

압밀속도법을 이용한 수평압밀계수 산정

Estimation of Horizontal Coefficient of Consolidation Using Velocity Method

김지용* 김정기** 염혜선** 김수삼***
Kim, Ji-Yong Kim, Jung-Ki Yeam, Hye-Seon Kim, Soo-Sam

ABSTRACT

Velocity method was supposed by Parkin et al.(1985) in order to supplement previous $\log t$ and \sqrt{t} method. 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. Velocity method throughly eliminated not only settlement curve which had shape with difficulty in evaluating coefficient of consolidation but also the effect of unknown intial compression, the secondary consolidation and occurrence of unknown point by using velocity instead of settlement.

The purpose of this study is to investigate its application in field. Velocity method was used in obtaining horizontal coefficient of consolidation in Kyung-gi area. Horizontal coefficient of consolidation using velocity method was calculated and compared with $\log t$ method, \sqrt{t} method, Magnan & Deroy's method, Bergado's method.

1. 서론

Parkin et al.(1985)은 $\log t$ 법과 \sqrt{t} 법의 단점을 보완하여 압밀속도법(velocity method)를 제안하였다. 본 연구에서는 수평배수 압밀이론(Barron, 1948)을 바탕으로 하여 Lun & Parkin(1985)이 제시한 압밀속도법(velocity method)을 수평배수 압밀조건으로 확장하여 점성토의 수평압밀계수, C_h 를 산정하기 위한 방법을 제시하였다. 이 방법은 침하량 대신 압밀속도를 이용함으로써 기존의 방법으로 압밀계수를 산정하기 곤란한 형태의 침하곡선 뿐 아니라 미지의 초기압축의 영향과 2차압밀, 미지점의 발생 등의 영향을 완전히 제거하였다.

이 논문의 목적은 경기도 지역의 현장 데이터를 이용하여 압밀속도법(velocity method)과 기존의 압밀계수산정기법($\log t$ 법, \sqrt{t} 법, Magnan법, Bergado법)과의 결과를 비교, 분석함으로써 현장 적용성을 검토하고자 하는 것이다.

* 중앙대학교 박사수료, 비회원

** 중앙대학교 석사과정, 비회원

*** 중앙대학교 교수, 정회원

2. 압밀속도법

2.1 연직배수압밀조건

Casagrande(1940)에 의해 제시된 $\log t$ 법과 Taylor(1942)에 의해 제안된 \sqrt{t} 법은 자동화계측에는 부적절한 도해법을 사용하고 있고, 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 압밀속도법(Velocity method)을 제안하였다. 이 방법은 곡선의 수정도 필요하지 않고 기존의 방법에 비하여 간편한 장점이 있다.

압밀속도법은 침하량 대신 압밀속도(Velocity)를 이용함으로써 기존의 방법으로 압밀계수를 산정하기 곤란한 형태의 침하곡선뿐 아니라 미지의 초기압축 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 그림1.에 제시된 바와 같고, 다음과 같이 정리될 수 있다.

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

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

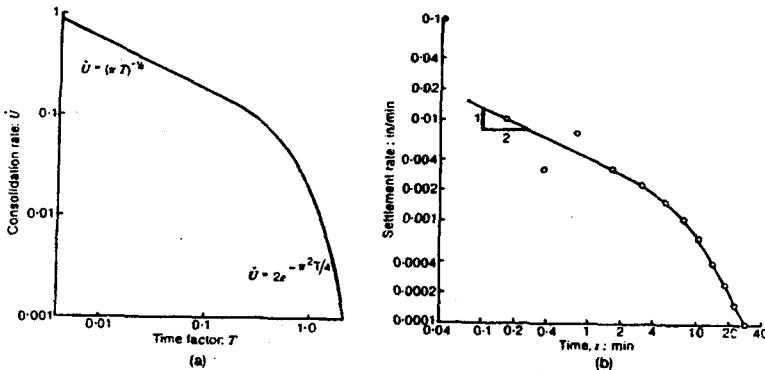


그림1. (a) Terzaghi 이론의 압밀속도-시간계수 관계

(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.

그림1.(b)는 표준압밀시험결과 압밀속도-시간관계를 나타낸 것으로서 마찬가지로 2개의 선형관계가 존재한다는 것을 알 수 있다. 변곡점이 발생하는 50%압밀도 시점을 바탕으로 압밀계수는 다음

과 같이 산정된다.

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

2.2 수평배수압밀조건

그림2는 Barron의 수평배수압밀식을 이용하여 간격비(n)에 따른 압밀속도와 시간계수와의 관계를 나타낸 것이다. 수평배수압밀조건에서도 연직배수압밀조건과 같이 2개의 구배를 가지는 곡선으로 나타났다. 그러나, 연직배수압밀조건일 경우 초기곡선의 기울기가 1:0.5로 나타나는 것과는 달리 수평배수 압밀조건일 경우는 1:0.25로 나타남을 알 수 있다.

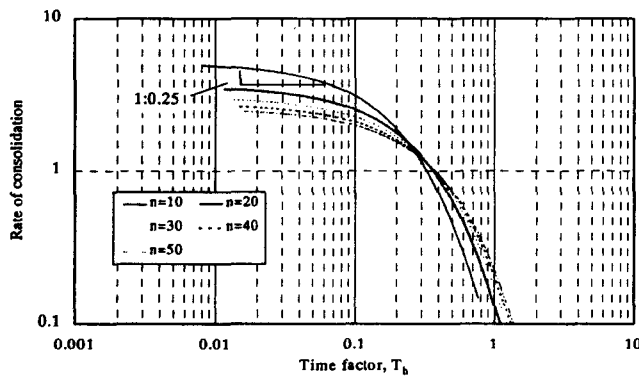


그림2. 수평압밀조건시 압밀속도-시간계수 관계곡선

변곡점이 나타나는 시간계수는 n값이 커짐에 따라 증가하며, 변곡점 발생시기는 50%압밀도 시점임을 알 수 있다. 따라서, 변곡점이 발생하는 시기를 바탕으로 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. 현장계측자료

· 압밀속도법(velocity method)의 현장 적용성을 검토하고자 다음 지역의 현장 데이터를 이용하여 수평압밀계수를 비교·분석하였다.

본 지역은 경기도 지역으로서 단지조성면적은 1,412,000m²이고 현 지반고는 EL + 0.2m ~ + 2.0m으로서 계획고는 EL + 0.2m ~ + 3.0m이다.

도표1.에 제시된 바와 같이 본 지역의 흙 분류는 ML, CL이고, 액성한계는 50~60%, 소성지수는 20~30%이다. 자연함수비가 액성한계 이상으로서 본 지반은 매우 연약한 상태를 보이고 있다.

본 연구에서 사용된 자료는 연약지반 개량공법으로서 Paper Drain공법을 이용한 도로부 지역의 침하계측자료이다. 위치는 A-1, A-2, A-3, A-4, A-5로 구분되며, 각 지역에 대한 성토 높이와 Paper Drain의 설치간격 및 구분내용은 도표2.에 정리된 바와 같다.

도표1. 대상지역의 토질특성

| 구 분 | | 특 성 |
|---------|------|----------------------------|
| 입도조성 | | CL, MH, ML |
| 함수비 | | 50~90% |
| 단위체적중량 | | 1.2~1.5 t/m ³ |
| 간극비 | | 1.5~2.5 |
| 에터버그한계 | 액성한계 | 50~60% |
| | 소성지수 | 20~30% |
| 표준관입시험치 | | N : 10이하 |
| 점착력 | | 0.1~0.3 kg/cm ² |

도표2. 지반개량시의 설치간격 및 구분

| 지 역 | 연약층 두께 H(m) | 성토고 (m) (매립+Preloading) | Drain 설치 간격 d(m) | d _e (정방향 1.13d) | 시공완료후 사용구분 |
|-----|-------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------|---------------|
| A-1 | 17 | 2.49 | 2.0 | 2.26 | 도로 |
| A-2 | 6.5 | 2.35 | 2.0 | 2.26 | 도로 |
| A-3 | 11 | 2.64 | 2.0 | 2.26 | 도로 |
| A-4 | 17 | 2.68 | 2.0 | 2.26 | 도로 |
| A-5 | 9.0 | 2.68 | 2.0 | 2.26 | 도로 |

4. 결과 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 직선으로 표현될 수 있는 이원화된 관계를 나타낸다. 이들 상이한 구배를 각각 1차구배와 2차구배로 구분한다. 그림3은 분석에 사용된 현장의 다섯 개 지역 중에서 A-1, A-3, A-4 지역의 데이터로부터 시간과 압밀속도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 각각은 양대수지상에서 1:0.20~1:0.25의 완만한 구배를 보이며 이후에 압밀속도가 급하게 감소하는 2차구배가 나타났다. 이것은 그림 2.에 제시된 Barron의 수평배수압밀식을 이용하여 나타낸 압밀속도와 시간계수 관계그래프의 1차구배인 1:0.25에 거의 일치한다.

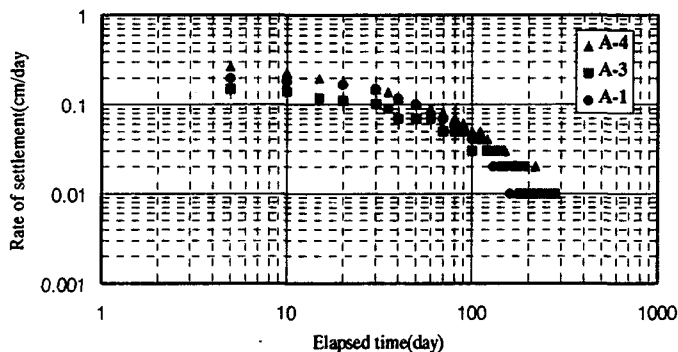


그림3. 시간-압밀속도 관계(A-1, A-3, A-4지역)

또한 각 영향원의 크기별 압밀속도의 변화는 1차구배에 있어서는 거의 동일하지만, 2차구배가 나타나는 시점이 다르게 나타나 단면이 클수록 변곡점이 나타나는 시간이 증가되는 사실과 관련하여 Lun & Parkin(1985)은 두께가 다른(19mm~76mm) 점토시료에 대한 연직압밀시험을 실시하고 그림4.와 같은 압밀속도곡선의 형태를 제시한 바 있다. 그들은 여기서, 2차구배가 발생하는 시간은 시료두께의 제곱(H^2)과 근사적으로 비례한다고 보고하였다. 강민수(1998)는 그림5.에서 보는 바와 같이 소형의 방사형 압밀시험결과를 통하여 각 시험결과와 2차구배부분에서 동일한 압밀속도가 나타나는 시간은 등가영향원, d_e 의 제곱에 비례한다고 제시하였다.

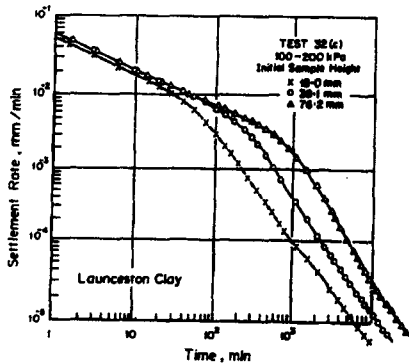


그림4. 시료두께에 따른 압밀속도의 변화 (Lun & Parkin, 1985)

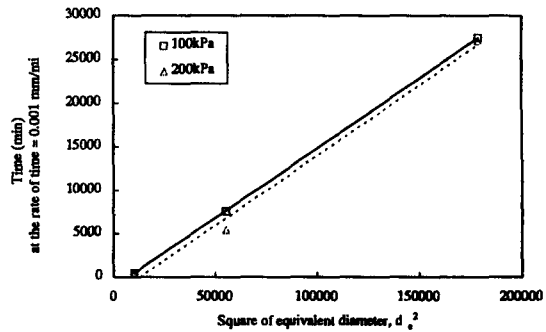


그림5. 압밀속도와 등가유효경의 관계 (강민수, 1998)

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 도표3.과 그림6.에 제시된 바와 같다.

도표3. 각 기법별 수평압밀계수의 비교

| 대상지역 \ 기법 | Velocity Method (cm ² /day) | \sqrt{t} (cm ² /day) | $\log t$ (cm ² /day) | Magnan and Deroy(1980) (cm ² /day) | Bergado et al. (1993)(cm ² /day) |
|-----------|--|-----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| A-1 | 335.40 | 402.48 | 327.514 | 303.34 | 331.89 |
| A-2 | 251.55 | 295.94 | 234.17 | 215.17 | 229.29 |
| A-3 | 223.60 | 251.55 | 211.81 | 185.93 | 196.42 |
| A-4 | 287.50 | 316.41 | 281.69 | 229.58 | 245.70 |
| A-5 | 324.58 | 374.81 | 309.60 | 232.32 | 248.84 |

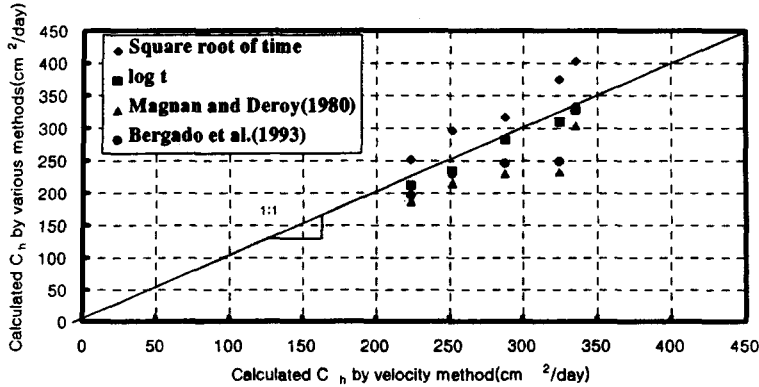


그림6. 압밀속도법(Velocity Method)에 의해 계산된 C_h 값과 기존 산정법과의 비교

그림6.에서 각 기법별 수평압밀계수는 다소 차이가 발생되고 분산되어 있는 경향을 나타내지만, 전체적인 경향을 고려해볼 때 계산된 수평압밀계수는 \sqrt{t} 법이 가장 크고, $\log t$ 법, Bergado et al.(1993) 그리고 Magnan & Deroy(1980)법에 의한 산정법 순서로 나타났다.

평균적으로 볼 때, 압밀속도법으로 계산된 수평압밀계수는 \sqrt{t} 법으로 계산된 값보다는 약간 크게 나타났으며, $\log t$ 법보다는 작게 산정되어 압밀속도법은 두 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 $\log t$ 법과 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. 결론

본 연구에서는 수평압밀계수를 산정하기 위하여 Lun & Parkin(1985)이 제안한 압밀속도법을 수평배수 압밀조건으로 확장하였으며, 현장에서의 적용성을 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 시간-압밀속도의 관계에서 1차구배와 2차구배가 나타나며 약 50% 압밀도에서 변곡점이 발생하였다. 연직배수압밀조건에서 1차구배가 1:0.5인 것과는 달리 경기도 지역의 현장에서는 1:0.20~1:0.25의 구배를 나타내었다. 이것은 그림 2에 제시된 Barron의 수평배수압밀식을 이용하여 나타낸 압밀속도와 시간계수 관계그래프의 1차구배인 1:0.25에 거의 일치한다.

(2) 압밀속도법을 이용하여 산정된 수평압밀계수는 \sqrt{t} 법과 $\log t$ 법의 중간정도 값을 나타내었다. 특히 본 기법은 도해법으로 압밀계수를 산정하기 어려운 침하곡선을 나타내는 사례의 경우 신뢰성 있게 적용될 수 있는 방법이 될 것으로 사료된다.

(3) 약 50%정도의 압밀도에 도달하여 압밀속도의 변곡점이 발생하는 시점에서 현 지반의 압밀계수를 산정할 수 있기 때문에 현장계측관리에 있어서 편리한 기법으로 적용될 수 있을 것이라 사료된다.

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. 천홍래(1999), “放射形 排水 壓密/透水 特性에 關한 研究”, 中央大學校 92回 碩士學位論文.
2. 김지용, 천홍래, 한상재, 김수삼(2000), “Velocity Method를 이용한 수평압밀계수 산정에 관한 연구”, 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.475-480.
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).