한국지반환경공학회 논문집
제10권 제6호 2009년 10월 pp. 69~77

실내모형실험을 통한 PBD공법이 적용된 대심도 연약지반 개량에 관한 연구

A Study on the Soft Ground Improvement in Deep Depth by Application of PBD Method Using Model Test

변 요 셉[1] · 안 병 제[1] · 천 병 식†
Byun, Yoseph · Ahn, Byungje · Chun, Byungsik

ABSTRACT : The shortage of bearing capacity and settlement, shear deformation may occur when constructing a structure such as harbor, airport and bridge on soft ground such as marine clay, silty clay, sandy soil because it is very soft. The various ground improvement methods were applied to obtain preceding settlement of soft ground and strength increase. The vertical drain method has been used to reduce the required time for consolidation of the soft ground. Especially, the PBD (Plastic Board Drain) has been widely used among in the vertical drain method. In this study, a behavior of characteristic was evaluated by operating a compound drainage capacity test about the PBD (Plastic Board Drain) method applied in soft clay in deep depth. As a result, the settlement gradually occurred with increase of surface load. The consolidation settlement was processed with dissipation of pore pressure after surface load of 500 kN/m^2. Accordingly, it was found that change of settlement through load steps was resulted from dissipation of pore pressure. It was also found that the drainage capacity of vertical drains was considerably reduced with pressure increase and time elapse.

Keywords : PBD (Plastic Board Drain), Vertical Drain Method, Compound Drainage Capacity Test, Deep Depth

요 지 : 연약지반은 해성점토, 실트질, 사질토 등과 같은 지반으로 항만, 공항, 교량과 같은 구조물의 축조시 지지력 부족 및 침하, 전단변형 등의 문제점을 가진다. 이러한 문제점을 개선하고 연약지반의 조기 침하 및 강도증진을 위해 다양한 지반개량공법들이 적용되고 있으며 연약지반의 압밀에 소요되는 시간을 단축시키기 위해 연직배수공법이 많이 사용되고 있다. 특히, 연직배수공법에서 가장 많이 사용되는 배수재는 PBD(Plastic Board Drain)이다. 본 연구에서는 대심도 연약지반에 적용될 PBD공법에 대해 복합통수능 실험을 실시하여 거동특성을 평가하였다. 그 결과, 상재압력의 증가에 따라 침하는 점진적으로 발생하였으며, 상재압력 500kN/m^2 이후에는 간극수압의 소산에 따라 압밀침하가 진행되었다. 따라서 재하단계별 침하량의 변화는 간극수압의 소산에 따른 것임을 확인할 수 있었다. 또한, 연직 배수재의 통수능은 압력이 증가할수록 또 시간이 경과함에 따라 현저히 감소함을 알 수 있었다.

주요어 : PBD(Plastic Board Drain), 연직배수공법, 복합통수능실험, 대심도

1. 서 론

현재 연약지반은 해성점토, 실트질, 사질토 등과 같은 지반으로 항만, 공항, 교량과 같은 구조물의 축조시 지지력 부족 및 침하, 전단변형 등의 문제점을 가진다. 이러한 문제점을 개선하고 연약지반의 조기 침하 및 강도증진을 위해 다양한 지반개량공법들이 적용되고 있으며, 연약지반의 압밀에 소요되는 시간을 단축시키기 위해 연직배수공법이 많이 사용되고 있다. 그러나 연직배수공법에서 배수재료로서 양질의 모래를 구하기가 어려워짐에 따라 모래의 대체재로 PBD의 사용이 증가하고 있는 실정이다. 연직배수공법에 사용되는 PBD는 플라스틱 코어와 섬유제 필터로 구성되어 있다. PBD를 연직 배수공법에 적용하여 사용할 때 토양의 미세 입자들이 유로를 막아 배수성능을 저하시키기도 하고, 연약지반이 압밀 되면서 토양의 압력이 증가하고, 압력에 의한 필터 및 코어의 변형에 따른 유로의 감소에 의해 배수성능이 저하되는 것으로 알려져 있다(서문호 등, 2004; J. C. Chai et al., 2004; N. Miura et al., 1998). PBD 배수재의 통수특성은 현재까지 많은 연구가 진행되었는데, 국외의 경우 Oosstveen & Troost(1990)은 셀 내에 배수재를 설치하고 측압을 가한 조건에서 배수재의 통수능력을 분석하는 실험을 제안하였고, Koemer & Lawrence(1988)도 Drexel이라는 시험기를 제작하여 하중을 가하여 원하는 응력으로 설정하여 임의의 동수경사 조건으로 외부 물의 높이를 조절한 후 배수재 내부로 물을 흘려보내면서 시간에 따른 통과유량을 측정하여 배수재의 통수능력을 분석하는 시험을 수행하였다.

1) 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정
† 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail : hengdang@unitel.co.kr)

국내의 경우 장용채 등(2004)은 연직배수재의 설치를 연직 및 수평방향으로 다양하게 변화시켜 수치해석을 수행함으로써 성토시 효율적인 연약지반개량 범위의 형태를 결정하도록 하였으며, 박영목(1996)은 직경 30cm, 높이 100cm의 강재(Steel)토조에 멤브레인으로 피복된 배수재를 설치하여 통수능력을 분석하였다. 강윤(1996)은 PBD공법의 특성상 배수재 주변의 교란효과와 통수능력이 압밀거동에 미치는 효과에 대해 연구하였다. 그러나 현재 PBD의 필터 및 코어의 특성에 따른 배수성능에 관한 연구의 진행이 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 대심도 이층연약지반에 적용될 PBD공법에 대한 적용성 분석을 위해 PBD가 설치된 연약점토지반의 압밀거동에 대한 실내모형실험을 실시하였다. 이때, PBD 필터 및 코어의 특성을 달리한 경우에 대해 실험을 실시하였고, 상재압력은 단계별로 시간의 경과에 따라 재하하였다. 또한 그에 의해 발생하는 압밀침하, 과잉간극수압, 통수능을 측정하였다.

2. 이론적 배경

연직배수공법의 일환으로 적용되는 플라스틱 드레인 공법(PBD)은 점토층 내에 배수재를 설치하여 최대배수거리를 인위적으로 단축하여 압밀을 도모하는 방법으로 배수원리는 그림 1에 나타내는 바와 같다. 지표면에 수평배수재(샌드매트, sand mat)를 설치한 후 개량지반 대상 속에 PBD를 타설하고 그 상부에 성토 등에 의한 소요의 하중을 적용시켜 연약지반 토층내의 과잉간극수압을 발생시킨다. 토층내의 간극수는 성토하중에 의해 발생한 과잉간극수압의 영향으로 수평으로 이동하여 타설된 PBD의 표면(필터)을 통해 PBD내부로 침투하여 연직으로 설치된 코어(core)의 홈을 따라 지표면까지 상승한 후 샌드매트를 통하여 수평으로 배출된다(조병기, 1998).

모든 vertical drain은 동일한 이론적 해석 방법을 이용하는데 드레인 타설시 발생하는 교란효과와 드레인의 유한한 투수성에 따른 배수저항에 의해 압밀지연이 발생하는 문제를 나타내게 되었고, 이를 해결하고자 연구가 진행되어 왔다.

Yoshikuni(1974)는 Barron(1948)과 Hansbo(1981)의 해로부터 식 (1)과 같은 평균압밀도에 대한 간편해를 제안하였는데, 이는 연직배수재의 투수계수가 변화가 없는 상태를 가정한 식이다.

$$U = 1 - \exp\left(\frac{-8T_h}{F_n + 0.8L}\right) \quad (1)$$

여기서, $L = \frac{32}{\pi^2}\frac{k_c}{k_w}\left(\frac{H}{d_w}\right)^2$

$$F_n = \frac{n^2}{n^2-1}ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}3$$

$T_h = \frac{C_h \cdot t}{d_e^2}$: *radial* 방향 시간계수

C_h : *radial* 방향에서 토양의 압밀계수

$n = \frac{d_e}{d_w}$: 드레인 직경비

d_e : 영향원의 직경,

d_w : 드레인의 환산직경

t: 압밀소요시간

k_c : 비교란지역에서의 수평방향 투수계수

k_w : 수직배수재의 투수계수

H: 배수재의 길이

그러나 실제로 연직배수재에 사용되는 배수재의 경우에 여러 가지 요인에 의해 투수계수가 변화하게 되는데, PBD의 경우 외부의 압력조건과 시간 등의 요인에 의해 변형이 발생하므로 시공할 연약지반의 조건, 목표로 하는 압밀시간 등을 고려해야 한다. 이러한 요인들을 고려했을 때 식 (1)의 L을 다음과 같이 표시할 수 있다(서문호 등, 2004).

$$L = \frac{8}{\pi}\frac{k_c p H}{q_w} \quad (2)$$

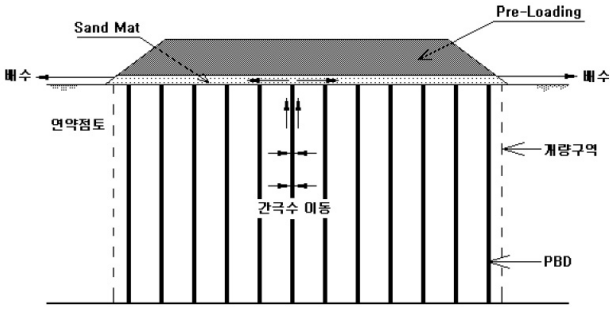


그림 1. 배수원리 개략도(조병기, 1998)

3. 연구대상지반의 특성

3.1 지반공학적 특성에 따른 상·하부층의 구분

본 연구대상지역의 해성 퇴적층은 상당 부분이 점토질 퇴적층으로 구성되어 있으나, 위치에 따라 해성 퇴적층 최하위와 중간부에는 모래질 퇴적층이 출현하기도 한다. 점토질 퇴적층은 지반공학적 관점에서 약 30m 지점에 수평적 연속성이 양호하고 비교적 얇은 두께로 산출되는 중간부의 모래질

표 1. 퇴적 특성 및 물리적, 역학적 특성에 따른 상·하부 점토층의 구분

구분	상부층	하부층
퇴적속도(cm/year)	0.3	1.35
포화단위중량(kN/m^3)	16.29	18.45
비중	2.725	2.731
초기간극비	1.674	1.019
소성한계(%)	29.0	22.8
액성한계(%)	68.8	43.5
소성지수(%)	39.2	20.8
압축지수	0.82	0.467
수직압밀계수(cm^2/sec)	6.07×10^{-4}	1.77×10^{-3}
수직투수계수(cm/sec)	6.01×10^{-8}	3.95×10^{-8}

퇴적층을 중심으로 상부 점토층과 하부 점토층으로 크게 구분된다. N치로써 점토의 연경도를 구분하면, 상부 점토층은 대체로 매우 연약(very soft)에서 보통 견고(meeeum stiff)한 범위를 보이는 반면, 하부 점토층은 보통 견고(medium stiff)에서 매우 견고(very stiff)의 범위를 갖는다. 지역에 따라 중간부의 모래층이 존재하지 않고 상·하부 점토층이 직접 접하기도 한다. 퇴적 특성 및 물리적, 역학적 특성에 따른 상·하부 점토층의 구분은 표 1과 같이 나타내었다.

3.2 이층연약지반의 역학적 특성

3.2.1 강도 특성

일축압축강도시험 분석결과, 비배수 전단강도는 그림 2에서 보는 바와 같이 4～74kN/m^2(평균 23kN/m^2)의 범위로 심도에 따라 약간 분산적인 경향을 나타내고 있으나, 심도가 깊어짐에 따라 대략적으로 선형 증가하는 경향을 보이고 있다.

삼축압축시험 분석결과, 비배수 전단강도는 그림 3에서 보는 바와 같이 4～94kN/m^2(평균 29kN/m^2)의 분포로 나타나며, 삼축압축시험이 일축압축강도시험에 비해 비배수 전단강도가 더 폭넓게 분포하며 크게 나타나는 경향을 보인다. 이런 경향은 삼축압축시험에서 구속응력의 영향 때문인 것으로 판단된다.

한편, 일축압축시험과 삼축압축시험결과의 비배수전단강도를 회귀 분석하여 다음 식 (3)을 도출 할 수 있었다. 여기서, y는 일축압축시험의 비배수전단강도이고, x는 삼축압축시험의 비배수 전단강도이다. 또한 일축압축강도시험에서의 비배수 전단강도가 약 77%의 신뢰도를 보인 반면 삼축압축시험에서의 비배수 전단강도가 약 82%의 신뢰도를 보이는 것으로 확인되었다.

$$y = 11.655\ln(x) - 17.871 \quad (3)$$

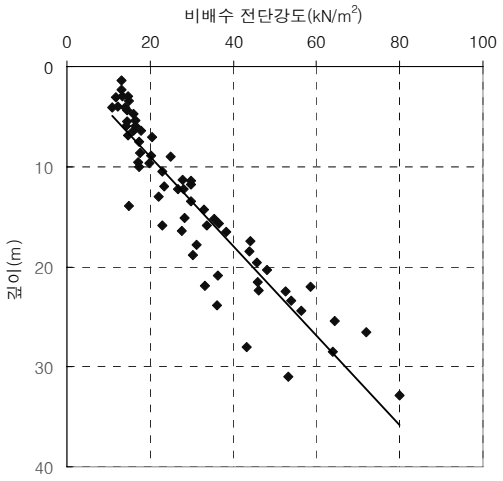


그림 2. 일축압축강도시험에서의 비배수 전단강도

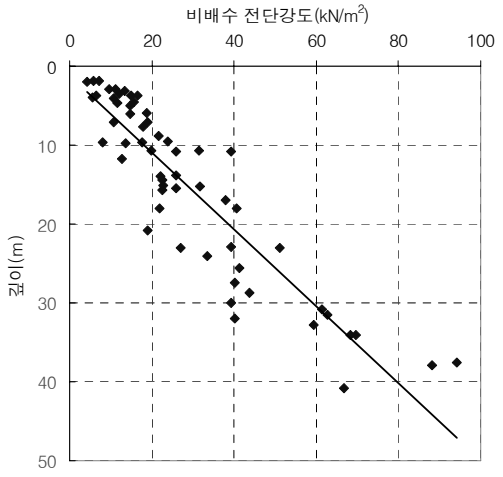


그림 3. 삼축압축시험에서의 비배수 전단강도

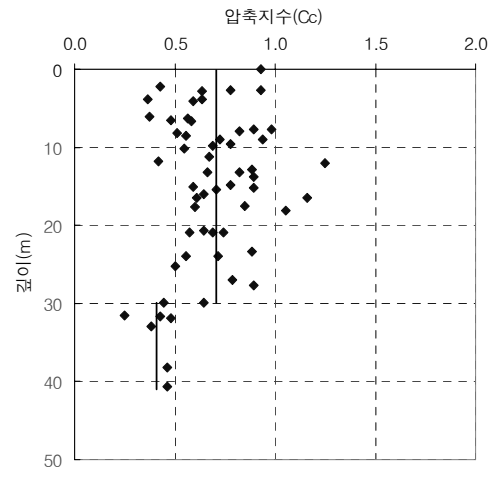


그림 4. 압축지수(Cc)

3.2.2 압밀 특성

압축지수는 그림 4에서 보는 바와 같이 0.25～1.25(평균 0.68)이며 깊이에 따라 약간 감소하는 경향을 보이고 있다.

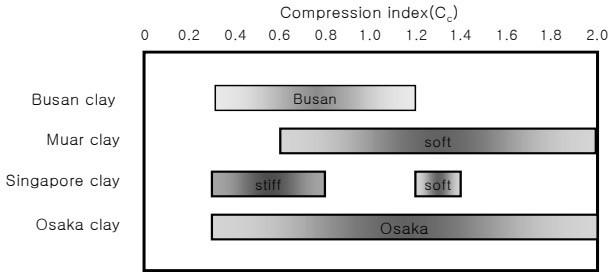


그림 5. 부산점토와 해외유명점토와의 압축성비교(한국컨테이너부두공단, 2003)

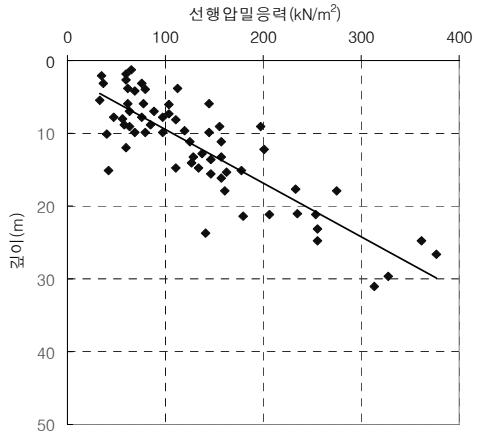


그림 6. 선행압밀하중(Pc)

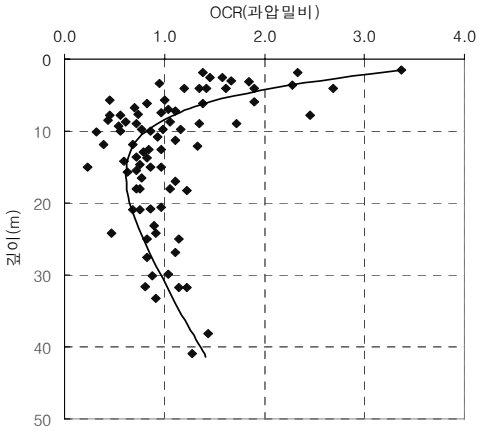


그림 7. 과압밀비(OCR)

또한 그림 5에서 보는 바와 같이 심도 30m 이상에서는 상부 점토층과는 확연히 다른 압축지수 경향을 보이고 있다. 이는 해외 유명점토와 비교해 볼 때, 압축성이 적은 경향을 보이나, 서해안 점토보다는 훨씬 크다고 볼 수 있는데, 오랜 기간 동안 낙동강 하구 유역에서 해수와 담수의 영향을 받아 상당히 두꺼운 퇴적층이 형성되었고, 해수면의 변화에 따른 퇴적속도의 차이와 해수 이온 등의 영향으로 정규압밀 내지는 미압밀된 점토의 특성을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

선행압밀하중은 그림 6에서 보는 바와 같이 18～350kN/m^2 (평균 97kN/m^2)이며 깊이에 따라 증가하는 경향을 보이고

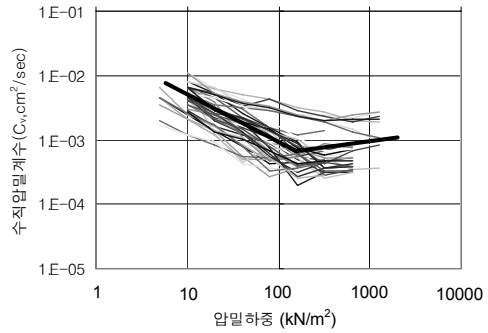


그림 8. 수직방향 압밀계수(C_v)

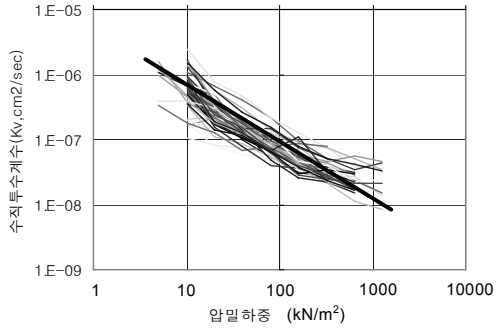


그림 9. 수직방향 투수계수(k_v)

있고, 과압밀비는 그림 7에서 보는 바와 같이 0.3～3.3으로 대략적인 평균치가 1.0 안팎으로 분포하므로, 전체적으로 정규압밀 내지는 미압밀 점토로 판단된다. 깊이 10m까지의 상부 지층은 건조와 지하수위의 변동, 파도에 의한 침식 등의 영향에 의해서 과압밀된 경향을 보여주고 있으나, 10m하부 지층은 정규압밀내지는 미압밀된 상태를 나타내고 있다.

수직압밀계수 분석결과는 그림 8에서 보는 바와 같이 압밀계수의 경향은 초기 압밀하중에 대하여 비교적 상당히 큰 압밀계수를 나타내지만 압밀하중이 증가함에 따라 어느 정도 일정한 값으로 수렴하다가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 수직투수계수 분석결과 그림 9에서 보는 바와 같이 압밀하중이 증가함에 따라 간극수압 소산과 더불어 투수계수가 감소하는 경향을 보이고 있다.

Rowecell시험에 의한 압밀계수 산정시 수평방향 압밀계수 분석결과는 그림 10에서 보는 바와 같이 압밀계수의 경향은 초기 압밀하중에 대하여 비교적 상당히 큰 압밀계수를 나타내지만 압밀하중이 증가함에 따라 어느 정도 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다. 수평방향 투수계수 분석결과는 그림 11에서 보는 바와 같이 압밀하중이 증가함에 따라 간극수압 소산과 더불어 투수계수가 감소하는 경향을 보이고 있다.

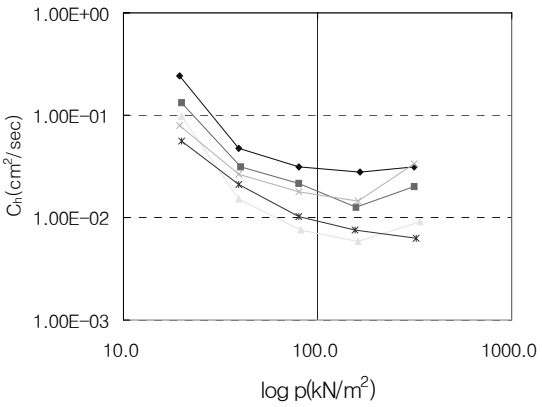


그림 10. 수평방향 압밀계수(C_h)

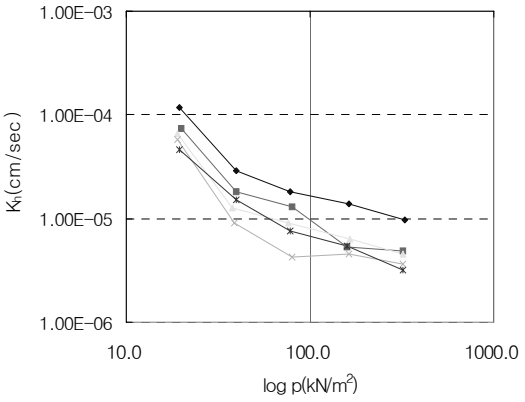


그림 11. 수평방향 투수계수(K_h)

4. 실내모형실험

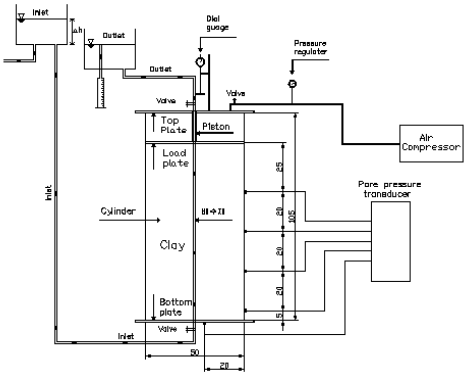
4.1 실험장치개요

본 연구에서는 그림 12에서 보는 바와 같이 복합 통수능 실험장치를 제작하여 실내시험을 통해 배수재가 지중에 타설된 후 받는 일정 상재압력하에서의 통수능력을 파악하였다. 본 실험장치는 직경 50cm, 높이 105cm의 원통형 강재 프레임으로 제작되었고, 실험장치 측면에는 압밀진행에 따른 과잉간극수압 측정 포트(Port)를 20cm 간격으로 설치하였으며, 하부 바닥에는 배수재로부터 이격거리별 과잉간극수압을 측정하고자 1개의 포트(Port)를 설치하여 압밀진행에 따른 과잉간극수압의 소산을 측정하게 되며, 측정된 과잉간극수압은 Digital Transducer를 통해 기록된다. 동수경사(i) 조절을 위한 장치로 유출수조와 유입수조가 있으며, 유출수조에서 배수관로를 통해 유입된 물이 실험장치 하부를 통해 배수재 내부로 유입되어 상부 배수관로를 통해 유입수조로 들어온다. 이때, 물의 흐름은 두 수조의 수두차로 조절된다. 실험장치내에 배수재의 양단을 시험기의 상·하부 클램프(Clamp)에 고정시키고 상부에 원형판과 연결하여 실험중 점토가 배수재 또는 배출구로 유입되지 않도록 하였다. 침하량을 측정하기 위한 장치로는 실험장치 상부에 다이얼게이지(Dial Gauge)를 설치하여 침하량을 측정하였다. 압밀이 진행됨에 따라 침하가 발생하여 배수재의 굴곡이 발생하므로 동수경사는 변화하게 된다. 압밀 진행에 따라 변화하는 동수경사는 최초 타설시 배수재 길이에서 침하량을 빼서 산출하였다. 이렇게 설치된 실험기 내의 배수재에 대하여 상재압력의 크기, 동수경사의 변화, 가압시간 등의 조건을 달리하여 단위시간당 통수량(배수량)을 측정한다.

4.2 모형지반 제작

4.2.1 대상시료

복합통수능실험에 사용된 시료는 부산신항 북컨테이너



(a) 복합 통수능 시험기 모식도

(b) 복합 통수능 시험장치

그림 12. 복합 통수능 실험장치

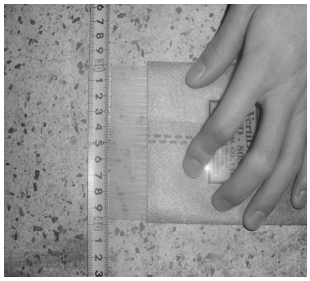
표 2. 이층연약지반의 물리적 특성

구분	상부층(30m)	하부층(30m~55m)
점토함유율(%)	20~60	20~30
초기간극비	1.674	1.019
포화단위중량(kN/m^3)	16.29	18.45
함수비(%)	55.5	32.3
비중	2.725	2.731
소성한계(%)	29.0	22.8
액성한계(%)	68.8	43.5
소성지수(%)	39.2	20.8

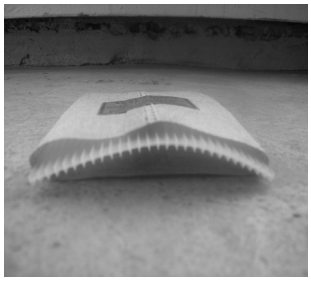
터미널 축조공사 구역 중 퇴적기원이 다른 대심도 이층연약지반으로서 물리적 특성은 표 2에서 보는 바와 같다.

4.2.2 대상 배수재의 선정

사용된 배수재는 그림 13에서 보는 바와 같이 단일코어PBD는 폭 100mm(±5mm), 두께 5.0mm(±0.5mm)의 단면을 가진 하모니카형 코어와 포켓식 필터로 구성되어 있고, 이중코어PBD는 폭 100mm(±0.5mm), 두께 7.0mm(±0.5mm)이며 코어는 2개의 코어를 맞물려 끼워놓은 이중필터의 단면



(a) 단일코어PBD 평면



(b) 단일코어PBD 측면

(c) 이중코어PBD 평면

(d) 이중코어PBD 측면

그림 13. 실험에 사용된 배수재 사진

표 3. 사용한 배수재의 특성 비교

항 목	단일코어PBD(대형코어형)	이중코어PBD(이중코어형)
필터재료	폴리프로필렌	폴리프로틸렌
코어재료	폴리프로필렌	폴리프로틸렌
전체폭	100mm(± 5mm)	100mm(± 5mm)
두께	5mm(± 0.5mm)	7mm(± 0.5mm)
최대 인장강도	20000이상(kN/폭)	25000이상(kN/폭)
코어형태 및 크기	하모니카형	이중 하모니카형

을 가져 중심부에는 소정의 배수통로를 유지할 수 있게 구성되어 있다. 본 실험에서 사용된 단일코어PBD와 이중코어PBD의 특성은 표 3과 같다.

4.2.3 실험방법 및 조건

본 연구에서 실시한 실내 통수능실험에서는 현장조건을 최대한 모식화하기 위해 점토로 채워진 실험기 내부에 배수재를 타설한 후 일정한 연직하중을 가함으로써 배수재의 필터 부분에 점토가 실제로 영향을 미치는 상황에서 복합 통수능 실험을 통하여 이러한 영향을 살펴보고자 하였다. 또한, 점토가 압밀됨에 따라 배수재 굴곡시의 통수능력(Discharge Capacity, Q_w)을 측정하였다. 이를 위하여 그림 14에서 보

(a) PBD의 중앙부 설치

(b) PBD의 중앙부 설치 과정

(c) 클램프에 PBD 고정

그림 14. 복합 통수능 실험 전경

표 4. 복합 통수능 실험조건

시 험 항 목	시 험 조 건
배 수 재 종 류	단일코어PBD, 이중코어PBD
초기배수재길이	560mm
하 중	최대 500kN/m^2 (50kN/m^{2}부터 50kN/m^{2}씩 증가)
동 수 경 사	0.5
초기 시료 높이	560mm
초 기 함 수 비	73~77%

는 바와 같이 지반 및 배수재를 설치하였다. 한편, 본 실험의 최종 상재압력은 대심도 현장조건을 고려하여 500kN/m^{2}까지 가압하였으며, 점토로 채워진 셀에 일시에 500kN/m^{2}의 압력을 적용하였을 경우 급작스런 하중 증가로 인한 과잉간극수압의 급증으로 시료의 불안정상태가 예상되므로 50kN/m^{2}씩 증가시키면서 실험을 수행하였다.

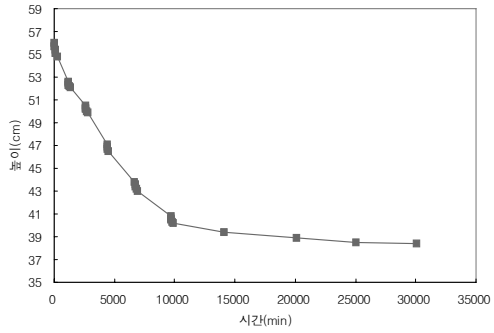
5. 실험결과 및 분석

5.1 시간경과에 따른 압밀 침하

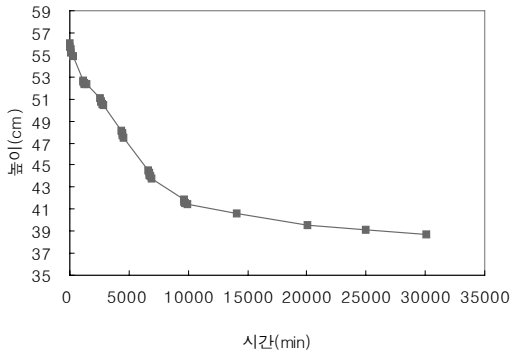
그림 15는 단일코어PBD 및 이중코어PBD의 시간경과에 따른 침하량의 변화를 나타낸 그림으로 상재압력 50kN/m^{2}부터 가압한 다음 간극수압이 소산되었다고 판단되면 다시 50kN/m^{2}씩 가압하여 500kN/m^{2}까지 점차 가압한 결과, 단일코어PBD 및 이중코어PBD 모두 침하는 점진적으로 발생하였으며, 상재압력 500kN/m^2 이후에는 간극수압 소산에 따라 압밀침하가 감소하여 약 10000분(약7일) 이후에는 압밀침하가 수렴하였다. 이는 통수능이 큰 이중코어PBD의 침하속도가 단일코어PBD의 침하속도보다 빠를 것으로 예측하였으나 침하속도는 거의 비슷한 경향을 보였으며 하중이 증가되고 시간이 경과됨에 따라 침하량이 거의 일치되어 가는 것을 알 수 있었다.

5.2 시간경과에 따른 간극수압

그림 16은 단일코어PBD 및 이중코어PBD의 재하에 따른 간극수압의 상승과 각 하중단계별로 압밀진행에 따른 간극수압 소산곡선을 나타낸 그림으로서, 그림 15와 비교해 보면 재하단계별로 침하량의 변화가 간극수압의 소산에 따른 것임을 알 수 있었고, 상재압력 500kN/m^2 이후부터는 간극수압이 일정하중에서 압밀거동에 의해 감소하는 것과 동일한 경향을 보였다.

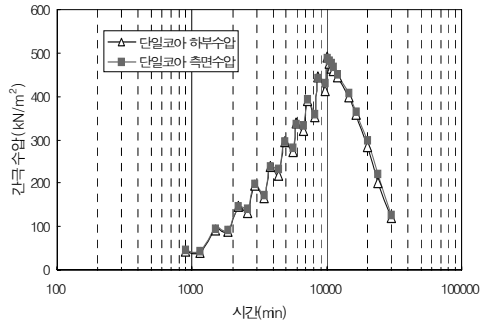


(a) 단일코어PBD

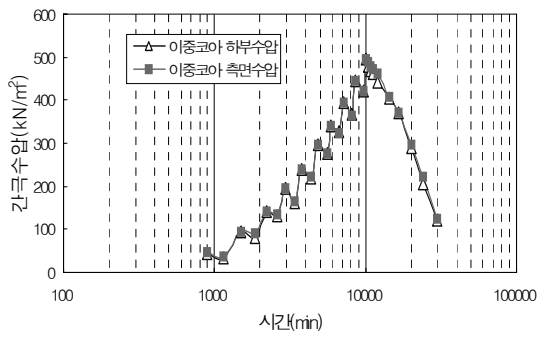


(b) 이중코어PBD

그림 15. 시간경과에 따른 압밀침하곡선

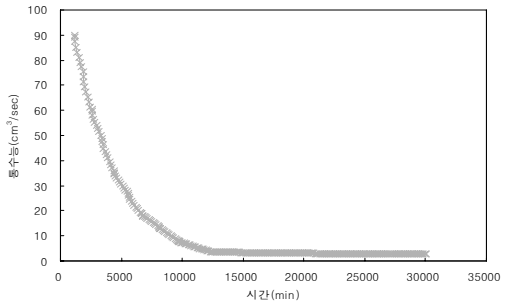


(a) 단일코어PBD

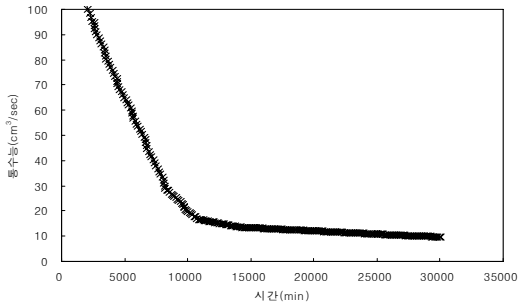


(b) 이중코어PBD

그림 16. 시간경과에 따른 간극수압 변화곡선



(a) 단일코어PBD



(b) 이중코어PBD

그림 17. 시간경과에 따른 통수능 변화

5.3 시간경과에 따른 통수능 변화

그림 17은 시간경과에 따른 통수능력의 변화를 나타낸 그림으로 통수능은 압력이 증가할수록 또 시간이 경과함에 따라 현저히 감소함을 알 수 있다. 통수능은 가압단계에서 상당하게 저하되는 것으로 나타났으며, 상재하중 450kN/m^2 이후에는 통수능이 대략 10cm^3/sec이하로 작아지고, 상재하중 500kN/m^2 이후에는 점차 서서히 감소하여 약 10000분(약 7일) 이후에는 단일코어PBD의 통수능은 2.8cm^3/sec, 이중코어PBD의 통수능은 대략 9.8cm^3/sec로서 변화가 거의 없이 일정하게 수렴하는 것으로 나타났다. 이것은 시간경과에 따라 압밀침하가 수렴되어 통수능이 일정하게 수렴된 것으로 판단된다. 한편, 단일코어PBD와 이중코어PBD의 통수능의 차이가 나는 이유는 단일코어PBD는 압밀침하로 인해 배수재의 휨발생과 측압으로 인하여 필터의 크리프와 막힘으로 유로 감소에 큰 영향을 미치는 반면, 이중코어PBD는 압밀진행에 따른 배수재의 휨발생과 측압이 증가한 이후에도 중앙 유로의 확보로 인한 영향으로 판단된다.

5.4 실험 후 점토지반의 함수비변화

실험 후 배수재에 점토 지반의 함수비 변화를 파악하기 위해 실험기 하부 바닥으로부터 55cm 상부 지점에서 횡방향으로 배수재 중심으로부터 2.5cm, 13cm, 25cm 이격된 위치에서 함수비를 측정한 결과, 그림 18에서 보는 바와 같이 2.5cm, 13cm, 25cm 이격된 위치에서 함수비 감소율은 각각 24.54%, 3.22%, 1.08%로 나타나 배수재로부터 거리가 멀어질수록 함수비의 변화가 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

5.5 PBD의 통수능 결정

복합 통수능 실험결과로부터 얻은 단일코어PBD의 통수능은 측압 500kN/m^2, 동수구배 0.5인 경우에 약 2.8cm^3/sec 정도가 됐을 때 최소값으로 안정화되어 일정한 값을 갖는 것으로

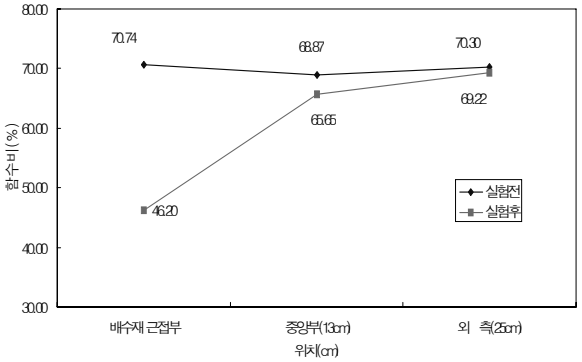


그림 18. PBD중심으로부터 이격거리별 함수비 변화

나타났다. 따라서 기존의 국내연구 결과에서는 3～10cm^3/sec의 통수능이 제시되어 있고 외국의 경우 3～5cm^3/sec의 통수능을 요구하고 있으며, 영향인자를 고려한 최소치는 약 5.3cm^3/sec의 통수능으로 계산되었다. 또한, 복합통수능 시험기의 실험결과는 2.8cm^3/sec인 것을 감안하면 최소 요구 통수능은 3cm^3/sec로 설계에 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

6. 결 론

대심도 이층연약지반에 적용될 PBD공법에 대한 적용성 분석을 위해 PBD가 설치된 연약점토지반의 압밀거동에 대한 실내모형실험을 실시한 결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

(1) 상재압력의 증가에 따라 침하는 점진적으로 발생하였으며, 상재압력 500kN/m^2 이후에는 간극수압의 소산에 따라 압밀침하가 진행되었다. 따라서 재하단계별 침하량의 변화는 간극수압의 소산에 따른 것임을 확인할 수 있었다.

(2) 상대적으로 통수능이 큰 이중코어PBD의 침하속도가 단

일코어PBD의 침하속도보다 빠를 것으로 예측하였으나 침하속도는 거의 비슷한 경향을 보였으며 하중이 증가되고 시간이 경과됨에 따라 침하량이 거의 일치되어 가는 것을 알 수 있었다.

(3) 연직 배수재의 통수능은 압력이 증가할수록 또 시간이 경과함에 따라 현저히 감소함을 알 수 있었다. 통수능은 가압단계에서 상당히 크게 저하되는 것으로 나타났으며, 상재하중 500kN/m^2 이후에는 점차 서서히 감소하여 약 10000분(약 7일) 이후에는 단일코어PBD와 이중코어PBD의 통수능이 각각 2.8cm^3/sec, 9.8cm^3/sec로 변화가 거의 없이 일정하게 수렴하는 것으로 나타났다. 이것은 시간경과에 따라 압밀침하가 수렴되어 통수능이 일정하게 수렴된 것으로 판단된다.

(4) 단일코어PBD와 이중코어PBD의 통수능의 차이가 나는 이유는 단일코어PBD는 압밀침하로 인해 배수재의 휨발생과 측압으로 인하여 필터의 크리프와 막힘으로 유로 감소에 큰 영향을 미치는 반면, 이중코어PBD는 압밀진행에 따른 배수재의 휨발생과 측압이 증가한 이후에도 중앙 유로의 확보로 인한 영향으로 판단된다.

(5) 실험 후 배수재에 점토 지반의 함수비를 측정한 결과, 그림 18에서 보는 바와 같이 2.5cm, 13cm, 25cm 이격된 위치에서 함수비 감소율은 각각 24.54%, 3.22%, 1.08%로 나타나 배수재로부터 거리가 멀어질수록 함수비의 변화가 작게 나타남을 확인할 수 있었다.

(6) 단일코어PBD의 통수능은 측압 500kN/m^2, 동수구배 0.5인 경우에 약 2.8cm^3/sec 정도가 됐을 때 최소값으로 안정화되어 일정한 값을 갖는 것으로 나타났으며, 통수능 2.8cm^3/sec인 것을 감안하면 최소 요구 통수능은 3cm^3/sec로 설계에 고려하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 강윤 (1996), *연직배수재의 교란영역특성을 고려한 압밀지연특성 분석*, 박사학위논문, 홍익대학교.
2. 박영목 (1996), 국내 PBD재의 배수성능과 진공효과에 의한 통수능력 향상에 관한 연구, *한국지반공학회 1996년도 봄 학술발표회 논문집*, pp. 39～52.
3. 서문호, 김형섭, 김동환 (2004), 플라스틱 보드 드레인의 배수성능 변화, *한국섬유공학회지*, 제41권, 제5호, pp. 378～385.
4. 장용채, 김주한, 이진수 (2004), 유한요소해석을 이용한 연직배수재의 타설범위에 따른 개량효과에 관한 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, 제5권, 제1호, pp. 5～12.
5. 정하익 등 (1999), 양산물금 점토의 광물학적 특성, *한국지반공학회 가을학술발표회 논문집*, pp. 75～80.
6. 한국컨테이너부두공단 (2003), *부산신항 북컨테이너 터미널 축조공사 지반보고서*, pp. 25～42.
7. Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S. (1991), Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay, *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*, Vol. 117, No. 10, pp. 1509～1529.
8. Hansbo, S. (1979), Consolidation of Clay by Band-Shaped Prefabricated Vertical Drains, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 21～25.
9. Hansbo, S. (1981), Consolidation of Fine-grained Soils by Prefabricated Drains, *Proc. of the 10th ICMFE*, Stockholm, Vol. 3, pp. 677～682.
10. J. C. Chai, N. Miura. and T. Nomura (2004), Effect of Hydraulic Radius on Long-term Drainage Capacity of Geosynthetics Drains, *Geotextiles and Geomembrans*, Vol. 22, pp. 3～16.
11. Koemer, C.M. and Lawrence, C.A. (1988), Flow Behavior of Kinked Strip Drains, *Proc. of ASCE Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement*, Nashvile, Tenn., Geotechnical Special Publication No. 18, pp. 22～35.
12. Mesri, G. and Lo, D. O. K. (1991), Field Performance of Prefabricated Vertical Drains, *GEO-COAST* '91, Yokohama, pp. 231～236.
13. N. Miura, J. C. Chai, and K. Toyota (1998), Investigation on Some Factors Affecting Discharge Capacity of Prefabricated Vertical Drain, *6th Int. Conf. on Geosynthetics*, pp. 845～850.
14. Oostveen, J.P. and Troost, G.H. (1990), Dicharge Index Tests on Vertical Drains. *Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, pp. 345～350.
15. Yoshikuni, H. (1979), Design and Construction Control of Vertical Drain Methods. *Gihodo, Tokyo, Foundation Engineering Series*, Dissertation, Hiroshima University (Japan).
16. Yoshikuni, H. and H. Nakanodo (1974), Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability, *Soils and Foundations*, Vol. 14, No. 2, pp. 35～46.

(접수일: 2009. 5. 8 심사일: 2009. 6. 30 심사완료일: 2009. 8. 4)