

암반공학시스템과 수치해석을 이용한 저심도 암반터널에서의 낙석 발생 가능성 평가

김만광, 유영일, 송재준(서울대학교)

1. 서론

도심지에서의 인구 및 시설물 과밀화 현상으로 인해 지하 공간의 효율적인 활용 문제가 대두되고 있으며, 이에 대한 해결책으로 저심도 지하공간의 개발을 추진하고 있는 추세이다. 이러한 추세와 더불어 터널 굴착시 붕락의 문제도 함께 발생하고 있으므로, 도심지 저심도 터널에서의 암반거동 유형을 미리 파악하고 분류하는 것은 터널의 붕락을 예상하는데 도움이 될 수 있으며 이를 통해 설계뿐만 아니라 시공 시에도 인명 및 재산을 보호할 수 있는 토대를 만들 수 있다. 저심도에서의 암반 거동은 낙석(cave-in), 낙반(rock fall), 소성변형(plastic deformation)의 3가지 유형으로 분류할 수 있다.

본 연구에서는 터널 굴착 시 가장 큰 인명 및 재산상의 피해가 예상되는 낙석 발생에 영향을 미치는 매개변수들을 3개변수군(내생적 변수, 외생적 변수, 굴착변수)으로 분류하였고 이를 7가지 매개변수(일축압축강도, 암질지수, 절리면 상태, 응력 상태, 지하수위 및 지하수량, 지진, 터널폭)로 세분화하였다. 전문가 집단의 의견을 수렴하여 암반공학 시스템에 반영하였고, 앞서 제시된 7가지 매개변수들간의 상호영향성과 가중치를 산정하여 저심도 암반터널에서의 낙석 발생 지수를 제시하였다. 이를 서울 지하철 9호선 000구간에 적용하여 보았으며, 불연속체 해석을 통해 낙석 발생 유무를 확인하여 로지스틱 회귀분석을 통해 회귀식을 도출하였다. 도출된 회귀식으로 지보패턴별 파괴확률을 도출하였고 낙석 발생 지수와 비교해 보았다.

2. 저심도 터널의 암반 거동 유형 분석과 암반공학시스템

2.1 암반 거동 유형

암반 거동 유형은 다양한 매개변수에 따라 다양한 거동을 보이며 거동간에 경계를 비교적 명확히 구분하기가 곤란하므로 복합적으로 거동한다고 보는 것이 바람직하다(유영일 등, 2008). 이러한 복합적인 암반 거동을 매개변수와 관련하여 설명하는 선행연구들을 살펴보면 다음과 같다(Table 2.2). Martin 등(1999; 2003)은 암반 거동을 10가지 형태로 분류하였으며, 응력 및 중력 지배적인 거동에 따라 3가지 형태로 분류하였다. Kaiser 등(2000)은 응력 상태에 따라 3개 군으로 분류하였으며, Goricki 등(2004)은 비교적 저심도에서의 암반 거동 유형을 11가지 형태로 분류하였다. Palmstrom 등(2007)은 중력, 응력, 지하수의 3개 군과 14개의 소분류를 통해 암반 거동 유형을 분류하였다.

이러한 복잡한 암반 거동을 고려할 때 저심도 터널 굴착 시 예상되는 암반거동 유형은 Fig. 2.1 에서 제시된 바와 같이 중력지배적인 암반거동과 응력지배적인 암반거동으로 분류할 수 있다. 낙석(cave-in)은 불연속면을 따라 발생하는 무결암(intact rock)에서의 국지적인 취성과괴 (Hoek 외 1995; Martin 외 1999) 또는, 잘게 쪼개진 암편들이 10m³ 이상의 큰 부피로 터널 내부로 빠르게 쏟아지는 현상(Palmstrom 등, 2007)으로 정의할 수 있다.

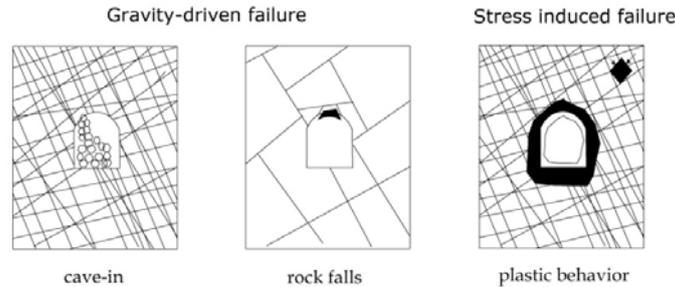


Fig. 2.1 Rock behavior types in shallow depth rock tunnel

2.2 매개변수 결정암반 거동 유형

Cai 등 (2004)은 암반 거동과 관련한 다양한 매개변수의 암반분류를 위해 3개 군으로 분류하고 이를 다시 16가지로 세분화했다. Hudson (1992)은 지하굴착 시 암반 거동과 관련하여 고려해야 할 12가지 매개변수를 제시했다. 그러나 이러한 암반 거동에 따른 매개변수들을 모두 고려하는 것은 현실적으로 어려운 문제이며 간결화 및 단순화하기에 제약이 된다. 따라서 기존의 암반분류법에서 사용되는 영향인자를 이용하여 매개변수를 산정하였다 (Table 2.1)

2.3 암반공학시스템

프로젝트에 맞는 영향인자들 간의 관계를 고려한 목적지향적인 방법론이 암반공학시스템이다. Hudson(1992)은 이 방법론을 이용하여 암반공학적 설계 및 건설 등의 관련 정보를 통합하는 방법론을 제시하였고, Mazzoccola 와 Hudson(1996)은 일반적인 환경과 관련된 19개 요소들과 암반 특성을 고려한 요소를 암반공학시스템을 이용하여 암반 분류 위험지역의 지시 적합성 등을 나타내었다. 또한 Benardos 와 Kaliampakos(2004)는 TBM 굴착시 사전에 손상지수로 위험도를 정량화하여 설계 단계에서 안정성과 적절성을 신속히 파악하고자 하였으며 Zhang 등(2004)은 총 14개의 낙반(rock fall) 관련 매개변수를 이용하여 낙반 위험도를 평가하였다. 이러한 암반공학 시스템은 매개변수간의 원인과 영향을 이용하여 상호영향성을 파악하기 쉬우며 비교적 손쉽게 가중치를 적용하기 쉬운 장점이 있다.

여러 매개변수간의 영향성을 손쉽게 표현할 수 있는 상호영향 행렬은 암반의 안정화 문제에 적용되었고(Hudson, 1992; Hudson 과 Harrison, 1992; Mazzoccola 와 Hudson, 1996), Mahtab 등(1997)은 터널을 설계하기 위한 여굴의 지질학적 평가를 위해 주요 인자들 간의 상호영향 행렬을 이용하여 5가지 암석학적 인자와 5가지 건설 인자간의 영향성을 평가하였다. 각각의 인자들은 서로 얼마나 영향을 주고받는지의 영향성 정도를 원인(cause)과 영향(effect)으로 나타낼 수 있으며, 이러한 인자들은 정사각 매트릭스의 주 대각 방향을 따라 나열되어 시계방향으로 진행된다.

Table 2.1 Parameters affecting rock behavior

Main Parameter	Parameter	comparison with Hudson(1992)
Rock mass intrinsic parameter	UCS	Rock mass quality
	RQD	Rock mass structure
	SCR	Discontinuity geometry
Rock mass extrinsic parameter	Stress	In situ rock stress
	Ground water	Hydraulic conditions
	Earthquake and Vibration	-
Excavation parameter	Tunnel span	Excavation demensions

Table 2.2 ESQ-coding of the parameters' interaction intensity used in the model

coding	Description
0	No interaction
1	Weak interaction
2	Medium interaction
3	Strong interaction
4	Critical interaction

2.4 전문가에 의한 의사결정방법 및 가중치 산정

낙석의 발생 유·무를 예측하기 위해서는 현장 사례로부터 충분한 자료를 획득해야하지만 자료의 부족으로 발생 예측에 한계가 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 전문가 집단의 의견을 수렴하여 원인과 영향에 따라 가중치를 결정하였으며 설계사, 시공사, 연구원의 3개 그룹, 총 24명으로 구성되었다. 구성된 전문가 집단의 판단을 바탕으로 앞서 제시된 7가지 매개변수들 간의 상호영향성을 확인할 수 있으며, 이를 바탕으로 공통 가중치, 낙석 거동 가중치 및 최종 가중치를 산정할 수 있다. Table 2.1 에서 결정된 7가지 매개변수와 ESQ (Expert Semi-Quantitative)를 이용하면 Fig. 3.1과 같은 상호영향 행렬을 구성할 수 있다.

Fig. 2.2 에서 표현된 P_i 를 통해서 행과 열을 따라가면 각각의 값은 I_{ij} 가 되고, 행의 값들과 열의 값들을 합하게 되면 각각 원인 "*Cause : C*" 과 영향 "*Effect : E*" 가 되며 다음과 같이 정의된다.

$$C_{Pi} = \sum_{j=1}^n I_{ij} \quad (1)$$

$$E_{Pj} = \sum_{i=1}^n I_{ij} \quad (2)$$

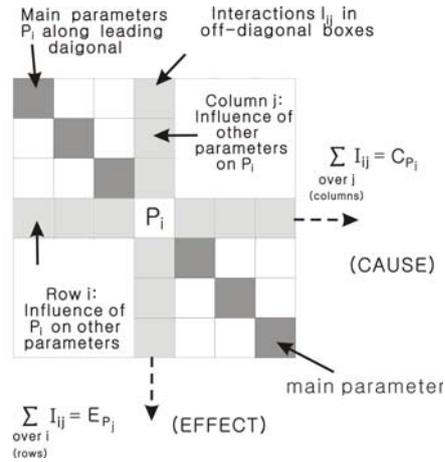


Fig. 2.2 Summation of coding values in the row and column through each parameter to establish the cause and effect co-ordinates (modified from Hudson, 1992)

여기서 C_{P_i} 는 인자가 시스템에 영향을 주는 범위를 나타내며, E_{P_i} 는 인자가 시스템에 의해서 영향을 받는 범위를 나타낸다. 이러한 방법으로 원인과 영향을 합산한 값($C+E$)은 변수별 $C+E$ value로 나타낼 수 있다. 공통 가중치는 7가지 변수들 사이의 가중치가 되며, 공통 가중치($W1_i$)를 구하는 방법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W1_i = \frac{(C_i + E_i)}{(\sum_i C_i + \sum_i E_i)} (\%) \quad (3)$$

공통가중치 $W1_i$ 는 각 요소들의 원인과 영향의 총합을 합한 값과 i 번째 원인과 영향의 합에 대한 비를 말한다.

전문가 그룹에 의한 판단 결과를 지배도와 상호영향도를 통해 살펴보면, 낙석 거동에 가장 많은 영향을 미치는 변수는 터널의 폭이며 가장 적은 영향을 미치는 변수는 지진 및 진동으로 나타났다. 또한 가장 지배적인 변수는 터널의 폭이며 가장 종속적인 변수는 암질지수로 나타났다. 매개변수들에 의해 산정된 공통 가중치 $W1_i$ 는 낙석 거동 가중치인 $W2_i$ 와 함께 최종 가중치 $W3_i$ 를 구성한다. 최종 가중치는 공통 가중치와 낙석 거동 가중치의 기하평균으로 계산할 수 있다.

$$W2_i = \frac{E_i}{\sum E_i} (\%) \quad (4)$$

여기서 E_i 는 i 번째 요소의 영향을 나타낸다.

$$W3_i = (W1_i \times W2_i)^{1/2} \quad (5)$$

3. 수치해석 및 로지스틱 회귀분석

3.1 수치해석

수치해석은 개별요소법을 기반으로 한 상용프로그램인 UDEC을 이용하였다. 절리간격은 4개군으로, 점착력과 마찰각을 각각 최소 및 최대로 입력하여 수치해석을 수행하였다

3.2 로지스틱 회귀분석

수치해석을 통해 확인한 낙석(cave-in) 유·무를 정량적으로 판단하기위해 SPSS사가 개발한 통계분석 프로그램인 SPSS 10.0의 로지스틱 회귀분석(Logistic regression analysis) 기법을 이용하였다. 로지스틱 회귀분석 결과 총 288개의 사례가 분석에 포함되어 있으며 결측치는 없다. 분석결과로부터 도출된 낙석 발생에 관한 회귀식은 다음과 같다.

$$y = 2.287 - 0.032x_1 - 6.502x_2 + 0.034x_3 + 0.773x_4 - 43.131x_5 - 0.107x_6 \quad (6)$$

4. 현장 적용

대상 지역은 서울시 강남구에 위치한 서울 지하철 9호선 000구간으로 터널구간은 1.41km이다. 대상 지역의 지보 패턴별 낙석 거동지수(CBI)는 PD-3의 경우 평균 58.86이며 51.91~65.91의 범위로 산출되었으며 이는 “높은 발생 가능성”을 나타낸다. 지보 패턴 PD-4와 PD-5의 평균 낙석발생지수는 각각 54.36 과 54.08이며 50.13~59.37과 50.76~57.89의 범위로 산출되었다. 따라서 낙석 거동지수는 40~60 범위의 “보통의 발생가능성”을 보이고 있으며(Fig. 4.3~4.5) 결과적으로, 양호한 지보패턴(PD-5)으로 갈수록 낙석 거동지수(CBI)는 낮은 값을 나타내고 있다. 한편, 균질 절리 영역(HFD)은 암중, 지질구조대, 절리면 강도와 거칠기가 고려된 영역으로서 연구지역은 3개의 균질절리영역으로 구분된다. 각 영역별 파괴확률은 수치해석에 입력된 6개의 매개변수를 통하여 도출되었으며 이를 지보패턴별 분류를 하면 Table 4.1과 같다. 분류 결과 지보패턴이 PD-3인 경우, 낙석 거동지수와 파괴확률 모두 양호한 지보패턴(PD-5)보다 각각 4.78과 0.58 %의 증가된 결과를 보이고 있다.

Table 4.1 Results of Cave-in Behavior Index and Failure Probability

	CBI	Pf(%)
PD-3	58.86	2.86
PD-4	54.36	2.21
PD-5	54.08	2.28

5. 결론

본 연구에서는 저심도 터널에서의 암반거동 유형 중 발생 부피와 속도 면에서 가장 큰 인명 및 재산상 피해를 유발 할 가능성 있는 낙석 거동에 영향을 주는 7가지 매개변수를 이용하였다. 낙석 거동과 낙석 거동에 영향을 주는 매개변수간의 영향성은 전문가집단의 판

단자료를 이용하였으며 판단 자료의 분석은 Hudson(1992)이 제시한 암반공학시스템 접근법을 이용하였다. 또한 7가지 매개변수간의 영향성을 손쉽게 표현할 수 있는 상호영향 행렬로 원인과 영향의 관계를 나타내었으며, 가중치를 산정하였다. 산정된 가중치를 이용하여 낙석 거동지수(*CBI*)를 제시하였으며 이를 지하철 9호선 000현장에 적용하여 보았다.

지보패턴별 낙석거동 지수는 PD-3의 경우 51.91~65.91의 범위로 산출되었다. 따라서 낙석발생지수는 “높은 발생 가능성”에 해당되었다. 지보 패턴 PD-4와 PD-5의 경우 각각 50.13~59.37과 50.76~57.89의 범위로 산출되어 “보통의 발생 가능성”에 해당되었으며, 결과적으로 양호한 지보패턴(PD-5)으로 갈수록 낙석 거동지수(*CBI*)는 낮은 값을 나타내고 있음을 확인하였다. 또한 수치해석을 통해 확인한 낙석발생의 유·무를 정량적으로 판단하기 위해 통계분석 프로그램인 SPSS를 이용하여 로지스틱 회귀분석을 실시하였으며, 낙석발생확률에 관한 회귀식을 제안하였다. 회귀식에 의한 파괴확률 역시 양호한 지보패턴(PD-5)이 PD-3보다 0.58% 감소한 수치를 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 에너지자원기술개발사업 (과제명: 비재래 유전의 최적생산을 위한 특성화 및 모니터링 시스템 개발)의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 노형진, 2005, Excel 및 SPSS를 활용한 다변량분석 이론과 실제, 형설
2. 유영일, 김만광, 송재준, 2008, 계층 분석적 의사결정과 암반 공학 시스템에 의한 저심도 암반터널에서의 암반거동 유형 정량화 방법론, 터널과 지하공간, Vol. 18, No. 6, pp. 465-479
3. Goricki, A., Schbert W., Riedmueller, G., 2004, New developments for the design and construction of tunnels in complex rock masses, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, Supplement 1, 720-725
4. Hudson, J. A. 1992, Rock Engineering Systems, Rock Engineering Consultants and Imperial College, University of London, Ellis Horwood, New York
5. Kaiser, P. K., Diederichs M. S., Martin, C. D Sharp J., Steiner, W., 2000, Underground works in hard rock tunneling and mining, An international conference on geotechnical and geological engineering
6. Martin, C. D., Kaiser, P. K., McCreath, D. R., 1999, Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels, Canadian Geotechnical Journal 36(1), pp. 136-151
7. Palmstrom, A., Stille, H., 2007, Ground behavior and rock engineering tools for underground excavations, Tunnelling and Underground Space Technology 22, pp. 363-376
8. Zhang L. Q, Yang, Z. F. Liao Q. L., Chen, J., An application of the rock engineering systems(RES) methodology in rockfall hazard assessment on the CHENGDU-LHASA Highway, China Paper 3B 11 SINOROCK2004 Symposium International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, No. 3, pp. 32-43