

연직배수재로서 순환골재와 쇄석의 활용방안

Utilization of Recycled Aggregates and Crushed Stone as Vertical drains

이달원¹⁾, Dal-Won Lee, 이정준²⁾, Jung-Jun Lee, 김시중²⁾, Si-Jung Kim, 이영학²⁾, Young-Hak Lee

¹⁾ 충남대학교 지역환경토목학과 교수, Professor, Dept. of Agricultural Engineering, Chungnam Univ.

²⁾ 충남대학교 지역환경토목학과 석사과정, Graduate student, Chungnam University.

SYNOPSIS : In this study, a laboratory model test on utilization of recycled aggregates and crushed stone as vertical drains to use alternative material of sand in soft ground is performed. The vertical and horizontal coefficient of permeability of the recycled aggregates and crushed stone showed largely 1.2~4.0 times and 3.0~3.3 times greater than sand, respectively. Therefore, it showed enough to be an alternative material to the sand which had been being used as the vertical and horizontal drainage material before. The variations of pore water pressure with time showed constantly regardless of the load in all vertical drainage materials. When water level drops suddenly, the pore water pressure of the recycled aggregate and crushed aggregate is reduced to nearly zero. Therefore, it was applicable to the field because discharge capacity was similarity to that of sand. The settlement in crushed aggregates and recycled aggregate decreases gradually with the load increase. When water level drops suddenly, earth pressure in all drains materials was evaluated the equivalent drainage capacity similarity to sand because it show approaching the nearly zero.

Key words: Recycled aggregates, Crushed stone, Drain material, Pore water pressure, Settlement

1. 서 론

최근 국토의 효율적인 이용을 위해서 항만공사와 배후단지 조성 사업 등의 연약지반의 개발이 광범위하게 진행되고 있고, 이들 조성 사업에 막대한 양의 건설재료의 수급이 요구되고 있으나 천연자원의 고갈과 환경파괴로 인해 많은 문제점이 대두되고 있다. 일반적으로 연약지반 상에 축조되는 대규모 단지 개발과 도로 건설시 압밀침하를 촉진하기 위해서 수평 및 연직배수재로서 모래를 시공하는 것이 일반화되어 있다.

그러나 모래 채취원이 원거리에 있거나, 채취량, 가격 등의 변동에 따라서 시공과정 및 전체공정을 좌우하는 중요한 요인이고, 양질의 재료가 확보될 수 있는 모래 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 연직 및 수평 배수재로서 재이용하기 위한 방안이 요구되고 있다.

매년 심각해지는 환경공해와 설 틈 없이 쏟아지는 건설폐기물의 처리는 국내외적으로 심각한 문제로 대두되고 있다. 따라서 연약지반에 대한 효과적인 개량뿐만 아니라 환경적으로 무해하고 가용 건설 폐기물을 발굴하여 건설재료로 활용하기 위한 많은 관심과 연구가 모아지고 있다.

순환골재를 활용한 연구 결과에서 윤 등(2008)은 순환골재를 활용한 연약지반 개량용 다공질 콘크리트

말뚝의 전단 특성을 실내 삼축압축시험을 실시하여 활용성을 평가하고자 하였다. 박 등(2007)은 표면처리방법을 이용한 순환골재의 품질향상에 관한 실험적 연구를 통하여 순환골재의 물성을 비교 고찰하였다. 김 등(2005)은 건설폐기물 재활용 촉진을 목적으로 국내 건설폐기물의 재활용 실태를 조사, 분석한 결과를 정리하였다.

2007년도 우리나라의 건설폐기물 발생량은 172,006 톤/일로 전체폐기물 중 약 5%를 차지하고 있고, 계속 증가하여 2012년 279,489 톤/일에 이를 것으로 추정된다(2009 한국건설자원협회).

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 5,115 천톤/년)를 차지하고 있다.

이에 100,000 톤/일 이상 발생하고 있는 폐 콘크리트를 재활용하여 생산되고 있는 순환골재는 국내의 유수의 학회 연구보고 결과, 환경성 및 활용성에 대한 가치가 높게 평가되고 있다.^{1),2)} 따라서 수요급증으로 인한 단가 상승과 자원고갈로 인한 환경적, 경제적 문제를 해결하기 위해서 모래 대신 이용할 수 있는 순환골재 및 쇄석 등의 대체재료 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

1990년대 초부터 폐콘크리트로부터 순환골재를 생산하기 위해서는 일반적으로 수집된 폐 콘크리트를 파쇄 하여 채움재 및 노반재로 사용하는 기초적 기술만을 활용하였다. 1990년대 말부터 정부의 폐기물 정책에 맞추어 폐콘크리트의 재활용 기술이 급성장해 왔으며, 2003년 12월 『건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률(이하 건설폐기물법)』을 제정하여 건설현장에서 발생하는 건설폐기물중 순환골재 사용의 법제화가 가능해졌고, 그 이후 폐콘크리트를 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 촉진법 등에 의해 구분하고, 도로보조기층용으로 순환골재 소요량의 15%를 사용하도록 법률로서 고시하고 있다(2009 b 국토해양부, 환경부).

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, 연직 및 수평배수재 등과 같은 고부가가치용도 (24.8%)의 재활용 실적은 매우 저조한 실정이다.

그 동안 연약지반에 대한 압밀특성과 개량공법 등에 관해서는 많은 연구가 진행되어 왔지만, 연직 및 수평배수재의 대체공법으로서 순환골재와 쇄석에 관한 연직배수재의 비교분석 연구가 미약하여 품질관리기준 뿐만 아니라 실내 및 현장시험 사례가 거의 없어 실용화 되지 않고 있다 (김 등, 2001; 이 등, 2007; 이 등, 2008; 이 등, 2009; 정 등, 1996).

따라서 본 연구에서는 연약지반개량시에 연직 및 수평배수재로서 이용되고 있는 모래의 대체 재료로서 순환골재와 쇄석의 활용가능성에 대해 실내모형실험을 실시하고, 연직배수재로 사용하였을 경우에 공극수압 변화에 따른 배수성능 등을 비교 분석하여 현장적용 가능성을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용시료

실험에 사용한 점토는 연약지반현장에서 채취한 교란시료를 이용하여 물리적 성질, 역학적 성질, 압밀 시험을 실시하였으며, 그 결과는 표 1과 같다.

통일분류법(USCS)상 CL로 분류되고, 자연함수비(w_n)가 액성한계(LL)보다 크고, 액성지수(LI)가 1보다 커서 압축성이 크고 유동가능성이 있는 점토로 나타났다.

표 1. 사용된 점토의 공학적 성질

Depth (m)	W_n (%)	G_s	Atterberg limits		Shear parameters (UU)	Consolidation test					k_v (cm/s)	U.S.C.S
			LL	PI	c (kPa)	Pc (kPa)	C_c	e_o	C_v (cm^2/s)	C_a		
2.0~4.0	45.9	2.76	26.4	8.6	29.43	20.0	0.206	0.980	1.21E-3	0.016	3.7E-7	CL

표 2. 배수재의 물리적 성질

Sample	Symbol	Particle size	Passing No.200 (%)	Angle of internal friction, ϕ	k_v (cm/s)	D_{15} (mm)	D_{85} (mm)	Cu	U.S.C.S
Sand	SA	2mm	4.35	35	2.86E-02	0.13	0.36	2.88	SP
Recycled aggregate	RAB10	below 10mm	2.71	40	3.33E-02	0.3	4.4	7.26	SW
	RA25	25mm	0		6.24E-02	12.6	23.5	1.83	GP
	RAB25	below 25mm	1.31		7.03E-02	0.86	10.1	14.77	GW
Crushed stone	CS25	25mm	0	42.5	8.60E-02	9	18.8	1.8	GP

연직 배수재로 사용한 모래(해사), 순환골재와 쇄석은 충남 당진군 석문면에서 채취 및 구입하였고, 사용된 시료는 모래, 순환골재 10mm이하, 25mm이하, 25mm와 쇄석 25mm로 총 5종으로 그의 물리적 특성과 입도곡선은 표 2 및 그림 1과 같다.

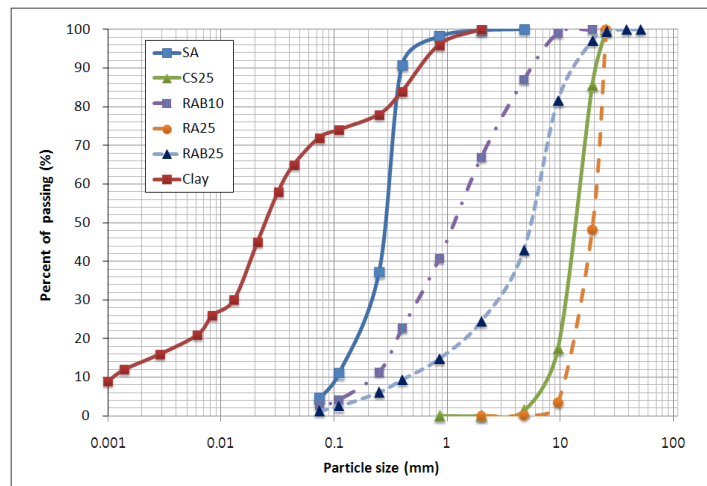


그림 1. 입도곡선

2.2 연직배수재의 실험

2.2.1 모형장치

모형실험장치는 높이(H) 100cm, 폭(W) 80cm, 길이(L) 200cm의 크기로 현장에서 채취된 교란된 점토를 균질하게 하고 패류, 유기물질, 사력분을 제거하기 위하여 No.4 체에서 통과시켜 수중에서 약 20cm

두께로 자중압밀시킨 후, 약 3개월 후에 같은 방법으로 40cm를 추가로 수중에서 자중압밀시켜 총 75cm의 실내모형을 축조하였고, 그 후 약 9년 동안 압밀시켰다.

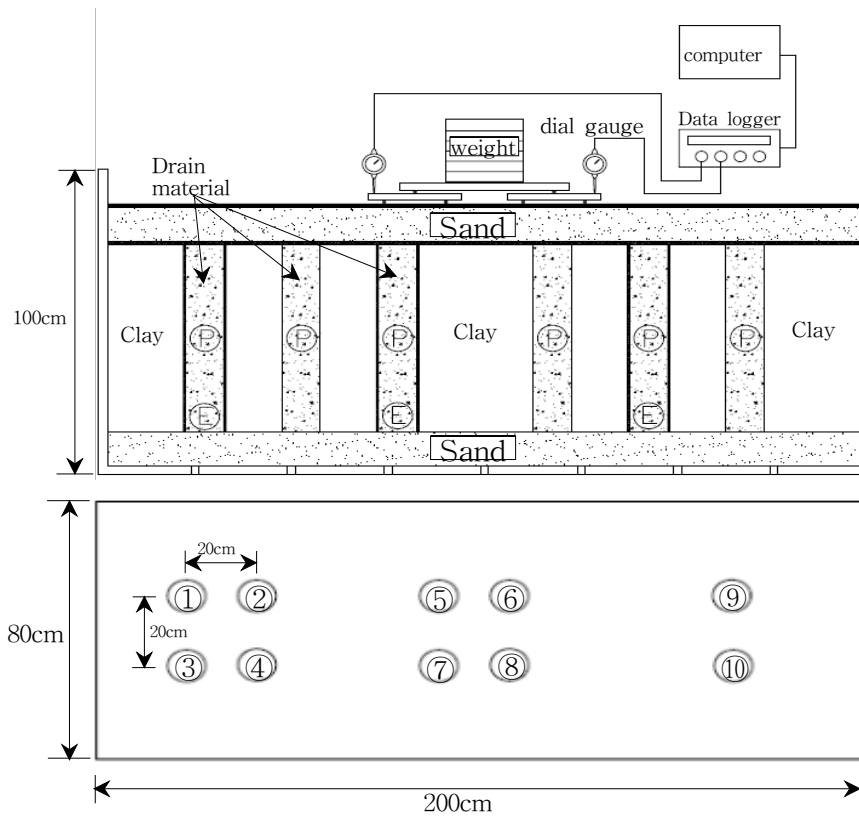
2.2.2 측정 장치 및 하중재하

모형지반의 상부와 하부는 모래와 부직포를 약 17cm정도 부설하여 양면배수조건으로 하였고, 측면마찰을 감소시키기 위하여 비닐에 그리스를 발라 모형지반의 측면마찰을 경감시켰다.

연직배수재의 투입은 특별히 제작된 원형관을 이용하여 직경 11cm 로 보링 후 원형관 안쪽의 점토를 제거한 후 배수재를 투입하였고, 토조의 밑면에는 배수구멍을 뚫어 배수재내의 물이 일시에 배수되도록 하였다. 모형지반은 그림 2와 같이 각 연직배수재의 상부에는 침하계, 중앙에는 공극수압계(Ⓟ), 하부에는 토압계(ⓔ)를 설치하고, 측정기기 매설 후 PP매트를 한 겹으로 덮은 후 모래를 10cm 부설 하였다. 측정장치는 전기식 공극수압계(일본 Kyowa사 50 kPa), 전기식 토압계(일본 SSK 사, 1.0kgf/cm²)와 침하계 (LVDT)는 Data Logger에 연결하여 컴퓨터에 자동 저장 되도록 하였다.

상부모래층 위에는 형강을 부설하여 상부하중이 모형지반에 균등하게 전달되도록 하였다. 하중은 4일마다 75kg씩 증가시켜 75kg, 150kg, 225kg, 300kg, 375kg, 425kg을 약 25일 동안 재하 시켰다.

unit : cm



No	Type	No	Type	No	Type	No	Type
①	FSA(Filter+Sand)	④	RAB10	⑦	FRA25(Filter+RA25)	⑩	CS25
②	SA(Sand)	⑤	FRAB25 (Filter+RAB25)	⑧	RA25		
③	FRAB10 (Filter+RAB10)	⑥	RAB25	⑨	FCS25(Filter+CS25)		

그림 2. 실내모형장치와 연직배수재의 종류

2.2.3 연직배수재 배치

연직배수재의 단면은 그림 2와 같이 직경은 10cm이고, 배치간격은 20cm의 정사각형 배치로 타입하였다. 연직배수재를 타입한 후 시간이 경과함에 따라 점토가 배수재속으로 혼입하여 배수성을 감소시키는 clogging 현상을 고찰하기 위하여 2가지 형태로 구분하여 타입하였다. 첫 번째는 특별히 제작된 원형 철망속에 연직배수재를 넣어 시험중에 점토 이동이 원활하게 한 경우와 두 번째는 PBD 공법에 사용되는 filter(규격 : 100×4mm, 유효구멍크기(O_{90}) : 90 μ m이하, 투수계수 1×10^3 cm/s 이상)속에 연직배수재를 넣어 점토입자의 이동을 차단한 경우와의 차이점을 비교하였다.

2.3. 수평 및 연직 투수실험

수평투수계수를 구하기 위한 대형 토조는 그림 3과 같이 높이(H) 100cm, 폭(W) 130cm, 길이(L) 132cm로 콘크리트로 제작하였다. 토조 전면에는 2개의 아크릴을 설치하였고, 유량공급수조에서 조절된 물은 pipe를 통해 수평으로 흐르도록 하였다.

물 공급은 토조 내에 일정하게 유량을 공급 시켜줄 수 있도록 플라스틱 원형수조를 설치하였고, 직경(\varnothing) 50mm 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 실험동안의 변화량을 측정하였다. 연직투수계수를 구하기 위한 원형토조는 직경(\varnothing) 19.5cm, 길이(L) 39~44cm를 사용하였다.

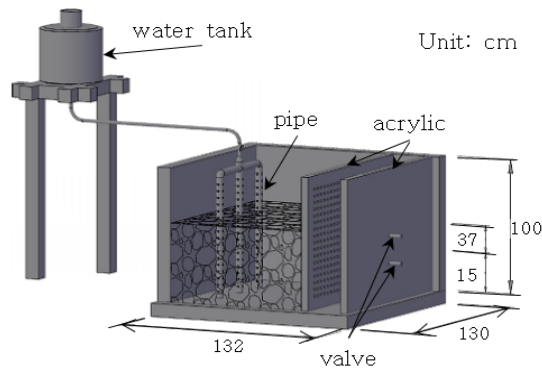


그림 3. 수평배수실험 장치

3. 결과 및 고찰

3.1 배수재별 수평 및 연직투수계수

연약지반에서 수평 및 연직배수재로서 사용되는 모래와 순환골재, 쇄석의 투수계수를 비교하기 위하여 투수시험을 실시하였다.

표 3 및 그림 4는 재료별 수평(k_h) 및 연직투수계수(k_v)를 나타낸 것이다.

그림 4 (a)는 재료별 수평투수계수를 나타낸 것으로 모래를 기준으로, 순환 10mm 이하는 1.8배, 순환 25mm는 2.9배, 순환 25mm 이하는 4.0배 정도, 쇄석은 3.3배 정도 높은 것으로 측정되었다.

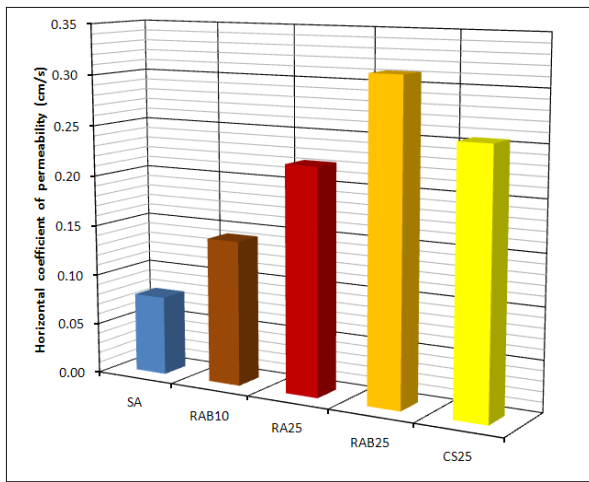
그림 4 (b)는 재료별 연직투수계수를 나타낸 것으로 모래를 기준으로, 순환 10mm 이하는 1.2배, 순환 25mm는 2.2배, 순환 25mm 이하는 2.5배 정도, 쇄석은 3.0배 정도 높은 것으로 측정되었다.

전체적으로 연약지반에서 연직 및 수평배수재로서 순환골재와 쇄석의 입경별 투수시험을 모래를 기준으로 비교·분석한 결과, 순환골재의 경우에 수평투수계수는 1.8~4.0배, 연직투수계수는 1.2~2.5배 정도 더 크게 나타났고, 쇄석의 경우에 수평투수계수는 3.3배, 연직투수계수는 3.0배 정도 더 크게 나타났다.

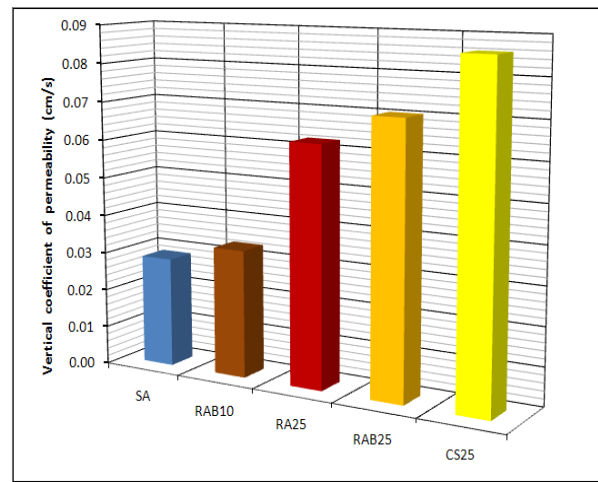
따라서 기존에 연직 및 수평배수재로서 사용되어 왔던 모래의 대체 재료로서 순환골재 및 쇄석은 충분한 배수성을 나타내어, 현장 적용 시 우수한 배수재로서 사용가능할 것으로 평가되었다.

표 3. 배수재별 수평 및 연직투수시험 결과

Sample	Symbol	Particle size	k_h (cm/s)	k_v (cm/s)
Sand	SA	2mm	7.82E-02	2.86E-02
Recycled aggregate	RAB10	below 10mm	1.43E-01	3.33E-02
	RA25	25mm	2.23E-01	6.24E-02
	RAB25	below 25mm	3.12E-01	7.03E-02
Crushed stone	CS25	25mm	2.55E-01	8.60E-02



(a) 수평투수계수



(b) 연직투수계수

그림 4. 배수재별 수평투수계수와 연직투수계수

3.2 공극수압 변화에 따른 배수성능 평가

연약지반에 연직배수재를 타입하였을 경우 배수성능을 평가하는 방법 중의 한 가지는 동일한 재하조건에서 일시에 배수를 허용하였을 경우(수위 급강하시) 연직배수재 내의 공극수압이 얼마만큼 감소하느냐에 따라서 각 재료의 우수성을 판단할 수 있다.

그림 5는 모래, 순환골재 10mm이하, 25mm이하, 25mm와 쇄석 25mm로 총 5종에다 철망속에 연직배수재를 넣어 점토 이동이 원활하게 한 경우와 PBD filter속에 연직배수재를 넣어 점토입자의 이동을 차단한 경우와의 차이점을 비교하기 위하여 10개의 배수재에 대한 공극수압변화량을 나타낸 것이다.

각 연직배수재에서 공극수압은 하중변화와는 큰 차이없이 일정한 현상이 나타났고, 순환25mm이하(RAB25), Filter+순환25mm이하(FRAB25), Filter+순환25mm(FRA25), Filter+쇄석25mm(FCS25), 쇄석 25mm(CS25)은 공극수압이 20gf/cm² 이하로 다른 배수재보다 작고 변화량도 작게 나타났다.

모래와 순환 10mm에서는 공극수압이 다른 순환골재와 쇄석보다 크게 나타난 이유는 토립자의 공극이 상대적으로 작기 때문으로 판단된다.

수위를 급강하 하였을 경우 7종(모래(SA), Filter+순환10mm이하(FRAB10), Filter+순환25mm이하, 순환 25mm, Filter+순환25mm, 쇄석25mm, Filter+쇄석25mm)에서는 공극수압은 0~10gf/cm² 범위로 감소하였고, 2종(순환10mm이하, 순환25mm이하)에서는 10~20gf/cm² 범위로 감소하였다.

이와 같이 순환골재와 쇄석에서 수위 급강하시 공극수압이 0에 가깝게 감소하는 것은 모래와 동등한 배수 성능을 나타낸다는 것을 의미한다.

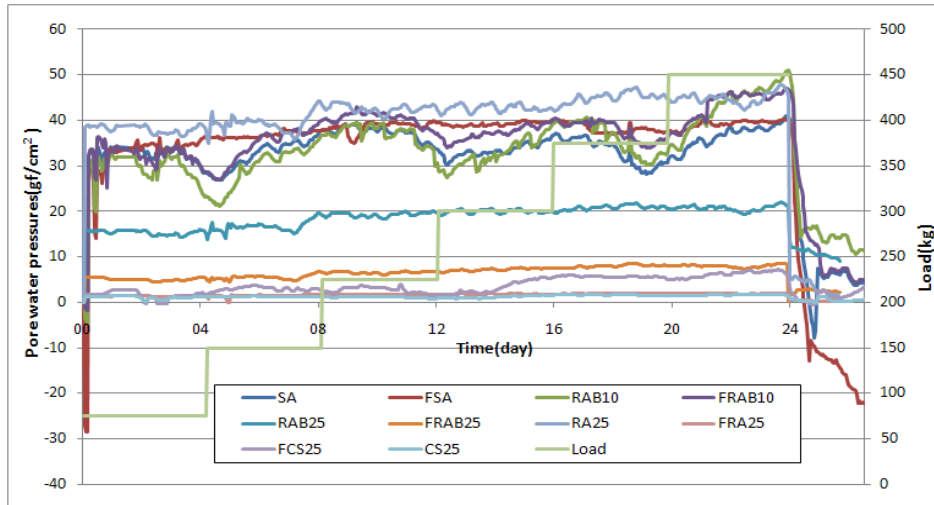


그림 5. 시간에 따른 공극수압의 변화

그림 6은 24일 동안 일정한 상태로 수위를 유지한 후 하부로 일시에 배수시켰을 경우 각 재료별 공극수압 감소폭을 나타낸 것이다.

모래와 Filter+모래에서는 공극수압의 감소폭이 30~50gf/cm²범위, 순환10mm이하와 Filter+순환10mm 이하에서는 30~40gf/cm²범위로 감소하였다. 순환25mm와 Filter+순환25mm에서는 2~40gf/cm²범위, 순환 25mm이하와 Filter+순환25mm이하에서는 5~10gf/cm²범위로 감소하였다.

모래와 순환10mm 및 순환25mm에서는 초기 공극수압이 크고 시간에 따라 일정하게 유지하다가 수위 급강하로 인해 감소폭이 다른 순환골재와 쇄석보다 크게 나타났다.

철망속에 연직배수재를 넣어 점토 이동이 원활하게 한 경우와 PBD filter속에 연직배수재를 넣어 점토 입자의 이동을 차단한 경우에서 공극수압은 큰 차이점을 나타내지 않았다. 그러나 시험기간이 비교적 짧고 실내모형실험의 한계로 공극수압은 큰 차이점을 나타내지 않았으나, 실제 현장에 적용하였을 경우는 filter 작용에 의해 clogging 현상을 방지할 수 있고, 성토하중에 의한 측방진단파괴를 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

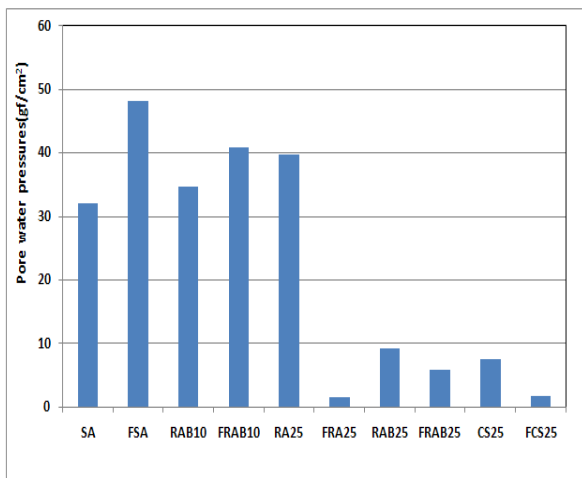


그림 6. 수위급강하 조건에서 공극수압의 감소

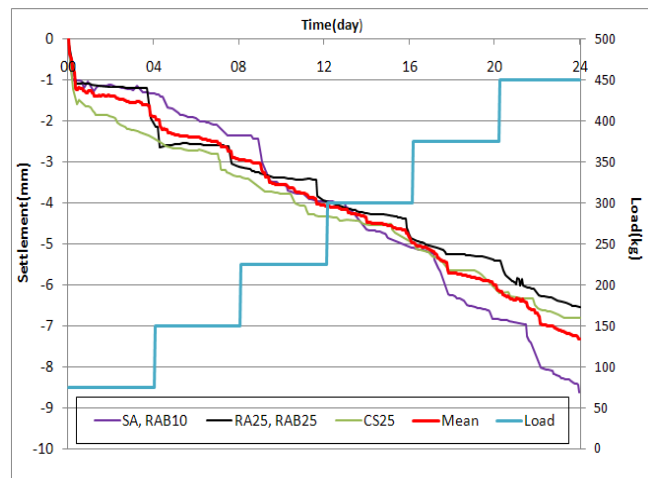


그림 7. 시간에 따른 침하량의 변화

3.3 시간에 따른 침하량과 토압의 변화

그림 7은 점증하중 재하시 시간에 따른 침하량을 나타낸 것이다.

실내모형실험은 모래와 순환10mm이하, 순환25mm와 순환25mm이하, 쇄석25mm으로 구분하여 실시하고, 하중은 75kg씩 4일 간격으로 24일간 재하를 하였다.

하중증가에 따라 각 연직배수재에서 침하량은 점차적으로 감소하면서 완만한 침하형태를 나타내고 있다. 침하량은 실내모형의 한계로 24일 동안 재하를 하였을 경우 최종 평균침하량은 7.2mm로 매우 작게 측정되었다.

그림 8은 점증하중을 재하하였을 경우에 실측침하량과 예측침하량을 나타낸 것이다.

예측침하량은 각 배수재에 따라 큰 차이 없이 비슷하게 나타났고, 실측치보다는 약간 더 큰 1.0cm로 나타났다. 이는 각 재료의 투수계수가 큰 상태에서는 배수가 빠르게 진행되기 때문에 침하량도 유사하고, 실측치보다 더 크게 나타난 것으로 판단된다.

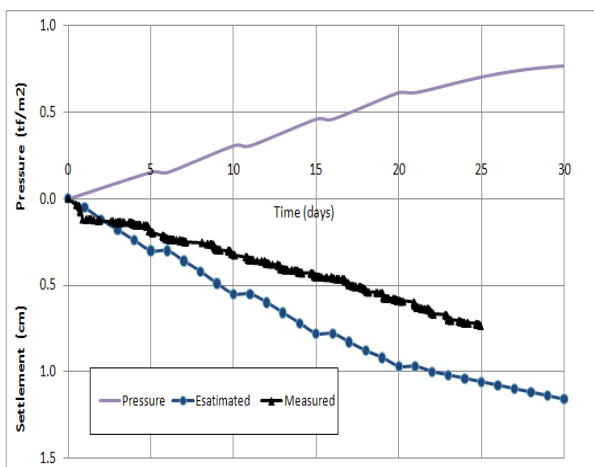


그림 8. 실측 및 예측침하량의 변화

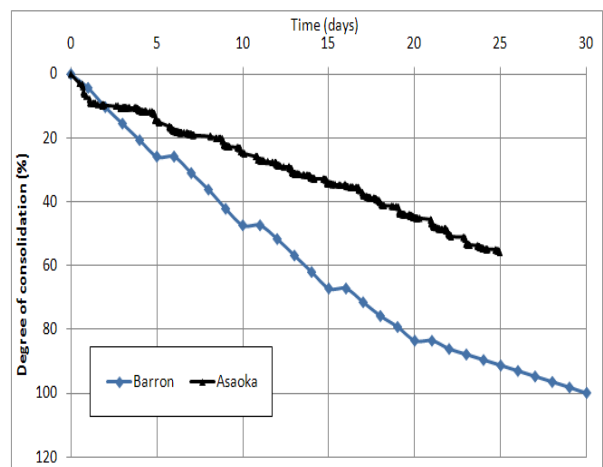


그림 9. 압밀도의 변화

그림 9는 각 연직드레인재별로 예측한 압밀도를 나타낸 것이다.

실측침하량으로부터 Asaoka 방법에 의한 압밀도와 Barron식에 의한 압밀도는 약 25일에서 약 30% 정도로 매우 큰 차이를 나타냈다. 이와 같은 현상은 실험모형 축조시 실제로는 점토의 교란이 발생되었으나 해석에서는 웰저항과 스미어 효과를 고려하지 않았기 때문으로 판단된다.

그림 10은 5종의 연직배수재에서 시간에 따른 토압의 변화량을 나타낸 것이다.

연직배수재별로 토압은 하중변화에 관계없이 거의 일정하게 나타났고, Filter+순환25mm는 토압이 다른 재료보다 크게 나타났다. 수위 급강하시에 토압은 모래와 유사하게 0 이하로 감소하였는데 이는 순환골재와 쇄석도 모래와 동등한 배수 성능을 나타낸다는 것을 의미한다.

그림 11은 24일 동안 일정한 상태로 수위를 유지한 후 하루로 일시에 배수시켰을 경우 각 재료별 토압의 감소량을 나타낸 것이다.

Filter+모래(FSA)에서는 토압의 감소폭이 $50\text{gf}/\text{cm}^2$, Filter+순환10mm이하(FRAB10)에서는 $60\text{gf}/\text{cm}^2$ 으로 감소하였다. Filter+순환25mm이하(FRAB25)에서는 $160\text{gf}/\text{cm}^2$ 이고, Filter+순환25mm(FRA25)에서는 $180\text{gf}/\text{cm}^2$, Filter+쇄석25mm(FCS25)에서는 $110\text{gf}/\text{cm}^2$ 으로 감소하였다.

전체적으로 수위 급강하시 시간에 따른 토압은 순환골재와 쇄석 모두 모래와 유사하게 0이하로 근접하게 나타나는 것으로 보아 모래와 동등한 배수성능을 나타내는 것으로 판단된다.

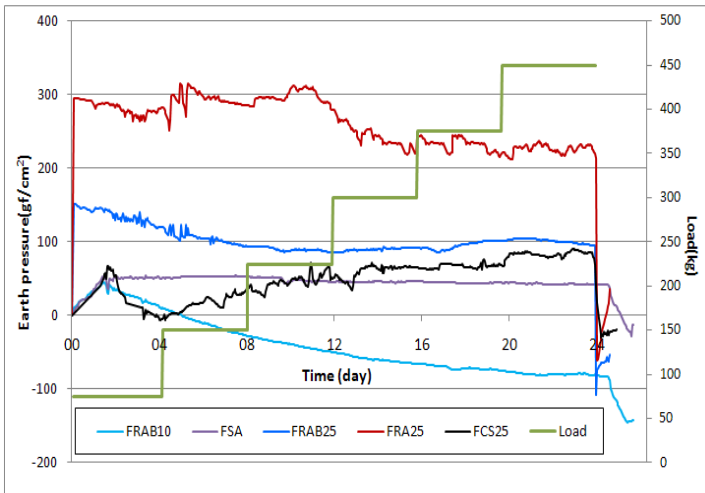


그림 10. 시간에 따른 토압의 변화

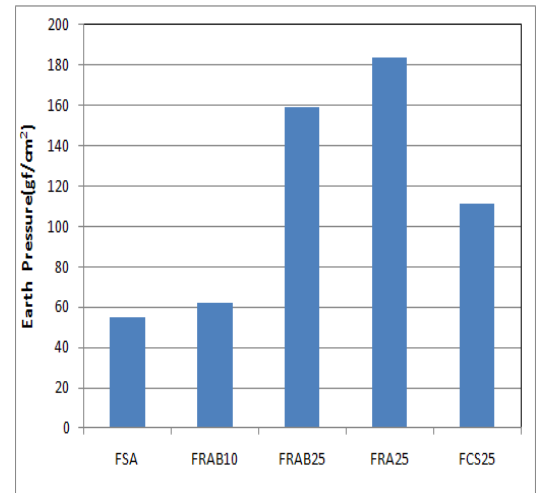


그림 11. 수위급강하시 토압 감소

4. 결론

본 연구에서는 연약지반개량시에 연직 및 수평배수재로서 이용되고 있는 모래의 대체 재료로서 순환골재와 쇄석의 활용가능성에 대해 실내모형실험을 실시하고, 연직배수재로 사용하였을 경우에 공극수압 변화에 따른 배수성능 등을 비교 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 연직 및 수평배수재로서 순환골재와 쇄석의 입경별 투수시험 결과를 모래를 기준으로 비교·분석하면, 순환골재의 수평투수계수(k_h)는 1.8~4.0배, 연직투수계수(k_v)는 1.2~2.5배 정도 더 크게 나타났고, 쇄석의 수평투수계수(k_h)는 3.3배, 연직투수계수(k_v)는 3.0배 정도 더 크게 나타났다. 따라서 순환골재 및 쇄석은 기존에 연직 및 수평배수재로서 사용되어 왔던 모래의 대체 재료로 충분한 배수성능을 나타내서 현장 적용성이 우수할 것으로 평가되었다.

2. 공극수압 변화에 따른 연직배수성능을 평가하기 위해 실내모형실험을 실시한 결과, 시간에 따른 공극수압은 모든 연직배수재에서 하중변화에 관계없이 큰 차이를 나타내지 않았고, 수위 급강하시에 순환골재와 쇄석에서의 공극수압은 0에 가깝게 감소하여 모래와 동등한 배수성능을 나타내므로 현장 적용이 가능할 것으로 판단된다.

3. 침하량은 배수재에 따라 큰 차이 없이 완만한 침하형태를 나타냈고, 수위 급강하시 시간에 따른 토압은 순환골재와 쇄석 모두 모래와 유사하게 0에 근접하여 동등한 배수성능을 나타내는 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 강성호, 이상훈, 광기석, 이주형, 정문경(2005), "용출특성규명을 통한 재생골재 환경성", 대한환경공학회, 제27권, 제3호, pp.293-301.
2. 김남욱, 김혁중, 배주성(2008), "표면처리방법을 이용한 순환 굵은 골재의 물성평가 및 순환골재 콘크리트의 특성 연구", 대한토목학회논문집, 제28권, 제4호, pp.603-609.
3. 김영삼, 전성철, 이세현(2005), "국내 순환골재 생산 및 활용현황 분석 연구", 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제 25권, 제1호, pp.97-100.
4. 김현태, 김상규, 공길용(2001), "연약지반위에 성토시 수평배수층의 소용통수능", 한국지반공학회 논문집, 제 17권, 제5호, pp.83-96.
5. 국립환경과학원(2007), 2006년 전국폐기물 발생 및 처리현황, 연차보고서.

6. 국토해양부(2009a), 순환골재 품질기준, <http://www.mltm.go.kr>.
7. 국토해양부(2009b), 건설 폐기물의 재활용촉진에 관한 법률 (타)일부개정 법률 제9770호
8. 박래선, 배주성(2007), "표면처리방법을 이용한 순환골재의 품질향상에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제 27권, 제3호, pp.421-426.
9. 이달원, 김시중, 오경훈, 임진혁, 이정준(2009), "연약지반에서 수평배수재로서 순환골재와 쇄석의 적용성 평가", 2009년 한국농공학회 학술발표회.
10. 이봉직, 권영철, 이종규(2007), "연약지반의 침하특성을 고려한 샌드매트의 실용적 설계를 위한 고찰", 한국지반환경공학회, 제 8권, 제5호, pp.31-38.
11. 이종윤, 전해표, 정우철, 임해식(2008), "연약지반 개량을 위한 수평배수층 재료로 순환골재의 적용 방안에 대한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제 24권, 제10호, pp.5-15.
12. 윤길립, 윤여원, 강오람, 유승경, 이규환(2008), "순환골재를 활용한 연약지반개량용 다공질 콘크리트 말뚝의 전단특성", 한국지반공학회논문집, 제 24권, 제12호, pp.75-84.
13. 정문경, 이성원, 우제윤(1996), "연약지반 연직배수공법 효율개선에 관한 연구", 한국건설기술연구원, 건기연보고서 96-058.
14. 한국건설자원협회(2009), 순환골재·재생아스콘 우수활용사례집, <http://www.koras.org>.
15. 한국토지공사(1997), 연약지반처리공법과 침하계측에 관한 연구
16. 환경부(2009), 순환골재 위무사용 건설공사의 순환골재 사용용도 및 의무사용량 등에 관한 고시, <http://www.me.go.kr>.
17. Indraratna, B. and Balasubramaniam, A. S.(1992), "Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 118, No.1, pp.12-33.
18. Smith, R. L.(1993), "Fly ash for use in the stabilization of industrial wastes", Fly ash for soil Improvement, Geotechnical Special Publication No.36, ASCE, New York, pp. 58-72.
19. Onoue, A.(1988). "Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consolidation", Soil and Foundations, Vol. 28, No. 4, pp.165-174.
20. Yoshikuni, H. and H. Nakanodo(1974), "Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability", Soils and Foundation, Vol. 14, No.2, pp.35-46.
21. Zhang, L.(1999), "Settlement patterns of soft soil foundations under embankments", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36, No.4, pp.774-781.