

남해안 준설패립 연약지반에 대한 압밀 물질함수 및 초기응력 산정

Assessment on Consolidation Material Function and Initial Stress for Soft Ground by Hydraulic Fill the at Southern Coast of Korea

전 제 성^{1)*}

Jeon, Je Sung

구 자 갑²⁾

Koo, Ja Kap

Abstract

For a massive project related to building national industrial complexes on a soft ground applied to PVD after dredging and hydraulic fill, laboratory tests were carried out using undisturbed sample taken from various depth. Piezocone penetration and dissipation tests were carried out to assess horizontal coefficient of consolidation and initial stress in field. The ground consists of upper dredged fill and lower original clay layer having both similar marine clays. It should be, however, considered as multi-layered soft ground having different initial void ratio, initial water content, initial effective stress, and permeability and compressibility with directions. To assess initial stress of those soft layers in which have different stress history related to consolidation, CPTu test results, especially excess pore water pressure, were analyzed. It allows to find out distribution of excess pore water pressure and initial stress inner original clay layer.

Keywords : Consolidation, Marine clay, Consolidation properties, Material function, In-situ initial stress

1. 서론

고압축성 해성점토를 이용한 대규모 지반조성 및 연약 지반 개량을 계획할 때, 압밀거동 예측을 위한 사전 지반 조사와 이를 통한 압밀특성 분석은 매우 중요한 과정이다. 특히, 준설패립이 완료된 후 일정 시간이 경과한 시점에서의 원지반 점토층 및 준설패립층 내에서의 응력 상태는 준설패립의 규모, 준설패립으로 인한 각 지층의 압밀 진행정도, 원지반의 배수조건 등에 따라 크게 달라지게 되며, 이는 지반개량을 위한 연직배수공법의 설계에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구대상 인근 지역에 대한 과거 연약지반개량 사례(Jeon 등, 2008)에서는, 설계단계에서의 예측 압밀침하량에 비해 과도한 침하가 발생하고 압밀거동의 예측에서도 큰 오차가 발생하였다. 이러한 설계와 실제 압밀거동의 차이에 대한 분석을 실시한 결과, 설계단계에서 준설패립층과 원지반 점토층의 심도별 초기 응력상태, 초기 간극비 등의 압밀 특성치를 잘못 적용하였으며, 이는 압밀거동 예측오류의 주 원인이 된다는

연구결과가 발표되었다. Chu 등(2002)은 싱가포르 창이공항의 준설패립 및 연약지반 개량 프로젝트(Choa 등, 2001)를 대상으로 싱가포르 해성점토 지반에 대한 현장시험과 실내시험을 실시하고, 이 결과를 바탕으로 연약지반 개량시 요구되는 압밀특성치 분석에 관한 연구를 수행하였다.

전세계적으로 대규모 연약지반개량 프로젝트에 대한 이러한 내용의 연구가 활발히 수행되었다(Bell, 2002; Egashira 등, 2002; Katagiri 등, 2000).

본 논문에서는 한국 남해안에서의 대규모 연약지반개량 프로젝트를 대상으로, 다양한 실내시험과 현장시험을 통해 한국 남해안 해성점토지반의 압밀 특성치 및 초기 압밀조건을 분석하였다. 실내시험으로서 물리적 특성시험, 압밀시험, 개량형 수평배수 압밀시험 등을 수행하였으며, 현장시험은 피에조콘(CPTu)을 이용한 관입시험과 소산시험 등을 수행하였다. 다양한 시험결과는 연약지반 개량시 요구되는 상부의 준설패립층과 하부의 원지반 점토층에 대한 압밀 특성치 및 물질함수, 초기 응력상태 산

1) 정회원, 인덕대학 건설정보공학과 전임강사

2) 정회원, 한경대학교 토목공학과 교수

* Corresponding author : jsjeon@induk.ac.kr 02-950-7586

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

정 측면에서 분석되었다.

2. 대상 프로젝트 및 지역

2.1 준설매립 및 지층현황

추가 국가산업단지가 건설되고 있는 본 연구 대상지역은 한국의 남해안에 위치하고 있으며(Fig. 1), 인근에는 철강 산업시설과 석유화학 단지가 위치하고 있다.

이 지역은 고압축성의 원지 점토층이 10m~15m 두께로 분포하고 있으며, 해안가로 갈수록 깊어지는 층후 형태를 보이고 있다. 원지반 점토층 위에 인근 연안의 해상점토를 준설한 후, 펌프 이송에 의해 매립하는 방법으로 대략 10m 두께의 매립지반을 조성하였다(Fig. 9). 연직 배수재에 의한 지반개량이 필요한 연약지반은 상부의 준설 매립층과 하부의 원지반점토층으로 이루어져 있다. 이 두 층은 유사한 종류의 해상점토로 구성되어 있으나, 압밀침하와 관련된 연약층의 초기조건은 매우 상이하다. 준설 매립층의 경우, 준설매립 시공은 2년여 기간 동안 총 6회에 걸쳐 순차적으로 수행되었으며, 준설매립이 완료 후 1~2년 기간이 경과된 시점에서, 107~135%의 고함수비 및 3.2~3.5의 높은 초기 간극비 분포를 보이는 매우 연약한 상태이다(Fig. 2). 반면, 준설 매립층 하부의 원지반 점토층은 88~95%의 함수비 및 1.6~2.8의 초기 간극비 분포를 보이고 있다.

2.2 불교란시료 채취

전체 연약지반 개량지역 중 50m 떨어진 두 지점을 선택한 후, 준설 매립층과 원지반 점토층 전체에 걸친 전심



Fig. 1 Location of the national industrial complex project in southern Korea

도 시료채취를 실시하였다. 즉, 전체 연약층 두께가 24.9m인 BH-T1과 두께 25.4m인 BH-T2 시추공에 대하여 길이 80cm의 불교란 시료를 총 47개 채취하였다. 시료 채취에는 직경 76mm의 샘플러가 이용되었으며, 준설 매립층 상부의 초연약점토를 채취할 때는 샘플러 인발 시 점토가 샘플러 밖으로 흘러 나오는 현상을 방지하기 위하여 샘플러 하단에 얇은 스테인레스 재질의 차단재를 장착하였다.

3. 해상점토의 물리적 특성

준설 매립층 및 원지반 점토층의 해상점토에 대한 물리적 특성 분석을 위하여 함수비, 입도분포, 비중, 연경도, 단위중량 등의 실내시험을 수행하였다. 전심도 시료채취에 의한 각각의 불교란시료에 대하여 상부와 하부의 자연 함수비를 측정하여 전체 심도별 그 결과를 도시하였다.

시험당시 상부에는 대략 1.0m 정도의 성토시공이 수행된 상태이며, 최상부의 표층건조 영향 및 지층상태 등을 고려하여 시료채취 및 실내시험을 수행하였다.

준설 매립층은 107~135%, 원지반 점토층은 88~95%의 초기 함수비 분포를 보이고 있다(Fig. 3). 지표면을 기준으로 -10m 인근 심도는 준설 매립층과 원지반점토층의 경계로서, 준설매립 이전의 표층건조 영향으로 인해 대략 80% 정도의 부분적으로 낮은 함수비를 보이고 있다.

준설 매립층과 원지반 점토층은 함수비, 간극비 등의 초기 압밀조건에서 상이한 특성을 보이지만, 기본적인 해상점토의 종류는 유사한 것으로 나타났다. 심도별 액성한계는 준설 매립층과 원지반 점토층 모두 90~97% 범위에서 유사한 경향을 나타내고 있다. 소성한계는 25~27% 범위에서 유사한 분포를 보이고 있으며, 소성지수는



Fig. 2 Soft ground surface when 2~3 years have elapsed since hydraulic fill was finished

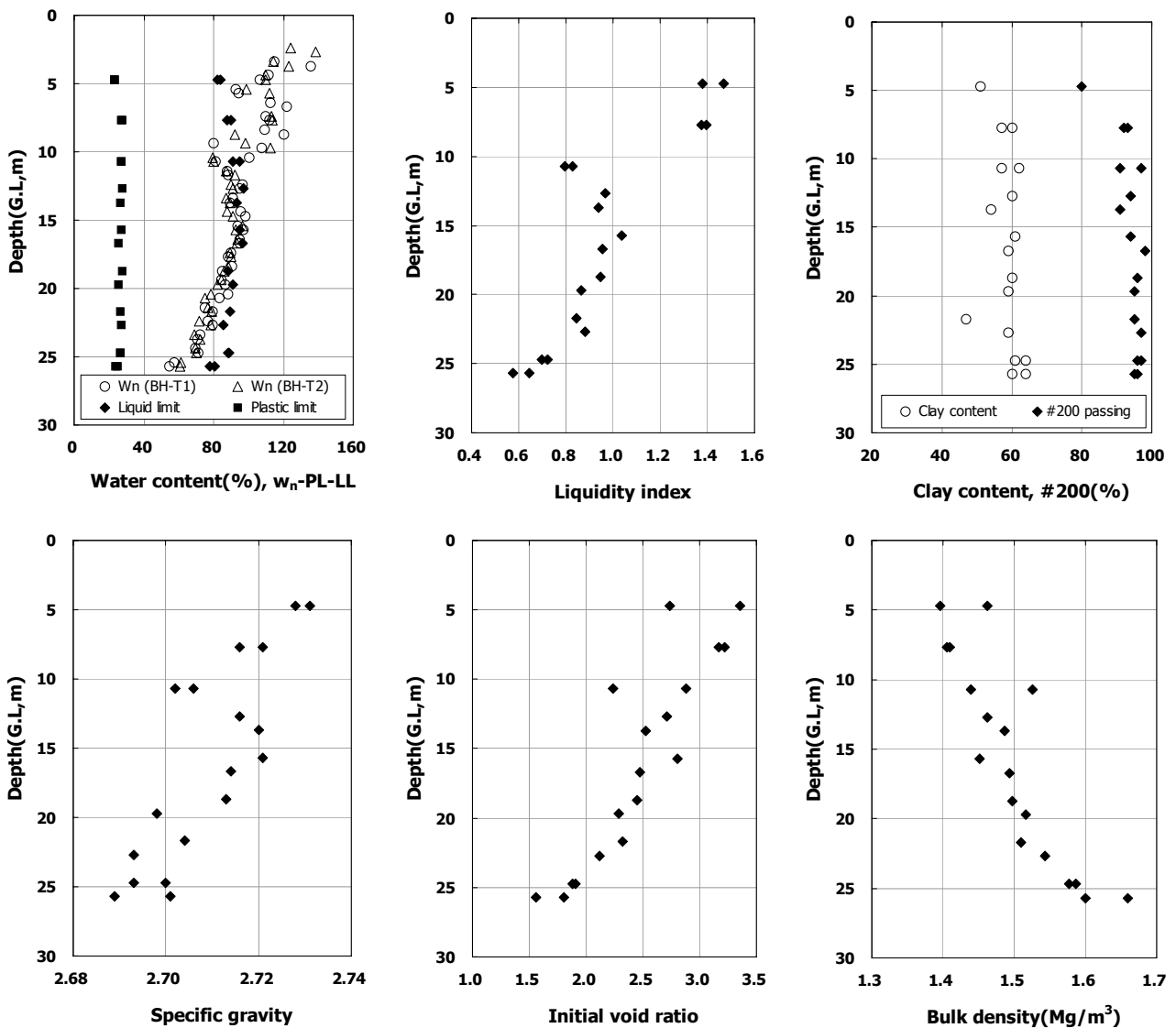


Fig. 3 Soil index and physical properties of the marine clays in southern Korea

60~70, 액성지수는 0.8~1.0 분포를 보이는 고소성 점토의 특성을 나타내고 있다. 입도분포에 있어서, 점토 함유율은 대략 60%, 200번체 통과율은 95~98% 범위의 결과를 나타내고 있다. 흙의 활성도는 1.7~2.2, 비중은 2.71~2.73의 분포를 나타내고 있다. 간극비와 단위중량 등은 상부 준설패립층과 하부 원지반점토층에서 확연한 차이를 보이고 있다. 준설패립층의 경우 초기 간극비는 3.2~3.5, 단위중량은 1.40tf/m³ 정도로 심도에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있는 반면, 원지반 점토층의 경우, 초기 간극비는 1.6~2.8, 단위중량은 1.45~1.60tf/m³ 로서 심도에 따라 선형적 변화 형태를 나타내고 있다.

4. 압밀 특성치 및 물질함수

4.1 압밀시험 종류

연약지반 개량에 있어 적정 압밀 특성치를 산정하여 설계 및 분석에 적용하는 것은 가장 중요한 과정이며, 이를 위하여 본 연구에서는 실내 압밀시험 및 피에조콘을 이용한 현장 소산시험을 실시하였다.

압밀 특성치 및 유효응력-압축성-투수성에 대한 물질함수 관계식을 도출하기 위하여 불교란시료를 이용한 표준압밀시험, 개량형 수평배수 압밀시험 등의 실내시험을 실시하였다. 전제성(2009)은 실내 압밀시험을 수행하는데 있어 별도의 압밀시험 장치를 이용하였는데, 이는 일

반적인 표준압밀시험 장치의 프레임 및 하중재하 장치를 그대로 사용하되 수평 배수조건을 압밀시험이 가능하도록 모형 연직배수재와 상부캡 등을 적용시킨 압밀시험 장치이다.

Fig. 4는 본 현장을 대상으로 전제성(2009)이 수평배수 압밀특성 연구에 사용한 개량형 수평배수 압밀시험 장치로서, 전체적으로 상부캡과 중앙의 모형 연직배수재 두 부분으로 이루어져 있다. 상부캡에는 압밀과정중에 모형 연직배수재가 관입될 수 있도록 중앙부에 원형의 중공홀이 있고, 모형 연직배수재로 유도된 간극수의 배수를 위하여 별도의 배수라인을 설치하였다.

수평 압밀계수 산정을 위하여 실내 압밀시험과 함께 피에조콘을 이용한 현장 소산시험을 수행하였다. 소산시험 결과는 수평압밀계수 산정과 함께 매립하중에 의해 압밀이 진행되고 있는 해성 점토층의 유효응력 상태를 파악하는데도 유용하게 이용되었다. 시험에 사용된 피에조콘은 선단각 60°, 원추 저면적 10cm², 주면 표면적 150cm²의 스웨덴 GEOTECH사의 장비이다.

4.2 압축성 및 투수성 물질함수

초연약 준설패립지반의 적정 압밀거동 예측을 위해서는 특정 유효응력 수준에서의 압밀특성치이외에 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 등의 압축성 및 투수성 관련 물질함수가 매우 중요한 요소이다.(Stark 등, 2005).

기존 연구결과에 따르면, 초연약 점토의 간극비-유효응력 관계 및 간극비-투수계수 관계는 지수함수 또는 소성지수와 함수비가 포함된 방정식 형태로 표현되었다 (Somogyi 등, 1980; Carrier 등, 1984; Mesri 등,

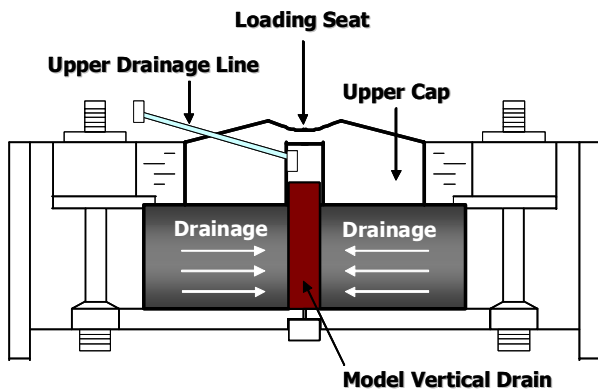


Fig. 4 Modified oedometer test equipment with horizontal drainage(Jeon, 2009)

1985; Stark 등, 2005). Stark 등(2005)은 준설패립 점토에 대한 시험결과를 이용하여 압밀 특성치를 쉽게 산정하기 위한 경험적 관계식을 식 (1) 및 식 (2)와 같이 제시하였는데, 40<PI<70인 경우의 시험결과가 이용되었다.

$$\sigma' (kPa) = s_{coe} \times 10^{e - \frac{(\alpha_s PI + \beta_s)}{\eta_s}} \quad (1)$$

$$k (m/s) = p_{coe} \times 10^{e - \frac{(\alpha_p PI + \beta_p)}{\eta_p}} \quad (2)$$

여기서, σ' : 유효응력

k : 투수계수

e : 간극비

$s_{coe}, \alpha_s, \beta_s$: 유효응력-간극비 관계식 상수

$p_{coe}, \alpha_p, \beta_p$: 투수계수-간극비 관계식 상수

본 연구대상 지역의 고압축성 해성점토에 대한 표준압밀시험을 통해 산정된 압축지수 및 재압축지수는 Fig. 5와 같다. 상부 준설패립층의 압축지수는 평균적으로 1.25의 값을 나타내고 있으며, 하부 원지반 점토층의 압축지수는 1.3~1.8의 범위에 분포하고 있다. 준설패립층과 원지반 점토층의 경계부 및 원지반 점토층의 하단부는 시공과정 및 배수층의 모래 혼입으로 인해 압축지수 값이 부분적으

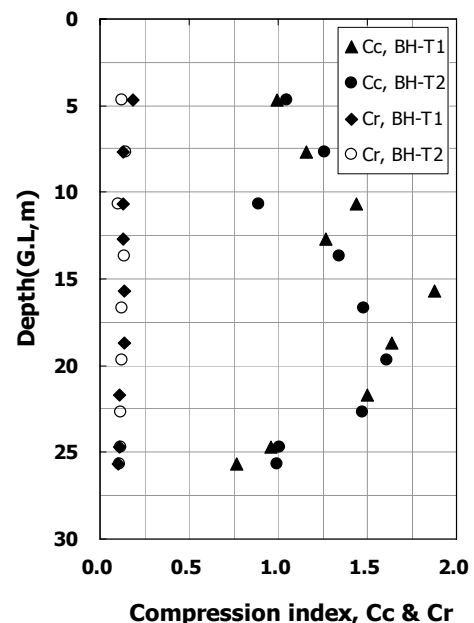


Fig. 5 Compression and recompression index

로 감소하는 경향을 보이고 있다. 반면, 재압축지수의 경우는 점토층에 관계없이 0.3부근의 일정한 값을 나타내고 있다.

수평배수 조건에서의 압밀특성치 산정은 실내시험 및 현장시험을 통해 모두 가능하다. 피에조콘 소산시험 등의 현장시험은 특정 시점에서의 지반내 다양한 심도에 대한 수평 압밀계수 산정에는 유용하게 이용될 수 있으나, 다양한 유효응력별 수평 압밀계수 또는 간극비에 대한 관계식 산정에는 이용되기 어렵다.

Fig. 6은 본 연구의 실내시험에서 산정된 간극비-투수계수 분포를 나타낸 것으로서, 수직방향 투수계수는 표준 압밀시험을 통해 산정하였으며, 수평방향 투수계수는 개량형 수평배수 압밀시험을 통해 산정하였다. Table 1은

Table 1 Parameters for void ratio-effective stress and void ratio-permeability relationship

Properties	Parameter	Stark et al. (2005)	Marine clay at southern Korea(Jeon, 2009)	
			Vertical	Horizontal
Effective stress (kPa)	s_{coe}	4.79E-05	1.20E-05	
	α_s	0.113	0.09	
	β_s	5.09	3.0	
	η_s	-1.811	-1.1	
Permeability (cm/s)	P_{coe}	3.53E-05	4.10E-05	3.75E-05
	α_p	0.12	0.09	0.06
	β_p	3.80	0.34	1.22
	η_p	2.126	1.31	0.76

실내시험 결과를 Stark 등(2005)의 관계식 형태로 표현했을 때의 계수값을 나타낸 것으로서, 간극비-유효응력, 간극비-투수계수간의 경험적 관계식은 모두 소성지수의 함수로 표현됨을 확인할 수 있었다.

방향별 투수계수비(k_h/k_v)를 살펴보면, 간극비가 3.5에서 2.0으로 감소함에 따라 투수계수비는 1.4에서 9.4까지 증가하였다. 본 연구에 사용된 불교란 시료중, 간극비가 매우 큰 시료는 준설패립에 의해 형성된 상부지반에서 채취된 시료로서, 이 경우 방향별 투수계수에는 큰 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 반면, 유효응력이 상대적으로 큰 하부 원지반 점토층에서는 간극비가 작아질수록 방향별 투수계수비가 크게 증가함을 알 수 있다

4.3 방향별 압밀계수 및 콘 소산시험

준설패립층과 원지반 점토층의 수직 압밀계수는 기존의 표준압밀시험을 통해 산정되었으며, 수평 압밀계수는 개량형 압밀시험을 통해 산정되었다. 상부의 준설패립층은 자중압밀만이 종료된 상태로서 원지반의 유효응력이 매우 작으며, 이로 인해 유효응력이 증가됨에 따라 완만하고 일정하게 압밀계수가 소폭 증가하는 경향을 보이고 있다. 지표하 10.5m 이하의 원지반 점토층에서는, 과압밀영역에서 일정한 값을 보이던 압밀계수가 정규압밀 영역으로 가면서 급격히 감소된 후 다시 완만하고 일정하거나, 소폭 증가하는 경향을 보였는데, 이러한 경향은 압밀계수 산정에 있어 유효응력 증가에 따른 투수계수 감소와 체적변화계수 감소가 복합적으로 작용하는 이유에 기인

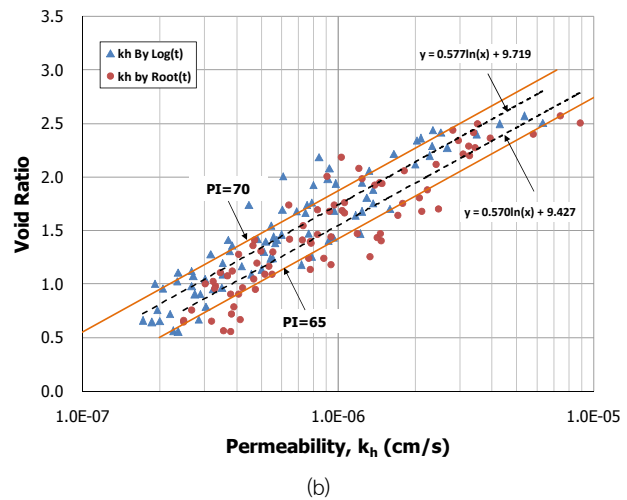
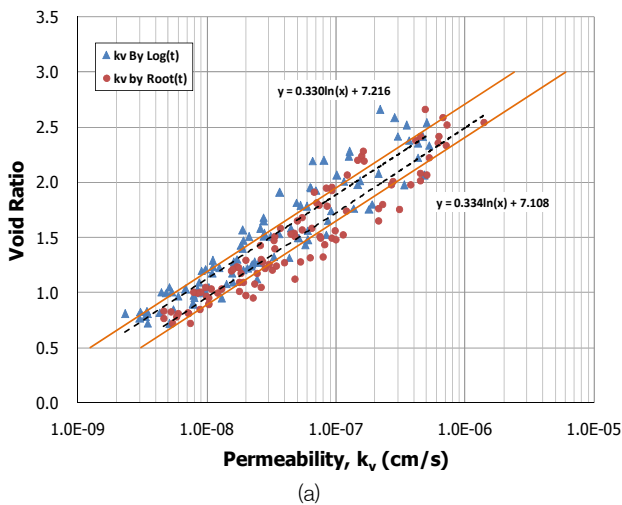


Fig. 6 Void ratio-permeability relationship for vertical and horizontal direction(Jeon, 2009)

한다.

피에조콘 소산시험에 의해 현장의 심도별 수평 압밀계수를 산정하였다. 소산시험 결과를 분석하는데 있어, 임의 시간에서의 간극수압(u_t) 및 소산초기의 최대 간극수압(u_{max})과 관입전 현장 간극수압(u_o)을 이용하여 정규화된 간극수압(U_n)을 이용하였다.

단, 본 연구대상 지역은 매립하중 및 상부 성토하중으로 인해 큰 소산시험 초기부터 일정 크기의 과잉간극수압이 작용하고 있다. 이러한 조건에서는 식 (3)의 초기 간극수압(u_o)에 단순히 정수압을 고려하는 것이 아닌, 큰 소산시험 진행 직전의 상부 매립하중 및 추가 성토하중 효과가 반영된 현장 초기 간극수압을 적용하여야 한다. 이 초기 간극수압의 산정을 위하여, 본 연구에서는 큰 관입에 의한 과잉간극수압이 대부분 소산될 때까지 소산시험을 장시간 진행하였으며, 최종 소산후의 간극수압을 측정하여 이를 시험 초기 대상지점에 작용하는 초기 간극수압(u_o)으로 적용 하였다.

$$U_n = \frac{u_t - u_o}{u_{max} - u_o} \quad (3)$$

Teh and Houslby(1988, 1991)는 흙의 강성계수(I_r)를 고려한 간극수압 소산의 수치해석적 결과에 의하여 무차원 시간계수와 수평 압밀계수의 관계식은 식 (4)와 같이 제시되었다.

$$T^* = \frac{c_h \cdot t}{r_0^2 \sqrt{I_r}} \quad (4)$$

Robertson등(1992)은 다양한 피에조콘 소산시험 결과들을 분석한 결과, Teh and Houslby(1988) 방법에 의해 산정된 압밀도별 시간계수의 해가 가장 신뢰성이 있다는 연구결과를 발표하였다. 최종적인 수평배수 조건에서의 압밀도별 시간계수에 대한 해를 살펴보면, 압밀도 50%에 대한 시간계수(T^*)는 필터가 콘의 바로 윗부분에 위치할 경우 0.245로 제안되었으며, 본 연구에서는 이를 수평 압밀계수 산정에 이용하였다.

소산시험은 준설 매립층내 지표하 3.0m, 5.0m, 7.0m와 원지반 점토층내 지표하 14.5m, 19.5m, 23.0m의 심도에서 수행되었다.

각 심도별 소산시험을 실시하기에 앞서 피에조콘 간극수압 센서에 대한 검증은 수행하였다. 지표면으로부터 10m까지 지반을 천공하고 케이싱을 설치한 후, 케이싱내에 물을 채웠다. 이 상태에서 케이싱 내부로 피에조콘을 관입시키면서 각 심도별 간극수압을 측정하였으며, 그 값을 심도별 정수압 크기와 비교하였다(Fig. 7).

Fig. 8은 준설 매립층 및 원지반 점토층에서 실시한 소산시험 결과를 나타낸 것으로서, 시간에 따른 정규화 간극수압의 소산과정을 보여주고 있다.

피에조콘 소산시험시 측정되는 간극수압에는 정수압, 압밀진행에 따른 과잉간극수압, 콘 관입에 의한 과잉간극수압이 있을 수 있다. 소산시험에서는 콘 관입에 의해 발생된 초기 과잉간극수압의 시간별 소산정도를 측정하여 해당 지반의 수평 압밀계수를 산정하게 된다.

본 연구 대상지역의 준설 매립층은 매립이 완료된 후 별도의 지반개량 없이 1~2년 자연 방치 되었으므로 함수비가 135%에 달하는 매우 연약한 상태이다. 이러한 조건에서는 Fig. 8(a)에서와 같이 큰 관입에 의한 과잉간극수압이 거의 발생되지 않는 관계로 소산시험에 의한 수평 압밀계수를 산정할 수 없었다.

원지반 점토층도 함수비가 95%에 달하는 매우 연약한 상태이며, 상부의 매립하중에 의해 압밀이 진행되고 있다. 그러므로 피에조콘 소산시험시 측정되는 간극수압에는 정수압 이외에 상당량의 압밀과정중의 과잉간극수압과

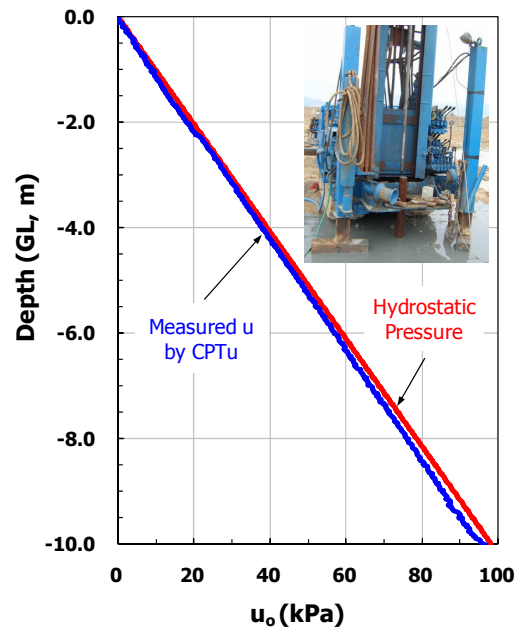


Fig. 7 Verification of pore pressure sensor

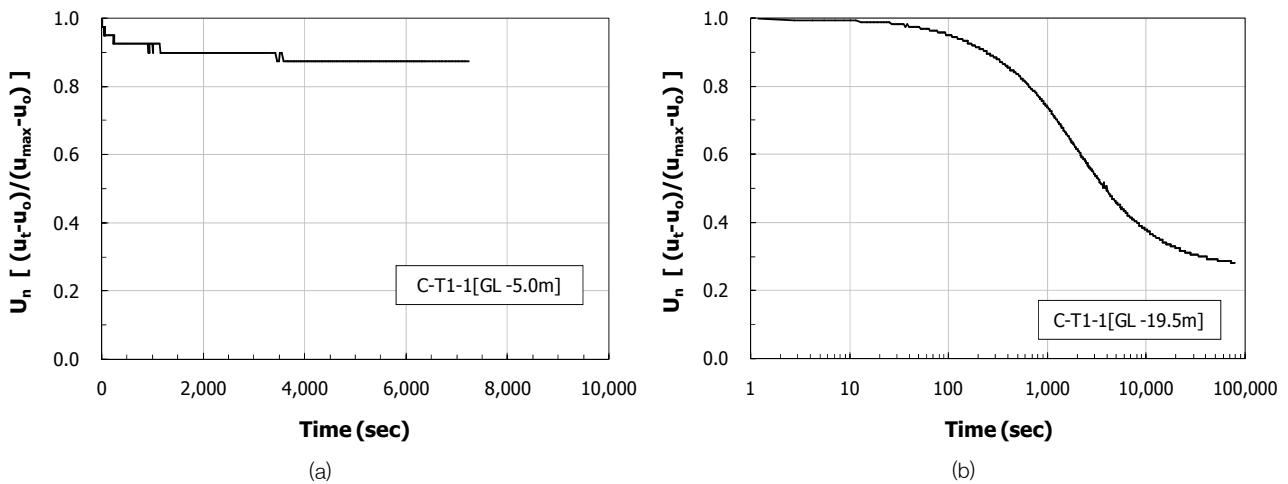


Fig. 8 Normalized dissipation test data of CPTu

콘 관입에 의한 과잉간극수압이 포함되어 있다. Fig. 8(b)은 원지반 점토층에서 콘 관입에 의해 발생한 과잉간극수압의 시간별 소산과정을 정규화된 과잉간극수압으로 표현한 것이다. Teh and Houlsby(1991)의 이론해에 의해 최종적으로 산정된 수평 압밀계수는 $4.6 \times 10^{-3} \sim 8.8 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ 으로 나타났다. 현장 콘 관입시험을 통한 구한 수평 압밀계수는 실내시험에서 구한 값에 비해 대략 1.8~2.5배 크게 나타났다.

5. 지층별 초기응력 상태

5.1 압밀거동에 대한 초기응력 영향 사례

연약지반의 장기 압밀침하 거동을 예측하는데 있어, 압밀침하 속도에 가장 큰 영향을 미치는 특성값은 지반의 압밀계수 및 투수계수 등이며, 압밀침하량에 가장 큰 영향을 미치는 특성값은 초기 간극비, 초기 유효응력, 압축지수, 하중재하에 따른 응력 증가량 등이다.

본 연구대상 지역의 인근에서는 본 지역과 동일한 방식으로 원지반 점토층위에 준설매립에 의해 연약지반을 형성하고 전체 연약지반에 대한 지반개량 공사를 수행하였다. 그러나 지반개량 공사중 설계단계에서 예측한 압밀침하량을 크게 상회하는 침하가 발생하였으며, 지반침하에 대한 현장 계측결과를 분석하고, 실내 및 현장시험을 통해 이러한 과다 지반침하의 원인 및 향후 압밀침하거동 예측 등에 대한 연구가 수행되었다(Jeon 등, 2008). 하부의 원지반 점토층과 상부의 준설 매립층은 모두 대략 10m 두께로 분포하고 있으며, 상부의 준설 매립층은 매립이 완료

된 후 2~3년간 자연상태로 방치되었으며, 이로 인해 하부의 원지반 점토층은 압밀진행중인 상태에 있었다.

그러나, 설계단계에서는 원지반 점토층의 압밀진행중인 상태를 고려하지 않은 채, 준설 매립층과 원지반 점토층의 단위중량만을 이용하여 초기 유효응력을 산정하였으며, 이는 원지반 점토층의 실제 초기 유효응력을 매우 과다 평가하는 결과를 초래하였고, 이로 인해 최종 압밀 침하량은 실제에 비해 매우 작게 예측되었다. 상부의 성토고가 2.35m인 구간의 경우, 설계단계에서 예측한 최종 침하량은 3.4m인데 반해, 재분석된 최종 침하량은 4.6m로 나타났으며, 이는 지반개량 과정중의 현장 계측결과를 통해 확인되었다.

본 연구대상 인근 지역의 과거 사례에서 알 수 있듯이, 신뢰성 있는 초기 유효응력의 산정은 최종적인 압밀침하량 및 시간별 압밀침하거동을 예측하는데 매우 중요하다.

5.2 심도별 초기응력 측정 및 분석

압밀이 진행되고 있는 상부의 준설 매립층 및 하부의 원지반 점토층에 대하여, 지반개량공법이 적용되는 시점에서의 초기 유효응력을 산정하기 위해서는, 지층내의 각 심도별 간극수압 측정이 가장 중요하다. 본 연구대상 지역의 경우는 이 시점에서 상부에 1.0m 높이의 성토시공이 수행 되었으므로, 콘 관입 과정에서 측정되는 총 간극수압 u_{bt} 는 식 (5)와 같이 표현되며, 여기에는 정수압 u_0 및 매립하중에 의해 발생한 과잉간극수압 u_1 , 상부 성토에 의한 과잉간극수압 u_2 , 콘 관입 효과에 의해 발생한

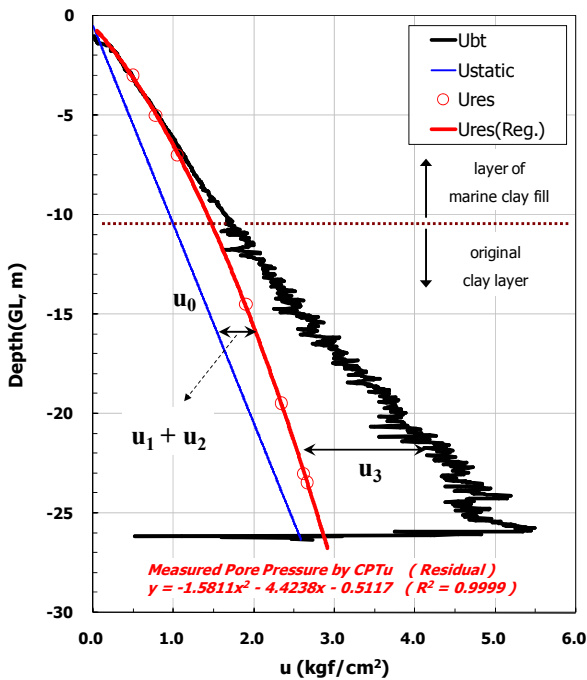


Fig. 9 Assessment of pore water pressure by CPTu

과잉간극수압 u_3 가 모두 포함되어 있다. 이 중 큰 관입효과에 의해 발생하는 과잉간극수압 u_3 는 20~32시간 (hour) 정도 경과되면서 모두 소산되었다.

$$u_{bt} = u_0 + u_1 + u_2 + u_3 \quad (5)$$

Fig. 9는 큰 관입 및 소산시험에 의한 측정된 심도별 간극수압과 분석 결과를 나타내고 있다.

큰 관입 과정에서 측정되는 총 간극수압 u_{bt} 는 준설 매립층을 지나 원지반 점토층에서 기울기가 증가하는 분포 형태를 나타내고 있다. 이는 원지반 점토층이 준설 매립층에 비해 상대적으로 초기 간극비가 작고, 이로 인해 큰 관입 효과에 의한 과잉간극수압이 크게 발생하였기 때문이라고 판단된다. 이러한 간극수압의 기울기 변화를 통해 지층의 변화를 파악할 수 있다. 본 연구에서는 총 7개 심도에서, 큰 관입효과에 의해 발생한 과잉간극수압이 모두 소산될 때까지 기다린 후의 잔류 간극수압 u_{res} 를 측정하였다. 잔류 간극수압에는 정수압 u_0 및 매립하중에 의해 발생한 과잉간극수압 u_1 , 상부 성토에 의한 과잉간극수압 u_2 가 모두 포함되어 있다.

각 심도별 잔류 간극수압은 Fig. 9에서 제시된 바와 같이 다항식 형태의 회귀 방정식으로 표현되었다. 이 방정

식은 지층조건 및 하중조건에 따라 달라지게 되지만, 이를 통해 큰 관입효과가 제거된 잔류 간극수압의 심도별 상관성 검증 및 최종적인 각 심도별 간극수압 산정이 가능하였다. u_{res} 에서 정수압을 제거하면 각 심도별 매립하중에 의해 발생한 과잉간극수압과 상부 성토에 의한 과잉간극수압의 합을 산정할 수 있다. 결과에서 알 수 있듯이, 상부의 준설 매립층은 자중압밀 효과로 인해 심도가 증가함에 따라 과잉간극수압이 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데 반해, 원지반 점토층은 하부로 갈수록 과잉간극수압이 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 배수층과 접해있는 하부 지층에서 매립하중에 의한 압밀이 더욱 빠르게 진행되었기 때문이라고 판단된다.

6. 결론

준설매립에 의한 초연약지반의 적정 압밀침하 예측을 위해서는 신뢰성 있는 압밀 특성치 및 유효응력 단계별 압밀 물질함수 산정과 각 지층별 과거 응력이력 등을 고려한 초기응력 산정 등이 매우 중요하다. 본 연구에서는 준설매립후에 연직배수공법을 적용하여 지반개량을 수행하는 대규모 산업단지 조성 프로젝트를 대상으로, 한국 남해안 해성점토의 물리적 특성치, 방향별 압밀 특성치 및 유효응력 단계별 압밀 물질함수, 지반개량 착수시점에서의 지층별 초기응력 등을 산정하였다. 이 지역은 10~15m 두께를 갖는 원지반 점토층 위에 대략 10m 두께의 해성점토로 매립된 준설 매립층이 형성되어 있으며, 준설매립 완료 후 1~2년 기간이 경과된 시점에서 지반개량공법을 적용되었으므로, 응력이력상 압밀진행 조건에 해당하는 연약지반이다. 원지반 점토층과 준설 매립층은 기본적인 해성점토의 종류가 유사한 관계로, 입도분포, 비중, 연경도 등의 물리적 특성은 비슷한 결과를 보였으나, 초기 함수비 및 초기 간극비, 초기 응력상태 등은 매우 큰 차이를 보이고 있다. 이는 두 지층이 비록 같은 종류의 해성점토로 구성되어있다 해도 시간경과에 따른 압밀거동에 매우 큰 차이를 보이는 다층형태의 연약지반임을 알 수 있으며, 이는 압밀거동 예측시 중요한 영향요소로 작용한다.

기존 표준압밀시험 이외에 별도로 고안된 수평배수 조건의 개량형 압밀시험을 실시하여 간극비-유효응력, 간극비-투수계수 등의 압밀 물질함수를 분석하였다. 압밀 물질함수는 소성지수의 함수형태로 표현되었으며, 그 계

수값은 기존 연구결과(Stark, 2005)와 달리 Table 1과 같이 나타났다. 압축성과 투수성의 압밀 물질함수를 소성 지수의 함수형태로 표현함으로써 제한된 수의 시험결과를 이용하는 조건에서도 기존 방법에 비해 높은 신뢰성을 갖는 물질함수 산정이 가능할 것으로 판단된다.

압밀관련 응력이력이 다른 두 지층의 초기응력을 산정 하는데 있어, 기존의 단위중량에 의한 단순 계산방식이 아닌, 피에조콘 관입 및 소산시험 결과를 이용한 방법을 고안하여 본 연구에 적용하였다. 본 연구에서의 분석방법을 통해, 초기부터 일정 크기의 과잉간극수압이 작용하고 있는 경우, 총 간극수압에서의 각 하중요인별 간극수압 선별 및 압밀진행중 조건에서의 침도별 초기 간극수압과 유효응력의 효과적 산정 등이 가능함을 알 수 있었다.

본 연구대상 지역과 같이 소산시험 초기부터 일정 크기의 과잉간극수압이 작용하고 있는 경우는 정규화 소산곡선을 작성하는데 있어, 단순히 정수압을 고려하는 것이 아닌, 콘 소산시험 진행 직전의 현장 초기 간극수압을 적용하여야 하며, 이를 위해서는 충분한 소산시간 확보를 통한 잔류 간극수압 산정이 필수적임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 인덕대학 교내학술연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 전제성, "개량형 수평배수 압밀시험 장치에 의한 압밀특성 평가", 한국지반환경공학회 논문집, 제10권 제7호, 2009, pp.143-150.
2. Bell, F. G., "The geotechnical properties of some till deposits occurring along the coastal areas of eastern England", Engineering Geology, Vol. 63, 2002, pp.49-68.
3. Carrier, W. D. and Beckman, J. F., "Correlation between index test and properties of remoulded clay", Geotechnique, Vol. 34, No. 2, 1984, pp.211-228.
4. Choa, V., Bo, M. W. and Chu, J., "Soil improvement

- works for Changi east reclamation project", Ground Improvement, Vol. 5, No. 4, 2001, pp.141-153.
5. Chu, J., Bo, M. W., Chang, F. and Choa, V., "Consolidation and Permeability Properties of Singapore Marine Clay", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, No. 9, 2002, pp.724-732.
6. Egashira, K., Yamagata, N., Takada, T., Katagiri, M., Yoshifuku, T. and Murakawa, S., "Settlement analysis and observational method for the reclamation with dredged clay - a case record at New-Kitakyushu Airport", Soft Ground Engineering in Coastal Areas, Swetz & Zeitlinger, 2002, pp.119-126.
7. Houlsby, G. T. and The, C. I., "Analysis of the piezocone in clay", Proceeding of the International Symposium on Penetration Testing, ISOPT-1, Orlando, Balkema Pub., Rotterdam. 1988, pp.2777-83.
8. Jeon, J. S, Koo, J. K. and Oh, J. T., "Prediction and assessment on consolidation settlement for soft ground by hydraulic fill", Journal of the KGS, Vol. 24, No. 9, 2008, pp.33-40.
9. Mesri, G. and Choi, Y. K., "Settlement Analysis of Embankments on Soft Clays. ASCE, Journal of Geotechnical Engineering Division", Vol. 111, No. 4, 1985, pp.441-464.
10. Robertson, P. K., Sully, J. P., Woeller, D. J., Lunnes, T., Powell, J. J. M. and Gillespie, D. G., Estimating Coefficient of Consolidation with Radial Drainage. Canadian Geotechnical Journal, 29, 1992, 539-550.
11. Stark, T. D., Choi, H. and Schroeder, P. R., "Settlement of dredged and contaminated material placement areas. II : Primary consolidation, secondary compression, and desiccation of dredged fill input parameters", Journal of Waterway, port, coastal, and ocean engineering, Vol. 131, No. 2, 2005, pp.52-61.
12. Somoghi, F., "Large strain consolidation of fine-grained slurries", Presented at canada society for civil engineering annul Conference, Winnipeg, Manitoba, Canada. 1980.
13. Teh, C. I. and Houlsby, G. T., "An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay", Geotechnique, Vol. 41, No. 1, 1991, pp.17-34.

(접수일자 : 2011년 1월 5일)
 (수정일자 : 2011년 5월 18일)
 (심사완료일자 : 2011년 5월 30일)

요 지

준설매립후 연직배수공법을 적용하여 지반개량을 수행하는 대규모 국가산업단지 조성 프로젝트를 대상으로, 각 심도별 채취된 불교란 시료를 이용하여 물리측 특성 및 압밀 특성 등을 분석하기 위한 실내시험을 실시하였으며, 수평 압밀계수 및 현장 초기 응력 산정을 위한 콘 관입 및 소산시험을 수행하였다. 지층을 구성하고 있는 하부의 원지반 점토층과 상부의 준설 매립층은 유사한 해성점토로 구성되어 있으나, 초기 간극비와 초기 함수비, 초기 응력상태, 방향별 투수성과 압축성 등의 압밀특성에 있어서는 시간경과에 따른 압밀거동에 있어 매우 큰 차이를 보이는 다층 지반의 특성을 띠고 있다. 압밀과 관련된 응력이력이 다른 두 지층의 초기응력을 산정하기 위하여 콘 관입시험 및 소산시험시의 간극수압 측정결과를 분석하였으며, 이를 통해 압밀이 진행중인 하부 원지반 점토층에서의 매립하중과 상부 성도에 의한 각 심도별 과잉간극수압 분포 및 이를 통한 초기응력을 산정할 수 있었다.

핵심 용어 : 압밀, 해성점토, 압밀특성치, 물질함수, 원지반 초기응력
