

점토질 모래의 투수 및 압밀 특성 평가

Permeability and Consolidation Characteristics on Clayey Sand Soils

김광균¹⁾, Kwangkyun Kim, 박두희²⁾, Duhee Park, 장재훈³⁾, Jae-Hoon Chang

¹⁾ 한양대학교 건설환경공학과 박사후연구원, Post doctoral researcher, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 건설환경공학과 조교수, Assitant Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

³⁾ 한양대학교 건설환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : Evaluation of permeability and coefficient of consolidation of clayey sand is critical to analyze ground stability or environmental problems such as diffusion and dispersion in groundwater flow. Permeability tests using a flexible wall permeameter were performed to derive the coefficient of consolidation and permeability of reconstituted soil samples with various mixing ratios of kaolin clays and two different types of sands, Jumunjin sand and Ottawa sand. The test results indicated that coefficient of consolidation and permeability in log scale have linear relationships with clay contents in low clay mixing ratio. It is also recognized that coefficient of consolidation and permeability of sand and clay mixture are also dependent on the soil structure.

Keywords : Coefficient of consolidation, permeability, flexible wall permeameter test, clayey sand, clay and sand mixture, reconstituted soil sample

1. 서론

지반의 투수성과 압밀특성에 의한 지반의 안정성 평가나 지하수를 통한 오염물질의 확산 등의 환경문제를 평가하는데 있어서 투수계수와 압밀계수는 매우 중요한 계수이다. 점토지반에서의 압밀특성뿐 아니라 투수성이 큰 모래질의 지반에서도 환경적인 영향이나 디워터링, 제방물길로 쓰일 때 파이핑 등의 해석에 있어서 이 계수들은 지반공학상의 디자인에 매우 영향이 크다. 뿐만 아니라 지반의 동적거동 해석 및 액상화 판정에서도 투수계수는 매우 중요하다. 투수계수는 지반공학상의 문제를 푸는데 있어서 매우 중요한 공학적 계수이지만 다른 매개변수와의 상관관계에 대한 연구는 많이 수행되지 않았다. 특히 모래와 점토의 경계선상에 있는 혼합토에 대해서는 더더욱 알려지지 않았다. 투수계수의 경우 일반적으로 흙의 분류기준으로 많이 쓰이는 USCS에 의해 50%이상의 조립질을 포함하여 사질토로 판정이 되면, 점토 또는 실트의 세립질이 상당량 포함되어 있는 경우일지라도 지반공학적 거동상 단순히 배수 조건으로 간주되는 경우가 많다. 하지만 순수한 모래에 소량의 점토입자가 혼합된다 하더라도 순수모래에 비해 투수계수는 급격히 감소하게 되며 20% 내지 30%의 점토입자가 혼합되어 있다면 투수계수의 감소는 모래에 비해 매우 커서 비록 모래로 분류된다 하더라도 해석조건에 따라 투수계수의 영향이 반드시 고려되어야 한다.

일반적으로 순수한 모래의 투수계수는 입도분포 특성이나 간극비와 상관관계를 가지는 것으로 알려져 있고 이런 변수들에 대한 경험식들이 제안되어 있다(Hazen, 1930; Kenney 등., 1984). 한편, 점토질 흙에

서는 소성지수와 간극비가 주요한 투수계수에 영향을 끼치는 매개변수로 알려져 있으며 이에 대한 많은 연구들이 수행되었고 관계식들이 제안되어져 왔다(Sridharan and Nagaraj, 2004; Sridharan and Nagaraj, 2005; Sivapullaiah 등., 2000, Raju 등, 1995). 하지만 모래에 소량의 점토질이 혼합된 흙에서는 점토질 흙의 특성을 대변하는 소성지수나 간극비에 의해 투수계수나 압밀계수를 예측할 수 없으며 또한 순수모래에서와는 달리 단순히 입도분포 특성이나 간극비에 의해 투수계수와 상관성을 나타낼 수 없다. 따라서 모래와 점토의 혼합토로서 중간적인 성질을 가지는 흙에 대해서는 투수계수나 압밀계수를 예측하기 위해 다른 관점에서의 정의가 필요하다.

본 연구에서는 국내에서 대표적인 실험용 표준사로 사용되고 있는 주문진 표준사와 북미의 대표적인 실험용 표준사인 오타와 샌드에 카올리나이트 점토를 10%에서 30%사이의 다양한 비율로 혼합하여 시료를 제작한 후 연성벽체 투수시험을 수행하였다. 시험결과 시험이 실시된 카올린 점토 혼합범위에서는 로그 스케일에서 점토의 혼합비와 투수계수 및 압밀계수가 선형적 관계를 나타내었다. 또한 시험이 실시된 혼합비의 범위 내에서 투수계수 및 압밀계수와 간극비와 상호관계를 그래프로 나타내었으며, 이 결과는 흙의 구조적 특성에 의해 설명되었다.

2. 연성벽체 투수시험

2.1 투수계수와 압밀계수의 계산

점토질이 포함된 모래의 정밀한 투수계수와 압밀계수를 측정하기 위해 본 연구에서는 ASTM D 5084의 규격에 따른 연성벽체 투수시험(flexible wall permeameter test)이 수행되었다. 각기 다른 혼합비에서의 투수계수 k 와 m_v , 그리고 두 값에 의해 c_v 가 계산되었다. 연성벽체투수시험은 일반적으로 모래시료를 위해 사용되는 강성벽체투수시험에 비해 벽체를 통한 누수가 매우 적고 또한 시험중의 시료의 응력상태를 제어할 수 있기 때문에 흙의 응력상태에 대한 정확한 투수계수를 얻을 수 있는 이점이 있다(Samingan 등., 2003). 시험을 위해 계획된 비율로 모래와 점토를 혼합한 슬러리를 압밀성형한 시료를 사용하였다. 연성벽체 투수시험에서 투수계수 k 는 다음과 같은 식 (1)에 의해 얻어진다.

$$k = \frac{\Delta Q \cdot L}{A \cdot h \cdot \Delta t} \quad (1)$$

여기서, ΔQ = 측정시간 Δt 동안 투수된 물의 용량, L = 시료의 길이, A = 시료의 단면적, h = 시료에서의 수두차이다. 한편 연성벽체투수시험에서 등방압력을 단계적으로 증가시킬 때 등방압축계수 m_{vi} 는 다음식 (2)와 같이 구해진다;

$$m_{vi} = \frac{1}{1 + e_1} \left(- \frac{\delta e}{\delta p} \right) = \frac{\Delta V_{sp}}{\Delta \sigma'_3} \quad (2)$$

여기서, e_1 = 등방압력을 증가시키기전의 간극비, ΔV_{sp} = 압력이 δp 만큼 증가될 때 시료의 부피감소분, V_{sp} = 압력증가전의 시료의 부피, $\Delta \sigma'_3$ = 유효구속압력의 증분이다. 연성벽체투수시험에서는 등방삼축 압축시험에서와 마찬가지로 등방으로 구속압력을 증가시키므로 일축압축시험의 K_0 조건에서 얻어지는 압축계수와는 차이가 있다. 그러므로 일축압축시험에서 얻어지는 압밀계수와 같은 압밀계수를 연성벽체 투수시험으로부터 얻기 위해서는 연성벽체투수시험에서의 등방압축계수 m_{vi} 를 적절한 계수를 이용해서 일축압축시험에서의 압축계수 m_v 로 보정해 주어야 한다. 등방압축조건에서와 일축압축조건에서의 압축계수는 이론적으로 구속탄성계수(constrained modulus) D 와 체적탄성계수(bulk modulus) B 를 통해서 다음식 (3)과 같은 관계를 가진다

$$\frac{m_{vi}}{m_v} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{1}{D}} = \frac{D}{B} = \frac{\frac{E'(1-\nu')}{(1+\nu')(1-2\nu')}}{\frac{E'}{3(1-2\nu')}} = \frac{3(1-\nu')}{1+\nu'} \quad (3)$$

여기서 E' = 흙의 변형계수, ν' = 배수조건에서의 흙의 프와송비이다. 여기서, 배수조건에서의 ν' 의 일반적인 값은 약 1/3이므로, 식 (3)에서 m_v 와 m_{vi} 의 관계는 $m_v = 1/1.5 \cdot m_{vi}$ 로 나타내어질 수 있다 (Head, 1992; Carraro, 2004).

압밀계수 c_v 는 측정된 투수계수 k 와 식 (2)와 식 (3)에 의해 계산된 압축계수 m_v 에 의해 테르자기의 일축압축이론에서 유도된 다음 식(4)에 의해 얻어진다

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} \quad (4)$$

2.2 실험 준비 및 방법

본 연구에서 사용된 시료는 국내에서 대표적인 실험용 표준사로 사용되고 있는 주문진 표준사와 북미의 대표적인 실험용 표준사인 오타와 샌드에 카올리나이트 점토를 다양한 비율로 혼합하여 제작되었다. 주문진 표준사와 오타와 샌드의 일반적인 물성치는 다음과 같이 표 1에 나타내어지고 두 모래의 입도분포특성은 그림 1에 보여진다.

표 1. 주문진 표준사와 오타와 샌드의 물성치 비교

물성치	주문진 표준사	오타와 샌드
비중	2.65	2.65
균등계수 C_u	1.49	1.89
D_{50} (mm)	0.53	0.31
e_{max}	0.605	0.495
e_{min}	0.980	0.767

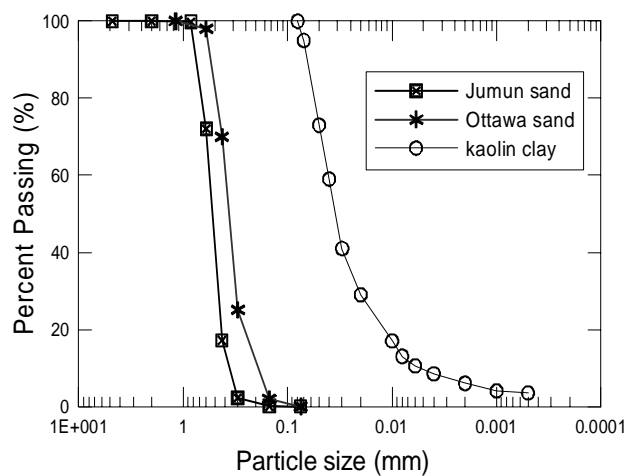


그림 1. 주문진 표준사, 오타와 샌드, 카올리나이트 점토의 입도분포곡선

순수한 모래 또는 모래와 실트가 혼합된 시료를 제작하는데 일반적으로 쓰이는 방법으로는 모이스트

땀핑(moist tamping) 방법, 슬러리 침강(slurry deposition)방법이나 대기 강사방법(dry air deposition) 등이 있다(Thevanayagam 등., 2002; Kuerbis and Vaid, 1988; Carraro 등., 2003). 이들 실험시료 제작방법들은 모래 또는 모래와 실트가 혼합된 시료의 상대밀도를 균질하게 하고 혼합토의 경우 일정한 혼합비를 유지하는 것으로 검증되어 있다. 본 연구에서는 카올리나이트 점토의 혼합비가 10%에서 약 30%정도까지 되도록 계획하였으므로 모래에 주로 쓰이는 재성형 시료방법을 이용할 경우 재료분리가 우려되었다. 따라서 본 연구에서는 점성토가 공학적 성질을 결정하는 혼합시료에 일반적으로 사용되는 슬러리 압밀 기법을 사용하였다. 점토질 흙의 경우 소성한계의 약 1.5배 내지 2배에 준하는 물을 혼합하여 슬러리를 만들어 압밀할 경우 균질한 시료를 얻는 것으로 알려져 있다(Sridharan and Prakash, 2001). 하지만 모래의 혼합비가 큰 경우 제작된 시료의 균질성을 검증한 연구결과가 없으므로 이 방법으로 제작된 시료를 연성벽체투수시험 종료 후 시료를 종방향으로 5조각으로 분리한 후 각각의 조각에 대해 함수비와 카올리나이트 점토의 혼합비를 측정하여 시료의 균질성 여부를 검증하였다.

재성형 시료의 제작과정은 다음과 같다. 먼저 계획된 건조중량 혼합비로 모래와 점토를 섞은 후 소성한계의 약 1.5배 또는 이에 준하는 증류수를 첨가하고 완전히 교반하여 슬러리 상태를 만든다. 믹스된 슬러리를 바닥 포러스스톤과 필터가 안치되고 멤브레인이 씌워진 직경 72mm, 높이 150mm의 분리형 삼축몰드에 50mm의 링을 수직연결한 셀에 안착시킨다(그림 2a). 안착된 슬러리 위에 포러스스톤, 필터와 캡을 얹고 30kPa의 연직응력을 가하여 1차 압밀시킨다(그림 2b). 1차 압밀이 종료된 후 상부의 캡과 포러스스톤은 제거한 후 상부에 연결된 링을 제거하고, 분리형 삼축몰드 위로 돌출된 부분의 시료를 컷팅한다(그림 2c). 시료의 상부를 평탄하게 한 후 필터와 포러스스톤을 시료위에 안착시키고 그 위에 캡을 씌운 후 멤브레인을 말아올린다. 그리고 난 후 상·하부의 캡에 연결된 관을 통해 시료내부에 진공압을 가하여 시료를 자립시킨 후 삼축몰드를 제거한다(그림 2d). 그다음 삼축시험기와 동일한 방법으로 셀을 준비하고 물을 채워 시험준비를 한다. 시료를 포화시킨 후 시료에 50kPa의 등방 구속압력을 가하여 2차 압밀 시킨다. 계획된 압밀스케줄에 의해 단계별로 구속압력을 증가시키며 투수시험을 실시한다. 투수시험중인 연성벽체 투수시험기가 그림 3에 보여지고 있다.

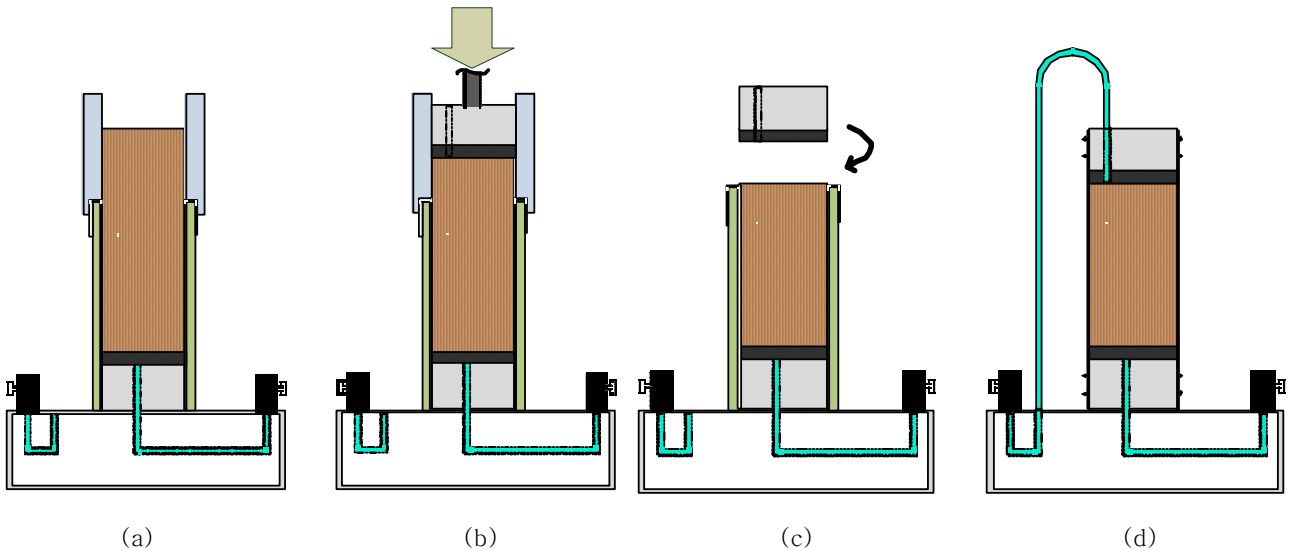


그림 2. 균질시료 제작을 위한 슬러리 압밀방법 (a) 슬러리 거치 (b) 연직하중 재하 (c) 상부 링 제거 및 상부시료 컷팅 (d) 상부캡 연결



그림 3. 연성벽체 투수시험기

연성벽체 투수시험은 총 15개의 각기 다른 혼합비를 가진 혼합시료에 대해 수행되었다. 오타와 모래와 카올리나이트의 혼합시료는 9개의 다른 혼합비(10%, 14.5%, 15%, 16.6%, 19%, 21%, 21.8%, 24%, 29.1%, kaolin clay)로 제작되어 시험이 수행되었으며, 주문진 표준사와 카올리나이트의 혼합시료는 6개(16%, 17.5%, 18.5%, 22%, 22.2%, 25%, kaolin clay)의 다른 혼합비로 제작되어 시험이 수행되었다. 오타와 샌드와 카올리나이트 점토의 혼합시료는 앞서 설명한대로 시료를 제작한 후 등방 구속압력을 50kPa에서 70kPa, 100kPa, 150kPa, 220kPa의 4단계로 점차 증가시켜가면서 각 단계에서 투수계수와 압밀계수를 측정하였다. 한편 주문진 표준사와 카올리나이트 점토의 혼합시료의 경우 50kPa에서 100kPa, 150kPa, 220kPa의 3단계로 등방구속압력을 증가시켜가며 각 단계에서 투수계수와 압밀계수를 측정하였다. 각각의 구속압력 단계에서 정수두 투수시험을 실시하여 투수계수 k 를 얻었으며, 식 (2)와 식 (3)에 의해 K_0 상태에서의 m_v 가 얻어지고, 식 (4)에 의해 c_v 가 계산된다.

3. 실험 결과

연성벽체 투수시험에 앞서, 본 실험에서 사용된 슬러리 압밀방법에 대한 적정성 검토를 하였다. 시료의 점토함유량이 낮은 경우 슬러리 압밀방법에 의한 시료제작과정중 모래와 점토의 분리현상(segregation)이 발생할 가능성이 있었고, 또한 시료가 입자분리현상 없이 등질의 시료가 만들어졌다 하더라도 점토의 혼합비가 낮으면 투수계수시험도중 점토입자들이 모래의 간극사이로 수압차에 의해 이동할 가능성도 배제할 수 없었다. 이와 같은 입자분리 또는 세립자의 이동이 일어날 경우 실험결과 얻어진 투수계수의 신뢰도가 떨어지며 점토의 혼합비가 낮은 시료와 혼합비가 높은 시료에서 얻어진 결과를 비교 분석할 때 신뢰도가 떨어지게 된다. 따라서 투수시험 실시 후 10.0%, 14.5%, 19%, 21.8%의 네가지 다른 혼합비의 시료에 대해 시료의 균질성 여부를 테스트하였다. 투수시험이 끝난 시료를 수직으로 5단으로 분리하여 각각의 세그먼트에 대해 점토의 혼합비와 함수비를 측정하였으며, 그 결과 각 세그먼트들 결과는 높이에 따라 점토의 함량비의 변화나 함수비의 변화가 미소하며 허용가능한 범위에 있었다.

수행된 연성벽체 투수시험의 결과가 그림 4와 그림 5에 나타났다. 오타와 모래와 카올리나이트 점토의 혼합비와 압밀응력의 변화에 따른 투수계수, 압축계수, 그리고 압밀계수의 변화가 그림 4에 나타나며, 주문진 모래와 카올리나이트 점토에서의 투수계수, 압축계수, 그리고 압밀계수의 변화를 그림 5에 각각 도시하였다. 그림 4(a)와 그림 5(a)에서 나타나듯이 투수계수는 등방압축응력의 증가에 따라 감소

하는 경향을 보여주지만 큰 변화를 보여주지는 않으며 그보다는 카올리나이트 점토의 혼합비에 따라 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 오타와 샌드와의 혼합시료의 경우 혼합비가 10%에서 29%로 증가하는 동안 투수계수는 대략 100배 정도 감소되었음을 볼 수 있고 주문진 표준사와 혼합된 경우 혼합비가 16%에서 25%로 증가하는 동안 약 50배 정도 감소되었음을 볼 수 있다. 그림 4의 (b)와 (c), 그림 5의 (b)와 (c)에 나타나고 있는 압축계수와 압밀계수의 결과는 모두 구속압력의 증가에 따라 큰 변화를 보이지 않으며 투수계수와 마찬가지로 카올리나이트 점토의 혼합비에 따라 변하고 있다. 그래프상에서 압축계수는 혼합비의 변화에 대해 10배 이내의 변화를 보이고 있으나 압밀계수는 혼합비의 변화에 따라 매우 큰 변화를 보여 오타와 샌드와의 혼합시료의 경우 혼합비가 10%에서 29%로 증가하는 동안 대략 500배 정도 감소되었고 주문진 표준사와 혼합된 경우 약 100배 정도 감소되었음을 볼 수 있다. 투수계수와 압밀계수의 카올리나이트 점토의 혼합비에 따른 관계는 그림 6에서 보여진다. 이는 앞선 연구에서도 보여지듯이 흙의 구조가 non-floating 에 가까운 경우 간극비에 따른 영향보다는 함유된 점토의 흡착력에 의해 투수계수가 영향을 받음을 알 수 있다.

그림 6은 점토 혼합비에 대해 구속압력 150kPa에서의 투수계수와 압밀계수의 선형적 상관관계를 보여준다. 그림에서와 같이 실험이 수행된 점토 혼합비의 구간에서는 투수계수와 압밀계수가 log 그래프 상에서 선형적으로 감소함을 볼 수 있다. 동일한 점토의 혼합비에서는 주문진 표준사와의 혼합시료가 오타와샌드 혼합시료에 대한 실험결과보다 투수계수와 압밀계수가 더 큼을 알 수 있는데 이 차이는 순수 모래와 혼합시료의 간극비 차이에 의해 설명될 수 있다. 주문진 표준사의 최대간극비와 최소간극비는 각각 0.98과 0.61이었으며 이 값들은 오타와샌드의 최대간극비와 최소간극비인 0.78과 0.41에 비해 상당히 크다. 따라서 소량의 점토와 동일한 혼합비를 가질 때 구조적으로 주문진 표준사와의 혼합시료에서 점토 입자들은 더 자유로운 구조를 가지며, 따라서 주문진 표준사와의 혼합시료에서 더 큰 투수계수를 가지게 된다. 그러나 이러한 혼합시료의 구조적인 차이는 점토의 혼합비가 커질수록 감소하며, 점토의 혼합비가 커져 구조적 성질을 지배하는 혼합비에서는 차이가 없어지게 된다. 그림 6(a)의 그래프에서도 카올리나이트 점토의 혼합비가 낮은 부분에서는 투수계수의 차이가 크지만 점토함유비가 25%인 시료에서는 투수계수의 차이가 적음을 알 수 있다.

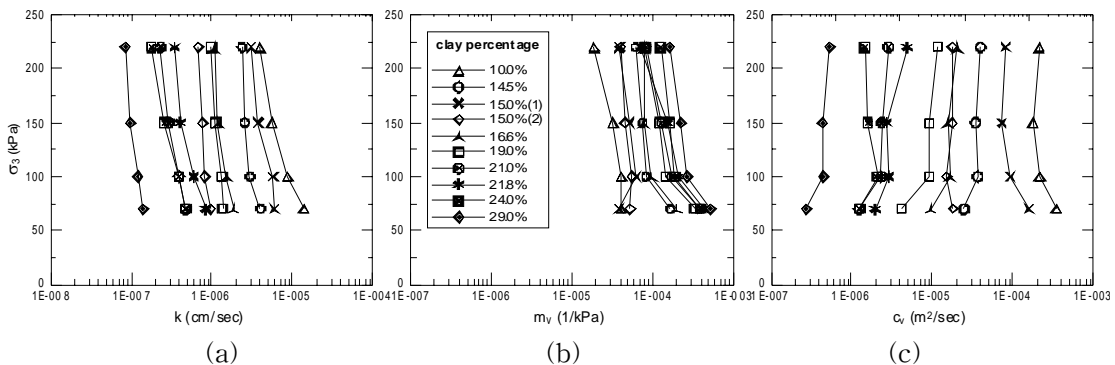


그림 4. 오타와 샌드 - 카올리나이트 점토의 등방압축응력증가에 따른 연성벽체 투수시험 결과
(a) 투수계수 k , (b) m_v , (c) c_v

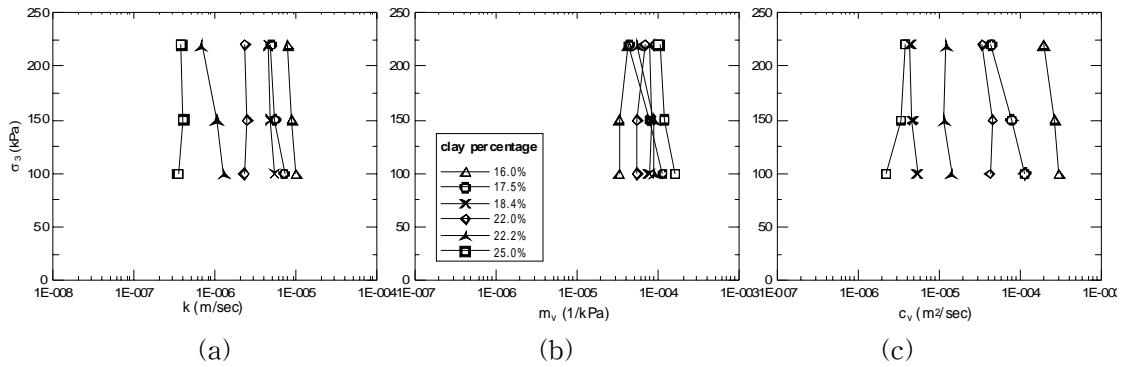


그림 5. 주문진 표준사 - 카올리나이트 점토의 등방압축응력증가에 따른 연성벽체 투수시험 경과
(a) 투수계수 k , (b) m_v , (c) c_v

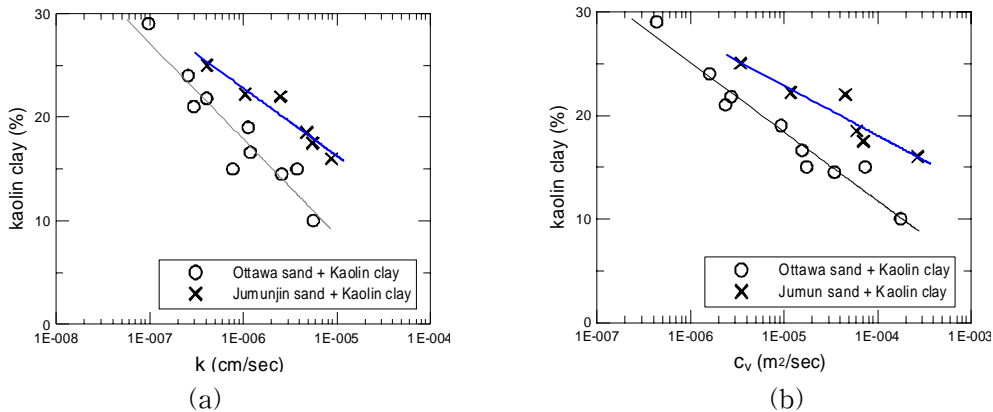


그림 6. 구속압력 150 kPa 일때 카올리나이트 점토의 혼합비와의 상관관계 (a) 투수계수 (b) 압밀계수

모래에 세립질(점토, 실트)의 흙이 혼합될 때 일정 혼합비까지는 세립질을 흙의 공학적 거동에 영향을 끼치지 않으며 전체적인 흙의 공학적인 거동은 모래에 의해 결정된다. 하지만 세립자의 함유비가 증가함에 따라 세립자는 모래입자 사이의 간극을 채워나가며, 어느 이상의 함유비에서는 모래입자들의 접촉면에 세립자들이 끼어들어가 입자들을 분리시켜 전체적인 흙의 공학적 거동이 바뀌게 된다. 이와 같이 모래와 세립토의 혼합비에 따라 흙은 공학적 거동을 달리 하며 이를 흙의 구조(fabric)에 따라 정량화하기 위한 노력이 있어왔다(Thevanayagam, 1998; Thevanayagam 등., 2002; Salgado 등., 2000; Carraro 등., 2009; Vaid, 1994; Kuerbisr and Vaid, 1988). 모래와 세립토의 혼합시료의 공학적 특성이 모래에 의해 주도될 때를 모래의 안정구조 (non-floating fabric) 상태로 보고 세립분에 의해 주도될 때를 부유구조 (floating fabric) 상태라 하며 이를 구조 간극비(skeleton void ratio) e_{sk} 를 써서 정량적으로 구분하였다(Thevanayagam 등., 2002; Vaid, 1994). 구조간극비는 다음과 같은 식 (5)로 계산된다.

$$e_{sk} = \frac{e+f}{1-f} = \frac{e+1}{1-f} - 1 \quad (5)$$

여기서, e = 흙의 간극비(global void ratio), f = 세립분의 전체흙에 대한 중량비이다. 식 (5)에 의해 계산되어진 e_{sk} 가 순수모래의 최대간극비 e_{max} 보다 클 경우 흙은 부유구조를 가지며, 반대로 최대간극비보다 작을 경우 흙은 안정구조를 가진다(Salgado, 2000). 이러한 세립자의 간극채움에 대한 구조적인 해석은 모래와 세립자의 혼합토에서 일반적인 간극비의 변화양상과도 연관되어 있다. 세립토의 혼합비가 작을 때는 세립분이 모래의 간극사이를 채워주기 때문에 혼합비가 일정비율에 도달할때까지 간극비가 감소하지만 모래입자간의 접촉이 분리된 이후에는 세립자 자체의 간극비가 전체간극비를 결정하게되어

혼합비의 증가에 따라 간극비가 증가하게 된다. Thevanayagam (1998)은 일반적으로 20%에서 30%사이의 세립분 혼합비에서 이러한 간극비의 전환이 이루어진다고 하였다. 본 논문에서는 모래와 점토 혼합 시료의 구조적 변화 및 간극비의 전환이 투수계수와 압밀계수에 미치는 영향에 대해서 검토하였다.

흙의 구조변화에 따른 간극비의 변화와 투수계수의 변화를 알아보기 위해 시료의 점토의 혼합비에 따른 구조변화를 알아보았다. 연성벽체시험에 수행된 시료들의 구조간극비와 점토함유비에 따른 비교를 그림 7에 나타내었다. 그림 7(a)에서 보여지듯이 주문진 표준사의 혼합시료는 대략 점토의 혼합비 22% 정도 이상에서 부유구조(floating fabric)로 바뀌지만 오타와 샌드의 혼합시료는 대략 15% 정도 이상의 점토 혼합비에서 부유구조(floating fabric)로 바뀌음을 알 수 있다. 앞서 그림 6에 보여진 혼합비에 따른 투수계수의 그래프에서도 시료의 구조가 바뀌는 22%의 점토 혼합비(주문진 표준사)와 15%의 점토 혼합비(오타와 샌드)에서의 1×10^{-6} cm/sec 내외의 유사한 범위의 투수계수를 보여주고 있다.

흙의 입자구조의 변화는 그림 8에서 보여진 점토의 혼합비에 따른 간극비와 투수계수의 관계에서도 명확히 나타나는데 그림에서 보여지듯이 주문진 표준사는 약 15% 정도의 혼합비까지는 간극비는 0.5 내외의 일정한 수준을 유지하다가 그 이상의 혼합비에서는 간극비가 증가함을 알 수 있다. 한편 오타와 샌드의 경우 22.2%의 혼합비까지는 간극비가 0.5내외로 거의 일정하다가 25%의 혼합비에서는 간극비가 0.6정도로 증가하고 있다. 그림 8에서 보여진 간극비와 투수계수의 결과에 의하면 투수계수는 점토입자가 구조를 지배하는 부유구조에서는 간극비와 상관관계를 가질 가능성이 있으나 안정구조(non-floating fabric)에서는 점토의 혼합비에 따라 간극비의 변화가 없어 간극비와 상관관계가 없다. 따라서 점토의 혼합비가 10% 에서 30%인 혼합토의 경우 점토의 혼합비에 의해 투수계수는 가장 큰 영향을 받으며, 순수모래의 초기 간극비에 의해서도 영향을 받는다.

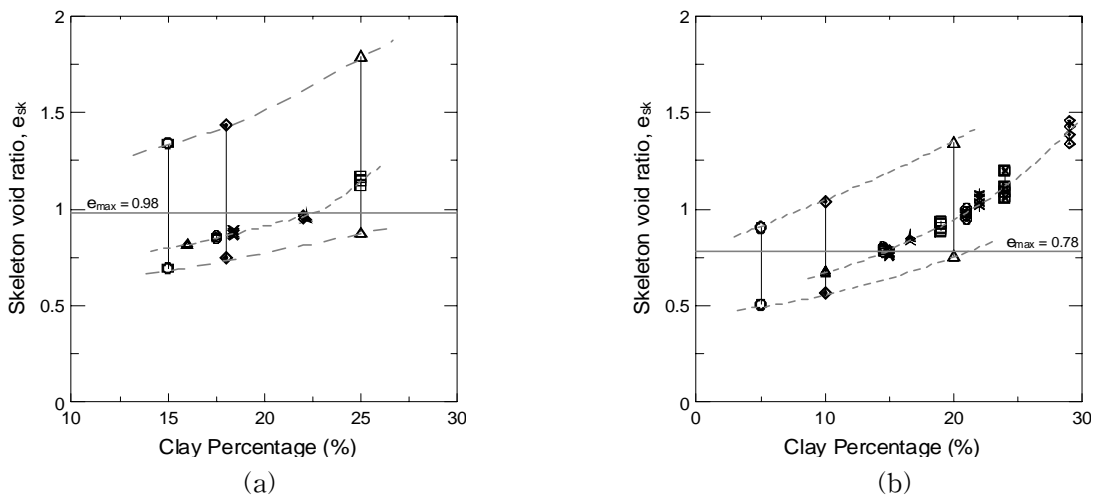


그림 7. 혼합비의 변화에 따른 구조 간극비 비교 (a) 주문진 표준사 (b) 오타와 샌드

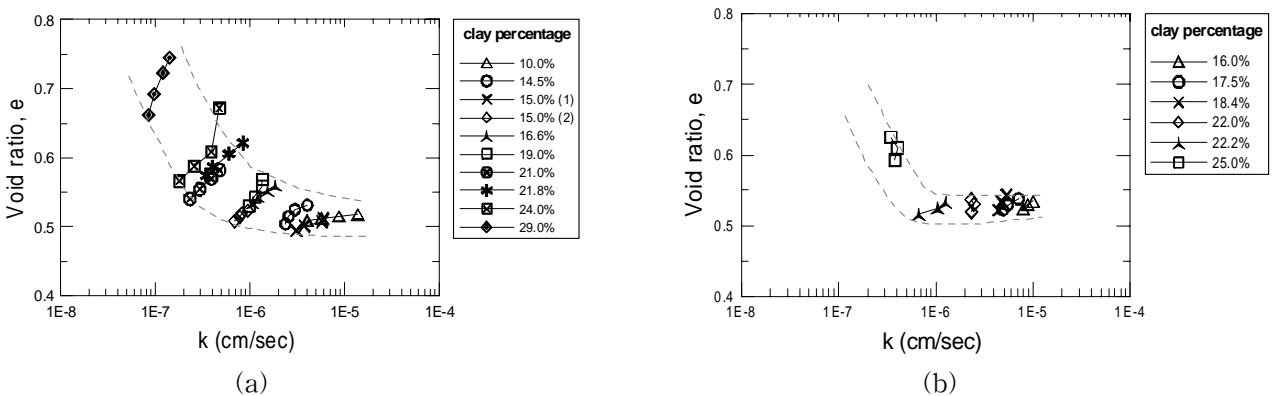


그림 8. 혼합비의 변화에 따른 투수계수와 간극비의 상관관계 (a) 주문진 표준사 (b) 오타와 샌드

4. 결론

본 연구에서는 모래에 혼합된 점토의 혼합비에 의한 투수계수와 압밀계수의 영향분석을 위해 주문진 표준사와 오타와 샌드에 카울린 점토를 다양한 혼합비로 섞은 시료를 제작하여 연성벽체 투수시험을 실시하였다. 본 실험에서 사용된 시료 제작방법인 슬러리 압밀방법은 모래와 점토의 분리현상이 일어나지 않고 간극비의 균질성을 확보, 슬러리 압밀방법이 매우 유효함을 확인하였다. 연성벽체 투수시험 결과는 다음과 같다.

1. 투수계수는 등방압축응력의 증가에 따라 감소하는 경향을 보여주지만 큰 변화는 나타나지 않으며 카울리나이트 점토의 혼합비에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.
2. 압축계수와 압밀계수의 결과는 모두 구속압력의 증가에 따른 영향이 적으며 투수계수와 동일하게 카울리나이트 점토의 혼합비에 영향을 받는 것으로 나타났다. 투수계수와 압밀계수를 로그-로그 그래프 상에 나타내었을 때 실험이 수행된 점토혼합비의 범위인 10%부터 30%의 사이에서 선형적 상관관계를 나타내었다.
3. 동일한 점토의 혼합비에서는 주문진 표준사와의 혼합시료가 오타와샌드 혼합시료에 대한 실험결과보다 투수계수와 압밀계수가 크게 나타났다. 이는 간극비 차이에 의한 영향으로 판단되며 점토의 혼합비가 증가할수록 차이가 감소하였다.
4. 주문진 표준사의 혼합시료는 점토의 혼합비가 22%정도 이상에서 부유구조로 바뀌고 오타와 샌드는 15%이상의 혼합비에서 부유구조로 바뀔을 확인하였다. 각각의 혼합시료가 부유구조로 바뀔 때의 시료의 투수계수는 $1 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 내외의 유사한 범위를 나타냈다.
5. 간극비-투수계수-혼합비에 대한 관계를 분석한 결과, 각각의 혼합시료가 부유구조로 바뀔 때까지는 간극비가 일정한 경향을 나타내고 있으나 그 이상의 혼합비에서는 간극비가 증가하고 있음을 확인하였다. 즉, 투수계수는 점토입자가 구조를 지배하는 부유구조에서는 간극비와 상관관계를 가질 가능성이 있으나 안정구조에서는 점토의 혼합비에 따른 상관관계가 없는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Carraro, J., Bandini, P. & Salgado, R.(2003), "Liquefaction resistance of clean and nonplastic silty sands based on cone penetration resistance". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 129, pp.965~976.
2. Carraro, J., Prezzi, M. and Salgado, R.(2009), "Shear strength and stiffness of sands containing plastic or nonplastic fines", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 135, pp.1167.
3. Garcia-bengochea, I., Lovell, C. and Altschaeffl, A.(1979), "Pore distribution and permeability of silty clays", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 105, pp.839~856.
4. Hazen, A.(1930), *Water supply. american civil engineers handbook*, John Wiley and Sons, New York.
5. Kenney, T., Lau, D. and Ofoegbu, G.(1984), "permeability of compacted granular materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 21, pp.726~729.
6. Kuerbis, R. and Vaid, Y.(1988), "sand sample preparation: the slurry deposition method", *Soils and Foundations*, Vol. 28, pp.107~118.
7. Raju, P., Pandian, N. and Nagaraj, T.(1995), "analysis and estimation of the coefficient of consolidation", *Astm Geotechnical Testing Journal*, Vol. 18, pp.252~258.
8. Salgado, R., Bandini, P. and Karim, A.(2000), "shear strength and stiffness of silty sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 126, pp.451.
9. Samingan, A., Leong, E. and Rahardjo, H.(2003), "A flexible wall permeameter for measurements

- of water and air coefficients of permeability of residual soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, pp.559~574.
10. Sivapullaiah, P., Sridharan, A. and Stalin, V.(2000), "Hydraulic conductivity of bentonite-sand mixtures", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 37, pp.406~413.
 11. Sridharan, A. and Nagaraj, H.(2004), "Coefficient of consolidation and its correlation with index properties of remolded soils", *Astm Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, pp.469~474.
 12. Sridharan, A. and Nagaraj, H.(2005), "Hydraulic conductivity of remolded fine-grained soils versus index properties", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 23, pp.43~60.
 13. Sridharan, A. and Prakash, K.(2001), "Consolidation and permeability behavior of segregated and homogeneous sediments", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 24, pp.109~120.
 14. Thevanayagam, S.(1998), "Effect of fines and confining stress on undrained shear strength of silty sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 124, pp.479~491.
 15. Thevanayagam, S., Shenthan, T., Mohan, S. and Liang, J.(2002), "Undrained fragility of clean sands, silty sands, and sandy silts", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 128, pp.849.
 16. Vaid, Y.(1994), "Liquefaction of silty soils". ASCE Geotechnical Special Publication, Vol. 44, pp. 1~16