

Sand Pile 설치지반에서 텍소트로피에 의한 지반개량특성

The Characteristics of Ground Improvement by Thixotropy in the Ground Surrounding by Sand Piles

천 병 식*¹ Chun, Byung-Sik
여 유 현*² Yeoh, Yoo-Hyeon

Abstract

Generally, consolidation characteristics of the ground surrounding sand piles are delayed by well resistance and smear effect under construction. This study is executed for the purpose of understanding factors that affect the characteristics of consolidation at the ground surrounding sand pile. Especially, the degree of disturbance is high in the ground of sensitive clay. Also, when thixotropy phenomenon is delayed, bearing capacity and compression characteristics work adversely. In the study, model test was executed under the condition of perfect disturbance and mechanical test was executed under the condition of varied salty density. The specimen in this study was gathered from natural ground whose properties were well known. From the result of model test, coefficient of consolidation at low load step was similar to properties of undisturbed sample. Besides, as salty density increase, unconfined compressive strength increased and recovery strength was fast and compression index was low. Eventually, salty density of clay ground affected strength increment and the change of compression properties. Moreover, salty density is considered to be a cause of excessive settlements under construction at the ground containing water. This effect of salty density should be regarded as an important factor together with settlement behavior caused by lateral flow.

요 지

일반적으로 샌드파일 설치로 인해 파일주변지반은 교란되어 스미어 영향과 배수저항에 의해 압밀지연 현상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 예민한 점성토 지반일 경우 교란정도가 크며, 텍소트로피현상이 지연될 경우 지지력 및 압축특성은 불리하게 된다. 본 연구에서는 원지반 특성이 파악된 채취시료를 이용하여 완전 교란조건에서의 실내모형시험과, 염분농도 변화에 의한 실내역학시험을 실시하였다. 실내모형시험 결과 낮은 하중단계에서의 압밀계수는 비교란 시료의 특성과 유사하게 나타났으며, 염분농도 증가에 따라 일축압축강도는 증가하고 강도회복은 빠르며 압축지수는 작게 나타났다. 결과적으로 점성토지반 간극수중 염분농도는 강도증대와 압축특성 변화에 영향을 주며, 텍소트로피 증대의 영향요소가 적은 담수지반에서 샌드파일을 시공할 경우 발생하는 과다침하의 한 원인으로 여겨지는바, 이와 같은 요인은 측방유동에 의한 침하거동과 함께 고려하여야 할 영향요소로 파악되어야 할 것으로 판단된다.

Keyword : Sand pile, Thixotropy, Sensitive clay, Disturbed sample, Salty density

*1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

1. 서론

점토광물(점성토)은 교란이 발생하면 강도가 저하되고 시간경과에 따라 저하되었던 강도는 천천히 회복하는 텍소트로피현상이 있다. 점성토 지반에 연직배수공법으로 샌드파일을 설치할 경우 예민특성 정도에 따라 교란되고, 시간경과에 따른 강도회복과정에서 지반의 역학적 특성변화를 파악하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 이와 같이 샌드파일 설치로 인해 교란된 지반에 대하여 압밀과 강도특성의 변화 및 이에 미치는 영향을 파악하기 위하여 지반상태가 확인된 현장 채취시료를 이용하여 실내모형시험을 실시하였으며 특히, 현장의 물리적 조건과 염분농도 변화조건(0, 17.5, 35‰)으로 실내역학시험(일축압축강도, 압밀시험)을 실시하여 그 특성을 파악하고자 하였다. 또한 하성퇴적지반에서 성토시공과정중 실시한 계측수행결과를 이용한 분석을 실시하여 텍소트로피 특성에 따라 다르게 발생할 수 있는 과다침하발생원인을 파악하고자 하였다.

2. 샌드파일 주변지반 개량에 영향을 주는 요소

2.1 배수저항과 스미어 영향

샌드파일 설치로 인한 주변지반의 교란영역을 스미어존(smeared zone)이라 하고, 이와 같은 스미어존이 형성되면 상대적으로 큰 수평투수계수가 현저히 감소되므로 압밀을 지연시키게 된다. 이와 같은 스미어 영향을 고려한 방사선 방향의 압밀에 대한 해석 방법은 다음과 같다.

$$U = 1 - e^{-8 T_v / m} \quad (1)$$

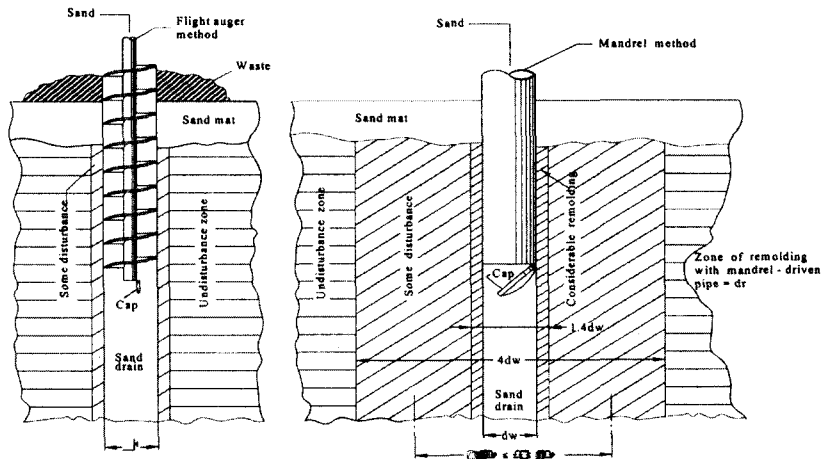


그림 1. 샌드파일 시공방법에 따른 스미어존

여기서,

$$m = \left[\frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} + \frac{k_h}{\gamma_w K} \frac{n^2 - 1}{n^2} \right] \quad (2)$$

$$\text{또한, } \frac{k_h}{\gamma_w K} = \frac{(f-1) k_h}{k_s} \quad (3)$$

k_s : 스미어존의 수평방향 투수계수

k_h : 교란되지 않은 흙의 수평방향 투수계수

$f = d_s/d_w$: 모래말뚝 직경에 대한 스미어존의 직경의 비

$n = d_s/d_w$

T_v : 방사선 방향의 시간계수

$1/K$: 웰의 표면저항

샌드파일을 지중에 삽입하면 주로 맨드렐에 인접한 부분에서 흙이 상당히 교란된다. 그림 1에서와 같이 샌드파일 설치방법에서 오거 천공의 방법보다는 맨드렐 천공시 교란에 의한 스미어존이 확대되며 Hunt(1986)등에 의하면 맨드렐 직경의 1.4~4배 정도까지 교란된다고 하였다.

2.2 텍소트로피 특성

흙이 교란되어 강도가 감소되면 시간이 경과함에 따라 일단 감소되었던 강도는 천천히 증가한다. 그러나 교란전의 원상태까지 회복하지는 못한다. 이와 같은 강도증가의 원인은 불교란 상태의 면모구조에서 교란으로 말미암아 이산구조로 되었던 점토가 다시 면모화 하려는 텍소트로피(thixotropy) 현상에 의한다. T. S. Nargaraj(1990)에 의하면 연약한 예민점토에서의 압밀거동은 그림 2에서와 같이 불교란 시료토에서는 항복응력(yield stress, σ_c) 이후의 거동(zone-2)과 응력증가에 따른 간극비 감소가 둔화된 후 일정한 증가를 보이는 전이응력(transition stress, σ_t)이

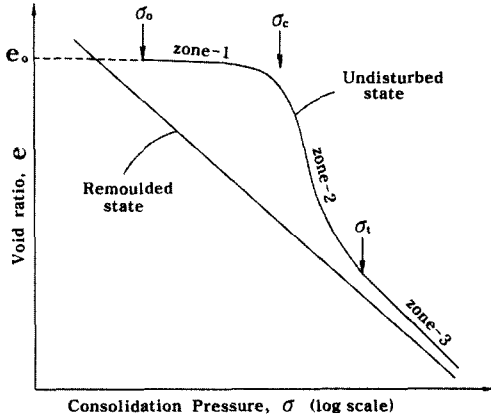


그림 2. 예민점토에서의 압밀거동 특성(불교란시료 및 재성형시료)

후의 거동(zone-3)을 나타내며, 재성형 시료상대에서는 불교란 시료와 다른 압축특성을 보이며, 시료채취 방법 및 상태에 따라 압축특성은 차이가 있다.

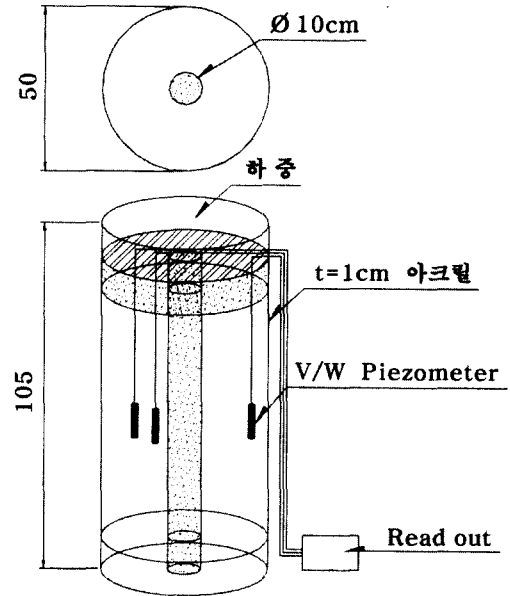
그림 2에서와 같이 지반의 교란 정도 및 하중변화에 따라 압축특성(C_c)에 차이를 보이는 것은 교란정도에 따라 낮은 하중단계에서 침하량이 다르게 평가될 수 있는 사항으로 지반의 교란정도(교란의 크기 및 범위)와 이에 따른 텍스트로피 특성에 의해 지반개량특성이 변화될 수 있음을 보여준다. 한편 박영목(1994)에 의하면 예민한 점성토 시료에 대하여 실시한 실내시험결과, 염분농도가 다른 각 지역의 해성점토에 대한 재성형시료의 강도시험에서 염분농도가 큰 지역의 시료토일 경우 높은 강도회복율을 보이는 것으로 보고하고 있다. 이것은 염분농도가 큰 지반일 수록 교란된 지반에서 텍스트로피현상의 증대효과가 있음을 의미하는 것으로 텍스트로피현상은 해성퇴적층 또는 모래를 사용한 샌드파일 시공시에 교란된 원지반의 역학적 특성이 텍스트로피경향에 의존될 수 있음을 보여주는 것이다.

3. 실내시험

실내시험은 현장의 지반상태가 파악된 천안-논산간 고속도로 연약지반처리 구간에서 채취한 시료를 이용하여 완전교란상태로 모형시험 및 염분농도에 따른 역학시험

표 1. 원지반 및 모형지반의 공학적 특성

구 분	함수비 (w_n) (%)	액성한계 (w_L) (%)	소성지수 (PI) (%)	단위중량 (γ_t) (t/m^3)	압축지수 (C_c)	압밀계수 (C_v) (cm^2/sec)	비배수 전단강도(S_u) (t/m^2)
원지반	27~55 (45.1)	32~64 (42.4)	1.1~33 (20.2)	1.45~2.01 (1.73)	0.20~0.42 (0.325)	1.1×10^{-3}	2.0~4.0 (2.1)
모형지반	60.5	47.66	19.2	1.54	0.20	1.1×10^{-3}	1.2



(a) 모형도



(b) 모형토조 설치

그림 3. 제작 모형토조

(일축압축강도, 압밀시험)을 다음과 같이 실시하였다.

3.1 실내모형시험

3.1.1 지반 물성치

시험대상토 및 모형지반의 지반물성치는 표 1과 같다. 배수재인 샌드파일에 사용한 모래는 주문진 표준사를 사용하였다.

표 2. 실내역학 시험용 시료토 제작 조건

구 분	함수비 (w_n , %)	단위중량 (γ_t , t/m ³)	염분농도 (%)	비 고
일축압축시험	41.0	1.70	0, 17.5, 35	
표준압밀시험	41.0	1.70	0, 17.5, 35	

3.1.2 시험모형토조 제작

시험을 위한 모형토조의 제작은 모형지반에서 원지반과 샌드파일의 면적치환비를 고려하여 그림 3에서와 같이 두께 1cm, 직경 50cm, 높이 105cm의 아크릴로 제작하였으며, 수직배수재의 직경은 10cm로 하여 등가유효원을 50cm로 가정하였다. 모형지반은 최대한 연약화한 상태에서 토조에 넣고 자중압밀에 의해 표면건조 상태까지 방치한 후 수직배수재를 설치하는 것으로 하였으며 시험 원지반 상부에 수평배수층(샌드매트층)을 포설하였다. 또한 샌드파일 설치시 모형토조 중심에 직경 10cm의 판을 설치하고 빼면서 설치하였으며, 수직배수재 설치시 타설이 불량한 경우에는 시험지반을 다시 제작하여 재설치하였다.

3.1.3 하중재하 및 계측

모형토조 내에 설치한 샌드파일에 대하여 하중증가에 따른 간극수압특성 및 압축특성을 파악하기 위하여 단계 하중을 가하였으며, 하중단계는 1단계에서는 0.84t/m², 2단계에서는 0.47t/m²을 추가하여 1.31t/m²을 재하하는 것으로 하였다. 2단계 하중재하시는 1단계 하중재하 후 과잉간극수압 소산이 50%정도일 때로 하여 과재하중으로 인한 모형지반의 파괴를 최소화 하도록 하였다. 하중재하 과정중 과잉간극수압특성을 파악하기 위하여 샌드파일 설치심도 중앙에 수직배수재 직경(10cm)비로 중심으로부터 1.0D, 1.5D, 2.0D 간격에 진동현식 간극수압계(V/W type piezometer)를 설치하였다. 간극수압계는 낮은 하중 단계에서도 정밀도의 유지가 가능한 점·교정 완료된 tip을 사용하였으며, 설치 전 계측기 이상 유무에 대한 검수를 완료하였다. 간극수압계는 원지반 천공 후 설치하였으며, 설치 후 상부지반을 밀폐하였다. 또한 모형지반 상단부 4개소에서 재하하중과 시간경과에 따른 침하량을 측정하였다. 이와 같이 설치된 계측기는 하중단계 및 시간경과에 따라 충분한 계측빈도로 계측을 수행하였으며, 계측시간은 22,000분 이상 실시하였다.

3.2 염분농도 변화에 따른 역학시험

염분농도 변화에 따른 시료토의 토질특성 변화를 파악

하기 위하여 모형시험용 채취 시료를 이용하여 시험용 공시체를 제작하여 실내역학시험(일축압축강도 및 압밀시험)을 다음과 같이 실시하였다.

3.2.1 시료토 제작

시료토 재성형은 시료를 완전히 건조시킨 후 해수층의 표준 염분농도인 35‰를 기준으로 하여 담수지반에서의 샌드파일 설치조건을 고려를 위하여 담수지층의 시료에 염분농도를 0‰과 중간단계의 17.5‰로 구분하였다. 원지반의 물리적조건(함수비, 단위중량)을 고려하여 담수에 각각의 농도별로 구분된 중량의 소금을 녹여 표 2의 조건으로 시료토를 제작하였다.

일축압축강도 시험용 시료토는 각각의 염분농도와 재령일수별로 시험이 가능하도록 직경(D) 5.5cm, 높이(H) 11cm, 체적(V) 261.2cm³으로 동일하게 제작하였으며, 양생방법은 수중양생(각각의 염분농도로 만든 수조속에서 양생 시킴)과 항온·항습조건으로 하였다. 표준압밀시험용 시료토는 교란 초기 압밀특성을 파악하기 위한 시험임을 고려하여 각각의 염분농도조건으로 1개씩 제작하여 시험을 실시하였다.

3.2.2 시험방법

(1) 일축압축강도시험

일축압축강도 시험은 염분농도변화 조건 및 재령일수(0, 3, 7, 14, 21, 28, 35, 60일)에 따른 각각 시험치의 비교평가가 가능하도록 일정시간-일정변형이 발생하도록 하였으며, 측정시 최대 변형률은 15%로 하였다.

(2) 표준압밀시험

동일한 물리적 특성(함수비, 밀도)에 염분농도 변화조건(0‰, 17.5‰, 35‰)에 따른 압밀특성 변화를 파악하기 위하여 동일한 시험자가 동일한 시간에 시험을 실시하였으며, 최종단계의 하중조건은 12.8 kg/cm²로, 재하완료 후 재하 및 재재하를 실시하여 전체적인 압밀거동특성변화를 파악하고자 하였다.

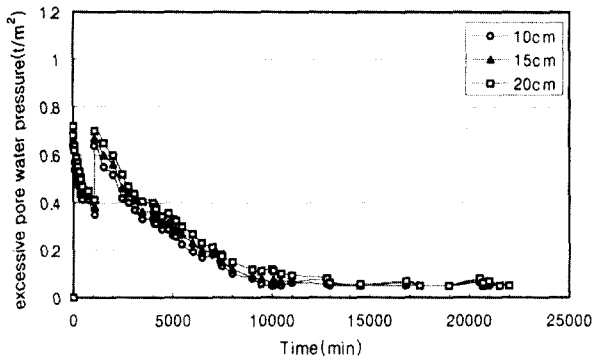


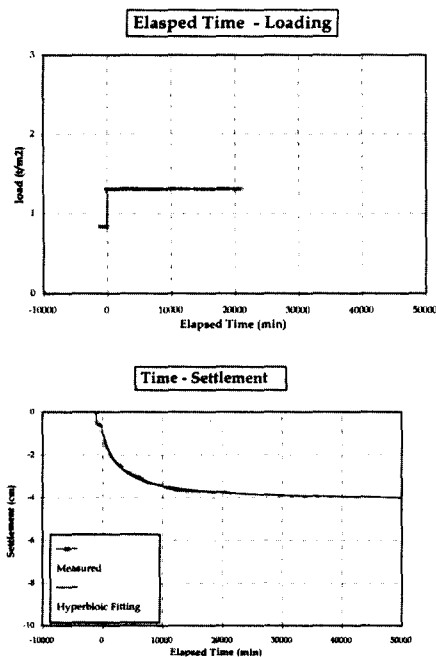
그림 4. Sand Drain 주변지반의 거리별 과잉간극수압 변화

4. 시험결과

4.1 실내모형시험 결과

4.1.1 과잉간극수압

모형토조 중앙부에서 수직배수재로부터 수평거리 (1.0D, 1.5D, 2.0D)에 따라 측정된 간극수압 측정결과로부터 파악된 과잉간극수압을 나타내면 다음 그림 4와 같다. 그림으로부터 1단계 0.84t/m² 하중재하시 발생 과잉간극수압은 2.0D 위치에서 최대 0.70t/m²이 발생한 것으로 나타났다, 과잉간극수압이 어느 정도 소산된 다음 2단계 1.31 t/m² 하중재하 후에는 최대 0.71t/m² 정도 발생 후 계속적으로 소산되어 13,000분 경과시점으로부터 수평거리별



로 3개소 모두 유사하게 시험종료시 까지 약 0.05t/m² 정도로 수렴하는 것으로 나타났다.

4.1.2 압밀 침하량

모형토조의 하중단계와 시간경과에 따른 압밀침하 측정결과는 다음 그림 5에 나타내었다. 그림에서와 같이 시험기간동안 발생한 압밀침하량은 약 3.76cm 정도로 수렴상태를 보이고 있다. 측정결과에 대하여 쌍곡선법에 의해 침하해석을 실시하였으며, 그 결과 상관계수(R)는 0.9973, 최종예측침하량은 4.17cm로 나타났으며, 현재 발생침하량 3.76cm를 고려하면 잔류침하량은 0.41cm로 평균압밀도(U)는 90.2%정도로 평가되었다.

4.2 역학시험 결과

4.2.1 일축압축강도

염분농도별 재령일수에 따른 일축압축강도 변화를 그림 6에 나타내었다. 또한 염분농도별 재령일수에 따른 일축압축강도변화 및 재령일수별 염분농도에 따른 일축압축강도변화는 각각 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

그림에서와 같이 재령기간 경과에 따라 일축압축강도는 증가하며, 염분농도 증가에 따라 일축압축강도는 일정한 경향으로 증가하고 있다. 완전교란조건에서 염분농도

HYPERBOLIC METHOD	
LOCATION :	SAND DRAIN
PLATE NO :	
Regression Output:	
Constant	878.55
Std Err of Y Est	108.06
R Squared	0.9973
No. of Observation	43
Degrees of Freedom	41
X Coefficient(s)	0.307982836
Std Err of Coef	0.002525882
alpha=	878.55341
beta=	0.30799
So=	0.92cm
St=So+1/beta	4.17cm
St=	3.76cm
U(%)	90.24%
Sr=	0.41cm
t'(date)	0
t'(date)	20950
t'(day)=	20950

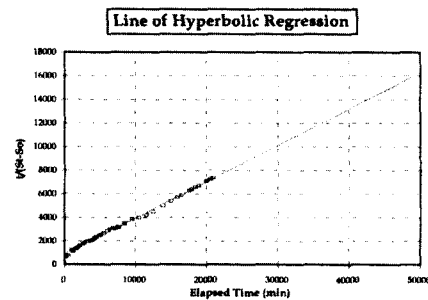
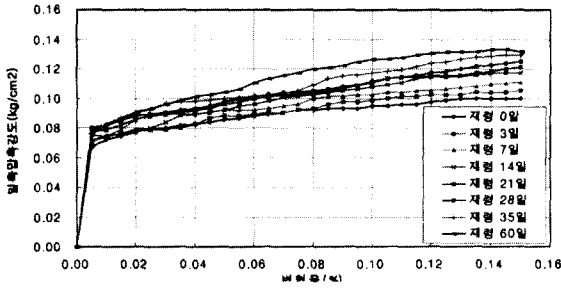
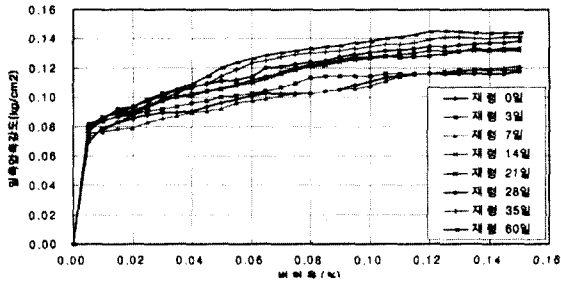


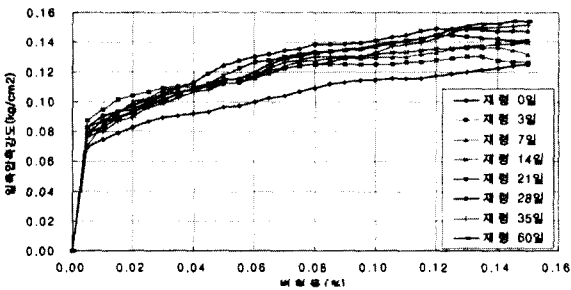
그림 5. 모형시험에 의한 침하측정결과 및 해석결과



(a) 염분농도(0%)인 경우



(b) 염분농도(17.5%)인 경우



(c) 염분농도(35.0%)인 경우

그림 6. 재령일수별 염분농도에 따른 일축압축강도 변화

구분에 따라 시료제작직후(재령 0일)의 일축압축강도(q_u)는 염분농도 0%조건에서 1.0 t/m^2 , 염분농도 17.5%조건에서는 1.17 t/m^2 , 염분농도 35%조건(일반적인 해수조건)에서 1.25 t/m^2 로, 해수조건에서의 염분농도인 35%조건에서의 일축압축강도는 담수조건의 경우와 비교하여 약 25%가 증대한 것으로 나타나 염분농도가 클수록 교란 초기에 확실한 강도증대효과가 있으며, 염분농도 증가에 따라 증가경향이 있는 것으로 나타났다.

염분농도 및 재령일수증가에 따른 강도증가는 재령 60일의 강도를 기준으로 재령 7일의 염분농도 0%조건에서 83.5%, 염분농도 17.5%조건에서는 84.0%, 염분농도 35%조건에서 88.3%으로 나타났으며, 재령 14일에서의 강도회복율은 60일 양생조건을 기준으로 염분농도 0%조건에서 85%, 염분농도 17.5%조건에서는 91%, 염분농도 35%조건에서 91%로 염분농도의 증가에 따라 강도회복이

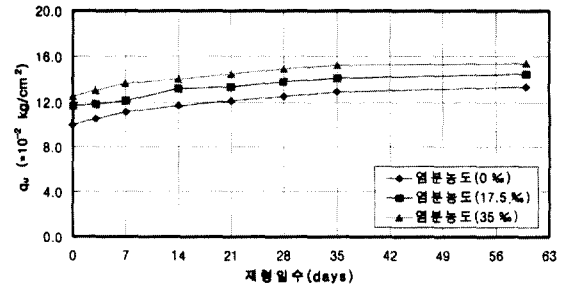


그림 7. 염분농도별 재령일수에 따른 일축압축강도 변화

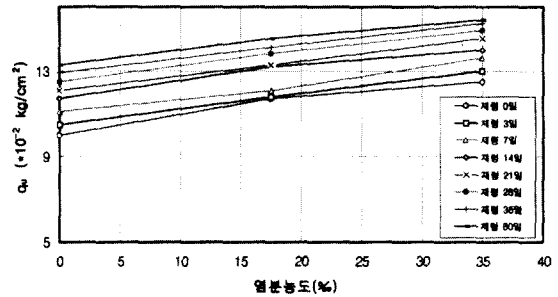


그림 8. 재령일수별 염분농도에 따른 일축압축강도 변화

크게 나타났다. 이와 같이 담수조건의 교란시료에서 염분농도가 증가할수록 강도회복현상이 빠르게 나타났다.

재령60일 경과 후의 일축압축강도는 0%조건에서의 1.33 t/m^2 , 17.5%조건에서는 1.45 t/m^2 , 35%조건에서 1.54 t/m^2 로 35%(해수의 염분농도) 조건에서의 일축압축강도는 0%(담수시) 조건과 비교하여 0.21 t/m^2 증가하여 약 16% 정도의 강도증대효과가 있으며, 초기의 상대적인 강도증대효과인 25%와 비교하면 다소 둔화된 것으로 평가될 수 있다. 이것은 염분농도 증가에 따라 강도회복이 빠르고 초기에 더욱 빠르게 진행되어가고 있음을 보여주고 있는 것이다.

4.2.2 표준압밀시험

표준압밀시험을 통한 염분농도 변화조건(0%, 17.5%, 35%)에 따른 압밀특성 변화는 그림 9와 같다.

그림에 나타낸 바와 같이 염분농도변화에 따른 표준압밀시험 결과에서와 같이 낮은 하중단계(약 1.0 kg/cm^2)에서 염분농도가 증가할수록 하중증가에 따른 간극비 변화는 작게 나타나 염분농도가 증가할수록 일정한 하중단계에서의 발생침하량이 작게 나타날 수 있음을 보여주고 있는 것으로 판단된다. 이와 같은 현상은 대상시료토 중에 염분농도가 증가할수록 텍스트로피 현상에 의해 강도가 회복되고 이에 따라 발생침하량이 감소되는 현상을 확인할 수 있게 된다. 높은 하중단계에서는 e-logp곡선이 시험과

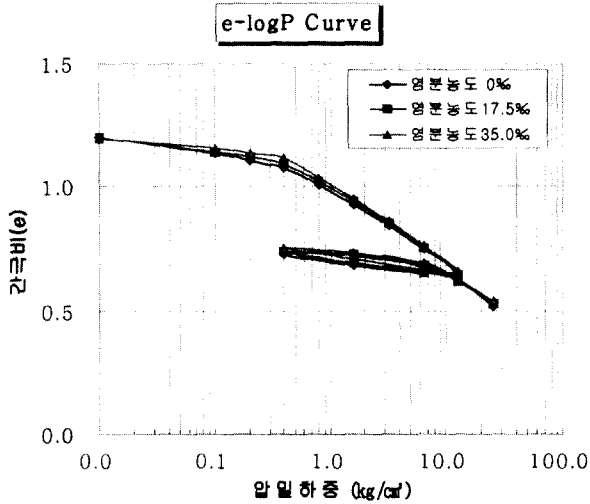


그림 9. 염분농도에 따른 표준압밀시험 결과(e-logP곡선)

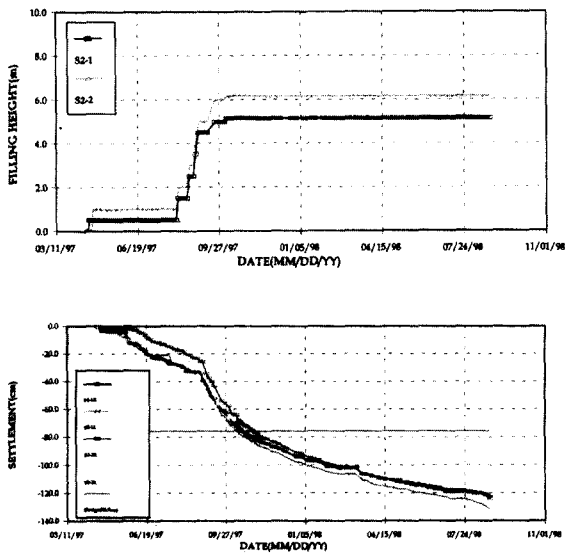
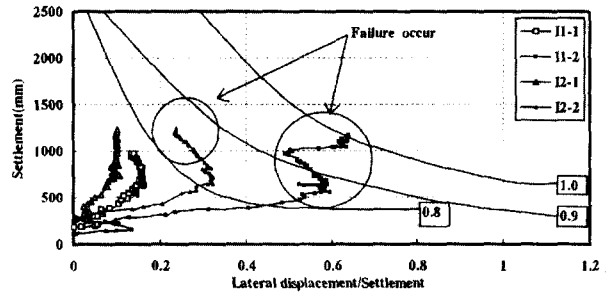


그림 10. 대심도 연약지반 도로성토 시공중의 침하관리 예

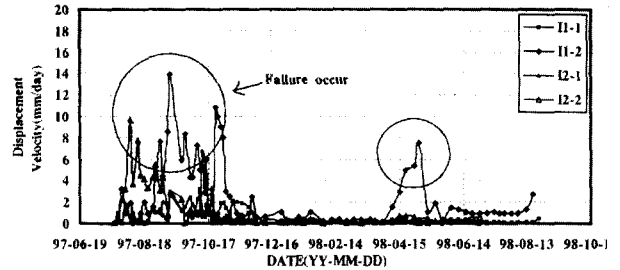
정중 오차로 여겨질 정도의 유사한 경향을 보이고 있다. 이와 같은 현상으로부터 텍소트로피 현상과 압밀특성의 일정한 상관관계를 추론할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 교란된 샌드파일 주변지반에서의 계측결과

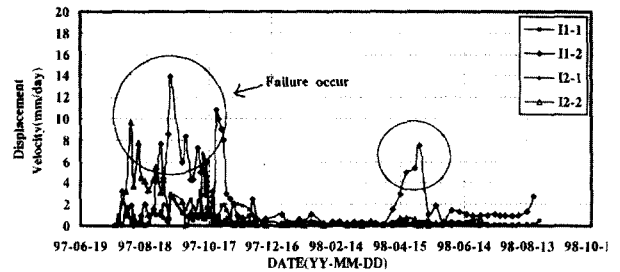
현장계측 수행지역은 지중 간극수중에 염분함유율이 없고, 샌드심의 영향이 작으며, 압밀층의 두께가 깊고 (18.5~23m), N치는 2~9정도의 연약지반상에 대규모 성토(16~17m)로 연직배수공법에 의해 샌드파일을 적용한 경북지역 내륙의 연약지반이다. 그림 10은 계획된 3단계 성토시공중 1단계 성토후 방치과정중 시간경과에 따른 지



(a) MATSUO-KAWAMURA'S METHOD



(b) KURIHARA'S METHOD



(c) TOMINAGA-HASHIMOTO'S METHOD

그림 11. 대심도 연약지반 도로성토 시공중의 안정관리 예

표면 침하판 측정결과에 의한 압밀침하량을 나타낸 것이다. 당초 설계 검토에서는 1단계 개량완료후 예상 침하량은 그림에 나타낸 바와 같이 약 80cm로 검토하였으나 실제 측된 침하량 100~140cm의 침하가 발생하고 침하발생 경향은 수렴하지 않고 지속적으로 증가하고 있다.

또한 그림 11은 경사계가 설치된 4개지역의 계측수행결과를 이용하여 안정관리 해석기법에 따라 분석한 결과이다. 그림에 나타낸 바와 같이 과도한 측방변위의 발생으로 파괴거동 양상을 보이고 있다. 이것은 연약지반의 성토구간에서 일반적인 파괴거동양상으로 평가가 가능하다. 이와 같은 파괴거동의 기본적 원인중 한 요소는 샌드파일 설치로 인해 주변지반의 교란으로 지지력이 감소하여 측방유동에 의한 활동파괴와 동반하여 텍소트로피경향이 지연된 상태에서 과도한 침하가 발생한 것으로 판단될 수 있다.

5. 분석 및 고찰

5.1 완전교란토에서의 압밀특성

4.1.2에서 쌍곡선법을 이용하여 침하해석을 실시한 결과와 시험종료시 추정압밀도 90.2%를 이용하여 모형토조 시험 조건에서의 압밀계수를 계산하면 연직압밀계수(C_v)는 $1.5 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 로 나타났다. 이와 같은 연직압밀계수 값은 표 1의 $1.1 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 와 비교적 유사한 것으로 평가되었으며, 모형토조의 초기조건(초기 간극비($e_0=1.81$))으로부터 계산된 예측 최종침하량은 약 4.8cm 정도로 측정치의 압밀도로부터 예측되는 최종예측침하량 4.17cm와 비교하면 0.63cm 정도 작게 나타났다. 이와 같이 실제침하량이 다소 작게 평가될 수 있는 사항은 본 시험에서의 낮은 하중조건(최대작용하중 1.31t/m^2)과 모형지반에서의 unit cell 개념의 시험토조의 구속조건에 기인할 수 있어 실제 상황과 차이가 발생할 수 있는 것으로 실제지반에서의 경계조건과 작용하중 증가에 따른 교란된 주변지반의 압축지수(C_c) 특성 파악이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

또한, 송(1991)과 천동(2000)에 의하면 샌드파일 설치시 공동확장이론(Vesic, 1972)에 의한 소성영역범위는 샌드파일 주변지반 전체를 의미하므로 샌드파일 설치시 주변지반 전체를 소성영역으로 평가하고 교란발생과 텍스트로피경향을 고려한 압밀특성 파악이 필요한 것으로 판단된다.

5.2 염분농도에 따른 텍스트로피 특성

염분농도 증가 및 재령일수 경과에 따라 실시한 일축압축강도 시험결과와 완전교란점토의 강도회복에 영향을 미치는 요소중에서 중요한 인자는 간극수중의 염분농도임을 확인할 수 있었으며, 간극수중에 염분 함유율이 높을 경우에는 지반교란 발생 초기에 텍스트로피현상이 더욱 활발하게 나타날 수 있을 것이다. 특히 샌드파일 시공지역이 해수중이거나 해사를 이용한 준설매립지반일 경우 또는 샌드파일 재료로 바다모래를 사용할 경우 샌드파일 설치시 교란된 주변지반의 강도회복은 내륙의 하성퇴적지반에서 보다 빠르고 크게 나타날 수 있는 영향요인이 될 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 표준압밀시험결과 지층내 간극수중의 염분농도는 압축특성에 영향을 주며 특히 샌드파일 설치시 주변지반의 교란정도 및 텍스트로피현상 정도에 따라 변화하는 강도 및 압축특성이 변화될 수 있고 특히 샌드파일 설치시

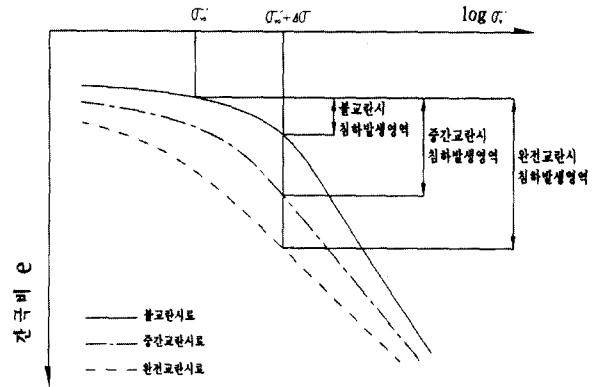


그림 12. 교란과 불교란 상태에 따른 침하발생영역 비교

주변지반의 교란정도 및 강도회복 조건에 따라 일정한 낮은 하중단계에서의 실측침하량은 계산침하량과 비교하여 매우 큰 차이가 발생할 수 있으며, 지반의 교란정도가 심할 경우 발생침하량은 더욱 크게 증가할 수 있게 된다.

이것은 샌드파일 설치시 주변지반의 교란정도 및 텍스트로피현상 정도에 따라 강도 및 압축특성이 다르게 나타날 수 있는 현상을 설명할 수 있다. 이와 같은 관계를 고려하여 그림 12에서는 원지반 조건에서와 같이 교란의 영향이 없는 조건의 불교란시료 조건과 완전 교란상태의 시료 조건으로 구분하여 지반의 교란정도에 따른 침하발생량이 차이를 보여줄 수 있음을 표현하여 상대적인 침하영역을 나타낸 것이다.

그림에서와 같이 일정한 하중단계(특히 낮은 하중단계)에서 불교란시와 비교된 교란시료에서 예상되는 발생침하량은 더욱 증가될 수 있으며, 샌드파일 주변지반의 교란정도와 텍스트로피 특성에 따라 발생침하량은 변화될 수 있음을 보여주는 것이다. 또한 대부분 성토시공중의 하중재하정도가 약 10t/m^2 내외임을 감안하면 압밀시험시 평가(최대 128t/m^2)되는 C_c 곡선에 의한 압밀침하량 보다는 시공과정 중 정확한 압밀침하량의 예측이 필요하므로 실제적인 하중단계(낮은 하중단계)에서 교란정도가 고려된 C_c 의 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5.3 교란된 샌드파일 주변지반에서의 압축특성

일반적으로 예민비가 큰 연약 점성토지반에 샌드파일을 설치할 경우 상재하중만을 가하는 프리로딩공법 적용시와 비교하여 압축특성이 다르게 평가될 것이다. 특히 교란된 주변지반에서 시간경과에 따라 강도회복현상이 발생하지 않는다면 발생침하량은 예측치(계산치)보다 커질 수도 있고, 해성퇴적 지반에서는 샌드심과 같이 수평배

수층의 영향으로 압밀지연 없이 개량을 완료하는 사례도 있다. 샌드파일 설치로 인해 교란된 주변 지반은 텍소트로피 영향 요소에 따라 강도특성 및 압축특성이 변화될 수 있는 것이다.

이와 같이 샌드파일 설치지반에서 과다 침하 발생원인은 깊은 심도로 분포하는 연약지층(김수삼, 2000)과 측방 유동에 의한 파괴 거동 뿐 아니라 교란지반에서의 압축특성 변화에 따른 영향요소로 파악되는 바 연직배수공법으로 샌드파일을 적용할 경우 지반교란의 고려는 지반조사를 통하여 지지력 및 압밀특성의 평가하는 것에 추가하여 샌드파일 설치로 교란된 주변지반의 시간경과에 따른 텍소트로피진행에 영향을 주는 요소의 존재여부 확인과 더불어 이에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

6. 결론 및 제언

지반의 교란과 텍소트로피 정도가 강도 및 압밀특성 변화에 미치는 영향요소와 텍소트로피특성에 영향을 주는 요소를 파악하기 위하여 실내모형시험 및 역학시험결과와 실측예의 분석결과를 다음과 같이 요약·정리하였다.

- (1) 낮은 하중단계(최대작용하중; 1.31t/m^2)의 완전교란 조건에서의 실내모형시험 결과로부터 평가된 압밀계수(C_v)는 원지반 조건의 불교란 시료의 특성과 유사하게 나타났으며, 모형토조 초기조건과 비교하여 평가한 발생침하량은 다소 작게 나타났다. 이와 같이 발생침하량이 작게 평가된 것은 토조의 구속조건의 영향에 의한 것으로 실제지반의 거동과 다르게 나타났을 것으로 판단된다.
- (2) 염분농도 변화(0, 17.5, 35%)에 따른 교란시료의 텍소트로피경향을 파악하기 위하여 일축압축강도시험을 실시한 결과 염분농도에 따라 재령 0일의 강도는 0% 조건에서 1.0t/m^2 , 35% 조건에서 1.25t/m^2 로 일반적인 해수조건에서 약 25%정도 개선된 강도증대효과가 있는 것을 확인하였으며, 재령 60일을 기준으로 하여 재령일수에 따른 강도회복율은 재령 14일 경과 후 0% 조건에서 85%, 35% 조건에서 91%로 나타나 염분농도가 증가할수록 시간경과에 따른 강도회복율 또한 크게 나타났다.
- (3) 염분농도변화에 따른 표준압밀시험결과 낮은 하중단계(1.0 kg/cm^2)에서 염분농도가 증가할수록 하중증가에 따른 간극비 변화는 작게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 대상 시료토중에 염분농도가 증가할수록 텍소

트로피 현상에 의해 강도가 회복되고 이에 따라 발생 침하량이 감소되는 현상을 확인할 수 있게 된다. 또한 높은 하중단계에서는 e-logp곡선이 시험과정중 오차로 여겨질 정도의 유사한 경향을 보이고 있다.

- (4) 대부분 성토시공중의 하중재하 정도가 약 10 t/m^2 내외 임을 감안하면 압밀시험시 평가(최대 128 t/m^2)되는 C_c 곡선에 의한 압밀침하량 보다는 시공과정 중 정확한 압밀 침하량을 예측하기 위해서는 실제적인 하중단계(낮은 하중단계)에서 지반교란정도가 고려된 C_c 의 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
- (5) 지반의 교란정도 및 텍소트로피 현상에 따라 지반의 지지력 특성 및 압축특성이 변화되므로, 일정한 하중단계(특히 낮은 하중단계)에서 불교란시료와 비교된 교란시료에서의 발생 침하량은 더욱 증가될 수 있으며, 특히 샌드파일 주변지반의 심한 교란과 텍소트로피 현상에 영향을 주는 요소가 적을 경우 발생 침하량은 더욱 크게 발생할 수 있는 것으로 판단된다.
- (6) 일부의 샌드파일 설치지반에서 발생하는 침하량과 과다 발생원인은 측방유동에 의한 파괴 거동 뿐 아니라 교란지반에서의 압축특성 변화에 따른 영향요소의 고려가 필요한 것으로 여겨지므로 연직배수공법으로 샌드파일을 적용할 경우 압밀특성 변화에 영향을 주는 것으로 추론할 수 있는 텍소트로피 현상에 대한 추가 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김수삼(2000), "해양공간 건설기술의 전개", 현대건설(주), 준설매립지반의 특성 및 지반개량기술 특별세미나 논문집, pp.152~155
2. 송정락(1991), "공동확장이론에 의한 sand pile 항타시의 과잉간극수압 예측", 대우엔지니어링 기술보, 제 8권 제 1호, pp.3~10
3. 천병식, 여유현(2000a), "공동확장이론에 의한 sand pile 주변지반에서의 압밀특성에 관한 연구", 한국지반공학회 2000년 봄학술 발표회, pp.231~238
4. 천병식, 여유현(2000b), "Sand Pile 주변지반에서의 지반개량특성에 관한 연구", 한국지반공학회논문집, 제16권 제5, pp.203~212
5. 천병식, 여유현(2000c), "Sand Pile 주변지반에서의 공동확장이론에 의한 과잉간극수압 특성 연구", 대한토목학회논문집, 제20권 5-C호, pp.429~439
6. 朴永穆(1994), "低平地に堆積する海性粘土の土質特性と鉛直排水工法による地盤改良に關する研究", 博士學位論文, 佐賀大學校大學院 pp.1~229
7. Hunt(1986), Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation, McGraw-Hill Book Company, pp236~240
8. T.S.Nagaraj, B.R.S. Nurthy, A. Vatsala, R.C.Joshi(1990), "Analysis of Compressibility of Sensitive Soils", ASCE, pp.105~118
9. Vesic, A. S.(1972), "Expansion of Cavities in Finite Soil Mass", J.of Soil Mechanics and Foundations Div, ASCE, Vol.98, No.SM3, Mar. pp.265~290

(접수일자 2000. 11. 1)