

Sand Drain에 의한 점성토의 압밀 특성 A Study on Consolidation Characteristics in Marine Clay by Sand Drain

전용백*, 곽수정**
Yong-Baek Chon*, Soo-Jeong Gwak**

<Abstract>

The analysis about consolidation characteristic in soft clay has been depending one-dimension consolidation analysis. but, drain and undrain zone are explicated as homogeneous by consolidation behavior following consolidated settlements in soft clay.

- 1) Established sand drain in soft clay in many types, and measured water content, unconfined compression strength, vertical stress, horizontal stress, vertical settlement, pore water pressure.
- 2) Arranged the result from the test and numerically explicated effective stress, total stress, and effective stress path at the drain and undrain zone.
- 3) We also analyzed and compared elastic and elastic-plastic in soft clay using measured data. The result analyzed does not approach to a special theory, but, it is well in accord with the result of other investigator's study in the same condition.

Key words : sand drain, Marine Clay, consolidation, behavior, drain

1. 서 론

Sand drain에 의해 개량된 연약지반 내부의 배수특성과 압밀하중에 의한 응력-변형분포는 균등하지 않으므로, Barron이 제안한 연직 배수에 의한 해석법으로는 압밀 메카니즘을 예측할 수는 없다.

탄성압밀론에 의한 최종압밀상태에서 응력-변형은 균등하게 분포하고 있지만 실제 지반에

서는 배수면 부근에서 응력 집중이 두드러지게 발생되고 있다. 이 현상이 점토의 탄소성 거동에 의한 것인지, 또는 드레인 타설시 점토의 교란에 의한 것인지는 판단할 수 없는 상태이다.

연직 배수공법에 의해 개량된 연약지반에서의 압밀 진행속도는 이론에서 구해진 압밀진행 속도 보다도 지연되는데, 그 이유 중 하나로 드레인 타설시 점토교란의 문제가 지적되어 이

* 정회원, 대구대학교 건설환경공학부 교수, 工博
TEL: 053)850-0000, HP: 011-547-8652
E-mail: Yongbaek@biho.daegu.ac.kr

**지한엔지니어링(주)대표, 工博, 기술사
TEL: 02)597-4530, HP: 011-336-2701
E-mail: gsj2060@chollian.net

* Prof. Division of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Daegu University, Ph.D

**CEO. Jihan Engineering Co.,Ltd, Ph.D, Professional Engineer

방면으로 많은 이론적 연구와 실험적 연구가 수행되었다. 드레인 타설시 교란문제는 압밀거동의 해석을 복잡하게 만드는데, 샌드 드레인에 의해 개량된 지반으로부터 얻어진 응력-변형분포는 시공시 교란의 영향이 포함되어 압밀해석에 큰 장해가 되고 있다.

샌드 드레인에서 점토의 압밀거동은 배수방향과 변형방향이 다르므로 1차원 압밀과는 다르고 복잡하다. 샌드 드레인에서는 점토의 압밀거동을 상세하게 조사할 필요가 있으며, 또한 모형실험을 통하여 압밀거동을 파악할 필요가 있다.

압밀 모형실험을 위하여 대구시 범어동 소재 대일공업사에서 실험장치를 제작하였으며, 이 실험장치는 크게 나누어 물 하중장치, 재하판, 원통형 토조, 배수장치, 일본 KYOWA제품인 로드셀 토압계, 간극수압계, 각종 배선장치로 구성되어 있으며, 측정장치로는 일본 TML사의 TDS-302 Data Logger에 PC컴퓨터를 연결하여 장기간에 걸쳐 실험을 수행하여 얻어진 자료를 바탕으로 타 이론과 분석, 고찰하였다. 실험에 있어 점토의 불균질성과 교란의 문제를 최대한 배제하였으며, 변형은 K_o 등연직 변형으로, 배수는 내측의 방사류 방향으로 배수되어 압밀이 진행되는 것으로 보고 모형실험을 통해 압밀 메카니즘을 연구하였다. 또한 압밀과정에서 발생되는 점토의 탄소성 거동을 명확히 하고자 배수면으로부터 비배수면까지 응력-변형의 압밀 메카니즘을 압밀 모형실험으로 고찰, 분석하였다.

2. 실내모형 실험

2.1 시료

실험에 이용한 시료는 광양항에서 채취한 남해안 점토로서 실내에서 재 성형하여 실험에 이용하였으며, 시료의 함수비 조정작업을 위해 점토를 slurry 상태에서 #200체를 통과시켜 조립분을 제거하고, 함수비를 액성한계의 약 2배인 230%정도로 변화시킨 후 탈기조에 넣어서 24시간 진공탈수 시킨 시료를 사용하였다. 본 실험에서는 함수비를 변화시킨 점토 slurry를 지름 920mm, 높이 1,200mm의 원통형 압밀 용기에 넣어 2주간 자중압밀 시킨 후 하중을 재하하였다.

시료의 물리적 특성을 알아보기 위해 연경도시험, 함수비시험, 비중시험등을 실시하였으며, 점토시료의 물리적 특성은 액성한계 120.3%, 소성한계 45.4%, 액성지수 71.1, 토립자밀도 2.623이다.

샌드 드레인에 사용한 모래는 주문진 표준모래를 시료로 사용하였으며, 시료의 물리적 특성을 알아보기 위해 체분석시험, 최대·최소건조단위중량시험, 비중시험 등을 실시하였다. 본 실험에 사용된 모래시료의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

체분석시험은 KS F2301 규정에 따라 #4, #10, #20, #40, #60, #140, #200체를 사용하여 USCS에 의하여 흙을 분류하였으며, 입경가적곡선은 Fig. 1과 같다.

Table 1. 시료의 물리적 성질

시험 항목	토질 정수	시험 항목	토질 정수
D_{10} (mm)	0.39	e	0.71
D_{30} (mm)	0.47	G_s	2.63
D_{60} (mm)	0.61	$\gamma_{d\max}$ (g/cm^3)	1.83
C_u	1.54	$\gamma_{d\min}$ (g/cm^3)	1.38
C_g	0.92	γ_d (g/cm^3)	1.54
e_{\max}	0.91	D_r (%)	42
e_{\min}	0.44		

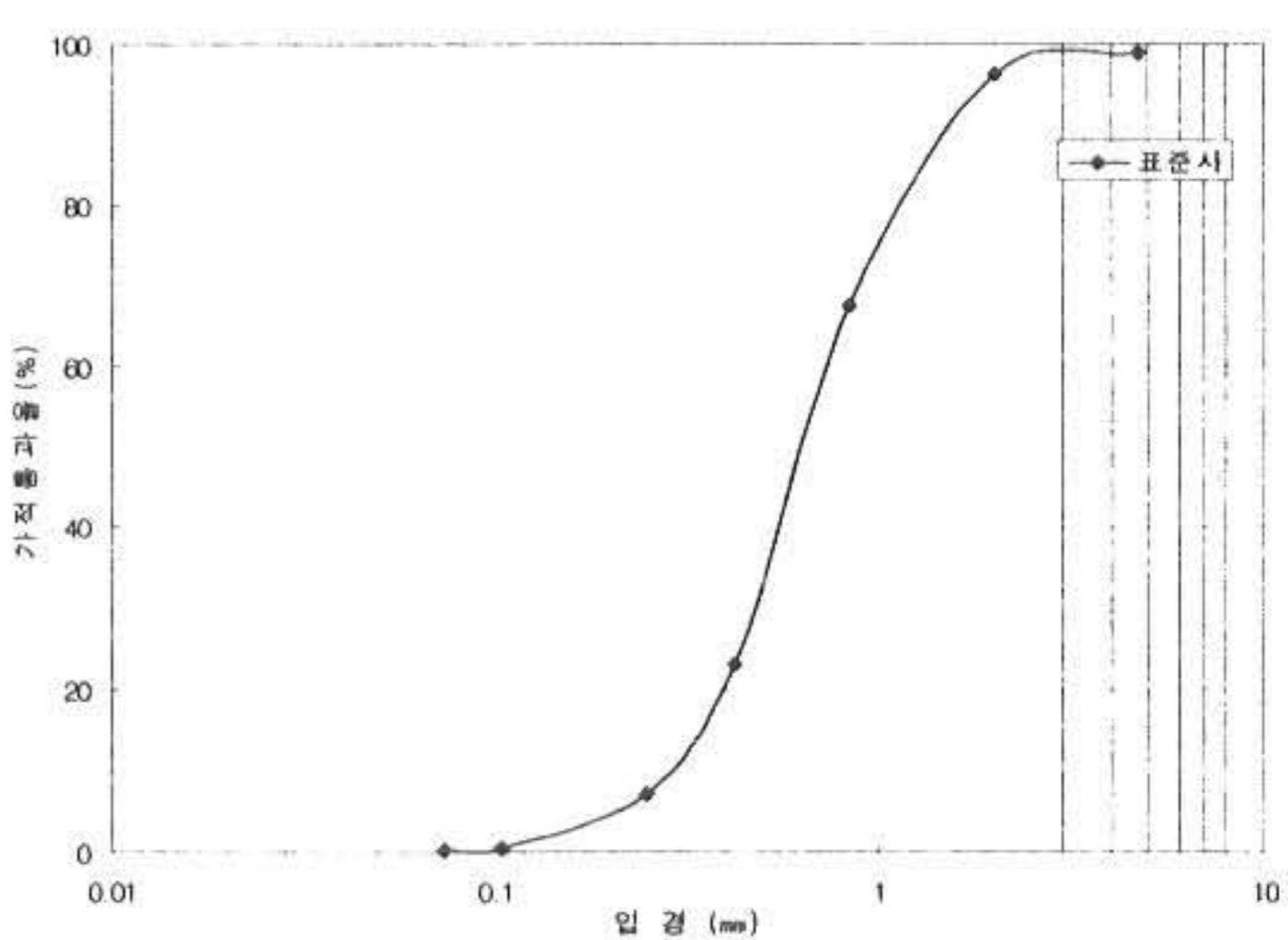


Fig. 1 시료의 입경가적 곡선

2.2 실험장치

압밀모형 실험장치는 Fig. 2와 같이 12mm 강판을 이용하여 1,200mm×2,400mm의 크기로 원통형 압밀실험장치를 제작하였다. 제작된 원통형 압밀실험장치를 원형으로 제작하기 위해 기계제작회사에서 정밀제작기를 이용하였으며, 하부에는 12mm 철판을 원형으로 절단하여 용접이음하여 물이 새지 않도록 제작하였다.

압밀용기의 기울어짐을 방지하기 위해서 바닥받침은 I형강을 사용하여 상부에 설치되는 재하대와 압밀용기 바닥에 설치한 받침대를 격자형으로 제작하였다. 상부 재하대와 압밀용기내 점토를 재하할 수 있는 재하판으로는 원형철판을 사용하여 사각강관을 연결하였으며, 재하시 압밀원통에 마찰이 생기지 않도록 압밀용기의 원통형 지름보다 작게 설계되었다.

물하중 재하장치는 하중재하시 재하하중의 손실이 생기지 않도록 하기 위해서 지주강봉을 사용하였다. 강봉의 위치는 받침부 재하틀 사각 모서리에 4개를 설치하였으며, 강봉을 따라 재하대가 자유 낙하될 수 있도록 원통형 볼 베어링을 설치하였다.

압밀시험시 연직응력을 측정하기 위해서 압밀용기의 바닥 중앙에 $\phi 65\text{mm}$ 토압계를 설치하였고, 수평응력을 측정하기 위해서 시료용기 중간 높이에 $\phi 65\text{mm}$ 토압계 3개를 120° 각도로 설치하였다. 압밀시 발생되는 간극수압을 측정하기 위해 간극수압계를 점토와 드레인재 내에 설치하였다.

실험에 사용된 측정장치는 Table 2와 같다.

Table 2. 측정장치 종류 및 설치위치

측정장치	규격	설치수량	설치위치
연직토압계	$\phi 65$ load cell	1	바닥 중심부
수평토압계	$\phi 65$ load cell	3	저면으로부터 높이 50cm
간극수압계	$\phi 34$ BP-2KB	4	점토내 상, 중, 하 및 드레인 중앙부
침하계	1/100 dial gauge	2	재하판 상부

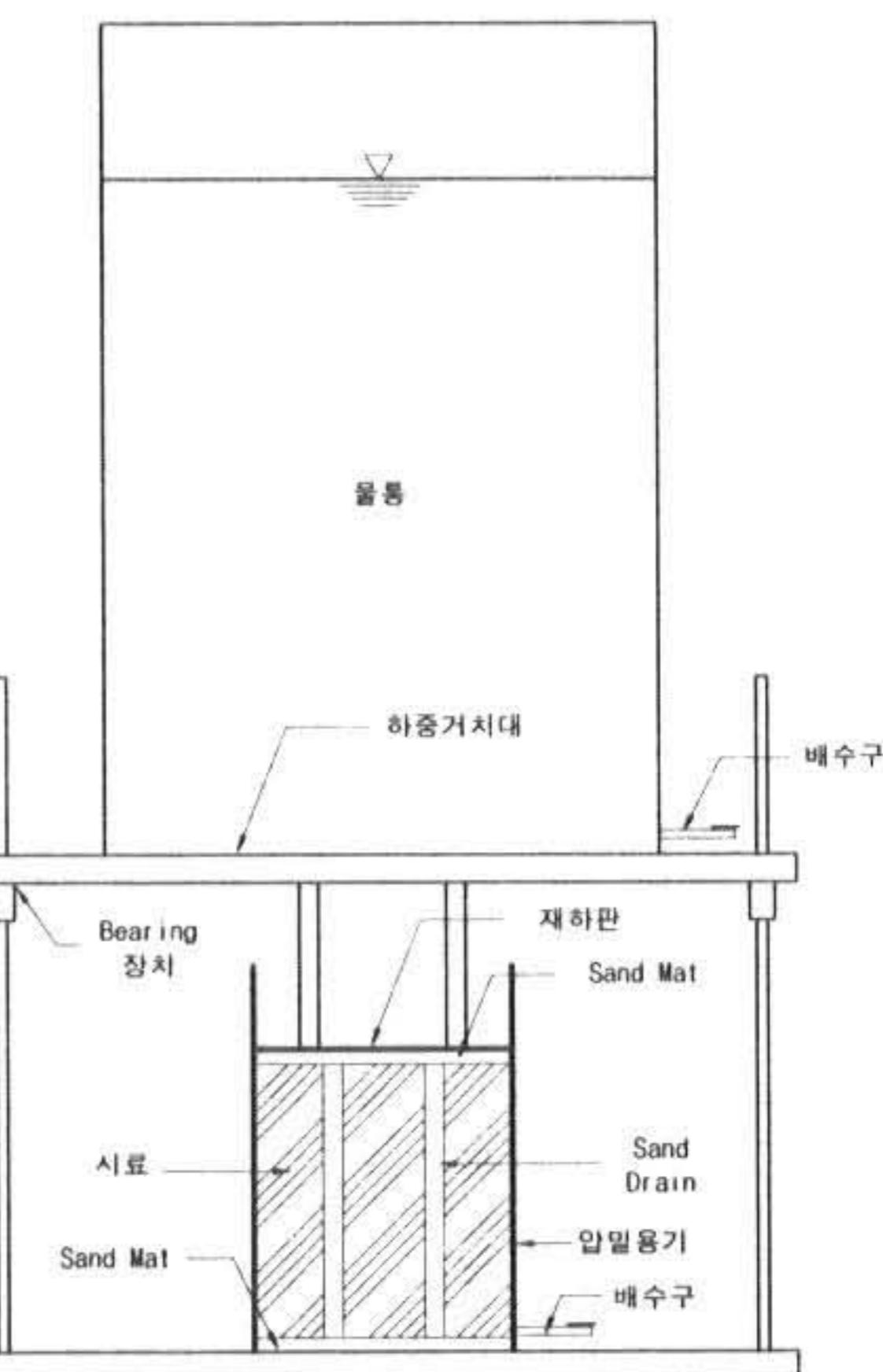


Fig. 2 모형실험장치 측면도

2.3 실험 방법

(1) 실험 case

모형실험 초기상태에서 점토의 높이는 약 1,000mm정도이며 지름은 920mm로서 Sing Sample Test의 경우 드레인 간격과 드레인 지름과의 비를 n값으로 표시하면 n=13 정도이다.

드레인 설치는 Fig. 3과 같다.

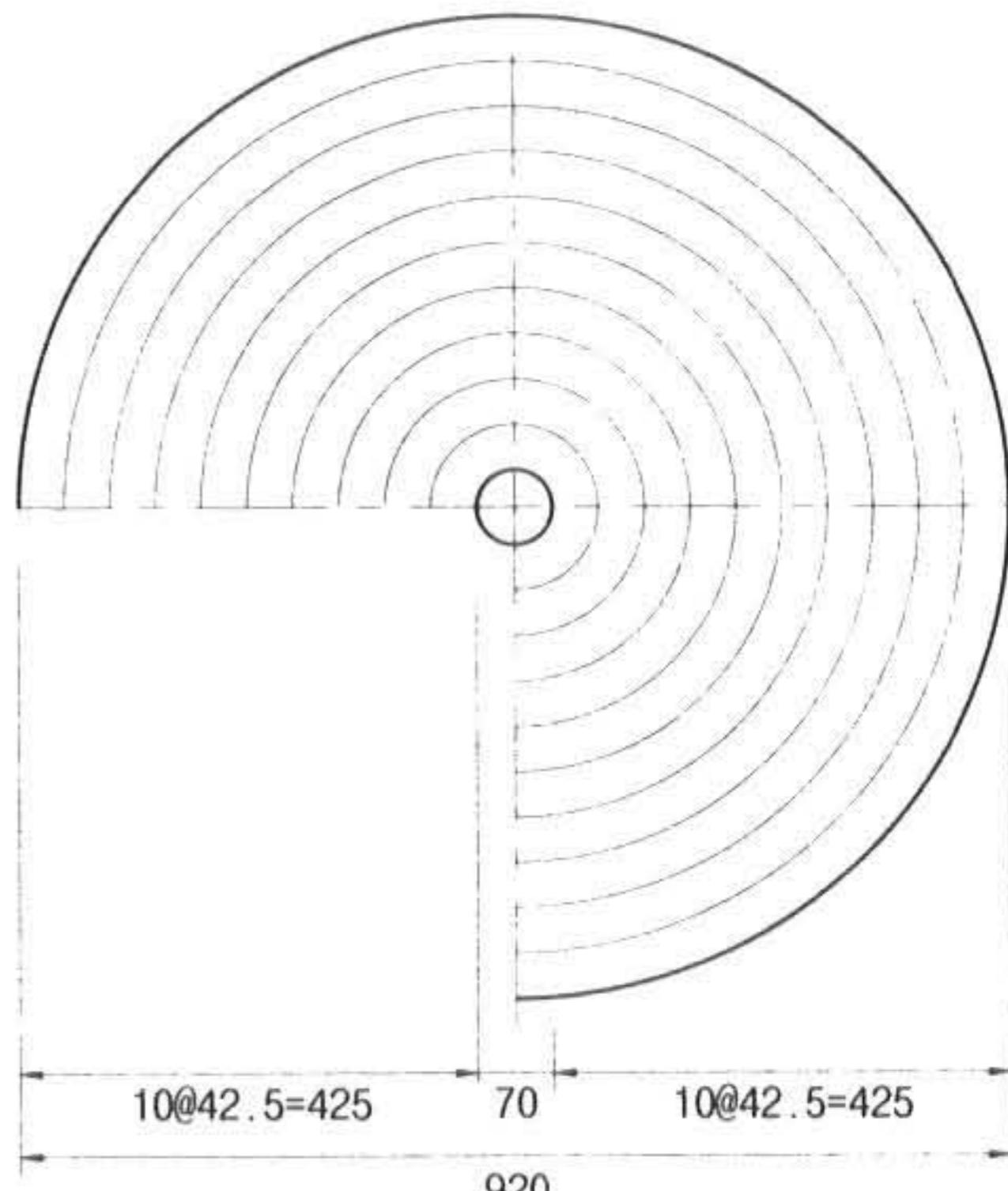


Fig. 3 드레인 설치위치

(2) 측정장치 검정

토압계와 간극수압계의 보정계수는 Table 3, Table 4와 같이 보정계수를 사용하였다.

Table 3. 토압계의 보정계수

측정장치	연직토압계	수평토압계1	수평토압계2	수평토압계3
보정계수	1.423	1.082	1.152	1.103

Table 4. 간극수압계의 보정계수

측정장치	간극수압계1	간극수압계2	간극수압계3
보정계수	1.034	1.102	1.261

(3) 실험순서

실험순서는 실험장치에 점토시료를 넣기 전에, 샌드 드레인을 설치하고 점토를 넣은 후 1주간 자연 방치하여 시료성형이 될 수 있도록 고려하였으며 점토시료 설치후 1주일 후에 샌드 드레인을 감싸고 있는 아크릴 관을 서서히 제거한 후 1주일을 방치하였다. 1단계 하중으로 재하판 및 재하대를 설치하였으며 24시간마다 물 하중을 재하하여 측정장비로 데이터를 측정하였다. 점토시료의 침하가 완료된 후 하중을 제거하고 함수비 및 Vane시험 등을 실시하여 그 결과치를 이용하여 분석자료로 활용하였다.

1) 시료설치 및 드레인타설

점토시료를 압밀용기에 넣기 전에 용기 하부에 10cm정도 모래층을 설치한 후에 점토시료를 넣으면서 샌드 드레인을 설치하고, 상부에도 10cm정도의 모래층을 두어 샌드 드레인과 연결하여 배수가 가능하도록 하였다. 샌드 드레인의 모래망 지름은 $\phi 60\text{mm}$ 와 $\phi 70\text{mm}$ 두 가지를 설치하였으며, 하중재하시 과잉간극수압을 측정할 수 있도록 간극수압계를 설치하였다.

샌드 드레인 설치시 모래사주 주변에서 점토의 교란을 줄이고자 원형 아크릴 관을 이용하여 점토를 넣기 전에 샌드망을 설치한 후 표준사를 자유낙하시켜 모래사주를 타설 하였다. 아크릴 관은 점토시료를 성형한 후 1주일 뒤에 매우 느린 속도로 빼내었으며, 인발시 발생될

수 있는 교란을 안정화시키기 위해서 1주일 정도 방치한 후 하중을 재하하였다.

2) 하중재하

하중재하는 대형수조를 이용하여 재하대, 재하판을 거쳐 점토시료에 하중이 재하될 수 있도록 하였으며, 이때 작용하중은 최대 1.0kgf/cm^2 를 재하할 수 있도록 하였다. 재하방법은 연직 등하중으로 압밀될 수 있도록 24시간마다 단계재하를 하였으며, 각 단계별 재하하중 및 재하시간은 아래의 표 5와 같다.

Table 5. 단계별 재하하중

항 목	재하단계	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계
하중증분/재하하중 (kgf/cm^2)	0.2/0.2	0.2/0.4	0.2/0.6	0.2/0.8	0.2/1.0	
재하시간(hr)	24	24	24	24	904	

압밀 진행시간에 의해 응력-변형분포 형태가 압밀시간에 따라 변화하며, 압밀시간이 단시간이면 배수면 부근에서는 압밀완료 상태로 되고, 배수면보다 떨어진 위치에서는 미압밀상태로 나타날 수 있다. 이러한 경우에 응력-변형은 배수면측과 비배수면측에서 분명하게 달리 분포된다. 반대로 압밀시간을 장기간으로 하면 2차 압밀 기간도 오래 걸리며 응력 완화현상에 의해 일단 발생된 응력-변형분포가 압밀 진행시간의 영향을 받는다. 이러한 이유에서 압밀진행시간은 토질시험법에 표시하고 있는 $\log t$ 법에 의해 결정하였으며, 드레인 지름은 70mm, 초기 함수비는 102.9%, 재하압밀하중은 $0 \rightarrow 1.0\text{kgf/cm}^2$ 압밀 진행시간은 60,000분이다.

3) 실험장치의 마찰저항 측정

하중재하시 원통형 토조와 재하판의 마찰을 줄이기 위해 토조 내부에 그리스(grease)를 발라서 마찰저항에 의한 영향을 최소화하였으며, 성형된 점토시료는 모형장치 내에서 2주 가량 자연방치 후 저면에 연결된 배수구로부터 지하수위를 측정하고 하중을 재하 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 함수비의 분포성상

압밀모형 실험 완료된 후 시료를 채취하여 함수비시험을 실시하였다. 샌드드레인에 의한 압밀 결과로 비배수면에서 일정간격으로 분할하여 4cm마다 함수비를 측정하여 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 함수비는 반지름 방향으로 균등하지 않고 배수면 측에 근접할 수록 감소 형상을 보였다.

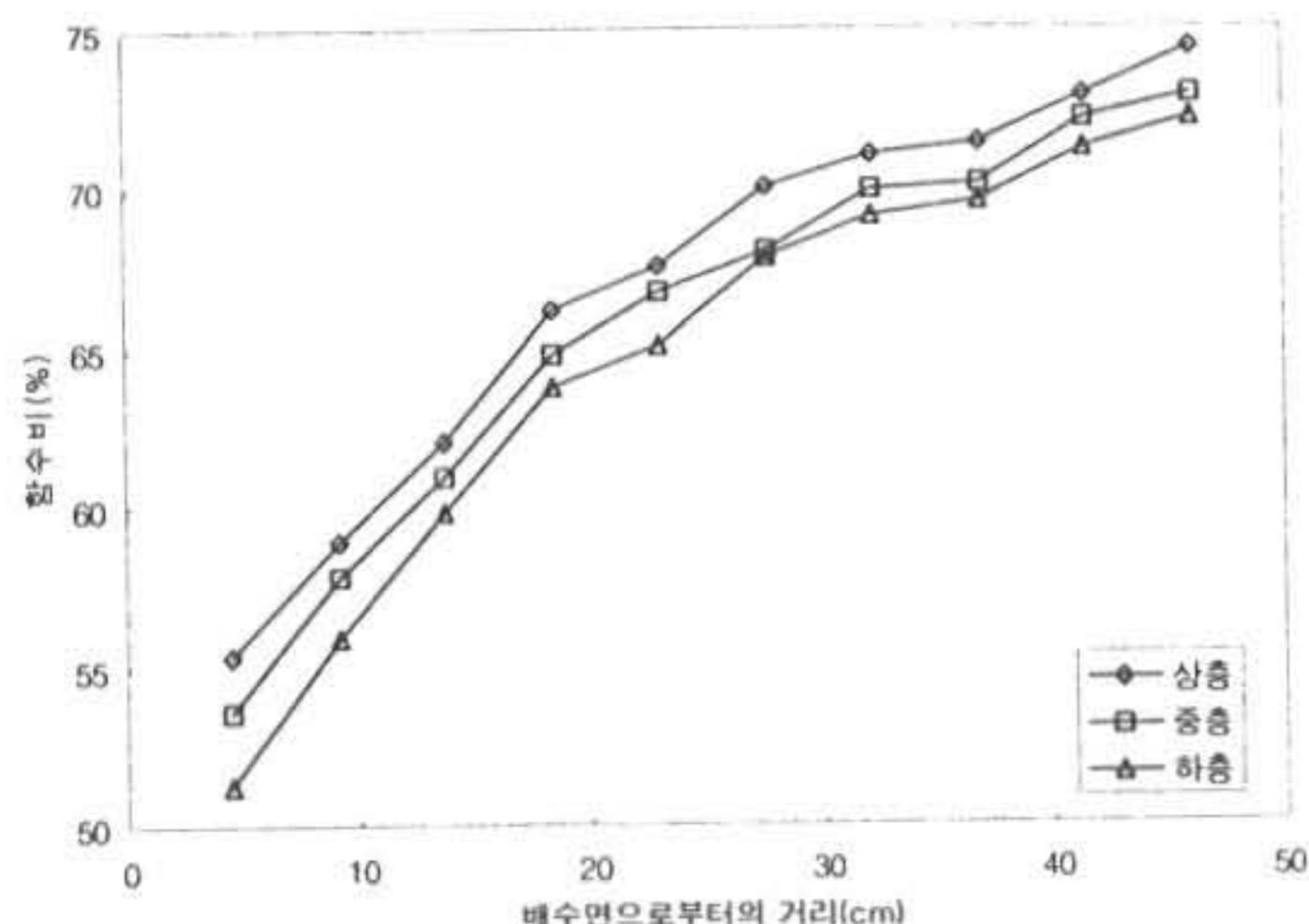


Fig. 4 함수비의 분포

3.2 드레인 주변 점토의 응력분포

반지름변형 분포성상까지의 결과에서는 샌드드레인에 의한 압밀이 2차 압밀단계에서도 점토지반 내에 반지름방향의 응력이나 변형이 비균등하게 분포하는 것으로 밝혀졌으며, 특히 드레인 주변의 응력집중이 현저하다. 여기에서는 이 응력집중 과정을 밝히고자 연직 전응력의 측정결과를 Fig. 5에 나타내었다.

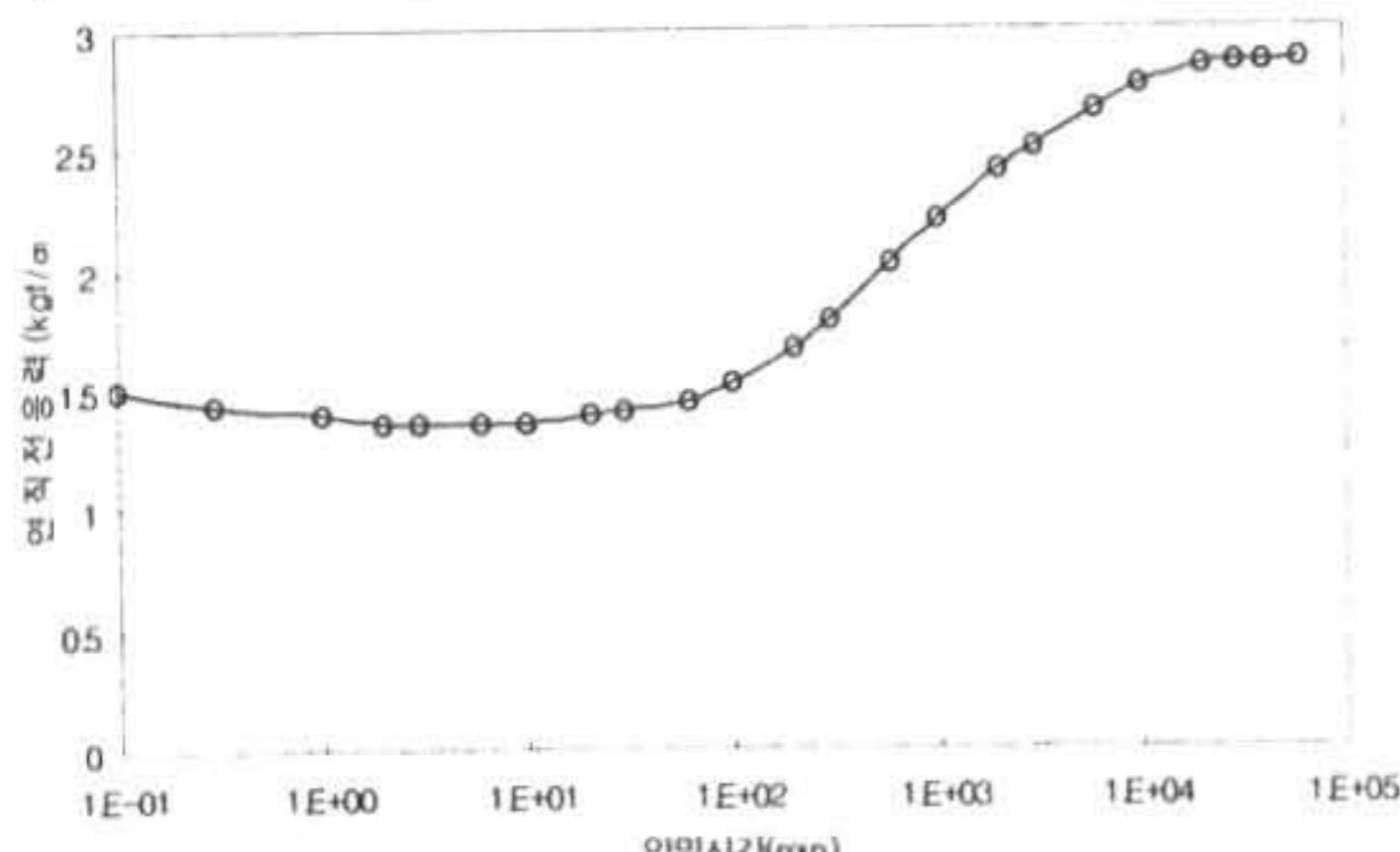


Fig. 5 배수면 점토의 압밀시간에 따른 연직전응력

드레인 주변에 연직응력은 단조롭게 증가되고 최종치는 초기치의 1.9배 이상에 도달된다. 연직전응력과 침하량과의 관계를 Fig. 6에 나타

내었다.

샌드 드레인에서는 압밀 중에 응력 분배현상이 나타나고, 배수면측의 점토에 응력집중이 나타나는 것이다. 결국 지반전체에 가해진 전응력은 일정하게 되고, 비배수면측의 점토는 반대로 연직 전응력이 일시적으로 감소하게 된다. 이 현상은 점토의 응력-변형관계에 탄성을 가정한 이론과는 근본적으로 크게 차이가 있다.

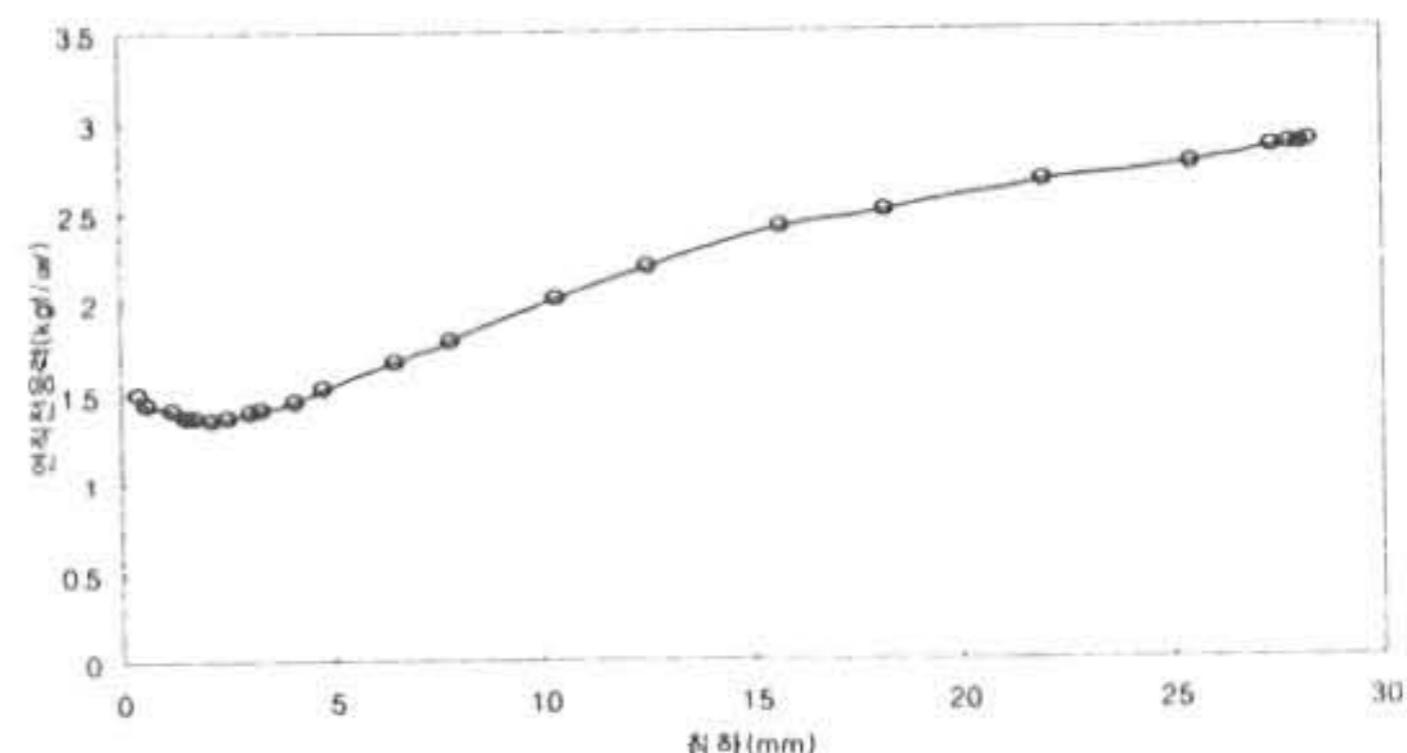


Fig. 6 배수면 점토의 침하에 따른 연직전응력

3.3 일축압축강도 분포

일반적으로 점토구조가 변화하는 점토일수록 피크강도시 변형은 작다고 말할 수 있다. Fig. 7은 앞의 실험에서 얻어낸 일축압축강도의 반지름방향 분포이다. 이 그림에서 일축압축강도 값은 분명히 반지름방향에 비균등 분포하고 있고, 배수면측 일수록 높게 나타나고 있다.

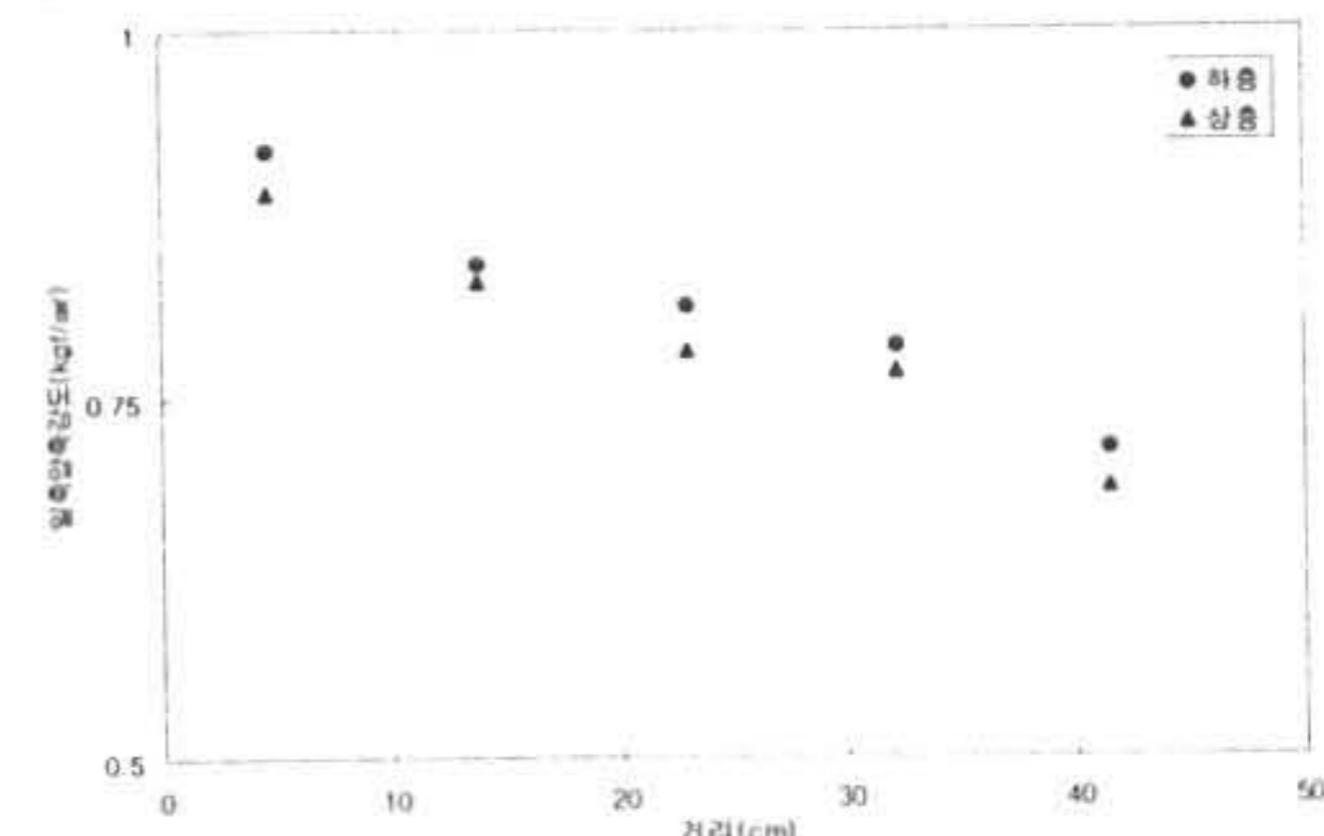


Fig. 7 간극수압의 분포

3.4 간극수압 분포

Fig. 8은 시간에 따른 간극수압의 변화를 나타내고 있다. 간극수압계에 의한 측정결과는 단계별 성토재하시에는 증가하고 방치기간이 경과되면서 감소하는 경향을 보여주고 있다. 배수면은 거의 0에 가깝게 나타나고 있으며, 하부로부터 25cm 높이에 설치된 간극수압계는 하부로부터 50cm 부근에 설치된 간극수압계보다 성토재하 초기에는 값이 크게 나타나고 있으나, 단

개별 성토재하시에는 심도보다 하중재하 영향이 크게 미치므로 간극수압 경시분포는 유사한 경향을 나타내고 있다. 이러한 경향은 점토상단에 설치된 샌드매트 내부의 간극수압과는 역으로 초기하중 재하시에는 샌드매트 내부의 과잉 간극수압 상승이 크게 작용되나 단계하중 재하에 의해 하중 증가시부터는 일정한 경향을 나타내고 있다. 압밀재하 초기에는 샌드 드레인과 샌드매트는 동일한 간극수압을 나타내며 단계별 하중 증가시에는 샌드매트보다 점토층 내부에 단계별 간극수압이 크게 증가되고 있다. 그리고 시간이 경과함에 따라 샌드 드레인의 영향에 의해 간극수압은 빠르게 소산되었다.

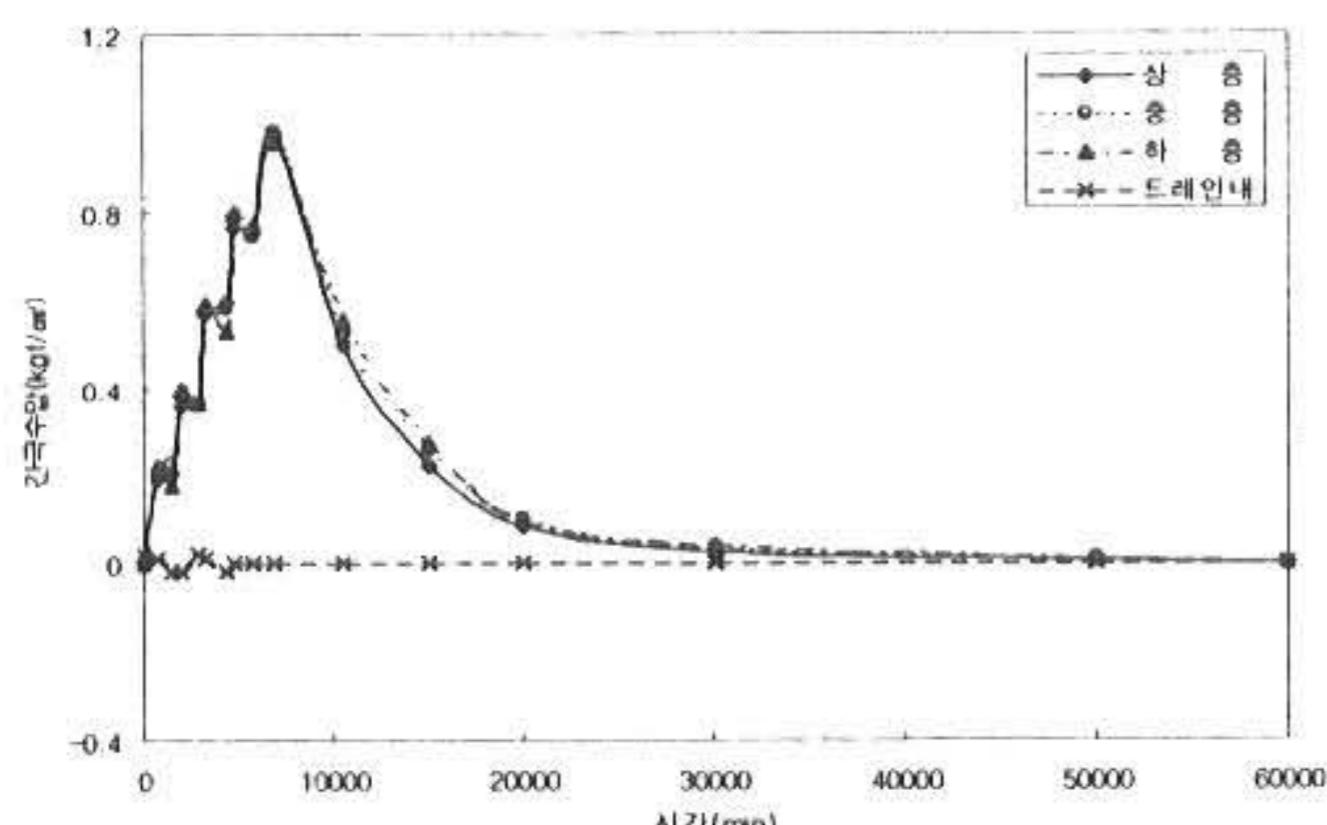


Fig. 8 간극수압 측정치

4. 결론

본 연구는 샌드 드레인에 의한 연약점토 지반의 압밀변형 메카니즘과 압밀과정에서 응력-변형 거동을 규명하기 위하여 모형 실험장치를 제작하여 다양한 실험을 통하여 기존 이론과 비교, 분석하였다.

(1) 등연직 변형의 Sand drain 압밀은 배수면과 비배수면 사이 응력-변위는 배수면측 점토에서 응력집중이 두드러지게 나타나며, 압밀초기를 제외하고 드레인 주변 점토에 작용하는 연직 전응력은 침하가 진행되면서 서서히 증가현상을 보이고 있다.

(2) 배수면과 비배수면간에 있어서 점토의 일축 압축시험강도에 대한 분포는 배수면측에서 강도가 크고, 배수면으로부터 멀어지면 강도가 낮아지고 간극비에 대해서도 압밀시간이 길어지면 커진다는 사실에서 압밀에 의한 점토의 강도는 간극의 감소 외에 압밀시 변형속도에 의한 시간효과의 영향을 받는다.

(3) 응력집중현상은 드레인 주변에 과압밀점토 영역을 형성하고 과압밀화의 정도는 압축침하량의 크기에 관계되며, 탄소성 해석에서 배수면 근처의 점토는 압밀초기에 등방유효응력의 증가가 크고 그 이후는 주로 연직방향의 응력집중에 의해 편차응력의 증가가 커지고 있다.

연직배수공법을 적용한 연약지반 설계에서 점토지반을 균일한 토체로 가정하여 적용하고 있으나 배수면과 비배수면에서 응력이 달라지므로 이 연구결과를 적용함으로서 연약지반해석에 기여할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) Barron, R.A. "Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells". Transaction ASCE. Vol.113, Paper No.2345, pp.718-742 (1948)
- 2) Hansbo S. "Consolidation of Fine Grained Soils by Prefab-ricated Drains", proc. International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm. Vol.3, pp.677-682 (1981)
- 3) Yoshikuni, H. and H. Nakanodo, Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", Soils and Foundation, Vol.14, No.2, pp.35-46 (1974)
- 4) Kjellman, W. "Accelerating Consolidation of Fine Grained Soils by Means of Cardboard Wicks". Proc 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rotterdam. Vol.2, pp.302-305 (1948a)
- 5) Moran, Proctor, Mueser and Rutledge. "Study of Deep Soil Stabilization by Vertical Drains", Bureau of Yards and Docks. U. S. Navy Rept NOY 88812. (1958)
- 6) Terzaghi, K. "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley and Sons, pp.265-296 (1943)
- 7) Porter, O. J. "Studies of Fill Construction over Mud Flats Includung a Description of Experimental Construction Using Vertical Sand Drains to Hasten Stabilization". Proc. 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Vol.1, p. 229 (1936)
- 8) Rendulic, L. "Der Hydrodynamische Spannungsausgleich in Zentral Entwasser-ten Tonzylin dern", Wasserwirtsch. U.Tech. Vol.2, pp. 250-253, 269-273 (1935)

- 9) Carrillo, N, "Simple Two and Three Dimensional Cases in the Theory of Consolidation of Soils", Jour. Math. Physics, Vol.21, pp.21-31 (1942)
- 10) Biot, M. A. "General Theory of Three-Dimensional Consolidation", Journ. Appl. Phys, Vol.12, pp.155-164 (1941)

(2003년 10월8일 접수, 2004년 2월20일 채택)