

## 강우시 철도 성토사면의 안정성 평가에 관한 연구

A Study on the Stability Evaluation of Railway Embankment  
under Rainfall신민호<sup>\*1</sup>, 박영곤<sup>\*2</sup>, 김현기<sup>\*3</sup>

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

**Keywords** : Stability(안정성), Railway Embankment(철도 성토사면), cumulative rainfall(누적강우량), hourly rainfall(시간우량)

## Abstract

In order to evaluate the stability of railway embankment 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 maximum hourly rainfall during 24 hours before failure caused the collapse of railway embankment and could be used estimate the stability of railway embankment. From the result of application to a collapse example, the evaluation method by critical rainfall curve is satisfactory.

## 1. 서론

국내 철도 성토사면은 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 재해 우려 감소의 적절한 도출, 방재대책의 적절한 수립, 그리고 선로구간의 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 특정한 사면에 제한될 수밖에 없다. 그러므로 철도 성토사면 전체에 걸친 안정계산은 사실상 불가능하다.

따라서 본 연구에서는 거시적인 위험도 평가로서 과거의 붕괴사례에 기초한 통계적 방법으

\*1 정회원, 한국철도기술연구원 시설전기연구본부장

\*2 정회원, 한국철도기술연구원 선임연구원

\*3 정회원, 한국철도기술연구원 주임연구원

로 성토사면의 위험도를 평가하기 위해 강우에 의해 발생한 성토사면 재해에 대한 국내문헌 및 현장조사의 결과를 기초로 하여 붕괴시의 강우량을 외적기준으로 하여 통계적 해석을 실시하고, 누적강우량(cumulative rainfall)과 시간우량(hourly rainfall)으로서 붕괴시의 한계우량 예측식을 산정하고자 하였다.

## 2. 강우시 철도 성토사면의 붕괴 요인

### 2.1 붕괴에 영향을 미치는 설명변수의 선정

강우시 사면의 안정성에 관한 포텐셜(potential)  $S$ 는 일반적으로 토질역학적인 사면안정이론으로부터 다음과 같이 주어진다.

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

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

철도 성토사면에 위 식을 적용할 경우, 붕괴에 대한  $\epsilon$ 로서 고려해야할 추가적인 매개변수를 살펴보면, 기반을 포함하여 발생하는 성토사면의 기저붕괴에서 기반두께  $D$ , 기반의 지하수위  $h_B$ , 표층지반의 토질강도  $q_B$ , 기반경사각  $\theta_B$  등이 관계한다. 또한 선로주변의 지형적인 집수 상태  $W_G$ , 선로방향의 종단구배 등으로 대표되는 성토의 종단형태  $T_L$ , 그리고 성토의 횡단형태  $T_H$ 를 들 수 있다. 이상의 관계를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

만약 철도운행을 시작한 때부터 성토사면의 다짐부족 부분 등이 강우에 의한 침식 피해를 받게 되면 붕괴에는 도달하지 않지만 소규모적

인 피해를 받을 수 있게 된다. 하지만 정상적인 범주에서는 그 기간 중에 어느 정도의 복구가 시행된다. 따라서 이와 같은 경우 그 기간 중에 받는 경험우량  $R_E$  인자를 함께 고려하면 성토사면에 대한  $\epsilon$ 은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

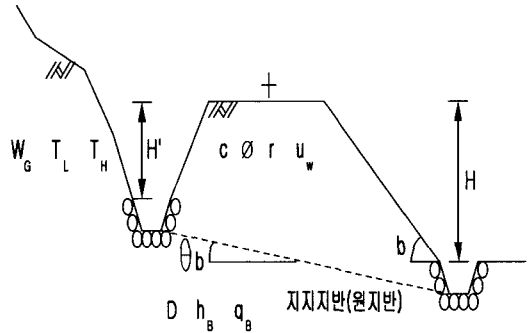


Fig. 1 성토사면의 설명변수

$$\epsilon = g(D, h_B, q_B, \theta_B, W_G, T_L, T_H, R_E)$$

성토사면의 경우 토질조건  $c, \phi, \gamma$ 는 성토재료(점토, 사질토, 자갈 등)의 토질분류  $S_E$ 와 성토 표층부의 간이 관입시험에 의한 관입강도  $N_c$ 에 의해 대표되는 것으로 하고, 성토사면의 간극수압  $u_w$ 은 입도특성으로부터 얻어지는 투수계수  $k$ 를 사용하였다. 그러나 성토구배  $\beta$ 는 철도의 경우 대부분 일정하기 때문에 이 요인은 배제하였다. 또한 기저붕괴는 대부분 발생하지 않기 때문에 기저지반 인자인  $D, h_B, q_B, \theta_B$ 는 고려할 필요가 없지만, 성토체내의 수위의 상승은 지하수위와 밀접하게 관계하기 때문에 표층지반에 관한 요인으로서 기반경사각  $\theta_B$ 과 표층지반의 지질인자인  $S_B$ (충적층, 기타)는 고려하였다.

따라서, 상기 내용과 식 (2)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 성토사면의 안정성에 관한 포텐셜

S는 다음과 같다.

$$S = f(H, S_E, N_c, k, S_B, \theta_B, W_G, T_L, T_H, R) \quad (3)$$

본 연구의 분석에 사용된 인자 즉, 설명변수는 식 (3)의 우변 10개 항이다.

## 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.

$$\begin{aligned} S &= r^\alpha \cdot R^\beta (0 < \alpha, \beta < 1) \\ S &= r (\alpha = 1, \beta = 0) \\ S &= R (\alpha = 0, \beta = 1) \end{aligned} \quad (4)$$

대상사면에 대한 현장조사 결과를 통계적인 해석, 즉 각각의 경우를 목적변수로 설정하여 분석하면 입력 데이터와의 상관관계가 가장 높은 목적변수를 찾을 수 있다. 다음의 Table 1은 각 사면에 대한 설명변수와 목적변수를 보인 것이다. 여기에서 주의할 점은 시간우량  $r$ 은 붕괴발생 시각의 시간우량이 아니고, 붕괴 발생시점보다

12시간 이내에 있어서의 최대 시간우량으로 한다. 그 이유는 사면은 표면의 침식에 의해서도 어느 정도의 국소 붕괴가 발생하므로 성토내의 간극수압의 상승에 의한 붕괴를 고려하기 위해서이다.

## 3. 강우시 사면현장조사와 분석기법

### 3.1 현장조사 및 평가항목

강우에 의한 성토사면의 안정성 평가를 수행함에 있어서 설명변수로 취해진 평가항목은 식 (3)과 같고, 이를 성토사면에 대한 현장조사시 조사·평가항목으로 나타내면 다음의 Table 2와 같다.

Table 2에서 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 성토사면의 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 성토사면의 현장조사는 위의 점검양식에 의거하여 해당 보선사무소의 협조를 받아 실시하였으며, 선정된 개소는 25개소이다.

### 3.2 통계처리기법

중회귀분석(multiple regression analysis)은 여러가지의 원인과 결과를 결합하는 것으로 목적변량(criterion variable)  $y$ [결과]와 그것에 영향

Table 1 설명변수와 목적변수

목적변수	설명변수
$r$	H, S <sub>E</sub> , N <sub>c</sub> , k, S <sub>B</sub> , θ <sub>B</sub> , W <sub>G</sub> , T <sub>L</sub> , T <sub>H</sub> , R <sub>E</sub>
$R$	
$r^\alpha \cdot R^\beta$	

Table 2 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
	관입장도 $N_C$	$N_C < 4$	$4 \leq N_C < 6$	$6 \leq N_C < 8$	$8 \leq N_C$	
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 $T_L$	질개·성토경계/유입구배점			평탄·단일구배	
	횡단형태 $T_H$	순성토			편질개편성토 복부성토	
경험우량조건	경험우량 $R_E \times 10^4 mm \cdot year$	$R_E < 2$	$2 \leq R_E < 5$	$5 \leq R_E < 10$	$10 \leq R_E < 15$	$15 \leq R_E$

을 주는 여러 가지의 설명변량(explanatory variable)  $x_1, x_2, \dots, x_p$ [원인]으로부터 식 (5)와 같은 1차식을 작성하고, 이 식을 사용하여 목적변량  $y$ 의 예측과 제어에 사용하도록 하는 방법이다.

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

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 Table 3에 보인 더미변수(dummy variable) 개념을 도입하여 사용하였다.

철도연변 사면을 현장조사하여 작성된 점검양식을 통하여 각 항목에 대한 답(카테고리)을 작성하

여 행렬(matrix)화하고 외적기준을 붕괴시의 강우량으로 하여 수량화 I류 해석을 시행한다. 사면 점검양식과 기상청 자료의 해석으로 다음의 Table 4에서 보인 방법으로 가중치(weight factor)를 결정하여 설명변수와 목적변수간의 선형상관관계를 규정하였다.

Table 3 더미변수의 개념

$$x = \begin{cases} 1 : \text{아이템의 카테고리에 반응할 때} \\ 0 : \text{기타} \end{cases}$$

외적기준은 2.2절에서 설명한 바와 같이  $r, R, r^aR^b$ 의 세 가지 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 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 4 한계우량 산정을 위한 가중치 계산

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

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

여기에서 각  $a$ ,  $x$ 의 첨자는 다음 <표 5>에 설명하여 보였다.

강우량을 기상청으로부터 입수하였다. 붕괴발생 개소는 전국적으로 산재하여 있지만, 강우량을 측정하는 관측소는 특정지역에 국한되어 있어 가장 가까운 관측소에서 측정되어진 시간강우량 및 일강우량을 사용하였으며, 연평균 강우량 및 누적강우량에 대해서는 철도가 건설된 당시부터의 연평균 강우량의 평균값 및 누적강우량을 취하여 사용하였다.

#### 4. 강우시 성토사면 안정분석

##### 4.1 붕괴발생지역의 강우량 데이터

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

강우에 의한 피해가 발생한 지역에 있어서 시간강우량, 일강우량, 연평균강우량 그리고 누적

##### 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 원본 데이터의 기본자료입력을 실시하였다.

한편 분석 케이스(case)에서 설명변수는 현장조사에서 기입된 항목에 의거하여 설정하게 되므로 하나의 케이스밖에 존재하지 않지만, 목적변수의 경우 앞의 2.2에서 이미 제시하였듯이  $r$ ,  $R$ ,  $r^\alpha$ ,  $R^\beta$ 의 세 가지 타입(type)을 정했기 때문에 여러 가지 경우의 수가 존재한다. 통계적 처리를 통해 가장 상관성이 높은 경우를 목적변

Table 5 다항식 (6)의 첨자 설명

	i	ii	iii
$x_{i \ ii \ iii}$	항목	세부항목	카테고리
	분류	아이템	카테고리
	예) 구조조건 등	사면높이 등	3m미만 등
$a_{i \ ii \ iii}$	$x_{i \ ii \ iii}$ 에 해당하는 가중치(Weight factor)		
$a_0$	상수항		

수로 정의하기 위하여 여러 가지의 경우의 수를 고려하기로 한다.

본 분석에서는  $r$ 과  $R$ 의 누승의 곱의 경우에 있어  $\alpha, \beta$ 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 I류해석에 의해 계산된 각각의 경우에 대한 상관계수( $R^2$ )를 다음의 Table 6에 보였다.

목적변수는 121가지 경우에 대하여 수량화 해석을 실시한 결과로부터 결정되었는데, 철도 성토사면에 있어서  $r^1 \cdot R^0$ 이 가장 크게 계산되었다. 따라서 목적변수로 최대시간우량을 정의하여 사용하였다. 여기에서 알 수 있는 것은 철도 성토사면에 있어서 강우에 대한 안정성은 강우 개시 후 누적강우량에 관계되기 보다 최대 시간우량에 영향을 많이 받게 된다는 사실이다. 이는 일선 보선업무 담당자들이 경험했던 시간우량이 급격하게 증가할 때 사면붕괴사태가 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 Table 7에 중심화한 가중치를 보였다.

본 분석결과에서 알 수 있듯이 철도 성토사면에 있어서 기여율은 집수상태, 표층지반지질, 성토높이, 관입강도, 토질, 경험우량, 종단형태, 지반경사각, 투수계수, 횡단형태의 순임을 알 수 있었다. Table 7에 제시한 가중치에 의해 계산된 예측 데이터와 실측 데이터와의 비교를 위해 오차분포를 도표화하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 예측 데이터와 실측 데이터는 오차범위  $r = \pm 10 \text{ mm/hr}$  정도로 실제 파괴시 값과 근사하게 계산되어지는 것을 알 수 있었다.

**5. 강우시 사면붕괴 발생개소에 대한 한계우량곡선의 적용**

**5.1 교외선 ○○-△△구간의 예**

**5.1.1 재해의 개요**

청량리 보선사무소 관할 교외선 ○○-△△구

**Table 6 성토사면의 경우 상관계수 분포**

R \ r	$\alpha$											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
$\beta$	0	0	0.81	0.88	0.91	0.90	0.56	0.91	0.92	0.92	0.920	<b>0.922</b>
	0.1	0	0.70	0.77	0.82	0.84	0.54	0.87	0.88	0.89	0.90	0.90
	0.2	0.59	0.71	0.71	0.76	0.79	0.52	0.83	0.85	0.86	0.87	0.88
	0.3	0.61	0.66	0.68	0.72	0.75	0.52	0.80	0.81	0.83	0.84	0.85
	0.4	0.60	0.64	0.66	0.70	0.72	0.51	0.77	0.79	0.80	0.82	0.83
	0.5	0.61	0.63	0.66	0.68	0.71	0.51	0.75	0.77	0.72	0.80	0.81
	0.6	0.61	0.63	0.65	0.70	0.69	0.51	0.73	0.75	0.76	0.78	0.79
	0.7	0.61	0.63	0.64	0.66	0.68	0.51	0.72	0.73	0.75	0.76	0.77
	0.8	0.61	0.62	0.64	0.66	0.67	0.51	0.70	0.71	0.73	0.74	0.76
	0.9	0.61	0.62	0.64	0.65	0.66	0.51	0.69	0.71	0.72	0.73	0.74
	1.0	0.61	0.62	0.63	0.65	0.66	0.51	0.68	0.70	0.70	0.72	0.73

Table 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 ( $a_0$ )		48.38			
성토높이	x111	9.12	투수계수	x312	3.28
	x112	-6.73		x313	0.02
	x113	-4.00		x314	0.20
토질	x121	-2.05	집수조건	x321	6.52
	x122	-3.02		x322	-2.23
	x123	11.25		x323	-19.85
관입강도	x131	-1.03	종단형태	x331	10.60
	x132	0.67		x332	-1.77
	x133	-2.55	횡단형태	x341	-1.55
	x134	11.80		x342	5.03
표층지반/지질	x211	-4.50	경험우량	x411	9.80
	x212	13.01		x412	-2.94
지반경사각	x221	3.46		x413	-3.71
	x222	-5.19		x414	1.20
투수계수	x311	-4.09		x415	-3.52

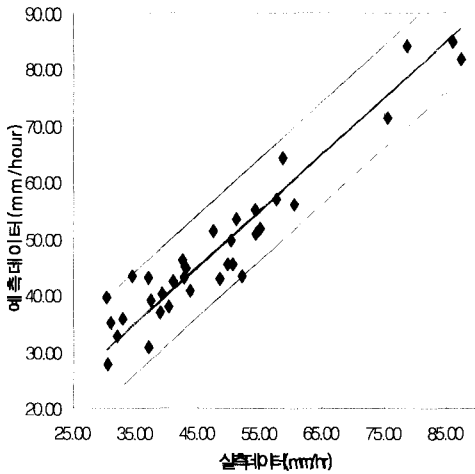


Fig. 3 성토사면의 경우 예측 데이터와 실측 데이터 비교

간에서 장마시 집중 호우에 의해 1998년 8월 6일 01시경에 사면붕괴 재해의 발생으로 선로가 매몰되었다. 본 사고의 복구는 보선원 4명과 백호우 장비에 의해 응급 복구되었으며, 복구액은 약 2천만 원이 소요되었다.

본 피해개소는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 좌

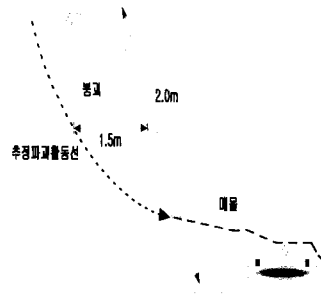


Fig. 4 재해상황 개요도 (교외선 ○○-△△구간)

측은 절개구간이며, 우측은 성토구간으로 편절개·편성토의 구간임을 알 수 있다. 또한 우측 성토구간 쪽으로 주택가가 형성되어 있고 사면 활동에 대한 대책공법은 시공되지 않았다. 피해는 집중호우에 의해 좌측 절개면에서 활동이 발생하여 사면이 붕괴되어 열차 운행에 지장은 준 경우이다.

5.1.2 한계우량의 산정과 평가

본 사면에서 재해가 발생하였을 때의 누적강우량은 348.5 mm이었으며, 최대 시간우량은 86.0 mm/hr이었다. 상기 구간에 대하여 사면 점검양식에 의거하여 한계우량을 산출한 결과, 교외선 ○○-△△ 구간의 재해 발생구간에 대한 한계우량은 최대 시간우량으로 84.82 mm/hr로 계산되었다.

Fig. 5에서는 강우 개시시각(1998/08/05/19:00) 이후의 각 시간을 x축에, 각 시간대별 강우량(시간우량)을 y축에 도시하였으며, 계산된 한계우량 곡선을 함께 도시하였다. 그림에서 강우개시 후 약 13시간 경과 후, 최대 시간우량  $\gamma = 86.0$  mm/hr에서 붕괴가 발생한 것을 볼 수 있다. 이로써 철도 성토사면에서 한계우량과 실제 사면 붕괴 발생시 강우량과 상당히 일치하는 경향을 알 수 있었다.

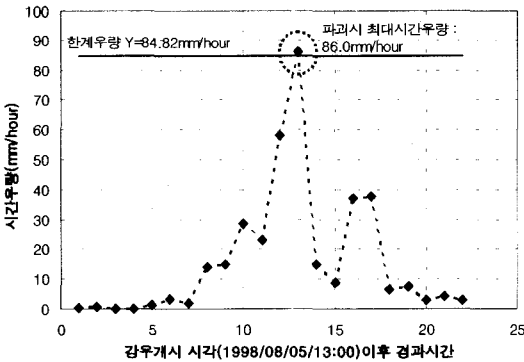


Fig. 5 한계우량곡선과 실제 강우량 비교 검증(1)

5.2 경부선 ○○-▽▽구간의 예

5.2.1 재해의 개요

대전 보선사무소 관할 경부선 ○○-▽▽구간

의 상행선에서 장마시 집중호우에 의해 1995년 8월 30일 16시경에 선로에 위험을 줄 수 있는 성토사면에서 붕괴가 발생하였다. 본 사고의 복구는 보선원과 기타 장비에 의해 침목쌓기 및 마대쌓기에 의해 응급 복구되었으며, 추후에 옹벽을 설치되었다. 복구액은 응급복구에 백만 원이 소요되었고, 위험지역으로 분류되어 약 200 m의 옹벽설치로 5천만 원이 추가로 소요되었다.

본 피해개소는 Fig 6에서 보는 바와 같이 평지구간의 순성토 구간인 상행선으로 우측에 하행선이 위치하게 되는 개소이다. 사면활동에 대한 대책공법이 시공되지 않아 집중호우에 의해 성토면에서 활동이 발생하여 응급복구 시간 동안 열차운행이 불통된 경우이다.

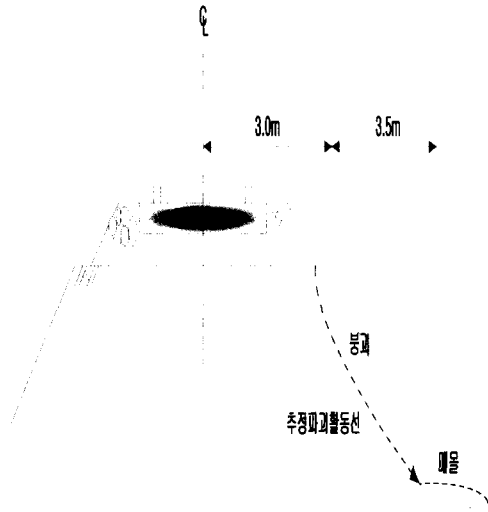


Fig. 6 재해상황 개요도 (경부선 ○○-▽▽구간)

5.2.2 한계우량의 산정과 평가

본 사면에서 재해가 발생하였을 때, 기상청의 강우량 데이터에서 얻은 값은 누적강우량 194.3 mm, 최대 시간우량 43.8 mm/hr였다. 상기 구간에 대하여 사면 점검양식에 의거하여 한계우량



을 산출한 결과, 경부선 ○○○-▽▽구간의 재해 발생구간에 대한 한계우량은 최대 시간우량 40.78 mm/hr로 계산되었다.

앞의 5.1과 마찬가지로 Fig. 7에 강우 개시시각(1995/08/30/05:00) 이후 시간을 x축에, 각 시간대별 강우량(시간우량)을 y축에 도시하였으며, 계산된 한계우량곡선을 함께 도시하였다. 그림에서 강우개시 후 약 13시간 경과 후, 최대시간우량  $\gamma = 43.8 \text{ mm/hr}$ 에서 붕괴가 발생한 것을 볼 수 있으며, 계산치가 실측치보다 적게 계산됨으로 강우에 대한 철도 성토사면의 안정성 평가에 있어 본 사면은 안전측에 있다고 판단할 수 있었다.

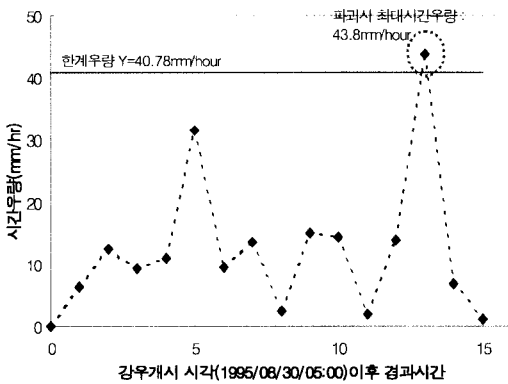


Fig. 7 한계우량곡선과 실제 강우량 비교 검증(II)

### 5.3 중앙선 ◇◇-▷▷구간의 예

#### 5.3.1 재해의 개요

청량리 보선사무소 관할 중앙선 ◇◇-▷▷구간에서 장마시 집중 호우에 의해 1998년 8월 8일 05시 17분경에 사면붕괴 재해의 발생으로 성토면의 선로에서 궤도를 포함한 도상붕괴 및 노반붕괴를 발생시켰다. 붕괴되었다. 본 사고의 복구는 보선원 32명에 의해 마대쌓기와 침목쌓기

에 의해 응급 복구되었으며, 복구액은 약 13백만원이 소요되었다.

본 피해개소는 Fig. 8과 같이 단선구간으로 순성토 구간에 해당되는 개소이며, 사면대책공법이 시공되지 않은 구간이다. 피해는 집중호우에 의해 궤도 중심부분부터 성토 저면까지 도상붕괴  $20 \text{ m}^3$ , 노반붕괴  $352 \text{ m}^3$ 의 토사가 붕괴 후, 매몰되어 열차운행에 지장을 준 경우이다.

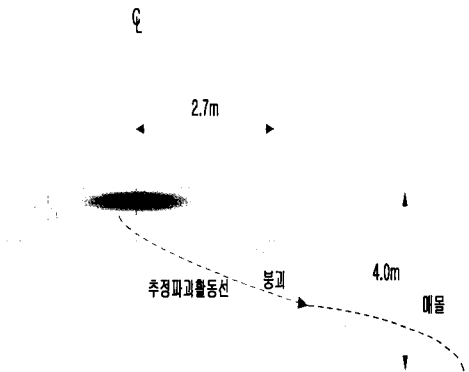


Fig. 8 재해상황 개요도 (중앙선 ◇◇-▷▷구간)

#### 5.3.2 한계우량의 산정과 평가

본 사면에서 재해가 발생하였을 때의 누적강우량은 203.2mm이었으며, 최대시간우량은 50.3 mm/hr이었다. 상기 구간에 대하여 사면 점검양식에 의거하여 한계우량을 산출한 결과, 중앙선 ◇◇-▷▷구간의 재해 발생구간에 대한 한계우량은 최대 시간우량으로 53.39 mm/hr로 계산되었다.

Fig. 9에서는 강우 개시시각(1998/08/05/19:00) 이후 각 시간을 x축에, 각 시간대별 강우량(시간우량)을 y축에 도시하였으며, 계산된 한계우량곡선을 함께 도시하였다. 그림에서 강우개시 약 2시간 경과 후, 최대 시간우량보다 높은 강우량이 관측됨에도 사면이 붕괴하지 않았는데 이는 사면의 초기 표면건조상태에 기인한 것으로 판단

된다. 한편 본 사례에서는 앞의 5.1 및 5.2의 두 가지 사례와는 다르게 계산치가 실측치를 초과하고 있어 불안전측에 해당하는 것을 볼 수 있는데, 이는 통계해석상  $\pm$  오차범위에 해당하는 것으로, 이를 극복하고자 Fig. 9에 계산에 의한 한계우량의 90% 붕괴확률선과 80% 붕괴확률선을 제시하여 보였다. 이는 추후 강우시 열차운전 규제기준으로 설정할 수 있는 붕괴확률선으로 계산 한계우량곡선을 100% 붕괴확률로 보고, 추가적인 문헌조사와 실험 등에 의해 고찰한다면, 적정 근거에 의한 가감으로 한계우량을 조정하여 강우시 열차운행에 있어, 보다 안전하고 효율적인 재해예방이 이루어질 수 있음을 시사하는 것이다.

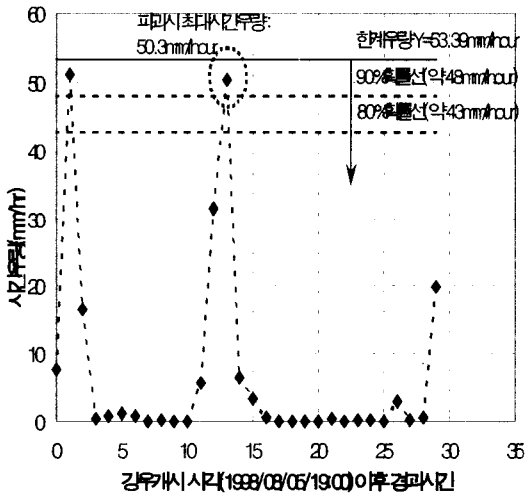


Fig. 9 한계우량곡선과 실제 강우량 비교 검증(III)

### 6. 결론

위험개소를 적절히 도출함으로써 철도사면재해를 미연에 방지하고 동시에 그 구간의 특성에 대응하는 적절한 운전규제를 정립하기 위하여

사면 현장조사를 통해 작성한 한계우량곡선으로 강우에 의한 사면붕괴의 위험성을 예측하고, 평가하고자 하였다. 이를 이용하여 강우시 철도 성토사면의 위험도 평가방안을 마련하였다.

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

### 감사의 글

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

### 참고 문헌

1. 구호본, 정의진, 1999, "도로절개면 유지관리 시스템 개발", 지반공학회 사면안정 학술발표회, pp. 169~175
2. 노한성, 황영철, 1999, "절토사면 유지관리 시스템", 지반공학회 사면안정 학술발표회, pp. 176~185
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