

준설매립토지반의 압밀침하량 예측

Prediction of Consolidational Settlement of Dredged and Reclaimed Ground

유 남 재* 박 병 수** 정 길 수***
Yoo, Nam-Jae Park, Byung-Soo Jeong, Gil-Soo

Abstract

For soils with high void ratios, the inverse method of utilizing results obtained from centrifuge model test was used to find the constitutive relation of effective stress - void ratio - permeability whereas conventional oedometer test and constant rate of strain consolidation test were also used to fine its relation at ranges of relatively low void ratio. Results of column test about settlement of interface and pore pressure and distribution with time were compared with numerically estimated values to confirm such a constitutive relation as obtained from the inverse method. Consolidational settlement in dredged and reclaimed ground, where the consolidation was in progress, was predicted by using the numerical technique implemented with the finite strain consolidation theory.

키워드 : 준설매립토, 압밀, 원심모형실험, 유한변형률압밀, 역해석기법

Keywords : Dredged and Reclaimed Soil, Consolidation, Centrifuge Model Test, Finite Strain Consolidation Theory, Inverse method

1. 서론

최근 해안지역에서 활용가능 지반의 제한적 수급으로 인하여 해안매립에 의한 부지조성이 심각하게 요구되고 있다. 이와 같은 해안매립사업 수행시 부지조성을 위하여 해상에서 점토 또는 세립질의 흙을 준설하여 매립하거나, 또는 양호한 입도의 육상 흙을 운반, 다짐, 성토 할 때 준설매립토 자체의 압밀침하량, 또는 지반성토에 따른 하루 연약지반의 압밀침하거동에 관한 예측은 효율적인 매립지 설계 및 경제적인 시공관리상 매우 중요한 의미를 지닌다.

특히, 준설토의 자중 압밀이 진행되는 동안 침하

량과 전단강도의 변화를 예측하는 것은 매립물량의 산정, Dyke의 높이 결정, 준설 및 매립 공사기간 결정 및 그에 따른 시공비 결정, 준설 매립토의 전단강도 변화에 따른 적정의 공사장비의 투입시기 및 지반보강 공법의 결정 등에 영향을 미치는 매우 중요한 사항이다. 그와 관련하여 예측 방법이 다양하게 제시되어 온바 본 연구에서는 실내에서 수행한 준설토의 자중 압밀 특성을 구하기 위하여 <Fig. 1>에 보인바와 같은 표준압밀실험, 일정변형률 압밀실험, Column 실험, 원심모형실험 등의 실내 실험결과를 종합적으로 비교 분석하여 역해석 기법에 의하여 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계를 추정하고 현장조건이 주어진 시공조건에 대하여 준설매립토 지반의 압밀침하량 예측을 실시하였다.

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사
*** 강원대학교 대학원 토목공학과, 박사과정

2. 유한변형률 압밀이론

연약점토의 일차원 압밀에 관한 이론식은

Terzaghi[1]가 열전도(Heat Conduction)의 압밀지배 방정식을 제안한 이래로 제한된 가정을 사용한 보다 일반적인 압밀지배방정식이 소개되었다. Richart[6]는 얇은 점토층에 관한 일차원 압밀해석을 위하여 유효응력-간극비 관계를 비선형 함수를 사용하여 축소좌표(Reduced Coordinate, Z)로 표현한 유한변형을 압밀지배방정식, Raymond[5]는 Richart[6]의 지배방정식을 개선하여 간극비-유효응력-투수계수 관계의 경험식을 고려한 유한변형을 압밀지배방정식, Mikasa[4]는 최초로 토립자의 자중압밀 효과를 고려한 압밀지배방정식을 유도하였으며 초기간극비가 점토층의 깊이에 따라 일정하다는 제한조건하에 일반적인 유한변형을 압밀지배방정식의 형태를 제시하였다. Schiffman 과 Gibson[2]은 제한조건이 없는 비 선형 구성관계를 고려한 일반적인 미소변형을 압밀지배방정식, Davis 과 Raymond[1]는 비 선형적 유효응력-간극비 관계의 경험식을 사용한 미소변형을 압밀식, Gibson 등[3]은 일정한 압밀함수 및 간극비-유효응력간의 지수함수를 사용한 압밀 지배방정식을 사용하였다.

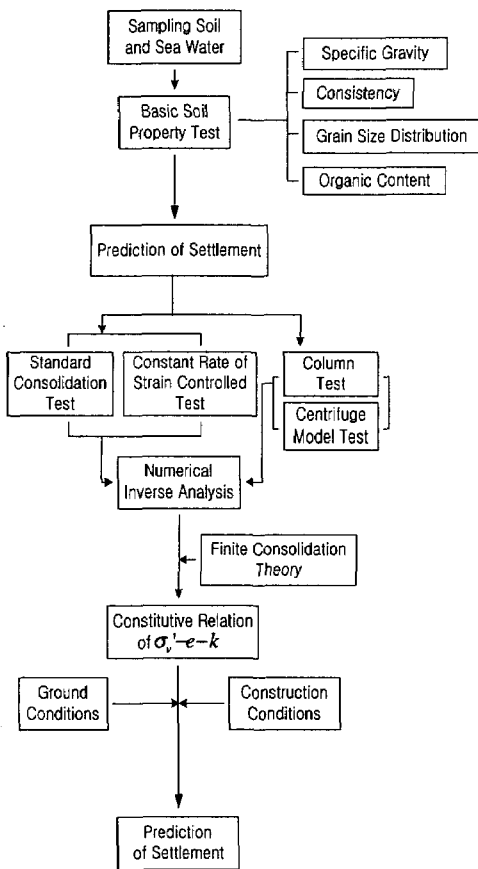


Fig. 1 Flow Chart for Research Scope

일반적으로 점토층 지반에서 발생하는 일차원 압밀량 및 압밀도를 산정하기 위하여 이용되고 있는 Terzaghi 압밀이론은 이론 전개시 설정한 압밀중 투수계수와 압축계수가 일정하다는 가정은 현장조건과 불일치하고 있다. 압밀층의 미소변형을 가정한다면 압밀층의 두께는 일정하며 기준면으로부터의 거리도 항상 일정하다고 할 수 있으므로, 시간에 관계없이 고정좌표인 Eulerian좌표를 생각할 수 있다. 그러나 준설매립토의 압밀침하량과 같이 대변형이 발생하는 경우는 기존의 압밀이론을 사용할 수 없다.

연약점토의 준설매립지반처럼 변형이 클 경우 Eulerian좌표의 사용은 토립자의 위치를 추적할 수 없는 한계성을 지니고 있기 때문에 침하이동하는 토립자에 기준을 둔 상대적인 변위를 알 수 있는 Lagrangian좌표의 사용이 요구된다. 유한변형을 압밀이론에서는 Eulerian좌표의 일반적인 경우인 시간의 변화에 따른 좌표의 변화를 고려한 이류좌표(Convective Coordinate)를 사용하는 한편 Lagrangian 좌표와의 변환관계를 이용하므로써 시간변화에 따른 압밀층 두께의 변화 및 임의의 점에서 의 간극비 또는 과잉간극수압의 크기를 정확히 추적할 수 있다.

Gibson 등[2]은 간극의 완전 포화, 유효응력 법칙과 Darcy 법칙의 유효, 토립자와 간극수의 비 압축성 등의 기본 가정 하에 간극수와 토립자로 구성된 혼합체의 힘의 평형, 토립자와 간극수의 시간변화에 대한 질량보존을 고려한 연속정리, 간극비와 유효응력의 구성식, 간극비와 투수계수의 구성식을 이용하여 다음 식 (1)과 같은 비선형 유한변형을 압밀지배 방정식을 유도하였다.

$$\left[\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right] \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{e+1} \right] \frac{\partial(e)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{\partial \sigma}{\partial e} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0$$

..... (1)

여기서, γ_s : 흙의 단위중량, γ_w : 물의 단위중량
 e : 간극수, k : 투수계수
 σ : 유효응력, z : 축소좌표
 t : 시간

상기의 지배 방정식의 특징은 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수의 관계에 대하여 특정의 제한 조건 없이 유효응력과 투수계수의 변화를 간극비의 함수로 표시하므로써 임의의 비선형 구성관계에 대하여도 적용 가능한 비선형 압밀이론으로, 축소 좌표로 구성식을 표시함으로써 이류 좌표로 변환이 가능할 뿐 아니라 점토층의 압밀에 의한 변형률의 크기에 제한을 받지 않는 유한변형을 압밀지배방정식의 형태를 지니고 있다. 한편, 과잉간극수압을 변수로 표시한 지배방정식은 토립자의 자중에 의한 압밀 효과를 외적규정으로 표시해야 되는 불편함이 있는 반면, 상기의 지배방정식은 간극비의 향으로

표시함으로써 토립자의 자중에 의한 압밀 효과가 자동적으로 고려되었다. 상기 식은 자중에 의한 압밀 효과를 나타낸 첫 번째항(Convective Term)과 상재 하중에 의한 압밀 효과를 나타낸 두 번째 항(Conduction Term)으로 구성되어 있으며, 시료의 두께가 적은 실내 압밀실험이나 현장조건에서 상재 하중의 크기가 점토 층의 자중의 크기 보다 상당히 클 경우에는 두 번째 항을 무시할 수 있다. 또한 축소 좌표를 사용함으로써 이동하는 경계조건 문제에서 수치해석을 보다 간단히 할 수 있는 편리함이 있다.

축소 좌표(Z)를 이용한 식 (1)은 일정한 흙의 체적에서 점토 층의 높이가 변하지 않는 고정된 압밀 층에서 경계치 문제를 해결하는데 사용되었다. 그러나 시간의 경과에 의해 점토 층의 두께가 증가되어 흙이 퇴적되는 경우 축소 좌표는 자중의 증가와 배수거리의 변화, 그리고 간극수압의 발생 등 이동하는 경계조건 문제로 그 적용에 한계성이 있다.

따라서, 점진적 준설매립 지반의 자중압밀일 경우 다음 식 (2)에 의해 정의된 무차원 축소 좌표(Y)로 문제점을 해결할 수 있다.

$$Y = \frac{Z}{h_z} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서, h_z : 토립자의 전 높이.

무차원 축소 좌표와 축소 좌표의 관계식을 이용, 좌표를 변환하여 시간의 경과에 의해 점토 층의 두께가 증가하는 경우 유한 압밀지배방정식은 다음 식 (3)과 같이 확장될 수 있다.

$$\left[\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right) \frac{d}{de} \left(\frac{k(e)}{(1+e)} - Y\gamma_z \right) \frac{\partial(e)}{\partial Y} + \frac{1}{h_z} \frac{\partial}{\partial Y} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma}{de} \frac{\partial e}{\partial Y} \right] + \frac{1}{h_z} \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \right. \dots\dots\dots (3)$$

상기의 지배방정식은 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 관계를 간극비의 지수함수로 표시하고, 이동하는 경계치 문제를 무차원의 축소 좌표를 사용하여 고정된 경계치 문제로 변환시켜 시간에 의한 배수거리의 변화와 자중의 증가를 고려한 점진적으로 누적 성토되는 준설매립지반의 자중압밀 해석 기법이다. 식 (3)의 지배방정식에서 간극비, 유효응력 및 투수계수 사이의 관계를 표시하는 구성식을 다음의 매개변수식을 사용하여 단순화시킴으로써 다음 식 (4)와 같은 매개변수 압밀방정식으로 표시할 수 있다.

$$\frac{1}{h_z^2} \frac{\phi_2(e)}{\gamma_w} \frac{\partial^2(e)}{\partial Y^2} + \frac{\phi_2'(e)}{\gamma_w} \left[\frac{\partial(e)}{\partial Y} \right]^2 \frac{1}{h_z^2} + \left[\frac{\gamma^* \phi_1'(e)}{h_z} - \frac{Y\gamma_z}{h_z} \right] \left[\frac{\partial e}{\partial Y} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서,

$$\phi_1(e) = \frac{k(e)}{e+1}, \quad \phi_2(e) = \frac{k(e)}{e+1} \frac{d\sigma}{de},$$

$$\phi_1'(e) = \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{e+1} \right], \quad \gamma^* = \left[\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right],$$

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

매개변수 식 $\phi_1, \phi_2, \phi_1', \phi_2'$ 는 실험을 통하여 구한 간극비-유효응력과 간극비-투수계수 관계의 일차 및 이차 도함수로 표시한 식이다.

압밀지배방정식의 해를 만족시키면서 주어진 시간에 대한 간극비의 값이에 따른 분포를 구하기 위하여 공간계에서는 중앙 차분법을, 시간계에서는 전향 차분법을 사용하여 간극비의 공간에 대한 일차 편도함수와 간극비의 시간에 대한 일차 편도함수를 각각 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{\partial e}{\partial Y}(y_i, t) \equiv \frac{\partial f_i}{\partial y} = \frac{1}{2\delta} [f_{i+1} - f_{i-1}] \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\frac{\partial^2 e}{\partial Y^2}(y_i, t) \equiv \frac{\partial^2 f_i}{\partial y^2} = \frac{1}{\delta^2} [f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}] \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t}(y_i, t) = \frac{1}{\tau} [e_i - f_i] \quad \dots\dots\dots (7)$$

한편, 경계조건에 대하여 정규압밀상태의 연약점토 층에서 자중압밀이 진행되는 경우, 두 가지의 경계조건을 고려할 수 있다. 압밀 층의 상하부면이 간극수가 자유롭게 빠져나갈 수 있는 양면배수의 경우와 상부 층은 배수 층이고 하부는 불투수층인 경우이다.

상부층에서 배수되는 경우, 압밀직전 ($t=0$) 때 경계면에 작용하는 연직 유효응력과 압밀 중 가해지는 상재하중의 합에 대응하는 간극비를 사용하여 간극비-유효응력 구성 경계조건식으로 표시할 수 있다.

압밀층 하부가 배수상태인 경우, 전술의 경계조건에 압밀 층의 자중에 의한 연직유효응력이 추가되어 표시할 수 있다.

한편, 압밀층 하부에서, 비배수 상태인 경우에는 비배수조건, 즉 토립자의 이동속도와 간극수의 이동속도가 동일한 조건과 토립자와 간극수로 형성된 혼합체의 힘의 평형관계를 고려하여 경계조건 문제를 해결할 수 있다.

3. 실험 및 결과분석

점토질의 준설매립토지반의 압밀특성을 파악하여 압밀침하량을 예측하기 위하여 기본물성시험, 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험, 대형 Column 시험, 원심모형시험을 수행하고 결과를 분

석하였다.

3.1 기본물성시험

부산의 준설패립지반에서 교란된상태로 채취한 시료의 기본물성 시험결과는 <Table 1>에 보인 바와 같으며 입도분포는 <Fig. 2>로 모래0.7%, 실트83.1%, 점토16.2%로 구성되어 있다.

Table. 1 Basic Soil Property Test Results

Gs	LL (%)		PL (%)	
	Oven Dry	Air Dry	Oven Dry	Air Dry
2.71	55.1	80.1	27.5	27.9
PI (%)		Organic Content(%)	USCS	
Oven Dry	Air Dry			
27.6	52.3	12.8	CH	

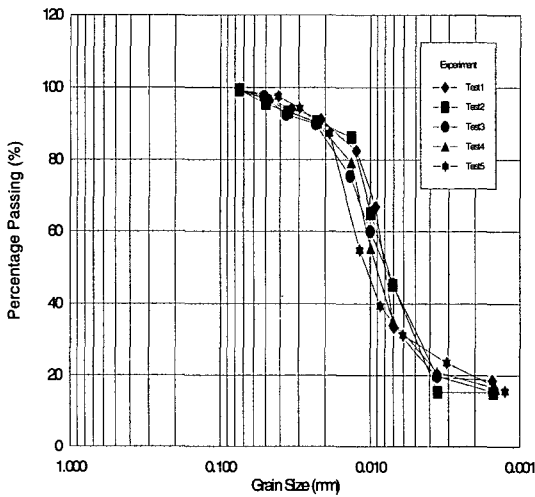


Fig. 2 Grain Size Distribution Curve

3.2 표준압밀시험 및 일정변형률 압밀시험

KS F 2316 규정에 의거하여 단계별 점중하중 재하 형태의 표준압밀시험을 실시하였으며 각 하중단계에서 압밀 완료 후 주어진 소정의 간극비에 대한 투수계수를 측정하기 위하여 시료의 하부 배수경면에 Stand Pipe를 설치하여 변수위 투수시험을 수행하여 간극비-투수계수의 구성관계를 구하였다.

또한, 비교적 높은 간극비(e=6.0)에서 시료의 구성관계식을 구하기 위하여 대형 압밀cell(직경=15cm)로 구성된 일정변형률 압밀시험기를 사용하였다.

<Figs. 3>과 <Fig. 4>는 표준압밀시험결과와 일

정변형률압밀시험결과 획득한 간극비-유효응력과 간극비-투수계수의 구성관계를 조합한 것으로 높은 초기 간극비에서부터 비교적 일관성있는 곡선을 나타내고 있음을 알 수 있다. 상기의 결과로부터 표준 압밀시험에서 비교적 높은 초기 간극비의 유효응력과 투수계수관계식을 얻을 수 없는 단점을 직경이 큰 압밀Cell을 이용한 일정변형률 압밀시험을 통하여 보완할 수 있음을 알 수 있다.

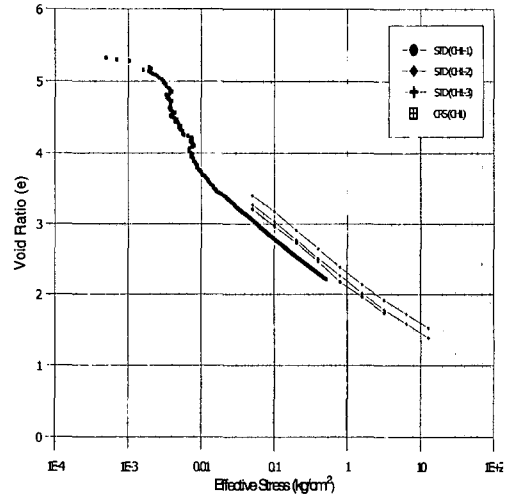


Fig. 3 Void Ratio-Effective Stress Relation

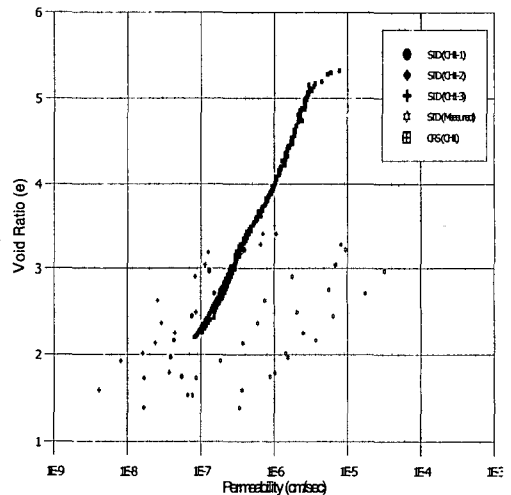


Fig. 4 Void Ratio-Permeability Relation

3.3 Column시험

초기간극비가 큰 준설패립토의 자중압밀특성을 실내시험으로 재현하기 위하여 높이 200cm, 직경 21cm의 Column을 <Fig. 5>에서 보인 바와 같이

Plexiglass로 제작하여 초기함수비를 250, 500%로 변화시켜가며, 일면배수조건인 토립자 자중에 의한 압밀을 유도시켜 실험을 수행하였고, 시간변화에 따른 압밀침하량 및 깊이에 따른 과잉간극수압분포를 측정하였다. 균일한 시료분포를 만들기 위해 Column바닥에 Air Compressor를 이용한 압축공기를 불어넣으면서, 계산된 혼합시료를 Column에 넣고, 충분히 교반 시킨 후 실험을 실시하였다.

침강압밀특성을 분석하기 위하여 준설토의 초기 조건에 따라 함수비를 250, 500%로 변화시켜가며 일면배수조건으로 실험을 수행하였다. 시간의 경과에 따른 침하계면을 측정함으로써 <Figs. 6~7>과 같은 시간-침하 곡선을 얻을 수 있었다.

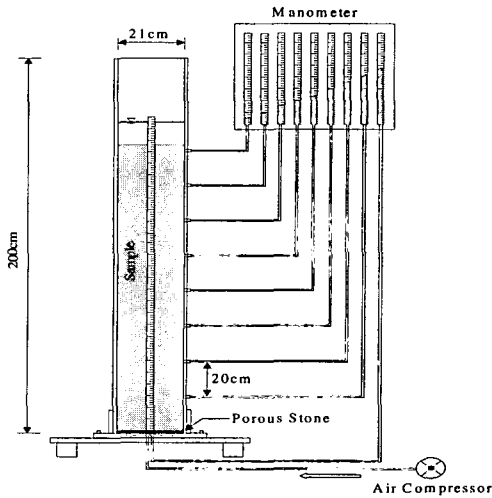


Fig. 5 Column

<Fig. 6>에서 침강단계가 보이지 않고 바로 자중압밀이 시작되는 모습을 나타내는데, 비교적 낮은 함수비에서는 토립자간 유효응력이 발현되어 응집 침강을 거치지 않고 자중압밀이 시작됨을 알 수 있다.

<Fig. 7>는 초기함수비가 크기 때문에 침강이 발생하여 침강단계와 압밀시작점의 변곡점이 관찰되며, 실질토량이 적어서 과잉간극수압이 빨리 소산되기 때문에 2차압밀시점을 나타내는 2차 변곡점이 보이기 시작하고 있다. 위의 곡선을 살펴보면, 같은 함수비의 두 실험의 시간경과에 따른 침하량이 다소 차이를 보이고 있는데 이는 시료의 투기후 교반에서 약간의 차이가 있었던 것으로 생각된다. 대체적으로 실험을 시작한후 초기에는 얼마의 시간이 경과할 때까지 침하량이 거의 없음을 보이는데 이는 초기에 고함수비를 갖는 Slurry 상태의 점토가 침강은 거의 발생하지 않고 Floc을 형성하는 단계

이며 초기에서 조금 벗어나면 침하곡선은 급격히 떨어지며 급한 경사를 보이는데 이 상태는 침강단계로 판단되어지며, 그 후 시간경과에 따라 침하곡선이 갑자기 완만해짐을 보이는데 이는 상부의 침강단계는 사라지고 자중압밀이 시작되는 압밀단계이다.

과잉간극수압의 측정은 Column측면에 바닥으로부터 상단까지 20cm 간격으로 Standpipe를 설치하여 Manometer에 연결함으로써, Column내에 시료를 투기한 직후 준설토의 침강 및 자중압밀 동안에 변화하는 과잉간극수압을 측정하였다.

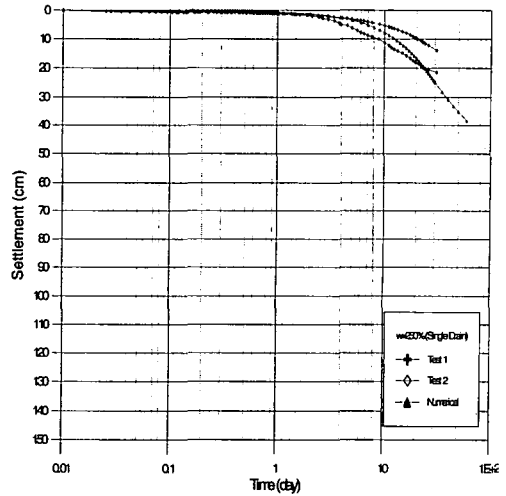


Fig. 6 Settlement with Time (w=250%, Single Drain)

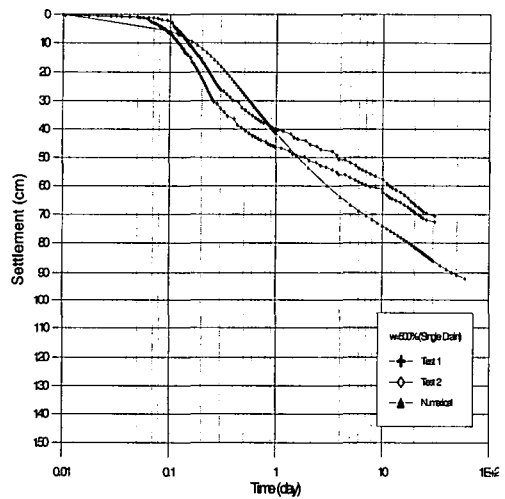


Fig. 7 Settlement with Time (w=500%, Single Drain)

<Figs. 8>과 <Fig. 9>는 초기 함수비를 변화시키면서 측정된 과잉간극수압의 깊이별 시간경과에 따른 분포를 도시한 것이다. 그림에서 깊이는 무차원으로 표시(z/H ; 여기서 z 는 시료의 깊이, H 는 과잉간극수압 측정부의 높이)한 것이며 이론치(Theoretic)는 슬러리 투여직후($t=0$) 간극수압분포($u = \gamma' z$; 여기서 γ' 는 슬러리의 유효단위중량, z 는 깊이)를 나타낸 것으로 측정치($t=0$ day)와 비교하기 위한 것이다.

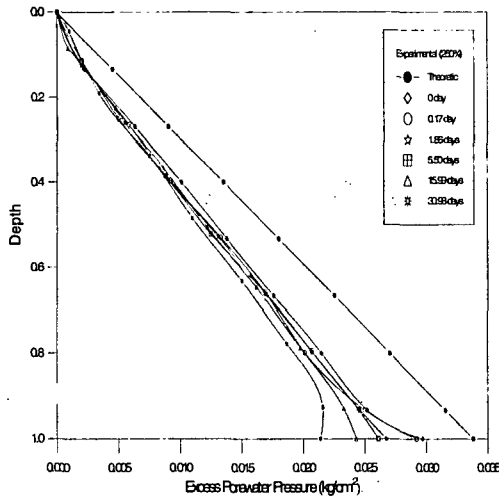


Fig. 8 Distribution of Measured Excess Porewater Pressure with Depth and Time ($w=250\%$, Single Drain)

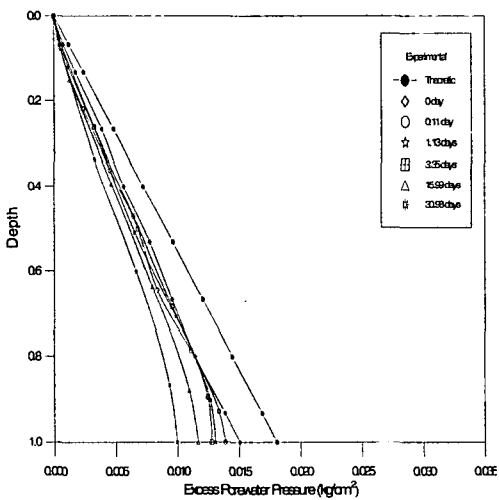


Fig. 9 Distribution of Measured Excess Porewater Pressure with Depth and Time ($w=500\%$, Single Drain)

250%, 500% 함수비의 초기 슬러리 농도에서는 이론적인 값에 비하여 감소된 과잉간극수압 분포를 나타내고 있다. 이러한 현상은 Column 하부에 공기 주입에 의하여 깊이에 따라 균질한 초기 함수비 분포를 유도하였으나, 측정시험에서 이미 자중압밀이 부분적으로 진행된 것으로 판단된다.

그림에서 볼 수 있듯이 초기 함수비가 증가할수록 유효단위중량이 감소하여 과잉간극수압 크기가 작을 뿐만 아니라 배수거리도 짧기 때문에 간극수압 소산 속도가 빠른 것으로 판단된다.

3.4 원심모형실험

준설매립토의 자중압밀특성을 규명하고 실험결과를 바탕으로 고함수비 상태의 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계식을 역해석하기 위하여 강원대학교 지반공학연구실에 위치한 원심모형실험기를 사용하여 원심모형실험을 수행하였다.

실험은 초기시료함수비를 200%와 250%로 성형하고 일면배수조건으로 시료높이 10cm에서 40G의 중력수준으로 가속시켜 실시하였다. 실험에 사용된 토조는 <Fig. 10>에 보이는 바와 같이 원형토조의

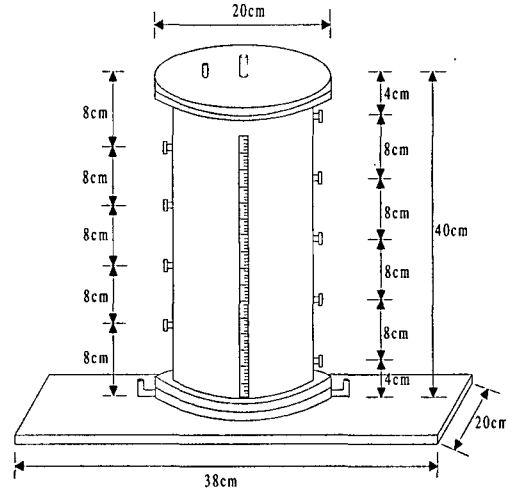


Fig. 10 The Model Container of Column

직경은 14cm이며 높이는 40cm이고, 토조의 측면에는 간극수압계를 설치할 수 있도록 2cm간격으로 단자가 설치되어 있다. 원형토조는 실험시 원심모형실험기내의 Swing Basket에 장착이 되며 토조의 전면 판은 투명한 아크릴 판으로 제작되어 실험시 실험기내에 있는 비디오 카메라와 SLR 카메라를 이용하여 시간에 따른 시료의 침하를 관찰할 수 있다. 또한, 시료의 침하를 관찰하기 위하여 토조의 전면 판 위에 Scale을 부착하였다. 실험완료후 깊이별 함수비는 시료의 추출 시 교란을 최소화하는 면적비를 고려한 시료 추출기를 제작하여 원심모형실험 후 시료의 깊이별 간극비를 측정하였다.

<Fig. 11>은 초기함수비 $w=200\%$, 대용간극비 $e=5.42$, 시료높이 $h=10\text{cm}$ 의 모형시료를 중력가속도 $40G$ (현장조건 $40G \times 10\text{cm}=400\text{cm}$ 점토층), 일면배수 조건에서 수행한 원심모형실험 결과에서 시간경과에 따른 압밀 침하량을 나타낸 것이다. 그림은 실험결과를 역해석에 의해 추정된 구성 관계식을 바탕으로 유한변형을 압밀이론을 사용한 수치해석으로 예측한 결과와 비교 분석한 것이다. 도시된 침하 및 시간에 대한 좌표축은 실험조건을 상사법칙에 의해 현장조건으로 환산하여 표현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 침강단계 없이 압밀이 시작됨을 볼 수 있으며, 예측과 실험결과가 상호 근접하게 나타남을 볼 수 있다.

<Fig. 12>는 초기함수비 $w=250\%$, 대용간극비 $e=6.775$, 시료높이 $h=10\text{cm}$ 의 모형시료를 중력가속도 $40G$ (현장조건 $40G \times 10\text{cm}=400\text{cm}$ 점토층), 일면배수 조건에서 수행한 실험결과이다. 실험결과에 비하여 수치해석 결과가 초기에 빠른 침하를 나타내고 있으나, 시간경과에 따라 실험값에 접근함을 알 수 있으며 최종 침하량은 거의 일치함을 볼 수 있다.

<Fig. 13>은 시간에 따른 측정된 과잉간극수압 분포를 수치해석과 비교한 결과를 보여준다. 전반적으로 측정된 과잉간극수압은 시간경과에 따라 감소되고 있음을 볼 수 있으며, 수치해석결과와 비교하여 실측치와 예측치의 과잉수압 소산이 유사하게 진행됨을 알 수 있다.

<Fig. 14>와 <Fig. 15>는 원심모형실험 완료 후 시료 추출기로 모형토조에서 시료를 채취한 후 깊이 별로 얇게 절단하여 함수비를 측정하여 간극비를 산정한 결과를 보여준다. 측정된 깊이별 간극비 분포를 역해석에 의한 구성관계식 추정에 의한 유한변형률 이론의 수치해석 결과와 비교를 실시하였다.

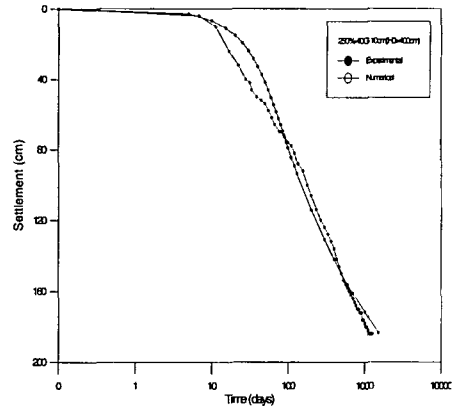
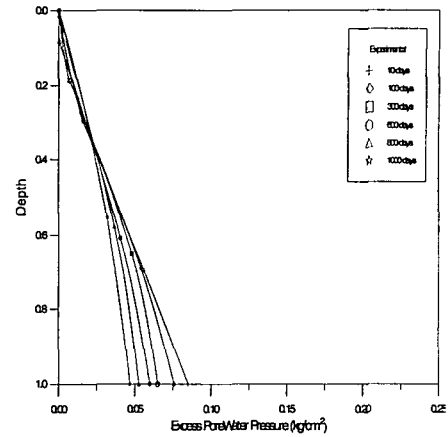


Fig. 12 Settlement with Time($w=250\%$, $e=6.775$, Single Drain, $h=10\text{cm}$, $40G$)



(a) Results of Centrifuge Test

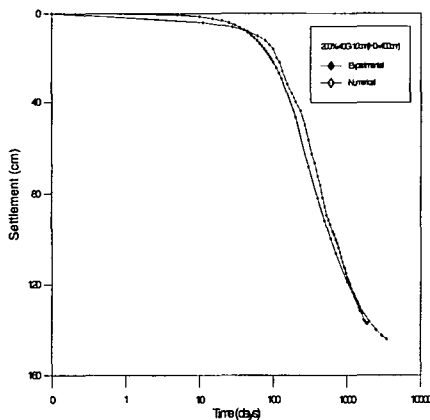
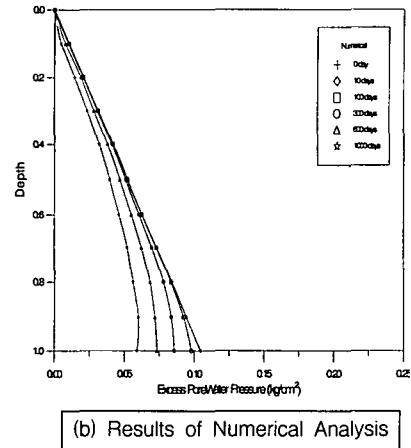


Fig. 11 Settlement with Time ($w=200\%$, $e=5.42$, Single Drain, $h=10\text{cm}$, $40G$)



(b) Results of Numerical Analysis

Fig. 13 Distribution of Excess Porewater Pressure with Depth $w=200\%$, $e=5.42$, Single Drain, $h=10\text{cm}$, $40G$)

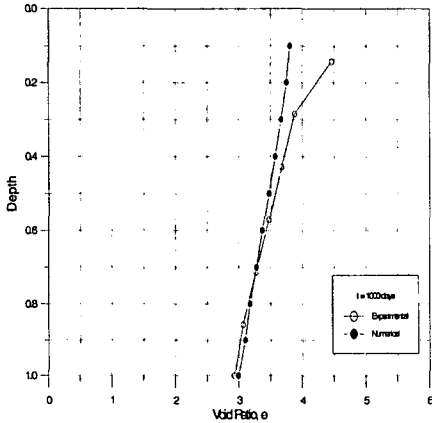


Fig. 14 Void Ratio Distribution with Depth (w=200%, e=5.42, Single Drain, h=10cm, 40G)

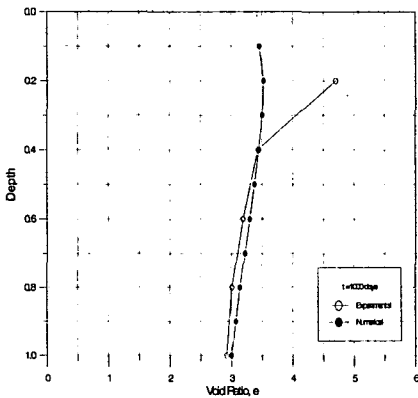


Fig. 15 Void Ratio Distribution with Depth (w=250%, e=6.775, Single Drain, h=10cm, 40G)

3.5 현장의 침하량예측

3.5.1 역해석에 의한 압밀 구성관계식 산정

(1) 개요

준설패립지반의 압밀특성을 파악하기 위해서 간극비-유효응력과 간극비-투수계수의 구성관계식을 결정하는 것은 매우 중요하다. 특히, 준설패립 지반과 같이 비교적 큰 현장 함수비의 적절한 구성관계식 추정은 향후 발생하는 압밀침하량 산정에서 매우 중요하지만, 현실적으로 고함수비일 때의 구성관계식을 획득하기는 실험장비의 제약 등의 문제로 어려운 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 원심모형 실험을 통하여 획득한 시간경과에 따른 계면고의

변화량을 이용하여 역해석 기법의 해석방법을 실시함으로써 구성관계식을 수정·보완하였다.

(2) 산정기법

해석방법은 우선 표준압밀실험과 일정변형을 압밀실험, 변수위 투수실험 등을 통하여 비교적 작은 간극비에 대한 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계를 획득하고, 이 자료를 바탕으로 다음의 식 (8)과 같은 지수함수의 구성관계로 분석하여 해석을 실시하였다.

$$e = A(\sigma)^{-B}, \quad k = C(e)^D$$

(8)

한편, 식 (8)에서 사용한 구성식 관계를 기본식으로 하여 개략적인 구성식을 조성한 다음, 식 (9)와 같은 정교한 지수함수를 사용하여 구성식을 완료하였다. 압밀식은 2차 편미분 방정식으로 압밀량의 경우 초기시간에 대하여 급격히 비선형적으로 변하고 시간이 지남에 따라서 기울기가 완만해지는 특성이 있으며, 특히 간극비가 큰 경우에는 시간변화에 따라 압밀량이 크게 변하는데, 이러한 특성에 적절한 구성식을 다음과 같이 지수함수형태로 표현함으로써, 간극비의 폭이 클 경우에도 식의 상수 값만으로 임의의 미분점을 구할 수 있도록 단순화하였으며, 변곡점에서의 수치해석상 오차를 방지하여 해의 안정성을 도모하였으며, 수행시간을 단축할 수 있다.

$$e = \frac{AA + BB \times \ln(\sigma')}{1 + CC \times \ln(\sigma') + DD \times (\ln \sigma')^2}$$

$$e = \frac{EE + FF \times \ln(K)}{1 + GG \times \ln(K) + HH \times (\ln K)^2}$$

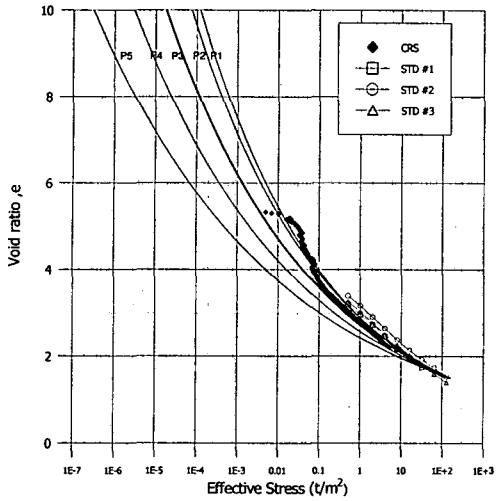
(9)

이러한 방법으로, 식 (9)의 구성식에 대한 상수(AA~HH)값을 유도하고, 원심모형실험에서 획득한 시간경과에 따른 계면고의 변화에 관한 자료와 유도된 상수 값을 이용한 수치해석 결과를 비교하여 가장 근접한 결과에 대응하는 유효응력 - 간극비 - 투수계수의 구성관계를 확정하는 방법으로 분석하였다.

(3) 시료의 구성관계식 산정

역해석을 이용한 구성관계식 추정을 위해 <Fig. 16>에 도시한바와 같이 표준압밀실험과 CRS 실험에서 획득한 간극비-유효응력의 구성관계를 기준점으로 P1, P2, P3, P4, P5 형태의 구성관계식을 유도하였다. 같은 방법으로 <Fig. 17>의 간극비-투수계수의 구성관계에서도 표준압밀실험 및 변수위 투수 실험에서 구한 구성관계를 근거로 하여 K1, K2, K3, K4 형태의 구성관계식을 유도하여 해석을 수행하였다.

준설매립토 지반의 압밀침하량 예측



<Fig. 16> Prediction of Void Ratio - Effective Stress Relationship

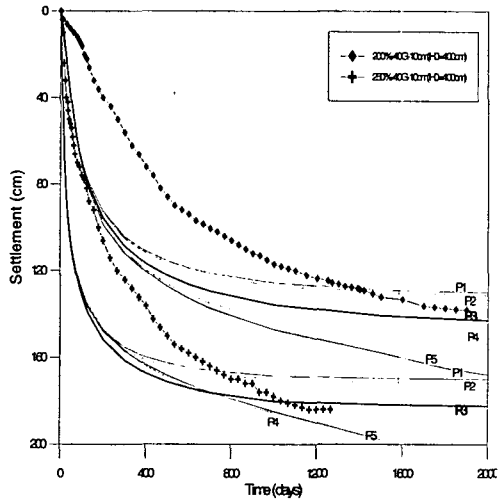


Fig. 18 Prediction of Consolidation Settlement with Changing Void Ratio - Effective Stress Relationship and Constant Void Ratio - Permeability Relationship

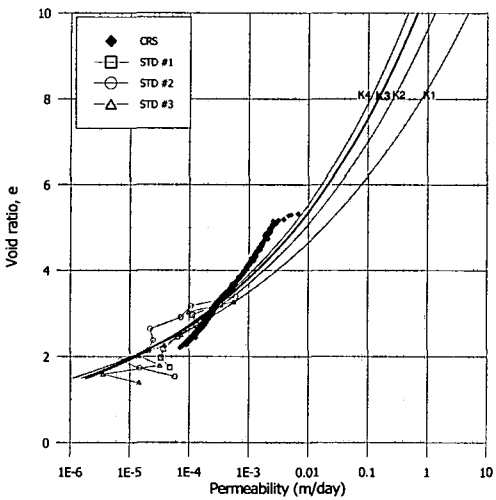


Fig. 17 Prediction of Void Ratio - Permeability Relationship

이렇게 구한 몇 가지의 구성관계에 대해 역해석 기법을 적용하여 초기함수비 200%와 250%의 원심모형실험의 시간에 따른 제면침하 결과와 비교하였다.

예측된 몇 가지의 구성관계를 사용하여 구한 수치해석 결과와 원심모형실험 결과를 비교분석 하여, 간극비-유효응력 구성관계식은 P3의 경우가 최종 침하량과 가장 근접하게 나타났으며, 시간에 대한 침하경향은 K3의 경우 비교적 근접하게 추정되었다. 간극비-유효응력 구성관계의 변화에 따른 비교

결과는 <Fig. 18>에 나타냈으며, 간극비-투수계수 구성관계에 따른 비교결과는 <Fig. 19>에 나타내었

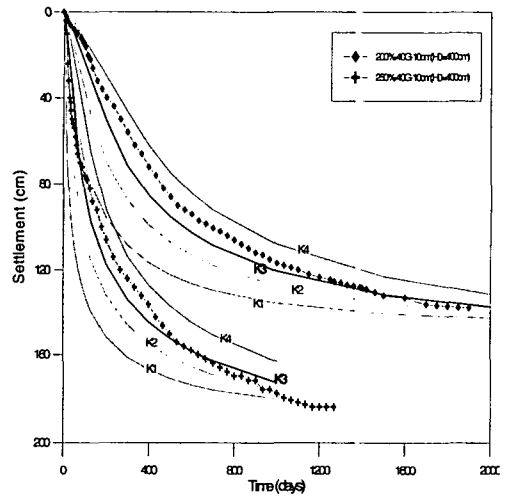


Fig. 19 Prediction of Consolidation Settlement with Changing Void Ratio - Permeability Relationship and Constant Void Ratio - Effective Stress Relationship

다. 추정된 간극비-유효응력 관계 P3와 간극비-투수계수 관계 K3으로 해석된 예측치가 실험치와 상당히 근접하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 역해

석 결과로 보아 주어진 현장조건에서 침하량 예측에 대한 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

이러한 과정을 통하여 본 실험에서 가장 적정하다고 판단되는 간극비-유효응력과 간극비-투수계수의 구성 관계식을 다음과 같이 획득하였다.

▷ 간극비 - 유효응력 구성방정식 상수
 AA : 0.27326E+01 CC : 0.76024E-01
 BB : -0.11278E+00 DD : 0.19134E-02

▷ 간극비 - 투수계수 구성방정식 상수
 EE : 1.0558E+02 GG : -0.10556E+00
 FF : 0.36890E+00 HH : 0.77999E-02

3.5.2 현장의 침하량 예측

현장 시추 조사결과 나타난 지층을 아래 <Fig. 20>과 같이 심도별 현장 간극비를 적용하여 19.0m의 압밀층에 대한 수치해석을 수행하여 침하량을 예측하였다.

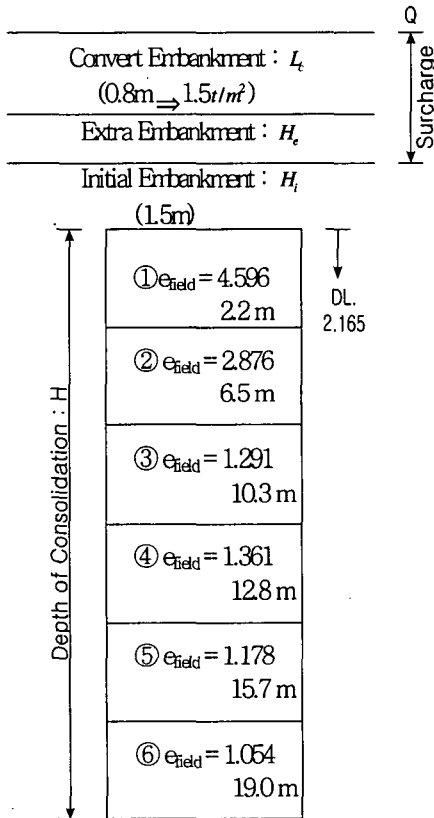


Fig. 20 Ground Profile

현장 침하량 예측을 위한 수치해석은, <Fig. 20>

에서와 같이 매립층 상부에 위치한 초기성토고에 대한 하중과, 환산 성토고층 0.8m에 대한 환산성토하중 1.5t/m²에 대한 초기하중(Q₁)을 상재하중으로 취하여 압밀침하량을 계산하고, 그 침하량을 여성토하중으로 환산하여 초기하중과 여성토하중에 대해 (Q) 압밀침하량을 다시 계산하는 방법으로, 잔류침하량이 허용치(±10cm)에 만족할 때까지 반복하여 수행하였으며, 그 흐름도는 <Fig. 21>과 같다.

해석결과 여성토 3.0460m에 대하여 압밀침하 3.0582m, 즉시침하 0.0052m로 허용침하량 (3.0634-3.0460 = 1.74cm < 10cm)에 만족하였다. <Fig. 22>은 최종 성토하중에 대한 시간에 따른 침하량의 수치해석 결과를 도시한 그림이다.

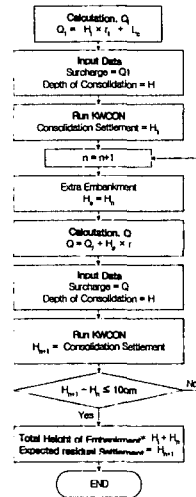


Fig. 21 Flow Chart

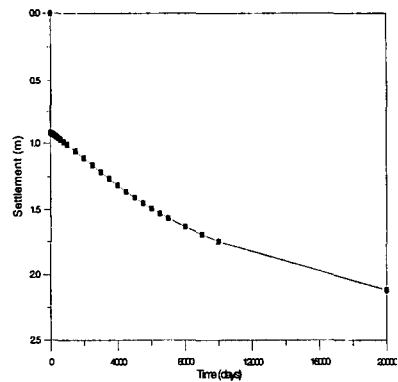


Fig. 22 Consolidation Settlement with Time

4. 결론

- 1) 표준압밀시험에서 보다 높은 간극비와 낮은 유효응력에서 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 관계를 얻을수 얻는 단점을 보완하여 압밀Cell의 직경이 큰 일정변형률 압밀시험을 수행한 결과, 표준압밀시험과 일정변형률압밀시 시험에서 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 일관성 있는 관계식을 얻을 수 있었다.
- 2) 역해석기법에 의한 흙의 구성관계식을 바탕으로 수치해석을 실시하여 Column 시험의 시간경과에 따른 침하특성을 비교한 결과, 수치해석이 다소 큰 침하량 분포를 나타내나 매우 유사한 경향을 나타내었다.
- 3) 원심모형실험결과를 역해석 기법에 의하여 구한 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계식을 바탕으로 시간경과에 따른 압밀침하량 및 간극수압분포, 시험 종료후의 간극비 분포를 비교한 결과, 실험결과와 예측치가 상호 근접하였다.
- 4) 압밀 진행중인 연약점토 지반의 경시적 압밀침하량을 역해석 기법에 의하여 구한 구성관계식을 사용한 유한변형률 압밀이론 프로그램을 사용하여 효과적으로 구할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Davis, E. H. and Raymond, G. P.(1965), " A Non-linear Theory of Consolidation ", Geotechnique, Vol. 15, pp. 161-173
- [2] Gibson, R. E., England, G. L. and Hussay, M.J.L.(1967)," The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturatef Clay I: Finite Non-linear Consolidation of Thick Homogeneous Layers ", Geotechnique, Vol. 17, pp. 261-273
- [3] 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.
- [4] Mikasa, M.(1963), " The Consolidation of Soft Clay - A New Consolidation Theory and Its Application ", Japanese Society of Civil Engineering In Japan, pp. 21- 26
- [5] Raymond, G. P.(1969), " consolidation of Deep Deposits of Homogeneous Clay", Geotechnique, Vol. 19, pp. 478-494.
- [6] Richart, F. E.(1957), " A Riview of The Theory for Sand Drains ", Proc. a. Soc. Civ. Engrs., Sm3, No. 1301
- [7] Schiffman, R. L. and Gibson, R. E.(1964), " Consolidation of Non-homogeneous Clay Layers", Journal of The Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, 90. SM5, Proceedings Paper 4043, pp. 1-30.
- [8] Terzaghi, K.(1923), " Die Berechnung Der Durchlässigkeit Des Tones Aus Dem Verlauf Der Hydrodynamischen Spannungserscheinungen', Akademie Der Wissenschaften, Wien, Sitzungsberichte, Mathematisch Naturwissenschaftliche Klasse, Parta, Vol. 132(3-4). pp. 125-138.