

샌드심이 존재하는 점토에 Rowe Cell를 이용한 일정변형률 압밀시험

Constant Rate of Strain Consolidation Test with Rowe Cell on the Clay with Sand Seam

김 재 홍¹ Kim, Jae-Hong

김 찬 기² Kim, Chan-Kee

김 태 형³ Kim, Tae-Hyung

Abstract

The sand layer deposited in clay is called a sand seam, which is formed by inflow of sands due to river flooding or slope failure in the middle of sinking and sediment of clay. When the sand seam exists in clay layer, the drainage direction changes from one way to both ways, and the time of consolidation may be reduced. However, it is not clearly proved due to lack of studies of sand seam and currently is not reflected in the design of soft soil improvement. As a fundamental study about sand seam, the oedometer tests and constant rate of strain tests with Rowe cell were conducted on clay specimens with sand seam. For tests, a frozen method was specially designed for making the sand seam. It was concluded that the test results showed the sand seam affects the coefficient of consolidation of clay. If the thickness of sand seam exceeds 0.05 times of specimen height, the sand seam works as drainage layer of pore water horizontally as well as vertically, and consequently the consolidation is accelerated.

요 지

샌드심(Sand seam)은 점성토 지층속에 모래층이 층상으로 존재하는 것으로 점토가 침강·퇴적하는 과정에서 하천의 범람이나 사면활동 등에 의하여 모래 성분이 유입되어 생성된 것으로 알려져 있다. 연약지반내에 샌드심이 존재할 경우 일방향 배수에서 양방향 배수가 되기 때문에 압밀시간이 단축이 가능하다 판단되어지나, 샌드심에 대해 연구가 국내외적으로 미진하여 연약지반개량 설계 시 이를 설계에 제대로 반영 못하는 실정이다. 본 연구는 샌드심에 대한 기초연구로 얇은 모래층(샌드심)이 존재하는 점토 시료에 대해 표준압밀시험과 Rowe cell을 이용한 일정변형률시험을 수행하였다. 시험을 위해 냉동법을 이용한 특별히 고안된 샌드심 제작방법을 제시하였다. 시험 결과 샌드심이 점토지반에 존재 시 압밀계수에 영향을 줄 수 있었다. 샌드심의 높이가 시료높이의 0.05배 이상이면 샌드심이 충분한 배수층 역할을 하여 간극수의 배수방향이 수평방향뿐만 아니라 수직배수가 함께 진행되어 압밀이 빠르게 진행되는 것으로 나타났다.

Keywords : Sand seam, Rowe cell, Constant rate of strain consolidation, Coefficient of consolidation

1 정희원, 한국수자원공사 기반시설연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Infrastructure Technology Center, KWIE, K-water)

2 정희원, 대전대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Daejin Univ.)

3 정희원, 한국해양대학교 건설공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Korea Maritime and Ocean Univ., Tel: +82-51-410-4465, Fax: +82-51-410-4460, kth67399@kmou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

연약지반 개량을 위해 연직배수재를 타설하면 연직배수재를 통해 하부 연약지반 내의 간극수가 통상적으로 배출된다. 하지만 인접구역에서도 어떤 구역에서는 지반내 간극수가 전혀 배출되지 않는 현상이 종종 나타난다. 이런 현상은 주로 샌드심이 존재하는 구간에서 발생되는데 이러한 원인을 규명하기 위해 간극수압계, 지하수위계, 강우일자 등의 자료를 면밀히 분석하여도 마땅히 그 원인을 찾지 못하였다(Kim et al., 2014).

국내에서 연약지반을 설계하기 위한 지반조사 시 종종 샌드심(sand seam)이 발견되고 있다. 특히, 낙동강 델타지역 일부구간에서는 지표면에서 10~15m 정도의 두께로 형성된 퇴적사질토의 하부 점토지반 내에 약 수 cm에서 수 m 두께의 샌드심이 존재하는 것으로 추정되고 있다(Kim, 2016). Im et al.(2009)도 연직배수재가 적용된 현장의 압밀침하 계측결과에서 좁은 구역임에도 불구하고 구역별로 설계 예상치에 비해 과소, 유사, 과대 등의 복합적인 양상이 나타나는 것이 하부 연약지반에 존재하는 샌드심과 관련이 깊은 것으로 추측하였다. 그래서 낙동강 델타지역의 화전지구에서 지반조사를 통해 수 cm에서 수십 cm의 샌드심을 확인하였고 이와 같은 샌드심이 존재하는 지반의 압밀침하량은 예상침하량 보다 작게 발생되었다고 보고하였다. 또한 샌드심이 압밀에 미치는 영향을 알아보기 위한 압밀시험도 수행하였는데 시험에 사용된 공시체는 모래와 점토를 배합한 것을 사용하였다.

Piezocone 관입시험을 이용한 샌드심에 대한 연구도 진행이 되었다. 그 중 Choi(2000)는 Piezocone 관입시험을 이용하여 샌드심의 존재를 확인하는 방법을 소개하여 샌드심이 있는 지반의 압밀침하특성(압밀침하량 및 압밀시간, 압밀계수 등)을 실내시험에 의해 산정된 예측침하와 현장계측에 의한 실측 침하를 비교분석하였다. 그 결과 샌드심이 있는 연약점토층에 연직배수재를 설치 시 압밀계수는 실측치가 예측치보다 4.1~5.2배 크게 나왔으며, 압밀시간은 1.6~2.5배 빠르게 산출되는 것으로 나타났다. 그는 이 연구에서 일반 점토시료에 대해 압밀시험을 수행하였다. Byun(2006)도 Choi(2000)와 유사한 방법으로 샌드심이 점토층의 수평방향압밀계수에 어떤 영향을 미치는지 조사하였다. 그의 연구에서 수평방향 압밀계수는 계측자료의 역해석을 통해 산정하였으며, 얇은 모래층의 분포개수와 비율은 CPTU시험을

통해 얻은 콘관입자료를 이용하였다. 얇은 모래층의 비율과 분포개수와 수평방향 압밀계수와 관련성을 회귀분석을 통해 산출하고 간극수압소산시험의 결과와 비교하여 결과를 판정하였다. Kim et al.(2000, 2001)은 간극수압소산시험으로 샌드심이 있는 점성토 지반의 투수성이 샌드심이 없는 점토지반의 투수성보다 100배 크게 나타났고, 수평압밀계수와 연직압밀계수의 압밀계수비(C_h/C_v)가 약 4.3~10.2 정도임을 밝혔다. 그리고 표준 압밀시험에서 구한 압밀계수와 현장 수평압밀계수와 압밀계수비는 1.0~2.4 정도라고 지적하였다. 이들 연구는 Piezocone 관입시험과 Dilatometer 시험을 통해 획득한 자료를 이용하여 수행되었다.

Choi(2016)는 우리나라에서 인천공항 건설시 몇 개의 구역에서 샌드심을 설계에 반영하였다. 예를 들어 재하기간 6개월 미만의 경우와 배수거리가 4.0m이하인 구역에 연약지반 깊이가 평균보다 얇고 압밀계수가 평균보다 큰 구역에서는 지반개량 없이 샌드심 영향을 고려해서 재하하중(preloading)만을 시행하여 지반을 개량하였다.

샌드심은 점성토 지층속에 모래층이 층상으로 존재하는 것으로 점토가 침강·퇴적하는 과정중에 하천의 범람이나 사면활동 등에 의하여 모래 성분이 유입되어 생성된 것으로 알려져 있다. 연약지반내에 샌드심이 존재할 경우 일방향 배수에서 양방향 배수가 되기 때문에 압밀시간이 단축이 가능하다 판단되어지나, 샌드심에 대해 연구가 국내외적으로 미진하여 연약지반개량 설계 시 이를 설계에 제대로 반영하지 못하는 실정이다. 그것은 지금까지 실시된 기존연구가 Piezocone 관입시험, 현장계측자료 분석, 일반점토에 대한 실내압밀시험 등에 한정되어 진행되어 샌드심이 포함된 점토에서 간극수의 소산 메카니즘에 대한 규명이 명확하게 이루어지지 못하였기 때문이다.

본 연구는 점토지반에 샌드심이 존재할 경우 샌드심이 수평배수층으로서의 역할에 대한 기초 연구로 표준 압밀시험과 Rowe Cell을 이용한 일정변형률시험 실시하여 점토시료 내에 샌드심 유무에 따른 수평압밀계수의 변화특성을 확인하였다. 샌드심을 가진 점토 공시체에 대한 시험은 기존연구에서는 시도되지 않은 것으로 본 연구에서는 샌드심 제작을 위해 냉동을 이용한 방법을 고안하였고, 공시체는 기존 압밀시험과정에 샌드심층 추가라는 절차를 추가하여 제작하였다. 본 연구 결과는 향후 연약지반 설계 시 샌드심 반영여부에 대한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

2. 일정변형률 압밀이론

연직배수조건하에서의 일정변형률 압밀시험방법으로는 Wissa et al.(1971)이 제안한 방법이 현재 가장 보편적으로 사용되고 있다. 그리고 이 시험방법은 많은 실험을 통하여 검증된 방법으로서 Janbu(1965)의 변형률에 근거한 일차원 압밀해석 이론을 기초로 하여 압밀 초기의 전이상태(transient state) 및 전이상태 이후의 정상상태(steady state)로 구분하여 연직방향 유효응력 및 압밀계수를 산정한다. 정상상태인 경우 변형률-유효응력 관계가 선형인 경우와 비선형인 경우로 나누어 해석하였다. 이 중 정상상태에서의 비선형($\varepsilon - \log \sigma'$ 선형관계) 해가 ASTM에 표준 시험 해석방법으로 채택되어 현재 널리 사용되고 있다.

방사배수조건하에서의 일정변형률 압밀시험의 해석방법은 Yune et al.(2002), Seah and Juimarongrit(2003), Yune and Chung(2005) 등에 의해 연구되었으며 이론을 정리하면 다음과 같다. 방사방향으로 배수되는 경우 원통형 공시체의 압밀지배 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 e 는 간극비, u 는 간극수압, t 는 시간, k_h 는 횡방향 투수계수, γ_w 는 물의 단위중량이다.

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left(\frac{1}{\gamma} \frac{\partial u}{\partial \gamma} + \frac{\partial^2 u}{\partial \gamma^2} \right) = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

식 (1)의 간극수압 u 와 간극비 e 는 r, z, t 에 관한 함수로 방사배수에 의해서만 압밀이 진행된다. 그러므로 간극수압 u 는 연직방향(z 방향)으로 항상 일정하게 분포하며 시료의 두께가 얇은 경우 간극비 e 도 연직방향으로 일정하게 분포한다고 가정할 수 있으므로 간극수압과 간극비는 r 과 t 의 함수로 나타낼 수 있다. 제시된 시험방법에서 시료는 상·하부의 강성판 사이에서 연직방향으로 등변형(equal strain)되므로 간극비는 시간의 함수, $e(t)$ 로 나타낼 수 있다. 시료의 면적 및 초기 높이를 각각 A, H 라 할 때, 시료가 일정한 속도로 변형하고 그 때의 변형률 속도(strain rate)를 $\dot{\varepsilon}$ 라 하면 연직 변위량(δ)과 시간에 따라 변화하는 간극비, $e(t)$ 는 식 (2), 식 (3)과 같다.

$$\delta = \dot{\varepsilon} H t \quad (2)$$

$$e(t) = e_0 - \frac{\dot{\varepsilon} H t A}{V_s} \quad (3)$$

여기서 e_0 는 초기 간극비이고 V_s 는 흡입자의 부피이다. 식 (3)을 이용하면 식 (1)은 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{k_h}{\gamma_w} \left(\frac{1}{\gamma} \frac{\partial u}{\partial \gamma} + \frac{\partial^2 u}{\partial \gamma^2} \right) = \frac{C}{1+e_0 - C t} \quad (4)$$

식 (4)에서 횡방향 투수계수 k_h 는 간극비 크기에 따라 변화하므로 시간에 대한 함수 $k_h(t)$ 로 표시된다. 방사방향으로 배수가 발생하면서 시료가 압밀될 때 시료의 반경을 R 이라고 하면, 간극수압은 시료의 외측 경계면($\gamma = R$)에서 0이 되고 중앙부($\gamma = 0$)에서 최대값을 나타내며, 중앙부에서의 동수경사는 0이 될 것이므로 식 (4)로부터 식 (5)와 같은 해를 구할 수 있다.

$$u(r,t) = \frac{\gamma_w}{k_h} \frac{C}{1+e_0 - C t} \left(-\frac{\gamma^2}{4} + \frac{R^2}{4} \right) \quad (5)$$

이 때, 시료 중앙에서의 간극수압(u_c)은 식 (6)과 같다.

$$u_c = u(0,t) = \frac{\gamma_w}{k_h} \frac{C}{1+e_0 - C t} \frac{R^2}{4} \quad (6)$$

횡방향 변형이 구속된 연직 1차원 변형조건에서 방사방향의 배수만이 허용되는 경우에 대한 압밀계수(c_{vr})는 다음 식 (7)로부터 구할 수 있으며 미소변형률 조건을 가정하면 $a_v = -\frac{de}{d\sigma'} = -\frac{\Delta e}{\Delta \sigma'}$ 라 할 수 있으므로 이들을 식 (7)에 대입하면 식 (8)과 같으며 이로부터 압밀계수를 구할 수 있다.

$$c_{vr} = \frac{k_h(1+e)}{a_v \gamma_w} \quad (7)$$

$$c_{vr} = \frac{\Delta \sigma' R^2}{\Delta t 4u_c} \quad (8)$$

3. 표준압밀 및 일정변형률 실험

점토 지반내의 샌드심 유무에 따른 수평압밀계수를 확인하기 위하여 점토시료 중앙에 얇은 모래층을 성형하여 일정변형률 실험을 시행하였다. 또한 같은 방법으로 성형된 시료를 이용하여 표준압밀실험도 실시하였다.

3.1 사용 시료

실험에 적용한 점토 시료는 울촌 지역의 점성토를 100 번째로 체가름하여 이물질 제거 후 물리적 특성 실험을 수행하였다. 본 시료의 액성한계는 57.1%, 소성한계는 28.9%, 비중은 2.69이고 입도분포는 Fig. 1과 같으며 통일분류법에 따르면 액성한계가 높은 점성토(CH)로 분류된다.

또한, 샌드심의 역할을 하는 모래는 100번체 통과하고 200번체에 잔류하여 투수계수가 $1.22 \times 10^{-4} (cm/s)$ 인 표준사를 사용하였다(Table 1).

3.2 공시체 제작

모형지반에 사용할 점토지반은 점토 시료는 액성한계 약 3배의 함수비로 교반한 슬러리 상태에서 Fig. 2와 같이 사전압밀 장치에 넣어 1일 정도의 자중압밀을 시킨 후 단계별 12시간 정도 씩 2.5kgf의 하중을 점증적으로 증가시켜 압밀을 진행시켰다. 그리고 최종단계에서 $0.5kgf/cm^2$ 의 응력이 발생되도록 하중을 36시간 재하

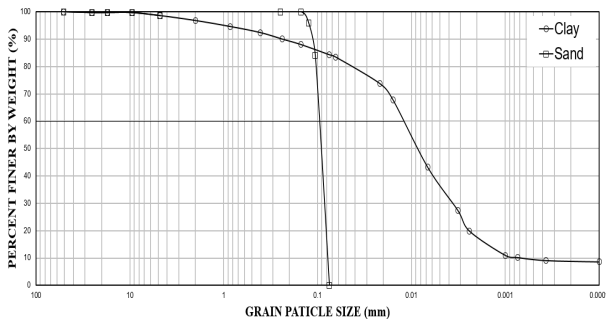


Fig. 1. Grain size distribution curves of the tested clay and sand

Table 1. Properties of Jumunjin standard sand used as sand seam

Types	Symbol	Value
Maximum void ratio	e_{max}	0.923
Minimum void ratio	e_{min}	0.604
Maximum dry density	$\gamma_{dmax} (g/cm^3)$	1.652
Minimum dry density	$\gamma_{dmin} (g/cm^3)$	1.378
Specific gravity	G_s	2.65
Water content	$w (%)$	0.30
Mean particle size	$D_{50} (mm)$	0.595
Effective particle size	$D_{10} (mm)$	0.443
Coefficient of uniformity	C_u	1.402
Coefficient of curvature	C_g	0.912

하여 시험용 시료를 완성시켰다. 완성된 점토시료에서 시험에 사용될 점토 공시체는 높이 1cm의 압밀링을 사용하여 제작되었다. 참고로 기존 시험에서는 2cm 높이의 압밀링을 사용하고 있고 있는데 본 연구에서는 점토 시료 중간에 샌드심을 설치하기 위해 1cm 압밀링을 사용하였다.

샌드심으로 사용할 얇은 모래층을 만드는 것이 본 시험에서 매우 어려운 작업이었다. 몇 번의 시행착오를 거쳐 최종적으로 선택한 방법은 냉동을 이용한 샌드심 제작 방법으로 그 절차는 다음과 같다. 샌드심 모래층을 만들기 위해서 먼저 압밀링(높이 1cm, 직경 6cm)을 Fig. 3과 같이 비닐랩(vinyl)을 씌운 소성판에 놓고 준비된 모래를 소정의 두께로 포설하였다. 샌드심 두께는 압밀링의 체적을 계산하여 해당 높이에 필요한 양의 모래를 스푼을 사용하여 가급적 고르게 간극비 $e=0.923$ 을 갖도록 포설하였다. 이후 분무기를 이용하여 물을 뿌린 후



Fig. 2. Pre-consolidation equipment



Fig. 3. Consolidation ring

직경 6cm 의 소성판을 포설된 모래위에 올려 가급적 모래의 높이를 고르게 하는 작업을 수행하였다. 이후 전체를 냉동하여 0.5mm($t=0.025H$), 1.0mm($t=0.05H$), 2.0mm($t=0.1H$) 두께의 샌드심을 각각 제작하였다(Fig. 4).

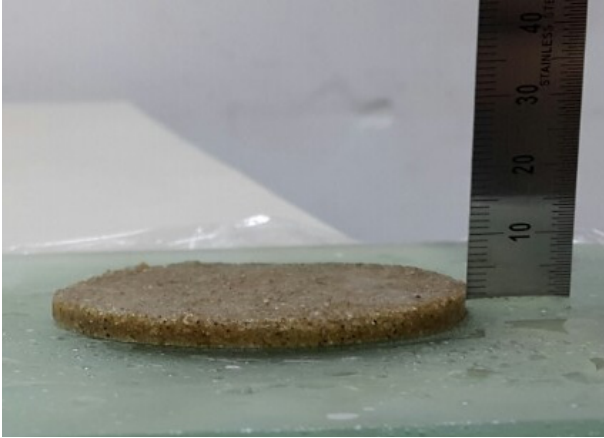


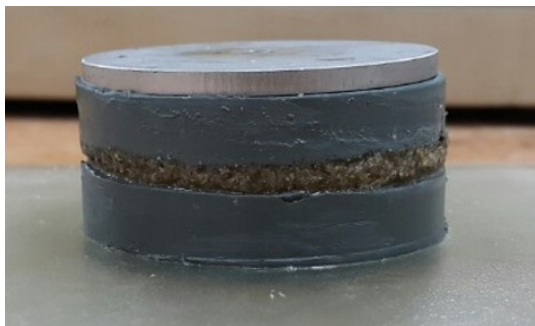
Fig. 4. Frozen sand seam

Fig. 5는 10mm의 점토시료 사이에 샌드심이 들어간 시험용 공시체의 모습이다. 공시체 제작은 다음과 같은 절차에 따라 진행되었다. 먼저 냉동된 샌드심이 포함된 압밀링을 공기중에 해동시켜 압밀링으로부터 샌드심을 분리하였다. 그 다음 비닐랩위에 놓인 샌드심을 준비된 1cm 높이의 점토위에 놓고 비닐랩을 떼어내었다. 그 위에 다시 점토시료를 놓아 샌드심이 포함된 압밀공시체를 완성하였다.

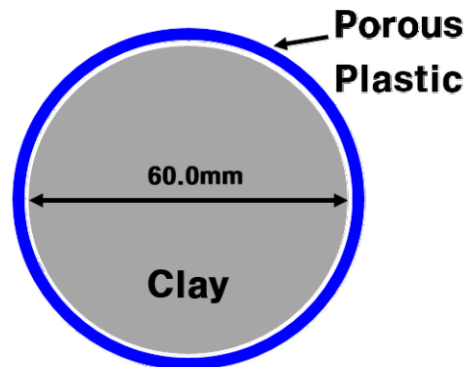
표준압밀과 수직방향 일정변형률(CRS) 실험에는 공시체 상단에 다공질판을 넣어 배수가 원활하도록 하였고 수평방향 일정변형률실험은 측면에 Porous Plastic을 감싸서 수평방향 배수가 원활하도록 하였다.

3.3 시험 장치

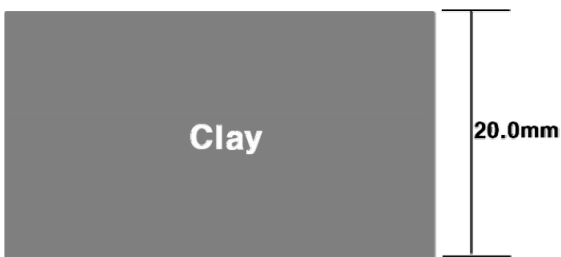
본 연구에 사용한 표준압밀시험기는 고정식 표준압밀기를 사용하였으며 시험기의 구조로는 고정링, 압밀



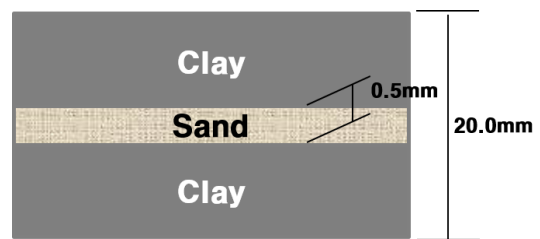
(a) Side view



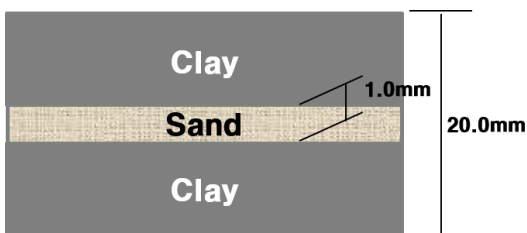
(b) Plane view



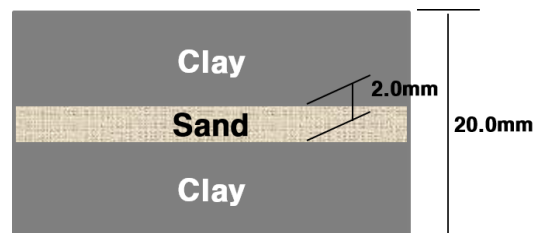
(c) Cases 1, 2, 4



(d) Case 5 ($t=0.025H$)



(e) Cases 3, 6 ($t=0.05H$)



(f) Case 7 ($t=0.1H$)

Fig. 5. Test mold

링, 가압관, 다공식판, 필터, 수침상자 및 다이얼 게이지로 구성되어 있다. 국내에서 일반적으로 사용되는 시료는 현장시험용 샘플러로 채취한 시료를 이용하는데 적합하도록 직경과 높이를 수정한 시험기로서 시료의 직경은 60mm, 높이는 20mm이다.

Fig. 6은 하중재하 장치로서 공시체에 하중을 가하고 변위와 하중을 측정하는 Load Trac II load frame, 체적변화를 조절할 뿐만 아니라 시료의 압력을 발생하고 측정하는 Flow Trac-II unit, Rowe 압밀 셀, 그리고 실험전반을 조절하는 컴퓨터로 구성되어 있다.

하중은 변형률 속도 0.001mm/min으로 하중을 재하하였다. 이와 같이 준비된 시료를 이용하여 통상의 방법으로 표준압밀시험과 Rowe Cell을 이용한 일정변형률 압밀시험을 수평방향, 수직방향 배수조건으로 실시하였다.

3.4 시험방법

표준압밀시험은 KS F 2316에 규정에 의거하여 시료를 직경은 60mm, 두께는 20mm로 성형하고 압밀 셀을 시험기에 거치 한 후 24시간 이상 수침상태로 두어 포화시켰으며 하중재하비($\Delta P/P=1$)가 1이 되도록 재하

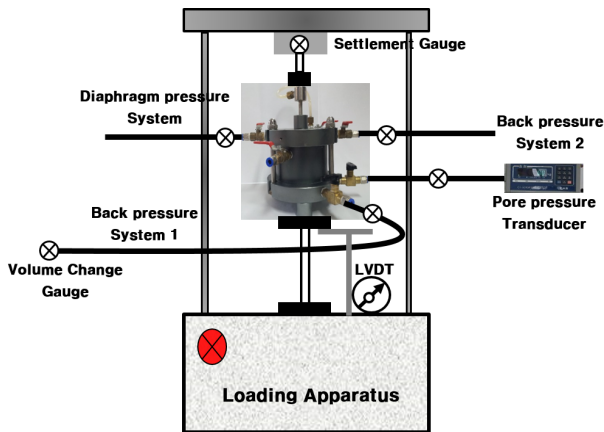


Fig. 6. Loading apparatus

하였다. 각 하중 재하단계, 재하단계 별 측정간격 그리고 재하단계는 시험규정에 준하여 시험을 실시하였다.

Rowe Cell을 이용한 일정변형률 실험은 국내에서 그동안 많은 기술자로부터 연구되어 졌다(Yune et al., 2002; Ju et al., 2002; Ko et al., 2002; Yune and Chung, 2005). 본 연구에서 Rowe Cell을 이용한 CRS시험은 ASTM D4186-89에 의해 변형률 속도에 따른 영향을 살펴보기 위하여 속도를 변화시켜가며 실험을 하였다. 실험절차는 시료성형단계, 압밀링 조립단계, 초기화단계, 포화단계, 압밀단계로 구분될 수 있으며 실험조건은 Table 2와 같다.

4. 실험 결과

4.1 압축지수

Fig. 7은 배수조건을 연직방향과 수평방향으로 달리 한 일정변형률시험과 표준압밀시험의 e-logP 곡선을 나타낸 것이다. 표준압밀시험의 e-logP 곡선의 경우에는 하중 재하 시 과잉간극수압이 완전히 소산되므로 일정

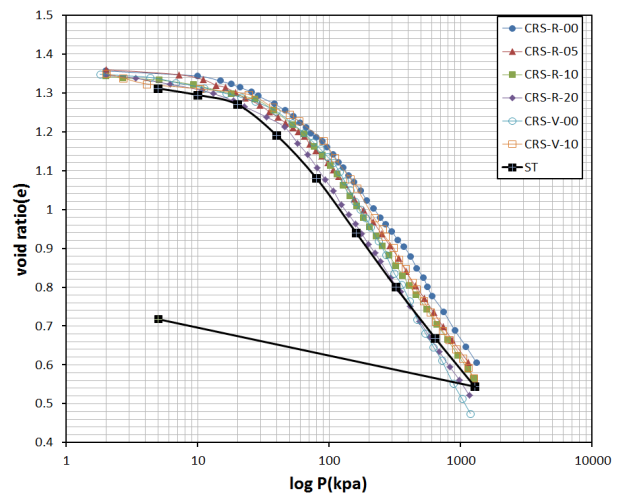


Fig. 7. e-logP curves

Table 2. Test condition

Test method	Drainage direction	Classification	Clay thickness (mm)	Sand seam thickness (mm)
Standard consolidation (ST)	Vertical	ST (Case 1)	20	-
CRS using the rowe cell	Vertical	CRS-V-00 (Case 2)	20	-
		CRS-V-10 (Case 3)	20	1.0
	Horizontal	CRS-R-00 (Case 4)	20	-
		CRS-R-05 (Case 5)	20	0.5
		CRS-R-10 (Case 6)	20	1.0
		CRS-R-20 (Case 7)	20	2.0

변형을 압밀시험의 간극비 변화보다 다소 크게 나타낸다. 그러므로 표준압밀의 e-logP는 Seah and Juirnarongrit (2003)이 지적한 바와 같이 일정변형율시험의 e-logP 곡선의 왼쪽 측, 동일한 하중에서 더 작은 간극비를 보이는 것을 알 수 있다. 일정변형율시험에서 e-logP곡선은 배수 방향에 무관하게 동일 하중조건에서 간극비의 변화가 매우 적어 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있는데 이는 연직압밀과 수평압밀 모두 재하하중이 같아 초기과잉간극수압이 비슷하기 때문이라 사료된다.

표준압밀시험의 압축지수 0.45이고 팽창지수는 0.05를 나타내고 있다. 그리고 Rowe Cell을 이용한 일정변형율시험 중 연직방향 배수조건인 경우 샌드심이 없는 CRS-V-00는 0.64, 점토층 사이에 샌드심이 1mm인 CRS-V-10은 0.54 정도의 압축지수를 나타내고 있다. 또한 배수조건이 수평방향이고 샌드심이 없는 CRS-R-00는 0.49, 샌드심이 0.5mm인 CRS-R-05 0.48, 샌드심이 1mm인 CRS-R-10는 0.49, 샌드심이 2mm인 CRS-R-20은 0.51의 압축지수를 각각 나타내고 있다.

4.2 압밀계수

Fig. 8은 각각의 시험조건에서 얻은 하중단계별 압밀계수를 나타낸 것이다. 일정 하중 이상에서의 간극수압 발생의 차이 때문에 재하 초기의 50kPa이하 응력에서는 압밀계수가 다소 발산하는 경향을 보인다. 그리고 연약지반 개량에서 공학적으로 500kPa 이상은 고려하지 않은 범위이므로 평균압밀계수는 50kPa에서 500kPa 사이 값으로 결정하였다. 또한 그림에 나타난 것처럼 작은 하중단계에서 연직압밀계수와 수평압밀계수는 시료의 중

류에 따라 큰 차이를 보이지만 하중이 커질수록 그 차이의 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다.

샌드심이 없는 CRS-R-00와 CRS-V-00의 압밀계수는 0.0327과 0.0336로서 배수방향에 관계없이 유사한 값을 나타내고 있다. 이는 시료를 재성형하므로 등방의 입자배열이 이루어져 자연 상태 퇴적지반의 시험결과 다소 차이를 보이고 있는 것으로 판단된다. 그리고 샌드심이 없는 CRS-R-00의 압밀계수와 샌드심이 0.5mm인 CRS-R-05의 압밀계수는 0.0327과 0.0343으로 유사한 결과를 보이고 있으며 CRS-R-10과 CRS-R-20은 0.0546과 0.0621로 유사한 결과를 나타내고 있는데 이것은 점토층 사이에 샌드심이 1mm($t=0.05H$) 이상이면 모래층이 충분한 배수층 역할을 할 수 있으므로 간극수의 배수방향이 수평방향 배수뿐만 아니라 모래층으로의 수직배수가 발생하며 점토시료의 외측방향에서는 수평방향과 수직방향의 배수가 함께 일어나기 때문이다.

그러나 기존의 압밀이론은 수직 혹은 수평방향만으로 배수를 기본으로 압밀계수 산정 시 식 (7)과 식 (8)을 적용하고 있어 본 현상과는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 그러므로 앞으로 이점을 고려한 시험이 면밀하게 수행될 필요가 있다고 생각한다. 이상의 시험결과를 요약하면 Table 3과 같다.

Fig. 9는 일정변형율시험에서 재하시간에 따른 연직응력의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타나듯이 재하 초기에는 선형적으로 연직응력이 증가하고 선형압밀응력 이후는 시간경과에 따라 연직응력 증가가 매우 크게 발생하고 있다. 샌드심이 없는 경우 같은 시간경과 시 수평방향 일정변형율시험의 응력이 수직방향 일정변형율 시험의 응력치보다 크게 나타났으며 샌드심이

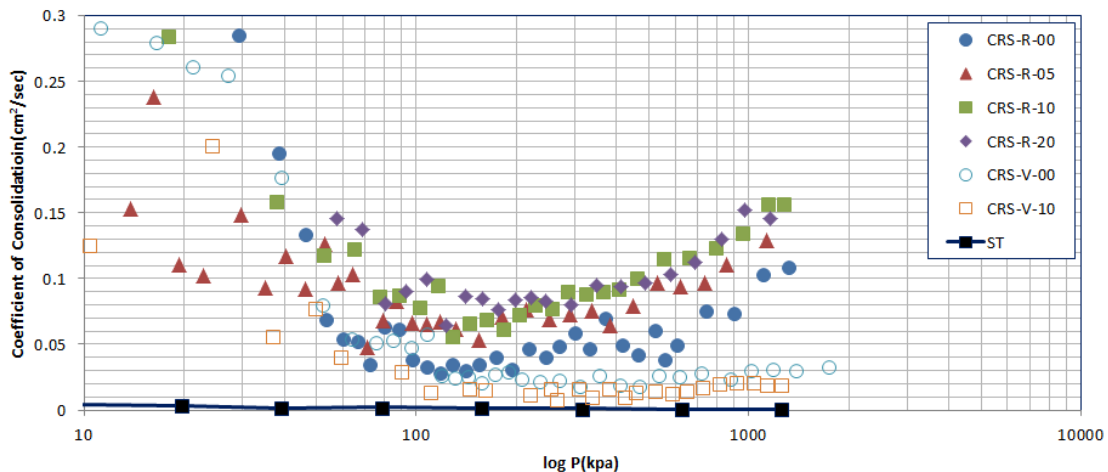


Fig. 8. Coefficients of consolidation curve

Table 3. Results of test (ST and CRS)

Classification	Compression index, C_c (C_r)	Coefficient of consolidation C_v, C_h (cm^2/sec)	Permeability index (cm/sec)
ST	0.45 (0.05)	0.0011	8.54E-08
CRS-V-00	0.64	0.0336	2.58E-06
CRS-V-10	0.54	0.0120	2.83E-06
CRS-R-00	0.49	0.0327	1.83E-06
CRS-R-05	0.48	0.0343	1.97E-06
CRS-R-10	0.49	0.0546	2.85E-06
CRS-R-20	0.51	0.0621	3.95E-06

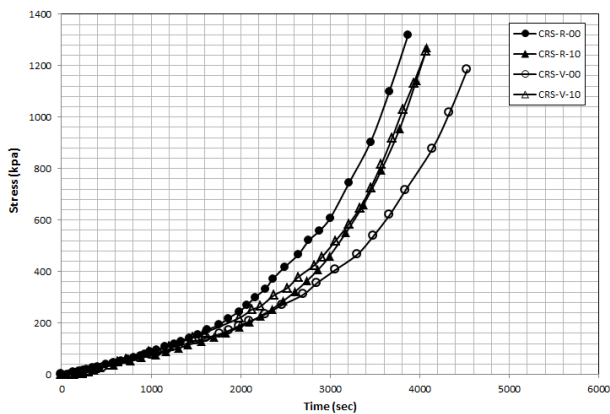


Fig. 9. Vertical stress variations with time in the constant rate of strain consolidation tests

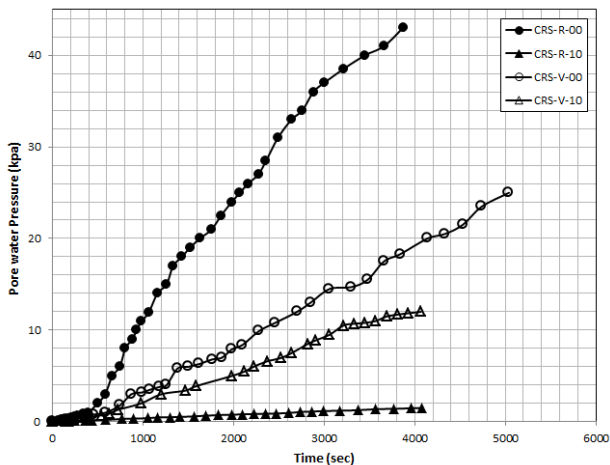


Fig. 10. Excess pore water pressure variations with time in the constant rate of strain consolidation tests

있는 경우 시간 경과에 따른 연직응력의 증가는 샌드심의 영향으로 수직방향과 수평방향이 서로 유사하게 나타났다.

Fig. 10은 일정변형률시험에서 재하시간에 따른 과잉 간극수압의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난바와 같이 재하 초기에는 간극수압이 점진적으로 증가하

다가 선행압밀하중 이후에 급격히 증가하고 있다. 이러한 경향성은 배수방향에 상관없이 동일하게 나타났으며 배수 길이가 긴 방사방향 배수 시험의 경우에 간극수압이 더 크게 발생하였다.

5. 결론

샌드심이 압밀에 미치는 영향을 알아보기 위한 시험 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 배수조건을 달리한 Rowe Cell을 이용한 일정변형률(CRS)시험을 시행하고 표준압밀시험에서 구한 압밀정수를 분석한 결과 표준압밀시험의 e-logP곡선은 일정변형률시험 곡선의 좌측에 위치하며 배수 방향에 무관하게 e-logP곡선은 매우 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.
- (2) 압밀계수는 하중단계에 따라 큰 변화가 나타나고 있어 50kPa에서 500kPa사이 값의 평균으로 압밀계수를 결정하였다. 연직압밀계수와 수평압밀계수는 작은 하중단계에서는 다소 큰 차이를 보이지만 하중이 커질수록 차이의 폭이 좁아지는 것으로 나타났다.
- (3) 샌드심이 없는 경우 재성형의 영향으로 배수방향에 관계없이 유사한 압밀계수를 보였다. 반면 점토층 사이에 샌드심이 1mm이상(시료높이의 0.05배)이면 압밀계수가 크게 나타났다.
- (4) 이것은 샌드심층이 충분한 수평배수층 역할을 하고 있어 샌드심층 상하의 점토층 간극수의 배수방향이 수평방향 배수뿐만 아니라 샌드심층으로의 수직배수가 발생하며 점토시료의 측방에서는 수평방향과 수직방향을 배수가 함께 일어나는 때문으로 판단된다.
- (5) 기존의 압밀이론은 수직 혹은 수평방향만으로 배수

를 기본으로 압밀계수를 산정하고 있어 샌드심 존재하는 경우 발생하는 현상과는 차이가 있음을 알 수 있다. 그러므로 앞으로 이점을 고려한 시험과 이론개발이 면밀하게 수행될 필요가 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국수자원공사의 ‘피압과 통수능에 따른 연약지반 압밀거동 및 토목섬유 적용 방안연구’과제로 수행되었으며, 마지막까지 연구에 대한 열정과 헌신을 보여주신 (고)김재홍 박사님께 이 논문을 받칩니다.

참고문헌 (References)

1. Byun, W. H. (2006), "The Estimation of the Horizontal Consolidation Coefficient of Clay with Sand Seams", Ms. D. Thesis. KookMin University.
2. Choi, I. G. (2016), "Application of Sand Seam in Incheon International Airport", *27th Continuous Education of Korean Geotechnical Society*, pp.424-437.
3. Choi, J. M. (2000), "Effects of Sand Seam to Estimate of Consolidation Settlement", Ms. D. Thesis. ChungAng University.
4. Janbu, N. (1965), "Consolidation of Clay Layers Based on Non-Linear Stress-Strain", *Proc. 6th ICSMFE*, Vol.2, Montreal. pp.82-87.
5. Ju, J. W., Jung, K. H., Kim, J. Y., and Cho, J. K. (2002), "Horizontal Drainage Consolidation Test by Rowe Cell", *Korean Society of Civil Engineering Conference*, pp.2355-2358
6. Kim, J. H. (2016), "Soil Improvement and Project of Busan Eco-Delta City Construction", *27th Continuous Education of Korean Geotechnical Society*, pp.48-59.
7. Kim, J. K., Sung, K. K., Kim, H. J., and Kim, Y. U. (2000), "The Application of Piezocone Penetration Test at Incheon International Airport", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.2, pp.115-123.
8. Kim, J. K., Kim, Y. U., Choi, I. G., and Park, Y. M. (2001), "Estimation of Geotechnical Characteristics at of the Marine Clay Incheon International Airport Marine Clay Using Piezocone and Dilatometer Tests", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.2, pp.41-49.
9. Kim, S. K., Kim, Y. T., and Kim, J. H. (2014), "Considering Factors in Design of Vertical Drainage in Deep thick Soft Soil", Technical Note, *Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.5, pp. 15-24.
10. Ko, Y. H., Kwon, G. B., Ryu, K. I., and Kim, P. K. (2002), "Analysis of the Coefficient of Horizontal Consolidation by CPTU and Rowe Cell Test", *Korean Society of Civil Engineering Conference*, pp. 2313-2316.
11. Lee, W. J., Lim, H. D., and Lee, W. J. (1998), "Study on the Consolidation Characteristics of Marine Clay by CRS and Conventional Test", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.14, No.4, pp.47-60.
12. Im, J. C., Park, L. K., Jang, J. K., and Ryu, J. H. (2009), "Report of the Results of Boring and Analysis in Development Project of Hwjeon District (3rd Section)", *Research Institute of Industrial Technology*, Busan National University, p.99.
13. Seah, T. H. and Juirnarongrit, T. (2003), "Constant Rate of Strain Consolidation with Radial Drainage", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.26, No.4, pp.1-12. Paper ID GTJ10173_264
14. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S. (1971), "Analysis of Consolidation at Constant Strain Rate", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 97(SM10), Proceedings Paper 8447, pp.1393-1413.
15. Yune, C. Y., Jang, I. S., and Chung, C. K. (2002), "Consolidation at Constant Strain Rate for Radial Drainage", *J. of Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.4, pp.147-157.
16. Yune, C. Y. and Chung, C. K. (2005), "Consolidation Test at Constant Rate of Strain for Radial Drainage", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol.28, No.1, pp.71-78.

Received : December 16th, 2016

Revised : May 9th, 2017

Accepted : May 18th, 2017