

연직배수재를 이용한 폐석회 슬러지의 지반개량 효과

Soil Improvement Effect of Waste Lime Sludge Using Prefabricated Vertical Drains

신은철* · 박정준** · 김종인***

Shin, Eun-Chul · Park, Jeong-Jun · Kim, Jong-In

Abstract

The disposal problem of waste lime which is a residual product of lime industry have caused a lots of arguments in the past few years. Further more, waste lime contains a high moisture content which causes the disposal of waste lime is a great difficulty. The purpose of this study is to investigate for the effective dewatering solutions by placing various prefabricated vertical drains. The moisture content and degree of consolidation, pore water pressure, changes of settlement, bearing capacity with various vertical drains in waste lime were analyzed. The laboratory test results indicate that PBD is 2 times higher than circular drain in coefficient of consolidation. Based on the laboratory test results, settlement, pore water pressure, and dewatering measurements are shown in similar tendency. It is considered that PBD can drain primitive pore water much efficiently. The picture of SEM shows that circular drain filter has a serious clogging problem in comparison with PBD. In conclusion, PBD holds a superiority in waste lime's ground improvement and dewatering pore water pressure from the waste lime sludge. Also, circular drain is desired for some modification in its filtering system.

Keywords : Waste lime sludge, Prefabricated vertical drains, Pore water pressure, Bearing capacity ratio, Clogging

요 지

최근 우리나라는 석회산업의 부산물인 폐석회의 처리문제로 많은 분쟁이 발생하고 있다. 폐석회는 높은 함수비를 갖고 있어 이를 처리하기 위해서는 적절한 탈수과정이 선행되어야 한다. 본 연구는 연직배수공법을 활용하여 폐석회의 높은 함수비를 저하시키고 지반의 안정화를 촉진시키기 위한 효율적인 방안에 대하여 연구하였다. 즉, 폐석회 슬러지로 구성된 지반내에 기성연직배수재를 설치하였을때, 압밀도와 간극수압의 소산, 침하량 변화, 지지력 증가를 평가하였다. 실험 결과를 고찰해 보면, PBD가 원형드레인 보다 압밀계수가 2배정도 크게 나타났다. 전반적으로 침하량과 간극수압의 소산, 통수량을 비교하면 두 방법이 서로 유사한 경향을 보이고 있으나, PBD가 원형드레인보다 초기 간극수가 더 효과적으로 배수되는 것을 알 수 있었다. 실내배수실험 후 SEM 촬영에 의한 배수재의 필터 층을 살펴보면, PBD에 비해 원형드레인의 필터가 막힘현상이 심한 것을 알 수 있었다. 폐석회지반의 지반개량효과와 간극수의 배수는 PBD가 우수하며, 원형드레인은 타설간격이 길고 PBD와 같은 섬유배율이 균질한 필터로 교환하여 사용할 때 효율성이 증대할 것이라 예상된다.

주요어 : 폐석회, 기성연직배수재, 간극수압, 지지력비, 막힘현상

* 정회원 · 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수

** 비회원 · 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사과정 수료

*** 비회원 · 인천대학교 대학원 토목환경시스템공학과 박사과정 수료

1. 서론

우리나라는 중화학공업 육성정책으로 눈부신 경제성장과 더불어 비교적 자원이 풍부한 석회산업이 발달되었다. 그러나 생산위주의 공장운영과 관리 소홀로 석회산업의 부산물인 폐석회(폐석회)가 적당한 대비책 없이 방치되어왔다. 국내 화학공장이나 비료공장에서 발생된 폐석회는 재활용이 미미한 수준이고 대부분이 인근부지에 야적된 상태로 주변미관의 파괴와 토지이용계획, 토양 및 지하수오염이 문제점으로 대두되고 있다.

국내의 사업장에서 발생하는 폐석회는 주로 소다회 공정에서 배출되는 것으로 적당한 처리기술의 미비로 공장주변에 방치되어 왔으며, 사업장에 야적된 수량은 대략 320만톤에 달하고 있다. 외국의 경우, 폐석회의 처리는 대부분 내륙매립과 석회비료로 사용되고, 지반안정제, 염분토양의 중화제, 폐기물 매립장의 복토제 등으로 많은 연구가 진행되고 있으나, 우리나라는 그 활용이 미흡하고 연구의 진행도 활성화되지 못하고 있다.

이와 같이 높은 함수비의 폐석회 탈수 방안으로 최근에 지반개량공법으로 효율성이 입증된 연직배수공법의 적용은 불가피하다. 연직배수공법은 인공배수재로 플라스틱재료를 사용한 코어와 부직포의 필터로 구성된 PBD(Plastic Board Drain)와 PVC 주름관과 부직포의 필터를 이용한 원형드레인, 코어재로 천연섬유를 이용해 친환경적인 공법을 추구하는 Fiber Drain 등이 있다.

배수재를 이용한 지반의 평균압밀도에 관한 연구로 Barron(1948)이 자연연직변형률의 경우와 등연직변형률의 경우에 대하여 지반교란효과와 배수저항의 영향을 고려한 평균압밀도를 산정하는 제안식을 제안하였다. Yoshikuni와 Nakando(1974)는 배수저항만을 고려한 근사식을, Hansbo(1979)는 방사상 흐름만을 가진 토층의 등연직변형의 조건에 대한 해를 제시했다. Onoue(1988)는 투수성에 상관없이 지반교란효과와 배수저항을 고려할 수 있는 식을 제안하였다.

연직배수재를 사용시 배수재의 통수능에 밀접한 영향을 미치는 교란영역(Smear Zone)에 대한 연구가 Bergado 등(1996)에 의하여 이루어졌다. 특히, 박영목(1997)은 멘드럴 타입에 의한 2차원과 3차원적인 실내시험을 실시하여 이로부터 교란영역의 범위를 제시하였고, 소형 포켓 콘을 사용하여 콘지수가 0.75이하인 경우를 교란영역으로 구분하

였다. 이밖에도 이송 등(1993), 김상규 등(2000)에 의해 연직배수공법의 압밀해석이 연구되어졌다. Basu 등(2000)이 필터재의 막힘에 따른 투수성을 연구했으며, 신은철 등(2001)은 PBD의 초기 배수면적과 배수저항을 고려한 통수능력에 관하여 연구하였다.

따라서 폐석회 슬러지로 구성된 지반에 여러 가지 연직배수공법을 활용하여 폐석회 내의 수분을 효과적으로 배제하여 최적의 지반개량효과를 도출하는데 있다. 또한, 폐석회 지반에서 연직배수재 거동시 나타나는 침하량과 간극수압의 소산, 압밀도 등을 비교·분석하고, 배수재에 따른 지지력의 증가와 통수능의 감소 원인을 규명하였다.

2. 시료의 공학적 특성

2.1 흙시료의 공학적 특성

실험에 사용된 폐석회 슬러지는 ○○화학(주)에서 채취한 것으로서 실험전에 높은 함수비를 갖고 있는 폐석회를 50℃ 이하의 자연상태에서 건조해 실험을 실시하였다. 폐석회의 화학적인 성분비를 살펴보면 표 1과 같으며, 석회석이 24.1%로 수분을 제외하고는 가장 많은 성분을 갖고 있음을 알 수 있다. 또한, 폐석회의 공학적 특성은 표 2에 나타난 바와 같이 자연함수비가 100.4%, 비중은 2.21으로 나타났고, 그림 1에 나타난 바와 같이 폐석회의 200체 통과량은 61.9%, 균등계수는 6.7, 곡률계수가 0.38을 나타내었다.

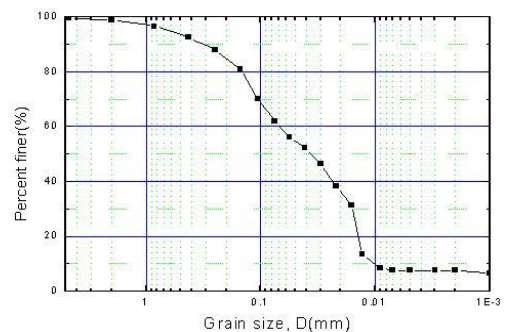


그림 1. 폐석회의 입도분포곡선

표 1. 폐석회의 성분분석

구 분	성분백분율(%)
CaCO ₃ (석회석)	24.1
CaO(생석회)	10.9
MgO(산화마그네슘)	4.6
CaCl ₂ (염화칼슘)	5.8
CaSO ₄ (황산칼슘)	3.5
Fe ₂ O ₃ (산화제2철)	1.2
Al ₂ O ₃ (산화알루미나)	2.3
NaCl(염화나트륨)	3.6
SiO ₂ (이산화규소)	4.0
수분	40.0
합계	100

표 2. 폐석회의 공학적 특성

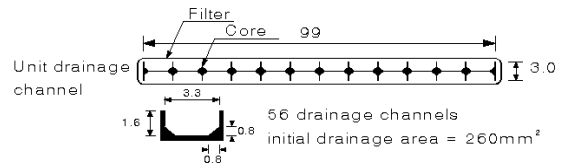
구 분	특성	
자연함수비(%)	100.4	
균등계수	6.7	
곡률계수	0.38	
비중	2.21	
pH	11.99	
No.200 통과량(%)	61.9	
액성한계(%)	33.2	
일축압축강도 (tf/m^2)	3.63	
투수계수(cm/sec)	2.214×10^{-6}	
다짐시험	$\gamma_{dmax}(tf/m^3)$	1.371
	$w_{opt}(\%)$	28.7
일면배수	$P_c(tf/m^2)$	11.65
	C_c	1.136
	C_s	0.035
양면배수	$P_c(tf/m^2)$	10.74
	C_c	1.184
	C_s	0.052

또한, 최대건조단위중량은 1.371 tf/m^3 , 일축압축강도는 3.63 tf/m^2 , 투수계수는 $2.214 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 으로 나타났다. 폐석회의 pH값은 11.99로 강알칼리에 속하며 철과 접촉시 철을 빨리 부식시키는 성질을 갖는다.

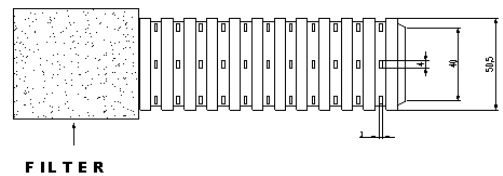
2.2 연직배수재의 물리적 공학적 특성

본 연구에서 사용된 플라스틱 보드 드레인인 그림 2(a)와 같이 일반적으로 폭 100 mm, 두께 3mm 정도이고, 코어와 필터 두 부분으로 나누어져 있는 복합형상으로 제작되었다. 이러한 PBD의 필터는 지반으로부터 코어 안으로 유입되는 흙입자를 저지하고 압밀수를 원활히 통과시킬 수 있도록 되어 있다. 사용된 PBD는 분리형으로서 하모니카 코어를 가진 포켓식 PBD로 코어와 필터는 모두 폴리프로필렌으로 되어 있다.

그림 2(b)에 나타난 바와 같이 원형드레인은 PVC 주름관에 PP필터로 구성되어 있다. 코어의 주름관에는 4개의 구멍이 뚫려 있어 필터를 통과한 간극수가 코어로 이동이 자유롭게 만들었다. 원형드레인의 직경은 50.5mm이며 필터와 코어는 한쪽부분으로 접착되어 있어 일체형을 이루고 있다.



(a) 플라스틱 보드 드레인



(b) 원형드레인

그림 2. 연직배수재의 코어구조

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 대형압밀시험기

본 연구에서 사용된 대형압밀시험기는 배수재가 지반에 타설된 후, 가해지는 상재하중 하에서 배수능력과 침하량, 간극수압의 소산, 지지력의 증가를 파악하기 위하여, 일정하중에 따른 변형량을 측정하였다. 그림 3에 도시된 바와 같이 직경 50cm, 높이 120cm의 원통형 강관에 공기압으로 상재하중을 줄 수 있도록 제작된 하중재하장치와 변위량 측정장

치, 간극수압계와 데이터로그 등으로 되어 있다. 배수재가 타설된 모형지반 조성은 두께 12mm 원통형 강관 내에 배수재를 하단부 부터 고정시키고 강관 내에 토사시료를 채운 후, 하중재하장치로 하중을 가하여 배수재가 모형 지반과 함께 거동하도록 하였다.

공기압은 0.1kgf/cm²씩 조절이 가능하도록 압력조절장치가 설치되어 있으며, 변위량 측정은 포텐서미터를 사용하였다. 또한, 강관 내부에는 간극수압계를 설치하여 시험시 배수재에서의 거리와 깊이에 따른 간극수압의 변화를 측정하였다. 자료의 수집은 데이터로그를 설치해 자동으로 시간에 따른 변위량을 측정하였다.

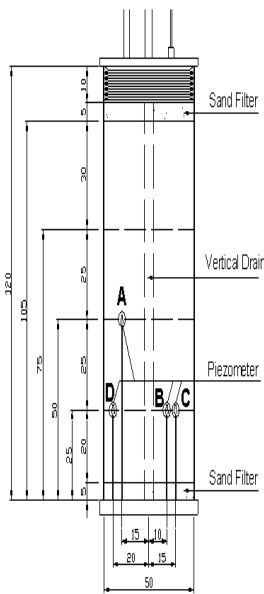


그림 3. 시험기의 내부 상세도 (단위:cm)

3.2 실험방법

시험기는 물이 유출되지 않도록 연결부위에는 코킹처리한 후 바닥에 50mm의 표준사를 포설하고 현장함수비 75%에 맞추어 폐석회를 1m 높이로 240kg을 포설하였다. 48시간동안 포화시키면서 안정화시킨 후에 다시 50mm의 표준사를 포설하였다.

3.2.1 침하량과 압밀도의 측정

실험이 시작되기전 수위 차를 일정하게 유지시키며 하중재하장치를 설치한 후 완전히 밀폐시켰다. 실험의 진행은 1분 간격으로 재하하중을 0.2kgf/cm² 씩 증가시켜 간극수압

과 실 하중의 비로 B계수를 측정해 포화상태를 평가하였다. 재하하중이 0.8kgf/cm²에 도달했을 때 하중을 고정시킨 후 8일간 유지하면서 시간에 따른 침하량을 측정하고 압밀계수 값을 결정하였다. 변위량의 측정은 포텐서미터를 사용하였으며, 위치는 배수재가 설치된 중앙을 기준으로 정하였다.

3.2.2 간극수압 및 통수량의 측정

간극수압의 측정은 간극수압계를 이용해 시험기 하부로부터 25cm와 50cm에 스텐드파이프를 설치하여 높이에 따른 간극수압의 차이를 측정하였다. 또한, 그림 3에 나타난 바와 같이 배수재 중심에서 10cm, 15cm, 20cm의 거리에서 같은 높이상에 스텐드 파이프를 설치하여 배수재로부터의 거리에 따른 간극수압을 측정하였다.

통수량의 측정은 하중재하장치의 상부에 위치한 배수관을 통해 하중재하에 따른 배출수가 상부에 위치한 수조로 월류된 수량을 측정하였고, 하중재하에 따른 배출수의 양을 정확히 측정할 수 있도록 하였다.

3.2.3 지지력 측정

시험 전·후의 지지력의 변화를 관찰하기 위해 콘관입시험과 베인전단시험을 통해 변화된 지지력을 지지력비로 나타내었다.

콘관입시험은 최대 100kgf까지 측정이 가능한 휴대용 콘관입시험기를 사용하였다. 측정은 시험기의 중심에서 10, 20cm 떨어진 위치에서 실시하였고 10cm 간격으로 q_c 를 측정하였다. 그림 4는 콘관입시험의 경우, 중심에서 10cm의 위치를 C1, 20cm의 위치를 C2로 나타내었다. 베인전단시험의 위치도 중심에서 10cm의 위치를 V1, 20cm의 위치를 V2로 나타내었다. 또한, 휴대용 베인전단시험기를 사용하여 시험장치의 하부로부터 25, 50, 75cm의 높이와 중심에서부터 10, 20cm의 거리에서 측정하여 심도 및 배수재와의 거리에 따른 흙의 비배수전단강도(c_u)를 측정하였다.

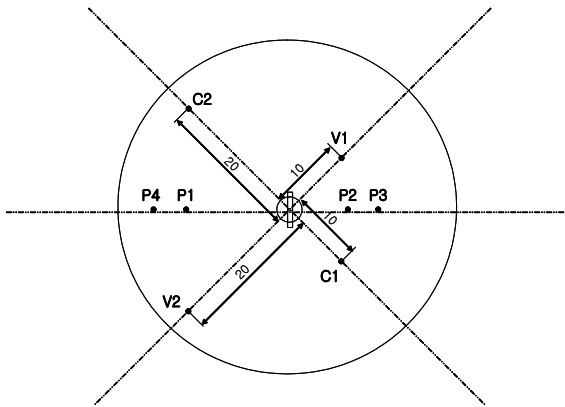


그림 4. 콘관입시험과 베인전단시험의 위치

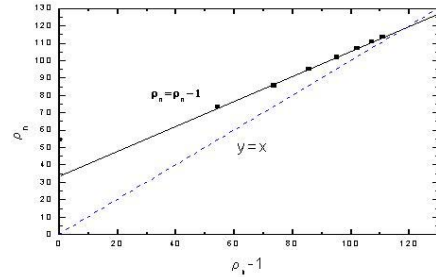


그림 5. Asaoka의 최종침하량 예측방법

4. 실험결과 및 분석

4.1 침하량과 압밀도의 분석

폐석회의 침하량과 압밀도에 대한 분석은 상재하중이 0.8kgf/cm²를 기준으로 포텐서미터를 통한 시간에 따른 침하량의 변화를 분석하였다. 최종침하량과 Taylor의 \sqrt{t} 법에 따라 90%압밀이 되었을 때 소요되는 시간이 PBD가 가장 빨랐고, 최종침하량도 가장 크게 나타났다. 실험결과, 표 3에 나타낸 바와 같이 PBD의 최종침하량은 14.12cm이고, 90%의 압밀이 나타나는 시간이 581분으로 가장 효과적인 것으로 판명되었다. 압밀계수의 차이를 보아도 PBD가 0.205 cm²/sec로 가장 크게 나타났으며, 원형드레인이 0.069 cm²/sec, 선행하중재하만을 실시한 배수방법은 0.026 cm²/sec로 가장 낮은 압밀계수를 나타내고 있다. 90%의 압밀도를 평가하는 다른 방법으로 Asaoka(1978)가 제안한 최종침하량 예측법을 이용해 선행하중재하시의 최종침하량에 90%에 해당하는 침하량에서의 시간과 압밀계수를 확인하여 그림 5와 표 4에 각각 나타내었다. 90%의 압밀도에 해당하는 시간과 압밀계수의 차이는 PBD가 원형드레인에 비해 2배의 값을 갖는 것으로 나타났다.

표 3. Taylor방법에 의한 압밀계수와 압밀시간

구분	최종침하량 (cm)	t ₉₀ (min)	압밀계수 c_v (cm ² /sec)
선행하중재하	12.74	4665	0.026
PBD	14.12	581	0.205
원형 드레인	13.48	1739	0.069

표 4. 90%압밀도의 압밀계수와 압밀시간

구분	t ₉₀ (min)	압밀계수 c_v (cm ² /sec)
선행하중재하	8967	0.014
PBD	1682	0.071
원형드레인	3690	0.033

4.2 간극수압의 분석

본 실험에서는 상재하중을 0.8kgf/cm² 까지 올린 후 그 이후의 간극수압의 변화를 측정하였다. 각 지점의 위치는 그림 3에 나타낸 바와 같이 P1지점은 하부에서 50cm위에 위치하고 P2, P3, P4지점은 하부에서 25cm의 높이에서 시험기의 중심으로부터 10cm, 15cm, 20cm 떨어진 위치의 간극수압을 측정할 수 있도록 하였다.

그림 6(a)에 도시된 실험결과로 판단한다면 선행하중재하의 경우에는 간극수압이 소산되는 순서가 P1, P2, P3, P4순으로 나타나 있으며, 초반부의 간극수압은 비슷한 경향을 보이다가 상부의 간극수압이 작아지고 중심에서 멀어질수록 간극수압이 커지는 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 시험기의 배수가 상향배수로 이루어져 있고 압밀이 상부에서부터 이루어지면서 간극수가 상부에서부터 소산되고 간극수압의 분포가 타원형의 형태를 나타나게 되어 간극수압의 변화가 중심쪽에서 더 빨리 소산되는 것을 알 수 있다.

그림 6(b)에 나타난 PBD의 경우, 초반부는 위치별로 유사한 간극수압의 분포를 보이고 있으며 24시간까지 급격한 압밀효과로 인해 간극수압의 급격한 변화를 보이고 있다. 특히, P1 지점의 간극수압이 다른 지점의 간극수압보다 높은 경향을 나타나게 되는데 이는 배수재의 영향으로서 하중을 가해짐에 따라 하부에서부터 간극수의 배수로 인해 간극수가 소산되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 배수재의 중심에서부터 거리에 따른 간극수압의 변화는 거리에 따라 간극

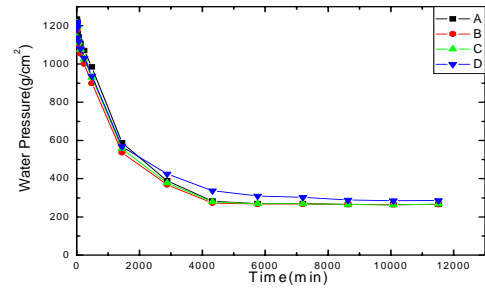
수압이 커지는 경향을 보이거나 그 차이가 명확하게 나타나지 않는데 이는 압밀에 의한 배수재의 변형으로 인해 다소 차이가 발생한 것으로 사료된다.

원형드레인의 경우에는 그림 6(c)로부터 초반부의 변형에 있어서 상부측과 하부측의 간극수압의 분포는 PBD와 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러나 PBD에 비해 그 값이 약간의 차이를 나타내는 것은 배수재의 직경이 넓고 간극수압의 차이로 초기의 신속한 간극수의 배수가 이루어지지 않았기 때문이라 판단된다. 간극수압은 3일후부터 수렴하는 형상을 나타내고 배수재로부터 거리가 멀수록 간극수압이 큰 것을 알 수 있다.

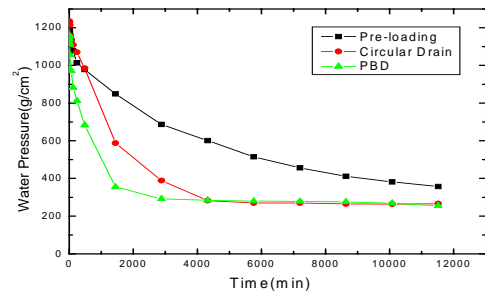
그림 6(d)는 P1지점에서 공법별 간극수압의 소산상태를 측정함으로써 간극수압의 변화 역시 침하량의 변화와 통수량의 변화와 유사한 특성을 나타내고 있다.

PBD와 원형드레인의 경우 3일후부터는 간극수압이 동일한 크기를 보이는 것으로 보아 압밀이 충분히 진행되었다는 것을 알 수 있고, 선행하중재하의 경우는 아직도 압밀이 진행중에 있음을 알 수 있다.

PBD가 가장 빠르게 간극수압이 소산되어 2일후부터는 일정한 값에 수렴하는 것을 알 수 있었으며, 원형드레인은 빠른 소산을 보이거나 초기에 원형 배수재 안에 간극수를 시료 안의 간극수가 밀어낼 시 물의 중량에 대한 저항으로 선행하중재하때보다 소산속도가 느려진 구간을 확인할 수 있다.



(c) 원형드레인 설치시



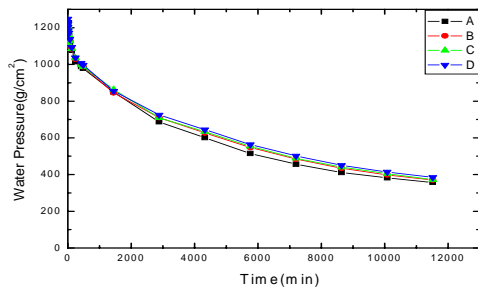
(d) P1 지점에서의 각 공법별 간극수압
그림 6. 간극수압 변화

4.3 침하량과 통수량의 분석

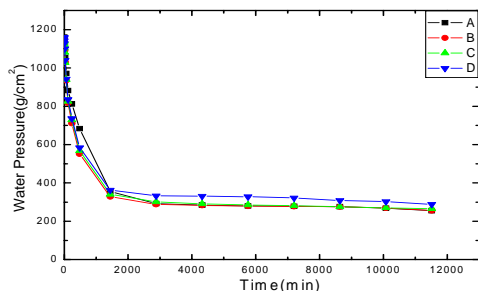
본 실험은 하중을 단계적으로 재하할때부터의 침하량과 0.8kgf/cm² 로 고정시킨 후의 침하량을 모두 합한 총 침하량과 8일동안 통수량을 측정하여 얻은 변화를 측정하였다.

그림 7의 총 침하량과 그림 8의 누적통수량 증가는 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있는데, 이는 폐석회속에서 배수된 물의 양만큼 침하가 이루어지는 것을 알 수 있다. 이로 인해 PBD나 원형드레인의 사용으로 초기의 통수량을 앞당길 수 있으며, 또한 초기침하량을 크게 할 수 있어 초기에 소요압 밀도에 도달 할 수 있음을 단적으로 보여주고 있다. 측정된 통수량이나 침하량의 결과로부터, 배수재를 사용한 실험은 3일후부터 결과가 수렴하는 경향을 보이며, PBD의 경우에는 통수량의 90%이상이 하루에 나오는 것을 알 수 있어 침하량이나 통수량에서 매우 우수한 특성을 나타내고 있다.

통수량의 결과에서 살펴보면, 초기 통수량의 경우 PBD의 사용한 결과가 현저히 높음을 알 수 있다. 원형드레인의 경우 통수량은 배수된 물이 먼저 코어를 채운 후 윗류된 물의 양이라 배수단면이 커서 배수저항이 없으나 초반에 모세관 현상도 없어서 이러한 경향을 나타내는 것이라 판단된다.



(a) 선행하중재하 상태



(b) PBD 설치시

그림 9에서는 시간에 따른 원형드레인과 PBD의 투수량을 투수단면적과 동수경사로 나누어서 투수면적에 따른 투수계수의 변화를 그래프로 나타내었다. 실험결과를 분석하면 원형드레인의 경우 투수계수의 변화가 초반부를 제외하면 거의 일정한 투수계수를 유지하는 반면 PBD의 경우는 초반부에 높은 투수계수를 보이다 점차 투수계수가 감소하는 경향을 보이고 있다.

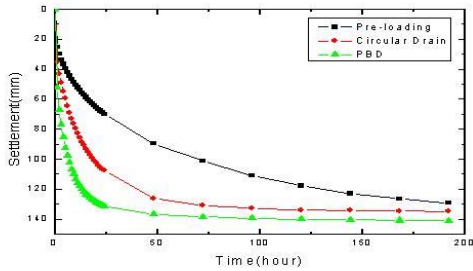


그림 7. 시간에 따른 전체 침하량의 변화

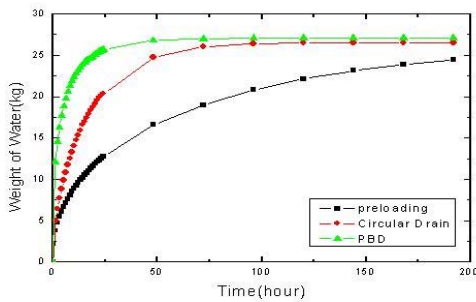


그림 8. 시간에 따른 누적투수량

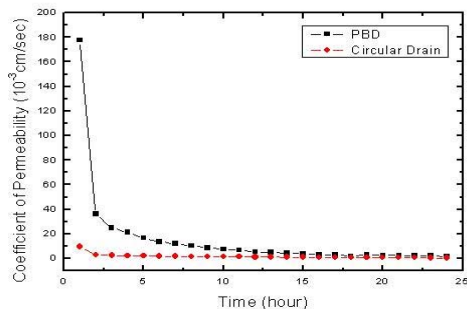


그림 9. 배수재에 따른 투수계수의 변화

연직배수재별 경과시간에 따른 투수계수의 변화는 최초의 한시간 동안에 투수계수의 값은 PBD의 경우 $177.5 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이며, 원형드레인의 경우 $9.6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 으로 PBD가 원형드레인에 비하여 18.5배나 큰 투수계수를 나타

낸다. 즉, PBD를 Hansbo가 제안한 등가직경으로 환산한 결과, 6.59cm로서 원형드레인보다 배수면적이 크고, 원형드레인속의 간극수가 자체의 중량과 배수재의 강성에 따른 축압에 대한 저항, 모세관을 따라 움직이는 간극수의 거동 등으로 인하여 이러한 결과가 도출된 것으로 판단된다.

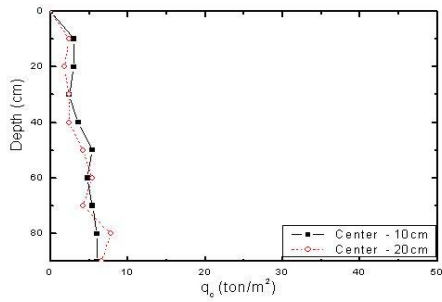
4.4 콘관입 저항치의 분석

본 실험은 압밀이 끝난후의 지지력 변화를 알아보기 위한 실험으로 선행하중재하, PBD, 원형드레인의 압밀실험후 콘관입저항치의 변화를 측정하였다. 측정위치는 시험기의 중심에서 10cm에 위치한 C1지점과 20cm에 위치한 C2지점에서 휴대용 콘관입시험을 실시해 관입저항치 q_c 를 조사하였다.

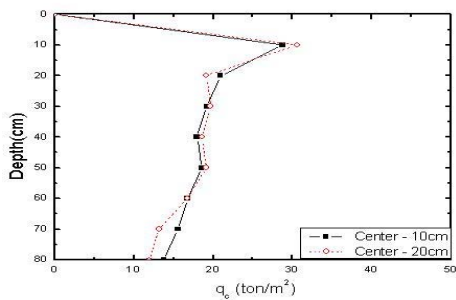
조사결과 원지반에 대한 콘관입저항치는 그림 10(a) 같으며, 선행하중재하의 경우 그림 10(b)과 같이 10cm의 콘관입 저항값과 20cm의 관입저항값이 유사한 경향을 보이는 것에 비하여 원형드레인과 PBD의 경우에는 그림 10(c)와 그림 10(d)로 알 수 있듯이 배수재로부터의 거리에 비례하여 지지력이 약해지는 것을 알 수 있고 원형드레인보다 PBD의 경우일 때 그 저항값의 차이가 큼을 알 수 있다. 표 5의 측정결과에 따라 배수방법에 따른 중심으로부터 거리가 10cm에 위치한곳의 콘저항값은 선행하중재하일때 18.95 tf/m^2 , PBD일때 31.83 tf/m^2 , 원형드레인의 경우 27.41 tf/m^2 로 PBD의 경우가 가장 큰 관입지지력을 보이고 있다.

깊이에 따른 배수방법의 지지력 변화를 살펴보면 심도가 증가함에 따라 지지력이 감소되는 경향을 볼 수 있다. 이것은 상부로부터 압밀이 시작되면서 심도별로 상재압의 영향을 받아 상부에서부터 높은 지지력을 얻게 된 것으로 판단되며, PBD의 경우는 중심부에서 가장 약한 지지력을 보이다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 침하에 따른 PBD의 변형과 배수 초반부의 모세관현상으로 하부의 간극수가 먼저 소산된 것으로 사료된다.

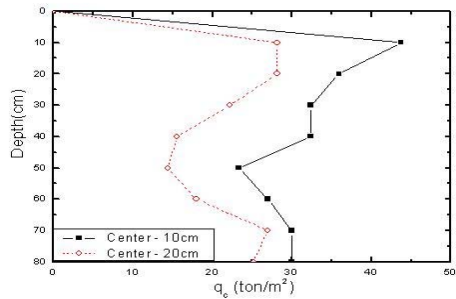
배수공법에 따른 지지력의 증가를 파악하기 위해 성형된 포화시료의 콘관입저항값을 1로 보고 압밀이 끝난후 배수공법에 따른 콘관입저항값을 지지력비(BCR)로 나타내었다. 표 6에 나타낸바와 같이 초기시료를 1이라 가정하면 선행하중재하와 원형드레인, PBD의 BCR은 4.4: 5.6 : 6.4 의 비를 나타내고 있으며, 배수재의 중심거리에 따른 지지력비의 증가량은 원형드레인의 경우 1.6, PBD의 경우 2.3으로 나타났다.



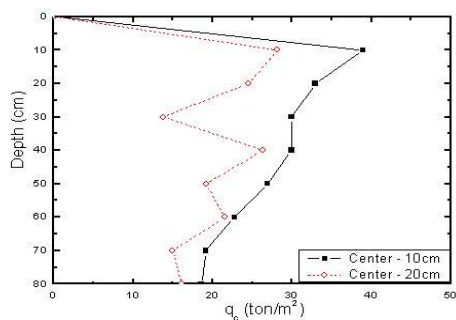
(a) 실험전 포화상태



(b) 선행하중재하 후



(c) PBD 사용 후



(d) 원형드레인 사용 후

그림 10. 콘관입 저항치

표 5. 배수재 중심에서 거리에 따른 콘관입저항값

구분	Center - 10cm (q_c , tf/m ²)	Center - 20cm (q_c , tf/m ²)	지지력변화 (tf/m ²)
초기시료	4.39	4.13	0.26
선행하중재하	18.95	18.64	0.31
원형드레인	27.41	20.59	6.82
PBD	31.83	22.32	9.51

표 6. 배수공법에 따른 BCR값의 변화

구분	초기시료	선행하중재하	원형드레인	PBD
BCR	1	4.4	5.6	6.4

4.5 베인전단강도의 특성분석

본 실험은 베인전단시험을 통한 비배수 전단강도를 파악하였다. 위치는 하단부에서 75, 50, 25cm의 심도에서와 시험기 중심에서 10, 20cm의 거리에서 비배수 전단강도를 측정하였다. 표 7에 나타낸바와 같이 전반적으로 심도에 따라 비배수 전단강도가 감소하는 경향을 보이거나 중심에서 10cm의 경우에 원형드레인이나 PBD의 경우는 중간 부위에서 강도가 증가되는 경향이 나타났다. 이는 중간의 위치에서 시료의 구속상태가 양호하여 이러한 경향이 나타난 것으로 사료된다.

표 7. 위치에 따른 비배수 전단강도

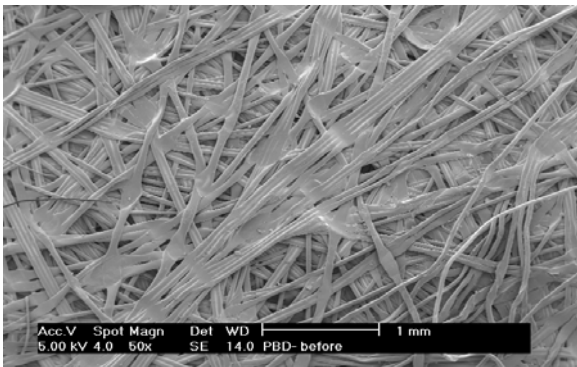
구분	선행하중재하 (tf/m ²)		PBD (tf/m ²)		원형드레인 (tf/m ²)	
	Center -10cm	Center -20cm	Center -10cm	Center -20cm	Center -10cm	Center -20cm
Bottom+75	2.65	2.65	3.57	2.55	3.06	2.96
Bottom+50	2.04	1.94	3.88	2.23	3.26	2.55
Bottom+25	1.53	1.53	2.65	1.53	2.55	1.63

4.6 막힘현상에 대한 분석

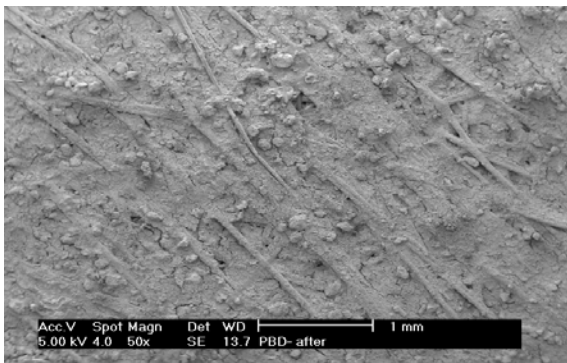
본 실험은 PBD와 원형드레인이 폐쇄회속에서 압밀중 막힘현상을 관찰하기 위하여 실험의 전후에 PBD와 원형드레인의 필터를 SEM장비를 이용하여 촬영을 실시하였다.

PBD의 필터는 그림 11(a)와 같이 100% 폴리프로필렌 장섬유의 부직포로 구성되어 있으며 섬유의 배열이 직선형으로 길고 섬유사이의 간격이 조밀하게 되어 있고, 수평방향으로 섬유가 발달되어 있어 비교적 가지런한 모습을 관찰할 수 있다. 한편, 원형드레인 필터는 그림 11(c)처럼 같은 폴리프로필렌의 부직포로 되어있어도 섬유의 배열이 매우 불규칙하게 엉켜 있는 모습을 관찰할 수 있다.

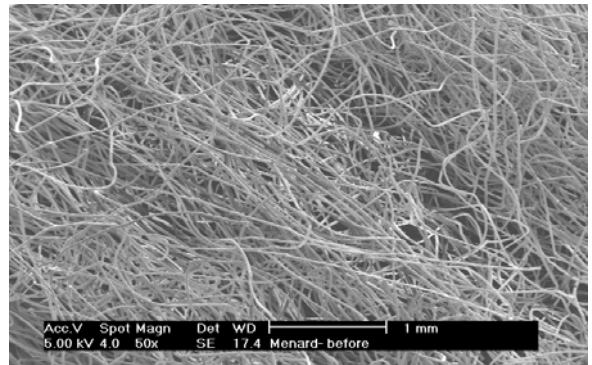
시험 전후의 막힘 현상을 관찰해 보면 그림 11(b)와 그림 11(d)에서 나타낸바와 같이 흡착력이 우수한 폐석회의 특성으로 인해 많은 양의 시료가 필터를 막고 있음을 알 수 있다. 그림 11(b)으로부터 PBD의 경우 필터의 표층에 얇은 막을 형성한 모습을 관찰할 수 있으며, 원형드레인 필터의 경우 그림 11(d)와 같이 전반적으로 불규칙한 섬유배열로 생긴 필터내의 공간에 많은 양의 시료가 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 원형드레인 필터의 섬유가 불규칙하고 섬유의 가닥에 접촉하는 면적이 커서 폐석회와 응집되어 필터 속에서 덩어리지는 현상으로 나타나 필터의 막힘현상에 원인이 되었다.



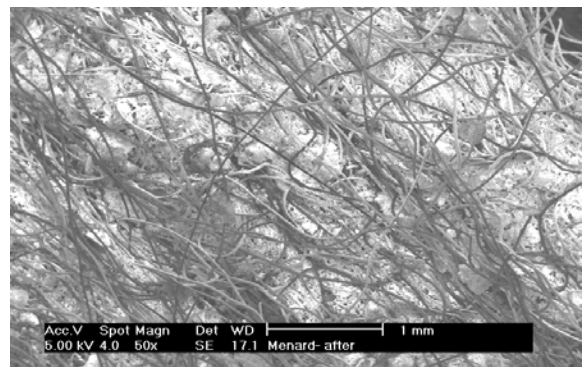
(a) PBD의 실험전 필터모습



(b) PBD의 실험후 필터 모습



(c) 원형드레인의 실험전 필터모습



(d) 원형드레인의 실험후 필터모습

그림 11. SEM 분석 결과

5. 결 론

본 연구를 통해서 폐석회의 효율적인 탈수방법과 배수재의 특성에 따른 지반개량효과를 기대할 수 있었다. 이 연구는 폐석회의 효율적 처리를 위한 지반개량공법을 선정하기 위해 공학적 특성과 배수재에 따른 탈수효과, 시공 후의 지지력 변화 등을 평가하였고, 연구결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) Taylor의 \sqrt{t} 법과 아소카의 최종침하량에 따른 90%압밀도의 압밀계수와 소요시간을 판단할시 PBD가 원형드레인에 비해 약 2배정도 90% 압밀도에 도달하며, 압밀계수도 2배정도 크게 나타났다.
- (2) 간극수압의 소산은 침하량과 통수량의 변화가 유사한 경향으로 나타나며, 모세관현상에 따른 급격한 간극수의 소산으로 PBD가 가장 우수한 간극수의 소산을 보여주고 있다. 또한, 배수재의 중심에서 멀어질수록 간극수압의 소산이 늦어지는 경향을 보인다.

- (3) 대형 압밀 실험동안 상재하중을 재하한 이후 통수량의 변화를 살펴보면 실험을 시작한 초기의 통수량이 매우 큰 경향을 나타낸다. PBD와 원형드레인 모두 3일 후부터 누적통수량이 수렴하며, 배수재에 따른 투수계수는 PBD가 원형드레인에 비하여 18배나 큰 투수계수를 나타낸다.
- (4) 콘관입 저항치와 배인전단시험을 통한 지지력의 특성을 지지력비로 살펴보면 초기시료의 지지력을 1로 볼 때 선행하중재하, 원형드레인, PBD의 지지력 증가비는 4.4 : 5.6 : 6.4 로 지지력의 증가효과를 보이고 있으며, 지표면과 가까운 위치와 배수재에서 가까운 지점일 수록 지지력이 증가하는 것을 알 수 있다.
- (5) SEM 촬영을 통해 시험전후의 배수재 필터의 상태를 확인한 결과 배수재의 필터에 막힘현상이 나타나며, 원형드레인의 필터가 섬유의 불규칙성과 폐석회의 흡착성으로 인해 막힘현상이 증가한 것으로 보인다.
- (6) 실험 결과를 종합적으로 검토하여 보면, 폐석회에서 지지력증가와 간극수의 배수에는 PBD공법이 효과적인 방법으로 판단된다. 원형드레인의 사용은 배수재의 간격이 코어속의 잔류 간극수가 영향을 미치지 못하도록 넓게 사용하고, 필터는 규칙성 있는 섬유배열을 가진 필터로 교환해 막힘현상을 저감시킨다면 배수성능이 향상 될 것으로 사료된다.

(접수일자 : 2005년 3월 3일)

참 고 문 헌

1. 김상규, 김현태, 홍병만(2000), 스미어존내 투수성변화를 고려한 연직배수공법의 압밀해석, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제16권, 제2호, pp. 31~39.
2. 박영목(1997), 국내 PBD재의 배수성능과 진공효과에 의한 통수능력 향상에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제13권, 제 2호, pp. 39~53.
3. 신은철, 김남현, 강신(2001), 실대형 모형실험을 통한 Plastic Board Drain의 통수능 분석, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp. 1~4.
4. 이 송, 양태선, 박종찬, 백영식(1993), 진공하중에 의한 Drain Board 타입 점토지반의 거동특성, 한국지반공학회지, 한국지반공학회, Vol.9, No.1, pp. 45~57.
5. Asaoka, A.(1978), Observational procedure for settlement prediction, Soil and Foundations, 18(4), pp. 87~101.
6. Barron, R. A.(1948), Consolidation of fine-grained soils by drain wells, Transaction ASCE, Vol. 113, Paper No.2346, pp. 718~742.
7. Basu, D., and Madhav, M. R.(2000), Effect of prefabricated vertical drain clogging on the rate of consolidation a numerical study, Geosynthetics International, Technical Paper, Vol. 7, No.3, pp. 189~215.
8. Bergado, D. T., Manivannan, R., and Balasubramaniam, A. S. (1996), Proposed criteria for discharge capacity of prefabricated vertical drains, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 14, No.9, pp. 481~505.
9. Hansbo, S.(1979), Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drain, Ground Engrg., Vol.12, No.5, pp. 16~25.
10. Onoue, A.(1988), Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consideration, Soils and Foundation, Vol.28, No.4, pp. 165~174.
11. Yoshikuni, H and Nakanodo, H.(1974), Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability, Soils and Foundation, Vol.14, No. 2, pp. 35~46.