

인천국제공항 부지 해성 세립토에 대한 CPTU와 DMT 결과 비교

Comparison of CPTU and DMT Results on Incheon International Airport Marine Soils

김 주 형* ¹	Kim, Ju-Hyong	김 영 웅* ²	Kim, Young-Ung
조 성 민* ³	Cho, Sung-Min	김 명 모* ⁴	Kim, Myoung-Mo

Abstract

CPTU and DMT are performed on Incheon International Airport marine soils to estimate the various properties of the soils such as the undrained shear strengths(s_u), the overconsolidation ratio(OCR), and the coefficient of consolidation(c_h), whose results are compared with each other. The comparisons show that both of the tests give better results, if the test soils are classified as clays by the piezocone parameter, B_q , and that the magnitudes of estimated soil parameters vary widely depending upon the methods utilized to interpret the test results, from which it is known that the method of interpretation for each soil property is one of the critical factors in obtaining dependable results for both tests. And erratic results may be produced regardless of the interpretations, if CPTU or DMT is used in the evaluation of s_u or OCR values for the fine soils with low plasticity.

요 지

인천국제공항에 분포하는 해성세립토 지반에서 일련의 CPTU와 DMT를 실시하고 그 결과로부터 구한 비배수전단강도(s_u), 과압밀비(OCR), 압밀계수(c_h) 등과 같은 지반 정수와 기존의 시험자료 등을 분석하여 두 시험 결과를 비교하였다. 이 분석에 의하면, CPTU와 DMT 두 시험은 모두 피에조콘 정수, B_q 로 분류하여 점성토인 지반에서 보다 신뢰성이 높은 결과를 주었으며, 또한 해석방법에 따라 지반정수 산정결과에 큰 편차를 보여, 적절한 해석 방법의 선택이 신뢰성 있는 지반정수의 산정을 위한 주요한 인자임을 알았다. 그리고, 소성적 성질이 낮은 세립토 지반에서의 CPTU와 DMT를 이용한 비배수전단 강도 또는 과압밀비의 산정은 상당한 오차를 유발할 수 있다고 판단되었다.

Keywords : CPTU, DMT, Overconsolidation ratio(OCR), Undrained shear strength(s_u), Coefficient of consolidation(c_h)

1. 서론

CPTU와 DMT는 각각 콘과 블레이드를 지반에 삽입하여 여러가지 공학적인 지반 정수를 연속적으로 얻을 수 있는 공통점을 가진 현장 시험 방법이다. 두 시험에 대한 연구는 각각의 시험기가 개발된 이후 현재까지 오랜 기간 계속 되어 왔으며, 그 결과로 경험적 또는 이론적인 지반 정수 산정식들이 많이 제안되었다. CPTU와 DMT를 이용하면 지

반 분류뿐만 아니라 점토지반의 비배수전단강도(s_u), 횡방향압밀계수(c_h), 과압밀비(OCR)등을 구할 수 있는데, 대부분의 경우에 이 두 가지 시험은 지반 정수를 시험결과로부터 직접 구하는 대신, 각각 기준이 되는 다른 시험 결과와 비교하여 지반 정수별 또는 지반특성에 따라 얻어진 경험 상수를 이용하여 원하는 지반정수를 산정한다.

현재까지 외국에서는 많은 연구를 통해 다양한 지반 정수 산정식들이 제안되어 있으나, 한국에 분포하는 세립토

*1 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 박사과정 수료
 *2 정회원, 인천국제공항공사 품질안전팀 건설시험소장
 *3 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원
 *4 정회원, 서울대학교 공과대학 지구환경시스템 공학부 교수

지반에 대해서는 CPTU와 DMT의 비교 분석 자료가 그리 많지 않다. 본 연구에서는 기왕에 제안된 여러가지 경험식들의 한국점토에 대한 적용성을 가리기 위해 약 10~30 정도의 소성지수와 비교적 큰 압밀계수를 갖는 서해안(인천) 해성 세립토 지반에서 CPTU와 DMT를 실시하고, 그 결과를 이용하여 다양한 방법으로 구한 여러 지반 정수들 즉, 비배수전단강도, 과압밀비 그리고 압밀계수 등을 비교 분석하였다.

2. CPTU와 DMT

CPTU와 DMT는 지반을 연속적으로 탐사하여 지반을 분류하고 각종 공학적 지반 정수를 구할 수 있다는 공통점을 가지고 있으나, 모양과 측정방법은 각각 다르다. CPTU는 원추관입저항력(q_c)과 슬리브의 마찰력(f_s), 그리고 원추 선단이나 후면의 간극수압(u_c 또는 u_{bt})을 측정하여 지반 정수를 산정하는 반면, DMT는 멤브레인이 0.05mm와 1.10mm 팽창할 때의 압력과 다시 0.05mm로 수축할 때의 압력을 각각 강판 멤브레인의 강성에 대해 보정하여 p_0 , p_1 , p_2 압력을 산정하고, 이를 연직방향유효응력(σ'_{v0})이나 현장간극수압(u_0) 등과 함께 이용하여 딜라토미터계수(E_D), 횡방향응력지수(K_D), 재료지수(I_D), 그리고 간극수압지수(U_D) 등을 구하여 제반 지반 정수들을 산정한다.

CPTU와 DMT시험으로부터 비배수전단강도, 과압밀비, 그리고 압밀계수를 산정하는 대표적인 방법을 다음에 간략히 요약하였다.

2.1 비배수전단강도

2.1.1 CPTU

CPTU로부터 비배수전단강도를 구하는 해석적 방법에는 고전적인 소성이론 또는 공동팽창이론을 이용하는 방법과 선형 또는 비선형 응력-변형률 관계를 이용하여 수치해석적으로 접근하는 방법이 있다. 그러나, 이러한 방법들은 해석상에 여러 가정들을 포함하고 있으며, 실제 문제에 적용하는 데 많은 어려움이 있어서, 보통은 특정한 강도시험을 기준으로 하여 경험적으로 비배수전단강도를 산정하는 방법을 많이 사용하고 있다. 원추 저면에서의 부등단면적효과로 인한 간극수압의 영향에 대해 보정한 원추저항력($q_T = q_c + (1-a)u_{bt}$)과 간극수압(u_{bt}) 그리고 이들의 차($q_T - u_{bt}$)를 연직응력(σ'_{v0})과 정수압(u_0) 등으로 보정하고, 이를 각각 경험적으로 구한 콘계수 N_{kt} , $N_{\Delta u}$, N_{qu} 등으로 나

누어주면 비배수전단강도(s_u)를 구할 수 있는데 여러 학자들이 제안한 경험식들이 아래 식(1)~(3)에 나타나 있다.

$$s_u = \frac{q_T - \sigma'_{v0}}{N_{kt}} \quad (\text{Lunne et al., 1985}) \quad (1)$$

$$s_u = \frac{u_{bt} - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (\text{Vesić, 1972}) \quad (2)$$

$$s_u = \frac{q_T - u_{bt}}{N_{qu}} \quad (\text{Campanella et al., 1982}) \quad (3)$$

2.1.2 DMT

Marchetti(1980)는 DMT시험의 횡방향응력지수(K_D)를 이용한 비배수전단강도 산정식을 아래 식(4)와 같이 제안하였으며, Roque(1988)는 보정압력 p_1 을 이용하여 고전적인 지지력 공식과 유사한 형태의 비배수전단강도 산정식을 식(5)와 같이 제안한 바 있다.

$$s_u = 0.22 \sigma'_{v0} (0.5 K_D)^{1.25} \quad (\text{Marchetti, 1980}) \quad (4)$$

$$s_u = \frac{p_1 - \sigma'_{v0}}{N_c} \quad (\text{Roque et al., 1988}) \quad (5)$$

여기서, σ'_{v0} : 현장 유효연직응력, σ_{h0} : 횡방향응력, N_c : 지지력 계수이다.

2.2 과압밀비

2.2.1 CPTU

과압밀비는 비배수전단강도와 마찬가지로 원추관입저항력(q_T), 간극수압(u_{bt}), 그리고 이들의 혼합형태를 이용하여 이론적 또는 경험적인 방법으로 구할 수 있다. Chang(1991)은 콘 관입으로 발생하는 과잉간극수압을($q_T - \sigma'_{v0}$)으로 정규화 한 간극수압계수비 B_q 를 이용하여 예민비와 과압밀비가 8이하인 점토의 과압밀비 산정식을 아래와 같이 제안하였다.

$$OCR = \frac{2.3 B_q}{(3.7 B_q - 1)} \quad (6)$$

이 외에도 Wroth(1988)는 보정 원추관입저항력(q_T)이 OCR과 직접 관계가 있음을 주장하였으며, Powell 등(1988)과 Sugawara(1988)는 정규화한 원추관입저항치와 OCR과의 관계를 경험식으로 나타내었다. Sugawara가 제

안한 식은 아래와 같다.

$$OCR = \frac{(q_T - \sigma_{i0})}{K \cdot \sigma_{i0}} \quad (7)$$

식(7)에서 K는 2.5~5.0까지 변화하는 상수이며 싱가포르의 창이 지역의 경우 K=3.14(Bo et al., 1997), 국내 점토의 경우에는 K=4.5(동부건설(주), 서울대학교, 1998)로 제안된 바 있다. 또한, Powell 등(1988)은 영국점토에서 시험한 결과 K⁻¹이 0.2~2.2(K=0.45~5.0)사이의 범위를 갖는다고 하였으며, Mayne(1986)은 q_r 대신 q_c를 사용하여 42 곳에서 시험한 자료를 바탕으로 K⁻¹이 0.15~0.9(K=1.1~6.7)의 범위를 갖는다고 하였다.

2.2.2 DMT

DMT를 이용하여 과압밀비(OCR)를 구하는 경험식이 많이 제안되어 있는데, 대표적으로 Marchetti (1980)는 이탈리아 점토에 대한 시험 결과를 근거로 하여 횡방향응력 지수(K_D)와 OCR의 관계를 식(8)과 같이 제안하였다.

$$OCR = (0.5K_D)^{1.56} \quad (8)$$

Lacasse & Lunne(1988)은 Marchetti의 제안식을 수정하여 노르웨이에 분포하는 해성점토에 대해 아래 식을 제안하였다.

$$OCR = 0.225K_D^n \quad (9)$$

윗 식에서 n은 1.35~1.67까지 변화하는 상수이며 이 값은 조성지수에 따라 변화한다. Powell & Uglow(1988)과 Lunne(1990) 등은 신생점토에 대하여 각각 식(10)과 식(11)을 제안하였다.

$$OCR = 0.24K_D^{1.32} \quad (10)$$

$$OCR = 0.30K_D^{1.17} \quad (11)$$

2.3 압밀계수

2.3.1 CPTU

Torstensson(1977)은 실린더형과 구형 공동팽창이론을 각각 이용하여 간극수압 소산시험을 통한 압밀계수(c) 추

정방법을 식(12)와 같이 제안하였다.

$$c = \frac{R^2 \cdot T_{50}}{t_{50}} \quad (12)$$

여기서 R은 등가 원주 반지름, t₅₀은 50% 압밀도까지의 간극수압 소산시간, 그리고 T₅₀은 시간 t₅₀에 대한 시간 계수이다.

Baligh & Levadoux(1980, 1986)는 콘관입 형태를 이차원의 축대칭 형태로 생각하여 변형률 경로법으로부터 초기 간극수압 분포를 추정하고, 이차원 압밀이론에 의거한 유한요소 해석을 통하여 횡방향압밀계수(c_h) 산정방법을 식(13)과 같이 제안하였다.

$$c_h = \frac{R^2 \cdot T}{t} \quad (13)$$

여기서, R은 콘의 반지름, t는 특정 압밀도까지의 간극수압 소산시간, 그리고 T는 시간 t에 대한 시간 계수이다.

한편, Teh & Houlsby(1991)는 변형률 경로법을 이용하여 초기 간극수압 분포를 추정하고 강성지수가 간극수압 소산 과정에 큰 영향을 끼친다는 점에 착안하여 식(14)와 같이 강성지수를 고려한 압밀계수 추정식을 제안하였다

$$c_h = \frac{R^2 \cdot T^*}{t} \sqrt{I_R} \quad (14)$$

여기서, R은 콘의 반지름, t는 일정 압밀도에 도달하는데 소요된 시간, T*는 수정시간계수, 그리고 I_R은 강성지수(=G/s_u)이다.

일반적으로 c_h는 c_v보다 큰 것으로 알려져 있으나 정량적인 관계는 정확히 알려져 있지 않다. 다만, Lacerda 등(1977)은 여러 현장, 실내시험을 수행하여 횡방향투수계수(k_h)가 연직방향투수계수(k_v)보다 약 2~3배정도 크다고 하였으며, Lee & Kim(1998)은 이 값을 근거로 하여 Torstensson이 제안한 CPTU의 간극수압소산시험 해석방법이 한국점토에는 제일 적합하다고 결론 내린바 있다.

2.3.2 DMT

Gupta(1988)는 DMT 결과를 이용한 횡방향압밀계수(c_h) 산정식을 식(15)와 같이 제안하였다.

$$c_h = 600 \left(\frac{T_{50}}{t_{50}} \right) (mm^2/min) \quad (15)$$

여기서 t_{50} = 50% 압밀도에 도달하는 시간

T_{50} = E/s_u비에 따라 제안된 무차원 시간계수

3. 지반 조건

시험 대상 지역은 2001년 개항을 목표로 하고 있는 인천 국제공항 건설 지역이다. 이 지역은 준설패립 지역으로 준설패립 두께는 약 3~5m 정도이며, 준설패립 아래에는 실트질 점토로 구성되어 있는 상부해성층, 실트질 또는 모래로 구성되어 있는 상부층적층, 점토로 구성되어 있는 하부해성층, 그리고 조립토로 구성되어 있는 하부층적층과 잔류토층이 존재한다.

표 1에는 준설패립 전 인천국제공항 원지반의 대표적인 지질 주상도와 토질 정수들을 나타내었으며 그림 1에는 지층 깊이에 따른 자연함수비, 아터버그한계, 과압밀비, 그

리고 압밀계수 분포를 나타내었다.

표 1과 그림 1(a)에서 보면 상부해성층의 압밀계수는 하부해성층의 압밀계수보다 평균적으로 크고 위치에 따라 그 크기가 큰 폭으로 변화하는데, 이는 상부해성층 곳곳에 실트질 함량이 큰 흩이 넓게 산재해 있기 때문이다. 이와 같은 경향은 소성지수를 비교해 보아도 알 수 있다(그림 1(b)). 그림 1(c)에서 보는 것처럼 상부 5m까지의 자연함수비는 액성한계와 비슷한 값을 가지며, 하부로 갈수록 함수비가 서서히 감소한다. 또한 그림 1(d)는 상부해성층의 과압밀비가 0.8~2.5 정도로서 조수간만의 차이에 의한 영향과 표층의 각질화로 인해 상부해성층이 약간 과압밀되어 있음을 보여주며, 하부해성층의 경우에는 정규압밀에 가까운 응력이력 상태를 나타내고 있다.

그림 2와 3은 이 지역에서 실시한 CPTU와 DMT 결과 예를 나타낸 것인데 선행재하공법 시행 전 약 2m 정도 준설패립 한 후에 실시한 시험 결과이다. 그림 2는 CPTU의 원추관입저항력(q_c)(그림 2(a)), 슬리브의 마찰력(f_s)(그림 2(b)) 그리고 간극수압(u_{bt})(그림 2(c))을 나타낸 것으로 매

표 1. 인천국제공항 지역의 대표적인 원지반 지질 주상도

Depth(m)	Soil Stratification	w _n (%)	I _p (%)	w _l (%)	c _v × 10 ⁻³ (cm ² /sec)	N-value	q _c (kg/cm ²)	U.S.C.S
0	Upper Clayey Soil	26.3~39.4	3.6~23.9	30.0~40.2	2~28	0~6	1~10	ML~CL
6	Upper Alluvial Soil	27.7~33.7	-	-	-	1~50	20~203.8	ML~SM
10	Lower Clayey Soil	25~33.4	17.6~29.1	30.0~44.2	1~15	4~33/30cm	13.1~327	ML~CL
16	Lower Alluvial Soil	15.2~26.6	-	-	-	15~50/13cm	-	SM
35	Weathered-Residual Soil	16.7~18.3	NP	NP	-	38/30~50/7cm	-	-

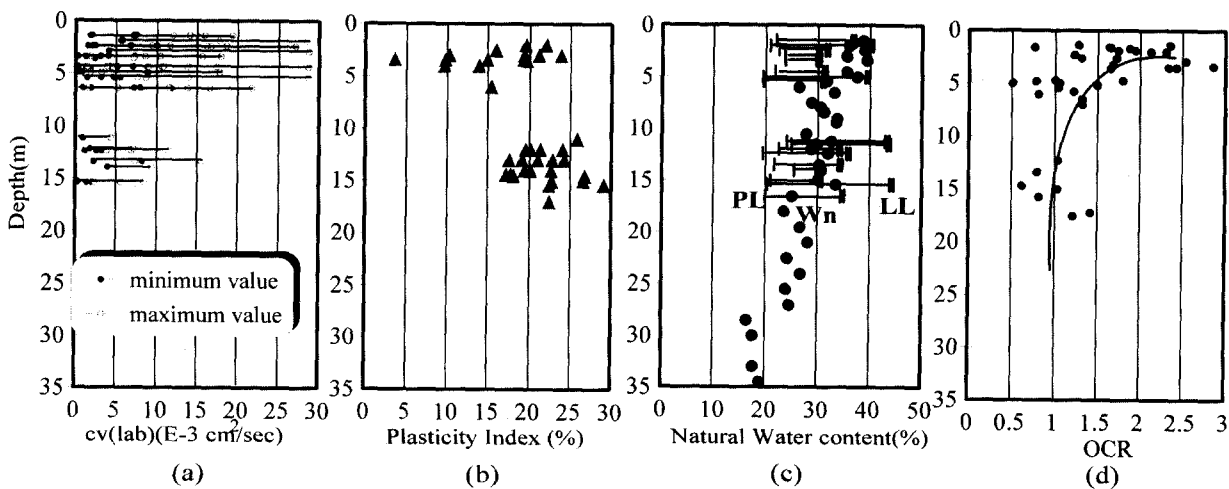


그림 1. 인천국제공항 지역의 지반 정수 분포도

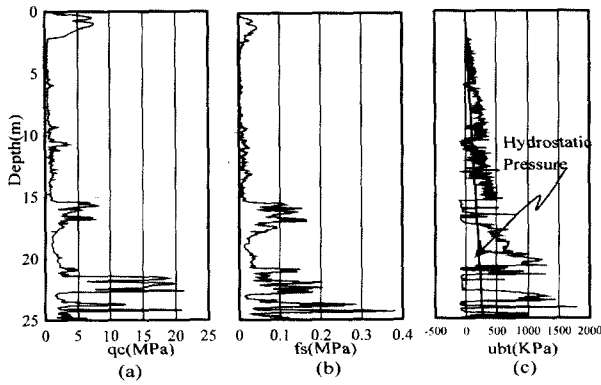


그림 2. CPT 결과(시험조사지역)

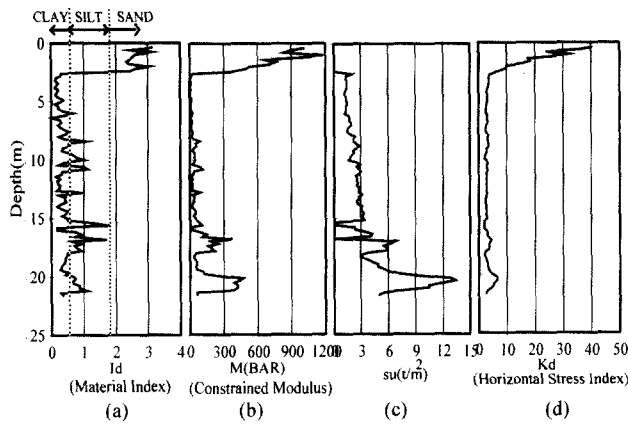


그림 3. DMT 결과(시험조사지역)

립층 하부에 약 6m~7m 정도의 상부해성층이 존재하며, 상부해성층 하부에는 q_c 가 2MPa 이상이고 간극수압(u_{bt})이 정수압보다 작게 측정되는 상부충적층이 존재한다. 그 하부에는 다시 하부해성층과 잔류토가 존재하며, 해성점토층 사이사이에 실트·모래층이 끼어 있음을 보여준다. 또한, 그림 3의 DMT 결과로부터 산정한 재료지수(I_D)(그림 3(a))로 흙의 종류를 판단하면 상부 준설패립층 아래에 약 2~3t/m²의 비배수전단강도를 갖는 점토와 실트가 지층 전반에 혼재되어 있으며, 심도가 깊어질수록 상부해성층, 상부충적층, 하부해성층, 하부충적층의 순으로 나타나 대체로 그림 2의 CPTU 결과와 동일한 경향을 보인다.

4. 지반 정수 평가

인천국제공항에서는 많은 지반 조사가 실시되었는데, 본 논문에서는 그 중에서 시험 성토 중에 실시된 지반 조사 자료와, CPTU, DMT 결과를 포함하고 있는 시험 조사 자료를 이용하여 분석하였다. 시험 성토시에는 GMF Gouda 사가 제작한 CPTU를 사용하였으며, 시험 조사시에는

A.P. van den Berg사가 제작한 CPTU를 사용하였다. 두 시험기 모두 20t의 관입 용량을 갖는 관입기를 사용하였으며, 시험에 사용한 콘은 원추 뒷면에 간극수압을 측정하는 다공질 필터가 있는 것이다. DMT는 FHWA(1992)와 SGI(1994)에서 제안한 표준형 시험기를 사용하였으며, 비배수전단강도 기준시험으로 수행한 FVT 시험기는 Geonor 사가 제작한 55×110mm 크기의 것을 사용하여 시험하였다. 시험 성토 지역과 시험 조사 지역에서 실시한 위치별 각각의 현장시험 수량을 표 2에 나타내었는데, 이 표에서 보는 바와 같이 현장배인시험은 주로 시험 성토 지역에서 CPTU와 함께 수행되었고, DMT는 시험 조사 지역에서 CPTU와 같이 수행되었다. 따라서, 이 논문에서 시험 결과의 비교는 CPTU를 중심으로 이루어졌다.

보정압력 p_0 , p_2 와 간극수압 u_{bt}

CPTU의 원추 후면에서 측정된 간극수압(u_{bt})은 콘관입시 발생하는 과잉간극수압이며, 지반 분류나 비배수전단강도, 과압밀비 등의 지반정수 산정에 사용된다. 또한, DMT 결과로 얻는 보정압력 p_0 는 비배수전단강도나 과압밀비와 관련 있는 횡방향응력지수(K_D)를 산정하는데 사용되며, 보정압력 p_2 는 비배수전단강도 산정 및 흙분류 등에 사용된다. 보정압력 p_0 와 p_2 는 현재까지의 여러 연구자들에 의해 블레이드 관입시 발생하는 간극수압과 유사하다는 연구결과가 있는데, Mayne(1987)은 p_0 가 CPTU로 구한 최대간극수압 u_{max} 와 비슷한 값을 갖는다고 밝힌 바 있으며, Campanella 등(1985)과 Lutenegeger(1988)는 연약점토에서 p_2 가 DMT 관입에 의한 간극수압과 거의 유사하게 나타난다고 하였다.

그림 4와 5에는 인천국제공항 건설 지역에서 실시한 DMT의 p_0 와 p_2 그리고 CPTU의 간극수압 u_{bt} 의 비를 CPTU 수행시 흙의 분류에 사용되는 간극수압계수비 $B_q(=su/(q_t - \sigma_{vo}))$ 와 함께 나타내었으며, Sunneset & Janbu (1985) 그리고 동부건설 & 서울대학교(1998)가 제안한 흙분류 영역도 같이 나타내었다. 이들이 제시한 분류도표에서는 B_q 값에 따라 유일한 흙을 구분해 내지는 못하나 대체로 보면 B_q 값이 0.1~0.2 이상일 때 소성성이 있는 세립토로 분류된다. 이 그림들에서 보면 CPTU와 DMT는 지반에 관입되는 콘과 블레이드의 모양이 다르고 간극수압 측정 방법도 다르지만 보정압력 p_0 는 B_q 가 0.2보다 큰 경우에 CPTU의 원추 후면에서 측정된 간극수압 u_{bt} 와 유사하게 나타나며, 특히 p_2 는 B_q 가 0.2보다 큰 범위에서부터 CPTU의 u_{bt} 값과 유사한 양상을 보인다. 그러나, B_q 가 0.2보다 작

표 2. 각 시험 종류별 시험 위치와 수량

시험종류		시험위치	현장배인시험	CPTU	DMT	표준압밀시험	Rowe cell 압밀시험	간극수압 소산시험	
								CPTU	DMT
시험성토	활주로		46회(19)	46회(19)	-	-	9회(7)	10회(9)	-
	유도로		3회(2)	3회(2)	-	-	-	1회(1)	-
시험조사	유도로		7회(4)	135회(4)	135회(4)	15회(8)	-	13회(8)	3회(2)

* 괄호안은 총 시험 지점의 갯수이다.

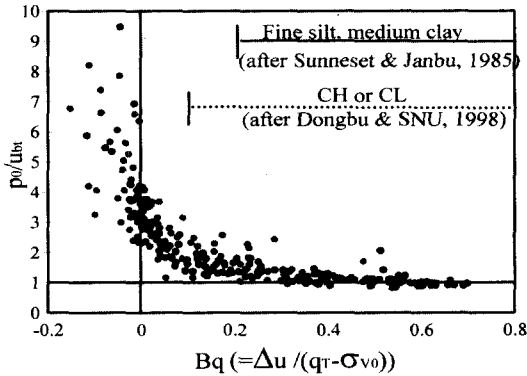


그림 4. Bq와 p₀/u_{bt}와의 관계

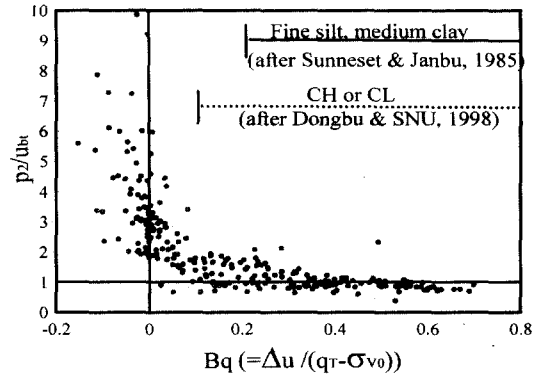


그림 5. Bq와 p₂/u_{bt}와의 관계

아지면 DMT로 측정된 간극수압(p₀, p₂)이 CPTU의 간극수압(u_{bt}) 보다 점점 더 큰 값을 나타낸다. 이는 동료 연구자들 (Bugno and McNeilan, 1984)이 분석한 바와 같이 압밀계수가 큰 점토질 실트에서 나타나는 순간배수(partial drainage)의 영향과 다일라턴시(dilatancy)에 의한 음의 간극수압 발생이 CPTU에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 생각된다.

4.1 비배수전단강도

CPTU로 비배수전단강도를 산정하기 위해서는 앞의 식 (1), (2), (3)에 보인 콘계수를 먼저 결정하여야 하는데, 이 때 기준이 되는 시험에 의한 비배수전단강도 값이 필요하다. 본 해석 대상지반의 세립토층은 압밀계수가 크고 소성이 비교적 낮은 특성을 가지고 있기 때문에 과도한 교란을 우려하여 현장배인시험을 기준시험으로 이용하였다.

인천국제공항 지역 25곳에서 실시한 56개의 CPT와 현장배인시험 결과를 근거로 구한 콘계수 N_{kt}(=(q_r-σ_{vo})/s_u)와 N_{Δu}(=(u_{bt}-u₀)/s_u) 및 N_{qu}(=(q_r-u_{bt})/s_u)를 그림 6(a), (b), (c)에 각각 도시하였다. 그림 6에서 상관관계수 R²로 판단해 볼 때, 원추관입저항력을 이용한 N_{kt}가 가장

좋은 상관성을 보이며 그 다음이 간극수압과 원추관입저항력을 모두 이용한 N_{qu}이고, 간극수압만을 이용한 N_{Δu}는 상당히 큰 분산을 보인다. 따라서, 본 연구에서는 CPTU를 이용한 비배수전단강도 산정을 위한 콘계수로서 N_{kt}를 사용하였는데, 90% 신뢰범위의 N_{kt}값의 평균은 14.5±1.6이다.

그림 7(a)는 원추관입저항력(q_r)과 현장배인시험 결과(s_{u(FVT)})로부터 구한 콘계수 N_{kt}와 소성지수의 관계를 보인 것이다. 이 그림에는 몇 개 데이터의 OCR값도 나타나 있다. 콘계수는 일반적으로 OCR과 소성지수에 영향을 받아 감소하거나 증가하는 것으로 알려져 있는데, 본 현장의 경우에는 OCR에 따른 콘계수의 변화는 알 수 없으나, 소성지수가 증가할수록 콘계수 N_{kt}가 감소하는 경향을 나타내고 있다 (N_{kt}= -0.59PI + 27.7). 이와 같은 경향은 그림 7(c)에 나타나 있는 콘계수 N_{qu}의 경우도 마찬가지임을 알 수 있다(N_{qu}= -1.25PI + 41.5).

그러나, 그림 7(b)의 콘계수 N_{Δu}의 경우에는 분산도가 지나치게 커서 이와 같은 경향성을 판단할 수 없다.

DMT로부터 비배수전단강도를 구하기 위해서는 앞에서 이미 설명한 바와 같이 횡방향응력지수(K_D)를 이용하는 Marchetti의 식(4)와 보정압력 p₁과 토질 특성에 따른 N_c 및 횡방향응력(σ_{ho})을 함께 사용하는 Roque의

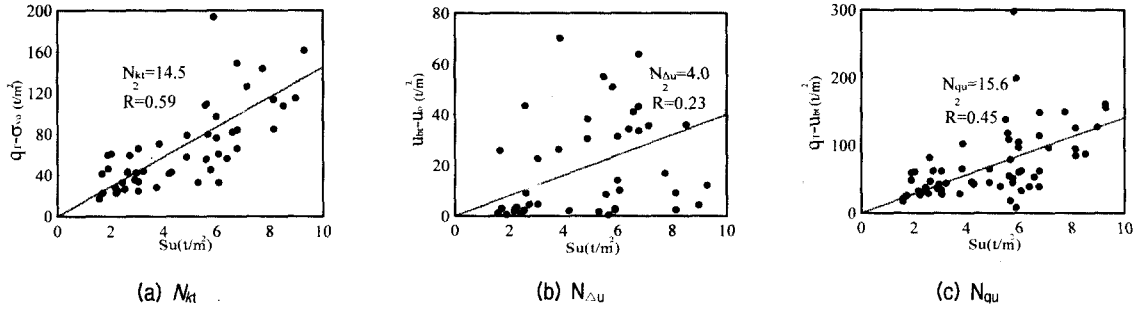


그림 6. 콘계수 N_{kt} , N_{du} , N_{qu}

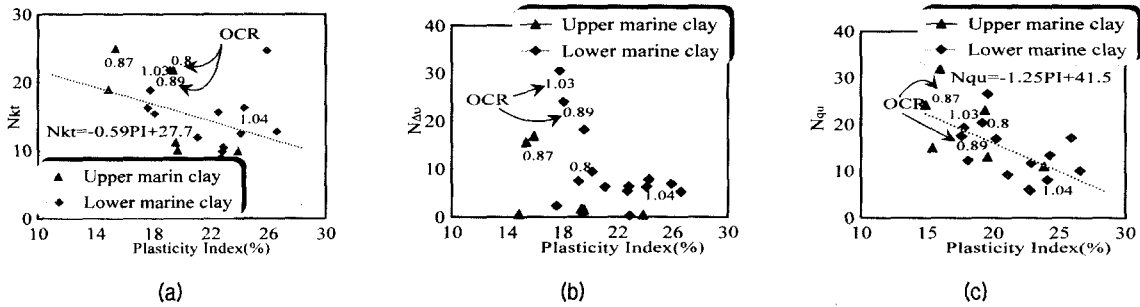


그림 7. (a) N_{kt} vs. PI (b) N_{du} vs. PI (c) N_{qu} vs. PI

식(5)를 이용하는 것이 일반적이다. 본 논문에서도 이 두 가지 방법으로 비배수전단강도(s_u)를 산정해 보았는데, Roque의 식(5)에 포함되어 있는 횡방향응력(σ_{h0})은 Lunne(1990)이 신생점토에 대해 제안한 $K_0=0.34K_D^{0.54}$ 관계를 이용하여 산정하였으며, N_c 는 Roque(1988)가 부서지기 쉬운 점토 또는 실트에 대하여 제안한 값 5를 사용하였다.

그림 8은 앞에 설명한 콘계수 $N_{kt}=14.5$ 를 이용하여 인천국제공항 세립토 지반의 비배수전단강도($S_{u(CPTU, N_{kt}=14.5)}$)를, DMT 결과를 이용하여 Marchetti (1980)와 Roque (1988) 제안식으로 구한 비배수전단강도($S_{u(Marchetti)}, S_{u(Roque)}$)와 현장배인시험으로 구한 비배수전단강도 등으로 정규화한 값을 B_q 와 함께 나타낸 것이다. 그림 8에서 보면, B_q 값이 작아질수록 $S_{u(CPTU)}/S_{u(Marchetti)}$, $S_{u(CPTU)}/S_{u(Roque)}$ 값의 분산이 커지고, B_q 가 대략 0.2 이상이면 $S_{u(CPTU)}/S_{u(Marchetti)}$, $S_{u(CPTU)}/S_{u(Roque)}$ 는 대체로 1에 가까워지는 경향을 나타내고 있는데, 이를 좀 더 정확하게 관찰하기 위하여 B_q 가 0.2 이상 일 때의 $S_{u(CPTU)}$ vs. $S_{u(FVT)}$, $S_{u(CPTU)}$ vs. $S_{u(Marchetti)}$, $S_{u(CPTU)}$ vs. $S_{u(Roque)}$ 관계를 각각 그림 9, 10, 11에 나타내었다.

그림 9에서 보면 $S_{u(CPTU)}$ 는 $B_q > 0.2$ 인 지반에서 $S_{u(FVT)}$ 와 좋은 상관성을 보이는 반면, $S_{u(Marchetti)}$ 는 $S_{u(CPTU)}$ 와 비교해 볼 때 s_u 를 일관되게 작게 평가하는 경향이 있으며,

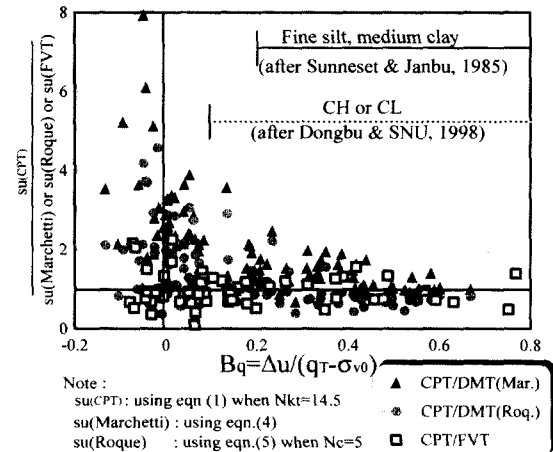


그림 8. 흙의 분류에 따른 $S_{u(CPTU)}$ 와 $S_{u(Marchetti)}$, $S_{u(Roque)}$, $S_{u(FVT)}$ 비의 관계

$S_{u(Roque)}$ 는 일관되게 크게 평가하는 경향이 있음을 알 수 있다. 그러나, 두 경우 모두 비배수전단강도 값이 작아지면(대략 $10t/m^2$ 이내) $S_{u(CPTU)}$ 와의 상관성이 좋아진다.

4.2 과압밀비

CPTU와 DMT 결과를 이용하여 이론적으로 또는 경험적인 방법으로 지반의 과압밀비를 구할 수 있다.

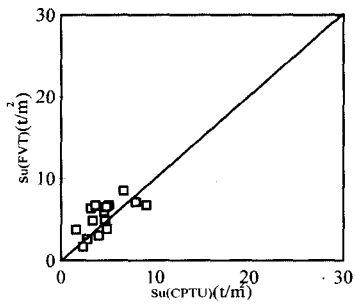


그림 9. $S_u(\text{CPTU})$ VS. $S_u(\text{FVT})$
($B_q > 0.2$)

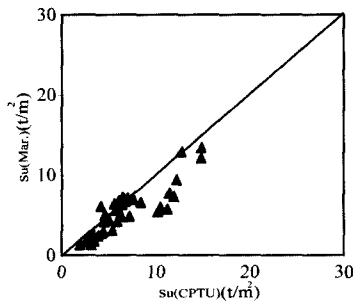


그림 10. $S_u(\text{CPTU})$ VS. $S_u(\text{Marchetti})$
($B_q > 0.2$)

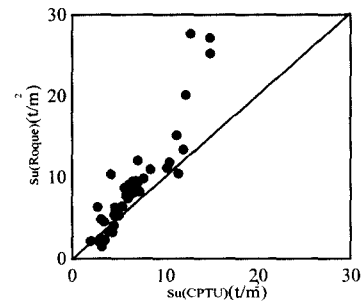


그림 11. $S_u(\text{CPTU})$ VS. $S_u(\text{Roque})$
($B_q > 0.2$)

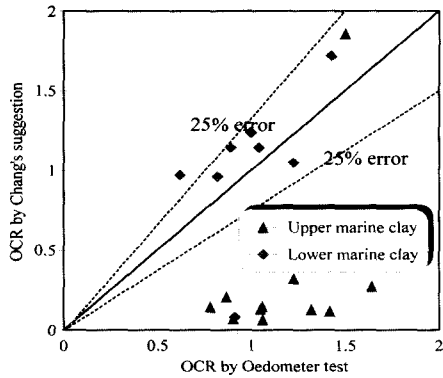


그림 12. Chang(1991)이 제안한 OCR 분포

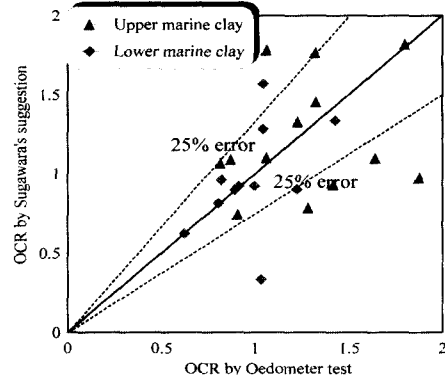


그림 13. Sugawara(1988)가 제안한 OCR분포

CPTU 결과를 이용하는 경우 비배수전단강도와 마찬가지로 원추관입저항력(q_c)과 간극수압(u_c 또는 u_{bt})을 이용하여 과압밀비를 구할 수 있으며(식(6), (7)), DMT로 과압밀비를 구하는 경우에는 비배수전단강도와 마찬가지로 K_D 값을 이용하여 구한다(식(8)~(11)).

그림 12는 Chang(1991)이 CPTU의 B_q 를 이용해 제안한 식(6)과 실내압밀시험으로 구한 OCR 결과를 비교한 것이다. 이 그림에서 보면 CPTU의 간극수압을 이용하여 산정한 OCR은 실트질 흙이 많이 분포한 상부해성층에서 매우 과소하게 산정된다. 이는 비배수전단강도의 경우와 마찬가지로 실트질이 많이 포함되어 있는 지반에서 CPTU로 측정된 간극수압(u_{bt}) 값이 실제보다 작게 나타나기 때문이며, 이로부터 투수성이 비교적 큰 실트질 세립토 지반에서는 CPTU로 측정된 간극수압을 이용하여 과압밀비를 산정하기가 어렵다는 것을 알 수 있다.

그림 13은 원추관입저항력(q_T)을 이용한 Sugawara(1988) 제안식(7)에 국내 점토에 대한 경험값 $K=4.5$ 을 적용하여 구한 OCR과 실내압밀시험을 이용하여 구한 OCR 값을 비교한 것이다. 시료 채취과정에서 나타나는

교란효과에 대해 약 25% 정도의 선형압밀하중의 편차를 고려하면 하부해성층에서는 실내압밀시험 결과와 국내 점토에 대한 제안 식(7)과 비교적 일치하는 반면에 실트질이 많이 섞인 상부해성층에서는 역시 잘 일치하지 않고 있다. 그러나 불일치 정도는 식(6)의 결과에 비하여 많이 개선되었다.

DMT를 이용하여 Marchetti(1980)와 Lunne(1990)이 제안한 과압밀비 산정식 식(8)과 (11)로 구한 결과와 CPTU를 이용한 과압밀비 산정식(식7)에 의한 결과를 간극수압계수비 B_q 와 함께 그림 14에 나타내었다. 이 그림에서 보면, 과압밀비의 경우에도 비배수전단강도와 마찬가지로 B_q 값에 따라 CPTU, DMT, 그리고 표준압밀시험으로 구한 각각의 과압밀비가 서로 상이한 결과를 보인다. 먼저, B_q 가 0.2보다 작은 실트 지반에서는 B_q 값이 작아질수록 CPTU로 구한 과압밀비($OCR_{\text{CPTU}, K=4.5}$)가 실내압밀시험으로 구한 과압밀비($OCR_{\text{Lab.}}$)와 DMT 결과로 산정한 과압밀비($OCR_{\text{Mar.}}$, $OCR_{\text{Lun.}}$)보다 점점 큰 값을 나타낸다. 그러나, B_q 가 0.2보다 큰 점토 지반에서는 CPTU로 구한 과압밀비($OCR_{\text{CPTU}, K=4.5}$)와 실내압밀시험으로 구한 과압밀비($OCR_{\text{Lab.}}$)가 비슷하게

나타난다. 이를 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 B_q 가 0.2 일 때의 $OCR_{(CPTU)}$ vs. $OCR_{(Lab.)}$, $OCR_{(CPTU)}$ vs. $OCR_{(Mar.)}$, $OCR_{(CPTU)}$ vs. $OCR_{(Lun.)}$ 관계를 각각 그림 15, 16, 17에 나타내었다.

그림 15~17에서 보면 점성토 지반($B_q > 0.2$)에서 $OCR_{(CPTU, K=4.5)}$ 은 $OCR_{(Lab.)}$ 과 좋은 상관관계(그림 15)를 보이며, $OCR_{(CPTU, K=4.5)}$ 을 DMT결과와 비교하면, $OCR_{(Mar.)}$ 의 경우(그림 16)에는 50% 이상 과대 평가할 확률이 높은 반면 $OCR_{(Lun.)}$ 의 경우(그림 17)에는 그 편차가 $\pm 50\%$ 정도이다.

4.3 압밀계수

CPTU와 DMT 수행시 콘이나 블레이드 관입으로 발생하는 간극수압 소산정도를 측정하여 압밀계수를 구할 수 있는데 해석 방법에 따라 매우 큰 차이를 나타낸다. 두 시험의 해석 결과는 지반의 과압밀비 및 강성지수 그리고 콘이나 블레이드 주변에 유발되는 공동의 형태 등 여러가지 요인에 영향을 받게 된다. 이러한 요인을 모두 고려한 무차원 시간계수는 아직까지 제안된 바 없으나 지반의 강성지수를 고려한 무차원 시간계수가 제안되었으며 이를 이용한 해석 방법이 또한 제안되어 있다.

그림 18은 CPTU와 DMT의 간극수압 소산시험 결과를 해석적 방법으로 산정한 횡방향압밀계수($Ch_{(CPTU)}$, $Ch_{(DMT)}$)와 실내시험으로 구한 연직방향압밀계수($Cv_{(Oedo.)}$), 그리고 Rowe cell 압밀시험으로 구한 횡방향압밀계수($Ch_{(Rowe)}$)를 소성지수에 대하여 도시한 것이다. 이 그림의 $Ch_{(CPTU)}$ 는 50% 압밀도를 기준으로 하여 Torstensson의 원통형 이론해(식 12)와 Levadox & Baligh가 제안한 이론해(식 13) 및 Teh & Houlsby의 해(식 14)를 이용하여

산정하였으며, $Cv_{(Oedo.)}$ 와 $Ch_{(Rowe)}$ 는 CPTU와 DMT를 실시한 깊이의 유효응력에 해당하는 값이다. 표 3에는 동일한 소성지수에서의 $Cv_{(Oedo.)}$ 값에 대한 여러방법에 의한 $Ch_{(CPTU)}$ 값의 비를 수록하였다.

표 3과 그림 18에서 보면 CPTU로 구한 횡방향압밀계수 $Ch_{(CPTU)}$ 는 해석 방법에 따라 다른 결과를 나타내는데, 강성지수를 고려한 Torstensson과 Teh & Houlsby의 방법으로 산정한 횡방향 압밀계수 값은 대체로 비슷하여 $Cv_{(Oedo.)}$ 와 비교할 때 각각 1.3~2.6배, 1.1~2.1배 정도의 값을 나타내는 반면, Levadox & Baligh 방법은 $Cv_{(Oedo.)}$ 값의 4.5~5.5배 사이의 Ch 값을 산정하여 Torstensson과 Teh & Houlsby의 방법보다 압밀계수를 크게 평가한다. 또한, 산정방법에 상관없이 압밀계수비(Ch/Cv)는 소성지수가 감소할수록 증가하는 경향을 나타낸다.

DMT 간극수압 소산시험 결과로부터 $Ch_{(DMT)}$ 를 산정하기 위해서 재료지수 $I_D \leq 0.6$ 와 횡방향응력지수 $K_D \leq 5.0$ 인 조건에서 관측한 보정압력 p_2 를 이용하여 \sqrt{t} 법으로 50% 압밀도를 결정하고, 이에 상응하는 시간계수

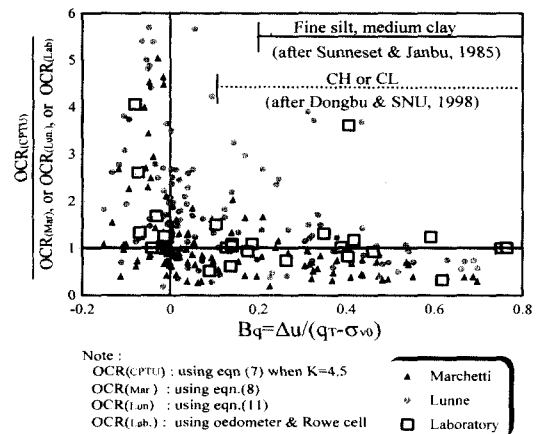


그림 14. B_q vs. $OCR_{(CPTU)}$ 와 $OCR_{(Mar.)}$, $OCR_{(Lun.)}$, $OCR_{(Lab.)}$ 의 비

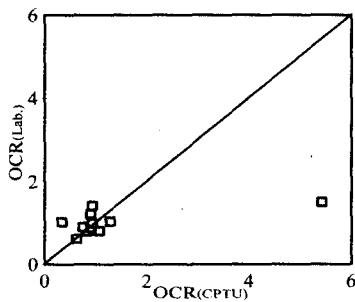


그림 15. $OCR_{(CPTU)}$ vs. $OCR_{(Lab.)}$ ($B_q > 0.2$)

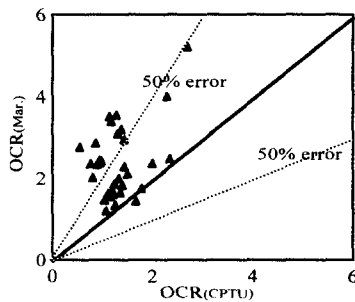


그림 16. $OCR_{(CPTU)}$ vs. $OCR_{(Mar.)}$ ($B_q > 0.2$)

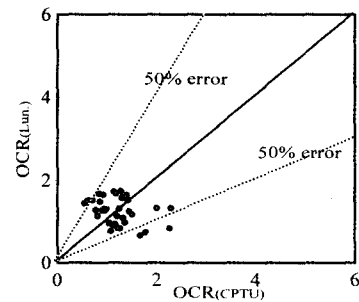


그림 17. $OCR_{(CPTU)}$ vs. $OCR_{(Lun.)}$ ($B_q > 0.2$)

표 3. 소성지수에 따른 압밀계수비 변화

압밀계수비(ch/cv)	PI				
	5	10	15	20	25
L / O	5.5	5.4	5.2	4.9	4.5
To / O	2.6	2.4	2.2	1.8	1.3
Te / O	2.1	1.9	1.8	1.5	1.1

* To:Torstensson(1975, 1977) L:Levadox & Baligh(1986)
Te:Teh & Houlsby(1991) O:Oedometer

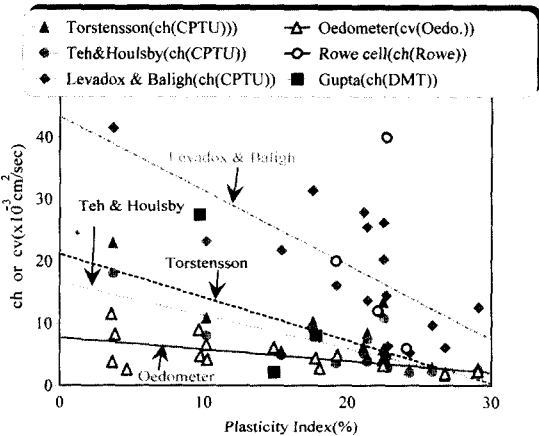


그림 18. 소성지수에 따른 c_h/c_v

를 Gupta(1983)가 제안한 도표에서 얻었다. 이 때, 강성지수($I_r=G/s_u$)는 압밀비배수삼축(CU)시험으로 구한 E_{50} 과 s_u 를 대입하여 산정하였다. 이렇게 하여 구한 3개의 횡방향압밀계수 $c_{h(DMT)}$ 와 Rowe cell 압밀시험으로 구한 4개의 횡방향압밀계수($c_{h(Rowe)}$)를 그림 18에 도시하였는데, 이들 데이터는 현재 시험 자료수가 적긴하지만 분산도가 지나치게 커서 두 방법 모두 신뢰성에 문제가 있는 것으로 판단된다.

5. 결론

인천국제공항 건설 지역과 같이 낮은 소성지수와 평균 $5 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 정도의 높은 압밀계수를 가지는 해성 세립토 지반에 대해서 실시한 CPTU와 DMT 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) CPTU시험의 간극수압계수비 B_q 가 0.2 이상인 점성토 지반의 경우에는 DMT로 구한 p_0, p_2 가 CPTU로 구한 u_{br} 와 거의 일치하며, B_q 가 0.2 이하인 경우에는 B_q 가 작아질수록 p_0, p_2 가 u_{br} 보다 점점 크게 평가되는 경향이 있다.
- (2) 소성이 낮고 비교적 압밀계수가 큰 세립토 지반인 인천

국제공항 건설부지에서 CPTU로부터 비배수전단강도를 구하기 위한 큰계수 $N_{kt}, N_{\Delta u}$, 그리고 N_{qu} 를 산정하여 평가한 결과 N_{kt} 가 가장 좋은 상관성을 나타내며 90% 신뢰범위에서 그 크기는 14.5 ± 1.6 이다. 또한 큰계수 N_{kt} 와 N_{qu} 는 소성지수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

- (3) B_q 값이 0.2 이상인 점성토의 경우에 DMT 결과를 Marchetti 방법을 이용하여 구한 $s_{u(Marchetti)}$ 는 CPTU로 구한 $s_{u(CPTU)}$ 에 비해 일관되게 작게 평가되는 반면 Roque 방법을 이용하여 구한 $s_{u(Roque)}$ 는 비배수전단강도를 크게 평가하는 경향을 보인다. 그러나, 비배수전단강도 값이 작아지면 오차의 크기 또한 줄어든다.
- (4) B_q 값이 0.2 이상인 점성토의 경우 국내 점토에 대해 제안된 경험상수를 적용한 과압밀비, $OCR_{(CPTU, K=4.5)}$ 과 실내압밀시험으로 구한 $OCR_{(Lab)}$ 은 유사한 결과를 나타낸다. 그러나, DMT로 구한 과압밀비는 해석방법에 관계없이 그 결과의 분산정도가 크며, 그 중에서 Marchetti 방법은 50%이상 과대 평가할 확률이 높은 반면, Lunne의 방법으로 구한 $OCR_{(Lun)}$ 은 오차가 $\pm 50\%$ 정도이다.
- (5) CPTU로 구한 횡방향압밀계수 $c_{h(CPTU)}$ 는 해석 방법에 따라 다른 결과를 나타내는데, Torstensson과 Teh & Houlsby의 해는 대체로 비슷하고 표준압밀시험 결과($c_{v(Oedo.)}$)와 비교할 때 1.1~2.6배 정도의 값을 나타낸다. 그러나, Levadox & Baligh 방법은 $c_{v(Oedo.)}$ 값의 4.5~5.5배 사이의 횡방향압밀계수 값을 산정하여 압밀계수를 크게 평가하는 경향이 있다.

참고문헌

1. 동부건설(주), 서울대학교 (1998), 피에조콘 관입시험 활성화를 위한 동부건설(주)-서울대학교 공과대학 산학협동연구, 170p.
2. Baligh, M. M. and Levadox, J. N.(1980), "Pore pressure dissipation after cone penetration", Research Report, MIT, Dept. of Civil Eng. Const. Fac. Div. Cambridge, Massachusetts 02139
3. Baligh, M. M. and Levadox, J. N.(1986), "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration, II: Interpretation," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 112, No. 7, pp.727-745
4. Bo, M. W., Arulrajah, A., Choa, V.(1997), "Assessment of Degree of Consolidation in Soil Improvement Project", International Conference on Ground Improvement Techniques, Macau, pp.71-80
5. Bugno, W. T. and McNeilan, T. W.(1984), "Cone Penetration Test Results in offshore California Silts. Strength Testing of Marine Sediments; Laboratory and In Situ Measurements". Symposium San Diego 1984, ASTM Special Technical publication, STP 883, pp. 55-71
6. Campanella, R. G., Gillespie, D. G. and Robertson, P. K.(1982), "Pore Pressure during Cone Penetration Testing", Proc. of 2nd European

- Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2, pp507-512
7. Campanella, R., Robertson, P., Gillespie, D. and Grieg, J.(1985), "Recent Developments in In Situ Testing of Soils", Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp849-854
 8. Chang, M. F.(1991), "Interpretation of Overconsolidation Ratio from In-Situ Tests in Recent Clay Deposits in Singapore and Malaysia", Canadian Geotechnical Journal, 28, pp210-225
 9. FHWA(1992), "The Flat Dilatometer Test", Report No FHWA-SA-91-044, O. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration
 10. Gupta, R. C.(1988), "Determination of the In Situ Coefficient of Consolidation and Permeability of Submerged Soils Using Electrical Piezoprobe Soundings", PhD. Dissertation to the University of Florida, 282pp.
 11. Lacasse, S., and Lunne, T.(1988), "Calibration of Dilatometer Correlations", Proc. of 1st International Symposium on Penetration Testing, Orlando, Vol.1, pp 539-54
 12. Lacerda, W. A., Costa-Filho, L. M. & Duarte, A. E. R.(1977), "Consolidation Characteristics of Rio de Janeiro soft clay", Proceedings of International Symposium on Soft Clay, Bangkok, pp231-243
 13. Lee, S. J. and Kim, M. M.(1998), "Estimations of Geotechnical Properties from Piezocone Penetration Tests in Korea", 1st International Conference on Site Characterization, Atlanta, pp.1099-1104
 14. Lunne, T., Christofferson, H. P. and Tjelta, T. I.(1985), "Engineering use of Piezocone data in North Sea Clays", Proc. of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 2, pp907-912
 15. Lunne, T., Powell, J. J. M., Hauge, E. A., Uglow, I. M., and Mokkelbost, K. H.(1990), "Correlation of Dilatometer Readings to Lateral Stress", Paper submitted to specialty session on Measurement of Lateral Stress, 69th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D. C., USA
 16. Lutenegeger, A. J.(1988), "Current status of the Marchetti dilatometer test", Proceedings, 1st international Symposium on Penetration Testing, Vol. 1, pp137-157
 17. Marchetti, S.(1980), "In-Situ Tests by Flat Dilatometer", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 106, 299-321
 18. Mayne, P. W.(1986), "CPT indexing of in-situ OCR in clays" Proc. of the ASCE Specialty Conference on Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering, Blackburg, VA, pp 780-793
 19. Mayne, P. W.(1987), "Determining Preconsolidation Stress and Penetration Pore Pressures from DMT Contact Pressures", Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 10, No.3, pp.146-150
 20. Powell, J. I. M., and Uglow, I. M.(1988), "The Interpretation of the Marchetti Dilatometer Test in UK Clays", Proc. of ICE Geotechnolgy Conference on Penetration Testing in UK, London, pp269-273
 21. Roque, R., Janbu, N., and Sennset, K.(1988), "Basic Interpretation Procedures of Flat Dilatometer Tests", Proc. of the 1st International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, Florida, Vol.1, pp577-587
 22. SGI(1994), "Recommended Standard for Dilatometer Tests", SGF Report I:95E of Swedish Geotechnical Society, pp.1-15
 23. Sugawara Noriaki(1988), "On the Possibility of Estimating In-Situ OCR using Piezometer(CPTU)", Proceedings of 1st International Symposium on Penetration Testing, Vol. 2, pp.985-991
 24. Sunneset, K., and Janbu, N.(1985), " Shear Strength Parameters obtained from Static CPT", Strength Testing of Marine Sediments(STP 883), R. C. Chaney and K. R. Demars, ed, ASTM, Philadelphia, pp.41-54
 25. Vesic, A. S.(1972), "Expansion of Cavities in Infinite Soil Masses", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 98, SM3, pp.265-290
 26. Wroth, C. P.(1988), "Penetration Testing - A More Rigorous approach to Interpretation", Proceedings of 1st International Symposium on Penetration Testing, Orlando, Vol. 1, pp.303-311
 27. Teh, C. I. and Houlby, G. T.(1991), "An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay", Geotechnique, No. 41, Vol 1., pp.17-34
 28. Torstensson, B. A.(1977), "The Pore Pressure Probe", Nordiske Geotekniske Mote, Oslo, Paper No. 34, pp.34.1-34.15

(접수일자 2000. 6. 1)