

---

---

## Drain board 타입된 점토지반의 강도특성

---

---

이 송 교수(서울시립대학교, 토목공학과)

양 태 선 (서울시립대학교, 토목공학과)

박 종 찬 ((주) 평원 엔지니어링)

### 1. 서 론

### 2. 본 론

#### 2.1 이론적 배경

#### 2.2 재하방법

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

#### 3.2 실험방법

### 4. 해석 및 결과분석

#### 4.1 압밀특성

#### 4.2 토성변화

#### 4.3 강도변화

### 5. 결 론

### 참고문헌

## 1. 서론

준설, 매립을 통하여 형성된 지반의 이용을 극대화한다는 관점에서 볼 때 연약지반의 강도유지는 중요한 문제이다. 연약점성토는 흙의 구조면에서 압축에 대하여 구조적으로 약하며 입자간의 마찰저항이 적고 점착력이 작다. 또한, 간극상태를 살펴보면 간극이 커서 압축이 크게 일어나고 압축시간이 길어지며 함수비가 높다. 특히, 연안을 따라서 발달된 연약지반에 대한 처리는 국토의 효율적 이용가치면이나 경제성에 대하여 상당한 의미를 가진다. 우리나라의 경우 서남해안에 걸쳐 널리 펼쳐진 연약지반은 그 개발가치가 상당히 크다.<sup>10)</sup>

과거 연약지반 처리공법은 그 지반의 압밀을 촉진시키기 위하여 연약지반상에 성토를 통해 간극수압을 소산시켜 소요의 압밀을 통해 그에 따른 지반의 강도를 유지하여 작업을 진행하는 것이다. 그러나, 이 공법은 압밀소요시간이 길고 성토시 지반의 활동파괴가 우려되는 문제가 있었다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 적용될 수 있는 방법이 Vertical Drain 공법이다.

이 공법은 인위적인 연직방향의 배수층을 만들어 배수거리를 단축시켜 압밀에 소요되는 시간을 현저하게 줄이는 방법이다. 일반적인 연직배수 뿐만 아니라 수평배수도 가능하여 일차원 압밀보다 효과적인 압밀을 시킬 수 있다. 그리고, 사용하는 재료의 종류에 따라 Sand Drain과 Paper Drain이 널리 사용된다.

그러나, Sand Drain공법은 모래말뚝이 부러지거나 지역에 따라 다량의 모래를 구할 수 없고 Sand Swim이 발달하면 효과가 줄어드는 단점이 있다. 이러한 점을 보완하여 개발된 방법이 모래말뚝 대신 투수성과 압밀효과가 좋은 Drain Board를 이용하는 방법이다. 실제로 이 방법은 외국에서도 많은 시공성을 보이고 있고 우리나라에서는 창원 적현단지, 일산 자유로, 남해고속도로, 삼척 등지에서 적용되었다.<sup>8)</sup>

페이퍼드레인 공법은 지반내에 생기는 과잉간극수의 배수거리를 줄여서 배수를 촉진시켜 압밀 소요시간을 단축시키는 것을 목적으로 한다. 배수에 의한 지반개량이라는 점과 이론적 원리가 샌드 드레인공법과 같지만 배수재로서 페이퍼를 사용하는 것이 다르다. 이 공법에 사용되는 카드보드는 횡방향변위에 대한 적응력이 뛰어나고 토립자의 유입을 방지할 수 있는데, 본 연구에서는 배수재로 Non-woven보드를 사용하였다.

본 논문에서 적용된 하중재하방법은 동일조건외 시료에 대하여 실하중 재하와 진공하중 재하 두 가지 방법을 모두 사용하였다. 과잉간극수압의 소산에 따른 침하량의 발생은 상재하중의 작용에 따라 차이를 보이고 있으며 실하중 재하에 따른 일차 압밀량의 소요 시간은 길며 이어서 2차 압밀이 발생된다. 그러므로, 전체적으로 침하에 요하는 시간은 길어진다. 이 경우 적용되는 하중의 크기와 재하기간의 결정이 시공에 앞서 선결되어야 할 문제이다. 그러므로, 진공하중을 통한 압밀효과와 그 시간적 효용성, 가치성을 분석하는 것이 중요하다. 진공하중 재하는 시료를 밀폐시킨뒤 진공펌프로 하중을 가하고 배수는 상향과 하향등 2가지로 하였으며 실하중 재하는 지렛대원리를 이용하였다.

또한, 실험을 통하여 Paper Drain의 효과를 검토하는 것이 보다 중요할 것이다. 이에 본 연구에서는 Paper Drain을 타입한 경우에 대하여 진공압을 가하고 또는 실하중을 가한 경우를 비교 검토하므로써 그 강도특성을 파악하는데 그 목적이 있다.

## 2. 본론

### 2.1 이론적 배경

Karl Terzaghi는 「점토층내의 과잉간극수압의 소산에 소요되는 시간은 배수거리의 제곱에 비례한다」는 이론을 적용하여 페이퍼 드레인 및 샌드 드레인등을 이용한 연직배수공법이 지반개량에 사용되게 되었다.<sup>21)</sup> Sweden의 W. Kjellman은 Paper를 드레인재로서 점토층내의 배수효과에 대한 실험을 실시하였다. 그는 점토층내에 연직 드레인을 타설했을 경우 배수효과는 드레인 보드의 배수단면적보다 드레인 보드와 점토의 접촉면적에 관계한다는 것을 발견하고 드레인 보드재로서 샌드 드레인같은 원형단면보다는 띠모양 단면 쪽이 유리하다고 발표하였다.

페이퍼 드레인 이론은 근본적으로 샌드 드레인 이론과 동일한데 이 이론을 전개하는데 이용된 기본 가정은 다음과 같다.

드레인의 중심을 향하여 배수되는 영향범위는 원이며 압밀이 진행되는 동안 그대로 수평면을 유지한다. (등변형을 이론) 그리고, 드레인의 배수는 제한을 받지 않으며 Darcy의 법칙이 성립된다는 내용이다.<sup>18) 22)</sup>

이러한 기본적인 가정을 근거로, 방사선 방향만에 의한 압밀시간은 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$U_h = \frac{e^{-\delta T_h}}{\mu} \quad \langle 2-1 \rangle$$

$$T_h = \frac{ch \ t}{De^2} \quad \langle 2-2 \rangle$$

이므로 식 <2-1>을 시간 t에 관해서 풀면 식 <2-3>과 같다.

$$t = \frac{De^2 \ \mu}{8 \ ch} \ln \frac{1}{1 - U_h} \quad \langle 2-3 \rangle$$

여기서, t : 압밀시간    De : 배수원통의 등가직경  
ch : 방사선 방향의 압밀계수  
U<sub>h</sub> : 평균압밀도    T<sub>h</sub> : 방사선 방향의 시간계수

$$\mu = \frac{n^2}{n^2-1} \left[ \ln(n) - 0.75 + \frac{1}{n^2} \left( 1 - \frac{1}{4n^2} \right) \right] \quad \langle 2-4 \rangle$$

여기서,  $n : De / d$        $d : \text{드레인의 등가직경}$

식 <2-5>를 식 <2-3>에 대입하면 식 <2-6>으로 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} t &= \frac{De^2}{8ch} \frac{n^2}{n^2-1} \left[ \ln(n) - 0.75 + \frac{1}{n^2} \right] \ln \frac{1}{1-Uh} \\ &= f1 \ln \frac{1}{1-Uh} \end{aligned} \quad \langle 2-6 \rangle$$

여기서

$$f1 = \frac{De^2}{8Ch} \frac{n^2}{n^2-1} \left[ \ln(n) - 0.75 + \frac{1}{n^2} \right] \quad \langle 2-7 \rangle$$

이다.

계수 f1을 알면 압밀계수와 드레인의 유효직경이 주어졌을 때 식 <2-7>로 부터 배수원통의 등가직경 De를 결정할 수 있다.

페이퍼 드레인의 등가직경은 띠의 둘레를 원의 둘레로 환산하여 구한다.

따라서 폭이 b이고 두께가 t인 페이퍼 드레인의 등가직경은

$$De = \frac{2(b+t)}{\pi} \quad \langle 2-8 \rangle$$

그런데, 여러 연구결과에 의하면 페이퍼 드레인에서 처럼 동수경사가 낮은 경우 Darcy의 법칙이 실제와 잘 맞지 않는다고 보고되고 있다. 실내와 현장 투수시험 결과에 의하면 물의 투수속도와 동수경사는 지수관계가 성립하므로, Darcy의 법칙은

$$v = k i^n \quad \langle 2-9 \rangle$$

여기서,  $v : \text{물의 침투속도}$      $k : \text{흙의 투수계수}$

$i : \text{동수경사}$        $n : \text{지수}$

De가 결정되면 드레인의 간격 S는 다음 식으로 구한다.

$$\text{정삼각형 배치} : S = De / 1.05 \quad \langle 2-10 \rangle$$

$$\text{정사각형 배치} : S = De / 1.13 \quad \langle 2-11 \rangle$$

압밀도에 대한 Barron의 해는

$$u_r = \frac{4\bar{u}}{d_e^2 F(n)} \cdot r e^{2 \log\left(\frac{r}{r_w}\right)} - \frac{r^2 - r_w^2}{2} \quad \dots \quad \langle 2-12 \rangle$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \bar{u} &= u_0 e^{-\lambda} & \lambda &= \frac{-8T_h}{F(n)} \\ T_h &= \frac{C_h}{d_e^2} t & n &= \frac{d_e}{d_w} \\ F(n) &= \frac{n^2}{n^2-1} \ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2} \end{aligned}$$

라면 평균압밀도는 식 <2-13>이 된다.

$$U_r = 1 - \exp(-\lambda) \dots \dots \dots \langle 2-13 \rangle$$

또, 압밀진행중의 침하량 S는

$$S = m_v p' H \dots \dots \dots \langle 2-14 \rangle$$

여기서, p' : 증가하중

이다. 이 경우의 압밀도는

$$U = \frac{p'}{q} \dots \dots \dots \langle 2-15 \rangle$$

이고, 또  $\frac{q}{q-p'} = \frac{1}{1-U}$  이므로

$$U = 1 - \exp \left\{ \frac{-2 \cdot C_v \cdot t}{\frac{L^2}{\pi} \left( \log \frac{1}{r\sqrt{\pi}} - \frac{3}{4} \right)} \right\} \dots \dots \dots \langle 2-16 \rangle$$

$$\begin{aligned} &= 1 - \exp(-C_v t / m_1) \\ &= 1 - \exp(-t / g_1) \dots \dots \dots \langle 2-17 \rangle \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } m_1 = \frac{L^2}{2\pi} \left( \log \frac{1}{r\sqrt{\pi}} - \frac{3}{4} \right)$$

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

이다. 식 <2-17>은 W. Kjellman(1948)에 의해 제안된 연직 배수공법에 의한 평균압밀도

를 표시한 식이다. 여기에서 주의할 것은 식 <2-15>는 드레인을 정방형으로 배치한 경우이고, 정삼각형배치인 경우에는 식 <2-15>대신 식 <2-18>을 쓴다.

$$R^2 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi} L^2 \dots\dots\dots \langle 2-18 \rangle$$

정삼각형배치인 경우의 평균압밀도는

$$U = 1 - \exp \left[ \frac{-4 C_v t}{\frac{\sqrt{3}L^2}{\pi} \left( \log 0.913 \frac{L}{r\sqrt{\pi}} - \frac{3}{4} \right)} \right] \dots\dots \langle 2-19 \rangle$$

$$= 1 - \exp (-t/g_2) \dots\dots\dots \langle 2-20 \rangle$$

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

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

와 같이 된다.

Paper Drain공법에 관하여 현장에서의 시공과 그에 따른 분석에서 고려할만 한 사항은 드레인 보드의 형상계수  $\alpha$ 의 산정이다. Paper Drain의 해석을 Sand Drain과 같은 방법으로 해석한 경우 B, t를 Paper Drain의 폭, 두께라 하면 등가직경  $De = \frac{2(B+t)}{\pi} * \alpha$ 에서

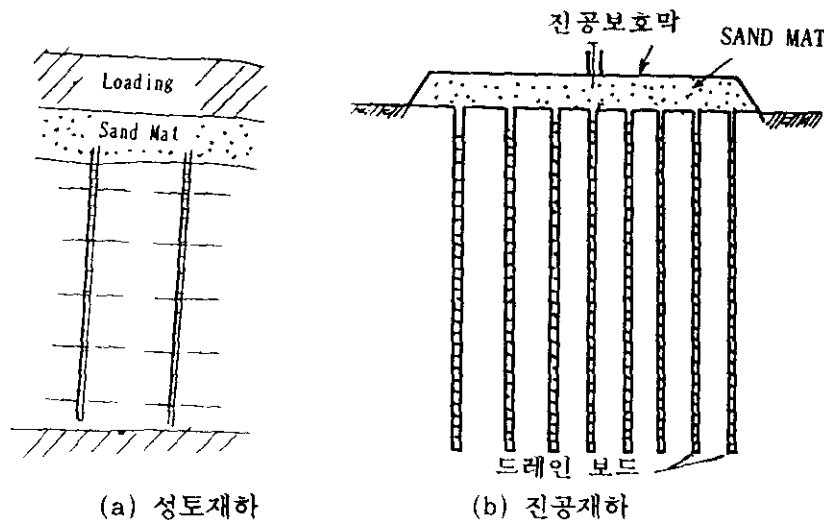
$\alpha$ 는 드레인보드자체의 공장제품의 특성을 나타내고 있다.

둘째, 압밀계수의 결정이다. 일차원 압밀을 좌우하는 연직압밀계수외에 수평압밀계수를 구하는 것이 중요하다. 실제로 수평압밀계수보다 4-7배 크다고 발표되고 있는데 실험실에서 구하는 경우 보통시료의 재하상태에서 시료를 90° 회전시킨 상태에서 압밀시험을 실시하여 구한다. 그러나, 이것을 고려하여 구한 침하량 값은 실제값보다 상당히 과대침하량을 예측하게 된다. 현장의 실측보고에 따르면  $C_v \approx C_h$ 로 계산하는 것이 실제와 가까운데 이는 Drain타입시 시료의 교란문제가 제기되기 때문이다.

셋째, 확실한 Boring 조사의 필요성이다. Boring 조사에 나타난 Sand seam등의 존재로 압밀효과를 반감시킬 수 있으므로 Boring 조사를 정확히 하여 그 영향을 줄이는 것이 중요하다 하겠다. <sup>6) 7) 8)</sup>

## 2.2 재하 방법

일반적인 압밀상태와 그에 따른 압밀축진 공법의 적용에 대하여 살펴보면 먼저 연약지반이나 보통지반에서 성토하중을 통하여 압밀이 일어나는 Terzaghi의 일차원 압밀이론에 대한 해석을 실시한다. 즉, 상부를 통한 일면배수 또는 하부를 포함한 양면배수를 고려할 수 있다. 또는, 재하를 하더라도 오랜시간이 소요될 수 있으므로 배수를 통한 압밀축진을 위하여 지반내에 모래말뚝을 박아 배수거리를 짧게 하여 압밀을 촉진하는 방법이다. 그리고, 모래말뚝 대신에 드레인 보드를 타입하여 압밀을 촉진시키는 방법인데 전술한 방법은 모두 실하중 재하방법을 택하여 그에 따른 문제점을 내포하고 있으므로 재하방법을 달리한 실험을 실시할 필요가 있다. 즉, 진공하중을 적용하는 경우로 성토재하와 진공압 재하에 대하여 드레인 보드를 타입한 배수공법을 나타낸 <그림 1>이 있다.



(a) 성토재하 (b) 진공재하  
<그림 1> 연약지반의 재하방법에 따른 배수공법

### 2.2.1 재하압밀

현장에서 선행압밀하중을 가하는 방법은 성토방법, 물탱크설치, 지하수위 저하 등이 있으며 보통 성토하중 재하방법이 많이 사용된다. 그 효과를 고려하면 기초지반의 침하량을 미리 허용치 이내로 제한시키는 것과 침하에 따른 전단강도의 증대효과로 볼 수 있다. 이러한 침하 문제는 1차 압밀침하와 2차 압밀침하로 나눌수 있는데, 1차 압밀량은 Terzaghi의 압밀이론을 이용하여 구한다. Johnson은 설계하중에 의한 침하문제를 연구하였다.

먼저, 장점을 살펴보면 성토방법이므로 시공이 간단하며 현재 기술이 많이 축적되어 있어서 가장 보편화된 시공법이라 생각된다. 또한 공사재료가 일반적인 것이므로 공사비가 저렴하다. 한편, 단점으로는 준설지역의 고함수비상태의 지중 과잉간극수가 보드를 통한 배수처리효과의 확인이 어렵고, 시공후 큰 침하발생으로 변형될 경우 지중배수기능 저하에 따른 압밀 효과가 낮다.



그리고, 계측관리 도입이 필수적이며, 계측기가 성토하중 증가로 인하여 매설위치가 변하는 경우 시공중 개량효과 확인이 어렵다. 압밀재하후 개량효과가 기대치 이하일 경우 공기연장및 추가공사비가 소요된다. 또, 침하발생시 수평배수층인 샌드매트의 불규칙 거동으로 배수기능과 드레인 보드의기능도 불량하다.

이 방법은 구조물하의 연약지반을 개량하는 효과적이고 경제적 방법이지만 공사기간이 오래 걸리게 된다. 또, 공법의 설계과정에서 많은 가정과 불확실성이 내포되어 설계당시의 값과 계속해서 비교해 보는 것이 필요하다.

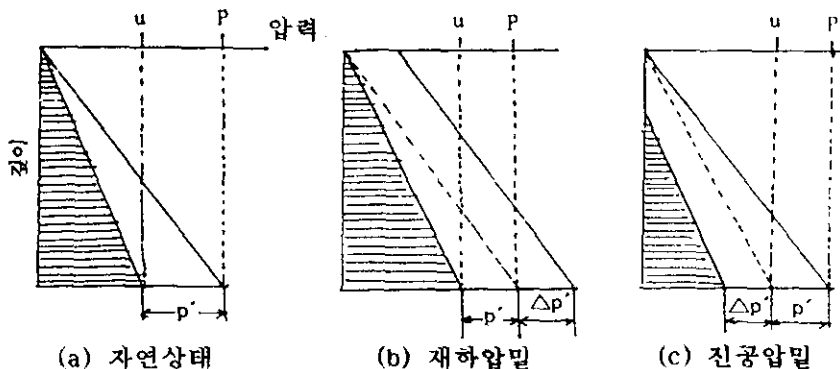
### 2.2.2 진공압밀

흙의 중립응력(간극수압)의 감소에 의한 유효응력 증가분을 압밀응력으로 이용하는 방법을 중립응력 저하공법이라고 한다. 중립응력을 저하시키는 방법으로 진공압을 이용하는 방법, 지하수위를 저하시키는 방법등이 있는데 전자를 대기압공법 또는 진공압밀공법, 후자를 지하수위 저하공법이라고 한다. 진공압밀공법은 중립응력저하공법의 일종으로 Sweden의 W. Kjellman에 의해 처음 발표된 지하수위 변동없이 지반내의 간극수압을 저하시켜 압밀을 촉진시키는 공법이다.

재하압밀과 진공압밀의 가장 큰 차이점은 지반내의 응력변화 상태를 파악하면 알 수 있다. <그림 2>에서 응력변화 상태를 비교해 보면, 재하압밀의 경우는 압밀종료시에 있어서

$$P + \Delta p' = ( p' + \Delta p' ) + u \quad \dots\dots\dots (2-21)$$

여기서, P : 재하전의 전응력    p' : 재하전의 유효응력  
 $\Delta p'$ : 재하응력 증, 압밀응력의 증분    u : 간극수압



여기서, : 간극수압    : 유효응력

<그림 2> 지반내의 응력변화

재하압밀에서는 압밀완료후 전응력은  $\Delta p'$  만큼 증가하게 된다.

한편, 진공압밀에 있어서는 간극수압을 자연상태에서 감소시킨 양을  $\Delta u$  라 하면

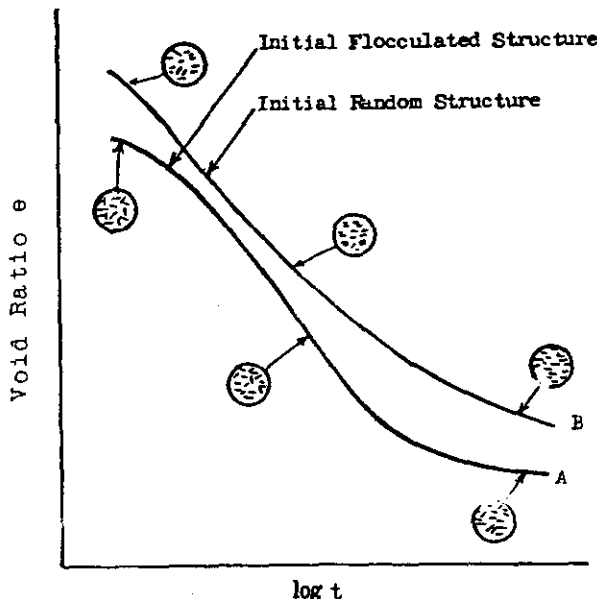
$$\Delta u = \Delta p' \dots\dots\dots \langle 2-22 \rangle$$

이다. 즉, 증가하는 압밀하중은 간극수압의 감소치와 같고, 재하압밀인 경우 <2-21>에 대해서 진공압밀의 경우는 압밀종료시

$$P = ( p' + \Delta p' ) + ( u - \Delta u ) \dots\dots\dots \langle 2-23 \rangle$$

가 된다. 이 상태에서 압밀에 작용하는 응력은 식 <2-21>과 식 <2-23>의 경우 모두  $\Delta p'$  만큼 증가한다. 그러나, 재하압밀은 전응력이  $\Delta p'$  만큼 증가하지만 진공압밀의 경우는 전응력의 변화가 전혀 없다.

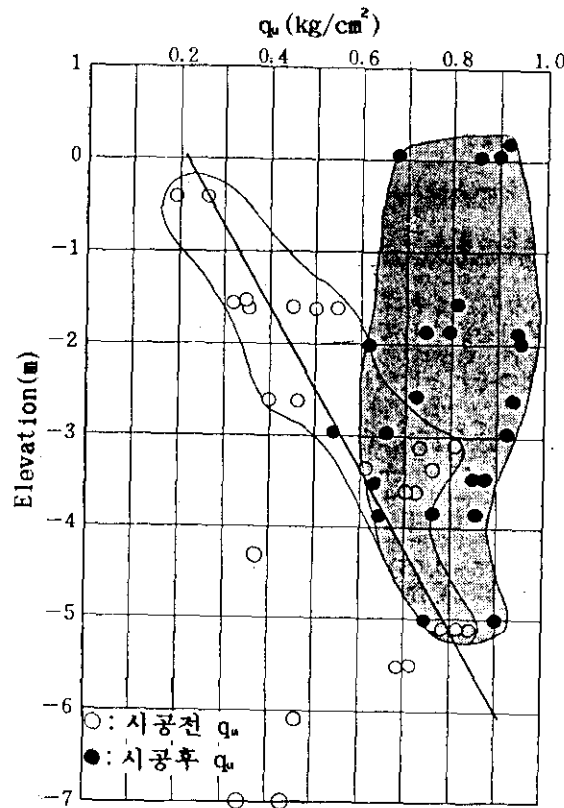
압밀상태에 있어서 재하압밀은 압밀링 내에서 완전한 1차원 압밀거동을 나타내지만 진공압밀에서는 미소하지만 3차원 압밀거동을 보인다. 또, 압밀과정에 있어서 재하압밀의 경우 토립자의 구조가 평행구조를 이루지만, 진공압밀의 경우 배향구조를 나타내는 경향이 있다. 시간-변형곡선에 따른 초기 흡구조의 영향은 <그림 3>과 같다. A선은 최초 재하전의 면모구조로 불교란 해성점토의 대표적인 모습이다. B선의 최초 재하전의 구조는 불완전 배향구조 또는 random구조이다. 결국 재하에 의해 입자간격이 감소하여 과잉간극수압이 소산된다. 재하압밀의 초기거동은 B선을 따른다고 생각된다. 결국 중기까지는 진공압밀의 그것과 같으나 후기에 있어서는 재하에 의한 일차압밀이 끝나지만 진공압밀의 일차압밀은 계속되게 된다.



<그림 3> 시간-변형에 따른 초기구조의 영향 <sup>23)</sup>

그리고, 진공압밀은 상부지반이 연약할 경우 재하성토로 인한 전단파괴 없이 압밀을 촉진시킬 수 있고, 깊은 심도까지 개량할 수 있으며 재하에 의한 압밀보다 배수시간이 훨씬 단축된다는 특징이 있다.

이 공법 적용에 따른 효과는 지반의 지지력을 증대시키고 활동을 방지하여 침하를 빠른 시간에 완료시키는 것으로 요약되는데 그 판정은 토성의 변화를 조사하거나 침하정도, 강도의 확인으로 부터 알 수 있다. 진공하중의 현장적용에 따른 결과는 <그림 4>와 같이 강도효과로 알 수 있다. 진공압의 적용이 종료된 후 전 지반에 대하여 균등한 강도분포가 이루어 지고 있음을 알 수 있다.

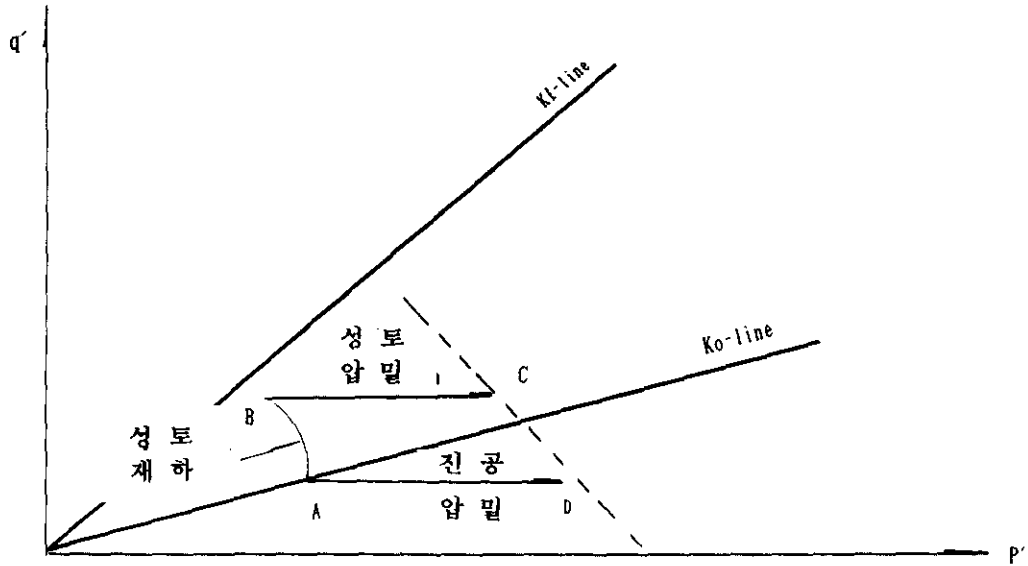


<그림 4> 진공하중 재하전후의 강도변화

즉, 처리하고자 하는 초연약 지반 및 고함수비 상태의 지반에서 등방압밀 효과로 압밀 효과가 확실하여 시공성이 양호하며 초연약지반에서 탈수공법보다 많은 공사비가 소요되나 급속성토가 가능하고 단기간 2차 압밀침하 영역까지 지반개량이 가능하다. 공장에서 대량생산하는 경우 재료수급이 용이하고, 시공성 및 품질관리가 확실하다.

재하압밀과 진공압밀의 응력경로를 그려보면 <그림 5>와 같다. 전자의 경우 성토하중이 증가하면 간극수압도 증가하여 연약지반 속의 최대주응력과 최소주응력이 동시에 감

소(A-B)하고, 시간이 경과하면서 간극수압이 소산되어 유효 최대주응력과 최소주응력이 증가(B-C)하게 된다. 후자의 경우 진공압을 재하하면 간극수압의 감소량만큼 유효 최대주응력과 최소주응력이 증가(A-D)하게 된다.

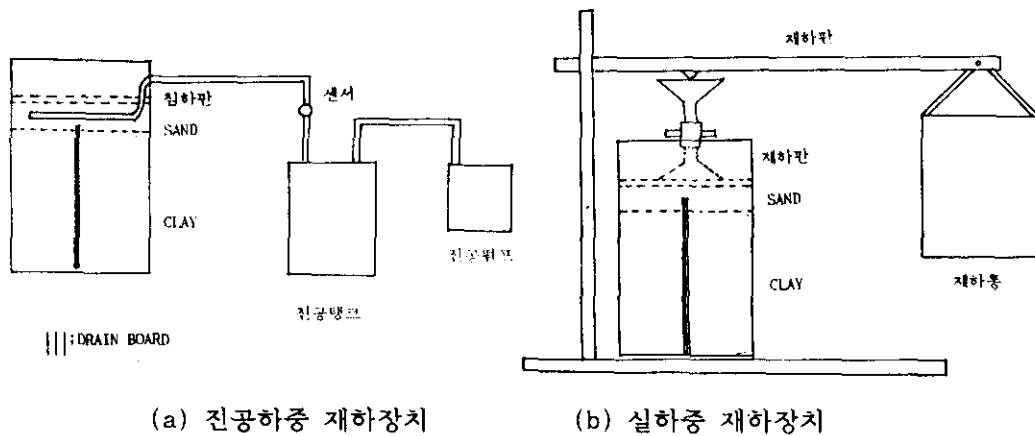


<그림 5> 재하방법에 따른 응력경로

### 3. 실험장치 및 방법

#### 3.1 실험장치

본 실험에서는 하중재하방법이 진공압 하부재하 하부배수, 상부재하 상부배수, 그리고 실하중재하 하부배수인데 그 중 후자 두방법의 경우 높이 120cm 직경 70cm 의 철제탱크 2개를 제작하여 사용하였다. 진공하중과 실하중을 재하하기 위한 장치는 <그림 6>과 같다. (a)는 진공하중 재하장치이고 (b)는 실하중 재하장치를 간략하게 나타낸 그림이다.



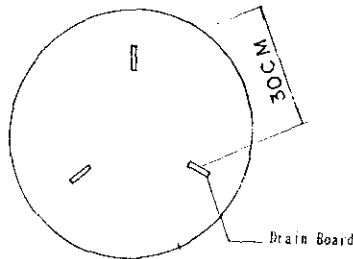
<그림 6> 재하방법에 따른 재하장치

그림에서 진공재하의 경우 시료상부 모래층에 구멍뚫린 파이프를 설치하고 여기에 진공 펌프를 호스로 연결하여 진공하중을 가하였고 일정한 압이 유지되도록 하중을 조절하였다. 또 실하중재하의 경우 지렛대 원리를 이용하여 하중함에 자갈을 채워 그 무게로 시료에 하중이 전달되도록 장치를 고안하였다. 시료상부는 재하판을 설치하여 상부하중이 균일하게 분포되도록 하였으며 배수효과를 촉진하기위하여 모래를 부설하였다. 그리고, 진공하중을 재하하기 위한 장치에는 진공압이 새지 않도록 상부를 밀폐하였으며 침하에 따라 유연하게 대처하도록 여유를 두었다. 재하장치만 다르고 그 외의 모든 조건은 두 시료 모두 동일하다.

진공압 하부배수장치는 (a)에서 배수방향과 재하방향이 다르고 나머지는 같고 직경 70cm, 높이 100cm 규격의 대형탱크를 제작하였으며 시료하부에 침하판을 얹고 침하측정용 침하대를 설치한 뒤 다이알게이지로 침하를 측정하였다. 그리고, 배수효과를 좋게 하기 위하여 탱크 하부에 배수층을 두고 점토시료사이에 시료단면에 균등한 진공압이 작용하

도록 P.V.C. 유공판을 설치하고 그 위에 여과지를 깔았다. 상부는 기밀을 유지하였고 밸브나 나사홈 틈이 있는 곳은 밀폐하였다.

드레인 보드는 <그림 7>과 같이 30cm 간격으로 정삼각형으로 배치하였다. 본 실험에 사용한 드레인 보드는 부직포 형태 (non-woventype)로써, 제원은 폭 50mm 두께 4mm 이고 Hansbo의 등가직경식 식 <3-1>를 이용하여 계산한 등가직경은 34.4mm이다.



<그림 7> 드레인 보드의 설치위치

### 3.2 실험방법

본 연구에 사용할 시료는 인천의 남항 지역에서 채취한 점토로써 우리나라의 대표적 해안의 점토시료라 할 수 있다. 시료의 균질성을 높이기 위해서 NO.40 체를 통과한 시료를 대상으로 했다.

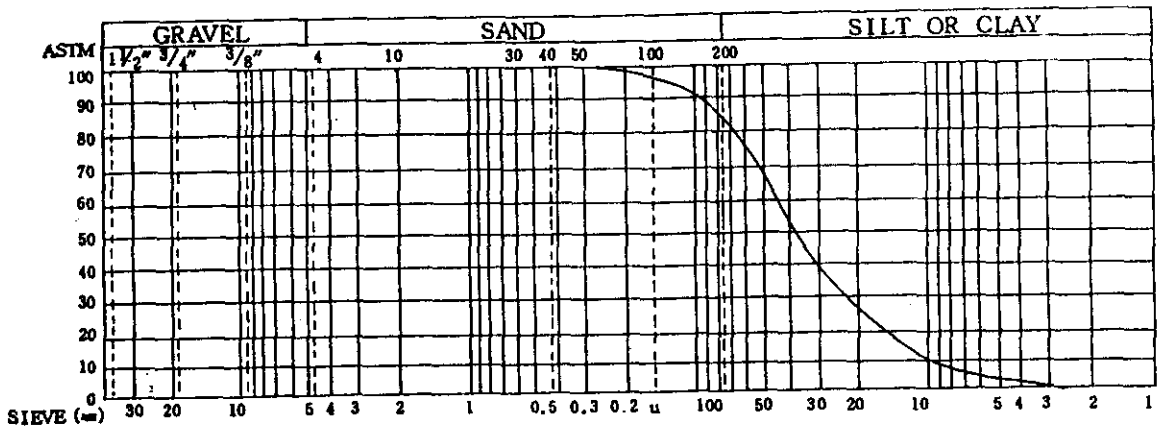
이 시료에 대한 토성시험 결과는 <표 1> 및 <그림 8>에 나타낸 바와 같다. 인천 남항의 해수를 채취하여 Imai등 이 제안한 염분비 실험을 한 결과 염분비  $\beta=0.03$ 이었다. 따라서, 해수와 같은 조건을 만들기 위해 식염을 이용해서 식 <3-1>과 같이 염분비  $\beta=0.03$ 으로 조절하여 실험을 실시하였다.

$$\beta = \frac{W_c}{W_w} \quad \langle 3 - 1 \rangle$$

여기서,  $\beta$  : 염분비     $W_c$  : 소금의 무게     $W_w$  : 증류수의 무게

< 표 1 > 시험전 시료의 토성시험 결과표

함수비 (%)	80.0	비        중	2.68
액성한계 (%)	31.3	단위중량( $g/cm^3$ )	1.517
소성지수 (%)	9.7	간    극    비	2.248
#200 통과율 (%)	86.0	포    화    도 (%)	99.9
통일분류	CL		



〈그림 8〉 입도분포곡선

시료를 교반한 뒤 탱크벽면과 시료사이의 마찰을 방지하기 위하여 탱크벽면에 액체 실리콘수지를 바르고 시료를 1000mm 높이까지 투기한 후 필터를 놓고 배수층을 깔았다. 그리고 소형타입기로 드레인 보드를 타입하고 이로 인한 지반의 교란 영향과 재하판과 모래층의 하중으로 인한 압밀영향을 고려하여 시료를 일정시간동안 방치하였다.

실험준비가 완료된 후 투기된 점토는 초연약 상태이므로 상당히 작은 하중부터 조심스럽게 단계별로 하중을 재하하였다. 각 경우에 대하여 하중재하단계는 〈표 2〉와 같다. a)의 경우는 기밀을 충분히 확보하지 못하여 0.676 kg/cm<sup>2</sup> 까지만 고려하였다.

〈표 2〉 하중재하 단계

a) 진공압 상부배수, 실하중재하시

단 계	1	2	3	4
진 공 cmHg	8	16	32	52
실하 중 kg/cm <sup>2</sup>	0.104	0.208	0.416	0.676
기 간	3	6	7	7

b) 진공압 하부배수

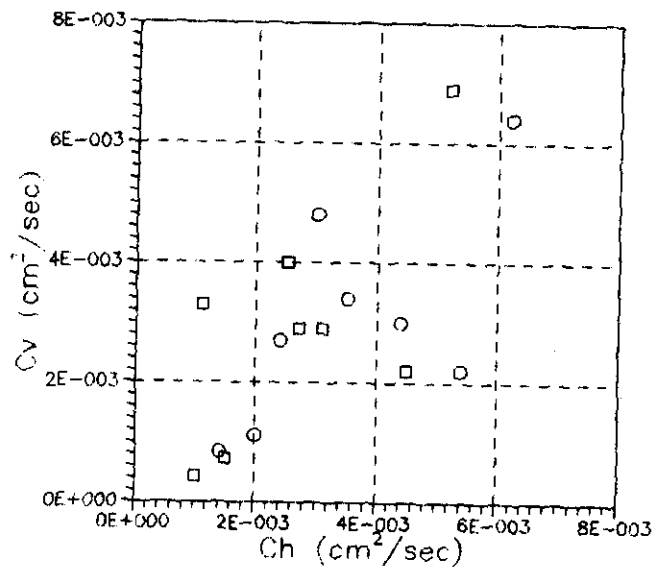
단 계	1	2	3
하 중 cmHg	30	50	58
kg/cm <sup>2</sup>	0.390	0.660	0.730
기 간	3	10	10

압밀이 완료된 후에는 층별로 압밀시험과 강도시험을 실시하여 초기치와의 변화량을 비교하였다.

## 4. 해석 및 결과분석

### 4.1. 압밀특성

<그림 9>는 연직압밀계수  $C_v$ 와 연직압밀계수  $C_h$ 를 압밀시험을 통하여 구한 결과이다. 이 시험은 시료채취를 연직방향과  $90^\circ$ 회전시켜서 얻은 시료 각각에 대하여 실시하였다. 연직압밀계수  $C_v$ 는 진공압 상부배수의 경우  $2.31E-4 \sim 1.08E-3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이고 하부배수의 경우  $5.7E-4 \sim 1.4E-2 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 이며 실하중의 경우  $6.5E-4 \sim 1.4E-2 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 인 범위의 값을 가지고 있다.

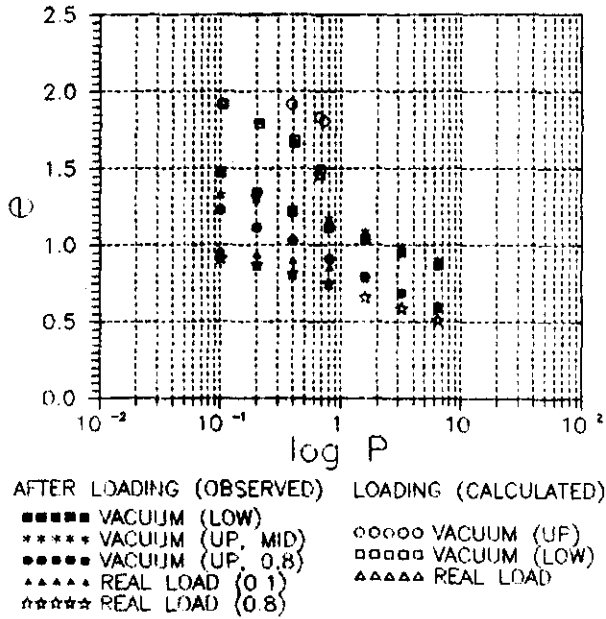


<그림 9> 연직압밀계수  $C_v$ 와 연직압밀계수  $C_h$  관계

그림에서 보는 바와같이  $C_h = (1 \sim 3)C_v$ 인 관계를 알 수 있다. 현장에서는 시공성과 현장성을 고려하여  $C_h = C_v$ 인 관계를 현장계측을 통하여 발견할 수 있다. 이번 실험과 같은 관계를 고려한다면 실제 침하량은 과도하게 예측될 수 있을 것이며 더우기 sand seam이 발달한다면 보다 보수적인 분석결과를 초래하게 된다.



<그림 10>은 진공압 상, 하부 배수, 실하중재하의 각각에 대한 e-log p곡선이다.



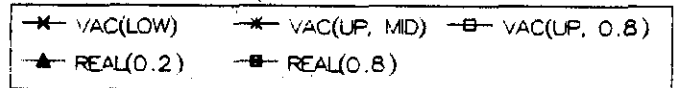
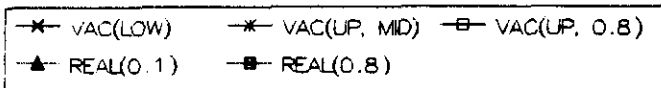
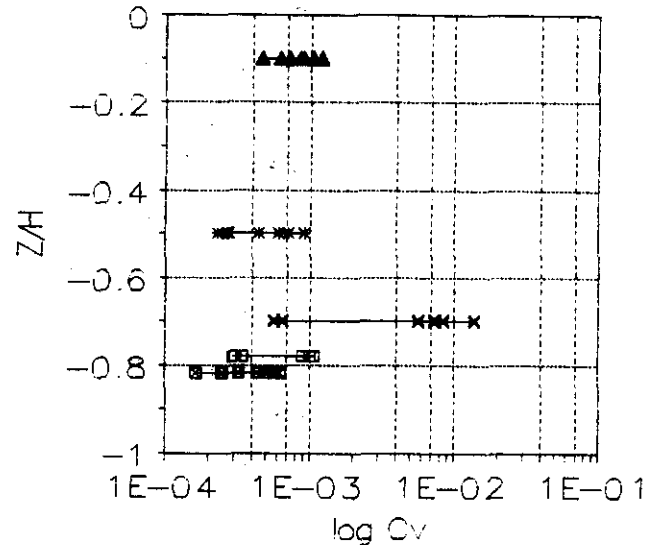
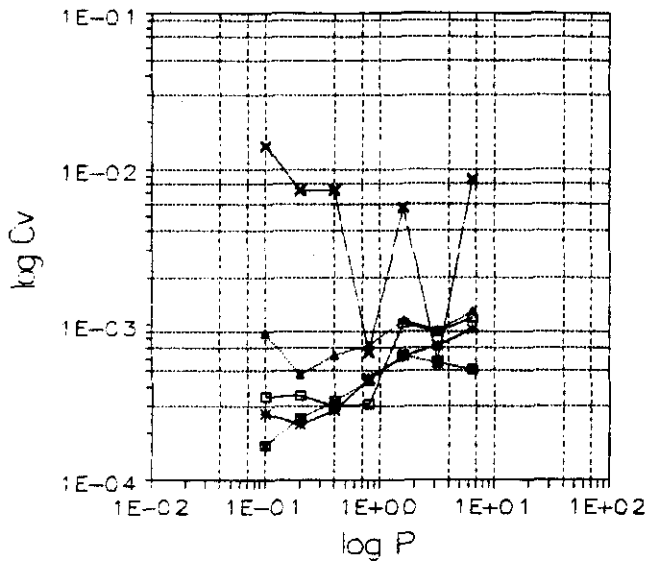
<그림 10> e-log p 관계

<그림 10>에서 재하시의 값은 관측된 자료를 토대로 계산한 값이며 재하후의 값은 하중 단계를 마친 후 각 탱크의 일정한 위치에서 시료를 채취하여 표준압밀실험을 한 결과이다. 재하시의 e-log p 관계는 재하후의 e-log p 관계보다 전반적으로 상향의 추세를 보여 주고 있는 데 이는 크기효과의 결과로서 보다 큰 침하를 예상할 수 있을 것이다. 재하후의 e-log p 관계는 진공하중을 적용시킨 결과가 실하중의 경우보다 간극비의 분포가 크게 나타났으나 전체적인 분포를 판단할 때 일정한 경사를 취하고 있다는 것을 발견할 수 있다. 결국 재하방법에 관계없이 일정한 e-log p 관계를 유지한다는 사실을 알 수 있다.

또한, <표 1>에서 초기간극비는 재하가 시작되기전 2.248이고 자중압밀은 완료된 상태이므로 어느 정도 선형화의 가능성을 재하시의 e-log p 관계로 엿볼 수 있다. 결론적으로 <그림 10>의 재하방법별 e-log p 관계는 평균 압축지수를 사용하여도 이 지반의 압밀 특성을 파악할 수 있게 된다.

<그림 11>은  $\log C_v$ - $\log P$ 관계를 나타내고 있다. 진공압 하부배수의 경우가 가장 큰 값을 보이고 있으며 그 외는 집단을 이루고 있다.

<그림 12>는 깊이- $\log C_v$ 관계를 나타낸 결과이다. 진공압 하부배수의 경우가 가장 크며 실하중의 경우가 다음이다. 깊이별로 균등한 분포를 이루고 있다.



<그림 11>  $\log C_v$ - $\log P$ 관계

<그림 12> 깊이- $\log C_v$  관계

#### 4.2. 토성 변화

재하시의 자료를 토대로 각각에 대한 토성값을 계산하고 하중단계를 모두 적용하여 재하가 끝난 후 실험장치를 제거하고 각각에 대한 토성치 즉, 함수비, 간극비에 대하여 깊이별로 각 시험에 따라 그 값을 나타내었다.

먼저 <그림 13>에 나타난 함수비 분포를 보면 진공압 상부배수의 경우 39.6~57.2%이고 하부배수의 경우 33.8~35.2이며 실하중의 경우 35.9~39.2인 범위의 값을 가지고 있다.

전체적으로 균등한 값을 보여주고 있으며 재하시의 초기 함수비로부터 감소된 경향을 알 수 있다. 상부 진공재하의 상부배수 경우 다른 시험에 비하여 비교적 큰 값을 나타내고 있다. 이는 다른 시험보다 그 효과가 적었던 것으로 생각된다. 투기전의 함수비와 비교할 때 작아졌으나 상부가 큰 것은 상부 진공압에 대하여

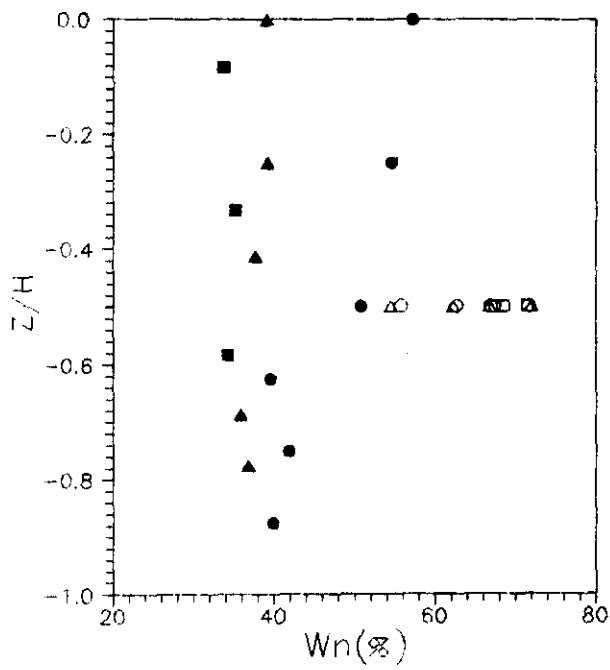
배수가 상향이 되므로 그에 따른 배수가 원활하지 못한 결과이다. 이것은 현장상황과도 일치하는 데 현장재하에 따른 배수문제 그리고, 상부재하 상부배수에 따른 원활한 배수는 상당히 중요하다는 사실을 발견하게 된다. 그 외의 재하 방법을 검토하면 진공하부재하나, 실재하는 모두 균일한 양상을 보여주고 있어서 전 검토층에 대하여 효과가 거의 동일하다고 생각된다.

<그림 14>의 간극비의 경우를 검토하여 보면, 재하시 초기간극비에서 감소된 것을 예측할 수 있으며 재하후 진공압 상부배수의 경우 1.027~1.482이고 하부배수의 경우 0.923~0.963 이며 실하중의 경우 0.909~1.050인 범위의 값을 가지고 있다.

상부 배수의 경우 비교적 양호한 압밀 결과가 나타나지 않으므로 간극비가 크게 나타나고 있다. 시료의 하단은 거의 비슷한 분포를 나타내면서 동일한 결과를 얻을 수 있다. 즉, 재하의 경우는 하중이 재하되는 부분에서 그 효과를 발견할 수 있었으며 또한, 진공재하는 핵심요건인 기밀유지의 효과에 따라 달라지고 특히 하부배수가 상부배수보다는 압밀효과를 기대할 수 있다는 사실을 발견하게 된다.

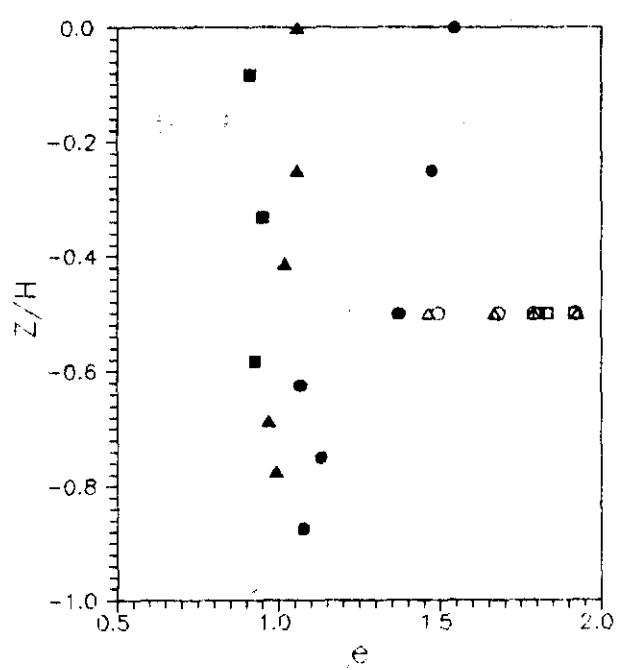
이제, <그림 15>의 심도별 건조단위중량을 살펴보기로 하자. 진공압 상부배수의 경우 1.088~1.332g/cm<sup>3</sup>이고 하부배수의 경우 1.361~1.406g/cm<sup>3</sup>이며 실하중의 경우 1.317~1.414g/cm<sup>3</sup>인 범위의 값을 가지고 있다. 이러한 결과로 부터 심도별로 건조단위중량이 증가하는 결과를 얻을 수 있었다. 결국, 압밀효과를 기대할 수 있다는 사실을 나타내고 있다.

재하하중의 경우 직접재하되는 부근이 가장 큰 값을 보이고 있으며 영향에서 멀어질수록 그 효과는 다소 줄어들고 있다. 그리고, 상부배수의 경우 하단이 크고 상부로 갈수록 작은 값을 나타내고 있는데 이는 하부의 간극수가 상부로 옮겨갔으나 완전한 배수상태가 되지 않고 상부에 모여 있기 때문으로 풀이된다. 하부배수의 경우는 비교적 균일한 단위중량 분포를 보여주고 있다. 이러한 결과를 종합할 때 진공하중을 통한 상부 또는 하부의 배수는 압밀효과를 기대할 수 있으나 전자의 경우 원활한 배수기능이 확보되지 않는 한 그리고, 기밀을 유지하지 않으면 완전한 효과를 기대하기 어렵다는 사실이다.



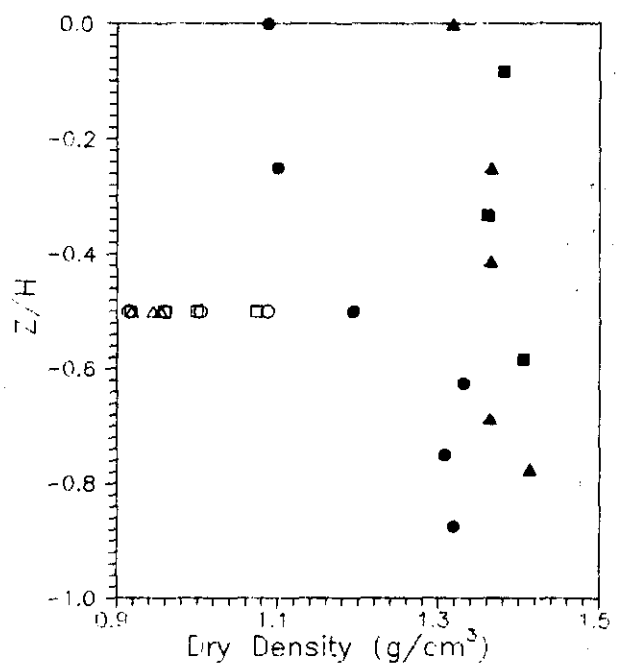
AFTER LOADING (OBSERVED)    LOADING (CALCULATED)  
 ●●●● VACUUM (UPPER)    ○○○○ VACUUM (UPPER)  
 ■■■■ VACUUM (LOW)    □□□□ VACUUM (LOW)  
 ▲▲▲▲ REAL LOAD        △△△△ REAL LOAD

<그림 13> 함수비 분포



AFTER LOADING (OBSERVED)    LOADING (CALCULATED)  
 ●●●● VACUUM (UPPER)    ○○○○ VACUUM (UPPER)  
 ■■■■ VACUUM (LOW)    □□□□ VACUUM (LOW)  
 ▲▲▲▲ REAL LOAD        △△△△ REAL LOAD

<그림 14> 간극비 분포

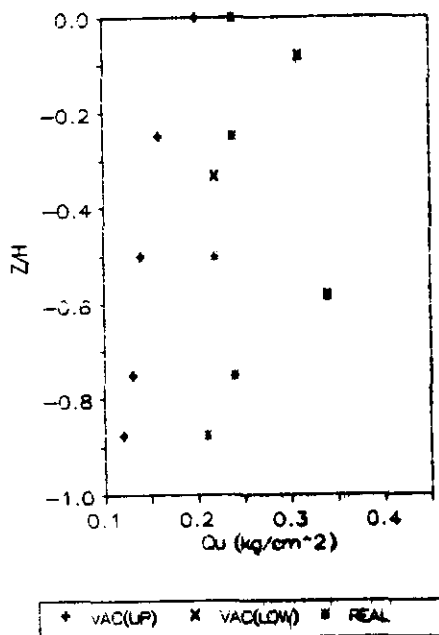


AFTER LOADING (OBSERVED)    LOADING (CALCULATED)  
 ●●●● VACUUM (UPPER)    ○○○○ VACUUM (UPPER)  
 ■■■■ VACUUM (LOW)    □□□□ VACUUM (LOW)  
 ▲▲▲▲ REAL LOAD        △△△△ REAL LOAD

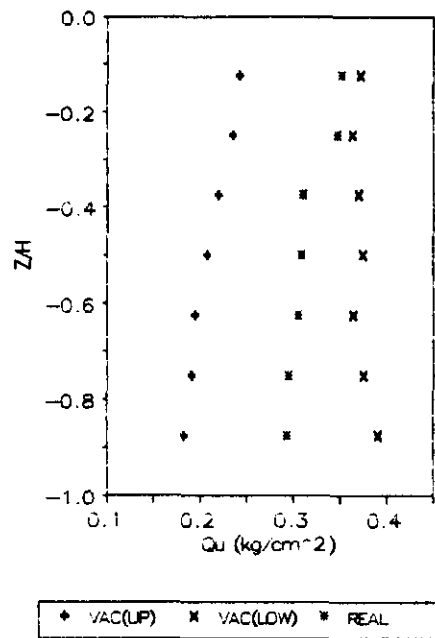
<그림 15> 건조단위중량 분포

### 4.3 강도변화

재하를 마친 후 각각에 대하여 강도시험을 실시한 결과는 다음과 같다.



<그림 16> Su-깊이 관계



<그림 17> qu-깊이 관계

<그림 16>은 Torvane를 이용하여 비배수강도  $S_u$ 를 심도별로 표시한 것이다. 진공압 상부배수의 경우  $0.12 \sim 0.20 \text{ kg/cm}^2$ 이고 하부배수의 경우  $0.22 \sim 0.34 \text{ kg/cm}^2$ 이며 실하중의 경우  $0.21 \sim 0.24 \text{ kg/cm}^2$ 인 범위의 값을 가지고 있다.

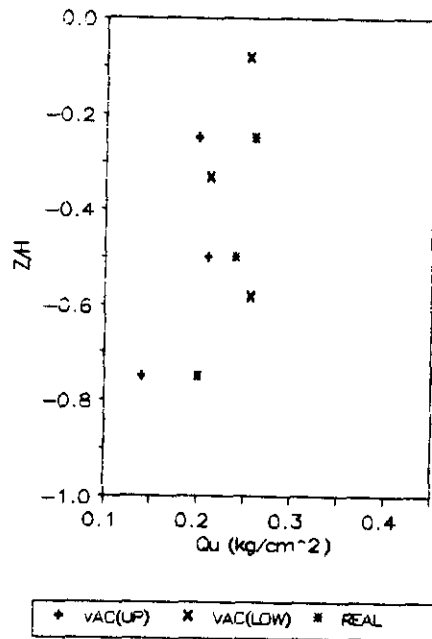
그림에서 발견할 수 있는 비와 같이 실하중 재하방법은 상부배수이고 상부재하이므로 상부층에서 큰 강도를 나타내고 있다. 상부하중에 의한 과잉간극수압은 상향으로 작용하는 간극수의 배출로 점차 소산되는데 그 영향권이 상부층에 가까울수록 크다. 그리고 하부배수의 경우는 압력의 작용과 함께 중력방향의 배수영향도 작용하여 전반적으로 그 효과가 커진 것으로 생각된다. 그러므로, 전반적으로 하향배수를 통한 진공압의 영향이 크다하겠다.

이러한 사실은 Static Cone Test를 이용한 일축압축강도 시험결과를 나타낸 <그림 17>에서 알 수 있다. 진공압 상부배수의 경우  $0.18 \sim 0.24 \text{ kg/cm}^2$ 이고 하부배수의 경우  $0.36 \sim 0.39 \text{ kg/cm}^2$ 이며 실하중의 경우  $0.29 \sim 0.35 \text{ kg/cm}^2$ 인 범위의 값을 가지고

있다. 이 값은 비배수강도  $C_u = q_c / 10$ 와 일축압축강도  $q_u = 2C_u$ 인 관계로부터 구한 값이다. 진공압을 작용시킨 경우 상부배수는 다소 균일하지 않은 값을 보이고 있으나 하부배수는 강도가 다소 고른 분포인 것을 확인할 수 있었다.

일축압축시험을 이용하여 깊이별 일축압축강도  $q_u$ 를 구한 결과는 <그림 18>과 같다. 그림에서 진공압 상부배수의 경우  $0.14 \sim 0.21 \text{ kg/cm}^2$ 이고 하부배수의 경우  $0.21 \sim 0.26 \text{ kg/cm}^2$ 이며 실하중의 경우  $0.20 \sim 0.26 \text{ kg/cm}^2$ 인 범위의 값을 가지고 있다.

일축압축시험의 결과도 앞에서 열거한 결과와 마찬가지로 하부배수의 경우가 보다 양호한 결과를 얻었다.



<그림 18> 일축압축강도-깊이 관계

## 5. 결 론

연약한 점토지반에 압밀축진을 위한 배수기능으로 드레인 보드를 타입한 후 진공하중에 의한 상, 하부배수 그리고, 실하중에 대하여 재하하고 얻은 결과는 다음과 같다.

먼저 재하후 각각에 대한 심도별 강도를 분석하면 진공압을 하부로 작용시켜서 얻은 결과가 실하중을 적용한 결과보다 큰 강도를 얻을 수 있었으며 진공압을 상부로 작용시킨 경우는 비교적 불량한 결과를 얻었다. 그러므로, 진공압을 작용시켜 압밀을 촉진하는 배수공법에서는 하부배수에 의한 경우가 양호한 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 진공압을 하부로 작용시키면 개량을 목적으로 하는 전지반에 대하여 균일한 강도증가를 얻을 수 있었다.

간극비-하중관계를 살펴보면 재하시의  $e-\log p$  곡선은 재하후의 그것에 비하여 경사가 크게 나타나는 데 이는 *scale effect*의 결과로 생각되며 재하방법에 관계없이  $e-\log p$  관계는 일정한 경사를 유지하고 있다. 그러나, 실하중작용시의 간극비-하중관계는 비교적 일정한 경사를 유지하지 못하는 경향을 보이고 있다.

함수비, 간극비, 건조밀도를 깊이별로 분석하면 진공하중을 작용시키고 하부배수의 경우 전 점토층에 대하여 균등한 분포를 유지하고 있고 계산치와 비교해도 비교적 양호한 압밀효과를 기대할 수 있다고 생각되며 진공하중을 작용시킨 상부배수의 경우 원활한 배수가 이루어지지 않았다.

## 참 고 문 헌

1. 高木俊介, "サンドイル排水工のためのグラフ使用例", pp.8-17
2. 龜卦川, 長谷川, "大深度ベバドレインとその實施例", pp.45-60
3. 五洋建設株式會社 技術研究所 編, "ベバドレイン工法と大氣壓工法", 理工圖書, 1968, pp.76-85
4. 中堀和英, "パチカルドレイン工法", 森北出版株式會社, 1982, pp.1-7, pp.45-67
5. 青柳晴一, 山根孟, 竹下春見, "金浦道路におけるサンドパイル工法について", 953, pp.17-21
6. 김상규, "Paper Drain의 효과와 문제점에 관한 연구", 1990, pp.1-19
7. 대한토목학회, "연약지반처리공법", 대한토목학회지, 제35권, 6호, 1987, pp. 21-24.
8. 유태성, 박광준, "선행하중과 Wick Drain공법에 의한 연약해성점토의 개량", 대한토질공학회지, Vol.3, No.1, 1987년, 3월, pp.7-23
9. 박종찬, "페이퍼드레인에 의한 점토지반의 변형특성에 관한 연구", 석사학위 논문(1992학년도), 서울시립대학교 토목공학과, 1992
10. 이 명환외, "연약지반 천층안정처리에 관한 연구", 건설기술연구원, 1988
11. 이상호, "Geotextile의 투수 및 배수 특성에 관한 연구" 한국 지반공학회 토목 섬유 위원회 학술세미나 논문집 제 1 회 1992 년 pp33-41
12. 이송, 양태선, 박종찬, 백영식, "진공하중에 의한 Drain Board 타입 점토 지반의 거동 특성", 한국 지반공학회지 제 9 권 제 1 호 1993년 3월 pp.45-57
13. 임병조 외 공저, "최신 토질역학상론", 학연사, 1991, pp.211-224
14. Atsuo Onue, "Consolidation by Vertical Drains taking Well Resistance and Smear into Consideration", Soils and Foundations, Vol.28, No.4, Dec., 1988, pp.165-174
15. Dannes T. Bergado, Hiroshi Asakami, Marolo C. Alfaro and A. S. Balasubramaniam, "Smear Effects of Vertical Drains on Soft Bangkok Clay", ASCE, Vol.117, No.10, 1991, pp.1509-1530
16. E. C. McRoberts and F. Nixon, "A Theory of Sedimention", Can.Geotech., Vol13, 1976, pp.294-310



17. E. G. Hart and R. L. Konder, "Analysis for Partially Penetrating Sand Drains", ASCE, October, 1958, pp.1812-1-1812-15
18. F. E. Richart, "A Preview of the Theories for Sand Drains", ASCE, July, 1957, pp.1301-1-1301-38
19. Goro Imai, "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", Soils and Foundations, Vol.21, No.1, 1981, pp.7-20
20. Goro Imai, Kaquo Tsuruya and Kouichino, " A Trearment of salinity in water content Determination of very soft days" Soils and Fonnations, Vol 19, No 3, 1979, pp. 84-89
21. Karl Terzaghi and Ralph B. Peck, "Soil Mechanics in Engineering Practice", John Wiley and Sons, 1967, pp.173-182
22. Mitchell, " Soil Improvement - state - of - the - Art ", Proc, 10th, ICSMFE 2, 1981, PP.509-565.
23. R. N. Yong and B. P. Warkentin, "Introduction to Soil Behavior", The Macmillan Co., 1966, pp.216