

# 서해 점토지반에서 생석회 파일 타설에 의한 지반개량효과

천병식\*, 허웅\*\*, 최상훈\*\*\*, 이대동\*\*\*, 김준섭\*\*\*, 김용규\*\*\*

## 요 지

생석회에 의한 지반개량공법은 일반적으로 연약한 점성토 지반에 대해 적용되어져 왔으며, 생석회 공법은 주로 혼합처리의 형태와 파일의 형태로 사용되어져왔다. 생석회 파일에 의한 지반개량은 유럽이나 일본 등지에서 발전하여 많은 시공사례가 있는 공법이나 국내에서는 거의 시공되지 않은 실정이어서 생석회 파일에 의한 지반의 개량효과나 경제성 등에 대한 문제는 많은 지반공학자들의 관심을 끌기에 충분하다.

본 연구는 우선 생석회 파일에 의한 주변지반의 개량효과에 대하여 이론적인 분석을 실시하고 생석회 자체에 대한 특성분석과 현장시험 대상지반에 대한 공학적 특성에 대한 분석을 시행하고 생석회 파일의 개량효과를 현장시공을 통하여 전단강도나 함수비 등과 같은 실용적인 측면에 대하여 검증하였다.

본 연구를 통하여 우리는 대상지반의 지하수위가 상당히 높은 지반임에도 불구하고 생석회 파일을 타설한 주변지반의 함수비 저하량이나 전단강도 증가가 이론식에 근접할 정도로 주변지반의 개량 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

## 1. 서론

우리 나라는 지형특성상 삼면이 바다로 둘러 싸여 있으며 국토의 3분의 2가 산지로 구성되어 있어 국토의 효율적인 이용을 위하여 해안지역의 개발의 필요성이 점차 증대되고 있다. 이와 같은 실정에서 최근의 영종도 신 국제 공항 건설, 서해안 고속도로, 서남해안 개발 등 준설·매립에 의한 대규모 국토개발사업이 막대한 비용의 투자로 시행되고 있다. 특히 해안도시인 인천지역에서는 해안을 준설·매립하여 개발하는 신도시개발계획이 시행계획에 있거나 이미 시행되고 있는 실정이다. 이와 같은 해안지역의 개발은 모두가 막대한 비용으로 준설·매립하고 초연약 지반을 개량하는 사업으로서 사업의 성패는 연약지반 개량의 성패에 달려있다고 해도 과언이 아니다.

한편, 우리 나라의 연약지반 처리 공법은 주로 치환공법, 재하공법, 탈수공법(Vertical

\* 한양대 교수  
\*\* 감사원 감사관  
\*\*\* 한양대 석사과정

Drain공법), 진동다짐공법, 배수공법(Well Point공법), 혼합처리 공법 등이 있으며 이들 공법중 시공실적이 많은 공법이 있는 반면, 생석회를 활용한 지반개량공법과 같이 기술개발 및 연구실적, 시공실적이 전혀 이뤄지지 않은 공법도 있다.

생석회 파일공법은 연약한 포화점토의 개량을 위해서 외국에서 보편적으로 시행되고 있는 공법으로서 본 연구에서는 생석회 파일에 의한 주변지반의 개량효과에 대한 이론적 고찰과 함께 현장계측을 통하여 실질적 개량효과를 파악하고자 한다.

생석회 파일의 시험시공 대상부지로서 경기도 안산시 시화공단 우수지를 선정하여 총 9공에 생석회를 투입하여 경과일수에 따른 생석회 파일 주변지반의 전단강도 및 함수비 변화를 관찰하고 기존의 이론식들과의 비교를 통하여 이론식의 적정성을 구하고자 하였다.

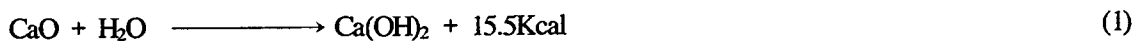
## 2. 생석회(Quick-Lime) 파일의 原理

생석회 파일과 다습한 연약지반이 만나게 되면 연약한 지반의 특성에 영향을 주는 다음과 같은 여러 과정이 발생하게 된다(그림 1 참조).

- (1) 생석회를 소화시키기 위한 물의 흡수과정
- (2) 소화반응에 의한 열의 발생과정
- (3) 소화에 의한 생석회의 팽창으로 인한 횡방향 지반압축과정
- (4) 생석회의 팽창에 의한 파일주변 環形부위의 경화진행과정

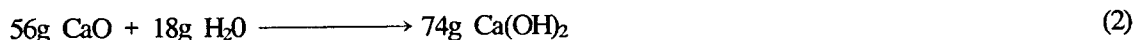
생석회와 지반과의 반응 과정은 동시에 진행하며 이에 대한 완전한 이해는 대단히 복잡하므로 해석상 어느 정도의 가정을 필요로 한다.

우선, 생석회의 소화반응은 다음과 같은 화학반응식으로 기술될 수 있다.

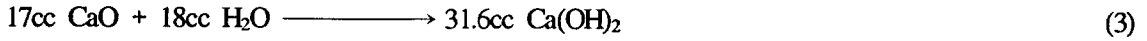


파일근처의 지반의 온도는 열이 발생함에 따라 상승하고 온도경사(temperature gradient)는 지반과 생석회의 비열과 열전도계수에 따른 반응속도에 의존한다. 이것은 결과적으로 수분의 증발을 초래하며 수분의 증발은 지표면에서만 가능하고 생석회 파일의 소화반응은 약 2일~10일정도가 소요되므로 온도의 상승은 안정 처리될 지반근처에 제한적으로 작용함을 알 수 있다.

생석회의 소화작용을 동반한 팽창량은 화학량을 계산하여 대략적으로 추정할 수 있다.



체적에 따른 반응식은 다음과 같다.



식 (3)으로 보아 생석회는 소화후 체적이 약 85%정도 증가함을 알 수 있으며 현장의 생석회를 소화시키기 위한 상대적인 수량은 생석회의 중량에 대하여 0.3을 얻을 수 있다 (식 2참조).

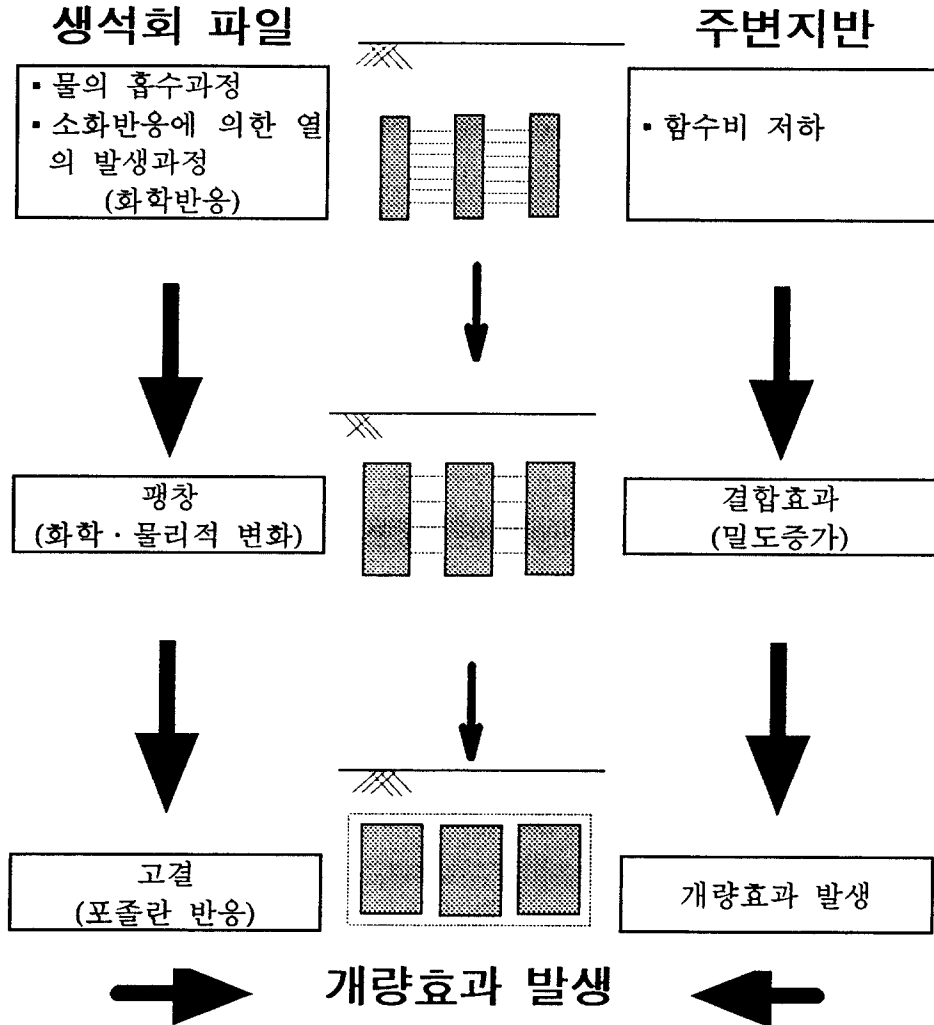


그림 1. 생석회 파일의 원리

### 3. 생석회 파일에 의한 주변지반의 개량효과에 대한 예측이론

생석회 파일공법은 생석회를 지반중에 타설하여 생석회의 消化, 吸水에 의한 脫水효과, 파일의 膨脹에 의한 壓密효과 및 파일 자체의 강도에 의한 지지력 증가, 침하저감 효과 등의 지반개량을 목적으로 한다.

본 장에서는 상기와 같은 생석회 파일에 의한 지반개량효과를 검증하기 위하여 기존의 지반개량효과에 대한 이론을 분석하였으며 향후 실시할 파라미터들에 대한 실내시험 및 현장시험에 대한 기초자료로서 활용가능성을 분석하였다.

### 함수비 저하량 예측 이론

생석회 파일은 북유럽이나 인도, 일본 등지에서 지금까지 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 특히 생석회 파일에 의한 주변지반의 개량정도를 예측할 수 있는 이론식은 주로 일본에서 연구되어 왔다. 그 가운데 石田宏(1973)이 제안한 다음 식이 생석회 파일의 설계 시 주로 이용되어져 오고 있다.

연약지반 중에 생석회 파일을 시공했을 때의 消化吸水 반응에 의한 지반의 평균적인 함수비 저하량  $\Delta W_h$ 는 다음 식과 같다.

$$\Delta W_h = \frac{1 + (W_o/100)}{\gamma_t} \cdot a \cdot h \cdot \gamma_c \quad (4)$$

여기서,

- $W_o$  : 지반의 초기함수비(%)                       $\gamma_c$  : 생석회 파일의 단위체적중량( $g/cm^3$ )  
 $\gamma_t$  : 지반의 단위체적중량( $g/cm^3$ )               $h$  : 생석회 파일의 소화흡수계수  
 $a$  : 생석회 파일의 체적혼입율, 또는 생석회 파일의 타설면적비

여기에서  $a$ 의 값은 생석회 파일의 시공방식에 따라 다른 값을 가지며 시공방식이 케이싱의 압입에 의한 타설이면 생석회 파일 1개가 분담하는 지반의 유효단면적에 대한 파일의 면적비로 나타내고 오거 보링에 의한 타설이면 보링된 흙의 면적을 제외한 지반의 유효단면적에 대한 파일 한 개의 면적비로 나타낼 수 있으며, 이들을 요약하면 다음 표1과 같다.

표 1. 생석회 파일 시공방식에 따른  $a$ 값의 비교

계수	시공방식	케이싱 압입 방식	오거 보링 방식
$a$		$\frac{\pi d^2}{4S^2}$	$\frac{\pi d^2}{4S^2 - \pi d^2}$

$d$  : 생석회 파일의 직경,  $S$  : 생석회 파일의 중심거리

식 (4)에서 구해진 함수비 저하량은 생석회 파일의 소화흡수만을 고려한 것이며, 파일이 절대 건조상태에 있는 것을 전제조건으로 하고 있다. 파일의 소화흡수과정 외에도 지반의 간극수는 평형상태에 이를 때까지 파일간극에 흡수되는 데, 이 현상에 의한 지반

의 함수비 저하량  $\Delta W_s(\%)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\Delta W_s = \frac{1 + (W_o/100)}{\gamma_t} \cdot a \cdot n' \cdot (1 + \epsilon_v) \cdot \frac{S_r'}{100} \cdot \gamma_w \quad (5)$$

여기서,

$n'$  : 소화후의 파일간극율

$\epsilon_v$  : 겉보기 체적팽창율

$S_r'$  : 흡수 후 평형상태에서의 파일의 포화도(%)

$\gamma_w$  : 물의 단위체적중량( $g/cm^3$ )

최종적인 지반의 평균함수비 저하량은 식(4)와 식(5)의 합으로 표시되며 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta W_h + \Delta W_s \\ &= \frac{1 + (W_o/100)}{\gamma_t} \cdot a \cdot \left( h \cdot \gamma_c + n' \cdot (1 + \epsilon_v) \cdot \frac{S_r'}{100} \cdot \gamma_w \right) \end{aligned} \quad (6)$$

### 剪斷強度增加에 관한 理論

생석회 파일에 의한 전단강도 증가량 예측이론은 원칙적으로 대상지반이 포화, 정규 압밀상태에 있는 점성토로 생각하고 생석회 파일의 소화흡수가 완료된 상태만을 고려하고 있다.

우선 생석회 파일이 주변지반의 물과 반응하여 생기는 함수비의 저하로부터 식(7)과 같은 간극비 저하가 발생한다.

$$\Delta e = G_s \cdot \frac{\Delta W}{100} \quad (G_s : \text{토립자의 비중} \quad \Delta e : \text{간극비 저하량}) \quad (7)$$

그러므로 생석회 파일에 의해 개량된 후의 간극비  $e'$  은 초기간극비  $e_o$  를 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e' = e_o - G_s \cdot \frac{\Delta W}{100} \quad (8)$$

원지반의 불교란(不攪亂)시료에 대한 압밀곡선과 개량된 지반의 간극비  $e'$  에 대응하는 압밀하중  $p'$  를 구하여 선행압밀하중  $p_c$  와의 차를 구하면 외견상의 증가압밀하중  $\Delta p$  를 산출할 수가 있다. 자세한 사항은 그림 2에 제시하였다.

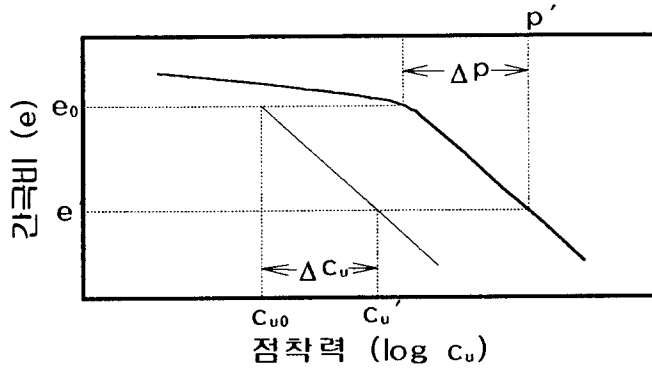


그림 2 압밀곡선에 의한 개량효과의 추정

여기에서 개량 후의 비배수전단강도  $C_u'$  는 이  $\Delta p$ 를 이용하여 다음 식으로 추정된다.

$$C_u' = C_{u0} + m \cdot \Delta p \quad (C_{u0} : \text{원지반의 비배수 전단강도}, m : \text{강도증가계수}) \quad (9)$$

즉, 불교란(不攪亂) 포화점성토에서는 함수비와 비배수 전단강도  $C_u$ 의 대수가 직접 관계를 이루고 압밀곡선  $e \sim \log p$ 의 소성압밀부분과 평형관계에 있다. 따라서 소성압밀 부분의 경사를 나타내는 압축지수  $C_c$ 에 의하여 간극비와 압밀응력의 관계에서 개량지반의 압밀상태를 추정하고 선행압밀하중  $p_c$ 와의 차(差)에서 생석회 파일 타설에 의한 지반 개량에 유효한 응력  $\Delta p$ 를 산출한다. 이들의 관계식을 열거하면 다음과 같다.

$$e_0 - e' = C_c \cdot \log(p' / p_c) \quad (10)$$

$$p' = p_c \cdot \exp(2.3 \Delta e / C_c) \quad (11)$$

$$\Delta p = p_c \left[ \exp\left(\frac{2.3 \Delta e}{C_c}\right) - 1 \right] \quad (12)$$

$$\therefore C_u' = C_{u0} + m \cdot p_c \left[ \exp\left(2.3 \cdot \frac{G_s \cdot \Delta W}{100 C_c}\right) - 1 \right] \quad (13)$$

여기서,

- |  |                     |
|--|---------------------|
| $e_0$ : 원지반의 간극비                             | $e'$ : 개량지반의 추정간극비  |
| $\Delta e$ : $e_0 - e' = G_s \cdot \Delta W$ | $p'$ : 개량지반의 압밀응력   |
| $p_c$ : 원지반의 선행압밀하중                          | $\Delta p$ : 압밀증가응력 |

압밀에 의한 점착력 증가계수  $m (= C_u/p)$ 은 정규압밀상태의 불교란시료토에 대하여 비배수 조건으로 전단시험을 실시한 경우, 어떠한 시험방법이라도 큰 차(差)없이  $m=0.28$

~0.33 이라고 보고되어 있으므로 충적토 지반에서는 설계시에 보통  $m \approx 0.3$  이라고 가정하여 사용한다.

#### 4. 室内試驗

**생석회의 特性分析** :국내의 석회석의 주산지는 강원도의 삼척 등지와 충남의 논산·단양 등지이며 본 연구에서 시험대상으로 정한 생석회는 충남 단양산으로 삼광석회 산업에서 생산된 생석회를 사용하였다. 본 연구에서는 우선 생석회자체의 공학적 특성에 대한 여러 시험을 실시하였다.

**생석회의 比重試驗** :생석회의 비중시험은 일반 흙의 비중시험과 달리 시멘트의 비중시험방법을 사용하여 측정하였으며 측정에는 비중이 0.83인 등유를 사용하였다. 일반적으로 외국에서 사용되는 생석회의 비중은 약 3.3정도이며 소석회의 비중은 약 2.2정도로 참고문헌에서 조사되었다. 연구대상 생석회의 비중은 3.06으로 측정되었으며 이 값은 외국의 생석회에 비하여 조금 낮은 편에 속함을 알 수 있다.

**생석회의 化學組成分析** :화학조성시험은 생석회의 풍화도 및 생석회의 품질을 판별할 수 있는 기준을 제시하여 준다. 다음 표 2는 연구대상 생석회의 화학조성을 수행한 결과이다.

표 2 생석회의 화학조성시험

시료종류	SiO <sub>2</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ig-Loss	SUM
단양	1.8	0.5	0.3	93.2	1.8	0.01	0.04	2.30	100

단위 : %

위의 시험결과를 분석하면 연구대상 생석회는 CaO함유율이 93.2%로서 일본의 공업용생석회의 분류기준에 의하면 특호에 속하는 양질의 생석회로 분류됨을 알 수 있다.

#### 생석회의 X-ray회절분석 및 SEM촬영

:시험대상 생석회에 대한 X-ray회절분석을 시행하였으며, 시험결과 대상생석회는 그림과 같이 잔 피크(peak)가 거의 나타나지 않는 것으로 보아 불순물이 거의 없는 순수한 생석회인 것으로 판단된다(그림 3 참조).

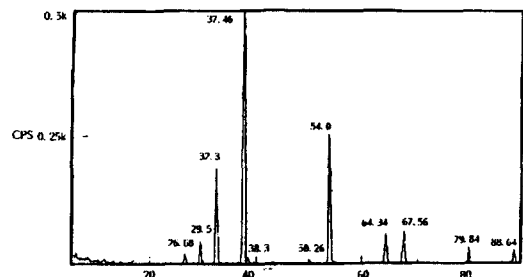


그림 3 시험대상 생석회의 X-ray회절분석

생석회만의 SEM(Scanning Electron Microscope)촬영을 통하여 생석회의 품질 및 생석회의 입자크기를 조사함으로써 지반 내에서의 반응성을 확인할 수 있다. 다음 그림 4는 연구대상 생석회의 SEM촬영결과이다.

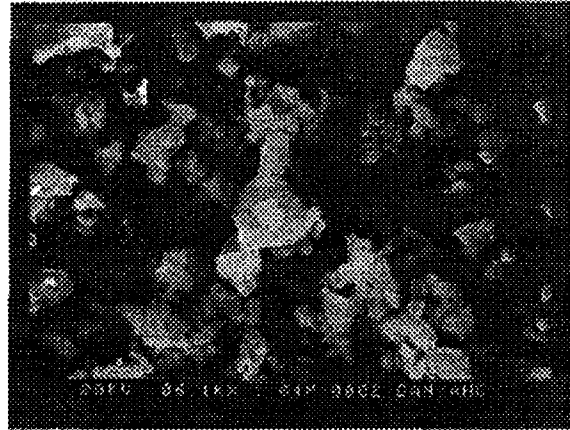


그림 4 시험대상 생석회의 SEM촬영결과

**생석회의 粒度分析** :시험대상 생석회에 대한 입도 분석을 실시하였으며 그 시험결과는 다음 표 3에 제시하였다.

표 3 시험대상 생석회의 입도 분포

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

**생석회의 膨脹量 測定試驗** :생석회의 지반 내에서의 팽창정도를 방사(放射)방향 팽창과 비교하기 위하여 기존의 압밀시험장치를 이용하여 1차원 팽창(상향팽창, 하부 및 횡방향 구속)시험을 실시하였다.

본 시험은 기존의 압밀 시험장치를 이용하여 수행하였으며 생석회와 반응하는 물은 증류수와 4%의 염수를 사용하여 실시하였으며, 생석회의 건조단위중량은  $1.334\text{g/cm}^3$ 으로 시험을 실시하였다. 생석회의 팽창율은 초기 생석회의 두께(1cm, 1.5cm)에 대하여 물과 반응한 후의 팽창량에 대한 비로서 나타내었다.

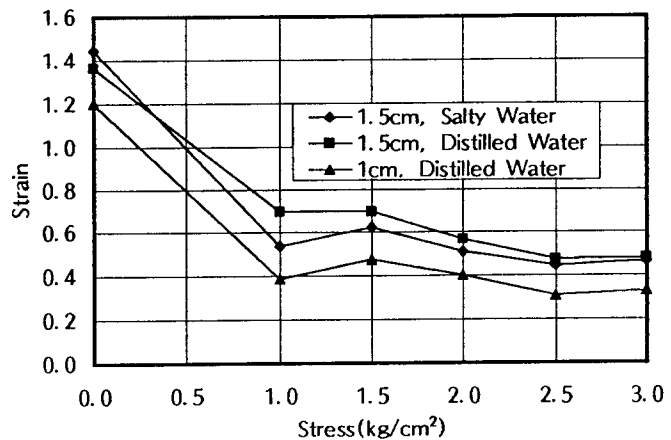


그림 5 수직응력에 따른 수직방향 팽창량의 변화 (두께 1cm, 1.5cm의 경우)

시험결과 상재하중이 없는 자유팽창시 두께 1cm일 경우 변형율은 1.2로 측정되었으며 두께 1.5cm의 경우는 1.4 정도로 측정되었다. 외국의 참고문헌의 경우는 일반적으로 약 1.5~1.7정도의 범위로 보고



되었다. 본 시험의 경우가 외국의 경우보다 팽창율이 작은 이유는 변형량 측정을 위한 판의 하중이 상당히 작용한 것으로 판단된다. 또한 그림 5를 참고하면 생석회 파일의 상부는 약 1.4배정도 팽창하게되나 생석회 파일이 약 15m의 깊이로 타설하게 될 경우 생석회 파일의 하단부는 오히려 원래 직경의 1/2정도로 수축함을 알 수 있다.

**생석회의 팽脹壓 測定試驗** :생석회의 팽창압을 측정하기 위하여 지름 6cm, 높이 10cm의 모듈드를 제작하여 생석회의 수직방향 팽창압을 측정하였다.

대상시료인 생석회의 건조단위 중량은 1.1, 1.3, 1.5g/cm<sup>3</sup>으로 변화시켰으며 사용수는 증류수와 염수를 사용하였다. 시간에 따른 생석회의 팽창압을 그림 6과 7에 제시하였다.

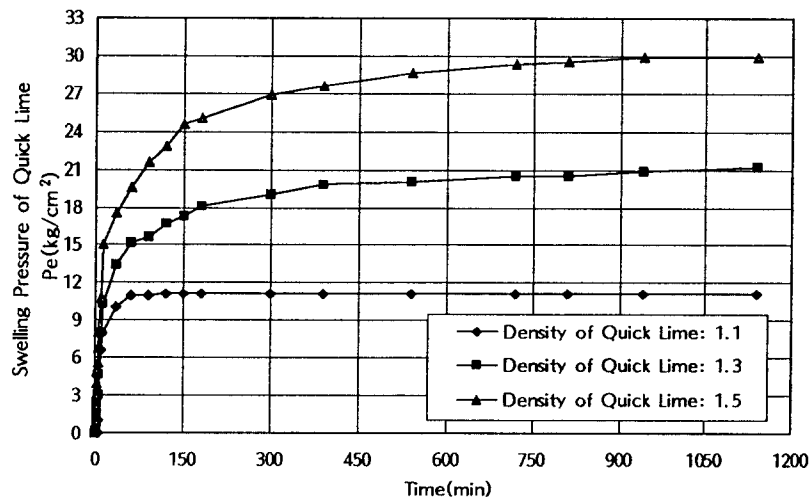


그림 6 생석회의 팽창압(증류수)

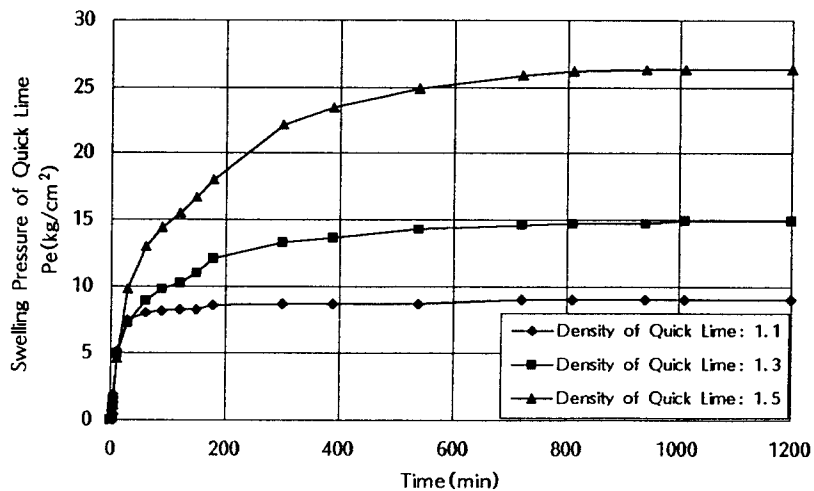


그림 7 생석회의 팽창압(염수의 경우)

생석회의 단위중량에 따른 팽창압은 증류수의 경우 생석회의 단위중량이  $1.5\text{g/cm}^3$ 인 경우 최대  $29.9\text{kg/cm}^2$ 까지 측정되었으며 염수의 경우는 최대  $26.3\text{kg/cm}^2$ 까지 측정되었으며 일본의 黒田(Kuroda, 1980)이 시험한 경우에 의하면 생석회의 수직방향의 변위를 허용하지 않은 경우  $28.61\text{kg/cm}^2$ 이 측정되었다. 본 시험의 값과 黒田의 측정치와의 차이는 그다지 크지 않으며 또한 측정방법 또한 약간의 차이가 있으므로 본 시험대상 생석회의 팽창 특성은 일본의 생석회와 대체로 유사함을 알 수 있다.

### 對象地盤에 대한 室内試驗

대상지반의 공학적 특성을 파악하기 위하여 현장의 시료를 진공 thin wall sampler를 이용하여 심도 2m의 깊이에서 채취하여 비중, 입도분포시험, 액소성 시험, 압밀시험 등을 시행하였다.

**比重 試驗(KS F 2308)** :비중이란 동일한 온도와 체적에서 증류수의 중량에 대한 흙의 중량 비를 의미하는 것으로서 대상지반의 비중은 2.765로 측정되었다.

**Atterberg 限界試驗(KS F 2303)** :액성한계 시험결과 본 시료는 미소한 함수비의 변화에 따라 흙의 유동성이 급격히 변화하는 비소성(NP)으로 나타났다.

**粒度分布試驗(KS F 2302)** :대상지반의 체분석 시험결과 No.200체를 통과한 시료의 중량 백분율이 70%에 달하였으므로 비중계 분석을 추가로 실시하였다. 비중계 분석은 애터버그 한계 시험에서 측정된 지반의 소성한계가 비소성(NP)으로 판명되었으므로 증류수와 규산 나트륨을 이용한 A방법으로 시험을 실시하였다.

체분석 시험과 비중계 분석을 통해 얻어진 입경가적곡선은 그림 8과 같다.

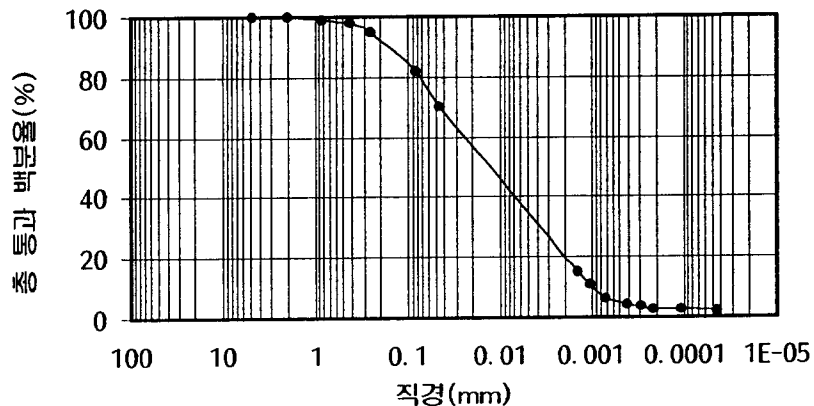


그림 8 대상지반의 입경가적곡선

**壓密試驗(KS F 2316)** : 생석회 파일 시공현장에서 심도 2m의 깊이에서 채취한 시료 2종류를 성형하여 표준압밀시험을 실시하였다. 시료의 초기 함수비는 42%로 측정되었으며 시료의 초기 간극비는 0.584로 측정되었다.

본 표준압밀시험은  $\sqrt{t}$  방법을 사용하여 간극비-하중곡선을 구하였으며 투수계수는 압밀계수와 관계식 ( $K = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w$ )을 사용하여 구하였다. 다음 그림 9는 e-log P 곡선을 나타낸 것이다.

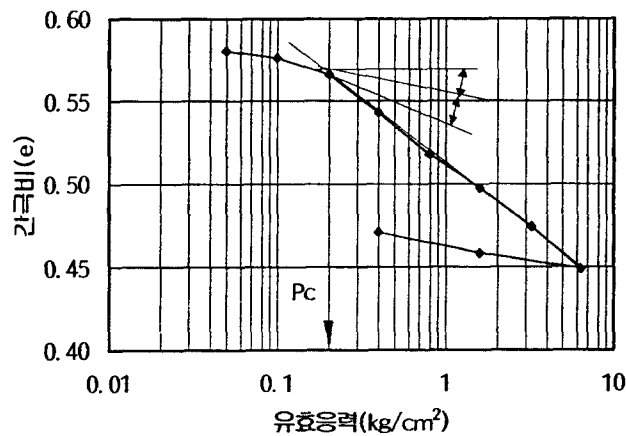


그림 9 하중-간극비 곡선

그림 9를 참조하면 하중-간극비 곡선에서 구한 선행압밀하중  $p_c$ 는  $0.2 \text{ kg/cm}^2$ 으로 나타났으며 압축지수 ( $C_c$ )는 0.2778로 나타났다.

하중의 증가에 따른 압밀계수는  $\sqrt{t}$  법 ( $C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}}$ )에 따라  $3.546 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$  ~  $8.027 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 계산되었으며 이에 상응하는 투수계수의 범위는 압밀계수와 관계식 ( $K = C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w$ )에 따라  $0.043 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$  ~  $0.478 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 으로 계산되었다. 상재하중에 따른 투수계수와 압밀계수의 값이 그림 10과 11에 제시되어 있다.

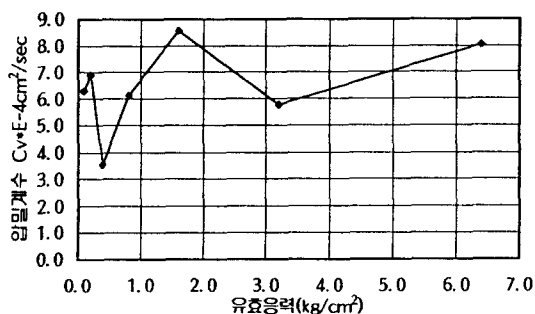


그림 10 하중증가에 따른 압밀계수

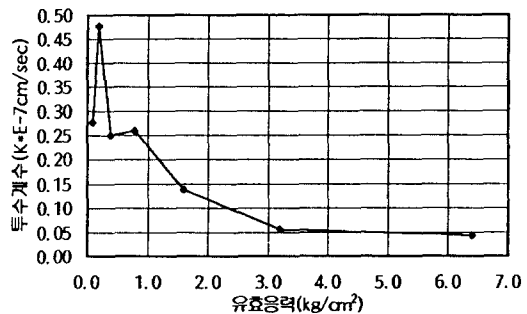


그림 11 하중증가에 따른 투수계수

## 5. 생석회 파일의 현장시험

**현장시험개요** : 생석회 파일은 도로의 제방이나 굴착현장 등지에서 지반의 지지력을 증가시키고 지반의 과도한 침하를 감소하기 위하여 스웨덴 등을 포함한 북유럽과 일본 등지에서 폭넓게 사용되어 왔다. 지금까지 생석회 파일에 의한 주변지반의 개량효과에 대한 구체적인 연구가 국내에서는 시행되지 않아 본 연구에서 생석회 파일의 시험시공을 통하여 주변지반의 개량효과를 전단강도를 중심으로 파악하고자 한다. 본 현장시험은 생석회 파일을 이용한 지반의 강도증대를 목적으로 하는 연약한 지반에 대한 지반의 전단강도 증대효과를 파악하고 예측하기 위한 기초적 자료로 활용하기 위하여 시행되었다.

시험시공 대상지역은 시화지구 공단조성을 위한 해안 매립부지로서 경기도 시흥군 군자면에 위치한 우수지로서 본 연구대상지역의 토질 주상도(시화지구 개발 타당성조사 및 기본설계 지질조사보고서, 1986.4, 건설부)를 검토한 결과 지표면에서 깊이 2m까지는 실트섞인 모래가 분포하며, 깊이 2m~6.6m까지는 실트섞인 점토, 9.5m~18.7m까지는 풍화토이며 그 이하는 풍화암이 존재하고 있다. 또한 깊이에 따라 자연상태의 함수비는 22.18%~42.87%로 존재하고 있으며 심도 1.0~1.8m까지의 액·소성한계는 비소성(Non-Plastic)으로 나타났으며 심도 3.0~3.8m까지는 액성한계 34.1%, 소성지수 14.13%로 나타났다.(지질조사보고서 참조)

심도 2m의 시료를 채취하여 현장지반에 대한 실내시험을 실시한 결과 액·소성한계는 NP(비소성)으로 측정되었으며 대상지반의 함수비도 42%로 기존의 지질조사 보고서와 큰 차이를 보이고 있지 않고 있음을 알 수 있다.

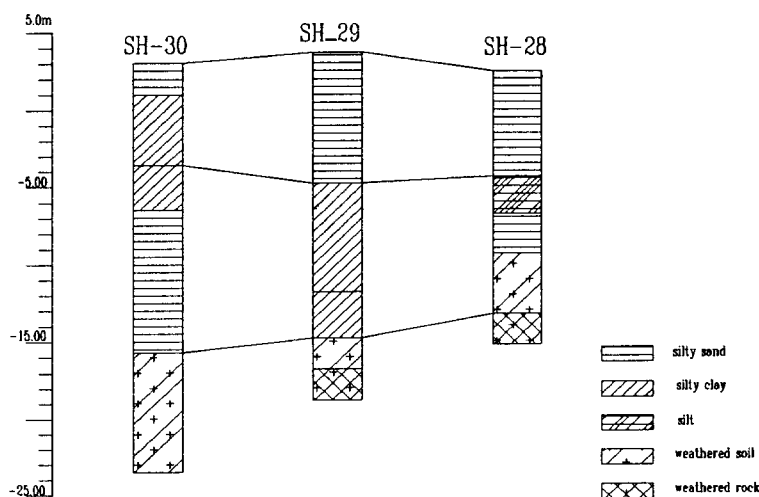


그림 12 시험시공 대상부지에 대한 지질단면도(지질조사보고서, 1986. 4)

지질조사보고서(1986.4)상에는 지하수위에 대한 언급이 없지만 현장 Test Pit로 조사한 바에 의하면 지하수위는 거의 지표면에 가까웠다.

생석회 파일에 의한 주변지반의 전단강도를 측정하기 위하여 각각의 파일주변에 대해서 Dutch Cone 관입시험과 Vane 전단시험을 실시하고 양생일에 따른 함수비를 측정하였다.

**생석회 파일의 施工** :생석회 파일의 현장시험은 우선 대상지반의 특성을 파악하고 실내시험에서 파악된 대상지반의 특성에 따라 생석회 파일의 직경, 간격, 개량심도, 밀도 등을 결정하여야 한다.

본 연구대상 시험부지의 생석회 파일의 제원은 다음과 같은 과정을 통해 선정되었다.

- ① 생석회 파일의 시험시공이나 생석회 파일 시공현장에 대한 문헌조사.
- ② 대상지반에 대한 실내 토성시험.
- ③ 시험대상부지의 특성 파악(지하수위, 개량대상 지층의 두께, 투수계수).
- ④ 문헌상의 생석회의 직경과 대상지반의 특성을 본 현장의 경우와 비교분석.
- ⑤ 현재 사용 가능한 시공장비의 파악(개량심도, 오우거 직경, 각종 굴착장비의 사용가능 여부).
- ⑥ 현장상황에 알맞은 계측장비의 선정.
- ⑦ 상기의 여러 조건을 충족시킬 수 있는 최적의 직경, 간격, 공수, 심도, 생석회 파일의 배치형태의 선택.

상기의 여러 조건에 부합하는 생석회 파일의 제원을 선정한 결과 본 현장시험은 총 9공의 생석회 파일을 선정하여 시공하였으며 파일의 간격과 배치 및 직경의 결정은 일반적으로 가장 많이 사용하고 있는 4각형의 배치 형태를 선정하였으며, 생석회 파일의 직경은 40cm, 간격은 1m로 결정하였다. 생석회 파일의 배치 평면도를 그림 13에 제시하였다.

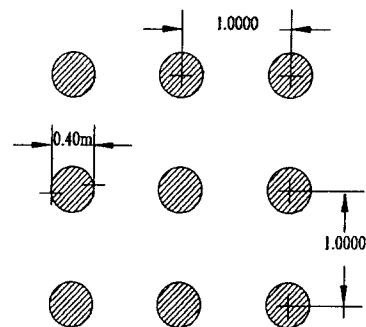


그림 13 생석회 파일의 배치도

본 현장의 경우 개량심도는 굴착장비의 굴착가능심도가 3m로 제한되어 있는 관계로 3m로 정하였으며 생석회의 밀도는 자유낙하시의 생석회의 밀도인  $1.1\text{g/cm}^3$ 으로 정하였다.

생석회 파일을 시공하기 전에 시험 공을 뚫은 결과 공내에 별도의 케이싱을 삽입할 필요가 없으며 생석회 파일의 시공시 필요로 하는 표준장비와 시공순서를 그림 14와 15에 제시하였다.

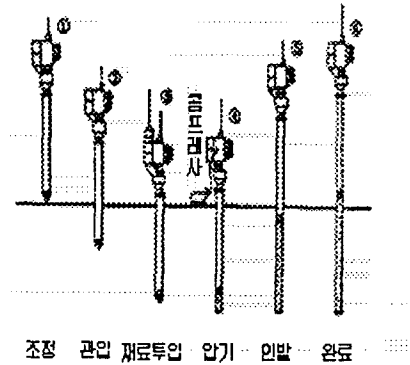
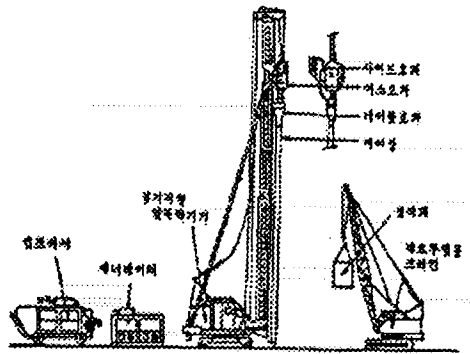


그림 14 생석회 파일 시공 표준장비

그림 15 생석회 파일 시공순서

### 現場의 剪斷強度 測定試驗

생석회 파일 시공후 지반의 개량된 정도를 측정하기 위해 일반적으로 사용되는 장비나 시험방법은 정적 Cone 관입시험, 베인 시험, 삼축압축시험 등이 있으며 이 중 삼축압축시험은 지반의 초기 전단강도가 낮아 시료의 성형에 문제가 있어 제외하였으며 정적 Cone관입 시험기의 경우는 본 시험의 목적과 가장 잘 부합하는 장비이나 장비의 대어나 경제적인 측면 때문에 부득이 휴대용 정적 Cone관입시험기인 Dutch Cone 관입시험기를 사용하였다.

### 베인 剪斷試驗

#### 베인시험결과

현장 베인 시험은 함수비 시험 및 기타 실내시험과 동일한 조건에서 시험결과를 얻기 위해 심도 2m 정도의 깊이에서 실시하였다. 생석회 파일 시공후의 전단강도 변화를 살펴보기 위하여 시공 직후로부터 7일 간격으로 파일 사이 지반의 9개소에서 실시하였으며, 각 시험위치에서의 실측치 평균을 결과치로 하였다.

생석회 파일의 양생일수에 따른 지반 전단강도의 변화를 그림 16에 나타내었다.

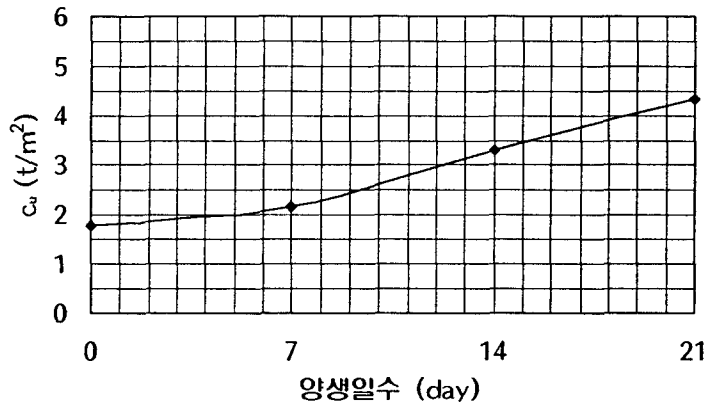


그림 16 배인시험에 의한 양생일수에 따른 주변지반의 점착력 변화

### Dutch Cone 貫入試驗

생석회 파일에 의한 지반의 개량효과를 확인하기 위하여 현장 배인시험뿐 아니라 정적 콘관입 시험기 중에서 가장 조작이 용이하고 응용 범위가 넓은 Dutch cone 관입시험을 실시하였다. 이 시험은 연약한 점토나 피트(peat) 층의 개략적인 점착력이나 연약층의 깊이를 신속하게 파악하는데 편리하다. 구조는 핸들이 붙은 하중계, 50cm 로드와 선단 콘으로 되어있다.

Dutch cone 관입시험은 생석회 파일 시공후 양생일에 따른 콘지수( $q_c$ ) 변화량을 측정하여 콘지수로부터 얻어진 대략적인  $N$ 치, 일축압축강도 및 점착력의 변화를 관찰함으로써 지반개량효과를 확인하고 배인 전단시험결과의 타당성을 확인하기 위하여 실시하였다.

Dutch Cone은 표층으로부터 2.7m 깊이까지 관입하였으며, 생석회 파일의 시공직후로부터 7일 간격으로 시험하였다.

생석회 파일의 양생일수 및 깊이에 따른 여러 가지 Cone 지수의 변화는 다음 그림 17에 제시하였으며 콘 시험에 의한 전단강도와 배인 시험에서 측정된 전단강도사이의 관계를 그림 18에서 확인할 수 있다.

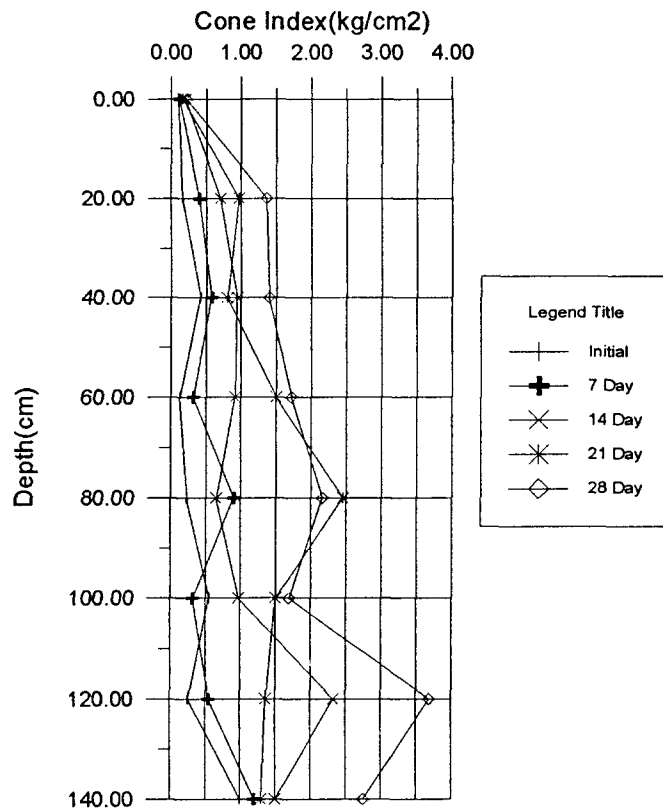


그림 17 양생일 및 깊이에 따른 Cone지수의 변화

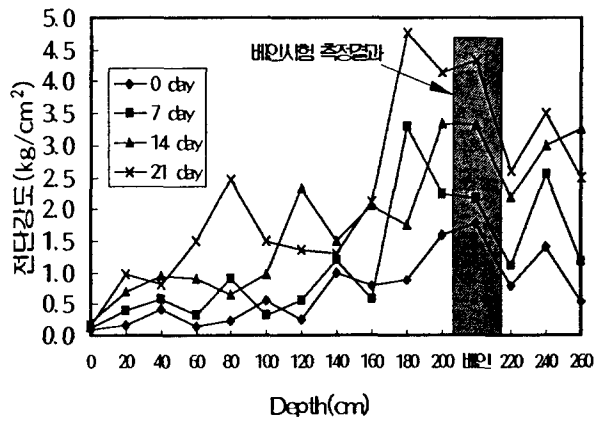


그림 18 콘 관입시험에 의한 전단강도와 베인시험의 전단강도와의 비교

## 6. 고찰

### 含水比 低減效果

본 장에서는 함수비 저하효과에 대한 이론치와 현장 시험시공에서 측정한 실측치와



의 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 토대로 하여 결정하였다.

표 4 함수비 저하량 예측 이론식에 적용된 파라미터의 명칭 및 적용수치

기호	설 명	물성치	주석
h	생석회말뚝의 소화흡수반응계수	0.275	이론치
n'	소화후 말뚝의 간극율	0.55	이론치
$\epsilon_v$	겉보기 체적 팽창율	0.65	이론치
$S_r'$	평형상태 말뚝의 간극수 포화도(%)	85	이론치
$W_0$	지반의 초기함수비(%)	42	실험치
$\gamma_t$	지반의 단위체적중량( $t/m^3$ )	1.78	실험치
a	생석회 말뚝의 체적혼입율	0.144	실험치
$\gamma_c$	생석회 말뚝의 단위체적중량( $t/m^3$ )	1.1	실험치
$\gamma_w$	물의 단위체적중량( $t/m^3$ )	1	이론치

산정된 함수비저하량의 이론치와 실측값을 비교해 보면 표 5와 같다. 결과를 보면 생석회 파일의 21일 양생후 함수비 저하량의 경우 현장의 계측치와 예측치와의 차이는 1% 정도를 보이므로 거의 비슷한 수치를 보이고 있다.

표 5 함수비 저하에 관한 이론 값과 실측값 과의 비교

초기 함수비 $W_0$	7일 양생	14일 양생	21 양생	$\Delta W$ (실측값)	$\Delta W$ (이론값)
42(%)	36(%)	33(%)	31(%)	11(%)	12(%)

현장에서 측정한 양생일에 따른 함수비 저하량은 다음 그림 19와 같다.

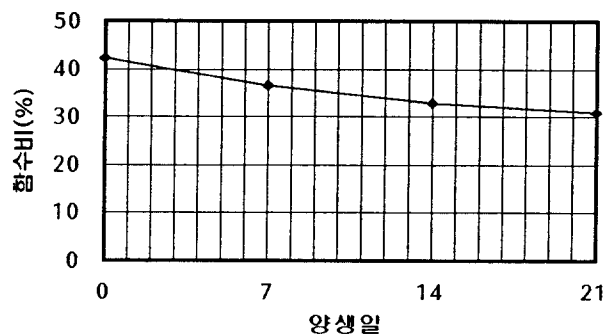


그림 19 양생일에 따른 함수비의 변화

## 剪斷強度 增加

이론식 계산에 필요한 여러 Parameter들 중 강도증가계수  $m$ 의 값은 시험 대상지반이 충적토 지반이므로  $m=0.3$ 의 값을 사용하였고, 나머지 값들은 실내 및 현장시험에서 얻은 자료를 이용하였다. 따라서 이론식에 사용된 파라미터는 표 6과 같다.

표 6 전단강도 증가 이론식에 적용된 특성값

기호	파라미터의 의미	적용 수치	비고
$m$	강도증가계수	0.3	이론치
$C_{uo}$	초기점착력( $t/m^2$ )	1.78	실측치
$P_c$	원지반의 선행압밀하중( $t/m^2$ )	2.0	실측치
$C_c$	원지반의 압축지수	0.2778	실측치
$\Delta W$	최종 함수비 저하량(%)	12.0	이론치

표 6과 식(13)을 통해 구해진 전단강도 증가에 대한 이론값과 현장 배인 전단시험을 통해 얻은 실측값을 비교해보면 초기의 전단강도는  $1.78t/m^2$ 이며 21양생후의 실측 전단강도는  $4.45t/m^2$ 으로 측정되었으며 이론식에 의한 전단강도는  $5.34t/m^2$ 으로 분석되었다. 실측 전단강도와 이론 전단강도의 차이 값은  $0.89t/m^2$ 으로 나타나고 있으며 이 차이는 현재 파일에 의한 팽창이 진행 중에 있으므로 점점 더 줄어들 것으로 판단된다.

## 7. 結論

우리 나라는 국토면적이 좁고 해안선이 풍부한 지형적 특성으로 인해 해안 매립으로 필요한 부지를 확보하려는 노력을 계속해 왔다. 또한 우리 나라 서남해안의 지질학적 특성은 연약한 실트질 점토로 구성된 해성퇴적층으로 이루어져 있으며 이러한 연약지반에 대한 대책공법이 활발하게 연구되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 생석회 파일을 사용한 해성퇴적층 지반의 개량을 위하여 여러 이론들을 분석하였으며 또한 생석회 파일에 의한 지반개량효과를 현장시험시공을 통하여 검증하였으며 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

본 연구에 의한 결론은 다음과 같다.

(1) 시험대상지반에 대한 토성시험 결과 대상지반의 비중은 2.765로 측정되었으며 액소성

시험결과 비소성(NP)으로 측정되었다. 또한 압밀시험결과 선행압밀하중  $P_c$ 는  $0.2\text{kg/cm}^2$ , 압축지수( $C_c$ )는 0.2778로 측정되었고, 하중의 증가에 따른 투수계수의 범위는  $4.3 \times 10^{-9} \sim 4.78 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 으로 계산되었다.

- (2) 시험대상 생석회의 비중은 3.06이며 화학조성분석과 X-ray, SEM촬영 결과 생석회의 품질은 상당히 우수한 것으로 판단된다. 또한 생석회의 팽창특성에 대한 시험결과 팽창량 시험결과는 기존 문헌에 의한 외국산 생석회에 비해 조금 떨어지나 팽창압 시험결과는 외국산 생석회에 비해 우수한 결과를 보이고 있다. 그러므로 전체적으로 판단해 볼 때 시험대상 생석회가 지반개량재로서 사용되기에는 별다른 무리가 없으리라 판단된다.
- (3) 생석회 파일 시공 후 21일 양생된 파일 주변지반의 함수비 저하량은 11%로 측정되었다. 21일 양생된 생석회 파일 주변지반의 전단강도는 초기 전단강도  $1.78\text{t/m}^2$ 에서  $4.45\text{t/m}^2$ 로 약 2.5배 증가하였다.
- (5) 이론식에 의한 함수비 저하량은 12%로 분석되었으며, 현장 시험시공에서 예측된 함수비 저하량은 11%로 나타나 이론치와 실측치의 차이는 1%로 분석되어 이론식이 생석회 파일주변의 함수비 저하량을 예측하는데 상당히 정확함을 알 수 있다.
- (6) 생석회 파일에 의한 개량완료 후 이론식에 의한 지반의 최종 전단강도는  $5.34\text{t/m}^2$ 로 분석된 반면에 21일 양생된 생석회 파일 주변지반의 전단강도는  $4.45\text{t/m}^2$ 로 측정되어  $0.89\text{t/m}^2$ 의 차이를 보이고 있다. 생석회 파일에 의한 주변지반 개량효과에 관한 이론식과 실측값의 비교는 파일의 양생이 21일 진행된 현재 함수비 측면에서는 이론식과 실측값이 거의 비슷하였고, 전단강도에 있어서는 이론식의 값과 실측값에 다소의 차이를 보이고 있으나 양생일수의 증가와 함께 어느 정도 근접한 값에 이를 것으로 판단된다.
- (7) 생석회 파일의 현장시험결과 생석회 파일의 팽창과 소화작용에 의하여 생석회 파일 주변의 연약지반은 확실한 개량효과를 나타내고 있으며, 지반개량에 관한 기존의 이론식은 실측치와 비교적 잘 일치하여 생석회 파일에 의한 지반개량공법의 실제 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나 Holyman 등에 의하면 생석회 파일에 의한 개량효과를 확실히 보장하기 위해서는 좀 더 높은 투수계수를 갖는 것이 바람직하다고 제시하였다.

## 參考文獻

- (1) 삼성중공업 건설기술 연구소, “해안매립과 연약지반 개량을 위한 신기술 개발 연구 논문집”, Vol. 1, pp 6-1~6-67, 1995. 12.
- (2) 천병식 외, “생석회 공법에 의한 지반개량효과에 관한 연구”, 한국지반공학회, 96봄 학술발표회 논문집, pp 275~292, 1996. 3
- (3) 건설부, 산업기지개발공사, “시화지구 개발타당성조사 및 기본계획 지질조사보고서”, 1986. 4

- (4) 日本石灰協會 土質安定處理工法委員會 篇, “石灰による土質安定處理工法”, 山海堂, 1970.
- (5) 眞田英夫 外, “水硬性生石灰パイルによる北海道泥灰地盤の改良”, 1976
- (6) 高橋秀雄 外, “泥灰地盤中における水硬性生石灰杭の長期安定性”, 日本材料學會論文集, 1980
- (7) 山崎光行 外, “生石灰杭工法の最近の施工例”, 1991
- (8) 田中政典 外, “生石灰杭工法で改良さむた地盤土質試験成果”, 第24回日本土質工學研究發表會, 1993
- (9) 石田 宏, “生石灰パイルによる軟弱地盤の改良効果”, 日本土質工學研究發表會, 1978
- (10) 日本材料學會, “生石灰パイル工法”, 地盤改良工法便覽, 1982
- (11) A. Holyman, J. K. Mitchell, “Assessment of Quicklime Pile Behavior”, Improvement of Ground, Vol 2
- (12) B. Broms, U. Anttikoski, “Soil Stabilization-Lime Columns”, Improvement of Ground, Vol 3
- (13) K. T. Law, P. A. Chen, “Pore Pressure Change in Soft Soils Improved by Lime-Fly Ash Piles”, 11Th Southeast Asian Geotechnical Conf, 1993
- (14) Kuroda E., Ohashi Y. & Tsuyoshi M., “Expansive Pressure of Quick Lime Piles”, Research Institute of Technology, Tokyu Construction Co, Ltd, Japan, 1980