

Bottom Ash를 활용한 Chemical Compaction Pile의 주변 지반 개량 특성 평가

Evaluation on the Characteristics of Weak Soil Adjacent to Chemical Compaction Pile of Using Bottom Ash

김 상 철* 박 경 태** 성 익 현*
Kim, Sang-Chel Park, Kyung-Tae Sung, Ik-Hyun

Abstract

To evaluate on the applicability of Chemical Compaction Pile (CCP) method to weak soil improvement, two kinds of testing chambers were fabricated and the changes of water content and shear stress associated with soil types, ages and distances from the center of pile were measured with different mixing proportions of CCP such as bottom ash, lime powder and added admixture. As results of test, it was noted that water content and shear stress of ground are mainly affected by the amount of lime powder and increase of the amount corresponds to rapid improvement of soil. And the improvement depended greatly on the types of soil also. It was finally found that CCP developed can be applicable to bearing pile as well as soil improvement since CCP has a bearing capacity enough to carry loads.

요 지

본 연구에서는 개발한 Chemical Compaction Pile(이하 CCP)공법의 연약지반 개량의 적용성을 평가하기 위하여 모형 아크릴 토조와 CCP 전용 토조를 제작하였으며, CCP를 구성하는 주재료인 Bottom Ash, 생석회 및 첨가제의 배합비를 실험변수로 하여 지반의 종류에 따른 함수비, 전단강도의 변화를 측정하였다. 실험결과, 지반의 함수비 감소나 강도증진효과는 생석회의 함유량이 많을수록 크게 나타났으며, 지반개량효과도 짧은 시일 내에 나타나는 것이 확인되었다. 또한, 지반개량에 따른 전단강도의 증진과 함수비의 변화는 지반의 종류에 따라서도 영향을 받는 것으로 나타났다. 그 외에도 개발된 CCP는 충분한 지지력도 확보하고 있어 연약지반개량과 함께 지지말뚝으로써의 가능성이 있는 것으로 평가되었다.

Keywords : Chemical compaction pile, Testing chamber, Bottom ash, Lime powder

핵심 용어 : Chemical compaction pile, 모형토조, Bottom ash, 생석회

* 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 미래이엔씨(주) 대표이사

E-mail : schkim@hanseo.ac.kr 041-688-0182

• 본 논문에 대한 토의를 2007년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2007년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

우리나라는 전 국토 면적의 70%가 산악지이고 30%정도가 평야부로 구성되어 있으며 특히, 평야부는 큰 하천 유역과 해안을 따라 제4기 충적세에 퇴적되어 아직 고결이 되지 않은 많은 부분이 연약한 지층으로 이루어져 있다. 이와 같은 지질학적 특성과 좁은 국토의 효율적인 이용을 위하여 해안 인접지역의 개발은 필수 요건이며 이와 아울러 연약지반 개량이 활발히 진행되고 있다(김찬기 등, 1998 : 임종석, 2001).

종래에는 이러한 연약지반의 개량공법으로 모래를 주 재료로 하는 Sand Drain공법이나 Sand Compaction Pile 공법 등이 주로 사용되었다. 그러나 이들 공법에서 사용되는 모래는 대규모 건설공사의 건설재료로도 막대한 양이 사용되고 있어 연약지반 안정처리의 주 개량 재료로 이용하기에는 공급이 부족한 실정에 있으며, 더욱이 향후 천연자원의 고갈로 인해 모래를 연약지반 개량재로 활용하기에는 많은 어려움이 있을 것으로 예상된다(천병식, 1998 : 박용원 등, 2000).

따라서 본 연구에서는 기존의 Chemical Pile 공법과 Sand Compaction Pile 공법을 보완, 향상시킨 공법으로써 Chemical Compaction Pile(이하 CCP로 칭함)공법을 제안하며, 이 공법의 특징으로는 모래 대신에 첨가골재로 Bottom Ash를 사용함으로써 상기한 천연자원 고갈이라는 문제점을 해소함과 동시에 기존에 매립 처리되던 폐자원을 활용함으로써 환경보전효과도 얻고자 하였다. 또한, Bottom Ash가 갖고 있는 독특한 공학적인 성질로 인해 다른 어떤 재료보다도 효과적인 지반개량재의 역할을 할 것으로 판단되며, 화력발전소가 전국에 산재해 있으므로 보다 안정적이고 경제적인 재료 수급이 가능하게 된다.

본 연구에서는 CCP공법의 주재료로 사용되는 Bottom Ash와 생석회 및 첨가재를 적용함으로써 주요 적용 대상인 연약지반개량에 미치는 효과를 모형토조 실험을 통해 함수비와 전단강도의 변화를 관찰하

고, 또한 말뚝의 횡방향 지반개량 효과를 확인함으로써 CCP공법의 기능성 확보 여부를 평가하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

2.1.1 Bottom Ash

본 연구에서 사용된 Bottom Ash는 서천화력발전소에서 발생되어 회처리장에 이송된 최대골재치수 5mm이하의 잔골재를 사용하였으며 그 물리·화학적 특성은 Table 1과 같다.

2.1.2 생석회

생석회의 주요 역할은 소화흡수, 팽창반응 등에 의한 연약지반개량이며, 이러한 기능은 생석회에 포함된 CaO의 함유량에 의해 크게 좌우된다(Holyman 등, 1983). 본 연구에서는 CaO 함유량이 90%이상인 생석회를 사용하였으며 화학성분 분석(X-ray fluorescence spectroscopy: XRF)결과는 Table 2와 같다.

Table 2 생석회의 화학적 성질 (%)

Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	기타
1.06	5.45	0.04	-	92.58	0.14	0.74	2.01

2.1.3 첨가재

Chemical Pile이 지지능을 확보하지 못하는 것은 강도가 일반 말뚝과 비교하여 50배 이상 작기 때문으로 말뚝으로서의 역할을 하기 위해서는 주변 지반보다 강도에서 뚜렷한 차이를 나타냄으로서 응력집중효과를 가져올 수 있어야 한다(Chew 등, 1993). 따라서 강도 증가를 위해서는 골재인 Bottom Ash를 결합시킬 수 있는 결합재가 필요하다. 또한, Bottom Ash에는 환경기준치 이하이지만 미량의 유해중금속을 포함하고 있으므로 이 중금속의 용출을 방지하는 기능을 가진 재료

Table 1 Bottom ash의 물리, 화학적 성질

물리적 특성			화학적 특성(%)								
비중(G _s)	균등계수(C _u)	곡률계수(C _c)	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	기타	
2.22	10	1.78	23.14	50.57	1.12	-	3.15	0.64	13.27	5.67	

가 필요하고, 생석회의 급속한 반응은 작업원의 안전과 지반개량 메커니즘에 불리한 기능으로 작용하므로 반응속도를 제어하는 효과를 가진 재료가 요구된다. 본 연구에서는 강도 증진 효과, 중금속 용출 방지 효과, 반응시간 제어 효과를 가진 첨가제를 개발하였으며, 첨가제의 화학성분 분석(XRF)결과는 Table 3과 같다.

Table 3. 첨가제의 화학적 성질 (%)

Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	SO ₃	CaO	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	기타
4.9	26.5	2.3	2.2	56.0	0.6	2.3	1.2

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 시료

CCP의 각기 다른 지반에서의 개량 효과를 관찰하기 위하여 실트질, 점토질 모래, 점토질 토양을 대상 시료로 선정하였다. 실트질 시료는 인천 남향 준설매립지에서, 점토질 모래와 점토질 시료는 부산 신항만 공사현장에서 채취하였으며 대상 시료의 공학적 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 애터버그 한계시험 등을 실시하였다. 토조실험에 사용하기 위하여 현장에서 채취한 시료는 조개껍질 및 기타 이물질을 제거하고 수조에 넣어 완전히 교반시킨 후 슬러리 상태의 시료를 모형 토조에 투입하였다. 각 시료의 기본 물성치는 Table 4와 같다.

Table 4 시료의 물리적 특성

구 분	액성한계(%)	소성한계(%)	비중(G _s)
실트질(ML)	27.47	-	2.66
점토질 모래(SC)	30.49	17	2.65
점토질(CL)	27.9	19.5	2.68

2.2.2 모형 아크릴 토조 제작 및 실험방법

CCP의 경시효과, 측정위치, 배합비에 따른 전단강도 및 함수비 효과를 측정하기 위하여 가로×세로×높이가 0.5m×0.5m×0.5m인 아크릴 모형 토조 5개를 제작하였다. 모형 토조의 하부에는 배수공을 설치하여 배수를 원활하게 하였으며, 배수공의 막힘을 방지하기 위해 배수공 상부에 50mm의 모래층을 포설하였다.

제작된 모형 토조에 케이싱을 압입한 상태에서 슬러

리 상태의 시료를 넣고 일주일 정도의 자중압밀기간을 거쳐 말뚝 타설 직전에 전단강도와 함수비를 측정하였다. 지반의 전단강도는 베인시험기를 적용하여 측정하였으며, 함수비는 유리봉을 이용하여 측정할 지점의 시료를 채취하였다. 그 후에 배합된 재료를 케이싱 내에 타설하고 케이싱을 인발하였다. 실험은 상온 20℃의 조건에서 초기, 1, 3, 7, 14, 28일 후에 전단강도와 함수비를 측정하였고 측정위치는 표면으로부터 침도 0.05, 0.25, 0.45m를 대상으로 하였다. 또한, 28일이 경과한 후에는 말뚝 횡방향의 지반개량효과를 보기 위하여 말뚝주면으로부터 0.05, 0.1, 0.15m 떨어진 3지점에서 전단강도와 함수비를 측정하였다. 각 토조별 배합비는 Table 5와 같으며, Photo 1은 실험에 사용된 모형 토조의 전경을 나타낸 것이다.

Table 5 토조별 적용 CCP 배합비

토 조 명	배합비(중량비) % (B/A-생석회-첨가제)
A	0 - 0 - 0
B	60 - 20 - 20
C	40 - 40 - 20
D	60 - 40 - 0
E	0 - 100 - 0



Photo 1 모형 아크릴 토조 시험 전경

2.2.3 CCP 전용 토조 제작 및 실험방법

실내 토조실험의 크기효과(scale effect)를 줄이고 균말뚝의 효과를 살펴보기 위하여 아울러 CCP의 지지력을 확인하기 위하여 별도의 CCP 전용 토조를 제작하였

다. Fig. 2와 같이 가로×세로×높이가 1.0m×1.0m×1.0m의 정방형인 사각 토조로써 상부에 하중을 재하할 수 있는 재하 장치를 Photo 2와 같이 설치하였다.

토조의 지반조성은 아크릴 토조와 마찬가지로 배수공 상부에 50mm의 모래층을 설치하고 토조에 케이싱을 압입한 상태에서 슬러리 상태의 시료를 넣고 일주일 정도의 자중압밀기간을 거쳐 말뚝 타설 직전에 전단강도와 함수비를 앞서 아크릴 토조와 동일한 방법으로 측정하였다. 말뚝의 배합비는 Table 5의 토조 B의 배합비를 적용하였다.

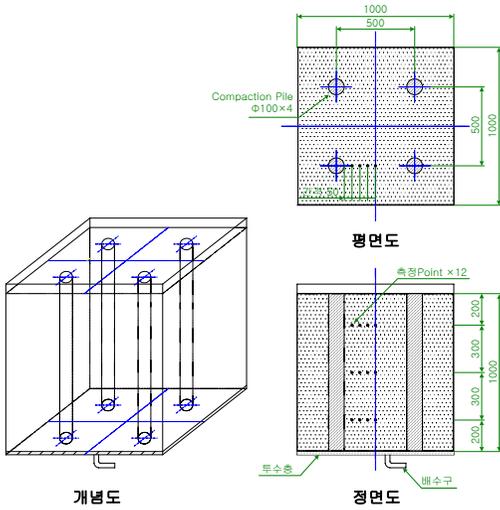


Fig. 1 전용 토조의 크기 및 개념도



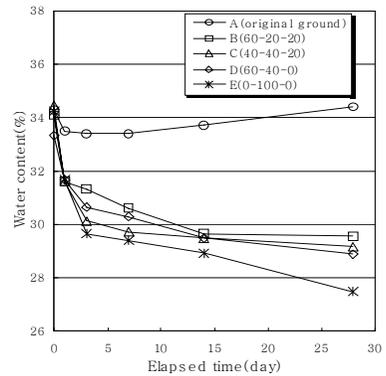
Photo 2 전용 토조 전경

3. 실험결과 및 고찰

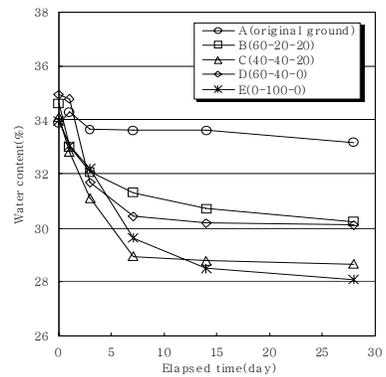
3.1 함수비 경시효과

Fig. 2와 3은 각각 실트질과 점토질 모래지반에서의 경과시간에 따른 함수비 변화를 나타낸 것으로, CCP 타설에 의한 실트질 지반과 점토질 모래지반의 함수비 변화 추이는 비슷함을 알 수 있다.

Fig. 2의 실트질 지반의 경우, CCP를 설치하지 않은 토조 A의 경우는 함수비의 변화가 거의 없으나 나머지 토조들은 함수비 감소효과가 뚜렷하게 나타났다. 배합비와 함수비의 변화를 관찰해 보았을 때 생석회의 함유량이 증가할수록 말뚝 주변지반의 함수비가 더 많이 감소하는 경향을 보여주었다. 그리고 대부분의 반

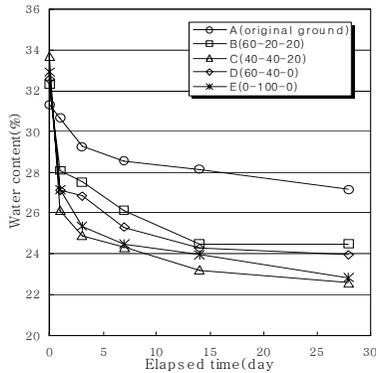


(a) 상부 0.05m 지점

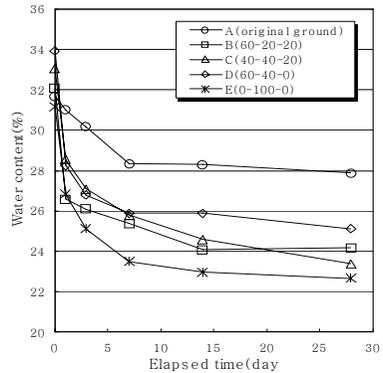


(b) 상부 0.25m 지점

Fig. 2 함수비의 경시효과 (실트질 지반)



(a) 상부 0.05m 지점



(b) 상부 0.25m 지점

Fig. 3 함수비의 경시효과 (점토질 모래지반)

응은 7일 정도까지는 급속히 감소하다가 그 이후로는 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 생석회의 반응이 7일 이내에 대부분 발현한다는 것을 의미한다. Fig. 2(a)에서 CCP 타설 후 3일까지는 지표면에 근접한 층에서 반응이 활발하고, Fig. 2(b)에서와 같이 깊이가 깊어지면 그 경향은 작아지면서 7일 정도까지 꾸준히 감소하게 된다. 그 이유는 공기와 접하고 있는 지표면에서는 생석회의 팽창으로 인한 압밀 보다는 생석회의 발열반응이 활발히 일어나 개량 초기의 함수량 감소를 지배하는 반면, 심부에서는 수화반응과 생석회의 팽창으로 인한 압밀이 일정한 속도로 발생하여 지속적으로 감소하기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 30일 정도의 시간이 경과하면 깊이에 관계없이 비슷하며 감소율도 거의 0에 가까운 것으로 나타났다. CCP에 의한 실트질 지반의 함수비 감소량은 생석회량이 적게 들어간 토조 B의 경우는 약 4%정도의 감소 효과가 있었고, 생석회량이 증가할수록 최대 6%정도까지 감소되는 효과가 관찰되었다.

점토질 모래지반에서는 투수계수가 크기 때문에 생석회의 반응에 필요한 물이 활발하게 공급되어 함수비의 저하가 크게 나타날 것으로 예측하였다. 그러나 Fig. 3에서 실제로 생석회의 양이 100%인 토조 E의 경우는 약 10%정도로 실트질 지반의 6%보다 크게 나타났지만 말뚝을 타설하지 않은 토조 A의 경우도 자연적인 함수비의 변화가 4%정도 관찰되어 실제로 6%의 함수비 감소효과만을 나타내었다.

따라서 실트질 지반과 점토질 모래지반의 실제적인 함수비의 변화 크기는 비슷함을 알 수 있다.

3.2 전단강도 경시효과

Fig. 4는 실트질 지반에 대해 표면으로부터 0.25m 떨어진 위치에서의 베인시험을 통하여 측정된 전단강도의 경시효과를 나타낸 것으로, 그림에서 보듯이 전단강도는 함수비의 변화와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 말뚝 타설 후 7일 정도까지는 함수비의 감소와 동시에 지반의 전단강도는 급격히 증가하며 14일 이후에는 증가량이 미소하게 나타났다. 말뚝을 타설하지 않은 토조 A의 경우는 전단강도의 경시변화가 거의 없지만 생석회의 양이 증가할수록 지반의 전단강도가 크게 증가함을 알 수 있다. 토조 B의 경우 초기 상태와 비교할 때 2~3배정도의 전단강도 증가 효과를 보였고, 생석회량의 함유량이 가장 큰 토조 E의 경우는 최대 4배까지 전단강도가 증가하였다. Fig. 5는 점토질 모래지반의 전단강도변화를 도시한 것으로 실트질 지반과 비슷한 강도변화가 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.3 말뚝 횡방향 전단강도와 함수비 변화

말뚝 횡방향의 지반개량 효과를 확인하기 위하여 CCP 타설 후 28일이 경과한 시점에서 깊이 0.25m,

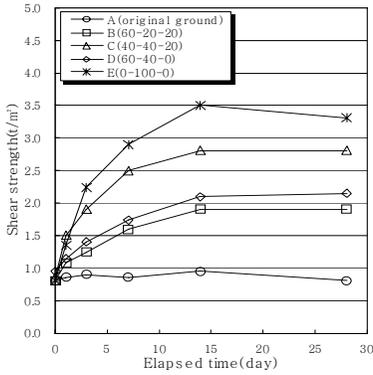


Fig. 4 전단강도의 경시효과(실트질)

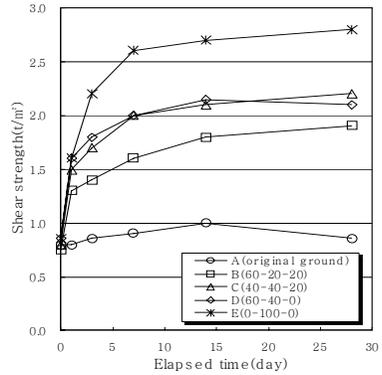
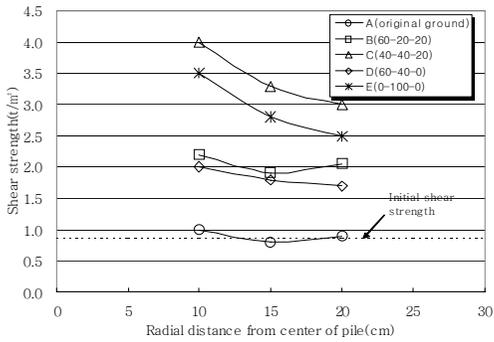
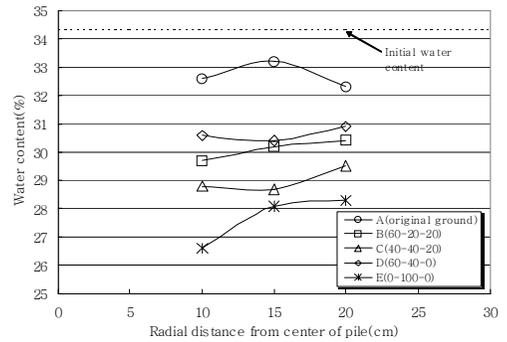


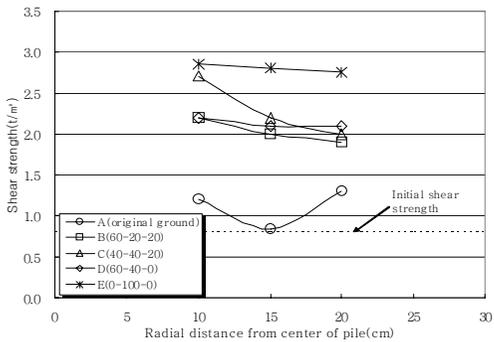
Fig. 5 전단강도의 경시효과(점토모래질)



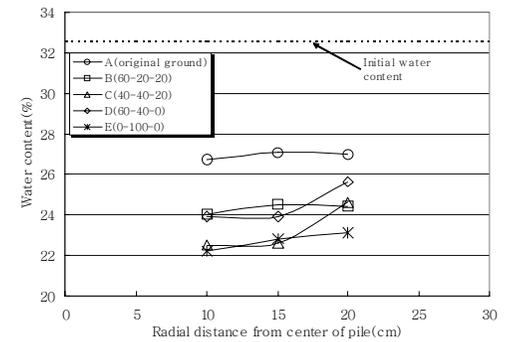
(a) 실트질 지반



(a) 실트질 지반



(b) 점토질 모래 지반



(b) 점토질 모래지반

Fig. 6 말뚝 횡방향 전단강도 경시효과

Fig. 7 말뚝 횡방향 함수비 경시효과

말뚝 중심으로부터 횡방향으로 0.1m, 0.15m, 0.2m 떨어진 지점에서의 함수비 및 전단강도를 측정하였다.

Fig. 6과 7에서의 점선은 CCP 타설 전 각 토조의 초기전단강도와 함수비를 평균하여 나타낸 것이다. 횡

방향 변화 추이를 살펴봤을 때, Figs. 6과 7의 (a)와 같이 실트질 지반에서는 말뚝 중심과 가까울수록 함수비는 낮고 전단강도는 높았으며, 반대로 말뚝 중심에서 멀어질수록 함수비는 높고 전단강도는 낮게 측정되

Table 6 전용 토조내 CCP의 지지력 결과

PILE NO.	$\gamma_t(\text{kg}/\text{m}^3)$	W(%)	$\gamma_d(\text{kg}/\text{m}^3)$	$q_u(\text{MPa})$
A	1640	31.8	1240	4.736
B	1680	32.1	1270	4.924
C	1660	30.6	1270	4.885
D	1640	31.2	1250	4.712

었다. 이는 말뚝과 인접한 부분에서 탈수 및 팽창작용으로 인하여 지반개량효과가 단기적으로는 좋아짐을 의미한다. 이와 반면에 투수계수가 높은 점토질 모래 지반에서는 전단강도와 함수비 모두 횡방향 거리에 따른 변화가 실트질 지반보다 작게 나타났다. 이는 모래의 높은 투수성으로 인하여 상대적으로 지반 전체가 빠르게 균질해지기 때문에 횡방향의 거리에 따른 변화가 작아진 것으로 추측된다.

3.4 전용 토조의 지반개량 효과와 지지력

아크릴 토조는 크기의 제한으로 인하여 크기효과 영향과 균말뚝 효과가 올바르게 반영되지 못하므로 토조의 크기를 크게 하여 토조 내는 점토질 토양으로 채우고 적절한 치환 면적비를 산정하여 4개의 균말뚝을 형성하였다. 함수비와 전단강도의 변화는 말뚝의 중심으로부터 각각 0.1m, 0.175m, 0.25m 떨어진 위치에서 중간 심도의 개량 정도를 측정하였다.

측정결과, 함수비는 9%내외의 변화를 나타내었지만 지반자체의 압밀배수를 통한 함수비 변화를 고려하면 6%내외의 변화를 보였다. 전단강도에 있어 초기 강도



Photo 3 전용 토조에서의 말뚝 주변의 토양 전경

는 이전 아크릴 토조 실험결과에 비해 낮았으나 개량 기간이 28일 경과되었을 때에는 비슷한 결과를 나타내었다. Fig. 8과 9는 횡방향 거리에 따른 함수비와 전단강도의 크기를 도시한 것이며, Photo 3은 시험 중의 전용 토조 내 토양의 거동을 나타낸 것이다.

개량완료 후 하중재하기를 이용하여 4개의 말뚝에 대해 각각의 지지력을 측정하였다. 말뚝이 지중에서 상부하중을 지지하는 원리는 크게 선단지지력과 주면마찰저항력에 의한 지지로 나누어 생각할 수 있는데, 본 실험에서는 토조 바닥판이 상부 하중에 대하여 거의 변형이 없이 하중을 지지하고, 말뚝길이의 한계로 인해 주면마찰에 의한 지지는 거의 없을 것이므로 말뚝 파괴시의 하중값은 말뚝 자체의 압축강도와 큰 차이를 보이지 않을 것이라 사료된다. 실험결과는 Table 6과 같이 4.7~4.9MPa정도를 나타내고 있어 연약지

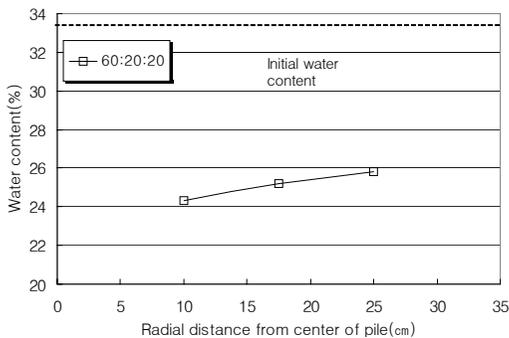


Fig. 8 횡방향 거리별 함수비의 변화

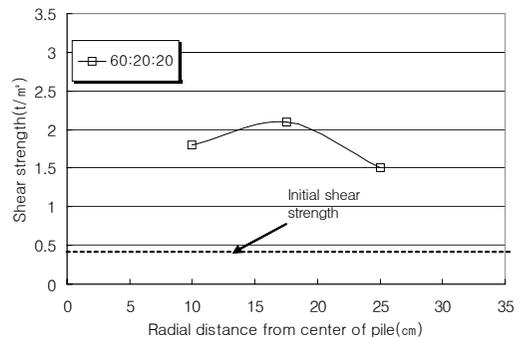


Fig. 9 횡방향 거리별 전단강도변화

반 상의 충분한 지지력이 확보되고 있음을 알 수 있다. 하지만 실제 현장에서는 연약지반의 특성상 말뚝의 선단지지보다는 주변마찰저항에 의해서 상부하중을 지지하는 양상을 띠게 될 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 Bottom Ash, 생석회 및 개발한 첨가재를 Chemical Compaction Pile (CCP)의 주재료로 하여 그 적용에 따른 말뚝 주변 연약지반개량 효과를 아크릴과 전용 토조 실험을 통해 평가하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) CCP 타설 후 28일이 지난 연약지반의 전단강도는 생석회 함유량이 증가할수록 크게 나타났으며 초기 전단강도보다 최대 4배까지 증가하였고, 함수비는 6%정도의 감소효과가 있었다.
- 2) CCP 타설 후 3~7일 이내에 연약지반의 함수비와 전단강도의 변화가 가장 크게 나타났다. 따라서 CCP에 의한 지반개량의 정도는 짧은 시일 내에 개량효과를 얻을 수 있음을 의미한다. 심도에 따른 개량 특성의 경우, 상단부에서는 생석회의 발열반응에 의한 함수비 감소가 뚜렷하였으며 심도가 깊을수록 말뚝의 팽창에 따른 압밀이 진행되어 지반 개량 효과가 나타났다.
- 3) 28일이 경과한 후 말뚝 횡방향으로의 전단강도와 함수비의 변화는 말뚝 중심에서 거리가 멀어질수록 실트질이나 점토질 지반보다 점토질 모래지반의 변화 크기가 작았으며, 이는 투수계수가 큰 지반에서의 개량이 보다 빠르게 진행되어 그 변화의 폭이 작아진 것에 기인한다.
- 4) Bottom Ash를 적용한 CCP는 연약지반 상에서 충분한 지지력을 확보하고 있어 연약지반개량이외 에도 말뚝으로서의 기능성이 있는 것이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부에서 시행한 에너지·자원기술 개발사업 (2002-C-CC02-P-02)지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김찬기, 정진섭, 장용채. “생석회말뚝에 의한 연약점토 지반 개량효과”, 대한토목학회논문집, 제18권, 제III-4

호, 1998, pp853~862.

2. 박용원, 김병일, 윤길림, 이상익, 문대중, 권오순, “모래다짐말뚝의 치환율 변화에 따른 거동 특성 연구”, 한국지반공학회는문집, 제16권, 제4호, 2000, 8, pp.117~128.
3. 임중석, “생석회말뚝 타설면적비의 변화에 따른 연약 점토지반의 개량효과”, 한국지반공학회는문집, 제17권, 제5호, 2001, 10, pp37~42.
4. 삼성중공업 건설기술 연구소, “해안매립과 연약지반 개량을 위한 신기술 개발 연구논문집”, Vol 1, 1995, pp6-1~6-67.
5. 천병식, 고갑수, “남해 울촌 해성점토의 생석회과일에 의한 개량효과”, 대한토목학회논문집, 제18권, 제III-4호, 1998, pp521~529.
6. 최대호, “토질시험”, 동화기술, 2001, pp269~280.
7. 下田正雄, “石灰安定處理工法”, 鹿島出版會, 日本, 1983, pp12~38.
8. 石田宏, “石灰ペイルによる含水比の低下について”, 日本土質工學研究發表會(12回), Japan, No 321, 1977, pp54~62.
9. Holyman, A. and Mitchell, J. K., “Assessment of Quicklime Pile Behavior” Improvement of Ground, Vol 2, 1983, pp897~902.
10. Broms, B. B. and Boman, P., “Lime Columns-A New Type of Vertical Drains” 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1977, pp427~432.
11. Chen, P. A. and Law, K.T., “Pore Pressure Changes in Soft Soils Improved by Lime-Fly Ash Piles”, 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, 4-8, 1993, May, pp363~367.
12. Chew, H. H., Takeda, T., Ichikawa, K., Hosoi, T., “Chemico Lime Pile Soil Improvement used for Soft Clay Ground”, 11th Southeast Asian Geotechnical Conference, 4-8 1993, May, pp319~324.
13. Henkel, D. J., “The Shear Strength of Saturated Remolded Clay”, Proc. of the ASCE Research Conference on Shear Stength of Cohesive Soil, 1960, pp533~544.
14. Ingles, O. G. and Metcalf, J. B., Soil Stabilization, Butterworths, Ausralia, 1972, pp127~143.
15. Roscoe, K. H. and Burland, J. B., “On the generalized stress strain behavior of wet clay Engineering Plasticity”, Cambridge Univ. Press, 1968, pp336~342.

(접수일자 : 2006년 9월 13일)