

생석회말뚝 타설면적비의 변화에 따른 연약점토지반의 개량효과

Improvement Effects of Soft Clay Soils with Varying Installation Area Ratio of Quicklime Piles

임 중 석* Lim, Jong-Seok

Abstract

The quicklime pile method is a useful ground improvement technique on soft clay and the improvement effects are revealed very quickly. In this study, the improvement effects of soft clay soils were investigated with varying installation area ratio of quicklime piles. For this purpose, a series of model tests were performed. Model grounds were prepared with soft clay in steel boxes. Quicklime piles were installed with required area. Water content and shear strength of the clay in each box were then measured with proper time interval. According to the result, water content decreased with increasing area ratio and shear strength increased. But this tendency of improvement is negligible if the area ratio reaches 10%. And, at the same area ratio, the smaller the diameter of piles and the distance between piles are, the larger the improvement effect is. It is also found that the increase of shear strength of the soil with quicklime mixing method is higher than that with quicklime pile method in case of using the same amount of quicklime.

요 지

생석회말뚝공법은 연약점토에 대한 유용한 지반개량공법으로서 그 개량효과는 매우 빨리 나타난다. 본 연구에서는 생석회말뚝 타설 면적비에 따라 연약점토지반의 함수비나 전단강도등의 특성이 어떻게 변화하는가를 규명하고자 하였다. 이를 위하여 철제상자에 연약점토로 모형지반을 조성하고 소요 면적비로 생석회말뚝을 타설한 후 적당한 시간 간격을 두고 함수비와 전단강도를 측정하는 실내 모형시험을 수행하였다. 그 결과 면적비가 증가함에 따라 함수비의 감소량과 전단강도의 증가량은 커지지만 면적비가 약 10%를 초과하면 별 차이를 보이지 않으며 같은 면적비에서 생석회말뚝의 지름이 작고 간격이 좁으면 함수비의 감소량과 전단강도의 증가량은 더 크다는 것을 규명하였다. 또한 같은 양을 사용했다면 생석회말뚝공법보다 생석회혼합공법을 적용한 흙의 전단강도 증가량이 더 크다는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Area ratio, Ground improvement, Model test, Quicklime pile, Soft clay

1. 서 론

생석회말뚝공법은 생석회를 말뚝모양으로 타설하여 생석회의 탈수, 발열, 팽창 및 경화반응에 의하여 연약 점토지반을 조기에 개량할 수 있는 연약지반개량공법이다. 연약지반을 재하성토하지 않고 단시간에 개량하

여 지지력을 급속히 증가시키고 압밀침하를 감소 내지 억제할 수 있는 생석회말뚝공법은 매우 유용한 지반개량공법이라 할 수 있으며 일본이나 유럽에서는 생석회말뚝공법에 대한 활발한 연구 및 현장적용이 이루어지고 있다(Ingles and Metcalf, 1972; 石田宏, 1977; 下田正雄, 1983; Holyman and Mitchell, 1983; 松尾新一郎,

* 정회원, 목포대학교 공과대학 토목공학과 부교수

1991). 그러나 우리나라에서는 1990년대에 들어와서야 생석회에 대한 관심을 갖기 시작하였으며 일부 학자들의 연구에 의존하고있는 실정이다(천병식 등, 1997). 해안의 연약한 해성점토에서의 건설이 계속 증가하고 있는 우리나라의 실정상 생석회말뚝공법에 대한 관심과 활발한 연구가 이루어질 필요가 있다.

생석회말뚝공법의 적용에 있어서는 면적비 즉, 지반의 면적에 대한 말뚝의 면적에 따라 개량효과가 어떻게 달라질 것인가를 알아야 한다. 천병식과 고갑수(1998)에 의하면 생석회말뚝 타설 면적비가 10%인 경우 초기 함수비 58.6%에서 28일 양생 후의 함수비는 49.1%로, 20%인 경우에는 41.5%로 측정되어 면적비의 증가에 따라 함수비의 저감효과가 더 크게 나타났다. 또한 이 연구에서 생석회말뚝 주변 지반의 전단강도는 양생 28일 기준으로 볼 때 면적비 10%인 경우 개량 전보다 5배의 증가효과가 나타났고 면적비 20%인 경우에는 개량 전보다 약 8배 증가하였다. 김찬기 등(1998)에 의하면 면적비 10%에서 생석회말뚝 타설 후 30일이 경과한 지반의 강도는 초기의 지반강도보다 10배 이상 증가하였다. 이와 같이 면적비에 따른 개량효과는 연구자마다 다소 다른 결과를 주고 있으므로 이에 대한 규명이 필요한 실정이다. 또한 석회의 혼합은 흙의 강도를 증진시켜주지만 어느 비율 이상의 혼합은 강도증가에 효과가 없거나 역효과를 나타내는 경우가 있다(Kezdi, 1979)는 연구 결과도 있다.

본 연구에서는 생석회말뚝 타설 면적비에 따라 연약점토지반의 함수비나 전단강도등의 특성이 어떻게 변화하는가를 측정하여 면적비에 따른 개량효과를 확인하고자 하였다. 이를 위하여 실내에서 토조에 연약점토로 모형지반을 조성하고 소요 면적비로 생석회말뚝을 타설한 후 시간간격을 두고 함수비와 전단강도를 측정하는 실내 모형시험을 수행하였다.

2. 실내 모형시험

2.1 점 토

시험에 사용된 점토는 전라남도 진도에서 채취한 것으로서 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 점토의 특성

비중 G_s	액성한계 LL	소성지수 PI	단위중량 γ_t t/m^3
2.65	31.9	16.2	1.614

2.2 생석회

우리나라 생석회의 주생산지로는 강원도의 삼척·영월·정선, 충청도의 논산·단양·제천, 경상북도의 문경지역 등이다. 본 연구에서는 충청도의 단양생석회를 시료로 사용하였다.

천병식 등(1997)에 의하면 단양생석회는 일본 공업용 생석회 분류 기준(日本石灰協會, 1983)의 특호에 해당하는 양질의 생석회이다.

2.3 시험장치 및 방법

본 연구를 수행하기 위하여 가로×세로×높이가 50cm×50cm×50cm인 철제 모형토조를 제작하였다. 이 토조에 연약점토로 깊이 40cm의 모형지반을 조성하였다.

표2에는 각 토조별 조성 상황을 나타내었다. 채취한 점성토는 액성한계를 초과하는 상태로서 물은 첨가하지 않았다. 이 흙을 손으로 고루 반죽하여 각 토조에 타설하였다. 타설 후에는 약 1주일간 방치하였다. 따라서 각 토조의 점성토는 비교적 균등한 상태를 이루었다고 볼 수 있다. 그러나 이와 같은 방법으로 정확히 각 토조의 상태가 일치했다고 볼 수는 없다. 실제로 표 2에서와 같이 각 토조의 함수비는 38.0%에서 41.9%까지 약간의 차이를 보이고 있다. 그러나 이 정도의 함수비 차이는 함수비 측정상의 문제 등에 비추어 허용할 수 있는 범위 이내라고 사료된다. 실제로 나중의 실험결과에서 보면 초기의 이 정도의 함수비 차이는 면적비에 따른 함수비 변화의 경향에 별다른 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다.

실제 현장에 적용하는 경우에는 정삼각형 분포가 더 효과적이라고 볼 수 있다. 그러나 정삼각형 분포시는 영향범위가 육각형이 되는데, 본 모형실험에 있어서는 사용된 토조가 정사각형이어서 영향범위, 경계조건 및 대칭을 감안하면 정삼각형 타설이 곤란하였다. 따라서 부득이하게 정사각형으로 타설하였다.

생석회말뚝의 타설은 먼저 케이싱을 압입한 후 내부의 점토를 제거하고 생석회를 투입하는 방법으로 행하였다. 이 때 면적비를 감안하여 말뚝의 지름을 결정하였으며 대칭을 이루도록 그림 1과 같이 말뚝의 중심을 위치시켰다. 타설깊이는 지반의 깊이와 같게 하여 2차원적으로 고려할 수 있도록 하였다. 말뚝타설 후에는 생석회의 연직방향 팽창을 억제하기 위해 0.02kg/cm²의 상재

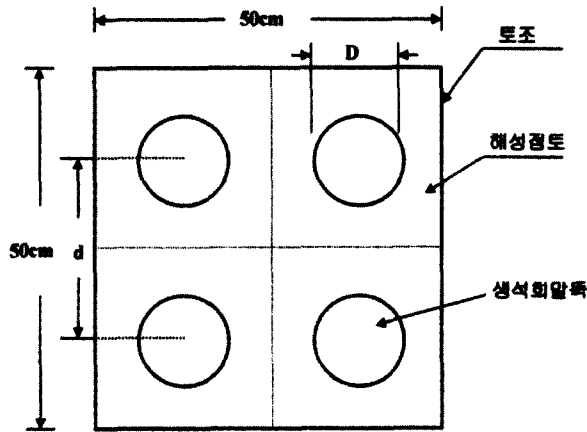


그림 1. 생석회말뚝 타설 평면도

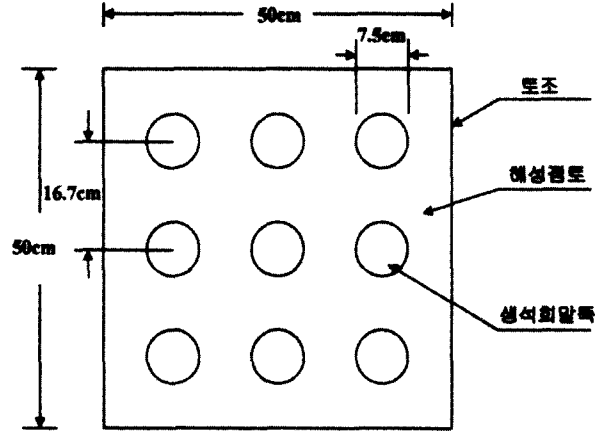


그림 2. 토조 F의 생석회말뚝 타설 평면도

하중을 가하여 상부팽창을 구속하였다. 타설된 생석회말뚝에 대하여 일일이 단위중량을 확인하지는 못하였으나 토조에서 생석회말뚝을 타설하는 방법과 동일한 방법으로 부피를 아는 용기에 생석회를 투입하고 단위중량을 측정한 결과 약 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ 였다.

토조들은 표 2와 같이 면적비를 달리하여 조성하였다. 이 중에서 토조 A는 생석회말뚝을 타설하지 않은 점토만으로 이루어진 지반이다. 이것은 점토만으로 이루어진 지반의 자연적인 함수비 감소와 틱스트로피에 의한 강도회복을 측정하여 생석회말뚝이 타설된 다른 지반과의 비교를 위하여 조성하였다.

토조 F는 다른 토조와 달리 생석회말뚝의 타설이 그림 2와 같이 이루어졌다. 이 토조는 토조 E와 면적비가 거의 같도록 조성하여 생석회말뚝의 타설간격이 점토의 특성변화에 미치는 영향을 알아보고자 하였다.

토조 G는 생석회를 말뚝형태로 타설하지 않고 점토와 혼합하여 조성하였으며 전체부피의 9.2%가 생석회

이다. 이 토조는 생석회말뚝공법과 생석회혼합공법의 효과를 비교하기 위하여 조성하였다.

조성 직후에 원지반 점토의 전단강도를 베인전단시험을 적용하여 측정하였다. 사용한 베인은 현장베인시험기로서 날개의 크기는 지름 5cm, 높이 10cm이다. 이때 측정위치는 측정횟수를 감안하여 말뚝과 인접한 말뚝 사이의 중간에서 서로 영향을 주지 않는 2점씩을 취하기로 결정하였으며 따라서 한 토조에서 측정할 수 있는 위치는 8개까지이다. 베인시험이 행해진 깊이는 베인이 충분히 묻히는 정도로서 베인의 상단은 지표면 하 3cm 정도에 위치하였다.

베인시험 후에는 베인을 수직으로 조심스럽게 인발하여 지반의 교란을 최소화하였다. 또한 베인전단시험이 행해진 위치에서 함수비를 측정하였다. 이는 이후의 시험에서도 마찬가지이다. 이 값은 지반의 평균함수비는 아니지만 지반특성 변화의 경향을 파악하고 이를 정성적으로 분석하는 데에는 유효하다고 볼 수 있다. 그

표 2. 토조별 조성상황

토조 구분	지름 D cm	중심간격 d cm	면적비 A_i %	초기함수비 w_i %	초기전단강도 c_{ui} t/m^2
A ^{*1}	-	-	0.0	38.1	0.39
B	5.5	25.0	3.80	41.2	0.17
C	7.5	25.0	7.07	38.7	0.39
D	8.5	25.0	9.08	41.9	0.17
E	11.0	25.0	15.21	39.3	0.17
F ^{*2}	7.5	16.7	15.90	38.0	0.39
G ^{*3}	-	-	9.20	-	0.39

- *1 점토만으로 조성
- *2 9개의 생석회말뚝
- *3 점토와 생석회 혼합

결과는 표 2에 나타내었다.

그 후로는 1, 3, 7, 8, 15, 28일 후에 위와 같은 방법으로 함수비와 전단강도를 측정하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 함수비의 변화

그림 3에는 경과일에 따른 토조별 함수비의 변화를 나타내었다. 토조 G의 함수비는 점토만의 함수비가 아니라 생석회와 점토가 혼합된 혼합토의 함수비가 되므로 다른 토조들과 그 의미가 다르다. 따라서 토조 G의 함수비는 고려하지 않았다.

그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 지반의 함수비는 생석회말뚝의 타설 후 3일 정도까지는 급격히 감소하며 이후에는 함수비의 감소량이 아주 작으며 15일 경과 후에는 거의 변화를 보이지 않음을 볼 수 있다. 이는 생석회의 작용이 3일 이내에 대부분 발현한다는 것을 보이는 것으로서 김찬기 등(1998)에 의하면 생석회말뚝 타설 후 1~3일 정도까지는 지표면에 근접한 층에서 함수비 저하율이 크며 깊이가 깊어질수록 그 경향이 작아진다고 하였는데, 그 이유로서 공기와 접하고 있는 지표면에서는 생석회의 팽창으로 인한 압밀보다는 생석회의 발열반응이 활발히 일어나 개량 초기의 함수량 저하를

지배하는 반면 심부에서는 수화반응과 생석회의 팽창으로 인한 압밀이 일정한 속도로 발생하여 지속적으로 감소하기 때문이라고 하였다. 그러나 30일 정도의 시간이 경과하면 깊이에 관계없이 비슷하며 감소율도 거의 "0"에 가깝다고 하였다. 본 연구에서 생석회말뚝 타설 후 3일 정도까지 지반의 함수비가 급격히 감소한 것은 함수비의 측정위치가 지표면에 비교적 가까운 깊이였기 때문이라고 볼 수 있다.

그림 4에는 일자별 함수비를 면적비에 따라 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 면적비의 증가에 따라 함수비의 감소량은 커진다. 그러나 약 10% 이상의 면적비에서는 감소량에 별다른 변화를 보이지 않는다. 따라서 생석회말뚝공법에서 면적비는 10% 이내가 적절하다고 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 다음과 같은 원인으로 인하여 나타났다고 추정된다.

본 연구에서의 실험은 약 30일 정도 진행하였으며 이 기간동안의 함수비는 액성한계를 초과하는 고함수비에서 액성한계와 소성한계 사이의 값으로 저하하였다. 일반적으로 점성토에 있어서 고함수비에서의 함수비 저하는 비교적 용이하게 이루어질 수 있으나 그 이하로의 함수비 저하는 보다 큰 노력과 시간이 필요하다. 생석회말뚝공법은 생석회의 흡수, 발열, 팽창하는 원리를 이용하여 고함수비의 점성토지반을 초기에 개량하는 공법으로서 고함수비의 점성토지반의 함수비를 흡수, 발열에 의

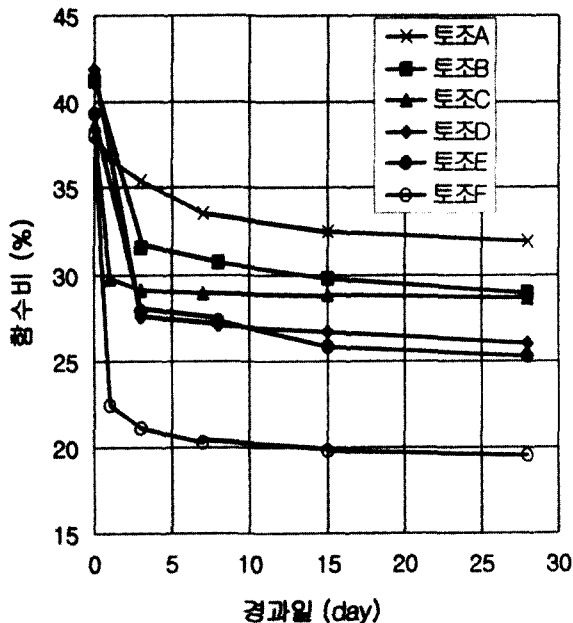


그림 3. 경과일에 따른 토조별 함수비의 변화

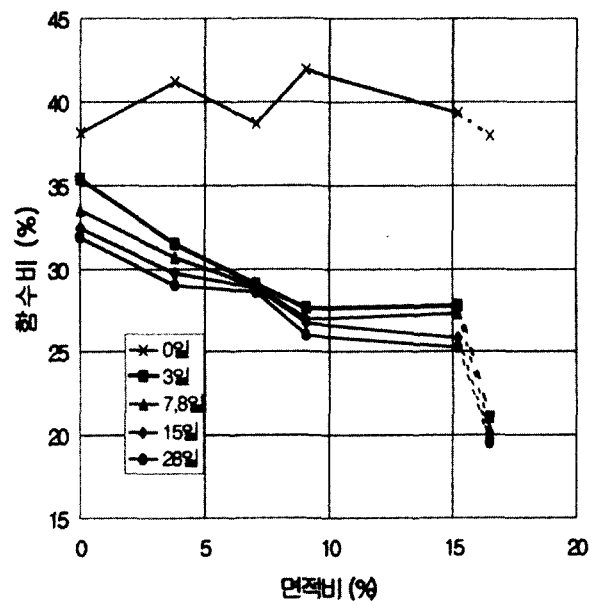


그림 4. 면적비에 따른 토조별 함수비의 변화

하여 어느 정도 저하시키기는 용이하며 팽창에 의한 압밀은 상당히 오래 걸린다. 따라서 좀 더 낮은 함수비의 저하는 상당한 시일이 소요된다고 볼 수 있으며 이때에는 면적비 10%가 한계가 아닐 수도 있을 것이다. 그러나 공법의 목적과 본 연구의 범위 내에서는 면적비 10% 이상에서는 별다른 차이가 없다고 볼 수 있다.

그림 4에서 각 일자별 선의 마지막 점선으로 연결된 점은 타설간격을 좁힌 토조 F에 대한 점이고 이 점의 바로 앞의 점은 토조 F와 거의 비슷한 면적비인 토조 E에 대한 점이다. 그림에서 보면 토조 E와 F는 비슷한 면적비임에도 함수비 감소에 차이가 크다. 즉, 중심간격이 2.5cm인 토조 E보다 1.67cm인 토조 F의 감소량이 훨씬 크다. 따라서 같은 면적비라도 타설간격이 좁다면 더 큰 함수비감소효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

3.2 전단강도의 변화

그림 5에는 경과일에 따른 토조별 전단강도의 변화를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 전단강도의 변화는 함수비의 변화와 아주 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 지반의 전단강도는 생석회말뚝의 타설 후 3일 정도까지는 급격히 증가하며 이후에는 증가량이 아주 작으며 15일 경과 후에는 거의 변화를 보이지 않는다.

그림 5에는 토조 G에 대한 결과도 볼 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 토조 G의 경우는 생석회혼합공법으로

로 조성한 토조이며 이 토조에 사용된 생석회의 부피는 전체지반부피의 9.20%로서 면적비 9.08%의 생석회말뚝으로 조성한 토조 D와 점성토 대 생석회의 비율이 유사하다. 그림 5에 나타낸 바와 같이 토조 G와 토조 D의 28일 경과 후의 전단강도는 각각 $6.94t/m^2$ 및 $2.29t/m^2$ 로서 토조 G 즉, 생석회혼합공법으로 조성한 지반이 토조 D 즉, 생석회말뚝공법으로 조성한 지반보다 3배 이상의 강도를 나타냈다. 이는 토조 G의 전단강도가 점토만이 아닌 생석회가 혼합된 상태임을 감안하더라도 매우 크다고 볼 수 있다. 이는 생석회혼합공법에서는 입자들의 혼합, 물과의 접촉 등이 우수하기 때문이라고 사료된다. 따라서 생석회말뚝공법보다는 생석회혼합공법의 효과가 더 낫다고 할 수 있다. 그러나 깊은 지반에 대한 시공의 난이도를 고려한다면 효과만으로 유불리를 판단하기는 곤란하다.

그림 6에는 일자별 전단강도를 면적비에 따라 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 면적비의 증가에 따라 전단강도의 증가량은 커진다. 그러나 함수비와 마찬가지로 약 10% 이상의 면적비에서는 증가량에 별다른 변화를 보이지 않는다. 따라서 생석회말뚝공법에서 면적비는 10% 이내가 적절하다고 볼 수 있다.

그림 6에서 각 일자별 선의 마지막 점선으로 연결된 점은 타설간격을 좁힌 토조 F에 대한 점이고 이 점의 바로 앞의 점은 토조 F와 거의 비슷한 면적비인 토조

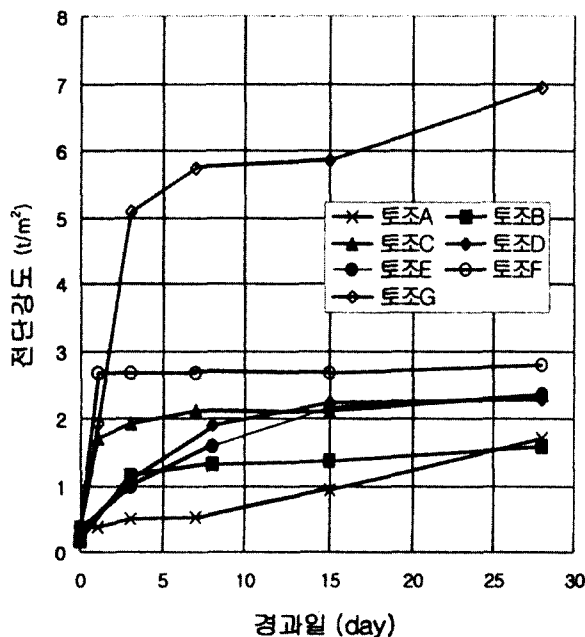


그림 5. 경과일에 따른 토조별 전단강도의 변화

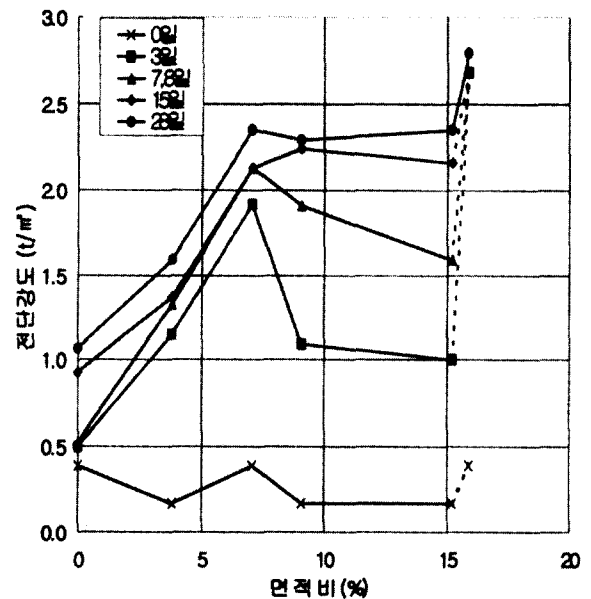


그림 6. 면적비에 따른 전단강도의 변화

E에 대한 점이다. 그림에서 보면 토조 E와 F는 비슷한 면적비임에도 전단강도 증가에 차이가 크다. 즉, 중심간격이 2.5cm인 토조 E보다 1.67cm인 토조 F의 증가량이 훨씬 크다. 따라서 같은 면적비라도 타설간격이 좁다면 더 큰 전단강도증가효과를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

이러한 사실은 그림 5에서도 확인할 수 있다. 그림 5에서 토조 G는 타설간격을 극단적으로 좁힌 것으로 볼 수 있다. 토조 G의 결과를 비슷한 면적비인 토조 D와 비교해 보면 토조 G의 전단강도 증가량이 훨씬 더 큼을 볼 수 있다. 따라서 타설간격이 좁아지면 더 큰 전단강도증가효과를 얻을 수 있다는 것을 다시 한번 확인할 수 있다.

4. 결 론

생석회말뚝공법 적용시 생석회말뚝의 면적비에 따른 연약점토지반의 개량효과를 알아보기 위하여 토조를 제작한 후 면적비를 달리하여 생석회말뚝을 타설하고 경과일에 따른 함수비와 전단강도의 변화를 측정하는 실내모형시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 면적비가 증가함에 따라 함수비의 감소량과 전단강도의 증가량은 커지지만 면적비가 약 10%를 초과하면 별 차이를 보이지 않는다.

(2) 같은 면적비에서 생석회말뚝의 지름이 작고 간격이 좁으면 함수비의 감소량과 전단강도의 증가량은 더 크다.

(3) 같은 양을 사용했다면 생석회말뚝공법보다 생석회 혼합공법에서의 전단강도 증가량이 더 크다.

참 고 문 헌

1. 김찬기, 정진섭, 장용채(1998), "생석회말뚝에 의한 연약점토지반개량 효과", 대한토목학회논문집, 제18권, 제Ⅲ-6호, pp.853~862.
2. 천병식, 고갑수(1998), "남해 울촌 해성점토의 생석회파일에 의한 개량효과", 대한토목학회논문집, 제18권, 제Ⅲ-4호, pp.521~529.
3. 천병식, 김수삼, 고경환(1997), "국산생석회 혼합처리에 의한 지반개량", 대한토목학회논문집, 제17권, 제Ⅲ-5호, pp.589~596.
4. 石田宏(1977), "岩手ロームの生石灰による土質改良", 土と基礎, Vol.22, No.5, pp.37~42.
5. 松尾新一郎(1991), 特許よりみた石灰安定處理公法, 日刊工業新聞社.
6. 日本石灰協會(1983), 石灰による軟弱地盤の安定處理公法, 石灰安定處理委員會, pp.14~18.
7. 下田正雄(1983), 石灰安定處理公法, 鹿島出版會, pp.12~38.
8. Holyman, A. and Mitchell, J. K.(1983), "Assessment of Quicklime Pile Behavior", Improvement of Ground, Vol.2, pp.897-902.
9. Ingles, O. G. and Metcalf, J. B.(1972), Soil Stabilization, Butterworths, Australia, pp.127~143.
10. Kezdi, A.(1979), Stabilized Earth Roads, Elsevier Scientific Publishing Company, p.327.

(접수일자 2001. 3. 26)