

철도 사면에서 확률론적 기법을 이용한 사면안정성 매개변수 비교연구

A Comparative and Parametric Study of Slope Stability Using a Probability-based Method in Railway Slope

최찬용^{1*}, 김주용², 엄기영³

Chan-Yong Choi^{1*}, Ju-Yong Kim², Ki-Young Eum³

¹Member, Senior Researcher, High Speed Railway Infrastructure System Research Center, 360-1, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

²Nonmember, Researcher, High Speed Railway Infrastructure System Research Center, 360-1, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

³Member, Principal Researcher, High Speed Railway Infrastructure System Research Center, 360-1, Woram-dong, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Republic of Korea

ABSTRACT

In this study, it was carried out reliability analysis and slope stability analysis in a standard cross-sectional embankment on high speed railway. It was confirmed that changing tendency of safety factor with various parameter of each soil materials properties and trends of the probability of failure according to the reliability index. The results have shown that a safety factor were relatively large affected an cohesions and internal friction angle of soil compared to the unit weight of soil. Also, most of the standard cross-sectional embankment in high speed railway was generally evaluated the level of below average (below average) by the reliability analysis according to criterion in US. Army but the 12m height of dry embankment case was shown bad condition as Poor.

요 지

본 논문에서는 고속철도 표준사면에 대해 안전율 평가와 확률론적 방법에 의한 신뢰성 해석을 수행하였다. 원지반과 흙 쌓기재료의 지반정수에 따른 안전율 변화경향과 신뢰도 지수 및 파괴확률의 분포경향을 확인하였다. 철도표준 성토사면에 대한 사면안정 해석결과 점착력과 내부마찰각은 단위중량에 비하여 안정성에 상대적으로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 국내 철도 표준성토단면에 대한 신뢰성 해석결과 미공병단 기준에 의거하여 대체적으로 “평균이하(Below average)”의 수준이며, 건기 시 성토높이 12.0m에서는 “나쁨(Poor)”으로 나타났다.

Keywords : Slope stability, Factor of safety, Probability-based method, Railway slope

1. 서 론

현재 흙 구조물에 대한 설계는 단순히 쌓거나 깎는 과거의 토공개념에서 설계자가 요구하는 구조물의 성능을 만족시킬 수 있는 진보된 개념의 구조물로서 교량, 터널 등

과 같이 선로를 구성하는 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 다른 구조물과 달리 성능기반으로 설계할 경우 과도한 노력과 비용이 발생할 수 있기 때문에 현재에는 일반철도 및 고속철도 모두 표준 단면을 이용한 설계방법을 제공하여 설계자가 별도의 해석과 실험절차가 없이 손쉽게 설계할 수 있도록 배려하고 있다. 또한 흙 구조물에 대한 비탈면 안정성 평가는 사면해석을 수행하여 철도설계기준에서 제시하고 있는 안전율을 기초로 한 설계방법을 하고 있다. 이러한 안전율 설계는 결정론적인 접근법에서 지반공학적

Received 23 Oct. 2012, Revised 13 Dec. 2012, Accepted 15 Dec. 2012

*Corresponding author

Tel: +82-31-460-5317; Fax: +82-31-460-5289

E-mail address: cychoi@krii.re.kr (C. Y. Choi)

인 불확실성을 고려하기 위하여 비교적 큰 안전율을 적용함으로써 보수적인 설계 방법으로 인식되고 있다. 지반공학 불확실성이라함은 크게 지반재료의 내재적인 분산성, 지반조사의 불확실성, 모델링의 한계에 의한 불확실성으로 분류할 수 있다. 지반재료의 내재적인 분산성은 암이나 토사 등 지반재료가 매우 다양한 물질과 복잡한 형성과정을 통해 형성되어 겉보기에는 균일하게 보일지라도 구성재료가 공간에 따라 변하는 고유의 분산성을 가짐에 따라 발생하는 불확실성이다. 둘째, 지반조사의 불확실성은 지반의 공학적인 특성을 파악하기 위한 지반조사가 불충분하거나 완벽한 지반조사가 현실적으로 불가능하여 나타나는 불확실성이다. 마지막으로 모델링한계에 의한 불확실성은 실제 현상을 규명하기 위해 필요한 공학적 가정의 오류나 수식으로 단순화하는 과정에서 발생하는 오류에 기인하는 불확실성이다. 따라서 기존의 안전율을 이용한 결정론적 접근법은 다양한 불확실성을 명확히 고려하는 것이 불가능하기 때문에 허용안전율로 설계의 안전여유를 두고 있다. 즉, 검정이 부족한 경험식이나 시험을 이용하여 하는 설계일수록 그리고 설계나 시공경험이 없는 구조물일수록 높은 안전율을 적용함으로써 정성적인 안전여유를 확보하는 것이다. 그러나 다소 높은 안전율을 가지고 설계한 구조물에도 비록 작은 빈도이기는 하나 파괴가 발생하였고 그 원인은 파악할 수 있으나 정확한 안전여유는 산정할 수 없었다. 이러한 위험도는 인간이 예측하기 어려운 자연재해에 대하여는 더욱 크다고 할 수 있다.

이러한 문제를 보완하기 위하여 확률론적 접근법에 의한 설계방법을 도입하여 구조물의 안정성에 영향을 미치는 매개변수의 불확실성을 고려하고 이로부터 구조물의 안정성은 파괴확률을 토대로 정량적으로 평가되어 분석된 파괴확률을 근거로 공학적 의사결정을 할 수 있는 개선된 방법이 적용되고 있는 실정이다.

Hassan 등(1999)는 기존의 결정론적 사면안정해석 프로그램을 이용하여 확률론적 임계파괴면을 구하는 방법을 제시하였으며, Griffiths 등(2004)은 탄소성 유한요소법을 사용한 확률론적 사면안정해석을 수행한바 있다. Low(2003)는 Hasofer-Lind의 신뢰지수에 바탕을 둔 확률론적 사면안정해석기법을 개발하여 연약지반의 사면안정해석에 적용하였다. 국내에서는 김형배 등(2002)가 기존의 결정론적 사면안정 해석기법에 공학적 확률해석 기법을 결합시키는 방안을 제시하였으며, 장연수 등(2002)과 배규진 등(2002)은 암반사면의 파괴확률산정에 관한 연구를 수행하

였다. 또한 박성욱 등(2010)은 실제 붕괴 암반사면에 대해 확률론적 안정해석을 수행하였으며, 사면의 붕괴이력과 부합되는 결과를 도출하였다. 김기영 등(2006)은 결정론적 해석방법에 지반정수의 불확실성과 공간적 변동성을 고려하도록 확장하였으며, 조성은 등(2007)은 인공신경망 기반의 한계상태함수를 이용하여 사면의 신뢰성 해석을 수행하였다. 정남수 등(2011)은 GIS와 확률론적 해석기법을 활용하여 자료의 불확실성을 정량적으로 고려한 광역적인 지역에서 발생하는 사면재해의 취약성을 평가하였다. 따라서 본 논문에서는 철도의 표준단면에서 제공되는 단면을 대상으로 흙 구조물의 성토높이별 사면안정성에 대한 안전율의 변화와 신뢰성 해석 결과와 비교하기 위하여 다양한 매개변수를 적용하여 안전율의 변화를 분석하였다. 또한 성토높이별 외부하중의 영향인 우기 시와 지진 시 안정성을 신뢰성 해석을 통해 평가하였다.

2. 신뢰성 해석이론

2.1 개요

결정론적 접근법에서 사면의 안정성을 표현하는 방법은 한계평형상태에서 허용전단강도와 필요전단강도의 비로 정의되며, 가장 일반적인 방법은 식 (1)과 같은 Bishop의 간편법이 사용된다.

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (cb_n + W_n \tan \phi) \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \quad (1)$$

여기서, $m_{\alpha(n)} = \cos \alpha_n + \frac{\tan \phi \cdot \sin \alpha_n}{F_s}$, W : 절편 흙의 전체중량 (kN/m^3), α : 경사각 ($^\circ$), c : 흙의 점착력 (kN/m^2), b : 절편 폭(m), ϕ : 흙의 내부마찰각($^\circ$)이다.

반면 확률론적 접근법에서는 저항력과 작용하중의 차로 정의되며, Table 1은 확률론적 기법의 종류와 대표 예를 나타낸 표이다. 표에서와 같이 토목구조물의 안정성에 대한 파괴확률 계산은 Monte carlo simulation이 많이 사용된다. 이 방법은 샘플링 횟수를 작게 하면 신뢰도가 저하되기 때문에 일정 수준의 신뢰도를 유지하기 위해서는 수치해석 시 상당한 계산시간이 소요된다. 그에 반해 분석

Table 1. Kind of Probability-based method

구분	분석방법	대표 예
분석적 기법	변수의 확률분포를 가정하여 저항 및 외력의 평균치와 표준편차로부터 파괴확률을 구하는 방법	일계이차모멘트법, 이계이차모멘트법, 응답면기법 등
샘플링 기법	변수들의 난수를 발생시켜 시뮬레이션이나 특징점의 해석결과와 기중치를 적용하여 파괴 확률을 산정하는 방법	몬테카를로, 점추정법 등

적 근사기법은 비교적 적은 연산시간으로 해를 구해줄 뿐만 아니라 입력변수나 그 분포에 대한 매개변수들이 신뢰도지수나 파괴확률에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 따라서 본 논문에서 적용된 신뢰성해석은 미공병단에서 제안한 분석적 근사기법인 일계이차모멘트법을 사용하였다.

일계이차모멘트법에서는 사면안정의 안전율 함수를 Taylor 급수로 전개하여 1차항까지만 표시하고 각 지반강도의 확률변수 기댓값(E[FS])에 대하여 풀면 다음과 같이 안전율의 기댓값을 얻을 수 있다.

$$E[FS] = FS(E[X_1], E[X_2], \dots, E[X_n]) \quad (2)$$

여기서, $[X_i]$: 지반강도의 확률변수이다.

안전율의 표준편차(σ_{FS})는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$\sigma_{FS}^2 = \sum \left[\left(\frac{\partial FS}{\partial X_i} \right)^2 \sigma_{X_i}^2 \right] + 2 \sum \left[\left(\frac{\partial FS}{\partial X_i} \cdot \frac{\partial FS}{\partial X_j} \right) \sigma_{X_i} \sigma_{X_j} \rho_{x_i x_j} \right] \quad (3)$$

여기서, $\rho_{x_i x_j}$: 지반강도 확률변수들 사이의 상관계수이다.

식 (3)에서 우변의 첫 번째항은 안전율의 표준편차에 대하여 각 지반강도 확률변수가 기여하는 정도를 의미하는 것으로서 각 지반강도 확률변수들이 전체 사면안정 안전율의 불확실성에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 두 번째항은 지반강도 확률변수간의 상관관계가 안전율의 표준편차에 미치는 영향을 의미하며 각 변수들간의 상관관계에 따라 전체 안전율의 표준편차를 보정하게 된다. 일반적인 결정론적 사면안정해석 프로그램을 이용할 경우 식 (5)에서 보이는 편미분항은 다음과 같은 차분법에 의하여 계산될 수 있다.

$$\frac{\partial FS}{\partial X_i} = \frac{FS(X_{i+}) - FS(X_{i-})}{X_{i+} - X_{i-}} \quad (4)$$

여기서, X_{i+} 또는 X_{i-} : $X_i \pm \Delta$ 이다.

보다 정확한 계산을 위하여 기댓값에 더해지거나 감해지는 Δ 의 크기에 대하여 미공병단에서는 실용적인 측면을 고려하여 각 변수들의 표준편차만큼을 제안하고 있으나, 본 논문에서는 지반정수에 따른 안전율 변화를 보기 위해 지반의 변동성보다 큰 범위의 변화범위를 설정하여 해석조건의 입력변수 조합을 적용하였다.

이론적으로 구조물의 파괴확률은 성능함수가 0이하일 확률로 표현된다. 그러나 사면의 파괴확률은 안전율에 대한 확률밀도함수를 구하고 한계상태(FS=1)보다 작은 값을 갖게 되는 확률밀도면적을 구하여 결정하는 것이 좋다. 그러나, 신뢰성해석의 확률밀도함수를 정확히 구하는 것은 매우 어려우므로 보통 사용되는 실용적인 방법은 안전율의 기댓값과 표준편차를 통하여 구하는 것이다. 파괴확률은 신뢰도 지수에 의해 간접적으로 산정할 수 있으며, 기준안전율이 1.0인 경우 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\beta = \frac{E[FS] - 1.0}{\sigma_{FS}} \quad (5)$$

여기서, β : 신뢰도 지수, $E[FS]$: 안전율의 기댓값, σ_{FS} : 안전율의 표준편차이다.

한편, 지반의 안정해석결과인 안전율은 정규확률분포로 따른다고 가정하면 파괴확률은 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$P_r(f) = \Phi(-\beta) = \int_{-\infty}^{-\beta} g(z) dz \quad (6)$$

여기서, $P_r(f)$: 파괴확률, $\Phi(-\beta)$: 표준정규분포 상의 $-\infty$ 에서 $-\beta$ 까지의 확률면적, $g(z)$: 한계상태함수이다.

2.2 목표파괴확률(Target probability of failure)

확률론적 기법에 의해 구조물의 안정성을 평가하고자 하는 경우 기존 설계방법의 안전율과 마찬가지로 목표파괴확률(Target probability of failure)의 설정이 필요하다. 목표파괴확률은 설계결과의 타당성을 판단하는 근거가 될 수 있으며 이에 따라 구조물의 안정성과 경제성이 결정되므로 구조물의 중요도 및 파괴 발생 시 피해정도를 고려하여 결정하여야 한다.

Table 2는 기존 문헌에서 제시된 목표파괴확률이다. 표에서와 같이 구조물의 종류에 따라 목표파괴확률이 다르게 적용할 수 있으며, 댐의 파괴확률 범위는 $1.0E-03 \sim 9.0E-04$ 이고, 일반

적인 토목구조물의 파괴확률은 $1.0E-02 \sim 1.0E-04$ 의 범위이다. 또한 제방의 평균정도의 성능을 유지하기 위한 파괴확률은 $1.0E-03 \sim 6.0E-03$ 의 범위를 가진다는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 흙 쌓기 높이에 따른 성토사면의 안정성을 건기시, 우기시 및 지진시 조건에서 신뢰성 해석을 통해 평가하는 것이 목적이기 때문에 Table 2를 참조하여 제방의 목표파괴확률에 따른 기대성능수준으로 평가하였다.

3. 철도표준단면 및 해석조건

본 논문에서는 철도 쌓기 표준단면을 대상으로 높이별 사면의 안정성을 분석하기 위해 Table 3과 같이 철도설계

Table 2. Target probability of failure

구조물	기대성능수준/파괴형태	신뢰도지수(β)	목표파괴확률(P_f)	참고문헌
Dam	전도	-	$1.0E-03$	Singh 등(2007)
	파이핑	-	$2.0E-03$	
	여수로 파괴	-	$4.0E-04$	
	댐사면 붕괴	-	$9.0E-04$	
Embankment	높음(High)	5	$3.0E-07$	US Department of the Army(1997)
	좋음(Good)	4	$3.0E-05$	
	평균이상(Above average)	3	$1.0E-03$	
	평균이하(Below average)	2.5	$6.0E-03$	
	나쁨(Poor)	2.0	$2.3E-02$	
	불만족(Unsatisfactory)	1.5	$7.0E-02$	
위험(Hazardous)	1.0	$1.6E-01$		
Earthworks	-	2,33	$1.0E-02$	Meyerhof(1982)
Earth retaining Structure	-	3,10	$1.0E-03$	
Offshore foundation	-	3,10	$1.0E-03$	
Onshore foundation	-	3,80	$1.0E-04$	

Table 3. The Generally slope of fill-slope

시공기면까지의 높이(H)		일반철도 (자갈궤도)	고속철도 (자갈, 콘크리트 궤도)
일반철도	고속철도		
$H < 5.0m$	$H < 3.0m$	1 : 1.5	1 : 1.8
$5.0m < H < 10.0m$	$3.0m < H < 9.0m$	1 : 1.8	1 : 1.8
$10.0m < H < 15.0m$	$9.0m < H < 15.0m$	1 : 2.0	1 : 2.0
$H \geq 15.0m$	$H \geq 15.0m$	1 : 2.3	1 : 2.3

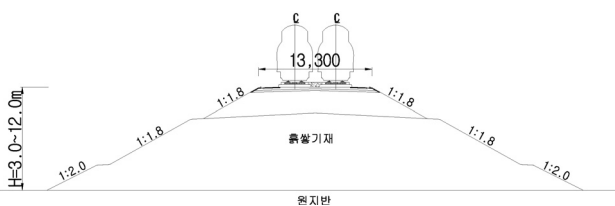


Fig. 1. The generic railway embankment

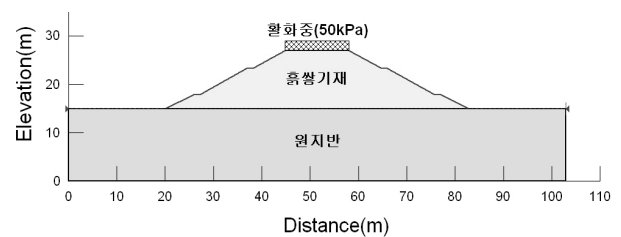


Fig. 2. The analysis modeling(H=12.0m)

기준에서 제시되어 있는 표준기울기를 적용하여 대표단면을 가정하였다. 해석단면은 Fig. 1과 2와 같이 성토사면 위에 건설된 복선철도를 대상으로 하였으며, 성토높이는 3.0m, 6.0m, 9.0m, 12.0m 단면으로 해석하였다.

상재하중은 현행 고속철도 철도설계기준에 적용되고 있는 궤도사하중(15kPa)과 열차하중(35kPa)을 노반압력으로 치환하여 적용하였으며, 수평지진계수는 Table 6와 같이 적용하였다.

노반재료는 흙 쌓기와 원지반 재료로 단순화시켰으며 노반재료의 단위중량, 점착력, 내부마찰각은 각각 Table 4와 같이 철도설계기준에서 제시된 지반정수 참고하여 선정하였다. 또한 매개변수를 위한 단위중량과 내부마찰각의 변화폭은 표준값에 대하여 60~130%의 분포로 점착력은 0~200%의 변화범위를 조합하여 성토높이별 건기 시, 우기 시 및 지진 시 해석조건을 변화시켜가며 안정해석을 수행하였다(Table 7 참조). 지하수위 조건은 건기 시는 지

하수가 없는 것으로 적용하였으며, 우기 시는 현행 실무에서 적용되고 있는 지표면 포화로 고려되었다. 또한 각 확률분포의 분포형태는 정규분포로 가정하였다(Table 5 참조). 사면안정해석은 한계평형해석 방법 중 모멘트 평형조건에 의한 안전율 산정방법인 Bishop의 방법을 적용하여 상용 프로그램인 GEO-SLOPE사의 Slope/w를 이용하였다.

4. 사면안정 및 신뢰성 해석결과

4.1 한계상태해석

Fig. 3에서와 같이 일반적으로 비탈면의 파괴형태는 비탈면의 내부와 외부에서 나타날 수 있으며 본 논문에서 수행된 철도표준사면에 대한 사면안정해석결과 내부와 외부의 파괴 빈도는 각각 약 66.7%, 33.3%로 내부에서 파괴가 나타났다. 이러한 결과는 쌓기재료와 원지반 재료의 전단

Table 4. The properties of soil materials

흙의 종류(통일 분류법)	재료의 상태	건조단위중량(kN/m^3)	내부마찰각(도)	점착력(kN/m^2)
GW, GP	다진 것	20	40	0
SW, SP	입도분포가 좋은 것	20	35	0
	입도분포가 나쁜 것	19	30	0
SM, SC	다진 것	19	25	30이하
ML, MH, CL, CH	다진 것	18	15	50이하

Table 5. The criterion of safety factor of slope in railway

구분	기준안전율	참조
건기	FS > 1.5	• 지하수가 없는 것으로 해석
우기	FS > 1.3	• 일반적인 쌓기 비탈면은 별도의 지하수위 조건 없음 • 한쪽 쌓기 한쪽 깎기 비탈면에서는 측정된 지하수위 또는 침투해석을 통한 지하수위를 이용하여 해석 • 쌓기 표면에 강우침투가 발생하는 경우에는 강우침투를 고려한 해석 실시
지진시	FS > 1.1	• 지진관성력은 파괴토체의 중심에 수평방향으로 작용 • 지하수위는 실제 측정 또는 침투해석을 수행한 지하수위
단기	FS > 1.1	• 기간 1년 미만의 단기간의 안정성 검토 시

Table 6. Horizontal earthquake coefficient

지진구역	위험도계수	지표면 최대가속도	수평지진계수
0.11g(지진구역 I)	1.4(재현주기 1,000년)	0.15g	0.077

Table 7. The Range properties of soil materials

구분	흙쌓기 재료(표준물성값)	원지반 재료(표준물성값)	표준물성값 대비 변화량
단위중량(γ)	$19.0kN/m^3$	$19.0kN/m^3$	60%~130%
점착력(c)	15kPa	15kPa	0%~200%
내부마찰각(ϕ)	25°	30°	60%~130%

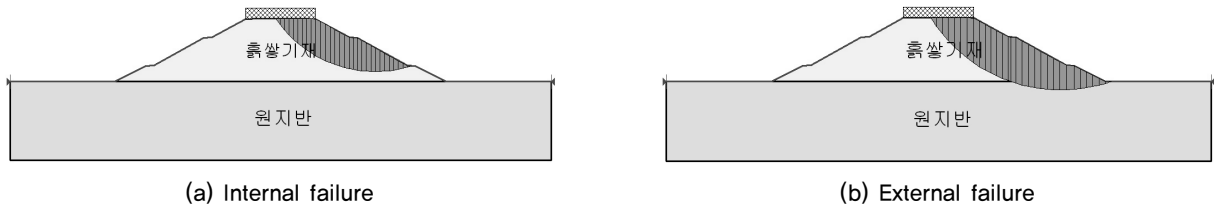


Fig. 3. The mode of slope failure

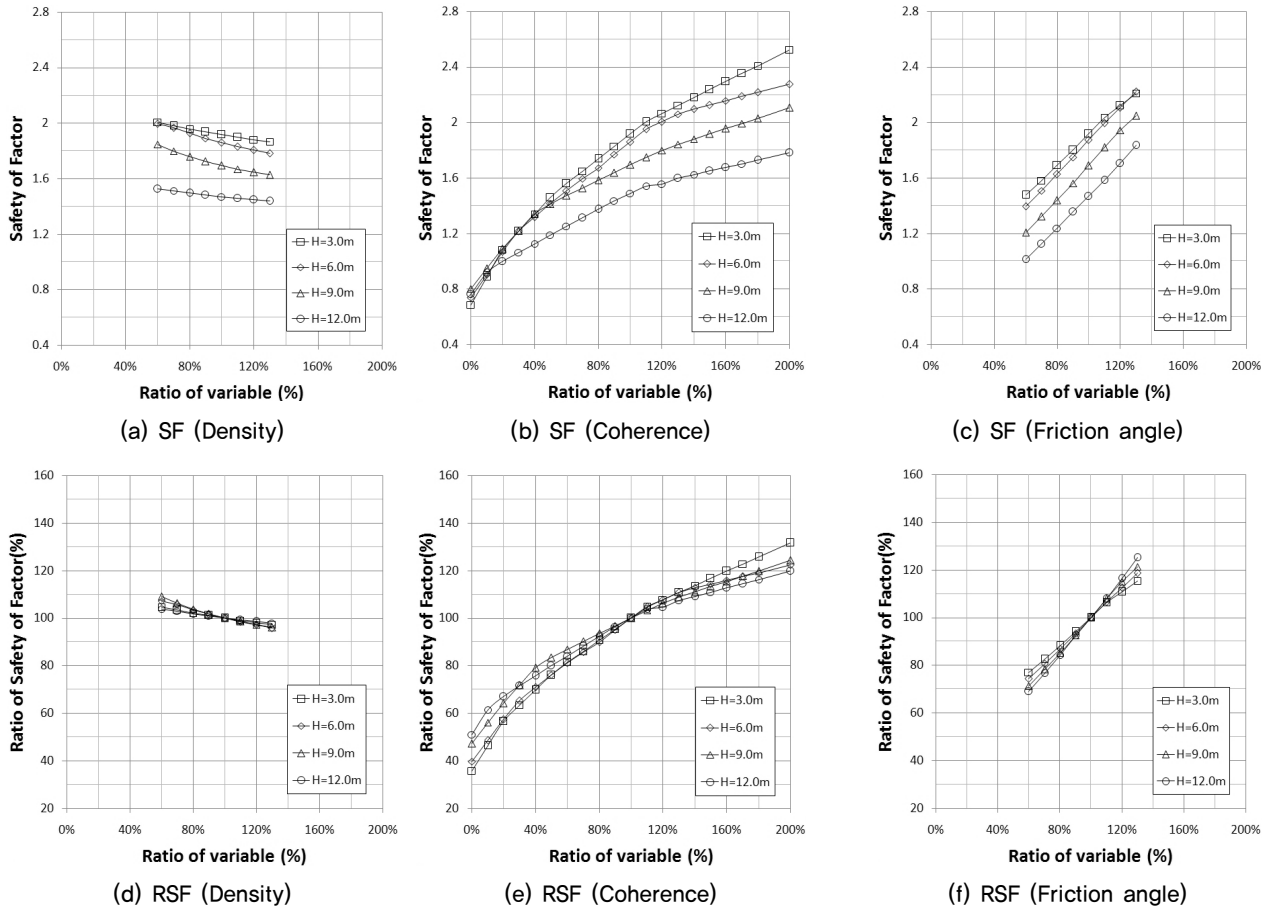


Fig. 4. Variation of Safety Factor (SF) and Ratio of Safety Factor (RSF) with materials properties in subgrade

강도가 큰 비율이 전체 해석에서 31.9%, 68.1%로 재료의 전단강도의 차이에 따라 비탈면 파괴 형태가 결정되고 있음을 알 수 있다. 즉 원지반재료의 전단강도가 쌓기재료의 전단강도에 비해 크게 되면 사면 내의 파괴가 발생하게 되고, 반대의 경우에는 사면 외의 파괴가 발생하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 4는 흙 쌓기 재료와 원지반 재료의 단위중량, 점착력, 내부마찰각에 대한 성토높이별 안전율의 변화 양상이다. 해석결과 성토 높이가 높아짐에 따라 안전율은 점진적으로 감소하며, 지반정수의 표준값은 철도설계기준에서 제시하고 있는 허용안전율(1.5)을 만족시키는 최소한의 지반정수인 것으로 평가되었다. 즉, 현행 설계에서는 최대한

보수적으로 설계가 되고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 각 지반정수별로 안전율은 변화정도는 점착력이 H=3.0m에서 35.8~131.7%, 내부마찰각은 H=12.0m에서 69.0~125.1%, 단위중량은 H=9.0m에서 96.0~109.1%의 범위로 평가되었다. 안전율 변화비(RSF, Ratio of Safety Factor)는 식 (7)에서와 같이 Table 7의 표준값에 대하여 해석조건으로 나타난 물성값에 대한 정규화하여 분석하였다. 안전율 변화비(RSF, Ratio of Safety Factor)로 분석한 결과 단위중량 5.4~12.2%, 점착력 22.2~33.0%, 내부마찰각 43.7~68.5%으로 지반정수에 대한 가장 민감한 영향을 주는 인자는 내부마찰각, 점착력, 단위중량 순으로 내부마찰각의 영향이 가장 큰 것을 알 수 있다.

안전율변화비 (RSP, Ratio of Safety Factor)

$$= \frac{\text{조건별 입력 물성값}}{\text{Table 7에서 제시한 표준 물성값}} \times 100 \quad (7)$$

Fig. 5는 원지반의 지반정수 변화에 대한 안전율과 안전율 변화비(RSF)에 대한 결과이다. 원지반 재료의 단위중량의 변화에 따른 안전율의 변화는 성토높이에 따라 안전율을 차는 발생하나, 흙쌓기 사면의 활동력 및 저항력 증감에는 영향이 미미하기 때문에 원지반의 단위중량의 변화는 사면 안정성에 큰 영향을 미치지 않고 있는 것을 확인할 수 있었다. 원지반 재료의 점착력에 따른 안전율 변화는 사면의 활동저항력 증가에 따라 안전율이 커지는 경향을 보이거나, 원지반재와 흙쌓기 재료의 전단강도 차에 따라 사면파괴형상이 심부파괴에서 사면 내 파괴로 변화되어 약 90% 이상에서는 사면 내 파괴 발생으로 사면 안정성에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 내부마찰각에 따른 안전율 변화는 성토높이가 낮을수록 활동력의 감소에 따라 안전율이 크게 나타난다. 안전율 변화비는 약 90% 이상에서 원지반재의 전단강도가 흙쌓기 재료보다 크게 되므로

사면 내 파괴가 발생하며, 안전율의 변화가 없는 상태 즉 사면안정성에 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

4.2 일계이차모멘트를 활용한 신뢰성 해석

성토높이별 건기시, 우기 시, 지진 시 3가지 조건에 대한 사면안정해석 결과에 대하여 일계이차모멘트법을 적용하여 흙쌓기와 원지반 재료의 지반정수를 확률변수로 보고 신뢰성 해석을 수행하였다. Table 8은 한계평형해석과 신뢰성해석결과를 표로 정리하였다. 표에서와 같이 한계평형 해석결과 안전율은 국내의 철도설계기준 등에서 제시하고 있는 허용안전율에 비해 대체적으로 안정한 것으로 평가되었으며, 성토높이 H=12.0m에 대해서만 건기 시 평균 안전율이 1.5 미만으로 나타났다. 또한 평균 안전율과 편차, 분산도를 가지고 신뢰도 평가한 결과 신뢰도 지수는 약 1.76~2.94범위로 미공병단에서 제시하고 있는 2.5와 Moyerhof(1982)에 제시한 토공(earthworks)의 신뢰도 지수 2.33의 수준인 것으로 평가되었다. 신뢰도 지수는 식 (5)에서와 같이 안전율이 크고 안전율의 표준편차와 분

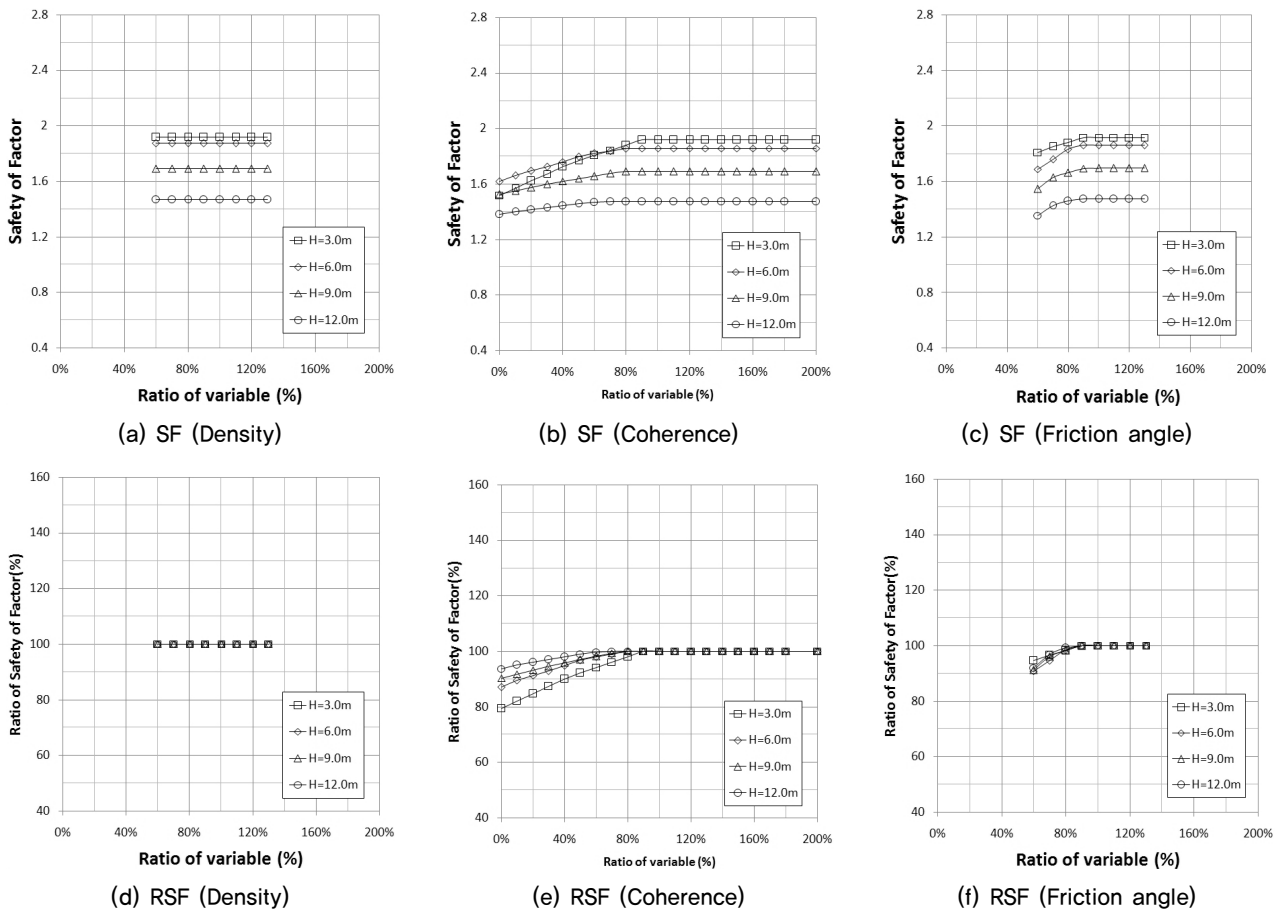


Fig. 5. Variation of Safety Factor (SF) and Ratio of Safety Factor (RSF) with materials properties in foundation

Table 8. The results of reliability analysis

구 분		평균 안전율	안전율 표준편차	안전율 분산	신뢰도 지수	파괴확률	비고
건기시 (1.5)	3.0m	1.84	0.30	0.089	2,811	2.469E-03	Table 2 미공병단 파괴확률 참조
	6.0m	1.80	0.27	0.072	2,942	1.631E-03	
	9.0m	1.65	0.22	0.048	2,930	1.696E-03	
	12.0m	1.44	0.18	0.033	2,377	8.723E-03	
우기시 (1.3)	3.0m	1.83	0.29	0.015	2,844	2.229E-03	
	6.0m	1.77	0.26	0.012	2,903	1.851E-03	
	9.0m	1.63	0.22	0.088	2,892	1.915E-03	
	12.0m	1.42	0.18	0.060	2,373	8.823E-03	
지진시 (1.1)	3.0m	1.67	0.26	0.012	2,545	5.465E-03	
	6.0m	1.55	0.23	0.087	2,463	6.880E-03	
	9.0m	1.41	0.18	0.059	2,269	1.165E-02	
	12.0m	1.26	0.15	0.038	1,759	3.930E-02	

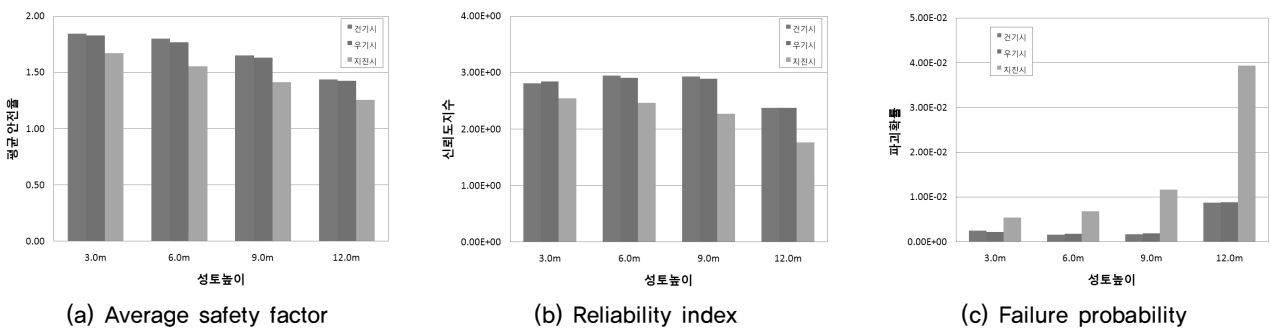


Fig. 6. The results of reliability analysis with embankment height

산계수가 작을수록 커지게 되며 이에 따라 파괴확률은 작아지는 경향을 나타낸다. 따라서 철도 표준성토단면에 대한 신뢰성 해석결과에서는 신뢰도지수가 1.76~2.94로 산출되었으며, 파괴확률은 0.00163~0.0393 수준인 것으로 평가되었다. 이를 미공병단에서 제시한 목표파괴확률 및 신뢰도 지수를 고려하면 대체적으로 국내에 적용되고 있는 철도표준단면의 안정성은 “평균이하(Below average)”의 범위의 수준으로 볼 수 있으며, 건기 시의 경우 성토높이가 약 12.0m에서는 “나쁨(Poor)” 수준으로 평가되었다. 이러한 결과를 볼 때 국내에 적용되고 있는 표준성토 단면에 대한 기존의 안전율과 신뢰성평가를 바탕으로 검토한 결과 대부분 적절한 표준단면으로 적용되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 논문에서는 철도표준 성토단면을 대상으로 성토높이와 대표적인 지반정수인 단위중량, 점착력, 내부마찰각의 변화를 가지고 매개변수 해석을 수행하여 기존의 전통

적인 결정론적 방법에 의한 안전율 변화경향과 일제이차 모멘트법을 이용하여 신뢰성 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 사면의 안정성 영향을 주는 지반정수 인자로는 내부마찰각, 점착력, 단위중량 순으로 내부마찰각의 영향이 가장 크며, 단위중량 및 내부마찰각은 선형적 거동을 보이며, 점착력은 비선형적 거동을 보이는 것으로 나타났다. 또한 원지반재료와 쌓기재료의 두 재료간의 전단강도의 차이에 따라 사면내부와 외부로의 파괴형태가 나타나는 것을 확인하였다.
- (2) 철도 표준성토단면에 대하여 안전율 평가결과 철도설계 기준 등에서 제시하고 있는 허용안전율에 비해 대체적으로 안정한 것으로 평가되었으며, 성토높이 H=12.0m에 대해서만 건기 시 평균 안전율이 1.5 미만으로 나타났다.
- (3) 철도 표준성토단면에 대한 신뢰성 해석결과에서는 신뢰도지수가 1.76~2.94로 산출되었으며, 파괴확률은 0.00163~0.0393 수준인 것으로 평가되었다. 미공병단에서 제시한 목표파괴확률 및 신뢰도 지수를 고려하면

철도표준단면의 안정성은 “평균이하(Below average)”의 범위의 수준으로 볼 수 있으며, 지진 시의 경우 성토높이가 약 12.0m에서는 “나쁨(Poor)” 수준으로 평가되었다.

Acknowledgement

Authors would like to appreciate financial support for this work provided by Land, Transport and Maritime Affairs through a research project “Development of Infra Technology for 400km/h High Speed Rail”.

참고문헌

1. Hassan A. M., Wolff, T. F. (1999), “Search Algorithm for Minimum Reliability Index of Earth Slope”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.125. pp. 301-308.
2. Griffiths, D. V., Fenton G. A. (2004), “Probabilistic Slope Stability Analysis by Finite Elements”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.130, No.5 pp.507-518.
3. Low, B. K. (2003), “Practical Probabilistic Slope Stability Analysis”, *12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 39th U.S. Rock Mechanics Symposium*, MIT, Cambridge, Massachusetts, Vol.2, pp.2777-2784.
4. H.B. Kim, S.H. Lee (2002), “A Study to Develop a Practical Probabilistic Slope Stability Analysis Method”, *The Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.5, pp.271-280.
5. Y.S. Jang, S.H. Oh, J.S. Kim (2002), “Reliability Analysis of Plane Failure in Rock Slope”, *The Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.4, pp.119-126.
6. G.J. Bae, H.J. Park (2002), “Evaluation of Planar Failure Probability for Rock Slope Based on Random Properties of Discontinuities”, *The Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.2, pp.97-105.
7. S.W. Park, H.J. Park (2010), “Probabilistic Stability and Sensitivity Analysis for a Failed Rock Slope using a Monte Carlo Simulation”, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.20, No.4, pp.437-447.
8. K.Y. Kim, S.E. Cho (2006), “A Study on the Probabilistic Stability Analysis of Slope”, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.22, No.11, pp.101-111.
9. S.E. Cho, W.Y. Byeon (2007), “Reliability Analysis of Slopes Using ANN-based Limit-state Function”, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.23, No.8, pp.117-127.
10. US Department of the Army (1997), *Introduction to probability and reliability methods for use in geo-technical engineering*, US Department of the Army Report, ETL 1110-2-547.
11. Singh V.P., K.J. Sharad and A.K. Tyagi, (2007), *Risk and reliability analysis : a handbook for civil and environmental engineers*, ASCE Press, Virginia, pp.674.
12. Meyerhof G. G. (1982), “Limit state design in geotechnical engineering”, *Structural Safety*, Vol.1 pp.67-71.
13. N.S. Jeong, K.H. You, H.J. Park (2011), “Stability Analysis of Landslides using a Probabilistic Analysis Method in the Boeun Area”, *The Journal of Engineering Geology*, Vol.21, No.3, pp.247-257.