



## 수평 배수재로서 순환골재와 쇄석의 활용 방안

### Utilization of Recycled Aggregates and Crushed Stone as Horizontal Drains in Soft Ground

이달원\*† · 임진혁\*\*

Lee, Dal Won · Lim, Jin Hyuk

#### ABSTRACT

In this study, laboratory model test on utilization of recycled aggregates and crushed stone as horizontal drains to use alternative material of sand in soft ground is practiced. The coefficient of permeability of the recycled aggregates and crushed stone showed largely 1.2~5.1 times and 2.0~3.3 times greater than sand, respectively. The horizontal coefficient of permeability in case of installing the horizontal perforated drain pipe showed largely 1.9~6.8 times more than the case of not installing. The drainage distance showed 1.7~1.8 times greater than sand. When a degree of consolidation is 90 %, there is no delay of consolidation in SCP and PVD improvement sections. Therefore, it is proven that the field applicability is excellent. Also, the suitable quality management criterion is presented to make use of a horizontal drains in soft ground on the basis of analysis of the physical and environmental characteristics.

**Keywords:** Recycled aggregates; crushed stone; horizontal drains; coefficient of permeability; quality management criterion

#### 1. 서 론

최근 국토의 효율적인 이용을 위해서 항만공사와 배후단지 조성 사업 등의 연약지반의 개발이 광범위하게 진행되고 있고, 이들 조성 사업에 막대한 양의 성토재료의 공급이 요구되고 있으나 천연자원의 고갈과 환경파괴로 인해 많은 문제점이 대두되고 있다. 일반적으로 연약지반 상에 축조되는 대규모 단지개발과 도로 건설시 압밀침하를 촉진하기 위해서 수평배수재로서 모래를 시공하는 것이 일반화 되어 있다 (Koea Land Corporation, 1997).

그러나 모래 채취원이 원거리에 있거나, 채취량, 가격 등의 변동에 따라서 시공과정 및 전체공정을 좌우하는 중요한 요인이고, 양질의 재료가 확보될 수 있는 모래의 채취 규제에 따라서 투수성이 큰 재료의 확보가 상당히 어렵게 되어 있다. 뿐만 아니라 모래 및 골재의 무분별한 채취로 인하여 생태환경의 파괴 및 천연적인 자연경관의 손상 등의 환경적 문제가 발생하고

있다.

도시의 재개발에 따른 노후화된 구조물 해체 시 발생하는 많은 양의 건설 폐기물의 양은 매년 증가하고 있지만, 아직까지 재활용하기 위한 연구가 부진하여 단순히 매립하거나 폐기처분하여 국토의 오염뿐만 아니라 심각한 환경문제로 대두되고 있다. 이에 따라 건설 폐기물 중 골재를 재생하여 수평배수재로서 재이용하기 위한 방안이 요구되고 있다. 매년 심각해지는 환경공해와 실 틈 없이 쏟아지는 건설폐기물의 처리는 세계적으로 심각한 문제로 대두되고 있다. 따라서 연약지반에 대한 효과적인 개량뿐만 아니라 환경적으로 무해하고 가용 건설 폐기물을 발굴하여 건설재료로 활용하기 위한 많은 관심과 연구가 모아지고 있다 (Lee et al., 2009; Kim et al., 2001; Lee et al., 2007).

2007년도 우리나라의 건설폐기물 발생량은 172,006 톤/일로 전체폐기물 중 약 5 %를 차지하고 있고, 계속 증가하여 2012년 279,489 톤/일로 증가할 것으로 추정된다. 건설폐기물 발생량 중 순환골재 생산원료인 폐 콘크리트 발생량의 경우는 '07년도에 43,021 천톤/년, 폐 아스팔트 콘크리트의 경우 8,094 천톤/년으로 전체의 81.4 % (약 51,115 천톤/년)를 차지하고 있다 (Korea Construction Resource Association, 2009).

이에 100,000 톤/일 이상 발생하고 있는 폐 콘크리트를 재활용하여 생산되고 있는 순환골재는 국내외 유수의 학회 연구 보고 결과, 환경성 및 활용성에 대한 가치가 높게 평가되고 있

\* 충남대학교 지역환경토목학과

\*\* 충남대학교 대학원

† Corresponding author Tel.: +82-42-821-5793

Fax: +82-42-821-8877

E-mail: dwlee@cnu.ac.kr

2010년 10월 4일 투고

2010년 11월 19일 심사완료

2010년 11월 19일 게재확정

다. 따라서 수요급증으로 인한 단가 상승과 자원고갈로 인한 환경적, 경제적 문제를 해결하기 위해서 모래 대신 이용할 수 있는 순환골재 및 쇄석 등의 대체 재료 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

1990년대 초부터 폐 콘크리트로부터 순환골재를 생산하기 위해서는 일반적으로 수집된 폐 콘크리트를 파쇄하여 채움재 및 노반재로 사용하는 기초적 기술만을 활용하였다. 1990년대 말부터 정부의 폐기물 정책에 맞추어 폐 콘크리트의 재활용 기술이 급성장해 왔으며, 2003년 12월 『건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률 (이하 건설폐기물법)』을 제정하여 건설현장에서 발생하는 건설폐기물중 순환골재 사용의 입법화가 가능해졌고, 그 이후 폐 콘크리트를 이용한 연구는 매년 꾸준히 증가하고 있는 실정이다. 2009년부터 순환골재 의무사용 건설공사를 도로법, 국토계획 및 이용에 관한 법률 시행령, 산업용지 및 개발에 관한 법률, 하수도법, 택지개발 촉진법에 의해 구분하고, 도로보조기층용으로 순환골재 소요량의 15 %를 사용하도록 법률로서 고시하고 있다 (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009).

건설폐기물의 재활용률은 매년 증가하고 있으며, 2007년 재활용률은 97.5 %로 높은 수준을 나타내고 있고 '00년 84.7 % 대비 12.8 % 증가하였다. 앞으로 건설폐기물은 배출·처리에 관한 관리가 강화되고 재개발, 재건축 및 택지개발 등 대형 공사의 증가로 지속적으로 증가할 것으로 전망된다.

건설폐기물처리 통계상 재활용이 97.5 %에 이르고 있으나, 건설폐기물의 대부분은 성토 및 복토 (약 56 %), 되메우기 및 뒤채움용 (10.9 %) 등 저급용도 (75.2 %)로 이용되고 있고, 도로기층용, 보조기층용, 콘크리트용, 콘크리트 제품제조용, 아스팔트 콘크리트용, 도로포장 아스팔트용, 수평배수재 등과 같은 고부가가치용도 (24.8 %)의 재활용 실적은 매우 저조한 실정이다 (National Environmental Research Institute, 2007).

그 동안 연직 배수재에 대한 압밀특성과 개량공법 등에 관해서는 많은 연구가 진행되어 왔지만, 수평배수재의 대체공법으로서 순환골재와 쇄석에 관한 투수계수 실험, 수평유공관의 배수성능 실험 및 설계방법 및 동수경사와 매트 저항을 고려한 수평배수재의 비교분석 연구가 미약하여 품질관리기준 뿐만 아니라 실내 및 현장시험 사례가 거의 없어 실용화 되지 않고 있다 (Kim et al., 2001; Lee et al., 2007; Lee et al., 2008; Lee et al., 2009).

따라서 본 연구에서는 연약지반에서 모래의 대체 재료로서 순환골재와 쇄석의 활용가능성에 대해 실내모형실험을 실시하고, 수평 및 연직 투수계수의 비교, 수평 유공관 설치에 따른 배수성능, 수평배수층 두께와 침하속도에 따른 배수거리 및 동수경사와 매트저항을 고려한 수평유공관의 간격 등을 비교 분석하

여 합리적인 설계방법을 제시하고자 한다. 또한 순환골재와 쇄석의 물리적·환경 특성분석 등을 고려하여 연약지반에 적합한 수평배수재의 품질관리기준을 제시하고자 한다.

## II. 수평배수층의 투수성

### 1. 과잉간극수의 배출에 필요한 수평배수층의 두께

수평배수재의 배수성능이 부족하면 과잉공극수압이 상승하고, 그 영향으로 유효성토하중은 전하중의 40~80 % 정도로 저감하고 압밀지연현상을 초래한다. 수평배수층에서의 배수성능은 성토기간에 영향을 크게 받는데 압밀초기에는 연약지반개량으로 인해 배수량이 많고 시간에 경과함에 따라 배수량이 점차로 감소하여 압밀지연이 발생하지 않는다. 따라서 압밀초기 배수량을 기준으로 하는 것 보다는 전체적인 압밀기간을 고려하여 배수성능을 결정하여야 한다.

수평배수층의 기능 중 간극수의 배출 기능만을 고려하여 수평배수층의 두께를 결정할 때 지배되는 인자는 수평배수층의 투수계수  $k$ , 배수량  $Q$  및 배수거리  $L$ 이다.

수평배수층 내에는 연약층에서 배출된 간극수, 강우 및 기타 유입된 지하수가 존재하게 된다. 성토로 인한 지반의 평균 침하속도를  $S$  (cm/day)라 하고 이 침하량의 연약층의 압밀에 의한 것이라 한다면 성토 단위길이 당 압밀로 인한 전체 배수량 ( $Q$ )은  $L \cdot S$ 이며, 투수계수, 단면적, 동수경사를 고려하면 배수량( $Q$ )은  $k \cdot i \cdot A$ 로 표시된다. 지하수의 배수를 무시하고 상부 수평배수층의 배수 (일면배수)만을 연약층의 압밀배수로 본다면 다음식이 성립된다.

$$Q = L \cdot S = k \cdot i \cdot A = k \cdot \frac{\Delta h_w}{L} \cdot H_m \quad (1)$$

$$\Delta h_w = \frac{L^2 \cdot S}{k \cdot H_m} \quad (2)$$

여기서,  $Q$  : 배수량 (cm<sup>3</sup>/day),  $i$  : 동수경사,  $\Delta h_w$  : 수두손실 (cm),  $H_m$  : 수평배수층 두께 (cm),  $k$  : 수평배수재 투수계수 (cm/day),  $L$  : 수평배수층의 배수거리 (cm) (도로제방 폭의 1/2, 유공관 거리의 1/2),  $S$  : 연약지반 개량공사 시 평균 침하속도 (cm/day)

수평유공관 간격 검토 시 적용되는 침하속도는 일반적으로 1차 압밀침하량을 침하기간으로 나눈 평균 침하속도를 적용한다. 그러나 드레인 타입 후 재하성토 시점부터 성토완료시까지 침하

속도는 총 압밀침하량의 50 % 정도 발생하며 이와 같은 경우에 평균 침하속도를 적용하면 유공관이 배수기능을 못하는 결과를 초래하기 때문에 매트 저항이 발생되어 압밀지연이 나타나게 된다. 따라서 수평배수층 내에서 압밀지연이 발생되지 않기 위해서는 수평배수층의 두께가 동수경사보다 크게 하거나 ( $\Delta h_w \leq H_m$ ) 수평유공관을 매설하여야 한다.

## 2. 수평배수층의 매트 저항 (mat resistance)

수평배수층의 투수성은 무한히 크다고 하여 연직 드레인을 설계하는 것이 보통이다. 그러나 투수성이 좋은 모래를 구득하기가 곤란하다면 어느 정도 투수성이 좋지 않은 모래를 이용하는 경우도 있다. 또한 투수성이 좋은 모래라 할지라도, 투수성이 유한하기 때문에 수평배수층 내에서 물이 흐르기 위해서는 어느 정도의 동수경사가 필요하고 그 배수거리가 긴 경우에는 수평배수층의 투수성을 무한대라고 생각하기 어렵다. 수평배수층의 투수계수는 무한하지 않고 한정된 값이므로 수평배수층에 도달된 과잉간극수는 위치에 따라 순간적으로 소산되지 않고 시간이 경과함에 따라 천천히 소산된다. 수직방향흐름으로 인한 압밀을 무시하면 압밀진행 흐름에 대해서 수평배수층의 투수성이 저항으로 작용하기 때문에 수평배수층 중앙에서는 배수거리가 길어져 압밀지연이 발생하게 된다.

Yoshikuni (1979)는 sand mat내에서의 매트저항계수 ( $L_{mat}$ )를 고려하여 압밀지연에 따른 평균압밀도를 계산하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$U = 1 - \exp\left(\frac{-8 \cdot T_h}{F(n) + 0.8 \cdot L_{mat}}\right) \quad (3)$$

$$L_{mat} = \left(\frac{32}{\pi^2}\right) \left(\frac{H \cdot k_c}{n^2 H_m k_m}\right) \left(\frac{B}{d_w}\right)^2 \quad (4)$$

$$F(n) = \frac{(n)^2}{(n)^2 - 1} \ln(n) - \frac{3(n)^2 - 1}{4(n)^2} \quad (5)$$

여기서,  $L_{mat}$  : 수평배수층의 mat resistance coefficient,  $d_w$  : 연직 배수재의 직경 (cm),  $T_h$  : 시간계수,  $n(=d_e/d_w)$  : 간격비,  $H$  : drain 길이 (cm),  $H_m$  : 수평배수층 두께 (cm),  $k_c$  : 점토층의 투수계수 (cm/s),  $k_m$  : 수평배수층의 투수계수 (cm/s),  $B$  : 성토폭의 1/2 (유공관 간격의 1/2)

## III. 재료 및 방법

### 1. 사용재료

본 실험에 사용한 모래 (해사), 순환골재 및 쇄석은 충남 당진군에서 구입하였다. 시험에 사용된 시료는 모래 (1종), 순환골재 (5종) 10 mm 이하, 25 mm, 25 mm 이하, 40 mm, 40 mm 이하, 쇄석 (3종) 6 mm 이하, 25 mm, 40 mm 이하로 총 9종의 시료를 사용하였다.

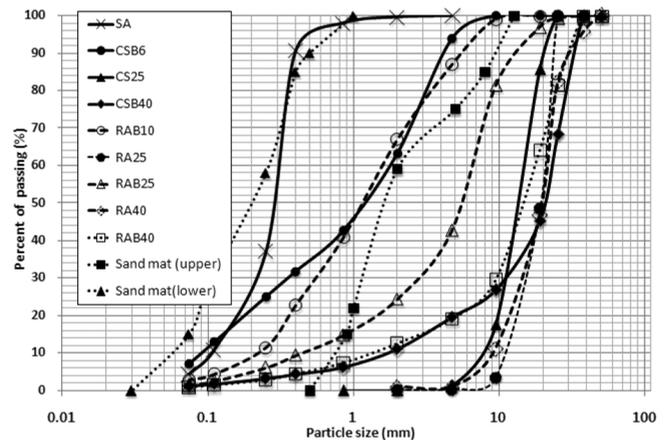


Fig. 1 Grain size accumulation curve

Table 1 Physical properties of used soil

Sample	Symbol	Particle size	Passing 5 mm (%)	Passing No. 200 (%)	PI	$r_{dmax}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	D <sub>15</sub> (mm)	D <sub>85</sub> (mm)	Cu	U.S.C.S
Sand	SA	2 mm	100	4.35	NP	1.524	8.98	0.13	0.36	2.88	SP
Recycled aggregate	RAB10	below 10 mm	87.01	2.71	NP	1.711	10.6	0.3	4.4	7.26	SW
	RA25	25 mm	0.27	0	NP	1.362	14.1	12.6	23.5	1.83	GP
	RAB25	below 25 mm	42.83	1.31	NP	1.862	7.05	0.86	10.1	14.77	GW
	RA40	40 mm	1.04	0	NP	-	-	20.1	32.8	1.49	GP
	RAB40	below 40 mm	19	0.88	NP	1.873	13	3	27.5	12.85	GW
Crushed stone	CSB6	below 6 mm	93.87	6.96	NP	-	-	0.13	3.64	20.56	SW-SM
	CS25	25 mm	1.31	0	NP	-	-	9	18.8	1.8	GP
	CSB40	below 40 mm	19.51	1.17	NP	2.032	17.6	3	31.4	13.41	GW

**Table 2 Physical properties of fill and clay material**

Soil	Passing No. 200 (%)	$W_n$ (%)	$G_s$	Atterberg limits		Shear parameters (UU) c (kPa)	Consolidation test				U.S.C.S
				LL	PI		$P_c$ (kPa)	$C_c$	$e_0$	$C_v$ (cm <sup>2</sup> /s)	
Clay	84.4	44.8	2.72	32.89	17.14	29.43	70	0.419	1.184	2.33E-3	CL
Fill material	43.0	14.4	2.55	24.13	3.72	-	-	-	-	-	SM

투수시험에 사용된 시료의 물리적 특성 및 입경별 입경가적 곡선은 Fig. 1 및 Table 1과 같다.

모래, 순환골재, 쇄석의 입도분석 결과를 sand mat 시방서 기준과 비교하면 모래, 순환골재 10 mm 이하, 쇄석 6 mm 이하는 적용기준에 만족한다. 그 외의 경우는 조립토가 많이 포함되어 있어 기준에 벗어나 있지만 수평배수재로서 사용가능 여부를 판단하는 것이 목적이므로 다른 재료와 혼합 없이 사용하였다. 수평유공관 배수성능에 관한 실내모형실험 시 상부 성토재와 하부 점토재로 사용한 시료의 실내시험 결과 지반정수는 Table 2와 같다.

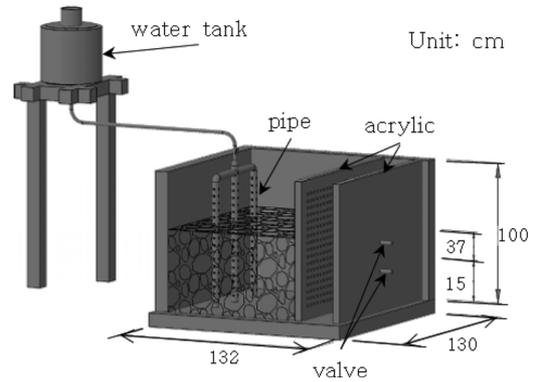
**2. 수평 및 수직 투수실험**

수평투수계수를 구하기 위한 대형 토조는 Fig. 2와 같이 높이 (H) 100 cm, 폭 (W) 130 cm, 길이 (L) 132 cm로 콘크리트로 제작하였다. 토조 전면에는 2개의 아크릴을 설치하였고, 유량공급수조에서 조절된 물은 pipe를 통해 수평으로 흐르도록 하였으며 토조 내부는 방수 페인트를 칠하여 누수를 방지하였다. 물 공급은 토조 내에 일정하게 유량을 공급 시켜줄 수 있도록 플라스틱 원형수조를 설치하였고, 직경 (Ø) 50 mm 파이프에 구멍을 뚫어 시료 내에 매설하고 좌측에서 우측으로 물이 일정한 동수경사 0.5를 유지하며 수평이동 하도록 급수밸브를 조절하였다. 토조내의 수평배수재가 원활하게 배수되는지의 여부를 판단하기 위해 시료하부에 공극수압계를 설치하여 실험 동안의 변화량을 측정하였다. 수직투수계수를 구하기 위한 원형토조는 직경 (Ø) 19.50 cm, 길이 (L) 39~44 cm를 사용하였다.

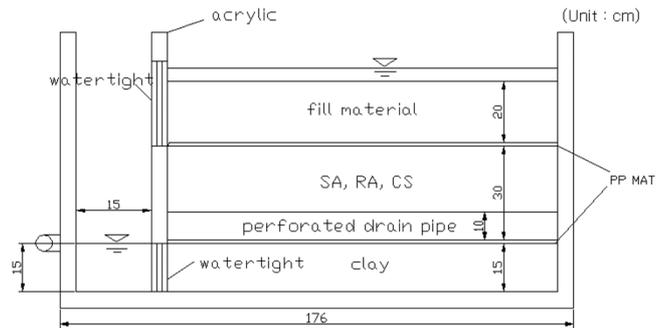
**3. 수평유공관의 배수성능 실험**

수평유공관의 배수성능실험을 실시하기 위한 소형토조는 Fig. 3과 같이 높이 (H) 80 cm, 폭 (W) 40 cm, 길이 (L) 176cm로 철재와 아크릴로 제작하였다.

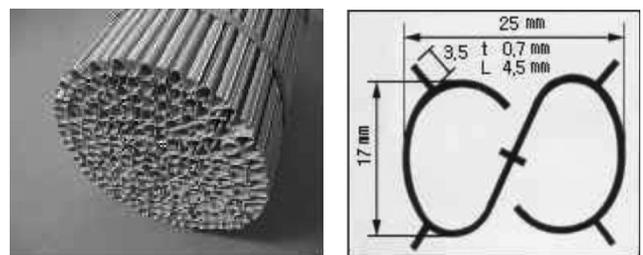
유량공급수조에서 조절된 물은 파이프를 통해 상부에 포설된 성토재와 수평배수층에 침투한 후 유공관을 통해 수평방향으로 배수되도록 하였다. 수평배수재와 성토 사이에 공극수압계를 삽입하고, 공극수압의 값이 일정할 때까지 물을 공급시킨 후에 실험



**Fig. 2 Cross-section of horizontal permeability test**



**Fig. 3 Apparatus of horizontal perforated drain pipe**



**Fig. 4 Shape of horizontal perforated drain pipe**

험을 실시하였다. 점토와 모래, 성토재 포설후 다짐은 각각의 재료에 공극이 생기지 않도록 나무막대를 이용하였다.

모형실험에 사용한 수평유공관 (S형 집속다발관)의 관경은 100 mm, 다발수는 13본이고, 형상은 Fig. 4와 같이 실제 연약지반 현장에 사용된 재료로서 S자형 다발로 접속되어 다수의 집수구와 배수구가 상호 연결되어 있어 뛰어난 집배수 효과를 발휘할

**Table 3 Discharge capacity test for various case**

Case	Type
case 1	clay (15 cm)+ pp mat+ SA (30 cm)
	clay (15 cm)+ pp mat+ RA (30 cm)
	clay (15 cm)+ pp mat+ CS (30 cm)
case 2	clay (15 cm)+ pp mat+ perforated pipe+ SA (30 cm)
	clay (15 cm)+ pp mat+ perforated pipe+ RA (30 cm)
	clay (15 cm)+ pp mat+ perforated pipe+ CS (30 cm)
case 3	clay (15 cm)+ pp mat+ perforated pipe+ SA (30 cm)+ pp mat+ fill (20 cm)
	clay (15 cm)+ pp mat+ perforated pipe+ RA (30 cm)+ pp mat+ fill (20 cm)
	clay (15 cm)+ pp mat+ perforated pipe+ CS (30 cm)+ pp mat+ fill (20 cm)
case 4	clay (15 cm)+ pp mat+ RA (30 cm)+ pp mat+ fill (20 cm)
	clay (15 cm)+ pp mat+ CS (30 cm)+ pp mat+ fill (20 cm)

수 있는 특징을 가지고 있다.

수평유공관 배수성능실험에 사용한 시료는 연약지반 현장의 시험시공에 수평배수재로 사용되었던 모래 (해사), 순환골재 25 mm, 쇠석 25 mm를 사용하였다.

상부 성토재는 No. 4체를 통과한 시료를 준비하고, 하부 점토는 현장에서 채취한 연약한 상태로 시험하였다. 시험방법은 Table 3과 같이 case 1-4 별로 수평유공관의 설치유무, PP mat 포설 유무, 성토재의 포설 유무로 구분하여 배수성능 실험을 실시하였다.

수평배수층은 상부 성토재와 하부 점토층의 중간층에 존재한다. 따라서 시공장비 운행 및 강우 등에 의해 성토재가 수평배수층 내로 혼입되고, 연약지반 개량시 점토가 혼입되어 막힘 현상이 발생되기 때문에 배수성능이 감소하게 된다.

이에 따라 수평배수재의 막힘 현상에 대한 검토가 필요하여 Table 3과는 별도로 수평유공관이 없는 상태에서 수평배수재의 상하부에 PP mat (인장강도: 49 kN/m)를 포설한 경우와 포설하지 않은 경우에 대하여 막힘 현상을 실험하였다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 수평배수재에 따른 수평 및 수직투수계수

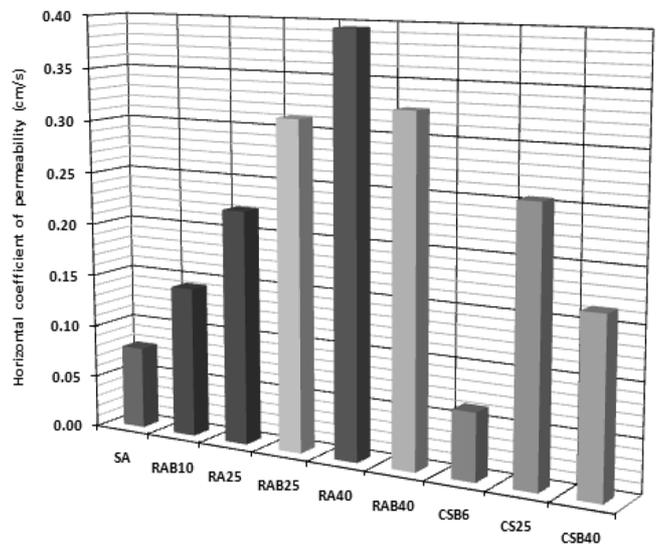
연약지반에서 수평배수재로서 사용되는 모래와 순환골재, 쇠석의 투수계수를 비교하기 위하여 수평 및 수직투수시험을 실시하였다.

Table 4 및 Fig. 5, 6은 재료별 수평 ( $k_h$ ) 및 수직투수계수 ( $k_v$ )를 나타낸 것이다.

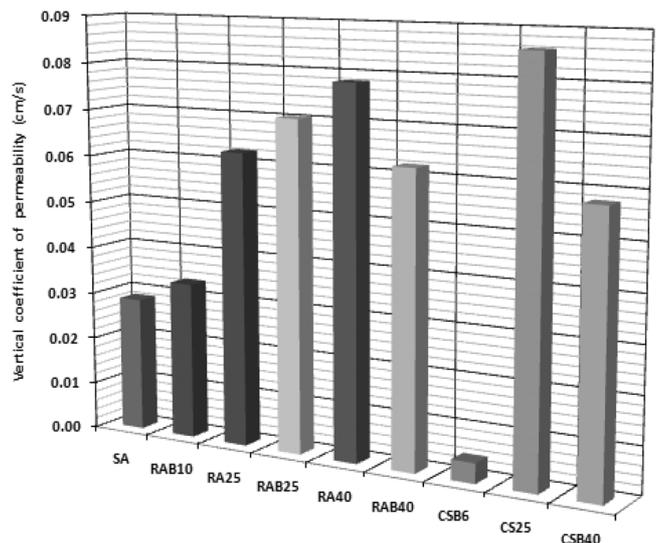
Fig. 5는 재료별 수평투수계수를 나타낸 것으로 모래를 기준으로 순환골재의 입경별 수평투수계수를 분석해 보면, 순환 10 mm 이하는 1.8배, 순환 25 mm는 2.9배, 순환 25 mm 이하

**Table 4 Results of horizontal and vertical permeability test**

Sample	Symbol	Particle size	$k_h$ (cm/s)	$K_v$ (cm/s)
Sand	SA	2 mm	7.82E-02	2.86E-02
Recycled aggregate	RAB10	below 10 mm	1.43E-01	3.33E-02
	RA25	25 mm	2.23E-01	6.24E-02
	RAB25	below 25 mm	3.12E-01	7.03E-02
	RA40	40 mm	3.95E-01	7.82E-02
Crushed stone	RAB40	below 40 mm	3.26E-01	6.21E-02
	CSB6	below 6 mm	6.37E-02	4.25E-03
	CS25	25 mm	2.55E-01	8.60E-02
	CSB40	below 40 mm	1.65E-01	5.78E-02



**Fig. 5 Horizontal coefficient of permeability for various drains**



**Fig. 6 Vertical coefficient of permeability for various drains**

는 4.0배, 순환 40 mm는 5.1배, 순환 40 mm 이하는 4.2배 정도 높은 것으로 측정되었다. 쇄석의 수평투수계수는 모래를 기준으로 쇄석 6 mm는 0.8배, 쇄석 25 mm에서는 3.3배, 쇄석 40 mm 이하에서는 2.1배 정도 높은 것으로 측정되었다.

Fig. 6은 재료별 수직투수계수를 나타낸 것으로 모래를 기준으로 순환 10 mm 이하는 1.2배, 순환 25 mm는 2.2배, 순환 25 mm 이하는 2.5배, 순환 40 mm는 2.7배, 순환 40 mm 이하는 2.2배 정도 높은 것으로 측정되었다. 쇄석의 입경별 수직투수계수는 모래를 기준으로 쇄석 6 mm는 0.15배, 쇄석 25 mm는 3.0배, 쇄석 40 mm 이하는 2.0배 정도 높은 것으로 측정되었다.

전체적으로 연약지반에서 수평배수재로서 순환골재와 쇄석의 입경별 투수시험을 모래 (해사)를 기준으로 비교·분석한 결과, 순환골재의 경우 (6 mm 제외), 수평투수계수는 1.8~5.1배, 수직투수계수는 1.2~2.7배 정도 더 크게 나타났고, 쇄석의 경우 (6 mm 제외), 수평투수계수는 2.1~3.3배, 수직투수계수는 2.0~3.0배 정도 더 크게 나타났다.

따라서 기존에 수평배수재로서 사용되어 왔던 모래의 대체 재료로서 순환골재 및 쇄석은 충분한 배수성능을 나타내어, 현장 적용 시 우수한 수평배수재로서 사용가능할 것으로 평가되었다.

## 2. 수평유공관 설치에 따른 배수성능 비교

수평배수재내에 수평유공관의 설치 유·무에 따른 배수성능 효과를 비교하기 위하여 실내모형실험을 실시하였다.

Table 5 및 Fig. 7은 case별로 각 재료의 수평투수계수를 비교·분석한 것이다.

실내모형실험 결과, 순환골재 중 10 mm 이하, 25 mm 이하, 40 mm, 40 mm 이하는 공장 파쇄 및 혼합배합 중에 이물질의 함유량이 많고, 특히 대량생산의 경우에는 더 심각하게 혼합될 것으로 판단되어 배수성능시험에는 25 mm를 선정하였다. 또한 쇄석의 경우는 40 mm 이하에서 석분의 함유량이 너무 많아 25 mm를 선정하였다.

점토 포설 후 수평배수재만 포설하였을 경우 (case 1)의 수평투수계수는 모래를 기준으로 순환골재 25 mm는 1.7배, 쇄석 25 mm는 2.7배 정도 높은 것으로 측정되었다.

점토 포설 후 수평배수재내에 유공관을 매설하였을 경우 (case 2)의 수평투수계수는 모래를 기준으로 순환골재에서는 2.1배, 쇄석에서는 2.2배 정도 높은 것으로 측정되었다.

점토 포설 후 수평배수재내에 유공관을 매설하고 성토재를 포설한 경우 (case 3)의 수평투수계수는 모래를 기준으로 순환골재는 2.2배, 쇄석은 2.4배 정도 높은 것으로 측정되었다.

점토 포설 후 유공관을 매설하지 않고 수평배수재와 성토재만

Table 5 Results of horizontal coefficient of permeability ( $k_h$ ) and discharge capacity (Q) for various case

Case	Sand (SA)		Recycled aggregate 25 mm (RA)		Crushed stone 25 mm (CS)	
	$k_h$ (cm/s)	Q (m <sup>3</sup> /day)	$k_h$ (cm/s)	Q (m <sup>3</sup> /day)	$k_h$ (cm/s)	Q (m <sup>3</sup> /day)
Case 1	2.11E-01	5.00E-01	3.64E-01	8.61E-01	5.70E-01	1.35E+00
Case 2	4.92E-01	1.16E+00	1.01E+00	2.39E+00	1.08E+00	2.55E+00
Case 3	1.07E-01	2.54E-01	2.31E-01	5.48E-01	2.59E-01	6.15E-01
Case 4	-	-	3.92E-02	1.14E-01	3.81E-02	1.08E-01

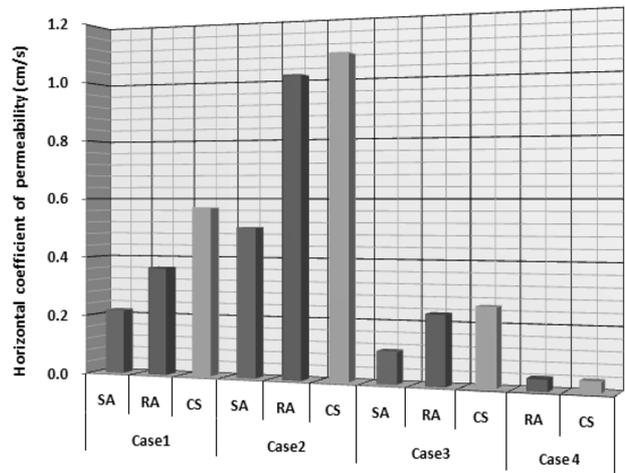


Fig. 7 Comparison of horizontal coefficient of permeability for different case

을 포설한 경우 (case 4)는 순환골재가 쇄석보다 1.1배 정도로 큰 차이를 나타내지 않았다.

수평유공관을 매설하였을 경우 (case 2)는 수평배수재만 포설하였을 경우 (case 1)보다 모래는 2.3배, 순환골재는 2.8배, 쇄석은 1.9배 정도로 높게 측정되었다.

상부 성토재를 포설하였을 경우의 수평투수계수는 유공관을 매설한 경우 (case 3)는 유공관을 매설하지 않는 경우 (case 4)보다 순환골재는 5.9배, 쇄석은 6.8배 정도 높게 측정되었다.

위와 같이 case별 배수성능 시험결과로부터 수평유공관을 매설하였을 경우와 매설하지 않았을 경우에 수평투수계수를 비교해보면 수평유공관 설치로 인해 배수성능은 1.9~6.8배 정도 효과가 매우 우수하다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 실제 현장에서 수평유공관을 매설할 경우에 상당한 배수성능효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 3. 수평배수층의 두께와 침하속도에 따른 배수거리 산정

수평배수재가 원활한 배수성능을 유지하기 위해서는 수평배수층의 두께가 동수경사보다 커야하고 그렇지 못한 경우에는 압

밑배수량을 처리하기 위하여 수평유공관 간격을 검토하여야 한다.

수평유공관의 간격을 검토하기 위해 모래 (SA), 순환골재 25 mm (RA25), 쇄석 25 mm (CS25)의 수평투수계수 ( $k_h$ )를 사용하였고, 수평배수층 두께 ( $H_m$ )는 50, 80, 100 cm로 변화를 두어 수두차 ( $\Delta h_w$ )를 계산하였다. 현장시험시공에 적용된 수평배수층은 배수성능시험을 통하여 순환 25 mm와 쇄석 25 mm를 선정하였고, 수평배수층의 두께는 50~100 cm 범위에서 분석하였다.

Fig. 8은 수평배수층 두께 ( $H_m$ )가 80 cm일 때 배수거리 (L)에 따른 동수경사를 나타낸 것이다. 여기서, 평균 침하속도는 시험시공 현장의 단계 성토 구간에서의 침하량과 성토완료시까지의 침하시간을 고려하여 0.442 cm/d를 적용하였다. 배수거리가 길어짐에 따라 동수경사는 모래에서 급격하게 증가하였고, 순환골재와 쇄석에서 거의 같게 약간씩 증가하였다.

Fig. 9는 수평배수층 두께 ( $H_m$ )를 50, 80, 100 cm로 변화시켰을 경우에 간극수가 원활히 배출되기 위한 적정한 배수거

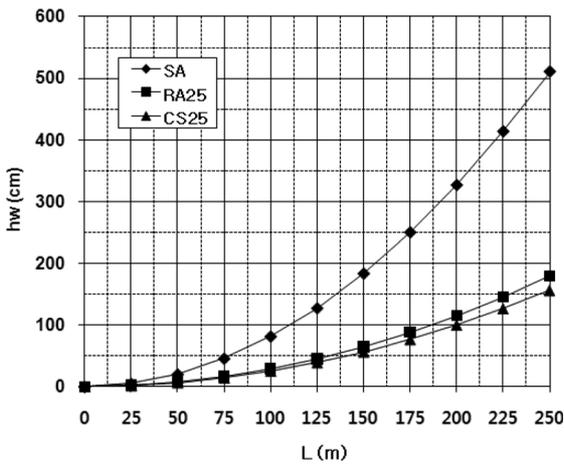


Fig. 8 Comparison between drainage distance and hydraulic gradient in case  $H_m=80$  cm

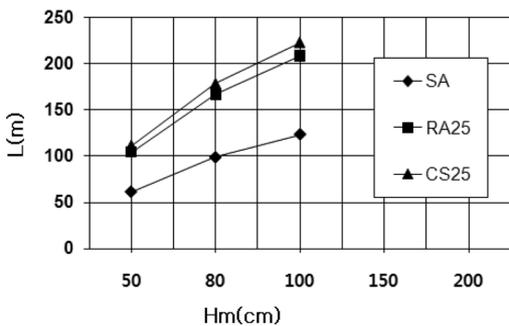


Fig. 9 Optimum drainage distance according to the thickness of a mat for various drains

리 (L)를 나타낸 것이다.

수평배수층 두께가 50 cm일 때 모래의 경우는 배수거리가 62 m, 순환골재와 쇄석은 104 m, 112 m이고, 80 cm일 때에는 모래 99 m, 순환골재 167 m 및 쇄석은 179 m이며, 100 cm일 때에는 모래 123 m, 순환골재 208 m 및 쇄석은 223 m로 나타났다.

수평배수층 두께에 따른 배수거리는 모래를 기준으로 순환골재는 1.7배, 쇄석은 1.8배 정도 크게 나타났다.

Fig. 10은 수평배수층 두께 ( $H_m$ )가 80 cm이고 배수거리 (L)가 110 m일때 침하속도 (S)에 따른 동수경사를 나타낸 것이다. 연약지반의 측방유동으로 인하여 안정관리상 평균 침하속도의 범위는 2 cm/d까지 정하였다.

수평배수층 두께를 80 cm로 포설할 경우, 간극수가 수평배수층을 통하여 원활히 배출되기 위해 동수경사가 수평배수층 두께보다 작아야 한다. 따라서 수평유공관은 수평배수층 중간 깊이 40 cm에 매설하고, 동수경사를 80 cm 이내로 하기 위한 배수거리를 계산하면 모래 70 cm, 순환 118 cm, 쇄석 126 cm로 나타나 범위를 70, 90, 110, 130 m로 결정하였다. 평균 침

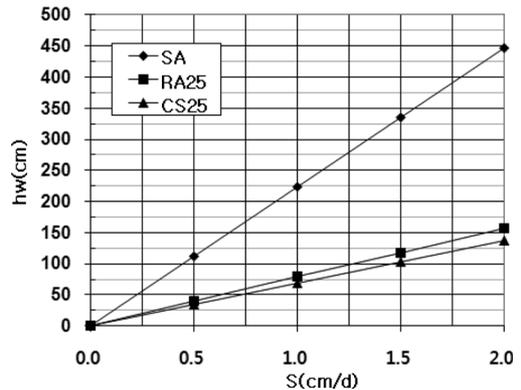


Fig. 10 Comparison between settlement velocity and hydraulic gradient in case  $L=110$  m

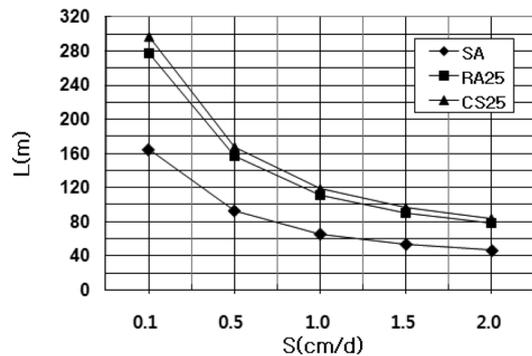


Fig. 11 Comparison between settlement velocity and drainage distance in case  $H_m=80$  cm

하속도가 0.442 cm/d이고 배수거리가 70 m~130 m 범위일 때 동수경사는 모래 40 cm~138 cm, 순환골재 14 cm~49 cm, 쇄석 12 cm~42 cm로 나타났다.

전체적으로, 침하속도가 증가함에 따라 순환골재와 쇄석은 비슷한 동수경사를 나타냈으나 모래는 동수경사가 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 수평배수층의 두께가 80 cm일 때 평균 침하속도에 따른 배수거리를 나타낸 것이다. 모든 수평배수층에서 배수 거리는 침하속도가 0.5 cm/d 까지는 급격하게 감소하고 그 이후는 약간씩 감소하였다. 연약지반 시험시공 구간에서 수평배수층 두께가 80 cm이고, 평균 침하속도가 0.442 cm/d일 때 적절한 배수거리는 모래 99 m, 순환골재와 쇄석은 167~179 m로 나타낼 수 있다.

따라서 모래와 동일한 조건에서 순환골재와 쇄석의 유공관 간격을 검토할 경우, 상대적으로 투수계수가 크기 때문에 유공관 간격(2L)을 크게 할 수 있기 때문에 공사비와 공기를 단축시킬 수 있다. 그러나 성토기간 중에 압밀침하량이 크게 발생되고, 부등침하 및 장비주행에 따른 지지력확보를 위한 여유두께를 감안하여 수평배수층의 두께와 배수거리를 결정하여야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 매트 저항 (mat resistance)을 고려한 수평 유공관 간격 검토

수평 유공관 간격은 동수경사와 매트저항을 고려하여 결정하여야 하고, 부적절한 유공관 설치로 인한 지하수위 상승은 유효토압을 감소시켜 침하량이 작게 나타난다. 또한 압밀지연으로 인하여 시간-침하량 곡선이 일정하게 나타나 압밀이 완료된 것으로 판단하여 여성토 제거시기를 앞당기게 되는 오류를 초래한다. 수평배수층에 도달된 과잉공극수는 시간이 경과함에 따라 천천히 소산되고, 수직방향흐름으로 인한 압밀을 무시하면 수평배수층 중앙에서는 배수거리가 길어져 압밀지연이 발생하게 된다. 압밀지연효과를 검토하기 위해 Yoshikuni (1979)가 제안한 압밀해석방법을 사용하였고, 분석대상지반은 Table 6과 같이 수평배수재를 현장에 포설한 연약지반 개량구간에 대하여 검토하였다.

모래의 포설 규모는 폭 50 m, 높이 80 cm, 길이 50 m이고, 순환골재와 쇄석의 포설 규모는 폭 50 m, 높이 80 cm, 길이 20

m로 중앙부는 25 mm, 성토 비탈면 부분은 40 mm를 포설하였다. 또한 수평배수층 하부에 PP mat (49 kN/m)와 상부에 PET mat (392.4 kN/m)를 포설하고, 유공관은 직경 100 mm 다발관을 모래, 순환골재 및 쇄석 층의 중앙부에 깊이 40 cm 깊이로 5m간격으로 매설하였다.

매트저항 검토 시 수평배수층의 두께 ( $H_m$ )는 50, 80, 100 cm로 변화를 주었고, 수평배수층의 투수계수는 재료별로 실내모형 실험에 의해 구한 수평투수계수를 사용하였다. Yoshikuni (1979) 제안식에 의해 매트저항 ( $L_{mat}$ )이 전혀 없다면 0이 되며 압밀도 90 %에서 압밀지연효과를 계산하면 SCP와 PVD에서의 매트저항은 작아 압밀지연효과가 나타나지 않아 현장에 매설된 수평유공관 간격은 적당한 것으로 판단된다.

Fig. 12는 SCP와 PVD 공법 개량구간에서 수평배수층의 두께 ( $H_m$ )에 따른 매트저항 ( $L_{mat}$ )의 변화를 나타낸 것이다.

수평배수층의 두께가 증가할수록 매트저항은 점차로 감소하였고, 전체적으로 매트저항은 매우 작게 나타났는데 이는 유공관 간격의 영향으로 판단된다. 순환골재와 쇄석은 거의 비슷하고, 모래의 경우 배수저항이 순환골재와 쇄석보다 2.9~3.3배 정도 크게 나타났다. 모래의 경우는 수평배수층의 두께가 80 cm일 때가 50 cm일 때보다 매트저항은 약 2배 정도 작게 나타났다.

Fig. 13 (a)는 드레인 간격 (d)이 2 m이고, 수평배수층 두께가 80 cm일 때 유공관 간격 (B)에 따른 매트저항 ( $L_{mat}$ )을 나타낸 것이다.

유공관 간격이 넓어지면서 모래는 매트저항이 급격하게 증가

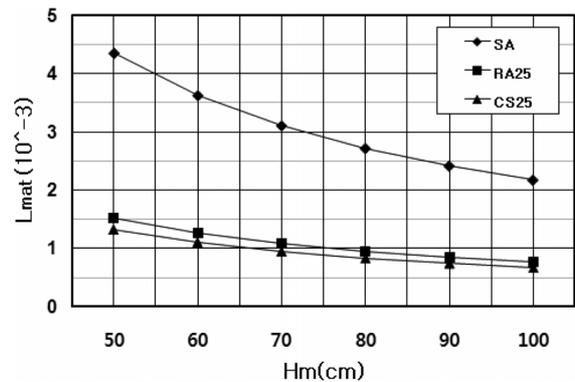


Fig. 12 Comparison between mat resistance and the thickness of a mat for SCP and PVD method

Table 6 The condition of filed test

Depth	Height of embankment	Soft ground improvement method	Scale of field test	Interval of drain	Perforated drain pipe
9.7 m	9.0 m	- Prefabricated Vertical Drain (PVD) - Sand Compaction Pile (SCP)	width : 50 m height : 80 cm length : 20-50 m	2 m	diameter : 100 mm

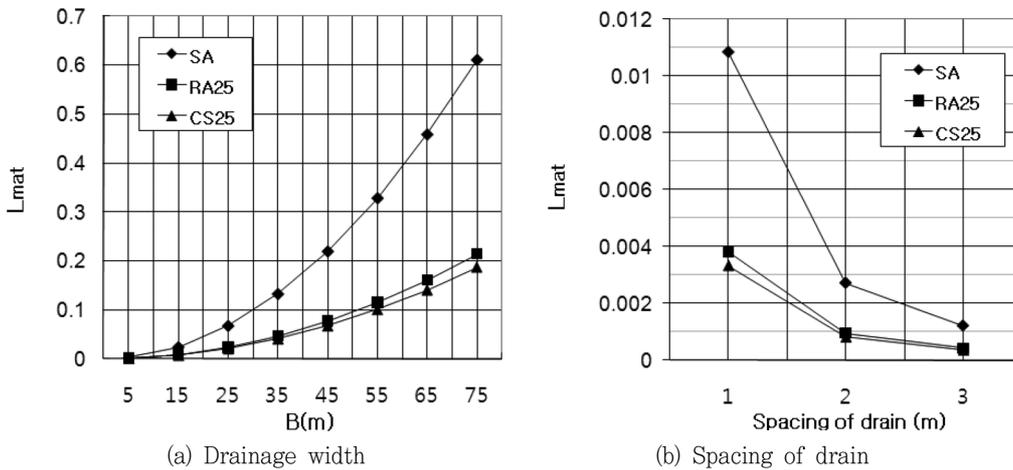


Fig. 13 Comparison between mat resistance, drainage width, and spacing of drain in case  $H_m=80$  cm

하고, 순환골재와 쇄석은 약간씩 증가하는 현상을 나타냈다. 모든 재료에서 매트저항은 작게 나타나 압밀지연은 발생되지 않았으나 순환골재와 쇄석은 모래보다 배수저항에 대한 영향이 작기 때문에 유공관 간격을 넓게 설계할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 13 (b)는 수평배수층 두께가 80 cm이고 드레인 간격(d)을 변화시켰을 경우의 매트저항을 나타낸 것이다. 순환골재와 쇄석의 경우는 드레인 간격에 따라 배수저항이 거의 비슷하게 나타났으나 모래는 큰 차이가 나타났다.

드레인 간격이 1 m일 때는 모래는 순환골재, 쇄석보다 3배 정도 크게 나타나지만, 드레인 간격이 2~3 m일 때는 큰 차이를 나타내지 않았다. 드레인 간격이 1.0 m에서 2.0 m로 증가할 때 매트저항이 약 3~4배 정도 급격하게 감소하였고, 그 이후로는 큰 차이를 나타내지 않아 적절한 드레인 간격을 추정하는데 참고자료로서 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 14는 간격비 (n)와 매트저항 ( $L_{mat}$ )에 따른 수평배수층의 거리별 압밀도를 나타낸 것이다. SCP 공법의 간격비 (n)는 3.22이고 PVD는 34.18이므로 간격비를 5, 35로 정하였고, 매트저항은 가장 큰 값 ( $L_{mat}=0.5$ )을 사용하였다.

SCP 공법 (a)에서는 중앙 ( $x/B=1.0$ )부터 측면 ( $x/B=0.1$ )까지 시간계수에 따른 압밀도는 거의 일정하지만, 중앙부의 압밀도는 작고, 측면으로 갈수록 압밀도가 약간씩 증가하는 것으로 나타났다.

PVD 공법 (b)에서는 중앙부터 측면까지 시간계수에 따른 압밀도는 중앙부에서 압밀도가 약간씩 작아지지만 큰 차이는 나타나지 않았다.

전체적으로 동일한 시간계수에서 수평배수층의 거리에 따른 압밀도는 큰 차이를 나타내지 않았고, 동일한 배수저항 조건에서 SCP 공법에서는 시간계수가 작은 경우에도 이미 압밀이 완

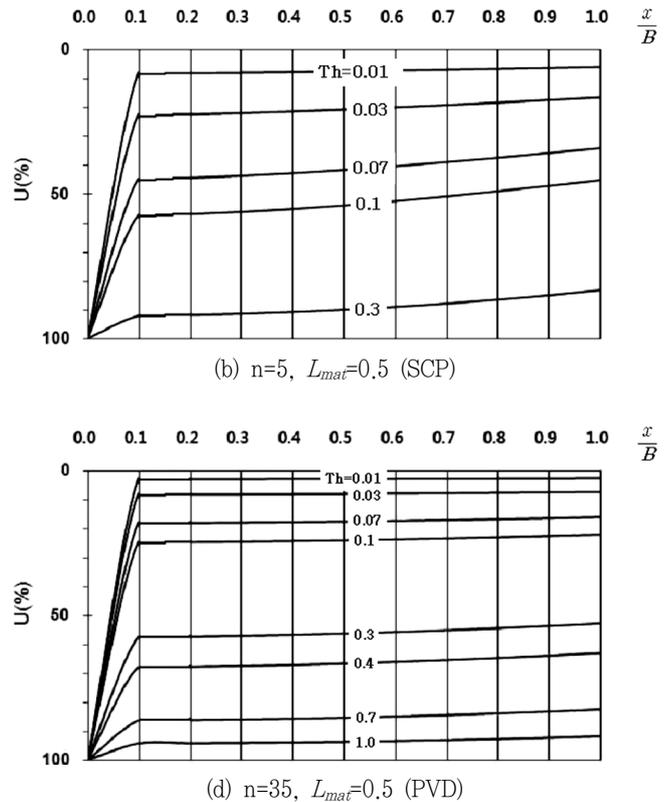


Fig. 14 The isochrones of the degree of consolidation in horizontal drains for the case n and  $L_{mat}$

료되었지만, PVD 공법에서는 시간계수가 1.0이 되어야만 압밀이 완료되는 것으로 나타났다.

### 5. 수평배수재의 품질관리기준 검토

정부에서는 2003년 건설폐기물법을 제정하고, 2009년에 개

정하여 건설현장에서 발생하는 건설폐기물을 자원으로 활용할 수 있게 되었다. 건설폐기물의 재활용 용도는 성토, 복토용이 대부분을 차지하고 있으며, 도로기층용, 콘크리트용, 수평배수용 골재 등과 같이 대량소비 용도로의 재활용 실적은 매우 저조한 실정으로 건설폐기물 자원화를 위한 아이템 개발 및 현장적용 기술 확보가 필요하다. 또한 건설폐기물법 제정으로 순환골재 활용을 위한 법적근간은 확보되었지만, 실제 활용을 위해서는 각종 품질기준, 환경 및 재활용 관련 법률에 대한 이해가 필요하다.

건설폐기물 자원화를 위해 건설폐기물법 제정 이전부터 각종 법를 제정을 통해 순환골재 13개 용도별 품질기준 규정(2009), 의무사용 건설공사의 범위 및 의무사용량 (도로보조기층용으로 재활용용도 골재 소요량의 15 % 이상, 2009)등 건설폐기물을 현장에 활용할 수 있도록 기준을 마련하여, 공공기관의 순환골재 의무사용 권장과 친환경상품으로 순환골재를 등록하는 등 자원화를 위한 노력을 계속해 왔다.

본 논문에서는 현재 연약지반에 수평배수재로 사용 중인 모래의 대체 재료로서 순환골재와 쇄석의 활용성을 검토하는 것이나, 아직까지 연약지반 개량을 위한 모래의 대체 재료로서의 순환골재와 쇄석의 품질관리기준이 정립되지 않았다. 따라서 폐기물관리법, 토양환경 분석법을 참고해서 물리적 특성과 환경 특성 등에 관한 실험을 하고 품질관리기준을 검토하였다.

순환골재를 사용하기 위한 물리적 특성을 분석하기 위해 한국도로공사의 sand mat 시방기준과 국토해양부에서 제정한 순환골재 품질기준 (성토용, 도로보조기층용)을 사용하여 순환골재의 활용성에 대해 판단하였다.

시험결과 순환골재와 쇄석의 물리적 특성은 최대치수, 수정 CBR, 소성지수, 이물질 함유량 등은 순환골재 품질기준 (성토용, 도로보조기층용)에 만족하고 있다. 그리고 sand mat 시방 기준인  $D_{15}$  및  $D_{85}$  입경에서는 순환골재 25 mm, 40 mm 이하, 쇄석 25 mm, 40 mm 이하인 재료는 만족하지 못하고 있다. 그러나 투수계수는 모래 기준보다 ( $10^{-3}$  cm/s) 약 100배 ( $10^{-1}$  cm/s) 크게 나타나 배수성능의 우수성이 실내모형실험을 통하여 검증되었다. 통일 분류법 (USCS)에 의한 입도는 SW, SP, GP, GW 등으로 나타났고, 균등계수 (Cu)는 1~19 범위로 세립분의 함유량이 적게 나타났다.

순환골재와 쇄석은 sand mat 입도 범위에 벗어나 막힘 현상이 발생할 것으로 판단되었다. 실내모형실험과 NAVFAC 기준 (1986)을 참고로 3가지 입도범위기준으로 막힘 현상을 분석한 결과, 상부 성토재를 기준으로 고려하면 순환골재는 기준 ①에서만 막힘 현상이 발생되고 쇄석은 ①, ②, ③의 모든 기준에서 막힘 현상이 발생되었다. 하부 점토를 기준으로 고려하면 순환골재는 10 mm 이하에서만 기준 ②에서 막힘 현상이 없고,

그 이외의 모든 수평배수재에서 막힘 현상이 발생되었다.

$$4 < \frac{D_{15}(RA)}{D_{15}(B)} < 20 \quad \text{①}$$

$$\frac{D_{15}(RA)}{D_{85}(B)} < 5 \quad \text{②}$$

$$\frac{D_{50}(RA)}{D_{50}(B)} < 25 \quad \text{③}$$

여기서,  $D_{15}(B)$ ,  $D_{50}(B)$ ,  $D_{85}(B)$  : 성토재의 15, 50, 85 % 통과하는 직경,  $D_{15}(RA)$ ,  $D_{50}(RA)$  : 순환골재의 15, 50 % 통과하는 직경,  $D_{15}(CS)$ ,  $D_{50}(CS)$  : 쇄석의 15, 50 % 통과하는 직경

수평배수층은 상부 성토재와 하부 점토층의 중간에 존재하기 때문에 입도뿐만 아니라 강우 및 연약지반개량시 시공장비 등에 의해 상부 성토재와 하부 점토가 혼입으로 막힘 현상이 발생되어 배수성능이 감소하게 된다. 이러한 막힘현상을 최소화하기 위한 대책으로 수평배수층 상하부에 PP mat (49 kN/m)를 포설하여 배수성능을 실내모형실험으로 분석한 결과, 순환골재 25 mm와 쇄석 25 mm에 대하여 상하부에 PP mat를 포설한 경우는 포설하지 않은 경우보다 2.2배 정도 배수성능이 향상되었다.

PP mat를 포설하지 않았을 경우에 상부 성토재의 미립자가 수평배수층으로 혼입되는 깊이는 순환골재에서는 약 3~4 cm, 쇄석에서는 약 2~3 cm 정도로 이는 수평배수층 두께의 6.7~13.3 % 범위로 공극이 감소하였다. 또한, 하부 점토가 수평배수층으로 혼입되는 깊이는 순환골재 약 2 cm 정도, 쇄석은 약 1 cm 정도로 이는 수평배수층 두께의 3.3 %~6.7 % 범위로 공극이 감소하여 전체적으로 토사유입에 의한 순환골재 및 쇄석의 통수단면감소는 작은 것으로 나타났다.

Fig. 15는 순환골재와 쇄석에 대한 입도기준 범위를 나타낸 것이다.

입경 범위는  $D_{15}$ ,  $D_{50}$ ,  $D_{85}$  기준으로 상·하한치 범위를 설정하였고, 각 입경범위에서 시험에 이용한 수평배수재의 입도 곡선 오차를 고려하여 다음과 같이 결정하였다.

순환골재 : ①  $0.2 < D_{15}(RA) < 20$  ②  $0.5 < D_{50}(RA) < 30$  ③  $2.0 < D_{85}(RA) < 40$

쇄석 : ①  $1.0 < D_{15}(CS) < 20$  ②  $5 < D_{50}(CS) < 30$  ③  $10 < D_{85}(RA) < 40$

이상과 같은 물리적 시험결과를 바탕으로 순환골재와 쇄석의

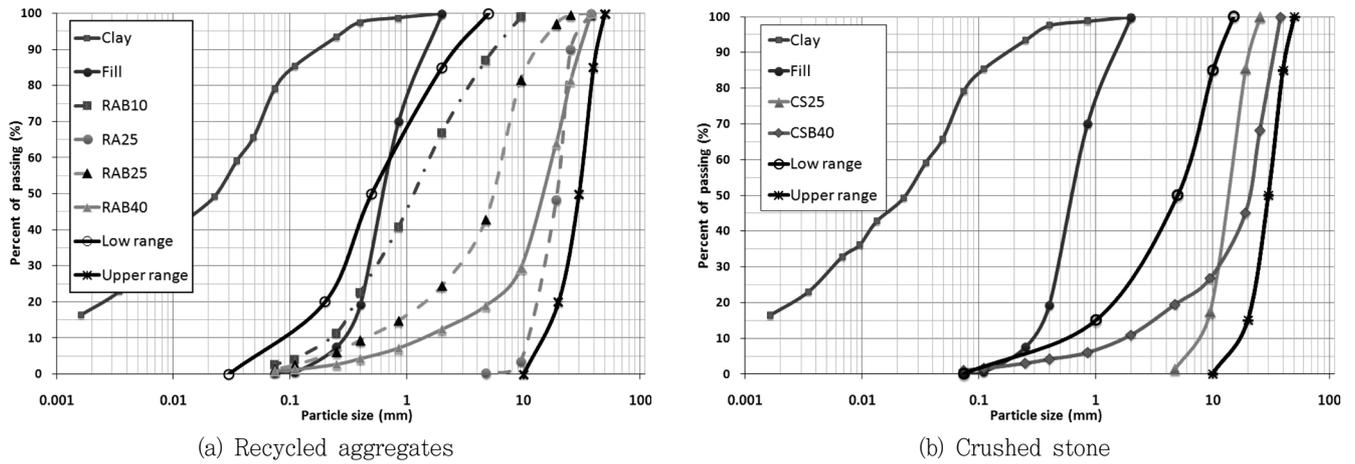


Fig. 15 The range of particle size distribution for various drains

Table 7 Quality management criterion of horizontal drains

Classification	Criterion of sandmat <sup>1)</sup>	Criterion of recycled aggregate (subbase) <sup>2)</sup>	Criterion of recycled aggregate (embankment) <sup>3)</sup>	Sand	Recycled aggregates					Crushed stone		
					below 10 mm	25 mm	below 25 mm	below 40 mm	criterion	25 mm	below 40 mm	criterion
Max. diameter (mm)	-	< 50	< 100	< 100	< 10	< 25	< 25	< 40	< 40	< 25	< 40	< 40
Modified CBR	-	> 30	> 10	47	-	47	-	-	> 30	-	47	> 30
Passing 5 mm (%)	-	30-70	25-100	100	87.01	0.27	42.83	19	0-100	1.31	19.51	0-50
Passing 0.08 mm (%)	-	2-10	0-25	4.35	2.71	0	1.31	0	0-10	0	1.17	0-10
PI	-	< 6	< 10	NP	NP	NP	NP	NP	< 6	NP	NP	< 6
Different material content (%) (organic)	-	< 1.0 (volume)	< 1.0 (volume)	0.06	-	-	-	1.06	< 1.0	0.2	-	< 1.0
USCS	-	-	-	GP	SP	SW	GP	GW	-	GP	GW	-
Cu	-	-	-	2.88	7.26	1.83	14.77	12.85	-	1.8	13.41	-
D <sub>15</sub> (mm)	0.075-0.9	-	-	0.13	0.3	12.6	0.86	3	0.2-20	9	3	1.0-20
D <sub>50</sub> (mm)	-	-	-	0.29	1.18	19.41	5.5	15.88	0.5-30	14.41	21	5-30
D <sub>85</sub> (mm)	0.4-8	-	-	0.36	4.4	23.5	10.1	27.5	2.0-40	18.8	31.4	10-40
Passing No. 200 (%)	< 15	-	-	4.35	2.71	0	1.31	0.88	< 10	0	1.17	< 10
Max. dry density (t/m <sup>3</sup> )	-	-	> 1.5	1.524	1.711	1.362	1.862	1.873	> 1.5	-	2.032	> 1.5
Coefficient of permeability (cm/s)	> 1.0×10 <sup>-3</sup> (k <sub>v</sub> )	-	-	7.8×10 <sup>-2</sup> (k <sub>h</sub> )	1.43×10 <sup>-1</sup> (k <sub>h</sub> )	2.23×10 <sup>-1</sup> (k <sub>h</sub> )	3.12×10 <sup>-1</sup> (k <sub>h</sub> )	3.26×10 <sup>-1</sup> (k <sub>h</sub> )	> 1×10 <sup>-2</sup> (k <sub>h</sub> )	2.55×10 <sup>-1</sup> (k <sub>h</sub> )	1.65×10 <sup>-1</sup> (k <sub>h</sub> )	> 1×10 <sup>-2</sup> (k <sub>h</sub> )
Gs	-	-	-	2.62	2.65	2.65	2.65	2.65	-	2.67	2.67	-

<sup>1)</sup> Ministry of Land of the Korea Highway Corporation, criterion of sand mat

<sup>2)</sup> Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, road sub-base, RSB-2 (2009)

<sup>3)</sup> The sub-ground within 100cm from the highest surface of filling

품질기준을 검토한 결과는 Table 7과 같다.

Table 8은 순환골재와 쇄석의 환경 특성을 분석하기 위해 국내에서 일반적으로 적용되고 있는 폐기물 공정시험법에 의한 시험결과를 나타낸 것이다.

국토해양부의 순환골재 품질기준 (성토용, 복토용)에서는 순환골재를 사용 시 환경에 유해한 영향을 미치는지 확인하기 위하여 토양환경보전법 시행규칙 제1조의 5 (토양오염우려기준)에 의한 시험을 실시하여 유해한 영향이 없어야 한다고 명시하였다.

Table 8 Environment management criterion of horizontal drains

Material (mg/kg)	Soil environmental conservation law [3 regions] <sup>1)</sup>	Management law of waste. [attached sheet 1] <sup>2)</sup>	Sand	Recycled aggregate : < 40 mm	Crushed stone : 25 mm	Quality criterion (horizontal drains)
pH	-	-	9.27	11.58	10.42	pH < 12.5
Organic	-	-	0.06	1.06	0.2	< 1.0 (volume)
Cu	2,000	3 이하	0.505	0.315	0.115	2,000
Cd	60	0.3 이하	0.145	0.2	0.19	60
Pb	700	3 이하	1.585	1.13	0.53	700
Hg	20	0.005 이하	0	0	0	20
As	200	1.5 이하	0.033	3.364	2.937	200
Zn	2,000	-	13.486	80.985	21.548	2,000
Ni	500	-	0.571	5.447	16.535	500
F	800	-	17.214	156.325	235.552	800

<sup>1)</sup> 3 regions : industrial, road, railroad, embankment, parking and gas station site, Ministry of Environment (2009)

<sup>2)</sup> A toxic sub-stance including specified waste, Ministry of Environment (2009)

따라서 모래, 순환골재 및 쇄석이 환경에 미치는 영향을 분석하기 위해 현장시험시공에 사용된 대표시료 (모래, 순환골재 40 mm 이하, 쇄석 25 mm)를 선정하여 화학적 시험을 실시하였다.

각종 품질기준에 제시된 유기물은 모래, 순환골재, 쇄석은 품질 기준치 1.0보다 낮게 나타났다. 구리와 카드뮴, 납은 2가지 기준치보다 낮았고, 수은은 전혀 검출되지 않았다. 비소는 토양환경보전법 시행규칙의 토양오염우려기준보다는 낮았고, 지정 폐기물관리법의 기준치보다 순환골재와 쇄석은 2배 정도 높게 나타났다. 수평배수재가 도로에 사용되므로 토양환경보전법 중 [3지역]을 기준으로 판단하면 문제가 없는 것으로 나타났다. 아연과 니켈, 불소는 폐기물관리법 기준치보다 훨씬 낮은 수치를 보였다. 시행규칙 등에는 pH에 관한 적절한 기준이 없지만 콘크리트용 순환골재는 알칼리양의 과다로 콘크리트 품질에 유해한 성분이 포함될 수 있어 선정시험을 실시하여야 하고, 강알칼리에서는 생태계에 영향은 미칠 수 있으므로 중성화 하도록 하여야 하나 현실적으로 시설장비가 설치되어야 하는 등의 어려움이 있다. 시험결과 9.0 < pH < 12.0 범위에 포함되어 pH < 12.5가 되어야 할 것으로 판단되고, 향후 연구를 통하여 적절한 기준을 수립해야 할 것으로 보인다.

위와 같은 시험결과를 기초로 순환골재와 쇄석은 유해물질의 농도가 각종 규제기준을 밑도는 것으로 나타나 수평배수재로 사용함에 있어 환경적인 영향은 미미할 것으로 판단된다. 특히, 순환골재는 생산과정에서 크러셔로 가공된 후, 유기물과 이물질의 제거를 위해 파쇄 및 세척과정을 거치기 때문에 환경적으로 유해한 물질이 용출될 가능성이 적고, 용출된 물질도 배수층을 통한 분산, 이동과정에서 연약지반에서 배출된 공극수와 희석되기 때문에 환경적인 유해요소가 감소될 것으로 판단된다.

현재까지 수평배수재로서 순환골재와 쇄석에 대한 환경적인 품

질관리기준이 아직 정립되어 있지 않고, 수평배수재의 용도가 주로 도로인 경우를 감안하여 토양환경보전법 시행규칙 [3지역]을 바탕으로 수평배수재의 환경특성 기준을 검토하면 Table 8과 같다.

## V. 결 론

본 연구에서는 연약지반에서 모래의 대체 재료로서 순환골재와 쇄석의 활용가능성에 대해 실내모형실험을 실시하고, 수평 및 연직 투수계수의 비교, 수평 유공관 설치에 따른 배수성능, 수평배수층 두께와 침하속도에 따른 배수거리 및 동수경사와 매트저항을 고려한 수평유공관의 간격 등을 비교 분석하여 합리적인 설계방법을 제시하고자 한다. 또한 순환골재와 쇄석의 물리적·환경 특성분석 등을 고려하여 연약지반에 적합한 수평배수재의 품질관리기준을 제시하고자 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 순환골재의 수평투수계수 ( $k_h$ )는 모래보다 1.8~5.1배, 수직투수계수 ( $k_v$ )는 1.2~2.7배 정도 더 크게 나타났고, 쇄석의 수평투수계수 ( $k_h$ )는 2.1~3.3배, 수직투수계수 ( $k_v$ )는 2.0~3.0배 정도 더 크게 나타났다. 따라서 순환골재 및 쇄석은 기존 수평배수재로서 사용되어 왔던 모래의 대체 재료로 충분한 배수성능을 나타내서 현장 적용성이 우수할 것으로 평가되었다.

2. 수평유공관을 매설하였을 경우의 수평투수계수는 매설하지 않았을 경우보다 1.9~6.8배 정도 커서 현장 매설시에는 매우 양호한 효과를 나타낼 것으로 평가되었다.

3. 수평배수층의 간극수가 원활히 배출되기 위한 합리적인 배수거리는 배수층의 두께가 증가할수록 직선적으로 증가하고, 순환골재는 모래보다 1.7배, 쇄석은 1.8배 정도 더 크게 나타나

로 모래와 동일한 조건에서 순환골재와 쇄석은 유공관 간격을 크게 할 수 있어 공사비와 공기를 단축시킬 수 있다.

4. 현장시험시공에서 SCP공법과 PVD공법은 압밀지연이 없는 것으로 나타났고, 수평배수층의 두께가 증가할수록 매트저항은 점차로 감소하여 모래는 순환골재와 쇄석보다 2.9~3.3배 정도 크게 나타났다.

5. 수평배수재의 매트저항은 드레인 타입간격이 1.0 m에서 2.0 m로 증가할 때 약 3~4배 정도 급격하게 감소하였고, 동일한 시간계수에서 수평배수층의 거리에 따른 압밀도는 큰 차이를 나타내지 않았다.

6. 순환골재와 쇄석의 입도기준 범위와 물리적·환경적 특성 분석을 바탕으로 연약지반에서 수평배수재를 활용할 수 있도록 적합한 품질관리기준을 제시하였다.

이 논문은 설계·시공 최적화를 위한 연구사업의 일부로 대전지방국토관리청과 동부건설(주) 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

## REFERENCES

1. Kim, H. T., S. K. Kim, and K. Y. Kong, 2001. Required discharge capacity of horizontal drains for fills on the soft ground, *Journal of the Korean Geotechnical Society* 17(5): 83-96 (in Korean).
2. Korea Construction Resource Association, 2009. Recycled aggregates and recycled asphalt concrete superiority application casebook, <http://www.koras.org>.
3. Korea Land Corporation, 1997. A study on the soft ground improvement method and settlement measurement (in Korean).
4. Lee, D. W., S. J. Kim, G. H. Oh, J. H. Lim, and J. J. Lee, 2009. Evaluation of the applicability of recycled aggregates and crush rock as horizontal drains materials for soft ground, *Proceedings of the 2009 KSAE Annual Conference* (in Korean).
5. Lee, B. J., Y. C. Kwon, and J. K. Lee, 2007. Practical design of the sandmat considering consolidation settlement properties, *Journal of Korean Geoenvironmental Society* 8(5): 31-38 (in Korean).
6. Lee, J. Y., 2008. A study on utilization of recycled aggregates as lateral drain for soft ground improvement, *J. of the Korean Geotechnical Society* 24(10): 5-15 (in Korean).
7. Ministry of Environment, 2009. The law enforcement regulation about the recycling promotion of the construction waste, <http://www.me.go.kr>.
8. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009. The quality criterion of recycled aggregates, <http://www.mltm.go.kr>.
9. National Environmental Research Institute, 2007. The present of state of occurrence and disposal of waste of the national, 2006 annual report.
10. NAVFAC, 1986. Design manual for Soil mechanics 7.1, Dept. of the Navy, Naval facilities engineering command, 272-278.
11. Onoue, A., 1988. Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consolidation, *Soil and Foundations* 28(4): 165-174.
12. The National Assembly of the Republic of Korea, 2009. The law about the recycling promotion of the construction waste, <http://www.assembly.go.kr>.
13. Yoshikuni, H., and H. Nakanodo, 1974. Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability, *Soils and Foundation* 14(2): 35-46.