

부분배수가 발생하는 지반의 수평압밀계수 결정을 위한 자가굴착식 프레스미터 유지시험의 최적화 해석법

An Optimization Method for Self-Boring Pressuremeter Holding Test to Determine a Horizontal Coefficient of Consolidation under Partial Drained Soil Condition

김영상¹⁾, Young-Sang Kim

¹⁾ 국립 여수대학교 해양공학전공 조교수, Assistant Professor, Dept. of Ocean Engineering, Yosu National University

개요(SYNOPSIS) : This paper describes a systematic way of identifying the horizontal coefficient of consolidation for clayey soil under undrained condition and silty soil under partial drained condition by applying an optimization technique to the early part of dissipation data measured from the self-boring pressuremeter strain holding test. An analytical solution developed by Randolph & Wroth (1979) was implemented in normalized form to express the build-up and dissipation of excess pore pressures around a pressuremeter as a function of the rigidity index. Horizontal coefficient of consolidation was determined by minimizing the differences between theoretical and measured excess pore pressure curves using optimization technique.

It was found that the proposed optimization technique can evaluate in-situ horizontal coefficient of consolidation rationally, which is similar with that obtained from the piezocone dissipation test. Furthermore, proposed method can evaluate appropriate coefficient of consolidation for soil under partially drained condition.

주요어(Key words) : analytical solution, coefficient of consolidation, self-boring pressuremeter, strain holding test, optimization

1. 서 론

자가굴착식 프레스미터 시험(self-boring pressuremeter test, 이하 SBPT)은 지반의 교란을 최소화하면서 지중에 관입한 프레스미터 멤브레인을 질소가스를 이용하여 일정한 변형률 속도로 가압하여 팽창시키고 이때의 압력과 공동반경을 측정하는 시험으로, 특정 프레스미터에는 멤브레인 중간에 간극수압을 측정할 수 있는 간극수압 셀이 설치되어 시간에 따른 간극수압의 변화를 관측함으로써 현장지반의 수평압밀계수를 추정할 수 있다. 현장지반의 수평압밀계수를 추정할 수 있는 원위치 관입시험으로는 프레스미터 이외에도 피에조콘 시험, 딜라토미터시험 등이 있으나 자가굴착식 프레스미터는 이들의 방법에 비해 최소한의 교란과 함께 명확한 경계조건을 가져 이론적인 해석기법이 효과적으로 적용될 수 있는 장점이 있다 (장인성 등, 2002).

SBPT로부터 수평압밀계수를 추정하는 방법으로는 변형률 유지시험(strain holding test)과 응력 유지시험(stress holding test)의 두 가지로 나누어 질 수 있다. 전자의 경우는 프레스미터의 멤브레인을 특정 변형률까지 재하한 후 일정하게 유지시킨 상태에서 시간에 따른 과잉간극수압의 소산을 관측하여 수평압밀계수를 추정하며 후자의 경우는 초기 멤브레인 팽창이후에 일정 변형률에 도달하였을 때 응력을 일정하게 유지시키

면서 과잉간극수압의 소산을 관측하는 시험법이다.

Clarke 등(1979)은 Randolph & Wroth (1979)의 해석적 해를 이용하여 완전 비배수 조건하의 프레스메터 유지시험 결과로부터 수평압밀계수를 추정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$c_h = \frac{T_{50} \cdot r_o^2}{t_{50}} \quad (1)$$

여기서, r_o 는 프레스메터 유지시험 시작 시 멤브레인의 공동반경, t_{50} 은 초기에 발생된 과잉간극수압의 50%가 소산될 때까지 소요시간, T_{50} 은 이론적으로 50% 소산이 유발되는 무차원 시간으로 Clarke 등(1979)은 실험에서 직접적으로 측정되는 최대 과잉간극수압 Δu_{max} 과 점성토지반의 비배수전단강도 s_u 의 비로부터 결정할 수 있도록 그림 1을 제안하였다.

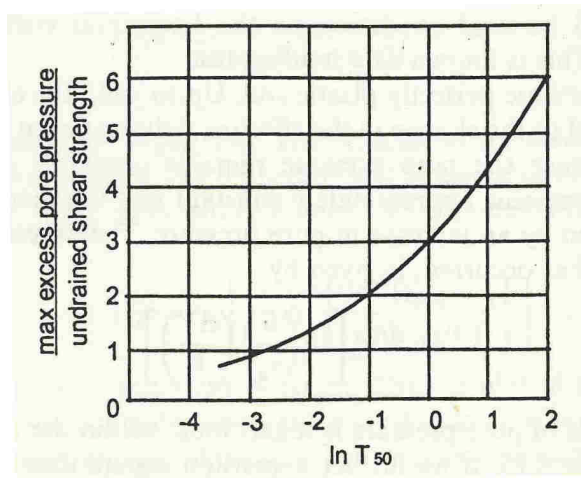


그림 1. 50% 소산도에 도달하는 이론적인 시간계수 (Clarke 등, 1979)

본 논문에서는 Randolph & Wroth (1979)의 해석적 해와 최적화기법을 통합하여 간극수압의 소산경향을 고려할 수 있는 소산시험 해석기법에 대하여 기술하였고 Clarke 등(1979), 장인성 등(2002)이 지반의 완전 비배수 조건을 가정하고 특정 소산도 50%에서 수평압밀계수를 산정하도록 제한한 방법들과 최적화기법을 이용하여 결정된 수평압밀계수를 비교하고 원위치 피에조콘 소산시험 및 일차원 압밀시험결과와도 비교하였다. 이를 통하여 완전 비배수 조건 뿐 아니라 부분배수가 발생하는 지반에서 수행된 프레스메터 유지시험 결과 해석에 최적화 기법을 적용할 경우, 배수조건 변화를 고려할 수 없는 기존 이론의 단점을 극복하고 합리적으로 현장 수평압밀계수 산정이 가능함을 보였다.

2. 초기 과잉간극수압 분포에 대한 해석적 해와 최적화 기법

Randolph & Wroth (1979)는 그림 2와 같이 실린더형 관입체의 관입으로 주변지반에 발생하는 과잉간극수압(u_e)과 반경방향 변형(outward radial movement, ξ)을 예측하는 해석적 해를 제안하였다. 이들은 무한영역을 대상으로 수행되던 기존의 해석과 달리 과잉간극수압의 소산과정 중 과잉간극수압이 도달할 때까지는 그 이상에 과잉간극수압이 존재하지 않는 특정 반경(r^*)을 도입하였고 그 크기를 소성영역(R)의 5~10 배로 제안하였다. 소성영역 내에 로그분포로 유발되는 초기 과잉간극수압의 분포 식 (2)에 대하여 시간에 따른 과잉간극수압 소산의 해석적 해는 식 (3)과 같이 베셀함수(Bessel function)로 표현되며 식 (4)에 가정된 바와 같이 특정반경 r^* 이상에는 과잉간극수압이 존재하지 않는다. 반경방향 변형 ξ 에 대한 해는 Randolph & Wroth (1979)에 설명되어 있다.

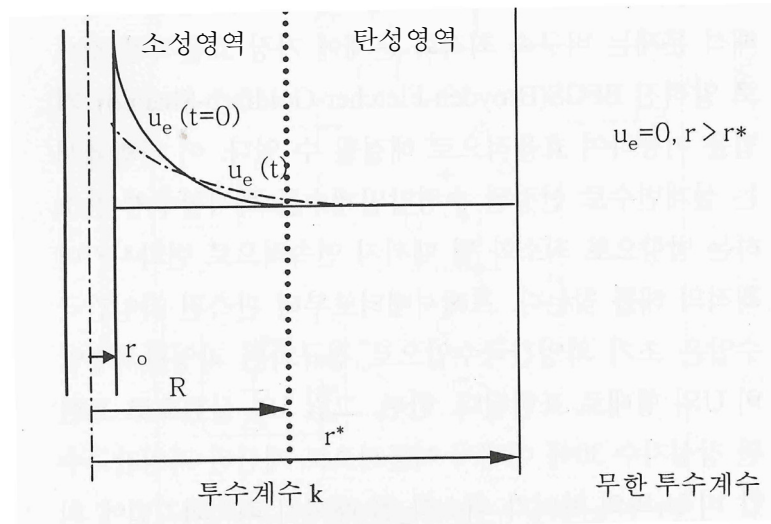


그림 2. 실린더형 관입체의 팽창에 의해 주변 지반에 발생된 초기 간극수압(Randolph & Wroth, 1979)

$$u_{ei} = 2s_u \ln(R/r), \quad t = 0 \quad (2)$$

$$u_e = \sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n^2 \cdot t} C_o(\lambda_n r), \quad r_o \leq r \leq r^* \quad (3)$$

$$u_e = 0, \quad r > r^* \quad (4)$$

여기서, $B_n = \frac{4s_u}{\lambda_n^2} \frac{[C_o(\lambda_n r_o) - C_o(\lambda_n R)]}{[r^{*2} C_1^2(\lambda_n r^*) - r_o^2 C_o^2(\lambda_n R)]}$; $C_i(\lambda_n r) = J_i(\lambda_n r) + \mu_n Y_i(\lambda_n r)$; J_i 와 $Y_i = 1, 2$ 종 베셀함수(Bessel

functions of first and second kind); $\alpha_n = \lambda_n r_o$; $r^* = 5 \sim 10 R$; $R/r_o = \sqrt{G/s_u}$; r_o = 프레셔미터 반경; s_u = 비배수전단강도

식 (3)에 포함된 시간 t 를 식(5)와 같이 정의되는 정규화 된 무차원 시간 T 로 대체하고 시간계수 $T=0$ 에서의 초기 과잉간극수압(u_{ei})으로 과잉간극수압(u_e)을 정규화 함으로써 이론시간계수와 정규화 된 과잉간극수압 $T-U_T$ 관계가 간단히 유도될 수 있다.

$$T = \frac{c \cdot t}{r_o^2} \quad (5)$$

$$U_T = \frac{u_e}{u_{ei}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} B_n e^{-\alpha_n^2 T} C_o(\lambda_n r)}{\sum_{n=1}^{\infty} B_n C_o(\lambda_n r)} \quad (6)$$

여기서, $C_o(\lambda_n r) = J_o(\lambda_n r) + \mu_n Y_o(\lambda_n r)$, $n=1, 2, 3, \dots, 50$.

이때, 식(6)에 포함된 변수 λ_n 와 μ_n 는 특정반경 $r=r^*$ 에서의 경계조건으로부터 결정되며, 특정반경 r^* 의 크기는 강성지수에 따른 소성영역의 5 ~ 10배이므로 정규화 된 이론소산곡선 식(6)은 지반의 강성지수 $I_R(=G/s_u)$ 에 의존된다. 대표적인 강성지수들에 대한 이론 해는 그림 3과 같으며 본 연구에서는 박용원 등 (2003)의 연구를 바탕으로 국내 서남해안 점성토지반의 대표적 강성지수인 30을 바탕으로 한 이론곡선을 수평압밀계수의 산정에 적용하였다.

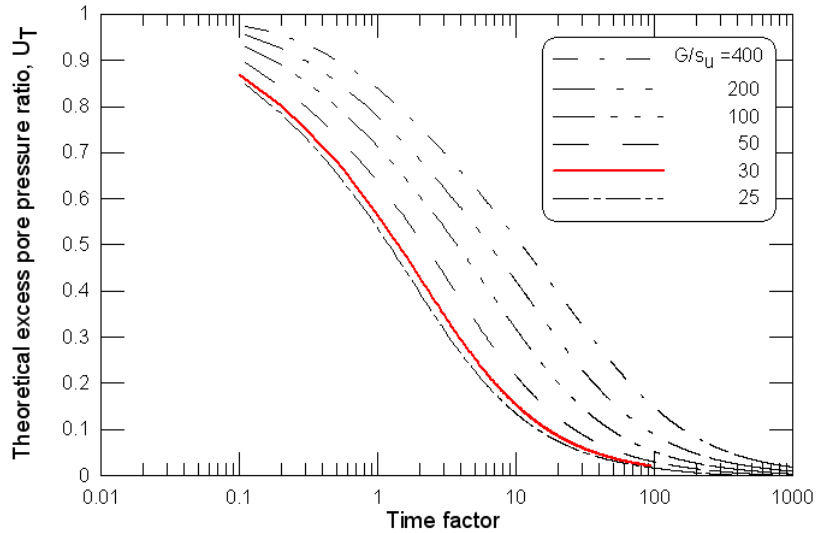


그림 3. 강성지수 I_R 에 따른 이론적인 과잉간극수압 소산곡선

그림 3의 실선으로 표현된 $I_R=30$ 인 경우의 이론 소산곡선과 현장에서 관측된 실제 소산곡선의 차이를 최소화하는 기법으로 수평압밀계수를 역해석하는 문제는 다음 식(7)과 같이 정의되는 목적함수를 최소화하는 문제로 표현될 수 있다.

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^{N_T} (U_T^n - U^n)^2 \quad (7)$$

여기서, $f(\mathbf{x})$: 목적함수, $\mathbf{x} = c_h$: 설계변수, N_T : 과잉간극수압 비를 비교하는 총 시간단계의 수, U^n : 정규화된 관측 과잉간극수압, U_T^n : 정규화된 이론 과잉간극수압.

식(7)과 같이 정식화 된 수평압밀계수의 최적화 문제는 비구속 최적화 문제에 가장 효율적인 것으로 알려진 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 기법을 이용하여 목적함수 $f(\mathbf{x})$ 가 감소하는 방향으로 최소화 될 때까지 설계변수를 연속적으로 변화시키며 최적의 수평압밀계수를 찾는 것으로 해결된다.

3. 적용사례

본 연구에서 사용된 방법을 검증하기 위하여 장인성 등(2002)에 보고된 국내 양산 및 김제지역에서 수행된 자가굴착식 프레셔미터 소산시험 결과 해석을 수행하였다. 김제현장의 경우, 지표로부터 13m 깊이까지는 약한 과압밀상태($OCR=2\sim4$)이며 비배수전단강도가 80~120 kPa로 비교적 균질하다. 양산현장의 경우, 지표로부터 10m까지는 실트질 점토와 모래로 이루어져 있으며 그 하부에는 비배수전단강도가 100kPa 정도인 정규압밀점토($OCR=1.5$)로 이루어져 있다. 각 현장의 보다 상세한 설명은 장인성 등(2002)을 참고하라. 그림 4는 각 현장에서 수행된 자가굴착식 프레셔미터 소산시험 결과이다.

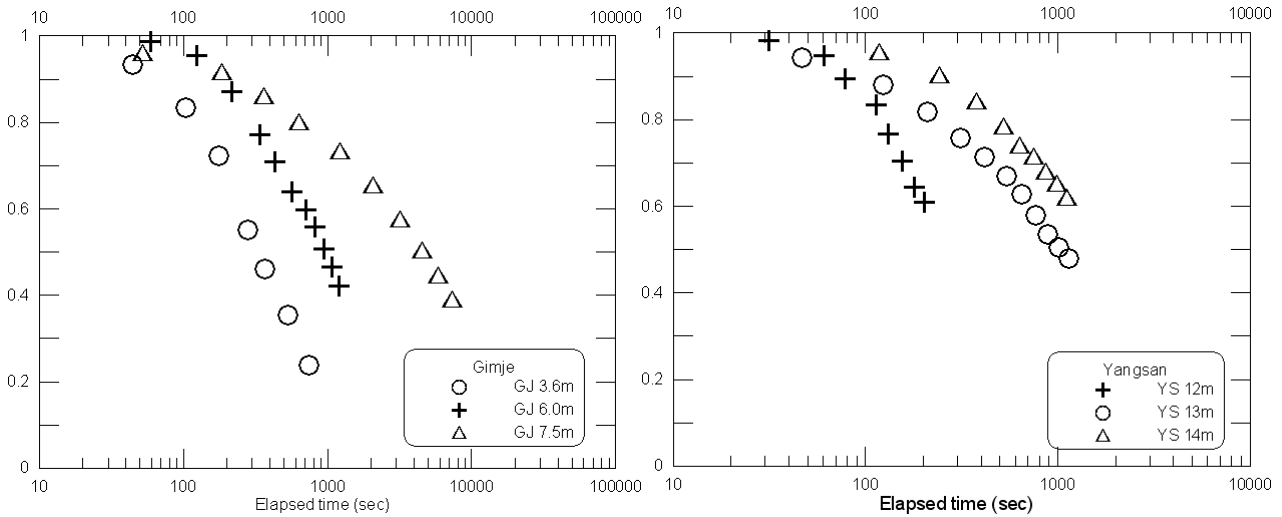


그림 4. 김제 및 양산현장의 프레스메터 소산시험 결과 (장인성 등, 2002)

표 1에는 최적화 방법에 의하여 계산된 수평압밀계수와 함께 기존의 연구 - Clarke 등, 장인성 등 - 방법에 의한 수평압밀계수가 비교되어 있다. 또한 장인성(2001)에 의해 수행된 Rowecell 및 피에조콘 소산시험에 의한 수평압밀계수와 표준압밀시험결과에 의한 연직방향 압밀계수가 함께 비교되어 있다.

표 1. 각 방법 및 실험법에 의한 압밀계수($\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)의 비교

| 현장 | 깊이(m) | 프레스메터 변형률 유지시험 | | | 피에조콘 | 로우셀 | 표준압밀시험 |
|----|-------|----------------|-------|------|-------|------|--------|
| | | Clarke 등 | 장인성 등 | 본 연구 | | | |
| 김제 | 3.6 | 3.2 | 12.5 | 81.8 | 15.13 | 2.7 | 3.9 |
| | 6 | 0.9 | 3.8 | 24.3 | 20.94 | 2.6 | 2 |
| | 7.5 | 3.7 | 7.6 | 6.4 | 4.03 | 3.7 | - |
| 양산 | 12 | 14.6 | 38.8 | 49.2 | 55.5 | 30.7 | 8.6 |
| | 13 | 2.3 | 6.8 | 24.1 | 28.9 | 9.5 | 4.7 |
| | 14 | 1.1 | 3.6 | 10.9 | 14.7 | 16.3 | 4 |

* 표준압밀시험 결과는 연직방향압밀계수 $c_v \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 임

장인성 등(2002)은 김제현장의 경우 로우셀(Rowecell)에 의한 수평압밀계수가 매우 작게 나타났으며 이를 실험시료의 교란효과, 현장지반의 균열, 현장 점성토에 존재하는 실트의 영향으로 지적하였다. 따라서 프레스메터 유지시험에 의한 수평압밀계수 비교대상으로는 피에조콘 소산시험으로 얻어진 수평압밀계수가 가장 현장 수평압밀계수에 가까울 것으로 판단된다. 본 연구에서 얻어진 수평압밀계수는 김제 3.6m를 제외하고는 Clarke 등 (1979), 장인성 등(2002)의 제안에 의한 이론해에 의한 방법에 비해 피에조콘 소산시험 결과와 매우 유사하게 나타났다. 특히, 양산현장의 경우 장인성 등(2002)은 지반의 투수성이 커서 자료들의 분산이 크고 자신들의 해석결과에 일관된 경향성을 찾을 수 없다고 기술한 점을 고려한다면 본 연구에서 사용된 최적화기법을 이용한 수평압밀계수 결정법은 매우 일관성 있게 두 현장에서 피에조콘 결과와 유사한 수평압밀계수를 추정하여 매우 신뢰성 있는 것으로 사료된다.

김제 3.6m 깊이에서 결정된 수평압밀계수의 경우, 김영상(2004)에 의하면 본 연구에서 사용된 방법이 다른 방법들에 비해 매우 큰 값을 주는 이유로 원지반의 부분배수를 지적하였다. 프레스메터의 프로브(probe)의 팽창으로 인한 초기 과잉간극수압 유발 시 부분적으로 배수가 발생할 경우 Randolph & Wroth의 해석적 이론해를 바탕으로 한 Clarke 등(1979)의 제안과 비록 유한요소법을 바탕으로 했으나 지반의 투수계수 $k \leq 10^{-10} \text{m/sec}$ 인 경우 완전 비배수조건과 일치하는 장인성 등(2002)의 제안에서는 이론적으로 가정된 간극수압의 분포와 실제 부분배수로 인해 최초로 발생된 간극수압의 분포가 현저히 달라 특정 소산도에서

추정된 수평압밀계수가 실제와 소산경향(dissipation trend)을 반영하지 못한 채 매우 다르게 추정될 수 있다. 그러나 본 연구에서 적용된 최적화기법에서는 초기 간극수압의 분포는 완전 비배수 조건을 가정한 Randolph & Wroth의 해석적 해를 사용할지라도 기존의 방법과 같이 특정 소산도에서 비교를 통해 수평압밀계수를 산정하지 않고 일정 소산도 범위(0~50%)에서 관측 소산곡선의 경향과 이론 소산곡선이 가장 일치하도록 소산경향(dissipation trend)을 반영하므로 초기 간극수압의 차이로 인해 발생한 특정 소산도에서 수평압밀계수를 결정할 때 발생하는 오류를 극복할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 자가굴착식 프레스미터에서 수행된 변형률 유지시험을 보다 신뢰성 있게 해석할 수 있는 최적화 기법을 적용한 수평압밀계수 추정법에 대하여 기술하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 논문에서 사용된 최적화기법을 적용한 수평압밀계수 결정법은 배수조건에 큰 영향을 받지 않고 실제 현장에서 관측된 변형률 유지시험 결과로부터 피에조콘 소산시험으로 결정된 수평압밀계수와 유사한 수평압밀계수를 일관성 있게 추정하여 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

2) 특히 프레스미터 변형률 유지시험 시 부분배수가 유발될 경우, 완전배수 조건을 가정하고 있는 기존의 이론해를 이용하여 특정 소산도에서만 일치하는 압밀계수를 추정하면 실제와 동떨어진 초기 과잉간극수압 분포를 갖는 기반조건으로 인해 잘못된 압밀계수를 추정할 가능성이 높으나 최적화기법을 이용한 압밀계수 추정법은 일정 소산도 범위에서 간극수압의 소산경향(dissipation trend)을 가장 잘 표현하는 압밀계수를 추정하므로 초기 과잉간극수압 분포 차이에 의한 오류를 최소화하고 보다 합리적으로 수평압밀계수 추정이 가능하다.

참고 문헌

1. 김영상(2004), "간극수압 소산경향을 고려한 자가굴착식 프레스미터로부터의 수평압밀계수 결정법", **한국지반공학회논문집**, 제20권 3호, pp. 151~159.
2. 박용원, 구남실, 김영상(2003), "피에조콘 시험을 위한 국내 연약지반의 대표적 강성지수 도출과 수평압밀계수 산정에의 적용", **대한토목학회논문집**, 제23권 6C호, pp. 389~398.
3. 장인성(2001), CPTu와 SBPT로부터 구한 점성토의 강도 및 압밀특성, **서울대학교 대학원 공학박사 학위논문**, p128. (in English)
4. 장인성, 정충기, 김명모, 조성민(2002), "자가굴착식 프레스미터를 이용한 점성토의 압밀특성 산정", **한국지반공학회논문집**, 18권 제2호, 87~96.
5. Clarke, B. G., Carter, J. P. and Wroth, C. P.(1979), "In situ determination of the consolidation characteristics of saturated clay", *Proceedings of Seventh European Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, pp. 207~213.
6. Randolph, M. F., Wroth, C. P.(1979), "An Analytical Solution for the Consolidation around a Driven Pile", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 3, 217~229.