

강우조건을 고려한 불포화사면의 안정성 평가

Evaluation of Rainfall Conditions on Slope Stability in Unsaturated Weathered Soils

권흥기¹⁾, Hong-Ki Kwon, 박성완²⁾, Seong-Wan Park

¹⁾ 단국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environment Engineering, Dankook Univ.

²⁾ 단국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environment Engineering, Dankook Univ.

SYNOPSIS : It has been reported that many slope failures in unsaturated soils are mainly caused by downward infiltration due to rainfall. The rainfall characteristics could be an important factor, and more predictable slope failures can be achieved by considering more reasonable rainfall conditions. So, a need exists that these trends of infiltration in weathered soils, which is commonly found in Korea, are assessed by considering rainfall conditions based on phenomenological approach. In this paper, numerical analyses of unsaturated soil slope under rainfall conditions are presented based on the soil-water characteristic curve in the laboratory and huff method. Then the performance of unsaturated weathered soil slopes was evaluated under various conditions after applying the effect of overburden pressure on SWCCs and fines contents. The results demonstrated that the rainfall conditions using Huff method can be very effective and the proper application on analysis is very important to enhance the prediction on unsaturated slope stability.

Keywords : Unsaturated soil, Soil-water characteristic curve, Overburden pressure, Slope stability, Rainfall condition, Huff method

1. 서론

다수의 사면이 존재하는 지형적 특성과 더불어 급속한 산업발달에 의해 형성된 인공사면이 많은 국내의 실정에 반해, 적용하고 있는 사면의 안전율은 건조할 경우와 만수위의 극단적인 경우를 비취 설계에 적용하는 경우가 많다. 그러나 2000년대 이후 기상이변을 원인으로 7~8월에 집중적으로 내리는 호우에 대해서는 일률적인 강우주기를 사용하는 설계로써는 사면 안정에 대한 신뢰도가 떨어지고 있다.

최근에 들어서 불포화토 이론을 활용하여 사면 설계에 적용하는 사례가 늘어나고 있으나 불포화 함수특성곡선을 획득하는데 많은 시간이 걸리고 있어 대상 지반의 대표적인 함수특성곡선을 보편적으로 설계에 적용하고 있는 실정이다. 하지만 실제의 대상 지반은 흙의 종류와 더불어 내외부적인 환경적 조건이 다르고 상재하중과 세립분의 영향을 고려하지 않은 상태의 함수특성곡선을 적용하고 있기 때문에 문제가 될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 자연 상태의 사면에 더욱 현실적으로 접근할 수 있는 불포화 이론을 토대로 한 사면에서 중요한 물성으로 이용하고 있는 함수특성곡선에 응력의 변화를 주어 기존의 함수특성곡선의 적용보다 좀 더 합리적인 반응을 꾀하고, 더 나아가 세립분의 영향을 보기 위해 점토의 함유율에 따른 함수특성곡선의 변화로 인한 사면의 안정성을 알아보고, 강우강도와 침투거동에 대한 수치해석적인 적용으로 사면의 안정성에 대한 변화를 알아보려고 한다.

2. 이론적 배경

2.1 함수특성곡선

함수특성곡선은 체적함수비와 모관흡수력의 관계로 정의할 수 있다. 흙 속의 수분의 양을 표현할 때 중량함수비, 체적함수비, 포화도로 나타낼 수 있으나, 불포화토 해석을 위해서는 지반 내 흙, 물, 공기의 세 가지 구성요소에 대해서 동시에 고려해야 하는 특징 때문에 간극공기를 고려할 수 있는 체적함수비의 개념으로 표현한다. 즉, 함수특성곡선은 기하학적 조건이 같은 시료의 경우, 흡수력에 따른 물의 보유할 수 있는 능력을 표현할 수 있다.

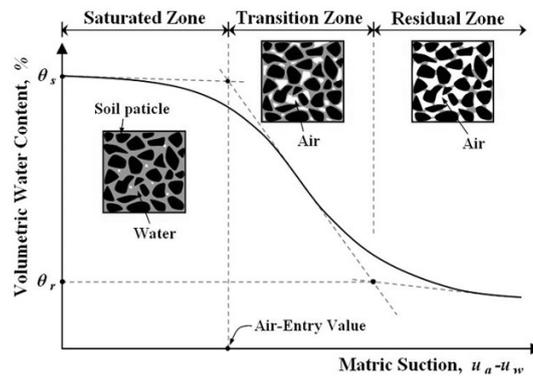


그림 1. 전형적인 함수특성곡선 (Fredlund & Xing, 1994)

<그림 1>에서는 전형적인 함수특성곡선을 보여주고 있다. 불포화 지반의 함수특성곡선은 일반적으로 축전환기법을 이용하여 각 흡수력에 대한 함수비를 측정할 수 있으며 연속적인 관계를 추정하기 위해 Fredlund & Xing(1994)은 3계수 비선형 경험식을 제안하였고 다음과 같은 식(1), (2)를 활용하였다.

$$\theta = C(\psi)\theta_s \left[\frac{1}{\ln[e + (\psi/a)^n]} \right]^m \quad (1)$$

$$C(\psi) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + 10^6/\psi_r)} \right] \quad (2)$$

여기서 ψ 은 흡수력, θ 은 체적함수비, $C(\psi)$ 는 보정계수, a 는 공기함입치(AEV)와 관계하는 곡선계수, n 은 함수특성곡선의 기울기와 관계하는 곡선계수, m 은 잔류함수비와 관계하는 곡선계수를 의미한다. 또한 함수특성곡선에는 시료를 건조시키면서 생기는 건조곡선과 반대로 시료에 수분이 흡착되면서 생기는 습윤곡선을 얻게 되는데, 이 두 곡선은 서로 다른 경로를 보이는데 이를 이력현상이라고 한다.

Fredlund & Raharjo(1993)는 이론적으로 응력의 변화를 주면 함수특성곡선에 그 영향을 미칠 것이라고 하였다. 이후 여러 실험적인 연구들이 진행되어 응력의존적인 함수특성곡선을 제안하였으며, 국내에서도 등방조건하 구속압의 증가에 대한 연구(성상규 등, 2003)가 수행되었다. 그 결과 전체적으로 응력이 증가할수록 함수특성곡선의 기울기는 완만해지면서 공기함입치(AEV)는 점차 증가함을 보였다.

2.2 불포화 투수계수

보통 포화도가 증가할수록 물의 흐름이 지배적이고, 공기는 물속에 갇혀 있게 된다. 이와 반대로 포화도가 낮아질수록 물의 흐름은 점점 감소하게 된다. 따라서 포화상태에서와 달리 불포화상태에서의 투수

계수는 일정한 상수가 아니다. 불포화 투수계수는 일반적으로 체적함수비와 흡수력의 함수로 표현할 수 있는데, 체적함수비는 흡에 작용하는 흡수력에 따라서 변화하므로 흡내에 물이 흐를 수 있는 공간을 나타내는 지수이다.

따라서 함수특성곡선을 전제로 제안된 경험식을 바탕으로 불포화 투수계수를 구하는 간접적인 방법을 활용하는데, Fredlund & Xing(1994)에 의한 지배방정식은 다음 식(3)와 같다.

$$K_r = \Theta^q(\psi) \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{ave})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (3)$$

여기서 K_r 은 포화투수계수에 대한 불포화 투수계수의 비, $\theta^q(\psi)$ 는 보정계수, b 는 $\ln(10^6)$, θ' 은 체적함수비를 모관흡수력에 대해 미분한 값, y 는 모관흡수력을 대수로 나타낸 변수를 의미한다.

2.3 Huff 방법의 강우사상

Huff 방법의 강우사상은 Huff(1967)가 미국 Illinois주에 위치한 하천유역에서 발생한 호우에 대해 호우기간 중에 내린 총 우량의 시간분포 양상을 분석하여 강우의 시간분포 모형을 제시한 것이다. 실제 발생한 호우기간 중의 누가우량곡선을 관찰하여 총 강우지속기간을 4개의 등시간 구간으로 나누었을 때 가장 큰 강우량이 어느 구간에서 발생하느냐에 따라 강우의 시간분포 특성을 4가지로 구분하였다. 이와 같이 강우의 시간 분포형을 4개 분위로 분류한 후 각 분위에 속하는 개개 호우의 시간별 누가우량기록을 호우별 총 지속기간과 총 우량을 사용하여 다음 식(4),(5)와 같이 무차원화 할 수 있다.

$$PT(i) = \frac{T(i)}{TO} \times 100\% \quad (4)$$

$$PR(i) = \frac{R(i)}{RO} \times 100\% \quad (5)$$

여기서, $PT(i)$ 는 총 강우지속기간 TO (분)에 대한 임의시간 $T(i)$ 에서의 강우지속기간 백분율(%)이며, i 는 단위시간 구간 수로서 통장 $i=10$ 을 택하며, $PR(i)$ 는 총 지속기간 TO 동안의 총 우량(mm)에 대한 임의시간 $T(i)$ 까지의 누가우량백분율(%)이다.

3. 불포화사면의 안정성 평가

본 연구에서는 편마풍화토와 화강풍화토를 대상으로 안정해석을 수행하였으며, 수치해석에 있어서 안정해석에 영향을 미치는 요소로는 단위중량, 포화강도정수(c', ϕ'), 불포화강도정수(ϕ^b)가 있는데 각각의 요소에 따라 해석결과가 다르게 나타난다.

안정성 평가는 두 가지로 나누어 실시하였다. 첫째, 상재하중이 불포화 사면에 미치는 안정성과 둘째, 점토함유율에 따른 안정성을 Huff의 방법의 강우사상을 통해 분석하였다. 이를 위해 유한요소해석 프로그램인 SEEP/W와 SLOPE/W를 활용하여 침투해석을 선행한 후에 사면의 안정해석 시 Bishop의 간편법을 사용하였다.

본 논문에 사용된 시료는 경기 북부지역의 절토사면에서 채취한 편마풍화토와 화강풍화토이고 점성토 시료는 인천지역에서 채취하였다. 표 1과 2는 풍화토와 점토의 기본물성실험에 대한 결과이다.

표 1. 풍화토의 기본 물성

구분	편마풍화토	화강풍화토
USCS	SP-SM	SW
No.200체 통과량 (%)	3.7	2.6
LL (%)	-	-
PL (%)	N.P	N.P
G_s	2.676	2.657
$\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)	1.675	1.895

표 2. 점토의 기본 물성

구분	점토
USCS	CL
LL (%)	37.9
PL (%)	17.1
No.200체 통과량 (%)	97.32
G_s	2.675
K_s (cm/sec)	3.384×10^{-7}

또한 사면안정해석에 있어서 기존의 데이터를 적용하기 위하여 점토함유율 0%, 5%, 10% 에서의 함수특성곡선, 포화투수계수(김병수, 2006)와 상재하중 0~75kPa의 함수특성곡선, 포화투수계수(박재영, 2007)를 통하여 분석하였다. 이를 Fredlund & Xing(1994)의 모델을 이용하여 불포화 투수계수를 추정하였다. 또한 포화조건의 CU 상태 삼축압축시험을 통한 편마풍화토와 화강풍화토에 대한 강도정수는 다음 표 3과 같다.

표 3. 포화조건 강도정수 (김병수, 2006)

	clay 0%		clay 5%		clay 10%	
	c' (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ (°)	c' (kPa)	ϕ (°)
편마풍화토	4.86	34.75	7.81	34.60	11.46	34.31
화강풍화토	0	41.95	4.69	39.71	6.28	37.39

본 연구에서 조성한 사면은 실내시험을 통하여 획득한 편마풍화토와 화강풍화토의 함수특성곡선과 불포화투수계수를 이용하여 1:1.5의 사면경사와 단위중량 17.5kN/m²으로 적용하였다. 지하수위는 강우시 침투거동에 영향을 최대한 배제하기 위하여 사면하부에서 지하 9m 밑에 존재하는 것으로 가정하였다.

상재하중을 고려한 사면의 경우 4층 구조의 사면에 0~75kPa의 응력을 재하하였고, 점토함유량을 고려한 사면의 경우 풍화토에 0~10%의 점토를 함유시켜 2층 구조로써 0, 50kPa의 상재하중을 재하하였다. 그림 2과 3은 상재하중을 고려한 사면과 점토함유량을 고려한 사면을 모사하였다.

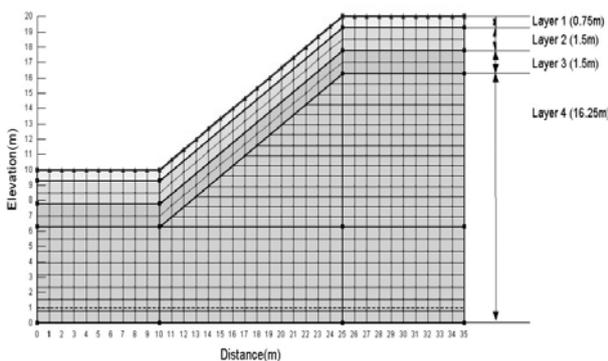


그림 2. 상재하중을 고려한 사면 모델링

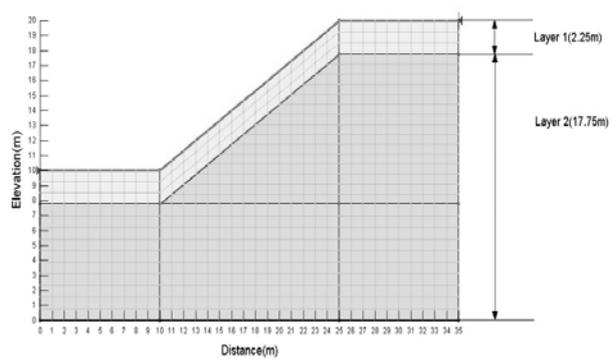


그림 3. 점토 함유율을 고려한 사면 모델링

Huff 방법의 경우, 강원도 강릉지역과 충청남도 청주지역의 강우사상에 대해 200년 빈도 48시간 강우 조건을 선택하였다. 하지만 지반물성의 특성상 화강풍화토의 경우 24시간 강우 조건의 강우사상을 적용하였다.

3.1 상재하중이 불포화사면에 미치는 안정성 평가

Huff 방법의 강우사상을 이용하여 불포화 사면의 안정성에 대해 평가하였다. 총 4개의 층에 0, 25, 50, 75kPa의 상재하중을 통한 각기 다른 불포화강도정수를 이용하였다. 따라서 상재하중에 따른 불포화강도정수와 해석조건은 다음 표 4와 5와 같다.

표 4. 상재하중에 따른 걸보기 내부마찰각 (박재영, 2007)

구 분			상재하중(kPa)			
			0kPa	25kPa	50kPa	75kPa
$\phi^b(^{\circ})$	편마풍화토	건조과정	31.02	31.30	31.29	32.55
		습윤과정	30.14	31.97	30.89	31.44
	화강풍화토	건조과정	29.47	31.37	32.94	34.72
		습윤과정	26.02	28.30	30.45	30.37

표 5. 상재하중에 따른 해석조건

구분	시료종류	함수특성곡선	강우지역	강우사상	상재하중
구분	편마풍화토	건조경로 습윤경로	강원도 강릉 충청남도 청주	Huff 1분위	0kPa
				Huff 2분위	25kPa
	Huff 3분위			50kPa	
	Huff 4분위			75kPa	

그림 4와 5는 편마풍화토와 화강풍화토의 상재하중에 따른 안정성을 비교한 결과 편마풍화토와 화강풍화토의 안전율 변화의 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 6과 7은 Huff 방법의 각분위의 영향에 따른 안정성을 비교한 결과 편마풍화토의 경우 Huff 방법의 각분위의 영향을 거의 받지 않고 비슷한 안전율 흐름을 보이고 있지만, 화강풍화토의 경우 강우가 집중되는 시간대에 가장 낮은 안전율을 보이고 있다.

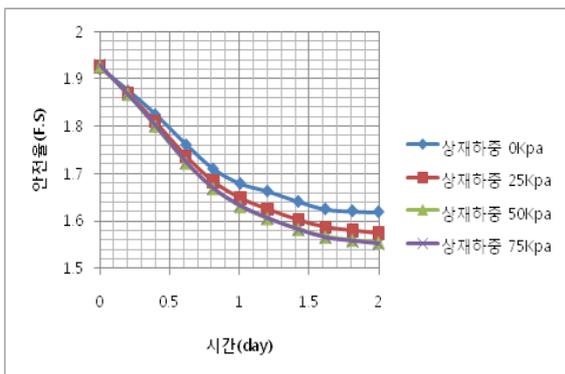


그림 4. 편마풍화토 Huff 방법 1분위일 때의 상재하중별 안전율의 변화 (건조경로, 강릉)

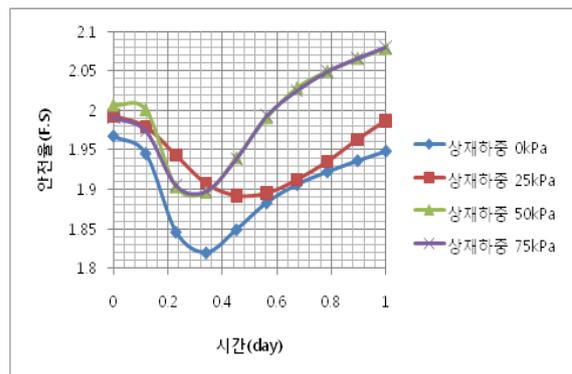


그림 5. 화강풍화토 Huff 방법 1분위일 때의 상재하중별 안전율의 변화 (건조경로, 강릉)

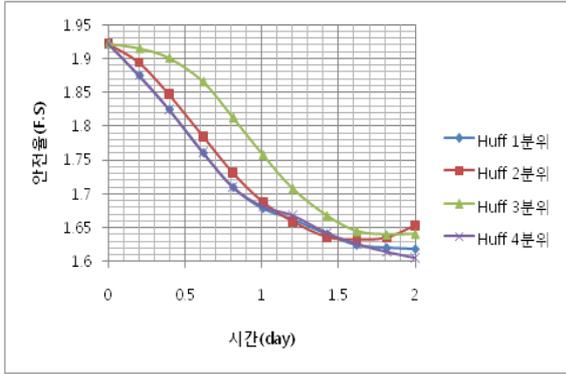


그림 6. 편마풍화토 분위별 안전율의 변화 (건조경로, 강릉)

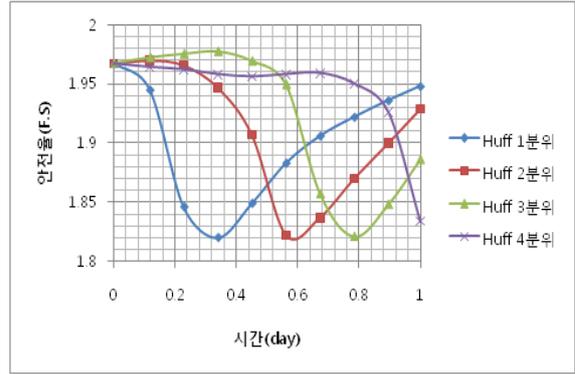


그림 7. 화강풍화토 분위별 안전율의 변화 (건조경로, 강릉)

3.2 점토함유율에 따른 불포화 사면에 미치는 안정성 평가

Huff 방법의 강우사상을 이용하여 불포화 사면의 안정성에 대해 평가하였다. 우선 기존의 편마풍화토와 화강풍화토에 점토의 함유량은 0~10%로 하였다. 총 2개의 층에 0, 50kPa의 상재하중을 통한 각기 다른 불포화강도정수를 이용하였다. 따라서 점토함유율에 따른 불포화강도정수와 해석조건은 표 6, 7과 같다.

표 6. 점토 함유율에 따른 해석조건

구분	시료종류	점토함유량	함수특성곡선	강우지역	강우사상	상재하중
구분	편마풍화토	0%	건조경로	강원도 강릉 충청남도 청주	Huff 1분위	0kPa 50kPa
	화강풍화토	5%			Huff 2분위	
		10%	Huff 3분위			
			Huff 4분위			

표 7. 점토함유율과 상재하중에 따른 겉보기내부마찰각 (김병수, 2006)

	상재하중	편마풍화토		화강풍화토	
		clay 5%	clay 10%	clay 5%	clay 10%
$\phi^b(^{\circ})$	0kPa	31.04	28.52	28.50	30.91
	50kPa	33.04	33.64	37.48	36.59

편마풍화토와 화강풍화토에 대하여 Huff 방법과 점토 함유율에 따른 결과는 그림 8에서 11과 같다. 편마풍화토의 경우, 점토 함유율이 0%의 경우를 제외하고 Huff 방법 1분위부터 4분위까지의 안전율 차이가 거의 동일함을 알 수 있었다. 점토의 함유율별로 보게 되면 점토 함유율이 높을수록 안전율의 변화폭이 작음을 알 수 있다. 화강풍화토의 경우, 상재하중에 따른 안전율을 산출했을 때와 마찬가지로 초기 안전율이 상승하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 Huff 방법의 각분위별로 강우량이 많은 시기에 안전율이 급격히 하강하였고 최소안전율 이후에는 회복함을 알 수 있다.

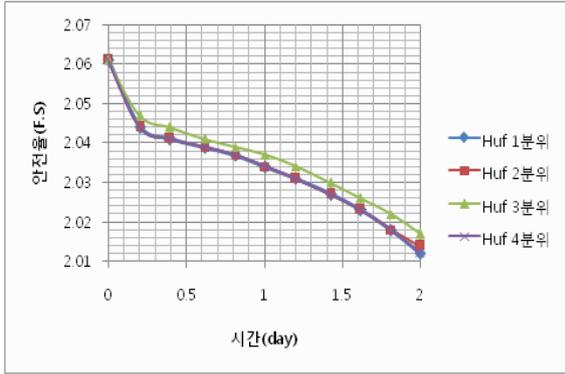


그림 8. 편마풍화토 점토함유율 5% Huff 방법 분위별 안전율의 변화 (건조경로, 강릉)

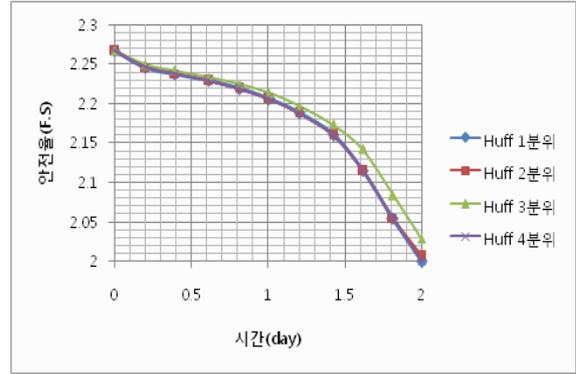


그림 9. 편마풍화토 점토함유율 10% Huff 방법 분위별 안전율의 변화 (건조경로, 강릉)

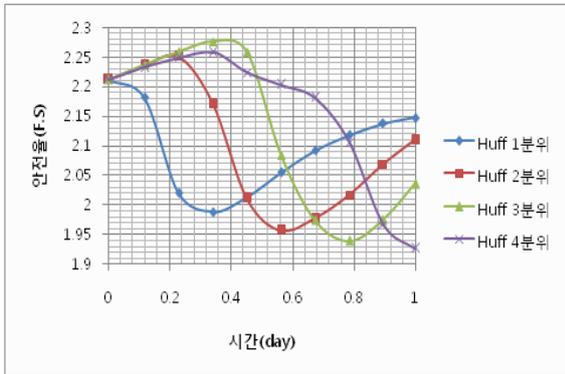


그림 10. 화강풍화토 점토함유율 5% Huff 방법 분위별 안전율의 변화 (건조경로, 강릉)

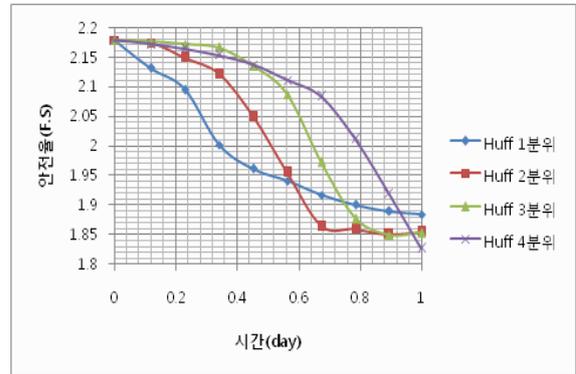


그림 11. 화강풍화토 점토함유율 10%일 때 Huff 방법 분위별 안전율의 변화 (건조경로, 강릉)

4. 결론

본 논문에서는 국내의 대표적인 풍화토인 편마풍화토와 화강풍화토에 Huff 방법 강우사상을 적용하고 함수특성곡선의 건조경로와 습윤경로에서 상재하중에 따른 사면의 안정성, 점토 함유율에 따른 사면의 안정성에 대해서 평가하였다. 따라서 다음과 같은 결론을 내리게 되었다.

- (1) Huff 방법 강우사상에 따른 안전율의 추이는 편마풍화토의 경우, 분위별로 많은 차이가 없음을 알 수 있고, 화강풍화토의 경우 초기 안전율이 증가하는 추세를 보였으나 분위별로 강우가 많이 내리는 시점에서 안전율이 감소하며 최소 안전율 이후에는 회복함을 보였다.
- (2) 상재하중을 고려한 해석은 편마풍화토의 경우, 상재하중을 고려하지 않은 해석보다 안전율이 작음을 알 수 있다. 화강풍화토의 경우, 편마풍화토와 반대로 상재하중을 고려하지 않았을 경우가 안전율이 작음을 알 수 있다.
- (3) 점토함유율을 고려한 해석은 편마풍화토의 경우, 점토 0%의 함유율을 제외하고 Huff 방법 1~4분위의 안전율 추이가 비슷하다. 안전율의 변화의 폭은 점토의 함유율이 높을수록 작아지는데 이는 투수계수와 관련되어 있다. 화강풍화토의 경우 초기 안전율이 증가하는 추세를 보였으나 분위별로 강우가 많이 내리는 시점에서 안전율이 감소하며 최소 안전율 이후에는 회복함을 보였다.

참고문헌

1. 김병수 (2006), “강우사상이 불포화 풍화사면의 안정성에 미치는 영향”, 석사학위 논문, 단국대학교.
2. 박성완, 신길호 (2009), “습윤경로 함수특성곡선을 고려한 불포화 편마풍화토 사면의 안정해석”, 대한토목학회논문집, 제29권, 제5C호, pp. 191-198.
3. 박성완, 박재영 (2009), “불포화 풍화계열 사면의 안정성에 미치는 상재응력의 영향”, 한국지반공학회 논문집, 제25권 제10호, pp. 55-65.
4. 성상규, 이인모 (2003), “화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향”, 한국지반공학회 논문집 제19권 제2호, pp. 27-38.
5. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), "Equations for the Soil-Water Characteristic Curve", Canadian Geotechnical journal, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532
6. GEO-SLOPE International Ltd. (2004), "Computer program SEEP/W for finite element seepage analysis", User's guide, Calgary, Canada.
7. Huff, F. A., (1967), "Time distribution of Rainfall in Heavy Storms", Water Resources Research, Vol. 3, No. 4, pp. 1007-1019