

강우재현모형실험에 의한 불포화 화강풍화토 사면의 간극수압 특성

김선학*
*조선대학교 토목공학과

Pore Water Pressure Characteristic of Unsaturated Weathered Granite Soil Slopes through Rainfall Simulation

Sun-Hak Kim^{1*}

¹Dept. of Civil Engineering, Chosun University

요약 본 연구는 강우재현장치를 제작하고, 화강암질 풍화토로 조성된 모형사면에 강우 및 사면조건에 따라 모형 실험과 수치해석을 실시하였다. 모형실험에서 측득된 체적함수비와 간극수압의 변화특성을 분석하였으며 또한 수치해석 결과와 비교하였다. 체적함수비는 강우강도가 크고 사면경사가 급할수록 한계값에 도달하는데 짧은 시간이 소요되는 반면 강우강도가 작고 사면경사가 완만할수록 많은 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 강우강도가 작고 강우지속 시간이 짧을수록 더 큰 부의 간극수압을 나타내고 회복하는 시간도 짧은 것으로 나타났다. 이와 반면 강우강도가 크고 강우지속시간이 길수록 부의 간극수압을 회복하는데 오랜 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 강우재현 모형실험과 수치해석을 수행한 결과 체적함수비와 간극수압의 분포경향이 유사하게 나타났다. 그러나 체적함수비는 최대 5% 정도, 간극수압은 최대 3kPa 정도의 차이를 보였다.

Abstract This present study implemented a rainfall simulation system, and performed simulation and numerical analysis according to rainfall and slope conditions using a model slope built with weathered granite soil. Extensive analysis were conducted on the characteristics of changes in volumetric water content and pore water pressure measured in the simulation, and compared them with the results of numerical analysis. It took longer for the volumetric water content to reach the limit when rainfall intensity was high and the slope was steep and shorter when rainfall intensity was low and the slope was gentle. When rainfall intensity was low and the duration of rainfall was short, negative pore water pressure was higher and the time for restoration was shorter. On the contrary, when rainfall intensity was high and the duration of rainfall was long, it took a longer time to restore negative pore water pressure. In the results of rainfall simulation and numerical analysis, the distribution of volumetric water content and pore water pressure was similar between the two. However, the volumetric water content was different by up to 5%, and pore water pressure by up to 3kPa.

Key Words : Rainfall Simulation System, Weathered Granite Soil, Volumetric Water Content

1. 서론

불포화지반은 포화지반과 비교할 때 역학적 개념이나 거동특성에서 많은 차이점이 있다[5]. 불포화지반에서는 물과 공기의 압력차에 의한 흡인력으로 부(-)의 간극수압이 발생된다. 부의 간극수압이 증가하면 유효응력을 증가시키고, 부의 간극수압이 감소하면 유효응력이 감소되어 사면의 안정성이 저하된다. 부의 간극수압은 불포화 사면

의 역학적 거동을 지배하는 매우 중요한 인자로서 이로 인해 강도와 침투거동 등이 변화된다. 불포화지반에서 침투거동의 영향요인으로는 강우강도, 강우지속시간, 선행 강우, 포화투수계수, 함수특성곡선, 흙의 저류능력, 지반 응력, 흙의 이질성, 초기 지하수위, 사면의 기하학적 특성 등 여러 가지가 있는데, 이 중에서 강우는 지표 근처 흙의 함수량 변화에 큰 영향을 주어 간극수압의 변화를 유발하고 또한, 체적변화와 강도변화를 발생시킨다

*교신저자 : 김선학(sun93k@naver.com)

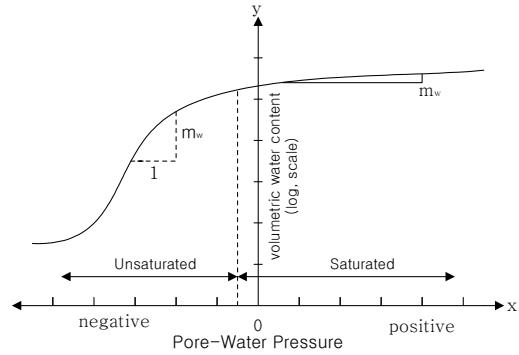
접수일 09년 07월 10일

수정일 (1차 09년 10월 29일, 2차 09년 11월 10일)

게재확정일 09년 11월 12일

[1-4,7,8]. 그러므로 불포화지반에서 보다 합리적인 침투 거동을 파악하기 위해서는 강우시 불포화토의 특성에 대한 기본적인 이해와 부의 간극수압을 고려한 함수특성 및 투수특성에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 강우로 인한 사면붕괴가 발생된 현장에서 화강암질 풍화토를 채취하여 물리·역학적 실험을 실시하고, 불포화지반의 거동을 규명하는데 있어 가장 큰 요인인 체적함수비와 부의 간극수압 즉, 모관흡인력이 사면 및 강우조건에 따라 변화되는 특성을 파악하고자 강우재현모형실험과 수치해석을 실시하였다. 강우재현모형실험은 강우재현장치와 모형사면을 제작하고 사면하부를 투수조건으로 조성하여 선행연구 자료를 토대로 결정된 사면경사, 강우강도, 강우지속시간의 조건에 따라 습윤과정과 건조과정 구분하여 실시하였으며 또한, 동일 조건으로 수치해석을 실시하였다. 강우재현모형실험에서 예측된 체적함수비와 간극수압의 변화를 수치해석 결과와 비교·분석하였다. 이러한 불포화지반의 체적함수비와 간극수압의 변화예측은 화강암질 풍화토로 구성된 불포화사면의 거동을 예측하는데 도움이 될 것이다.



[그림 1] 체적함수비의 일반적 분포

2.2 모관흡인력

포화지반과 불포화지반의 거동이 크게 차이가 나는 것은 그림 2에서와 같이 불포화지반에서는 포화지반과는 달리 공기상태가 하나 더 존재하며 이로 인해 공기와 물의 접촉면인 수축막이 발생하여 4상의 관계가 되기 때문이다.

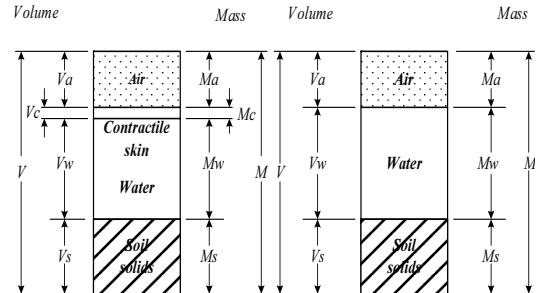
2. 불포화지반의 특성인자

2.1 체적함수비

간극수가 흙 속을 통과하여 흐를 때 간극수의 일부는 흙에 잔류하게 된다. 흙 속에 억류되거나 혹은 저류된 간극수의 양은 간극수압과 흙 구조의 특성에 따라 달라진다. 침투해석시 적용되는 체적함수비(θ)란 저류된 간극수의 양을 전체 체적에 대한 간극수의 체적의 비로 정의하고 있으며 (1)식과 같다.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (1)$$

여기서, V_w 는 간극 속에 있는 물의 체적을 나타내며 V 는 전체 체적을 나타낸다. 체적함수비는 간극수압에 따라 변화되며, 그림 1은 이러한 관계와 함수특성함수를 나타내고 있다. 흙이 완전포화 되었을 경우 체적함수비는 전체 체적에 대한 간극의 체적과 같아진다. 간극수압이 거의 0인 완전 포화된 흙에 외력이 일정한 경우, 간극수압이 양(+)의 값으로 커지게 되면 유효응력은 감소한다. 이러한 이유로 흙은 팽창되고 체적함수비는 증가하게 된다. 반대로 간극수압이 부의 값으로 커지게 되면 흙은 불포화상태가 되며 체적함수비는 감소한다.



[그림 2] 불포화토의 3상과 4상

발생된 수축막은 공기압과 수압의 평형상태를 유지하는 역할을 하는 것으로 물의 표면장력에 의해 인장력을 발휘하게 된다. 일반적으로 불포화지반은 흙 입자와 물-공기의 접촉면에서 포화지반과 매우 다른 거동특성을 나타내므로 흙 속에 포함된 공기를 고려하면 포화지반과는 달리 거동예측이 매우 복잡해진다. 불포화상태의 흙 입자 사이에 간극수가 존재할 경우 간극수의 표면장력으로 인해 입자 사이에 인력이 발생하게 되는데 그 크기는 일반적인 모세관현상과 동일하게 입자 사이의 간극크기가 작을수록 커지게 된다. 불포화토의 4상 중 하나인 수축막은 공기압과 수압을 동시에 받으며, 둘 중 공기압이 수압보다 크게 작용한다. 이러한 공기압과 수압의 압력차이를 모관흡인력이라 한다.

3. 강우재현모형실험 및 수치해석

3.1 실험계획

홍원표 등은 지난 30년간의 우리나라의 산사태 기록을 분석한 결과, 대규모 붕괴의 경우 최대 시간강우강도가 35mm/h를 초과하고, 2일간의 누적강우량이 140mm를 초과할 경우 발생하는 것으로 나타났다[4]. 또한, 24시간 내에 200mm 이상의 강우가 지속되거나, 강우가 하루이상 지속되면서 시간당 평균 강우량이 10mm/h 이상일 경우에 산사태가 발생할 위험이 큰 것으로 나타났다. 선행된 여러 연구들로부터 실험시 고려할 영향인자는 강우강도, 강우지속시간, 선행강우, 포화투수계수, 함수특성곡선, 토사의 저류능력, 지반응력, 토사의 이질성, 초기 지하수위, 사면의 기하학적 특성 등임이 알려졌다. 열거한 영향인자에 따라 강우시 사면의 간극수압 분포가 변화되나 사면 설계단계에서 이러한 영향인자를 모두 고려하는 것은 많은 시간의 소요와 경제적인 측면에서 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 설계단계에서 고려가 가능하고 불포화 풍화토사면의 간극수압 분포에 비교적 큰 영향을 미치는 강우강도, 사면경사, 강우지속시간을 강우재현모형실험 영향인자로 선정하였다. 선정된 영향인자들의 조건에 따른 강우재현 실험계획을 수립하였고 그 내용을 정리하면 표 1과 같다.

[표 1] 영향인자에 따른 강우재현모형실험

영향인자	Model Test			
	MT-1	MT-2	MT-3	MT-4
강우강도(mm/h)	15	30	15	30
강우지속/방치시간(h)	16/24	16/24	16/24	8/32
사면경사	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 1.5	1 : 2.0

3.2 화강암질 풍화토의 특성

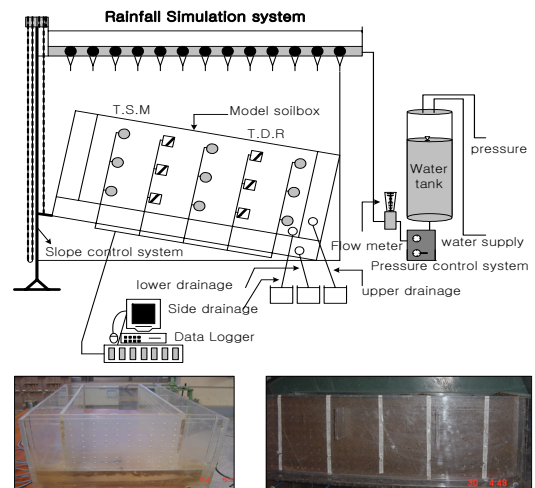
대상 화강암질 풍화토는 강우침투로 인한 사면붕괴가 발생된 토사로 전라남도 담양의 도로현장에서 채취하였다. 물리·역학적 특성파악을 위해 비중시험, 입도분석, 다짐시험, 삼축압축시험 등을 실시하였으며 포화투수계수를 구하기 위해 실내투수시험도 실시하였다. 화강암질 풍화토의 물리·역학적 특성은 표 2와 같다.

[표 2] 화강암질 풍화토의 물리·역학적 특성

물리적 특성	비중(G_s)	2.61
	최적함수비(%)	11.40
	최대건조밀도(γ_{dmax} , KN/m^3)	18.82
	균등계수(C_u)	13.33
	곡률계수(C_g)	2.13
	통과중량백분율 10%의 입경(D_{10} , mm)	0.075
	통과중량백분율 30%의 입경(D_{30} , mm)	0.40
	통과중량백분율 60%의 입경(D_{60} , mm)	1.00
	0.075mm 통과중량백분율($P_{\#200}$, %)	10.00
역학적 특성	통일분류법(U.S.C.S)	SW
	투수계수(K , m/sec)	8.50×10^{-6}
	점착력(C , KN/m^2)	20.58
	포화점착력(C_{sat} , KN/m^2)	1.96
	내부마찰각(ϕ , °)	22.5
포화내부마찰각(ϕ_{sat} , °)	8.0	

3.3 강우재현실험장치 및 실험방법

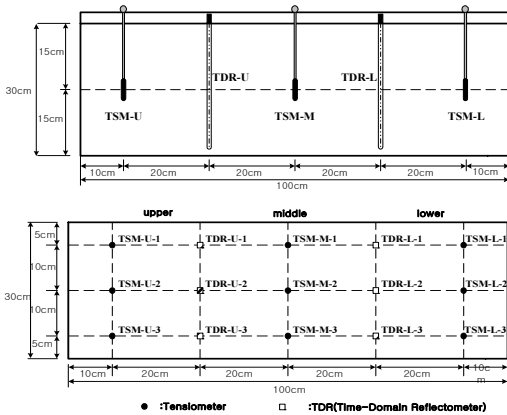
강우재현실험장치는 크게 모형사면을 축조할 수 있는 모형토조와 강우강도에 따라 인공강우를 재현할 수 있는 강우재현장치, 그리고 토사의 상태와 사면의 경사를 재현할 수 있는 강사장치 및 경사조절장치, 간극수압과 함수량을 측정할 수 있는 계측기로 구성되어 있다[그림 3].



[그림 3] 강우재현모형실험장치 모식도 및 모형사면

모형사면(폭×깊이×길이=30×30×100cm)은 화강암질 풍화토의 단일토층으로 사면하부로 배수가 가능하게 구성하였다. 유량계에서 강우강도를 고정하면 공기압에 의

해 해당 유량만큼 물이 저수조를 통해 강우재현장치로 이동하여 인공강우를 재현하게 된다. 모형사면의 길이방향(상부, 중부, 하부), 사면의 표면에서 깊이방향(상단, 중단, 하단)에 설치된 tensiometer와 함수량계(TDR)를 통해 강우에 의해 발생하는 간극수압과 체적함수비가 측정된다. 압력변환기는 각각의 tensiometer와 함수량계(TDR)에 연결되어 측정값이 연속하여 계측이 가능하도록 데이터 로거에 연결, 컴퓨터로 실시간 계측이 가능하도록 구성하였다. 또한, 모형토조에서 유출량을 측정하기 위해 전면, 측면, 하면에 유출량 탱크를 설치하여 수동으로 측정하였다. 토사유출을 방지하기 위해 토조의 저면에 부직포를 설치하였으며 화강암질 풍화토는 시험 전 미리 건조로에서 24시간 이상 건조시켜 활용하였다. 건조된 시료에 함수비를 9~11% 정도로 제조한 후 강사장치를 통해 3층으로 나누어 사면모형 토조에 평행하게 단계별로 포설하였다. 다짐도를 조절하기 위해 시료의 무게를 잰 후, 사각다짐대(12×20cm)로 다짐을 실시하여 모형사면을 구현하였다. 모형사면을 길이방향(상부, 중부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)으로 구분하여 TDR과 tensiometer를 설치하였다[그림 4].



[그림 4] Tensiometer와 TDR 매설 평면 및 단면상세도

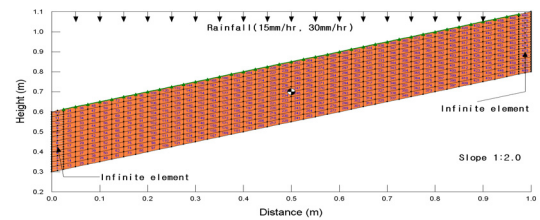
3.4 수치해석의 해석조건 및 경계조건

수치해석은 불포화 침투해석이 가능한 GEO-SLOPE사의 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W를 활용하였으며 모델링한 사면은 607개의 Node와 480개의 Element로 구성하였으며 Element는 주로 사각형을 활용하였다[6]. 강우침투해석은 강우재현모형실험에서와 같이 설계단계에서 고려가 가능한 강우강도와 강우지속시간, 사면경사로 크게 3가지 영향인자에 대해 4가지의 조건으로 결정하였으며 기타 해석시 필요한 조건은 강우재현모형실험에서 사용한 동일 조건을 적용하였다[표 3].

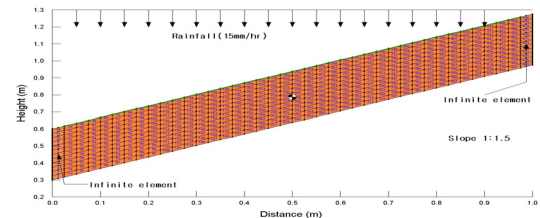
[표 3] 영향인자에 따른 수치해석

영향인자	수치해석			
	NA-1	NA-2	NA-3	NA-4
강우강도(mm/h)	15	30	15	30
강우지속/방치시간(h)	16/24	16/24	16/24	8/32
사면경사	1 : 2.0	1 : 2.0	1 : 1.5	1 : 2.0

모형사면의 좌, 우 경계 및 하부경계는 투수성 다공질 판이 설치되어 있으므로 이를 수치해석에서 고려하기 위하여 좌, 우 경계요소는 무한요소로 처리하였다. 하부경계의 경우에도 좌, 우 경계와 동일하게 투수성 다공질 판을 고려하기 위하여 무한요소로 처리하도록 하였으나 무한요소로 처리하는 경우에는 초기해석에서 무한요소에 부의 간극수압이 형성되어 초기해석을 수행하지 못하기 때문에 하부는 무한요소로 처리하지 않았다. 단, 하부의 경계는 투수조건이므로 불투수경계로 주지 않아 하부로 침투수가 배출되도록 경계조건을 모델링하였다[그림 5].



(a) 사면경사 1:2.0(NA-1, NA-2, NA-4)



(b) 사면경사 1:1.5(NA-3)

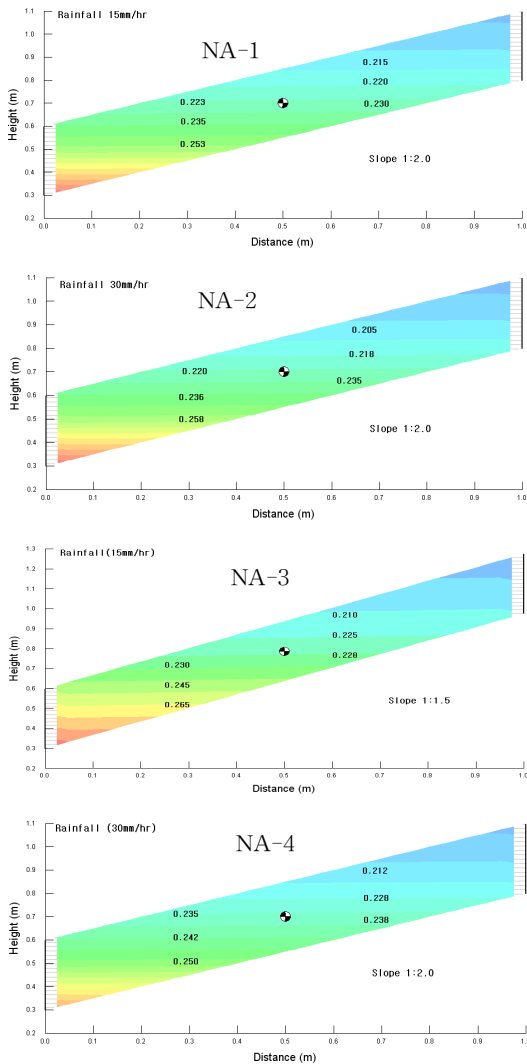
[그림 5] 수치해석 모델과 경계조건

불포화 사면은 초기에 수위가 없는 조건이기 때문에 초기경계는 모두 압력수두로 작용하게 모델링하였으며, 입력된 압력수두의 값은 강우재현모형실험에서 계측된 초기 간극수압을 이용하여 결정하였다. 수치해석에 있어서 강우재현을 통해 시간에 따른 간극수압의 변화를 살펴보고자 해석타입을 transient 해석을 수행하였으며, 불포화 사면의 상부에 소정의 강우량을 단위유량으로 유입되는 것으로 강우강도를 모델링하였다.

4. 결과 및 분석

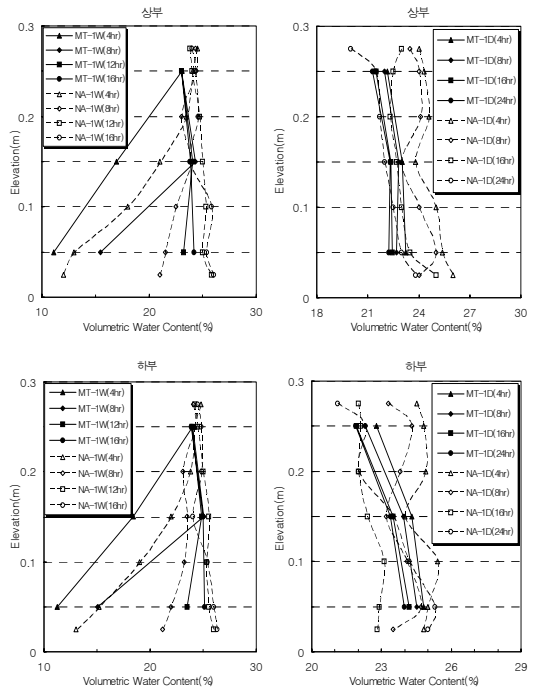
4.1 체적함수비 변화

길이방향(상부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)에서 실시간 측정된 TDR 측정값 중 변화 상태를 구분할 수 있는 대표시간의 값을 선정하여 비교·분석하였다. MT-1~MT-3에서는 흡윤과정의 경우 4h, 8h, 12h, 16h의 값, 건조과정의 경우 4h, 8h, 16h, 24h의 값을 활용하였다. 강우재현시간이 짧고 방치기간이 긴 MT-4에서는 흡윤과정의 경우 2h, 4h, 6h, 8h의 값, 건조과정의 경우 흡윤과정에 이어 12h, 16h, 24h, 32h, 40h의 값을 활용하였다.

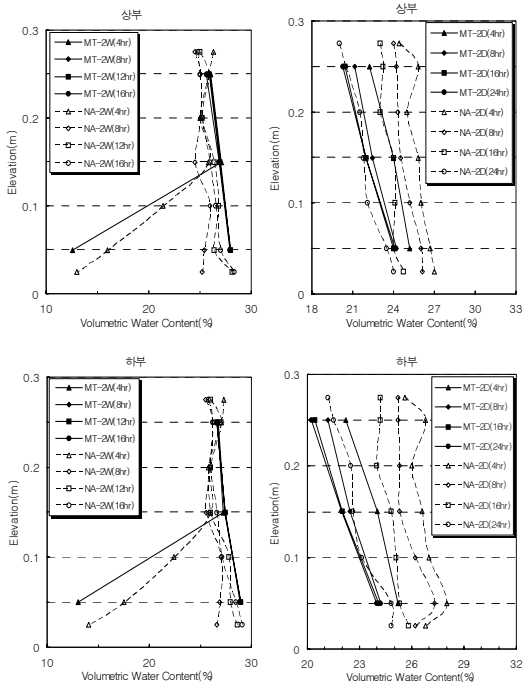


[그림 6] 수치해석에 의한 체적함수비 분포

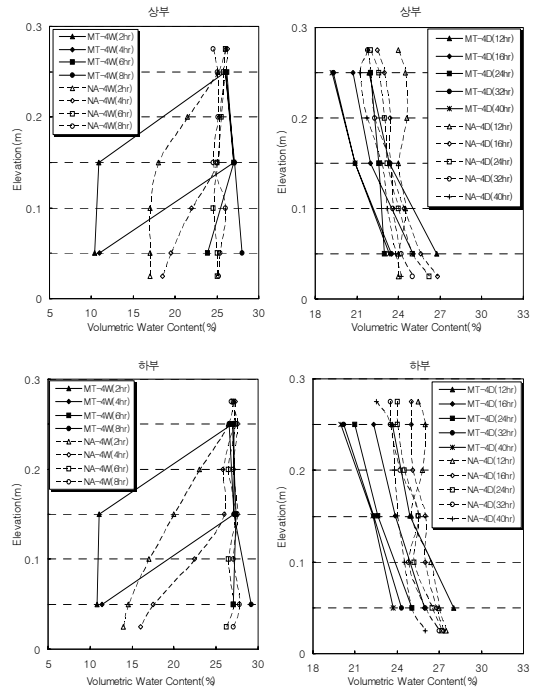
그림 6은 조건별 수치해석 결과에서 대표적으로 최종 단계에서 체적함수비 분포를 나타낸 것이다. NA-1의 경우 체적함수비의 분포가 21.5~25.3%, NA-2의 경우 20.5~25.8%, NA-3의 경우 21.0~26.5%, NA-4의 경우 21.2~25.0%의 범위로 나타났다. 그림 7~그림 10은 사면의 상·하부에서 사면깊이와 경과시간에 따라 체적함수비 변화를 나타낸 것이다. 흡윤과정에서는 강우지속시간에 따라 체적함수비가 증가하여 한계값으로 수렴하는 경향을 나타내었으며 건조과정에서는 방치기간에 따라 2~5% 정도 감소하는 경향을 나타내었다. 그림 8과 그림 9에서 강우강도가 크고 사면경사가 급할 경우 체적함수비가 한계값에 도달하는데 8시간정도 소요되는 반면 강우강도가 작고 사면경사가 완만한 경우 12시간 이상이 소요되는 것으로 나타났다(그림 7). 흡윤 및 건조과정 모두에서 수치해석 결과와 모형실험 측정값의 차이를 보였으나, 변화하는 경향은 유사하게 나타났다. 수치해석 결과와 모형실험 측정값의 차이는 4~5% 정도로 초기체적함수비의 차이로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 특히, 흡윤과정에서는 강우재현 초기 2~4hr에서 크게 나타났으며 건조과정에서는 초기 체적함수비의 차이로 인해 다소 큰 차이를 보였다.



[그림 7] 체적함수비 분포 비교(MT-1과 NA-1)



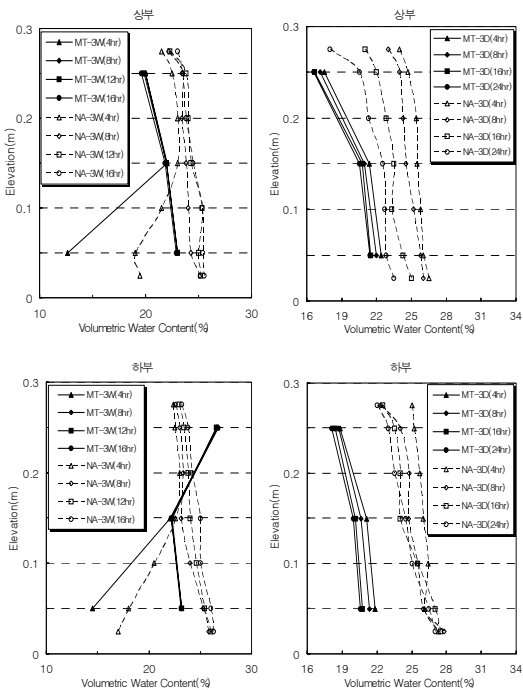
[그림 8] 체적함수비 분포 비교(MT-2와 NA-2)



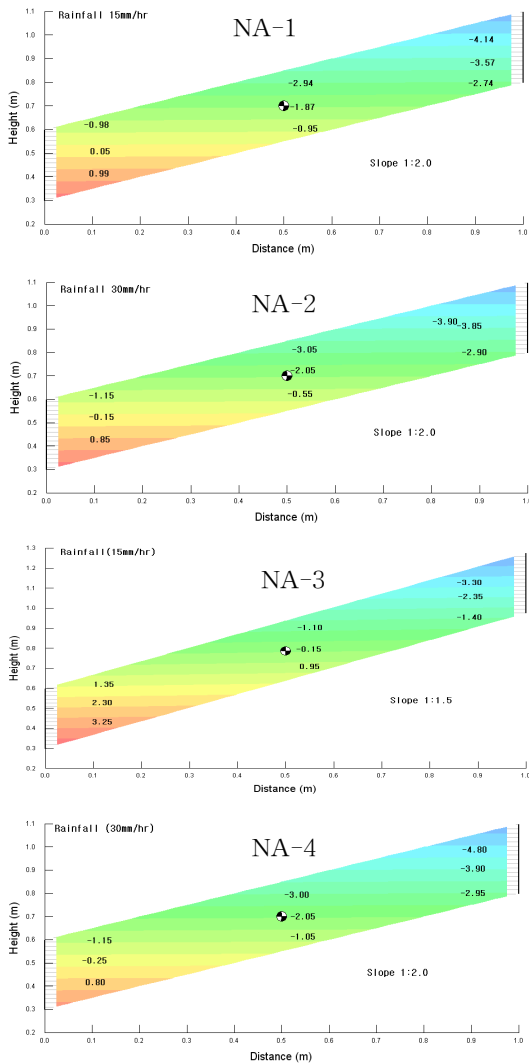
[그림 10] 체적함수비 분포 비교(MT-4와 NA-4)

4.2 간극수압의 변화

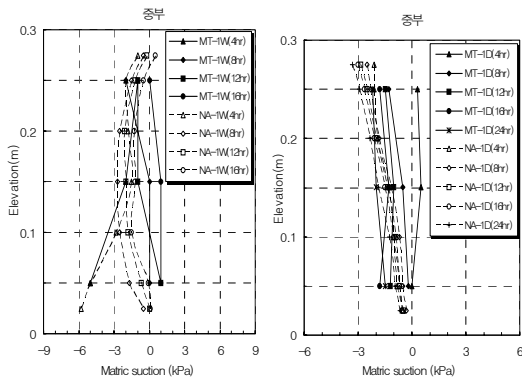
길이방향(상부, 중부, 하부)과 깊이방향(상단, 중단, 하단)에서 실시간 계측된 tensiometer 측정값 중 변화 상태를 구분할 수 있는 대표시간의 값을 선정하여 비교·분석하였다. MT-1~MT-3에서는 습윤과정의 경우 4h, 8h, 12h, 16h의 값을 활용하였으며 건조과정의 경우 4h, 8h, 16h, 24h의 값을 활용하였다. 강우재현시간이 짧고 방치기간이 긴 MT-4에서는 습윤과정의 경우 2h, 4h, 6h, 8h의 값을 활용하였으며 건조과정의 경우 습윤과정에 이어 12h, 16h, 24h, 32h, 40h의 값을 활용하였다. 수치해석결과(NA-1~NA-4)는 모형실험 결과와 비교하고자 동일 시간, 동일 위치의 간극수압 값을 추출하여 비교·분석하였다. 그림 11은 조건별 수치해석 결과 중 대표적으로 최종단계에서 간극수압의 분포를 나타낸 것이다. NA-1의 경우 간극수압의 분포가 -4.14~0.99kPa, NA-2의 경우 -3.90~0.85kPa, NA-3의 경우 -3.30~3.25kPa, NA-4의 경우 -4.80~0.80kPa의 범위로 나타났다.



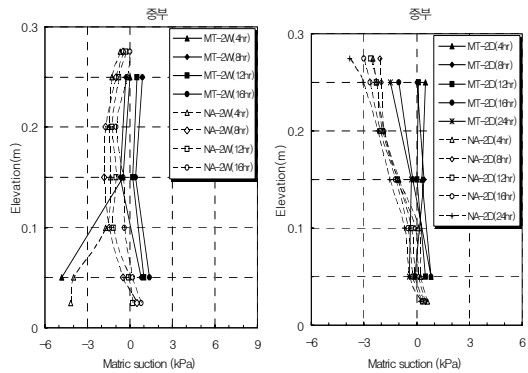
[그림 9] 체적함수비 분포 비교(MT-3과 NA-3)



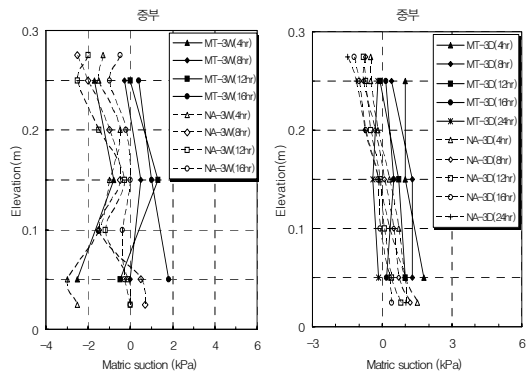
[그림 11] 수치해석에 의한 간극수압 분포



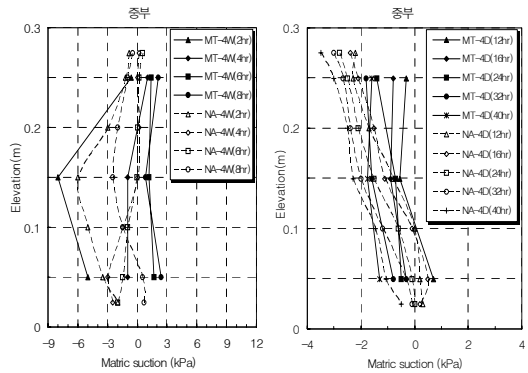
[그림 12] 간극수압 분포 비교(MT-1과 NA-1)



[그림 13] 간극수압 분포 비교(MT-2와 NA-2)



[그림 14] 간극수압 분포 비교(MT-3과 NA-3)



[그림 15] 간극수압 분포 비교(MT-4와 NA-4)

그림 12~그림 15는 사면의 중부에서 사면깊이와 경과 시간에 따라 간극수압(모관흡인력)의 변화관계를 나타낸 것이다. 습윤과정에서는 강우지속시간에 따라 부의 간극수압이 감소하여 정의 간극수압을 나타내는 경향을 보였으며 건조과정에서는 방시시간에 따라 다시 부의 간극수

압을 회복하는 경향을 보였다. 특히, 그림 12와 그림 15에서 나타난 바와 같이 강우강도가 작고 강우지속시간이 짧을수록 더 큰 부의 간극수압을 나타내고 회복하는 시간도 짧은 것으로 나타났다. 이와 반면 강우강도가 크고 강우지속시간이 긴 그림 13과 그림 14에서는 부의 간극수압을 회복하는데 18시간이상의 오랜 시간이 소요되는 것으로 나타났다. 습윤 및 건조과정 모두에서 수치해석 결과와 모형실험 측정값의 차이를 보였으나 변화하는 경향은 유사하게 나타났다. 그러나 수치해석으로 얻은 간극수압의 값은 강우재현 모형실험결과와 2~3kPa 정도의 차이를 보이는 것으로 나타났는데 이는 초기함수비 조건 및 다짐, 사면하부의 투수성 다공판 등 기타조건이 수치해석 모델링과 완벽하게 일치하지 않은 이유에서 발생하는 것으로 판단된다. 또한, 수치해석만으로 모형사면의 지반상태를 정확하게 모델링하는 것이 불가능하기 때문인 것으로 여겨지며 침투해석에 적용된 모형사면의 크기가 작아 작은 변수에도 값의 변화가 상대적으로 크게 나타난 것으로 판단된다.

4.3 모형실험과 수치해석의 결과비교 및 고찰

수치해석조건의 해석결과와 강우재현모형실험조건에 따른 측정결과로 경과시간과 사면깊이에 따라 체적함수비와 간극수압의 변화특성을 비교·검토하였다. 체적함수비는 사면의 상부와 하부, 간극수압 분포는 사면의 중부를 대표단면으로 선정하여 검토하였다. 해석조건에 따라 수행된 모든 수치해석결과에서 시간에 따른 간극수압의 분포경향은 강우재현 모형실험에서 측정된 값과 유사하게 나타났으며, 깊이에 따른 체적함수비 변화도 유사한 경향을 보였다. 다만, 수치해석에서 산정된 결과와 강우재현 모형실험에서 측정된 체적함수비와 간극수압의 값은 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다. 체적함수비는 최대 5% 정도, 간극수압(모관흡인력)은 최대 3kPa 정도 값의 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 초기함수비 조건, 다짐, 사면하부의 투수성 다공판 등의 많은 지반조건들을 완벽하게 모델링하는 것이 불가능하기 때문이며, 또한 침투해석에 적용된 모형사면의 크기가 너무 작아 작은 변수에도 많은 차이를 보이기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 차이가 큰 체적함수비는 초기 체적함수비의 차이에서 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결론

강우재현장치를 제작하고, 불포화 화강암질 풍화토로

조성된 모형사면에 강우 및 사면조건에 따라 모형실험과 수치해석을 실시하였다. 모형실험에서 측정된 체적함수비와 간극수압의 변화특성을 분석하였으며 또한 수치해석 결과와 비교하였다.

- 1) 체적함수비는 강우강도가 크고 사면경사가 급할수록 한계값에 도달하는데 짧은 시간이 소요되는 반면 강우강도가 작고 사면경사가 완만할수록 많은 시간이 소요되는 것으로 나타났다.
- 2) 강우강도가 작고 강우지속시간이 짧을수록 더 큰 부의 간극수압을 나타내고 회복하는 시간도 짧은 것으로 나타났다. 이와 반면 강우강도가 크고 강우지속시간이 길수록 부의 간극수압을 회복하는데 오랜 시간이 소요되는 것으로 나타났다.
- 3) 강우강도가 클수록 사면경사가 급할수록 강우지속시간이 길수록 습윤과정에서는 체적함수비의 증가시점이 빨라지고 모관흡인력의 감소가 빠르게 진행되는 양상을 보인 반면, 건조과정에서는 모관흡인력의 회복이 늦어지는 양상을 보였다.
- 4) 강우재현 모형실험과 수치해석을 수행한 결과 체적함수비와 간극수압의 분포경향이 유사하게 나타났다. 그러나 체적함수비는 최대 5% 정도, 간극수압은 최대 3kPa 정도의 차이를 보였다. 이는 초기함수비, 다짐, 사면하부의 투수성, 다공판 등의 많은 지반조건들을 프로그램에서 완벽하게 모델링하지 못했기 때문인 것으로 보이며, 또한 수치해석에 적용된 모형사면의 크기가 너무 작아 작은 변수에도 많은 차이를 보이기 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 심태섭, 김선학, 기완서, 주승완, "강우에 따른 화강암질 풍화토 사면의 전단강도 특성에 관한 연구", 대한지질공학회지, 제14권, 제4호, pp. 349~360, 12월 2004.
- [2] 이광모, 심태섭, 김선학, 최용준, "강우강도에 따른 무한사면의 간극수압 변화의 특성", 대한토목학회 2005년도 정기 학술대회 논문집, pp. 4442~4445, 10월 2005.
- [3] 조성은, 이승래, "강우침투에 따른 불포화 토사사면의 안정해석", 한국지반공학회는논문집, 제16권, 제1호, pp. 51~64, 2월, 2000.
- [4] 홍원표, 김상규, 김마리아, 김윤원, 한중근, "강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측", 대한토질공학회지, 제6권, 제2호, pp. 55~63, 4월, 1990.
- [5] Fredlund, D. G., Rahardjo, H., "Soil Mechanics for

- Unsaturated Soils", John Wiley and Sone, Inc, 1993.
- [6] SEEP/W User's Guide, GEO-SLOPE International Ltd, 2002.
- [7] Tami, D., Rahardjo, H., Leong, B. C., Fredlund, D. G., "Design and laboratory verification of a physical model of sloping capillary barrier", Canadian Geotechnical Journal, Vol.41, pp. 814-830, 2004.
- [8] Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D. G. and Leong, E. C., "Controlling parameters for rainfall-induced landslides", Computers and Geotechnics, Vol.29, pp. 1~27, 2002.
-

김 선 학(Sun-Hak Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 겸임교수

<관심분야>

사면안정, 연약지반, CM