

단계석선압 조건에 따른 석선보드드레인 공법의 효율 분석

Analysis of Efficiency of Suction Board Drain Method by Step Vacuum Pressure

김기년* · 한상재** · 김수삼***

Kim, Ki-Nyun · Han, Sang-Jae · Kim, Soo-Sam

Abstract

In this study, a series of column test as a way in order to make up for the weakness point of the conventional acceleration method were conducted to both propose the suction board drain method and grapes the specific improvement character of this method as a result of a sort of plastic drain board and a phase of vacuum pressure conditions. On this occasion, the study focused on computing the effective factors of the fittest Suction board drain method affected by each condition through confirming the settlement generated during the test, the water content reduction and stress increase effect occurred arising from the test, and the ratio of consolidation related to the improvement period. In accordance with the shape of core and that whether the core is attached to the filter(pocket or adhesion), the castle type of adhesion and the column type of pocket are more efficient than the others as a consequence of the test to find out the improvement effect depending on each drainage such as a castle type, coil type, harmonica type, column type of pocket and a castle of the adhesion. In case of the step suction pressure, the shorter the period of -0.8 kg/cm^2 as a final step of the suction pressure is, the better the improvement is. In addition, the correlation between degree of consolidation per each suction pressure level and duration of application was drawn as a curve and the point of inflection on this curve was provided to determine the duration period to maximize the consolidation.

Keywords : Suction board drain method, plastic drain board, step vacuum pressure, undrained shear strength

요 지

본 연구에서는 전통적인 압밀축진공법의 단점을 보완하기 위한 방법으로 석선보드드레인 공법을 제안하고, 본 공법의 개량 특성을 파악하기 위해, 배수재 종류 및 단계 진공압 조건에 따른 일련의 Column 실험을 실시하였다. 이때 실험 간 발생하는 침하량과 실험 종료 후 발생된 함수비 저감효과 및 강도증진효과를 파악하고, 개량 기간에 따른 압밀도를 파악하여 각 조건에 따른 최적의 석선보드드레인 공법 영향인자를 산정하고자 하였다. 각 배수재(포켓식 성곽형, 코일형, 하모니카 형, 원형 및 열융착식 성곽형배수재) 종류에 따른 개량 효과를 파악하기 위한 실험 결과, Core 형상(원형, 판형)과 필터의 Core 부착 여부(포켓식, 열융착식)에 의해 열융착식 성곽형 배수재와 포켓식 원형배수재의 배수효율이 다른 배수재의 경우 보다 좋게 나타났다. 단계석선압 조건 실험의 경우 최종 단계석선압인 -0.8 kg/cm^2 으로의 기간이 짧을수록 개량도가 크게 나타났다. 또한 각 석선압 단계 별 압밀도-적용기간 곡선 상의 변곡점을 이용하여 압밀효과를 극대화 시킬 수 있는 적용기간을 산정할 수 있었다.

핵심용어 : 석선보드드레인 공법, 연직배수재, 단계석선압, 비배수전단강도

1. 서 론

전통적인 압밀축진공법의 단점을 보완하기 위해 진공압밀 공법이 제안(Kjellman, 1952)되었으나, 진공유지를 위해 사용되는 기밀시트가 고가이고 시공 중 잦은 파손이 발생하며, 진공펌프의 장시간 가동에 따른 펌프의 효율감소 등 여러 가지 문제점이 발생되고 있는 실정이다. 따라서, 이러한 기존 공법들의 단점을 보완할 수 있는 새로운 압밀축진공법의 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서 제안된 석선보드드레인

(Suction Board Drain) 공법은 지반 내 연직배수재를 타입하여 배수재에 직접적인 진공압을 가함으로써 진공압 효율을 획기적으로 개선시킬 수 있는 공법이다. 비록 하중을 가해줄 수 있는 범위가 진공압의 최대 하중인 1.0 kg/cm^2 정도 밖에 되지 않지만, 석선압을 전 심도에 고르게 전달할 수 있으며, 기존의 성토재하공법 및 연직배수공법과는 다르게 성토하중을 필요로 하지 않고 배수재와 진공호스의 직접적인 연결을 통해 진공압밀(대기압 재하) 공법의 단점으로 지적되었던 여러 가지 문제점을 개선시킬 수 있다. 그러나 현재까지 본 공

*정회원 · 한국농촌공사 농이촌연구원 연구원 (E-mail : kkn1976@hanyang.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · (주)지구환경전문가그룹 기술연구소 소장 (E-mail : hansj@ege.co.kr)

***참여회원 · 한양대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : kimss@hanyang.ac.kr)

법의 영향인자 산정을 위한 연구가 거의 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 관련 영향인자 중, 기존에 상용화된 배수재를 석션보드드레인 공법에 적용한 경우 발생하는 배수효율을 분석하여, 최적의 배수재를 선정하고자 하였으며, 석션보드드레인 공법의 적용 시, 가해지는 진공압이 한번에 가해지면, 배수재의 막힘현상 및 Hardening Zone(석션압으로 인한 투수성 저하구간)의 영향으로 인해 배수 효율에 위해적 요소로 작용될 수 있기 때문에 최대 배수효율을 유지시킬 수 있는 단계석션압 조건을 선정하기 위한 일련의 실험을 실시하였다. 이를 통해 각 조건에 따른 압밀도 변화 양상 및 강도증가비, 함수비 저하양상 등을 비교/분석하였다.

2. 석션보드드레인 공법

2.1 석션보드드레인 공법의 원리

연직배수공법은 재하된 하중으로 인해 발현된 과잉간극수압의 소산을 통해 압밀이 진행되는 원리를 이용한 공법인 반면, 석션보드드레인공법은 포화된 연약지반에 진공압을 가함으로써, 지반 내 간극수를 저감시켜 유효응력의 증대를 유발하고 이를 통해 지반의 압밀을 촉진시키는 공법이다. 그림 1에는 석션보드드레인 공법의 현장 적용 모식도를 나타내었다. 이 공법은 성토하중이나 기밀 시트 없이 배수재 상부에 기밀유지를 위한 원지반 층(Sealing 층)을 두고 진공압만을 이용하여 지반을 개량하기 때문에 기존의 성토재하공법과 진공압밀공법의 단점들을 동시에 극복할 수 있다. 또한 배수재와 진공펌프를 직접 연결하고 배수재가 타입되는 깊이를 조절하여 Sealing 층의 두께를 자유자재로 조절할 수 있기 때문에, 진공효율을 극대화시킬 수 있고 균일한 진공압을 지반에 적용시킬 수 있으며, 이로 인해 지반 내 부등침하 및 전단 파괴를 방지할 수 있다.

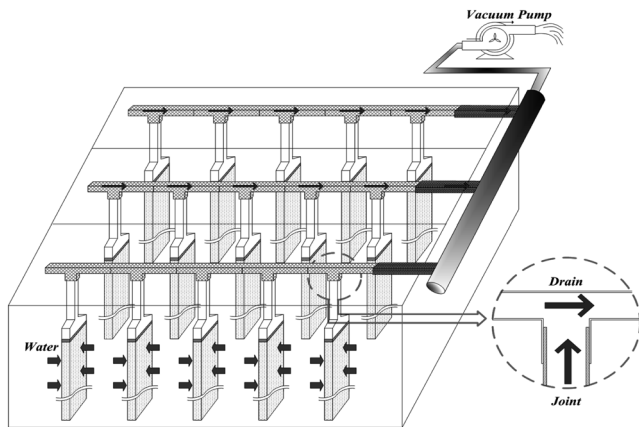


그림 1. 석션보드드레인 기술의 현장 적용 개념도

2.2 석션보드드레인 공법의 영향인자

석션보드드레인 공법을 현장에 적용하는데 있어서, 배수재 특성은 배수효율에 영향을 미칠 수 있다. 배수재는 필터의 종류, 코어의 형상, 필터와 코어의 접합형태 등에 따라 그 특성이 달라지게 되며, 이러한 배수재 종류에 따라 배수재 필터에서 발생하는 막힘현상, 배수재 주변에 발생하는 Hardening Zone의 범위 등에 영향을 미치게 된다. 따라서

본 연구에서는 배수재 종류에 따라 발생하는 석션보드드레인 공법의 효율을 파악하기 위해 국내/외에 시판되는 배수재를 조사한 후, 대표 배수재를 선정하여 실내 Column 실험을 실시하였다(Test 1~6). 그림 2에는 여러 가지 배수재 코어형상을 나타내었다.

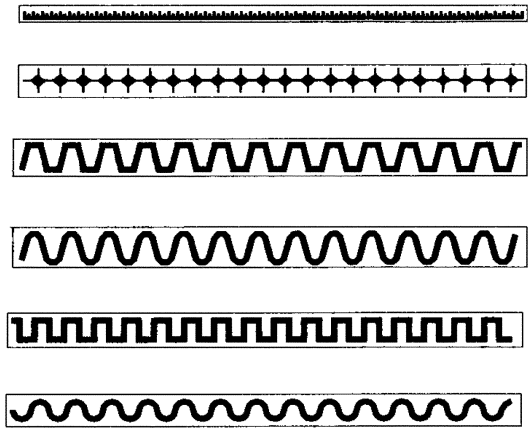


그림 2. 다양한 배수재 코어형상(Bo et al., 2003)

석션보드드레인공법 적용 시 배수재에 가해지는 진공압의 경우, 비교적 고압의 진공압을 급작스럽게 적용하게 되면 배수재 주변이 일시에 경화되는 현상이 발생하는데 이렇게 발생된 배수재 인접부근의 경화구간은 Hardening Zone(정연인, 2004)으로 정의 될 수 있다. 이러한 Hardening Zone이 발생한 부분의 지반은 간극이 줄어들고, 투수계수가 감소하기 때문에 배수재를 통한 간극수의 배출효과를 현저히 감소시킬 수 있다. 따라서 이러한 Hardening Zone의 범위를 파악하는 것은 석션보드드레인 공법을 효율적으로 적용하는데 있어서 중요한 설계 인자로 작용한다. Hardening Zone의 범위는 지반 내 가해지는 진공압의 크기에 따라 가변적이 되는데, 기존 연구에 의하면, 비교적 낮은 진공압을 가한 경우에서 Hardening Zone으로 인한 배수효율 저감 효과가 작아짐을 제시한 바 있다(차정일, 2003). 그러나 전체적인 효율과 개량시간을 고려할 때, 높은 진공압을 가하는 것이 석션보드드레인 공법을 적용하는데 있어서 효율적인 것으로 예상되지만 Hardening Zone을 감소시키므로서 효율성을 극대화시킬 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 이에 본 연구에서는 Hardening Zone의 범위를 감소시키며, 진공효율을 극대화시키기 위한 방법으로 단계적인 진공압(낮은 상태에서 높은 상태)을 지반 내 가하여 발생하는 배수효율 및 개량효과를 파악하고자 하였으며, 이를 위해 여러 가지 단계석션압 조건(Test 7~12)에 따른 실내 Column 실험을 실시하였다.

3. 실내실험

3.1 대상 시료의 특성

본 연구에서는 경기도 화성시 소재의 OO방조제 부근에 매립된 해성점토를 채취하여 사용하였다. 시료조성 시, 액성한계를 고려하여 완전포화체로 재조성하면서 실험기로의 타설이 용이하도록 액성한계보다 1.5배 높은 함수비(66%)로

조성하여 실험을 실시하였다. 표 1에는 대상 시료의 지반 공학적 특성을 나타내었다.

3.2 배수재 특성

본 연구에서는 국내/외에 시판중인 제품 중에서 크게 다섯 가지의 대표 배수재 형상을 선택하여 실험에 적용하였다. 국내에 시판되는 배수재들은 대부분 포켓식(비접착식) 형태였기 때문에, 열융착식 배수재와의 비교를 위해 국외 O사의 열융착식 성곽형 배수재를 실험에 적용하였다(표 2). 그러나 사용된 배수재는 실제 현장에 사용되는 배수재를 선택하여 사용되었기 때문에, 각 배수재 별 코어의 형상(성곽형, 하모니카형, 원통형, 코일형, 더블코어형) 및 필터의 접합 유무(접착식, 비접착식)에 의한 효율 비교는 가능하지만, 동일한 코어 형식에 대한 필터 접합 여부 및 동일한 필터에 대한 코어 형식 변화에 대한 비교는 수행되지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 실제 현장 개량에 사용되는 배수재 종류에

따른 석션보드드레인 공법의 배수효율에 중점을 두고 실험을 진행하였다.

3.3 실험장치 및 조건

본 연구에서 사용된 실험 장치는 직경 50cm, 높이 50cm (1단의 높이)의 원통형 본체로 이루어져 있으며, 총 2단 높이(1m)의 원통형 본체로 실험을 진행하였다. 이때, 원통형 본체는 시료의 타설 및 해체가 용이하도록 분리형으로 제작되었고, 각 심도 별 간극수압 및 석션압의 변화를 측정할 수 있도록 실험기 측면 및 하부에 밸브가 설치되어 있다. 또한 시료 내 압력변화를 충분히 견딜 수 있도록 5mm 두께의 철판으로 제작되었으며, 해수로 인한 실험기의 부식을 방지하기 위해 내/외부를 도색 처리하였다. 실험 도중 진공호스의 흔들림을 방지하고, 시료 내 시간 경과에 따른 침하량을 측정하기 위해 시료 타설 후 상부 중앙에는 진공호스 크기보다 약간 큰 구멍이 뚫린 원판형 디스크를 설치하였다.

표 1. 실험에 사용된 시료의 토질공학적 특성 결과

USCS	Passing 200 sieve (%)	Specific Gravity	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Plastic Index (%)	Compression index (Cc)	Coefficient of Consolidation (Cv, cm ² /sec)
CL	99.3	2.66	44	21.7	22.3	0.27	8×10 ⁻³

표 2. 적용된 배수재 형상 및 조건

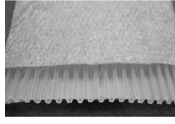
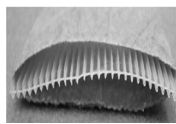
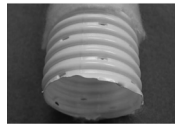

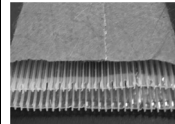
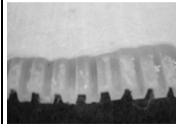
배수재와 필터의 접합 형식	포켓식(비접착식)					열융착식
	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Test 6
Core 형태	P-Castle	P-Hamonica	P-Column	P-Coil	P-Double	A-Castle
형상						
특성	폭 : 10cm 두께 : 3mm	폭 : 10cm 두께 : 3mm	직경 : 5cm 두께 : 3mm	폭 : 10cm 두께 : 3mm	폭 : 10cm 두께 : 5mm	폭 : 10cm 두께 : 3mm

표 3. 실험조건(배수재 산정실험)

고정인자					변동인자
Test No.	적용기간(일)	배수재길이	Sealing 층 두께	적용최종석션압	배수재 형상
Test 1	28일	50cm	50cm	-0.8kg/cm ²	포켓식 성곽형
Test 2					포켓식 하모니카형
Test 3					포켓식 원통형
Test 4					포켓식 코일형
Test 5					포켓식 더블코어형
Test 6					열융착식 성곽형

표 4. 실험조건(단계 석션압조건에 따른 효율분석)

고정인자					변동인자
Test No.	적용기간(일)	배수재길이	Sealing 층 두께	배수재 타입	적용석션압(kg/cm ²)
Test 7	16일	50cm	50cm	열융착식 성곽형 (A-Castle)	0.1(1일) → 0.2(1일) → 0.4(1일) → 0.6(1일) → 0.8(12일)
Test 8					0.1(2일) → 0.2(2일) → 0.4(2일) → 0.6(2일) → 0.8(8일)
Test 9					0.1(1일) → 0.2(2일) → 0.4(3일) → 0.6(4일) → 0.8(6일)
Test 10					0.2(2일) → 0.4(4일) → 0.8(10일)
Test 11					0.1(4일) → 0.4(6일) → 0.8(6일)
Test 12					0.8(16일)

Test 1~6에서는 석션보드드레인 공법에 최적화된 배수재를 선정하기 위해 6가지의 상용배수재를 이용하여 실험을 실시하였으며, Test 7~12에서는 최적 배수효율을 유지시킬 수 있는 단계석션압 조건을 선정하기 위한 실험을 실시하였다. 각 실험에서 석션압유지를 위한 원지반 층(Sealing 층)은 50cm로 설정하였다. 표 2와 3에는 본 실험에 적용된 배수재 종류 별 Core 형상 및 실험조건을 나타내었다. 또한, 표 4에는 석션압조건에 따른 실험조건을 나타내었으며, 그림 3과 4에는 실험기 모식도 및 실험 전경을 나타내었다.

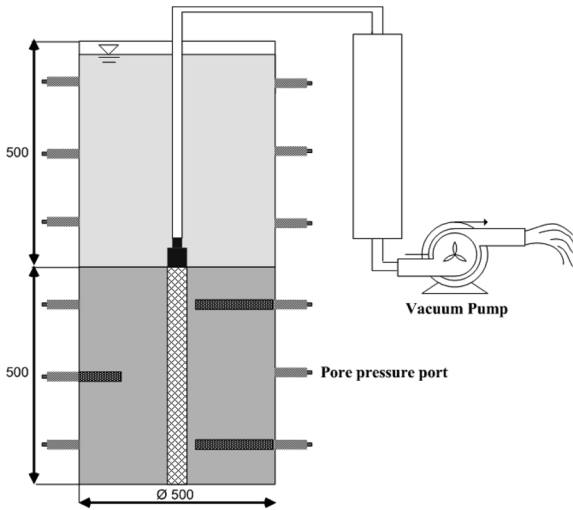


그림 3. 실험기 모식도



그림 4. 석션보드드레인 실험 전경

4. 실험결과

본 실험 진행 중에는 시간에 따른 침하량 변화를 측정하였으며, 종료 후에는 배수재를 중심으로 단면을 4등분하여 각각 배수재로부터 외곽측 등간격으로 3지점의 함수비 및 콘저항치를 심도 별(10cm)로 측정하여, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

4.1 침하 특성

배수재 산정 실험의 경우(Test 1~6), 모든 조건에서 시간이 경과함에 따라 대략 25일 이상의 기간이 경과되면 일정한 값으로 침하량이 수렴하여, 압밀도 80% 이상에 도달됨을 알 수 있었다. 또한 실험에 적용된 여섯 가지의 배수재 중 접착식 성곽형 배수재, 포켓식 원형 배수재, 포켓식 더블코어

배수재의 시간경과에 따른 침하양상이 비교적 크게 나타났다(그림 5). 이는 필터의 접합형식(포켓식, 접합식) 및 배수재 코어의 형상(원형, 더블코어 형)에 따른 석션압 효율 차이 때문인 것으로 판단된다. 차정일(2003)은 지반 내 큰 진공압을 한 번에 가하면, 배수재 주위에 발생하는 경화구간의 급속한 발생을 촉진시킴으로써 배수 효율이 떨어질 수 있음을 제시한 바 있다. 따라서 Test 1~5의 경우, 모든 조건에서 낮은 진공압에서 높은 진공압으로 단계적(-0.2kg/cm²-0.4kg/cm²-0.6kg/cm²-0.8kg/cm²)으로 증가시켜 시료에 적용하였는데, 이러한 변화로 인해 그 지점에서 비교적 급격한 침하가 발생하였다. 또한, 모든 배수재 조건에서 시간 경과에 따라 침하량이 감소하는 경향이 나타났다.

그림 6에는 적용 석션압을 최종 석션압인 -0.8kg/cm²까지 6가지 조건으로 단계적으로 증가시켰을 때(Test 7~12), 발생된 침하량을 나타내었다. 실험결과 -0.8kg/cm²의 최종 석션압까지 비교적 빠른 시간에 석션압을 증가시킨 Test 7, 8, 10 조건에서의 침하량이 비교적 크게 나타났으며, -0.8kg/cm²의 석션압을 일시에 가한 Test 12의 경우보다도 큰 침하량이 나타났다.

각 단계석션압 조건(Test 7~12)에서 측정된 침하량을 바탕으로 Monden(1963)의 시산법으로 최종침하량을 추정하여 각 실험조건에서의 압밀도를 추정하였다. 그 결과 단계석션압을 가한 경우(Test 7~11) 최대 약 60% 정도에 도달한 반면, 일시에 석션압을 가한 경우(Test 12), 압밀도 약 85%

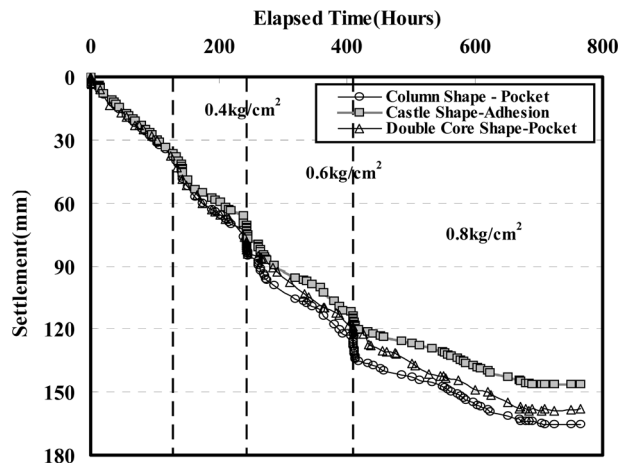


그림 5. 처리시간에 따른 침하거동(접착식 성곽형, 포켓식 원통형 배수재, 포켓식 더블코어 배수재)

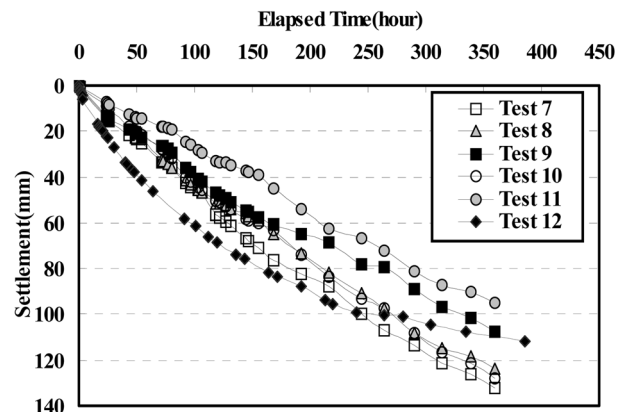


그림 6. 단계 석션압 조건에 따른 침하량

에 도달됨을 알 수 있었다. 이는 일시에 석션압을 가하게 되면, Hardening Zone이 단계 석션압을 가한 경우 보다 일찍 발현되고, 간극의 막힘현상을 초래하게 되어 최종 침하량이 작아져 나타난 결과로 사료된다(그림 7).

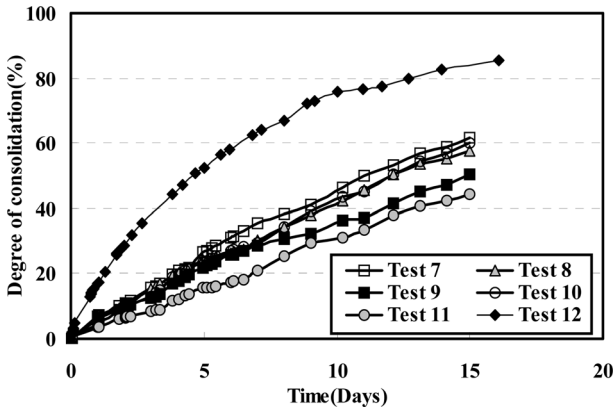


그림 7. 각 단계 석션압 조건에 따른 압밀도 분포

4.2 시간경과에 따른 배수 특성

실험 간 발생하는 배수량을 측정된 침하량을 통해 추정하기 위해, 압밀과정 동안 실제 시료에서 배출된 간극수의 배수량은 포화된 시료에서 침하된 체적과 동일한 간극수가 배출된다는 가정 하에 다음과 같은 식 (1)을 통해 시간 경과에 따른 배수량을 산정하였다.

$$Q_{out} = \frac{S_t \times A}{t} \quad (1)$$

여기서, Q_{out} : 배수량(cm^3/sec)
 S_t : 임의 시간 t에서의 침하량(cm)
 A : 시료의 단면적(cm^2)

그림 8에는 배수재 산정 실험(Test 1~6) 중에서, 배수량이 비교적 크게 발생한 열융착식 성곽형 배수재(Test 6), 포켓식 원통형 배수재(Test 3), 포켓식 더블코어 배수재(Test 5) 조건의 시간경과에 따른 배수량 변화를 나타내었다. 두 조건 모두 석션압 조건이 변하는 지점(저 진공압에서 고진공압으로 변화되는 지점)에서의 배수량이 비교적 크게 나타났으며, 압밀이 진행됨에 따라 배수량이 점차적으로 감소하는 경향

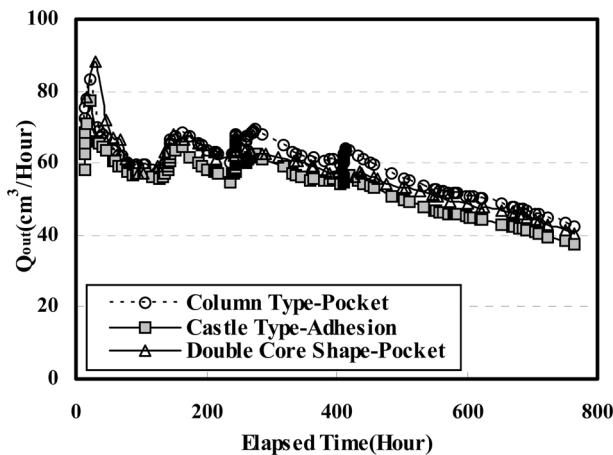


그림 8. 시간경과에 따른 배수량(배수재 산정실험)

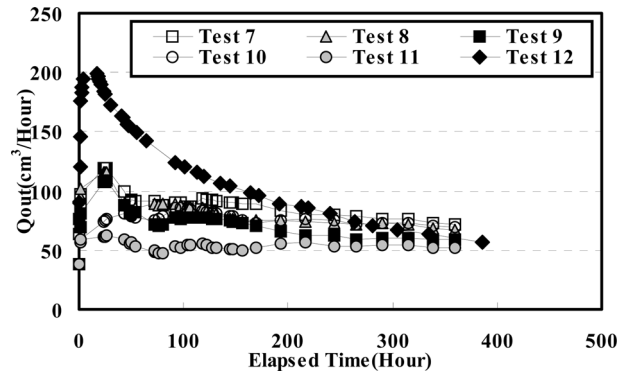


그림 9. 시간경과에 따른 배수량(단계석션압 조건 실험)

이 나타났다.

그림 9에는 단계석션압 실험(Test 7~12)에서, 식 (1)을 통해 산정된 배수량과 누적시간과의 관계를 나타내었다. 모든 실험 조건에서 초기단계에는 배수량이 많이 발생하다가 압밀이 진행됨에 따라 일정한 값으로 수렴하는 경향이 나타났다. 그러나 Test 12(일시 재하조건)의 경우 초기에 가해진 석션압의 크기가 가장 컸기 때문에, 배수량이 비교적 크게 나타나다가 점차적으로 감소되는 경향이 나타났다.

배수량의 감소경향이 배수재 산정실험(Test 1~6)의 결과와는 다르게 비교적 적게 나타난 이유는, 단계석션압 조건 실험(Test 7~11)에서의 압밀도가 약 60% 이하까지만 진행되었기 때문이다(그림 6). 또한 단계석션압조건이 비교적 세분화된 Test 7, 8, 9의 경우(5단계의 석션압 조건 실험)에서 초기 배수량이 크게 나타났으며, $-0.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 단계의 석션압기간이 비교적 짧게 적용된 경우에서의 배수량이 가장 적게 나타났다(Test 9, 11). Test 12의 경우, 초기 배수량이 비교적 크게 나타났지만, 시간 경과에 따라 감소되는 폭이 비교적 크게 나타났다. 따라서 실제 현장지반에 본 공법을 적용할 경우, 최적의 배수효율을 유도하기 위해서는 적용 초기 단계에서의 석션압단계를 세분화시키면서 비교적 짧은 기간을 적용시키고, $-0.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 단계의 석션압을 비교적 오래 적용시킬수록 배수효율이 높을 것으로 판단된다.

4.3 강도특성

그림 10에는 Test 1~6에서 배수재를 중심으로 방사형으로 측정된 강도를 평균 내어 나타난 전단강도 분포를 배수재로

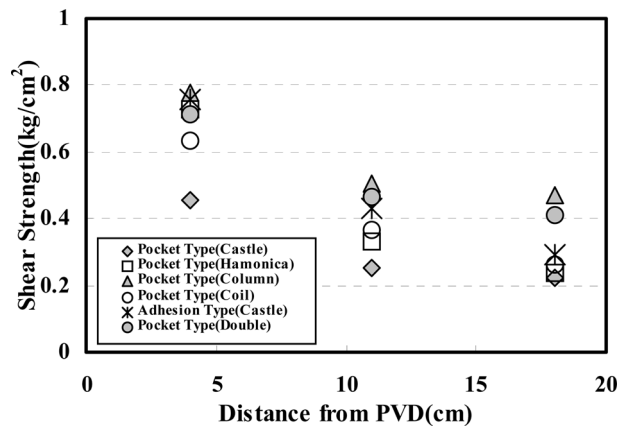


그림 10. 배수재로부터의 거리에 따라 발생된 전단강도(배수재 산정실험, Test 1~6)

부터의 거리에 따라 나타내었다. 그 결과, 배수재로 부터의 거리가 멀어질수록 강도는 감소하는 경향이 나타났으며, 배수재로부터 이격된 거리 12cm 이후에는 감소경향이 줄어들며, 수렴되는 경향이 나타났다.

특히, 사용된 배수재 중 필터 형식을 무시하고 그 효율을 비교해 보면, 열융착식 성곽형 배수재(Test 6)와 포켓식 원형 및 더블코어 배수재(Test 3, 5)의 시료 내 강도분포가 비교적 크게 나타났는데(그림 10), 열융착식 성곽형 배수재의 경우, 필터가 Core에 직접적으로 붙어 있기 때문에 필터와 Core 사이에 공간이 존재하는 포켓식 배수재에 비해 진공으로 인한 배수재 유로 단면적의 감소가 상대적으로 작게 발생하여 나타난 결과이다(그림 11).

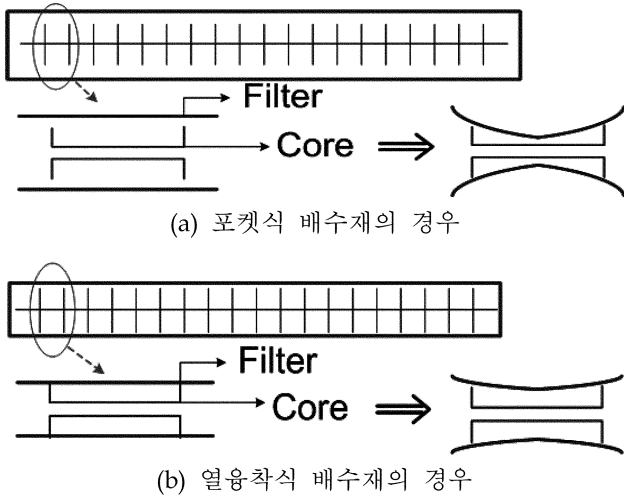


그림 11. 진공압으로 인한 배수 단면적의 감소 현상

또한, 포켓식 원형 배수재의 경우, 동일외주면의 개념으로 계산된 관형 배수재의 영향원(r_w)과 원형배수재의 직경으로 인해 발생하는 영향원이 5cm로 같지만, 관형의 배수재에 비해 원형배수재에서 진공압을 방사형으로 동일하게 적용시킬 수 있었기 때문에, 평균 개량효율이 증가되어, 배수재로부터의 거리에 따른 강도 감소량이 비교적 적게 나타났다(그림 12).

더블코어 배수재의 경우, 하모니카형 코어가 2중으로 겹쳐져 이루어져있기 때문에, 코어의 두께가 다른 관형 배수재(0.5cm)에 비해 두꺼우며(1cm), 유로단면적이 비교적 크기 때문에, 진공이 지반에 가해질 수 있는 공간이 크다. 따라서 배수효율이 다른 관형배수재에 비해 비교적 크게 나타났다.

그림 13에는 각 단계 석선압 조건(Test 7~12)에서 시료 내 발생된 전단강도를 배수재로부터 이격된 거리에 따라 나타내었다. 모든 조건에서 배수재로부터의 거리가 멀어질수록 강도는 감소하는 경향이 나타났으며, 배수재로부터 이격된 거리 약 12cm 이상에서 일정한 값으로 수렴했다. 또한 최종 석선압(-0.8kg/cm²)으로의 도달 시간이 가장 짧았던 Test 7의 강도 증가율이 비교적 크게 나타났다.

4.4 함수비 변화 특성

함수비의 경우, 초기 함수비 보다 약 10~30% 정도 감소하는 경향이 나타났으며, 심도가 깊어질수록 감소하는 경향이 나타났다(그림 14). 이는 배수거리가 길어짐으로서 발생

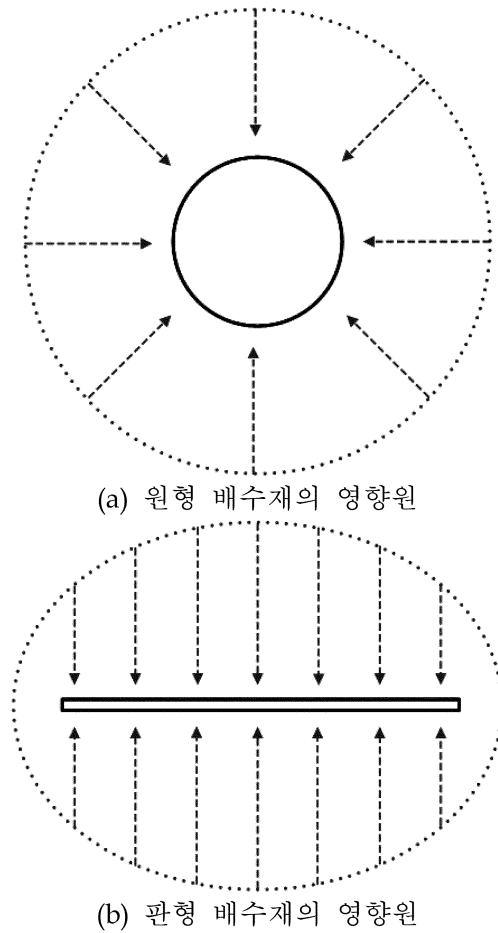


그림 12. 배수재 Core 형상 별 적용 영향 범위 모식도

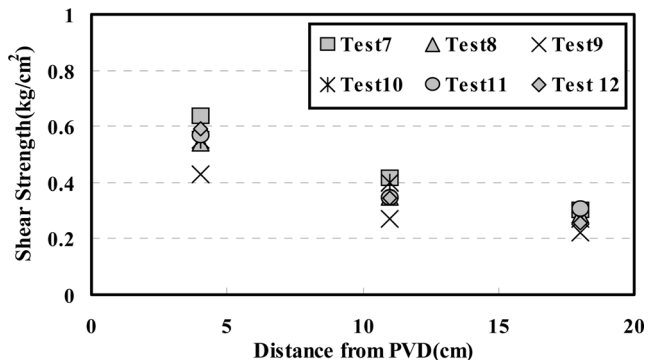


그림 13. 배수재로부터의 거리에 따라 발생된 전단강도(단계 석선압 조건, Test 7~12)

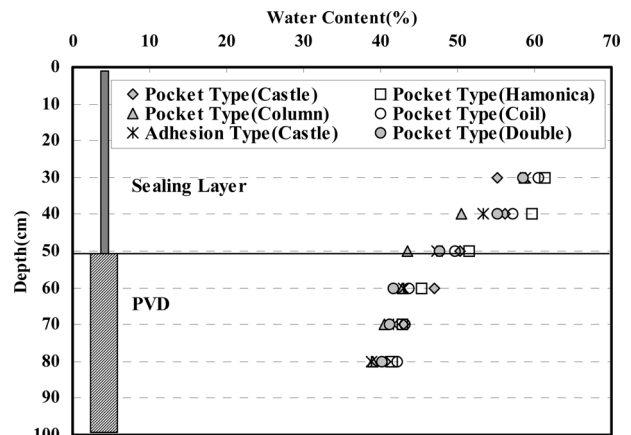


그림 14. 배수재로부터 11cm 이격된 거리에서 측정된 심도에 따른 함수비(Test 1~6)

된 결과지만, 거리의 차가 비교적 작았기 때문에 감소경향은 크지 않았다. 또한 그림 14에 나타난 바와 같이 Sealing 층에 비해 개량영역에서 함수비 감소 경향이 더욱 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 이를 통해 본 공법에서 적용된 진공압으로 인해 함수비가 감소되어 배수효율이 증대됨을 파악할 수 있었다. 그러나 이러한 감소 경향은 시간경과에 따라 발생하는 진공압에 의한 배수필터의 막힘 현상 및 배수재 유로 단면적의 감소 효과 등에 의해 배수재로부터의 거리가 멀어짐에 따라 그 감소폭이 비교적 작게 나타났다(그림 15).

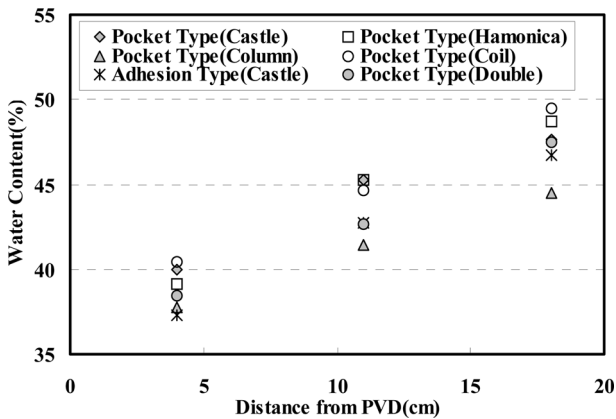


그림 15. 배수재로부터의 거리에 따라 발생된 함수비(Test 1~6)

4.5 함수비와 강도의 관계

그림 16에는 Test 1~6에서, 실험 종료 후 각 배수재 조건 별 초기 강도 대비 증가된 강도비와 최종 함수비 분포를 나타내었다. 모든 배수재에서 대략 10~20배 정도의 강도증진효과가 나타났으며, 포켓식 원형 배수재의 경우 약 24배로 가장 큰 강도증진효과가 나타났는데, 이는 각 배수재에서 발생한 함수비 감소에 기인한다. 그림 17에는 각 단계 석션압 조건 별 개량영역에서의 평균 함수비 분포와 평균 전단강도 분포를 나타내었다(Test 7~12). 모든 실험조건에서 전반적으로 평균 약 20% 정도의 함수비 감소효과가 발생하였으며, -0.8kg/cm^2 석션압을 가장 오래 적용시킨 Test 7, Test 8, Test 10에서의 함수비 감소가 비교적 크게 나타났다. 특히, -0.8kg/cm^2 을 가장 오래 적용하였던, Test 7에서의 함수비 분포가 가장 작았으며, 평균전단강도 값은 크게 나타났다.

본 실험에 사용된 시료의 함수비와 강도의 관계를 정량적으로 분석하여 나타내기 위해 단계석션압 실험조건(Test

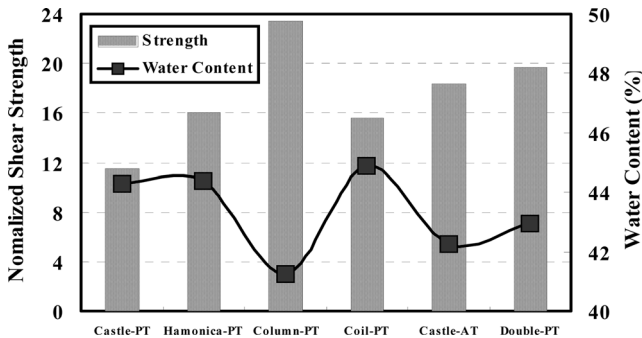


그림 16. 개량영역에서의 각 배수재별 정규화된 평균 강도 및 함수비 분포(Test 1~6)

7~11, Test 12제외)에서 실험 종료 후 시료 내 각 지점에서 측정된 함수비와 비배수전단강도의 관계를 나타내었다(그림 18). 각 지점 별 함수비 감소에 따른 비배수전단강도 증가치의 추세를 도시해보면, 함수비 감소에 따라 강도가 선형적으로 증가되는 경향을 띠게 됨을 파악할 수 있었다. 따라서 이렇게 실내 실험으로 파악된 함수비와 비배수전단강도의 관계를 통해, 실내 실험에서 수행된 시료와 동일한 조건의 지반에 본 공법을 적용할 경우 발생하는 지반 내 강도 변화량을 현장침하량 및 시간 당 배수량 등을 통해 간접적으로 유추할 수 있을 것으로 판단된다.

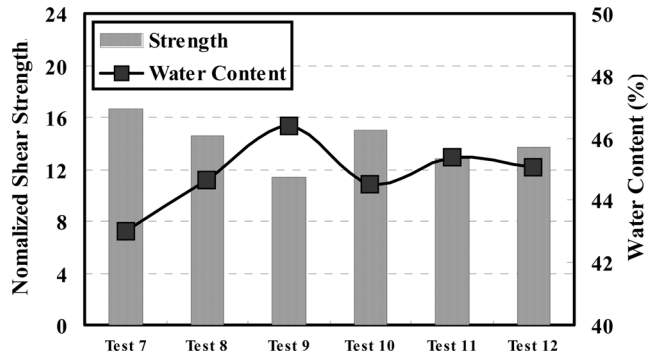


그림 17. 개량영역에서의 각 단계석션압 별 정규화된 평균 강도 및 함수비 분포(Test 7~11)

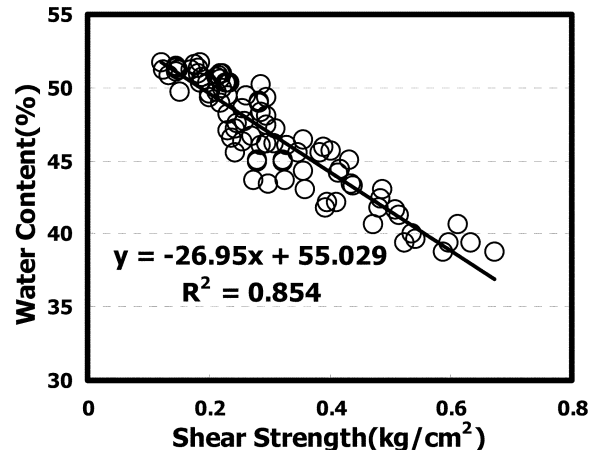


그림 18. 단계석션압 조건에서의 함수비와 비배수전단강도의 관계

4.6 처리기간에 따른 단계석션압 조건 선정

단계석션압 조건 실험(Test 7~11, Test 12제외)에서 각 단계 석션압 조건이 지반의 압밀도에 미치는 영향을 비교하기 위해 모든 실험 조건에서 Moden(1967)의 시산법을 통해 산정된 압밀도를 각 석션압(-0.1 , -0.2 , -0.4 , -0.6 , -0.8kg/cm^2) 단계 별로 분리하여 나타내면, 표 5와 같다. 이때, 각 석션압 단계 이전에 가해진 석션압이 이후 단계에 미치는 영향은 무시하였으며, 각 단계에 나타난 압밀도만을 나타내었다. 이러한 압밀도 분포를 그림 19, 20에 나타내었다. 그 결과 각 단계석션압 조건 별로 발생하는 압밀도의 분포가 대체적으로 시간의 경과에 따라 증가되는 경향이 나타났으며, 일정 기간이 지나면, 비교적 큰 변화가 발생하는 변곡점이 발생하여 일정한 값으로 수렴되는 경향을 나타냈다.

따라서 실내 실험을 통해 각 단계석션압 단계에서의 최적 적용기간을 선정하기 위해서, 진공압 적용기간에 따라 각 단

표 5. 진공압 단계에 따른 압밀도(Test 7~11)

단계 별 적용기간(Days)	단계별 석션압(kg/cm ²)				
	-0.1	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8
0	0	0	0	0	0
1	6.53	3.74	7.4	3.81	-
2	9.48	8.82	13.25	-	-
3	-	-	-	10.22	-
4	11.98	-	17.79	10.72	-
6	-	-	20.1	-	13.60
8	-	-	-	-	23.32
10	-	-	-	-	32.75
12	-	-	-	-	40.94

계석션압 조건에서 발생하는 압밀도의 변화가 감소되어 수렴되는 부분의 연장선과 적용초기에 발생된 압밀도 곡선의 연장선이 만나는 점을 압밀효과를 극대화 시킬 수 있는 적용기간으로 가정했을 때, 각 진공압 단계 별로 발생하는 적용기간을 그림 19, 20을 통해 $-0.1\text{kg/cm}^2 \rightarrow 1.2\text{일}$, $-0.4\text{kg/cm}^2 \rightarrow 2\text{일}$, $-0.6\text{kg/cm}^2 \rightarrow 3.3\text{일}$ 로 산정할 수 있다. -0.8kg/cm^2 의 경우 적용기간의 증가에 따라 거의 직선적으로 압밀도가 증가하는 경향이 나타났기 때문에 최적의 기간을 산정할 수 없었지만, 최종 석션압적용 기간이 증가할수록 배수효율이 증가하는 경향을 띠었기 때문에(그림 8), 본 실험조건

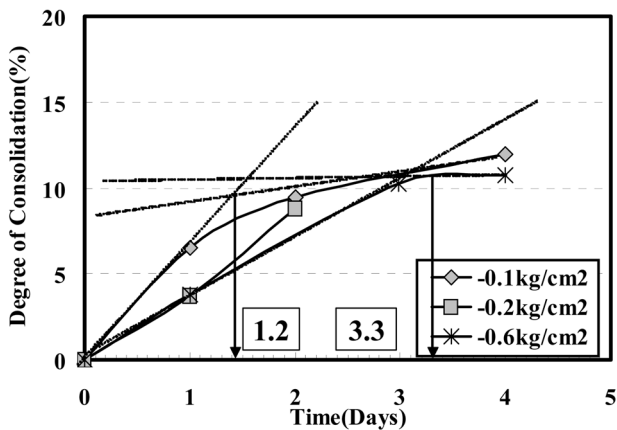


그림 19. 각 단계석션압에 따른 압밀도와 적용기간의 관계(-0.1 , -0.2 , -0.6kg/cm^2 의 단계석션압이 적용된 경우)

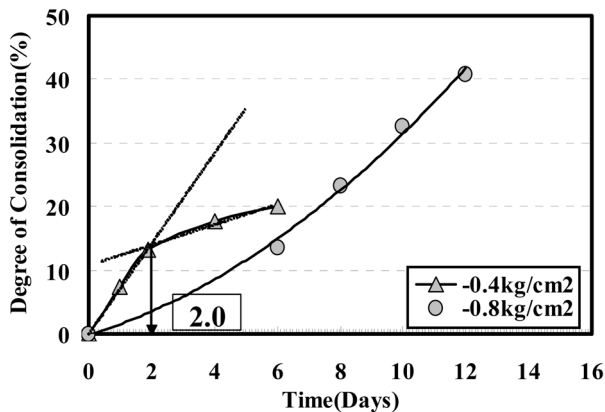


그림 20. 각 단계석션압에 따른 압밀도와 적용기간의 관계(-0.4 , -0.8kg/cm^2 의 단계석션압이 적용된 경우)

에서 가장 적용기간이 길었던 8일을 적용하였다. 그러나 실제적으로는 본 실험의 종료 시점에서의 압밀도가 약 60%였던 점을 감안할 때, 최종 단계인 -0.8kg/cm^2 의 경우, 1차 압밀 종료 시점까지를 적용 기간으로 적용해야 할 것으로 판단된다. -0.2kg/cm^2 를 적용한 경우에는 적용기간에 따른 압밀도 조건이 두 지점밖에는 없었기 때문에 최적의 적용기간을 제시할 수 없었다. 따라서 -0.2kg/cm^2 조건의 경우, 최대 적용기간인 2일로 최적기간을 가정하였다.

그림 19, 20에서 산정된 적용기간 결과를 통해 각 단계석션압 별 최적의 적용기간을 산정해보면, 그림 21, 22와 같이 나타낼 수 있다. 그림에 나타난 바와 같이 최종 단계석션압까지의 도달기간이 본 연구에서 제안된 단계 석션압의 조건의 왼쪽에 존재하는 Test 7, 8, 10의 효율이 비교적 크게 나타났다. 이는 최종 제안된 단계 석션압 조건 보다 최종 석션압(-0.8kg/cm^2)에 도달하기 위한 기간이 비교적 짧았던 경우에 해당하는데, 이러한 결과를 통해 실제 지반에 석션보드드레인 공법을 적용하는데 있어서 본 연구에서 제안된 단계 석션압 조건을 기준으로 단계석션압 기간을 설정할 수 있다.

제안된 석션압 조건을 바탕으로 최적의 적용기간 별 압밀도 분포를 나타내 보면, 그림 23과 같다. 실제 실험을 통해 예측된 단계석션압 조건을 바탕으로 현장지반에 적용할 경우에는 전체 침하량을 지반의 물성치 및 현장조건으로 예측한 후, 실제 발생하는 침하량 추이를 바탕으로, 각 단계별로 발생하는 압밀도가 $0.1\text{kg/cm}^2 \rightarrow$ 약 10%, $0.2\text{kg/cm}^2 \rightarrow$ 약 22%, $0.4\text{kg/cm}^2 \rightarrow$ 약 35%, $0.6\text{kg/cm}^2 \rightarrow$ 약 45%, 0.8kg/cm^2

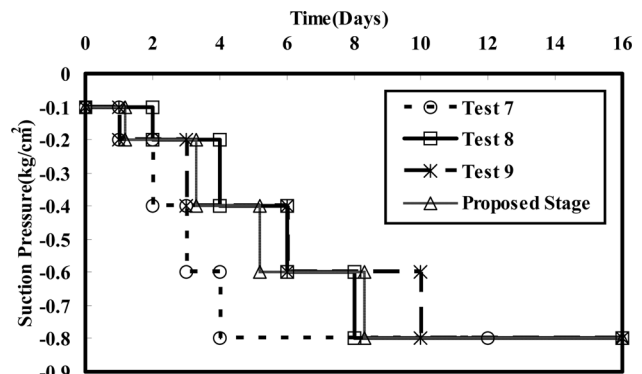


그림 21. 본 연구에서 제안된 단계 석션압 조건 및 각 실험에서 수행된 단계 석션압의 비교(Test 7, 8, 9의 경우)

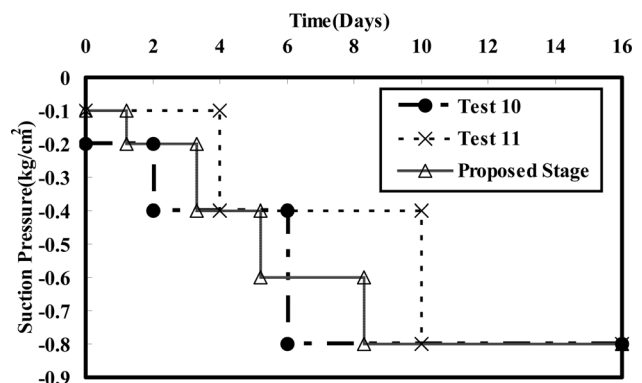


그림 22. 본 연구에서 제안된 단계 석션압 조건 및 각 실험에서 수행된 단계 석션압의 비교(Test 10, 11의 경우)

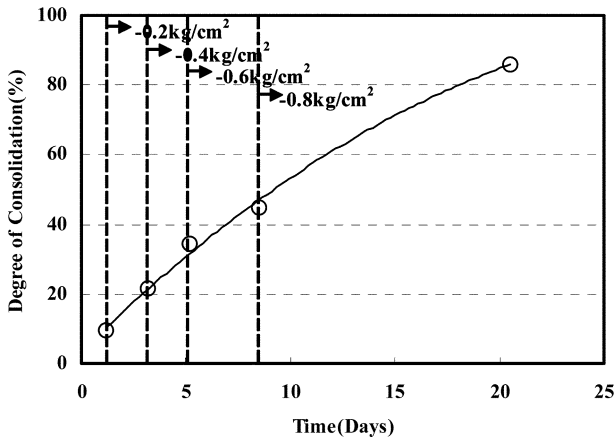


그림 23. 본 연구에서 제안된 단계석선압 조건으로 예측된 시간에 따른 압밀도 분포

목표압밀도 도달 시까지 이를 때 석선압을 조절해주면, 최적의 조건에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 석선보드드레인 공법에 적합한 배수재 및 처리 기간에 따른 단계 석선압 조건의 산정을 위해, 각 배수재 및 단계석선압 조건 별 침하량, 배수량, 강도, 함수비의 영향을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 현장에서 상용되고 있는 배수재(포켓식 성곽형, 코일형, 하모니카 형, 원형 및 열융착식 성곽형배수재) 종류에 따른 개량 효과를 파악하기 위한 실험 결과, Core 형상(원형, 판형)과 필터의 Core 부착 여부(포켓식, 열융착식) 등의 영향으로 인해 열융착식 성곽형 배수재와 포켓식 원형배수재의 배수효율이 다른 배수재의 경우 보다 비교적 좋게 나타났다. 따라서 석선보드드레인 공법의 현장 적용 시에는 필터 부착방식과 Core 형상을 고려하여 적용해야 배수 효율을 최대로 할 수 있을 것으로 판단된다.
2. 모든 실험 조건에서 대부분 초기 함수비 보다 약

10~30% 정도 감소하는 경향이 나타났다. 그러나 이러한 경향은 시간경과에 따라 발생하는 진공압에 의한 배수필터의 막힘 현상 및 배수재 유로 단면적의 감소 효과 등에 의해 배수재로 부터의 거리가 멀어짐에 따라 그 감소 폭이 비교적 작게 나타났다.

3. 단계석선압 조건 및 일시에 석선압을 가해준 실험으로 파악된 함수비와 비배수전단강도의 관계를 통해, 일부 단계 석선압을 가해준 조건에서의 개량도가 비교적 크게 나타남을 파악할 수 있었으며, 실제 지반에서 본 공법을 적용할 경우 발생하는 지반 내 강도 변화량을 현장침하량 및 시간 당 배수량 등을 통해 유추할 수 있다.
4. 각 석선압 단계 별 압밀도-적용기간 곡선 상의 변곡점을 이용하여 압밀효과를 극대화 시킬 수 있는 적용기간을 산정 할 수 있었는데, 이러한 결과는 석선보드드레인 공법의 현장 적용 시 가해지는 단계석선압 적용기간의 기준으로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 정연인, 김희중, 장준호(2004) 진공압밀 배수공법에 의한 Hardening Zone에 대한 연구, 한국구조물진단학회논문집, 한국구조물진단학회, 제8권 제3호.
- 차정일(2003) 진공압밀배수공법에 의한 Hardening Zone의 개선 방안에 대한 연구, 석사학위논문, 계명대학교 대학원.
- Bo, M.W., Chu, J., Low, B.K., and Choa, V. (2003) *Soil improvement - prefabricated vertical drain technique*, Thomson, pp. 148.
- Hansbo, S. (1981) Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains, *Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Stockholm, Sweden* Vol. 3, No. 12/22, pp. 677-682.
- Kjellman, M. (1948) Accelerating consolidation of fine grained soils by means of cardboard wicks, *Proc. 11th Conf. Soil Mech., Rotterdam*, No. 2, pp. 302-305.
- Monden, H. (1963) A new time-fitting method for the settlement analysis of foundation on soft clays, *Memoir Faculty of Engineering, Hiroshima University*, Vol. 2-1, No. 21, pp. 21-29.
- (접수일: 2007.6.27/심사일: 2007.7.27/심사완료일: 2008.3.17)