

파괴확률을 이용한 철도절개면의 위험도 평가

Risk Assessment of Slopes using Failure Probability in Korean Railways

김현기[†] · 김수삼^{*}

Hyun-Ki Kim · Soo-Sam Kim

Abstract Abstract Infiltration of rainfall that may lead to reduce resistance force due to reduction of matric suction and to increase driving force due to increase of self weight makes the slope fail. There are many specifications to make slope stable based on factor of safety. Although result of slope stability analysis satisfy the specifications, slope failures triggered by rainfall are frequently occurred in reality because slope stability analysis cannot consider uncertainty of each soil properties. This is why conventional analysis has limitation and development of alternative method is needed. So it is suggested to adopt the reliability analysis rather than design based on factor of safety into designing safer structure. Through the evaluation of handicaps for the factor of safety based design, calculation of soil properties by site investigation, and reliability analysis considering distribution of each soil properties, distribution of failure probability in railway slope is obtained. Then, Risk assessment of slopes in Korean railway is executed from the results. Damage loss and incoming loss are considered as the loss. Using these results, it is possible to make proper countermeasure or efficient maintenance.

Keywords : Railway Slope, Factor of Safety, Reliability Analysis, Probability Assessment

요 지 강우침투는 지반의 모관흡수력을 감소시켜 저항력의 감소를 유발하며, 자중 증가로 인하여 구동력의 증가를 발생시켜, 사면 붕괴를 발생시킨다. 각종 기준에서 제시된 안전율을 만족한다해도 강우에 의한 사면붕괴는 자주 발생하고 있으며, 막대한 사회적 손실을 발생시키고 있다. 이와 같은 사면붕괴 발생의 주요 원인중에 하나는 사면을 구성하는 토질정수에 대한 불확실성을 고려하지 못했기 때문이며, 이를 보완하기 위하여 신뢰성해석의 기법을 도입을 검토하였다. 신뢰성해석은 지반물성과 결과적 부산물인 안전율의 확률분포특성을 고려할 수 있는 장점이 있으며, 결과물로 산출되는 파괴확률을 위험도관리에 확장하여 적용할 수 있다. 본 연구에서는 철도사면 8개소에 대하여 각종 기준에서 제시하고 있는 기준을 적용하여 신뢰성해석을 시행한 후 그 결과를 분석하였으며, 철도영업선에 대한 손실을 고려하여 철도사면의 위험도관리가 정량적으로 시행될 수 있음을 보였다.

주요어 : 철도절개면, 안전율, 신뢰성해석, 위험도평가

1. 서론

철도시설의 노후화, 환경 및 설계 조건 등의 변화로 안전사고와 재해 발생 가능성이 상존하며, 안전에 취약한 시설물은 이상기후로 인한 천재지변에 노출되면 예기치 못한 재해를 야기하여 상당한 인적·물적 손실을 유발하므로 이상기후에 대비하는 재해방지 기술이 요구되어진다. 한편, 최근

두 차례의 태풍, 즉 2002년의 태풍 루사, 2003년의 태풍 매미는 집중호우와 강풍을 동반하여 막대한 재해를 발생시켰다.

지구온난화 등으로 인한 장마철 국지성 호우와 폭설은 해마다 철도 수송을 지연시킴으로써 막대한 인적·물적 손실을 가져오게 하는 바, 이와 같은 기상재해로부터 철도 시설물, 차량 및 승객을 안전하게 보호하고 사전에 예방할 수 있는 시스템화 된 방재운영체계의 구축이 절실히 요구된다.

우리나라의 지반재해 중 대표적인 산사태 재해는 그 중 연평균 26명의 인명피해와 연평균 6,000억원의 재산피해가 발생하였고, 피해규모가 급격히 증가하는 추세이다. 특히 철도에서는 노반, 둑, 선로, 도상 유실 및 침하, 용벽전도, 깎

[†] 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원
E-mail : hkkim@krrri.re.kr
Tel : (031)460-5307 FAX : (031)460-5319

^{*} 정회원, 한양대학교 건설환경시스템공학과 교수

기비탈·독비탈붕괴, 선로침수, 궤도매몰과 같은 재해(약 57%)가 가장 빈번하게 발생하고 있어, 다발하는 재해를 중심으로 우선적인 방재 방안이 필요하다(철도청자료, 1999~2003). 더욱이 태풍 및 국지성 강우 등에 의한 자연재해는 반복성, 재발 가능성이 높기 때문에 위험개소에 대한 철저한 위험요인 및 경제성 분석을 통해 보수보강 방안과 함께 재해를 예·검지를 할 수 있는 감시시스템의 설치방안을 수립하는 게 절실히 요구된다.

특히, 철도노선에서는 선로유실 뿐만 아니라 소량의 사면 활동으로 인하여 토사가 철로로 이송된 경우 기차의 탈선으로 이어질 수 있으며, 결국에는 대형사고로 발생할 가능성이 있으므로 철저한 점검 및 조사가 필요하다. 이와 같이 강우로 인한 사면의 활동은 철도분야 뿐만 아니라 도로 및 일반 사면에서도 재산 및 인명상의 피해를 발생시킨 것을 알 수 있다.

다양한 외력 가운데 강우침투는 모관력 저하, 간극수압 증가 등에 의한 저항력 감소와 더불어 자중증가 등에 의한 활동력 증가로 이어져 사면붕괴를 유발하게 되며, 강우에 의한 붕괴 예방을 위해 안전율에 기반을 둔 다양한 기준이 제안되어 있다. 하지만, 해석결과가 기준을 만족하더라도 실제 현장에서는 강우에 의한 파괴가 빈번하게 발생하며, 이는 기본적으로 지반물성의 불확실성을 해석에서 고려할 수 없기 때문이다. 이와 같이 안전율 기반 설계는 점차 그 한계를 드러내고 있으며, 각 물성의 분포와 특성을 파악하여 보다 안전한 구조물로 설계하기 위한 신뢰성 해석이론이 도입되고 있다. 또한, 절개면의 파괴는 사회경제학적 손실을 동반하게 되므로 붕괴시 발생하는 위험성으로 표현되는 파괴확률을 이용하여 노선별 지역별 특성을 반영한 철도절개면의 위험도 평가가 필수적으로 수반되어야 적절한 예산배분, 운용이 가능할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 안전율 기반 설계의 문제점 분석, 현장정밀조사를 통한 지반물성 산정 그리고 물성의 분포특성을 고려한 신뢰성해석을 시행한 결과물로 산출되는 파괴

확률을 이용하여 철도절개면의 보수보강 및 유지관리에 있어 우선순위를 결정할 수 있도록 철도절개면의 위험도평가를 시행하였다. 이를 기반으로 보다 철도절개면의 효율적인 유지관리가 가능할 것이라 판단된다.

2. 이론적 배경

2.1 안전율과 파괴확률

전통적인 사면안정해석에서의 안정성 판단기준은 안전율 개념을 사용하고 있으며, 이러한 안전율에 의한 사면안정의 판단은 결정론적 사면안정기법에서 많이 활용되고 있지만, 안전율은 사면의 파괴확률과 신뢰성 정도를 그 자체만으로 보여줄 수 없으며, 단순히 식 (1)과 같이 지반의 허용전단강도와 필요 전단강도의 확률적 편차를 고려하지 않고 평균 기댓값만을 비교하는 개념이다.

$$FS = S/\tau \quad (1)$$

여기에서, S 는 지반의 허용 전단강도, τ 는 한계평상태를 이루는데 필요한 전단강도이다.

이론적으로 사면의 임계활동면에 대한 파괴확률은 안전율에 대한 확률밀도함수를 구하고 한계상태($FS = 1$)보다 낮은 값을 갖게 되는 확률밀도면적을 구하여 결정하게 된다. 하지만, 확률밀도함수를 정확히 구하기 위한 정밀확률해석기

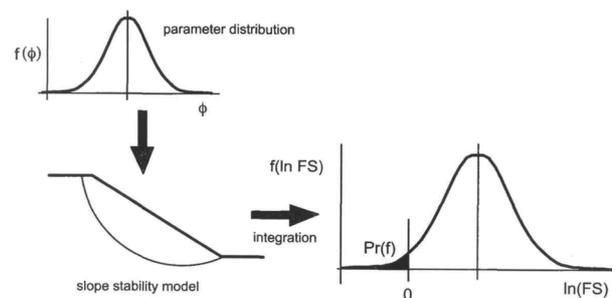


Fig. 1. Failure probability and reliability index

Table 1. Information of cut slopes

노 선	역구간	사면번호 (No. of Slope)	사면고 (m)	경사 (°)	토층깊이 (m)	점착력 (kN)	내부마찰각 (°)	포화투수계수 (cm/sec)
영동선	승부-석포	1	124	25	2.8-3.7	5.7	32	3.1×10^{-5}
	춘양-녹동	2	15	30	4.5-6.0	9.0	31	5.4×10^{-5}
호남선	몽탄-일로	3	13	44	2.8-11.0	14.4	29	3.3×10^{-5}
우암선	우암-신선대	4	21	55	10.8	8.0	31	5.4×10^{-5}
경부선	군포-의왕	5	10	35	12.5	13.0	23	2.7×10^{-5}
	의왕-성균관대	6	5	36	5.8	13.0	23	1.3×10^{-5}
경춘선	평내-파석	7	8	45	6.6	5.9	29	1.7×10^{-5}
장항선	판교-서천	8	11	35	6.0	14.7	25	2.0×10^{-5}

법이 아닌 공학적 근사확률해석 기법을 사용하여 임계활동면 안전율의 기댓값과 표준편차만을 구하게 되는 실용적인 확률적 사면안정해석에서 파괴확률은 다음과 같은 신뢰지수라는 개념을 통해서 간접적으로 결정할 수 있다.

$$\beta = \frac{E[FS]-1}{\sigma_{FS}} \quad (2)$$

사면안정의 안전율이 정규확률분포를 따른다면 파괴확률은 다음과 같이 구해진다.

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

여기서, $P_i(f)$ 는 파괴확률, $\Phi(-\beta)$ 는 표준정규분포를 따르는 확률밀도함수에서 $-\infty$ 부터 $-\beta$ 까지의 확률면적, $g(z)$ 는 사면안정의 안전율의 상태함수로 정의된다.

2.2 위험도평가

고전적인 공학분야에서의 위험도 평가모델은 위험도 정의에 기초를 두어, 다음 식과 같이 피해가 상정되는 사상에 대하여, 그 사상이 발생할 빈도(혹은 가능성)와 그때의 손실 레벨을 곱한 손실 기대치(Expected Loss)로서 정의한다.

$$R = \sum_{i=1}^J P_i \times C_i \quad (4)$$

여기에서 R 은 손실기대치, P_i 는 사상 i 가 발생할 확률, C_i 는 사상 i 가 발생한 경우의 손실을 나타낸다. 본 연구에서는 식 (4)의 정의에 기초하여 산정된 손실기대치를 위험도라 정의하였다.

발생확률(파괴확률) P_i 는 신뢰지수에 기반을 두고 식(2)와 식 (3)에 근거하여 산출하며, 손실 C_i 는 인프라의 대표 예인 철도를 상정하는 경우에 절개면 붕괴 이후에도 복구하여 사용하는 것으로 하면, 철도 파손에 의한 사업자 및 이용자 손실은 아래와 같이 열거할 수 있다.

- 1) 사업자 손실 : L_O
 - 복구비
 - 노선 폐쇄기간의 영업손실
 - 인적·물적 보상비
- 2) 이용자 손실 : L_U
 - 철도폐쇄기간의 시간손실

일반성을 부여하기 위해 소요의 설계강도를 x^* 로 하면, 그 강도조건에 대한 손실은 다음 식과 같이 표현된다.

$$L(x^*) = L_O(x^*) + L_U(x^*) \quad (5)$$

이 가정 하에서는 손실 $L(x^*)$ 는 소요의 설계강도 x^* 에서

의 구조물 성능을 본래의 성능으로 회복하기 위해 필요한 손실로 정의할 수 있다. 또한, 사업자만이 아니라 이용자의 손실을 고려함으로써 위 식에서 보인 손실은 사회 전체에 대한 손실을 나타내는 것으로 한다.

철도절개면의 경우에는 사고 발생에 따라 발생하는 피해 복구비와 철도 폐쇄에 따른 수입손실의 2가지를 상정하여 본 연구에서 고려하였다.

한편, 일시적인 철도 불통에 따라 철도이용자의 통행시간 증가, 기존 철도이용자의 도로 및 항공 등 기타수단 이용으로 인한 혼잡비용 증가 및 차량운행비용 증가 등을 고려할 수 있겠지만, 그 범위의 설정이 곤란하며, 인적·물적 보상비의 경우에는 한국철도공사(구. 철도청)으로 부터의 자료입수가 원활하지 못한 원인 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다.

3. 수치해석

3.1 개요 및 해석대상

대상 절개면의 대표적인 단면에 대하여 1공 내지 2공의 NX 직경의 시추 조사가 실시되었다. 지반의 지층구조, 강도 및 투수 특성을 파악하기 위하여, 현장시험으로 표준관입시험, 감마선 밀도검층시험, 시추공전단시험, 현장투수시험 등을 시행하고 실내 토질 시험으로 기본 물성시험, 압밀비배수 삼축압축시험, 실내 투수시험 등을 수행하였다. 또한 토사층에 대하여 불포화토의 SWCC(Soil-Water Characteristic Curve)를 결정하기 위한 불포화도 함수특성 시험도 추진하였다. Table 1은 본 연구에서 대상으로 하는 철도 절개면을 나타낸 것이다.

우기시, 강우침투로 인한 사면안정성 저하를 평가하기 위해 통상적인 설계방법에서 제시하고 있는 기준을 적용하여, 지하수위를 지표 부근에 가정한 경우에 대한 사면 안정해석을 수행하였다(Table 2).

3.2 철도 절개면 안정해석

강우에 의한 침투를 고려하기 위해서 현행 설계에 적용하고 있는 각 기관의 우기시 지하수위 적용기준에 따라 극한평형 해석을 수행하였다. 현행 설계 기준은 침투해석 결과와 무관하게 지하수위가 지표 부근에 존재한다고 가정하여 안정해석을 수행한다. 본 연구에서는 한국도로공사의 도

Table 2. Specification of infiltration of rainfall

건기	강우에 의한 침투 미고려
우기	지하수위가 GL-3 m에 위치
(강우에 의한 침투 고려)	지하수위가 지표에 위치

로설계실무편람(1996) 및 도로설계요령(2001), 건설교통부의 국토건설공사설계실무요령(2004) 등을 따라 지하수위가 지표에 위치한 경우와 지표 아래 3m에 위치한 두 가지 경우에 대하여 사면안정해석을 수행하였다.

사면안정해석은 극한평형해석 방법 중 모멘트 평형조건에 의한 안전을 산정방법인 Bishop의 방법을 적용하였으며, 상용프로그램인 GEO-SLOPE사의 SLOPE/W를 사용하여 수행하였다. Table 2와 같이 지하수위를 지표면 부근에 가정한 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

3.3 철도절개면 신뢰성해석

철도절개면의 신뢰성해석을 위해 사면안정해석에 필요한 입력변수에 대하여 분산계수를 조사하였다. 변수별로 실험을 통해 분산계수를 결정하기에는 비용적, 시간적 소모가

상당하여 과거 문헌을 근거로 분산계수를 결정토록 하였다. Table 3은 Lumb(1966), Hammitt(1966), Schultze(1972), Fredlund 등(1972), Padilla & Vanmarcke(1974)에 의해 제안된 각 지반정수의 분산계수를 나타낸 것이며, 이를 수치해석 프로그램인 SLOPE/W에서 제공하는 신뢰성해석 도구의 입력변수로 지정하여 해석을 진행하였다.

MCS(Monte Carlo Simulation)의 경우, 반복횟수는 변화하는 입력변수의 수와 예상되는 파괴확률에 따라 결정되며 일반적으로 수천 번 정도의 반복으로 Monte-Carlo probabilistic slope analysis에서 타당한 신뢰성을 확보할 수 있다고 제시(Mostyn and Li, 1993)하고 있으므로 이를 기반으로 약 9,000회의 반복횟수를 적용하였다.

4. 해석결과

4.1 사면안정해석결과

Fig. 2는 전형적인 사면안정해석 결과로 승부-석포 구간의 사면에 대한 것이다. 그림에서 (a)는 각각 건조기의 강우에 의한 침투를 고려하지 않은 경우, (b)는 지하수위가 GL-3m에 있다고 가정한 경우이며, (c)는 지하수위가 지표에 있다고 가정한 경우에 대하여 한계평형해석법으로 결정된 최소안전율이 발생하는 활동면이다. 예상 활동면은 강우에 대한 고려 조건에 상관없이 유사한 형태로 발생하는 것으로 나타났으나, 최소안전율의 경우는 모든 개소에 대하여 강우 고려 조건에 급격하게 감소되는 것을 확인할 수 있었다((a)>(b)>(c)). 다음의 Table 4는 본 연구에서 대상으로 한 8개 지역의 철도절개면에 대한 안전율과 파괴확률을 제시한 것이다. 지하수위를 지표로 가정한 경우에는 의왕-성균관대 구간의 안전율 1.433을 제외하고는 모든 사면의 안전율이 0.811~0.456으로 분포하고 있어 건기시와 비교시 매우 불안정한 결과가 산정되었다. 하지만, 강우침투에 의한 지하수의 상승이 지표면에 도달한다는 것은 현실적으로

Table 3. COV of soil parameters

변수	분산계수	참고문헌	
Porosity	0.10	Schultze(1972)	
Specific gravity	0.02	Padilla & Vanmarcke(1974)	
Water content	Silty clay	0.20	Padilla & Vanmarcke(1974)
	Clay	0.13	Fredlund & Dahlman(1972)
Degree of saturation	0.10	Fredlund & Dahlman(1972)	
Unit weight	0.03	Hammitt(1966)	
Coefficient of permeability	S=80%	2.40	Nielsen et al.(1973)
	S=100%	0.90	
Compressibility factor	0.16	Padilla & Vanmarcke(1974)	
Preconsolidation pressure	0.19	Padilla & Vanmarcke(1974)	
Compression index	Sandy clay	0.26	Lumb(1966)
	Clay	0.30	Fredlund & Dahlman(1972)
Standard penetration test	0.26	Schultze(1975)	
Standard cone test	0.37	Schultze(1975)	
Friction angle(F)	Gravel	0.07	Schultze(1972)
	Sand	0.12	Schultze(1972)
Cohesion(c)	0.40	Fredlund & Dahlman(1972)	

Table 4. Factor of safety and failure probability of railway slop

노선	역간		건기		GL -3m		GL 0m	
			안전율	파괴확률(%)	안전율	파괴확률(%)	안전율	파괴확률(%)
경부선	군포	의왕	1.334	4.829	1.316	5.467	0.632	99.001
	의왕	성균관대	2.153	-	2.103	0.29	1.433	13.122
경춘선	평내	마석	1.088	31.548	1.02	43.15	0.456	99.998
영동선	춘양	녹동	1.487	0.216	1.223	6.686	0.811	92.054
	승부	석포	1.447	0.172	1.069	27.064	0.582	100
우암선	우암	신선대	1.371	2.419	1.363	1.478	0.627	99.751
장항선	판교	서천	1.512	0.376	1.367	2.064	0.803	89.245
호남선	몽탄	일로	1.466	2.411	1.292	6.69	0.79	100

불합리하므로 이에 대한 설계기준의 조정이 필요로 됨을 알 수 있었으며, 송평현 등(2004)은 지하수위가 지표면에 있다는 적용기준을 준용할 경우, 표준구배에 따라 설계가 이루어진 사면도 우기 시 대부분 불안정하게 평가되어 과도한 보강이 이루어지게 되며 표준구배에 대한 사실상의 의미도 상실된다고 지적한 바 있다.

한편, 예상 활동면은 비교적 심도가 깊은 원호과괴 형태로 결정되어 표층유실 형태의 실제 파괴 상황을 전혀 반영하고 있지 못하고 있다. 이러한 결과를 토대로 볼 때, 원호과괴를 가정한 한계평형해석을 적용한 경우는 강우로 인한 실제 토사 절개면에서 강우로 인해 발생하는 표층유실 형태의 파괴를 적절히 고려할 수 없을 것으로 판단된다. 따라서, 사면 내에서 발생한 파괴면에 대한 보다 정밀한 조사를 통하여 사면제원, 강우특성, 유역면적으로 고려한 표면 유출량 등에 따른 파괴패턴을 명확히 구분하고 파괴패턴에 따라 서로 다른 적절한해석기법을 적용하기 위한 추가연구가 필요로 된다.

4.2 신뢰성해석결과

신뢰성 해석결과에 의하면, 해석조건에 따라 절개면의 파괴확률은 다양하게 분포하고 있는 것을 알 수 있었다. 특히, 안전율이 유사하게 나타나고 있음에도 불구하고, 파괴확률은 상이하게 나타나고 있다. 이는 평균값으로 대표되는 지반정수를 근거로 한 전통적인 사면안정해석과 비교할 때, 지반정수의 분포형태를 고려함에 의해 보다 명확한 해석의 결과로 판단된다. 이를 이용하여 통상 사용되는 안전율을 보완할 수 있는 대안으로서의 파괴확률을 고려할 수 있을 것이다.

한편, 파괴확률의 분포는 건기시 파괴확률은 최소 0.172% 부터 최고 31.548%로 분포하고 있으나, 몽단-일로를 제외 하면 대부분 5% 미만의 값을 보이고 있음을 알 수 있었으며, 지표하 3m까지 포화된 조건에서는 최소 0.29%~최대 43.15%의 값을 얻을 수 있었다. 하지만, 지표면 포화조건에서는 최소 13.122%~최대 100%를 보이고 있다. 다시 말해, 건기시 및 우기시의 지표면 아래 3m 포화조건에 대해서는 모두 50%를 하회하는 결과를 보이고 있는데 반해, 지

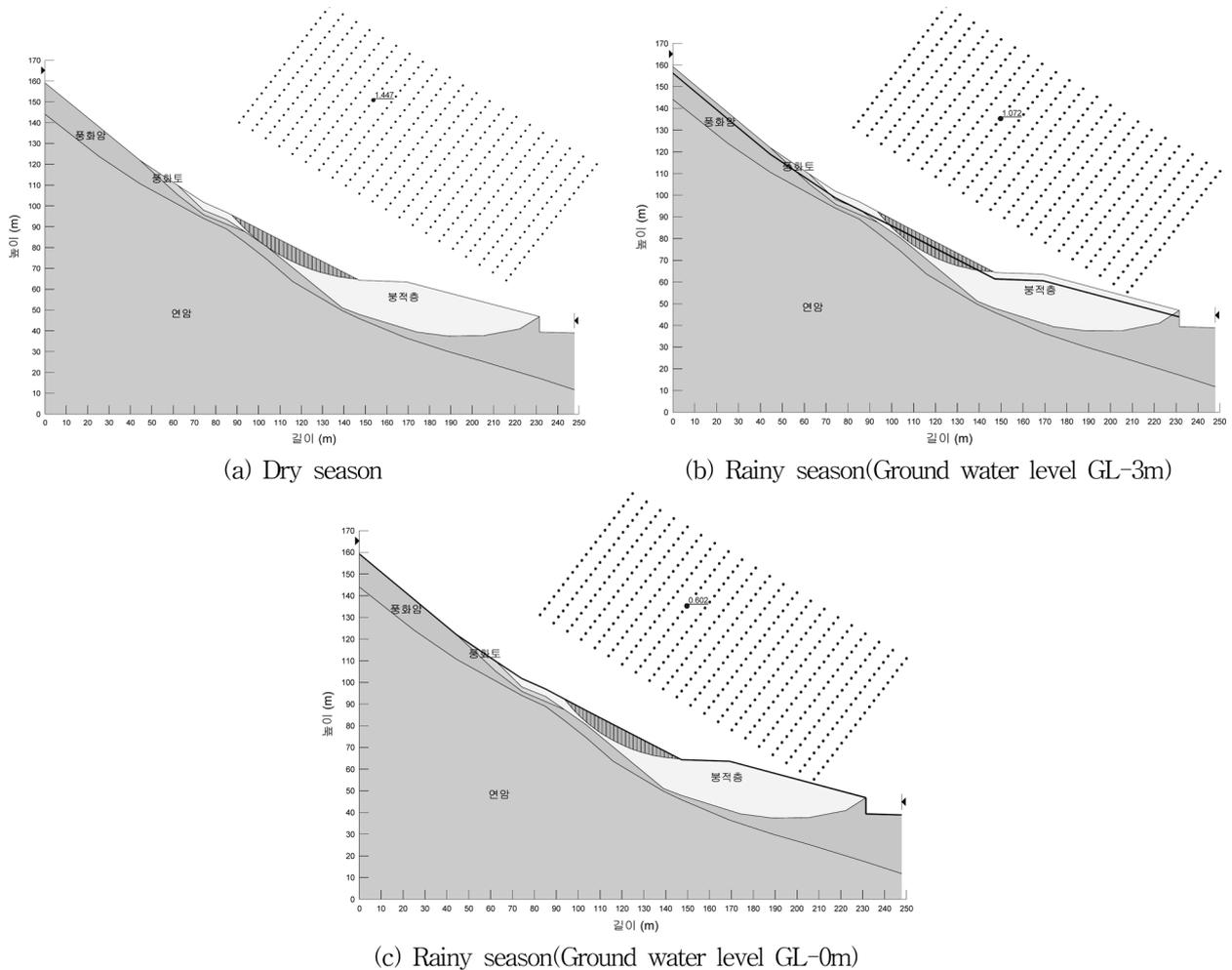


Fig. 2. Results of slope stability analysis(Seungbu-Sucpo)

표면 포화조건에 대해서는 거의 모든 사면이 90% 이상을 나타내고 있어, 사면안정해석에 대한 각종 적용기준이 과다함을 재확인할 수 있었다.

4.3 철도절개면 위험도평가

4.3.1 피해복구에 따른 손실

피해복구비용 절감 편익의 산정을 위해서 먼저 과거 10년간의 피해 현황을 노선별, 연도별로 분석하였으며, 노선별로 재구성하여 사고건수당 피해액을 산정하였으며, 연도별로 산정된 피해액은 현시점으로 보정하기 위하여 물가지수를 고려하였다. 피해액 산정을 위해 노선별로 연평균 피해건수를 산정하고, 각 노선별로 정밀조사 대상 절개면 전체에 대해서 연평균 발생할 것으로 판단되는 피해건수를 산정하였다. 동일한 노선 내에서는 각 정밀조사 대상 절개면에서 사고가 발생할 가능성은 동일한 것으로 가정하여 1개 소당 예상되는 연평균 피해건수를 산정하였다. 이상의 분석 결과를 토대로 피해경력이 있는 노선의 경우에는 이를 그대로 적용하고 과거의 피해 실적이 없는 경우에는 전체 노선의 평균을 적용하여 조사지점별로 사고 건당 피해액을 산정하였다.

Table 5의 분석 결과를 보면 동일한 노선 내에서는 피해

Table 5. Damage loss (including recovery cost)
 unit:thousand won

사면번호	노선	역간	피해 복구비
1	경부선	군포-의왕	11,608
2	경부선	의왕-성균관대	11,608
3	경춘선	평내-마석	13,297
4	영동선	춘양-녹동	4,985
5	영동선	승부-석포	4,985
6	우암선	우암-신선대	11,568
7	장항선	판교-서천	65,398
8	호남선	몽탄-일로	3,911

복구비용이 동일한 것으로 설정하였는데 그 이유는 각 절개면별 예상피해를 정확히 예측하기에는 곤란하며, 사고발생 유형도 다양하게 나타날 것이므로 차별화가 곤란하기 때문이다.

4.3.2 철도 폐쇄에 따른 수입손실

수입손실비용의 절감은 각 대상 절개면별로 사고가 발생하였을 때 예상되는 수입의 손실을 새마을, 무궁화, 통근열차, 화물별로 분석하였으며, 무궁화 및 통근열차 정기관 및 소화물의 경우에는 분석에서 제외하였다. 본 연구에서는 사고 건당 수입손실비용을 추정하고 위에서 계산된 각 절개면별 예상피해건수를 적용하여 대상 절개면별로 연평균 예상되는 수입손실비용을 추정하였다. 각 절개면별 손실수와 각 노선별 단위 승객(또는 화물)당 수입을 고려하여 지점별 수입손실비용을 분석한 결과는 Table 6과 같다.

이를 위하여 각 노선별 총 수송수요 및 수입을 근거로 노선별 1통행에 대한 수입의 원단위를 산정하고, 사고 발생에 따른 노선의 평균차단시간을 과거 실적을 근거로 다음과 같이 산정하였다. 사고 발생에 따른 차단시간은 노선별로 적용하기에는 자료의 수의 한계로 오차가 크게 날 수 있기 때문에 전체 평균인 472분(minutes)을 일괄적으로 적

Table 6. Incoming loss of each slope
 unit:thousand won

사면번호	새마을	무궁화	통근	화물	합계
1	173,794	170,052	1,187	78,378	423,412
2	173,794	170,052	1,187	106,543	451,577
3	0	6,754	3,386	4,979	15,118
4	0	2,339	55	8,436	10,830
5	0	2,250	40	8,311	10,602
6	0	0	0	14,383	14,383
7	682	2,746	39	1,333	4,801
8	2,815	7,578	427	1,032	11,853

Table 7. The results of risk assessment

사면번호	손실평가(단위 : 천원)			파괴확률(%)	위험도(천원)	우선순위
	피해복구비	수입손실액	소계			
1	11,608	423,412	435,020	5.467	23,782	1
2	11,608	451,577	463,185	0.290	1,343	5
3	13,297	15,118	28,415	43.150	12,261	2
4	4,985	10,830	15,815	6.686	1,057	6
5	4,985	10,602	15,587	27.064	4,218	3
6	11,568	14,383	25,951	1.478	383	8
7	65,938	4,801	70,739	2.064	1,460	4
8	3,911	11,853	15,764	6.690	1,054	7

용하였다. 또한, 각 대상 절개면별로 이 구간을 통과하는 수요를 분석하여 피해 발생에 따라 파생되는 손실수요를 각 구간의 통과수요와 차단시간을 고려하였다.

4.3.3 철도 절개면 위험도평가

철도절개면의 위험도평가는 식 (4)에 의거하여 Table 7과 같이 산출하였다. 손실평가는 피해복구비와 수입손실액에 대하여 시행하였으며, 신뢰성해석 결과로 산출되는 파괴확률은 수치해석으로부터 추출하였다. 파괴확률의 선정에 있어서 현재 기준에서 강우시 침투를 적절히 고려할 수 있다고 판단되는 '지하수위가 GL-3m에 위치'의 경우를 대표치로 하여 적용함에 의해 손실평가와 파괴확률을 고려한 위험도를 산출할 수 있었으며, 이에 따라 우선순위 적용이 가능해짐을 알 수 있다. 이와 같은 위험도평가를 기반으로 철도절개면의 유지관리 및 보수보강에 있어서 선진화된 기술의 도입이 가능해질 것이라 판단된다.

5. 결론

현재 철도가 운행 중인 절개면 8개소를 대상으로 절개면의 파괴확률 분포를 파악하였다. 현재 각종 설계기준에서 제시하고 있는 건기시 및 우기시 사면안정해석 기준에 맞춰 절개면 안정해석을 실시한 결과, 지표면까지 포화된 조건을 적용한 경우 과다설계의 개연성이 나타나고 있음을 확인할 수 있었으며, 이에 대한 보다 명확한 근거로 평균 81.4% 파괴확률 증가량을 들 수 있었다. 더욱이 유사한 안전율이 산출되었어도 파괴확률의 경우 많은 차이를 보이고 있어, 지반정수의 확률적 분포를 고려한 신뢰성해석기법의 도입이 시급하다는 사실도 알 수 있었다. 또한, 신뢰성해석을 시행한 결과물로 산출되는 파괴확률을 이용하여 철도절개면의 위험도평가를 시행하였다. 피해복구액과 수입손실액의 2가지에 국한하여 평가하였으나, 철도절개면의 효율적인 유지관리를 위한 보수보강, 유지관리 및 감시시스템 적용 등의 분야에 대한 우선순위 선정에 적절히 활용할 수 있을 것이다. 향후 손실평가분야의 확대와 더불어 설계비용, 시공비용 및 대책공법비용 등을 고려하여 사회경제적 효과를 고려한 위험도평가기법의 개발이 시도되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참고 문헌

1. 건설교통부(2004), “국도건설공사 설계실무요령”.
2. 김형배, 이승호(2002), “실용적인 확률론적 사면안정해석 기법 개발”, 한국지반공학회논문지 제18권, 5호, pp. 271-280.
3. 박용원, 김갑래, 여운관(1993), “1991년 용인-안성 지역 산사태 연구”, 한국지반공학회지, 제9권, 제4호, pp.103-116.
4. 사공명(2004), “강우로 인한 사면의 안정성 평가”, 한국철도학회 추계학술발표회 논문집 CD.
5. 송평헌, 김연희, 이춘석, 배규진(2004), “강우시 사면안정해석기법에 관한 연구”, 지반공학회 창립20주년 기념 지반구조물 설계/시공 사례집, pp. 471-480.
6. 철도청(1999~2003), “철도사고 사례집”.
7. 철도청(1980~2003), “철도통계연보”.
8. 한국도로공사(1996), “도로설계실무편람”.
9. 한국도로공사(2004), “도로설계요령”.
10. 한국철도기술연구원(2004), “철도절개면 안정성 평가 및 대책방안 연구”.
11. Fredlund, D. G et al. (1972), “Statistical Geotechnical Properties of Glacial Lake Edmonton Sediments”, in Statistics and Probability in Civil Engineering. HongKong Univ. Press.
12. Hammitt, G M. (1966), “Statistical Analysis of Data from a Comparative Laboratory Test Program Sponsored by ACIL”, Miscellaneous Paper 4-785, U.S. Army Engineering waterways Experiment Station, Corps of Engineers.
13. Lumb, P. (1966), “The Variability of Natural Soils”, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3, No. 2, pp. 74-97.
14. 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.
15. Padilla, J. D. et al. (1974), “Settlement of Structures on Shallow-Foundation, A Probabilistic Analysis”, Res. Rep. R74-9, MIT, Cambridge, Mass
16. Schultze, E. (1972), “Frequency Distribution and Correlations of Soil Properties”, Proc. of the 1st International Conference on Application of Statistics and Probability to Soil and Structural Engineering, Vol. 1, pp. 371-387.

(2008년 1월 22일 논문접수, 2008년 3월 8일 심사완료)