

## 연직배수재 타설 후 장기간 경과된 지반의 통수성능

### Discharge Capacity of Prefabricated Vertical Drain Confined In-Clay Under Long-Term Conditions

정상국<sup>1\*</sup>

Sang-Guk Jeong<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Department of Civil Engineering, Songwon University, 73 Songam-ro, Nam-gu, Gwangju 61756, Republic of Korea

#### ABSTRACT

Typically, soft clay improvement is carried out using installation of PVD and surcharge method. According to circumstances, installed PVD has left for a long time due to the change in construction schedule. Therefore, for simulation of this kind of condition, discharge capacity tests were carried out under a series of temperature condition (30, 35, 40°C). The results indicated that under water confinement, the discharge capacities significantly reduced with elapsed time. And, the empirical equation by Miura and Chai (2000) was used for estimating the long-term in-clay discharge capacity. Based on the test results, it is recommended that in term of long-term discharge capacity, Miura and Chai's equation and reliability evaluation using discharge capacity tests under a series of temperature condition may be used.

#### 요 지

연약점토 지반 개량을 위해 연직배수재 타설 후 선행재하공법이 일반적으로 적용되는데, 현장에서의 시공계획 변경 등으로 인해 연직배수재 타설 후 장기간 방치되는 경우가 종종 발생된다. 따라서 장기간 방치된 조건에서의 연직배수재 열화 현상을 고려하기 위해 구속압으로 적용되는 수온을 각각 30, 35, 40°C를 적용하였다. 그 결과, 시간경과에 따라 배수성능이 급격히 저하되는 경향을 나타냈다. 그리고 현장 원위치 조건, 즉, 점토 구속조건하에서 장기간 통수능 저하 정도를 평가하기 위하여 Miura와 Chai(2000)식을 적용하였다. 그 결과, 온도 변화 조건에서 수행된 통수능 시험결과를 이용한 신뢰성 해석 방법과 Miura와 Chai(2000)식을 적용하여 장기 통수능을 평가할 수 있는 것으로 평가되었다.

**Keywords** : Long-term in-clay discharge capacity, Temperature condition, PVD

## 1. 서 론

현장에 적용한 연직배수공법의 효과는 배수재 자체의 배수능력뿐만 아니라 배수재 설치 과정에서 발생하는 주변지반의 교란정도와 공상현상, 수직 설치 정도 등의 정밀 시공 여부에 따라 큰 영향을 받는다. 배수재에 대한 압밀 배수효과의 주요 영향인자는 필터재의 투수계수, 유효구멍크기, 배수재의 통수능이라고 할 수 있다. 본 연구에서

는 기존에 타설된 연직배수재의 장기방치 상태에서의 압밀배수효과의 유효성을 검증하기 위하여 일련의 통수능 시험을 실시하였다. 특히, 점토 지반 내에 연직배수재 타설 후 장기간 방치된 조건을 모사하기 위하여 3가지 온도 조건(30, 35, 40°C)에서 장기 통수능 시험(일명 가속수명 시험)을 실시하였으며, 이를 토대로 연직배수재의 통수능이 현저히 떨어지는 시점에 대해 신뢰성 분석을 실시하였다. 또한, 점토구속 조건하에서의 장기 통수능 시험으로 시간경과에 따른 통수능 저하정도를 예측할 수 있는 식을 제시한 Miura and Chai(2000) 방법과의 비교를 통해서 적용성을 평가하였다.

Received 14 Nov. 2018, Revised 3 Dec. 2018, Accepted 17 Dec. 2018

\*Corresponding author

Tel: +82-62-360-5911; Fax: +82-62-671-5952

E-mail address: jungsg@songwon.ac.kr (S.-G. Jeong)

## 2. 점토구속 조건하에서의 연직배수재의 장기 투수 성능

일반적으로 투수성능시험은 배수재를 멤브레인으로 감싼 상태에서 구속압을 가하는 경우가 많지만, 이는 현장상황을 적절하게 반영하지 못하게 된다. 현장에서 연직배수재를 타설함에 따라 주변지반에 교란영역이 발생되며, 교란된 점토지반에 구속된 상태에 놓이게 된다. 따라서 연직배수재가 타설된 주변점토 지반의 세립자가 배수재의 코어에 유입됨과 동시에 압밀침하에 의해 재료가 굴곡될 가능성이 있다. 이러한 현상은 연직배수재의 투수성능에 영향을 끼치게 된다. Miura et al.(1998)은 연직배수재의 투수성능에 관한 일련의 실내시험을 수행해서, (1) 구속조건(멤브레인 구속, 점토구속)의 영향, (2) 연직배수재의 굴곡 영향, (3) 통수로에 채류하는 기포의 영향, (4) 점토구속 조건하에서의 투수성능의 경시변화 등을 조사하였다. 이를 통해서, 점토구속 조건하에서의 투수성능은 멤브레인 구속조건인 경우와 비교할 때 현저하게 떨어지며, 시간 경과에 따라 성능저하가 발생하는 것을 제시하였다. Chai and Miura(1999)는 점토구속 조건하에서의 PD의 투수성능에 관한 시험과 필터재의 크립 시험을 수행하여, 점토구속 조건하에서의 투수성능 저하의 메커니즘을 조사하였다. 연직배수재 2종류의 시험결과를 기준으로, 필터재 변형에 의한 투수성능 저하는 전체의 20% 이하에 해당되며, 나머지 80%의 투수성능 저하는 연직배수재의 코어에 침입된 점토 세립자와 통수로에 생성된 생물막에 의한 통수로의 “막힘현상(Clogging)”이 원인인 것으로 추측하였다.

Miura et al.(1998)과 Chai and Miura(1999)가 보고한 연직배수재의 투수성능에 관한 시험 데이터는, 낮은 동수구배(0.08) 적용 조건하에서 2종류의 연직배수재의 시험결과를 토대로 아래와 같은 검토사항을 남겨놓았다. 첫 번째, “현재까지 얻은 결론은 다른 종류의 연직배수재에도 적용가능한가”, 두 번째, “점토구속 조건하에서의 장기적인 연직배수재의 투수성능에 영향을 미치는 요인은 어떤 것들인가”, 세 번째, “멤브레인구속 조건하에서의 단기적인 투수성능으로부터 점토구속 조건하의 장기적인 투수성능을 추정하는 방법”, 네 번째, “어떤 종류의 연직배수재가 점토구속 조건하에서도 장기적으로 높은 투수성능을 보유하고 있는가” 이다.

점토구속 조건하에서의 투수시험장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 직경 200mm, 높이 600mm의 원형셀로 구

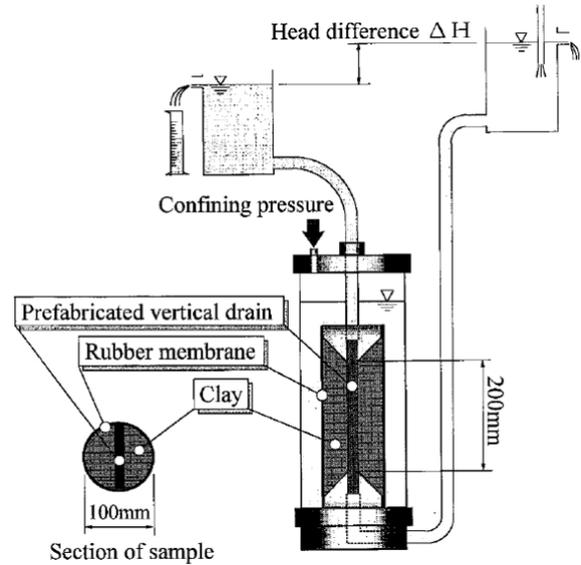


Fig. 1. Illustration of discharge capacity test device (Chai and Miura, 1999)

성되어 있으며, 연직배수재의 길이는 200mm까지 시험을 실시할 수 있다.

연직배수재의 투수성능에 있어서 동수경사가 영향을 끼치게 되지만, 동수경사가 높을수록 통수로의 막힘현상은 작아지게 된다. 실내시험에서 적용되는 동수경사를 현장 상황에 맞게 설정하는 것이 바람직하지만, 현장에서 동수경사는 시간에 따라 변하게 되며, 흙의 종류, 시공조건에 따라 달라지게 된다. Chai and Miura(1999)는 3종류의 연직배수재 타설 조건에서의 재하성토시의 지반개량 해석을 실시하여, 시공직후에 연직배수재 내의 최대동수경사는 0.1~0.3이 된다는 것을 제시하였다.

Fig. 2는 점토구속 조건하에서 5종류의 배수재의 투수 시험결과를 나타내고 있는데, 각각의 그림의 좌측의 수직축은 투수성능비,  $Q_c/Q_R$  ( $Q_c$ : 점토구속조건하에서의 투수성능,  $Q_R$ : 약 2주 경과시점에서의 멤브레인 구속조건하에서의 투수성능)을 나타내고 있다. 우측의 수직축은 시험중의 투수량을 나타내고 있다. 이를 통해 전체 5종류 배수재의 시험결과로부터, 점토구속 조건하에서의 투수성능은 시간의 경과에 따라 현저하게 감소되는 경향을 확인할 수 있다. 여기서 사용된 연직배수재는 각각 서로 다른 코어와 필터재 형태를 띠고 있으므로, 적용된 시험조건에서 시간 경과에 따라 연직배수재의 투수성능이 감소되는 것은 일반적인 현상으로 간주할 수 있을 것이다. 따라서 연약지반 내에 연직배수재를 타설하여 지반개량을 수행할 경우에는 설계 시 앞에서 언급한 현상을 고려할 필요성이 있다.

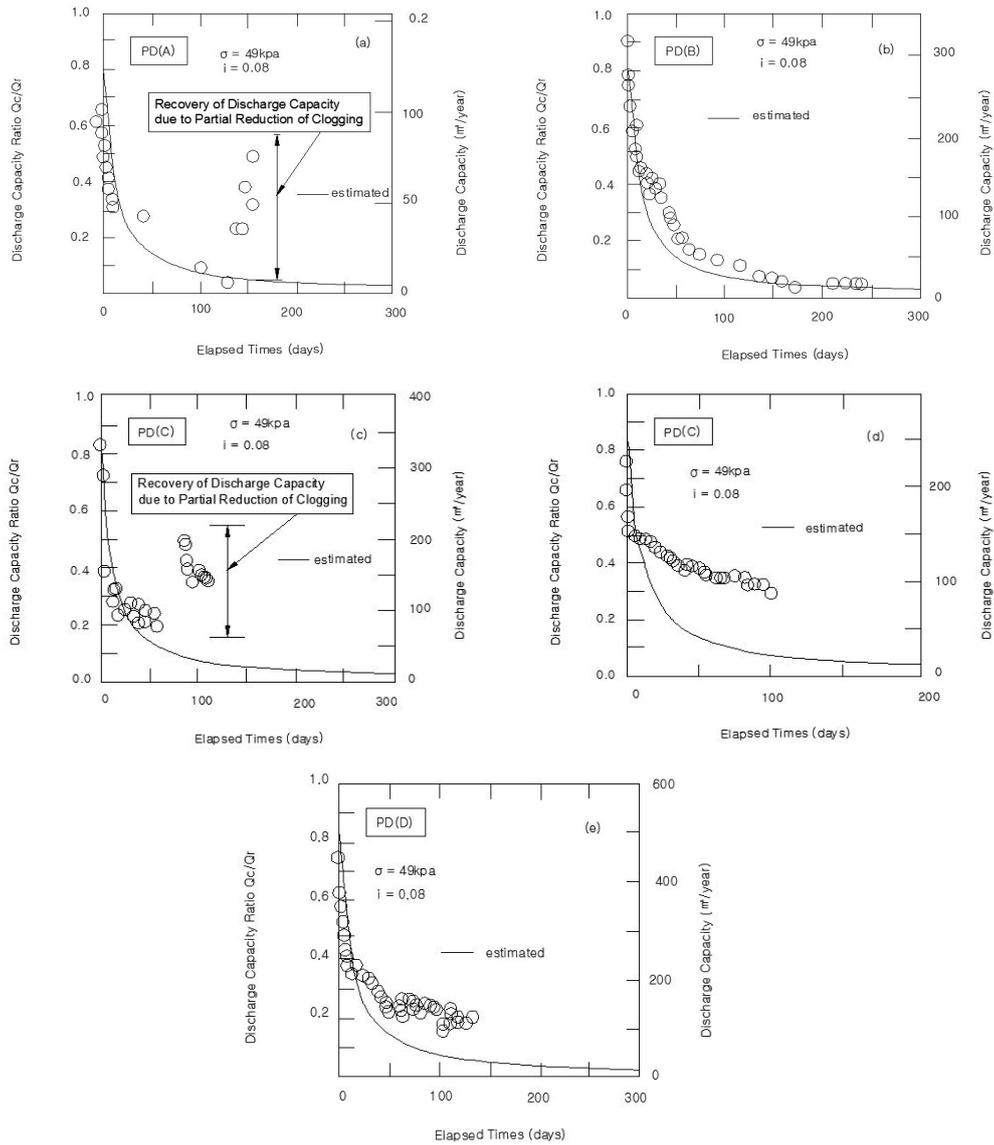


Fig. 2. Comparison of discharge capacity test results under confined-in clay and membrane (Miura and Chai, 2000)

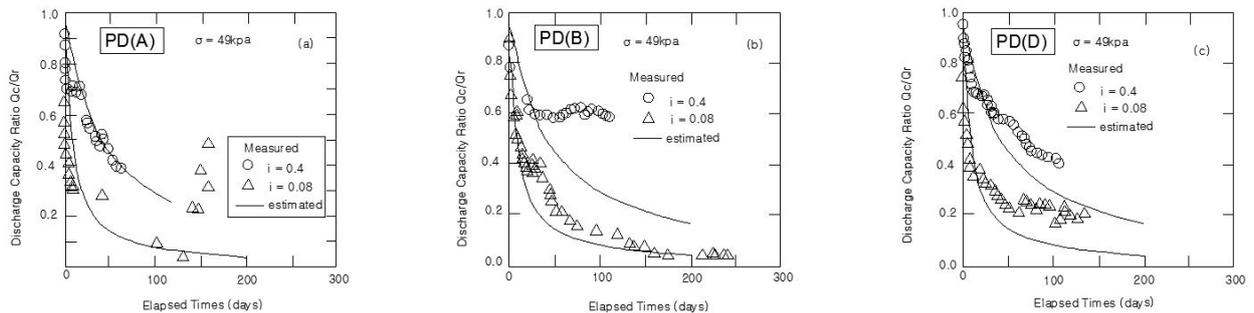


Fig. 3. Comparison of hydraulic gradient affecting discharge capacity (Miura and Chai, 2000)

Miura and Chai(2000)는 동수경사의 영향을 조사하기 위해, PD(A), (B), (D)에 대해, 높은 동수경사( $i=0.4$ )를 적용하여 점토구속 조건하에서 시험을 수행하였다. 측정된  $Q_c/Q_R$  값은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 높은 동수경사의

경우, 통수성능의 저하율은 낮은 동수경사의 경우보다 작은 경향을 나타냈다. 시험경과시간 2개월 시점에서의 수치를 비교하면, PD(A), (B), (D)에 대해,  $i=0.08$  조건에서의  $Q_c/Q_R$  값은 각각 18%, 20%, 23% 인 반면에,  $i=0.4$  조

건에서의  $Q_c/Q_R$  값은 각각 35%, 46%, 55%로  $i=0.08$  일 때와 비교할 때 약 2배 정도를 나타냈다. 현장에서는 연직 배수재 타설 후에 압밀 진행에 따라 연직배수재 내의 동수 경사는 감소하게 된다. 따라서 지반개량 설계 시, 압밀방치가 장기간에 걸쳐 진행되는 경우에는 이러한 특성을 고려할 필요가 있다.

장기적으로 점토구속 조건하에서의 연직배수재의 통수 시험은 시간을 요하는 특별한 시험이므로, 앞에서 언급한 시험결과를 토대로, 멤브레인 구속조건하에서의 단기적인 통수시험결과  $Q_R$ 로부터 장기적인 점토구속 조건하에서의 통수성능  $Q_c$ 를 예측할 수 있는 방법을 식 (1)과 같이 제시하였다. 이 때, 구속압의 영향은 멤브레인 구속과 점토구속 조건이 동일하다고 가정하고, 필터재의 크리프 변형에 의한 영향은 미미하다고 간주하였다.  $Q_c$ 와  $Q_R$ 는 각각 점토구속 및 멤브레인 구속조건 하에서의 통수능을 나타내며,  $i$ 는 동수경사,  $C_s$ 는 정수,  $t$ 는 경과시간,  $t_c$ 는 차원을 맞추기 위해 도입된 시간정수(1일)를 의미한다.

$$Q_c = Q_R \frac{i}{C_s(t/t_c + i)} \quad (1)$$

연직배수재와 구속압으로 작용하는 흙의 종류가 달라지면,  $C_s$  값은 달라지지만, Miura and Chai(2000)는  $C_s=0.01$ 을 제안하였다. 식 (1)에서 예측된 통수성능비의 곡선은 Fig. 2와 3의 실선에 해당되며, 제안식은 시험값을 개략적으로 예측 가능한 것을 알 수 있다. 예측결과를 개선하기 위해서는 지반조건, 필터재의 종류, 연직배수재 코어 통수로의 기하형상에 따라  $C_s$  값을 변경시킬 필요가 있다. 정성적으로는, 필터재의 크리프 변형이 클수록, 통수로의 단면적·형상계수가 작을수록,  $C_s$  값은 커지게 된다. 따라서 필터 재질이 강하고, 통수로 단면적·형상계수가 큰 연직배수재가 시간경과에 따른 통수성능 감소량이 작아지게 된다. 또한, 통수로 형상은 직사각형 보다 정사각형(이론적으로는 원형)이 보다 적절하다고 할 수 있다.

### 3. 연직배수재 수명시험

#### 3.1 가속수명시험

연직배수재의 배수성능( $q_w$ )이  $5\text{cm}^3/\text{s}$  미만으로 감소되는 시점을 연직 배수재의 고장 기준으로 정의하고 있으며,

특히, 통상적으로 연직배수재 통수능 시험 시 온도에 따른 물의 동점도차를 보정해 주기 위해  $20^\circ\text{C}$ 의 물을 기준으로 온도 보정계수를 곱해주게 된다. 본 시험법에서는 배수재 열화에 따른 배수성능 감소현상을 모사하기 위하여 수온 30, 35,  $40^\circ\text{C}$  조건에서 각각 시험을 실시하도록 규정하고 있으며, 1, 5, 10, 24, 48, 72, 96, 144 및 192시간 경과시점에서 배수성능을 측정하여 시간-배수성능 회귀분석식을 구한 후, 즉, 예를 들어, 수명시험에서 예상 고장시간의  $B_{10}$  수명이 90% 신뢰수준에서 3년을 만족하면, 연직 배수재의 사용 수명을 3년까지 보장하는 것으로 특정 온도에서 특정 방치기간을 모사하는 것이 아니라 오히려 방치 가능 기간을 찾는 시험방법이다(KRCC, 2016).

#### 3.2 수명-스트레스 관계식

배수성능 저하를 가속시험하기 위해 가속인자로 열적 스트레스인 온도를 선택하였으며, 수명-스트레스 관계식은 아래와 같이 아레니우스(Arrhenius, 1889) 관계식을 적용하며, 원래 본 식은 화학반응속도의 온도 의존성을 설명하기 위하여 제시한 경험식이다.

$$\alpha = Ae\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

여기서,  $\alpha$ 는 와이블 분포의 척도모수,  $E$ 는 활성화 에너지(J/mol),  $R$ 은 기체상수( $8.314\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$ ),  $T$ 는 절대온도(K),  $A$ 는 빈도인자이다.

#### 3.3 기대수명에 대한 신뢰도 척도 계산

연직 배수재의 수명분포를 추정하기 위하여, 와이블 분포를 적용하여 다음의 신뢰성 척도 및 와이블 분포의 모수를 추정한다. 사용온도  $20^\circ\text{C}$ 에서의 수명을 포함한 신뢰성 척도를 예측한다. 와이블 분포는 스웨덴의 물리학자 와이블(Waloddi Weibull, 1951)이 재료의 파괴강도를 분석하면서 고안한 확률분포로 금속 및 복합재료의 강도, 전자 및 기계부품의 수명분포를 나타내는 데 적합한 방법이다.

$$\text{신뢰도} : R(t) = e \left[ -\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta \right] \quad (3)$$

$$\text{고장률} : h(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

$$B_{10} \text{ 수명} : B_{10}=t_{0.1}=\alpha [-\ln(0.90)]^{\beta-1} \quad (5)$$

여기서,  $\alpha$ 는 척도모수(가속수명시험에서 약 63%가 고장나는 시간),  $\beta$ 는 와이블 형상모수,  $t$ 는 수명(고장시간)을 의미한다.

#### 4. 연직배수재의 복합-장기통수능 시험결과

##### 4.1 배수성능 시험결과

연약지반 개량용 플라스틱 연직배수재(PVD)는 점성토 지반의 압밀을 촉진하여 연약지반을 개량하는 목적으로 사용하는 제품이다. 플라스틱 코어를 부직포(필터)로 감싸

고 있는 포켓 방식의 연직배수재이다. 부직포는 외부의 흙을 비롯한 불순물의 침입을 막고 과잉수만을 통과시켜 주는 역할을 하며, 코어는 부직포를 통하여 들어온 과잉수를 배출하는 통로역할을 수행한다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 통수능 시험에는 총 5종류의 연직배수재가 이용되었다. 배수재 품질 시험을 위해 KS K 0940, KS K ISO 18325, RS-KORAS-FITI-021, ASTM D4716을 각각 적용하였다.

5종류의 배수재에 대해 중량, 폭, 두께의 기본적인 특성과 필터재 및 코어에 대한 인장강도 및 인장변형률 평가한 결과를 Table 1에 나타냈다.

플라스틱 연직배수재는 외부에서 압력이 가해지는 상태로 시간이 경과하게 되면 배수성능이 저하하게 된다. 실제 현장에서 발생하는 배수성능의 저하는 여러 가지 요인

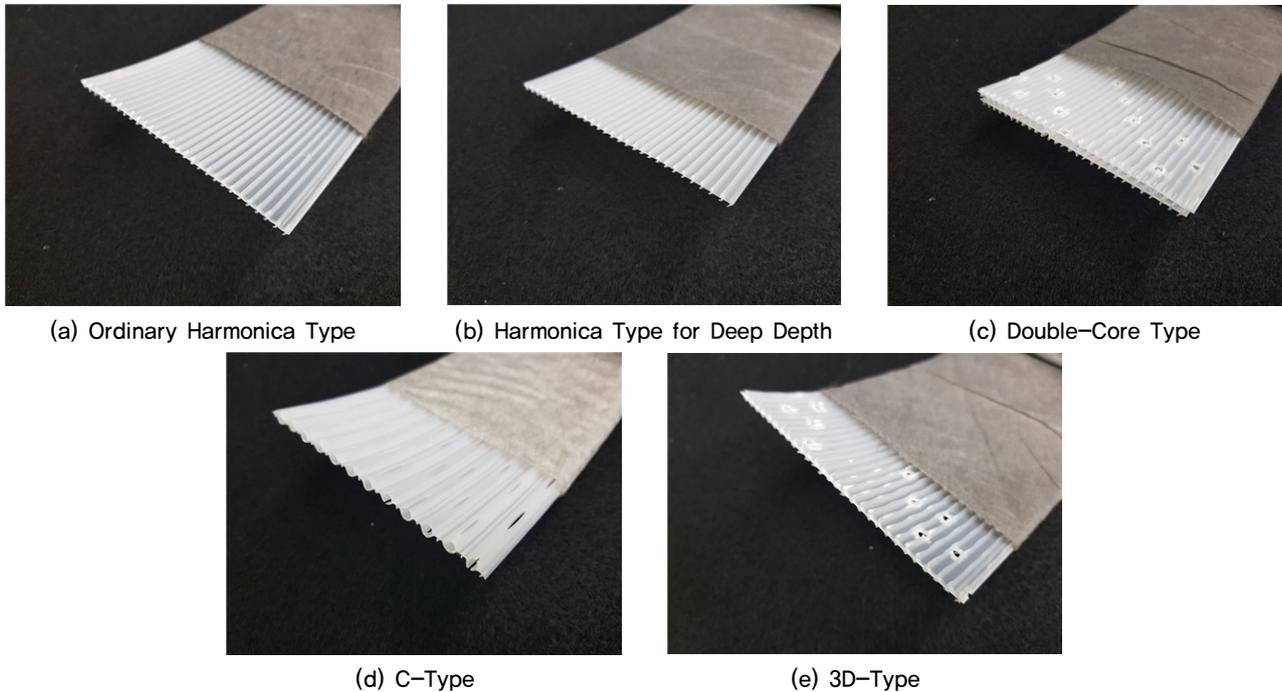
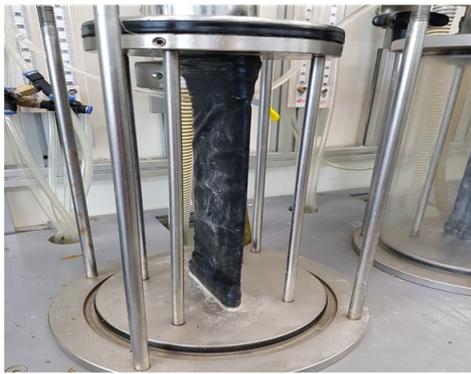


Fig. 4. Pictures of prefabricated vertical drains

Table 1. Physical Properties of PVDs

| Division | Item             | Unit             | Harmonica | Harmonica for Deep Depth | Double-Core | C-Type | 3D-Type |
|----------|------------------|------------------|-----------|--------------------------|-------------|--------|---------|
| Drain    | Unit Weight      | g/m <sup>2</sup> | 81,2      | 92,8                     | 151,9       | 116,7  | 88,6    |
|          | With             | mm               | 97,5      | 95,7                     | 96,8        | 96,5   | 95,7    |
|          | Thickness        | mm               | 4,32      | 4,54                     | 6,54        | 5,41   | 4,53    |
|          | Tensile Strength | N/full width     | 3149      | 4331                     | 5259        | 3545   | 3566    |
| Core     | Material*        | -                | PP, PE    | PP                       | PP          | PP, PE | PP      |
| Filter   | Material         | -                | PET       | PET                      | PET         | PP     | PET     |
|          | Tensile Strength | N/100 mm         | 702       | 865                      | 674         | 705    | 701     |
|          | Tensile Strain   | %                | 35,6      | 35,5                     | 40,2        | 50,1   | 36,5    |

\*PP : Polypropylene, PE : Polyethylene, PET : Polyester



(a) Straight Condition



(b) Bended Condition

Fig. 5. Discharge Capacity Test Device

Table 2. Discharge Capacity Test Results of PVDs

| Test condition | Confined pressure (kPa) | Hydraulic gradient | Unit               | Discharge capacity |                          |             |        |         |  |
|----------------|-------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|-------------|--------|---------|--|
|                |                         |                    |                    | Harmonica          | Harmonica for Deep Depth | Double-Core | C-Type | 3D-Type |  |
| Straight       | 100                     | 0.1                | cm <sup>3</sup> /s | 270                | -                        |             |        |         |  |
|                |                         | 0.5                |                    | 140                | 200                      | 277         | 173    | 202     |  |
|                |                         | 0.8                |                    | 115                | -                        |             |        |         |  |
|                | 300                     | 0.1                |                    | 128                | -                        |             |        |         |  |
|                |                         | 0.5                |                    | 50                 | 143                      | 240         | 122    | 145     |  |
|                |                         | 0.8                |                    | 36                 | -                        |             |        |         |  |
| Bended 30%     | 100                     | 0.1                |                    | 213                | -                        |             |        |         |  |
|                |                         | 0.5                |                    | 102                | 107                      | 167         | 112    | 120     |  |
|                |                         | 0.8                |                    | 93                 | -                        |             |        |         |  |
|                | 300                     | 0.1                |                    | 58                 | -                        |             |        |         |  |
|                |                         | 0.5                |                    | 31                 | 83                       | 123         | 83     | 87      |  |
|                |                         | 0.8                |                    | 21                 | -                        |             |        |         |  |

에 의해 나타날 수 있는데 그 중 가장 큰 영향을 미치는 것이 토체의 압력에 의한 배수유로의 감소로 이러한 현상을 예측하고자 외부에서 배수재의 측면 방향으로 압력을 가한 후 일정 동수경사를 유지하여 물이 통과하는 양을 측정함으로써 배수성능을 평가하였다.

연직배수재의 배수성능은 KS K 0940, KS K ISO 18325에 명시된 배수성능 시험기를 사용하였으며(Fig. 5), 직선 및 굴곡(30% 변형)의 조건으로 측압을 100, 300 kPa, 동수경사를 0.1, 0.5, 0.8로 시험하였으며 7일 동안 압력을 가한 후 통과 유량을 1분 동안 측정하였다. 시험에 사용된 실린더 높이는 400mm, 실린더 직경 220mm, 연직배수재를 감싸는 멤브레인 두께는 약 6.0mm 이며, 시험편 길이는 직선조건 360mm, 굴곡조건 450mm를 적용하였다. 배수성능 시험결과는 Table 2 및 Fig. 6에 나타났다. 전반적으로 동수경사 및 구속압이 커질수록, 직립조건 대비 굴곡

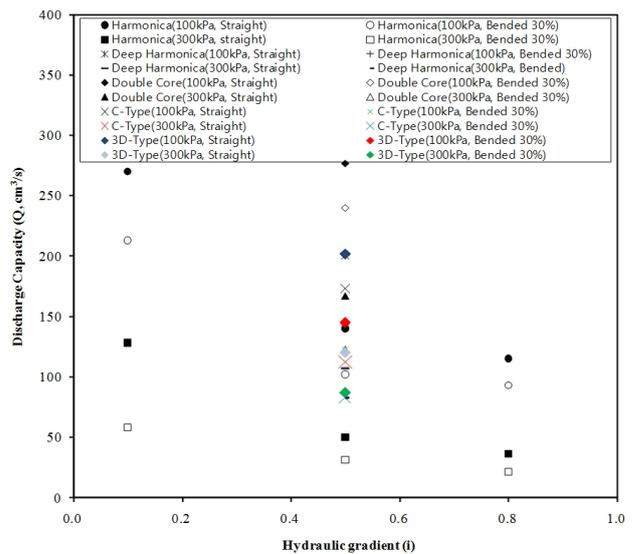


Fig. 6. Variation of discharge capacity of PVDs with hydraulic gradients and confined pressure

변형 30% 조건에서 통수능이 감소하는 경향을 나타냈다.

구체적으로 동수경사 0.5를 적용하여 직립조건에서 실시된 시험결과를 살펴보면, 구속압 100kPa 조건에서 이중코어 277cm<sup>3</sup>/s, 3D-PBD 202cm<sup>3</sup>/s, 대심도 하모니카 200cm<sup>3</sup>/s, C-PBD 173cm<sup>3</sup>/s, 일반 하모니카형 140cm<sup>3</sup>/s 순서로 통수능 값이 얻어져, 이중코어형 연직배수재 대비 각각 3D-PBD 72.9%, 대심도 하모니카 72.2%, C-PBD 62.5%, 일반 하모니카 50.5%의 통수 성능을 나타냈다. 또한, 동수경사 0.5, 구속압 300kPa 조건에서도 동일하게 이중코어 240cm<sup>3</sup>/s, 3D-PBD 145cm<sup>3</sup>/s, 대심도 하모니카 143cm<sup>3</sup>/s, C-PBD 122cm<sup>3</sup>/s, 일반 하모니카형 50cm<sup>3</sup>/s 순서로 통수능 값이 얻어져, 이중코어형 연직배수재 대비 각각 3D-PBD 60.4%, 대심도 하모니카 59.6%, C-PBD 50.8%, 일반 하모니카 20.8%의 통수 성능을 나타냈다.

구속압 100kPa, 동수경사 0.5, 굴곡변형 30% 조건에서는 이중코어 167cm<sup>3</sup>/s, 3D-PBD 120cm<sup>3</sup>/s, C-PBD 112cm<sup>3</sup>/s, 대심도 하모니카 107cm<sup>3</sup>/s, 일반 하모니카형 102cm<sup>3</sup>/s 순서로 통수능 값이 얻어져, 직립조건 시험대비, 각각 이중코어 60.3%, 3D-PBD 59.4%, C-PBD 64.7%, 대심도 하모니카 53.5%, 일반 하모니카 72.9%의 통수 성능을 나타냈다. 또한, 구속압 300kPa, 동수경사 0.5, 굴곡변형 30% 조건에서는 이중코어 123cm<sup>3</sup>/s, 3D-PBD 87cm<sup>3</sup>/s, 대심도 하모니카 83cm<sup>3</sup>/s, C-PBD 83cm<sup>3</sup>/s, 일반 하모니카형

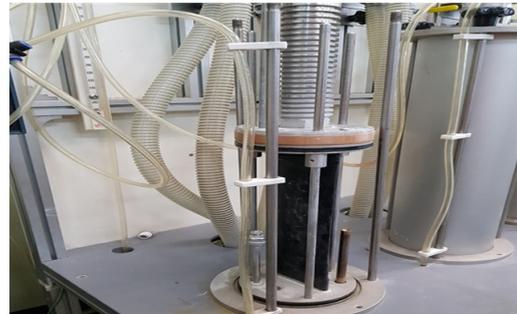
31cm<sup>3</sup>/s 순서로 통수능 값이 얻어져, 직립조건 시험대비, 각각 이중코어 51.3%, 3D-PBD 60%, 대심도 하모니카 58%, C-PBD 68%, 일반 하모니카형 62%의 통수 성능을 나타냈다. 구속압의 크기에 따라 직립 및 굴곡 변형 30% 조건에서 이중코어형 연직배수재의 배수 성능이 가장 우수한 것으로 분석되었고, 그 다음으로 3D-PBD, 대심도, C-PBD의 배수 성능은 유사한 경향을 나타냈지만, 그 중에서도 3D-PBD의 배수 성능이 다소 높은 것으로 분석되었다. 일반 하모니카형의 배수재의 경우, 구속압 300kPa, 동수경사 0.5, 굴곡 변형 30% 조건에서도 31cm<sup>3</sup>/s의 배수 성능을 갖는 것으로 분석되었지만, 이는 배수재를 멤브레인으로 감싼 조건에서 7일간 시험을 지속하여 얻어진 값이므로, 점토구속 조건에서 장기간 통수능 시험 실시로, 코어 내부로 점토가 혼입되는 경우를 모사한 시험결과가 아니라는 것을 주목할 필요가 있다.

#### 4.2 장기통수능 시험결과

플라스틱 연직배수재의 사용수명을 예측하기 위하여, 온도를 가속인자로 하는 가속수명시험을 실시하였다. 실제 배수재가 타설되는 지반조건보다 높은 3가지 온도 조건(30, 35, 40°C)에서 배수성능 시험을 진행하였으며, 이때 압력은 300kPa, 동수경사는 0.5를 적용하였다. 각 온도



(a) Test Device



(b) Installation of PVD



(c) Installation of External Cell



(d) Finished Condition of PVD After Test

Fig. 7. Discharge capacity test process with long-term condition

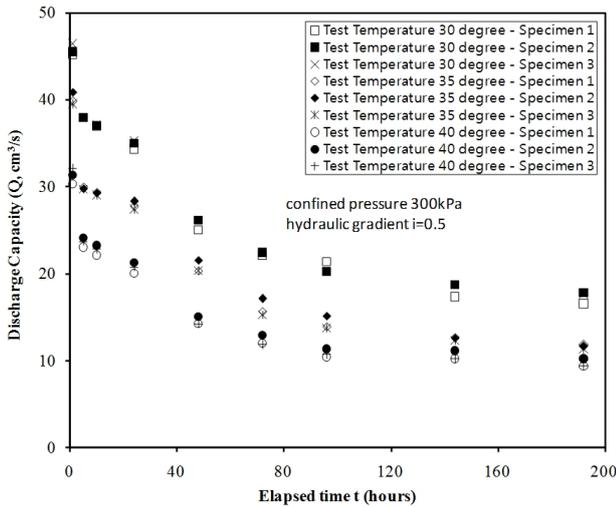


Fig. 8. Variation of discharge capacity of PVDs with elapsed time and test temperatures

조건에서 3 개의 시료에 대해 1, 5, 10, 24, 48, 72, 96, 144 및 192시간 경과 시점에서 각각 배수성능을 측정하였다. 크리프 거동을 설명하기 위한 Voigt 모델식을 이용하여 비선형 관계식을 유도한 후, 시간과 배수성능 간의 관계를 나타낼 수 있는 회귀분석식을 구하였으며, 이 회귀분석식을 이용하여 배수성능이 5.0, 3.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.1cm<sup>3</sup>/s로 저하되는 다양한 고장시점(지반개량을 위한 배수재로서의 기능이 발휘되지 못하는 시점)에 도달되는 시간을 각 온도 조건에 대해 구하였다. 마지막으로 아레니우스 식을 이용하여 20°C에서의 수명을 예측하여 플라스틱 연직배수재의 신뢰성을 평가하였다.

연직배수재의 장기통수능 시험은 한국신뢰성인증센터에서 발행한 RS-KORAS-FITI-021에 명시된 가속수명시험기를 사용하여(Fig. 7) 일반 하모니카형 연직배수재에 대해 가속수명 시험을 실시하였으며, 이에 대한 시험결과를 Fig. 8, 9에 나타냈다.

시험온도 30°C, 35°C, 40°C에 대해 1시간 경과시점에서 통수 성능은 각각 45.7cm<sup>3</sup>/s, 40.1cm<sup>3</sup>/s, 31.2cm<sup>3</sup>/s가 얻어졌으나, 192시간 경과시점, 즉, 시험 종료 시점의 통수 성능은 각각 17.3cm<sup>3</sup>/s, 11.6cm<sup>3</sup>/s, 9.4cm<sup>3</sup>/s로, 1시간 경과시점 대비 약 38%, 29%, 31%의 통수 성능으로 감소되었다. 특히, 시험온도 30°C의 시험 종료 시점의 통수 성능 대비, 시험온도 35°C 및 40°C에서 각각 70% 및 60% 수준의 통수 성능에 머물러 있는 것으로 분석되었다.

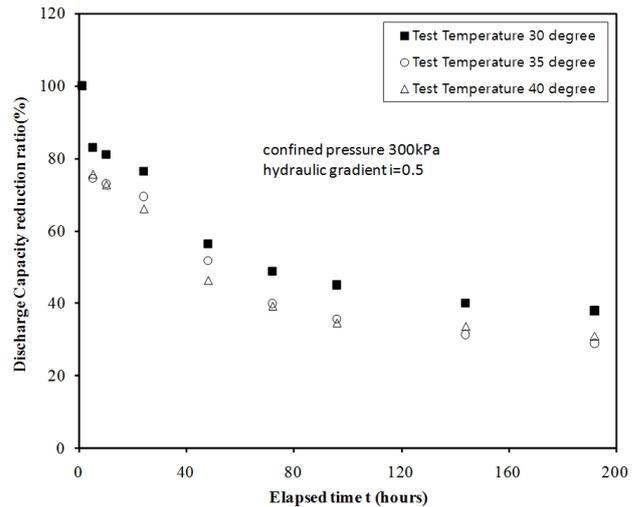


Fig. 9. Reduction ratio of discharge capacity with elapsed time and test conditions

#### 4.3 와이블-아레니우스 모델식에 의한 신뢰성 평가

플라스틱 연직배수재의 고장시간을 구하기 위하여 먼저 경과시간과 배수성능간의 관계를 나타낼 수 있는 관계식을 구하여야 한다.

일정 압력을 받고 있는 상태에서 제품의 배수성능 저하는 두께 감소로 인해 유로가 축소되는 것으로 볼 수 있다. 이러한 일정하중이 부여된 상태에서의 두께 감소는 일반적으로 크리프(creep)거동을 보이며, 이를 설명하기 위하여 다음과 같이 Voigt 모델이 여러 개 직렬로 조합된 형태인 일반화된 Voigt 모델을 많이 이용한다.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_0}{E_i} (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_i}}) \quad (6)$$

압축인 경우, 시간에 따른 두께의 변화는 다음과 같다.

$$\frac{L}{L_0} = (1 - \frac{\Delta L}{L_0}) = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_0}{E_i} (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_i}}) \quad (7)$$

수평 투과율(hydraulic transmissivity)  $\theta$ 와 두께와의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \left[ 1 - \frac{1 - (L/L_0)}{n_0} \right]^3 \quad (8)$$

한편 연약지반의 안정화를 위해 사용되는 연직배수재는 띠형태로 제품의 폭이 일정하므로 수평 투과율 대신 다음과 같은 식으로부터 배수성능을 평가한다.

$$q_w = \frac{Q_w}{i} \quad (9)$$

따라서, 식 (3)~(5)으로부터 일정 압력 하에서 발생하는 플라스틱 연직배수재의 배수성능 감소거동은 다음과 같다.

$$\frac{q_w}{q_{w0}} = \left[ 1 - \frac{1 - (L/L_0)}{n_0} \right]^3 = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\sigma_0}{E_i} (1 - e^{-\frac{t}{\lambda_i}})}{n_0} \right]^3 \quad (10)$$

식 (10)을 전개하게 되면  $ae^{-bt}$ 와 같은 지수함수의 시리즈 형태가 된다. 각각의 지수함수들의 매개변수는 실험결과와 비교하여 비선형 회귀법(nonlinear regression method)에 의해 결정된다. 그러나 비선형 회귀시에 매개변수가 필요 이상으로 많으면 무의미한 결과가 나오므로 여기서는 다음과 같이 3개의 지수함수 조합으로만 평가하였다.

$$q_w = a e^{-bt} + c e^{-dt} + g e^{-ht} \quad (11)$$

위의 관계식을 회귀분석을 통해 각각의 파라미터(a, b, c, d, g, h) 값을 구한 다음, 배수성능이 5.0, 3.0, 1.5, 1.0, 0.5, 0.1 cm<sup>3</sup>/s에 도달하는 고장시간을 계산하여 Table 3에 나타냈다.

온도에 따른 고장시간을 와이블 분포로 가정하고, 신뢰성 척도를 최우추정법(MLE : Maximum Likelihood)으로 추정하였다. 95% 신뢰수준에서 Bonferroni 방법으로 와이블 분포의 형상모수에 대한 동일성을 검증한 결과 각 온도에서의 형상모수가 통계적으로 동일하다고 볼 수 있으므로 온도에 대한 가속성이 성립된다고 할 수 있다.

따라서 3가지 온도에서의 시료 3개를 반복 측정된 고장시간(Table 3)을 와이블-아레니우스(Weibull-Arrhenius) 모델에 적용하고, 추정된 와이블 분포의 형상모수, 척도모수 및 아레니우스 모델의 활성화 에너지를 이용하여 사용 온도 20°C에서의 고장기준에 대해 신뢰수준 90 %에서의 B<sub>10</sub> 수명을 Table 4에 나타냈다.

멤브레인 구속조건하의 구속압 300kPa, 동수경사 0.5, 직립조건인 일반 하모니카형 배수재의 통수능 50cm<sup>3</sup>/s 결과를 이용하여 Miura and Chai(2000) 식으로 현장 원위치 점토구속 조건하에서의 장기 통수능 저하 정도를 예측한 결과 및 기대수명 신뢰성 평가결과를 함께 도시하여 Fig. 10 및 Table 4에 나타냈다. 통수능 5cm<sup>3</sup>/s 및 3cm<sup>3</sup>/s 시점까지의 소요시간은 Miura and Chai(2000) 예측식의 결과가 1.26~1.85년 정도 빨리 도달하는 것으로 검토되었는데,

Table 3. Failure Times with Temperature Under Failure Criterion

| Division               | Test Specimen   | Failure Times, h |       |       |
|------------------------|-----------------|------------------|-------|-------|
|                        |                 | 30°C             | 35°C  | 40°C  |
| 5.0 cm <sup>3</sup> /s | Test Specimen-1 | 11032            | 8518  | 1762  |
|                        | Test Specimen-2 | 12682            | 7964  | 2586  |
|                        | Test Specimen-3 | 12583            | 8046  | 1803  |
| 3.0 cm <sup>3</sup> /s | Test Specimen-1 | 16140            | 13626 | 3039  |
|                        | Test Specimen-2 | 17790            | 13071 | 4289  |
|                        | Test Specimen-3 | 17691            | 13151 | 3080  |
| 1.5 cm <sup>3</sup> /s | Test Specimen-1 | 23070            | 20557 | 4771  |
|                        | Test Specimen-2 | 24719            | 20005 | 6599  |
|                        | Test Specimen-3 | 24620            | 20086 | 4812  |
| 1.0 cm <sup>3</sup> /s | Test Specimen-1 | 27126            | 24608 | 5785  |
|                        | Test Specimen-2 | 28777            | 24057 | 7951  |
|                        | Test Specimen-3 | 28678            | 24137 | 5827  |
| 0.5 cm <sup>3</sup> /s | Test Specimen-1 | 34057            | 31536 | 7518  |
|                        | Test Specimen-2 | 35708            | 30986 | 10261 |
|                        | Test Specimen-3 | 35609            | 31066 | 7559  |
| 0.1 cm <sup>3</sup> /s | Test Specimen-1 | 50058            | 47605 | 11538 |
|                        | Test Specimen-2 | 51795            | 47060 | 15600 |
|                        | Test Specimen-3 | 51697            | 47139 | 11579 |

Table 4. Performance Prediction Result of PVD (Ordinary Harmonica type)

| Failure Criterion      | Reliable Evaluation (Confidence Level 90%) | Prediction Equation by Miura and Chai (2000) |
|------------------------|--|--|
| 5.0 cm <sup>3</sup> /s | B <sub>10</sub> 1124days (3.08years)       | 450days (1.23years)                          |
| 3.0 cm <sup>3</sup> /s | B <sub>10</sub> 1230days (3.37years)       | 770days (2.11years)                          |
| 1.5 cm <sup>3</sup> /s | B <sub>10</sub> 1464days (4.01years)       | 1600days (4.38years)                         |
| 1.0 cm <sup>3</sup> /s | B <sub>10</sub> 1617days (4.43years)       | 2400days (6.58years)                         |
| 0.5 cm <sup>3</sup> /s | B <sub>10</sub> 1891days (5.18years)       | 4500days (12.33years)                        |
| 0.1 cm <sup>3</sup> /s | B <sub>10</sub> 2544days (6.97years)       | 20000days (54.8years)                        |

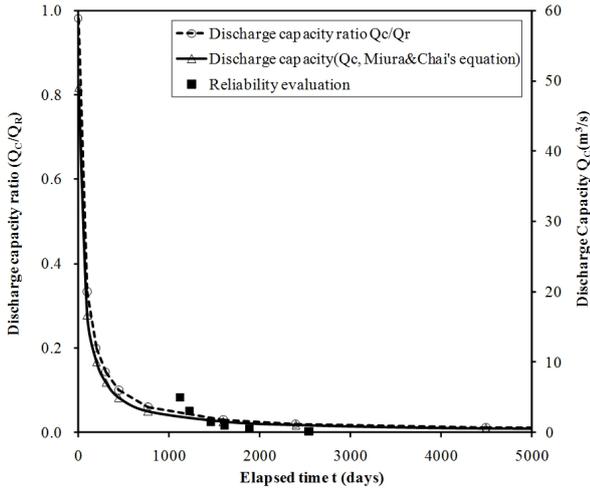


Fig. 10. Reduction of Discharge Capacity of PVD with Elapsed times Under Field Condition

기대수명 시험과정에서 온도를 올려서 배수재를 열화시키는 과정으로 현장조건을 모사한 반면에 Miura and Chai (2000) 예측식의 경우, 코어 내의 세립자 유입으로 장기 통수능이 저하되는데 초점을 맞춘 특성으로 인해 두 Case에서 결과값에 차이가 발생된 것으로 판단된다. 그러나 통수능 1.5cm<sup>3</sup>/s 이하 시점까지의 소요시간은 기대수명 신뢰성 평가결과가 보다 Miura and Chai(2000) 예측식에 비해 빨리 도달하는 경향을 나타냈다. 전체적인 경향을 볼 때, 두 방법을 적용한다면, 연직 배수재 타설 후 장기간 경과된 시점에서의 통수 성능을 예측 가능할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

기존에 타설된 연직배수재의 장기방치 상태에서의 압밀배수효과의 유효성을 검증하기 위하여 일련의 통수능 시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연직배수재의 배수성능 시험결과, 전반적으로 동수경사 및 구속압이 커질수록, 직립조건 대비 굴곡 변형 30% 조건에서 통수능이 감소하는 경향을 나타냈다. 일반 하모니카형의 배수재의 경우, 구속압 300kPa, 동수경사 0.5, 굴곡 변형 30% 조건에서도 31cm<sup>3</sup>/s의 배수 성능을 갖는 것으로 분석되었지만, 이는 점토구속 조건하에서의 장기 통수능 시험에서 코어 내부로 점토가 혼입되는 경우를 모사한 시험결과가 아니라는 것을 주목할 필요가 있다.
- (2) 점토 지반 내에 연직배수재 타설 후 장기간 방치된 조건을 모사하기 위하여 3가지 온도 조건(30, 35, 40°C)에서 장기 통수능 시험(일명 가속수명시험)을 실시하였다. 시험온도 30°C, 35°C, 40°C에 대해 1시간 경과 시점에서 통수 성능은 각각 45.7cm<sup>3</sup>/s, 40.1cm<sup>3</sup>/s, 31.2cm<sup>3</sup>/s가 얻어졌으나, 192시간 경과시점, 즉, 시험 종료 시점의 통수 성능은 각각 17.3cm<sup>3</sup>/s, 11.6cm<sup>3</sup>/s, 9.4cm<sup>3</sup>/s로, 1시간 경과시점 대비 약 38%, 29%, 31%의 통수 성능으로 감소되었다. 특히, 시험온도 30°C의 시험종료 시점의 통수 성능 대비, 시험온도 35°C 및 40°C에서 각각 70% 및 60% 수준의 통수 성능에 머물러 있는 것으로 분석되었다.
- (3) 장기통수능 시험결과를 이용하여, 연직배수재의 통수능이 현저히 떨어지는 시점을 신뢰성 분석을 토대로 평가한 결과, 배수재의 통수능 5cm<sup>3</sup>/s, 3cm<sup>3</sup>/s, 1.5cm<sup>3</sup>/s, 1.0cm<sup>3</sup>/s, 0.5cm<sup>3</sup>/s, 0.1cm<sup>3</sup>/s에 도달되는 시점은 각각 3.08년, 3.37년, 4.01년, 4.43년, 5.18년, 6.97년으로 평가되었다. 한편, Miura and Chai(2000) 식으로 현장 원위치 점토구속 조건하에서의 장기 통수능 저하 정도를 예측한 결과, 통수능 5cm<sup>3</sup>/s 및 3cm<sup>3</sup>/s 시점까지의 소요시간은 Miura and Chai(2000) 예측식의 결과가 1.26~1.85년 정도 빨리 도달하는 것으로 검토되었는데, 기대수명 시험과정에서 온도를 올려서 배수재를 열화시키는 과정으로 현장조건을 모사한 반면에 Miura and Chai(2000) 예측식의 경우, 코어 내의 세립자 유입으로 장기 통수능이 저하되는데 초점을 맞춘 특성으로 인해 두 Case에서 결과값에 차이가 발생된 것으로 판단된다. 전체적인 경향을 볼 때, 두 방법을 적용한다면, 연직 배수재 타설 후 장기간 경과된 시점에서의 통수 성능을 예측 가능할 것으로 판단된다.

## References

1. ASTM D4716 (2014), "Standard test method for determining the (in-plane) flow rate per unit width and hydraulic transmissivity of a geosynthetic using a constant head".
2. Arrhenius, S. A. (1889), "Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte", *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, Vol 4U, Issue 1, pp.96-116.
3. Chai, J. C. and Miura. N. (1999), "Investigation of factors affecting vertical drain behavior", *J. of Geotech. and Geoenviron. Engrg.*, ASCE, Vol.125, No.3, pp.216-226.
4. Korea Reliability Certification Center (2016), "Prefabricated vertical drain board for soft ground improvement", RS-KORAS-FITI-021.
5. KS K 0940 (2008), "Test method for discharge capacity of plastic drain board".
6. KS K ISO 18325 (2017), "Geosynthetics-Test method for the determination of water discharge capacity for prefabricated vertical drains".
7. Miura. N., Chai, J. C. and Toyota, K. (1998), "Investigation on some factors affecting discharge capacity of prefabricated vertical drain", *Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Geosynthetics*, Atlanta, pp.845-850.
8. Miura. N. and Chai, J. C. (2000), "Discharge capacity of prefabricated vertical drain confined in-clay", *Geosynthetics Journal*, Japan Chapter of International Geosynthetics Society, Vol.15.
9. Waloddi Weibull (1951), "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", *Journal of Applied Mechanics*.