산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제20권, 2000.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Nat'l Univ., Korea, No. 20, 2000.

준설토의 건조수축에 의한 강도증가 특성과 지지력에 관한 연구

A Study on Characteristics of Strength Increase and Bearing Capacity in Dredged and Reclaimed Soil due to Desiccation Shrinkage

유남재* 이종호** 이명욱** 김현주***
Yoo, Nam-Jae Lee, Jong-Ho Lee, Myung-Woog Kim, Hyun-Joo

Abstract

This research is results of experimental and numerical works on characteristic of strength increase and bearing capacity in dredged and reclaimed soil due to desiccation shrinkage.

For a soil sampled from southern coastal area in Korea, basic soil property tests and standard consolidation test with falling head permeability tests were carried out to obtain consolidational characteristics of soil. Double cone penetration test, laboratory vane test and unconfined compression test were also performed to investigate the change of shear strength with degree of desiccation.

Model tests were performed in 1G environment and 30G level artificially accelerated condition by using the centrifuge model test facilities to investigate the bearing capacity of desiccated ground. Test results were analyzed by using the theoretical and load-settlement characteristics method proposed by Meyehof & Hanna(1978).

On the other hands, the numerical technique, using the finite strain consolidation theory considering the effect of desiccation was used to estimate the appropriate time of using heavy construction equipments in field with respect to strength increase due to desiccation.

키워드 : 준설매립토, 건조수축, 강도증진, 지지력, 수치해석

Keywords : dredged and reclaimed soil, desiccation shrinkage, strength increase, bearing capacity, numerical analysis

1. 서론

최근 산업화와 경제발전에 따른 가용토지의 확보를 위하여 준설매립의 필요성이 대두되었으며 서해안과 남해안을 중심으로 해안매립이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 해성점토로 준설 매립된 지역은 고함수비이며 압밀에 의하여 평형상태에 도달하는데 장시간이 소요되며 전단강도 및 지지력이 매우 약하기 때문에 후속공정을 위한 장비의 진입이 불가능하다. 따라서 지반개량을 위한 장비 및 인력의 접근을 위해 초연약 상태의 준설 매립 지반의 표층강도를 증가시킴으로서 소정의 지지력을 확보할 수 있는 공법의 실시가 요구되며 최근에는 이러한 공법들이 개발되고 있다. 그중 가장 일반적으로 사용되고 있는 표층건조에 의한 강도증진효과 및 건조수축에 의한 침하는 준설매립장 설계에 중요한 요소이다.

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 토목공학과, 공학박사
**** 강원대학교 토목공학과, 석사과정

건조수축에 의한 건조층의 형성과정과 이에 따른 지지력을 결정하는 경우 다층지반의 지지력 산정문제가 도출된다. 균질한 지층에 대하여 연직방향으로 재하된 기초의 지지력 산정은 기존의 Terzaghi 지지력 공식을 사용하여 구할 수 있으나 이 공식은 소정의 점착력과 내부마찰각을 지닌 완전 강소성체의 균질한 지반에 대한 적용식으로 알려져 있으며 다층 또는 심도에 따라 그의 물성이 변화되는 지층에서는 적용할 수 없다.[6]

따라서 본 논문에서는 준설토의 지반공학적 특성을 파악하고자 기본물성실험과 표준압밀실험 및 변수위 투수실험을 실시하였으며 준설매립지반의 건조수축에 의한 강도증가 특성을 파악하기 위하여 실내건조실험에 의한 이중관 콘관입실험과 베인전단실험을 실시하였으며 건조 정도에 따른 일축압축실험을 실시하였다. 건조층이 형성된 지층에서의 해석 및 기존 방법의 분석, 모형 실험의 수행과 실험 결과의 관찰 및 분석을 수행하여 소정의 지지력 확보를 위한 소요시간의 추정과 지반 개량을 위한 중장비 진입 시기를 예측하였다.

2. 이론적 연구

2.1 건조수축해석 모델

해성점토를 사용한 준설매립지반의 표층은 지하수위 저하와 함께 대기중에 노출되어 표면으로부터 건조수축 현상이 발생한다. 표면 건조는 슬러리 상태로 투기된 지반의 간극비를 감소시킴으로서 단위중량이 증가하며 이로 인해 표층이하의 토층에 하중으로 작용함으로서 압밀이 발생하며 장기적인 침하는 최소가 되는 것으로도 해석할 수 있다[1].

이러한 준설토의 건조과정은 예측하기 어려운 많은 요인들을 포함하고 있으며 근본적으로 지표면이 복사열을 받거나 바람에 의해서 지표면의 간극수가 수증기의 형태로 공기 중으로 발산되어 간극수가 제거됨으로써 발생한다. 증발은 주로 물과 공기의 온도, 태양의 복사열, 지구의 대류열, 기온, 지온, 상대습도, 풍속 등과 같은 많은 요인에 의해 영향을 받는다.

건조수축현상은 실제 준설매립지반에서 침하나 초기표면강도 문제에 상당한 비중을 차지하고 있으며 건조수축을 고려한 준설매립지반의 해석모델 중 Cargill이 제안한 건조수축해석모델은 식(1)과 같이 축소좌표로 표시된 Gibson, England and Hussey(1967)가 제안한 유한 변형률 압밀지배방정식[3]을 사용한 자중압밀 침하부분과 건조침하 부분으로 구성되어 있다[2].

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

건조에 의한 지반의 침하는 배수와 증발에 대한 효과를 고려하여 두 단계로 해석할 수 있으며 다음과 같다.

2.1.1 제 1 단계

$$\Delta W' = CS - C'_E \cdot EP + (1.0-C_D) \cdot RF \quad (2)$$

여기서, $\Delta W'$: 1단계 건조과정 중 증발된 간극수의 양
CS : 자중압밀로 유입된 간극수의 양
C'_E : 최대 증발효율
EP : Pan 증발량
CD : 매립지 배수효율
RF : 강우량

2.1.2 제 2 단계

$$\Delta W'' = CS-C'_E(1-\frac{h_{wt}}{h_{2nd}}) \cdot EP+(1-C_D) \cdot RF \quad (3)$$

여기서, $\Delta W''$: 2단계 건조과정 중 증발된 간극수의 양
h_{wt} : 지하수위의 깊이
h_{2nd} : 2단계 건조의 최대 깊이

2단계 건조에 의한 침하량은 다음과 같이 산정된다.

$$\delta''_D = -\Delta W'' - (1 - PS/100) \cdot h_{wt} \quad (4)$$

여기서, δ''_D : 2단계건조에 의한 침하량
PS : 균열을 포함한 건조층의 전체 포화도

2.2 점성토 층상지반의 극한지지력

Meyerhof & Hanna(1978)는 그림 1.에 보인바와 같이 연약층위에 놓인 단단한 층에 지지되는 얕은 강성 연속 기초의 극한 지지력 평가에 대한 이론을 발전시켰다. 이들의 이론에 의하면, 단위면적당 극한 하중(q_u)에서 파괴면은 그림 1.에 보인바와 같이 나타날 것이다. 깊이 H가 기초 폭 B에 비해 상대적으로 작다면 하부 연약층에서는 전반 전단파괴(General Shear Failure)가 나타나고 상부 강성층에서는 관입 전단 파괴(Punching Shear Failure)가 발생할 것이다. 그래서, 연속 기초의 극한지지력은 식(5)와 같이 주어질 수 있다.

$$q_u = q_b + \frac{2(C_a + p_p \sin\delta)}{B} - \gamma_1 H \quad (5)$$

여기서, B : 기초폭

γ_1 : 강성층의 단위중량

C_a : 부착력(adhesive force)

P_p : aa'과 bb'면의 단위 길이당 수동토압

q_b : 하부층의 지지력

δ : 수평에 대한 수동토압 P_p의 구배

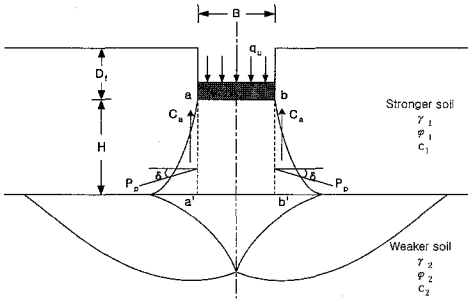

그림 1 층상지반에 놓인 얕은기초

식(5)에서

$$C_a = c_a H \tag{6}$$

여기서, c_a : 부착력(adhesion)

$$P_P = \frac{1}{2}\gamma_1 H^2\left(\frac{k_{pH}}{\cos\delta}\right) + (\gamma_1 D_f)\cdot(H)\cdot\left(\frac{k_{pH}}{\cos\delta}\right)$$

$$= \frac{1}{2}\gamma_1 H^2\left(1+\frac{2D_f}{H}\right)\cdot\left(\frac{k_{pH}}{\cos\delta}\right) \tag{7}$$

여기서, k_{pH} : 수평 수동토압계수

또한,

$$q_b = c_2 N_{C(2)} + \gamma_1(D_f + H)N_{q(2)} + \frac{1}{2}\gamma_2 B N_{\gamma(2)} \tag{8}$$

여기서, c_2 : 하부연약층의 점착력

γ_2 : 하부점토층의 단위중량

$N_{c(2)}, N_{q(2)}, N_{\gamma(2)}$: 하부층의 지지력 계수 (즉, 하부층의 흙의 마찰각에 대한 것)

식(6), (7), 그리고 (5)를 결합하면 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_u = q_b + \frac{2c_a H}{B} + (2)\left[\frac{1}{2}\gamma_1 H^2\left(1+\frac{2D_f}{H}\right)\right]\cdot\left(\frac{k_{pH}}{\cos\delta}\right)\cdot\left(\frac{\sin\delta}{B}\right) - \gamma_1 H$$

$$= q_b + \frac{2c_a H}{B} + \gamma_1 H^2\left(1+\frac{2D_f}{H}\right)\cdot\frac{k_{pH}\tan\delta}{B} - \gamma_1 H \tag{9}$$

식(9)에서 $k_{pH}\tan\delta = k_s\tan\phi_1$로 놓으면(여기서, k_s=관입전단계수) 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_u = q_b + \frac{2c_a H}{B} + \gamma_1 H^2\left(1+\frac{2D_f}{H}\right)\cdot\frac{k_s\tan\phi_1}{B} - \gamma_1 H \tag{10}$$

만약 깊이, H가 기초폭, B에 비하여 클 경우에는 파괴면은 완전히 상부의 강성층에 위치하게 될 것이며 이러한 경우 q_u는 다음과 같은 형태를 나타낼 것이다.

$$q_u = q_t = c_1 N_{c(1)} + qN_{q(1)} + \frac{1}{2}\gamma_1 B N_{\gamma(1)} \tag{11}$$

그러므로 식(10)와 식(11)을 결합하면 다음과 같다.

$$q_u = q_b + \frac{2c_a H}{B} + \gamma_1 H^2\left(1+\frac{2D_f}{H}\right)\cdot\frac{k_s\tan\phi_1}{B} - \gamma_1 H \le q_t \tag{12}$$

직사각형 기초에 대해서, 앞의 식(12)는 다음과 같이 수정될 수 있다.

$$q_u = q_b + \left(1+\frac{B}{L}\right)\left(\frac{2c_a H}{B}\right)s_a + \left(1+\frac{B}{L}\right)\gamma_1 H^2\left(1+\frac{2D_f}{H}\right)\left(\frac{k_s\tan\phi_1}{B}\right)s_s - \gamma_1 H \le q_t \tag{13}$$

Meyerhof & Hanna(1978)의 식(13)을 마찰각이 없는 하부 연약 점토지반위에 강성의 상부 점토층이 위치하는 경우에 대하여 고려하면 $N_{q(1)}$과 $N_{q(2)}$는 모두 1이며 $N_{\gamma(1)} = N_{\gamma(2)} = 0$, $N_{c(1)} = N_{c(2)} = 5.14$가 되며 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$q_u = \left[1+0.2\left(\frac{B}{L}\right)\right]c_2 N_{c(2)} + \left(1+\frac{B}{L}\right)\left[2c_a\left(\frac{H}{B}\right)\right]s_a + \gamma_1 D_f \le q_t \tag{14}$$

여기서, $q_t = \left[1+0.2\left(\frac{B}{L}\right)\right]c_1 N_{c(1)} + \gamma_1 D_f$

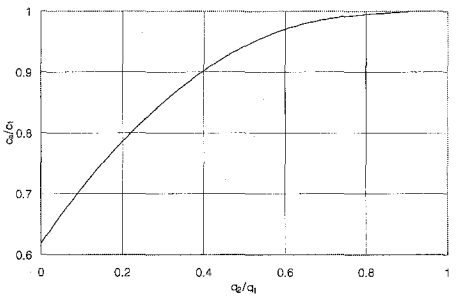

그림 2. q_2/q_1에 대한 c_a/c_1의 변화

형상계수, s_a의 크기는 대략 1로 고려될 수 있으며 부착력, c_a는 그림 2.에 나타낸 것처럼 q_2/q_1의 함수이며 이 조건에서는 다음과 같이 결정된다.

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{c_2 N_{c(2)}}{c_1 N_{c(1)}} = \frac{5.14 c_2}{5.14 c_1} = \frac{c_2}{c_1}$$

3. 실험내용 및 결과

3.1 시료의 지반공학적 물성

본 연구에 사용된 시료와 해수는 남해안 여천부근 인근해역에서 채취하였으며 균질한 시료를 성형할 수 있도록 소형교반기를 사용하여 충분히 교반된 재성형 시료를 사용하였다.

3.1.1 기본물성실험

기본물성실험결과는 표 1.에 나타난 바와 같으며 시료의 그림 3.의 입도분포곡선에서 볼 수 있듯이 입도시험결과 No.200 체 통과율은 모두 90%이상으로 나타났으며 통일분류법에 의한 분류결과는 노건조 시료와 자연건조 시료가 각각 CL과 CH로 균등입도를 나타내고 있다.

표 1. 기본물성실험결과

Gs	노건조시료			공기건조시료		
2.78	LL(%)	PL(%)	PI(%)	LL(%)	PL(%)	PI(%)
	47.9	25.5	22.4	62.6	27.5	35.1

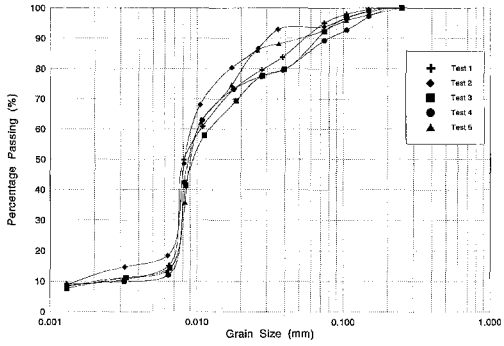

그림 3. 해성점토의 입경가적곡선

3.1.2 압밀정수

준설토의 압밀정수를 구하기 위하여 단계별 점증하중 재하 형태의 표준압밀실험을 실시하였다. 표준압밀실험과 병행하여 변수위 투수시험을 실시하여 간극비-투수계수의 관계를 구하였다.

그림 4.의 간극비-유효응력 관계에서 압축지수의 값은 0.467을 나타내며 팽창지수는 0.0573의 값을 보인다. 그림 5.는 간극비-투수계수 관계를 나타내는 실험결과이며 전반적으로 간극비의 감소에 따른 투수계수의 감소현상이 뚜렷이 나타남을 알 수 있으며, 간극비 0.5~1.7의 범위에 대하여 투수계수는 $2.0\times10^{-8} \sim 2.5\times10^{-6} cm/sec$ 의 범위에 분포하고 있음을 나타내고 있다.

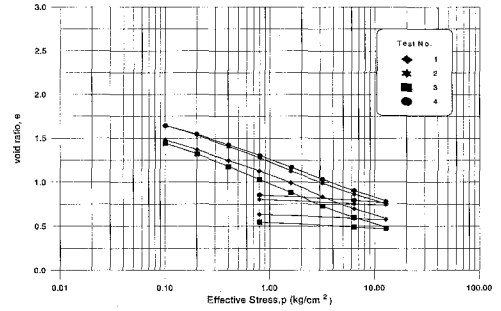

그림 4. 간극비-유효응력 관계곡선

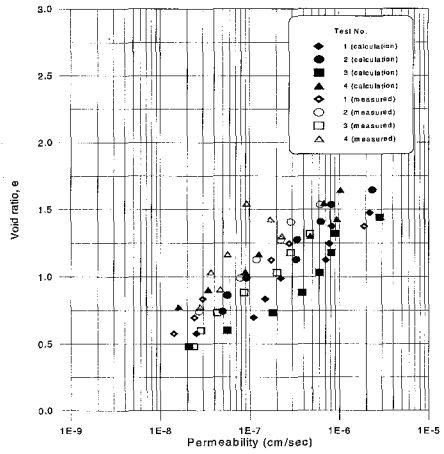

그림 5. 간극비-투수계수 관계

3.2 실내건조실험

본 연구에서는 준설매립이후 자연방치에 따른 압밀 및 지하수위 저하로 인한 건조층의 형성과정과 전단강도의 변화를 파악하기 위하여 재성형 시료를 사용하여 실내건조실험을 수행하였다.

실험에 사용된 시료의 조건은 표 2.에 나타내었으며 250W 발열전구 4개를 준설토의 표면으로부터 58cm 높이에 설치하여 증발률을 11.16mm/day로 인위적으로 유발하여 40일 동안 실험을 수행하였다. 표면 건조층의 형성으로 인한 전단강도의 변화를 측정하기 위하여 콘관입시험과 베인전단시험을 실시하였다. 그리고 실험 종료 후 표면건조층에 대한 시료를 채취하여 함수비를 측정하였다.

표 2. 실내건조실험 초기조건

초기함수비 (%)	초기높이 (cm)	증발률 (mm/day)	초기간극비
155.1	45	11.16	4.31

3.3 콘관입실험

콘 관입실험(Cone Penetration Test, CPT)은 로드 선단에 콘저항체를 부착하여 지반에 일정속도로 관입시킬 때의 저항으로부터 심도에 따른 지반의 굳기와 고결정도를 측정하는 실험으로 현장에서 주로 연약지반조사에 많이 이용되고 있다.

본 연구에서는 준설토의 건조수축에 의한 표층에서의 전단강도의 변화를 측정하기 위하여 실내건조실험과 병행하여 콘관입실험을 실시하였으며 투기 후 7일, 21일, 30일, 40일 경과시점에 깊이별 함수비에 따른 콘 관입저항치를 구하였다. 실험에 사용한 콘은 그림 6.에 보인바와 같이 선단각이 30° , 저면적이 1.77cm^{2}인 이중관 콘관입시험기이며, 로드셀에 장착된 콘을 관입속도 2cm/sec로 관입하여 자동자료 수집장치(Automatic Data Acquisition System)를 통해 콘저항치를 일정 시간간격으로 측정하였다.

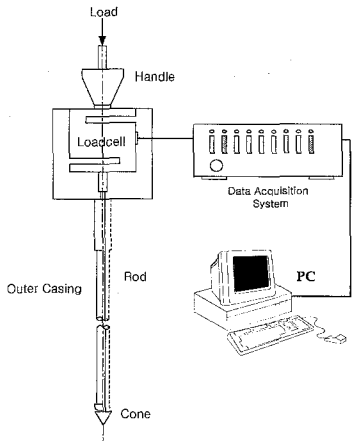

그림 6. 이중관 콘관입시험장치

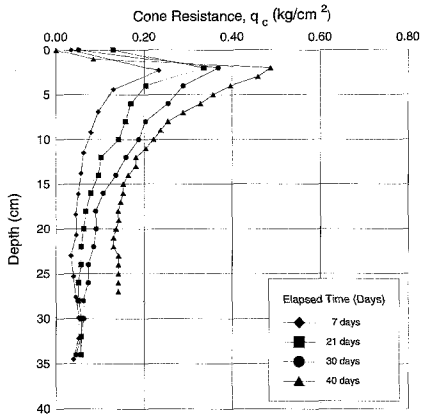

그림 7. 깊이에 따른 콘관입저항치의 변화

그림 7.의 실험결과로부터 표면건조층의 형성과정 및 전단강도의 변화를 확인할 수 있으며 콘관입저항치가 표면에서부터 선형적으로 감소하는 것이 아니라 먹함수 형태로 감소하고 있으며 일정 깊이 이하에서는 콘관입저항치가 수렴하고 있음을 알 수 있다. 이것은 건조로 인하여 표층에서 부의 간극수압이 먹함수 형태를 나타내며 이로 인한 토립자간의 결속력의 증가와 체적변화에 의한 강도증가가 주된 원인이다.

3.4 베인전단실험

표면 건조에 의한 전단강도의 변화를 측정하기

위하여 실험이 종료되는 40일 경과 시점에 베인전단실험을 실시하여 비배수 전단강도(S_u)를 추정하고 콘저항치(q_c)와의 상관관계를 구하였다.

그림 8.에서는 베인전단실험 결과에 의한 비배수 전단강도를 함수비와의 관계로 나타내었다. 결과로부터 비배수 전단강도는 함수비에 따라 지수함수형태의 비선형적인 결과를 나타내고 있으며 회귀분석에 의한 관계식을 아래에 나타내었다.

$$S_u = 0.9935e^{-0.0407w} \quad (15)$$

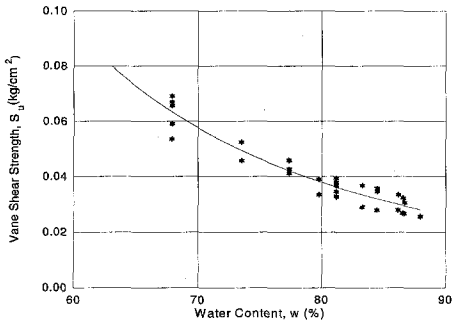

그림 8. 함수비에 따른 비배수전단강도

그림 9.에서 콘관입저항치(q_c)와 베인전단실험에 의한 비배수 전단강도(S_u)와의 관계를 나타내었으며 이로부터 콘계수 8.4226을 획득하였다.

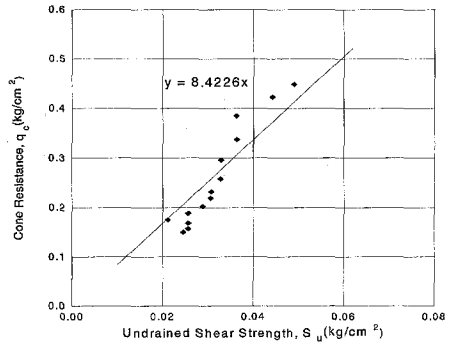

그림 9. 콘저항치와 비배수전단강도의 관계

3.5 일축압축실험

일축압축시험은 비압밀-비배수 삼축압축시험의 구속응력이 0인 경우이며, 비배수전단강도(S_u)가 파괴시 강도인 일축압축강도(q_u)의 1/2에 해당하는 점을 이용하여 비배수전단강도를 산정하고 있다.

실험에 사용된 공시체는 실내에서 난방기를 이용하여 건조시켜 시료추출기를 이용하여 제작하였다. 그림 10.과 같이 제작된 공시체를 변형속도 1mm/min.로 압축할 때 다이얼 게이지와 로드셀이 읽어들인 데이터를 자동자료 수집장치(Automatic Data Acquisition System)를 사용하여 일축압축강도를 측정하였다.

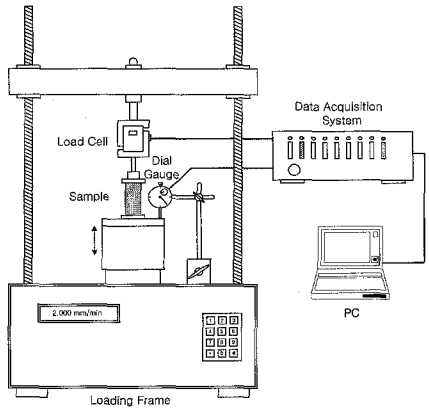

그림 10. 일축압축시험장치

그림 11.은 일축압축실험 결과로써 그림으로부터 일축압축강도는 함수비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 잘 나타내고 있으며 연성파괴(Ductile Failure)로 최대강도값이 나타나지 않는 변형경화(Strain Hardening)현상을 보여주고 있으며, 그와 반대로 건조시간이 긴 시료 즉 함수비가 감소함에 따라 일축압축강도는 증가하며 최대극한강도에 도달하는 변형률이 6~8%의 범위의 취성파괴(Brittle Failure)를 나타내고 있음을 알 수 있다.

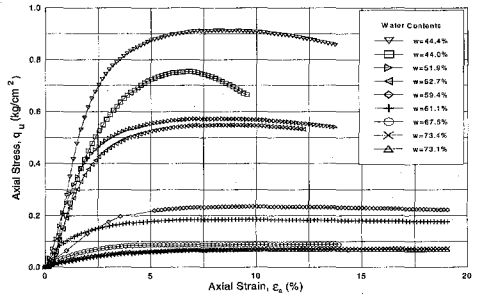

그림 11. 일축압축실험에 의한 응력-변형 곡선

그림 12.는 일축압측실험으로부터 획득한 일축압축강도와 실험 중 측정한 함수비와의 관계를 나타내었다. 함수비가 감소함에 따라 일축압축강도는 지수함수의 형태로 증가하고 있음을 알 수 있으며 이에 대한 회귀분석 결과는 다음과 같다.

$$q_u = 53.35e^{-0.0915w} \quad (16)$$

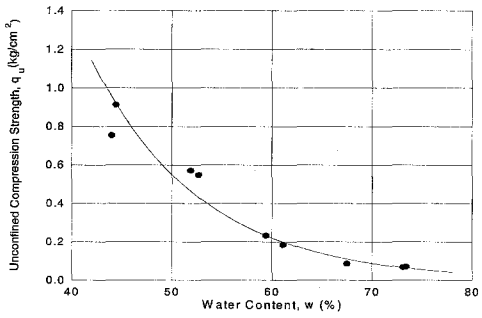

그림 12. 함수비 변화에 대한 일축압축강도

3.6 모형실험

준설토의 건조수축에 의한 지지력의 증가특성을 획득하기 위하여 850W 전열기를 사용한 건조장치를 제작하여 1G 상태에서 건조시간을 2, 4, 8시간으로 변화시켜 건조시킨 후 강원대학교 원심모형시험기를 사용하여 1G와 30G 상태에서 모형기초 재하실험을 실시하였다. 실험에 사용된 기초는 기초폭이 2cm, 4cm인 알루미늄으로 제작된 강성기초를 사용하였다. 실험에 사용된 모형토조와 하중재하장치는 그림 13.에 나타내었으며 초기함수비 115.5%, 시료높이 20cm로 성형하여 실험을 실시하였다. 모형실험의 실험내역을 표 3.에 나타내었다.

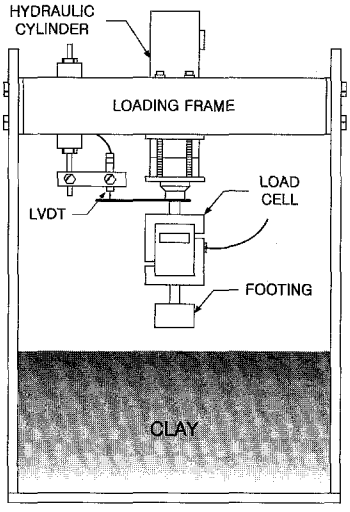

그림 13. 모형기초 및 하중재하장치

표 3. 모형실험 실험내역

Test 1			
G-Level (건조)	G-Level (모형실험)	기초폭 (cm)	건조시간 (hour)
1	1	2	2
			4
			8
Test 2			
G-Level (건조)	G-Level (모형실험)	기초폭 (cm)	건조시간 (hour)
1	30	2	2
			4
			8
Test 3			
G-Level (건조)	G-Level (모형실험)	기초폭 (cm)	건조시간 (hour)
1	30	4	2
			4
			8

3.6.1 하중-침하 특성

그림 14.는 1G 상태에서 기초폭이 2cm일 때 기초 재하 시험에 대한 하중-침하 곡선을 나타내었다. 건조시간이 증가함에 따라 지지력이 증가함을 볼 수 있으며 하중-침하 곡선의 기울기는 침하비(S/B)가 50% 정도에서 수렴하고 있다.

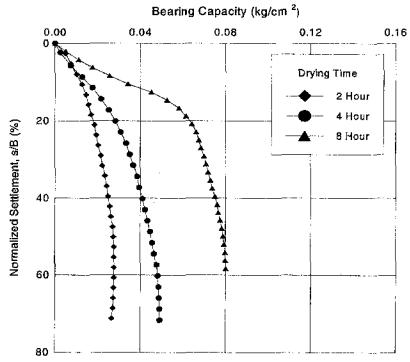

그림 14. 하중-침하 곡선
(G-Level=1G, B=2cm)

그림 15.는 30G 상태로 기초폭, B=2cm에 대한 원심모형 실험결과이며 그림 16.은 동일한 조건에서 B=4cm로 변화시킨 원심모형 실험결과이다. 그림에서 나타난 바와 같이 건조시간이 증가함에 따라 지지력의 증가를 확인할 수 있었지만 최대 변형연화를 분명하게 알 수 없었으며 점진적으로 증가하는 하중-침하 곡선은 재료의 압축성에 기인하는 국부 전단 파괴와 유사하며 이것은 적절한 지지력의 추정을 어렵게 한다. 전체적으로 극한 하중 및 초기 접선 탄성계수의 증가를 확연히 알 수 없

는 형태의 하중-침하 곡선을 얻을 수 있었다.

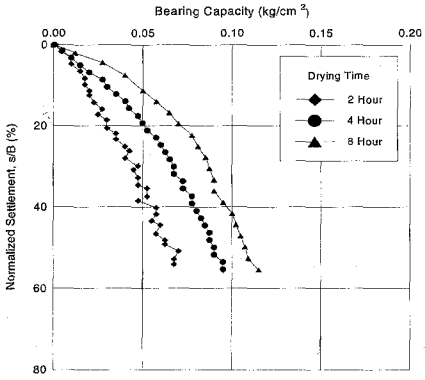

그림 15. 하중-침하곡선
(G-Level=30G, B=2cm)

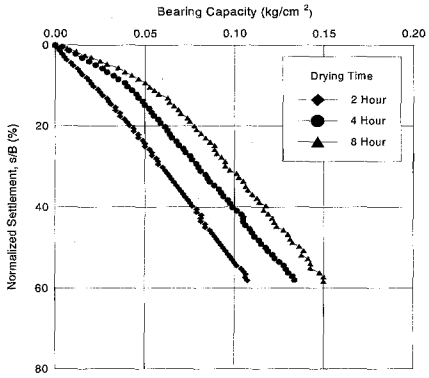

그림 16. 하중-침하곡선
(G-Level=30G, B=4cm)

3.6.2 극한지지력

실험완료 후 건조 시간에 따른 건조 정도와 실험분석을 위한 자료로써 사용하기 위하여 깊이별 함수비를 0.5cm 간격으로 측정을 하였으며 이에 대한 깊이에 따른 평균함수비를 그림 17.에 나타내었다.

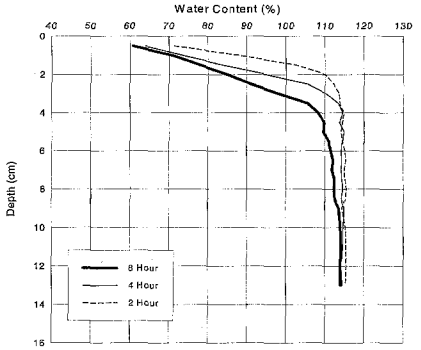

그림 17. 평균함수비 분포

그림 17.에 나타낸 바와 같이 건조의 영향을 받은 상층부와 건조 효과가 미치지 않은 하층부로 확연히 구별할 수 있으며 건조시간이 증가함에 따라 상층부의 표면에서는 초기에 급격한 함수비 감소가 발생하지만 시간이 경과할수록 표면보다는 하부 쪽에서 함수비의 변화가 발생함을 알 수 있다.

준설매립지반은 시간이 경과함에 따라 건조수축에 의하여 체적변화가 발생하는 깊이까지는 전단강도의 증가현상이 현저한 반면 하부지반은 포화상태로 존재하기 때문에 지지력의 평가시 개별적인 층으로 구분하여 평가하는 것이 바람직하다. 그러므로 본 연구에서는 Meyerhof & Hanna(1978)와 Reddy & Srinivasan(1967)이 제안한 층상점토지반에 설치된 기초의 지지력 산정공식을 사용하여 극한지지력을 예측하였으며 실험결과와 비교하여 표 4. 와 그림 18.에 나타내었다.

표 4. 극한지지력의 비교(1G, B=2cm)

	극한지지력 (kg/cm^2)		
상부층 두께 H (cm)	2	3	4
Experiments	0.027	0.049	0.080
Meyerhof & Hanna(1978)	0.024	0.048	0.070
Reddy & Srinivasan(1967)	0.039	0.087	0.132

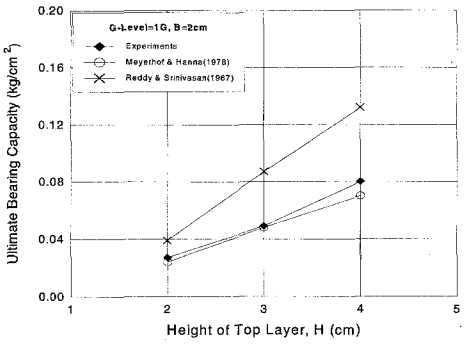

그림 18. 극한지지력의 비교(1G, B=2cm)

Meyerhof & Hanna(1978)의 제안식에 의해 예측되는 극한지지력, Reddy & Srinivasan(1967)의 지지력 공식에 의한 예측되는 극한지지력을 실험결과와 비교한 결과 그림 18.에 나타난 바와 같이 Reddy & Srinivasan(1967)에 의한 예측 지지력 보다 Meyerhof & Hanna(1978)의 제안식에 의한 예측 지지력이 실험결과와 비교적 일치하고 있음을 알 수 있다. Reddy & Srinivasan(1967)은 극한 상태의 파괴면이 원호상태로 가정하였으나 실험시에 관찰된 파괴 형태는 연직 전단면 또는 상부 지층의 파괴면에서 깊이가 증가함에 따라 폭이 증가하는 형태의 파괴면이 관찰되었다. 이것은 Meyerhof & Hanna (1978)가 가정한 파괴메카니즘과 유사한 것으로 생각되며 이러한 예측되는 극한지지력의 차이는 상이한 파괴메카니즘 때문인 것으로 판단된다.

4. 현장 준설매립지반의 지지력 추정

4.1 수치해석

준설토의 건조수축에 의한 강도증가와 이에 따른 지지력을 예측하기 위하여 Gibson, England and Hussey(1967)가 유도한 유한변형률 압밀지배방정식에 건조수축 효과가 고려된 Cargill(1985)이 제안한 건조수축모델을 이용하여 수치해석을 실시하였다.

수치해석 모델링으로 준설매립지반의 자중압밀 및 표층건조로 인한 침하를 예상하였으며, 자연방치 기간에 따른 깊이별 함수비를 예측하여 본 연구에서 실행된 강도특성실험결과에서 획득한 전단강도 관계식을 이용하여 강도증가를 예측하였다. 적용현장은 여천지구 0공구 0B/L이며 현장조건은 표 5.에 나타난 바와 같다.

표 5. 준설매립지반의 현장조건

	기간	물량 (m^3)	유보율 (%)	준설직후 평균함수비 (%)	준설고 (m)
1차 준설	97.11.11 ~ 98.8.31	2,143,121	85	164	8.38
2차 준설	99.4.27 ~ 99.5.26	140,154	80	?	8.38

해석지반의 함수비 분포는 2차 매립이후 1년 경과시(2000년 5월 26일) 계측한 함수비 분포를 기준으로 하였으며 수치해석에 필요한 증발량 및 강우량은 여수지방의 1961년부터 1990년까지의 일별평년증발량을 사용하였다.[7]

준설매립이후 표층처리공법을 수행함에 있어 전단강도에 따른 장비의 선택이 중요한 문제가 되며 이것은 장비의 접지압에 따라 달라지게 된다. 표 6.에 이러한 각종 장비의 접지압을 나타내었다.[8]

표 6. 각 시공장비에 대한 평균접지압

종류	규격	접지압(kg/cm2)
보통 불도저	2 ton급	0.32~0.37
스크레퍼 불도저	4 m2	0.43
습지불도저	8 ton 급	0.25~0.26
초습지 도저	8 ton급	0.12~0.18

4.2 수치해석 결과

그림 19.~그림 22.에서는 유한변형률 압밀지배방정식에 건조수축 효과가 고려된 Cargill(1985)이 제안한 건조수축모델을 이용하여 수치해석을 수행한 결과 투기 후 540일, 720일, 900일, 1,080일 경과시점의 예상되는 함수비 분포를 나타내었다.

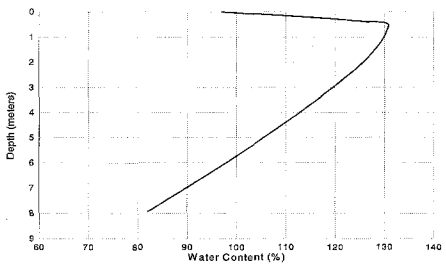

그림 19. 함수비 분포(Time=540days)

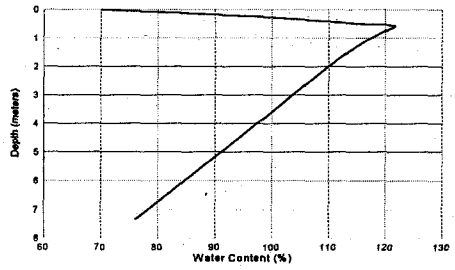

그림 20. 함수비 분포(Time=720days)

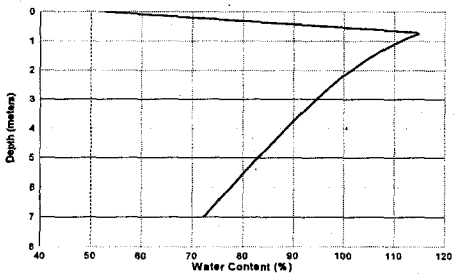

그림 21. 함수비 분포(Time=900days)

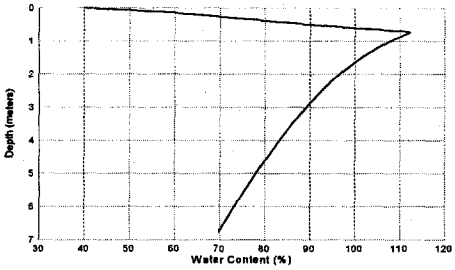

그림 22. 함수비 분포(Time=1,080days)

그림 19.~그림 22.에 나타낸 시간에 따른 깊이별 함수비 분포를 사용하여 상·하부층의 비배수 전단강도를 결정하고 Meyerhof & Hanna(1978)의 제안식에 의해 극한지지력을 예측하여 시간 경과에 따라 표7.에 나타내었다.

표 7. 극한지지력의 예측

경과시간 (Days)	상부층 두께(m)	c_{u1} (kg/cm^2)	c_{u2} (kg/cm^2)	극한지지력 (kg/cm^2)
540	0.520	0.0012	0.00017	0.00087 + 0.00094/B
720	0.580	0.0101	0.00039	0.00200 + 0.00764/B
900	0.737	0.0413	0.00073	0.00375 + 0.03863/B
1080	0.731	0.1101	0.0103	0.00478 + 0.10053/B

표 7.에서 예측되는 지지력을 토대로 접지압이 0.12kg/cm^{2}정도인 초습지 도저의 경우 그림 23.에 나타낸 것처럼 폭을 0.5m로 가정하였을 경우 956일 경과 시점에 장비 진입이 가능할 것으로 예상된다.

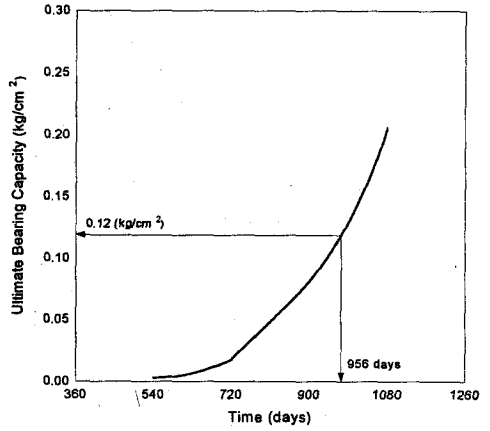

그림 23. 장비 투입시기의 결정

5. 결론

준설매립지반의 건조수축에 의한 강도 증가 특성과 소정의 지지력 확보를 위한 소요시간의 추정을 위하여 실내실험 및 모형실험에 의한 분석과 현장 적용을 수행한 결과 도출된 결론은 다음과 같다.

1. 실내 건조실험과 건조에 따른 강도실험을 통하여 증발 초기에는 강도증가와 함수비의 감소가 최상부에서 발생하지만 시간이 경과함에 따라 증발에 의한 건조현상이 하부지반으로 확장됨을 확인하였다.

2. 실내 건조실험에 의한 콘관입실험결과 표면 건조층의 형성과정 및 전단강도의 변화를 확인할 수 있었으며 콘관입저항치는 표면에서부터 먹함수 형태로 감소하고 있음을 알 수 있었다.

2. 일축압축 실험결과 함수비 변화에 따른 일축압축강도는 지수함수로 변화하며 함수비가 감소할수록 취성파괴 및 변형률 연화현상의 응력-변형률 곡선으로 변화됨을 관찰하였다.

3. 모형 실험 결과 뚜렷한 극한하중을 찾을 수 없는 점진적으로 증가하는 형태의 하중-침하 곡선을 얻을 수 있었으며 건조시간이 경과하여 건조층의 두께가 증가할수록 지반의 지지력이 커짐을 확인하였다.

4. 건조수축에 의한 지지력 증가 특성을 파악하기 위하여 Meyerhof & Hanna(1978)의 제안식과 Reddy & Srinivasan(1967)이 유도한 층상점토지반

의 지지력 공식을 사용하여 예측한 극한 지지력을 실험결과와 비교한 결과 Meyerhof & Hanna(1978)의 제안식을 사용하는 것이 실험결과와 근접함을 알 수 있었다.

5. 준설매립현장에서 건조에 의한 지반의 강도증가와 이에 따른 시공 장비의 투입시기를 예측하기 위하여 유한 변형률 압밀이론에 건조수축 효과가 고려된 수치해석을 실시하였으며 그 결과 투기 후 경과 시간에 따른 준설매립지반의 함수비와 전단강도 분포를 예측하여 이에 따른 지지력을 추정하였다.

참고문헌

[1] Abu-Hejleh, A. N. and Znidarcic, D. (1995), "Desiccation Theory for Soft Cohesive Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.121, No.6, pp.493-502.

[2] Cargill, K. W. (1985), "Mathematical Model of The Consolidation 6/ Desiccation Processes in Dredged Material", Technical Report D-85-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Miss.

[3] Gibson, R. E., England, G. L. and Hussey, M. J. L.(1967). " The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clay 1. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous layers" , Geotechique, 17, pp. 261 - 273.

[4] Meyerhof, G. G. and Hanna, A. M. (1978), "Ultimate Bearing Capacity of Foundations of Layered Soils under Inclined Loads", Can. Geotech. J., Vol.15, pp.565-572.

[5] Reddy, A. S. and Srinivasan, R. J. (1967), "Bearing Capacity of Footings on Layered Clays", J. Soil. Mech. Found. Div., ASCE 93, SM2, pp.83-99.

[6] Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons, pp.265-296.

[7] 기상청 (1991), "한국기후표 제Ⅰ권-일별 및 순별 평년값-(1961-1990)".

[8] 김석열, 김승욱, 김홍택, 강인규 (2000), "준설매립토의 건조수축에 따른 강도증가 예측과 장비투입시기 결정에 관한 연구", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp.591-598