

지반 물성치의 공간적 분포에 따른 터널 변위 특성 분석

Effect of Spatial Distribution of Geotechnical Parameters on Tunnel Deformation

송기일¹, 조계춘*²

Song, Ki-Il·Cho, Gye-Chun

Abstract

The spatial distribution of design parameters greatly affects tunnel behavior during and after construction, as well as in the long-term temporal responses. However, the tunnel design parameters commonly used in numerical modeling tend to be representative or average values of global-scale properties. Furthermore, the uncertainty and spatial variation of the design parameters increase as the tunnel scale increases. Consequently, the probability of failure also increases. In order to achieve structural stability in large-section tunnels, the design framework must take into consideration the quantitative effect of design parameter variations on tunnel behavior. Therefore, this paper suggests a statistical approach to numerical modeling to explore the effect of spatially distributed design parameters in a circular tunnel. Also, the effect of spatial variation in the lining strength is studied in this paper. The numerical results suggest that the deformation around the tunnel increases with an increase in the variation of the design parameters.

Keywords: Spatial distribution, numerical and statistical approach, tunnel deformation

요 지

지반 설계 인자는 공간적으로 분포하는 특성이 있으며, 이는 터널의 설계와 시공과정 뿐만 아니라 장기 거동에 큰 영향을 미친다. 그러나 일반적으로 터널의 수치해석을 위한 설계 지반 인자는 대상 영역을 대표하는 값 또는 대상 영역의 광역적 평균값 등이 적용되고 있다. 특히, 지하공간의 크기가 증가할수록 설계 지반 인자의 불확실성 및 공간적 분포 또한 증가한다. 결국 이러한 불확실성과 공간적 분포 특성의 확대는 해석의 정확성 및 신뢰성 저하를 초래하게 된다. 따라서, 대형 터널의 구조적 안정성을 확보하기 위해 지반 물성치들의 공간적인 분포에 대한 정량적인 조사가 설계에 포함되어야 한다. 본 연구에서는 지반 물성치 및 구조적 설계 인자의 공간적 분포가 터널의 변위에 미칠 수 있는 영향을 분석하였다. 여러 COV(Coefficient of Variation)에 따라 정규분포하는 지반 물성치의 공간적 특성이 이상화된 원형 터널의 변위에 미치는 영향에 대한 분석과, NATM(New Austrian Tunneling Method) 터널에서 숏크리트의 강도의 공간적 분포가 터널 변위에 미치는 영향을 분석하였다. 공간적 분포의 COV가 증가할수록 터널 주변 발생하는 변위량도 증가하는 것으로 나타났으며, 분석 결과 이들은 지반 물성치에 따라 고유한 계수를 갖는 삼차방정식으로 표현된다.

주요어: 공간적 분포, 수치적 통계적 접근법, 터널 변위

1 KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정

*2 정희원, KAIST 건설 및 환경공학과 부교수 (gyechun@kaist.edu)

1. 서론

설계 지반 물성치는 현장 지반 조사 및 실내 실험을 통해 획득된다. 측정된 값들 사이에 뚜렷한 변화가 존재한다 하더라도 현재 설계 지반 파라미터로 적용하기 위해서는 측정치를 평균하여 사용하고 있다. 지반 공학적 물성치의 변화에 의한 터널의 변위 및 안정에 미치는 영향에 대한 통계적 개념에 기반을 둔 연구는 아직 미진한 실정이다 (Schweiger *et al.*, 2001). 설계 지반 인자의 변동성을 야기하는 두 가지 원인은 공간적인 분포와 불확실성으로 구분할 수 있다.

지반 공학적 설계 인자들의 불확실성 및 공간적 분포는 서로 구별되어야 한다. 불확실성은 고유한 지반이 갖는 확실하지 않은 또는 신뢰할 수 없는 특성을 의미한다. 즉, 신뢰성 기반 설계시, 지반의 불확실성은 해당 조사 지반의 확률적 특성을 결정하는데 중요한 변수로 다루어진다. 따라서, 지반 공학적 설계 인자는 특정 현장의 시물레이션 과정에서 합리적인 범위에서 설계자의 판단에 의해 결정된다. 지반의 고유특성, 측정오차, 그리고 변환오류는 설계 지반 인자의 변동성을 지배하는 세 가지 주요한 지반 공학적 불확실성 요인이다 (Phoon and Kulhawy, 1999).

지반의 공간적 분포 특성은 생태학 또는 환경 모델링에

서 주로 고려되어 왔다 (Jury, 1985). 불확실성과 마찬가지로, 설계 지반 인자의 공간적 분포는 특히 변동성이 있는 토사나 암반에 시공되는 터널과 같은 지하구조물의 역학적 거동에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 중요하게 다루어져야 한다. 특히, 이상대 구간의 경우 극단적인 지반 변동성으로 인해 시공 시 사고를 야기할 수 있으므로 보다 상세한 지반 조사 자료를 통하여 신뢰성 향상에 신중을 기해야 한다. 지반 자체는 등방의 균질 재료가 아니라 비등방, 비균질 재료이다. 비등방, 비균질 재료 특성은 지반의 형성 과정이나 지반의 응력상태로부터 결정된다. 따라서, 지반의 공간적 분포 특성은 관심범위에 따라 거시적 또는 미시적 관점에서 지반 구조물의 거동 해석 시 고려되어야 한다.

최근 대형·대단면 지하공간에 대한 필요성이 증대되고 그에 따른 설계지침이나 시공법들이 연구 발표되고 있다. 지하공간의 규모가 대형화함에 따라 대상 과업 구간에 대한 설계 지반 인자의 변동성도 증대된다. 따라서 현장 지반에 대한 설계 지반 인자의 변동성을 사전에 예측하고 이를 적절히 설계 및 시공에 반영하여야 보다 안전한 설계 및 시공계획을 수립할 수 있다. 본 연구에서는 확률적 개념을 적용하여 보다 간편하게 지반의 변동성을 수치해석 시 적용할 수 있는 기법을 제시하고자한다.

표 1. 지반 공학적 설계 인자들과 숏크리트 강도의 COV

Properties	COV(%)	Reference
탄성계수	15~45	Harr(1987), Phoon and Kulhawy(1999)
마찰각	24~32	Schultze(1972)
접착력	40~68	Schultze(1972), Tan <i>et al.</i> (2000)
일축압축강도	10~27	Karakus and Tutmez(2006)
숏크리트 강도	5~10	Kanda <i>et al.</i> (2004)

2. 설계 지반 인자의 공간적 분포에 대한 통계적 접근법

2.1 설계 지반 인자의 정규분포 특성

일반적으로 설계 지반 인자의 변동특성을 정량화하기 위하여 COV(Coefficient of Variation)가 사용되어져 왔다 (Harr, 1987). COV는 식 (1)과 같이 설계 지반 인자의 표준편차(σ)를 평균값(μ)으로 나눈 백분율로 정의된다.

$$COV(\%) = \left(\frac{\sigma}{\mu} \right) \times 100 \quad (1)$$

각각의 설계 지반 인자의 공간적 분포는 어느 정도의 확률오차를 갖는 정규분포로 나타낼 수 있다. 특히 풍화

암의 공학적 물성치의 공간적 분포가 정규분포 한다는 것은 많은 연구에 의해 밝혀졌다. 마찰각과 단위중량의 공간적 분포는 평균과 COV를 매개변수로 하는 정규분포곡선을 따른다 (Lumb, 1966; Hoeg and Murarka, 1974; Lacasse and Nadim, 1996; Low and Tang, 1997; Phoon and Kulhawy, 1999; Tanit *et al.*, 2004). 따라서 본 연구에서 고려하고자 하는 Mohr-Coulomb 모델과 Hoek-Brown 모델을 구성하는 설계 지반 인자들은 정규분포 특성을 갖는 것으로 가정하였다. 표 1에 대표적인 지반 공학적 설계 인자들과 숏크리트 강도의 COV를 정리하였다.

2.2 수치모델링에의 적용

랜덤 데이터 (Random Data) 생성이 가능한 소프트웨어를 이용하여 각각의 설계 지반 인자들에 대하여 임의의 평균과 표준편차를 갖는 정규분포 데이터 집합을 생성할 수 있다. 생성된 정규분포 데이터들은 물성치 입력 단계에서 생성된 모델의 관심 대상영역의 격자점들에 무작위로 할당된다. COV가 0%인 경우는 설계 지반 정수의 평균값이 전체 모델영역에 할당된다. 이러한 평균값을 적용한 수치모델의 해석 결과는 특정 설계 지반 인자의 공간적 분포에 의해 터널 주변에서 발생하는 변위의 변동성을 분석하기 위한 정량적인 기준 모델로 이용되었다. 정규분포하는 설계 지반 인자의 변동폭은 COV가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향이 있다. 본 연구에서는 다양한 분포범위에 따른 설계 지반 인자의 공간적 분포의 효과를 평가하기 위하여 다양한 COV (즉, COV=10%, 20%, 30%, 40%)와 분포범위 (즉 1R, 2R, 3R. 여기서, R은 터널의 반경)에 대하여 수치해석을 수행하였다.

변위의 변화량을 정량적으로 비교 분석 하기 위하여 정규화된 변위변동비 (NDVR, zero-shifted Normalized Deformation Variation Ratio)를 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$NDVR = \left(\frac{\delta_{COV}}{\delta_{ref}} \right) - 1 \quad (2)$$

여기서, 정규화된 변위변동비는 임의 COV에서의 변위 (δ_{COV})를 기준모델의 변위(δ_{ref})로 정규화한 후 원점을 0으로 옮긴 값이다. 즉, 여기서 기준모델의 변위(δ_{ref})는 모든 설계 지반 인자들의 COV가 0%인 평균값에 의한 해석 변위이다.

국부적으로 작은 값이 할당된 터널 벽면의 격자점에 의해 천단부 혹은 측벽부의 변위값이 경향으로부터 왜곡되어 큰 변위가 발생할 수 있기 때문에 터널 주변에서의 합리적인 변위 변화 특성을 획득하기 위하여 각각 다섯 개의 격자점에서 변위 변화 특성을 분석하였다. 또한 무작위 할당에 의한 편향성을 소거하기위하여 다섯 번 이상의 해석을 수행한 후 획득된 값들을 평균하였고, 통합된 변위 거동 특성 경향을 획득하였다.

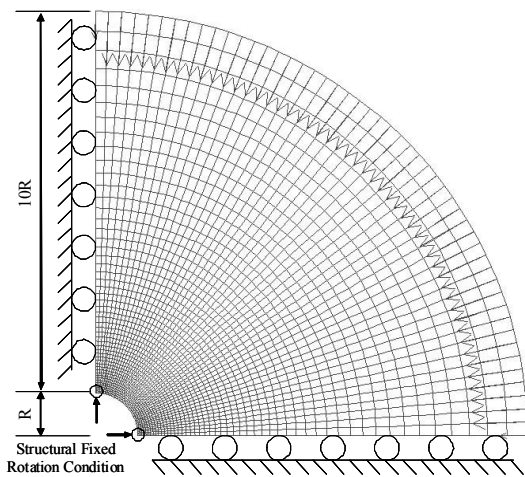
3. 설계 지반 인자의 공간적 분포에 의한 터널 변위 특성 분석

3.1 해석 모델

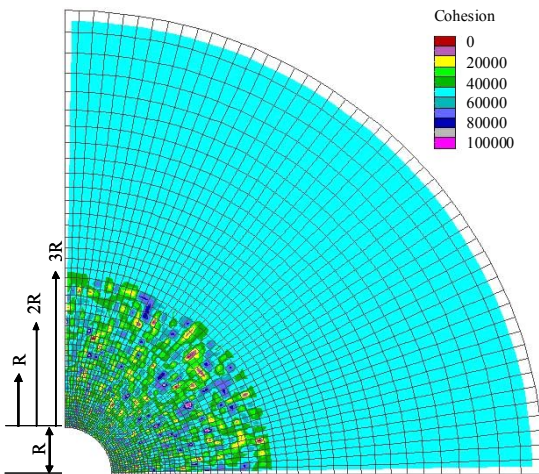
설계 지반 인자의 공간적 분포가 터널 변위 특성에 미치는 효과를 분석하기 위하여 상용 유한차분해석 프로그램인 FLAC (Itasca, 1996)을 이용하여 터널 모델링 및 해석을 수행하였다. 터널은 이상적인 원통형으로 단순화하였고, Mohr-Coulomb과 Hoek-Brown 해석 모델을 적용하여 각각의 모델에 사용되는 설계 지반 인자들의 공간적 분포 변화에 따른 터널 변위 특성을 분석하였다.

원통형 터널의 반지름은 2.5m이고, 30MPa의 균등한 압축응력을 받는 무한 매질 내에 존재하는 것으로 가정하였다. 모델의 대칭성을 이용하여 1/4모델만을 해석하였으며 터널 축방향에 직교하는 면에 평면 변형률 조건을 적용하였다. 본 연구의 해석 모델에서 숏크리트 라이닝에 작용하는 내부 압력은 존재하지 않는 것으로 가정하였다.

생성된 격자 모델과 경계 조건은 그림 1(a)에서 보는 바와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 터널 벽면으로부터 멀어질수록 구역의 크기가 점차 증가되도록 하였으며 방사방향 대칭성을 갖는 모델로 구성하였다. 터널 주변에서 설계 지반 인자의 공간적 분포 효과를 모사하여 보다



(a) 수치해석 모델과 경계 조건



(b) 설계 지반 인자의 공간적 분포
(점착력, 범위=3R, COV=40%)

그림 1. 설계 지반 인자의 공간적 분포와 수치해석 모델

정확하게 실제적으로 적용하기 위하여 모델의 격자는 2500개의 구역으로 구성하였으며 모델의 경계는 터널 직경(R)의 10배(즉, 10R)에 해당하는 영역을 설정함으로써 해석결과에 미치는 경계효과를 최소화 하였다. 그림 1(b)는 터널직경의 3배(즉, 3R)에 걸쳐 40%의 COV를 갖는 점착력의 공간적 분포 형상을 모델링한 것이다.

실제 터널의 시공을 위한 지반 조사 자료로부터 획득된 풍화암 지반의 물성치를 본 연구의 해석을 위한 자료로 사용하였으며, 수치해석에 적용된 지반의 Mohr-Coulomb 모델과 Hoek-Brown 모델의 설계 지반 정수를 정리하면 표 2와 같다. 표의 설계 지반 인자들은 통상적으로 사용되는 풍화암 지반의 평균값을 나타낸다. 일반화된 Hoek-Brown 모델은 식 (3)과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3)$$

여기서, σ_1 , σ_3 은 최대 및 최소 주응력, σ_{ci} 는 일축압축강도, m_b , s 그리고 a 는 GSI 및 암반의 손상과 관련된 Hoek-Brown 상수이다.

기준 모델의 해석 결과 Mohr-Coulomb 모델에서의 변위는 천단부와 측벽부에서 0.1938m로 나타났으며, Hoek-Brown 모델에서는 0.1926m로 나타났다. NDVR은 COV와 터널 벽면으로 부터의 분포범위에 따라 변동한다. 따라서, 설계 지반 인자들의 공간적 분포에 의한 분포범위의 영향을 평가하기 위하여 각각의 COV에 따라 분포범위를 1R부터 3R까지 변화하며 해석을 수행하였다. 이로부터 분포범위에 따른 터널 변위 특성을 NDVR과 COV와의 평면상에 나타낼 수 있다.

표 2. 수치해석에 적용된 Mohr-Coulomb 모델 및 Hoek-Brown 모델의 설계 지반 인자

Material Property of Weathered Rock			
Mohr-Coulomb Model		Hoek-Brown Model	
Unit Weight (kg/m^3)	2100		
Cohesion (Pa)	5.0E4		
Friction Angle ($^\circ$)	32	Uniaxial Compressive Strength (Pa)	5.0E7
Ko	1		
Young's Modulus (Pa)	2.5E8		
Poisson's Ratio	0.30	m_b	1.598
Shear Modulus (Pa)	9.6E7	s	0.00019
Bulk Modulus (Pa)	2.08E8	a	0.5
Young's Modulus of Shotcrete Lining (Pa)			5.0E9

3.2 탄성계수의 공간적 분포에 의한 터널 변위 특성

체적 탄성계수(B)와 전단 탄성계수(G)는 탄성계수(E)와 포와송비(ν)와 각각 상호교환하여 사용할 수 있는 중요한 지반 물성치이다. 본 연구에서는 임의의 COV에 대해 정규분포하는 탄성계수의 데이터 집합을 생성하고 일정한 포와송비에 대하여 이를 체적 탄성계수와 전단 탄성계수로 전환함으로써 터널의 변위 변동성에 미치는 탄성계수의 공간적 분포의 영향을 조사하였다. 수치해석 결과는 그림 2에 나타내었다. 터널의 천단부와 측벽부에서 획득된 NDVR 분포는 거의 동일함을 알 수 있다. 해석 결과는 회귀분석을 통해 COV와 NDVR을 종속변수로 하는 식 4와 같은 단순 삼차방정식으로 곡선 맞춤할 수 있다.

$$NDVR = C_0 \cdot COV^3 \quad (4)$$

COV 변화에 따른 탄성계수 NDVR 회귀 곡선의 계수는 표 3과 같이 정리할 수 있다. 단순 삼차방정식의 계수 C_0 는 분포범위에 비례하는 특성을 보인다. 즉, 공간적 분포범위가 넓어질수록 C_0 도 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 2차원 공간에서 무작위로 할당된 탄성계수의 분포 특성에 의해 COV에 대한 NDVR의 단순 삼차 회귀

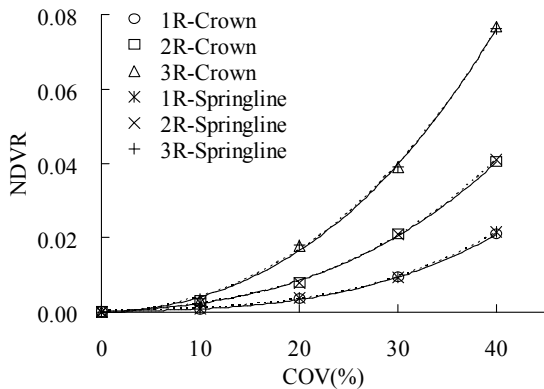


그림 2. 탄성계수의 공간적 분포에 의한 터널 천단부와 측벽부의 변위 특성

표 3. 탄성계수의 공간적 분포에 의한 회귀된 단순 삼차방정식 계수

Eq. (4)	1R	2R	3R
C_0	0.3306~0.3412	0.657~0.664	1.243~1.248

방정식의 계수는 천단부와 측벽부에서 약간 다른 값을 갖는다. 탄성계수의 COV가 30% 이상일 때 터널 내부에서 과도한 변위를 유발하는 것으로 해석 결과 나타난다. 탄성계수는 터널의 변위 변화에 영향이 큰 설계 지반 물성치이다. 탄성계수의 공간적 분포에 대하여 COV가 40%, 분포범위가 3R인 경우 NDVR은 0.075 이상이다. 그림 2로부터 터널 중심부로부터의 분포범위에 따라 탄성계수의 공간적 분포에 기인하는 변위 변동성을 예측할 수 있다.

3.3 마찰각의 공간적 분포에 의한 터널 변위 특성

마찰각의 공간적 분포가 터널의 변위 거동 특성에 미치는 영향에 대한 수치해석 결과가 그림 3에서 제시되어 있다. 터널 천단부와 측벽부에서 획득한 마찰각의 공간적 분포에 대한 NDVR은 분포범위가 3R, COV가 40% 일 경우 0.077~0.078 정도의 값을 갖는다. 그러므로 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 수치해석 시 마찰각의 공간적 분포가 다른 설계 지반 인자들에 비해 터널의 변위 거동에 가장 큰 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다. 일반적인 마찰각의 COV는 대략 12% 정도이다 (Schultze, 1972). 그러므로 터널의 변위 특성에 중요하게 작용되는 마찰각의 변동성은 10~20% 수준으로 평가할 수 있다. 마찰각의 공간적 분포에 의한 COV에 따른 NDVR은 원점을 지나는 식 5와 같은 삼차방정식으로 곡선 근사할 수 있다. 마찰각의 공간적 분포에 의해 천단부와 측벽부에서 획득된 회귀 방정식의 계수들은 표 4와 같이 정리할 수 있다. 표 4로부터 분포범위가 증가할수록 곡률의 경사도 증가하는 경향을 나타낸다.

$$NDVR = C_0 \cdot COV^3 + C_1 \cdot COV^2 + C_2 \cdot COV \quad (5)$$

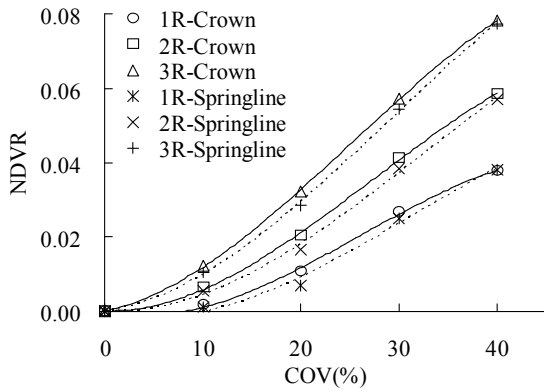


그림 3. 마찰각의 공간적 분포에 의한 터널 천단부와 측벽부의 변위 특성

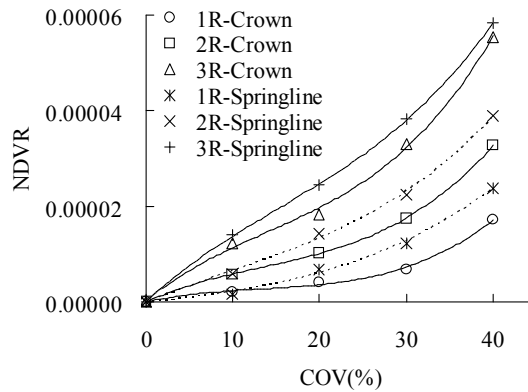


그림 4. 점착력의 공간적 분포에 의한 터널 천단부와 측벽부의 변위 특성

표 4. 마찰각의 공간적 분포에 의해 회귀된 삼차방정식 계수

Eq. (5)	1R	2R	3R
C_0	-0.7507 ~	-0.6688 ~	-0.8365 ~
	-1.017	-0.9163	-0.9791
C_1	0.7009 ~	0.6651	0.7349 ~
	0.7908	~ 0.753	0.7462
C_2	-0.0586 ~	-0.00772 ~	0.03366 ~
	-0.064	-0.01542	0.05403

3.4 점착력의 공간적 분포에 의한 터널 변위 특성

자연상태 지반의 점착력의 COV는 약 40% 정도이다 (Fredlund and Dahlman, 1972). 그림 4에서 보는 바와 같이 공간적으로 분포하는 점착력의 COV가 증가할수록 NDVR도 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 점착력의 공간적 분포가 터널의 변위 변화에 미치는 영향은 탄성계수나 마찰각과 같은 다른 설계 인자에 비해 상당히 미소함을 알 수 있다. 점착력의 공간적 분포에 의한 최대 NDVR은 분포범위가 3R, COV가 40%인 경우에도 0.00006 보다 작기 때문이다. 그러므로, 점착력의 공간적 분포는 터널 변위 거동에 중요한 설계 인자가 아님을 알 수 있다. COV에 따른 NDVR의 회귀 곡선은 식 5와 같이 나타낼 수 있고, 그 계수들은 표 5에 정리하였다. 분포범위가 증가할수록 계수의 크기도 비례하여 증가하는 것으로 나타난다.

표 5. 점착력의 공간적 분포에 의해 회귀된 삼차방정식 계수

Eq. (5)	1R	2R	3R
C_0	0.000198 ~	0.00046 ~	0.00083 ~
	0.00061	0.00078	0.00115
C_1	-0.00024 ~	-0.00012 ~	-0.00038 ~
	0.00003	-0.00031	-0.00049
C_2	1.75E-05 ~	7.28E-05 ~	0.00015 ~
	4.12E-05	8.18E-05	0.00017

3.5 일축압축강도의 공간적 분포에 의한 터널 변위 특성

일축압축강도는 Hoek-Brown 모델을 이용한 암반 구조물 해석시 주요한 설계 인자이다. 암석의 일축압축강도는 ISRM 또는 ASTM(D2938)에서 제시하는 일축 압축 시험을 통해 획득할 수 있다. 그러나 암석 자체의 고유한 강도 변동성을 비롯한 시편의 크기와 모양, 시료의 이방성, 가압판과 시료의 접촉면 상태, 재하속도, 함수비 등 시험과 관련된 영향인자들에 의해 암석시료의 강도 변동성이 결정된다.

일축압축강도의 공간적 분포에 의한 터널의 변위 특성을 COV에 따른 NDVR 특성 곡선으로부터 그림 5와 같이 나타낼 수 있으며, 탄성계수에서 적용된 식 (4)와 같은 단순 삼차방정식으로 회귀곡선을 획득할 수 있다. 삼차방정식의 계수는 표 6에 정리하였다. 일축압축강도의 공간적 분포범위가 확장될수록 C_0 는 비례적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나, 일축압축강도의 분포에

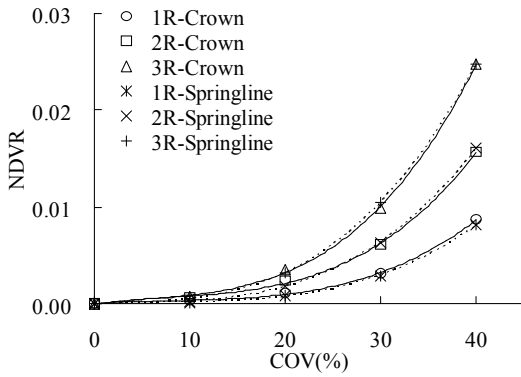


그림 5. 일축압축강도의 공간적 분포에 의한 터널 천단부와 측벽부의 변위 특성

표 6. 일축압축강도의 공간적 분포에 의해 회귀된 단순 삼차 방정식 계수

Eq. (4)	1R	2R	3R
C_0	0.1236 ~ 0.1324	0.2424 ~ 0.2477	0.3813 ~ 0.3841

의한 C_0 는 탄성계수의 분포에 의한 C_0 에 대하여 대략 30% 수준이다. 즉, Hoek-Brown 모델에서 일축압축 강도의 공간적 분포는 Mohr-Coulomb 모델에서의 탄 성계수나 마찰각에 비하여 터널의 변위 특성에 미치는 영향이 작다고 할 수 있다.

4. 숏크리트 강도의 공간적 분포에 의한 터널 변위 특성

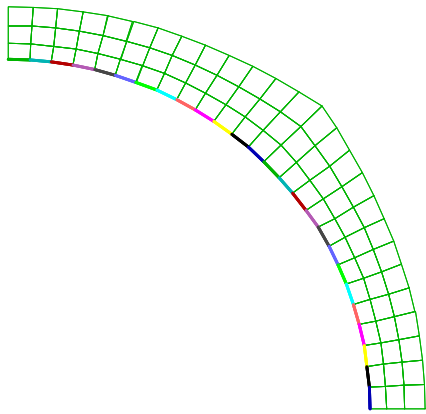
NATM(New Australian Tunneling Method) 터널 에서 숏크리트 라이닝의 강도는 균등하지 않다. 천공과 발파를 이용하여 굴착하는 NATM 터널에서 여굴과 각력 등에 의해 비균등한 굴착표면을 형성하게 되고 이러한 굴착표면에 숏크리트 라이닝이 시공되므로 숏크리트 라 이닝의 두께는 일정하지 않다 (Hoek and Brown, 1980). 또한, TBM (Tunnel Boring Machine)을 이용 한 터널 굴착 후 뿔어붙인 숏크리트 라이닝은 일정한 강

도를 갖지 않는 것으로 알려져 있다 (U.S. Army Corps of Engineers, 1997). 따라서 이러한 배경으로부터 본 연구에서는 숏크리트 라이닝 강도의 공간적 분포가 터널 변위 거동에 미치는 영향에 대한 분석을 수행하였다. 다 양한 직경의 터널에 대하여 숏크리트 라이닝의 강도 변 동이 터널의 변위 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 숏 크리트 강도의 COV는 ECC (Engineered ceme- ntitious composites)의 경우 대략 5~10% 정도 수준 이다 (Kanda *et al.*, 2004).

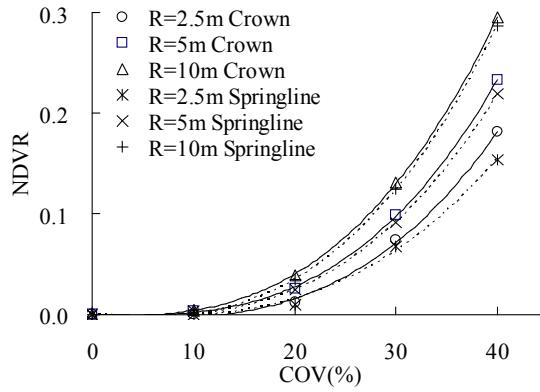
수치해석을 위한 숏크리트 라이닝 모델은 그림 6(a)와 같다. 랜덤 데이터 생성이 가능한 소프트웨어를 이용하 여 26(R=2.5m), 50(R=5m), 그리고 100(R=10m)개 의 정규분포하는 숏크리트 강도 데이터 집합을 생성하였 다. 이때 정규분포의 평균은 5E9[Pa]이며, COV는 10~40%에 걸쳐있다고 가정하였으며 생성된 데이터 집 합은 숏크리트 모델로 사용한 범요소들의 물성치로 할당하 였다. 그림 6(a)에서 할당된 범요소는 서로 다른 강도를 갖고 있으므로 이는 서로 다른 색으로 나타난다. 천단부와 측벽부에서 획득한 COV에 따른 NDVR의 특성곡선 은 그림 6(b)와 같다. 이는 식 (4)와 같은 단순 삼차방정 식으로부터 회귀곡선을 얻을 수 있다. 표 7에 제시된 삼 차방정식의 계수 C_0 로부터 터널 크기와 강도의 변화에 따른 터널 변위 특성을 평가할 수 있다. 그림 6(b)로부터 터널크기가 증가함에 따라 C_0 도 비례적으로 증가함을 알 수 있다. 표 3부터 표 7로부터 구조적 설계 인자의 공간 적 분포는 지반 공학적 설계인자의 공간적 분포보다 터 널 변위에 더 큰 영향을 미치는 것으로 해석된다. 특히, 숏크리트 강도의 공간적 분포가 30% 이상인 경우 NDVR은 터널의 크기에 상관없이 급격히 증가한다. 그 러므로 숏크리트의 강도의 COV가 30% 이상인 경우 이 는 터널의 변위 특성에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한, 숏크리트의 품질 관리는 NATM 터널뿐만 아니라 TBM 터널의 시공시 안정성 확보를 위한 필수 요 소라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 설계 지반 인자의 공간적 분포에 의한



(a) 슛크리트 라이닝 모델과 강도의 공간적 분포형상 (R=2.5m, COV=40%)



(b) 터널 천단부와 측벽부에서의 NDVR-COV 관계

그림 6. 슛크리트 라이닝 강도의 공간적 분포에 의한 터널 거동 특성 분석

터널의 변위 특성을 분석하기 위하여 수치해석에 적용하기 위한 통계적 접근법을 제시하였다. 각 설계인자에 대하여 COV와 터널 중심으로부터 분포범위에 따른 NDVR의 변화 추이를 분석하였다. 또한 구조적 설계인자의 공간적 분포에 의한 터널 변위 특성도 제시된 기법을 기반으로 분석하였다. 각 설계 인자의 공간적 분포가 터널 변위에 미치는 영향은 터널의 천단부와 측벽부에서 정규화된 변위변동비로 평가하였다.

결과적으로 정규화된 변위 변동비는 COV와 분포범위가 증가할수록 증가하는 경향을 나타낸다. 또한 획득된 COV와 NDVR의 관계는 단순 또는 원점을 지나는 삼차방정식으로 회귀되며 그 계수는 표와 그림들로 정리하였다. 제시된 계수와 그림으로부터 각 설계 인자의 COV에 따른 공간적 분포에 의한 영향을 정량적으로 평가할 수 있으며, 설계 인자의 공간적 분포범위가 터널 변위 특성에 미치는 영향도 평가할 수 있다. 해석결과 Mohr-Coulomb 모델에서는 마찰각과 탄성계수의 공간적 분포가, Hoek-Brown 모델에서는 일축압축강도가 터널의 변위에 가장 큰 영향을 미치는 설계 인자로 나타났다. 따라서, 지반 구조물의 설계 및 해석을 위한 현장 지반 조사 및 실내 시험시 보다 정확히 물성값을 결정하여야 한다. 슛크리트의 강도와 같은 구조적 요소의 공간적 분포 또한 지반 물성치와 더불어 터널 변위에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 향후, 비배수터널의 라이닝에

표 7. 슛크리트 강도의 공간적 분포에 의해 회귀된 삼차방정식 계수

Eq. (4)	Tunnel Radius, R		
	R=2.5m	R=5m	R=10m
C_0	2.401 ~ 2.802	3.413 ~ 3.64	4.506 ~ 4.66

작용하는 침투압의 영향이나 암반의 투수성이 터널 거동에 미치는 영향등도 공간적인 분포를 고려하여 해석하여야 할 것이고, 본 연구에서 제시된 방법을 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

지하공간의 규모가 대단면화·대형화함에 따라 설계 지반 인자의 변동성도 증대되고 그에 따른 지반 물성치와 구조적 설계인자의 공간적 분포가 대형 지하공간에 미치는 영향도 증가한다. 본 연구에서 제시한 추세식은 각 설계 인자의 고유한 변동성에 의한 터널 변위 특성이므로 이를 이용하여 공간적 분포에 대한 영향을 고려할 수 있을 것이다. 이상대 구간과 같은 극단적인 지반 변동성을 갖는 지반은 토모그래피나 수직 탄성파탐사(Vertical Seismic Profiling: VSP)등을 이용하여 상세한 지반 조사를 바탕으로 수치해석에 적용할 수 있는 데이터를 획득하고 본 연구에서 제시된 간편 기법을 이용하여 설계 및 시공을 수행한다면 보다 안전한 지하공간 창출을 가능하게 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업 (04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌다.

참고문헌

1. Harr, M. E. (1987), Reliability Based Design in Civil Engineering, Dover Publications, INC.
2. Hoek, E. and Brown, E. T. (1980), Underground excavations in Rock, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
3. Hoeg, H. and Murarka, R. P. (1974), "Probabilistic analysis and design of a retaining wall", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 100(3), pp. 349-366.
4. Itasca Consulting Group. (1996), FLAC - Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0, Minneapolis, MN.
5. Jury, W. A. (1985), "Spatial variability of soil properties", In: Hern, S.C., Melancon, S.M. (Eds.), Vadose Zone Modeling of Organic Pollutants, Lewis, Chelsea, MI, pp. 245-269.
6. Karakus, M. and Tutmez, B. (2006), "Fuzzy and Multiple Regression Modelling for Evaluation of Intact Rock Strength Based on Point Load, Schmidt Hammer and Sonic Velocity", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 39(1), pp. 45-57.
7. Kanda, T., Hiraishi M. and Sakata, N. (2004), "Tensile Properties of ECC in Full-Scale Production", Proceedings of FRAMCOS-5, Vail, Colorado, USA, pp. 1013-1020.
8. Lacasse, S. and Nadim, F. (1996), "Uncertainties in characterizing soil properties", Uncertainty' 96, Geotechnical Special Publication No. 58, ASCE, New York, 1, pp. 49-75.
9. Low, B. K. and Tang, W. H. (1997), "Reliability analysis of reinforced embankments on soft ground", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 34(5), pp.672-685.
10. Lumb, P. (1966), "The variability of natural soils", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3(2), pp.74-97.
11. Phoon, K. K. and Kulhawy, F. H. (1999), "Characterization of Geotechnical Variability", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36(4), pp. 612-624.
12. Schweiger, H. F., Thurner, R. and Pottler, R. (2001), "Reliability Analysis in Geotechnics with Deterministic Finite Elements", The International Journal of Geomechanics, Vol. 1(4), pp. 389-413.
13. Schultze, E. (1972), "Frequency Distributions and Correlations of Soil Properties", Statistics and Probability in Civil Engineering, Hong Kong University Press.
14. Tanit, C. (2004), "Reliability-Based Design for International Stability of Mechanically Stabilized Earth Walls", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 130(2), pp. 163-173.
15. Tan, W., Wang, J., and Cai, M. (2000), "Spatial Variability of Rock Strength and Its Impact on Slope Stability", The Electrical Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 5.
16. U.S. Army Corps of Engineers. (1997), Engineering and design tunnels and shafts in rock.



송기일

한국과학기술원 건설 및 환경공학과
박사과정
kiilsong@kaist.ac.kr



조계춘

한국과학기술원 건설 및 환경공학과
교수
gyechun@kaist.ac.kr