

생석회공법에 의한 지반개량효과에 관한 연구

A Study on the Improvement of Ground by Quick-Lime

천병식¹, BYUNG-SIK CHUN, 김수삼², SOO-SAM KIM, 강부건³, BOO-KUN KANG, 고경환⁴, KYUNG-HWAN KOH, 김준섭⁵, JOON-SUB KIM

- | | |
|-----------------------|---|
| 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, 건설사업본부, 전무이사 | Managing Director, Construction Division, Samsung Heavy Industries. |
| 4 삼성중공업, 기술연구소, 연구원 | Senior Researcher, Institute of Technology, Samsung Heavy Industries. |
| 5 한양대학교, 토목공학과, 석사과정 | Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Han Yang Univ. |

SYNOPSIS : Soft soil improvement with quick lime has been mainly used in two ways: lime mixing method and lime pile method.

This paper presents engineering properties of soil treated by quick lime produced in Korea. In case of mixing method, sand (from Chumunjin) and marine clay (from Nakdong river) were used as test soil. Soil property tests such as Proctor test, unconfined compression test, electron micrograph(SEM), and XRD were performed to verify the effectiveness of soil improvement. For lime pile method, the behavior (pore pressure) of soil due to the swell of quick lime pile was investigated by using test container.

1. 서 론

생석회에 의한 연약지반 개량공법은 생석회 혼합처리공법과 생석회 파일공법으로 나뉘어진다. 본 논문은 국내에서 생산되는 생석회를 사용하여 처리한 지반의 공학적 물성치 산정에 관한 연구이다. 혼합처리공법의 경우 대상지반으로서 표준사와 낙동강 하구에서 채취한 해성점토를 사용하였다. 혼합처리토에 대하여 일축압축강도, 다짐시험, SEM촬영, X-ray회절분석과 같은 시험을 통하여 생석회에 의한 개량효과를 검증하였다. 또한 생석회 파일공법의 경우 생석회의 팽창에 의한 생석회 주변지반의 거동을 검토하기 위해 간극수압 변화를 측정하였다.

2. 생석회의 특성분석

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 단양생석회를 시료토로 사용하였다. 석회의 분류는¹⁾ 구성광물과 생산과정에 의하여 나눌 수 있으며 석회공업이 발달한 일본에서는 공업용생석회를 CaO의 함량이나 불순물의 정도에 따라 그 등급을 정하고 있으나 아직 우리나라에서는 생석회에 대한 그 기준이 마련되어 있지 않다.

2.1 생석회의 물리실험 및 화학조성

생석회의 비중은 소화반응 때문에 시멘트의 비중시험방법을 사용하여 시행하였다. 측정에는 비중이 0.83인 등유를 사용

하였다. 그 결과 단양산은 3.06 으로 나타났으며, 일반적으로 외국에서 사용되는 생석회의 비중은 약 3.01~3.3정도이므로 우리나라의 생석회는 외국의 생석회에 비하여 비중은 다소 낮음을 알 수 있다. 단양산생석회의 입도분석결과는 표 1에서와 같으며, #200 통과량은 94.3% 이다. SEM촬영에서도 입자가 미세하고 입도가 균등한 것으로 나타났다.

표 1 단양 #200 통과 생석회의 입도분포

체크기(μm)	192	128	96	64	48	32	24	16	12	8	6	4	3	2	1.5	1
잔류량(%)	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

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

표 2 단양산 생석회의 화학조성시험

화학조성	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Ig.-Loss	SUM
(%)	1.8	0.5	0.3	93.2	1.8	0.01	0.04	2.30	100

표 3 수화반응열시험 (°C)

시간	1분	2분	4분	5분	6분	8분	10분	15분	20분	25분	30분	35분	45분	55분	물의 온도
°C	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

위의 시험결과를 분석하면 단양산 생석회는 CaO함유율이 93.2%로서 일본의 공업용생석회의 분류기준의 특호에 해당하는 양질의 생석회로 분류되었다.

표 3의 시험의 결과에 의하면 단양생석회는 초기에 빠른 반응을 보이기 시작하고 수화반응열 면에서도 고열로 나타났다. 또한 X-ray회절분석에서 단양생석회는 불순물이 거의 없는 순수한 생석회인 것으로 나타났다.

3. 생석회의 지반내에서의 주요 반응원리 및 효과

3.2.1 압밀/배수효과

CaO는 식(1)의 반응에 의해 토중의 물을 흡수하며 이 반응으로부터 생기는 발열 및 팽창작용에 의해 토중수의 감소와 흙의 압밀이 촉진된다.



3.2.2 이온 전환 효과

세립점토입자의 표면이 음전기성으로 포화될 때 점토 입자의 표면은 소화된 석회의 칼슘(Ca⁺⁺)이온을 흡수한다. 결과적으로 점토 입자 정착 활동에 의해 서로 이어져 있다.²⁾ 연약 점토는 전단력의 부가적 증가와 더불어 개량된다.

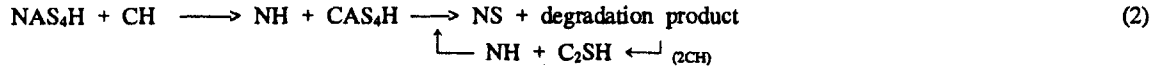
3.2.3 Pozzolan반응 효과

칼슘(Ca⁺⁺)은 오랫동안 점토에서 Al₂O₃(산화알루미늄), SiO₂(산화규소)와 반응하여 CaO · SiO₂ · H₂O합성물을 형성하는데 이 반응을 포졸란반응 이라고 한다. 반응생성물이 결합제로 작용하여 강도·내구성이 발휘된다.³⁾⁴⁾ 또한 다른 첨가제로서는

처리하기 어려운 Allophane ($Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 \cdot SiO_2$ 화합물), Montmorillonite 등의 점토광물과의 사이에도 Pozzolan반응 생성물을 만들 수 있다.⁵⁾

3.2.4 석회의 탄산화

석회는 탄산가스와 반응하여 탄산칼슘($CaCO_3$)을 형성하고, 알루미늄탄산칼슘이 탄산칼슘과 반응하여 흙을 고결시킨다. 이러한 일련의 반응은 토중에서 석회와 토중수 사이 및 석회와 점토광물 사이에 일어나며 Ingles에⁶⁾ 의하면 식(2)의 화학반응식으로 설명된다.



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

4. 생석회혼합 처리토의 공학적 특성

4.1 대상지반의 특성

표 4 대상 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 생석회혼합 처리토의 일축압축강도 분석

생석회 처리토의 일축압축강도시험은 대상지반인 해성점토와 표준사를 사용하여 시행하였다. 해성점토에 대한 일축 압축강도시험시 함수비(Water/Marine Clay)를 60, 70, 80%로 변화시켰으며 생석회-해성점토 배합비(Lime/Marine Clay)는 10, 20, 30%를 사용하였다. 또한 양생일수는 1일, 3일, 7일, 28일, 45일, 60일로 시험을 실시하였다. 양생조건은 온도 $25 \pm 5^\circ C$ 로 유지 하며 함수를 유지하였다. 표준사를 시료토로 한 경우는 생석회배합비율 (Lime/Sand)은 5, 15, 30%로 변화시켰고 물-골재비 (Water/Sand)는 15, 30, 50%로 변화시켜서 시험하였고 양생조건은 해성점토의 경우와 같다

그 결과 해성점토-생석회처리토의 일축압축강도는 L/MC 30%, W/MC 70%와 L/MC 30%, W/MC 80%에서 특히 높게 나타났으며(그림 1) 동일 W/MC 조건에서 L/MC가 증가할 수록 강도는 크게 나타났다. 표준사를 시료토로한 경우의 일축압축강도는 동일 W/S의 조건에서, W/S 와 L/S가 같을때(15%-15%, 30%-30%) 강도발현이 우수하게 나타났으며(그림 2), 양생일이 길수록 강도가 증가하였다. 또한, 동일함수비에서 L/S가 증가할수록 강도가 크게 나타났다.

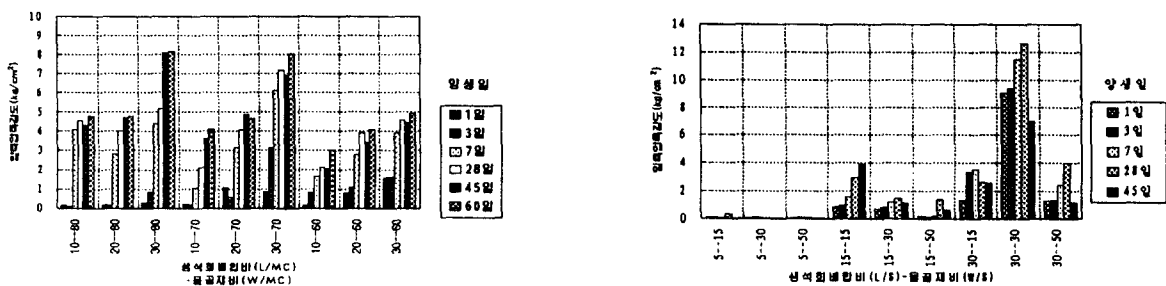


그림 1 해성점토의 L/MC, W/MC 및 양생일에 따른 일축압축강도 그림 2 표준사의 L/S, W/S 및 양생일에 따른 일축압축강도

4.3 생석회혼합 처리토(해성점토)의 다짐특성

생석회-해성점토 처리토의 다짐시험을 위하여 배합비는 L/MC 20%와 30%(W/MC 70%로 일정)로 하였고, 양생일은 1일, 3일, 7일, 28일, 45일로 하여 시험을 실시하였다. 양생조건은 온도는 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 유지하고 함수율을 유지하였다. 처리토의 다짐특성은 L/MC 20%와 30%에서 동일한 특성을 보이는 데, 원시료토에 비해 최대건조밀도가 작아지고, 최적함수비는 높아지는 경향을 나타내고 있다. 그 이유는 생석회가 수화반응시 비중이 낮아지고 양생일이 지남에 따라 반응생성물이 생겨 공극을 채우고, 이 반응생성물들이 면모화구조를 형성함으로써 위와 같은 다짐특성이 나타난 것으로 판단된다.

생석회-모래 처리토의 다짐시험은 배합비 L/S=15%, W/S=15% 와 L/S=30%, W/S=30% 에 대하여 실시하였다. 그 특징을 보면 생석회-해성점토 처리토에서는 양생일수가 증가함에 따라 최대건조밀도는 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보이고 있다. (표4, 5 참조)

표 4 양생기간과 석회혼합비에 따른 최적 함수비와 최대건조밀도(W/MC=70%)

종 류	원시료토	L/MC	1일	3일	7일	28일	45일
최대건조밀도(t/m^3)	1.75	20%	1.408	1.485	1.382	1.227	1.460
		30%	1.260	1.481	1.381	1.287	1.401
최적함수비(%)	17.1	20%	26.7	29.3	32.2	34.5	25.12
		30%	28.4	24.3	28.1	34.4	25.92

표 5 양생일수에 따른 생석회-모래 처리토의 최대건조밀도 및 최적함수비

종 류	L/S-W/S (%)	1일	3일	5일	45일	60일
최대건조밀도(t/m^3)	15-15	1.98	1.91	1.93	1.91	1.92
	30-30	1.93	1.87	1.88	1.87	1.85
최적함수비(%)	15-15	9.4	10.5	10.2	11.12	9.7
	30-30	10.1	11.0	10.7	11.6	11.8

4.4 생석회혼합 처리토의 함수비 저하 효과

초기의 소화반응에 의해 시료토의 함수비는 저하 효과가 나타난다. 함수비 저하는 생석회 처리토의 초기의 압축강도와 밀접한 관계를 가지며 새로운 형태의 vertical drain재로서의 사용 가능성을 알 수 있다. 그림 3은 표준사에 대한 생석회 처리토의 양생일과 함수비의 관계를 나타내고 그림 4는 해성점토에 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.

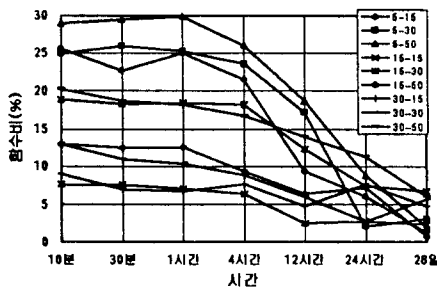


그림 3 표준사-생석회 처리토의 함수비 저하

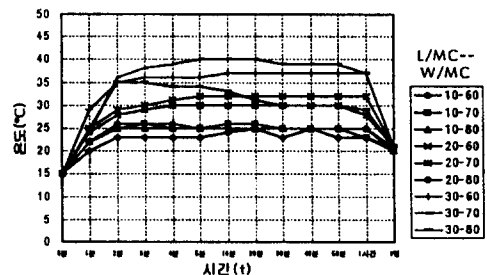
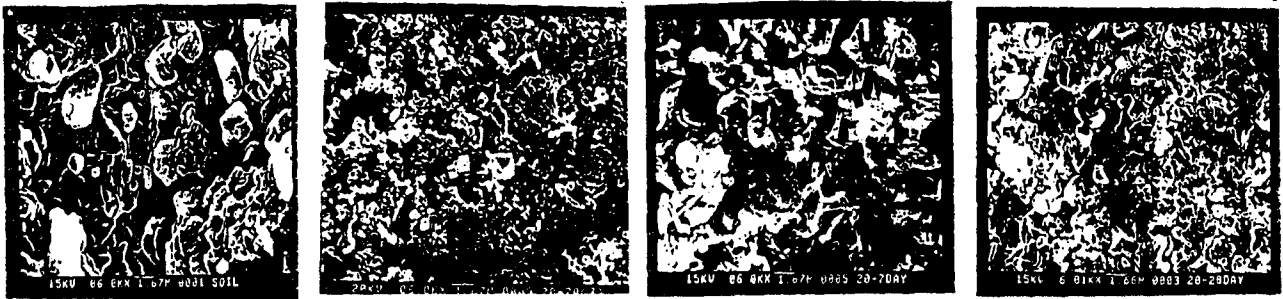


그림 4 해성점토-생석회 처리토의 함수비 저하

4.5 생석회 혼합처리토(해성점토)의 SEM촬영

양생일에 따른 생석회 혼합처리토의 입자구조 변화를 관찰하기 위하여 원지반과 생석회 혼합처리토에 대하여 SEM촬영을 실시하였다. 양생일은 1,3,7,28일에 대하여 관찰하였고, 생석회 배합비는 10%, 20%, 30%로 변화시켰다.

SEM촬영 결과를 종합하여 보면, 원시료토는 그림5에서 보는 바와 같이 공극이 크며 입자도 분산되어 있음을 볼 수 있으나 양생일에따라 생석회 반응생성물로 인해 조직에 변화가 나타나고 면모화와 응집작용이 진행되고 있음을 알 수 있다. (그림5(a) ~ 그림5(d) 참조) 같은 양생일에서는 생석회 배합비가 높을수록 면모화와 응집작용이 더 진행되어 있음을 알 수 있으며 입자의 모양으로 미루어 생석회와 점토광물과의 반응에 의하여 여러 다른 생성물의 존재를 확인할 수 있다



(a) 원 시료토의 SEM촬영 (b) 양생일 3일후의 SEM촬영 (c) 양생일 7일후의 SEM촬영 (d) 양생일 28일후의 SEM촬영
그림 5 양생일에 따른 처리토의 SEM촬영 (L/MC=20%, L/W=70%).

4.6 원지반 및 혼합처리토(해성점토)의 X-Ray회절분석(XRD, XRF)

X-Ray 회절분석을 실시한 결과, 대상점토를 구성하는 주요광물은 고령토(Kaolinite), 蛭石(Vermiculite), 소다장석(曹長石, Albite), 백운모(Muscovite), 석영(α - Quartz, SiO_2), Portlandite($\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$)등인 것으로 분석되었다.

본 시험에서는 XRD분석(조성광물분석)를 이용하여 대상토및 처리토의 광물분석을 하였고, 정량적인 분석을 위하여 XRF분석(화학조성분석)을 실시하였다.

원시료토, 20-70(L/MC)와 30-70(L/MC)의 구성물질의 정량적 시험결과는 표 6과 같다. 결과에서 보면 일반적인 토질보다 Al_2O_3 와 Fe_2O_3 의 상대적 비율이 높고 CaO, MgO, Na_2O 비율이 약간 작은 것으로 나타났으며 처리후의 특징을 보면 SiO_2 , Al_2O_3 비율은 비교적 크게 감소하였고 Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O 도 비교적 감소하였다. 그러나 CaO와 SO_3 비율은 원시료토에 비해 처리토에서 크게 증가하였다. 또한 이 증감은 석회 첨가량 20%와 30%를 비교해 볼 때 30%에서 더 뚜렷이 나타났다. 이 결과는 생석회 처리로 인한 산화물이 증가하였음을 알 수 있다.

표 6 XRF를 이용한 시료토 및 처리토의 화학성분 분석결과

시료	성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig.-loss	Sum
		원시료토	1	58.1	19.7	5.9	0.7	1.2	0.80	0.11	1.99	2.46	0.26
	2	57.8	19.9	6.0	0.7	1.0	0.83	0.11	2.21	2.58	0.34	8.5	99.97
20/70(L/MC)	1일	49.8	16.1	4.2	11.0	1.1	0.63	0.09	1.72	2.08	0.77	12.5	99.99
	3일	50.8	15.9	4.4	10.7	0.9	0.60	0.09	1.72	2.14	0.79	11.8	99.84
	7일	49.8	15.8	4.2	12.1	0.9	0.56	0.1	1.8	2.08	0.82	11.7	99.86
	28일	49.5	15.6	4.2	11.3	1.7	0.58	0.1	1.57	2.02	1.02	12.4	99.99
30/70(L/MC)	1일	47.0	14.7	3.8	15.1	1.0	0.53	0.1	1.58	1.90	0.75	13.4	99.86
	3일	46.9	14.7	3.9	14.9	0.9	0.53	0.1	1.62	1.87	0.69	13.7	99.81
	7일	45.8	14.5	3.7	15.9	1.5	0.53	0.1	1.56	1.95	0.69	13.7	99.93
	28일	46.6	14.3	3.7	15.6	0.9	0.54	0.1	1.54	2.0	0.61	14.0	99.89

XRD분석(조성광물분석) 결과를 보면 원시료토에 비해 석회처리토에 반응생성물인 Portlandite가 생성되어 있으며, 양생일에 따라 Portlandite($\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$)의 Intensity가 상대적으로 높아짐을 알 수 있었다. 이는 Portlandite가 증가하고 있음을 나타내는 것이며 양생일에 따라 반응생성물이 증가함을 보이는 것이다. 이 경향은 생석회 혼합비가 20%일 때 보다 30%일 때 더 뚜렷이 나타났다.

5. 생석회 파일로서의 활용

생석회 파일공법은 심층 토양의 안정화에 사용되며 생석회파일공법에 의한 지반개량공법은 생석회파일의 지반을 횡방향으로 압축시키는 팽창효과와 탈수작용에 의하여 대상 지반을 개량하는 속도가 빠르다는 장점을 가지고 있다.

생석회 파일공법 심층의 지반개량공법으로서 깊이 4m이상의 연약토에 생석회 파일을 시공하여야 한다. 1992년 Hosoi 등에 의하면 생석회 파일공법은 두가지로 분류될 수 있는데 첫번째 방법으로 석회기등을 형성하기 위해 토양과 석회를 혼합하는 것으로서 이것은 스칸디나비아 국가에서 폭넓게 사용어져 왔다. 또다른 방법으로서 생석회를 혼합하지 않고 지반에 석회 기등을 형성하는 것이며 주로 일본 등지에서 사용한다.

5.1 생석회 파일의 작용원리 및 반응과정

생석회 파일의 작용원리에 대한 도해가 다음 그림6에 제시되어 있다.

생석회파일과 다습한 연약지반이 만나게 되면 연약한 지반의 특성에 영향을 주는 여러과정이 발생하게 된다. 첫째, 생석회를 소화시키고 간극을 메우기위한 물의 흡수과정, 둘째, 소화반응에 의한 열의 발생과정, 셋째, 소화에 의한 생석회의 팽창으로 인한 횡방향 지반압축과정, 넷째, 생석회의 확산이 일어나는 파일주변지반의 경화진행과정이다.

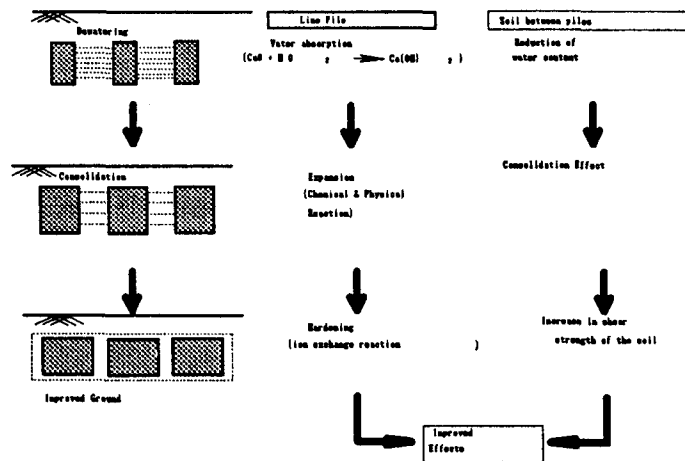


그림 6 생석회 파일의 원리

5.2 생석회 파일 주변지반의 간극수압분포 예측

A. Holyman & Mitchell⁷⁾은 생석회 파일 주변지반의 압밀이론식을 제안하였다. 방사방향거동에 대한 차분식은 생석회의 팽창과 압축, 소화반응속도, 지반의 특성 등을 고려하고 있다. 또한 Chen 등(1990)은 Holyman의 식을 수정하여 생석회 파일의 팽창에 의하여 발생된 과잉간극수압의 분포에 대한 이론식을 제시하였다. 그리고 기존의 패키지를 이용한 유한차분 해석을 실시하고 이러한 이론상의 값을 검증하기 위하여 모형토조를 사용하여 생석회 파일 주변의 간극수압을 실측하고 그 결과를 이론값들과 비교하였다.

5.2.1 팽창량 측정시험

생석회의 지반내에서의 팽창정도의 측정과 방사방향 팽창과 비교하기위하여 기존의 압밀시험장치를 이용하여 1차원 팽창

(상향팽창, 하부 및 측방향 구속)시험을 하였다. 사용수는 증류수와 3%의 염수를 사용하였다. 생석회의 건조단위중량은 1.334g/cm^3 으로 시험을 실시하였다. 시험결과 수직응력이 0.5kg/cm^2 일 경우 최대 수직변위는 5.576mm 로 측정하였고 전반적으로 수직응력이 증가함에 따라 점점 감소하는 경향이 나타났다. 변형율은 팽창완료시간의 95%의 팽창량과 원시료높이의 비로 나타내었다.

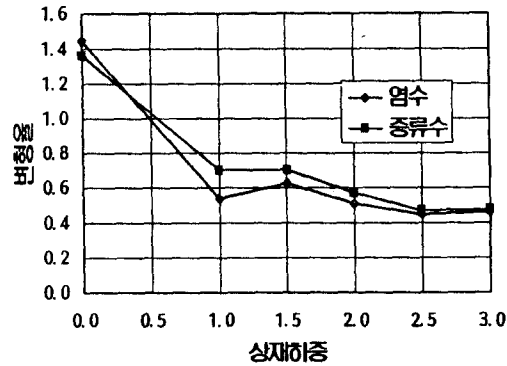


그림 7 수직응력에 따른 수직방향 팽창량의 변화(두께 1.5cm의 경우, 염수, 증류수)

5.2.2 팽창압 측정시험

생석회의 팽창압을 측정하기 위하여 지름 6cm, 높이 10cm의 모듈드를 제작하여 생석회의 수직방향 팽창압을 측정하였다. 다음 그림 8은 생석회의 팽창압을 측정하기 위한 장치의 개략도이다.

대상시료인 생석회의 건조단위 중량은 1.1, 1.3, 1.5kg/cm^2 으로 변화시켰으며 사용수는 증류수와 염수(3%)를 사용하였다.

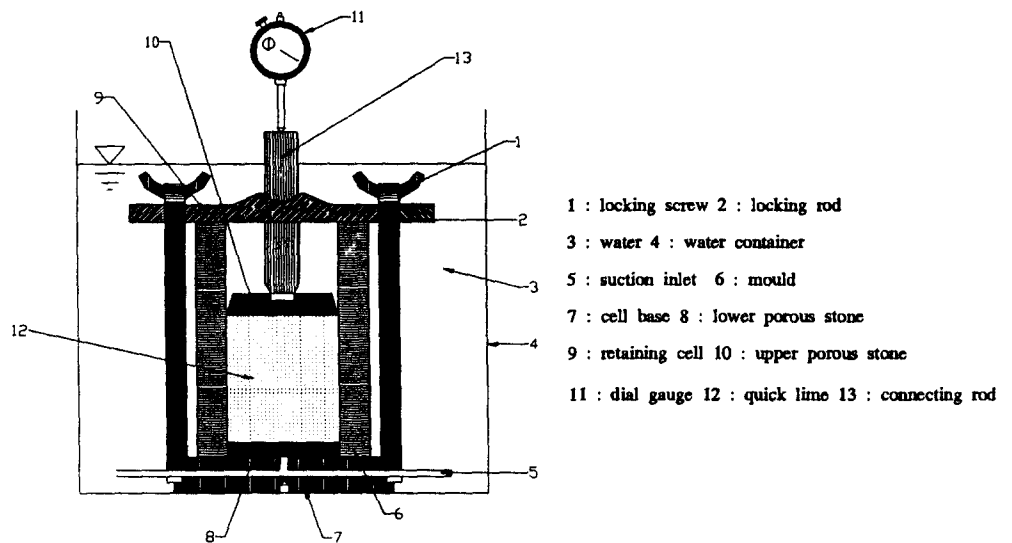


그림 8 팽창압을 측정 장치의 도해

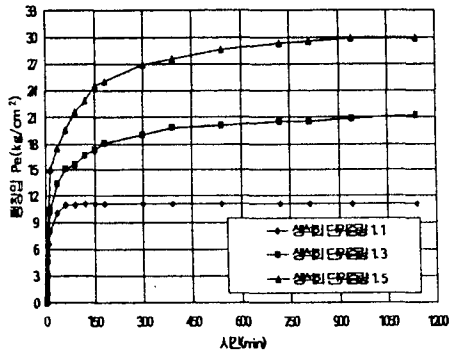


그림 9 시간에 따른 생석회의 팽창압(증류수)

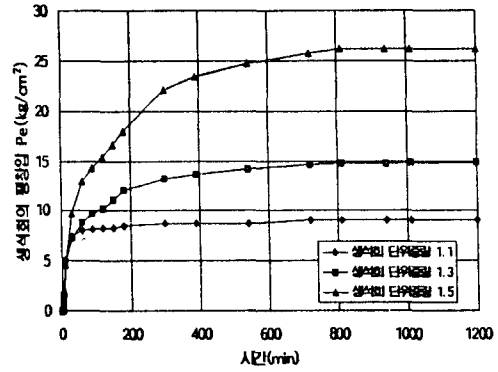


그림 10 생석회의 팽창압(염수의 경우)

시험결과 팽창압은 그림 9~10과 같이 나타났다. 생석회의 단위중량에 따른 팽창압은 단위중량이 1.5kg/cm^3 인 경우 사용수가 증류수일 때 최대 29.9kg/cm^2 , 염수일 때 최대 26.3kg/cm^2 까지 측정되었다. 생석회의 단위중량이 1.3kg/cm^3 인 경우는 1.1kg/cm^3 인 경우보다 약 1.8배 증가하였으며 단위중량이 1.5인 경우는 1.3인 경우에 비하여 약 1.6배 증가하였다.

5.2.3 생석회에 대한 소석회의 압축비

Holyman & Mitchell⁷⁾이 제안한 식에 의하면 생석회와 소석회의 압축비(C_3) 값은 석회의 종류에 상관없이 일정하며 그 값은 0.2로 분석되었다. 본 연구대상 생석회의 경우 생석회 파일 주변지반의 응력이 $0\sim 1.5\text{kg/cm}^2$ 인 경우에 대하여 C_3 의 값은 0.2~0.5사이로 측정되었다

5.2.4 응력증가에 따른 생석회의 압축비

응력증가에 따른 생석회의 압축비를 결정하기 위하여 압밀모듈드를 사용하여 시험을 하였다. 생석회의 건조밀도를 1.1~ 1.5kg/cm^3 , 응력을 $0\sim 0.35\text{MPa}$ 로 변화시키면서 측정하였다. 시험결과는 그림11~12와 같다.

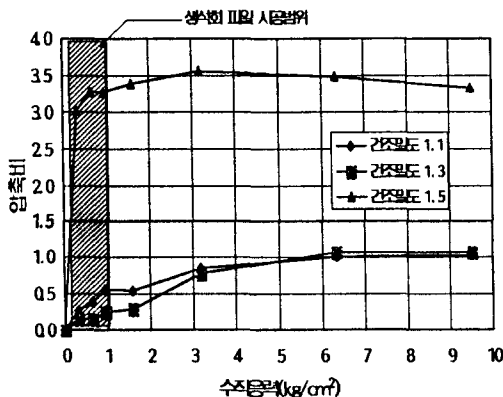


그림 11 생석회에 대한 소석회의 압축비(C_3)

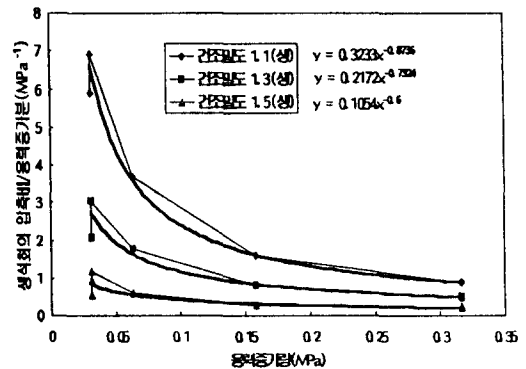


그림 12 응력증가량에 따른 생석회의 압축비(C_3)

응력증가량에 따른 생석회 압축비(C_3)는 생석회의 건조밀도가 커질수록 C_3 의 값은 감소되어가는 경향을 보이할수록 C_3 의 값은 감소함을 보이고 있다. 응력증가량($\Delta\sigma_v$)은 0.3MPa이상의 경우에는 0.3~1.2MPa⁻¹정도의 값으로 수렴되어가고 있음을 알 수 있다.

5.2.5 생석회 파일 주변지반의 간극수압 측정시험

5.2.5.1 시험장치 및 시험조건

생석회파일에 의한 주변지반의 간극수압변화를 추정하기위해 직경50cm, 높이100cm의 간극수압을 측정하였다.과 같다.

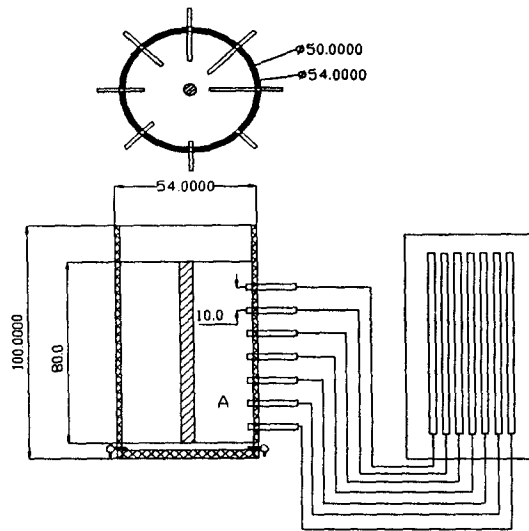


그림 13 모형토조에 의한 생석회 파일 주변지반의 간극수압측정장치

그림 13의 모형토조를 이용하여 파일주변의 간극수압을 측정하고 그 결과를 이론식에 의하여 계산한 수치와 비교 및 분석을 실시하였다. 측정대상 지반의 초기조건을 일정하게 하기 위하여 원 시료를 #10체에 거른 후 약 0.5t/m²의 상재하중을 일주일간 재하시켰다. 생석회 파일의 직경은 10cm를 사용하였으며 생석회의 밀도는 1.1g/cm³로 하여 실험하였다. 또한 생석회 파일 타설후 생석회파일이 상방향으로 팽창하는 것을 방지하기 위하여 상부방향을 구속하였다.

5.2.5.2 시험결과

시험 시작전과 후의 함수비를 측정된 결과 시작전의 평균 함수비는 66.3%~70.16%로 측정되었으며 반응 완료후의 함수비 측정결과는 깊이가 중간정도(약 0.4m)에서 측정된 결과 생석회 파일에서 멀리 떨어진 부분(약 20cm)는 평균 58.4%이며 생석회 파일 바로 옆의 경우에는 평균 47.2%로 측정되었다. 또한 생석회 파일의 함수비는 상부와 하부의 함수비가 비교적 비슷한 분포를 보이고 있으며 그 값은 평균 81.1%로 측정되었다. 그림 16 은 모형토조에 의한 파일 주변지반의 간극수압 분포를 측정된 결과이다. 시험 결과 파일에 가까울수록 간극수압 증가의 기울기가 낮은 반면 생석회 파일에서의 거리가 먼 지점에서의 간극수압은 그 소산에 상당한 시간이 소요됨을 알 수 있다. Holyman & Mitchell⁷⁾의 논문에 의하면 간극수압의 소산시간은 대상지반의 투수계수에 크게 의존하며 투수계수가 약 1×10^{-7} m/sec이상일 경우 압밀은 간극수압의 생성보다 빨리 진행하여 그 효과가 우수한 것으로 보고되었다. 본 연구대상지반의 투수계수는 약 1×10^{-9} m/sec정도의 투수계수를 가지고 있

으므로 높은 파잉간극수압의 발생이 예상되었으며 시험결과 또한 비슷한 거동을 나타내었다.

상기의 시험결과를 보면 시간경과에 따른 간극수압 분포 형태는 유사함을 알 수 있다. 특히 생석회 팽창에 따른 간극수압의 증가는 약 1000분 이내에 거의 완료되며 생석회 파일에 인접한 부분의 최대 간극수압은 0.02MPa로 측정되었다.

Chen의 시험결과는 초기 간극수압 20KPa, 전단강도 15KPa, 투수계수 10^{-8} m/sec, $\nu=0.3$, r_1 (생석회 파일의 반경)=0.14, r_2 (생석회 파일의 영향반경)=0.42m, $E=10$ MPa의 조건에서 최대 약 100KPa정도의 파잉간극수압이 측정되었다. 또한 다른 조건의 시험에서도 최대 간극수압은 104KPa로 측정되었음을 알 수 있다. 본 시험의 경우는 약 20KPa의 최대 간극수압이 측정되었다. 본 시험의 결과는 향후 시험Data의 축척에 의해 판단해야한다.

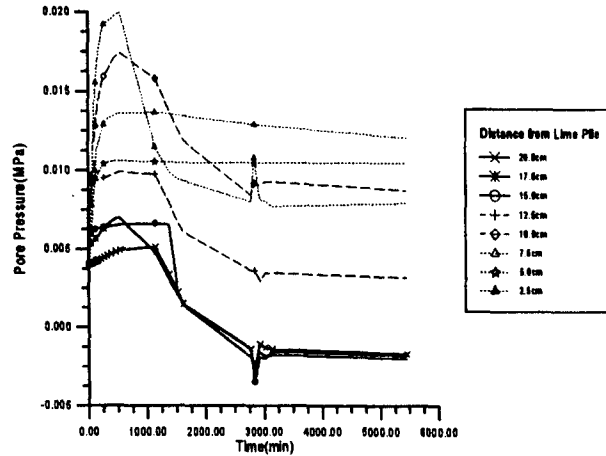


그림14 생석회 파일 주변의 간극수압 분포의 측정

5.3 간극수압예측에 관한 이론적 고찰

5.3.1 Holyman식에 의한 간극수압예측⁷⁾

5.3.1.1 해석을 위한 가정 및 알고리즘

간극수압예측을 위한 Holyman의 가정은 생석회 파일은 탄-소성 거동에 의존하는 원주형이고 반응한 생석회는 포화되어서 팽창하며 대상지반은 무게가 없고 등방성이며 균질한 지반으로 가정하였다. 생석회 파일은 무한히 긴 것으로 가정하였다. 또한 파일 사이의 대칭 표면에서의 변형은 없는 것으로 가정하였다. 이러한 가정으로 부터 파일의 등가 영향 반경으로 정의된 r_2 가 결정된다. 등가 반경은 등가 원형 면적에 대하여 파일에 영향을 받은 면적을 계산하여 얻을 수 있다.

상기의 가정을 기초로 하여 Holyman & Mitchell⁷⁾은 생석회 파일에 의한 지반개량과 관련된 현상을 묘사하는 물리적 모델을 개발하였다. Holyman의 식을 시간의 함수로서 현상을 모델링하기위한 알고리즘은 다음 과정에 그 기본을 두고 있다.

① 초기공급수압분포는 다음에 의해 결정된다.

$$P_w=0 \quad \text{for } 0 < r \leq R_1 \quad \text{for } t \geq 0$$

$$P_w=D_{r0} \quad \text{for } R_1 < r \leq R_2 \quad \text{for } t=0$$

(3)

② 압밀방정식을 방사방향 노달포인트 사이에서 ΔR 의 간격이 있는 유한 차분법을 사용하여 시간간격 Δt 사이 에 대하여 계산될 수 있다.

$$U_{i,t+\Delta} = U_{i,t} + C_h \left(\frac{U_{i+1,t} - 2U_{i,t} + U_{i-1,t}}{\Delta R^2} + \frac{1}{R_i} \frac{U_{i+1,t} - U_{i,t}}{\Delta R} \right) \cdot \Delta t + U_{g,t} \quad (4)$$

③ $U_{g,t}$ 는 다음 방식으로 계산된다.

$$U_{g,t+\Delta} = \frac{C_1 \cdot \Delta \mu}{C_3 \cdot [1 + \mu_{p,t} \cdot C_1 + (1 - \mu_t) \cdot C_5] + \frac{1}{K_1}} \quad (5)$$

여기서 $\Delta \mu = \frac{\Delta Q}{C_2 \cdot V_c}$ 이며 ΔQ 는 다음중 작은값을 택한다.

$$\Delta Q = \text{minimum of} \begin{cases} 2\pi R_1 K_h \cdot \left(\frac{U_{2,t} - U_{1,t}}{\Delta R} \right) \cdot \Delta t \\ 2\pi R_1 \sqrt{1 - \mu_t} \cdot V_{lim} \cdot \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

여기서 μ_t 와 $\mu_{p,t}$ 의 초기값은 0이다.

$$\mu_{t+\Delta} = \mu_t + \Delta \mu, \quad \Delta \sigma_{r,t} = \sum_{i=0}^t U_{g,t}, \quad \mu_{p,t} = \frac{\Delta \sigma_{r,t}}{K_1 \cdot C_1} \quad (7)$$

④ 간극수압에 의한 압밀은 $\mu=1$ 일때까지 발생한다. $\mu=1$ 이되면 모든 생석회는 반응을 끝냈으며 $U_{g,t}=0$ 이고 $\Delta \mu=0$ 이 된다. 최종 팽창은 $\mu_p \cdot C_1$ 에 의하여 구하며 방사방향 압밀은 석회기등으로 수직배수 때문에 계속된다.

표 7 간극수압 계산을 위한 파라미터

계수	내 용	비고
μ	초기체적에서 반응한 생석회의 퍼센티지	cal.
K_1	체적강도계수 $\left(= \frac{\nabla \sigma_r}{(\nabla V/V)} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{1}{1-(R_2^2/R_1)^2} \right)$	cal.
ΔV_f	μ 의 변화에 따른 자유체적 팽창량	cal.
C_1	대기중에서 생석회의 체적 팽창량(체적 팽창율이 1.4배이면 C_1 은 0.4)	test
C_2	생석회와 반응하는데 필요한 물의 상대체적(본 연구대상 생석회는 0.3)	test
C_3	생석회의 압축량 = $\left[\frac{\nabla V_{CaO}/V_{CaO}}{\nabla \sigma_r} \right]$	test
C_5	생석회에 대한 소석회의 압축량의 비	test
μ_p	소화반응이 일어나는 단계에서 비구속 팽창에 대한 실제 팽창의 비	cal.
V_{lim}	생석회로부터 소화반응이 일어나는 일정한 한계속도 기존의 연구결과에 의하면 $V_{lim}=0.2\text{mm/sec}$	ref.
R_1	생석회 파일의 반경	test
R_2	생석회 파일이 영향을 끼치는 유효반경	test
P_w	간극수압	test
$U_{i,t}$	반경($R_1+(i-1)\Delta R$)에서 시간 t 일경우 간극수압	test, cal.

$U_{e,t}$	시간 Δt 동안 발생된 간극수압	test, cal.
λ	Lame 상수 = $\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$	cal.
V_c	생석회 cavity의 체적	cal.
D	지반의 횡방향 구속(constrained) = $K_1 \cdot (1 - (R_2^2/R_1^2))$	cal.
P_e	생석회의 팽창압	test, cal
$\mu_{p,t}$	$\mu_{p,t} = \frac{\Delta\sigma_{r,t}}{K_1 \cdot C_1}$	cal.
C_h	$C_h = \frac{K_h}{\gamma} \cdot \frac{1}{m_h[2(1-\nu)]}$	cal.

* cal. : 계산된 값, test : 실험에 의하여 산출된 값, ref : 참고문헌에 의하여 산출된 값

5.3.1.2 문제점 분석 및 결과분석

① 입력 Data 산정

생석회 파일주변지반의 간극수압을 예측하기 위한 식으로서 Holyman의 식을 사용하여 간극수압을 계산하였다. 모형토조의 시험에 의한 값과 비교하기 위하여 생석회 파일의 직경이나 유효반경은 모형토조에서 사용한 값을 사용하였다. 생석회 파일 주변지반의 간극수압을 계산하는데 필요한 여러 변수들은 주로 이전 분기까지의 시험에 의하여 결정하였으며 시험에 의하여 산정할 수 없는 파라미터들은 참고문헌을 통하여 결정하였다.

② 결과 분석

Holyman식에 의하여 간극수압을 예측하는 방법이 다음과 같은 여러 가지 문제점 때문에 실제의 간극수압분포 현상을 모델링하기에는 부적절하다는 판단을 내릴 수 있었다.

첫째, 주변지반의 강성을 나타내는 강도계수(K_1 , stiffness coefficient)가 잘못 계산되어짐을 알 수 있다(계산결과가 음수로 나타남). 둘째 그림 15에서 알 수 있듯이 생석회의 팽창에 의한 간극수압 증가가 거의 고려되지 못하고 있다. 단지 소산하는 과정만을 나타내고 있으며 소산시간도 역시 실제현상과 거리가 있음을 알 수 있다. 셋째, 같은 시간대에서는 방사방향 거리에 상관없이 간극수압증분($U_{e,t}$)이 항상 일정한 값을 갖도록 계산된다.

Holyman식에 의한 간극수압분포의 계산결과는 그림 15와 같다.

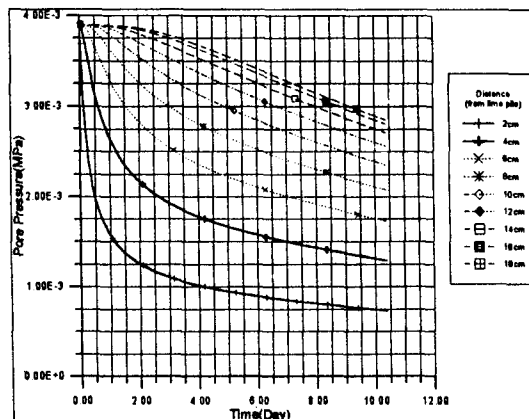


그림 15 Holyman식에 의한 주변지반의 간극수압 분포

5.3.2 Chen & Law 식에 의한 간극수압 예측⁸⁾

5.3.2.1 해석을 위한 가정

Chen & Law⁸⁾는 Holyman & Mitchell⁷⁾이 제안한 생석회 파일 주변지반의 거동에 관한 이론중 간극수압의 증가는 방사 방향 거리에 따라 비선형이며 생석회 주변지반의 과잉간극수압의 크기는 비배수 전단강도, 배수 변형 계수, 지반의 배수 프와송비, 생석회 파일의 간격의 함수라는 가정을 기초로하여 생석회 주변지반의 거동을 예측하는 새로운 식을 제안하였다.

소화 반응을 하는 생석회 파일의 메커니즘은 Pressuremeter나 파일 항타시 공동의 체적 팽창과 그 거동이 비슷하다. 그러므로 Holyman & Mitchell⁷⁾은 원주형 공동 팽창의 이론을 탄성 지반에 생석회 파일의 소화 반응을 조사하기 위하여 사용하였다. 그들은 간극 수압의 발생이 전체 지반에 대하여 일정하다고 가정하였다. 그러나 1967년 Koizumi⁹⁾와 1965년 Lo¹⁰⁾에 의한 현장 시험에 의하면 Pressuremeter나 파일 항타에 의하여 발생한 과잉 간극 수압은 거의 파일 축으로부터의 반경의 대수에 따라 직선적으로 감소함을 알 수 있었다.

생석회 파일 주변지반의 과잉간극수압은 생석회 파일이 설치되고 나서부터 임의시간이나 임의위치에서 발생된 응력 단계의 함으로 표현된다. 그러므로 간극 수압의 분포는 비선형임을 알 수 있다.

5.3.2.2 해석 알고리즘

강도 계수 K_1 은 생석회 파일의 체적 변형에 대하여 생석회와 지반과의 접촉면에서의 방사 방향 응력과 관련된 것이다. Chen & Law는 K_1 의 식을 재 유도하였으며 그것은 Holyman & Mitchell⁷⁾에 의해서 유도된 강도계수와 다른 결과를 보이고 있다. 그 차이는 원식의 유도 과정에서의 실수로 인한 것이다. 새로운 식은 생석회 파일 면에서의 응력 증분과 Δt 의 시간 간격 동안 생석회의 팽창에 의한 체적 변형을 증가와의 사이에서 다음 관계식을 이끌어 냈다.

$$\Delta\sigma_v(r_1, \Delta t) = \frac{C_1 \Delta\mu}{C_3[(1 + \mu_p C_1) \cdot C_5 \mu + (1 - \mu)] + \frac{1}{K_1}} \quad (8)$$

여기서 C_1 : 대기압하에서의 체적 팽창량, C_3 : 생석회의 압축성

C_5 : 생석회에 대한 소석회의 압축성의 비

μ : 생석회의 초기 체적에 대하여 물과 반응하는 생석회의 체적비

$\Delta\mu$: 생석회의 초기 체적에 대하여 Δt 동안 물과 반응한 생석회의 체적비

μ_p : 소화 반응의 단계에서 비구속 팽창에 대한 실제 팽창의 비

K_1 은 주변 지반의 강도 계수로 다음과 같이 주어진다.

$$K_1 = \frac{G\left(\frac{r_2^2}{r_1^2} + 1\right) + \lambda}{\frac{r_2^2}{r_1^2} - 1} \quad (9)$$

여기서 r_1 : 생석회 파일의 반경, r_2 : 파일의 영향 반경, λ : lame 상수

소화 반응이 일어난 후 시간 t 에서 총 방사 방향 응력 증가량은 다음과 같이 나타난다.

$$\Delta\sigma_r(r_1, t) = \sum_{i=0}^n \nabla\sigma_r(r_1, \Delta t) \quad (10)$$

지반이 항복하기 전이나 탄성 거동을 보이고 있는 동안 Δu 는 다음 식과 같다.

$$\Delta u = \frac{\Delta\sigma_r(r_1, t)}{G\left(\frac{r_2^2}{r_1^2} + 1\right) + \lambda} \cdot \left[\lambda + G\left(1 + \alpha \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2}\right) \right] \quad (11)$$

여기서, $\Delta\sigma_r(r_1, t)$: 생석회 파일 면에서 총 방사 방향 응력 증분, α : Henkel(1960)의 간극수압계수

만일 재하가 지반의 어느 부분에 항복을 일으키게 한다면 이 부분(소성 영역이나 항복 영역으로 알려진)에서의 항복 응력은 다른 방정식으로 주어질 것이다. 비배수 조건하에서 재하된 연약한 포화 점토에 대하여 Tresca Failure Criterion을 만족하는 탄·소성 지반 거동으로 가정하는 것은 타당하다. 이 규준은 원래 금속에 대한 항복조건으로 사용되고 발전되었다. 이 규준에 따르면 파괴는 한 점에서의 최대 전단응력이 한계치 k 에 도달할 때 발생한다.

한편, 소성 영역에 대하여서 Δu 는 다음 방정식과 같다.

$$\Delta u = S_u \cdot \left[\frac{\zeta^2}{1-2\nu} + 2 \ln\left(\frac{r_u}{r}\right) \right] \quad (12)$$

여기서, S_u : 지반의 비배수 전단강도

r_u : 생석회 파일 축에서 탄·소성 영역 경계로의 방사 방향 거리

r_u 의 값은 다음 식에서 계산된다.

$$\zeta = \sqrt{\frac{\Delta\sigma_r(r_1, T)}{S_u \cdot \left[G\left(\frac{r_2^2}{r_1^2} + 1\right) + \lambda \right]}} \quad (13)$$

여기서, ζ : r_u/r_2

ζ 의 값은 파일 벽체에서의 응력 수준의 크기에 따라 좌우된다는 것을 주목하여야 한다. 지반은 ζ 의 값이 r_2/r_1 의 비보다 더 작으면 항복하지 않을 것이다.

5.3.2.3 고찰결과 및 문제점 분석

Chen & Law의 식에 의한 생석회 파일 주변지반의 간극수압분포를 여러 인자들을 변화시켜 계산하였다. Chen식에 의한 생석회 파일 주변지반의 간극수압 분포의 특성은 대체로 모형실험에서 측정된 값과 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 특히, 간극수압에 영향을 미치는 여러 인자들 가운데 투수계수의 변화에 따라 간극수압 분포의 특성의 변화가 민감한 결과를 얻을 수 있다. 그리고 입력물성치를 Holyman식에 적용한 수치를 그대로 적용하였을 경우(표8 참조)의 간극수압 분포는 다음 그림 16과 같다. 반응기간과 최대 팽창이 일어나는 시간을 정확히 얻고 초기 간극수압의 수준으로 간극수압이 소산하는데 걸리는 시간이 얼마인지를 알아보기 위하여 x, y 축에 로그 스케일을 사용하였다.

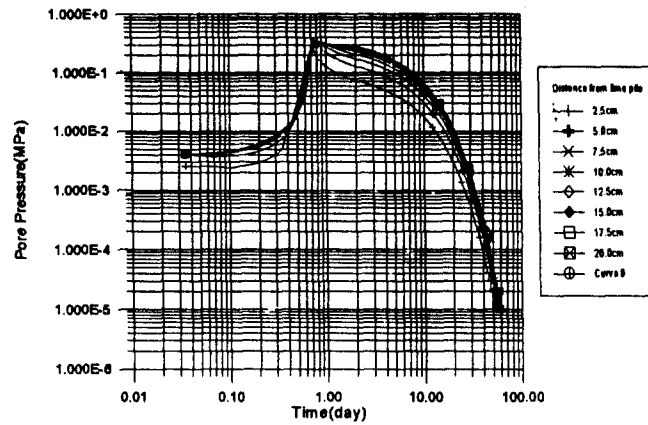


그림 16 Chen식에 의한 간극수압분포(입력물성치는 표8 참조)

그림16을 모형토조에서의 측정치와 비교하였을 경우 상당히 유사한 거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 하지만, 가장 큰 차이점은 실제보다 반응완료시간이 상당히 오래 지속되며 간극수압의 소산에도 상당한 기간이 소요됨을 알 수 있다. 예측치의 최대 간극수압은 약 0.35MPa로서 급변 시험에서의 예측치인 0.02MPa와는 상당한 차이가 있으나 Chen이나 Holyman의 실험치와는 비교적 비슷한 수치를 보이고 있다. 하지만 파일간극수압의 소산에 약 10~20일 정도가 소요되는 것은 실제보다 오래 소요되는 것으로 판단된다.

그리고, Holyman의 식이나 Chen의 식은 지반이 가지고 있는 초기 함수비의 영향을 고려하지 못하고 있다. 또한 생석회 가 지반내의 물과 반응이 일어난 후 생석회 파일 주변의 지반이 불포화되는 현상에 대하여 설명해 주지 못하고 있다. 또한 생석회 파일 내부의 간극수압을 반응이 시작하기 전(前)이나, 후(後)에 대하여 계속 0으로 고정시킴으로 인하여 Time step이 경과할수록 각 부분의 간극수압이 생석회 파일내의 간극수압의 영향을 받아 거의 0에 수렴하게 되는 현상을 보이고 있다(그림 16 참조). 상기와 같은 문제점에도 불구하고 Chen식에 의한 간극수압계산은 상당히 신뢰성이 있으므로, 생석회의 밀도와 생석회 파일의 직경 및 간격, 주변지반의 투수계수, 전단강도를 변화시켜 시간과 방사방향 거리에 따른 간극수압분포 특성을 검토하였다.

표 8 입력 DATA 산출근거

계 수	내 용	비 고
E(점토지반의 탄성계수)	0.5MPa	ref.
ν	0.4	ref.
G	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	cal.
K_i	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \frac{1}{1-(R_2^2/R_1^2)} = -0.0807$	cal.
K_h	① : $k_v=7.92 \times 10^{-7} \sim 4.12 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ② : $k_h=4.94 \sim 9.3 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ ③ : $k_v=6.1 \times 10^{-7} \sim 5.0 \times 10^{-5} \text{cm/s}$	test, cal.
m_h	① : m_v 는 평균 3.025MPa^{-1} ② : m_v 는 평균 0.283MPa^{-1}	test, cal.
C_h	$C_h = \frac{K_h}{\gamma} \cdot \frac{1}{m_h[2(1-\nu)]} = 4.6 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{sec}$	cal.
C_1	0.5~0.8	test
C_2	0.3	test

C_3	$\left[\frac{(\nabla V_{cso}/V_{cso})}{\nabla \sigma_t} \right] = 1 \sim 2 \text{MPa}$	test
C_5	0.2~0.5	test
R_1	5cm, 10cm	test
R_2	50cm	test
D	$K_1 \cdot \left(1 - \frac{R_2^2}{R_1^2} \right) 1.897 \text{MPa}$	cal.
P_0	$3.9 \times 10^{-3} \text{MPa}$	cal.
V_{im}	$2 \times 10^{-4} \text{m/sec}$	ref.

* cal. : 계산된 값, test : 실험에 의하여 산출된 값, ref. : 참고문헌에 의하여 산출된 값

① 생석회 파일의 밀도에 따른 특성

지난 분기까지 주로 생석회의 팽창특성에 대하여 연구를 시행하여왔다. 여러 가지 종류의 밀도를 정하여 각각에 해당하는 생석회의 팽창압, 팽창율, 압축율 등을 산정하였다. 그러한 시험결과를 기준으로 생석회의 팽창특성을 나타내는 파라미터인 C_1, C_2, C_3, C_5 를 다음 표 9와 같이 산정하였다. 표 9의 각각의 파라미터의 의미는 표 7에 제시하였다. 그림 17은 생석회 파일의 밀도에 따른 간극수압 분포 특성을 제시하였다.

표 9 생석회의 밀도에 따른 팽창특성 파라미터

Parameter	C_1	C_2	C_3	C_5
생석회 밀도				
1.1g/cm ³	0.5	0.3	2.0 MPa ⁻¹	0.2
1.3g/cm ³	0.7	0.3	1.5 MPa ⁻¹	0.2
1.5g/cm ³	0.8	0.3	1.0 MPa ⁻¹	0.2

생석회의 밀도에 따라서 최대 간극수압이 0.27~0.45MPa정도가 계산되었으며 생석회의 밀도가 클수록 최대 간극수압도 큰 것으로 나타났으나 현재 시험한 3가지 밀도의 경우는 가장 낮은 밀도의 경우가 제일 우수한 지반개량효과가 있다고 판단된다. 그 이유는 과잉간극수압이 클 경우는 파일과 파일사이의 지반의 용기를 야기할 수 있으며 과잉간극수압의 소산시간은 서로 비슷하기 때문이다.

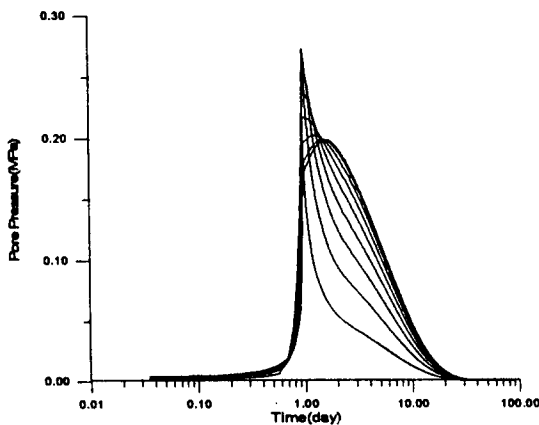


그림 17.a 생석회의 밀도 1.1g/cm³ 일경우 간극수압분포

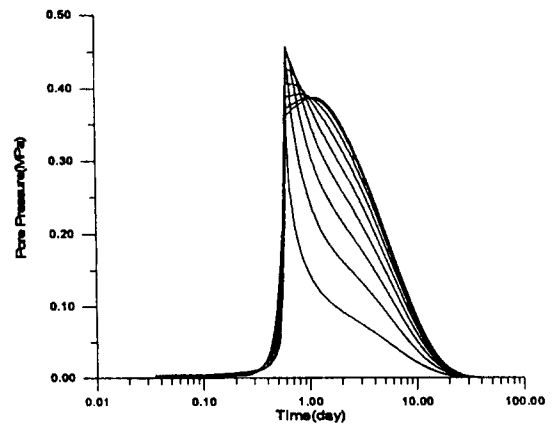


그림 17.b 생석회의 밀도 1.5g/cm³ 일경우 간극수압분포

② 주변지반의 투수계수의 변화에 따른 특성

주변지반의 투수계수는 생석회 파일을 시공하여 연약지반을 개량할 경우 그 개량효과에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 표 8을 참조하면 본 해석에 사용된 점토의 투수계수는 $5 \times 10^{-10} \text{m/sec}$ 으로 선정하였다. 이 값에 대하여 투수계수를 1/10, 1/50, 2배, 10배, 100배로 변화시켜 주변지반의 간극수압 분포 특성을 관찰하였다. 그림 18는 투수계수의 변화에 따른 간극수압 분포의 특성이다.

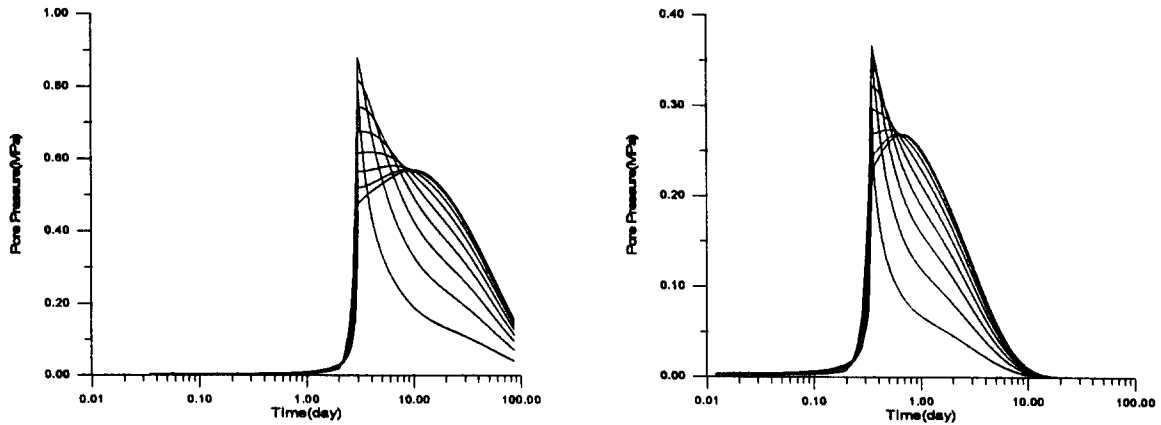


그림 18.a 투수계수가 원시료의 1/10일 경우 간극수압분포 그림 18.b 투수계수가 원시료의 2배일 경우 간극수압분포

상기의 결과를 보면, 생석회 파일 주변지반의 투수계수에 따라서 간극수압 분포양상이 크게 변함을 알 수 있으며 정확한 투수계수의 측정과 이에 따른 예측식의 보정을 수행한다면 좀 더 정확한 예측이 가능하리라 판단된다.

투수계수가 현상태의 100배정도인 $5 \times 10^{-8} \text{m/sec}$ 정도가 되면 실제적인 반응은 대체로 1일 이내에 모두 완료되며 이러한 현상이 실제 지반에도 적용된다면 상당히 빠른 기간내에 연약한 지반을 개량할 수 있을 것이다. 그러므로 대상지반의 투수계수는 생석회 파일을 사용하여 지반을 개량하는데 있어서 가장 중요한 요소이며 지나치게 낮은 투수계수를 가진 지반의 경우에는 생석회 파일을 시공시 생석회 파일과 지반과의 반응면에서 물의 공급이 원활하지 않으므로 파일간극수압의 소산속도가 상당히 저하되는 단점을 가지고 있음을 보여주고 있다.

6. 결론

6.1 혼합토

- 1) 생석회-모래 처리토의 일축압축강도는 생석회 혼합비가 5%일 때는 강도발현이 거의 나타나지 않으며, 동일 석회혼합비에서 L/S와 W/S가 같은 경우(L/S 15%와 W/S 15%일 때, L/S 30%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.
- 2) 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.
- 3) 생석회 처리토(해성점토)의 다짐시험결과 원지반에 비해 최대건조밀도는 낮아지고 최적함수비는 증가하는 경향이 나타났으며, 이는 입자가 세립화되고 입도가 균질해지기 때문임을 알 수 있다.

- 4) 생석회혼합 처리토의 함수비 저하효과는 생석회 배합비가 클수록 크게 나타났다.
- 5) 생석회혼합 처리토의 XRD, XRF분석 결과 생석회혼합 처리로 인한 산화물이 증가하였고 양생일이 지남에 따라 반응 생성물이 증가함을 알 수 있다.
- 6) 연구결과를 종합하여 보면, 생석회혼합 처리에 의해서 대상지반의 토질공학적 특성이 개선됨을 알 수 있다.

6.2 생석회 파일

- 1) 생석회파일 공법은 생석회의 팽창과 주변지반의 간극수압의 소산으로 인한 압밀효과를 생석회의 밀도에 따른 팽창압은 생석회의 밀도가 클수록 팽창압의 차이가 크게 나타났으며, 본 시험결과중 팽창압은 밀도 1.5g/cm^3 는 1.1g/cm^3 에 비해 2.88배가 큰 것으로 나타났다. 또한 생석회와 반응하는 물의 종류에 따른 팽창압의 차이는 중류수의 경우가 염수보다 약간 크게 나타났다. 향후 염도가 생석회의 팽창에 미치는 영향에 대해서 검토해 볼 계획이다.
- 2) 생석회파일 주변지반의 방사방향 거리에 따른 간극수압 변화를 측정하기위해 원형토조를 사용하여 시험한 결과, 생석회의 밀도 1.1g/cm^3 경우 초기 간극수압 3.9kPa에서 최대 약 20kPa까지 증가하였다. 향후 생석회파일의 밀도와 직경을 변화시켜 시험하여 해성점토에 최적이 되는 파일의 규모 및 밀도를 구하고자 한다.
- 3) 생석회파일 주변지반의 간극수압변화를 해석하기 위한 이론적 고찰결과 Holyman과 Mitchell(1983)이 제안한 식에 의하여 간극수압을 계산한 결과 생석회 파일주변의 간극수압을 잘 고려하지 못함을 알 수 있다. 그러나 Law와 Chen(1993)이 제안한 이론식을 사용하여 생석회 파일주변의 간극수압을 검토한 결과 실험에서 얻은 경향과 비슷한 경향을 나타내고 있으나 최대 간극수압에서 차이가 나는 것을 알 수 있다.
- 4) 생석회파일 주변지반의 간극수압에 영향을 주는 여러 파라미터들을 비교한 결과 지반의 투수계수가 간극수압의 생성과 소산에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.
- 5) 이상의 연구 결과로 볼 때 해성점토지반에서 생석회공법인 혼합처리 및 파일공법의 개량효과를 있음을 판단할 수 있다.

사사

본 연구는 삼성중공업의 연구비지원에 의해 수행되고 있는 연구성과의 일부임을 밝히며 이에 심심한 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- (1) T. Leonards, "Foundation Engineering", McGraw-Hill Book Company, pp. 398~437.
- (2) 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.
- (3) 千柄植, "最新 基礎工學", 建設研究社, 1988, 195~198.
- (4) 千柄植, "基礎地盤改良工法", 建設研究社, 1987, 145~148.
- (5) 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.
- (6) O.G.Ingles & J.B. Metcalf, "Soil Stabilization", Butterworths, Australia, 1972, pp.127~143.
- (7) A. Holyman, J. K. Michell, "Assessment of Quicklime Pile Behavior", Improvement of Ground, Vol 2, 1983, pp.897~902.
- (8) K. T. Law, P. A. Chen, "Pore Pressure Change in Soft Soils Improved by Lime-Fly Ash Piles", 11Th Southeast Asian Geotechnical Conf, 1993, pp. 363~367.
- (9) Kuroda E., Ohashi Y. & Tsuyoshi M., "Expansive Pressure of Quick Lime Piles", Research Institute of Technology, Tokyuu Construction Co, Ltd, Japan, 1980, pp. 1~7.