, 보조 기층재료로써 흙의 석회안정 처리에 의한 연구, 동아대, 1987.
5. 이 명환, 석회안정 처리 공법의 배합설계시 고려사항, 건설부, 건설연구소, 1989.3.
6. 조 성정, 석회혼합토의 강도특성에 관한 연구, 한국농공학회지, 1980.9.
7. 진 병훈 외, 고화안정처리에 의한 지반개량 공법 연구, 주택공사, 1989.12.
8. 천병식, 기초지반개량공법, 건설연구사, 1990, pp.113~135.
9. Bowless, Joseph P., Foundation analysis and design, 2nd edition, McGraw-hill, 1984, pp.188~189.
10. Brandl, H., Alternation of soil parameters by stabilization with lime, Proceedings the 10th international conference on soil mechanics & foundation engineering, vol.3, 1981.
11. Fossberg, P.E., Some fundamental engineering properties of a lime-stabilized clay, Proceedings the 6th international conference on soil mechanics & foundation engineering, vol.1, 1965.
12. Graham, James and Stuart, John Gordon, Scale and boundary effects in foundation analysis, vol.97, no.sm11, 1971, ASCE.
13. Ingles, O.G & Metcalf, J.B, Soil stabilization, 1972, pp.127~143.
14. Koerner, Robert M., Construction and

- geotechnical method in foundation engineering, McGraw-Hill, 1984, pp.375 ~380.
15. Rathmayer, H.G. and Saari, K.H.O., Improvement of ground, Proceedings the 8th european conference on soil mechanics & foundation engineering., vol.1, 1985.
 16. Texas Highway Department, Soil testing procedures, Austin, Texas, 1952.
 17. Thompson, Marshall.R., factors influencing the plasticity and strength of lime-soil mixtures, Bulletin No.492, Engineering Experience, Sta. University of Illinois, 1967.
 18. Thompson, Marshall.R., Lime-treated soils for pavement construction, vol.94, no.hw2, 1968, ASCE.
 19. Van Nostland Reinhold Company, Soil stabilization, Foundation engineering handbook, 1975, pp.323~325.
 20. Weaver H.C, Lime stabilization, Rural roads, 1956.
 21. Welsh, Joseph P., Soil improvement, A ten year update geotechnical special publication, No.12, vol.1, 1987, ASCE.