

확률론적 기법을 이용한 터널 지보시스템의 신뢰성 평가

박도현¹⁾, 박의섭^{1)*}, 송원경¹⁾, 류동우¹⁾

Reliability Assessment of Tunnel Support Systems Using a Probability-Based Method

Dohyun Park, Eui-Seob Park, Won-Kyong Song, Dong-Woo Ryu

Abstract The present study developed a program which can assess the reliability of tunnel support systems based on a probability-based method. The developed program uses FLAC2D as a solver, and can automatically execute all the processes, associated with numerical and probabilistic analysis. Since a numerical analysis, which models the ground, requires a significant calculation time, it is actually impossible to apply simulation-based methods to probabilistic assessment on the reliability of tunnel support systems. Therefore, the present study used a point estimate method, which is efficient for probabilistic analysis since the method can significantly reduce the number of samples when compared with the simulation-based method. The developed program was applied to a tunnel project, and the results were compared with those through a deterministic approach. From the comparison, it was identified that a probabilistic approach can quantitatively assess the reliability of tunnel support systems based on probability of failure and can be used as a tool for decision making in tunnel support designs.

Key words Probability-based method, Point estimate method, Probability of failure, Tunnel support system, System reliability

초 록 본 연구에서는 확률론적 기법을 토대로 터널 지보시스템의 신뢰성을 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 솔버로서 FLAC2D를 사용하며 수치해석과 확률론적 해석의 전 과정을 자동적으로 처리할 수 있다. 지반을 모델링한 수치해석시 상당한 계산시간이 소요되므로 시물레이션 기법을 적용하여 터널 지보시스템의 신뢰성을 확률론적으로 평가하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 샘플의 수를 시물레이션 기법에 비해 상당히 줄일 수 있어 확률론적 해석을 하는 데 효율적인 점추정법을 사용하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램을 터널 프로젝트에 적용하여 결정론적 접근법에 의한 결과와 비교 분석하였다. 이로 부터 확률론적 접근법은 파괴확률을 토대로 터널 지보시스템의 신뢰성을 정량적으로 평가할 수 있고 터널 지보설계시 의사결정의 도구로서 활용될 수 있다는 것을 확인하였다.

핵심어 확률론적 기법, 점추정법, 파괴확률, 터널 지보시스템, 시스템 신뢰성

1. 서 론

지반공학적 문제와 관련된 불확실성(uncertainty)은 크게 지반의 불확실성, 지반조사의 불확실성, 모델링의 불확실성으로 분류할 수 있다. 먼저 지반의 불확실성은 자연 재료인 지반의 특성이 공간에 따라 변하는 고유의 불확실성(inherent or intrinsic uncertainty)이고, 지반조

사의 불확실성은 지반의 공학적인 특성을 파악하기 위한 지반조사가 불충분하거나 완벽한 지반조사가 현실적으로 불가능하여 나타나는 불확실성이다. 마지막으로 모델링의 불확실성은 실제 현상을 규명하기 위한 모델링 오차로 인해 발생하는 불확실성이다.

기존의 결정론적 접근법에서는 이러한 불확실성을 고려하기 위하여 안전율 개념을 도입하였으며, 비교적 큰 안전율을 적용하여 보수적이고 비경제적인 설계를 지향하여 왔다. 또한 결정론적 접근법에서는 지반 특성에 대한 보수적인 값이나 평균값을 적용하여 해석을 수행하기 때문에 지반공학적 불확실성을 나타내는 분산의 체계적인 반영이 어려웠다. 이로 인해 어떤 시스템의

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부

* 교신저자 : espark@kigam.re.kr

접수일 : 2010년 1월 7일

심사 완료일 : 2010년 1월 20일

게재 확정일 : 2010년 1월 25일

안전율이 허용 기준을 만족하는지 여부만을 평가할 수 있었다. 반면 확률론적 접근법에서는 시스템의 안정성에 영향을 미치는 매개변수의 불확실성을 고려한다. 이로부터 시스템 안정성은 파괴확률(probability of failure)을 토대로 정량적으로 평가되며, 분석된 파괴확률을 근거로 공학적 의사결정(decision making)을 할 수 있다. 예를 들어, Juang 외(1999)는 캘리포니아 Moss Landing 지역의 액상화(liquefaction) 가능성을 확률론적 기법을 이용하여 평가하였다. 기존의 결정론적 해석 기법을 이용한 경우 안전율이 기준치 이상이라서 액상화 가능성이 없는 것으로 분석되었으나, 실제 현장에서는 액상화가 일부 영역에서 발생하였다. 이를 분석하기 위해 확률론적 기법을 이용하여 액상화 가능성을 분석하였고, 실제 액상화가 발생한 영역의 파괴확률이 0.01 이상인 것으로 분석되어 액상화 가능성이 높은 것으로 검토되었다. 이 연구로부터 어떤 시스템이 허용 안전율을 만족하더라도 시스템의 파괴확률이 큰 경우에는 그 시스템이 파괴될 가능성이 높다는 것을 알 수 있다. 즉 결정론적 접근법보다는 확률론적 접근법이 시스템 안정성을 더 신뢰도 높게 예측할 수 있고, 파괴확률에 근거하여 시스템 안정성에 대한 공학적 의사 결정을 할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 공학적 장점을 갖는 확률론적 기법은 다양한 분야에서 활용되어 왔다. 즉 한계상태설계 또는 하중저항설계, 토사 및 암반 비탈면(Christian 외, 1994, 김형배와 이승호, 2002, 박희진, 2002, 장연수 외, 2002), 댐 및 성토체(Barbosa 외, 1989, Xu & Low, 2006, Preziosi, 2008), 액상화 가능성 평가(Juang, 1999, Hwang 외, 2005), 동적 위험도 분석(Ellingwood, 2001, Geist & Parsons, 2006), 광산 내 광주(pillar) 안정성 분석(Griffiths 외, 2002) 등 다양한 분야에서 적용되어 왔다. 반면 확률론적 기법에 의해 터널 안정성을 정량적으로 평가한 연구는 많지 않았다. Laso 외(1995)와 Li & Low(2010)는 원형 굴착단면에 대한 이론식으로부터 얻어진 지보반응곡선을 토대로 터널 지보시스템의 신뢰성을 평가하였으나 원형 굴착단면이 아닌 경우에 적용하기 어려운 문제점이 있었다. Oreste(2005)는 hyperstatic reaction method를 이용하여 확률론적 터널 지보설계를 수행하였으나, 경험식을 토대로 지보재에 작용하는 외부 하중을 산정해야 하는 문제점이 있었다. Schweiger 외(2001)는 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS2D(Plaxis)를 이용하여 터널 안정성에 대한 확률론적 평가를 수행하였으나, 터널 안정성 평가시 많이 활용되는 FLAC2D(Itasca) 해석코드와 연계하여 터널 지보시스템의 신뢰성을 확률론적으로 평가한 연구는 거의 없었다. You 외(2005)는 시뮬레이션 기법을 이용

하여 터널 지보의 신뢰성을 평가하였으나 입력 확률변수에 대한 시뮬레이션 횟수가 충분하지 않은 문제점이 있었다. 한편 확률론적 기법에 의해 터널 지보시스템의 신뢰성을 평가하는 경우 다양한 터널 형상을 고려하기 위해서는 수치해석을 기반으로 해야 하며, 수치해석의 계산시간을 고려할 때 시뮬레이션 기법보다 수치계산 면에서 효율적인 확률론적 기법을 적용할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 확률론적 기법을 토대로 터널 지보시스템의 신뢰성을 평가하기 위해 수치계산 면에서 효율적인 점추정법(point estimate method)을 사용하였고 연속체 유한차분 수치해석 코드인 FLAC2D에 적용하였다. 터널 안정성에 대한 수치해석과 확률론적 해석시 계산과정을 자동화하기 위해 FLAC2D를 제어할 수 있는 프로그램(이하 “TunnelPEM”이라고 함)을 비주얼 베이직을 이용하여 개발하였다. 본 연구에서 개발한 프로그램을 터널공사 프로젝트에 적용하여 기존의 결정론적 해석 기법에 의한 결과와 비교 분석하였다. 이로부터 확률론적 접근법은 파괴확률을 토대로 터널 지보시스템의 신뢰성을 정량적으로 평가할 수 있고, 터널 지보설계시 공학적 의사결정을 위한 도구로서 활용될 수 있을 것이다.

2. 터널 지보시스템의 신뢰성 평가를 위한 확률론적 기법

2.1 확률론적 기법 개요

시스템의 안정성을 평가하는 기본 개념에 있어 확률론적 접근법이 기존의 결정론적 접근법과 다른 점은 시스템의 안정성을 결정하는 변수들의 변동성을 고려하는 것이다. 즉 재료의 물성치나 작용 하중 등의 임의성을 고려하기 위해 확률론적 접근법에서는 확률 및 통계 이론을 적용한다. 시스템의 변수들이 갖는 변동성이 상대적으로 작다면 결정론적 해석에 의한 결과를 안정성 평가시 그대로 반영할 수 있으나, 시스템 변수들의 임의성이 큰 경우에는 결정론적 접근법에 의한 결과를 신뢰할 수 없다. 기존의 결정론적 접근법에서는 시스템 변수들의 임의성을 고려하기 위해 시스템 변수에 대한 보수적인 값이나 평균값을 적용하여 시스템의 안정성을 평가하였다. 그러나 이러한 접근법은 시스템의 변수가 갖는 임의성을 정량적으로 분석하지 못하는 단점이 있다. 이와 같은 기존의 결정론적 접근법의 문제를 해결하기 위해서는 확률론적 접근법이 필요하다.

확률론적 해석을 위해서는 시스템의 안정성을 나타내는 성능함수(performance function), 즉 한계상태방정식을 정의해야 한다. 일반적으로 식 (1)과 같이 성능함

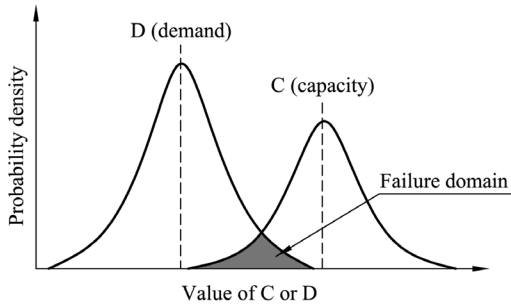


Fig. 1. Schematic representation of probabilistic approach (Harr, 1996)

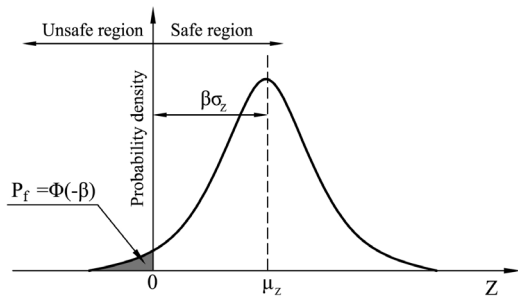


Fig. 2. Probability of failure of a system(Harr, 1996)

수를 정의하며, Fig. 1에서 음영으로 표시된 영역은 시스템이 파괴될 수 있는 영역을 나타낸다.

$$Z = C - D \tag{1}$$

여기서 Z는 시스템의 성능함수, C는 작용 하중 등에 저항할 수 있는 강도 등을 나타내는 capacity이고, D는 시스템에 작용하는 하중 등을 나타내는 demand이다.

성능함수 Z가 0 이하일 확률이 시스템의 파괴확률이므로 파괴확률은 식 (2)에 의해 산정된다.

$$P_f = P[Z \leq 0] = \Phi\left(\frac{0 - \mu_z}{\sigma_z}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = \Phi(-\beta) \tag{2}$$

여기서 P_f 는 파괴확률, Φ 는 표준정규분포, μ_z/σ_z 는 신뢰도 지수(reliability index), β 로서 신뢰도 지수가 커질수록 파괴확률이 감소하므로 신뢰도 지수가 큰 값일수록 시스템의 안정성은 증가한다(Fig. 2).

2.2 확률론적 기법 종류 및 특징 비교분석

확률론적 기법은 크게 분석적 근사 기법(analytical approximation method)과 샘플링 기법(sampling-based

method)으로 분류할 수 있다. 분석적 근사 기법은 수식으로 표현된 시스템의 성능함수를 일차 또는 이차의 테일러 급수로 근사한 후 평균을 나타내는 일차 모멘트(moment)와 분산을 나타내는 이차 모멘트를 이용하여 시스템의 파괴확률을 구하는 방법이다. 분석적 근사 기법에는 일계이차모멘트법(first order second moment method), 이계이차모멘트법(second order second moment method), 응답면 기법(response surface method) 등이 있다. 샘플링 기법은 수식으로 표현된 성능함수를 요구하지 않는 방법으로서 시스템의 성능을 결정하는 변수들의 확률분포를 토대로 난수를 발생시켜 시뮬레이션을 수행하거나, 특정 샘플링 점들에 대한 해석 결과와 가중치를 적용하여 시스템의 파괴확률을 구하는 방법이다. 샘플링 기법에는 direct or crude Monte Carlo simulation(MCS), 중요도 추출(importance sampling) 또는 Latin hypercube sampling(LHS)에 의한 MCS 등과 같은 시뮬레이션 기법과 점추정법이 있다.

분석적 근사 기법은 수식으로 표현된 시스템의 성능함수를 이용하는 방법이다. 따라서 수치해석을 기반으로 하는 확률론적 해석식 수식으로 표현된 시스템의 성능함수가 필요하다. 그러나 수치해석으로부터 수식화된 성능함수를 예측하기가 어렵기 때문에 분석적 근사 기법은 터널 지보시스템의 신뢰성 평가를 위한 해석 기법으로는 적절하지 않다. 물론 응답면 기법을 이용하여 성능함수를 근사화할 수 있으나, 근사화된 성능함수를 토대로 분석적 근사 기법을 적용하는 것은 합리적이지 않다. 샘플링 기법에는 시뮬레이션 기법과 점추정법이 있다. 시뮬레이션 기법은 기본적으로 입력 확률변수의 전 범위에 걸쳐 난수를 발생시켜 시스템의 안정성을 평가하기 때문에 시뮬레이션을 위한 샘플링 수를 결정하는 것이 중요한 문제이다. 그러나 수치해석을 기반으로 한 시뮬레이션 수행시 일반적으로 시뮬레이션 횟수를 100보다 작게 하는 경우가 대부분이며(Harr, 1996), 이는 해석결과의 신뢰도가 저하되는 원인이라고 할 수 있다. 또한 지반을 모델링한 수치해석시 상당한 계산시간이 소요되므로 시뮬레이션 기법을 적용하는 것은 현실적으로 불가능하다. 점추정법은 특정 샘플링 점들에 대한 해석 결과와 가중치를 적용하여 시스템의 파괴확률을 구하는 방법으로서 분석적 근사 기법과 같이 시스템의 성능함수가 필요하지 않고, 시뮬레이션 기법과 같이 방대한 계산횟수를 요구하지 않는다. 한편 Bucher 외(2000)에 따르면 시뮬레이션 기법은 계산의 정확도는 가장 높으나 수치계산의 효율은 가장 낮고, 일계이차모멘트법은 수치계산 효율은 가장 높으나 계산 정확도는 가장 낮으며, 응답면 기법과 점추정법의 계산 정확도와

수치계산 효율은 시뮬레이션 기법과 일계이차모멘트법의 중간 정도이다. 위와 같은 확률론적 기법들의 특징을 고려할 때, 시뮬레이션 기법에 비해 계산의 정확도는 다소 떨어지지만 수치계산 면에서 효율적인 점추정법이 수치해석에 기반하여 터널 지보시스템의 신뢰성을 평가하기 위한 확률론적 기법으로 적절하다고 판단된다.

2.3 허용 파괴확률(acceptable probability of failure)

확률론적 기법에 의해 구조물의 안정성을 평가하고자 하는 경우 허용 파괴확률의 설정이 필요하다. 허용 파괴확률에 따라 시스템의 안정성과 경제성이 결정되므로 구조물의 중요도 또는 구조물의 파괴 발생시 피해정도를 고려하여 허용 파괴확률을 적절히 설정해야 한다. Table 1은 여러 연구자들이 제시한 허용 파괴확률을 나타낸다. 댐에서 허용 파괴확률의 범위는 1×10^{-3} - 9×10^{-4} 이고(Singh 외, 2007), 제방(embankment)이 평균 정도의 성능을 유지하기 위한 파괴확률은 1×10^{-3} - 6×10^{-3} 의 범위이다(US Department of the Army, 1997). 그리고 일반적인 영구 비탈면과 높이가 50 m 이상인 비탈면에서 허용 파괴확률은 각각 0.01, 3×10^{-3} 이다(Priest & Brown, 1983). 본 연구에서는 위의 자료를 참고하여 터널의 허용 파괴확률을 1×10^{-3} 으로 설정하였으며, 향후

터널공사에 적용하기 위한 허용 파괴확률을 터널의 종류 또는 규모에 따라 정립할 필요가 있다. 터널에서 파괴확률은 다음과 같이 해석될 수 있다. 일반적으로 2차원 수치해석시 종방향으로 1 m 길이를 고려하므로 터널 지보시스템의 파괴확률이 1×10^{-3} 으로 분석되었다면, 지반조건 및 시공조건이 수치해석과 유사한 터널 1 km 구간 중 평균 1 m 구간에서 지보시스템이 파괴될 수 있다는 것을 의미한다.

3. 터널 지보시스템의 신뢰성 평가를 위한 프로그램

3.1 프로그램 개요

본 연구에서는 터널 지보시스템의 신뢰성을 확률론적으로 평가하기 위해 대칭 확률변수의 상관성을 고려할 수 있는 Rosenblueth(1975)의 점추정법을 사용하였다. 연속체 수치해석에 의한 터널 안정성 평가시 변형계수, 점착력, 내부마찰각이 안정성에 지배적인 영향을 미치고, 이 세 가지 지반정수의 통계값이 Hoek-Brown 파괴 기준에 따르는 MCS 및 베이지안 접근법을 통해 산정될 수 있으므로 변형계수, 점착력, 내부마찰각을 입력 확률변수로 적용하였다. 세 가지 입력 확률변수에 대한 점추정법을 통해 시스템의 안정성을 평가하는 과정은 다음과 같다.

Table 1. Acceptable probability of failure

Geotechnical structure	Event or level of performance/failure	Acceptable P_f	Reference
Dam	Overtopping	1×10^{-3}	Singh 외(2007)
	Piping	2×10^{-3}	
	Failure of spillway	4×10^{-4}	
	Sloughing on dam slope	9×10^{-4}	
Embankment	High	3×10^{-7}	US Department of the Army(1997)
	Good	3×10^{-5}	
	Above average	1×10^{-3}	
	Below average	6×10^{-3}	
	Poor	0.023	
	Unsatisfactory	0.07	
Slope	Hazardous	0.16	Priest & Brown(1983)
	Not serious ^a	0.1 ^d	
	Moderately serious ^b	0.01 ^d	
	Very serious ^c	3×10^{-3d}	

P_f = probability of failure

^a Individual benches; small temporary slopes not adjacent to haulage roads(slope height, $H < 50$ m)

^b Any slopes of a permanent or semi-permanent nature

^c Medium-size and high slopes carrying major haulage roads or underlying permanent mine installations($H \geq 50$ m)

^d Probability that a factor of safety is less than 1.0

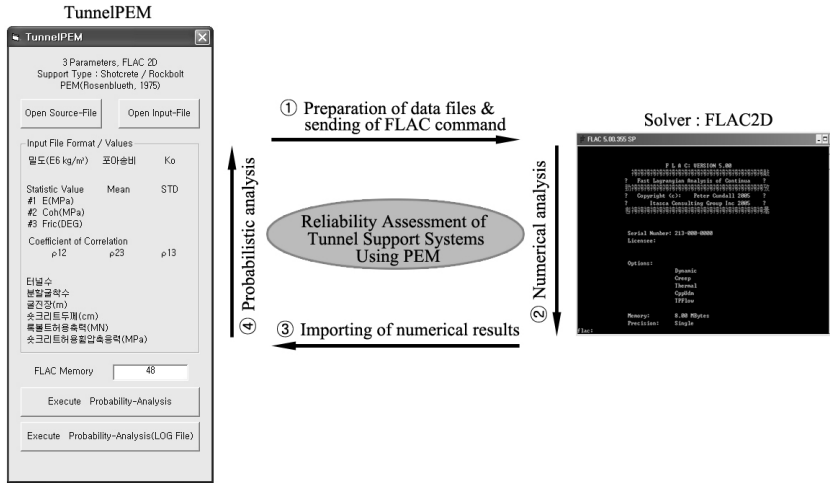


Fig. 3. Reliability assessment of tunnel support systems using TunnelPEM and FLAC2D

성능함수의 입력 확률변수가 3개이고 정규분포인 경우, 각 입력변수에 대한 2개의 점, 즉 평균값을 기준으로 표준편차만큼 떨어진 점들을 이용하여 성능함수의 평균과 분산을 구하는 과정은 식 (3)-(10)과 같으며, 식 (2)에 의해 파괴확률을 구한다.

$$Z_{\pm\pm\pm} = Z(\bar{X}_1 \pm \sigma_{X_1}, \bar{X}_2 \pm \sigma_{X_2}, \bar{X}_3 \pm \sigma_{X_3}) \quad (3)$$

$$E[Z^M] = p_{+++} Z_{+++}^M + p_{++-} Z_{++-}^M + \dots + p_{---} Z_{---}^M \quad (4)$$

$$p_{+++} = p_{---} = \frac{1}{2^3} (1 + \rho_{12} + \rho_{23} + \rho_{31}) \quad (5)$$

$$p_{++-} = p_{-+-} = \frac{1}{2^3} (1 + \rho_{12} - \rho_{23} - \rho_{31}) \quad (6)$$

$$p_{+-+} = p_{-+-} = \frac{1}{2^3} (1 - \rho_{12} - \rho_{23} + \rho_{31}) \quad (7)$$

$$p_{--+} = p_{-+-} = \frac{1}{2^3} (1 - \rho_{12} + \rho_{23} - \rho_{31}) \quad (8)$$

$$\mu_Z \approx E[Z] \quad (9)$$

$$\sigma_Z^2 = V[Z] = E[Z^2] - (E[Z])^2 \quad (10)$$

여기서 Z는 성능함수, $\bar{X}_1, \bar{X}_2, \bar{X}_3$ 은 각각 변형계수, 점착력, 내부마찰각의 평균, $\sigma_{X_1}, \sigma_{X_2}, \sigma_{X_3}$ 은 각각 변형계수, 점착력, 내부마찰각의 표준편차, $p_{\pm\pm\pm}$ 는 각 확률변수의 샘플링 점에 대한 가중치, ρ_{ij} 는 i번째와 j번째 확률변수의 상관계수, $E[Z^M]$ 은 Z^M 의 평균, μ_Z 와 σ_Z^2 은 각각 성능함수의 평균과 분산, 기호 +와 -는 각각 샘플링 점이 (평균값+표준편차)와 (평균값-표준편차)인 경우를 나타낸다.

본 연구에서는 솔버로서 FLAC2D를 사용하였으며, 비주얼 베이직에 의해 수치해석과 위의 확률론적 해석의 전 과정을 자동 처리할 수 있는 TunnelPEM 프로그램을 개발하였다. Fig. 3은 TunnelPEM과 FLAC2D를 연계해 확률론적 해석을 하는 과정을 나타낸다. 먼저 TunnelPEM은 수치해석을 위한 기본 해석 파일과 확률론적 해석을 위한 데이터 파일을 불러드린 후 샘플링 점들에 대한 해석 파일들을 작성한다. 그리고 작성된 해석 파일들에 대한 수치해석과 지보재 부재력의 출력이 가능하도록 배치 파일을 만든 후 FLAC2D에 수치해석을 위한 명령어를 전송한다. 다음으로 샘플링 점들에 대한 FLAC2D의 수치해석이 종료된 후 지보재의 부재력에 대한 로그 파일을 읽어 들인다. 마지막으로 읽어 들인 지보재의 부재력에 대한 정보를 토대로 점추정법에 의한 확률론적 해석을 수행하여 슛크리트와 록볼트의 각 요소에 대한 파괴확률, 지보시스템의 파괴확률을 계산 및 출력한다.

3.2 터널 지보시스템의 파괴확률 산정

터널 지보시스템의 신뢰성은 지보재인 슛크리트와 록볼트의 파괴 가능성을 기준으로 평가하였다. 일반적으로 사용되는 압축강도 21 MPa인 슛크리트와 항복강도 350 MPa인 SD35 이형철근(직경 25 mm)을 록볼트로 적용하였다. 이 경우 슛크리트와 록볼트의 허용 부재력은 각각 8.4 MPa, 88.67 kN이고(한국콘크리트학회, 2007), 슛크리트와 록볼트의 성능함수 선언시 capacity가 된다. 따라서 터널 지보시스템의 신뢰성 평가를 위한 슛크리트와 록볼트의 성능함수는 각 지보재의 요소

에 대해 각각 식 (11), (12)와 같이 정의할 수 있다.

$$Z_{shot,i} = 8.4 - D_{shot,i}(E, c, \phi) \tag{11}$$

$$Z_{rock,j} = 88.67 - D_{rock,j}(E, c, \phi) \tag{12}$$

여기서 $Z_{shot,i}$ 와 $Z_{rock,j}$ 는 각각 i 번째 슛크리트 요소의 성능함수(MPa)와 j 번째 록볼트 요소의 성능함수(kN), $D_{shot,i}$ 와 $D_{rock,j}$ 는 각각 i 번째 슛크리트 요소의 힘 압축응력(MPa)와 j 번째 록볼트 요소의 축력(kN), E, c, ϕ 는 각각 지반의 변형계수, 점착력, 내부마찰각이다.

2.1절에서 언급한대로 성능함수 Z 가 0 이하일 확률이 파괴확률이므로 슛크리트와 록볼트의 각 요소에 대한 파괴확률은 점추정법에 의해 각 지보재에 발생하는 부재력의 평균과 분산을 계산한 후 식 (2)를 이용하여 산정되었다.

스�크리트와 록볼트로 구성된 터널 지보시스템의 파괴확률은 두 가지 지보재 중 하나의 지보재만 파괴되어도 지보시스템이 파괴되는 것으로 간주하였다. 슛크리트와 록볼트의 파괴모드가 서로 독립적이라고 가정하였고, 식 (13)과 같이 각 지보재의 최대 파괴확률을 이용하여 터널 지보시스템의 파괴확률을 계산하였다.

$$P_{f,system} = P_{max-f,shot} + P_{max-f,rock} - P_{max-f,shot} \cdot P_{max-f,rock} \tag{13}$$

여기서 $P_{f,system}$ 은 지보시스템의 파괴확률, $P_{max-f,shot}$ 와 $P_{max-f,rock}$ 은 각각 슛크리트와 록볼트의 최대 파괴확률이다.

4. 적용 사례 및 결과 고찰

터널 지보시스템의 신뢰성에 대한 확률론적 평가를 위해 본 연구에서 개발한 프로그램을 철도터널 건설공사에 적용하여 기존의 결정론적 접근법에 의한 결과와 비교 분석하였다. 적용 현장은 경상남도 김해시와 창원시를 연결하는 복선전철 건설공사로서 2개의 터널이 계획되었다. 터널공사 구간에는 Fig. 4와 같이 흑운모화강암, 주산안산암, 진동층(퇴적층)이 존재하며, 전반적으로 흑운모화강암이 넓게 분포하였다(한국철도시설공단, 2003a). 본 연구에서는 흑운모화강암에 계획된 터널구간 중 지보패턴 P3과 P4인 구간에서 지보시스템의 신뢰성을 평가하였다. Table 2는 P3과 P4의 표준지보패턴을 나타내고, Fig. 5는 각 지보시스템의 신뢰성을 검토하기 위한 해석단면을 나타낸다.

Table 3은 Hoek-Brown 파괴기준에 따르는 MCS와 베이지안 접근법을 통해 분석된 변형계수, 점착력, 마찰

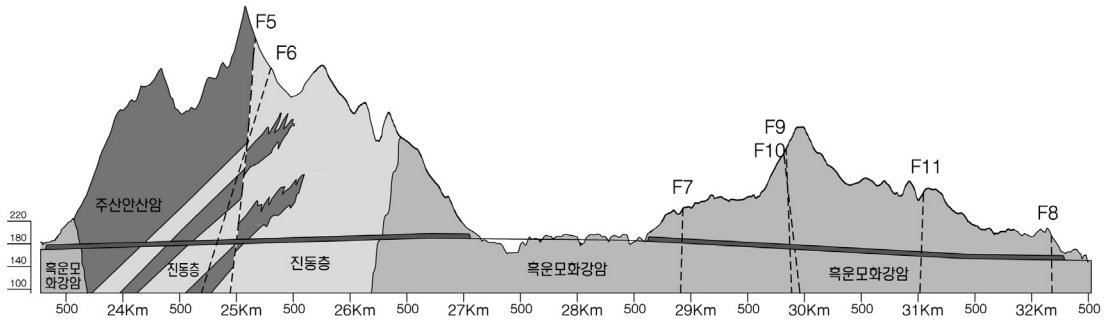
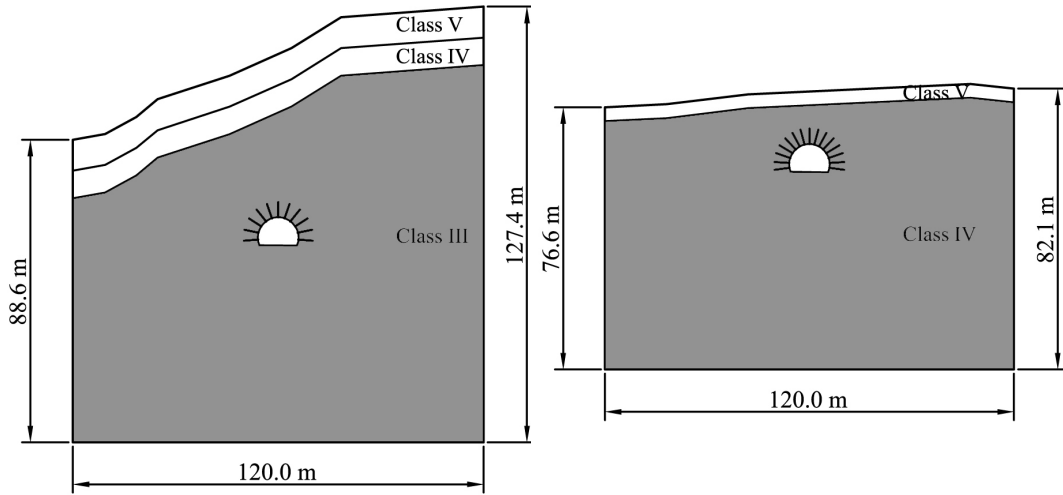


Fig. 4. Geological map(한국철도시설공단, 2003a)

Table 2. Typical support pattern(한국철도시설공단, 2003a)

Support type		P3	P4
Excavation method		Full-face	Half-face
Advance length(m)		2.0	1.5(upper)/1.5(lower)
Shotcrete thickness(cm)		8	12
Rockbolt	Length(m)	4.0	4.0
	S_L (m)/ S_T (m)	2.0/2.0	1.5/1.5
Steel rib	Dimension/ S_L (m)	-/-	LG-50×20×30/1.5

S_L and S_T = spacings in the longitudinal and transverse direction of a tunnel, respectively; LG = lattice girder



(a) Support pattern P3(28km860) (b) Support pattern P4(23km430)
 * The dark area denotes the region considering uncertainty in geotechnical properties

Fig. 5. Schematic of numerical analysis

Table 3. Means and standard deviations of geotechnical properties of biotite granite(한국철도시설공단, 2003b)

Ground class		Class I	Class II	Class III	Class IV	Class V
Deformation modulus (MPa)	Mean	27,057	15,575	8,123	1,254	503
	SD	5,152	5,467	2,527	222	117
Cohesion(MPa)	Mean	5.55	2.37	0.85	0.56	0.27
	SD	1.07	0.82	0.13	0.05	0.03
Friction angle(°)	Mean	51.5	49.7	45.1	40.9	33.7
	SD	1.3	3.3	3.7	1.3	0.5

SD = standard deviation

Table 4. Geotechnical properties of biotite granite for deterministic analysis(한국철도시설공단, 2003b)

Geotechnical class	Class I	Class II	Class III	Class IV	Class V
Unit weight(kN/m ³)	28.0	26.0	25.0	22.0	20.0
Deformation modulus(MPa)	20,000	12,000	8,000	1,000	300
Cohesion(MPa)	5.0	2.0	0.8	0.15	0.03
Friction angle(°)	47.0	42.0	38.0	34.0	31.0
Poisson's ratio	0.20	0.22	0.23	0.25	0.30
Stress ratio	1.25				

각의 평균 및 표준편차를 나타내고, Table 4에서 값들은 프로젝트 설계자가 결정한 설계 적용 지반 물성치로서 본 연구의 결정론적 해석시 사용하였다(한국철도시설공단, 2003b). 본 연구에서는 터널 안정성에 미치는 영향이 클 것으로 예상되는 터널 주변의 지반, 즉 Fig. 5에 음영으로 표시된 영역에서 지반 물성치의 불확실성을 고려하여 확률론적 해석을 수행하였으며, Table 3의

통계자료를 지반의 불확실성으로 고려하였다.

기존의 결정론적 접근법에 의해 지보시스템의 신뢰성을 평가한 결과, 슛크리트와 록볼트에 발생하는 최대 부재력이 지보패턴 P3의 경우 각각 2.63 MPa, 8.25 kN 이었고, 지보패턴 P4의 경우 각각 4.01 MPa, 50.09 kN 이었다(Table 5). 본 연구에서 고려한 슛크리트와 록볼트의 허용 부재력이 각각 8.4 MPa, 88.67 kN이므로 결

Table 5. Summary of results based on the deterministic approach

Support pattern	Max. bending compressive stress of shotcrete(MPa)	Max. axial force of rockbolt(kN)	Stability
P3	2.63	8.25	Stable
P4	4.01	50.09	Stable

Table 6. Summary of results based on the probabilistic approach

Support pattern	$P_{\max-f,shot}$	$P_{\max-f,rock}$	$P_{f,system}$	Failure
P3	1.00×10^{-20}	1.00×10^{-20}	2.00×10^{-20}	No failure
P4	1.00×10^{-20}	1.12×10^{-3}	1.12×10^{-3}	Possible

$P_{\max-f,shot}$ and $P_{\max-f,rock}$ = maximum probabilities of failure of shotcrete and rockbolt, respectively; $P_{f,system}$ = probability of failure of tunnel support system

정론적 접근법에 의하면 터널 지보시스템의 신뢰성이 확보된 것으로 판단할 수 있다.

확률론적 접근법에 의해 터널 지보시스템의 신뢰성을 평가한 결과는 Table 6과 같다. 지반등급 Class III의 불확실성을 고려하여 지보패턴 P3의 신뢰성을 평가한 결과, 슛크리트와 록볼트의 파괴확률이 모두 1.00×10^{-20} 으로 파괴 가능성이 거의 없다고 판단할 수 있으며, 이는 결정론적 접근법에 의한 결과와 일치한다. 지반등급 Class IV의 불확실성을 고려하여 지보패턴 P4의 신뢰성을 평가한 결과, 슛크리트와 록볼트의 파괴확률이 각각 1.00×10^{-20} , 1.12×10^{-3} 으로 산정되었고, 지보시스템의 파괴확률은 식 (13)에 의해 1.12×10^{-3} 으로 계산되었다. Fig. 6은 지보패턴 P4에서 각 록볼트 요소의 최대 파괴확률을 나타낸다. 본 연구에서 설정한 허용 파괴확률(1×10^{-3})을 기준으로 지보패턴 P4의 신뢰성을 평가한다면, 지보시스템의 파괴확률이 허용 파괴확률 이상이므로 지보시스템의 신뢰성이 확보되었다고 할 수 없으며, 결정론적 접근법에 의한 결과와 일치하지 않는다. 이는 결정론적 접근법에서는 지보시스템의 신뢰성 평가시 변형계수, 점착력, 내부마찰각의 불확실성을 고려하지 않았기 때문에 나타난 결과라고 판단된다.

위의 결정론적 접근법에 의한 결과에 의하면 슛크리트와 록볼트로 구성된 지보시스템이 안정함에도 불구하고 지반의 불확실성을 고려하여 경험적으로 강지보재를 적용하였다. 반면 확률론적 접근법에 의한 결과를 토대로 지보시스템의 신뢰성을 평가한다면, 슛크리트와 록볼트로 구성된 지보시스템의 파괴확률이 허용 파괴확률 이상이므로 슛크리트와 록볼트의 지보량을 늘리거나 추가 지보재가 필요하다. 이로부터 확률론적 접근법에 의한 지보시스템의 신뢰성 평가 결과가 지보패턴 P4에서 경험적으로 적용한 강지보재의 설계 근거가 된

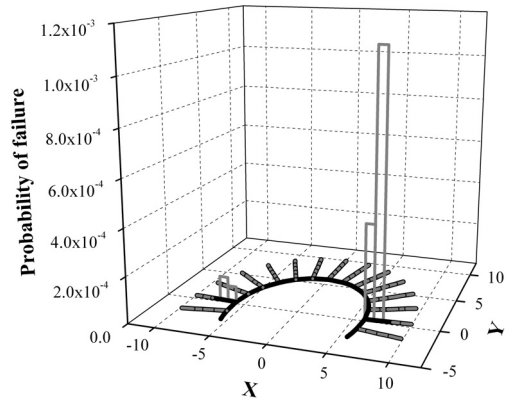


Fig. 6. Probabilities of failure of rockbolt elements (support pattern P4)

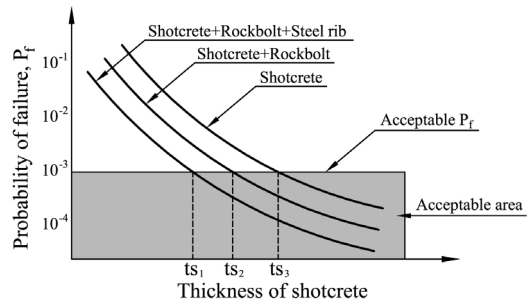


Fig. 7. Schematic of decision making in tunnel support design using probability-based method

다고 할 수 있다.

또한 확률론적 접근법에 의한 결과는 터널 지보설계를 위한 기초자료로 활용될 수 있다. Fig. 7에서와 같이 허용 파괴확률 이하의 지보설계를 위해 세 가지 지보조건, 즉 슛크리트(두께 ts_1)+록볼트+강지보재, 슛크리트

(두께 ts_2)+록볼트, 숏크리트(두께 ts_3)의 적용이 가능하며, 시공성, 경제성, 안정성을 고려하여 위의 지보조건들 중 하나를 선택적으로 설계에 반영할 수 있다. 이와 같이 확률론적 접근법은 터널 지보시스템 설계시 의사결정을 위한 도구로서 활용될 수 있다.

5. 결론 및 향후 연구사항

본 연구에서는 연속체 수치해석 프로그램인 FLAC2D와 연계하여 터널 지보시스템의 신뢰성을 확률론적으로 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발한 프로그램은 수치해석과 확률론적 해석의 전 과정을 자동적으로 처리할 수 있으며, 일부 수정을 통해 기타 텍스트 기반의 수치해석 프로그램을 제어할 수 있다. 본 연구에서 개발한 프로그램을 철도터널 건설공사에 적용하여 기존의 결정론적 접근법에 의한 결과와 비교 분석하였고, 이로부터 확률론적 접근법에 의한 터널 지보시스템의 신뢰성 평가 결과가 지보설계시 기초자료, 즉 공학적 의사결정을 위한 도구로서 활용될 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 지반 변형계수와 강도정수의 불확실성만을 고려하였기 때문에 향후 축압계수, 하중분담율, 지보재 물성 등의 불확실성을 추가적으로 고려할 필요가 있다. 이를 위해 입력 확률변수가 많은 경우 샘플링 수를 줄일 수 있는 확률론적 기법과 이를 자동 처리할 수 있는 프로그램 개발이 필요하다. 확률론적 기법 적용시 입력 확률변수의 통계 특성이 결과에 가장 중요한 영향을 미치므로 입력변수의 다양한 통계 분포특성을 고려하고 그 특성을 정량적으로 산정할 수 있는 방법의 개발이 필요하다. 또한 본 연구에서는 제방, 댐, 비탈면에 대한 기존 연구를 참고하여 터널의 허용 파괴확률을 1×10^{-3} 으로 설정하였으나, 향후 터널공사에 적용하기 위한 허용 파괴확률을 터널의 종류 또는 규모에 따라 정립할 필요가 있다.

마지막으로 확률론적 접근법은 불확실성을 고려하고 파괴확률을 토대로 시스템의 안정성을 신뢰도 높게 평가할 수 있으므로 터널관련 문제에 다양하게 적용할 필요가 있을 것이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 ‘지하복공식 에너지저장시스템 개발’의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김형배, 이승호, 2002, 실용적인 확률론적 사면안정 해석 기법 개발, 한국지반공학회논문집 18.5, 271-280.
2. 박혁진, 2002, 점추정법을 이용한 평면파괴의 파괴확률 산정, 터널과 지하공간(한국암반공학회지) 12.3, 189-197.
3. 장연수, 오승현, 김종수, 2002, 암반사면의 평면파괴에 대한 신뢰성해석, 한국지반공학회논문집 18.4, 119-126.
4. 한국철도시설공단, 2003a, 경전선 삼랑진-진주 제3공구(진영-창원간) 복선전철 건설공사 각종계산서 터널분야.
5. 한국철도시설공단, 2003b, 경전선 삼랑진-진주 제3공구(진영-창원간) 복선전철 건설공사 지반조사 보고서.
6. 한국콘크리트학회, 2007, 콘크리트구조설계기준, 기문당, 서울.
7. Barbosa M.R., D.V. Morris and S.K. Sarma, 1989, Factor of safety and probability of failure of rockfill embankments, Géotechnique 39.3, 417-483.
8. Bucher C., D. Hintze and D. Roos, 2000, Advanced analysis of structural reliability using commercial FE-codes, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, Barcelona, CD-ROM.
9. Christian J.T., C.C. Ladd and G.B. Baecher, 1994, Reliability applied to slope stability analysis, Journal of Geotechnical Engineering 120.12, 2180-2207.
10. Ellingwood B.R., 2001, Earthquake risk assessment of building structures, Reliability Engineering and System Safety 74.3, 251-262.
11. Geist E.L. and T. Parsons, 2006, Probabilistic analysis of Tsunami hazards, Natural Hazards 37.3, 277-314.
12. Griffiths D.V., G.A. Fenton and C.B. Lemons, 2002, Probabilistic analysis of underground pillar stability, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 26.8, 775-791.
13. Harr M.E., 1996, Reliability-based design in civil engineering, McGraw-Hill, New York.
14. Hwang J.H., C.H. Chen and C.H. Juang, 2005, Liquefaction hazard analysis: a fully probabilistic method, Proceedings of Sessions of the Geo-Frontiers 2005 Congress, CD-ROM.
15. Juang C.H., D.V. Rosowsky and W.H. Tang, 1999, Reliability-based method for assessing liquefaction potential of soils, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 125.8, 684-689.
16. Laso E., M.S.G. Lera and E. Alarcón, 1995, A level II reliability approach to tunnel support design, Applied Mathematical Modelling 19.6, 371-382.
17. Li H.Z. and B.K. Low, 2010, Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field, Computers and Geotechnics 37.1-2, 50-58.
18. Oreste P., 2005, A probabilistic design approach for tunnel supports, Computers and Geotechnics 32.7, 520-534.
19. Preziosi M.C., 2008, Probabilistic assessment of small earthfill dams, Dams and Reservoirs 18.1, 27-30.
20. Priest S.D. and E.T. Brown, 1983, Probabilistic stability

- analysis of variable rock slopes, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A, Vol 92, 1-12.
21. Rosenblueth E., 1975, Point estimates for probability moments, Proceedings of the National Academy of Sciences USA 72.10, 3812-3814.
 22. Schweiger H.F., R. Thurner and R. Pöttler, 2001, Reliability analysis in geotechnics with deterministic finite elements, The International Journal of Geomechanics 1.4, 389-413.
 23. 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, 674p.
 24. US Department of the Army, 1997, Introduction to probability and reliability methods for use in geotechnical engineering, US Department of the Army Report, ETL 1110-2-547.
 25. Xu B. and B.K. Low, 2006, Probabilistic stability analyses of embankments based on finite-element method, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 132.11, 1444-1454.
 26. You K., Y. Park and J.S. Lee, 2005, Risk analysis for determination of a tunnel support pattern, Tunnelling and Underground Space Technology 20.5, 479-486.

박도현



1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2009년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사
 Tel: 042-868-3911
 E-mail: jparkdo@paran.com
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 Post-Doc

박의섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3098
 E-mail: espark@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

송원경



1982년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1986년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 1996년 프랑스 에콜데민 지질공학과 공학박사
 Tel: 042-868-3247
 E-mail: songwk@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

류동우



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사
 Tel: 042-868-3099
 E-mail: dwryu@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원