

준설매립지반의 건조수축특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of the Desiccation Shrinkage in Reclaimed Hydraulic Fills

홍 병 만* ¹ Hong, Byung-Man	김 상 규* ² Kim, Sang-Kyu
김 석 열* ³ Kim, Seog-Yeol	김 승 욱* ⁴ Kim, Seung-Wook
김 홍 태* ⁵ Kim, Hong-Taek	강 인 규* ⁶ Kang, In-Kyu

Abstract

In the present study, laboratory tests including the seepage-induced consolidation test, suction test, and desiccation shrinkage test are performed to investigate characteristics of the desiccation shrinkage in reclaimed hydraulic fills. Soil samples for laboratory tests are obtained from three sites (districts of Haenam, Kogeum and Koheung in Chunnam area). Desiccation shrinkage settlement caused by three dimensional volume change is numerically evaluated using finite difference technique based on the governing equation proposed by Abu-Hejleh & Znidarcic. Also characteristics of the desiccation shrinkage analyzed from the test results are used as input data for numerical evaluations. Further predicted total settlements including the self-weight consolidation settlement are compared with values measured at the site of Haenam district. Finally, effects of parameters related to the desiccation shrinkage on settlements are examined.

요 지

본 연구에서는 연약한 점토층 준설매립지반을 대상으로, 비교적 활발히 연구가 진행되고 있는 자중압밀 침하분야에 비해 상대적으로 연구성과가 미흡한 표토층의 건조수축특성 규명에 초점을 두고, 침투압밀시험,

-
- *1 정회원, 농어촌진흥공사 경영정보실장
 - *2 정회원, 동부산대학교 학장
 - *3 정회원, 농어촌진흥공사 농어촌연구원 책임연구원
 - *4 농어촌진흥공사 농어촌 연구원
 - *5 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수
 - *6 정회원, (주)브니엘컨설팅트 책임기술자

부압시험 및 건조수축시험 등 실내시험을 시행하였다. 실내시험이 시행된 시료는 전라남도에 위치한 해남 지구, 고금지구 및 고흥지구 등 3개 지구의 현장시료이며, 실내시험결과를 토대로 건조수축 관련특성을 분석하였다. 또한 Abu-Hejleh & Znidarcic가 제안한 연약한 세립점토 지반의 건조수축 침하이론 지배방정식을 유한차분형태로 표현하고 실내시험을 통해 파악된 해남지구 현장시료의 건조수축특성 등을 입력자료로 하여, 3차원 체적변화에 따른 건조수축침하를 수치적으로 예측하였다. 계속해서 자중압밀침하를 포함한 전체침하 예측치를 해남지구 현장에서의 10년간 실제 관측결과와 서로 비교하였다. 최종적으로는 건조수축특성에 관련된 변수들이 침하 등에 미치는 영향정도를 분석하였다. 특성 (불연속면의 방향 및 강도), 하중조건 및 암반사면의 기하학적 형상 등이다. 확률론적해석에서 고려할 수 있는 불연속면의 방향 및 마찰각의 통계적특성이 파괴형태를 고려한 암반사면의 안정에 큰 영향을 보였다. 암반사면의 안정은 굴착면의 방향에 가장 민감하였다. 예제분석을 통하여 개발된 파괴형태를 고려한 암반사면의 신뢰도모델은 암반사면의 안정성 조사에 성공적으로 적용할 수 있었다.

Keywords : Reclaimed hydraulic fills, Desiccation shrinkage, Seepage-induced consolidation test, Suction test, Cracking void ratio, Crack depth, Clay content .

1. 서 론

준설매립은 수면아래의 지반을 굴착하여 물과 토립자가 혼합된 상태로 배송관을 통해 매립지역으로 이송하는 공법이다. 과거의 준설매립은 부지이용을 위한 측면보다는 저수지, 수로 등의 수심을 유지하기 위한 방법으로 사용되어 왔으나, 최근들어 급속한 산업사회의 발달과 경제성장으로 인해 공장용지, 택지 등의 부족을 해소하기 위해 해안매립사업이 활발하게 추진되고 있다. 매립에 대한 국내에서의 관행은 육지에서 취토장을 개발한 후 이곳으로 부터 방조제 축조에 필요한 사석과 매립지에 소요되는 토사를 공급하는 방법이 적용되었다. 그러나 매립공사가 활발해짐에 따라 점차적으로 육상토를 구하기가 어려운 실정에 도달하게 되었고, 이와 더불어 자연경관 보존에 관한 환경공학적인 문제 및 경제적인 측면에 있어서도 준설성토에 의한 매립방법의 개발이 더욱 요구되고 있는 실정이다.

연약한 점토층 준설매립지반의 침하현상을 보

다 구체적으로 규명하기 위해서는, 매립지반의 자중압밀특성은 물론 표토층의 건조수축특성 등을 체계적으로 파악하기 위한 실내시험 및 현장계측 등이 선행되어야 하며, 결과적으로는 두가지 특성을 종합하여 준설매립지반의 전체침하를 합리적으로 예측할 수 있는 이론 및 해석법의 제시가 요구된다.

본 연구에서는 연약한 점토층 준설매립지반을 대상으로, 비교적 활발히 연구가 진행되고 있는 자중압밀 침하분야(참고문헌 5~9, 11)에 비해 상대적으로 연구성과가 미흡한 준설매립지반 표토층의 건조수축특성 규명에 초점을 두고, 고안·제작된 실내시험장치를 이용하여 침투압밀시험, 부압시험 및 건조수축시험 등을 시행하였다. 실내시험이 시행된 시료는 전라남도에 위치한 해남지구, 고금지구 및 고흥지구 등 3개 지구의 현장시료이며, 얻어진 실내시험결과를 토대로 건조수축 관련특성을 분석하였다. 또한 Abu-Hejleh & Znidarcic(1996)가 제안한 연약한 세립점토 지반의 건조수축 침하이론 지배방정식을 유한차분형태로 표현하고 실내시험

을 통해 파악된 해남지구 현장시료의 건조수축특성 등을 입력자료로 하여, 3차원 체적변화에 따른 건조수축침하를 수치적으로 예측하였다. 특히 건조수축과 관련하여서는 강우조건 및 계절별 증발량을 포함하여 표층의 반복적인 건습작용 등을 고려한 해석이 타당하지만 매년마다 달라지는 기후적인 조건 외에도 현장에서의 침사지 관리방법 등이 다르기 때문에 모든 현장에 폭넓게 적용할 수 없는 점 등 때문에 본 연구에서는 강우량 및 증발량 등의 조건을 고려하지는 않았다. 계속해서, 유한변형률(finite strain) 개념을 근거로 한 Gibson등(1967, 1981)의 1차원 자중압밀침하를 포함하여 전체침하 예측치를 해남지구 현장에서의 10년간 실제 관측결과와 서로 비교하였으며, 최종적으로 건조수축특성에 관련된 변수들이 침하 등에 미치는 영향정도를 분석하였다.

2. 준설매립지반의 건조수축 및 자중압밀 등 침하거동

본 연구에서 다루고자 하는 연약한 준설매립지반의 건조수축 및 자중압밀 등 관련 침하해석에 적용되는 이론식을 우선 정리하면 다음과 같다.

Abu-Hejleh & Znidarcic(1996)는, 유한변형률 개념을 근거로 한 Gibson등(1967)의 1차원 자중압밀 이론식을 일부 변형하여 즉, 균열발생 등 건조수축에 의해 예상되는 지반의 3차원 체적변화를 1차원 형태로 변환하여 고려하는 특성변수 α 를 도입하여, 연약한 세립점토 지반의 건조수축 침하이론 지배방정식을 식(1)과 같이 제안한 바 있다.

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

식(1)에서 $\alpha=1.0$ 일 경우에는 Gibson등(1967)의 1차원 자중압밀이론 지배방정식과 동일하며, Abu-Hejleh & Znidarcic(1996)가 제안한 건조수축 침하이론 지배방정식은 식(1)에서 α 값이 1.0 보다 작은 경우에 해당된다. AbuHejleh & Znidarcic(1996)가 제안한 특성변수 α 의 정의는 식(2)와 같다.

$$\alpha(e, e_{cr}) = \frac{1+e}{(1+e_{cr})[1-\varepsilon_v(e, e_{cr})]} \quad (2)$$

식(2)에서, $\varepsilon_v(e, e_{cr})$ 는 3차원 건조수축의 시점을 기준으로 연직방향의 변형률을 나타내며, 단위지반 요소에서 3차원 건조수축에 의해, 체적은 $1+e_0$ 에서 $1+e$ 로, 높이는 $1+e_{cr}$ 에서 $(1+e_{cr})[1-\varepsilon_v(e, e_{cr})]$ 로 감소됨을 의미한다. 여기서 e_0 는 전체토층의 평균 초기간극비율, e_{cr} 은 균열간극비를 각각 의미한다.

한편, 식(1)의 비선형 특성은 매개변수 g 및 λ 를 도입하여 식(3)과 같이 선형화 할 수 있다.

$$-(\gamma_s - \gamma_w)g\lambda \frac{\partial e}{\partial z} + g\alpha \frac{\partial^2 e}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (3)$$

식(3)에 포함된 g 및 λ 는 Gibson등(1981)이 제시한 매개변수이며, g 는 간극비 및 이에 따른 지반의 연직방향 투수계수의 변화를 고려하는 변수로, 또한 λ 는 간극비와 연직방향 유효응력 (σ_z') 사이의 관계를 정의하는 다음의 식(4)로부터 결정되는 상수로 가정하였다.

$$e = (e_{00} - e_{\infty}) \exp(-\lambda \sigma_z') + e_{\infty} \quad (4)$$

여기서,

e_{00} : 초기상태(시간 $t = 0$)에서 최상부 지표면 흙의 간극비

e_{∞} : 최종상태(시간 $t = \infty$)에서의 간극비

본 연구에서는 식(1)의 건조수축 또는 지중압 밀 침하 이론 지배방정식을 Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘을 이용하여 정식화하였으며, 이를 요약하면 식(5)와 같다. Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘은 공간계에서는 중앙차분법을, 시간계에서는 전방차분법을 각각 사용하고 있다.

$$E^{T+\Delta T}(z_i) = \frac{1}{C_1} \{ C_2 E^{T-\Delta T}(z_i) + C_3 E^T(z_{i+1}) + C_4 E^T(z_{i-1}) \} \quad (5)$$

$$C_1 = \frac{1}{2a\Delta t} + \frac{ga}{(\Delta z)^2}$$

$$C_2 = \frac{1}{2a\Delta t} - \frac{ga}{(\Delta z)^2}$$

$$C_3 = -\frac{(\gamma_s \gamma_w)g\lambda}{2\Delta z} + \frac{ga}{(\Delta z)^2}$$

$$C_4 = \frac{(\gamma_s \gamma_w)g\lambda}{2\Delta z} + \frac{ga}{(\Delta z)^2}$$

초기상태(시간 $t=0$)에 지반은 완전포화상태에 있다고 가정하였으며, 이 때 식(4)의 간극비와 유효응력 사이의 관계식을 유한차분화하면 식(6)과 같다.

$$E^0(z_i) = (E_{00} - E_{\infty}) \exp[-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)z_i] + E_{\infty} \quad (6)$$

또한 경계조건으로, 준설패립지반의 하부경계면이 투수조건인 경우에는 식(7)이 적용되며, 불투수조건인 경우에는 식(8)이 적용된다.

$$E^T(h) = \frac{E_T(h - \Delta z) - \lambda(\gamma_s - \gamma_w)E_{\infty}\Delta z}{1 - \lambda(\gamma_s - \gamma_w)\Delta z} \quad (7)$$

$$E^T(h) = (E_{00} - E_{\infty}) \exp[-\lambda(\gamma_s - \gamma_w)h] + E_{\infty} \quad (8)$$

여기서, h : 임의의 시간(t)에서의 준설패립지반 두께

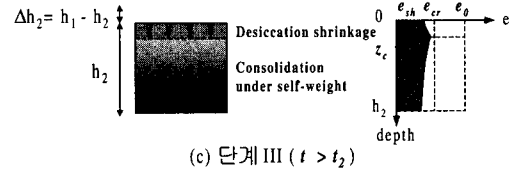
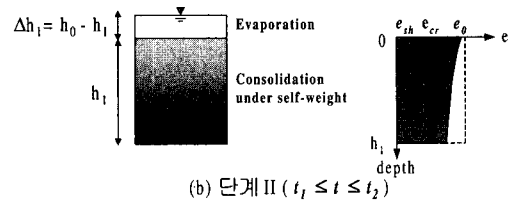
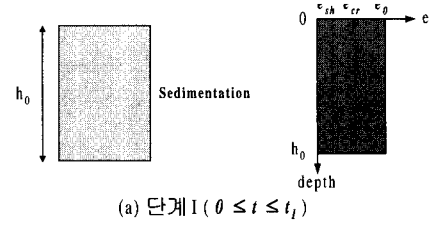


그림 1. 시간단계별 준설패립지반의 침하특성

결국, 임의의 시간에서의 평균침하량(S_{ave})은 식(9)에 의해 최종 평가된다.

$$S_{ave} = \frac{1}{N_i} \sum [E^0(z_i) - E^T(z_i)] \frac{h}{1 + e_0} \quad (9)$$

여기서, N_i : 유한차분화한 요소의 개수

자중압밀을 포함하여 본 연구에서 특히 초점을 두고 있는 건조수축 등에 의한 준설패립지반의 침하현상에 대해, 깊이별 간극비의 변화 등 그 예상되는 과정을 시간대별로 구분하여 도시하면 그림 1과 같다. 본 연구에서 적용된, 그림 1의 각 단계에 관련된 침하해석기법을 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

그림 1에서 단계 I에 해당되는 준설패립지반의 초기침강단계는 본 연구 해석에서는 다루어 지지 않으며, 단계 II는 지표 부근에 존재하는 물의 증발

과 더불어 그 하부 준설매립지반 내부에서 자중압 밀이 시작되어 진행되는 상태의 깊이별 간극비 변화를 표현하고 있으며, 관련 침하해석은 Gibson 등(1967)의 1차원 자중압밀 지배방정식(식(1)에서 α 값이 1.0인 경우)의 유한차분화 표현식(2장 참조)을 이용해 수행된다.

계속되는 단계 III는 건조수축이 지표면 부근 상부지반에서 시작되어 진행되고, 동시에, 하부지반에서는 자중압밀이 계속하여 진행되는 상태의 간극비 변화를 표현하고 있다. 단계 III를 더욱 구체적으로 설명하면, 건조수축에 의해 균열이 발생하는 깊이는 시간경과에 따라 최상부 지표면으로부터 아래쪽 지반으로 점차 확장되며, 해석상으로는, 최상부 지표면 지반의 간극비가 점차 감소하여 균열간극비(e_{cr})에 도달한 시점이 건조수축에 의한 균열발생의 최초 시점이 되며, 이때부터 최상부 지표면 지반에 관련된 침하해석은 Abu-Hejleh & Znidarcic(1996)가 제안한 건조수축 침하이론 지배방정식(식(1)에서 특성변수 α 값이 1.0 미만인 경우)의 유한차분화 표현식을 토대로 이루어지며, 특성변수 α 값의 크기는 해당 준설매립지반 점토시료에 대한 부압시험 및 건조수축시험 결과(다음의 3장 참조)를 토대로 정의되는 간극비와의 관계를 이용해 결정된다.

계속해서 균열간극비에 도달하는 지반의 깊이는 최상부 지표면으로부터 점차 아래쪽으로 확장되며, 각 경우에 최상부 지표면으로부터 균열간극비에 도달한 깊이까지의 지반은, Abu-Hejleh & Znidarcic(1996)가 제안한 건조수축 침하이론 지배방정식의 유한차분화 표현식을 토대로 침하해석이 이루어지며, 그 아래쪽(그림 1(c)에서 불연속점에 해당되는 꺾이는 점 아래쪽) 지반의 침하해석은 Gibson 등(1967)의 1차원 자중압밀 지배방정식의 유한차분화 표현식을 이용해 수행된다. 그림 1(c)에서 불연속점에 해당되는 꺾이는 점은 어느 정도의 시간이 경과된 다음에는 더이상

발생하지 않게 되며, 이 과정을 통해 건조수축에 의해 발생하는 균열깊이(그림 1(c)에 표시된 z_c 를 의미함)의 최대치가 확정된다. 그 이후에는 건조수축현상과 자중압밀현상의 경계지점에 해당되는 최대균열깊이를 기준으로, 상부쪽 지반의 침하해석은 Abu-Hejleh & Znidarcic(1996)가 제안한 건조수축 침하이론 지배방정식의 유한차분화 표현식을 토대로, 또한 하부쪽 지반의 침하해석은 Gibson 등(1967)의 1차원 자중압밀 지배방정식의 유한차분화 표현식을 이용해 수행된다. 이와 같은 각각의 침하해석 과정은 준설매립지반의 깊이별 간극비가 수축한계간극비(e_{sh})에 도달할 때까지 계속되어 최종적으로 종결된다.

본 연구에서 적용한 유한차분해석 프로그램의 해석절차는 그림 2와 같다.

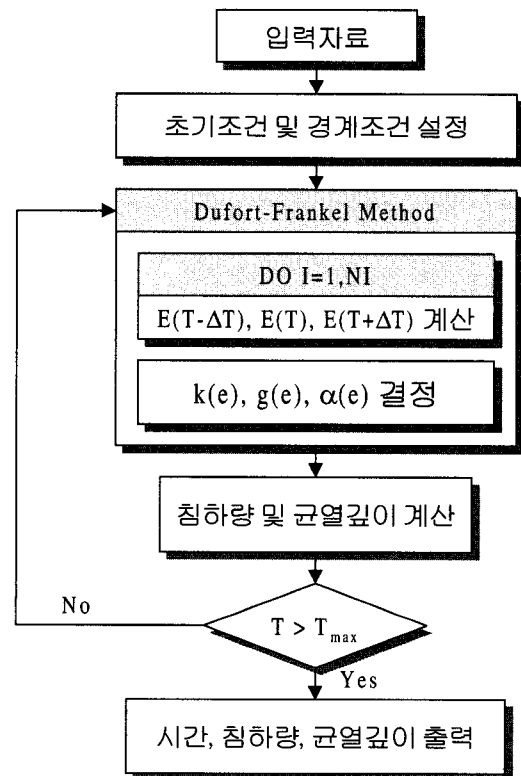


그림 2. 유한차분해석 프로그램의 흐름도

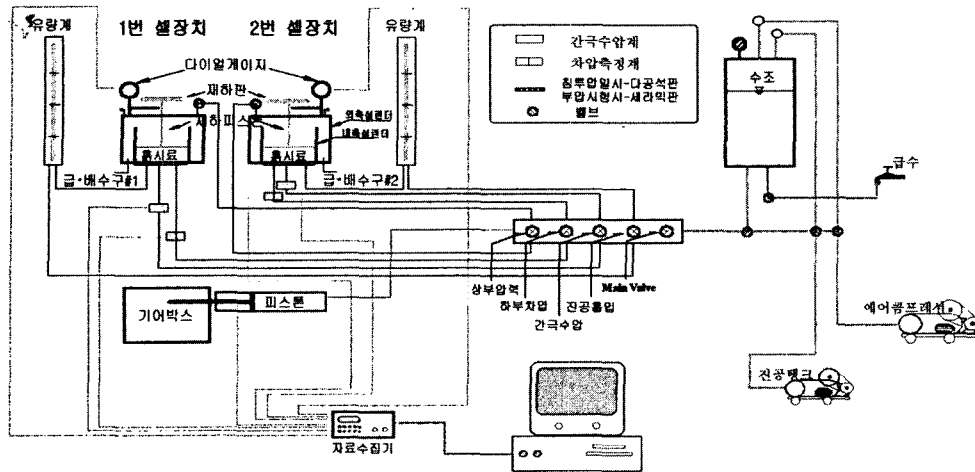


그림 3. 침투압밀시험 및 부압시험 장치

3. 실내시험장치 및 시험방법

전술한 바와 같이 자중압밀과 연계하여 국내 준설매립지반의 건조수축특성을 체계적으로 살펴 보기 위해, 그림 3 및 4에 도시된 실내시험장치를 고안·제작하였다. 본 시험장치는 정확한 압력상태가 유지되도록 압력개폐밸브를 설치하고, 동일한 제원의 셀 2 조로 구성하는 등 Abu-Hejleh (1993)에 의해 제안된 침투압밀시험기를 일부 개선하여, 선행압밀과정과 침투압력 차이에 의한 압밀과정, 부압(부-)의 간극수압을 의미함)에 의한 수축과정 및 건조수축시험 등을 연속적으로 수행할 수 있도록 제작되었다. 그림 4에 도시된 건조수축시험 장치는, 하부받침대와 침투압밀시험 및 부압시험에 사용되는 시료실린더로 구성된다.

침투압밀시험과 부압시험을 수행하기 위해 사용되는 그림 3의 시험장치는, 셀장치, 순환펌프, 수조, 유량계, 차동압력계 및 자료수집기 등으로 구성되어 있다.

셀장치는 압력실, 시료실린더, 시료받침대, 재하피스톤 및 재하판, 다이얼게이지 등으로 구성되어 있고, 시료실린더는 두께 0.3cm, 높이 15cm, 내경 10cm의 투명한 아크릴 재질이며, 침투압밀

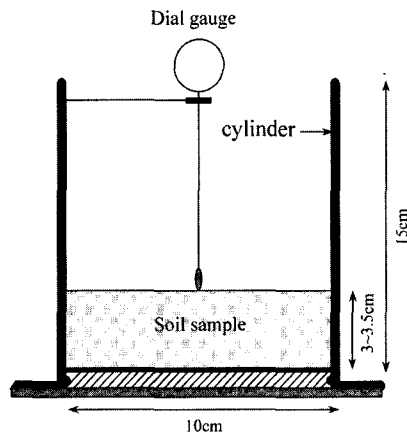


그림 4. 건조수축시험 장치

시험과정에서 변화하는 시료의 높이는 다이얼게이지를 이용하여 측정하였다. 침투압밀시험시에는 시료하부에 다공석판을 설치하고, 다공석판 하부에 연결되어 있는 각종 채널을 통해 시험과정에 변화하는 간극수압 및 압력수가 시료를 통과할 때의 압력차이를 측정하고, 시료를 통과하는 유량의 변화는 유량계를 이용하여 측정하였다. 또한, 재하피스톤은 시료의 상부에 설치되어, 재하판 위에 하중이 추가된 재하축을 하부로 내려 시료를 압축 또는 구속한다. 순환펌프는 기어박스와 연결된 전

기모터에 의해 작동되며, 저속과 고속의 2가지 개별적인 속도선택이 가능하도록 되어 있다. 직경이 6cm인 피스톤은 최대한 누수를 배제하고, 물을 채우고 기포를 제거하는 등의 작업이 용이하도록 고안되었으며, 시험기의 전면에 설치된 제어판을 이용하여 일정한 유량을 조절한다. 유량은 속도조절 스위치와 주입피스톤의 직경에 의해 제어된다.

부압시험시에는 특수재질의 투수성 세라믹판을 설치하도록 되어있으며, 세라믹판은 상부와 하부의 압력 차이가 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 범위 내에서는 물만을 흡입하고, 공기의 흐름은 막을 수 있는 특징을 지니고 있다. 부압시험에서는 포화된 세라믹판의 저면에서 순환펌프를 이용하여 유량이 정밀하게 제어되는 조건하에 물을 흡입함으로써, 시료에 인장을 가하는 동시에 차동압력 측정기를 이용하여 간극수압의 변화를 측정하도록 구성하였다.

시험과정중 특히 부압시험에서는 일정한 속도의 유량을 선택하는 것과 더불어 적절한 시료높이를 결정하는 사항이 현장지반의 건조특성 등을 반영하는데 특히 중요한 요소이기 때문에, 예비시험을 실시하였다. 예비시험결과, 유속이 빠른 경우 시료의 높이에 관계없이 연직방향으로만 변형이 발생하는 1차원적인 체적변화가 유발되었고, 유속이 느린 조건에서도 시료의 높이가 낮은 경우에는 시료의 하부와 저면판 사이에서의 마찰로 인해 연직방향으로만 시료의 변형이 유발된 반면에, 시료의 높이와 유속이 적절한 경우에는 연직방향과 횡방향 변형이 동시에 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 예비시험결과를 토대로 시료의 높이는 3~3.5cm, 직경은 10cm, 또한 유속은 $5.582\text{ml}/\text{hr}$ 등으로 시험기준을 설정하였다. 이외에도, 시험기 측정장치의 정확성 여부는 예비시험에서 물을 채워 확인하고, 또한 지수성 여부와 압력 및 속도에 대한 영향도 점검하였다.

한편 본 시험에서는, 건조균열의 발생시점에 해당되는 균열간극비를 보다 정확하게 결정하기

위해 셀장치를 2조로 구성(그림 3 참조)하여, 시료에 대해 침투압밀시험 및 부압시험을 동일한 조건에서 연속적으로 수행하고, 부압시험이 종료되는 단계에서 한 개의 시료는 노건조시켜 균열간극비를 결정하고, 다른 한 개의 시료는 연속적으로 건조수축시험을 실시하는데 이용하였다.

침투압밀시험과 부압시험의 과정을 거친 후에는 연직방향과 횡방향의 구속이 없는 조건에서 건조수축시험을 실시하고, 이로부터 간극비-함수비 관계에 의한 수축곡선과 3차원 수축현상이 유발되는 동안의 연직방향과 횡방향으로의 변형 비율에 의해 정의되는 건조수축 특성변수($\alpha(e, e_{cr})$)의 범위를 평가하였다. 계속해서, 각각의 시험에 관련된 구체내용을 기술하면 다음과 같다.

3.1 침투압밀시험

본 침투압밀시험의 시행에 앞서, 시료실린더, 차동압력측정기 및 순환펌프 등으로 구성된 시험장치(그림 3 참조)는 기포를 제거한 물로 완전히 포화시키는 작업을 선행하고, 성형된 시료를 시료 컨테이너 내에 투입한 후, 흡시료의 높이변화가 0일 때에 대응하는 다이얼게이지의 초기 읽음값을 결정하였다. 또한 시험과정에서 시료내에 존재할 수 있는 공기의 영향을 배제하기 위해, 침투압밀시험에 앞서 $1.0\sim 2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 배압(back pressure)을 가하여 포화시키고, 아울러 기록장치를 초기화하였다.

이와같은 준비과정을 거친 후, 순환펌프의 유속이 선택된 조건에서 가동시켜, 시료 상부와 하부의 압력차이가 정적인 상태에 도달할 때까지 계속하였다. 시료 상부와 하부의 압력차이($\Delta\sigma_v'$)를 측정하고 또한 다이얼게이지를 이용하여 변화하는 토립자의 높이(H_s)를 측정하였고, 시료 하부에서의 유효응력(σ_v')은 식(10)으로 부터 평가하였다.

$$\sigma'_b = \sigma'_0 + \sigma'_{sw} + \Delta\sigma'_z \quad (10)$$

여기서, σ'_0 : 재하피스톤에 의한 연직응력

σ'_{sw} : 지중에 의한 유효응력

$$= (G_s - 1.0)/(1 + e_0) \cdot \gamma_w \cdot H_s$$

또한 상대적으로 큰 동수경사가 발생되도록 점차 빠른 유속으로 증가시켜 시험을 반복하고, 이에 따라 시료의 압밀이 크게 발생하여 보다 조밀한 상태가 되도록 하였다. 몇가지 유속 조건의 반복되는 과정에서 각 단계별 침투력에 의한 압밀이 완료될 때, 시료의 투수계수(k_s)를 구하기 위해 작은 동수경사에서 시료를 통과하는 압력의 차이가 정적인 상태에 도달할 때까지 계속하였으며, 투수계수는 식(11)로 부터 평가하였다.

$$k_s = \frac{q}{A_s \cdot i_r} \quad (11)$$

여기서, q : 유속조절에 의한 시간당 유량

A_s : 흡시료의 단면적

i_r : 동수경사 ($i_r = \Delta\sigma'_z / (H_r \cdot \gamma_w)$)

H_r : 투수시험 이후 시료의 평균높이

3.2 부압시험

전술한 침투압밀시험이 종료된 후 실시하는 부압시험은, 포화상태로부터 건조균열이 발생하기 직전까지 시료에 가해지는 부압의 크기 및 수축량 또한 부압에 의해 시료에서 추출되는 물의 양 등을 측정하여, 간극수압, 간극비 및 함수비 등을 평가하고, 최종적으로는 건조균열의 발생시점에 해당되는 균열간극비를 결정하기 위한 시험이다. 본 부압시험에서는 투수성 세라믹판을 완전히 포화시키는 과정이 선행되어야 하며, 이를 위해 세라믹판을 24시간 이상 노건조시켜 셀장치 내부에 설치하고, 셀내부는 진공펌프를 이용하여 세라믹판 내부에 존재할 수 있는 기포를 흡입하여 제거하고, 세

라믹판 하부에 압력수를 공급하여 세라믹판의 상부에 기포가 제거된 물이 분출되어 완전히 포화될 때까지 몇시간 동안 계속하였다. 포화과정의 최종 단계에서는 셀내부에 가해졌던 진공을 풀고 셀내부에 유입된 물을 배수시킴으로써 준비과정을 종료하였다. 한편, 다공석판을 세라믹판으로 교체하는 등의 준비과정 동안에 침투압밀시험을 통해 선행압밀된 시료 상부에 재하하였던 미소하중이 제거되므로 시료의 팽창에 의해 압밀특성이 달라질 수 있는 점을 감안하여, 부압시험을 시작하기에 앞서 셀 내부에 준비된 시료의 상부에 재하피스톤에 의해 미소하중을 가하여 추가적인 압밀을 허용하는 조건하에 12시간 이상 방치하였다.

본 부압시험은 5.582ml/hr의 유속에서 순환 펌프를 가동시키면서 시작하였으며, 시험에 소요되는 시간은 시료의 초기두께가 커짐에 따라 또한 유속이 작을수록 늘어나는 현상을 나타냈다. 시험은 시료의 하부에서 측정되는 부압이 일정한 수치에 수렴할 때까지 계속되었으며, 부압이 최대치에 수렴하게 되면, 캘리퍼스를 이용하여 시료를 돌려가며 여러 위치에서 균형되게 측정하여 평균 높이 및 직경을 결정하였다. 그 이후 시료를 24시간 이상 노건조시켜, 중량(M_s) 및 체적을 결정하였다. 20여회 이상 캘리퍼스로 반복 측정된 최종적인 시료의 높이와 직경으로 부터 결정한 체적이 균열 간극비의 평가에 이용되었다.

세라믹판 하부에서 측정되는 간극수압의 변화를 구하기에 앞서, 유속에 따라 달라지는 다공질 세라믹판을 교차하는 압력손실(p_l)을 우선 측정하였다. 이 과정에서, 시료 대신에 용기 내부에 시료높이에 해당하는 3~3.5cm 정도의 물을 채우고 부압시험을 실시하여 얻은 결과를 토대로 세라믹판을 사이에 두고 발생하는 압력의 차이($\Delta u'_{sm}$)가 5.582ml/hr의 유속에서는 0.04kg/cm²으로 나타났다. 압력손실의 측정 후, 시료 하부에서의 보정된 간극수압($\Delta u'_{sb}$)은 시간변화에 따라 식

(12)를 이용해 계산하였다.

$$\Delta u'_{sb}(t) = \Delta u'_{sm} - p_f \quad (12)$$

또한 임의의 시간에서의 함수비(w_a)는 식(13)에 의해 평가된다.

$$w_a(t) = w_f - ((\Delta t \cdot q) / M_s) \cdot 100\% \quad (13)$$

식(13)에서, Δt 는 시험시작 시점으로 부터 종료시까지의 시간이며, 부압시험을 시행하는 동안 시료로부터 흡입된 물의 전체량은 유량계를 통해 측정하였다. 측정된 물의 전체량과 함수비(w_f) 및 중량 등은 부압시험 시작단계에서의 함수비(w_i) 계산에 이용되며(식(14)), 초기간극비는 $e = G_s \cdot w_i$ 에 의해 결정하였다.

$$w_i = w_f - ((q \cdot \Delta t) / M_s) \cdot 100\% \quad (14)$$

3.3 건조수축시험

전술한 침투압밀시험 및 부압시험이 종료된 다음, 시료를 내측벽과 하부 받침대의 표면에 얇게 기름칠을 한 실린더로 옮기고(그림 4 참조), 실린더 중앙 상부에 장착된 다이얼게이지 및 캘리퍼스를 이용하여 건조수축이 진행되는 동안 시간대 별로 시료의 높이 및 직경을 측정하였다. 평균 20°C의 실내온도를 유지하였으며, 시료의 높이는 중앙부를 중심으로 V자 형상으로 수축되기 이전에는 다이얼게이지 읽음값으로부터 결정하였고, 그 이후의 높이는 시료를 돌려가면서 캘리퍼스로 측정 한 값과 다이얼게이지 읽음을 통해 얻어진 중앙부

표 1. 실내시험용 시료의 물리적 특성

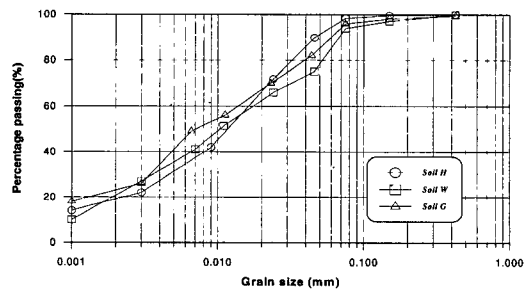
시료명	입도(%)			단위중량 (g/cm ³)	액성한계 (%)	소성지수 (%)	함수비 (%)	비중 G _s	초기간극비 e ₀	통일분류
	점토	실트	모래							
해남지구(Soil H)	31.0	67.4	1.6	1.655	48.9	21.3	58.3	2.683	1.564	CL
고금지구(Soil W)	36.4	57.5	6.1	1.676	53.2	23.7	59.1	2.704	1.598	CH
고흥지구(Soil G)	42.1	53.8	4.1	1.494	56.8	24.5	90.0	2.692	2.423	CH

측정값의 평균으로 결정하였다. 또한 시료의 직경은 캘리퍼스를 이용한 측정값의 평균으로, 체적은 직경 및 높이의 측정값을 토대로 결정하였다.

시료가 더 이상의 체적변화를 나타내지 않는 수축한계까지 지속적인 측정을 시행한 후, 시료를 24시간 동안 노건조하여 함수비 및 중량을 결정하고, 이를 토대로 시료의 수축한계간극비를 최종 평가하였다.

3.4 현장시료의 물리적 특성

본 연구에서 시행한 침투압밀시험, 부압시험 및 건조수축시험 등에 이용한 시료는, 국내 남해안에 대표적으로 기 조성된 간척지를 배수가 원활토록 준설매립을 실시한 바 있는 전라남도에 위치한 해남지구, 고금지구 및 고흥지구 등의 현장시료이며, 본 3개 지구는 지반의 건조현상 등으로 인해 체적변화가 비교적 크게 예상되는 지역이다. 각 현장 지표로부터 50cm 정도의 심도에서 채취한 불교란 시료를 이용하여 시험을 실시하였으며, 각각의 시료에 대한 기본적인 물성시험결과 및 입도 분포곡선은 표1 및 그림 5에 각각 정리되어 있다.



(그림 5. 각 지구별 시료의 입도곡선)

표1에서 점토는 입경 0.005mm 이하인 토입자에 해당되며, 중량백분을 형태로 점토의 함유율 (clay content)을 나타내었다.

4. 시험결과의 분석

4.1 침투압밀시험결과

3개 준설매립지구 현장시료를 대상으로 수행한 침투압밀시험의 결과는 그림 6에 도시되어 있다.

그림 6의 결과를 살펴보면, 시료를 통과하는 침투압의 차이는 고금, 해남 및 고흥 지구의 순이며, 초기간극비가 클수록 침투압이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 해남지구 시료의 특성은 정규압밀상태에 가까우나, 고흥지구 시료의 경우는 최대침투압에 도달한 이후 침투압이 저하되는 현상이 발생한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 침투수가 통과하는 방향으로 유로가 형성되어, 결과적으로 침투압에 대한 저항이 감소되어 발생한 것으로 판단되며, 그 이후 침투압의 차이가 다시 커지는 현상은 연속적으로 가해지는 침투압으로 인해 시료 흡입자가 구조적으로 재배열되는 데 기인하는 것으로 판단된다.

그림 6에 도시된 각 시료를 통과하는 침투압의 차이로 부터 시료 하부에서의 유효응력을 식(10)에 의해 평가하고, 또한 다이알게이지를 이용하여 측정된 변화하는 시료의 높이로 부터 해당되는 간극비를 결정한 다음, 이를 이용하여 간극비-유효응력 사이의 변화관계를 각 시료에 대해 도시하면 그림 7과 같다.

그림 7에 도시된 각 지구별 간극비-유효응력 사이의 관계는 대부분 선형에 가까운 변화경향을 보이고 있으며, 대체적으로 볼 때 초기간극비가 큰 고흥시료의 경우 유효응력 증가에 따른 간극비의 감소율도 상대적으로 큰 경향을 나타내고 있다. 또한 식(11)에 의해 평가된 투수계수와 전술한 해당 간극비 사이의 관계는 그림 8에 도시되어

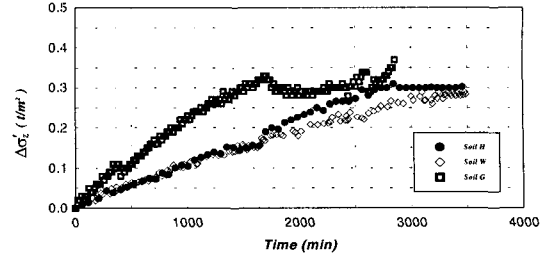


그림 6. 각 지구별 시료의 침투압밀시험 결과

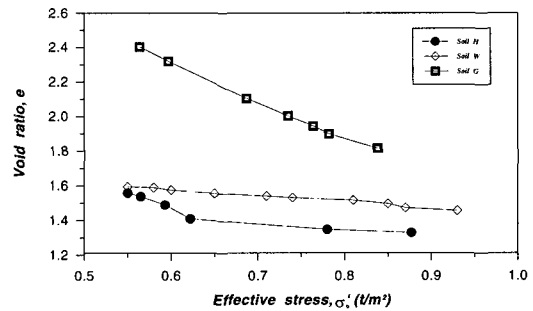
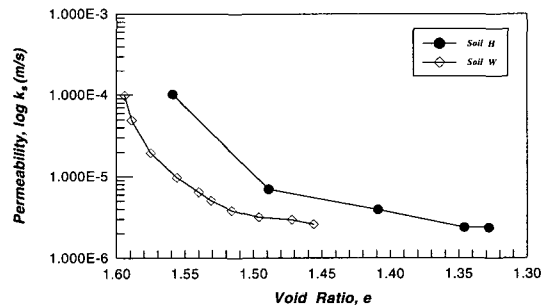
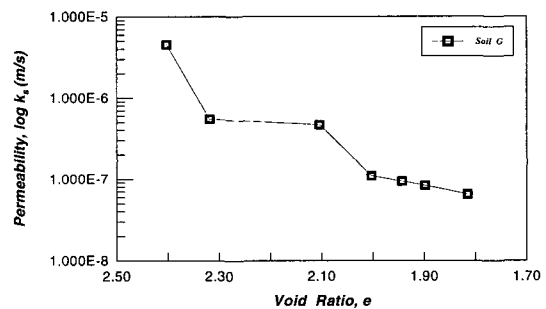


그림 7. 각 지구별 시료의 간극비-유효응력 관계



(a) 해남, 고금지구



(b) 고흥지구

그림 8. 각 지구별 시료의 투수계수-간극비 관계

있으며, 각 지구별 관계곡선의 형상은 대체적으로 유사하나, 해남시료의 경우 간극비 감소에 따른 투수계수 감소율이 다른 지구의 시료에 비해 큰 것으로 나타났다. 또한 시료의 점토함유율이 작을 수록(고흥, 고금, 해남 지구의 순으로, 표1 참조) 투수계수의 감소율이 커지는 경향을 보이고 있다.

4.2 부압시험 및 건조수축시험 결과

침투압밀시험을 통해 선행압밀된 시료에 대해 부압시험을 실시하는 목적은, 시료에 가해지는 부압이 최대값에 도달할 때의 간극비로 정의되는 균열간극비(e_{cr})를 결정하기 위함이다.

그림 9는 각 지구 현장시료들에 대한 부압시험결과이며, 이를 토대로 최대부압의 크기를 평가하면, 고금시료의 경우 -0.82kg/cm^2 , 해남시료의 경우 -0.77kg/cm^2 , 또한 고흥시료의 경우 -0.58kg/cm^2 등이다. 이에 해당하는 균열간극비는, 고흥, 고금, 해남 지구의 순서로, 각각 1.559, 1.453, 1.297 등으로 평가되며, 점토함유율과 초기간극비가 상대적으로 큰(표1 참조) 고흥시료의 경우가 균열간극비가 가장 큰 현상을 나타내고 있다.

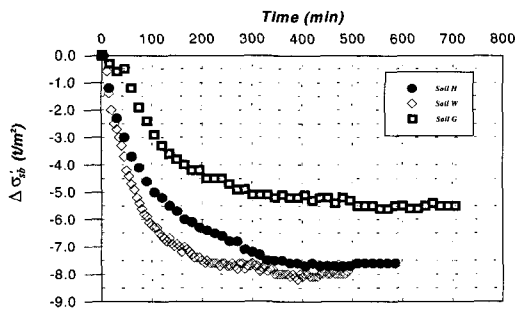
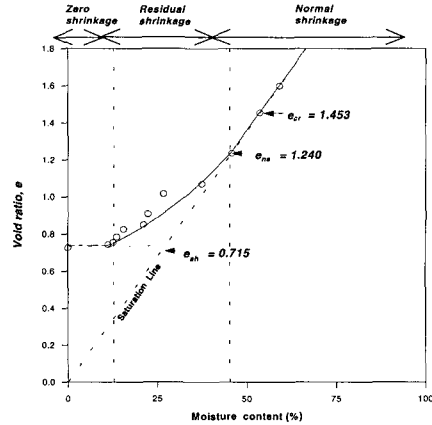
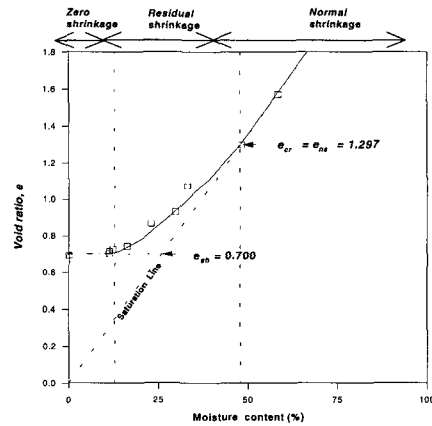


그림 9. 각 지구별 시료의 시간-부압관계

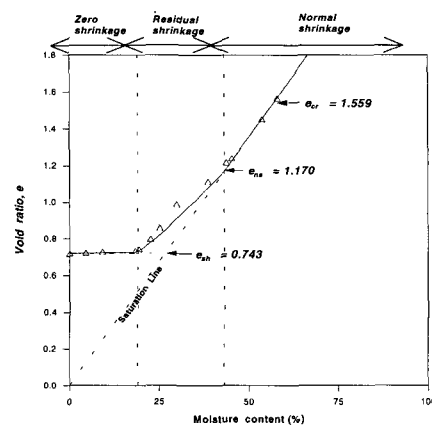
부압시험을 통해 각 현장시료의 균열간극비를 결정한 다음, 본 시료들을 계속 자연건조시키는 건조수축시험을 통해 체적변화를 측정하였고, 이를 토대로 각 현장시료의 간극비 및 함수비를 평



(a) 고금지구



(b) 해남지구



(c) 고흥지구

그림 10. 각 지구별 시료의 건조수축특성도

가하여 그 관계를 건조수축특성도에 도시하면 그림 10과 같다.

그림 10의 건조수축특성도에서, 정규수축구간(Normal shrinkage zone)은 건조수축으로 인한 함수량의 감소와 시료의 체적감소가 동일한 구간을, 잔류수축구간(Residual shrinkage zone)은 시료의 체적감소 보다 함수량의 감소가 더 큰 구간을 각각 의미한다. 또한 영수축구간(Zero shrinkage zone)은 시료의 체적감소는 없이 함수량의 감소만 발생하는 구간을 의미하며, 그림 10의 건조수축특성도에서 영수축구간에 해당되는 간극비를 토대로 수축한계간극비(e_{sh})를 결정하면, 고금시료의 경우 0.715, 해남시료의 경우 0.700, 고흥시료의 경우 0.743 등이다. 또한 그림 10의 건조수축특성도를 살펴보면, 점토함유율이 가장 큰 고흥시료의 경우, 정규수축구간의 범위가 고금시료 및 해남시료에 비해 넓게 나타나는 반면, 점토함유율이 가장 작은 해남시료의 경우에는 잔류수축구간의 범위가 가장 넓게 나타나고 있으며, 따라서 해남시료의 경우 건조수축에 의한 침하량이 상대적으로 클 것으로 예상된다.

1) 점토함유율에 따른 균열간극비의 분포

3개 지구 현장시료들에 대한 건조수축특성을 정의하는 균열간극비, 정규수축한계간극비(e_{ns}) 및 수축한계간극비 등은 시료의 점토함유율과 관련되어 있음을 부압시험 및 건조수축시험 결과분석을 통해 확인한 바 있다. 3개 지구 현장시료들에 대한 건조수축시험결과(그림 10 참조)를 토대로 점토함유율과의 관계를 도시하면 그림 11과 같으며, 점토함유율을 CC(%)로 표시하여, 그림 11에 도시된 각 경우의 선형관계를 식으로 표현하면 아래의 식(15)와 같다.

$$e_{cr} = 0.0235 \cdot CC(\%) + 0.576 \quad (15-1)$$

$$e_{ns} = -0.0115 \cdot CC(\%) + 1.654 \quad (15-2)$$

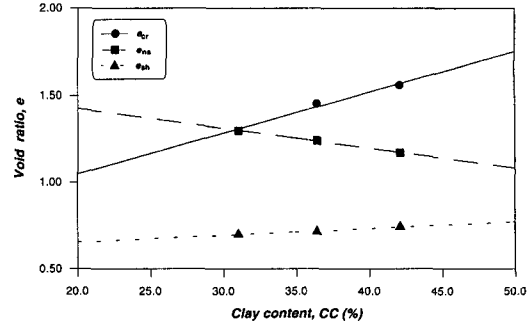


그림 11. 점토함유율과 간극비 e_{cr} , e_{ns} , e_{sh} 사이의 관계

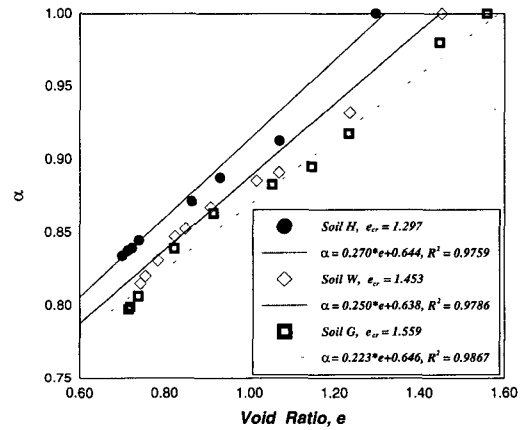


그림 12. 각 지구별 시료의 간극비-특성변수 α 값 사이의 관계

$$e_{sh} = 0.0039 \cdot CC(\%) + 0.578 \quad (15-3)$$

그림 11의 결과를 살펴보면, 균열간극비 및 수축한계간극비 모두, 점토함유율이 클수록 이에 비례하여 선형적으로 증가하고 있으나, 그 증가율은 균열간극비의 경우가 훨씬 크며, 상대적으로 수축한계 간극비는 점토함유율에 비교적 둔감하게 반응하는 경향 즉, 선형적 증가율이 비교적 완만한 경향을 보이고 있다. 이와는 달리 정규수축한계간극비는 점토의 함유율이 클수록 점차 작아지고 있으며, 이는 점토함유율이 클수록 정규수축범위는 넓어지는 반면에 잔류수축범위는 오히려 작아짐을 의미한다.

2) 흙시료별 α 값 분포의 비교

현상태의 간극비(e)와 균열간극비의 함수 형태로 표현되는 특성변수 α (식(2) 참조)는 건조수축현상에 의한 지반의 3차원적인 수축량의 범위를 정의한다. 3개 지구 현장시료들에 대한 시험결과로부터 구한 간극비와 α 값 사이의 관계를 도시하면 그림 12와 같다.

그림 12의 결과를 살펴보면, 다소 분산되는 경향은 있으나 간극비와 α 의 관계는 대체적으로 선형에 가까운 형태를 보이고 있으며, 3개 지구 현장시료 중, 점토함유율이 가장 큰 고흥시료의 경우 α 값의 변화폭은 1.0 ~ 0.797 정도로서 다른 2개 지구에 비해 상대적으로 큰 경향을 보이고 있다. 고금시료는 α 값의 변화폭이 1.0 ~ 0.815 정도의 범위이며, 점토함유율이 가장 작은 해남시료는 1.0 ~ 0.834 정도로서 다른 2개 지구에 비해 α 값의 변화폭이 가장 작은 범위를 나타내고 있다. 또한 그림 12의 선형관계를 각 지구별로 식으로 정리하면 아래의 식(16)과 같다.

$$\text{(해남지구)} \quad \alpha = 0.270 \cdot e + 0.644 \quad (16-1)$$

$$\text{(고금지구)} \quad \alpha = 0.250 \cdot e + 0.638 \quad (16-2)$$

$$\text{(고흥지구)} \quad \alpha = 0.223 \cdot e + 0.646 \quad (16-3)$$

위의 식(16)에 표현된 각 지구 현장시료별 관계식은, 준설패립지반의 건조수축특성으로 부터 얻은 경험식으로서 제한적이긴 하나, 해당지구의 건조수축에 의한 침하량 해석을 위해 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

이외에 α 값은 균열간극비와도 연관이 되고 있으며(식(2) 참조), 또한 앞서 분석된 바와 같이 균열간극비는 점토함유율과 선형형태로 관련되어 있는 점(식(15) 참조) 등을 감안할 때, α 값의 점토함유율과의 상관관계가 예상되며, 각 지구별 α 값의 최소치를 토대로 이와 같은 상관관계를 도시하면 그림 13과 같다.

그림 13의 결과를 살펴보면, α 값 또한 점토함

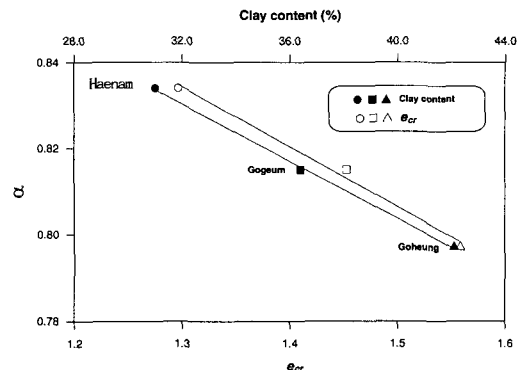


그림 13. α 값의 최소치- e_{cr} -점토함유율 사이의 관계

유율과 선형형태의 상관관계를 이루고 있으며, 종합적으로 볼 때 준설패립지반의 건조수축에 큰 영향을 미치는 요소는 점토함유율이며, 따라서 점토함유율이 클수록 α 값의 변화폭도 커지게 되고 이로 인해 3차원 체적변화도 크게 발생하는 현상을 예견할 수 있다.

5. 해남지구 관측결과와의 침하량 비교 분석

과거 10년간 현장침하를 관측한 해남 간척사업 지구를 대상으로, 관측된 침하량과 2장에 기술된 해석기법(건조수축 및 자중압밀에 의한 침하량 예측기법) 및 특성변수 α 값 관계식(식(16-1) 참조) 등에 의거한 침하량 예측치를 서로 비교하고, 이를 통해 건조수축이 전체침하에 미치는 영향정도 등을 분석하였다.

본 해남지구는 1987년 5월에 방조제의 최종 체질이 이루어졌으며, 내부개답설계는 그 다음해인 1988년에 실시하였다. 간척농지면적과 담수량을 증가시키기 위해 간척지 내부에서 1991년 4월부터 5월까지 준설패립토를 실시하였다. 내부개답설계 이후 10년이 경과한 현재까지 자중압밀 및 건조수축 등에 의한 지반침하가 계속 진행되고 있다. 해남지구 현장의 침하관측은 간척지를 단지로 구분하여 매년 평균 2회씩 측량을 실시하고,

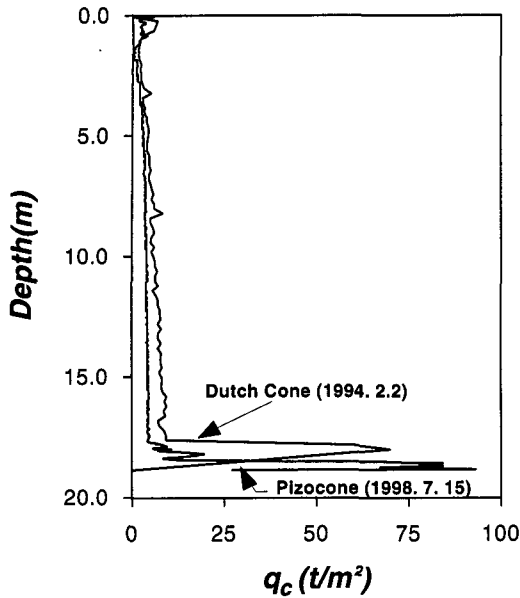


그림 14. 해남지구 콘관입시험 결과

간척지는 1ha 단위로 분할하여 각 구획마다 사변형 각 모서리와 중앙의 5개소 측정점에 대한 지반고 측정결과를 평균하여 결정하였다. 또한 설계시 내부개답 개발면적은 3,711ha로서 지반고를 높이기 위한 성토량은 4,660,000m³ 이었으며, 성토고는 공구별로 차이가 있으나 평균 25.1cm로 측정되었다. 1994년 이후 간척지는 농지로서 가경작이 이루어 지고 있어 대부분의 간척지가 연농기에 담수로 인해 지반이 포화된 상태로 유지되고, 간척지 내부의 담수 수위는 다소 변동은 있으나 EL. 0.5m로 관리하고 있는 상태이다.

해남지구 내부개답지의 기초지반은 심도가 17 ~ 18m 정도인 해성퇴적토로서 불투수성의 미성숙토이며, 액성한계가 45 ~ 55% 정도인 고소성 점토(CH)이고, 기초지반에 대한 콘관입시험 결과는 그림 14와 같다.

그림 14의 결과를 살펴보면, 지표에서 아래쪽으로 심도 1.0m 지점까지는 준설성토 하중과 건조수축의 영향으로, 1988년에 비해 10년 경과 후인 1998년의 선단저항력이 훨씬 큰 것으로 나타

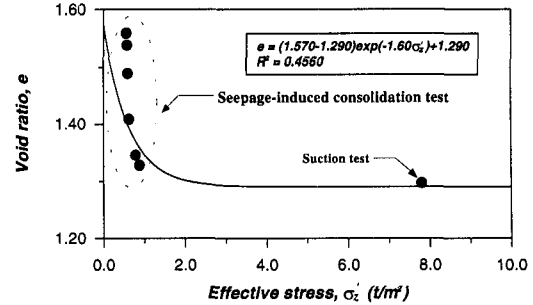


그림 15. 해남지구 시료의 간극비-유효응력 회귀분석 관계

났으나, 그 이하의 심도에서는 거의 변화가 없으며, 깊이에 따른 변화도 크지 않은 것으로 조사되었다. 또한 피조콘 시험결과에 의하면 심도 17m 지점까지는 배수층이 없으며, 표층으로만 배수되고 바닥은 불투수층으로 구성되어 있다. 계절 직후인 1988년 이전에는 지표까지 거의 포화된 상태였으나, 그 이후로는 간척지에 경작을 시행하여 지표 아래쪽 0.5 ~ 0.8m 정도 지점에 지하수위가 존재하고 있는 것으로 조사되었다. 또한 실측결과 지하수위는 1994년 조사에서 지표 아래쪽 0.5m 지점에, 1997년 조사에는 지표 아래쪽 0.3m 지점에 존재하였으나, 1998년 조사에서는 강우에 의하여 지표까지 완전히 포화된 상태로 나타나, 계절 및 강우 조건의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

그림 14에서 콘관입에 의한 선단저항치(q_c)는 심도 1.0m 이하에서는 심도에 비례하여 증가하나, 최대값은 8.0kg/cm² 정도로서 전체토층이 국내 남해안 지방에서 흔히 볼 수 있는 균질의 연약점토지반이다. 해석시 압밀토층의 두께는 하부 견고한 지반까지 총 18.0m를 적용하였으며, 지반의 배수조건은 표층으로 배수되는 일면배수로 가정하였다.

또한 그림 3 및 4의 침투압밀시험 장치를 이용한 측정결과(그림 15에 점으로 도시되어 있음)를 토대로, 해남지구 시료의 간극비-유효응력 사이의 관계를 Gibson 등(1981)의 지수형태 곡선으로

가정하여, 상수 λ , 초기간극비(e_0) 및 최종간극비(e_∞) 등의 값(식(4) 참조)을 회귀분석하여 결정하였다. 회귀분석을 통해 결정된 간극비-유효응력 사이의 관계식은 식(17)과 같고, 그림 15에서 곡선의 기울기를 의미하는 λ 는 1.6으로 결정되었다.

$$e = (1.570 - 1.290)\exp(-1.60\sigma_z') + 1.290 \quad (17)$$

또한 동일한 해남지구 시료에 대해 투수계수(k_s)와 간극비 사이의 관계를 함수형태로 정의하기 위해 그림 16에 점으로 표시된 측정결과를 회귀분석하였으며, 그 결과를 정리하면 식(18)과 같다.

$$k_s = (6.5 \times 10^{-14})\exp(12.6 \cdot e) \quad (18)$$

이외에 해석에 관련된 입력자료는, 해남지구에서 직접 채취한 시료를 대상으로 침투압밀시험, 부압시험 및 건조수축시험 등을 실시하여 얻어진 결과를 이용하였다.

침하량 비교결과는 그림 17에 도시되어 있으며, 이를 살펴보면, 2장의 해석기법 등에 의거한 예측침하량은 24.9cm이고, 해남지구 현장에서 과거 10년간 실제 관측된 침하량은, 준설성토로 인한 지표상승분을 제외하면 17.03cm로서, 예측침하량이 관측침하량에 비해 7.87cm 크게 평가되는 결과를 나타내고 있다.

전술한 1988년부터 현재까지 10년간의 해석 예측침하량 24.9cm를, 자중압밀 부분과 건조수축 부분으로 구분하여 침하량을 평가하면, 각각 14.5cm와 10.4cm이다. 결과적으로 본 해남지구의 경우, 10년간 건조수축에 의해 예측되는 침하량은 전체침하량 24.9cm의 41.8% 정도로서 건조수축이 침하에 미치는 영향이 상당히 큼을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 또한 그림 10의 건조

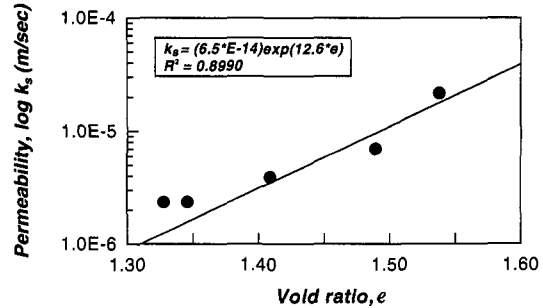


그림 16. 해남지구 시료의 투수계수-간극비 회귀분석 관계

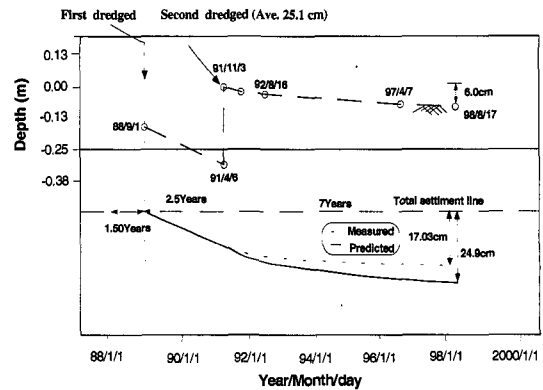
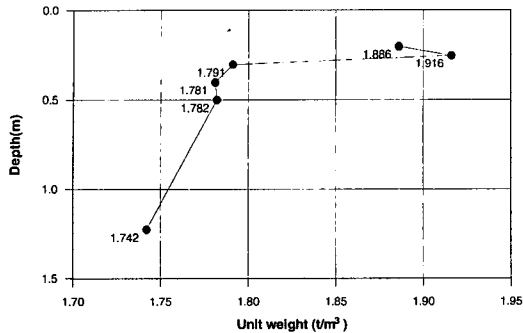


그림 17. 해남지구 침하량 관측치와 예측침하량의 비교

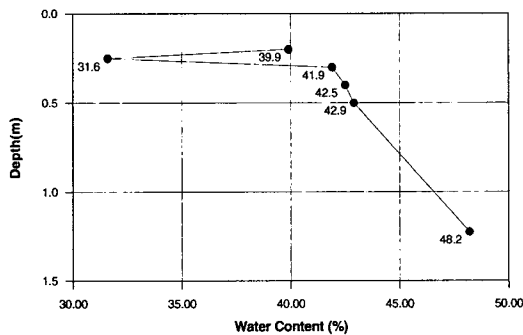
수축특성도를 통해 분석한 결과 즉, 점토함유율이 가장 작은 해남시료의 경우에는 잔류수축구간의 범위가 가장 넓게 나타나고 있으며, 따라서 해남시료의 경우 건조수축에 의한 침하량이 상대적으로 클 것으로 예상된다는 분석내용과 대체적으로 부합되는 결과이다.

예측침하량과 관측침하량의 차이 7.87cm는 예측된 전체침하량 24.9cm의 31.6% 정도에 해당되며, 이와같은 차이가 유발된 원인을 추정 분석하면 다음과 같다.

1) 본 해남지구의 경우 4년 정도 전부터 경작을 시작하였으며 이러한 조건을 해석상 적절히 반영하지 못한 점, 2) 오랜 세월을 통해 퇴적 형성된 지반의 지층구조와 토질특성의 다양성 등을 적절



(a) 단위중량변화



(b) 함수비변화

그림 18. 해남지구 표토층 심도별 단위중량 및 함수비 변화

히 반영하지 못한 점, 3) 해당시료 1점에 대한 시험치에 의존하여 시료의 대표성이 부족한 점, 또한 4) 지표의 건설 등 기상조건과 지하수위 변동 다양한 현장조건이 해석상 모두 반영되지 못한 점 등이 주된 원인으로 추정된다.

전술한 2)의 원인과 관련하여, 표토층의 단위중량 및 함수비 변화를 살펴 본 측정결과를 분석하여 부연 설명하면 다음과 같다.

그림 18은 1994년 2월 해남지구 침하관측지점에서 심도 1.5m까지 지표층을 굴착하고, 10~30cm 연직간격으로 불교란 시료를 채취하여 측정된 단위중량과 함수비의 깊이별 변화를 각각 나타낸다. 그림 18의 결과를 분석하면, 대체적으로 심도 20~30cm 지점에서 단위중량은 가장 크고 함수비는 가장 작은 상태가 존재하며, 이는 건조수축에 의한 영향깊이로 볼 수 있으며, 그림 14의

표 2. 분석에 적용된 입력자료

수축한계간극비, e_{sh}	균열간극비, e_{cr}	초기간극비, e_{p0}
0.70 ~ 1.10	1.00 ~ 1.30	1.57

콘관입시험 결과와도 대체적으로 일치하고 있다. 또한 2장의 해석기법 등에 의거해 예측된 본 해남지구의 최대균열깊이는 53cm이다. 결과적으로 현장의 토질상태는, 지표의 건설 등 기상조건과 지하수위 변동 등 복합적 요인에 의해 다양하게 변화함을 알 수 있다.

6. 건조수축 관련변수의 영향 분석

5장에서 해남지구 관측결과와의 비교를 통해 적용 타당성이 부분적으로 확인된, 2장의 해석기법 및 특성변수 α 값 관계식(식(16-1) 참조) 등을 이용해 건조수축 관련변수가 연약한 준설매립지반의 침하 등에 미치는 영향을 분석하였다. 방법으로는, 해남지구 현장시료에 대한 시험결과를 본 분석의 기초자료로 이용하는 한편, 표2에 명시된 범위의 값을 토대로 건조수축특성에 관한 다양한 분석을 실시하였다.

1) 수축한계간극비의 영향

준설매립지반의 두께는 3.0m로 가정하고 균열간극비(e_{cr})가 1.30인 경우, 3차원 건조수축에 의한 침하량을 Abu-Hejleh & Znidarcic (1996)가 제안한 건조수축 침하이론 지배방정식(식(1)에서 특성변수 α 값이 1.0 보다 작은 경우)의 유한차분화 표현식(2장 참조)을 토대로 예측하여 보았으며, 본 경우에 고려한 수축한계간극비(e_{sh})는 0.70, 0.80, 0.90, 1.00 및 1.10 등의 5종류이다. 각 경우에 대한 침하량-경과시간 사이의 관계는 그림 19에 도시되어 있으며, 이를 살펴보면, 수축한계간극비가 작을수록 건조수축에 의한 영향범

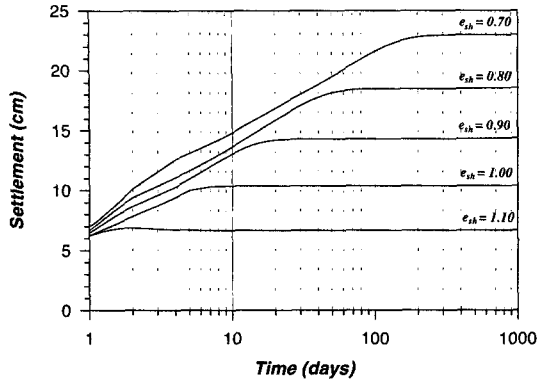


그림 19. 수축한계간극비의 변화에 따른 시간-침하량 관계

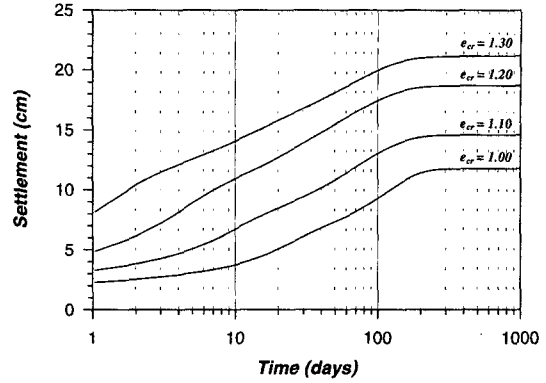


그림 21. 균열간극비 변화에 따른 시간-침하량 관계

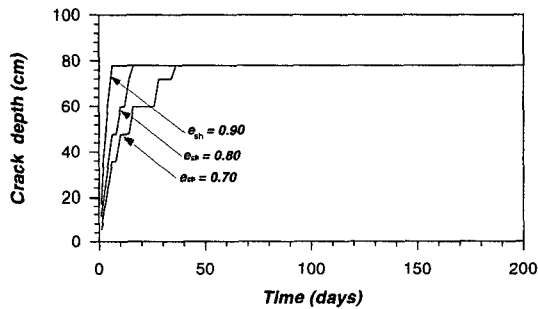


그림 20. 수축한계간극비의 변화에 따른 시간-균열깊이 관계

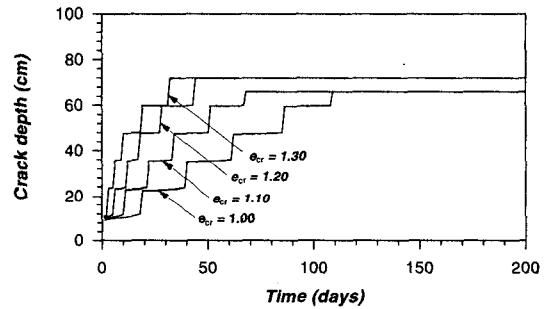


그림 22. 균열간극비 변화에 따른 시간-균열깊이 관계

위가 커져 결과적으로 침하가 크게 발생함을 알 수 있다.

또한 그림 19의 결과를 살펴보면, 수축한계간극비가 클수록 건조수축에 의해 예상되는 침하량의 최종값 정도에 도달하는 경과시간은 점차 짧아짐을 알 수 있으며, 이외에도 수축한계간극비가 본 분석에 적용된 균열간극비($e_{cr}=1.30$)에 근접할수록 건조수축에 의한 침하는 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

또한 수축한계간극비가 0.70, 0.80 및 0.90인 3가지 경우에 대해, 지표면으로 부터 아래쪽으로 점차 확장되는 균열의 발생깊이를 경과시간별로 살펴본 결과는 그림 20에 도시되어 있다.

그림 20의 결과를 분석하면, 최대균열깊이(78cm 정도)는 수축한계간극비와는 거의 연관이

없음을 알 수 있다. 그러나 최대균열깊이에 도달하기까지의 경과시간은 수축한계간극비가 작을수록 점차 길어짐을 알 수 있다.

2) 균열간극비의 영향

준설매립지반의 두께는 3.0m로 가정하고 수축한계간극비가 0.70인 경우, 3차원 건조수축에 의한 침하량을 1)과 마찬가지로 2장의 해석기법 등을 토대로 예측하여 보았으며, 본 경우에 고려한 균열간극비는 1.00, 1.10, 1.20 및 1.30 등의 4 종류이다. 각 경우에 대한 침하량-경과시간 사이의 관계는 그림 21에 도시되어 있으며, 이를 살펴보면, 다양한 경과시간 모두에 대해 균열간극비의 크기 증가에 비례하여 건조수축에 의한 침하량도 점차 커짐을 알 수 있다.

또한 다양한 균열간극비에 대해, 지표면으로 부터 아래쪽으로 점차 확장되는 균열깊이를 경과시간별로 살펴본 결과는 그림 22에 도시되어 있다.

균열간극비가 1.0에서 1.3으로 증가하면 균열 깊이는 66cm에서 78cm로 커지는 결과를 그림 22에서 나타내고 있으나, 이와같은 증가량은 본 분석에 적용한 준설패립지반 두께 3.0m의 4% 정도에 불과하며 또한 유한차분 수치해석이 지닌 근사성을 감안할 때, 최대균열깊이는 균열간극비의 크기에 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다. 그러나 최대균열깊이에 도달하기까지의 경과시간은 균열간극비의 크기에 연관이되어 균열간극비가 작을수록 점차 길어짐을 알 수 있다.

3) 자연침하비

준설패립지반의 침하는 일반적으로, 점토층의 건조수축으로 인한 침하와 자중압밀에 의한 침하 등 크게 2가지로 구성된다. 만약 이와같은 2가지 침하 모두를 자연침하라고 정의하면, 건조수축에 의한 침하량(S_{sh})과 자중압밀로 인한 침하량(S_{self})의 비(ratio)를 자연침하비(NSR, Natural Settlement Ratio)로 역시 정의할수 있으며, 이를 식으로 표현하면 아래의 식(19)와 같다.

$$NSR = \frac{S_{sh}}{S_{self}} \quad (19)$$

식(19)에서 $NSR=1.0$ 일 경우에는, 건조수축으로 인한 침하량과 자중압밀에 의한 침하량이 서로 동일한 크기임을 의미하고, 또한 $NSR > 1.0$ 일 경우에는 건조수축에 의한 침하량이 자중압밀에 의한 침하량에 비해 정량적으로 더욱 지배적임을 의미한다.

수축한계간극비가 0.70인 경우, 2장의 해석기법 등을 토대로 해당 침하량 및 자연침하비 평가를 시행하였으며, 본 경우에 고려한 균열간극비는

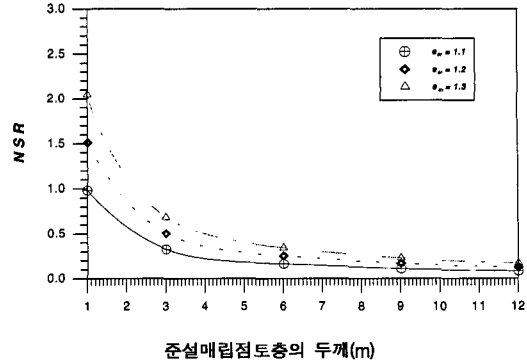


그림 23. 균열간극비의 변화에 따른 준설패립 점토층 심도와 자연침하비 관계

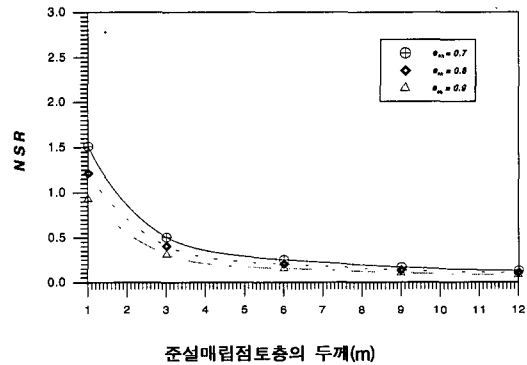


그림 24. 수축한계간극비의 변화에 따른 준설패립 점토층 심도와 자연침하비 관계

1.10, 1.20 및 1.30 등의 3종류이다. 준설패립 점토층의 두께를 바꿔 각 경우에 대해 NSR값을 평가해 본 결과는 그림 23에 도시되어 있다.

또한 균열간극비가 1.20인 경우, 2장의 해석기법 등을 토대로 해당 침하량 및 자연침하비 평가를 시행하였으며, 본 경우에 고려한 수축한계간극비 0.70, 0.80 및 0.90 등의 3종류이다. 준설패립 점토층의 두께를 바꿔 각 경우에 대해 NSR값을 평가해 본 결과는 그림 24에 도시되어 있다.

그림 23 및 24의 결과를 분석하면, 다양한 크기의 균열간극비 및 수축한계간극비 모두에 대해, 준설패립된 연약점토층의 두께가 커질수록 자연침하비 NSR값은 점차 작아져 점토층의 두께가

12m인 경우 NSR값이 0.2 ~ 0.3 정도에 근접하는 현상을 나타내고 있으며, 이는 점토층의 두께가 커질수록 전체 자연침하중 건조수축에 의한 침하가 차지하는 비중이 점차 작아짐을 의미하며, 이에 대한 원인은 앞의 1) 및 2)의 분석에서도 부분적으로 확인한 바와 같이 건조수축현상의 영향 범위에 해당되는 최대균열깊이가 수축한계간극비 및 균열간극비의 크기 변화에 거의 상관없이 대체적으로 일정한 현상 즉, 건조수축에 의한 3차원 체적변화가 표토층 부근에 치중하여 발생하는데 주원인이 있다고 판단된다.

구체적으로 그림 23 및 24의 결과를 살펴보면, 균열간극비 및 수축한계간극비, 준설매립 연약점토층의 두께 등의 변화에 따라 NSR값은 최대 2.0부터 최소 0.2까지 변화하고 있으며, 이를 통해 3차원 건조수축에 의한 침하발생 정도를 예상 총침하량 평가에 있어 결코 무시할 수 없음을 알 수 있다. 이외에도, 균열간극비가 증가할수록 또는 수축한계간극비가 감소할수록 동일한 각각의 NSR값에 해당하는 점토층 두께는 점차 커지는 현상을 나타내고 있으며, 그림 24의 결과에 의하면 점토층의 두께는 균열간극비가 1.10일 경우 1.0m 정도, 1.30일 경우에는 2.3m 정도임을 나타내고 있다.

7. 결론 및 제언

본 연구에서는 연약한 점토층 준설매립지반을 대상으로, 비교적 활발히 연구가 진행되고 있는 자중압밀 침하분야에 비해 상대적으로 연구성과가 미흡한 표토층의 건조수축특성 규명에 초점을 두고, 고안·제작된 실내시험장치를 이용하여 침투압밀시험, 부압시험 및 건조수축시험 등을 시행하였다. 실내시험이 시행된 시료는 전라남도에 위치한 해남지구, 고금지구 및 고흥지구 등 3개 지구의 현장시료이며, 실내시험결과를 토대로 건조수축 관련특성을 분석하였다. 또한 Abu-Hejleh

& Znidarcic(1996)가 제안한 연약한 세립점토 지반의 건조수축 침하이론 지배방정식을 유한차분 형태로 표현하고 실내시험을 통해 파악된 해남지구 현장시료의 건조수축특성등을 입력자료로 하여, 3차원 체적변화에 따른 건조수축침하를 예측하였다. 계속해서 자중압밀침하를 포함한 전체 침하 예측치를 해남지구 현장에서의 10년간 실제 관측결과와 서로 비교하였다. 최종적으로는 건조수축특성에 관련된 변수들이 침하 등에 미치는 영향정도를 분석하였다. 본 연구결과중 주요 부분을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 건조수축특성을 정의하는 균열간극비는 해당 준설매립지반의 점토함유율과 밀접한 관계가 있으며, 또한 균열발생 등 건조수축에 의해 예상되는 지반의 3차원 체적변화를 1차원 형태로 변환하여 고려하는 특성변수 α 값도 점토함유율과 상관관계를 이루고 있다. 종합적으로 볼 때 포화된 연약점토층 준설매립지반의 건조수축에 큰 영향을 미치는 요소는 점토함유율이며, 따라서 점토함유율이 클수록 α 값의 변화폭, 균열간극비 및 수축한계간극비 등도 커지게 되고, 이로 인해 결국 3차원 체적변화도 크게 발생하는 현상을 예견할 수 있다.
- 2) 구체적으로, 3개 지구중 점토함유율이 가장 큰 고흥시료의 경우 α 값의 변화폭은 1.0~0.797 정도로서 가장 크고, 고금시료의 경우는 1.0~0.815 정도의 변화폭이며, 상대적으로 점토함유율이 가장 작은 해남시료는 1.0~0.834 정도로서 가장 작은 α 값의 변화폭을 나타냈다. 이외에도 본 연구에서 시행한 3개 지구 현장시료에 대한 시험결과 및 회귀분석 등을 토대로, α 값과 간극비 사이의 상관성을 선형관계식으로 표현하였으며, 또한 균열간극비와 점토함유율 사이의 상관관계식도 제시하였다.
- 3) 다양한 크기의 균열간극비 및 수축한계간극

비 모두에 대해, 준설매립된 연약점토층의 두께가 커질수록 전체 자연침하중 건조수축에 의한 침하가 차지하는 비중이 점차 작아지긴 하나, 전체적으로 볼 때 균열간극비(1.1~1.3) 및 수축한계간극비(0.7~0.9), 준설매립 연약점토층의 두께(1.0~12.0m) 등의 변화에 따라 자연침하비 $NSR_{값} = \frac{\text{건조수축침하량}}{\text{자중압밀침하량}}$ 이 최대 2.0부터 최소 0.2까지 변화하고 있으며, 이를 통해 3차원 건조수축에 의한 침하발생 정도를 예상 총침하량 평가에 있어 결코 무시할 수 없음을 알 수 있다.

향후 계속해서 다양한 토질조건에 준설매립지반에 대해 체계적인 실내시험 및 현장계측 등을 시행할 것이며, 아울러 본 연구에서 고려하지 않은 강수량 및 기후조건에 의한 영향을 포함한 건조수축침하량의 평가 등을 통해 보다 신뢰성 있는 충분한 결과를 확보하여, 시간경과에 따른 관련지반의 강도변화를 평가하고 또한 건조수축특성 등을 고려하는 보다 합리적인 침하해석기법을 제시하여, 궁극적으로는 준설매립지반의 토립자의 유실율, 자중압밀 및 건조수축을 모두 포함하는 자연침하의 결정방법을 정립하고자 한다.

참고 문헌

1. Abu-Hejleh, A.N.(1993), "Desiccation Theory for Soft Soils," Ph.D. Thesis, Univ. of Colorado.
2. Abu-Hejleh, A.N. and Znidarcic, D.(1996), "Consolidation Characteristics of Phosphatic Clays," Journal of Geotechnical Engineering, Vol.122, No.4, ASCE, pp.295~301.
3. Gibson, R.E., England G.L., and Hussey, M.J.L.(1967), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays (I). Finite Nonlinear Consolidation of Thin Homogeneous Layers," Geotechnique, Vol.17, No.3, pp.261~273.
4. Gibson, R.E., Schiffman, R.L., and Cargill, K.W.(1981), "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays (II). Finite Nonlinear Consolidation of Thick Homogeneous Layers," Canadian Geotechnical Journal, Vol.18, pp.280~293.
5. Lee, K. and Sils, G.C.(1981), "The Consolidation of a Soil Stratum, including Self-Weight Effects and Large Strains," Int. Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.5, pp.405~428.
6. Lee, S.L., Karunaratne, G.P., Yong, K.Y., Chow, Y.K., and Chew, S.H.(1988), "Consolidation of Dredged Clay in Reclamations," Soils and Foundations, Vol.28, No.2, pp.1~13.
7. Toorman, E.A.(1996), "Sedimentation and Self-weight Consolidation : General Unifying Theory," Geotechnique, Vol.46, No.1, pp.103~113.
8. 유남재, 유건선, 김영길, 이명옥, 이종호, 이기우 (1996), 준설토안정에 소요되는 시간추정 기법, 「해안 매립과 연약지반 개량을 위한 신기술 개발」 보고서, Vol. I.
9. 이승, 양태선, 황규호(1994), "준설매립점토의 전단강도 특성에 자중압밀 특성에 관한 연구," 대한토목학회논문집, 제14권, 제4호, pp.953~963.
10. 홍병만(1998), "간척지반의 건조수축 및 자중압밀특성", 동국대학교 박사학위논문.
11. 황정규, 김홍택, 김석열, 강인규, 김승욱(1998), "플라스틱 배수제를 이용한 수평배수공법에 관한 연구," 한국지반공학회지, 제14권, 제6호, pp.93~112.

(접수일자 1999. 9. 2)