

개량형 수평배수 압밀시험 장치에 의한 압밀특성 평가

Assessment of Consolidation Properties Using Modified Oedometer for Radial Drainage Condition

전 제 성[†]

Jeon, Jesung

ABSTRACT : Material functions about effective stress, permeability, coefficient of consolidation and coefficient of volume change has important role to predict consolidation velocity and settlement of soft ground. Modified oedometer for radial drainage is adapted to find out material functions on laboratory tests. Undisturbed sample for laboratory tests were taken from construction sites of industrial complexes on southern coastal area which consists of upper dredged fill and lower original clay layer. For different drainage condition in consolidation process void ratio, effective stress, permeability, coefficient of consolidation and coefficient of volume change has been assessed with results of existing standard oedometer tests. It is worthwhile to note that consolidation material functions could be expressed as regression equation by Stark (2005), heterogeneity for permeability could be assessed from these relationships.

Keywords : Consolidation Analysis, Material function, Permeability, Heterogeneity

요 지 : 연약지반의 적정 압밀속도 및 압밀침하량 예측에 있어 유효응력, 투수계수, 압밀계수, 체적변화계수 등의 물질함수는 가장 중요한 요소로 작용한다. 본 연구에서는 수평배수 조건에서의 압밀 물질함수 산정을 위한 개량형 수평배수 압밀시험 장치를 고안하고, 이를 이용하여 고함수비 해성점토에 대한 압밀시험을 실시하였다. 시험에 이용된 시료는 상부 준설매립 지반과 하부 원지반점토로 구성된 남해안 산업단지 조성 현장에서 채취하였다. 기존의 표준압밀시험을 동시에 실시하였으며, 이 결과를 이용하여 배수조건별 간극비, 유효응력, 투수계수, 압밀계수, 체적변화계수 등을 분석하였다. 압밀 물질함수는 Stark(2005)이 제안한 소성지수 포함의 회귀분석 방정식 형태로 표현되었으며, 이를 통해 투수성에 대한 이방성 특성을 산정할 수 있었다.

주요어 : 압밀해석, 물질함수, 투수성, 이방성

1. 서 론

수평배수 조건에 대한 압밀계수, 응력-변형 관계, 체적변화계수 등의 수평 압밀특성은 연직배수공법이 적용된 연약지반의 설계 및 시공관리시 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 즉, 연직배수공법에 의한 지반개량시 압밀속도는 수평배수 조건에 의해 좌우되며, 대상지반의 적정 수평압밀 특성값을 산정하는 것은 최종 설계 및 시공관리의 정확성을 높이는 데 가장 중요한 요소라 할 수 있다. 수평배수 압밀특성의 산정은 실내시험 및 현장시험을 통해 가능하며, 콘관입 및 소산시험(Robertson 등, 1992; Arulrajah 등, 2007) 등의 현장시험은 특정 시점에서의 지반조건에 대한 수평 압밀계수 산정에는 유용하게 이용될 수 있으나, 수평 압밀계수에 대한 다양한 유효응력 단계별 물질함수 산정 등에는 이용될 수 없다.

수평배수 압밀조건에 대한 압밀특성치 산정에 이용되는 실내시험으로는 기존 수직배수 조건의 표준압밀시험 결과에

방향별 압밀계수비에 관한 경험치를 적용하는 방법(Bergado 등, 1990)과, 실제 압밀과정 중 수평배수 조건을 구현하여 수평 압밀계수 등 압밀특성을 평가하는 시험 등을 들 수 있다. 전자의 경우는 다양한 토질특성과 응력조건을 갖는 대상현장에 일반적 경험치를 적용함으로써 압밀거동을 예측하는데 큰 오류를 발생시킬 수 있다. 가장 일반적으로 이용되는 수평배수 조건에 대한 압밀시험으로는 로우셀 시험(Rowe 등, 1966; Head, 1986)을 들 수 있으며, Seah 등(2004)은 기존 일정 변형률 압밀시험기에 수평배수를 위한 배수재를 시료 중앙부에 설치하여 수평 압밀계수를 산정하였다. 이러한 수평배수 조건을 고려한 압밀시험은 기존 수직배수 조건의 표준압밀시험에 비해 시험과정과 결과분석이 복잡하며 시험자의 이론적 이해도와 기술적 숙련도에 따라 그 결과에 큰 차이가 발생하는 것도 사실이다.

본 연구에서는 기존 수직배수 조건에 대한 표준압밀시험기를 개량한 수평배수 압밀시험 장치를 고안하고, 이를 이

[†] 정희원, 인덕대학 건설정보공학과 전임강사(E-mail : jsjeon@induk.ac.kr)

용하여 남해안의 고함수비 해성 점토지반의 불교란 시료에 대한 수평배수 압밀시험을 실시하였으며, 이를 통해 간극비-유효응력, 간극비-투수계수에 대한 물질함수 및 유효응력 단계별 수평 압밀계수와 체적변화계수 등을 분석하였다.

2. 개량형 수평배수 압밀시험 장치

2.1 시험장치 및 방법

본 연구에서는 수평배수 조건에서의 압축특성 및 투수특성을 파악하기 위하여 기존의 표준압밀시험기를 개량한 수평배수 압밀시험 장치를 제작, 압밀시험을 수행하였다.

이 시험장치는 압밀셀 및 하중재하 장치, 시험방법 등에 있어 기존 표준압밀시험과 동일한 관계로 로우셀 시험 등에 비해 시험비용이 저렴하고, 시험방법이 간편하며 유효응력 단계별 압밀 물질함수의 신뢰성이 우수한 특징이 있다.

고안된 장치의 압밀셀은 기존 표준압밀시험기와 동일한 크기이며, 그림 1에서와 같이, 시험장치는 전체적으로 상부캡과 시료 중앙부로의 수평배수를 유도하기 모형 배수재의 두 부분으로 이루어져 있다.

상부캡은 압밀중 모형 배수재의 관입을 유도할 수 있도록 중앙부에 원형의 홈이 있고, 모형 배수재로 유도된 간극수에 의한 압력생성을 방지하기 위하여 별도의 배수라인을 설치하였다. 모형배수재는 다공질 재료로 제작하였으며, 7.0mm, 10.0mm, 12.0mm의 다양한 직경 크기로 제작하였다. 한편, 모형 배수재의 설치과정에서 발생할 수 있는 시료교란을 최소화하기 위하여 끝부분이 얇은 스테인레스 재질의 커팅링을 제작하였다.

그림 2는 개량형 수평배수 압밀시험 장치와 시험과정을 나타내고 있다. 시험전 모형 배수재 타입을 위한 천공용 커팅링 및 상하부 하중판, 상부캡 등을 준비하게 되는데, 모형 배수재의 크기에 따라 영향원과 연직배수재의 직경비가 달

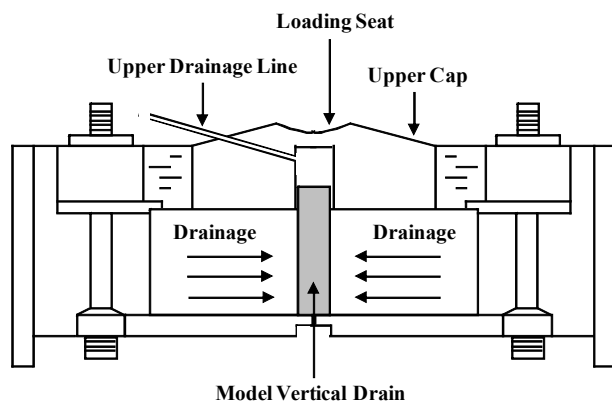


그림 1. 개량형 수평배수 압밀시험 장치

라지게 되며, 이는 압밀해석 결과분석시 직경비에 따른 시간계수 산정에 적용된다.

한편, 기존 표준압밀시험에서는 시료 상하부에 수직배수를 위한 다공판을 설치하는데 반해, 본 시험장치에서는 수평배수만을 유도하기 위하여 상하부에 불투수 하중판을 설치하였다. 압밀링내에 시료를 채취한 후 커팅링을 삽입하여 시료 중앙부에 원형의 중공을 형성하게 된다. 커팅링을 시료내로 삽입하는 과정에서 커팅링의 수직도 유지를 위하여 그림에서와 같은 별도의 가이드 프레임을 제작하여 사용하였다. 원형의 중공에 모형 배수재를 타입하고 상부에 다시 하중판 및 상부캡을 설치하게 된다. 하중재하 및 각 하중단계에서의 침하 측정방법은 기존 표준압밀시험과 동일하다.

2.2 결과분석

시험결과를 이용한 수평방향 압밀계수 산정은 Barron(1948)의 등변형 조건에 대한 수평배수 압밀이론을 이용하였다. 임의 압밀도에 대한 시간계수는 시료와 연직배수재의 직경비에 따라 달라지므로, 본 연구에서 수행된 개량형 수평배수 압밀시험에서의 직경비에 대한 이론적 시간계수를 구하고 이를 통하여 수평 압밀계수를 산정하였다. 본 연구에서는 직경 7mm 모형 배수재를 사용했으며, 이에 대한 직경비는 8.57 이다.

3. 실내 및 현장시험

3.1 현장조건 및 시료채취

본 연구에 사용된 시료는 남해안에 위치한 OO지역에서 채취한 불교란 시료로서, 이 지역은 대략 상부 9.5m의 준설매립층과 하부 15.5m의 원지반 연약점토층으로 구성되어 있다. 상부의 준설매립층은 매립 후 대략 4년의 자연 방치기간이 확보되어 있으며, 별도의 표층처리공법은 적용되지 않았다. 현재는 상부에 쇄석 및 산토가 대략 1.5m 성토되어 있는 상태이다.

본 대상지역은 연직배수공법에 의한 연약지반 개량이 계획된 지역으로서, 당초 연약지반 개량에 3년 정도 소요되는 조건으로 설계되었으나, 부지의 조기조성 필요성에 따라 지반개량 기간을 1년에 마무리하는 변경설계가 수행 되었다. 그러므로 정확한 연약지반 압밀침하 거동의 예측은 본 사업 전체의 성패에 매우 중요한 요인으로 작용하며, 이를 위해서는 수평배수 조건하에서의 정확한 압밀특성치 산정이 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 대상부지내 2개소(BH-T1-1, BH-T2-1)를

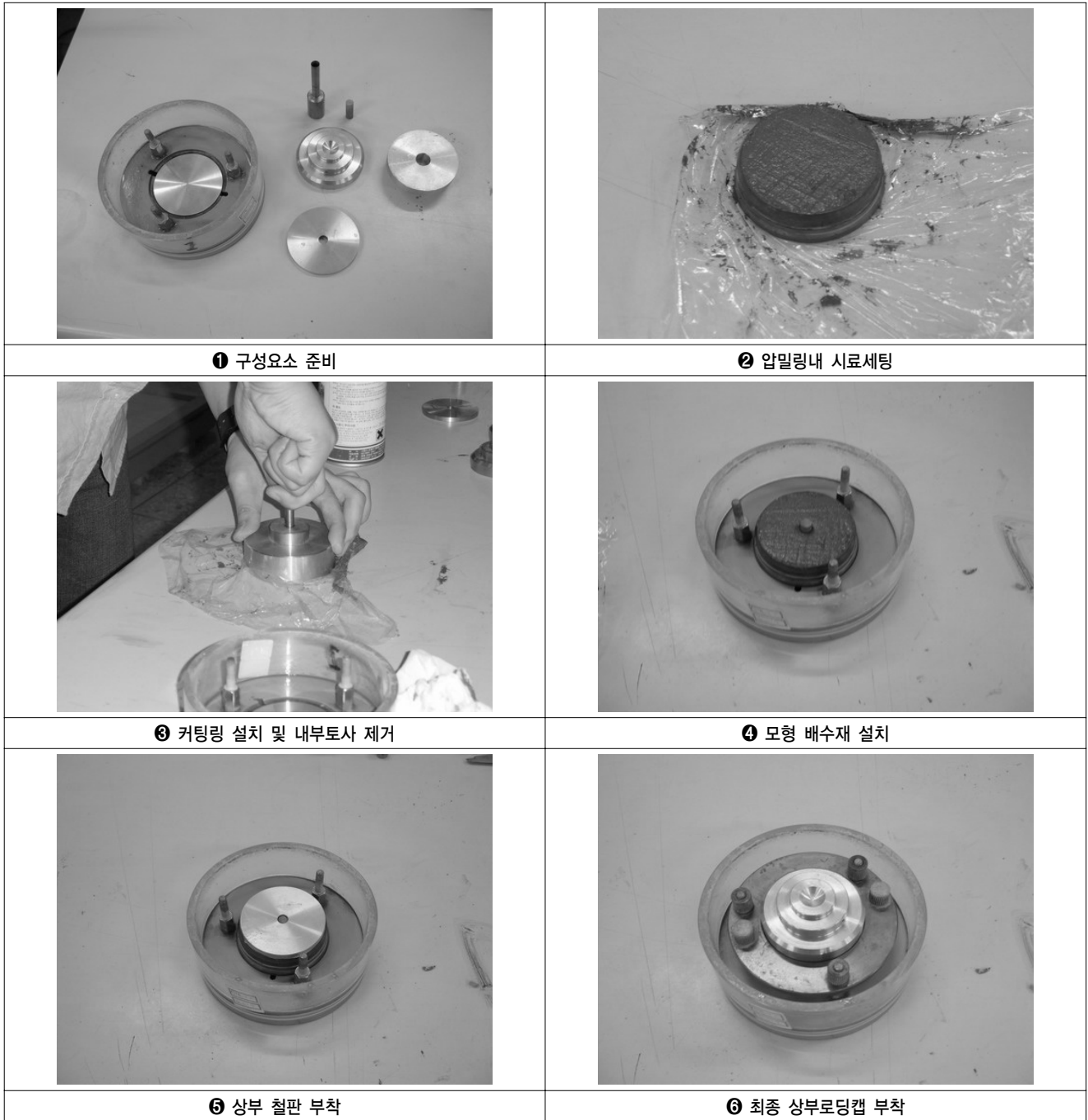


그림 2. 수평배수 압밀시험 과정



그림 3. 연구대상 부지(준설매립후 4년 방치상태)

선정하여 각 개소별 전심도 불교란 시료를 채취하였다. 준설매립층의 경우는 고함수비의 초기 조건으로 인해 샘플러에 스트레이너를 부착하여 시료를 채취하였다.

3.2 물리적 특성

그림 4는 전심도 채취의 불교란 시료에 대한 함수비, 액성 및 소성한계, 입도분포 등의 물리적 특성 시험결과를 나타낸다.

심도별 함수비 분포를 살펴보면, G.L-11.0m 지점을 경계로

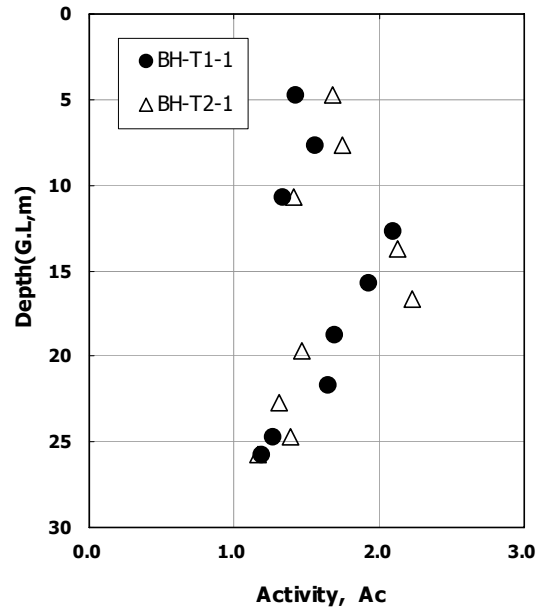
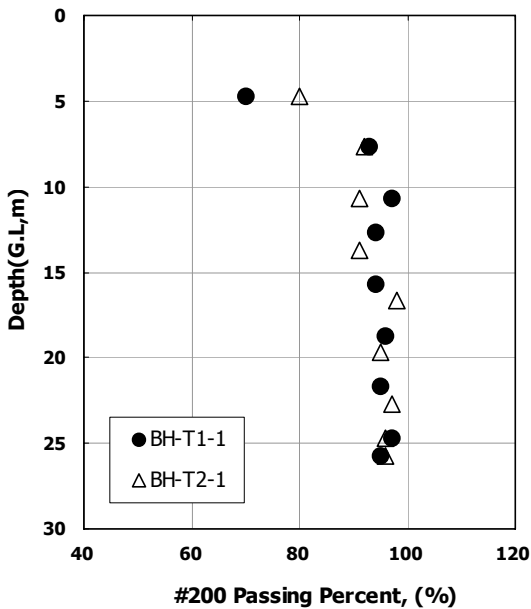
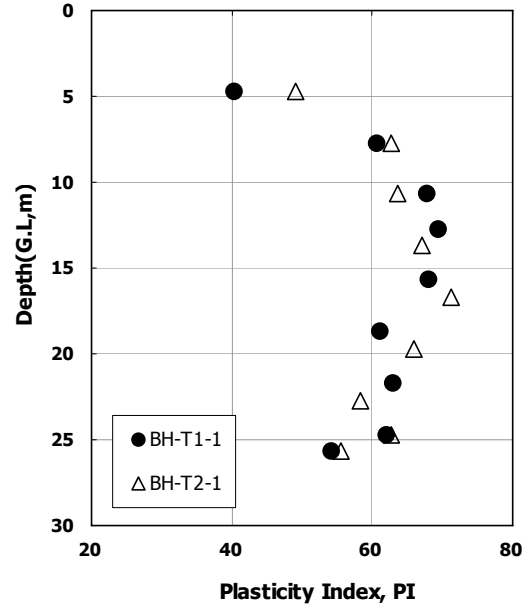
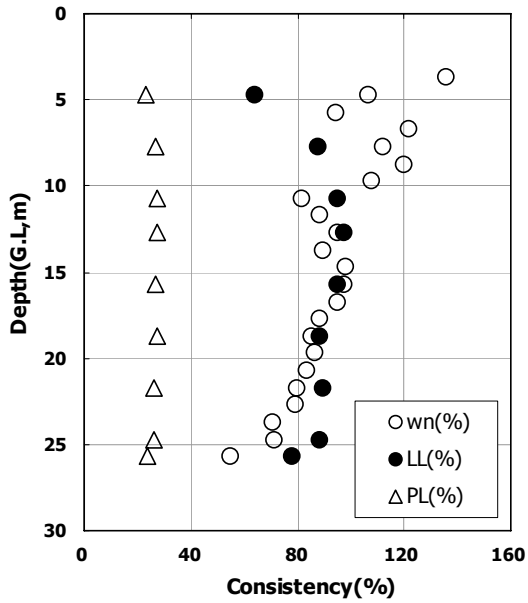


그림 4. 심도별 물리적 특성 분포

준설패립층과 원지반 점토층의 함수비 분포가 확연히 구분되는 것을 확인할 수 있다. 준설패립층의 경우, 대략 110~120%의 고함수비 분포를 보이며 심도에 대해 일정한 경향을 보이고 있다. 원지반 점토층의 경우, 상부(G.L.-11.0m~-13.0m)는 준설패립이전 오랜기간의 표면건조(desiccation)로 인해 극부적으로 낮은 함수비 분포를 보이고 있으나, 심도가 깊어짐에 따라 다시 증가하는 양상을 보이다, -15.0m 지점부터는 심도증가에 따라 일정하게 감소하는 경향을 보이고 있다.

준설패립층은 비록 준설후 방치기간이 4년정도 확보되었지만, 고함수비 슬러리상태의 펌프준설 영향으로 인해 자연함수비가 액성한계를 크게 상회하는 것으로 나타나고 있으며, 큰 압밀침하발생이 예상되었다. 원지반 점토층은 자

연함수비가 액성한계가 비슷한 분포를 보이고 있는 고함수비 조건을 나타내었다.

소성지수 분포를 살펴보면, 준설패립층 상부는 매립토사의 혼입 등으로 인해 상대적으로 40 근방의 낮은 소성지수를 보이고 있으며, 이는 동일개소의 #200통과량에 의해서도 상부 재하토의 혼입이 관찰되는 것을 확인할 수 있었다. #200통과량은 전심도에서 95%를 상회하는 것으로 나타났다. 비중은 2.70~2.72 분포를 보이며, 습윤단위중량은 준설패립층이 1.4(tf/m³), 원지반 점토층이 1.5(tf/m³) 근방의 분포를 나타내고, 활성도(Activity)는 대략 1.5~2.0로 매우 큰 활성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

3.3 수직 및 수평배수 압밀시험

전심도 채취 불교란 시료를 이용하여 배수조건별 실내 압밀시험을 실시하였다. 압밀시험은 기존의 표준압밀시험 18회, 개량형 수평배수 압밀시험 18회를 실시하였다. 개량형 수평배수 압밀시험시의 시료 세팅방법은 그림 2와 같으며, 각 하중단계별 시험방법 및 침하 측정방식은 두 가지 시험이 동일하다. 각 시험결과는 유효응력 단계별 간극비, 투수계수, 체적변화계수, 압밀계수 등으로 분류하여 분석에 활용 하였다.

4. 시험결과 및 분석

기존의 표준압밀시험, 개량형 수평배수 압밀시험(MRDOT) 결과를 이용하여 유효응력별 변형 및 투수특성 등의 압밀 물질함수를 분석하였다. 1차원적 침하에 따른 유효응력과 간극비 관계는 배수조건에 관계없이 유사한 경향을 나타내는 상식적 결과를 확인할 수 있었다. 과거 연구를 통해 연약 점토의 간극비-유효응력 관계는 누송형태 또는 소성지수와

함수비가 포함된 방정식 형태(Carrier 등, 1984)로 제시 되었다.

그림 5는 과거 다양한 준설패립지반의 연약점토를 대상으로한 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 물질함수와 이에 대한 회귀분석 결과를 나타낸다. Stark 등(2005)은 27개 소의 미공병단 준설패립현장을 대상으로 준설패립토에 대한 물리적 특성값 및 압밀 특성값을 조사, 분석하였다. 시험결과는 미공병단산하의 연구개발센터(ERDC)로부터 수집 하였으며, 물질함수 분석에 이용된 실내 압밀시험은 자중압 밀시험(0.96kPa 이하조건) 및 표준압밀시험(0.96kPa 이상조건) 이다. 비유기질 고압축성 준설패립점토(CH)에 대한 유효응력별 간극비, 투수계수 관계는 식 (1) 및 식 (2)와 같이 각각 소성지수의 함수로 표현되었는데, 이때 소성지수 $40 < PI < 70$ 인 경우의 준설패립점토에 대한 시험결과가 이용 되었다.

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

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

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

그림 6은 본 연구에 적용된 개량형 수평배수 압밀시험에 의해 얻어진 간극비-유효응력 물질함수 결과를 나타낸다. 여러 심도에서 채취된 불교란 시료는 각기 선행압밀하중이 상이한 관계로, 각 시료별 $e - \log \sigma'$ 곡선에서 직선부로 나

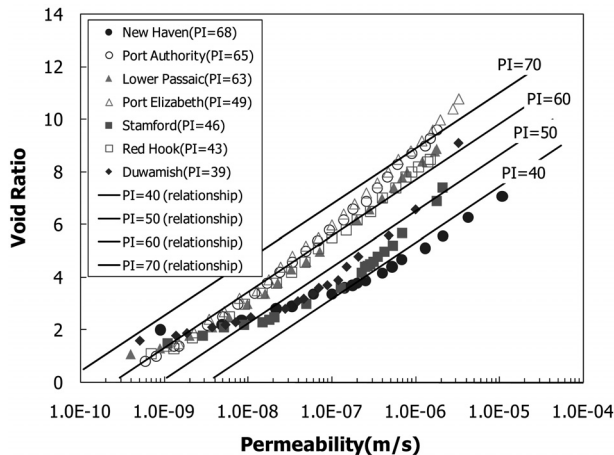
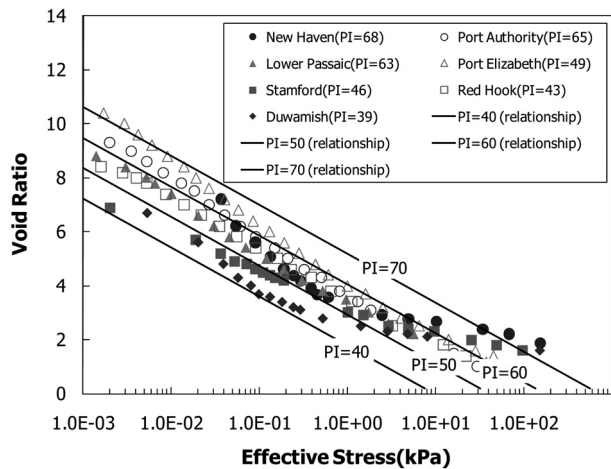


그림 5. 유효응력별 간극비 및 투수계수 관계(Stark et al., 2005)

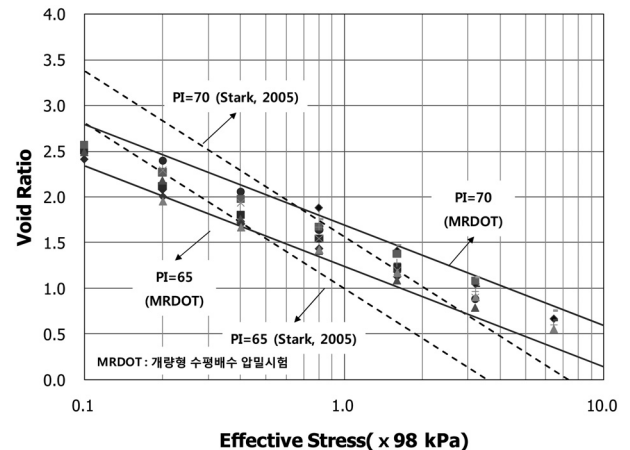


그림 6. 개량형 수평배수 압밀시험에 의한 간극비-유효응력 관계

타나는 구간을 우선 선별하고, 심도와 단위중량을 이용한 개략 선행압밀하중 산정 후 이를 바탕으로 정규압밀 구간의 유효응력별 간극비를 최종적으로 선별하였으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 간극비-유효응력 물질함수는 기존 연구(Stark, 2005)에서와 같이 소성지수(PI)의 함수로 표현됨을 확인 할 수 있었지만, 본 연구에 사용된 남해안 해성점토는 기존 연구(Start 등, 2005)에서 제시한 고압축성 준설패립점토의 물질함수와 다른 경향을 나타내었다.

본 연구에 사용된 준설패립점토는 소성지수가 65~70 범위에 분포하고 있으며, 이 범위에서 식 (1)로 표현되는 간극비-유효응력 물질함수에 대한 회귀분석을 실시한 결과는 표 1과 같다.

그림 7은 간극비에 대한 수직 및 수평방향 투수계수를 나타낸 것으로서, 선행압밀하중을 고려한 결과값 선별은 간극비-유효응력 물질함수 분석과 동일한 방법으로 수행하였다. 수직 및 수평방향 투수계수는 $\log t$, \sqrt{t} 의 두 가지 방법에 의해 산정하였으며, 우선적으로 각 방법에 의한 간극비-투수계수에 대하여 로그함수 형태의 회귀분석을 실시하였는데, 이때는 소성지수를 고려하지 않았다. 여기에 소성지수를 고려하여 식 (2)로 표현되는 간극비-투수계수 물질함수 방정식에 대한 회귀분석을 실시하였다. 수직 및 수평방향 투수계수 모두 소성지수와 간극비의 함수로 표현되는 식 (2)와 같은 물질함수 방정식 형태를 만족하는 것으로 나타났으며, 그 결과는 표 2와 같다.

간극비-유효응력 및 간극비-투수계수에 대한 물질함수는 모두 소성지수에 대한 함수형태로 표현됨을 확인할 수 있으며, 이는 압밀과정에서의 유효응력 단계별 압축성과 투수성을 판단하고, 이에 따른 정확한 압밀거동 예측을 가능하게 하는 주요 입력요소가 된다.

표 1. 간극비-유효응력 회귀분석 방정식 계수

항 목	방정식 계수	Stark et al.(2005)	금회 남해안 해성점토
Effective Stress, σ'	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

표 2. 간극비-투수계수 회귀분석 방정식 계수

항 목	방정식 계수	Stark et al.(2005)	금회 남해안 해성점토	
			k_h	k_v
Permeability k (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	1.32	0.76

한편, 투수계수에 대한 이방성을 분석하고자 다양한 유효응력 단계를 나타내는 각 간극비별 수직, 수평방향 투수계수를 비교하였다. 소성지수가 65인 경우, 간극비 3.0에서의 방향별 투수계수비(k_h/k_v)는 2.6으로 나타났으며, 간극비가 3.5~2.0으로 감소함에 따라 방향별 투수계수비는 1.4~9.4로 증가하였다. 본 연구에 사용된 불교란 시료 중, 간극비가 매우 큰 시료는 준설패립에 의해 형성된 상부지반에서 채취된 시료로서, 이 경우 방향별 투수계수에는 큰 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 반면, 유효응력이 증가하고 간극비가 작아질수록 방향별 투수계수비는 크게 증가함을 알 수 있다. 즉, 투수계수는 유효응력이 클 경우에 비해, 유효응력이 작은 조건에서 그 이방성이 더욱 크게 나타나게 되

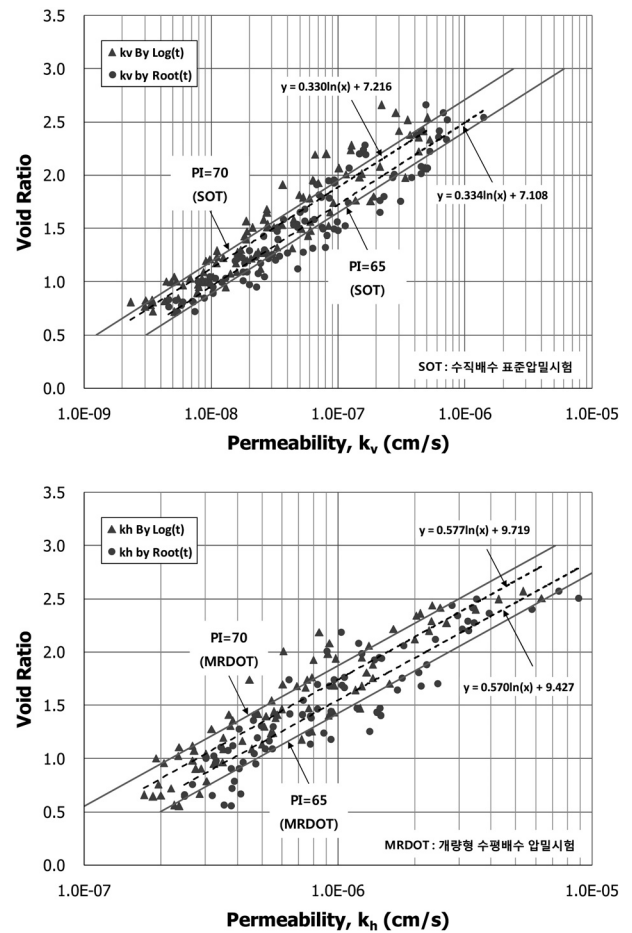


그림 7. 배수조건별 간극비-투수계수 물질함수

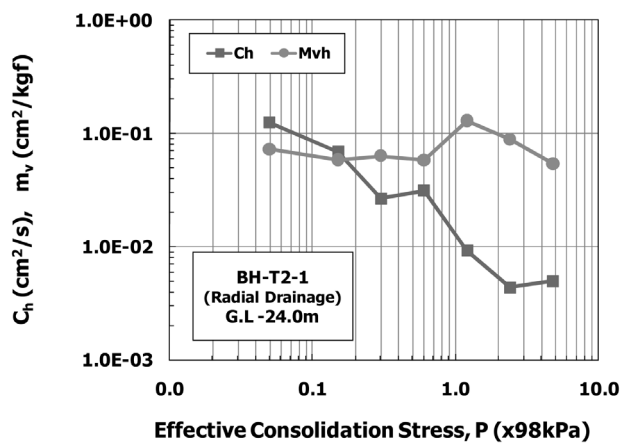
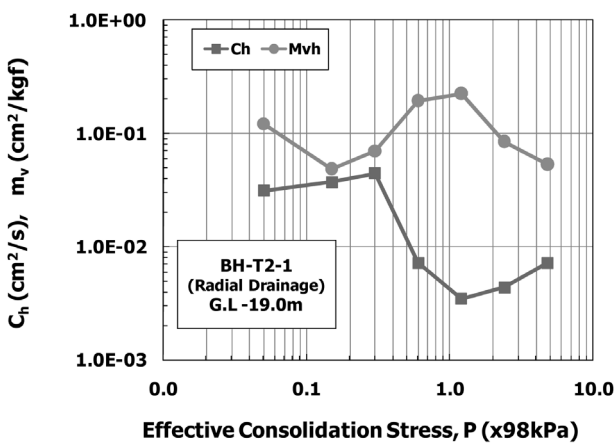
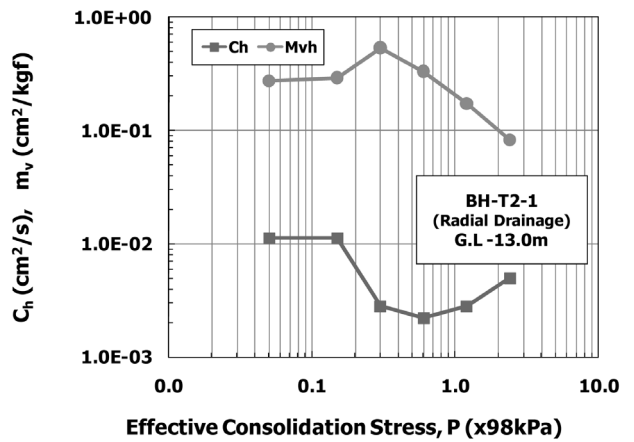
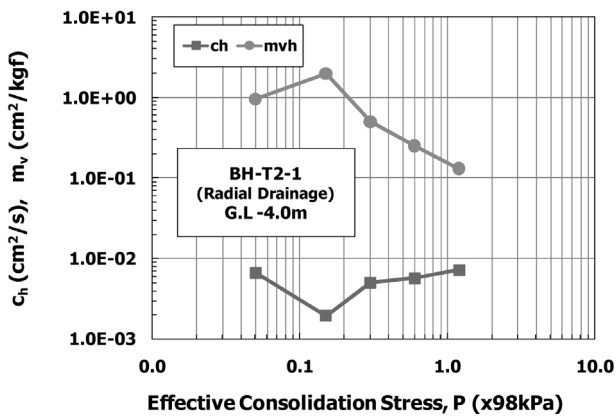
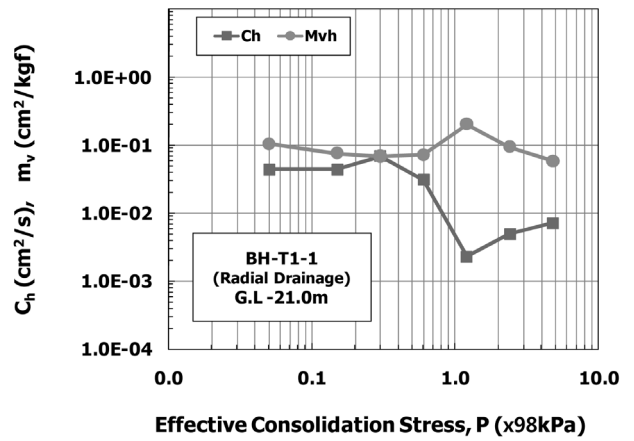
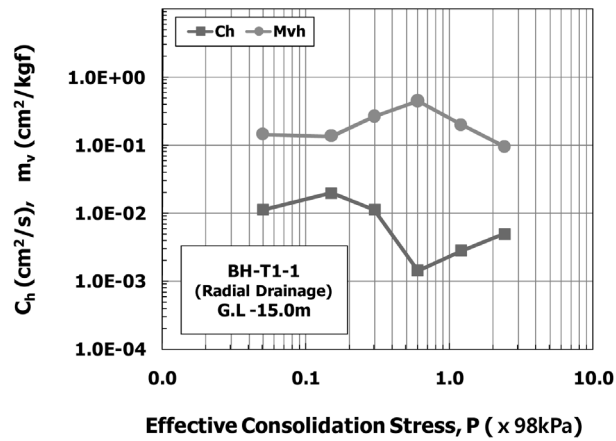
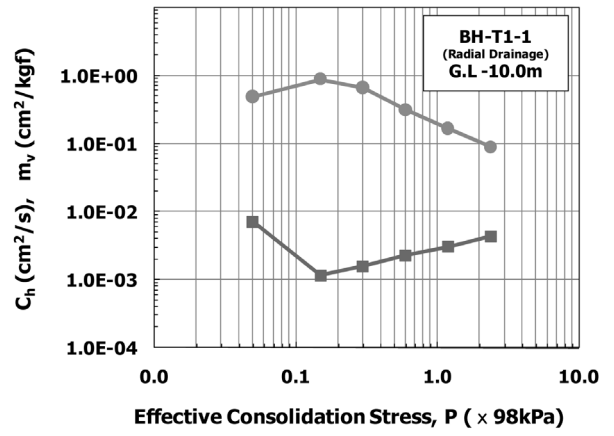
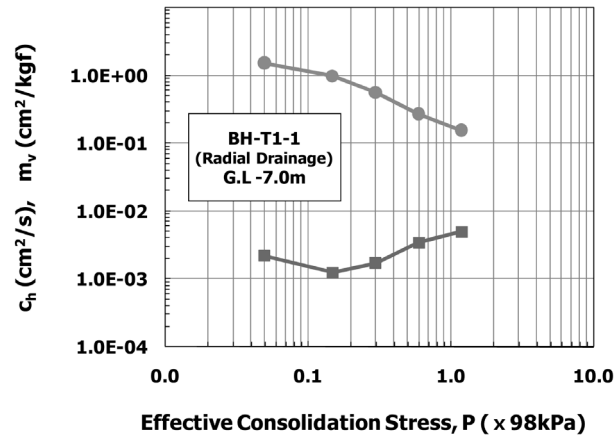


그림 8. 개량형 수평배수 압밀시험에 의한 압밀계수 및 체적변화계수

므로, 유효응력과 간극비의 관계를 고려할 때, 유효응력이 큰 조건 즉, 간극비가 작은 조건에서 이방성이 더욱 커지게 됨을 알 수 있다.

심도별 개량형 수평배수 압밀시험에 의한 유효응력 단계별 수평방향 압밀계수 및 체적변화계수 산정결과는 그림 8과 같다. 과압밀 구간에서 정규압밀 구간으로 유효응력이 변화하는 시점에서 압밀계수는 크게 감소하고 있으며, 이러한 특성은 앞서 언급된 선행압밀하중 판정에도 이용되었다. 압밀계수는 정규압밀 구간내에서는 약간 증가하는 경향을 나타내고 있는데, 이는 체적변화계수와 투수계수가 유효응력 증가에 따라 모두 감소하는 경향을 보이지만, 그 정도에 있어 투수계수의 감소정도가 크기 때문이라 판단된다. 특히, 초기 간극비와 함수비가 큰 초연약 준설패립 점토일수록 유효응력 증가에 따른 투수계수 감소정도가 크며, 이 경우 정규압밀 구간에서의 압밀계수 증가정도는 더욱 커지게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 수평배수 조건에서의 압밀 물질함수 산정을 위한 개량형 수평배수 압밀시험 장치를 고안하고, 이를 이용하여 고함수비 해상점토에 대한 압밀시험을 실시하였다.

상부캡 및 중앙부 수평배수를 유도하기 위한 모형 배수재의 두 부분으로 구성된 수평배수 압밀시험 장치는 압밀셀 및 하중재하 장치, 시험방법 등에 있어 기존 표준압시험과 동일한 관계로 로우셀 시험 등에 비해 시험방법이 간편하며 유효응력 단계별 압밀 물질함수의 신뢰성이 우수한 특징이 있다. 남해안 산업단지 조성 현장에서 채취한 불교란 시료를 이용하여 물리적 특성시험 및 개량형 수평배수 압밀시험, 표준압밀시험을 실시하였는데, 수평배수 압밀시험에 적용된 배수재와 시료의 직경비는 8.57 이다. 이 결과를 이용하여 배수조건별 간극비, 유효응력, 투수계수, 압밀계수, 체적변화계수 등을 분석하였는데, 압밀 물질함수는 Stark(2005)이 제안한 관계식과 같이 소성지수를 변수로 한 회귀분석 방정식 형태로 표현되었다. 한편, 투수계수에 대한 이방성을 분석하고자 다양한 유효응력 단계별 수직, 수평방향 투수계수

를 비교한 결과, 소성지수가 65인 경우, 간극비 3.0에서의 방향별 투수계수비(k_h/k_v)는 2.6으로 나타났으며, 간극비가 3.5~2.0으로 감소함에 따라 방향별 투수계수비는 1.4~9.4로 증가하였다.

본 연구에서 산정한 간극비, 유효응력, 방향별 투수계수, 압밀계수, 체적변화계수에 대한 물질함수 평가결과는 압밀 과정에서의 유효응력 단계별 압축성과 투수성을 판단하고, 이에 따른 정확한 압밀거동 예측을 가능하게 하는 주요 입력요소로 적용됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Arulrajah, A., Bo, M.W., Nikrazm, H. and Balasubramaniam, A.S. (2007), Dissipation Testing of Singapore Marine Clay by Piezocone, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 25, pp. 647~656.
2. Barron, R.A. (1948), Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells, *Transactions*. ASCE, Vol. 113, pp. 718~742.
3. Bergado, D.T., Ahmed, S., Sampaco, C.L. and Balasubramaniam, A.S. (1990), Settlement of Bangna-Bangpakong Highway on Soft Bangkok Clay, *Journal of Geotech. Eng'g. Div.*, ASCE, Vol. 116, No. GT1, pp. 136~155.
4. Carrier, W.D. and Beckman, J.F. (1984), Correlations between Index Test and the Properties of Remoulded Clays, *Geotechnique*, Vol. 34, No. 2, pp. 211~228.
5. Head, K.H. (1986), *Manual of Soil Laboratory Testing*, Pentech Press, London, Vol. 3, pp. 1129~1196.
6. Robertson, P.K., Sully, J.P., Woeller, D.J., Lunne, T., Powell, J.J.M. and Gillespie, D.G. (1992), Estimating Coefficient of Consolidation from Piezocone Tests, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 539~550.
7. Rowe, P.E. and Barden, L. (1966), A New Consolidation Cell, *Geotechnique*, Vol. 16, No. 2, pp. 162~170.
8. Seah, T.H., Tangthansup, B. and Wongsatian, P. (2004), Horizontal Coefficient of Consolidation of Soft Bangkok Clay, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 5, pp. 430~440.
9. Stark, T.D., Choi, H. and Schroeder, P.R. (2005), 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, pp. 52~61.

(접수일: 2009. 9. 10 심사일: 2009. 10. 6 심사완료일: 2009. 11. 5)