지하수위에 따른 철도사면의 안정성 변화

The Variation of Slope Stability by Ground Water Level in Railway Lines

김현기* 신민호** 신지수***

Kim, Hyun-Ki Shin, Min-Ho Shin, Ji-soo

ABSTRACT

Slope stability is affected by various factors. For safety management of slopes, monitoring systems have been widely constructed along railway lines. The representative data from the systems are variations of ground profile such like ground water level and pore water pressure etc. and direct displacement measured by ground clinometer and tension wire sensor. Slopes are mainly effected by rainfall and rainfall causes the decrease of factor of safety(FOS). Because FOS varies linearly by the variation of ground water level and pore pressure, it has a weak point that could not define the time and proper warning sign to secure the safety of the train. In this study, alternative of FOS such as reliability index and probability of failure is applied to slope stability analysis introducing the reliability concept. FOS, reliability index, probability of failure and velocity of probability of failure of the slopes by variation of ground water level are investigated for setting up the specification of safety management of slopes. By executing case study of a slope(ILLO-IMSUNGLI), it is showed to be applied to specification of safety management.

1. 서 론

지구온난화에 의해 국내 기후는 점진적으로 아열대 기후로 변화하고 있으며, 이상기온에 따른 국지성 호우, 태풍 등이 자주 발생하여 피해를 유발하고 있다. 흙쌓기와 땅깍기로 대표되는 철도사면의 붕괴는 이와 같은 기후의 영향에 의한 피해사례 중에서 가장 빈번하게 발생하여 철도의 영업손실과 함께 국민의 인적·물적 손실을 유발하게 된다. 강우에 의한 사면피해는 강우 개시 이후 우수의 지반 침투에 따라 지반의 자중이 증가하고, 지반강도가 저하함에 의해 발생하게 된다. 이 결과로 안전율의 감소와 파괴확률의 증가가 나타나며, 최종적으로 활동파괴로 정의되는 과정을 거치게 된다. 따라서 각 단계마다의 메커니즘을 적절히 구성하여 모델화하고, 시시각각으로 변화하는 강우량에 대응한 사면안정성의 변화를 파악할 수 있어야 그 시각의 붕괴위험성이 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 일반적으로 강우시의 사면안정성은 포화·불포화 침투류 해석과 원호활동해석 등의 사면안정해석을 결합한 연계해석에 의해 평가되어지는 것이 일반적이다. 하지만, 이 해석법은 상기 붕괴과정을 적절하게 표현할 수 있지만 지반강도 등의 입력 파라미터의 정밀도에 의해 결과가 큰 영향을 받는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 강우침투에 의한 사면붕괴메커니즘의 효율적 제안을 위해 지반정수에 대한 신뢰성해석기법의 적용성을 검토하였으며, 1차적으로 지하수위 변화에 따른 사면안정성 변화를 파악하기 위하여 파괴확률 및 파괴확률 변화속도를 이용하여 현행 안전율 기준을 보완할 수 있는 대안으로 적용하고자 하였다. 특히, 효율적인 사면안전관리를 위한 관리기준의 제안을 위해 지하수위 변화에 따른 철도사면의 안정성 변화를 파괴확률 변화속도를 이용하여 제안하였으며, 호남선 일로-임성리 사면에 대하여 적용성을 검토하였다.

* 책임저자 : 김현기 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원
E-mail : hkkim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5307 FAX : (031)460-5319
** 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 수석연구원
*** 정회원, 한국철도기술연구원 철도구조연구실 연구원

2. 이론적 배경

2.1 신뢰성해석기법

임의변수의 기댓값에 대하여 한계상태함수를 Taylor 급수 전개할 때, 급수의 1차 항까지 고려한다면, 독립적인 임의변수에 대한 한계상태함수의 기댓값은 다음과 같이 근사적으로 얻어질 수 있다(Hahn 등, 1967).

$$E[Z] = \mu_Z \approx g(E[X_1],\ E[X_2],\ \cdots\ ,\ E[X_n]) + e \quad (1)$$

여기에서 함수 $g(X_1,\ X_2,\ \cdots\ ,\ X_n)$은 구성요소 임의변수의 평균값에 상응하는 입력변수를 이용하여 결정되어진다. 임의변수의 쌍이 상호 연관성이 있는 경우($|\rho_{XY}| > 0$)에 대한 기댓값은 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$E[Z] = \mu_Z \approx g(E[X_1],\ E[X_2],\ \cdots\ ,\ E[X_n]) \quad (2)$$
$$+ \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k} \frac{\partial^2 Z}{\partial X_i \partial X_j} Cov(X_i, X_j) + e \quad \text{for} \quad i < j$$

여기에서 e는 모델링 오차이다. $\sum$항의 기여도는 통상 상대적으로 작고, 이차항으로 존재하므로 계산에서 생략될 수 있다. 더욱이 테일러 급수는 입력 임의변수에 대하여 한계상태함수 응답의 분산을 평가하는데 사용될 수 있다. 테일러 급수의 일차항까지만 고려하면, 분산은 다음과 같이 표현된다.

$$Var[Z] = \sigma_Z^2 \approx \sum_{i=1}^{k}\left[\left(\frac{\partial Z}{\partial X_i}\right)^2 Var[X_i]\right] \quad (3)$$
$$+ 2\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k}\left[\left(\frac{\partial Z}{\partial X_i}\frac{\partial X}{\partial X_j}\right) Cov[X_i,\ X_j]\right] + V[e] \quad \text{for} \quad i < j$$

여기에서, 편미분항 $\partial Z/\partial X_i$은 선택되어진 한계상태함수에 기초하여 각각의 임의변수에 대하여 평가되어진다.

the Corps of Engineers(1997)은 다음 식과 같은 미분항의 유한차분 근사해의 사용을 권고하고 있다.

$$\frac{\partial Z}{\partial X_1} = \frac{g(X_1+\sigma_1,\ X_2,\ \cdots\ ,\ X_n) - g(X_1-\sigma_1,\ X_2,\ \cdots\ ,\ X_n)}{2\sigma_1} = \frac{\Delta Z_1}{2\sigma_1}$$
$$\frac{\partial Z}{\partial X_2} = \frac{g(X_1,\ X_2+\sigma_2,\ \cdots\ ,\ X_n) - g(X_1,\ X_2-\sigma_2,\ \cdots\ ,\ X_n)}{2\sigma_1} = \frac{\Delta Z_2}{2\sigma_2} \quad (4)$$

상기 미분항을 제곱하고 임의변수에 상응하는 분산과 곱하면, 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial X_1}\right)^2 Var[X_1] = \left[\frac{\Delta Z}{2\sigma_1}\right]^2 \sigma_1^2 = \frac{1}{4}[\Delta Z_1]^2 \quad (5)$$

위의 식에서 $X_2,\ X_3,\ \cdots\ ,\ X_n$은 구성요소 임의변수의 평균값으로 정의된다. 상호 독립적인 임의변수에 대하여 분산은 다음과 같이 단순하게 표현될 수 있다.

$$Var[Z] = \sigma_Z^2 \approx \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{k}[\Delta Z_i]^2 + V[e] \quad (6)$$

한편, 상호 연관성이 있는 변수에 대하여 $Cov[X_i,\ X_j] = \rho_{ij}\sigma_i\sigma_j$를 치환하면,

$$Var[Z] = \sigma_Z^2 \approx \frac{1}{4}\sum_{i=1}^{k}[\Delta Z_i]^2 + \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k}[\Delta Z_i \Delta Z_j \rho_{ij}] + V[e] \quad \text{for} i < j \quad (7)$$

ΔZ의 차이는 두 표준편차에 대하여 얻어진다.

이와 같이 임의의 한계상태함수의 기댓값을 구성요소 임의변수의 평균값에 상응하는 입력변수로 신뢰성을 평가하는 방법을 평균값 일계이차모멘트법(Mean Value First Order Second Moment reliability method, MVFOSM)이라 한다.

2.2 파괴확률변화속도에 의한 사면붕괴 안정성 평가지표

철도사면에서 붕괴위험도가 높다고 판단되는 사면에 대하여 침투해석과 사면안정해석 및 신뢰성해석을 위한 지반물성치를 실내시험, 실외시험 및 문헌자료 등을 기초로 추출하고, 지역적 강우특성을 반영한 강우강도를 대상 사면에

서 가장 근접한 우량계의 데이터로부터 작성하고, 이차원 강우침투해석을 시행한다. 침투해석에서 얻어진 사면의 각 개소의 포화도 상승에 따른 자중증가, 전단강도 저하 등을 평가하여 사면안정해석의 입력변수를 결정한다.

신뢰성해석을 기반으로 하는 사면안정해석의 안정성 평가지표는 파괴확률의 변화속도에 기초하여 다음과 같이 정의하도록 한다.

$$\dot{P}_f = P_f(k) - P_f(k-1) \quad (8)$$

여기에서 단위는 $\%/hr$로 된다. 이상과 같은 결과를 붕괴위험관리기준과 비교함에 의해 붕괴 발생 또는 미발생의 경우로 구분하도록 한다. 일본의 경우, 자연사면을 대상으로 한 기존의 연구에 의하면 붕괴위험관리기준 Θ=8%$/hr$에서 붕괴 사례와 미붕괴 사례가 구분되는 것을 알 수 있어, 이 값을 기준으로 붕괴위험도를 판별하고자 하였다(그림 1)

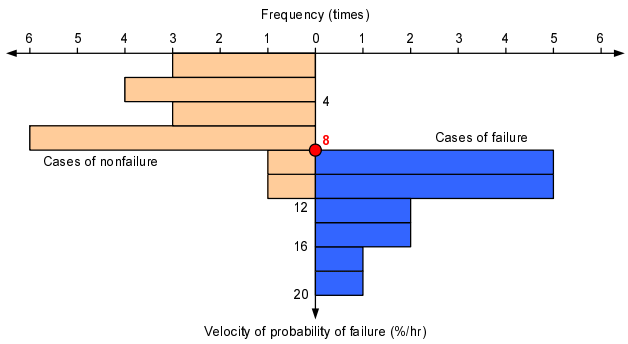

그림 1 파괴확률의 변화속도의 분포

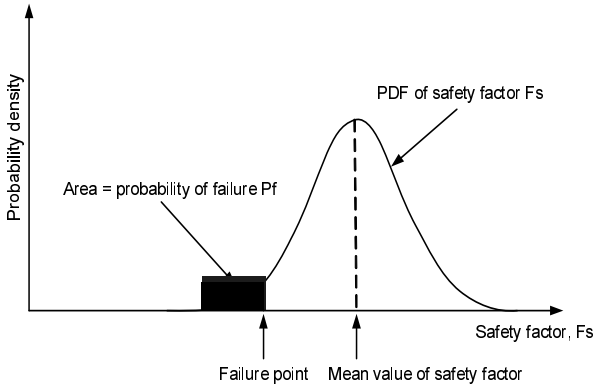

그림 2 안전율과 파괴확률의 관계

안전율과 파괴확률을 이용한 경우의 변화에 민감도를 비교하면, 파괴확률은 안전율이 '1' 이하인 확률로 정의된다. 일반적으로 사면의 활동해석의 안전율은 정규분포하는 것이 알려져 있다(그림 2). 그림 3은 평균안전율을 변화시킨 안전율의 분포형상이다. 그림 가운데 실선은 평균안전율이 변화할 때의 파괴확률의 변화, 점선은 파괴확률의 변화량의 천이를 보인 것이다. 평균 안전율이 2부터 1(파괴점)에 근접함에 따라서 파괴확률이 차제에 크게 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 안전율의 변화량은 F_s=2.0부터 1.9로 감소할 때와 F_s=1.3부터 1.2로 감소할 때는 동일한 변화량 0.1로 있지만, 파괴확률의 변화량은 각각 $\dot{P}_f$≒0%와 $\dot{P}_f$≒9.2%로 크게 다르게 된다. 이처럼 파괴확률의 변화량은 파괴에 가까워질수록 급속하게 증가하는 성질을 갖는다.

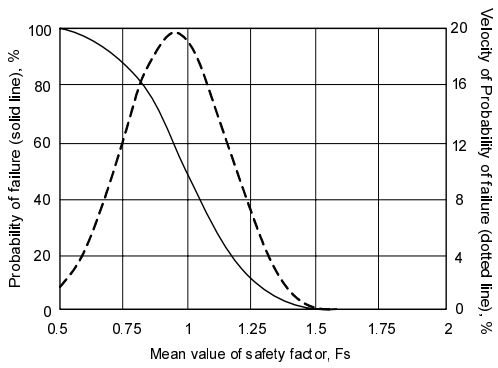

그림 3 안전율 변화에 따른 파괴확률 및 파괴확률 변화속도 변화

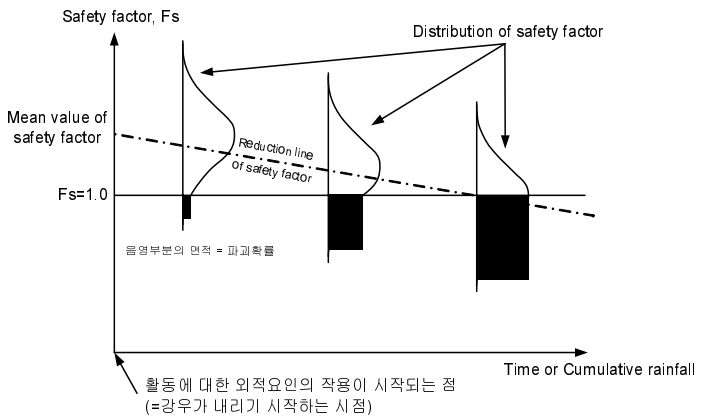

그림 4 강우시 평균안전율과 파괴확률의 관계

강우에 의한 사면의 안정성 저하 문제에 대해서 안전율과 파괴확률의 관계에 대해서 비교하였다. 강우시작부터의 강우단속시간과 사면의 평균안전율, 파괴확률의 3가지 파라미터의 상관관계를 도식적으로 정리한 것이 그림 4이다.

강우의 단속에서 의해 사면의 안정성은 저하함에 따라 붕괴에 도달하게 된다. 평균안전율로 비교하면 파괴확률(그림 가운데 검은색 부분)은 사면붕괴가 발생하는(평균안전율이 1로 됨) 부근에서 급속하게 증가하는 성질을 가지고 있다. 이 경우는 파괴확률의 대소로 붕괴의 위험성 유무를 검지할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

3. 신뢰성해석 프로그램 개발

사면안정해석기법과 신뢰성해석기법 모델을 이용하여 요소신뢰성해석프로그램을 개발하였다. Visual Basic을 이용하여 프로그램을 구성하였다. 프로그램의 특성은 다음과 같다.

1) Spread sheet형의 입력창과 출력창을 구현하여, 상용 프로그램인 Excel과 데이터의 직접적인 호환이 가능하도록 입출력의 간편성 추구
2) 지반정수의 평균 및 표준편차의 확률특성 입력창 제공
3) 파괴모드별로 필요한 정수의 직접 입력 가능
4) 모사법의 반복횟수에 대한 임의 조정 가능
5) 표층파괴, 평면파괴 및 원호파괴에 대한 실시간 안전율 및 파괴확률변화 파악 가능
6) 기존 연구에서 안전율의 한계상태함수는 정규분포 또는 로그 정규분포한다고 제안하고 있으므로 이를 반영할 수 있도록 한계상태함수의 분포형을 정규분포와 로그정규분포 2가지를 제공하여 선택적 활용
7) 안전율의 확률특성(표준편차, 분산계수) 및 파괴확률 제공

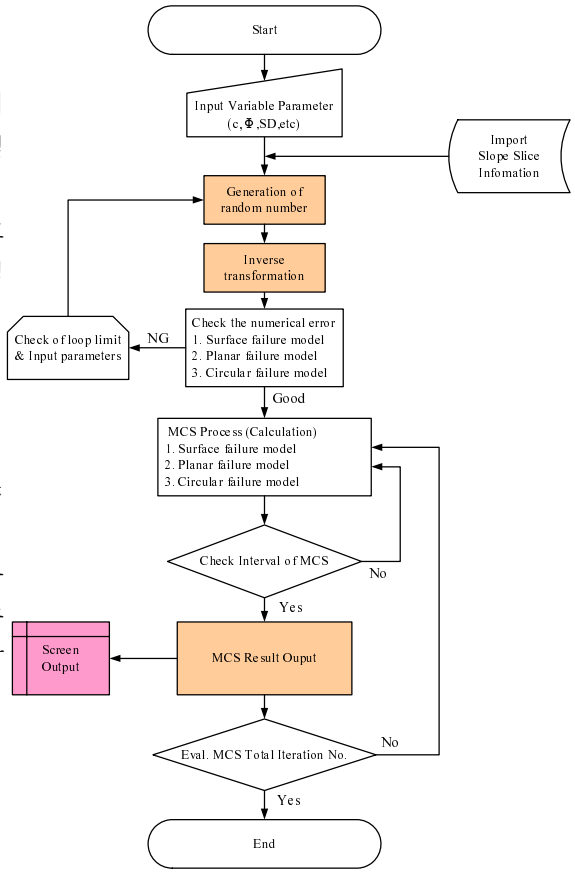

그림 5 신뢰성해석 프로그램 알고리즘

4. 적용성 분석

4.1 대상 사면

대상사면은 호남선 일로-임성리(240k740~240k950) 구간의 사면으로 연장 130m, 최대높이 70m, 사면경사 30°~35°의 지형적 특성을 갖는 절토사면이다. 표토는 화강 풍화토이며, 지층깊이에 따라 풍화암-연암-보통암-경암 등급의 암반으로 지층이 구성되어 있다. 하부에 낙석방지울타리가 시공되어 있으며, 일부구간은 숏크리트가 타설되어져 있다. 변상상황으로는 절개면 중앙 하단에 dyke가 관입으로 파쇄대가 형성되고 풍화와 절리에 의해 연약해져 얕은 표층붕괴가 발생될 이력을 보이고 있다. 절토사면에 대한 현장조사 결과, 절리면을 따라 지하수가 유입되어 전단강도가 약화된 절개면 중앙부에 숏크리트로 보강하였다.

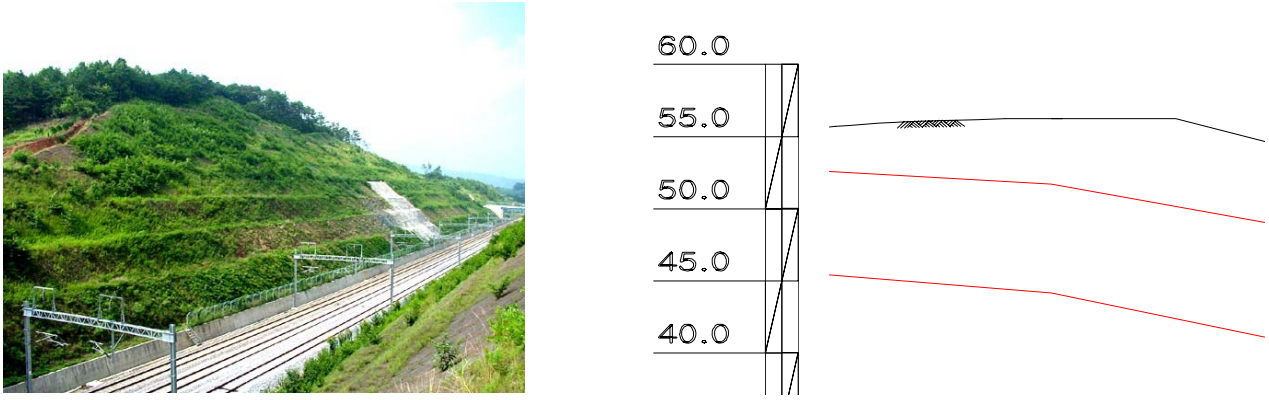

그림 6 대상사면 전경 및 지층구성

4.2 지하수위 변화에 따른 철도사면의 안정해석

본 연구에서 적용한 지하수위는 지표면 포화상태인 GL=0.0m를 포함하여 GL-1.5m, GL-3.0m, GL-4.0m, GL-5.0m, GL-6.0m, GL-7.0m, GL-8.0m이며, 각 지하수위에 대하여 사면안정해석과 신뢰성해석을 시행하였다. 현장 지하수위를 적용한 결과, 건설교통부 건설공사 비탈면 설계기준(2006)에서 제시한 안전율 기준에 따라 건기시 안전율은 1.56로 건기시 기준안전율 1.5이상을 만족하였다(그림 7).

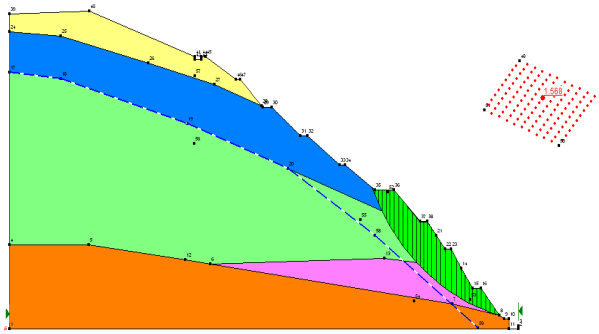

그림 7 Slope/w를 이용한 안정성 해석
(GL-8m, F_s=1.56)

도표 1 지하수위 변화에 따른 사면안정성 파라미터 일람

지하수위	안전율(F_s)	신뢰지수(β)	파괴확률(P_f)× 100%
GL-0.0m	0.92	-1.8	9.61E-01
GL-1.5m	1.05	1.4	8.37E-02
GL-3.0m	1.18	4.6	2.31E-06
GL-4.0m	1.27	6.4	8.60E-11
GL-4.5m	1.30	7.3	1.83E-13
GL-5.0m	1.33	8.1	3.01E-16
GL-6.0m	1.39	9.5	1.12E-21
GL-7.0m	1.44	10.7	5.16E-27
GL-8.0m	1.57	11.2	3.45E-29

도표 1에 지하수위 변화에 따른 사면안정성 관련 지표를 보였다. 예측할 수 있듯이 안전율은 선형적인 감소를 명확하게 보이고 있으며, 신뢰지수 또한 선형적 변화양상을 확인할 수 있었다. 다만, 파괴확률의 경우에서 그림 8과 같이 지하수위가 지표면 아래 3.0m를 넘어서는 시간부터 매우 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이와 같이 파괴확률의 변화량은 안전율과 신뢰지수에 비해 지반조건의 변화에 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있었다.

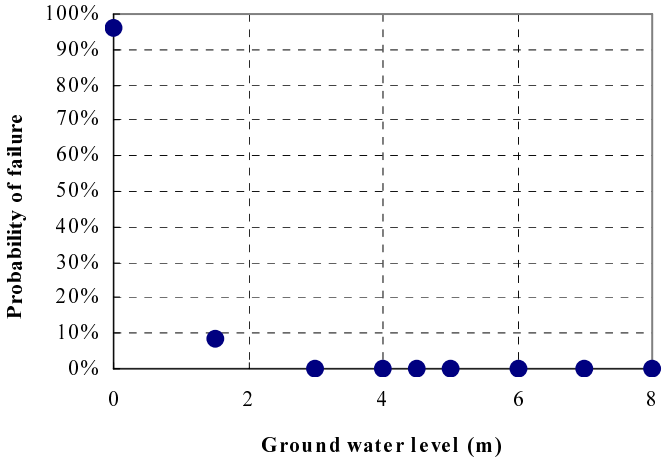

그림 8 지하수위 변화에 따른 파괴확률

4.3 지하수위 변화에 따른 파괴확률 변화속도 검토

파괴확률은 우기시 안전율 기준인 1.3 이하인 1.2의 값 부근에서 급변하게 되어, 안전율 기준과 비교하여 보완된 기준으로 정립하기에는 적용성이 난이하게 되는 반면(그림 9의 실선), 파괴확률 변화속도를 기반으로 하는 경우(그림 9의 점선)에는 안전율이 1.4 영역을 통과한 이후에 급속하게 변화되며, 파괴확률의 급격한 변화 이전에 파괴확률 변

화속도의 급격한 변화를 인지할 수 있어, 보다 안전측에서 사면안정성에 대한 위험도 예측이 가능하게 되며, 이를 기반으로 할 경우 사면의 위험경보 발령, 보수보강 시점 및 강우시 열차운전규제기준으로의 확장성이 용이함을 판단할 수 있었다.

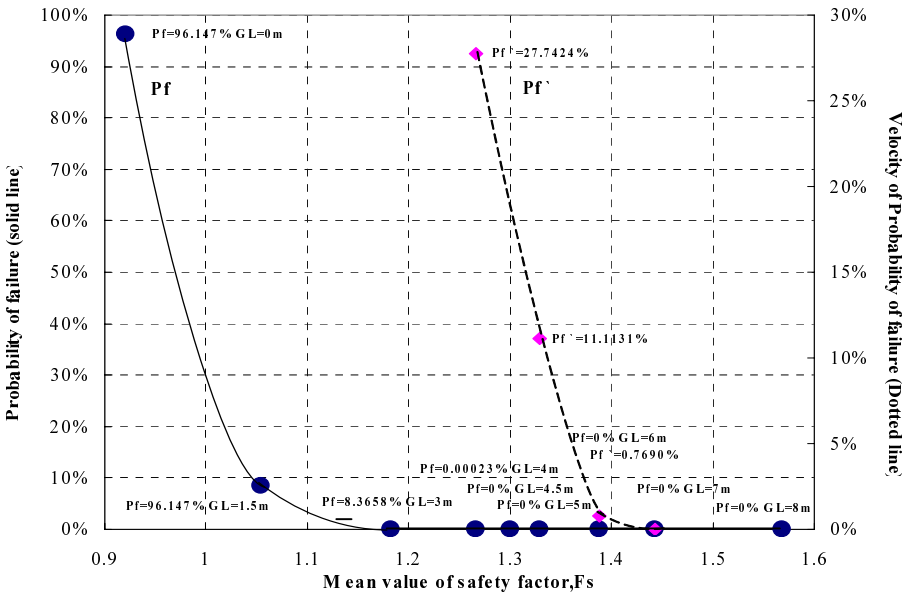

그림 9 지하수위 변화에 따른 파괴확률 변화속도

4.4 지하수위 변화에 따른 사면의 안전관리기준(일로-임성리 사면)

지하수위 변화에 따른 사면의 안전관리기준의 예를 일로-임성리 사면을 대상으로 설정하였다. 파괴확률 변화속도 8%에서 붕괴가 발생된다는 가정을 적용하면, 경보발령의 안전관리기준은 FS=1.33의 값을 갖게 되며, 이 때의 지반 내 지하수위는 지표하 5.5m에서 결정될 수 있어, 안전율과 파괴확률 및 파괴확률 변화속도를 이용한 상호 보완적인 관리기준의 제안이 가능함을 확인할 수 있었다. 따라서, 일로-임성리 사면에 대한 지하수위 변화에 따른 안전관리기준은 다음의 그림과 같이 결정되어질 수 있다.

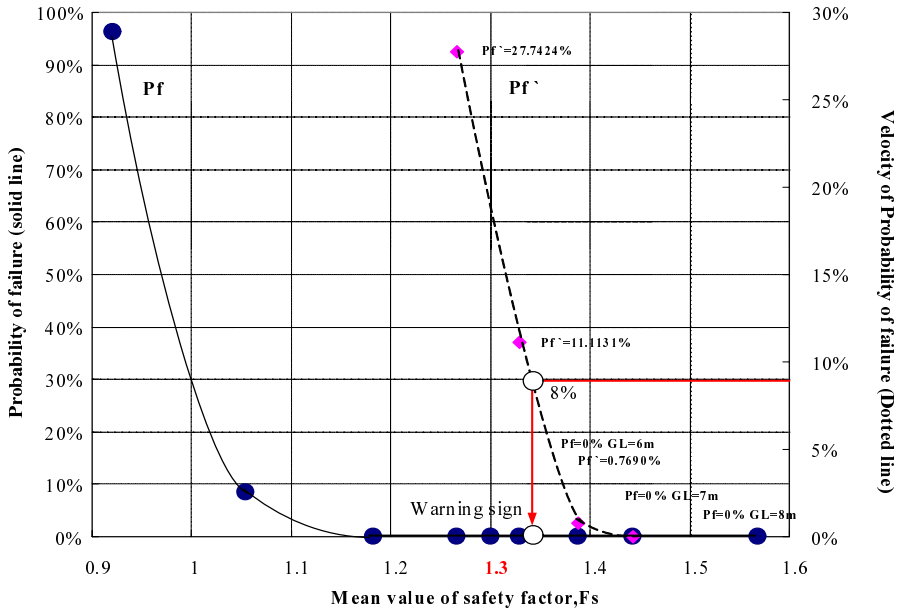

그림 10 지하수위 변화에 따른 사면의 안전관리기준(일로-임성리)

5. 결 론

본 연구에서는 지하수위 변화에 따른 철도사면의 안정성 변화를 검토하기 위하여 신뢰성해석기법을 적용하였으며, 안전율을 보완할 수 있는 대안으로 적용하고자 하였다. 철도사면의 안전관리를 위한 기준 제안을 위해 지하수위 변화에 따른 철도사면의 안정성을 안전율, 신뢰지수, 파괴확률 및 파괴확률 변화속도에 대하여 검토하였으며, 일로-임성리 사면에 대한 사례분석을 통하여 안전관리기준으로의 적용이 가능함을 보였다.

지하수위 변화에 따른 파괴확률은 안전율과 신뢰지수에 비하여 기준 안전율 부근에서 명확하게 민감한 변화를 보이지만, 파괴확률 변화속도는 보다 안전측에서 민감한 변화를 보이고 있어 사면안정성에 대한 위험도 예측을 효율적으로 제어할 수 있다고 판단되며, 이를 기반으로 할 경우 철도사면의 안전관리, 모니터링시스템의 경보발령, 보수보강 시점 및 강우시 열차운전규제기준 등의 분야로 확장 적용할 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 건설기술혁신사업의 연구비지원(06건설핵심B05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김현기, 김수삼 (2008), “파괴확률을 이용한 철도절개면의 위험도 평가”, 한국철도학회논문집 제11권, 제2호, pp.158-164
2. 김형배, 이승호 (2002), “실용적인 확률론적 사면안정해석기법 개발”, 한국지반공학회논문집 제18권, 제5호, pp. 271-280
3. 사공명 (2004). “강우로 인한 사면의 안정성 평가”, 한국철도학회 추계학술발표회 논문집 CD.
4. 한국철도기술연구원 (2004), “철도절개면 안정성 평가 및 대책방안 연구” 보고서
5. 大津宏康, Nutthapon Supawiwat, 松山裕幸, 高橋健二 (2005), “地下水排除工の性能低下お考慮した斜面アセットマネジメントに關する研究”, 土木學會論文集 No. 784/VI-66, pp.155-169
6. 上野誠, 松尾稔, 火田 一民, 中谷登, “破壞確率を用した斜面崩壞の豫知手法”, 土と基礎, No. 49-7(522), pp.28-30
7. Mostyn, G. R., and Li, K. S. (1993), “Probabilistic Slope Stability State of Play” Conf. on Probabilistic Methods in Geotechnical Eng. Li and Lo(eds.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp.89-110.
8. Padilla, J. D. et al. (1974), “Settlement of Structures on Shallow-Foundation, A Probabilistic Analysis”, Res. Rep. R74-9, MIT, Cambridge, Mass