생석회파일에 의한 연약지반개량효과
The Improvement Effects of Soft Ground by Quick Lime Pile

천병식* 고갑수** 장은석*** 임지섭*** 이용한***
Chun, Byung-Sik Ko, Kab-Soo Chang, Eun-Seok Lim, Ji-Sub Lee, Yong-Han

ABSTRACT

This paper is a study on the improvement effects by quick lime pile through theoretical analysis and in-situ construction test.

Effects of strength increase is studied to verify the improvement effects of soft ground arounding quick lime pile. First, engineering characteristics of quick lime and ground was studied, in the second place, laboratory test(consolidation test, triaxial compression test) and in-situ test(portable cone penetration test, vane test) were performed for verification of strength increase of adjacent ground. Finally, the results of in-situ test were compared with those of theorecal study.

From in-situ test results, strength at 28th curing days(6.11~6.55t/m^2) was twice as great as strength before improvement(3.06t/m^2) and was slightly greater than theoretical value(4.95t/m^2).

1. 서론

최근 우리 나라는 협소한 국토의 효과적인 개발에 많은 투자를 하고 있으며 이에 따른 해안의 준설·매립 등 연약지반 개량의 필요성이 날로 급증하고 있다. 따라서 지금까지의 연약지반 개량재보다 공학적으로 우수한 특성을 지닌 개량재의 개발이 요구되고 새로운 형태의 지반개량 기술도입의 필요성을 절감하게 되었다.

생석회파일에 의한 개량효과 검증을 위하여 지반강도 증가에 있어서는 생석회파일 주변지반에 대한 강도증가를 실내역학시험 및 현장시험을 통하여 측정하여 기존의 생석회파일에 의한 함수비 저하, 전단강도 증가 이론과 비교·분석하였다. 그리고 압밀현상 분석을 위하여 생석회파일 주변지반의 간극수압을 측정하여 수치해석 결과와 비교·검토하였다.

* 한양대학교 교수, 정회원
** 한양대학교 박사과정
*** 한양대학교 석사과정

2. 본문

2.1 생석회의 특성

단양산 생석회의 특성분석을 위하여 비중, 입도분석, 화학조성분석시험을 실시하였으며 비중은 3.06으로 나타났으며 입도분포 및 화학조성은 표 1, 2와 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
잔류량 (%)	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

표 2 생석회의 화학조성시험

구 분	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	Ig-Loss	SUM
단양(%)	2.0	0.6	0.4	92.2	1.8	0.02	0.06	2.33	100

2.2 생석회의 팽창량 측정시험

생석회의 지반내에서의 팽창정도와 방사방향 팽창을 비교하기 위하여 기존의 압밀시험장치를 이용하여 1차원 팽창(상향팽창, 하부 및 측방향 구속)시험을 하였다. 생석회의 건조단위중량은 1.4 g/cm^{3}이다. 단양산 생석회의 팽창량 결과는 그림 1과 같이 최대수직변위는 수직응력이 0.5kg/cm^{2}일 경우에 11.20 mm로서 팽창율은 56.00%로 측정되었다.

2.3 생석회의 팽창압 측정시험

밀도 1.4 g/cm^{3}을 갖는 단양산 생석회를 생석회의 수직방향 팽창압을 측정하였고 그림 2와 같이 최대 팽창압은 11.6 kg/cm^{2}으로 나타났다.

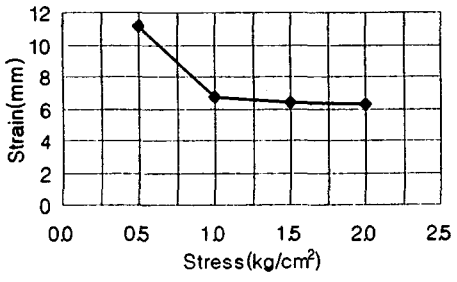

그림 1 생석회 팽창량 시험 결과

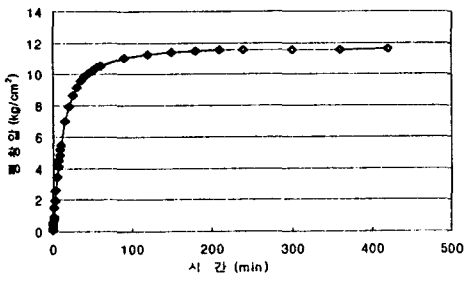

그림 2 시간에 따른 생석회의 팽창량

2.4 대상지반의 특성

본 연구의 시험시공 대상지반에 대한 특성은 표 3과 같다.

표 3 대상지반의 물리·역학적 특성

구 분	자연 함수비 (%)	통일 분류	비중	액성 한계 (%)	소성 한계 (%)	소성 지수	C_c	P_c (kg/cm^2)	c (kg/cm^2)
0.5m~1.2m	41.35	ML	2.65	32.49	24.12	8.37	0.223	0.46	0.38
1.5m~2.2m							0.183	0.5	0.41

2.5 현장시험

2.5.1 콘관입시험

콘관입시험은 원지반상태와 더불어 생석회 파일 시공 후 양생일에 따른 콘지수(q_c)의 변화를 측정하여 지반개량효과를 확인하였다.

콘은 표층으로부터 1.35m 깊이까지 관입하였으며 시공일로부터 7일 간격으로 생석회파일 중심에서의 거리별로 실시하였다.

생석회파일 중심에서의 거리(50cm, 35cm) 및 양생일에 따른 콘관입시험 결과는 다음 그림 3~4와 같다.

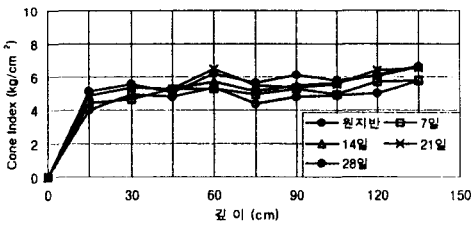

그림 3 콘지수(50cm 지점)

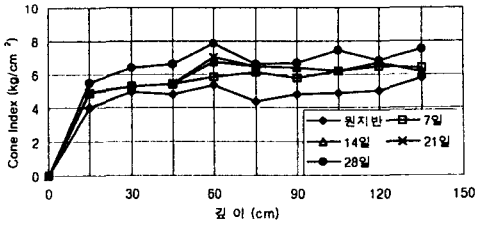

그림 4 콘지수(35cm 지점)

2.5.1 베인시험

현장 베인시험은 콘관입시험 및 삼축압축시험과 비교 분석하기 위해 생석회파일 중심에서의 거리 및 양생일별로 실시하였으며 그 결과는 그림 5, 6과 같다.

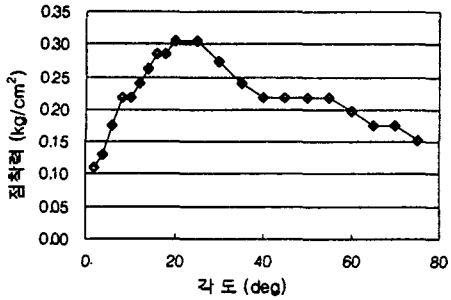

그림 5 원지반의 전단강도

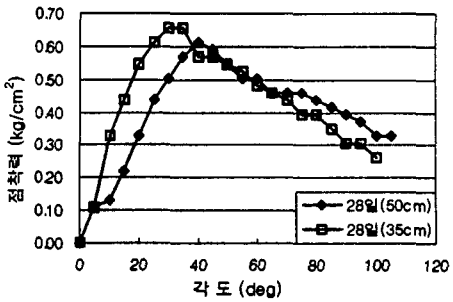

그림 6 거리별 28일 강도

그림 5, 6의 결과를 요약하면 표 4와 같다.

표 4 베인시험 결과

구 분	원지반	28일 강도	
		50cm	30cm
전단강도(kg/cm²)	0.306	0.611	0.655

3. 고찰

3.1 함수비 저감효과

본 절에서는 함수비 저감효과에 대한 이론치와 현장 시험시공에서 계측한 실측치와의 비교를 통하여 생석회 파일이 주변지반의 함수비 저하에 미치는 실제 영향 및 함수비 저하정도에 대한 분석을 실시하였다.

이론식에 의한 함수비 저하량 산정시 필요한 파라미터들의 대부분은 현장 및 실내시험에서 구한 수치를 적용하였으며 현장이나 실내시험으로 구할 수 없는 수치들은 기존의 문헌을 토대로하여 결정하였다.

표 5 함수비 저하량 예측에 적용된 파라미터

기호	설 명	물성치	주석
h	생석회말뚝의 소화흡수반응계수	0.28	이론치
n′	소화후 말뚝의 간극율	0.65	이론치
ε_v	겉보기 체적 팽창율	0.80	이론치
S_r'	평형상태 말뚝의 간극수 포화도(%)	85	이론치
W_0	지반의 초기함수비(%)	41.35	실험치
γ_t	지반의 단위체적중량(t/m³)	1.87	실험치
a	생석회 말뚝의 체적혼입율	0.0324	실험치
γ_c	생석회 말뚝의 단위체적중량(t/m³)	1.4	실험치
γ_w	물의 단위체적중량(t/m³)	1	이론치

표 5의 물성치를 사용하여 함수비 저하량을 계산하면 다음과 같다.

$$a = \frac{\pi d^2}{4s^2 - \pi d^2} = \frac{\pi \times 20^2}{4 \times 100^2 - \pi \times 20^2} = 0.0324$$

$$\Delta W = \frac{1 + (W_0/100)}{\gamma_t} \cdot a \cdot \left(h \cdot \gamma_c + n' \ (1 + \varepsilon_v) \frac{S_r'}{100} \cdot \gamma_w \right)$$

$$= \frac{1 + \frac{41.35}{100}}{1.87(t/m^3)} \times 0.0324$$

$$\times \left(0.28 \times 1.4(t/m^3) + 0.65 \times (1 + 0.80) \times \frac{85}{100} \times 1(t/m^3) \right)$$

$$= 0.034$$

$$\therefore \Delta W(\%) = 0.034 \times 100(\%) = 3.40(\%)$$

함수비 저하에 대한 이론치와 실측치를 비교해 표 6과 같다. 결과를 보면 생석회 파일의 28일 양생후 함수비 저하량은 현장의 실측값과 이론에 의한 예측값이 거의 비슷함을 알 수 있다.

표 6 이론과 실측에 의한 함수비 비교

초기 함수비(W_0)	28일양생	ΔW(실측값)	ΔW(이론값)
41.35(%)	38.05(%)	3.30(%)	3.40(%)

3.2전단강도 증가 효과

3.2.1 현장시험에 의한 분석

생석회파일에 의해 개량지반의 전단강도 증가를 생석회파일 중심으로부터 50cm와 35cm 지점에 대하여 콘관입시험 결과인 콘지수를 이용한 전단강도와 베인시험 결과를 비교하면 그림 7, 8과 같다.

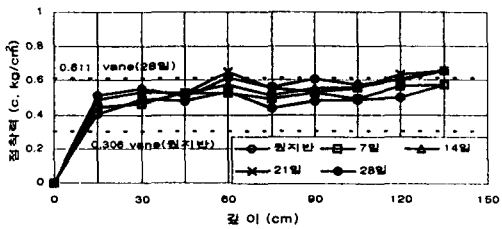

그림 7 전단강도비교(50cm 지점)

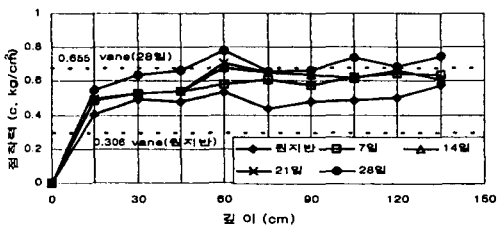

그림 8 전단강도 비교(35cm 지점)

3.2.2 이론식과 실측값과의 비교 · 분석

이론식 계산에 필요한 여러 Parameter들 중 강도증가계수 m의 값은 시험 대상지반이 충적토 지반

이므로 m=0.3(三笠正人 外, "各種試驗方法によるCu/p値の比較", 第13回 日本土質工學研究發表講演集, 1978)의 값을 사용하였고, 나머지 값들은 실내 및 현장실험(베인시험)에서 얻은 자료를 이용하였다. 따라서 이론식에 사용된 파라미터는 표 7과 같다.

표 7 전단강도 증가 이론식에 적용된 특성값

기호	파라미터의 의미	적용 수치	비고
m	강도증가계수	0.3	이론치
C_{u0}	초기점착력(t/m^2)	3.06	실측치
P_c	원지반의 선행압밀하중(t/m^2)	4.6	실측치
C_c	원지반의 압축지수	0.233	실측치
ΔW	최종 함수비 저하량(%)	3.30	실측치

이론식에 의한 전단강도는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$C_u' = C_{uo} + m \cdot p_c \left[\exp\left(2.3 \cdot \frac{G_s \cdot \Delta W}{100 C_c}\right) - 1 \right]$$

$$= 3.06(t/m^2) + 0.3 \times 4.6(t/m^2) \times \left[\exp\left(2.3 \times \frac{2.65 \times 3.30}{100 \times 0.233}\right) - 1 \right]$$

$$= 4.95(t/m^2)$$

표 7의 물성치를 이용해 구한 전단강도 증가에 대한 이론값과 현장 베인 전단시험을 통해 얻은 실측값을 비교해보면 초기의 전단강도는 $3.06t/m^2$이며 28일 양생후의 실측 전단강도는 50cm 지점에서는 $6.11t/m^2$, 35cm 지점에서는 $6.55t/m^2$으로 측정되었으며 이론식에 의한 전단강도는 $4.95t/m^2$으로 분석되었다. 실측 전단강도와 이론 전단강도의 차이값은 1.16~1.60t/m^2으로 나타났으나, 양생일이 경과할수록 비슷한 값으로 수렴할 것으로 보인다.

4. 결론

지금까지의 생석회파일에 의한 연약지반의 개량효과에 대하여 현장시험시공을 통하여 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 시험대상 생석회의 비중은 3.06이며 화학조성분석결과 CaO 함유율이 92.2%인 고품질의 생석회로서 지반개량재로서 적절한 것으로 판단된다.

(2) 시험대상지반에 대한 물리·역학시험 결과 대상지반의 비중은 2.65, 액성한계는 32.49%, 소성한계는 24.12%, 소성지수는 8.47%로 측정되었으며 입도분석 결과 ML로 분류되었다. 또한 0.5~1.2m, 1.5~2.2m 두 지점에서 UD sample을 채취하여 압밀시험과 삼축압축시험(UU Test)를 실시한 결과 0.5~1.2m의 경우 압축지수(Cc)는 0.223, 선행압밀하중(Pc)는 0.46 kg/cm^2, 점착력(c)는 0.38kg/cm^2, 1.5~2.2m 의 경우 압축지수(Cc)는 0.183, 선행압밀하중(Pc)는 0.50 kg/cm^2, 점착력(c)는 0.41kg/cm^2로 측정되었다.

(3) 생석회파일 시공 후 28일 양생된 생석회파일 주변지반의 함수비 저하량은 3.30%로 측정되었으며

이론식에 의한 함수비 저하량(3.40%)과 비교적 비슷한 값을 보였다.

(4) 생석회파일 시공 후 28일 양생된 생석회파일 주변지반의 전단강도는 초기 전단강도 3.06t/m^2과 비교하여 생석회파일 중심으로부터 50cm 지점의 경우 6.11t/m^2, 35cm 지점의 경우 6.55t/m^2으로 약 2배 증가하였으며 전단강도 증가 이론식에 의한 값(4.95t/m^2)과는 1.16~1.60t/m^2 정도의 차이를 보였다.

(5) 생석회파일에 의한 지반개량효과를 검증하기 위해 함수비 저하, 전단강도 증가, 간극수압분포 등의 연구결과 지반개량효과는 기존의 이론식과 비교적 잘 일치하였다. 그러나 간극수압의 경우 좀 더 정확한 간극수압의 측정을 통하여 생석회파일에 의한 압밀효과 분석이 필요할 것이라 판단된다.

참고문헌

1. 천병식(1997년), "건설기술자를 위한 기초공학", 건설연구사, pp108-184
2. 三笠正人 外(1978), "各種試驗方法によるCu/p値の比較", 第13回 日本土質工學研究發表講演集
3. 眞田英夫 外(1989), "生石灰パイルの長期耐久性", 第24回 日本日本土質工學研究發表講演集
4. 田中政典 外(1993), "生石灰杭工法で改良さむた地盤土質試驗成果", 第24回日本土質工學研究發表會
5. 石田 宏(1978), "生石灰パイルによる軟弱地盤の改良效果", 日本土質工學研究發表會
6. 日本材料學會(1982), "生石灰パイル工法", 地盤改良工法便覽
7. B. Broms, U. Anttikoski, "Soil Stabilization-Lime Columns", Improvement of Ground, Vol 3
8. H. H. Chew, T. Takeda, Kichikawa(1993), "Chemico Lime Pile Soil Improvement Used for Soft Clay Ground", 11Th Southeast Asian Geotechnical Conf
9. S. Narasima Rao, G. Rajasekaran, C. V. Prsad(1993), "Lime Coulumn Method of Stabilization in a Marine Clay", 11Th Southeast Asian Geotechnical Conf