

객관적인 터널 갱구사면 평가를 위한 통계기법 연구

Study on Statistical Method for Objective Evaluation of Tunnel Portal Slopes

권오일¹⁾, O-Il Kwon, 백 용²⁾, Yong Baek, 나종화³⁾, Jong-Hwa Na, 서용석⁴⁾, Yong-Seok Seo, 김교원⁵⁾, Gyo-Won Kim

- 1) 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원, Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, kwonoil@kict.re.kr
- 2) 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Dept., Korea Institute of Construction Technology
- 3) 충북대학교 자연과학대 정보통계학과 교수, Professor, Dept. of Information and Statistics, Chungbuk National University
- 4) 충북대학교 자연과학대 지구환경과학과 교수, Professor, Dept. of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University
- 5) 경북대학교 자연과학대 지질학과 교수, Professor, Dept. of Geology, Kyungpook National University

SYNOPSIS : This study was intended to develop a high reliable technique by statistically processing on-site data with a general linear model, providing the basic data for construction, analysis of stability and establishment of maintenance measures for tunnel portal slopes in the future. This study evaluated the stability of a tunnel portal slope using a quantified technique, which is based on a general linear model. The important scores of each independent variable were allocated by using the ranges of the quantified values, based on the predicted coefficient of regression and the scores for categories of each independent variable were allocated so that those are equally spaced. The quantification model obtained from the results of evaluating the total data used for the quantification process provided precise results. In addition, it is expected that a more detail subdivision of response variables and sufficient data would produce a better stability evaluation standard.

Key words : Tunnel portal slope, Statistically processing, General linear model, Stability evaluation

1. 서 론

국내 일반국도 상에 2004년과 2005년 사이에 신규로 개설된 터널 현장의 개소수는 무려 73개에 이른다. 2004년도 이전까지 터널 현장의 총 개소수가 112개인 점을 고려할 때, 그 수가 기하급수적으로 증가하였음을 알 수 있다. 국내의 경우 지형특성상 70% 이상이 산지로 구성되어 있어 도로 건설에 따른 터널의 발생은 필연적이고 매년 그 수가 급격히 증가하고 있으며, 해마다 터널갱구사면 및 입출구 사면의 붕괴로 발생하는 교통의 두절과 인명 손실은 엄청난 국가적 손실을 발생시키고 있는 실정이다. 터널 시공중에 있어 안정성 검토 등에 대한 연구는 최근 활발히 이루어지고 있다(유충식, 2004). 반면, 갱문

부의 사면에 대한 연구는 미진한 상태라 할 수 있다. 일반사면의 경우, 절토사면 유지관리시스템이나 상시점검 체계를 구축하여 고속도로, 국도, 철도 등에서 일괄 관리하고 있으며 지침도 마련되어 있다(한국시설안전기술공단, 2003). 그러나 이러한 기법들은 경험적인 자료를 기초로 하여 작성되어 객관적인 평가의 신뢰도가 높지 못하며, 평가 결과에 대한 검증에도 어려움이 있다. 뿐만 아니라 이러한 기법을 터널 갱구사면에 적용하기는 더욱 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 일반화 선형모형에 기초한 수량화 기법을 이용하여 터널의 갱구사면 안정성에 대한 객관적이고 신뢰도 높은 평가기법을 제안하였다. 일반국도 터널 갱구사면을 현장에서 직접 조사한 데이터를 일반선형모형(General Linear Model, GLM) 기법을 이용한 통계처리를 통하여 새로운 상태평가 기법을 개발하고, 갱구사면의 시공 및 안정성 평가 및 향후 유지관리 대책 마련과 관련된 연구에 기초 자료로 활용하는데 그 목적이 있다. 추정된 회귀계수에 기초한 수량화값 범위를 이용하여 각 설명변수의 중요도 점수와 범주별 점수를 부여하였다. 수량화 과정에 사용된 전체 자료에 대해 모형평가를 실시한 결과 구축된 수량화 모형이 정확한 결과를 제공하였다. 향후 연구에서 반응변수의 값이 좀 더 세분화되고, 자료의 확보가 충분히 이루어질 경우 보다 합리적인 안정성 평가의 기준이 마련될 것으로 생각된다.

2. 터널 갱구사면 현황 분석

일반국도변의 터널 갱구사면 현황분석을 위하여 현장조사를 통하여 자료를 수집하였다. 본 자료 분석에 활용된 자료는 2004년 이전에 완공된 112개소 현장으로 표 1에서 보는 바와 같이 터널 명, 터널 갱구사면, 갱구사면의 수로 구분하여 현황을 분석하였다. 터널 유형별 개수 및 터널 연장을 분석한 결과는 표 2와 같다.

표 1. 관리 기관별 터널 및 갱구사면 개수

Regional Construction Management Offices	highway Maintenance & Construction Offices	Number of tunnel name	Number of portals	Number of tunnel sites
Total		72	161	112
서울청	수원 국도	2	8	4
	의정부 국도	8	17	16
원주청	홍천 국도	15	34	21
	강릉 국도	-	-	-
	정선 국도	4	8	4
대전청	논산 국도	5	10	7
	충주 국도	7	17	14
	보은 국도	-	-	-
	예산 국도	1	1	2
익산청	광주 국도	6	15	9
	전주 국도	1	2	1
	남원 국도	4	8	5
	순천 국도	3	8	5
부산청	대구 국도	-	-	-
	진주 국도	2	4	4
	포항 국도	4	8	6
	영주 국도	7	14	10
	진영 국도	3	6	4

표 2. 터널 유형별 개수 및 터널 연장

Tunnel type	No. of Tunnel	No. of portal	Division	Length (m)	Remarks
단선병렬터널	40	97	최소	150	광주국도(추월산 터널)
복선터널	31	62	최대	1,960	충주국도(박달재 터널)
단선터널	1	2	평균	608	

일반적으로 갱구부의 진입형태는 지형이나 기상의 영향을 가장 많이 받으며, 지형과 터널 중심축과의 관계에 따라서 총 다섯 가지 형태로 구분할 수 있다. 표 3과 같이, 분석결과 가장 많은 진입형태는 경사면 경사교차형, 골짜기 진입형, 밀뿌리 평행형, 경사면 평행형, 경사면 직교형 순으로 나타났다. 이는 산악지형인 국내의 여건과 도로선형화를 추진하고 있는 현 기본 계획에 부합된 결과로 생각된다. 터널의 길이를 최소화하기 위한 골짜기 진입형의 형태도 많은 것으로 나타났으며, 터널 안정성에 영향을 미치는 편압을 고려할 경우 경사면과 평행한 터널은 상대적으로 적게 나타났다.

표 3의 우측은 갱문형식에 대한 분석 결과이다. 터널 입구를 형성하는 갱문의 형식은 낙석 붕괴, 눈사태, 누수 등으로부터 갱문부를 보호하기 위해 지형, 지질, 배수 등을 고려하여 선택한다. 자료를 분석한 결과 국내 터널 갱문 형식은 크게 면벽형 날개식이 대부분을 차지하고 있으며 돌출형 원통절개식이 다음으로 많은 빈도를 나타내고 있다. 이는 국내의 산악지형이 많은 국토와 지세를 이용한 도로 개설 등으로 인하여 원지반 훼손을 최소화하기 위하여 터널의 갱문형식을 선정, 시공된 것으로 볼 수 있다.

표 3. 터널 갱구부의 진입형태 및 갱문형식별 갱구사면 개수

Access type	No. of Portal Slope	Portal form		No. of Portal Slope
경사면 직교형	10	중력형	중력반중력식	3
경사면 경사교차형	49	면벽형	날개식	106
			아치날개식	7
경사면 평행형	12	돌출형	원통절개식*	42
밀뿌리 평행형	42		파라퀼트식	2
골짜기 진입형	48		돌출식	1
			벨마우스식	0

*:국내에서 일부 원형절개식이라는 용어로 혼용하여 사용되고 있음

3. 일반화 선형 모형 개념

터널 갱구사면의 유지관리 방법으로 통계적 방법을 이용하여 터널 갱구사면 붕괴 예측 수량화 기법을 이용하여 평가하였다. 본 절에서는 본 평가 기법의 개념에 대하여 설명하면 다음과 같다. 먼저 반응변수가 연속형이고, 설명변수가 연속형과 범주형의 혼합된 형태의 자료에 대한 일반화선형모형 방법은 다음의 절차를 통해 수행된다. 반응변수의 관측치를 $y=(y_1, y_2, \dots, y_n)'$ 이라 할 때, 다음의 선형모형을 생각할 수 있다.

$$y=X\beta + e \quad (1)$$

위의 선형모형에 대한 최소제곱법(least square method)에 기초한 회귀계수의 추정치는

$$\hat{\beta}=(X'X)^{-1}X'y \quad (2)$$

으로 주어진다. 수량화의 관점에서 회귀계수에 대한 추정은 다음의 상관계수

$$corr(y, X\hat{\beta}) \quad (3)$$

를 최대로 하는 β 값을 구하는 과정으로 해석할 수 있다. 이를 구체적으로 표현하면 선형모형에서 절편항을 고려하는 경우

$$\begin{aligned} X &= (1, X_1, \dots, X_p): n \times p \text{ 행렬} \\ y &= (y_1, \dots, y_n)': n \times 1 \text{ 벡터} \\ \beta &= (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p)': (p+1) \times 1 \text{ 벡터} \end{aligned} \quad (4)$$

로 표현되며, 편의상 X 와 y 는 중심화된 행렬과 벡터로 가정해도 무방하다. 이때, 식 (3)의 상관계수는

$$corr(y, X\hat{\beta}) = \frac{y' X \hat{\beta}_1}{[y' y]^{1/2} [(X \hat{\beta}_1)' (X \hat{\beta}_1)]^{1/2}} \quad (5)$$

이 되며, 이를 최대로 하는 β 값은 다음의 목적 함수와 제약식으로 표현될 수 있다.

$$\max_{\beta} y' X \hat{\beta}_1 \quad \text{subject to} \quad \beta_1' (X' X) \beta_1 = \text{constant} \quad (6)$$

위 식의 해는 다음의 라그랑지(Lagrange) 함수

$$L(\beta; \lambda) = y'X\beta_1 - \lambda\beta_1'(X'X)\beta_1 - \beta_1'(\widehat{X'X})\beta_1, \quad \lambda = \text{Lagrange multiplier} \quad (7)$$

를 최대화 하는 값이다. 즉, 함수 $L(\cdot)$ 을 β_1 에 대하여 편미분하여 0으로 놓으면

$$\partial L / \partial \beta = X'y - 2\lambda(X'X)\beta_1 = 0 \quad (8)$$

이 되고, $\lambda = 1/2$ 로 놓으면, β_1 의 추정값은

$$\widehat{\beta}_1 = (X'X)^{-1}X'y \quad (9)$$

이 된다. 이 경우 상수항 β_0 를 \bar{y} 로 놓을 때, 식 (6)을 최대화 하는 β 의 추정값은

$$\widehat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad (10)$$

이 된다.

위의 선형모형은 설명변수가 연속적인 경우를 가정하고 있으나, 설명변수가 범주형의 변수가 포함하는 혼합형의 경우에도 다음의 가변수 변환을 통해 동일하게 적용할 수 있다. 즉, 범주형 변수를 가변수(dummy variable)를 통해 표현하는 과정은 다음과 같다. 일반적으로 k 개의 범주를 갖는 범주형 변수 v 는 다음과 같이 $(k-1)$ 개의 가변수(dummy variable) w_1, \dots, w_{k-1} 들로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} v=1 & \Leftrightarrow w_1=1 \text{ and } w_2=\dots=w_{k-1}=0, \\ & \vdots \\ v=k-1 & \Leftrightarrow w_{k-1}=1 \text{ and } w_1=\dots=w_{k-2}=0, \\ v=k & \Leftrightarrow w_1=w_2=\dots=w_{k-2}=w_{k-1}=0 \end{aligned} \quad (11)$$

4. 주요 변수 수량화 기법

본 연구에서는 터널 갱구사면의 안정성에 영향을 미치는 설명변수(x)로는 범주형변수(7개)와 연속형 변수(2개)가 포함된 혼합형의 설명변수를 사용한다. 반응변수(y)로는 조사자에 의해 붕괴가능성을 수치로 표현한 연속형의 값을 이용한다. 즉, $y=1$ (안정)은 붕괴의 가능성이 낮은 상위 15%를, $y=5$ (계측)은 붕괴가능성이 높은 상위 30%~15% 그리고 $y=6$ (대책, 불안정)은 붕괴가능성이 높은 상위 15%의 값을 나타낸다. 변수들에 대한 자세한 설명은 다음의 표 4와 같다.

표 4. 터널 갱구사면 안정성평가의 주요변수

Category	Categorical variables							Continuous variables		Response variable
	Weathering	Vegetation	Convex	Seepage	Measure	Capability of collapse	Previous collapse	Slope height	Slope angle	y : Status of portal slopes
1	약간풍화	양호	평탄	건조	양호	무	무	5~18	25~47	안정(1)
2	보통풍화	보통	보통	습함	보통	낮음	낙석	19~31	48~59	계측(5)
3	심한풍화	불량	요철	젖음	불량	보통	표층유실	32~	60~	대책, 불안정(6)
4	완전풍화	-	-	흐름	-	높음	범면붕괴	-	-	-

위의 변수들에 기초하여 일반화선형모형을 통한 반응변수(\hat{y}) 추정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \hat{Y} = & a + b_1 HIGH + b_2 ANGLE + w_1 WEATHER1 + w_2 WEATHER2 + w_3 WEATHER3 \\
 & + v_1 VEGET1 + v_2 VEGET2 + c_1 CONVEX1 + c_2 CONVEX2 \\
 & + s_1 SEEPAGE1 + s_2 SEEPAGE2 + s_3 SEEPAGE3 \\
 & + m_1 MEASURE1 + m_2 MEASURE2 \\
 & + t_1 C_COLLAPSE1 + t_2 C_COLLAPSE2 + t_3 C_COLLAPSE3 \\
 & + p_1 P_COLLAPSE1 + p_2 P_COLLAPSE2 + p_3 P_COLLAPSE3 \quad (12)
 \end{aligned}$$

위 모형에 대한 적합도 검정과 회귀계수들에 대한 추정결과는 표 5와 표 6에 제시되어 있다. 표 5의 적합도 검정의 결과를 보면 F-value가 10.88, 유의확률이 <.0001**로 모형이 유의수준 5%에서 유의한 것을 알 수 있다. 식 (1)의 상관계수는 결정계수 R^2 의 제곱근으로 $\sqrt{0.7462} = 0.8638$ 로 높게 나타나며, 오차항의 크기는 표준편차(Root MSE) 1.1904로 나타났다.

표 5. 모형의 적합성 검정

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	20	308.2978	15.4149	10.88	<.0001**
Error	74	104.8600	1.4170		
Corrected Total	94	413.1579			
R-Square	Coeff. Var	Root MSE	Y Mean		
0.7462	33.2609	1.1904	3.5790		

표 6은 회귀계수의 추정값과 각 설명변수의 중요도(기여도)를 평가하는 지표로서 수량화값의 범위(Range)를 제시하고 있다. 범위란 각 설명변수 내 범주들의 수량화 값들 중에서 최대값과 최소값의 차이를 말한다. 범위가 큰 설명변수는 수량화에 있어 상대적으로 큰 기여를 하는 것으로 생각할 수 있다. 그 이유는 설명변수 각각이 반응변수의 척도에서 수량화 값의 범위만큼 차이를 벌리기 때문이다.

표 6. 회귀계수 추정치 및 수량화 범위

설명변수	범주	빈도	추정치	수량화값	수량화값 범위
사면높이	= 1 (18 이하)	32	0.0220	-	0.674
	= 2 (19~31)	31			
	= 3 (32 이상)	32			
법면경사	= 1 (47 이하)	32	-0.0084	-	-0.176
	= 2 (48~59)	31			
	= 3 (60 이상)	32			
풍화도	= 1	1	-1.1715 B	-1.172	1.230
	= 2	40	-0.1194 B	-0.119	
	= 3	40	0.0578 B	0.058	
	= 4	14	0.0000 B	0.000	
식생상태	= 1	56	-1.0294 B	-1.029	1.029
	= 2	25	-0.4848 B	-0.485	
	= 3	14	0.0000 B	0.000	
요철상태	= 1	51	-0.0376 B	-0.038	0.300
	= 2	26	-0.2999 B	-0.300	
	= 3	18	0.0000 B	0.000	
누수상태	= 1	82	-4.0894 B	-4.089	4.089
	= 2	10	-3.6581 B	-3.658	
	= 3	2	-3.2838 B	-3.284	
	= 4	1	0.0000 B	0.000	
대책공법	= 1	66	0.6359 B	0.636	0.674
	= 2	27	-0.0375 B	-0.038	
	= 3	2	0.0000 B	0.000	
붕괴정후	= 1	41	-3.9309 B	-3.931	3.931
	= 2	23	-0.9153 B	-0.915	
	= 3	16	-0.5921 B	-0.592	
	= 4	15	0.0000 B	0.000	
붕괴이력	= 1	50	0.2793 B	0.279	0.599
	= 2	21	0.0135 B	0.014	
	= 3	19	0.5994 B	0.599	
	= 4	5	0.0000 B	0.000	

위의 표 6에서 범주형 변수들에 대한 수량화값 범위는 각 가변수별 추정치들의 (최대값 - 최소값)으로부터 구해진다. 또한 연속형 변수에 대한 수량화값 범위는 $R(X)=(\text{변수 } X \text{의 추정된 회귀계수}) * (\text{변수 } X \text{의 구간화 범위})$ 로부터 구해진다. 여기서 구간화 범위란 해당 연속형 변수를 몇 개의 구간 범주로 구분하였을 때 생기는 최대 구간 중위수와 최소 구간 중위수와와의 차이로 정의된다. 연속형 변수를 몇 개의 구간으로 나누는 이유는 범주형 변수들과의 형평성을 고려한 것으로, 본 연구에서는 연속형 변수 사면높이와 법면경사에 대해 각각 3개의 구간으로 나누었다. 즉, 총 자료수가 95개이므로 첫 구간에 32개 관측값을 넣고, 중간 구간에 31개, 마지막 구간에 32개의 관측값을 넣으면 균형있게 범주화가 이루어진다. 수량화값 범위의 계산은 아래의 표 7과 같다.

표 7. 연속형 변수의 수량화값 범위

Variable	Category	Section	No. of Data	Median	Calculation of the range of quantified value
Slope height	1	5~18	32	14.85	$R(\text{high})=0.022*(45.5-14.85)$ $=0.6743$
	2	19~31	31	24.18	
	3	32~	32	45.5	
Slope angle	1	25~47	32	41	$R(\text{angle})=-0.008*(63-41)$ $=-0.176$
	2	48~59	31	55	
	3	60~	32	63	

5. 붕괴 가능성도 점수와 모형평가

상기 수량화값 범위로부터 각 설명변수별 중요도를 알 수 있다. 아래의 표 8은 각 변수의 중요도를 범위값에 비례하도록 할당하고(총합 : 100점), 또한 범주 내에서의 점수를 등간격이 되도록 할당하였다. 따라서 표 8의 결과로부터 특정 터널의 갱구사면에 대한 안정성을 100점 만점으로 점수화 할 수 있다. 점수가 낮을수록 안정성이 높고, 높을수록 불안정함을 나타내는 것으로 해석할 수 있다. 또한 이 점수에 기초하여 안정성에 대한 등급을 나누고자 할 경우에는 적당한 기준값(threshold)의 선정과정이 필요하다.

표 8의 범주별 기여점수의 결과를 이용하여 분석에 사용된 95개의 총자료에 대한 평가를 실시하였다. 표 9에서는 붕괴가능도 점수를 7개의 구간으로 나누고, 해당 자료수와 함께 실제관측 결과를 제시하였다. 붕괴가능도 점수가 낮을수록 관측된 y값이 작은 값을 가지고, 붕괴가능도 점수가 높을수록 y의 값이 큰 값으로 관측되었음을 알 수 있다.

표 8. 붕괴가능도 점수

Variable	Slope height	Slope angle	Weathering	Vegetation	Convex	Seepage	Measure	Capability of collapse	Previous collapse	Total
범위	0.674	0.176	1.230	1.029	0.300	4.089	0.674	3.931	0.599	-
변수별 중요도 점수	5	2	10	8	2	32	5	31	5	100
범주별 기여 점수	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-
	2	2.50	1.00	3.33	4.00	1.00	10.67	2.50	10.33	1.67
	3	5.00	2.00	6.67	8.00	2.00	21.33	5.00	20.67	3.33
	4	-	-	10.00	-	-	32.00	-	31.00	5.00

표 9. 모형의 평가

Collapse probability score	No. of data	Actual values(y)				Collapse probability
		1	5	6	계	
0 ~ 10	20	18	2	0	20	낮음
10 ~ 20	20	16	3	0	20	
20 ~ 30	18	3	13	2	18	
30 ~ 40	8	0	7	1	8	
40 ~ 50	16	0	11	5	16	
50 ~ 60	11	0	8	3	11	
60 ~ 70	1	0	1	0	1	높음
70 ~ 80	1	0	0	1	1	
계	95	37	45	13	95	

6. 결 론

본 연구에서는 일반화선형모형에 기초한 수량화 기법을 이용하여 터널의 갱구사면 안정성에 대한 평가를 수행하였다. 추정된 회귀계수에 기초한 수량화값 범위를 이용하여 각 설명변수의 중요도 점수와 범주별 점수를 부여하였다. 수량화 과정에 사용된 전체 자료에 대해 모형평가를 실시한 결과 구축된 수량화 모형이 정확한 결과를 제공하였다. 다만, 반응변수의 값이 좀 더 세분화되고, 자료의 확보가 충분히 이루어질 경우 보다 나은 안정성 평가의 기준이 마련될 것으로 생각된다. 또한 이상의 통계학적 처

리 과정을 프로그램화하면 국도 유지관리자가 간단한 현황조사를 통하여 터널 갱구사면의 위험도 상태를 평가할 수 있으며, 유지관리에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2005년도 산학연 연구과제인 “시간열화 특성을 고려한 터널갱구사면 안정성 기법 및 상시계측시스템 개발” 과 관련하여 수행되었으며, 이에 협조해주신 분들께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 철도청(2003), 철도설계편람(노반편), 제5편 터널, pp.1~42.
2. 이풍희, 신재상, 김일환, 김우성, 김영근(2003), “도로안전성을 고려한 친환경적 터널 갱문부 설계기준”, 한국터널공학회 터널기술, 제 5권, 제 4호, pp.18~33.
3. 한국시설안전기술공단(2003), “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(절토사면)”, 건설교통부, 제 1권, p.118.
4. 한국건설기술연구원(1999), “도로설계편람(I)”, 건설교통부, 제 1권, pp.600-1~623-5.
5. 유충식, 정영우, 김재훈, 박영진, 유정훈(2004), “GIS기반의 터널 시공에 따른 위험도 평가 시스템 개발 및 적용”, 한국지반공학회논문집 제20권 1호, pp.49~59.
6. 한국건설기술연구원(2002), “도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 IV” 연구보고서, 건설교통부, pp.153~173.