

강우에 의한 철도토공사면 방재를 위한 한계우량식 산출 및 적용(I)

A proposal and application of critical rainfall curve for disaster prevention of railway slopes due to rainfall(I)

김현기* 박영곤** 신민호**

Kim, Hyun-ki Park, Young-kon Shin, Min-ho

Abstract

In Korea, collapse of railway slopes is frequently occurred due to typhoon or heavy rainfall during rainy season and has been made personal and social damage greatly. In order to evaluate the stability of railway slopes under rainfall, explanatory variables and subordinate variables were selected for multivariate analysis. The sites which failure had occurred due to rainfall were investigated and critical rainfall was defined by the case that had high value of correlation factor after multivariate analyses for 121 cases had been executed. The maximum hourly rainfall during 24 hours before failure caused the collapse of railway embankment and the 0.3 square value of maximum hourly rainfall during 24 hours before failure caused the collapse of railway cut-slope. From the application to collapse examples, it is judged that critical rainfall curve will be used to estimate the stability of slopes.

keywords : *railway slope stability, rainfall, multivariate analysis, critical rainfall curve*

1. 서론

일반적으로 사면의 붕괴위험도를 평가하는 방법으로서 토질역학적인 사면의 안정해석이 이루어지고 있고, 이를 위해서 토질시험이나 현장계측에 의해 토질정수를 구하고 있지만 특정의 사면에 제한될 수밖에 없다. 그러므로 철도 성토사면 전체에 걸친 안정계산은 사실상 불가능하다.

본 연구에서는 거시적인 위험도 평가로서 과거의 붕괴사태에 기초한 통계적 방법으로 철도사면의 위험도를 평가하기 위해 강우에 의해 발생된 사면재해에 대한 국내문헌 및 현장조사의 결과를 기초로 붕괴시의 강우량을 외적기준으로 하여 통계적 해석을 실시하고, 누적강우량(cumulative rainfall)과 시간우량(hourly rainfall)으로서 붕괴시의 한계우량 예측식을 산정하고자 하였다.

2. 강우시 철도사면의 붕괴 요인

2.1 붕괴에 영향을 미치는 설명변수의 선정

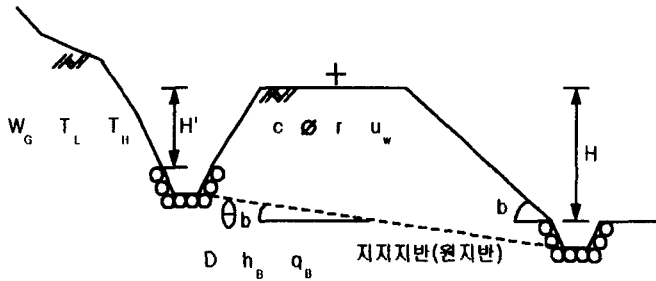
강우시 사면의 안정성에 관한 포텐셜(potential) S는 일반적으로 토질역학적인 사면안정이론으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$S = f(\beta, H, c, \phi, \gamma, u_w, \epsilon) \quad (1)$$

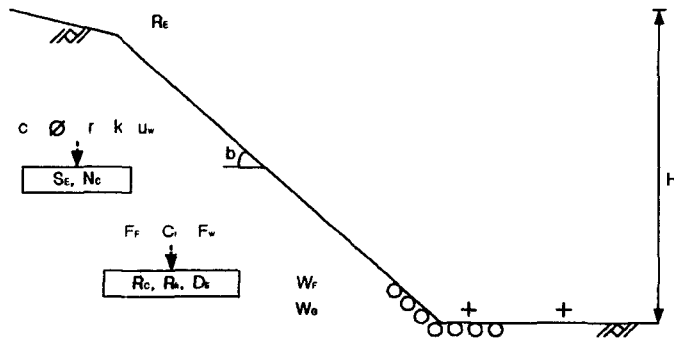
* 한국철도기술연구원 주임연구원
** 한국철도기술연구원 선임연구원
*** 한국철도기술연구원 시설연구본부장

여기서, β : 사면구배, H : 사면높이, c : 점착력, ϕ : 내부마찰각, γ : 단위체적중량, u_w : 간극수압, ε : $\beta, H, c, \phi, \gamma, u_w$ 이외의 요인이다.

철도사면에 위 식을 적용할 경우, 붕괴에 대한 ε 로서 고려해야할 추가적인 매개변수는 성토·절개사면의 두가지 경우로 나눌 수 있다. 다음 <그림 1>과 <그림 2>는 각 경우에서 고려되어진 매개변수를 도시한 것이다.



<그림 1> 성토사면의 설명변수



<그림 2> 절개사면의 설명변수

강우시 사면의 안정성에 관한 포텐셜(potential) S 는 각 대상사면별로 다음과 같이 주어진다.

$$\text{성토사면 } S = f(H, S_E, N_C, k, S_B, \theta_B, W_G, T_L, T_H, R_E) \quad (2)$$

$$\text{절개사면 } S = f(S_E, N_C, R_h, R_C, D_S, \beta, H, W_G, R_E) \quad (3)$$

2.2 붕괴에 관계하는 목적변수의 선정

사면의 붕괴에 관계하는 외적기준으로서 붕괴시의 강우량을 설정하였다. 붕괴시 강우량으로서는 시간우량 r , 누적강우량 R 을 들 수 있는데, 설명변수와의 관계를 통계적으로 분석하여 상관성이 가장 높은 값으로 정의한다. 따라서 사면의 안정성에 관한 포텐셜 S 와 외적기준을 식으로 표현하면 다음과 같은 3가지 경우가 존재하게 된다.

$$S = r^\alpha \cdot R^\beta (0 < \alpha, \beta < 1)$$

$$S = r (\alpha=1, \beta=0)$$

$$S = R (\alpha=0, \beta=1)$$

(4)

3 강우시 사면현장조사와 분석기법

3.1 현장조사 및 평가항목

강우에 의한 사면의 안정성 평가를 수행함에 있어서 설명변수로 취해진 평가항목은 식(2)와 식(3)과 같고, 이를 사면에 대한 현장조사시 조사·평가항목으로 나타내면 다음의 <도표 1>와 <도표 2>와 같다. 또한 성토·절개사면 각기 25개소의 사면을 현장조사 대상으로 하였다.

<도표 1> 성토사면의 사면조사 평가항목

항목(Item)		카테고리(Category)				
성토의 구조조건	성토높이 $H(m)$	$H < 3$		$3 \leq H < 10$		$10 \leq H$
	토질 S_E	점성토		사질토		자갈질흙
	관입강도 N_C	$N_C < 4$	$4 \leq N_C < 6$	$6 \leq N_C < 8$	$8 \leq N_C$	
기반조건	표층지반지질 S_B	충적지반			기타	
	지반경사각	$\theta_B < 10$			$10 \leq \theta_B$	
집수·침투조건	투수계수 $k(cm/sec)$	$k < 10^{-4}$	$10^{-4} \leq k < 10^{-3}$	$10^{-3} \leq k < 10^{-2}$	$10^{-2} \leq k$	
	집수조건 W_G	무		대상측사면	반대측사면	
	종단형태 T_L	절개·성토경계/유입구배점			평탄·단일구배	
	횡단형태 T_H	순성토			편절개편성토 복부성토	
경험우량조건	경험우량 $R_E \times 10^4 mm \cdot year$	$R_E < 2$	$2 \leq R_E < 5$	$5 \leq R_E < 10$	$10 \leq R_E < 15$	$15 \leq R_E$

<도표 2> 절개사면의 사면조사 평가항목

항목(Item)		카테고리(category)			
구조조건	사면구배(β)	$\beta < 45$		$\beta = 45$	$45 < \beta$
	절개높이(H, m)	$H < 10$		$10 \leq H < 20$	$20 \leq H$
토질·지질조건	토질(S_E)	점성토		실트	사질토
	표층토두께(D_S, m)	$D_S < 2$			$2 \leq D_S$
	관입강도(N_C)	$N_C < 4$		$4 \leq N_C < 8$	$8 \leq N_C$
	지질(R_C)	퇴적암		화강암류	기타
	기반강도(R_b)	경암		연암	위약암·토사
집수조건	상부지형(W_G)	집수지형	등가유입지형	평탄지형	비집수지형
경험우량조건	경험우량(R_Y, mm)	$R_Y < 1200$	$1200 \leq R_Y < 1700$	$1700 \leq R_Y < 2000$	$2000 \leq R_Y$

3.2 통계처리기법

철도연변 사면을 현장조사하여 작성된 점검 양식을 통하여 각 항목에 대한 답(카테고리)을 작성하여 행렬(matrix)화한 후, 외적기준을 붕괴시의 강우량으로 하여 수량화 I류 해석을 시행하였다.

<도표 3> 한계우량 산정을 위한 가중치 계산(수량화 I류 해석)

붕괴시 강우량	=	가중치 (Weight factor)	항목에 대한 답
Y		A	X
$Y = \{A\}X \Rightarrow Y \cdot X^{-1} = \{A\}X \cdot X^{-1} \Rightarrow \therefore \{A\} = Y \cdot X^{-1}$			

4. 강우시 철도사면 안정분석

4.1 붕괴발생지역의 강우량 데이터

현재 철도청에서는 15개 보선사무소 산하의 각 분소에서 강우시 강우량을 측정하고 있다. 따라서 각 보선분소에서는 강우개시시간 및 종료시간, 그리고 파피시의 강우량 및 시간을 파악하고 있지만, 인원부족 등으로 인하여 정확한 강우량을 측정하거나 강우에 따른 시간을 기입하는 것은 매우 어렵기 때문에 기상청에서 입수되는 강우자료를 사용하였다.

4.2 분석 케이스

통계적처리를 통해 가장 상관성이 높은 경우를 목적변수로 정의하기 위하여 여러 가지의 경우의 수를 고려하였다. 본 분석에서는 r 과 R 의 누승의 곱의 경우에 있어 α , β 값의 분포는 0, 0.1, 0.2, 0.3, ..., 1.0까지 변화하는 변수로 정의하여 11²가지 경우의 수가 존재하게 된다.

4.3 목적변수의 결정

다변량 해석-수량화 I 류해석에 의해 계산된 상관계수(R^2) 분포에서 결정된 목적변수를 다음의 <도표 4>에 보였다.

<도표 4> 대상사면별 목적변수

대상	목적변수	대상	목적변수
성토사면	r	절개사면	$r^{0.3}$

4.4 분석결과에 의한 설명변수의 가중치

한계우량을 계산하기 위한 가중치의 적용에 있어서 설명변수의 수량화 값들의 합이 '0'이 되도록 다시 표현하는 중심화(Centering)를 실시하여 <도표 5>과 <도표 6>에 중심화한 가중치를 보였다.

또한 <도표 5>, <도표 6>에 제시한 가중치에 의해 계산된 예측데이터와 실측데이터와의 비교를 위해 오차분포를 도표화하였다. <그림 3>과 <그림 4>에서 볼 수 있듯이 예측데이터와 실측데이터는 성토사면의 경우 오차범위 $r = \pm 10\text{mm/hr}$ 정도, 절개사면의 경우 오차범위 $r^{0.3} = \pm 0.5$ 이 내에 드는 것을 볼 수 있었다. 절개사면의 경우 오차를 mm/hr로 환산하면 0.81mm/hr 정도로 분포되어 양쪽의 경우 모두, 실제 파피시 값과 근사하게 계산되어지는 것을 알 수 있었다.

5. 강우시 사면붕괴 발생개소에 대한 한계우량곡선의 적용

5.1 성토사면의 예

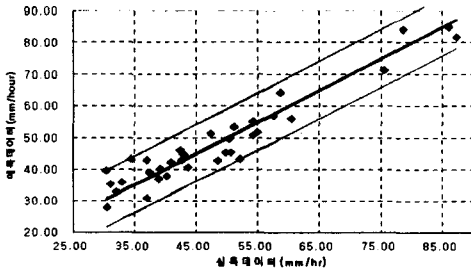
청량리 보선사무소 관할 교외선 ○○구간에서 장마시 집중 호우에 의해 1998년 8월 6일 01시경에 사면붕괴 재해의 발생으로 선로가 마물되었다. 본 사고의 복구는 보선원 4명과 백호우 장비에 의해 응급복구되었으며, 복구액은 약 2천만원이 소요되었다(<그림 5>). 본 사면에서 재해가 발생하였을 때의 누적강우량은 348.5mm이었으며, 최대시간우량은 86.0 mm/hr였다. 상기 구간에 대하여 사면점검양식에 의거하여 한계우량을 산출한 결과, 교외선 ○○구간의 재해 발생구간에 대한 한계우량은 최대시간우량으로 84.82mm/hr로 계산되어졌다. <그림 6>에서 강우개시 후 약 13시간 경과후, 최대시간우량 $r = 86.0\text{mm/hr}$ 에서 붕괴가 발생하여 한계우량과 실제 사면붕괴 발생시의 강우량과 상당히 일치하는 것을 알 수 있었다.

<도표 5> 성토사면 가중치(Weight factor)

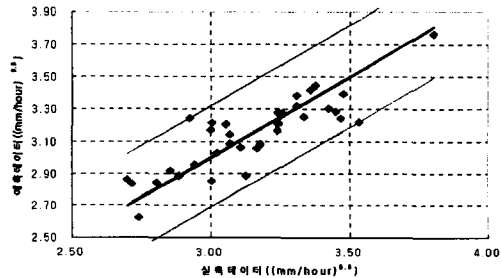
계수 ($x_{i\ ii\ iii}$)	가중치 ($a_{i\ ii\ iii}$)	계수 ($x_{i\ ii\ iii}$)	가중치 ($a_{i\ ii\ iii}$)
상수 (a_0)	48.38	x312	3.28
성토높이	x111 9.12	투수계수	x313 0.02
	x112 -6.73		x314 0.20
	x113 -4.00		x321 6.52
토질	x121 -2.05	집수조건	x322 -2.23
	x122 -3.02		x323 -19.85
	x123 11.25		x331 10.60
관입강도	x131 -1.03	중단형태	x332 -1.77
	x132 0.67		x341 -1.55
	x133 -2.55	횡단형태	x342 5.03
			x411 9.80
표층지반/지질	x211 -4.50	경험우량	x412 -2.94
	x212 13.01		x413 -3.71
지반경사각	x221 3.46		x414 1.20
	x222 -5.19		x415 -3.52
투수계수	x311 -4.09		

<도표 6> 절개사면 가중치(Weight factor)

계수 ($x_{i\ ii\ iii}$)	가중치 ($a_{i\ ii\ iii}$)	계수 ($x_{i\ ii\ iii}$)	가중치 ($a_{i\ ii\ iii}$)
상수 (a_0)	3.15	지질	x242 0.04
사면구배	x111 0.04	기반강도	x243 0.06
	x112 -0.10		x251 0.41
	x113 -0.16		x252 -0.01
절개높이	x121 0.01	상부지형	x253 -0.06
	x122 -0.03		x311 -0.05
	x123 0.21		x312 0.03
토질	x211 -0.29	경험우량	x313 -0.04
	x212 0.04		x314 0.14
	x213 0.03		x411 0.37
	x221 0.08		x412 -0.03
표층토두께	x222 -0.14		x413 -0.29
	x231 0.02		x414 0.06
관입강도	x232 -0.01		
	x233 0.16		
지질	x241 -0.16		



<그림 3> 성토사면의 경우 예측데이터와 실측데이터 비교

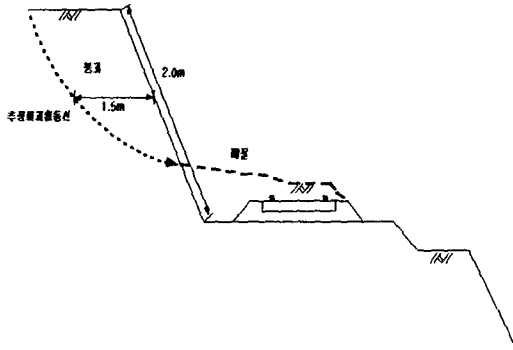


<그림 4> 절개사면의 경우 예측데이터와 실측데이터 비교

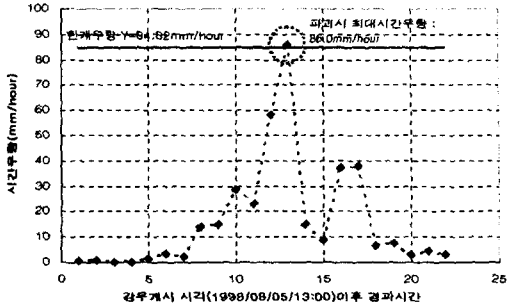
5.2 절개사면의 예

청량리 보선사무소 관할 경춘선의 △△구간에서 장마시 집중 호우에 의해 1998년 8월 8일 17시 경에 사면붕괴 및 옹벽 전도의 재해가 발생하였다. 본 사고의 복구에는 보선원 2명, 궤도공 2명과 백호우 장비에 의해 응급복구되었으며, 복구액은 86,465천원이 소요되었다(<그림 7>). 본 사면에서 재해가 발생하였을 때의 누가우량은 471mm이었으며, 최대시간우량은 67.0mm/hr, $r^{0.3}=3.5304$ 였다. 다음으로 상기 구간에 대하여 사면점검양식에 의거하여 한계우량을 산출한 결과, 경춘선 △△구간의 재해 발생구간에 대한 한계우량은 $r^{0.3}$ 의 값으로 3.22로 계산되어졌으며, 이를 최대시간우량으로 환산하면 49.3mm/hr로 계산되어졌다.

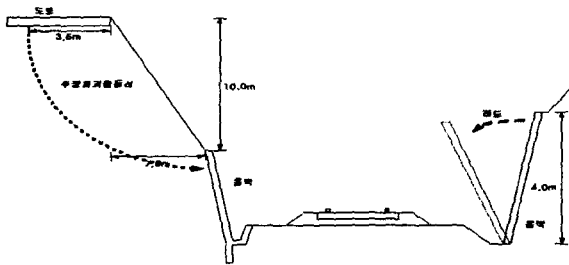
<그림 8>에서 볼 수 있듯이 강우개시시각(1998/08/05/20:00) 이후 각 시간을 x축에, 각 시간대별 강우량(시간우량)을 y축에 도시하였으며, 계산된 한계우량곡선을 함께 도시하였다. 그림에서 강우개시 후 약 60시간 경과후에도 한계우량곡선을 넘어서는 강우가 발생했음에도 붕괴는 발생하지 않은 것을 볼 수 있으며, 또한 한계우량곡선을 넘어서는 $r^{0.3}=3.5304$ 에서 1998년 8월 8일 17시 경에 붕괴가 발생한 것을 볼 수 있다. 이로써 한계우량과 실제 사면붕괴 발생시 강우량과 상당히 일치하는 경향을 알 수 있었지만, 강우 개시후 60시간 경과 대역의 결과와 같은 문제점이 발생할 수 있다는 것이 추후 연구과제로 남아있다.



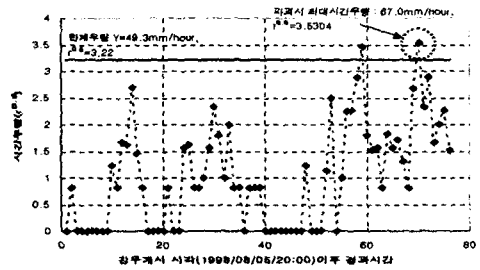
<그림 5> 성토사면 재해상황 개요도 (교의선 ○○구간)



<그림 6> 한계우량곡선과 실제 강우량 비교 검증(성토사면)



<그림 7> 절개사면 재해상황 개요도 (경춘선 △△구간)



<그림 8> 한계우량곡선과 실제 강우량 비교 검증(절개사면)

6. 결론

위험개소를 적절히 도출함으로써 철도사면재해를 미연에 방지하고 동시에 그 구간의 특성에 대응하는 적절한 운전규제를 정립하기 위하여 사면현장조사를 통해 작성한 한계우량곡선으로 강우에 의한 사면붕괴의 위험성을 예측하고, 평가하고자 하였다. 이를 이용하여 강우시 철도사면의 위험도를 평가방안을 마련하였다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술혁신 5개년사업의 일환으로 건교부의 연구지원에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Katsuya Okada et al., 1994, "Statistical risk estimating method for rainfall on surface collapse of a cut slope", Soils and Foundations Vol. 34, No. 3, pp. 49~58
2. Tomoyasu Sugiyama et al., 1995, "Statistical Rainfall Risk Estimating Method for a Deep Collapse of a Cut Slope", Soils and Foundations Vol. 35, No. 4, 37~48,
3. 岡田勝也, 1995, "自然災害に對する鐵道防災の研究開發の回顧と展望", RTRI Report Vol. 9, No. 3, pp. 1~6