

파괴확률 변화속도를 이용한 철도 성토사면의 안전관리기준

Safety Regulation of Railway Embankment using Velocity of Failure Probability

김현기[†] · 신민호* · 이성혁** · 최찬용***

Hyun-ki Kim · Min-ho Shin · Sung-hyeok Lee · Chan-yong Choi

Abstract Safety regulation of railway embankment is restricted by safety factor in dry season or rainy season in Korea. Safety factor which is results from the limit equilibrium analysis is varied by various external conditions. And because it has no reflection point, it is very difficult to manage the safety of trains. Safety regulation such like warning sign, reduce speed and train stop is the best choice to reduce the damage of embankments where it is worried about occurrence of disasters. In this study, additional index is proposed to support present safety standards based on unsaturated soil mechanics and reliability analysis. It is velocity of failure probability. It has an apparent reflection point near present safety regulation. It is possible to modify the regulation for safety management and monitoring system of embankments by using this index.

Keywords : Unsaturated soil, Reliability analysis, Safety regulation, Slope stability, Velocity of failure probability

요 지 국내 사면안정성 설계기준은 우기·건기시로 제한되어 사용되고 있지만, 한계평형해석의 결과로 산출되는 안전율이 외부조건에 의해 변화되며, 특정한 변곡점이 없기 때문에 사전에 안전을 확보하기 어렵다는 점에 착안하여 경보발령, 서행 및 열차정지 등과 같은 안전규정의 설정이 가능한 대안을 검토하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 불포화토질역학과 신뢰성해석에 기초하여 현행 안전율을 보조할 수 있는 부가적인 지표를 도입하였다. 강우침투에 따라 안전율과 신뢰지수는 지수함수형태로 감소하는 특징을 보이며, 파괴확률은 누적확률분포함수 형태로 증가함을 확인할 수 있었다. 본 연구에서 검토한 부가지표인 파괴확률 변화속도는 현재의 기준 안전율 부근에서 명백한 변곡점을 갖는 특징이 있다. 이를 이용하면 사면의 안전관리와 모니터링 시스템에 대한 적정 규정으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

주 요 어 : 불포화토, 신뢰성해석, 안전규정, 사면안정, 파괴확률 변화속도

1. 서 론

철도는 공공 교통수단으로서 안전하고, 안정된 운송의 확보를 책임지고 있다. 최근 지구온난화로 인한 국지성 호우와 태풍 등은 해마다 철도수송을 지연시킴으로써 막대한 인적·물적 손실을 발생시키기 때문에 이와 같은 기상재해로부터 철도시설물, 차량 및 승객을 안전하게 보호하기 위한

사전예방체계가 필요하다. 철도 성토사면은 붕괴시 철도수송 체제의 지장을 초래하며, 인명 및 국가 재산의 손실을 발생시킨다. 강우에 의한 철도 사면붕괴는 강우침투에 의한 포화도의 상승에 의한 자중의 증가, 포화에 따른 모관흡수력의 소실에 의한 겉보기 점착력의 소실, 간극수압의 저하에 의한 흙의 강도저하에 기인한다. 일반적으로 강우시 사면 안전성은 포화 및 불포화 침투, 그리고 불포화투수함수와 전단강도함수를 이용하여 강우강도, 강우지속시간 변화가 사면의 안정성 변화에 주는 영향을 파악하게 된다.

본 연구에서는 강우침투시 사면붕괴 메커니즘을 효율적으로 분석하기 위하여 불포화토질역학과 신뢰성해석을 적용하였다. 철도 성토사면에 대한 안전관리기준의 설정을

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원
E-mail : hkkim@krii.re.kr

TEL : (031)460-5307 FAX : (031)460-5319

* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 수석연구원

** 정회원, 한국철도기술연구원, 연구시설건설단, 책임연구원

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 철도구조연구실, 선임연구원

위하여 강우침투에 따른 사면안정성 변화를 파괴확률 변화 속도 변화와 비교하여 분석하였으며, 철도 성토사면에 대한 적용성을 검토하였다. 파괴확률 변화속도를 이용하면 현재 기준을 보완하여 운행 중인 열차에 대한 개선된 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 이론적 배경

2.1 강우침투 경계조건

현재 활용하고 있는 흐름/침투방정식은 강우침투가 사면의 경사각에 따라 변화됨을 고려할 수 없어 사면경사각 0인 경우에 적용이 가능하다. 또한 수치해석 프로그램의 강우침투조건은 단위유량으로 경사면에 부여해 경사면에 직각인 방향으로 침투가 발생토록 하여 이에 따라 강우침투 깊이의 과대평가가 발생할 여지가 있다. 이는 사면안정해석의 오차를 발생시킬 수 있으므로, 이를 보완할 수 있는 강우침투경계조건의 재설정이 필요하다(Fig. 1).

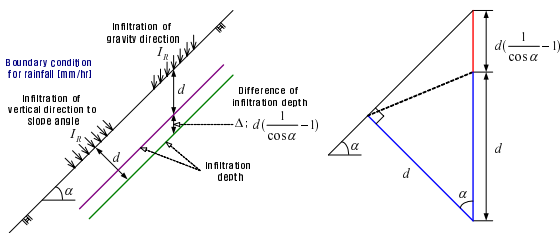


Fig. 1. Schematic diagram for rainfall infiltration (Kim et al., 2003)

2.2 지반내 흐름

포화흐름과 불포화흐름을 모두 고려할 수 있으며, Darcy의 법칙을 기본으로 한 지배방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Fredlund et al., 1994).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + q = \frac{\partial (V_w/V)}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 h : 전수두

k_x, k_y : x, y 방향 투수계수

q : 외부에서 공급되는 수량

V_w/V : 체적함수비

t : 시간

2.3 신뢰성해석

전통적인 사면안정해석에서의 안정성은 지반정수의 대푯값을 적용한 안전율 개념을 사용하고 있어 지반내에 존재하는 불확실성을 반영하기 어렵지만, 신뢰성해석에서는 지반

정수의 확률분포를 반영한 해석이 가능하고, 이를 이용하여 지반정수, 해석모델의 불확실성을 최소화할 수 있는 기법으로 최근 많은 연구가 수행되고 있다(김 등, 2006; 김, 2007).

신뢰성해석기반 사면안정해석은 사면의 임계활동면에 대한 파괴확률을 산출하여 안정성을 평가하며, 안전율의 확률밀도함수가 기준 안전율을 하회하는 한계상태함수 구간의 확률밀도 면적을 통해 결정한다. 하지만, 신뢰성해석의 확률밀도함수를 정확히 구하는 것은 매우 어렵고 보통 사용되는 실용적인 방법은 안전율의 기대값과 표준편차를 통한 것이다. 파괴확률은 신뢰지수에 의해 간접적으로 산정할 수 있으며, 기준안전율이 1.0인 경우 다음과 같이 산정한다(김 등, 2002).

$$\beta = \frac{E[FS] - 1.0}{\sigma_{FS}} \quad (2)$$

사면안정의 안전율이 정규확률분포를 따른다고 가정하면 파괴확률은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$P_r(f) = \Phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{-\beta} g(z) dz \quad (3)$$

여기서, $P_r(f)$ 는 파괴확률, $\Phi(-\beta)$ 는 표준정규분포 상의 $-\infty$ 에서 $-\beta$ 까지의 확률면적, 그리고 $g(z)$ 는 사면안정에서 안전율에 대한 한계상태함수로 정의된다.

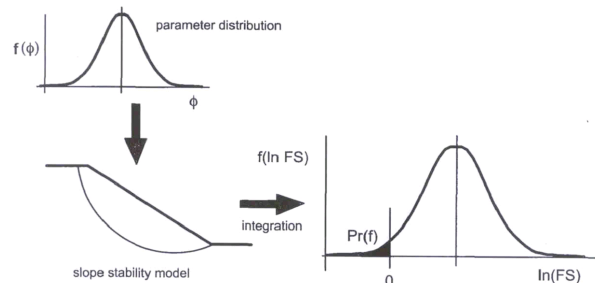


Fig. 2. Failure probability and reliability index

신뢰성 해석을 기반으로 하는 사면안정해석의 안정성 평가지표는 파괴확률의 변화속도에 기초하여 다음과 같이 정의하도록 한다(Ueno Makoto et al., 2001).

$$\dot{P}_f = P_f(k) - P_f(k-1) \quad (4)$$

여기에서 단위는 %/hr이다.

파괴확률 변화속도는 강우지속시간에 따라 변화되는 파괴확률의 시간변화량이고, 신뢰성해석결과인 파괴확률은 결정론적 해석결과인 안전율에 비해 빠른 변화량을 보이게 되며, 파괴확률 변화속도의 경우, 보다 민감한 변화를 나타내게 되어 보조지표로의 적용을 검토하게 되었다.

3. 수치해석

3.1 해석단면 및 경계조건

강우침투에 의한 사면의 안정성을 검토하기 위해 대표 단면을 가정하여 수치해석을 실시하였다. 성토사면 위에 건설된 단선철도를 대상으로 하였다. 해석의 용이성을 위하여 지반은 균질한 화강풍화토로 조성되었고 지반의 투수계수는 수평방향 및 연직방향이 동일한 것으로 가정하였다. 지하수위는 불투수층의 상부에 존재하는 것으로 하였다. 강우침투 및 사면안정해석에 사용된 해석단면은 Fig. 3과 같다. 강우침투해석에 있어 강우경계조건은 실험결과에 의해 부여하였으며 이로 인해 평지 및 경사면의 강우조건을 다르게 설정하였고 열차하중의 경계조건은 국내 1급2급 선로조건을 적용하고 표준하중에 근거하여 충격률(i)에 의한 변동률을 고려한 동적하중을 계산하였다. 해석의 용이성을 위해 윤증을 레일면에 직하지 않고, 노반압력으로 변환하여 적용하였다. 한편, 적용된 토질정수와 강도정수는 Table 1과 Table 2에 제시하였으며, 실내시험 수행을 통하여 얻어진 결과를 사용하였다(Kim et al., 2001, 2003).

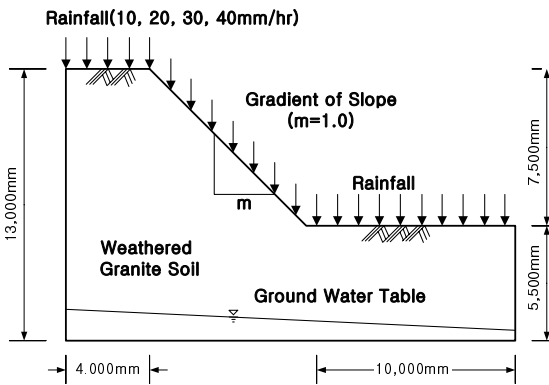


Fig. 3. A Conceptual view of the generic railway embankment

Table 1. Soil properties

Soil	γ_{dmax} (t/m^3)	w_{opt} (%)	k_s (cm/sec)	G_s	S (%)	w_{sat} (%)
Weathered Granite Soil	1.82	11	4.41×10^{-4}	2.64	100	20.1

Table 2. Strength parameters

Soil	c' (kPa)	ϕ'	ϕ_b	$(\sigma_n - u_a)$ (kPa)
Weathered Granite Soil	2.45	37.5	12	34

3.2 수치해석

강우시 사면의 안정성변화의 파악을 위하여 수치해석을 시행하였다. 강우시간 및 열차속도에 따른 강우침투 및 지하수위변화가 사면안정에 미치는 영향을 분석함과 동시에 각 시점에서의 안전율을 기반으로 신뢰성해석을 시행하여 신뢰지수, 파괴확률 그리고 파괴확률 변화속도를 계산하였다.

침투해석은 Geo-Slope사의 Seep/w를 사용하여 유한요소 해석을 시행하였다. Seep/w는 지반의 불포화 특성을 고려한 침투 해석이 가능하며, 해석대상사면에 지하수위를 적용한 정상상태에서 1차 해석을 시행하여 불포화침투해석의 초기조건을 구현하였으며 다음단계로 비정상상태로 지반의 함수특성과 투수계수 등을 적용하여 강우침투상황의 재현을 모사하였다. Fig. 4는 강우침투깊이에 따라 사면상단 선단부 위치에서 높이방향으로 측정된 압력수두의 변화를 보인 것이다. 초기 지하수위조건에서 강우침투에 따라 상부영역이 포화되어 압력수두가 '0'이 되는 것으로 확인할 수 있으며, 지하수위도 시간증가에 따라 상부로 상승하고 있다.

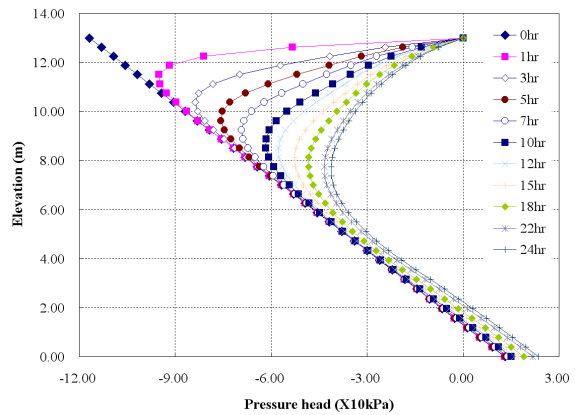


Fig. 4. Pressure Head with infiltration depth

또한 Slope/w를 이용하여 강우침투에 의한 사면안정해석을 수행하였다. 침투해석결과로 구한 간극수압 분포를 통하여 침투에 의한 사면안정의 저하를 불포화 전단강도 함수(ϕ_b)를 이용하여 사면안정의 저하를 고려하는 것이 가능하다.

신뢰성해석은 Slope/w에서 제공되는 몬테카를로 시뮬레이션(Monte Carlo Simulation, MCS)은 안전율 1.0을 기준으로 신뢰성해석을 시행하게 되므로, 국내 우기시 안전율 기준인 1.3을 적용하기 위해서는 상기결과를 기반으로 The Corps of Engineers(1997)에서 근사값으로 사용을 권고한 평균값 일계이차모멘트법을 사용하였다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 안전율

강우지속시간과 열차속도변화에 의한 하중변화에 따른 사면의 안정성을 검토하기 위하여 강우강도 30mm/hr를 적용하여 사면의 안정성 변화를 해석함으로써 강우지속시간과 열차속도변화에 의해 사면에 재하되는 하중변화가 사면에 미치는 영향을 알아보았다. Fig. 5와 같이 강우지속시간이 증가함에 따라 사면의 포화심도가 증가하여 사면의 안전율은 우기시 기준 안전율(Fs=1.3) 이하로 감소하는 경향을 나타낸다. 동적하중은 열차속도에 비례하므로 열차속도가 증가하면 안전율은 감소하게 된다. 안전율의 감소량은 약 0.4이며, 안전율의 변화 경향은 모든 열차속도에 대하여 유사한 것을 알 수 있다.

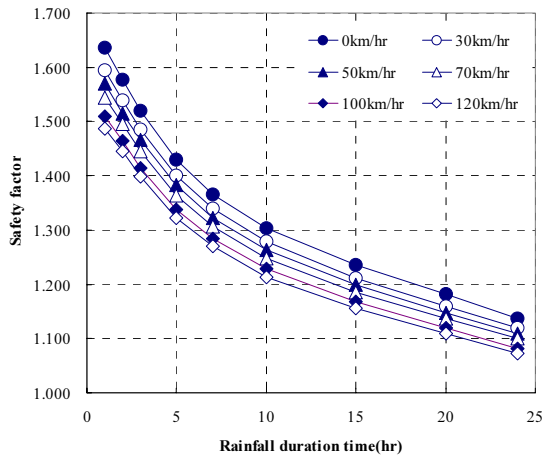


Fig. 5. Safety factor with rainfall duration time

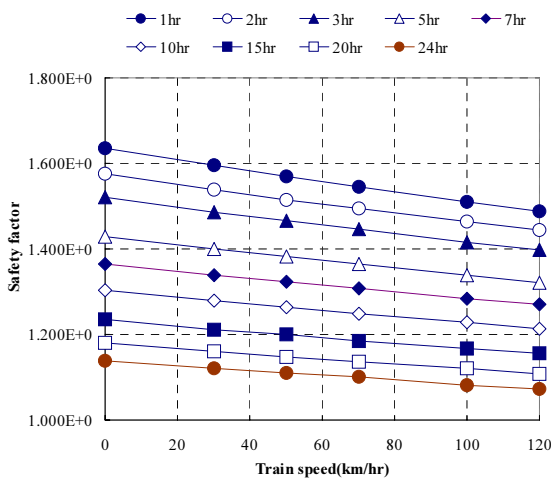


Fig. 6. Safety factor with train speed

Fig. 6은 열차속도변화에 의한 하중변화에 따른 안전율

의 변화를 보여주고 있는데 열차속도에 따라 직선적으로 감소하는 경향을 나타낸다. 강우침투 초기상태 시 열차속도 증가에 의한 안전율의 변화는 최대 0.148이지만 24시간 이후의 변화는 0.064로 선형적인 감소로 나타났다. 즉, 사면의 안전율 변화는 지반의 강도조건이나 강도정수뿐만 아니라 강우강도, 강우지속시간, 누적강우량 및 열차속도변화에 의해 사면에 재하되는 하중변화로 인한 충격률의 증가를 동반하고 결과적으로 사면의 안정성 변화에 보다 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

4.2 신뢰지수

강우지속시간과 열차속도변화에 의한 하중변화에 따른 사면의 안정성을 검토하기 위하여 강우침투에 따른 사면의 신뢰지수를 검토하였다. 강우지속시간에 따른 누적강우량이 증가함에 따라 안전율은 감소하여 사면의 신뢰지수가 점점 감소하는 경향을 나타낸다. 신뢰지수는 국내 우기시 기준 안전율인 1.3을 적용하면 $\beta = (\overline{FS} - 1.3) / \sigma_{FS}$ 이므로 안전율의 변화에 직접적으로 비례하는 관계에 있다. Fig. 7에 강우지속시간에 따른 신뢰지수의 변화를 나타내었고, Fig. 8은 열차속도변화에 의한 하중변화에 따른 신뢰지수 변화를 보인 것이다. 강우침투에 따른 안전율의 저하와 동반하여 신뢰지수도 감소함을 확인할 수 있다.

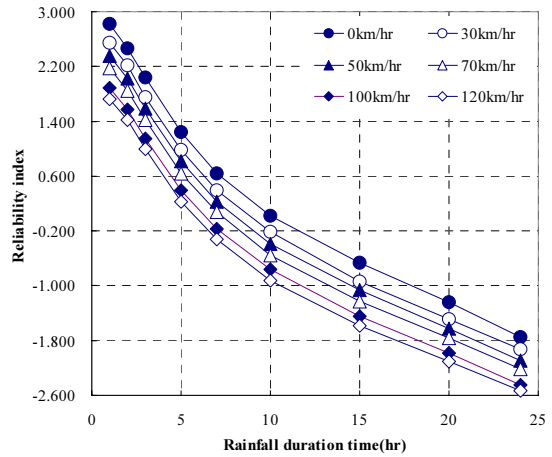


Fig. 7. Reliability index with rainfall duration time

4.3 파괴확률

강우침투에 의해 안전율과 신뢰지수가 빠른 감소를 보이는데 반해, 파괴확률은 비선형적으로 급증하는 변화를 나타낸다. 강우지속시간에 따른 파괴확률은 강우지속시간 20시간 동안 100% 가까이 증가하고 6시간 동안 50% 이상 증가하며, 비선형적으로 증가하게 된다(Fig. 9). 한편, 파괴확률의 변화량은 안전율과 신뢰지수에 비해 외부 변화에 민감하게 반응하고 있다.

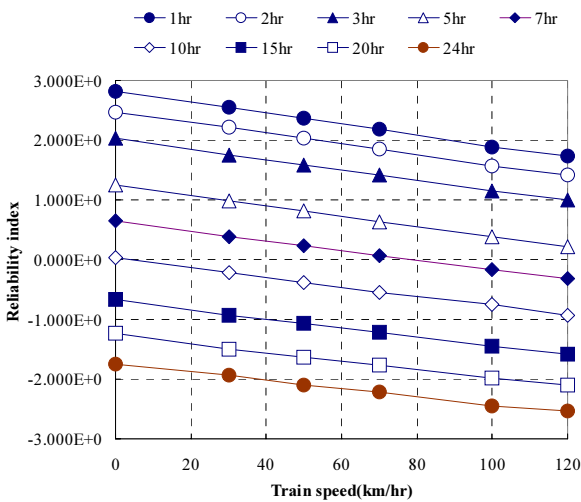


Fig. 8. Reliability index with train speed

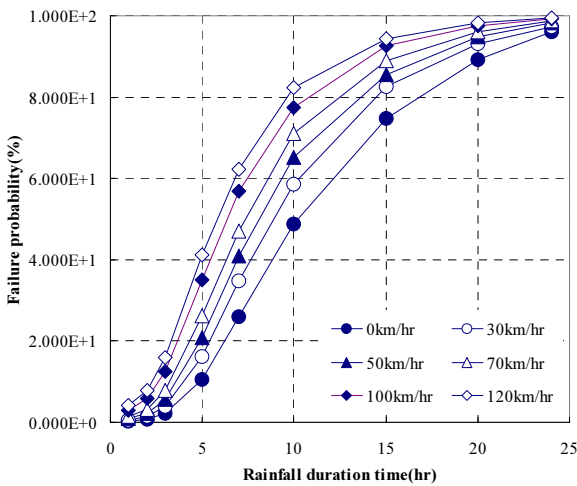


Fig. 9. Failure probability with rainfall duration time

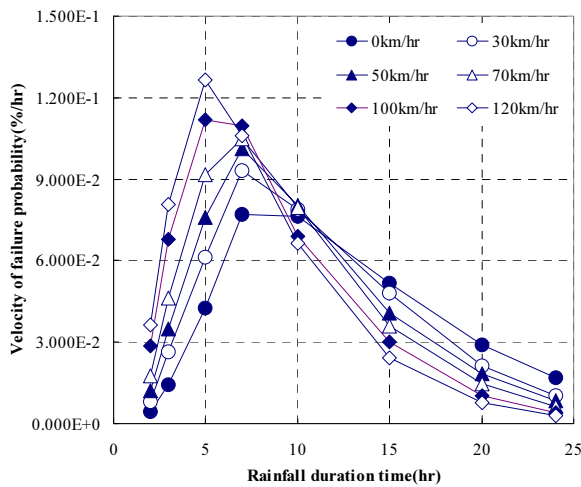


Fig. 10. Velocity of failure probability with rainfall duration time

4.4 파괴학을 변화속도

파괴학을 변화속도는 안정에 관련된 기타 지표가 기준치 (안전율 1.3, 신뢰지수 0, 파괴확률 50%)에 도달하기 전에 변곡점인 피크값에 도달하는 것을 볼 수 있으며, 설정된 기준 안전율의 값에 전적으로 의존하게 될 것이다. 파괴확률 변화속도가 가지는 이 특성을 이용하면 열차운행에 있어 경보발령 포인트로 활용할 수 있을 것이며, 효율적인 안전 관리기준의 제안이 가능할 것으로 판단된다(Fig. 10).

4.5 파괴학을 변화속도를 이용한 안전관리기준 설정

파괴학을 변화속도의 변화특성을 이용하면 우기시 국내 사면안전율 기준을 보완할 수 있는 보조 지표로 적용이 가능하다. 본 연구에서는 파괴확률 변화속도를 이용한 효율적인 사면의 안전관리기준을 Table 3과 같이 제안하였다.

Table 3. Concept of safety standard for railway slopes

Safety regulation	FS	Failure probability	Velocity of failure probability	Remarks
Step I	-	-	peak value	Warning
Step II	1.3	about 50%	-	Train stop

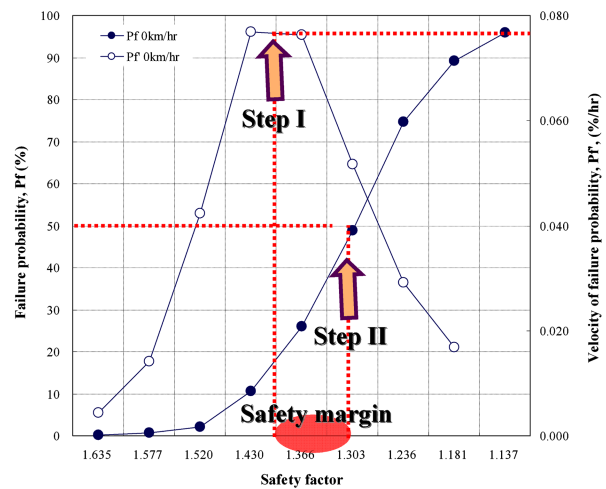


Fig. 11. Conceptual view of safety regulation

Step I은 ‘경보발령’ 단계로 파괴확률 변화속도의 피크값으로 정의된다. 이때의 안전율은 약 1.4이며 우기시 안전율 기준인 1.3보다 약 0.1의 여유를 가지고 경보가 발령될 수 있다. Step II는 ‘열차정지’로 기준 안전율 1.3 또는 파괴확률을 약 50% 지점으로 정의하였다. 이 점을 열차운행 정지선으로 활용하게 되면, Step 사이에 존재하는 영역은 ‘안전 여유(margin) 영역’으로 열차의 서행 또는 주의운전 등으로 유용하게 활용할 수 있는 구간이다(Fig. 11). 이상의 개념을 연구결과에 대하여 적용한 결과, Fig. 12와 같이 열차속도

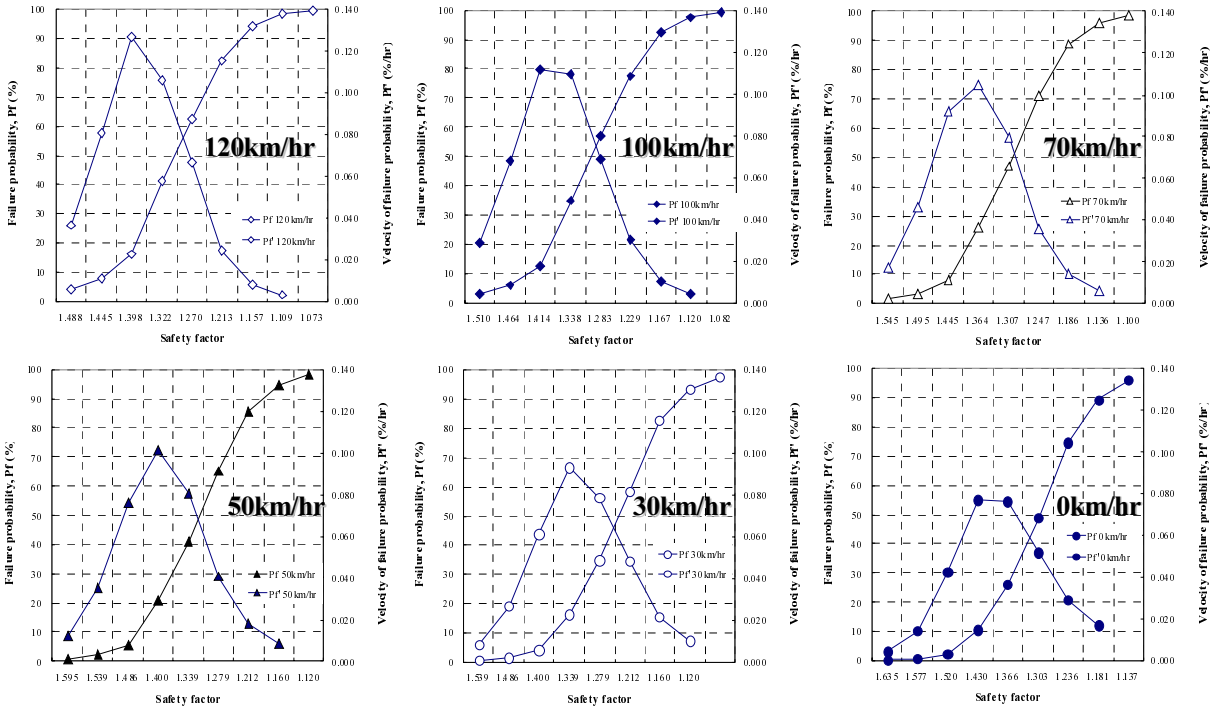


Fig. 12. Safety regulation of railway embankment with train speed

에 따라 운용이 가능한 안전관리기준을 제안할 수 있었다.

5. 결론

강우침투에 따른 철도 성토사면의 안정성 변화를 파악하기 위하여 신뢰성 해석기법을 적용하였다. 철도 성토사면의 안전관리를 위한 기준 제안을 위하여 강우조건과 열차 속도변화에 따른 하중변화에 기인한 안정성 변화를 안전율, 신뢰지수, 파괴확률 그리고 파괴확률 변화속도에 대하여 분석하였다.

안전율, 신뢰지수 및 파괴확률은 강우침투 변화에 따라 급격한 변화를 보이지만, 명백한 변곡점이 없어 붕괴 이전의 사전대책으로의 적용이 어렵다. 하지만, 본 연구에서 제안한 파괴확률 변화속도를 이용하면, 안전율이 우기의 기준치에 도달하기 전에 변곡점인 피크값을 보이는 특성이 있으므로 이를 이용하여 철도 성토사면에 대한 효율적인 통제가 가능할 것으로 판단된다. 철도사면의 안전관리, 모니터링 시스템의 경보발령기준에 본 보조지표와 관리기준의 적용이 가능할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. D. G. Fredlund, Anqing Xing, and Shagyan Huang(1994), "Pre-

dicting the Permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve," Canadian Geotech. J., Vol. 31, pp.533-546

2. H. K. Kim et al.(2001), "Slope stability evaluation of railway embankment under rainfall for rail-transport operation control," Railway Eng. 2001 on CD-rom, London, U.K.

3. H. K. Kim et al.(2003), "The development of rail-transport operation control using the variation of slope stability under rainfall," Railway Eng. 2003 on CD-rom, London, U.K.

4. U.S. Army Corps of Engineers(1997), "Engineering and design, introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical eng.," Engr. Tech. Letter No. 1110-2-547, Department of the Army, Washington.

5. Ueno Makoto et al.(2001) "The prediction of slope failure by reliability index," Soil and Foundation, No. 49-7(522), pp.28-30 (in Japanese).

6. 김기영, 조성은(2006), "확률론적 사면안정 해석기법에 관한 연구," 한국지반공학회논문집, 제 22권, 제 11호, pp.101-112.

7. 김진만(2007), "통계오차를 고려한 사면안정 신뢰성해석," Jour. of the KGS, Vol. 23, No. 3, pp.51-59.

8. 김현기, 김수삼(2008), "파괴확률을 이용한 철도절개면의 위험도 평가," 한국철도학회논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 158-164.

9. 김형배, 이승호(2002), "실용적인 확률론적 사면안정해석기법 개발," 한국지반공학회논문집 제18권, 5호, pp.271-280.

10. 한국철도기술연구원(2009), "철도시설물 안전관리 네트워크 시범 구축," 제3차년도 연구보고서.

접수일(2009년 10월 6일), 수정일(2009년 11월 24일), 게재확정일(2009년 12월 15일)