

Vertical Drain에 의해 개량된 점토지반의 압밀특성 Consolidation Characteristic of Clay Improved by Vertical Drain

곽수정¹⁾, Soo-Jeong Gwak, 박종덕²⁾, Jong-Deok Park, 전용백³⁾, Yong-Baek Jeon

- ¹⁾ 남원건설 엔지니어링 토질부 이사 P.E Engineer, Namwon Engineering Co, Dept. of Soil
²⁾ 충청전문대학 토목공학과 교수 Professor, Dept. of Civil Eng., Junior Coll. of Chungcheong
³⁾ 대구대학교 공과대학 토목공학과 교수 Professor, Dept. of Civil Eng., Daegu Univ.

SYSNOSIS : The design of vertical drain installations may seem simple in theory but is connected with a great number of uncertainties from a partical point of view. The paper deals with consolidation characteristic of dredged clay improved by vertical drain. As the result, it is found that The consolidation characteristic is can be the stress concentration about 1.8 times larger than before the consolidation around sand drain.

KEYWORDS : Vertical drain, Stress concentration, Sand drain, Consolidation characteristic

1. 서 론

Vertical Drain에서 압밀이론이 적용되고 있으나, 지반성상의 복잡한 불균질성, 토질정수평가의 부정확성, 시공에 의한 Drain주변 점토의 교란영향, Well Resistance, 드레인 강성등에 의한 복합작용이 나타난다. 이러한 문제에 대하여 많은 이론적 연구와 실험적 연구가 행해지고 있으며 교란의 문제는 압밀거동이 복잡하여 Vertical Drain의 유효성을 이해하는데 주요인자로 인식하고 있다. 그러나 Drain의 강성을 고려하여 압밀이론을 전개하는 강성압밀의 입장에서 압밀기구는 다소 부족하여 제반요소들이 변화하는 Mechanism에 대한 고찰을 실시하였다.

2. 실내모형실험

2.1 토질조건

실험에 이용한 시료는 광양항에서 채취한 남해안 준설편토를 실내에서 재성형하였고, 그 물리적 성질은 (표2.1)에 표시하였다. 시료의 작성순서는 점토를 slurry 상태에서 2개월 방치한후 1.0kg/cm²의 하중력을 재하하여 함수비조절을 행하였다.

표2.1 물리적성질

초기함수비 w_n (%)	액성한계 w_L (%)	소성한계 w_s (%)	액성지수 I_p	토립자 밀도 ρ_s	#200체 통과량(%)
122.19	116.5	45.4	71.1	2.623	96

2.2 실험방법

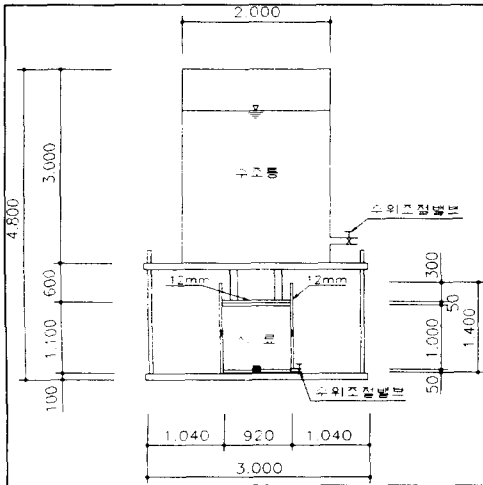


그림 2.1 실험장치 단면도

이 실험에서 인위적 조작용 점토의 교란을 최대한 줄이기 위해서 시료성형시 아크릴판을 이용하여 Sand Pile을 형성하였으며 Sand의 흐트러짐을 방지하기 위하여 팩망을 이용하여 제작사용하였고 점토상하단에 P.E Mat와 Sand Mat 층을 두어 양면배수가 이루어지도록 하였다.

재하장치는 $1.0\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 재하할수 있도록 제작하였으며 하중단계는 4단계로 나누어 재하하였다.

점토의 높이는 약100cm정도이며 여기에 사용한 드레인의 직경은 $d_w = 50\text{mm} \sim 70\text{mm}$ (드레인비

$n = d_e / d_w = 7 \sim 9$)이며 실험모델의 범위는 1/10정도의 축척에 상당한다.

2.3 실험결과와 고찰

2.3.1 실험결과와 개요

실험에서 얻은 압밀 최종상태의 기본 Data를 이용하여 침하·시간관계, 함수비·간극비·변형분포, 연직응력의 경시변화, 유효응력의 경시변화등을 표시하였다.

2.3.2 시간·침하곡선

각 실험 CASE에서 얻은 시간 침하곡선을 (그림2.2)~(그림2.3)에 표시하였다. 이것으로 3가지 침하곡선을 비교하였으며 TST3과 RST4 보다는 SST1의 침하곡선에서 초기압밀지연현상이 발생되고 있다.

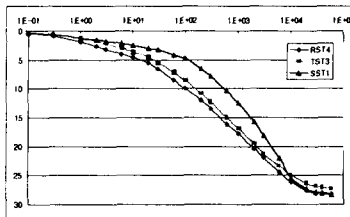


그림 2.2 시간-침하곡선

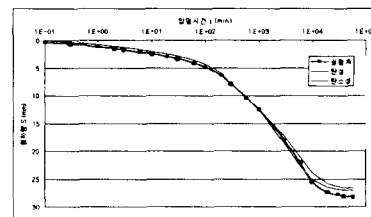


그림 2.3 SST1 시간-침하곡선

2.3.3 함수비·간극비·변형분포

(1) 함수비의 분포성상

시험은 각각의 모형지반을 3가지로 함수비 분포곡선을 구하였으며 실험 CASE는 SST1, TST3, RST4의 3개 실험에서 얻은 함수비의 반경방향 분포를 (그림2.4)에 표시하였으며 그림의 종축은 함수비 w , 횡축은 Sand Drain의 외주면(배수면)까지 반경방향의 거리를 표시하고 있다. 함수비는 반경방향의 모양으로서 배수면측 부근에서 낮게 나타난다. 즉 함수비 시험결과 층별 data를 보면 하층부에서 분포경향이 작게 나타난다. 상층부의 함수비 분포는 배수면측에서 함수비가 저하하고, 배수거리비로 표시한 비배수

면측에서 함수비 저하가 나타나고, 전체로 보면 중앙부의 함수비가 \cup 의 산형의 형상으로 나타나고 있다.

(2) 간극비의 분포상태

(그림2.5)의 비교에서 함수비 w 와 간극비 e 는 선형 비례관계에 있으며, 간극비 분포형은 전술의 함수비의 분포형과 유사한 분포를 하고 있다. 배수변부근과 비배수면측 간극비의 최대차를 보면 SST1의 경우 0.15전후, SST3의 경우 0.19전후, RST4의 경우는 0.22전후에 달하고 있다.

(3) 체적변형 ϵ_v 의 분포성상

(그림2.6)에서 나타난 경향은 각 CASE의 변형 ϵ_v 의 절대치는 각기 동일하게 나타난다. SST1~RST4간의 압축시간의 차이에 의한 분포형상의 차이가 확인되어지고 있으며, 체적변형의 분포형은 장기간 동안 일정한 형으로 나타난다. 편의상 장기간의 압밀을 행하는 경우에 있어서 체적변형이 불분명하고, 이러한 실험결과는 탄성이론에 의한 압밀 최종상태에 변형을 고려하기는 곤란하다.

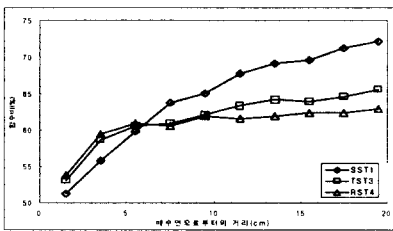


그림2.4 함수비의 분포성상

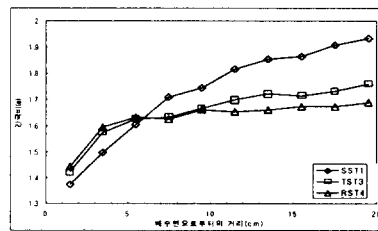


그림2.5 간극비의 분포상태

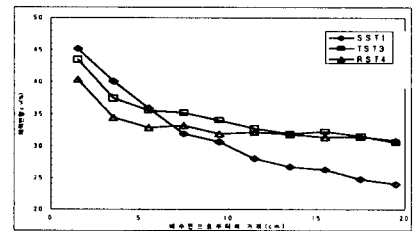


그림2.6 체적 ϵ_v 의 분포성상

(4) 반경방향의 분포성상

(그림2.7)는 ϵ_r 의 반경방향 분포를 표시한다. 배수면측의 변형이 크게 발생하고 배수면에서 멀어질수록 부의 변형에 변화하는 경향이 있다. 점토의 구조골격이 탄성을 가정한 이론에서 압밀초기에 같은 변형상태가 발생한 후 압밀 종료시는 $\epsilon_r = 0$ 와 같은 상태로 회복한다. 즉 실제의 점토는 탄성성분이 탁월하고 변형은 잔류하는 것을 표시하고 있다. 이 결과는 반경방향의 응력 σ_r 도 점토 요소내에 분포하는 것을 표시하고, 그 크기는 배수면측에서 커지고 있다.

(5) Drain 주변 점토의 응력집중

(그림2.8)은 ST1의 연직전응력의 측정결과를 표시한다. 연직전응력의 측정은 sand drain에서 응력집중 성분의 영향은 배제하고, drain직경 $\phi 70\text{mm}$ 의 경우에서 행하였다. 실험은 용기의 저부를 특수가공하여 그 중심부에 65mm의 토압계를 매설하였으며 토압계의 면적과 sand drain의 면적비는 약 116%이다. (그림2.8)에서 압밀초기를 제외하고 drain 주변 점토에 작용하는 연직전응력은 단조증가하고, 최종치는 초기치의 1.8배 이상 도달된다.

(6) 일축압축강도의 반경방향분포

모형지반에서 반경방향의 압축강도분포를 조사하는 것은 간접적으로 응력분포의 유무를 알 수 있는 것이다. (그림2.9)은 배수면측을 중심으로 Vane전단시험기를 이용하여 시험에서 얻어낸 일축압축강도 q_u 를 반경방향분포로 나타내고 있다. 그림을 보면 q_u 값은 반경방향에 비균일분포하며, 배수면측에서

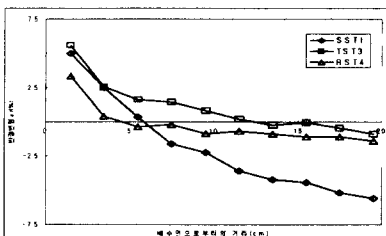


그림2.7 반경방향의 변형분포

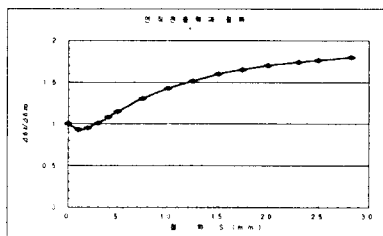


그림2.8 드레인 주변 응력집중

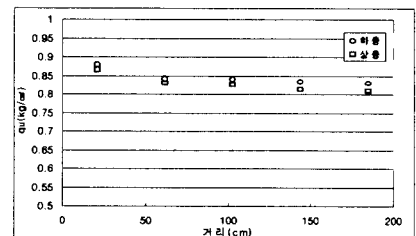


그림2.9 일축압축강도의 반경방향분포

높다. 특히 배수면 부근의 q_u 의 증가 경향은 함수비, 간극비와 체적변형 등의 반경방향의 분포경향과 일치한다.

3. 실험결과해석

3.1 수치해석에 이용한 구성식

Drain주변 점토에서 응력집중 과정을 조사한 결과이며, 압밀초기를 제외한 연직전응력은 압밀진행에 따른 단조증가로 판명되었다. 점토는 선형탄성구성식과 수정Cam-Clay이론에 기초하여 탄소성구성식을 이용하였다. 수정Cam-Clay이론으로 항복함수 f 는 다음과 같은 형태로 표시하였다.

$$f = p \left(1 + \frac{\eta^2}{M^2} \right) - p_{cy} = 0 \quad (1)$$

여기서, p : 평균유효응력,

$$\eta = q/p$$

$$q = \sqrt{1.5 S_{ij} S_{ij}},$$

$$S_{ij} : \text{편차응력 } (= \sigma'_{ij} - p \delta_{ij})$$

M : critical state line의 항,

p_{cy} : 항복곡면의 p 축상($q = 0$)의 값

3.2 계산모델 및 토질파라메타

3.2.1 계산모델

압밀과정에서 점토내부거동을 검토하기 위해서 실험CASE SST1, TST3, RST4를 유한요소법으로 수치해석을 행하였다. 해석은 축대칭조건에서 행하였으며 점토의 구성식으로는 선형탄성모델과 앞의 Cam-clay Model을 이용하였다. 해석은 점토를 내주와 외주의 수평방향변위를 고정하고 연직변형조건으로 하였다. 배수면은 점토내주면으로하고 있다. 점토요소는 1층으로 반경방향을 19요소로 분할하고 있다. 재하는 연직변형조건으로 강한 재하판으로 재하하여 재하판과 점토요소의 경계는 Joint요소를 이용하고 있다.

(절점수 : 80, 요소수 : 57, 점토요소 : 1~19, Joint.요소 : 20~38, 재하판요소 : 39~57)

3.2.2 토질파라메타

탄성해석과 탄소성해석에 이용한 파라메타는 다음과 같다.

표-3.1 해석에 적용한 토질 파라메타

탄성해석 파라메타	탄소성해석 파라메타	
$E = 6.1 \text{ Kg/cm}^2$	$\lambda = 0.360$	$\chi = 0.036$
$\nu = 0.333$	$M = 1.505$	$\sigma_{z0} = 0.5 \text{ Kg/cm}^2$
$k = 1.04E10^{-5} \text{ cm/min}$	$Ko = 0.50$	$\nu = 0.333$
$k = c_v m_v r_w$	$\lambda_k = 0.36$	
$r_w = 0.001 \text{ kg/cm}^3$	$ko = c_v m_v r_w = 3.025E10^{-5} \text{ cm/min}$	
$c_v = 0.102 \text{ cm}^2/\text{sec}$	$r_w = 0.001 \text{ kg/cm}^3, c_v = 0.102 \text{ cm}^2/\text{sec}$	

3.3.3 해석결과

실험 RST4에 대한 탄소성해석에서 얻은 함수비 ω , 간극비 e , 체적변형 ϵ_v , 반경변형 ϵ_r 의 반경방향의 분포에서 나타난 함수비와 간극비 분포의 해석결과를 보면 실험치와 해석치는 양호하게 일치하고 있다. 실험결과 배수면부근에서 함수비와 간극비가 급격히 저하하고 정량적으로 보면 일치도가 높다. 체적변형 해석결과와 실험결과를 비교한 결과 양자의 입도분포 형상은 양호하게 일치하고 있으며 배수면 주변의 체적변형이 크고 비배수면측의 약 1.5배 이상에 달하며, 배수면측에 응력집중이 발생하는 것으로 표현된다. 반경방향 변형 해석결과와 시험결과는 같은 양상이다.

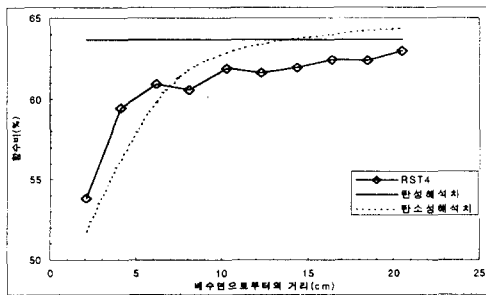


그림 3.1 함수비의 반경방향 분포

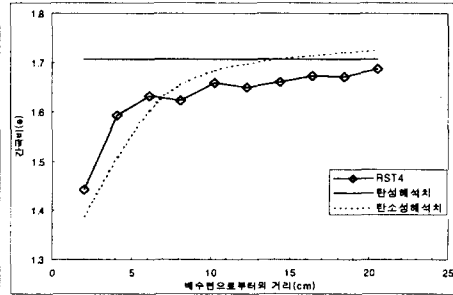


그림 3.2 간극비의 반경방향 분포

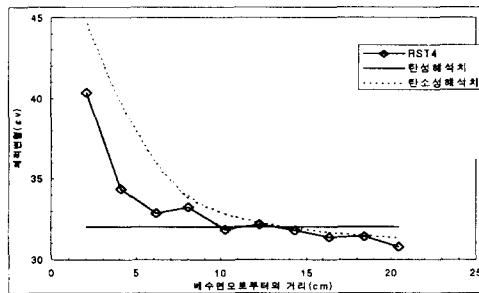


그림 3.3 체적변형의 반경방향 분포

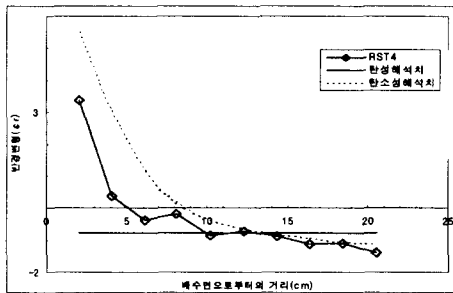


그림 3.4 반경변형의 반경방향 분포

C_v 가 일정한 조건의 계산에서 탄성해석과 탄소성해석을 비교한 결과 탄성해석에서 압밀진행이 다소 빨라지는 경향이 있으나 실험치와 해석치를 비교하면 탄소성해석치는 실험치와 거의 일치하고 있다. 한편, 탄성해석치와 실험치의 압밀곡선은 압밀후반에서 양자곡선이 확장되는 경향이 있다. 이러한 결과는 Vertical Drain에서 압밀메카니즘은 실제 지반에서 입밀이론과 해석치에 의한 탄성압밀론과는 서로간에 차이를 있음을 보여주고 있다.

SST1의 실험에서 얻은 연직전응력과 유효응력비의 경시변화는 탄소성해석결과와 실험치를 그림 3.6에 비교하였으며 침하량이 증가하면서 전반적으로 단조증가하고 있다.

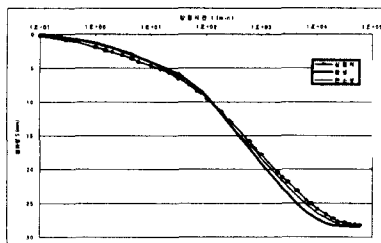


그림 3.5 실측치와 해석치의 압밀침하량 비교

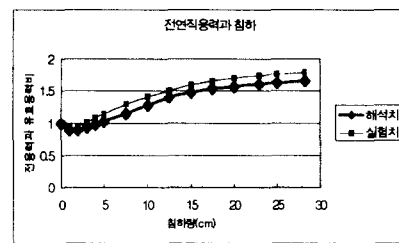


그림 3.6 배수면주변 점토의 연직전응력과 침하관계

4 결 론

Vertical Drain으로 압밀모형실험, 탄성 및 탄소성 유한요소법으로 시뮬레이션해석을 하였으며 해석 결과와 실험결과를 비교검토하여 얻은 결론은 아래와 같다.

- (1) 1차원 압밀과 거의 같은 시간-침하관계를 얻기 위해서 탄성해석과 탄소성해석 및 구심방사류 압밀 해석을 실시하였고 양자의 해석에서 얻은 시간-침하와 관련한 전반적인 차이가 없는 것으로 나타났다.
- (2) 탄소성해석결과 반경방향변형의 분포 및 배수면측에서 응력집중현상은 드레인주변에 과압밀점토영역을 형성한다.
- (3) 배수면 근처의 점토에 나타나는 응력집중은 압밀초기를 제외하고 압밀과정동안 큰원을 통하여 단조 증가한다. 이 점토의 탄소성압밀거동은 비배수면측의 점토응력을 완화하고 반경방향의 응력은 배수면측으로부터 불균일 분포로 나타나고 있다.

* 참고문헌

1. “광양항 컨테이너 부두공사 계측종합 보고서”, 1997. 3, 동아건설산업(주).
2. “광양항 1단계(2차) 개발 실시설계 보고서 제5부”, 자료편(4), 1993.5, 한국컨테이너 부두공단.
3. Aboshi, H. H. Yoshikuni and T. Uchibayashi “Stability of Soft Clay Founddations underneath Embankment”, Consolidated by Means of Card-board Drains.
4. Barron, R. A., “Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells Trans.”
A.S.C.A., Vol. 113, No. 2346, pp. 718~754, 1948.
5. Biot, M. A., “General Theory of Three dimensional Consolidation”, Journ. Appl.
Phys., Vol. 12, pp. 155~164, 1941.
6. Onoue, A. “Consolidation by Vertical Drains Talking Well Resistance and Smear into Consolidation”, Soils and Founddations, Vol. 28, No. 4, JSSMFE, pp. 165~174, Dec. 1988.
7. Hansbo, S., “Consolidation by Vertical Drains Fine Grained Soils by Prefabricated Drains.”
Proc. 10th ICSMFE, 12/22, pp. 667~689, 1981.