

천단변위의 x-Rs 관리도 분석을 이용한 터널 막장 전방 단층대 예측

윤현석¹ · 서용석^{2*} · 김광염³

¹비회원, 충북대학교 지구환경과학과 박사과정

²정회원, 충북대학교 지구환경과학과 교수

³정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

Prediction of fault zone ahead of tunnel face using x-Rs control chart analysis for crown settlement

Hyun-Seok Yun¹, Yong-Seok Seo^{2*}, Kwang-Yeom Kim³

¹Chungbuk National University, Dept. of Earth and Environmental Sciences, Ph. D Student

²Chungbuk National University, Dept. of Earth and Environmental Sciences, Professor

³Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

ABSTRACT: A measurement of tunnel displacement plays an important role for stability analysis and prediction of possible fault zone ahead of tunnel face. In this study, we evaluated characteristics of tunnel behaviour due to the existence and orientation of fault zone based on 3-dimensional finite element numerical analysis. The crown settlement representing tunnel behaviour is acquired at 5 m away from tunnel face in combination with x-Rs control chart analysis based on statistics for trend line and L/C (longitudinal/crown displacement) ratio in order to propose risk management method for fault zone. As a result, x-Rs control chart analysis can enable to predict fault zone in terms of existence and orientation in tunnelling.

Keywords: x-Rs control chart, Crown settlement, Prediction of fault zone, 3-D finite element numerical analysis

초 록: 터널 변위 계측은 전방의 단층대의 예측과 안정성 해석에서 매우 중요하다. 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통해 터널 단층대의 방향과 존재에 따른 터널의 거동 특성을 평가하였다. 터널의 거동을 대표하는 계측치인 천단변위를 막장면에서 5 m 떨어진 지점에서 평가하였으며, 경향선과 L/C비 (종방향변위/천단변위)를 계산하여 통계적 관리기법인 x-Rs를 적용하여 단층대의 예측방안을 제시하였다. 결과적으로, x-Rs 관리도 기법이 전방 단층대의 존재와 방향을 예측하는데 활용될 수 있음을 확인하였다.

주요어: x-Rs 관리도기법, 천단변위, 단층대 예측, 3D 유한요소해석

1. 서 론

일반적으로 NATM 터널에서 단층 등의 위험지반 분포 시 터널의 안정성 분석을 위해서 설계단계에서의 수치해석적인 방법, 시공단계에서의 굴진면관찰 및 계측이 주로 이루어지고 있다. 특히 시공 중에 이루어지는 계측은 터널 굴착에 따른 지반의 거동을

파악하고 굴진면 전방에 분포하는 단층 등의 위험지반을 예측하여 굴착에 따른 지반의 안정성 확보 및 지보량 산정을 위하여 필수적인 자료로 활용된다.

하지만, 터널공사의 특성상 계측을 통해 획득되는 변위 데이터 중 굴착 직후 발생하는 초기변위를 시간적, 공간적 제약으로 인해 바로 획득할 수 없기 때문에 계측 자료를 이용하여 주변 지반의 거동 및 굴진면 전방에 분포하는 단층대 등의 위험지반 규모를 예측하는 것은 용이한 일이 아니다. 이러한 이유로 많은 연구자들이 터널의 변위를 이용하여 굴진면 전방에

*Corresponding author: Yong-Seok Seo
E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

Received June 30, 2014; Revised July 11, 2014;
Accepted July 16, 2014

분포하는 지반상태를 예측하기 위해 연구를 수행하고 있다.

Schubert & Vavrovsky (1994)는 경향선(trendline)과 영향선(influence line)을 이용하여 3차원으로 계측된 내공변위에 대한 연구를 수행한 바 있으며, Steindorfer (1998)는 터널의 반경방향 변위와 진행방향 변위의 비인 벡터방향성(vector orientation)의 변화 추이를 분석하여 전방의 지반조건에 따라 터널 주변의 지반거동이 달라지는 것을 3차원 수치해석을 통해 분석하였다. 또한 Panet & Guenot (1982)과 Sulem et al. (1987)은 탄소성 변형에서의 변위 함수 회귀식을 분수함수 형태로 제안한 바 있다. 국내에서도 NATM 터널에서의 3차원 수치해석 및 계측을 통해 획득한 내공변위의 경향선과 영향선 등을 분석하여 굴진면 전방의 파쇄대를 예측하는 연구(Lee et al., 1998)가 수행되었으며, Park et al. (2004)은 천단변위의 평균값을 이용한 C/C_0 비를 분석하여 연약대를 예측하였다. 또한, Kim et al. (2004)은 변위함수 회귀식에서의 function parameter를 이용하여 굴진면 전방에 연약대를 예측하였으며, Kim et al. (2010)은 변위벡터 방향성을 이용하는 연구를 수행한 바 있다.

이와 같이 연약대 예측을 위해 터널의 내공변위를 이용한 많은 연구가 수행되어 왔지만, 시공 시 획득되는 방대한 양의 계측변위 데이터를 분석하는 데 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 현장에서 발생하는 변위의 변화 추이를 파악하는 것은 어려운 과정이다. 이러한 이유로 Yim & Seo (2009)는 터널에서의 이상 징후 판정을 위해 응용 통계기법의 일종인 x-MR 관리도 기법을 적용하여 계측 데이터의 변화양상을 분석하는 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 터널굴착 시 굴착단계별로 축적되는 계측데이터를 활용하여 그 변화양상을 객관적으로 분석함으로써 굴진면 전방의 위험지반을 예측할 수 있도록 계측데이터의 x-Rs 통계관리도를 작성하여 계측데이터를 분석하고 관리한계선을 적용하는 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해 터널 굴착 시 위험지반

의 일종인 단층대를 포함하는 지반을 모델링하여 3차원 수치해석을 수행하였으며, 단층의 기하학적 차이에 따른 천단변위를 분석하였다. 또한 획득된 천단변위를 이용하여 통계관리도 기법의 일종인 x-Rs 관리도를 작성하고 관리한계선을 적용하여 굴진면 전방에 단층대가 분포할 경우의 이상거동에 대해 분석하였다.

2. x-Rs 관리도 이론

관리도는 Shewhart (1924)에 의해 최초로 제안된 이론으로 반복적인 공정에서 획득한 데이터의 변동에서 이상상태를 확인하는데 유용한 통계적 공정관리의 분석기법 중 하나이다. 즉, 이상징후로 인한 산포를 구분할 수 있도록 통계적인 관리한계선을 결정하여 이를 벗어날 때 검출할 수 있는 기준을 제시한다. 관리도는 관리하고자 하는 데이터 계열의 개수에 따라 크게 단변량 관리도와 다변량 관리도로 구분된다. 데이터 계열이 하나인 경우에는 단변량 관리도를 사용하며, 다변량 관리도는 다수의 데이터 계열을 관리하기 위해 사용하는 방법이다. 특히, x관리도는 단변량 관리도 중 많이 이용되고 있는 방법으로 측정값을 합리적인 군으로 나눌 수 없는 경우, Rs 관리도와 병행하여 함께 사용한다. 이것이 x-Rs 관리도이며, 개별(x) 관리도와 이동범위(Rs) 관리도를 병합하여 분석하는 방법이다. 개별(x) 관리도는 한 개의 타점을 하나의 측정값으로부터 얻어서 분석하는 방법이고, Rs 관리도는 인접한 관측값의 차이를 분석하는 방법이다. 즉, 1회에 1개 자료밖에 얻을 수 없거나 자료의 발생간격이 긴 공정관리에 이용되는 방법으로 터널에서 1회 계측마다 1개의 계측 결과가 산출되는 점을 감안한다면 본 연구에서는 x-Rs 관리도를 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

x-Rs 관리도 분석을 위해서는 우선 측정값(x)에 대하여 관리한계선(control limit)을 설정해야 한다. 관리한계선은 측정값의 평균값과 표준편차에 의해 산정되며, 관리상한선(upper control limit, UCL)과

관리하한선(lower control limit, LCL)으로 구분된다. 각각의 데이터 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 을 얻었다면, x 관리도의 관리한계선은 식 (1)과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} UCL &= \mu + 3\sigma \\ LCL &= \mu - 3\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 μ 와 σ 은 각각 측정값(x)의 평균치와 표준편차로 식 (2)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu &= \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \\ \sigma &= \frac{\bar{R}}{d_2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, n : 측정값(x)의 전체수

R : 범위내 측정값(x)의 차이

d_2 : 관리도용 계수

x 관리도에서는 각각의 측정값으로부터 범위를 계산할 수 없으므로 인접한 두 측정값 사이의 차이 이동 범위(Rs)를 사용한다. Rs의 일반식은 식 (3)과 같다.

$$Rs = |x_i - x_{i+1}| \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n-1) \quad (3)$$

또한, 이동 범위의 수는 $n-1$ 이 되므로 평균 \bar{R} 은 식 (4)로 표현될 수 있다.

$$\bar{R} = \frac{\sum Rs}{n-1} \quad (4)$$

식 (2)에서 관리도용 계수 d_2 는 Table 1의 관리도용 계수표에서 확인할 수 있으며, 본 연구에서 이동범위 Rs를 구하기 위해 사용된 측정값은 2개이므로 $d_2 = 1.128$ 이다. 따라서, x 관리도의 관리한계선은 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (5)와 같이 요약된다.

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{x} + 3\left(\frac{\bar{Rs}}{d_2}\right) = \bar{x} + \frac{3\bar{Rs}}{1.128} = \bar{x} + 2.66\bar{Rs} \\ LCL &= \bar{x} - 3\left(\frac{\bar{Rs}}{d_2}\right) = \bar{x} - \frac{3\bar{Rs}}{1.128} = \bar{x} - 2.66\bar{Rs} \end{aligned} \quad (5)$$

x 관리도의 관리한계선을 설정하였다면, Rs 관리도의 관리한계선도 설정하여야 한다. Rs 관리도의 관리한계선은 식 (6)으로부터 구할 수 있으며, 본 연구에서 Rs를 구하기 위해 사용된 측정값은 2개이므로 Rs 관리도의 관리상한선의 경우 사용되는 계수 D_4 는 Table 1에서 3.267이며, 관리하한선의 계수 D_3 는 음(-)의 값이 산출되므로 인접한 두 측정값의 차의 절대값을 나타내는 Rs 관리도에서 고려하지 않는다. Rs 관리도의 관리한계선은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} UCL &= \left(1 + 3\frac{d_3}{d_2}\right)\bar{Rs} = D_4\bar{Rs} = 3.267\bar{Rs} \\ LCL &= \left(1 - 3\frac{d_3}{d_2}\right)\bar{Rs} = D_3\bar{Rs} = \text{고려하지 않음.} \end{aligned} \quad (6)$$

본 연구에서 x-Rs 관리도를 적용하는 목적은 각 지점에서 측정된 변위 변동의 이상지점을 찾아 굴진면 전방에 분포하는 단층대를 예측하기 위함이다. 따라서, 관리도에 적용할 측정값(x)은 수치해석을 통해

Table 1. Coefficients for control limit

Size of group	D_3	D_4	d_2	d_3
2	-	3.267	1.128	0.853
3	-	2.575	1.693	0.888
4	-	2.282	2.059	0.880
5	-	2.114	2.326	0.864

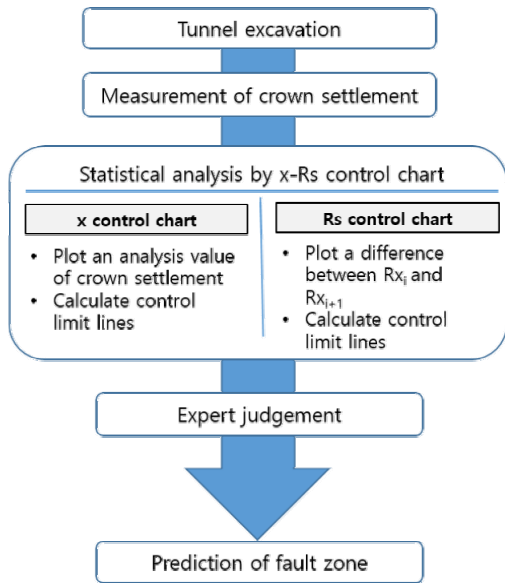


Fig. 1. Flow chart showing a process of prediction of fault zone using measured crown settlements in tunneling

획득한 각 지점별 천단변위 분석값이 된다. 굴착으로부터 계속되는 천단변위 측정치로부터 x-Rs 관리도 분석을 수행하여 굴진면 전방의 단층대를 예측하기까지의 과정은 Fig. 1과 같다.

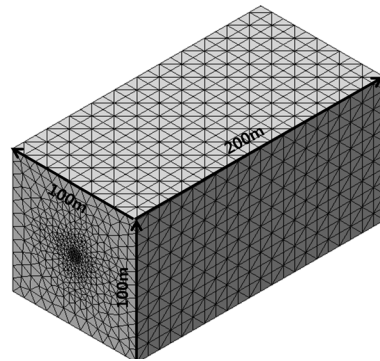


Fig. 2. 3D FEM model for numerical analysis

3. 수치해석

3.1 해석모델

본 연구에서는 터널의 굴착에 따른 3차원 거동 특성을 분석하기 위해 유한요소해석 프로그램인 MIDAS GTS/NX를 이용하였으며, 직경 10 m인 원형터널 형상을 모델링하여 등방성 지반을 가정하여 탄성 해석을 실시하였다. 터널의 굴진장은 5 m로 천단면 굴착을

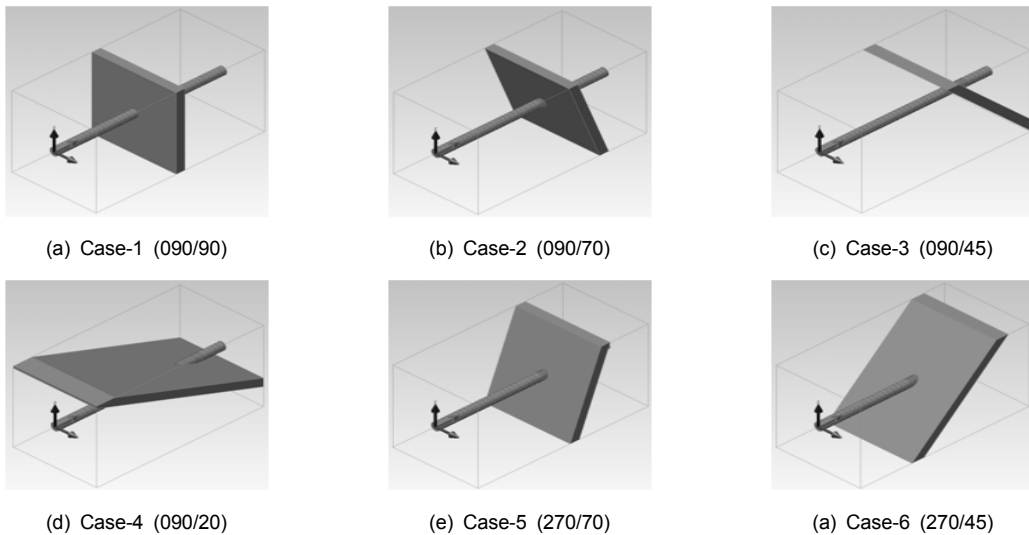


Fig. 3. Analysis cases based on the orientation of fault to tunnel. Figures in parentheses indicate dip direction and dip of fault respectively.

수행하였으며, 단층의 형상에 따른 변위분포 특성을 알아보기 위해 축압계수는 1.0으로 고정하고, 지보재의 영향은 고려하지 않았다. 또한 굴착에 의한 경계조건을 고려하여 측면 및 하부 경계는 터널 직경의 5배로 설정하였으며, 상부 지표면은 자유경계조건, 측면과 하부 경계는 각각의 면에 수직 방향으로 작용하는 변위를 구속하였다(Fig. 2). 단층을 포함하는 해석모형을 구성함에 있어 단층의 방향은 터널의 굴착 방향(Trend 090도)과 수직, 폭은 10 m로 고정, 단층의

경사방향과 경사는 6가지로 달리하여 해석을 수행하였다. Fig. 3은 수치해석에 적용된 단층의 형상에 따른 해석 모델을 나타낸 것이다.

3.2 지반정수 산정

수치해석에 사용된 지반정수는 탄성계수, 포아송비, 단위중량이다. 본 연구에서는 국내 10개 터널 현장에 적용된 지반정수값과 Yim et al. (2009)의 역해석을

Table 2. Representative physical and mechanical properties of rock mass rated RMR III for 11 data in Korea and their median values.

Location	Rock mass class	Elastic modulus (MPa)	Poisson's ratio (ν)	Unit weight (kN/m ³)
Yongin (Gneiss)		5,000	0.22	26.2
Ulsan (Granite)		5,000	0.25	24.5
Hongcheon (Granite)		7,000	0.25	24.5
Samcheok (Limestone)		7,000	0.25	24.5
Samcheok (Granite)		7,000	0.25	24.5
Gyeongju (Granite)		5,000	0.23	24.5
Gyeongju (Shale)		4,000	0.24	24.5
Asan (Gneiss)		5,000	0.25	24.5
Cheonan (Granite)		5,000	0.25	24.5
Seoul (Gneiss)		7,000	0.25	25.0
Yim et al. (2009, Sedimentary rock)		408	0.24	24.4
Median		5,000	0.25	24.5

Table 3. Fault properties derived from previous studies

Property	Dalg ν (2003)		Lee & Lee (2009)		Lee (2014)	
	Fault zone		Fault gouge ~ Altered zone		Fault core zone	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Elastic modulus (MPa)	130	640	70	110	50	250
Poisson's ratio (ν)	-	-	0.265	0.28	0.25	0.30
Unit weight (kN/m ³)	-	-	19.0	20.0	10.0	19.0

Table 4. Input parameters for 3-D numerical analysis in this study

Input parameter	Rock mass	Fault zone
		MC=100
Elastic modulus (MPa)	5,000	50
Poisson's ratio (ν)	0.25	0.32
Unit weight (kN/m ³)	24.5	19.0

통해 얻은 결과의 중위값을 이용하였다. 중위값은 각각의 값을 크기 순서로 나열했을 경우 가장 중앙에 위치하는 값을 말한다. 본 연구는 굴진면 전방에 위치하는 단층의 형상에 따른 변위분포 특성을 평가함이 목적이기 때문에 수치해석시 III등급 지반의 물성을 적용하였으며, 지역별로 획득된 지반정수는 Table 2와 같다. 단층의 지반정수는 원지반과 단층의 물성비인 MC (modulus contrast)를 100으로 설정하여 산출하였으며, 이는 Dalgıç (2003), Lee & Lee (2009), Lee (2014) 등의 연구에서 인용 또는 획득한 단층대에서의 지반정수와 근사치 내지 범위 안에 분포한다 (Table 3). 수치해석에 적용된 지반정수를 정리하면 Table 4와 같다.

4. 터널 천단변위 분석

4.1 경향선(trend line) 분석

터널의 천단변위를 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정한 변위를 하나의 선으로 연결한 것을 영향선(influence line)이라 정의하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(trend line)이라고 정의한다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 영향선과 경향선을 이용하면 굴진면 전방

의 단층대에 대한 예측이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 3차원 수치해석을 통해 획득한 굴착에 따른 천단 변위를 통해 굴진면에서 5 m 이격된 지점에서의 경향선을 분석하였다.

Fig. 5는 각 단층모델별로 굴진면에서 5 m 이격된 지점에서의 천단변위 경향선을 나타낸 것이다. Case-1의 경우 일정한 변위를 유지하다 단층대로부터 약 10 m 전부터 변위가 지속적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 단층의 경사가 터널의 굴착방향(Trend 090)과 동일한 모델 Case-2,3,4의 경우는 단층대로부터 약 5 m 전에 변위의 증가가 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 또한, 단층의 경사가 작아질수록 천단변위량이 전반적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며, 이는 단층대 출현 전에 터널 상부에 단층이 위치하고 있기 때문에 천단부와 거리가 가까운 낮은 경사의 단층대일수록 변위량이 많아지는 것으로 분석된다.

이와는 달리 굴진면 쪽 경사방향을 가진 단층모델인 Case-5는 단층대로부터 약 10 m를 전후하여 변위의 변화가 일어나고 있지만, 변위의 변화폭이 크지 않고, 이전에 나타난 변위량의 범위 내에 있어 단층대에 대한 예측이 쉽지 않은 것을 확인할 수 있다. Case-6의 경우도 변위가 단층대에 접근할수록 지속적으로 감소하다가 약 5 m전에 변위의 증가가 일어나기 시작하지만, Case-5의 경우와 마찬가지로 단층대 예측이

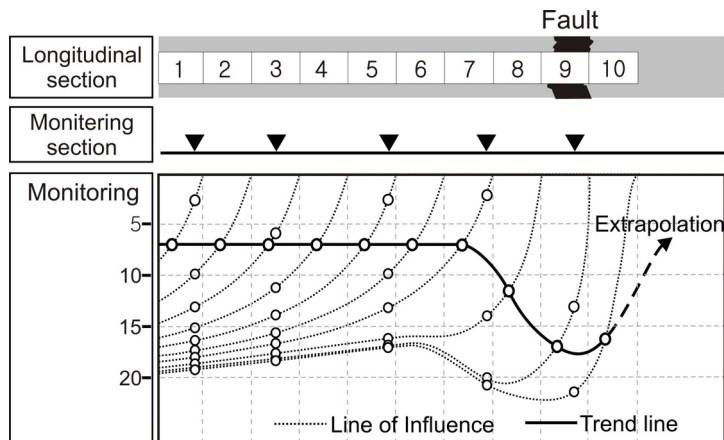


Fig. 4. The change of influence and trend line when a tunnel face approaches a fault zone (modified after Steindorfer, 1998)

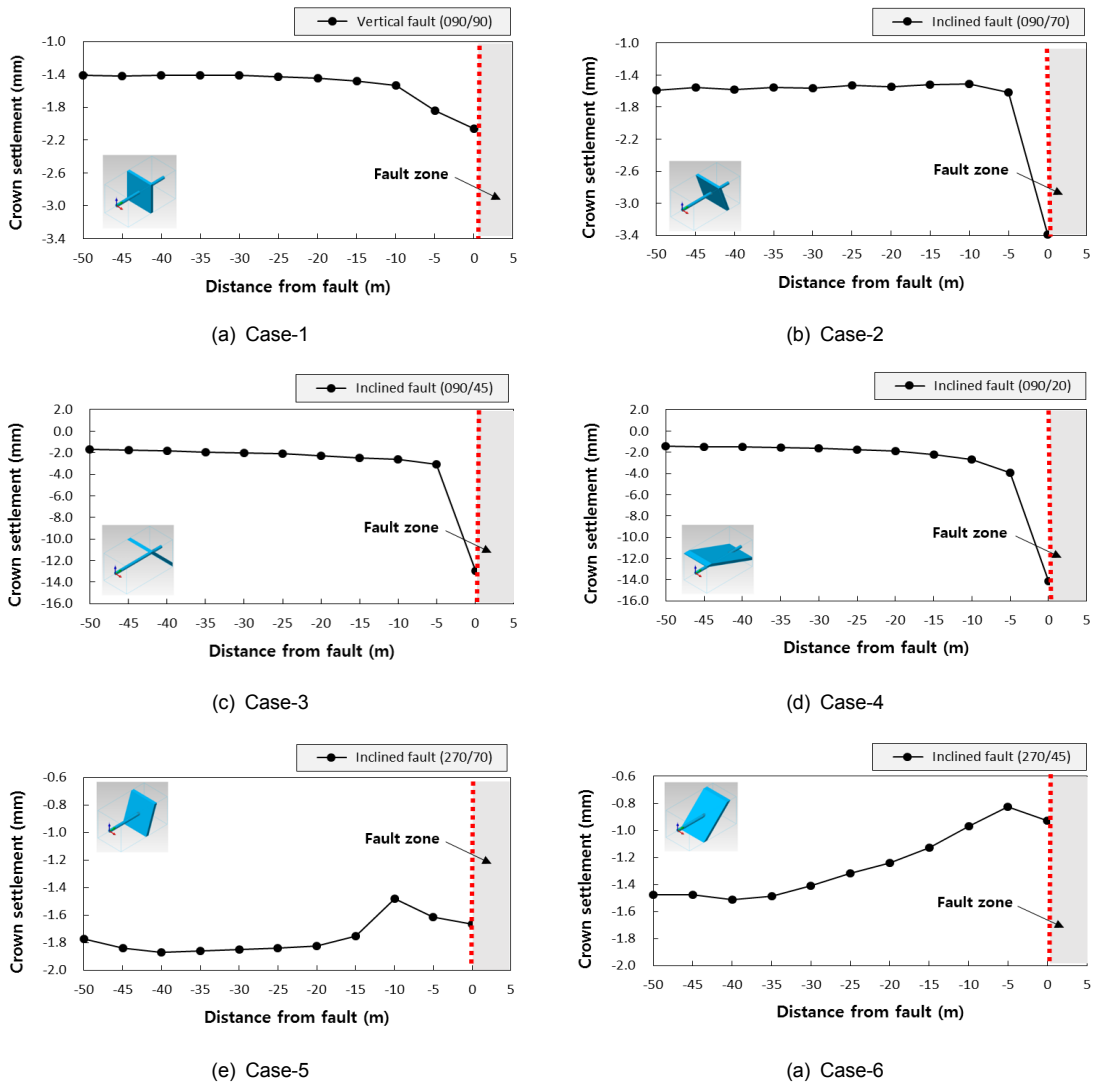


Fig. 5. Trend lines of crown settlement at 5m behind the tunnel face

가능할 정도의 변화폭은 아니다. 이는 단층대의 기하 구조에 기인한 것으로 터널이 굴착해 오는 반대방향으로 단층이 위치하고 있기 때문에 굴진면에서 5 m 이격된 지점에서 측정된 천단변위로는 감지가 어렵다는 것을 보여주고 있다.

4.2 종방향 변위/천단변위의 비(L/C) 분석

굴진면 전방에 단층대가 존재하면 굴착 시 아칭효

과가 제대로 이루어지지 않아 굴진면으로 응력이 집중되어 천단부의 종방향 변위가 증가하게 된다. Schubert and Steindorfer (1996)은 이를 이용하여 천단변위 측정 결과로부터 단층대를 예측하는 방법을 제시하였다.

터널 천단부에서의 종방향 변위를 L이라 하고, 천단변위를 C라 할 때, 단층대가 굴진면 전방에 위치하면 L의 값이 C값에 비해 증가하므로 L과 C의 비를 이용하여 굴진면 전방의 단층대를 예측할 수 있다(Fig

6). 따라서 3차원 수치해석을 통해 획득한 굴착에 따른 변위를 통해 굴진면에서 5 m 이격된 지점에서의 종방향 변위(L)와 천단변위(C)를 분석하여 단층대에 접근할수록 L/C비의 변화를 분석하였다.

Fig. 7은 모델별로 계산된 단층대로부터의 거리에 따른 L/C비의 변화양상을 보여주고 있다. Case-1은 L/C비가 약 -0.03정도로 일정한 값을 유지하다가 단층대로부터 약 15 m 되는 지점에서 양(+)의 값으로 변하면서 약 10 m 지점에서 기울기가 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 앞서 분석된 경향선의 결과와 일치하는 것으로 Case-1의 경우는 경향선과 L/C비 분석에서 단층대에 대한 예측이 비교적 잘 나타나고 있다. Case-2의 경우도 경향선 분석과 동일하게 단층

대로부터 약 5 m 이격된 지점에서 기울기의 변화를 나타내어 단층대의 예측이 가능하였다. 그러나 Case-3의 경우는 L/C비가 지속적으로 증가하다 10 m 이격된 지점에서 감소하는 양상을 보이지만, 이전에 나타난 L/C비 범위 내에 점사되고 있어 단층대를 예측하는 것이 쉽지 않다. Case-4의 경우도 단층대에 접근할수록 L/C비가 일정하게 증가하다가 단층대 약 5 m 전에서 기울기가 급격히 감소하는 양상을 보이지만, 20 m 전에서의 값들과 큰 차이가 없어 판단에 어려움이 따른다. 따라서 경사방향이 굴착 진행방향이면서 저각인 단층(Case-3과 4)의 경우 경향선 분석이 L/C비 분석보다 단층대 예측에 더 효과적이라 할 수 있다.

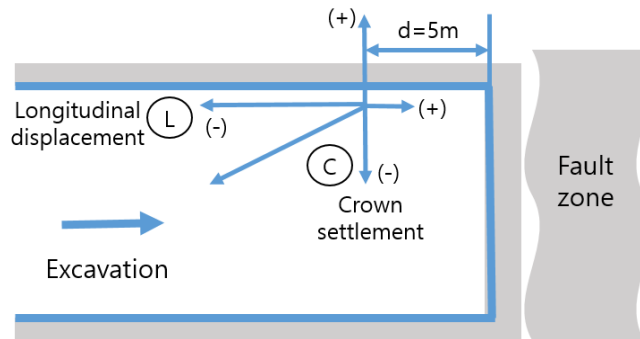


Fig. 6. Schematic of longitudinal displacement, crown settlement and L/C ratio at 5 m behind tunnel face

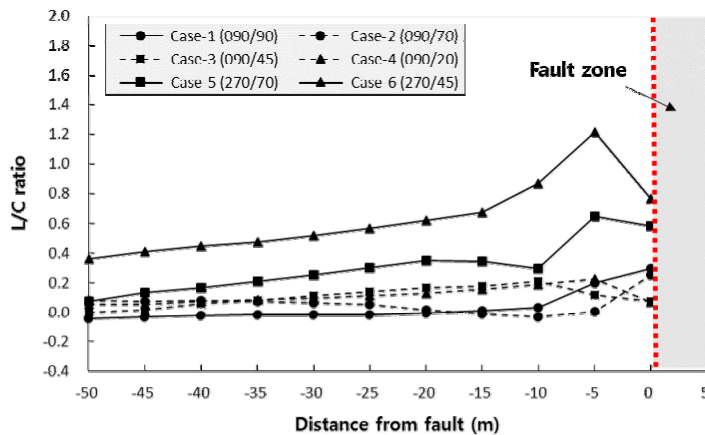


Fig. 7. L/C ratios calculated at 5 m behind tunnel face for each cases

반면, Case-5와 Case-6의 경우는 경향선 분석과 반대로 단층대 약 10 m 전에서 L/C비가 급격히 증가하여 단층대 예측이 가능한 것으로 나타났다. 이는 터널 굴착 진행방향으로 단층이 경사하고 있는 기하학적 구조로 인하여 천단변위 경향선 분석에서는 잘 파악되지 않았던 단층대 예측이 L/C비를 이용하면 가능함을 보여주고 있다.

4.3 x-Rs 관리도 분석

굴진면 5 m 이전 구간에서의 경향선과 L/C비를 분석한 결과, 대부분 단층대에 근접(5~10 m, 단층대 폭의 0.5~1.0D)해서 변위의 변화가 시작되었으나, 실제 현장에서 계측을 통한 천단침하 분석 시 경향선과 L/C비의 변화를 통해 이상징후를 바로 판단하여 단층대를 예측하는 것은 쉽지 않다. 앞에서 언급한 해석결과에 의하면 Case-1과 Case-2를 제외하고 대부분의 모델에서 각각 다른 결과가 나타나 단층대 예측에 대한 판단이 쉽지 않았다. 또한, 변위 발생 양상이 급격히 변화하는 징후가 나타나는 경우라도 이전에 측정된 변위값의 범위 내에 분포하고 있어 단층대를 판단하는데 어려움이 따른다. 따라서 변위변동에 대한 이상상태를 보다 명확히 확인하여 단층대 예측에 대한 판단을 돕기 위해 앞서 분석된 경향선과 L/C비의 결과를 바탕으로 x-Rs 관리도 분석을 수행하였다. x-Rs 관리도 분석을 위해 이용된 측정값(x)은 경향선

의 경우 굴진면에서 5 m 이격된 지점에서의 천단변위가 되며, L/C비의 경우 측정값(x)은 L/C비 값이 된다. 이 값을 바탕으로 x 관리도와 Rs 관리도의 관리한계선을 결정할 수 있다. 관리한계선 설정에 필요한 측정값(x)의 평균치(\bar{x})와 관리한계선 값은 각 모델별로 Table 5에 나타나 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 굴진면 5 m 이전에서의 천단변위에 대한 경향선과 L/C비를 이용하여 분석한 x-Rs 관리도이다. 각각의 모델별로 상단의 그래프가 x 관리도이며, 하단의 그래프는 Rs 관리도이다. 단층대의 형상으로 인해 경향선에서 이상 유무의 파악이 불분명했던 Case-5의 경우 x-Rs 관리도 분석결과, 단층대로부터 약 10 m 이전에 관리한계선 범위를 벗어나 이상징후를 판단할 수 있으며, Case-6의 경우 Rs 관리도에서는 파악되지 않으나, x 관리도에서 약 10 m 이전에 관리한계선을 넘어 예측 가능한 결과를 보여주고 있다(Fig. 8). 또한 L/C비에서 예측이 불분명했던 Case-3의 경우 역시 Rs 관리도에서는 관리한계선 범위에 분포하여 파악되지 않으나, x 관리도에서는 약 10 m 이전에 관리상한선을 벗어나는 결과를 보여주고 있다(Fig. 9). 또한 Case-4의 경우도 L/C비 분석에서 기울기가 단층대 약 5 m 전에서 급격히 감소하였으나, 이전의 값 범위 내에 분포하고 있어 판단이 어려웠다. 하지만 x-Rs 관리도 분석을 통해 관리한계선 범위 밖에 분포하는 것이 확인되어 예측이 가능하다.

상기 결과에 의하면 수직단층 및 굴진 방향으로

Table 5. Averages and control limit values for each model using x-Rs control charts

Case	Trend line of crown settlement					L/C ratio				
	x control chart(mm)			Rs control chart		x control chart			Rs control chart	
	\bar{x}	UCL	LCL	\bar{R}_s	UCL	\bar{x}	UCL	LCL	\bar{R}_s	UCL
Case-1	-1.53	-1.35	-1.71	0.07	0.22	0.03	0.12	-0.06	0.03	0.11
Case-2	-1.72	-1.17	-2.27	0.21	0.67	0.06	0.17	-0.05	0.04	0.14
Case-3	-3.15	-0.15	-6.15	1.13	3.69	0.10	0.19	0.01	0.03	0.11
Case-4	-3.12	0.26	-6.50	1.27	4.15	0.11	0.20	0.02	0.03	0.11
Case-5	-1.76	-1.58	-1.94	0.07	0.22	0.30	0.50	0.10	0.08	0.25
Case-6	-1.25	-1.03	-1.47	0.08	0.27	0.63	0.97	0.28	0.13	0.43

경사하는 고각 단층의 경우는 천단침하의 경향선 및 L/C비 분석만으로 단층대 예측이 가능하나, 굴착진행 방향으로 경사하는 저각단층과 굴착진행 반대방향의 경우에는 x-Rs 관리도 분석을 통하여 관리한계선을 설정함으로써 단층대를 명확히 예측할 수 있다.

5. 결론

현장에서의 계측은 굴착 후 초기에 집중적으로 수행되며, 시간이 경과할수록 변위가 수렴되기 때문에 계측횟수를 줄여 나간다. 또한, 터널공사의 특성상

현장에서 계측기 설치 이전에 발생한 선행변위를 파악하는 것이 어렵기 때문에 측정된 변위의 변화폭이 미세하게 변화하는 경우 단층대의 예측이 어렵다. 따라서 x-Rs 관리도 분석을 통하여 관리한계선을 명확히 함으로써 계측자료를 이용하여 굴진면 전방에 분포하는 단층대 등과 같은 위험지반의 분포 예측을 효과적으로 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 굴진면 굴착 후 일정한 시간과 거리를 유지하면서 측정된 양질의 계측자료와 실시간 계측 등을 통해 많은 양의 자료를 확보한다면 보다 명확한 분석이 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.

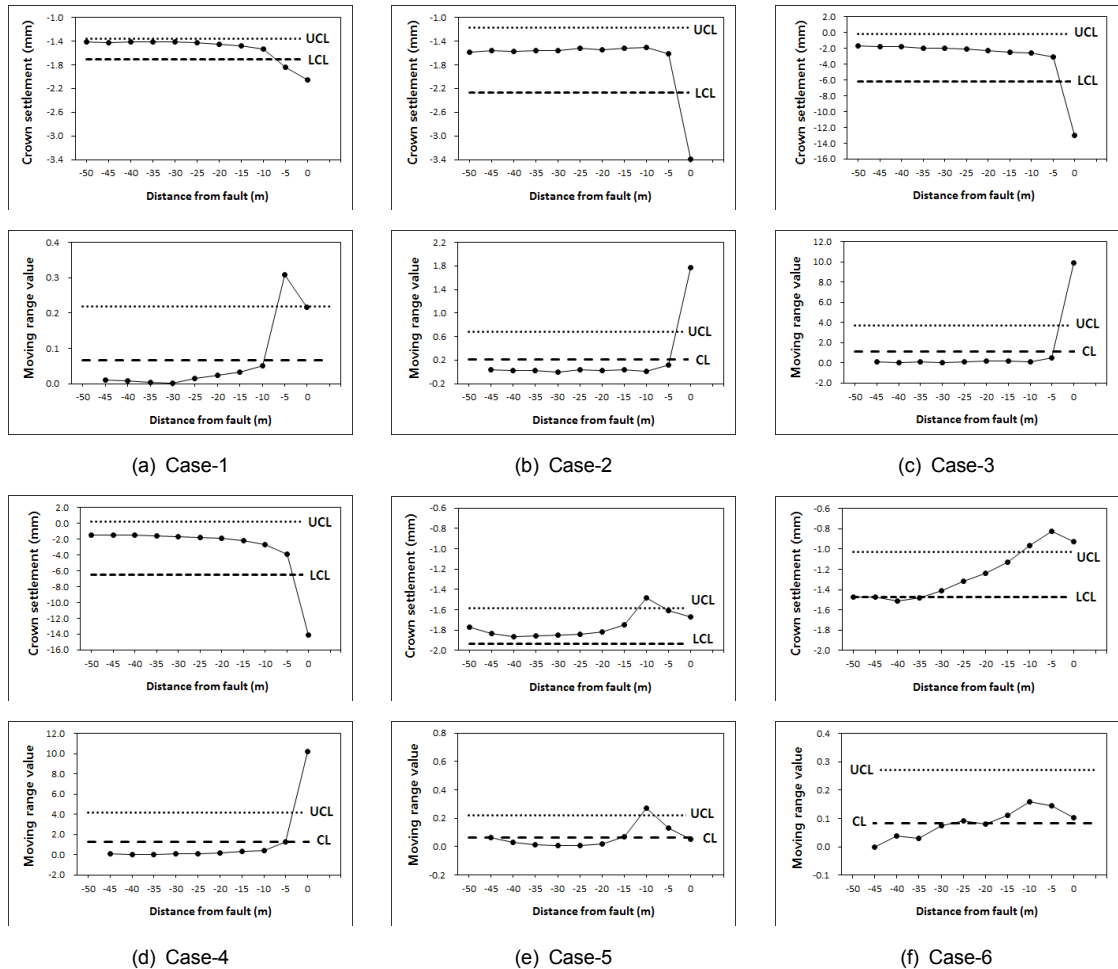


Fig. 8. x-Rs control charts for trend line of crown settlement (CL means center line)

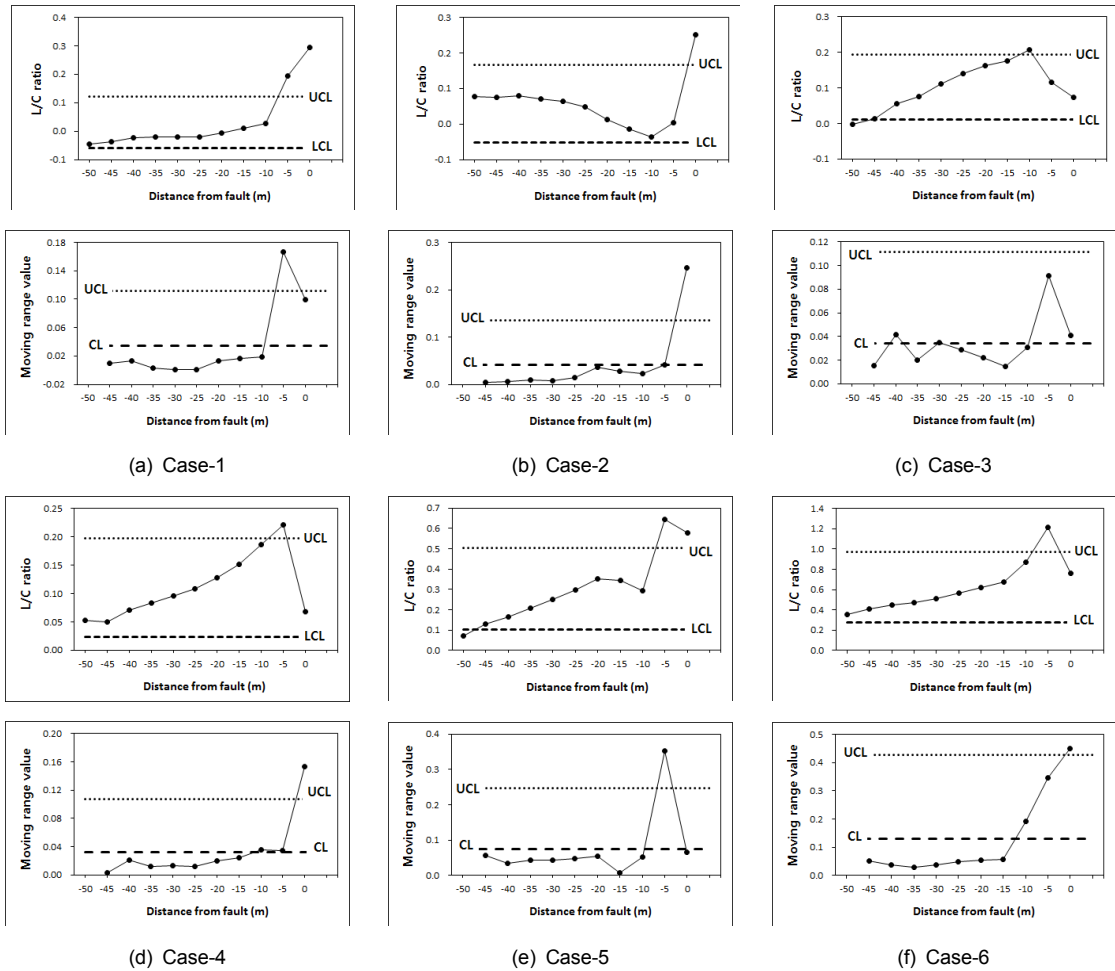


Fig. 9. x-Rs control charts for trend line of L/C ratio

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구 사업 13건설연구S03 “터널시공 중 디지털 맵핑을 통한 온라인 암관정 기술 및 운영모델 개발” 과제의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

1. Dalgıç, S. (2003), “Tunneling in fault zones, tuzla tunnel, turkey”, Tunnelling and Underground Space

Technology, Vol. 18, No. 5, pp. 453-465.
 2. Kim, C.Y., Hong, S.W., Kim, K.Y., Baek, S.H. (2004), “A study on interpretations of tunnel convergence function parameters”, Tunnelling Technology, Korean Tunnelling Association, Vol. 6, No. 3, pp. 183-197.
 3. Kim, K.Y., Yim, S.B., Kim, J.K., Seo, Y.S., Kim, J.W. (2010), “Prediction of a fault zone ahead of a tunnel face based on the orientation of displacement vectors”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 20, No. 4, pp. 371-380.
 4. Lee, C.K. (2014), “Correlation analysis of rock

- properties and hazard distribution using 3D FEM FEM strike-slip fault model”, Master’s thesis of Chungbuk National University, pp. 17-19.
5. Lee, C.S., Lee, H.M. (2009), “Hydrothermal alteration and engineering characteristics in the bokan tunnel area passing through the YangSan fault”, Jour. Geol. Soc. Korea, Vol. 22, No. 1, pp. 13-22.
 6. Lee, I.M., Kang, G.D., Park, K.J. (1998), “Prediction of ground-condition ahead of the tunnel face by using 3-dimensional absolute displacements”, The Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 14, No. 4, pp. 17-31.
 7. Panet, M., Guenet, A. (1982), “Analysis of convergence behind the face of a tunnel, Tunnelling 1982”, The Institution of Mining and Metallurgy, pp. 197-204.
 8. Park, Y.J., You, K.H., Song, H.S., Kim, K.S., Lee, D.H. (2004), “The prediction of ground condition ahead of the tunnel face using 3-dimensional numerical analysis”, Tunnel & Underground Space, Journal of Korean Society for Rock Mechanics, Vol. 14, No. 6, pp. 440-449.
 9. Schubert, W., Steindorfer, A. (1996), “Selective displacement monitoring during tunnel excavation”, Felsbau, Vol. 14, No. 2, pp. 93-98.
 10. Schubert, W., Vavrovsky, G.M. (1994), “Interpretation of monitoring results”, World Tunnelling and subsurface excavation, Vol. 7, No. 8, pp. 351-356.
 11. Shewhart, W.A. (1924), “Some applications of statistical methods to the analysis of physical and engineering data”, Bell System Technical journal, Vol. 3, No. 1, pp. 43-87
 12. Steindorfer, A. (1998), “Short term prediction of rock mass behaviour in tunnelling by advanced analysis of displacement monitoring data”, Doctoral Thesis at Institute for Rock Mechanics and Tunnelling, Techn. Univ. Graz, Austria.
 13. Sulem, J., Panet, M., Guenet, A. (1987), “An analytical solution for time-dependent displacement in a circular tunnel”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol. 24, No. 3, pp. 155-164.
 14. Yim, S.B., Jeong, H.G., Seo, Y.S. (2009), “Assessment of tunnel displacement with weak zone orientation using 3-D numerical analysis”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 19, No. 1, pp. 43-50.
 15. Yim, S.B., Seo, Y.S. (2009), “A new method for the analysis of measured displacements during tunnelling using control charts”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 19, No. 3, pp. 261-268.