

## 강우침투에 따른 화강풍화토 사면의 얇은파괴 특성

김선학\*

<sup>1</sup>조선대학교 토목공학과

### Shallow Failure Characteristics of Weathered Granite Soil Slope in accordance with the Rainfall Infiltration

Sun-Hak Kim<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Chosun University

**요 약** 본 연구는 화강풍화토로 구성된 절토사면에서 얇은파괴의 특성을 규명하고자 우리나라의 강우특성에 따른 한계투수계수를 산정하고, 국내에 분포하는 화강풍화토의 대표적 물성을 기준으로 절토사면의 파괴면까지의 수평거리, 사면의 경사각, 사면높이 그리고 강우로 인한 포화깊이 등에 따른 안정해석을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 한계 투수계수를 분석한 결과 국내의 지역별 강우특성을 고려한 최대 한계투수계수가  $7.16 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 의 값으로 나타났다. 최대 한계투수계수 이하의 값을 갖는 국내의 화강풍화토로 구성된 절토사면에서 한계강우강도 이하의 강우가 최소 강우지속시간보다 오랫동안 지속될 때에는 포화깊이에 따른 얇은파괴의 검토가 고려되어야 할 것으로 판단되었다. 또한, 가상파괴면이 발생하는 수평거리, 포화깊이, 강도정수 변화에 따른 사면안전율의 변화관계를 통해 절토사면의 얇은파괴 특성을 파악 할 수 있었다.

**Abstract** In order to examine the characteristic of shallow failure in cut slopes composed of weathered granite soil, this study calculated critical permeability coefficient according to rainfall characteristic in Korea, performed stability analysis according to the representative physical properties of weathered granite soil distributed in Korea such as horizontal distance to the failure surface of cut slope, slope inclination, slope height, and the depth of wetting by rainfall, and analyzed the results. In the results of analyzing critical permeability coefficient, when the local rainfall characteristic was considered, the maximum critical permeability coefficient was  $7.16 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ . We judged that shallow failure according to wetting depth should be considered when rainfall below the critical rainfall intensity lasts longer than the minimum rainfall duration in cut slopes composed of weathered granite soil, which had a critical permeability coefficient lower than the maximum critical permeability coefficient. Furthermore, using simulated failure surface, this study could understand the characteristic of shallow failure in cut slopes based on the change in slope safety factor according to horizontal distance, wetting depth, and strength parameter.

**Key Words** : Shallow failure, Critical permeability coefficient, Weathered granite soil, Rainfall infiltration

### 1. 서론

최근 국내에서는 신속한 물류운송과 체계적인 도로망 구축을 위해 기존도로 확장 및 도로 신설로 형성된 절토 사면에 강우침투로 인한 사면의 포화와 지하수위의 영향으로 사면의 얇은파괴가 상당히 빈번하게 발생되고 있다 [1]. 특히, 대절토사면의 경우는 얇은파괴라도 상당히 큰

피해를 줄 수 있다. 그런데 이러한 얇은파괴에 대한 안정 검토는 기존의 사면안정해석에서는 간과하는 경우가 많았다. 일반적으로 강우침투시 사면의 안정해석방법은 침윤선의 하강을 기준으로 하는 방법, 지하수위 상승으로 인한 방법과 침윤선의 하강과 지하수위 상승을 모두 고려한 안정해석 해석법을 들 수 있다[2]. 지하수위 상승에 의한 사면파괴는 사면 내에 기존 지하수위가 높은 경우

\*교신저자 : 김선학(sun93k@naver.com)

접수일 09년 09월 05일

수정일 09년 09월 29일

재제확정일 09년 10월 14일

와 지하수위가 낮게 분포할 때 강우 등이 과다하게 유입되어 지하수위 상승으로 인한 사면파괴가 발생한다. 강우 강도가 크거나, 지하수위면이 낮은 경우 절토사면에서 얕은파괴는 지하수위 상승에 의한 영향보다는 강우침투로 발생하는 포화깊이의 증가에 따른 전단강도의 감소가 파괴의 주요인이라 할 수 있다[3,4].

본 연구에서는 포화깊이에 따른 절토사면의 얕은파괴에 대한 안정성검토를 실시하여 얕은파괴에 지대한 영향을 주는 포화깊이를 결정하였다. 결정된 포화깊이에 따라 지역(서울, 대전, 부산, 광주, 목포, 여수)별 강우분포특성을 고려하여 한계강우강도와 지속시간을 얻고, 이를 바탕으로 한계투수계수를 산정하였다. 산정된 한계투수계수의 특성을 기존연구결과와 비교·분석하여 화강풍화토로 구성된 절토사면에 대해서 침투깊이에 따른 얕은파괴의 검토가 필요함을 확인하였다. 또한, 강우침투시 사면수평 파괴범위, 사면경사, 사면높이, 강도정수, 포화깊이 등을 변화시키면서 안정해석을 실시하고 절토사면의 얕은파괴에 대한 안전율의 변화관계를 분석하여 화강풍화토로 구성된 국내 절토사면의 강우침투를 고려한 얕은파괴의 특성을 규명하였다.

## 2. 강우침투와 사면안정해석

### 2.1 한계강우강도와 한계투수계수

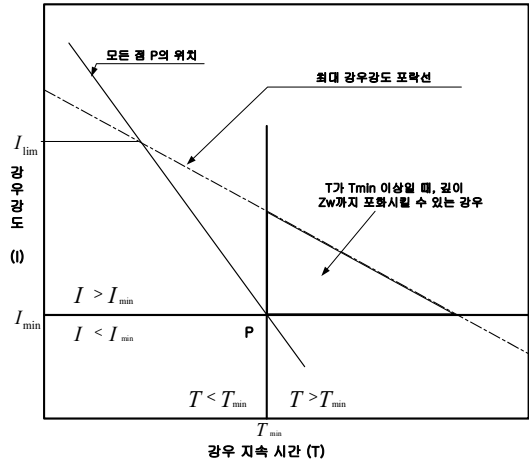
Pradel과 Radd(1993)는 사면의 안정성검토를 위하여 강우강도, 강우지속시간, 강우재현기간을 고려할 수 있는 방법을 Green-Ampt 모델을 이용하여 제안하였다[7]. 이 방법은 사면에서 습윤전선의 깊이( $z_w$ )까지 포화되기 위해서는 다음과 같은 두 가지 조건이 만족되어야 한다. 첫 번째 조건은 강우가 지반의 침투능을 초과해야하고, 둘째는 강우지속시간이 습윤전선의 깊이까지 포화될 수 있도록 충분히 오래 동안 지속되어야 한다. 이 때, Green-Ampt 모델로부터 지반을  $z_w$ 까지 포화시키기 위해 필요한 시간은 (1)식과 같음을 알 수 있다. 이러한 조건들은  $T \geq T_w$ 와  $I \geq f$ 를 요구한다.  $z_w$ 까지 포화되기 위해 (2)와 (3)식의 최소조건을 만족해야한다.

$$T_w = \frac{\Delta\theta_i}{k_s} [z_w - \psi_f \ln \left( \frac{\psi_f + z_w}{\psi_f} \right)] \quad (1)$$

$$T_{min} = T_w \quad (2)$$

$$I_{min} = f = \frac{\Delta\theta_i}{T_{min}} \left[ z_w - \psi_f \ln \left( \frac{\psi_f + z_w}{\psi_f} \right) \right] \left( \frac{z_w + \psi_f}{z_w} \right) \quad (3)$$

여기서  $T_w$ 는 지반을 포화시키기 위해 필요한 강우지속시간(hr),  $z_w$ 는 습윤전선의 깊이(cm),  $\psi_f$ 는 습윤전선의 흡인력을 나타내며  $\Delta\theta_i$ 는 포화 전후의 체적함수비차로 강우 전·후 사이의 변화량( $\theta_s - \theta_i$ )을 나타낸다. 또한,  $T_{min}$ 은 일정깊이까지 포화되기 위한 최소의 강우지속시간이며,  $I_{min}$ 은 최소의 강우지속시간동안에 일정깊이까지 포화시킬 수 있는 강우강도를 의미한다.



[그림 1] 포화조건인 강우강도와 지속시간[7]

강우강도와 지속시간을 산정할 때 유출과 증발산을 고려하지 않았으므로,  $z_w$ 까지 포화시키는데  $I_{min}$ 보다 더 큰 강우강도가 요구될 것이다.  $z_w$ 까지 포화시키기 위한 최소의 강우지속시간과 그 시점의 강우강도( $T_{min}$ ,  $I_{min}$ )의 좌표를 P점이라고 가정하면 그림 1에서 포화되기 위한 조건들은 최대강우강도 포락선 위에 위치할 것이다. 그 위치는 강우가 없더라도  $z_w$ 까지 포화 될 수 있을 것이다. (1)식의 조건의 점과 최대강우강도 포락선은 그림 1에서와 같이 만나는 점에서 한계강우강도( $I_{lim}$ )와 한계투수계수( $k_{lim}$ )를 정할 수 있다. 즉, 한계투수계수는 최대 투수계수로 (4)식과 같이 나타낼 수 있으며  $z_w$ 까지 포화되기 위한 최소조건을 나타낸다.

$$k_{lim} = I_{lim} \left( \frac{z_w}{z_w + \psi_f} \right) = \frac{\Delta\theta_i}{T_{min}} \left[ z_w - \psi_f \ln \left( \frac{\psi_f + z_w}{\psi_f} \right) \right] \quad (4)$$

여기서  $k_{lim}$ 는  $z_w$ 까지 포화할 수 있는 최대투수계수이다. 그림 1에서와 같이 최대강우강도선과 포화하기 위한 최소 조건의 선이 만나는 위치는 사면 토체에서  $z_w$ 까지

포화시킬 수 있는 최소강우시간을 정한다.

### 2.2 확률강우강도

본 연구에서는 허준행(1999) 등이 GEV 확률분포모형으로 산정한 확률강우강도 (5)식을 활용하여, 국내 주요 지역(서울, 대전, 부산)과 광주전남지역(광주, 목포, 여수)을 대상지역으로 선정하고 강우빈도 2년, 10년, 25년, 50년에 대해 각 지역의 한계강우강도를 추정하는데 활용하였다[5].

$$I(t, T) = \frac{a + b \ln \frac{T}{t^{0.2}}}{c + d \ln \frac{\sqrt{T}}{t} + \sqrt{t}} \quad (5)$$

여기서 a, b, c, d 는 회귀계수로서 표 1에 나타내었다. T의 단위는 ‘년’이고 t의 단위는 ‘분’ 이다.

【표 1】 지역별 확률강우강도식 회귀계수[5]

지역 \ 계 수	a	b	c	d
속초	482.5	175.9	4.286	-2.281
춘천	332.7	63.1	0.485	-0.501
강릉	291.1	121.0	3.193	0.461
서울	396.4	174.2	1.681	-0.167
인천	300.4	143.7	2.303	0.789
원주	408.5	141.1	0.321	-0.603
수원	710.9	141.1	4.371	-0.763
서산	441.5	85.1	1.286	-0.821
청주	344.4	91.1	1.582	0.044
대전	397.1	84.2	1.396	0.124
추풍령	229.7	59.4	-0.122	0.013
포항	248.1	67.9	0.500	-0.145
군산	305.6	85.6	1.469	0.378
대구	203.9	117.6	1.070	0.511
전주	226.6	116.0	0.863	0.828
울산	332.7	125.0	2.266	0.517
광주	363.0	60.1	0.428	-0.150
부산	318.5	143.9	2.146	0.655
충무	395.8	120.5	2.448	-0.198
목포	328.0	43.2	0.531	-0.134
여수	346.6	118.2	1.865	0.138
완도	298.4	243.6	9.402	2.890

### 2.3 사면안정해석

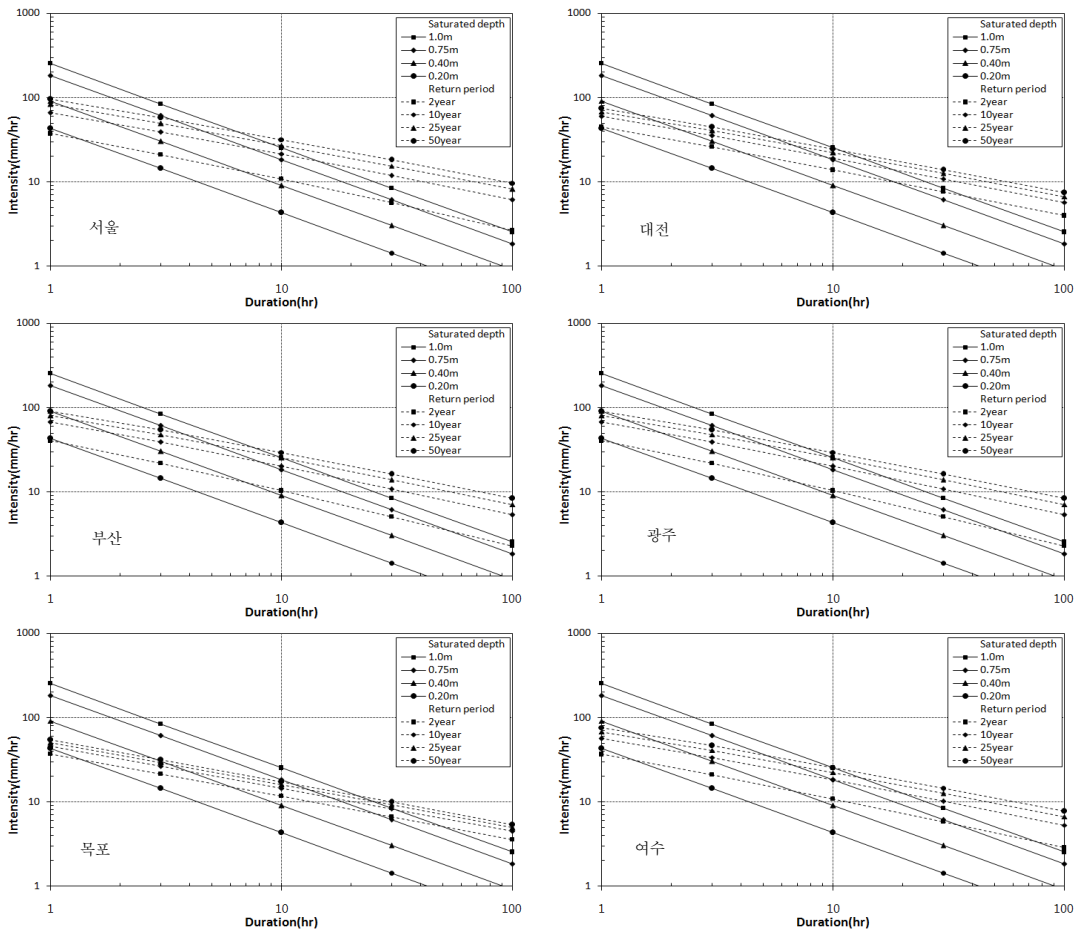
사면안정해석은 일반적으로 활동면을 여러 가지로 가정하여 활동체에 작용하는 힘의 평형을 생각하고 안전율을 계산하며 안전율 중 최소치를 택하여 그 사면의 안전율로 정한다. 일반적으로 굴착이나 성토작업이 많은 도로

사면, 제방, 댐, 해안방조제 등은 종단길이가 길어 가장 경제적이고 시공성이 뛰어난 단면설계가 이루어져야 한다. 적절한 설계를 위해서는 현장의 사면안정을 정확히 해석할 수 있는 Computer Program과 토층의 시험자료가 요구된다. 본 연구에서는 절토사면의 안정해석을 위한 한계평형해석은 SLOPE/W를 사용하였다. 다양한 이론으로 토사암반으로 구성된 자연사면, 절토사면, 성토사면 등의 안전율을 계산하는데 적용할 수 있으며 SEEP/W 해석 결과를 활용하여 한계평형해석을 할 수 있는 편리성이 있다. 이 프로그램으로 해석할 수 있는 해석방법으로는 Fellenius/Ordinary, Bishop의 간편법, Janbu의 간편법, Spencer, Morgenstern-Price, Crops of Engineers, Lowe-Karafiath, GLE(General Limit Equilibrium) 등이 있다. 또한 절편간의 힘을 Morgenstern-Price법이나 GLE법으로 정의할 경우에는 Sine함수, 불완전 Sin함수, 사다리꼴 또는 유한요소해석 결과의 형태로 절편간 힘을 정의할 수 있다[8]. 본 연구에서는 이들 해석방법 중에서 Fellenius/Ordinary법, Bishop의 간편법, Janbu의 해석방법을 이용하여 사면안정해석을 실시하였다.

## 3. 지역별 한계강우강도와 한계투수계수

### 3.1 한계강우강도와 지속시간

본 연구에서 (3)식에 의한 최소강우강도를 적용할 때 적용된 포화깊이는 4.4의 해석결과를 바탕으로 사면높이에 따라 안전율이 1.0이하로 떨어지는 1.00m, 0.75m, 0.40m, 0.20m를 적용하였다. 또한, 국내에 분포하는 화강 풍화토의 일반적인 함수특성곡선을 고려하여 얻어진 체적함수비 변화와 모관흡인력의 값을 각각 40%와 80 cm를 적용하였다[6]. 국내 대표지역으로 서울, 대전, 부산을 비롯하여 광주, 목포, 여수지역을 선정하고 허준행(1999) 등이 제안한 확률강우강도 (5)식을 적용하였다. 또한, 강우재현기간을 2년, 10년, 25년, 50년에 대해 해석을 실시하고 각 포화깊이를 포화시키기 위한 최소강우지속시간과 그 시점의 강우강도인 한계강우강도를 산정하여 그림 2와 표 2에 나타내었다. 강우재현기간이 길수록, 포화깊이가 낮을수록 한계강우도가 커지는 것을 알 수 있다. 한계강우강도가 크다는 것은 지반을 포화시킬 수 있는 강우강도의 범위가 넓다는 것을 나타내며 그 최대강우강도의 값이 한계강우강도를 의미한다. 또한 한계강우강도가 커질수록 지반을 포화시킬 수 있는 강우지속시간은 짧아진다. 동일조건에서 한계강우강도의 평균한 크기를 비교해 보면 서울지역이 가장 큰 한계강우강도를 보였으며



[그림 2] 강우재현기간과 포화깊이에 따른 최소 및 최대 강우강도

다음으로 부산, 대전, 여수, 광주, 목포지역 순으로 나타났다. 특히, 강우재현기간 2년인 경우 한계강우강도는 대전지역이 가장 큰 한계강우강도를 보였으며 다음으로 광주, 목포, 여수, 서울지역 순으로 나타났으며 부산지역이 가장 작은 한계강우강도를 보였다. 이처럼 전체적인 경향과 차이를 보이는 것은 허준행(1999) 등이 강우측정 자료를 이용한 확률강우강도 식을 추정할 때 대전지역에 집중된 이상강우의 자료가 반영되었기 때문인 것으로 여겨진다.

### 3.2 한계투수계수

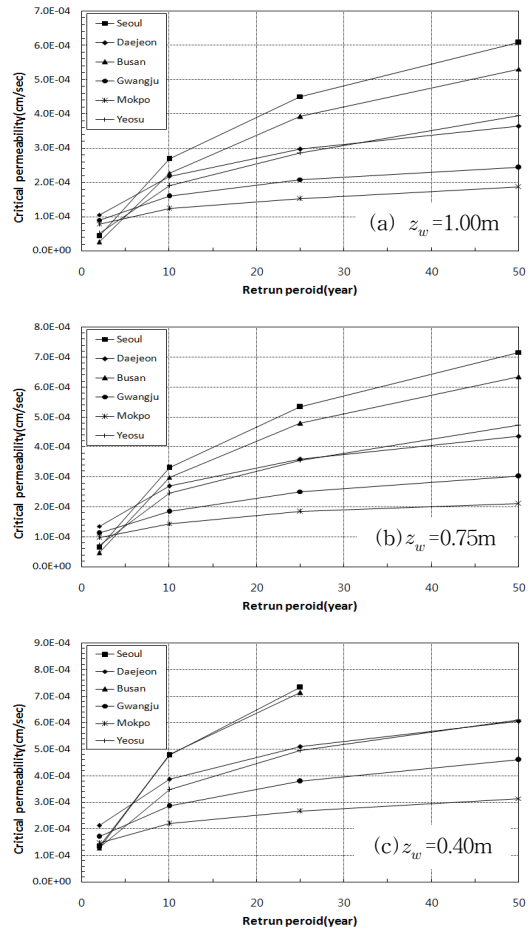
Pradel 등은 그림 1에서와 같이 최대강우강도와 최소강도가 교차하는 점 P를 한계강우강도로 정의하고 이에 상응하는 투수계수를 한계투수계수로 정의했다. 표 2의 한계강우강도와 강우지속시간의 결과를 (4)식에 적용하

여 한계투수계수를 산정하였다. 대표적으로 각 지역의 강우특성을 고려한 포화깊이 1.0m일 때 한계투수계수의 변화관계를 나타낸 그림 3을 살펴보면, 강우재현기간이 2년인 경우 한계투수계수의 크기는 대전지역이 최대로 나타났으며 다음으로 광주, 목포, 여수, 서울, 부산지역 순으로 나타나고 있다. 이 외의 강우재현기간에서의 평균한계투수계수는 서울지역이 최대로 나타났으며 다음으로 부산, 대전, 여수, 광주, 목포지역 순으로 나타났다. 또한, 포화깊이 0.75m와 0.40m에서도 유사한 경향을 보였으나 0.20m에서는 강우재현기간 2년 외의 경우는 한계강우강도와 강우지속시간을 산정할 수 없어 한계투수계수를 얻지 못하였다. 한계투수계수는 6곳의 대상지역 중에서 서울지역이 최대로 나타났으며 다음으로 부산, 대전, 여수, 광주, 목포지역 순으로 나타났다.

[표 2] 한계강우강도( $I_{lim}$ )와 강우지속시간( $T_{min}$ )

포화깊이 ( $z_w$ , m)	$I_{lim}$ (mm/hr)				$T_{min}$ (hr)				
	2년	10년	25년	50년	2년	10년	25년	50년	
1.00	서울	2.9	17.4	29.2	39.4	89.5	14.7	8.7	6.5
	대전	6.8	14.1	19.2	23.6	37.1	18.0	13.2	10.7
	부산	1.7	14.7	25.4	34.4	152.2	17.4	10.0	7.4
	광주	5.8	10.3	13.5	15.8	45.0	25.0	19.0	16.5
	목포	5.1	8.0	9.9	12.1	51.0	32.5	26.2	20.3
	여수	3.3	12.3	18.5	25.6	79.0	21.0	14.5	10.0
0.75	서울	4.8	24.7	39.7	53.3	38.9	7.5	4.7	3.5
	대전	10.0	20.0	26.7	32.4	18.3	9.2	6.9	5.7
	부산	3.4	22.3	35.7	47.2	53.9	8.3	5.2	4.0
	광주	8.4	13.8	18.7	22.5	22.1	14.3	10.0	8.2
	목포	7.2	10.7	13.8	15.7	26.0	18.0	14.0	12.0
	여수	5.2	18.2	26.5	35.1	35.8	10.0	7.2	5.3
0.40	서울	14.5	51.5	79.3	-	6.0	1.7	1.1	-
	대전	23.0	41.7	54.9	65.3	3.8	2.1	1.6	1.3
	부산	13.8	51.8	77.1	-	6.3	1.7	1.3	-
	광주	18.5	30.9	41.1	49.7	4.8	2.9	2.1	1.7
	목포	16.3	24.5	29.8	35.1	5.2	3.5	2.9	2.4
	여수	14.0	37.6	53.5	65.9	6.3	2.4	1.7	1.4
0.20	서울	31.5	-	-	-	1.4	-	-	-
	대전	44.0	-	-	-	1.0	-	-	-
	부산	38.4	-	-	-	1.1	-	-	-
	광주	37.2	-	-	-	1.2	-	-	-
	목포	51.2	-	-	-	0.5	-	-	-
	여수	29.9	-	-	-	1.5	-	-	-

본 연구 대상지역에서 강우재현기간이 50년일 때 포화깊이의 변화 1.00m, 0.75m, 0.40m에 대해 한계투수계수의 최대치가 각각  $6.08 \times 10^{-4}$  cm/sec,  $7.16 \times 10^{-4}$  cm/sec,  $6.10 \times 10^{-4}$  cm/sec로 나타났다. Pradel 등[7]의 연구에서는 포화깊이가 1.22m일 때 한계투수계수가 최대  $1.10 \times 10^{-4}$  cm/sec로 나타났는데, 국내의 대표적 한계투수계수는 그들의 연구지역에 비해 한계투수계수가 5.5~6.5배의 크기로 나타났다. 이 범위의 투수계수에 해당하는 토질은 통일분류법에 의하면 SM, SC, ML, MH, CL, CH가 포함된다. 따라서 국내의 지역별 강우특성을 고려할 때 투수계수가  $7.16 \times 10^{-4}$  cm/sec 이하의 값을 갖는 화강풍화토로 구성된 절토사면에서는 포화깊이에 따른 얇은파괴의 검토가 필요할 것으로 여겨진다. 또한, 최대 한계투수계수에 대응하는 한계강우강도는 25.8mm/hr, 최소 강우지속시간은 7.2시간으로 나타났다. 그러므로 최대 한계투수계수 이하의 값을 갖는 화강풍화토로 구성된 절토사면에서 한계강우강도 이하의 강우가 최소 강우지속시간보다 오랫동안 지속될 때에는 포화깊이에 따른 얇은파괴의 검토가 중요하게 고려되어야 할 것으로 여겨진다.



[그림 3] 지역별 재현기간에 따른 한계투수계수

#### 4. 얇은파괴 사면안정해석 및 결과

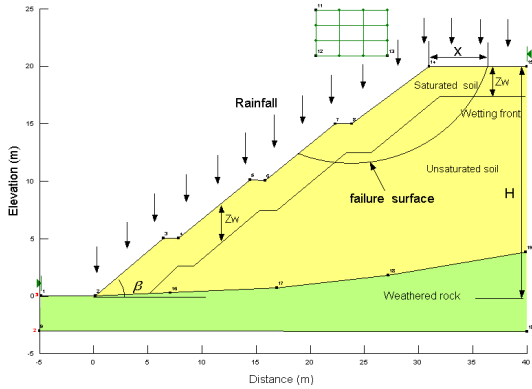
##### 4.1 화강풍화토의 지반정수 및 해석단면

본 연구에서는 국내의 절토사면에 일반적으로 분포하고 있는 화강풍화토의 물리·역학적 특성결과를 바탕으로 대표적 성질을 나타내는 화강풍화토(SM)의 강도정수 및 제반 값을 결정하여 해석에 적용하였다.

[표 3] 화강풍화토 물리·역학적 특성값

현장함수비 (%)	비중	액성 한계 (%)	소성 한계 (%)	소성 지수 (%)	No. 200 통과율 (%)	통일분류기호 (USC S)	습윤 단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)
18.0	2.70	23.1	17.3	5.8	14.3	SM	1.80	0.50	25.0

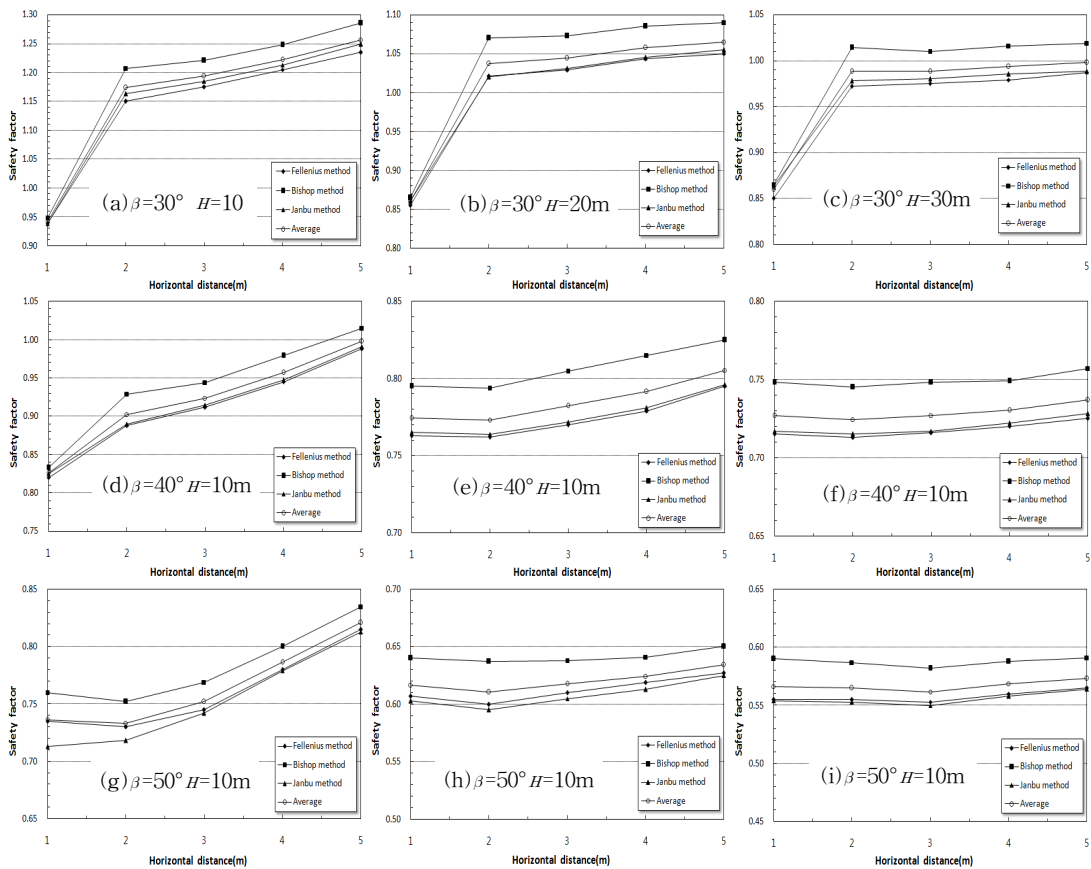
강우침투를 고려한 경우의 사면내 얇은파괴에 대한 특성을 알아보기 위해서 그림 4와 같이 지표에 강우가 지속되어 포화깊이가 강우강도 및 강우지속시간에 관계없이 일정하게 증가한다고 가정하였다.



[그림 4] 강우침투를 고려한 얇은파괴의 해석단면

#### 4.2 수평파괴범위 변화에 따른 안정해석

그림 4와 같이 수평파괴거리( $x$ )를 1~5m까지 증가시키면서 해석을 실시하여 안전율을 산정하고, 이를 바탕으로 강우침투시 얇은파괴에 대한 특성을 검토하였다. 전체적인 안전율의 분포형태는 2가지 경향을 보이는 것으로 나타났다. 첫 번째로 수평파괴거리 2m 내외까지 안전율이 증가한 후 곡선의 기울기가 감소하는 경우로 사면 경사각이 대체로  $30^\circ$  이하에서 나타났다. 두 번째로 수평파괴거리 2m 내외까지 안전율이 미세하게 감소하거나 일정하게 나타나다가 안전율이 증가하는 경우로 사면경사각이 대체로  $40^\circ$  이상에서 나타났다. 이는 안전율의 크기가 전반적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다. 이 2가지 유형의 공통점은 수평파괴거리 2m 내외에서 변곡점이 발생했다는 것이다. 따라서, 강우침투시 수평파괴거리 2m 내외에서 안전율이 증가 또는 일정하게 나타나는 변곡점이 나타나므로 이 수평거리 내외에서의 안정해석에 주의가 요망된다고 할 수 있다.

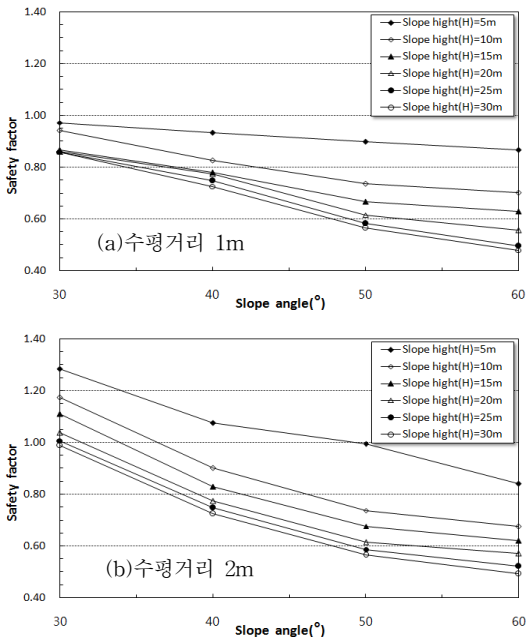


[그림 5] 수평거리에 따른 안전율의 변화

### 4.3 사면경사와 높이 변화에 따른 안정해석

강우시 높이가 큰 사면의 얕은파괴 특징을 알아보기 위해 사면경사와 높이를 변화시키면서 안정해석을 실시하였다. 4.2장에서 강우침투를 고려한 경우 얕은파괴가 수평거리 2m 내외에서와 포화깊이가 1m 내외에서 변곡점이 나타나므로 포화깊이는 1m로 적용하여 수평파괴거리가 1m일 때와 2m일 때로 구분하여 해석을 실시하였다.

사면높이가 5~10m 구간에서 사면의 높이에 따른 안전율의 변화량이 다른 구간의 안전율 변화량 보다 현저하게 나타났다. 수평파괴거리가 1m일 때 이 구간의 안전율은 평균 0.116의 감소를 보이고 있으며, 수평파괴거리가 2m인 경우 이 구간의 안전율은 평균 0.176의 감소를 보이고 있다. 수평파괴거리가 2m인 경우에는 1m인 경우보다 이 구간의 안전율 감소폭이 약간 크지만 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 또한, 사면경사각이 커지면서 그래프의 기울기가 더욱 감소하여 안전율의 감소율이 둔화되는 경향을 나타내고 있다(그림 6).



[그림 6] 사면경사각에 따른 안전율의 변화(평균)

수평파괴거리가 1m인 경우 사면높이에 관계없이 사면의 안전율이 1.0인 사면의 한계경사각은 30° 이하에서 나타나 30° 이상의 사면경사각에서는 안전율 1.0 이하로 나타남을 알 수 있다. 수평파괴거리가 2m인 경우는 사면높이가 5m에서 10m로 변하는 구간에서는 사면의 안전율이 1.0인 사면의 한계경사각은 각각 48.7° 및 36.5°로 나타나

고 있다. 또한, 사면높이가 15m에서 20m로 변하는 구간에서는 각각 33.8° 및 31.5°로 나타나고 있으며, 다음으로 사면높이가 25m와 30m인 경우 한계경사각은 각각 30.5° 및 29.8°로 나타났다(표 4). 수평파괴거리가 2m인 경우에서 사면의 높이가 높을수록 한계경사각이 작게 나타났는데, 이는 사면의 높이가 낮을수록 안전율이 크게 나타남을 의미한다.

[표 4] 안전율이 1.0일 때의 한계경사각

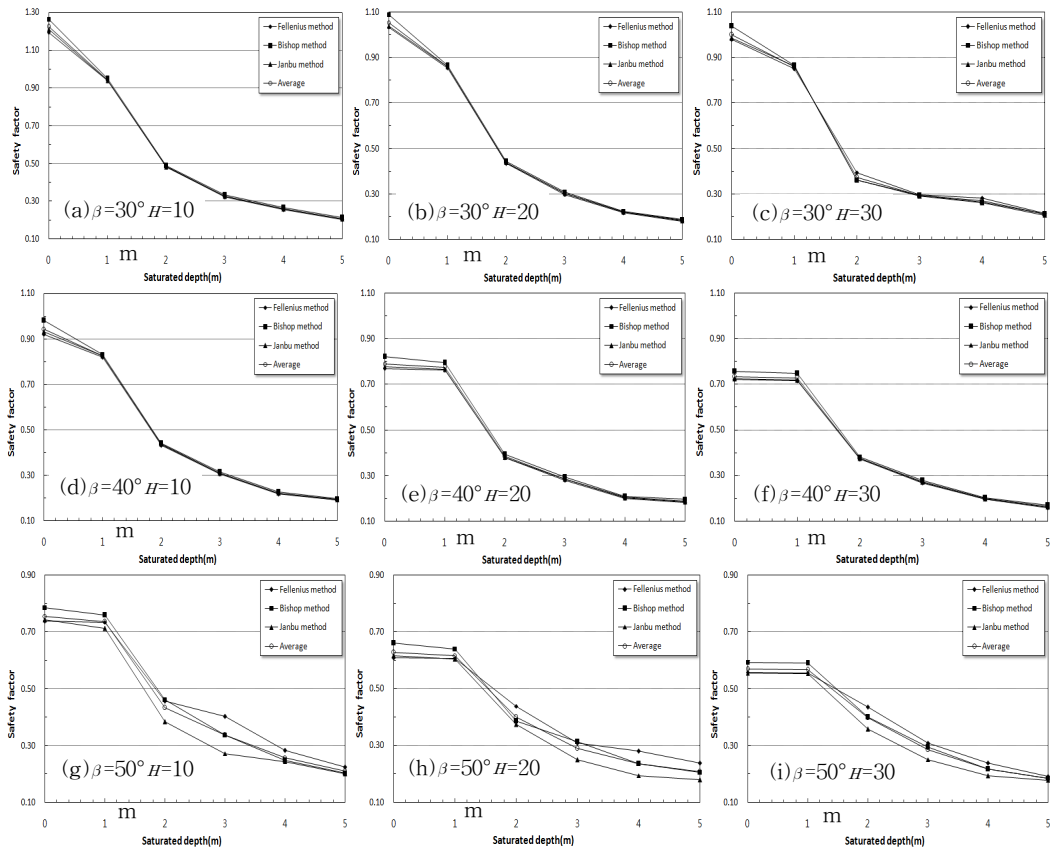
수평거리 (x, m)	사면높이 (H, m)	한계경사각(°)			평균
		Fellenius 방법	Bishop 방법	Janbu방 법	
2	5	47.5	50.0	48.5	48.7
	10	36.0	37.5	36.0	36.5
	15	33.5	34.0	34.0	33.8
	20	31.0	32.5	31.0	31.5
	25	30.0	31.5	30.0	30.5
	30	29.5	30.5	29.5	29.8

### 4.4 포화깊이 변화에 따른 안정해석

포화깊이가 강우강도와 강우지속시간에 관계없이 지중으로 일정하게 증가한다고 가정하여 포화깊이에 따른 안전율을 분석하였다. 수평파괴거리는 1m로 고정시키고 포화깊이를 0~5m까지 변화시키면서 사면경사와 사면높이에 대한 안전율의 변화를 분석하였다. 이를 바탕으로 강우침투를 고려한 포화깊이에 따른 얕은파괴에 대한 특성을 검토하였다. 사면의 경사각 30°에서 사면높이가 10m, 20m, 30m로 변할 때 안전율이 1이하던 지점은 포화깊이가 각각 0.75m, 0.40m, 0.20m 이상일 때로 나타났다. 그러나 사면경사각 30°이외의 경우는 사면의 경사각과 사면높이가 증가함에 따라 안전율은 모두 1.0이하로 나타나고 있으며 포화깊이가 1m에서 급격하게 감소하는 경향을 보이고 있다(그림 7). 이는 포화깊이가 증가함에 따라 내부 전단강도의 감소가 급격히 진행되고 있기 때문인 것으로 여겨진다. 따라서 강우침투를 고려한 사면의 얕은파괴 검토에서 포화깊이가 1m 내외일 때 안정해석에 주의가 요망된다고 할 수 있다.

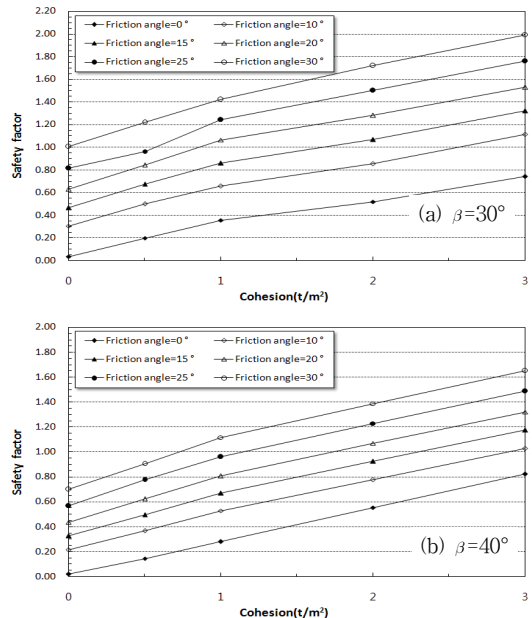
### 4.5 강도정수 변화에 따른 안정해석

강우침투시 강도정수(C, Ø)에 따른 안전율의 변화특성을 살펴보고자 다음의 조건으로 안정해석을 실시하였다. 수평파괴거리 1m, 사면높이 20m, 포화깊이 1m의 조건에서 사면경사각(30°, 40°, 50°)별로 강도정수를 각각 변화시키면서 안정해석을 실시하여 사면안전율의 변화를 분석하였다. 사면경사각이 30°에서 내부마찰각이 10° 증

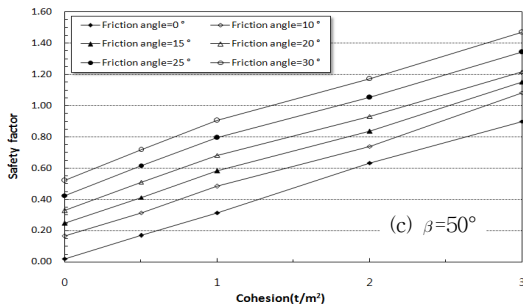


[그림 7] 포화깊이에 따른 안전율의 변화

가함에 따라 안전율의 증가율이 평균 40.8%, 경사각이 40°에서 평균 35.7%, 경사각이 50°에서 평균 27.7% 정도의 증가를 보이고 있다. 이처럼 경사각이 증가함에 따라 안전율의 증가율이 작아지고 있음을 알 수 있으며 이와 같은 경향은 경사각이 클수록 안전율이 작아지기 때문인 것으로 여겨진다. 이와 반면 사면경사각이 30°에서 점착력이 1t/m<sup>2</sup> 증가함에 안전율의 증가율이 평균 28.5%, 경사각이 40°에서 평균 34.7%, 경사각이 50°에서 평균 40.3% 정도의 증가를 보이고 있다(그림 8). 이처럼 경사각이 증가함에 따라 안전율의 증가율이 커지고 있음을 알 수 있다. 위의 결과에서 강우침투를 고려한 안정해석에서는 내부마찰각의 증가보다 점착력의 증가에 따른 안전율의 증가율이 더 크음을 알 수 있었다.







[그림 8] 강도정수 변화에 따른 안전율의 변화

### 5. 결론

절토사면에서 얇은파괴의 특성을 규명하고자 우리나라의 강우특성에 따른 한계투수계수를 산정하고 화강풍화토로 구성된 균질한 절토사면에서 가상 파괴면까지의 수평거리, 사면의 경사각, 사면높이 그리고 강우로 인한 포화깊이 등에 따른 해석을 수행하고 그 결과를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, 우리나라의 지역별 강우특성을 고려한 한계투수계수는 Pradel과 Radd의 적용대상지역보다 5.5 ~ 6.5배 정도 크게 산정되었으며 이는 화강풍화토로 구성된 절토사면의 일반적인 토질특성을 고려할 때 강우에 의한 침투수가 포화깊이에 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다.

둘째, 국내의 지역별 강우특성을 고려한 최대 한계투수계수가  $7.16 \times 10^{-4}$  cm/sec의 값으로 나타났으며 이에 대응하는 한계강우강도는 25.8mm/hr, 최소 강우지속시간은 7.2시간으로 나타났다. 따라서, 최대 한계투수계수 이하의 값을 갖는 화강풍화토로 구성된 절토사면에서 한계강우강도 이하의 강우가 최소 강우지속시간보다 오랫동안 지속될 때에는 포화깊이에 따른 얇은파괴의 검토가 중요하게 고려되어야 할 것으로 여겨진다.

셋째, 높이 10m 이상의 화강풍화토 절토사면에서 가상파괴면이 발생하는 수평거리를 변화시키면서 안정해석을 실시한 결과 강우침투를 고려한 경우 모두 수평파괴범위 2m 내외에서 안전율이 증가 또는 일정하게 변화하는 변곡점이 나타났다. 따라서 화강풍화토 절토사면의 얇은파괴에 대한 안정해석시 수평파괴범위 2m 내외에서 안정검토를 중요하게 고려해야 할 것으로 여겨진다.

넷째, 강우침투로 인한 포화깊이 변화에 따른 해석을 실시한 결과 포화깊이 1m 내외에서 안전율이 급격히 감소하는 경향을 보였다. 따라서 강우침투를 고려한 절토사면의 얇은파괴에 대한 안정해석시 포화깊이가 1m 내외에서의 안정검토를 중요하게 고려해야 할 것으로 여겨진다.

다섯째, 강도정수 변화에 따른 얇은파괴의 해석결과 동일한 사면경사각에서 점착력과 내부마찰각 변화에 따른 안전율의 증가는 선형적인 관계를 보였으며, 경사각이 커질수록 내부마찰각의 증가에 따른 안전율의 증가율이 작아지고 점착력의 증가에 따른 안전율의 증가율은 커지는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

- [1] 행정자치부 국립방재연구소, “사면붕괴 방지대책 제도화를 위한 기본 방안 연구”, 동인문화사, 2000.
- [2] 한중근, “역지말뚝을 이용한 사면의 안정해석 및 설계”, 박사학위논문, 중앙대학교, 1997.
- [3] 심태섭·김선학·기완서·주승완, “강우에 따른 화강암질 풍화토 사면의 전단강도 특성에 관한 연구”, 대한지질공학회지, 제14권, 제4호, pp. 349-360, 2004.
- [4] 이광모·심태섭·김선학·최용준, “강우강도에 따른 무한사면의 간극수압 변화의 특성”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, pp. 4442-4445, 2005.
- [5] 허준행·김경덕·한정훈, “지속기간별 강우자료의 적정분포형 선정을 통한 확률강우강도식의 유도”, 한국수자원학회논문집, 제32권, 제3호, pp. 247-254, 1999.
- [6] 김재홍·박성완·정상삼, “강우로 인한 불포화 풍화토의 침투깊이 해석”, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, pp. 63-66, 2002.
- [7] Pradel, D. and Raad, G., "Effect of permeability on surficial stability of homogeneous slopes", Journal of geotechnical engineering, Vol. 119, No. 2, pp. 315-332, 1993.
- [8] SLOPE/W User's Guide, GEO-SLOPE International Ltd, 2002.

김 선 학(Sun-Hak Kim)

[정회원]



- 1999년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 조선대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 조선대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2007년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 겸임교수

<관심분야>  
사면안정, 연약지반, CM