

DCVD 배수재의 성능평가

A Performance Evaluation of the Deformation-Compatible Vertical Drain

송석규¹⁾, Seok-Kyu Song, 천윤철²⁾, Youn-Chul Chun, 심재범³⁾, Jai-Beom Shim, 심성현⁴⁾, Seong-Hyeon Shim, 김영욱⁵⁾, Young-Uk Kim, 이석원⁶⁾, Seok-Won Lee

¹⁾ 삼보기술단, Sambo Engineering Corporation

²⁾ 삼성물산 국내토목사업부 전무, Executive Vice President, Domestic Civil Engineering Business Department, Samsung C&T Corporation

³⁾ 삼성물산 건설부문 토목 ENG 팀 상무, Vice President, Civil ENG Team, Samsung Corporation

⁴⁾ 삼성물산 건설부문 토목 ENG 팀 차장, Deputy General Manager, Civil ENG Team, Samsung Corporation

⁵⁾ 명지대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Myongji Univ.

⁶⁾ 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, Konkuk Univ.

SYNOPSIS : The use of vertical drain method to improve the soft soil ground has been continuously increased in Korea such as Busan New Port, Saemangeum reclamation project and so on in Korea. Especially PBD(Plastic Board Drain), one of the vertical drain, has been widely used due to the economic feasibility, construction compatibility and quality control. However in case of using PBD, discharge capacity reduction caused by creep deformation of the PBD filter, bending, kinking and so on can be occurred. Therefore the purpose of this study is to solve these problems by developing Deformation-Compatible Vertical Drain, DCVD which allows to deform with consolidation settlement without bending and kinking of vertical drain. In order to investigate the performance of DCVD developed in this study, discharge capacity test, centrifuge model test and complex discharge capacity test for both PBD and DCVD are performed and the results are compared.

Keywords : plastic board drain, discharge capacity, Deformation-Compatible Vertical Drain

1. 서 론

1990년대에 계획된 부산 신항만 건설 및 개발계획의 수립과 더불어 전 국토에 걸친 해안지대에 대규모 개발계획이 수립되었으며, 현재 이러한 사회기반시설 건설을 위한 공사가 한창 진행 중에 있다. 이러한 해안지역은 지지력이 약한 지역적인 특성을 지니고 있기 때문에 연약지반 개량공사가 필수적이다. 연약지반 개량공법 중 연직배수 공법은 시공이 간편하며 공사비도 저렴하기 때문에 과거 수십 년 동안 활용되어온 공법이며, 1975년 창원 종합기계공업단지 조성을 위한 적현 단지에 처음으로 연직배수공법을 사용한 이래로 광양, 부산신항만 공사, 군산항 개발 등 해안지방을 중심으로 많은 공사 현장에서 사용되고 있다 (김수삼, 1976).

하지만 연직배수공법 중 가장 많이 사용하고 있는 PBD(Plastic Board Drain) 배수재는 타설 후 시간이 지남에 따라 통수능 저하 현상이 일어나는데, 그 현상은 여러 가지 요인이 복합적으로 발생하는 것

으로 통수능 저하 원인을 정확히 규정하기는 어려운 실정이다. 현장 적용 시 이러한 문제점들은 압밀 지연 현상을 일으키며, 이는 곧 공사비의 증가 또는 공사기간을 연장시키는 등의 큰 손실을 가져오기 때문에 이 문제를 해결하기 위하여 많은 연구자들에 의해서 연구가 이루어졌으며, 지금도 이루어지고 있다. 본 연구의 목적 또한 이러한 문제를 해결하기 위함이며, 그 중 가장 큰 원인인 지반 침하 시 배수재의 변형 현상과 대심도의 경우 측압에 의한 통수단면적의 감소 현상으로 인한 통수능 저하 현상을 해결하기 위하여 새로운 형상의 배수재(DCVD, Deformation-Compatible Vertical Drain)를 개발하여 여러 가지 시험을 실시하였다. 첫째로 원심모형시험장비를 이용하여 지반침하에 따른 배수재의 변형현상을 관찰하였으며, 복합통수능 시험을 통하여 기존 PBD 배수재와 DCVD 배수재의 시간에 따른 침하량과 통수능을 측정하였다.

2. 원심모형시험

연직 배수공법은 지지력이 약한 연약지반 속에 연직으로 배수재를 타설하여 배수거리를 인위적으로 짧게 하여 지반 압밀을 촉진 시키는 공법이다. 하지만 지반에 타설되어 있는 배수재는 플라스틱 관형으로 길게 늘어진 일체형이기 때문에 지반 침하 시 배수재의 강성을 이기지 못하고 꺾임, 만곡 등의 변형이 발생한다. 이러한 배수재의 변형에 관한 많은 연구가 수행 되었으며, 10% 굴곡변형에서 14~38%, 20% 굴곡변형에서 22~40%, 180° 꼬임조건에서는 25~85%의 감소를 보인다고 하였다(Bergado and Balasubramaniam, 1996).

따라서 이러한 지반침하에 따른 변형현상을 해결하기 위하여 연직으로 수축이 자유로운 스프링형상의 배수재, 즉 DCVD(Deformation-Compatible Vertical Drain)를 제작하여 실제 지반침하 시 함께 연직 방향으로 수축하는지 여부를 판단하기 위하여 원심모형 장비를 이용하여 시험을 실시하였다.

원심모형시험 장비는 그림 1과 같이 모터와 감속기 두 회전팔과 토조 박스로 이루어져 있다. 모터와 감속기를 이용하여 원심모형시험 장비를 초당 N 번 회전시키면 반경반향으로 $r(\text{회전팔의 반경}) \times (2\pi N)^2 m/s^2$ 의 원심가속도가 작용한다. 이러한 원심가속도를 계산하여 중력가속도 $9.81m/s^2$ 의 n 배, 즉 ng 만큼 모형 토조를 가속시키게 되면 Z_p 깊이 아래 있는 실제 지반의 응력조건과 유사한 상태를 구현할 수 있다.



그림 1. 원심모형시험 장비

다음 식 (1)에서와 같이 Z_p 의 깊이에서 받는 연직응력은 σ_p 이며, 여기에서 ρ 는 흙의 밀도, $g=9.81m/sec^2$ (중력가속도), γ_f 는 흙의 단위중량이다.

$$\sigma_p = g \rho z_p = \gamma_t z_p \quad (1)$$

모형 토조를 원심모형시험 장비에 장치하고 g 의 n 배만큼 가속할 때 토조 속의 깊이 $z_m = z_p/n$ 의 연직응력은 다음 식 (2)와 같다.

$$\sigma_m = n g \rho z_m = \frac{n g \rho z_p}{n} = \gamma_t z_p \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)에 따라 $\sigma_p = \sigma_m$ 이 되며, 따라서 원심력에 따라 원하고자 하는 깊이에 지반 응력 상태를 구현할 수 있음을 보여준다.

2.1 시험 내용

2.1.1 배수재의 제원

원심모형 시험은 DCVD 배수재와 결과 분석 및 비교하기 위하여 PBD 배수재, 이렇게 두 가지 배수재를 이용하여 시험을 실시하였다. PBD 배수재는 그림 2와 같이 폭 $100\text{mm}(\pm 5\text{mm}) \times$ 두께 $5\text{mm}(\pm 0.5\text{mm})$, 길이는 200mm 의 단일 하모니카형 배수재이며, DCVD 배수재는 그림 2와 같이 코어부분은 고압 나선호스의 경질부분과 연결 부분 중 경질부분만을 추출하여 직경 55mm , 선경 3mm , 피치 10mm 의 원형 스프링형상으로 제작하였으며, 필터재는 PBD 배수재와 동일한 제품을 사용하였다.

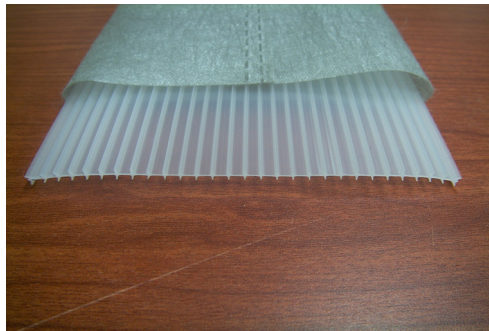


그림 2. PBD 배수재



그림 3. DCVD 배수재

2.1.2 시험 조건

본 시험에 사용된 시료는 부산 ○○현장에서 채취한 점토로 CH 로 분류되었으며, 시험 시 시료의 함수비는 50% 로 하였다. 원심모형 시험장비에 장착된 모형 토조의 총 길이는 70cm 이며, 상재하중판과 어댑터 연결부분을 뺀 나머지 길이 약 60cm 가 배수재의 길이가 되며 지반 타설 시 흠속에 포함되어 있는 기포에 의한 영향을 받기 때문에 이러한 기포의 발생을 줄이기 위해서 시험 전 물 속에 배수재를 수침시킨 후 시험을 실시하였다. 또한 기준의 통수능 시험장비는 하중판을 이용하여 압밀을 유도하여 배수재의 변형을 인위적으로 발생시키기 때문에 압밀에 의한 순수변형이라고 판단하기에는 어렵다고 판단된다. 따라서 원심모형 시험에서 사용된 모형토조의 상재 하중판은 그 영향을 최소화하기 위하여 가벼운 알루미늄($G_s=2.7$)을 사용하여 순수 압밀에 의한 변형이 이루어지도록 하였다.

시험은 총 20시간을 가동하였으며 $25G$ 의 속도로 3시간 동안 압밀시킨 후 17시간동안 $50G$ 의 속도로 압밀시켰다.

2.2 시험 결과

원심모형 시험 후 두 배수재의 변형 형상을 알아보기 위하여 모형 토조를 분리하여 압밀이 완료된 원형 시료의 단면을 절단하였다. 그림 4는 원심모형 시험 후 각각의 배수재가 변형된 형상을 측정된 결과이다.

PBD 배수재의 경우 기존 연구에서 통수능 저하 요인으로 밝혀졌던 굴곡과 만곡현상이 3~4회 일어난 것을 볼 수 있으며, 특히 하부로 내려갈수록 변형정도가 심한 것을 알 수 있다. 이는 기존 배수재 압밀 시험과는 다르게 원심모형시험 장비를 이용하여 상부와 하부 위치별 수직응력의 크기차로 인한 압밀량의 차이 때문인 것으로 판단된다. 그에 반하여 DCVD 배수재는 그림 4의 (b)와 같이 설치 시의 직립 상태와 유사하며 압밀침하에 따른 변형이 거의 일어나지 않는 것을 볼 수 있다. 따라서 DCVD 배수재는 압밀침하 시 지반과 함께 거동하는 것, 즉 침하 순응형 기능을 수행 할 수 있는 것을 알 수 있으며, 이것은 기존 배수재의 문제점이었던 굴곡 또는 만곡 등의 변형에 의한 통수능 저하를 해결 할 수 있다고 판단된다.



(a) PBD

(b) DCVD

그림 4. 배수재 형상 변형결과

3. 복합 통수능 시험

본 연구는 새로운 형상의 DCVD 배수재의 침하순응성의 검토와 기존배수재와의 비교를 통하여 성능을 검토하기 위한 것에 그 목적이 있다. 원심모형 시험을 통하여 침하 순응성을 확인하였으며, 복합 통수능 시험을 실시하여 기존 PBD 배수재와의 압밀 시 배수재의 침하량 비교 및 시간에 따른 각각의 배수재에 대한 통수능을 측정하였다.

3.1 시험 방법 및 조건

3.1.1 시험 장비

복합통수능 시험에 사용된 시험 장비의 모식도는 그림 5와 같으며, 그림과 같이 다리길이를 뺀 장비

의 길이는 120cm이며 직경은 70cm이다. 하중은 하부피스톤 판으로 가압하게 되어 있으며, 균일한 하중효과를 주기 위하여 수압을 이용하였다. Air compressure를 이용하여 공기압을 가해주면 수조안의 물에 공기압이 가해지며 가압된 물이 통수능 시험장비 하부판에 전달되어 하중이 가해지는 것이다. 하부 피스톤 판은 상하로 이동이 가능하게 되어 있으며 그 범위는 약 35cm이며, 그 가운데에는 통수능을 측정하기 위하여 원형기둥 안에 물이 흐를 수 있도록 되어있다. 또한 시험 후 배수재의 변형 결과를 쉽게 관찰 할 수 있도록 하부를 뺀 나머지 상부는 20cm씩 3부분으로 나누어서 분리 할 수 있도록 되어 있으며, 원통형 셀 바깥쪽으로 간극수압을 측정할 수 있는 측정게이지를 장착할 수 있도록 되어 있다.

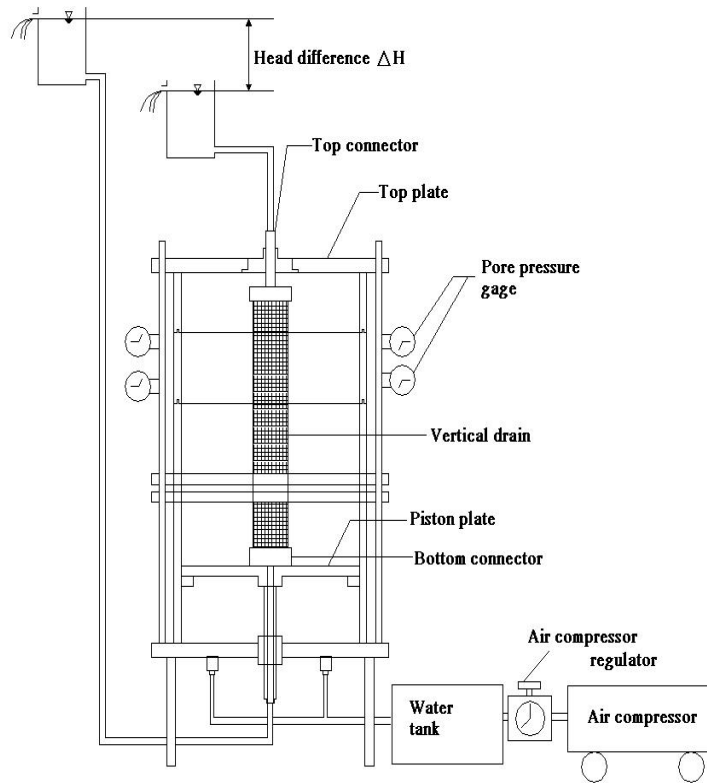


그림 5. 복합통수능 시험 장비의 모식도

3.1.2 시험 조건 및 방법

복합 통수능 시험은 DCVD 배수재의 현장적용시의 배수성능을 파악하기 위한 시험으로 기존 배수재와의 비교 시험을 통하여 그 성능의 우수함을 검토 하고자 한다. 따라서 본 시험은 PBD 배수재와 DCVD 배수재 각각 1회씩 시험을 실시하였으며, 시간에 따른 침하량과 변형률에 대한 각각의 통수능을 측정하였다.

사용된 배수재는 원심모형시험에서 사용된 배수재와 동일한 것이며, 배수재의 길이는 시험 장비에 맞추어 80cm로 결정하였다. 상·하부 배수재 연결 어댑터에 배수재를 결합한 후 복합 통수능 시험 장비 가운데 수직으로 설치한다. 이때 배수재 이외의 구간에서의 누수를 방지하기 위하여 연결부 주변을 실리콘 및 에폭시로 실링처리를 하였다. 다음 시료 믹싱기를 이용하여 생성된 60%의 함수비를 갖는 시료를 시험장비 안에 가득 채운다. 그 후 상부 판을 결합한 다음 시료의 안정화를 위하여 약 12시간동안 0.5kPa의 힘으로 가압한다. 모든 시험 준비가 완료된 후 시간에 따른 침하량을 실시간으로 측정하였으며, 통수능은 배수재의 변형량(침하량/배수재의 전체길이)에 따라서 5%, 10%, 15%, 20%, 25%일 때 각각의 값을 측정하였다. 배수재의 압밀 시간은 피스톤 하부판의 최대 변형된 길이를 기준으로 하여 25%의 압밀일 때를 종료시점으로 결정하였다.

3.2 시험 결과

3.2.1 시간에 따른 침하량

복합통수능 시험 후 시간에 따른 침하량 측정결과는 그림 6과 같이 나타났다.

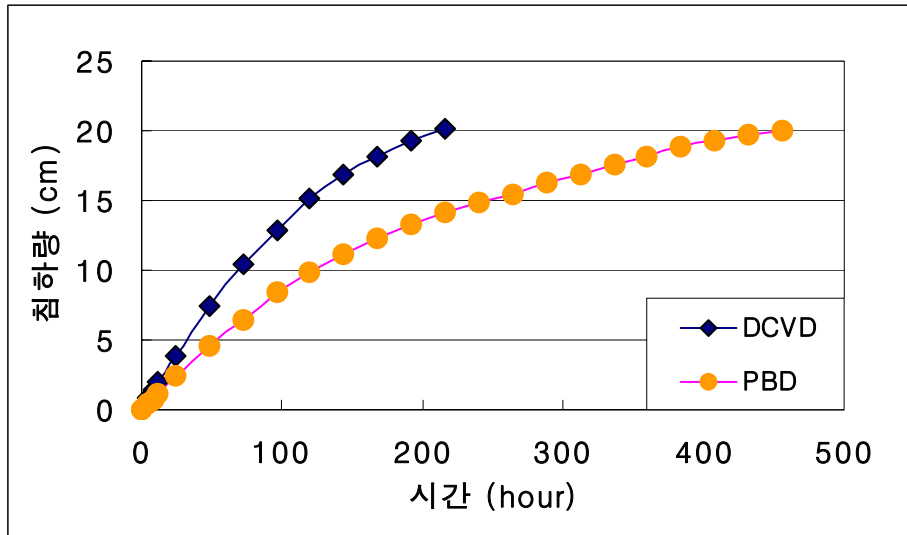


그림 6. 시간에 따른 침하량

그림 6과 같이 두 배수재 간의 침하 속도에 있어서 큰 차이를 보이고 있다. 최종 도달 침하량인 20cm에 도달할 때까지 걸린 시간은 DCVD 배수재는 216시간이 걸리는데 반하여 PBD 배수재의 경우 456시간이 걸려 DCVD 배수재의 약 2배 정도의 시간이 걸리는 것으로 확인되었다. 특히 침하 초기 5% 침하율에서는 거의 동일한 속도를 나타내고 있지만 시간이 지남에 따라 침하속도의 차이가 점점 커져가는 것을 알 수 있다.

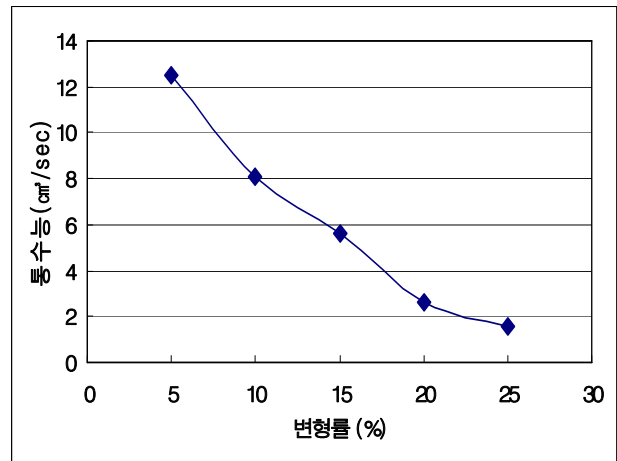
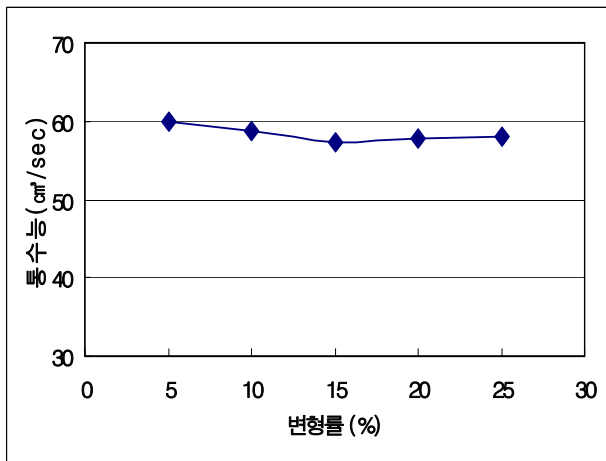


그림 7. 변형률에 따른 DCVD 배수재의 통수능 변화 그림 8. 변형률에 따른 PBD 배수재의 통수능 변화

그림 7과 8은 변형률에 대한 두 배수재의 통수능 변화를 측정된 결과이다. 그림 7의 DCVD 배수재는 5~25% 까지의 침하가 진행되는 과정에 있어서 거의 동일한 통수능을 유지하는 것을 볼 수 있으며, 이

는 측압이나 변형에 대해서도 어떠한 통수능 저하 현상을 보이지 않는 것으로 판단된다. 하지만 그에 반하여 PBD 배수재의 경우 변형이 일어남에 따라 통수능 저하현상이 크게 일어나는 것을 알 수 있다. 특히 15%이상의 변형이 일어날 경우 초기 통수능의 1/2배로 감소하였으며, 25%의 경우는 약 1/6으로 감소하는 것으로 확인되었다.

3.2.2 함수비 분포

복합 통수능 시험 실시 후 각각의 위치별, 높이별 함수비를 측정함으로써 개량효과를 비교·분석하여 보았다. 함수비 측정 지점은 그림 9와 같이 높이별로 구분하여 상부지점에서부터 10cm, 30cm, 50cm, 70cm의 깊이로 나누었으며 같은 위치별로는 가운데를 중심으로 방사방향으로 안쪽 부분과 바깥쪽으로 구분하여 총 32개 지점의 함수비를 측정하였다.

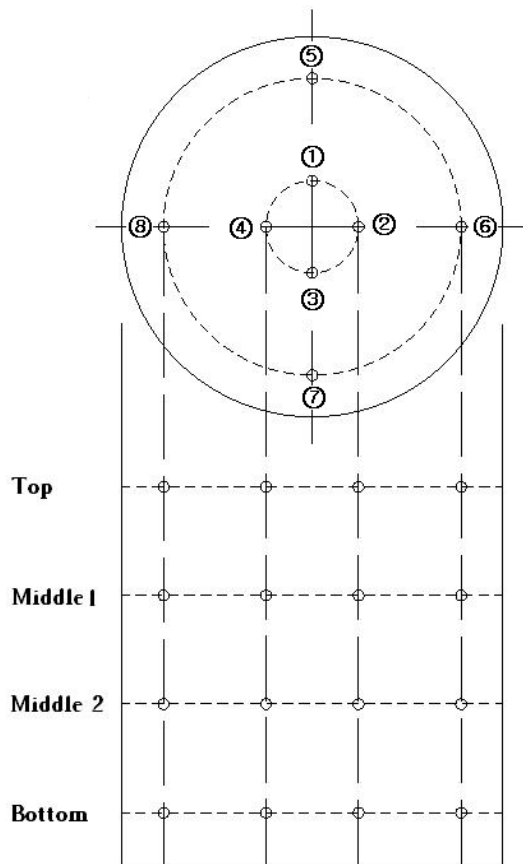


그림 9. 함수비 측정 지점

DCVD 및 PBD 배수재의 함수비 측정결과는 각각 표 1 및 표 2와 같게 나타났다. 전체적 함수비의 분포는 비슷한 경향을 보이고 있으나 함수비의 분포를 보면 DCVD 배수재는 균일한 분포를 보이고 있으나 PBD 배수재의 경우 불균일한 분포를 보이고 있다.

그림 10과 그림 11은 DCVD 배수재와 PBD 배수재의 함수비 분포를 그래프로 나타낸 것으로 전반적으로 하부판으로 하중이 가해지기 때문에 두 배수재 모두 상부로 갈수록 함수비가 감소하는 경향을 보이고 있다. DCVD 배수재의 경우 위치별로 살펴보면 안쪽부분(1~4번)과 바깥쪽부분(5~8번)이 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 하부로 갈수록 안쪽과 바깥쪽의 함수비 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다.

표 1. DCVD 배수재의 함수비 분포 (%)

구 분	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Top	23.0	23.4	21.5	23.0	32.7	33.9	32.1	32.6
Middle 1	21.8	21.2	19.3	20.9	27.1	27.5	26.7	26.5
Middle 2	21.5	20.8	20.4	21.2	27.7	28.5	28.1	28.4
Bottom	21.0	20.4	21.2	21.0	27.1	26.8	26.9	27.0

표 2. PBD 배수재의 함수비 분포 (%)

구 분	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
Top	23.5	23.0	22.8	23.3	33.1	32.6	32.4	32.9
Middle 1	23.4	21.1	22.3	25.7	28.4	22.45	27.6	29.3
Middle 2	22.7	21.4	22.3	25.5	27.4	22.7	28.4	29.1
Bottom	21.4	19.7	21.4	22.1	26.9	25.4	27.3	28.1

그에 비하여 PBD 배수재의 경우 전체적으로 고르지 못한 분포를 보이며 특히 4, 8번 지점의 함수비가 높은 반면 6번 지점의 경우는 같은 거리의 다른 지점에 비하여 낮은 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 만족현상이 발생하는 중앙부분(Middle 1, 2)으로 갈수록 심해지는 것을 알 수 있으며, 이것은 배수재의 만족현상이 2, 6번 방향으로 발생하여 영향을 받은 것으로 판단된다.

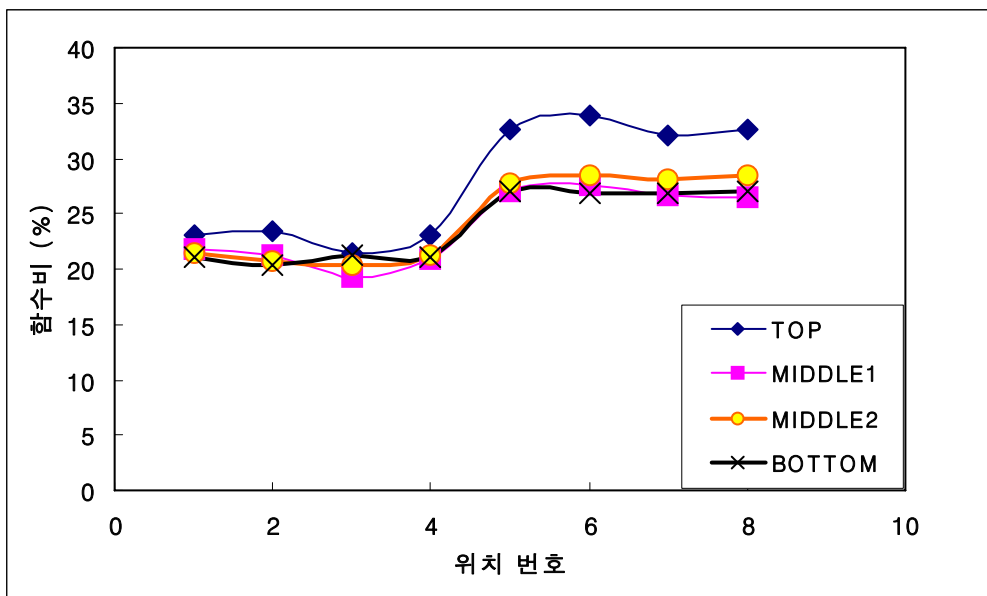


그림 10. DCVD 배수재의 함수비 분포도

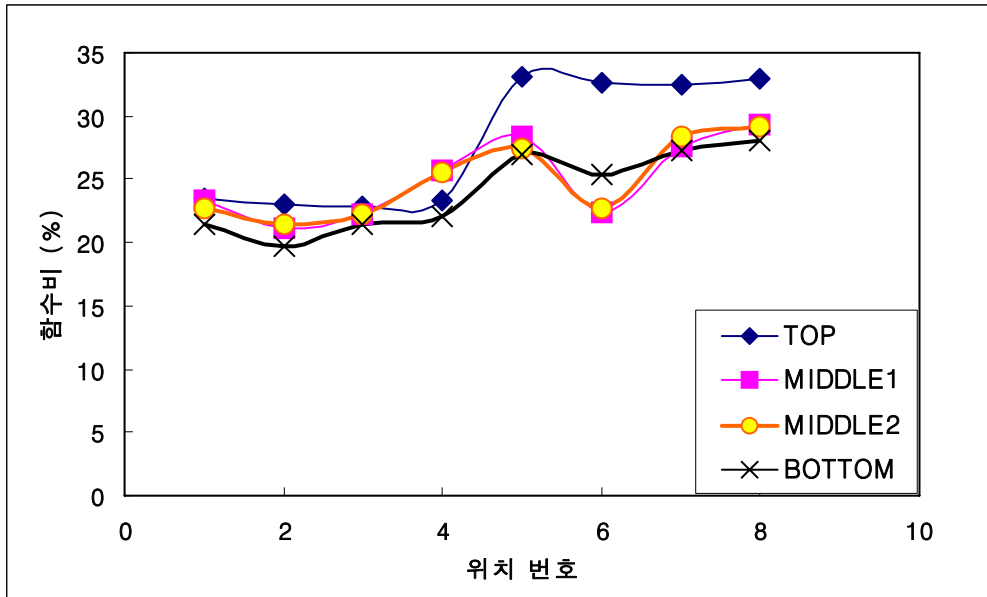


그림 11. PBD 배수재의 함수비 분포도

지반 압밀 시 강성이 높은 PBD 배수재의 경우 만곡 또는 굴곡과 같은 현상으로 인한 불균일한 함수 분포를 발생시켜 궁극적으로 지반의 강도 증진 시 균일하지 못한 효과를 발휘함으로 지지력향상에 있어서 큰 문제를 발생시킬 가능성을 내포하고 있다. 이에 반하여 DCVD 배수재의 경우 원형 그대로의 모습으로 직립의 형태를 유지하며 지반 침하에 순응하여 변형을 일으키므로 기존 배수재보다 균일한 개량 효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

4. 결론

새로운 형상의 DCVD 배수재의 성능 검토를 위하여 원심모형 시험과 복합통수능 시험을 통한 결론은 다음과 같다.

- (1) 지반 압밀 시 기존 PBD 배수재는 강한 강성으로 인하여 굴곡, 만곡, 꺾임 현상이 발생되어 통수능 저하 현상의 원인이 되었으나, DCVD 배수재의 경우 지반 압밀과 함께 순응하여 변형이 이루어 지기 때문에 굴곡 등과 현상은 발생하지 않았으며 직립의 형태를 그대로 유지하는 것으로 보아 침하에 따른 변형으로 인한 통수능 저하 현상은 일어나지 않을 것으로 판단된다.
- (2) 복합통수능 시험을 통하여 PBD 배수재와 DCVD 배수재의 침하량을 비교해 본 결과 초기 5%의 변형에서는 거의 동일한 시간이 소요되지만 이 후 변형이 증가함에 따라 두 배수재 간의 침하속도는 큰 차이를 보이고 있는 것을 확인하였다. 또한 통수능 측정결과 DCVD 배수재는 초기 통수능을 시험 종료 시까지 거의 그대로 유지하고 있으나 PBD 경우 15%이상 변형이 이루어질 경우 급속한 통수능 저하가 일어난다. 이것은 DCVD 배수재의 경우 굴곡 등의 현상도 발생하지 않을 뿐만 아니라 축압에 의한 통수단면적 감소 현상도 일어나지 않아 기존 배수재에 비하여 큰 배수효과를 나타내는 것을 알 수 있다.
- (3) DCVD 배수재는 주변의 함수비 분포를 측정된 결과 균일한 분포를 보이지만 PBD 배수재의 경우 굴곡이 일어난 방향을 중심으로 배수가 이루어지기 때문에 불균일한 분포를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 DCVD 배수재가 지반 침하 시 직립상태를 그대로 유지하며 변형이 이루어지기 때문에

고른 함수비 분포를 보이는 것으로 판단되며 굴곡현상이 일어나는 판형 배수재 보다 원형 배수재인 DCVD 배수재가 지반개량에 더 적합함을 알 수 있다. 본 DCVD 배수재는 현재 특허 출원중에 있다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산 건설부문의 지원으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김수삼(1994), “적현단지에 한국최초로 적용된 paper drain공법”, 한국지반공학발자취, 한국지반공학회.
2. Bergado, R. M., and Balasubramaniam, A. S. (1996), “Proposed criteria for discharge capacity of prefabricated vertical drains”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 14, pp. 481~505.