한국토목섬유학회논문집 제6권 1호 2007년 3월 pp. 33 ~ 38
J. Korean Geosynthetics Society Vol.6 No.1 Mar. 2006 pp. 33 ~ 38

현장 토질특성을 고려한 연직배수재 필터의 성능평가

Drain Capacity of PVD Filter Considering the Field Condition

한 성 수[1] Han, Sung-Su
정 경 한[2]* Jeong, Kyeong-Han

ABSTRACT

PVD (Prefabricated Vertical drain) consists of filter and core. An effective PVD has two basic filtration functions ; first to retain soil particle ; and second, to allow water to pass from the soil into the PVD core without clogging or blinding. Clogging which reduces the permeability of the geotextile filter jacket is caused by fine particles penetrating into the geotextile filter jacket in relatively low permeability soil conditions. As clogging performance increases gradually, excess pore water flow from soil is resisted and finally consolidation delays. Current soil–geotextile filter system criteria are generally based on relationships between a representative pore size of the geotextile and particle size of the soil. In Korea, PVD geotextile filter system criteria have been applied by only testing AOS (Apparent Opening Size) of filters without evaluating the filtration and clogging performance on soil–geotexile filter systems. Therefore, the filtration tests on soil-geotexile filter systems were conducted in order to evaluate the filtration and clogging performance with 3 kinds of geotextile filters. On these tests, we have applied geotextile filter system criteria on PVD in OO sites.

요 지

연직배수재는 필터와 코어로 형성되며, 필터의 주요기능으로 첫째, 흙 입자의 유실을 방지할 수 있는 흙 보유성과 둘째, Clogging 또는 Blinding현상 발생 없이 간극수를 원활히 배출시키는 투수성을 갖추어야 한다. 상대적으로 투수성이 낮은 지반에서 미세입자로 인하여 필터의 투수성을 저하시키는 필터폐색(Clogging) 현상이 발생하는데 필터의 폐색현상(Clogging)이 점진적으로 증가하면, 간극수의 흐름을 저하시켜 결국 압밀지연을 초래한다. 지반-필터의 거동에 따른 설계(시방)기준은 토목섬유 필터의 간극크기와 흙의 입도의 상관관계에 의해 결정되어야 하나, 국내에서는 필터폐색(Clogging)현상과 지반-필터의 거동 분석 없이 필터재의 유효입경(AOS, Apparent Opening Size)만을 고려하여 필터의 설계(시방)기준을 일률적으로 적용하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 3가지 종류의 연직배수재 필터를 대상으로 필터의 거동 및 필터폐색(Clogging)현상을 평가하고자 실내시험을 수행하였고, 이를 토대로 OO지역에서 연직배수재 필터의 설계(시방)기준을 선정하여 적용하였다.

Keywords **:** Apparent opening size, Clogging, Filtration, Prefabricated vertical drain

1. 서 론

최근 항만개발사업과 연계된 대규모 연약지반 관련 공사가 설계·시공되고 있으며, 연약지반 처리공법 중 기성제품을 이용한 연직배수공법(PVD, Prefabricated Vertical Drain)이 광범위하게 적용되고 있다.

연직배수재는 필터와 코어로 형성되며, 특히 필터의 역할은 간극수의 흐름을 허용하고 인접한 흙 입자가 필터 내부로 이동하는 것을 방지하여 장기적으로 필터 폐색(Clogging)이 발생되지 않게 하는데 있다. 상대적으로 투수성이 낮은 지반의 미세입자가 필터에 폐색현상(Clogging)을 유발하고 간극수의 원할한 배출을 저하시켜 압밀지연을 초래한다. 현재 연직배수재 필터를 선정함에 있어 필터재의 유효입경(AOS, Apparent Opening Size)만을 고려하여 "$O_{90} \leq 80 \mu m \sim 90 \mu m$"인 기준만을 일률적으로 적용하고 있고, 대상지반의 입경 및 투수성 등은 고려하지 않아 토질특성을 반

1 도담이앤씨 터널부 과장 (Section Chief, Dodam E&C)
2* 도담이앤씨 터널부 상무 (Executive Director, Dodam E&C, birdyayaya@hanmail.net)

영한 필터재의 선정이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 OO지역에서 토질특성 및 연직배수재 필터의 시방기준을 분석하였다. 이를 토대로 현장조건에 적합한 연직배수재 선정을 위해 국내에서 대표적으로 사용되는 연직배수재에 대해 유효입경(AOS)시험 및 장기통수능 시험을 수행하고 연직배수재의 적용성에 대해 검토하였다.

2. 연구대상지역의 지반특성 분석

○○지역은 준설점토 총 23,984천m^3을 펌프준설방법으로 투기하여 매립·조성되었으며, 투기완료 후(1996) 약 8년이 경과되었다(해양수산부, 2004a; 해양수산부, 2004b). 연약지반은 준설매립층과 원지반으로 구분할 수 있으며, 지반조사결과 준설 매립층은 4.2~7.5m, 원지반 연약층인 해성퇴적층은 5.1~17.0m 층으로 분포하는 것으로 나타났다(그림 1(a)). OO지역의 지반특성은 대부분이 고압축성의 점토(CH)로서 200번체 통과백분율이 94.5%로 세립분 함량이 높고, D_{90}=0.095~0.060mm, D_{85}=0.074~0.040mm, D_{50}=0.026~0.004mm 범위이며, 투수계수는 1.56×10^{-6}~9.48×10^{-8} cm/sec로 K_v(준설층)≒1.5K_v(원지반)의 경향을 나타냈다 (그림 1(b~e)).

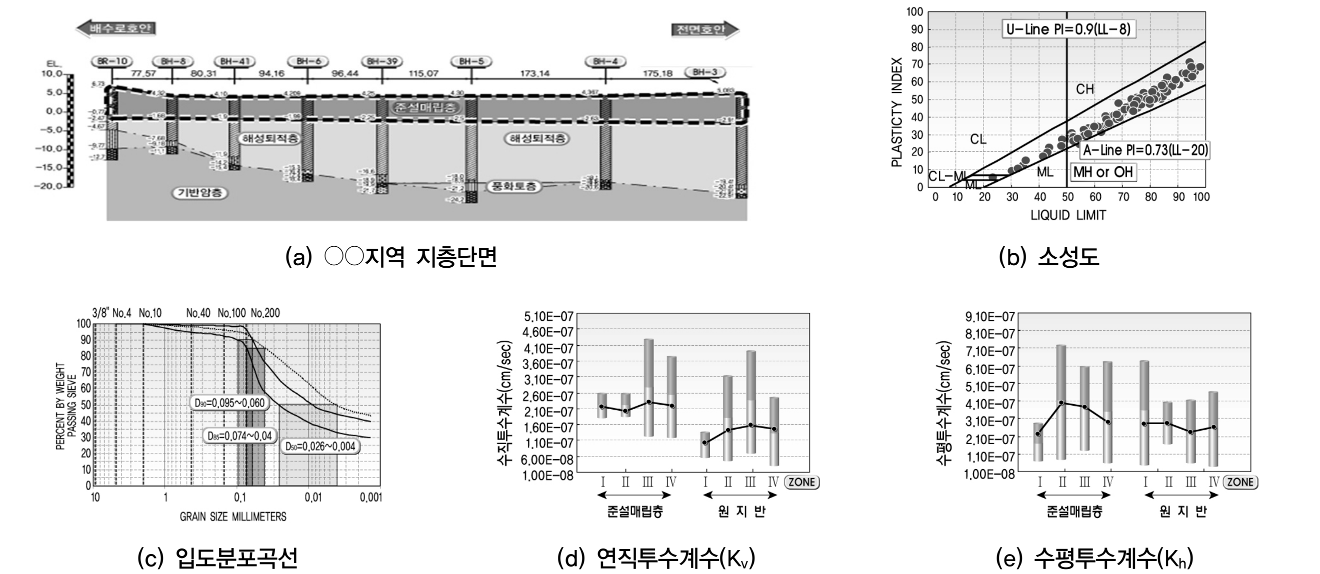
3. 연직배수재 필터의 성능평가

3.1 필터의 제원 및 특성 분석

국내에서 사용되고 있는 대표적인 3종류의 연직배수재 필터의 특성 분석의 일환으로 필터 투수시험 및 유효입경(AOS) 시험을 수행하였다. 필터 투수시험에는 토목섬유 고유의 시험법인 ASTM D 4491방법과 건설기술관리법에 규정된 KS F 2322방법이 있다. KS F 2322방법에 의한 필터의 투수계수는 8.5×10^{-3}~1.0×10^{-3}cm/sec 범위인 것으로 나타났으며, 시험결과는 필터 투수성(Permeability) 분석에 사용되었다. 유효입경(AOS)시험으로는 건식법인 ASTM D 4751방법, 습식법인 KS K ISO 12956방법 및 수리동역학적 KS F 2126방법 등이 있으며 시험결과, 건식법 및 습식법에 의한 필터의 유효입경(AOS, O_{90}기준)은 45~88μm 범위인 것으로 나타났다(표 1). 유효입경(AOS)시험결과는 간극수 흐름저항의 원인 중 흙 보유성(Retention)과 필터 폐색(Clogging)현상을 간접적으로 평가하는데 사용하였다. 또한, 각각 필터를 SEM 촬영(300배)하여 필터 표면형상을 관찰하였다. S-1의 Geotextile Filaments는 원형으로 S-3에 비하여 굵고 일부 Geotextile Filaments가 접합되어 있으며, S-2는 납작한 모양으로 간극 크기는 불규칙하였다. S-3의 경우 Geotextile filaments는 S-1 및 S-2에 비하여 가는 원형모양으로 개개의 filament들이 분리되어 있다.

3.2 국내 현장 설계(시방)기준 적용사례 분석

일반적으로 배수재 필터는 흙 입자를 적절히 보호하면서 흙 속의 물을 막힘없이 통과시키는 기능을 갖추고 있어야 한다. 압밀진행과정 동안 필터 폐색현상(Clogging)이 유발되면 필터에 인접한 흙의 투수계수가 현저히 감소하고 압밀지연으로 이어져 결국에는 필터의 기능을 발휘할



(a) ○○지역 지층단면 (b) 소성도

(c) 입도분포곡선 (d) 연직투수계수(K_v) (e) 수평투수계수(K_h)

그림 1. 지층단면 및 지반특성

수 없게 된다. 다음은 고전적인 필터의 투수성(Permeability)과 흙 보유성(Retention)에 관한 기준이다.

$$O_{15(filter)} > 5D_{15(soil)},\ O_{15(filter)} < 5D_{85(soil)}$$

그러나, 국내 연약지반 설계시 필터의 투수성(Permeability) 및 흙 보유성(Retention)을 고려하지 않고, 단지 필터의 유효입경(AOS)만을 고려하여 “$O_{90} \leq 80\mu m \sim 90\mu m$”인 기준을 일률적으로 적용하고 있다.

표 2는 국내에서 시공되었거나 시공 중인 현장의 연직배수재 필터 설계(시방)기준으로써 상기 시험결과를 토대로 3종류 연직배수재 필터의 적용성을 검토하였다. 각 현장별 유효입경(AOS)에 대한 시험방법을 달리 적용하고 있으나, 본 연구에서는 건식법과 습식법에 의한 시험결과를 구분 없이 통합하여 검토하였다. 시험결과, 배수재 필터의 유효입경(AOS, O_{90})은 45~88μm 범위로 3종류의 연직배수재 필터 모두 설계(시방)기준($O_{90} \leq 80\mu m \sim 90\mu m$)을 만족하는 것으로 나타났다.

3.3 투수성(Permeability) 기준 분석

여러 연구자들이 제안한 기준에 의하면, 필터의 투수계수는 흙의 투수계수보다 최소 2배에서 10배의 값을 확보토록 요구하고 있다(표 3). 검토대상 필터의 투수계수는 약 1×10^{-3}cm/sec 수준으로 점토의 투수계수(K=1.56×10-6 ~ 9.48×10-8cm/sec)보다 약 1000배 이상 투수성을 확보하고 있다. 따라서, 필터 투수성으로 인한 압밀지연은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

3.4 유효입경비에 의한 흙 보유성(Retention) 기준 분석

점토의 입도분포 분석 및 필터의 유효입경(AOS)시험결과를 토대로 여러 연구자들이 제안한 기준을 검토한 결과는 다음과 같다. 국내 유효입경(AOS)시험 여건 상 O_{50}과 O_{15}에 대한 결과를 획득하기 곤란하여 O_{90}과 O_{95}에 해당하는 제안된 기준에 대해서만 검토하였다. S-1, S-2 및 S-3 필터 유효입경(AOS)은 제안된 흙 보유성(Retention) 기준을 대부분 만족하는 것으로 나타났다(표 4). 또한, 제안된 기준은 국내 기준에 비하여 비슷하거나 보다 강화된 것으로 판단된다. 이러한 제안기준들은 국내 점토시료를 대상으로 한 연구결과가 아니므로 이를 직접적으로 국내 점토시료를 대상으로 적용하기에는 다소 무리가 따를 것으로 판단된다.

표 1. 필터의 제원 및 특성

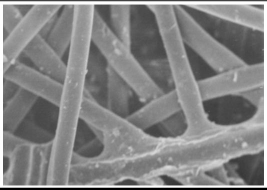
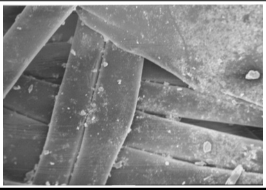
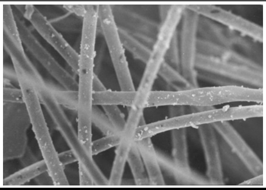
구 분			S-1	S-2	S-3
재 질			PE	PP	PE
투 수 계 수			9.7×10^{-3}cm/sec	8.5×10^{-3}cm/sec	1.0×10^{-2}cm/sec
유효입경 (AOS)	건식법	O_{90}	–	63~71μm	88μm
		O_{95}	50~54μm	72~76μm	–
	습식법	O_{90}	45~48μm	55~70μm	59μm
		O_{95}	51~53μm	61~73μm	68μm
SEM 촬영 (300배율)					

표 2. 국내 현장 적용사례 및 적용성 검토 **(적합 : ◎, 일부 적합 : ○, 부적합 : ×)**

현장명	설계(시방)기준	유효입경(AOS) 시험방법	적용성 검토		
			S-1	S-2	S-3
인천국제공항	$O_{90} \leq 50 \sim 90\mu m$	건식법(ASTM D 4751)	◎	○	○
부산신항	$O_{95} \leq 80\mu m$	수리동역학법(KS F 2126)	◎	◎	◎
광양항	$O_{90} \leq 80\mu m$, $O_{95} \leq 90\mu m$	습식법(KS K ISO 12956)	◎	◎	◎

표 3. 연구자들이 제안한 투수성(Permeability) 기준 분석 **(적합:◎, 일부 적합:○, 부적합:×)**

구 분	제안기준	적용성 검토		
		S-1	S-2	S-3
Bergado et al.(1997)	$K_{filter} > 2K_{soil}$	◎	◎	◎
Holtz & Cristopher(1987)	$K_{filter} > 10K_{soil}$	◎	◎	◎
Giround(1982)	$K_{filter} > 10K_{soil}$(Clogging 고려)	–	–	–

표 4. 제안기준 및 흙 보유성(Retention) 기준 분석 (적합 : ◎, 일부 적합 : ○, 부적합 : ×)

구 분	제안기준	적용성 검토		
		S-1	S-2	S-3
Bergado et al. (1992)	$O_{90}/D_{85} \leq 2 \sim 3$	0.72~1.29 (◎)	0.99~1.78 (◎)	0.92~1.66 (◎)
	$O_{90}/D_{50} \leq 18 \sim 24$	2.04~13.25 (◎)	2.81~18.25 (○)	2.62~17.0 (◎)
Ogink (1975)	$O_{90}/D_{90} \leq 1.8$	0.56~0.88 (◎)	0.77~1.22 (○)	0.72~1.13 (◎)
Carrol (1983)	$O_{95}/D_{85} \leq 2 \sim 3$	0.65~1.17 (◎)	0.95~1.71 (◎)	0.80~1.44 (◎)
Christopher & Holtz (1985)	$O_{95}/D_{85} \leq 1.8$	0.65~1.17 (◎)	0.95~1.71 (◎)	0.80~1.44 (◎)
Holtz & Christopher (1987)	$O_{50}/D_{85} \leq 0.5$	-	-	-
Calhoun (1972)	$O_{95}/D_{85} \leq 1$	0.65~1.17 (○)	0.95~1.71 (○)	0.80~1.44 (○)
Chen & Chen (1986)	$O_{90}/D_{85} \leq 1.2 \sim 1.8$	0.72~1.29 (○)	0.99~1.78 (○)	0.92~1.66 (○)
	$O_{50}/D_{50} \leq 10 \sim 12$	-	-	-
Sweetland (1977)	$O_{15}/D_{85} \leq 1$	-	-	-
Rankilor (1981)	$O_{50}/D_{85} \leq 1$	-	-	-
	$O_{50}/D_{50} \leq 25 \sim 37$	-	-	-

3.5 필터 폐색현상(Clogging)을 고려한 장기통수능 시험

3.5.1 필터 폐색현상(Clogging) 기준 분석

Hansbo는 필터재 설치시 유량과 필터재 미설치시 유량의 관계로부터 투수계수를 유추하여 폐색현상(clogging)을 방지하기 위한 필터 입경 및 투수계수에 대한 기준을 다음과 같이 제안하였다.

$$O_{15}/D_{15} \geq 1.5, \; K_{(filter)} > 2K_{(soil)}$$

앞서 언급하였듯이, 일반적으로 국내에서 사용하는 필터의 투수계수는 "$K_{filter} > 2 \sim 10K_{soil}$"기준을 만족하기 때문에 필터 투수성으로 인한 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다. 유효입경비 "$O_{15}/D_{15} \geq 1.5$"기준은 필터 폐색현상(Clogging)발생으로 투수성이 저하될 가능성에 대한 제안기준으로써 국내 시험장비 여건상"O_{15}"에 해당하는 유효입경(AOS)을 획득하기가 곤란한 실정이다. 따라서, 필터 폐색현상(Clogging)을 포함한 장기적인 배수성을 평가하고자 장기통수능 시험을 수행하였다.

3.5.2 시험방법

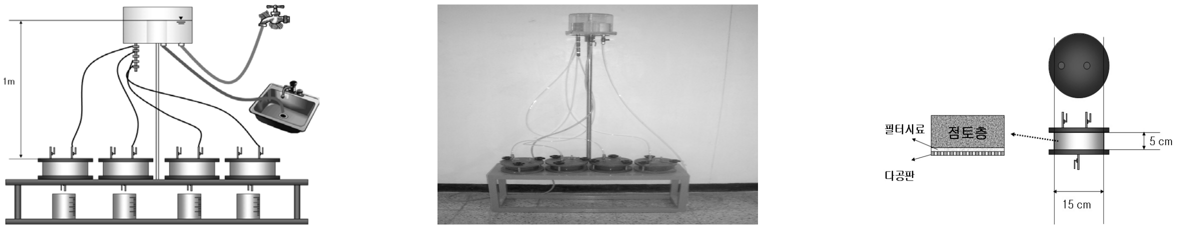
장기통수능 시험에서는 수두가 일정하게 유지될 수 있도록 수조를 구성하였고, 4조의 Cell을 제작함으로써 동시에 시험이 수행될 수 있도록 하였다. 수조는 강봉을 이용하여 Cell로부터 일정 높이에 설치하였으며, 내부에는 월류부를 설치하여 항상 일정한 수두가 유지되도록 구성하였다. 각각의 Cell은 토립자의 유동 및 유로형성 등의 내부상황을 관측할 수 있도록 구성하였으며, 직경 15cm, 높이 5cm의 아크릴을 이용하여 제작하였다. 밑판 및 덮개에는 누수를 방지하기 위하여 고무 O-ring을 설치하였다. 덮개에는 유입밸브와 공기밸브를 설치하여 덮개 장착시 공기의 유입이 되더라도 제거할 수 있도록 하였으며, 셀의 하부에는 흙 시료와 필터를 통과한 물의 양을 계량하기 위해 유출밸브를 설치하였다. 또한, 필터재를 통과한 세립분의 유출을 방지하기 위하여 필터재 하부에는 다공판을 설치하였다(그림 2, 3).

3.5.3 시험결과

실내시험은 동수경사 1.0인 조건하에 매 60분 간격으로 유량이 일정 값으로 수렴할 때 까지 실시하였으며, 그 결과를 그래프로 도시하면 그림 4와 같다.

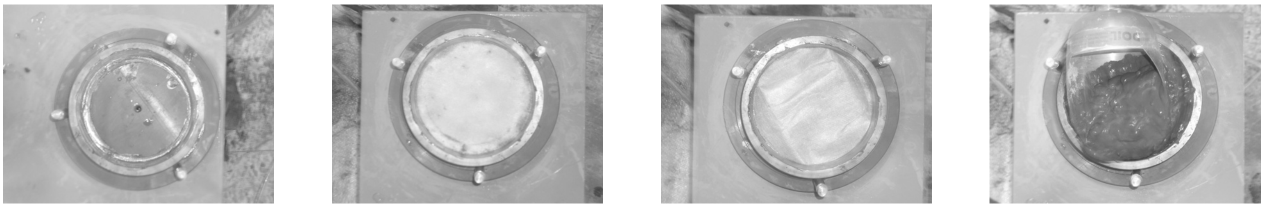
시험결과에 의하면, 시간에 따른 흙 입자 유동 및 유량의 변화를 기준으로 지반-필터 투수거동을 3단계로 구분할 수 있다. 초기에는 필터 주변 흙 입자가 이동하는 단계로 적은 양의 물 흐름이 발생하고, 두 번째 단계에서 흙 미세입자들이 손실되고 굵은 흙 입자들이 Bridging과 Arching이 형성되어 물 흐름은 증가한다. 마지막으로 Filter Cake이 형성되고 난 뒤 흙 입자의 유동은 더 이상 일어나지 않는 Soil-Geotextile Jacket System평형을 이루며, 물의 흐름은 감소하다가 정상상태에 도달한다.

초기 단계는 3종류의 필터 모두 300분 정도 소요되었고, 약 $15m^3/year/m^2$의 물 흐름이 발생하였다. 미세입자가 손실되고 물의 흐름이 증가하여 최대유량 발생지점까지 S-1, S-2, S-3 필터는 각각 660분, 1,560분, 780분이 소요되었고, S-2의 경우 상대적으로 더 많은 시간이 필요한 것으로 나타났다. 이는 S-2의 유효입경(AOS)이 상대적으로



(a) 시험장치 모식도 (b) 시험전경 (c) 시험 Cell 상세도

그림 2. 장기통수능 시험장치



(a) 밑판 체결 (b) 다공판체결 (c) 필터재 설치 (d) 흙시료 포설

(e) 흙시료 조성 (f) 덮개 설치 (g) 볼트 설치 (h) 유입관 설치

그림 3. 장기통수능 시험장비 설치순서

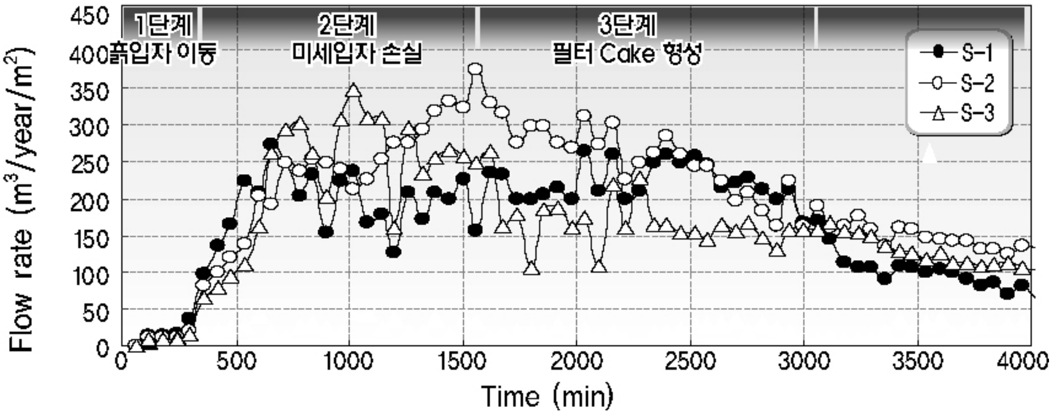


그림 4. 장기통수능 시험결과

크기 때문에 점토 미세입자의 유실이 많았던 것으로 추정된다. 필터의 배수성이 결정되는 마지막 단계에서는 S-3가 2,340분, S-1과 S-2는 각각 3,180분과 3,540분으로 S-3에 비하여 800~1200분 정도 빨리 정상상태에 도달하였다. 이는 S-3 필터가 S-1과 S-2 필터에 비하여 두께가 상대적으로 두껍기 때문에 Geotextile Filter Filaments에 흙 미세입자에 의한 폐색현상(Clogging)이 보다 빨리 발생하여 입자유동이 일어나지 않는 정상상태에 수렴하기 때문인 것으로 판단된다.

정상상태에 도달한 이후의 유량을 살펴보면, S-1 시료의 경우에는 약 $65m^3/year/m^2$, S-2는 $134m^3/year/m^2$, S-3는 약 $104m^3/year/m^2$ 정도의 수준에서 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 필터의 유효입경(AOS) 크기가 S-1이 가장 작고, S-2는 S-3에 비하여 크거나 비슷한 수준으로 유효입경(AOS) 크기의 순서와 유사한 결과를 나타냈다. 유효입경비에 의한 흙 보유성(Retention) 기준을 만족한다면, 필터의 유효입경(AOS)과 필터의 투수성에는 일정한 상관관계가 있는 것으로 추정된다.

따라서, 본 과업 대상지반에 연직배수재를 선정하는 과정에서 배수재 필터의 유효입경(AOS)에 대한 기준 및 필터 폐색(clogging)현상을 파악하고자 할 경우 본 시험결과의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

지반과 필터의 상호작용으로 연직배수재 필터의 배수성이 결정되는데, 최근 설계에서 지반 및 필터의 상관관계 분석 없이 오직 필터재 유효입경(AOS)평가에 의해서만 배수재 필터를 선정하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 대상지반의 토질특성을 고려한 필터 설계(시방)기준을 제시하고자 OO지역 토질특성 분석, 필터 유효입경(AOS) 평가 및 장기통수능 시험을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 유효입경비에 의한 지반-필터의 투수성(Permeability) 및 흙 보유성(Retention) 기준을 평가한 결과, 3가지 종류의 연직배수재 필터 모두 연구자들이 제안한 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 제안된 기준은 국내 설계(시방)기준에 비하여 비슷하거나 다소 강화된 것으로 분석되었다.

(2) 장기통수능 시험결과, 물의 흐름이 최종 단계에서 정상상태에 도달할 때의 유량을 살펴보면, S-1 시료의 경우에는 약 65m^3/year/m^2, S-2는 134m^3/year/m^2, S-3는 약 104m^3/year/m^2 정도의 수준에서 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이는 유효입경(AOS)의 크기가 S-1이 가장 작고, S-2는 S-3에 비하여 크거나 비슷한 수준으로 유효입경(AOS) 크기의 순서와 유사한 결과를 나타냈다. 따라서, 유효입경비에 의한 흙 보유성(Retention) 기준을 만족한다면, 필터의 유효입경(AOS)이 클수록 장기적인 필터의 배수성은 우수한 것으로 추정된다.

(3) 본 과업현장에서 필터 폐색현상(Clogging)을 고려한 필터 설계(시방)기준으로써, 투수성(Permeability)은 “$K_{filter} > 2K_{soil}$”, 흙 보유성(Retention)은 “$O_{90} \leq 90\mu m$”을 적용하였다. 이러한 기준이 적용된다면 흙 미세입자에 의한 필터 폐색(Clogging)현상으로 발생하는 압밀지연은 미미할 것으로 판단된다.

위의 기준은 OO지역 현장의 토질특성이 반영된 필터 설계(시방)기준으로써, 타 현장 적용시 본 연구와 같은 시험과정을 거친다면 그 대상지역의 토질특성에 적합한 배수재 필터를 선정할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 해양수산부 (2004a), *○○항 동측배후단지 대안설계 보고서*, pp.101~115.
2. 해양수산부 (2004b), *○○항 동측배후단지 실험보고서 제14권 연직배수재 통수능 및 Smear Zone 영향평가보고서.*

(논문접수일 2007. 1. 12, 심사완료일 2007. 3. 9)