

사면안정을 위한 지중 흡수관의 설계

Design of Absorption Pipe for Slope Stability

조 홍 제¹ Cho, Hong-Je

문 종 규² Moon, Jong-Kyu

이 광 제³ Lee, Kwang-Je

Abstract

Incessant rainfalls in unsaturated soil raises pore water pressure and drops shear stress. Controlling pore water pressure in unsaturated soil prevents pressure increase and leads to slope stability. Laboratory experiment of pore water absorption in soil tank has been conducted for pore pressure decrease in soil slope under artificial rainfall supplied in varying rainfall intensities. Soil slope failure triggers the deepening of the wetting front to critical depth accompanied by decrease in matric suction induced by water infiltration. This paper addresses an experimental design for absorption pipe to prevent pore pressure increase in unsaturated soil slope from heavy rain. It is expected that absorption pipe will be widely used in unsaturated soil slope to strengthen slope stability.

요 지

불포화토에 강우가 지속되면 토체내 간극수압이 상승하게 된다. 따라서 토층의 포화로 인해 강도가 저하되고, Suction압이 균형을 이루는 임계 깊이까지 Wetting Front가 하강하여 사면붕괴가 발생한다. 지중 간극수압을 제어할 수 있다면 강도저감을 방지함으로써 사면안정을 유지할 수 있을 것이다.

본고는 지중 간극수를 흡수하여 배출할 수 있는 흡수관 설계를 시도하여 실험성으로 그 가능성을 제시하였다. 흡수관은 사면안정을 위한 보조공법으로 활용하는 것이 효과적일 것이다.

Keywords : Drain pipe, Absorption, Pore water, Slope stability

1. 서 론

토사나 암반사면의 안정을 위한 보강공법의 연구는 지난 반세기 동안 꾸준히 진행되어 왔으며 그 성과도 크고 공학적으로 유용한 방법들도 많이 개발되어 현장 시공에 적용되고 있다. 적용대상과 시공방법에 따라 이론의 연구와 공법의 개발이 다양하며 시공성의 편의와 공사비 절감 및 재해를 사전에 방지하는데 매우 큰 도

움이 되었던 것이 사실이다.

그러나 이 방법들은 대부분이 역학적인 억지력이나 억제기능을 밝히는데 한정되고 있으며, 강우에 의한 간극수압 증가로 인한 지반의 저항력 상실에 대한 사전 방지책에 대한 연구는 아직 뚜렷한 진전을 보이지 못하고 있는 실정이다. 지반내 간극수압 증가로 인한 저항력 저감을 차단할 방법은 침투수를 차단하거나 혹은 침투수를 신속히 배수시켜 간극수압 상승을 막는 방법이

1 정회원, 울산대학교 공과대학 건설환경공학부 교수, 공학박사 (Member, Prof. Dept. of Civil & Environ., Univ. of Ulsan)

2 정회원, 동명기술공단(주), 공학박사, 토질 및 기초기술사 (Member, Dongmyung Eng. Consultant Co., 1067mjk@hanmail.net, 교신저자)

3 울산대학교 공과대학 건설환경공학부, 석사과정 (Grad. Student, Dept. of Civil & Environ., Univ. of Ulsan)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

될 것이다.

최근 한반도는 지구온난화로 인해 대기 중의 수분량이 증가되고 있다. 그로 인해 강우강도가 증가하고 강우 빈도는 감소되는 경향을 보이고 있다(Stephens 1990; Gordon 등, 1992). 이러한 결과로 2002년 8월 발생한 태풍 ‘루사’는 일강우 870.5mm의 집중호우가 쏟아졌고 3,000여 곳에 사면붕괴를 발생시키는 원인이 되었다(권태영 등, 1998; 이문세 등, 2009). 이러한 사실은 차후의 사면붕괴 빈도증가 및 피해규모의 대형화를 유발할 것으로 예상되며 그 원인은 집중호우에 따른 지중 간극수압의 급증에 의한 것으로 판단된다. 사면붕괴는 강우로 인한 침투수가 사면내부의 간극수압과 체적함수비(volumetric water content)를 상승시키고 토층부의 포화로 인한 전단강도가 저하되어 발생(Yoshida 등, 1991; Lim 등, 1995; Meilani 등, 2005)하기 때문에 지중 간극수압 제어의 필요성이 대두되고 있다.

사면 수평배수공 유무에 따른 사면 안전율의 변화에 대한 연구 결과에 의하면 사면 수평배수공을 설치했을 때, 이것을 설치하지 않았을 때에 비하여 13.3%의 안전율 증가와 25%의 지하수위 감소를 보였다(노홍제 등, 2006). 이는 사면 수평배수공을 설치하여 지속적인 배수 기능을 유지시킨다면, 이것은 사면의 안정성 확보에 긍정적인 영향을 미치는 구조물로서 역할을 할 것이라 판단된다. 그러나 사면에 적용되고 있는 사면 배수공법 중 수평배수공에 대한 배수성능 평가 및 연구는 전무한 실정이다. 따라서 사면붕괴는 강우로 인한 침투수가 사면내부의 간극수압, 체적함수비(volumetric water content)를 상승시키고 토층부의 포화로 인한 전단강도가 저하되어 발생(Yoshida 등, 1991; Lim 등, 1995; Meilani 등, 2005)하기 때문에 지중 간극수압 제어의 필요성이 대두되고 있다.

2. 이론적 배경

본 연구의 실험적 접근을 위해서 실제 강우 발생시 강우 침투수에 의한 사면 붕괴의 메커니즘을 정확히 이해할 필요가 있다. 과거에는 강우에 의한 침투수가 사면내 지하수와 접촉하여 지하수위가 상승하고 그로 인해 간극수압이 증가하여 사면붕괴가 발생한다고 알려져 있었다. 그러나 최근 연구결과들에 따르면 강우에 의한 침투수는 사면 하부에 존재하는 지하수까지 침투하지 못하고 지표면에서 약 1~2m의 깊이까지만 영향을 미

치는 것으로 보고되었다(Mein과 Larson, 1973; Pradel과 Raad, 1993; Fredlund 등, 1994; Ng와 Xi, 1998; 조성은과 이승래, 2000; 조성은과 이승래, 2001; 정상섭 등, 2004; 정상섭 등, 2009). 이러한 이론적인 공식을 근거로 포화 깊이를 산정하고 그에 대한 지반특성을 연구한 결과들에 의하면, 강우시 약 1~1.2m 침투깊이에서 안전율이 급격히 감소되는 것으로 보고되었다(Zhang 등, 2000; 김재홍 등, 2002). 필자의 사면안정 보고서(2008, 2009, 2010)에서도 침투깊이(사질토 및 풍화잔류토)가 79~88cm로 산정된 바 있다.

이러한 결과는 사면을 불포화토의 개념으로 해석하여야 한다는 사실을 말해주고 있다. 지하수위 위의 지반은 불포화 상태로 존재한다. 불포화 지반은 투수성이 낮고 모관흡수력(metric suction)이라는 부의 간극수압이 존재하기 때문에 강우가 깊은 심도까지 침투되기 어렵다. 모관흡수력은 사면의 안정을 유지하는데 매우 중요한 역할을 하는 장력의 개념을 의미한다. 즉, 침투된 강우는 표층에 존재하는 모관흡수력을 감소시키면서 사면 내부로 이동하게 된다. 모관흡수력이 감소하거나 소멸하면 사면 내 강도는 점차 약화된다. 또한 지표부근에 침윤선(seepage line, wetting front)이 형성되고 양의 간극수압이 유발되어 사면 내 강도가 급격히 약화되기도 한다. 이렇게 약해진 사면은 지속적인 강우로 인해 안정성을 확보할 수 없는 임계 깊이(critical depth)까지 침투가 발생할 경우 붕괴된다(Mein과 Larson, 1973; Pradel과 Raad, 1993; Fredlund 등, 1994; Ng와 Xi, 1998; 조성은과 이승래, 2000; 정상섭 등, 2004).

그러므로 침윤선위 지반에 존재하는 얇은 깊이의 침투수를 흡수하여 배제할 수 있는 기술을 개발한다면 사면내의 붕괴위험 요소를 감소시킬 수 있을 것이다.

그림 1과 그림 2는 Green-Ampt(1911)이론과 불포화토

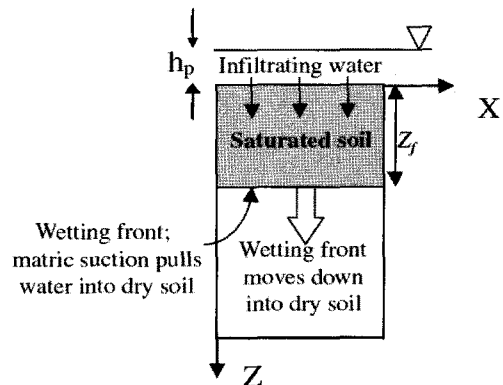


그림 1. 침윤선의 모식도(Green-Ampt, 1911)

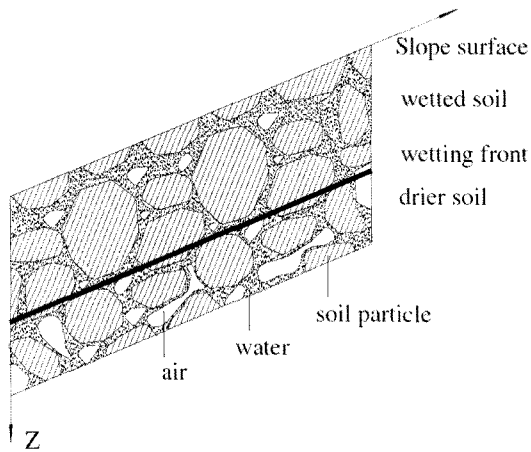


그림 2. 불포화토 사면에서의 침윤선(Green-Ampt, 1911)

사면에서의 침윤선(wetting front)의 개념도를 나타낸다.

3. 수평배수관

3.1 각종규정의 검토

우리나라 건설공사에서 각종 구조물 즉, 터널(터널라 이닝 뒷면 배수판:한국도로공사, 1990), 옹벽(옹벽판:국토해양부, 2003) 및 깎기사면의 지하수 배수(지하수 배수시설의 설계판:국토해양부, 2006)를 위하여 설치하는 수평배수관에 관한 설계기준을 요약하면 다음과 같다. 즉 수평배수관 설치는 구조물 배면 및 지하배수를 원활히 하여 배면토압을 경감시키거나 지하배수로 유효응력 저감을 방지시켜 토층의 저항력 증대를 목적으로 하기 위함이다. 그리고 배수는 토립자 사이의 간극수가 포화되어 유동을 하는 상태의 지하수를 대상으로 하고 있다. 재료는 토목 섬유나 유공관 사용을 권장하고 있으나, 배수관 재료의 규격, 유공의 밀도 및 간격, 관설치의 간격 및 길이에 대한 기준은 제시되어 있지 않다.

일부 현장에 적용되고 있는 사면배수공법은 현장 시공자의 경험에 따라 임의적인 시공이 이루어지고 있어 신뢰성 측면에서도 부족한 점이 있다(이승호 등, 2007). 또한 불포화토에 강우시에 간극수가 포화되기 전에 흡수를 하여 배수시켜 유효응력 저감을 방지할 지중흡수관 설치를 시도한 사실은 없다.

토사사면의 불포화상태의 간극수를 흡수하여 배수하거나 암반사면의 불규칙한 절리면을 흐르는 침투수를 흡수하여 배수시킬 수 있다면 사면안정에 매우 효과적일 것이며 보강력 저감을 유도하여 보강공사비 절감에

큰 효과가 있을 것으로 기대할 수 있을 것이다.

3.2 흡수관의 구비요건

사면에서 불포화토의 간극수나 절리면의 침투수를 흡수하여 간극수압을 저감시키는 것은 사면재료의 점착력과 내부 마찰각 저감을 방지시켜 저항력증대를 기하는 직접적인 요인이 될 것이다. 간극과 절리면내의 지중수는 흐름속도가 낮아 흡수력이 우수한 재료와의 접촉이 원활하면 대부분의 간극수 배수가 가능할 것이다. 흡수재에서 흡입된 간극수는 보수력과 배수능력이 좋은 재료와 접촉시켜 신속한 배수가 된다면 강우시에도 사면 저항력 저감을 막을 수 있는 수단이 될 수 있을 것이다. 여기서 재료의 가장 중요한 기능을 꼽는다면 흡수력, 보수성능, 배수성능 및 부식방지 기능이 가장 필요한 기능이라 할 것이다.

4. 설 계

4.1 개요

불포화토 사이를 흐르는 침투수는 중력과 흙의 흡수력 및 투수계수에 영향을 받는다. 강우로 인한 침윤선이 형성되면 강우 지속시간에 따라 침윤선은 차츰 하강하게 되고 지표면에서부터 흙의 전단강도는 저하하게 된다. 불포화토의 특성에 의해 침윤선이 임계 깊이까지 하강하면 계속되는 강우량에 의해 흙내부의 간극수압은 증가되고 과잉간극수압의 상태가 되어 전단강도가 거의 없는 상태로 사면의 붕괴가 발생하게 될 것이다.

많은 연구자들은 야외 및 실내실험을 통하여 임계 깊이가 경사면 표층에서 1-2m정도라는 것을 밝혀냈다. 이것은 강우에 의한 토사사면 파괴는 얇은 깊이에서 붕괴된다는 것을 뜻한다. 본 연구에서는 이러한 연구결과에 따라 잔층 침투수를 배제하여 전단강도 저하를 방지하기 위한 흡수관 설계를 시행할 것이다.

본 시험에는 흡수재료의 선택을 위한시험, 강우강도 재현시험 및 대상토사의 토질시험이 포함된다. 대상토사와 체적함수비를 연계한 흡수분 특성곡선시험이 필요하지만 흡수재와의 연관성을 직접 대비시키기 어려운 점을 감안하여 흡수재의 모관상승시험으로 흡입능을 판단하였으며 여러 가지의 가상 흡수관을 제작하여 토조에서 강우재현에 의한 흡수-배수시험을 시행하였다.

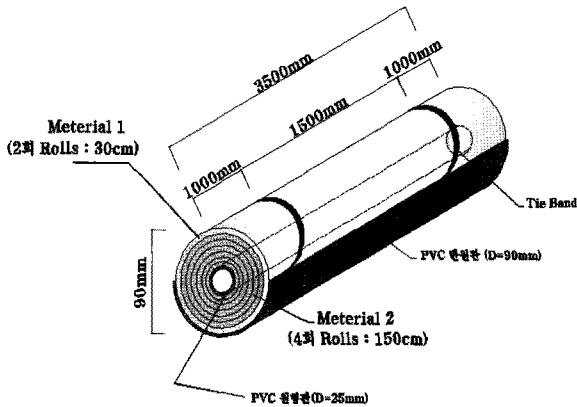


그림 3. 흡수관 모식도(가정)



그림 4. 모관상승고 실험

4.2 실험준비

4.2.1 흡수관 설계

흡수관 설계를 함에 있어 간극을 통해 흐르는 침투수 흡수에 초점을 두었다. 불포화토 사이를 흐르는 침투수는 중력과 흙의 흡수력의 영향을 받는다. 그러므로 본고에서는 침투수의 배제를 흡수 및 배수의 개념에서 접근하였다. 즉 지중 간극수와 흡수관의 접촉면적을 최대한 넓히기 위하여 PVC 반월관을 아래에 설치하고 상부 단면은 흡수재가 흙과 직접 접촉하도록 설계하였다. 흡수재를 외측에 감고 보수 및 배수재를 내부에 감아 흡·배수 기능을 발휘하도록 하였다. 내부 핵에는 흡·배수재의 변형을 막을 수 있는 직경 25mm의 PVC 원형관을 설치하였다. 이들 재료의 감는 두께와 종류는 실험으로 흡·배수기능이 가장 좋은 상태의 것을 선택할 것이다. 흡수관의 지름은 90mm로, 천공경 105mm에 적합하게 시공성을 고려하였다. 천공경과 흡수관의 지름차이에서 생기는 공간은 지중 천공에 의한 토층의 응력해방으로 흙의 재배치에 의해 빠른 시간 내에 느슨하게 채워질 것이다. 오랫동안 간극수의 흐름과 흙의 재배치로 흡수관을 변형시키더라도 지중 맹암거의 원리에 의해 그 기능은 계속될 것이다. 본고에서 예상한 흡수관의 가상도를 그림 3에 도시하였다.

설계된 흡수관은 Material 1(외측 흡수재)이 간극 사이를 흐르는 침투수를 흡착, 흡수하고 Material 2(보수 및 배수재)를 통하여 중력방향 이동을 통해 PVC 원형관을 타고 배수되는 구조이기 때문에 중요한 것은 재료의 선택인데 Material 1, 2의 흡수력과 배수력이 높아야 한다. 일반적으로 현장에서 많이 쓰이는 사면 수평배수 공용 부직포와 시중에서 유통되는 여러 부직포를 이용

표 1. 재료 선정 실험결과

순번	구분	모관상승고(cm)
1	사면배수공용 부직포(450g/m ²)	2.0
2	일면친수처리 부직포(362g/m ²)	7.5
3	양면친수처리 부직포(215g/m ²)	10.0
4	의료용 가아제	6.5
5	부직포(pp본드)	1.0
6	부직포 (350g/m ² -Y.산업)	0.5
7	부직포 (300g/m ² -A사제품)	3.0
8	부직포 (350g/m ² -B사제품)	2.7
9	부직포 (400g/m ² -C사제품)	4.0
10	부직포 (450g/m ² -D사제품)	4.5
11	극세사(263g/m ² -흙)	22.0

하여 흡수 및 배수실험을 실시한 결과, 실제에 적합한 4가지 재료, 즉 양면친수 부직포, 일면친수 부직포, 극세사 및 일반부직포를 선정하였다. 재료는 모관상승고와 배수기능을 기준으로 선정하였다. 모관상승고 실험을 통한 재료 선정실험은 그림 4와 같으며 실험대상 재료는 표 1과 같다.

4.2.2 강우재현장치

강우재현장치는 원심형 펌프, 수압을 조절하는 압력 regulator, nozzle 및 분사높이를 조절하는 장치로 구성된다. regulator 조작, nozzle의 분사각, 분사높이, 분사공의 유기적 조절이 균형을 유지해야 강우강도 재현이 가능하였으며 계획한 강우강도의 근사 값에 가까운 값을 찾을 수 있었다. 이렇게 시행착오를 여러 번 겪은 후 임의로 실험할 강도 값을 구한 결과 10mm, 22.4mm, 52.3mm, 92mm, 152mm/hr의 값을 재현할 수 있었다.

본 실험에서는 water tank를 frame 상부에 설치하여 수압을 일정하게 유지하도록 시도하였다. 실험중 강수

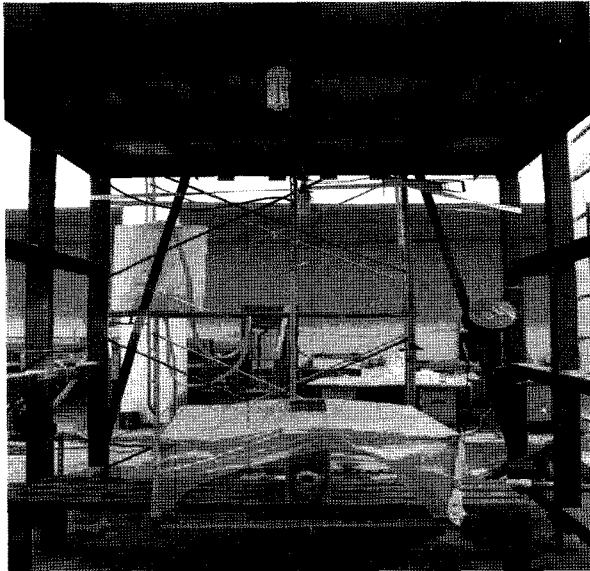


그림 5. 강우재현장치

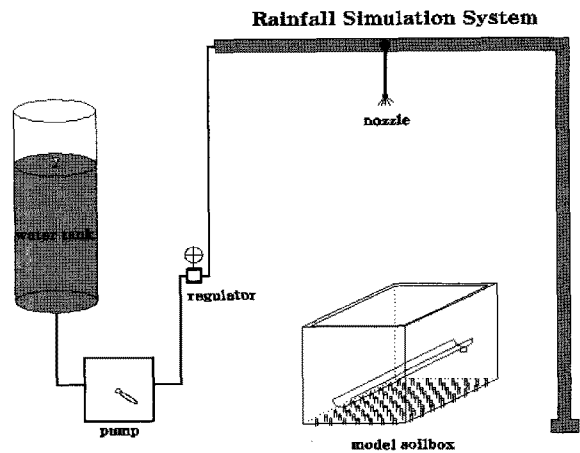


그림 6. 강우재현장치 모식도

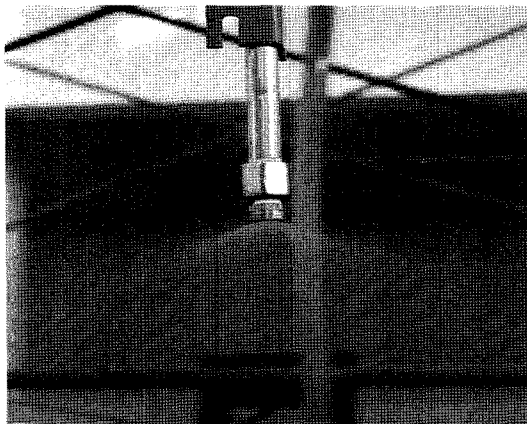


그림 7. 노즐의 강우재현

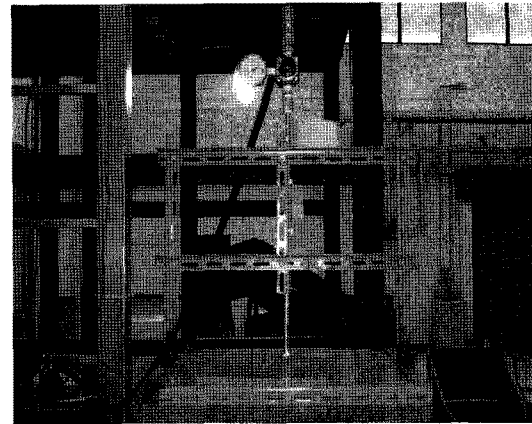


그림 8. 분사높이 조절 System

량이 일정한 값을 가지는지를 유출량과 강수면적을 계측하여 확인하였다. 그림 5는 강우재현장치이며 그림 6은 모식도이다. 그림 7은 nozzle의 분사형태를, 그림 8은 분사높이를 조절하는 장치를 보인 것이다.

4.2.3 지반모형

이 연구는 지중 간극수를 가장 효율적으로 흡수-배수할 수 있는 재료의 조합을 찾기 위한 연구이므로 강우량이 토사의 표면에 수직으로 강하하는 구조를 택하여 일정 강수량이 전부 토조에 강하되도록 시도하였다.

지반모형은 실험 내 침투경로를 최대한 일정하게 하여 동일한 침투조건이 되고 토조벽면의 간섭효과를 배제하기 위하여 토조 높이는 50cm로, 폭을 15cm, 30cm 및 50cm로 변화시키며 각각에 대하여 실험을 시행하였다. 토조는 아크릴재로 제작하여 포화상태의 수위를 눈

으로 식별이 가능하도록 하였다. 이는 유출물과 유출량을 극대화한 상태의 흡수관 구조를 찾기 위함이다. 또한 불포화상태의 간극수 흡수력을 찾기 위하여 강우 강도에 따라 토조하부에 포화상태의 수위를 흡수관 아래 10cm이상 상승하지 못하도록 유지하기 위하여 토조바닥에 배수공을 두어 자연배수상태를 유지하였고, 강우 강도가 매우 클 때는 수위상승이 되므로 그림 9처럼 토조하부 양쪽에 강제배수구를 설치하여 흡수관은 포화토와 항상 10cm 간격을 두어 불포화상태의 흡에 위치하도록 하였다. 흡수관에서 유출되는 유출량과 바닥 및 강제 배수되는 양을 측정하여 전체 물수지를 측정하였다. 또한 실험중 증발산양에 따라 미세한 차이는 오차배분으로 처리하였다. 그림 10은 지반모형의 모식도를 나타낸 것이다.

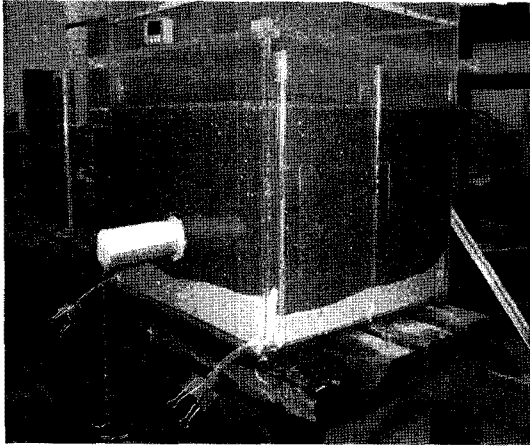


그림 9. 실험용 토조

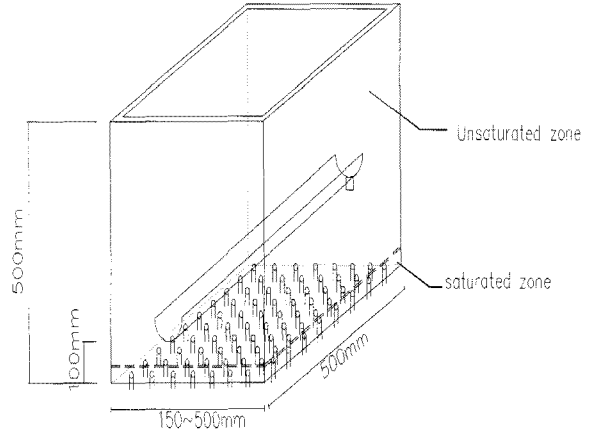


그림 10. 토조의 모식도

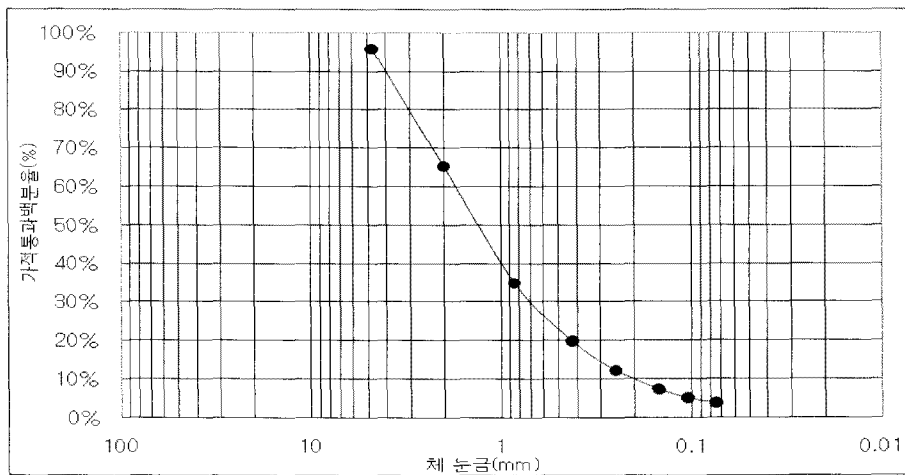


그림 11. 화강암 풍화토 입도분포곡선

표 2. 화강암 풍화토 물성치

통과중량백분율 10% 입경(mm)	D_{10}	0.21
통과중량백분율 30% 입경(mm)	D_{30}	0.72
통과중량백분율 60% 입경(mm)	D_{60}	1.80
균등계수	C_U	8.65
곡률계수	C_C	1.38
비중	G_S	2.65
투수계수(cm/sec)	K	3.9×10^{-3}
자연함수비(%)	W_n	3.17%
최적함수비(%)	OMC	8.82%
최대건조단위중량(t/m^3)	γ_{dmax}	2.001
NO. 200체 통과량(%)		3.77

4.2.4 토질특성

본 연구에 사용된 토사는 점토분 함량이 작은 화강암 (대보 화강암) 풍화토로서 안동지역에서 채취하였다. 그

에 대한 물리적 특성을 실험을 통하여 분석하였다. 표 2와 그림 11은 실험을 통해 분석된 화강암 풍화토의 물 성치와 입도분포곡선을 나타내고 있다. 또한, 실험에 사 용된 화강암 풍화토는 통일분류법에 의하여 SW로 분류 된 흙으로 점토함량이 3.77%이다. 실험에 필요한 토사 는 24시간 105°C로 건조후 자연함수비보다 높고 최적 함수비보다 약간 낮은 4.4~8.2%의 함수비로 불포화토 조건을 부여하였다. 동일한 토사로 강우강도별 새 흙으 로 토조를 채워 실험에 임했으며 다짐은 A다짐의 1/2로 통일하였다.

4.3 실험방법

본 연구의 실험은 다음과 같은 가정 하에 이루어졌다.

1. 각 사면 흡수관의 배수능력 실험 조건은 동일하다 (강우강도, 토조 등).
2. 시스템내로 유입되는 유량과 시스템 내에서 발생

표 3. 실험에 적용된 흡수관 유형

구분	Material 1 (같은 길이 L = 0.3m)	Material 2 (같은 길이 L = 1.5m)	PVC 원형관	PVC 반원관
Case 1	양면친수처리 부직포	일반 부직포	Core재	바닥재
Case 2	일면친수처리 부직포	일반 부직포		
Case 3	극세사	일반 부직포		
Case 4	일반 부직포	일반 부직포		
Case 5	양면친수처리 부직포	양면친수처리 부직포		
Case 6	일면친수처리 부직포	일면친수처리 부직포		
Case 7		원형 배수공		
Case 8		S형 다발관		

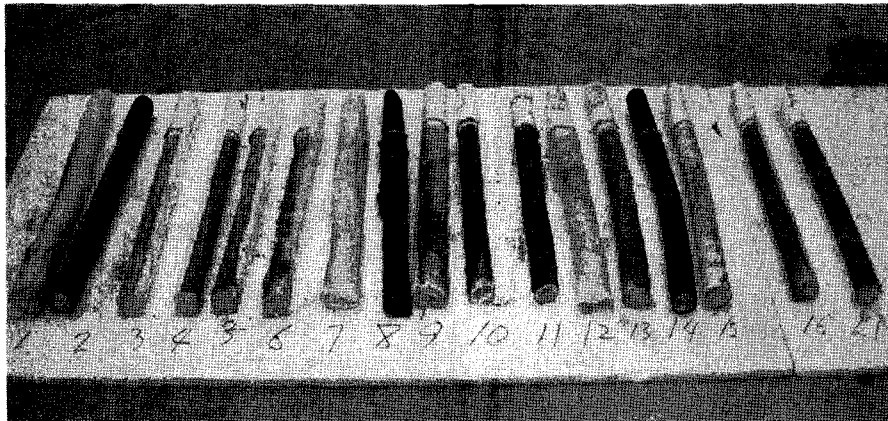


그림 12. 부직포 시료

되는 총 유량은 동일하다.

3. 각 사면 흡수관의 배수능력은 유출량의 크기로 판단한다.

지반모형은 선행실험에 의해 결정된 일정한 강우재현 하에 부피에 대한 흙의 무게를 일정하게 함으로써 단위중량을 일정하게 하였다. 강우재현 실험에서 일정한 강우강도를 펌프와 레귤레이터를 이용하여 유지하게 하였다. 지반모형내로 유입되는 총 강우량과 실험종료 후 모형 외부 유출 및 내부 보수량을 측정하여 총 유입량과 총 유출량을 비교하였다. 흡수관의 유출량의 측정은 최초유출시간 이후 5분 간격으로 1분 동안 측정하여 강우 발생 동안의 배수경향 및 유출량을 함께 측정하였다. 또한, 지하수 유출량도 함께 측정하여 총 유출량의 변화를 측정하였다. 지반모형 내부의 보수량은 흙의 선행함수비를 확인한 후, 실험 종료 후의 함수비와 비교하여 결정하였다. 흡수관 재료의 보수량은 실험 전의 무게와 실험 후의 무게를 비교하여 결정하였다. 실험에 사용된 흡수관의 유형은 재료 선정실험을 통하여 선정된 재료중에서 흡수능이 좋은 4가지 재료를 사용하였다. 선정된 4가지 재료를 이용하여 6가지의 유형을 제작

하였고 현행 설계기준에 따른 원형배수공과 S형 다발관을 제작하여 실험에 적용하였다. 표 3은 실험에 적용된 흡수관의 유형이다.

4.4 강우재현실험

실험에 적용한 강우강도는 10.0, 22.4, 52.3, 92.0, 152.0 mm/hr 등 5가지이며 각 강우강도별 평균 146분의 연속 강우를 재현하여 평균값을 강우강도에 따른 유출률과 유출량으로 산정하였다. 선정된 흙·배수재를 사용하여 감기두께를 다양하게 변경해가며 17가지 흡수관에 대하여 각 강우강도를 적용하여 각각의 유출률을 비교 검토한 후 선정대상을 8가지로 압축하여 공학적 검토를 시행하였다. 부직포의 조합으로 다양하게 시험한 시료를 그림 12에서 볼 수 있다.

강우재현시험에서 각 Case별로 유출률과 유출량의 성과는 해당 Case별로 각각 도시를 하였다.

4.4.1 152mm/hr 적용

152mm/hr를 적용하였을 경우, 총 유입량에 대한 흡

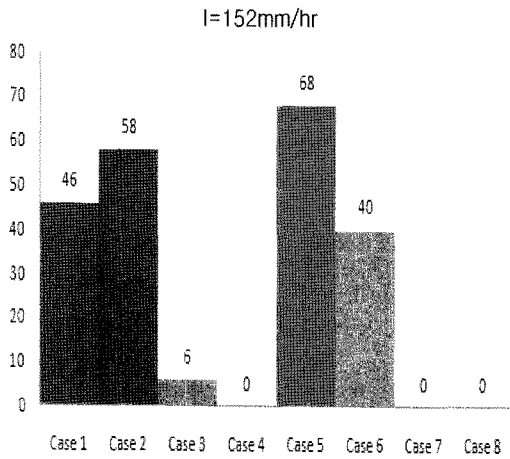


그림 13. 유출량 (ml/min/)

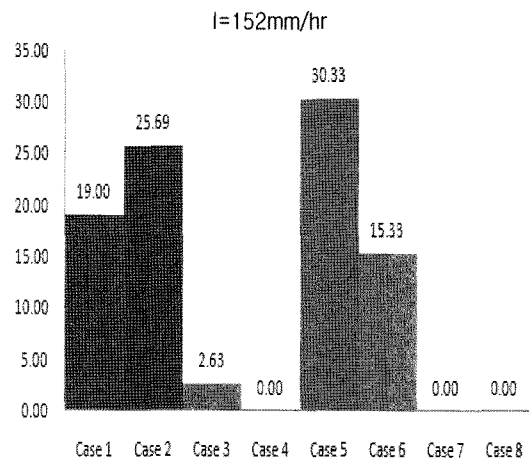


그림 14. 유출율 (%)

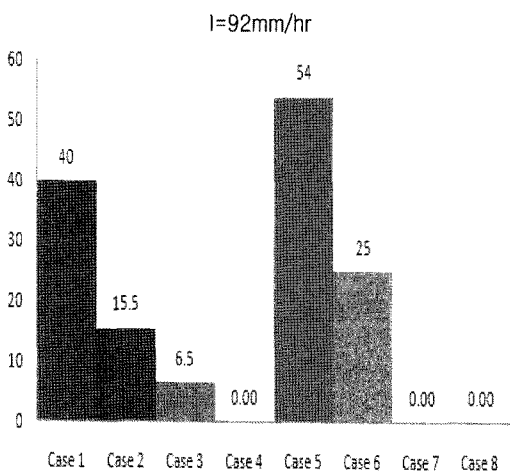


그림 15. 유출량 (ml/min/)

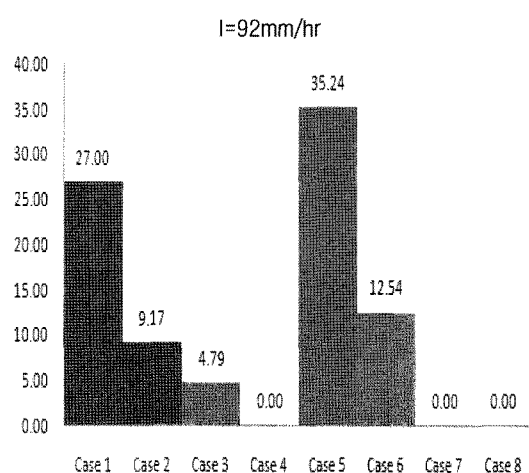


그림 16. 유출율 (%)

수관의 유출률은 Case 5가 30.33%로 가장 좋은 효율을 보였다. 다음은 Case 2, Case 1, Case 6, Case 3 순으로 각각 25.69%, 19.00%, 15.33%, 2.63%의 유출률을 보였다. 흡수관의 1분당 유출량 역시 같은 순으로 각각 68ml/min, 58ml/min, 46ml/min, 40ml/min, 6ml/min의 값을 나타내었다. 반면, 사면 수평배수공용 일반 부직포로 이루어진 Case 4와 현행 설계기준을 반영한 Case 7, Case 8에서는 배수가 발생하지 않았다. 이것은 일반부직포는 흡수능력이 전혀 없다는 것을 뜻하며 일반적으로 구조물 뒷채움이나, 사면에 사용하는 유공 PVC관과 S형 다발관은 토층의 간극이 완전포화되어 있는 경우가 아닌 불포화상태의 지중 간극수를 배수하지 못한다는 것을 증명하고 있다.

4.4.2 92mm/hr 적용

92mm/hr를 적용하였을 경우, 총 유입량에 대한 흡수

관의 유출률은 Case 5가 35.24%로 가장 좋은 효율을 보였다. 다음은 Case 1, Case 6, Case 2, Case 3 순으로 각각 27.00%, 12.54%, 9.17%, 4.79%의 유출률을 보였다. 흡수관의 1분당 최대 유출량 역시 같은 순으로 각각 54ml/min, 40ml/min, 25ml/min, 15.5ml/min, 6.5ml/min을 보였다. 여기서도 Case 4, Case 7 및 Case 8에서는 전혀 배수되지 않았다.

4.4.3 52.3mm/hr 적용

강우강도 52.3mm/hr를 적용하였을 경우, 총 유입량에 대한 흡수관의 유출률은 Case 1이 53.75%로 가장 좋은 유출률을 보였다. 다음은 Case 5, Case 2, Case 3, Case 6 순으로 각각 43.39%, 17.41%, 6.87%, 2.45%의 유출률을 보였다. 흡수관의 유출량은 Case 5가 38ml/min로 가장 큰 값을 나타냈다. 다음은 Case 1, Case 2, Case 3, Case 6 순으로 각각 37.5ml/min, 14ml/min, 5ml/min, 3ml/min의

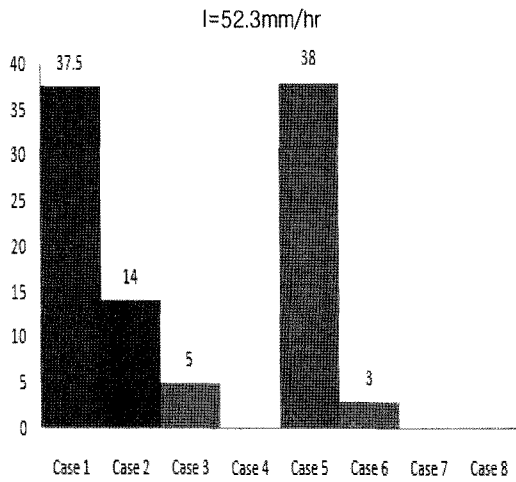


그림 17. 유출량 (ml/min)

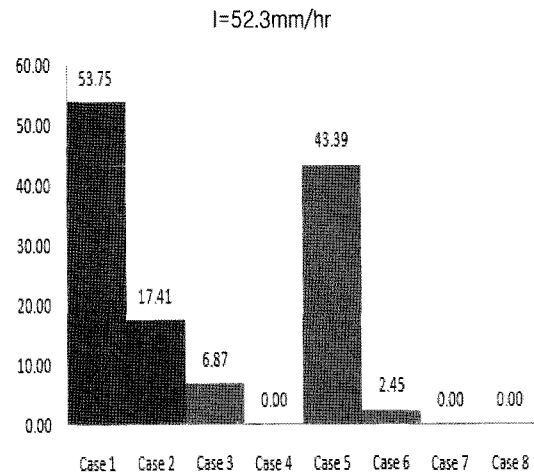


그림 18. 유출율 (%)

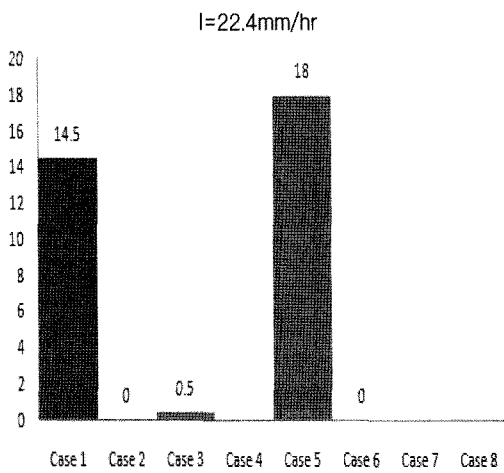


그림 19. 유출량 (ml/min)

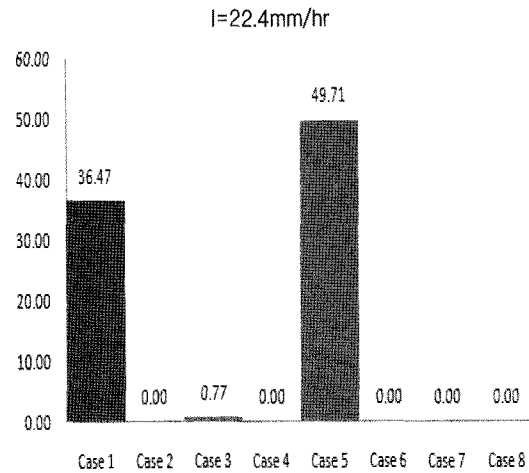


그림 20. 유출율 (%)

유출량을 보였다. 여기서도 Case 4, Case 7 및 Case 8에서는 전혀 배수되지 않았다.

4.4.4 22.4mm/hr 적용

22.4mm/hr을 적용하였을 경우, 총 유입량에 대한 흡수관의 유출률은 Case 5가 49.71%로 가장 좋은 효율을 보였다. 다음은 Case 1, Case 3 순으로 각각 36.47%, 0.77%의 유출률을 보였다. 흡수관의 유출량 역시 같은 순으로 각각 18ml/min, 14.5ml/min, 0.5ml/min의 유출량을 보였다. 반면, 강우강도가 52.3mm/hr 적용시 배수가 발생하였던 Case 2, Case 6은 강우강도 22.4mm/hr 적용시 배수가 발생하지 않았다. 또한 Case 4, Case 7 및 Case 8에서는 전혀 배수되지 않았다.

4.4.5 10mm/hr 적용

강우강도 10mm/hr을 적용했을 때 모든 유형의 흡수

관에서 배수가 발생하지 않았다. 10mm/hr 강우량이 평균 146분간 지속되었으나 wetting front는 지표에서 25cm 정도였기에 흡수관에도, 바닥 drain hole에도 배수가 되지 않았다. 이 실험으로 미루어볼 때 초기 강우시에는 불포화토의 suction압이 간극수압보다 크게 작용하는 것으로 판단된다.

4.4.6 자료의 정리

실험대상인 8가지 흡수관에 대하여 강우강도별로 흡수관에서의 유출률, 유출량을 측정하였다. 이들 값의 신뢰성에 대한 검토를 하기 위하여 먼저 토조흡의 선행함수비를 측정하였으며 이 함수비로 토사 흡수율, 재료의 흡수율, 재료의 보수율을 산정하여 총 물수지에 대한 검토를 하였다. 또한 각종 재료 및 흙의 물 수지에 대한 값의 오차를 줄이기 위해 강우지속시간은 실험의 편의상 Case별로 약간의 차이는 있으나 136분~163분간 강

표 4. (I = 152mm/hr)의 시험값 예시

	단위	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8
선행함수비	%	4.4	6.0	7.5	7.5	6.7	4.7	6.7	8.2
강우지속시간	min	141	141	147	143	163	145	136	154
분당유입량	ml/min	190	190	190	190	190	190	190	190
총 유입량	l	27	27	28	27	31	27	26	29
흡수관 최초유출시간	min	26	26	27	-	23	30	-	-
흡수관 유출량	ml/min	46	58	6	0	68	40	0	0
흡수관 총 유출량	ml	5078	6858	734	0.0	9412	4214	0.0	0.0
흡수관 유출률	%	19.0	25.7	2.6	0.0	30.3	15.3	0.0	0.0
지하수 최초유출시간	min	41	41	27	28	33	35	31	24
지하수 최대 유출량	ml/min	150	130	178	194	116	151	204	193
지하수 총 유출량	l	17	15	24	24	16	19	22	28
지하수 유출률	%	61.9	57.0	85.0	86.8	52.7	68.1	84.3	95.1
토사 흡수량	ml	4396	2942	1863	3383	3521	5137	3611	1336
토사 흡수율	%	16.5	11.0	6.7	12.5	11.4	18.7	14.0	4.6
재료 보수량	ml	153	200	134	8	1238	743	29	5
재료 보수율	%	0.6	0.8	0.5	0.0	4.0	2.7	0.1	0.0
총 유출량	l	26	25	27	27	31	29	25	29
물수지(In-Out)	ml	564	1476	1474	186	522	-1329	421	86
오차율	%	2.1	5.5	5.3	0.7	1.7	-4.8	1.6	0.3

수시험에 의한 값을 평균값으로 각 Case 실험값으로 대표하였다. 강수 이후 흡수관의 최초 유출시간은 23~30 분 후로 측정되었으며 이 시간은 강수량에 의해 토중 포화 zone이 형성된 시간으로 볼 수 있으며 흡수관 하부에 고인물을 지하수로 간주하였는데 이 물이 바닥 배수가 되기 시작한 시간은 23~41분 후로 측정되었다. 즉 흡수관 하부 10cm 두께의 토사에 물이 포화된 시간으로 간주하면 된다.

표 4에서 알 수 있듯이 Case5(양면친수처리 부직포)의 유출량이 가장 크며 지하수 유출률이 가장 작게 측정되었다. 즉, 양면친수처리 부직포가 지중 간극수를 가장 많이 흡수하여 배수하는 기능이 우수하다는 것을 알 수 있다. 이 결과로 총유입량과 유출량의 오차는 0.30~5.53%로 나타났다. 이 오차는 시험 중 증발산량과 측정 오차가 포함되어 있을 것이다. 전체적 오차의 규모가 시험성과에 큰 영향을 미치는 수준이 아니기에 이 시험을 해석자료로 사용함에 문제가 없을 것으로 판단된다. 여러 시험자료중 강수량 152mm/hr에 대한 자료를 표 4에 예시하였다.

4.5 시험결과

흡수관의 유형별로 비교해 보았을 때, 양면친수처리

로 가공된 Case 1과 Case 5는 강우강도가 증가할수록 1분당 최대 유출량은 증가하고 흡수관 유출률은 감소하는 경향을 보인다. 일면친수처리로 가공된 Case 2와 Case 6은 강우강도가 증가할수록 1분당 최대 유출량과 흡수관 유출률이 함께 증가하는 경향을 보였다. 그 중, 양면 및 일면친수 처리되어 가공된 부직포만으로 구성된 Case 5, Case 6은 강우강도-유출관계에서 일정한 경향을 보였다. 설계된 흡수관의 배수능력 실험에 적용될 재료 선정을 위한 선행 실험에서 가장 큰 모관상승고를 나타낸 극세사로 이루어진 Case 3은 강우강도-유출관계에서 유출률과 유출량에서 매우 미흡한 것으로 나타났다. 내부에 일반 부직포를 감은 Case 1, 2, 및 Case 3은 강우강도가 50mm/hr의 경우에 유출률이 최대로 나타나는데 이는 강우강도가 작을 때는 유출이 잘되나 강도가 차츰 커지면 재료의 특성상 유출률이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 각 흡수관의 강우강도에 따른 1분당 최대 유출량 및 유출률의 변화는 표 5, 표 6, 그림 21 및 그림 22와 같다. 표 5와 표 6에서 기존 수평배수관으로 사용하고 있는 원형배수관과 S형 다발관에서 강우강도 152mm/hr가 136분과 154분간 지속되었지만 유출량 발생이 없었다. 그리고 강우강도 10mm/hr에서는 모든 흡수관에서 유출량이 없었다. 즉 각각의 흡수관 시험에 사용된 불포화도에 평균 146분간의 연속된 강우강도

표 5. 강우강도별 흡수관의 유출률 (%)

	흡수관 재료구성	152.0mm/hr	92.0mm/hr	52.3mm/hr	22.4mm/hr	10.0mm/hr
Case 1	양면친수+일반	19.00	27.00	53.75	36.47	0.00
Case 2	일면친수+일반	25.69	9.17	17.41	0.00	0.00
Case 3	극세사+일반	2.63	4.79	6.87	0.77	0.00
Case 4	일반+일반	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Case 5	양면친수+양면친수	30.33	35.24	43.39	49.71	0.00
Case 6	일면친수+일면친수	15.33	12.54	2.45	0.00	0.00
Case 7	원형배수관	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Case 8	S형다발관	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

표 6. 강우강도별 흡수관의 유출량 (ml/min)

	흡수관 재료구성	152.0mm/hr	92.0mm/hr	52.3mm/hr	22.4mm/hr	10.0mm/hr
Case 1	양면친수+일반	46.0	40.0	37.5	14.5	0.00
Case 2	일면친수+일반	58.0	15.5	14.0	0.0	0.00
Case 3	극세사+일반	6.0	6.5	5.0	0.5	0.00
Case 4	일반+일반	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Case 5	양면친수+양면친수	68.0	54.0	38.0	18.0	0.00
Case 6	일면친수+일면친수	40.0	25.0	3.0	0.0	0.00
Case 7	원형배수관	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
Case 8	S형다발관	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00

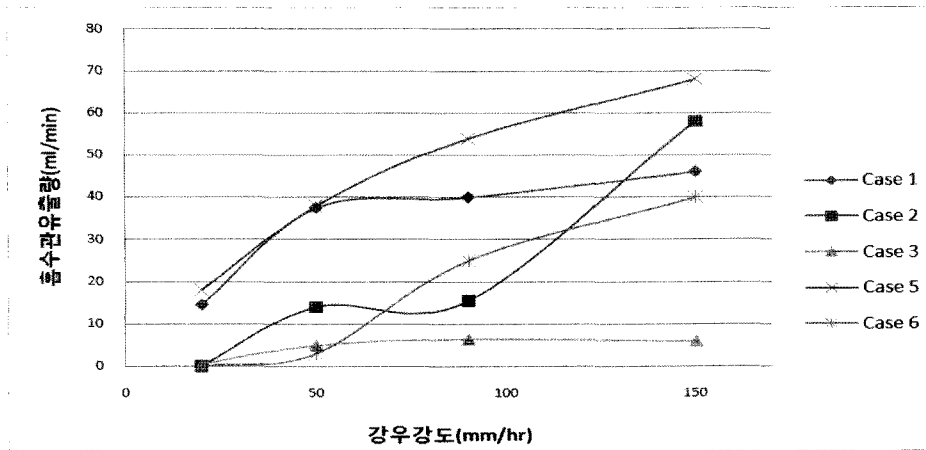


그림 21. 강우강도-유출량 변화(ml/min)

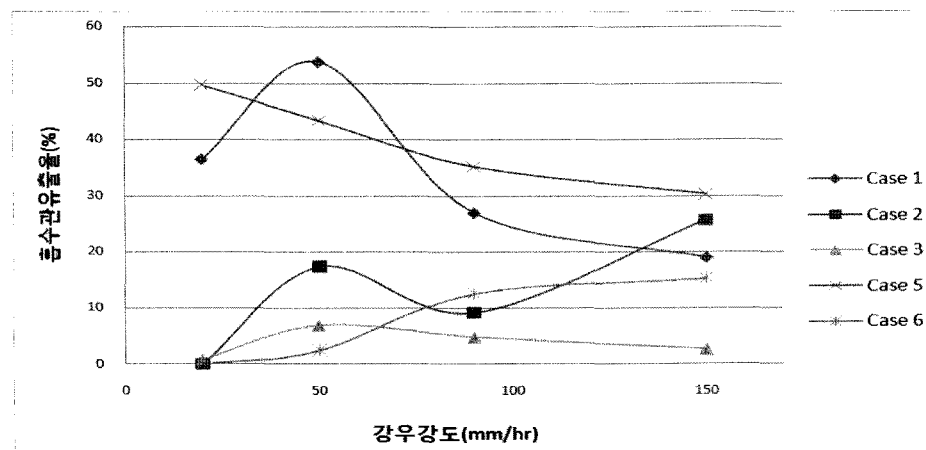


그림 22. 강우강도-유출률(%)

10mm/hr에서는 모든 흡수관에는 Suction압에 미치지 못한다는 의미로 판단된다.

5. 결과의 검토

본 연구에서는 양면친수처리 부직포와 일면친수처리 부직포의 흡수력과 배수능력이 극세사나 일반 부직포의 흡수력과 배수력보다 우수함을 알 수 있다. 표 3에서 보인 8가지 흡수관 재료로 강우강도가 10mm/hr에서부터 높은 순으로 152.0mm/hr까지, 평균 146분간 연속강우의 재현실험으로 각각의 흡수관을 사용하여 흡수력과 배수능력시험을 시행하여 강우강도별 유출량과 유출률을 측정하였다.

설계 및 시공에서 보편적으로 사용되는 유공원형관(Case 7)이나 S형 다발관(Case 8)은 토사가 지중포화상태일 때 배수기능을 가진 구조로 간극수 흡수는 불가능함이 증명되었다. 일반부직포(Case 4)로 구성된 흡수관도 배수가 전혀 되지 않는 직포구조를 가진 것으로 생각할 수 있다. 극세사로 구성된 흡수관은 흡수능력은 좋으나 보수만 되며 배수는 잘 되지 않음을 보여주고 있다. 일면친수처리 부직포 구조인 Case 2(일면친수 부직포+일반 부직포)와 Case 6(일면친수 부직포+일면친수 부직포)를 검토하면 유출률과 유출량에서 Case 1과 Case 5에 비해서 값이 낮게 나왔다. 이는 일면친수처리 부직포는 양면친수처리 부직포에 비해 흡수능력이 떨어진다는 것을 의미한다.

양면친수처리 부직포 구조인 Case 1(양면친수 부직포+일반 부직포)과 Case 5(양면친수 부직포+양면친수 부직포)를 검토하면 Case 1은 강우강도가 큰 92.0, 152.0mm/hr에서는 배수효율이 큰 폭으로 떨어지는 반면 Case 5는 떨어지는 폭이 작다. 따라서 유출량은 Case 5가 강우강도의 비례에 따라 매우 크게 나타나고 있다. 이러한 결과에 따라 흡수관은 양면친수 부직포 단일재료로 구성함이 지중 간극수 흡수 및 배수에 가장 효율적이라 판단된다.

더욱이 재현기간 50년-지속시간 1시간 동안의 우리나라의 확률강우량도(국토해양부, 2000)가 53~109mm/hr로 분포됨을 감안한다면, 표 5에서 52.3mm/hr와 92.0mm/hr에서 양면친수처리 부직포 구조의 흡수관 효율이 각각 43.30 및 35.24%로 다른 구조의 흡수관보다 매우 높게 나타나기 때문에 양면친수처리 부직포 구조로 흡수관을 제작하는 것이 합리적이라 판단된다.

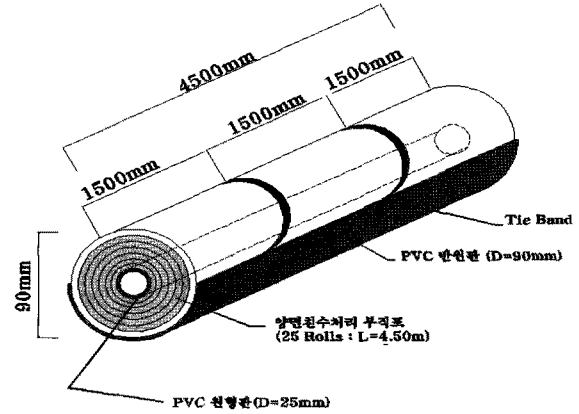


그림 23. 지중흡수관의 제안

이상의 요소들을 감안하여 wetting front의 최대깊이를 2.0m로, 토사사면의 일반적 기울기를 1:1.5로, 흡수관 설치각을 7°로 가정하면 흡수관의 길이는 4.5m로 산출할 수 있다. 즉 PVC 25mm관을 Core로 설치하고 양면친수 부직포를 1.8m 감고 90mm PVC 반월관에 올려 요동방지 띠를 1.5m마다 둘러 제작된 지중 흡수관이 가장 적합한 재료조합으로 사료된다. 따라서 그림 23과 같은 구조의 흡수관을 활용할 것을 제안한다.

지중간극수 흡수관은 불포화상태의 간극수를 흡수, 배출함으로써 간극수압상승으로 인한 토사의 점착력과 내부마찰각 저감을 최소화하여 사면 활동력에 대한 저항력이 떨어지는 것을 방지함으로써 일종의 사면보강공의 보조공법으로 역할을 할 수 있으리라 기대한다.

6. 결론

강우시 불포화토의 지중 간극수압 제어를 위하여 흡수관 설계를 위한 연구를 시행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 여러 종류의 부직포 중 양면친수처리 부직포의 흡·배수능력이 가장 우수하다.
- (2) 양면친수처리 부직포로 제작된 흡수관은 지중 간극수 흡입 및 배수에 매우 좋은 효과를 보이고 있다.
- (3) 흡수관은 사면보강공의 보조공법으로 활용이 가능할 것이다.

참고 문헌

1. 국토해양부 (2006), *건설공사 비탈면 설계기준*, 19.4.3(1), 구미서관.
2. 국토해양부 (2006), *건설공사 비탈면 설계기준*, 19.4.6, 구미서관.

3. 국토해양부 (2003), *구조물 기초설계 기준*, 6.3-(4).
4. 국토해양부 (2003), *구조물 기초설계 기준*, 6.7.3-(4)배수대책.
5. 국토해양부 (1992), *토목공사 일반표준시방서*, 7.3.7-(2).
6. 국토해양부 (2000), “재현기간 50년- 지속시간 1시간 확률강우량도”, *1999년도 수자원관리기법 개발연구조사 보고서/1999년도 제1권 별책부록*.
7. 권태영, 오성남, 박상욱 (1998), “한반도 여름강우의 장기변동과 지역적 특성”, *한국기상학회*, 제34권 제1호, pp.20-30.
8. 김재홍, 박성완, 정상삼, 유지형 (2002), “강우시 습윤에 의한 불포화도 풍화도의 사면안정해석 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 18권2호, pp.123-136.
9. 노홍제, 이승호, 황영철, 천성열 (2006, 9), “사면수평배수공 유무에 따른 사면 안전율 변화에 관한 연구”, *한국지반환경공학회*, pp. 395-400.
10. 문종규 (2008), “사면안정 보강공법 연구보고서”, *안동~서후간 국도확포장공사*, 부산지방국토관리청.
11. 문종규 (2009), “비탈면안정성 검토 보고서”, *개발촉진지구사업 (3지구용접-신기간 도로건설공사*, 경상북도.
12. 문종규 (2010), “사면안정 검토 및 보강공법제안”, *진해국가산업단지 진입로 부산지방국토관리/서진산업(주)*.
13. 이문세, 김경수, 송영석, 류제천 (2009), “강우 및 식생에 의한 토질특성변화특성”, *대한지질공학회*, 19(1), pp.33-41.
14. 이승호, 천성열, 정지수 (2007, 9), “현행 사면수평배수공법에 사용되는 배수재의 문제점 및 개선에 관한 연구”, *한국지반환경공학회*, pp. 341-345.
15. 조성은, 이승래 (2000), “강우특성을 고려한 사면의 표면파괴에 대한 안정성평가”, *한국지반공학회 논문집*, 16(5), pp.107-116.
16. 조성은, 이승래 (2001), “불포화 토사사면의 얕은파괴 해석에 대한 비교 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제17권, 4호, pp.135-143.
17. 정상삼, 김재홍, 박성완 (2004), “강우시 국내 불포화 풍화도 사면에서의 습윤영향 분석”, *한국지반공학회 논문집*, 20(7), pp. 159-169.
18. 정상삼, 최재영, 이재환 (2009), “지속강우특성에 따른 불포화 풍화도사면의 안정성분석”, *대한토목학회 논문집*, 제29권 제1C호, pp.1-9.
19. 한국도로공사 (1990), *고속도로공사 일반표준시방서*, 709.2.
20. 확률강우량도 (2000), “1999년도 수자원 관리기법 개발연구보고서”, *확률강우량도*, 국토해양부, 제1권, 별책 부록.
21. Fredlund, D.G., Xing, A. and Huang, S. (1994), “Predicting the permeability functions for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve” *Can. Geotech J.*, Ottawa, Vol.31, pp.533-546.
22. Gordon H. B., Whetton P. H. Pittok A. B., Fowler A. N., and Haylock M. R. (1992), “Simulated changes in daily rainfall intensity due to the enhanced greenhouse effect: implications for extreme rainfall event”, *Climate Dyn*, 4, pp.83-102.
23. Green, W.H., Ampt, G.A. (1911), “Study on soil physics I, The flow of air and water through soils”, *Journal of Agricultural Sciences* 4(1), pp.1-24.
24. Lim T. T., Rahardjo H., Chang M. F. and Fredlund D. G. (1995), “Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope”, *Canadian Geotechnical Journal*, 33(4), pp. 618-628.
25. Meilani I., Rahardjo H. and Leong, E. (2005), “Porewater pressure and water volume change of an unsaturated soil under infiltration conditions”, *Canadian Geotechnical Journal*, 42(6), pp.1509-1531.
26. Mein, R.G. and Larson, C.I. (1973), “Modeling infiltration during a steady rain” *Water Resour Res.*, Vol.9, No.2, pp.384-394.
27. Ng, C.W.W. and Xi, Q. (1998), “A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage” *Computers and Geotechnics*, Vol.22, N0.1, pp.1-28.
28. Pradel, D. and Raad, G. (1993), “Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes” *J. Geotech. Eng.*, Vol.119, No.2, pp.315-332.
29. Stephens G. L. (1990), “On the relationship between water vapor over the oceans and sea surface temperature”, *J. Climate*, 3, (pp. 634-645).
30. Yoshida Y., Kuwano J. and Kuwano R. (1991), “Rain-induced slope failures caused by reduction in soil strength”, *Soil and Foundations*, 31(4), pp.187-193.
31. Zhang, J., Jiao, J.J. and Yang, J. (2000), “In situ infiltration studies at a hillside in Hubei Prince”, *China, Eng. Geol.*, Vol.57, pp.31-38.

(접수일자 2010. 8. 12, 심사완료일 2010. 10. 25)