원지반조건을 고려한 연직배수재의 통수능에 관한 연구

A Study on Discharge Capacity of Vertical Drain Considering with In-situ Soil Condition

박 민 철¹ Park, Min-Chul

김 은 철² Kim, Eun-Chul

이 송^{3*} Lee, Song

ABSTRACT

Discharge capacity of PBD is sensitive in proportion to thickness and ground condition, and drainage of PBD declines due to disturbance effect in surrounding ground by mandrel used for vertical drainage setting and setting machines and type. Also, deviation of discharge capacity gets larger according to ground condition, construction condition and soil properties. But cause and analysis of those problems like reduced discharge of capacity and delayed dissipation of pore water pressure for discharge capacity is lack. Thus, in this text, ground improvement and discharge capacity is investigated by implementing composite discharge capacity test for analysis of an effect factor of PBD discharge capacity with in-situ ground condition. After fixing the vertical drain on a cylindrical cylinder, put churned sample into the cylinder. After in-situ ground and reclamation of ground are dredged, load following the loading step of 30, 70 and 120kPa using a pressure device. Result of the test, The discharge capacity was $SM > ML > CL > CL(\text{dredged soil})$ in situ condition and more fine-grained content, the amount of discharge was greater.

요 지

PBD의 통수능력은 지반조건 및 두께에 비례하여 영향을 크게 받는 성질이 있으며, 배수재 타입 시 사용되는 맨드릴, 타입기기 및 방식에 의한 주변지반의 교란영향으로 배수능력이 저하되는 문제점 등이 있다. 또한, 여러 가지 조건에 따라 통수능의 편차가 크게 나타나며 원지반 조건에 따라 배수재의 통수능 저하, 간극수압소산의 시간지연 등의 분석이 미흡하다. 따라서 본 연구에서는 원지반 조건을 고려한 연직배수재의 복합 통수능 시험을 실시하여 지반개량 및 통수능 평가를 하였다. ø 38×70cm 크기의 원통형 실린더에 배수재를 고정한 후 교반한 시료를 투기하고 원지반 조건 CL, ML, SM과 준설토 CL을 매립한 후 가압장치를 사용하여 30, 70, 120 kPa의 하중을 가해 단계별로 복합통수능 실험을 수행하였다. 시험결과, 통수능의 크기는 원지반 조건이 $SM > ML > CL > CL(\text{준설토})$ 인 순으로, 세립분 함량이 적을수록 통수량은 크게 나타났다.

Keywords : Composite discharge capacity test, PBD, Acceleration of consolidation method

1. 서 론

연약지반에 구조물을 축조하고 부지를 조성하기 위해서는 안정성이 도모되어야 하는데 연직배수공법에 의한 지반개량 사례가 꾸준히 증가되고 있는 추세이며 최근에는 연약지반 뿐만 아니라 지하 구조물에 관심을 갖게 되었

다. 하지만 연약지반은 상부 구조물을 지지하기에는 지지력이 부족하며 장시간에 압밀과 2차 침하의 가능성이 높은 공학적인 특성을 가지고 있으므로 연약지반개량의 필요성이 대두되고 있는 실정이다. 또한, 연직배수공법은 배수재를 설치하여 과잉간극수압의 배수거리를 단축시킴으로써 압밀을 촉진시키는 공법이다. 이러한 연직배수공법

¹⁾정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Civil Engrg., Univ. of Seoul)

²⁾비회원, 서울시립대학교 토목공학과 석사 (Non-Member, Master, Civil Engrg., Univ. of Seoul)

³⁾정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Civil Engrg., Univ. of Seoul, E-mail: scugeo@uos.ac.kr)

에서 현재까지 주로 사용되는 연직 배수재는 PBD(Plastic Board Drain), SD(Sand Drain), PD(Paper Drain) 등이 있다.

그 중 연약지반에서 시공의 용이성과 경제성을 지닌 압밀축진 공법 중 하나인 PBD공법을 많이 사용하고 있다. PBD는 기존 샌드 드레인을 대체할 수 있는 공법으로서 국내에서도 널리 사용되고 있으며 많은 현장에서 성과는 좋지만, 현장에서 시공 중의 중장비 주행에 따른 지반 표층의 교란과 드레인 타설에 필요한 멘드렐(Mendrel)의 관입 및 인발에 기인된 드레인 주위 지반의 교란이 발생하여 스미어존이 발생한다. 이 외에도 PBD를 타설 후 원지반조건 및 토질특성에 따라 배수성능저하 및 압밀축진효과 지연 등 여러 문제점의 원인이 되기도 한다.

따라서, 본 연구에서는 현재 원지반 조건을 고려한 연직 배수재의 통수능에 대한 문제의 원인 및 분석이 미흡한 실정이므로 이에 관한 원지반 조건이 통수능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 현재 가장 많이 사용되고 있는 H형 PBD를 이용하여 원지반 조건을 다르게하여 복합 통수능 시험을 실시하고 이 결과를 통해 지반개량 및 통수능력을 평가하는데 목적을 두고 있다.

2. 이론적 배경

방사형 압밀방정식에 대한 해를 구하기 위해 최초로 시도한 것은 Kjellman(1948)으로 등변위 조건을 가정하여 수평방향의 변형은 발생되지 않고 배수재의 투수성이 무한하며, 타설에 의한 교란은 전혀 고려하지 않는 이상적인 조건에 대하여 간편해를 제시하였다. 하지만, Kjellman(1948)이 제시한 이상적인 조건은 현실적이지 못한 것으로 실제 현장조건을 과대평가할 수 있는 가능성이 크다. 즉, 배수재의 투수성은 유한하며, 이로 인하여 배수재 내의 흐름 저항이 발생한다.

지금까지 가장 전형적이면서 연직 배수재의 적용을 위

한 실제적인 연구로서 받아들여지는 것이 Barron(1948)이 제시한 이론이다. 그가 제시한 등변형률 조건에 대한 배수재의 해석해는 현재까지도 수많은 현장이나 연구에 그대로 적용되고 있을 만큼 유명하다. Barron(1948)은 자유변형률조건과 등변형률조건 모두에 대해서 해를 구하고자 하였으며, 더불어 스미어존과 배수저항의 영향을 고려할 수 있는 식을 최초로 제시하였다. 또한, Barron(1948)은 Terzaghi(1925)의 1차원 압밀방정식의 전개과정을 인용하였으며 이상적인 배수재의 등변형률 조건에 대한 압밀해에 추가하여 Barron(1948)은 스미어존과 웰저항을 모두 고려하는 경우에 대한 해를 제시하였다.

Yoshikuni and Nakanodo(1974)도 스미어존의 문제는 스미어존의 두께와 스미어존에서의 압축성에 대한 실제적인 연구가 선행된 후에야 고려할 수 있다고 전제하면서, 배수저항을 고려한 엄밀해를 등변위 조건에 대하여 구하고 있다. 그들은 Biot(1941)의 3차원압밀에 대한 가정 사항을 그대로 따르면서, 중공원주의 경계면은 매끄러운 표면을 가지고 있고, 배수재의 투수계수는 무한한 것으로 간주하였고, 배수재 자체의 강성은 고려하지 않고 있으며, 중공원주의 상부표면에 작용하는 하중은 일정하다고 가정하였다.

Hansbo(1979)는 Kjellman(1948)이 사용한 간편 해의 유도과정을 인용하면서 토층 내 임의의 깊이 z 에서의 압밀도에 따른 스미어존과 배수저항의 영향을 고려한 이론해를 제시하였다.

3. 실내모형실험

3.1 실험개요

기존의 PBD의 통수능 실내실험은 그림 1(a)에 나타난 것처럼 근입깊이를 고려하지 않고 수행하였다. 하지만 실

그림 1. 기존연구와 실제현장의 PBD 타설 깊이 현황

제 현장에서는 그림 1(b)와 같이 PBD 근입깊이는 준설패립지반을 지나 원지반까지 실시하며 원지반의 공학적 조건도 다양하다.

따라서 본 연구에서는 기존의 통수능 실내실험의 한계를 극복하고 다양한 원지반 조건을 모사하기 위하여 CL(준설토), CL(준설토)+CL(원지반), CL(준설토)+ML(원지반), CL(준설토)+SM(원지반)과 같이 4가지 조건으로 통수능 실험을 실시하였다. 연직배수재의 종류는 현재 경제적이고 적용성이 뛰어나며 많이 사용되고 있는 H형-PBD(L=60cm)를 사용하였다. 상재하중은 현장과 같은 조건을 모사하기 위하여 30kPa, 70kPa, 120kPa 3단계의 단계별 하중으로 나누어 실험하였고, 압밀속도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 3개소에 간극수압계를 설치하여 압밀도를 평가하였다. 통수능 종료 기준은 실제 압밀도가 100%에 미치는 것은 불가능하기 때문에 가장 이상적인 90%로 정하였다.

마지막 통수능 시험이 종료 되었을 때 배수재에서부터 거리별 및 심도별로 전단강도 및 함수비 측정을 하였다. 표 1은 본 연구에서 실시한 실험조건을 나타내고 있다.

표 1. 실험조건

지반조건	함수비(%)	시료높이(cm)	배수재 종류 및 길이	재하하중 (kPa)	동수경사 (i)
CL(준설토)	준설토-70	준설토-60	H형 PBD/ 60cm	30, 70, 120	0.5
CL(준설토)+CL	준설토(70)/CL(40)	준설토(35)/CL(25)			
CL(준설토)+ML	준설토(70)/ML(20)	준설토(35)/ML(25)			
CL(준설토)+SM	준설토(70)/SM(20)	준설토(35)/SM(25)			

표 2. 지반에 종류에 따른 물성실험 결과

Sample	Gs	Wn(%)	PI(%)	#200체 통과량(%)	비 고
CL(준설토)	2.71	70.0	23.6	99.1	부산
CL(원지반)	2.70	41.6	21.3	98.0	부산
ML(원지반)	2.68	19.8	N.P	60.5	인천
SM(원지반)	2.66	14.1	N.P	23.6	인천

3.2 대상지반의 특성

본 연구에서 사용된 시료는 부산 옹동지구, 인천에서 채취한 시료로써 시험기의 크기를 고려할 때 이에 필요한 불교란 시료를 확보하는 것은 매우 어렵기 때문에 시료를 교란된 상태로 채취하여 실내시험실에서 습윤상태의 흙을 No.10번체로 체가름한 것을 사용하였다. 이 과정 중 시험결과에 영향을 미칠 정도의 크기가 큰 흙이나 나무껍데기 등의 불순물을 제거하였다. 표 2에서 나타냈듯이 통일분류법상 부산시료의 준설토와 원지반은 CL, 인천시료 원지반은 ML, 다른 원지반은 SM으로 분류되었다.

3.3 실험장치

본 연구에서는 실내시험을 통해 배수재가 지중에 타설된 후 일정 상재압력에서의 최소 통수능을 파악하고자 그림 2와 같이 복합통수능 시험기를 제작하였다. 실험장치는 직경 38cm, 높이 70cm의 원통형 프레임으로 제작되었으며, 동수경사(i) 조절을 위한 장치로 그림 2에서 보는 바

그림 2. 실험장치 모식도 및 사진

와 같이 유출수조와 유입수조가 있다. 유입수조에서 배수관로를 통해 유입된 물이 시험기 하부를 통해 배수재 내부로 유입되어 상부 배수관로를 통해 유출수조로 들어온다. 이 때, 물의 흐름은 두 수조의 수두차로 조절된다.

시험기 내에서 배수재의 양단을 시험기의 상, 하부 클램프에 고정시키고 상부에 원형판과 연결하여 시험 중 시료가 배수재와 배출구의 사이로 유입되지 않도록 하였고, 침하량을 측정하기 위한 장치로 시험기 상부에 LVDT를 설치하여 침하량을 측정하였다. 이렇게 설치된 시험기 내의 배수재에 대하여 상재압력의 크기, 가압시간 등의 조건을 달리하여 단위시간당 통수량을 측정한다.

3.4 실험방법

본 연구에서 실시한 실내 통수능 시험에서는 현장조건을 최대한 모사하기 위해 점토로 채워진 시험기 내부에 배수재를 타설한 후 일정한 연직하중을 가함으로써 배수재의 필터 부분에 점토가 실제로 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 분석하였다.

복합통수능 시험 방법으로는 먼저 그림 3에 나타난 것처럼 시험기에 지반을 조성한 다음, 압축공기 콤프레서를 이용한 압축공기로 단계하중을 가한 후, 쌍곡선법을 이용하여 압밀도 90% 이상이 되었을 때 통수능을 측정한 후 다음 단계 하중을 가하는 방식으로 시험이 진행되었다.

점토로 채워진 셀에 일시적으로 120kPa의 압력을 적용하였을 경우 급작스런 하중의 증가로 인한 과잉간극수압의 급격한 증가로 시료의 불안정 상태가 예상되므로 단계적으로 하중을 분할하여 증가시키며 시험을 수행하였다. 단계하중은 압축공기로 30kPa, 70kPa, 120kPa 3단계로 나누었다.

4. 실험결과 분석

4.1 원지반 조건을 고려한 통수능 결과

통수능 저하 요인으로 지반의 침하에 따른 배수재의 변형, 축압증가에 따른 배수재 필터의 크리프(Creep), 클로깅(Clogging)으로 인한 통수단면적 감소, 동수구배가 0.5 이상으로 증가되면 배수재 속의 물 흐름의 난류화 등이 통수능력 감소 요인이며, 이 중 배수재 굴곡에 의한 통수능력 저하는 직립조건 초기 통수능력에 비해 15%~40% 정도로 크게 감소한다고 알려져 있어 그 굴곡 정도에 따라 배수재의 역할이 현저히 떨어질 수 있다(권오일, 2007).

또한, Koerner & Lawrence(1988)등에 의하면 굴곡에 의한 배수재의 통수능 감소가 15%~20%를 초과하는 경우의 변형률에서는 통수불능상태라고 하며 절곡된 배수재에 대해서는 직립의 최소통수능력의 30% 이상이 확보되어야 된다고 한다.

(a) 함수비 제조

(b) 배수재 및 간극수압계 설치

(c) 시료 투기

(d) 하중 가압판 설치

(e) 통수능 측정

(f) 함수비 및 전단강도 측정

그림 3. 실험순서

그림 4. 원지반 조건을 고려한 통수능 결과

원지반 조건에 따른 통수능 효과분석을 위해 부산 및 인천지역의 시료를 대상으로 원지반 조건을 달리하여 실내실험을 수행한 후 실험결과값으로부터 통수능 효과, 간극수압, 전단강도, 함수비 변화 및 SEM 등을 비교·분석하였다.

그림 4에 나타낸 바와 같이 원지반 조건 및 단계별 하중에 따른 PBD의 통수능 시험결과 CL(준설토)은 25.6~38.2cm³/sec, CL(준설토)+CL(원지반)은 29.9~43.1cm³/sec, CL(준설토)+ML(원지반)은 32.9~45.1cm³/sec, CL(준설토)+SM(원지반)은 36.7~48.6cm³/sec로 각각 나타났다. CL(준설토)+SM(원지반)의 지반조건에서 가장 높은 통수능 값을 나타냈으며, 원지반 조건을 고려하지 않은 CL(준설토)의 경우는 가장 적은 통수능 값을 나타냈다.

원지반 조건을 고려하지 않은 CL(준설토)의 값을 기준으로 통수능 증가를 비교했을 경우 CL(준설토)+CL(원지반)은 14.36%, CL(준설토)+ML(원지반)은 23.09%, CL(준설토)+SM(원지반)은 33.83%로 원지반을 고려했을 경우가 고려하지 않은 경우보다 더 많은 통수량을 나타낸 것으로 확인되었다.

이는 원지반에서 세립분 함량이 적고, 함수비가 적으면 클로깅(Clogging)현상이 적게 발생함에 따라 통수단면적이 원지반 조건을 고려하지 않은 경우보다 크기 때문에 나타난 결과라고 볼 수 있다.

4.2 원지반 조건을 고려한 침하량 분석

원지반 조건에 따른 침하량 측정은 LVDT를 이용하여 일정한 시간동안 분석하였다. 가장 보편화 되어 있는 쌍곡선법을 적용하여 압밀도 90%가 되었을 때 실험을 종료하였으며, 원지반 조건을 고려한 침하량을 비교·분석하였다.

그림 5는 원지반 조건에 따른 침하량 결과를 나타내고

그림 5. 원지반 조건에 따른 침하량 측정 결과

있다. 4가지 조건의 경우 중에서 CL(준설토)+SM(원지반) 조건이 압밀도달 시간이 가장 빠르게 도달하였으며, 원지반의 침하량이 적어 전체 침하량은 적게 발생하였다. 이는 원지반에 근입된 배수재의 클로깅(clogging) 발생여부에 따라 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 원지반의 투수계수가 높을수록 압밀도달 시간은 빠르게 도달 되었다.

4.3 원지반 조건을 고려한 간극수압 소산 분석

연약지반의 간극수압의 소산 정도를 분석하기 위하여 0.05kPa 단위로 측정이 가능한 간극수압계를 그림 2에 나타낸 모식도처럼 배수재로부터 수평방향으로 5cm, 10cm, 15cm 하단으로부터 높이 20cm, 30cm, 40cm인 지점에 3개를 설치하여 압밀진행에 따른 시료 위치별 간극수압 변화를 측정하였다. 침하량 측정을 통한 압밀도 분석은 최종 침하량을 예측하여야 하며 반복시험의 특성상 침하량의 차이를 나타내는 원인이 다양할 수 있어 원지반 조건에 따른 통수능이 압밀속도 차이의 주원인이라고 볼 수 없다. 이러한 문제를 보완할 필요가 있어 실험 중 측정된 간극수압의 위치별 발생 및 소산특성을 분석함으로써 원지반 조건에 따른 압밀속도 분석의 적정성을 검토하는데 적용하였다.

그림 6은 원지반 조건에 따른 하중단계별로 나타낸 간극수압 경시변화를 나타내고 있으며, 압밀도($U = \frac{u_i - u_e}{u_i}$) 90%일 때 기준을 적용하여 비교·분석한 결과이다.

압밀도 90% 도달시간은 원지반 조건에 따라서 351hr~383hr의 범위로 나타났으며, 원지반 조건을 고려하지 않은 CL(준설토) 보다 CL(준설토)+CL(원지반)은 3.53%, CL+ML 5.46%, CL+SM 8.35%로 원지반 조건을 고려한 경우가 압밀이 더 빨리 진행되었다. 또한, 압밀도 90% 도달시간도 원지반을 고려한 경우가 가장 빠르게 도달하는

(a) 30kPa(H-20cm) 간극수압 측정

(b) 30kPa(H-30cm) 간극수압 측정

(c) 30kPa(H-40cm) 간극수압 측정

(d) 70kPa(H-20cm) 간극수압 측정

(e) 70kPa(H-30cm) 간극수압 측정

(f) 70kPa(H-40cm) 간극수압 측정

(g) 120kPa(H-20cm) 간극수압 측정

(h) 120kPa(H-30cm) 간극수압 측정

그림 6. 간극수압 소산 분석(계속)

(i) 120kPa(H=40cm) 간극수압 측정

그림 6. 간극수압 소산 분석

그림 7. Vane Test 위치

것으로 확인할 수 있었다.

이는 통수능 및 침하량 결과에 나타났듯이 원지반의 투수성은 침하량 뿐만아니라 압밀축진에 영향을 미치는 것으로 확인할 수 있었다. 간극수압이 배수재 근처에서 빨리 소산되는 이유는 컬럼(Column) 중앙에 위치한 PBD를 통해 배수거리가 짧아진 연약지반 내의 간극수가 빨리 배수되어 나타난 결과이다.

4.4 전단강도 분석

간극수압 소산($U = \frac{u_i - u_e}{u_i}$)이 90% 정도로 되었을 때 연약지반에 대한 압밀축진 효과를 확인하기 위하여 그림 7과 같이 배수재 중앙에서부터 5cm, 10cm, 15cm 거리별과 일정한 심도별 간격으로 베인시험(Vane Test)을 실시하여 전단강도 값을 도출하였다.

표 3은 전단강도 측정결과를 나타내고 있으며, 분석은 신뢰성을 확보하기 위해서 원지반위에 투기된 준설토만을 대상으로 수행하였다. CL(준설토) 7.1kPa~23.9kPa, CL(준설토)+CL(원지반)은 15.1kPa~24.8kPa, CL(준설토)+ML

(원지반)은 19.5kPa~26.5kPa, CL(준설토)+SM(원지반)은 18.7kPa~27.3kPa로 나타났으며, 원지반 조건에 따른 전단강도는 미세한 차이를 나타내 지반조건에 따른 전단강도 변화는 크지는 않으나 거리별, 심도별 전단강도 범위는 큰 차이가 발생하는 것으로 확인할 수 있었다.

또한, PBD 부근의 중앙부분과 가장자리의 전단강도 차이는 CL(준설토)의 1.39배~1.91배, CL(준설토)+CL(원지반)의 1.17배~1.33배, CL(준설토)+ML(원지반) 1.18배~1.13배, CL(준설토)+SM(원지반) 1.18배~1.23배로 나타났다.

PBD로부터 멀어질수록 간극수압의 소산이 적어 전단강도가 적게 나오는 것으로 확인되었다. 실험조건이 상방향 일면배수 조건이기 때문에 심도의 깊이에 따라 전단강도의 차이를 최상부와 최하부의 조건으로만 분석하면, CL(준설토)의 경우 1.90배~2.42배, CL(준설토)+CL(원지반)은 1.23배~1.40배, CL(준설토)+ML(원지반)은 1.20배~1.15배, CL(준설토)+SM(원지반)은 1.19배~1.24배로 최상부의 전단강도가 최하부의 전단강도에 비해 현저히 큰 것을 알 수 있으며, CL(준설토)+CL(원지반), CL(준설토)

표 3. 시험조건별 전단강도 분석

깊이	CL(준설토) (kPa)		CL(준설토)+CL(원지반) (kPa)		CL(준설토)+ML(원지반) (kPa)		CL(준설토)+SM(원지반) (kPa)	
	5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm
5cm	23.9	17.2	24.8	21.2	26.5	22.4	27.3	23.1
15cm	22.1	15.8	23.1	18.2	24.6	22.6	25.3	22.9
20cm	20.9	14.2	21.6	16.8	23.8	21.3	24.3	21.9
25cm	19.0	12.8	20.1	15.1	22.1	19.5	23.0	18.7
30cm	18.5	10.9	28.3	23.6	32.4	24.2	34.2	25.6
35cm	17.5	9.2	26.8	22.4	30.1	23.1	32.7	24.3
40cm	15.3	8.2	25.1	21.6	27.5	22.4	29.2	23.1
45cm	12.6	7.1	24.3	20.6	26.1	21.3	28.1	22.1

그림 8. 함수비 측정 위치

그림 9. SEM 측정장치

토)+ML(원지반), CL(준설토)+SM(원지반)은 심도 30cm 부근에서 가장 큰 값을 보이는 것은 원지반에서도 PBD로 배수가 되어 압밀축진이 이루어진 것으로 판단된다.

4.5 함수비 분석

연약지반개량공사에서 PBD 타입 후 원지반 조건에 따른 압밀축진 효과를 알아보기 위하여 그림 8과 같은 위치에서 거리별, 심도별 시료를 채취하여 함수비 변화를 분석하였다.

표 4와 같은 함수비 분석은 신뢰성을 확보하기 위해 원지반 위에 투기된 준설토만을 실시하였다. 함수비는 CL(준설토)의 경우 39.30%~52.85%, CL(준설토)+CL(원지반)은 43.02%~49.06%, CL(준설토)+ML(원지반)은 42.75%~48.02%, CL(준설토)+SM(원지반)은 42.02%~47.06%로 거리별, 심도별로 많은 차이를 나타냈다.

또한, PBD 부근의 중앙부분과 가장자리의 함수비 차이는 CL(준설토)를 기준으로 비교했을 경우 8.61%~11.03%, CL(준설토)+CL(원지반)은 4.16%~8.95%, CL(준설토)+ML(원지반)은 3.04%~9.23%, CL(준설토)+SM(원지반) 3.06%~8.73%로 나타났으며, 지반조건에 따른 함수비 차이는 미세하게 나타났지만, PBD에서 거리가 멀어질수록 함수비는 높게 측정되었다. 이는 배수거리가 길어 압밀축진이

미미하게 이루어진 것으로 판단할 수 있다.

실험조건이 상방향 일면배수 조건이기 때문에 심도의 깊이 여부에 따라 함수비 차이를 최상부와 최하부의 조건만으로 분석하였다.

그 결과 CL(준설토)의 경우 17.8%~18.6%, CL(준설토)+CL(원지반)은 3.70%~8.50%, CL(준설토)+ML(원지반)은 3.71%~8.18%, CL(준설토)+SM(원지반)은 2.17%~7.89%로 큰 차이가 나타났다.

이는 전단강도 시험결과와 마찬가지로 심도별, 거리별 함수비 분포를 통해 컬럼(Column)중앙에 위치한 PBD를 통해 배수거리가 짧아진 연약지반 내의 간극수가 빨리 배수되어 PBD 공법의 압밀축진이 이루어진 것으로 판단된다.

4.6 Scanning Electronic Microscope 측정 결과

SEM의 원리는 그림 9와 같이 전자선이 시료면 위를 주사할 때 시료에서 발생하는 여러 가지 신호 중 그 발생확률이 가장 많은 이차전자 또는 반사전자를 검출하는 것이다.

본 연구에서는 복합통수능 시험 종료 후 PBD의 SEM 촬영을 위하여 필터부를 절삭하여 시편을 준비하고 PBD 필터의 안쪽과 바깥쪽을 진공상태에서 촬영하였다. 시료의 조건은 복합통수능 시험이 완료된 후 각각의 시편에 대해 시료크기를 1.0cm×1.0cm 정사각형으로 만들었으며 준

표 4. 시험조건별 함수비 분석

폭 깊이	CL(준설토)(%)		CL(준설토)+CL(원지반)(%)		CL(준설토)+ML(원지반)(%)		CL(준설토)+SM(원지반)(%)	
	5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm	5cm	15cm
5cm	43.40	48.30	43.02	47.25	42.75	46.24	42.02	46.04
10cm	45.50	49.70	45.08	48.19	44.87	47.09	43.83	46.29
20cm	47.40	51.20	47.02	49.06	46.56	48.02	45.62	47.06
30cm	48.60	52.61	36.08	37.42	17.49	18.21	17.02	18.11
40cm	49.50	54.66	37.06	37.98	17.82	18.55	17.35	18.02
50cm	51.60	54.66	37.62	38.01	18.03	18.88	17.75	18.39

(a) CL(준설토)-안쪽

(b) CL(준설토)-바깥쪽

(c) CL(원지반)-안쪽

(d) CL(원지반)-바깥쪽

(e) ML(원지반)-안쪽

(f) ML(원지반)-바깥쪽

(g) SM(원지반)-안쪽

(h) SM(원지반)-바깥쪽

그림 10. SEM 측정 결과 사진

설토인 CL(준설토)과 원지반인 CL, ML, SM의 PBD 필터 부를 배율 300 μ m로 확대 촬영하여 배수재에 대한 흡착 여부를 그림 10에 나타내었다.

분석결과는 준설토인 CL의 경우가 원지반의 경우인 CL(원지반), ML(원지반), SM(원지반)등 보다 점토 입자가 바깥쪽 필터부분에 많이 흡착되어 있는 것으로 확인되었다. 이는 PBD 타입 후 높은 함수비와 미세한 점토입자로 인하여 PBD 필터 부분에 점토 입자의 많은 흡착으로 인해 통수능에 영향을 끼쳤다고 판단된다. 반면에 필터 안쪽에는 점토 입자가 거의 붙어 있지 않아 Clogging이 발생

하지 않은 것으로 나타났다. 이에 따른 Well resistance의 영향은 거의 없을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 원지반 조건에 따른 통수능의 효과를 분석하기 위해 4가지 조건을 설정하여 실내모형 실험을 통해 PBD의 통수능 효과를 비교·분석하였다. 각각의 조건에 따른 복합통수능시험을 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 통수능 효과를 분석한 결과, 원지반 조건을 고려하지 않은 CL(준설토) 경우보다 원지반 조건을 고려한 CL(준설토)+CL(원지반)은 14.36%, CL(준설토)+ML(원지반)은 23.09%, CL(준설토)+SM(원지반)은 33.83%로 높게 측정되었다. 원지반 부분에서 클로깅(Clogging) 현상이 거의 발생하지 않아 원지반 조건을 고려하지 않은 경우보다 통수단면적이 더 크기 때문에 통수량이 크게 나타난 것으로 확인할 수 있었다.
- (2) 원지반 조건에 따른 CL(준설토)의 침하량은 CL(준설토)+CL(원지반) 보다 7.4%, CL(준설토)+ML(원지반)보다 16.7%, CL(준설토)+SM(원지반)보다 27.4% 더 많은 침하가 발생한 것으로 확인되었다. 이는 원지반에서 침하량이 발생하지 않았기 때문이고, 원지반의 투수성이 높아 압밀소요 시간도 짧았기 때문으로 판단된다.
- (3) PBD 타설 후 원지반 조건에 따른 간극수압소산을 분석한 결과, 원지반 조건을 고려한 경우가 압밀속도 더 빨리 진행된 것으로 확인되었다. 이것은 PBD의 클로깅(Clogging) 발생여부에 따라 차이를 나타냈다고 볼 수 있으며 통수능 결과에서 보듯이 원지반의 투수성도 침하량과 압밀촉진에 영향을 미치는 것으로 확인할 수 있었다.
- (4) 원지반 조건에 따른 전단강도와 함수비분석 결과 각각 미미한 차이가 있지만, 모든 조건의 거리별, 심도별에서는 큰 차이가 발생하는 것으로 확인되었다. SEM 분석결과, 준설토인 CL의 경우 원지반의 경우인 CL(원지반), ML(원지반), SM(원지반)등 보다 점토 입자

가 바깥쪽 필터부분에 많이 흡착되어 있는 것으로 확인되었다. PBD 필터 자체에는 점토입자의 흡착이 많지는 않았지만 현장 적용 시 점토입자 흡착으로 클로깅(Clogging)현상이 발생하여 통수능에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 권오일 (2007), *좌굴을 고려한 연직배수재의 통수능 특성 연구*, 석사학위논문, 서울시립대학교, pp.26-46.
2. Barron, R. A. (1948). "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", *Trans, ASCE*, Vol.113, No.2346, pp.718-742.
3. Biot, M. (1941), "General theory of three dimensional consolidation", *J. Appl. Phys.* Vol.12, pp.155-169.
4. Hansbo, S. (1979), "Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains", *Ground Engineering*, Vol.12, No.5, pp.21-25.
5. Kjellman, W. (1948), "Accelerating Consolidation of Fine Grained Soils by Means of Cardboard Wicks", *Proc. 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Rotterdam*, Vol.2, pp.302-305.
6. Koerner, C. M. and Lawrence, C. A. (1988), "Flow Behavior of Kinked Strip Drains", *Proc. of ASCE Symposium on Geosynthetics for Soil Improvement*, Nashville, Tenn., Geotechnical Special Publication, No.18, pp.22-35.
7. Terzaghi, K. (1925), "Principle of soil mechanics IV: Settlement and consolidation of clay", *Engineering News-Record*, 95, Nov.26, pp.874-878.
8. Yoshikuni, H. and Nakanodo, H. (1974), "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Permeability", *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, pp.35-46.

(논문접수일 2011. 12. 22, 심사완료일 2012. 3. 18)