

## Velocity Method를 이용한 수평압밀계수 산정에 관한 연구 The Estimation of Horizontal Coefficient of Consolidation Using Velocity Method

김지용<sup>1)</sup>, Ji-Yong, Kim, 천홍래<sup>2)</sup>, Hong-Rae, Chun, 한상재<sup>3)</sup>, Sang-Jae Han, 김수삼<sup>4)</sup>, Soo-Sam, Kim

<sup>1)</sup> 중앙대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng. Chung-Ang University

<sup>2)</sup> 천일지오컨설팅연구소, Chun-Il Geoconsultant Research Institute

<sup>3)</sup> 중앙대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Eng. Chung-Ang University

<sup>4)</sup> 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environment Eng., Chung-Ang University

**SYNOPSIS** : This study was to present the method for estimating the horizontal coefficient of consolidation by using velocity method which was based on the Barron's equation. Horizontal drainage consolidation tests, including a radial drainage consolidation test, a cylindrical consolidation test, and a large soil box test, were performed to examine its validity. Using the velocity method, horizontal coefficient of consolidation was calculated and compared with  $\log t$  method,  $\sqrt{t}$  method, Magnan & Deroy's method, Bergado's method.

**Key words** : velocity method, horizontal coefficient of consolidation

### 1. 서론

본 연구에서는 Barron(1948)이 제시한 수평배수압밀이론을 바탕으로하여 Lun & Parkin(1985)이 제시한 압밀속도법(velocity method)을 수평배수압밀조건으로 확장하여 점성토의 수평압밀계수,  $C_h$ 를 산정하기 위한 방법을 제시하였다.

실내시험을 통하여 본 기법의 적용성을 검토하기 위하여 직경 10cm, 높이 5cm의 소형방사형압밀시험, 직경 23.5cm, 높이 50cm의 원통형압밀시험을 실시하였으며, 보다 현장조건에 가깝게 모델링하여 4개의 연직배수재를 설치한 대형토조압밀시험을 실시하였다. 각 실험결과를 이용하여 기존의 압밀계수산정기법( $\log t$ 법,  $\sqrt{t}$ 법, Magnan법, Bergado법)과 압밀속도법의 분석결과를 비교, 분석하였다.

### 2. 압밀속도법

#### 2.1 연직배수압밀조건

Casagrande에 의해 제시된  $\log t$ 법과 Taylor에 의해 제안된  $\sqrt{t}$ 법은 자동화계측에는 필요하지 않은 도해법을 사용하고 있고, 게다가 압밀곡선의 초기와 최종 부분이 이론치와 다른 형태를 나타내는 경우에는  $C_v$ 값을 산정하기가 곤란한 단점이 있다. 이에 따라 Parkin et al.(1985)은 이러한 단점들을 고려하여 압밀

속도법(Velocity method)를 제안하였다. 이 방법은 곡선의 수정도 필요하지 않고 기존의 방법에 비하여 간편한 장점이 있다.

이 방법은 침하량 대신 압밀속도(Velocity)를 이용함으로써 기존의 방법으로 압밀계수를 산정하기 곤란한 형태의 침하곡선뿐 아니라 미지의 초기압축의 영향과 2차압밀과 미지점의 발생 등의 영향을 완전히 제거하였다. 압밀속도법은 시간계수와 압밀속도를 대수좌표로 나타낸 것으로 이 때 압밀속도의 변화는 전형적으로 2개의 상이한 구배를 가지는 직선으로 나타난다.

Terzaghi의 미분방정식에 의해서 속도는 다음과 같이 얻어진다.

$$\dot{U} = 2 \sum e^{-M^2 T} \quad (1)$$

여기서,  $M = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots$

이러한 관계는 그림 1.에 제시된 바와 같고, 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\dot{U} = (\pi T)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{for } U < 0.5 \quad (2)$$

$$\dot{U} = 2e^{-\frac{\pi^2 T}{4}} \quad \text{for } U > 0.5 \quad (3)$$

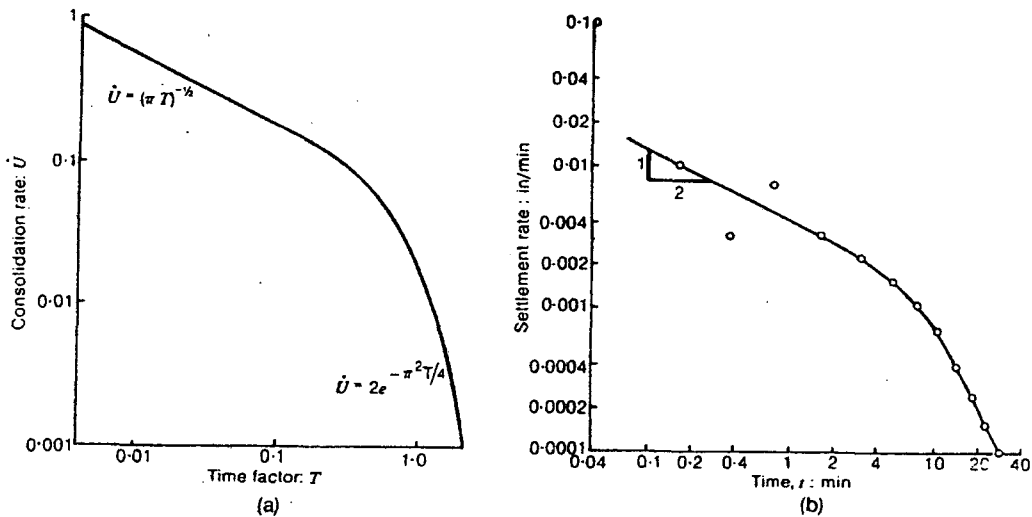


그림 1. (a) Terzaghi 이론의 압밀속도-시간계수 관계

(b) 표준압밀시험으로부터 산정된 압밀속도-시간의 관계

연직방향 압밀에 있어서 압밀속도는 시간계수와와의 관계에서 압밀도 50% 이전에는 1:0.5의 구배를 가지고 감소하다가 압밀도 50%이후에는 지수적으로 감소되는 2원적 함수로 표현하고 있다.

그림 1.(b)는 표준압밀시험결과 압밀속도-시간관계를 나타낸 것으로서 마찬가지로 2개의 선형관계가 존재한다는 것을 알 수 있다. 변곡점이 발생하는 50%압밀도 시점을 바탕으로 압밀계수는 다음과 같이 산정된다.

$$C_v = \frac{T_{50} H^2}{t_{50}} \quad (4)$$

## 2.2 수평배수압밀조건

그림 2.는 Barron의 수평배수압밀식을 이용하여 간격비에 따른 압밀속도와 시간계수와와의 관계를 나타낸 것이다. 수평배수압밀조건에서도 연직배수조건과 같이 2개의 구배를 가지는 곡선으로 나타났다. 그

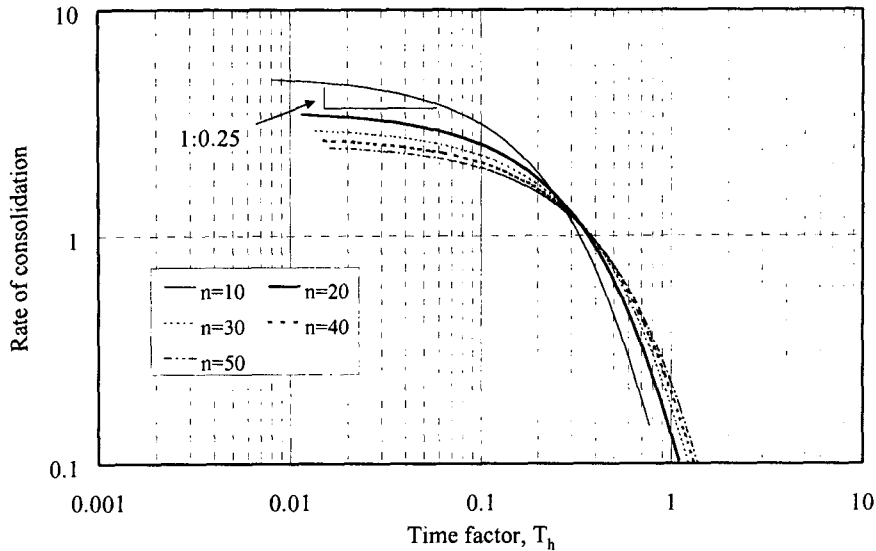


그림 2. 수평압밀조건기 압밀속도-시간계수 관계곡선

러나, 연직압밀조건일 경우 초기곡선의 기울기가 1:0.5로 나타나는 것과는 달리 수평배수압밀조건일 경우는 1:0.25로 나타남을 알 수 있다.

변곡점이 나타나는 시간계수는  $n$ 값이 커짐에 따라 증가하며, 변곡점 발생시기는 50%압밀도 시점임을 알 수 있다. 따라서, 이 변곡점이 발생하는 시기를 바탕으로하여 수평압밀계수는 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$C_h = \frac{T_{50} d_e^2}{t_{50}} \quad (5)$$

여기서,  $T_{50}$  : 시간계수,  $d_e$  : 영향원의 직경,  $t_{50}$  : 50%압밀도의 소요시간

### 3. 수평배수압밀시험

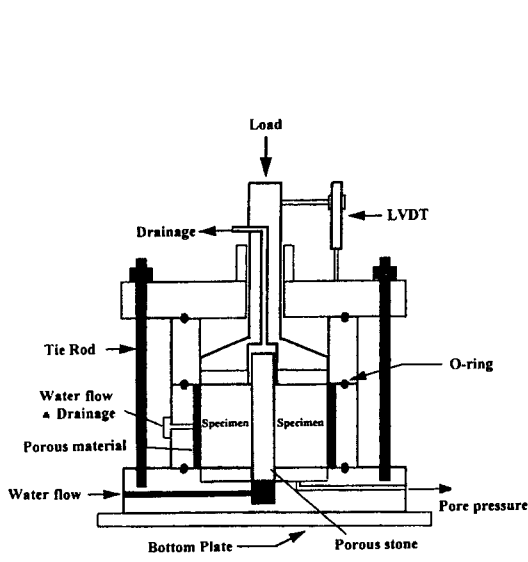
실내시험결과를 이용하여 압밀속도법의 적용성을 검토하기 위하여 수평배수압밀시험을 실시하였다. 본 시험에서 사용된 기기는 그림 3.에 제시된 바와 같이 10cm( $\psi$ ) $\times$ 5cm(H) 크기의 압밀시험기, 그리고 23.5cm( $\psi$ ) $\times$ 50cm(H)인 원통형 압밀시험기를 사용하였으며, 연직배수재가 설치된 실제 현장조건에 보다 가깝게 모델링하여 4개의 연직배수재를 설치한 75cm(B) $\times$ 76cm(L) $\times$ 80cm(H) 크기의 대형토조압밀시험을 실시하였다.

시험시료는 액성한계(LL) 61%, 소성지수(PI) 36, 비중( $G_s$ ) 2.70인 남해안 가덕도 지역의 해성점성토를 재조성하여 사용하였으며 100, 200, 300kPa의 하중을 1차압밀종료시점까지 단계적으로 가압하였다.

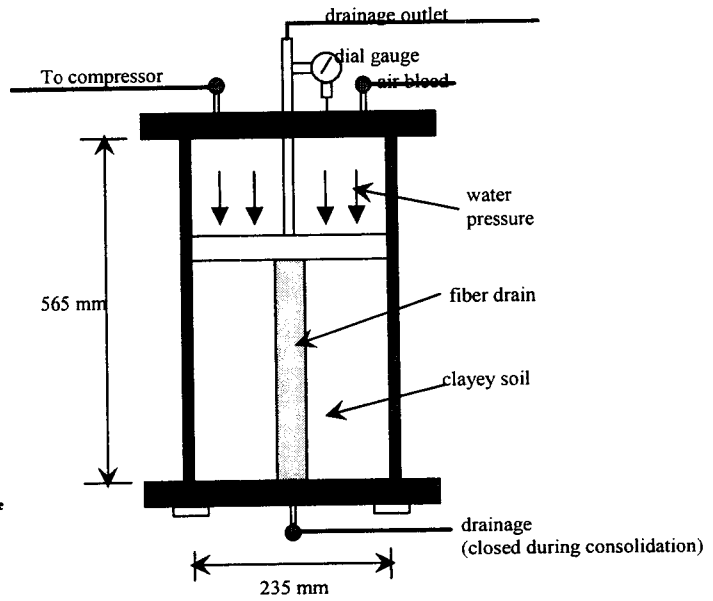
### 4. 실험결과 비교분석

#### 4.1 압밀속도의 비교분석

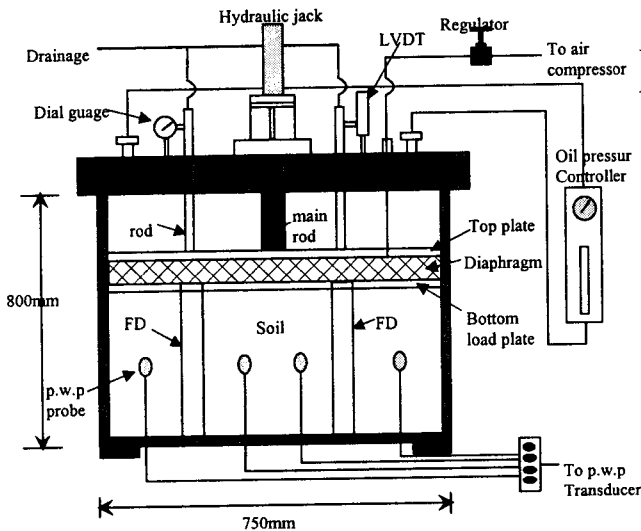
일반적으로 시간의 경과와 압밀속도의 관계는 변화의 폭이 매우 크기 때문에 이들 관계를 양대수지상에 표현하는 것이 분석하기에 용이하다. 이때 압밀속도의 변화는 결정적으로 2개의 구배를 가진 직선으



(a) 10cm( $\phi$ ) $\times$ 5cm(H)



(b) 23.5cm( $\phi$ ) $\times$ 50cm(H)

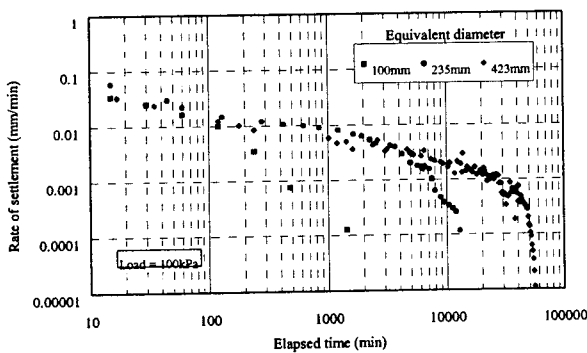


(c) 대형토조압밀시험기  
그림 3. 수평배수압밀시험기

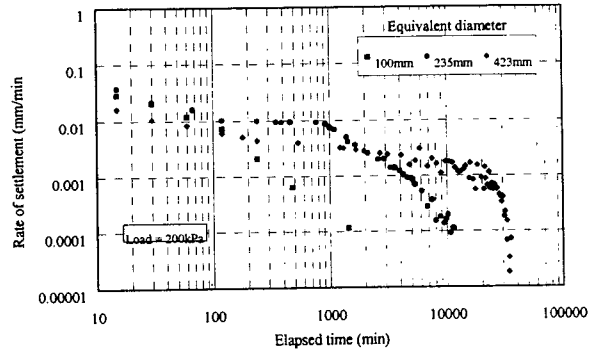
로 표현될 수 있는 이원화된 관계를 나타낸다. 이들 상이한 구배를 각각 1차구배와 2차구배로 구분한다.

그림 4.는 각 압밀시험결과로부터 시간에 따른 압밀속도를 나타내고 있다. 시료의 크기, 하중단계와는 관계없이 전형적으로 양대수지 곡선에서 1차구배가 약 1 : 0.25정도로 매우 선형성이 크게 나타났으며 그 이후에는 압밀속도가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

또한, 그림으로부터 각 영향원의 크기별 압밀속도의 변화는 1차구배에 있어서는 거의 동일하지만, 2차구배가 나타나는 시점이 다르게 나타나 단면이 클수록 변곡점이 나타나는 시간이 증가되는 것을 알 수 있다. 이와 관련하여 Lun & Parkin(1985)은 두께가 다



(a) 100kPa



(b) 200kPa

그림 4. 시료크기에 따른 시간-압밀속도의 관계

른(19mm~76mm) 점토시료에 대한 연직압밀시험을 실시하고 그림 5.와 같은 압밀속도곡선의 형태를 제시한 바 있다. 그들은 여기서, 2차구배가 발생하는 시간은 시료두께의 제곱( $H^2$ )과 근사적으로 비례한다고 보고하였다. Lun & Parkin(1985)이 실시한 시험방법은 본 시험과는 달리 연직방향의 압밀시험이고, 시료의 두께 또한 현저히 작기 때문에 이를 정량적으로 비교하는 것은 다소 무리일 것으로 판단되나, 대체적인 경향은 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

그림 4.로부터 각 시험결과와의 2차구배부분에서 동일한 압밀속도가 나타나는 시간을 구해보면 그림 6.에서와 같이 등가영향원,  $d_e$ 의 제곱에 비례한다고 할 수 있다. 하지만 본 결과는 실내시험에 한정된 결과이기 때문에, 이에 대해서는 보다 많은 시험결과를 통하여 검증되어야 할 것으로 사료된다.

#### 4.2 압밀계수 산정법의 비교

본 논문에서 제시된 압밀속도법의 적용성을 살펴보기 위하여 기존의 수평압밀계수 산정법인 Magnan and Deroy(1980)의 제안식, 그리고 Bergado et al.(1993)의 제안식에 의해 산정된 수평압밀계수와 함께, 기존에 보편적으로 이용되고 있는 작도법에 의한 압밀계수 산정기법인  $\log t$ 법 및  $\sqrt{t}$ 법, 그리고 앞서 제안된 압밀속도법에 따라 수평압밀계수를 산정하여 비교하였다. 그 결과들은 그림 7.에 제시된 바와 같다.

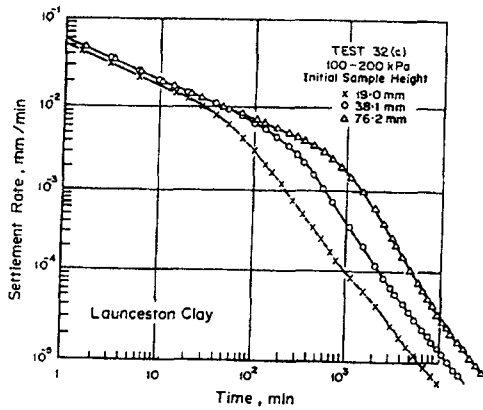


그림 5. 시료두께에 따른 압밀속도의 변화 (Lun & Parkin, 1985)

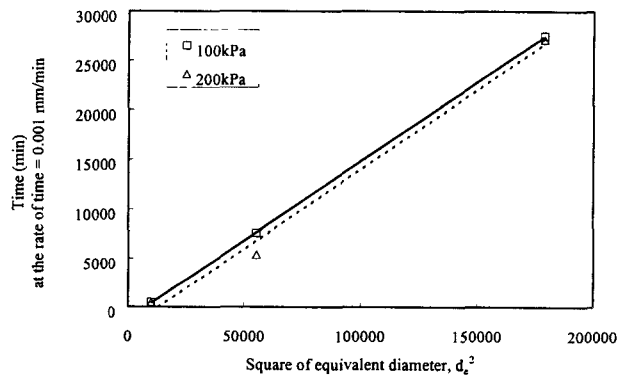


그림 6. 압밀속도와 등가유�효경의 관계

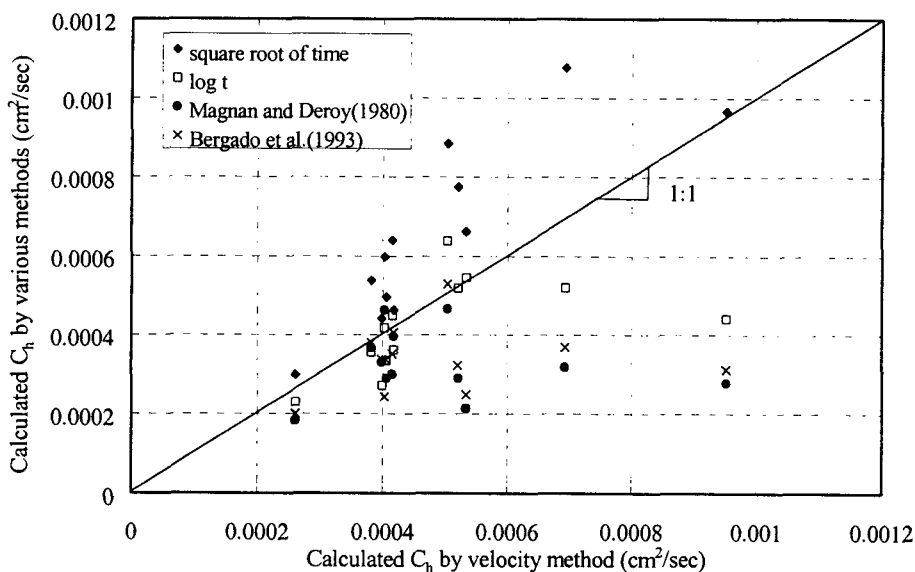


그림 7. 압밀속도법(Velocity Method)에 의해 계산된  $C_h$ 값과 기존 산정법과의 비교

그림 7.에서 각 기법별 수평압밀계수는 다소 차이가 발생되고 분산되어 있는 경향을 나타내지만, 전체적인 경향을 고려해볼 때 계산된 수평압밀계수는  $\sqrt{t}$ 법이 가장 크고, logt법, Magnan & Deroy(1980)법, 그리고 Bergado et al.(1993)에 의한 산정법 순서로 나타났다.

평균적으로 볼 때,  $\sqrt{t}$ 법으로 계산된 수평압밀계수는 압밀속도법에 비하여 약 30%정도 크게 나타났으며, logt법은 약 15%정도 작게 산정되어 압밀속도법은 두가지 방법의 중간정도 값을 나타냄을 알 수 있다. 따라서, 본 시험결과의 경우 압밀속도법을 이용하여 수평압밀계수를 산정하는 것은 대체적으로 만족할 만한 결과를 얻었다고 판단된다. 특히,  $\sqrt{t}$ 법과 logt법과 같은 도해법으로 압밀계수를 산정하기 어려운 침하곡선을 나타내는 사례의 경우 압밀속도법의 적용은 신뢰성 있는 방법이 될 것으로 판단되며, 약 50%정도의 압밀도에 도달하여 압밀속도의 변곡점이 발생하는 시점에서 현 지반의 압밀계수를 산정할 수 있기 때문에 현장계측관리에 있어서 편리한 기법으로 적용될 수 있을것이라 사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 수평압밀계수를 산정하기 위하여 Lun & Parkin(1985)이 제안한 압밀속도법을 수평배수 압밀조건으로 확장하였으며, 실내시험데이터를 이용하여 그 적용성을 판단한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 시간-압밀속도의 관계에서 1차구배와 2차구배가 나타나며 약 50% 압밀도에서 변곡점이 발생하였다. 연직배수압밀조건에서 1차구배가 1 : 0.5 인것과는 달리 수평배수압밀조건에서는 1 : 0.25의 구배를 나타내었다.

(2) 수평배수압밀조건에서 압밀속도의 변곡점이 발생하는 시점은 배수재 영향원 직경의 제곱( $d_c^2$ )에 비례하는 경향을 나타내었다.

(3) 압밀속도법을 이용하여 산정된 수평압밀계수는  $\sqrt{t}$ 법과 logt법의 중간정도 값을 나타내었다. 특히 본 기법은 도해법으로 압밀계수를 산정하기 어려운 침하곡선을 나타내는 사례의 경우 신뢰성있게 적용될 수 있는 방법이 될 것으로 판단되며, 약 50%정도의 압밀도에 도달하여 압밀속도의 변곡점이 발생하는 시점에서 현 지반의 압밀계수를 산정할 수 있기 때문에 현장계측관리에 있어서 편리한 기법으로 적용될 수 있을것이라 사료된다.

## 6. 참고문헌

1. 강민수(1999), "影響因子를 考慮한 鉛直排水技術의 開發에 關한 研究", 中央大學校 64回 博士學位論文.
2. Bergado, D. T., Enriquez, A.S., Sampaco, C.L., and Balasubramaniam, A.S.(1992), "Inverse analysis of geotechnical parameters on improved soft Bangkok clays", Journal of Geotechnical Engineering, Vol.118, No.7.
3. Magnan J.P., Pilot G., and Queyroi D.(1983), "Back analysis of soil consolidation around vertical drain", Proceeding of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
4. Parkin, A.K.(1995) "Consolidation analysis by the velocity method", Proceedings of the International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey Soils(IS-Hiroshima)