

PCPT 소산결과를 이용한 압밀해석

Direct Application of CPTu Result for Consolidation Analysis

강병준¹⁾, Kang Beongjoon, 조성환¹⁾, Cho Sunghwan, 서경범²⁾, Seo Kyungbum, 이준환³⁾, Lee Junhwan

¹⁾ 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

²⁾ 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

³⁾ 연세대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : In this study, a method to predict the consolidation behavior of soft clays and marine clays was developed by combining the equation of Terzaghi's 1-dimensional consolidation and CPTu dissipation. The special attention was given to the consolidation anisotropy due to the difference between 1-D consolidation and radial consolidation of CPTu dissipation. The analysis combining two equations enables direct application of CPTu results. And above all it doesn't require to sample undisturbed specimens and determine consolidation coefficient which is both costly and time consuming and often contains measuring error. It is also advantageous that CPTu test can be carried out any position and any depth. Clays typically have a greater horizontal permeability, k_h , than vertical permeability, k_v , and the coefficient of consolidation in the horizontal direction is generally higher than the vertical direction. Various data of horizontal and vertical consolidation coefficient ratio were collected and analyzed to develop and verify the method.

Keywords : consolidation, PCPT dissipation, soft clay, marine clay

1. 서론

압밀해석은 주로 압밀에 걸리는 시간과 압밀침하량을 산정하기 위해 수행된다. 현재 압밀에 걸리는 시간을 예측하는 데는 표준압밀시험의 결과를 분석하여 압밀계수를 구하고 이를 바탕으로 압밀소요시간을 추정하는 방법이 사용되고 있다. 표준압밀시험은 비교란 시료를 채취하고 시료에 단계하중을 가하여 완전히 압밀시키면서 변형량을 측정·기록해나가는 시험법으로 많은 시간과 비용이 소요되는 시험임에도 불구하고 정확한 압밀계수의 산정은 어려운 현실이다. 또한 압밀계수 산정을 통한 압밀해석 방법은 시료채취 과정에서 발생하는 시료 교란의 영향뿐만 아니라 현장 지반 상태를 대표하는 시료를 얻기는 거의 불가능하다는 점 외에도 압밀시험의 결과를 해석하는 방법들마다 서로 다른 압밀계수가 산정되는 등 근본적인 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 PCPT 소산결과를 이용해 압밀소요시간을 추정하는 방법을 고찰하였으며 이를 위해 PCPT에서 얻어지는 간극수압 소산곡선을 직접 활용하는 방법을 착안하였다. Terzaghi (1943)의 1차원 압밀이론식에 콘관입 소산이론식을 조합함으로써 기존의 실험결과 해석에 의해 산정되는 압밀계수의 항을 1차원 압밀이론의 수직압밀계수와 콘관입 소산이론의 방사방향 압밀계수의 비의 항으로 대체하였다.

2. 1차원 압밀이론과 압밀계수의 결정

2.1 Terzaghi의 1차원 압밀이론

점토층이 모래층과 자갈층의 중간에 위치하는 경우 모래층과 자갈층 모두 점토층보다 단단하며 압밀

또한 점토에 비해 순간적으로 이루어진다고 가정하면 과잉간극수압은 점토층에서만 발생하며, 침하의 대부분은 점토층의 체적변화에 의해 발생하게 된다. 수직변형의 크기에 비해 수평방향 너비가 매우 크므로 모든 수직단면은 같은 과잉간극수압과 상재압이 분포한다. 간극수의 흐름은 수직방향으로만 발생하며, 수평방향으로의 변형은 없다. Terzaghi (1943)는 이러한 단순한 조건하에서 선형으로 가정한 응력-변형률 조건과 연속조건을 조합하고 유효응력을 전응력과 간극수압의 항으로 나타냄으로써 다음과 같은 압밀 방정식을 제안하였다.

$$c_v \frac{\partial^2 u_e}{\partial z^2} = \frac{\partial u_e}{\partial t} - \frac{\partial \sigma_v}{\partial t} \quad (1)$$

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad (2)$$

여기서 압밀계수 c_v 는 수직응력의 증가분에 대한 수직변형률의 비를 나타내는 체적변형계수 m_v 와 투수계수 k , 물의 단위중량 γ_w 로 구성되어 있다. 즉, 흙은 압축성이 클수록 압밀에 소요되는 시간도 길어지고 흙의 투수계수가 클수록 압밀속도는 빠르다. 현재 쓰이고 있는 압밀해석은 바로 이 압밀계수의 산정을 통해 이루어진다.

2.2 압밀계수의 결정

압밀계수의 결정에 이용되는 표준 압밀시험은 Terzaghi의 1차원 압밀이론에서 가정한 조건과 같이 수직방향 배수와 변형만을 허용하면서 포화점성토에 단계 하중을 재하하는 실내시험이다. 표준압밀시험은 보통 일주일 이상의 시험기간이 소요되며 경우에 따라 선행압밀하중과 압밀계수의 산정에 문제점이 있음에도 현재까지 연약점토의 압밀계수 산정에 널리 이용되고 있다. 이러한 표준압밀시험 결과를 통해 포화점성토의 압밀계수를 결정하는 방법은 Terzaghi 1차원 압밀방정식의 풀이 해를 도시한 이론곡선과 실험결과를 비교하는 곡선맞춤법을 이용하고 있다. 대표적인 곡선맞춤법에는 Casagrande (1936)가 제안한 $\log t$ 방법과 Taylor (1948)가 제안한 \sqrt{t} 방법이 있다. 하지만 이 두 방법으로 계산한 c_v 의 값은 꼭 일치하지 않는다. 일반적으로 $\log t$ 방법으로 구한 c_v 의 값이 정규압밀범위내에서는 더 작게 나타나며, 이 방법으로 c_v 를 구하여 압밀속도를 계산하는 것이 실제와 더 부합한다고 알려지고 있다. 하지만 두 방법 모두 시간 축의 변형에 의해 선형화 되는 구간을 바탕으로 압밀 완료시점을 유추하는 간접적인 방법이며, 산정된 압밀계수에는 매우 큰 불확실성 및 오차 가능성이 내포되어 있다.

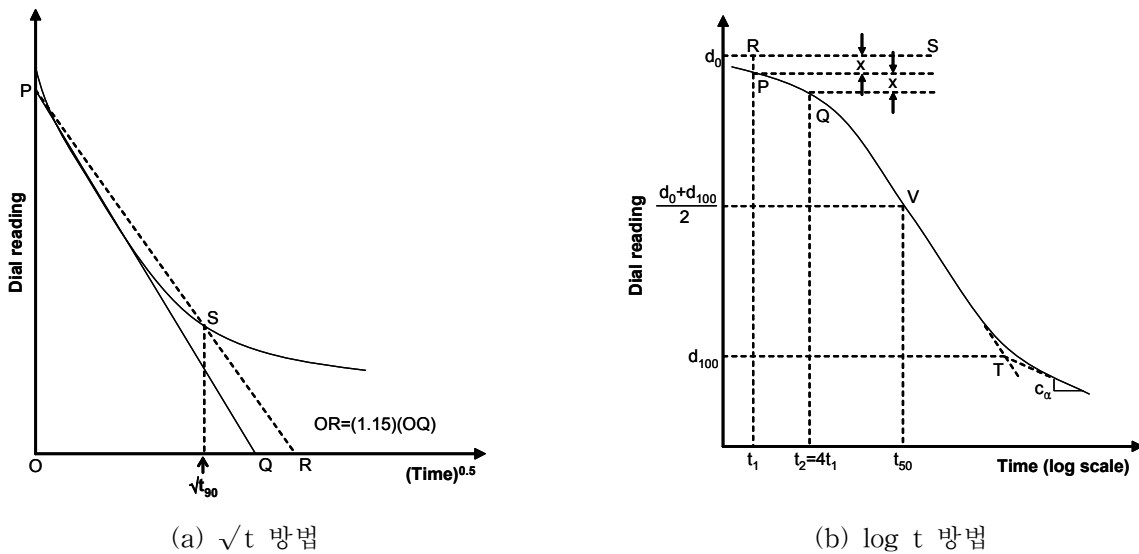


그림 1. 대표적인 압밀계수 결정방법

3. PCPT 결과의 직접활용을 통한 압밀해석

3.1 PCPT 소산시험

PCPT 소산시험은 시료를 채취하는 대신 임의의 깊이까지 콘을 관입한 후 콘의 관입으로 인해 발생한 과잉간극수압이 소산되는 추이를 측정하는 시험으로 현장의 응력 상태와 기타 조건을 정확히 반영할 수 있다. 따라서 PCPT 소산곡선은 해당 지반의 압밀특성에 대하여 보다 정확한 정보를 담고 있으며, 이를 효과적으로 활용하여 압밀해석을 할 경우 기존의 표준압밀시험에 비해 많은 이점이 있다.

다음 그림 2에 PCPT를 이용하여 측정된 간극수압 소산데이터를 나타내었다. 그림 2.(a)의 경우 센서로부터 측정된 간극수압을 그대로 나타낸 것이며 간극수압이 약 180kPa에 수렴하는 것으로 보아 콘의 관입으로 인하여 약 210kPa의 과잉간극수압이 발생한 것을 알 수 있다. 그림 2.(b)는 정규화된 형태로 나타낸 간극수압 데이터이다.

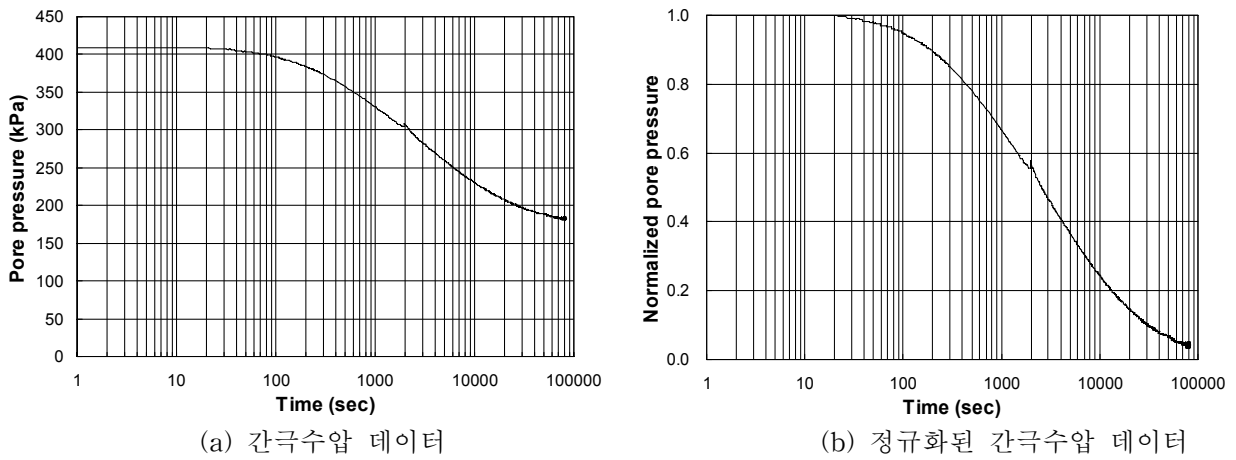


그림 2. PCPT 소산 데이터

3.2 PCPT 소산곡선의 직접활용 방법

앞선 1차 압밀미분방정식에 응력분포와 배수 조건을 고려하여 얻은 해를 무차원의 시간계수 T_v 와 배수거리 H_{dr} 로 나타내면 다음 식 (3)과 같다.

$$t = \frac{T_v \times H_{dr}^2}{c_v} \quad (3)$$

PCPT 소산곡선을 해석하는 방법은 1차원 압밀이론의 식과 유사하나 1차원 압밀과는 달리 콘의 관입으로 인한 압밀현상의 배수거리를 정의하기가 난해한 이유로 배수거리 대신 콘의 반지름 r_0 가 대신 사용된다. 또한 시간계수와 압밀계수의 항은 과잉간극수압의 소산이 주로 수평방향으로 이루어지므로 각각 수평방향 시간계수 T_r 와 수평방향 압밀계수 c_r 로 대체되어 있다.

$$t_{CPTu} = \frac{T_r \times r_0^2}{c_r} \quad (4)$$

위 두 식을 조합하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$t = \left(\frac{T_v}{T_r}\right) \times \left(\frac{H_{dr}}{r_0}\right)^2 \times \left(\frac{c_r}{c_v}\right) \times t_{CPTu} \quad (5)$$

1차원 압밀식은 수평방향 압밀을 배제하고 오직 수직방향의 압밀만을 고려한 반면 콘의 관입으로 인한 과잉간극수압의 소산 경향은 콘의 위치별로 다르며 소산의 방향 또한 다르다. 식 (5)의 시간계수의 항 (T_v/T_r)은 이러한 차이를 반영한다. 또 앞에서 언급하였듯이 콘의 관입으로 인한 배수거리는 콘의 반경 r_0 로 대체되어있다. 따라서 콘의 반경과 배수거리가 정확히 비례하지 않을 경우 배수거리의 항 $(H_{dr}/r_0)^2$ 에는 보정이 필요하게 된다. 그 다음으로 (c_r/c_v) 항은 지반의 압밀특성의 이방성을 나타낸다. 이는 압밀계수를 산정하여 압밀해석을 하는 기존의 방법과 차별되는 요소이다. 마지막으로 PCPT 소산시간을 앞의 세 항에 곱함으로써 CPTu 소산시험 결과로부터 현장의 압밀 거동을 유추하게 된다.

4. 국내 연약지반 및 해안지역의 압밀계수의 이방성

1차원 압밀이론의 식과 PCPT 소산이론의 식을 조합하는데 있어 수평방향과 수직방향의 압밀계수의 비에 대한 사용자의 판단이 요구된다. 기존 연구에 의하면 PCTU 소산곡선으로부터 구한 압밀계수 c_r 을 c_v 로의 변환하기 위해 흙의 압축성을 등방으로 가정하고 c_r 에 수평방향/수직방향 투수계수의 비 k_h/k_v 를 곱하는 방법을 제안하고 있다 (Baligh and Levadoux 1986). 표 1에 흙의 성질과 투수계수의 비에 대한 경험적 상관관계를 나타내었다.

표 1. 흙의 성질과 k_h/k_v 의 상관관계 (Baligh and Levadoux 1986)

흙의 성질	k_h/k_v
층을 이룬 흔적이 없음	1.2±0.2
약간의 층 (예. 실트층이 틈틈이 낀 점토 퇴적층)	2~5
미(美) 북동부의 호상 점토	10±5

관상미립형태의 점토입자는 퇴적과정 중에 불규칙한 배열의 면모구조로 퇴적되고 오랜 기간의 지질학적인 시간을 거치는 동안 압밀이 진행되면서 입자의 길이 방향이 수평에 가까운 배열을 갖는 구조적인 이방성을 나타내게 된다. 이로 인해 퇴적 점토의 투수계수 및 압밀계수는 일반적으로 수평방향이 연직 방향보다 큰 값을 가지는 경우가 많다. 국내 연약지반 및 해안지역에서의 현장 및 실내시험 자료를 수집하여 분석하였으며, 해당 지역을 다음 그림 3에 표시하였다. PCPT 소산시험에서 얻은 c_r 값은 Baligh and Levadoux (1986)의 방법을 이용하였고 다음 그림 4에 나타내었다.



그림 4. 자료수집 지역

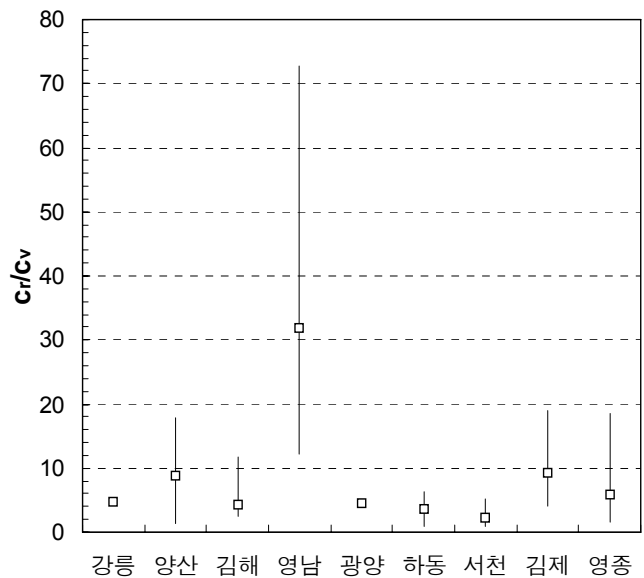


그림 5. 각 지역별 압밀계수비

표 2. 각 지역군의 압밀계수비

지역	서해권	서남권	동남권	동해권
c_r/c_v	5.8	13.3	6.7	4.7

국내 연약지반 및 해안지역의 수평/수직방향 압밀계수의 비는 대부분 2 이상의 값을 보이며 이는 일반적인 퇴적점토에서 나타나는 특성과 같다. 또 일부지역을 제외하면 압밀계수비는 10 미만의 값을 갖는 것을 알 수 있다. 표 2는 조사된 압밀계수비를 4개의 지역군으로 분류하여 평균값을 표시한 것이다. 하지만 대상지역의 압밀계수비를 기존 자료의 수집을 통해 어느 한 값으로 결정하기에는 다소 큰 편차가 존재하며 이와 별개로 물리적 물성치로부터 압밀계수를 유추할 수 있는 방법에 대한 연구가 추가로 이루어져야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 압밀계수 산정 과정을 거치지 않고 CPTu 시험에서 얻어지는 간극수압 소산곡선을 직접 활용하여 압밀소요시간을 추정하는 방법을 착안하였다. 이를 위해 Terzaghi의 1차원 압밀이론식에 CPTu 소산이론식을 조합함으로써 기존의 실내실험 결과의 해석에 의해 산정되는 압밀계수의 항을 1차원 압밀이론의 수직압밀계수와 CPTu 소산이론의 수평방향 압밀계수의 비의 항으로 대체하였고, 국내 연약지반 및 해안지역에서의 시험 자료를 수집·분석하여 수평/수직방향 압밀계수의 비는 대부분 2 이상 10 미만의 값을 갖는 것을 확인하였다.

참고문헌

1. Casagrande, A. (1938), "Note on soil mechanics", Harvard University (unpublished), pp.129.
2. Baligh, M.M. & Levadoux, J.N. (1986), "Consolidation after undrained piezocone penetration", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 112(GT7), pp. 727~745
3. Taylor, D.W. (1948), "Fundamentals of soil mechanics", John Wiley and Sons, New York, pp.700.
4. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, pp.100~120.