

- of International Symposium on Penetration and Drivability of Piles, San Francisco, Vol. 1, pp. 69-72
3. Broung, N. W. A. (1982), "The Analysis of Cone Resistance 'qc' and Sleeve Friction 'fs' as Interactive Stresses, Resulting in a New Pile Bearing Capacity Design Method", Proc. of 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2, pp. 469-478.
 4. Hvorslev. M. J.(1949), "Subsurface Exploration and Sampling of Soils for Civil Engineering Purposes", ASCE Research Project of the Committee on Sampling and Foundation Division. ASCE, 521pp.
 5. Kindel, C. E.(1977), "Mechanism of Soil Resistance for Driven Pipe Piles", 4th Annual Symposium of the Waterway Port, Coastal and Ocean Division of ASCE", Long Beach, pp. 251-268.
 6. Kishida, H.(1967), "The Ultimate Bearing Capacity of Pipe Piles in Sand", Proc. of 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 196-199.
 7. Kishida, H. & Isemoto, N(1977). "Behavior of Sand Plugs in Open-End Steel Pipe Piles", Proc. of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Tokyo, Vol. 1, pp. 601-604.
 8. Kraft, L. M.(1991), "Computing Axial Pile Capacity in Sands for Offshore Conditions", Marine Geotechnology, Vol.9, No.1, pp. 61-92.
 9. Leong, E. C. & Randolph, M. F.(1991), "Finite Element Analysis of Soil Plug Response", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 15, pp. 121-141.
 10. Murff, J. D., Raines, R. D. & Randolph, M. F.(1990), "Soil Plug Behavior of Piles in Sand", Proc. of the 22nd Offshore Technology Conference, Houston, pp. 25-32.
 11. Nauroy, J. F. & Le Tirant, P.(1983), "Model Tests of Calcareous Sands", Proc. of the Conference on Geotechnical Practice in Offshore Engineering, ASCE, pp. 356-369.
 12. Nishida, Y., Ohta, H., Matsumoto. T. & Kurihara, S.(1985), "Bearing Capacity due to Plugged Soil in Open-Ended Pipe Pile", JSCE, Vol. 364, pp. 219-227.
 13. O'Neill, M. W. & Raines, R. D. (1991), "Load Transfer for Pipe Piles in Highly Pressured Dense Sand", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 8, pp. 1208-1226.
 14. Paikowsky, S.G(1989), "A Static Evaluation of Soil Plug Behavior with Application to the pile Plugging Problem", Sc. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, MA.
 15. Paikowsky, S. G. (1990), "The Mechanism of Pile Plugging in Sand", Proc. of the 22nd Offshore Technology Conference, Houston, pp. 593-603.
 16. Parkin, A. K. & Lunne, T. (1982), "Boundary Effect in the Laboratory Calibration of a Cone Penetrometer for Sand", Proc. of the 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, pp. 761-768.
 17. Randolph, M. F.(1988), "The Axial Capacity of Deep Foundations in Calcareous Soil", Proc. International Conference on Calcareous Sediments, Vol. 2, pp. 837-857.
 18. Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platform(1989). American Petroleum Institute Recommended Practice 2A (RP2A), 18th Edition, API, Washington, D. C.
 19. Vipulanandan, C., Waong, D., Ochoa, M. & O'Neill, M. W.(1989), "Modelling Displacement Piles in Sand using a Pressure Chamber", Foundation Engineering : Current Principles and Practices, 1, F. H. Kulhawy, ed., ASCE, pp. 526-541

(접수일자 1992. 10. 26)

진공하중에 의한 Drain Board 타입 점토지반의 거동 특성

Characteristics of Behavior of Drain Board - driven Clay
Layers by Vacuum Loading

이	송*1	양	태	선*2	
Lee,	Song	Yang,	Tae-Seon		
박	종	찬*3	백	영	식*4
Park,	Jong-Chan	Paik,	Young-Shik		

Abstract

Paper drain method is one of the methods used for the improvement of soft clay as hydraulic fill sites or the seaside industrial complex.

This method adopts a card board as the drain materials instead of sand piles in sand drain method. In this paper 3 types of drain board are used to find out the characteristics of consolidation by vacuum consolidation model test. So does the no drain board test. This test causes the reduction of pore water pressure to promote the settlement without change of ground water level.

Conclusively, the vacuum consolidation shows 3-dimensional behaviors and pore water pressure reaches a negative value in a short time. In addition, it is expected to have a comparatively good consolidation effect using non-woven board, and vacuum loading results in increasing the shear strength at the bottom and top of caly layers.

요 지

준설매립지나 임해공업단지과 같은 연약점토지반 개량공법중의 하나가 페이퍼드레인공법이다. 페이퍼 드레인 공법은 Drain재로서 샌드 드레인 공법의 모래말뚝대신 card board paper를 사용한다. 본 연구에서는 페이퍼 드레인 공법에 많이 사용되는 3가지 종류의 드레인 보드를 타

*1 정회원, 서울시립대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*2 정회원, 서울시립대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*3 정회원, (주) 평원엔지니어링

*4 정회원, 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수

입한 시료와 드레인 보드를 타입하지 않은 무처리시료에 대하여 진공재하시험을 실시하여 압밀 특성을 파악하였다. 이러한 진공하중은 지하수위 변동없이 지반내의 간극수압을 저하시켜 압밀을 촉진시킬 수 있다.

시험결과, 진공압밀시험은 3차원압밀거동을 보이고 간극수압은 단시간에 음의 값이 된다. 그리고 non-woven board의 경우 지반 전체에 비교적 균등하게 진공하중이 작용한다. 하부에서 진공하중을 작용시킨 결과 시료의 상부와 하부의 강도가 증가하는 결과를 얻었다.

1. 서 론

삼면이 바다로 둘러 쌓인 우리나라는 공업단지, 공항, 부두, 물양장등의 사회간접시설 공사를 위해서 울산, 창원, 포항, 광양, 군장지구등과 같은 대단위 임해공업단지의 조성이 수반된다. 그러나, 이 지반들은 대부분 해안매립이나 준설매립에 의한 연약지반이므로 이 지반위에 구조물축조나 성토가 진행된다면 압밀과 전단 변형에 따른 전단파괴가 발생하므로 지반이 소정의 강도를 갖도록 개량해야 하는 것이 급선무이다. 압밀침하를 촉진시킬 목적으로 card board를 이용하는 페이퍼 드레인 공법은 처음에 스웨덴의 W. Kjellman(1948)⁽¹⁾에 의해 제안되었는데 샌드 드레인 공법과 같은 원리로서 모래말뚝 대신 투수성과 압밀효과가 좋은 드레인 보드를 사용하는 공법이다. 우리나라에서 창원 적현단지, 울산공업단지, 일산 자유로, 남해고속도로 확장공사등에 페이퍼 드레인 공법이 적용되었고 현재 여러 현장에서 시공되고 있으며 앞으로도 많이 이용될 전망이다.

실하중을 재하할 경우 모형지반이 연약한 준설토이므로 파괴가 발생할 우려가 있어서 본 연구에서는 모형지반의 파괴를 방지하기 위하여 진공압밀방법을 채택하였다. 진공압밀은 압밀완료 전과 후에 전응력의 변화가 없어서 지반파괴를 방지할 수 있고 간극수압의 소산속도가 빠른 것등 여러가지 장점이 있다. 그리고, 기밀을 유지해야하고 대기압까지만 재하가 가

능하다는 단점도 있지만 장점을 고려하면 보다 효과적인 방법이라 할 수 있다. 본 연구는 연약 점토지반에 드레인 보드를 타입한 후 진공하중을 가하여 압밀침하량과 간극수압의 변화에 따른 지반응력의 변화, 압밀침하중 연약점토의 거동특성과 압밀완료후 시료의 강도상태를 파악하여 진공압밀을 이용한 페이퍼 드레인 공법의 변형특성을 분석하였다. 본 연구는 각 드레인 보드의 유형별로 진공재하에 따른 압밀거동 특성을 비교·분석하여 현장에서의 응용성을 찾아내는데 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 자중압밀과 침투압밀

2.1.1 자중압밀

초연약점토의 대표적인 침강거동을 살펴 보면, 응집단계(flocculation stage), 침강단계(settling stage), 압밀단계(consolidation stage)등 3단계⁽²⁾⁽³⁾로 나뉘는데 첫단계로 점토입자가 서로 결합하여 flocc을 형성하는 응집 단계를 거친 후 flocc이 서로 결합하여 aggregate를 이루어 침강하기 시작한다. aggregate가 침강하는 단계를 침강단계라 하며 상층부의 물과 하층부의 현탁액 사이에 뚜렷한 계면이 형성되고 현탁액속의 aggregate가 침강하면서 이 계면은 일정한 속도로 내려간다. aggregate의 침강이 모두 끝나면 등속도로 내려가던 계면의 속도가 급격히 떨어지고 토립자

의 자중에 의한 압밀이 시작된다. 이 단계를 압밀단계라고 하는데 이 때의 압밀을 자중압밀이라고 한다. 초기함수비가 침강단계의 함수비보다 작게 되면 초기단계부터 자중압밀이 발생하게 된다.

2.1.2 침투압밀

자중압밀이 완료될 때까지는 상당히 오랜 시간이 소요된다. 자중압밀시간을 단축하기 위해서 물의 침투압을 이용하는 방법이 있는데 연약점토지반의 상부와 하부에 수두차를 두어서 수두차에 의한 침투압을 압밀응력으로 이용하는 방법이다. 침투가 발생하지 않는 상태에서는 유효응력이

$$P' = \gamma_{sub} \cdot z \quad (1)$$

이지만 침투가 발생하면 상부와 하부사이에 Δh 만큼의 수두차를 주어 상부에서 하부로 하향 침투를 발생시키면

$$\begin{aligned} P' &= (i \cdot \gamma_w + \gamma_{sub}) \cdot z \\ &= (j + \gamma_{sub}) \cdot z \end{aligned} \quad (2)$$

가 되어 유효응력은 침투압 j 만큼 증가하게 된다. 수두차로 인해 발생한 침투압만큼 유효응력이 증가하고 유효응력의 증가분(침투압)이 압밀응력으로 작용하게 되는 것이다.

2.2 진공압밀

흙의 중립응력(간극수압)의 감소로 인한 유효응력의 증가분을 압밀하중으로 이용하는 방법을 중립응력 저하공법⁽⁴⁾이라고 한다. 중립응력을 저하시키는 방법으로는 진공압을 이용하는 방법, 지하수위를 저하시키는 방법등이 있는데 전자를 대기압공법 또는 진공압밀공법, 후자를 지하수위 저하공법이라고 한다. 진공압밀공법⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾은 1949년 Sweden의 W. Kjellman⁽¹⁾에 의해 처음 발표된 지하수위 변동없이 지반내의 간극수압을 저하시켜 압밀을 촉진시키는 공법이다. 재하압밀과 진공압밀의 가장 큰 차이점은 지반내의 응력변화상태⁽⁴⁾이다. 재하압밀에서는 압밀 완료후 압밀응력(재하응

력)만큼 전응력이 증가하지만 진공압밀의 경우는 전응력에 변화가 없다. 그외에 압밀상태에 있어서도 재하압밀은 시험용 압밀링내에서 완전한 1차원 압밀거동을 나타내지만 진공압밀에서는 미소하지만 3차원압밀거동을 보인다. 또, 압밀과정에 있어서 재하압밀의 경우 토립자의 구조가 평행구조를 이루지만 진공압밀의 경우 배향구조를 나타내는 경향이 있다. 그리고 진공압밀의 경우 감압에 의해 간극수축의 용존기체가 빠져나와 불포화되기 쉽고 기화열에 의해 시료의 온도가 저하되는 현상이 발생⁽⁴⁾ 하지만 상부지반이 연약할 경우 재하성토로 인한 전단파괴 없이 압밀을 촉진시킬 수 있고, 깊은 심도까지 개량 할 수 있으며,⁽⁴⁾⁽⁷⁾ 실하중 재하에 의한 압밀보다 배수시간이 훨씬 단축된다는 장점이 있다. 이외에도 잔류침하를 허용하지 않으며 2차압밀침하 영역까지 압밀을 시킴으로써 압밀 침하에 대한 침하대책 공법으로서 확실한 방법이다.⁽⁵⁾

이제 기존 성토재하압밀, 진공압밀의 응력경로를 그림1에 나타내었다.

기존의 성토재하시 성토하중증가에 따라 지중간극수압이 증가하여 최대주응력, 최소주응력이 동시 감소되어 응력경로는 AB를 따른다. 그리고, 압밀이 계속되면서 같은 양만큼 유효 최대주응력과 최소중력이 증가하면서 응력경로는 BC를 따른다. 진공압밀의 경우 압밀이 계속되면서 대기압만큼 최대주응력과 최소주응력이 증가되므로 응력경로는 AE를 따른다.

2.3 페이퍼 드레인 공법

점토지반의 투수계수는 $k=1 \times 10^{-7} \sim 10^{-9} \text{cm/sec}$ 정도로 아주 작기 때문에 현장에서는 과잉간극수압의 소산에 수년 혹은 수십년이 걸리는 게 보통이다. 페이퍼 드레인 공법은 지반내에 생기는 과잉간극수의 배수를 배수거리단축에 의하여 촉진시켜 압밀소요시간을 줄이는 것을 목적으로 한다. 또 배수에 의한 지반개량, 이론적 원리가 샌드 드레인공법과 같지만 drain 재

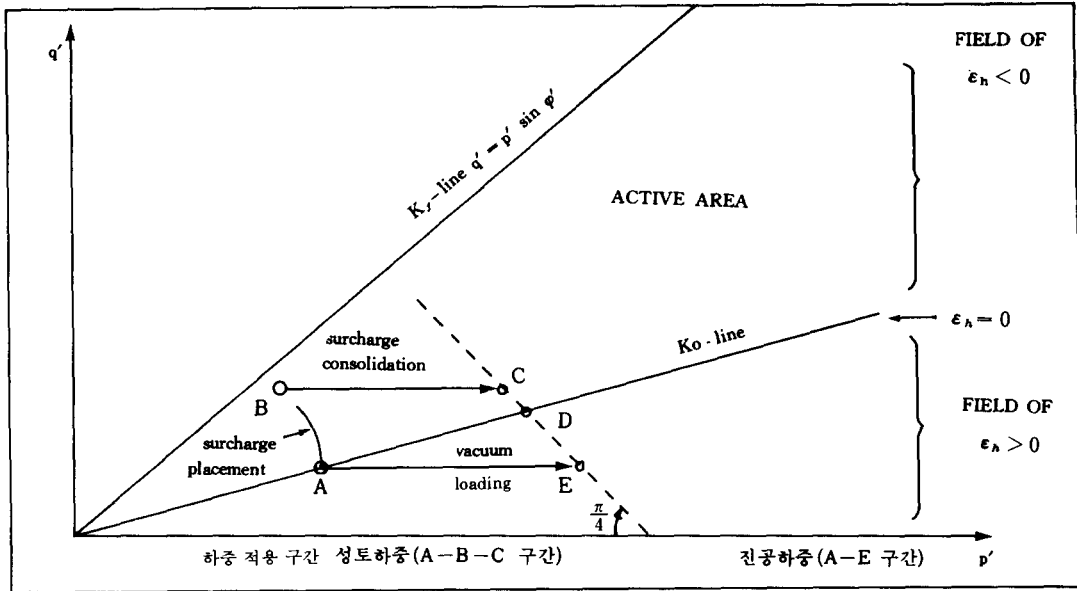


그림 1. 재하압밀과 진공압밀의 응력경로

로서 paper(card board)를 사용하는 것이 다른 점이다. Sweden의 W. Kjellman(1948)은 paper를 drain재로서 점토층내의 배수효과에 대한 실험을 실시하여 배수효과는 드레인 보드의 배수단면적보다 드레인 보드와 점토의 접촉면적에 관계한다는 것을 발견하고 드레인 보드재로서 샌드 드레인같은 원형단면보다 띠 모양 단면쪽이 유리하다고 발표하였다.⁽⁸⁾

2.3.1 Barron의 이론

Barron⁽⁹⁾(1948)에 의하면 점토지반중의 vertical drain의 영향원직경 d_e 는 간격 d 로 타설했을때, 정삼각형배치의 경우 d_e 는 간격 d 로 타설했을때, 정삼각형배치의 경우 $d_e = 1.05d$ 이고 정방형배치의 경우 $d_e = 1.13d$ 이다.

그림 2의 영향원과 같은 원주형의 경우 Terzaghi의 압밀방정식으로부터 Rendulic(1935)이 도입한 확장형 압밀방정식이 쓰인다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + c_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (3)$$

여기서 u : 점 (z, r) 의 간극수압
 c_v : 연직방향 압밀계수
 c_h : 수평방향 압밀계수

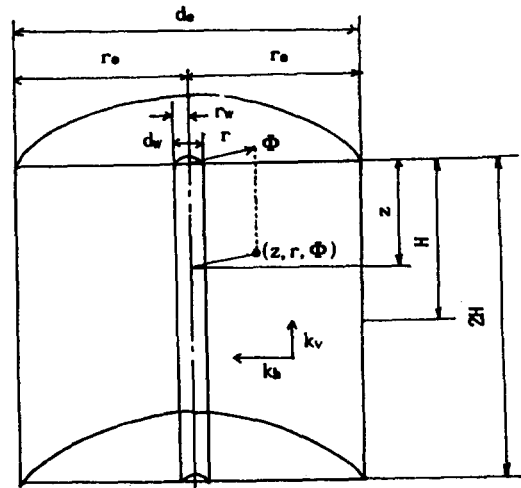


그림 2. 드레인의 영향원

수평방향 흐름만 고려하고 연직방향의 흐름을 무시하면 $c_v = 0$ 가 되어서 식(3)은

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_h \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (4)$$

가 되고 또 연직방향의 흐름만 고려하면 $c_h = 0$ 가 되고 식(3)은

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

가 된다. 식(4)의 Barron에 의한 해는 식(6)이 된다.

$$U_r = 1 - \exp(\lambda) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \bar{u} = u_0 e^{\lambda} \quad \lambda = \frac{-8T_h}{F(n)}$$

$$T_h = \frac{C_h}{d_{e2}} t \quad n = \frac{d_e}{d_w}$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

연직방향과 수평방향의 배수를 모두 고려할 때, 식(6)은 수평방향의 배수만을 고려한 경우이고 식(5)의 해는 Terzaghi의 해이므로 이 식 모두를 고려하여 평균압밀도를 U 라 하면 U 와 수평방향 평균압밀도 U_r , 연직방향 평균압밀도 U_z 사이에는

$$U = 1 - (1 - U_r) \cdot (1 - U_z) \quad (7)$$

인 관계가 있다.

2.3.2 Kjellman의 이론

연직 배수공법에서는 영향원내의 과잉간극수가 중앙의 drain을 통해서 배수된다고 가정한다.⁽⁸⁾ 정방향배치인 경우 평균압밀도는

$$U_r = 1 - \exp\left[\frac{-2 \cdot c_v \cdot t}{\frac{L^2}{\pi} \cdot \left(\log \frac{L}{r\sqrt{\pi}} - \frac{3}{4}\right)}\right] \\ = 1 - \exp(-c_v \cdot t / m_1) \\ = 1 - \exp(-t / g_1) \quad (8)$$

$$\text{여기서, } m_1 = \frac{L^2}{2\pi} \left(\log \frac{L}{r\sqrt{\pi}} - \frac{3}{4}\right)$$

$$g_1 = \frac{m_1}{c_v}$$

이고 정삼각형배치인 경우 평균압밀도는

$$U_r = 1 - \exp\left[\frac{-4c_v t}{\frac{\sqrt{3} \cdot L^2}{\pi} \left(\log 0.913 \frac{L}{r\sqrt{\pi}} - \frac{3}{4}\right)}\right]$$

$$= 1 - \exp(-c_v \cdot t / m_2) \\ = 1 - \exp(-t / g_2) \quad (9)$$

여기서,

$$m_2 = \frac{\sqrt{3}L^2}{4\pi} \left(\log 0.913 \frac{L}{r\sqrt{\pi}} - \frac{3}{4}\right)$$

$$g_2 = \frac{m_2}{c_v}$$

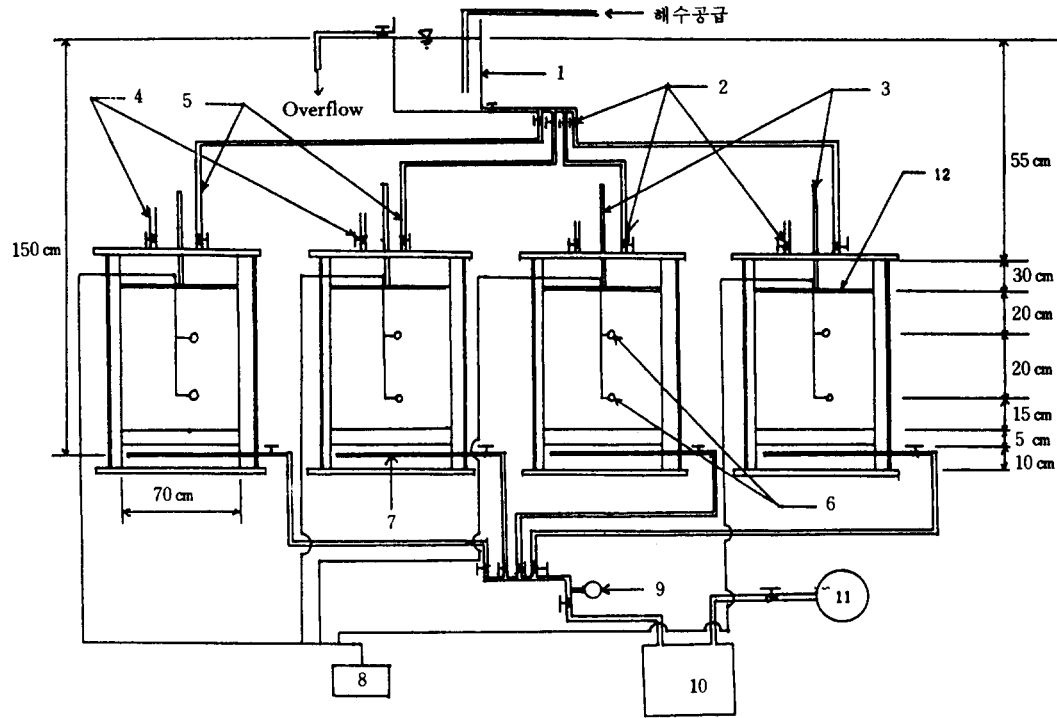
와 같이 된다.

Barron의 해와 Kjellman의 해를 비교해 보면 $n=10$ 인 경우 오차는 약 1%정도이고 실용상 차이는 없지만 Barron의 해가 일반적으로 쓰이고 있다.

3. 실험장치

본 실험에서는 그림 2와 같이 직경 70cm, 높이 100cm 규격의 대형 탱크 4개를 제작하여 탱크의 벽면은 마찰을 방지하기 위하여 액체 실리콘수지를 발랐다. 시료 상단에서부터 심도 20cm, 40cm 되는 위치에 digital로 측정할 수 있는 매립식 간극수압계를 매설하였다. 그리고, 시료 상부에는 P.V.C. 유공 침하판을 얹고 침하측정용 침하대를 설치한 뒤 다이알게이지로 침하량을 측정하였다. 또한 침투압밀을 위한 수조와 진공압밀을 위한 진공펌프 및 제작치를 제작 설치하였다. 배수효과를 좋게 하기 위하여 탱크하부에 자갈과 모래를 깔아 배수층으로 이용했고 배수층과 점토 사이에는 P.V.C. 유공판을 설치하고 그 위에 여과지를 깔았다. 구멍을 뚫은 십자형 P.V.C. 파이프를 자갈층내에 설치한 후 시료탱크와 뚜껑사이에는 기밀을 유지하였다.

드레인 보드는 30cm간격 정삼각형으로 배치하였고 중앙에는 간극수압계를 매설하였다. 시험에 사용한 각 드레인 보드의 제원은 표1에 나타내었다.



- | | | |
|--------------|---|---------------------|
| 1. 수 | 조 | 7. 배수 파이프 |
| 2. 밸 | 브 | 8. Digital Read-Out |
| 3. 침하측정용 침하대 | | 9. 진공 Sensor |
| 4. 공기제거밸브 | | 10. 진공 탱크 |
| 5. 해수공급호스 | | 11. 진공 펌프 |
| 6. 간극수압계 | | 12. PVC 유공침하판 |

그림 3 시험장치

표 1. 드레인보드의 제원

종 류	요철형 Board	Non-woven	망형 Board
탱 크 No.	2	3	4
폭(mm)	50.0	50.0	50.0
두께(mm)	4.0	4.0	4.0
길이(mm)	450.0	450.0	450.
환산계수	1	1	1
환산직경(mm)	34.4	34.4	34.4

4. 시험방법

본 연구 실험에 사용한 시료는 인천시 남향

매립지역에 준설, 투기중인 현장에서 채취한 점토로서 세립토에 대한 변형특성을 분석하기 위해 대형 교반기로 충분히 교반한 뒤 No.40체를 통과한 시료에 대하여 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 점토와 모래 그리고 자갈의 입도분포곡선은 그림 3과 같고 통일분류로는 각각 CL, SP, GP 로 분류되었다.

그리고 해수속에 용해되어 있는 염분을 고려하여 실험으로 구한 함수비를 Imai, Tsuruya and Yano⁽¹⁰⁾에 의해 제안된 염분비 (salt content) β 를 사용하여 함수비를 보정하였다.

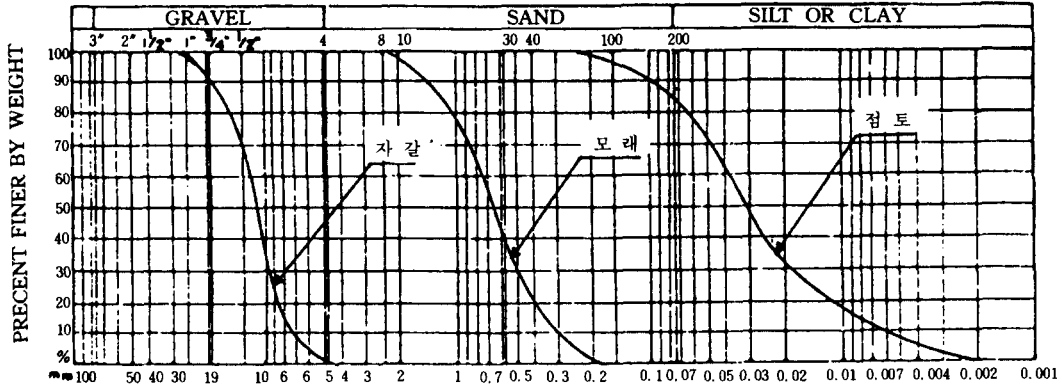


그림 4 입도분포곡선

$$\beta = \frac{W_c}{W_w}$$

$$w = \frac{1 + \beta}{1 - \beta W_n} \times W_n \quad (10)$$

여기서, W_c : 염분의 무게

W_w : 물의 무게

w : 염분을 고려한 함수비(%)

W_n : 염분을 고려하지 않고 측정된 함수비(%)

표 2. 점토시료의 토성시험 결과

구 분	실험값	염분을 보정한 값
함 수 비(%)	79.4	83.8
액 성 한 계(%)	31.3	32.5
소 성 한 계(%)	21.4	22.2
소 성 지 수(%)	9.7	10.3
염 분 비	0.03	
No.200 체 통과율(%)	86.0	
흙 의 비 중(Gs)	2.68	
물 의 비 중(Gr)	1.02	
습윤단위중량(t/m^3)	1.517	
건조단위중량(t/m^3)	0.825	
간 극 비(e)	2.248	
포 화 도(%)	99.9	
분 류 (USCS)	CL	

시료로 사용한 점토에 대해 실시한 토성시험 결과와 염분비로 보정한 값은 표 2와 같다.

점토를 각 탱크에 75cm 높이까지 투기하고 자중압밀을 시켰으며 계면의 침하량에 변화가 없을때까지는 약 65일이 소요되었다. 이때, 시료 상하부에 150cm의 수두차를 주어 침투압밀을 병행하였다. 자중압밀과 침투압밀이 끝난 뒤 2, 3, 4번 탱크에 각각 요철형 core board (이하 요철형 board), non-woven board, 망형 core board(이하 망형 board)를 묻었고 1번 탱크는 drain board를 묻지 않았다. 드레인 보드와 간극수압계의 매설시 시료가 교란된 영향을 줄이기 위하여 약 한달간 시료를 방치한 뒤 표 3과 같이 3단계에 걸쳐 진공압을 재하하였다. 압밀 진행중에는 층별 간극수압의 변화와 침하량을 측정하였으며 이론침하량과 실측치를 비교하였다.

표 3. 재하단계

단 계	1단계	2단계	3단계
진공압	30cmHg (0.39kg/cm ²)	50cmHg (0.66kg/cm ²)	63cmHg (0.83kg/cm ²)
시간	4일	10일	10일

5. 시험결과

5.1 침하량

시간변화에 따른 침하량의 관계를 그림 5에 나타내었다. (점토를 투기하였을 때 배수층을 제외한 시료의 높이는 75cm였고 자중압밀과 침투압밀 완료후 시료의 높이는 54cm였다.) non-woven board를 설치한 경우의 침하량과 망형 board를 설치한 경우의 침하량은 거의 비슷한 변화를 보이고 있고 요철형 board를 설치한 경우의 침하량이 조금 작게 나타나고 있다. 보드 종류에 따라 침하량에 차이가 생기는 것은 보드의 투수계수에 따른 환산계수때문이다. 보드에 대해 투수시험을 실시하여 그 결과로부터 정확한 환산계수 α 를 구하여 침하량을 예측하여야 하는데 본 연구에서는 α 를 제품의 제원표에 나와 있는 1을 사용하여 침하량을 계산하였다. 실측 결과로 판단하면 non-woven board와 망형 board는 α 값이 비슷하고 이에 비해 요철형 board는 α 값이 작다.

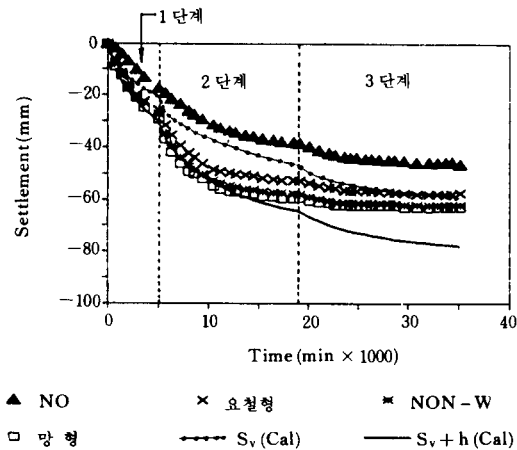


그림 5 시간-침하량 곡선

점이 있는 실선과 점이 없는 실선이 Barron의 식에 의해 구한 이론침하량이다. 이론식에

필요한 압밀계수들은 동일시료에 대한 표준압밀시험을 실시하여 구하였다. 표준압밀시험을 실시한 결과 $C_c=0.465$ 이고 $c_h=2.9 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 이며 $c_v=2.7 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 였다. 점이 있는 실선은 드레인 보드를 설치하지 않은 무처리시료에 대한 수직방향의 배수만을 고려한 이론값이고 점이 없는 실선은 드레인 보드를 설치했을 때에 수직방향과 수평방향의 배수를 고려한 이론값이다. 이론치와 실측치를 비교해보면 초기에는 일치하다가 시간이 경과하면서 차이가 점점 커진다. 이 원인은 이론식으로 구한 침하량은 수직·수평방향의 배수가 발생하면서 발생하는 압밀량을 수직방향의 변위로만 표시했기 때문이다. 압밀이 종료된 후 시료를 확인해 본 결과 횡방향의 압밀도 발생하여 시료와 탱크벽면사이에 0.5~1.0cm 정도의 틈새가 생겼다. 즉 전체 압밀량은 실측된 수직변위에 이 횡방향변위가 영향을 미쳐 수직변위만을 측정하면 실제 압밀량보다 작게 나타나므로 이론치와 차이가 발생한 것으로 생각된다. 이 결과로부터 진공압밀은 수평방향과 연직방향의 변위가 발생하는 3차원 압밀거동을 보이는 것이 확인되었다.

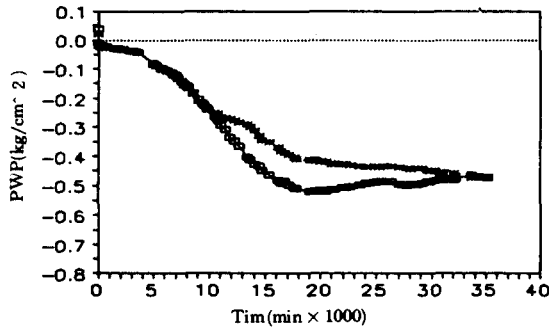
5.2 간극수압변화에 따른 응력변화

그림 6에 각 시료의 간극수압변화를 나타내었다. 간극수압계를 매설한 20cm, 40cm의 심도를 고려한 8가지의 서로 다른 조건을 구별하기 위해서 표 5와 같은 기호를 사용하였다.

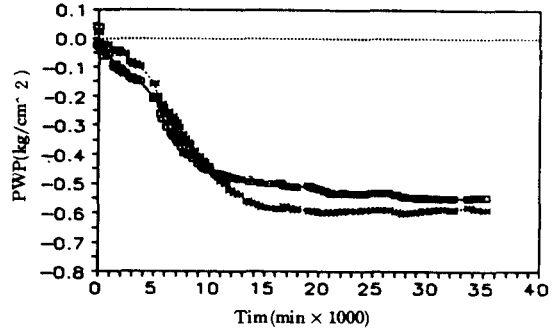
표 5 결과분석에 사용한 기호

보드종류	No	요철형Board	Non-woven	망형 Board
탱크 No.	1	2	3	4
심도(cm)	40	20	40	20
사용기호	1-1	1-2	2-1	2-2
			3-1	3-2
				4-1
				4-2

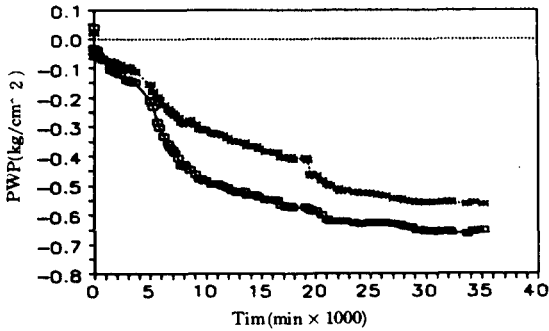
4개 탱크 모두 진공압을 재하한 후 짧은 시간에 시료의 상부와 하부 모두 음(-)의 간극



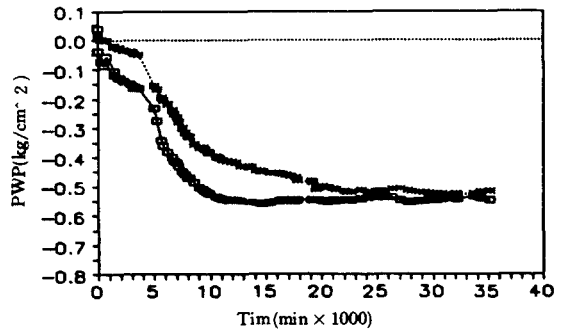
(a) 무처리



(b) 요철형 Board



(c) Non-Woven Board



(d) 망형 Board

그림 6 간극수압변화

수압이 발생하는 즉 유효응력이 증가하는 것으로 나타났다. 시료 하부의 간극수압 변화폭이 상부에 비해 훨씬 크고 또 진공압을 작용시키기 전에는 하부의 간극수압이 상부보다 컸지만 작용시킨 후에는 하부의 간극수압이 더 작아지는 것으로 측정되었다. 이 원인은 하부에서 진공압을 작용시켰기 때문에 시료하부의 간극수압의 변화가 더 크게 측정된 것으로 사료된다.

이 간극수압의 변화를 이용한 지반내의 응력 변화는 그림 7과 같이 된다. 응력변화를 살펴보면 4개 탱크 모두 진공압을 작용시키기 전과 작용시킨 후의 전응력에는 변화가 없고 간극수

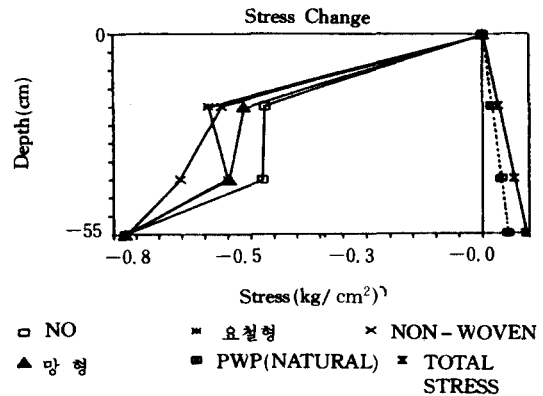


그림 7. 지반내의 응력변화

압이 감소하여 음(-)의 값이 되는 것이 특징이다. 심도 20cm에서는 요철형 board를 타입한 시료가 유효응력이 가장 크게 증가하고 심도 40cm에서는 non-woven board를 타입한 시료가 유효응력이 가장 크게 증가한다. non-woven board의 경우가 비교적 유효응력의 증가가 크고 심도별로 편차가 심하지 않은 것으로 나타났다.

5.3 함수비와 단위중량 변화

압밀이 완료되고 난 다음 불교란 시료를 채취하여 시료의 상·중·하층에서의 함수비, 건조단위중량 그리고 간극비를 구한 결과를 각각 그림 8, 그림9, 그림10에 도시하였다. 함수비의 분포를 보면 상층에서는 망형 board가 34.6~35.1%로 약간 크고 non-woven board가 33.8~33.9%로 조금 작다. 중층에서는 비슷한 분포를 보이고 있는데 그중에서 non-woven board가 34.3~36.7%로 조금 크게 나타났다. 하층에서는 요철형 board가 32.6~35.4%로 가장 작고 무처리기가 34.2~35.9%로 가장 크다. 전체적으로 함수비는 32~38%의 범위이고 하층의 함수비가 작고 중층의 함수비가 큰 경향을 나타낸다.

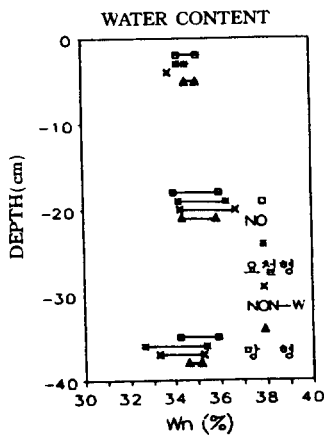


그림 8. 함수비 분포

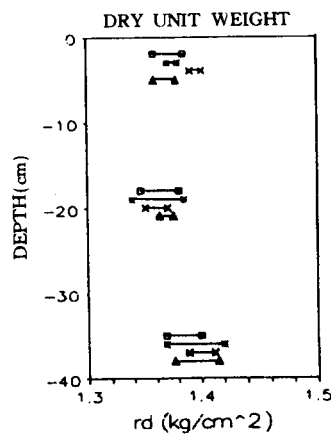


그림 9. 건조단위중량 분포

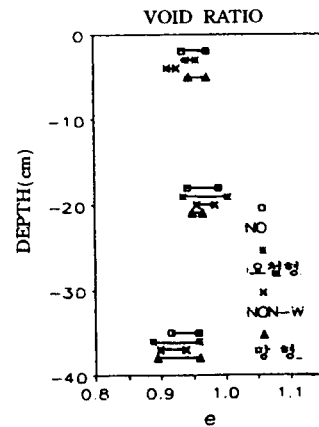


그림 10. 간극비 분포

그림 9의 건조단위중량의 분포를 보면 1.33~1.43의 값을 나타내는데 상층에서는 non-woven board가 1.392~1.402kg/cm²로 가장 크고 무처리와 망형 board가 작으며 중층에서는 비슷한 값을 나타내는데 요철형 board가 1.339~1.386kg/cm²로 분포폭이 크다. 하층에서는 보드를 설치하지 않은 무처리가 1.369~1.400kg/cm²로 조금 작은 값을 보인다. 전반적으로 하층의 값이 크고 중층의 값이 작다. 그리고, 간극비는 그림 10에서와 같이 0.88~1.01의 값을 보이는데 전체적으로 하층에서의 값이 작고 중층에서의 값이 크다. 상층에서는 non-woven board가 0.911~0.926으로 가장 작고 중층과 하층에서는 4가지 경우가 비슷하다.

5.4 강도변화

압밀시험 완료후 시료의 강도를 측정하기 위하여 static cone 관입시험을 실시하였고 불교란시료를 채취하여 일축압축시험과 Torvane 시험을 실시하였다.

그림 11에 Torvane으로 구한 비배수전단강도 s_u 를 표시하였는데 0.1kg/cm²에서 부터 0.5 kg/cm²까지 큰 변화를 보인다. 상층과 하층의 값이 비슷하고 중층의 값이 작게 측정되었

다. 4가지 경우가 모두 비슷한 분포를 보이고 있어서 Torvane 으로 구한 비배수 전단강도만으로는 압밀후의 강도특성을 비교하기 힘들다. 그림 12는 일축압축시험을 실시한 결과인데 상층부의 강도가 가장 크고 중층의 강도가 가장 작게 측정되었다. 상층에서는 망형 board가 0.352kg/cm^2 으로 가장 크고 중층에서는 non-woven board가 0.225kg/cm^2 으로 가장 크며 하층에서도 non-woven board가 0.252kg/cm^2 으로 가장 크게 측정되었다. 무처리는 전층에 걸쳐 가장 작은 값을 나타냈다. 망형 board와 요철형 board는 층에 따라 강도차가 크고 non-woven board와 무처리는 층에 따른 강도차가 작다.

그림 13은 static cone 관입 시험결과를 도시한 것이다. static cone 관입시험은 직경 28.5mm 각도 30° 인 콘을 사용하였고 관입속도는 2cm/sec 로 하였다. 그림 13(a)는 콘저항치 q_c 를 나타낸 것이고 (b)는 $c=q_c/10$ 과 $q_u=2 \cdot c$ 로 계산한 일축압축강도 q_u 를 나타낸 것이다.

그림 13(a)의 콘저항치 q_c 를 4가지 경우에 대해 서로 비교해 보면 상부층과 하부층에서는 콘저항 차이가 약 $0.07 \sim 0.10\text{kg/cm}^2$ 정도이고 그외의 심도에서는 훨씬 큰 차이가 난다. 가운데 층으로 갈수록 그 차가 커져서 최고 약

0.23kg/cm^2 의 차이가 난다. 각각의 경우에 대해 살펴보면 요철형 board가 심도에 따라 변화폭이 가장 크고 콘저항도 가장 작으며 non-woven board가 심도에 따른 변화폭이 가장 작고 콘저항도 가장 크게 측정되었다. 그림 12의 q_u 와 그림 13(b)의 q_u 를 비교해보면 콘관입 시험으로 구한 q_u 가 일축압축시험으로 구한 q_u 가 일축압축시험으로 구한 q_u 보다 1.13~2.09배 정도 크게 나타났다. 무처리가 1.78~2.09배, 요철형 board가 1.24~1.99배, non-woven board가 1.51~1.73배 그리고 망형 board가 1.13~1.84배 정도 크게 나타났다. 상층에서는 일축압축시험 결과가 분산되어 있고 중층에서는 콘관입시험결과가 다소 분산되어 있다.

모든 결과를 종합해 보면 중층에 비해 상층과 하층의 압밀효과가 좋은 것으로 나타났다. 그 원인을 분석해 보면 상·중·하층 모두 드레인 보드 즉 연직방향 배수층까지의 수평거리는 같지만 하층은 상·중층에 비해 시료 하부의 배수층까지 거리가 가깝기 때문에 진공압의 영향이 커서 배수가 빠르고 상층은 중·하층에 비해 배수층과의 수두차가 크기 때문에 수두차에 의한 중력방향의 배수가 추가되어서 상층과 하층의 압밀효과가 크다고 추정된다.

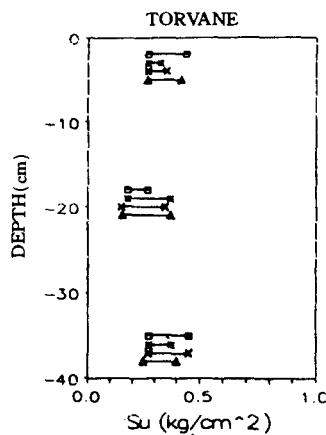


그림 11 Torvane 실험결과

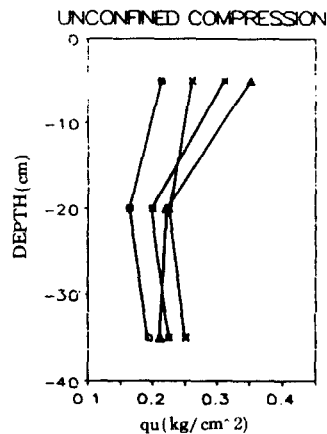
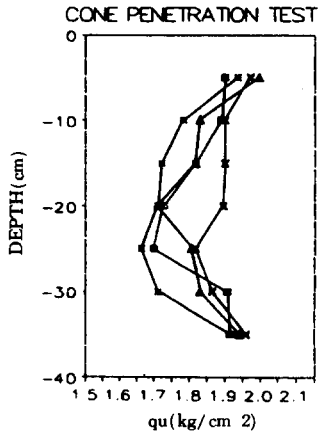
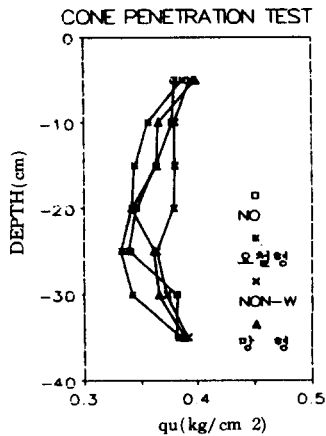


그림 12 일축압축시험 결과



(a) 콘 저항치



(b) 일축압축 강도

그림 13 콘 관입시험 결과

7. 결 론

페이퍼 드래인을 타입한 연약점토에 대하여 진공재하실험을 실시한 결과, 망형 board를 타입한 시료와 non+woven board를 타입한 시료의 침하량이 크게 나타났고 진공압밀은 3차원 압밀거동을 보이는 것이 확인되었다. 진공압에 의해 빠른 시간에 음(-)의 간극수압이 나타나고 간극수압의 변화에서 유효응력이 증

가함을 확인할 수 있었고 밀도와 강도증가를 볼 때 non-woven board를 타입한 경우가 지반 전체에 진공압이 비교적 균등하게 작용하여 압밀효과가 비교적 우수한 것으로 나타났다. 본 연구에서 진공하중에 의한 압밀은 3차원 거동이 발생하는 것이 확인되었지만 정확한 압밀 변형량을 측정하지는 못했다. 수평방향 변위와 연직방향 변위 즉 3차원변형을 측정할 수 있는 장치를 고안하여 분석하는 것이 요구된다. 시험결과를 볼때 국내에는 시공사례가 없으나 유럽에서 이용되는 non-woven board에 관한 연구가 더 진행되어 확실하고 경제적인 시공을 위해 제품생산시 환산계수 α 의 신뢰성이 확보되고 품질관리에 철저를 기하기 위하여 토목섬유 특성시험법의 규격화에 관한 연구와 관심이 뒤따라야 된다고 본다.

또한 진공하중에 의한 압밀실험과 실하중 재하에 의한 압밀 실험을 실시하여 2차압밀영역을 포함한 침하효과와 과잉간극수압의 소산속도에 따른 시간단축효과를 비교하는 것이 필요하고 장기적으로 실내 진공재하 실험결과와 진공압밀 시공현장의 실측값을 상호비교, 분석이 필요하다고 생각된다.

감사의 글

본 연구를 위하여 연구비를 지원하여 주신 (주)대한산자 윤훈모사장님과 실험기구제작을 도와주신(주)삼보콘트롤의 이종일사장님 그리고 준설매립토 채취에 많은 지원을 해주신 (주)한진종합건설의 인천 남항 현장 최성종소장님께 감사의 마음을 전합니다.

참 고 문 헌

1. W. Kjeliman, "Consolidation of Clay Soil by means of Atmospheric Pressure", Conference of Soil Stabilization, MIT, 1952, pp.1~6
2. Goro Imai, "Settling Behavior of Clay Suspension", Soils and Foundations, Vol. 20, No.

- 1, 1981, pp. 61~77
3. K. Been and G. C. Sills, "Self-Weight Consolidation of Soft Soils: An Experimental and Theoretical Study", *Geotechnique*, Vol. 31, No. 4, 1981, pp.519~535
4. 佐佐木, 高見, 森岡, "中立應力低下による地盤改良實驗", *土と基礎*, Vol. 22, No. 7, 1974, pp. 31~36
5. Sangji Menard Texsol Co. Ltd., "Vacuum Consolidation Method", 1992, pp. 1~22
6. 五洋建設株式會社 技術研究所 編, "ペーパードレーン工法と大氣壓工法", *理工圖書*, 1968, pp. 76~85.
7. 龜卦川, 長谷川, 大深度ベパドレイソとその實施例"pp.45~60
8. W. Kjellman, "Accelerating Consolidation of Fine-Grained Soils by means of Card-Board Wicks", *ICSM*, Vol. 2, 1948, pp.302
9. Reginald A. Barron, "Consolidation of Fine-Grained Soils by Drain Wells", *ASCE*, Vol. 113, 1948, pp. 718~754
10. Goro Imai, Kazuo Tsuruya and Kouichino, "A Treatment of Salinity in Water Content Determination of Very Soft Clays", *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 3, 1979, pp.84~89
11. 金翔圭, "Paper Drain의 效果와 問題點에 關한 研究" 1990. pp.1~19
12. "페이퍼드레인工法", (株)洋豊商社, pp.1~8, pp.25~36.
13. 中堀和英, "バーチカルドレーン工法", 森北出版株式會社, 1982, pp.1~7, pp.45~67
14. 佐佐木, 高間佐太男, "ペーパードレイソについての實驗" *土と基礎*, Vol. 17, No.4, April, 1969, pp. 13~18
15. Mitsui Petrochemical Industries Ltd., "Tafnel Drain Method" (접수일자 1993. 2. 4)