

인천국제공항지역의 피에조콘조사와 결과의 적용

The Application of Piezocone Penetration Test at Incheon International Airport

김 종 국*¹ Kim, Jong-Kook

성 기 광*² Sung, Ki-Kwang

김 학 중*³ Kim, Hak-Joong

김 영 웅*⁴ Kim, Young-Ung

Abstract

Piezocone Penetration Test has been performed in the soft ground over the site preparation area at Incheon International Airport(IIA). With the pore pressure dissipation test results, the changes in the permeability and the coefficient of consolidation in clayey soil were checked and the differences of the undrained shear strength verified the soft ground improvement effect from vane test and piezocone test both before and after the improvement. From the results, thin sand seam was found and this caused a big difference in the coefficient of permeability and consolidation. The coefficient of consolidation was high in the upper marine deposit and relatively low in lower marine deposit. It was found that the reduction of void ratio by preloading resulted in the reduction of coefficient of consolidation after the ground improvement. In addition, there were some variations of undrained shear strength when the number of 15 or 18 was used as the coefficient of piezocone(N_{kt}). However, when the average value of undrained shear strength calculated using $N_{kt}=10$ was applied, the result indicated the similar average value with the result of vane test and the increasing rate of strength($\Delta s_u / \Delta \sigma' \approx 0.38$) also showed the similar distribution.

요 지

인천국제공항 부지조성지역의 연약지반대상으로 피에조콘조사를 실시하여 간극수압소산시험 결과로부터 점성토 지반에서의 투수성과 압밀계수 변화를 알아보았으며, 개량 전·후의 피에조콘조사 및현장베인시험로 얻은 비배수전단 강도로 부터 연약지반개량 효과를 확인하였다. 그 결과로부터, 공항부지의 연약지반에는 얇은 샌드심(Sand Seam)층이 존재하며, 그 존재 유·무에 따라 투수계수와 압밀계수가 큰 차이를 보이는데 상부해성층에는 높은 압밀계수, 하부 해성 층에서는 상대적으로 낮은 압밀계수를 가지며 개량 후는 선행제하로 인한 간극비 감소로 압밀계수의 감소를 확인하였다. 또한, 피에조콘 계수(N_{kt}) 적용시 15 또는 18에서는 편차를 보이나, $N_{kt}=10$ 을 사용하여 산정한 비배수전단강도의 평균 값을 적용할 경우 현장베인결과의 평균값과 비슷한 경향을, 강도 증가율 분포도($\Delta s_u / \Delta \sigma'$) 약0.38로 비슷한 양상을 보이고 있는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Pore pressure dissipation, Coefficient of consolidation, Undrained shear strength

*1 정회원, 한국건설품질시험원 지반기술과 과장
*2 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 사원
*3 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 과장
*4 정회원, 인천국제공항공사 건설시험소 소장

1. 서론

인천국제공항 건설지역은 조수간만의 차가 9m에 이르는 섬사이의 간석지를 준설매립한 지반과 연약층이 약 5~10m 정도의 연약지반으로 분포되어 있어 원지반뿐만 아니라 연약지반개량 전·후의 다양한 지반조사, 시험 및 계측자료를 근거로 연약지반의 공학적 특성을 규명해 왔다. 현재 국내의 지반조사시 가장 널리 쓰이고 있는 조사방법은 시추에 의한 표준관입시험(SPT)이며, 이 방법은 모든 지층에 적용 할 수 있고, 그 동안에 축적된 경험이 풍부하며 장비의 보급이 용이한 이점이 있다. 그러나, 연약지반의 경우 표준관입시험은 신뢰도가 저하되는 것으로 알려져 있으며, 일본의 경우 N치 4이하의 연약지반에서는 표준관입시험을 기피하고 있는 실정이다. 따라서, 최근 들어 지반조사에 피에조콘과 같은 새로운 시험의 활용이 되고 있다. 피에조콘 관입시험은 일련의 연결로드 끝에 전기식콘을 장착하여 지중에 일정한 관입속도로 압입하여 연속적으로 소정의 심도에서의 콘선단 저항값, 슬리브의 마찰력, 간극수압, 마찰비 등을 연속적으로 조사함으로써 지반내 흙의 분류, 강도 및 변형을 파악할 수 있으며 최근 전세계적으로 가장 많이 이용되고 있는 장비중 하나이다. 인천국제공항 1단계 포장지역 430만㎡의 부지조성지역에서는 국내 어느 지반보다도 많은 약 500여공의 피에조콘 조사를 수행하였다. 본 연구에서는 1단계 부지조성지역의 피에조콘조사로부터 원지반에서 Sand Seam층의 투수성을 알아보고 연약지반 개량 전·후의 지반을 대상으로 피에조콘조사 결과와 간극수압 소산시험결과를 토대로, 점성토지반의 압밀계수의 변화를 살펴보았다. 또한 사전·후에 실시한 피에조콘조사 결과와 현장베인시험의 비배수전단강도의 비교를 통한 콘계수를 적용, 비배수전단강도특성 규명 및 지반개량효과를 확인하였다.

2. 지반공학적 특성

현재 시공중인 인천국제공항 1단계공사는 활주로 및 유도도로, 계류장지역과 여객청사, 복합교통센터, 배후지원단지등 매우 광범위한 지역에 대해 면밀한 지반조사가 수행되었으며, 전형적인 지반특성 분포는 그림 1과 같다.

그림1에서와 같이 인천국제공항지역의 일대의 지질은 선캠브리아기의 경기편마암 복합체(Kyeong ki Gneiss Complex)와 이를 관입한 중생대 쥐라기의 대보 화강암 및 이들 암류들을 부정합으로 피복하고 있는 제 4기 현행퇴

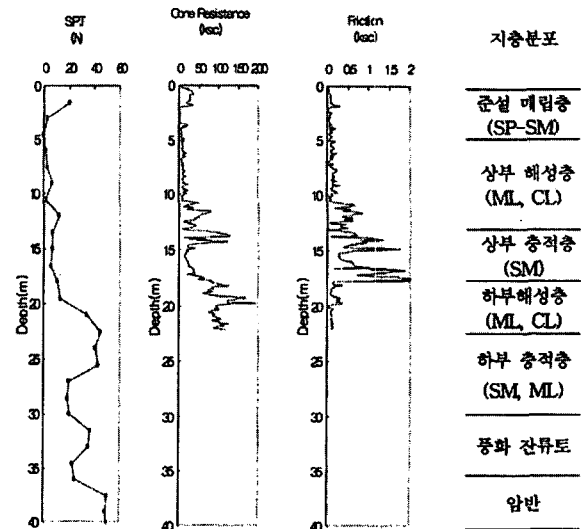


그림 1. 전형적인 지반공학적특성 분포

적층 등으로 구성되어 있다. 또한, 연약지반의 지층분포상 태는 매립층, 퇴적층, 풍화대 및 기반암으로 구성되어 있다. 상부·하부해성층은 실트질 점토(CL), 점토섞인 실트(ML), 실트섞인 모래로 분류되며, 퇴적층 하부에 가반암은 오랜기간동안 풍화작용의 영향으로 형성된 풍화대를 이루고 있다. 특히, 해성 점토층에는 샌드심(Sand Seam)이 5~20cm두께로, 2~4개 정도로 일부 구간에 분포하고 있는 것으로 나타났다.

3. 시험 개요

3.1 시험장비

피에조콘(Piezococone)은 기존의 더치 콘(dutch cone)을 개량한 것으로, 1960년 이후 자동화 계측에 의한 선단저항과 주면저항을 동시에 측정할 수 있는 전기식 콘이 개발되었으며, 간극수압 및 간극수압소산을 측정할 수 있도록 1970년도 초에 개발되었다.(Sanglerat, 1972) 이후 10~30ton의 유압식 관입장치에 의한 일련의 연결로드에 전기식 콘(3성분 또는 4성분)을 장착하여 일정한 관입속도로 지중에 압입하여 소정의 심도까지 연속적으로 관입저항 및 슬리브의 마찰력, 관입간극수압을 측정하는 장비가 개발되어 현재와 같은 장비가 사용되고 있다. 피에조콘관입 시험은 심도에 따라 신속하게, 연속적으로 지반의 공학적 특성을 파악할 수 있어 설계에 직접 이용할 수 있으며, 관입속도, 콘의 모양 및 크기 등에 따라 달라질 수 있다. 이러한 콘관입시험결과에 영향을 주는 요소를 없애기 위해 관

입속도를 $2 \pm 0.5 \text{cm/sec}$, 선단각 60° , 선단면적 10cm^2 , 측면면적 150cm^2 을 표준화하고 있으며 시험결과는 응력이력, 압축성, 입자크기등의 지반조건에 따라 다르게 나타나는데, 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

3.2 콘 관입시험의 특성

피에조콘관입시험은 흙의 여러가지 성질을 동시에 측정할 수 있으며, 간극수압 소산시험에 의한 현장 압밀계수를 산정할 수 있는 등의 현장조사 장비로 가장 유용하게 사용되는 장비로써, 피조콘 관입시험 수행시 획득할 수 있는 토질정수 및 특성은 아래와 같으며, 이중 1), 2), 3) 항은 타 조사시험으로는 획득하기 어려운 피조콘만의 특성이다.

- 1) 연속적인 지층주상도 및 비배수강도의 산정
- 2) 수평방향 압밀특성 파악
- 3) 점토층내에 분포하는 샌드심(sand seam) 파악 가능
- 4) 지반개량 전 · 후의 강도 기준치 설정
- 5) 응력경로 및 과압밀비 측정
- 6) 간극수압 측정
- 7) 연관 토질정수의 추정

관입시험 결과에 의한 지층구분, 흙의 분류, 압밀도 및 응력이력(과압밀비), 지반의 수평응력, 변형특성, 비배수 선단강도, 액상화 등의 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 최근 피에조콘시험 결과를 이용한 토질정수를 예측하는 방법이 Schmertmann(1975), Baligh(1975)와 Robertson et al.(1983) 등의 많은 연구자들에 의해 개발되었으며, 국내에서도 피에조콘를 이용한 공학적인 특성 파악(이선재, 1997), 소산시험을 이용한 압밀특성(이승래 외, 1997), 지반의 강도(윤길립 외, 1996, 백세환, 1998) 등의 국내지반의 지반정보와 관련하여 많은 연구가 수행되고 있다.

3.3 시험결과의 해석

3.3.1 간극수압 소산시험

일반적으로 토층의 투수성은 실내 · 외 투수시험에 의해 지반특성을 파악하기도 하나, 모래층과 같이 지중에 얇게 산재해 있는 경우에는 실내투수시험이 적정하지 못하며, 현장투수시험은 샌드심(sand seam)층이 얇아 시험의 정도를 유지 할 수 없어, 자연시료 채취시 추출된 샌드심층에 대한 입도분석에 의한 투수계수 추정방법과 피에조콘

에 의한 간극수압 소산시험을 실시하여 투수성을 파악하였다. 또한, 선행재하 전 · 후에 실시한 간극수압 소산시험 결과를 해석방법 따라 비교 분석하였다.

이 해석방법에 대한 연구는 Torstensson(1975, 1977)를 시작으로, Baligh 와 Levadox(1980), Levadox와 Baligh(1986), Houlsby 와 Teh(1991)등에 의해 연구가 시도되고 있으며, 압밀계수 산정 방법은 보편적으로 과잉간극수압의 소산이 50%에 이르렀을 때를 기준으로 압밀계수를 산정하는 것이 일반화 되어 있다. 이때 정규화된 과잉간극수압을 산정하여야 하는데, 소산정도로부터 구해지는 압밀도(U)는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$U_i = \frac{u_i - u_o}{u_i - u_o} \cdot 100(\%) \quad (1)$$

여기서, u_i : 경과시간에 대한 간극수압,
 u_i : 초기간극수압,
 u_o : 간극수압의 수렴치(정수압),

Torstensson(1977)은 지반을 탄소성 재료로 보고, 구 또는 원주의 공동팽창이론에 기초하여 압밀계수를 산정하는 방법을 다음 식(2)같이 제안하였다.

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

여기서, T_{50} : 압밀도 50%에 해당하는 시간계수,
 t_{50} : 압밀도 50%에 도달하는 시간,
 R : 원주의 반경,

이는 50%의 압밀도에서 예측치와 실측치가 가장 근사하다고 제안하여, 압밀계수 추정시 압밀도 50%에서의 소산시간(t_{50})과 그에 다른 시간계수(T_{50})를 사용할 것을 주장하였으나, 이 해석방법은 압밀과정의 비선형성, 콘 선단 각과 다공질 필터 위치의 영향, 콘의 관입에 따른 흙의 교란등을 고려하지 못하였다. 또한, Baligh와 Levadox(1980)는 2차원의 축대칭으로 간주하여 변형률 경로법으로 초기 간극수압 분포를 추정하고, 이차원 압밀이론을 이용한 유효요소 해석법을 통하여 식 (3) 제안하였다.

$$C_h = \frac{T}{t} \cdot R^2 \quad (3)$$

$$C_h = \frac{R^2 \cdot T}{t_{50}} \cdot \sqrt{I_r} \quad (4)$$

여기서, R: 원주의 반경,
T: 는 수정시간계수,
I_r: 는 강성지수

Houlsby와 Teh(1991)는 관입간극수압을 변형이 큰 유한요소해석과 간극수압을 변형이 큰 유한 요소차분법으로 해석하여 지반의 강성지수(rigidity index), I_r(=G/S_u, G: 전단변형계수, S_u:지반의 전단강도)의 영향을 고려하여 식(4)을 제안하였다. 이와 같은 해석방법들을 이용하여 압밀계수를 추정하고 그 결과를 비교하고자 하였다.

3.3.2 비배수 전단강도

콘 관입시험의 최초 응용은 점토층의 비배수전단강도 추정이었으며, 점토의 비배수전단강도는 단일변수가 아니고, 시험방식과 변형률, 파괴면의 방향에 크게 영향을 받는다. 콘지지력결과를 이용한 점성토의 비배수전단강도를 산정하는 방법에는 일반적으로 이론적인 방법과 경험적인 방법이 있으며, 이론적인 방법이란 공동 팽창이론과 극한 지지력이론에 근거하여 콘관입시험의 결과와 비배수 전단강도의 관계를 유도하여 이를 이용하는 것이고, 경험적인 방법은 콘관입시험의 결과로부터 직접적으로 정하는 것이다. 전체 과잉압력의 기여도는 현장 연직응력이나 수평응력 또는 현장평균응력으로 해석되며, N_{kt}(콘 계수)에 대한 이론적 해법은 지지력에 근간을 두고 있으며 최근 공동팽창이론의 사용으로 더욱 두드러진다. 일반적으로 콘 저항력을 이용하여 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 이론적인 방법보다는 경험적인 방법을 많이 사용하고 있으며 현재 우리나라를 비롯한 여러 각지에서 시험을 통한 경험적인 콘 계수를 제안하고 있는 실정이다. 이를 위해 Lunne(1985)등은 극한지지력이론과 공동 팽창이론을 근거로 하여 콘계수(N_{kt})를 식(5)과 같이 제안하였다.

$$N_{kt} = \frac{q_t - \sigma_v}{s_u} \quad (5)$$

여기서, N_{kt}는 콘 계수, q_t는 순 원추관입저항력, σ_v는 총 상재하중, s_u는 비배수전단강도이다. q_t는 Baligh(1981)등과 Campanella(1982)등이 제안한 식(6)으로 구

할 수 있다.

$$q_t = q_c + (1 - a)u \quad (6)$$

여기서, q_c와 u는 측정된 원추관입저항력과 간극수압이고, a는 피에조콘의 형태에 따른 면적비이다.

또한, 위의 식에서 실제 현재 상재하중을 정확히 알 수 없다는 점을 감안할 때 상재하중 항을 제외하고, N_{kt}대신에 콘계수 N_c를 사용하는 방안도 실용적으로 사용하고 있다. 다양한 지반에 대해 실시한 콘관입시험의 결과와 실내 및 현장시험을 통해 구한 강도와의 상관관계를 통해 경험적 방법에 의해 콘 계수를 결정하고 있다. 이와 같이 피에조콘관입시험을 이용하여 비배수전단강도를 구하기 위해 사용하는 콘 계수는 보통의 예민비를 가지는 정규압밀 점토의 경우 10~19정도의 값을 가지는 것으로 나타났다. 최근들어 국내 점성토 지반의 비배수전단강도를 산정하기 위한 콘계수에 대한 연구가 활발해지고 있으며, 인천국제공항의 시험시공 구간에서 실시한 비배수 전단강도 산정을 위한 콘계수를 제안한 바와 같이 상재하중을 고려하는 경우 N_{kt}=15, 상재하중을 고려하지 않은 경우 N_c=18을 제시하고 있다.(이갑열,1997) 본 연구에서는 OCR에 따라 제안된 콘계수를 산정에 있어 참고강도로 현장배인결과를 이용하는 경우와 가장 일치하고 있으며, OCR에 따른 콘계수 N_{kt}=10로 나타났다. 이를 사용하여 선행재하 전·후에 실시한 현장시험결과와 비교하여 비배수 전단강도 변화와, 이를 통계처리한 시험별 비배수전단강도 증가율 분포의 범위를 파악하고자 하였다.

4. 시험결과의 이용

4.1 샌드심(sandseam)층의 투수성

점성토 지층속에 Sand성분이 많은 토층이 층상으로 존재하는 것을 샌드심(sand seam)이라 하며, 점토가 침강·퇴적하는 과정에 하천의 범람이나 사면활동 등에 의하여 Sand성분이 유입되어 자연적으로 생성되며, 층후가 얇고 지역분포에 따라 변화를 보이는 것이 특징이다. 이러한 점성토속에 샌드심이 존재할 경우, 모래의 투수계수는 점토의 100~1000배에 달하므로 투수층 역할을 함으로써압밀이 촉진되며, 이에 따라 전체적인 압밀거동이 크게 변화하게 된다. 이러한 점성토층에 존재하는 샌드심을 대상으로 투수계수를 추정하기 위해 연속적인 자연시료를 채취하

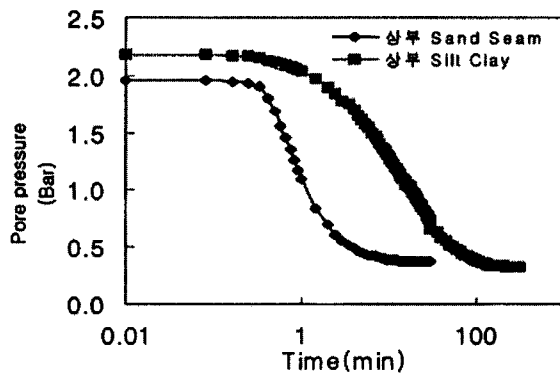
표 1. 샌드심 재료의 기본 물성시험결과

	Proportion(%)				D ₁₀ (mm)	k(cm/sec)	uscs	remarks
	gravel	sand	silt	clay				
4-1Area	-	54	46	-	0.05	2.5x10 ⁻³	SM	BH-5
4-2Area	-	63	32	5	0.06	3.6x10 ⁻³	SM	P-49
4-2Area	-	61	37	2	0.05	2.5x10 ⁻³	SM	P-31
5-1Area	-	58	42	-	0.04	1.6x10 ⁻³	SM	P-62

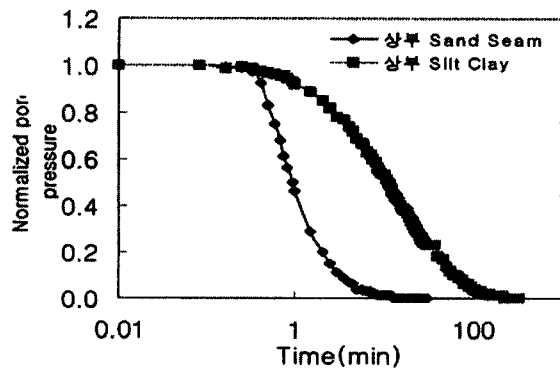
였고, 입도분석에 의거 추정된 투수계수 및 입도 특성은 다음 표 1과 같이 나타났다.

표 1.의 샌드심의 기본 물성시험결과는 일반적인 사질 토에서 나타나는 간극비와 투수계수의 경향과 비교했을 때, 샌드심의 입도분포는 모래가 54~63%, 실트가 32~46%로 중간크기부터 미세한 입자의 모래가 비교적 느슨하게 분포하고 있는 것으로 판단된다. 본 시험부지 점토의 투수계수는 $1 \times 10^{(-5 \sim -7)}$ cm/sec이며, 샌드심의 투수계수는 $1.6 \sim 3.6 \times 10^{-3}$ cm/sec으로 나타나 투수성은 점토에 비해 약 100배의 투수성을 가지고 있는 것으로 보인다.

한편, 이 지역의 수평방향 압밀특성을 규명하기 위해 피에조콘을 이용한 간극수압 소산시험을 실시하였으며, 대표적인 값은 아래의 그림 2와 같이 나타났다.



a) 간극수압측정 소산곡선



b) 정규화 곡선

그림 2. 대표적인 피에조콘의 소산시험 결과

이 지역에서 나타난 소산시험결과 그림 2를 이용하여 앞 절에서 언급한 식 $[C_h = (T \times R^2) / t_{50}]$, 여기서, T는 압밀 상수 : 3.65, R은 피에조콘 반경 : 1.785cm]을 근거로 하여 수평방향 압밀계수를 산정하였으며 그 결과 샌드심층의 압밀계수(C_h)는 2.11×10^{-1} cm²/sec로 나타났고, 실트질 점토의 경우 수평방향 압밀계수(C_h)가 1.76×10^{-2} cm²/sec로 나타났다. 이 때, 샌드심층의 압밀계수(C_h)가 실트질 점토에 비해 대략 10배 정도의 큰 차이를 보이고 있으며, 실트질 점토의 경우 실내시험에서 산출된 수직압밀계수(C_v)는 3.00×10^{-3} cm²/sec으로 수직방향보다 수평방향의 압밀계수가 약 5배 정도로 큰 특성을 보이고 있다. 이 지역의 압밀특성을 살펴보면, 연약층은 양면배수조건에 의한 배수효과로 당초 예상보다 빠른 압밀이 진행되는 것으로 판단되었다.

본 공항부지의 원지반에서 수행한 피에조콘시험 결과를 통해 투수성을 확인한 바와 같이 샌드심층의 존재 유무에 따라 투수성 및 압밀거동이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서, 콘관입시험의 출력결과 분석시 관입저항이 주변에 대하여 급격히 증가하는 경우, 간극수압이 주변의 분포보다 급격히 저하되는 경우, Friction Ratio가 급격히 저하되는 경우, 토층분석 결과 모래성분이 우세한 경우 등에 의해 샌드심층의 정확한 판정이 이루어져야 한다. 이와 같이 피에조콘조사 결과에 의해 나타나는 샌드심층의 지반특성을 고려한 경제적인 지반개량공법이 적용되는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

4.2 압밀계수 비교

본 연구에서는 샌드심이 존재하는 지역을 중심으로 선행채하 전·후에 실시한 간극수압소산시험 결과를 토대로 여러 연구자들이 제안한 해석 방법에 따라 압밀계수를 산정하였으며, 그림 3, 4와 같이 시범조사지역의 대표적인 값을 압밀도 40%, 50%, 60%에 따른 수평압밀계수를 비교 하였다.

그림 3, 4에 보인 바와 같이 소산시험 결과는 해석 방법에 따라 압밀계수 결과가 다소 다르게 산정되었다. 이들 비교결과에서 Teh와 Houlsby는 강성지수를 고려하였을 때 보다 Levadox와 Balugh가 제안한 해석방법의 결과보다 다소 작은 값을 보이고 있다. 이는 강성지수 값이 기준이 되는 전단변형계수와 비배수전단강도 산정방법에 따라 그 값이 매우 달라지기 때문이다. 따라서, 본 해석에서는 이런 오차를 배제하기 위해 해석방법에 강성지수가 포함되

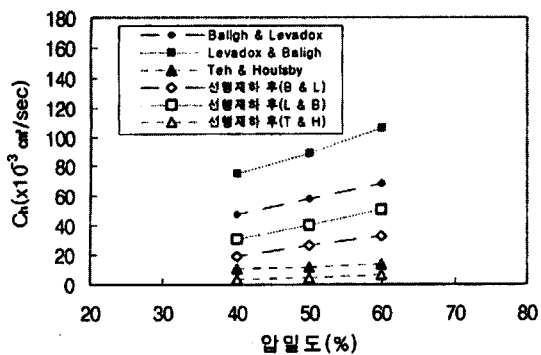


그림 3. 압밀계수 비교(상부해성층: BH01)

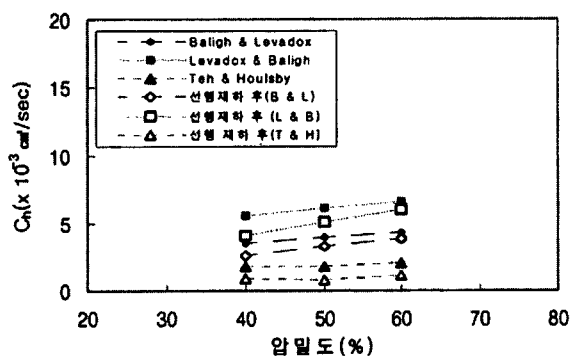
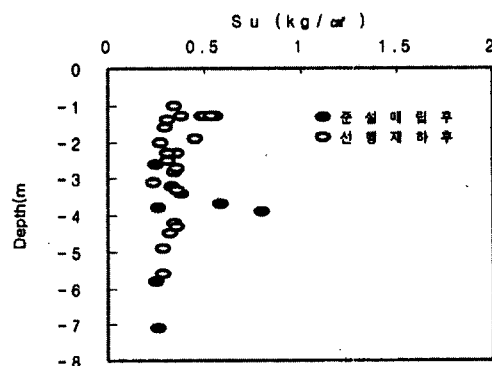


그림 4. 압밀계수 비교(하부해성층: BH04)

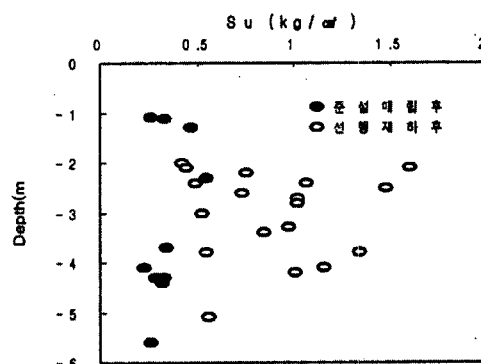
지 않은 Levadox와 Balugh(1986)의 해석을 기준으로 분석하였다. 해석결과를 보면, 상부 해성층의 경우에는 기존의 결과와 같이 매우 높은 압밀계수를 가지는 것으로 나타나 매우 빠른 속도로 압밀이 진행된 것으로 판단된다. 하지만 하부 해성층의 경우에는 상대적으로 상부해성층보다는 작은 압밀계수를 가진 것으로 나타났다. 또한, 선행재하 전·후에 실시한 소산 시험결과는 선행재하 전보다는 다소 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 결과는 선행재하로 인해 간극비가 감소하여 압밀계수가 감소하는 것으로 선행재하 전보다 선행재하후의 압밀속도가 감소한다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 각각의 해석방법을 이용하여 압밀도에 따른 압밀계수 추정을 할 수 있었으나, 추후 이 지역 압밀계수 산정에 적합한 해석방법에 관한 연구가 이루어져야 할 것으로 판단되었다.

4.3 비배수전단강도

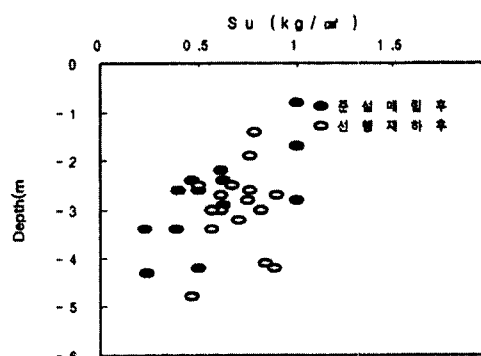
본 공항부지지역에서는 압밀축진과 지반의 전단강도 증대를 위해 선행재하공법을 실시하였으며, 이를 확인하기 위해서 준설매립 후와 선행압밀 후 각각 실내, 현장시험을 실시하여 그 결과를 적용하여 비배수전단강도의 변화를



a) 4-2공구



b) 5-1공구



c) 5-2공구

그림 5. 현장배인에 의한 비배수전단강도의 변화

를 살펴보았다. 본 연구에서는 현장배인시험과 피에조콘관입시험에 의한 비배수 전단강도 증대량을 정량적으로 분석하고 이를 통계처리하여 강도 증가비의 범위를 살펴보고자 하였다.

유효응력 증가에 따른 비배수전단강도 증대를 측정하기 위해 실시한 현장배인시험은 모두 원지반하 6m 이내의 상부 해성층을 대상으로 준설매립후와 선행재하후에 여러 지역에서 실시한 현장배인시험결과 중 선행재하 전후 동일 위치에서 수행한 지점에 대한 결과는 그림 5와 같이

표 2. $\Delta s_u / \Delta \sigma'_o$ (현장배인시험) 결과

위 치	5-1 공구					5-2공구					4-2 공구		
	A	B	E	F	H	I	J	K	L	O	SI20	SI28	SI44
$\Delta s_u / \Delta \sigma'_o$	0.4	0.7	0.4	0.7	0.5	0.2	0.4	0.2	0.3	0.0	0.14	0.07	0.42

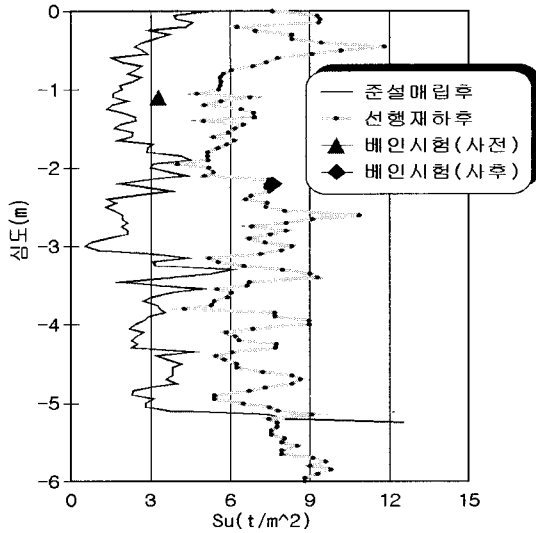


그림 6. A지점의 심도별 비배수전단강도 ($N_{kl}=10$ 적용)

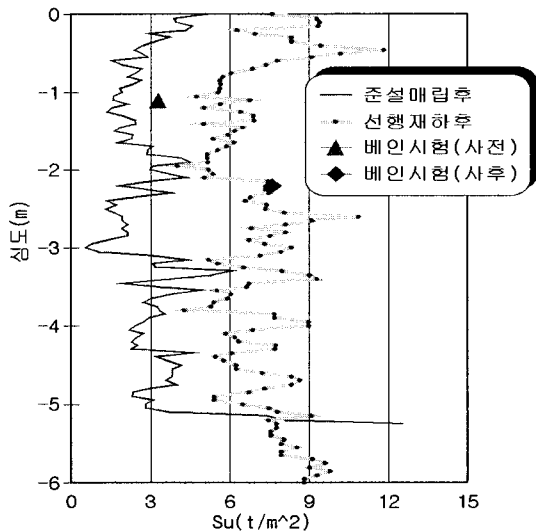


그림 7. F지점의 심도별 비배수전단강도 ($N_{kl}=10$ 적용)

나타났다. 그림5의 결과를 이용하여 선행재하로 인해 증가하는 유효응력에 대하여 증가하는 지반의 비배수전단강도 양상($\Delta s_u / \Delta \sigma'_o$)을 산정하여 보았다. 여기서 심도에 따른 유효응력증분 $\Delta \sigma'_o$ 을 산정하기 위해 Osterberg가 제안한 제형 단면의 성토체에 대한 심도별 응력분포 양상을 고려한 결과, 약 70m폭을 갖게 되는 유도로나 약 100m

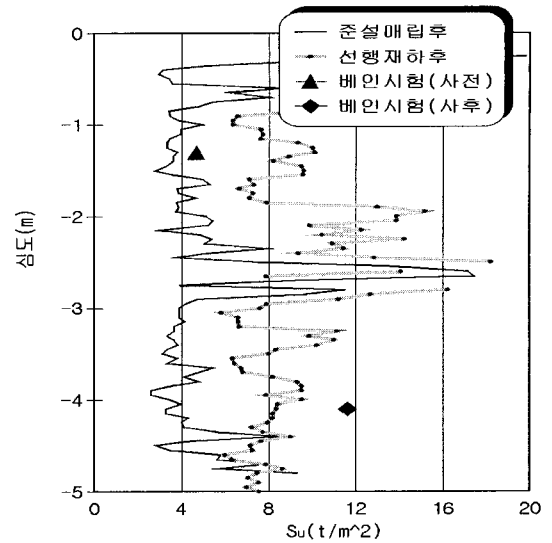


그림 8. H지점의 심도별 비배수전단강도 ($N_{kl}=10$ 적용)

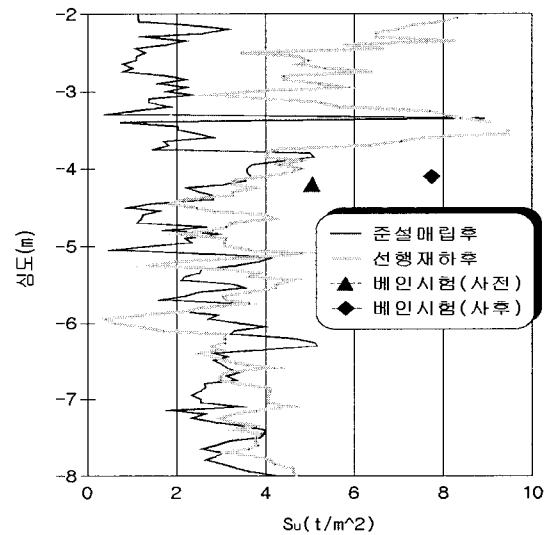


그림 9. L지점의 심도별 비배수전단강도 ($N_{kl}=10$ 적용)

의 폭을 갖게 되는 활주로의 경우 모두 성토체 중앙부분에서는 재하된성토하중의 95% 이상이 원지반에서 부터 심도 20m까지 미치는 것으로 나타나 대부분 압밀층 두께가 10m이하인 인천국제공항의 경우 상부 해상층에서의 성토하중에 의한 지중응력의 감소는 없는 것으로 가정하였다.

이러한가정 조건을 바탕으로 하여 유효응력 증분에 따른 비배수 전단강도 증분($\Delta s_u / \Delta \sigma'_o$)을 산정한 결과는 표 2에서 처럼 0.07~0.76로 강도가 거의 증가하지 않은 경우에서부터 매우 큰 강도 증대를 보이는 경우까지 그 형태가 매우 다양하게 나타나고 있다. 회귀 분석 결과 현장배인시

험을 이용하여 나타난 $\Delta s_u / \Delta \sigma'$ 는 매우 상관도가 떨어졌으며, 그 평균값은 약 0.39 정도로 나타났다.

한편, 콘 관입시험결과를 이용하여 비배수전단강도를 산정하기 위한 콘 계수(N_{kt})의 결정은 OCR에 따라 제안된 $N_{kt}=10$ 을 사용하여 그림 6~9와 같이 나타낼 수 있었다. 피에조콘관입시험결과를 이용한 경우 $\Delta s_u / \Delta \sigma'$ 값은 제안된 콘계수에 따라 다소 다른 경향을 보이고 있다. 인천국제공항 시험시공 지역에서 수행한 피에조콘 관입시험 결과를 근거로 하여 제안한 콘계수($N_t=18$ or $N_{kt}=15$)의 경우 $\Delta s_u / \Delta \sigma'$ 평균값은 0.26~0.28 정도를 나타내고 있으나, 본 연구에서 채택한 콘계수 $N_{kt}=10$ 을 적용한 결과 값은 0.19~0.64로 매우 광범위하게 나타나고 있으며, 평균값은 대략 0.38 정도로 현장배인시험 결과와 비슷한 양상을 보이고 있음을 알 수 있다.

4.4 강도 증가율 분포

본 시험 결과들은 모집단에서 일정 표본을 추출한 확률 표본으로 가정하고 이 확률표본을 근거로 하여 현장배인 시험과 피에조콘관입시험의 비배수전단강도 증가율에 대한 분포를 산정하였다. 본 연구에서는 정규 모집단에서 표본의 크기가 작을 때 특히 유용하게 쓰이는 t분포(W.S.Gosset)를 사용하여 비배수전단강도 증가율의 90% 신뢰구간을 산정하였다. t분포도를 이용하여 목표로 하는 신뢰구간은 다음 식(7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\bar{x} \pm K \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (7)$$

여기서, \bar{X} : 확률 표본의 평균값,

K: 신뢰구간에 따른 상수

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2 / (n-1)} : \text{표본표준편차}$$

N: 표본의 개수

현장시험 결과를 이용하여 통계 처리를 수행한 결과 현장배인시험으로 나타난 $\Delta s_u / \Delta \sigma'$ 의 모평균 90% 신뢰구간은 다음 식(8)과 같이 나타났다.

$$[\Delta s_u / \Delta \sigma']_{f.vane} = 0.38 \pm 0.11 \quad (8)$$

또한, 피에조콘 관입시험 결과를 이용하여 $\Delta s_u / \Delta \sigma'$

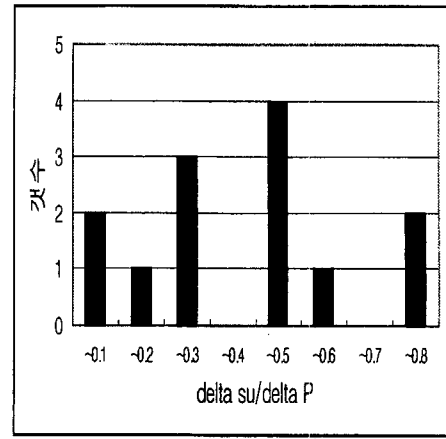


그림 10. 각 $\Delta s_u / \Delta \sigma'$ 에 대한 도수 분포(베인시험)

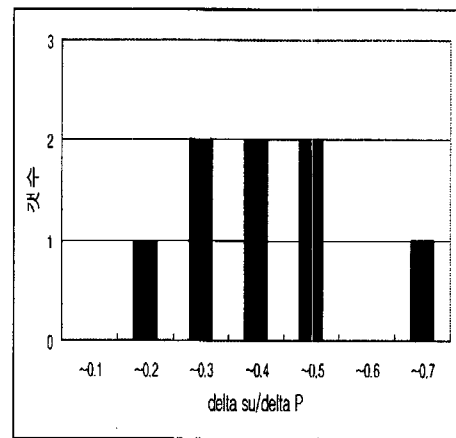


그림 11. 각 $\Delta s_u / \Delta \sigma'$ 에 대한 도수 분포(CPT)

의 도수 분포도는 다음과 같으며, t분포를 근거로 한 모평균 90% 신뢰구간은 식(9)와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

$$(\Delta s_u / \Delta \sigma')_{CPTu} = 0.38 \pm 0.09 \quad (9)$$

이와 같이 인천국제공항지역의 선행재하 전·후의 지반 개량효과를 확인하기 위해 실시한 피에조콘관입시험 결과를 바탕으로 비배수전단강도 도수 분포의 범위는 그림 10, 11에서 보는 바와 같이 현장배인시험결과를 이용하여 구한 도수 범위의 값이 크게 차이 나지 않으며 강도증가율 분포는 잘 일치하는 결과를 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 인천국제공항부지 1단계지역의 원지반 및 개량 전·후의 지반을 대상으로 피에조콘조사를 통해

연구한 결론은 다음과 같다.

- 1) 피에조콘을 이용하여 점성토사이에 존재하는 샌드심(sand seam)층의 확인 판정이 가능하였으며, 샌드심(sand seam)이 존재하는 경우의 지반특성은 점토에 비해 약 100배의 투수성을 가지며, 압밀계수(C_h)는 실트질 점토의 압밀계수(C_v)에 비해 대략 10배 정도 크고, 실트질 점토의 경우 수평방향의 압밀계수(C_h)가 수직 압밀계수(C_v)보다 약 5배 정도로 크게 나타나, 배수효과로 상당히 커 당초 예상보다 빠른 압밀이 진행되는 것으로 사료된다.
- 2) 압밀계수 추정에는 각 해석방법에 따라 다소 다르게 나타나며, Levadox 과 Balugh(1986)의 이론해 의하면, 상부해성층에는 매우 높은 압밀계수를 가진 것으로 나타나 매우 빠른 속도로 압밀이 진행된 것으로 보이며, 하부해성층에서는 상대적으로 작은 압밀계수를 가진 것으로 나타났다. 또한, 선행재하로 인해 간극비 감소로 압밀계수가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- 3) 비배수전단강도 특성은 콘 계수 $N_{kr} = 10$ 을 적용한 경우의 평균값은 0.38정도로 현장배인시험을 이용한 경우의 평균값과 비슷한 경향으로 보이고 있고, 강도 증가율 분포도 비슷하게 나타나 피에조콘을 이용하여 효과적인 지반개량정도를 확인할 수 있었다. 향후, 점성토지반의 비배수전단강도 및 수평방향 압밀계수의 추정을 위

해서 피에조콘(CPTu)과 딜레토미터(Dilatometer) 등의 현장시험결과와 삼축시험, RoweCell 압밀시험 등의 실내시험을 수행하여 보다 많은 시험결과로 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 이선재(1997), " 피에조콘을 이용한 국내지반의 공학적 특성 연구" , 서울대학교 공학박사 학위 논문
2. 이갑열(1997), " 현장시험을 통한 비배수전단강도의 산정" , 서울대학교 공학 석사 학위 논문
3. 윤길림 외 3인, " CPT를 이용한 비배수전단강도 평가" 96 한국지반공학회 가을학술세미나, pp. 321 -326
4. 김영상, 이승래, (1998), " 콘 선단부 뒤에서 관측된 간극수압 소산곡선을 이용한 수평압밀계수 추정," 한국지반공학회, 제 14권, 제4호, pp. 141-149
5. (주)유신설계공단, 수도권 신공항 부지조성공사4, 5공구 지반개량 검토보고서, 1994
6. 신공항건설공단, 수도권신공항 4, 5공구 지역 지반조사 보고서, 1996
7. 신공항건설공단, 수도권신공항 시험시공 관리 용역 보고서, 1997
8. 신공항건설공단, 인천국제공항 지반조사용역 종합보고서 VOL2/2 (부지조성지역)
9. Lunne,T,P.K.Robertson & J.J.M.Powell,(1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic & Professional.
10. Asaoka, A(1978), Observational Procedure of Settlement Prediction, Soils and Foundations, Vol118,
11. Campanella, R.G., Robertson, P.K., (1998), Current status of the piezocone test, Invited Lecture, 1st International Conference on Penetration Testing, Disney World. Das. B.M, Principle of Geotechnical Engineering,(1990), PWS-KENT

(접수일자 2000. 1. 21)