

콘관입으로 인한 과압밀점토의 과잉간극수압의 분포

Excess Pore Pressure Induced by Cone Penetration in OC Clay

김 태 준¹ Kim, Tai-Jun
김 상 인² Kim, Sang-In
이 우 진³ Lee, Woo-Jin

Abstract

A series of calibration chamber tests are performed to investigate the spatial distribution of the excess porewater pressure due to piezocone penetration into overconsolidated clays. It was observed that the excess porewater pressure increases monotonically from the piezocone surface to the outer boundary of the shear zone and then decreases logarithmically, approaching zero at the outer boundary of the plastic zone. It was also found that the size of the shear zone decreases from approximately 2.2 to 1.5 times the cone radius with increasing OCR, while the plastic radius is about 11 times the piezocone radius, regardless of the OCR. Based on the modified Cam clay model and the cylindrical cavity expansion theory, the expressions to predict the initial porewater pressure at the piezocone were developed, considering the effects of the strain rate and stress anisotropy. The method of predicting the spatial distribution of excess porewater pressure proposed in this study was verified by comparing it with the porewater pressure measured in overconsolidated specimens in the calibration chamber.

요 지

본 논문에서는 과압밀된 점토에서 피에조콘 관입으로 인한 과잉간극수압의 공간적인 분포를 알아내기 위한 대형 토조시험을 실시하고 분석결과를 제시하였다. 시험결과에 의하면 콘 주변의 전단영역에서 과잉간극수압은 콘 표면으로부터 전단영역의 경계까지 직선적으로 증가하며, 소성영역에서는 대수적으로 감소하여 소성영역 경계에서 영으로 접근하였다. 또한 전단영역의 크기는 콘 반경의 2.2-1.5배 정도이며 과압밀비 증가 시 전단영역의 크기는 감소하는 반면 소성영역의 크기는 과압밀비에 상관없이 콘 반경의 약 11배로 일정하였다. 본 연구에서는 변형률 속도와 응력이 방성 효과를 고려하여 MCC(Modified Cam Clay) 모델과 공동확장이론으로부터 피에조콘 위치에서의 과잉간극수압을 예측하였으며, 전단영역에서 Δu_{shear} 의 선형증가와 전단 및 소성영역에서 Δu_{oc} 의 대수적 감소를 가정하여 과잉간극수압의 공간적 분포를 예측하기 위한 방법을 제시하였다. 이러한 방법으로 예측된 간극수압의 분포는 대형 토조시험에서의 콘 관입시험 결과와 비교를 통해 검증되었다.

Keywords : Calibration chamber, Overconsolidated clay, Piezocone, Porewater pressure

1 정회원, 쌍용건설(주) 토목기술부 과장 (Member, Ssangyong Construction & Engrg.Co.)

2 고려대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 고려대학교 사회환경시스템공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

과압밀 점토에서 피에조콘 소산시험 시, 과잉간극수압이 큰 관입 직후 증가하기 시작하여 최대값에 도달한 후 시간이 경과함에 따라 감소하여 정수압에 접근하는 현상이 많이 관찰된다(Lunne 등 1986, Sully 등 1988, Chen & Mayne 1994). 잘 알려진 바와 같이 과압밀 점토의 팽창(dilation)특성으로 인해 피에조콘 관입 시 음의 과잉간극수압이 발생하며, 과잉간극수압이 소산되면서 간극수압이 최대 값에 도달할 때까지 증가한다. 연약한 정규압밀 점토지반에서의 소산거동을 묘사할 수 있는 모델은 많은 반면, Burns & Mayne(1998)을 제외하고는 팽창(dilation)특성을 갖는 굳은 점토의 소산거동을 합리적으로 묘사하지 못하고 있다.

소산곡선의 합리적 해석을 위해서는 피에조콘 관입 직후 초기 과잉간극수압의 공간적 분포를 알아야 한다. 피에조콘의 관입 시 전단변형이 주로 발생하는 전단영역과 압축변형이 거동을 지배하는 소성영역이 피에조콘 주변에 발생하며, 이들 영역에서 발생하는 과잉간극수압은 octahedral shear stress에 의한 성분(Δu_{shear})과 octahedral normal stress에 의한 성분(Δu_{oct})으로 구성된다. Δu_{oct} 는 대부분 양의 값을 갖으나, Δu_{shear} 는 정규압밀 또는 작은 과압밀비에서는 양의 값을 갖는 반면 과압밀비가 큰 경우에는 음의 값을 갖는 것으로 알려져 있다(Burns & Mayne 1998). Chen & Mayne(1994), Burns & Mayne(1998), Chang 등(2001)은 MCC모델과 공동확장이론을 이용하여 콘 관입으로 인한 과잉간극수압을 Δu_{shear} 과 Δu_{oct} 으로 분리하였으나, 일반적으로 자연지반은 K_0 상태에서 압밀되므로 등방압밀 조건으로 가정하여 MCC모델을 적용하는 경우에는 상당히 조심스러운 검증이 필요로 한다.

콘 관입 시 발생하는 간극수압에 상당한 영향을 미치는 강성지수(rigidity index)는 비배수 전단강도와 전단탄성계수의 함수로 표현되며, 변형을 속도가 증가하면 이들은 증가하는 것으로 알려져 있다. 일반적으로 피에조콘의 관입속도는 삼축압축시험의 변형을 속도보다 훨씬 빠르므로 콘관입으로 인한 과잉간극수압을 예측하는 경우에는 이러한 영향을 고려하여 비배수 전단강도와 전단 탄성계수를 보정하여야 한다.

본 논문에서는 응력의 이방성과 변형을 속도를 고려하면서 공동확장이론과 MCC모델을 이용하여 피에조콘 관입으로 인한 과잉간극수압의 방사상 분포를 예측할 수 있는 식을 제안하였다. 또한 대형 토조에서 인위적

인 응력경로로 과압밀시킨 점성토에서 콘관입시험을 실시하고 이때 발생하는 과잉간극수압을 측정하여 전단영역과 소성영역의 크기를 추정하였다. 이러한 과정을 통해 여러 과압밀비를 갖는 점토에 대해 과잉간극수압의 공간적 분포를 예측하는 방법을 제시하고 대형토조의 실험결과와 비교를 통해 제안된 방법을 검증하였다.

2. 콘 관입으로 인한 과잉간극수압

피에조콘의 관입 시 콘 주변 지반변형으로 인해 간극수압의 변화가 유발되며 그 크기는 콘의 형상, 지반의 강도와 강성, 응력이력 등에 의해 결정된다. 콘 관입에 의한 영향범위는 콘과 인접한 전단영역과 그 외곽에 형성되는 소성영역으로 구성되며 각각의 크기는 주로 전단강도와 전단 탄성계수에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 전단 응력보다 압축응력의 영향범위가 훨씬 크므로 소성영역이 전단영역에 비해 크다. 전단영역은 콘과 인접한 얇은 원형 띠의 형상인 것으로 추정되며 콘 관입 시 전단변형이 상당히 커서 전단영역의 높은 한계상태에 도달하고 과잉간극수압의 크기는 dilatancy에 의해 결정된다. 소성영역의 과잉간극수압은 체적변형에 주로 영향을 받으며 대부분 양의 과잉간극수압이 발생한다. 각 영역에서의 초기 과잉간극수압 분포를 추정하기 위한 여러 가지 이론적 방법이 제안되었으나 실제 측정치와는 상당한 차이가 있는 것으로 알려져 있으며, 특히 과압밀 점토에 대해서는 실험적인 검증이 실시된 적이 없다.

Gupta(1983)는 전단영역의 크기를 콘 반경의 4배로 가정하였고, 전단영역에서는 음의 과잉간극수압이 대수적인 분포를 보이며 소성영역에서는 양의 간극수압이 3차 곡선 분포를 갖는 것으로 가정하였다. Burns & Mayne(1998)은 구형 공동확장이론으로 소성영역 크기를 추정하였으며 과잉간극수압의 선형적인 변화를 가정하고 회귀분석으로 전단영역의 크기를 추정하였다. 그러나 위의 방법들이 제시한 초기 과잉간극수압 분포에 대한 가정들은 추리적 성격이 강하다. 과압밀 점토의 경우에는 콘 관입으로 인해 발생하는 전단영역 내의 과잉간극수압은 양 또는 음의 값을 가질 수 있으며 그 크기에 따라 소산곡선의 초기 변화양상이 결정된다. 표 1은 콘 관입으로 발생하는 전단영역의 크기에 대한 연구결과를 요약한 것이다. Vesic(1972), Gupta(1983), Burns & Mayne(1998)은 전단영역의 크기가 과압밀비와 무관하다고 주장한 반면 Abu-Farsakh 등(1998)은 수치해석을 통해 전단영역

의 크기가 과압밀비 의존적이며 정규압밀 지반보다 과압밀 지반에서 전단영역이 작다고 주장하였다.

Burns & Mayne(1998)과 Chang 등(1999)은 공동확장 이론과 MCC모델로 피에조콘 관입으로 인한 과잉간극수압을 예측하였다. 또한 Wroth(1984), Wood(1990), Chang 등(1999)은 응력 이방성을 고려한 MCC모델로 지반거동의 해석을 시도하였다. Burns & Mayne(1998)과 Mayne & Bachus(1988)는 하이브리드 공동확장이론을 이용하여 피에조콘의 간극수압을 octahedral normal stress에 의한 성분과 octahedral shear stress에 의한 성분으로 분리하여 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$\Delta u = \frac{4}{3} \left[\sigma'_{vo} \frac{M}{2} \left(\frac{OCR}{2} \right)^\Lambda \right] \ln I_r + \sigma'_{vo} \left[1 - \left(\frac{OCR}{2} \right)^\Lambda \right] \quad (1)$$

여기서 σ'_{vo} 는 유효연직응력, M은 p'-q 평면에 표현된 한계상태선의 경사, Λ 는 소성 체적변형률비로서 $1 - C_c/C_c$ 로 표현되며 C_c 와 C_s 는 압밀시험에서 결정되는 압축지수와 팽창지수, I_r 는 지반의 강성지수이다. 그러나 식 (1)은 평균유효응력을 유효연직응력으로 가정하였으며 지반의 응력이방성 효과를 무시하였다. 이와 같은 단순화는 과압밀비가 큰 점토지반의 초기응력상태를 정확히 표현하지 못하는 문제점이 있으며 이로 인해 과잉간극수압의 성분들이 과소평가될 수 있다.

식 (1)에 의하면 전단변형에 의한 간극수압의 크기는 비배수 전단강도에 의해 결정되며 비배수 전단강도는 변형률 의존적인 것으로 알려져 있으므로 결국 간극수압의 크기는 변형률에 의해 영향을 받는다. 일반적으로 피에조콘 시험 시 관입속도는 20mm/sec 정도이며 이는 삼축압축시험의 변형률 속도보다 훨씬 빠르다. 그러므로 콘의 관입으로 인한 과잉간극수압의 예측을 위해서는 비배수 전단강도에 대한 변형률 속도의 영향을 고려하여야 한다. Ladd & Foott(1974)는 변형률 속도가 10배 증가하면 비배수 전단강도가 10% 증가한다고 주장하였으며, Kulhawy & Mayne(1990)은 26개 점토에 대한 삼

표 1. 과압밀 점토의 전단영역

참고문헌	전단영역의 크기	해석방법
Vesic(1972)	소성영역과 동일	공동확장이론
Gupta(1983)	콘 반경의 3-4배	현장측정
Burns & Mayne(1995)	10mm	가정
Burns & Mayne(1998)	2mm	시행착오법
Abu-Farsakh 등(1998)	정규압밀 지반보다 작음	유한요소해석

축압축시험 결과를 분석하여 변형률 속도에 대한 비배수 전단강도의 보정계수를 다음과 같이 제안하였다.

$$\alpha_\epsilon = \frac{s_u}{(s_u)_{\dot{\epsilon}=1\%/hr}} = 1.0 + 0.1 \log \dot{\epsilon} \quad (2)$$

여기서 α_ϵ 는 보정계수, s_u 는 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 에서의 비배수 전단강도, $(s_u)_{\dot{\epsilon}=1\%/hr}$ 는 변형률 속도 1%/hr에서의 기준 비배수 전단강도이다. 피에조콘 관입으로 인한 과잉간극수압의 예측을 위해 Chen & Mayne(1994)은 콘 관입의 변형률 속도를 200,000%/hr로 가정한 반면 Chang 등(2001)은 공동의 변형 속도를 고려하여 콘 관입의 변형률 속도를 800,000%/hr로 제안하였다. 이와 같은 결과를 식 (2)로 환산하면 콘 시험에서 추정된 비배수 전단강도는 기준 변형률 속도로 실시한 등방압밀비배수(CIU) 삼축압축시험의 결과보다 53-59% 큰 것을 알 수 있다.

Ladanyi(2002)는 콘관입시험의 기준 변형률속도의 정의에 대해 의문을 제기하고 콘의 관입속도와 삼축압축시험의 변형률속도 간의 관계를 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\dot{\epsilon} = 6\epsilon_f \left(\frac{\dot{s}}{B} \right) \quad (3)$$

여기서 $\dot{\epsilon}$ 는 콘의 관입속도 \dot{s} 에 상응하는 삼축압축시험의 환산 변형률속도, ϵ_f 는 삼축압축시험에서 파괴시의 변형률, 그리고 B는 콘의 직경이다. Ladanyi(2002)는 변형률속도의 효과를 보정하여 콘 관입시험으로부터 얻은 비배수 전단강도는 기준 변형률속도로 얻은 강도보다 12-15% 정도 큰 것으로 가정하였으며, 이는 Chen & Mayne(1994)과 Chang 등(2001)이 보고한 값보다 작다.

Chang 등(2001)은 변형률속도를 보정하기 위한 계수 α_ϵ 를 도입하여 피에조콘의 간극수압을 예측하는 식 (4)를 제안하였다.

$$\Delta u = 2\alpha_\epsilon \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{I_r \sqrt{3}}{2} \right) - \frac{1}{M} \right] + p'_{vo} \quad (4)$$

여기서 p'_{vo} 는 평균 유효연직응력이다. 실무적용을 위해 식 (4)의 강성지수는 콘 관입저항으로, 평균 유효연직응력은 유효상재하중으로, 그리고 등방응력상태에서 정의된 과압밀비는 전통적인 과압밀비로 표현하여 다음과 같은 식으로 제시하였다.

$$\Delta u = 0.866q_t - \alpha_\epsilon (1 + 0.66M) \sigma'_{vo} \left(\frac{OCR}{2} \right)^\Lambda + 0.134\sigma'_{vo} \quad (5)$$

3. 실내시험

3.1 KUCCS(Korea University Calibration Chamber System)

피에조콘 소산시험은 점성토 지반의 압밀특성을 결정하기 위해 자주 사용되는 현장시험이지만 과잉간극수압의 소산은 여러 변수에 영향을 받으므로 시험결과의 해석에 상당한 주의를 요한다. 따라서 소산시험의 해석방법을 개발하기 위한 시험은 이러한 변수들을 조절한 상태에서 실시되어야 한다. 이러한 측면에서 calibration chamber는 균질한 시료를 반복적으로 조성할 수 있고 시료의 밀도와 응력상태를 조절할 수 있으며 현장의 응력상태와 경계조건을 적절히 재현할 수 있는 최적의 시험장비로 판단된다.

본 연구에서는 점성토에서의 현장시험을 모사하기 위해 2단계 압밀에 의한 시료조성이 가능한 대형 calibration chamber를 시험에 사용하였으며 이러한 시스템은 그림 1에 보이는 바와 같이 슬러리 압밀장치, calibration chamber, 콘트롤 시스템, 그리고 데이터 획득 시스템으로 구성된다. 슬러리 압밀장치는 자연상태에서 퇴적 및 압밀과정을 묘사하기 위한 것이며 상부판을 가압하여 슬러리 상태의 초기시료가 자립이 가능할 때까지 1단계 압밀하기 위한 것이다. Calibration chamber는 유연한 2중 실린더 벽체와 하부의 피스톤 실린더로 횡방향 응력과 종방향 응력을 조절하며 직경 1.2m 높이 1m의 시료를 다양한 응력경로로 2단계 압밀하여 원하는 응력이력과 응력상태를 재현할 수 있다. 데이터 획득과 시스템 조절을 위한 소프트웨어는 상업용 프로그램인 LABVIEW를 이용하여 개발되었다(Kim, 2005).

압밀단계, 콘 관입, 소산시험 시 간극수압을 측정하기 위해 챔버의 하부판을 통해 시료내부에 여러 개의 피조미터를 설치하였다. 그림 2에 보이는 바와 같이 피조미

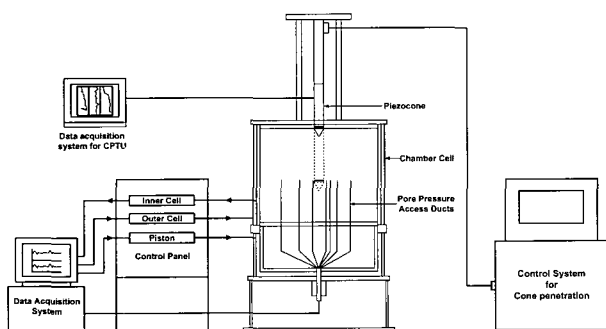


그림 1. Calibration chamber 시스템

터는 계획된 관입경로 주변에 방사형으로 설치되었으며 이를 통해 과잉간극수압의 공간적인 분포와 각 영향구역의 크기를 평가하였다. 설치된 피조미터는 수압측정용 트랜스듀서, 어댑터, 덕트, 폴리프로필렌 필터로 구성된다. 덕트는 내경이 4mm인 실린더 모양의 스테인레스 스틸이며 흙에 의한 clogging을 방지하고 덕트 내부의 포화상태를 유지하기 위해 덕트 끝부분에 필터를 설치하였으며 덕트 하부와 트랜스듀서는 어댑터로 연결하였다.

본 연구에서 사용된 피에조콘은 단면적이 10cm²이고 꼭지각이 60°이며 콘 선단저항과 간극수압의 측정을 위한 트랜스듀서의 용량은 각각 50Mpa과 2.5Mpa이다. 필터는 콘 어깨 뒷부분의 본체에 설치되어 있으며 선단저항값을 보정하기 위한 면적비는 0.58이다.

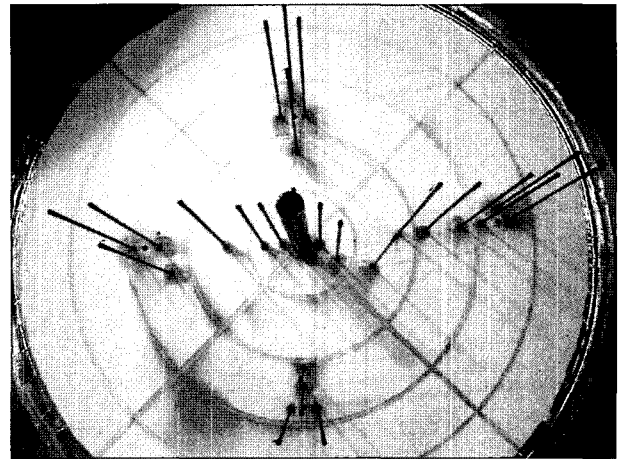


그림 2. 챔버의 하부를 통해 설치된 피조미터

3.2 KU-50의 지반공학학적 특성

본 연구를 위해 점성토의 역학적인 특성을 유지하면서 압밀 시 최소한의 시간이 소요되는 시료를 개발하였으며 KU-50으로 명명하였다. 이 시료는 kaolinite와 주문진사를 무게비로 50%씩 혼합한 것이며 공학적 성질은 표 2에 요약되어 있다. 연직방향과 횡방향 압밀계수는 대형토조 위쪽 표면부터 15, 30, 45, 60cm 지점의 중앙으로부터 20cm와 40cm지점에서 얻은 시료의 압밀시험 결과를 log t방법으로 해석하여 결정하였으며 표 2의 결과는 평균 값이다. Baligh & Levadoux(1980)는 층상이 없는 점성토의 투수계수 비(k_h/k_v)가 1.2±0.2 정도라고 제안하였으며 Mitchell 등(1978)과 Ladd 등(1977)은 투수성의 추정을 위해 흙의 압축성을 대략 등방으로 가

표 2. KU-50 시료의 공학적 물성

공학적 특성	물성치
액성한계(LL)	33.5
소성한계(PL)	14.6
비중	2.62
연직방향 압밀계수(정규압밀)	$1.04 \times 10^{-03} \text{cm}^2/\text{sec}$
연직방향 압밀계수(과압밀)	$1.28 \times 10^{-03} \text{cm}^2/\text{sec}$
수평방향 압밀계수(정규압밀)	$1.09 \times 10^{-03} \text{cm}^2/\text{sec}$
수평방향 압밀계수(과압밀)	$1.59 \times 10^{-03} \text{cm}^2/\text{sec}$

정하여도 무방하다고 주장하였다.

KU-50의 비배수 전단강도와 전단탄성계수를 평가하기 위해 CK_0UC 시험을 실시하였다. 모든 시료는 유효상재하중 200kPa까지 K_0 상태로 압밀하였으며 정규압밀시료를 제외하고는 과압밀비 5, 10, 20을 갖도록 적절한 유효상재하중까지 제하하였다. 각 시료의 응력조건과 시험결과는 다음의 표 3에 요약된 바와 같으며 그림 3은 유효상재하중으로 정규화한 축차응력과 축변형률의 관계를 도시한 것이다. 결과에 의하면 정규압밀 시료는 작은 변형에서 파괴되었으나 파괴 시 과압밀 시료의 변형은 과압밀비와 함께 증가함을 관찰할 수 있다. SHANSEP(Ladd 등, 1977)에 의하면 과압밀비와 s_u/σ'_{vc} 의 관계는 식 (6)과 같이 표현할 수 있으며 KU-50시료의 과압밀비에 대한 지수

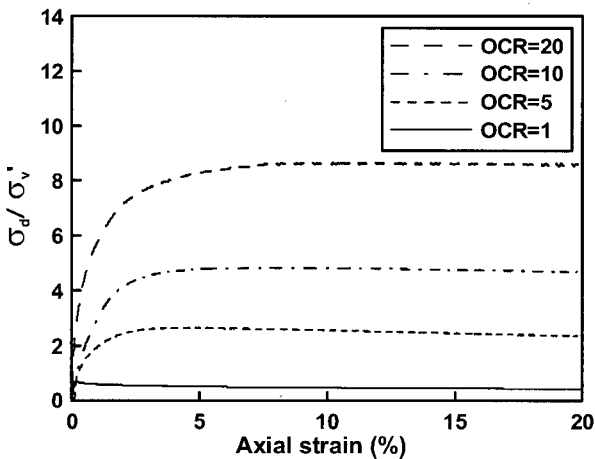


그림 3. KU-50시료의 정규화 응력-변형률 관계

표 3. CK_0UC 시험 결과

OCR	1	5	10	20
K_0	0.5	1.1	1.6	2.2
σ'_{vc} (kPa)	200	40	20	10
σ'_h (kPa)	100	44	32	22
s_u (kPa)	70	54	48	43
ϵ_t (%)	0.05	3	5	7

는 Ladd 등(1977)이 제안한 0.75-0.85의 범위 내에 있다.

$$\frac{s_u}{\sigma'_{vc}} = 0.35(OCR)^{0.84} \quad (6)$$

4. 간극수압 예측을 위한 이론식

4.1 과잉간극수압의 분포

피에조콘의 관입으로 인한 과잉간극수압의 반응은 상당히 복잡하여 위에서 설명한 이론적인 방법으로 정확히 설명할 수 없으며, 관입 시 전단으로 인한 주응력의 회전을 고려할 수 있는 현실적인 모델이 현재로서는 존재하지 않는다. 모델링이 복잡할 수록 수치해석의 과정에 훨씬 많은 시간과 노력이 필요한 반면 간단한 이론적인 방법에 비해 그 결과가 우수하지 않을 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 콘의 관입으로 과압밀 점토에 발생하는 과잉간극수압의 초기분포를 예측하기 위해 과잉간극수압을 구성하는 각 성분은 그림 4와 같이 분포하는 것으로 가정하였다.

콘의 관입 시 전단영역과 소성영역에 octahedral normal stress에 의해 발생하는 초기 과잉간극수압(Δu_{oct})은 공동확장이론에서 제안된 바와 같이 대수적인 분포를 갖는 것으로 가정하였다. 반면 전단영역에서 octahedral shear stress에 의해 발생하는 초기 과잉간극수압(Δu_{shear})은 콘 표면에 최대 절대값을 보이고 전단영역과 소성영역 경계에서 영이 되도록 선형 변화한다고 가정하였다. 소성영역 바깥에서의 과잉간극수압과 소성영역에서의 Δu_{shear} 는 발생하지 않는 것으로 가정하였다.

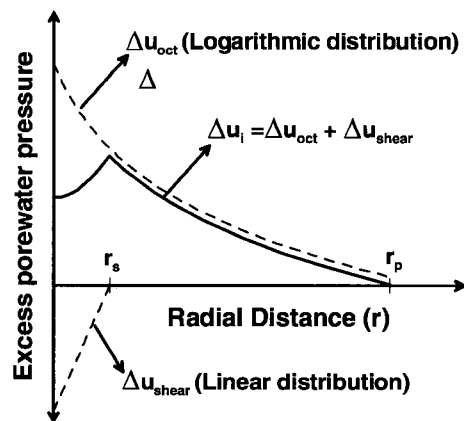


그림 4. 과잉간극수압 구성 성분들의 공간적 분포

4.2 이론적인 영향범위

Teh & Houlsby(1991)는 관입체에 인접하여 큰 전단 변형률이 발생하는 영역을 관찰하고 탄성변형영역과 소성변형영역으로 주변의 지반을 분리하는 탄소성 경계를 제안하였다. Bond & Jardine(1991)은 말뚝반경의 1.5배 이내 영역에서는 50% 이상의 전단변형률이 발생하여 한계상태에 도달하는 것을 관찰하였으며, 말뚝반경의 1.5-4배 영역에서는 전단변형이 dilation을 일으키지만 한계상태에 도달하지는 못한다고 주장하였다. 위의 관찰내용을 정리하면 피에조콘 주변지반에는 관입으로 인해 각기 다른 정도의 전단변형이 발생하며 전단탄성계수의 변형률 의존적인 특성으로 인해 강성지수가 변화함을 알 수 있다.

본 논문에서는 전단탄성계수의 변형률 의존적인 특성을 감안하여, 공동확장이론에 의한 전단영역과 소성영역 예측시, 각각의 경우에 따라 다른 강성지수를 적용하여 예측하였다. 원통형 공동확장이론에 근거한 이론적인 소성반경은 다음식으로 표현할 수 있다.

$$r_p = r_o \left(\frac{G_{50}}{s_u} \right)^{0.5} = r_o (I_r)^{0.5} \quad (7)$$

여기서 r_p 는 소성영역의 반경, r_o 는 콘의 반경, G_{50} 은 최대전단응력의 50%에 해당하는 응력에서의 접선전단탄성계수, s_u 는 비배수 전단강도, I_r 은 강성지수다. 예측된 소성영역의 크기는 calibration chamber에서 수행된 피에조콘 시험결과로부터 결정된 값과 비교를 통해 검증되었다.

과압밀 점토에 관입되는 피에조콘에 의해 발생하는 전단영역은 작은 원통형 고리모양이며 발생하는 Δu_{shear} 는 지반의 dilatancy에 따라 양 또는 음의 값을 갖는다. 과압밀 점토의 CK₀UC시험에서 음의 과잉간극수압은 최대응력 부근의 축방향 변형률에서 관찰되었으므로 최대응력에서의 전단탄성계수를 원통형 공동확장이론에 적용하여 전단영역의 크기를 산정하였다.

$$r_s = r_o \left(\frac{G_f}{s_u} \right)^{0.5} \quad (8)$$

여기서 r_s 는 전단영역의 반경이고 G_f 는 최대응력에서의 전단탄성계수다. 전단영역 내의 지반은 한계상태에 도달하기 때문에 응력이방성은 전단영역의 결정에 그 영

향이 크지 않을 것으로 판단된다. 그러므로 피에조콘의 관입속도가 삼축압축시험의 변형률속도보다 크다는 사실이 전단영역의 예측치와 실측치 간의 차이를 유발시키는 요인일 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 강성지수에 대한 변형률속도 효과를 보정하기 위한 계수를 전단영역의 예측식에 다음과 같이 적용하였다.

$$r_s = r_o (\alpha_s \frac{G_f}{s_u})^{0.5} \quad (9)$$

여기서 α_s 는 변형률속도 효과를 보정하기 위한 계수이다. 보정계수 α_s 는 이론적인 방법으로 구하기 어려우므로 calibration chamber의 시험결과로부터 경험적으로 결정하였다.

4.3 초기 과잉간극수압 산정을 위한 이론식

콘 관입으로 유발되는 과잉간극수압은 식 (10)에 주어진 바와 같이 octahedral normal stress와 octahedral shear stress에 의한 두 성분으로 구성된다.

$$\Delta u = \Delta u_{oct} + \Delta u_{shear} \quad (10)$$

각 성분들의 기여도는 이론적으로 구분할 수 있으나 피에조콘은 합산된 간극수압만을 측정하므로 소산시험에서 각 성분을 분리하여 제시할 수 없다. Wroth(1984)와 Campanella 등(1986)에 의하면 콘 선단 하부에서는 간극수압의 크기가 평균 주응력에 의해 가장 큰 영향을 받지만 콘 주변에서는 주응력의 이완이 발생하므로 전단응력의 영향이 지배적이다.

Wroth 등(1979)은 octahedral shear stress에 의한 과잉간극수압을 p' - q 공간에서 평균유효응력의 최종값과 초기값의 차이로 표현하였다.

$$\Delta u_{shear} = p'_o - p'_f \quad (11)$$

여기서 p'_o 와 p'_f 는 각각 초기와 파괴 시의 평균 유효응력이다. 또한 비배수 전단강도는 다음과 같이 정의된다.

$$s_u = \frac{1}{2}q = \frac{M}{2}p'_f \quad (12)$$

등방압밀 시료에 대한 비배수 삼축압축시험 (CIUCTX)에서 얻은 비배수전단강도를 MCC모델을 이용하여 정

규화하면 다음과 같으며

$$\left(\frac{s_u}{\sigma'_{vo}}\right)_{cisc} = \frac{1}{2}M\left(\frac{R}{2}\right)^\Lambda \quad (13)$$

여기서 σ'_{vo} 는 유효연직응력, M은 p'-q공간에서 정의된 한계상태선의 경사, R은 등방응력으로 정의된 과압밀비, 그리고 Λ 는 소성 체적변형률비를 나타낸다.

과압밀비가 큰 점토의 초기응력상태($\sigma'_h > \sigma'_v$)에서는 과압밀비를 유효연직응력 또는 평균유효응력으로 정의할 수 있다. OCR과 R을 같다고 가정하면, 과압밀비가 증가함에 따라 그 차이가 커져 그에 따른 오차가 약 30~50% 정도까지 커질 수 있으므로, Chang 등(1999)은 이들간의 관계를 다음과 같이 제안하였다.

$$R = \alpha_R OCR \quad (14)$$

여기서 $\alpha_R = \{9(1-K_{onc})^2 + M^2(1+2K_{onc})^2\} / \{M^2(1+2K_0)(1+2K_{onc})\}$, $K_0 = K_{onc} OCR^{\sin\phi'}$, 그리고 $K_{onc} = 1 - \sin\phi'$ 이다. Chang 등(1999)은 이를 식 (13)에 도입하여 K_0 압밀된 시료에 대한 비배수 삼축압축시험(CK_0 UCTX)에서 얻은 비배수 전단장도를 평균 유효주응력의 함수로 정의하였다.

$$\left(\frac{s_u}{p'_o}\right)_{ck,uc} = \frac{1}{2}M\left(\frac{\alpha_R OCR}{2}\right)^\Lambda \quad (15)$$

실내시험의 변형률 속도와 현장시험의 관입속도 간의 차이를 고려하기 위해 Cao 등(2001)은 원통형 공동의 변형률속도를 다음과 같이 정의하였다.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{r_0} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{r_0} \dot{s} \quad (16)$$

여기서 $\dot{\varepsilon}$ 는 실내시험의 등가 변형률속도, r_0 는 콘의 반경, \dot{s} 는 콘의 관입속도이다. 변형률속도에 대한 보정계수 (α_ε)는 식 (2)와 식 (16)으로부터 결정되며 콘시험 결과로부터 추정되는 비배수 전단장도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$s_u = \alpha_\varepsilon \frac{1}{2} Mp'_o \left(\frac{\alpha_R OCR}{2}\right)^\Lambda \quad (17)$$

따라서 파괴 시의 평균 유효주응력은 다음과 같이 정

의되며

$$p'_f = \alpha_\varepsilon p'_o \left(\frac{\alpha_R OCR}{2}\right)^\Lambda \quad (18)$$

콘 관입에 의한 Δu_{shear} 를 응력이방성과 변형률속도에 대해 보정하면 다음 식과 같다.

$$\Delta u_{shear} = p'_o \left[1 - \alpha_\varepsilon \left(\frac{\alpha_R OCR}{2}\right)^\Lambda\right] \quad (19)$$

Vesic(1972)과 Torstensson(1977)이 제안한 원통형 공동확장이론을 이용하면 octahedral normal stress에 의한 간극수압을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta u_{oct} = s_u \ln(I_r) \quad (20)$$

따라서 변형률속도와 이방응력조건을 고려하여 공동확장이론과 MCC모델로부터 Δu_{oct} 를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta u_{oct} = \alpha_\varepsilon \frac{1}{2} Mp'_o \left(\frac{\alpha_R OCR}{2}\right)^\Lambda \ln(I_r) \quad (21)$$

Robertson과 Campanella(1983)은 Δu_{oct} 를 구하기 위한 강성지수는 G_{50} 으로 평가되어야 한다고 주장하였다. Roy 등(1982)에 의하면 콘 선단 근처의 지반에 대해서는 초기 접선 탄성계수를 사용해야 하는 반면 콘 선단 뒷부분의 지반에 대해서는 E_{50} 을 사용해야 한다고 주장하였다. Konard와 Law(1987)는 소성영역 바깥에서 발휘되는 탄성계수는 초기 접선탄성계수부터 파괴시의 작은 값까지 범위가 넓으므로 E_{50} 으로부터 강성지수를 평가해야 한다고 주장하였다. 강성지수에 대한 많은 주장에도 불구하고 Baligh 등(1986)과 Jamiolkowski 등(1985)은 G_{50} 에서 추정된 압밀계수가 과압밀 지반에 적절하다고 주장하였다. 본 연구에서도 일반적으로 가장 많이 사용되는 전단 탄성계수 G_{50} 으로 정의된 강성지수를 이용하여 Δu_{oct} 를 평가하였다. 또한 피에조콘 관입 시 전단영역에서는 상당한 octahedral normal stress가 발생하므로 Δu_{oct} 도 변형률속도에 대해 보정되어야 한다. 따라서 Δu_{oct} 를 구하기 위한 식은 다음과 같이 제안되었다.

$$\Delta u_{oct} = \alpha_\varepsilon \frac{1}{2} Mp'_o \left(\frac{\alpha_R OCR}{2}\right)^\Lambda \ln\left(\alpha_s \frac{G_{50}}{s_u}\right) \quad (22)$$

5. Calibration Chamber 시험 결과 및 분석

5.1 시료준비 및 피에조콘 관입시험

시험에 사용될 시료를 제작하기 위해 기계식 믹서에 점토와 모래를 1:1로 넣고 액성한계의 2배에 해당하는 함수비로 섞어 KU-50 슬러리를 제작하였다. 믹서를 진공에 연결하여 기포를 제거한 후 슬러리를 압밀토조에 포설하고 유압식 가압기로 상부판에 압력을 가하여 압밀을 시작하였다. 초기압력 10kPa을 가한 후 매 24시간마다 하중증가율 1.0으로 160kPa까지 하중을 증가시켰으며 160kPa의 압력은 잔여의 슬러리 압밀기간 동안 유지하였다. 초기에 1700mm이던 슬러리의 높이가 1100mm 정도까지 압밀되어 자립강도를 얻게 되면 압밀토조는 분해되고 시료 외부에 calibration chamber가 조립된다. Calibration chamber 내에 설치된 시료는 K_0 상태를 유지하면서 재압밀되었으며 최종 압밀단계에서는 연직응력 400kPa, 횡방향응력 300kPa, 배압 200kPa을 유지하였다. 이러한 과정을 통한 시료의 준비는 슬러리압밀 45일과 재압밀 30일 등 총 75일정도가 소요되었다.

Calibration chamber에서의 압밀이 완료되면 배압과 구속압을 동시에 증가시켜 챔버 상부판을 통해 설치된 피에조콘의 반응을 점검하였다. 피에조미터의 포화상태와 교정상태도 같은 절차로 검증하였다. 먼저 정규압밀된 시료에서 콘의 관입시험과 소산시험을 실시하였으며 SHANSEP에서 이용된 응력경로를 따라 특정한 과압밀비를 갖도록 시료를 제하한 후 관입시험과 소산시험을 반복하였다. 피에조콘 관입위치 간의 거리는 관입 시 발생하는 소성영역의 크기를 고려하여 콘 반경의 15배 이상으로 하였다. 모든 시험에는 porous stone이 콘 어깨 뒤에 위치한 표준형 피에조콘을 사용하였으며 관입속도는 2cm/sec를 유지하였다. 관입 시의 간극수압은 데이터 수집용 소프트웨어로 매 0.1-1.0초 간격으로 측정하였다.

5.2 피에조콘 관입으로 인한 과잉간극수압의 초기분포

피에조콘 관입으로 발생하는 과잉간극수압의 분포를 추정하기 위해 콘의 관입 예상경로 주변에 여러 개의 피조미터를 설치하고 0.1-1.0초 간격으로 간극수압을 측정하였다. 피에조콘과 인접하여 설치된 피조미터는 콘 관입으로 인해 횡방향 변위가 유발될 가능성이 크지만,

그림 5에 보이는 바와 같이 피에조콘을 회수한 후에는 피조미터가 원위치로 회복되는 것을 관찰하였다. 피조미터가 콘 주변의 지반과 같이 움직이는 한 피조미터의 변위로 인한 영향은 없는 것으로 판단된다.

그림 6과 7은 각기 다른 과압밀비를 갖는 점토에서

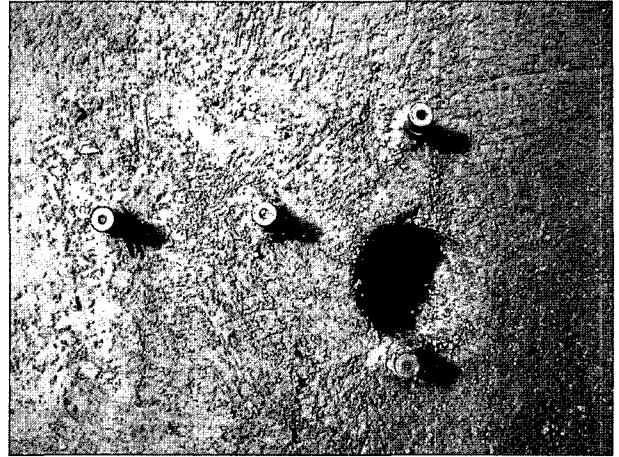


그림 5. 피에조콘 관입위치와 인접한 피조미터

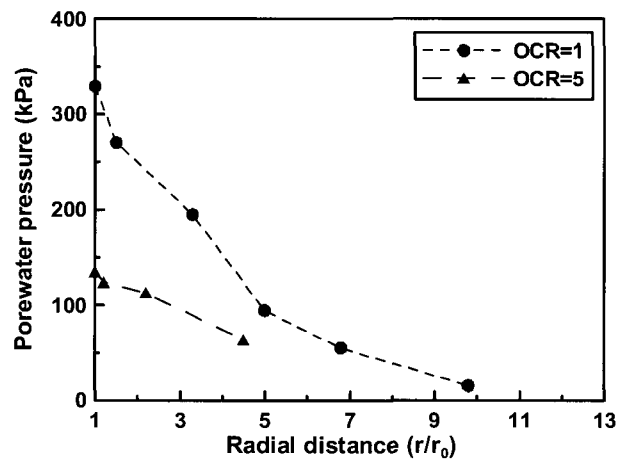


그림 6. 과압밀비 1과 5에서 과잉간극수압의 공간적 분포

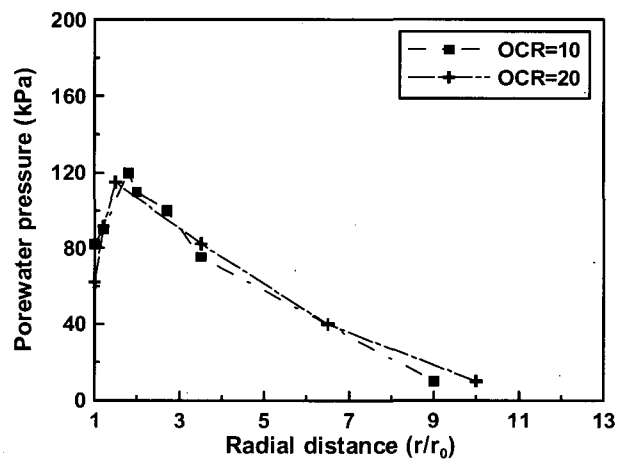


그림 7. 과압밀비 10과 20에서 과잉간극수압의 공간적 분포

피에조콘과 피조미터로 측정한 과잉간극수압의 공간적 분포를 도시한 것이다. 이 그림에 의하면 정규압밀점토에서 콘 관입으로 발생하는 과잉간극수압은 콘에서 멀어질수록 급속히 감소하는 반면, 약간 과압밀된 점토에서는 완만한 감소 경향을 보이는데 이는 Δu_{oct} 가 Δu_{shear} 에 비해 상당히 크기 때문이다. 심하게 과압밀된 점토들은 콘으로부터 멀어질수록 피에조콘의 간극수압으로부터 최대값까지 증가하였다가 최소값으로 감소하는 경향을 보인다. 과압밀비가 큰 지반에서는 콘 관입 시 전단영역에 dilation의 경향을 유발할 정도로 전단변형률이 크게 발생하며 결과적으로 전단영역에 음의 Δu_{shear} 를 발생시킨다. 이러한 dilation 경향은 과압밀비가 클수록 증가하므로 피에조콘에서 측정되는 간극수압이 과압밀 점토에서 작은 값을 보인다.

5.3 전단영역과 소성영역

소성영역 내에서는 Δu_{oct} 가 대수분포한다고 가정하고 calibration chamber에서 피조미터로 측정한 간극수압에 대해 회귀분석을 실시하여 과잉간극수압이 0이 되는 반경을 소성영역의 크기로 추정하였다. 그림 6과 7에 의하면 과압밀비에 상관없이 소성반경의 크기는 일정하며 콘 반경의 10.7-13.0배 정도인 것으로 관찰되었다. 과압밀비가 5인 점토에서는 피에조콘에서 가장 멀리 설치된 피조미터까지의 거리가 콘 반경의 4.5배이고 예상되는 소성영역 내에 2개의 데이터만 존재하므로 육안관찰을 통해 소성반경은 콘반경의 11.4배인 것으로 추정하였다.

일반적으로 소성영역의 이론적인 크기는 원통형 공동확장이론(식 (7))에 의해 추정되며 본 연구에서는 전단탄성계수 G_{50} 를 사용하여 소성반경의 크기를 산정하여 실측된 과잉간극수압에서 추정된 소성반경과 비교하였다. 그림 8은 과압밀비에 따른 소성반경 크기의 변화를 도시한 것으로, 과압밀비가 증가하면 공동확장이론에 의한 이론적인 소성반경은 감소하는 반면 실험결과로부터 추정된 소성반경은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 정규압밀점토의 경우 이론치가 실험결과보다 약 2.2배 정도 큰 반면 과압밀비 10과 20에서 소성반경은 실험결과에 비해 약 34.75% 정도 과소평가되었다.

전단영역의 크기는 최대 과잉간극수압이 발생하는 반경으로 정의하였으며, 그림 4에 보이는 것과 같이 전단영역 내에서 Δu_{shear} 의 선형증가와 Δu_{oct} 의 대수적 감

소를 가정하여 예측한 간극수압분포와 측정된 분포를 비교하여 전단반경을 결정하였다. 약간 과압밀된 점토에서 측정된 간극수압 분포는 뚜렷한 최대값이 관찰되지 않았지만 육안관찰에 의해 전단반경은 콘 반경의 2.2배로 추정되었으며 과압밀비 10과 20인 점토의 전단반경은 각각 1.8배와 1.5배의 콘 반경으로 평가되었다. 이상에서 얻은 결과에 의하면 과압밀 정도가 증가할수록 전단영역의 반경은 감소함을 알 수 있고 이러한 경향은 Abu-Farsakh 등(1998)의 수치해석 결과와 일치한다.

본 연구에서는 식 (8)과 전단탄성계수 G_r 를 사용하여 이론적인 추정한 전단반경을 실험결과로부터 얻은 전단반경과 비교하였다. 그림 9에 의하면 공동확장이론에 의한 반경은 실험으로부터 추정된 값에 비해 약 2배 정도 크지만 과압밀비의 증가에 따라 반경들이 감소하는 비슷한 경향을 보인다. 두 값의 차이는 피에조콘의 관입

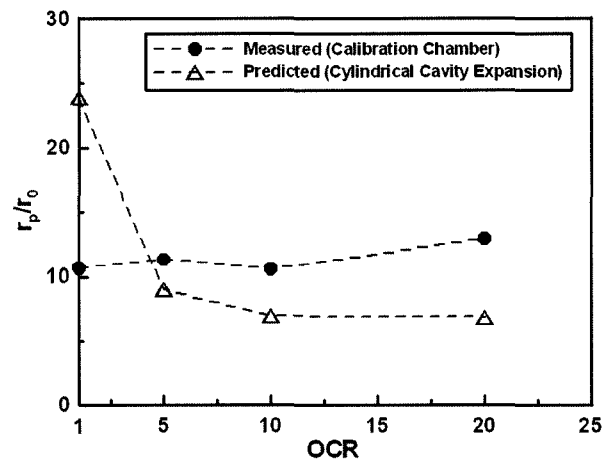


그림 8. 과압밀비에 따른 소성반경의 변화

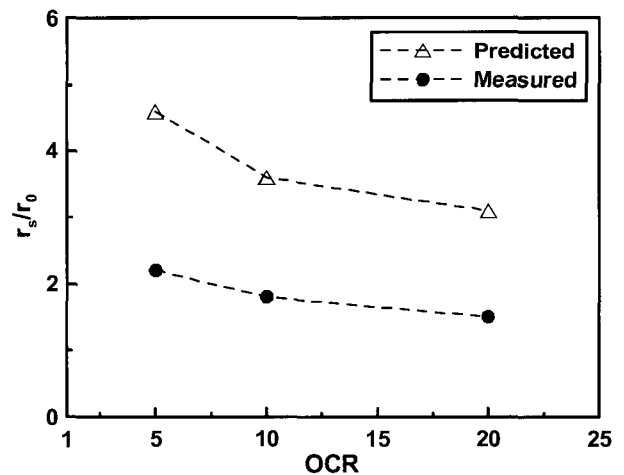


그림 9. 과압밀비에 따른 전단반경의 변화

속도가 실내시험의 변형률 속도에 비해 큰 것이 중요한 원인이므로 강성지수에 대한 변형률 속도를 보정하는 계수 α_s 를 식 (9)와 같이 도입하였다. 그림 9의 결과에 의하면 보정계수 α_s 는 0.23-0.25의 범위이며 본 연구에서는 0.25를 사용하였다.

5.4 피에조콘의 초기 과잉간극수압

피에조콘에 의해 측정된 과잉간극수압은 이론적인 방법으로 추정된 값과 약간의 차이를 보이며 이는 이론식 유도시의 가정사항과 시료 물성치의 불확실성으로 인한 것이다. 본 연구에서는 공동확장이론으로 추정된 Δu_{ocf} 와 MCC를 확장하여 추정한 Δu_{shear} 의 합으로 콘 위치에서의 초기 간극수압을 예측하였다.

그림 10은 초기응력상태와 변형률 속도의 효과를 알아보기 위해 측정된 피에조콘 간극수압과 원통형 공동확장이론에 의한 예측값을 비교한 것이다. 여기서 Δu_{ocf} 의 예측을 위해서는 G_{50} 을 사용한 반면 Δu_{shear} 의 예측을 위해서는 G_r 를 사용하였다. 그림에 의하면 응력이방성을 고려하는 경우 간극수압이 과대평가되는 반면 변형률속도를 고려하는 경우에는 간극수압이 과소평가됨을 알 수 있다. 응력이방성이나 변형률 속도를 무시하고 예측된 간극수압의 크기가 실측치와 가장 근접한 것을 그림에서 관찰할 수 있으나 이는 응력이방성과 변형률속도가 과잉간극수압에 대해 서로 상반된 효과를 보임으로 인한 것이다. 일반적으로 응력이방성과 변형률속도

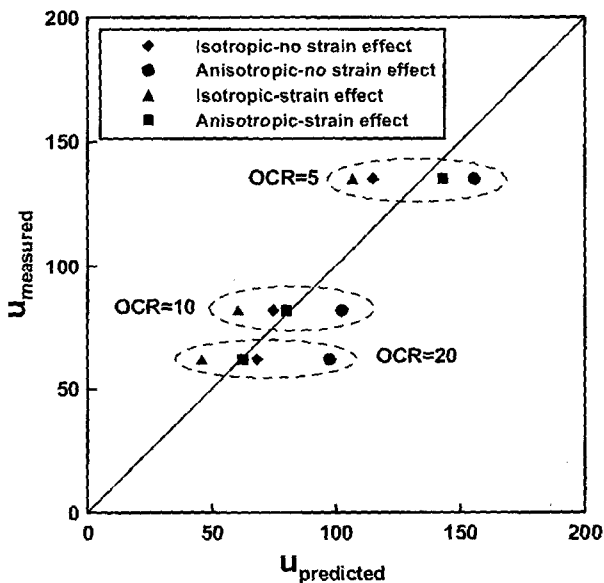


그림 10. 간극수압에 대한 응력이방성과 변형률속도의 영향

두 가지를 모두 고려하여 예측한 값은 실내시험에서 측정된 값과 상당히 비슷하므로, 피에조콘 관입으로 인해 유발되는 간극수압은 응력이방성과 변형률속도에도 영향을 받는다고 결론 내릴 수 있다.

그림 11은 공동의 종류가 피에조콘 간극수압 예측치에 미치는 영향을 보이고 있다. 그림에 의하면, 구형 공동확장이론은 과압밀비에 상관없이 피에조콘의 과잉간극수압을 원통형 공동확장이론에 비해 다소 과대 평가하는 경향을 보이며, Δu_{ocf} 를 위해 G_{50} 을 사용한 원통형 공동 확장이론이 과압밀 점토의 간극수압을 적절히 예측하고 있다. 그림 12는 calibration chamber에서 측정된 피에조콘 간극수압과 여러 연구자의 방법에 의한 예측 값을 비교한 것이다. 본 연구에서 응력이방성과 변형률속도를 고려하여 예측한 간극수압이 측정된 값과 가장

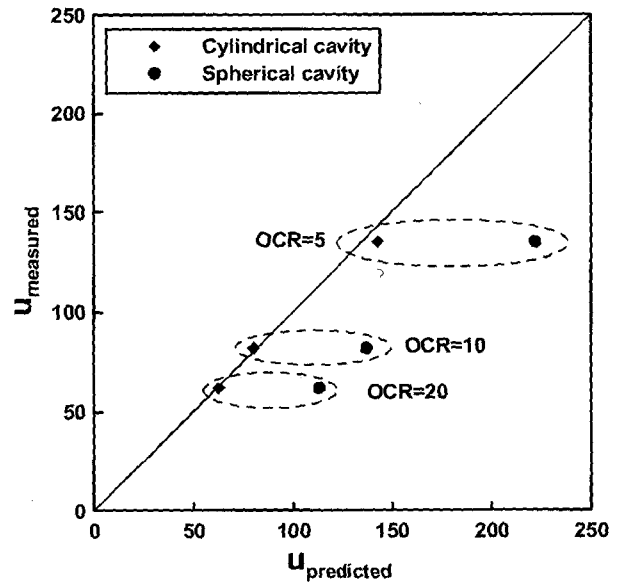


그림 11. 간극수압에 대한 공동 형태의 영향

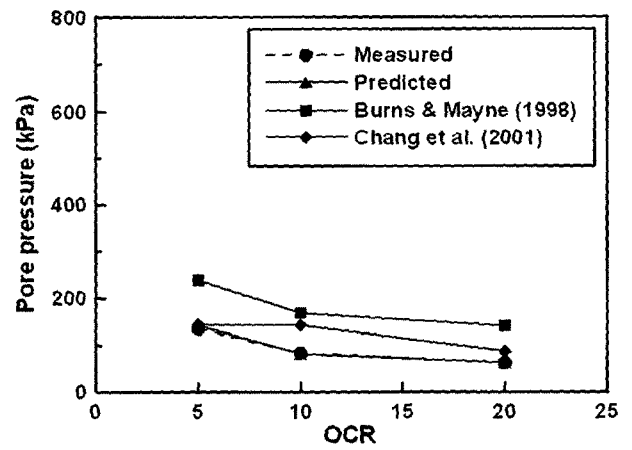


그림 12. 여러 방법에 의한 피에조콘 간극수압의 예측

근사한 결과를 보이는 반면, Burns & Mayne(1998)의 방법은 간극수압을 약 100% 정도 과대평가하고 있다. 이는 응력이방성을 고려하지 않았고 다르게 정의된 전단탄성계수를 사용하였기 때문으로 판단된다. 또한 Chang 등(2001)의 방법은 과압밀비에 상관 없이 거의 일정한 값을 보인다.

5.5 초기 간극수압 분포의 검증

본 연구에서 제안된 반경험적 방법을 검증하기 위해, 여러 가지 방법으로 피에조콘 관입으로 유발되는 초기 간극수압의 분포를 추정하고 이를 calibration chamber에서 얻은 결과와 비교하였다. 표 4는 간극수압을 추정하기 위해 사용한 방법과 이론식을 요약한 것이다.

방법 1과 2는 변형률 속도와 응력이방성을 고려하여 공동확장이론과 MCC모델로 피에조콘의 간극수압을 예상한 후 간극수압의 공간적인 분포를 예측한다. 식 (16)과 식 (2)에 의해 결정된 보정계수 α_s 은 1.56이고 OCR값과 R값 간의 보정계수 α_R 은 OCR=5, 10, 20일 때 0.87, 0.66, 0.52의 값을 갖는다. 강성지수에 대한 변형률속도의 보정계수 α_s 는 0.25로 일정한 값을 사용하였다. 방법 1에서는 원통형 공동확장이론으로 소성반경을 결정하였으나 방법 2에서는 실험에서 관찰된 일정한 값 $11r_o$ 를 소성반경으로 하였다. 비교의 목적으로 Burns & Mayne(1998)의 방법에 의한 분포예측 결과를 함께 도시하였다.

그림 13~그림 15는 표 4의 방법으로 예측된 간극수압의 분포와 calibration chamber에서 측정된 결과를 비

교한 것이다. 그림에 의하면, 모든 과압밀비에서, 일정한 소성반경을 갖는 것으로 가정하고 간극수압의 분포를 예측한 방법 2가 측정된 분포에 가장 근접한 결과를

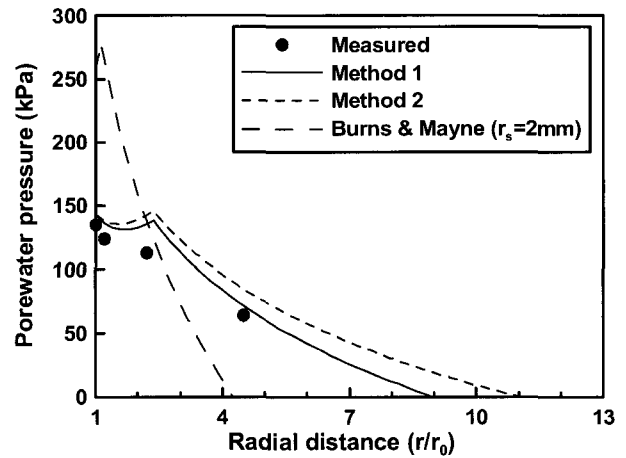


그림 13. OCR=5인 경우 콘 주변의 과잉간극수압 분포

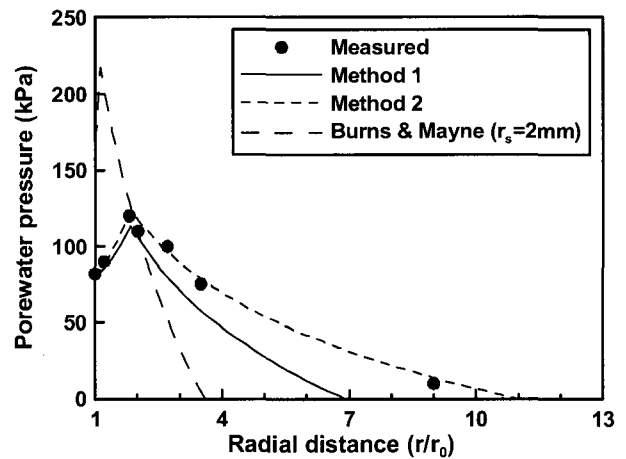


그림 14. OCR=10인 경우 콘 주변의 과잉간극수압 분포

표 4. 예측방법의 비교

방법	영향영역의 크기	초기 간극수압
Burns & Mayne (1998)	$r_s : 2\text{mm}$ $r_o : \text{spherical cavity}$	$\Delta u_{shear} = \sigma'_{vo} \left[1 - \left(\frac{OCR}{2} \right)^\lambda \right]$ $\Delta u_{oct} = \frac{4}{3} \sigma'_{vo} \frac{M}{2} \left(\frac{OCR}{2} \right)^\lambda \ln \left(\frac{G_{50}}{s_u} \right)$
방법 1	$r_s = r_o \left(0.25 \times \frac{G_f}{s_u} \right)^{0.5}$ $r_p = r_o \left(\frac{G_{50}}{s_u} \right)^{0.5}$	$\Delta u_{shear} = p'_o \left[1 - \alpha_v \left(\frac{\alpha_R OCR}{2} \right)^\lambda \right]$ $\Delta u_{oct} = \alpha_c \frac{1}{2} M p'_o \left(\frac{\alpha_R OCR}{2} \right)^\lambda \ln \left(0.25 \times \frac{G_{50}}{s_u} \right)$
방법 2	$r_s = r_o \left(0.25 \times \frac{G_f}{s_u} \right)^{0.5}$ $r_p = 11.0 r_o$	

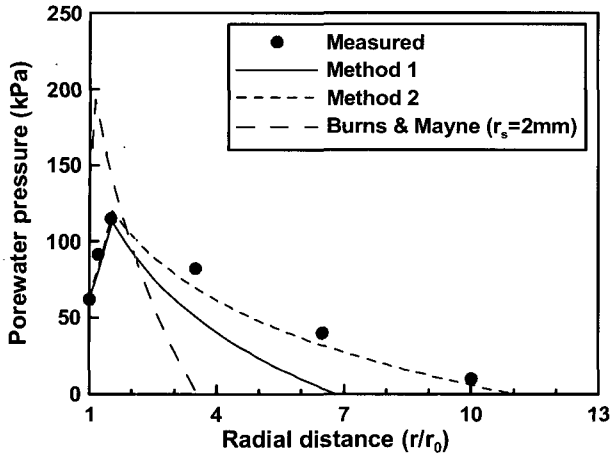


그림 15. OCR=20인 경우 콘 주변의 과잉간극수압 분포

보임을 알 수 있다. Burns & Mayne(1998)에 의한 예측은 측정분포와는 상당히 다른 결과를 제시하며 이는 전단반경과 소성반경의 크기가 상대적으로 작고 예측된 피에조콘 간극수압의 크기가 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 대형 calibration chamber에 조성된 과압밀 점토에 대한 피에조콘의 관입시험을 실시하고 콘 주변에 발생하는 과잉간극수압의 공간적 분포에 대한 분석 결과를 제시하였으며 이로부터 콘 주변에 형성되는 전단 및 소성영역의 크기를 평가하였다. 또한 변형률속도와 응력이방성 효과를 도입하여 피에조콘 간극수압을 예측하기 위한 방법을 제시하였으며, 검증을 위해 과잉간극수압의 예측치와 실내시험의 측정치를 비교하였다. 이와 같은 과정을 통해 얻은 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 중간 또는 심한 과압밀 점토의 경우, 피에조콘으로부터 거리가 멀어질수록 전단영역에서는 과잉간극수압이 증가하여 최대값에 도달하고 소성영역에서는 대수적으로 감소하여 0에 접근하는 것으로 관찰되었다. 이러한 관찰로부터 OCR=10~20의 점토에 피에조콘이 관입되면 콘 주변에 전단영역이 형성되는 것을 알 수 있다. 약간 과압밀된 점토에서는 피에조콘 과잉간극수압의 소산 초기에 약간의 지체현상이 발생하는 것으로 미루어 전단영역의 존재를 간접적으로 알 수 있었으나 측정된 과잉간극수압의

공간적 분포에서는 전단영역에 의한 영향이 확실하지 않았다.

- (2) 측정된 과잉간극수압의 공간적 분포에 의하면, 전단영역의 크기는 콘 반경의 1.5~2.2배 정도이며 그 크기는 과압밀비가 클수록 감소하는 것이 관찰되었다. 전단탄성계수 G_r 를 이용한 원통형 공동확장이론은 전단영역의 크기를 측정된 크기보다 약 2배 정도 크게 예측하였으나 과압밀비가 증가하면 그 크기가 감소하는 비슷한 경향을 보여주었다. 실측치와 예측치의 차이는 변형률속도의 영향으로 생각되며, 본 연구에서는 이에 대한 보정계수 α_s 를 0.25로 제안하였다.
- (3) Calibration chamber에서 수행된 시험결과에서 소성영역의 크기는 과압밀비에 상관없이 거의 일정한 값을 보이며 평균적인 크기는 콘 반경의 11배 정도로 관찰되었다. 이러한 결과는 과압밀비가 증가하면 소성반경의 크기가 감소한다고 주장하는 이전의 연구결과와 상반된다.
- (4) 공동확장이론과 MCC모델에 변형률속도와 응력이방성에 대한 보정계수를 도입하여 Δu_{oct} 와 Δu_{shear} 를 추정하고 이들의 합으로 피에조콘의 초기간극수압을 예측할 수 있다. 변형률속도와 응력이방성 효과를 고려하지 않은 과잉간극수압의 예측이 측정된 결과와 근접한 것은 두 효과가 과잉간극수압에 서로 상반된 영향을 미치는 것으로 인한 우연한 결과이므로 두 효과를 모두 고려하는 것이 합리적이다. 또한 구형 공동확장이론에 비해 원통형 공동확장이론이 콘 선단 뒷부분의 과잉간극수압을 더 정확히 예측함을 알 수 있었다.
- (5) 본 연구에서 제안된 Δu_{shear} 와 Δu_{oct} 의 예측식, 전단영역과 소성영역의 크기, 그리고 각 영향영역에서 Δu_{shear} 와 Δu_{oct} 의 분포를 이용하여 예측한 콘 주변 간극수압의 공간적인 분포는 calibration chamber 시험을 통한 실측치와 상당히 잘 일치하고 있다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 지원에 의해(과제번호 R01-2000-000-00374-0) 이루어진 연구 결과입니다.

참고 문헌

1. Abu-Farsakh, M. Y., Voyiadjis, G. Z., and Tumay, M. T. (1998),

- “Numerical Analysis of the Miniature Piezocone Penetration Tests in Cohesive Soils”, *International Journal for Numerical and Analytical Methods on Geomechanics*, Vol.22, pp.791-818.
2. Baligh, M. M. and Levadoux, J. N. (1980), “Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration”, *Report R80-11*, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.
 3. Baligh, M. M. and Levadoux, J. N. (1986), “Consolidation after Undrained Piezocone Penetration. II: Interpretation”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.112, No.7, pp.727-745.
 4. Bond, A. J. and Jardine, R. J. (1991), “Effects of Installing Displacement Piles in a High OCR Clay”, *Geotechnique*, Vol.41, No.3, pp.341-363.
 5. Burns, S. E. and Mayne, P. W. (1998), “Monotonic and Dilatory Pore-Pressure Decay during Piezocone Tests in Clays”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.6, pp.1063-1073.
 6. Campanella, R. G., Robertson, P. K., and Gillespie, D. (1986), “Factor affecting the Porewater Pressures and its Measurements Around a Penetrating Cone”, *39th Canadian Geotechnical Conference*, Ottawa, pp.291-299.
 7. Cao, L. F., Teh, C. I., and Chang, M. F. (2001), “Undrained Cavity Expansion in Modified Cam Clay I: Theoretical Analysis”, *Geotechnique*, Vol.51, No.4, pp.323-334.
 8. Chang, M. F., Teh, C. I., and Cao, L. F. (1999), “Critical State Strength Parameters of Saturated Clays from the Modified Cam Clay Model”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, No.5, pp. 876-890.
 9. Chang, M. F., Teh, C. I., and Cao, L. F. (2001), “Undrained Cavity Expansion in Modified Cam Clay II: Application to the Interpretation of the Piezocone Test”, *Geotechnique*, Vol.51, No.4, pp.335-350.
 10. Chen, B. S. and Mayne, P. W. (1994), “Profiling the Overconsolidation Ratio of Clays by Piezocone Tests”, *Report GIT-CEECEO-94-1*, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 280pp.
 11. Gupta, R. C. (1983), “Determination of the In-situ Coefficient of Consolidation and Permeability of Submerged Soils using Electrical Piezoprobe Soundings”, Ph.D. Dissertation, University of Florida.
 12. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R. (1985), “New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils”, *11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, pp.57-153.
 13. Kim, T. J. (2005), “Dissipation of Porewater Pressure due to Piezocone Penetration in OC Clay”, Ph.D. dissertation, Korea University.
 14. Konard, J. M. and Law, K. T. (1987), “Undrained Shear Strength from Piezocone Tests”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, No.3, pp.392-405.
 15. Kulhawy, F. H. and Mayne, P. W. (1990), “Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design”, *Report EPRI EL-6800*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, C.A.
 16. Ladanyi, B. (2002), “Discussion: Undrained Cavity Expansion in Modified Cam Clay II: Application to the Interpretation of the Piezocone Test”, *Geotechnique*, Vol.52, No.4, pp.307-311.
 17. Ladd, C. C. and Foott, R. (1974), “New Design Procedure for Stability of Soft Clays”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.100, No.7, pp.763-786
 18. Ladd, C. C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F., and Poulos, H. G. (1977), “Stress Deformation and Strength Characteristic”, *9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, pp.421-494.
 19. Lunne, T., Eidsmoen, T. E., Powell, J. J. M., and Quaternmann, R. S. T. (1986), “Piezocone Testing in Overconsolidated Clays”, *39th Canadian Geotechnical Conference*, Ottawa, pp.209-218.
 20. Mayne, P. W. and Bachus, R. C. (1988), “Profiling OCR in Clays by Piezocone Soundings”, *International Symposium on Penetration Testing*, Rotterdam, Netherlands, pp.857-864.
 21. Mitchell, J. K., Guzikowski, F., and Villet, W. C. B. (1978), “The Measurement of Soil Properties In-Situ”, *Report W-7405-ENG-48*, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley, C.A., 67pp.
 22. Robertson, P. K. and Campanella, R. G. (1983), “Interpretation of Cone Penetration Tests. Part II: Clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, No.4, pp.734-745.
 23. Roy, M., Tremblay, M., Tavenas, F., and La Rochelle, P. (1982), “Development of Pore Pressures in Quasi-Static Penetration Tests in Sensitive Clay”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.19, No.1, pp.124-138.
 24. Sully, J. P., Campanella, R. G., and Robertson, P. K. (1988), “Overconsolidation Ratio of Clays from Penetration Pore Pressures”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.114, No.2, pp. 209-216.
 25. Teh, C. L. and Houlsby, G. T. (1991), “An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay”, *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17-34.
 26. Torstensson, B. A. (1977), “The Pore Pressure Probe”, *Geotechnical Meeting*, Norwegian Geotechnical Society, Oslo, pp.34.1-34.15.
 27. Vesic, A. S. (1972), “Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.98, No.3, pp.265-290.
 28. Wood, D. M. (1990), *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
 29. Wroth, C. P. (1984), “The Interpretation of In-Situ Soil Tests”, *Geotechnique*, Vol.34, No.4, pp.449-489.
 30. Wroth, C. P., Carter, J. P., and Randolph, M. F. (1979), “Stress Change around a Pile Driven into Cohesive Soil”, *Recent Developments in the Design and Construction of Piles*, I.C.E, London, pp.255-264.

(접수일자 2006. 5. 9, 심사완료일 2006. 10. 17)