

피에조 콘 소산시험을 이용한 현장 압밀거동 예측

Prediction of In-Situ Consolidation Behavior from CPTU Dissipation Test

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

¹⁾ 한국과학기술원 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, KAIST

²⁾ 한국과학기술원 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, KAIST

SYNOPSIS : For normally consolidated clay, several researchers have developed a number of theoretical time factors to determine a coefficient of consolidation from piezocone test results. These researches are basically related to the distribution of initial excess pore pressures. However, the coefficient of consolidation determined by those methods not only make predicted dissipation curve matched to measured dissipation curve only at around 50% degree of dissipation but also make it difficult to predict the excess pore pressure at high-degree of dissipation which is used to evaluate the degree of consolidation of in-situ site. Therefore, such methods have some troubles in predicting long-term behavior of soft soil by using a linear consolidation theory with their prediction of the coefficient of consolidation.

Based on the previous results that the coefficient of consolidation could be reasonably estimated by the optimization technique, in this paper, we have tried to predict more realistic excess pore pressure at high degree of dissipation.

Even though more researches are needed to apply the proposed method to domestic construction sites, the results show that the prediction of excess pore pressure at high degree of dissipation can be good enough if the proposed method uses the dissipation curve data up to around 50% degree of dissipation.

KEYWORDS : Piezocone, Degree of dissipation, Coefficient of consolidation, Excess pore pressure

1. 연구배경

현장지반의 압밀도를 예측하기 위하여 피에조 콘의 소산시험을 이용하는 경우에 현장의 잔류 과잉간극수압 측정을 위해서는 매우 긴 시간과 노력이 요구되는 어려움이 있다. 뿐만 아니라 지금까지 여러 연구자들에 의해 제안된 이론적인 시간계수들은 모두 현장에서 관측된 표준화된 간극수압 곡선과 50% 압밀도와 같은 특정 압밀도에서만 일치하도록 제안되어 있으므로 기존의 압밀계수 산정법으로 추정된 압밀계수로는 현장지반의 장기적인 간극수압 및 압밀거동 예측이 부적합하다.

따라서, 본 연구에서는 중간 압밀도(50%정도)까지의 소산시험 결과를 바탕으로 최적화 방법을 적용하여 압밀계수를 산정하고 이를 이용하여 고 소산도(High degree of dissipation; 80~90% 정도)에서의 잔류 간극수압을 예측하는 방법에 관한 연구를 수행하였다.

2. 제안된 방법

본 연구에서 사용한 방법은 두 단계(two phase)로 이루어져 있으며 그림1과 같이 정리할 수 있다. 먼저 일정 압밀도 상태까지 관측된 간극수압 소산곡선과 개발된 프로그램으로부터 예측된 간극수압의 차이의 제곱을 아래 식(1)과 같이 목적함수로 정의하고 이를 최소화하는 최적화 방법을 이용하여 압밀계수를 구하는 첫 단계(phase 1)와 (김영상 등, 1997) 구해진 압밀계수를 이용한 축대칭 선형 압밀해석을 통하여 간극수압이 소산되는 과정을 모사함으로써 고 소산도 수준까지의 간극수압을 예측하는 두 번째 단계(phase 2)로 이루어져 있다.

$$f(x) = \sum_{n=1}^{ntime} (u^n - U^n)^2 \quad (1)$$

여기서, ntime = 계측 시간단계의 수이며 u^n 와 $U^n = n$ 시간 단계에서의 예측 및 관측 과잉 간극수압이고 $x =$ 설계변수로서 연직 및 수평압밀계수(C_v, C_h) 또는 평균압밀계수(C_{avg})이다.

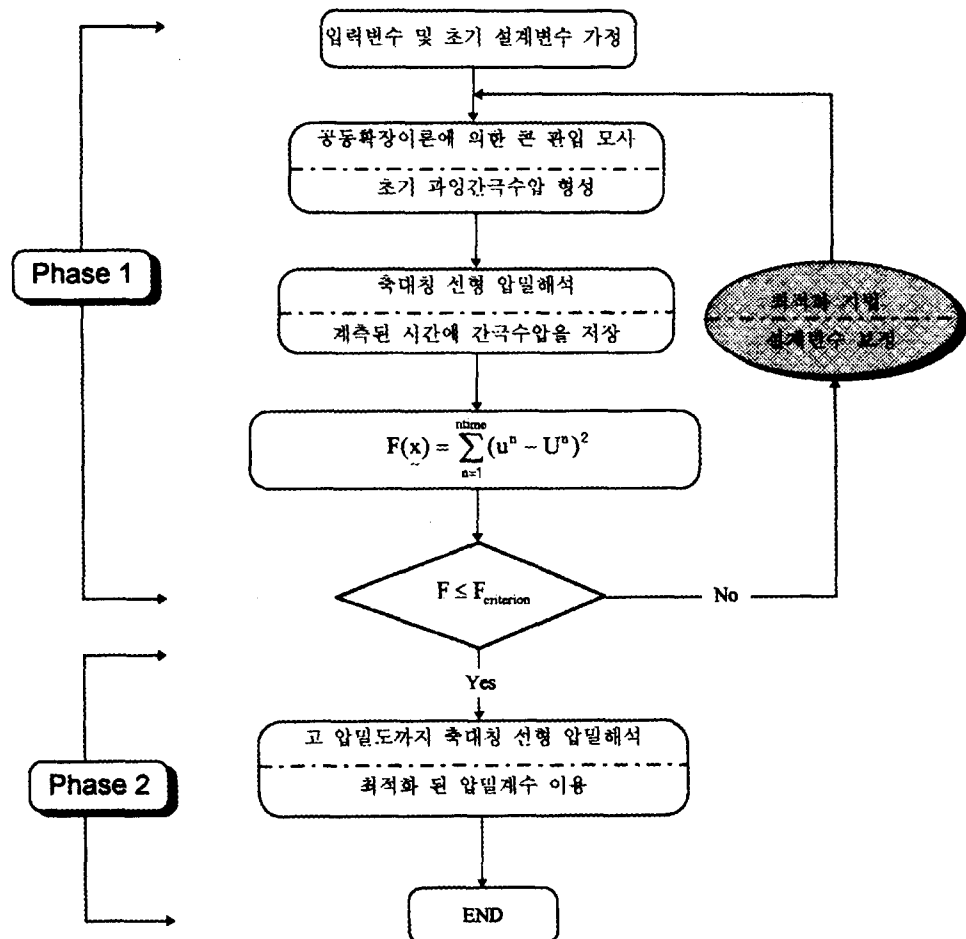


그림 1. 제안된 방법의 개략도

3. 입력 소산도에 따른 압밀계수와 고 압밀도에서의 거동예측

3.1 압밀계수 추정에 미치는 영향

입력 소산도의 변화가 압밀계수 최적화 결과에 미치는 영향을 알아보기 위해 예제해석 4.1의 경우에 대하여 입력 소산도를 약 30%~80% 범위로 나누어 입력하였다.

표 1. 입력 소산도에 따른 압밀계수 최적화 결과

입력소산도 (%)	수평압밀계수	평균압밀계수
29.1	11.44	6.24
40.0	9.01	5.12
49.1	7.51	4.38
60.0	6.99	4.16
70.0	6.87	4.13
80.0	6.70	4.03

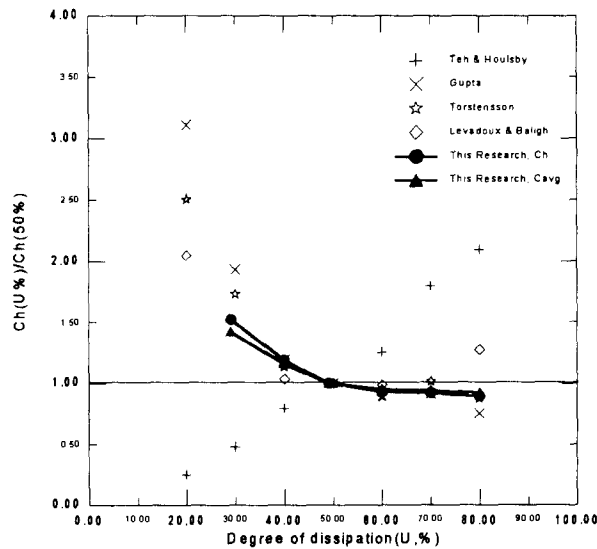


그림 2. 50% 소산도의 압밀계수로 표준화 한 여러 소산도에서의 압밀계수 변화

그림 2에는 본 연구결과와의 비교를 목적으로 Torstensson(구형 공동확장 이론, $I_R=300$ 인 경우), Teh & Houlsby ($I_R=267$ 인 경우), Gupta, Baligh & Levadoux의 방법 등으로 구한 여러 소산도에서의 압밀계수(Robertson 등,1992)를 50% 소산도에서 구한 압밀계수로 표준화 하여 함께 표시하였다. 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. 그러나, 본 연구에서 제안된 방법으로 각 소산도에서의 압밀계수를 산정하는 경우에는 50% 소산도에서 구한 압밀계수에 비하여 저(30%정도) 소산도에서부터 고(80%정도) 소산도에 이르기까지 비교적 일관성 있는 (consistent) 압밀계수를 산정할 수 있을 뿐만 아니라 소산곡선의 표준화 과정에서 기인하는 오류를 포함하지 않는다.

3.2 고 소산도에서의 간극수압 예측에 미치는 영향

입력 소산도의 변화에 따른 고 소산도에서의 간극수압 예측결과 변화와 그 영향을 살펴보았다. 입력된 소산도까지의 소산곡선은 관측된 간극수압과 함께 그림 3에 나타냈으며 추정된 압밀계수를 이용하여 80% 소산도까지 예측한 소산곡선은 그림 4와 같다.

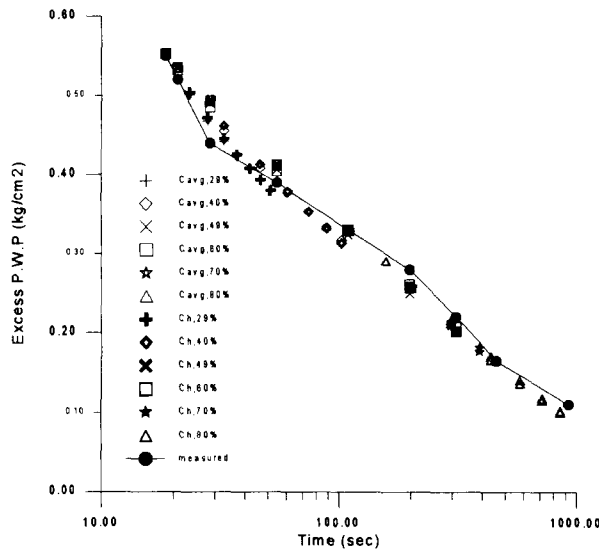


그림 3. 입력 소산도까지 예측된 소산곡선

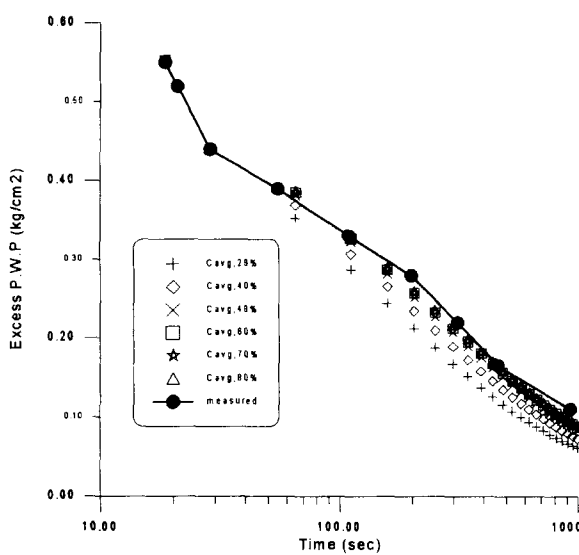


그림 4(a). 평균압밀계수

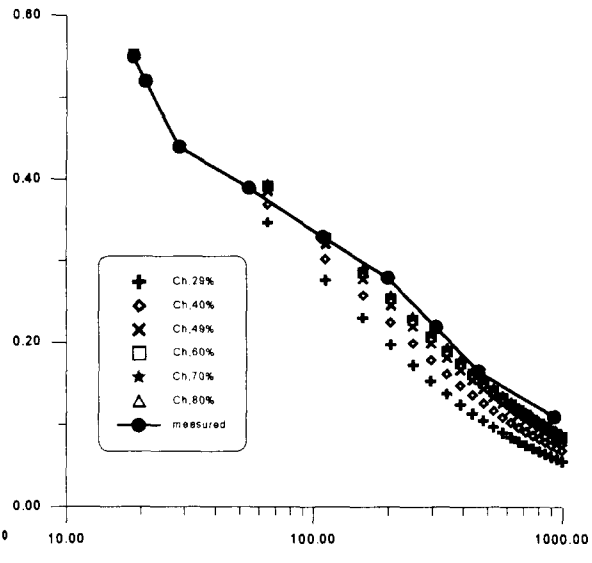


그림 4(b). 수평압밀계수

그림 4. 80% 소산도까지 예측된 소산곡선

그림 3에서는 모든 소산곡선이 입력 소산도까지는 관측된 간극수압과 큰 차이가 없이 잘 일치하고 있으나 그림 4를 살펴보면 29.1%, 40%까지의 입력 소산도를 바탕으로 압밀계수를 결정한 경우 고 소산도 영역에서의 간극수압이 관측된 간극수압에 비해 과소 평가되고 있음을 알 수 있다. 그러나 49.1%~80% 범위의 입력 소산도를 바탕으로 산정된 평균 압밀계수와 수평 압밀계수는 표 1에서 보는 바와 같이 그 값이 크게 차이 나지 않으며 관측된 간극수압과 매우 잘 일치하는 간극수압을 예측함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 볼 때 비록 저 소산도까지의 소산곡선을 입력자료로 압밀계수를 산정한 결과가 해당 소산도까지는 비교적 잘 일치하는 결과를 줄 수 있고, 3.1절에서 설명된 그림 2의 결과와 같이 다른 방법에 비하여 다른 소산도에서 구해진 압밀계수와 일관성 있는 압밀계수를 얻을 수 있다 하더라도 고 소산도에서의 잔류 간극수압을 예측하는 데에는 다소 부적합하다고 사료된다. 따라서 고 소산도의 간극수압 예측을 위해서는 50%에 가까운 입력 소산도로부터 추정된 압밀계수를 이용하는 것이 비교적 경제적이면서도 장기 거동해석에 있어서도 바람직할 것으로 사료된다.

4. 예제해석

4.1 소형 실내 피에조 콘 실험(Kurup,1994)의 경우

앞 절에서 연구한 바를 바탕으로 최적의 입력 소산도인 50%정도 소산도까지의 소산곡선으로부터 압밀계수를 결정하면 아래의 표2와 같으며 소산곡선은 그림 5에 도시되어 있다.

표 2. 입력 소산도로부터 결정된 압밀계수

입력 소산도 (%)	C_{avg}	C_h
49.1	4.38	7.51

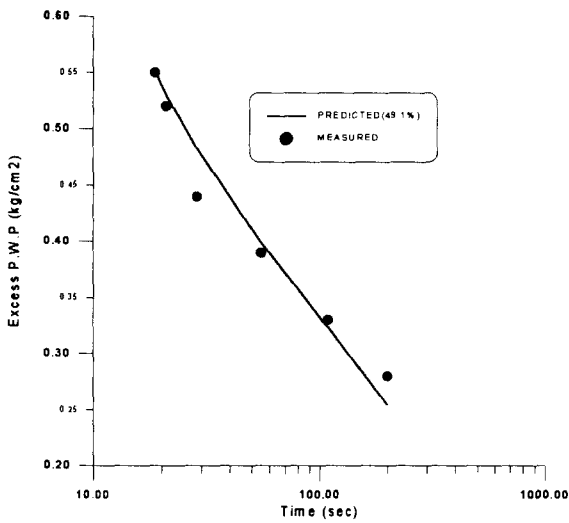


그림 5(a). 평균압밀계수

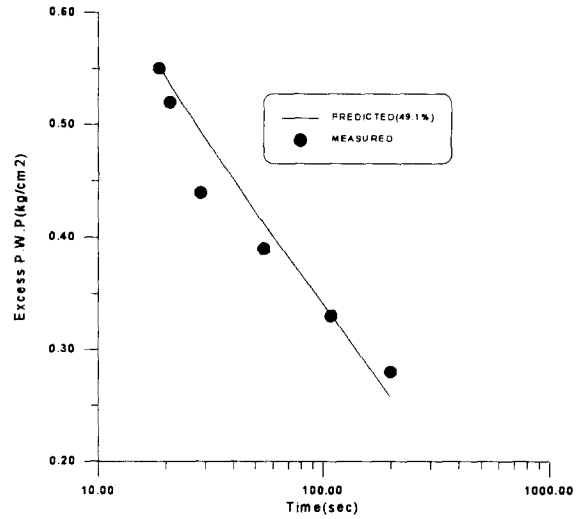


그림 5(b). 수평압밀계수

그림 5. 입력 소산도까지의 소산곡선

49.1% 입력 소산도로부터 결정된 압밀계수로부터 80%이상의 소산도까지의 간극수압을 예측한 결과는 그림 6과 같다. 그림에는 제안된 방법 이외의 다른 연구자들의 방법으로 결정된 압밀계수를 사용하여 예측한 간극수압 소산곡선이 함께 나타나 있다. 다른 연구자들의 해들은 소산 초기인 저 소산도영역에서는 다소 빠르게 그러나 고 소산도 영역에서는 느리게 소산하는 결과를 예측했으며 이는 그들의 방법들이 50%에서만 일치하는 압밀계수를 산정하도록 되어있으므로 필연적인 결과라 할 수 있다. 그러나 본 연구에서 제안된 방법에 의해 49.1%까지의 입력 소산도로부터 결정된 압밀계수는 저 소산도에서 고 소산도에 이르기까지 관측된 간극수압 소산곡선과 매우 잘 일치하는 결과를 예측함을 알 수 있다.

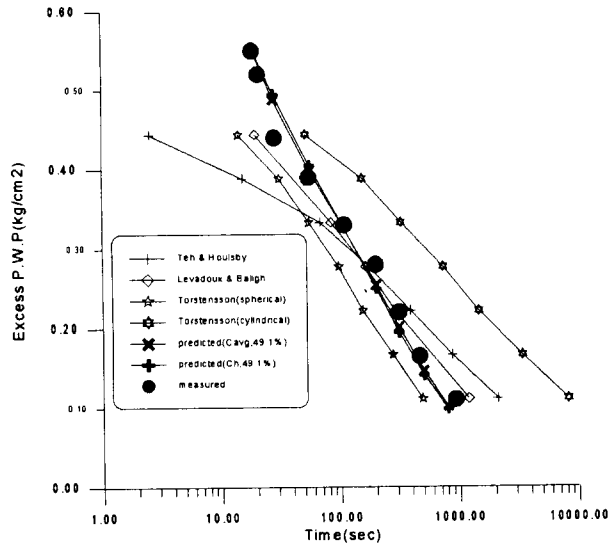


그림 6. 고 소산도까지의 소산곡선 예측 결과

4.2 Lake Alice site(Gupta,1983)의 경우

이번 예제는 현장에서 실시된 실제 소산시험을 입력하여 얻어진 결과로 두 차례의 소산시험 결과를 분석하였다. 입력 소산도와 그 결과는 표3 및 그림 7에 나타냈으며 이를 이용하여 고 소산도까지 예측한 결과는 그림 8과 같다.

표 3. 입력 소산도로부터 결정된 압밀계수

Number of Sounding	입력 소산도 (%)	C_{avg}	C_h
1	45.3	1.83	3.57
2	35.0	1.52	2.92

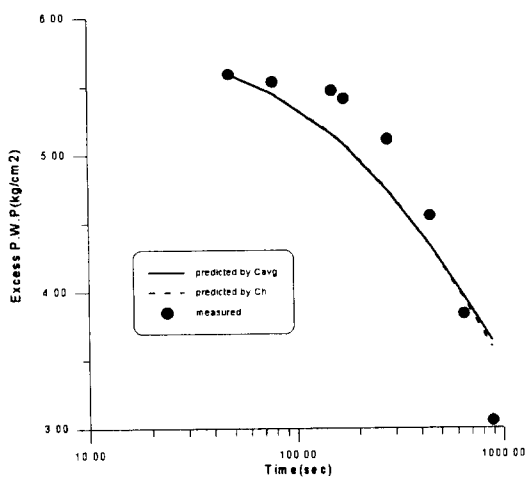


그림 7(a). 1차 실험결과

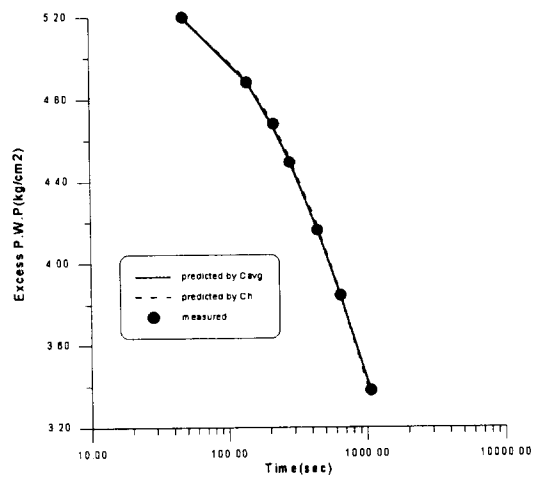


그림 7(b). 2차 실험결과

그림 7. 입력 소산도까지의 소산곡선

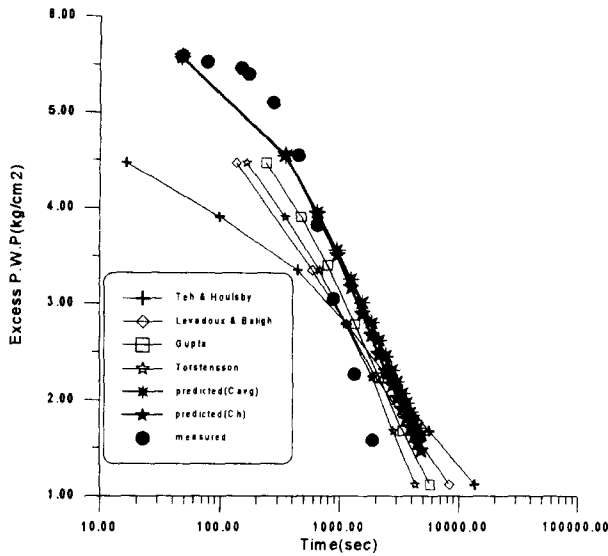


그림 8(a). 1차 실험결과

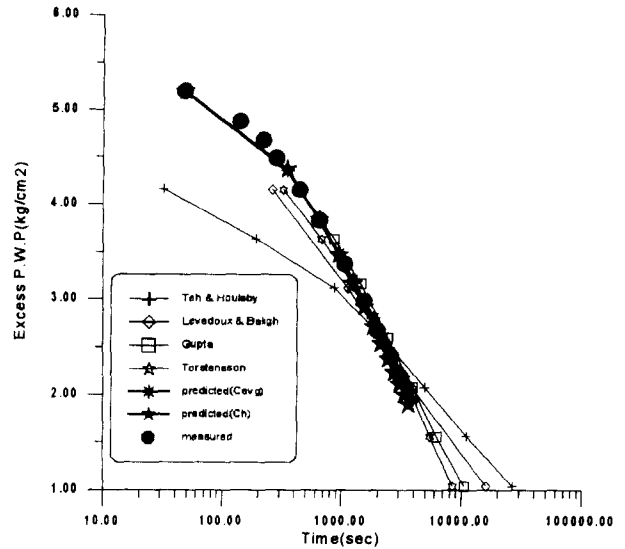


그림 8(b). 2차 실험결과

그림 8. 고 소산도까지의 소산곡선 예측 결과

이 예제는 현장 실험결과를 입력자료로 사용한 경우이므로 현장의 다소 불균질하고 불균등한 지반조건이 초기 간극수압의 형성과 연관되어 이론적으로 예측한 소산곡선의 형태와 다소 차이가 나는 첫번째 경우와 소산 초기부터 이론값과 거의 일치하는 두 번째 경우가 발생할 수 있다. 그러나 두 경우 모두 다른 방법에 의한 압밀계수로부터 예측한 소산곡선에 비해 전체적으로 그 소산경향을 매우 잘 반영하는 것을 알 수 있어 압밀계수와 고 소산도에서의 간극수압 예측을 위한 본 연구에서 제안된 방법의 현장 적용성을 뒷받침하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 피에존 콘 소산실험 결과로부터 압밀계수를 추정하는 기존의 방법을 보완한 최적화 기법을 적용한 추정방법을 고 소산도 영역에서의 장기적인 간극수압 거동예측을 위해 적용하였다. 그 결과 다음과 같은 결과들을 도출하였다.

(1) 제안된 방법으로부터 결정된 압밀계수는 입력 소산도에 따라 크게 차이 나지 않는 일관성 있는 압밀계수가 추정됨을 알 수 있어 제안된 방법의 신뢰성을 확인하였으며 고 소산도에서의 잔류 간극수압을 적절히 예측하기 위해서는 최소한 50% 정도의 소산도까지는 소산시험을 수행하여야 할 것으로 사료된다.

(2) 예제 해석을 통하여 볼 때 제안된 방법은 최적화 방법을 이용함으로써 중간 소산도(50% 주변)까지의 압밀특성을 전체적으로 반영한 압밀계수를 결정하기 때문에 기존의 방법과 같이 특정 소산도(50%)에서만 일치하도록 구한 압밀계수를 이용한 방법보다 장기거동 해석 시 고 소산도(90%) 영역에서의 과잉 간극수압을 보다 실제 관측 값에 가깝게 모사할 수 있어 압밀도 평가 기법에 보다 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

(3) 제안된 방법으로 구한 압밀계수는 축대칭 선형 압밀해석을 이용하여 해석함에도 불구하고 고 소산도 영역의 간극수압을 비교적 잘 예측하므로 현장 연약지반의 장기 압밀거동을 보다 경제적이며 실제적으로 예측할 것으로 사료된다.

(4) 본 연구의 제안방법을 국내 지반에 적용하기 위해서는 국외사례에서 보인 바와 같이 국내 지반에서 실시한 피에조 콘 실험결과를 대상으로한 많은 사례연구를 통해 초기 과잉간극수압의 형성과 직접적으로 관련된 국내 지반의 물성(즉, $I_R A_v$ 등) 영향과 피에조 콘 해석결과와 기존 연구장비(Oedometer, Rowecell 등)와의 상관성에 대한 검토가 반드시 이루어져야 할 것으로 사료된다.

6. 참고문헌

1. 김영상, 이승래, 김윤태(1997), "피에조 콘 시험을 이용한 압밀계수 결정 시 최적화 기법의 적용", 한국지반공학회지, 심사완료.
2. Acar., Y. B., M. T. Tumay, and A. Chan(1982), "Interpretation of the dissipation of penetration pore pressure", *International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, Zurich, 13-17 September.
3. 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*.
4. 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.
5. Robertson, P. K., J. P. Sully, D. J. Woeller, T. Lunne, J. J. M. Powell, & D. G. Gillespie(1992), "Estimating coefficient of consolidation from piezocone tests", *Canadian Geotech. J.* 29, 539-550.