KGS Spring '95 National Conference
25, March, 1995/Seoul/Korea

생석회에 의한 연약지반개량에 관한 기초적 연구

A Study on the Improvement of Soft Ground by Quick-Lime

천병식[1], BYUNG-SIK CHUN, 김수삼[2], SOO-SAM KIM, 고경환[3], KYUNG-HWAN KOH, 오민열[4], MIN-YUL OH, 임해식[5], HAE-SIK IM

1 한양대학교, 토목공학과, 교수 Professor, Dept. of Civil Engr., Han Yang Univ.
2 중앙대학교, 토목공학과, 교수 Professor, Dept. of Civil Engr., Chung Ang Univ.
3 삼성중공업, 기술연구소, 연구원 Senior Researcher, Institute of Technology, Samsung Heavy Industries.
4 한양대학교, 건설연구소, 연구원 Researcher, Institute of Construction, Han Yang Univ.
5 대한주택공사, 주택연구소, 연구원 Researcher, Institute of Housing Researcher, Korea National Housing Co.

This paper is an experimental study for ground improvement which is suitable for our actual circumstance by quick-lime generally used in advanced nations as the material for ground improvement. The principles of ground improvement by quick-lime are classified into several groups as water absorption, expansion, exothermic reaction, ionization, ion-exchange, flocculation operation, pozzolanic reaction. Under the same ratio of quick-lime/sand(L/S) & water/sand(W/S), the soil treated by quick-lime shows the excellent ground improvement effect. Also, after the reaction, the decrease of water content is excellent. In case of marine clay the higher mass ratio of quick-lime to marine clay, the more effective the improvement of marine clay, especially when quick-lime/marine clay(L/MC) ratio, water/marine clay(W/MC) ratio is 30-70%, 30-80% respectively. As L/MC ratio is increased, the effect of decreasing water content increased. According to the standard proctor test, the longer curing-time, the lower maximum dry density and the higher optimum water content.

1.서론

최근 우리나라는 연약지반개량의 필요성이 날로 급증하여 지금까지의 지반개량재 보다 우수한 특성을 지닌 개량재를 개발하거나 새로운 형태의 지반개량 기술도입의 필요성을 절감하게 되었다. 본 연구는 외국에서 지반개량재로써 많이 이용되는 생석회를 사용하여 우리나라에 알맞는 지반개량에 적용하기 위한 기초적 연구이다. 본 연구에서는 우리나라에서 생산되는 생석회의 물리,화학분석을 행하고 해성점토와 시험토를 개량대상토질로 선정하여 지반개량정도와 효율성에 대하여 물리적 및 화학적 실험을 통하여 제반 특성을 비교분석하였다. 생석회를 이용한 지반개량의 원리는[1)2)] 첫째, 흡수, 팽창 및 발열 작용, 둘째, ion화 및 ion교환, 셋째, 면모화 응집작용, 넷째, Pozzolan반응으로 크게 나눌 수 있으며, 이들 작용에 의해 주변지반 교란의 최소화는 물론 탈수 및 압밀효과면에서 우수한 공학적 효과가 발휘되는 것으로 알려졌으며, 본 연구결과에서도 개량효과가 뚜렷하게 나타났다.

2.생석회의 특성분석

2.1 생석회의 생산지 및 종류

우리나라에서는 생석회의 주 원료가 되는 석회석 산지가 전국적으로 분포되어 있는데 생석회의 주생산지로는 강원도의 삼척·영월·정선, 충청도의 논산·단양·제천, 경상북도의 문경지역 등이다. 본 연구에서는 그 중 대표적 생산지인 단양, 논산산 생석회를 시료토로 사용하였다. 석회의 분류는[1)] 구성광물과 생산과정에 의하여 표 1과 같이 다섯가지로 나눌 수 있으며 석회공업이 발달한 일본에서는 공업용생석회를 표2와 같이 분류하고[2)3)] CaO의 함량이나 불순물의 정도에 따라 그 등급을 정하고 있으나 아직 우리나라에서는 생석회에 대한 그 기준이 마련되어 있지 않다.

표 1 구성광물과 생산과정에의한 석회의 분류[1)]

석회의 분류	구성광물
High-calcium quicklime	CaO
Dolomitic quicklime	CaO+MgO
Hydrated high-calcium lime	$Ca(OH)_2$
Normal hydrated dolomitic lime	$Ca(OH)_2$+MgO
Pressure-hydrated dolomitic lime	$Ca(OH)_2+Mg(OH)_2$

표 2 일본 공업용생석회 분류[2)3)]

종류	등급	CaO함유율(%)	불순물(%)	무수탄산(CO_2,%)
생석회	특호	93.0 이상	3.2 이하	2.0이하
	1호	90.0 이상	--	--
	2호	80.0 이상	--	--

2.2 생석회의 물리실험

생석회의 비중은 소화반응 때문에 시멘트의 비중시험방법을 사용하여 시행하였다. 측정에는 비중이 0.83인 등유를 사용하였다. 그 결과 단양산은 3.06, 논산산은 3.04로 나타났으며, 일반적으로 외국에서 사용되는 생석회의 비중은 약 3.01~3.3정도이므로 우리나라의 생석회는 외국의 생석회에 비하여 비중은 다소 낮음을 알 수 있다. 생석회의 입도분석결과는 표 3~4에서와 같이 입경은 논산산이 단양산에 비해 미세하고, 입도가 균등하며 SEM촬영에서도 단양산의 입자가 더 미세한 것으로 나타났다.

표 3 단양·논산생석회의 입도분포

체번호(No)		4	10	20	40	60	140	200	pan
잔류량 (%)	단양	0	0	4.6	13.7	13.6	19.9	11.1	37.1
	논산	0	0	0	0	0	0	5.7	94.3

표 4 단양·논산 #200 통과 생석회의 입도분포

체크기(μm)		192	128	96	64	48	32	24	16	12	8	6	4	3	2	1.5	1
잔류량 (%)	단양	0	0	0	16.1	24.4	53.3	65	72	75.5	79.7	82.5	85.3	88	89.6	90.5	92.2
	논산	0	0.8	6.5	16	23.4	40.8	53.6	67.3	76.5	84.8	89.4	92.6	94.7	95.4	96	96.4

2.3 생석회의 화학조성

화학성분 분석시험 결과는 표 2에서와 같이 생석회의 풍화도 및 생석회의 품질을 판별할 수 있는 기준이 된다. 다음 표 5는 산지별 생석회의 화학조성시험의 결과이다.

표 5 산지별 생석회의 화학조성시험

시료종류	SiO_2	Al_2O3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Ig.-Loss	SUM
단양생석회(%)	1.8	0.5	0.3	93.2	1.8	0.01	0.04	2.30	100
논산생석회(%)	0.0	0.5	0.2	79.3	1.6	0.05	0.03	18.3	100

위의 시험결과를 분석하면 논산생석회는 풍화정도가 단양생석회 보다 심하며, 수화반응열시험에서도 낮은 반응온도를 보였으며, CaO의 함유율도 79.3%로 일본의 공업용생석회의 분류 2호에도 약간 미달되는 등급이다. 반면에 단양산 생석회는 CaO함유율이 93.2%로서 일본의 공업용생석회의 분류기준의 특호에 해당하는 양질의 생석회로 분류되었다. 그리고 수화반응열시험에서도 표 6과 같이 단양산 생석회가 더 발열이 크게 일어났다.

표 6 수화반응열시험 (℃)

시간 / 시료명	1분	2분	4분	5분	6분	8분	10분	15분	20분	25분	30분	35분	45분	55분	65분	120분	물의 온도
단양생석회	37.2	40.6	47.6	50.6	52.9	56.0	57.8	61.1	63.1	64.6	65.5	66.2	66.8	66.6	--	--	20.4
논산생석회	21.2	21.4	21.8	21.9	22.0	22.5	23.0	23.7	24.5	25.4	26.4	26.8	28.2	29.9	31.2	34.3	20.7

표 6의 시험의 결과에 의하면 단양생석회는 초기에 빠른 반응을 보이기 시작하고 수화반응열 면에서도 고열로 나타났으며 반면에 논산생석회는 시간경과에 따라서 점진적으로 미세하게 반응함을 알 수 있다. 또한 X-ray회절분석에서 단양생석회는 불순물이 거의 없는 순수한 생석회인 것으로 나타났고 논산생석회는 2 Theta값 18.02와 34.06에서 INT값 86과 128이 나타났다. 이 값은 순수한 생석회에서는 나타나서 않는 값으로 석영(SiO_2)성분임을 알 수 있다.

3. 생석회의 지반내에서의 효과 및 영향

3.1 생석회의 지반내에서의 작용원리 및 효과

생석회안정처리의 작용을 요약하면 아래 표와 같다.

표 7 생석회안정처리의 작용 및 효과[1)2)3)]

	단 기 간	장 기 간(수개월~수년)
안정작용	1) 수화·흡수 2) 수화·발열시 수분증발 3) 토립자 응집, 단립화 4) 모관 흡수	1) Pozzolan반응에 의한 경화 2) 탄산화 반응(토중)
처리효과	1) 함수량 저하 2) 소성저하 3) 점성저하 4) 작업성 향상	1) 압축·전단강도 증가 2) 차수효과 3) 강성증가 4) 압밀특성의 향상

3.2 생석회의 주요 반응원리

3.2.1 압밀/배수효과

CaO는 식(1)과 표8의[4] 반응에 의해 토중의 물을 흡수하며 이 반응으로부터 생기는 발열 및 팽창작용에 의해 토중수의 감소와 흙의 압밀이 촉진된다.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15.6kcal/mole \tag{1}$$

표 8 생석회의 흡수반응의한 변화량

	CaO	H_2O	$Ca(OH)_2$
분자량	56	18	74
비중	3.3	1	2.2
무게비	1	0.32	1.32(1.3배 흡수)
가시부피	1	1.99	2.0(2.0배 팽창)

3.2.2 이온 전환 효과

세립점토입자의 표면이 음전기성으로 포화될 때 점토 입자의 표면은 소화된 석회의 칼슘(Ca^{++})이온을 흡수한다. 결과적으로 점토 입자 섬착 활동에 의해 서로 이어져 있다.[4] 연약 점토는 전단력의 부가적 증가와 더불어 개량된다.

3.2.3 Pozzolan반응 효과

칼슘(Ca^{++})은 오랫동안 점토에서 Al_2O_3(산화알루미늄), SiO_2(산화규소)와 반응하여 $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$합성물을 형성하는데 이 반응을 포졸란 반응 이라고 한다. 반응생성물이 결합재로 작용하여 강도·내구성이 발휘된다.[5)6)] 또한 다른 첨가재로서는 처리하기 어려운 Allophane ($Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot SiO_2$화합물), Montmorillonite 등의 점토광물과의 사이에도 Pozzolan반응 생성물을 만들 수 있다.[2]

3.2.4 석회의 탄산화

석회는 탄산가스와 반응하여 탄산칼슘($CaCO_3$)을 형성하고, 알루민산칼슘이 탄산칼슘과 반응하여 흙을 고결시킨다. 이러한 일련의 반응은 토중에서 석회와 토중수 사이 및 석회와 점토광물 사이에 일어나며 Ingles에[7] 의하면 식(2)의 화학반응식으로 설명된다.

$$NAS_4H + CH \longrightarrow NH + CAS_4H \longrightarrow NS + \text{degradation product} \tag{2}$$
$$\uparrow\!\text{— } NH + C_2SH \longleftarrow \text{(3CH)}$$

여기서, $S=SiO_2$, $H=H_2O$, $A=Al_2O_3$, $C=CaO$, $N=Na_2O$

4. 생석회 처리토의 공학적 특성

4.1 대상지반의 특성

시료토는 표준사와 낙동강하구 근처의 해성점토로서 해성섬토를 대상으로한 제반 토질실험의 수행결과는 아래와 같다.

표 9 해성점토의 공학적 및 화학적 특성

항목 / 시료토	자연함수비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수	비중	최적함수비 (%)	최대건조 밀도(t/m^3)	NaCL 함유량(%)	유기물 함유량(%)	pH
해성점토	68.71	30.1	14.8	15.3	2.56	15.2	1.75	0.40	5.18	7.99

4.2 생석회 처리토의 일축압축강도 분석

생석회 처리토의 일축압축강도시험은 대상지반인 표준사와 해성점성토를 사용하여 시행하였다. 해성점성토의 경우 현장함수비인 68.71% 의 전후의 해성점토의 함수비(Water/Marine Clay)를 60, 70, 80%로 변화시켰으며 생석회-해성점토 배합비(Lime/Marine Clay)는 시험배합을 통하여 10, 20, 30%로 결정하였다. 그리고 양생일수는 1일, 3일, 7일, 28일, 45일, 60일로 결정하였다. 양생조건은 온도 25±5°C로 유지하며 항습을 유지하였다. 사질지반에서의 생석회 반응특성을 비교분석하기 위하여 표준사를 시료토로한 경우는 생석회배합비율(Lime/Sand)은 5, 15, 30%로 변화시켰으며,. 물-골재비(Water/Sand)는 15, 30, 50%로 변화시켜서 시험하였고 양생조건은 해성점토의 경우와 같다.

그 결과 해성점토의 일축압축강도는 1일, 3일, 7일 측정결과 L/MC 30%, W/MC 70%와 L/MC 30%, W/MC 80%에서 특히 높게 나타났으

며(그림 1) 동일 W/MC 조건에서 L/MC가 증가할 수록 강도는 크게 나타났으며 현재 양생을 시행중인 28일, 45일, 60일 등의 결과를 계속 관찰해야 할 것이다. 표준사를 시료로한 경우의 일축압축강도는 L/S 5%에서는 강도발현이 거의 나타나지 않아 L/S 30%와 50%에 중심을 두어 특징을 보면 동일 W/S의 조건에서, W/S 와 L/S가 같을때(15%-15%, 30%-30%) 강도발현이 우수하게 나타났으며(그림 2), 양생일이 길수록 강도가 증가하였다. 이는 모래지반에서 생석회배합설계의 기초자료가 될 수 있는 부분이다. 또한, 동일함수비에서 L/S가 증가할수록 강도가 크게 나타났다.

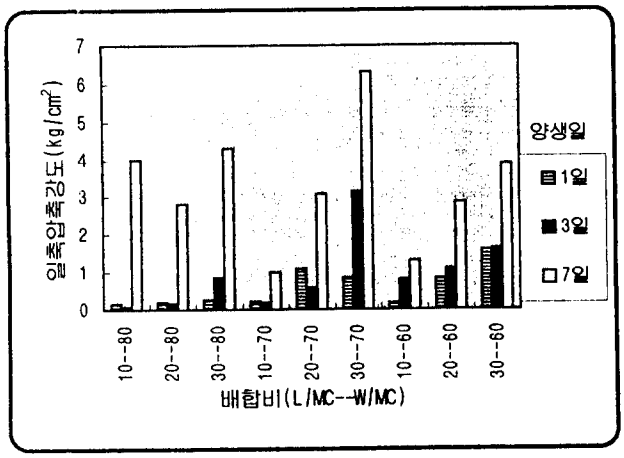

그림 1 해성점토의 L/MC, W/MC 및 양생일에 따른 일축압축강도

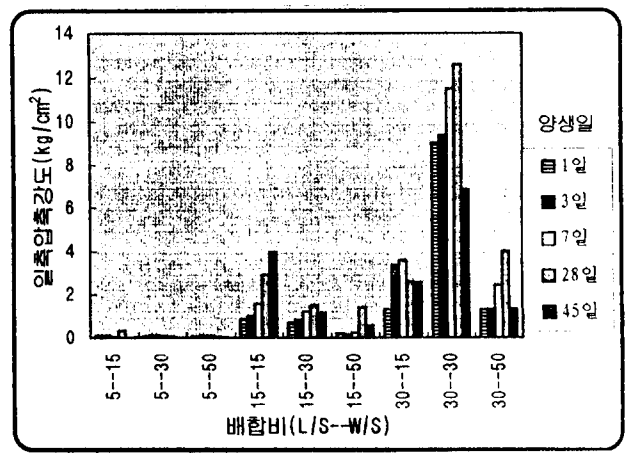

그림 2 표준사의 L/S, W/S 및 양생일에 따른 일축압축강도

4.3 생석회 처리토(해성점토)의 다짐특성

생석회 처리토의 다짐시험[2]을 위하여 배합비는 L/MC 20%와 30%(W/MC 70%로 일정)로 하였고, 양생일은 1일, 3일, 7일로 하여 시험을 실시하였다. 양생조건은 온도는 25±5℃로 유지하고 항습을 유지하였다. 처리토의 다짐특성은 L/MC 20%와 30%에서 동일한 특성을 보이는데 초기에 원지반에 비해(표 10, 그림 3~4) 최대건조밀도가 급격히 작아지고 3일째 상승한 후 7일째 다시 낮아지는 경향이 나타났고 최적함수비는 높아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 입자가 세립화 되고 입도가 균질해짐을 알 수 있다.

표 10 양생기간과 석회혼합비에따른 최적함수비와 최대건조밀도(W/C, 70%)

종 류	원지반	L/MC	1일양생	3일양생	7일양생
최대건조밀도(t/m³)	1.75	20%	1.408	1.485	1.382
		30%	1.260	1.481	1.381
최적함수비(%)	17.1	20%	26.7	29.3	32.2
		30%	28.4	24.3	28.1

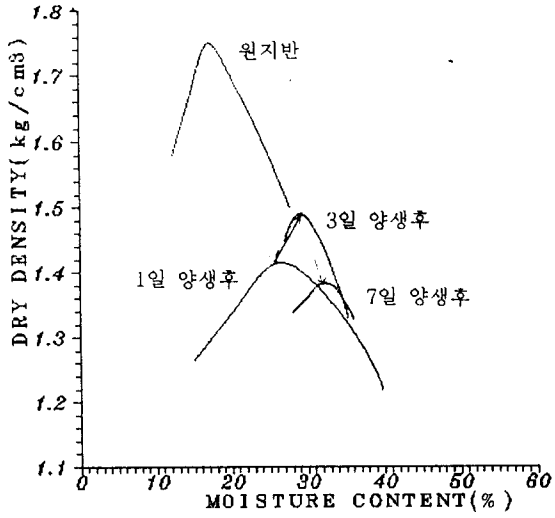

그림 3 양생일에 따른 다짐곡선(L/MC 20%, W/MC 70%)

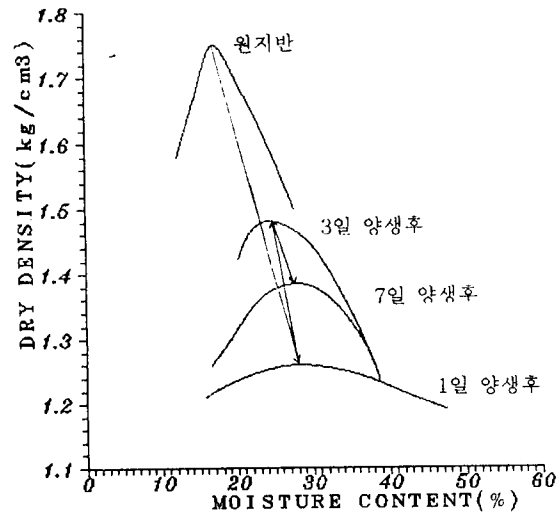

그림 4 양생일에 따른 다짐곡선(L/MC 30%, W/MC70%)

4.5 생석회 처리토의 소화반응 특성

4.5.1 생석회 처리토의 함수비 저하 효과

초기의 소화반응에 의해 시료토의 함수비는 저하 효과가 나타난다.[8)9)10)] 함수비 저하는 생석회 처리토의 초기의 압축강도와 밀접한 관계를 가지며 새로운 형태의 vertical drain재로서의 사용 가능함을 알 수 있다. 그림 5는 표준사에 대한 생석회 처리토의 양생일과 함수비의 관계를 나타내고 그림 6은 해성점성토에 대한 생석회 처리토의 양생일에 따른 함수비의 관계를 보인 것이다. 표준사의 경우 반응초기에 함수비가 급격히 줄어들고 해성점토의 경우 L/MC 20%에서 평균 저하폭이 크게 나타나고 있다. 그리고 전체적으로 함수비저하 효과가 나타남을 알 수 있다.

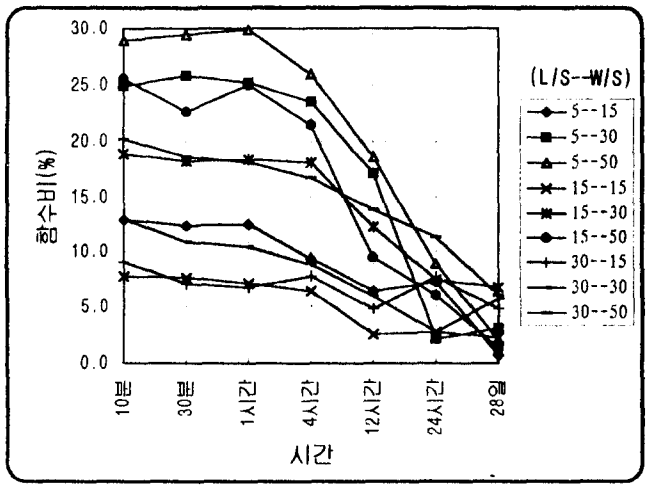

그림 5 표준사 생석회 처리토의 함수비 저하

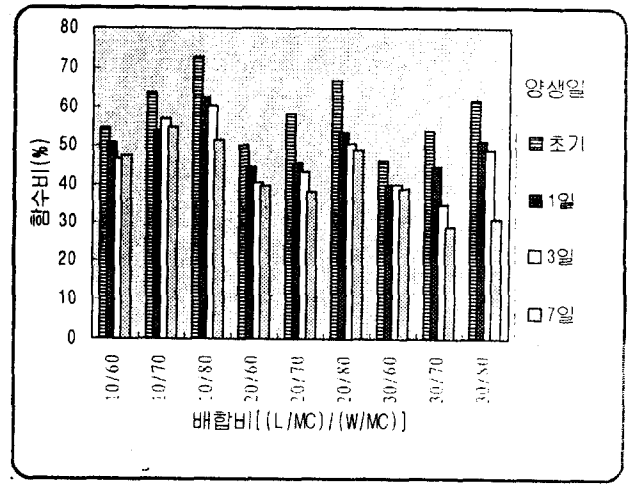

그림 6 해성점성토-생석회 처리토의 함수비 저하

4.5.2 생석회 처리토의 반응열

이 시험의 목적은 반응시간에 따라 생석회 처리토의 온도변화를 측정함으로써 지중에서 생석회가 반응하는 정도를 측정하며 초기의 팽수적용 및 소화반응의 지속시간등을 반응온도 측정시험을 통하여 예측할 수 있다. 그림 7은 생석회 혼합비율에 따른 반응온도의 측정결과이다. 생석회 처리토의 반응온도 측정시험결과 초기 2시간 동안에 매우 빠른 반응을 하여 점차 반응속도가 완화됨을 알 수 있다.

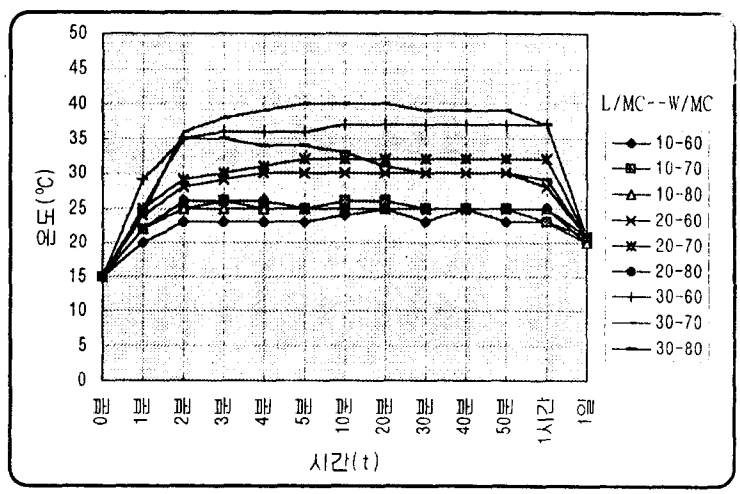

그림 7 시간에 따른 생석회 처리토(해성점토)의 온도(℃)변화

5. 결론

본 연구는 모래 생석회처리와 해성점성토 생석회처리의 두 가지로 나누어 실시하였다. 먼저 생석회의 특성을 파악하기 위한 화학조성분석, X ray회절분석, SEM관찰, 입도분석, 수화반응열시험, 비중시험을 실시하였고, 사질토 생석회 처리토에 대하여 생석회배합비(5, 15, 25%), 시료토의 함수비(15, 30, 50%), 양생일(1, 3, 7, 28일)에 따른 강도특성을 파악하기 위한 일축압축강도시험과 함수비측정시험, 발열온도시험등을 수행하였다.

해성점토 생석회 처리토의 경우 대상토질의 공학적 특성을 파악하기 위한 다짐, 비중, 액·소성시험, 입도분석,입분측정시험, 유기물함량시험을 실시하였으며, 해성점성토-생석회 처리토의 배합비(10, 20, 30%), 함수비(60, 70, 80%), 양생일수(1, 3, 7일)에 따른 강도특성을 파악하기 위한 일축압축강도 시험과 다짐, 액·소성, 함수비측정시험, 발열온도측정시험을 하였으며 이상의 시험결과를 비교분석한 결과는 다음과 같다.

1) 단양생석회가 논산생석회에 비해 CaO의 함유량이 많고 입자가 미세하며 수화반응시 온도상승이 논산생석회가 약 34° 인데 비해 단양생석회는 약 67° 까지 발열온도가 크게 나타나므로 연약지반개량 목적에 적합한 것으로 판단된다. 비중은 단양 3.06, 논산 3.04로 일본산생석회 3.01 ~3.37에 비해 다소 낮다.

2) 생석회-모래 처리토의 일축압축강도는 L/S가 높을수록, 양생일수가 길수록 증가하였다. 생석회 혼합비가 5%일 때는 강도발현이 거의 나타나지 않으며, 동일 석회혼합비에서 L/S와W/S가 같은 경우(L/S 15%와 W/S 15%일 때, L/S30%와 W/S 30%일 때) 일축압축강도가 더 크게 나타났고 발열량과 팽창율도 큰 것으로 나타나 이때 배합비를 지반개량에 적용하여야 지반보강 효과가 더 크게 나타날 수 있다.

3) 해성점토 생석회 처리토의 강도특성은 함수비가 일정할 경우 생석회 배합비가 높을 수록 증가하며 생석회-해성점토(L/MC)비와 함수비 해성점토(W/MC)가 각각 30%-70%, 30%-80%일 때가 그 외의 배합비, 함수비의 경우보다 우수한 것으로 나타났다.

4) 생석회 처리토(해성점토)의 다짐시험결과 원지반에 비해 최대건조밀도는 낮아지고 최적함수비는 증가하는 경향이 나타났으며, 일반 흙에서는 건조밀도가 높을 수록 공학적으로 우수한 토질이나 생석회 처리토의 경우 양생일수에 따라 건조밀도가 낮게 나타나는 경향을 보인다.

5) 생석회 처리토의 함수비 저하효과는 모래 생석회 처리의 경우 전체적으로 처리후 4시간부터 크게 저하되었고, 해성점토 생석회 처리의 경우는 생석회 배합비가 클 수록 저하 폭이 크게 나타나며, 생석회배합비(L/MC)와 해성점토의 함수비(W/MC)가 각각 30%-70%, 30% 80%일 때 저하폭이 크게 나타났다.

6) 현재까지 수행한 연구결과를 종합해 보면, 사질토, 점성토 모두 생석회에 의해서 공학적 특성이 개선되고 생석회를 지반개량에 유용하게 이용할 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 삼성중공업의 연구비에 의해 수행되고 있는 연구성과의 일부임을 밝히며 이에 심심한 감사의 뜻을 전합니다. 아울러 본 연구를 수행함에 있어 불철주야 수고한 한양대학교 대학원생 김준섭, 이대동, 최상훈군 등에게 감사의 뜻을 전한다.

참고문헌

(1) T. Leonards, "Foundation Engineering", McGraw-Hill Book Company, pp. 398~437.

(2) 日本石灰協會 土質安定處理工法委員會 編, " 石灰による土質安定處理工法 ", 山海堂, Japan, 昭和45年, pp. 6~35.

(3) 日本石灰協會 石灰安定處理委員會 編," 石灰による軟弱地盤の安定處理工法 ", Japan, 昭和58年, pp. 14~43.

(4) 松尾新一郎, " 特許よりみた石灰安定處理工法 ", 日刊工業新聞社, Japan, 1991, pp. 5~11.

(5) 千柄植, " 最新 基礎工法 ", 建設研究社, Korea, 1988, 195~198.

(6) 千柄植, " 基礎地盤改良工法 ", 建設研究社, Korea, 1987, 145~148.

(7) O.G.Ingles & J.B. Metcalf, "Soil Stabilization", Butterworths, Australia, 1972, 127~143.

(8) 千本彌三郎, 三好迪男, 金安進, "生石灰グイによる地盤改良效果とその問題點", 土と基礎 Vol.22 No.5, Japan, 1974. 5. pp. 31~36.

(9) 石田宏, " 岩手ロームの生石灰による土質改良", 土と基礎 Vol.22 No.5, Japan, 1974. 5, pp. 37~42.

(10) 日本材料學會, " 地盤改良工法便覽 ", 日刊工業新聞社, Japan, 1990, pp. 311~323.