

준설점토지반의 전단강도 예측 및 장비투입시기 결정에 관한 연구

A Study on the Prediction of Shear Strength and Determination of the Embarkation Time of Equipment in Dredged Clay Fills

김홍택* · 김석열** · 강인규*** · 김승욱****

Kim, Hong Taek · Kim, Seog Yol · Kang, In Kyu · Kim, Seung Wook

Abstract

In the present study, mainly to determine the embarkation time of equipment in dredged clay fills, an analytical approach is performed to predict a variation of the undrained shear strength in the outermost layer. In this approach, Gibson's non-dimensional linear constant defining the relationship between the void ratio and the effective stress is employed. Also in this approach, void ratios and settlements associated with the volume change due to the self-consolidation and the desiccation shrinkage are evaluated at various elapsed times based on the finite difference solution technique proposed by the authors(1999) and the developed computer program named as *DSCON*.

Predicted results(water content ratio, unit weight and undrained shear strength) are compared with those of laboratory model tests conducted with soil samples obtained from the Koheung site. Based on the predicted undrained shear strengths, possible embarkation time of a equipment is also evaluated. In addition, further analyses are made to indirectly verify the efficiency of the analytical approach proposed in the present study using the *PSDDF* computer program which can consider the drainage efficiency.

Keywords : Dredged clay fills, Undrained shear strength, Embarkation time of equipment

요 지

본 연구에서는 궁극적으로 준설점토 매립지반에 대한 장비투입 가능시기를 결정하기 위한 목적으로, 표층의 비배수전단강도 변화를 예측하기 위한 해석적 접근이 이루어 졌으며, 이를 위해 Gibson 등이 제시한 무차원 선형상수(간극비-유효응력 관계)가 도입되었다. 또한 이 과정에서 준설점토 매립지반의 자중압밀 및 건조수축 등에 의한 체적변화에 관련된 경과시간별 간극비 및 침하량의 평가를 위해, 필자 등이 제시한 해석기법 및 이를 토대로 개발된 프로그램(*DSCON*)이 이용되었다.

또한 전남 고흥지구 준설점토 현장시료를 대상으로 실시한 모형토조 실험결과와, 본 연구 제시 해석절차에 의거한 예측치(함수비, 단위중량 및 비배수전단강도 등)를 서로 비교하는 등 분석이 이루어 졌다. 이외에도, 예측된 비배수전단강도를 토대로 본 고흥지구 현장의 장비투입 가능시기를 평가하여 보았으며, 본 평가에 대한 간접적인 타당성 검증을 위해, 배수효율을 고려하는 *PSDDF* 프로그램 해석을 추가로 시행하여, 결과를 비교 분석하였다.

주요어 : 준설매립점토, 비배수전단강도, 장비투입시기

* 정회원 · 홍익대학교 공과대학 건설도시공학부 교수

** 정회원 · 농업기반공사 농어촌연구원 책임연구원

*** (주)브니엘건설턴트 책임기술자

**** 농업기반공사 농어촌연구원

1. 서론

준설매립공법은 수면아래의 지반을 굴착하여 물과 토립자가 섞인 상태로 배송관을 통해 매립하는 공법이며, 이로 인해 조성되는 준설매립지반은 퇴적토와 유사한 토립자의 골격을 가지고 있으나 입도분포의 변화가 심하고, 함수비가 매우 크다. 준설매립지반의 입도조성이 실트질 이하의 해성점토로 주로 이루어진 경우에는 단위중량이 작고, 압축성이 매우 크며, 또한 강도증가현상이 미미한 특징이 있다. 준설매립지반은 토립자의 침강현상과 지반의 하부층에서 발생하는 자중압밀 및 주로 표층에서 발생하는 건조수축 등에 의한 자연침하과정을 복합적으로 거치면서 과도한 체적변화가 유발되며, 시간의 경과에 따른 체적변화과정 동안에 준설매립지반의 평균함수비가 감소하고, 단위중량이 증가하는 동시에 전단강도가 미소하게 증가하는 현상이 나타난다. 이러한 함수비, 단위중량 및 비배수전단강도 등과 관련하여 연약지반 상부에 성토하중이 작용함으로 인한 비배수전단강도의 증가량을 산정하기 위해 Terzaghi의 일차원 압밀이론을 토대로 한 접근이 시도된 바 있으나 (Stamatopoulos and Kotzias, 1985), 상부에 성토하중이 존재하지 않는 상태에서 과도한 침하가 발생하고 이로 인해 미소하게 강도가 증가하게 되는 준설점토지반에 관해서는 아직까지 명확한 규명이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

준설점토 매립지반의 체적변화는 자중압밀 및 건조수축 등에 주로 기인하며(그림 1), 이와 같은 체적변화로 인해 단위중량은 증가하고 함수비와 간극비는 감소하는 등 전단강도의 변화가 지속적으로 발생하게 된다. 이러한 전단강도의 변화현상은 특히 매립지반의 표층에서 현저하게 나타나며, 결과적으로 장비투입에 따른 소요지지력은 주로 표층의 전단강도에 의존하게 된다.

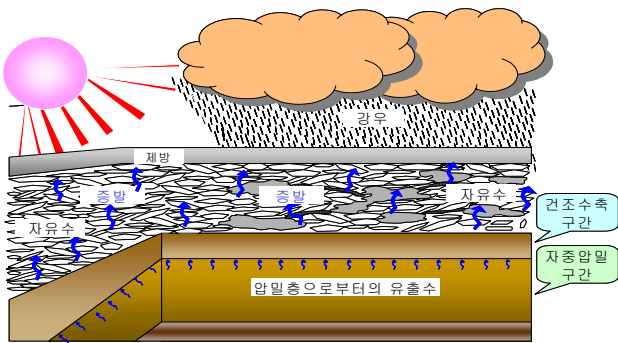


그림 1 준설점토 매립지반의 체적변화 메커니즘 개요

본 연구에서는 궁극적으로 준설점토 매립지반에 대한 장비투입 가능시기를 결정하기 위한 목적으로, 표층의 비배수전단강도 변화를 예측하기 위한 해석적 접근이 이루어졌으며, 이를 위해 Gibson 등(1967, 1981)이 제시한 무차원 선형상수(간극비-유효응력 관계)가 도입되었다. 또한 이 과정에서 준설점토 매립지반의 자중압밀 및 건조수축 등에 의한 체적변화에 관련된 경과시간별 간극비 및 침하량의 평가를 위해, 필자 등(1999)이 제시한 해석기법 및 이를 토대로 개발된 프로그램(DSCON)이 이용되었다.

또한, 전남 고흥지구 준설점토 현장시료를 대상으로 실시한 모형토조 실험결과와, 본 연구 제시 해석절차에 의거한 예측치(함수비, 단위중량 및 비배수전단강도 등)를 서로 비교하는 등 분석이 이루어 졌다. 이외에도, 예측된 비배수전단강도를 토대로 본 고흥지구 현장의 장비투입 가능시기를 평가하여 보았으며, 본 평가에 대한 간접적인 타당성 검증을 위해, 배수효율을 고려하는 PSDDF 프로그램 해석을 추가로 시행하여 결과를 비교·분석하였다.

2. 기본 해석법

본 연구에서 다루고자 하는 준설점토 매립지반 표층의 비배수전단강도 예측을 위해서는, 각각의 경과시간별로 간극비 및 침하량이 산출되어야 한다. 이를 위해 필자 등(1999)이 제시한 해석기법과 이를 토대로 개발된 프로그램(DSCON)이 이용되었으며, 관련 내용 중 주요부분을 요약·정리하면 다음과 같다.

Abu-Hejleh and Znidarcic(1995)는, 유한변형률 개념을 근거로 한 Gibson 등의 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 제안하였다.

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

식 (1)에서 $\alpha=1.0$ 일 경우에는 Gibson 등의 1차원 자중압밀이론 지배방정식과 동일하며, Abu-Hejleh and

Znidarcic가 제안한 건조수축 침하이론 지배방정식은 식 (1)에서 α 값이 1.0보다 작은 경우에 해당된다. Abu-Hejleh and Znidarcic가 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 $(1+e_{cr})[1-\varepsilon(e, e_{cr})]$ 로 감소됨을 의미한다. 여기서 e_0 는 전체토층의 평균 초기간극비를, 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.

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

식 (3)에 포함된 g 및 λ 는 Gibson 등이 제시한 매개변수이며, 여기서 g 는 간극비 및 이에 따른 지반의 연직방향 투수계수의 변화를 고려하는 변수에 해당되고, λ 는 간극비와 연직방향 유효응력 (σ'_z) 사이의 관계를 정의하는 다음의 식 (4)로부터 결정되는 상수이다.

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

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

e_{∞} : 최종상태(시간 $t=\infty$)에서의 간극비

식 (1)의 건조수축 또는 자중압밀 침하이론 지배방정식은 Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘을 이용하여 정식화되며, 초기상태(시간 $t=0$)에서 지반은 완전포화상태에 있는 것으로 가정하고 또한 경계조건으로는, 준설점토 매립지반의 하부경계면이 투수조건인 경우와 불투수조건인 경우 모두가 고려된다.

자중압밀 및 건조수축 등에 의한 준설매립지반의 침하현상에 대해, 깊이별 간극비의 변화 등 그 예상되는 과정을

시간대별로 구분하여 도시하면 그림 2와 같으며, 그림 2의 각 단계에 관련된 침하해석기법을 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

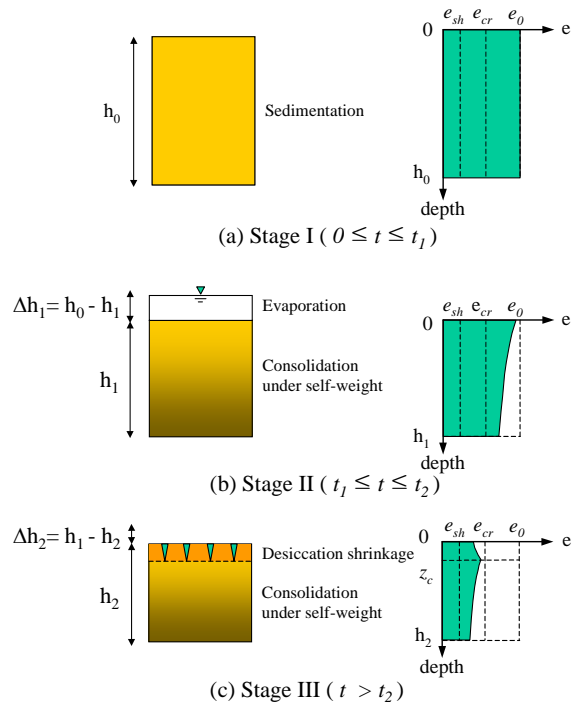


그림 2 시간단계별 준설매립지반의 침하특성

그림 2에서 단계 I에 해당되는 준설매립지반의 초기침강 단계는 본 해석에서는 다루어지지 않으며, 단계 II는 지표 부근에 존재하는 물의 증발과 더불어 그 하부 준설점토 매립지반 내부에서 자중압밀이 시작되어 진행되는 상태의 깊이별 간극비 변화를 표현하고 있으며, 관련 침하해석은 Gibson 등의 1차원 자중압밀 지배방정식(식 (1)에서 α 값이 1.0인 경우)의 유한차분화 표현식을 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 and Znidarcic가 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 결과를 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 and Znidarcic가 제안한 건조수축 침하이론 지배방정식의 유한차분화 표현식을 토대로 침하해석이 이루어지며, 그 아래쪽(그림 2(c)에서 불연속점에 해당되는 꺾이는 점 아래쪽) 지반의 침하해석은 Gibson 등의 1차원 자중압밀 지배방정식의 유한차분화 표현식을 이용해 수행된다. 그림 2(c)에서 불연속점에 해당되는 꺾이는 점은 어느 정도의 시간이 경과된 다음에는 더이상 발생하지 않게 되며, 이 과정을 통해 건조수축에 의해 발생하는 균열깊이(그림 2(c)에 표시된 z_c 를 의미함)의 최대치가 확정된다. 그 이후에는 건조수축현상과 자중압밀현상의 경계지점에 해당되는 최대균열깊이를 기준으로, 상부쪽 지반의 침하해석은 Abu-Hejleh and Znidarcic가 제안한 건조수축 침하이론 지배방정식의 유한차분화 표현식을 토대로, 또한 하부쪽 지반의 침하해석은 Gibson 등의 1차원 자중압밀 지배방정식의 유한차분화 표현식을 이용해 수행된다. 이와 같은 각각의 침하해석 과정은 준설매립지반의 깊이별 간극비가 수축한계간극비(e_{sh})에 도달할 때까지 계속되어 최종적으로 종결된다.

3. 비배수전단강도의 예측

전단강도의 변화현상은 특히 매립지반의 표층에서 현저하게 나타나며, 결국 장비투입에 따른 소요지지력은 주로 표층의 전단강도에 의존하게 된다. 본 연구에서는 궁극적으로 장비투입 가능시기 결정에 관련된 즉, 준설점토 매립지반 표층의 지지력을 평가하기 위한 비배수 전단강도의 예측기법을 제시하였으며, 이를 정리하면 다음과 같다.

단위면적당 건조토의 자중은 $h \cdot \gamma_d$ 로서 시간경과에 상관없이 동일하기 때문에, 아래의 식 (5)와 같이 표현된다.

$$d(h \cdot \gamma_d) = 0 \quad \text{또는} \quad h \cdot d\gamma_d + \gamma_d \cdot dh = 0 \quad (5)$$

또한 포화상태 매립지반의 건조단위중량은 식 (6)으로부터 결정된다.

$$\gamma_d = \frac{G \cdot \gamma_w}{1 + w_n \cdot G} \quad (6)$$

여기서, G : 매립지반 흡입자의 비중

w_n : 시간경과에 따라 변화하는 평균함수비

$$\left(= \frac{S \cdot e}{G} \right)$$

식 (5) 및 (6)의 관계를 토대로 준설점토 매립지반 단위중량의 증가분($\Delta\gamma_d$)과 함수비의 감소분(Δw_n)은 아래의 식 (7) 및 (8)과 같이 각각 표현할 수 있다.

$$\Delta\gamma_d = - \frac{G^2 \cdot \gamma_w}{(1 + w_n G)^2} \Delta w_n \quad (7)$$

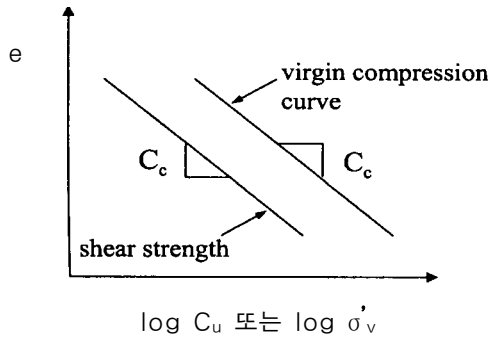
$$\Delta w_n = - \left(w_n + \frac{1}{G} \right) \frac{\delta}{h} \quad (8)$$

여기서, δ : 준설점토 매립지반의 침하량

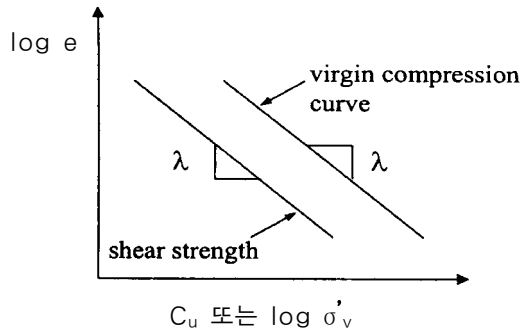
한편 Terzaghi 일차원 압밀이론에서는 간극비와 비배수 전단강도(또는 유효응력) 사이 관계의 접선 기울기는 그림 3(a)와 같이 압축지수(C_c)인데 비해, 본 연구에서 다루고 있는 유한변형률 침하이론에서는 그림 3(b)에 도시한 바와 같이 Gibson 등이 제시한 무차원 선형상수(λ)로 이와 같은 관계를 가정할 수 있는 점에 착안하여 전단강도의 증가량 예측관계식을 전개하였으며, 여기서 그림 3(b)에 도시된 간극비와 비배수전단강도 사이의 관계를 표현하면 식 (9)와 같다.

$$\log e = -\lambda \times c_u + A_1 \quad (9)$$

여기서, A_1 : 상수



(a) Terzaghi 일차원 압밀이론



(b) 유한변형률 침하이론(Gibson 등, 1967, 1981)

그림 3 간극비 비배수전단강도 관계

계속해서 식 (9)를 미분하여 비배수전단강도의 변화를 표현하면,

$$dc_u = -\frac{0.434}{\lambda} \cdot \frac{1}{e} \cdot de \quad (10)$$

또한 포화지반의 경우, 간극비의 변화는 $de = G \cdot dw_n$ 으로 나타낼 수 있으며, 이를 식 (10)에 대입하면,

$$dc_u = -\frac{0.434 \cdot G}{\lambda} \cdot \frac{1}{e} \cdot dw_n \quad (11)$$

따라서 준설패립지반의 체적변화에 따른 비배수전단강도의 증가량(Δc_u)은, 식 (8)과 (11)을 연계한 아래의 식 (12)를 통해 최종 평가할 수 있다.

$$\Delta c_u = \frac{0.434(1 + \Delta w_n \cdot G)}{\lambda} \cdot \frac{1}{e} \cdot \frac{\delta}{h} \quad (12)$$

4. 장비의 투입가능시기 결정

준설택점토 매립지반은 일반적으로, 건조수축에 의해 체적변화가 발생하는 깊이까지는 전단강도의 증가현상이 뚜렷한 반면에, 포화상태인 그 아래쪽 지반은 강도증가가 비교적 미미한 현상을 보이게 되며 따라서, 이들 지반을 서로 구분하여 지지력을 평가함이 적절하다.

본 연구에서는 Merifield 등(1999)의 연구결과를 토대로 전체 준설택점토 매립지반을 두개의 층으로 구분하였다. 즉, 건조수축에 의한 최대균열깊이를 기준으로, 상부지반의 비배수전단강도를 c_{ut} 로 또한 그 하부지반의 비배수전단강도를 c_{ub} 로 각각 구분하여, 준설택점토 매립지반의 표층에 대한 극한지지력(q_u) 평가식을 아래의 식 (13)과 같이 표현하였다.

$$q_u = N_c^* \cdot c_{ut} \quad (13)$$

여기서, N_c^* : 수정지지력계수,

$$= 1.5 \cdot (H/B) + 5.14 \cdot (C_{ub}/C_{ut})$$

H : 최대균열깊이

B : 투입장비의 폭

표 1 각종 장비의 접지압

| 기종 | 구분 | | 기종 | 구분 | |
|--------|---------|--------------------------|-------------|--------------------|--------------------------|
| | 규격 | 접지압(kg/cm ²) | | 규격 | 접지압(kg/cm ²) |
| 보통 불도저 | 2 ton급 | 0.32~0.37 | 스크레퍼 불도저 | 4.0 m ² | 0.43 |
| | 5 ton급 | 0.46~0.47 | | 6.4 m ² | 0.60 |
| | 7 ton급 | 0.51~0.53 | 습지 불도저 | 8 ton급 | 0.25~0.26 |
| 대형 불도저 | 18 ton급 | 0.61~0.72 | | 14 ton급 | 0.27~0.29 |
| | 23 ton급 | 0.73~0.84 | 초습지 도저 | 8 ton급 | 0.12~0.18 |

또한 매립지반에 장비가 투입되기 위해서는 주행성이 확보되어야만 하고, 투입장비의 주행성 여부는 접지압(표 1)과 매립지반 표층의 전단강도에 의존하게 된다.

결국 위의 식 (13)에 의해 계산되는 극한지지력과 투입장비의 접지압 (q_{cp}), 그리고 허용지지력 (q_a) 등의 관계로부터, 장비의 투입가능시기를 결정하게 된다. 즉,

$$q_a = \frac{q_u}{FS} \geq q_{cp} \quad (14)$$

여기서, FS : 안전율(=3.0)

표 2 고흥지구 준설편토 시료의 토질특성

| 지구명 | 함유율(%) | | | 단위중량 $\gamma_s(\text{gf}/\text{cm}^3)$ | 함수비 (%) | 액정 한계 (%) | 소성 지수 (%) | 비중 G | 통일 분류 |
|-----|--------|------|-----|---|------------|-----------------|-----------------|-----------|----------|
| | 점토 | 실트 | 모래 | | | | | | |
| 고흥 | 35.2 | 61.3 | 3.5 | 1.083 | 201.8 | 61.8 | 34.2 | 2.672 | CH |

모형토조(그림 4)는 길이 5m, 높이 1m의 크기이며, 전체가 5mm 두께의 철판으로 제작되었고, 길이 5m를 2.5m씩 양분하여 한쪽은 drained case의 토조로, 다른 한쪽은 undrained case의 토조로 사용하여 시험을 실시하였다. 여기서 drained case는 양면배수상태를, undrained case는 일면배수상태를 각각 의미한다.

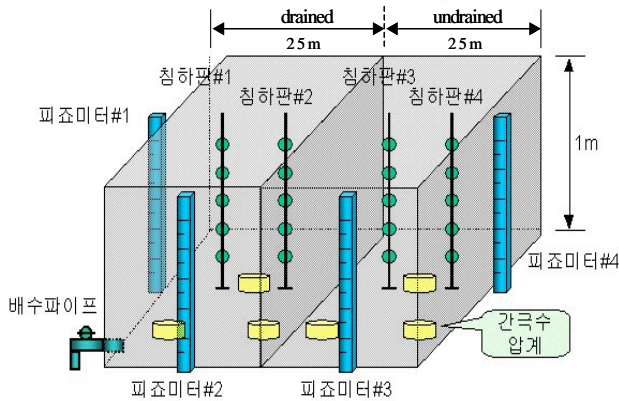


그림 4 모형토조 개요도

또한 모형토조에 투기한 고흥지구 준설편토(100일 정도 경과한 시점에서 채취한 시료)를 대상으로 실시한 표준압밀 시험결과로부터 얻은 간극비-유효응력 및 간극비-투수계수 사이의 관계는 그림 5 및 6에 각각 도시되어 있다.

5. 모형토조 실험결과 및 해석절차

식 (12)에 정의된, 체적변화에 따른 준설편토 매립지반 표층의 비배수전단강도 증가량 (Δc_u)을 평가하기 위해서는, 입력자료로서 λ , Δw_n , G , e , δ 및 h 등의 값이 결정되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는, 전남 고흥 간척지의 현장시료를 대상으로 모형토조실험 등을 수행하였으며, 함수비가 200% 정도인 고흥지구 준설편토의 토질특성을 정리하면 표 2와 같다.

그림 5에 도시된 바와 같이, 본 고흥지구 준설편토의 경우, 간극비와 연직방향 유효응력 (σ'_z) 사이의 관계를 정의하는 Gibson 등의 무차원 선형상수(λ)값은 0.03이다.

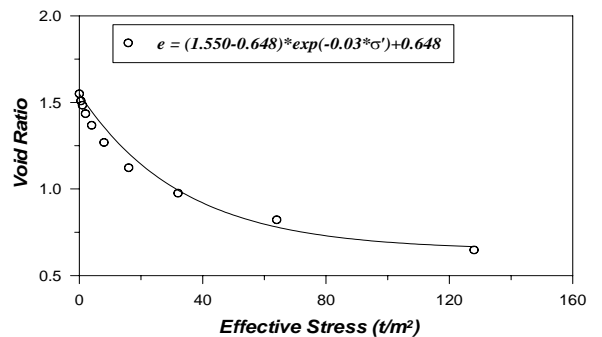


그림 5 간극비 유효 응력 관계

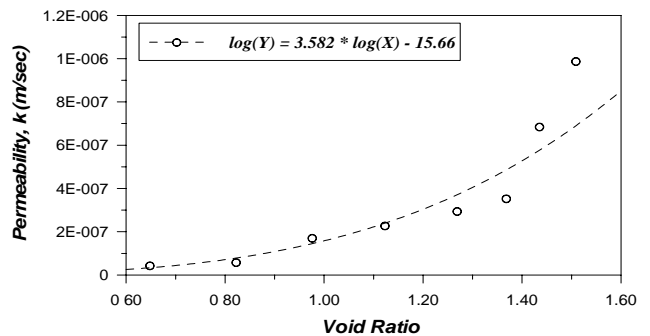


그림 6 간극비 투수계수 관계

이외에도 필자 등(1999)은 제작된 침투압밀실험, 부압 실험 및 건조수축실험 등의 장치를 이용하여, 전남 고흥지구 준설풀점에 대한 실험실험을 기 시행한 바 있으며, 이를 통해 본 시료의 수축한계간극비(e_{sh})는 0.743으로 또한 건조수축 특성변수 α 값과 간극비 사이의 관계는 다음과 같이 결정된 바 있다.

$$\alpha = 0.223 \cdot e + 0.646 \quad (15)$$

계속해서 해석절차를 정리하면 우선, 해당 준설풀점 매립지반(본 연구의 경우 고흥지구 준설풀점 매립지반)의 토질특성치, 수축한계간극비 및 건조수축 특성변수 α 값과 간극비 사이의 관계 등 실험결과를 입력자료로 하여, DSCON 프로그램(2장 참조)에 의한 해석을 실시하여 각각의 경과시간별로 준설풀점 매립지반의 간극비 및 침하량을 산출한다. 계속해서 산출된 프로그램 해석결과를 토대로 본 연구 3장 및 4장에서 제시된 기법에 의거해, 장비의 준설풀매립지반내 투입가능시기를 최종 결정한다.

6. 실험결과와의 비교 및 장비투입시기 예측

6.1 함수비 및 단위중량의 변화

그림 7 및 8에는 모형토조에 투기된 고흥지구 준설풀점에 대해 표층(상부로부터 10~15cm 정도의 깊이)을 대상으로, 시간경과에 따라 원형커터를 이용, 시료를 채취하여 함수비와 단위중량을 각각 측정된 결과와, 본 연구 2장 및 3장에서 제시된 해석절차에 따라 예측된 결과가 비교·도시되어 있다.

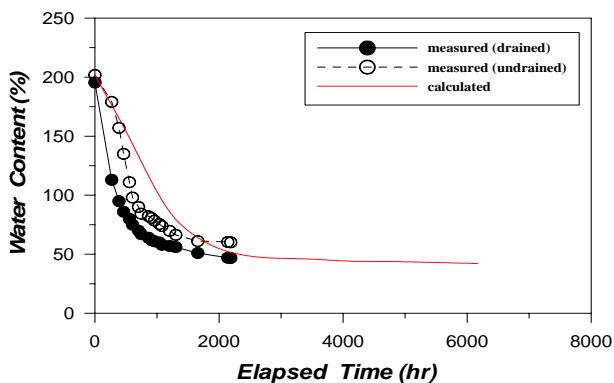


그림 7 시간경과에 따른 함수비의 변화

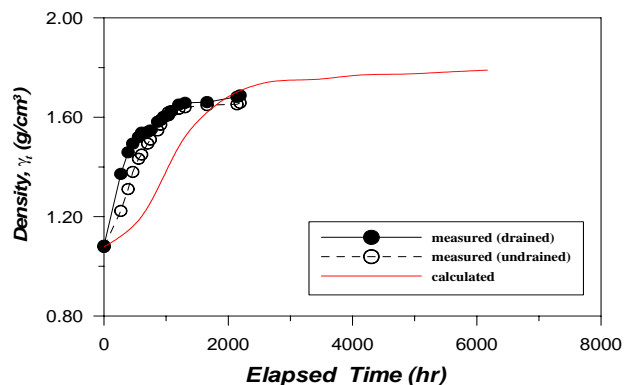


그림 8 시간경과에 따른 단위중량의 변화

그림 7 및 8에서 drained case는 양면배수상태를, undrained case는 일면배수상태를 각각 의미하며, 본 연구 제시 해석절차에 의거한 예측치는, 대부분의 실제 준설풀 매립 현장조건에 해당되는, 일면배수상태를 토대로 한 결과이다. 그림 7 및 8의 비교결과를 살펴보면, 측정치 및 예측치 모두 시간경과에 따라 함수비는 감소하고 단위중량은 증가하고 있으며, 또한 측정치 또는 예측치를 서로 연결한 경과시간별 곡선의 변화경향도 대체적으로 유사한 경향을 보이고 있다. 그러나 특히 초기단계에서, 함수비의 경우 예측치가 다소 크게 평가되고 또한 단위중량의 경우 측정치가 다소 크게 평가되는 등 약간의 오차가 존재하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 본 연구 제시 해석절차에 적용된 토질특성치가 100일 정도 경과된 시점, 즉 압밀이 어느 정도 진행된 상태에서 채취된 시료의 표준압밀시험결과를 토대로 결정되었기 때문에 준설풀점의 초기변화를 정확히 예측할 수 없었던 사실에 일부 원인이 있는 것으로 판단된다.

계속해서 함수비의 변화경향을 좀 더 구체적으로 살펴보면, 대략 20일 정도 경과시점까지는 비교적 급격한 감소를 보이다가, 그 이후부터는 감소폭이 상대적으로 미미한 양상을 나타내고 있으며, 단위중량의 변화경향도 이와 유사한 양상을 나타내고 있다.

6.2 비배수전단강도의 변화 및 장비투입 가능시기 예측

그림 9에는 모형토조에 투기된 고흥지구 준설풀점의 표층(15cm 정도의 깊이)에 대한 베인시험결과와 본 연구 예측 비배수전단강도를 경과시간별로 서로 비교한 결과가 도시되어 있으며, 또한 그림 10에는 예측된 비배수전단강도

를 토대로 장비투입 가능시기를 결정하기 위한 경과시간별 허용지지력 변화곡선이 아울러 도시되어 있다.

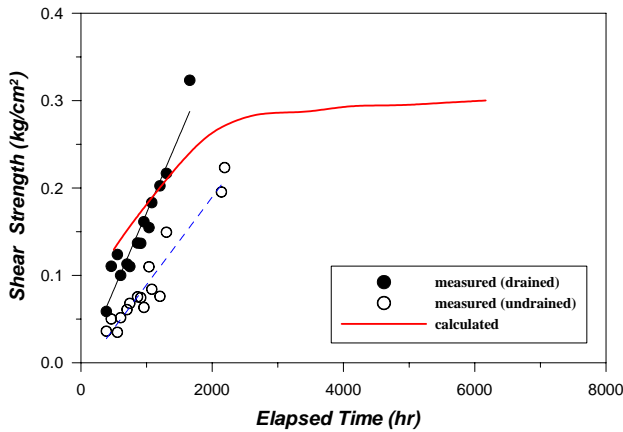


그림 9 전단강도 변화 관계 곡선 비교

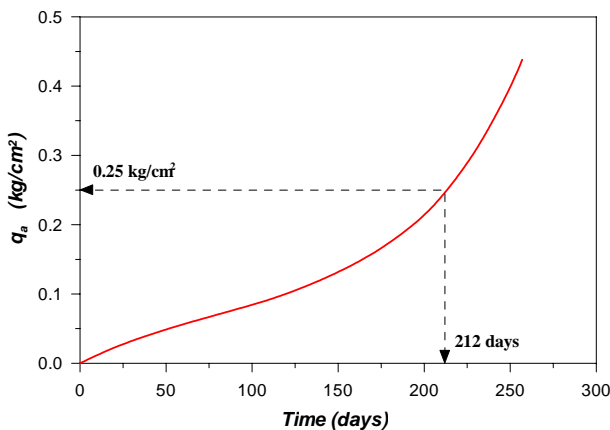


그림 10 장비투입 시기결정 관계 곡선

그림 9에 도시된 결과 중 우선 모형토조 베인시험결과를 살펴보면, drained case가 undrained case 보다 크게 측정되었으며, 일면배수상태에 해당되는 본 연구 예측치는 대체적으로 볼 때, 초기단계에서는 베인시험결과를 다소 상회하는 결과를 보이고 있으나, 시간이 점차 경과함에 따라, drained case와 undrained case에 대한 모형토조 베인시험결과와의 중간 정도에 해당되는 결과를 보이고 있다. 이외에도 대략 경과시간 40일을 기준으로 그 이전에 비해 그 이후가 비배수전단강도의 증가율이 더욱 현저한 양상을 보이고 있으며, 이와 같은 경과시간 40일은 앞의 그림 7 및 8에서 함수비 및 단위중량이 각각 하한치 및 상한치에 상당히 근접해 있는 시점에 해당된다.

그림 10은 그림 9에 도시된 본 연구 예측 비배수전단강도를 토대로, 앞의 4장에서 기술된 방법에 의거 고흥지구 준설점토 매립지반 표층의 허용지지력을 경과시간별로 평가한 결과이다.

그림 10의 결과에 의하면, 예를 들어 겹지압(q_{cp})이 0.25 kg/cm^2 정도인 습지불도저(표 1 참조)의 경우라면, 준설매립 이후 212일 정도 경과한 시점부터 고흥현장 대상 지반에 투입이 가능할 것으로 예측되었다.

또한 그림 11에는 모형토조에 시료를 투기한 시점(1999. 6. 5)으로부터 약 180일이 경과한 시점(1999. 11. 29)에 휴대용 콘관입시험을 실시하여, drained case 및 undrained case에 모두에 대해 측정된 깊이별 콘관입 저항치와 본 연구 제시기법으로부터 예측된 깊이별 비배수 전단강도(일면배수상태)가 함께 도시되어 있다. 그림 11의 결과를 살펴보면, 본 연구 예측치는 최대한의 강도증가가 예상되는 drained case의 측정치와 최소한의 강도증가가 예상되는 undrained case의 측정치 사이 값 정도에 해당되는 경향을 보이고 있다.

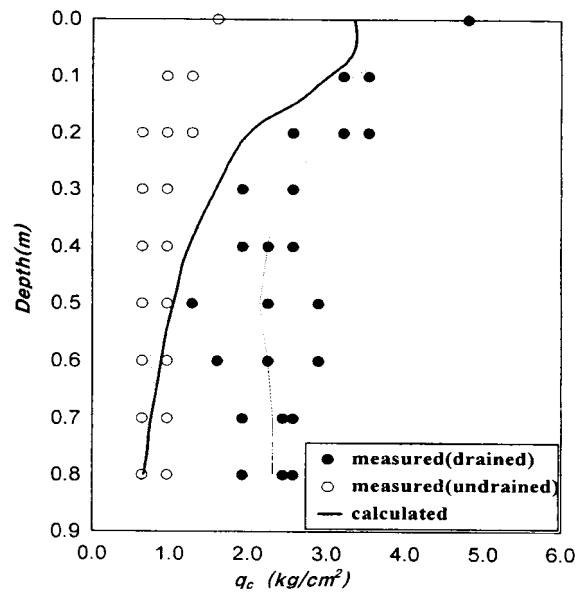


그림 11 콘관입저항 분포 및 비교

6.3 PSDDF 프로그램 해석결과와의 비교

필자 등(1999)이 제시한 2장의 해석기법 및 DSCON 프로그램 등은 현장의 기후조건 등을 적절히 반영할 수 없

는 제한성을 지니고 있으므로, 앞서 예측된 본 고흥현장에 대한 장비투입(투입장비는 접지압이 0.25kg/cm^2 정도인 8 ton급 습지용 불도저, 표 1 참조) 가능시기(즉, 준설 매립 이후 212일 정도 경과한 시점부터, 그림 9 참조)의 타당성 정도를 간접적으로 확인하기 위해, 동일한 토질특성치(표 2 참조) 및 수축한계간극비를 적용하여 배수효율 등을 고려하는 *PSDDF* 프로그램 해석을 추가로 시행하였다. *PSDDF* 프로그램 해석을 통해 계산된 간극비 및 침하량과, 이를 토대로 본 연구 제시 비배수전단강도 예측기법 등(2장 및 3장 참조)에 의거해 고흥현장에 대한 장비투입 가능시기를 추가로 평가해 본 결과는 그림 12에 도시되어 있다.

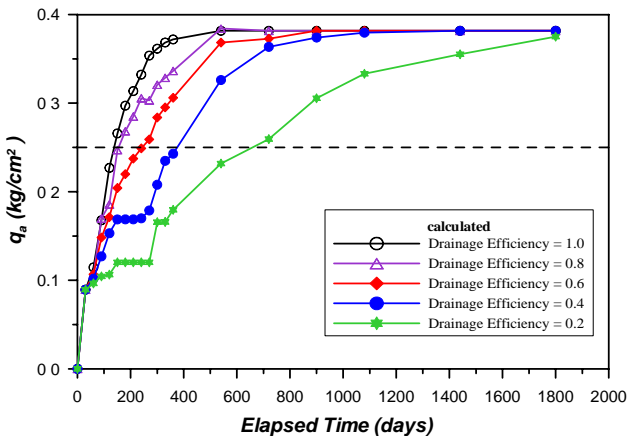


그림 12 *PSDDF* 프로그램 해석결과

PSDDF(Stark 등, 1996)는, 1차원 유한변형률 이론(Gibson 등, 1967, 1981)을 이용한 준설토의 압밀과정과 Mesri and Godlewski(1977)에 의해 제안된 압축이론 및 Cargill(1985)의 경험적 건조수축모델 등을 토대로 미공병단에서 개발된 준설점토 거동예측 프로그램이다. *PSDDF*의 경우, 준설점토 매립지반 표층의 증발효율과 배수효율을 이용하여 기후조건을 간접적으로 반영하고 있으며, 미공병단에서 추천하고 있는 증발효율 값은 0.75이다. 또한 배수효율은 현장의 침사지 관리정도에 따라 좌우되며, 만약 침사지 관리가 잘 되어 배수가 양호할 경우에는 0.8~1.0 정도의 배수효율 값이 추천되며, 이와는 반대로 침사지 관리가 불량할 경우에는 배수효율 값을 0.2~0.3 정도로 낮춰서 사용할 것을 추천하고 있다.

그림 12에 도시된 *PSDDF* 프로그램 해석 예측결과를 살펴보면, 배수효율이 작아짐에 따라 장비투입 가능시기는

130일(배수효율=1.0인 경우), 160일(배수효율=0.8인 경우), 240일(배수효율=0.6인 경우), 380일(배수효율=0.4인 경우) 및 660일(배수효율=0.2인 경우) 등으로 점차 지체되는 경향을 나타내고 있으며, 여기서 배수효율 1.0이란 월 강수량이 여수토를 통해 모두 배수되어 결국 침사지에 남아 있는 잔여 강수량이 전혀 없다는 것을 의미하므로, 실제의 현장여건을 감안할 때 장비투입 가능시기 결정에 적용하기에는 적절치 않은 배수효율로 판단된다.

본 고흥현장의 경우 동일한 투입장비(접지압이 0.25kg/cm^2 정도인 8 ton급 습지용 불도저)를 대상으로 *DSCON* 프로그램 및 본 연구 예측 비배수전단강도 등을 토대로 제시된 장비투입 가능시기(즉, 준설 매립 이후 212일 정도 경과한 시점부터, 그림 10 참조)는 배수효율이 0.6인 경우에 *PSDDF* 프로그램 해석결과를 토대로 한 장비투입 가능시기와 대체적으로 근접하는 경향을 보이고 있다.

7. 요약 및 결론

본 연구에서는 준설점토 매립지반에 대한 장비투입 가능시기를 결정하기 위해, Gibson 등이 제시한 무차원 선형상수 및 해석적 접근방법을 토대로 매립지반 표층의 비배수전단강도 예측기법이 제시되었다. 이 과정에서 준설점토 매립지반의 자중압밀 및 건조수축에 의한 체적변화에 관련된 경과시간별 간극비 및 침하량의 평가를 위해, 필자 등이 제시한 해석기법이 이용되었다.

또한 전남 고흥지구 준설점토 현장시료를 대상으로 실시한 모형토조 실험결과와 본 연구 제시 해석절차에 의한 예측결과를 서로 비교하였으며, 이를 통해 예측된 매립지반 표층의 함수비, 단위중량 및 비배수전단강도 등이 모형토조실험 측정결과와 시간경과에 따른 변화경향이 대체적으로 유사함을 확인하였다.

아울러 본 연구 예측 비배수전단강도 및 제시 해석절차를 토대로, 고흥지구 준설점토 매립지반 표층의 허용지력력을 경과시간별로 평가하여 보았으며, 이 결과에 의하면 접지압이 0.25kg/cm^2 정도인 8 ton급 습지용 불도저의 경우 투입가능시기는 준설 매립 이후 212일 정도 경과한 시점에 해당되었다.

계속해서 본 고흥현장에 대한 이와 같은 장비투입 가능시기 예측결과와 타당성 정도를 간접적으로 확인하기 위해, 배수효율 등을 고려하는 *PSDDF* 프로그램 해석을 추

가로 시행하였다. *PSDDF* 프로그램 해석을 통해 계산된 간극비 및 침하량과 이를 토대로 본 연구 제시 비배수전단 강도 예측기법 등에 의거해 고흡현장에 대한 장비투입 가능시기를 추가로 평가해 본 결과, 배수효율이 0.6인 경우에 *PSDDF* 프로그램 해석결과를 토대로 한 장비투입 가능시기와 대체적으로 근접하는 경향을 보이고 있다.

본 연구에서 제시된 준설점토 매립지반 표층의 비배수전단 강도 예측기법은 현장계측결과와의 비교 등을 통해 지속적으로 검증되어야 하고, 또한 기후조건을 적절히 고려하는 알고리즘 개발 등을 통해, 보다 신뢰성 있는 장비투입시 결정기법의 체계화가 가능할 것으로 사료된다.

(접수일자 : 2001. 6. 11.)

참 고 문 헌

- 1 홍병만, 김상규, 김석열, 김승욱, 김홍택, 강인규(1999), "준설매립지반의 건조수축특성에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제15권, 제6호, pp 219~238
- 2 Abu Hejleh, A N and Znidarcic, D(1995), "Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 121, No 6, ASCE, pp 493~502
- 3 Cargill, K W (1985), "Prediction of Consolidation of Very Soft Soil", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 110, No 6, ASCE, pp 775~795
- 4 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
- 5 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
- 6 Mesri, G and Godlewski, P M (1977), "Time and Stress Compressibility Interrelationships", Journal of Geotechnical Engineering, Vol 103, No 5, ASCE, pp 417~430
- 7 Merifield, R S , Sloan, S W and Yu, H S (1999), "Rigorous Plasticity Solutions for the Bearing Capacity of Two Layered Clays", Geotechnique, Vol 49, No 4, pp 471~490
- 8 Stamatopoulos, A C and Kotzias, P C (1985), "Soil Improvement by Preloading", John Wiley & Sons, pp 156~167
- 9 Stark, T D (1996), "Program Documentation and User's Guide: PSDDF Primary Consolidation, Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fills", US Army Engineer Waterways Experiment Station