

불포화 토사사면 해석에 대한 강우사상과 분포의 영향

Impacts of Rainfall Events and Distribution on Unsaturated Soil Slope Analysis

김 재 홍¹ Kim, Jae-Hong

김 호 겸² Kim, Ho-Kyum

김 병 수³ Kim, Byeongsu

박 성 완⁴ Park, Seong-Wan

Abstract

The time distribution of rainfall is one of the most important considerations for evaluating soil slope stability. In order to study the rainfall-induced slope failure, the rainfall pattern has generally been assumed as uniform rainfall intensity for rainfall duration. However, it should be noted that the time distribution of the design rainfall method has a significant effect on the soil slope instability. The study implemented Mononobe, Huff, and uniform method as three types of time distribution method of the design rainfall to estimate the factor of safety of soil slopes by rainfall duration. As a result, the difference of soil suction and unsaturated hydraulic properties in a soil by rainfall pattern was found through the application of an appropriate time distribution method to numerical simulation for rainfall-induced slope stability.

요 지

사면 안정성을 평가하기 위해서는 강우의 시간적 분포가 매우 중요한 영향을 끼친다. 강우로 발생하는 사면붕괴를 해석하기 위해서는 강우패턴을 일반적으로 일정한 형태로 가정하고 해석을 수행한다. 그러나 강우의 시간적분포를 적용하는 설계방법은 사면의 불안정성을 평가하기에 중요한 요소이다. 본 연구에서는 강우에 의한 사면파괴를 계산하기 위해 강우의 시간적 분포는 Mononobe 방법과 Huff 4분위 방법을 적용하였다. 그 결과, 표층으로부터의 습윤대 깊이의 차이를 보였으며, 사면의 안전율 계산에서도 강우의 시간적분포가 영향을 끼치고 있음을 확인하였다.

Keywords : Unsaturated soil slope, Soil-water characteristic curve, Huff method, Mononobe method, Rainfall distribution

1. 서 론

최근 여름철에 집중되는 강우 또는 태풍의 영향으로,

사면재해 및 산지주변의 피해가 지속적으로 증가하고 있고 이로 인한 피해 복구비용 역시 증가하고 있는 추세이다. 우리나라 국토의 63.7%가 산지로 이루어져 있고

1 정희원, 동신대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongshin Univ.)

2 정희원, 단국대학교 토목환경공학과, 공학석사 (Member, Master of Eng., Dept. of Civil & Environment Engrg., Dankook Univ.)

3 정희원, 일본 오카야마대학교 환경이공학부 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Environmental & Civil Engrg., Okayama Univ., Japan)

4 정희원, 단국대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environment Engrg., Dankook Univ., Tel: +82-31-8005-3472, Fax: +82-31-8005-3496, spark@dankook.ac.kr, Corresponding Author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

인구 팽창과 더불어 많은 주거지 및 도로의 개발로 인하여 인공사면이 증가하게 되면서 사면의 안정성에 대한 중요성 또한 증가하였다(Chang, 2012). 2000~2009년 사이의 국내 자연재해 사망자와 급경사지 재해 사망자를 비교 분석한 결과 10년 평균 전체 자연재해 사망자는 72.3명이고 급경사지 재해로 인한 사망자는 19.1명으로 26.2%의 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다(National Disaster Management Institute, 2010). 사면파괴는 사면의 지반적 특성뿐만 아니라 침투특성(강우특성과 침투깊이)에 의해서도 복합적으로 발생하기 때문에 사면의 안정성 평가 시 강우침투를 고려한 접근이 필요하다(Kim, 2009). 현재 불포화 사면의 안정해석을 수행할 때 강우조건을 고려한 다수의 연구(Lee et al., 2012; 2013; I. Tsaparas et al., 2002; Oh, 2013)들이 수행되었고, 강우 시 실제 사면의 침투거동을 파악하기 위해서는 침투 해석 시에 지역적 특성과 시간적 분포를 고려해준 강우 값을 적용하는 연구가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서 침투 해석 시에 들어가는 요소 중 강우 자료는 시간의 흐름에 따른 분포를 적용하였고 강우지속시간은 각각 24, 36, 48, 72시간을 적용하여 지속시간별 사면내의 간극수압의 변화와 강우 패턴 별 사면의 안전율을 비교 분석하였다. 이를 통하여 지역적 특성과 시간적 흐름을 고려한 설계 강우가 사면의 안정성에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

2. 강우사상

2.1 Huff 4분위법

Huff는 1967년에 미국 일리노이주의 강우기록을 가지

고 무차원 시간분포곡선을 제시하였다(Huff, 1967; 1970). Huff 4분위 방법은 누가우량곡선을 이용하여 지속시간을 4개의 구간으로 나누고 각 구간 중 최대 누가우량 구간을 선별하여 총 4개의 분위로 구분한다. 그리고 분류된 분위별로 무차원 강우지속기간비와 무차원 강우량비로 환산하여 무차원 지속기간비에 대응하는 무차원 강우량의 발생확률을 계산한다. 각 구간별 확률계산 시 무차원 지속기간은 10개의 구간으로 분할하고, 10개의 각 구간별 확률은 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%로 하여 무차원 누가곡선을 작성한다. 본 연구에서는 각 분위의 50%의 무차원 누가곡선을 활용하여 적용하였다.

Table 1은 국토해양부에서 발간한 확률강우량도 개선 및 보완 연구(MLTMA-PR, 2011) 중 강우수집자료 내용이다. Table 1에 제시된 Huff의 4분위법은 1968년~2010년까지 기상청 산하 측후소 및 관측소 69개 지점의 시 강우자료로부터 유도된 호우 사상수를 나타내고 있다.

본 연구에서 Huff 4분위 강우를 적용하기 위하여 국토해양부에서 제시하고 있는 시간분포표(Table 2)를 사용하였다. 여기서 강우자료는 대상사면에서 가장 인접한 관측소인 전주 관측소의 강우자료를 사용하였다.

본 연구에서는 9개의 분포형태 중 침투 강우가 해당 분위의 중심에 위치하는 50%의 무차원 초과 확률을 적용하였다. 이는 국내 강우설계 시 주로 적용되고 있는 확률 분포이다(MLTMA, 2012). Fig. 1~4는 국토해양부의 강우자료들을 바탕으로 획득한 전주 지역의 Huff 1~4분위 강우량 값이다. 이와 같은 4가지 분위와 비교하기 위해서 일반적으로 일정한 강우강도 적용 시 불포화 침투에 대한 사면 안전율 변화를 비교하고자 한다.

Table 1. Rainfall events of various sites for Huff method (MLTMA-PR, 2011)

No.	Site	Year	Number of rainfall event						
			Total	Select	Remove	1st	2nd	3rd	4th
133	Daejeon	1969~2010	3696	643	12	142	203	170	116
135	Chupungnyeong	1961~2010	4290	638	13	138	183	205	99
136	Andong	1973~2010	2672	409	14	77	107	122	89
138	Pohang	1961~2010	3664	633	5	105	205	193	125
140	Gunsan	1968~2010	3684	580	11	101	175	176	117
143	Daegu	1961~2010	3481	571	9	111	148	174	129
146	Jeonju	1961~2010	4395	720	27	144	226	181	142
152	Ulsan	1961~2010	3545	716	2	119	225	232	138
156	Changwon	1985~2010	1959	460	4	60	125	175	96

Table 2. Time distribution of Huff's method in Jeonju area (MLTMA-PR, 2011)

E.P.	Duration percent (Huff 1 st)											E.P.	Duration percent (Huff 2 nd)										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
10%	0.0	39.5	68.1	81.8	89.3	93.7	96.9	98.2	98.9	99.5	100	10%	0.0	13.2	30.5	58.4	81.9	91.3	96.3	98.0	98.9	99.6	100
20%	0.0	29.4	58.6	72.3	82.8	88.4	92.0	96.2	98.1	99.1	100	20%	0.0	9.9	23.1	47.6	71.2	85.9	92.7	96.3	98.1	99.3	100
30%	0.0	22.7	49.3	68.2	78.4	85.8	90.4	94.1	97.2	98.8	100	30%	0.0	7.4	19.3	38.9	65.3	80.6	90.2	94.7	97.3	99.0	100
40%	0.0	19.7	44.4	64.5	74.2	81.7	88.4	91.9	95.9	98.4	100	40%	0.0	5.9	16.6	34.4	58.3	76.0	86.9	93.4	96.3	98.5	100
50%	0.0	17.2	40.8	56.5	67.1	75.7	84.3	90.2	94.4	97.8	100	50%	0.0	4.1	12.5	29.0	52.7	70.8	83.2	90.9	95.1	98.1	100
60%	0.0	13.3	35.4	50.5	61.4	70.4	79.5	86.1	91.8	96.9	100	60%	0.0	2.8	9.5	24.7	47.5	67.2	80.1	87.9	93.8	97.6	100
70%	0.0	9.6	30.9	46.6	56.3	65.2	73.0	80.9	89.6	95.6	100	70%	0.0	1.9	7.1	19.9	41.6	61.9	74.5	84.1	91.8	97.0	100
80%	0.0	6.1	27.1	41.0	50.2	58.4	66.6	75.1	86.2	94.1	100	80%	0.0	1.1	5.2	13.9	34.5	55.4	69.3	79.1	88.7	95.4	100
90%	0.0	3.5	20.4	35.5	40.6	48.5	57.6	71.0	78.4	90.3	100	90%	0.0	0.8	2.9	9.1	25.3	47.5	61.4	72.4	84.5	92.0	100

E.P.	Duration percent (Huff 3 rd)											E.P.	Duration percent (Huff 4 th)										
	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
10%	0.0	11.1	23.9	36.0	45.1	58.3	82.6	94.2	98.4	99.5	100	10%	0.0	13.4	26.4	35.9	44.3	54.5	61.1	68.8	86.3	98.3	100
20%	0.0	8.5	17.6	27.2	38.6	52.5	73.7	90.3	97.0	99.1	100	20%	0.0	10.0	17.7	27.2	35.4	44.3	53.7	63.7	81.5	96.8	100
30%	0.0	5.3	14.2	23.3	32.4	45.9	68.9	85.4	94.9	98.6	100	30%	0.0	6.4	13.8	21.9	29.4	37.0	45.6	57.6	76.0	94.2	100
40%	0.0	3.4	9.9	17.5	28.8	41.9	62.4	82.8	93.2	97.9	100	40%	0.0	4.1	10.9	18.4	24.7	30.7	38.8	51.3	72.9	92.8	100
50%	0.0	2.6	6.7	13.7	23.2	36.4	57.7	77.3	92.1	97.2	100	50%	0.0	3.2	6.9	13.4	21.3	25.9	33.0	45.5	67.0	90.3	100
60%	0.0	1.7	4.9	11.0	18.8	32.6	51.7	74.1	89.8	96.5	100	60%	0.0	2.1	5.0	9.6	15.6	22.1	28.9	41.2	62.8	87.2	100
70%	0.0	1.2	3.8	8.1	14.8	26.0	45.8	69.8	86.4	95.8	100	70%	0.0	1.5	4.1	8.3	13.2	16.9	25.4	36.1	58.9	83.0	100
80%	0.0	1.0	2.5	5.4	11.2	21.3	39.2	65.5	83.2	94.1	100	80%	0.0	1.0	2.9	4.9	7.8	13.4	21.4	29.7	49.5	78.5	100
90%	0.0	0.4	1.2	2.6	5.6	13.6	29.7	57.3	80.1	91.0	100	90%	0.0	0.4	1.6	3.2	4.9	6.6	12.6	22.1	38.0	69.8	100

E.P. (Exceedance Probability)

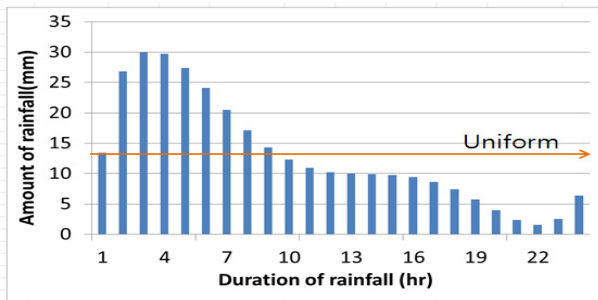


Fig. 1. Time distribution of rainfall by Huff 1st method in Jeonju area (rainfall duration=24hrs)

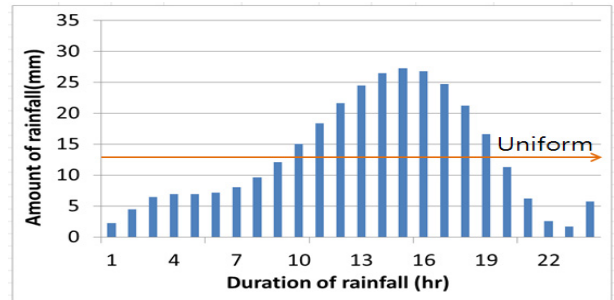


Fig. 3. Time distribution of rainfall by Huff 3rd method in Jeonju area (rainfall duration=24hrs)

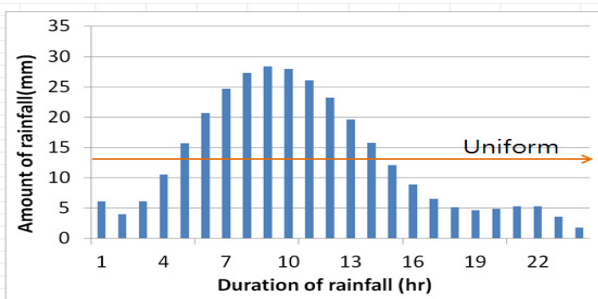


Fig. 2. Time distribution of rainfall by Huff 2nd method in Jeonju area (rainfall duration=24hrs)

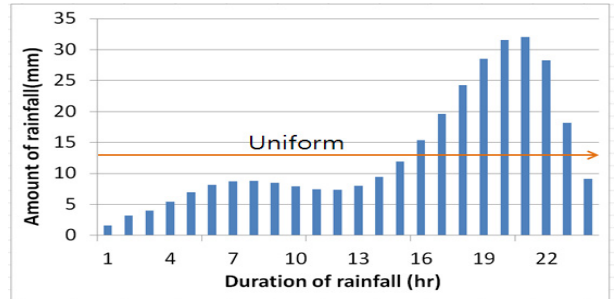


Fig. 4. Time distribution of rainfall by Huff 4th method in Jeonju area (rainfall duration=24hrs)

24시간동안 일정한 강우강도 값은 기상청에서 제시하고 있는 확률강우강도 13.1mm/hr 값을 선택하였다(Fig. 10). 이 값은 100년 평균 강우빈도를 기준으로 전주·완주지역에 해당하는 강우강도 크기이다.

2.2 Mononobe 방법

Mononobe 방법(MLTMA-PR, 2011)은 총강우량과 지속기간 사이의 관계를 규정하는 식이다. 설계 강우량에 시간구간을 곱하여 설계 강우량을 시간별로 분포시키는

방법으로 Eq. (1)과 같다.

$$R_t = \frac{R_T}{T} \left(\frac{T}{t} \right)^n \cdot t \quad (1)$$

- 여기서, R_T = 지속기간 T시간인 설계 강우량(mm)
- R_t = 강우시작부터 t시간까지의 누가우량(mm)
- T = 강우지속기간으로 보통 24시간을 사용(hr)
- n = 상수(일반적으로 2/3)

R_T 는 T시간까지의 누가우량이고 임의의 시간구간 $\Delta t = t_2 - t_1$ 에 대한 강우량은 $R_{t_2} - R_{t_1}$ 으로 구한 뒤 각각의 시간구간 Δt 별 설계 강우량을 구하고 Fig. 6~8과 같이 그 지역의 강우패턴과 비슷한 형태로 강우량을 분포시킨다.

본 연구에서 적용하기 위한 Mononobe 방법은 Eq. (1)을 사용하여 누가우량을 구하고 시간별 누가우량을 빼주어 각 구간별 강우량을 구하게 된다. Eq. (1)에서 n값은 지점 혹은 지역별로 다르기 때문에 각 지점에 맞는 n값을 사용하여야 한다. Fig. 5은 국토교통부의 확률강우량도 개선 및 보완연구(MLTMA-PR, 2011)에서 제시되었던 각 지역별 Mononobe n값을 나타내고 있다. 다음의 Fig. 6~8은 국토부의 강우자료들을 바탕으로 획득한 전주 지역의 Mononobe의 유형별 강우량 값이다.

3. 강우사상을 고려한 비탈면 침투 및 안정해석

강우 시 강우의 사면침투 평가를 위하여 물성조사가 이루어진 사면을 대상으로 사면 침투해석을 실시하였다. 해석에는 유한요소 프로그램인 GeoStudio(2012) SEEP/W와 SLOPE/W를 활용하였다. 대상사면은 Fig. 9와 같이

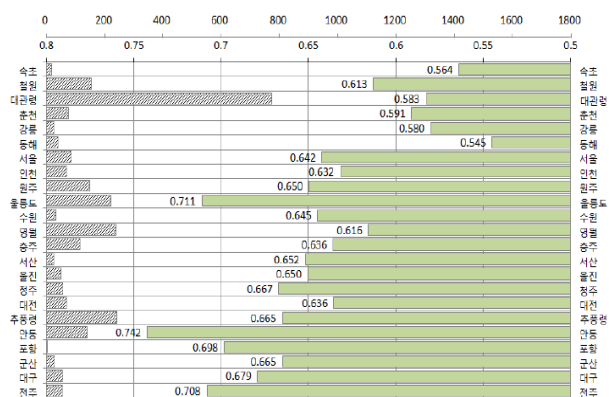


Fig. 5. Site elevation and Mononobe 'n' values (MLTMA-PR, 2011)

길이 38m, 높이 25m, 사면의 경사는 1:1.2로 적용하였고, 침투해석에 적용된 초기흡수력은 Lee et al.(2006)의 계측 값을 적용하여 우기시 흡수력 20kPa로 적용하였다.

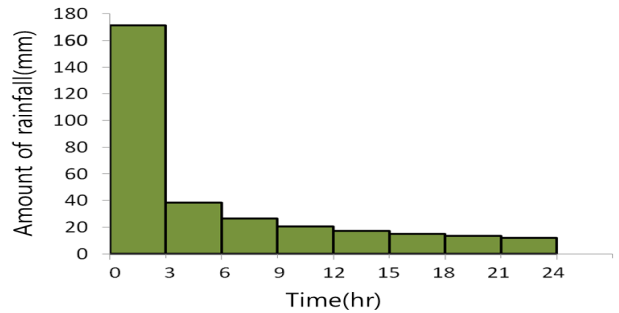


Fig. 6. Advanced type of Mononobe method

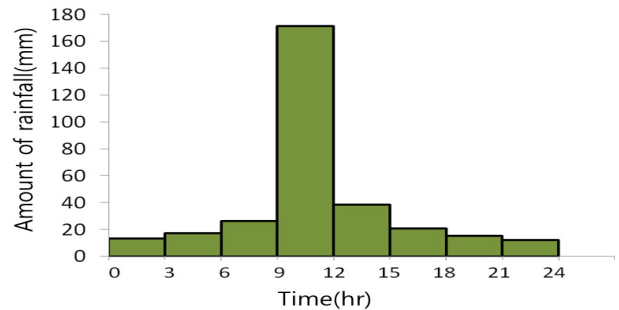


Fig. 7. Centered type of Mononobe method

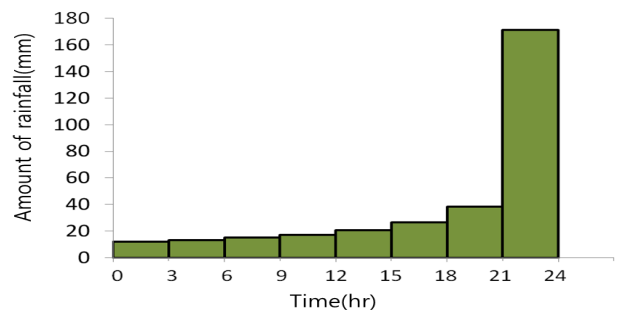


Fig. 8. Delayed type Mononobe method

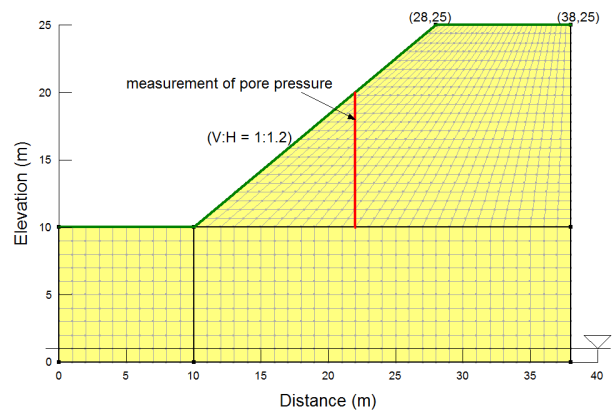


Fig. 9. Geometry for numerical analysis

Table 3. Soil water characteristic curve parameter of Wanju area specimen

Soil Specimen	USCS	Soil Water Characteristic Curve Parameters				
		a	n	m	θ_s	saturated permeability (cm/sec)
Jeonbuk Wanju-gun	ML	445.71	0.5597	1.3132	0.376	2.29×10^{-6}

Table		Chart																			
임의지점 (Precipitation Frequency Estimates, IDF)																					
Duration(min)																					
(mm/hr)																					
		5	10	15	20	30	40	50	60	90	120	180	240	360	540	720	900	1080	1440	2880	4320
Average Recurrences Interval(years)	2	139.2	100	83.4	73.1	60	51.8	46	41.6	33	27.9	21.8	18.2	14	10.7	8.7	7.5	6.5	5.3	3.1	2.3
	3	161	111.3	93.7	83	69.1	60.1	53.6	48.6	38.8	32.7	25.6	21.4	16.5	12.6	10.4	8.9	7.8	6.3	3.7	2.7
	5	185.4	123.7	105.3	94.1	79.4	69.4	62.1	56.4	45.1	38.1	29.9	25	19.4	14.8	12.2	10.4	9.1	7.3	4.3	3.2
	10	216	139.7	119.6	107.8	92	81.1	72.8	66.4	53.2	45	35.2	29.5	22.8	17.6	14.5	12.4	10.9	8.8	5.1	3.8
	20	245.3	155	133.5	121.1	104.2	92.3	83.1	75.8	60.9	51.6	40.4	33.8	26.2	20.2	16.6	14.2	12.5	10.1	5.9	4.4
	30	262.2	163.6	141.5	128.8	111.3	98.7	89	81.3	65.3	55.3	43.4	36.3	28.2	21.7	17.9	15.3	13.4	10.8	6.3	4.7
	50	283.3	174.7	151.4	138.3	120.1	106.8	96.4	88.1	70.8	60	47	39.4	30.6	23.6	19.5	16.7	14.6	11.8	6.9	5.1
	70	297.1	181.8	157.9	144.5	125.8	112	101.3	92.6	74.5	63.1	49.5	41.5	32.2	24.8	20.5	17.6	15.4	12.5	7.2	5.4
	80	302.6	184.6	160.5	147	128.2	114.2	103.2	94.3	75.9	64.3	50.4	42.3	32.9	25.4	20.9	17.9	15.7	12.7	7.4	5.5
	100	311.7	189.4	164.8	151.1	131.9	117.6	106.4	97.3	78.3	66.4	52.1	43.6	33.9	26.1	21.6	18.5	16.2	13.1	7.6	5.7
200	340	204.3	178.2	163.8	143.6	128.4	116.3	106.5	85.8	72.7	57	47.8	37.1	28.7	23.7	20.3	17.9	14.4	8.4	6.2	
300	356.5	212.7	186	171.4	150.6	134.8	122.1	111.8	90.1	76.4	59.9	50.3	39.1	30.2	24.9	21.4	18.8	15.1	8.8	6.5	
500	377.4	223.6	195.8	180.8	159.3	142.7	129.4	118.6	95.6	81.1	63.6	53.3	41.5	32.1	26.5	22.7	20	16.1	9.3	6.9	

Fig. 10. Probability rainfall in Wanju area (www.k-idf.re.kr)

3.1 지반의 물리적 특성 및 지형조건

수치해석에 적용하기 위하여 본 연구의 대상사면인 전라북도 완주군 사면에서 채취한 ML계열의 시료를 가지고 삼축압축시험 및 불포화함수특성시험을 실시하였다. 압밀비배수조건에서 삼축압축시험을 통하여 유효점착력 15kPa, 유효내부마찰각 31.12°를 획득하였고, 사면의 단위중량은 현장단위중량인 16.7kN/m³로 하였다. 또한 불포화함수특성시험을 통해 얻은 대상 시료의 함수특성곡선 맞춤변수와 포화투수계수는 Table 3에 나타내었다.

대상사면 시료의 물성뿐만 아니라 대상 지점(위도: 35° 53'19", 경도: 127° 9'40")의 강우강도는 국토부에서 제공하는 한국 확률 강우량 정보 시스템(www.k-idf.re.kr)을 통하여 획득하였다. 완주군 확률강우강도 값 중에서 100년 빈도 24시간(13.1mm/hr), 36시간(9.5mm/hr), 48시간(7.6mm/hr), 72시간(5.7mm/hr)의 강우강도를 Fig. 10을 참고하여 수치해석에 강우자료로 적용하였다.

전라북도 완주군의 시료는 ML계열로 실내시험을 통하여 불포화상태 함수특성곡선을 획득하였고 1,100kPa 이상의 높은 흡수력 범위는 압력식 시험의 한계로 인하여 Fredlund & Xing(1994)의 모델을 이용하여 Fig. 11과

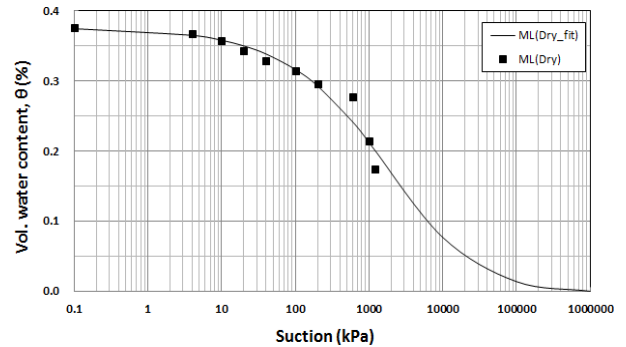


Fig. 11. Soil water characteristic curve of soil specimen (ML) in Wanju area

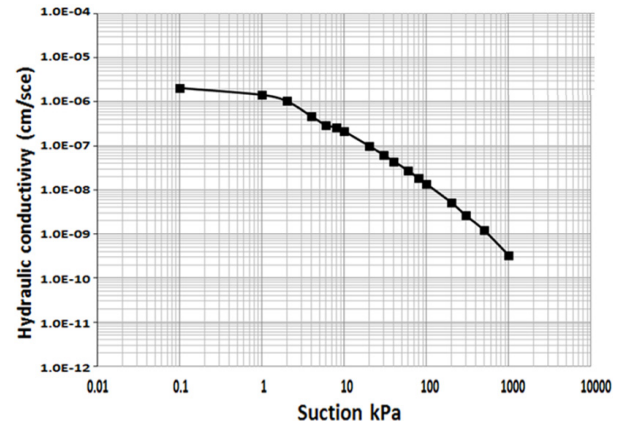


Fig. 12. Permeability function of unsaturated soil specimen (ML) in Wanju area

같이 추정하였다.

실험을 통하여 구한 포화투수계수 값은 Fredlund & Xing(1994)의 모델식을 사용하여 불포화투수계수를 추정할 수가 있다. Fig. 12는 ML계열의 완주 시료로써 불포화 투수계수를 도시한 그림이다. 비선형적으로 흡수력이 높아짐에 따라 투수계수가 작아지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 침투해석 결과

침투해석은 Huff 1~4분위, Mononobe 전진형, 중앙집중형, 지연형, 그리고 등분포형에 대하여 강우 지속시간을 24, 36, 48, 72시간으로 적용하여 그 결과를 비교분석하였다. Fig. 13~14는 강우지속시간에 따른 Huff방법과 등분포방법에 대한 깊이별 간극수압의 변화이다. Fig. 13에서 강우지속시간이 24시간일 경우에는 Huff와 등분포 방법 사이에 미소한 간극수압의 변화만을 보인다. Huff와 등분포 방법 간에 간극수압의 차이가 작으므로 사면내의 침투깊이에도 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 그러나 강우지속시간이 48시간 이상일 때, Fig. 14와 같이 Huff의 분위에 따라 깊이별 간극수압이 변하는 것을 확인하였다. 특히 Huff 2분위의 경우, 지표면에서 음의 간극수압이 6kPa 정도까지 포화도가 감소하는 것을 확인하였다. 이는 Huff 2분위의 강우 패턴에서 강우가 초반에 집중되고 후반부에서는 상대적으로 약한 비가 내리기 때문에 포화되었던 사면이 배수가 진행되면서 다음과 같은 결과가 나타났다고 판단된다.

Fig. 15~16은 강우지속시간에 따른 Mononobe 방법의 깊이별 간극수압 변화이다. Huff방법과 유사하게 강우지속시간이 24시간일 경우에는 간극수압이 크게 차이가 나지 않는 것을 확인하였으며, Fig. 16을 통해 강우지속시간이 48시간으로 길어짐에 따라 깊이별 간극수압의 차이가 나는 것을 확인하였다. 전진형과 중앙집중형은 유사한 간극수압의 변화를 보였으며, 지연형은 지표면에서 등분포방법과 동일하게 포화되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이 또한 Huff 방법과 마찬가지로 강우의 집중도가 어디에 위치하는지에 따라 간극수압이 변화하는 것으로 판단된다.

Fig. 13~16에서 알 수 있듯이, 강우지속시간이 길어지면 Huff 4가지 분위별과 Mononobe 3가지 강우분포 사상은 지반내의 간극수압 차이가 커진다. 강우초기에는 Huff 1분위와 Mononobe 전진형 강우사상일 때

등분포 강우강도보다 간극수압 크지만, 일정하게 지속적으로 강우강도를 유지하기 때문에 등분포 강우강도가 간극수압이 점점 커지고 있음을 알 수 있다. 이러한 간극수압의 분포변화는 사면의 안전율 계산에서도 영향을 끼친다. 초기 지반이 갖고 있는 침투능 곡선에 맞는 강우사상(Huff 1분위와 Mononobe 전진형)이 적용될 때, 지반의 포화가 빨리 진행되어 간극수압이 상승하는 경향을 보였으며 침투능 곡선과 비슷한 형태의 강우사상에서는 간극수압 상승이 비교적 작게 나타나고 있었다.

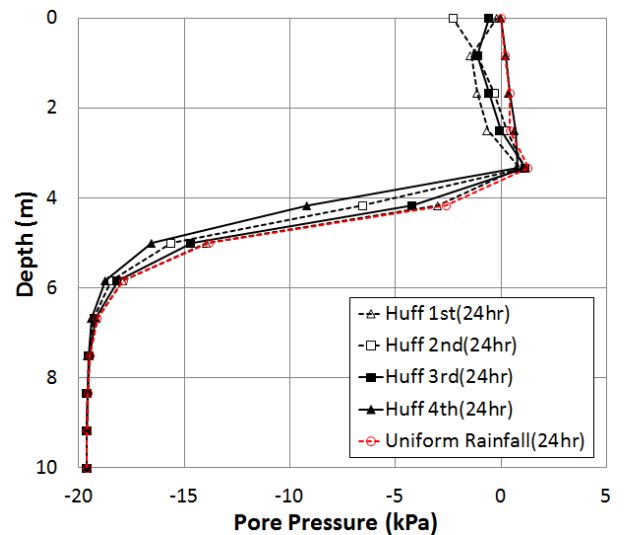


Fig. 13. Variation of pore pressure in depth by Huff method for rainfall duration 24hrs

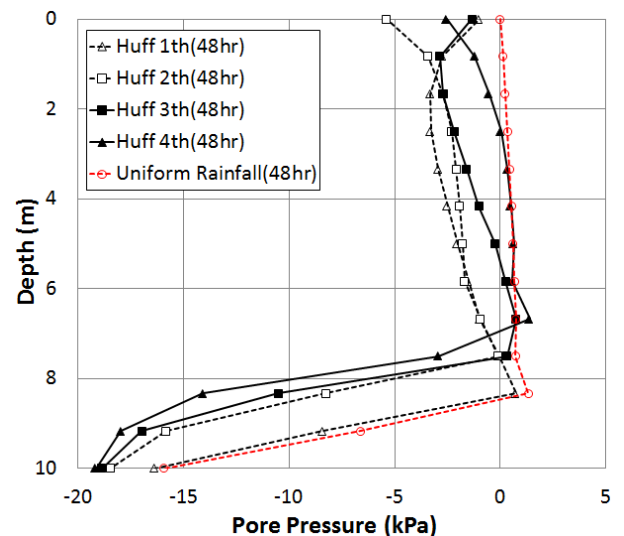


Fig. 14. Variation of pore pressure in depth by Huff method for rainfall duration 48hrs

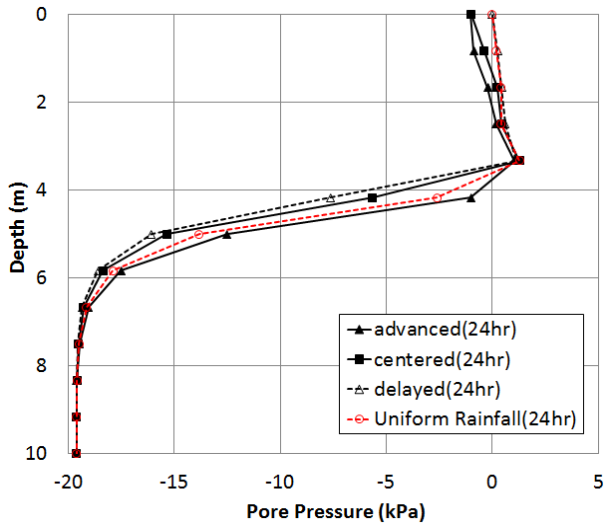


Fig. 15. Variation of pore pressure in depth by Mononobe method for rainfall duration 24hrs

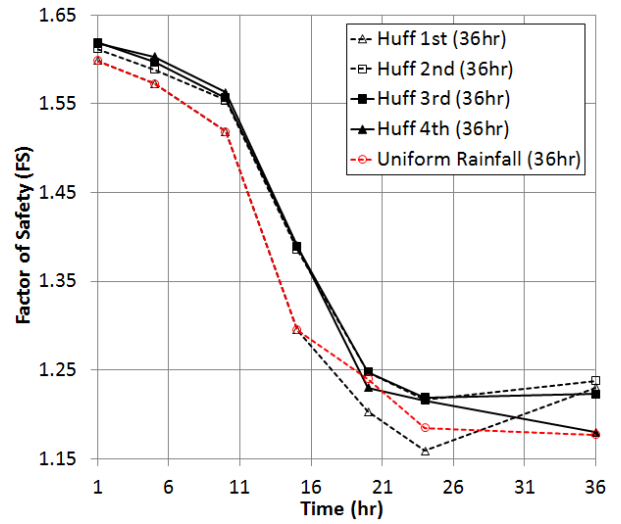


Fig. 17. Safety factor distribution by Huff method for rainfall duration 36hrs

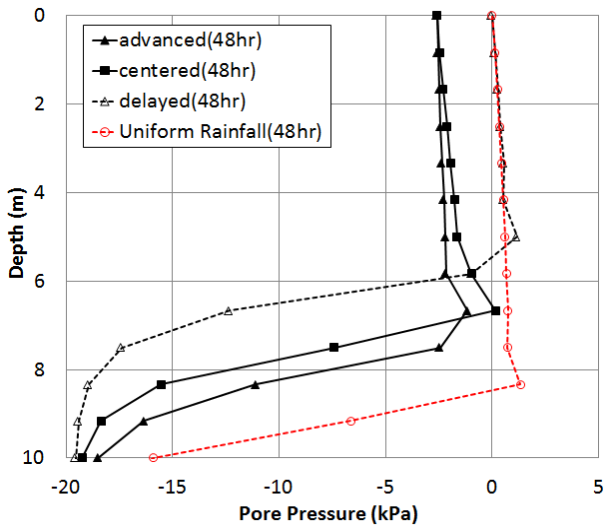


Fig. 16. Variation of pore pressure in depth by Mononobe method for rainfall duration 48hrs

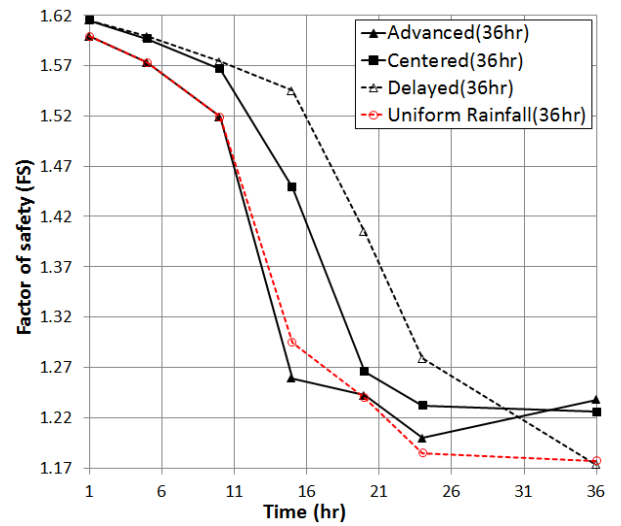


Fig. 18. Safety factor distribution by Mononobe method for rainfall duration 36hrs

Table 4. Slope stability calculated by Huff method in Wanju area (probable rainfall = 342 mm)

Factor of Safety implemented by Huff method for rainfall duration 36hrs							
Rainfall type	1hr	5hr	10hr	15hr	20hr	24hr	36hr
Huff 1st	1.599	1.573	1.519	1.295	1.203	1.159	1.23
Huff 2nd	1.612	1.589	1.554	1.386	1.248	1.217	1.238
Huff 3rd	1.619	1.597	1.557	1.389	1.248	1.219	1.223
Huff 4th	1.618	1.603	1.563	1.39	1.23	1.216	1.18
Uniform Rainfall	1.599	1.573	1.519	1.295	1.24	1.185	1.177

Table 5. Slope stability calculated by Mononobe method in Wanju area (probable rainfall = 342 mm)

Factor of Safety implemented by Mononobe method for rainfall duration 36hrs							
Rainfall type	1hr	5hr	10hr	15hr	20hr	24hr	36hr
Advanced type	1.599	1.573	1.519	1.259	1.242	1.2	1.238
Centered type	1.615	1.597	1.567	1.449	1.266	1.232	1.226
Delayed type	1.615	1.599	1.574	1.545	1.405	1.279	1.173
Uniform Rainfall	1.599	1.573	1.519	1.295	1.24	1.185	1.177

3.3 시면안정해석 결과

사면안정해석은 각각 Huff 1~4분위, Mononobe 전진형, 중앙집중형, 지연형, 그리고 등분포형을 강우지속시간 24, 36, 48, 72시간으로 적용하여 그 결과를 비교 분석하였다. 본 논문에서는 각각의 지속시간들 중에서 강우의 시간적 분포방법에 따라 가장 작은 안전율 값을 나타내는 지속시간에서의 시간에 따른 안전율 변화를 나타내었다. Fig. 17과 18은 사면안정해석 시 최소안전율 값을 보였던 강우지속시간 36시간일 때의 완주지역 분위별 안전율을 나타내고 있다.

Huff와 Mononobe 방법 모두 강우지속시간이 36시간일 때 최소안전율 값을 갖는 것을 확인하였다. 36시간일 경우 Huff 방법은 1분위에서 1.159로 최소안전율을 갖고, Mononobe 방법은 지연형에서 1.173의 최소안전율 값을 갖는 것을 확인하였다. 이 두 유형의 안전율 차이는 크지 않았지만 Huff 1분위의 경우 총 강우시간 36시간 중 24시간에서 최소안전율 값을 가진 반면 Mononobe 지연형의 경우는 최종강우시간 36시간에서 최소안전율 값을 보이는 것을 확인하였다.

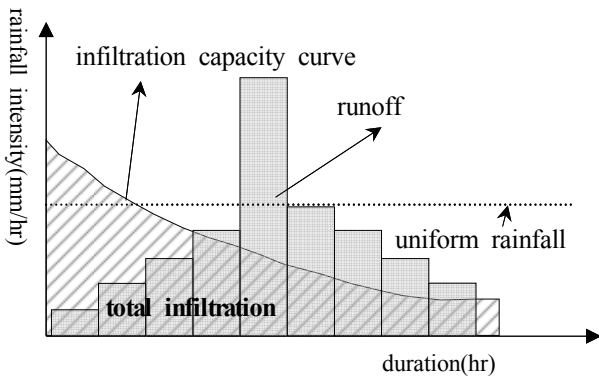


Fig. 19. Storm runoff and infiltration capacity curve (centered type of model)

5. 결 론

본 연구에서 강우의 빈도함수를 이용하기 위해서 Huff와 Mononobe 방법을 이용하여 강우사상을 적용하고 일반적으로 등분포 강우를 이용한 적용 사례와 비교하여 분석하였다. 강우 시 사면에서 침투해석하기 위해서는 침투능 곡선에 따라 강우 유출량과 손실량을 계산하여 사면의 유효응력을 간극수압 분포에 따라 계산할 수 있다. Fig. 19와 20은 침투능 곡선이 초기에 많은 침투가 발생하면서 시간에 따라 작아지는 침투능 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 지표면에서 발생하는 침투는 침투능 곡선에 따라 조절되지만, Fig. 19처럼 중앙집중형 또는 지연형, 그리고 Huff 3rd와 4th 방법 유형과 같은 강우의 시간적 분포는 지반의 초기 침투능이 클 때 충분한 지반이 포화되는 침투량이 만족하지 못하여 지표면으로부터 포화두께도 작아지고 안전율 역시 비교적 크게 안전함을 보였다(Fig. 13~16). Fig. 20에서 보여주고 있는 전진형 또는 Huff 1st와 2nd 방법과 같은 강우 시간적 분포는 초기 침투능이 클 때 충분한 강우강도로 지반이 포화되는 위한 조건을 만족하기 때문에 표층으로부터의 습윤대가 깊어지고 그에 따른 안전율 역시 비교적

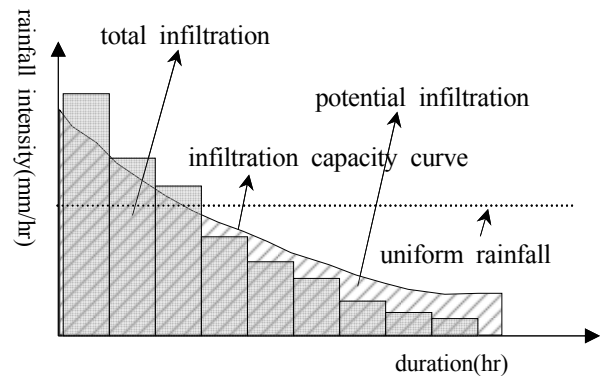


Fig. 20. Storm runoff and infiltration capacity curve (advanced type of model)

Table 6. Event type along rainfall duration distributed by Huff method in Jeonju area (MLTMA-PR, 2000)

Duration	Huff 1st	Huff 2nd	Huff 3rd	Huff 4th	Total
total	302 (27%)	307 (27%)	272 (24%)	238 (21%)	1119
~ 6 hrs	115 (28%)	107 (26%)	86 (21%)	96 (24%)	404
7 hrs ~ 12 hrs	96 (31%)	81 (27%)	60 (20%)	68 (22%)	305
13 hrs ~ 18 hrs	44 (24%)	43 (24%)	55 (31%)	38 (21%)	180
19 hrs ~ 24 hrs	19 (18%)	36 (35%)	31 (30%)	17 (17%)	103
25 hrs ~	28 (22%)	40 (31%)	40 (31%)	19 (15%)	127
x .GT. Mean	100 (26%)	122 (31%)	109 (28%)	58 (15%)	389
x .LE. Mean	202 (28%)	185 (25%)	163 (22%)	180 (25%)	730

작은 값들을 보이고 있다(Fig. 17~18).

지표면의 초기 침투능이 크기 때문에 일정한 강우패턴은 Huff 1st 방법 또는 Mononobe 전진형의 유형과 비슷한 습윤대의 간극수압과 사면 안전율을 보이고 있다. 따라서 강우 초기에 큰 침투능을 갖는 지반의 일반적인 특성은 강우의 시간적 분포에 따라서 지반내의 간극수압 분포를 다르게 분산시키며, 사면의 안전율에 차이를 보이고 있음을 확인하였다.

Table 6에서 알 수 있듯이, 전주지역(또는 완주)에서는 발생하는 강우의 시간적 분포는 강우지속시간에 따라 전진형 또는 지연형의 형태로 확률적으로 분류되고 있음을 보여준다. 강우지속시간이 짧을수록 전진형과 Huff 1st 방법에 유사한 형태를 보이고 있으며, 강우지속시간 길어질수록 확률적인 분포는 Huff 2nd와 3rd 방법 또는 Mononobe 방법의 중앙집중형으로 분포되고 있음을 확인할 수 있었다. 강우의 시간적 분포는 지역적 설계에 맞게 적용하여 신뢰성 있는 사면 안전율 계산이 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 한일 협력연구사업(NRF-2013K2A2A4003406)과 2013년 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2062218)으로 지원된 연구입니다. 지원에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Chang, Bhum-Soo (2012), "Paradigm Shift to Reduce Upcoming Slope Disasters", Magazine of National Disaster Management Institute, Vol.14, No.4, pp.16-21.
2. Fredlund, D. G. and Xing, A. (1994), "Equations for the Soil-water Characteristic Curve", *Canadian geotechnical Journal*, Vol.31, No.3, pp.512-532.
3. GeoStudio (2012), Version 8.0, User's guide, International Ltd., Calgary, Canada.
4. Huff, F. A. (1967), "Time Distribution of Rainfall in Heavy Storms", *Water Resources Research*, Vol.3, No.4, pp.1007-1019.
5. Huff, F. A. (1970), "Time Distribution Characteristics of Rainfall Rates", *Water Resources Research*, Vol.6, No.2, pp.447-454.
6. Kim, Y. K. (2009), "Soil Slope Design and Stability Evaluation Methodology Considering Hydraulic Conductivity and Rainfall Characteristics", Ph.D Thesis, KAIST.
7. Kim, H. K. (2014), "Stability Analysis in Unsaturated Soil Slopes Considering Time Distribution of Rainfall", Master Thesis, Dankook University.
8. Lee, S. R., Kim, Y. K., Choi, J. C., and Oh, J. K. (2006), "Measurements of Variation of Unsaturated Soil Properties in Compacted Road Slope due to Rainfall Infiltration", *Proceeding of Korean Society of Civil Engineering*, No.10, pp.3865-3868.
9. Lee, J. S., Song, Y. K., and Kim, Y. T. (2012), "Slope Stability Characteristic of Unsaturated Weathered Granite Soil in Inje considering Antecedent Rainfall", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.12, No.4, pp.85-92.
10. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA-PR, 2011), "Probability Rainfall Table", Available from "www.k-idf.re.kr"
11. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTMA, 2012), "Design Standard for Flood Estimation", Korea.
12. National Disaster Management Institute (2010), "Study on the Steep Slope Information Compilation and Establishment of an Analysis System", Report.
13. Oh, J. R. (2013), "Analysis of Landslide Triggering Rainfall Threshold for Prediction of Landslide Occurrence", Ph.D. Thesis, Sejong University.
14. Tsaparas, I., Rahardjo, H., Toll, D. G., and Leong, E. C. (2002), "Controlling Parameters for Rainfall-induced Landslides", *Computers and Geotechnics*, Vol.29, pp.1-27.
15. van Genuchten (1980), "A Closed form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.

Received : November 23rd, 2015
 Revised : December 26th, 2015
 Accepted : December 30th, 2015