

현장에 타설된 연직배수재의 통수능력 분석

Analysis on the Discharge Capacity of Vertical Drains Installed in the Field

박영목¹⁾, Yeong-Mog Park, 진규남²⁾, Kyu-Nam Jin, 정하익³⁾, Ha-Ik Chung, 정길수⁴⁾, Gil-Soo Chung

¹⁾ 영남대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dep. of civil Eng., Yeungnam University

²⁾ 한국토지공사 연구개발처 주임연구원, Associate Researcher, Korea Land Corporation

³⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, KICT

⁴⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, KICT

SYNOPSIS : The discharge capacity of vertical drains installed in the field is reduced with time elapsed after installation due to deformation of drains and clogging effect. Discharge capacity of two types of vertical drains was analysed about three years after installation in the subsoil. Discharge capacity of two types of vertical drains were measured by small, middle, and large scale test apparatus. The results indicate that the discharge capacity of vertical drains after three years operation dramatically decreased compare to the initial discharge capacity.

KeyWords : soft clay, vertical drains, discharge capacity, clogging, deformation

1. 서론

최근 연약지반 처리를 위하여 연직배수공법을 사용하는 사례가 늘고 있는데, 연직배수공은 압축성이 크고, 투수계수가 작은 연약지반에 배수거리를 인위적으로 단축하여 간극수의 배출을 촉진시킴으로써 압밀침하속도를 증가시키고 이에 따라 지반의 전단강도를 증진시키는 특징이 있다. 연직배수공법에 사용되고 있는 플라스틱보드 드레인(Plastic board drain)은 필터와 코어의 재질, 코어 형상 등에 따라 다양한 종류의 배수재가 생산되고 있으며, 제품종류에 따라 다양한 크기의 통수능을 보인다. 일반적인 연직배수재의 배수효과는 지반내에서 축압에 의한 코어내 흐름통로의 체적감소와 침하에 따른 타설배수재의 변형, 굴곡, 구조상의 내구성 및 내열화성에 따른 재료성능감소, 세립자의 막힘(clogging)에 따른 투수성 저하등의 여러 가지 요인에 의한 영향을 받는다.

본 연구에서는 현장에 타설된 배수재를 채취하여 실내에서 통수능 실험을 실시하여 초기상태의 통수능 시험결과와 비교함으로써 연약지반에 타설된 연직배수재의 통수능력 변화특성을 분석하였다. 실험에 사용된 배수재는 양산물금 택지조성공사 시험시공부지에서 현장굴착하여 채취한 배수재이며, 현장 타설 후 약 3년이 경과되었다.

2. 연직배수재의 일반 통수특성 분석

2.1 시료채취 위치

본 연구에서 현장상태의 통수능을 알아보기 위하여 그림 1와 같이 심도 5.0m까지 굴착하여 현장에 타설된지 3년 정도가 경과된 2종류(E제품, F제품)의 드레인재를 현장에서 채취하여, 실내에서 그 변위형

상을 그대로 재현하여 통수능시험을 수행하였다. 대상지반에 타설 되어져있는 드레인재를 채취하기 위하여 백호우를 이용하여 심도 5.0m지반 아래까지 조심스럽게 굴착한 후 변형된 드레인재를 스케치하였으며, 그림 2은 조사지점에서 채취한 배수재를 보여주고 있다.

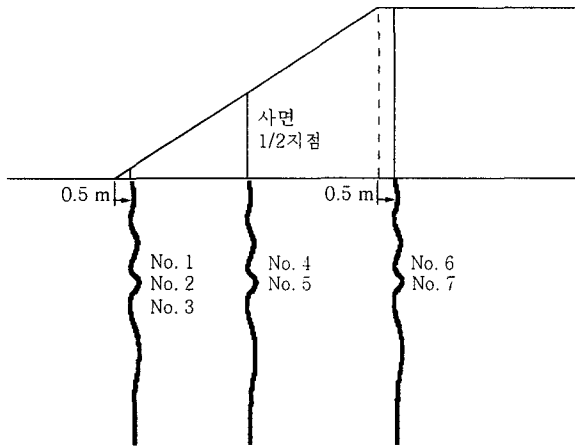


그림 1. 양산물금재구내 PD배수재의 채취위치

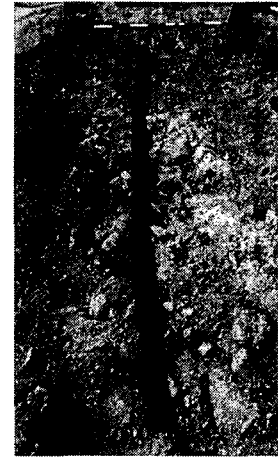


그림 2. 배수재 채취후 드레인 상태

2.2 소형 통수능 시험에 의한 통수특성 분석

(1) 실험장치

타설전후 배수재의 통수능 변화량을 예측하기 위하여, 동일한 조건(시험기, 시험조건)하에서 단기간에 걸친 직립조건에서의 드레인 통수능 시험을 실시하였다. 드레인의 통수능 시험은 그림 3에서 보는 바와 같이 동국대학교 지반연구실에서 네델란드 Delft University of Technology의 Standard Drain Discharge Tester를 모방하여 국내에서 제작한 시험기를 사용하였다. 시험장치는 지름 20cm, 높이 67cm의 원형 압력실과 측압을 가할 수 있는 가압장치, 동수경사를 조절하여 물의 유입 유출량을 제어할 수 있는 수두장치로 구성되어 있다.

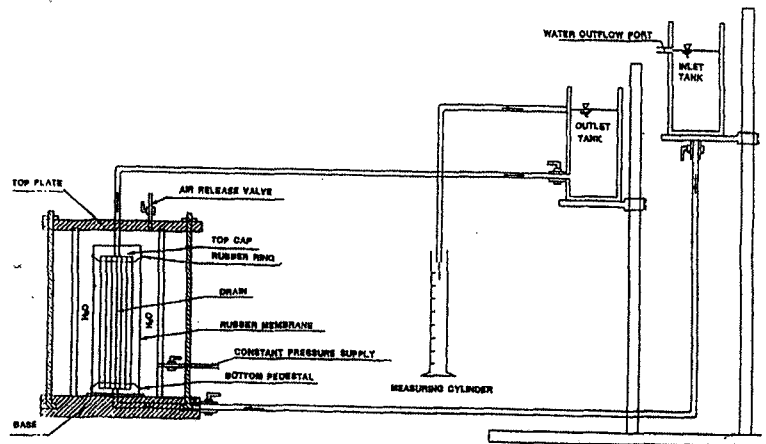
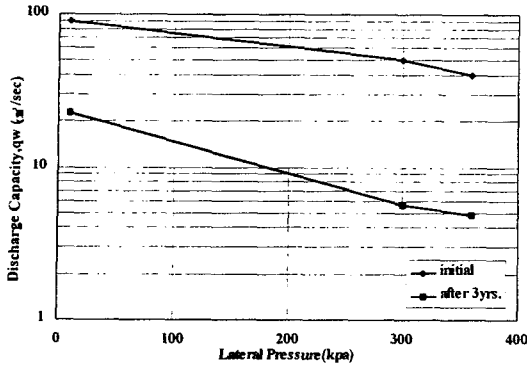


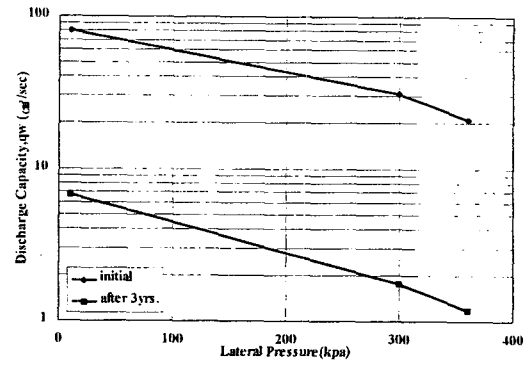
그림 3. 소형 통수능 시험장치 개요

(2) 결과분석

시험시공현장의 굴착을 통한 배수재 변형조사 과정에서 채취한 드레인재(E제품, F제품)를 이용하여 통수능 시험을 실시한 결과를 그림 4에 나타내었다. 직립조건하에서 실시한 통수능 시험결과, 타설전후 드레인의 통수능은 75~94.4% 감소되었으며, 이는 배수기능 수행시 배수재 변형에 기인된 일부 통수단면 감소와 clogging에 기인된 마찰손실증대 등이 요인으로 작용한 결과로 판단된다. 측압이 증가할수록 통수능 저하는 더욱 심화되는 경향을 보인다. 이것은 측압이 증가할수록 드레인의 압축에 의해 통수단면적이 축소되어 통수량이 감소하는 것으로 판단된다.



(a) E제품



(b) F제품

그림 4. 타설전후 드레인 통수능시험 결과

2.3 중, 대형 통수능 시험에 의한 통수특성 분석

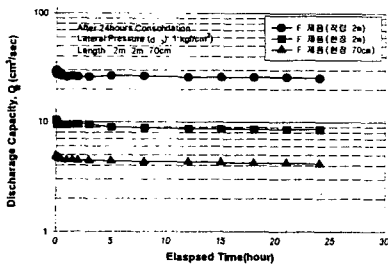
(1) 시험장치 및 시험조건

현장에서 압밀후 변형된 PBD재의 통수능력을 실물길이로 맞추어 검토하기 위하여 대형 통수능 시험장치(직경:120cm, 높이:200cm) 및 중형통수능 시험장치(직경:30cm, 높이:100cm)를 각각 2대씩 이용하였다.

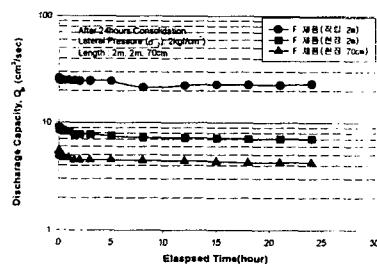
시험의 조건은 현장상태의 굴곡된 배수재를 선정하여 배수재의 길이를 2m, 0.7m, 그리고 직립상태의 배수재로 2m로 한후 측압 $\sigma_3 = 1, 2, 4 \text{ kg/cm}^2$, 동구구배 $i=0.2, 0.5, 1.0$ 의 조건으로 경사변화에 따른 Q_w 의 변화를 측정하였다.

(2) 결과분석

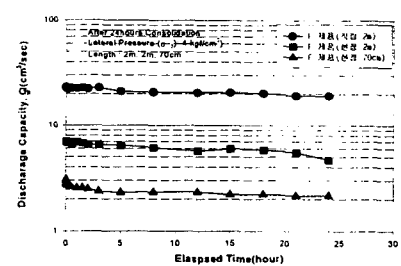
그림 5에서 (c)의 경우 $\sigma_3 = 4 \text{ kg/cm}^2$, 배수재 2m일 경우 Q_w 의 변화는 직립조건은 초기상태보다 약 16.7% 감소하였고, 현장굴곡조건은 약 33.3% 감소하였다. 그리고, 중형시험에 의한 70cm의 드레인재 경우는 약 29.7%감소된 상태에서 일정함을 나타낸다. 또한, 직립상태와 굴곡상태를 비교할 때 굴곡상태는 직립상태 Q_w 치보다 70~76% 감소하였다.



(a) $\sigma_3 = 1 \text{ kg/cm}^2, i = 0.2$



(b) $\sigma_3 = 2 \text{ kg/cm}^2, i = 0.2$



(c) $\sigma_3 = 4 \text{ kg/cm}^2, i = 0.2$

그림 5. 배수재에 따른 시간~통수능력(Q_w)의 관계

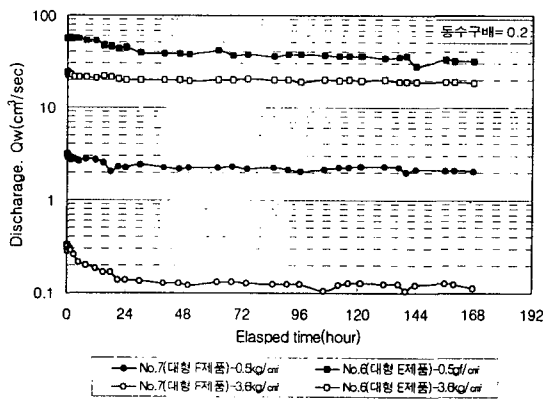
3. 연직배수재의 장기 통수특성 분석

시험성토구간에 심도 5.0m로 굴착하여 채취한 No.7의 F제품, No.6의 E제품을 대상으로 대형실물 실

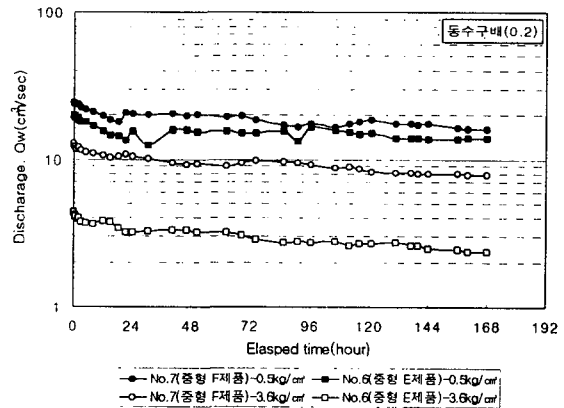
험장치와 중형실험 장치를 이용하여 장기통수능력 시험을 실시하였다.

그림 6은 No.7(F제품) 및 No.6 (E제품)의 드레인재를 대상으로 경과시간에 따른 통수량의 변화를 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 F제품에 대한 시험결과, 시험조건이 $L=2m$, $\sigma_3=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우 Q_w 의 변화는 초기값을 1로 기준할 때 약 65.2% 감소하였으며, 시험조건이 $L=2m$, $\sigma_3=3.6 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우 Q_w 변화는 약 66.4% 감소하였다. $\sigma_3=3.6 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우 $\sigma_3=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 에 비하여 11%~54% 감소함을 보인다. E제품에 대한 시험결과, 시험조건이 $L=2m$, $\sigma_3=0.5$ 인 경우에는 52.2% 감소하였으며, 시험조건이 $L=2m$, $\sigma_3=3.6 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우는 76.8% 감소하였다. $\sigma_3=3.6 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우 $\sigma_3=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 의 43%~58.8% 감소함을 보인다. 대형통수능실험장치로 시험한 결과 E제품의 경우가 F제품 보다 변형 발생후 통수능력이 다소 뛰어나게 나타나는 것은 재료자체의 특성차이에 기인된 원인과 시험 셋팅시에 드레인재를 고정시키기 위한 실리콘의 영향으로 인해 배수의 흐름이 막히게 되어 원래의 통수능력을 충분히 발휘하지 못한 것도 다소간의 영향을 미친 것으로 판단된다.

그림 6(b)는 중형실험장치로 $L=0.7m$ 인 경우 시간경과에 따른 통수능력을 나타내었다. 실험의 결과는 대형실물 실험장치와는 반대로 F제품의 경우가 E제품 경우보다 약 65.2%~82%정도 통수능력이 좋은 것으로 나타났다. 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 $\sigma_3=3.6 \text{ kg/cm}^2$ 의 높은 축압에서는 통수량의 변화는 경과시간이 1~3일 정도후에 안정화 되면서 약 3일 이후에는 거의 일정해지는 경향을 나타내는 반면 낮은 축압의 경우인 $\sigma_3=0.5 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우에는 오랜시간이 경과하여도 흐름의 안정화가 쉽게 얻어지지 않고 불규칙하지만 계속적으로 감소되는 것을 알 수 있다. 이러한 이유로는 배수재내의 흐름이 높은 축압일 경우보다 낮은 축압일 경우 흐름량이 크기 때문에 흐름의 변화가 층류성이 아닌 난류성 흐름이기 때문에 흐름이 불규칙한 것으로 추측되며, 또 다른 이유로는 축압이 높은 경우 필터재의 신장에 따른 변화가 급격히 이루어 짐으로서 필터재가 배수유로내에서 최대로 신장되어 인장력이 평형을 이루게 되나 축압이 낮은 경우 Creep 현상의 발생이 지연되어 유로의 감소가 서서히 이루어지기 때문으로 추측된다.



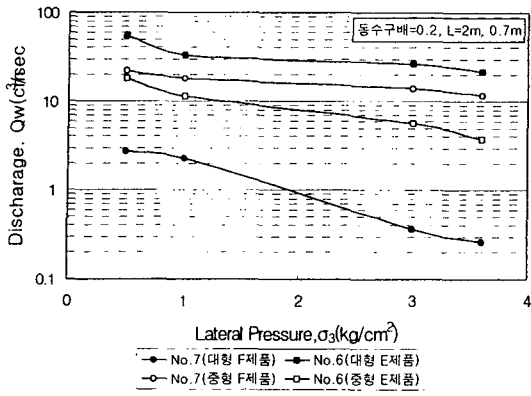
(a) $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$, $i=0.2$, $L=2m$



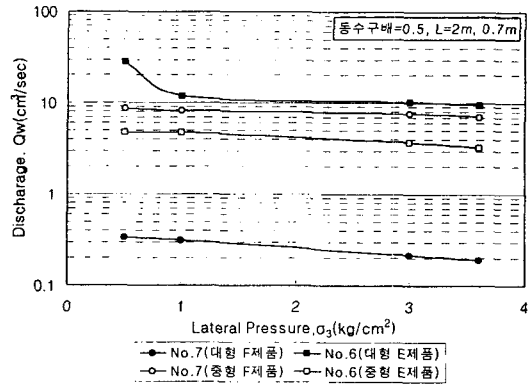
(b) $\sigma_3 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$, $i=0.2$, $L=0.7m$

그림 6. 시간-통수능 관계

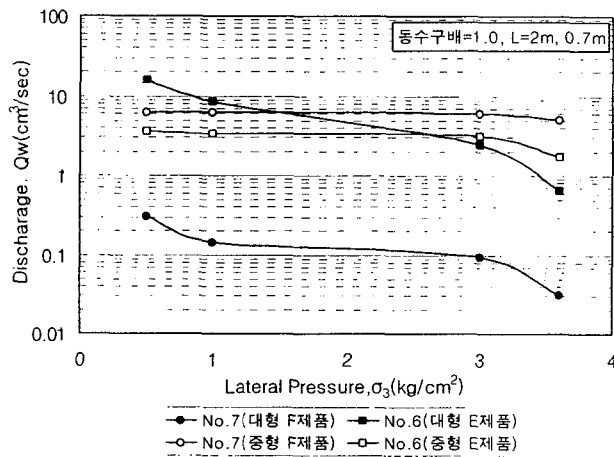
그림 7은 축압에 따른 통수능변화를 나타내고 있다. 그림 8은 동수구배에 따른 통수능을 나타내고 있다. 실험결과에서 F제품일 경우 대형실험장치보다 중형실험장치에서의 통수능이 크게 나타났으며, E제품의 경우는 대형 통수능 시험결과가 크게 나타났다. 이와 같이 동일 배수재의 경우라도 통수능의 차이가 발생하는 것은 앞서 언급한 바와 같이 배수재의 굴곡형상의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.



(a) $i=0.2$

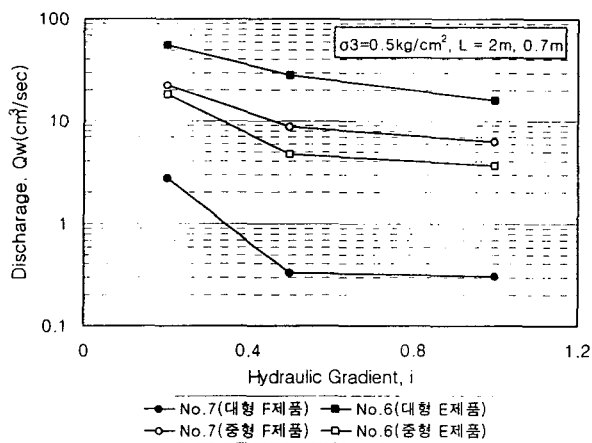


(b) $i=0.5$

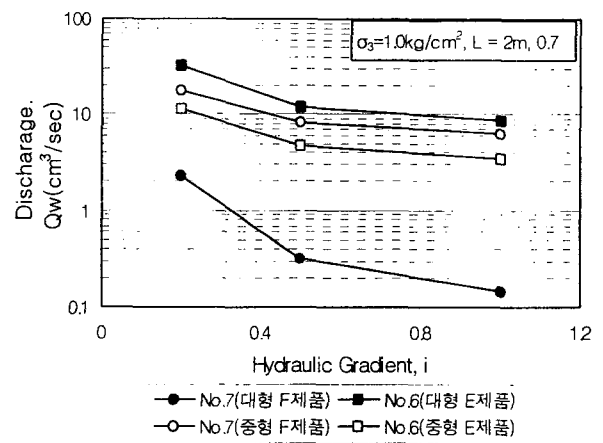


(c) $i=1.0$

그림 7. 시간통수능 관계

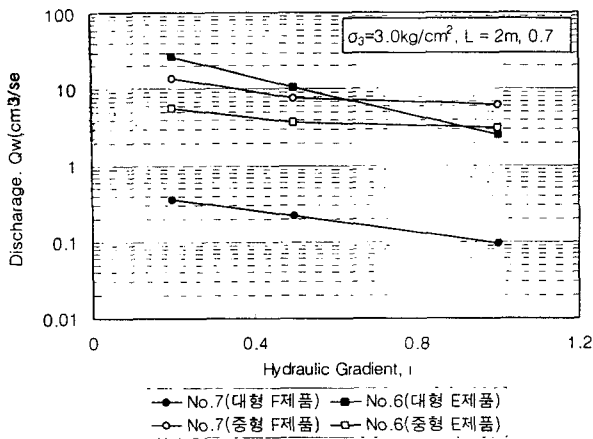


(a) $\sigma_3=0.5$ kg/cm²

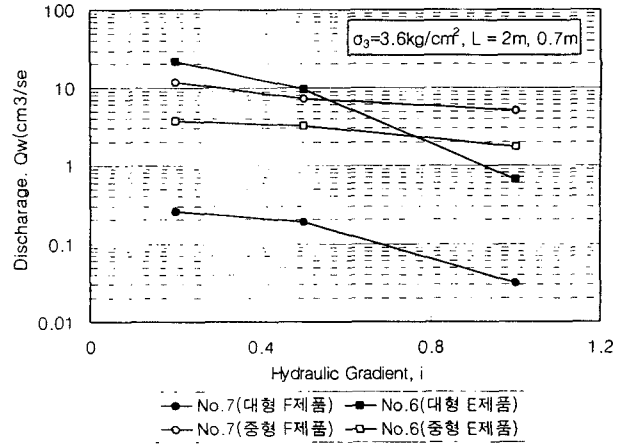


(b) $\sigma_3=1.0$ kg/cm²

그림 8. 동수구배-통수량의 관계



(c) $\sigma_3=3.0 \text{ kg/cm}^2$



(d) $\sigma_3=3.6 \text{ kg/cm}^2$

그림 8. 동수구배-통수량의 관계 (계속)

4. 배수재의 통수능 평가

본 연구에서는 배수재의 통수능 시험시 중형 및 대형시험에서는 현장에서 채취한 배수재에 대하여 현장 굴곡상태를 그대로 유지하여 실험을 실시하였다. 그리고 소형시험에서는 현장채취 배수재에 대하여 직립조건에서 실험을 실시하였는데 앞서 언급한 바와 같이 통수능 시험시 측압에 의해 현장상태의 변형조건으로 회귀하는 현상이 발생하는 경향을 보였다.

통수능시험중 품질기준에서 제시한 측압 300KPa, 동수경사 0.5이하의 시험조건에서 실시한 시험결과와 품질기준을 비교하여 표 4에 나타내었다. 표에서 보는바와 같이 E제품의 경우 통수능 시험기의 크기에 따라 5.6~26.8 cm³/sec의 통수능을 보이며, F제품의 경우 0.4~14 cm³/sec의 통수능을 보이는 것으로 나타났다. 두 배수재의 통수능의 평균값은 각각 11.3, 4.1cm³/sec으로 나타나, 타설후 3년이 경과한 후의 배수성능은 굴곡조건에서의 배수성능인 15cm³/sec이하로 나타나 소정의 기준을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

표 4. 배수재의 통수능 평가

구분	시험조건				시험결과(cm ³ /sec)	
	변형상태	사용시료	측압	동수경사	E제품	F제품
품질기준	직립		300kPa	0.5이하	25이상	
	굴곡(20%)				15이상	
소형시험	직립	초기상태	300KPa	0.5	50	31
대형시험	현장굴곡	현장채취	3.0kg/cm ²	0.2	26.8	0.4
중형시험	현장굴곡	현장채취	3.0kg/cm ²	0.2	5.6	14.0
대형시험	현장굴곡	현장채취	3.0kg/cm ²	0.5	10.3	0.2
중형시험	현장굴곡	현장채취	3.0kg/cm ²	0.5	7.6	3.7
소형시험	직립	현장채취	300KPa	0.5	6	2
평균					11.3	4.1

양산물금 시험시공에서는 초기상태와 타설후 3년이 경과한 배수재에 한하여 통수능시험을 실시하였기 때문에 타설후 시간이 경과함에 따라 복합적인 원인에 의해 통수능이 감소하는 변화량을 추정할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 시간경과에 따른 배수재의 통수능 허용계수를 추정하기 위해 Koda 등 (1989)의 연구결과중 일부분과 본 연구에서 얻은 연구결과를 취합하여 그림 9와 같은 통수능 감소계수 (f)를 추정하여 보았다. 여기에는 품질기준에서 실시된 동수경사 0.5, 측압 300kPa 조건의 실험결과를 이용하였다. 그림에서와 같이 시간이 경과함에 따라 지중에 타설된 배수재는 복합적인 원인에 의해 다음과 같은 지수함수 형태로 통수능이 감소하는 것으로 분석되었다.

$$f = 0.65e^{-0.005t} + 0.35e^{-0.0013t} \quad (3)$$

여기서, t: 배수재 통수 경과일수(day)

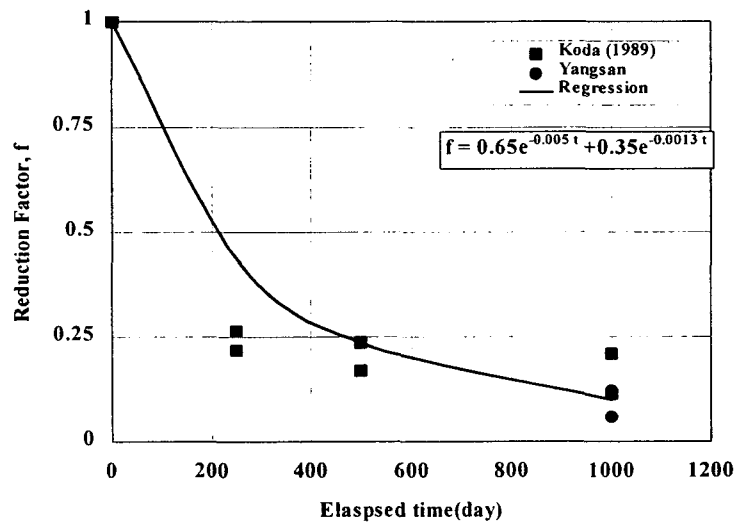


그림 9. 현장채취 배수재에 대한 통수능 감소계수 산정결과

5. 결론

양산물금 택지조성공사 시험시공부지에서 현장굴착하여 채취한 연직배수재를 채취하여, 소형, 중·대형 통수능시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 현장 타설되기 전과 타설후 약 3년이 경과된 배수재에 대한 소형 통수능 시험 결과, E제품의 경우 초기보다 75~89%정도 통수능이 감소하였으며, F제품의 경우 초기보다 90%이상 통수능이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 대형 통수능시험 결과, F제품의 경우 초기보다 약 70%의 통수능이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 지반의 압밀증가에 동반하여 지중간극수의 유입량이 감소되므로 3년경과 후 반드시 초기치와 동일수준의 통수능을 유지할 필요는 없을 것으로 판단된다.
- (2) 통수능력 적용시 측압, 굴곡 및 동수구배 등이 최악의 조건으로 이루어진 상태의 값을 대상 PBD재의 통수능력이라고 판단하는 것은 다소의 문제가 있는 것으로 사료된다. 따라서, 현장의 여건을 충분히 고려하여 실험결과치로부터 보간법 등을 이용하여 현장 조건에 대응하는 상태의 통수능력을 산정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (3) Koda 등(1989)의 연구결과와 본시험 결과를 이용하여 경사변화에 따른 PBD의 통수능 감소계수(f)를 식으로 나타내면 $f = 0.65e^{-0.005t} + 0.35e^{-0.0013t}$ 이다

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(1999), “연직배수공법적용시 지반교란에 따른 압밀특성 평가에 관한연구”
2. 한국건설기술연구원(1999), “해안공간개발을 위한 연약지반 처리기술”
3. 한국토지공사(1999), “연약지반의 압밀특성에 관한 연구”
4. Bergado, D. T., Miura, N., and Danzuka, M.,(1988), “Reliability analysis of a test embankment by variance reduction and nearest-neighbor methods” , International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 2, No. 6, pp. 1353~1359.
5. Koda, E., Szymanski, A. and Wolski, W.,(1989), “Behavior of geodrains in organic subsoil” , International Conference on Soil Mechanics and Foundation Eng., Vol. 2, No. 12, pp.1377~1380.
6. 朴永穆(1994). “低平地に堆積する海成粘土の土質特性と鉛直排水工法による地盤改良に関する研究” . 日本 佐賀大學 博士學位論文. pp.1-235.