

피에조콘 관입시험을 이용한 시화지구 해성 점성토의 압밀특성 산정 Evaluation of Consolidation Characteristics of Marine Clayey Soils in Shihwa Region from Piezocone Tests

장인성¹ · 김범상² · 권오순¹ · 석정우³

In Sung Jang¹, Bum Sang Kim², O Soon Kwon¹ and Jeong Wo Seok³

1. 서 론

최근 들어 시화호 주변에 연구개발 및 주거를 목적으로 하는 사업지구가 활발하게 계획 또는 시공되고 있는데, 모든 건설공사에서와 마찬가지로 안전하고 경제적인 설계 및 시공을 위해서는 실내 및 현장지반조사를 통하여 지반의 공학적 특성에 대한 정확한 평가가 반드시 선행되어야 한다. 특히 연약 해성점토는 매우 연약하고 지반공학적으로 불안정한 상태에 있기 때문에 적절한 처리 공법을 적용하여야 하는데, 시화호 주변과 같이 건설부지 내에 점성토가 비교적 넓게 존재할 경우, 연약지반 개량공법을 적용하는데 있어 압밀 침하량을 비롯하여 개량기간 및 범위와 직접적인 관련이 있는 압밀계수(Coefficient of consolidation) 및 과압밀비(Overconsolidation ratio, OCR) 등 지반의 압밀특성을 보다 정확하게 파악함으로써 파다 또는 파소설계를 피할 수 있다.

지반 내 과잉간극수압이 소산되는 압밀시간과 직접적인 관계가 있는 압밀계수와 및 강도 특성이나 간극수압 발생양상 및 압축성 등에 큰 영향을 미치는 요소인 과압밀비는 일반적으로 현장에서 채취한 불교란시료(Undisturbed sample)를 이용한 표준압밀시험 등으로부터 산정되고 있다. 하지만, 이러한 실내시험 이외에도 피에조콘 관입시험(piezocone penetration test, CPTu) 등 다양한 현

장시험을 이용하여 압밀특성을 파악하고자 하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 대표적인 현장 지반조사 방법인 피에조콘 관입시험은 콘 관입시 측정되는 결과를 바탕으로 흙의 분류나 지반의 강도 특성을 비교적 정확하게 추정할 수 있는 시험법이다. 특히, 콘의 관입 시 발생한 과잉간극수압의 소산 양상이 지반의 압밀 또는 투수 특성과 밀접한 관련이 있고, CPTu에서 직접 측정되는 q_c 나 u_{br} 는 점성토의 과압밀비와 밀접한 연관이 있기 때문에 이러한 결과를 이론적 경험적 기법에 적용하여 지반의 압밀계수 및 과압밀비 결정에 활용하고 있다.

하지만, 지반의 압밀계수와 과압밀비는 흙의 투수성 및 지층분포, 압축성 등 흙의 종류에 따른 다양한 요인의 영향을 받고, 또한 같은 점성토라 하더라도 지역 및 흙의 형성 경로에 따라 다른 값을 보이게 된다. 따라서 현장시험이나 실내시험으로부터 지반의 압밀특성을 파악하는데 있어 기존의 연구방법을 일괄적으로 적용하기에는 무리가 따를 수 있다.

본 연구에서는 시화지구 10개 위치에서 수행한 피에조콘 관입시험 결과와 함께 표준압밀시험 결과를 이용하여 시화지구 해성 점성토의 압밀특성을 파악하였는데, 피에조콘 관입시험을 이용하여 이 지역 해성점토층의 압밀계수 및 과압밀비를 가장 합리적으로 산정할 수 있는 방법에 대하여

1 한국해양연구원 연안항만공학연구본부(Corresponding Author : Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)
2 SK건설(주) 부설연구소 (SK Engineering and Construction, Seoul 110-300, Korea)
3 삼성건설기술연구소 기술연구팀 (R&D team, Institute of Technology, Samsung Corporation, Seongnam-Si, Gyonggi-Do 463-771 Korea)

알아보았다.

2. 기존의 연구내용

2.1 해성점토의 공학적 특성 관련 기존의 연구 내용

우리나라 해성점토의 압밀 특성과 관련한 연구는 신은철과 김기한(1995), 정철호(1998)와 김규선 등(1999)에 의해 이루어져왔다. 그리고 피에조콘 관입시험과 관련해서는 김종국 등(2001)이 인천국제공항 근처 해성점토에 대한 공학적 특성을 CPTu와 딜레토미터 시험(Dilatometer Test, DMT)을 이용하여 분석하였으며, 이강운 등(2002)은 울릉지역에 대한 CPTu 결과로부터 그 지역 해성점토의 응력이력, 즉 과압밀비에 대한 기존의 해석기법을 비교한 바 있다.

하지만, 해성점토의 공학적 특성과 관련한 기존의 연구내용은 거의 대부분 실내시험으로부터 구한 결과에 근거하여 이루어졌으며, 또한 피에조콘 관입시험을 이용한 압밀특성에 대한 연구는 기존의 해석방법을 그대로 적용하거나 데이터의 수가 절대적으로 부족한 관계로 피에조콘 관입시험을 이용한 압밀특성 산정기법에 대한 연구가 아직까지 부족한 실정이다. 또한, 앞서 언급한 바와 같이 지반의 공학적 특성, 특히 압밀특성은 지역 및 성인에 따라 큰 영향을 받기 때문에 본 연구지반인 시화호 인근에 대한 CPTu의 적용성을 확인하고 압밀특성의 산정기법에 대한 연구를 수행할 필요가 있다.

2.2 CPTu를 이용한 기존의 압밀계수 산정기법

피에조콘 관입시험에서 콘의 관입시 발생한 과잉간극수압은 시간에 따라 소산되며, 특정 심도에서 관입을 멈추었을 때, 과잉간극수압의 소산양상을 측정할 수 있다. 이러한 소산양상은 식 (1)에 나타낸 압밀도와 압밀 소요 시간의 관계인 간극수압소산곡선의 형태로 얻을 수 있는데, 점성토 지

반의 압밀계수를 산정하기 위해서는 식 (2)에서 보는 바와 같이 현장에서 직접적으로 측정할 수 있는 각 압밀도(일반적으로 50%)에서의 압밀시간 이외에도 시간계수(T)가 필요하게 된다. 각 압밀도에 해당되는 시간계수는 여러 연구자들(Torstensson, 1975; Baligh와 Levadoux, 1986; Teh와 Houlby, 1991)이 이론적인 기법을 이용하여 Table 1과 같이 제안하였다. 여기서, I_r 은 강성지수($=G/s_u$: G :전단탄성계수, s_u :비배수 전단강도)를 나타낸다.

$$u^* = 1 - U = \frac{\Delta u}{\Delta u_i} = \frac{u - u_0}{u_i - u_0} \quad (1)$$

$$c_h = \frac{T \cdot R^2}{t} \quad (2)$$

여기서, u^* :정규화한 과잉간극수압, U :압밀도, u :소산시간 t 에서의 과잉간극수압, u_0 :정수압, u_i :초기 과잉간극수압, c_h :수평방향 압밀계수, T :시간계수, R :콘의 반경을 나타낸다.

장인성 등(2002)은 국내 9개 지역 총 56회에 걸쳐 수행한 간극수압 소산시험 결과를 기존의 여러 해석 방법에 적용한 결과, 수평방향 압밀계수를 산정하는 여러 방법 중 축대칭 변형 및 배수조건을 토대로 지반의 변형 특성을 강성지수로서 고려할 수 있도록 제안된 Torstensson의 원통형 방법 및 Teh와 Houlby의 방법이 가장 적합한 것으로 제시하였다.

2.3 CPTu를 이용한 기존의 과압밀비 산정기법

과압밀비(OCR)는 현재 유효상재하중에 대한 지반이 과거에 경험한 최대 연직하중의 비로 나타난다. Schmertmann(1978) 등은 CPTu로부터 구한 비배수 전단강도(s_u)를 이용하여 OCR을 간접적으로 추정하는 방법을 제안하였다. 그리고 원추관입 저항력(q_c)과 관입간극수압(u_{br} :다공질 필터가

Table 1. Time factor at different degrees of consolidation according to interpretation methods

Degree of Consolidation (U_v , %)	Torstensson								Baligh and Levadoux	Teh and Houlby
	Spherical				Cylindrical					
	$I_r=30$	$I_r=70$	$I_r=100$	$I_r=130$	$I_r=30$	$I_r=70$	$I_r=100$	$I_r=130$		
20	0.044	0.065	0.081	0.097	0.12	0.19	0.24	0.28	0.69	0.038
40	0.18	0.26	0.34	0.40	0.74	1.14	1.48	1.78	3.0	0.142
50	0.29	0.44	0.58	0.69	1.47	2.19	2.90	3.55	5.6	0.245
60	0.46	0.73	0.98	1.17	2.49	3.83	5.36	6.63	10	0.439
80	1.21	1.79	2.22	2.66	9.97	18.65	25.16	31.67	39.0	1.6

원추뒷면에 위치할 때의 관입간극수압) 등 콘의 측정값과 관련한 주상도로부터 대략적으로 흙의 과압밀 정도를 파악할 수 있는 방법도 제시된 바 있다.

이러한 간편화한 방법들 이외에도 Table 2에 나타낸 바와 같이 콘의 측정값(q_c, u)으로부터 결정되는 여러 피에조콘 변수들과의 상관관계를 이용하여 OCR을 산정하는 이론적·경험적인 시도가 다양하게 이루어졌는데, 이는 크게 ($q_T-\sigma_{v0}$)를 이용하는 방법, (q_T-u_{bT})를 이용하는 방법, ($u_{bT}-u_0$)를 이용하는 방법, B_q 를 이용하는 방법 등으로 구분할 수 있다.

Table 2. Various piezocone parameters

피에조콘 변수	기호 설명
$q_T-\sigma_{v0}$	q_T : 부등 단면적 효과를 고려한 원추관입 저항력
q_T-u_{bT}	α_{v0} : 연직 전응력
$u_{bT}-u_0$	u_{bT} : 다공질 필터가 원추뒷면에
$B_q = \frac{(u_{bT}-u_0)}{(q_T-\sigma_{v0})}$	위치할 때의 간극수압 u_0 : 정수압

먼저, 피에조콘 관입시험 결과 중 ($q_T-\sigma_{v0}$)를 이용하는 방법의 경우, 공동팽창이론과 한계상태이론을 이용하면, 아래의 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$OCR = 2 \left[\frac{(2/M)(q_T - \sigma_{v0})/\sigma_{v0}'}{(4/3)(1 + \ln I_r) + \pi/2 + 1} \right]^{1/4} \quad (3)$$

여기서, σ_{v0} 는 현장 연직전응력, I_r 는 강성지수, M 은 한계상태선의 기울기로서 $6\sin\phi/(3-\sin\phi)$ 로 나타나고, A 는 소성 체적변형률 비($=1-C_s/C_c$; C_s :재압축지수, C_c :압축지수), 그리고 σ_{v0}' 은 현장 연직 유효응력이다.

한편, Powell 등(1988)은 OCR이 ($q_T-\sigma_{v0}$)/ σ_{v0}' 과 비례관계에 있다고 보고 비례상수 k 를 도입하여 식 (4)와 같이 제시하였다.

$$OCR = k \left(\frac{q_T - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \right) \quad (4)$$

여기서, 영국의 점성토에 대한 연구 결과, k 는 0.2에서 2.2 사이의 값을 나타낸다고 하였다.

Mayne과 Bachus(1988)는 한계상태이론과 공동팽

창이론에 근거하여 (q_T-u_{bT})와 OCR의 관계를 식 (5)와 같이 유도하였다.

$$OCR = 2 \left[\frac{1}{1.95M+1} \left(\frac{q_T - u_{bT}}{\sigma_{v0}'} \right) \right]^{1/4} \quad (5)$$

Mayne(1987)은 30개 현장에서의 시험결과를 바탕으로 ($\Delta u_{bT}=u_{bT}-u_0$)를 이용하는 방법을 식(6)과 같이 제시하였다.

$$OCR = (0.317 \Delta u_{bT} / \sigma_{v0}')^{1.79} \quad (6)$$

Chang(1991)은 OCR이 8 이하인 지반에 대하여 수행한 실험을 통해 간극수압계수(B_q)와 OCR의 경험적인 관계식을 식 (7)과 같이 제시하였다.

$$OCR = \frac{2.3B_q}{(3.7B_q - 1)} \quad (7)$$

Lunne 등(1989)은 여러 현장에서의 시험 결과를 바탕으로 하여 정규화한 여러 가지 피에조콘 변수로부터 OCR을 추정하는 것이 어느 정도 신뢰성을 가지는 것을 주장하였다. 하지만 이는 지반의 성인과 지반 특성이 국내 지반과는 서로 다른 해외의 특정 지역에 국한된 경험적인 해석 결과이기 때문에 국내 지반에서도 같은 경향성을 보일지에 대해서는 의문이 있다.

국내 10개 현장에서 수행한 CPTu 및 불교란시료를 이용한 실내 표준압밀시험으로부터 CPTu 결과와 점성토 지반의 OCR의 관계를 비교·분석한 장인성 등(2002)의 연구에 따르면, 측정 OCR과 여러 가지 피에조콘 변수의 상관성을 분석한 결과, 측정 OCR과 ($q_T-\alpha_{v0}$)/ α_{v0}' 및 (q_T-u_{bT})/ α_{v0}' 은 비례관계를 나타내지만, ($u_{bT}-u_0$)/ α_{v0}' 및 B_q 는 반비례관계를 보이고 전체적인 상관성은 비교적 뚜렷하게 나타난다. 또한 ($q_T-\alpha_{v0}$)/ α_{v0}' 에 대한 OCR의 비를 나타낸 N_{OCR} 을 연구지반에 대하여 구한 결과, 2.0~13.0(평균:6.5) 정도의 값을 가지는데, 여기서의 평균값인 $N_{OCR}=6.5$ 를 사용하여 간접적으로 과압밀 정도를 판별할 것을 제시하였다.

3. 시험 개요 및 연구 수행 지반

본 연구에서는 선단각이 60°, 원추 저면적이 10cm², 그리고 다공질 필터가 원추 뒷면에 위치

하고 있는 피에조콘을 사용하여 총 10개 시험지역에서 2cm/sec의 속도로 관입하면서 원추관입 저항력(q_c)과 주면 마찰력(f_s), 그리고 관입 간극수압(u_{br})을 측정하였으며, 원하는 심도까지 관입한 후 시간에 따른 간극수압의 변화를 측정하여 간극수압 소산시험을 수행하였다.

피에조콘 관입시험을 수행한 위치에서 대구경 시료를 포함한 불교란시료를 채취하여 기본 물성 시험, 일축압축시험 이외에도 표준압밀시험 등 다양한 종류의 실내시험을 수행하여 압밀계수와 함께 과압밀비를 구하였다. 그리고 CPTu로부터 압밀계수 및 과압밀비를 산정하는데 있어 필요한 강성지수의 산정을 위해 현장배인시험, 프래셔미터 시험, 그리고 삼축시험도 함께 실시하여 점성토 지반의 비배수 전단강도 및 변형계수 값을 산정하였다.

본 연구에서 시험을 수행한 시화지구는 선캠브리아기의 편암류 및 편암류들이 주로 분포하는 지체구조구의 분할 상 경기육괴에 해당하는 지역으로 쥬라기의 흑운모화강암과 백악기 경상누층군에 대비되는 역암 및 응회질퇴적암이 소규모로 분포하고 있으며, 강과 골짜기 주변으로 제 4기 충적층이 부정합으로 피복되어 있다. Fig. 1은 본 연구를 수행한 시화지구의 대표적인 주상도를 나타낸 것으로, 피에조콘 관입시험 결과와 함께 시추시험 결과를 함께 나타내었다. 이러한 지층형태는 시험 위치 총 10개 지역에서 비슷하게 나타나고 있는데, 상부 5-9m 정도의 실트질이 함유점성토층, 모래층, 실트층, 그 이후로 자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암 등이 순서대로 분포하고 있다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 압밀계수

Fig. 2는 CPTu 중 22회의 간극수압소산곡선을 나타낸 것으로 이를 이용하여 가장 보편적으로 사용되고 있는 압밀도인 50%에서의 시간 t_{50} 을 산출하였고, 이로부터 수평방향 압밀계수를 추정하였다.

일부 시험 결과에서는 콘의 관입이 멈추었는데도 불구하고 압밀초기에 간극수압의 증가가 관측되었다. 이는 콘이 시험 이전에 충분히 포화가 이루어지지 않아서 그럴 수도 있지만, 이 연구에서 사용한 콘과 같이 원추 뒷면에 다공질 필터가 위치한 경우에는 과압밀비가 큰 지반에서

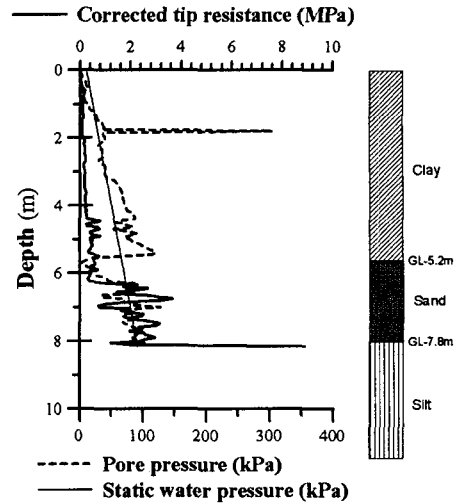


Fig. 1. Typical soil profile in Shihwa region.

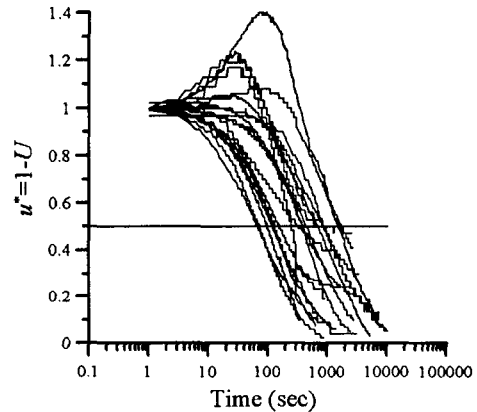


Fig. 2. Excess pore pressure dissipation curves.

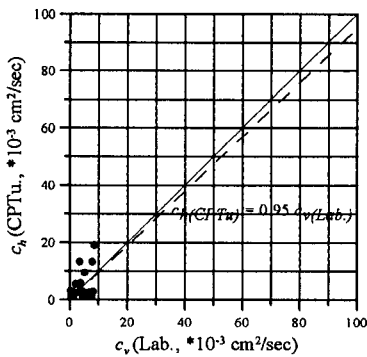
간극수압의 재분포로 인해 나타날 수도 있는 현상이다. 본 연구에서는 이러한 과압밀된 지반이 그 원인으로 판단된다. 이렇듯 간극수압이 소산 시험 중에 상승하는 경우에는, 초기간극수압과 소산시작 시간의 선정이 매우 중요하다. 본 연구에서는 Sully와 Robertson(1999)이 제시한 방법으로, 초기 간극수압 상승과 함께 발생한 압밀효과를 무시하고, 과잉간극수압이 최대가 되었을 때를 압밀시점으로 초기화하여 $t_{50\%}$ 산출하였다.

CPTu의 간극수압 소산시험으로부터 추정된 압밀계수의 경우, Torstensson(1977)의 구형 및 원통형 해석방법과 Baligh와 Levadoux(1980, 1986)의 해석방법, 그리고, Teh와 Houlsby(1991)의 해석방법에 의하여 산정하였다. Torstensson의 방법이나 Teh와 Houlsby의 방법을 적용하는데 필요한 지반

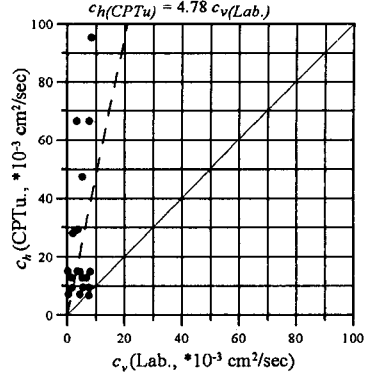
의 강성지수($I_p = G/s_u$, 여기서 G 는 전단탄성계수, s_u 는 비배수 전단강도)는 현장베인시험과 프레스미터 시험(또는 일축압축시험)으로부터 구하였다.

Fig. 3은 피에조콘 관입시험에 의한 수평방향 압밀계수를 표준압밀시험으로부터 구한 수직방향 압밀계수와 비교한 것으로, 각 해석방법에 따라 구분하여 나타낸 것이다. 먼저, 표준압밀시험으로부터 구한 시화지구 해석점토층의 연직방향 압밀계수를 살펴보면 $1.5 \sim 8.3$ (평균: 4.6) $\times 10^{-3}$ cm^2/sec 정도로 일반적인 점성토의 범위에 해당된다(Lambe, 1979).

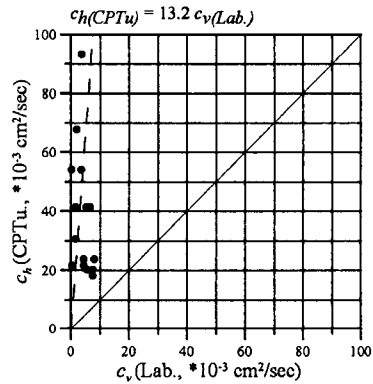
그리고 그림을 보면, Torstensson의 구형해석법(Fig. 3(a))은 표준압밀시험 결과의 평균 0.95배이고, Torstensson의 원통형 해석방법(Fig. 3(b))과 Teh와 Hously의 방법(Fig. 3(d))은 4.78배 및 4.38배로 실내에서 구한 수직방향 압밀계수보다 크게 산정하는 반면, Baligh와 Levadoux의 방법(Fig. 3(c))은 13.2배로 상당히 크게 평가하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 3만을 보면, Torstensson의 구형해석법이 실내에서 구한 연직방향 압밀계수와 가장 잘 일치하는 것으로 추정할 수 있다. 하지만, 일반적으로 현장에서의 큰 실험대상영역과 지반 내 균열이나 부분적 조립토 성분의 영향 등으로 인해 현장 압밀계수값이 실내시험 결과값보다 크게 나타나는 것으로 알려져 있고, 또한 Jamiolkowski(1985)가 제시한 바와 같이 같은 현장이나 실내시험 결과라 하더라도, 방향성에 따라 압밀계수값이 차이를 보이는데, 일반적으로 수평방향 압밀계수가 연직방향에 비해 1~4배 정도 큰 차이를 보인다. 따라서 투수계수의 방향성을 감안하고 현장에서 직접 구한 결과임을 고



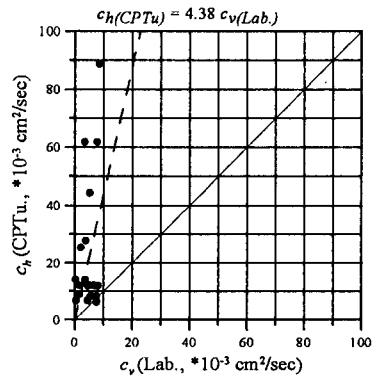
(a) Torstensson's Spherical method.



(b) Torstensson's Cylindrical method.



(c) Baligh and Levadoux's method.



(d) Teh and Hously's method.

Fig. 3. Comparison of c_h values from CPTu with c_v values from oedometer test.

려한다면, 본 연구지반인 시화지구의 해석점성토층에서 수행한 피에조콘 관입시험으로부터 수평방향 압밀계수를 산정하는데 있어 Torstensson의 원통형 방법이나 Teh와 Hously의 방법이 보다 적

절할 것으로 판단된다.

4.2 과압밀비

시화지구 해성점토층의 피에조콘 관입시험 결과로부터 과압밀비(OCR)를 산정하는 방법에 대하여 알아보기 위하여 피에조콘 변수와 실내 표준 압밀시험으로부터 구한 측정 OCR의 상관관계를 분석하였다. Fig. 4는 다양한 피에조콘 변수 중에서 장인성 등(2002)이 상관성이 가장 뚜렷한 것으로 제시한 $(q_T - \alpha_{\sigma_0}) / \alpha_{\sigma_0}'$ 과의 관계를 나타낸 것인데, 장인성 등(2002)의 실험결과 및 Lunne 등(1989)의 실험결과와 함께 도시하였다. 그림을 보면, 시화지구 해성점토층의 과압밀비는 1~5 정도의 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지층으로서 국내 점성토층의 일반적인 특성에 해당되는 값을 보이고 있다.

그리고 OCR이 큰 지반일수록 $(q_T - \alpha_{\sigma_0}) / \alpha_{\sigma_0}'$ 이 크게 나타나는 경향성은 장인성 등(2002) 및 Lunne 등(1989)의 결과와 일치하지만, 국내 지반에 대한 증가곡선의 기울기는 Lunne 등(1989)에 비해 크게 나타난다. 이는 본 연구지반인 시화지구 뿐 아니라 국내 대다수의 지반이 실트질 성분의 흙을 다량 함유하거나 지반의 불균질성 등 여러 가지 요인으로 인해 같은 OCR이라 하더라도 q_T 값이 Lunne 등(1989)에 비해 크게 측정되기 때문인 것으로 판단된다.

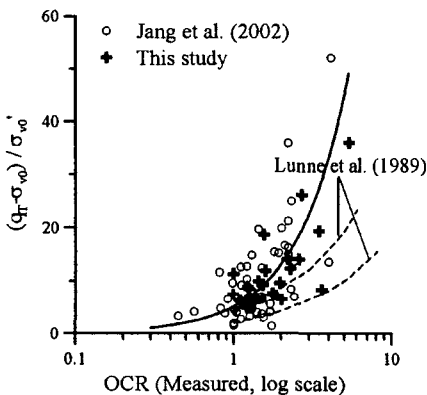


Fig. 4. Correlation between measured OCR and piezocone parameter $(q_T - \alpha_{\sigma_0}) / \alpha_{\sigma_0}'$.

Fig. 5는 피에조콘 관입시험 결과를 기존의 다양한 해석기법 중 장인성 등(2002)이 제시한 방법인 $N_{OCR}=6.5$ 를 적용하여 산정한 예측 OCR을 측정 OCR과 서로 비교하여 나타낸 것으로, 측정 OCR과 예측 OCR간의 상관관계가 장인성 등

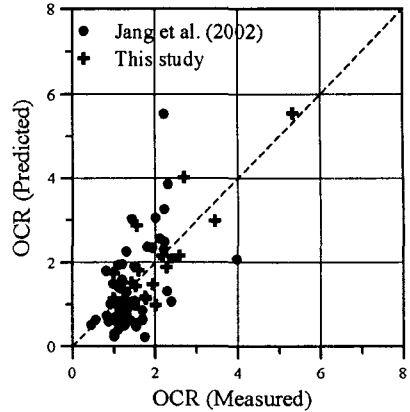


Fig. 5. Comparison of predicted OCR with measured OCR ($N_{OCR}=6.5$).

(2002)의 실험결과보다 오히려 더 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 이로부터 시화지구 해성점토층의 과압밀비를 피에조콘 관입시험으로부터 추정하는 데 있어 장인성 등(2002)이 제안한 경험적인 과압밀비 계수인 $N_{OCR}=6.5$ 를 사용하여 간접적으로 과압밀 정도를 파악하는 것이 가장 바람직한 것으로 판단된다.

4.3 시화지구 해성 점토의 압밀특성

4.1절과 4.2절에서의 결과를 바탕으로 CPTu로부터 시화지구 점성토 지반의 수평방향 압밀계수(c_h) 및 과압밀비(OCR)를 정리하면 Table 3과 같다. 여기에는 국내 다른 점성토 지반에 대한 CPTu 결과(장인성 등, 2002)도 함께 제시하였다. 수평방향 압밀계수는 Teh와 Houlsby(1991)의 방법을 이용하여 산정한 것이고, 과압밀비의 경우는 $N_{OCR}=6.5$ 를 적용한 경험적인 방법으로부터 구한 것이다.

표를 보면, 시화지구 해성점토층의 수평방향

Table 3. Comparison of c_h and OCR in Korean clayey deposits

Location	$c_h (\times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec})$		OCR
	Range	Average	Range
Shihwa	6.2~88.8	24.1	1.0~10.6
Yangsan	1.0~14.7	4.0	1.0~2.3
Yeoungjong	1.2~20.3	6.6	1.0~2.3
Gangneung	1.1~26.3	10.9	1.0~2.4
Yeongam	1.5~11.4	4.1	1.6~4.2
Hadong	0.3~40.3	7.4	1.0~1.5
Seocheon	0.9~4.9	2.4	1.5~4.7
Kimje	4.0~20.9	13.4	1.5~2.3

압밀계수는 평균 $24.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 다른 지역에 비해 상대적으로 크게 나타나는데, 이는 이 지역의 점성토가 실트질을 많이 함유하고 있을 뿐만 아니라, 점성토의 압밀계수에 큰 영향을 미치는 과압밀비 또한 표에서 보는 바와 같이 다른 지역에 비해 크게 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 시험지반인 시화지구에서 연직 배수재를 이용한 연약지반 개량공법을 적용할 경우 다른 지역에 비해 압밀 시간이 그만큼 줄어들 것으로 예상된다.

5. 결 론

시화지구 해성점토층에서 수행한 피에조콘 관입 시험 결과로부터 압밀계수와 과압밀비를 다양한 해석방법을 이용하여 산정하고, 이를 표준압밀시험 등 실내시험 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시화지구 해성점토층의 연직방향 압밀계수는 $1.5\sim 8.3(\text{평균}:4.6) \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 정도로 일반적인 점성토의 범위에 해당되고, 과압밀비는 1~5 정도의 정규압밀 또는 약간 과압밀된 지층에 해당되는 값을 보이고 있다.

2. 현장과 실내에서의 투수성의 차이 및 투수계수의 이방성을 감안한다면, 시화지구의 해성점토층에서 수행한 피에조콘 관입시험으로부터 수평방향 압밀계수를 산정하는데 있어 Torstensson의 원통형 방법이나 Teh와 Houlsby의 방법이 보다 적절할 것으로 판단된다.

3. 피에조콘 변수 중에서 $(q_r - \alpha_v) / \alpha_v$ 와 OCR의 관계를 비교한 결과, OCR이 큰 지반일수록 $(q_r - \alpha_v) / \alpha_v$ 이 크게 나타나는 경향을 보인다. 이는 기존의 여러 문헌과 일치하는 결과이다.

4. 피에조콘 관입시험 결과로부터 과압밀비를 산정하는데 있어 경험적인 과압밀비 계수 $N_{OCR}=6.5$ 로 가정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

5. 시화지구 해성점토층의 수평방향 압밀계수는 국내 다른 지역에 비해 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. 이는 점성토가 실트질을 많이 함유한 특성 뿐 아니라 과압밀비 또한 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

참고 문헌

김규선, 임형덕, 이우진, 1999. 실내압밀시험에

의한 남해안 해성점토의 C / C_c . 한국지반공학회논문집, 15(6), pp. 87-98.

김종국, 김영웅, 최인걸, 박영목, 2001. CPTu와 DMT를 이용한 인천국제공항 해성점토의 공학적 특성연구. 한국지반공학회논문집, 17(2), pp. 41-49.

이강운, 윤길립, 채영수, 2002. 피조콘 시험을 이용한 해성점토의 응력이력(OCR, σ'_p)판정. 대한토목학회 2002년 학술발표회, pp. 321-324.

신은철, 김기환, 1995. 인천지역에 분포하는 해성점토의 압밀거동. 대한토목학회 1995년도 학술발표회 논문집, pp. 463-466.

장인성, 이선재, 정충기, 김명모, 2002. CPTu를 이용한 국내 점성토 지반의압밀계수 산정. 대한토목학회논문집, 22(1-C), pp. 67-79.

장인성, 권오순, 정충기, 김명모, 2002. 피에조콘 관입시험 결과와 점성토의 과압밀비의 관계. 대한토목학회논문집, 22(6-C), pp. 651-659.

정철호, 1998. 포항 해성점토의 분포와 공학적 특성. 한국지반공학회논문집, 14(5), pp. 77-88.

Baligh, M. M. and Levadoux J. M., 1986. Consolidation after Undrained Piezocone Penetration. II: Interpretation. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol 112, No. 7, pp. 727-745.

Chang, M. F., 1991. Interpretation of overconsolidation ratio from in situ tests in Recent clay deposits in Singapore and Malaysia. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 28, pp. 210-225.

Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T. and Lancellotta, R., 1985. New developments in field and laboratory testing of soils. *State-of-the art report, Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 1, pp. 57-153.

Lambe, T. W. and Whitman, R. V., 1979. *Soil mechanics, SI Version*, John Wiley & Sons

Lunne, T., Lacasse, S. and Rad, N. S., 1989. SPT, CPT, Pressuremeter testing and recent developments on in situ testing of soils. *General report from the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 4, pp. 2339-2403.

Mayne, p. W., 1987. Determining preconsolidation

- pressures from DMT contact pressures. *Geotechnical Testing Journal*, 10, pp. 146-150.
- Mayne, P. W. and Holtz, R. D., 1988. Profiling stress history from piezocone soundings. *Soils and Foundations*, 28, pp. 1-13.
- Powell, J. J. M., 1988. Interpretation and use of the piezocone test in UK clays. *Penetration Testing in the UK*, Thomas Telford, London, pp. 151-156.
- Schmertmann, J. H., 1978. Guidelines for cone penetration test. Performance and Design. *Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209*, Washington, July, 145p.
- Teh, C. I. and Housby, G. T., 1991. An analytical study of the cone penetration test in clay. *Geotechnique*, No. 41, Vol. 1, pp. 17-34.
- Torstensson, B. A., 1977. The pore pressure probe. *Nordiske Geotekniske Mte*, Oslo, Paper No. 34, pp. 34.1-34.15.