

Tunnelling Technology

해저지반의 불확실성을 고려한 확률론적 터널 안정성 평가



박의섭
한국지질자원연구원
지하공간환경연구실
선임연구원

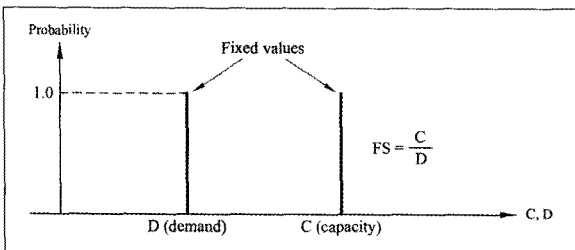


박도현
한국지질자원연구원
지하공간환경연구실
POST-DOC

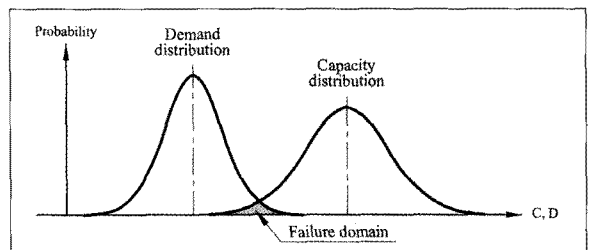
1. 서론

지반의 공학적 특성을 파악하기 위한 지반조사는 조사 수량이 불충분하거나 완벽한 조사가 현실적으로 불가능하여 그 불확실성이 항상 존재한다. 또한 지반은 그 특성이 공간에 따라 변하는 고유의 불확실성이 있다. 특히 해저지반에서 터널공사시 지반의 불확실성이 더 커지므로 안정성 검토시 지반의 불확실성을 정량적으로 고려할 수

있는 확률론적 접근법의 적용이 필요하다. 기존의 결정론적 접근법에서는 불확실성을 고려하기 위해 안전율 개념을 도입하였으며, 비교적 큰 안전율을 적용하여 보수적이고 비경제적인 설계를 지향하여 왔다(그림 1(a)). 또한 결정론적 접근법에서는 지반 특성에 대한 보수적인 값이나 평균값을 적용하여 해석을 수행하기 때문에 지반공학적인 불확실성을 나타내는 분산의 체계적인 반영이 어려웠다. 이로 인해 어떤 시스템의 안전율이 허용 기준을 만족하는



(a) 결정론적 접근법



(b) 확률론적 접근법

그림 1. 시스템의 안정성 평가 기법

해저지반의 불확실성을 고려한 확률론적 터널 안정성 평가

지 여부만을 평가할 수 있었다. 반면 확률론적 접근법에서는 시스템의 안정성에 영향을 미치는 매개변수의 불확실성을 고려한다(그림 1(b)). 이로부터 시스템 안정성은 파괴확률을 토대로 정량적으로 평가되며, 분석된 파괴확률을 근거로 공학적 의사결정을 할 수 있다. 본 고에서는 터널 안정성 평가를 위한 확률론적 해석 기법과 국내 보령-태안 연결도로 해저터널 구간의 지보시스템 신뢰성을 확률론적으로 평가한 사례를 소개하고자 한다.

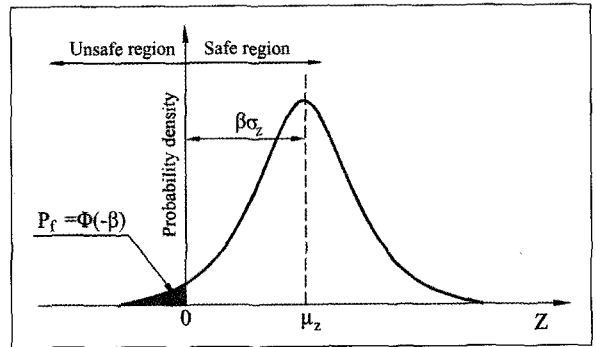


그림 2. 시스템의 파괴확률

2. 확률론적 터널 안정성 평가 기법

2.1 확률론적 기법 개요

확률론적 해석을 위해서는 시스템의 안정성을 나타내는 성능함수, 즉 한계상태방정식을 정의해야 하며, 일반적으로 식 (1)과 같이 성능함수가 표현된다.

$$Z = C - D \quad (1)$$

여기서 Z 는 시스템의 성능함수, C 는 작용 하중 등에 저항할 수 있는 강도 등을 나타내는 capacity이고, D 는 시스템에 작용하는 하중 등을 나타내는 demand이다.

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

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

여기서 P_f 는 파괴확률, Φ 는 표준정규분포, μ_z (성능함수 Z 의 평균)/ σ_z (성능함수 Z 의 표준편차)는 신뢰도 지수, β 로서 신뢰도 지수가 커질수록 파괴확률이 감소하므로 신뢰도 지수가 큰 값일수록 시스템의 안정성은 증가한다(그림 2).

확률론적 기법은 분석적 근사 기법과 샘플링 기법으로 분류된다. 분석적 근사 기법에서는 수식으로 표현된 시스템의 성능함수를 일차 또는 이차의 테일러 급수로 근사한 후 일차 모멘트(평균)와 이차 모멘트(분산)를 이용하여 시스템의 파괴확률을 구한다. 분석적 근사 기법에는 일계이차이계이차 모멘트법, 응답면 기법 등이 있다. 샘플링 기법은 수식으로 표현된 성능함수를 요구하지 않는 방법으로서 시스템의 성능을 결정하는 변수들의 확률분포를 토대로 난수를 발생시켜 시물레이션을 수행하거나, 특정 샘플링 점들에 대한 해석 결과와 가중치를 적용하여 시스템의 파괴확률을 구하는 방법이다. 샘플링 기법에는 direct Monte Carlo simulation(MCS), 중요도 추출 또는 Latin hypercube sampling에 의한 MCS 등과 같은 시물레이션 기법과 성능함수의 통계 모멘트 계산시 수치적분법을 이용하는 점추정법이 있다.

앞서 언급한 대로 분석적 근사 기법은 수식으로 표현된 시스템의 성능함수를 이용하는 방법으로 수치해석을 기반으로 하는 확률론적 해석시 수식으로 표현된 성능함수가 필요하다. 그러나 수치해석으로부터 수치화된 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. 시물레이션을

해저지반의 불확실성을 고려한 확률론적 터널 안정성 평가

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 해석결과와 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 일반적으로 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.

2.2 터널 안정성 평가를 위한 확률론적 기법

2.1절에서 살펴본 여러 가지 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 가장 적절하다고 할 수 있다.

점추정법에 의해 성능함수의 통계값을 산정하는 방법은 다음과 같다. 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)-(8)과 같으며, 식 (2)에 의해 파괴확률을 구한다.

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

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

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

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

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

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

여기서 Z 는 성능함수, $\overline{X}_1, \overline{X}_2, \overline{X}_3$ 은 시스템의 확률변수, $\sigma_{X_1}, \sigma_{X_2}, \sigma_{X_3}$ 은 각 확률변수의 표준편차, p_{+++} 는 각 확률변수의 샘플링 점에 대한 가중치, ρ_{ij} 는 i 번째와 j 번째 확률변수의 상관계수, $E[Z^M]$ 은 Z^M 의 평균, 기호 +와 -는 각각 샘플링 점이 (평균값+표준편차)와 (평균값-표준편차)인 경우를 나타낸다.

2.3 터널 지보시스템의 파괴확률 산정

터널 지보시스템의 신뢰성은 지보재인 슛크리트와 록볼트의 파괴 가능성을 토대로 평가할 수 있다. 지보설계시 일반적으로 사용되는 압축강도 21MPa인 슛크리트와 록볼트로서 항복강도 350MPa인 SD35 이형철근(직경 25 mm)을 적용한 경우, 슛크리트 허용 휨 압축응력과 전단 응력은 각각 8.4MPa, 0.37MPa, 록볼트의 허용 축력은 88.67kN이다(한국콘크리트학회, 2007). 이 값들은 슛크리트와 록볼트의 성능함수 선연시 capacity가 된다. 따라서 입력 확률변수로서 지반의 변형계수, 점착력, 내부마찰각을 고려한 경우, 터널 지보시스템의 신뢰성 평가를 위한 슛크리트와 록볼트의 성능함수는 각 지보재의 요소에 대해 식 (9)-(11)과 같이 정의할 수 있다.

해저지반의 불확실성을 고려한 확률론적 터널 안정성 평가

$$Z_{shot-comp,i} = 8.4 - D_{shot-comp,i}(E, c, \phi) \quad (9)$$

$$Z_{shot-shear,j} = 0.37 - D_{shot-shear,j}(E, c, \phi) \quad (10)$$

$$Z_{rock,k} = 88.67 - D_{rock,k}(E, c, \phi) \quad (11)$$

여기서 $Z_{shot-comp,i}$, $Z_{shot-shear,j}$, $Z_{rock,k}$ 는 각각 i , j 번째 슛크리트 요소의 압축 및 전단거동에 대한 성능함수 (MPa), k 번째 록볼트 요소의 성능함수(kN), $D_{shot-comp,i}$, $D_{shot-comp,j}$, $D_{rock,k}$ 는 각각 i , j 번째 슛크리트 요소의 휨 압축 응력(MPa), 전단응력(MPa)과 k 번째 록볼트 요소의 축력 (kN), E , c , ϕ 는 각각 지반의 변형계수, 점착력, 내부마찰각이다.

앞서 언급한대로 성능함수 Z 가 0이하일 확률이 파괴 확률이므로 슛크리트와 록볼트의 각 요소에 대한 파괴확률은 점추정법에 의해 각 지보재에 발생하는 부재력의 평균과 분산을 계산한 후 식 (2)를 이용하여 산정할 수 있다.

스�크리트의 압축전단 파괴, 록볼트 파괴 모드가 서로 독립적이라고 가정하고, 두 가지 지보재 중 하나의 지보재만 파괴되어도 지보시스템이 파괴되는 것으로 간주하는 경우, 식 (12)와 같이 각 지보재의 파괴모드별 최대 파괴확률을 이용하여 터널 지보시스템의 파괴확률을 계산할 수 있다.

$$P_{f,sys} = P_{max-f,sc} + P_{max-f,ss} + P_{max-f,r} - P_{max-f,sc} \cdot P_{max-f,ss} - P_{max-f,sc} \cdot P_{max-f,r} - P_{max-f,ss} \cdot P_{max-f,r} + P_{max-f,sc} \cdot P_{max-f,ss} \cdot P_{max-f,r} \quad (12)$$

여기서 $P_{f,sys}$ 는 지보시스템의 파괴확률, $P_{max-f,sc}$, $P_{max-f,ss}$, $P_{max-f,r}$ 은 각각 슛크리트 최대 압축파괴 확률, 슛크리트 최대 전단파괴 확률, 록볼트의 최대 파괴확률이다.

3. 보령-태안 연결도로 해저터널의 지보시스템 신뢰성 평가 사례

3.1 개요

국내 보령-태안 해저터널 공사는 충청남도 보령지역과 태안군 안면도를 연결하는 총연장 14km의 도로사업으로 터널구간 총 연장은 6.9km(태안방향 기준)이고 일방향 2차로 병렬터널로 계획되어 있으며, 해저면으로부터 평균 50m 하부에 터널이 위치하도록 종단선형을 설계하였다 (그림 3).

본 공사의 지반조사에서는 암반등급별 강도정수를 산정하기 위해 Hoek-Brown 파괴기준에 의한 MCS와 Bayesian

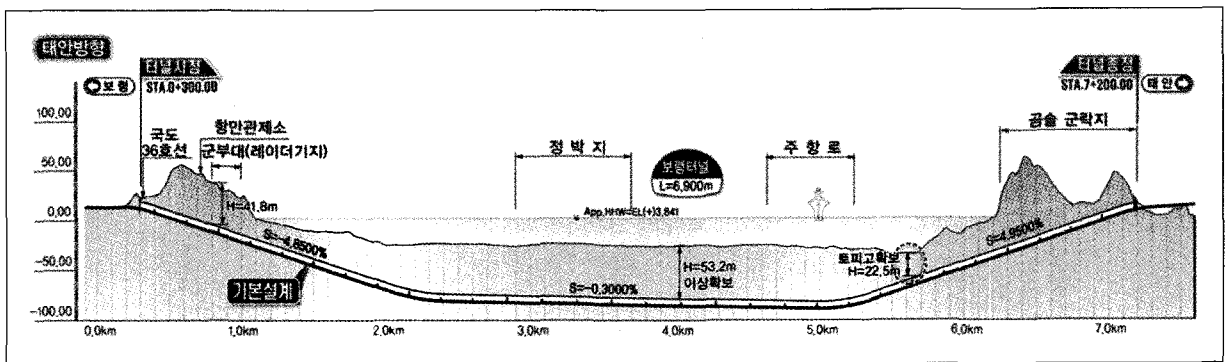


그림 3. 보령-태안 연결도로 해저터널 종단면도

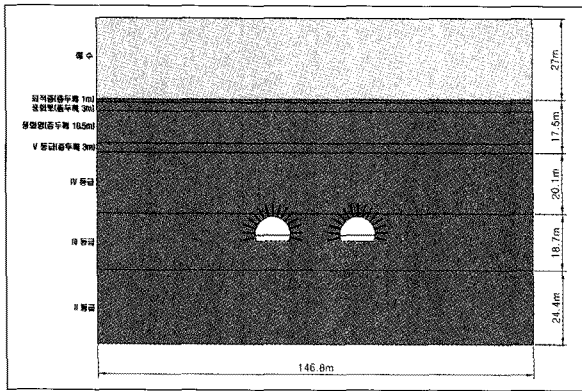
해저지반의 불확실성을 고려한 확률론적 터널 안정성 평가

표 1. MCS와 Bayesian approach에 의해 산정된 지반 강도정수의 통계값

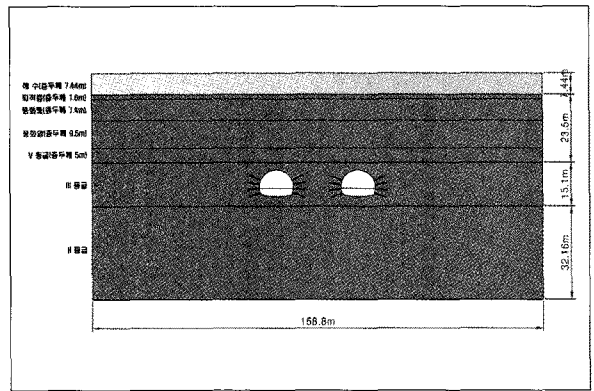
구분		I등급	II등급	III등급	IV등급	V등급
점착력 (kPa)	평균	5,182	2,294	1,230	502	200
	표준편차	871	417	283	67	21
내부마찰각 (°)	평균	48.0	44.1	37.2	33.1	31.6
	표준편차	3.0	2.0	2.0	4.0	3.0

표 2. 3-sigma rule에 의해 산정된 변형계수의 통계값

구분		I등급	II등급	III등급	IV등급	V등급
변형계수 (MPa)	평균	13,178	7,204	3,938	2,152	1,244
	표준편차	1,288	704	385	210	92



(a) 지보패턴 SP-4(STA. 2+020)



(b) 지보패턴 SP-5(STA. 1+320)

그림 4. 확률론적 터널 안정성 평가 단면

approach를 수행하였다. 표 1은 지반 강도정수에 대한 Bayesian approach 적용 결과를 나타내며, 표에서의 통계값을 확률론적 터널 안정성 해석시 사용하였다. 변형계수에 대한 불확실성 자료는 현장시험 결과가 많지 않아 공내 재하시험의 결과에 3-sigma rule을 적용하여 평균과 표준편차를 산정하였고 이를 확률론적 해석시 적용하였다(표 2). 터널 지보시스템의 확률론적 신뢰성 평가는 암반상태가 불량한 지보패턴 SP-4(STA. 2+020)와 SP-5(STA. 1+320)인 구간을 선정하여 수행되었다. 그림 4는 각 구간의 해석단면을 나타낸다.

3.2 분석 결과

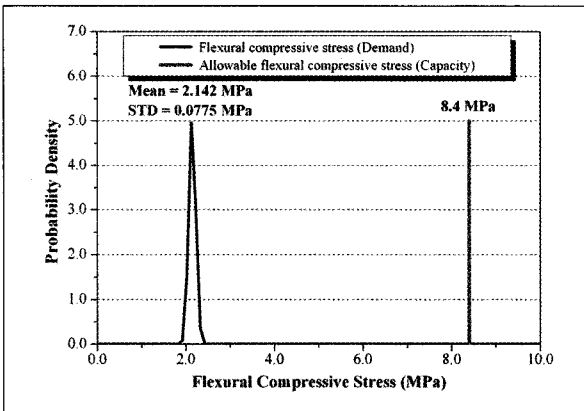
지보패턴 SP-4(STA. 2+020)와 SP-5(STA. 1+320) 구간의 지보시스템 신뢰성을 확률론적으로 평가한 결과는 다음과 같다. 본 해석에서는 해저지반의 변형계수, 강도정수를 입력 확률변수로 고려하였다. 표 3은 지반의 불확실성을 고려하여 얻어진 확률론적 터널 안정성 결과를 나타낸다. 표 3에서 지보패턴 SP-4와 SP-5의 지보시스템의 파괴확률은 식 (9)-(12)에 의해 결정되었다. 지보패턴 SP-4의 신뢰성을 평가한 결과, 숏크리트의 압축파괴 및 전단파괴의 확률과 록볼트의 파괴확률이 모두 0.00으

해저지반의 불확실성을 고려한 확률론적 터널 안정성 평가

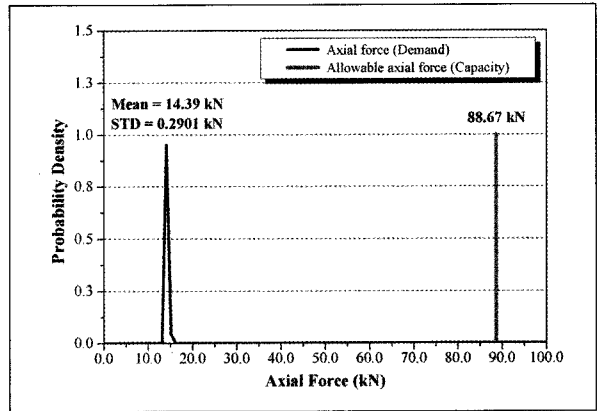
표 3. 확률론적 터널 안정성 평가 결과

지보패턴	$P_{\max-f,sc}$	$P_{\max-f,ss}$	$P_{\max-tr}$	$P_{f,sys}$	파괴가능성
SP-4	0.00	0.00	0.00	0.00	없음
SP-5	0.00	0.00	0.00	0.00	없음

$P_{\max-f,sc}$ = 슛크리트 요소의 최대 압축파괴 확률, $P_{\max-f,ss}$ = 슛크리트 요소의 최대 전단파괴 확률, $P_{\max-tr}$ = 록볼트 요소의 최대 파괴확률, $P_{f,sys}$ = 터널 지보시스템의 파괴확률



(a) 슛크리트 요소 휨 압축응력



(b) 록볼트 요소 축력

그림 5. 좌측터널 천단부 지보재 요소의 지보재력 통계분포(SP-4, 최종 해석단계)

로 분석되어 파괴 가능성이 없는 것으로 검토되었다. 또한 지보패턴 SP-5의 신뢰성을 평가한 결과, 슛크리트의 압축파괴 및 전단파괴의 확률과 록볼트의 파괴확률이 모두 0.00으로 분석되어 파괴 가능성이 없는 것으로 검토되었다. 즉 확률론적 해석으로부터 설계된 SP-4와 SP-5 지보시스템의 신뢰도가 높은 것으로 분석되었다.

그림 2에서 언급한 것처럼 시스템의 파괴확률은 성능함수의 평균과 표준편차에 의해 결정되는데, 신뢰도 지수, β 가 커질수록, 즉 성능함수의 평균이 허용치(보통 '0')보다 커지고 표준편차가 작아질수록 시스템의 파괴확률은 줄어들게 된다. 표 3에서와 같이 지보패턴 SP-4와 SP-5에서 지보재의 파괴모드별 파괴확률이 0.00으로 분석되었는데, 이는 그림 5(a)와 (b)에서와 같이 슛크리트와 록볼트에서 발생한 지보재력의 평균값이 허용 지보재력보다 훨씬 작아 지보재력의 표준편차가 존재하더라도

허용 지보재력보다 큰 지보재력이 발생할 확률이 거의 없었기 때문이다. 즉 각 지보재의 요소별 성능함수의 신뢰도 지수가 높아 표 3과 같이 터널 지보시스템의 파괴 가능성이 거의 없는 것으로 분석되었다. 그림 5는 지보패턴 SP-4의 최종 해석단계에서 좌측터널의 천단부 슛크리트의 휨 압축응력과 록볼트 축력의 통계분포를 나타낸다. 그림 6과 7은 각각 지보패턴 SP-4와 SP-5의 최종 해석단계에서 발생한 슛크리트 요소별 휨 압축응력 및 전단응력, 록볼트 요소별 축력의 평균을 나타낸다.

한편 본 사례에서 적용한 해저지반의 역학적 특성에 대한 불확실성은 설계단계에서의 지반조사 자료를 토대로 분석되었으므로 실제 시공 시에는 지반 특성에 대한 조사를 추가적으로 수행하여 그 불확실성을 정량화하고, 설계 시 분석된 불확실성과 상이한 경우 지보시스템의 신뢰성을 재검토할 필요가 있을 것이다.

해저지반의 불확실성을 고려한 확률론적 터널 안정성 평가

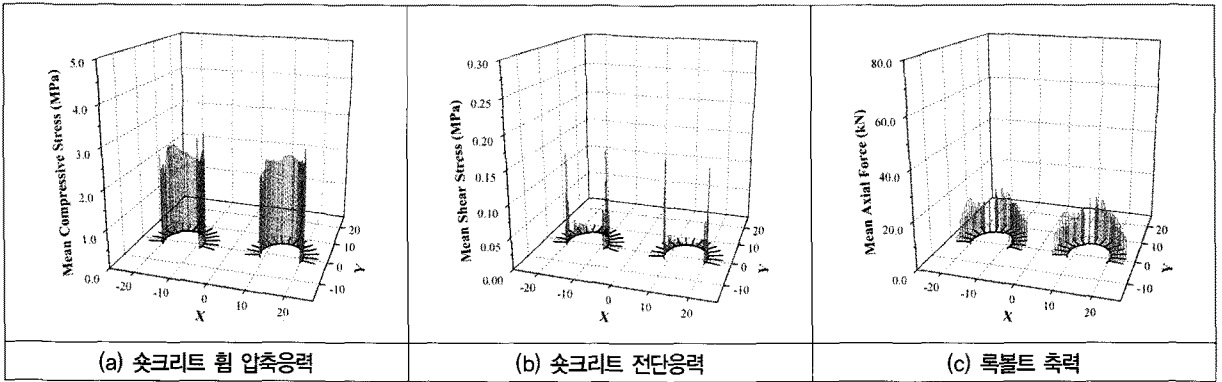


그림 6. 지보패턴 SP-4의 지보재력 평균(최종 해석단계)

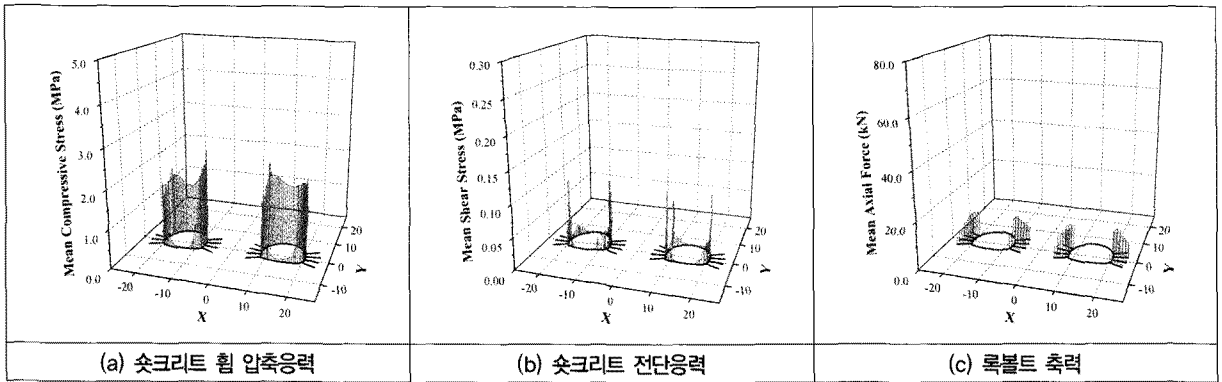


그림 7. 지보패턴 SP-5의 지보재력 평균(최종 해석단계)

4. 맺음말

본 고에서는 터널 안정성을 신뢰도 높게 평가하기 위한 확률론적 해석 기법과 국내 보령-태안 연결도로 해저터널 구간의 지보시스템 신뢰성을 확률론적으로 평가한 사례를 소개하였다. 사례 연구로부터 확률론적 접근법을 통해 터널 지보시스템의 신뢰성을 정량적으로 평가할 수 있고, 지보설계시 공학적 의사결정을 할 수 있다는 것을 확인하였다. 즉 결정론적으로 시스템의 안전율이 허용치 이상 이 되더라도, 불확실성을 고려한 시스템의 파괴확률이 기준치 이상이 되는 경우 시스템의 신뢰도가 높다고 할 수 없으며, 그에 따른 대책수립이 필요함을 알 수 있다.

또한 허용 파괴확률을 토대로 경험적 지보설계 외에 여러 가지 지보설계 조합을 계획할 수 있고, 시공성, 경제성, 안정성을 고려한 선택적 지보설계가 가능하다.

위와 같은 특징 및 장점을 갖는 확률론적 접근법의 활용도 및 결과의 신뢰도를 제고하기 위해서는 다음과 같은 추가적인 연구가 필요하다.

- (1) 확률변수가 많은 경우 샘플링 수를 줄일 수 있는 확률론적 해석 기법 개발
- (2) 확률론적 해석을 자동적으로 처리할 수 있는 소프트웨어 개발
- (3) 확률변수의 다양한 통계 분포특성을 고려하고 그 특

성을 정량적으로 산정할 수 있는 기법 개발

(4) 터널의 종류와 규모를 고려한 허용 파괴확률 정립

마지막으로 확률론적 접근법은 입력 매개변수의 불확실성을 고려하고, 파괴확률을 토대로 시스템의 안정성을 신뢰도 높게 평가할 수 있으므로 다양한 터널공학 문제에 활용하는 시도가 필요하며, 확률이론에 기초하여 터널 설계기준을 도출하기 위한 적극적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박도현, 박의섭, 송원경, 류동우, 2010, "확률론적 기법을 이용한 터널 지보시스템의 신뢰성 평가", 터널과 지하공간(한국암반공학회지), Vol. 20, No. 2, pp. 39-48.
2. 한국콘크리트학회, 2007, "콘크리트구조설계기준", 기문당, 서울.
3. 현대건설, 2009, "보령-태안(제1공구) 도로건설공사 설계보고서".
4. Harr M.E., 1996, "Reliability-based design in civil engineering", McGraw-Hill, New York.
5. Rosenblueth E., 1975, "Point estimates for probability moments", Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Vol. 72, No. 10, pp. 3812-3814.
6. 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.