

준설매립토의 건조수축에 따른 강도증가 예측과 장비투입시기 결정에 관한 연구 A Study on the Prediction of Increased Strength due to Desiccation Shrinkage and Determination of Deposit Time for Equipments in Dredged Fills

김석열¹⁾, Seog-Yol Kim, 김승욱¹⁾, Seung-Wook Kim, 김홍택²⁾, Hong-Taek Kim, 강인규³⁾, In-Kyu Kang

¹⁾농업기반공사, Korea Agricultural & Rural Infrastructure Corporation

²⁾홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept of Civil Eng., Hong-Ik University

³⁾(주)브니엘컨설팅트 책임기술자, Chief Engineer, Vniel Consultant Co., Ltd.

SYNOPSIS : In the present study, the variation of settlement, pore water pressure and undrained shear strength through model tests were measured. Also, the variation of water content, unit weight and shear strength by the vane shear tests were observed. In this study, appropriate deposit time of construction equipments used in treatment of hydraulic fills is determined from the prediction curve of increased shear strength in dredged fills.

Key words : dredged fills, desiccation shrinkage, contact pressure, bearing capacity

1. 서 론

준설매립공법은 수면아래의 지반을 굴착하여 물과 토립자가 섞인 상태로 배송관을 통해 매립하는 공법이며, 이로 인해 조성된 준설매립토는 퇴적토와 유사한 토립자의 골격을 가지고 있으나 입도분포의 변화가 심하고, 함수비가 매우 큰 특징이 있다. 또한 준설매립토는 단위중량이 매우 작기 때문에 강도증가 현상이 미미하고, 압축성이 매우 큰 특징이 있다. 준설매립토의 자연침하하는 토립자의 침강과 자중압밀 및 건조수축 과정을 거쳐 발생하며, 본 연구에서는 자연침하에 의한 체적변화와 전단강도와와의 관계로부터 준설매립토의 자연침하에 따른 강도증가의 예측과 매립지내에 투입될 장비들에 대한 장비투입시간(즉, 장비의 소요 접지압에 대한 매립토의 지지력이 확보되는 시점)을 결정하는 방법에 대한 접근이 이루어졌다. 이를 위해 본 연구에서는 고흥지구 준설매립지의 현장시료를 실내실험실로 운반하여 모형토조에 투기한 후 간극수압, 침하량 측정과 시간경과에 따른 비배수 전단강도의 증가현상을 파악하기 위한 배인시험을 실시하였다. 계측의 종료시점에는 휴대형 콘관입시험을 실시하여 침하종료 시점에 도달하였을 때의 콘관입저항치를 측정하였으며, 비교란시료를 채취하여 압밀비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 또한 본 연구에서는 매립지내에 투입될 장비의 접지압을 평가하고 시험결과를 종합한 지반내 지지력을 규명함으로써 장비의 투입에 소요되는 방치기간을 결정하였다.

2. 이론적 배경

2.1 준설매립토의 체적변화

본 연구에서는 준설매립토의 자중압밀과 건조수축에 의한 침하해석을 위해 Gibson 등(1967)의 1차원 자중압밀 이론식을 일부 변형한 Abu-Hejleh & Znidarcic(1996)의 제안식을 사용하였다. 자중압밀과 건

조수축에 의한 침하현상을 동시에 고려할 수 있는 형태로 표현된 Abu-Hejleh & Znidarcic(1996)의 제안식은 다음과 같다.

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

식(1)에서 α 는 균열발생 등 3차원적인 체적변화를 1차원형태로 변환하여 고려하는 특성변수이며, α 가 1.0인 경우에는 Gibson 등(1967)의 자중압밀 지배방정식과 동일하고, 건조수축 침하이론 지배방정식은 α 가 1.0 보다 작은 경우에 해당된다. 특성변수 α 는 식(2)와 같이 표현된다.

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

식(2)에서 $\varepsilon_v(e, e_{cr})$ 는 3차원 건조수축의 시점을 기준으로 연직방향의 변형률을 나타내며, 3차원 건조수축으로 인해 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 초기간극비를, e_{cr} 은 균열간극비를 각각 의미한다.

본 연구에서는 식(1)의 자중압밀 및 건조수축 침하이론 지배방정식을 Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘을 이용하여 정식화하였으며, Dufort-Frankel의 유한차분화 알고리즘은 공간계에서는 중앙차분법을 사용하고, 시간계에서는 전방차분법을 각각 사용하고 있다(참고문헌 2 참조).

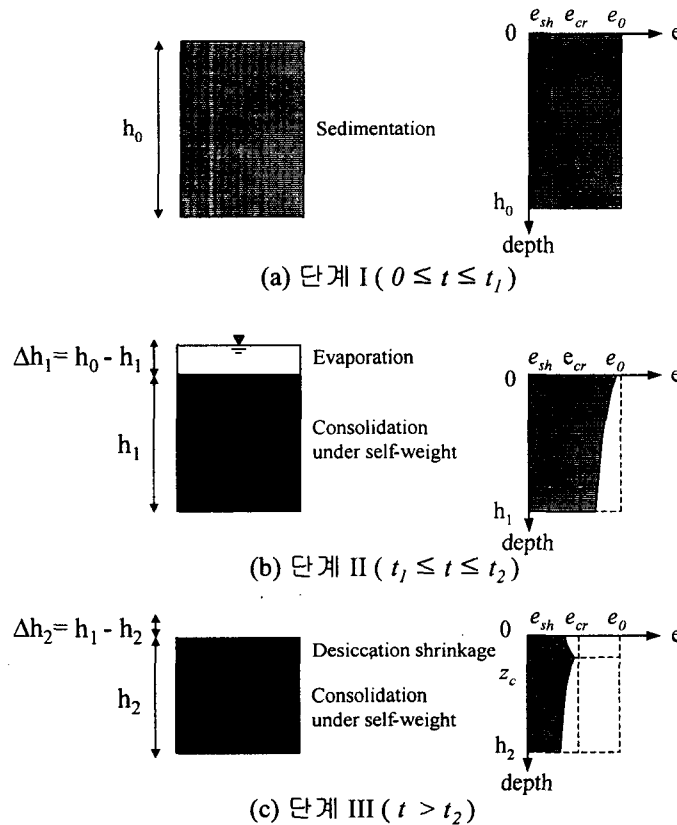


그림 1. 시간단계별 준설패립지반의 침하특성

준설패립지반의 체적변화과정 및 시간의 경과에 따른 깊이별 간극비의 변화과정 등을 도시하면 그림 1과 같다. 그림 1의 단계 I에 해당되는 침강단계는 이론적으로 체계화되어 있지 않아 본 연구에서는 고려하지 않았으며, 단계 II는 준설패립지반 내부에서 자중압밀이 진행되는 단계로 Gibson 등(1967)의 자중압밀이론이 적용 가능한 단계이다. 또한 단계 III은 건조수축이 지표면 상부에서부터 진행됨과 동시에,

하부지반에서는 자중압밀이 계속 진행되는 상태로써 균열간극비에 도달하는 지반의 깊이는 지표면으로부터 점차 아래쪽으로 확장되며, 균열간극비에 도달한 깊이까지의 지반은 건조수축 침하이론을 토대로 해석이 이루어지고, 하부지반의 침하해석은 자중압밀이론을 이용하여 해석이 수행된다.

2.2 체적변화에 따른 강도증가 예측

준설매립지반은 시간이 경과함에 따라 자중압밀과 건조수축에 의한 체적변화가 발생하면서 단위중량의 증가하고, 함수비와 간극비가 감소하는 등 체적변화 및 전단강도의 증가가 지속적으로 발생하며, 체적변화와 전단강도의 증가 정도는 체적변화에 따른 중량의 손실이 없다는 가정하에 다음과 같은 관계식으로 설명할 수 있다(참고문헌 6 참조).

$$\Delta\gamma_d = -\frac{G^2 \cdot \gamma_w}{(1 + w_n G)^2} \Delta w_n \quad (3)$$

$$\Delta w_n \approx \left(w_n + \frac{1}{G}\right) \frac{\Delta h}{h} = -\left(w_n + \frac{1}{G}\right) \frac{\delta}{h} \quad (4)$$

여기서, $\Delta\gamma_d$ 는 건조단위중량의 변화, Δw_n 은 함수비의 변화, G 는 토립자의 비중이며, $-\Delta h$ 는 전체지반의 침하량으로써 δ 와 동일한 의미이다. 식(3) 및 (4)로부터 비배수전단강도의 증가량(Δc_u)을 다음식과 같이 예측할 수 있다.

$$\Delta c_u = \frac{1 + w_n G}{0.434 C_c} \cdot c_u \cdot \frac{\delta}{h} \quad (5)$$

2.3 접지압에 따른 소요 지지력

준설매립 이후 시간의 경과에 따라 지반의 전단강도는 투입 초기시점에 0에서부터 간극수의 배제로 인한 압밀과 토립자의 재배열 및 표층에서의 건조수축으로 인해 점차 증가하게 된다. 매립지내에 장비가 투입되기 위해서는 장비의 주행성이 확보되어야만 하고, 장비의 주행성 여부는 투입될 장비의 접지압과 매립지반의 전단강도에 의존하게 된다. 대상지반에 투입되는 각종 장비의 접지압은 표 1과 같다.

표 1. 굴착 및 운반작업을 위한 각종 장비의 접지압

기종	구분	규격	접지압(kg/cm ²)	기종	구분	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

일반적으로 준설매립지반은 건조수축에 의해 체적변화가 발생하는 깊이까지는 전단강도의 증가현상이 현저한 반면에 하부지반은 포화상태로 존재하기 때문에 지지력의 평가시 개별적인 층으로 구분하여 평가하여야 한다. 본 연구에서는 Brown & Meyerhof(1969)의 실험결과를 바탕으로 한 Meyerhof & Hanna(1978)의 제안식을 토대로 건조수축에 의한 균열깊이를 기준으로 상부의 전단강도를 c_{ub} 그 하부지반의 전단강도를 c_{ub} 로 구분하고, 준설매립지반의 극한지지력(q_u) 평가식을 다음과 같이 표현하였다

(참고문헌 5 참조).

$$q_u = N_c^* \cdot c_{ut} = \left\{ N_c \frac{c_{ub}}{c_{ut}} + 2 \frac{c_a}{c_{ut}} \frac{H}{B} \right\} c_{ut} \quad (6)$$

여기서, N_c^* 는 수정지지력계수이고, 지지력계수 N_c 는 점토의 경우 5.14, H 는 건조수축이 발생하는 두께로 즉, 인장균열의 발생깊이를 의미한다. 또한 식(6)에 의해 계산된 극한지지력과 표층의 전단강도를 토대로 계산된 지반의 허용지지력(q_a) 및 접지압(q_{cp}) 등의 관계는 다음과 같다.

$$q_a = \frac{q_u}{FS} \geq q_{cp} \quad (7)$$

2.4 전단강도와 장비투입시기의 결정

본 연구에서는 준설매립지반의 전단강도 예측과 대상지반에 투입될 장비종류에 따른 소요지지력 및 적절한 투입시기를 결정하기 위해 그림 2의 절차에 따라 유한차분화 해석을 실시하였다. 본 해석은 준설매립지반의 초기조건, 경계조건, 투수계수-간극비 및 간극비-유효응력 관계 이외에 투입장비의 제원을 입력치로 하여 침하량과 건조수축특성 등을 계산하고, 이를 토대로 단위중량, 함수비, 전단강도의 변화 등을 평가하며, 최종적으로 식(6) 및 (7)에 의해 계산되는 극한지지력과 투입장비의 접지압을 비교하여 장비의 투입시기를 결정하게 된다.

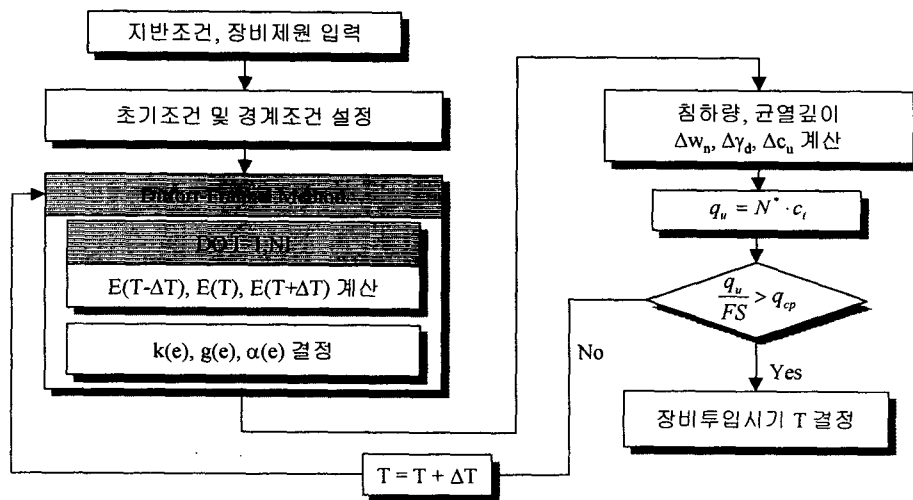


그림 2. 유한차분해석 프로그램의 흐름도

3. 실내시험

3.1 건조수축 복합모형시험

본 연구에서는 전남 고흥 간척지의 현장시료를 모형토조에 투기하여 자중압밀과 건조수축특성을 관측하는 동시에, 투기 후 시간의 경과에 따라 배인시험을 실시하고, 계측종료 시점에서는 휴대형 콘관입 시험을 실시하여 지지력을 파악하였다.

모형토조는 길이 5m, 폭 2m, 높이 1m 의 크기로 전체가 5mm 철판으로 제작되었으며, 길이 5m를 2.5m로 양분하여 한쪽은 배수조건인 토조로 사용하고, 다른 한쪽은 비배수조건인 토조로 사용하여 시험

을 실시하였다. 한편, 배수조건인 경우, 토조의 좌측면 최하단 바닥에 직경 50mm의 파이프를 설치하고 U자형 파이프를 연결하였으며, 토조 바닥면으로부터 10cm 높이에 배수밸브를 설치하여 물을 유출시킴으로써 바닥면에서 부의 간극수압이 발생하지 않도록 하였다. 또한, 간극수압측정을 위해 바닥면에서부터 높이 10cm 간격으로 피조미터를 설치하였으며, 각각 배수조건 토조에 2개소, 비배수조건 토조에 2개소를 설치하였다. 침하량 측정을 위해서는 층별침하계를 이용하였으며, 표층으로부터 각각 15cm 간격이고, 배수조건 토조에 2조, 비배수조건 토조에 2조씩 설치하였다(그림 3 참조).

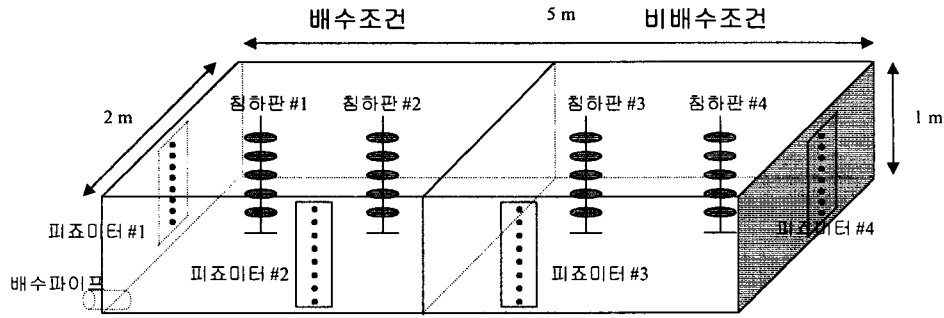


그림 3. 건조수축 복합모형시험의 장치 개요도

3.2 토질특성

모형시험에 사용한 준설토 시료의 함수비는 200% 정도이며, 기본적인 물리적 특성을 파악하기 위해 실내시험을 실시한 결과는 표 2에 명기하였다.

표 2. 모형토조 투기시료의 물리적 토질특성

지구명	입도 (%)			단위중량, γ_s (g/cm ³)	함수비 (%)	액성계 (%)	소성수 (%)	비중 G_s	통일분류
	점토	실트	모래						
고 흥	35.2	61.3	3.5	1.083	201.8	61.8	34.2	2.672	CH

3.3 계측항목 및 계측빈도

본 연구의 모형토조시험에서는 피조미터와 층별침하계를 이용하여 간극수압과 침하량을 측정하였으며, 간극수압은 1일 2회 측정, 침하량은 1일 1회 빈도로 측정하였다. 베인시험의 경우 초기시점에서는 전단강도가 거의 0으로 나타났으며, 약 20일 경과한 시점에서부터 비로소 전단강도가 측정되기 시작하였다. 베인시험은 최초 전단강도 측정시점 이후부터 3~4일 간격으로 실시하였다. 또한 투기후 180일 정도 경과한 시점에서는 최종적인 표층의 전단강도를 확인하기 위해 휴대형 콘관입시험을 실시하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 침하량의 경시변화

준설토를 모형토조에 투기한 후 24시간이 경과한 시점부터 약 80일 경과시점까지의 심도별 침하량 측정결과를 살펴보면 그림 4와 같다. 모형지반 전체의 침하량을 나타내는 15cm 심도의 침하량을 비교하면, 배수조건인 경우 평균 151.9mm, 비배수조건인 경우 142.9mm로 나타났으며, 건조수축에 의한 침하현상이 자중압밀 보다 우세하게 나타날 것으로 예상되는 15~30cm 심도의 침하량은 배수측의 경우가 비배수측의 경우보다는 약간 크게 나타나고 있다. 또한 표층에서 깊이 45, 60, 75 cm 심도에서는 배수조건과 비배수조건에서 발생한 침하량이 거의 유사하게 나타났다. 그림 4의 경향을 종합적으로 분석해 볼 때 침하량은 배수조건인 경우가 비배수조건인 경우와 비교하여 6% 정도 큰 결과를 나타내고 있다.

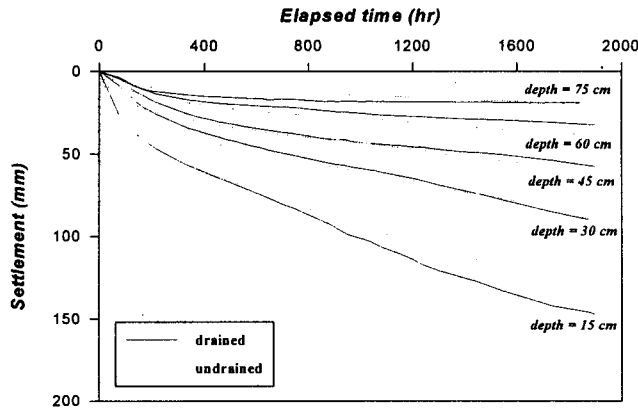


그림 4. 시간경과에 따른 침하량 측정결과

4.2 간극수압의 경시변화

그림 5 및 그림 6은 배수측 및 비배수측 토조에서 피조미터를 이용하여 측정된 과잉간극수압의 분포를 나타낸 결과이며, 투기후 시간의 경과에 따른 과잉간극수압의 분포경향을 살펴보면, 배수측 토조에서는 20일 정도 경과한 시점부터 하부측에서 빠르게 과잉간극수압이 소산되는 결과를 나타내고 있다.

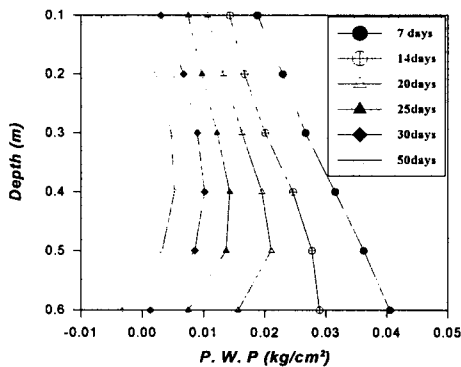


그림 5. 배수측 토조의 과잉간극수압 분포

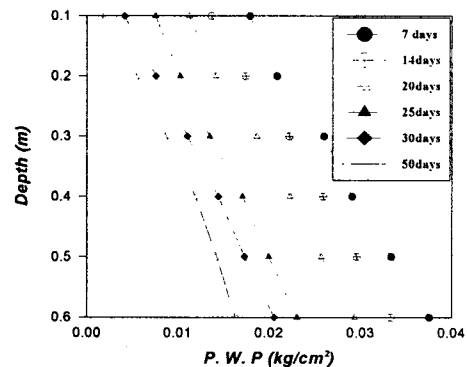


그림 6. 비배수측 토조의 과잉간극수압 분포

4.3 단위중량 및 함수비의 변화

그림 7 및 8은 표층(10~15cm)을 대상으로 시간경과에 따라 원형커터를 이용, 시료를 채취하여 단위중량과 함수비를 측정된 결과와 유한차분해석에 의해 계산된 결과를 비교하여 도시한 결과이다. 본 연구에서는 유한차분 수치해석에 사용한 준설토의 간극비-유효응력 관계, 간극비-투수계수 관계는 100일 정도 경과한 시점에서 채취한 표준압밀시험결과를 이용하였다.

실측치와 수치해석결과에 의해 도시된 시간경과에 따른 함수비와 단위중량의 변화 관계곡선을 비교한 결과, 함수비의 감소 및 단위중량의 증가경향은 유사하게 나타났으나 초기단계에서는 실측치와 약간의 오차가 발생하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 본 연구의 유한차분해석상에 적용한 지반특성치가 압밀이 어느정도 진행된 상태에서 채취된 시료로부터 측정된 표준압밀시험결과를 사용하였기 때문에 준설토의 초기 변화를 정확히 예측할 수 없었던 것으로 판단된다.

또한 배수측과 비배수측 토조에서 계측된 결과를 비교해 보면, 함수비 변화 관계곡선의 경우 20일(약 500시간) 경과 시점까지는 급격히 감소하다가 이후부터는 감소폭이 미소하게 나타나고 있는 것으로 나타났다. 단위중량 변화 관계곡선의 경우도 함수비 변화 관계곡선과 유사한 경향을 나타냈다. 이들 관계곡선에서 최대곡률이 나타나는 시점은 전단강도의 증가현상이 현저하게 나타나는 시점(약 40일 경과 시점)인 것으로 나타났다.

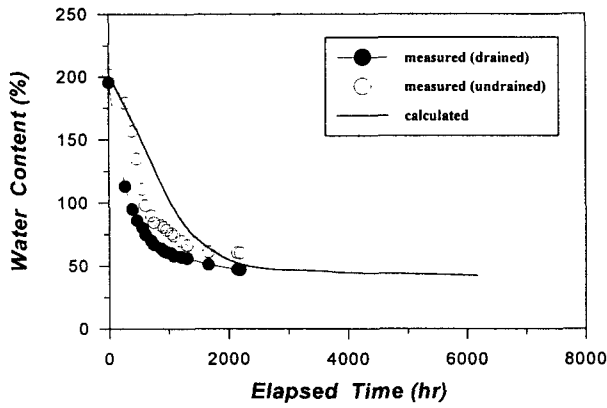


그림 7. 시간경과에 따른 함수비의 변화

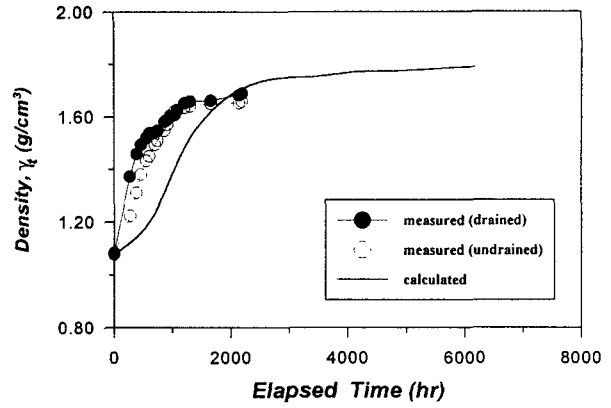


그림 8. 시간경과에 따른 단위중량의 변화

4.4 전단강도의 변화 및 장비투입시기 결정

그림 9에는 배수조건과 비배수조건에서 측정된 배인시험 결과와 유한차분해석에 의해 예측된 전단강도의 변화 관계곡선을 도시한 것으로 표층에서 약 15cm 깊이에서 측정된 결과이다. 그림 9에서 계산된 전단강도를 토대로 장비투입시기를 결정하기 위한 시간경과에 따른 접지압 관계곡선을 도시하면 그림 10과 같다.

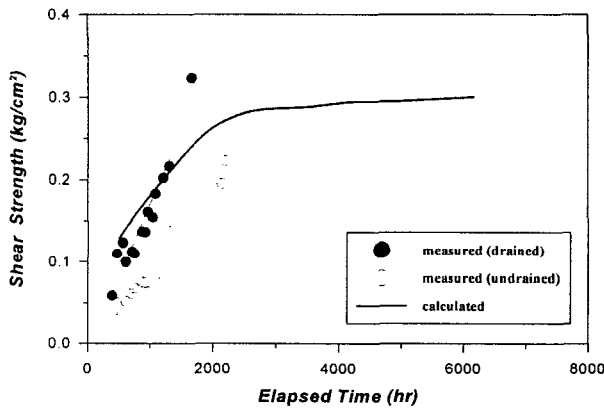


그림 9. 전단강도 변화 관계곡선 비교

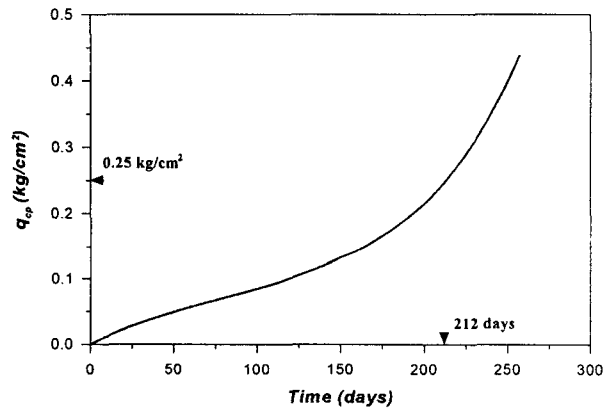


그림 10. 장비투입시기 결정 관계곡선

그림 9의 배인시험결과는 배수측의 경우가 비배수측보다 크게 나타났으며, 유한차분해석에 의해 계산된 전단강도의 변화 관계곡선은 배수측과 비배수측 사이에 분포하는 것으로 나타났다. 또한 그림 10은 장비투입시기를 결정하기 위해 그림 9의 전단강도 변화와 식(6) 및 (7)을 토대로 도시한 결과이며, 투입장비의 접지압(q_{cp})이 0.25kg/cm^2 정도인 습지 불도저(표 1 참조)인 경우 준설 매립 후 212일 경과한 시점 이후부터 대상지반에 투입이 가능한 것으로 예측되었다.

그림 11은 준설투기시점(99. 6. 5)부터 약 180일이 경과한 시점(99. 11. 29)에서 휴대형 콘관입시험을 실시하여 배수측과 비배수측 토조에서 측정된 깊이별 콘관입저항 분포와 본 연구에서 제시된 깊이별 전단강도 예측치로부터 환산된 콘관입저항 분포를 함께 도시한 결과이다. 그림 11의 결과를 통해서 볼 때, 본 연구에서 제시한 준설매립토의 체적변형에 따른 전단강도 예측치는 실제조건에서 최대한의 강도증가가 예상되는

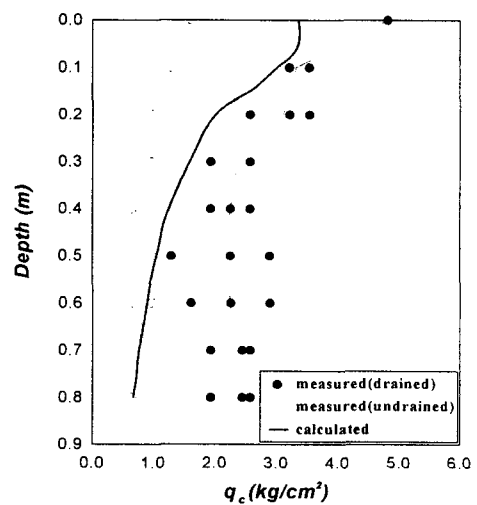


그림 11. 깊이별 콘관입저항 분포

조건인 배수조건에서 측정된 결과와 최소한의 강도증가가 예상되는 비배수조건에서 측정된 결과 사이에 분포함으로써 어느 정도 신뢰성이 있는 결과라고 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 주요결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 준설패립지반의 체적변화에 따른 단위중량, 함수비 및 전단강도의 변화량을 체적 변화로 인한 중량 손실이 없다는 가정으로부터 유도하여 준설패립지반 내에 투입되는 장비의 투입시기를 결정하였으며, 이에 대한 검증을 위해 모형토조 내에 고흥지구에서 채취한 준설퇴토를 투기하여 약 6개월간 계측한 측정결과와 비교·분석하였다.
- (2) 모형토조로부터 측정된 침하량 및 과잉간극수압은 배수조건인 경우가 비배수조건에서 측정된 결과보다 약 6% 정도 침하량이 크게 발생하였으며, 과잉간극수압은 약 20일 정도 빠르게 소산된 것으로 나타났다.
- (3) 준설패립토의 체적변화에 따른 함수비와 단위중량에 대한 실측치와 예측치를 서로 비교한 결과, 함수비의 감소 및 단위중량의 증가경향은 유사하게 나타났으나 초기단계에서는 실측치와 약간의 오차가 발생하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 본 연구의 유한차분해석상에 적용한 지반 특성치가 압밀이 어느 정도 진행된 상태에서 채취한 시료로부터 측정된 표준압밀시험결과를 사용하였기 때문으로 판단된다.
- (4) 장비투입시기 결정을 위해 전단강도 변화를 토대로 예측한 결과, 접지압이 0.25kg/cm^2 정도인 습지 불도저의 경우 준설패립 후 약 212일 경과한 시점 이후부터 대상지반에 투입이 가능한 것으로 예측되었다.
- (5) 본 연구에서 제시한 준설패립토의 체적변형에 따른 전단강도 예측치는 실제조건에서 최대한의 강도증가가 예상되는 조건인 배수조건에서 측정된 결과와 최소한의 강도증가가 예상되는 비배수조건에서 측정된 결과 사이에 분포함으로써 어느 정도 신뢰성이 있는 결과라고 판단되었다.

참고문헌

1. 홍병만, 김상규, 김석열, 김승욱, 김홍택, 강인규(1999), "준설패립지반의 건조수축특성에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제15권, 제6호, pp.219~238.
2. 황정규, 김홍택, 김석열, 강인규, 김승욱(1998), "플라스틱 배수재를 이용한 수평배수공법에 관한 연구", 한국지반공학회지, 제14권, 제6호, pp.93~112.
3. 伊勢田哲也(1981), "土工-一般土砂-", 施工機械と土質工學, 土と基礎, Vol.29, No.8, pp.47~54.
4. 畠昭治郎 등(1981), "施工機械に關する土質工學的問題點", 施工機械と土質工學, 土と基礎, Vol.29, No.7, pp.73~80.
5. R. S. Merifield, S. W. Sloan & H. S. Yu(1999), "Rigorous Plasticity Solutions for the Bearing Capacity of Two-Layered Clays", Geotechnique, Vol.49, No.4, pp471~490.
6. Stamatopoulos, A. C. and Kotzias, P. C.(1985), Soil Improvement by Preloading, John Wiley & Sons, pp.156~167.