



수평배수재용 순환골재와 쇄석의 현장시험

Field Test of Recycled Aggregates and Crushed Stone as Horizontal Drains

김시중* · 이달원**†

Kim, Si Jung · Lee, Dal Won

ABSTRACT

In this study, field test on utilization of recycled aggregates and crushed stone as horizontal drains to use an alternative material of sand in soft ground is practiced. The settlement with time showed similarly ranged from 28.4-30.3 cm in the all horizontal materials. The excess pore water pressure of the recycled aggregates and crushed stone showed smaller than sand. The small the excess pore water pressure becomes faster the consolidation period and it can reduce the amount of residual settlement. Therefore, it was verified as having enough to an alternative materials that the field applicability is excellent. The distribution of earth pressure with time showed similarly in the all horizontal materials. The recycled aggregates and crushed stone was very applicable to practice because there is no mat resistance in the horizontal drains layer. The penetration rate in the SCP and PVD improvement sections did not show large differences as the grain size and the horizontal drainage height increases.

Keywords: Recycled aggregates; crushed stone; field test; excess pore water pressure

1. 서 론

최근에 산업화에 따라 도로, 항만, 주택 건설 등에 많은 양의 토지 수요가 증가 되고 있으며 주로 해안매립, 산지 개발 등으로 이러한 수요를 충족하고 있으나, 해안 매립시 발생하는 연약지반은 지반의 강도가 작고 침하 등의 변형이 매우 크기 때문에 도로나 항만의 구조물 시공 시에 공학적 성질을 정확히 분석하여 개량에 필요한 제반대책을 강구 하여야 한다.

연약지반의 압밀 침하를 촉진시키기 위하여 수평배수재로서 주로 모래가 이용 되고 있고 육지에서의 채취가 극히 제한적이므로 주로 해사를 채취하여 사용하고 있다. 그러나 어장파괴 등의 재산상의 피해와 환경단체 등의 해사채취 금지요청에 따라 지자체의 해사 채취 불허와 생산 제한으로 투수성이 큰 재료의 확보가 어려워지고 이로 인한 해사의 가격 급증, 운반비 상승 등으로 인해 전체적인 공정 지연이 발생 되고 있다. 이러한 상황으로 인해 모래를 대체할 양질의 재료 개발이 절실히 요구되어

최근에 활발히 연구가 진행되고 있는 실정이다. 정부에서는 2003년 12월 “건설폐기물의 재활용 촉진에 관한 법률”을 제정하여 건설공사에서 발생한 건설폐기물을 친환경적으로 적정 처리하고 재활용 등을 통한 자원이용의 효율성을 높이는 전략이 필요하다고 판단하여 자원 활용의 기본계획을 발표하였다 (MLTM, 2009; ME, 2009).

2009년도 우리나라에서 재개발에 따른 노후화된 구조물의 해체에 발생하는 많은 양의 건설 폐기물의 양은 매년 꾸준히 증가하여 183,351 톤/일로 전체 폐기물중 건설폐기물이 약 51.2%를 차지하였으며, 2012년에는 279,489 톤/일로 증가 할 것으로 추정된다 (The National Assembly of the Republic of Korea, 2009).

건설폐기물 발생량 중에 순환골재의 생산원료인 폐 콘크리트의 발생량 2009년도에 115,424 톤/일, 폐 아스팔트 콘크리트의 경우 32,612 톤/일로 폐 콘크리트는 전체 건설 폐기물의 63%, 폐 아스팔트 콘크리트는 17.8%를 차지하고 있다 (KORAS, 2009).

건설폐기물의 처리는 재활용이 97.5%에 이르고 있으나, 대부분은 성토 및 복토 (약 56%), 퇴매우기 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

* 충남대학교 대학원

** 충남대학교 지역환경토목학과

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

Fax: +82-42-821-8877

E-mail: dwlee@cnu.ac.kr

2011년 11월 21일 투고

2011년 12월 12일 심사완료

2011년 12월 13일 게재확정

Research Institute, 2010).

연약지반의 압밀 침하를 촉진시키기 위한 수평배수재로 모래의 공급이 원활하지 못하여 대체 재료로서 순환골재와 쇄석의 개발 및 연구가 절실히 필요한 시점이다. 연직배수공법에 관한 이론은 Terzaghi의 1차원 압밀방정식을 제안한 이후로 Barron (1947), Hansbo (1981), Onoue (1988) 등은 자유변형률과 등변형률의 경우와 교란과 불교란의 경우에 대하여 지반의 거동식을 유도하였다. 특히 Yoshikuni et al. (1979)는 수평배수층에서의 배수저항 (well resistance)에 의하여 압밀이 지연되는 현상을 고려하여 평균압밀도를 산정할 수 있는 근사식을 제안하였다.

그러나 기존의 연구들은 거의 연직 배수재에 관해 초점이 맞춰져 있으며 그나마 수평배수재에 관련된 연구는 수평배수재의 특성, 토목 섬유 및 플라스틱 배수재료에 관한 연구, 통수능 실험 등의 실내 실험에 한정되어 있는 경우가 많다 (Kim et al., 2001; Jang et al., 2005; Jung et al., 2006; Lee et al., 2007; You et al., 2009).

또한 성토 하중에 의해 장기간의 압밀 침하 발생이 예상되는 연약지반현장에 지하수위계, 공극수압계, 토압계, 지표 침하판을 설치하여 기존 수평배수재의 대체재로 순환골재와 쇄석을 비교 분석한 연구는 아직까지 많은 연구가 이루어지고 있지 않아 이에 대한 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 연약지반에서 수평배수재로 모래를 대체할 수 있는 순환골재와 쇄석의 활용 가능성에 대해서 현장 시험 시공을 실시하여 침하량, 공극수압 및 토압 등을 비교 분석하고, 수평배수재의 두께를 변화시켰을 경우의 관입저항을 평가하여 순환골재와 쇄석의 현장 적용성을 제시 하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 지반

본 연구에서는 00지구 도로 공사 현장을 선정하고 수평 배수재로 순환골재와 쇄석을 포설하여 현장시험시공을 하였다. 현장 지반의 물리적·역학적 특성을 파악하기 위하여 지반조사를 실시하였고, 불교란 시료를 채취하여 실내시험을 실시하여 현장자료와 비교분석하였다. 지반조사 결과 퇴적토층이 23.5 m이고, 실트층 (ML)이 0.0-8.9 m 깊이에서 2.9-4.9 m 두께로 N 치가 3정도로 대단히 연약한 상태로 분포하고 있다.

점토층 (CL)은 11.5-20.0 m 깊이에서 8.5 m 두께로 분포하고 N치는 11-23 범위로 대단히 단단한 상태이고, 모래층 (SP)은 1.1-2.6 m 두께로 N치는 3-35로 매우 느슨 내지 조밀한 상태의 상대밀도를 나타내고 있다. 자갈층 (GM)은 20.0-23.5 m 깊이에서 3.5 m 두께로 N 치는 35-37으로 조밀한 상태의 상대밀도를 나타내고 있다. 실내시험 결과는 Table 1과 같이 No. 200번체 통과량은 거의 90 % 이상으로 세립분의 함유량이 매우 높은 점토이고, 일축압축시험에서 구한 점착력은 23.6-32.5 kPa, 삼축압축시험에서 구한 점착력은 17-22 kPa 범위로 연약한 상태로 나타났다.

2. 현장시험시공

순환골재 (RA)와 쇄석 (CS)의 현장시험시공 구간은 Table 2 및 Fig. 1과 같이 연약층 두께가 9.7 m, 현재까지의 성토고는 약 3.8 m이고, 연약지반개량공법은 중앙부는 PVD, 비탈면은 SCP 공법으로 정사각형 배치로 2 m 간격으로 타입 하였다. 모래 (SA)의 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 5 m간격으로 매설하였다.

Table 1 Physical properties of the field test

Depth (m)	W_n (%)	G_s	Atterberg limits (%)		Unconfined Comp. strength, q_u (kPa)	Shear parameters (UU) c (kPa)	Consolidation test				U.S.C.S
			LL	PI			P_c (kPa)	C_c	e_0	C_v (cm ² /s)	
2.0-3.0	40.3	2.54	26.4	10.7	23.6	22.0	46.08	0.225	1.012	1.17E-02	CL
6.5-7.3	39.0	2.67	33.2	4.6	32.5	17.0	35.32	0.289	1.028	7.26E-03	ML

Table 2 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	3.8 m	- Prefabricated Vertical Drain (PVD) - Sand Compaction Pile (SCP)	Width: 50 m Height: 80 cm Length: 20-50 m	2 m	Diameter : 100 mm

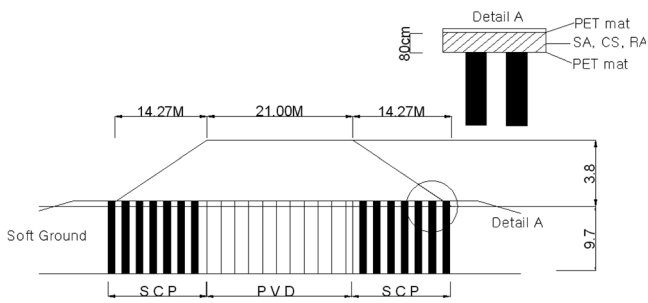


Fig. 1 The embankment of the field test

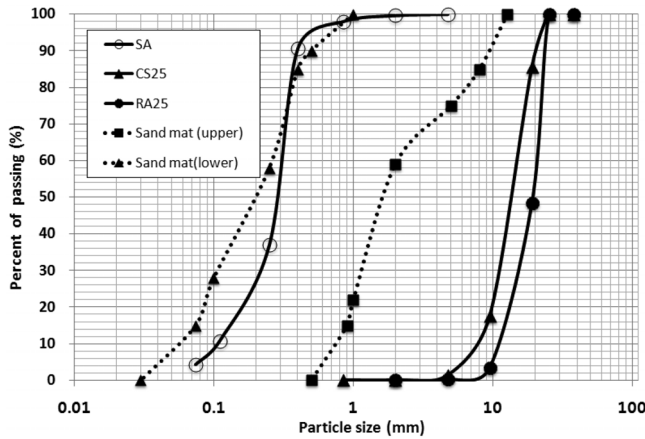


Fig. 2 Grain size accumulation curve

Fig. 2는 수평배수재로 주로 사용하고 있는 시방화된 sand mat의 입경범위 기준과 현장시험시공에서 사용한 모래 (SA), 순환골재 (RA25 mm) 및 쇄석 (CS25 mm)의 입도분포곡선을 나타낸 것이다.

순환골재와 쇄석은 sand mat의 상한과 하한치의 범위에 포함되지 않아 시방서 기준에 적합하지 않으나, 실내모형실험 결과 투수성이 양호하고 공극의 막힘으로 인한 배수기능 저하현상이 미미하여 현장에 적용하였다. 또한 현장시험시공에서 SCP공법과 PVD공법은 압밀지연이 없는 것으로 나타났고, 수평배수층의 두께가 증가할수록 매트저항은 점차로 감소하여 모래는 순환골재와 쇄석보다 2.9~3.3배 정도 크게 나타났다. 동일한 시간계수에서 수평배수층의 거리에 따른 압밀도는 큰 차이를 나타내지 않았다 (Lee et al., 2010).

3. 계측 방법

현장에 설치된 계측기는 연약지반의 침하 및 안정 관리 외에 수평배수재의 배수성능을 시험하기 위한 목적으로 매설된 현장 시험시공용 계측기로 시공 중에 발생하는 문제점을 정확하게 파악할 수 있도록 내구성이 양호하며, 신뢰성 있고, 파손가능성이

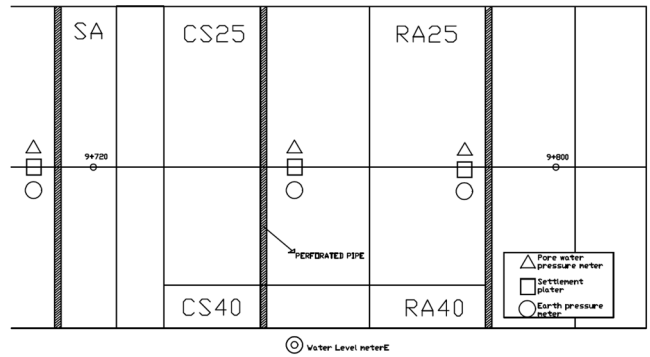


Fig. 3 The position of instrument

적은 진동현식 공극수압계와 토압계, 지표면 침하판 및 지하수위계 등을 매설하였다.

계측기는 모래 (SA), 쇄석 (CS) 및 순환골재 (RA)를 80 cm 성토 한 후에 수평유공관 사이 중심부에 지표 침하판(□), 공극수압계 (△), 토압계 (○)를 Fig. 3과 같이 매설하였다. 계측빈도는 성토중에는 1회/1일, 성토후에는 측정기간을 조정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시간에 따른 침하량 분포

Fig. 4는 시간에 따른 모래 (SA), 쇄석 (CS) 및 순환골재 (RA)의 침하량 분포를 나타낸 것이다. 성토는 42일, 648일, 707일, 834일의 4단계로 진행 되었다.

성토 진행 중에 방치기간이 길게 나타난 것은 현장여건상 성토반입이 원활하지 못하였기 때문으로, 모든 배수재에서 성토가 진행됨에 따라 침하량은 점차로 증가하고 성토고 약 3.8 m에서 834일 기준으로 모래와 쇄석, 순환골재의 침하량은 각각 29.7 cm, 30.3 cm 28.4 cm로 유사하게 나타났다. Barron식을 이용하여 예측된 침하량은 28.4 cm로 실측 침하량과 유사하게 나타났다.

수평배수층의 투수성은 무한히 크다고 하여 연직배수재를 설계하는 것이 보통이다. 그러나 투수성이 좋은 모래라 할지라도, 투수성은 유한하기 때문에 수평배수층 내에서 물이 흐르기 위해서는 어느 정도의 동수경사가 필요하고 그 배수거리가 긴 경우에는 수평배수층의 투수성을 무한대라고 생각하기 어렵다. 따라서 실제현장에 있어서 수평배수층의 투수성을 결정하는 인자가 무엇인가를 사전에 검토하여 두는 것은 대단히 중요하다. 연약지반 개량시 수직방향흐름으로 인한 압밀을 무시하면 압밀진행 흐름에 대해서 수평배수재의 투수성이 저항으로 작용하기 때문에 수평배수층 중앙에서는 배수거리가 길어져 압밀지연이 발생하게 된다.

수평배수재의 배수기능 저하와 부적정한 유공관 설치로 인한

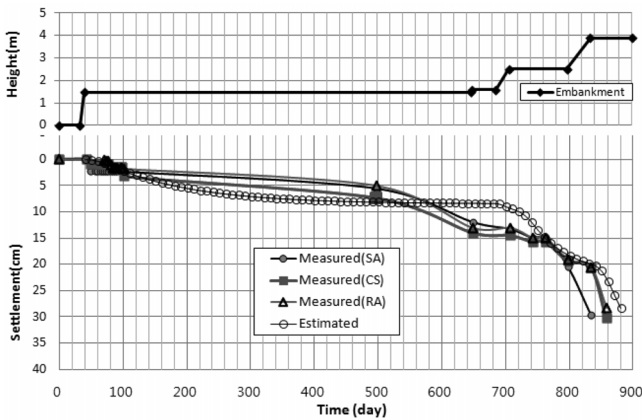


Fig. 4 Comparison of settlement for various drains

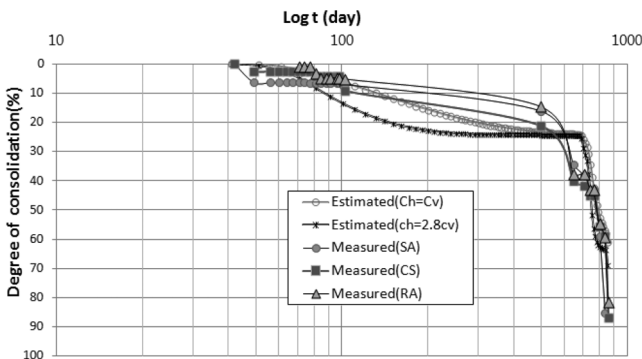


Fig. 5 Distribution of the degree of consolidation according to the time

공극수의 상승은 과잉공극수압을 증가시키고 토압을 감소시켜 침하량이 작게 나타나고, 압밀지연으로 시간에 따른 침하량 곡선이 일정하게 나타나 압밀이 완료된 것 같은 판단을 하게 되어 여성토 제거시기를 앞당기게 되는 오류를 초래한다.

그러나 시험시공 현장에 적용하였던 수평배수재 모두 유사한 침하량 분포를 나타냈고, 압밀지연은 발생되지 않아 순환골재와 쇄석 모두 수평배수재로서 충분한 배수성능을 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 5 시간에 따른 압밀도의 분포를 나타낸 것으로 실측된 압밀도는 모래 85.3 %, 쇄석 87.0 %, 순환골재 81.5 %로 나타났다.

수평배수층에서의 압밀도는 연직압밀계수보다는 수평압밀계수를 이용하여 구하여야 실측치와 유사한 결과를 나타낼 수 있다. 그러나 수평압밀계수를 구하는 것이 매우 어렵기 때문에 실내모형시험으로 구한 투수계수를 이용하였다. 수평배수재의 수평투수계수와 연직투수계수와와의 관계를 분석하기 위하여 실내모형실험을 실시한 결과, 평균적으로 수평투수계수는 연직투수계수의 $k_h = 2.8k_v$ 로 나타났다 (Lee et al., 2010).

따라서 수평배수층에서의 압밀계수를 연직압밀계수와 동일하게 고려한 경우($C_h = C_v$)와 수평압밀계수를 $C_h = 2.8C_v$ 로 고려한 경우의 압밀도를 분석한 결과, 각각 61 % 및 69 %로 나타나서 전체적으로 실측압밀도는 예측압밀도보다 크게 나타났다.

2. 시간에 따른 과잉공극수압 분포

수평배수재의 투수계수는 무한하지 않고 한정된 값이므로 수평배수층에 도달된 과잉간극수는 위치에 따라 순간적으로 소산되지 않고 시간이 경과함에 따라 천천히 소산된다. 과잉공극수압이 크게 나타나면 성토속으로 지하수가 상승하여 부력에 의한 실제 하중을 감소시키고 그에 따라 압밀 지연 현상을 초래하여 수평배수재의 배수기능을 저하시키는 원인이 된다. 연약지반개량시 일면배수 조건에서 연직배수재를 통하여 수평배수층으로 흘러 들어오는 공극수는 수평배수층 중앙에서 가장 적고 사면 선단에서 가장 크게 된다. 따라서 수평배수재의 배수용량이 부족하면 매트 저하가 발생되며 배수재 내의 과잉공극수압이 크게 되어 압밀이 지연된다.

Fig. 6은 시간에 따른 모래, 쇄석 및 순환골재의 과잉공극수압 분포를 나타낸 것이다.

각각의 수평배수재에서 과잉공극수압의 분포는 1단계 성토후 2.3-4.8 kPa 범위로 나타났으며 시간의 경과함에 따라 증가와 감소를 반복하다 단계 성토이후 다시 증가하였다. 모래, 쇄석, 순환골재 모두 방치 기간이 길어질수록 과잉공극수압이 일정하지 않고 변화가 나타났는데 이와 같은 원인은 우기 (7-9월)의 영향으로 판단된다.

전체적으로 과잉공극수압의 크기는 모래 > 쇄석 > 순환골재 순으로 나타나서 쇄석과 순환골재는 모래의 대체 재료로 충분한 배수 성능을 가진 것으로 확인되었다. 특히, 순환골재와 같이 과잉공극수압이 작게 되면 투수성이 우수하기 때문에 압밀침하속

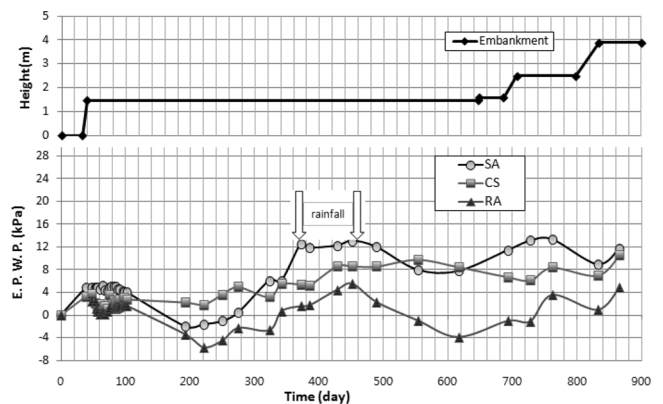


Fig. 6 Distribution of excess pore water pressure according to the time

도가 빨라져서 침하기간을 단축시키고 잔류침하량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3. 시간에 따른 토압 분포

연약 지반속에서 배출된 공극수가 수평배수층을 통하여 원활히 배수되면 매트저항(mat resistance)을 받지 않게 때문에 토압이 커지게 된다. 토압이 커지면 성토하중이 지반 속에 그대로 전달되어 압밀을 촉진시키게 되고, 압밀지연으로 인한 유공관 설치 간격도 넓게 할 수 있기 때문에 경제적으로도 효과적이다.

Fig. 7은 시간에 따른 모래, 쇄석 및 순환골재의 토압 분포를 나타낸 것이다.

수평배수재별로 성토하중의 증가에 따라 30.73 kPa - 116.62 kPa 범위에서 점차적으로 증가하였다. 과잉공극수압 변화와 동일하게 방치기간 중에 약간씩 증가와 감소현상이 나타났는데 이는 우기의 원인으로 판단된다.

토압 분포는 모래보다는 쇄석과 순환골재에서 약간 더 크지만 그 영향은 미미하게 나타났고, 쇄석과 순환골재는 원활한 배

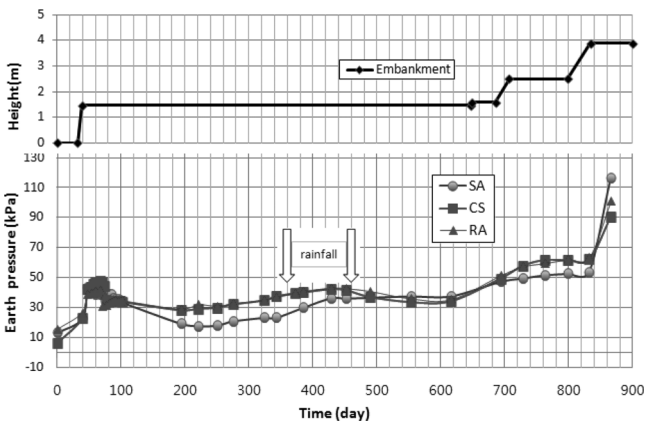


Fig. 7 Distribution of earth pressure according to the time

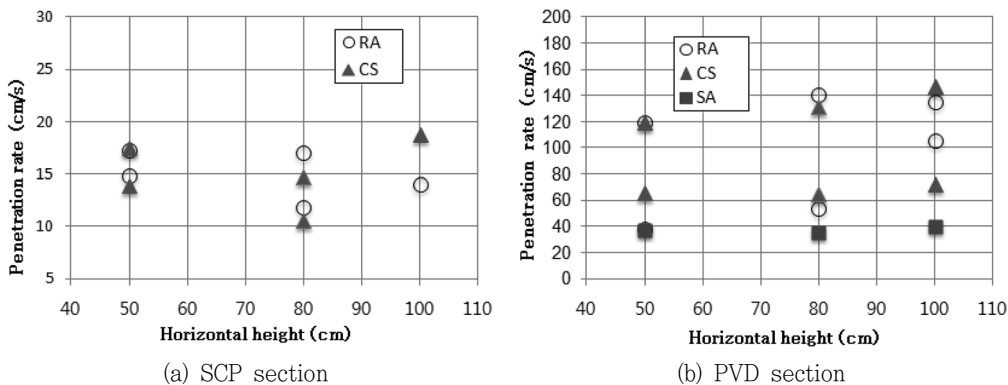


Fig. 8 Comparison of penetration rate for various drains

수로 인하여 매트저항이 발생되지 않은 것으로 판단되어 수평 배수재로서 충분한 배수성능을 가진 것으로 검증되었다.

4. 수평배수재의 관입저항 평가

수평배수재로서 순환골재와 쇄석을 사용할 경우 모래와는 다르게 연약지반 개량장비가 관입할 때 수평배수재의 두께와 입경에 따라 관입저항이 발생하게 된다. 따라서 이와 같은 상황에서 관입저항이 어느 정도 영향을 미치는가를 평가하고자 모래 (SA), 순환골재 (RA) 25 mm 및 40 mm, 쇄석 (CS) 25 mm 및 40 mm에 대해서 수평배수층 두께를 50 cm, 80 cm, 100 cm의 3단계로 변화시키면서 관입속도를 측정하였다. 연약지반 개량장비는 유압식 PVD 장비 (중앙부), SCP 장비 (비탈면)를 사용하였고, PVD 관입시에 shoe는 일반 직사각형 (10×15 cm) 철판을 사용하였다.

Fig. 8은 SCP와 PVD 개량구간에서 수평배수층의 두께를 50, 80, 100 cm로 변화시켰을 경우에 수평배수재의 종류에 따른 관입속도를 나타낸 것이다.

수평배수재의 두께에 따른 관입속도를 3번 측정하여 평균한 결과, SCP 개량구간에서는 10-20 cm/s (관입시간: 3-8 sec) 범위로 나타났고, 순환골재 (25 mm, 40 mm)와 쇄석 (25 mm, 40 mm) 모두 층두께에 따라서 큰 차이를 나타내지 않았다. PVD 개량구간에서는 40-140 cm/s (관입시간: 0.4-2.5 sec) 범위로 나타났고, 순환골재 및 쇄석 모두에서 관입속도가 빠르고 분포 범위도 넓게 나타났다. 모래층에서는 층두께 변화와 관계없이 약 40 cm/s 속도로 일정하게 나타났다.

전체적으로 수평배수층 두께가 증가할수록 관입하는데 시간이 많이 소요되어 관입저항이 클 것으로 예측되었으나 측정결과 큰 차이가 발생하지 않았다. 또한 입경에 따른 관입저항은 순환골재와 쇄석 모두 25 mm보다는 40 mm에서 관입저항이 약간 더 크게 나타났는데, 이와 같은 현상은 SCP와 PVD 관입시 shoe

때문에 초기 저항이 약간 크게 나타난 것으로 판단된다. 그러나 관입시간 차이는 0.4-8 sec 정도로 미미하여 입경이 관입저항에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 연약지반에서 수평배수재로서 모래를 대체할 수 있는 순환골재와 쇄석의 현장 적용성을 평가하기 위하여 현장시험 시공을 실시하고, 침하량, 공극수압 및 토압 등을 비교 분석하였다. 또한 PVD 및 SCP 장비를 이용하여 수평배수재의 두께를 변화시켰을 경우 관입저항을 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 시간에 따른 모래, 쇄석 및 순환골재의 실측 침하량은 각각 29.7 cm, 30.3 cm, 28.4 cm 이고, 예측침하량은 28.4 cm로 실측 침하량보다 작게 나타났다. 시간에 따른 실측압밀도는 모래 85.3%, 쇄석 87.0% 및 순환골재 81.5%로 예측압밀도보다 크게 나타났다. 순환골재와 쇄석 모두 압밀지연은 발생되지 않았고 모래와 유사한 침하량 분포를 나타내서 수평배수재로서 충분한 배수성을 가진 것으로 판단된다.

2. 시간에 따른 과잉공극수압의 크기는 모래 > 쇄석 > 순환골재 순으로 나타나서 쇄석과 순환골재는 모래의 대체 재료로 충분한 배수 성능을 가진 것으로 확인되었다. 순환골재와 같이 과잉공극수압이 작게 되면 투수성이 우수하기 때문에 압밀 침하속도가 빨라져서 침하기간을 단축시키고 잔류침하량을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

3. 시간에 따른 토압의 분포는 성토하중의 증가에 따라서 30.73 kPa - 116.62 kPa 범위에서 점차적으로 증가하였다. 토압분포는 모래보다는 쇄석과 순환골재에서 약간 더 크지만 그 영향은 미미하게 나타났고, 쇄석과 순환골재는 원활한 배수로 인하여 매트저항이 발생되지 않은 것으로 판단되어 수평배수재로서 충분한 배수성을 가진 것으로 검증되었다.

4. 수평배수층의 두께를 50, 80, 100 cm로 변화시켰을 경우에 관입속도는 SCP 개량구간에서는 10-20 cm/s 범위로 순환골재와 쇄석 모두 층두께에 따라서 큰 차이를 나타내지 않았다. PVD 개량구간에서는 40-140 cm/s 범위로 관입속도가 빠르고 분포범위도 넓게 나타나 수평배수층 두께에 따라서 큰 차이가 발생하지 않았다. 입경에 따른 관입저항은 순환골재와 쇄석 모두 관입시간 차이는 0.4-8 sec 정도로 미미하여 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

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

REFERENCES

- Barron, R. A., 1947. Consolidation of fine-grained soils by drain wells. *Journal of the Soil Mechanics Foundation Division ASCE* 73(6): 811-835.
- Hansbo, S., 1981. Consolidation of fine-graded soils by prefabricated drains. *In Proc. 10th ICSMFE* (3): 677-682.
- Jang, Y. S., C. S. Park, and S. S. Kim, 2005. Consolidation analysis of dredged fill ground installed with horizontal drains (II). *Journal of the Korean Geotechnical Society* 21(10): 41-48 (in Korean).
- Jung, G. H., Y. G. Lee, S. W. Lee, J. S. Kim, and B. T. Kim, 2006. Design example of gravel mat for horizontal drains. *Geotechnical Engineering KGS* 22(7): 28-39 (in Korean).
- 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).
- Korea Construction Resource Association(KORAS), 2009. Recycled aggregates and recycled asphalt concrete superiority application casebook. <http://www.koras.org>.
- Lee, B. J., Y. C. Kwon, and J. K. Lee, 2007. Practical design of the sand mat considering consolidation settlement properties. *Journal of Korean Geoenvironmental Society* 8(5): 31-38 (in Korean).
- Lee, D. W., and J. H. Lim, 2010. Utilization of recycled aggregates and crushed stone as horizontal drains in soft ground. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(6): 111-123 (in Korean).
- Ministry of Environment (ME), 2009. The law enforcement regulation about the recycling promotion of the construction waste. <http://www.me.go.kr>.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2009. The quality criterion of recycled aggregates. <http://www.mltm.go.kr>.
- National Environmental Research Institute, 2010. The present of state of occurrence and disposal of waste of the national. annual report.
- Onoue, A., 1988. Consolidation by vertical drains taking well resistance and smear into consolidation. *Soil and Foundations* 28(4): 165-174.

13. The National Assembly of the Republic of Korea, 2009. The law about the recycling promotion of the construction waste. <http://www.assembly.go.kr>.
14. Yoshikuni, H., and H. Nakanodo, 1979. Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability. *Soils and Foundation* 14(2): 35-46.
15. You. S. K., S. W. Kim, C. H. Lee, and H. S. Choi, 2009. Characterization of composite ground reinforced with recycled-aggregate porous concrete pile (RAPP). *Journal of the Korean Geotechnical Society* 25(11): 117-130 (in Korean).