수치해석을 통한 상향식 배수검용 쏘일네일링에 대한 강우모형사면 거동 연구

Numerical Analysis on the Behavior of a Slope with Upward Drainable Soil Nails during Rainfall

김영남¹, 이철규², 이강일^{3*}

Young-Nam Kim¹, Choul-Kyu Lee², Kang-Il Lee^{3*}

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

²Non-member, Ph.D Candidate, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 11-1, Sundan-dong, Pocheon-si, Gyeonggi-do, 487-711, 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

In this study, numerical analyses and model tests were conducted to figure out the behavior of a slope reinforced by upward drainable soil nails during rainfall. The model tests were carried out on both reinforced and unreinforced slopes. To verify the results of the tests, seepage analyses were performed and compared with the test results using a commercial program, SEEP/W. The results showed that the numerical analyses have in overall a good agreement with the experiments in the variations of ground water level and pore water pressure even though there is some time delay for the experiment before the changes in the ground water level and pore water pressure after rainfall are observed, while the numerical analyses not.

요 지

본 연구는 보강과 동시에 수평배수를 겸용하는 상향식 쏘일네일에 대한 지반거동을 파악하기 위해서 모형실험과 수치해석을 이용하여 그 거동을 연구하였다. 모형실험은 모형토조 내에 상대밀도 및 강우강도 조건별로 풍화토 지반의 모형사면을 만들고 그 위에 인공강우를 뿌리는 실험을 통해 쏘일네일을 설치하지 않는 무보강조건과 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일을 설치하는 보강조건으로 나누어 실험을 실시하였다. 또한 실험결과를 검증하기 위하여 침투해석 프로그램인 SEEP/W를 사용하여 모형실험이 시행된 조건으로 침투해석을 실시하고 그 결과를 비교분석하였다. 본 연구 결과 강우로 인한 지하수위와 간극수압의 변화는 수치해석의 경우는 지체시간이 없이 변화되는데 비하여 모형실험은 지체시간이 있는 상태로 나타났지만 전반적으로 최종 도달시점의 측정값은 유사하게 나타나 수치해석으로 모형지반을 모사할 수 있었다.

Keywords : Upward drainable soil nail, Pore water pressure, Reinforced and unreinforced slope

1. 서 론

사면의 안정성에 매우 중요한 강우시 사면의 거동은 국내의 경우 각 기관별로 제안하고 있는 조건이 약간 상이하지만 대부분 강우에 의해 지하수위가 지표면까지 상승하

는 것으로 보고 한계평형법에 의해 활동에 대한 안정성을 검토하고 있으며, 이로 인해서 사면의 활동 파괴면이 지표 부근에서 발생하는 얇은파괴 보다는 사면심부에서 발생하는 것으로 검토되고 있다. 또한 이를 바탕으로 보강범위를 결정하다 보니 사면보강(쏘일네일링 또는 어스앵커) 범위가 사면심부 파괴활동면 외부에 위치하도록 보강대책을 수립하여야 하는 불합리하고 비경제적인 과 보강이 이루어지고 있으며 실제의 지반거동과 상이한 접근이 이루어지고 있다. 또한 불안정한 사면보강 설계시 기존의 방법은

Received 19 Dec. 2013, Revised 4 Feb. 2014, Accepted 6 Feb. 2014

*Corresponding author

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

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

지하수 누출이 이루어지는 곳에 수평배수공을 설치하거나 일률적으로 약 5m~10m 간격으로 수평배수공을 배치시키고 있으나 이러한 수평배수를 고려하고도 설계시 또는 안정해석을 수행시 배수에 관한 고려는 이루어지지 않고 있는 실정이어서 과다한 보강 설계를 피할 수 없는 실정으로 이에 대한 많은 연구가 필요하다.

Hong et al.(1990)은 전국을 대상으로 1977년부터 1987년 사이에 발생한 사면붕괴 자료 분석을 통하여 누적 강우량, 파괴 당일 강우량 그리고 최대 강우강도의 영향 등에 대해 연구하였으며, Kim et al.(1991)은 강우로 인한 산사태발생 메커니즘에 관한 연구에서 침투해석을 수행하는 단계적 침투-응력 해석을 수행하였다. Lumb(1975)는 강우로 인한 직접적인 침투가 파괴의 주된 원인이었으며, 붕괴 당시의 일 강우량뿐만 아니라 선행 강우량의 크기에 중요한 영향을 받고 있다고 주장하였다. 그러나 그 후 Brand et al.(1984)는 사면붕괴 당시 강우강도의 크기가 지배적인 조건임을 발표하였다. 강우재현장치를 이용한 무한사면의 안정성에 대한 연구는 Kim(1990)과 Kim et al.(2001)의 연구사례가 있으며, Choi(2006), Baek(2006)은 모형사면을 제작하여 불포화 사면에 대한 전단강도의 변화 및 사면내 포화깊이 및 간극수압 등에 대하여 연구를 수행하였다. 또한 Kamalnath(2005)는 도요라 샌드를 이용하여 실제 사면을 축소 모델링하여 간극수압 및 지하수위와의 관계에 대하여 연구를 수행하였다. Noh et al.(2006) 등은 사면내에 수평배수공을 설치하였을 때 사면의 안정성에 대하여 SEEP/W를 통해 수치해석 연구를 하였고, 홍콩의 GEO(1985)는 수평배수공의 지하수위 저하효과에 대한 분석을 하고 이것을 설치하였을 때 수위가 저하되는 정도를 평가하였는데 구체적인 설계기법 등은 제시되지 못하였으며 설치 방법 및 재질 등에 대하여 규정을 제안하고 있는 상태이다.

본 연구는 배수를 겸한 상향식 쓰일네일을 설치했을 경우 지하수위 및 간극수압의 변화를 파악하기 위하여 강우재현 모형실험을 실시하였으며 이에 대한 실험결과를 검증하기 위하여 수치해석을 실시하였다. 실험조건은 상대 밀도가 75%인 지반조건에 강우강도가 50mm/hr, 75mm/hr,

100mm/hr 및 125mm/hr인 4가지 경우이며, 수치해석은 유한요소 침투해석 프로그램인 SEEP/W(Geo-Slop, 1998)를 사용하였고, 침투해석은 모형실험과 동일한 단면조건에 대하여 무 보강사면과 수평배수기능을 겸한 상향식 쓰일네일이 설치된 사면을 모델링하여 해석하였다. 이러한 실험결과 및 수치해석 결과를 통해서 상향식 배수검용 쓰일네일이 지반안정화 및 지하수위 저하에 어느 정도 효과가 있는지를 분석하였으며 더불어 수평배수공에 대한 유한요소 수치해석 모델링 방법도 함께 연구하였다.

2. 시료준비 및 강우모형 실험장치

2.1 시료준비

모형실험에 사용된 흙 재료는 입자가 매우 조립인 경기도 포천지역에서 채취를 하였으며, 공학적 특성은 Table 1과 같이 통일분류상 SM에 해당하며, No. 200번체 통과량이 17.2%이다. 또한 다짐시험에서 얻은 최적 함수비가 11.6%이고 최대건조단위중량은 18.1kN/m³인 재료에 해당한다.

2.2 강우모형장치

2.2.1 모형토조

실내 모형토조 장치는 Kim et al.(2013)의 논문에 자세히 설명하였으므로 간단히 설명하면 다음과 같다. 모형장치는 Fig. 1과 같이 모형토조(폭×높이×길이=400mm×500mm×800mm), 간극수압 측정장치, 저수조, 강우 재현장치 및 컴퓨터 등으로 구성되어 있으며 모형토조는 두께 10mm의 투명한 아크릴 재질의 박스로 제작하여 철판으로 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 No.200번 체 눈금 크기의 망을 설치하였다. 강우장치는 분무장치를 통해 강우량을 제어할 수 있으며

Table 1. Physical property of weathered granite soil (Kim et al., 2013)

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. Diagrams of rainfall device and model container (Kim et al., 2013)

2개의 강관에 각각 4개의 노즐 즉, 총 8개의 노즐을 부착하였다.

2.2.2 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 총 8개의 스탠드파이프를 10cm간격으로 설치하였으며 사면하단 좌측 위치부터 No.0번부터 사면 상단 No.7번까지 번호를 부여하여 각 위치별로 지하수위를 측정하였다(Kim et al., 2013).

2.3 실험방법

2.3.1 모형사면 제작

모형사면 제작은 먼저 현장에서 채취한 풍화토를 드라이오븐에서 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 로 완전히 건조시킨 후 다짐조건인 최적함수비(11.6%) 상태로 물을 가하고 잘 혼합하여 시료를 1시간 정도 보관한 뒤 모형토조 내에 6층으로 체적 등분하여 동적다짐을 실시하여 모형사면을 제작하였다.

사면 제작시 상대밀도는 최대건조단위중량과 최소건조단위중량을 KS F 2345 규정으로 상대밀도에 적합한 건조단위중량을 계산하였으며 모형토조의 부피에 적정량의 토량을 산정하여 사면을 제작하였다. 사면의 경사는 사면의 저부파괴 등의 관찰을 위해 1:1의 모형사면을 제작하였으

Fig. 2. Specification of model slope and reinforcing element installation (Back, 2006)

며 간극수압계는 Fig. 2와 같이 사면내부 St.1, St.2, St.3 및 St.4의 위치에 총 4개를 매설하였으며 간극수압계를 매설한 위치는 지반붕괴시 파괴영역을 벗어나고 또한 간극수압을 측정하기 위해 설치되는 전선으로 인한 지반보강 효과를 최소화할 수 있는 위치를 선정하였다.

2.3.2 모형장치용 쏘일네일 보강재

수평 배수재의 길이는 그라우트식 네일의 경우 일반적으로 $L=0.8 \sim 1.2H$ (H =구조물의 전체 높이)인 점을 감안하여 25cm인 경우로 가정하여 실험하였고 네일의 설치각도는 현장에서 수평배수공의 일반적인 설치각도인 상향 5° 로 설치하여 측정하였다. Fig. 3은 모형실험용 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일의 모식도를 나타낸 것으로 PVC관

Fig. 3. View of a bottom-up horizontal drain board installation for model test (cm) (Kim et al., 2013)

의 내경은 4mm이다. 전체의 길이는 25cm이며 그 중 배수가 가능한 배수공은 10cm로 그림과 같이 배수를 위해 2.0mm 정도의 구멍을 뚫었다. 이와 같은 모형실험용 쓰일 네일을 사면내부의 지하수위를 배수시키고 사면전체의 보강효과를 재현하기 Fig. 3의 단면도와 정면도에서 나타낸 바와 같이 모형사면에 10cm간격으로 가로 3개, 세로 4개씩 총 12개를 설치하였다.

3. 침투해석 조건

3.1 입력 특성치

3.1.1 지반 및 강우강도

본 연구에서는 강우모형실험결과(Kim et al, 2013) 표층 파괴와 저부파괴 모두를 관찰할 수 있었던 상대밀도 75%를 해석대상 지반조건으로 결정하였으며, 강우강도는 50mm/hr,

75mm/hr, 100mm/hr 및 125mm/hr로 변화시켜가며 침투해석을 수행하였다. 또한, 본 연구에서는 배수기능을 겸한 상향식 쓰일네일의 효과를 검증하기 위하여 배수겸용 상향식 쓰일네일이 설치되었을 경우와 설치되지 않은 무 보강 사면에 대하여 모형실험을 수행하였으며, 침투해석에서도 이 두 가지 경우를 모두 모델링하여 해석을 수행하였다.

3.1.2 흡-수분 특성곡선(SWCC) 및 투수계수

본 연구에서는 침투해석에 필요한 SWCC(Soil Water Characteristic Curve)는 SWCC 경험식과 Database를 이용한 방법을 이용하였다(Fredlund et al, 1994). 모형실험에 사용한 흙의 입도분포곡선과 기본물성 실험결과를 이용하여 SWCC를 산정하였으며, 구하는 과정은 Fredlund가 개발한 SoilVision 프로그램을 이용하였다. SoilVision 프로그램을 이용하여 SWCC를 구한 결과는 Fig. 4와 같으며, 흡인력(Air Entry Value)이 약 1kPa 까지는 포화시의

Fig. 4. SWCC used for numerical analysis

Fig. 5. Permeability used for numerical analysis

체적함수비(volumetric water content)인 0.344를 유지하다가 흡인력이 1kPa 이상 증가할 경우에는 급격하게 체적함수비가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 흡인력이 1kPa 이상에서는 흙속의 물을 보유할 수 있는 능력이 급격히 저하됨을 의미하며 물의 흐름속도 또한 급격히 저하될 것으로 판단된다.

투수계수는 Fredlund et al.(1994)이 제안한 통계적 모델을 사용하여 투수계수함수를 결정하였으며, 결정과정은 앞의 SWCC를 산정할 때 사용한 SoilVision 프로그램을 이용하였으며 Fig. 5와 같은 투수계수-흡인력 관계를 도출하였다. 투수계수함수는 앞에서 산정한 SWCC를 이용하여 구하므로 그 형태가 유사하다. 즉, 흡인력 1kPa까지는 포화시의 투수계수 $7.0 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ 가 일정하게 유지되며, 흡인력 1kPa 이후에는 투수계수가 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 이는 흡인력이 1kPa 보다 클 경우에는 투수계수가 매우 작아 물의 흐름이 어렵다는 것을 예측할 수 있으며, 외부 조건에 의하여 지반이 포화될 경우에는 흡인력이 감소하여 포화시의 투수계수를 보이므로 물의 흐름이 상대적으로 원활하게 이루어 질 것으로 예상할 수 있다.

3.2 모델링 및 경계조건

3.2.1 해석망 및 경계조건

모형실험을 수치해석으로 재현하기 위하여 침투해석 프로그램인 SEEP/W Ver.5를 사용하였다. 본 연구에서는 무보강 사면과 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일이 설치되었을 때의 침투특성을 분석하였고, 해석단면은 모형실험 단면과 동일하며 Fig. 6과 같다. 배수기능을 겸한 상향

식 쏘일네일은 모형실험과 동일하게 6cm 간격, 상향으로 5°의 기울기로 모델링하였으며 단부에 유공관의 효과가 있도록 모델링하였다.

수치해석의 경계조건은 Fig. 6(b)과 같이 우측 및 하부 경계면은 모형실험에서 물이 통과하지 않게 제작한 것과 동일하게 물의 흐름이 발생하지 않게 경계조건을 설정하였다. 상부 경계는 강우가 일정한 강도가 지속적으로 지반 내로 유입되도록 경계조건을 설정하였으며, 특히 1:1 경사의 비탈면경계는 물의 흐름의 정도에 따라 경계조건이 변하므로 정확한 경계조건을 알 수 없어 review boundary로 설정하였으며 좌측경계는 물이 배출되도록 압력수두를 0으로 설정하였다.

3.2.2 수평배수공의 모델링 방법

일정한 간격으로 설치된 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일의 문제는 엄밀하게 말해 3차원 문제이나 본 연구에서는 위의 모형실험을 2차원으로 해석할 수 있는 방법을 제안하였으며, 제안한 방법을 이용하여 배수공을 겸한 상향식 쏘일네일 설치시 지하수위의 저하를 해석하였다.

본 모형실험에서 적용한 배수공을 겸한 상향식 쏘일네일은 불투수성의 쏘일네일 보강부와 투수를 유도하는 유공관으로 구성된다. 이러한 쏘일네일링을 2차원으로 모델링할 경우에는 불투수성의 쏘일네일 보강부가 횡방향으로 연속되어 있는 것으로 모델링되어 다음 Fig. 7(a)와 같이 강우시 보강부 상부에 지하수위가 형성되는 현상을 보인다. 그러나 실제로는 쏘일네일 사이의 원지반으로 배수가 이루어지므로 이러한 결과는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

(a) Meshes of elements without horizontal drainage hole

(b) Meshes of elements with horizontal drainage hole

Fig. 6. Element mesh for seepage analysis

(a) Ground water level at the part of reinforcement in 2-D analysis

(b) Modeling of drainable upward soil nails

(c) Reduced ground water level (Rainfall Intensity 50 mm/hr)

Fig. 7. Modeling of horizontal drainage hole

따라서 본 연구에는 쏘일네일 부분이 불투수성인 상향식 쏘일네일링을 2차원으로 모델링하기 위하여 불투수성인 쏘일네일 부분과 쏘일네일 부분보다 상대적으로 투수계수가 큰 원지반을 동시에 고려할 수 있는 가상의 요소(ELEMENT-1)를 Fig. 7(b)와 같이 쏘일네일 부분에 적용하였다. 또한, 유공관으로 유입된 지하수가 비탈면쪽으로 원활하게 배수될 수 있도록 쏘일네일 내부와 유공관 설치부분을 원지반 투수계수보다 큰 요소(ELEMENT-2)로 모델링 하였다. 두 층의 투수계수는 해석결과와 모형실험의 결과를 비교하여 ELEMENT-1은 $3.5 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$, ELEMENT-2

는 $5.0 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$ 를 적용하였다. 따라서 이러한 방법을 적용하였을 경우에는 Fig. 7(c)와 같이 지하수위가 쏘일네일 위에 형성되지 않고 저하되어 현실에 부합하는 합리적인 해석이 이루어 질 수 있다고 판단된다.

4. 해석결과 및 분석

4.1 지하수위

Fig. 8은 시간에 따른 지하수위 변화(강우강도 50mm/hr)

(a) without horizontal drainage hole

(b) with horizontal drainage hole

Fig. 8. Ground water level vs. Time (Rainfall Intensity 50 mm/hr)

(a) without horizontal drainage hole

(b) with horizontal drainage hole

Fig. 9. Stream velocity vector under equilibrium state (Rainfall Intensity 50mm/hr)

(a) without horizontal drainage hole

(b) with horizontal drainage hole

Fig. 10. Comparison of ground water level with time

양상을 수치해석을 통해 나타난 것으로서 지하수위는 지표면까지 올라가지 않고 지중에 형성되는 것으로 나타났다. 지하수위가 지표면까지 상승하지 않고 지중에 형성되는 것은 지반의 투수계수와 실험조건으로 설명할 수 있다. 모형실험 및 수치해석에 적용한 강우강도는 각각 50mm/hr (1.39×10^{-5} mm/s), 75mm/hr (2.08×10^{-5} mm/s), 100mm/hr (2.78×10^{-5} mm/s) 및 125mm/hr (3.47×10^{-5} mm/s)로 지반의 투수계수는 7.0×10^{-5} m/s보다 작으므로 강우가 지중으로 원활하게 유입될 것으로 판단된다. 또한, 모형실험 및 수치해석의 하단 좌측경계조건은 물이 원활하게 배수되도록 설정하였으므로 지하수위는 지표면까지 상승하지 않고 지중에서 평형상태를 이루게 된다. 이러한 해석 결과는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 수평배수공 적용 여부에 관계없이 유사한 양상을 보인다. 이는 강우강도와 투수계수의 비(I/K_{sat})

와 관련하여 지표면까지의 포화정도를 분류한 기존의 연구(Park et al., 2007)와도 잘 부합된다. 그러나 수평배수공을 설치한 Fig. 8(b)의 경우에는 수평배수공으로 원활한 배수가 이루어져 지하수위는 수평배수공을 설치하지 않았을 경우보다 상대적으로 작게 상승하였다.

Fig. 9는 수평배수공 설치유무에 따른 평형상태의 유속 벡터를 나타낸 것으로서 배수기능을 겸한 소일네일을 설치하였을 경우 즉, Fig. 9(b)의 유속벡터에서 볼 수 있듯이 대부분의 지하수가 수평배수공을 통해 비탈면 외부로 배출되는 것을 볼 수 있으며, 이러한 수평배수공의 역할은 지하수위 상승을 억제한다. 수평배수공을 설치하지 않았을 경우에는 Fig. 9(a)에서 볼 수 있듯이 지하수위 아래의 비탈면 하부로 대부분의 지하수가 배출되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 모형실험 및 수치해석을 통한 시간에 따른 지

하수위 분석결과를 나타낸 것이다. 수치해석 결과에 의하면 수평배수공 적용 유무에 관계없이 지하수위는 강우강도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이는 강우강도가 증가할수록 비탈면으로 침투되는 유량이 증가하여 발생하는 현상으로 모형실험의 결과와 유사한 양상을 보이고 있으나 시간에 따라 서서히 증가하는 모형실험결과와 달리 수치해석에서는 지하수위가 급격하게 증가하는 경향을 보이고 있다.

모형실험시 형성된 지하수위는 지표면까지 상승하지 않고 지중에서 평형상태를 이루게 되고 또 풍화토에서 일반적으로 갖는 포화시 투수계수보다 큰 값을 적용하여 수치해석을 시행하여도 모형실험 보다 수치해석에 의한 지하수위가 보다 높게 계산되는 경향이 있는데 이에 대한 사유는 모형실험시 강우를 구현할 때 분무장치로 살수를 해서 강우를 뿌린 양 전체가 사면에 뿌려지지 않고 일부는 물의 손실(즉 인공 강우량 모두가 실험된 모형사면에 뿌려지지 못할 가능성)이 있을 가능성이 있으며 수치해석시에는 균질한 토층조건이 적용되나 모형사면을 제작하는 과정에서 층상으로 다짐을 하여 이 다짐층 사이로 유로가 존재할 가

능성과 토조 측벽 및 후면 벽과 지하수위 관측용 파이프가 설치된 곳으로 유로가 형성되어 물이 유출될 통로가 있었을 개연성도 있다. 특히 지하수 관측용 파이프가 있는 곳이 다짐을 하기가 극히 어려워서 이러한 가능성이 클 수도 있다.

따라서 수치해석의 경우에는 모형실험이 갖는 외부적인 요소가 없으므로 지하수위 상승속도가 모형실험보다 큰 것으로 판단된다. 그러나 전술한 바와 같이 모형실험과 강우강도에 따른 최종 지하수위는 유사한 것으로 나타났으므로 수치해석결과를 이용하여 강우강도에 따른 시간 및 공간적 분석을 수행하는 것은 의미가 있을 것으로 판단된다.

4.2 비탈면내의 체적함수비 분포

Fig. 11은 시간에 따른 체적함수비를 분석한 것으로서 비탈면 좌측 하부에서부터 포화가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 비탈면 좌측 하부의 높이가 가장 낮아 이 부분부터 포화가 발생했기 때문으로 판단된다. Fig. 11(a)의

(a) Time step 10 (5 minutes later)

(b) Time step 15 (10 minutes later)

(c) Time step 20 (19 minutes later)

(d) Time step 30 (39 minutes later)

Fig. 11. Volumetric water content vs. Time (Rainfall Intensity 50 mm/hr)

(a) Rainfall Intensity 50 mm/hr

(b) Rainfall Intensity 100 mm/hr

Fig. 12. Distribution of volumetric water content at the same time step (Time step 10, 5 minutes later)

(a) Rainfall Intensity 50 mm/hr

(b) Rainfall Intensity 75 mm/hr

(c) Rainfall Intensity 100 mm/hr

(d) Rainfall Intensity 125 mm/hr

Fig. 13. Comparison of pore water pressures with time (with drainable soil nails)

(a) without horizontal drainage hole

(b) with horizontal drainage hole

Fig. 14. Distribution of volumetric water content at the final time step (Rainfall Intensity 50 mm/hr)

1:1 경사의 비탈면부분은 지표로 강우가 침투하기 때문에 지표면 부근의 체적함수비가 지중의 체적함수비보다 큰 것을 관찰할 수 있다. 시간이 지나감에 따라 본 연구의 경계조건 하에서는 비탈면 좌측 하부부터 서서히 상부로 포화가 발생하는 것으로 나타났다. Fig. 11에서 지하수위 상부도 체적함수비가 포화된 값을 보이는 것은 해석시 입력한 흡-수분 특성곡선이 흡인력 약 1kPa에서도 포화시의 체적함수비를 보이기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 12는 동일 시간대에서 강우강도에 따른 체적함수비 분석결과를 나타낸 것으로서 강우강도가 증가할수록 포화되는 속도는 증가한다. 따라서 전체적으로 포화되는 속도가 상대적으로 느린 강우강도 50mm/hr 조건에서는 비탈면 표면이 포화되어 있는 시간이 길어져 표층파괴가 우선적으로 발생하는 것으로 판단된다. 반면에 포화속도가 상대적으로 빠른 강우강도 100mm/hr 조건에서는 초기의 빠른 비탈면 포화도 증가에 의한 파괴가 발생하지 않아 사면이 어느 정도 포화된 후 저부파괴가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 강우강도가 큰 조건에서는 초기에 지표면 포화에 의한 표면파괴가 발생하지 않는다면 큰 규모의 저부파괴가 발생할 가능성이 큰 것으로 분석될 수 있다.

4.3 간극수압 분석

Fig. 13은 배수기능을 겸한 쏘일네일링이 설치되었을 때(즉 수평배수공을 적용했을 경우) 시간에 따른 간극수압 변화를 모형실험과 수치해석 결과에 대하여 Fig. 2의 간극수압계 설치지점의 위치에서 상호 비교한 것이다. 간극수압 분포를 수치해석을 중심으로 분석한 결과 간극수압계 St.2 설치지점에서의 최종간극수압에 도달하는 시간은 강

우강도가 50mm/hr일 경우에는 30분, 75mm/hr일 경우에는 9분, 100mm/hr일 경우에는 7분, 125mm/hr일 경우에는 1분으로 나타났다. 이 결과로부터 알 수 있듯이 수치해석 결과는 강우강도가 클수록 매우 짧은 시간에서 최대 간극수압으로 상승한 후 더 이상 증가하지 않고 일정하게 수렴되는 현상을 보였다. 강우강도에 따라 최종간극수압 도달 시간이 감소하는 것은 모형실험에서 강우강도가 증가함에 따라 최종지하수위 도달시간이 짧아지는 것과 일치한다. 또한 수치해석에 비해 강우모형실험으로부터 얻은 간극수압은 초기 부의 간극수압과 최종 값은 어느 정도 일치하지만 최종시간에 이르기까지 수치해석과는 다르게 완만한 상승을 보이고 있다.

Fig. 14는 수평배수공 미 설치시와 설치시의 강우강도 50mm/hr인 경우 최종단계에서 간극수압분포를 수치해석을 통해 분석한 것으로서 수평배수공을 설치하지 않았을 경우보다 지하수위 및 간극수압이 작은 것으로 나타났다. 이는 수평배수공을 설치할 경우 지하수위 및 간극수압을 감소시킬 수 있어 사면의 안정성을 증가시키는데 효과적인 것으로 판단할 수 있다.

4.4 비탈면내의 체적함수비 분포와 사면의 안정성

본 연구에서와 같이 강우의 시작 초기에 사면에 포화대가 존재하지 않는다고 가정하면 불투수층인 기반암위의 토층에 강우의 시작으로 인하여 침윤전선(wetting front)이 발생할 것이며 강우가 지속되면 강우는 비포화대를 통하여 사면의 기반암까지(즉 모형실험의 바닥까지) 침투할 수 있다.

Lumb(1962)에 의하면 화강풍화토의 투수계수는 3×10^{-5}

(a) Time step 10 (5 minutes later)

(b) Time step 23 (25 minutes later)

Fig. 15. Variation of volumetric water content ($k=4.25 \times 10^{-6}$ m/sec, Rainfall Intensity 50 mm/hr)

$\sim 3 \times 10^{-7}$ m/sec 정도의 범위에 있다고 하는데 이 범위의 중간 정도의 크기의 투수계수인 4.25×10^{-6} m/sec를 적용하여 모형실험 사면에 대한 침투해석을 하면 50mm/hr의 강우 조건에서 Fig. 11과는 다르게 비탈면내의 체적함수비 분포가 확인되었다. 즉, Fig. 15(a)와 Fig. 15(b)는 각각 강우 시작 후 5분 및 25분이 경과했을 때 비탈면내의 체적함수비 분포상태인데 모두 사면표면 부분이 거의 포화된 상태에 가까운 체적함수비 분포를 보이면서 사면내로 이러한 체적함수비의 분포가 이동하는 양상을 보인다.

이는 지반조건에 따라 강우시 사면의 포화도가 증가하면서 사면을 형성하는 지반의 전단강도를 보수적으로 유지시켰던 지표면에서의 음의 간극수압(suction) 감소로 인한 강도의 저하를 유발시켜서 사면표면에서 국부적인 파괴영역이 발생할 수 있고 이러한 영역이 점점 확대되어 전체적인 파괴에 이르게 될 수 있음을 나타내는 것으로 강우시 사면 안정이 시간 의존적인 문제이며 이러한 국부적인 파괴영역의 영향을 더 이상 무시할 수 없다는 것이 확인되었다. 또한 강우로 인한 사면 붕괴가 대부분 지표로부터 지하 수 m 내외의 얇은 부분에서 발생하고 지표면과 나란하게 발생하는 점을 고려하여야 되는 것을 확인시켜 준다고 판단된다.

5. 결론

(1) 배수겸용 상향식 쏘일네일에 포함된 수평배수공에 대한 모델링방법으로 Fig. 7(b)와 같이 쏘일네일과 원지반을 동시에 고려할 수 있는 가상의 ELEMENT-1와 유공관으로 유입된 지하수가 비탈면쪽으로 원활하게 배수될 수 있도록 하는 ELEMENT-2를 이용하는 2차원 모델링 기법을 제안하였다.

- (2) 모형실험을 실시하고 그 결과를 수치해석으로 모사한 결과 강우로 인한 지하수위와 간극수압의 변화는 유사한 형태를 보이나 수치해석의 경우는 지체시간이 없이 변화되는데 비하여 모형실험은 지체시간이 있는 상태이며 이러한 차이는 이상화된 균질토층에 대한 제한된 방법에 의한 해석과 모형실험 장치 및 사면제작 과정의 제한성 등에 기인한 것으로 판단된다.
- (3) 비탈면내 체적함수비 분포에 대한 해석결과 강우가 지속되면 사면표면부터 포화도가 증가되면서 내측으로 이동하여 음의 간극수압 감소로 강도저하가 유발되어 사면표면에서 국부적인 파괴영역이 발생할 수 있고 이러한 영역이 점점 확대되어 전체적인 파괴에 이르는 즉, 선행파괴가 추가 붕괴를 유발하는 시간의 존적인 다중파괴 상태가 발생할 수 있음을 수치해석을 통하여 확인하였다.
- (4) 일반적으로 현재 국내에서 사용되고 있는 쏘일네일을 하향으로 설치하고 별도로 수평배수공을 5~10m간격으로 설치하는 방법은 수평배수공으로 유도배수를 하는 침투로가 길어서 배수효율성이 낮고 지중의 지층 변화에 따른 지하수의 유로에 대한 적응성이 작지만 배수기능을 겸한 상향식 쏘일네일은 설치간격이 1.5~2.5m내외로 침투로가 짧고 지하수 유로에 대한 적응성이 좋고 추가의 배수로 설치가 불필요하여 실용화할 가치가 있다.

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. Brand, E. W., Phillipson, H. B. (1984), "Relationship between Rainfall and Landslides in Hong Kong", Proceedings of the Forth International Symposium on Landslides, Toronto, Vol.1.
 3. Choi, K. Y. (2006), "A Study on the Behavioral Characteristics of Unsaturated Infinite Slopes Through Laboratory Model Test", Ph.D Thesis, Hongik University, pp.7-74.
 4. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), "Equation for the Soil-Water Characteristic Curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, pp.521-532.
 5. GEO (1985), "Geotechnical Manual for Slope", Geotechnical Control Office, Hong Kong, pp.53-70.
 6. Geo-Slop (1998), "User's Manual for SEEP/W and SLOP/W", Geo-Slop International, Canada.
 7. Hong, W. P., Kim, Y. W., Kim, S. K., Han, J. G., Kim, M. (1990), "Prediction of Rainfall-Triggered Landslides in Korea", *Journal of the Korean Society of Geotechnical Engineering*, Vol.6, No.2, pp.53-63.
 8. Kamalnath Dissanayake A (2005), "Rain-Induced Groundwater Flow Experiments in Relation to the Initiation of Shallow Landslides in Hilly Areas", Hiroshima University, Doctorial Thesis, pp.124-153.
 9. Kim, Y. M. (1990), "Seepage Behavior in Infinite Slopes during Rainfall", Ph.D Thesis, Dongguk University.
 10. 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.
 11. Kim, H. T., Yoo, H. K., Kang, I. K., Lee, H. J. (2001), "Investigation of Pore Water Pressure Variation in Slope during Rainfall from Laboratory Model Tests", *Proceedings of Korean Geotechnical Society*, pp.199-206.
 12. Kim, Y. N., Chae, Y. S., Lee, K. I. (2013), "Experimental Study of Down-Scaled Model Slope on the Variation of the Ground Water Level of Drainable Soil Nailing", *Journal of the Korean Geosynthetic Society*, Vol.12, No.1, pp.39-50.
 13. Lumb P. (1962), "The Properties of Decomposed Granite", *Geotechnique*, Vol.12, pp.226-243.
 14. Lumb P. (1975), "Slope Failures in Hong Kong", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol.8, pp.31-65.
 15. Noh, H. J., Lee, S. H., Hwang, Y. C., Chun, S. R. (2006), "A Study on Variation of Slope Stability Ratio by Slope Horizontality Drainage Existence", *Proceedings of Korean Geotechnical Society*, pp.395-400.
 16. Park, S. W., Han, T. K., Kim, K. T., Baek, S. C. (2007), "Prediction of Saturation Time for the Soil Slopes due to Rainfalls", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.8, No.2, pp.67-74.