

인천국제공항 지반조사 평가를 위한 최신장비 이용 연구사례(IV)

김종국^{*1}, 박기순^{*2}, 이강운^{*3}, 채영수^{*4}

1. 서론

최근 국토이용계획 발전에 따라 해안매립을 통한 공단조성이나 교통수송 개선을 위해 항만시설이 증설되고 있으며 도로와 철도등의 대형 국책사업이 활발히 진행되면서 해안 연약지반이나 산악지 개발을 위한 토목공사가 진행중에 있거나 완공된 사업이 늘고 있다. 이에 따라 경제성과 안정성이 요구되면서 지반조사의 신뢰성이 그 어느 때 보다 필요한 상황이다. 이같은 차원에서 현장 지반조사 방법이 다양해지고 시험수량과 항목증가에 따른 새로운 조사장비와 조사기법, 그리고 시험방법에 대한 개선이 요구되고 있으며, 더불어 지반 물성치에 대해 신뢰성 높은 자료가 요구되고 있다. 더구나 최근에는 건설현장이 대형화되고 민간투자사업(S.O.C) 및 Turn-Key 입찰방식이 증가하면서 국내 관련업체들이 최신 시험장비와 개선된 시험방법을 제안하고 있어 부분적인 개선이 진행되고 있으나 사회 전반적인 장비개발과 투자확보가 필요한 상황이다.

일반적으로 현장조사시험으로 사용되고 있는 표준 관입시험(SPT)은 지반의 개략적인 관입저항 정도를 파악하는 차원에서 그 적용성과 신속성면에서 뛰어난 장점을 갖고있으나 점토지반에서의 신뢰성은 매우 낮으며, 현장 Vane(F.V)시험은 신뢰성은 비교적

높으나 연속적인 시험이 곤란하므로 적용성이 제한되어 있다. 이에 반해 최근 보급되고 있는 Piezocone 시험기나 Dilatometer 장비등의 조사장비는 대부분의 지반에 적용이 가능하고 다양한 지반 상태를 연속적으로 파악할 수 있으며 동시에 비교적 신뢰성 높은 지반정보나 자료를 얻을 수 있어 적용사례가 증가하고 있는 추세이다.

한편 인천국제공항의 지반조사는 종합적인 조사계획하에 1,700만평의 공사부지중 1,400만평 전지역에 걸쳐 평균 72m간격으로 시추조사와 Vane 시험(FVT), Piezocone 관입시험(CPTu), Dilatometer 시험(DMT), 공내재하시험(PMT), 물리탐사 등의 현장시험을 실시하였다. 그리고 실내시험은 Rowecell 압밀 및 삼축압축시험, 표준압밀시험 등을 자동화하여 실시하였으며, 시추조사는 약 3,100개소, 현장시험은 50,000회, 그리고 실내시험은 28,000회 이상 실시하였다. 이중 본 현장 시험시공 지역에서 실시한 Piezocone 관입시험과 Dilatometer 시험을 중심으로 공학적 특성을 소개하고자 한다.

2. 시험장비

2.1 장비구성

인천공항 건설지역내에서 실시한 원지반조사, 사전 정밀조사 그리고 연약지반 개량 후 확인조사 등에 사용된 주요시험은 현장 Geonor Vane-Test,

*1 정희원, 한국건설품질시험원 지반기술팀 과장
*2 정희원, 인천국제공항공사 기술개발팀 과장
*3 정희원, (주)동성엔지니어링 상무이사
*4 정희원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

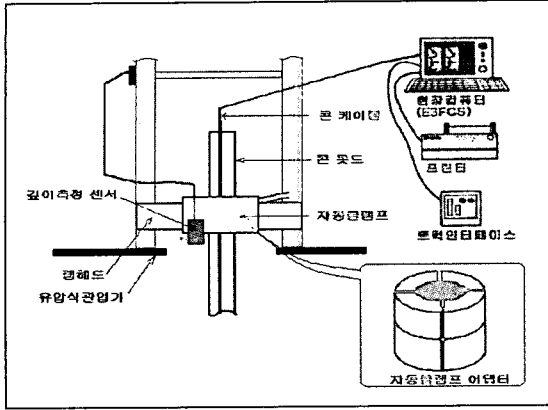


그림 1. 유압식 관입장치의 자동클램프장치

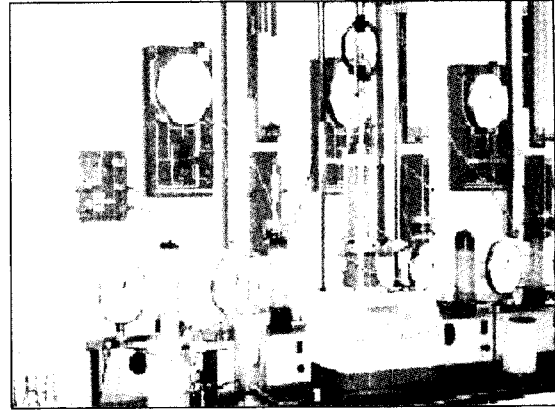


그림 3. 삼축압축 시험기

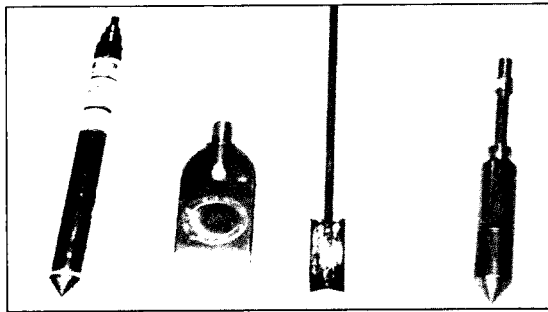


그림 2. 각종 시험(CPTu, DMT, FVT, GM)의 선단 관입 모양

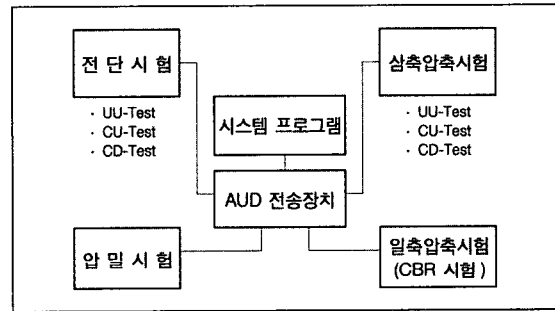


그림 4. AUD시스템의 역학시험장비구성(ELE)

Piezocone 관입시험, Dilatometer 시험, 공내재하 시험, BAT시험 등이며, 관련시험을 수행할 수 있도록 제작된 관입장치는 다음 그림 1과 같다.

현장조사를 위해 구성된 조사시험 장비는 보조 관입장치 및 동일 부대설비를 공유할 수 있도록 조합하여 필요시 자동클램프의 부품을 교체하여 사용할 수 있도록 구성하였으며, 다양한 측정장치를 교체하는 방식에 따라 Rod 규격에 상관없이 사용할 수 있는 이점이 있으며, 그림 2와 같은 측정장치를 다양하게 이용할 수 있다.

또한 실내 시험장비는 역학적 특성을 규명하기 위해 그림 3과 같은 자동화 삼축압축시험기를 비롯해 진단, 압밀, 일축압축시험 그리고 지지력비(CBR)시험을 동시에 수행할 수 있도록 구비하였으며, 그림 4와 같이 각 역학시험 장비에 자동으로 제어할 수 있

도록 전자센서를 설치하여 중앙 자동제어 시스템을 구성하여 자동화 프로그램에 운영할 수 있도록 하였다.

자동화 시스템은 데이터의 적용성과 처리 효율을 증대시키는 등의 장점이 있지만 어떠한 시스템도 현장상황을 모두 고려하지 못하므로 전체적인 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해서는 현장 기술자 및 전문가의 공학적인 판단이 있어야 한다.

또한, Rowecell 압밀시험기, 배수재의 배수능력 시험기등 연약지반 개량공사와 관련하여 지반공학적 특성을 규명하기 위한 다양한 장비를 운영하였다.

2.2 구성장비 특성

대규모 사회간접시설 건설과 향후 건설시장의 개방을 대비하기 위해서는 조사·장비에 있어 보다 신

표 1. 자동화 시스템 장비의 장·단점 비교

장 점	단 점
① 측정치의 감도(Sensitivity)의 증가 ② 측정치의 정밀도(Accuracy)의 증가 ③ 측정과 해석에 소요되는 인력 감소 ④ 연속적인 자동기록으로 측정 회수 증가 ⑤ 타 역학시험과 동시에 병행할 수 있고 독립적으로 운영이 가능해 시험 소요기간 단축 ⑥ 즉각적인 데이터 전송 기능 ⑦ 요구되는 데이터의 선택에 있어서의 융통성 증가	① 높은 초기 투자 비용과 유지비 ② 육안에 의한 관찰사항 및 데이터에 영향을 미치는 요인들이 기록되지 않음 ③ 데이터의 과잉축적과 문서화 ④ 정확하지 않은 데이터의 맹목적인 수용 ⑤ 초기 시스템의 운영시와 숙련도에 따라 신뢰도 저하 가능성이 있음 ⑥ 정기적인 장비의 점검과 센서 교정 등에 의한 유지 ⑦ 지속적인 전원 공급 필요(일정한 전압 필요)

속하고 정밀한 시공이 요구되는 최신 첨단장비가 필요하다.

최신 시험장비는 1990년대에 들어 건설현장에 도입되기 시작하여 지반정보 및 품질관리 효율을 높이는 데 많은 기여를 했다. 더구나 최신장비의 활용은 건설공사의 신속 정밀 시공을 위한 기초자료를 제공하고 있으며, 이들 자동화 시스템의 특징을 보면 표 1과 같다.

이같은 차원에서 당 현장 조사시험기술이 국내 조사시험을 한차원 향상시키고 발전시킨 기회가 되어 이들 적용장비 각각에 대해 상세히 설명하고자 한다.

2.2.1 Piezocone 관입시험(CPTu)

CPTu는 10~30ton의 유압식 관입장치로써 일련의 연결Rod에 전기식 Cone(3성분 또는 4성분)을 장착하여 일정한 관입속도로 지중에 압입하여 소정의 심도까지 연속적으로 원추관입저항력(q_c)과 Sleeve 마찰력(f_s), 그리고 원추 선단이나 후면의 간극수압(u_c 또는 u_{bt})을 측정하여 지반정수를 산정하는 방법으로서 흙의 여러가지 성질을 동시에 측정할 수 있으며, 간극수압 소산시험에 의한 현장 압밀계수를 산정할 수 있는 등의 현장조사 장비로 가장 유용하게 사용되는 장비이다.

CPTu는 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 콘관입시험 결과에 영향을

주는 요소를 없애기 위해 관입속도를 $2 \pm 0.5 \text{cm/sec}$, 선단각 60° , 선단면적 10cm^2 , 주면면적 150cm^2 을 표준화하고 있으며 시험결과는 응력이력, 압축성, 입자크기 등의 지반조건에 따라 다르게 나타나는데, 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

CPTu 결과에 의한 지층구분, 흙의 분류, 압밀도 및 응력이력(과압밀비), 지반의 수평응력, 변형특성, 비배수 전단강도, 액상화평가 등의 다양한 시험분석이 이루어지고 있으나, 올바른 데이터의 측정 및 해석을 위해서는 아래와 같은 몇 가지 사항에 대해 유의하여야 한다.

① Cone Tip의 불균등 면적의 영향

Cone관입 시 수압 측정은 마찰 Sleeve의 끝점과 Cone Tip 노출면에서 측정하게 되는데, Sleeve 마찰과 Tip 저항 값에 이미 소정의 수압이 합산되어 있어 지반의 전응력으로 표현되지 못하고 있다. 따라서 일정한 보정이 필요하게 되는데, 측정 자료의 불균등 간극수압 유발에 따른 오차는 관계식(1)을 통해 보정되어 산출된다.

$$q_t = q_c + u_{bt}(1-a) \quad (1)$$

여기서, q_t 는 수정된 Tip 관입저항치, q_c 는 측정된 Tip 관입저항치, u_{bt} 는 관입중에 발생된 최대 간극수압, a 는 순 면적비(A_b/A_c)이다.

② Piezo Element의 위치, 크기의 영향

③ Piezo Element의 포화 영향

2.2.2 Dilatometer 시험 (DMT)

Dilatometer 시험은 1970년 이탈리아의 Silvano Marchetti 교수에 의하여 고안된 장비로 두께 14mm, 폭 95mm의 강판에 지름 6cm인 Steel Membrane의 한쪽면에 부착된 Blade를 사용하여 관입 압력을 측정하는 장비로써, 시험은 정적 Cone 관입장치를 이용하여 자갈층 및 굳은 지반 (N=40 이상)을 제외한 모든 점토 또는 모래 등의 연약지반에서 쉽게 활용할 수 있으며 특히 20cm 간격으로 연속적인 시험이 가능하고, 시험방법이 간편하여 토질정수를 추정하는데 매우 효과적이다.

기본개념은 선단 관입장치인 Blade에 Cable을 통해 압축공기를 주입하면 Steel Membrane이 팽창되고, 그 압력으로 인하여 지반내에 변형을 발생시켜 Membrane이 0.05mm와 1.10mm로 팽창할 때의 압력과 다시 0.05mm로 수축할 때의 압력을 각각 강판 Membrane의 강성에 대해 보정하여 P_0 , P_1 , P_2 압력을 산정하고, 이를 연직방향유효응력(δ'_v)이나 현장간극수압(u_0)등과 함께 이용하여

Dilatometer Modulus [$E_d = 34.7(P_1 - P_0)$],

Horizontal Stress Index [$K_d = \frac{P_0 - u_0}{\sigma'_v}$],

Material Index [$I_d = \frac{P_1 - P_0}{P_0 - u_0}$],

Pore Pressure Index [$U_d = \frac{P_2 - u_0}{P_0 - u_0}$]

를 얻게된다.

Dilatometer 특성은 Cone 관입시험과 유사하며, Cone 대신 Blade를 이용하여 가스압에 의한 팽창과 수축에 의한 압력변형에 의해 제반지수등의 상호관계를 파악하는 것이며, Dilatometer 수행 시 획득할 수 있는 토질정수 및 특성은 다음과 같다.

- ① 흙의 분류 (단위중량)
- ② 비배수전단강도
- ③ 과압밀비, 압밀계수등의 다양한 물성을 추정
- ④ 정지토압계수
- ⑤ 전단계수 등

다만, Dilatometer 시험으로부터 얻는 자료는 지반상태와 현장시험 조건에 따라 영향을 받으므로 기존에 제안한 상호관계들은 그 지역 지반특성만을 반영한 결과로서 이들 결과를 이용할 때는 대상지반의 적용성을 검토하여야 하며, 주기적인 검교정 및 시험시의 고장에 유의해야 한다.

2.2.3 Geonor Vane Test

현장배인시험은 스웨덴의 Olsson(1919)에 의해 사용되면서 부터 Skempton, Cadling과 Odenstad 등의 연구자들에 의해 발전된 시험방법으로서 본 시험장치는 Casing 없이 관입하도록 제작된 Scandinavia 형식의 Geonor사의 전동식 Model을 기본으로 이미 언급된 유압식 관입장치와 Rod를 이용하여 일정심도까지 Vane날개를 압입시켜 시험을 실시한다. Vane는 통상 Vane지름(D)에 대한 높이(H)의 비(H/D)가 2인 것을 사용하며, 비배수 전단강도(S_{uv})는 전단응력이 전체파괴면을 따라 균등하게 분포된다고 가정하여 식 (2)와 같이 결정하며, 교란전단강도(S_{wv})의 경우도 동일하다.

$$S_{wv} = \frac{6}{7} \frac{T}{\pi D^3} \quad (2)$$

여기서 T=최대 Torque 측정치

Vane시험시 전단강도에 영향을 미치는 제반 영향 요소들은 Vane의 모양, Vane 주변의 전단응력 분포, 관입으로 인한 지반의 교란, 관입 후 회전까지의 시간경과에 의한 압밀, 회전속도, 전단강도의 이방성 등으로 구분되며, Vane 측정치의 정확성을 확보하기 위해서는 검교정이 수시로 이루어져야 한다.

2.2.4 공내재하시험(Pressuremeter Test)

공내재하시험은 지반의 변형특성과 강도특성을 동시에 측정할 수 있으며, 시험시 주변지반의 경계조건 및 응력과 변형을 상태를 파악하기 위한 지반의 탄성계수나 지반반력계수를 구하기 위해 시추공내에 고무 튜브를 넣고 압축공기를 밀어 넣어 측정하는 하중-변위관계를 이용한 시험이다.

공내재하시험은 Probe의 설치 방법에 따라 다음과 같이 3종류로 분류된다.

- ① 사전에 굴착공을 형성한 후 Probe를 시험깊이까지 내려 시험을 실시하는 선굴착 Pressuremeter(PBP, Prebored Pressuremeter)
- ② Probe 하단에 위치한 Cutter를 회전시켜 시험깊이까지 자체적인 굴진을 하여 Probe가 설치되는 자가굴착식 Pressuremeter(SBP, Self-boring Pressuremeter)
- ③ 유압잭을 이용하여 Probe를 갯별과 같이 아주 연약한 점토지반 내에 강제로 밀어 넣어 설치하는 압입식 Pressuremeter(PIP, Push-in Pressuremeter)

이들은 시추공을 이용하여 원위치에서 지반의 반력계수(K)와 탄성계수(E) 등의 역학적 자료를 구체적으로 구하는 방법으로서 시험기기는 재하장치, 압축장치, 측정기기의 3개 부분으로 구분된다. 공내에 재하장치를 삽입하고 가압하면 고무막이 공벽에 밀

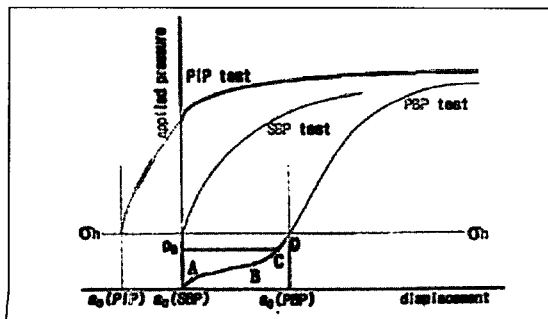


그림 5. 공내재하시험의 전형적인 시험결과

착되면서 지반 변위가 발생하게 되는데, 이때 발생변위와 가압력 P의 관계도로부터 지반 변위값인 K_{∞} 값과 E_{∞} 값을 구할 수 있다. 다음 그림 5는 여러 가지의 공내재하시험의 전형적인 시험결과들을 나타낸 것이다.

일반적으로 압입식은 초기압력이 현장 수평응력보다 큰 값을 가지며 시험압력이 Membrane의 특성과 균형을 이룰 때 A점까지 증가하다가, 굴착시 교란된 지반과 Membrane이 밀착하는 순간 B점까지 증가한다. 그 후 곡선은 거의 선형적인 거동을 보이는데, 압력은 Membrane이 공벽과 완전히 밀착하는 단계 C점까지 증가한다. 이 후 D점을 초과하게 되면 지반의 탄성적인 거동을 보이며 궁극적으로는 소성변형의 양상을 나타내게 된다.

2.2.5 BAT GM 시스템(BAT Grondwater Monitoring System)

BAT GM시스템은 현장에서 연약지반 및 사질토 지반에서의 지하수위 위치 추정은 물론 현장 투수시험을 직접 수행할 수 있다. 특히 오염지반이나 연약지반 지중에서의 지하수, 침투수, 침출수 등을 Sampling 할 수 있어 오염물의 종류, 중금속 오염뿐만 아니라 해수구조물 지역의 염분농도 등을 간접적으로 추정할 수 있어 환경지반에 효과적으로 조사할 수 있는 장비이다.

본 장비는 Piezocone과 동일 관입장치를 이용하여 Adapter와 Rod를 교체한 후 BAT Cone(환경콘)을 임의의 지중에 압입하여 기초자료를 획득할 수 있으



그림 6. BAT GM 시스템 장치

며, 구성은 그림 6과 같이 BAT Cone과, Cone안에 압입식 유리봉이 정착되어 있다. 현장투수시험은 자동기록기에 의해 측정될 수 있도록 구성되어 있다. BAT Cone을 지중에 관입시켜 심도별 측정이 가능하며, 빠르고 신속하며 System 운영이 간편해 해수, 오염물을 지중에서 채취할 수 있고 지하수를 탐사할 수 있어 오염물과 사람과의 직접적인 접촉이 없어 안전하며 압밀특성도 파악할 수 있다.

2.2.6 Rowecell 압밀시험

Rowecell로 알려진 압밀시험은 P.W.Rowe교수에 의해 개발되었으며, Rowe와 Barden(1966)에 의해 자세히 발표되었다. 이들의 목적은 비균질한 퇴적토를 포함하여 낮은 투수성의 흙에서 압밀시험을 할때 기존 압밀시험의 단점을 극복하기 위한 것으로서 기존 압밀시험과 달리 시료에 기계적인 Lever System 대신 횡경막에 압력을 작용시켜 가압하도록 구성되어 있다.

Rowecell 압밀시험기는 수압 또는 Air Compressor에 의한 공기압에 의해 시료에 하중을 재하하는 Flow Trac, 몸체, 덮개, 저판의 3부분으로 이루어진 압밀 Cell 그리고 컴퓨터 프로그램을 이용한 자동화 장비로 시험조건에 따라 표준 압밀시험은 물론 CG, CRS시험 등 다양한 시험을 수행할수 있으며, 그림 7과 같이 3조로 구성되었다.

이 시험은 균질 층적층과 투수계수값이 각 흙에 대하여 압밀시험 과정중에 배수를 제어하고 간극수압

을 측정하므로써 표준 압밀시험(Oedometer Test)을 수행할 때의 단점들을 보완한 것으로 수압에 의한 하중조절 시스템, 자동제어설비 및 큰 공시체에 의한 시험이 가능하며, 그 특성은 다음과 같다.

① 하중조절 시스템

수압에 의한 하중조절 시스템을 이용하는 경우, 시료가 표준 압밀시험의 하중조절시스템(Lever Loading System) 보다 진동에 의한 영향을 거의 받지 않으며 큰 시료에 적용할 수 있도록 1000Kpa 까지 압력을 가할 수 있고, 매우 단단한 흙을 제외하고는 변형에 대한 보정을 무시할수 있다.

② 자동제어설비

시료의 배수를 조절할 수 있고, 초기침하를 압밀침하와 분리하여 측정할 수 있다. 또한 간극수압을 정확하고 필요한 시간에 측정할 수 있으며, 향상된 Back Pressure에 의해 조절되어 완전 포화상태에서 시행할 수 있다. 특히 시료에 자유변형(Free Strain)과 등변형(Equal Strain)에 의해 둘 다 재하할 수 있고 낮은 압력에서 초기하중을 포함한 하중조절을 쉽게할 수 있는 이점이 있다.

③ 큰 공시체

큰 공시체(250mm, 150mm, 50mm Thick or Larger) 시험은 작은 공시체로 시행하는 기존의 압밀시험보다 침하해석에 관련된 보다 신뢰할 수 있는 자료를 제공하게 된다. 이같은 차원에서 Rowecell시험은 보다 큰 시료로부터 수직배수에 의한 압밀과 수평배

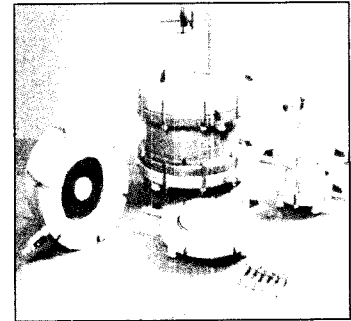
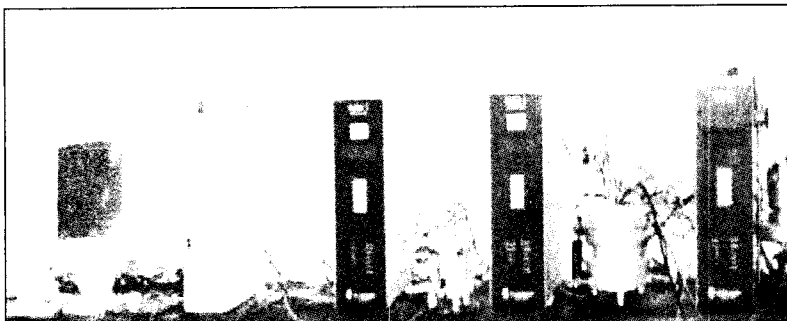


그림 7. Rowecell 압밀시험 시험장치 구성

수에 의한 압밀, 투수계수 측정, 재하조건의 선택 (Free Strain/Equal Strain), 수직배수에 최적공간의 평가, Slurry와 같은 초기 퇴적토의 압밀, Cyclic Loading의 재하와 간극수압에 따른 결과 관찰, 액상화(Liquefaction)시험에서 순간 최대간극수압의 관찰, 연속적으로 다양한 하중재하 하에서의 압밀시험을 수행할 수 있어 연약지반 개량공법 설계의 기초자료는 물론 검증자료로 이용하고 있다.

3. 지반의 공학적 특성 평가

3.1 흙의 분류

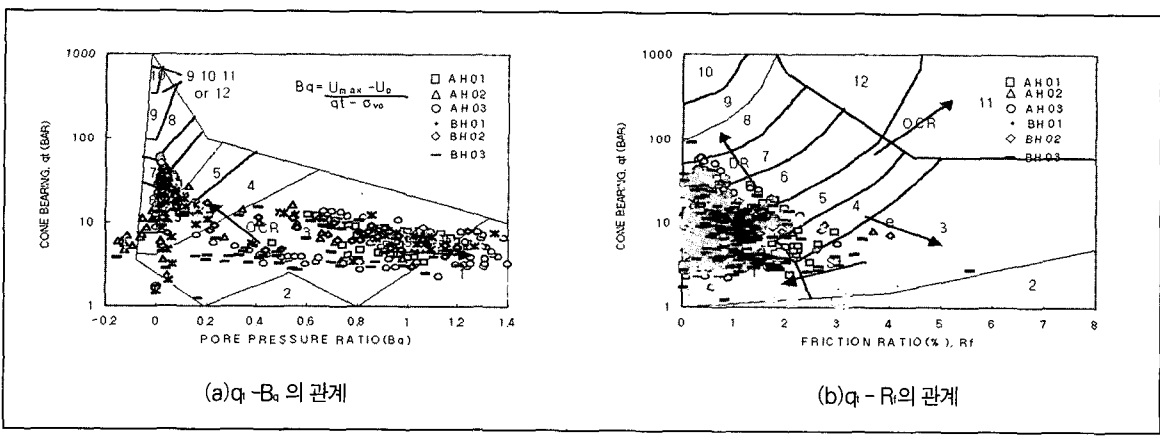
흙의 분류 방법은 실내 입도시험을 통한 통일분류 방법이 널리 사용되고 있으며, 이 방법을 이용하여 흙을 분류하는 방법이 가장 신뢰성이 높으나 시료를 채취하여 실내시험을 거쳐 결과값을 얻어야 하는 바 시간적으로나 연속적인 자료를 얻기 곤란하다. 따라서 이같은 단점을 보완하고자 CPTu와 DMT 방법을 이용하여 흙을 분류하는 방법이 최근에 많이 시도되고 있다. 이에 대해 본 현장 지반분류를 CPTu 방법

을 사용할 경우, Campanella & Robertson(1988)의 지반 분류방법에 따라 콘관입 저항치(q_t)와

$$\text{간극수압 계수}(B_q = \frac{U_{max} - U_0}{q_t - \sigma_{vo}})$$

(q_t)와 마찰비(R_f)의 관계로 나타내면 그림 8과 같다.

그림 8로부터 $q_t - B_q$ 인 경우는 주영역으로 1의 예민한 세립토, 3의 점토, 부가적으로 4의 실트질 점토~6의 모래질 실트 내지 점토질 실트의 영역까지 나타나며, 마찰율(R_f)의 범위는 0~6%를 보이고, 과압밀비가 증가할수록 Cone 관입 저항치(q_t)가 증가하는 것으로 나타났다. 이들중 점토층에서 나타난 Cone 관입 저항치는 2.0~25.5 bar, 간극수압계수는 -0.2~1.4, 마찰율은 0~2%의 범위를 보이고 있고, 실트의 경우 Cone 관입 저항치는 5.1~51.0 bar, 간극수압계수는 -0.1~0.3, 마찰율은 4%이하의 범위를 보이며, 소성이 증가할수록 Cone 관입 저항치와 마찰율이 감소하는 것으로 나타났다. 특히 해성 점토층에서 나타나는 관입저항치는 일정범위내에서 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 지반분류상 주요지층은 해성점토층인 실트질 점토나 점토층으로 나타나며, 부분적으로 모래층이나 모래



주) 여기서 1은 Sensitive, Fine Grained, 2는 Organic Soils-Peat, 3은 Clays-Clay to Silty Clay, 4는 Silt Mixtures-Clayey Silt to Silty Clay, 5는 Sand Mixtures-Silty Sand to Sandy Silt, 6는 Sands- Clean Sand to Silty Sand, 7은 Gravelly Sand to Sand, 8은 Very Stiff Sand to Clayey Sand, 9는 Very Stiff, Fine Grained.

그림 8. CPTu의 분류도표를 이용한 흙의 분류 (Campanella & Robertson, 1988)

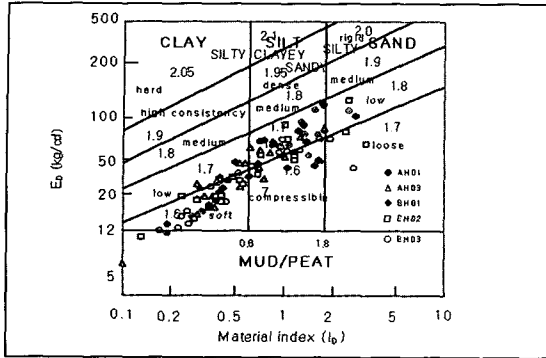


그림 9. DMT에 의한 단위중량과 흙의 분류

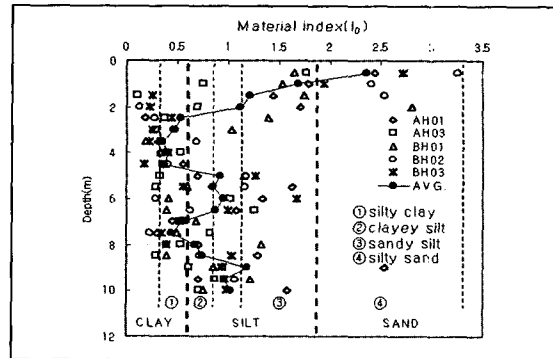


그림 10. ID값을 이용한 지반의 종류 구분

표 2. 현장 및 실내시험결과에 의해 추정된 흙의 분류

Depth(m)	CPT _u	USCS	DMT
1	sand, silty sand to sandy silt	SM, ML	silt sand, sandy silt
2			
3	sensitive fine grained		mud
4		ML-CL or CL	
5	sandy silt to clayey silt		silty clay, clayey silt
6	sensitive fine grained		sandy silt
7	sandy silt to clayey silt	ML-CL	
8	sensitive fine grained		silty clay
9	sandy silt to clayey silt	sand seam	
10	clayey silt to silty clay	CL	silt
11		ML-CL	clay, clayey silt
		sand seam	sandy silt, silty sand
			clayey silt, sandy silt

질 실트층으로 나타나게 되는데, 이것은 퇴적층내에 Sand Seam이 분포하고 있는 것으로 추정할 수 있다. 한편 그림 9, 그림 10은 DMT의 I_b 값을 이용한 분류방법을 나타낸 것으로서 Marchetti(1980)의 DMT 분류방법에 따르더라도 점토층이나 실트층이 주요지반분류로 나타나며, 부분적으로 사질토층이 출현하는 것을 알 수 있다.

한편 그림 10의 I_b 값에 따른 심도별 지반분류를 보면 대체로 I_b 가 1.2보다 작은 값을 나타내고 있어 지반특성은 연약하고 중간정도의 압축성 지반으로 점토와 실트 성분이 다량 분포하는 것으로 사료된다.(김종국 외, 2000) 이같은 시험결과는 실내 물리

시험으로부터 실시한 통일분류 방법과 비교하더라도 유사한 것으로 나타났다. 즉 표 2와 같이 심도별로 통일분류법과 비교한 결과도 비교적 일치하는 것으로 나타났다.

또한 현장 시험자료를 과잉간극수압비로부터 지반분류를 개략적으로 판단할 수 있는데, 기 수행된 연

구내용들을 집계하여 비교해 보면 대체로 $\frac{P_v}{u_b}$ 는

B_q 가 0.2 이상에서 세립토로 분류하는 것으로 나타났다(그림11 참조). 그리고 점토질이 우세한 지반에서는 Mayne(1987)이 주장한 대로 DMT로 구한 P_v

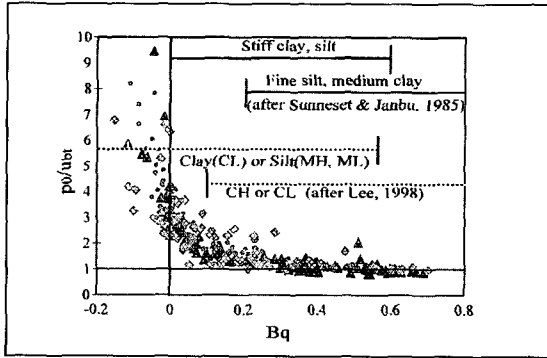


그림 11. Bq와 pu/ubi와의 관계

와 CPTu시험의 원추 후면에서 측정된 간극수압 u_{bt} 가 일치하는 양상을 나타내고 있어 Bq가 0.2 이하인 경우에는 CPTu시험의 원추 후면에서 측정된 간극수압(u_{bt})이 DMT로 측정된 간극수압(P_v)보다 작은 값을 나타내고 있다. 이는 Bruzzi & Battaglio (1987)에 제시한 바와 같이 압밀계수가 큰 점토질 실트에서 나타나는 순간배수의 영향과 Dilatancy에 의한 음의 간극수압 발생이 CPTu시험에 더 큰 영향을 미치기 때문으로 생각된다(김주형 외, 2000).

분석결과 CPTu의 경우 Campanella & Robertson (1988)에 의한 흙의 분류방법에 따를 경우 선단저항

력의 증가와 간극수압의 감소를 토대로 점토층 사이에 실트 및 모래층의 분포를 구별 할 수 있었다. DMT의 경우에서도 I_b 와 U_b 등에 의해 비교해 볼 때 지층속에 존재하는 실트나 모래층의 존재에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다.

3.2 샌드심(Sand Seam) 추정

일반적으로 불투수층인 점성토의 투수계수는 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ cm/sec로 나타나는 바 점성토 지반이 대심도로 구성되어 있을 경우 지반개량을 위해 소요되는 비용이나 시간은 총공사비에 대해 매우 큰 비중을 차지한다. 따라서 지반특성 정도가 단지계획이나 사업구상의 정도에 미치는 영향력은 크다. 이 같은 차원에서 본 현장은 시추조사 결과 부분적으로 층적층으로 형성된 점토층내에 층상의 모래성분이 분포하는 것은 공사비나 공사기간 결정에 많은 영향을 주는 요소가 된다. 그러나 통상적인 시추조사방법으로 All Sampling을 실시하지 않는 한 그 경향을 파악하기 어려운 바 Piezocone조사시험은 대단히 유용한 시험이 된다. 이 때 토층내에 모래층이 분포하는 것을 Sand Seam이라 하며, 그림 12와 같이 점성토 속에

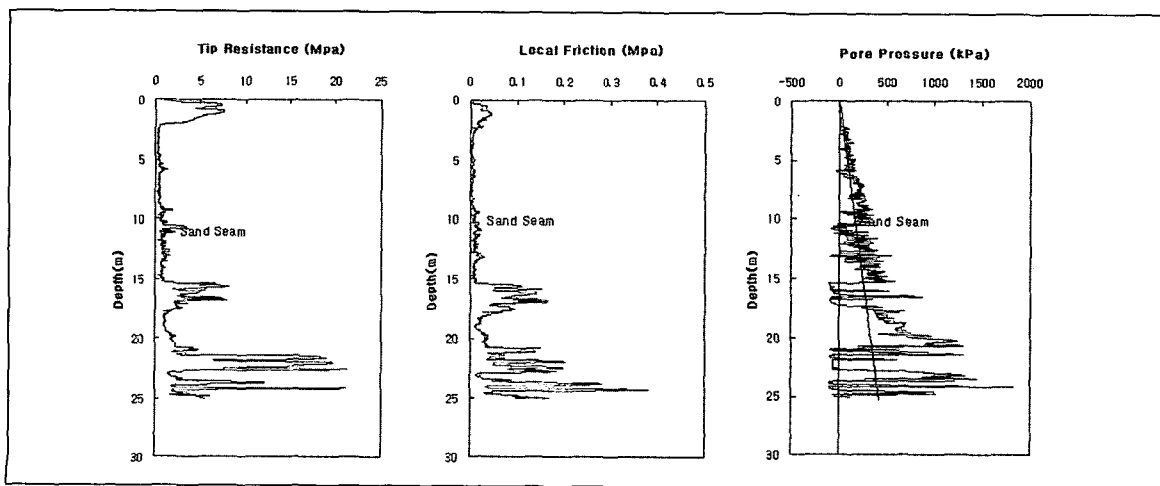


그림 12. 피에조콘에 의한 샌드심추정

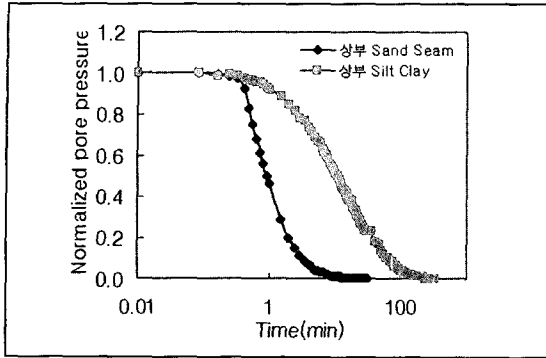


그림 13. 간극수압소산시험 결과

Sand Seam이 존재할 경우, 모래의 투수계수는 점토의 100배이상에 달하므로 투수층 역할을 함으로써 공사시간과 공사비의 절감효과에 기여하는 바가 크다. 이에 따라 전체적인 압밀거동의 변화는 크게된다.

인천공항에서 실시된 CPTu 결과를 이용하여 수평방향 압밀특성을 규명하기 위해 소산시험을 실시하였다. 그림 13의 시험결과에 따르면 Sand Seam의 배수촉진은 대단히 큰 효과를 발휘할 것으로 나타났다. 따라서 Sand Seam층의 존재 유무에 따라 투수성 및 압밀거동이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이같은 결과에 의거 본 현장에 적용된 연약지반 개량공법은 경제적인 설계검토를 하게 되었으며, 그 사례에서도 Sand Seam이 연속적으로 출현하는 지역과 연약층 두께가 6.0m이하인 지역에 대

해서는 선행재하공법(Pre-loading)을 적용하였다.

3.3 비배수전단강도

CPTu시험에 의한 비배수전단강도 산정방법은 제 3장에서 언급한 바와 같이 이론적·경험적인 방법 중 주로 경험적인 방법이 많이 사용되며, 이를 동일한 값으로 비교평가하기 위해서는 일정한 보정계수를 적용해야 하는데, 이때 사용되는 계수가 콘계수이다. 콘계수는 시험장비와 지역별 위치별로 상이한 값을 나타내므로 일정한 값으로 제한할 수 없으나 현재까지 연구된 추천 값을 보면 표 3과 같다. 한편 본 연구는 경험적 방법의 콘계수 추정법(N_{kt} , N_{du} , N_{qu}) 중 N_{kt} 방법을 중심으로 비교검토 하였다.

표 3과 같이 콘계수는 연약지반의 특성과 지역에 따라 그 값이 다르며, 비배수강도 또한 시험방법에 따라 상이한 값을 나타내는 변수가 많기 때문에 콘계수값 차이가 크다. 즉, 그림 14, 그림 15는 공항지역 각 공구에서 실시한 68개의 현장Vane시험과 CPTu 및 실내시험인 일축압축시험과 삼축압축시험(UU - Test)결과를 비교한 것인데, 비교결과 현장Vane시험은 다른 시험 결과값에 비해 대략 1.5~2.0배정도 크게 나타나 측정방법에 따라 비배수강도가 큰 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있으며, 추정방법에 따라서 차이가 있음을 알 수 있다.

표 3. 인천국제공항 연약지반에서의 경험적인 콘계수 추정

제안자	콘계수	참고 강도	비 고
이갑열(1997)	$N_{kt} = 15$ $N_{kt} = 18$	FVT	· 상재하중을 고려한 경우 · 상재하중을 고려하지 않은 경우
이선재(1998)	$N_{kt} = 10$	FVT	· OCR 고려
김주형외(2000)	$N_{kt} = 14.5 \pm 1.3$	FVT	· 정규압밀점토에서 약간 과압밀점토의 소성지수 고려 · 소성지수 20이상
	$N_{du} = 5$		
박기순(2001)	$N_{kt} = 9$	FVT	· 정규압밀점토에서의 소성지수, OCR 고려
	$N_{kt} = 21$	UU-Test	
	$N_{kt} = 15$ $N_{kt} = 24$	FVT UU-Test	
김종국외(2001)	$N_{kt} = 18.2$	UU-Test	· 소성지수 10이하의 낮은 실트질 점토 · 상재하중을 고려하지 않은 경우

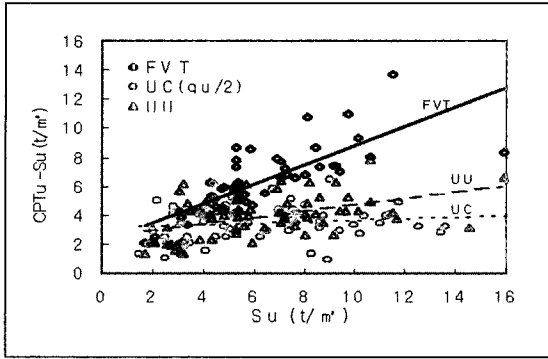


그림 14. 시험방법에 따른 비배수강도 비교

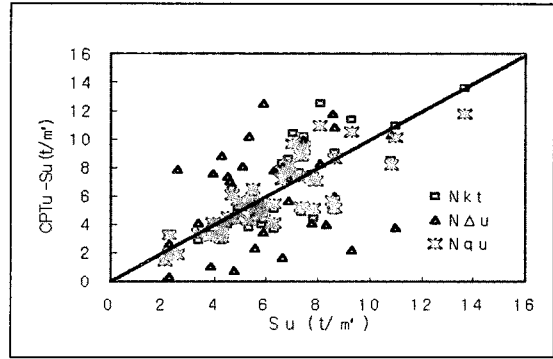


그림 15. 현장베인시험에 의한 콘계수 비교

대상지역의 지반은 저소성의 실트질 점토로 ML~CL의 세립층으로 압밀계수가 크고 소성이 낮은 특성을 보이고 있어 시료채취와 제작시 교란에 의한 영향이 비교적 크게 발생하여 실내시험의 비배수강도는 과소평가되었으며, 따라서 상대적으로 현장베인시험이 과대평가된 것으로 나타났다.

또한, 대상지역의 지반특성에 따른 과압밀비와 소성지수의 영향을 고려하여 콘계수의 변화를 고찰하고자 그림 16과 같이 과압밀비를 고려하여 비교하였다.

해당지반 점성토의 과압밀비는 대략 0.8~2.7(평균 1.2)로 정규압밀상태 내지 약간 과압밀상태인 경우에 대하여 그림 16과 같이 OCR<1.0경우, 1.0<OCR<1.5, 1.5<OCR이상으로 구분하여 현장 Vane시험결과를 기준으로 콘계수를 산정하였다. 각각의 콘계수를 정규분포로 가정하여 평균콘계수를

구하고 이에 대한 오차한계를 90%의 신뢰도로 추정하였으며 그 결과 N_{kt} 가 비교적 높은 상관도를 보이며 그 다음이 N_{qu} 가 유사한 변화 양상을 보이고 있다. OCR<1.0일때의 $N_{kt}=10.0\pm 3.8$, 1.0<OCR<1.5일때의 $N_{kt}=15.0\pm 3.8$, 1.5<OCR일 때 $N_{kt}=17.0\pm 5.2$ 로 나타나, 과압밀비가 증가함에 따라 N_{kt} 가 증가하고 있어 De Ruiter(1982)의 연구결과와 일치하고 있는 것으로 나타났다. De Ruiter(1982)에 의하면 N_{kt} 는 정규압밀점토는 10~15이고, 과압밀점토는 15~20으로 제안한 경우와 본 해당지역의 정규압밀점토의 10, 약간 과압밀점토의 15~17과 근사한 값을 보이고 있는 것으로 나타났다.

대상지반의 소성지수 PI는 대략 2~20으로 그림 17의 콘계수와 소성지수와의 관계에서 N_{kt} 는 소성지수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있다.

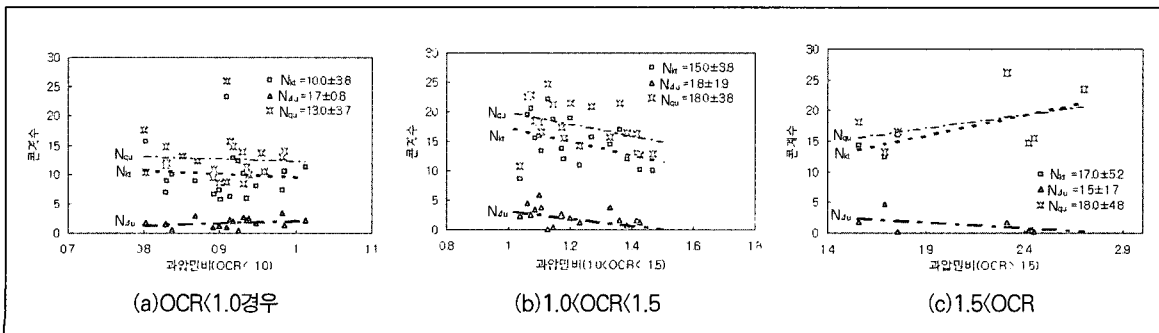


그림 16. 과압밀비와 콘계수와의 관계

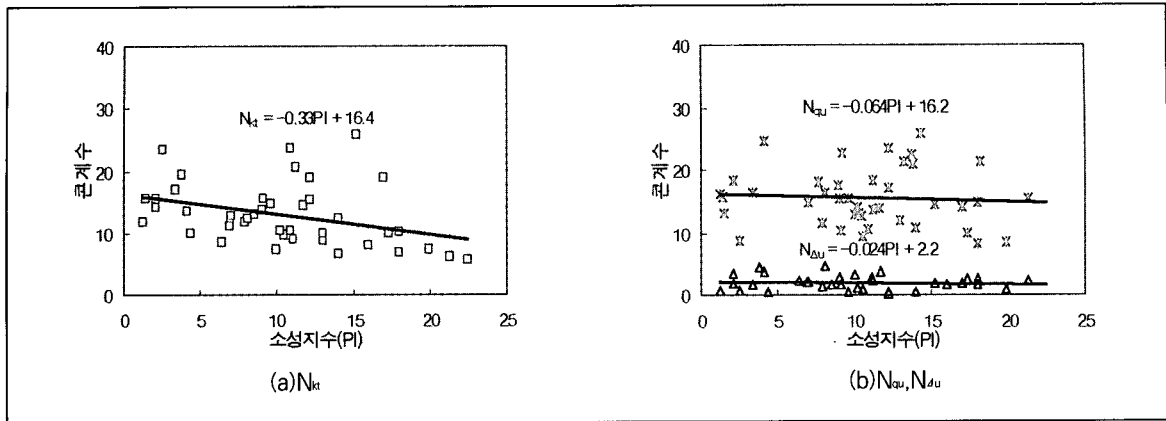


그림 17. 콘계수와 소성지수와의 관계

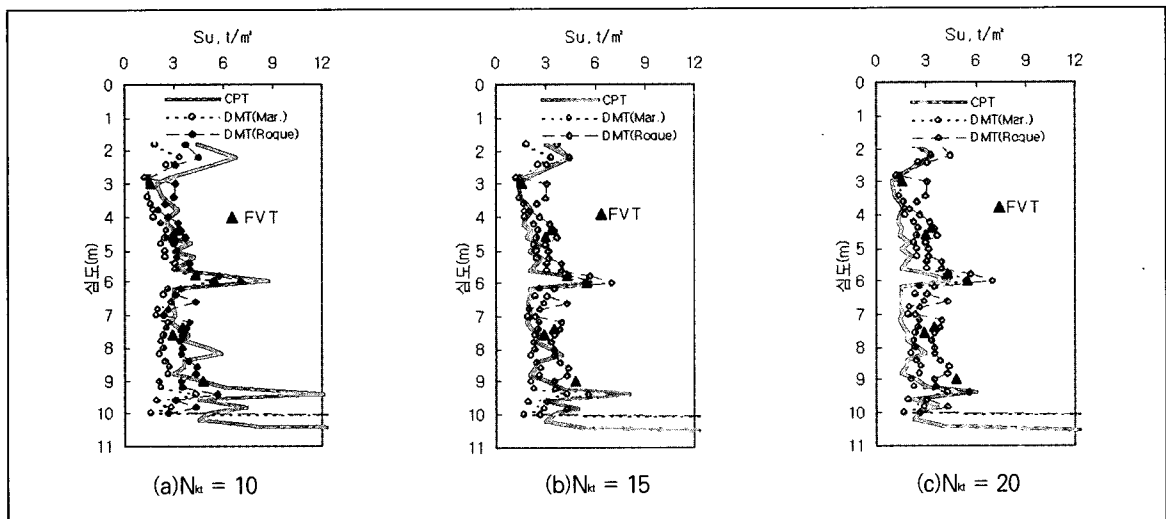


그림 18. DMT와 CPTu와의 비배수전단강도 비교도(조사위치 : CH01지점)

이는 Konrad와 Law(1987)가 제시한 결과와 유사한 경향을 보이나 Aas 등(1986)이 제시한 결과와 상반된 경향을 보인다. 반면 La Rochelle 등(1988), 이선재(1997)는 소성지수와 콘계수와의 관계에 대하여 어떠한 상관성도 발견하지 못한 것으로 보고한 바 있다. 따라서, 콘계수 산정은 공동팽창이론과 경험적인 방법에 의해 산출하는 것이 보편적이나 본 대상지역의 지반특성을 고려하여 경험적 방법으로 고찰하였으며, 콘계수는 정규압밀점토인 경우 현장배인시험 결과를 기준강도로 할 경우 $N_{kt}=10$, 약간 과압밀

점토($1.0 < OCR < 2.5$)의 경우 15~17을 적용하여 CPTu시험을 이용한 비배수 전단강도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

한편 DMT 시험의 콘계수값은 실내역학시험 결과에 의거 $N_c=5.0$ 을 적용하였으나 기 연구조사 결과에 따르면 $N_c=6.35$ 를 추천하기도 한 바 본 현장은 1단계지역 해성점토층 대상 DMT 시험결과를 근거로 Roque(1988) 제안식을 적용하여 추정하였다(전창대·김종국, 1998) 그림 18은 현장배인시험으로 구한 비배수전단강도와 CPTu의 콘계수 (N_{kt})를 10,

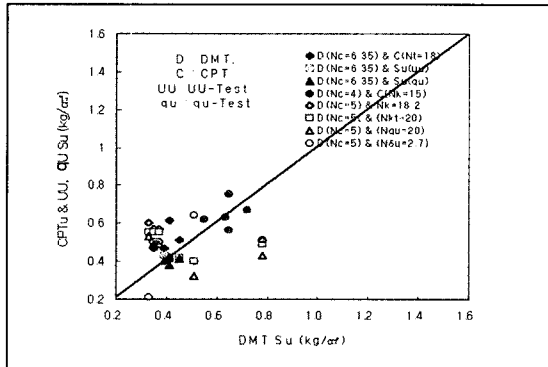


그림 19. DMT, CPTu, 실내시험에 의한 Su 비교

15, 20인 상태와 DMT의 콘계수(N_c) 6.35인 상태에서의 Roque의 제안식과 Marchetti의 제안식을 나타낸 결과이다.

그림 18에서 CPTu의 콘계수 (N_{kc})를 10으로 가정할 때와 DMT의 콘계수(N_c)를 6.35로 가정하여 Roque의 제안식으로 가정할 때 상부해상층인 정규 압밀점토 지반에서의 FVT에 의한 비배수전단강도는 유사한 것으로 나타났으며, 하부 과압밀점토 지반에서는 CPTu 콘계수(N_{kc})값이 20일 경우 유사한 것으로 나타났다. 상기 평가방법을 또다른 방법으로 비교하고자 DMT와 CPTu, 그리고 실내시험으로부터 구한 비배수 전단강도를 나타내면 그림 19와 같다. 그림 19에서의 비배수 전단강도는 시험방법별로 분산정도가 커서 일정한 관계성을 찾는 것은 어려우나 삼축압축시험의 비배수 전단강도를 기준으로 산정함

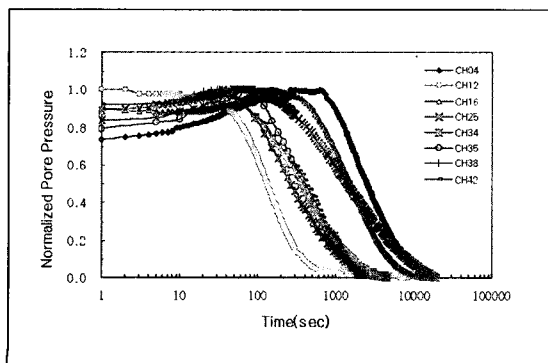


그림 20. CPTu의 소산시험결과비교

콘계수는 CPTu의 경우 $N_k=18.2$ 을, DMT의 경우는 콘계수 $N_c=6.35$ 값을 적용할 경우 비교적 적절한 것으로 나타났다(김종국의, 2001).

또한, DMT 조사방법을 비교 평가해보면 B_q 값이 0.1~0.2이상인 점토질 세립토이면 CPTu시험인 경우 전응력콘계수(N_{kc})를 이용하는 방법이, DMT 시험인 경우는 Roque의 제안방법이 FVT결과와 유사한 것으로 나타났다(김주형의, 2001).

3.4 압밀계수

인천국제공항 부지의 연역지반을 대상으로 CPTu와 DMT의 간극수압 소산시험을 통해 수평압밀계수 ($C_{h(CPTU)}$)를 산정하였다. CPTu의 경우 압밀계수 산정 이론에는 Torstensson(1977), Baligh & Levadoux(1980), Levadoux & Baligh(1986) 그리고 Housby & Teh(1991) 등의 방법을 이용하였으며, DMT의 경우 Robertson이 제안한 DMT-C의 방법에 따라 산정하였다.

그림 20과 그림 21은 공항지역 2단계지역에서 실시한 CPTu와 DMT의 간극수압 소산시험 결과를 나타낸 것이다.

CPTu와 DMT의 간극수압 소산시험 결과 전반적인 수평방향 압밀계수는 표준압밀시험의 수직압밀계수(C_v)에 비해 크게 나타났다. 이에 대해 각 시험방법별 압밀계수를 비교한 결과는 표 4와 같다.

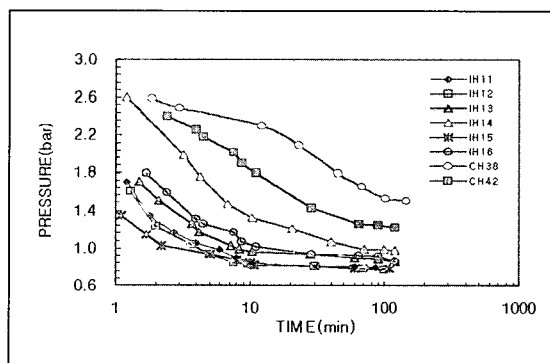


그림 21. DMT의 소산시험결과비교

표 4. 실내 및 현장시험에 의해 산정한 평균압밀계수 비교(Oedo, Rowecell, CPTu, DMT)

	Oedometer (C _v)	Oedometer (C _v)	CPTu (C _v)				DMT(C _v)
			Torstensson (1977)	Baligh & Levadoux(1980)	Levadoux & Baligh(1986)	Houlsby & Teh(1991)	
평균압밀계수 (cm ² /sec)	0.00966	0.0418	0.0537	0.0675	0.0988	0.0453	0.0908
압밀계수비 (C _h /C _{v Oedo})	1	4.3	5.6	7.0	10.2	4.7	9.4
압밀계수비 (C _h /C _{v Oedo})	-	1	1.3	1.6	2.4	1.1	2.2
압밀계수비 (C _h /C _{v Rowe})	-	-	0.6	0.8	1.1	0.5	1.04

표 4로부터 나타난바와 같이 CPTu와 DMT로부터 구한 수평압밀계수는 표준압밀시험에서 구한 연직압밀계수보다 상당히 크게 나타났다. CPTu의 경우, 제안된 이론해에 따라 압밀계수비(C_h/C_{v Oedo})는 4.7~10.2로 큰 차이를 보이고 있으나, 횡방향으로 90° 회전한 조건의 표준압밀시험에서 얻은 수평압밀계수와 비교할 때, 압밀계수비(C_{h(CPTu, DMT)}/C_{h Oedo})는 1.1~2.4정도로 나타났다. 이 때, 압밀계수비는 소성지수가 감소할수록 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 특히, Levadoux & Baligh의 해는 표준압밀시험으로 구한 연직방향압밀계수(C_v) 보다 상당히 큰 값으로 나타나 횡방향압밀계수비(C_{h(DMT)})와 Rowe cell 압밀시험으로 구한 횡방향압밀계수(C_{h(Rowe)})는 C_{h(CPTu)}와 유사한 것으로 나타났으나, 시험 갯수가 적고 분산이 상당히 크게 나타나 정량적으로 분석하기에는 다소 어려움이 따랐다.

또한, 김주형 외(2000)의 공항 1단계부지 해성세립토에서 CPTu와 DMT비교 결과에 의하면 CPTu로 구한 횡방향압밀계수는 강성지수를 고려한 Torstensson과 Teh & Houlsby의 방법으로 산정한 횡방향 압밀계수는 대체로 비슷하여 표준압밀계수(C_h)와 비교할 때 각각 1.3배, 1.1배 정도의 값을 보이고 있으며, Levadoux & Baligh방법은 표준압밀계수(C_h)의 1.6배 사이의 값으로 산정되어 Torstensson과 Teh & Houlsby의 방법보다 압밀계수가 크게 평가되는 것으로 나타났다.

이와 같이 수평압밀계수가 연직압밀계수보다 큰 것은 퇴적점성토 사이에 실트질 지반과 샌드십의 층상화와 해성점토의 구조적 이방성, 토립자의 재배열, 지층상태, 그리고 시험방법, 이론해 등에 따라 큰 차이가 있기 때문으로 사료된다(김종국의, 2001).

한편 BAT GM System을 이용하여 현장 임의의 심도에서 현장투수계수를 산정할 수 있어 압밀계수 추정에 이용될수 있으나, 본 시험장비는 해안연안의 특성을 고려해 지중구조물에 미치는 염분농도 및 전기전도도 등을 조사 분석하는데 이용되었다.

3.5 과압밀비(OCR)

CPTu 시험으로부터 OCR을 산정할 경우 Chang(1991)의 제안식과 원추관입 저항력을 이용한 Sugawara(1988) 제안식을 이용하는 경우가 있으나, 실트질로 구성된 지반은 간극수압(u_{sk})값이 매우 작기 때문에 측정된 간극수압으로부터 OCR을 산정하는 것은 매우 어렵다. Sugawara(1988) 제안식은 정규화한 원추관입저항치와 OCR과의 관계를 경험식으로 나타낸 것으로서, 식 (9)에서 K는 2.5~5.0까지의 경험상수이며, 이에 대해 Bo et al.(1997)는 싱가포르의 창이지역에서 K=3.14로 제시하였고, 국내 점토지반의 경우 서울대(1998)에서 K=4.5로 제안한바 있다. 본 연구는 이들 값을 이용하여 그림 22와 같이 심도별로 OCR을 비교하였

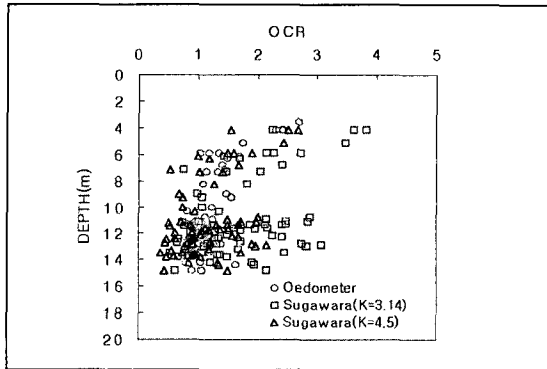


그림 22. Oedo.와 CPTu의 OCR 비교

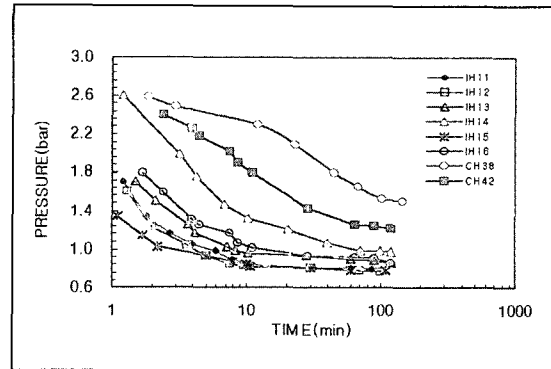


그림 23. Oedo.와 DMT의 OCR 비교

다. 비교결과 Sugawara의 제안식($K=4.5$)은 실내 표준압밀시험으로부터 추정된 산정값과 유사한 것으로 나타났다. 또한 그림 23은 Marchetti(1980)와 Lunne(1990)의 제안방법에 따른 심도별 실내압밀 시험과 DMT시험결과를 나타낸 것으로서 Marchetti(1980)가 제안한 방법은 실내 Oedometer 시험방법에 비해 과대평가된 것으로 나타났다. Lunne(1990)의 제안방법이 유사한 경향을 보였다.

또한 그림 24는 이에 대해 또 다른 방법으로 비교하고자 실내 Oedometer 시험과 CPTu, 그리고 DMT방법을 종합하여 나타낸 것으로서 상기 분석결과를 검증하고 있다. 그리고 그림 25는 B_q 값에 따라 CPTu, DMT 그리고 표준압밀시험(Oedometer)으로 구한 각각의 OCR을 비교하여 나타낸 것으로서

먼저 B_q 가 0.1보다 큰 실트질 점토에 대해서는 CPTu로 구한 과압밀비($OCR_{(CPTu, K=4.5)}$)와 실내압밀 시험으로 구한 과압밀비($OCR_{(Lab.)}$)는 비교적 잘 일치하며, DMT 결과로 산정한 과압밀비($OCR_{(Mar.)}$, $OCR_{(Lun.)}$)도 이와 유사한 경향을 나타낸다. 또한, CPTu의 경우 Sugawara(1988)의 제안식을 이용하여 경험상수 $K=4.5$ 를 적용하는 경우 본 공항지역의 실내압밀시험결과와 근접하는 것으로 나타났으나 실트질로 구성된 지반은 간극수압(u_{bt})값이 매우 작기 때문에 측정된 간극수압으로부터 과압밀비를 산정하는 것이 매우 어려운 것으로 보고되고 있다. DMT의 경우 Marchetti(1980)와 Lunne(1990)가 제안한 방법을 보더라도 Marchetti가 제안한 방법에 의한 다소 과대평가 되는 것으로 나타났다.

그러나, $OCR_{(Mar.)}$ 은 B_q 가 증가할수록 $OCR_{(Lab.)}$ 과

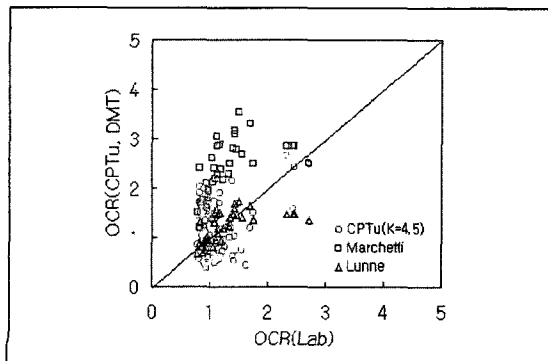


그림 24. $OCR_{(Lab.)}$ 과 $OCR_{(CPTu, DMT)}$ 와의 비교

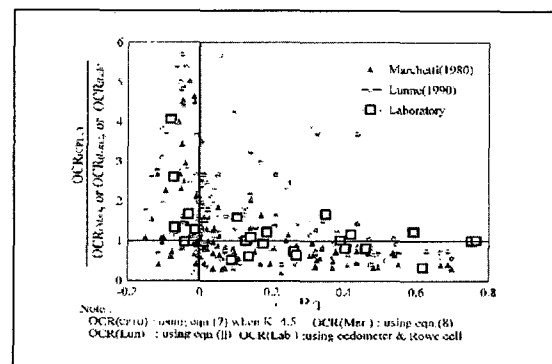


그림 25. B_q 와 $OCR_{(CPTu, DMT)}$ 와의 비교

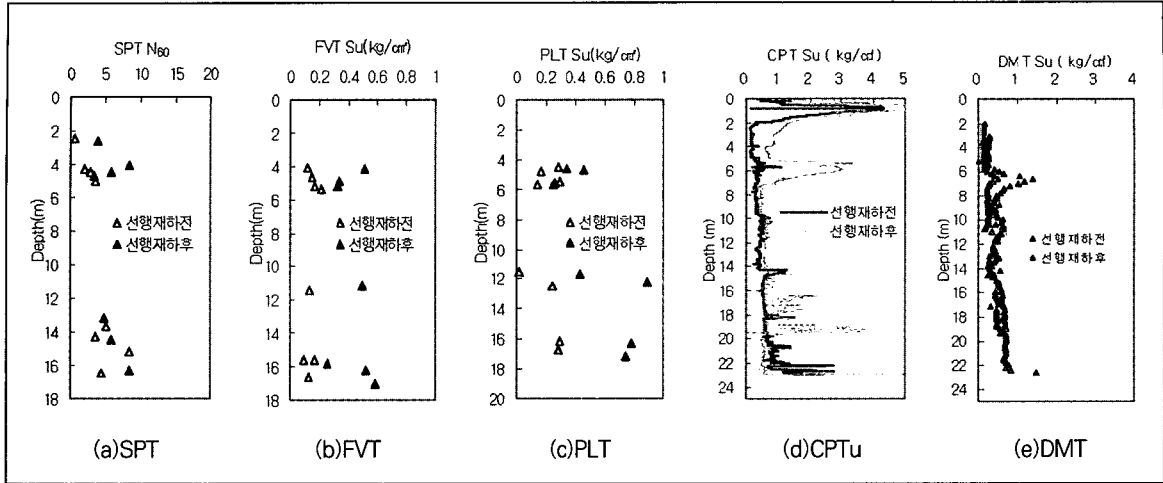


그림 26. 선행재하 전·후의 현장시험 비교(6공구)

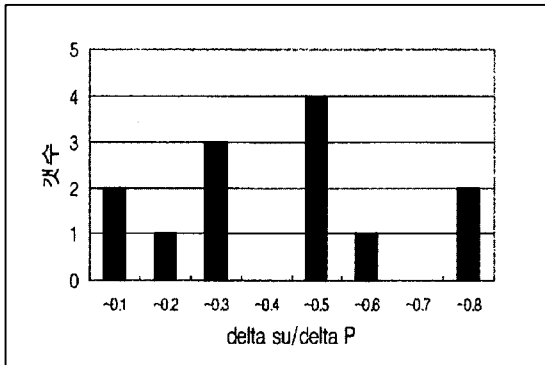


그림 27. Vane시험의 강도증가율 도수분포

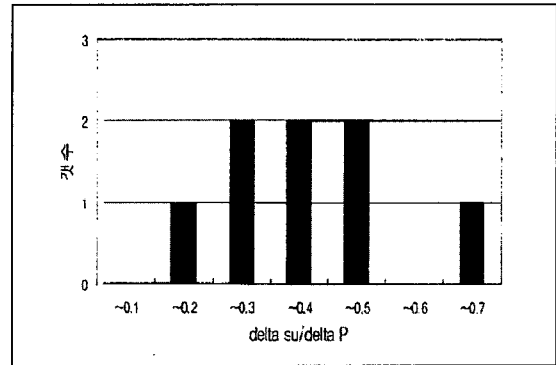


그림 28. CPTu 강도증가율 도수분포

$OCR_{(CPTu, K=4.5)}$ 보다 작은 값을 나타내는데, 이는 Marchetti가 제안한 식은 대체로 과압밀비를 크게 평가한다는 것을 의미하며, 대략 2배정도 크게 나타났다. 그 분산 정도가 커 편차가 큰 것을 알 수 있다.

3.6 비배수 전단강도 증가율

표준관입시험, 현장베인시험, 공내재하시험, CPTu, DMT등을 통해 연약지반 개량전·후의 비배수전단강도 증가율을 분석한 결과는 그림 26, 표 5와 같다.

이들 강도증가율($\Delta S_u / \Delta \sigma'_v$) 비교결과, 순수 점토 지반에서 FVT, CPTu, DMT시험에 의한 비배수강도 증가비는 서로 유사한 경향으로 보이고 있으나, 과압밀점토 및 실트질 모래층에서는 CPTu에 의한 강도증가율이 DMT에 의한 경우보다 과대 평가되는 것으로 나타났다. 이를 통계분석하여 도수분포로 나타낸 결과는 그림 27, 그림 28과 같다.

상기 시험 결과에 대해 통계처리하여 모평균 90%의 신뢰성을 나타내는 식은 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$\left(\frac{\Delta S_u}{\Delta \sigma'} \right)_{\text{Fieldvane}} = 0.37 \pm 0.10 \quad (3)$$

표 5. 비배수 강도증가율($\Delta S_u / \Delta \sigma_c$) 추정 결과

구분	UU	FVT	PLT	DMT	CPT _u
$\Delta S_u / \Delta \sigma_c$	0.17~0.25	0.16~0.53	0.09~0.76	0.16~0.44	0.15~0.47
모평균 90% 신뢰구간(t 분포)	0.21(±0.04)	0.37(±0.10)	0.40(±0.36)	0.34(±0.08)	0.38(±0.09)

$$\left(\frac{\Delta S_u}{\Delta \sigma} \right)_{CPT_u} = 0.38 \pm 0.09 \quad (4)$$

이와 동일한 방법으로 각 시험방법별 비배수 전단 강도 증가율을 분석해보면 표 5와 같이 매우 광범위하게 나타났는데, 이는 동 지역의 연약층 심도가 불규칙함에 따라 선행하중에 따른 전단강도 증가율이 불규칙했기 때문으로 분석된다.

한편 삼축압축(UU)시험에 의한 비배수 전단강도 증가율이 현장시험에 의한 결과보다 작게 나타난 것은 시료채취, 성형 및 실내시험 과정에서 시료가 교란되었기 때문인 것으로 판단된다(김종국, 2000).

한편 공내재하시험 결과를 이용하여 비배수전단강도를 산정한 결과 선행재하 후의 비배수 전단강도가 선행재하 전에 비해 증가하는 양상을 나타내고 있으나, 탄성계수나 정지토압계수는 교란 정도에 따라 영향을 크게 받는다.

4. 결론

1. CPT_u와 DMT시험에 의한 지반분류 방법은 현장 시공 자료정보의 신속성과 편리성에서 매우 유용하며, 본 현장의 경우 주요 퇴적층인 점성토층은 해성점토층으로서 간극수압계수(B_u)가 0.2 이상에서는 그 지반특성이 명확히 구분되지만 0.2 미만에서는 다른 지반특성을 나타내므로 퇴적층내에 Sand Seam이 분포하는 것을 간접적으로 확인할 수 있었다.

2. Sand Seam의 출현은 연속적인 CPT_u와 DMT 시험으로 부터 판단이 가능하며, 간극수압 소산시험 결과 본 현장 Sand Seam층이 배수통로 역할을 할 수 있을 것으로 판단되었다.

3. 비배수 전단강도 추정은 간극수압계수(B_u)값이

0.1~0.2이상에서는 CPT_u시험인 경우 전응력 콘계수를 사용하는 방법과 DMT 시험인 경우 Roque의 제안방법이 FVT결과와 유사한 결과를 얻는 것으로 나타났다.

4. 압밀계수는 실내 압밀시험값에 비해 현위치 시험값이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 특히 본 현장의 수평 및 수직압밀비는 약 4.3을 나타내 퇴적조건에 따른 압밀조건이 확연히 구분됨을 알 수 있다. 이것은 일반적인 값보다 2~3배이상 크게 나타남을 알 수 있다.

5. 과압밀비는 간극수압계수(B_u)값이 0.1이상에서는 CPT_u와 DMT시험, 그리고 실내역학시험 모두가 유사한 것으로 나타나 그 이하에서는 부적절한 값을 나타냈다. 이 때 DMT시험에서 Marchetti(1980)가 제안한 값은 과대평가되는 것으로 나타났다.

6. 비배수 전단강도 증가율은 FVT와 CPT_u는 유사한 것으로 나타났으나 PLT 방법은 그 편차가 크고 다른 방법과의 차가 크므로 신뢰성이 떨어지는 것으로 나타났다.

7. 설계시 적용한 압밀계수와 실측 압밀계수를 비교한 결과 대체로 유사한 경향을 보이나, 일부 원지반 압밀계수는 교란정도와 배수재의 설치간격에 따라 설계에 적용된 실내 압밀계수가 과소 평가되는 것을 알 수 있었으며, 정확한 지반개량 효과를 얻기 위해서는 C_u 와 C_v 의 상호관계를 충분히 규명하고 그 결과를 설계에 적용하는 방법이 타당할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김영상, 이승래, (1998), "콘 선단부 뒤에서 관측된 간극

수압 소산곡선을 이용한 수평압밀계수 추정”, 한국지반공학회, 제 14권, 제4호, pp. 141-149

2. 김종국, 김학중, 전창대, (2000), “Dilatometer를 이용한 인천국제공항지역의 지반개량효과 평가” 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집 pp. 309~317
3. 김종국, 성기광, 김학중, 김영웅, (2000), “인천국제공항 지역의 피에조콘조사와 결과의 적용” 한국지반공학회 논문집 제16권 제2호 pp. 115~123
4. 김종국, 김영웅, 최인걸, 박영목, (2001), “CPTu와 DMT을 이용한 인천국제공항 해상점토의 공학적특성연구” 한국지반공학회 논문집 제17권 제2호 pp. 41~49
5. 김주형, 김영웅, 조성민, 김명모, (2000), “인천국제공항 부지 해상 세립토에 대한 CPTu와 DMT결과비교” 한국지반공학 논문집, Vol. 16, No.6, pp. 23~34
6. 박기순, 김학중, 김성수, (1999), “ 인천국제공항 연약지반개량 시험시공 결과 및 적용” 한국지반공학회지, Vol. 15, No. 4, pp. 17~25
7. 박기순, (2001), “피조콘시험을 이용한 인천지역 해상점토의 비배수전단강도 추정”, 인하대학교 석사학위 논문
8. 신공항건설공단, (1995), “수도권신국제공항 부지조성공사 시험시공 관리용역 종합보고서”
9. 신공항건설공단, (1997), “수도권신공항 시험시공 관리용역 보고서”
10. 유신설계공단, (1994), “수도권 신공항 부지조성공사 4, 5공구 지반개량 검토보고서”
11. 이선재, (1997), “피에조콘을 이용한 국내지반의 공학적 특성 연구” 서울대학교 박사학위 논문
12. 이갑열, (1998), “현장시험을 통한 비배수 전단강도 평가” 서울대학교 석사학위 논문
13. 이강운, 채영수, 윤길립, 백세환, (2001), “해상점토의 강도특성에 대한 불확실성 분석” 한국지반공학회 봄 학술발표회, 논문집, pp. 215~222
14. 전창대, 김종국, (1998) “Flat Dilatometer시험을 이용한 인천국제공항 점성토의 비배수 전단강도 추정” 대한토목학회, 학술발표회 논문집(Ⅱ), pp. 151 -154
15. 전창대, 김종국, (1999) “Flat Dilatometer시험을 이용한 인천국제공항 점성토의 공학적 특성 추정” 한국지반공학회, 지반조사 위원회 논문집, pp. 113 -135
16. 최인걸, 김종국, 김영웅, 최원호, (2000) “인천국제공항 지역의 연약지반개량에 관한 연구” 한국농공학회 논문집, pp. 105~118
17. Asaoka, A(1978), “Observational Procedure of Settlement Prediction”, Soils and Foundations No.3, pp87-101
18. Baligh, M. M. and Levadoux, J. N.(1980), “Pore Pressure Dissipation after Cone Penetration”, Research Report, Cambridge, Massachusetts 02139
19. Baligh, M. M. & Levadoux, J. N.(1986), “Consolidation after Undrained Piezocone Penetration, II : Interpretation,” Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol 112, No. 7, pp.727-745
20. Bjerrum.L.(1972). “Embankments on Soft Ground”. State of the Art Report, Proc. ASCE Specialty Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures, Lafayette, Vol.2, pp.1-54
21. Campanella, R.G., Robertson,P.K.,(1988), “Current Status of The Piezocone Test”, Invited Lecture, 1st International Conference on Penetration Testing, Disney World, pp91-116
22. FHWA(1988). “Guidelines for Using the CPT. CP-TU and Marchetti DMT for Geotechnical Design”. FHWA-PA-87-922+84-24
23. 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
24. Hansbo, S(1981), “Consolidation of Fine-Grained Soils by Pfabricated Drains”, Proc.10th Int. Conf. Soil Mech. Eng. Stockolm, Vol.3, Paper12/22
25. Jamiolkowski et al.,(1985) “New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils, State-of-the

- Report, San Francisco, 1, Balkema Pub., Rotterdam.No.4. pp. 57-153
26. Kjekstad, O., Lunne, T. and Clausen, C. J. F.(1978), "Comparison Between Insitu Cone Resistance and Laboratory Strength for Overconsolidated North Sea Clays", Marine Geotechnology, Vol. 1
27. T. Akagi(1981), "Effects of Mandrel-Driven Sand Drains on Soft Clay", 10th ICSMFE, Stockholm, Vol.3, pp.581-584
28. Marchetti, S.(1980), "In-Situ Tests by Flat Dilatometer", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 106, pp.299-321
29. Marchetti, S. and Totani, G.,(1989) "Ch Evaluations from DMTA Dissipation Curves," Proceeding, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, Rio de Janeiro, pp. 281-286
30. Robertson, P. K. and Campanella, R.G.(1983), "Interpretation of Cone Penetration Tests", Part II :Sand, Canadian Geotechnical Journal, Vol.20, No. 4, pp718-733

2002년도 한국지반공학회 정기총회 및 봄 학술발표회·GEO EXPO 개최 안내

2002년 새봄을 맞이하여 한국지반공학회 정기총회 및 봄 학술발표회·GEO EXPO를 다음과 같이 개최합니다. 회원 여러분의 많은 참여를 바랍니다.

- 다 음 -

- 일 시** : 2002년 3월 21일(목)~22일(금) 08:30~
- 장 소** : 한국 교원단체 총연합회(서초구 우면동)
- 회 비** : 정회원 30,000원 / 비회원 40,000원 / 학생회원 : 15,000원
(중식, 논문집 1부, 리셉션 제공)
- 문 의** : 학회 사무국(02-3474-4428, kgssmfe@chollian.net)