

강우시 철도 절개사면의 안정성 평가에 관한 연구

A Study on the Stability Evaluation of Railway Cut-Slope Under Rainfall

김현기¹⁾, Hyun-Ki Kim, 박영곤²⁾, Young-Kon Park, 신민호³⁾, Min-Ho Shin

- 1) 한국철도기술연구원 시설연구본부 주임연구원, Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI
- 2) 한국철도기술연구원 시설연구본부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Research Dept., KRRI
- 3) 한국철도기술연구원 시설연구본부 본부장, General Director, Civil Engineering Research Dept., KRRI

개요(SYNOPSIS) : In order to evaluate the stability of railway cut-slope under rainfall, explanatory variables and subordinate variables were selected for multivariate analysis. Furthermore the site which had occurred failure due to rainfall was investigated, and by executing multivariate analysis for 121 cases, critical rainfall was defined by the case that had high value of correlation factor. The 0.3 square value of maximum hourly rainfall during 24 hours before failure caused the collapse of railway cut-slope and could be used to estimate the stability of railway cut-slope. From the result of application to a collapse example, the evaluation method by critical rainfall curve is satisfactory.

주요어(Key words) : stability of railway cut-slope, multivariate analysis, critical rainfall

1. 서론

국내 철도 절개사면은 지표 및 지하에 존재하는 유입수의 영향으로 그 안정성이 변화되어 종종 붕괴에 도달하는 경우가 많다. 특히 연중 강우량의 상당량이 6, 7, 8월에 집중되는 우리나라와 같은 경우, 장마나 태풍 등에 의한 집중호우에 의해 사면이 붕괴되는 사례가 많이 발생한다. 강우에 의한 철도사면의 붕괴는 열차의 안전과 안정적인 운송을 저해하게 되고 인명피해를 유발하기도 하며 복구에 있어서도 경제적, 시간적인 손실을 유발하게 된다.

이와 같은 재해를 미연에 방지하기 위해서는 재해우려개소의 적절한 도출, 방재대책의 적절한 수립 그리고 선로 구간의 특성에 대응하는 적절한 운전규제가 필요하며, 이를 위하여 강우에 의한 사면붕괴의 위험성을 정확하게 예측하고, 현장 보선원이 쉽게 접근하여 용이하게 활용할 수 있는 평가방법이 제시되어야 한다.

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

따라서 본 연구에서는 철도연변 절개사면의 거시적인 위험도 평가로서 강우에 의한 붕괴이력을 가진 사면에 대한 현장조사 및 문헌조사를 통하여 붕괴시의 강우량을 외적기준으로 한 통계적 해석을 실시하였고, 누적강우량(cumulative rainfall)과 시간우량(hourly rainfall)으로서 철도 절개사면 붕괴시 한계우량 예측식을 산정하고자 하였다.

2. 강우시 철도 성토사면의 붕괴 요인

2.1 붕괴에 영향을 미치는 설명변수의 선정

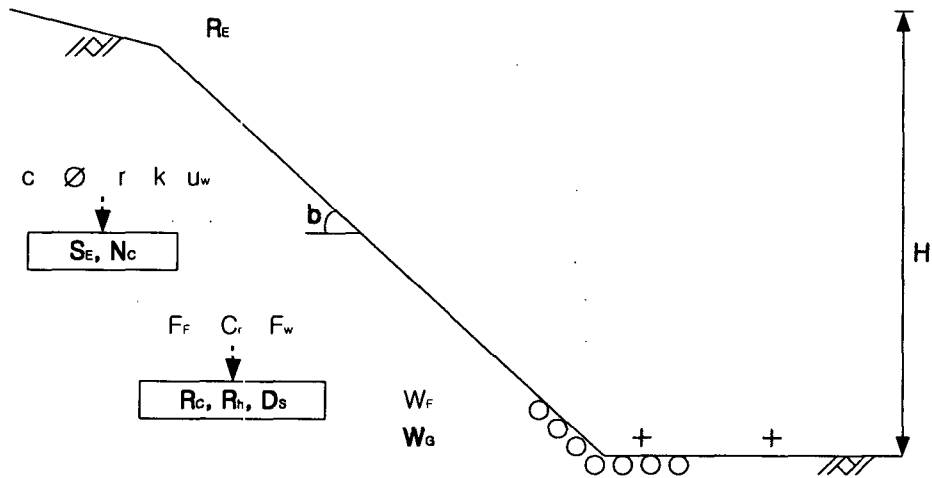
강우시 사면의 안정성에 관한 포텐셜(potential) S는 일반적으로 토질역학적인 사면안정이론으로부터 다음과 같이 주어진다.

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

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

절개사면에 상기 식을 적용할 경우 ϵ 값으로 지질구조의 불균질성 등 지질조건에 관계되는 인자를 추가로 고려할 수 있다. 그 주요인자로는 단층대의 파쇄상황이나 층리면의 상황을 나타내는 F_F , 균열계수 C_r , 사면 표면의 지하수의 침출상황을 나타내는 W_F , 절개사면의 풍화정도를 보여주는 F_W 등이다. 또한 강우에 의한 붕괴의 실태를 고려하면 강우의 집수·침투조건인 선로상부의 지형적인 집수상태인 W_G , 절개 표층부의 투수계수 k 그리고 절개사면이 사용 중에 받는 주변우량 R_E 등의 인자도 추가로 고려될 수 있다.

$$\epsilon = g(F_F, C_r, W_F, F_W, W_G, k, R_E) \quad (2)$$



<그림 1> 절개사면의 설명변수

절개사면의 경우, 토질조건 c, ϕ, γ, k 는 표층토의 토질 S_E 와 표층토의 풍화 정도를 나타내는 관입강도 N_C 로 대표되고, 지질조건인 F_F, C_r, F_W 는 평가대상인 절개사면이 시공 후 어느 정도의 시간경과로 인하여 그 변화상태를 관찰하는 것이 불가능한 경우가 많기 때문에 퇴적암, 화성암과 같은 지질분류 R_C , 기반의 경도분류 R_h 그리고 표층토 두께 D_S 로 나타내기도 한다. 그러나 지하수의 침출상태인 W_F 는 붕괴 후에 실시하는 현장조사에서도 용수상황이 명확하지 않은 경우가 많으므로 현장조사 항목에서 이 요인은 제외시킬 수 있다.

따라서, 식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면, 절개사면의 안정성에 관한 포텐셜 S 는 다음 식과 같이 9가지 요인으로 대표될 수 있다.

$$S = f(S_E, N_C, R_h, R_c, D_S, \beta, H, W_G, R_E) \quad (3)$$

본 장의 분석에 사용된 인자는 식(3)의 우변 9개항이다.

2.2 붕괴에 관계하는 목적변수의 선정

사면의 붕괴에 관계하는 외적기준으로서 붕괴시의 강우량을 설정하였다. 붕괴시 강우량으로서는 시간우량 r , 누적강우량 R 을 들 수 있는데, 설명변수와 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)

대상사면에 대한 현장조사결과를 통계적인 해석, 즉 각각의 경우를 목적변수로 설정하여 분석하면 입력 데이터와의 상관관계가 가장 높은 목적 변수를 찾을 수 있다. 다음의 <표 1>은 사면평가에 있어서 설명변수와 목적변수를 보인 것이다.

<표 1> 설명변수와 목적변수

목적변수	설명변수
r	$S_E, N_C, R_h, R_c, D_S, \beta, H, W_C, R_E$
R	
$r^\alpha \cdot R^\beta$	

여기에서 주의할 점은 시간우량 r 은 붕괴발생시각의 시간우량이 아니고, 붕괴발생시점보다 12시간 이내에 있어서의 최대시간우량으로 한다. 그 이유는 사면의 표면 침식에 의해 어느 정도의 국소 붕괴가 발생하는 것을 고려하기 위해서이다.

3 강우시 사면현장조사와 분석기법

3.1 현장조사 및 평가항목

강우에 의한 절개사면의 안정성 평가를 수행함에 있어서 설명변수로 취해진 평가항목은 식(3)과 같고, 이를 절개사면에 대한 현장조사시 조사·평가항목으로 나타내면 다음의 <표 2>와 같다.

<표 2> 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_h)	경암	연암	위약암·토사	
집수조건	상부지형(W_C)	집수지형	등가유입지형	평탄지형	비집수지형
경험우량조건	경험우량(R_Y, mm)	$R_Y < 1200$	$1200 \leq R_Y < 1700$	$1700 \leq R_Y < 2000$	$2000 \leq R_Y$

<표 2>에서 카테고리화를 각각의 항목을 통계적 해석을 위한 자료로 활용하기 위해 설정하였는데, 이는 일본 철도총합연구소의 자료를 근거로 하였다.

기본 자료를 획득하고 이를 바탕으로 통계분석을 실시하기 위하여 철도 절개사면의 현장조사를 실시하였다. 대상현장으로는 전국의 보선사무소에서 입수된 재해대장을 근거로 하여 강우에 의한 사면피해 정보(철도연변 사면 붕괴 시간, 장소, 위치, 선구 등)를 비교적 명확하게 얻을 수 있는 개소를 선정하였으며, 현장을 직접 방문하여 조사하고 관련 자료를 얻는 것으로 하였다. 또한 철도 절개사면의 현장조사는 위의 점검양식에 의거하여 해당 보선사무소의 협조를 받아 실시하였으며, 선정된 개소는 25개소이다.

3.2 통계처리기법

중회귀분석(multiple regression analysis)은 여러 가지의 원인과 결과를 결합하는 것으로 목적변량(criterion variable) y [결과]와 그것에 영향을 주는 여러 가지의 설명변량(explanatory variable) x_1, x_2, \dots, x_p [원인]으로부터

$$Y = a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_px_p + a_0 \quad (5)$$

와 같은 1차식을 작성하고, 이 식을 사용하여 목적변량 y 의 예측과 제어에 사용하도록 하는 방법이다.

한편 수량화이론은 정도·상태·유무 또는 예·아니오 등으로 표현되는 질적 데이터에 수량을 주어, 중회귀분석·주성분분석·판별분석과 동일한 다차원적 해석을 시행하는 것이다.

본 연구에서 사용된 수량화 I류기법은 질적 데이터로부터 양적으로 측정되는 외적기준을 예측하고 또 설명하기 위한 방법이며, 수량화 I류기법에서는 분석시에 다음 <표 3>에 보인 더미변수(dummy variable) 개념을 도입하여 사용하였다.

<표 3> 더미변수의 개념

더미변수 = x_{ij}		1	: 아이템 i 의 카테고리 j 에 반응할 때
		0	: 기타

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

사면점검 양식과 기상청 자료의 해석으로 다음의 <표 4>에서 보인 방법으로 가중치(weight factor)를 결정하여 설명변수와 목적변수간의 선형상관관계를 규정하였다.

<표 4> 한계우량 산정을 위한 가중치 계산

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

외적기준은 2.2절에서 설명한 바와 같이 r, R, r^aR^b 의 3가지 형태로 설정하고, 결과적으로 중상관계수가 가장 높게 계산되는 다시 말해, 강우에 대한 사면평가를 실시할 때 상관성이 높은 것을 대상사면의 강우에 대한 한계우량으로 규정하였다.

수량화 I류 해석을 위하여 각 항목에 대한 다항식을 전개하면 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = a_{111} \cdot x_{111} + a_{112} \cdot x_{112} + a_{113} \cdot x_{113} + a_{121} \cdot x_{121} + a_{122} \cdot x_{122} + \dots + a_{nnn} \cdot x_{nnn} + a_0 \quad (6)$$

여기에서 각 a, x 의 첨자는 다음 <표 5>에 설명하여 보였다.

<표 5> 다항식의 첨자설명(식(6))

	i	ii	iii
$x_{i\ ii\ iii}$	항목	세부항목	카테고리
	분류	아이템	카테고리
	예	구조조건 등	사면높이 등
$a_{i\ ii\ iii}$	$x_{i\ ii\ iii}$ 에 해당하는 가중치(Weight factor)		
a_0	상수항		

4. 강우시 절개사면 안정분석

4.1 붕괴발생지역의 강우량 데이터

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

강우에 의한 피해가 발생한 지역에 있어서 시간강우량, 일강우량, 년평균강우량 그리고 누적강우량을 기상청으로부터 입수하였다. 붕괴발생개소는 전국적으로 산재하여 있지만, 강우량을 측정하는 관측소는 특정지역에 국한되어 있어 가장 가까운 관측소에서 측정되어진 시간강우량 및 일강우량을 사용하였으며, 연평균강우량 및 누적강우량에 대해서는 철도가 건설된 당시부터의 연평균강우량의 평균값 및 누적강우량을 취하여 사용하였다.

4.2 입력데이터 및 분석 케이스

설명변수와 목적변수가 정의되고 현장조사에 의해 각각의 설명변수를 얻었으며, 기상청으로부터 목적변수인 강우량의 입수가 이루어졌다. 이와 같은 자료의 통계적 처리를 위하여 우선 더미변수 적용에 의해 원본데이터의 기본자료입력을 실시하였다.

한편 분석 케이스(case)에서 설명변수는 현장조사에서 기입된 항목에 의거하여 설정하게 되므로 하나의 케이스밖에 존재하지 않지만, 목적변수의 경우 2.2절에서 이미 제시하였듯이 r , R , $r^\alpha \cdot R^\beta$ 의 세가지 타입(type)을 정했기 때문에 여러 가지 경우의 수가 존재한다. 통계적처리를 통해 가장 상관성이 높은 경우를 목적변수로 정의하기 위하여 여러 가지의 경우의 수를 고려하기로 한다. 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 정의하였다. 이에 따라 전체 분석케이스는 r , R 그리고 $r^\alpha \cdot R^\beta$ 의 11^2 가지 경우의 수가 존재하게 된다.

4.3 상관계수 분포 및 목적변수의 결정

다변량 해석-수량화 I 류해석에 의해 계산된 각각의 경우에 대한 상관계수(R^2)를 다음의 <표 6>에 보였다.

목적변수는 121가지 경우에 대하여 수량화 해석을 실시한 결과로부터 결정되었는데, 철도 절개사면에 있어서 $r^{0.3} \cdot R^0$ 이 가장 크게 계산되었다. 따라서 목적변수로 최대시간우량을 정의하여 사용하였다. 여기에서 알 수 있는 것은 철도 절개사면에 있어서 강우에 대한 안정성은 강우 개시후 누적강우량에 관계되기 보다 최대시간우량에 영향을 많이 받게 된다는 사실이다. 이는 일선 보선업무 담당자들이 경험했던 시간우량이 급격하게 증가할 때 사면붕괴사례가 많았다는 사실과 일치하는 결과이다.

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 <표 7>에 중심화한 가중치를 보였다.

<표 6> 상관계수 분포

R	r	α										
		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
β	0	0	0.68	0.72	0.785	0.782	0.784	0.784	0.782	0.783	0.781	0.78
	0.1	0.45	0.59	0.66	0.68	0.71	0.73	0.734	0.74	0.75	0.75	0.75
	0.2	0.54	0.56	0.60	0.64	0.66	0.68	0.69	0.71	0.71	0.72	0.72
	0.3	0.54	0.56	0.58	0.61	0.63	0.65	0.66	0.68	0.69	0.70	0.70
	0.4	0.55	0.56	0.57	0.59	0.61	0.63	0.65	0.66	0.67	0.68	0.69
	0.5	0.56	0.55	0.57	0.59	0.60	0.62	0.63	0.65	0.66	0.67	0.67
	0.6	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.63	0.64	0.65	0.66	0.66
	0.7	0.57	0.57	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66
	0.8	0.57	0.58	0.58	0.59	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.66	0.65
	0.9	0.57	0.58	0.59	0.59	0.60	0.61	0.62	0.64	0.64	0.64	0.65
1.0	0.58	0.58	0.59	0.60	0.61	0.64	0.61	0.63	0.64	0.64	0.65	

본 분석결과에서 알 수 있듯이 철도 절개사면에 있어서 기여율은 년평균우량, 기반강도, 토질, 절개면 높이, 표층토 두께 및 지질, 사면구배, 상부지형, 관입강도의 순으로 높게 나타난 것을 알 수 있었으며, 이를 이용하여 강우에 대한 사면안정도를 한계우량의 개념으로 전환하여 평가할 수 있다. 한편 <표 7>에 제시한 가중치에 의해 계산된 예측데이터와 실측데이터와의 비교를 위해 오차분포를 도표화한 것이 <그림 3>인데, 여기에서 볼 수 있듯이 예측데이터와 실측데이터는 오차범위 $r^{0.3} = \pm 0.5$ 이내에 드는 것을 볼 수 있고, 본 오차를 mm/hr로 환산하면 0.81mm/hr 정도로 분포하고 있다.

<표 7> 가중치(Weight factor)의 중심화

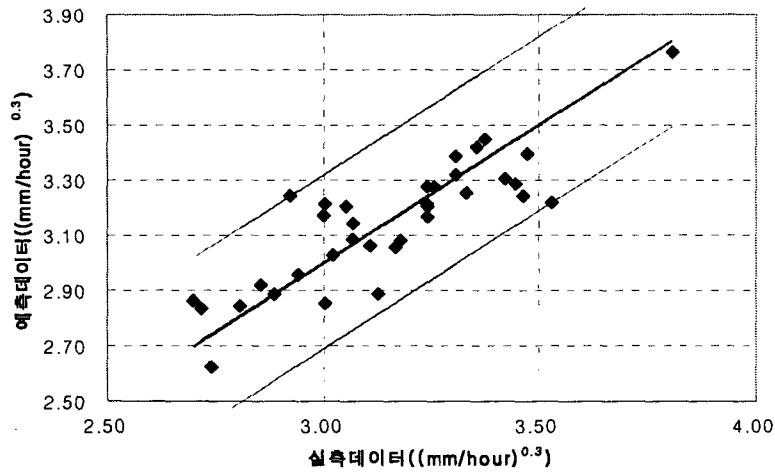
계수($x_{i\ ii\ iii}$)		가중치($a_{i\ ii\ iii}$)	계수($x_{i\ ii\ iii}$)		가중치($a_{i\ ii\ iii}$)
상수(a_0)		3.15	지질	x242	0.04
사면구배	x111	0.04		x243	0.06
	x112	-0.10	기반강도	x251	0.41
	x113	-0.16		x252	-0.01
절개높이	x121	0.01		x253	-0.06
	x122	-0.03	상부지형	x311	-0.05
	x123	0.21		x312	0.03
토질	x211	-0.29		x313	-0.04
	x212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

5 강우시 사면붕괴 발생개소에 대한 한계우량곡선의 적용

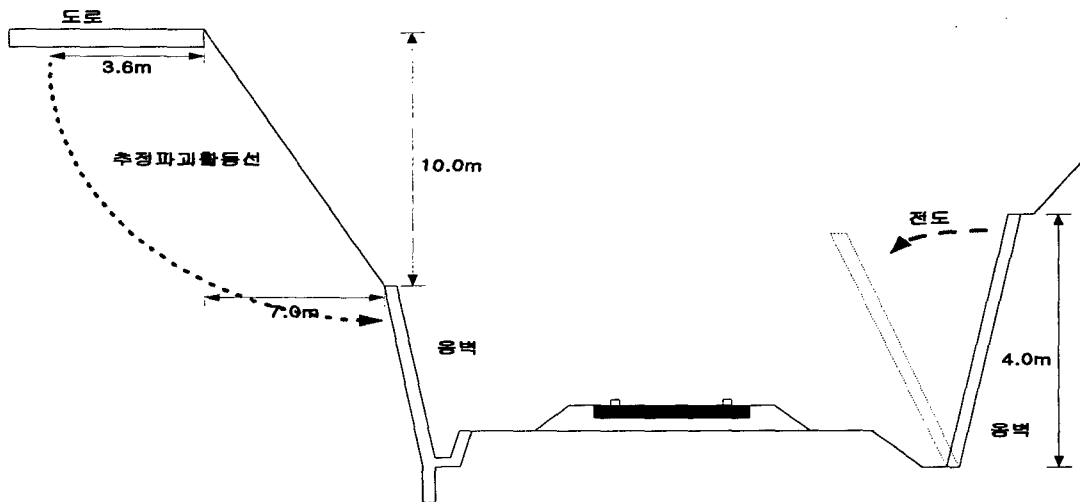
5.1 재해의 개요

청량리 보선사무소 관할 경춘선의 마석-대성리(32.320k~32.470k) 구간에서 장마시 집중 호우에 의해 1998년 8월 8일 17시경에 사면붕괴 및 옹벽 전도의 재해가 발생하였다. 본 사고의 복구는 보선원 2명, 레도공 2명과 백호우 장비에 의해 응급복구되었으며, 복구액은 86,465천원이 소요되었다.

본 피해개소는 <그림 3>에서 보는 바와 같이 좌·우측에 옹벽공이 시공되어져 있고, 좌측 옹벽 상부에 농업용 도로가 설치되어있다. 집중호우에 의해 좌측 옹벽 상부의 농도로부터 사면붕괴가 선로 방향으로 발생하였다. 또한 길이 4.0m의 우측 옹벽공도 전도되어 피해가 더욱 커졌던 사례이다.



<그림 2> 예측데이터와 실측데이터 비교



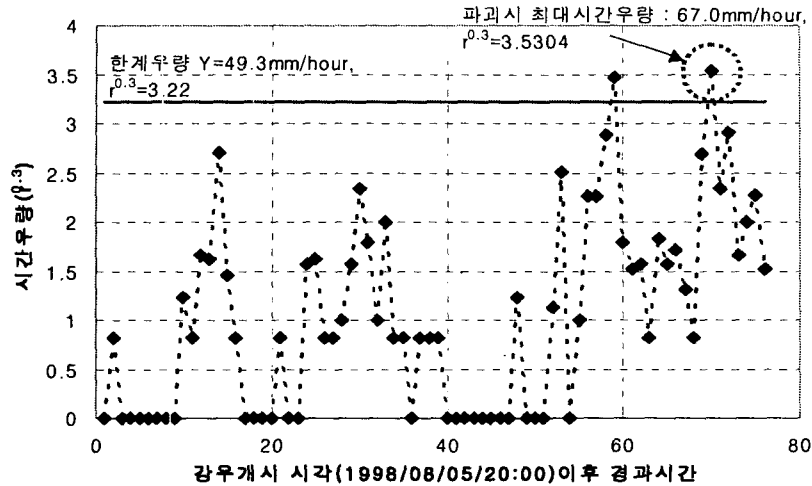
<그림 3> 경춘선 마석-대성리 구간의 재해상황 개요도

5.2 한계우량의 산정과 평가

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 마석-대성리 구간의 재해 발생구간에 대한 한계우량은 $r^{0.3}$ 의 값으로 3.22로 계산되어졌으며, 이를 최대 시간우량으로 환산하면 49.3mm/hr로 계산되어졌다.

다음의 <그림 4>에서 볼 수 있듯이 강우개시시각(1998/08/05/20:00) 이후 각 시간을 x축에, 각 시간 대별 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 17시경에 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 4> 한계우량곡선과 실제 강우량 비교 검증

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 철도 절개사면의 위험도 평가방안을 마련하였다.

향후 추가적인 철도 절개사면현장조사 및 통계적 분석을 통해 보다 상관성 높은 한계우량곡선을 작도하고, 보완된 한계우량곡선식에 근거한 프로그램 개발, 강우시 재해 예지를 통한 열차운전규제기준(안) 설정으로 열차의 안전운송 확보를 위한 다각적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 건교부(2000), "철도시설의 안정성 강화기술 개발", 건설교통기술혁신5개년사업 제1차년도 연구보고서
2. 신민호 외(2000), "강우시 철도 성토사면의 안정성 평가에 관한 연구", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 402~409
3. 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
4. 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,
5. 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