

피에조 콘과 딜라토미터 시험을 이용한 연약지반의 현장특성 비교

Comparison of In-situ Characteristics of Soft Deposits Using Piezocone and Dilatometer

김 영 상*¹

Kim, Young-Sang

이 승 래*²

Lee, Seung-Rae

김 동 수*²

Kim, Dong-Soo

Abstract

In order to select a proper ground improvement technology and to assess the quality and rate of improvement in the soft deposits, it is essential to characterize in-situ properties of the soft marine clay layer that may have many thin silt or sand seams. In this paper, both piezocone and flat dilatometer tests were performed to characterize in situ properties of a marine clay. Both tests provided quite similar site classifications, and in both tests the penetration pore water pressure was the better indicator for the classification of marine clay layer, especially in which sand or silt seams are frequently interbedded. Undrained strengths determined by both the cone tip resistance and the excess pore water pressure measured from piezocone were very similar in clayey soil layers. And the undrained strength determined by dilatometer had an approximately average value of undrained strengths obtained from piezocone. In addition, the theoretical time factor that can consider pore pressure dissipation effect during cone penetration may provide a reliable estimation of the coefficient of consolidation, especially for a coastal site which includes many silt or sand fractions or seams.

요 지

대상 연약지반의 적절한 개량기술 선택과 개량 효과들을 평가, 관리하기 위해서는 현장 연약 점토지반 특성을 정확히 평가할 수 있는 적절한 현장 시험기법의 적용이 필수적이다. 본 논문에서는 여러 현장시험 방법 중에 경제적이면서도 효과적인 것으로 알려져 국내에서 그 수요가 증가하고

*1 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

*2 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 부교수

있는 피에조 콘(piezocone)과 딜라토미터(dilatometer)를 이용하여 연약지반의 현장 물성을 평가하고 비교하였다. 연구결과 두 장비 모두 유사한 흙 분류 결과를 제공하였으나, 특히 간극수압으로부터 도출한 흙 분류 결과가 연약점토층 사이에 실트나 모래층 등이 산재한 우리나라 실정에 보다 적절하며 일관성 있는 결과를 주는 것으로 평가되었다. 점토층의 비배수 전단강도는 피에조 콘의 경우 간극수압과 선단저항력으로부터 도출된 값들이 유사하였고 딜라토미터로부터 추정된 비배수 전단강도는 피에조 콘의 두 관측 값으로 유추된 결과들의 평균값에 근접한 것으로 평가되었다. 그리고 실트 또는 모래층이 산재하는 경우 연약지반의 압밀특성을 평가하기 위해서는 관입과정에서 유발되는 소산효과를 고려한 이론적 시간계수가 보다 적절한 것으로 평가된다.

Keywords : Piezocone, Dilatometer, Soft clay, Soil classification, Undrained strength, Dissipation test, Coefficient of consolidation

1. 서 론

우리나라는 해안을 따라서 연약한 해성점토가 넓게 분포되어 있으며 특히, 서해안은 9m에서 18m정도, 남해안은 9m에서 25m정도의 깊이로 대부분 분포되어 있다. 이러한 연약점토 아래에는 2m정도 두께의 검회색 자갈과 실트질 모래가 존재하며 그 아래에는 풍화암이 존재하는 것이 일반적이다. 이러한 지반에서의 지반공학적인 문제는 주로 연약한 해성점토에 관련되어 있다. 대부분의 해성점토는 무기질이며 통일분류법에 의하면 ML과 CL로 분류되고 12%에서 24%정도의 낮은 소성지수(PI)를 갖는다. 평균 자연함수비는 액성한계를 넘는 36%에서 52%이며 평균 초기간극비는 거의 1.0이고 포화도(S_v)는 깊이에 따라서 증가한다. 압축지수(C_c)는 0.2에서 0.26정도이며 평균 과압밀비는 지표면에서 약 4m 깊이의 상부층의 경우 조수간만의 효과(tidal action), 지하수위의 변동, 표면건조(desiccation)등에 의하여 1.9에서 3.1정도 범위에 있으며 7m이상의 하부층은 대부분 정규압밀 상태이다(박영목 등, 1996).

또한 대부분의 해성점토층은 수평적으로는 비교적 균일하지만 깊이 방향으로는 모래나 실트층의 산재로 큰 변화를 보인다. 연약점토층 사이에 존재하는 이러한 실트 또는 모래질은

때때로 비교란 시료의 채취를 어렵게 할 뿐 아니라 운송 중의 시료 교란을 유발시키는 원인이 된다. 따라서, 지반공학적인 거동을 보다 적절히 모사하는 공학적 물성을 찾아내기 위해서는 피에조 콘이나 딜라토미터와 같은 현장시험을 통한 물성의 확인이 필수적이라고 생각된다.

본 논문에서는 국내 서해안의 장항지역에서 6개소(벽산건설, 1995), 아산지역에서 4개소(한국토지공사, 1997) 등 동 위치에서 수행된 피에조 콘과 딜라토미터 시험결과를 사용하여 흙분류 및 비배수 전단강도 그리고 압밀특성을 추정하였으며 그 결과를 상호비교하고 실내시험 결과와 비교함으로써 각 시험간의 정확도와 상관성을 평가하고자 하였다.

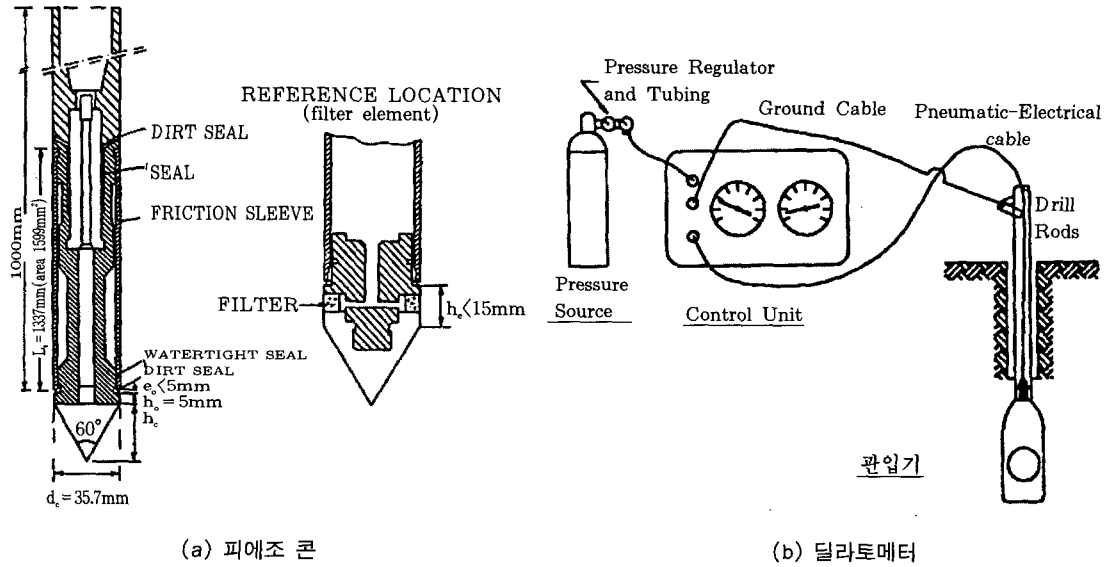
2. 피에조 콘과 딜라토미터

국내에 사용되고 있는 일반적인 피에조 콘은 각 부위에서 콘 선단저항력(q_c), 마찰저항력(f_s), 그리고 간극수압(u_v)의 세가지 값을 관측하며 그림1(a)에서 보는 바와 같이 60°의 선단각과 10cm²의 투영단면적을 가지는 선단부와 150cm²의 마찰저항부로 이루어져 있다. 피에조 콘은 2cm/sec의 균일한 속도로 관입되며 본 연구에서 사용된 콘의 간극수압 관측요소(porous stone)는 콘 선단부 바로 뒤(behind the cone tip)에 위치하고 있다. 또한, 아래 식

(1)과 같이 콘 형상에 의하여 유발되는 불균등 단면적 효과를 보정하기 위하여 필자들에 의해 특수제작된 실내토조 실험이 수행되었으며 a 값은 0.85로 결정되었다.

$$q_T = q_c + (1 - a)u_b \quad (1)$$

여기서, q_T 는 보정된 선단저항력, q_c 는 관측된 선단저항력, u_b 는 콘 선단부 바로 뒤에서 관측된 간극수압, a는 불균등 면적 비(unequal end area ratio) 또는 부등 단면적 비이다.



(a) 피에조 콘

(b) 딜라토미터

그림 1. 피에조 콘과 딜라토미터의 개략도

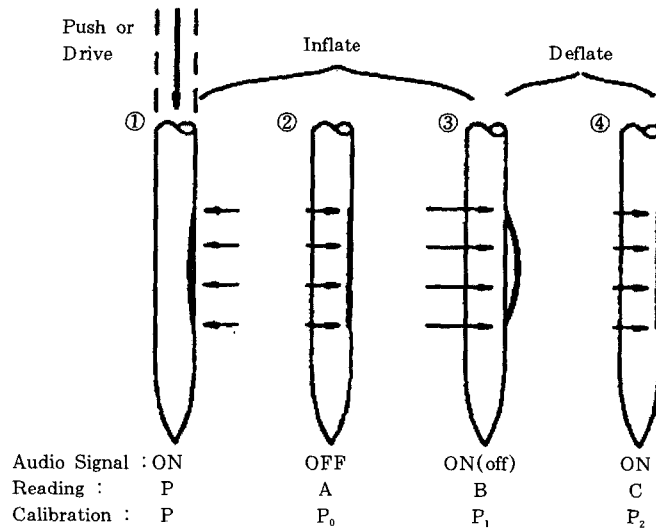


그림 2. 딜라토미터 시험 순서와 관측값

Marchetti형 딜라토미터는 그림1(b)에서 보는 바와 같이 두께 14mm, 폭 95mm, 그리고 220mm길이의 관입기(blade)를 사용하며 이 관입기의 한면에는 60mm직경의 유연한 강판(steel membrane)이 위치하고 있어 외부로부터 압축공기를 주입하면 강판이 팽창되고 그 압력으로 인하여 지반 내에 변형을 유발시키게 된다. 관입기는 콘 관입 시 사용된 관입장비(driving device)를 사용하여 2cm/sec의 속도로 관입되었으며 20cm의 일정한 깊이 간격으로 그림 2와 같이 4단계에 의해 강판(stainless steel membrane)의 중심부가 1.1mm 변형되는 데에 요구되는 압력 A, B, C 값을 순차적으로 읽는다. 이때, A값은 관입에 의하여 강판(steel membrane)이 수축된 상태에서부터 대기중과 같은 평형상태로 회복될 때의 압력, B값은 강판(steel membrane) 중심부가 1.1mm 팽창했을 때의 압력, 그리고 C값은 강판이 원래의 평형상태로 돌아 왔을 때의 압력으로 그림에 표현된 바와 같이 벨소리(Audio signal)에 의해 각

상태를 알 수 있다. 그 후 이 값들을 강판(steel membrane)의 강성에 대해 보정하여 해석에 사용되는 P_0 , P_1 , P_2 값으로 환산하였다 (FHWA, 1988).

3. 실험결과 분석

3.1 흙 분류

피에조 콘과 딜라토미터를 사용하여 얻을 수 있는 공학적인 결과 중에서 흙 분류는 가장 효과적인 것 중의 하나로 깊이에 따라서 연속적인 흙의 분류정보를 제공한다. 피에조 콘을 사용한 흙분류 표는 여러 연구자들에 의하여 개발되어 왔으며 본 연구에서는 Robertson 등 (1986)에 의하여 개발된 도표를 사용하였고 이 도표는 잘 알려진 바와 같이 보정된 선단저항력 q_T 와 마찰율 R_f 을 사용하는 도표와 보정된 선단저항값 q_T 와 간극수압 비 B_q 를 사용하는 두 가지 도표로 이루어져 있다.

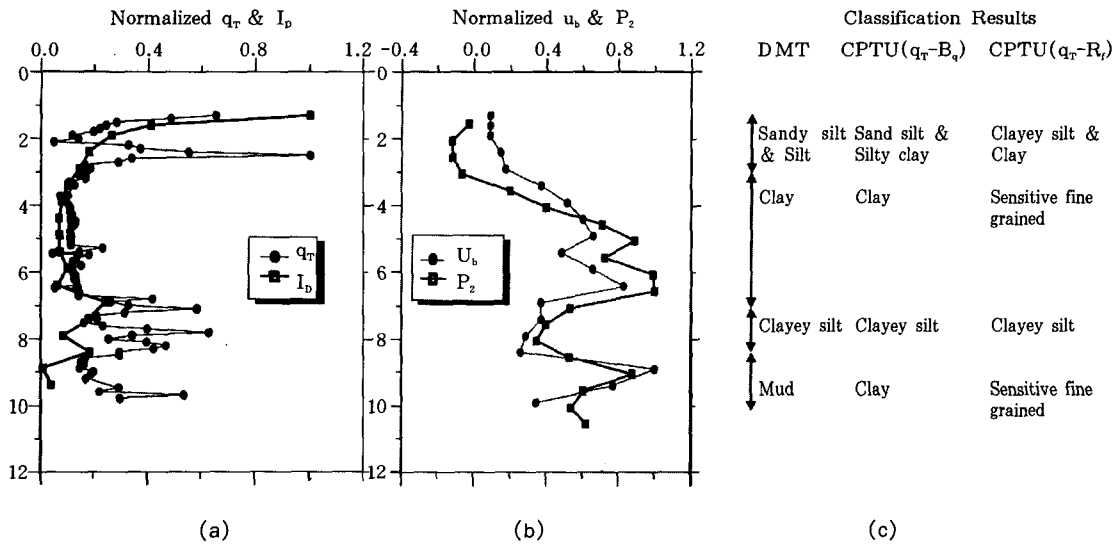


그림 3. 피에조 콘과 딜라토미터를 사용한 흙 분류 결과 비교

Robertson이 제안한 q_r-R_r 와 q_r-B_r 도표에 의한 피에조 콘 흙 분류의 대표적인 결과는 그림 3과 같으며 두 도표가 유사한 결과를 도출할 뿐만 아니라 특히, 선단저항력의 증가나 간극수압의 감소를 바탕으로 점토층 사이에 존재하는 실트 및 모래층의 존재를 비교적 잘 구분할 수 있었다. 그러나, 실트층을 통과할 때 간극수압이 감소하는 현상이 매우 일관성 있게 반복되는 반면 선단저항력은 다소 불규칙할 뿐 아니라 간극수압을 바탕으로 추정된 얇은 실트층의 존재를 잘 찾지 못하는 경우도 있었다. 또한, q_r-R_r 분류 도표는 3~7m사이와 8.5m~10m 깊이에 존재하는 점토를 국내에서는 잘

존재하지 않는 예민한 점토(sensitive clay)로 분류하여 국내 지반특성을 고려한 새로운 흙 분류 도표의 개발(이선재, 1997)이나 기존 도표의 부분적인 수정이 필요하다. 따라서, 수행되는 과제의 종류에 따라 다르나 지반 내의 실트층의 존재 유무가 중요한 경우에는 간극수압을 바탕으로 한 흙 분류 결과가 국내 지반에 대해서도 보다 신뢰성 있고 바람직 할 것으로 사료된다.

딜라토미터 실험에서 관측 보정된 P_0 , P_1 , P_2 값들은 다음 식(2)와 같이 네 가지 지수(index)로 정의되며 Marchetti(1980)는 이 중 재료지수 I_b 값을 사용하여 지반의 종류를 구

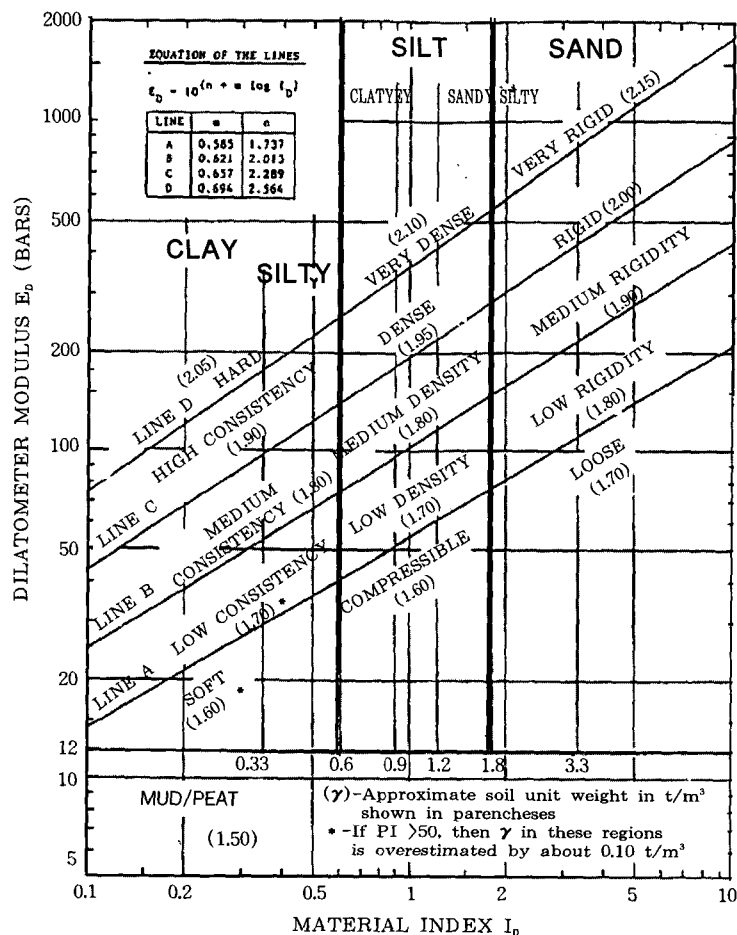


그림4. I_b 와 E_0 를 이용한 딜라토미터 흙분류 시스템(Marchetti와 Crapps, 1981)

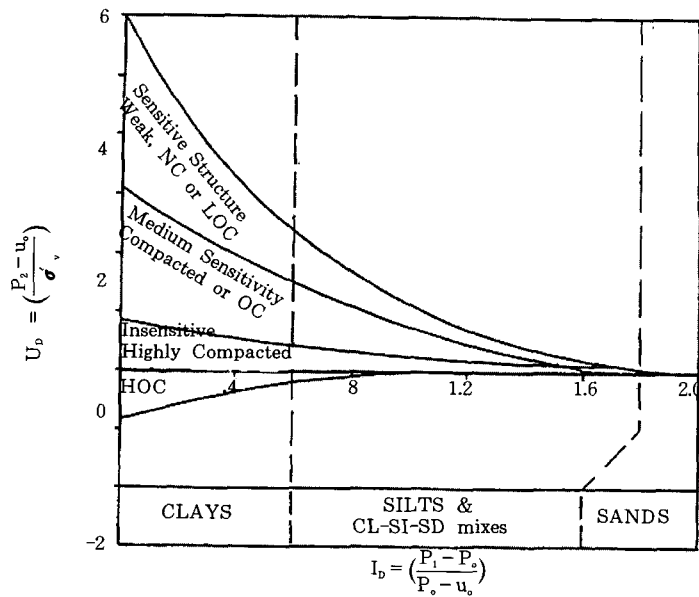


그림 5. I_b 와 U_b 를 이용한 딜라토미터 흠분류 시스템(Campanella와 Robertson, 1985)

분하는 도표를 제안하였고 Marchetti와 Crapps(1981)는 지반의 단위중량까지도 결정하기 위하여 딜라토미터 지수(dilatometer index) E_b 를 보조적으로 도입하여 다음 그림4와 같은 도표를 제안하였다. 그러나, Campanella와 Robertson(1985)은 점토와 실트질의 지반을 분류할 때는 재료지수 I_b 와 함께 반드시 P_2 값으로 정의되는 간극수압 지수(pore pressure index)를 이용하여야 한다고 주장하여 그림 5와 같은 도표를 제안한 바 있다.

$$I_b = \frac{P_1 - P_2}{P_0 - u_0} \quad (2-a)$$

$$K_D = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_v} \quad (2-b)$$

$$E_b = 34.7(P_1 - P_0) \quad (2-c)$$

$$U_b = \frac{P_2 - u_0}{\sigma'_v} \quad (2-d)$$

딜라토미터의 P_2 값은 그림 2에서 보는 바와 같이 강판의 중심이 1.1mm 변형한 뒤 원래의

평평한 상태로 회복될 때의 압력으로 그림 3(b)에서 정규화 된 P_2 값은 정규화 된 피에조 콘 관입 간극수압과 매우 유사한 분포를 가지는 것을 알 수 있어 피에조 콘의 관입 시 유발된 간극수압과 유사한 값을 나타낸다는 Robertson 등(1988)의 주장과도 일치해 이 값이 지층에 대한 흠 분류 정보나 지층 내의 투수특성 평가 시 지표가 되는 자료가 될 것으로 생각된다. 또한, 정규화 된 재료지수 I_b 와 비교해 볼 때 지층 속에 존재하는 실트나 모래층의 존재에 보다 민감한 것으로 나타나서 Campanella와 Robertson(1985)의 주장과 같이 딜라토미터를 이용한 국내 연약지반의 흠 분류 시 간극수압 지수 U_b 를 함께 이용한 그림5의 흠 분류 시스템 결과를 반드시 참고하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 본 연구에서도 이를 이용한 대표적인 흠 분류 결과가 그림 3(c)에 피에조 콘 흠 분류 결과와 함께 비교되어 있으며 그림에 보는 바와 같이 20cm 간격으로 시험이 수행됨에도 불구하고 연속적으로 관측

값을 얻는 피에조 콘 결과와 매우 유사한 결과를 제공함을 알 수 있다.

본 연구에서는 피에조 콘과 딜라토미터를 이용한 흙 분류 결과, 실트질 층이 존재할 것으로 예측되는 지점에서 2m 가량 연속적으로 비교란 시료를 추출하였으며 그림 6에 보이는 것과 같이 매우 얇게 점토층 사이에 존재하는 실트질 층을 확인함으로써 흙 분류 도표들의 신뢰성을 확인하였다.

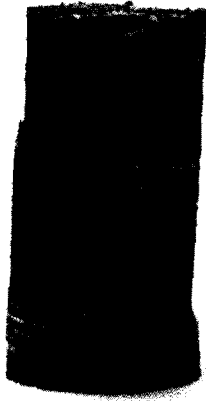


그림 6. 얇은 실트질 층이 포함된 시료

3.2 비배수 전단강도

피에조 콘을 이용한 현장 지반의 비배수 전단강도를 예측하는 방법은 그간 여러 연구자들에 의하여 이론적인 방법과 경험적인 방법으로 구분되어 제안되어 왔으며 그 중에서 국내에서 사용되는 경험적인 방법으로는 콘 계수 N_{kr} 와 보정된 선단저항력 q_T 를 이용한 방법과 간극수압 비 $N_{\Delta u}$ 와 피에조 콘의 관입 과잉간극수압 $\Delta u (=u_v - u_v)$ 를 이용한 방법이 있다. 일반적으로 콘 계수 N_{kr} 는 선단저항력 q_T 의 관측오차와 과압밀 비, 온도효과 등 여러 가지 원인에 의하여 연약 지반에서는 그 값이 매우 큰 범위를 갖는 것으로 알려져 있으며 저자들의 경험에 의하면 점토 지반 내에 존재하는 실트나 모래질 흙의 존재 양에도 매우 큰 영향을 받는

것으로 판단된다. 본 연구에서는 피에조 콘 실험이 이루어진 현장에서 비교란 시료를 채취한 후 실내 일축압축 실험을 통해 얻은 비배수 강도와 선단저항력 q_T 를 선형으로 관련지음으로써 N_{kr} 를 장항, 아산지역에 대하여 각각 14.4, 15로 결정하였으며 이때, 실트질 및 모래질이 비교적 많이 포함된 비교란 시료의 전단강도를 제외함으로써 흙의 성질 차이에 따라서 생기는 콘 계수의 분산을 최소화하고자 하였다.

한편, 연약지반에서 이루어지는 콘 실험은 관입 시 발생하는 과잉 간극수압의 크기가 선단저항력에 비해 상당히 크게 유발되므로 과잉 간극수압을 이용한 비배수 전단강도 S_u 의 추정 이 보다 정확할 수 있다. 본 연구에서는 FHWA (1988)에서 제안하고 있는 간극수압 비 $N_{\Delta u}$ 를 사용하였으며 이 값은 공동확장이론을 바탕으로 제안되었고 과압밀 비와 Skempton의 파괴 시 간극수압계수 A_r 를 이용하여 점토의 예민한 정도를 고려한 방법이다. 본 연구에서는 정확한 실내실험 자료가 없는 경우 FHWA에서 제안하고 있는 값에 따라서 $A_r=0.8$ 및 강성지수 $I_r=100$ 에 대한 $N_{\Delta u}$ 값 5.7을 사용하였다. 피에조 콘과 딜라토미터를 이용하여 본 연구에서 실험을 수행한 장항지역 비배수 전단강도의 대표적인 추정결과를 그림7에 나타냈다.

피에조 콘으로 추정된 비배수 전단강도는 그림7에서 보는 것과 같이 점토지반으로 표시된 부분인 경우 선단저항력과 간극수압을 이용하여 각각 예측한 결과가 상당히 비슷한 것을 알 수 있다. 그러나 그 지역을 제외한 실트질이나 모래질 층에서는 콘 선단부 뒤에서 관측되는 간극수압이 빠르게 배수되는 특성과 조밀한 모래지반의 경우에는 전단 시 팽창성(dilatancy)을 나타내는 특성에 의하여 관측된 간극수압이 정수위 u_0 에 근접하거나 부 간극수압(negative pore pressure)을 나타내 선단저항력을 바탕으로 추정된 비배수 전단강도와 일치하지 않고 오히려 반대 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 이러한 특성을 가진 지반에서의 무분별한

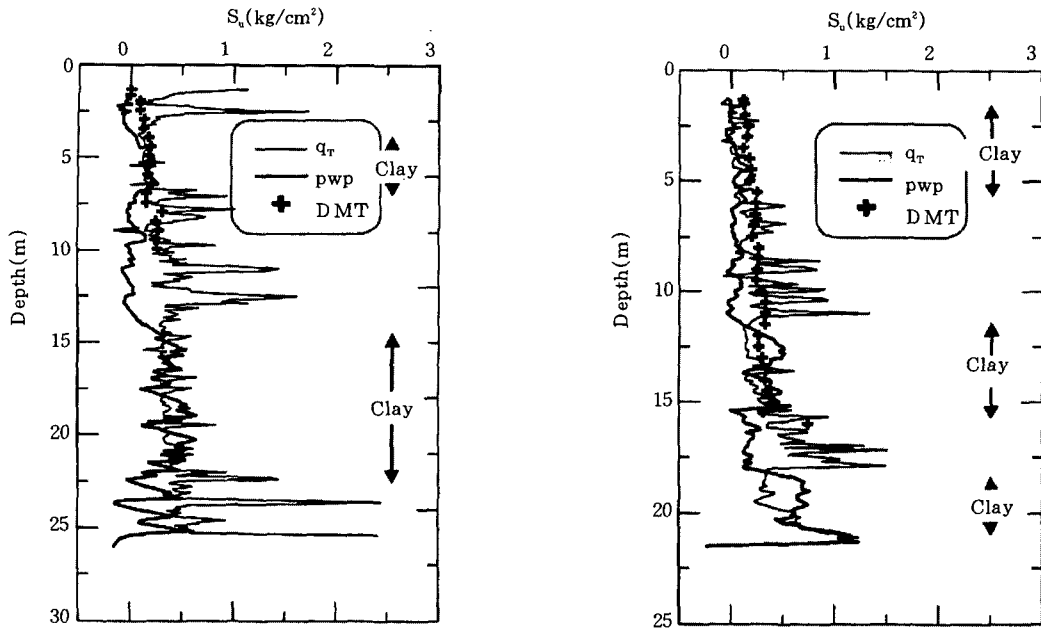


그림 7. 피에조 콘과 dilatometer를 이용한 전형적인 비배수 전단강도

비배수 전단강도 예측과 그 사용 적합성은 논란의 대상이 되고 있으므로 반드시 콘 실험에서 얻어진 흙 분류 결과를 고려하여 적절한 지반에 대한 비배수 전단강도의 추정이 이루어져야 한다(Lunne 등, 1996).

재료지수 I_p 가 0.6이하인 점토지반에 대하여 Marchetti형 dilatometer를 이용한 수평응력 지수 K_D 와 연직 유효응력으로 정규화 된 비배수 전단강도 (S_v/σ'_v)와의 경험적인 관계는 다음 식(3)과 같다(FHWA, 1988).

$$S_v = 0.22\sigma'_v(0.5K_D)^{1.25} \quad (3)$$

여기서,

- K_D : 수평응력 지수(horizontal stress index)
- σ'_v : 연직 유효응력

그림 7과 그 외의 수행된 실험결과를 바탕으로 볼 때 dilatometer 실험결과 식(3)을 이용하여 얻어진 연약지반의 비배수 전단강도는 피에조 콘을 이용한 2가지 방법과 비교할 때 대

략적으로 두 값의 평균값을 나타내는 경향이 있는 것으로 판단된다.

3.3 압밀특성

피에조 콘에서는 관입을 멈추고 관입 시 유발되어 관측되는 간극수압의 시간에 따른 변화로부터 다음 식(4)와 같이 수평 압밀계수를 추정한다.

$$C_h = \frac{T_{50} \cdot R_2}{t_{50}} \quad (4)$$

여기서,

- C_h : 수평 압밀계수
- T_{50} : 50% 소산도에서의 이론 시간계수
- R : 관입기의 반지름
- t_{50} : 50% 소산도에 도달하는데 소요되는 실제 관측시간

피에조 콘의 소산시험을 이용한 수평 압밀계수 추정에 관한 연구는 여러 연구자들에 의

표1. 여러 연구자들에 의한 이론 시간계수($I_R=100$ 인 경우)

	I_R	T_{50}	비 고
Torstensson	100	3	원통형 공동확장이론, 1978
Gupta	100	1.79	수정 구형공동확장이론, 1983
Levadoux & Baligh	-	5.6	변형률 경로법, 1986
Teh & Houlsby	100	2.45	$T^* = \frac{C_h \cdot t}{R^2 \sqrt{I_R}}$, 변형률 경로법, 1991

하여 진행되어 왔으나(Torstensson, 1978; Gupta, 1983; Levadoux and Baligh, 1986; Teh and Houlsby, 1991) 이들이 제시한 다양한 이론 시간계수들 중에서 실제 콘 주변에 유발되는 공동의 형태, 강성지수 I_R , 그리고 지반의 과압밀비 등을 고려하여 적절한 이론 시간계수 값을 선택하는 것은 매우 어려운 일이다(김영상 등, 1997). 표 1은 연구자들의 다양한 이론 시간계수를 정리한 것이며 이중 Gupta의 이론 해는 필자들이 $I_R=100$ 인 경우에 대하여 Gupta가 제안한 연속적인 구형공동확장과 축대칭 비혼합 압밀이론을 모사함으로써 결정하였다.

표 1에 제안된 연구자들의 이론 시간계수를 사용하여 각각 수평 압밀계수를 추정하였으며 이를 실내 압밀시험(oedometer)으로 얻어진 현장 비교란 시료의 수평 압밀계수와 비교함으로써 제안된 이론 해 중 실내실험 결과와 가장 일치하는 이론 시간계수를 찾고자 하였다. 이러한 노력은 현재 현장실험을 통하여 얻어지는 압밀계수들이 설계에 사용되지 못하고 있는 것을 극복하는 한 방법으로써 현장 소산 실험을 통해서도 국내 지반 공학자들에게 친숙한 실내 압밀시험 결과에 근접한 결과를 제시하고자 하는 것이다.

일반적으로 압밀시험으로부터 얻어지는 압밀계수는 연직방향 압밀계수이며 Baligh와 Levadoux(1980)는 동방의 압축성을 갖는 지반인 경우라면 다음 식(5)를 사용하여 수평 압밀계수를 산정할 수 있다고 하였고 본 연구에서는 현장 소산실험 결과 얻어진 수평 압밀계수와

비교하기 위하여 식(5)를 사용하여 실내 압밀 시험 결과로부터 수평 압밀계수를 추정하였다.

$$C_v = \frac{C_h \times k_v}{k_h} \quad (5)$$

여기서, k_h/k_v 는 본 연구지역과 같이 연약지반 사이에 실트질의 약한 층상이 존재하는 경우에 대하여 Ladd(1976)가 제안한 2~5의 평균 값인 3.5를 취하여 현장 시료의 k_h/k_v 가 없는 경우에 적용하였으며 위치에 따라서는 실내 실험에서 1.5~3의 비율이 얻어져 그 값을 사용하였다.

그림 8을 살펴보면 실내 압밀시험으로부터 얻어진 수평 압밀계수보다 현장 실험으로부터 얻어진 수평 압밀계수가 전반적으로 큰 값을 나타내는 경향을 보이지만 이러한 경향 중에서도 Gupta의 제안을 따라서 결정된 이론 시간계수로부터 얻어진 수평 압밀계수는 실내 압밀시험 결과와 상당히 일치하며 그 분산도 크지않은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 관입 시 유발되는 과잉 간극수압이 상당량 소산된다는 주장하에서 간극수압의 소산효과를 고려한 Gupta의 기본적인 접근방법이 국내 해안과 같이 실트 및 모래 성분을 많이 포함하는 지형에서 적절하며 국내에서 수행되는 콘 관입 시험 시, 유발되는 과잉 간극수압이 상당량 소산됨을 뒷받침하는 것으로 사료된다. 다음으로는 Teh와 Houlsby(1991), Torstensson(1978)의 원통형 이론 해가 근사한 결과를 주며 Levadoux와 Baligh(1986)의 해는 현장 압밀계수를 다소 과대 평가하는 것으로 나타났다.

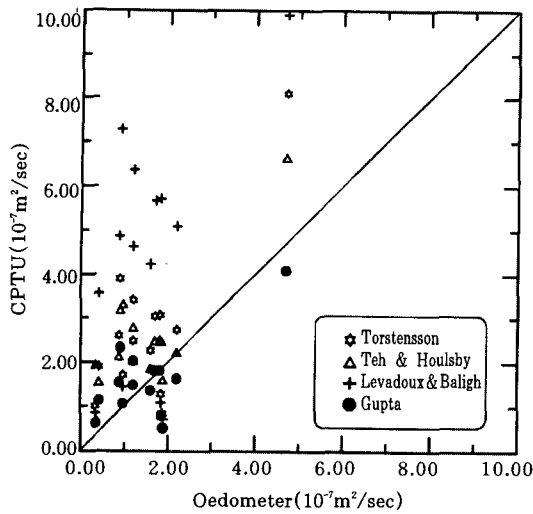


그림 8. 실내 압밀시험과 현장 소산시험으로부터 추정된 수평 압밀계수의 관계

표준 Marchetti형 딜라토미터의 P_2 값은 $I_b \leq 0.6$, $K_b \leq 5.0$ 인 정규압밀에 가까운 연약지반에서 피에조 콘의 관입 간극수압과 상당히 유사하다는 사실이 잘 알려져 있으며 이러한 연구 결과를 바탕으로 압밀계수를 구하려는 연구가 시도되어 왔다(FHWA, 1988). 딜라토미터를 이용한 압밀계수의 추정은 축대칭의 피에조 콘과 달리 관입 시 평면변형 상태의 지반변형으로 인하여 관입기 주변에 형성되는 간극수압의 크기가 작고 분포를 예측하기 어려우며 2차원적인 소산으로 동일한 소산도에 도달하는 데에 소요되는 시간은 피에조 콘에 비해 오히려 길어 이러한 현상을 모사한 이론 해가 제안된 바 없다. 그럼에도 불구하고 피에조 콘과 같이 porous stone의 포화에 소요되는 시간, 경비,

그리고 유지와 같은 어려움이 없고 porous stone의 불완전한 포화로 인한 소산 실험결과 분석 시 어려움이 없다. 그리고 현재 주로 사용되는 딜라토미터는 전기적인 장비가 아니므로 현장에서 사용 시 고장에 대한 염려가 적다는 장점이 있다.

본 연구에서는 표 2와 같이 $I_b \leq 0.6$, $K_b \leq 5.0$ 조건을 만족하는 연약지반 현장에서 시간에 따른 C -값을 관측하여 딜라토미터를 이용한 소산시험을 수행하고 이를 바탕으로 압밀계수를 추정하여 피에조 콘 및 실내 압밀시험 결과와 비교하였다. 먼저 95mm×14mm인 딜라토미터 관입기를 동가의 단면적을 갖는 원형 단면으로 가정하여 반경 R 을 구하였으며 이론 해는 선 단부로부터 관입기 강판(steel membrane)까지의 거리를 고려하여 반경의 4배 뒤에 porous stone이 위치하는 경우에 대한 Gupta의 피에조 콘 이론 해를 사용하고, 50% 소산도에 도달하는 시간 t_{50} 은 FHWA(1988)이 제안한 바와 같이 관측된 P_2 와 관측시간을 \sqrt{t} 축으로 하여 결정하였으며 식(4)로부터 수평 압밀계수를 산정하였다.

제한된 수의 딜라토미터 소산시험 위치에서 피에조 콘 소산시험이 동시에 행해졌으며 실내 압밀시험 결과와 비교정리하면 표2와 같다. 해석결과의 수가 적기 때문에 그 경향성을 명확히 판단하기는 어려우나 이론 해가 존재하지 않아 경험적인 접근이 이루어진 상황에서도 3.5m와 13m에서 모두 피에조 콘에 비해 그 변화 폭이 작았고 일반적인 실내 압밀시험 결과의 폭이 매우 큰 것을 감안하면 딜라토미터를 이용한 압밀계수에 대한 실내 압밀계수의 비율이 각각 1.58과 1.8로 두 배를 넘지 않는 비교

표 2. 피에조 콘, 딜라토미터, 실내 압밀시험에 의한 수평 압밀계수의 비교

깊이	I_b	K_b	T'_{50}	C_1 (DMT)	C'_{11} (CPTU)	C_1 (Oedometer)
3.5m	0.38	4.43	1.7	7.2	10.7	11.4
13.0m	0.39	3.81	1.7	11.7	3.6	21.1

* from Gupta's solution(1983) using $I_R=100$ and piez. element of 4R behind cone tip.

** using Gupta's theoretical solution

적 정확한 예측 결과를 제공해 딜라토미터의 P_2 를 이용한 수평 압밀계수 결정에 대한 현장 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 그러나, P_2 값이 기계적인 작동으로 관측되는 값인 만큼 실험자의 경험이 중요한 요소이며 해석 시 이론 해의 부재로 인한 경험적인 해석법의 단점을 극복하기 위해서는 이론 해의 개발에 대해 연구가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

국내 연약 해성점토의 공학적 특성을 파악하기 위하여 피에조 콘과 딜라토미터 시험을 수행하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 피에조 콘과 딜라토미터를 이용한 흙 분류결과는 연약지반 내에 존재하는 얇게 산재한 실트 및 모래질 층의 존재를 정확하게 예측하였으며 특히, 피에조 콘은 관입 간극수압과 선단저항력을 이용한 $q_r - B_v$ 시스템이 그리고 딜라토미터의 경우에도 간극수압 지수를 이용하는 $I_b - U_b$ 시스템이 이러한 지반조건에 대해서 보다 일관성 있는 결과를 제공하는 것으로 평가된다.
- (2) 연약지반에서 피에조 콘의 선단저항력과 간극수압으로 추정된 비배수 전단강도가 잘 일치하였으며 딜라토미터 시험 결과 얻어진 비배수 전단강도는 피에조 콘 시험결과 얻어진 선단저항력과 간극수압으로부터 각각 추정된 비배수 전단강도의 평균 값 정도를 추정하는 경향이 있는 것으로 평가된다.
- (3) 실트 및 모래질이 많이 포함된 국내 해안 연약지반에서 이루어진 압밀계수 추정결과 Gupta(1983)가 제안한 이론 해에 의한 수평 압밀계수가 실내 압밀시험 결과와 가장 근사하게 일치함을 알 수 있어 국내 해안지반과 같이 실트 및 모래 성분을 많이 포함하는 지반에 적

절하고 국내에서 수행되는 콘 관입 시험 시, 유발되는 과잉 간극수압이 상당량 소산됨을 뒷받침하는 것으로 생각되어 이 분야에 대한 추가적인 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

- (4) 딜라토미터의 P_2 값을 이용한 수평 압밀계수의 추정은 그 값이 실내 압밀계수와 크게 차이 나지 않는 비교적 정확하며 일관성 있는 결과를 제공하여 현장 적용 가능성을 확인하였으나 이론 해의 부재로 인한 경험적인 해석법의 단점을 극복하기 위해서는 이론 해의 개발에 대해 연구가 반드시 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김영상, 이승래, 김윤태(1997), "피에조 콘, 소산시험을 이용한 압밀계수 결정 시 최적화 기법의 적용", 한국지반공학회지, 제13권, 제4호, pp.95-107.
2. 벽산건설(주) (1995), *군장진입도로 (장항측) 축조 및 포장공사 구간내 연약지반의 물리적, 역학적 거동특성 파악 및 설계변수 도출 연구용역 보고서*.
3. 이선재(1997), "피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구", 박사학위논문, 서울대학교, pp.157.
4. 이승래, 김윤태, 김준석(1992), "Flat Dilatometer 현장시험을 통한 점토지반의 공학적 성질추정", 한국지반공학회지, 제8권, 제3호, pp.23-35.
5. 한국토지공사(1997), *아산공단 포승지구 연약지반 침하안정관리 용역 시험시공 토질조사 보고서*.
6. Campanella, R. G., Robertson, P. K. (1985), "Recent Developments in In Situ Testing of Soils", *Proceeding of XI ICSMFE*, San Francisco, Vol 2, pp. 849-854.
7. FHWA(1988), *Guidelines for using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design*, FHWA-PA-87-922+84-24.

8. Gupta, R. C. (1983), "Determination of the In Situ Coefficients of Consolidation and Permeability of Submerged Soil using Electrical Piezoprobe Sounding", Ph.D. Dissertation, University of Florida.
9. Ladd, C. C. (1976), *Use of Precompression and Vertical Sand Drains for Stabilization of Foundation Soils*, Research report No. R76-4, No.5431, MIT, Cambridge, Mass.
10. Levadoux, J. N. and Baligh, M. M. (1986), "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration II: Interpretation", *J. of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 112, No.7, July.
11. Lunne, T., Powell, J., and Robertson, P. (1996), "Use of Piezocone Tests in Non-Textbook Materials", *Advances in site investigation practice*, Thomas Telford, London.
12. Marchetti, S., Crapps, D. K. (1981), *Flat Dilatometer Manual*, International Report of G. P. E inc., distributed to purchasers of the DMT equipment.
13. Park, Yeong-Mog, Shin, Eun-Chul and Ahn, Sang-Ro (1996), "Geotechnical Properties of Soft Marine Clay in Korea", *Proceedings of 6th International Offshore Polar Engineering Conference*, Vol. 1, Los Angeles, U.S.A, pp.385 ~ 390.
14. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., and By, T.(1988), "Excess Pore Pressure and the Flat Dilatometer Test", *ISOPT-1*, Orlando, Florida.
15. Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D.G. and Greig, J.(1986), "Use of Piezometer Cone Data", *Proceedings of In-situ '86, ASCE, Specialty conference, Blacksburg, Virginia*.
16. Teh, C.I., Houlsby, G.T.(1991), "An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17 ~ 34.
17. Torstensson, B. -A., 1978. The Pore Pressure Probe. *Proceeding. Geoteknikkdagen*, Tapir Forlag, Oslo.

(접수일자 1998. 7. 18)