

암반공학시스템과 수치해석을 이용한 저심도 암반터널에서의 붕락 발생 가능성 평가

김만광¹⁾, 유영일²⁾, 송재준³⁾*

Evaluation of Cave-in Possibility of a Shallow Depth Rock Tunnel by Rock Engineering Systems and Uumerical Analyses

Kim, Man-kwang, Yoo, young-il, Song, Jae-joon

Abstract Overpopulation has significantly increased the use of underground spaces in urban areas, and led to the developments of shallow-depth underground space. Due to unexpected rock fall, however, it is very necessary to understand and categorize the rock mass behaviors prior to the tunnel excavation, by which unnecessary casualties and economic loss could be prevented. In case of cave-in, special attention should be drawn since it occurs faster and greater in magnitude compared to rock fall and plastic deformation. Types of cave-in behavior are explained and categorized using seven parameters - Uniaxial Compressive Strength (UCS), Rock Quality Designation (RQD), joint surface condition, in-situ stress condition, ground water condition, earthquake & ground vibration, tunnel span. This study eventually introduces a new index called Cave-in Behavior Index (CBI) which explains the behavior of cave-in under given in-situ conditions expressed by the seven parameters. In order to assess the mutual interactions of the seven parameters and to evaluate the weighting factors for all the interactions, survey data of the experts' opinions and Rock Engineering Systems (RES) were used due to lack of field observations. CBI was applied to the tunnel site of Seoul Metro Line No. 9. UDEC analyses on 288 cases were done and occurrences of cave-in in every simulation were examined. Analyses on the results of 288 cases of simulations revealed that the average CBI for the cases when cave-in for different patterns of tunnel support was estimated by a logistic regression analysis.

Key words Rock Engineering Systems (RES), Cave-in, Cave-in behavior index (CBI), Shallow depth rock tunnel

초 록 도심지에서의 인구 및 시설물 과밀화 현상으로 인해 지하 공간의 효율적 활용 문제가 대두되고 있으며, 이에 대한 해결책으로 저심도 지하공간의 개발이 증가되고 있다. 그러나 저심도 터널 굴착시 예상치 못한 붕락 문제도 함께 증가하고 있으므로, 터널 붕락으로 인한 인명과 재산의 피해를 줄이기 위해서는 굴착 개시전에 암반거동 유형을 파악하고 분류하는 것이 필요하다. 특히 붕락(cave-in)의 경우 낙반이나 소성변형보다 발생규모가 크고 빠르게 일어나는 특징이 있으므로 이에 대한 대비책이 마련되어야 한다. 본 연구에서는 7가지의 매개변수 - 일축압축강도, 암질지수, 절리면 상태, 응력 상태, 지하수, 지진 및 진동, 터널 폭을 이용하여 붕락 거동 유형을 파악하고자 하였다. 이러한 매개변수로부터 붕락 거동을 예측하기 위해서는 현장 사례로부터 충분한 자료를 확보하여야하나 현장자료의 부족 등의 현실적인 한계를 고려하여 7가지 매개변수들간의 상호영향성과 가중치를 산정하기 위해 전문가 집단의 의견과 암반공학시스템의 원리를 이용하였다. 그 결과로 저심도 암반터널에서의 붕락 거동 지수를 서울 지하철 9호선 000구간에 적용하였다. 한편 288가지 경우의 불연속체 해석을 통해 붕락 발생 유무를 확인하였고 이를 붕락 거동 지수와 비교하였다. 또한 로지스틱 회귀분석을 통해 도출된 회귀식으로 지보패턴별 파괴확률을 산출하였고 이를 붕락 거동 지수와 비교하였다.

핵심어 암반공학시스템, 붕락(cave-in), 붕락 거동 지수(CBI), 저심도 암반터널

¹⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 연구원 ²⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정 ³⁾ 서울대학교 에너지시스템공학부 조교수

* 교신저자 : songjj@snu.ac.kr

접수일 : 2009년 6월 15일

심사 완료일 : 2009년 6월 22일

게재 확정일 : 2009년 6월 25일

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 굴착 시 붕락의 문제도 함께 발생하고 있으므로, 도심지 저심도 터널에서의 암반거동 유형을 미리 파악하고 분류하는 것은 터널의 붕락을 예상하는데 도움이 될 수 있으며 이를 통해 설계 뿐만 아니라 시공 시에도 인명 및 재산을 보호할 수 있는 토대를 만들 수 있다.

저심도에서의 암반 거동은 붕락(cave-in), 낙반(rock fall), 소성변형(plastic deformation)의 3가지 유형으로 분류할 수 있으며 다음과 같이 정의할 수 있다. 붕락은 절리가 촘촘히 발달한 암반 또는 파쇄대에서 발생하고 이렇게 만들어진 블록들이 터널내부로 갑작스럽게 이동하는 현상이며 다량의 부피(10m^3 이상)를 발생시키는 현상이다. 낙반은 불연속면과 터널이 교차하여 발생한 블록이 낮은 절리면 전단강도로 인하여 터널 내부로 자유낙하 하거나 미끄러지는 현상이며 붕락과 비교하여 비교적 소량의 부피(10m^3 미만)에 해당한다. 소성변형은 굴착 후 응력 재분배로 인해 굴착 초기에 발생하는 비복원성 터널 변형이다(Palmstrom과 Stille, 2007).

터널 굴착 시 가장 큰 인명 및 재산상의 피해가 예상되는 붕락 발생에 영향을 미치는 암반거동 유형 정량화 방법론에 관한 기존 연구는 유영일 등(2008)에 의해 수행된 바 있다. 본 연구에서는 유영일 등(2008)이 제시한 7가지 매개변수를 이용한 붕락발생 가능성을 수치해석을 통한 파괴화률로 제시하였고, 이를 도심지 터널의 붕락에 관한 확률론적 리스크 분석에 적용할 수 있는 정보를 제공할 수 있다.

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. Martin 등(1999)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)

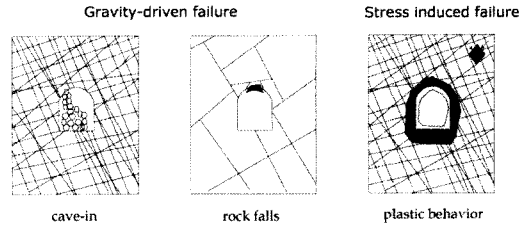


Fig. 2.1. Rock behavior types in shallow depth rock tunnel (유영일 등, 2008)

은 비교적 저심도에서의 암반 거동 유형을 11가지 형태로 분류하였다. Palmstrom과 Stille(2007)는 응력, 지하수조건 및 굴착특성의 3개 군과 14개의 소분류를 통해 암반 거동 유형을 분류하였다.

이러한 복합적인 암반 거동을 고려할 때 저심도 터널 굴착 시 예상되는 암반거동 유형은 Fig. 2.1에서 제시된 바와 같이 중력지배적인 암반거동과 응력지배적인 암반거동으로 분류할 수 있다. 붕락(cave-in)은 불연속면을 따라 발생하는 무결암(intact rock)에서의 국지적인 취성파괴(Hock 등, 1995; Martin 등 1999) 또는, 잘게 쪼개진 암편들이 10m^3 이상의 큰 부피로 터널 내부로 빠르게 쏟아지는 현상(Palmstrom 과 Stille, 2007)으로 정의할 수 있다.

2.2 매개변수 결정

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 암반 분류법에서 사용되는 영향인자를 이용하여 매개변수를 산정하였다(Table 2.1).

2.3 암반공학시스템

터널내의 암반 거동은 여러 변수들에 의해 복잡하게 작용하는 상호 영향성을 고려한 시스템적 접근 방법이 필요하다. Hudson(1992)은 상호영향행렬(interaction matrix)을 이용하여 암반 공학적 문제를 해결할 수 있도록 시스템적 접근 방법에 기초한 암반공학시스템 방법론을 제안하였다. Hudson(1992)은 이 방법론을 이용하여 암반공학적 설계 및 건설 등의 관련 정보를 통합하는 방법론을 제시하였고, Mazzoccola와 Hudson(1996)은 일반적인 환경과 관련된 19개 요소들과 암반 특성을 고려

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 (Expert Semi-Quantitative)-coding of the parameters' interaction intensity used in the model(Hudson, 1992)

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

한 요소를 암반공학시스템을 이용하여 암반 분류 위험 지역의 지시 적합성 등을 나타내었다. 또한 Benardos 와 Kaliampakos(2004)는 TBM 굴착시 사전에 손상지수(vulnerability index)로 위험도를 정량화하여 설계 단계에서 안정성과 적절성을 신속히 파악하고자 하였으며 Zhang 등(2004)은 총 14개의 낙반(rock fall) 관련 매개변수를 이용하여 낙반 위험도를 평가하였다. 배규진과 신후성(2007)은 붕괴사례의 민감도 분석 결과를 상호영향행렬 개념을 이용하여 터널 붕괴지수를 제시하였다. 암반공학 시스템은 매개변수간의 원인과 영향을 이용하여 상호영향성을 파악하기 쉬우며 비교적 손쉽게 가중치를 적용하기 쉬운 장점이 있다.

여러 매개변수간의 영향성을 손쉽게 표현할 수 있는 상호영향행렬(interaction matrix)은 암반의 안정화 문제에 적용되었다(Hudson, 1992; Hudson과 Harrison, 1992; Mazzoccola와 Hudson, 1996). 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 시계 방향으로 진행된다. 이때 코딩되는 점수는 0점의 '영향없음'에서 4점의 '중대한 영향'으로 구별할 수 있다(Table 2.2).

2.4 전문가에 의한 의사결정방법 및 가중치 산정

붕락의 발생 유무를 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 각각 8명의 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, 붕락 거동 가중치 및 최종 가중치를 산정할 수 있다. Table 2.1에서 결정된 7가지 매개변수와 Hudson(1992)이 제안한 반 정량적 코딩 방법인 ESQ(Expert Semi-Quantitative)를 이용(Table 2.2)하면 Fig. 2.2와 같은 상호영향 행렬을 구성할 수 있다.

Fig. 2.2에서 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)"이 되며 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

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

여기서 C_{Pi} 는 인자가 시스템에 영향을 주는 범위를 나타내며, E_{Pi} 는 인자가 시스템에 의해서 영향을 받는 범위를 나타낸다. 이러한 방법으로 원인과 영향을 합산한 값($C+E$)은 변수별 $C+E$ value로 나타낼 수 있다. 공

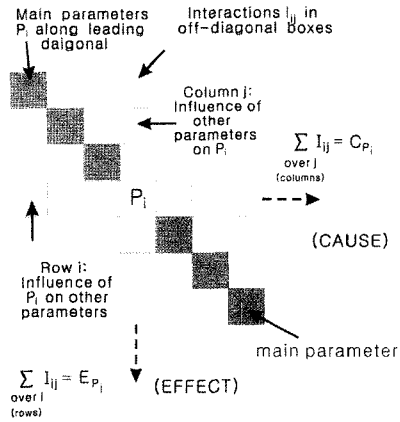


Fig. 2.2 Summation of coding values in the row and column through each parameter to establish the cause and effect coordinates (modified from Hudson, 1992)

통 가중치는 7가지 변수들 사이의 가중치가 되며, 공통 가중치(W_1)를 구하는 방법은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

공통가중치 W_1 는 각 요소들의 원인과 영향의 총합을 합한 값과 i 번째 원인과 영향의 합에 대한 비를 말한다.

전문가 그룹에 의한 판단 결과를 지배도(C-E: parameter dominance)와 상호영향도(C+E: interactive intensity)를 통해 살펴보면, 붕락 거동시 가장 큰 상호영향도를 갖는 변수는 터널의 폭이며 가장 작은 상호영향도를 갖는 변수는 지진 및 진동으로 나타났다. 또한 가장 지배도가 큰 변수는 터널의 폭이며 가장 지배도가 작은 변

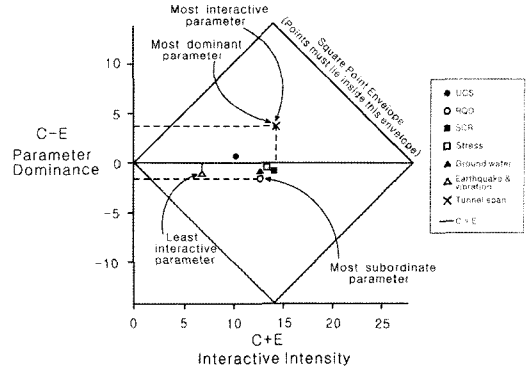


Fig. 2.3 Matrix coding plotted in $C+E$, $C-E$ space

수는 암질지수로 나타났다(Fig. 2.3). 매개변수들에 의해 산정된 공통 가중치 W_1 는 붕락 거동 가중치인 W_2 와 함께 최종 가중치 W_3 를 구성한다. 최종 가중치는 공통 가중치와 붕락 거동 가중치의 기하 평균으로 계산할 수 있다(Table 2.3).

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

여기서 E_i 는 i 번째 요소의 영향을 나타낸다.

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

2.5 붕락발생지수(CBI: Cave-in behavior index) 산정

붕락 거동에 대한 매개변수 가중치는 Table 3.4에 제시된 각 매개변수에 해당하는 배점 P_i 들의 선형조합으로 구성되며 n 개의 인자들의 총합으로 계산할 수 있다. 이러한 일련의 과정을 거쳐서 터널 굴착 시 예상되는

Table. 2.3 Weighting of the parameter and cave-in behavior

Parameter	Parameter weighting			Cave-in behavior weighting			Final weighting		
	$W1_i$			$W2_i$			$W3_i$		
	min	max	mean	min	max	mean	min	max	mean
UCS	0.0417	0.1935	0.1217	0.0000	0.1818	0.0575	0.0000	0.1756	0.0690
RQD	0.0636	0.2358	0.1500	0.1053	0.3333	0.1784	0.1021	0.2830	0.1706
SCR	0.0968	0.2404	0.1661	0.1000	0.3636	0.2131	0.1191	0.3186	0.1970
Stress	0.0833	0.2347	0.1594	0.0000	0.2857	0.1060	0.0000	0.2635	0.1306
Ground water	0.0789	0.2222	0.1513	0.0526	0.3077	0.1493	0.0790	0.2897	0.1555
Earthquake and vibration	0.0263	0.1538	0.0810	0.0000	0.3077	0.1179	0.0000	0.1954	0.0954
Tunnel span	0.0984	0.2745	0.1704	0.0952	0.4000	0.1778	0.1097	0.2729	0.1820

Table 2.4 Suggested rating of parameters affecting rock behavior in shallow tunnel(유영일 등, 2008)

Parameter	Description	Classes	Rating				
			0	1	2	3	4
UCS(MPa)	-	P_1	<25	25-50	50-100	100-250	>250
RQD(%)	-	P_2	<20	20-40	40-60	60-80	>80
SCR (Joint surface condition)	Joint weathering +Joint infilling+JRC	P_3	<3	3-8	8-12	12-15	>15
Stress condition	Overburden height /Tunnel span	P_4	<1.0	1.0-1.5	1.5-2.5	2.5-3.5	>3.5
Ground water condition	Ground water level - tunnel crown level	P_5	>15	15-10	10-5	5-0	<0
Earthquake and Vibration	Earthquake intensity	P_6	>0.25g	0.25g-0.20g	0.20g-0.15g	0.15g-0.1g	<0.10g
Excavation span	Tunnel span /Joint spacing	P_7	>200	200-100	100-50	50-5	<5

Table 2.5 Cave-in behavior index (CBI) categories

Linguistic values: Cave-in Behavior Index	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
Linguistic terms	Very low probable	Low probable	Moderately probable	High probable	Very high probable

붕락 발생지수(CBI)를 산정할 수 있으며 이는 식 (6)과 같다.

$$CBI = 100 \left(1 - \sum_{i=1}^n W3_i \frac{P_i}{P_{max}} \right) \quad (6)$$

여기서 P_{max} 는 정규화 요소로서 변수가 취할 수 있는 최대값이며, 여기에서의 P_{max} 값은 4이다(Table 2.2). 이와 같은 방식으로 산정한 매개변수별 등급은 Table 2.4와 같이 나타낼 수 있으며, 붕락 발생지수는 백분율로서 5개의 범주인 0~20, 20~40, 40~60, 60~80, 80~

100으로 분류(Table 2.5)할 수 있다. 작은 백분율 값을 가진 범주에 속할수록 붕락발생이 커지는 경향을 나타낸다. 점수 등급은 Fuzzy 수를 이용하여 구성하였다(Fig. 2.4).

3. 수치해석 및 로지스틱 회귀분석 결과

3.1 수치해석 방법 및 결과

수치해석은 개별요소법을 기반으로 한 상용프로그램인 UDEC을 이용하였다. 터널의 토피고는 최저심도 15m와 최고심도인 35m로 구성하였으며, 절리의 간격, 수평면과 이루는 절리의 경사각도, 측압비, 점착력, 마찰각을 변수로 하여 변위벡터를 측정하였다(Fig. 2.5). 절리의 간격은 암반의 상태가 blocky~bulky와 bulky의 구간에 위치하게 되고, CF지수(터널 직경/블록 직경)가 cave-in에 해당하는 20이상의 구간인 0.5m에서 0.1m까지를 변수로 하였다. 절리의 경사각도에 따른 변위 벡터의 변화 양상을 확인하기 위하여 30°/30°, 45°/45°, 60°/60°, 0°/90°의 네 가지 군으로 분류하였다. 측압비는 현지 응력을 충분히 고려하여 0.5~2.0까지의 범위로 분류하였고, 점착력과 마찰각은 각각 최소 0.01MPa과 최대 0.1MPa, 최소 22°와 최대 34°로 분류하였다. 2가지 경우의 토피

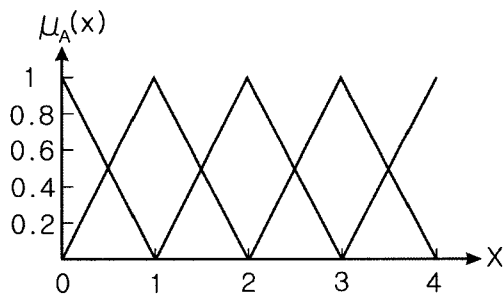


Fig. 2.4 Scale of fuzzy numbers in rating

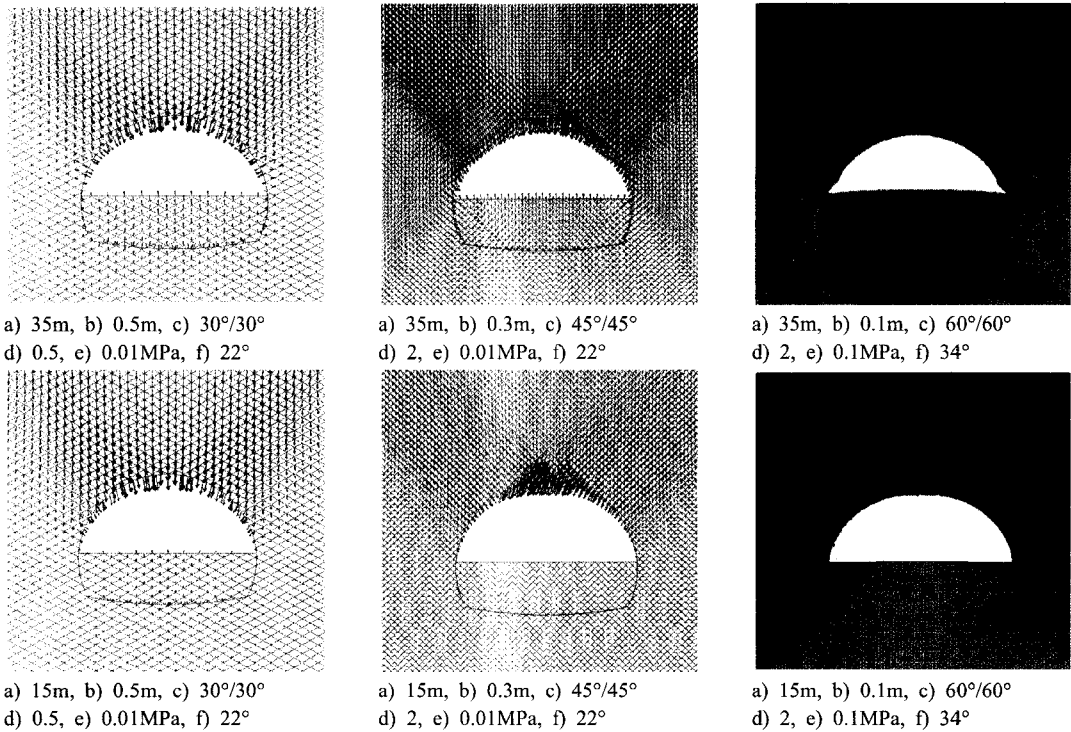


Fig. 2.5 Six UDEC models with different parameters(a:overburden height, b:joint spacing, c:joint angle, d:lateral/vertical ratio, e:cohesion, f:friction angle).

고, 3가지 경우의 절리간격, 4가지 경우의 절리경사, 3가지 경우의 축압비, 각각 2가지 경우의 점착력과 마찰각의 경우의 수를 조합하여 총 288개의 케이스에 대한 수치해석을 실시하였으며, 모두 수렴을 완료하는 단계인 15,000 step까지 수행되었다. 붕락의 발생 유무는 발생한 부피가 10m³ 이상일 경우로 정의하였으나, 수치해석을 실행한 UDEC의 경우 2차원으로 면적만을 계산할 수 있는 한계가 있으므로 이를 대체하는 방안으로 상반에서 발생한 최대변위벡터 값이 해당 절리간격의 10% 이상 발생 시 붕락발생으로 판단하였다. 예를 들어 절리간격이 0.5m 일 경우 발생한 최대변위벡터 값이 0.05m 이상이면 붕락이 발생한 것으로 판단하였다. 총 288개의 케이스 중 32개의 결과를 Table 2.6과 같이 나타내었다. 288개 케이스의 수치해석 결과를 살펴보면, 절리의 경사각도가 30° / 30° 와 45° / 45°인 경우 각각 9회 와 7회의 붕락이 발생했으며, 60° / 60° 와 0° / 90°인 경우 각각 20회와 18회의 붕락이 발생했다. 이는 절리 경사각도가 붕락 발생에 영향을 미치고 있음을 나타낸다. 또한 점착력과 마찰각이 각각 0.01MPa과 22°의 최소값일 때 31회의 붕락발생이 관찰되었으나, 각각 0.1MPa과 34°의 최대값일 경우 붕락 발생은 2회에 그

쳤다. 여기서 점착력과 마찰각 역시 붕락 발생에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 변위의 길이에 따른 붕락 발생 면적은 일반적인 상관관계를 찾기 어려웠다.

3.2 로지스틱 회귀분석

3.2.1 개요

수치해석을 통해 확인한 붕락(cave-in) 유무를 정량적으로 판단하기위해 SPSS사가 개발한 통계분석 프로그램인 SPSS 10.0의 로지스틱 회귀분석(Logistic regression analysis) 기법을 이용하였다. 로지스틱 회귀분석은 목적변수가 질적인 경우에 사용되며, 선형 회귀분석과 유사하면서 비선형적인 효과를 통합하고 있다. 특히 목적변수가 이원적인 경우(cave-in 발생 유무)와 설명변수들 사이의 인과관계를 분석하는 하나의 통계기법이라고 할 수 있다.

로지스틱 회귀분석은 설명변수(explanatory variables)들의 효과를 분석하기 위해서, 어떤 사건이 발생한 경우(1)와 발생하지 않은 경우(0)를 예측하기보다는 사건이 발생할 확률을 예측한다. 목적변수는 0(실패 또는 미발생)과 1(성공 또는 발생)으로 나타내며, 따라서 예측

값은 0과 1사이의 값을 갖게 된다. 로지스틱 반응함수에서 설명변수와 목적변수의 관계는 S자 모양의 비선형(nonlinear)을 보이고 있다(노형진, 2005). 설명변수가 여섯 개인 로지스틱 회귀모형은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E(y|x) = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \beta_6x_6)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \beta_6x_6)} \quad (7)$$

위의 로지스틱 함수는 β_0 와 β_1 에 대해서 비선형 함수이나 이를 선형으로 변환시킬 수 있다. 기대반응 $E(y|x)$ 는 확률을 의미하므로

$$E(y|x) = p \quad (8)$$

로 놓으면, 다음의 변환

$$p' = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \ln\left(\frac{E(y|x)}{1-E(y|x)}\right) \quad (9)$$

을 이용하여 식 (7)을 식 (9)에 대입할 수 있다. 이와 같은 변환을 로지스틱 변환(logistic transformation)이라 하고, p' 즉, $\ln\left(\frac{\pi}{1-\pi}\right)$ 를 로짓(logit)이라 부른다. 설명변수가 여섯 개인 경우의 선형 로지스틱 모형은 다음과 같다.

$$p' = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \beta_6x_6 \quad (10)$$

Table 2.6 Analyzed Results by UDEC 4.0 with various variables(overburden height : 35m, joint spacing : 0.5m)

Joint angle (°)	Lateral : vertical ratio	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)	Displacement (cm)	Cave-in (10% of joint spacing)	Cave-in area (m ²)
30/30	0.5	0.01	22	0.61	×	-
			34	0.28	×	-
	0.5	0.1	22	0.27	×	-
			34	0.22	×	-
	2.0	0.01	22	0.89	×	-
			34	0.46	×	-
2.0	0.1	22	0.45	×	-	
		34	0.42	×	-	
45/45	0.5	0.01	22	0.32	×	-
			34	0.25	×	-
	0.5	0.1	22	0.24	×	-
			34	0.22	×	-
	2.0	0.01	22	0.56	×	-
			34	0.48	×	-
2.0	0.1	22	0.45	×	-	
		34	0.41	×	-	
60/60	0.5	0.01	22	1.80	×	-
			34	0.28	×	-
	0.5	0.1	22	0.26	×	-
			34	0.18	×	-
	2.0	0.01	22	3.20	×	-
			34	0.81	×	-
2.0	0.1	22	0.51	×	-	
		34	0.45	×	-	
00/90	0.5	0.01	22	12.8	○	87.8
			34	3.20	×	-
	0.5	0.1	22	0.30	×	-
			34	0.29	×	-
	2.0	0.01	22	1.14	×	-
			34	0.61	×	-
2.0	0.1	22	0.44	×	-	
		34	0.42	×	-	

3.2.2 로지스틱 회귀분석 결과 및 적합성 검증

로지스틱 회귀분석 결과 총 288개의 사례가 분석에 포함되어 있으며 결측치(무응답치)는 없다(Table 3. 1). 목적변수의 원래 변수값은 0(cave-in 미 발생)과 1(cave-in 발생)이었으며 이로서 변수값 그대로 코딩되어 분석에 이용되었음을 알 수 있다(Table 3.1).

Table 3.2는 설명변수가 포함되어 있는 모형의 적합성을 나타내고 있다. 모형(model)에 나타난 통계량(Chi-Square)은 상수만 포함된 경우의 -2LL(-2Log Likelihood) 값과 설명 변수가 포함된 경우의 -2LL 값의 차이를 뜻한다. 여기서 -2LL는 데이터에 모형이 얼마나 적합한지에 대한 정도를 나타낸다.

모형과 블록의 카이제곱 값은 동일하며 여기에서 카

이제곱값은 110.324, 자유도(DF)는 6이고 유의확률(Sig)은 0.000($\alpha = 0.05$)이므로 통계적으로 유의하다. 모형의 적합도 검증결과 유의확률은 0.386($>\alpha = 0.05$)이므로 모형이 적합하다고 할 수 있다(Table 3.2). 여기에서 유의할 것은 적합도 검증에서 유의확률의 값이 0.05보다 커야 모형이 적합하다고 하는 귀무가설을 채택한다는 점이다. 따라서 y (cave-in 발생)와 x_2 (절리 간격), x_3 (절리 각도), x_4 (측압비), x_5 (점착력), x_6 (마찰각)의 관계를 나타내는 모형은 적합하다고 할 수 있다.

변수들의 회귀계수와 회귀모형의 유의성을 판단한 결과는 다음과 같다(Table 3.3).

[x_1 B -0.032 Sig 0.114] x_1 (토피고)의 회귀계수는

Table 3.1 Summary of cases in the logistic regression analysis

		N	Percent
Valid case	Valid	288	100.0
	Missing	0.0	0.0
	Total	288	100.0
Missing case		0.0	0.0
Total case		288	100.0

Table 3.2 Result of test in the logistic regression analysis

	Chi-Square	DF	Sig.
Stage	110.324	6	0.000
Block	110.324	6	0.000
Model	110.324	6	0.000

Table 3.3 Result of variables in equation

Variable & Invariable	B	S.E.	Wald	DF	Sig.	Exp (B)	R ²	95% Confidence Interval of the EXP(B)	
								Lower	Upper
x_1 (overburden height)	-0.032	.020	2.503	1	0.114	0.968	0.003	0.930	1.008
x_2 (joint spacing)	-6.502	1.412	21.196	1	0.000	0.001	0.121	0.000	0.024
x_3 (joint angle)	0.034	0.009	13.302	1	0.000	1.035	0.072	1.016	1.054
x_4 (lateral: vertical ratio)	0.773	0.325	5.661	1	0.017	2.167	0.023	1.146	4.099
x_5 (cohesion)	-43.131	7.641	31.862	1	0.000	0.000	0.189	0.000	0.000
x_6 (friction angle)	-0.107	0.035	9.138	1	0.003	0.899	0.045	0.839	0.963
Constant	2.287	1.300	3.094	1	0.079	9.843	0.007		

-0.032이며, 이 회귀계수의 통계적 유의성을 검증하는 값인 Wald 통계량 2.503의 확률적 표시인 Sig T가 0.114이므로, $\alpha = 0.05$ 에서 통계적으로 유의하지 않다.

[x_2 B -6.502 Sig 0.000] x_2 (절리간격)의 회귀계수는 -6.502이며, Sig T가 0.000 이므로 통계적으로 유의하다(Sig T= 0.000 < $\alpha = 0.05$).

[x_3 B 0.034 Sig 0.000] x_3 (절리각도)의 회귀계수는 0.034이며, Sig T가 0.000이므로 통계적으로 유의하다(Sig T= 0.000 < $\alpha = 0.05$).

[x_4 B 0.773 Sig 0.017] x_4 (측압비)의 회귀계수는 0.773이며, Sig T가 0.017이므로 통계적으로 유의하다(Sig T= 0.017 < $\alpha = 0.05$).

[x_5 B -43.131 Sig 0.000] x_5 (절리점착력)의 회귀계수는 -43.131이며, Sig T가 0.000이므로 통계적으로 유의하다(Sig T= 0.000 < $\alpha = 0.05$).

[x_6 B -0.107 Sig 0.003] x_6 (절리마찰각)의 회귀계수는 -0.107이며, Sig T가 0.003이므로 통계적으로 유의하다(Sig T= 0.003 < $\alpha = 0.05$).

[constant B 2.287 Sig 0.079] 회귀식의 상수는 2.287이며, Sig T=0.079 > $\alpha = 0.05$ 이므로 통계적으로 유의하지 않다.

위의 분석결과로부터 도출된 붕락 발생에 관한 결과는 토피코와 상수를 제외한 변수의 유의성이 확인되었으며, 그에 따른 회귀식은 다음과 같다.

$$y = 2.287 - 6.502x_2 + 0.034x_3 + 0.773x_4 - 43.131x_5 - 0.107x_6 \quad (12)$$

목적변수와 각각의 설명변수들 사이의 편상관을 알아 볼 때 쓰이는 통계량은 R이며 -1과 +1사이의 값을 가진다. 작은 R값은 그 설명변수가 모형에 적은 공헌도를 가지고 있음을 의미한다. 분석결과(Table 3.3) 절리간격

의 R²값은 0.12로 나타났으며, 점착력의 R²값은 0.18로 나타났다. 이는 수치해석모형에서 점착력과 절리간격 순으로 큰 공헌도를 가지고 있음을 의미한다.

4. 현장 적용

대상 지역은 서울시 강남구에 위치한 서울 지하철 9호선 000구간으로 터널구간은 1.41km이다. 각 영역별 매개변수 값(Table 4.1)을 이용한 대상 지역의 지보 패턴별 붕락 거동지수(CBI)는 비교적 양호한 암반의 지보 패턴인 PD-3의 경우 평균 58.86이며 51.91~65.91의 범위로 산출되었으며 이는 Table 2.5의 “높은 발생 가능성”을 나타낸다. 불량한 암반의 지보 패턴 PD-4와 PD-5의 평균 붕락발생지수는 각각 54.36과 54.08이며 50.13~59.37과 50.76~57.89의 범위로 산출되었다. 따라서 붕락 거동지수(CBI)는 40~60 범위의 “보통의 발생가능성”을 보이고 있으며(Table 2.5), 양호한 지보패턴(PD-5)으로 갈수록 붕락 거동지수(CBI)는 낮은 값을 나타내고 있다(Fig. 4.4). 한편, 균질절리영역(HFD)은 암종, 지질구조대, 절리면 강도와 거칠기가 고려된 영역으로서 연구지역은 3개의 균질절리영역으로 구분된다. 분류 결과 지보패턴이 PD-3인 경우, 붕락 거동 지수와 파괴확률 모두 양호한 지보패턴(PD-5)보다 각각 4.78과 0.58%의 증가된 결과를 보이고 있다. 한편 대상부지는 암반 내 발달한 불연속면의 분포특성에 따라 크게 네 부분의 균질절리영역(Homogeneous Fracture Domain, HFD)으로 이루어져 있으며(Fig. 4.1), 각 영역의 절리군 정보는 Table 4.2와 같다. 절리군 별 체적 빈도는 J1을 주절리군으로 J2와 J3을 부절리군으로 하여 결정하였다. 터널 축방향의 선주향과 선경사는 20°와 0°이다. 지보패턴별 붕락에 대한 파괴확률은 로지스틱 회귀분석식을 이용하여 Table 4.3과 같이 산출하였다.

Table 4.3의 결과를 바탕으로 지보패턴별 붕락발생지

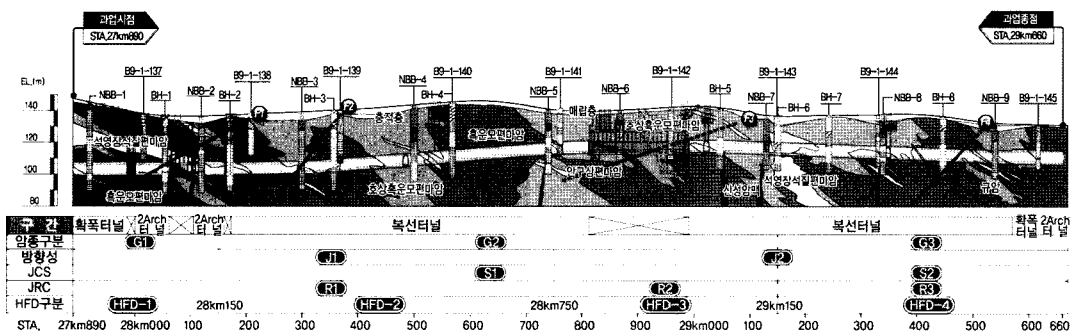


Fig. 4.1 Homogeneous Fracture Domain (HFD)

Table 4.1 The intrinsic parameter, extrinsic parameter and excavation parameter according to support pattern of PD section

Support pattern	Section	Representative section	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
PD-4	28,172 ~ 28,182	28,170	2	0	2	3	2	2	1
PD-5	28,182 ~ 28,270	28,200	3	2	2	3	3	2	1
PD-4	28,270 ~ 28,344	28,300	2	0	1	3	4	2	0
PD-5	28,344 ~ 28,414	28,350	1	1	1	3	4	2	1
PD-5	28,414 ~ 28,445	28,430	2	0	1	3	3	2	1
PD-4	28,445 ~ 28,510	28,500	2	2	2	3	4	2	1
PD-5	28,510 ~ 28,560	28,550	1	1	2	2	3	2	1
PD-5	28,999 ~ 29,105	29,000	2	0	1	2	3	2	1
PD-5	29,195 ~ 29,260	29,200	3	2	2	2	3	2	2
PD-3	29,480 ~ 29,573	29,540	2	1	2	2	2	2	1

Table 4.2 Joint properties in the study area

HFD		Joint orientation (Dip/Dip dir.)	Joint cohesion (MPa)	Joint friction(°)	Volumetric frequency (m ⁻³)
HFD-2	J1	32/093	0.0510	32.5	0.18
	J2	54/348	0.0749	32.1	0.14
	J3	60/176	0.0380	32.5	0.10
HFD-3	J1	08/224	0.0454	30.5	0.18
	J2	62/355	0.0384	29.3	0.14
	J3	56/170	0.0315	30.4	0.10
HFD-4	J1	32/155	0.0454	31.6	0.18
	J2	48/320	0.0381	34.0	0.14
	J3	64/176	0.0480	33.2	0.10

Table 4.3 Cave-in behavior index according to PD section

Support pattern	Section	Representative section	Cave-in Behavior Index	Failure probability (%)	HFD section
PD-4	28,172 ~ 28,182	28,170	58.35	1.75	HFD-2
PD-5	28,182 ~ 28,270	28,200	45.70	1.75	HFD-2
PD-4	28,270 ~ 28,344	28,300	59.89	1.75	HFD-2
PD-5	28,344 ~ 28,414	28,350	55.71	1.75	HFD-2
PD-5	28,414 ~ 28,445	28,430	59.44	1.75	HFD-2
PD-4	28,445 ~ 28,510	28,500	44.78	1.75	HFD-2
PD-5	28,510 ~ 28,560	28,550	56.64	1.75	HFD-2
PD-5	29,195 ~ 29,260	29,200	44.39	2.76	HFD-4
PD-3	29,480 ~ 29,573	29,540	58.86	2.76	HFD-4

Table 4.4 Results of Cave-in Behavior Index and Failure Probability

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

수(CBI) 평균값과 파괴확률(Failure probability) 평균 값은 Table 4.4와 같다.

5. 결론

본 연구에서는 기존의 연구(유영일 등, 2008)에서 제시한 저심도 터널에서의 암반거동 유형 중 발생 부피와

속도 면에서 가장 큰 인명 및 재산상 피해를 유발 할 가능성 있는 붕락 거동에 영향을 주는 7가지 매개변수를 이용하였다. 붕락 거동과 붕락 거동에 영향을 주는 매개변수간의 영향성은 전문가집단의 판단자료를 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, 산정된 가중치를 이용하여 붕락 거동지수(CBI)를 제시하였다. 한편 288가지 경우의 불연속체 해석을 통해 붕락 발생 유무를 확인하였고 이를 로지스틱 회귀분석을 통해 회귀식으로 도출하여 지보패턴별 파괴확률을 산출하였다. 산출된 지보패턴별 파괴확률과 붕락 거동지수(CBI)를 지하철 9호선 000현장에 적용하여 보았다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

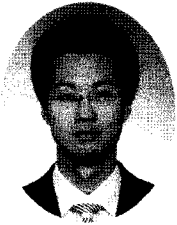
- 1) 전문가집단의 판단 자료를 바탕으로 매개변수 간의 영향도를 분석한 결과 터널의 폭이 붕락거동에 가장 큰 영향을 주고 있으며, 지진 및 진동은 가장 작은 영향을 주고 있다. 또한 터널의 폭은 매개변수 간의 지배도가 가장 큰 변수이며, 암질지수가 가장 지배도가 작은 변수로 나타났다.
- 2) 공통 가중치(W_1)와 붕락발생 가중치(W_2)를 이용하여 최종 가중치(W_3)를 계산하였으며 그 결과 절리면 상태(SCR)가 가장 큰 가중치 값(0.197)을 나타냈고, 단축압축강도(UCS)가 가장 작은 가중치 값(0.069)으로 나타났다.
- 3) 지보패턴별 붕락거동 지수는 PD-3의 경우 51.91 ~ 65.91의 범위로 산출되었다. 따라서 붕락발생지수는 “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 암반의 지보패턴(PD-5)으로 갈수록 붕락 거동지수(CBI)는 낮은 값을 나타내고 있음을 확인하였다.
- 4) 수치해석을 통해 서울지하철 9호선 000현장의 해당 터널을 모델로 하여 총 288개의 케이스에 대한 수치해석을 실시하였다. 수치해석을 통해 확인한 붕락발생의 유무를 정량적으로 판단하기 위해 통계분석 프로그램인 SPSS를 이용하여 로지스틱 회귀분석을 실시하였으며, 붕락발생확률에 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. 배규진, 신휴성, 2007, 터널 붕괴 위험도 지수 및 평가도표 개발, 대한토목학회논문집, Vol 27, No. 3C, pp. 221-227
3. 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
4. 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
5. Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F., 1995. Support of underground excavations in hard rock. Balkema, Rotterdam
6. Hudson, J. A. 1992, Rock Engineering Systems, Rock Engineering Consultants and Imperial College, University of London, Ellis Horwood, New York
7. Hudson, J. A. and Harrison, J. P. 1992, "A New Approach to Studying Complete Rock Engineering Problems", Quarterly J. of Engineering Geology, Vol. 25, pp. 93-105
8. 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
9. 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
10. Mazzoccola, D. F. and Hudson, J. A. 1996, "A Comprehensive Method of Rock Mass Characterization for Indicating Natural Slope Instability", Quarterly J. of Engineering Geology, Vol. 29, pp. 37-56
11. Palmstrom, A., Stille, H., 2007, Ground behavior and rock engineering tools for underground excavations, Tunnelling and Underground Space Technology 22, pp. 363-376
12. 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



김만광
2006년 강원대학교 자연과학대학 지질학과
이학사
2009년 서울대학교 공과대학 에너지시스
템공학부 공학석사

Tel: 02-880-9304
E-mail: raonmk@snu.ac.kr



유영일
1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과,
공학사
1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과,
공학석사

Tel: 02-880-9304
E-mail: hidemi04@snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 에너지시스템
공학부 박사과정



송재준
1993년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1995년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학
석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템
공학부 공학박사

Tel: 02-880-9043
E-mail: songjj@snu.ac.kr
현재 서울대학교 에너지시스템공학부 교수