

수평배수재의 통수특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Discharge Capacity for Horizontal Drains

박정용¹⁾, Jeong-Yong Park, 박정순²⁾, Jung-Soon Park, 장연수³⁾, Yeon-Soo Jang,
김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

- 1) 동국대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Dong-Guk Univ.
- 2) 동국대학교 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Dong-Guk Univ.
- 3) 동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Dong-Guk Univ.
- 4) 한양대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Hanyang Univ.

SYNOPSIS : Discharge capacity test is carried out to find out influencing factors on discharge capacity of prefabricated horizontal drains to improve weak dredged clay. Four representative prefabricated horizontal drains are selected based on the size of drain as well as the shape of core. Test is carried out for 10 days at each three level of confining pressure for all drains. Effects of elapsed time, confining pressure, hydraulic gradient and strength of filter and core on discharge capacities are examined. It is found that discharge capacity of drain, which has deformable core or has a possibility of squeezing filter into core, decreases more with time due to its low strength. As confining pressure increases, discharge capacity decreases due to the squeezing of filter into core.

Key words : Prefabricated horizontal drain, Discharge capacity, Confining pressure, Hydraulic gradient

1. 서 론

준설매립지반은 초기에 고함수비이고 간극비가 매우 커 압축성이 크며 지반의 강도가 거의 0인 상태이므로 시공기계의 반입은 물론 사람의 보행조차 곤란한 상태이다. 따라서 준설매립지반을 활용하기 위해서는 최우선적으로 지반개량 장비의 하중을 지지할 수 있도록 표층안정처리가 선행되어야 한다. 수평배수공법은 이러한 표층개량공법 중의 하나로서, 준설매립지반내에 배수재를 수평방향으로 타설하여 중력이나 진공압에 의해 간극수를 유출시켜 지반의 압밀침하를 촉진시키는 공법이다.

지반에 설치된 수평배수재는 토압과 수압으로 인한 구속압을 받게 되며, 이로 인해 배수재 내부의 단면적이 감소하게 되므로 결국 통수능의 저하가 발생하게 된다. 따라서 준설매립지반의 표층부개량을 위해 수평배수공법을 적용할 경우, 소정의 지반개량효과를 얻기 위해서는 수평배수재의 통수능 특성에 관한 검증이 필수적인 사항이다.

따라서 본 연구에서는 배수재가 수평방향으로 타설되어 간극수를 횡방향으로 소산시키는 수평배수공법 적용시, 배수재의 통수능에 영향을 미치는 요인들을 파악하고자 포화 통수능력 시험을 실시하였다.


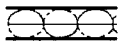

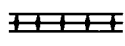
수평배수재의 단면의 크기, 코어의 형태, 필터와 코어의 부착성 여부 등에 따라 대표적인 4종류의 배수재를 선정하여 시험을 수행하였다. 선정된 배수재에 대해 각 압력별로 10일간의 시험을 실시하였으며, 시간에 따른 통수능 변화를 고찰하였다. 또한 구속압의 크기, 동수경사, 필터와 코어의 강성 등이 통수능에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

2. 통수능력시험 개요

2.1 시험대상 수평배수재

배수재는 일반적으로 필터와 코어로 이루어져 있으며, 제조방법에 따라 일체형과 분리형으로 구분된다. 일체형은 필터와 코어가 열융합으로 부착되어 있으며, 분리형은 떨어져 있는 형태를 지칭한다. 본 연구에서는 준설매립지반 개량을 위한 수평배수공법 적용시 사용될 수 있는 대표적인 배수재를 그 특성별로 4종류를 선정하여 포화 통수능력시험을 실시하였다. 본 시험에서 사용한 배수재의 단면의 크기 및 형상, 필터와 코어의 부착성 여부 등은 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1. 선정된 수평배수재의 단면크기 및 형상

배수재명	Type-E	Type-P	Type-O	Type-V
단면크기 폭×두께 (mm×mm)	100×20	100×10	100×10	100×3
구조적 분류	일체형	분리형	일체형	분리형
단면형상				

선정된 배수재들의 인장강도특성은 표 2에 보인 바와 같다. 분석결과, 대상 배수재들의 코어와 필터 시스템의 통합 인장강도값은 배수재에 대한 제안기준을 모두 충족하는 것으로 평가되었다. 또한 배수재 전체의 강도가 매우 강하더라도 필터가 일단 파단되면 배수재로서의 기능을 수행할 수가 없게 되므로 필터만의 강도특성도 최적 배수재 선정에 위한 중요한 조건인데, 선정된 모든 배수재의 필터가 기존 토목섬유 배수재 필터 제안기준을 만족하였다.

표 2. 수평배수재의 인장강도특성

배수재명 재료	인장강도 제안기준 (kgf/전폭)	시험 조건	인장강도시험 결과(kgf/전폭)			
			Type-E	Type-P	Type-O	Type-V
배수재 (필터+코어)	한국영중도신공항기준(김, 1998) 100	건조	213.4	242.5	715.8	388.6
		습윤	209.8	264.7	710.4	387.0
필터	Christopher(1985) 35.6	건조	79.2	48.8	76.1	91.8
		습윤	84.4	42.4	63.2	93.9

2.2 시험장치

본 연구에서는 현장타설시 배수재에 작용하는 구속압과 가압시간 등의 영향을 평가할 수 있도록 수평배수재 통수능력시험 기구를 자체 제작하였다. 그림 1에 보인 바와 같이 본 시험장치는 크게 원형압력실, 항압장치, 일정수두장치 등 3부분으로 구성되어 있다.

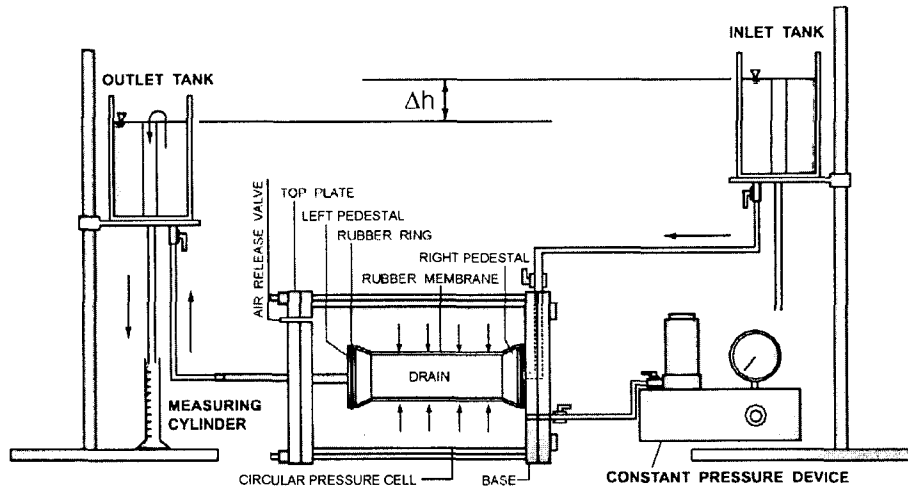


그림 1. 포화 통수능력시험 기구

2.3 시험방법 및 조건

2.3.1 시험방법

선정된 4종류의 배수재에 대한 포화 통수능력시험을 아래와 같은 과정으로 수행하였다.

- 1) 배수재를 길이 43 cm로 자른 다음 상·하부 캡에 고정시킨 후, 고무멤브레인으로 피복하여 원형압력실에 설치한다. 이후, 원형압력실과 배수재 내부에 증류수를 주입하여 완전히 포화시킨다.
- 2) 포화가 끝난 후, 일정수두장치를 조절하여 시험 동수경사에 맞추고 구속압력을 가하지 않는 상태에서 유입밸브를 열어 유과되는 물을 메스실린더로 받아 통수량을 측정한다. 이후 항압장치에 의해 원형압력실에 10 kPa의 구속압을 가하고, 각 시간별로 통수량을 측정한다. 이때 측정횟수는 3회로 하는데 3회의 측정값을 평균하여 그 시간의 통수능으로 한다.
- 3) 위와 같은 방법으로 측정이 끝나면 압력을 50, 100 kPa로 증가시켜 10일간 시험을 반복 실시한다.

2.3.2 시험조건

준설매립현장에 배수재 타설 후 시간의 경과와 함께 크리이프 변형이 일어나며 이로 인한 통수능 저하가 발생하게 되므로, 이를 평가하기 위해 본 연구에서는 1시간, 1일, 10일 경과시의 각각의 통수능을 측정하였다. 동수경사는 준설매립지반에서 고려할 수 있는 0.01과 0.05를 선택하여 시험을 실시하였다. 수평배수재에 대한 구속압은 준설매립지반에 배수재가 0.7~7 m 깊이에 타설되었을 때의 압력인 10~100 kPa에 대해 시험하였다. 표층안정처리를 위한 준설매립지반의 대상깊이는 크게 깊지 않아 이로 인한 부등침하의 정도가 미미할 것으로 판단하여 배수재의 굴곡조건은 반영하지 않고 직선조건으로 시험하였다.

3. 시험결과 및 분석

3.1 가압시간의 영향

각 배수재에 대한 포화 통수능력시험 결과, 동수경사가 0.01인 조건에서 가압시간에 따른 단위동수경사당의 통수능(Q_w)의 변화를 그림 2에 나타내었다. 구속압이 10kPa일 때 Type-E의 경우는 1일 경과시

와 10일 경과시 통수능이 가압전에 비해 각각 약 31.7%, 48.3% 감소하였다. 이는 이 배수재의 초기 통수단면적은 타 배수재에 비해 크지만, 필라멘트 모양의 코어의 강성이 작아서 가압후 통수단면적이 급격히 감소하였기 때문으로 판단된다. 또한 시간의 경과와 함께 통수능이 줄어들고 있는데, 이는 가압시간이 증가할수록 코어의 크리프 변형이 점차 증가하는 것에 기인한 것으로 평가된다.

한편, Type-O의 경우, 코어의 강성이 타 배수재에 비해 가장 크지만 구속압이 10 kPa일 때 시간에 따라 통수능이 다소 감소하는 경향을 보였다. 이는 시간의 경과와 함께 필터가 코어속으로 말려들어가는 현상에 의한 것으로 분석된다.

동수경사가 0.05인 경우(그림 3 참조), Type-E의 배수재는 필라멘트 코어의 강성이 작은 원인으로 인해 배수재 통수단면적이 감소하여, 시간의 경과에 따른 통수능이 저하하였다. 반면 그 외 다른 배수재들은 시간의 경과가 통수능에 큰 영향을 미치지 못함을 관찰할 수 있었다.

각 구속압에서 1시간 경과시와 10일 경과시의 시험 배수재에 대한 통수능력시험 결과를 표 3에 요약하여 정리하였다. 분석결과, 코어의 강성이 작아 가압시간에 따라 점진적으로 변형되는 코어를 갖는 배수재와, 비록 코어의 강성은 클지라도 필터가 코어속으로 말려들어가는 현상이 큰 배수재들은 낮은 동수경사에서 시간경과에 따라 통수능이 저하하였다. 그러나 동수경사가 증가할수록 대부분의 배수재에서 시간에 따른 통수능의 저하현상이 감소하는 것으로 나타났다.

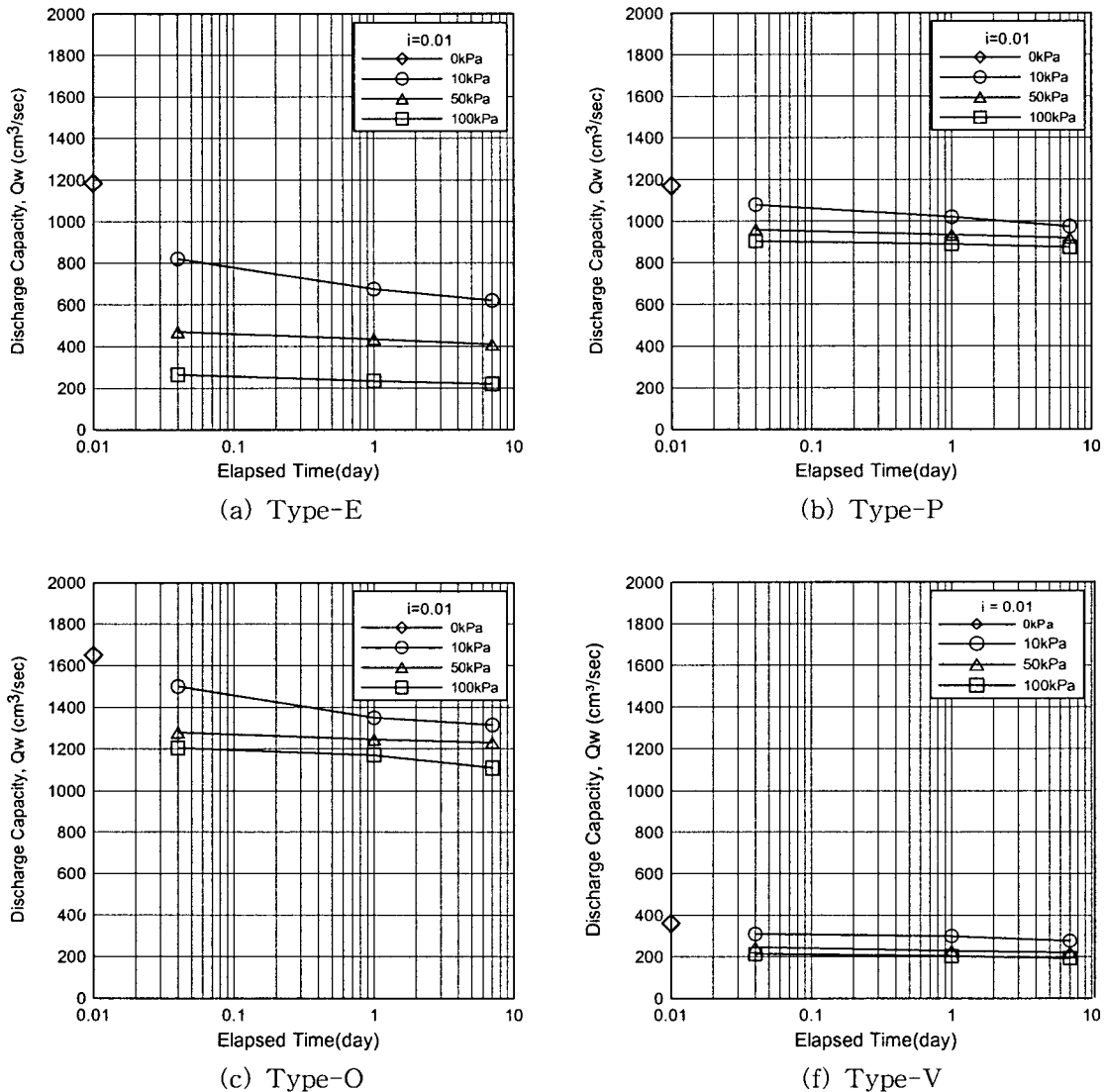
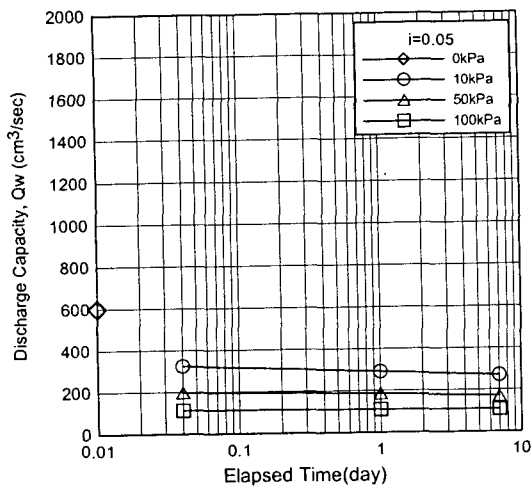
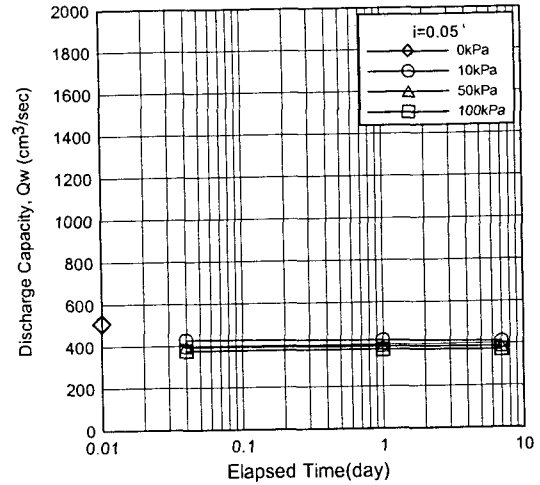


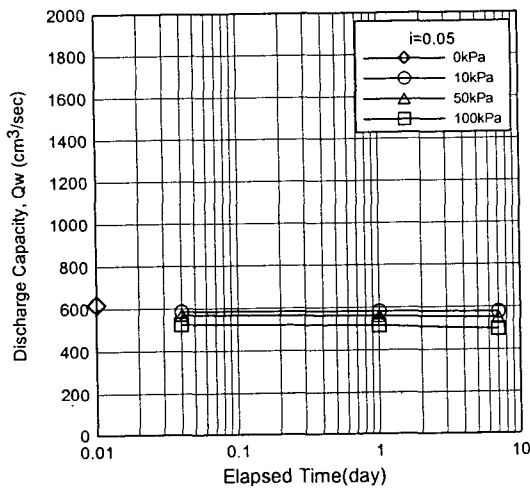
그림 2. 가압시간에 따른 통수능의 변화량(동수경사=0.01)



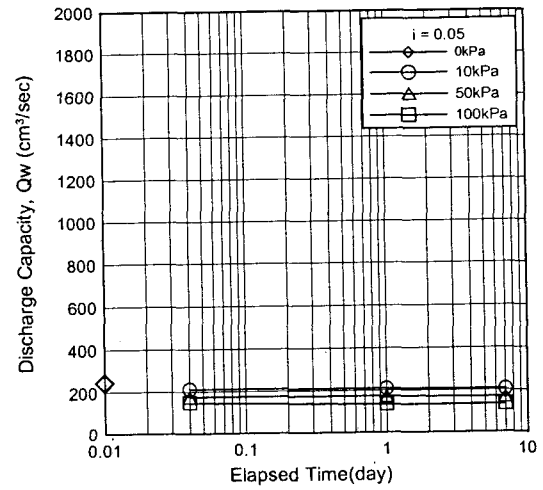
(a) Type-E



(b) Type-P



(c) Type-O



(f) Type-V

그림 3. 가압시간에 따른 통수능의 변화량(동수경사=0.05)

표 3. 10일 경과시 각 배수재의 통수능 감소량

배수재 종 류	구속압	i=0.01			i=0.05		
		Q _w (cm ³ /sec)		통수능 감소량(%)	Q _w (cm ³ /sec)		통수능 감소량(%)
		t=1hour	t=10days		t=1hour	t=10days	
Type-E	10kPa	820	620	24.4	325	271	16.6
	50kPa	470	410	12.8	199	171	14.1
	100kPa	265	220	17.0	113	108	4.4
Type-P	10kPa	1080	975	9.7	428	410	4.2
	50kPa	960	920	4.2	395	386	2.3
	100kPa	905	875	3.3	377	342	9.3
Type-O	10kPa	1500	1315	12.3	586	574	2.0
	50kPa	1280	1230	3.9	570	550	3.5
	100kPa	1205	1110	7.9	526	497	5.5
Type-V	10kPa	310	277	10.6	213	194	8.9
	50kPa	245	220	10.2	176	169	4.0
	100kPa	213	193	9.4	149	137	8.1

3.2 구속압의 영향

그림 4는 구속압의 증가에 따른 10일 경과시의 단위동수경사당의 최종 통수능(Q_w)의 변화를 보인 것이다. 이 그림에서 보듯이, 모든 배수재는 구속압의 증가와 함께 최종 통수능이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 구속압이 커짐에 따라 필터가 코어속으로 말려들어가서 통수단면적을 감소시키는 현상이 가중되기 때문으로 판단된다. 한편 Type-E의 필터의 인장강도는 타 배수재에 비해 큰 값을 가지므로 구속압의 작용시 코어안으로 말려들어가서 현상은 작았음에도 불구하고 통수능이 크게 감소하였다. 따라서 필터의 강도가 충분히 크다 할지라도 배수재의 통수단면적이 유지될 수 있도록 충분한 코어 강성이 동시에 확보되어야 배수재의 통수기능을 원활히 수행할 수 있음을 알 수 있다.

Type-V의 경우는 구속압에 따른 통수능의 변화가 거의 없는 것으로 보이나, 이는 배수재의 초기 단면적이 3 mm로서 타 배수재에 비해 상당히 작아서 단면 변화의 여지가 상대적으로 작았기 때문으로 판단된다.

필터와 코어의 부착여부와 통수능의 관계를 살펴본 결과, 필터와 코어가 일체형이면서 격자모양으로 이루어져 있는 Type-O의 경우가 모든 시험 구속압에서 가장 큰 통수능을 나타내었다. 기존의 연구에서 Holtz(1989) 등과 Kamon(1992) 등은 필터와 코어의 부착여부에 따른 통수능에 있어 일체형의 배수재가 분리형의 배수재보다 우수한 통수능을 나타내는 것을 밝혀낸 바 있다. 한편 필터와 코어가 일체형으로 이루어져 있는 Type-E의 배수재는 분리형의 Type-P보다 작은 통수능을 나타내었는데, 이는 이 배수재의 코어의 강성이 작아 배수재의 단면 축소가 크게 발생했기 때문으로 사료된다.

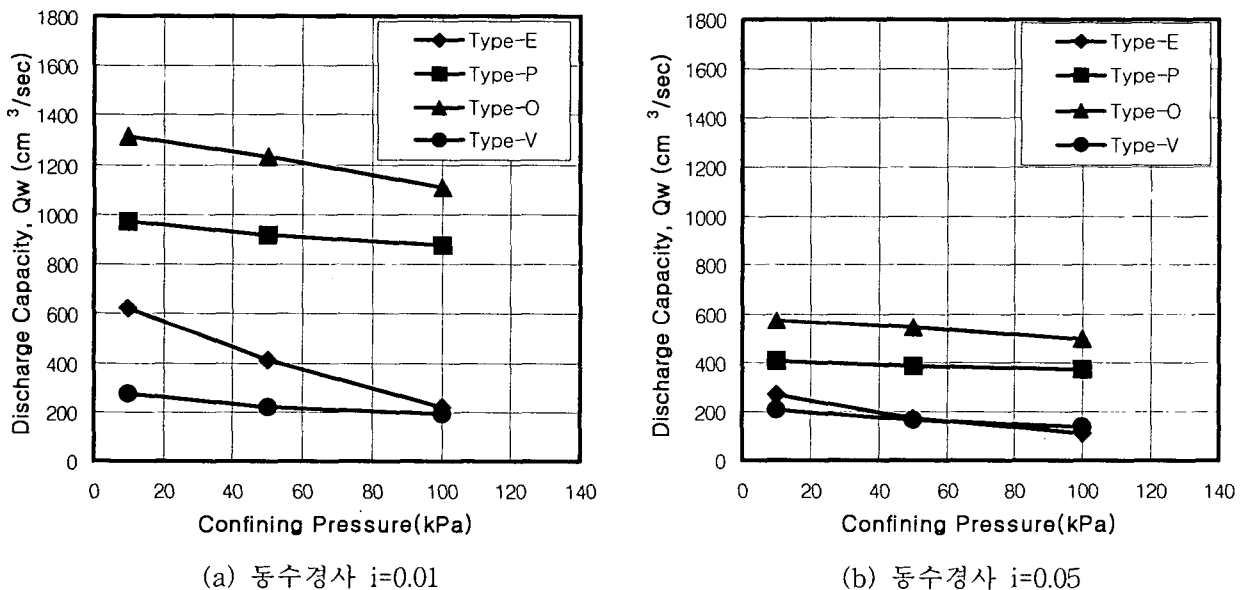


그림 4. 구속압의 증가에 따른 통수능의 변화량

3.3 동수경사의 영향

4종류의 시험배수재에 대해 구속압이 100kPa인 경우, 10일 경과시의 단위동수경사에 대한 통수능의 변화(Q_w)를 그림 5에 나타내었다. 이론적으로 단위동수경사당 통수능의 값은 동수경사에 대해 정규화되어 있으므로, 작용 동수경사와 관계없이 일정한 값을 나타내어야 한다. 그런데 이 그림에서 볼 수 있듯이 대부분의 배수재들은 동일 구속압하에서 동수경사가 0.01에서 0.05로 증가할 때 통수능이 급격히 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 그 원인은 동수경사가 증가함에 따라 배수재 내부의 필터에 인접한 면

과 코어의 표면에서 큰 마찰저항이 유발되어 이 영역들에서 유속이 감소되며, 결과적으로 높은 동수경사시 낮은 동수경사시에 비해 정상적인 흐름이 발생하는 유효단면적이 감소하기 때문으로 평가된다. 반면 통수능력이 상대적으로 작은 Type-E, Type-V와 같은 배수재에서는 동수경사의 증가에 따른 통수능의 저하가 타 배수재에 비해서 작게 발생하였다. 이는 Type-E의 경우 높은 구속압에서 단면적이 시험과 동시에 크게 감소하였고, Type-V의 경우는 초기 단면적이 작았으므로, 두 경우 모두 작은 단면적으로 인해 타 배수재에 비하여 동수경사의 변화에 덜 민감하였기 때문으로 분석된다.

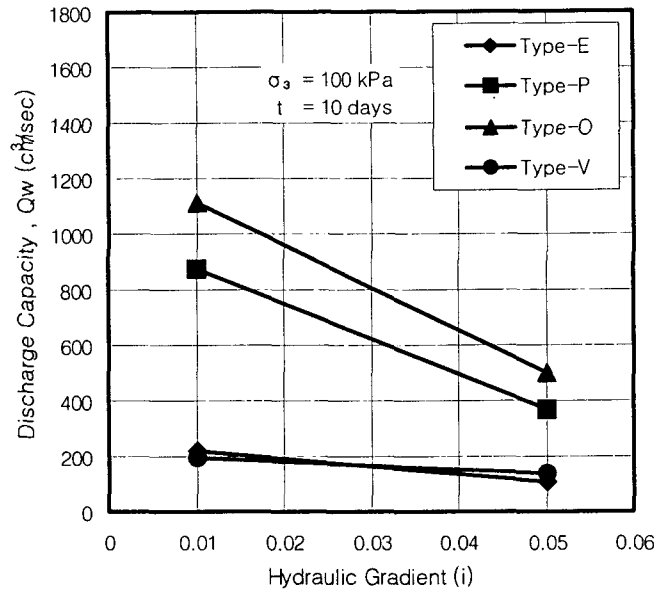


그림 5. 동수경사에 따른 통수능의 변화

4. 결론

준설매립지반의 표층안정처리를 위한 수평배수재의 통수특성을 파악하기 위해 대표적인 4종류의 배수재를 선정하여 포화 통수능력시험을 실시하고, 통수능에 대해 영향을 주는 요인들에 대해 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 코어의 강성이 작아 가압시간에 따라 점진적으로 변형되는 코어를 갖는 배수재와, 비록 코어의 강성은 클지라도 필터가 코어속으로 말려들어가는 현상이 큰 배수재들은 낮은 동수경사에서 시간의 경과에 따라 통수능이 저하하였다. 그러나 동수경사가 증가할수록 대부분의 배수재에서 시간에 따른 통수능의 저하현상이 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) 모든 배수재는 구속압의 증가와 함께 최종 통수능이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 구속압이 커짐에 따라 필터가 코어속으로 말려들어가서 통수단면적을 감소시키는 현상이 가중되기 때문으로 판단된다.
- 3) Type-E의 필터의 인장강도는 타 배수재에 비해 큰 값을 가지므로 구속압의 작용시 코어안으로 말려들어가는 현상은 작았음에도 불구하고 통수능이 크게 감소하였다. 따라서 필터의 강도가 충분히 크다 할지라도 배수재의 통수단면적이 유지될 수 있도록 충분한 코어 강성이 동시에 확보되어야 배수재의 통수기능을 원활히 수행할 수 있음을 알 수 있다.
- 4) 대부분의 배수재들은 동일 구속압하에서 동수경사가 0.01에서 0.05로 증가할 때 최종 통수능이 급격히 감소하는 현상을 관찰할 수 있다. 그 원인은 동수경사가 증가함에 따라 배수재 내부의 필터에 인

접한 면과 코어의 표면에서 큰 마찰저항이 유발되어 이 영역들에서 유속이 감소되며, 정상적인 흐름이 발생하는 유효단면적이 감소하기 때문에 평가된다.

- 5) 인장강도 및 통수능력시험 결과를 종합하여 분석해 볼 때 Type-O와 같은 큰 강성을 지닌 격자모양의 코어형상을 갖는 일체형의 배수재가 구속압에 의한 통수단면적의 감소를 최소화하고 이로 인해 배수재 내부를 통과하는 물이 저항을 덜 받아 수두손실을 최소화시켜 우수한 통수능을 나타내는 것으로 평가된다.

참고문헌

1. 김수삼, 장연수, 박영목(1998), 수직배수재의 적정단면 산출 및 개발에 관한 연구, 360p.
2. Christopher, B.R. and Holtz., R.D.(1985), *Geotextile Engineering Manual*, U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC. 1044p.
3. Holtz, R.D., Jamiolkowski, M., Lancellota, R. and Pedroni, S.(1989), "Behavior of Bent Prefabricated Vertical Drains", *Proc. of the 12th ICSMFE*, Vol. 3, Rio de Janeiro, pp. 1657~1660.
4. Kamon, M. and Pradhan, T.B.S.(1992), Laboratory Evaluation of the Discharge Capacity of Prefabricated Band-Shaped Drains, *The Society of Materials Science*, Japan. pp. 23~38.