

풍화잔적토의 평면흐름에 대한 필터의 막힘현상 연구

An Experimental Study of Filter Clogging for the In-Plane Flow of Residual Soils

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 박광준²⁾ Kwang-Joon Park, 유승헌³⁾ Seung-Hun Yu

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

²⁾ (주) 덕천엔지니어링, 상무, Managing Director, Duck-cheon Engrg., Co. Ltd.

³⁾ (주) 도담엔지니어링, 연구원, Researcher, Do-dam Engrg., Co. Ltd.

SYNOPSIS : A study on the two typical weathered residual soils in Korea, Shinae-dong soil and Poi-dong soil was carried out and the emphasis was on observation of the in-plane flow characteristics through geotextile filters with varying degree of compressive stresses applied on the filters and with various conditions of hydraulic gradients. The pore-size distribution curve of filters and the effective pore size, O_{95} were determined from the theoretical equations, and in comparisons with these, the existing clogging criteria were reviewed. As the pressure applied on the filters and the hydraulic gradient were increased, the flow efficiency was increased. The effect of the ratio of the effective pore size of filters to the particle size of base soils on the clogging phenomena was also studied to propose a tentative clogging criteria for the in-plane flow of the residual soils through filters. The flow efficiency was about 80% when $O_{95}/D_{15} = 3$ under the applied pressure = 0.3 kg/cm² and hydraulic gradient = 15. It means that the $O_{95}/D_{15} > 3$ can be tentatively proposed as the criteria for the in-plane flow. It was also observed that clogging phenomena will occur in the drainage system of tunnels if the shotcrete placed between base soils and filters has cracks due to shrinkage, settlements, and the forces acting on the tunnel system.

Key words : weathered residual soils, the in-plane flow, geotextiles, filters, effective pore size, clogging, drainage system.

1. 서론

필터재에 폐색이 발생하면서 투수계수의 저하를 초래하게 되면 구조물의 안정에 심각한 영향을 끼칠 수 있다. 본 연구에서는 토립자가 지오텍스타일 필터의 간극을 메움으로서 발생하는 투수계수의 저하에 초점을 두었으며 풍화잔류토 지반인 신내동, 포이동 시료를 중심으로 연구를 수행하였다. 동수경사 5, 10, 15조건에서 필터에 가해지는 하중이 0.075kg/cm², 0.15kg/cm², 0.3kg/cm², 0.6kg/cm²일 때, 풍화잔적토의 평면흐름에 관한 흐름특성 및 유출특성 파악에 초점을 두어 실험을 수행하였다. 또한 필터재의 간극분포곡선을 이론식으로부터 구하였고, 이 이론식으로부터 구한 유효간극크기를 이용하여 기존에 연구에서 제시된 폐색 방지기준(clogging criteria)과 비교를 수행하였으며, 신내동시료를 중심으로 평면흐름에서 필터재의 유효간극크기와 흡입경과의 비에 따른 흐름특성 및 유출특성을 파악하고자 투수실험을 수행하였다. 웅벽과 터널에서의 배수성능평가를 수행하였으며 터널내 슛크리트의 효과를 고려한 필터재의 투수능 실험을 수행하였다.

2. 실험 장치 및 시료

2.1. 시험 장치

배수재에서의 평면흐름에 관한 입자의 유동과 흐름의 특성변화를 고찰하기 위한 시험장치는 다음과 같다.

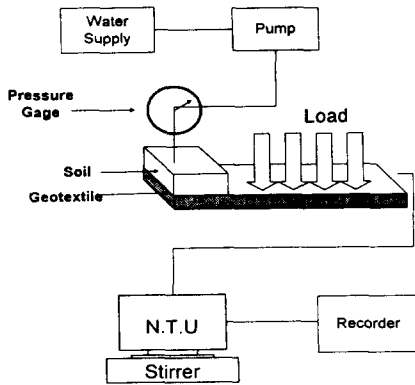


그림 1. 시험장치의 구성도

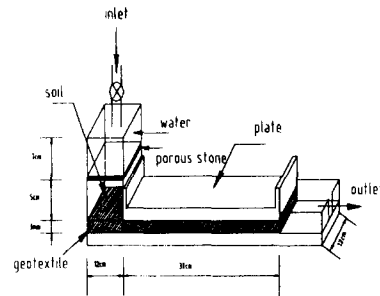


그림 2. 시험장치의 규격

2.2 시료의 특성

시료의 입도 분포를 파악하였고 그 결과는 그림 3과 같다. 그림 3의 입도 분포곡선으로부터 포이동 지역의 흙은 통일분류법상 “SC”로 분류되나 No.200체(0.075mm) 통과량이 47.36%이고, 압밀시험으로부터

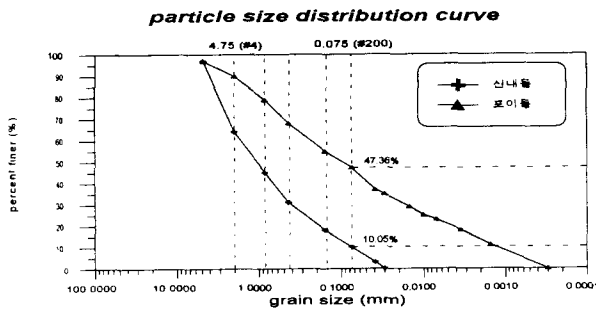


그림 3. 입도분포시험 결과

산정된 투수계수는 $9.02 \times 10^{-6} \sim 5.35 \times 10^{-7}$ cm/sec의 값을 보이는 것으로 보아 포이동 지역의 풍화잔적토지반은 사실상 점성토와 같이 거동할 것임을 추정할수 있다. 신내동 시료의 경우 No.200 표준망체(0.075mm) 통과량이 10.05%이고 통일 분류법상 SW-SM으로서 사실상 사질토와 같이 거동할 것으로 보인다.

2.3 지오텍스타일의 특성

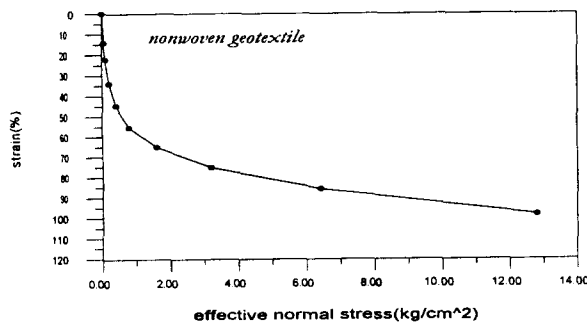


그림 4. 하중에 따른 변형률

본 시험에서는 지오텍스타일 필터의 하중에 의한 두께 변화를 구하기 위해서 지오텍스타일을 2cm이상의 두께가 되도록 겹친 다음 각 하중 단계에서의 시료의 두께를 다이얼 게이지(dial gauge)로 측정하여 해당되는 지오텍스타일의 갯수로 나눈 평균값을 구하였다. 그림 4는 지오텍스타일의 압축응력에 대한 두께의 변화를 도시한 것이다.

3. 실험 결과

3.1 신내동 시료

표 1. 신내동 시료의 실험결과 정리

하중 (kg/cm ²)	동수경사 (hydraulic gradient)	초기 유량 (ml/min)	정상상태 에서 유량 (ml/min)	흐름효율 (%)	정상상태에 이르는 시간 (min)	retaining ratio*
0.075	5	16.5	12.1	73.33	50	27.2
	10	17.9	12.1	67.59	70	35
	15	20.2	11	54.45	100	45
0.15	5	12.5	7.9	63.5	55	31.2
	10	14.38	8.87	61.94	75	31.2
	15	16.28	8.14	50	100	52.63
0.3	5	9.9	4.4	44	55	30.8
	10	11.58	5.04	43.5	80	43.2
	15	14.38	4.60	31.9	120	43.6
0.6	5	8.2	2.05	25	60	28.5
	10	9.3	2.1	22.5	100	37.42
	15	11.4	1.9	16.5	130	47.4

동수경사가 증가할수록 흐름의 효율은 더작게 나타남을 알 수 있으며 정상상태에 도달하는데 더 많은 시간이 소요되었다. 하중 및 동수경사가 증가할수록 흐름효율이 낮은 값을 보임을 알 수 있다. 이는 동수경사가 증가할수록 간극속에서 흐름의 속도가 증가하여 이동가능한 세립분의 양이 많아지며 지오텍스타일의 간극을 메우는 효과가 더 심하

게 발생한 것으로 보인다. 또한 하중이 증가할수록 지오텍스타일에 퇴적되는 양이 더 많아지면서 투수계수가 저하된 것으로 볼 수 있다.

3.2 포이동 시료

표 2. 포이동 시료의 실험결과 정리

하중 (kg/cm ²)	동수경사 (hydraulic gradient)	초기 유량 (ml/min)	정상상태 에서 유량 (ml/min)	흐름효율 (%)	정상상태에 이르는 시간 (min)	retaining ratio(%)
0.075	5	7.85	7.45	95	60	5
	10	10.908	9.81	90	110	7.4
	15	11.49	9.88	86	150	11
0.15	5	5.52	5.29	96	70	7
	10	7.34	6.53	89	100	6.3
	15	7.83	6.89	88	170	8
0.3	5	4.02	3.77	94	66	4
	10	6.36	5.78	91	90	5.4
	15	6.96	5.84	84	200	7.7
0.6	5	3.06	2.84	93	64	4.6
	10	4.08	3.75	92	105	7.54
	15	5.34	4.64	87	150	9.04

포이동 시료의 경우 입자의 점착성분 때문에 입자의 이탈이 적었으며 세립분이 지오텍스타일의 간극을 메우는 효과와 유출되는 효과는 신내동 시료에 비해 적은 것으로 나타났다. 신내동 시료에서와 같이 동수경사가 증가할수록 흐름의 효율(정상상태에서의 유량/초기의 최대 유량)은 감소하는 경향이 있으나 그 차이가 심하지 않은 것으로 나타났다. 초

기의 최대유량에서 정상상태의 유량이 되기까지 시간은 대략 1~2시간 정도가 되며 이는 신내동의 경우와 비슷한 것으로 나타났다.

3.3 동수경사와 간극메움 중량비

간극메움중량비(R_c)를 식 (1)과 같이 정의하였다

$$R_c = \frac{\text{단섬유부직포에 박힌 세립토의 중량}}{\text{단섬유부직포시료의 중량}} \quad (1)$$

그림 5는 하중 및 동수경사별 간극메움 중량비를 보여주고 있다. 동수경사가 증가할수록 흙속의

간극내 유속이 증가하게 되므로 이탈되는 세립분의 양도 증가하게 되며, 따라서 간극메움중량비도 증가함을 알 수 있다. 또한 대체적으로 하중이 증가할수록 지오텍스타일에 퇴적되는 양이 많아지므로 간극메움중량비가 증가하는 것으로 볼 수 있다. 신내동시료와 포이동시료를 비교하였을 경우 같은 동수경사에서 신내동시료가 포이동시료보다 간극메움중량비가 훨씬 크게 나옴을 알 수 있다. 이는 신내동시료의 경우 $O_{95}/D_{15} = 0.43$ 이며 포이동시료의 경우 $O_{95}/D_{15} = 49$ 로서 신내동시료가 지오텍스타일의 유효간극크기와의 비가 훨씬 작아서 지오텍스타일의 간극속에 갇히게 되는 흙입자의 양이 많아진 것으로 판단되며, 또한 포이동시료의 경우 점착성분 때문에 흙 입자로부터 이탈되는 세립분의 양이 상대적으로 적기 때문인 것으로 판단된다.

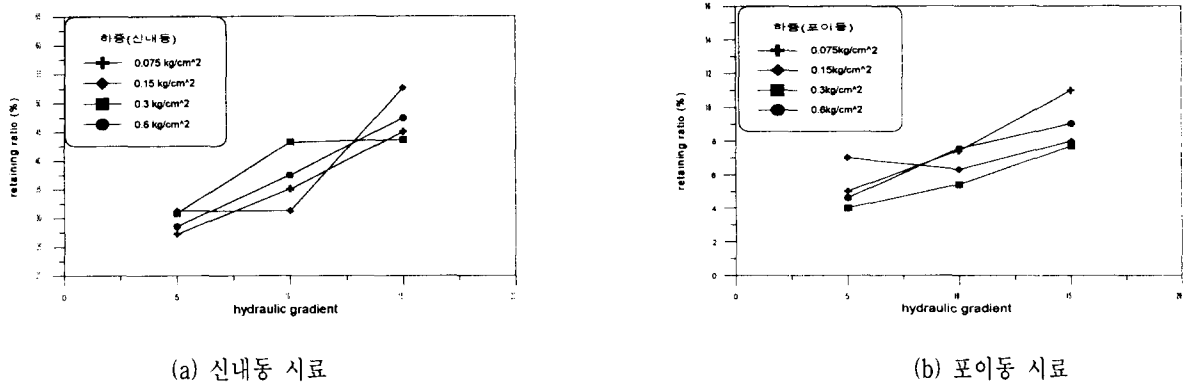


그림 5. 동수경사별 Retaining Ratio (신내동)

4. 필터 설계에의 응용

4.1 폐색 방지기준(Clogging Criteria)

4.1.1 지오텍스타일의 간극분포곡선

실험에서 사용한 부직포의 간극분포를 구하기 위해서 Faure(1988)가 제시한 식 (2)를 사용하였다

$$PSDC(d) = 1 - \left[\frac{4\mu d}{D_f(4\mu + 2\pi T_g \rho_f)} + 1 \right]^{\frac{2T_g}{D_f}} \times \exp \left[-\frac{4\mu d}{\pi D_f^2 \rho_f} \right] \quad (2)$$

그림 6은 Faure(1988)가 제시한 식을 사용하여 하중조건에 따라서 구한 지오텍스타일의 간극분포곡선을 나타내고 있다.

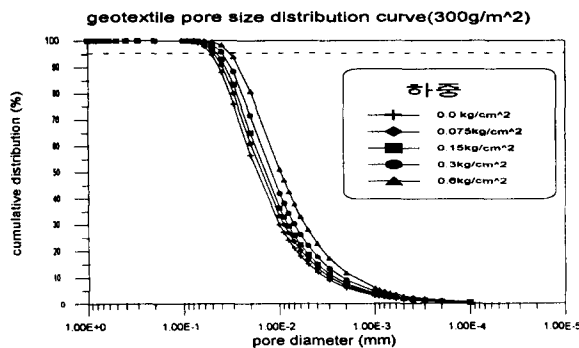


그림 6. 지오텍스타일의 간극분포곡선

4.1.2 폐색 방지기준

기존의 연구에서 제시된 폐색 방지기준과의 비교를 위해서 식 (2)를 이용하여 구한 간극분포곡선을 이용하여 O_{95} , O_{50} , O_{15} 값을 구하였다.

표 3. 신내동 시료의 비료결과

기준(criteria)	제안기관	비교치	비교 결과
$O_{95}/D_{15} > 3$	Christopher & Holtz	$O_{95}/D_{15} = 0.23$	부적합
$O_f/D_{15} > 4$	French Committee of Geotextiles	$O_f/D_{15} = 0.16$	부적합
$O_{15}/D_{15} > 0.8 \sim 1.2$	Fisher(1990)	$O_{15}/D_{15} = 0.02$	부적합
$O_{50}/D_{50} > 0.2 \sim 1.0$	Fisher(1990)	$O_{50}/D_{50} = 0.008$	부적합

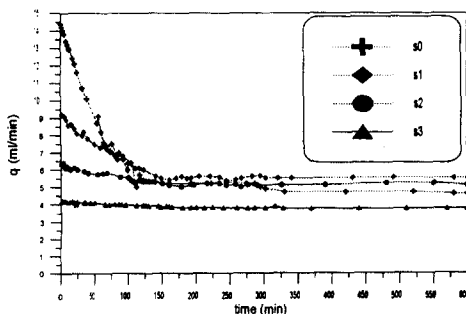
표 4. 포이동시료의 비료결과

기준(criteria)	제안기관	비교치	비교 결과
$O_{95}/D_{15} > 3$	Christopher & Holtz	$O_{95}/D_{15} = 26.19$	적합
$O_f/D_{15} > 4$	French Committee of Geotextiles	$O_f/D_{15} = 18.33$	적합
$O_{15}/D_{15} > 0.8 \sim 1.2$	Fisher(1990)	$O_{15}/D_{15} = 2.38$	부적합
$O_{50}/D_{50} > 0.2 \sim 1.0$	Fisher(1990)	$O_{50}/D_{50} = 0.16$	부적합

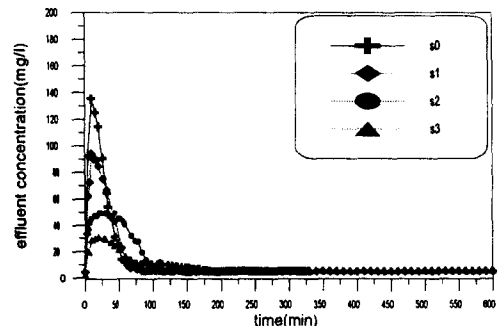
기존의 연구에서 제시된 기준은 지오택스타일의 수직흐름(cross-plane)에 관한 기준들이며 이 기준들이 평면흐름(in-plane)에 적용될 경우 Christopher와 Holtz가 제시한 $O_{95}/D_{15} > 3$ 가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4.1.3 흙/부직포 시스템에서 유효간극크기와 입경(D_{15})과의 관계

본 실험은 지오택스타일의 유효간극크기와 흙 입경 D_{15} 와의 비에 따른 유출특성 및 흐름특성을 파악하고자 실시하였다. 지오택스타일의 유효간극크기는 ASTM 건식체분석법에서 구한 값을 사용하였으며, 흙은 신내동흙을 사용하여 소요입도 곡선에 맞도록 중량비율로 배합하여 흙시료를 제조하였다. 실험에 사용한 조건으로서, O_{95}/D_{15} 비를 각각 2, 3, 5배로 해서 이를 각각 시료 S1, S2, S3으로 신내동 시료는 S0로 명명 하였으며, 하중조건이 $0.3\text{kg}/\text{cm}^2$, 동수경사=15를 기준으로 하였다.



(a) 시간에 따른 유량의 변화 ($\sigma = 0.3\text{ kg}/\text{cm}^2$ 인 경우)



(b) 유출특성의 변화 ($\sigma = 0.3\text{ kg}/\text{cm}^2$ 인 경우)

그림 7. 입경(D_{15})의 변화에 따른 유출유량 및 유출특성의 변화

그림 7에서 보는바와 같이 D_{15} 의 값이 작아질수록 세립분의 양이 많은 것을 뜻하게 된다. 먼저 유량 변화를 살펴보면, 신내동시료(S0)의 유출유량은 초기의 최대유량에서 점차적으로 감소하여 정상상태의 유량으로 될 때까지 변화의 폭이 가장 큰 것으로 나타났다. 즉 흐름의 효율이 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 신내동시료(S0)의 경우 O_{95}/D_{15} 의 값은 0.43이며 다른 시료에 비해서 비교적 큰 입자가 많이 포함되어 있어서 지오텍스타일의 구멍입구를 막는 blocking 현상이나 clogging 현상이 보다 많이 발생한 것으로 판단된다. O_{95}/D_{15} 가 증가할수록 흐름의 효율은 증가하게 되는데, S3의 경우 정상상태의 유량이 초기의 유량의 90%정도가 됨을 알 수 있다. 이는 S3으로 갈수록 유효간극크기보다 작은 세립분의 양이 많아서 폐색이 되는 정도도 적어지며 지오텍스타일을 통과해서 빠져나가는 세립분의 양이 더 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 7 (b)의 유출특성을 살펴보면 S3의 경우 세립분의 양이 많이 포함되어 있기 때문에 침투농도에서 정상상태에 이르기까지 시간이 더 길어짐을 알 수 있다. S0의 경우는 다른 시료에 비해 상대적으로 세립분의 양이 적기 때문에 침투농도에서 정상상태의 농도의 변화가 가장 단시간에 발생함을 알 수 있다. 각각의 시료의 침투농도값을 비교해보면 S0가 가장 큰 침투농도의 값을 나타내고 있으며 S3가 가장 적은 침투농도의 값을 나타내고 있다. 이는 S3의 경우에는 세립분이 많이 포함되어 있기 때문에 같은 건조단위중량에서도 투수계수가 가장 작아 흙속을 통과하는 흐름의 유속이 가장 적기 때문인 것으로 판단된다. 이상에서 지오텍스타일의 평면흐름에서 흙의 입경 및 지오텍스타일의 유효간극크기와의 관계를 살펴보았다. 흙/부직포 시스템에서 어느정도 폐색은 발생하는 것으로 판단이 되며, 주어진 현장조건에서 과도한 폐색효과가 발생하지 않도록 하는 것이 중요한 것으로 사료된다. S1, S0의 경우 흐름효율이 매우 낮은 값을 나타내며 S2의 경우 흐름효율은 90%로서, $O_{95}/D_{15} > 3$ 의 기준이 지오텍스타일의 평면흐름에 관한 기준으로서 무난할 것으로 사료되며, $O_{95}/D_{15} > 5$ 의 기준은 지오텍스타일의 평면흐름에서 확실한 폐색방지기준이 될 것으로 사료된다.

4.2 터널에서 배수성능 평가

터널에서 배수필터재의 배수성능을 평가하고자 하였으며 지반상수 및 지반조건은 그림 9에 나타내었다. 터널의 배수재는 방수막과 숏크리트 사이에 설치하게 되며, 배수재는 숏크리트를 타설하고 응력의 분배와 변형이 완료된후 설치하게 되므로, 작용하는 하중은 내부라이닝이 타설될 때의 자중에 의해 영향을 받게 된다. 즉 그림 8에서와 같이 터널의 바닥부에서 최대의 압축력을 받게 된다. 라이닝의 단위중량을 $2.5t/m^3$, 터널의 높이 10m, 측압계수를 0.2로 본다면 최대 $5t/m^2$ 정도가 배수재에 작용하는 압축응력으로 볼 수 있다. 그림 10은 터널 주변의 수두 및 수압분포를 나타내고 있다. 그림 10에서 알 수 있는 것처럼 $300g/m^3$ 부직포를 사용하는 터널에서 배면수압은 0(zero)으로 떨어지지 않는 것을 알 수 있다. 그림 11은 부직포에 작용하는 압축응력에 따른 터널 천정부에서의 최대 수압을 나타내고 있다. 압축응력이 증가할수록 터널 천정부에서의 수압이 증가함을 알 수 있으며, 압축응력이 0(zero)인 경우에도 터널 천정부에서의 수압이 0(zero)으로 떨어지지 않음을 알 수 있다.

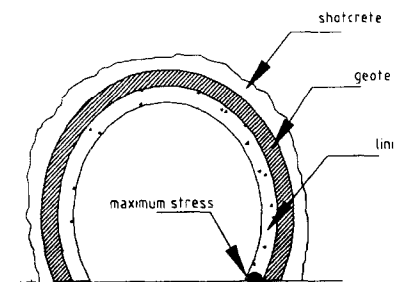


그림 8 터널에서 지오텍스타일이 받은 최대 응력

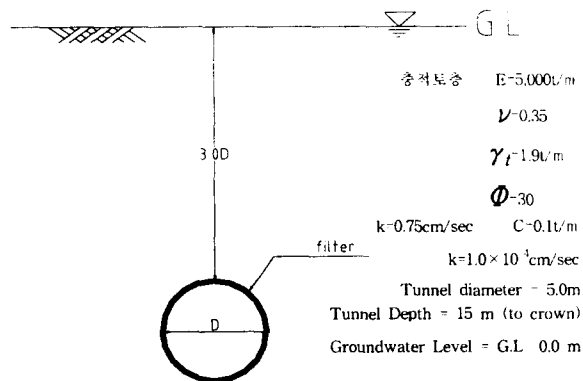


그림 9. 지반조건 및 지반상수

$$P_{max} = 6t/m^2$$

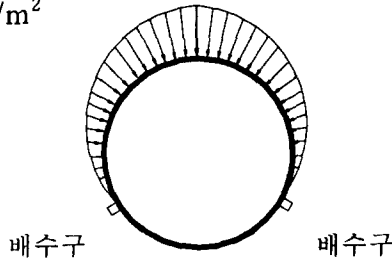


그림 10 터널주변에서의 수압분포

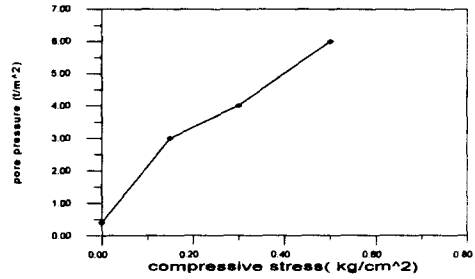


그림 11. 부직포의 압축응력에 따른 터널주변에서의 최대수압

터널에 설치되는 지오텍스타일은 폐색현상을 방지하기 위해서 $O_{95}/D_{15} > 3$ 나 $O_{95}/D_{15} > 5$ 의 기준을 만족시켜야 하며, 내압으로 인한 투수계수저하를 고려한 설계가 이루어져야 할 것으로 사료된다. 본 장에서 알 수 있는 것처럼 300g/m²의 얇은 부직포층의 통수능력은 유입수량에 비해 현저히 작으므로 라이닝의 배면수압을 0(zero)으로 떨어뜨릴 수 없으며, 배수재의 통수능력 여부에 따라 두꺼운 부직포를 사용하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

4.3 슛크리트의 효과

스�크리트의 효과를 모사하기 위하여 흙과 부직포 사이에 높이 1cm porous stone을 설치하여 시간의 경과에 따른 유출특성과 유출유량의 변화를 측정하였으며, 동수경사 5, 하중조건 0.3kg/cm²를 기준으로 하였다. 그림 14에서 알 수 있는 것처럼 시간의 경과에 따른 흐름효율의 급격한 감소는 나타나지 않았으며 대략 90%정도의 흐름효율을 나타내었다. 유출특성도 뚜렷한 침투농도의 값을 나타내지 않고 정상

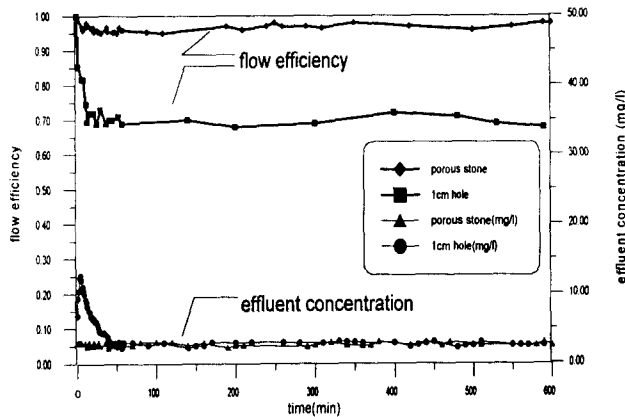


그림 14. 슛크리트 설치시 흐름효율 및 유출특성

상태의 값을 나타내었다. 슛크리트 손상에 따른 토사유출 및 폐색현상을 검토하기 위하여 porous stone의 중앙에 직경 1cm의 구멍을 뚫은다음 실험을 추가로 수행하였다. 이때, 흐름의 효율은 대략 65%로서, 유출특성은 뚜렷한 침투농도의 값을 나타내다듬 정상상태로 줄어들었다. 이는 구멍이 뚫린 부분과 접촉이 되있는 지오텍스타일에서 간극 막힘현상에 의해 흐름의 효율이 감소한 것으로 판단된다.

5. 결론

1) 두 시료 모두 동수경사가 증가할수록 유출유량이 정상상태의 유량으로 되는데 소요되는 시간이 길어짐을 알 수 있었다. 동수경사가 커지면 간극내 흐름의 속도가 증가하게 되어 간극속에서 이동가능한 세립분의 양이 많아지며, 간극속을 통과한 세립분이 지오텍스타일에 폐색되는 정도가 더 심하게 발생한 것으로 볼 수 있다.

2) 두시료 모두 하중 및 동수경사가 증가할수록 흐름의 효율이 낮게 측정되었다. 하중이 증가할수록 지오텍스타일에 퇴적되는 양이 많아지면서 투수계수가 저하된 것으로 볼 수 있다. 포이동 시료의 경우

흐름효율은 동수경사가 증가할수록 낮은 경향을 보였으나, 그 효과는 그리 크지 않았다. 이는 포이동시료의 점착성분 때문에 신내동 시료에 비해 입자의 이탈이 비교적 적게 발생했으며, 입자의 이탈로 인한 부직포의 폐색현상도 뚜렷하지 않은 것으로 볼 수 있다.

3) 간극메움 중량비는, 하중 및 동수경사가 증가할수록 높게 측정되었으며. 같은 동수경사에서 신내동 시료가 포이동 시료보다 더 큰 값을 나타냈다. 이는 신내동 시료의 경우 $O_{95}/D_{15} = 0.43$ 이며 포이동시료의 경우 $O_{95}/D_{15} = 49$ 로서 신내동시료가 지오텍스타일의 유효간극크기와의 비가 훨씬 작아서 지오텍스타일의 간극속에 갇히게 되는 흙입자의 양이 많아진 것으로 판단된다

4) 이론식에 의해 하중조건을 고려할 수 있는 지오텍스타일의 간극크기 분포곡선을 제시하였다. 지오텍스타일의 평면흐름에서, 신내동 시료는 Christopher와 Holtz가(1989) 제시한 폐색방지기준을 만족시키지 못했으며, 포이동 시료는 Christopher와 Holtz가(1989) 제시한 폐색 방지기준을 만족시켰다. 지오텍스타일의 평면흐름에서 유효간극크기와 흙입경과의 비에 따른 유출특성 및 흐름특성을 파악하고자 실험을 수행하였으며, O_{95}/D_{15} 의 값이 증가할수록 흐름 효율은 증가하는 경향을 띠었다. 기존의 연구에서 제시된 폐색 방지기준은 지오텍스타일의 수직흐름에 관한 것으로서, 평면흐름인 경우에 $O_{95}/D_{15} > 3$ 기준은 무난할 것으로 보이며 $O_{95}/D_{15} > 5$ 기준은 좀 더 안전한 기준이 될 수 있는 것으로 사료된다.

5) $300\text{g}/\text{m}^2$ 부직포가 터널의 배수재로 사용되는 경우에 $300\text{g}/\text{m}^2$ 의 얇은 부직포층의 통수능력은 유입수량에 비해 현저히 작을 수 있어 라이닝의 배면수압을 0(zero)으로 떨어뜨릴 수 없으며 주변지반의 지하수가 배수재를 따라 원활한 배수가 이루어지지 않을 수 있음을 알 수 있다. 배수재의 통수능력 여부에 따라 두꺼운 부직포를 사용하는 것이 바람직한 것으로 사료된다. 또한 슛크리트의 균열이 배수재의 투수성을 감소시키고 배면토사층으로부터 유실된 점토크기의 세립분에 의해서 지오텍스타일의 간극막힘 현상이 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 '96년도 건설교통연구과제의 지원사업으로 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Carroll, R. G., "Geotextile Filter Criteria", Transportation Research Record, 916, 46-53, 1983.
2. Christopher, B. R. and Holtz, R. D., "Geotextile Engineering Manual", Report No. FHWA-TS-86/203, US Federal Highway Administration, Washington. DC., 1985.
3. Christopher, B. R., and Holtz, R. D., "Geotextile Construction and Design Guidelines. HI-89-050", prepared for Federal Highway Administration, Washington. DC., 1989.
4. John, N. W. M., Geotextiles, Blackie, New York, pp. 347, 1987.
5. French Committee of Geotextiles and Geomembranes, "Recommendations for the Use of Geotextiles in Drainage and Filtration Systems". Institut Textile de France, Boulogne-Billancourt, France, 1986.
6. Giroud, J. P., "Filter Criteria for Geotextiles", Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas, Nevada, Vol. I. Industrial Fabrics Association International, St Paul, MN, pp. 103-108, 1982.