

지오그리드 복합 배수재를 이용한 터널 배수성능 개선에 관한 실험적 연구

이준석^{1*} · 최일윤² · 임지훈² · 윤석철³

¹정회원, 한국철도기술연구원

²비회원, 한국철도기술연구원

³비회원, 이정테크(주)

An experimental study on the improvement of tunnel drainage system using a geogrid composite

Jun S. Lee^{1*}, Il-yoon Choi², Jihoon Lim², Suk Chul Yoon³

¹Member, Korea Railroad Research Institute

²Nonmember, Korea Railroad Research Institute

³Nonmember, Ejung Tech., Ltd., Korea

ABSTRACT: A new testing equipment is designed to investigate the characteristics of the drainage fabric which is used in the tunnel drain system. The equipment is possible to model the loading as well as boundary conditions of the shotcrete precisely and it follows the general guideline of ASTM D4716 so that the interface between shotcrete and concrete lining retains the real situation in the tunnel site. Using the real loading conditions and surface irregularities, the flow rate and its capacity of the regular fabric has been estimated. A composite drainage fabric having geogrid inside was also used to investigate the flow rate and its efficiency. The advantages of the composite fabric compared with the regular one have been demonstrated using the experimental data and brief outline of the future work is finally proposed.

Keywords: Drainage system, Geogrid, Permeability, Roughness, Flow rate

초 록: 본 연구에서는 철도터널의 배수재로 사용되는 부직포의 배수 특성을 정밀하게 조사하기 위하여 실제 터널 시공현장과 유사한 경계조건 및 하중조합을 가진 실험장비를 고안하였다. ASTM D4716과 유사한 성능을 갖는 실험장비는 슛크리트 및 방·배수재와 콘크리트 경계면의 굴곡을 현장 조건과 유사하게 구현할 수 있으며 관련 시방조건 만족유무에 따른 실험결과로부터 일반 배수재의 성능을 규명하였다. 또한 배수성능 개선을 위하여 부직포 사이에 지오그리드를 삽입한 혼합형 배수재를 사용한 경우와 일반 배수재에 대한 실험결과로부터 혼합형 배수재의 배수성능 및 적용방안에 대하여 고찰하였다.

주요어: 배수체계, 지오그리드, 투수계수, 표면 거칠기, 투수량

1. 서론

철도터널의 방수재 및 배수재는 각각 터널 원주면으로 유입되는 유입수를 차단한 후 터널 측벽 하단으로 유도하여 외부로 유출시키는 목적으로 설치하며,

일부 특수구간을 제외하고는 방수재와 배수재를 사전에 접합한 일체형 방·배수재가 점진적으로 적용되고 있다. 일체형 방·배수재는 현장에서 방수재와 배수재를 접합하여야 하는 불편함을 최소화하는 한편 접합부 품질관리 측면에서도 장점으로 부각되고 있다. 철도터널용 방수재의 공학적 특성에 대해서는 관련 규정(KRNA, 2013a)에 비교적 자세히 기술되어 있으나 배수재의 경우에는 선언적인 개념들이 나열되어 있다. 즉, 세립분이 함유된 지반에서는 배수재의 두께를

*Corresponding author: Jun S. Lee
E-mail: jslee@krii.re.kr

Received November 23, 2015; Revised December 17, 2015;
Accepted December 28, 2015

증가시키거나 드레인보드를 사용하여 터널의 내구연한 동안 통수능력을 확보하며, 외부 압력에 의한 압착 및 폐색 등을 고려하여 적절한 배수재를 채택하도록 언급되어 있다. 철도터널용 배수재에 대한 자세한 공학적 물성기준은 철도건설공사 전문시방서(KRNA, 2013b) 등에 기술되어 있으며 대부분 관련 KS 표준규격을 따르도록 되어 있다. 한편 고속도로공사 전문시방서(KEC, 2012)에 따르면 배수재인 부직포의 경우, 중량 400 g/m^2 이상, 두께 2.0 mm 이상, 투수계수는 $2.6 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 이상인 단일겹의 장섬유 제품을 사용하도록 세부적으로 규정되어 있으며 동등 이상의 성능을 가진 배수재를 적용할 수 있도록 기술되어 있다.

일반적으로 배수시스템 설계시 유입수가 많은 곳에서는 배수재를 두 겹으로 설치하거나 드레인보드 등의 유도배수를 시행하게 된다. 그러나 용수가 많은 개소의 경우, 외부 압력 등으로 인한 배수재의 압착, 지반보강재의 용탈 및 토립자 등에 의한 배수재의 폐색 등이 동반되는 경우가 있으므로 이를 함께 고려하여야 한다. 또한 터널 입출구부의 경우, 외기 온도에 의해 라이닝 배면의 유입수가 결빙되는 경우가 발생 가능하므로 이에 대한 대책이 요구된다. 한편 최근 유럽에서는 양호한 암반내 터널시공시 앞서 언급한 방·배수시스템 설치를 대신하여 뿔어붙임식 방수재(Holter, 2014)를 적용한 사례가 보고된 바 있으며 터널 상부의 비배수 조건을 감안하더라도 뿔어붙임식 방수재 주변의 수압증가가 무시할 수 있을 정도인 것으로 확인되었다.

배수재의 성능은 수직 및 수평 투수계수 혹은 단위 폭당 투수량을 측정함으로써 유추할 수 있으며 수평 투수량 시험방법인 ASTM D4716-08(ASTM, 2013) 및 KS K ISO 12958(KSA, 2002) 규격을 적용하는 경우, 보다 직접적인 배수재의 성능을 확인할 수 있다. 이와 관련하여 Palmeira et al. (2002)은 외부 하중을 변수로 다양한 시험법을 적용한 후 배수재용 부직포의 특성을 규명하였으며 외부하중이 큰 경우, 부직포

의 불균질성을 고려하도록 제안하였다. 한편, Murillo et al. (2014)은 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 접촉부의 요철을 고려하기 위하여 가공한 요철판 및 부직포로 구성된 시편 상부에 신축성 막(membrane)을 이용한 하중을 가하고 ASTM D4716-08의 시험법을 적용하였다. 요철의 정량적인 변화는 Barton & Choubey (1977)의 암반절리 모형을 사용하였으며, 요철의 정도에 따른 배수재의 투수계수 변화를 제시하였다. Jang et al. (2015)은 부직포 및 지오그리드 합성 부직포 등의 토목합성재료(geocomposites)의 배수특성을 비교하기 위하여 외부하중 및 탄산칼슘 희석액을 변수로 한 투수시험을 수행하였으며 앞서의 경우와는 다르게 Delft 시험법을 적용하였다.

본 연구에서는 앞서 언급한 배수재의 특성 중, 통수능력을 증가시키기 위한 대안의 하나로 지오그리드를 합성한 배수재의 특성에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 KS K ISO 12958의 규정을 최대한 준수한 일반 및 합성 배수재 투수시험을 수행하였으며 기존의 연구방법과는 다르게 실제 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 재료를 사용하여 시편을 제작한 후 외부 하중에 따른 각종 배수재의 특성을 고찰하였다. 시험결과, 콘크리트 라이닝 등에 의한 외부 하중 고려시, 기존 배수재에 비해 통수능력이 향상되었음을 알 수 있으며 벤토나이트를 이용한 토립자 유입현상에 대하여도 함께 고려하였다.

2. 지오그리드 합성 배수재의 역학적 특성

Fig. 1(a)에는 국내 철도터널 현장에 적용되는 일반적인 형태의 일체형 방·배수재 구조를 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 터널내 유입수의 통수능력을 향상시키기 위한 방편의 하나로 Fig. 1(b)와 같이 부직포 등의 배수재를 두 겹으로 하고 그 사이에 지오그리드를 삽입한 후 방수막과 일체형으로 접합한 합성 배수재를 고려할 수 있다. 이 경우, Fig. 1(a)의 기존

일체형 방·배수재의 재료특성을 유지하고 지오그리드 및 배수재만 추가하거나, 기존 배수재의 단위중량을 줄이는 대신 두 겹의 배수재 및 지오그리드를 사용하는 방법이 가능하다. 본 연구에서 적용하는 지오그리드는 밀도 0.94 g/cm^3 , 중량 364 g/m^2 이고, 작용압력 약 4 kPa 에서 두께가 3.05 mm 로서 길이방향으로 길쭉한 일반적인 다이아몬드 형상이다. 한편 배수재와 관련한 철도터널 시방서의 관련 규정을 만족시키기 위해서는 합성 배수재의 인장강도 등을 파악하여야 한

다. 관련 KS규격에 의한 일반 배수재 및 합성 배수재의 시험결과를 Fig. 2 및 Table 1에 나타내었으며 예상할 수 있는 바와 같이 지오그리드를 포함한 합성 배수재의 인장강도는 더 크고, 인장신도(strain)는 지오그리드의 형상에 따라 유사하거나 더 크게 된다.

Table 1의 각종 재료적 특성은 모두 철도터널 관련 시방서내 품질기준 만족하고 있으며 지오그리드를 포함한 합성 배수재의 경우, 인장강도가 더 클 뿐만 아니라 통수단면이 늘어나는 효과를 함께 도모할 수 있다.

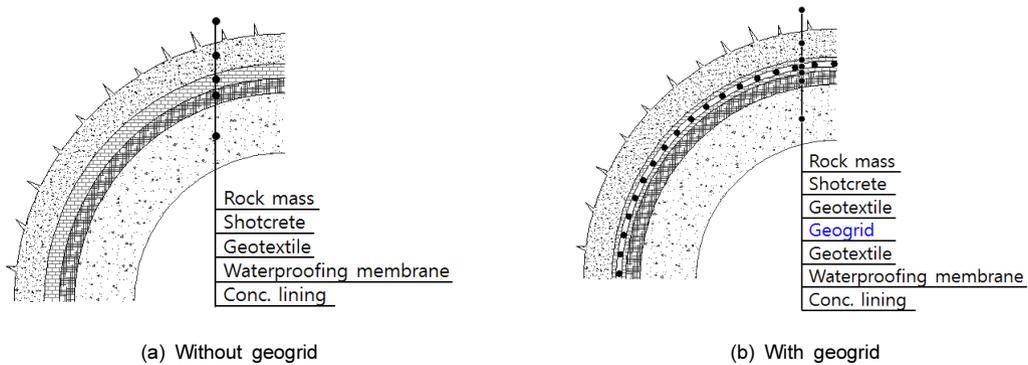


Fig. 1. Typical waterproofing and drainage system with/without geogrid



Fig. 2. Results of wide-width tensile test on non-woven geotextiles

Table 1. Results of wide-width tensile tests on geotextiles

Case	Weight (g/m^2)	Thick-ness (mm)	Test direction	Tensile strength (kN/m)	Tensile strain (%)	By
Without grid	400	2.1	length	11.28	61.1	KS K ISO 10319 or KS K 0520
			width	14.60	71.1	
With grid	$300 + 364 + 300$ $= 964$	3.3	length	17.60	59.2	
			width	15.36	99.2	
Specification	300	2.0		0.5	50	

3. 통수능 실내실험

3.1 실험 장치

일반 배수재 및 지오그리드를 포함한 합성 배수재의 통수 특성을 확인하기 위하여 가능한 한 터널 시공 현장과 유사한 환경을 조성하고 실내실험을 수행하였다. 이를 위하여 Fig. 3과 같은 정수위 통수시험 장치를 제작하였으며 온도시험용 환경챔버로 이동이 용이하고 수평조절이 가능한 바퀴를 추가하였다. 유입구 및 유출구와 숏크리트 시편 상부에 위치한 배수재가 동일 평면상에 위치할 수 있도록 높이 조절이 가능한 저판부를 함께 설계하였으며 외부 하중은 콘크리트 상부에 일정한 무게를 연속적으로 상재할 수 있도록 고려했다. 실험 중 유입수가 외부로 유출되지 않도록 각 시편 주변은 실리콘으로 처리하였으며 배수재를 유입구측 수조 및 유출구측 수조에 일정길이 이상 삽입한 후 실리콘 처리하여 외부 유출수량을 최소화 하였다.

3.2 실험 시편

정수위 통수시험과 관련하여 Palmeira et al. (2002)은 0.1 m × 0.1 m 크기의 실험용 시편을 사용한 바 있으며, KS K ISO 12958에서는 길이방향 최소 0.3m, 폭방향 0.2m 이상의 시편을 사용하도록 기술되어 있다. 본 연구에서는 ASTM D4716-08에서 제안한 바와

같이 0.3 m × 0.3 m의 크기를 갖는 배수재 시편을 채택하였으며 유입구 및 유출구 내부에 배수재 일부가 겹치도록 재단하였다. 강섬유 보강 숏크리트 시편은 두께 0.1 cm인 강재 박스를 제작한 후 터널 시공현장에서 직접 타설하였다. 숏크리트 시편이 양생된 후 표면에 비닐을 덮고 두께 0.1 cm의 콘크리트 거푸집용 강재 박스를 상재하여 자중에 의한 재료간 표면 맞물림이 이루어질 수 있도록 콘크리트를 타설하였다. Fig. 4는 숏크리트와 콘크리트 라이닝 표면을 나타내고 있으며 매끈한 표면, 일부 거친 표면 및 매우 거친 표면 등 3 종류의 시편을 제작하여 관련 실험을 진행하였다. 실제 철도터널 시공현장에서는 록볼트 등에 의한 표면 돌기가 발생하는 경우, Fig. 4(d)와 같이 길이 (length) 대 깊이(depth)의 비가 7:1 이상으로 완만한 숏크리트면을 유지하도록 권고하고 있으며, 본 실험에서는 거친 표면의 영향을 파악하기 위하여 길이 대 깊이의 비가 5:1 인 시편을 제작하였다. 한편, 숏크리트, 배수재 및 콘크리트 라이닝으로 구성된 시편 조립체는 Fig. 3의 중앙부에 설치되어 동수구배, 외부 하중 및 배수재의 종류별로 통수시험을 수행하게 된다.

본 연구에서 고려한 통수능 실험의 변수는 동수구배, 외부 하중 및 표면 거칠기 등으로 구별할 수 있으며 일반 배수재 및 지오그리드 합성 배수재를 함께 고려하였다. 이 중 동수구배는 Fig. 3의 유입구 높이를 조절함으로써 가능하고, 외부 하중은 높이 10 m의 터널을 가정한 후, 정지토압계수 개념을 도입하여 콘크리트 타설에 따른 숏크리트내 응력변화에 해당하는

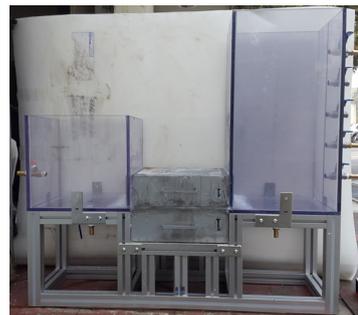
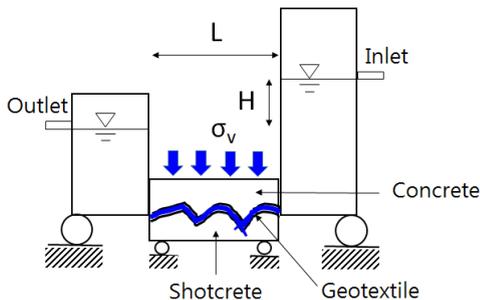


Fig. 3. A typical flow rate testing equipment including shotcrete & concrete lining specimens

수직응력 σ_v 를 상재함으로써 모형화할 수 있다. 이론상 Fig 3의 슛크리트에 가해지는 최대 응력은 $\sigma_v = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_c$ 로 계산될 수 있고 여기서 ν 및 σ_c 는 각각 콘크리트의 포아송비 및 수직응력, 즉 자중을 의미한다. 콘크리트의 단위중량 및 포아송비를 2.3 t/m^3 및 0.17로 가정하

면 10 m 높이의 라이닝 자중에 의한 슛크리트면내 최대 응력은 약 40 kPa에 이르나, 일반적으로 철도터널의 경우 콘크리트 라이닝은 수 회에 걸쳐 분할 시공되며 따라서 실제 실험에서는 분할시공의 영향과 실험장치의 변형 등을 고려하여 라이닝 높이 약 3 m에 해당하는 약 12 kPa의 응력을 가정하였다. Table 2는

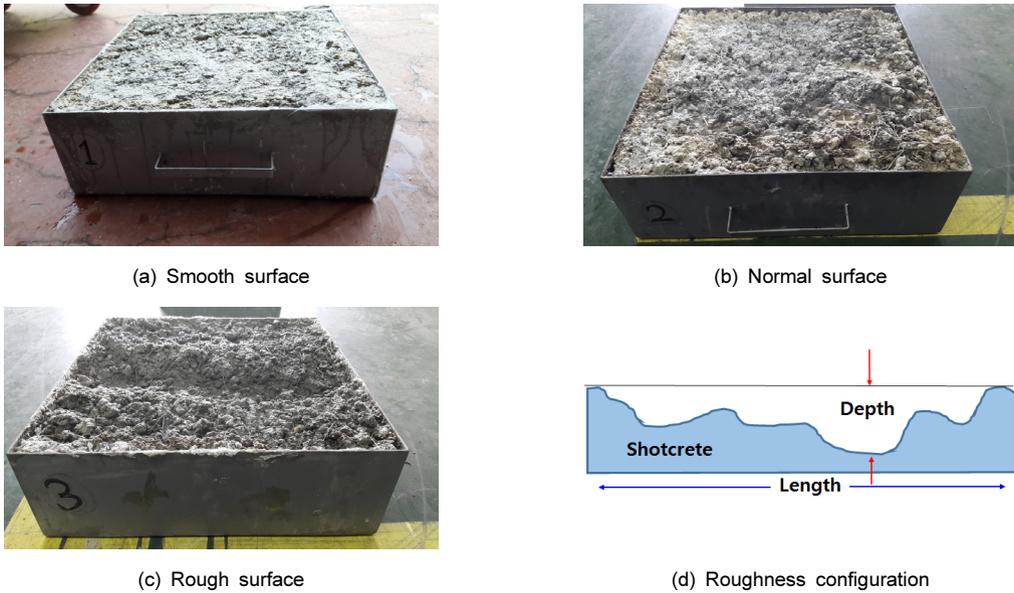


Fig. 4. Shotcrete specimens

Table 2. Parameters used in the transmissivity test

(unit : kPa)

Case	Type	Gradient	σ_v	Case	Type	Gradient	σ_v	Case	Type	Gradient	σ_v
1	S	0.3	2	13	N	0.3	2	25	R	0.3	2
2	S	0.7	2	14	N	0.7	2	26	R	0.7	2
3	S	1.0	2	15	N	1.0	2	27	R	1.0	2
4	S	0.3	4	16	N	0.3	4	28	R	0.3	4
5	S	0.7	4	17	N	0.7	4	29	R	0.7	4
6	S	1.0	4	18	N	1.0	4	30	R	1.0	4
7	S	0.3	7	19	N	0.3	7	31	R	0.3	7
8	S	0.7	7	20	N	0.7	7	32	R	0.7	7
9	S	1.0	7	21	N	1.0	7	33	R	1.0	7
10	S	0.3	12	22	N	0.3	12	34	R	0.3	12
11	S	0.7	12	23	N	0.7	12	35	R	0.7	12
12	S	1.0	12	24	N	1.0	12	36	R	1.0	12

Type: Smooth (S), Normal (N), Rough (R) interface between shotcrete & concrete lining

본 연구에서 수행한 매개변수별 시험 종류를 나타낸다. 각 실험은 다시 일반 배수재 및 지오그리드를 포함한 합성 배수재로 구별되어 총 72회의 시험을 수행하였다. 실험에 사용한 일반 배수재는 중량 400 g/m² 인 단섬유 부직포(Geosynthetic, 이하 GS)이며, 합성 배수재(Geogrid Composite, 이하 GC)는 중량 300 g/m²인 단섬유 부직포 2겹 사이에 중량 364 g/m²의 지오그리드를 부착하여 사용하였다.

한편, 터널 배수재로 유입되는 토립자의 영향을 파악하기 위하여 중량비 약 1%로 희석한 벤토나이트 용액을 사용하여 일반 배수재 및 합성 배수재의 통수 시험을 따로 수행하였다.

3.3 실험 결과

일반 배수재(GS)와 합성 배수재(GC)의 통수능력을 확인하기 위하여 ASTM D4716에 기반한 유출량을 측정한 후, 다음의 식 (1)에 의해 수평 투수량을 산정하였으며 Fig. 5에 그 결과를 나타내었다. 식 (1)에 나타난 단위 폭당 수평 투수량 q 는 배수재 전체 폭에 걸쳐 일정한 층류(laminar) 흐름을 가정한 후 실험에 사용한 유입수의 온도보정을 거치게 된다.

$$q = \frac{Q_t R_T}{W t} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1)$$

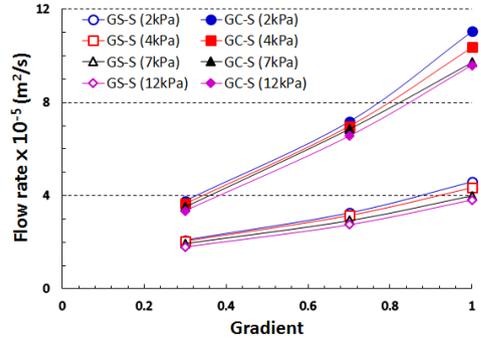
식 (1)에서 Q_t , R_T 및 W 는 각각 시간 t 에 걸쳐 측정한 유출량, 20°C의 수온 보정계수 및 배수재의 폭을 의미한다. 식 (1)로부터 (수평) 투수량 계수 (hydraulic transmissivity) θ 는

$$\theta = \frac{Q_t R_T L}{W H t} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2)$$

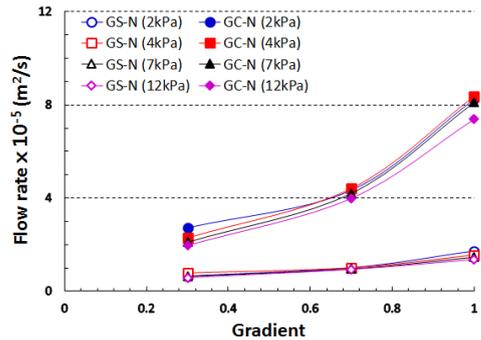
로 나타낼 수 있고 식 (2)의 H 및 L 은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 또한 투수계수 κ 는 식 (2)에 Table 1의 각 배수재의 두께, T ,를 고려함으로써 다음의 식 (3)과

같이 유도할 수 있으며, 수직 응력 증가에 따른 단면변화는 따로 고려하지 않았다.

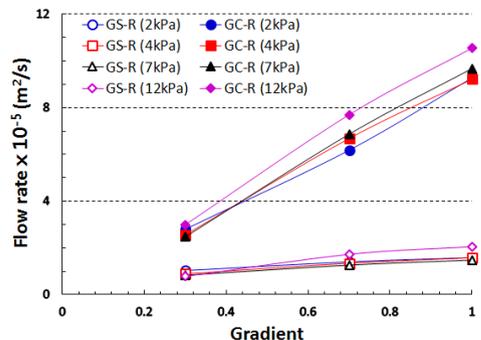
$$\kappa = \frac{\theta}{T} = \frac{Q_t R_T L}{W H T t} \quad (\text{m/s}) \quad (3)$$



(a) Smooth surface



(b) Normal surface



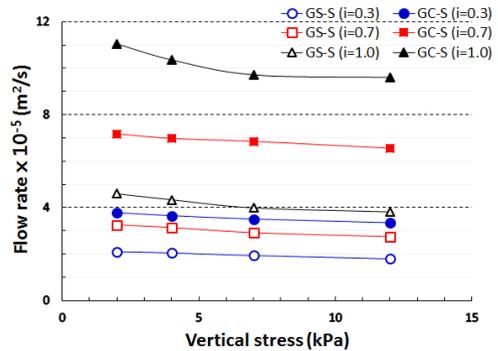
(c) Rough surface

Fig. 5. In-plane flow rate with varying hydraulic gradient (GS : Geosynthetic, GC : Geogrid Composite)

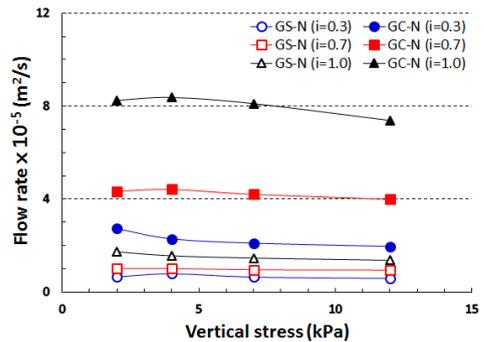
Fig. 5(a)는 숯크리트 표면이 매끄러운 경우, 동수구배 증가에 따른 투수량의 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동수구배가 증가할수록, 일반 배수재의 투수량은 선형적으로 증가하는 반면, 합성 배수재의 투수량은 비선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며 따라서 동수구배에 따른 합성 배수재의 효율성을 입증할 수 있다. 수직응력이 증가하는 경우에는 전체적인 투수량이 하중에 따라 감소하는 경향을 보인다. Fig. 5(b) 및 5(c)와 같이 숯크리트의 표면이 점차 거칠어지는 경우에는 전체적인 투수량이 감소하고 있으며 수직응력에 의한 투수량 감소는 그 경향이 일정치 않음을 알 수 있다. 반면, 앞서의 경우와 마찬가지로 합성 배수재의 배수기능은 숯크리트의 표면 거칠기와 무관하게 일반 배수재의 기능에 비해 탁월함을 알 수 있으며, 통수량의 비율은 거칠기에 관계없이 약 2~3배에 이르러 Table 1의 각 배수재별 통수단면 비인 1.6을 초과하는 값을 나타내었다. 이는 수직응력에 따라 줄어드는 통수단면이 지오그리드에 의해 영향을 받기 때문인 것으로 파악된다. 여기서 지오그리드를 포함한 합성 배수재는 제조과정에서 부직포와 지오그리드를 압착하게 되므로 각 두께의 합보다는 작은 값을 나타내게 된다.

수직응력에 의한 투수량 감소 경향을 자세히 파악하기 위하여 Fig. 6과 같이 수직응력에 따른 투수량의 변화를 살펴보았다. Fig. 6(a)에서 알 수 있는 바와 같이 숯크리트 표면이 평면이고 매끄러운 경우에는 수직응력 증가에 따른 전형적인 투수량 감소현상이 나타나고 있으며 동수경사, $i = \frac{H}{L}$ 의 증가에 따라 투수량이 선형적으로 증가하는 현상도 나타나고 있다. 한편 Fig. 6(b) 및 Fig. 6(c)와 같이 숯크리트 표면이 일부 거칠거나 현저히 굴곡이 있는 경우에는 하중이 재하됨에 따라 배수재의 종류에 관계없이 초기에 맞물려 있던 숯크리트 및 콘크리트 접촉면에 공간이 발생하면서 유입수의 흐름이 뚜렷해지는 현상이 발생한다. 이 흐름은 균일한 층류보다는 일부구간을 따라 발생한 관로내 흐름으로 이해할 수 있으며 표면이

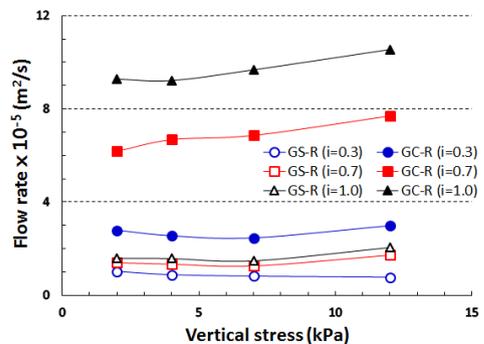
거칠수록 현저하게 나타난다. 또한 수평 투수량은 Fig. 6(a)와 같이 표면이 매끄러운 경우 일정한 경향을 보이고 있으나 표면에 일부 굴곡이 있는 경우에는 투수량이 줄어들다가 굴곡이 현저해지면 특정 관로를 따라



(a) Smooth surface



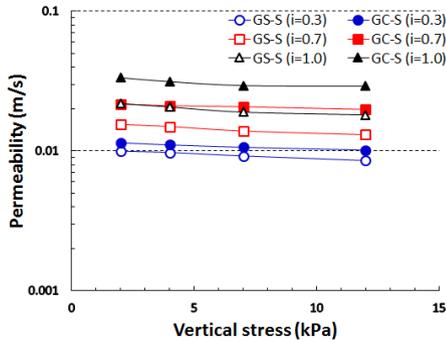
(b) Normal surface



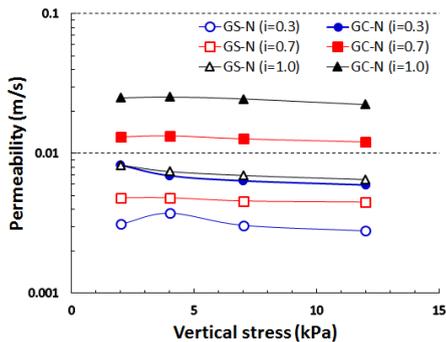
(c) Rough surface

Fig. 6. In-plane flow rate per unit width with varying vertical stresses (GS : Geosynthetic, GC : Geogrid Composite)

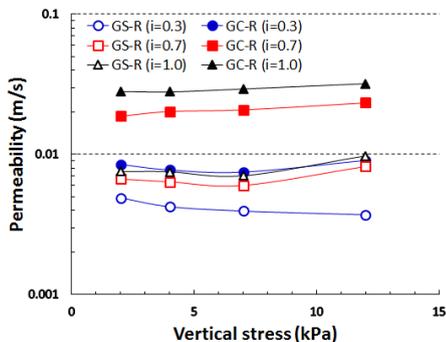
흐름이 집중되는 현상도 함께 관찰되었다. 이 경우, 일반 배수재를 적용하면 굴곡이 심해짐에 따라 전체 투수량이 감소하는 반면, 합성 배수재의 경우에는 일정부분 감소하다가 외부 압력 증가에 따라 투수량이 매끈한 표면의 경우와 유사하게 발생함을 알 수 있



(a) Smooth surface



(b) Normal surface



(c) Rough surface

Fig. 7. In-plane permeability with varying vertical stresses (GS : Geosynthetic, GC : Geogrid Composite)

며 이는 합성 배수재내 포함된 지오그리드 압축현상과 관계가 있을 것으로 보인다. 결국, 굴곡이 심한 슛크리트 표면은 가급적 평탄하게 조절해야 하나 불가피한 경우, 지오그리드를 포함한 합성 배수재를 적용함으로써 소기의 배수효과를 얻을 수 있다.

Fig. 7은 배수재의 통수단면을 고려한 투수계수를 나타내며, Fig. 7(a)와 같이 슛크리트 표면이 매끄러운 경우에는 작용하중과 동수구배에 따라 배수재의 두께 비율에 해당하는 정도의 투수계수 차이가 발생한다. 반면 Fig. 7(b) 및 7(c)와 같이 표면 굴곡이 점차 심해지는 경우에는 앞서 논의한 투수량의 경우와 마찬가지로 수직응력이 증가할수록 관로흐름에 따른 투수계수 증가 현상이 발생한다. 마찬가지로 슛크리트의 굴곡 정도에 관계없이 지오그리드를 포함한 합성 배수재의 투수계수가 월등함을 알 수 있다.

마지막으로 유입수내에 포함되어 있는 토립자 및 지반보강재의 용탈현상을 규명하기 위하여 벤토나이트를 이용한 통수능 시험을 수행하였다. 이를 위하여 중량비 1%로 희석한 벤토나이트 희석액을 유입조에 투입하고 일부 거친 표면을 포함한 슛크리트 및 콘크리트 시편을 사용하여 통수능 시험을 수행하였다. 한편 기존 문헌 및 터널 시공현장의 유입 토립자 관련자료가 부족함을 감안한 후 원활한 비교실험을 위하여, 벤토나이트 희석액의 중량비는 벤토나이트를 물에 희석하였을 때 투명도가 급격히 낮아지는 경우를 기

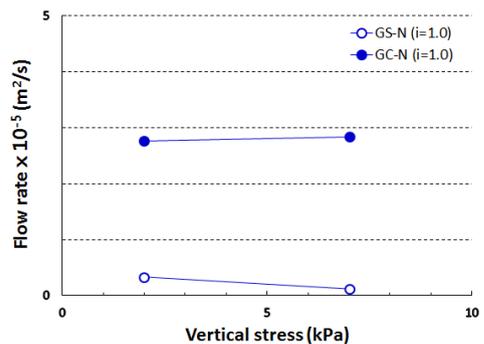


Fig. 8. In-plane flow rate according to bentonite mixture (GS : Geosynthetic, GC : Geogrid Composite)

준으로 정하였다. 초기 시험시 일반 배수재를 사용한 경우, 유출 수량이 극히 적어 수직응력은 2가지 경우에 대하여만 고려하였다. Fig. 8은 수직응력에 따른 투수량의 변화를 나타내고 있으며 일반 배수재를 적용한 경우(GS-N)에는 동수구배가 1.0임에 불구하고 수직응력의 재하에 따라 흐름이 정체되고 있음을 알 수 있다. 반면에 합성 배수재를 적용한 경우에는 Fig. 6(b)와 비교하여 투수량이 약 1/2로 감소하고 있으나 여전히 일정한 흐름을 보여주고 있으며 벤토나이트에 의한 배수재 폐색현상과 이를 고려한 지오그리드의 역할을 단적으로 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 숯크리트의 표면 거칠기에 따른 투수량 저감효과를 검증하기 위하여 ASTM D4716-08 및 KS K ISO 12958에 근거한 소규모 실내 실험장치를 제작하였으며, 배수효과를 증대시킬 수 있도록 일반 배수재 사이에 지오그리드를 접합한 합성 배수재의 특성을 살펴보았다. 실제 관련규격은 평평한 바닥면을 이용하여 층류 흐름을 유지한 후 배수재의 일반적인 특성을 파악하도록 규정되어 있으나, 본 연구에서는 숯크리트 표면의 특성을 검토하기 위하여 매끈한 표면 외에 거칠기가 관련 규정을 초과하는 경우에 대해서도 함께 고려하였다. 본 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 유추하였다.

1. 실제 터널내 숯크리트 및 콘크리트 라이닝의 표면 접촉부를 고려한 통수능 실험을 수행하기 위하여 소규모 실내 실험장치를 고안하였다. 실험장치는 시편의 두께에 따라 가변적으로 높이 조절이 가능하도록 조정장치를 추가하였으며 유입수의 외부 흐름을 최대한 차단하기 위하여 바닥면 방수 및 실리콘 방수처리를 수행하였다. 또한 철도터널 라이닝 시공단계를 감안하여 최대 12 kPa에 상당하는 하중을 상재할 수 있는 장치를 함께 장착하였다.

한편 매끄러운 시편의 경우, 일반적인 통수능 시험 결과와 매우 유사한 결과를 나타내고 있으며 따라서 고안한 실험장치의 효용성을 입증할 수 있다.

2. 숯크리트의 표면이 매끄러운 경우에는 전형적인 수직응력-투수량 및 동수구배-투수량 곡선을 얻을 수 있었으며 지오그리드를 포함한 복합 배수재의 경우, 일반 배수재에 비해 통수단면 비가 약 1.6임에도 불구하고 2배 이상의 통수능을 확보할 수 있었다.

3. 숯크리트 표면의 거칠기가 커질수록 층류흐름보다 관류흐름의 경향을 보이고 있으며 이로 인해 수직응력이 증가할수록 투수량이 증가하는 현상도 관찰되었다. 이 경우에도 복합 배수재의 통수능은 일반 배수재에 비해 2배 이상의 효과를 거둘 수 있음을 알 수 있으며, 따라서 숯크리트 표면이 매우 거칠고 지하수의 유입이 많은 곳에서는 효과가 클 것으로 예상된다.

4. 터널내 유입 토립자의 영향을 고려하기 위하여 중량비 1%인 벤토나이트 희석용액을 이용한 통수능 실험을 수행하였으며 이 결과, 일반 배수재는 수직응력에 관계없이 실험 초기에 폐색현상이 발생하였다. 반면 지오그리드를 이용한 복합 배수재의 경우, 투수량이 약 1/2로 감소하는 현상이 발생하였으나 전반적으로 투수성능에는 문제가 없음을 알 수 있었다.

앞서 언급한 바와 같이 숯크리트의 표면 거칠기가 일정 수준을 넘어서는 경우에는 방수막 및 배수재의 손상뿐만 아니라 유입수가 일부 유로를 따라 집중하는 현상이 발생가능하며 따라서 전반적인 터널 배수 체계에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 향후에는 숯크리트의 표면 굴곡과 관련하여 다양한 매개변수 실험이 이루어 질 예정이며 이를 토대로 숯크리트 표면 거칠기에 대한 관련 설계 및 시방규정을 개정할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 기업공감 윈스톱서비스를 통한 중소기업 기술개발 지원사업의 일환으로 수행되었습니다. 실험에 도움을 준 철도대학 정호성, 우연식 실습생 두 분께 감사의 뜻을 함께 전합니다.

References

1. ASTM (2013), D 4716-08 : Standard test method for determining the (in-plane) flow rate per unit width and hydraulic transmissivity of a geosynthetic using a constant head.
2. Barton, N., Choubey, V. (1977), The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.*, Vol. 10, pp. 1-54.
3. Holter, K.G. (2014), Loads on sprayed waterproof tunnel linings in jointed hard rock : A study based on Norwegian cases, *Rock Mech. Rock Eng.*, Vol. 47, pp. 1003-1020.
4. Jang, Y.-S., Kim, B., Lee, J.-W. (2015), Evaluation of discharge capacity of geosynthetic drains for potential use in tunnels, *Geotextiles & Geomembranes*, Vol. 43, pp. 228-239.
5. Korea expressway Corporation (2012), Expressway Construction Guide Specification.
6. Korea Rail Network Authority (2013a), Drainage and Waterproofing, KR C-12060, KR Code.
7. Korea Rail Network Authority (2013b), Railway Construction Guide Specification.
8. Korean Standards Association (2002), KS K ISO: 12958 Geotextiles and geotextile-related products: Determination of water flow capacity in their plane.
9. Murillo, C.A., Shin, J.H., Kim, K.H., Colmenares, J.E. (2014), Performance tests of geotextile permeability for tunnel drainage systems, *KSCE*, Vol. 18, No. 3, pp. 827-830.
10. Palmeira, E.M., Gardoni, M.G. (2002), Drainage and filtration properties of non-woven geotextiles under confinement using different experimental techniques, *Geotextiles & Geomembranes*, Vol. 20, pp. 97-115.