

## 시간 의존적 배수저항을 고려한 방사방향 압밀곡선 예측법

### A Modified Method for the Radial Consolidation with the Time Dependent Well Resistance

김 래 현<sup>1</sup> Kim, Rae-Hyun

홍 성 진<sup>2</sup> Hong, Sung-Jin

정 두 석<sup>3</sup> Jung, Doo-Suk

이 우 진<sup>4</sup> Lee, Woo-Jin

#### Abstract

The existing equations for radial consolidation cannot account for the changes of well resistance with time and cannot predict the appropriate in-situ consolidation curve. In this study, small cylinder cell tests are performed to evaluate the discharge capacity of PVD. Also, a block sample of 1.2 m in diameter and 2.0 m in height was consolidated to observe the change in the drainage capacity with time for three types of PVD. From the test results on a block sample, the drainage curves normalized with initial drainage of each PVD are similar, regardless of the PVD type and the consolidation curve, which is predicted using solutions of radial consolidation based on the discharge capacity measured in a small cylinder cell tests, significantly overestimates the degree of consolidation. The term of well resistance in the radial consolidation solution was back-calculated to fit the consolidation curve of a large block sample and it is defined as the time dependent well resistance factor,  $L(t)$ . The  $L(t)$  was found to be linearly proportional to the dimensionless time factor,  $T_h$ . It was also shown that the consolidation curve evaluated by using  $L(t)$  provides more accurate prediction than the existing solution.

#### 요 지

실내시험에서 측정된 배수재의 통수능과 실제 현장에서 나타나는 배수거동은 근본적으로 다름에도 불구하고 기존의 많은 연구들은 실내시험을 통해 획득한 통수능 값을 이용하여 압밀 곡선을 예측하고 있다. 또한 기존의 압밀 해는 압밀 진행에 따른 교란효과와 배수저항의 변화를 고려할 수 없어 실제 압밀거동과 잘 일치하지 않는 문제점이 있다. 본 연구에서는 현장에서 채취한 대형 블록시료에 연직배수재를 설치하고 압밀을 진행하면서 시간에 따른 침하량을 측정하였다. 이를 이용하여 시간에 따라 증가되는 배수 저항계수를 시간 의존적 함수로 정의하고 기존의 방사방향 압밀 해에 도입하여 수정된 방사방향 압밀 예측 방법을 제안하였다. 제안된 방법으로 예측한 결과를 실측 데이터 및 기존 제안식과 비교한 결과, 제안된 방법이 실측치에 가장 근접한 방사방향 압밀 곡선을 예측하는 것으로 관찰되었다.

**Keywords :** PVD, Radial consolidation, Smear effect, Vertical drain, Well resistance

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil, and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 대우건설주식회사 상무이사 (Managing Director, Daewoo Engrg. & Construction)

4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil, and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

연직배수재가 타설된 지반의 압밀은 수평 방향으로 발생하는 간극수의 흐름에 의해 지배되며 이러한 방사방향 압밀은 Barron(1948)에 의해 이론 해가 제시되었다. 그러나 Barron의 해는 배수재 타설시 발생하는 교란효과(smear effect)나 배수 저항(well resistance) 현상, 압밀에 따른 원지반의 투수 특성 변화를 고려하지 못하기 때문에 실제 압밀침하 거동을 올바르게 예측할 수 없다. Yoshikuni(1974), Hansbo(1981), Onoue(1988) 등이 교란효과나 배수저항을 고려하는 압밀 해를 제시하였으나 이들 제안식은 압밀이 진행되는 동안 배수재의 배수능력 감소를 고려하지 못한다. 또한 실제 지반에서 압밀이 지연되는 정도를 반영할 수 없어 예측된 압밀침하량과 압밀도는 실제 침하거동과 크게 다르게 나타나고 있다. 즉, 기존의 방사방향 압밀 해는 압밀이 진행됨에 따라 증가하는 배수 저항 효과를 시간에 따라 다르게 반영할 수 없어 압밀초기부터 압밀 종료시까지 배수 저항 정도가 일정한 것으로 가정하는 한계가 있다.

이를 극복하기 위해 본 연구에서는 현장에서 채취한 직경 1.2m의 대형 블록시료에 연직배수재를 타설하고, 압밀이 진행되는 동안 실측된 침하량과 배수량을 바탕으로 시간에 따라 증가하는 복합 배수 저항요소  $L(t)$ 의 개념을 도입하여 시간경과에 따른 압밀도의 변화를 예측할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 시간에 따른 배수 저항요소의 변화

연직배수재가 타설된 지반은 압밀이 진행되면서 배수재의 변형 및 굴곡, 내구성에 따른 재료성능 감소 등 여러 복합적인 요소로 인해 압밀지연 현상이 나타나는데 이러한 배수능력의 감소현상을 통틀어 배수저항이라 표현한다. Hansbo(1981)는 배수 저항요소로 인해 현장의 실제 배수능력과 실내시험에서 측정된 배수재의 통수능( $q_w$ )은 크게 다르다고 하였다. Xie(1987)과 Chu(2004)은 원지반의 수평투수계수가 커짐에 따라, 배수재의 길이가 길어짐에 따라 배수재의 통수능은 커져야 한다고 주장하였다. 특히 Chu(2004)는 배수계수(discharge factor)를 정의하여 이를 설명하였으며 배수재가 일정길이 이상이 되면 배수 저항을 고려하여야 함을 수치로 제시하였다. 구속압의 증가, 통수단면적의 감소, 배수재 내부의 잔존 기포, 동수구배 증가, 흙 필터의 형성 등의 이유로 시간이 경과함에

따라 배수재의 통수능은 감소하며 배수 저항은 커지게 된다. 그러나 아직까지 시간에 따른 이러한 변화를 적절하게 반영할 수 있는 압밀 해법은 제안되지 않고 있다.

한편, Hansbo(1997)는 최근에 생산되는 배수재는 자체 통수능력이 충분하기 때문에 압밀 해석 시 배수 저항의 영향을 고려하지 않는다고 하였으나, Holtz 등(1991)은 지중에 타설된 연직배수재는 높은 구속압으로 인해 통수능이  $25 \sim 100 \text{m}^3/\text{yr}$  이하로 떨어지며 심각한 경우 배수재의 막힘현상(clogging)으로 배수능력을 상실할 수 있다고 하였다. 이와 같이 많은 연구자들이 제안한 배수재의 통수능은 시험조건에 따라 각기 다르게 나타나며 평가도 다양하다. Yoshikuni(1974)와 Onoue(1988)는 배수재와 지반사이에서 발생하는 각종 압밀지연 효과를 배수 저항계수( $L$ )로 정의하였으나, 이는 단순히 지반의 초기 조건을 설정하고 배수재 자체의 투수성이 압밀 종료 시까지 지속되는 것으로 가정한 값이므로 실제 지반에서 복합적으로 발생하는 압밀지연 효과를 올바르게 묘사하지 못한다.

식 (1)은 Yoshikuni(1974)의 제안식으로 배수재 타설 길이, 원지반 투수계수, 배수재 투수계수로 계산되는 배수저항요소( $L$ ) 값을 정의하여 압밀 해에 반영하고 있다. Hansbo(1981)는 연직배수재의 타설시 지반이 교란되는 영향과 배수 저항을 동시에 고려하여 압밀도를 산정하는 방법을 식 (2)와 같이 제안하였으나 Yoshikuni(1974)의 압밀 해에서 크게 벗어나지 못하였다.

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n) + 0.8L}\right], \quad L = \frac{32}{\pi^2} \left(\frac{k_h}{k_w}\right) \left(\frac{H}{d_w}\right)^2 \quad (1)$$

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{\mu_s}\right], \quad \mu_s = \ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_c}{k_c'} \ln s - \frac{3}{4} + \pi z(2l - z) \frac{k_c}{q_w} \quad (2)$$

여기서,  $k_h$ 는 원지반의 수평방향 투수계수( $=k_c$ ),  $k_w$ 는 연직배수재 자체의 투수계수,  $k_c'$ 는 교란 영역의 수평방향 투수계수,  $d_c$ 는 연직배수재 타설간격에 따른 유효 등가직경,  $d_w$ 는 연직배수재의 환산직경,  $q_w$ 는 동수경사가 1일 때의 연직배수재의 통수능,  $H$ 는 연직배수재 타설심도( $=2l$ ),  $z$ 는 임의의 깊이,  $s$ 는 교란 영역 반경비( $=r_s/r_w$ ),  $T_h$ 는 시간계수( $=C_v t/d_c^2$ ),  $n$ 은 간격비( $=d_c/d_w$ )이며  $F(n) = n^2/(n^2 - 1) \ln(n) - (3n^2 - 1)/(4n^2)$  이다.

이상적인 예측식은 원지반의 투수와 압밀 특성을 올바르게 묘사하고 연직배수재가 타설된 지반에서 나타나는 일련의 현상을 최대한 유사하게 예측할 수 있어야

한다. 본 연구에서는 압밀진행과 함께 변화하는 주변지반의 압밀특성과 배수저항을 고려할 수 있는 개선된 방사방향 압밀도 예측방법을 제안하기 위해 연직배수재가 설치된 대형 불교란 시료에 대한 압밀시험을 실시하였다. Tan 등(1991)이 제안한 쌍곡선법(hyperbolic method)을 실측된 압밀데이터에 적용하여 각 압밀시간에서의 압밀도를 예측하였으며 역산된 각 압밀시간에서의 복합 배수저항 값을 시간에 따라 변화하는 시간의존 함수로 정의하였다. 또한 제안된 방법으로 예측된 압밀곡선과 통수능 시험 결과 및 기존의 식을 이용하여 예측된 압밀곡선과 비교하여 그 정확도를 검증하고자 하였다.

### 3. 배수재 통수능 평가시험

연직배수재 자체의 통수능력( $q_w$ )을 평가하기 위해 실내 배수재 통수능 시험법이 가장 널리 사용되고 있다.

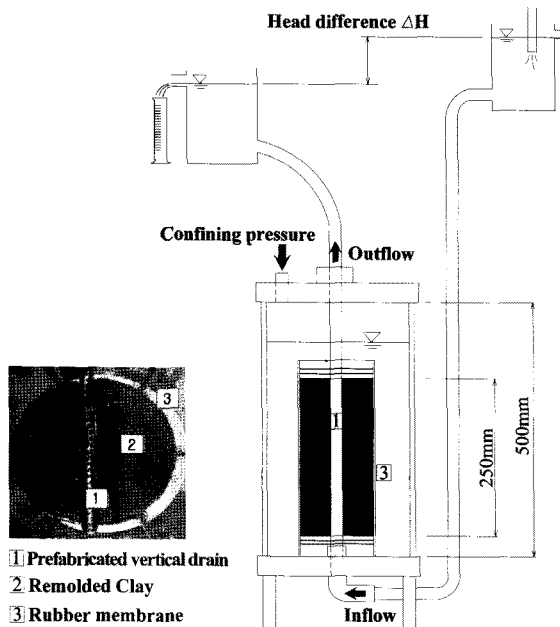


그림 1. 소형 실내 통수능 시험기 모식도(Chai와 Miura, 1999)

표 1. 시험에 사용된 배수재의 제원

구분	배수재 규격 (폭×두께, mm)	코어 채널수	단면적 (cm <sup>2</sup> )	배수재 형상	
PBD-A	100×7	28	7.0	이중 코어	
PBD-B	98×4	28	3.9	단일 코어	
PBD-C	98×6	21	5.9	X-형 코어	
PCD	Dia. 36	-	10.2	실린더형 코어	

투명아크릴로 제작된 원형 토조 내에 연직배수재를 설치하고 고무 멤브레인을 씌워 수압에 의한 수평 구속압을 주는 방법(Miura, 1998)과 배수재 주변에 슬러리를 형성하여 점토를 통해 구속압이 전달되도록 구성한 방법(Chai와 Miura, 1999)이 대표적이다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 흙을 통해 전달된 구속압으로 배수재의 통수능을 평가한 Chai와 Miura(1999)의 방법을 적용하여 표 1의 배수재 중 PBD-A, B, C에 대해 통수능 시험을 실시하였다. 연직배수재와 고무 멤브레인 사이에 점토 시료를 조성하고 100kPa, 300kPa의 구속압으로 24시간 동안 압밀시킨 후, 0.1의 동수경사로 7일간 통수능 시험을 실시하였으며 이 때 사용된 연직배수재는 표 1과 같다. 또한 통수능 시험기의 관마찰 손실수두를 산정하여 배수재 통수능 평가 시 이에 대한 보정을 실시하였다.

### 4. 대형 블록시료를 이용한 압밀시험

#### 4.1 대형 블록시료의 채취

대형 점토시료는 원지반으로 부터 채취하기 어렵고 비용도 많이 소요되기 때문에 통상 대형 배수능 시험은 액성한계 2배 이내의 슬러리 상태로 교반된 재성형 시료를 이용하게 된다. 그러나 이러한 방법은 원지반 수평 투수계수( $k_h$ )와 연직투수계수( $k_v$ )의 투수 이방성과 흙 구조를 반영할 수 없으므로 현장 조건을 적절히 모사한 방법이라 할 수 없다. 본 시험에서는 원지반의 퇴적특성과 이방성을 그대로 모사하기 위해 재성형 시료를 사용하지 않고 그림 2와 같이 현장에서 대형 블록시료를 채취하였다. 오실레이터(oscillator)가 설치된 대형 크레인으로 케이싱(casing)을 압입하고 부압(suction pressure)을 이용하여 직경 1.2m, 높이 2m의 블록시료를 채취하였다. 채취된 시료는 상하부를 완전히 밀봉한 뒤 방진장치가 설치된 별도의 운반대를 이용하여 교란영향을 최소화

소화 하였다. 시험에 사용한 블록 시료는 부산 화전지구 일대의 심도 12~14m의 점토층에서 채취한 해성점토로 통일 분류상 CH에 해당되며 평균 함수비는 53%, 액성 한계와 소성한계는 각각 54%, 27%로 분석되었다.

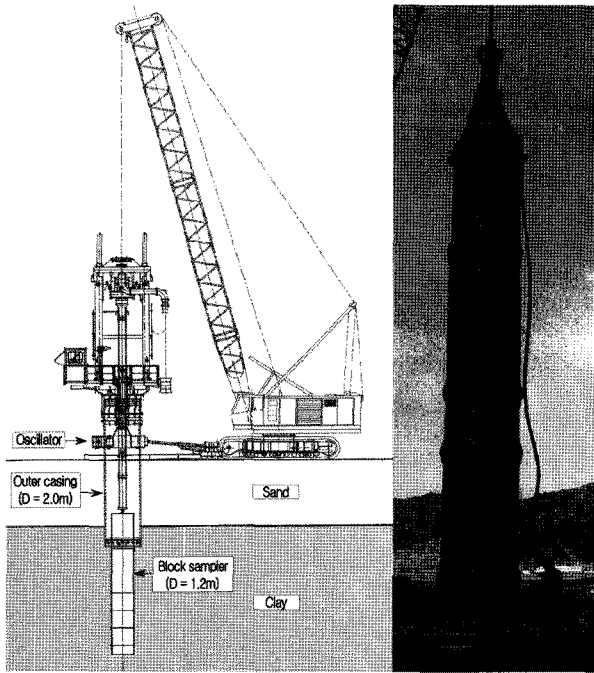


그림 2. 대형 블록시료 샘플링

#### 4.2 대형 챔버를 이용한 수평 배수시험

본 시험에서는 현장에서 채취한 대형 블록시료를 그대로 사용하고자 그림 3과 같이 샘플러 자체에 하중재 하 장치를 설치하였으며, 강관으로 제작된 샘플러는 충분한 강성을 가지고 있어 하중재하에 따른 수평변위는 없는 것으로 나타났다. 현장에서 도착한 대형 블록 시료의 밀봉을 제거하고 시료의 최상단에서 연직 및 수평방향 표준압밀시험에 필요한 샘플을 소량 채취하였으며 시험결과는 표 2와 같다. 별도로 제작한 슈(shoe)를 연직배수재 선단에 장착하고 가로 12cm, 세로 5cm인 직사각형의 맨드릴을 이용하여 수직도에 유의하면서 타설하였다. 위치는 그림 3과 같으며 시험에 사용한 연직 배수재의 재원은 표 1의 PBD-A, PBD-B 및 PCD와 같다. 타설된 연직배수재에 독립된 배수라인을 각각 연결하여 시료 내 간극수가 배수재를 통해서만 배수되도록 하였으며, 연직방향 배수가 발생하지 않도록 별도의 고무 멤브레인을 상부에 깔고 균등한 하중전달을 위한 모래를 10cm가량 도포하였다. 연직배수재 설치가 완료되면 하중 재하판을 설치하고 유압장치를 이용하여 구속 압을 300kPa까지 재하하였다. 장기간 하중재하시 손실되는 압력을 즉각 보정할 수 있도록 하중보정장치를 유

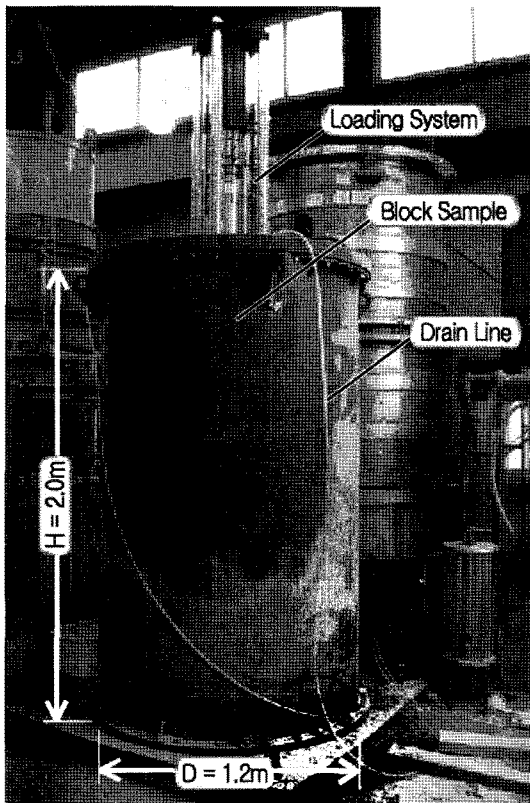
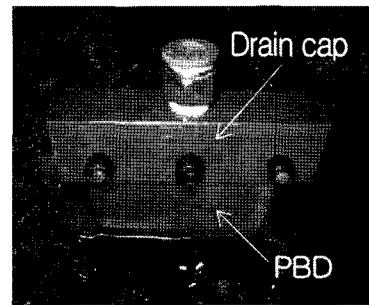
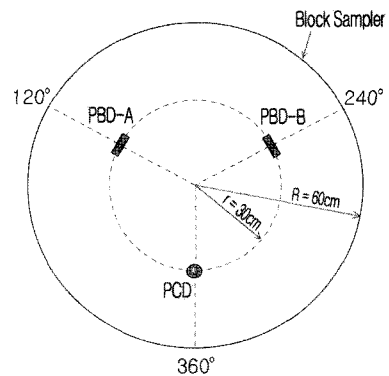


그림 3. 대형 챔버를 이용한 수평 배수시험



(a) 연직배수재의 타설모습



(b) 연직배수재 타설 위치도

압장치에 부착하여 일정한 하중이 유지되도록 하였다. 여기에 시간별 침하량을 측정하기 위해 LVDT를 설치하고 실시간으로 데이터 저장장치에 기록되도록 하였다. 아울러 일정 시간마다 배수재를 통해 배수되는 간극수의 양을 측정하였다. 셋팅이 완료된 시험장치는 3주 동안 방치하여 압밀침하량 및 배수량의 변화를 관찰하였으며, 시험이 진행되는 동안 LVDT에 기록된 침하량과 배수량을 비교하여 간극수가 배수재를 통해서만 발생되는지 확인하였다.

## 5. 시험결과 분석

### 5.1 배수재의 통수능과 실제 배수량의 관계

배수재 종류와 구속압 크기에 따른 배수재의 통수능

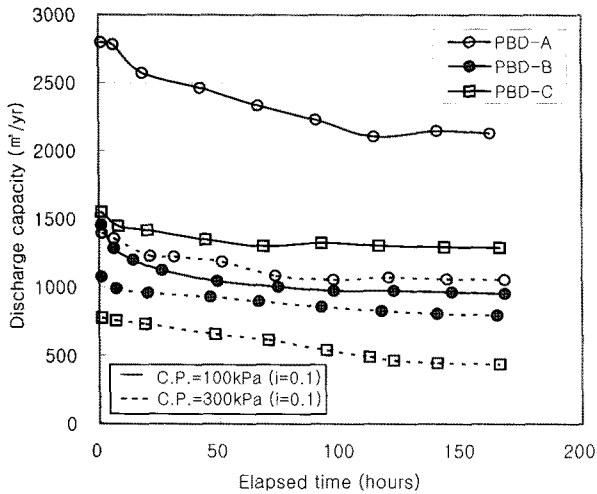
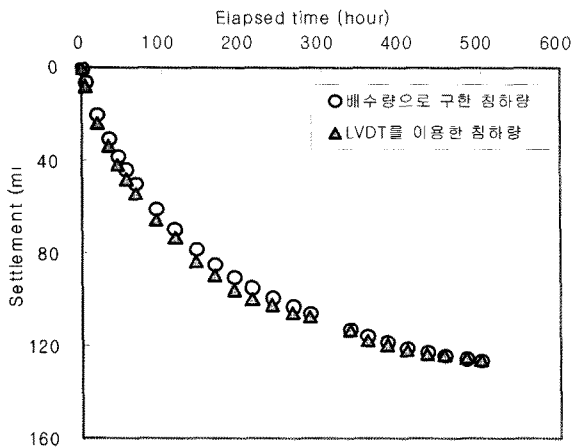


그림 4. 시간에 따른 배수재의 통수능 변화(C.P.=구속압)

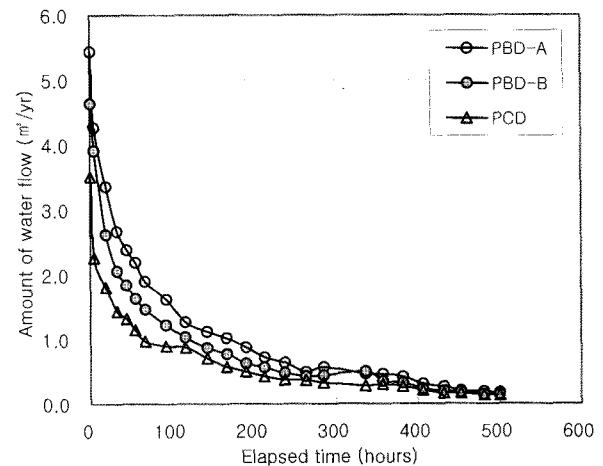


(a) 시간에 따른 압밀침하량 실측치

변화를 그림 4에 도시하였다. 배수재의 통수능( $q_w$ )은 구속압과 동수경사가 증가할수록 감소하게 되며 본 결과에서도 동일한 동수경사에 대해 구속압이 커짐에 따라 통수능이 감소하는 현상을 확인할 수 있었다. 또한 상대적으로 단면적이 큰 PBD-A는 다른 배수재 보다 1.8~1.9배 가량 초기 통수능이 좋은 것으로 나타나 단면적의 크기가 클수록 통수능에 유리한 것으로 분석되었다. 7일 동안 모든 배수재에서 통수능 저감 현상이 발생되어 초기 통수능의 57~83% 수준으로 수렴되었으며, 통수능이 가장 낮은 PBD-C는 300kPa의 구속압에서 438m³/yr의 통수능과  $4.2 \times 10^{-3}$ m/s의 투수계수를 유지하는 것으로 나타났다.

소형 통수능 시험법은 일정한 동수경사의 물을 지속적으로 배수재 내부에 직접 공급하면서 배수재가 통과시킬 수 있는 단위시간당 최대 배수량인 통수능을 구한다. 이는 실제 현장에서 압밀이 진행되면서 배수재로 유입되는 간극수 배출 메커니즘을 올바르게 모사하지 못하므로 지반 내에 타설된 연직배수재의 배수모델을 설명하기에는 한계가 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 현장에서 채취한 대형 블록 시료에 직접 연직배수재를 타설한 후 300kPa의 연직압력으로 압밀시험을 실시하였다. 이 시험결과는 그림 5와 같으며, 시간당 배출되는 간극수의 양은 소형 통수능 시험과는 크게 다른 경향을 나타내었다.

소형 통수능 시험에서는 구속응력 300kPa에서 438m³/yr 이상의 높은 통수능을 보였으나 지중에 타설된 경우는 5.4m³/yr 이하로 나타나 연직배수재가 가지는 통수능과 상관없이 매우 소량의 간극수가 배수됨을 알 수 있다.



(b) 배수재별 배수량 변화

그림 5. 대형 챔버 시험에서의 침하량 및 배수량의 변화

이는 Hansbo(1981)가 언급한 바와 같이 실내시험에서 측정된 배수재의 통수능은 배수재가 타설된 현장의 실제 배수능력과 크게 다르다는 내용에 부합된다. 또한 대형 챔버 시험에서도 배수재의 단면적이 클수록 많은 양의 간극수가 배출되는 것으로 나타났으나 초기 배수량( $q_0$ )을 기준으로 정규화(normalized)한 결과, 그림 6과 같이 압밀시간에 따른 배수량의 감소는 배수재의 크기와 종류에 상관없이 일정한 경향을 보였다. 즉, 시험에 적용된 각기 다른 배수재들은 모두 배수재의 통수능이 충분하기 때문에 배수재의 종류에 상관없이 정규화된 곡선에서 일치되는 양상을 보이고 있다. 이처럼 배수재의 통수능이 충분한 경우, 지중에 타설된 연직배수재에 발생하는 여러가지 배수 저항 현상을 감안하더라도 배수재의 자체 통수능은 흙의 간극을 통해 흘러나오는 간극수의 양보다 훨씬 크며, 점토의 간극수가 연직배수재까지 도달되는 물리적 시간은 원지반의 수평투수계수( $k_h$ )나 압밀계수( $C_v$ )에 의해 지배된다. 즉, 압밀이 진행되는 속도는 배수재의 자체 통수능과는 무관하며 배수재의 타설간격, 주변지반의 투수 및 압밀특성 등에 의해 지배된다. 이러한 특성에도 불구하고 기존의 압밀 해에서는 소형 통수능 시험을 통해 획득한 높은 통수능 값을 압밀도 예측식에 적용하고 있어 실제 현장에서 발생하는 압밀 속도보다 상당히 빨리 압밀이 진행되어 조기 종료되는 것으로 예측하는 오류를 범하고 있다.

## 5.2 연직배수재가 타설된 지반의 실제 압밀침하특성

점토 지반에 타설된 연직배수재의 압밀침하를 Kjellman(1948)이 등변형률(equal strain)로 가정하여 제시하였으

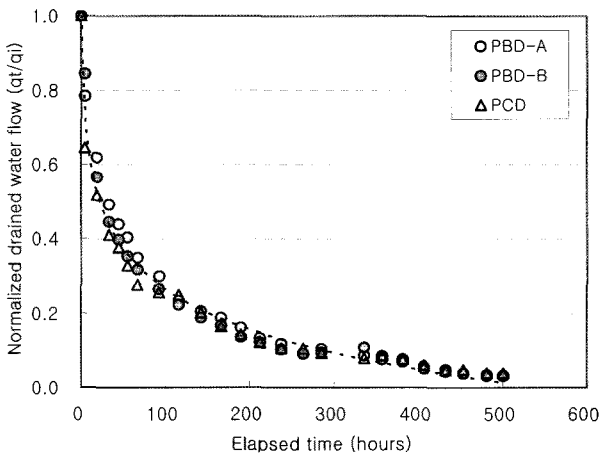


그림 6. 초기 배수량( $q_0$ )으로 정규화한 배수재별 배수량 감소곡선

며, 이 후 많은 연구자들이 비교적 간단한 등변형률 해석을 이용하여 압밀침하를 설명하고 있으며 이러한 해석조건을 바탕으로 기존의 방사방향 압밀 해는 식 (3)과 같이 지수형태를 가지는 간극수압 소산 모델로 설명되고 있다.

$$u = u_0 \exp\left[-\frac{8T_h}{\mu}\right] \quad (3)$$

여기서,  $u$ 는 임의 시간에서의 간극수압을 나타내며  $u_0$ 는 초기 간극수압,  $T_h$ 는 시간계수,  $\mu = \ln(n) - 3/4$ 이다.

한편, Tan 등(1991)은 쌍곡선 형태로 압밀침하가 발생하는 것으로 가정하여 실측 침하량을 바탕으로 식 (4)와 같이 최종 침하량을 산정하는 방법을 제안하였다.

$$S = \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (4)$$

$$S_f = \lim_{t \rightarrow \infty} S = \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

여기서,  $S$ 는 임의시간  $t$ 에서의 침하량이며  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 쌍곡선법으로 계산된 상수,  $S_f$ 는 최종 예측 침하량이다.

쌍곡선법으로 계산한 최종침하량을 이용하여 시간에 따른 압밀도 곡선을 도식한 결과, 그림 7과 같이 실측값과 매우 근접한 것으로 나타났다. LVDT 측정값과 배수된 간극수의 양( $Q_w$ )을 역산한 압밀도가 그림 7에서 보는 바와 같이 매우 유사하므로 간극수는 대부분 수평방향으로 배수 되었음을 알 수 있다. 3주 동안 발생한 압밀도는 80.8%인 것으로 분석되었다. 그러나 기존의 Yoshikuni(1974)와 Onoue(1988)의 압밀 해에 소형 통수능 시험기에서 측정된 배수재 최소 통수능  $438\text{m}^3/\text{yr}$ 을 대입하여 산정한 배수 저항계수( $L$ )을 적용하면 실측된 압밀도보다 20%가

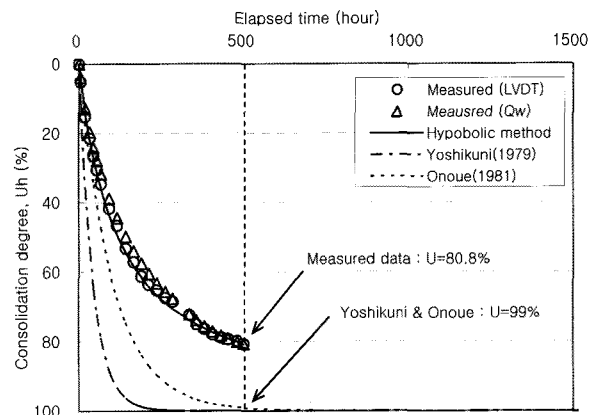


그림 7. 실측 데이터와 기존 압밀식으로 예측된 압밀곡선과의 압밀도 비교

량 큰 99%의 압밀이 진행된 것으로 계산된다. 즉, 일반적으로 사용되고 있는 소형 통수능 시험에서 획득된 통수능은 실제보다 수~수십 배 큰 값이므로 이를 식 (1)에 직접 대입하여 압밀도를 계산할 경우 올바른 압밀종료시점을 예측할 수 없다.

### 5.3 실제 배수 특성을 반영한 압밀침하 예측식 제안

식 (1)에 정의된 Yoshikuni(1974) 압밀 해의 배수 저항계수(L)는 식 (6)과 같이 압밀도와 시간계수의 함수를 이용하여 표현 할 수 있다. 대형 블록시료에서 측정된 침하 데이터와 쌍곡선법으로 예측한 최종 침하량( $S_f$ )을 이용하여 시간별 압밀도를 계산하였으며, 이를 바탕으로 시간계수에 따라 변화되는 복합 배수 저항요소를 L(t)로 정의하였다.

$$L(t) = 0.8L = \frac{-8T_h}{\ln(1-U_h)} - F(n) \quad (6)$$

계산된 L(t)를 시간계수에 대해 도시하면, 그림 8과 같이 시간계수가 증가함에 따라 배수저항이 선형 증가하는 것으로 나타난다. 즉, 복합 배수 저항요소 L(t)는 직선으로 표현되며 기울기와 y절편은 배수재 타설간격, 원지반 수평압밀계수에 의해 달라지게 된다. 또한 복합 배수 저항요소에는 연직배수재 타설시 발생하는 교란 효과와 압밀이 진행되면서 발생하는 배수재와 지반사이의 압밀지연 효과가 복합적으로 반영되어 있다. L(t)로 정의된 시간 의존적 복합 배수 저항요소를 기존의 Yoshikuni(1974) 제안식에 적용하여 식 (7b)와 같은 수정 압밀 해를 제시하였다.

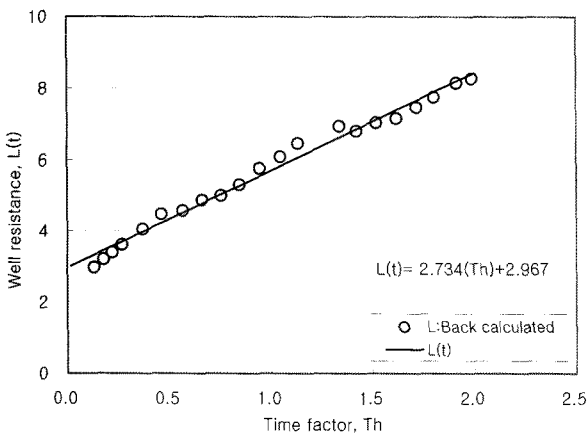


그림 8. 시간계수에 따른 복합 배수저항요소의 변화

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n) + L(t)}\right], \quad L(t) = aT_h + b \quad (7a)$$

따라서,

$$U_h = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n) + (aT_h + b)}\right] \quad (7b)$$

여기서, a, b는 시간계수와 복합 배수저항 값을 도시한 직선의 기울기와 절편,  $T_h$ 는 시간계수 ( $=C_{vt}/d_w^2$ )이고  $n$ 은 간격비( $=d_w/d_w$ )이며  $F(n) = n^2/(n^2-1)\ln(n) - (3n^2-1)/(4n^2)$ 이다. 또한 배수재의 환산직경( $d_w$ )은 배수재의 폭과 두께를 고려하여  $2(b+t)/\pi$ 로 산정하였으며 배수재 유효 등가직경( $d_w$ )은 Hansbo(1981)의 제안식에 따라 삼각형 배치로 가정하여 배치간격(S)의 1.05배로 하였다.

3주 동안 실측한 침하데이터는 80.8%의 압밀도를 가지는 것으로 계산되었고, 제안한 수정 압밀 해를 이용한 압밀 예측곡선은 압밀에 따라 증가되는 복합 배수 저항요소가 반영되어 그림 9와 같이 80.3%의 압밀도로 예측하고 있어 매우 근접한 것으로 나타났다. 또한 기존의 Yoshikuni(1974) 압밀 해를 이용하여 실측 데이터와 가장 유사한 거동이 보이는 배수재 투수계수( $k_w$ )를 시행 착오법으로 계산하여 보았다. 배수재 투수계수가  $5 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 인 범위에서 초기 침하거동이 가장 유사한 곡선이 형성되었으나 이 값은 소형 통수능 시험에서 획득한 배수재 투수계수  $4.2 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 보다 크게 작은 값으로 실측 데이터에 비추어 보면 압밀도 80% 이상 진행된 상태의 투수계수  $1.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 와 유사한 것으로 나타났다. 즉, 소형 통수능 시험에서 획득한 배수재의 통수능을 적용한 기존 압밀 해는 실제보다 빠르게 압밀이 진행되는 것으로 예측하고 있기 때문에 기존 식으로 예측한 압밀

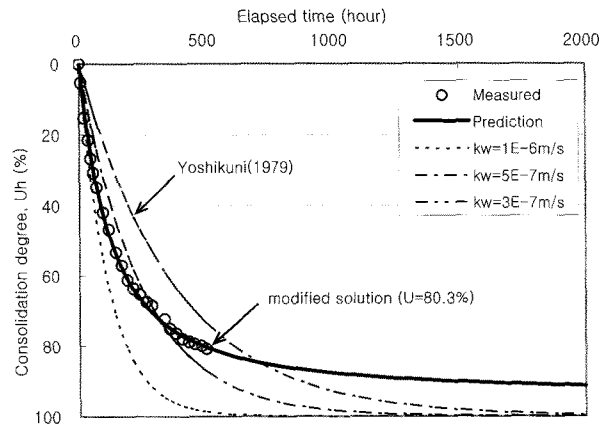


그림 9. 제안된 방법으로 예측된 압밀곡선과 기존 방사방향 압밀 해의 비교

종료시점은 올바른 값이라 보기 어렵다. 이와 같이 압밀이 종료된 것으로 예측된 시점에서부터 지속적인 침하가 발생하게 되는데 이를 자칫 2차 압밀침하량으로 오판할 수 있다. 실제로는 2차 압밀침하가 아니라 종료되지 않은 1차 침하가 계속 진행되고 있는 것이며, 이는 압밀 종료시점을 잘 못 예측하였기 때문에 야기될 수 있는 문제이다. 본 연구에서 제시한 방법은 실측 침하량과 시간에 따라 변화되는 배수 저항 값을 반영하여 도출된 해법이므로 보다 정확하게 압밀 종료시점과 압밀도를 예측할 수 있어 이러한 문제점을 최소화 할 수 있다.

## 6. 결론 및 고찰

본 연구에서는 현장에서 채취한 직경 1.2m의 대형 블록시료에 연직배수재를 타설하고 실측된 침하량과 배수량을 바탕으로 시간에 따라 증가되는 배수 저항계수를 도출하였으며, 이를 바탕으로 새로운 방사방향 압밀곡선 예측 방법을 제시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 대형 블록시료에서 측정된 단위시간당 배출되는 간극수의 양과 소형 통수능 시험기를 이용한 배수재 자체의 통수능은 크게 다른 거동을 보였으며, 이는 실내시험으로 측정된 배수재의 통수능은 배수재가 타설된 현장의 실제 배수능력과 크게 다르다는 Hansbo(1981)의 내용과 일치하였다.
- (2) 3주 동안 대형 블록 시료에서 실측한 침하량은 80.8%의 압밀이 진행된 것으로 나타났으나 소형 통수능 시험을 통해 획득한 배수재 통수능을 바탕으로 계산한 기존의 압밀침하 예측식은 99%이상 압밀이 진행된 것으로 예측하고 있어 기존의 압밀해법은 압밀 종료시점을 크게 과대 평가하고 있는 것으로 분석되었다.
- (3) 블록 시료의 실측 침하 데이터를 바탕으로 연직배수재 타설시 발생하는 교란효과와 압밀이 진행되면서 발생하는 압밀지연 효과 및 원지반 투수계수 변화 등을 반영하고자 쌍곡선법을 도입하여 시간계수

- 에 따라 선형 증가하는 배수 저항곡선을 도출하였으며, 이를 복합 배수 저항요소  $L(t)$ 로 정의하였다.
- (4) 정의된 복합 배수 저항요소  $L(t)$ 를 이용하여 제안된 압밀곡선 예측법은 실측 침하량과 시간에 따라 변화되는 배수 저항 값을 반영하여 도출된 식이므로 보다 정확하게 압밀 종료시점과 압밀도를 예측할 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Barron, R.A. (1948), "Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Transactions ASCE*, Vol.113, No.4, pp.718-742.
2. Chai, J.C., and Miura, N. (1999), "Investigation of factors affecting vertical drain behavior", *J. Geotech Engng ASCE*, Vol.125, No.3, pp.216-226.
3. Chu, J., Bo, M.W. and Choa, V. (2004), "Practical Consolidation for using vertical drains in soil improvement projects", *Geotextiles and Geomembranes*, Vol.22, Issue 1-2, pp.101-117
4. Hansbo, S. (1981), "Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains", *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, pp.677-682.
5. Hansbo, S., Jamiolkowski, M., and Kok, L. (1981), "Consolidation by vertical drains", *Geotechnique* 31, No.1, pp.45-66.
6. Hansbo, S. (1997), "Aspects of vertical drain design; Darcian or non-Darcian flow", *Geotechnique* 47, No.5, pp.983-992.
7. Holtz, R.D., Lancellotta, R., Jamiolkowski, M., and Pedroni, S. (1991), "Laboratory testing of prefabricated wick drains", *Geo-Coast'91*, 3-6, Yokohama, pp.311-316.
8. Kjellman, W. (1948), "In Barron: Consolidation of fine-grained soils by drain wells", *Transactions ASCE*, Vol.113, Discussion, pp.749-751.
9. Miura, N., Chai, J.C., and Toyota, K. (1998), "Investigation on some factors affecting discharge capacity of prefabricated vertical drain", *Proc. 6th Int. Conf. on Geosynthetics*, pp.845-850.
10. Onoue, A. (1988), "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consolidation", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.165-174.
11. Tan, T.S., et al. (1991), "Hyperbolic method for consolidation analysis", *J. Geotech Engng ASCE*, Vol.117, No.11, pp.1723-1737.
12. Xie, K.H. (1987), "Consolidation Theories and Optimisation Design for Vertical Drains", Doctor of Philosophy Thesis, Hewing University, China.
13. Yoshikuni, H., and Nakanodo, H. (1974), "Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability", *Soils and Foundations*, Vol.14, No.2, pp.35-46.

(접수일자 2008. 2. 20, 심사완료일 2008. 6. 25)