

지반특성을 고려한 연직배수재의 통수능 시험 및 선정 The Discharge Capacity Test & Vertical Drain Adoption Considering the Ground Condition

정헌철¹⁾, Hun-Chul Jung, 신경하²⁾, Kyung-Ha Shin, 정기문³⁾, Ki-Moon Jung, 허 집⁴⁾, Jip Huh

¹⁾ (주)에스코컨설턴트 전무, Managing Director of ESCO Engineers & Consultant Co., Ltd

²⁾ (주)에스코컨설턴트 차장, Senior Engineer of ESCO Engineers & Consultant Co., Ltd

³⁾ (주)에스코컨설턴트 대리, Associate Engineer of ESCO Engineers & Consultant Co., Ltd

⁴⁾ (주)에스코컨설턴트 대리, Associate Engineer of ESCO Engineers & Consultant Co., Ltd

SYNOPSIS : In the vertical drain method, discharge capacity is generally one of the most important factor which affect on the estimation of the drain efficiency. However, adopting the drain considering discharge capacity only is not sufficiently considered method so that systematic criteria for adoption is necessary to choose the most suitable drain. Therefore, this study represents the application method considering behavior of the ground and vertical drain which is coupled together and ground improvement efficiency analyzing various cases of discharge capacity test performed in the recent soft ground improvement projects. According to the analysis, most drains tend to satisfy the required discharge capacity. It presents that deformed shape of the drains and well resistance estimation along the ground settlement, improvement efficiency by water content ratio along the depth and shear strength obtained after ground improvement should be considered altogether with the discharge capacity to select the proper drain. Also, appropriate adoption of drain material considering the ground condition is vital through analyzing the field measured data and comparing the result of the discharge capacity test as various vertical drain materials are being constructed continuously.

Keywords : Discharge capacity test, Vertical drain, Required discharge capacity

1. 서론

최근 5~6년 동안 부산, 광양 및 서해안 지역의 대규모 연약지반 프로젝트가 진행되면서 다양한 연직 배수재료가 개발되고, 공사에 반영되고 있다. 특히, 최적의 연직배수재료를 선정하기 위하여 통수능시험을 수행하고, 산정된 통수능력을 기준으로 배수재료를 선정하고 있다.

연직배수재 선정시 통수능력이 중요한 요소이지만, 통수능시험결과 일반적으로 모든 연직배수재료가 요구되는 통수능력을 모두 만족하기 때문에 연직배수재를 선정함에 있어 통수능만을 고려하지 않고 대심도 또는 대변형 등의 과업지반의 특성을 고려한 통수능력의 평가와 침하경향, 배수재의 변형특성, 축압의 영향 및 개량전후의 함수비와 전단강도의 변화 등을 종합적으로 평가하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 국내에서 수행된 여러 통수능 시험결과를 분석하여 최적의 연직배수재료를 선정하기 위하여 지반특성에 적합한 통수능 시험방법 및 시험결과 평가방법에 대한 합리적인 방안을 모색하고자 한다. 이를 위하여 최근에 개발되어 설계 및 시공에 반영되고 있는 여러 연직배수재료의 개략적인 특성과 적용사례 등을 살펴보고, 통수능 시험장비의 종류와 국내 각 기관이 보유하고 있는 시험장비의 제원 및 기능으로부터 지반특성에 적합한 통수능 시험장비가 갖추어야 할 사항을 검토하였다.

또한 기존의 일반적인 통수능 시험결과와 분석내용과 설계 활용사례 등을 검토하였으며, 최근 개량 대상 연약지반의 특성을 고려한 통수능 시험사례로부터 연직배수재 선정의 종합적인 분석내용을 살펴보고, 합리적인 통수능 시험결과와 활용과 연직배수재 선정의 방안을 제시하고자 한다.

2. 연직배수재의 종류와 특성

연약지반개량을 위한 연직배수재는 주로 PBD가 적용되고 있으며, 최근 일반 PBD의 대심도에서의 꺾임, 굴곡 등에 의한 문제와 통수성능을 향상시킨 다양한 형태의 연직배수재가 소개되고 있다. 지금까지 소개된 연직배수재의 각각의 장단점은 표 1과 같으며, 연약지반의 개량품질의 확보를 위하여 중요한 것은 지반특성을 고려한 최적의 연직배수재를 선정하는 것이다.

표 1. 연직배수재의 종류와 특성

구분	개요	장점	단점	국내 시공사례	
PBD	일반 PBD	· 플라스틱 보드 드레인재	· 개량효율 안정적 · 시공실적 풍부 · 공사비 저렴	· 대심도 타설시 꺾임, 굴곡 발생 통수능 저하	· 다수
	X형 PBD	· X형 플라스틱 보드 드레인재	· 축압에 의한 절곡현상 감소 · 필터와 배수재 흡착으로 막힘현상 감소	· 특허출원공법으로 특정업체만 생산가능 · 최초 현장 시공중	· 화전지구3공구 시공중
	이중 코아 PBD	· 이중 플라스틱 보드 드레인재	· 큰축압에서도 일정량의 배수능력 유지 · 대심도에서 꺾임 및 좌굴현상 감소	· 중저심도 개량시 단일 코아 PBD와 개량효과 비슷하여 비효율적 · 시공실적 소수	· 부산신항 2-1 · 화전지구2공구 시공중
	오메가 (Ω)형 PBD	· 배수재 코아가 Ω형태로 통수 단면 확대	· 외부 간극수의 유입 단면이 크고 통수를 위한 단면형상이 원형으로 원활한 배수 가능	· 시공실적 없음 · 배수효과 검증 미비	· 없음
	실린더형 PBD	· 원형유공관과 수직지지대가 연속으로 구성	· 절단 및 절곡 최소화 · 독립원형 코어로 휨과 꺾임에 강한 저항성	· 시공실적 없음 · 배수효과 검증 미비	· 없음
PCD	PCD	· 나선형 주름관	· 변형, 굴곡, 꺾임 우수 · 기성제품으로 수급용이	· 시공실적 소수 · 특허공법으로 특정업체만 생산 가능	· 광양항 동측 2단계 · 부산경마장 · 광양항 서측 인입철도
	날개 드레인	· 플라스틱 보드 드레인과 주름관을 특수제작	· 통수단면적의 증가로 인한 배수효과 증대 · 대심도 연약지반개량에 양호	· 부직포와 코아 압착이 곤란하여 양날개 쪽 배수기능 저하 · 최초 현장 시공중	· 화전지구3공구 시공중
화이버 드레인	· 천연섬유를 이용한 드레인재	· 천연섬유를 드레인재로 사용하여 친환경적	· 자재비가 고가이며 · 국내 시공실적 소수 · 공사비 고가	· 녹산배수 펌프장 · 외국실적 다수	

표 1과 같이 다양한 연직배수재료가 개발되어 여러 연약지반개량 현장에서 적용되고 있기 때문에 개량 대상 연약지반의 특성과 부합되는 연직배수재료의 선정이 중요한 문제이며, 이를 위하여 지반특성에 적합한 통수능 시험의 계획과 분석이 요구되고 인근 시공현장의 연직배수재 계측결과와 상호 비교하여 최적의 재료를 선정하는 것이 필요하다.

3. 통수능 시험방법 및 장비

3.1 통수능 시험방법

배수재 통수능 시험에 주로 이용되는 Delft시험법과 복합통수능 시험의 특징은 표 2와 같으며, Delft시험법은 구속압력에 따른 배수재의 통수능은 산정할 수 있으나 배수재 내외부에 점토입자에 의한 막힘현상을 제대로 모사할 수 없어 최근에는 현장상태 모사가 가능한 복합통수능시험이 주로 이용되고 있다.

표 2. 통수능 시험방법

구분	시험 개요
Delft 시험	<ul style="list-style-type: none"> · 배수재를 멤브레인으로 감싸고 동수경사에 의한 배수재의 통수능 산정 · 점토의 거동특성에 대한 분석이 어려워 잘 사용 안됨 · 보완방법으로 점토의 거동특성을 파악하기 위하여 멤브레인과 배수재 사이에 점토를 넣어 Delft시험을 변형하여 사용
복합 통수능 시험	<ul style="list-style-type: none"> · 원통형 셀에 현장 시료 및 배수재를 타설하여 통수능 및 침하경향, 압밀 후 지반강도 등 다양한 정보추출 · 현장조건을 모사하기 어려운 Delft법을 보완하기 위한 시험법 · 국내 대부분의 통수능 시험 장비임

3.2 통수능 시험장비

3.2.1 통수능 시험장비 개발현황

지금까지 개발된 국외 통수능 시험장치 현황은 표 3과 같다.


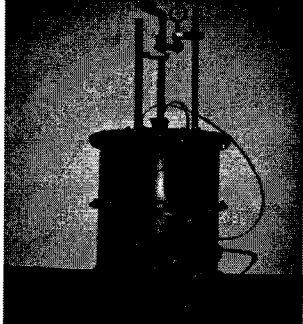
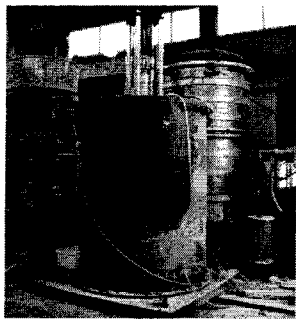
표 3. 국외 통수능 시험장치

연구자 및 기관	특성	비고	년도
Den Hoedt (Enka research institute)	· 현재의 통수능과 거의 비슷한 값 측정	비교적 낮은 압력에서 시험실시	1981
Hansbo(Cambridge)	· 내부 흐름저항에 대한 영향 생김	-	1983
Jamiolkowski(Torino 대학)	· 통수능 범위가 매우 작게 측정	-	1983
Oostveen(Delft공대)	· 프레임을 이용하여 변형조건 구사 · 측압이 수압으로 작용하여 현장모사 안됨	-	1990
Holtz(Enel-Cris)	· 현재의 통수능 시험기와 거의 흡사 · 현장조건 모사 어려움	-	1991
Broms(난양대학)	· 현장조건과 유사 · 종방향 흐름저항 모사 안됨	-	1994
Miura(Saga 대학)	· 기포영향 고려 및 장기시험 수행 · 침하량, 간극수압 측정불가	-	1998
Kamon(Kyoto대학)	· 실제 지반조건 유사, 굴곡 막힘현상 고려 · 압밀시험과 통수능 시험 동시수행 안됨	-	2000

3.2.2 통수능 시험장비 선정

국내에서 보유하고 있는 복합통수능 장비를 크기별로 구분하면 표 4와 같으며, 대부분 중형크기인 (30~50)cm×(60~100)cm의 원통형셀 장비이다. 배수재 선정에 관한 복합통수능 장비의 선정은 실제 현장에서의 지반개량조건을 모사할 수 있는 Size와 시험에 따른 다양한 계측이 가능한 장비를 선정하는 것이 중요하다. 기본적으로 통수량 측정과 함께 지반거동 계측을 위하여 침하 및 간극수압의 발생경향을 확인할 수 있는 장비가 바람직하다.

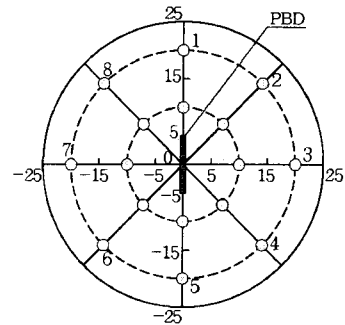
표 4. 국내 통수능 장비

소형	중형	대형
		
직경(50cm), 높이(60cm)	직경(50cm), 높이(100cm)	직경(120cm), 높이(200cm)

또한 조립해체가 용이하여 통수능 시험 완료 후 연직배수재의 변형을 확인할 수 있어야 하며, 시험전·후의 함수비와 전단강도의 변화를 측정하기 쉬워야 한다. 시험전·후의 함수비와 전단강도의 변화는 연직배수재를 중심으로 개량효과를 확인할 수 있도록 다음 표 5와 같은 방식으로 수행하는 것이 효율적이다.

표 5. 개량 전·후의 함수비 및 전단강도 측정포인트

명칭	측정 포인트
내측	9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16
외측	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
수평방향	1, 5, 9, 13
수직방향	3, 7, 11, 15
대각선 방향	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16



4. 통수능 시험 사례검토

4.1 설계 요구통수능 산정

연직배수재 타설에 따른 설계 요구통수능은 지반의 압밀이 진행됨에 따라 배출되는 압밀수를 연직배수재가 압밀지연 없이 배출할 수 있는 한계통수능으로 연직배수재 선정근거로 활용된다. 설계 요구통수능 산정방법은 경험적인 방법에 의하여 연구자들이 제시한 산정식에 의하여 결정되며 주로 Pradhan(1991), Kamon et al.(1992), Bergado(1988), Koerner(1997), Kim(2001)등이 제시한 산정식에 의하여 결정된다.

특히, Bergado와 Koerner 등은 시간, 배수재 변형, 막힘 현상 등을 반영하여 연직배수재의 통수능을 저감한 설계 요구통수능을 산정하고 있으며, 지역적으로 차이는 있지만, 일반적으로 설계에 반영되고 있는 요구통수능의 범위는 2.0~5.0cm³/sec 정도이다.

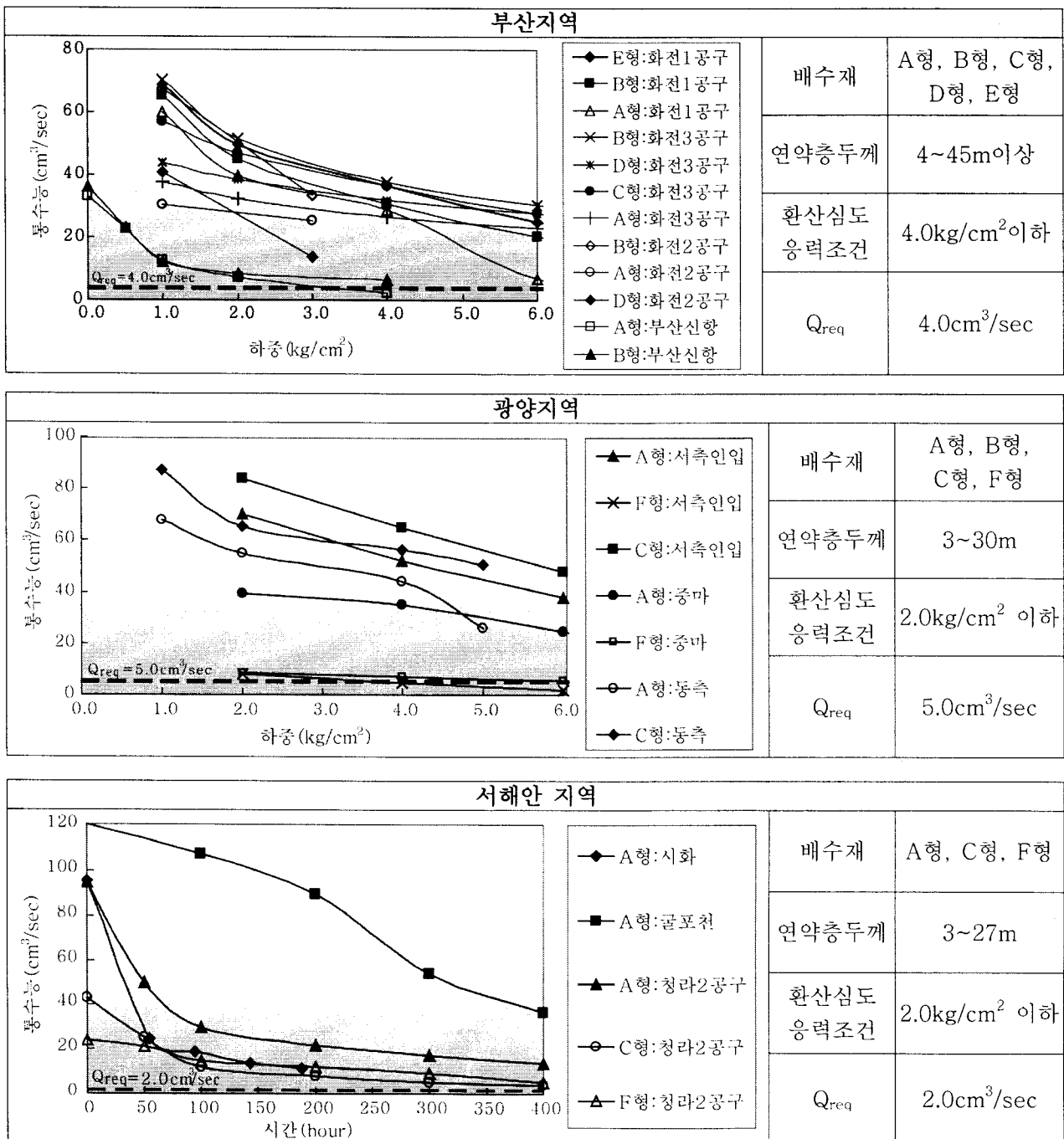
4.2 기존 통수능 시험결과 분석

기준에 수행된 연직배수재별 통수능 시험결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 연직배수재의 선정기준을 통수능만을 고려하고 있다. 재하하중에 따른 통수능과 설계 요구통수능을 비교하여 연직배수재를 선정하고 있으나 대부분의 연직배수재료가 모두 설계 요구통수능을 만족하기 때문에 설계자의 주관적인 판정에 따라 상이한 결과를 보이는 경우가 있다.

둘째, 설계 요구통수능을 만족하지 못하는 경우는 개량대상 지반의 특성에 기인하고 있다. 즉 부산지역의 경우 대심도 지반개량이기 때문에 재하하중에 따라 일정 심도에서, 광양지역처럼 원지반점토 상부로 초연약한 준설풀토가 투기되어 대변형이 예상되는 구간에서는 배수재의 변형에 따라 설계 요구통수능을 만족하지 못하는 결과를 보이므로 통수능시험 계획 수립시 개량대상 지반의 조건이 충분히 고려 되어야 한다.

셋째, 연직배수재의 선정 기준을 통수능 뿐만 아니라, 침하발생 경향과 침하에 따른 연직배수재의 변형, 그리고 개량전·후 지반의 함수비 및 전단강도의 변화 등을 종합적으로 분석하여야 할 것으로 판단된다.



5. 지반특성을 고려한 연직배수재 선정

지반특성을 고려한 연직배수재 선정을 위하여 개량대상 지반조건에 적합한 통수능 시험계획을 수립하여 수행하여야 하며, 통수능 시험결과에서 통수능에 의한 평가도 중요하지만 침하발생 경향, 연직배수재 변형특성, 개량전·후의 함수비 및 전단강도의 변화 등을 종합적으로 평가하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 대심도 지반인 부산지역과 준설점토가 원지반점토층 상부에 투기되어 대변형이 예상되는 광양지역의 통수능 시험 계획 및 시험결과를 분석하여 지반조건에 적합한 연직배수재의 선정 방안을 제시하고자 한다.

5.1 지반특성을 고려한 통수능 시험 계획

CASE-1의 경우, 심도에 따른 통수능력의 저하가 예상되므로 재하응력에 따른 통수능과 침하경향 등을 확인하도록 계획하고, CASE-2는 재하응력을 연속적으로 재하하여 발생된 침하에 따른 변형율과 통수능을 비교할 수 있도록 통수능 시험을 수행하도록 계획하였다.

CASE-1, CASE-2에 대한 지반조건 및 통수능 시험방법은 표 6과 같으며 분석항목은 표 7과 같다.

표 6. 통수능시험 조건

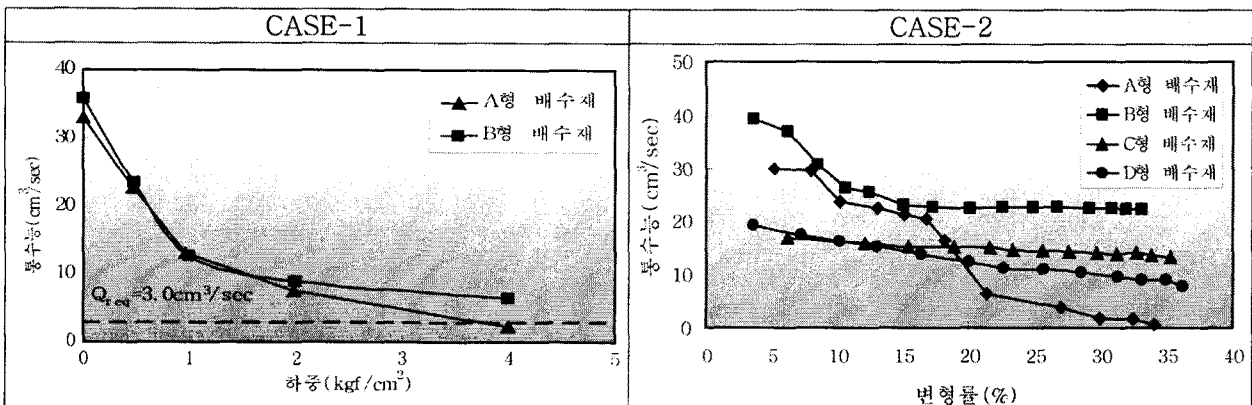
구분	배수재	재하응력(kgf/cm ²)	함수비(%)	비고
CASE-1	A형, B형	단계재하(0.5 → 1.0 → 2.0 → 4.0) 압밀도 80%이상 도달 후 다음 단계 재하	71.3	
CASE-2	A형, B형, C형, D형	연속재하(1.0 → 2.0 → 3.0) 연속적으로 바로 재하	62.4	

표 7. 분석항목

구분	분석항목	분석내용
①	배수재 변형	배수재 변형형상에 따른 적정성 평가
②	침하경향	타설지반 개량효과 판정
③	변형률-통수능	지반변형에 따른 적정 통수능 판정
④	함수비 변화	타설지반 개량효과 판정
⑤	전단강도 변화	타설지반 개량효과 판정
⑥	필터재 막힘현상	배수재 필터의 적정성 평가

5.2 통수능 시험결과 분석

5.2.1 통수능 판정



CASE-1의 통수능 시험결과, 재하하중에 따른 통수능을 보면 재하하중 4.0kgf/cm^2 인 경우 A형 배수재의 경우 설계 요구통수능을 만족하지 못하며(표 8 참조), 재하성토타중 1.0kgf/cm^2 를 고려한 4.0kgf/cm^2 의 환산심도 46.2m 이고 설계에서는 45.0m 이상의 심도에서는 설계 요구통수능을 만족하는 B형 배수재를 적용하였다.

CASE-2에서는 침하에 따른 변형률 20%를 전후로 A형 배수재의 배수성능이 급격히 저하되고, 변형률 25%에서는 설계 요구통수능을 만족하지 못하기 때문에 개량대상지반의 심도($H=20\text{m}$ 이상)와 변형률(25%)을 기준으로 연직배수재를 차별 적용하도록 설계에 반영하였다.

표 8. 통수능 시험결과(CASE-1)

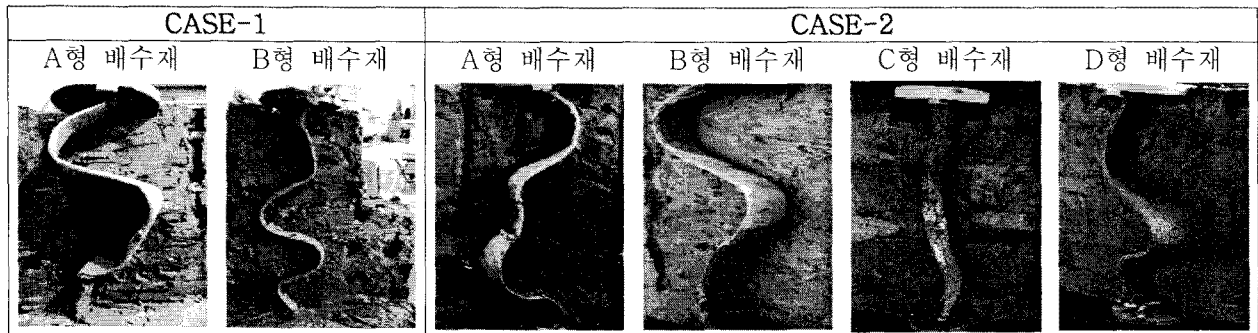
재하응력 (kgf/cm^2)	환산심도(m) (점토의 γ_{sub} 을 0.65tf/m^2 로 가정한 경우)	통수능(cm^3/sec)	
		A형 배수재	B형 배수재
0	-	33.11	36.04
1.0	표층	12.85	12.49
2.0	15.4	7.42	8.60
4.0	46.2	2.14	6.45

이와 같이 개량대상지반의 조건(대심도, 대변형 예상)에 따라 통수능시험 방법과 분석방향이 달라지므로 지반조건을 고려한 통수능시험을 계획을 수립하고, 분석방향도 검토되어야 한다.

5.2.2 통수능 시험결과 상세분석

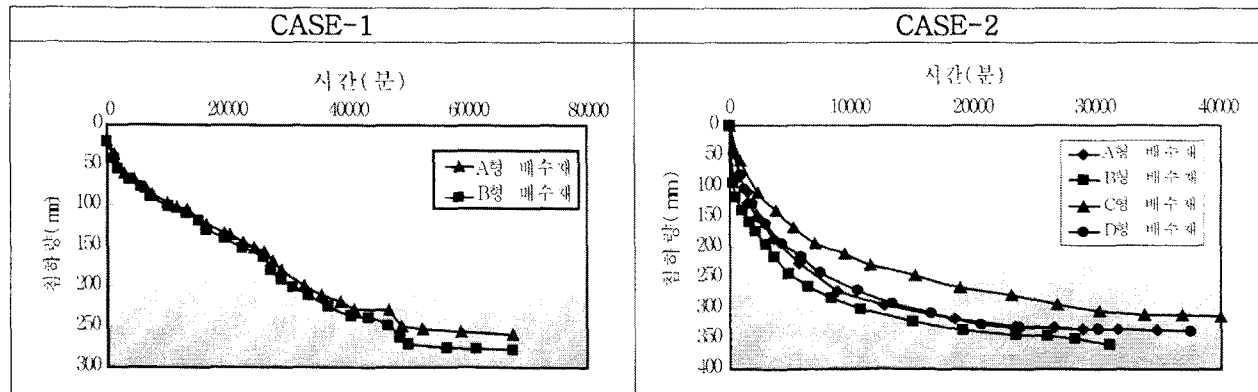
(1) 배수재 변형

CASE-1의 경우 A형 배수재는 하중이 커짐에 따라 하부에 절곡현상이 발생하였으며 B형 배수재의 경우 완만한 곡선형상을 보였다. CASE-2의 경우 A형 배수재는 하부에 굴곡 및 격임 현상이 발생했으며, B형 배수재는 하부에 주름접힘이 발생하였고, D형 배수재는 고강도 코어의 영향으로 비틀림이 발생하였다.



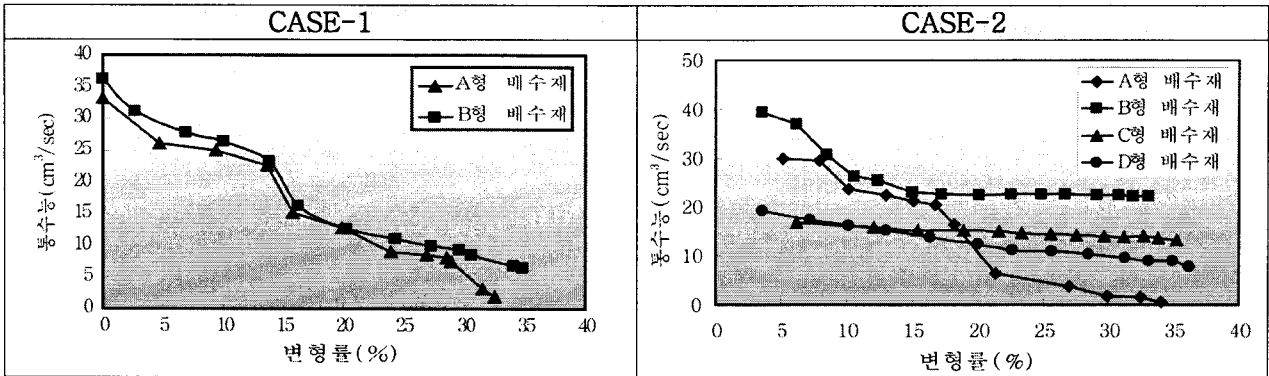
(2) 침하경향

CASE-1의 경우 하중이 커짐에 따라 A형 배수재의 침하가 B형 배수재에 비해 지연이 발생하는 것으로 판단되며, CASE-2의 경우 C형 배수재를 제외하고 비슷한 침하경향을 보이고 B형 배수재가 가장 빠른 침하경향을 나타내고 있다.



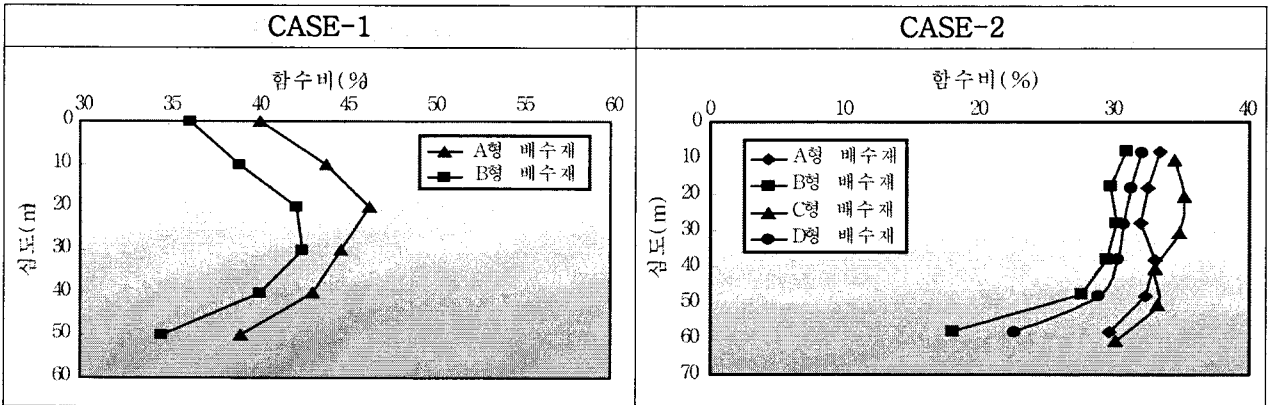
(3) 변형률-통수능

CASE-1의 A형 배수재가 약 27%의 변형률에서 통수능이 급격하게 감소하는 것으로 나타났고 CASE-2의 경우 대심도 구간과 마찬가지로 A형 배수재의 통수능이 약 20% 내외에서 급격한 감소경향을 나타내 대심도 및 대변형 구간에서 상당히 불리할 것으로 판단된다. 특히 CASE-1에서 A형 배수재는 25% 이상의 변형이 발생할 경우에는 설계 요구통수능을 만족하지 못하므로, 25% 이상의 변형이 예상되는 구간은 다른 종류의 배수재를 적용하여야 한다.



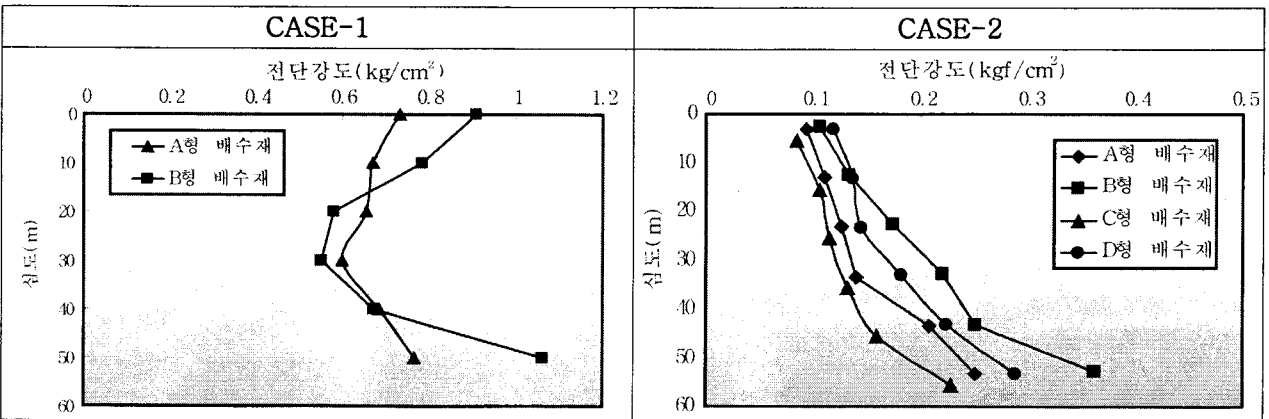
(4) 함수비 변화

CASE-1의 경우 A형 배수재에 비해 B형 배수재의 개량효과가 우수한 것으로 나타났으며 CASE-2의 경우 전체적으로 균등한 개량효과를 나타냈고 A형 배수재의 개량효율이 가장 떨어지는 것으로 나타났다.



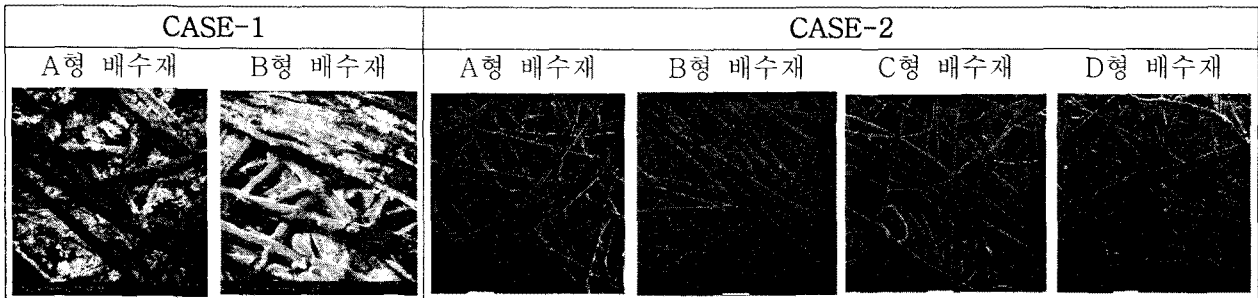
(5) 전단강도 변화

CASE-1의 경우 A형 배수재는 심도별로 균등한 개량효과를 나타냈고, B형 배수재의 경우 상부와 하부의 전단강도가 크고 심도별 강도가 급격한 변화를 나타냈다. CASE-2의 경우, 심도에 따라 증가하는 양상을 나타냈으며 C형 배수재의 개량효과가 가장 미비한 것으로 나타났다.



(6) 필터재 막힘현상

SEM촬영을 통하여 필터의 막힘 현상을 검토한 결과 AOS나 투수계수 등 시방기준을 만족하는 필터는 CASE-1, CASE-2 모두 통수능에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.



5.2.3 최적의 배수재 선정

배수재 선정을 위한 분석항목들에 대한 분석결과는 표 9와 같으며, 분석항목에 대한 지반특성을 고려한 가중치를 산정하여 합리적인 연직배수재의 선정도 가능할 것으로 판단된다.

표 9. 항목별 분석결과

분석항목	분석결과	
	CASE-1	CASE-2
배수재 변형	· A형 배수재 하부에 절곡현상 발생 · B형 배수재 원만한 굴곡형상 발생	· A형 배수재 하부에 굴곡, 꺾임 현상 발생 · B형 배수재 하부에 주름 접힘이 발생 · D형 배수재는 비틀림 발생
침하경향	· A형 배수재 하중이 큰 경우(대심도) 압밀지연 발생	· 대부분 비슷한 경향을 보이거나 C형 배수재는 전체적으로 압밀지연 발생
변형률-통수능	· A형 배수재 약 27% 변형률에서 통수능 급격한 감소 경향	· A형 배수재 약 20% 내외 변형률에서 통수능 급격한 감소경향
함수비 변화	· A형에 비해 B형 배수재 개량효과 우수	· 전체적으로 균등한 개량효과를 나타냈고 A형 배수재의 개량효율이 가장 떨어짐
전단강도 변화	· A형 배수재 심도별 균등한 개량효과 나타냄 · B형 배수재의 경우 상부와 하부의 전단강도가 크고 심도별 강도가 급격한 변화	· 심도에 따라 증가하는 양상을 나타냈으며 C형 배수재의 개량효과가 가장 미비
필터 막힘 현상	· 통수능에 큰 영향 미치지 않음	· 통수능에 큰 영향 미치지 않음
종합평가	· A형 배수재 : 대심도 경우, 절곡현상 등이 발생하여 통수능이 감소하는 것으로 판단됨 ⇒ 중저 심도에 적용 · B형 배수재 : 대심도에서 A형 배수재에 비해 우수한 개량효과 나타냄 ⇒ 대심도 적용	· A형 배수재 : 대변형 발생시 개량효율 급격히 감소 ⇒ 변형률이 작은 지반에 적용 · 대변형 발생구간에서는 분석항목에서 우수한 효과를 나타낸 배수재 적용

6. 결 론

본 논문은 최근 연약지반 개량을 위한 다양한 연직배수재료가 개발되어 여러 현장에 적용되고 있는 실정에서 최적의 연직배수재 선정을 위하여 기존의 통수능 시험결과를 분석하였으며, 통수능만 가지고 연직배수재료를 선정하기 보다는 지반조건을 고려한 통수능 시험을 수행하고 다양한 분석항목을 고려한 합리적인 방안을 제시하고자 하였다.

기존에 수행된 통수능 시험결과로부터

첫째, 기존 통수능 시험에서는 연직배수재료의 통수능력만을 기준으로 연직배수재료를 선정하였으나, 거의 대부분의 연직배수재료가 시간, 배수재 변형, 막힘현상 등의 영향을 고려한 설계 요구통수능을 만족하기 때문에 통수능과 함께 침하발생 경향, 배수재의 변형, 개량전후의 함수비 및 전단강도 변화 등으로 실질적인 개량효과를 분석하여 선정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

둘째, 통수능 시험결과에서 확인할 수 있듯이 일부 연직배수재료는 개량대상 지반특성을 고려할 경우 설계 요구통수능을 만족하지 못하기 때문에 합리적인 연직배수재료를 선정하기 위하여 지반특성을 고려한 통수능 시험을 수행하여야 한다. 특히 부산지역처럼 대심도 지반이거나 광양지역처럼 원지반점토층 상부에 연약한 준점토가 투기된 지반은 대변형 발생이 예상되기 때문에 지반조건을 반영한 통수능 시험과 분석으로 적절한 연직배수재료를 선정하여야 할 것으로 판단된다.

이상은 실내 통수능 시험결과 분석을 통한 결론으로 현재 다양한 연직배수재료가 시공되고 있기 때문에 향후 이에 대한 계측결과를 분석하여, 실제 현장 지반특성을 반영한 연직배수재료의 적정성이 검토되어야 할 것이고, 또한 통수능 시험과 현장 계측결과와의 상호 비교도 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김상규 외(2001), "연직배수재의 소요통수능 평가", 한국지반공학회논문집, 제 17권, 제 1호, pp.35~45.
2. 박영목 외(2005), "현장조건을 고려한 플라스틱 보드 드레인의 성능평가", 한국지반공학회 Geosynthetics Conference 논문집, pp.91~100.
3. 신은철 외(2005), "영향인자를 고려한 연직배수재의 통수능 평가", 한국지반공학회논문집, 제 21권, 제 9호, pp.13~23.
4. 정승용 외(2005), "현장조건을 고려한 연직배수재의 통수능 시험", 대한토목학회논문집, 제 25권, 제 5C호, pp.313~321.
5. Bergado, R. Manivannan., Balasubramaniam, A. S.(1996), "Proposed criteria for discharge capacity of prefabricated vertical drains", *Geotextiles and Geomembrains*, Vol. 14, pp.481~505.
6. Den Hoedt, G.(1981), "Laboratory testing of vertical drains", *Geotextiles Proc. of 10th ICSMFE*, Vol. 1, Stockholm, pp.627~630.
7. Kjellman, M., Pradhan, T. B. S.(1992), "Laboratory Evaluation of the discharge capacity of prefabricated band-shaped drains", *The Society of Materials Science, Japan*.
8. Oostveen, J. P., Troot, G. H.(1990), "Discharge index tests on vertical drains", *Geotextiles and Geomembrains and Related Products*, pp.345~350.
9. Pradhan, T. B. S., Kamon M. and Suwa, S.(1991), "Design method for the evaluation of discharge capacity of prefabricated band-shaped drains", *9th ARC, Bangkok*, Vol. 1, pp.523~536.