

피에조콘 소산곡선을 이용한 연약지반의 압밀계수 산정

Estimation of coefficient of consolidation in soft soils using PCPT dissipation results

서경범¹⁾, Kyungbum Seo, 조성환²⁾, Sunghwan Cho, 이준환³⁾, Junhwan Lee

1) 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

2) 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

3) 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

SYNOPSIS : While various PCPT-based methods for the analysis of consolidation were developed, additional laboratory test is needed to estimate the coefficient of consolidation. In this paper, hyperbolic method using PCPT dissipation curve for the estimation of coefficient of consolidation was proposed. To verify proposed method, field settlement test data and PCPT dissipation test data at same site were collected and analyzed. It is observed that proposed method shows good agreement with measured field settlement data.

Key words : coefficient of consolidation, piezocone dissipation test, hyperbolic method

1. 서 론

압밀특성은 많은 지반공학적 문제에서 고려되어야 할 중요한 특성으로 주로 실내시험 및 현장 원위치 시험으로부터 산정된다. 특히 피에조콘 시험방법은 현장 원위치 시험방법 중에서 활용빈도가 높고 효율적인 방법으로 간주된다. 피에조콘 소산시험으로부터 압밀계수를 산정하는 방법은 많은 학자들에 의해 연구되어 다양하게 제안되어 있으나, Levadoux & Baligh(1986)와 Teh & Houlsby (1991)의 방법이 가장 일반적으로 사용된다. 그러나 두 논문에서 제안된 시간계수가 큰 차이를 보이며 이로 인해 각각의 방법에 의해서 산정된 압밀계수 역시 큰 차이를 나타낸다. 또한 압밀계수 산정과정에서 피에조콘 시험 결과 이외에 추가적으로 실내시험을 필요로 한다. 결과적으로 피에조콘 소산시험결과만을 이용하여 압밀계수를 산정하는 것을 어렵게 만드는 결과를 초래하며 이는 실내시험에 소요되는 추가적인 시간 및 비용을 고려했을 때 매우 비효율적이라고 판단된다. 본 연구에서는 피에조콘 소산시험 결과만을 이용하여 압밀계수를 산정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 경우 소산곡선의 전체적인 형상을 이용하여 압밀계수를 산정할 수 있도록 하였으며, 이를 위해 하이퍼볼릭 방법을 적용하였다. 제안된 방법의 검증을 위해 국내 대표 연약지반에서 획득한 데이터를 활용하여 유효성을 검증하였다. 현장계측결과와의 비교 분석 결과 본 연구에서 제안한 방법을 이용하는 경우 추가적인 실내시험없이 비교적 정확하게 시간-침하곡선을 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

2 PCPT를 이용한 압밀 해석 이론

2.1 PCPT 해석 이론

피에조콘 관입시험(Piezocone Penetration Test : PCPT)은 콘 저항치, 마찰저항력, 관입간극수압 등의 연속적인 지층데이터를 획득할 수 있는 매우 유용한 원위치시험방법이다. 특히 현장의 압밀계수를 산정

하기 위해 간극수압소산시험을 수행하기도 한다. 이러한 PCPT 시험을 이용한 압밀해석방법은 공동형상, 지반모델, 초기 간극수압, 압밀해석 법등에 의해 구분되어진다. 소산결과의 해석법은 크게 다음과 같이 구분지을 수 있다. (1) 공동확장이론(Vesic 1972; Torstensson 1975, 1977), (2) 변형률 경로법(Baligh 1985; Levadoux and Baligh 1986; Teh and Houlsby 1991), (3) 경험/반경험적인 접근법(Lunne et al. 1985; Gupta and Davidson 1986; Sully and Campanella 1991), (4) 유한요소해석법(De Borst and Vermeer 1984; Kioussis et al. 1988; Voyiadjis and Kioussis 1987; Abu-Farsakh et al. 1998). 최근 들어 유한변형률 해석법(Voyiadjis and Song 2000), 관입을 멈추지 않고 압밀계수를 평가하는 방법(Elsworth and Lee 2005) 등이 제안되어있으나, 실무적으로 사용하기에는 다소 어렵고 복잡하다는 단점이 존재한다. 따라서 소산결과를 이용한 압밀해석 방법 중 Levadoux & Baligh(1986)와 Teh & Houlsby (1991)의 방법이 가장 널리 사용된다.

Levadoux & Baligh(1986)는 변형률 경로법을 이용하여 초기 간극수압 분포를 제안하고 방사방향과 구형 공동형태를 가정하여 다음과 같은 식의 압밀계수를 제안하였다.

$$c_r = \frac{T}{t} r_o^2 \quad (1)$$

여기서 c_r = 압밀계수, T = 시간계수, t = 압밀시간, r_o = 콘의 반경이다.

Levadoux & Baligh(1986)의 방법은 이론적인 접근을 통해 피에조콘 해석을 합리적으로 하는데 크게 기여하였으나, 강성지수(rigidity index, I_r)가 500인 Boston Blue Clay라는 제한된 지반조건하에서 수행된 해석결과로 인해 다양한 지반조건을 반영하지 못하는 단점이 존재한다.

한편 Teh & Houlsby(1991)는 강성지수를 도입하여 Levadoux & Baligh(1986)의 방법을 수정제안하였으며, 그 결과 압밀계수를 다음과 같은 형태로 제안하였다.

$$c_r = \frac{T^*}{t} r_o^2 \sqrt{I_r} \quad (2)$$

여기서 T^* = 수정시간계수, I_r = 강성지수 = G/s_u 이다.

Teh & Houlsby(1991)의 방법은 다양한 지반조건을 강성지수를 통해 반영할 수 있도록 되어 있어서 Levadoux & Baligh(1986)의 방법에 비해 합리적이라고 평가되어진다. 그러나 강성지수 산정은 또 다른 불확실성을 포함하고 있다. 강성지수는 주로 삼축압축시험, 프레스미터 시험 혹은 경험적인 관계식(Mayne, 2002)을 이용하여 산정하게 되는 데 이러한 추가적인 실험은 PCPT를 이용한 압밀해석의 유용성을 떨어뜨리는 하나의 원인이 된다.

2.2 기존해석방법의 제한점

피에조콘 관입시험(Piezocone Penetration Test : PCPT)을 통해 압밀계수를 산정하는 경우, 피에조콘 관입으로 인해 지반의 응력상태는 과압밀상태(OC)상태에 가깝게 된다. 이는 대부분의 지반조건에서 피에조콘 관입으로 인해 발생하는 간극수압의 순 증가량이 전응력의 증가량보다 순간적으로 더 크게 되며, 따라서 지반은 유효응력의 감소를 겪게 되고 결과적으로 과압밀에 가깝게 되는 것이다. 이러한 현상으로 인해 피에조콘으로부터 산정한 압밀계수를 정규압밀지반에 적용하기 위해서는 일종의 보정 계수가 필요하며, 이를 식 (3)에 나타내었다.

$$c_{r(NC)} = \frac{RR}{CR} c_{r(Piezocone)} \quad (3)$$

여기서 $c_{r(NC)}$ = NC상태에서의 지반의 압밀계수, RR = 재압축지수, CR = 압축지수, $c_{r(Piezocone)}$ = 피에조콘으로

부터 산정한 압밀계수이다.

식 (3)으로부터 알 수 있듯이 피에조콘으로부터 산정한 압밀계수를 정규압밀점토 지반에 적용하기 위해서는 추가적으로 재압축지수와 압축지수 산정이 필요하며, 이로 인해 추가적인 실내시험이 수행되어야 한다. 이는 피에조콘 소산시험결과를 활용하는데 있어 그 효율성을 상당히 저해하는 원인이다.

피에조콘 관입시험으로부터 압밀계수를 산정하기 위한 압밀도는 일반적으로 50%가 널리 활용된다. 본 연구에서는 Schnaid et al. (1997)의 연구결과를 이용하여 다양한 압밀도에서 일관된 압밀계수가 산정되는지 여부를 파악하기 위해 50% 압밀도에서 산정한 압밀계수를 기준으로 다양한 압밀도에서 산정한 압밀계수의 비를 구하였으며 이를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 확인 가능한 바와 같이 50% 압밀도를 기준으로 한 압밀계수와 다른 압밀도를 기준으로한 압밀계수의 비는 0.7에서 1.8로 다양하게 나타났으며, 비교적 큰 차이가 발생함을 확인할 수 있다. 따라서 기준이 되는 특정 압밀도에 따라서 변하는 압밀계수를 산정하는 방법이 아니라 여러 압밀도에서 비교적 공통된 결과를 도출할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 앞서 언급한 추가적인 실내시험 절차 없이 소산곡선의 전반적인 형상을 이용하여 원위치시험결과만을 이용하여 압밀계수를 산정하는 방법을 제안하고자 한다.

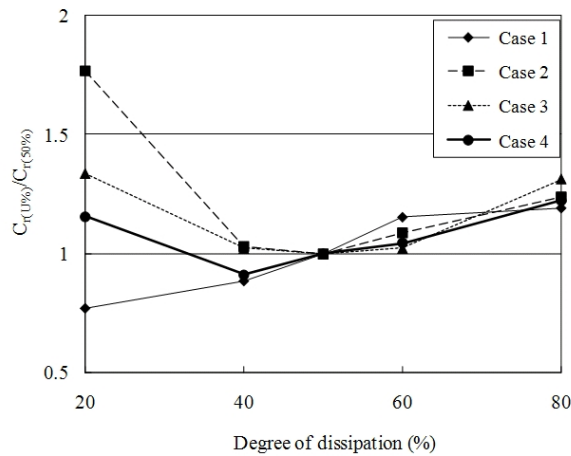


그림 1. 50% 압밀도를 기준으로 한 압밀도에 따른 압밀계수

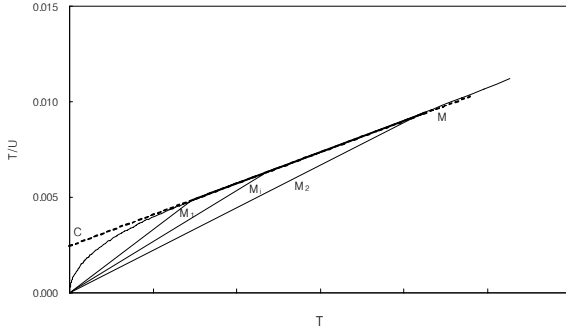
3 쌍곡선법을 이용한 PCPT 압밀 해석법 제안

3.1 쌍곡선법

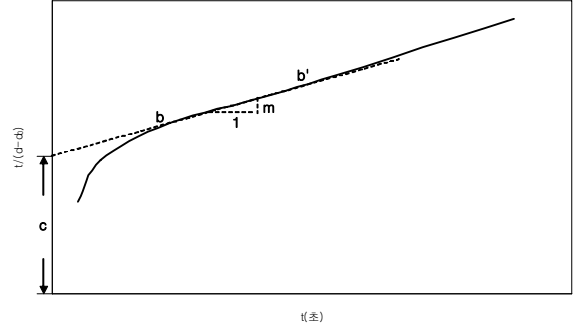
쌍곡선법은 Sridharan과 Sreepada Rao(1981)에 의해 제안되었으며, Terzaghi의 1차원 압밀이론을 이용하여 유도되었다. Sridharan과 Sreepada Rao(1981)는 압밀계수 T와 압밀도 U의 관계를 활용하여 압밀계수를 구하는 방법을 제안하였다. Sridharan과 Sreepada Rao(1981)는 Terzaghi가 제안한 U-T관계로부터 압밀도가 60%에서 90%일 때, 수직축이 T/U이고 수평축이 T인 평면상에서 다음과 같은 관계를 가짐을 확인하였다.

$$T/U = 8.208 \times 10^{-3}T + 2.44 \times 10^{-3} = M \times T + C \quad (4)$$

여기서 M은 T/U-T 그래프의 기울기 (= 8.208×10^{-3}), 을 M이라 하고, C는 T/U-T 그래프의 수직축의 절편 (= 2.44×10^{-3}) 이다.



(a) T - T/U 관계식



(b) t - t(d-d₀) 관계식

그림 2. 쌍곡선법에 의한 압밀계수산정 적용성 검토 및 산정 시 필요한 변수

그림 2 (a)는 수직축이 T/U이고 수평축이 T인 평면상에 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 따른 T/U-T 곡선을 도시한 것이며, 진한 실선이 식 (4)로 표현되는 부분이다. 식 (4)의 상관계수(R²)는 0.9999이며, U=60%인 점과 90%인 점을 각각 원점과 연결하였을 때의 기울기를 각각 M₁과 M₂, 그리고 60%<U<90%인 임의의 점과 원점을 연결한 직선의 기울기를 M_i라 정의한다.

식 (4)에서 압밀시험으로부터 구해지는 시간에 따른 압밀량 d에 기초하여 압밀도 U=(d-d₀)/(d₁₀₀-d₀)를 대입하면, T/U의 축은 t/(d-d₀)으로, T축은 t로 전환이 가능하고 다음 식으로 표현이 가능하다.

$$\frac{t}{d-d_0} = \frac{M}{d_{100}-d_0} t + \frac{C \cdot H_{dr}^2}{C_v(d_{100}-d_0)} \quad (5)$$

식 (5)에서 나타난 M/(d₁₀₀-d₀)를 m으로, C·H_{dr}²/C_v(d₁₀₀-d₀)를 c로 치환하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{t}{d-d_0} = m t + c \quad (6)$$

식 (13)의 관계식을 그림 2.(b)에 나타내었으며, 압밀도가 60%<U<90%인 임의의 시간 t에 대응하는 t/(d-d₀)값은 원점으로부터의 기울기를 고려한다면, 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{t}{d-d_0} = A m t \quad (7)$$

여기서, 식 (6)과 (7)로부터 다음과 같은 관계를 확인할 수 있다.

$$\frac{c}{(A-1)m} = t \quad (8)$$

따라서 압밀계수는 식 (8)을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$c_v = \frac{T}{t} H_{dr}^2 = \frac{(A-1)mT}{c} H_{dr}^2 = T \left(\frac{1}{MU} - 1 \right) \frac{m}{c} H_{dr}^2 = \frac{C}{M} \frac{m}{c} H_{dr}^2 \quad (9)$$

여기서, c_v는 수직압밀계수, H_{dr}은 배수거리이다. 또한 식 (6)으로부터 C/M=2.44×10⁻³/8.208×10⁻³

=0.297을 대입하면 최종적으로 압밀계수 c_v 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$c_v = 0.297 \frac{m}{c} H_{dr}^2 \quad (10)$$

3.2 쌍곡선법을 이용한 PCPT 소산 압밀해석법

본 절에서는 앞서 설명한 쌍곡선법을 이용하여 PCPT 소산곡선으로부터 압밀계수를 산정하는 방법을 제안하였다. 이 때 PCPT 소산이론은 다양한 지반조건을 반영할 수 있는 Teh & Houlsby 방법의 방법을 이용하였다. 쌍곡선법의 적용가능성을 검토하기 위하여 T-T/U의 관계를 분석하였으며, 이를 그림 3에 나타내었다. 그림 3의 결과로부터 식 (9)의 C/M값은 0.234(M=1.0041, C=0.2348, C/M=0.234)로 산정되었으며, 최종적으로 식 (10)을 이용하여 압밀계수를 산정하기 위해서는 m과 c를 정의해야 한다. 그림 2(b)에서 나타낸 바와 같이 식 (10)에서 m, c항은 임의의 시간 t에 대응하는 $t/(d-d_0)$ 값으로부터 정의된다. 피에조콘 소산시험의 경우 압밀도는 식 (11)과 같이 정의되며, 결과적으로 식 (6)과 유사한 형태로 T/U의 축은 $t/(u(t)-u_0)$ 으로, T축은 t로 전환이 가능하다. 이 결과를 이용하는 경우 식 (10)의 압밀계수는 다음 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U = \frac{u(t) - u_0}{u_i - u_0} \quad (11)$$

여기서, $u(t)$ 는 임의의 시간에서 측정된 간극수압, u_0 는 정수압, u_i 는 관입을 멈춘 후 소산시험을 시작할 때 ($t=0$) 측정된 간극수압이다.

$$c_r = 0.234 \frac{m'}{c'} H_{dr}^2 \quad (12)$$

여기서, c_r = 피에조콘시험으로부터 산정된 방사방향 압밀계수, $m', c' = t - t/(u-u_0)$ 그래프에서의 기울기와 절편

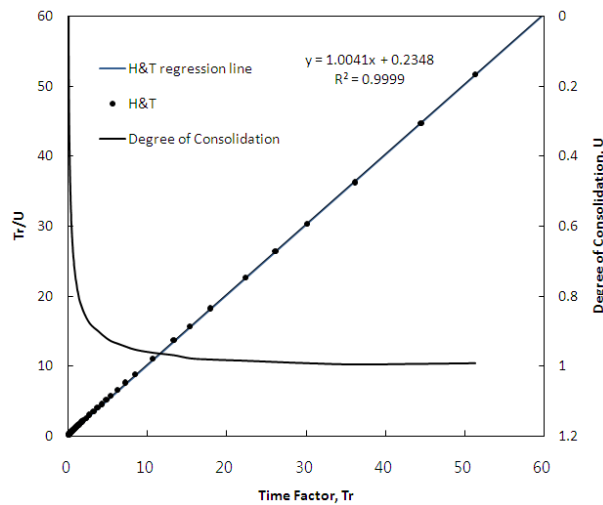


그림 3 쌍곡선법 적용성 검토를 위한 T-T/U 관계 분석

4. 해석결과

앞서 제안한 식 (12)의 적용성을 검토하기 위하여 동일한 지점에서 수행된 PCPT 소산시험 데이터와 침하데이터를 수집하여 분석하였다. 국내의 대표적인 연약지반 중 하나인 광양항에서 수행된 현장시험 데이터(현대건설 2006) 중 비교적 지반이 균질한 지층에서 수행된 시험결과 해석에 활용하였다. 지층은 통일분류법에 의해 CH 지반으로 분류되었으며, 액성한계와 소성지수는 각각 71-88, 41-63 범위의 값을 나타냈다. 또한 해당 지역에서의 기본물성시험 결과를 그림 4에 나타내었다.

해석에 사용된 PCPT 소산시험 결과는 그림 5에 나타내었으며, 압밀소요 시간 및 소산시험 결과의 중요 데이터를 정리하여 표 1에 나타내었다. 제안한 쌍곡선법을 이용하여 소산곡선을 해석하기 위해서는 식 (12)에서 나타난 바와 같이 $t - t/(u-u_0)$ 그래프에서의 기울기와 절편이 요구된다. 이를 위해 측정된 소산데이터를 분석하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6에서 확인되는 바와 같이 $t - t/(u-u_0)$ 그래프에서의 기울기와 절편 관계는 거의 모든 데이터에서 상관계수가 0.99이상으로 나타났으며, 이러한 결과를 정리하여 표 1에 함께 나타내었다. 제안된 방법의 검증을 위해 계측된 침하데이터와 제안된 쌍곡선법을 이용한 예측결과를 그림 7에 나타내었다. 추가적으로 기존 방법과의 비교분석을 위해 소산시험 결과로부터 Levadoux & Baligh(1986)와 Teh & Houlsby (1991)의 방법을 이용하여 압밀계수를 산정한 후 그림 7에 같이 도시하였다. 그림 7의 결과를 보면, 본 연구에서 제안한 방법에 의해 침하량을 예측한 결과가 계측결과와 가장 유사한 결과를 나타내며, Teh & Houlsby (1991) 방법을 적용한 경우 압밀시간을 다소 지연예측하는 반면, Levadoux & Baligh 방법은 이와 반대로 압밀시간을 다소 과소예측하는 경향을 보인다. 그림 7의 결과로부터 본 연구에서 제안한 쌍곡선법을 이용하여 압밀계수를 산정하는 경우 기존방법에 비해 우수한 예측결과를 보여주며, 또한 기존방법에서 요구되는 추가적인 실내시험 절차도 필요치 않아 실무에서 적용하기에 매우 합리적이고 경제적이라고 판단된다.

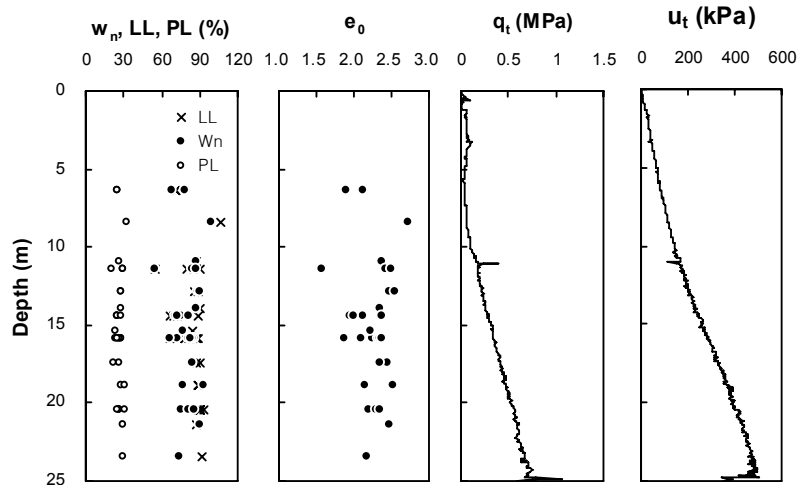


그림 4. 소산시험 지역의 기본물성시험 및 PCPT 측정 결과

표 1. 소산시험 데이터

Test No.	Dissipation depth (m)	$u_{e,PCPT}$ (kPa)	t_{50} (sec)	c'	m'
KY1	16.0	107.9	6030	68.08	0.04
KY2	13.0	91.4	12540	21.77	0.016
KY3	14.0	97.7	12690	30.3	0.004
KY4	16.0	110	2850	29.94	0.004

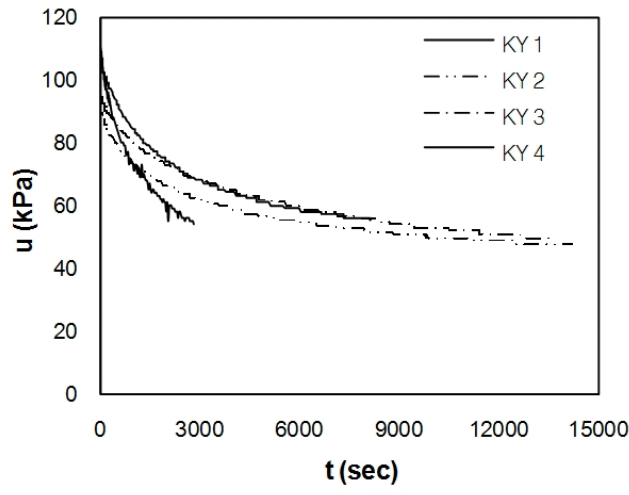
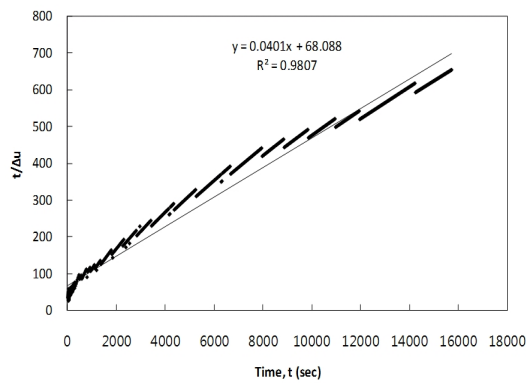
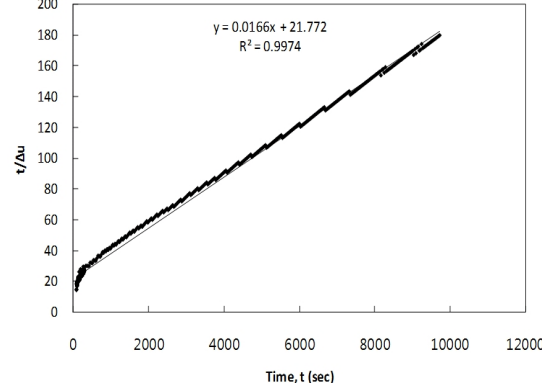


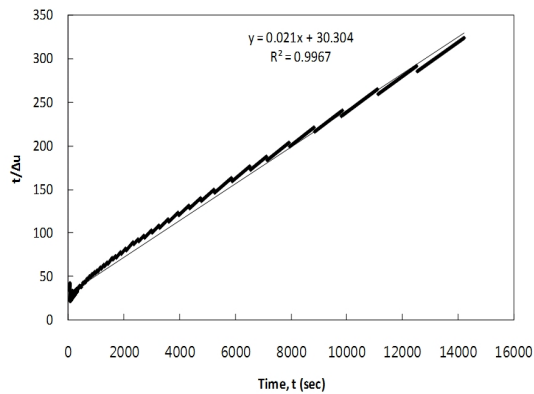
그림 5. 검증에 사용된 소산시험 결과



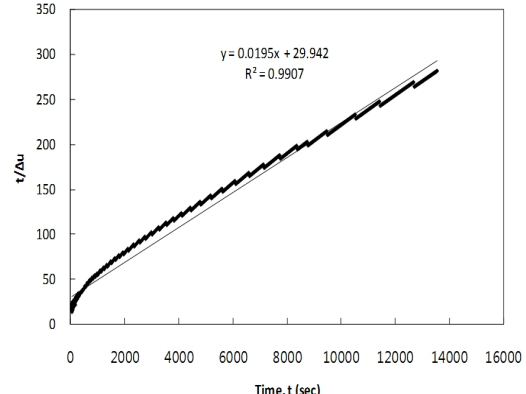
(a) KY-1



(b) KY-2

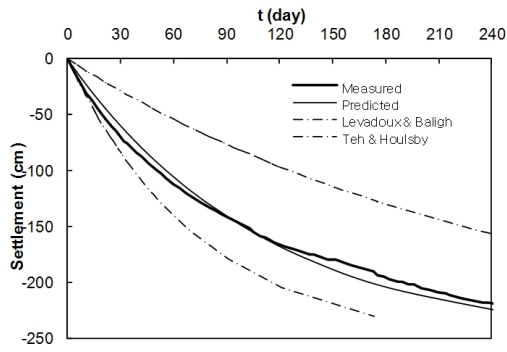


(c) KY-3

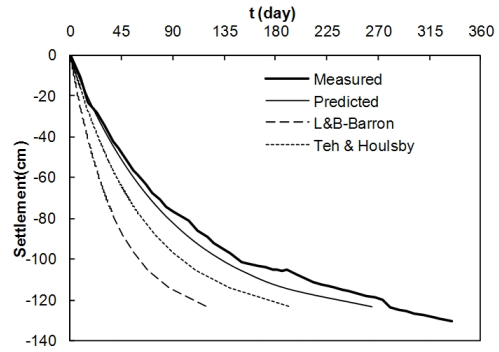


(d) KY-4

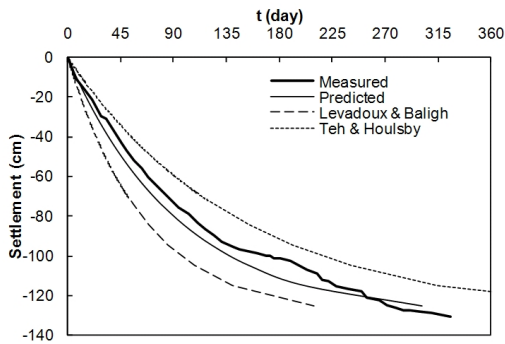
그림 6. $t - t/(u-u_0)$ 그래프 분석



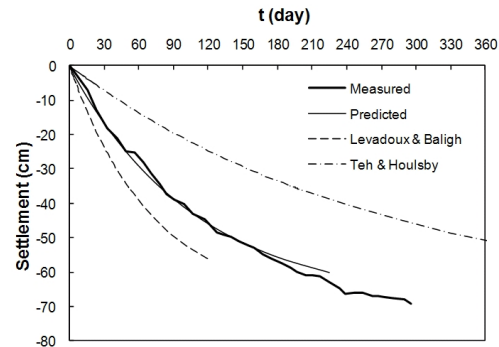
(a) KY-1



(b) KY-2



(c) KY-3



(d) KY-4

그림 7. 제안된 방법 및 기존방법에 의한 압밀침하곡선 비교

5. 결론

본 연구에서는 피에조콘 소산시험 결과만을 이용하여 압밀계수를 산정하는 새로운 방법을 제안하였으며, 이 때 쌍곡선법을 적용하였다. T-T/U 관계 분석을 통해 제안된 방법의 적용가능성을 확인할 수 있었으며, 쌍곡선법에 의해 압밀계수를 산정하는 식을 제안하였다. 산정된 압밀계수를 이용하여 시간-침하곡선을 예측한 결과 현장 계측결과와 상당히 유사한 결과를 도출함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 압밀계수는 기존 방법에 비해 산정절차가 간편하며, 또한 추가적인 실내실험을 필요로 하지 않아 경제적이며 실무에서의 쉬운 적용이 가능한 합리적인 방법이라고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2010-0016807)에 의해 수행된 결과의 일부로, 상기 기관의 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 현대건설 주식회사. (2006), '광양항 3단계 2차 컨테이너 터미널 축조공사 재하성토 제거 검토 보고서'
2. 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

3. Borst, De and Vermeer, P. A. (1984) "Possibilities and limitations of finite elements for limit analysis." *Geotechnique* 34, pp.199-210.
4. Elsworth, D. and Lee, D. S. (2005). "Permeability determination from on-the-fly piezocone sounding." *Journal Geotech and Geoenv Eng*, ASCE, Vol. 131, No. 5.
5. Gupta, R. C., and Davidson. J. L. (1986). "Piezoprobe determination coefficient of consolidation", *Soils and Foundations*, Vol.26, No.3, pp.12-22.
6. Kioussis, 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 Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 12 1, pp. pp.45 - 60.
7. Levadoux, J. N., and Baligh, M. M.(1986) "Consolidation after undrained piezocone penetration I: prediction", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol.112, No.7, pp.707-725.
8. Levadoux, J. N., and Baligh, M. M.(1986) "Consolidation after undrained piezocone penetration II: interpretation", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol.112, No.7.
9. Sridharan, A. and Sreepada Rao, A. (1981) "Rectangular hyperbola fitting method for one dimensional consolidation" *Geotech. Test. Journal*. No. 4, pp.161-168.
10. Schnaid, F., Sills, G.C., Soares, J.M. and Nyirenda, Z. (1997) "Predictions of the coefficient of consolidation from piezocone tests" *Canadian Geotechnical Journal*, 34, pp.315-327.
11. Sridharan, A., Murthy, N. S. and Prakash, K. (1987) "Rectangular hyperbola method of consolidation analysis" *Geotechnique*, 37, No. 3, pp.355-368.
12. Sully, J.P. and Campanella, R.G., (1991) "Effect of lateral stress on CPT penetration pore pressures," *Journal of Geot. Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 7, July, pp.1082-1088.
13. Teh, C. I., and Houlsby, G. T.(1991) "An analytical study of cone penetrometer test in clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17-34.
14. Torstensson, B. A.(1975) "The Pore Pressure Sounding Equipment", *Proceedings of ASCE Specialty Conference on In-situ Measurement of Soil Properties*, Raleigh, N.C., Vol. II, pp.48-55.
15. Torstensson, B. A. (1977) "The pore pressure probe", *Proceedings of Geoteknikkdagen*, Tapir Foreleg, Oslo.
16. Vesić, A.S., (1972), "Expansion of cavities in infinite soil mass," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE,. Vol.98, No..SM 3. pp.265-290.
17. Voyiadjis, G. Z. and Kioussis, P. D. (1987). "Stress rate and the Lagrangian formulation of the finite-strain plasticity for a von Mises kinematic hardening model", *Solids and Structures*, Vol 23, No. 1, pp.95-109.
18. Voyiadjis, G. Z., and Song, C. R. (2000). "Finite strain, anisotropic modified cam clay model with plastic spin. I: Theory." *Journal of Engineering Mechanics*, 126(10), pp.1012 - 1019.