

# 현장조건을 고려한 플라스틱 보드 드레인의 성능평가 EVALUATION OF PLASTIC-BOARD DRAINS CONSIDERING IN-SITU CONDITIONS

박영목, Yeong-Mog Park

영남대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam Univ., Gyongsan, Gyongbook.

개요(SYNOPSIS) : Discharge capacity of plastic-board drain(PD) in-situ is affected by air bubbles released from the water, lateral confining stress from the soil, flow gradient, the shape of PD with consolidation and the effect of smear around the PD. Experiments are conducted in the laboratory simulating the above in-situ conditions affecting the performance of PD. Contributions of each of these factors to the well resistance, are quantified. It is suggested that PD longer than 20m can also be used in practice in soft clay improvement.

주요어 : 플라스틱 보드드레인(PD), 배수성능, 웰 레지스턴스, 공기(기포), 스미어 존

## 1. 서론

연직배수공법(Vertical drain method)에 있어서 배수재로 플라스틱 보드 드레인(Plastic-board drain ; 이하 PD라 함)을 이용하는 케이스가 늘어나고 있으며 PD재의 배수성능에 대한 검토가 많이 실시되고 있다. 특히 三浦·朴·Madhav(1993)는 PD의 배수성능에 대해서 광범위한 실험을 하여 현행 등가경 평가법의 타당성, PD 주변 세립토의 이동현상, 종방향 통수능력, 웰 레지스턴스(well resistance)에 영향을 미치는 주요인에 대하여 고찰함과 동시에 2층 스미어 존(smear zone)에 대한 압밀해석모델을 제안했다. 본 연구에서는 먼저 PD재를 이용할 경우에 지반의 압밀속도에 영향을 미치는 주요인에 대해서 검토하고 그 결과를 기초로 현장조건을 고려한 PD재의 성능시험에 대해 고찰한다. 지금까지는 PD재의 현장조건을 고려한 검토가 충분히 되어 있다고 할 수 없으며, 그 적용심도도 20m 정도로 제한되어 있는 것이 실상이지만 본 연구에 의해 보다 깊은 점토층까지의 타설을 시도해도 문제가 없음을 나타낸다.

## 2. 압밀속도에의 영향요인

PD재를 이용하여 연약지반의 압밀개량을 실시한 경우, 압밀속도에 영향을 미치는 요인  $\mu_s$ 에 대해서 Hansbo(1986)는 식(1)과 같이 제시했다.

$$\mu_s = F(n) + F(s) + F(r) \dots \dots \dots (1)$$

여기서 F(n)은 PD재의 타설간격, F(s)는 스미어 존 및 F(r)은 웰 레지스턴스에 의한 영향이다. Fig. 1은 지반과 PD가 Table 1의 조건인 경우에 3가지의 영향치를 등가경과 PD의 타설 유효직경의 비

$n(=d_e/d_w)=10\sim50$ 의 범위에서 플롯된 것이다. 여기서 PD의 타설간격과 스미어 존에 관한 조건은 같기 때문에  $F(n)$  및  $F(s)$ 의 값은 모든 케이스에 있어서 동일조건으로 된다.

점토지반 ( $k_h=10^{-7}$ cm/sec, Case B, D)의 경우는, PD의 타설심도  $L$ 이 50m가 되어도 웰 레지스턴스(WR)의 영향은 적다. 투수계수가 높은 실트질 지반( $k_h=10^{-5}$ cm/sec, Case A, C 및 E)의 경우는 PD의 타설간격 및 스미어 존에 의한 영향과 마찬가지로 WR의 영향이 큰 값을 나타내어 타설길이가 10m로 짧아도 무시할 수 없게 된다. 따라서 실트지반의 경우는 PD재의 종방향 통수시험은 중요한 의미를 가지게 된다. 현장에서 지반의 압밀이 진행됨에 따라서 PD재의 종방향 통수능력  $Q_w(=단위시간당유량 Q / 동수구배 i)$ 에 영향을 미치는 새로운 요인이 발생한다.

Fig. 2는 압밀도  $U_s$ 의 진행에 따른  $Q_w$ 값 및 요구통수량  $Q_{req}$ (지반 및 PD재의 타설조건에 따라 요구되는  $Q_w$ )의 변화를 대표적인 PD재인 TS에 대해서 측정된 예이다.

본 실험에서 대상으로 한 PD재는 다음의 7종류이다.

- a) 폴리에치렌 심체의 코어와 폴리에스텔 합성섬유 필터를 접착하여 일체로 한 CS; b) CS의 개량타입인 CS<sub>2</sub>; c) 폴리프로필렌 부직포로 만든 MW; d) 폴리에치렌 수지로 제작하여 MW의 휨성을 개량한 MB; e) 폴리오레핀 수지의 코어 및 셀룰로이스와 폴리에스테르계 합성섬유의 필터로서 제작된 GL; f) 폴리프로필렌 장섬유에 부직포로 제작된 TF; g) 폴리에치렌 코어와 폴리프로필렌 장섬유의 필터로 만든 TS.

Fig. 2로부터 PD재의 굴곡 및 꺾임의 영향(Bending & folding)이 가장 큰 값을 나타내고 압밀진행에 따라 그 영향이 증가하는 것, 장기(Long-term) 성능시험에서 얻은 PD재의 크리프(creep) 변형의 영향은 대부분이 압밀초기 단계에 나타나는 것, 동수구배의 영향은 재하시에는 크지만 그후 압밀이 진행됨에 따라 저하해 가는 것 및 압밀도  $U_s$ 가 50% 넘어서 동수구배가 저하하여 PD재가 굴곡하면 기포의 영향을 심하게 받게되어  $Q_w$ 는 저하해 가는 것 등이 이해된다.

Table 1 Parameters of soil and PD for calculation

Case	Parameter		
	L of PD (cm)	$k_c (=k_h)$ (cm/sec)	note
A	1000	$10^{-5}$	$d_w = 5$ cm $k_w = 10$ cm/sec $s(=d_w / d_w) = 3$ $k_c / k_w = 3$
B	3000	$10^{-7}$	
C	3000	$10^{-5}$	
D	5000	$10^{-7}$	
E	5000	$10^{-5}$	

L: Length of PD

$d_w$ : Equivalent diameter of PD

$d_w$ : Diameter of smear zone

$k_c / k_w$ : Ratio of horizontal coefficient of permeability of undisturbed and smear zones

$k_w$ : Longitudinal coefficient of permeability of PD

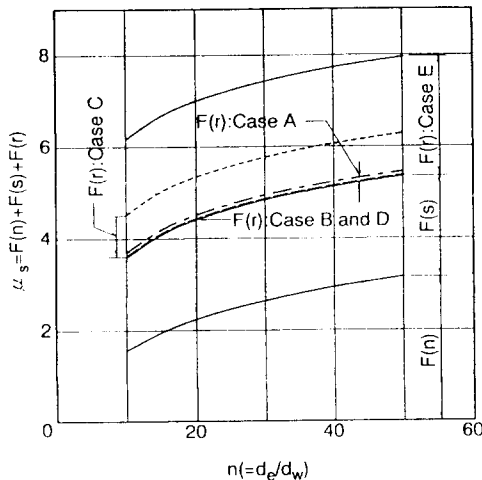


Fig.1 Factors influencing drainage performance

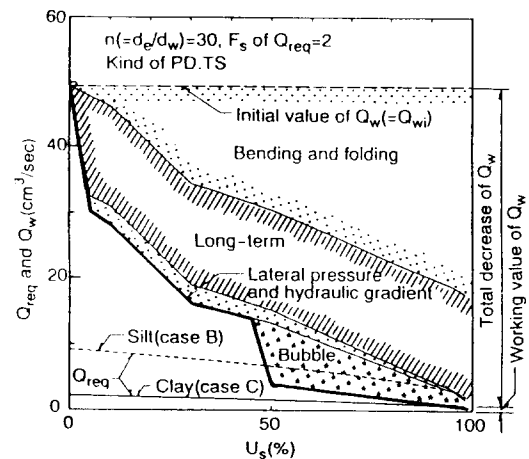


Fig.2 Decreases of  $Q_w$  and  $Q_{req}$  with consolidation

Fig. 2의  $Q_{req}$ 에 대해서는 Pradhan등(1991)이 나타낸 식(2)를 이용하여 계산했다.

$$Q_{req} = \epsilon_f \cdot U_h \cdot F_s \cdot L \cdot \pi \cdot c_h / (4 \cdot T_h \cdot 86,400) \dots \dots \dots (2)$$

$$T_h = -\mu_s \cdot \ln(1-U_h)/8$$

여기서,  $\mu_s = F(n) + F(s) + F(r)$ , 또한  $\epsilon_f$ : 연직방향의 최종변위(0.25H),  $U_h$ : 수평방향 압밀도,  $F_s$ : 안전계수 (=2),  $L$ : PD재의 타설길이 및  $c_h$ : 지반의 수평방향 압밀계수( $cm^2/day$ )이다. Fig. 2에 있어서, 실트(Silt, case B)와 점토(Clay, case C)의  $Q_{req}$ 를 압밀진행에 따라 통수능력이 저하한 후의  $Q_w$ (그림 속의 굵은 선) 와 비교해 다음을 알 수 있다. 점토지반의 경우는 압밀 전과정에 있어서  $Q_w \geq Q_{req}$ 로 되고 WR의 영향을 무시할 수 있다. 그러나 실트지반에서는 압밀도가 50% 넘으면  $Q_w < Q_{req}$ 로 되고 WR의 영향은 무시할 수 없으므로 PD재의 종방향 통수능력의 평가는 중요한 항목이다. PD의 통수능력에 대한 기본적인 사항에 대해서는 기 발표된 논문(三浦·朴·Madhav, 1993)에 상술하였으므로 참조바라며 본고에서는 현장조건을 고려한 실용적 실내시험 방법에 대해서 고찰한다.

### 3. 현장조건을 고려한 종방향 통수시험

#### 3.1 구속압의 크기

시험장치는 후술하는 Fig. 9에 나타내는 것과 같이 삼축압축시험장치와 유사한 것을 이용하는 경우가 많다. PD재의 양단을 수조의 유입 및 유출구에 접속하고 PD재 전체를 고무 슬리브로 감싼 후 수압으로 측압을 부하한다. 이 장치는 요소시험이기 때문에 현장에서의 PD에 작용하고 있는 응력 상태 등을 고려하여 시험조건을 설정할 필요가 있다. 먼저 부하할 측압에 대해서는 PD의 타설심도와 상재하중의 크기를 고려해서 결정한다. 최근에는 깊은 심도로 PD를 타설하는 경우도 있음을 감안하여 ;  $L=30m$ 인 PD재의 가장 깊은 곳에 작용하는 측압  $\sigma_3$ 를 지표면에 지하수가 위치한다고 가정하여 개략적으로 구하면 성토고  $h=3m$ 에 대하여 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \sigma_3 &\leq (L \cdot \gamma' + h \cdot \gamma_t) K_0 \\ &= (30 \times 4.9 + 3 \times 17.6) \times 1 = 200kPa \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

여기서  $\gamma'$ : 점성토의 수중단위중량,  $\gamma_t$ : 성토재의 습윤단위중량, 및  $K_0$ : 토압계수이다. 따라서 PD재 타설심도가 30m이하인 경우에 대해서는  $\sigma_3$ 를 작용압력의 2배인 400kPa정도를 부하할 수 있는 장치를 이용하면 된다.

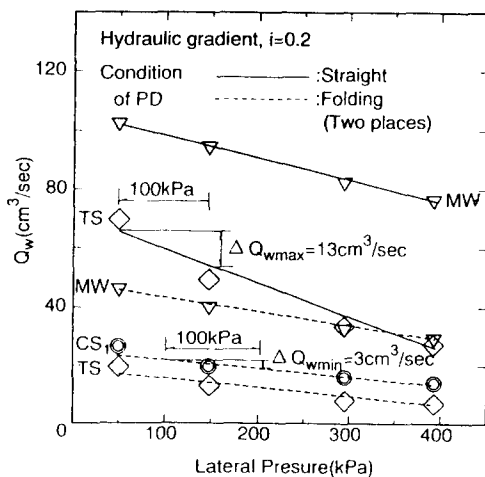


Fig.3 Variation of  $Q_w$  with lateral pressure  $\sigma_3$

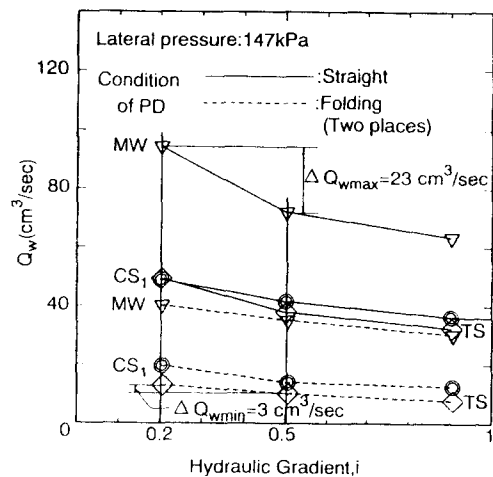


Fig.4 Variation of  $Q_w$  with hydraulic gradient  $i$

Fig. 3은  $Q_w$ 와  $\sigma_3$ 의 관계를 측정한 예이다. 측압의 증가에 따른  $Q_w$ 의 저하에 관하여 많은 측정예가 있으며 지수적으로 변화한다고 지적한 것도 있지만 실용적으로 개략치를 구하는 경우에는  $\sigma_3=50\sim 400\text{kPa}$ 의 범위에서  $Q_w$ 의 저하는 거의 직선적이라고 보아도 좋다. 따라서 측압의 영향에 관한 시험은,  $\sigma_3=49\text{kPa}(0.5\text{kgf/cm}^2)$ 과  $\sigma_3=392\text{kPa}(4.0\text{kgf/cm}^2)$ 의 2조건으로 실시하면 이 조건내의  $Q_w$ 는 보간법에 의해 개략 추정할 수 있다. 본 실험에 이용한 PD에 대해서는 구속력  $\sigma_3$  증가량  $\Delta\sigma_3=100\text{kPa}$ 에 대하여  $Q_w$ 의 저하량은 최소치  $\Delta Q_{w\min}=3\text{cm}^3/\text{sec}$ , 최대치  $\Delta Q_{w\max}=13\text{cm}^3/\text{sec}$ 이었다. PD시험편의 길이는 연구자에 따라서 다양각색이며 10~300cm의 범위가 많다. 시험편의 길이를 결정함에 있어서 고려해야 할 사항은 전 수두, 시험장치의 손실수두(Fig. 9의 장치에서는 0.6cm), 동수구배 및 기포의 영향이다. 또한 PD의 굴곡의 영향을 조사하기 위해서는 몇 개소의 강제변형을 줄 수 있는 길이가 필요하다. 이들을 종합적으로 고려할 때 실험실에서 길이 40~50cm의 시험편을 사용하면 좋다고 본다.

### 3.2 동수구배

Pradhan등(1991)은, PD의 종방향 동수시험에 있어서 동수구배가 같더라도 수두차에 의해  $Q_w$ 의 값이 변하는 것을 보고하고 있다. 이것은 동수구배를 일정하게 한 경우 시험관의 길이에 따라 전수두가 변하고 전수두가 변하면 시험장치의 손실수두에 대한 비율이 변하기 때문이다. 그러므로 현장조건에 맞는 동수구배를 이용한 실내시험이 요망된다. 지반개량현장에 있어서 PD에 작용하는 동수구배  $i$ 를 추정하면 다음과 같다. 하나의 예로서 길이  $L=20\text{m}$ 의 PD를 단면배수조건, 성토 1m에 의한 상재하중  $\Delta p=17.6\text{kPa}$ 의 것을 사용하는 경우, 수두차  $\Delta H(=\Delta p/\gamma_w)$ 로 하면  $i=\Delta H/(L/2)=(17.6/9.8)/10=0.18$ 로 되며  $L=10\text{m}$ 인 경우는  $i=0.36$ 으로 된다. 中ノ堂등(1992)은 현장에 있어서 PD내의 전수두 분포를 구하여,  $i=0.03\sim 0.8$ 이라는 결과를 얻고 있다. Fig. 4는 동수구배에 의한  $Q_w$ 의 변화를 나타낸 것이다.

이론적으로는  $Q_w$  값이 동수구배  $i$ 에 대하여 정규화되어 있으므로 동수구배  $i$ 의 값에 의존하지 않고 일정치를 나타내어야지 만, 이 그림에서  $i$ 의 증가에 따라  $Q_w$ 가 저하해 간다. 이것은 실내시험에 있어서 PD내부에서의 물의 흐름은 동수구배의 증가에 따라 층류에서 난류로 변화하여 Darcy의 법칙이 적용되지 않게 되어  $Q_w$ 에 영향을 끼치기 때문이라고 사료되나  $i\geq 0.5$ 에서의  $Q_w$ 는  $i$ 에 거의 의존하지 않게 된다. 작은 동수구배에 대해서  $Q_w$ 의 변화가 큰 것은 수위조정의 어려움도 그 하나의 원인이라 사료된다. 실제 현장에서는 동수구배가 그다지 크지 않을 것이며 투수계수가 낮은 지반으로부터 PD에 유입해 온 간극수의 흐름이 층류상태라고 가정해도 된다. 따라서 실내시험에서의 동수구배  $i$ 는 0.2 ~ 0.5 범위에서 실시하면 좋다고 할 수 있다.

### 3.3 PD의 굴곡의 영향

점토의 압축변형( $\epsilon_1$ )이 20%이상에 달하면 PD도 크게 변형한다(Holts등, 1989). 압밀에 의한 점토지반의 압축변형은 일반적으로 얇은 곳일수록 크다고 사료된다. 이것을 확인하기 위하여, 먼저 깊이 방향으로 선형압밀하중이 직선적으로 증가하는 지반에 대해서 검토한다. Fig. 5는 일본 有明점토의 간극비~압밀압력의 관계를 이용하여, 성토하중 35.2kPa을 가한 경우에 깊이 방향으로 간극비의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 6에서는 각 심도에 있어서 압밀량을 변위로 나타내고 있다. 이들의 결과로부터 심도방향으로 PD의 굴곡은 지반 표층부에서는 크고 하층부에서는 작게 생기는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 PD를 이용하여 지반 개량을 실시한 경우 有明점토지반중의 시험성토에 있어서, 재하후 300일( $\epsilon_1=8.7\%$ )에 있어서 층별침하량  $S_1\sim S_6$ 에 근거하여 각 층의 압밀량을 변위로 나타낸 것이다. 압밀된 두께 약 1m의 표층Top을 제외하면  $A_{c1}$ 층의 변위는  $\epsilon_1=13\%$ 이다. 주된 압밀층인 16m두께의  $A_{c2}$ 에 주목하면 그 하층 8m의 변위는  $\epsilon_1=7.6\%$ 여서 상층8m의 변위  $\epsilon_1=12.3\%$ 에 대하여 61%로 된다. 지표로부터 20m 아래 깊이에 퇴적되어 있는  $A_{c3}$ 층의  $\epsilon_1=3\%$ 에 불과하다. 이와 같이 깊은 점토층의 압밀량은 작기 때문에 그곳의 PD의 변형량도 작다고 생각해도 좋다.

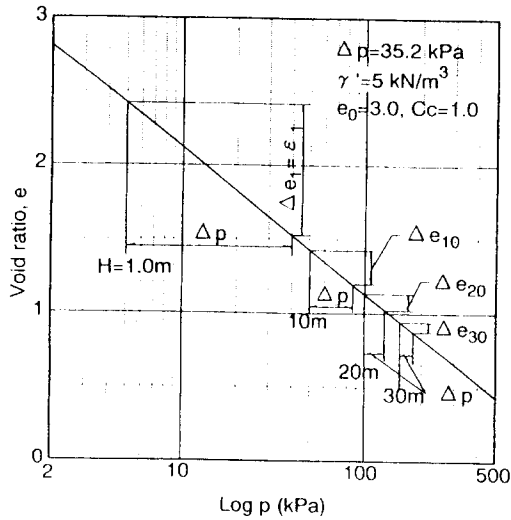


Fig. 5 Change of  $\Delta e$  due to fill loading at each depth of soft ground

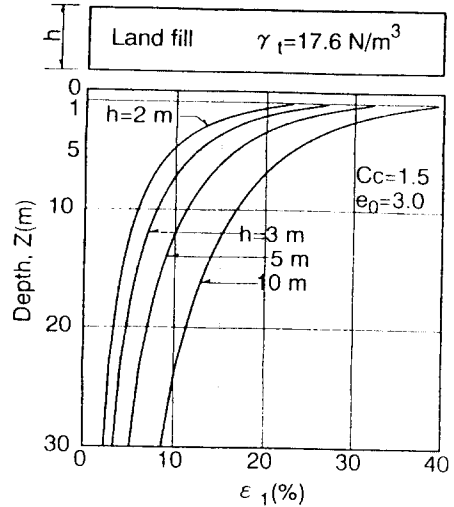


Fig. 6 Distribution of  $\epsilon_1$  with depth Z

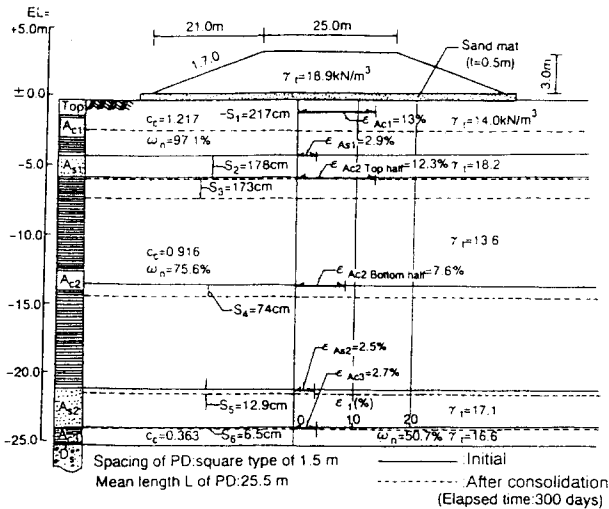


Fig. 7 Vertical strain  $\epsilon_1$  at each layer below the test embankment after elapsed time of 300 days

Fig. 6 의 계산에 이용한 토질 파라미터(Parameter)는 통상 정규압밀점토로서는 고압축성에 해당한다. 따라서 성토두께가 5m 정도이면, 20~30m 에 퇴적한 점토층의 압축변위는 10%를 넘는 경우가 적다고 생각해도 좋다. 따라서 현장에서 PD의 타설이 적절히 실시되었다고 가정하면 20m를 넘는 심도로 PD를 타설하여도 문제가 없다고 판단된다. PD의 굴곡에 의한  $Q_w$ 의 저하를 조사하는 방법으로서 三浦 등(1993)은 다음 5가지 변형상태를 제안하고 있다. a) 직립; b) 15%의 자유변형; c) 20%의 자유변형; d) 1개소 강제변형 및 e) 2개소 강제변형이 있다. 강제변형은 PD를 접은 후 폭 전체에 걸쳐 크립으로서 변형을 고정하는 방법이다.

Fig. 8은 PD의 굴곡상태에 의한  $Q_w$ 의 변화를 측정된 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이  $Q_w$ 의 변화특성은 PD의 종류에 따라 약간 다르고 TS, MW와 같이 자유변형 상태에서부터 저하하기 시작하는 것과 강제변형 상태에서부터 그 저하가 크게

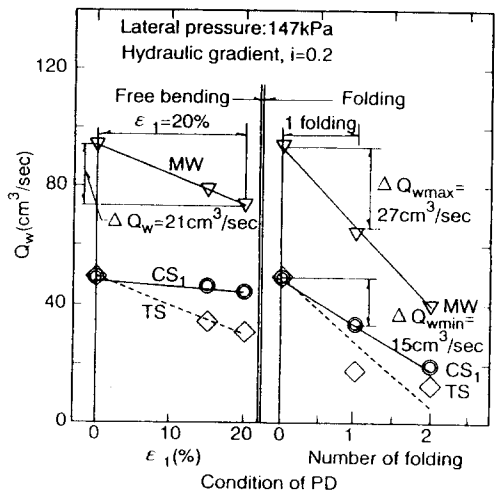


Fig. 8 Relationship between  $Q_w$  and deformed shapes of PD

되는 것으로 나누어진다. 전체적인 경향으로서는 자유 변형에 의한  $Q_w$ 의 저하는 변형량에 대하여 직선적이고, 측압  $\sigma_3=147\text{kPa}$ 일 때 굴곡 20%에 해당하는  $Q_w$  저하량  $\Delta Q_w$ 는 최대  $21\text{cm}^3/\text{sec}$ 로 보아도 좋다. 또한 강제변형의 개소수가 증가 됨에 따른  $Q_w$  저하도 거의 직선적이고, 강제변형 1개소에 해당하는  $\Delta Q_w$ 는 최소  $15\text{cm}^3/\text{sec}$ , 최대  $27\text{cm}^3/\text{sec}$ 였다.  $\sigma_3=392\text{kPa}$ 인 경우에 대해서도 같은 검토를 실시한 결과 변위 20% 및 강제변형 1개소의  $\Delta Q_w$ 의 저하량은  $\sigma_3=147\text{kPa}$ 인때와 거의 같은 값을 나타내고, 자유 변형에 의한  $\Delta Q_w$  및 강제변형 1개소의  $\Delta Q_w$ 는 측압 크기에 따른 영향이 작다는 것을 알았다. 본 연구에서는 굴곡수가 더욱 증가된 경우에 대해서는 조사하지 않았다. 그러나 실제 지반에 있어서 PD의 압축량이 20%를 넘는 것은 표층부에 국한되며, PD재에 유입한 간극 수량도 압밀진행과 함께 감소하기 때문에, 위에서 언급한 실험은 실제로 발생할 현장조건을 충분히 고려하고 있다고 생각해도 좋다. 그러나 1차 성토가 끝난후, 제2, 3차의 성토 시공을 하는 경우에, 처음에 타설한 PD의 기능 발휘 여부를 판단하는 경우에는 예상되어지는 지반의 압축변위량에 따라야하며, 경우에 따라서는 강제변형의 수를 증가시켜서 실험을 실시할 필요도 있을 수 있다.

### 3.4 기포의 영향

종방향 통수능력을 조사하기 위하여 사용되고 있는 장치는 Fig. 9의 (a)와 (b)의 2종류로 나눌 수 있다. 지금까지의 연구보고 등을 검토해 보면, 사용자가 의식적으로 두가지 타입의 장치를 나누어 사용하고 있다는 생각되지 않는다. 필자 자신도 당초에는 (a)타입의 장치를 이용해 실험을 하였는데, 많은 실험을 계속하는 과정에서 조건에 따라서 통수량이 경과시간에 따라 점차 감소해 가고 결국에는 제로(0)가 되는 것을 경험했다. 검토 결과 통수중에 포함된 기포가 PD재 내부 및 장치 내부에 누적된 것이 원인으로 되는 것을 알았다.

Fig. 10은 검토 결과의 일부를 나타낸 것이다. 수두차 $\Delta H=8\text{cm}$ , 동수구배 $i=0.2$ 의 조건으로 PD재를 1개소 강제변형을 시켜, 출구 호스의 일부분을 본체의 최상부 보다 낮은 상태(Fig. 9(a))로 시험을 하면 기포 제거를 하지 않을 경우에  $Q_w$ 가 점차 저하해 가고 약 50시간후에는 통수량( $Q_w$ )이 제로(0)의 상태가 된다.

호스 중의 기포를 제거하면  $Q_w$ 는 약 60~70% 회복하고, PD재 내부의 기포를 고무 망치로 가볍게 두들겨 제거하면 초기의 통수량까지 회복한다. Fig. 9(b)에 나타내는 바와 같이 수조 실린더를 본체보다 높은 위치에 세트하여 본체의 최상부보다 호스를 높은 위치에 고정시키면 기포의 영향은 없어진다. 이와 같이 실내 통수 시험을 실시한 경우에는 기포의 영향을 받지 않도록 Fig. 9(b)의 상태로 실험할 필요가 있다. 이와 같은 검토로부터 실제 지반에 있어서 간극수 중에 녹아 있던 공기가 배수 과정에서 기포로 환원되어 PD의 기능에 장애를 일으킬 수 있다고 사료된다.

압밀 초기 단계에 있어서는 성토하중에 상당하는 높은 과잉 간극 수압이 작용하기 때문에 PD내부에 소량으로 누적되는 기포는 수압에 밀려 배출된다. 그러나 압밀이 진행되어 점토 지반내부의 과잉간극 수압이 저하하고, 이와 더불어 PD의 변형이 크게 되면 기포의 영향은 무시할 수 없게 될 것이다.

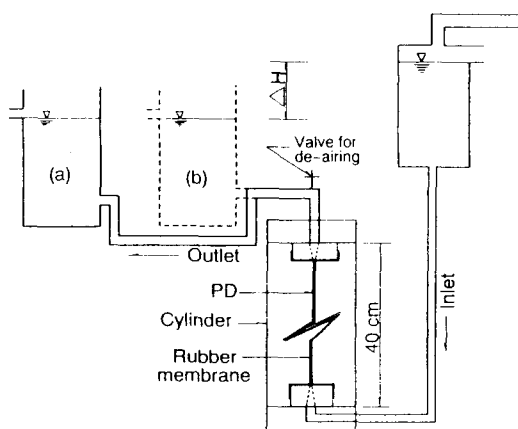


Fig.9 Test apparatus for investigating the influence of bubble

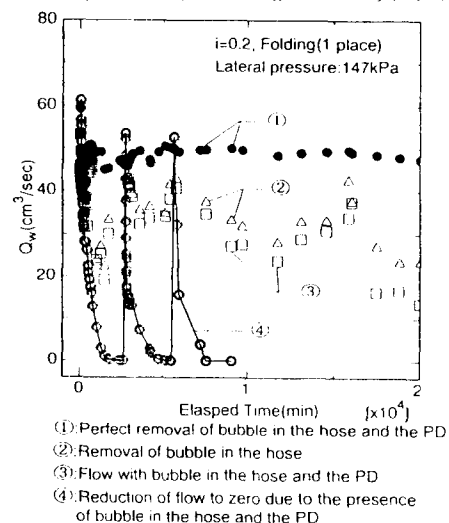


Fig.10 Influence of bubble on  $Q_w$

지반 개량이 1차성토, 2차성토로 단계적으로 실시 될 때, 1차 시공시 타설한 PD가 2차 성토에 대하여 유효한지의 여부를 검토하는 경우에도 이 문제가 관여 될 것이다. 또한 PD를 수평배수재로 이용하는 경우에는 Fig. 9(a)의 상태가 실제로 발생할 가능성이 크다. Fig. 10의 실험 사실은 실제 지반에 있어서도 PD의 배수성능이 기포에 영향받을 가능성이 있음을 시사하는 것이다.

### 3.5 장기 통수 시험

PD재의  $Q_w$ 를 구하는 데 있어서 통수량이 일단 안정된 지점에서  $Q_w$ 를 측정하는 단기 통수시험이 일반적이다. 그러나 현장에 있어서는 성토를 몇 단계로 나누어 장기간에 걸쳐서 재하하기 때문에 이것에 대응하는 장기통수 시험을 실시하여 경과 시간에 따른  $Q_w$ 의 변화를 조사할 필요가 있다. Fig. 11은 3종류의 PD재를 1개소 강제변형의 상태에서 8일간에 걸쳐서 통수시험을 한 결과를 나타낸다. 이 실험에서 기포의 영향을 없애기 위해서 기포를 충분히 제거한 상태에서 측정을 하였다. 실험에 사용한 3종류의 시료에 대해서는 최초의  $Q_w$ 의 55~70%까지 저하한 후에 1,140~5,000분에서 안정되었다. 일정한 측압( $\sigma_3$ )의 조건일지라도 장시간 경과하면 물과 접촉으로 연화된 필터 슬리브(Filter sleeve)재가 연화되어 코어(Core)재 틈 사이로 끼어들어 유로단면적이 줄어들기 때문에  $Q_w$ 는 저하된다고 생각된다. 상기의 사실들로 부터  $Q_w$ 의 값은 3일이상 통수한 후에 측정값으로 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

## 4. 스미어 존에 관한 실험

### 4.1 측정방법

PD 타설시에 생기는 스미어 존(Smear zone, 직경: $d_s$ )은, 지반 조건에 관계없이 압밀속도에 크게 영향을 미친다. 스미어 존의 측정 방법에 대해서 다음과 같이 고찰한다. 현재까지 스미어 존의 영역에서 투수계수의 저하를 직접 측정하여 구한 예는 거의 없으며, 또한 표준적 시험방법도 정해져 있지 않다. 필자는 기 발표된 실내 모형실험 결과(三浦·朴·Madhav, 1993)를 현장에서 확인하기 위하여 다음과 같은 방법으로 스미어 존을 측정하였다. 단면이 12cm×12cm, 길이가 4m의 각주(모형 멘드렐, 등가직경: $d_m$ )를 有明 점토 지반중에 관입, 인발하였다. 그후 모형 멘드렐(mendrel)에서 1m 떨어진 지점에서 1m 깊이로 굴착하여 핏트를 조성하고 그곳으로부터 모형 멘드렐을 향하여 3개의 샘플러(sampler)를 수평으로 삽입하여 시료를 채취했다. 각 샘플러로부터 일정 간격마다 실내시험용 시료를 채취하였으며, 첫째 샘플러의 시료에 대해서는 일축압축시험을, 둘째에 대해서는 포켓식 콘 페네트로메터(Pocket Cone Penetrometer, PCP, 콘 단면적:0.385cm<sup>2</sup>, 선단각:30°)에 의한 콘저항치  $q_c$ 의 측정, 셋째의 시료에 대해서는 표준 압밀시험을 하여 강도분포 및 수평방향의 투수계수의 변화를 조사했다.

### 4.2 스미어 존의 범위

Fig. 12는 PCP로서 구한  $q_c$ 값이 멘드렐 주변의 소성영역에서 변화하는 특성을 나타낸 것이다. 여기서 종좌표는 스미어 존의  $q_c$ 값( $q_{cs}$ )을 정규화하기 위해 불교란 점토의 콘저항치( $q_{co}$ )로 나눈 것이다. 즉,  $q_{cs}/q_{co}$ 에 의해 스미어 존에 있어서 교란의 정도를 나타내고자 의도하였다. 또한 이  $q_{cs}/q_{co}$ 에  $e_{os}/e_o$ 를 곱하여 지반의 불균일성에 의한 영향을 감소시켰다. 여기서  $e_{os}$ 는 측정지점의 간극비,  $e_o$ 는 불교란 점토의 자연 간극비이다. 횡좌표의  $d/d_m$ 은 멘드렐 중심으로부터의 거리와 멘드렐 직경의 비이다. 이 그림에서 ★표를 한 부분인  $q_{cs}/q_{co} \approx 0.75$ 의 영역은, 앞에서 설명한 것처럼 멘드렐의 관입·인발에 의해 발생한 스미어 존과 PCP에 의한  $q_{cs}/q_{co} \approx 0.75$ 의 범위와 거의 일치했으므로, 이를 스미어 존이라 정의하였다. 이 범위에 주목하면  $d_s/d_m = 5.0 \sim 7.0$ 로되며, 현장시험에서 측정된 스미어 존의 범위는 먼저 실내실험에서 측정된  $d_s/d_m = 2.5 \sim 3.0$ 보다 넓은 것을 알 수 있다.

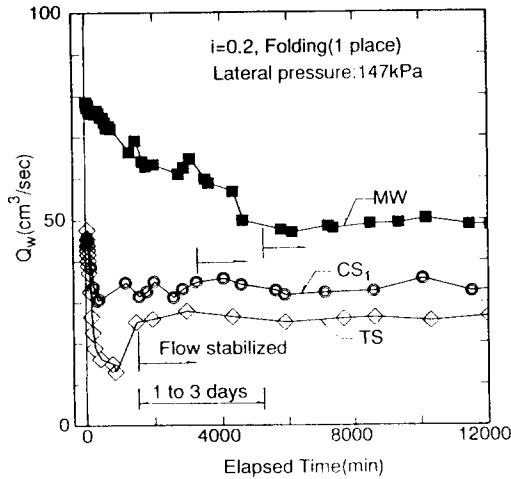


Fig.11 Relationship between  $Q_w$  and elapsed time

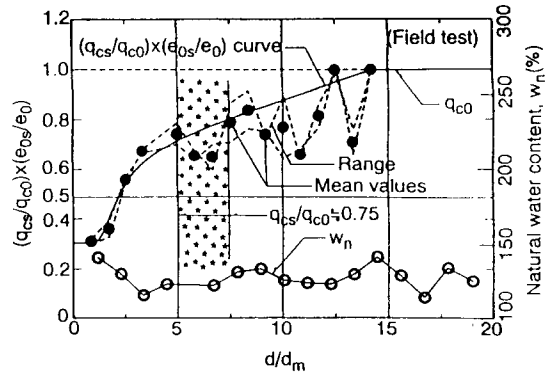


Fig.12 Distribution of  $q_t$  around the mandrel

PCP측정에 의한 현장에서의 교란범위  $d_s/d_m=14.0\sim 15.0$ 에까지 미치고 있고, 일축압축강도로부터  $d_s/d_m=15$ 라는 결과를 얻고 있지만, 이것은 현장에서의 중기작업이 지반의 교란에 영향을 미친 것으로 판단되어진다. 현장에 있어서 교란은 앞에서 기술한 바와 같이 넓은 범위까지 미치나 PD에 의한 지반개량에 영향을 미치는 스미어 존에 관해서는  $q_{cs}/q_{cc}\approx 0.75$ 의 범위를 고려의 대상으로 하면 좋다. 또한 이들의 결과로부터 스미어존에 관한 실내모형시험을 실시할 경우, 모듈드의 직경은  $d_m$ 의 약 10배정도를 확보하면 좋다고 사료된다.

### 4.3 수평방향의 투수계수의 변화

스미어존 내부의 수평방향 투수계수의 변화를 조사하기 위하여 앞에서 언급한 시료에 대해서 표준압 밀시험을 실시했다. 버티컬 드레인에 의한 지반개량을 실시한 경우 그 압밀시험에 관해서 小林 등(1990)은, 개량형 수평방향 압밀용기를 사용한 실험과 해석결과를 비교하여, 점성토의 수평방향 압밀계수의 결정방법을 제시하고 있다. 본연구에서는 小林 등(1990)의 방법과는 다르지만 간편한 방법으로 수평방향의 투수계수  $k_h$ 를 구했다.

Fig. 13은  $k_h\sim d/d_m$ 관계를 尾上의 결과(1991)와 같이 나타낸 것이다.  $d_m$ 의 약 1.5배까지의 완전교란 영역의  $k_h$ 는 불교란 점토의  $k_h$ 의 약 1/5배까지 저하한다. 또한, 멘드렐로부터의 거리가 멀어짐에 따라 교란정도는 낮게 되어,  $d_s/d_m=14$ 에서는 멘드렐의 관입·인발의 영향을 받지 않고 있다. 이 그림에 있어서 PCP의 결과로부터 구한  $q_{cs}/q_{cc}\approx 0.75$ 의 범위인  $d/d_m=5.0\sim 7.0$ 과 대응하는  $k_s/k_c$ 의 값은 0.75~0.83로 되고, 점토의 교란에 의한 투수계수의 저하율은 강도의 저하율과 거의 같은 값을 나타냄을 알았다.

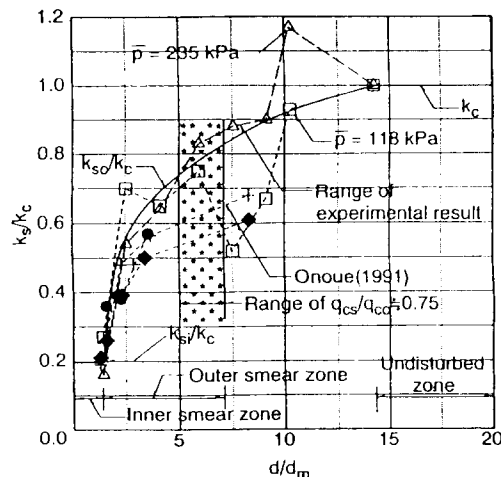


Fig.13 Distribution of horizontal coefficient of permeability  $k_h$  in smear zone



## 5. 결 론

현장조건을 고려한 플라스틱 보드드레인의 성능평가 방법에 대해서 고찰을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압밀속도에 영향을 미치는 웰 레지스턴스(WR)의 영향은,  $k_h=10^{-7}$ cm/sec이하의 점토에서는 압밀 전 과정에 걸쳐서  $Q_w \geq Q_{req}$ 로 되어 WR의 영향은 작지만,  $k_h=10^{-5}$ cm/sec이하의 실트에서는 압밀도 50%이상에서  $Q_w < Q_{req}$ 로 되어 WR의 영향은 무시할 수 없게 됨을 나타냈다. 따라서 PD재 종방향 통수능력 시험은 중요하게 된다.
- (2) 축압의 증가에 따른 PD의 종방향 통수능력의 저하  $\Delta Q_w$ 의 경향은 개략적으로 직선적이고, 축압  $\sigma_3 = 400$ kPa까지의 범위에서 압력 100kPa에 대한  $\Delta Q_w$ 는 3~13cm<sup>3</sup>/sec였다.
- (3) PD의 자유변형에 의한  $Q_w$  저하는 변위량에 대하여 직선적이고,  $\sigma_3=147$ kPa인 경우에 변위 20%의  $\Delta Q_w$ 는 최대 21cm<sup>3</sup>/sec로 봐도 좋다. 강제변형의 개소수가 증가함에 따른  $Q_w$ 의 저하도 직선적이고, 강제변형 1개소의  $\Delta Q_w$ 는 최대 27cm<sup>3</sup>/sec이었다.
- (4) 실제 지반에 있어서 PD의 변형은 지하 10m까지의 얇은 곳에서 발생하는 것을 해석적 고찰과 현장 측정 결과에 근거하여 나타냈다. 따라서 시공을 적절히 수행하면 PD는 20m이상의 비교적 깊은 지반의 개량에 사용해도 문제가 없을 것임을 지적했다.
- (5) 동수구배에 의한  $Q_w$ 의 변화를 조사하여,  $i \geq 0.5$ 에서는  $Q_w$ 가  $i$ 에 의존하지 않는 것을 나타냈다. 또한, 동수구배  $i$ 를 0.2부터 0.5로 증가시킴에 따라  $Q_w$ 의 저하는 3~23cm<sup>3</sup>/sec였다. 실제로는 투수계수가 낮은 지반으로부터 PD에 유입해 온 간극수 흐름은 층류상대라고 생각되기 때문에 실내시험에서의 동수구배  $i$ 는 0.2~0.5의 범위에서 실시하면 좋다.
- (6) 종방향 통수시험장치의 호스 배치에 따라 기포의 영향을 현저히 받음을 확인하고 그 영향을 받지 않기 위한 시험방법을 나타냈다. 또한, 실제의 지반개량에 있어서 기포의 영향을 받는 경우도 있음을 지적했다.
- (7) PD의 장기간에 걸친 통수시험을 했다.  $Q_w$ 는 경과시간과 함께 종류에 따라 1~3일 까지 감소한 후에 안정한다. 따라서  $Q_w$ 는 통수개시로부터 3일 후의 값을 취하는 것이 좋다고 판단된다.
- (8) PD의 배수성능에 크게 영향을 미치는 스미어 존의 범위를 현장시험에 의해 조사했다. 기 실시된 결과와 종합적으로 고찰하여 교란에 의한 강도저하가 75%이하로 되는 영역을 스미어 존이라 하는 것과, 현장에서는 그 범위가 멘드렐 직경의 5~7배로 되는 것, 또한 이 범위에서  $k_s/k_c=0.75\sim 0.84$ 로 되는 것을 나타냈다.

## 참 고 문 헌

- 1) Ali, F.H. : The flow behavior of deformed prefabricated vertical drains, Geotextiles and Geomembranes (10), pp. 235~248, 1991.
- 2) Hansbo, S. : Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains, Ground Engineering, Vol.12, No.5, pp. 21~25, 1979.
- 3) Hansbo, S. : Preconsolidation of soft compressible soils by the use of prefabricated vertical drains, Ann. des Travaux Publ. de Belgique, No. 6, 1986.
- 4) Holtz, R.D., Jamiolkowsky, M., Lancellotta, R. and Pedrony, S. : Behavior of bent prefabricated vertical drains, Proc. 12th ISSMFF, Rio De Janeiro, pp. 1657~1660, 1987.
- 5) Kamon, M., Pradhan, T.B.S. and Suwa, S. : Evaluation of design factors of prefabricated band shaped drains, ICGECD, GEO-COAST' 91, Yokohama, 1991.
- 6) Pradhan, T.B.S., Kamon, M, and Suwa, S. : Design method for the evaluation of discharge capacity of prefabricated band shaped drains, 9th ARC, Bangkok, 1991.
- 7) 尾上篤生 : ドレーンのウェル・レジスタンス關にする基礎的研究, 清水建設研究報告, 第32号, 1991.
- 8) 尾上篤生 : パーチカルドレーン周邊の攪亂帶の透水係數について, 第26回 土質工學研究發表會, pp. 2015~2018, 1991.
- 9) 小林正樹・水上純一・土田孝 : 粘性土水平方向壓密係數決定法, 運輸省港灣技術研究所報告, 第29卷 第2号, pp. 63~83, 1990
- 10) 中ノ堂裕文・花井光詔・今井運二 : フラスチックボードドレーンの透水性, 復建技報, Vol.17, pp. 139~151, 1992.
- 11) 三浦哲彦・朴 永穆・Madhav M.R. : ドレーンの排水性能に關する基礎的研究, 土木學會論文集, No.481, III-25, pp. 31~40, 1993.
- 12) 吉國 洋 : パーチカルドレーンの設計と施工管理, 技報堂出版, 1979.