

피에조콘 관입 시험을 이용한 투수계수 산정기법 연구

Estimation of Hydraulic Conductivity Using Piezocone Penetration Test

송 정 략* Song, Chung-Rak

Abstract

This study investigated the relationship between the hydraulic conductivity and the excess pore pressure measured in the piezocone penetration test. The modified Cam Clay model and the coupled theory of mixtures are used for the analytical approach. The comparison of analytical results with the piezocone penetration test data showed that there is a clear variation of the excess pore pressure with the hydraulic conductivity when the hydraulic conductivity lies between 10^{-9} m/sec and 10^{-6} m/sec. Therefore, it was found that a hydraulic conductivity can be conveniently estimated without requiring the measurement of pore pressure dissipation tests. This study also showed that the change of the excess pore pressure at the cone tip is almost constant when the hydraulic conductivity is less than 10^{-9} m/sec or greater than 10^{-6} m/sec. Therefore, it was also shown that the drainage condition around the cone tip is close to a fully undrained when the hydraulic conductivity of the soil is less than 10^{-9} m/sec, while it is close to a fully drained when the hydraulic conductivity of the soil is greater than 10^{-6} m/sec.

요 지

본 연구에서는 수정 Cam Clay 모델과 혼합체 커플링 이론(coupled theory of mixtures)을 이용하여 피에조콘 관입시험을 해석하여 지반의 투수계수와 과잉간극수압의 정량적 관계를 고찰하였다. 본 연구의 이론적 해석 결과는 시험결과들과 비교하였으며 그 결과 피에조콘 관입 시험시 관측된 과잉간극수압은 지반의 투수계수가 10^{-9} m/sec에서 10^{-6} m/sec의 범위에서는 투수계수에 따라 피에조콘 관입 시험시 관측된 과잉간극수압이 현저하게 변하는 것으로 나타나 피에조콘 관입시험시 관측한 과잉간극수압을 이용하여 지반의 투수계수를 결정할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 지반의 투수계수가 10^{-9} m/sec 이하에서는 지반이 거의 완전 비배수 상태에 가까운 거동을 나타내며, 투수계수가 10^{-6} m/sec 이상에서는 거의 완전 배수 상태에 가까운 거동을 하는 것으로 나타났다.

Keywords : Hydraulic conductivity, Piezocone, Excess pore pressure, Cam-clay, Coupled theory of Mixtures

1. 서론

피에조콘 시험을 이용한 지반의 투수특성 파악은 주로 과잉간극수압 소산시험을 이용하는데, 이는 피에조콘 관입시험중 특정위치에서 관입을 멈추고 관입시 발생한 과잉간극수압이 어떻게 소산되는가를 살펴보는 시험이다. 이 방법은 기존의 다른 현장 투수시험방법에 비교하여 비교적 간편하다는 장점이 있다. 기존의 현장 투수시험법이

별도의 시추공을 필요로 한다거나, 시간이 많이 걸린다거나(수 일 - 수주일), 신뢰도에 의심을 받는다거나 하는 점들을 감안할 때, 피에조콘을 이용한 소산시험은 그 방법이 매우 간편하고, 신뢰도 또한 비교적 양호한 것으로 알려져 있어 근래 널리 쓰이고 있는 추세이다.

그러나 소산시험 또한 시험을 별도로 하여야 한다는 불편함을 포함하고 있다. 즉 지반의 관입저항, 마찰저항, 과잉간극수압 등은 실시간적으로 측정하고 그래프를 그리

* 정희원, 삼보기술단 이사

는데 비하여, 소산시험은 피에조콘을 별도로 멈추어야 한다는 측면이 있다. 소산시험을 생략할 경우 보다 많은 수량의 피에조콘 관입시험을 할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 효율 측면을 감안하면, 소산시험은 피에조콘 관입시험의 효율을 저하시키는 중요한 요인중의 하나라고 할 수 있다. 또 다른 측면에서 소산시험은 관입체 주위에서 교란되었던 지반이 압밀에 의하여 강도를 회복하는 현상, 즉 Thixotrophy를 겪게되는 시험이다. 따라서 소산시험후 관입체 주변 지반은 강도를 회복하여, 추후의 관입시험을 어렵게 하거나, 인발이 어려운 상황까지 초래한다. 이상 살펴본 바와 같이 피에조콘을 이용하여 지반의 수리특성(압밀계수 및 투수계수)을 구하는 방법은 기존의 다른 방법에 비하여는 상대적으로 간편하다는 장점이 있으나, 아직도 개선의 여지가 많음을 보여주고 있다.

피에조콘 관입시험은 지반내부에 원추형 관입체를 일정한 속도(20mm/sec)로 관입시키면서 지반의 거동을 살펴보는 방법이다. 따라서 피에조콘 관입경로에 있는 지반은 작은 응력에서부터 큰 응력까지 서서히 증가되는 점증응력을 받게 된다. 전술한 점증응력의 경우와 유사하게 피에조콘 관입시의 과잉간극수압은 지반의 수리특성의 영향을 이미 받고 있다. 따라서 피에조콘 관입시의 과잉간극수압을 역해석하면 지반의 수리특성을 알아낼 수 있다. 피에조콘 관입시의 과잉간극수압은 거의 연속적으로 (매 2cm, 3cm, 또는 5cm 마다) 측정되므로 이를 해석하면 지반의 수리특성을 거의 연속적으로 (매 2cm, 3cm, 또는 5cm 마다) 알아낼 수 있다. 전술한 방법은 기존의 소산시험 이용법에 비교하여 다음과 같이 논리적으로도 보다 타당한 방법으로서 관입체 주위의 과잉간극수압의 상호간섭현상도 자연적으로 해결한다. 본 연구에서는 소산시험을 사용하지 않고 피에조콘 관입시험 과정중의 과잉간극수압 측정결과를 이용하여 지반의 수리특성을 구하는 방법을 제시하였다.

2. 소산시험의 평가

이론적인 측면에서 소산시험을 평가하면, 뜨거운 열을 가진 원추형 (또는 구형) 물체가 지반내부에 존재할 때 그 열이 지반내부에 어떻게 퍼져나가서 얼마나 빨리 식게 되는 것을 해석하는, 즉 열전도현상을 해석하는 것과 유사하다. 물론 피에조콘 관입시험시에 발생하는 과잉간극수압의 발생과 소산이 열전도현상과 정확히 동일한 현상이

아니라는 것은 이미 밝혀진 바이나(Baligh와 Levadoux 1986, Teh와 Houlsby 1991), 현재 소산시험을 해석하는 대부분의 방법은 Torstensson (1977)이 처음 제안한 원추형 열원에 대한 열전도현상에 대한 편미분 방정식을 푸는 것이다. 이 편미분 방정식은 일반적으로 Terzaghi 압밀 방정식으로 알려진 1차원 압밀 방정식과 매우 유사하다. Terzaghi 1차원 압밀 방정식의 경우 일방향의 배수상태만 고려하나, 원추형 열원에 대한 압밀은 수평 열전도 및(또는) 방사형 열전도를 고려한다. 다른 편미분 방정식과 마찬가지로, Torstensson의 방사형 열전도 편미분 방정식 역시 경계조건과 초기조건을 필요로 하는데, 이러한 경계조건 및 초기조건이 분명하게 정의되지 않는다는 점에 있어 Torstensson의 해법은 문제점을 포함한다. Torstensson의 해법은 이러한 초기조건 및 경계조건들을 가정하여 도출된 결과들이다. 현장에서 Torstensson의 해법을 이용하여 수리특성(압밀계수)을 산출할 때 종종 현장 과잉간극수압 소산곡선이 Torstensson의 표준소산곡선과 상이하여 Torstensson의 해법을 적용할 수 없는 경우들이 있는데, 이는 실제 현장의 초기조건 또는 경계조건들이 Torstensson이 가정하였던 초기조건 또는 경계조건들과 일치하지 않는 원인에 기인한다. 실제 현장에서의 초기조건이 Torstensson의 해법에서 가정한 조건과 일치하지 않기 때문에 인하여 발생하는 문제점은 Seneset 등(1988) 및 Elsworth (1993)에 의하여 지적된 바 있다. Seneset 등 (1988)은 과잉간극수압과 콘 관입저항치와의 비, Bq 값이 0.4 이하이면 현장에서 측정된 초기 과잉간극수압을 압밀 특성 파악을 위한 초기 과잉간극수압으로 사용하는 것이 부적절 하다고 보고하였다. Bq 값이 작다는 것은 지반의 투수특성이 양호하거나 피에조콘 관입과 동시에 상당한 정도의 과잉간극수압의 소산이 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 Seneset 등(1988)의 결과는 투수특성이 양호한 지반의 경우 현장의 경계조건 또는 초기 조건은 방사형 열전도 현상에 대한 편미분 방정식의 경계조건 또는 초기 조건과 부합하지 않게 됨을 의미한다. Elsworth(1993)는 Bq 값이 0.5보다 작은 경우에, 그 값이 지반의 압밀계수에 따라 변하게 되며, Bq 값이 0.5 보다 큰 경우에는 지반의 압밀계수에 대하여 Bq 값이 거의 변화하지 않는다고 보고하였다. 이와 같은 결과는 지반의 압밀계수가 작은 경우의 초기 과잉간극수압은 지반의 투수특성에 거의 무관하게 나타나므로 소산시험을 위한 초기 과잉간극수압으로서 사용할 수 있으나, 그렇지 않은 경우에는 소산시험을 위한 초기 과잉간극수압 자체가 이미 투수계수의 영향을 받게

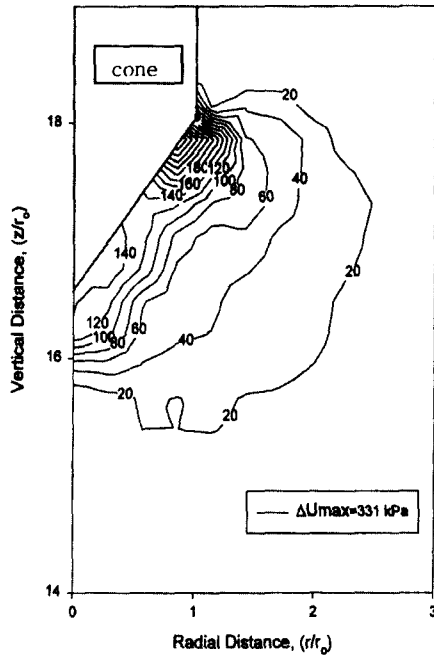


그림 1. 피에조콘 관입시 관입체 주위에 발생하는 과잉간극수압 분포도(ΔU_{max} =최대 과잉간극수압, r =콘 중심으로부터의 거리, r_0 =콘의 반경, z =기준점으로부터의 수직거리) (Voyiadjis and Song, 2000)

되므로 그 유효성이 저하된다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다. 즉 Senneset 등(1988) 및 Elsworth (1993)의 결과는 궁극적으로 지반의 투수특성이 양호할수록 소산시험의 유효성이 저하된다는 것을 나타낸다. Senneset 등(1988) 및 Elsworth(1993)는 그 이유에 대하여는 언급을 하고 있지 않으나 Song과 Voyiadjis (2000)에 의하면 이는 다음과 같은 근거리 과잉간극수압과 원거리 과잉간극수압의 상호 작용(interaction) 때문으로 풀이될 수 있다. 그림 1에 의하면 콘관입시 지반에 발생하는 과잉간극수압은 피에조콘의 상당한 앞부분에서 이미 발생하기 시작한다. 이때 그 분포는 일반적으로 피에조콘에 가까운 곳에서는 크고 먼 곳에서는 작아지는 양상이나, 위치에 따라 다른 양상이 나타나기도 한다. 특히 콘 어깨(cone shoulder) 부근에서는 과잉간극수압의 등고선이 밀집되어 있는 분포를 나타내고 있다. 따라서 열역학 제 2법칙에 의하여 콘 주위에서는 항상(관입중에도) 국부적으로 불규칙한 과잉간극수압이 보다 균질한 과잉간극수압으로 되려는 경향이 존재하게 된다. 피에조콘이 멈춘후의 과잉간극수압 소산은 피에조콘 주위의 전반적 Entropy 증가현상으로 해석될 수 있으나, 전술한 바와 같은 국부적 Entropy 증가현상이 압밀 해석을 위한 초기 과잉간극수압, 즉 전반적 Entropy 증가현상 해석을 위한 초기 Entropy에 영향을 미치게 되는 것이

다. (Entropy 증가현상이란 어느 제한된 공간의 에너지 또는 Potential 이 주위의 에너지 또는 Potential과 같아지려는 현상이다.)

3. 제안된 방법

포화된 지반에 점증하중이 작용할 경우, 하중에 의하여 발생하는 과잉간극수압은 순간하중의 경우처럼 일시 발생과, 일시 소산이 아닌 단계적 발생과 단계적 소산의 과정을 밟는다. 점증하중을 3단계의 단계하중으로 나누어 고려할 때, 첫 번째 하중에 대하여는 순간하중의 경우와 같이 과잉간극수압이 발생하여 소산되는 과정을 밟는다. 두 번째 하중이 재하되었을 경우는 두 번째 하중에 의하여 발생된 과잉간극수압과, 첫 번째 하중에 의하여 생성되었다가 미처 소산되지 못한 과잉간극수압의 잔류치가 합쳐지게 되며, 소산 또한 합쳐진 과잉간극수압이 소산하게 된다. 세 번째 하중이 재하되었을 경우는 첫 번째 하중 및 두 번째 하중의 잔류 과잉간극수압과 세 번째 하중의 신규발생 과잉간극수압이 합쳐서 발생하며, 그 소산 또한 혼합 과잉간극수압의 소산이 된다. 이와 같이 점증하중의 경우 과잉간극수압은 발생과 소산이 동시에 발생하는 복합적인 양상을 나타내게 된다. 과잉간극수압의 소산은 지반의 수리특성, 특히 압밀계수 또는 투수계수에 직접적으로 영향받게 된다. 따라서 점증하중의 경우에 측정되는 과잉간극수압은 그 자체로서 지반의 수리특성을 반영하고 있다. 투수계수가 매우 작은 지반의 경우, 점증하중에 의한 과잉간극수압은 각 단계별 과잉간극수압의 합과 거의 같게 될 것이고, 투수계수가 큰 지반의 경우, 점증하중에 의한 과잉간극수압은 거의 영(0)이 될 것이다.

그림 2는 피에조콘 관입경로에 있는 어느 작은 흡요소에 작용하는 과잉간극수압의 변화 과정을 모식적으로 나타내고 있다. 그림 2에서 Real Dissipation Curve는 실제 가능한 과잉간극수압 반응을, Assumed Dissipation Curve는 Torstensson의 해석적 방법에서 가정한 과잉간극수압 반응을 나타낸다. 이 흡요소는 처음에는 피에조콘과 거리가 멀어 과잉간극수압이 없으나, 피에조콘이 가까이 관입됨에 따라 점점 과잉간극수압이 증가하며, 어느 시점이 되면 최대치를 가지게 된다. 대개 u_1 위치(콘 전면으로서, 그림 1에서 과잉간극수압이 최대로 발생하는 위치)가 흡요소를 지나게 될 때에 최대 과잉간극수압을 가지게 되며 그 이후로는 조금 감소하게 된다. 피에조콘의 u_1 위치가 흡요소

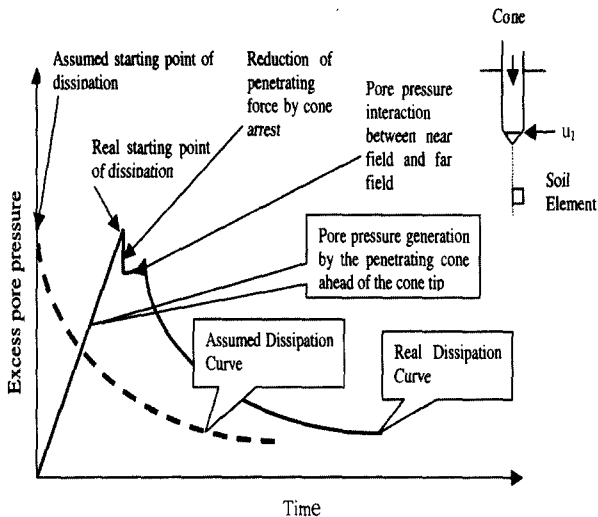


그림 2. 피에조콘 관입시험시의 과잉간극수압 발생 모식도 (Song et al. 1999)

위치에서 멈추게 되면 이때부터 본격적인 과잉간극수압 소산이 발생한다. 그러나 실제로 과잉간극수압의 소산은 그림 2의 전반부에서도 발생하고 있다. 즉, 전체적인 과잉간극수압의 소산은 전반부의 소산과 최대간극수압 이후의 소산이 합성되어 있다. Torstensson (1977)에 기초를 둔 소산시험을 이용하여 수리특성을 구할 경우 그림 2에 나타난 바와 같이 최대 과잉간극수압 이후의 결과만을 이용한다.

따라서 Torstensson (1977) 방법은 비교적 간단하게 지반의 수리특성(압밀계수 및 투수계수)를 구할 수 있다는 장점이 있으나, 최대 과잉간극수압의 초기값과 초기시간이 합리적으로 결정되지 않을 수 있다는 단점을 가지고 있다. 특히 지반이 과압밀토이거나, 실트가 많이 함유된 경우 현장에서 얻어지는 소산시험결과는 Torstensson (1977)의 표준 곡선과 많은 차이를 나타내어 그 적용성에 특히 제한을 받는데, 이는 이러한 흙의 경우, 점증하중에 의한 과잉간극수압의 발생 및 소산이 매우 복잡하게 이루어져 과잉간극수압의 소산양상이 표준 소산양상과 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 특히 과압밀토의 경우 관입체 부근에서 부(-)의 과잉간극수압이 발생하는 경우도 있는 등(u_2 위치에서), 지반에 따라서는 과잉간극수압의 발생양상이 충분히 규명되어 있지 않은 실정이다. 본 연구에서는 그 대상지반을 정규압밀토로 제한하며, 과압밀토 또는 실트질 지반에 대하여는 그토론을 유보하였다. 또한 본 연구에서는 u_1 위치에서의 과잉간극수압을 사용하여 u_2 위치의 부(-) 과잉간극수압의 영향을 최소화 하였다.

4. 해석

피에조콘 관입시험은 지반내부에 원추형의 관입체를 관입시켜 지반을 파괴시키면서 지반의 반응을 측정하는 방법이다. 따라서 관입체 주변 지반은 완전파괴가 일어나며 이때 발생하는 변형률은 수십 퍼센트에서 수백 퍼센트까지 되는 것으로 보고되고 있다 (Kioussis 등 1988, Levadoux와 Baligh 1986). 따라서 이때 적용되어야 하는 이론은 파괴 후 거동을 다루는 고변형률 소성 이론이 된다. 또한 포화된 지반을 대상으로 할 경우 점증하중에 대한 간극수압의 발생 및 이의 소산을 다루기 위하여는 복합체 지반의 커플링 이론 (coupled theory of mixtures)을 적용하여야 한다. 본 연구에서는 복합체 지반의 커플링 이론을 수정 Cam Clay 모델에 적용하여 콘 관입시험을 해석하고 이로부터 지반의 투수계수를 구하였다.

4.1 복합체 지반의 커플링 이론

(Coupled Theory of Mixtures)

이 이론은 지반을 흙입자와 간극으로 구분하고, 포화 지반의 경우 흙입자와 물, 불포화 지반의 경우 흙입자, 물, 공기로 구분하여 그 거동을 해석하며, 구성재료 상호간의 상호작용을 감안한다. 따라서 포화된 지반의 경우 간극수의 경우, 압력을 받으면 Darcy의 법칙에 의하여 간극수가 흘러나가는 것을 감안한다. 본 연구에서는 포화 지반을 대상으로 하였으며, 따라서 흙입자와 간극수의 두 구성체 물질에 대한 Prevost (1980)의 커플링 이론을 적용하였다. Prevost (1980)의 두 구성체 물질에 대한 커플링 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$- \text{div} [(n^w/\rho_w) K^{ws}(\text{grad } P_w - \rho_w b)] + \text{div } v^s = 0 \quad (1)$$

식(1)에서, n^w 는 지반의 간극률, ρ_w 물의 밀도, K^{ws} 는 투수계수 텐서, P_w 과잉간극수압, 그리고 b 는 물체력 (body force) 벡터이다.

전술한 바와 같이 피에조콘 관입시험은 대단히 고 변형률에 대한 지반거동을 다루므로 상기의 커플링 이론을 updated Lagrangian 좌표계로 표시하는 것이 필요하다. "updated Lagrangian" 좌표계는 작용하는 응력 또는 변형을 아주 작은 단계응력 또는 단계 변형으로 표시하고 각각 계마다 지반의 상태변수 및 형상변수들을 새로 계산하고 새로 계산된 상태변수 및 형상변수들을 다음 단계계산에

이용하는 기법으로서, 고변형률에서의 심한 비선형거동을 분석하는데 효과적이다. 식 (1)을 updated Lagrangian 좌표계로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \int^s C_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - \int^{s-1} C_{ij}^{s-1} X_{D,a}^s (\partial/\partial X_D) \\ & \times [(n_w/\rho_w) K_{AB}^{ws} X_{a,A}^s (\partial P_w/\partial X_B - \rho_w B_B)] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서, $C_{ij}^s = X_{K,I}^s X_{K,J}^s$, $\dot{\epsilon}_{ij}$ = 시간에 대한 변형률의 변화율, $X_{a,A}^s = \partial^{n+1} X_a/\partial^n X_A^s$, $B_b = b_b/X_{b,B}^s$, 그리고 \int^s = 자코비언(Jacobian)이다. 식 (1)과 (2)는 투수계수 텐서 K^{ws} , 간극수압 P_w , 마디포스 b 등이 서로 영향을 미치는 관계를 나타내고 있어, 하중을 받는 지반에 발생하는 간극수압은 그 투수계수의 영향을 받을 수 있다.

4.2 소성 이론

지반의 소성 거동을 다루는 이론은 가장 간단한 Mohr-Coulomb 이론에서부터, Drucker-Prager 이론, Cam Clay 이론, Cap 이론, 수정 Cam Clay 이론 등 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 수학적으로 비교적 간편하고, 실험 결과들도 잘 맞는 것으로 알려진 수정 Cam Clay 이론을 사용하였다. 단, 과압밀 구간에서 수정 Cam Clay 모델의 적용성은 일반적으로 알려진 바와 같이 일부 문제점이 있으므로 (Chen 1975) 본 연구에서는 정규 압밀토만을 대상으로 하였다. 수정 Cam Clay 에 의하면 지반의 항복한계는 다음과 같이 표시한다.

$$p d\epsilon_v^p + q d\epsilon_s^p = p \{ (d\epsilon_v^p)^2 + M^2 (d\epsilon_s^p)^2 \}^{1/2} \quad (3)$$

식 (3)에서 p = 평균 주응력, q = 축차 응력, ϵ_v^p = 소성 체적 변형률, ϵ_s^p = 소성 전단 변형률, 그리고 $M = p - q$ 좌표계에서 한계상태선의 기울기이다.

식 (3)과 소성변형에 대한 탄소성 변형률 분할 관계를 식 (4) 와같이 적용하여 소성연산자 $d\dot{\lambda}$ 를 계산하면 식 (5) 와 같이 표시된다.

$$d\epsilon_{ij}^e = d\epsilon_{ij} - d\epsilon_{ij}^p \quad (4)$$

식(4)에서 $d\epsilon_{ij}^e$ = 탄성 변형률의 증분, $d\epsilon_{ij}$ = 전체 변형률의 증분, 그리고 $d\epsilon_{ij}^p$ = 소성 변형률의 증분이다.

$$d\dot{\lambda} = \frac{B_{ij} C_{ijkl} d\dot{\epsilon}_{kl}}{B_{ij} C_{ijkl} B_{kl} - \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}} \quad (5)$$

식 (5)에서, $B_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}$, C_{ijkl} = 탄성계수 행렬이다.

식 (5)를 식(4) 대입하면 다음과 같이 소성거동에 대한 구성 방정식이 얻어진다.

$$d\dot{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} d\dot{\epsilon}_{kl} - \frac{C_{ijkl} B_{kl} B_{mn}^T C_{mnr} d\dot{\epsilon}_{rs}}{H^e - H^p} \quad (6)$$

식 (6)에서, $H^e = B_{ij} C_{ijkl} B_{kl}$, $H^p = \frac{\partial f}{\partial \epsilon_v^p} B_{ii}$ 이다.

식 (6)은 일반적으로 널리 알려진 구성 방정식으로서 $H = (H^p \times H^e)/(H^p + H^e)$ 의 모양을 갖는다.

여기서, H = 일축 탄소성계수, H^p = 일축 소성계수, H^e = 일축 탄성계수이다.

4.3 평형방정식 (Equilibrium Equation)

본 연구에서는 피에조콘 관입시험 해석을 위하여 가상일의 원리를 이용하였다. Bathe (1996)에 의하면 가상일의 원리를 이용한 평형방정식은 다음과 같다.

$${}^{n+1}R = \int_{{}^nV} {}^n S_{AB} \delta({}^{n+1}\epsilon_{AB}) d^n V \quad (7)$$

식 (7) 에서 ${}^n V = n$ 번째 상태에서 요소의 체적, ${}^n S_{AB} = n$ 번째 상태에서 $(n+1)$ 번째 상태로 변하는 사이의 제 2 Piola - Kirchoff 응력, $\delta {}^{n+1}\epsilon_{AB} = n$ 번째 상태에서 $(n+1)$ 번째 상태로 변하는 사이의 Green - Lagrangian 변형률 증분, 그리고 ${}^{n+1}R = (n+1)$ 번째 상태에서 작용하는 외력이다. 식 (7)은 다시 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} {}^{n+1}R &= \int_{{}^nV} ({}^n \sigma_{AB} + \Delta_n S_{AB}) \delta({}^n e_{AB} + {}^n \eta_{AB}) d^n V \\ &= \int_{{}^nV} {}^n \sigma_{AB} \delta({}^n e_{AB} + {}^n \eta_{AB}) d^n V \\ &+ \int_{{}^nV} \Delta_n S_{AB} \delta({}^n e_{AB} + {}^n \eta_{AB}) d^n V \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서, ${}^n e_{AB} = n$ 번째 상태에서의 선형변형률, 그리고 ${}^n \eta_{AB} = n$ 번째 상태에서의 비선형변형률이며 $\Delta_n S_{AB} = n$ 번째 상태에서 제 2 Piola - Kirchoff 응력의 증분이다. 식 (7) 및 (8)에 대한 용어들은 소성론 서적을 참고 바란다 ("예" Lubliner, 1990).

식 (8)에서, $\Delta_n S_{AB}$ 는 다시 다음과 같이 표시된다

$$\Delta_n S_{AB} = \int_t^{t+\Delta t} \dot{S}_{AB} dt \quad (9)$$

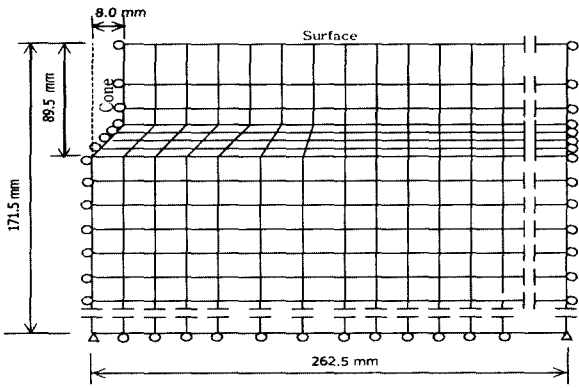


그림 3. 피에조콘 관입시험 해석을 위한 FEM mesh

식(9)에서 \dot{S}_{AB} = 제2 Piola-Kirchoff 응력의 시간에 대한 변화율이다. Voyiadjis and Kattan (1989)로부터 \dot{S}_{AB} 는 다시 다음과 같이 표시된다.

$$\dot{S}_{AB} = D_{ABCD}^* \dot{\epsilon}_{CD} + J^s X_{A,a}^s X_{B,b}^s \dot{P}_w \delta_{ab} \quad (10)$$

식(10)에서 윗첨자 "s" 는 간극수와 구별하여 흙에 관한 내용을 표시하며(유효응력개념) $X_{A,a}^s = \partial^{n+1} X_A^s / \partial^n X_a^s$ 이고, δ 는 Kronecker delta, 그리고 J는 자코비언이다. 식(10)에서 D_{ABCD}^* 는 다음과 같이 표시된다.

$$D_{ABCD}^* = [D_{abcd} - \sigma_{cb}^s \delta_{ad} - \sigma_{ac}^s \delta_{bd} + \sigma_{ab}^s \delta_{cd} + P_w \delta_{ab} \delta_{bd} - 2P_w \delta_{ac} \delta_{bd}] J^s X_{A,a}^s X_{B,b}^s X_{C,c}^s X_{D,d}^s \quad (11)$$

식(11)에서 " " 부호는 유효응력을 나타낸다. 식(10)과 (11)에서, D_{ABCD}^* 는 수정된 탄소성 계수 행렬이며, $\dot{\epsilon}_{CD}$ 는 시간에 대한 변형률의 변화율, P_w 는 간극수압, \dot{P}_w 는 시간에 대한 과잉간극수압의 변화율, D_{abcd} 는 탄소성 계수 행렬이다. 식(8)에서 식(11)까지의 관계를 식(7)에 대입하면 식(12)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} {}^{n+1}R &= \int_{\ast V} ({}^n \sigma_{AB}^s + {}^n P_w \delta_{AB}) \delta^n e_{AB} d^n V \\ &+ \int_{\ast V} ({}^n \sigma_{AB}^s + {}^n P_w \delta_{AB}) \delta^n \eta_{AB} d^n V \\ &+ \int_{\ast V} D_{ABCD}^{***} (\Delta_n e_{AB} + \Delta^n \eta_{AB}) \delta^n e_{AB} d^n V \\ &+ \int_{\ast V} D_{ABCD}^{***} (\Delta_n e_{AB}) \delta^n \eta_{AB} d^n V \\ &+ \int_{\ast V} J^s X_{A,a}^s X_{B,b}^s \delta_{ab} \Delta P_w ({}^n e_{AB} + {}^n \eta_{AB}) d^n V \quad (12) \end{aligned}$$

식(12)는 updated Lagrangian 좌표계에서의 평형방정식

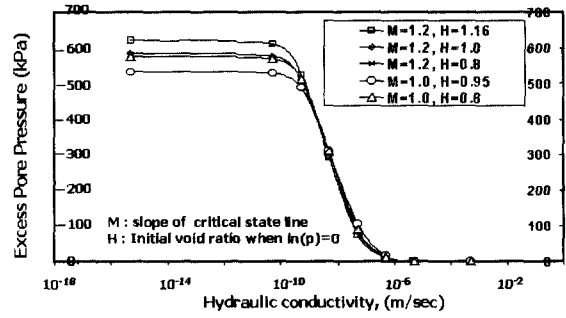


그림 4. 한계상태기울기 M, 간극비, 과잉간극수압 및 투수계수의 상관관계($\sigma_v = 200kPa$)

이다. 이를 식(2)로 표시되는 두 구성체 지반의 커플링 이론과 복합하여 행렬식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} {}^n K & -{}^n \Omega \\ -{}^n \Omega^t & {}^n \Psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^n \Phi \\ {}^n \Pi \end{bmatrix} \quad (13)$$

식(13)에서, ${}^n K$ = 강성도 행렬, ${}^n \Omega$ = 커플링 행렬, ${}^n \Psi$ = 플로우(flow) 행렬, ΔU = 절점 변위의 증분, ΔW = 과잉간극수압의 증분, ${}^n \Phi$ = 식(6)으로 표시되는 평형외력, 그리고 ${}^n \Pi$ = 식(8)의 연속방정식으로부터 계산되는 평형외력이다. 식(13)에서 투수계수는 ${}^n \Psi$ 속에 포함되어 있다. 따라서 식(13)은 피에조콘 관입시험시 발생하는 과잉간극수압을 지반의 투수계수의 함수로 나타내고 있다.

5. 피에조콘 관입시험에의 적용

식(13)을 피에조콘 관입시험에 적용하기 위하여 그림 3과 같은 FEM mesh를 작성하였다. 피에조콘(단면적 2 cm^2 의 소형 피에조콘)의 관입은 1 단계 관입에 0.01 mm씩 총 2500 단계 2.5cm의 관입을 해석하였다. updated Lagrangian 좌표계에서 언급한 바와 같이 매 단계마다 상태변수 및 형

표 1. 재료의 특성치

특성	값	단위
압축지수, λ	0.11	무차원
재압축지수, χ	0.024	무차원
초기간극비, e_0	1.0	무차원
포아손비, ν	0.3	무차원
한계상태선의 기울기, M	1.16	무차원
흙의 단위중량, γ_t	1.8	ton/m ³
지표로부터의 깊이	20	m
물의 단위중량, γ_w	1.0	ton/m ³

상변수들을 조정하여 실제 비선형거동에서 벗어나는 일이 최소화 되도록 하였다. 이때 사용된 입력자료는 표 1에 나타난 바와 같은 통상적 강도 및 압밀시험 결과들이다.

6. 해석결과

지반의 특성이 피에조콘의 관입시험 해석결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 한계상태선의 기울기 M 과 초기 간극비의 영향을 조사하였다. 그림 4는 M 을 1.0에서부터 1.2까지 변화시키고, 초기 간극비를 0.8에서 1.16까지 변화시키면서 투수계수와 피에조콘 관입시험시 과잉간극수압의 변화양상을 나타내고 있다. 그림 4에 나타난 바와 같이 피에조콘 관입시험시의 과잉간극수압은 지반의 투수계수뿐만 아니라 M 및 초기 간극비 등에 의하여도 영향을 받는 것으로 나타났다. M 및 초기 간극비의 영향은 분명치 않은데 이는 수치해석상의 오차때문으로 판단된다. 또한 정지토압계수, 과압밀비 등의 영향도 있을 것으로 판단되나, 본 연구에서는 정규압밀 연약지반을 주 대상으로 하였으므로 정지토압계수의 범위와 과압밀비가 제

한된 상태로 가정하였다. 그러나 이러한 지반특성의 영향은 주로 투수계수가 10^{-9} m/sec보다 작은 경우에 영향을 미치고, 투수계수가 큰 경우에는 그 영향이 크지 않음을 보여주고 있으며, 지반의 투수계수가 10^{-9} m/sec에서부터 10^{-6} m/sec사이에서는 투수계수가 관입시험결과에 가장 지배적인 영향 인자임을 나타내고 있다.

그림 5에서는 LSU (Louisiana State University) 캘리브레이션 토조 시험결과와 이 시료에 대하여 전술한 바와 같은 방법으로 예측한 결과, 그리고 여러 현장의 현장시험 결과들을(표2) 비교하고 있다. 참고로 현장시험 결과들은 각기 지반조건이 다른 상태에서 수행된 시험들이므로 결과의 통일성을 위하여 그 지반의 비배수 전단강도에 대하여 과잉간극수압 결과들을 표준화하였다. 즉, Vesic (1972)에 의하면 과잉간극수압 반응은 지반의 비배수 전단강도에 비례하므로 지반의 전단강도 60 kPa를 기준으로 하여 비배수 전단강도가 큰 지반에 대하여는 과잉간극수압을 줄여주고, 비배수 전단강도가 작은 지반에 대하여는 과잉간극수압을 늘여주는 방식으로 과잉간극수압의 절대치를 보정하여 비교하였다.

표 2. 현장시험결과

Soil	Undrained shear strength (kPa)	Hydraulic conductivity (m/sec) Test Method	Excess pore pressure, u (kPa)	unorm (kPa)	OCR (dimensionless)	Reference
StjØrdal Silty Clay,	83	$(0.7-5.2) \times 10^{-8}$ Oedometer	338	244 =338 × 60 ÷ 83	N.A.	Seneset et al. (1988)
Glava StjØrdal Silty Clay	90	$(3.6-6.3) \times 10^{-10}$ Oedometer	800	533	3 - 4	Sandven (1990)
Baklandet Trondheim Silty Clay	100	$(0.2-1.1) \times 10^{-9}$ Oedometer	800	480	1.7	Sandven (1990)
ValØya Trondheim Silty Clay	125	$(0.2-1.0) \times 10^{-9}$ Oedometer	1250	600	2 - 3	Sandven (1990)
Halsen StjØrdal Silty Clay	83	$(3 - 9) \times 10^{-8}$ Oedometer	300 - 400	216 - 289	N.A.	Sandven (1990)
Norco Silty Clay	50-60	$(0.30 - 5) \times 10^{-10}$ Oedometer	500 - 550	545 - 600	1 - 1.5	Tumay and Acar (1985)
Amherst Clayey Silt	71.8	$(1 - 2) \times 10^{-9}$ Lab. Perm. Test	450 - 500	376 - 417	1.3 - 3	Baligh and Levadoux (1986)
Pentre Clay	62.5	$(2 - 8) \times 10^{-9}$ Oedometer	600	576	1.2 - 1.8	Powell and Quarterman (1997)
Bothkenner Silty Clay	40-75	$(1.4-3) \times 10^{-9}$ Oedometer	830 - 870	664 - 696	1.0 - 1.5	Lunne et al. (1997)
LSU Calibration Chamber Artificial Soil	60	8×10^{-9} Oedometer	560 - 624	560 - 624	1	Kurup (1993), K-50 (50% Kaolinite + 50% Sand)
	85	2.1×10^{-8} Lab. Perm. Test	350-370	250-260	1.5	This study, K-33 (33% Kaoline + 67% Sand)
Quiou Sand	N.A.	3×10^{-4} Hazen s Law	10 - 15	10 - 15	1	Almeida et al. (1991)
Glass Bead	N.A.	9×10^{-3} Hazen s Law	0	0	1	Peterson (1991)

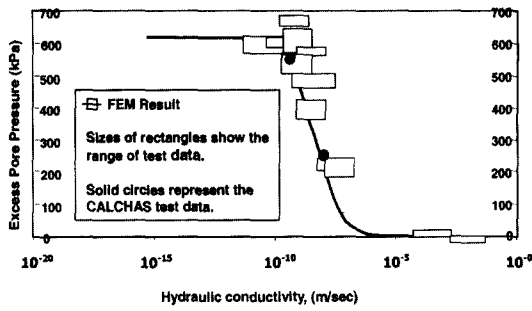


그림 5. 이론적 예측과 시험결과와의 비교

그림 5의 결과는 이론적인 예측치와 시험결과들이 비교적 잘 일치하는 것을 나타내고 있다. 시험결과 투수계수의 폭이 크다는 지적이 있을 수 있으나, 일반적으로 투수계수에 대한 실내 및 현장 시험들의 오차가 비교적 큰 것임을 감안하면 더욱 그림 5의 결과는 비교적 양호한 상태임을 알 수 있다. 특히 LSU 캘리브레이션 토조 시험결과와 예측치는 매우 좋은 상관관계를 나타내고 있다. 이러한 시험결과와 이론적 예측치들의 상관관계로부터 지반의 투수계수는 과잉간극수압 반응으로부터 쉽게 결정될 수 있다. 물론 지반의 투수계수가 10^{-9} m/sec 이하이거나 10^{-6} m/sec 이상인 경우에는 지반의 투수계수에 변화에 대하여 과잉간극수압의 변화가 없어 그 적용이 곤란한 것으로 나타남바, 위의 결과는 지반의 투수계수가 10^{-9} m/sec 이상 10^{-6} m/sec 이하의 경우에 적용될 수 있을 것이다. 그림 5는 투수계수 10^{-9} m/sec 이하인 경우에는 지반의 상태가 완전 비배수 상태에 가까운 거동을 하고, 투수계수 10^{-6} m/sec 이상에서는 지반의 상태가 완전 배수 상태에 가까워 짐을 나타낸다. 특히 투수계수 10^{-9} m/sec의 경계치는 Senneset 등(1988)의 B_q 0.4 이하, Elsworth (1993)의 B_q 0.5 이하와 서로 유사한 의미를 가지는 한계 투수계수로 풀이될 수 있을 것이다. 또한 한편으로 과잉간극수압 소산시험에 의하여 지반의 투수특성을 구하는 방법의 적용한계가 투수계수 10^{-9} m/sec 이하인 것으로 풀이될 수도 있을 것이다. 배수축진용 모래의 투수계수 요구조건이 10^{-5} m/sec 이상인 것을 상기하면, 투수계수 10^{-5} m/sec에서부터 실질적으로 자유배수와 유사한 상태가 얻어진다는 것은 합리적인 결과로 판단된다.

7. 결론

본 연구에서는 정규압밀토에 한하여 피에조콘 관입시 발생하는 과잉간극수압을 이론적으로 해석하고, 그 결과를 시험결과들과 비교하여 관입시험 결과로부터 지반의

투수계수를 산정하는 방법을 제시하였다. 콘 주변지반에 대한 소성 해석을 위하여는 수정 Cam Clay 모델을 적용하였으며, 고 변형률에서의 거동해석을 위하여 updated Lagrangian 좌표계를 사용하였다. 그 결과 피에조콘 관입시에 발생하는 과잉간극수압은 지반의 투수계수가 10^{-9} m/sec에서 10^{-6} m/sec 사이에서 투수계수에 따른 현저한 변화를 나타내어, 과잉간극수압으로부터 지반의 투수계수를 직접 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 이론적 예측결과와 시험결과들도 서로 상응하는 결과를 나타내었다. 그러나 지반의 투수계수가 10^{-9} m/sec 이하에서는 지반이 완전 비배수 거동에 가깝게 되며, 10^{-6} m/sec 이상에서는 완전 배수 거동에 가깝게 되는 것으로 나타났다. 이는 투수계수가 매우 큰 사질토의 경우 피에조콘 관입시 과잉간극수압의 절대치가 거의 영(0)에 가까우며, 투수계수가 매우 작은 지반의 경우 과잉간극수압의 절대치가 투수계수에 대하여 거의 변하지 않는다는 것과 상응한다. 상기의 완전 배수 또는 완전 비배수 거동은 피에조콘 관입시험시의 지반 반응이며, 다른 측면에서도 지반 거동이 완전 배수 또는 완전 비배수 거동을 의미하지는 않는다. 본 연구의 결과는 또한 u_1 위치에서 측정된 과잉간극수압을 대상으로 하였으므로 다른 위치에서 측정된 과잉간극수압에 대하여는 그 적용을 유보한다.

참고문헌

- Almeida, M.S.S., Jamiolkowski, M. and Peterson, R.W. (1991), Preliminary results of CPT tests in calcareous Quiou sand, *Calibration Chamber Testing*, ed. An-Bin Huang, Elsevier, pp.41-54
- Baligh, M.M. and Levadoux, J.N. (1986), "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration, Part II: Interpretation," *J. of GE., ASCE*, Vol. 112, No. 7, July, pp.727-745
- Bathe, K.J. (1996), *Finite Element Procedures*, Prentice Hall, pp.485-641
- Chen, W.F. (1975), *Limit Analysis and Soil Plasticity*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands
- Elsworth, D. (1993), "Analysis of Piezocone Dissipation Data Using Dislocation Methods," *J. of GE. ASCE*, Vol.119, No.10, pp.1601-1623
- Kioulos, P.D., Voyiadjis, G.Z. and Tumay, M.T. (1988), "A large strain theory and its application in the analysis of the cone penetration mechanism," *International J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol..12, No.1, pp.45-60
- Kurup, P. (1993), "Calibration Chamber Studies of Miniature Piezocone Penetration Tests in Cohesive Soil Specimen," Ph. D. Dissertation, Louisiana State University
- Levadoux, J.N. and Baligh, M.M. (1986), "Consolidation After Undrained Piezocone Penetrometer, I: Prediction," *J. of GE. ASCE*, Vol.112, No.7, pp.707-725
- Lubliner, J. (1990), *Plasticity Theory*, Macmillan Publishing Company, New York, 493p

10. Lunne, T., Robertson, P.K. and Powell, J.J.M. (1997), Cone penetration Testing, Blackie Academic & Professional, pp.218-222
11. Prevost, J.H. (1980), "Mechanics of continuous porous media," *Int. J. of Eng. Sci.* Vol. 18, pp.787-800
12. Peterson, R.W. (1991), "Penetration resistance of fine cohesionless materials," *Calibration Chamber Testing*, ed. An-Bin Huang, Elsevier, pp.215-328
13. Powell, J.J.M. and Quarterman, R.S.T. (1997), "A Study of Piezocone dissipation tests in soft clays for consolidation properties," under preparation, (excerpted from Lunne, Robertson, Powell, 1997)
14. Sandven, R. (1990), "Strength and Deformation Properties of Fine Grained Soils Obtained from Piezocone Tests," Ph. D dissertation, Institute for Geoteknikk, Trondheim, Norway
15. Senneset, K., Sandven, R., Lunne, T., By, T. and Amundsen, T. (1988), "Piezocone tests in silty soils," *Proceedings ISOPT 1*, Vol.2, pp.955-966, Orlando, Florida
16. Song, C.R. and Voyiadjis, G.Z. (2000), "Pore Pressure from Penetrometer and Hydraulic Conductivity," *International Journal of Mechanics of Cohesive and Frictional Materials*, submitted for publication
17. Song, C.R., Voyiadjis, G.Z. and Tumay, M.T. (1999), "Determination of Permeability of Soils Using Multiple Piezo-element Penetrometer," *International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.23, No.13, pp.1609-1629
18. Teh, C.I. and Houlsby, G.T. (1991), "An analytical study of the cone penetration test in clay," *Geotechnique*, Vol. 41, No.1, pp.17-34
19. Torstensson, B.A. (1977), "The pore pressure probe," Paper 34, *Geotech. Meeting, Norwegian Geotech. Soc., Oslo, Norway*, pp.34.1-34.15
20. Tumay, M.T. and Acar, Y.B. (1985), "Pore Pressures in Piezocone Penetration Test (PCPT) in Soft Cohesive Soils," Special Technical Publication No. 833, *Strength testing of Marine sediments : Laboratory and In Situ Measurements*, ASTM, Nov. pp. 72-82
21. Vesic, A.S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil mass," *J. of Soil Mechanics and Foundation Div. ASCE*, Vol.98, pp.265-290
22. Voyiadjis, G.Z. and Kattan, P.I. (1989), "Eulerian constitutive model for finite deformation plasticity with anisotropic hardening," *Mechanics of Materials*, Vol.7, No.4, pp.279-293
23. Voyiadjis, G.Z. and Song, C.R. (2000), "Finite Strain, Anisotropic Modified Cam Clay Model with Plastic Spin, Part II: Application to Piezocone Test," *J. of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.126, No.10, pp1020-1026

(접수일자 2000. 7. 5)