

국내 산지별 생석회에 따른 생석회파일의 연약지반개량효과 A Study on the Improvements of Soft Ground by Using of Lime Piles from Different Land of Origin

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 고갑수²⁾, Kab-Soo Ko, 임종윤³⁾, Jong-Yoon Lim, 장은석³⁾, Eun-Seok Chang

¹⁾ 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

²⁾ 한양대학교 대학원 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

³⁾ 한양대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

SYNOPSIS : Lime-pile method is used worldwide for the improvements of soft ground but there are few studies and use for this method in Korea. In this paper, it is studied that the excess pore pressure and the shear strength of clay around lime-pile which are from different lands of origin in Korea. We used the lime from Danyang, Jungsun and Nonsan, the clay from south sea. Experimental investigation of the study indicated that lime of Danyang is superior to lime of Jungsun and Nonsan on the effect of improvement of soft ground. We can see that in excess pore pressure, using Danyang lime was about 2 times better than Jungsun lime and in shear strength, about 1.2 times.

KEYWORDS : lime-pile method, excess pore pressure, shear strength, soft ground

1. 서론

최근 우리나라는 경부고속철도, 서해안 고속도로, 대도시 지하철, 서·남해안 준설매립·항만건설공사 등 여러 가지 공사가 진행중이며 이에 따른 연약지반 개량의 필요성이 날로 급증하여 지금까지의 지반개량재 보다 공학적으로 우수한 특성을 지닌 개량재의 개발이 요구되고 새로운 형태의 지반개량 기술 도입의 필요성을 절감하게 되었다. 본 연구는 외국에서 지반 개량재로써 많이 이용되는 생석회를 이용하여 우리나라에 알맞는 지반개량 공법으로서 적용하기 위한 기초적인 연구중 생석회파일에 의한 공법을 중심으로 우리나라에서 생산되는 산지별 생석회의 물리·화학분석을 행하여 공학적인 적용성을 검토하고, 연약점토를 개량대상 지반으로 선정하여 산지별 생석회의 지반개량 정도에 대하여 비교함을 그 목적으로 하고 있다.

대상 생석회로는 논산, 단양, 정선산 생석회를 이용하였으며 대상지반으로는 남해안 울촌 점토와 표준사를 선정하여 점토지반에 있어서는 간극수압과 강도정수에 대한 실험을 실시하고 표준사에서는 함수비의 저감을 점토지반과 비교하였다.

이를 위하여 생석회파일의 주변지반의 함수비와 간극수압을 측정할 수 있는 원형토조를 제작하였고, 정확한 간극수압의 측정을 위하여 진동현식 간극수압계를 이용하였으며 강도증가를 측정할 수 있는 사각형토조를 이용하여 생석회에 따른 직접전단시험을 실시하였다.¹⁾⁴⁾⁵⁾

2. 생석회 및 대상지반의 특성

2.1 생석회의 공학적 특성

본 연구에서는 국산 생석회의 산지별 특성분석을 위해 정선, 논산, 단양산 생석회를 선정하였고 이에 대한 특성분석을 위한 시험으로 비중, 입도, 화학조성분석시험을 실시하였다. 비중의 경우 정선산은 3.35, 단양산은 3.06, 논산산은 3.04로 나타났으며 일반적으로 외국에서 사용하는 생석회의 비중은 평균 약 3.01~3.3정도이므로 정선산의 경우 외국의 생석회에 비해서 비중이 다소 높음을 알 수 있다. 생석회의 입도분석결과와 화학조성분석시험결과는 표 1., 2.와 같다.

표 1. #200 통과 생석회의 입도분포

체크기(μm)		192	128	96	64	48	32	24	16	12	8	6	4	3	2	1.5	1
간류량 (%)	정선	0	0.1	0.6	15.4	25.7	49.4	60.7	68.4	75.4	78.8	83.9	86.4	87.1	89.9	81.2	93.4
	단양	0	0.9	5.4	17	19.5	36.7	54.7	63.8	78.7	85.4	89.9	92.1	94.8	95.1	97.2	97.5
	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

표 2. 생석회의 화학조성시험

구 분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig-Loss	SUM
정선(%)	2.19	1.06	0.43	87.86	0.18	0.08	0.09	8.00	100
단양(%)	2.0	0.6	0.4	92.2	1.8	0.02	0.06	2.33	100
논산(%)	0.0	0.5	0.2	79.3	1.6	0.05	0.03	18.3	100

2.2 대상지반의 특성

본 연구의 대상지반인 울촌 해성점토에 대한 공학적 특성은 표 3과 같다.

표 3. 해성점토의 공학적 특성

항 목	자연 함수비 (%)	액성 한계 (%)	소성 한계 (%)	소성 지수	비중	최적 함수비 (%)	최대 건조밀도 (t/m ³)	NaCl 함유량 (%)	유기물 함유량 (%)	pH
시료토										
울촌지역 해성점토	58.6	62.53	31.58	30.95	2.7	34.5	1.32	0.60	5.19	8.14

3. 생석회의 팽창특성 측정을 위한 실내시험

3.1 생석회의 팽창량 측정시험

생석회의 지반내에서의 팽창정도와 방사방향 팽창을 비교하기 위하여 기존의 압밀시험장치를 이용하여 1차원 팽창(상향팽창, 하부 및 측방방향 구속)시험을 하였다. 생석회의 건조단위중량은 정선산은 1.0 g/cm³, 단양산은 1.4 g/cm³이다. 그림 1.은 정선산과 단양산의 팽창량 결과이다.

팽창시험 결과 최대 수직변위는 수직응력이 0.5kg/cm²일 경우에 나타났으며 그 값은 정선산은

8.23mm, 단양산은 11.20mm, 그리고 팽창율은 각각 41.15%와 56.00%로서 단양산, 정선산 모두 수직응력이 증가함에 따라 점점 감소하는 경향을 나타내고 있다.

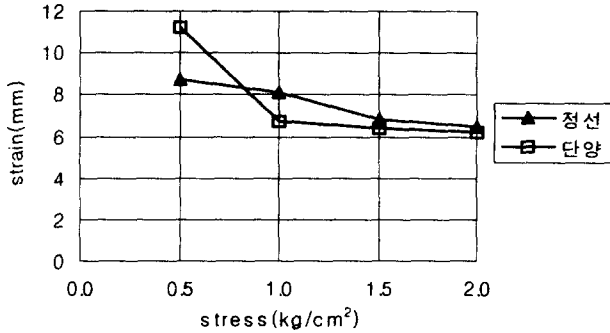


그림 1. 생석회의 수직응력에 따른 수직방향 팽창량의 변화(생석회 두께 2cm)

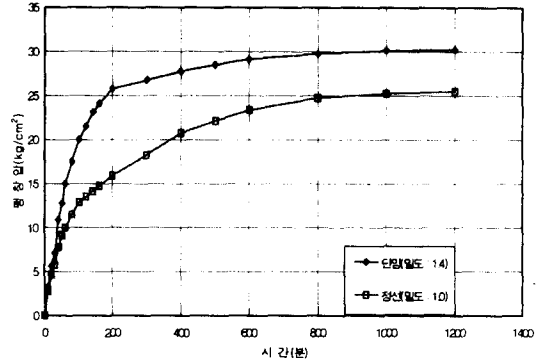


그림 2. 시간에 따른 생석회의 팽창압

3.2 생석회의 팽창압 측정시험

정선산 생석회(밀도 : 1.0 g/cm³)와 단양산 생석회(밀도 :1.4 g/cm³)에 대한 수직방향 팽창압을 측정 결과는 그림 2.와 같다. 정선산의 경우 최대팽창압은 25.5 kg/cm²으로 나타났으며 단양산의 경우는 30.2 kg/cm²으로 밀도가 높은 단양산이 정선산보다 팽창압은 다소 높게 나타났다.

4. 생석회파일 주변지반의 간극수압측정

지반내에 타설된 생석회파일의 흡수·팽창작용에 의한 주변지반내 과잉간극수압의 발생과 소산 양상을 측정하여 횡방향 압밀특성을 규명하고 이를 Chen & Law(1993)의 이론식과 비교·분석하기 위해 그림 3.과 같은 원형토조와 간극수압계를 이용하여 횡방향에 대한 간극수압을 측정하였다.

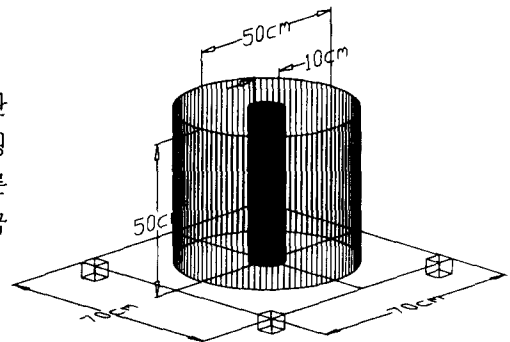


그림 3. 원형 모형토조 개략도

4.1 시험결과

4.1.1 대상지반이 점토일 경우

원형 모형토조시험에서는 정선산, 단양산 생석회를 사용하였으며 생석회의 풍화정도는 생석회의 팽창정도에 큰 영향을 미치므로 생석회의 품질을 일정하게 하기 위하여 반드시 개봉 직후의 생석회를 사용하여 시험을 실시하였다. 대상지반의 초기조건은 1주일간 자중압밀 상태를 유지하였고 이 때 함수상태는 정선산의 경우 평균 134.48%, 단양산의 경우 평균 135.17%였으며 생석회파일의 타설시의 건조 단위중량은 정선산 1.0g/cm³, 단양산 1.4g/cm³이었다. 그리고 생석회파일 주변지반의 간극수압을 측정하기 위하여 간극수압계를 파일 중심으로부터 각각 10cm, 15cm, 20cm, 깊이는 바닥으로부터 30cm위치에 설치하였다. 또한 생석회의 횡방향 팽창 및 주변지반의 압밀효과를 파악할 수 있도록 상방향 팽창은 구속하였다. 과잉간극수압 측정결과는 그림 4., 5.와 같다.

시험결과 대상지반의 함수비는 정선산의 경우 119.15% ~ 133.41%로, 단양산은 119.64% ~ 127.52%로 감소 되었다. 생석회 중량의 경우 정선산은 초기 약 3.35kg에서 약 80%가량 증가하여 약 6.03kg정도로, 단양산은 초기 약 5.38kg에서 약 87%가량 증가하여 약 10.1kg정도로 증가하였다. 생석회

부피의 경우 정선산은 직경이 10.6cm에서 약 15cm로 증가하여 체적증가비는 2.002의 값을 나타내었고 단양산은 직경이 10.6cm에서 약 17cm로 증가하여 체적증가비는 2.572의 값을 나타내었다.

그림 4, 5로부터 생석회파일의 탈수작용은 가까운 지점에서 효과가 크게 나타나지만 생석회파일의 팽창에 의한 횡방향 압밀작용은 파일 직경이 10.6cm일 경우에는 정선산일 경우 약 15cm 지점, 단양산일 경우 약 20cm 지점에서, 즉 파일직경과 유효원 직경의 비가 1:3(정선), 1:4(단양)일 때 가장 효과가 있음을 예측할 수 있다. 또한 10cm지점에서 약 400분(정선산), 250분(단양산) 경과 후 간극수압이 다시 증가함을 보이는데 이는 압력의 평형상태를 유지하기 위해 15, 20cm지점의 과잉간극수압이 상대적으로 낮은 간극수압을 보이는 10cm지점으로 소산되면서 발생하는 현상으로 보인다.

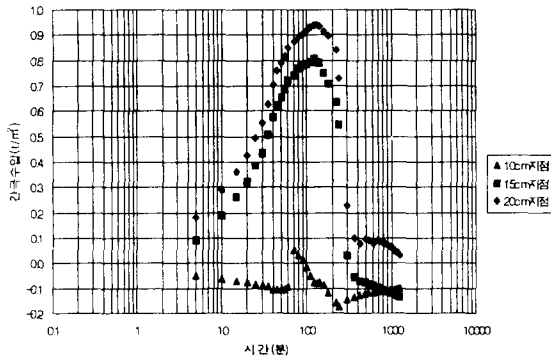


그림 4. 생석회파일 주변 점토지반의 과잉간극수압 분포 측정(단양)

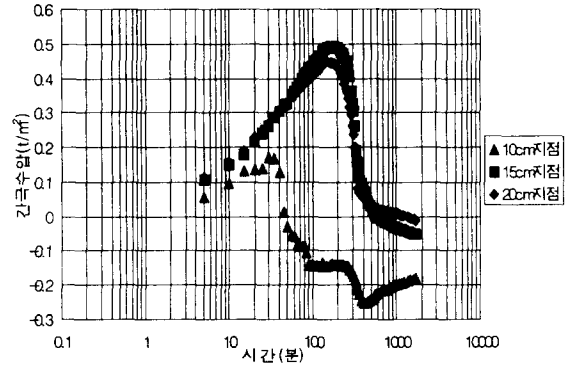


그림 5. 생석회파일 주변 점토지반의 과잉간극수압 분포 측정(정선)

그림 6은 Chen & Law(1993)의 이론식을 이용한 간극수압분포로서 본 연구에서 수행한 실내시험과 같은 생석회파일의 직경이 10cm일 때의 간극수압의 분포를 나타낸 것이다.

이는 그림 4, 5의 실내시험에서 얻은 결과와 유사한 형태를 나타내고 있으며 이론값과 실험값을 비교해 보면 이론의 경우 약 0.35MPa(35t/m²)의 최대값을 보이나 실험 결과치는 정선산의 경우 0.005MPa(0.5t/m²), 단양산의 경우 0.0094MPa(0.94t/m²)으로 상당한 차이를 나타내고 있다. 그러나 Chen & Law가 현장에서 측정한 값(0.07~0.104MPa)과의 차이는 이론식의 차이보다는 상당히 적게 나타났다.

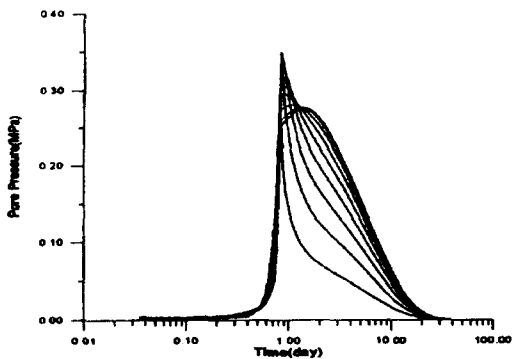


그림 6. 직경 10cm일 경우 간극수압 분포

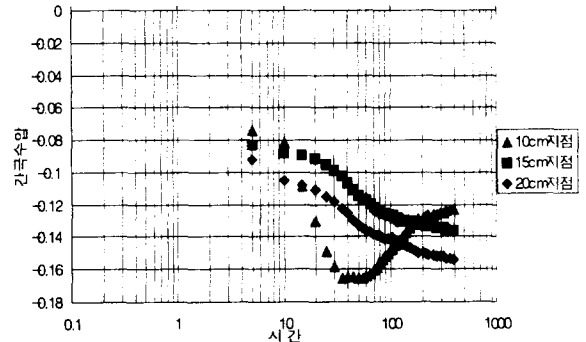


그림 7. 생석회파일 주변사질토지반의 간극수압 곡선(정선)

표 4. 사질토의 함수비변화

구 분		1	2	평균
함수비(%)	반 응 전	29.31	30.30	29.81
	반 응 후	15.62	16.11	15.87
함수비 저하량		13.69	14.19	13.94

4.1.2 대상지반이 사질토인 경우

생석회파일의 사질토 지반에서의 흡수·팽창작용에 의한 개량효과를 비교·관찰하기 위하여 점토지반과 동일한 방법으로 정선산 생석회에 대한 모형토조실험을 하였다. 시험결과 투수계수가 큰 사질지반이기 때문에 횡방향 팽창에 의한 과잉간극수압의 발생과 압밀효과의 측면보다는 생석회의 탈수·발열반응으로 인한 함수비의 변화가 점토지반에 비해 주목할만 하였다(그림 7, 표 4. 참조).

사질토의 경우 점토와는 달리 생석회파일 타설초기에는 과잉간극수압이 발생하지 않고 생석회파일의 탈수작용에 의해 초기 간극수압보다 낮게 감소하는 경향으로 나타난다. 탈수작용이 종료된 후 10cm 지점은 약 50~60분경 간극수압이 다시 증가하게 되고 이때 15, 20cm지점의 곡선은 변곡점을 이루어 완만한 형태를 나타낸다. 계속적인 측정을 할 경우 세 개의 곡선은 일정한 값으로 수렴을 하게 될 것이다.

점토에 대한 결과에 의하면 시험 초기에는 상당한 함수비의 저하효과가 야기되나 생석회파일에 인접한 지반이 현저히 불포화되는 시점에서부터는 점토의 낮은 투수성에 의해 완벽한 생석회의 반응을 기대하기 힘들고 또한 함수비 저하효과도 감소하게 된다. 따라서 사질토에 대한 결과와 점성토의 결과를 종합하면 생석회파일에 의한 연약지반개량은 압밀효과를 충분히 발휘할 수 있는 점성토이면서 어느 정도의 투수성을 갖는 토질에 적당하다는 것을 추측할 수 있다.

5. 생석회파일 주변지반의 개량특성시험

5.1 생석회의 강도특성 시험

지중에서의 타설조건(생석회 밀도, 상재하중)에 따른 강도특성을 분석하기 위해 밀도 1.0g/cm^3 의 정선산 생석회와 밀도 1.4g/cm^3 의 단양산 생석회에 대하여 소화반응 후 전단강도를 구하였으며 그 결과는 그림 8, 9와 같다.

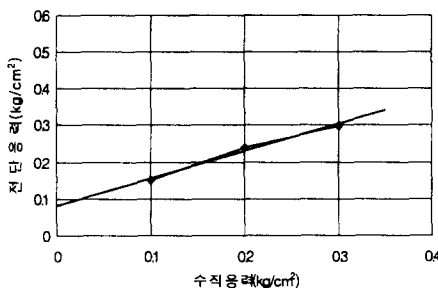


그림 8. 생석회의 전단강도(정선산)

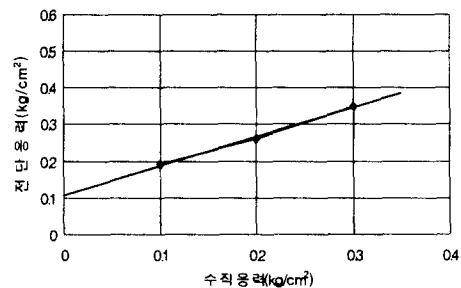


그림 9. 생석회의 전단강도(단양산)

0.3kg/cm^2 의 상재하중을 가한 상태에서 생석회에 대하여 직접전단시험을 수행한 결과 정선산의 경우 점착력(c)은 0.08kg/cm^2 , 마찰각(ϕ)은 36.9° 로 나타났으며 단양산의 경우 점착력(c)은 0.11kg/cm^2 , 마찰각(ϕ)은 38.7° 로 나타났다.

5.2 사각형 모형토조 시험

생석회파일 주변지반의 전단강도 및 함수비와 간극비 변화를 측정하기 위해 가로, 세로, 높이 각각 120, 60, 100cm인 모형토조를 제작하여 직접전단시험을 하였다.

대상지반(울촌 해성점토)을 1주일간 자중압밀을 한 후 원지반 상태의 지반강도정수(c, ϕ)를 직접전단시험에 의해 구하고 생석회 파일을 직경 7.5cm, 간격 30cm로 타설을 하여 10일간의 반응기간을 둔 후 개량된 지반의 강도정수를 마찬가지로 직접전단시험을 이용하여 구하였다.²⁾³⁾ 그 결과는 다음의 그림 10. ~ 12.과 표 5.와 같이 점착력의 경우 각각 0.0113kg/cm², 0.0171kg/cm², 마찰각의 경우 1.0°, 1.1° 등 상당한 개량효과를 보였다.

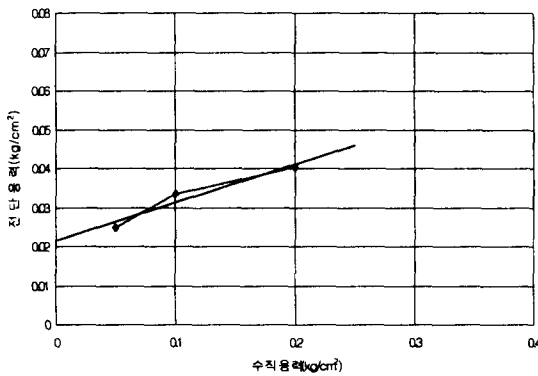


그림 10. 전단강도(원지반)

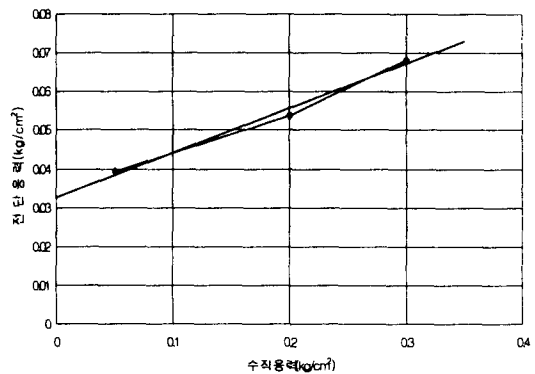


그림 11. 전단강도(개량후, 정선산)

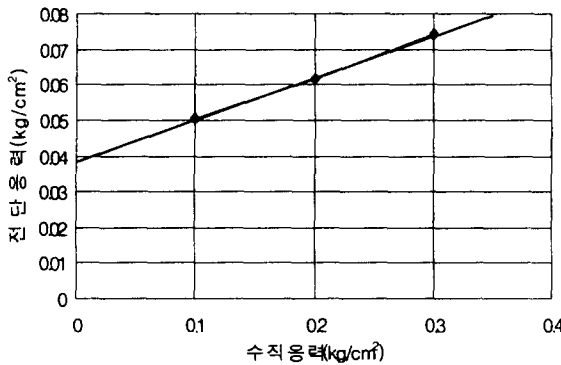


그림 12. 전단강도(개량후, 단양)

표 5. 개량전·후의 강도정수 비교

강도정수	개량전	개량후	
		정선산 생석회	단양산 생석회
$c(\text{kg/cm}^2)$	0.0214	0.0326	0.0385
$\phi(^{\circ})$	5.6	6.6	6.7

6. FLAC에 의한 간극수압분포 분석

유한차분법(FDAC)을 이용하여 지반의 간극수압의 거동을 실제 실험과 비교해 본 결과 최대과잉간극수압에서는 많은 차이를 보였지만 전체적인 거동은 유사한 것으로 분석되었다

그림 13.~18.은 FLAC해석을 통해 파일 중심에서 10, 15, 20cm지점의 간극수압변화를 분석한 것인데 팽창압에 따라 최대간극수압의 차이가 보이며 소산속도는 그래프의 대략적인 기울기의 차이로 나타나고 있다. 실제 측정된 팽창압을 적용하였을 경우 점토의 변위량(생석회의 팽창량)이 과다하게 되어 실제 해석시 실제 변위량(생석회의 팽창량)을 나타내는 팽창압(정선:85t/m², 단양:100t/m²)을 시행착오법으로 구하였다.

이는 실제의 실험에서는 점토내의 공극의 존재, 점토내의 유기물 함유 상태, 압력의 증가에 따른 물의 기화현상 등의 기타 요소에 의해 팽창압이 점토를 압축시키는 데 모두 사용되지는 않지만 프로그램

상에서는 해석상 주어진 대부분의 팽창압이 과잉간극수압을 유발시키는 데 사용되기 때문이다.

해석은 원형토조의 반단면을 기본으로 하여 직사각형 Mesh를 이용하였으며, 대상지반은 Mohr - Coulomb 모델을 이용하였고 생석회는 단양산, 정선산에 따른 팽창압만을 고려하여 해석하였다.

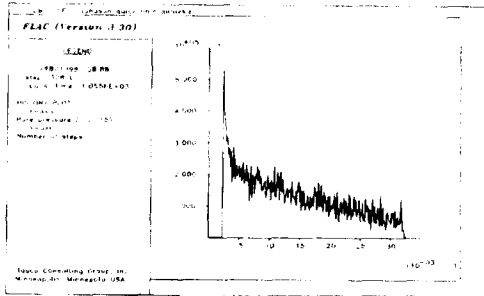


그림 13. 10cm 지점에서의 간극수압 변화(정선산 생석회)

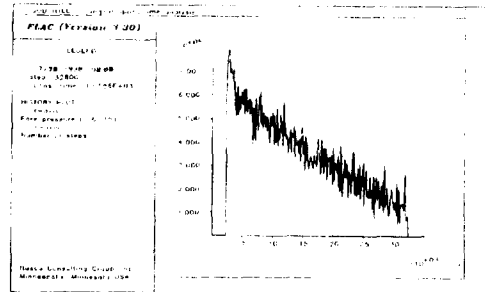


그림 14. 15cm 지점에서의 간극수압 변화(정선산 생석회)

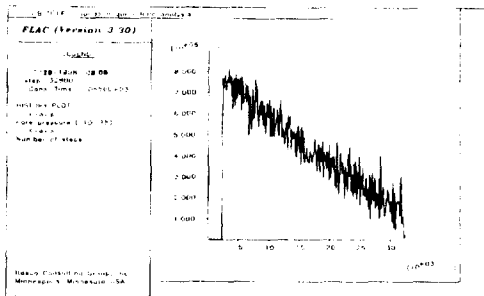


그림 15. 20cm 지점에서의 간극수압 변화(정선산 생석회)

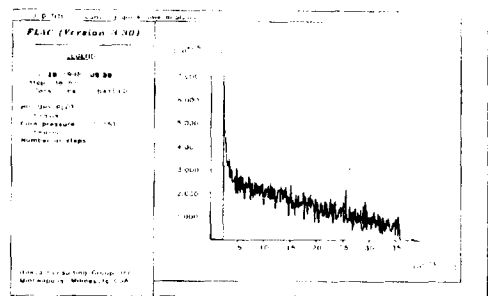


그림 16. 10cm 지점에서의 간극수압 변화(단양산 생석회)

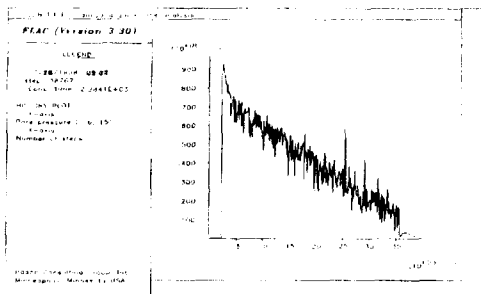


그림 17. 15cm 지점에서의 간극수압 변화(단양산 생석회)

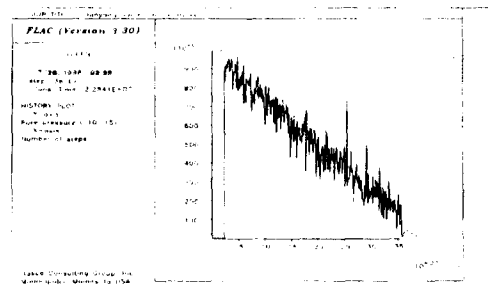


그림 18. 20cm 지점에서의 간극수압 변화(단양산 생석회)

그림 13. ~ 18.에서와 같이 정선산에 대한 간극수압거동의 경우 토조높이의 중간지점에서의 최대 간극수압은 생석회파일에 가까운 지점(10cm 지점)의 경우 0.54MPa(54t/m²), 중간지점(15cm 지점)은 0.76MPa(76t/m²), 외측(20cm 지점)은 0.81MPa(81t/m²)로 실측에서 구한 간극수압의 거동과 비슷한 경향을 보였고 간극수압의 소산속도는 10cm지점이 가장 빠르며 15cm, 20cm의 순서로 나타났다. 단양산에 대한 간극수압거동의 경우는 토조높이의 중간지점에서의 최대 간극수압은 생석회파일에 가까운 지점(10cm 지점)의 경우 0.71MPa(71t/m²), 중간지점(15cm 지점)은 0.92MPa(92t/m²), 외측(20cm 지점)은 0.95MPa(95t/m²)로 실측에서 구한 간극수압의 거동과 비슷한 경향을 보였다. 간극수압의 소산속도는 10cm지점이 가장 빠르며 15cm, 20cm 순서로 나타났다.

6. 결론

본 연구는 국내 산지별 생석회를 생석회파일공법에 적용, 표준사, 남해울촌지역 점성토 등 연약지반에 대한 효과를 검토한 것으로서 연구결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

- 1) 국내에서 생산되는 생석회는 CaO의 함량이 높고 팽창량, 팽창압시험 결과 상당한 효과를 보여 해성점토에 생석회파일 공법을 적용할 경우 경제적이고도 우수한 개량효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 원형 모형토조를 통한 생석회파일 주변 점토지반의 과잉간극수압의 발생 및 소산을 측정된 결과 정선산 생석회의 경우(밀도 : $1.0\text{g}/\text{cm}^3$, 직경 : 10cm) 파일반경과 파일중심으로부터의 거리의 비가 1:3일 때 $0.492\text{t}/\text{m}^2$ 의 최대값을 나타내었고 단양산 생석회의 경우(밀도 : $1.4\text{g}/\text{cm}^3$, 직경 : 10cm) 파일반경과 파일중심으로부터의 거리의 비가 1:4일 때 $0.939\text{t}/\text{m}^2$ 의 최대값을 나타내었다. 이 결과 적절한 타설 간격은 파일 직경의 3~4배임을 알 수 있다.
- 3) 모형 원형토조시험에 의하면 생석회파일에 인접한 지반이 불포화되는 시점에서 부터는 점토의 낮은 투수성에 의해 완벽한 생석회의 반응을 기대하기 힘들고 또한 함수비 저하효과도 감소하게 된다. 따라서 생석회파일에 의한 지반개량은 어느 정도 투수성을 갖고 압밀효과를 충분히 발휘할 수 있는 함수비가 높은 지반에 보다 적당할 것으로 판단된다.
- 4) 주변지반이 점토와 사질토인 경우의 간극수압분포도를 비교할 때 주변지반의 투수계수에 따라 분포양상이 크게 변함을 알 수 있으며 정확한 투수계수의 측정과 이에 따른 예측식의 보정을 수행한다면 좀 더 정확한 예측이 가능하리라 판단된다.
- 4) 사각형 모형토조시험에 의하면 생석회파일 타설 전과 타설 후 개량된 지반에 대한 강도특성은 원지반의 경우 점착력은 $0.0214\text{kg}/\text{cm}^2$, 마찰각은 5.6° 이며, 개량된 지반의 경우 정선산과 단양산에 대하여 점착력은 각각 $0.0326\text{kg}/\text{cm}^2$, $0.0385\text{kg}/\text{cm}^2$, 마찰각은 6.6° , 6.7° 로 나타났다. 점착력의 경우 각각 $0.0113\text{kg}/\text{cm}^2$, $0.0171\text{kg}/\text{cm}^2$, 마찰각의 경우 1.0° , 1.1° 등의 증가로 주변지반의 개량효과가 우수함을 알 수 있다.
- 5) 프로그램 해석시 실제 측정된 팽창압(약 $300\text{t}/\text{m}^2$)을 적용하였을 경우 점토의 변위량(생석회의 팽창량)이 너무 과다하게 되어 실제 해석시 실제 변위량(생석회의 팽창량)을 나타내는 팽창압(정선 : $85\text{t}/\text{m}^2$, 단양 : $100\text{t}/\text{m}^2$)을 시행착오법으로 구하여 사용하였다. 이는 실제의 실험에서는 점토내의 공극의 존재, 점토내의 유기물 함유 상태, 압력의 증가에 따른 물의 기화현상 등의 기타 요소에 의해 팽창압이 점토를 압축시키는 데 모두 사용되지는 않지만 프로그램상에서는 해석상 주어진 대부분의 팽창압이 간극수압을 유발시키는 데 사용되기 때문이다. 이러한 프로그램상의 문제점은 장래에 최적의 프로그램의 적용 및 개발시 유의해야 할 점이라 생각된다.

7. 참고문헌

1. 千柄植(1997), 基礎工學, 建設研究社, pp.180-184.
2. 천병식(1998, 5), “생석회파일에 의한 지반개량 공법연구”, 한국과학재단 1997년도 특정기초연구제 1차 중간보고서.
3. 천병식, 고갑수(1998, 7), “남해울촌 해성점토의 생석회파일에 의한 개량효과”, 대한토목학회 논문집, Vol 18, No. III-4, pp521-529.
4. 下田正雄(1983), 石灰安定處理工法, 鹿島出版會, pp.12-38.
5. J.K. Mitchell, A. Holyman(1983), Assessment of Quick Lime Pile Behavior, Improvement of Ground, Vol.2, pp.897-902.