

수평배수재를 이용한 압밀개량효과에 대한 실험연구

An Experimental Study on the Effect of Consolidation Improvement Using Horizontal Drains

김지용¹⁾, Ji-Yong Kim, 김정기²⁾, Jung-Ki Kim, 장연수³⁾, Jang-yeon Soo, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾중앙대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng. Chung-ang University

²⁾중앙대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Master course, Dept. of Civil Eng. Chung-ang University

³⁾동국대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Eng. Dong-guk University

⁴⁾중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environment Eng. Chung-ang University

SYNOPSIS : The horizontal drain method is one of the soil improvement methods in reclamation works using dredged soils. In this method, plastic drain boards are installed horizontally in the ground, and a seepage pressure or negative pressure is applied through one end of these drains.

In this study, a basic consolidation test using horizontal drains was conducted to investigate the effectiveness of this method. The configuration of soil box which was used in this test is 100cm(B) × 100cm(L) × 85cm(H). The drain board was reduced to 25mm × 5mm. The variations in settlement and volume of drain water during the consolidation process were measured, and the distribution of water content and the transpormation of horizontal drain were investigated.

Key words : Horizontal drain, Consolidation, Water content, Dredged soil.

1. 서론

본 연구는 초연약준설토의 안정처리기술과 중기의 주행성 확보기술을 개발하기 위하여 수평배수공법을 적용함으로써 지중수 및 우수를 신속히 배출시키는 효과를 증대시키고자 한다. 수평배수공법의 가장 주된 목표는 배수거리 단축에 따른 초연약지반의 압밀축진이다. 따라서, 수평배수재가 설치된 실제 지반에서 배수재 성능을 조사하기 위해서 배수재의 설치에 의한 압밀거동을 조사하고자 한다. 수평배수재가 설치된 지반의 압밀특성을 실내시험을 시행하여 수평배수공법에 의한 지반개량효과를 분석하고자 한다.

배수재가 수평으로 매설된 현장의 조건을 모사하여 이에 대한 압밀특성 조사시험으로 배수재 상호간의 역할에 의해 압밀을 유도하는 복합배수압밀시험으로서 대형토조시험과 단일의 배수재가 설치된 토괴

의 압밀특성을 조사하는 중형토조압밀시험을 실시하였다. 대형토조시험의 경우 시료내부의 수위와 배수재 내부의 수위차에 의한 침투압으로 배수를 유도하였고, 중형토조시험의 경우, -0.8kg/cm^2 의 진공압을 작용시켜 이에 따른 압밀특성을 조사하였다.

2. 실험

2.1 대상시료 및 수평배수재

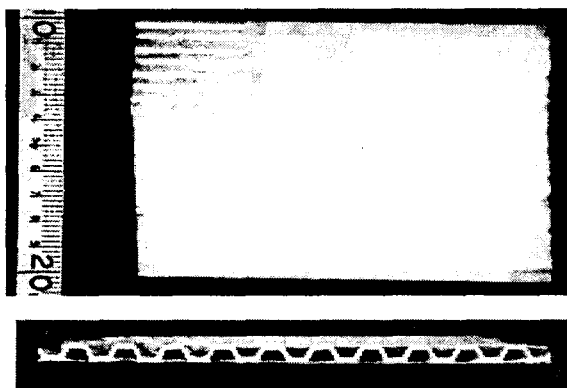
본 시험에서 사용된 시료는 남해안 진해지역에서 채취한 해성점성토로서 시험기의 크기를 고려할 때 이에 필요한 불교란 시료를 확보하는 것은 매우 어렵기 때문에 본 시험에서는 시료를 교란된 상태로 채취하여 실내시험실에서 습윤상태의 흙 그대로 #10번체로 체가름한 것을 사용하였다. 이 과정 중 시험결과에 영향을 미칠 정도의 크기가 큰 자갈이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하면서 이와 동시에 시료 채취지점과 동일한 위치에서 운반되어온 해수를 첨가하여 입자간의 포화도를 높이면서 고함수비 상태의 시료를 준비하였다. 본 시험에서 사용된 시료의 토질특성을 정리하면 <Table 2.1>에 제시된 바와 같다.

<Table 2.1> 본 시험에 사용된 시료의 물성특성

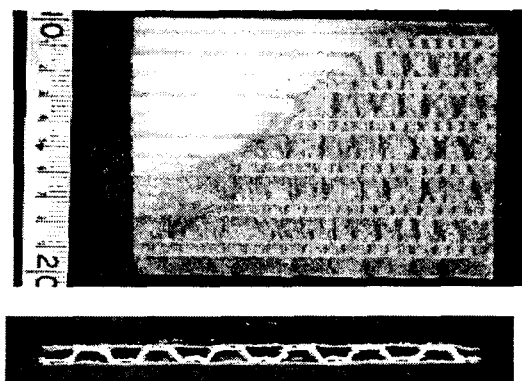
Classification	Properties	Classification	Properties
Soil classification	CH	Liquid limit (LL)	56.3%
Percent passing No. 200 sieve	93%	Plastic limit (PL)	20.6%
Specific gravity	2.67	Plastic index (PI)	25.7

대형토조시험에서 사용된 수평배수재는 폭 100mm×두께 5mm 단면을 가진 Type O-5로서 성곽형 코어와 열융착형 필터로 구성되어 있다(<Fig. 2.1>(a)참조). 본 시험에서는 현장의 배수재 설치간격과 유사하게 접근하기 위하여 배수재의 크기를 폭 25mm × 두께 5mm로 축소 제작하여 이용하였다.

중형토조시험의 경우 Type O-10을 사용하였으며 대형토조시험과 달리 배수재를 축소제작하지 않고 단면 그대로 사용하였다. Type O-10은 Type O-5와 마찬가지로 성곽형 코어와 열융착형 필터로 이루어져 있으며 단면의 크기는 폭 100mm×두께 10mm이다(<Fig. 2.1>(b)).



(a) Type O-5 (폭 100mm×두께 5mm)

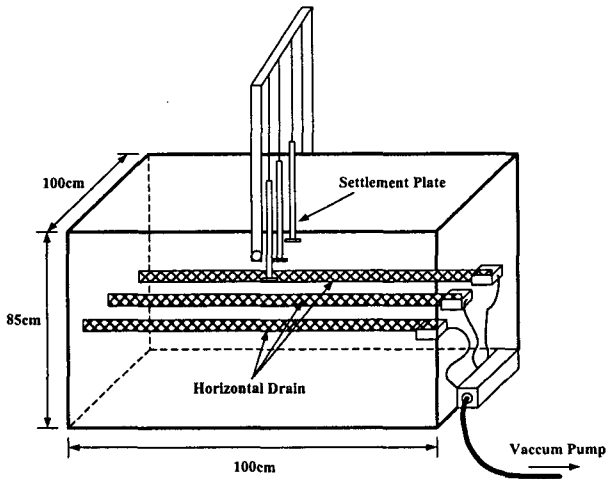


(b) Type O-10 (폭 100mm×두께 10mm)

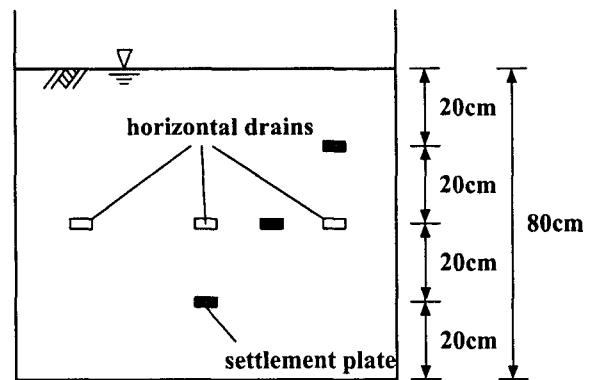
<Fig. 2.1> 토조시험에 사용된 수평배수재

2.2. 대형토조압밀시험

대형토조압밀 실험은 <Fig. 2.2>에 제시된 바와 같은 사각형 단면의 강철프레임으로 이루어진 대형토조를 이용한 복합압밀배수시험으로서 현장조건과 유사하게 다수의 배수재를 설치할 수 있으므로 배수재 간의 상호작용에 의한 배수재 타설지반의 배수압밀거동을 모델화한 것이다. 압밀에 따라 발생하는 과잉간극수압의 배제는 시료내부에 설치된 배수재와 시료 상부표면으로만 발생되도록 하였다. <Fig. 2.3>은 시료내부에 설치된 배수재와 층별침하계의 위치를 나타낸 것이다. 본 실험에서는 시료의 하부에서부터 20cm 간격으로 A, B, C의 위치에 침하계를 설치하였다. 시료의 초기함수비는 약 220%이고 초기높이는 80cm와 같다. 배수재는 시료의 중앙에 3개를 설치하였으며, 깊이방향으로 A, B, C의 위치에 층별 침하계를 설치하여 각각의 침하량을 측정하였다. 또한, 배수재에 집수된 간극수는 배수관을 통하여 배수량 측정 셀에 누적되어 그 양을 측정할 수 있도록 되어 있다.



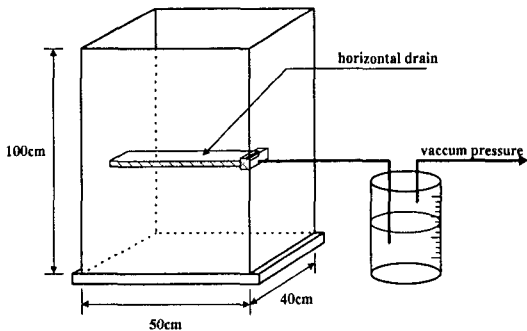
<Fig. 2.2> 대형토조시험기의 개략도



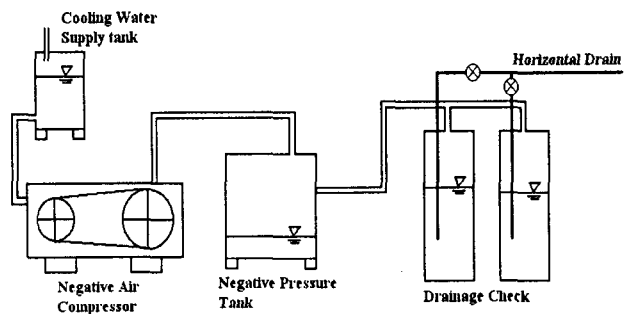
<Fig. 2.3> 배수재와 침하계의 설치위치

2.3 중형토조압밀시험

본 시험은 단일의 배수재가 설치된 지반의 형상을 모형화하여 진공압밀에 의한 개량효과를 조사하기 위한 시험으로서 시료의 압밀은 자중과 진공펌프에 의한 부압의 작용으로 발생된다(<Fig. 2.4>참조). 시료의 중앙에 설치된 배수재에 -0.8kg/cm^2 의 진공압을 가하여 압밀을 진행시켰으며, 경과시간에 따른 표층의 침하량과 배수량을 측정하였다. 시료의 초기함수비는 277%이고, 초기높이는 92cm와 같다.



<Fig 2.4> 중형토조시험기의 모식도



<Fig. 2.5> 진공시스템의 개략도

3. 수평배수재 적용시 압밀특성 시험결과

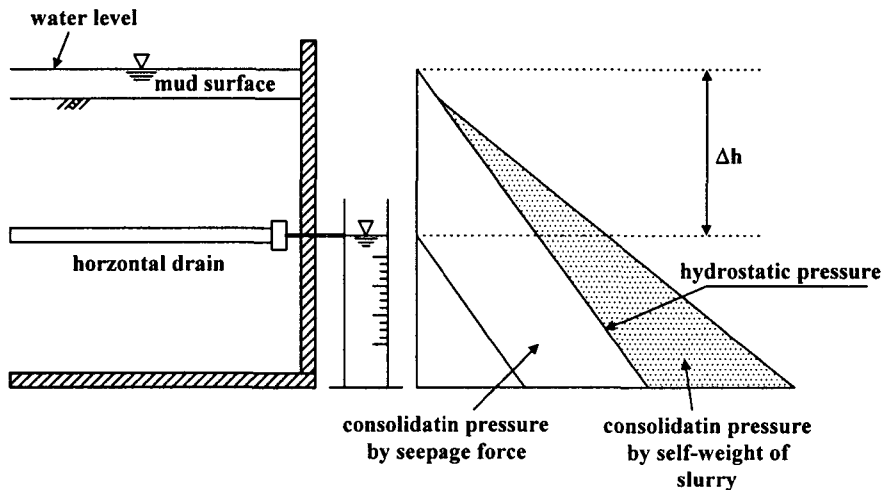
3.1 대형토조압밀시험결과

<Fig. 3.1>은 진공압을 작용시키지 않은 경우, 수위차에 의한 자연배수의 원리를 설명한 것이다. 그림에서와 같이 시료의 내부에 배수재를 수평으로 설치하고 배수구의 수위를 저하시켰을 경우 Δh 의 수두차가 발생하게 된다. 이 수두차는 침투압으로 작용하여 간극수의 흐름을 수평배수재로 유도할 것이고 유효응력으로 전환될 것이다. 또한, 그림에서 제시된 바와 같이 함수비가 높은 슬러리의 경우 자중에 의한 압밀도 발생될 것이다.

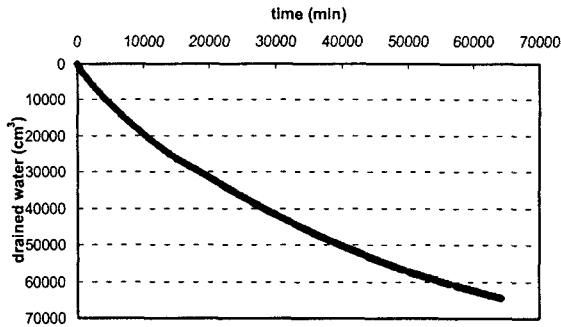
<Fig. 3.2>는 3개의 수평배수재를 설치하고 진공압을 가하지 않은 자중에 의한 자연배수시 발생된 시간에 따른 배수량의 변화를 나타낸 것이다. 시험 개시 후 44일이 경과한 시점까지 약 $64,530\text{cm}^3$ 정도의 간극수가 배출되었으며, 배수속도는 초기에 약 $5.6 \times 10^{-2}\text{cm}^3/\text{sec}$ 에서 $1.67 \times 10^{-2}\text{cm}^3/\text{sec}$ 로 점차 감소하였다(<Fig. 3.3>참조).

<Fig. 3.2>는 현 시점까지 시료내부의 위치별 침하량 측정결과를 나타낸 것이다. 그림에서 A, B, C는 <Fig. 2.3>에 제시된 바와 같이 실험초기에 시료의 표층으로부터 각각 60, 40, 20cm의 위치에 설치된 침하계를 의미한다. 또한, 그림에서 시료에서 배수된 간극수의 양으로부터 역계산(총배수량(cm^3)÷시료의 단면적(cm^2))한 침하량을 같이 나타내었다. 그림에서 제시된 바와 같이, 침하량은 시료의 상부에 설치된 C지점에서 가장 크게 발생하였으며(9.5cm), 다음으로 B(6.0cm), C(2.5cm) 순으로 나타났다. 이는 시료의 상부일 수록 시료 전체에서 발생하는 자중압밀에 의한 누적 압축량이 크게 나타나기 때문이라고 판단된다. 배수량으로부터 역계산된 침하량은 약 6.45cm정도로서 B지점에 설치된 침하계와 비슷한 경향을 나타내었다.

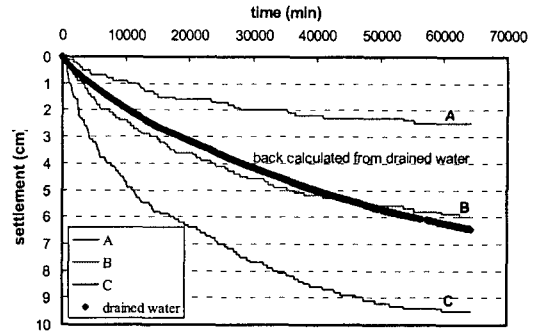
<Fig. 3.5>는 시료의 각 위치에서 압밀이 진행됨에 따른 침하속도의 변화를 나타낸 것이다. 시료 상부인 C의 경우 침투압에 의한 압밀과 자중압밀에 의한 침하량의 누적으로 인하여 시간당 침하량이 크게 발생되기 때문에 침하속도가 가장 크게 나타났고, 그 다음 B, A 순으로 나타났다. B지점의 침하속도는 초기에 배수량으로 역계산한 값보다 약간 크게 나타났지만 압밀이 진행됨에 따라 두 값은 거의 같아지는 경향을 나타내었다.



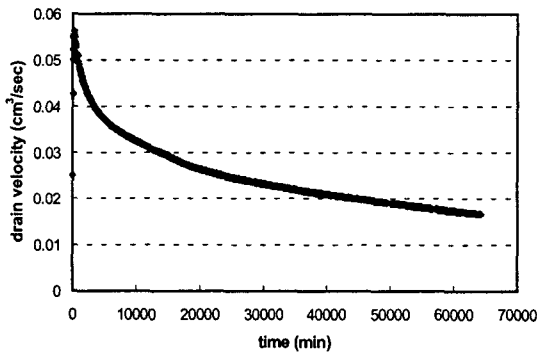
<Fig. 3.1> 침투압 발생의 원리



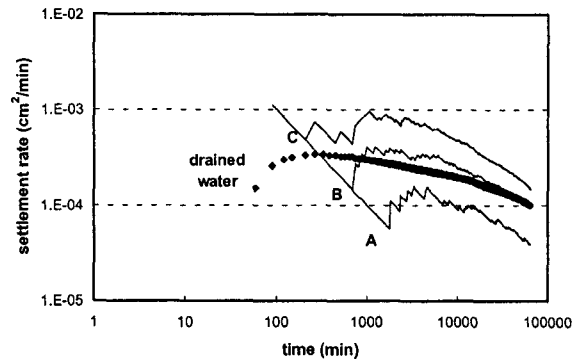
<Fig. 3.2> 시간에 따른 배수량의 변화



<Fig. 3.4> 시간에 따른 층별 침하량



<Fig. 3.3> 시간에 따른 배수속도의 변화



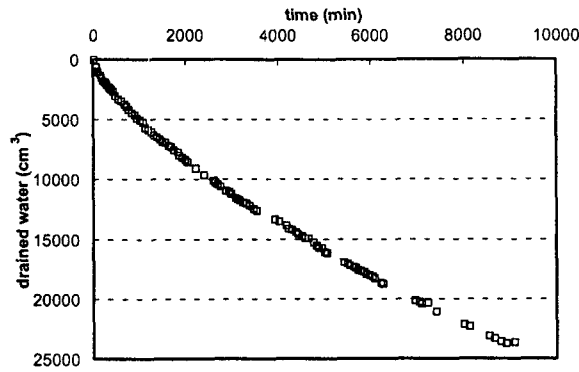
<Fig. 3.5> 시간에 따른 침하속도의 변화

3.2. 중형토조압밀시험결과

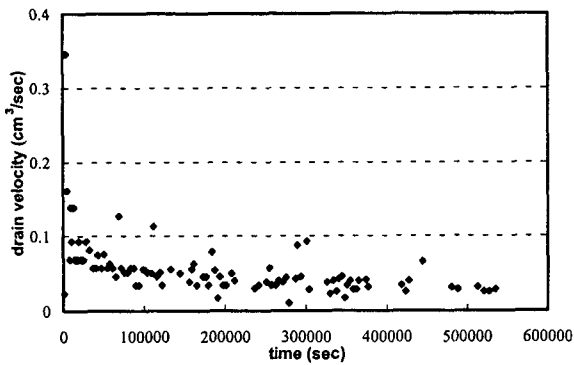
진공압(-0.8kg/cm²) 재하와 동시에 소정의 시간간격으로 표층의 침하량과 배수량을 측정함으로써 Type O-10을 이용한 연약점성토의 개량효과를 조사하였다. 시료의 초기함수비(w_0)는 약 277% 정도로서 초기간극비(e_0)는 7.396과 같고 초기높이(H_0)는 92cm이다.

<Fig. 3.6>은 압밀이 진행됨에 따라서 시료 중앙에 설치된 배수재를 통하여 배출된 간극수의 누적 배수량을 나타낸 것으로 현재까지 9,000분이 경과한 시점에서 약 23,800cm³의 간극수가 수평배수재를 통하여 배수되었다. <Fig. 3.7>은 시간의 경과에 따른 배수속도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 제시된 바와 같이 현 시점까지 배수재에서 배출된 간극수의 배수속도는 0.1cm³/sec 이하임을 알 수 있다. 통수능력 시험결과 Type O-10의 통수능력은 1,200~1,600cm³/sec 정도인 것을 감안하면 본 실내시험에서 시간당 배수되는 간극수의 양은 배수재의 통수능력에 비하여 크게 작기 때문에 배수재는 집수된 간극수를 원활히 배수하였고 따라서, 본 실험에서는 well resistane 효과는 무시하여도 좋다는 것을 알 수 있다.

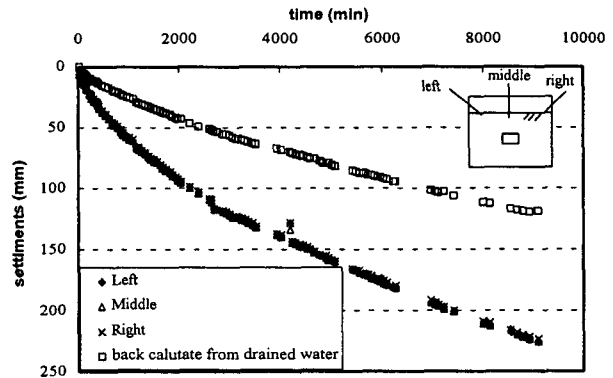
<Fig. 3.8>는 시간에 따른 표층의 침하량과 배수량으로 역계산(=배수량(cm³)÷시료의 면적(cm²))된 침하량을 비교한 것이다. 표층의 침하량 측정에 있어서 흡시료와 토조 측벽과의 마찰로 인하여 시료 측면의 침하량이 감소되는 것을 보정하기 위하여 그림과 같이 시료 중앙부를 중심으로 세 곳에서 표층침하량을 측정하였다. 그러나, 그림에서 보는 바와 같이, 현 시점까지는 세부분의 침하량이 거의 일치하고 있어서 측면마찰효과는 아직 발생되지 않았음을 알 수 있다. 그림에서 \square 로 표시된 점은 배수재로부터 배출된 간극수의 양으로부터 역계산한 침하량을 나타내고 있다. 역계산된 침하량은 표층부의 침하량에 약 54%정도밖에 미치지 못하고 있다. 이러한 차이가 발생하는 원인은 표층부 침하의 경우 진공압에 의한 압밀 이외에 시료의 전체적으로 발생하는 자중압밀에 의한 침하량이 누적되어서 나타나기 때문이며 이러한 경향은 시료의 하부로 내려갈 수록 줄어들 것으로 판단된다.



<Fig. 3.6> 시간에 따른 누적배수량



<Fig. 3.7> 시간의 경과에 따른 배수속도의 변화



<Fig. 3.8> 시간에 따른 표층의 침하량과 배수량으로 역계산된 침하량의 비교

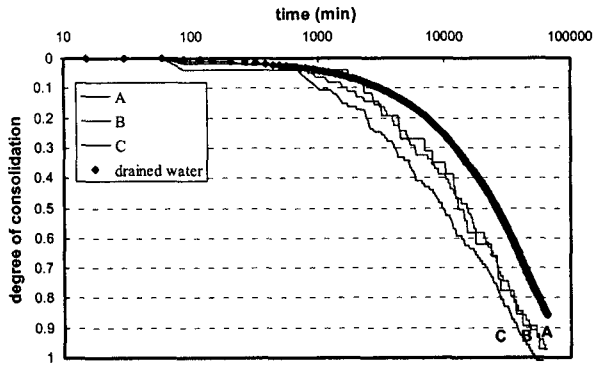
3.3. 압밀도의 산정

본 연구에서는 시간에 따른 침하량곡선에서 압밀도 계산을 위한 최종침하량 계산을 Mikasa(1963)의 압밀방정식을 기초로하여 유도된 예측기법인 Asaoka법을 이용하여 산정하였으며, 이를 바탕으로 분석을 시행하였다.

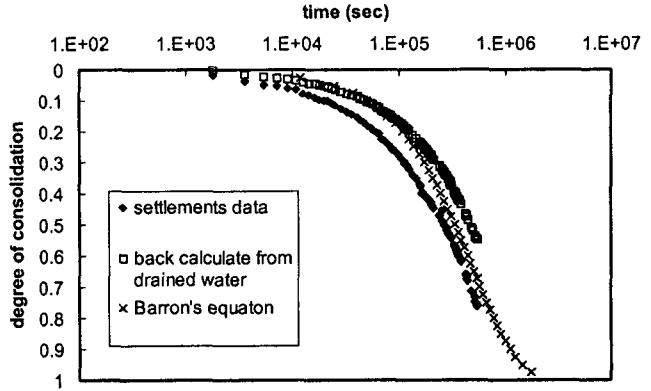
<Fig. 3.9>와 <Fig. 3.10>는 Asaoka법을 이용하여 최종침하량을 예측한 후 시간에 따른 압밀도를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 중형토조시험, 대형토조시험의 결과 모두 침하량으로부터 산정된 압밀도가 배수량으로 역계산된 압밀도 보다 빠르게 나타나는 경향을 나타내었다. 이러한 원인은 앞서 언급한 바와 같이 침하량 측정값은 침투압에 의한 침하량과 더불어 자중압밀에 의한 침하량을 포함하고 있기 때문으로 사료된다.

대형토조시험 결과인 <Fig. 3.9>를 살펴보면 시료의 상부 층인 C지점의 압밀도가 가장 빠르게 진행되었으며 A와 B지점은 거의 유사한 것으로 나타났다. 이는 간극수의 배수가 시료내부에 설치된 배수재를 통하여 배제되는 것 이외에 시료의 상부로도 발생되기 때문이라고 사료되며 더욱 세부적인 사항들은 시험종료 후 시료내부의 함수비분포 등을 통하여 간접적으로 조사될 수 있을 것이라 판단된다.

<Fig. 3.10>에서는 Barron의 이론식을 이용하여 산정된 압밀도-시간의 관계를 같이 나타내었다. Barron의 이론값은 초기에는 배수량으로부터 역계산된 압밀도와 비슷한 경향을 나타내었지만, 압밀이 진행됨에 따라 침하량의 결과값에 근접해가는 경향을 보이고 있다.



<Fig. 3.9> 시간에 따른 압밀도의 변화
(대형토조시험결과)



<Fig. 3.10> 시간에 따른 압밀도의 변화
(중형토조시험결과)

4. 결론

수평배수재가 설치된 지반의 압밀개량효과를 조사하기 위하여 중력배수조건으로 3개의 소형배수재를 설치한 대형토조시험과 1개의 배수재를 설치하고 진공압을 작용시킨 중형토조압밀시험을 실시하였다.

지금까지의 시험결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 대형토조시험의 경우 시험개시후 44일이 경과한 시점까지 약 $64,530\text{cm}^3$ 정도의 간극수가 배수재를 통하여 배출되었으며, 중형토조시험에서는 7일 동안 약 $23,800\text{cm}^3$ 정도가 배수되어 수평배수재는 지반의 압밀촉진에 큰 효과를 발생시킬 수 있다는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.
- (2) 침하량의 경우 시료 상부의 침하가 가장 크게 발생하였으며, 배수량으로부터 역계산된 침하량보다 더 크게 나타났다. 이는 시료의 상부의 경우 배수재로부터 간극수가 배제되어 침하가 발생하는 것 이외에 시료전체에서 발생하는 자중에 의한 침하가 누적되기 때문이라고 판단된다.
- (3) 중형토조시험결과 배수재에서 배출되는 간극수의 배수속도는 $0.1\text{cm}^3/\text{sec}$ 정도로 Type O-10의 통수능력($1,200\sim 1,600\text{cm}^3/\text{sec}$)에 비하면 본 실내시험에서 시간당 배수되는 간극수의 양은 배수재의 통수능력에 비하여 크게 작기 때문에 well resistance효과는 무시하여도 좋다는 것을 알 수 있다. 그러나, 시험에서 사용된 배수재의 길이는 50cm로 현장조건(100~200m)에 비하여 매우 짧기 때문에 well resistance의 효과를 조사할 수 없으므로, 현장시공과 이론식을 이용한 세심한 연구를 통하여 배수재의 타설길이에 따른 최소요구통수능력을 산정하는 것이 필요하다고 판단된다.
- (4) 시간-압밀도 관계에서 Barron의 이론식은 대체적으로 적용이 가능하다고 판단된다. 그러나, 압밀이 진행됨에 따라 변화되는 유효경을 정확히 산정할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. 강민수 (1998) : “영향인자를 고려한 연직배수기술의 개발에 관한 연구”, 중앙대학교 64회 박사학위논문
2. 박 영목, 김 석열, 김 호일, 홍 변만(1997) : “플라스틱 드레인(PD)재를 이용한 저습답의 배수개선에 관한 기술개발연구”, 최종보고서(요약), 농림수산부, pp. 1~78

3. Barron, R. A.(1948) : "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", Trans. ASCE, Vol. 113, No. 2346, pp. 718~742.
4. Lee. K., and Sills. G. C. (1979), "The Consolidation of a Soil stratum, Including Self-Weight Effects and Large Strains", Department of Engineering Science, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 5
5. 渡義治, 新舎博, 林健太郎, "水平ドレーン材を利用した真空圧密工法に関する基礎実験", 五洋建設(株), Vol.15, pp. 79-86, 1986
6. 新舎博, 山口了地, 高野泰, 松長作馬, "超軟弱地盤における真空圧密工法実験", 五洋建設(株), Vol. 17, pp. 79-88, 1988
7. 新舎博, 高野泰, 谷雄一, 阿部俊帳, "ラテラルドレーン工法による廢滓軟弱地盤の改良", 五洋建設(株), Vol. 19, 1990
8. 新舎博, 林健太郎, 渡義治, "水平ドレーンを利用した真空圧密工法の開発に関する研究(その2)-長大ドレーンのウェルレジスタンスの評価-", 土質工學研究發表會講演集, 第22回, pp. 1785-1788, 1987
9. 吉崎浩二, 新舎博, 谷雄一, 山口了地, "ラテラルドレーン工法によるダム堆積土の脱水處分", 五洋建設技術研究所年報, Vol. 20, 1991, pp. 63-68
10. 渡義治, 樋口洋平, 新舎博, "水平ドレーン工法による超軟弱地盤の改良", 第8回ジオテクニカルシンポジウム, pp. 102-110, 1993