배수겸용 쏘일네일링의 지하수위 변화에 관한 축소모형사면 실험연구

Experimental Study of Down-Scaled Model Slope on the Variation of the Ground Water Level of Drainable Soil Nailing

김영남¹, 채영수², 이강일^{3*}

Young-Nam Kim¹, Young-Su Chae², Kang-Il Lee^{3*}

¹Member, Vice President, Dongmyeong Engineering Consultants, Dongmyeong B/D, 501 Cheonggyecheon-ro, Dongdaemun-gu, Seoul, 139-823, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, The Suwon University, 17, Wauan-gil, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 445-743, Republic of Korea

³Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, Republic of Korea

ABSTRACT

This study aims at investigating the behavior of the ground water level when installing upward soil nails that drain water as well. To do this, a series of down-scaled model tests were conducted. A model slope with weathered soils was prepared and then an artificial rain was scattered on the slope. The relative densities of soil specimen were 60%, 75%, and 90%, and the rainfall intensities 50mm/hr, 75mm/hr, 100mm/hr, and 125mm/hr, respectively. The experimental parameters, such as the ground water level, ratio of soil runoff, and failure mode of the slope were measured and analyzed. As the results, It may be concluded that the ground water level in the slope supported by drainable upward soil nails increases very gradually while the unsupported soil changes dramatically. In addition, the ground water level becomes constant and no failure occurs as time goes by. In case of the relative density of 75%, the runoff ratio seemed to increase up to about 8~15% after reinforcement.

요 지

본 연구는 국내에서 널리 사용되고 있는 하향식 쏘일네일과 수평배수공의 별도 설치에 대한 일반적인 사고의 틀에서 벗어나 보강과 동시에 수평배수를 겸할 수 있는 상향식 쏘일네일을 설치할 경우 지하수위의 거동에 대한 특성을 축소모형실험을 통해 연구하였다. 이를 위해 실내에서 모형토조 내에 풍화토 지반의 모형사면을 만들고 그 위에 인공강우를 뿌리는 실험을 통해 상대밀도가 60%, 75%, 90%인 각 지반조건별로 50mm/hr, 75mm/hr, 100mm/hr 및 125mm/hr인 4가지 경우의 강우강도에 대하여 실험을 하였으며, 이로 부터 시간에 따른 지하수위, 사면의 유출비 및 사면의 파괴형태를 측정하고 분석하였다. 본 연구결과 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일로 보강한 지반의 경우 무 보강지반에 비해 지하수위 상승이 매우 완만하고 일정 시간이 경과 한 후 더 이상 증가하지 않았으며, 지반의 파괴도 발생하지 않았다. 또한, 상대밀도가 75%인 경우 보강 후는 보강 전에 비해 약 8~15%정도 유출비가 증가하였다.

Keywords : Down-scaled model test, Horizontal drain, Drainable soil nailing, Artificial rain

1. 서 론

우리나라는 여름철 집중 강우시 사면이 갑작스럽게 붕괴되는 사고로 큰 재난을 겪고 있다. 특히, 토사사면과 그 하부에 존재하는 절리가 발달된 암반의 경우 강우침투로 인해 파괴가 자주 발생하지만, 강우시 지하수위 상승에 관

Received 7 Feb. 2013, Revised 24 Mar. 2013, Accepted 24 Mar. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K. I. Lee)

한 사면파괴의 메커니즘 연구는 미비하다. 또한 강우시 사면안정 해석조건을 안정적인 측면인 지표면까지 지하수가 상승한다고 간주하여 해석을 실시하는 경향이 있어 과도한 사면보강으로 경제적 손실은 물론 정작 강우시 사면붕괴의 형태와 다른 지반거동을 해석하여 실제 필요한 대책을 수립하지 못해서 집중 호우시 사면의 불안정 요인이 여전히 내재되어 있어 많은 연구가 필요한 실정이다.

Kim et al.(1991)은 모형비탈면과 강우재현장치를 이용한 실험을 통해 습윤전선의 진행과정과 지표유출의 영향 및 강우지속시간에 따른 간극수압 변화를 연구하였고, Choi(2006)은 모형실험을 통해 강우시 비탈면의 간극수압 변화에 대한 연구를 수행하였다. 또한 Lee(2006)은 불포화 무한사면의 침투거동에 대하여 모형사면을 제작하여 사면내의 간극수압에 대한 연구를 수행하였고, Baek(2006)은 모형사면을 제작하여 불포화 사면에 대한 전단강도의 변화 및 사면내 포화 깊이 및 간극수압 등에 대하여 연구를 수행하였다. 또한 Wang et al.(2001)은 강우시 사면의 토석류는 사면 내부의 과잉간극수압에 의한 액상화가 원인이라는 점에 착안하여 인공강우를 이용한 모형실험으로 간극비와 입도분포에 따른 간극수압형성 및 토석류 발생 유형에 대한 연구를 수행하였고 Kamalnath(2005)는 강우에 대한 풍화토사면의 거동특성에 대하여 도요라 샌드를 이용하여 실제 사면을 축소 모델링하여 간극수압과 지하수위를 측정하고 사면의 파괴거동을 연구하였다. 더불어 Tami et al.(2004)은 세립토와 조립토층으로 구성된 경사사면 토조를 제작하여 인공강우 실험장치로 부터 정상상태의 침투실험을 통해 불포화토의 함수특성곡선 이력현상의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 홍콩의 GEO(1985)가 수평배수공의 지하수위 저하효과에 대한 분석을 하고 이것을 설치하였을 때 수위가 저하되는 정도를 평가하였다.

본 연구는 풍화토지반에 배수검용 쏘일네일링의 설치유무에 따라 강우시 사면내로 침투되는 지하수위 거동에 대한 영향을 알아보기 위해서 실내에서 토조(폭×높이×길이=400mm×500mm×800mm) 내에 풍화토 지반의 모형사면을 만들고 그 위에 인공강우를 뿌리는 실험을 실시하였

다. 실험조건은 상대밀도가 60%, 75%, 90%인 각각의 지반조건에 강우강도가 50mm/hr, 75mm/hr, 100mm/hr 및 125mm/hr인 4가지 경우이며 모형토조 내에는 L자형으로 피조미터를 설치하여 지하수위를 측정하였으며 강우로 인한 사면의 유출비 및 사면파괴형태도 측정하였다.

실험은 모형사면에 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일을 설치했을 경우와 이를 설치하지 않았을 경우(이하 무보강 사면)에 대하여 실시하였는데 이는 배수재가 사면에 있을 경우와 없을 경우의 비교를 하고 보강되지 않은 일반적인 사면의 강우시 거동을 파악하기 위함이다. 또한 보강사면(즉 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일을 지반에 설치했을 경우)에 대하여 모형실험을 실시한 이유는 현재 국내에서 시행되고 있는 우기시 절토사면 안정해석의 대부분은 지하수위를 지표면에 놓고 해석을 수행하고 있으며, 지하수가 누출되는 지역은 수평배수 시설을 시공함에도 불구하고 안정해석시 배수에 관한 고려가 이루어지지 않고 있어 향후 수평배수재에 의한 수위저하 효과를 고려할 수 있는 기초자료를 제공하기 위함이다.

2. 시료준비 및 강우모형 실험장치

2.1 시료준비

2.1.1 토질재료

모형실험에 사용된 흙 재료는 우리나라 전역에 가장 넓게 분포하고 있을 뿐만 아니라 가장 이용도가 많은 흙인 화강풍화토를 사용하였다. 이 재료는 건설현장에서 쉽게 접하는 흙으로서 풍화의 진행 정도에 따라서 흙 입자내의 간극이 잘 발달되어 있어 하중을 받으면 큰 변형이 발생되며 변형량은 간극비에 크게 의존하는 특징을 가지고 있다. 시료는 입자가 매우 조립인 경기도 포천지역에서 채취를 하였으며, 공학적 특성은 Table 1 및 Fig. 1과 같이 통일분류상 SM에 해당하며, No. 200번체 통과량이 17.2%이다. 또한 Fig. 2와 같이 다짐실험에서 얻은 최적 함수비가 11.6%이고 최대건조밀도는 18.1kN/m³인 재료에 해당한다(Han et al., 2007).

Table 1. Physical property of weathered granite soil

Sample Location	Compaction Test		Atterberg Limit		#200 Passing (%)	G _s	Li (Ignition Loss)	USCS
	γ_{dmax} (kN/m ³)	O.M.C (%)	Liquid (%)	Plastic (%)				
Pocheon	18.1	11.6	N.P		17.2	2.67	2.80	SM

Fig. 1. Grain size distribution of weathered granite soil

Fig. 2. Compaction test of weathered granite soil

Table 2. Condition of model test

Relative Density (%)	Experimental Type	Rainfall Intensity(mm/hr)			
		50	75	100	125
60	Non-reinforced soil	○	○	○	○
	Reinforced soil	○	○	○	○
75	Non-reinforced soil	○	○	○	○
	Reinforced soil	○	○	○	○
90	Non-reinforced soil	○	○	○	○
	Reinforced soil	○	○	○	○

2.1.2 실험조건

본 연구에서 적용한 실험조건은 Table 2와 같이 지반의 상대밀도가 60%, 75%, 90%인 각 경우에 대하여 서울관측소의 강우조건을 고려하여 강우강도를 각각 50, 75, 100, 125mm/hr로 변화시키면서 무 보강사면과 배수공을 겸한 상향식 쏘일네일링 보강지반에 대하여 모형실험을 실시하였다.

Fig. 3. Diagrams of rainfall device and model container

Fig. 4. Diagram of control part

2.2 강우모형장치

2.2.1 모형토조

실내 모형토조 장치는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 모형토조 (폭×높이×길이=400mm×500mm×800mm), 저수조, 강우 재현장치 및 컴퓨터 등으로 구성되어 있다.

모형토조는 Fig. 3과 같이 두께 10mm의 투명한 아크릴 재질의 박스로 제작하여 철재로 제작된 틀 위에 장착하였으며, 모형토조 우측 하단부에 우수의 배수를 위한 배수구멍을 설치하여 사면의 유출량을 측정할 수 있도록 하였다. 또한 사면의 토립자나 이물질의 유출을 막기 위하여

(a) rainfall device

(b) nozzle

Fig. 5. Rainfall simulation device

No.200번체 눈금 크기의 망을 설치하였다. Fig. 4는 분무장치를 통해 강우량을 제어할 수 있는 제어부분에 대한 모식도를 나타낸 것이다.

2.2.2 강우재현장치

강우장치는 Fig. 5와 같이 2개의 강관에 각각 4개의 노즐 즉, 총 8개의 노즐을 부착하였다. 이러한 노즐에는 저수조에서 공급되는 공기압과 수압조절 장치를 통해 노즐 속에서 공기와 물이 혼합하여 분무형태로 분사되도록 하여 강우를 재현하도록 되어 있다. 또한 토조 내의 사면의 경사가 1:1로 만들어지기 때문에 이에 대응하여 전체사면에 강우가 골고루 뿌려지도록 하기 위해서 강우장치의 지지대에 이와 비슷한 경사를 주어 물이 분사되도록 만들었다. 분사되는 노즐의 분사량은 실험 전에 각 노즐 당 분사되는 양을 반복하여 측정해서 일정하게 물이 분사되도록 노즐장치를 제어하였다.

2.2.3 지하수위 측정장치

모형토조 내에 형성되는 지하수위를 측정하기 위하여 모형토조 바닥의 중심을 기준으로 L자형으로 내경 6mm, 길이 60cm의 PVC투명 튜브를 이용하여 모형토조 아크릴 판 벽면에 부착하여 지하수위를 20분 단위로 측정하였다. 지하수위 관측위치는 Fig. 6과 같이 총 8개의 스탠드파이프를 10cm간격으로 사면하단 0번부터 사면상단 7번까지 설치하여 각 위치별로 지하수위를 측정하였다. 또한 강우재현 초기부터 사면에 살수되는 강우의 양과 사면에서 유출된 양을 배출탱크에 모아서 실험이 종료된 후 바로 그 양을 측정하여 유출비를 계산하였다.

Fig. 6. Location of the ground water level measurement

Fig. 7. Specification of model slope and reinforcing element installation

2.3 모형사면 제작

2.3.1 모형사면

모형사면 제작은 먼저 현장에서 채취한 풍화토를 드라이오븐에서 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 건조시켜 필요한 양만큼을 채취하여 다짐조건에 맞추어 최적함수비(11.6%) 상태인 약 12%

Fig. 8. View of a bottom-up horizontal drain board installation for model test(cm)

로 물을 가하고 손으로 잘 혼합하여 시료를 1시간 정도 보관하였다. 그 후 모형토조 내에 6층으로 체적 등분하여 동적다짐을 하여 사면을 제작하였다. 사면 제작의 상대밀도는 최대건조밀도와 최소건조밀도를 시산법을 이용하여 상대밀도에 적합한 건조밀도를 계산하여 모형토조의 부피에 적정량의 토량을 산정하여 사면을 제작하였다.

상대밀도는 실험조건별로 60%, 75%, 90%로 해서 중간과 조밀, 매우조밀의 3단계로 구분하여 토사사면을 형성하고 이에 맞는 건조밀도를 구하였으며 사면의 경사는 사면의 저부파괴 등의 관찰을 위하여 Fig. 7과 같이 1:1로 하여 모형사면을 제작하였으며 배수를 겸한 상향식 쓰일네일의 보강재는 상향 5°의 경사각으로 네일을 설치하였다.

2.3.2 모형장치용 쓰일네일 보강재

수평 배수재의 길이는 그라우트식 네일의 경우 일반적으로 $L=0.8\sim1.2H$ (H =구조물의 전체 높이)인 점을 감안하여 25cm인 경우로 가정하여 실험하였고 네일의 설치각도는 상향 5°로 설치하여 측정하였다. Fig. 8은 모형실험용 배수기능을 겸한 상향식 쓰일네일의 모식도를 나타낸 것으로 PVC관의 내경은 4mm이다. 전체의 길이는 25cm이며 그 중 배수가 가능한 배수공은 10cm로 그림과 같이 배수를 위해 2.0mm 정도의 구멍을 뚫었다. 이와 같은 모형실험용 쓰일네일을 사면내부의 지하수위를 배수시키고 사면 전체의 보강효과를 재현하기 Fig. 8의 단면도와 정면도에서 나타난 바와 같이 모형사면에 10cm간격으로 가로 3개, 세로 4개씩 총 12개를 설치하였다.

3. 무보강 및 보강사면의 지하수위 관측결과

3.1 무보강사면

Fig. 9는 무보강 사면에 대하여 강우시 모형사면의 지하수위 측정위치(Fig. 6참조)에서 각 위치별로 시간별 지하수위의 상승형태를 상대밀도가 75%인 경우를 대표적으로 나타낸 결과이다. 강우초기에는 사면 앞쪽에서 지하수위가 사면의 안쪽보다 더 크게 상승하다가 강우시간이 증가하면서 사면 안쪽 지하수위의 상승이 더 크게 발생하고 있다. 강우강도가 75mm/hr 및 100mm/hr인 경우는 강우강도 초기에는 지하수위 상승이 매우 느리게 나타나다가 강우시작 후 79분(Fig. 9(b)) 및 77분(Fig. 9(c))대에서 급격한 지하수위 상승현상이 나타나고 있는데 이는 불투수층인 모형실험 바닥위의 토층에 강우로 인해 침윤전선이 발생하여 강우가 지속되면 비 포화대를 통하여 모형실험의 바닥까지 침투하여 지하수위가 상승하고 아울러 강우로 인한 상부 쪽에서 발생된 습윤대가 확장되면서 하강하고 상승된 지하수위가 이와 조우되면서 발생한 현상으로 판단된다.

3.2 보강사면

무보강 사면에 대한 모형실험 결과와 비교하기 위해 보강사면에 대하여도 동일한 실험을 실시하였으며 지하수위 측정 위치는 무보강 사면과 동일하다.

Fig. 10은 보강사면의 경우에 대하여 대표적으로 상대

(a) Rainfall Intensity 50mm/hr

(b) Rainfall Intensity 75mm/hr

(c) Rainfall Intensity 100mm/hr

(d) Rainfall Intensity 125mm/hr

Fig. 9. Increase of the ground water level at a slope with no reinforcement ($D_r=75\%$)

(a) Rainfall Intensity 50mm/hr

(b) Rainfall Intensity 75mm/hr

(c) Rainfall Intensity 100mm/hr

(d) Rainfall Intensity 125mm/hr

Fig. 10. Increase of the ground water level at a slope with reinforcement ($D_r=75\%$)

밀도가 75%인 경우에 대하여 각 위치별로 시간에 따른 지하수위 상승형태를 나타낸 것이다. 이때 무보강사면의 경우와 비교하기 위하여 동일 시간으로 관측을 시행하였거나 또는 보간법으로 동일시간대로 환산하여 보강사면의 지하수위를 도식화 하였다. 무보강 사면과 유사하게 강우 초기에는 사면 앞쪽(X축 0m 위치)에서 지하수위가 더 크게 상승되다가 강우시간이 증가함에 따라서 사면 앞쪽보다 사면 안쪽(X축 70m위치)에서 더 크게 지하수위 상승 현상이 발생되었다. 또한 강우강도가 75mm/hr, 100mm/hr 및 125mm/hr인 경우 지하수위가 급격한 상승형태를 보였지만 무보강사면에 비해 그 크기는 작았다. 강우강도가 50mm/hr인 경우는 무보강 사면의 경우처럼 시간에 따라서 비교적 완만하게 지하수위 상승이 발생하였다.

3.3 보강 전후 사면의 지하수위 비교분석

Fig. 11은 Fig. 9 및 Fig. 10의 X축 40cm위치(Fig. 6의 스탠드파이프 No.4번 위치)에서 강우강도가 50mm/hr, 75mm/hr, 100mm/hr 및 125mm/hr인 경우에 대하여 각 상대밀도(60%, 75%, 90%)별로 시간에 따른 지하수위와의 관계를 모형사면에 대하여 무 보강사면과 배수기능을 겸

한 상향식 쏘일네일로 보강한 사면에 대한 실험결과를 비교하여 나타낸 것이다.

실험결과에 의하면 상대밀도와 관계없이 전반적으로 무 보강사면에 비해 보강한 사면에서의 지하수위가 낮게 측정 되었다. 또한 지하수위 상승 후 일정시간에서 보강 전에 비해 보강 후 사면에서 지하수위가 더 이상 증가하지 않고 안정되어가는 것을 볼 수 있다. 특히, 상대밀도가 75%인 경우는 보강 전후의 지하수위의 상승폭 및 안정화 양상이 뚜렷이 나타나고 있으며 대부분의 지하수위도 강우강도에 따른 지체시간은 있지만 보강 전에 비해 보강후의 지하수위 상승 지체시간이 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 Fig. 11의 시험결과를 하부지반에서 지하수위가 최초로 생성되는 시간대를 상대밀도 및 강우강도별로 정리한 것이다. 이 표에 의하면 상대밀도가 60%인 경우는 강우강도에 따른 지하수위 생성시간의 차이는 크지 않았지만 상대밀도가 90%인 경우는 강우강도가 클수록 하부에 지하수위 생성시간이 크게 지체되어 나타나고 있다. 그러나 상대밀도가 75%인 경우는 상대밀도 90%와는 정반대의 현상이 나타났다. 이와 같은 현상은 무보강사면 및 보강사면에서 동일하게 나타났으며 지체되는 시간은

Fig. 11. Comparison of the ground water level curve according to time before and after reinforcement

Table 3. Ground water level creation time at the bottom of slope during rainfall

Rainfall Intensity (mm/hr)	Ground water level creation time without reinforcement (min)			Ground water level creation time with reinforcement (min)		
	60%	75%	90%	60%	75%	90%
50	14	28	20	16	31	24
75	18	11	46	20	13	43
100	22	7	86	26	9	88
125	21	6	110	23	8	113

무보강 사면에 비해 보강사면에서 약간 더 크다.

특히, 상대밀도가 90%인 경우 다른 상대밀도에 비해 지하수의 최초 생성시간이 크게 지체되어 나타나고 있는데(Fig. 11(c)), 이는 다짐도가 높을수록 습윤전면 흡수력(wetting front section)이 증가하고 침투능력이 감소하기 때문이며(Yu, et al., 2004) 강우강도와 포화투수계수와 관련된 한계강우강도(I/K_{sat})로도 설명할 수 있는 현상이다. 즉, 강우강도가 지반의 포화투수계수의 4~5배까지는 강우강도가 증가할수록 습윤전선의 진행속도가 빨라지나 5배 이상일 때는 강우강도와 관계없이 습윤전선의 진행이 일정하다고 하며 이를 한계강우 강도라 하였으며(Kim, et al., 1991) 이는 강우강도가 아무리 크더라도 지반내로 침투되는 수량은 일정한 한계가 있다는 것이다. 본 실험에서도 상대밀도가 90%인 경우는 강우강도가 지반으로 침투할 수 있는 것보다 커서 강우의 일부분만 지반내로 침투하고 나머지는 지표층을 통하여 유출하여 지하수위 상승 및 초기 지하수위 생성시간의 지체현상이 크게 발생된 것으로 보인다.

3.4 사면유출비

Fig. 12는 모형 실험시 지하수위가 안정되었을 때, 즉 강우발생 120분~300분 경과후의 사면에서 유출된 유량을 측정하여 보강전후의 유출비를 비교분석하여 나타낸 것이다. 강우강도 및 상대밀도의 크기 여부와 무관하게 보강전에 비해 보강후의 유출비가 모두 더 크게 측정되었다. 특히 Fig. 12(b)와 같이 상대밀도가 75%인 경우는 배수기

능을 겸한 쓰일네일을 설치한 경우의 유출비가 무보강시의 유출비에 비해 약 8~15% 상승하였다. 이는 배수기능을 겸한 상향식 쓰일네일의 배수공을 통해 사면내로 침투하는 지하수위의 일정부분을 배수하고 있음을 나타낸 것이다.

또한 실험결과에 의하면 상대밀도가 75%일 경우가 강우로 인해 사면내 침투가 가장 잘 이루어지고 있음을 알 수 있었고 이는 사면의 불안정성이 커지기 때문에 이러한 지반에 배수공을 겸한 상향식 쓰일네일을 설치할 경우 사면안정에 대한 효과가 기대된다. 더불어 인공적으로 굴착되어 구속압이 해방된 상태로 대기중에 노출되는 풍화토 사면은 Slaking현상 등에 의해 상대밀도가 낮아지게 되며 이런 현상에 대해서도 배수공을 겸한 상향식 쓰일네일 공법의 적용성은 상당히 효용성이 클 것으로 판단된다.

4. 사면의 파괴형태

4.1 무 보강사면에서의 파괴형태와 지하수위

Table 4는 지반의 상대밀도 및 강우강도 조건에서 무보강 및 보강사면에 대하여 실험을 진행하는 과정에서 관찰된 사면의 파괴형태를 정리한 것이다. 사면의 파괴형태를 종합하면 다음과 같이 크게 세 가지 형태의 파괴로 분류된다. 먼저 상대밀도가 75%와 90%인 경우는 강우강도 50mm/hr 일때 표층파괴(얕은파괴), 다음으로는 상대밀도 60%이고 강우강도가 100mm/hr 및 125mm/hr일 경우는 사면 중앙부에서의 저부파괴, 마지막으로 상대밀도 75%이고 강

Fig. 12. Comparison of outflowing ratio of a slope before and after reinforcement

Table 4. Summary of failure mode of a slope without reinforcement

Rainfall Intensity (mm/hr)	Relative Density(%)		
	60	75	90
50	Partly scoured	Surface failure (shallow failure) → Initial failure at 35 min Overall shallow failure at 210 min (Refer to Fig. 14(a))	Surface failure (Shallow failure)
75	Partly scoured	Base failure(deep failure)	Partly scoured
100	Central base failure	Base failure (Deep failure) → failed in the lower part of the slope at 13min → failed in the center of the slope at 76min → failed in the top of the slope at 81min Entire failure at 107 min (Refer to Fig. 14(c))	Surface failure (Shallow failure)
125	Central base failure → failed in the lower part of the slope at 54min → failed in the center of the slope at 62min Entire failure at 92 min (Refer to Fig. 14(b))	Base failure (Deep failure)	Partly scoured

Fig. 13. Comparison of failure mode by the overall ground water level of slope without reinforcement

우강도 75mm/hr, 100mm/hr 및 125mm/hr인 경우에는 저부파괴(깊은파괴) 형태를 보였다.

또한 Fig. 13은 무 보강사면에서 수행된 상대밀도 및 강우강도조건에 대하여 시간에 따른 지하수위의 변화를 종합하여 나타낸 것이며 더불어 Table 4에서 제시한 파괴형태와 시간에 따른 지하수위 상승과 어떠한 관계를 보이는지를 그래프 상에 얕은파괴(Shallow Failure, SF)와 깊은파괴(Dip Failure, DF)로 나누어 표시하였다. 이때 지하수위는 모형실험장치의 지하수위 측정용 스텐드파이프 중 No.4 위치에서 측정된 값이다. 이 실험결과에서 흥미로운 점은 깊은파괴(DF)가 발생된 경우는 Table 3 및 Fig. 14에서와 같이 강우로 인하여 모형실험장치 바닥에 지하수위가 생성된 시간도 빠르지만 이와 함께 짧은 시간에 지하수위 상승이 가파르고 그 크기도 파괴가 발생되지 않은 조건

에 비해 더 크게 상승되었다는 점이다. 또한 파괴가 발생하는 지하수위 상승조건일지라도 약간의 지체시간을 갖고 지하수위가 상승한 상대밀도가 90%이고 강우강도가 50mm/hr인 경우와 상대밀도 75%이고 강우강도가 50mm/hr인 경우는 표층파괴(SF)가 발생하였으며 이러한 상승형태와 유사하게 지하수위가 상승한 상대밀도 60%이고 강우강도가 50mm/hr 및 75mm/hr은 사면파괴가 발생하지 않았다.

4.2 무보강 사면의 시간대별 파괴형태

사면의 파괴형태 중 대표적인 파괴형태인 표층파괴, 사면중앙 저부파괴, 저부파괴에 대하여 파괴형태를 시간대별로 Fig. 14 및 Table 4에 나타내었다.

표층파괴의 대표적인 경우는 상대밀도가 75%이고 강우강도가 50mm/hr일 때의 파괴형태로 시간대별 파괴형태는 Fig. 14(a)와 같다. 이 경우는 강우가 시작된 지 약 35분이 경과한 후 사면 일부분에서 파괴가 시작되는 것이 관찰되었으며, 그 후 계속적인 세굴현상이 동반되면서 최종적으로 강우시작 후 210분대에서는 사면의 파괴면적이 점점 더 확대되면서 저부파괴의 형태와는 다르게 사면표층부가 약 2~3cm 정도의 깊이로 사면이 파괴되는 얕은파괴 형태를 보였다. 이런 파괴형태의 영역은 사면 윗부분 근처까지만 확대되고 그 이상은 확대되지 않았다.

사면중앙 저부파괴는 Fig. 14(b)와 같이 상대밀도가 60%이고 강우강도가 125mm/hr인 경우이다. 이 경우는 강우가 시작된 지 약 54분대에서 최초 사면하단부에서 파괴가 시작되었다. 그 후 약 62분 정도에 사면중앙부로 파괴형태가 확대되다가 최종적으로 약 92분대에 사면중앙부에서

Fig. 14. Diagram of failure mode by the time

Fig. 15. Comparison of failure mode of a slope with relative density 75% before and after reinforcement

큰 저부 원호파괴가 발생한 경우이다.

저부파괴의 대표적인 경우는 상대밀도가 75%이고 강우강도가 100mm/hr인 경우로서 시간대 별 파괴형태는 Fig. 14(c)와 같다. 이 경우는 강우가 시작된 지 약 13분이 지나면서 사면의 하단부에서 약간의 파괴가 시작이 되었다. 그 이후 76분이 경과한 후 사면의 중앙부까지 파괴가 확대되었으며 81분대에는 사면의 정상부까지 파괴가 확대 되었다. 또한 107분대에는 그 파괴 영역이 더욱더 확대되어 완전한 파괴형태로 이어졌다. 이 경우는 다른 실험의 경우에서 발생된 파괴형태와는 다르게 파괴 활동면을 기준으로 해서 선행파괴가 추가파괴를 유발하는 다중파괴 형태로 점진적으로 보인 점이다.

4.3 무보강사면과 보강사면의 파괴형태 비교

상대밀도가 75%이고 실험을 실시한 모든 강우강도에 대하여 무 보강사면과 보강사면의 강우시 파괴형태 거동을 사진으로 비교 분석하였다. 먼저 Fig. 15(a)는 보강 전 즉, 무보강 사면에 대하여 인공강우를 뿌린 후 사면이 파괴된 상태의 실험결과를 나타낸 그림이며, Fig. 15(b)는 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일로 보강 한 후 강우실험이 종료된 후의 실험결과를 나타낸 것이다. 이 두 종류의 사면을 비교해보면 보강 전의 경우는 모든 사면에서 파괴가 발생한 반면 보강후의 사면은 모든 강우강도 조건에서 사면 하단부에 지하수가 많이 고여 있는 것을 제외하고는 사면의 어떤 곳에서도 파괴 및 세굴의 흔적을 엿볼 수가 없이 안전한 것으로 관찰되었다. 특히 실험과정에서 수평배수공부분으로 지하수의 유출이 관찰되었는데 이는 수평배수공이 지하수위 상승을 제어함으로써 지반의 안정성에 크게 기여한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 기존의 쏘일네일의 경우 네일 설치와 더불어 수평배수공을 별도로 설치하는 방법과는 달리 수평배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일 공법에 대한 적용성을 확인하기 위해 실내 모형실험을 통해 강우시 지하수위 및 사면의 파괴형태에 대하여 연구하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일로 보강한 지반의 경우 상대밀도 및 강우강도 조건에 관계없이 무 보강지

반에 비해 지하수위 상승이 매우 완만하고 일정시간이 경과 한 후 더 이상 증가하지 않았으며 지반의 파괴도 발생하지 않았다. 이는 배수겸용 쏘일네일이 배수기능과 더불어 지반의 보강역할을 한 것으로 판단된다.

- (2) 보강 전, 후의 사면의 유출비를 비교해 본 결과는 강우강도 및 상대밀도와 무관하게 보강 전에 비해 보강후의 유출비가 더 크게 측정되었다. 특히 상대밀도가 75%인 경우에는 보강 후 유출비는 보강 전에 비해 약 8~15%정도 증가하였는데 이는 사면내의 배수겸용 쏘일네일이 배수기능을 하고 있음을 알 수 있다.
- (3) 강우로 인한 무 보강사면에 대한 사면파괴 형태를 분석한 결과 선행파괴가 추가 붕괴를 유발하는 다중파괴가 발생하였다. 이러한 파괴양상은 상대밀도가 중간 내지 조밀한 정도 이면서 강우강도가 큰 경우이며 초기 지하수위 생성시간과 그 상승속도도 매우 빠른 경우에 발생하였다.
- (4) 본 연구결과 강우시 지하수위는 무보강시 사면높이의 55~70%정도까지 상승하는 것으로 나타났다. 이는 현재 국내에서 강우시 지하수위가 지표면까지 상승하는 것으로 가정하여 사면의 안정성 검토를 시행하는 것은 지나치게 보수적일 뿐만 아니라 표층파괴나 선행파괴가 추가 붕괴를 유발하는 다중파괴가 발생 할 수 있는 가능성을 고려하지 못하여 실제의 지반 거동과도 차이가 있을 수 있는 것이 인지되어 개선이 필요하다.

References

1. Baek, U. J. (2006), *An Experimental Study of a Slope in Weathered Soils Considering the Characteristics of Rainfall*, Master Thesis, Daejin University, pp.22-62.
2. Choi, K. Y. (2006), *A Study on the Behavioral Characteristics of Unsaturated Infinite Slops through Laboratory Model Test*, Ph.D Thesis, Hongik University, pp.7-74.
3. GEO (1985), "Geotechnical Manual for Slope", *Geotechnical Control Office*, Hong Kong, pp.53-70.
4. Han, S. S., Baek, Y., Kwon, O. I., Lee, K. I., Chae, Y. S. and Kim, Y. N. (2007), "A Model test of Upward Soil Nailing Technique Combined with Horizontal Drainage System", *Proceeding of Korean Geotechnical Society*, pp.313-318.
5. Kamalnath Dissanayake A. (2005), *Rain-Induced Groundwater Flow Experiments in Relation to the Initiation of Shallow Landslides in Hilly Areas*, Ph.D Thesis, Hiroshima University.
6. Kim, S. G. and Kim, Y. M. (1991), "Slope Instability Due to Rainfall", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.7,

No.1, pp.53-64.

7. Lee, S. K.(2006), *A Study on the Seepage Behavior of Unsaturated Infinite Slopes*, Ph.D Thesis, Hongik University.
8. Tami, D., Rahardjo, H., Leong, E. C., and Fredlund, D. G. (2004), "Design and Laboratory Verification of a Physical Model of Sloping Capillary Barrier", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, pp.814-830.
9. Wang, G. and Sassa, G. (2001), "Factors Affecting Rainfall-Induced Flowslides in Laboratory Flume", *Geotechnique*, Vol.51, No.7, pp.587-599.
10. Yu, N. D., Jeong, S. S., Kim, J. H. and Park, S. Y. (2004), "Effect of Rainfall-Induced Infiltration on Unsaturated Weathered Soils with Varying Clay Contents", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.20, No.8, pp.1-8.