

피에조 콘 소산시험을 이용한 압밀계수 추정 시 이론해의 선택 및 현장지반의 압밀도 평가

이승래¹⁾, Seung-Rae Lee, 김영상²⁾, Youns-Sang Kim

Abstract

Several researchers have developed a number of theoretical time factors to determine the coefficient of consolidation by piezocone excess pore water dissipation test in soft clay deposits. However, depending on the assumptions and analytical techniques, the estimated coefficient of consolidation could be in a considerably wide range even for a specific degree of consolidation.

These solutions are obtained from an initial excess porewater pressure distribution which can be determined from either the cavity expansion theory or the strain path method. The dissipation of the initial excess porewater pressure has been usually simulated by means of a linear-uncoupled consolidation analysis and then the dissipation curve is normalized by the initial excess porewater pressure for easy use.

However, since there is no guidelines or rules on which method gives the best solution for obtaining the coefficient of consolidation from the dissipation curve, the final selection was only based on engineer's experience and judgements. Thus, such an arbitrary selection might be inappropriate for a specific site to characterize the consolidation behavior.

In this paper, we reviewed various theoretical time factors and, based on this consideration, we mentioned needs for researches in selecting a specific solution that is compatible for Korean clays. Also we listed some source of errors that can be encountered in the procedure of dissipation analysis.

요 지

피에조 콘의 소산시험을 이용한 연약지반의 압밀계수 추정은 그간 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔으나 각 연구자들의 가정 사항과 해석 방법에 따라 특정한 압밀도에 대해서도 매우 넓은 범위의 이론적인 해들이 제시되어 왔다. 이러한 해들은 주로 공동확장이론(cavity expansion theory)이나 변형을 경로법(strain path method)을 이용하여 얻어진 초기 과잉간극수압의 소산과정을 모사함으로써 얻어졌다. 소산과정을 모사하기 위해서는 주로 선형-비혼합 압밀이론이 사용되었으며 이로부터 얻어진 소산곡선은 편리한 사용을 위해 초기 과잉 간극수압으로 표준화한 뒤 소산도-시간계수의 형태로 이론적인 해가 제시되어 있다.

그러나 이러한 해들은 특별한 기준이 없이 그동안 해석자의 공학적 판단을 근거로하여 임의적으로 선택되어 사용되었으며 그 결과 동일한 소산시험결과로부터 얻어진 압밀계수라 하더라도 그 대상지반에 따라서는 매우 그릇된 압밀거동 특성을 나타내었다.

따라서 본 논문에서는 소산시험으로부터 압밀계수를 얻기위해 그동안 사용되었던 이론해들을 고찰하였고 이를 바탕으로 국내 연약지반의 압밀계수 추정에 적합한 해를 얻기위한 연구의 필요성을 언급하였

1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

다. 또한 기존의 해석방법을 이용하여 현장지반의 압밀계수를 얻기위한 소산시험 해석과정에서 발생할 수 있는 여러 가지 오류의 원인을 살펴보았다. 그리고 현장지반의 압밀도를 평가하기 위해 현장 소산시험 자료를 이용하는 경우의 문제점과 그 문제점을 개선할 수 있는 방안에 대하여 간략히 기술하였다.

1. 서론

피에조 콘을 이용한 현장 지반의 압밀특성 추정에 관한 연구는 Schmertmann과 Janbu & Senneset가 처음으로 기존의 콘에 간극수압을 관측할 수 있는 장치를 부착하여 간극수압을 관측한 후로부터 시작되었다. 이후로 과잉간극수압의 소산시험을 이용하여 정규 압밀된 현장 지반의 압밀특성 및 투수특성을 규명하기 위한 여러 가지 방법들이 제안되어 왔다. 이러한 방법들은 대부분 피에조 콘 실험으로부터 얻어진 규준화된 현장의 과잉간극수압 소산곡선으로부터 일정한 압밀도에 도달하는 시간을 결정하고 이론적으로 제안된 시간계수로부터 압밀계수를 구하는 방법들이 주류를 이루고 있다.

이러한 이론 해들에서는 먼저 공동확장이론[Torstensson, Gupta]이나 변형을 경로기법[Baligh & Levadoux ; Teh & Houlsby]을 이용하여 콘 관입으로 인하여 콘 주변에 유발되는 초기 과잉간극수압의 분포를 결정한다. 공동확장이론은 비배수 상태에서 구형 공동과 실린더형 공동 확장에 의한 지반내의 간극수압 예측 방법을 이용하여 초기 과잉간극수압의 형태를 제시한 반면 변형을 경로기법은 콘 관입 현상을 유사 정적(quasi-static) 현상으로 고려하여 콘 주변에 유발되는 속도장으로부터 변형률장을 계산하고 구해진 변형률장을 적분함으로써 초기 과잉간극수압의 분포를 예측하는 기법이다.

다음 단계로는 이와 같은 방법들에 의해 얻어진 콘 주변의 초기 과잉간극수압을 초기조건으로 하여 일차원 또는 축대칭 압밀 해석을 실시함으로써 그 결과를 바탕으로 이론 해를 제시하는 것이다. 따라서, 기존에 제안되어 사용되고 있는 이론해들은 이러한 해석 단계마다 도입된 가정사항이나 해석방법에 따라서 얻어지는 해석결과가 달라질 수 있다.

2. 기존의 이론 해들에 대한 비교분석

현재까지 피에조 콘 소산시험으로부터 정규압밀 점토의 압밀계수를 예측하는 방법들 중 가장 많이 사용되고 있는 이론 해들의 가정 사항들을 살펴보면 표 1과 같으며 강성지수가 100인 경우로 가정하여 제안된 방법들에 의해 얻어지는 시간계수를 비교하여 나타내면 그림1과 같다. 그림 1에 의하면 특정한 강성지수에 대해서도 제안된 방법들이 가정한 사항들과 간극수압의 예측 위치, 해석 방법 등에 의해 얻어지는 이론적인 시간계수들 값이 약 10배까지 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 사용된 이론 해에 따라 얻어지는 압밀계수 값의 차이가 큰 것은 당연한 결과라 할 수 있으며 따라서 이러한 해들 중에서 가장 적절한 이론적인 해를 선택하는 것은 매우 어려운 문제이다.

또한, 이러한 해 중에서 공동확장이론을 적용하기 위해서는 콘 주변에 발생하는 공동의 형태를 명확히 정의하기 어려움에도 불구하고 공동의 형태(구형 또는 실린더형)를 알아야 하며, 지반의 강성지수(rigidity index) 및 파괴 시 간극수압계수(A_f)를 알아야 하는 단점이 있다. 지반의 강성지수와 간극수압계수는 쉽게 구할 수 있는 변수가 아니므로 이에 대한 지속적인 연구가 필요하며 이에 대해서는 후에 언급하였다. 그러나 그간의 제한적인 경험을 바탕으로 볼때 만약 지반의 강성지수와 간극수압계수를 알 수 있다면 우리나라와 같이 주로 콘 선단부 뒤에서 간극수압을 관측하는 경우에는 실린더형 공동확장이론에 대한 해를 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

표 1. 시간계수 T를 결정하는 이론적인 해와 가정 사항들

연구자	사용한 모델 및 가정사항
Torstensson	구형 또는 실린더형 공동확장이론 등방, 탄성-완전소성체 선형 비혼합 일차원 압밀이론(유한차분법)
Levadoux & Baligh	변형을 경로법(Strain Path Method) 선형 등방재료 비혼합 이차원 압밀이론(유한요소법)
Gupta & Davidson	현장 간극수압으로 보정한 구형 공동확장이론 등방 또는 비등방재료 선형 비혼합 축대칭 압밀이론(유한차분법)
Houlsby & Teh	변형을 경로법, 대변형 유한요소법 비혼합 일차원 압밀이론 강성지수를 고려한 시간계수 제안 $T^* = \frac{c_h t}{R^2 \sqrt{I_R}}$

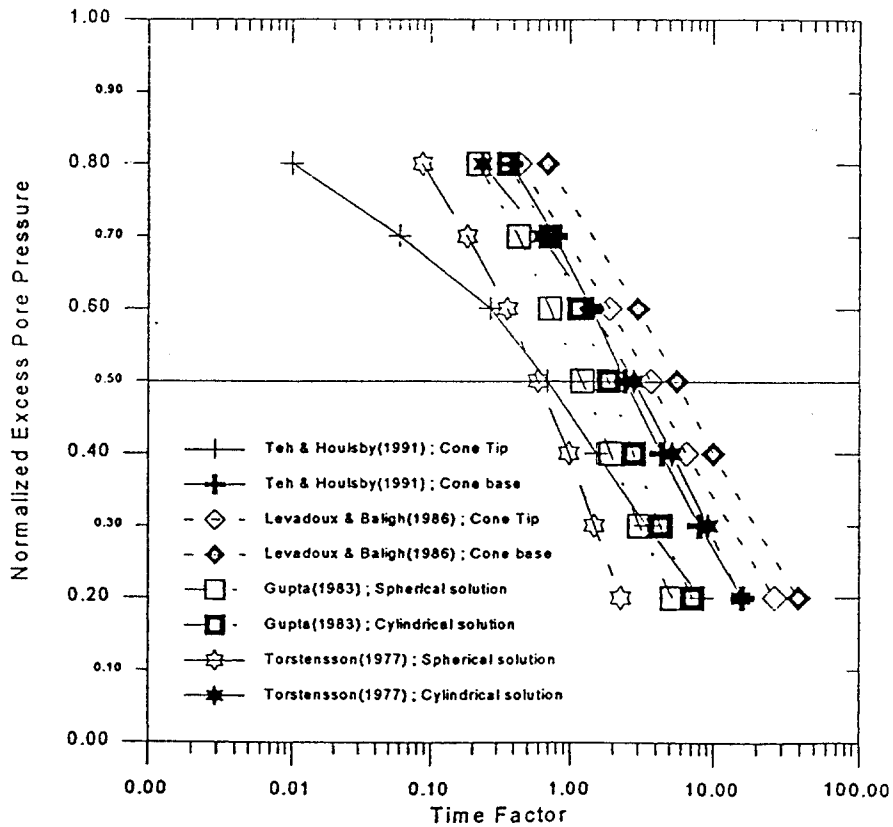


그림1. 기존의 이론해에 대한 비교분석($I_R = 100$)

한편, 변형을 경로기법은 보다 현실적인 초기 간극수압 분포 형태를 예측할 수는 있지만 해석이 복잡하고 개발된 해가 사용된 지반의 모델에 의존적이라는 단점이 있다. 그 중 Baligh & Levadoux에 의하여 제안된 이론 해는 Boston Blue Clay ($I_R=500$)의 실험 결과를 바탕으로 얻어진 결과이므로 다른 해들에 비하여 비교적 큰 이론해를 제안하고 있으며 그 결과 상대적으로 큰 압밀계수를 추정하게 된다. Teh & Houlsby에 의하여 제안된 이론해들은 지반의 강성지수에 대한 효과(결과적으로 공동의 크기)를 고려하기 위하여 강성지수를 포함하는 새로운 형태의 이론 해를 아래와 같이 제시하였으나 이 해 역시 강성지수를 알아야 한다는 문제점을 안고 있다.

$$T^* = \frac{c_h \times t}{r^2 \sqrt{I_R}} \quad (1)$$

뿐만아니라 이렇게 구분되는 두 종류의 모든 이론 해 들은 완전 비배수 상태에 대한 가정을 바탕으로 초기 간극수압의 분포를 결정하였으나 실제 지반에서 관입될 때 유발되는 압밀효과를 무시할 수 없다는 연구 결과(Gupta & Davidson, 1986)를 바탕으로 보면 우리나라 서해안과 같이 실트질 흙이 많이 포함된 경우에는 피에조 콘 관입 시 완전 비배수 상태 보다는 상당한 양의 간극수압 소산이 유발될 것으로 사료되므로 소산곡선에 영향을 주는 초기 간극수압의 분포 형태에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되어 이에 대한 고려가 요구된다.

그리고 기존의 방법에서는, 사용된 이론곡선과 실제 압밀곡선이 같은 형태를 갖는지 비교하여 같은 형태일 때만 초기 간극수압의 분포가 같은 것으로 가정할 수 있으므로 매번 이론곡선과 실제곡선을 비교해 보아야 한다는 불편함이 있다. 또한 일정한 압밀도에 대해서만 해를 주므로 서로 다른 압밀도에서 구해진 압밀계수 값과는 차이가 있다는 점과 이 외에도 관측된 간극수압 소산곡선을 표준화 할 때 기준으로 삼아야 하는 수압(관입 간극수압 또는 소산 시작 시의 초기 간극수압)에 대한 논란이 있으며 이에 대해서는 후에 자세히 논하였다.

따라서 이러한 이론 해들 중에서 국내 지반에 가장 적합한 해를 선정하는 것 자체가 매우 어려운 일이라 할 수 있으나 현장 피에조 콘 소산실험과 함께 적절한 실내 물성실험이 수행되어 여러 종류의 해들에 대한 적용성을 살펴봄으로써 이에대한 판단이 점차적으로 가능하리라 사료된다.

3. 소산시험 해석 시 유발되는 오류의 원인들

3.1 소산도에 따른 압밀계수의 변화

현재 국내에서 시행되고 있는 소산시험들의 결과들을 보면 대부분 초기에 발생된 과잉간극수압을 기준으로 50% 소산도까지는 실험이 수행되고 있는 것으로 보인다. 그러나 일부 자료들에서는 소산시험에 소요되는 시간과 경비의 문제를 들어 정해진 시간까지의 소산실험 결과를 바탕으로 현장 연약지반의 압밀계수를 추정하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 제안된 이론해들이 소산도에 무관하게 일정한 값의 압밀계수를 제공한다면 이러한 해석이 적용상 큰 문제가 없으나 Baligh & Levadoux의 연구결과에 의하면 50%(±10) 주변에 이르러서야 큰 분산없이 좋은 결과가 얻어질 수 있다는 것과 그간의 경험등을 바탕으로 볼 때 소산시간에 따라 얻어지는 압밀계수는 큰 차이를 나타낼 수 있다.

그림 2는 소형 실내 피에조 콘 실험결과를 토대로 기존의 여러 다른 방법으로 20~80% 소산도에서 구해지는 각 압밀계수를 기존의 방법에서 주로 사용하는 50% 소산도를 기준으로 표준화한 결과이다(이승래와 김영상, 1997). 이때, Torstensson의 해를 적용한 경우는 구형 공동확장 이론에서 $I_R=300$ 의 경우의 해를 사용하였으며, Teh & Houlsby의 해를 적용한 경우에는 $I_R=267$ 을 사용하였다. Teh & Houlsby의 경우를 제외한 모든 방법들이 50% 소산도 압밀계수에 비해 저 소산도에서는 2~3배 정도로 압밀계수를 과대평가하며 고 소산도에서는 반대로 다소 과소평가하는 것으로 나타났으며 이는 관측된 간극수압 곡선과 이론적인 간극수압 곡선이 각 소산도에서 다르기 때문에 나타나는 현상이다.

따라서 피에조콘 소산시험을 이용하는 목적이 압밀계수 추정이라면 최소한 50% 소산도까지는 소산 시험을 수행하는 것이 해석결과와 오류를 줄이는 방법이라 사료된다.

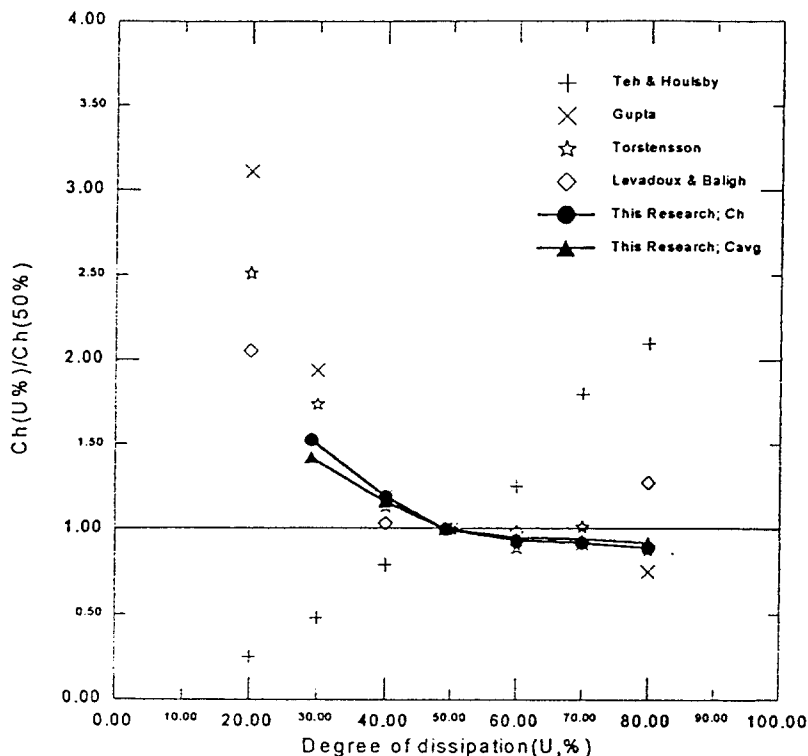


그림 2. 50% 소산도의 압밀계수로 규준화 한 여러 소산도에서의 압밀계수 변화

3.2 지반의 강성지수 I_R

압밀계수를 추정하기 위하여 이론적인 해를 선택할 때 만약 공동확장이론을 바탕으로한 해를 사용하거나 변형을 경로법이라 하더라도 Teh & Housby의 해를 사용하는 경우에는 지반의 전단탄성계수와 전단강도의 비로 정의되는 식 (2)와 같은 강성지수를 사용하여야 한다.

$$I_R = \frac{G}{s_u} \quad (2)$$

여기서, G는 지반의 전단탄성계수로 변형을 수준, 변형속도, 응력경로, 실험의 형태에 따라서 달라지므로 하나의 상수값으로 결정하기 어려울 뿐만아니라 비배수 전단강도 s_u 의 결정 또한 변형속도, 과압 밀비, 연화현상 등 다양한 원인에 따라서 달라질 수 있다. 이 중에서도 전단탄성계수는 변형을 수준에 따라서 그 값의 차이가 크며, 콘 주변에 유발되는 다양한 범위의 변형을 수준에 대해서 연구자에 따라 초기 접선 탄성계수(Gupta, 1983)를 주장하거나 중간응력 수준의 G_{50} 을 주장(Robertson & Campanella, 1983)하기도 하나 이에 대한 이론적인 배경은 아직 미흡한 실정이다.

Torstensson의 공동확장이론 해를 추천하고 있는 FHWA(1988)에서는 이러한 자료가 없는 경우에 $I_R = 100$, $A_f = 0.8$ 을 사용할 것을 추천하고 있다. 그러나 이 값은 지반에 따라서 그 값의 차이가 현저하며 Vesic에 의하면 특별한 경우를 제외하면 포화점토의 경우 $I_R = 100 \sim 300$ 범위에 존재한다고 알려져 있다. 그러나, 국내지반에서 행해진 소산시험에 대하여 I_R 값의 경향과 크기에 대하여는 연구된 바

가 있으므로 보다 정확한 압밀계수의 추정이 가능하도록 하기 위해서는 이에 대한 많은 실험결과가 축적되어질 수 있도록 지속적인 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

3.3 소산곡선의 표준화 시 이용되는 간극수압

현장시험 시 관입을 중단하고 소산시험을 실시하게 되면 관입시에 관측된 과잉간극수압 u_p 과 소산시험을 시작할 때 관측된 간극수압 u_i 사이에는 많은 차이가 관측되기도 한다. 이러한 간극수압의 차이로 인해 소산곡선의 표준화를 통하여 압밀계수를 추정해야 하는 기존의 방법들에서는 어떤 값을 사용하여 표준화할 것인지에 대한 논의가 필요하다. 관입 간극수압과 초기 간극수압의 차이는 크게 $u_i/u_p < 1$ 경우와 $u_i/u_p \geq 1$ 로 나눌 수 있다.

① $u_i/u_p < 1$ 인 경우

이에 대한 원인은 소산시험을 위한 관입기의 급작스런 관입속도 변화($2 \text{ cm/sec} \rightarrow 0 \text{ cm/sec}$)로 인하여 점토에 가해지던 연직응력이 감소되는 것과(Kurup 등, 1994) 이로 인한 porous stone의 팽창 등이다. 연직응력 감소에 의한 간극수압의 변화는 연직응력이 매우 크게 작용하고 있는 선단부에서 간극수압을 측정하는 경우일수록 그 효과가 크며 전단응력이 주도적으로 작용하는 콘 선단부 뒤에서는 이러한 현상이 크게 영향을 미치지 않으므로 콘 선단부 뒤에서 주로 간극수압을 관측하는 우리나라의 콘 실험 결과들은 연직응력의 감소에 의한 영향을 크게 받지 않을 것으로 생각된다. 그러나 국내 서해안 연약지반과 같이 연약점토층 사이에 실트 또는 모래층을 많이 포함하고 있어 이들의 존재가 콘 주변의 압밀 특성에 영향을 주는 요인이 이러한 초기 간극수압 u_i 의 변화 원인이 될 수도 있을 것으로 생각된다.

이 경우 문제가 되는 것은 대부분의 기존 해들이 이론 해를 제안하기 위하여 사용하였던 방법들(공동확장이론, 변형률 경로법)에서는 변형률 속도와 연직응력의 감소로 인한 효과를 모사할 수 없기 때문에 $u_p = u_i$ 인 경우로 가정되어 해가 제안된 것이라 점이다. 따라서, 이 경우에는 반드시 둘 중 한 값을 선택하여야 하며 기존의 연구자들(Kurup 등, 1994)의 연구를 바탕으로 볼 때 u_i 를 기준으로 간극수압 소산곡선을 표준화하면 압밀계수가 과소평가되는 경향이 있을 수 있으나 설계자의 입장을 고려하면 이러한 과정이 바람직할 것으로 사료된다. 또한 최근에는 소산곡선 초기에서의 관측점들이 간극수압- \sqrt{t} 관계에서 선형식으로 표현된다는 점을 이용하여 u_i 를 선택하는 연구(Thomas, 1986)도 진행된바 있어 이러한 방법의 적용성을 뒷받침하는 것으로 사료된다.

② $u_i/u_p \geq 1$ 인 경우

이 경우는 피에조 콘이 과압밀된 점토에 관입되는 경우, 콘 선단부와 선단부 뒤에 유발되는 간극수압 크기의 차이로 인한 간극수압 경사(gradient)로 과잉 간극수압의 재분배(redistribution)가 발생하거나 실험 전 porous stone의 포화가 만족스럽게 되지 않는 경우에 나타난다. 특히, 간극수압 재 분배에 의한 현상은 그림 3에서 보는 바와 같이 과압밀비가 증가할수록 콘 선단부와 선단부 뒤의 간극수압의 차이가 증가하므로 상승현상이 더욱 크게 나타난다.

이러한 소산곡선 형상은 일반적으로 표준화된 간극수압 소산곡선과 달리 소산초기에 간극수압의 상승효과를 보이며 이러한 형상의 곡선에 대해서는 기존의 해들이 제안된 바가 없다. 더구나 콘 선단부 뒤에서는 그림 3에서 보는 바와 같이 과압밀비가 커질 경우 심하게는 부(negative) 간극수압이 발생하는 경우도 있으므로 이러한 현상을 모사할 수 있는 수치적인 해석기법이 개발되지 않는 현 상황에서는 과압밀비가 4이상되는 과압밀 지반의 소산시험 결과에 대하여 기존의 이론 해들을 적용하는 것은 무리가 있는 것으로 사료된다.

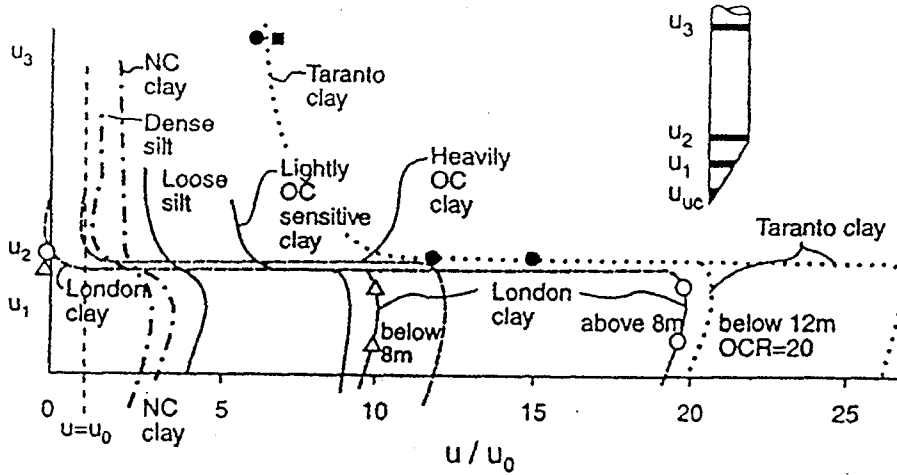


그림 3 과압밀 비에 따른 점토지반에 관입된 콘 주변의 간극수압 분포

그러나, 최근 Silly & Campanella(1994)는 Mandel-Cryer효과가 나타나는 기존의 이론을 적용할 수 없는 경우에도 상승된 최고 간극수압(u_{max})을 u_i 로 가정하여 Teh & Houlsby의 해를 적용하였으나, Teh & Houlsby의 해는 관입 간극수압 u_p 에 대하여 개발되었으며 해를 제안하기 위하여 사용된 기법들이 이런 상황의 초기 과잉간극수압의 분포를 모사할 수 없음을 고려할 때 이러한 사용은 이론적인 근거나 배경을 갖지 않는 다소 경험적인 방법이므로 많은 사례연구를 통해서 그 사용 가능성이 검증되어야 할 것으로 사료된다.

4. 피에조 콘을 이용한 현장지반의 압밀도 평가

4.1 원지반 또는 준설토 지반의 압밀도 평가

피에조 콘 소산시험을 이용한 또다른 분야로 크게 관심을 끄는 분야가 현장지반의 압밀도 평가에 관한 부분이다. 이때 압밀도는 아래 식(3)과 같이 정의된다.

$$\bar{U} = 1 - \frac{\Delta u(t)}{\Delta u_0} \quad (3)$$

여기서, $\Delta u(t)$ 는 임의의 시간 t 에서의 과잉간극수압이며 Δu_0 는 초기 과잉간극수압이다.

위의 식(3)을 사용하여 압밀도를 평가할 때 $\Delta u(t)$ 는 피에조 콘 소산시험을 완전히 수렴된 값까지 소산실험을 수행함으로써 얻을 수 있는 값이며 Δu_0 는 원지반인 경우에는 성토 등에 의하여 유발되는 초기 간극수압이다. 이 중 초기 간극수압은 원지반인 경우라면 지반 내 성토에 의한 간극수압 증가량을 성토재의 단위중량과 성토높이 등을 바탕으로 개략적인 예측이 가능하나 준설토 지역인 경우에는 준설지반의 조성시 지반 내에 유발된 간극수압이 포함되어야 하므로 자중압밀의 종료기간 등을 고려한 초기 간극수압의 산정이 이루어져야 하는 어려움이 있다. 따라서, 피에조 콘 소산시험을 이용한 압밀도의 평가는 이론적으로는 상당히 명확한 방법임에도 불구하고 이러한 현실적인 어려움이 있다.

또한 피에조 콘을 사용하여 현장의 잔류 간극수압을 예측할 때에도 시간적인 제약 때문에 소산시간이 보통 1~2일을 넘지 못하므로 정확한 잔류 간극수압을 관측하는 것은 상당히 어려우며 최근의 현장 실험 결과에 의하면 48시간이 지난 후에도 간극수압의 수렴은 완벽히 이루어지지 않는 것이 관측되는

등 소산실험을 통하여 이 값을 정확히 얻는 것은 상당한 노력이 요구된다(황대진 등, 1997).

따라서, 짧은 시간동안 이루어진 소산실험 결과로부터 긴 시간이후의 평형 잔류 간극수압을 예측하고자 하는 연구가 최근 필자(이승래 등, 1997)에 의하여 진행되었으며 이 들은 최적화 기법을 도입하여 전체 압밀도에서 일관성있는 압밀계수를 추정하고 이를 이용하여 고 소산도의 간극수압을 예측하는 기법을 제안하였다. 이 기법에서는 50%정도까지 관측된 소산곡선을 이용하여 80~90% 소산도의 간극수압을 비교적 정확하게 예측할 수 있었으나 100% 소산도에서의 수렴된 간극수압을 예측하기 위해서는 더욱 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 또한, 황대진 등(1997)은 최종 잔류간극수압을 예측하기 위하여 최종 침하량을 예측하기 위하여 사용되는 기존의 기법들(호시노 법, 쌍곡선 법, 아사오카법)을 사용하여 최종 간극수압을 예측하는 방법을 제안하였으며 그 결과 호시노 법이 이러한 예측에 소요되는 시간도 짧을뿐 아니라 그 수렴값이 타당한 값이어서 평형 잔류간극수압 추정으로 적절하다고 보고하기도 하였다.

이러한 연구들은 현장실험이 빠르게 그 지반의 평가를 위하여 행해진다는 점을 고려할 때 이러한 피에조 콘 실험의 장점이 본래의 목적에 맞도록 보다 적극적으로 활용되기 위해서는 이와 병행하여 반드시 많은 연구가 이루어 져야할 것으로 사료된다. 예로서 현장지반의 압밀도를 추정하고자 하는 목적은 크게 두가지로 예상된다. 그 첫 번째로 현장지반 물성(강도 등)에 대한 개량효과를 판단하기 위한 것과 두 번째로는 앞으로의 잔류침하량 등을 예측하기 위한 목적을 가진다고 할 수 있다. 이 중에서 현장 지반의 물성 개량효과 등은 피에조 콘 관입 시 선단저항값으로부터 어느 정도 확인이 가능하다. 따라서 식(3)과 같이 표현되는 압밀도 추정보다는 현재 잔존하는 과잉간극수압으로 인한 앞으로의 잔류침하량을 피에조 콘 소산시험을 통해 어느정도 예측이 가능할 것인가 하는 문제를 해결하기 위한 목적으로 시험이 수행된다면 현장 연약지반 압밀거동 평가에 피에조 콘 소산시험을 더욱 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

4.2 배수재가 설치된 지반의 압밀도 평가(Robertson 등, 1986)

그간 연약지반의 압밀을 효과적으로 진행시키기 위하여 사용되어 온 연직 배수재의 압밀시간 단축효과를 예측하기 위하여 많은 식이 제안되어 왔으며 Hansbo(1960)는 아주 낮은 수두하에서의 간극수의 흐름은 Darcy의 법칙으로 표현되지 않으며 지수형태의 $v=ki^n$ (여기서, $n=1.5$) 관계가 오히려 이러한 흐름의 거동을 잘 표현한다고 주장함으로써 다음과 같이 새로운 식(4)를 제안하였다.

$$t = \frac{\alpha}{\lambda} D^2 \frac{\sqrt{Dg\rho_w}}{\Delta u_o} \left(\frac{1}{\sqrt{(1-u)}} - 1 \right) \quad (4)$$

여기서,

t = 특정 압밀도에 도달하는데 소요되는 시간

α = D/d 의 함수(그림4)

D = 독립된 실린더 형태의 유효직경

d = 배수재의 유효직경

Δu_o = 초기 과잉간극수압

\bar{u} = 평균 압밀도

$\lambda = (0.1 \sim 0.5)c_h$

ρ_w = 물의 밀도

g = 중력가속도

위의 식에서 가장 중요한 변수 역시 현장지반에 유발되는 초기 과잉간극수압으로 큰 초기 과잉간극수압이 유발될수록 일정한 압밀도에 도달하는 시간이 길어짐을 알 수 있으며 초기 과잉간극수압을 정확

하게 평가할 수 있다면 현재의 시간에서의 압밀도에 관한 식으로 표현되어 배수재가 설치된 지반의 압밀도를 평가할 수 있다. 이때, 배수재의 관입에 의한 지반의 교란효과(smear effect)는 현장에서 피에조 콘 등으로 구해진 수평 압밀계수를 감소시켜서 사용하는 것으로 그 효과를 표현할 수 있다고 제안하였다.

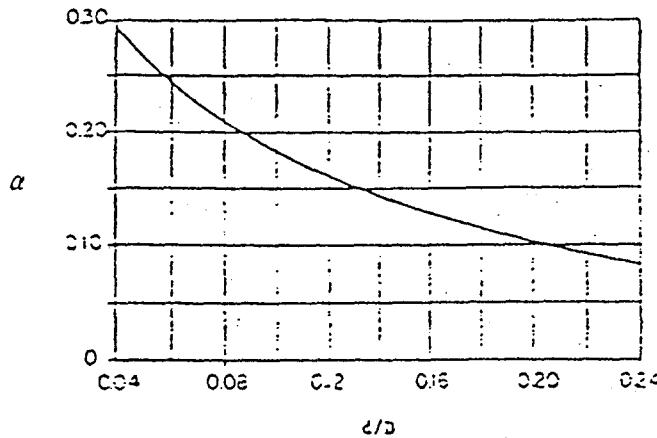


그림 4. 직경비에 따른 a 계수(Hansbo, 1960)

위 식 (4)는 배수재와 주변지반을 하나의 흙 실린더로 표현하여 실린더 내에서의 과잉간극수압의 배수를 고려한 것으로 피에조 콘은 현장지반의 수평압밀계수만을 추정하는데 사용된다. 그러나, 식 (3)을 사용해서도 압밀도를 평가할 수 있으며 이때에는 배수재가 설치된 지반에서 잔류 평형간극수압을 확인하기 위하여 실험이 실시되는 위치를 신중히 선정하여야 한다. 일반적으로 배수재가 설치된 지반의 압밀해석에 제안된 식들이 배수재의 간격과 배수재 하나에 대한 흙 실린더 내의 배수를 고려하므로 배수재에 가까울수록 빠르게 압밀이 진행되는 것은 자명하다. 따라서, 배수재와 배수재 사이의 중앙점, 즉 하나의 실린더에서 가장 먼 곳의 압밀도를 확인함으로써 보다 적절한 압밀도 평가가 이루어 질 수 있을 것이다.

참고문헌

김영상, 이승래, 김윤태, 피에조 콘 소산시험을 이용한 압밀계수 결정 시 최적화기법의 적용, 한국지반공학회지 13권 4호, 1997, 95~107.

이승래, 김영상, 피에조 콘 소산시험을 이용한 현장 압밀거동 예측, 한국지반공학회 가을학술 발표회, 1997, 229~236.

황대진, 김철웅, 피에조 콘의 간극수압 소산시험에 관한 연구, 한국지반공학회지, 제13권 6호, 1997, 25~35.

Cee-Ing Teh, Calibration Chamber Studies of Piezocone Test in Cohesive Soils, discussion, J. of Geotechnical Eng., ASCE, Vol.121, No.5, May, 1995, 454~456.

FHWA, Guidelines for using the CPT, CPTU, and Marchetti DMT for Geotechnical Design, Vol. I, 1988.

Gupta,R.C. & J.L.Davidson., 1986, Piezoprobe determination coefficient of consolidation, *Soil and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.12~22,September.

Gupta,R.C.,1983, Determination of the in situ coefficient of consolidation and permeability of submerged soil using electrical piezoprobe sounding. *Ph.D. Dissertation, Univ. of Florida*.

Kurup,P.U., G.Z.Voyiadjis, & M.T.Tumay,1994, Calibration Chamber Studies of Piezocone Test In Cohesive Soils, *J. of Geotechnical engineering, ASCE*, vol. 120, No.1,January.

Robertson, P. K., Campanella, R. G., Brown, P. T., and Robinson., K E., Prediction of Wick Drain and Preload Performance using Piezometer Cone Data, 39th Canadian Geotechnical Conference, Ottawa, August, 1986.

Robertson.P.K. & R.G.Campanella.,1983, Interpretation of cone penetration tests : clay, *Can. Geotech. J.* 20. 734~745.

Silly, J. P., Campanella, R. G., Evaluation of Field CPTU Dissipation Data in Overconsolidated Fine-Grained Soils, XIII ICSMFE, 1994, New Delhi, India, 201~204.

Thomas, S. D., Various Techniques for the Evaluation of the Coefficient of Consolidation from a Piezocone Dissipation Test, Soil Mechanics Report No. SM064, Department of Engineering Science, University of Oxford, 1986, 22p.