

깊이별 지반특성변화가 강우침투에 의한 사면표층 파괴에 미치는 영향

Effect of Depth-Variant Soil Properties on Shallow Failure of Slope during Rain Infiltration

박 가 현¹ Park, Ka-Hyun

김 지 영² Kim, Ji-Young

정 충 기³ Chung, Choong-Ki

김 경 석⁴ Kim, Kyung-Suk

Abstract

Intensive rainfall causes frequent slope failures at the shallow depths of slopes. Because soil layers at shallow depths of slopes usually become dense, and its permeability and soil strength vary according to depth, forensic studies and stability analyses of shallow slope failure need to consider the depth-variant soil properties. In this study, the effect of depth-variant soil properties on surface failure of slopes during rain infiltration is investigated using numerical analysis. Three different cases considering depth-variant soil properties were conducted and the results were compared. For the analysis, undisturbed soils at three different depths were sampled at actual slope failure sites and the properties including strength and permeability characteristics at each depth were obtained. Stability analysis and seepage analysis were conducted using actual rainfall records. The comparison of the results shows that analysis could lead to an erroneous conclusion according to the way of considering depth-variant soil properties. The case in which depth-variant soil properties were considered predicted similar failure times and failure shapes with the actual failure. Therefore it is recommended that the depth-variant soil properties should be considered for the analysis of shallow slope failure during rain infiltration.

요 지

집중강우 시에는 사면의 얇은 심도에서 파괴가 빈번하게 발생한다. 사면의 표층 지반은 심도에 따라서 조밀해지는 특성이 있으며 지반의 투수특성과 강도특성도 달라지므로 강우시 사면의 얇은 심도에서 발생하는 파괴의 원인분석과 안정해석은 이러한 지반특성 변화를 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 사면의 표층 부근의 지반특성 변화가 강우시 사면의 안정성에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석해 보고자 하였으며, 표층 근처에서 심도에 따라 구한 지반특성 값을 적용하는 방식에 따라 강우침투와 사면안정해석 결과의 차이를 비교해 보았다. 실제 강우시 파괴가 발생한 사면을 대상으로 사면의 표층에서 심도별로 시료를 채취하여 전단강도와 투수특성 등 지반특성을 구하였으며, 파괴를 유발한 강우기록을 적용하여 침투해석과 안정해석을 실시하였다. 해석결과 깊이별 지반의 특성 변화를 고려한 경우와 단일지층으로 가정하여 고려하는 방식에 따라 간극수압 분포, 예상파괴면, 안전율 변화에 차이가

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ., Tel: +82-2-880-8733, Fax: +82-2-880-6933, khpark04@snu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정희원, 서울대학교 공학연구소 연구원 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Eng., Seoul National Univ.)

4 정희원, 한국도로공사 책임연구원 (Member, Researcher, Korean Expressway Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 12월 31일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

있는 것으로 나타났으며, 깊이별 지반 특성 변화를 고려하는 경우가 실제 파괴거동과 유사한 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 강우침투에 의한 표층파괴현상을 규명하고자 하는 경우 지반의 심도별 지반특성 변화를 고려할 필요가 있음을 의미한다.

Keywords : Surface slope failure, Infiltration, Depth-variant soil properties, Slope stability

1. 서론

전세계적인 기후 온난화가 진행되면서 국내 기후특성도 집중강우 발생빈도가 높아지고 있고 여름철 한바도를 통과하는 태풍도 많은 비를 내리는 추세로 변화하고 있다. 강우로 인하여 다양한 자연재해가 발생하지만 특히 산지가 많은 국내 지형 특성상 토석류 산사태 및 사면 파괴와 같은 재해가 빈번하게 발생하며 이로 인해 인접한 시설물과 인명 피해를 유발하고 있어 사회적으로 관심이 집중되고 있다.

집중 강우 시 발생하는 사면파괴는 사면의 표층부분에서 발생하는 경우가 많은데, 이러한 얇은 깊이의 사면 파괴는 강우가 지반내로 침투되면서 모관흡수력(matric suction)으로 인해 일시적으로 증가되어 있던 지반의 전단강도가 감소하면서 발생하거나 표층 부근 지층의 투수특성 변화로 인해 일시적인 지하수위(perched water table)가 형성되어 파괴가 발생하는 것으로 알려져 있다 (Ng and Shi, 1998). 자연사면이나 장기간 노출된 절토 사면은 표층부근의 퇴적이나 풍화로 인해 상대적으로 느슨한 상태로 존재하며 심도가 깊어짐에 따라 조밀해지는 지층구성을 갖는 경우가 많으며, 심도에 따라 지반의 전단강도와 강우침투에 영향을 주는 함수특성 및 투수특성이 달라지게 된다(Lee, 1991).

심도에 따른 지반특성의 변화는 강우 침투에 따른 사면의 안정성에 큰 영향을 미치지만 기존의 사면 안정성에 관한 연구에서는 이러한 지표부근의 지반 특성 변화를 고려하지 않고 단일의 층으로 가정하여 해석하는 사례가 대부분이었다. 본 연구에서는 사면의 표층부근의 심도별 전단강도 및 투수특성 변화가 강우시 사면의 안정성에 미치는 영향을 수치해석적으로 분석해 보고자 하였으며, 표층 근처에서 구한 값을 적용하는 방식에 따라 사면의 안정해석 결과가 어떻게 차이가 나는지를 비교하였다. 이를 위해 실제 강우시 파괴가 발생한 사면에 대하여 사면의 표층에서 심도별로 불교란 시료를 채취하고 전단강도와 투수특성 등 지반특성을 구하였으며,

파괴를 유발한 강우기록을 적용하여 침투해석과 안정해석을 실시하였다.

2. 강우침투를 고려한 사면안정해석 방법

강우침투를 고려하는 사면안정해석방법은 1990년대 후반 Fredlund(1994)에 의한 불포화토 이론이 정립되고 상용 유한요소해석 프로그램이 도입되면서 많은 연구가 진행되었다. 강우침투와 안정해석방법은 수리지역학적 연동해석(coupled hydro-geomechanical analysis)을 수행하여 강우침투현상과 응력 및 변위분포를 동시에 해석하는 방법에서부터(Kim, 2002; Cho and Lee, 2001; Cai, 1998) 1차원 침투와 무한사면해석을 이용하여 수학적으로 해석할 수 있는 방법(Cho and Lee, 2000)이 사용되고 있으며 가장 보편적으로 침투해석을 통해 간극수압분포를 구하고 이를 종래의 한계평형기법에 기반한 사면안정해석방법에 이용하는 것이다(Fredlund and Rahadjo, 1993). 침투해석은 지반의 포화상태 또는 불포화상태를 고려하여 해석대상 영역의 간극수압분포(pore water pressure distribution)를 계산하는 과정이며 불포화상태를 고려할 경우에는 불포화 상태를 나타내는 함수특성, 투수계수를 정의하기 위한 매개변수가 추가로 필요하다. 사면안정해석은 침투해석으로부터 계산한 간극수압분포를 종래의 한계평형해석기법에 포함시켜 수행하게 된다. 이 방법은 침투해석과 응력해석을 연동하여 해석하는 방법에 비하여 간편하면서도 합리적으로 강우침투해석 및 사면의 안정해석을 할 수 있다는 장점이 있다(Oh et al., 2008).

침투해석을 위한 지배방정식은 식 (1)과 같이 포화 및 불포화영역내의 물의 흐름(Darcy법칙)과 연속방정식으로부터 유도한 식을 이용하게 되며(Richards, 1931) 유한요소해석이나 유한차분해석을 통해서 간극수압분포를 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(\psi) \frac{\partial h_w}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K(\psi) \left(1 + \frac{\partial h_w}{\partial z} \right) \right\} = \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, ψ 는 간극수압(양의 간극수압과 음의 간극수압-모관흡수력-을 포함, kPa), h_w 는 압력수두(= ψ/γ_w), θ 는 체적함수비(= V_w/V , 단위체적내 물의 부피비), $K(\psi)$ 는 포화, 불포화 상태에서의 투수계수를 나타낸다.

강우침투를 고려한 불포화토의 침투해석을 실시하기 위해서는 함수특성곡선과 불포화 투수계수를 파악하는 것이 중요하다. 불포화토의 함수특성곡선은 여러 연구자에 의한 다양한 모델이 제시되어 있으며(Brooks and Corey, 1964; Van Genuchten, 1980; Fredlund and Xing, 1994), 이 중에서 Van Genuchten(1980)의 방법이 광범위하게 쓰이는 방법 중 하나이며, 포화투수계수와 파라미터 a , n , m 으로부터 불포화투수특성 곡선을 간편하게 예측할 수 있다. Van Genuchten(1980)은 유효포화도와 모관흡수력 사이의 상관관계를 이용하여 흡-함수특성 곡선과 투수곡선을 식 (2) 및 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha S)^n} \right]^m \quad (2)$$

$$k_w = k_s \frac{[1 - (\alpha S^{n-1})(1 + (\alpha S^n)^{-m})]^2}{((1 + \alpha S)^n)^{\frac{m}{2}}} \quad (3)$$

여기서, θ : 표준화된 체적함수비, α , n , m : curve fitting 파라미터, S : 모관흡수력, k_s : 포화투수계수, $m = 1 - 1/n$ 을 나타낸다.

사면안정해석은 침투해석으로부터 계산한 간극수압 분포를 종래의 한계평형해석기법에 포함시켜 수행하게 되는데, 불포화 영역에서의 전단강도 증가량을 고려하

기 위하여 식 (4)와 같이 Fredlund(1978)가 정의한 전단강도를 이용한다. 보수적인 안정해석결과를 위해서 불포화상태의 전단강도 증가량을 고려하지 않기도 한다.

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi'_b \quad (4)$$

여기서, c' 는 유효점착력, ϕ' : 유효내부마찰각, $(\sigma - u_a)$: 순연직응력(net normal stress), $(u_a - u_w)$: 흡인력(matric suction), ϕ'_b : 흡인력에 의한 마찰각을 나타낸다.

3. 해석대상 사면 및 파괴 유발 강우

3.1 대상사면

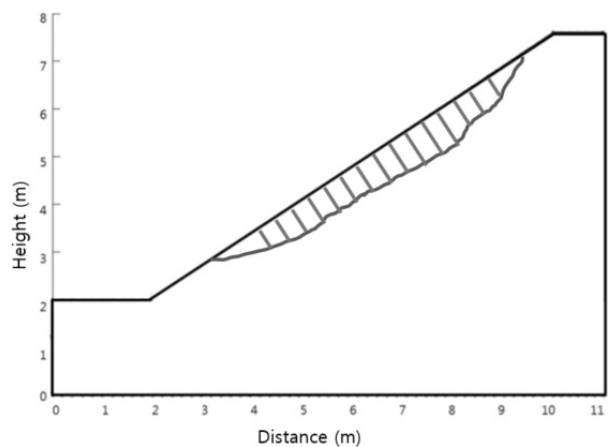
대상사면은 Fig. 1과 같이 서울 남부지역에 위치한 절토사면으로서 사면의 표면은 얇은 뿌리의 잔디로 덮여 있다. 사면의 높이는 약 5.5m이고 사면의 경사는 약 1:1.6(약 35도)이다. 사면 파괴는 2011년 7월 27일 집중강우가 내리는 과정에서 발생하였으며 파괴형태는 지표면에서 약 60cm 정도 깊이까지 표층부만 파괴되는 형태로 발생하였다. 사면파괴구간에 노출되는 사면의 지반조건은 화강풍화토로 나타났다.

3.2 지반특성

대상 사면의 지반특성을 구하기 위하여 파괴가 발생한 구간으로부터 인접한 위치에서 시료를 채취하였다. 시료는 황동관을 이용하여 표층에서부터 20cm 간격으



(a) Object site



(b) Schematic diagram of failure in slope

Fig. 1. Object site and schematic diagram of failure in slope

로 세 깊이(20, 40, 60cm)에서 불교란 시료 및 교란시료를 채취하였다. 지반의 기본 특성을 파악하기 위하여 비중, 입도분포, 상대밀도 등의 시험을 수행하였고, 입도분포시험 결과 대상현장의 흙은 모두 SW로 분류되었으며, 세립분의 함량은 10~20%로 측정되었다. 상대밀도는 표층에서부터 심도별로 각각 40%, 58%, 80%로 측정되었다.

불교란 시료에 대해서는 직접전단시험과 정수두 투수계수 시험을 실시하였는데, 직접전단시험은 황동관과 동일한 크기의 직접전단상자를 제작한 후 시료를 추출하여 시험하였고, 포화투수시험은 시료가 담겨있는 황동관을 직접 이용할 있도록 별도의 시험장치를 고안하여 실시하였다(Fig. 2).

시험결과는 Table 1에 나타내었다. 이에 따르면 사면 표면에서 0.6m심도까지의 지반특성은 심도가 깊어짐에 따라 크게 변화하는 것을 알 수 있는데, 표층에서 0.2m까지는 상대밀도가 40%정도로서 매우 느슨한 상태로 존재하며 0.6m에서는 상대밀도가 약 80%정도로 비교적 조밀한 상태로 나타났다. 포화투수계수는 지표면 근처와 0.6m심도에서 약 2배 정도의 차이를 나타내었다. 강도특성은 0.2m위치는 내부마찰각이 작지만 점착력이 있는 것으로 나타나는 반면, 0.4m와 0.6m시료에서는 비슷한 강도특성을 나타내었다.

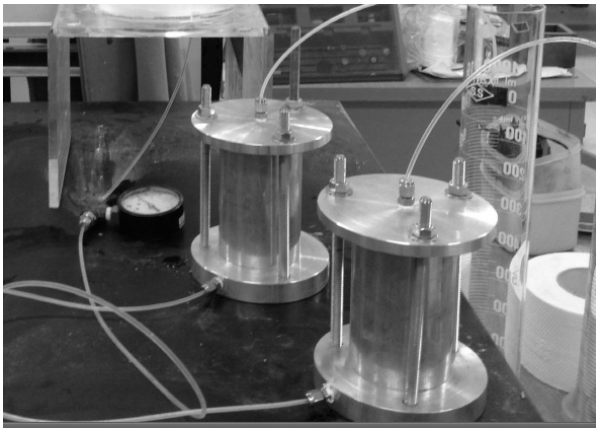


Fig. 2. Hydraulic conductivity testing apparatus

3.3 파괴 유발 강우

사면 파괴를 유발한 강우자료는 대상지역에서 가장 가까운 기상관측소인 관악관측소(509)의 기록을 이용하였다. 파괴 추정 일시는 2011년 7월 27일 07~09시이며, 이를 토대로 7월 26일 06시~7월 29일 06시 사이의 강우기록과 파괴추정 시간을 Fig. 3에 나타내었다. 7월 26일 06시 이전에 발생한 강우기록을 보면 약 10일 동안 누적강우량이 불과 20mm 정도로서 파괴 당일의 집중강우량에 비해 상대적으로 매우 적은 양으로 판단하여 그림에서는 제외하였다. 사면파괴 당일에 발생한 강우기록을 보면 최대시간강우량(2011년 7월 27일 08시)은 92mm를 기록하였고, 강우가 시작되는 시점(2011년 7월 26일 17:00)부터 파괴로 추정되는 시점(2011년 7월 27일 08시~09시)까지의 강우시간은 약 16~17시간, 이때까지의 누적강우량은 290~350mm로 나타난다.

4. 침투해석과 사면안정해석

4.1 해석방법

본 연구에서는 침투해석과 안정해석을 위해 SEEP/W와 SLOPE/W(Geoslope, 1998)를 사용하였으며, 해석은 실제 파괴가 발생한 사면을 대상으로 하였다.

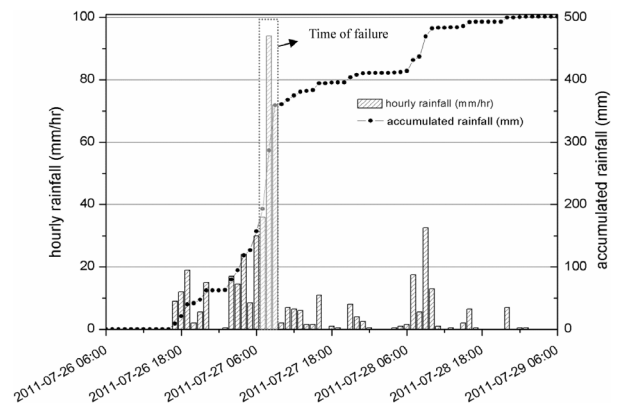


Fig. 3. Rainfall record at Kwan-ak rain station

Table 1. Soil properties

Depth (m)	Relative Density (%)	Initial Void Ratio	Sat. hydraulic conductivity (m/sec)	Sat. unit density (g/cm ³)	Sat. volumetric water content	Field degree of saturation (%)	Friction Angle (Deg)	Cohesion (kPa)
0.2	40	1.27	1.076E-05	1.70	0.56	35.09	21.80	6.00
0.4	58	0.81	8.019E-06	1.88	0.45	35.93	34.80	0.00
0.6	80	0.63	6.101E-06	1.97	0.39	35.43	35.70	0.00

침투해석을 위한 메쉬는 Fig. 4에 나타내었는데, 표층부의 지층변화를 고려하기 위하여 메쉬의 크기는 0.05m로 설정하였다. 강우침투를 고려한 해석을 수행하기 위해서는 사면내 초기 간극수압분포를 설정해야 하는데, 본 연구에서는 대상지역 표면의 모관흡수력을 구한 후 정상상태 해석을 수행하여 초기조건을 설정하였다. 표층에서 측정된 자연함수비와 비중, 간극비를 이용하면 표층에서의 체적함수비(0.18)를 구할 수 있고, 이렇게 산정된 체적함수비와 함수특성곡선(Fig. 5)을 이용하면 표층에서의 초기 모관흡수력을 구할 수 있는데, 해석결과 40kPa의 모관흡수력이 사면상부에서 발생하는 것으로 나타났다. 초기조건이 결정된 후 강우침투 해석은 실제 파괴를 유발한 강우(7월 26일 오전6시~29일 오전6시)를 지표면 경계조건으로 적용하여 시간에 따른 침투와 지층내 간극수압분포를 구하였다. 침투해석에서는 포화

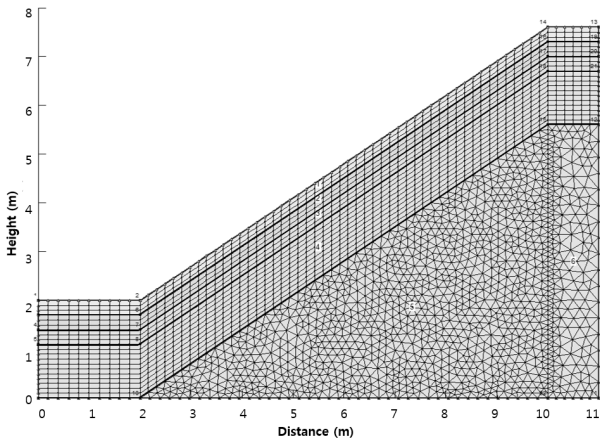


Fig. 4. Model slope section used in the analysis

투수계수보다 큰 시간당 강우량은 지표를 따라 흐르거나 유출되도록 고려하였다.

사면안정해석은 침투해석결과를 이용하여 절편법으로 해석을 수행하였으며 강우침투시간에 따른 사면의 안전율을 변화를 구하였다. 사면안정해석은 모멘트와 힘의 평형을 고려한 절편법인 Morgenstern-Price법을 이용하였다.

4.2 해석조건

깊이별 지반조건을 고려하는 방법에 따라 사면표층파괴의 안정성을 분석하기 위하여 해석조건을 다음과 같이 세가지 CASE로 나누어 해석을 실시하였다. 사면 표층파괴에 영향을 미치는 심도는 최대 2m까지로 가정하였다. 모든 해석 조건에 대하여 2m 이상 깊이에는 대해서는 0.4~0.6m에서 구한 투수 및 강도특성과 동일하다고 가정하고 해석을 수행하였다.

CASE-1) 표층부 지반특성 변화를 고려: 지층의 변화를

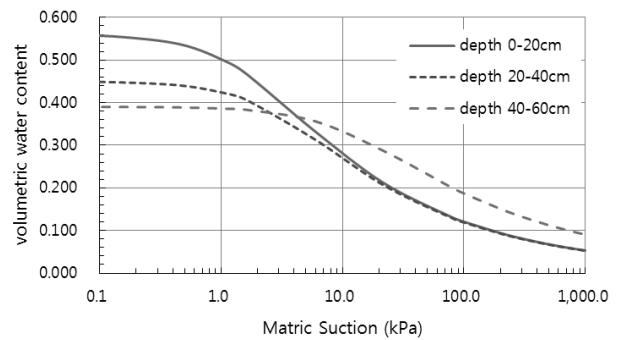


Fig. 5. Soil water characteristic curves according to depth

Table 2. Hydraulic and shear strength parameters for analysis

Case	Analysis Details	Depth (m)	D_r (%)	Sat. Vol. water content	Hydraulic parameters (van Genuchten)	Saturation Hydraulic Conductivity (m/sec)	γ_t (kN/m ³)	ϕ' (Deg)	c' (kPa)	ϕ^b (Deg)
CASE-1	Depth-variant soil properties	0.2	40	0.56	$\alpha=0.603$ $n=1.385$ $m=0.278$	1.08E-05	16.78	21.8	6	21.8
		0.4	58	0.45	$\alpha=0.348$ $n=1.383$ $m=0.277$	8.02E-06	18.42	34.8	0	34.8
		0.6~2.0	80	0.39	$\alpha=0.091$ $n=1.331$ $m=0.249$	6.10E-06	19.34	35.7	0	35.7
CASE-2	Averaged soil properties	0~2.0	58	0.45	$\alpha=0.348$ $n=1.383$ $m=0.277$	8.293E-06	18.18	30.77	2	30.77
CASE-3	Top soil layer properties	0~2.0	40	0.56	$\alpha=0.603$ $n=1.385$ $m=0.278$	1.08E-05	16.78	21.8	6	21.8

시험결과를 바탕으로 0~0.6m깊이의 층을 0.2m씩 세 층으로 나누고 각 층에 대하여 실험결과로 나타난 투수특성 및 강도특성 값을 그대로 이용하여 해석을 수행하였다. 0.6m보다 깊은 심도에서는 시료 채취에 어려움이 있기 때문에 투수 및 강도특성을 가정할 수밖에 없다. 실내시험 결과, 0.4~0.6m의 포화단위중량이 1.98로 매우 크게 나타났으며, 깊이가 깊어지더라도 더 큰 단위중량을 가지기 어렵다고 판단하여 0.6~2.0m 물성값을 0.4~0.6m의 지반과 동일하다고 가정하여 해석하였다.

CASE-2) 표층부 지반특성의 평균값을 이용: 표층부 지층변화 특성을 무시하고, 0~0.6m까지의 시험결과 평균값을 0~2.0m까지 적용하여 해석을 수행하였다.

CASE-3) 표층부 지반특성의 최상부 값을 이용: 일반적으로 사면안정해석을 실시할 때, 시료채취는 가장 표층에서만 이루어지기 때문에 CASE-2와 마찬가지로 표층부 지층변화 특성을 무시하고, 0~0.6m까지의 시험결과 중 최상부(0~0.2m)의 지반특성을 0~2.0m까지 적용하여 해석을 수행하였다.

Table 2에는 해석 CASE별로 사용한 물성을 나타내었다. 여기서 함수특성곡선의 매개변수값(α , n , m)은 Kim (2012)이 제안한 화강풍화토의 상대밀도에 따른 함수특성곡선을 보간하여 추정하였는데, 본 연구에서 사용한 풍화토는 Kim(2012)이 사용한 풍화토와 흙의 종류 및 분류가 화강편마암질 풍화토이고 통일분류법상 SW로서 그 특성이 매우 유사한 것으로 판단하였다. 함수특성곡선이 결정되면(Fig. 5), 실험에서 결정한 각 층의 포화 투수계수와 식 (3)으로부터 투수계수곡선(Fig. 6)을 예측할 수 있다.

4.3 침투해석 결과

Fig. 7(a)~Fig. 7(c)는 집중강우 기간 동안(7월 26일

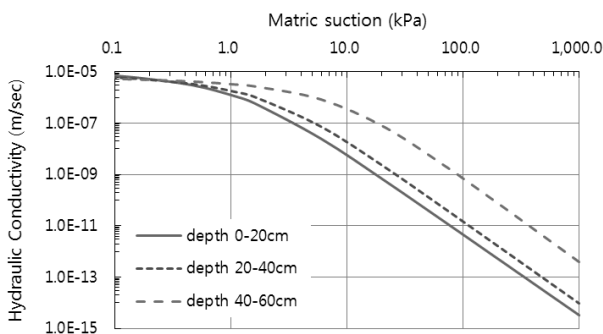


Fig. 6. Hydraulic conductivity curves according to depth

오전 6시부터 72시간 동안) 발생한 사면 내 간극수압 분포를 각 CASE 별로 도시한 것으로서 시간경과에 따른 사면내 침투과정을 확인할 수 있다. 결과에서 알 수 있듯이 사면 상부에 발생하였던 초기 40kPa의 모관 흡수력은 강우 침투에 따라 급격히 소산되어 21시간 경과 후에는 0으로 수렴하는 것을 관찰할 수 있다. 또한 집중호우 기간 중 35시간 이후에 사면 하부의 지하수위(간극수압 0인 깊이)가 점차 상승하는 것을 확인할 수 있

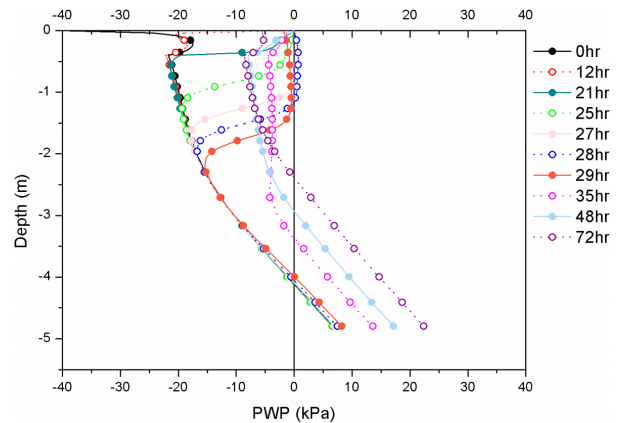


Fig. 7. (a) P.W.P distribution in slope of CASE-1

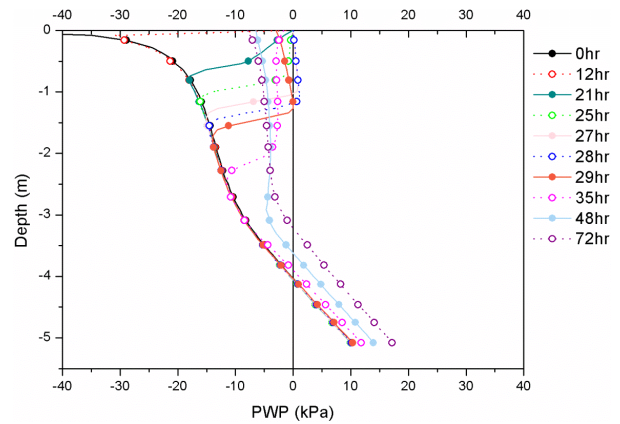


Fig. 7. (b) P.W.P distribution in slope of CASE-2

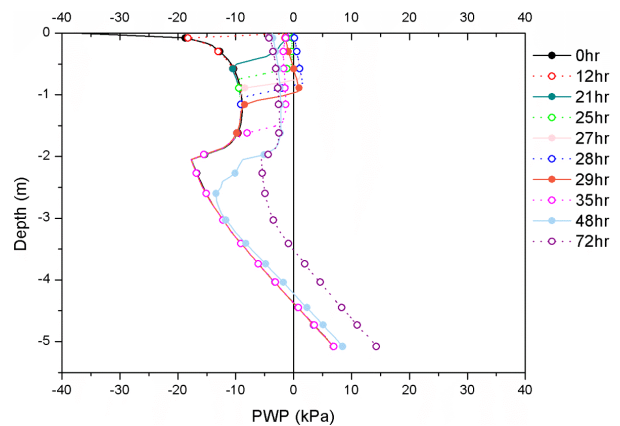


Fig. 7. (c) P.W.P distribution in slope of CASE-3

다. 한편, peak 강우강도시간과 그 직후시간인 27~28시간 후부터 사면 상부에 1kPa 내외의 양의 간극수압이 모든 CASE에서 발생하며, 강우강도가 줄어드는 29시간 후부터는 사면에 음의 간극수압이 다시 나타나는 것을 확인할 수 있다. 침투해석 결과, 침투강우강도 직후(28시간 쯤)에 CASE-1에서는 깊이 0.4m에서 0.75kPa의 최대 간극수압이 발생하며, 1.2m까지 양의 간극수압을 갖는 형상을 보인다. CASE-2의 경우에는 1.06m에서 최대값 1.11kPa의 간극수압이 발생하며, 직후에 바로 음의 간극수압을 갖는 형상을 보인다. CASE-3은 CASE-2와 마찬가지로 0.8m에서 최대 간극수압 1.53kPa가 발생하고, 직후에 바로 음의 간극수압이 발생하게 된다. 바로 이 때 발생하는 양의 간극수압과 각 층의 강도정수가 사면의 안정성을 결정하게 된다.

4.4 사면안정해석 결과

집중호우 기간 동안 시간에 따른 사면의 안전율 분포 변화와 최소안전율이 나타날 때의 파괴형태를 각각 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

사면의 표층을 3층으로 구분하여 해석한 CASE-1의 경우(Fig. 8(a)), 초기에는 약 2.2 정도의 안전율을 확보하고 있으나, 강우가 지속되고, 강우강도가 증가됨에 따라 모관흡수력의 감소 및 지반의 포화로 인하여 20시간 이후부터 안전율이 급격히 감소하는 것을 알 수 있으며, 침투강우강도를 나타낸 27시간부터 28시간에 안전율이 1보다 작은 파괴가 발생하였다. 28시간 이후에는 강우강도가 급격히 줄어들면서 점차 안전율이 회복하는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 9(a)는 CASE-1의 최소 안전율 단계에서 예상파괴면을 도시한 결과이다. 해석 결과 사면의 표층을 3층으로 구분하여 해석한 경우, 파괴형상은 얇은 파괴이며, 그 깊이는 40~60cm로 나타났다.

Fig. 7(a)의 사면내 간극수압 분포에서 27시간~28시간 쯤에 깊이 0m~1.2m에 양의 간극수압(임시 지하수위)이 발생한 것을 확인할 수 있는데, 강우 강도가 최대인 27~28시간에서 사면의 표층에 양의 간극수압이 발생하면서 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 이는 실제 대상 사면의 파괴시간과 심도 및 형상과 일치한다.

Fig. 8(b)는 사면의 표층을 하나의 층으로 가정하고 평균값을 해석에 적용한 CASE-2의 집중호우 기간 동안 시간에 따른 사면의 안전율 분포 변화를 강우 패턴과 함께 도시한 결과이다. 해석 시간 동안 모든 방법에 대

하여 안전율을 1보다 크게 평가하는 것을 확인할 수 있다. CASE-1과 마찬가지로 peak 강우 강도 직후에 가장 낮은 안전율을 나타내며, peak 강우 강도 이후 점차 안전율이 회복되는 경향을 보인다. Fig. 9(b)는 CASE-2의 최소 안전율에서의 예상파괴면을 도시한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 지하수위면을 따라 파괴면이 형성되며, 그 깊이는 약 80~100cm정도 되는 것을 확인할 수 있다.

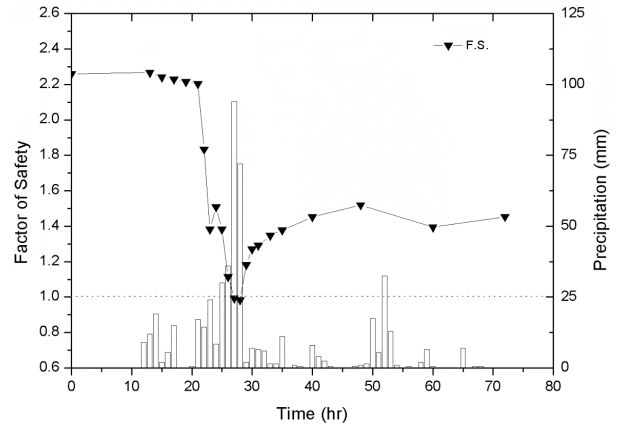


Fig. 8. (a) Time series of F.S. of CASE-1

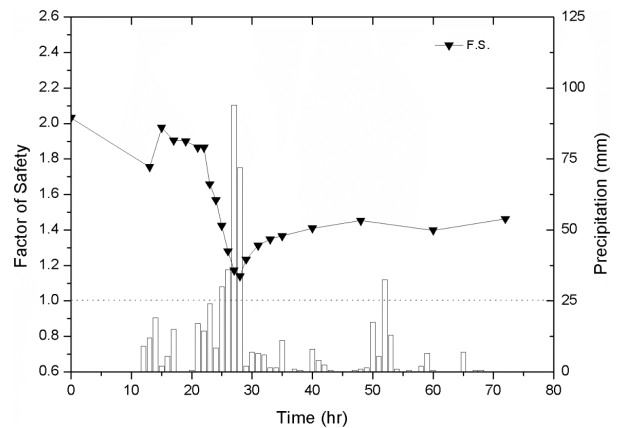


Fig. 8. (b) Time series of F.S. of CASE-2

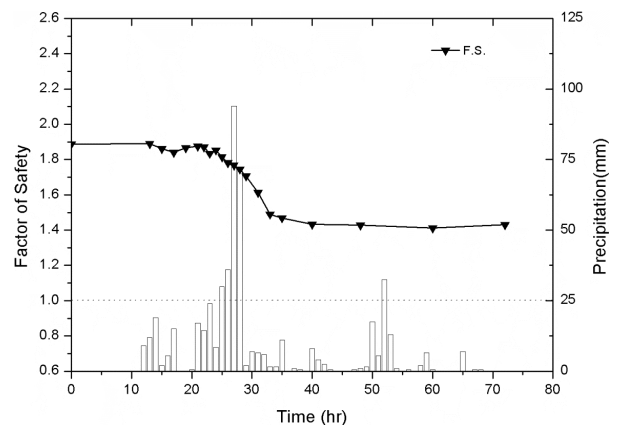


Fig. 8. (c) Time series of F.S. of CASE-3

Fig. 8(c)는 사면의 표층을 단일층으로 가정하고 표층의 물성값을 해석에 적용한 CASE-3의 시간에 따른 사면의 안전율 분포 변화를 강우 패턴과 함께 도시한 결과이다. 가장 연약한 표층의 물성값을 적용한 CASE-3의 경우, 안전율이 낮게 산정될 것이라는 예상과 달리, 모든 시간에서 안전율이 1 보다 크게 나타났다. 앞의 두 가지 CASE와 비교하였을 때, 집중호우 직전 안전율이 가장 작았지만, 호우로 인한 안전율의 변화가 가장 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 안전율의 회복

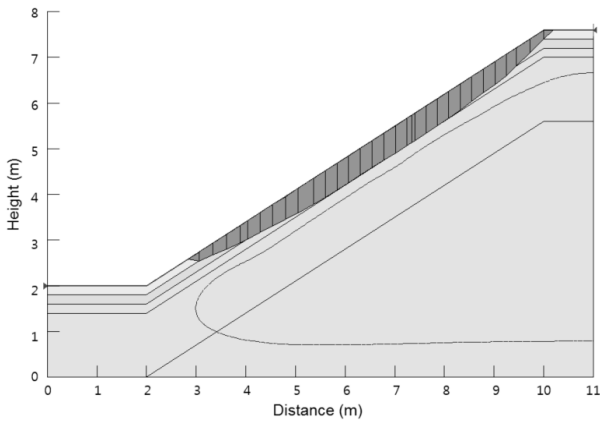


Fig. 9. (a) Failure surface at minimum F.S. of CASE-1

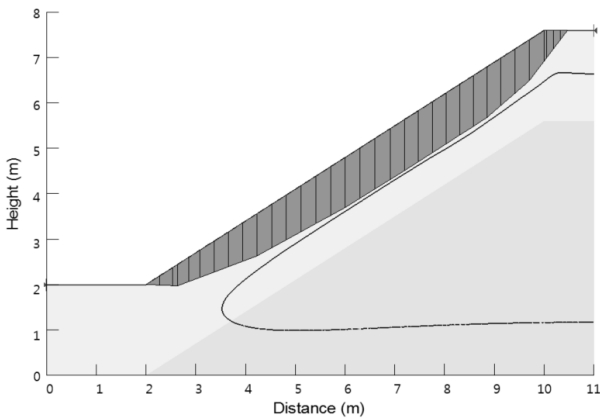


Fig. 9. (b) Failure surface at minimum F.S. of CASE-2

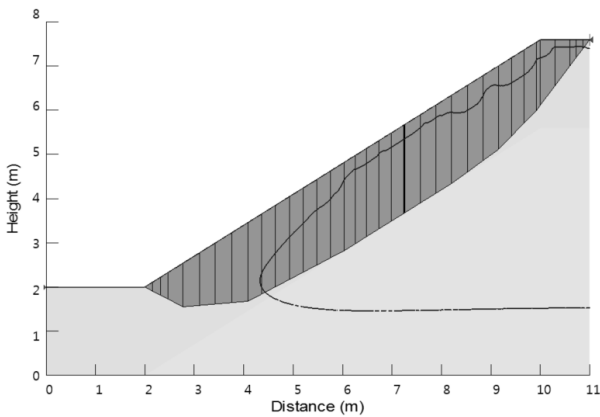


Fig. 9. (c) Failure surface at minimum F.S. of CASE-3

이 더디게 이루어지는 것을 알 수 있다. Fig. 9(c)는 CASE-3의 최소 안전율에서의 예상파괴면을 도시한 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 약 180cm~200cm 깊이의 깊은 파괴가 일어날 것으로 예상되며 이 때의 안전율은 1.325이다. Cho and Lee(2000)는 투수계수가 작은 경우에 침투의 지체가 발생하여 표면 부분의 강도가 깊은 부분보다 크게 감소하고 임계단면이 표면에 형성될 수 있다고 하였다. 이와 마찬가지로, CASE-3의 경우에는 투수계수가 1.076E-05m/sec로 상대적으로 크기 때문에 강우의 침투가 사면내부까지 원활하게 이루어져서 표층부에 물 흐름의 지체가 발생하지 않고, 층수가 달라지는 2.0m를 경계로 최소 안전율에서의 예상파괴면이 나오는 것으로 판단된다. 반면, CASE-1의 경우에는 층별로 투수계수가 다르기 때문에 층이 달라질 때마다 강우의 침투가 어렵게 되고 각 층의 경계에서 불안정을 유발하여 이 부분을 따라 파괴가 일어나게 되며, CASE-2의 경우에도 층별 효과를 고려하지는 않았지만, CASE-3에 비하여 작은 투수계수(8.019E-06m/sec)를 갖기 때문에 CASE-3에 비하여 사면 내부로 물의 흐름이 지연되고, 사면 표면 쪽에 불안정한 면이 형성되는 것으로 보인다. 다만, CASE-3의 경우 최상부(0~0.2m)에서 발생한 점착력(6kPa)을 2.0m 깊이까지 확장하여 적용함으로써 CASE-3에서 모사한 사면이 실제사면보다 높은 저항력이 발현되어 이 때문에 높은 안전율을 나타낸 것으로 판단된다.

해석결과와 실제 파괴시간 및 파괴형태와 유사한 결과를 나타내는 해석조건은 CASE-1으로서 집중강우 시 사면 표층의 파괴 현상을 구하기 위해서는 표층 지반의 변화를 고려할 필요가 있음을 알 수 있다.

5. 토의 및 결론

최근 집중호우로 인하여 발생한 사면파괴의 경우, 매우 얇은 표층 파괴가 많이 관찰되어 왔으며, 이에 대한 명확한 규명은 제대로 이루어지지 않았다. 한편, 그동안 사면 안정과 관련된 수많은 연구가 이루어졌으나 단순히 지층을 토사/ 풍화암/ 연암, 경암 정도로만 구별하였다. 그러나 오랜 시간 동안 노출된 실제 사면 표층의 지반은 깊이에 따라 조밀해 지는 경우가 많으며, 이로 인해 깊이에 따라 강도특성과 강우 침투에 영향을 주는 투수 특성이 달라지게 된다. 이에 착안하여 사면표층에서 발생하는 얇은 깊이의 파괴는 사면 표층의 깊이별

지반조건의 변화에 영향을 받게 될 것이라 예상하였다.

실제로 사면의 표층에서 시료를 20cm 간격으로 채취하여 본 결과, 깊이에 따라 상대밀도가 40%, 58%, 80%로 차이가 확연히 나타났으며, 이에 따라 투수특성 및 강도특성이 달라지는 것을 실내시험을 통해 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 3가지의 CASE에 대하여 침투해석 및 사면안정해석을 수행하고 비교 분석함으로써 표층의 깊이별 전단강도 및 투수특성 변화가 얇은 사면파괴에 미치는 영향을 분석하였다.

안전율의 경우에는 사면표층을 3층으로 구분하여 해석한 CASE-1의 경우에는 peak 강우시간 27시간째와 28시간째에 1보다 작게 평가하였다. 이는 2011년도 대상 사면 파괴 시점과 매우 일치한다. 반면 사면표층을 단일 층으로 해석한 CASE-2와 CASE-3에서는 모든 시간에서 안전율을 1보다 높게 평가하였다. 파괴형상 역시 CASE-1의 경우 40~60cm 의 얇은 파괴로 실제 대상사면의 파괴를 잘 묘사하였다. 지반조사를 깊은 심도까지 실시하여 그 결과가 반영된 CASE-2는 비교적 CASE-1의 안전율 및 파괴형상에 근접하였으나, 가장 표층 흙의 특성만 반영된 CASE-3의 경우에는 안전율 및 파괴형상을 잘 예측하지 못하였다. CASE-3의 경우에는 물의 침투가 실제 침투양상과 달리 균질하게 이루어지기 때문에 CASE-1과 달리 사면의 표층에서 불안정한 면이 없게 되어 층서 구분이 있는 2.0m 경계를 최소 안전율에서의 파괴면을 예측하게 되며, 2.0m 까지 확장하여 적용한 사면 표층 최상부의 점착력 때문에 전반적으로 안전율을 과대평가하는 것으로 판단된다.

풍화토 사면은 깊이가 깊어짐에 따라 조밀해지며, 비록 20cm 라는 얇은 깊이에서도 투수특성 및 강도특성이 달라진다. 본 연구에서 이러한 투수특성 및 강도특성의 변화가 사면의 파괴 형상과 안전율에 영향을 크게 미치는 것을 확인하였다. 따라서 사면안정해석을 실시할 때에는 얇은 깊이라 하더라도 깊이에 따라 변화하는 지반의 특성을 반영하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌 (References)

1. Brooks, R. H. and Corey, A. T. (1964), *Hydraulic properties of porous medium*, Hydrology Paper 3, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo.
2. Cai, F. Ugai, K. Wakai, K., and Li, Q. (1998), Effects of horizontal drains on slope stability under rainfall by three-dimensional finite element analysis, *Computers and Geotechnics*, Vol.23, No.4, pp. 255-275.
3. Cho, S.E. and Lee, S.R. (2000), Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil Slopes Due to Rainfall Infiltration, *Journal of Korean Geotechnical Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp.51-64.
4. Cho, S.E. and Lee, S.R. (2001), Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration, *Computers and Geotechnics*, Vol.28, No.3, pp. 185-208.
5. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978), Shear Strength of Unsaturated Soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.3, pp.313-321.
6. Fredlund, D.G. and Xing, A. (1994), Equations for the Soil-Water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.3, pp.521-532.
7. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H. (1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons Inc, NY, NY.
8. Fredlund, D. G., Xing, A., and Huang, S. (1994), Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.31, No.3, pp.533-546.
9. Kim, K.S. (2012), *Analysis of Rainfall Characteristics inducing Shallow Failure of Road Cut Slope*, PhD Thesis, Seoul national university.
10. Kim, J.M. (2002), A Fully Coupled Hydrogeomechanical Numerical Analysis of Rainfall Impacts on Groundwater Flow in Slopes and Slope stability, *Journal of Korean Geotechnical Engineering*, Vol. 18, No.6, pp.5-16.
11. Lee, I.K. (1991), *Mechanical behavior of compacted decomposed granite soil*, PhD Thesis, City university.
12. Ng, C. W. W. and Shi, Q. (1998), A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, *Computers and Geotechnics*, Vol.22, No.1, 1-28.
13. Oh, S.B., Mun, J.H., Kim, T.K., and Kim, Y.K. (2008), A Case Study of Rainfall-Induced Slope Failures on the Effect of Unsaturated Soil Characteristics, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.28, No.3C, pp.167-178.
14. Richards, L.A. (1931), Capillary conduction of liquids in porous mediums, *Journal of Applied Physics*, Vol.1, No.5, pp.318-333.
15. Van Genuchten, M.Th. (1980), A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, No.5, pp.892-898.

Received : March 27th, 2014

Revised : May 20th, 2014

Accepted : June 2nd, 2014