

유한변형을 압밀이론에 의한 남해안준설토의 압밀특성에 관한 연구 The Study on the Consolidation Characteristics of South Coast Spoil Reclaimed Ground by Finite Strain Consolidation Theory

송명규¹⁾, Myung-Gyu Songi, 임종철²⁾, Jong-Chul Im, 권정근³⁾, Jeong-Geun Kwon, 주인곤⁴⁾, In-Gon, Ju

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil Engineering, Pusan University

²⁾ 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan University

³⁾ 부산대학교 토목공학과 박사과정, Ph.D. candidate, Dept. of Civil Engineering, Pusan University

⁴⁾ 부산정보대학 건축디자인학과 교수, Professor, Dept. of Architecture Design, Busan Info-tech College

SYNOPSIS : Recently this country has carried out the coast reclamation centering on the west and south coast for effective practical use of a country, considering purchase of materials and environmental problem, most reclaiming work is processing to spoil reclamation which is easy to secure the amount of materials. In case of weak ground that is formed by spoil reclamation like this, initial moisture content is high, as slurry state that is rarely revealed ground strength, compressibility and water permeability have been shown nonlinear change by compaction progress. Analysis of weak ground is unreasonable because the existing Terzaghi compaction theory analyzes compaction fixed number to regular invariable number for prediction of compaction state. This study computes the relation with void ratio-effective pressure and void ratio-finite transformation which is the most basic matter to predict finite strain compaction state of the south coast spoil, and analyze the basic feature to predict compaction feature of the south coast spoil reclaimed ground.

Keywords : spoil reclamation, finite strain compaction

1. 서론

최근 우리 나라는 국토의 효율적인 활용을 위하여 서,남해안을 중심으로 해안매립을 활발하게 실시하고 있다. 국내에서의 초기 매립공사는 매립에 이상적인 재료인 투수성이 좋고 압축성이 작은 쇄석이나 산토, 해성모래를 이용하여 매립하였으나, 최근 들어서는 자연경관 파손, 생태계 파괴 등의 환경적 문제가 대두됨에 따라 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라에서 대부분의 공사가 물량확보가 용이한 준설토 매립으로 진행되고 있다. 이렇게 준설된 해성점토에 의해 조성된 기초지반은 지지력이 거의 없는 슬러리 상태의 초연약 지반을 형성하게 되며 오랜시간에 걸쳐 침강 및 자중압밀 과정을 걸치게 된다. 자중압밀이 종료된 준설매립토 역시 매우 연약하여 Terzaghi의 압밀이론이 아닌 유한변형을 압밀이론에 지배를 받는다.

위와 같이 준설·매립에 의해 형성된 초연약지반의 경우 자중압밀이 완료된 후에도 압밀 진행에 따른 압축성과 투수성이 비선형적 변화를 보이게 된다. 비선형적인 압밀침하현상의 예측을 위해서는 다양한 유효응력(특히 매우 작은 값의 유효응력)에 따른 간극비 및 투수계수의 관계를 표현할 수 있는 재료의 구성관계 (Material function)의 정립이 선행되어야 한다.

본 연구는 자중압밀이 완료된 남해안 준설토를 대상으로 저응력압밀, 표준압밀, 일정변형률압밀시험을 시행하고 그 결과를 바탕으로 유한변형 압밀 현상을 예측하기 위한 가장 기본적인 사항인 간극비~유효응력 및 간극비~투수계수의 관계를 구하여 남해안 준설매립토의 압밀거동을 예측하기 위한 기본 특성을 분석하였다.

2. 선행연구사례

연약점토의 일차원 압밀에 관한 이론식은 Terzaghi가 압밀지배방정식을 제안한 이래로 보다 개선된 압밀지배방정식이 소개되었다. Richart(1957)는 얇은 점토층에 관한 일차원 압밀해석을 위하여 유효응력~간극비 관계를 비선형 함수를 사용한 미소변형률에 근거한 압밀지배방정식, Raymond(1969)는 Richart(1957)의 지배방정식을 개선하여 간극비~유효응력~투수계수 관계의 경험식을 고려한 유한변형률 압밀지배방정식, Mikasa(1963)는 초기 간극비가 점토층의 깊이에 따라 일정하다는 제한조건하에 일반적인 유한변형률 압밀지배방정식, Schiffman and Gibson(1964)은 제한 조건이 없는 비선형 구성관계를 고려한 일반적인 미소변형률 압밀지배방정식, Davis and Raymond(1965)는 비선형적 유효응력~간극비 관계의 경험식을 사용한 미소변형률 압밀식, Gibson, Schiffman and Cargill(1981)은 일정한 압밀함수 및 간극비~유효응력간의 지수함수를 사용한 압밀 지배 방정식을 사용하였다.

특히, Gibson, England and Hussey(1967)는 간극의 완전포화, 유효응력 법칙과 Darcy 법칙의 유효, 토립자와 간극수의 비압축성등의 기본 가정하에 간극수와 토립자로 구성된 혼합체의 힘의 평형, 토립자와 간극수의 시간변화에 대한 질량보존을 고려한 연속정리, 간극비~유효응력~투수계수간의 구성식을 이용하여 다음 식 (1)과같이 비선형 유한 변형률 압밀 지배방정식을 유도하였다.

$$\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{1+e} \right] \frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서, γ_s 는 토립자의 단위중량(비중), e 는 간극비, z 는 Reduce 좌표, k 는 투수계수, γ_w 는 물의 단위중량, σ' 는 유효응력, t 는 시간이다.

상기의 지배 방정식의 특징은 간극비~유효응력 및 간극비~투수계수의 관계에 대하여 특정의 제한조건 없이 유효응력과 투수계수의 변화를 간극비의 함수로 표시하므로써 임의의 비선형 구성관계에 대하여도 적용 가능한 비선형 압밀이론으로, Reduce 좌표로 구성식을 표시함으로써 Convective 좌표로 변환이 가능할 뿐 아니라 점토층의 압밀에 의한 변형률의 크기에 제한을 받지 않는 유한 변형률 압밀 지배방정식의 형태를 지니고 있다.

상기의 압밀지배방정식에서 간극비, 유효응력 및 투수계수 사이의 관계를 표시하는 구성식을 다음의 매개변수 식을 사용하여 식 (2)와 같이 단순화된 매개변수 압밀방정식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{1}{h_z^2} \frac{\phi_2(e)}{\gamma_w} \frac{\partial^2(e)}{\partial Y^2} + \frac{\phi_2'(e)}{\gamma_w} \left[\frac{\partial(e)}{\partial Y} \right]^2 \frac{1}{h_z^2} + \left[\frac{\gamma^* \phi_1'(e)}{h_z} - \frac{Y \gamma_z}{h_z} \right] \left[-\frac{\partial e}{\partial Y} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

여기서, $\phi_1(e) = \frac{k(e)}{e+1}$, $\phi_2(e) = \frac{k(e)}{e+1} \frac{d\sigma'}{de}$, $\phi_1'(e) = \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{e+1} \right]$

$$\phi_2'(e) = \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{e+1} \left[-\frac{d\sigma'}{de} \right] \right], \quad \gamma^* = \left[\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right]$$

매개변수 식 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_1' , ϕ_2' 는 실험을 통하여 구한 간극비-유효응력과 간극비-투수계수 관계의 일차 및 이차 도함수로 표시한 식이다.

3. 실험방법

3.1 준설토 구성관계식 연구범위

준설에 의한 침강 후 자중압밀 및 저응력에서 고응력에 이르는 압밀상태를 분석하기위해 저응력압밀

시험, 표준압밀시험, 일정변형률압밀시험을 수행하고, 시험결과를 이용하여 준설토의 간극비~유효응력~투수계수의 관계식을 회기분석으로 산정하고자 한다. 준설에 의한 침강 후 자중압밀 및 저응력에서 고응력에 이르는 압밀상태를 분석하기위해 저응력압밀시험, 표준압밀시험, 일정변형률압밀시험을 수행하고, 시험결과를 이용하여 준설토의 간극비~유효응력~투수계수의 관계식을 회기분석으로 산정하고자 한다. 상세시험내용은 표 1과 같으며, 각 시험방법에 따른 압밀하중 범위는 그림 1과 같다. 준설토의 간극비~유효응력~투수계수의 상관관계 산정방법은 그림 2에 나타내었다.

표 1. 간극비-유효응력-투수계수 산정시험 항목

항 목		내 용	목 적	
기본물성시험		<ul style="list-style-type: none"> • 함수비, 입도분석, 비중, 액·소성 • 염분비 산정시험 	<ul style="list-style-type: none"> • 준설토의 기본특성 파악 • 염분비 보정 	
역학시험	압밀 시험	표준압밀시험	<ul style="list-style-type: none"> • 함수비 80%, 90%, 100% • 5kPa ~1280kPa까지 하중재하 	<ul style="list-style-type: none"> • 준설 슬러리의 간극비~유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계 파악 • 고응력부분의 준설토 압밀구성관계 규명
		일정변형률 압밀시험	<ul style="list-style-type: none"> • 함수비 80% 	<ul style="list-style-type: none"> • 준설 슬러리의 간극비~유효응력, 간극비~투수계수의 구성관계 파악 • 초기 침하에 민감함 상부 재하관의 자중 영향이 없음으로 표준압밀 시험보다 낮은 응력에 대한 준설토 압밀구성관계 규명
		저응력 압밀시험	<ul style="list-style-type: none"> • 직경 25cm의 침강시험기를 이용하여 슬러리 상태의 연약층에 대한 압밀시험 실시 • 1kPa ~24kPa까지 하중재하 	<ul style="list-style-type: none"> • 간극비가 큰 상태의 간극비~유효응력관계를 규명
투수시험	변수위 투수시험	<ul style="list-style-type: none"> • 저응력 압밀시험의 각 압밀하중 완료 후 변수위 투수시험 실시 	<ul style="list-style-type: none"> • 저응력압밀 상태의 간극비~투수계수 관계 규명 	

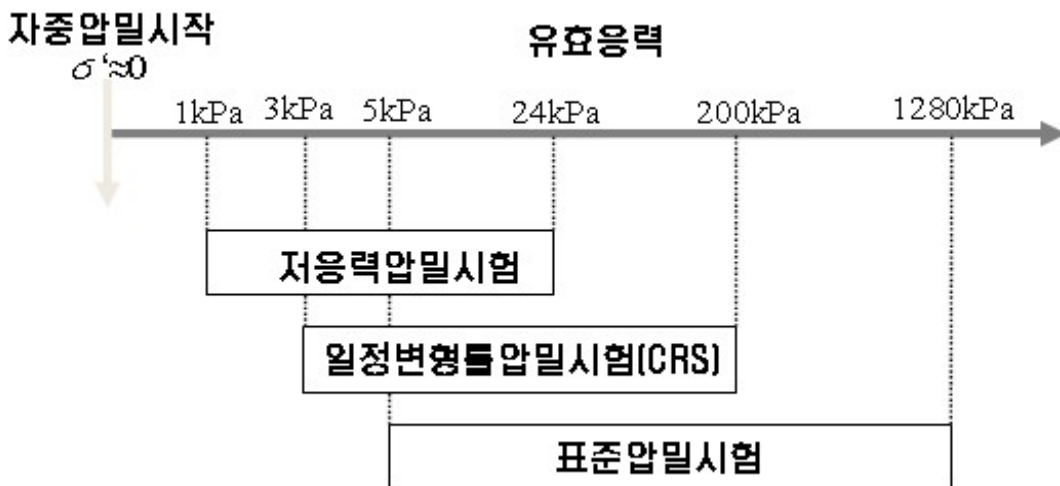


그림 1. 준설토 압밀특성 규명을 위한 각 시험법별 유효응력 범위

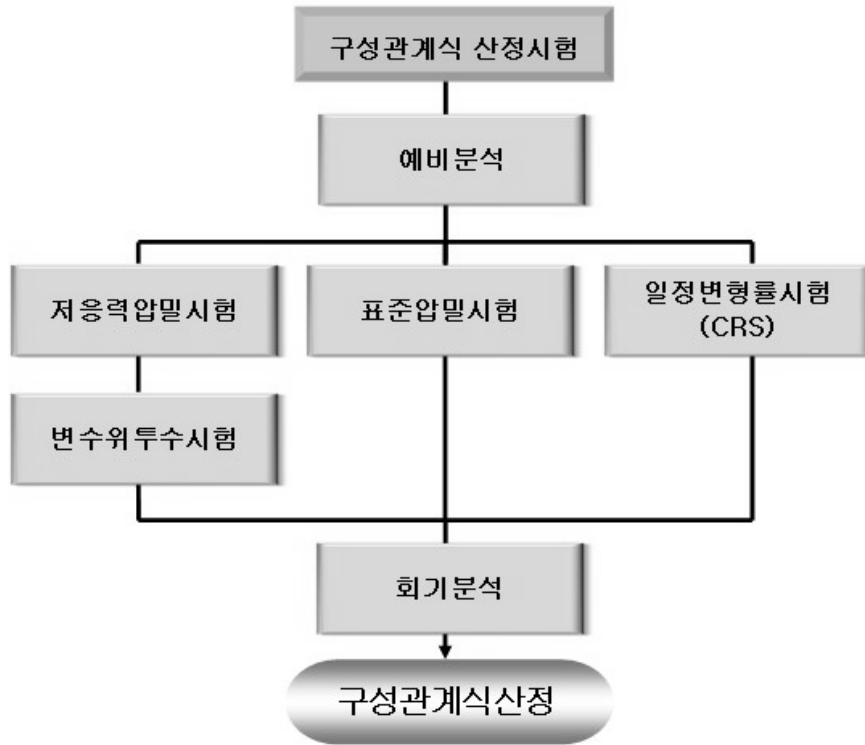


그림 2. 간극비-유효응력-투수계수 산정시험 수행절차

3.2 준설토 기본물성시험

1) 함수비 시험

- 한국산업표준 KS F 2306에 의거 실시
- 시험 대상 시료의 원지반 함수비를 측정
- 함수비 사용시 염분비 보정하여 사용

2) 비중시험

- 해상점토의 비중을 측정하기 위하여 KS F 2308에 의거
- 현장에서 채취한 시료를 사용하여 3회 시험한 평균값 사용

3) 액·소성시험

- 액·소성 시험은 한국산업표준 KS F 2303, KS F 2304에 준하여 실시
- 준설토의 액·소성한계는 탈염상태와 염수상태에 대해 값이 변화되나 본 시험에서는 염수를 이용하여 현장에서 채취한 시료를 3회 시험한 평균값을 사용

4) 입도분석

- 준설토의 입도를 분석하기 위해 KS F2302에 의거 체분석시험을 실시
- No. 200체를 통과하는 시료(입경 0.074mm이하)에 대해서는 비중계 분석 시험 실시
- 준설토가 염분의 영향으로 면모화하는 것을 방지하기 위하여 한국산업표준 KS F2302에 의거 흙의 소성지수에 따라 핵사메타인산나트륨 용액 분산제로 사용

3.3 침강 및 자중압밀시험

준설 현장과 동일한 조건을 모델링하기 위해 초기 투기 함수비를 결정하여 침강 및 자중압밀을 실시한다. 원형 Column에 함수비 700%로 제도된 준설 슬러리를 투기하고, 계면고를 측정한다. 계면고의 정확한 측정을 위하여 총 4면에 각각 측정용 자를 부착하고, 굴절오차를 최소화하기 위해 Column내부에 측정용자를 부착하여 관측하도록 한다. 계면고의 관측은 예비실험을 통해 투기 후 800분 내에 침강이 끝나는 변곡점이 발생하는 것을 토대로 800분까지는 세밀히 관측을 하였고, 그 이후로는 12시간 간격으로, 자중압밀 중간시점에는 1일에 한번 씩 관측한다.

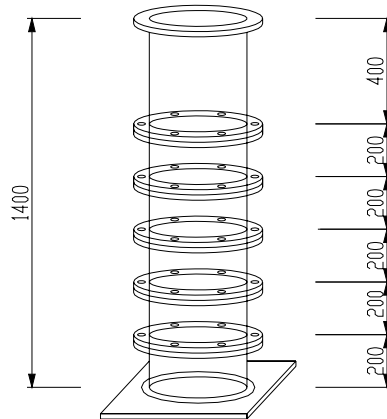


그림 3. 침강실험장치

3.4 저응력 압밀시험

3.4.1 저응력 압밀시험

침강과 자중압밀이 끝난 시료를 저응력압밀시험기로 옮겨서 안정화를 시킨후, 공압을 이용해 1, 3, 6, 12, 24kPa의 하중을 단계별로 가한다. 시험장치는 그림 4에 나타내었다.

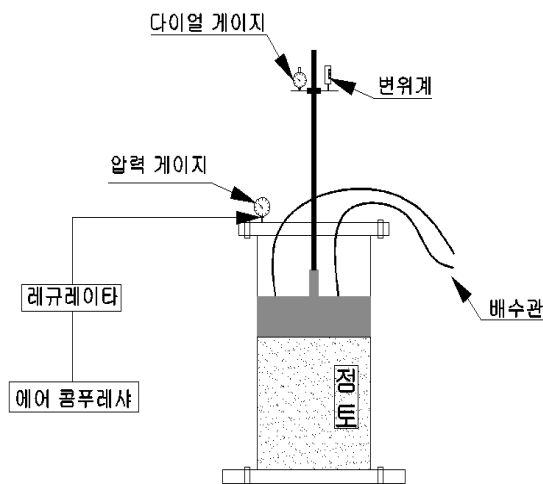


그림 4. 저응력압밀시험기 개요도

3.4.2 변수위 투수시험

간극비~유효응력관계뿐 아니라 간극비~투수계수의 관계산정을 위하여 변수위 투수시험이 필요하다. 저응력 압밀시험 중 투수시험이 불가능하므로 투수시험을 위한 시료를 따로 제작한다. 따라서, 저응력압밀시험의 대응으로 Column을 5개를 준비하여 침강과 자중압밀이 끝난 시료와 동일한 시료를 제작하여 1kPa, 3kPa, 6kPa, 12kPa, 24kPa로 하중을 재하한다 각 단계별로 저응력압밀이 종료된 시료를 추출하여 변수위 투수시험을 실시하였다.

3.5 표준압밀시험

준설토 투기 후 시간 경과에 따라 변화하는 준설토 슬러리의 간극비~유효응력 및 간극비~투수계수의 구성관계를 파악하기 위하여 표준압밀시험을 수행하였다. 본 시험은 저응력압밀시험 및 일정변형률압밀시험(CRS)보다 큰 하중상태를 재현할 수 있어 고응력 부분의 준설토 압밀 구성관계 규명에 중요한 요소이다.

본 시험은 교란시료에 대해 함수비 80%, 90%, 100%의 시료를 제작해 표준압밀 시험을 수행한다. 표준압밀 시험은 KS F 2316 규정에 의거하여 시료에 점증적으로 하중을 가하여 시료의 압밀을 유도하는 점증하중을 단계별 5kPa에서 1280kPa까지 가하여 압축지수, 체적압축계수, 압밀계수 등의 압밀정수를 구한 후 간극비~유효응력 관계를 규명한다. 표준압밀실험을 수행하는 동안 각 하중단계에서 압밀완료 후 주어진 소정의 간극비에 대한 투수계수를 측정하기 위하여 시료의 하부 배수경계면에 Stand Pipe를 설치하여 변수위 투수실험을 수행하여 간극비~투수계수의 구성관계를 규명하였다.

3.6 일정변형률 압밀시험

일정변형률 압밀시험은 준설토 슬러리를 현장함수비와 유사한 함수비 80%로 제조하여 1회를 수행하였다. 고함수비의 초연약 준설토에 대한 압밀하중 재하시의 문제점(매우 작은 초기하중 재하 및 침하량의 측정 등)을 극복하기 위하여 일정변형률 압밀시험을 수행하였으며, 표준압밀시험과의 차이점은 다음과 같다.

- 초기 침하에 민감한 상부 재하판의 자중 영향이 없음
 - Back pressure를 작용시켜 시료 내의 공기를 제거하여 포화도를 높임
 - 매우 작은 수준의 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계 유도 가능
- 시험에 사용된 일정변형률 압밀시험기는 그림 5와 같다.

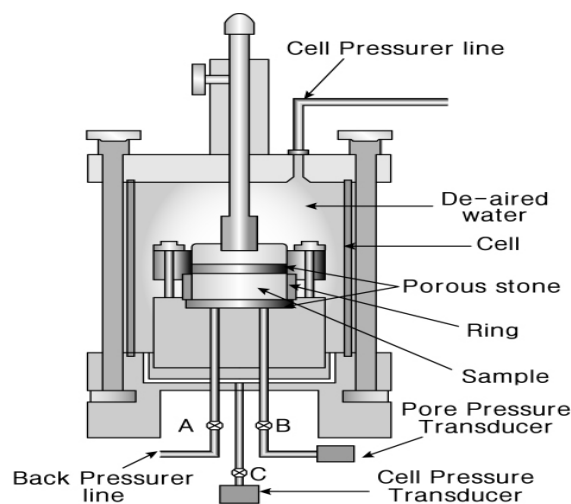


그림 5. 일정변형률 시험기

4. 결과분석

4.1 침강 및 자중압밀시험결과분석

초기함수비 700%의 시료를 제작하여 투기하고 계면고를 계측하였다. 계측결과 120cm의 시료는 침강 종료시 69.6cm의 침하량을 나타내었다. 계면고가 시간축에 평행한 creep거동을 나타낸 자중압밀구간은 24.1cm로 전체침하량의 20.1%를 차지하는 것으로 나타났으며 그림 6과 같다.

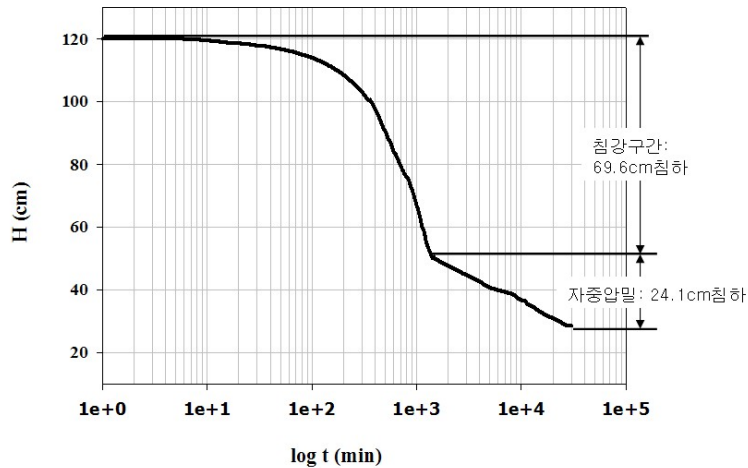


그림 6. 침강과 자중압밀의 침하량

4.2 저응력압밀시험

초기간극비가 18.55(초기 함수비 700%)인 시료는 자중압밀 종료시 3.975로 감소하였고, 저응력 압밀 시험 결과 압밀하중 24kPa 종료시 1.78로 상당한 범위에 걸쳐 압밀이 진행된다는 것을 알수 있었으며, 그 결과는 그림 7과 같다.

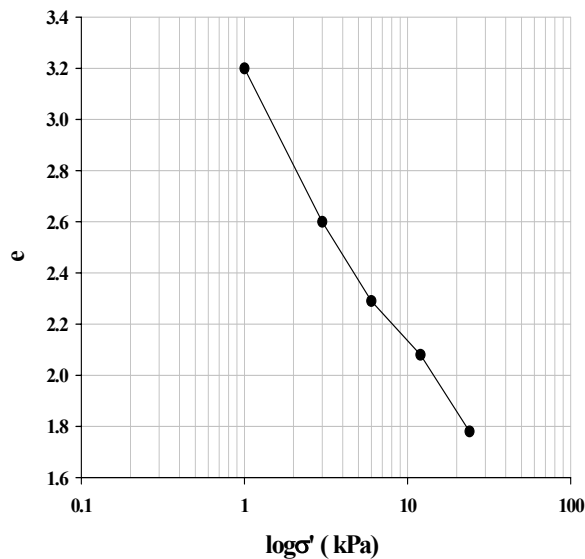


그림 7. 간극비 ~ 유효응력관계

4.3 변수위 투수시험

변수위투수시험결과 간극비~투수계수의 관계는 간극비가 커짐에 따라 투수계수가 증가하는 것으로 나타났으며, 산정된 투수계수의 범위는 $5.495 \times 10^{-7} \sim 1.479 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 으로 나타났으며, 간극비~투수계수관계는 그림 8과 같다.

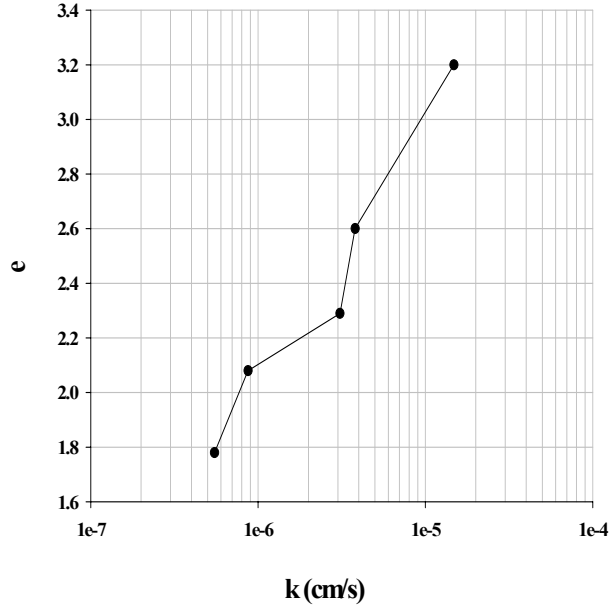


그림 8. 간극비~투수계수관계

4.4 표준압밀시험

본 시험은 교란시료에 대해 함수비 80%, 90%, 100%의 시료를 제작해 수행한 결과 그림 8,9,10에서 보듯이 간극비와 유효응력과 관계는 준설패립토의 특성상 선형압밀하중이 나타나지 않고 거의 직선적으로 나타났다. 압밀하중이 커짐에 따라 유효응력~간극비 곡선이 비선형적 거동을 나타내었다. 이는 초기함수비가 높아 압밀침하량의 과다로 인해 발생하는 것으로 판단된다.

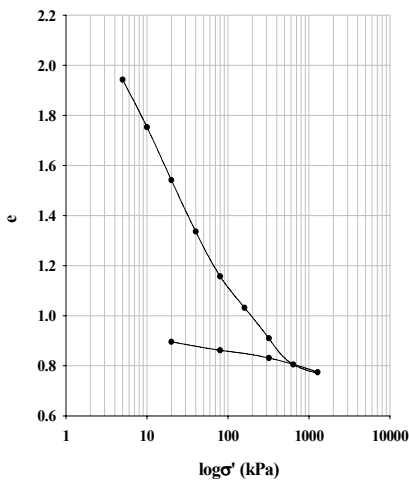


그림 8. 함수비80%
간극비~유효응력

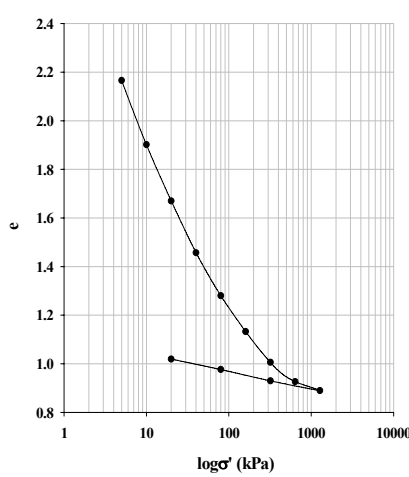


그림 9. 함수비90%
간극비~유효응력

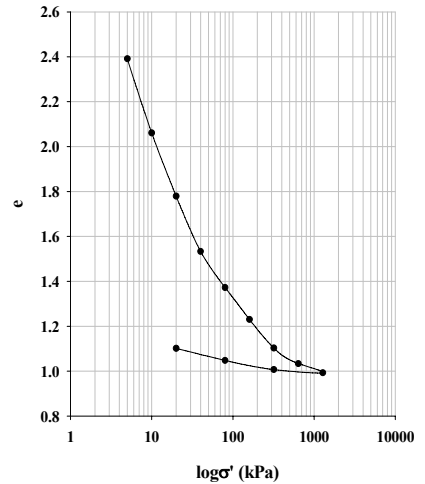


그림 10. 함수비100%
간극비~유효응력

투수계수는 $k = C_v m_v \gamma_w$ 의 관계식을 이용하여 추정된 결과 그림 11,12,13에서 보는바와 같이 간극비가 증가함에 따라 투수계수도 증가하는 경향을 나타내었다..

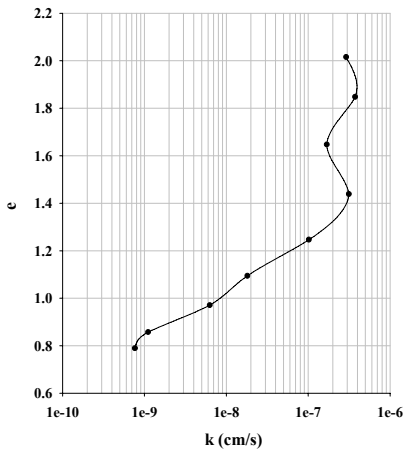


그림 11. 함수비80%
간극비~투수계수

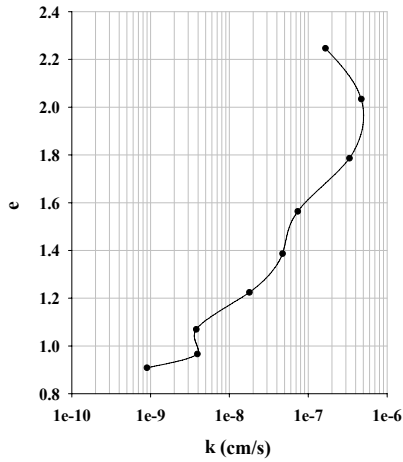


그림 12. 함수비90%
간극비~투수계수

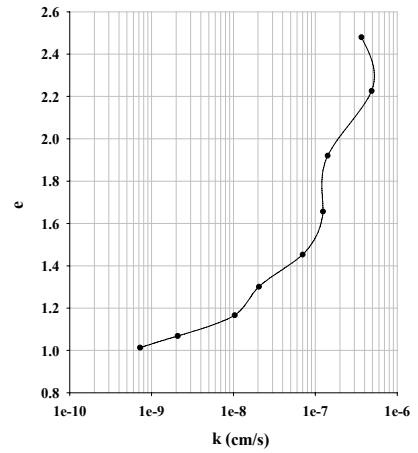


그림 13. 함수비100%
간극비~투수계수

4.5 일정변형률 압밀시험

준설패립토와 같이 매우 큰 간극비를 갖는 고함수비의 초연약 점토의 압밀특성을 파악하기 위하여 저응력압밀시험 및 표준압밀시험을 수행하였으며, 그 결과와 연계하여 일정변형률 압밀을 수행함으로써 준설토의 간극비~유효응력, 간극비~투수계수의 비선형 구성관계를 합리적으로 규명하고자 하였다. 실험결과 간극비 $e = 1.2 \sim 1.9$ 범위에서 유효응력 $3 \sim 200 \text{ kPa}$ 의 범위를 나타내었으며 그림 14와 같다.

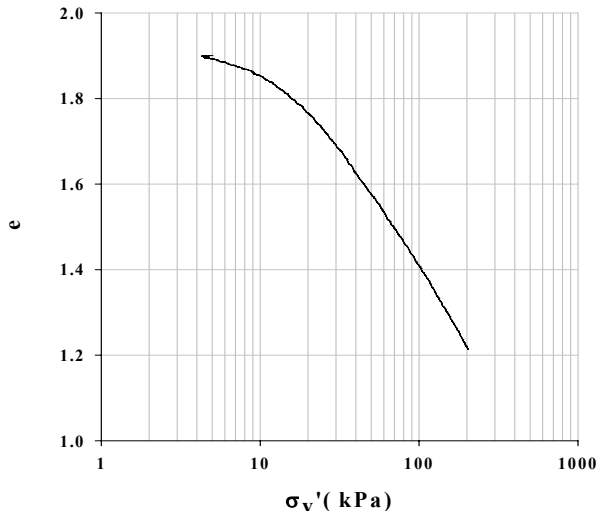


그림 14. CRS의 간극비~유효응력 관계

4.6 압밀구성관계식 산정

준설패립토에 의해 형성된 준설토의 압밀 특성을 파악하고자 저응력압밀 시험 및 표준압밀시험, 일정변형률 압밀시험(CRS) 시험을 수행하였다. 시험결과에 의해 산정된 준설토의 간극비~유효응력, 간극비~투수계수의 비선형적 관계를 도시하여 회기 분석을 통하여 구성관계식을 산정하였다.

4.6.1 간극비~유효응력관계

본 연구에서는 준설·매립에 의해 형성된 초연약 준설토의 시간 경과에 따른 간극비~유효응력의 관계를 저응력압밀, 표준압밀 및 일정변형률압밀시험(CRS) 결과를 바탕으로 Somogyi(1980)의 식 ($e = A \sigma'^B$) 으로 표현한 결과 실제 준설토 거동과 근접하며 그림 15와 같다.. 회기분석결과 간극비~유효응력 관계식은 $e = 2.8464 \sigma'^{-0.1594}$ 로 나타났다.

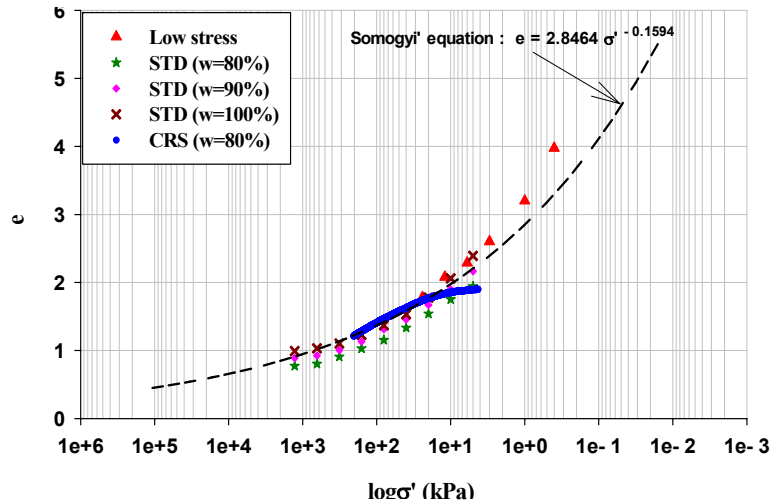


그림 15. 준설토의 간극비-유효응력관계

4.6.2 간극비~투수계수관계

본 연구에서는 준설·매립에 의해 형성된 초연약 준설토의 시간 경과에 따른 간극비~투수계수 관계를 저응력압밀, 표준압밀 및 일정변형률압밀시험(CRS) 결과를 바탕으로 Somogyi(1980)의 식 ($e = C k^D$) 을 이용, 회기분석에 의해 구성관계를 추정하였으며, 결과는 그림 16와 같다. 회기분석결과 간극비~투수계수 관계식은 $e = 13.458 k^{0.1325}$ 로 나타났다.

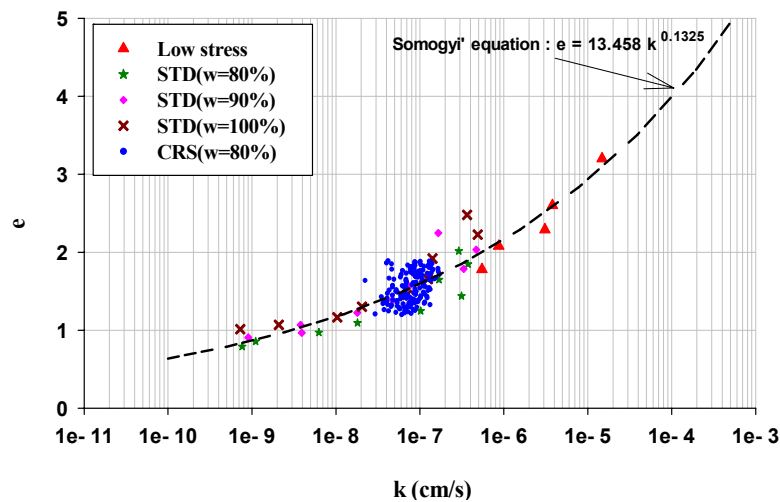


그림 16. 간극비-투수계수관계

5. 결론

본 연구는 남해안 응동지구 1단계 항만배후단지(제1공구)에 매립된 준설토에 대하여 기본물성시험, 함수율 선정시험 및 염분비 보정을 통해서 준설토의 특성을 분석하였고, 침강 및 자중압밀시험을 끝낸 시료에 대하여 저응력압밀시험, 변수위투수시험, 표준압밀시험, 일정변형률압밀시험(CRS test)을 각각 수행하여, 그 시험결과를 이용하여 준설토의 간극비~유효응력 및 간극비~투수계수 관계식을 회기분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 침강 및 자중압밀시험 결과 120cm 높이의 시료는 69.6cm의 침하량을 나타냈으며, 시간축에 평행한 creep거동을 나타내는 자중압밀구간은 24.1cm로 전체침하량의 20.1%로 준설토의 자중압밀도가 차지하는 비율이 상당함을 알 수 있었다.

2) 초기간극비가 18.55(초기 함수비 700%)인 시료는 자중압밀 종료시 3.975로 감소하였고, 저응력 압밀시험 종료시에는 간극비 1.78로 감소하여 자중압밀 종료 후에도 상당한 범위에 걸쳐 압밀이 진행됨을 알 수 있었다.

3) 저응력압밀, 표준압밀, 일정변형률압밀시험의 결과를 바탕으로 압밀구성관계식을 산정한 결과 Somogyi(1980)의 식으로 표현한 결과값이 남해안 준설토의 압밀거동과 가장 근접함을 알 수 있었으며, 관계식은 다음과 같다.

$$\text{○간극비-유효응력관계식은 } e = 2.8464 \sigma'^{-0.1594}$$

$$\text{○간극비- 투수계수의 관계는 } e = 13.458k^{0.1325}$$

참고문헌

1. Gibson, R. E., England, G. L. and Hussuy, M. J. L.(1967), " The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clay I: Finite Non-linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers ", Geotechnique, Vol. 17, pp. 261-273.
2. Gibson, R. E., Schiffman, R. L. and Cargill, K. W.(1981), " The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clay II : Finite Non-linear Consolidation of Thick Homogeneous Layers ", Canadian Geotechnique Journal, Vol. 18, pp. 280-293.
3. Mikasa, M.(1963), " The Consolidation of Soft Clay - A Comparison between Two Theory and its Application, Japanese Society of Civil Engineering Reprint from Civil Engineering in Japan pp. 21~26
4. Been. K. and Sills. G.C.(1981), "Self-Weight Consolidation of Soft Soils: An Experimental and Theoretical Study." Geotechnique. Vol. 31. No.4. pp 519~535
5. Davis. E.H. and Raymond. G.P.(1965), " A Non-Linear Theory of Consolidation." Geotechnique. Vol 15. pp. 161~173.
6. Lee. K. and Sills. G.C.(1981), "The Consolidation of a Soil Stratum. Including Self-Weight Effects and Large Strains." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. Vol. 5. pp. 405~429.
7. Pane.(1981) V., One-Dimensional Finite Strain Consolidation. M.S. Thesis. Department of Engineering University of Colorado. Boulder. Colorado. pp. 1~16.
8. Raymond. G.P.(1969), "Consolidation of Deep Deposits of Homogeneous Clay." Geotechnique. Vol. 19, pp. 478~494.
9. Schiffman. R.L. and Gibson. R.E.(1964), "Consolidation of Nonhomogenous Clay Layers." Journal of The Soil Mechanics and Foundation Divisions. ASCE. 90. SM5. Proceeding Paper 4043. pp. 1~30.
10. Townsend. F.C. and Mcvay. M.C.(1990), "Large Strain Consolidation." ASCE. Vol. 116. No. 2pp. 222~243.