돌발 산사태 예·경보를 위한 강우기준 설정 연구

Thresholds of Rainfall Duration and Intensity for Predicting Abrupt Landslide Occurrence

김성필* · 박재성** · 배승중***† · 허준****

Kim, Seong-Pil · Park, Jae-Sung · Bae, Seung-Jong · Heo, Joon

ABSTRACT

The objective of this study is to suggest rainfall threshold for landslide forecasting and warning. For this study, we chose the research area where landslide have occurred. And we performed infiltration-stability analysis with rainfall intensity-duration. As the results of this study, slope stability variation chart with rainfall intensity-duration are established. This kind of chart is believed to be able to be used for forecasting and warning the landslide caused by rainfall.

Keywords: Landslides; Slope stability; Rainfall Threshold; Unsaturated soil; Soil-water characteristic curve (SWCC)

I. 서 론

최근 10년간 (2002~2011년)의 폭풍, 홍수, 해일, 지진, 산사태 등 자연현상으로 생기는 인명피해, 재산손실 및 시설물 피해액을 살펴 보면, 연평균 인명피해는 68 명, 재산피해는 1조 6582 억원에 달하고 있다. 피해의 대부분은 하천, 사방, 도로, 군시설, 철도, 학교 등의 공공시설 (전체 피해액의 약 72 %)과 비닐하우스, 축사, 잡사, 수산증양식 등과 같은 농업 시설 (약 20 %)에 집중되어 있다 (통계청). 특히 국지성 집중 호우에 의해 2011년에만 824 ha에 달하는 산사태가 발생하여 43 명의 인명피해와 1,580 억원의 산림분야 총 복구비용이 소요되었다 (통계청). 짧은 시간에 집중된 호우에 의해 급속하게 발생하는 이러한 돌발재해의 경우 적절한 예·경보가 이루어 질 수 있다면 인명피해를 줄일 수 있을 것으로 판단되고 현재 적절한 예·경보를 발령하기 위한 기준 및 장비에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 (Aleotti, 2004; Kim et al., 2008; Oh et al., 2014). Oh et al. (2014)은 250 여개의 산

사태 발생이력과 강우 데이터를 분석하여 강우기준을 제시하였지만 통계적 기법에 의한 분석이고, Jeong et al. (2009)은 불포화 풍화토 사면에서 포화깊이, 지조건 등에 따른 안전율의 변화를 분석하였으나 무한사면을 대상으로 하였다. 따라서 실제의 강우조건에 의한 사면의 안전율 변화에 따른 예·경보 발생을 위한 연구가 필요하다.

현재 안전한 사면이 강우에 의해 안전율이 저하되면서 산사태가 발생하는 것이므로 산사태를 유발할 수 있는 강우기준을 설정할 수 있다면 예·경보 시스템을 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 과거 산사태가 발생했던 지역에 대한 강우에 따른 사면 안전율을 검토하고 강우강도와 강우 지속시간으로 표현될 수 있는 산사태 발생에 대한 강우기준을 제시하고자 한다.

II. 대상지역 및 해석방법

1. 대상지역

경기도 장흥 지역은 1996~1998년 대규모 산사태가 발생하였고 30명이 사망하는 등 피해가 컸고 지속적인 위험성이 존재하는 것으로 판단하여 대상지역으로 선정하였다.

실제 산사태가 발생한 곳은 연구대상지역에서 5 개소 (Fig. 1)이고 이 중에서 Site-2 인근에서 수평거리 약 300 m 수직거리 120 m의 단면을 추출한 후 가장 위험한 단면으로 예상되는 높이 30 m의 사면을 대상으로 지하수위를 고려하여 해석을 수행하였다 (Fig. 2).

* 서울대학교 그린바이오과학기술연구원
** 서울대학교 대학원
*** 서울대학교 그린바이오과학기술연구원
**** 한국농어촌공사 농어촌연구원
† Corresponding author Tel.: +82-33-339-5811
Fax: +82-33-339-5830
E-mail: bsj5120@snu.ac.kr

2014년 7월 11일 투고
2014년 7월 15일 심사완료
2014년 7월 17일 게재확정

Fig. 1 Research Area

Fig. 2 Analysis slope extraction(Site-2)

2. 입력자료 및 해석방법

Site-2에 대한 시추조사 결과 봉적층 6.5 m와 풍화토층 0.8 m를 포함해 토사가 총 7.3 m 두께로 분포하였고, 3.7 m 두께의 풍화암 그리고 이후 연암층으로 나타났다. 강우에 의한 포화심도의 변화는 불포화도 흐름 특성이며 사면의 안정성에 큰 영향을 미친다. 이러한 흙의 불포화 흐름의 해석에 필요한 것이 함수특성곡선 (Soil Water Characteristic Curve, SWCC)이다. 함수특성곡선은 순구속압, 간극비, 입도분포, 유기물함량, 광물학적 특징 등 여러 가지 인자에 영향을 받는다 (Lu and Likos, 2004). Lee and Yu (2012)는 실험적으로 순구속압과 간극비의 영향을, Song and Shin (2005)는 다짐율과 간극비의 영향을 제시한 바 있다. 함수특성은 흙 속에 존재하는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의되고, 물의 양은 중량함수비, 체적함수비 또는 포화도로 나타낼 수 있으며 일반적으로 체적함수비와 모관흡수력의 관계로 표현된다. 이에 대하여 Fredlund and Xing (1994)는 다음과 같은 특성곡선식을 제안하였다.

$$\theta_w = C(h) \left[\frac{\theta_s}{\left[\ln \left\{ \exp(1) + \left(\frac{h}{a} \right)^b \right\} \right]^c} \right] \quad (1)$$

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

여기서, a 는 공기유입값에 관계되는 토질상수, b 는 흙에서 수분이 빠져나가는 것과 관계되는 토질상수, c 는 잔류함수비에 관계되는 토질상수, h_r 은 잔류함수비일 때의 흡인력을 의미한다. 해석에 사용된 흙 시료에 대하여 건조조정을 통해 구한 체적함수비-모관흡수력의 관계는 Fig. 3과 같고, Fredlund and Xing (1994) 식에서의 계수는 Table 1과 같다. Table 2에 사면안정해석에 사용된 흙의 물리적 성질을 요약하였다.

이상의 입력자료를 이용하여 강우에 따른 습윤전선 (wetting front)의 변화를 seep/w로 해석하고 안정성은 slope/w로 해석하였다. Seep/w는 Darcy의 법칙을 따르는 포화-비포화 흐름에 근거하여 1차원의 단순한 정상포화흐름부터 임의적으로 변화는 2차원의 이방성 지반의 포화 및 비포화 흐름을 해석할 수 있고 해석결과를 slope/w와 연동하여 안정해석을 수행할 수 있다. 해석단면은 Fig. 4와 같다.

Fig. 3 Soil Water Characteristic Curve of Soil

Table 1 Fredlund and Xing (1994) equation parameter

a	b	c	hr
26.32	1.42	2.53	1000

Table 2 Physical properties of Soils

	Unit Weight γ_t (kN/m ³)	Friction Angle ϕ (°)	Cohesion C (kPa)	Permeability (cm/s)
Top Soil	19.0	34.0	5.0	1.92×10^{-4}
Weathered Rock	21.0	33.0	30	1.00×10^{-6}
Soft Rock	25.0	35.0	100	1.00×10^{-8}

Fig. 4 Analysis section

Fig. 5 Rainfall threshold for landslide

최종적으로 Fig. 5와 같이 대상 사면에 대한 강우강도와 강우 지속시간에 따른 사면 안전율의 분포를 구하면, 일기 예보상의 강우강도와 강우 지속시간을 이용하여 사면의 안정성 변화를

Fig. 6 Flow chart for rainfall threshold for of landslide

예측하여 돌발 산사태 예경보를 발생할 수 있을 것이다.

Table 1은 해석에 사용된 기상자료를 나타낸다. 본 연구 지역에 대한 IDF관계 (Intensity-Duration-Frequency)의 데이터 계열은 국토교통부에서 제공하는 한국 강우량도 활용 시스템 (k-idf.re.kr)에서 획득하였다.

해당 지역의 강우강도는 인근의 신곡, 행주대교, 전류, 통일대교, 적성, 전곡, 청산관측소에서 측정된 강우강도를 티센방법을 이용하여 보정한 값이다. 자료 계열의 범위는 지속기간 5분~4320분 (3일), 재현기간 2년 빈도~500년 빈도이며 총 260가지 기상조건에 대하여 침투해석 및 이를 연계한 사면안정 해석을 실시하였다. 이상의 해석과정을 요약하면 Fig. 6과 같다.

Table 4 Rainfall data of research area(Intensity, mm/hr)

Duration (min) \ Frequency (yr)	5	10	15	20	30	40	50	60	90	120	180	240	360	540	720	900	1080	1440	2880	4320
2	133.5	99.3	83.2	73.4	61.5	54.2	49.0	45.1	37.3	32.4	26.2	22.3	17.5	13.5	11.1	9.5	8.3	6.7	4.0	3.0
3	151.1	112.2	94.5	83.8	70.9	63.0	57.3	53.0	44.2	38.5	31.2	26.6	20.9	16.1	13.3	11.3	10.0	8.1	4.9	3.7
5	171.2	126.9	107.1	95.4	81.4	72.7	66.5	61.8	51.8	45.3	36.9	31.5	24.7	19.0	15.7	13.4	11.8	9.7	5.9	4.4
10	195.8	145.0	123.0	110.0	94.6	85.0	78.1	72.7	61.4	53.9	44.0	37.5	29.5	22.7	18.7	16.1	14.2	11.6	7.2	5.4
20	219.9	162.4	138.1	124.0	107.3	96.8	89.2	83.3	70.6	62.1	50.8	43.4	34.1	26.3	21.7	18.6	16.4	13.5	8.4	6.3
30	233.6	172.5	146.9	132.1	114.6	103.6	95.6	89.4	75.9	66.8	54.7	46.7	36.7	28.3	23.3	20.0	17.7	14.5	9.1	6.9
50	251.0	185.2	157.9	142.2	123.7	112.1	103.6	96.9	82.6	72.7	59.6	50.9	40.0	30.8	25.4	21.9	19.3	15.9	10.0	7.6
70	262.7	193.4	165.0	148.8	129.6	117.6	108.8	101.9	86.9	76.6	62.8	53.7	42.2	32.5	26.8	23.1	20.4	16.7	10.5	8.0
80	266.9	196.6	167.8	151.4	132.0	119.8	110.9	103.9	88.6	78.1	64.0	54.7	43.0	33.2	27.4	23.5	20.8	17.1	10.7	8.2
100	274.1	201.9	172.5	155.7	135.9	123.5	114.4	107.2	91.5	80.7	66.1	56.5	44.4	34.3	28.3	24.3	21.5	17.7	11.1	8.4
200	297.8	218.8	187.2	169.3	148.2	134.9	125.2	117.4	100.4	88.6	72.7	62.2	48.9	37.7	31.1	26.8	23.6	19.5	12.3	9.4
300	311.3	228.7	195.8	177.3	155.3	141.6	131.4	123.3	105.6	93.2	76.5	65.5	51.5	39.7	32.8	28.2	24.9	20.5	13.0	9.9
500	327.9	240.9	206.5	187.2	164.3	149.9	139.3	130.8	112.1	99.1	81.4	69.6	54.7	42.2	34.8	30.0	26.5	21.8	13.8	10.5

III. 결과 및 고찰

1. 강우량에 따른 안정성 변화

Fig. 7은 260가지 조건의 강우 침투해석 중에서 강우강도 23.3 mm/hr 지속시간 12 시간 및 강우강도 7.2 mm/hr-48 hr에 대한 결과이다. 지속시간 12 hr일 때의 침투해석 결과 지하수위는 표층으로부터 약 3.9 m 지점에 위치하고 있었으며 이는 본래 지하수위보다 대략 0.3 m 가량 상승한 수치이다. 한편 강우강도 7.2 mm/hr, 지속시간 48 시간일 때의 침투해석 결과 이미 표층까지 포화된 상태임을 확인 할 수 있었다.

Fig. 8은 Fig. 5의 침투해석 결과에 따른 안정해석 결과이다. 강우가 전혀 없고 평상시의 지하수위 일 때 안전율은 1.391로 안정한 상태이다. 하지만 강우강도 23.3 mm/hr, 지속시간 12 시간일 때의 사면안정해석 결과는 안전율이 1.161로 나타났다. 지하수위가 일정하게 유지될 때보다 0.3m 가량 지하수위가 상승하였을 때 안전율이 대략 0.2 정도 낮은 값을 나타낸 것이다. 또한 강우강도 7.2 mm/hr, 지속시간 48 시간일 때 사면안정해석 결과 안전율은 0.771을 나타냈으며 이는 기준 안전율에 비해 매우

낮은 값이라 볼 수 있다. 이미 표층까지 포화가 된 상태이며 사면 슬라이딩 및 표층 붕괴 등의 현상이 나타날 수 있는 상태이다. 이와 같이 강우량에 따라 산사태의 발생 여부가 결정된다고 가정하면 강우강도와 지속시간에 따라 사면 안정성 변화를 평가할 수 있으며 이를 활용해 산사태 발생의 예·경보를 발생시킬 수 있다.

Fig. 9는 총 강우량에 따른 사면의 안전율을 나타낸 것으로 총 강우 100 mm~400 mm 구간에 대한 지속시간별 그래프이다. 동일한 총 강우량에서도 지속시간 증가에 따라 안전율은 작아지는데 이는 동일 강우량일지라도 지속시간이 길게 되면 지표 내로 침투하는 침투수량이 증가하기 때문이다. 따라서 산사태를 유발하는 강우의 기준을 설정하기 위해서는 강우강도와 강우 지속시간을 동시에 고려할 필요가 있다. Fig. 10은 안전율 Table 1의 경우에 대한 해석결과를 강우강도와 강우 지속시간에 대하여 사면의 안전율 별로 나타낸 그림이다.

일반적으로 기준이 되는 안전율 1.2에서 해당사면에 대하여 산사태 예보를 발령한다고 가정하면 20 mm/hr의 강우가 예보된 상태에서는 약 11 시간이 경과하면 예보를 발령하는 것이 타당하다. 그리고 약 3 시간 더 강우가 지속될 것으로 예상되면 안전율이 1.0에 접근할 것이므로 경보에 해당하는 조치를 취할 수 있을 것이다.

(b) I=7.2 mm/hr, D=48 hr

(a) I=23.3 mm/hr, D=12 hr

Fig. 7 Infiltration analysis results

(b) I=7.2 mm/hr, D=48 hr(FS=0.771)

(a) I=23.3 mm/hr, D=12 hr(FS=1.161)

Fig. 8 Stability analysis results

Fig. 9 Factor of safety and total rainfall relationship with duration

Fig. 10 Rainfall Threshold for Landslide

IV. 요약 및 결론

본 연구는 최근에 증가 추세에 있는 강우에 의한 돌발 산사태 피해에 대비하기 위하여 산사태 예·경보에 강우 예측자료를 활용하기 위한 연구이다. 이를 위하여 과거 산사태 피해 지역을 선정하여 강우강도와 강우 지속시간에 따른 사면 침투 및 안정 해석을 수행하였다. 이상의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 강우 이전에 불포화 조건인 사면에서 강우에 따른 습윤전선의 분포를 해석하기 위하여 함수특성곡선을 실험에 의하여 구하고 침투해석을 수행하였다. 강우에 의한 습윤전선의 이동은 강우량과 지속시간에 관계되며, 따라서 산사태 발생 예측을 위해서는 강우강도와 강우 지속시간을 동시에 고려할 필요가 있다.

2. 연구지역의 IDF (Intensity-Duration-Frequency)관계를 이용하여 침투해석과 안정해석을 수행한 결과 총 강우량 기준으로 약 100 mm~400 mm구간에서 안전율이 급격히 감소하는 것을 확인하였다.

3. 전체 해석자료를 이용하여 강우강도와 강우 지속시간에 대하여 사면의 안전율 분포를 확인한 결과 예·경보되는 강우자료를 활용하여 산사태 발생을 예측하고 경보를 발령할 수 있는 자료로 활용할 수 있음을 확인하였다.

향후 강우 이상의 과정을 통한 강우에 따른 산사태 예측자료와 현장의 계측자료 (습윤전선의 진행, 지하수위 변동 등)를 활용하면 보다 효율적인 산사태 예·경보 시스템을 구축할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 산사태 예·경보를 위한 안전율 기준에 대한 연구와 현장에서 효율적인 계측을 위한 장치에 대한 연구가 수행될 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 농림축산식품부 농림수산식품기술기획평가원의 “센서-네트워크 기술을 활용한 농업·농촌시설의 돌발재해 조기 예·경보체계 개발” 연구에 의해 이루어진 것입니다.

REFERENCES

1. Aleotti, P., 2004, A Warning System for Rainfall-Induced Shallow Failure, *Engineering Geology* 73: 247-265.
2. Baek, H. J., K. M. Kim, D. H. Kim, 2010, Effect of the Hysteresis of Soil-Water Characteristic Curve on Unsaturated Soil Slopes Stability, *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers* 47(3):349-358 (in Korean) .
3. Dahal, R. K. and Hasegawa, S., 2008, Representative Rainfall Thresholds for Landslides in the Nepal Himalaya, *Geomorphology* 100: 429-443.
4. Fredlund, D. G. and Xing, A, 1994, Equations for the Soil-Water Characteristic Curve, *Canadian Geotechnical Journal* 31: 521-532.
5. Jeong, S. S., J. Y. Choi, H. H. Lee, 2009, Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers* 29(1C): 1-9 (in Korean) .
6. Kim, H. W., G. S. Kim, S. B. Chang, 2008, A study on the landslide detection method using wireless sensor network(WSN) and the establishment of threshold for issuing alarm, *Preceeding of the 2008 ITFE Summer Conference*, 262-267. Yongin, Gyeonggi, Korea (in Korean).
7. Korea Precipitation Frequency Data Server(KPFDS) : <http://www.k-idf.re.kr/>

8. Lee, J. and C. Yu, 2012, A Study on Change of Soil-Water Retention Curve with Different Net Confining Pressures and Porosities using a Suction-Saturation Control Technique, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 54(4): 93-103 (in Korean).
9. Lu, N. and Likos, W. J., 2004, Unsaturated Soil Mechanics, Hoboken, NewJersey : John Willey & Sons, Inc.
10. Oh, J. R. and H. J. Park, 2014, Analysis of Landslide Triggering Rainfall Threshold for Prediction of Landslide Occurrence, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 14(2): 115-129 (in Korean).
11. Saito, H., Nakayama, D., and Matsuyama, H., 2010, Relationship between the Initiation of a Shallow Landslide and Rainfall Intensity-Duration Thresholds in Japan, *Geomorphology* 118: 167-175.
12. Song, C. S. and C. S. Shin, 2005, Characteristics of Permeability for an Unsaturated Soil, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 47(4): 35-41 (in Korean).