깎기비탈면 침투해석을 위한 최소 안전율 적용성 고찰

이정엽* · 이종현 · 옥영석 · 구호본
한국건설기술연구원 GEO-인프라연구실

Consideration of Minimum Safety Factors for Cut-slope Infiltration Analysis

Jeong-Yeob Lee*, Jong-Hyun Rhee, Young-Suk Oak, and Ho-Bon Koo

Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction and Technology

본 연구에서는 강우지속시간과 강우종료 후 침투에 의한 깎기비탈면 안전율 변화를 고찰하였다. 강우강도와 강우지속시간의 다양한 조건에서 깎기비탈면의 침투특성과 안전율 변화는 soilworks 프로그램으로 분석하였다. 분석 결과, 깎기비탈면 안전율은 강우 종료 후에 간극수압의 증가로 추가적으로 감소하여 최소 안전율에 도달한다. 강우지속시간 동안 안전율 감소율보다 강우종료 후 안전율 감소율이 더 큰 경우도 발생하게 되므로, 깎기비탈면 침투해석 시 유의해야 할 것이다.

주요어 : 비탈면 안정, 침투특성

Infiltration characteristics of cut-slope safety factors are considered for precipitation duration and intensity. Infiltration characteristics (infiltration module) and safety factor (slope module) changes of a cut-slope are analyzed under various conditions of precipitation intensity and duration, using the Soilworks program. The results indicate that the addition safety factors of the slope decreased immediately after the end of precipitation due to an increase in pore water pressure. The minimum safety factor for cut-slope infiltration analysis should be considered because of the because of the decrement of safety factors after precipitation that exceeds the decrement of safety factor during the duration of precipitation.

Key words : slope stability, infiltration characteristics

서 론

도로변에 조성된 깎기비탈면은 대부분의 지반이 자연 환경에 노출되어 있기 때문에, 강우와 풍화 등에 의해 안정성의 저하가 발생한다. 깎기비탈면 붕괴는 도로이용자의 안전에 직접적인 영향을 미칠 수 있으므로 설계단계에서부터 준공 후까지 주의깊은 유지관리가 요구된다.

강우는 깎기비탈면 붕괴를 유발하는 중요한 요소로

간주된다. 그 중 침투수는 그 절대량의 크기는 작을지라도 시간이 지남에 따라 지반내의 간극수압이 증가하여 지반의 전단강도를 감소시켜 비탈면의 안전율을 저하시키는 요인이 된다(Shin, 1990).

한반도 면적의 약 65%는 산악지형으로 구성되어 있어, 산악지형 내 도로는 터널이나 깎기비탈면 조성이 동반된다. 또한, 한반도의 평균 강수량은 약 1,200 mm이며, 이 중 여름철인 6~9월에 연중 강수량의 약 70%가 집중적으로 발생한다. 이러한 지형적, 기후적인 특성상 국내 비탈면은 여름철 집중강우에 의하여 붕괴가 일어날 가능성이 많고 이로 인하여 막대한 재산피해와 인명피해가 일어날 수 있다. 이에 따라 국내 · 외 경우에도 강우침투에 대해 다양한 해석방법을 통해 침투에 대한 연구가 진행되고 있다(Kim and Kim, 1991; Fredlund

*Corresponding author: yeupi@kict.re.kr

© 2012, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Fig. 1. Process of slope failure.

and Rahardjo, 1995; Park et al., 1995; Spiereburg and van Esch, 1995; Ng and Shi, 1998; Fourier et al., 1999).

본 연구에서는 강우지속시간과 강우강도의 조건에 따른 깎기비탈면 침투연계 안전율과 강우종료 후 시간의 경과에 따라 안전율 변화를 Soilworks 프로그램을 이용하여 분석하고자 한다.

비탈면 붕괴 과정

강우 발생시 비탈면이 불안정화되어 붕괴되는 과정은 연직침투 과정, 불투수층 평행침투 과정 및 붕괴 등의 3 단계로 구분할 수 있다(Fig. 1).

연직침투 과정은 강우가 비탈면 토층 내에 침투하면서 형성된 침윤선이 시간 경과와 함께 연직방향으로 강하하는 과정이며, 불투수층 평행침투 과정은 침윤선이 불투수층에 도달한 후 암반과 평행한 방향의 침투가 발생하는 과정이다. 마지막으로 침윤선의 연직침투와 상승된 지하수위의 평행침투는 비탈면 하단부로 갈수록 크게 나타나 한계수위 형성 위치에서 붕괴가 발생하게 된다.

침투에 대한 Darcy의 법칙과 기본방정식

흙속으로 흐르는 물의 침투이론은 Darcy에 의해 식 (1)과 같이 제안되었다.

$$q = ki \quad (1)$$

여기서, q 는 단위체적량 침투유량, k 는 투수계수, i 는 동수구배이다.

Darcy의 법칙은 포화토에 대해 유도되었지만, 그 후의 연구에 의해 불포화토의 흐름에도 적용될 수 있다는 것을 알게 되었다(Richards, 1931; Childs and Collis-George, 1950). 불포화 흐름에 있어서는 투수계수가 일정한 값이 아니고 포화도 또는 체적함수비에 따라 변화한다.

비정상 흐름에 있어서 외부에서 들어오는 유량이 있을

때 요소내의 유량의 변화율의 합계는 체적함수비의 시간에 관한 변화율과 동일하다. 2차원의 흐름에 대해서는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Lam and Fredlund, 1984).

$$\frac{\partial}{\partial h} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \frac{\partial (V_w/V)}{\partial t} \quad (2)$$

여기서, k_x 와 k_y 는 x 와 y 방향의 투수계수, h 는 전수두, q 는 외부에서 들어오는 단위체적유량, V_w 는 요소내 물의 체적, V 는 요소의 전체적, V_w/V 는 체적함수비, t 는 시간이다.

함수특성곡선 이론

투수계수는 완전 포화된 흙에서의 물의 흐름값이며, 일반적으로는 정류상태의 동일 흙에서는 같은 값을 가지지만, 불포화토의 경우 함수비 상태에 따라 투수계수가 달라진다.

함수특성곡선은 불포화 지반의 고유 특성이며, 지반의 강도와 거동 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이라 할 수 있다. 침투해석을 위해서는 불포화 지반의 구성요소인 흙 입자, 물, 공기의 세가지 구성성분으로 고려되어야 하며, 이러한 특징 때문에 포화지반 해석에서 사용되는 함수비보다는 간극공기를 고려하는 체적함수비 개념으로 설명된다(Jeong et al., 2009).

본 연구에 사용된 함수특성곡선은 침투연계 깎기비탈면 안전율 도출을 위해 사용된 'Soilworks'에서 제시된 포화도 함수특성곡선을 인용하여 사용하였으며, Fig. 2와 같다.

국내 강우자료 분석 경향

국내 강우자료 분석은 강우강도식의 기본형인 Talbot형(식 (3)), Sherman형(식 (4)), Japanese형(식 (5))에서부터 국내 학자들의 연구를 통해 재현기간과 추가 회귀상수를 고려한 강우강도식(식 (6)과 식 (7)) 및 6차 다

Fig. 2. Soil water characteristic curve.

	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	133.3	96.2	80.7	71.4	60.2	53.2	48.2	44.4	36.7	31.7	25.4	21.5	16.7	12.7	10.4	8.8	7.7	6.2	3.7	2.7
3	148.8	108.7	92.0	82.1	70.1	62.5	57.0	52.7	43.9	38.0	30.6	25.8	20.0	15.2	12.4	10.5	9.2	7.4	4.4	3.3
5	166.7	122.8	104.8	94.2	81.2	72.9	66.8	62.0	51.8	45.1	36.2	30.6	23.6	17.9	14.6	12.4	10.8	8.8	5.3	4.0
10	188.1	140.3	120.9	109.4	95.2	85.9	79.1	73.6	61.9	53.9	43.4	36.6	28.2	21.3	17.4	14.8	12.9	10.5	6.4	4.8
20	209.6	157.1	136.1	123.8	108.5	98.4	90.9	84.8	71.5	62.3	50.2	42.3	32.6	24.6	20.1	17.1	14.9	12.1	7.5	5.6
30	221.5	166.9	145.1	132.2	116.2	105.6	97.7	91.2	77.0	67.2	54.1	45.6	35.1	26.5	21.6	18.4	16.1	13.1	8.1	6.1
50	237.1	179.2	156.2	142.7	125.9	114.7	106.2	99.2	84.0	73.3	59.0	49.8	38.3	28.9	23.5	20.0	17.5	14.3	8.8	6.7
70	247.8	187.2	163.4	149.5	132.1	120.5	111.7	104.5	88.5	77.3	62.3	52.5	40.4	30.5	24.8	21.1	18.5	15.0	9.3	7.1
80	251.4	190.3	166.2	152.1	134.6	122.9	113.9	106.6	90.3	78.9	63.5	53.6	41.2	31.1	25.3	21.5	18.9	15.4	9.5	7.2
100	257.4	195.3	170.9	156.6	138.7	126.7	117.5	110.0	93.3	81.5	65.7	55.3	42.5	32.1	26.1	22.2	19.5	15.9	9.8	7.5
200	278.8	211.5	185.7	170.6	151.7	138.9	129.0	120.9	102.6	89.7	72.3	60.9	46.8	35.3	28.7	24.4	21.4	17.5	10.8	8.2
300	290.7	221.3	194.5	178.9	159.2	145.9	135.6	127.1	108.0	94.5	76.1	64.1	49.3	37.2	30.2	25.7	22.6	18.4	11.4	8.7
500	305.1	233.0	205.3	189.1	168.6	154.8	144.0	135.0	114.8	100.5	81.0	68.2	52.4	39.5	32.1	27.3	24.0	19.6	12.2	9.3

Fig. 3. Precipitation frequency estimates, IDF (Seoul).

항식의 강우강도식(식 (8)) 등 국내 강우조건에 적합하도록 지속적으로 제안되고 있다(Heo et al., 1999; MLTM, 2012).

국토해양부에서는 관측기록이 20년 이상이고 단시간의 관측기록이 양호한 기상청 산하 전국 측후소 및 관측소 69개 지점을 선정하여, 지속기간과 재현기간별 확률강우량 및 강우강도 표를 비롯하여 강우강도-지속기간-재현기간 곡선(IDF Curves)과 강우량-지속시간-재현기간 곡선(DDF Curves)에 대한 정보를 확률강우량도 활용시스템(<http://www.k-idf.re.kr>) 사이트를 통해 제공하고 있다(Fig. 3). 또한, 2012년에 발간된 “확률강우량도 개선 및 보완 연구”에서는 6차 다항식의 강우강도식을 제안하고 있다(MLTM, 2012). 이와 같이 확률론적 강우강도 개념을 통해 회귀상수를 결정하게 되면 복잡한 검정작업을 거치지 않고 임의의 강우지속시간에 따른 강우강도를 획득할 수 있는 장점이 있다.

$$I(t) = \frac{a}{t+b} \quad (3)$$

$$I(t) = \frac{a}{t^n} \quad (4)$$

$$I(t) = \frac{a}{\sqrt{t}+b} \quad (5)$$

$$I(T, t) = \frac{a+b \log T}{t^n+c} \quad (6)$$

$$I(T, t) = \frac{a+b \ln \frac{T}{t^n}}{c+d \ln \frac{\sqrt{T}}{t} + \sqrt{t}} \quad (7)$$

$$\ln(I) = a + b \ln(t) + c(\ln(t))^2 + d(\ln(t))^3 + e(\ln(t))^4 + f(\ln(t))^5 + g(\ln(t))^6 + \quad (8)$$

Fig. 4. Distribution of slope types.

여기서 $I(t)$, $I(T, t)$ 는 강우강도(mm/hr), t 는 강우지속시간(min), T 는 재현기간(year), a, b, c, d, e, f, g, n 는 각 지점마다 산정되는 회귀상수이다.

국내 일반국도변 비탈면 분포 현황

국토해양부에서는 전국 일반국도 내 분포하고 있는 깎기비탈면의 기초조사를 2006년부터 수행하여, 2010년에 전수조사를 완료하였다. 또한, 매년 신규로 조성되는 깎기비탈면과 구노선 내 위치하여 삭제되는 깎기비탈면의 현황을 파악하여 지속적인 유지관리를 하고 있다.

깎기비탈면 기초조사 자료에서 구성재료 별 분포현황은 암반깎기비탈면(46%), 혼합깎기비탈면(35%), 흙깎기비탈면(17%), 자연비탈면(2%) 순으로 나타났다(Fig. 4).

Fig. 5. Slope section.

해석단면 및 해석 조건 결정

본 연구를 위해 깎기비탈면 해석단면은 높이 20m, 높이 5m 마다 폭 2m의 소단으로 하였으며, 경사는 깎기비탈면 45°(1:1.0 경사도), 상부자연비탈면 0°를 이루는 단일 단면을 이용하였다(Table 1, Fig. 5). 구성재료는 상부 풍화토층과 하부 풍화암층으로 구성되어 있으며, 지하수위는 풍화암층과 풍화토층의 경계부에 위치하도록 하였다. 이와 같은 해석단면의 선정은 실제 연구대상 깎기비탈면 사례이기보다는 깎기비탈면 침투연계 안전율 변화를 용이하게 분석하기 위해 임의로 선정하였다.

강우강도는 Fig. 3의 “서울”의 재현빈도 10년, 20년, 50년, 100년, 200년에서 각각 강우지속시간 1일과 2일의 자료를 인용하였으며, 재현빈도별 강우강도는 Table 2와 같다. Table 2에서 괄호 안의 값은 강우강도 대 투

Table 1. Slope section and analysis conditions.

Section					
Condition	slope type	height (m)	grade (°)	berm width (m)	grade of upper slope (°)
Application	Weathering soil weathering rock	20	45	2	0
Precipitation Condition					
Condition	Hydraulic conductivity (mm/h)		Duration (day)	Average recurrences interval (year)	
Application	21.0		1, 2	10, 20, 50, 100, 200	
Strength Parameter					
Condition	Wet unit weight (kN/)	Saturated unit weight (kN/)	Cohesion (kN/)	Internal friction angle (°)	
weathering soil	18.3	19.3	20.8	27.8	
weathering rock	20.3	21.3	30.5	29.5	

Table 2. Precipitation intensity.

(unit: mm/h)

Duration (day)	Average recurrences interval (year)				
	10	20	50	100	200
1	10.5	12.1	14.3	15.9	17.5
2	6.4	7.5	8.8	10.5	10.8

Fig. 6. Infiltration interpretation.

Fig. 7. Slope interpretation.

수계수의 비율을 나타낸 것이다.

또한, 강우종료시간에 대한 안전율 변화를 분석하기 위해 전체 해석 수행 시간은 20일이 되도록 하였으며, 모든 강우조건에서 초기 안전율은 1.4309, 초기 모관흡수력은 20 kPa로 동일하도록 적용하였다(Lee et al., 2006). 경향분석의 용이함을 위해 soilworks 프로그램에서 도출되는 소수점 4자리의 깎기비탈면 안전율을 사용하였다.

강우조건에 따른 깎기비탈면 침투특성과 안전율의 상관성 분석

침투특성을 반영한 깎기비탈면의 안전율을 도출하기 위해 MIDAS사의 'Soilworks' 프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 강우 시 깎기비탈면 불포화 침투거동특성을 '침투모듈'을 통해 평가할 수 있고, 이와 연계하여 깎기비탈면 안전율 도출은 '비탈면모듈'을 통해 도출할

Fig. 8. Comparison of safety factors between Soilworks and Slope/w.

수 있다. 또한, 사용자가 지정한 시간 단계별로 침투특성과 안전율을 한꺼번에 도출할 수 있는 특징이 있다 (Figs. 6 and 7).

'Soilworks' 프로그램 결과의 객관성을 파악하기 위해 침투연계 깎기비탈면 안정해석을 위해 사용되고 있는 'Seep/W'와 'Slope/W' 프로그램을 이용하여 유사한 조건에서 두 프로그램의 경향성을 비교하였다(Figs. 8 and 9). 그 결과, 두 프로그램 모두 강우종료 후에도 깎기비탈면 안전율 저하가 발생하여 최소 안전율에 도달한 후 안전율이 서서히 상승하는 경향성을 보이고 있다. Fig. 8은 'Soilworks'와 'Slope/W'의 10년 빈도 강우강도에서 1일 강우지속시간 후 경과시간에 따른 안전율 변화를 나타낸 것으로, 강우종료 후에도 안전율의 저하가 발생하여 최소 안전율에 도달한 후 서서히 안전율이 상승하는 경향성을 보이고 있다. Fig. 9는 두 프로그램에서 최소 안전율 도달시간에서의 안전율을 도출 결과이다.

강우가 발생하는 동안 강우 중 일부가 침투되어 깎기비탈면 안전율은 표층의 부분포화, 모관흡수력 감소 및 지하수위면 상승 등으로 인해 감소된다. 강우강도와 강우지속시간 조건 변화에 따른 침투연계 깎기비탈면 안전율 변화 분석을 수행하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, 동일한 강우지속시간 조건에서 강우강도와 깎기비탈면 안전율의 상관성을 분석한 결과 강우강도와 안전율은 반비례 경향을 나타내었다. Fig. 10은 2일 강우지속시간 발생 후 10년 빈도 강우량과 200년 빈도 강우강도에서의 안전율을 나타낸 것으로 도출된 안전율은 각각 1.3198과 1.2712로서 강우강도가 클수록 안전율은 감소한다.

동일한 강우강도 조건에서 강우지속시간과 깎기비탈면 안전율의 상관성을 분석한 결과 강우지속시간과 안전율은 반비례 경향을 나타내었다. Fig. 11은 100년 빈도의 강우강도가 발생하는 동안 1일 강우지속시간과 2

Fig. 9. Minimum safety factor between Soilworks (left) and Slope/w (right).

Fig. 10. Interrelationship of safety factor and precipitation intensity.

Fig. 11. Interrelationship of safety factor and precipitation duration.

Table 3. Safety factor according to the analysis conditions.

(duration: 1 day)

Duration (day)	Average recurrences interval (year)				
	10	20	50	100	200
0	1.4309	1.4309	1.4309	1.4309	1.4309
1	1.3974	1.3939	1.3881	1.3854	1.3813
2	1.3356	1.3253	1.3099	1.2996	1.2886
3	1.3163	1.3032	1.2846	1.2708	1.2577
4	1.3076	1.2944	1.2745	1.2630	1.2503
5	1.3015	1.2895	1.2699	1.2585	1.2471
6	1.2976	1.2856	1.2666	1.2562	1.2455
7	1.2947	1.2830	1.2649	1.2553	1.2449
8	1.2926	1.2814	1.2641	1.2552	1.2452
9	1.2912	1.2808	1.2642	1.2559	1.2463
10	1.2904	1.2808	1.2651	1.2568	1.2479
11	1.2905	1.2812	1.2663	1.2582	1.2499
12	1.2912	1.2821	1.2678	1.2601	1.2522
13	1.2924	1.2834	1.2695	1.2621	1.2545
14	1.2937	1.2851	1.2736	1.2642	1.2570
15	1.2953	1.2871	1.2758	1.2663	1.2596
16	1.2972	1.2893	1.2781	1.2685	1.2622
17	1.2992	1.2915	1.2806	1.2734	1.2646
18	1.3015	1.2939	1.2832	1.2762	1.2671
19	1.3039	1.2964	1.2860	1.2790	1.2698
20	1.3066	1.299	1.2889	1.2819	1.2750

일 강우지속시간에서의 안전율을 나타낸 것으로 도출된 안전율은 각각 1.3992와 1.2827로서 강우지속시간이 증가할수록 안전율은 감소한다.

각 해석단계에서 안전율 변화는 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

즉, 강우강도와 강우지속시간은 꺾기비탈면의 침투특성과 안전율에 직접적인 영향을 미치는 중요 인자이며, 안정해석을 통한 설계 시 강우강도와 강우지속시간 값의 선택에 따라 안전율 변화와 보수보강 사업비 변동이 발생하게 되므로 객관적이고 합리적인 기준으로 적용해야 할 것이다.

둘째, 강우지속시간과 강우종료 후 경과시간을 포함한 총 20일의 꺾기비탈면 안전율 변화 경향은 강우지속 시간동안 지속적인 안전율 감소가 발생하다가 강우종료 후 즉시 안전율을 회복하지 않고, 완만하게 최소 안전율까지 도달한 후 서서히 회복하는 경향을 보이고 있다 (Tables 3 and 4, and Fig. 12).

Table 3과 Table 4는 각각 강우지속시간이 1일과 2일

의 경우 총 20일 동안의 안전율 변화이며, 각 조건에서 관찰되는 최소 안전율은 굵은 글씨로 표시하였다.

강우종료 후 추가적인 안전율 감소가 발생하는 이유는 꺾기비탈면 전체가 포화되지 않는 이상 상부에 남아 있는 침투수가 지하수위면에 축적되어 간극수압에 의해서 안전율이 저하되며, 시간이 경과함에 따라 상부에서 음의 간극수압 회복 등으로 모관흡수력의 증가로 안전율이 회복하기 때문으로 판단된다.

따라서, 최소 안전율을 고려한 설계 시 강우종료 후 도출되는 최소 안전율을 고려한 안정해석이 필요할 것으로 판단된다.

셋째, 동일한 강우강도 조건에서 강우지속시간 1일과 2일의 최소 안전율 도달시간을 분석한 결과 강우지속시간과 최소 안전율 도달 시간은 반비례하는 경향을 보이고 있다. 동일한 강우강도의 조건에서 꺾기비탈면 예상 붕괴면 내 임의의 절점에서 획득되는 간극수압 변화곡선을 도시하여 비교한 결과 강우지속시간 2일인 경우 최대 간극수압에 도달하는 시간이 상대적으로 빠름을 알

Table 4. Safety factor according to the analysis conditions.

(duration: 2 days)

Duration (day)	Average recurrences interval (year)				
	10	20	50	100	200
0	1.4309	1.4309	1.4309	1.4309	1.4309
1	1.4112	1.4071	1.4047	1.3992	1.3966
2	1.3198	1.3079	1.2965	1.2827	1.2712
3	1.2913	1.2725	1.2538	1.240	1.2264
4	1.2844	1.2657	1.2466	1.2323	1.2179
5	1.2812	1.2629	1.2447	1.2306	1.2174
6	1.2790	1.2613	1.2437	1.2307	1.2183
7	1.2778	1.2607	1.2434	1.2308	1.2202
8	1.2775	1.2607	1.2440	1.2320	1.2226
9	1.2777	1.2612	1.2451	1.2335	1.22500
10	1.2781	1.2621	1.2466	1.2354	1.2274
11	1.2787	1.2634	1.2486	1.2376	1.2299
12	1.2798	1.2649	1.2507	1.2399	1.2325
13	1.2811	1.2666	1.2529	1.2431	1.2351
14	1.2827	1.2684	1.2552	1.2458	1.2378
15	1.2846	1.2704	1.2577	1.2487	1.2406
16	1.2868	1.2748	1.2602	1.2515	1.2440
17	1.2891	1.2771	1.2626	1.2546	1.2471
18	1.2914	1.2795	1.2650	1.2575	1.2502
19	1.2938	1.2820	1.2673	1.2603	1.2534
20	1.2962	1.2847	1.2698	1.2629	1.2566

Fig. 12. Change of safety factor (precipitation duration: left, 1 day; right, 2 days).

수 있다(Figs. 13 and 14).

또한, 간극수압과 안전율의 상관성을 분석하기 위해 강우지속시간 1일과 2일의 경우에서 각각 간극수압의 변화곡선과 안전율의 변화곡선을 한 그래프에 도시하였다(Fig. 15). 그 결과, 간극수압과 안전율 변화곡선의 선형은 유사한 선형관계를 보여주고 있으며, 간극수압의

변화와 안전율의 변화는 상관성이 있음을 알 수 있다.

넷째, 초기조건에서 강우종료까지 안전율 감소율을 A, 강우종료 직후부터 최소 안전율이 산출되는 기간까지의 안전율 감소율을 B라고 가정하면, 동일한 강우지속시간에는 A는 강우강도와 비례적인 상관성이 있다(Fig. 16). B와 강우강도의 상관성은 뚜렷한 경향을 보이고 있지

Fig. 13. Pore water pressure by time stage.

Fig. 14. Change of pore water pressure.

않지만, 경우에 따라 A보다 큰 안전율 감소가 발생하는 것을 알 수 있다.

동일한 강우강도 조건에서 강우지속시간 1일과 2일의 안전율 감소 경향을 분석한 결과 A는 각각 2.34%와 10.36% 감소하였으며, 약 4.42배의 차이를 보이고 있다. B는 각각 3.38%와 4.06% 감소하였으며, 약 1.20배의 차이를 보이고 있다. 따라서, 강우종료 후 최소 안전율에 도달하는 안전율의 저하는 강우지속시간과 큰 상관성을 보이고 있지 않으므로, 짧은 시간의 국지성 강우가 발생하여도 강우종료 후의 안전율 감소가 발생할 수 있음을 염두해야 할 것이다.

Fig. 15. Correlation of pore water pressure & safety factor (left, 1 day; right, 2 days).

Fig. 16. Decrease of safety factor (precipitation duration: left, 1 day; right, 2 days).

결론

깎기비탈면의 강우는 지표면으로 유출되는 지표수를 통한 불안정성과 지반 내 침투수를 통한 불안정성을 유발시키고 있으며, Soilworks 프로그램을 이용하여 깎기비탈면의 침투연계 안정성을 분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 강우강도와 강우지속시간은 침투연계 안정성에 직접적인 영향을 미치는 중요 인자로서, 데이터 선택에 따라 안전을 변화가 나타나므로 객관적이고 합리적인 기준을 통해 적용해야 할 것이다.

둘째, 강우가 발생하게 되면 안전율은 초기상태에서 강우지속시간까지 1차 감소와 강우종료 직후부터 시간의 경과에 따라 2차 감소가 발생하는데, 최소 안전율은 2차 감소에서 확인된다. 최소 안전율을 이용한 깎기비탈면 설계 시에는 강우종료 후에 도출되는 최소 안전율이 고려된 안정해석이 수행되어야 할 것이다.

셋째, 강우지속시간 동안 안전율 감소는 강우강도와 비례하는 경향을 보이고 있지만, 강우종료 후 최소 안전율을 도달까지 안전율 감소는 강우강도와 강우지속시간과 뚜렷한 상관성을 보이고 있지 않기 때문에 짧은 시간의 국지성 강우가 발생하여도 강우종료 후의 안전율 감소가 발생할 수 있음을 염두해야 할 것이다.

References

- Childs, E. C. and Collis-George, N., 1950, The Permeability of Porous Materials, The Royal Society of London, 201, 392-405.
- Fourier, A. B., Rowe, D. and Bloght, G. E., 1999, The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump, Geotechnique, 49(1), 1-13.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H., 1995, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, Jon Wiley & Sons Inc, 6-13.
- Heo, J. H., Kim, K. D and Han, J. H., 1999, Derivation of Rainfall Intensity-Duration-Frequency Equation

Based on the Appropriate Probability Distribution, Korea Water Resources Association, 32(3), 247-254 (In Korean with English abstract).

- Jeong, S. S., Choi, J. Y. and Lee, J. H., 2009, Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slopes Considering Rainfall Duration, Korean Society of Civil Engineers, 29, 1-9 (In Korean with English abstract).
- Kim, S. K. and Kim, Y. M., 1991, Slope Instability Due to Rainfall, Korean Geotechnical Society, 7, 53-64 (In Korean with English abstract).
- Lam, L. and Fredlund, D. G., 1984, Saturated-Unsaturated Transient Seepage Model for Geotechnical Engineering, 5th Finite Elements in Water Resources Conf., 18-22.
- 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, Korean Society of Civil Engineers, C, 80 (In Korean with English abstract).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM), 2012, Korea precipitation frequency data improvement and supplementation, 55-94 (In Korean).
- Ng, C. W. and Shi, Q., 1998, A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, Computer and Geotechnics, 22(1), 1-28.
- Park, S. J., Choi, J. Y., Jeong, D. H., Yu, Y. I. and Jeong, K. H., 1995, Transient, Saturated Groundwater Flow Analysis by the Finite Element Method, Korean Society of Civil Engineers, 353-356 (In Korean with English abstract).
- Richards, L. A., 1931, Capillary Conduction of Liquids through Porous Mediums, Physics, New York, 1, 318-333.
- Shin, S. O., 1990, Infiltration analysis in slope, Korea Land Corporation, 3(3), 64-71 (In Korean).
- Spierenburg, S. E. J. and van Esch, J. M., 1995, Slope stability during infiltration, Proceedings of the First Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris, 309-314.

원고접수일 : 2012년 9월 7일

수정본채택 : 2012년 9월 27일(1차)

2012년 11월 6일(2차)

게재확정일 : 2012년 11월 12일

이정엽

한국건설기술연구원 GEO-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0526
Fax: 031-910-0561
E-mail : yeupi@kict.re.kr

이종현

한국건설기술연구원 GEO-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0227
Fax: 031-910-0561
E-mail : jhrhee@kict.re.kr

옥영석

한국건설기술연구원 GEO-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0101
Fax: 031-910-0561
E-mail : beauguy@kict.re.kr

구호본

한국건설기술연구원 GEO-인프라연구실
411-712, 경기 고양시 일산서구 고양대로 283
Tel: 031-910-0217
Fax: 031-910-0561
E-mail : hbkoo@kict.re.kr