

터널 시공 중 이상 거동 예측을 위한 계측 변위의 x-MR 관리도 활용

윤현석¹ · 송규진² · 신영완³ · 김창용⁴ · 추석연⁵ · 서용석^{6*}

¹정회원, 충북대학교 지구환경과학과 박사과정

²비회원, 충북대학교 지구환경과학과 석사과정

³정회원, 하경엔지니어링 사장

⁴정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 연구위원

⁵정회원, ㈜단우기술단 대표이사

⁶정회원, 충북대학교 지구환경과학과 교수

Application of x-MR control chart on monitoring displacement for prediction of abnormal ground behaviour in tunnelling

Hyun-Seok Yun¹, Gyu-Jin Song², Young-Wan Shin³, Chang-Yong Kim⁴, Seok-Yeon Choo⁵, Yong-Seok Seo^{6*}

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

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

³Hakyong Engineering, President

⁴Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

⁵Danwoo E&C, President

⁶Chungbuk National University, Dept. of Earth and Environmental Sciences, Professor

ABSTRACT: The displacement data monitored during tunnel construction play a crucial role in predicting the behaviour of ground around and ahead of excavation face. However, the management criteria for monitoring data are not well established especially for the reliable analysis on varying aspect of displacement data along with chainage. In this study, we evaluated the applicability of x-MR control chart method, which is kind of applied statistical management method, for the analysis of displacement monitoring data in terms of prediction of possible collapse or induced cracks. As a result, a possible abnormal behaviour could be predicted beforehand at 5~13 m ahead or on at least one day before it occurred by using x-MR control chart method. In addition, it is noted that the moving range for the x-MR control chart should be set to 5~10 for this purpose.

Keywords: Measurement, Control criteria, Abnormal behavior, x-MR control chart, Control limit, Displacement

초 록: 터널 시공 중 측정된 계측 데이터는 굴진면 전방에 분포하는 지반과 터널 거동을 예측하는데 있어 중요한 요소이다. 그러나 현장에서 측정된 계측 데이터의 변동성을 객관적으로 분석할 수 있는 관리 기준이 명확하게 설정되어 있지 않다. 본 연구에서는 응용 통계 관리기법의 일종인 x-MR 관리도기법을 이용하여 시공 중 붕괴 또는 구조물 균열 등을 발생시키는 현장의 계측 데이터를 분석하고 분석기법의 적용성을 검토하였다. x-MR 관리도를 통해 관리 한계선을 설정하여 분석한 결과, 붕괴 발생 전 약 5~13 m 이전에 이상 거동에 대한 예측이 가능하였으며, 시간에 따른 변위의 분석 결과, 최소 1일 전에 예측이 가능하였다. 또한, x-MR 관리도 작성시 이동 범위(k)는 5~10으로 설정하는 것이 이상 거동 예측에 적절한 것으로 판단된다.

주요어: 계측, 관리 기준, 이상 거동, x-MR 관리도, 관리한계선, 변위

*Corresponding author: Yong-Seok Seo

E-mail: ysseo@cbu.ac.kr

Received August 22, 2014; Revised September 12, 2014;

Accepted September 15, 2014

Copyright ©2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

터널 굴착중 구조물의 상태 및 안정성을 확인하는 방법에는 해석(역해석)적 방법과 지반정보, 지보정보, 굴착방법 등과 같은 시공실적과 시공 중 획득하는 계측데이터를 활용하여 변위의 절대치와 속도 등을 파악하는 방법이 있다(The Japanese Geotechnical Society, 1999). 굴착 중 측정된 계측 변위에 대한 분석은 전문가의 경험과 분석 등을 통해 종합적으로 이루어지지만, 정량적인 판단 기준을 제시하는 데 한계가 있다. 특히 동일한 시공 현장이라도 터널 내 분포하는 지반의 공학적 특성은 구간별로 다양하며, 각 구간별 설치되는 지보재의 종류 및 보강범위가 다르기 때문에 계측 시 발생하는 변위의 크기도 달라진다. 또한 굴착이 진행됨에 따라 획득되는 변위의 변동이 미세하거나 점진적으로 발생하는 경우 지반의 이상 거동에 대한 예측에 실패하여 사고로 이어지는 경우가 있다. 이러한 이유로 Kim (2008)은 터널 시공 중 획득한 굴진면의 RMR과 내공변위 계측 결과를 비교하여 지질 상태의 변화가 터널의 거동에 미치는 영향을 분석하였으며, Park et al. (2008)은 시공 중 획득한 내공변위와 천단침하를 분석하여 한계변형률 개념을 이용한 터널의 안정성 평가 방법을 제시하였다. 또한, Yim and Seo (2009)는 관리도 기법을 통해 굴착 후 측정된 변위의 수렴 여부를 판단하여 터널의 안정화 시점을 결정하는 연구를 수행하였고, Yim et al. (2010)은 RMR 인자에 대해 관리도 기법을 적용함으로써 굴진면 전방의 단층대를 예측하는 방법에 대해 분석한 바 있으며, Yun et al. (2014)은 수치해석을 통해 굴진면 전방에 분포하는 단층대 예측을 위해 x-Rs 관리도 기법을 이용한 방안을 제시한 바 있다. 터널 구조물 이외에도 계측 변위에 대한 분석을 위해 Kwon et al. (2008)은 통계관리 이론을 적용하여 비탈면에서의 계측데이터 분석 시스템을 발표한 바 있다. 한편, Kim et al. (2010)은 미세변동 감지를 위해 공정

관리도의 연구 동향을 분석하여 각각의 통계관리 기법에 대한 적용성과 활용방안에 대해 발표한 바 있다.

본 연구에서는 터널현장에서 활용할 수 있는 객관적이고 정량적인 관리 기준을 수립하기 위해 응용 통계기법인 x-MR 관리도를 이용하여 실 계측 데이터의 변화 양상을 분석하였다. 시공 중 붕괴 또는 구조물의 균열이 발생된 터널에서 측정된 계측 데이터를 이용하여 x-MR 관리도를 작성하였으며, 각 관리도 대한 관리 한계선을 설정함으로써 붕괴 발생 전 변위의 변동을 분석하여 이상 거동에 대한 예측이 가능한지 검토하였다. 또한 관리도 작성을 위한 분석 구간의 범위에 따른 관리 한계선의 유효성을 비교함으로써 관리도기법의 활용방법을 제시하였다.

2. x-MR 관리도

2.1 관리도의 기본개념

Shewhart (1924)에 의해 창안된 관리도는 통계적 품질관리 기법 중 하나로 모든 데이터가 정규분포를 한다는 가정 하에 공정 중 발생하는 데이터의 이상 징후를 판별하기 위한 방법이다. 즉, 정규분포를 이루는 데이터의 평균을 μ , 표준편차를 σ 라 한다면, 분포 함수는 평균 μ 를 중심으로 좌우 대칭을 이루며, 산포의 정도는 σ 에 의해 결정된다. 여기서, μ 와 σ 에 대해 확률론적인 방법을 이용하여 공정의 안정 상태를 평가하는 것이 관리도의 기본 개념으로 중심선을 기준으로 3σ 의 관리 한계선인 관리 상한선(UCL, upper control limit)과 관리 하한선(LCL, lower control limit)을 설정하여 공정 중 획득한 데이터를 점으로 찍어 나가면서 관리 한계선을 이탈하는 점이 발생하면 이상 상태로 판단하게 된다. 관리 한계선은 이러한 이상 상태를 용이하게 파악하기 위해 설정한 기준선으로 공정 중 획득되는 데이터가 $\mu - 3\sigma \leq x \leq \mu + 3\sigma$ 범위 내에 분포할 확률은 약 99.7%이다(Fig. 1).

2.2 x-MR 관리도

x-MR 관리도는 x 관리도와 MR (moving range) 관리도를 병행하여 사용하는 것으로 공정의 평균과 산포를 동시에 관리하기 위한 목적으로 이용된다. x 관리도는 개개의 측정값(x)을 이용하여 공정을 관리하는 것으로 1회에 1개의 측정값 밖에 얻을 수 없거나 측정값을 얻는데 시간이나 경비가 많이 들어 정해진 공정으로부터 현실적으로 1개의 측정값 밖에 얻을 수 없을 때 사용하는 방법이다. 이 경우에 x 관리도와 병행하여 MR 관리도를 동시에 사용하는 데 이것을 x-MR 관리도라고 하며, MR 관리도는 이동범위 관리도로 공정의 산포 σ 를 관리할 때 이용되는 방법이다 (Park and Park, 2013). 본 연구에서는 터널 시공 중 획득한 계측 변위가 측정값이 되며, 1회 계측마다 1개의 측정값을 얻으므로 x-MR 관리도를 이용하는 것이 타당하다.

2.3 관리한계선 설정

x 관리도의 관리 한계선은 Fig. 1과 같이 $\mu \pm 3\sigma$ 로 결정되지만, 터널 시공 중에는 공정 특성상 시공이 완료되기 전까지 공정 전체의 변위에 대한 평균값(μ)과 표준편차(σ)를 알 수 없다. 따라서 시공 중에 획득한

n개의 계측 변위의 μ 와 σ 는 추정값 $\hat{\mu}$, $\hat{\sigma}$ 을 사용하며, 본 연구에서의 x-MR의 관리도 작성 방법은 다음과 같다.

- (1) \bar{x} 계산 : 시공 중 획득된 n개 계측 변위(x)의 추정 평균 $\hat{\mu}$ 를 계산한다.

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$$

- (2) MR 계산 : Fig. 2와 같이 계측 변위(x)에 대한 이동 범위(k)를 설정하여 범위 내의 최대 변위값과 최소 변위값의 차이를 계산한다. MR의 값은 k에 따라 달라진다.

$$MR_i = x_{\max} - x_{\min} \quad (i = k, k+1, k+2, \dots, n)$$

- (3) \overline{MR} 계산 : MR의 평균을 계산한다. 여기서 MR의 수는 n-k+1이 된다.

$$\overline{MR} = \sum_{i=k}^n MR_i / (n - k + 1)$$

- (4) 관리 한계선 계산 : 계측 변위(x)와 MR 값으로부터 계산된 평균을 이용하여 중심선(CL), 관리

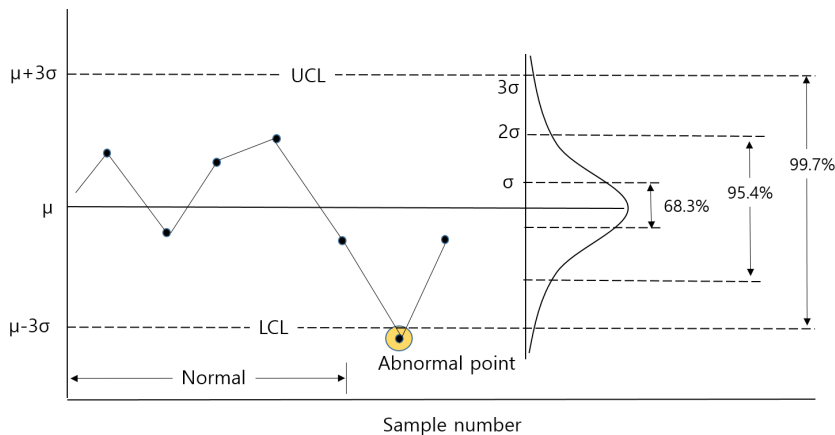


Fig. 1. Schematic representation of the control chart method

상한선(UCL), 관리 하한선(LCL)을 계산한다. 여기서, 중심선(CL)은 평균값으로 x 관리도는 \bar{x} , MR 관리도는 \overline{MR} 을 사용한다.

한편, MR에 대한 평균값 \overline{MR} 과 표준오차 σ (MR)는 정규분포인 경우에 관리도용 계수인 d_2 와 d_3 로 표현될 수 있다. 관리도용 계수는 통계학에서 품질 관리를 위해 정한 상수로서 이동 범위(k)에 따라 값이 달라지며, 본 연구에 이용된 k에 따른 관리도용 계수 d_2 와 d_3 는 Table 1과 같다.

$$\overline{MR} = d_2 \hat{\sigma}, \quad \sigma(MR) = d_3 \hat{\sigma}$$

① x 관리도의 관리 한계선

$$CL = \bar{x}$$

$$UCL = \mu + 3\sigma \approx \bar{x} + 3\hat{\sigma} = \bar{x} + 3\left(\frac{\overline{MR}}{d_2}\right)$$

$$LCL = \mu - 3\sigma \approx \bar{x} - 3\hat{\sigma} = \bar{x} - 3\left(\frac{\overline{MR}}{d_2}\right)$$

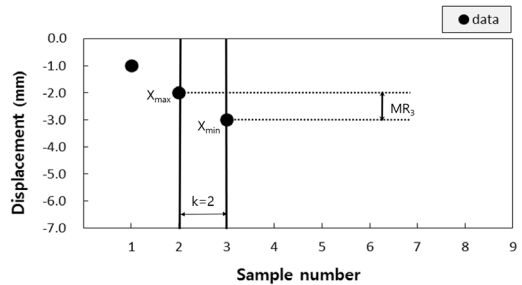
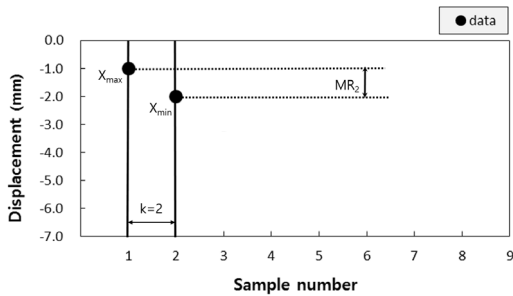
② MR 관리도의 관리 한계선

$$CL = \overline{MR}$$

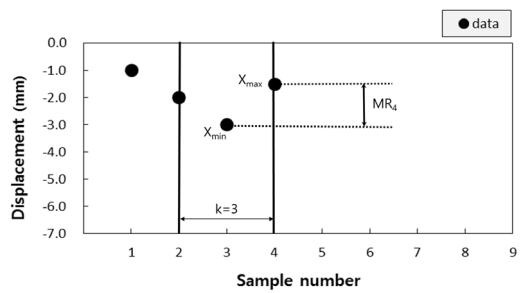
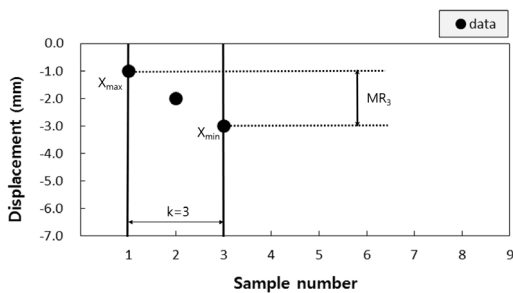
$$UCL = \mu + 3\sigma \approx \overline{MR} + 3\sigma = d_2 \hat{\sigma} + 3d_3 \hat{\sigma} =$$

$$(d_2 + 3d_3) \hat{\sigma} = (d_2 + 3d_3) \frac{\overline{MR}}{d_2} = \left(1 + 3\frac{d_3}{d_2}\right) \overline{MR}$$

$$LCL = \mu - 3\sigma \approx \overline{MR} - 3\sigma = d_2 \hat{\sigma} - 3d_3 \hat{\sigma} =$$



(a) k=2



(b) k=3

Fig. 2. The calculation method of a MR value in the control chart method (modified after Yim et al., 2007)

Table 1. Coefficients for control limit

k	2	3	5	7	10	20
d_2	1.128	1.693	2.326	2.707	3.078	3.735
d_3	0.853	0.888	0.864	0.833	0.797	0.729

$$(d_2 - 3d_3)\hat{\sigma} = (d_2 - 3d_3)\frac{\overline{MR}}{d_2} = (1 - 3\frac{d_3}{d_2})\overline{MR}$$

(5) 계측 수행마다 측정된 변위 및 MR값, 각각의 관리한계선을 타점하여 관리도 작성을 수행하여 터널의 이상 거동을 판단한다.

여기서, MR 관리도의 관리 하한선(LCL)의 경우 k=2~6일 때, 음(-)의 값이 산출되므로 항상 양(+)의 값이 산출되는 MR 관리도에서는 고려하지 않는다.

3. x-MR 관리도를 이용한 계측 데이터 분석

시공 중 지반의 붕괴나 구조물의 균열 등 이상 거동이 나타난 터널 시공 현장을 대상으로 5개 굴진면에서 측정된 천단 침하와 내공 변위를 이용하여 x-MR 관리도를 작성하였다. 본 연구의 목적은 터널 시공 중 지반의 이상 거동을 신속하고 정확하게 판단하기 위하여 굴착이 진행됨에 따라 1회에 1개씩 획득되는 계측 변위를 이용하여 관리 한계선을 작성하였다. 즉, 한 개의 계측 데이터가 입력될 때마다 x 관리도와 MR 관리도의 관리 한계선은 달라진다. 또한 이동범위(k)에 따라서 관리 한계선은 변화하며, 관리 한계선 작성 초기에 계측 데이터의 수가 k만큼 필요하기 때문에 현장에서 획득한 데이터의 수를 고려하여 k를 2, 3, 5, 7, 10, 20으로 달리하여 이동범위에 따른 관리 한계선의 변화 양상을 상호 비교함으로써 붕괴 발생

전 이상 거동에 대한 최적의 판단 방법을 분석하였다.

Table 2는 대상 터널에 대한 지질과 이상 거동에 대한 유형, 붕괴원인을 간략히 요약한 것이다. 퇴적암, 화성암, 변성암 지반에 시공된 터널 각 1개소씩 선정하여 분석하였으며, 대부분 붕괴원인은 단층에 의한 것으로 파악되었다. Fig. 3은 x-MR 관리도 분석을 위해 이용된 각 터널에서의 천단침하 및 내공변위를 나타낸 것이다. Fig. 3의 (a)~(d)는 붕괴가 발생하기 전 각 굴진면에서 측정된 최대 변위를 나타낸 것이며, (e)는 균열이 발생한 굴진면에서 굴착 후 날짜별로 측정된 변위의 경향을 나타낸 것이다. 특히, Tunnel B-2와 B-3은 평행하게 위치하는 2개의 양방향 터널 시공 중 한 터널에서 이상 거동이 발생하면서 인접한 터널에 영향을 미친 경우로 하행선 굴착 중 붕괴가 발생한 후(Fig. 3의 (c)), 이에 대한 영향으로 상행선에서 과다변위가 발생하면서 토사유실이 발생한 현상이다(Fig. 3의 (d)).

3.1 굴진면에서의 천단침하 분석: Tunnel A

Tunnel A는 퇴적암 지반에 시공된 도로 터널로 굴진면에 대한 굴착 및 보강이 완료된 후 낙반과 동시에 붕괴가 발생하였다. 굴진면 관찰 결과, 중앙부에 폭 약 1 m, 경사 70° 이상 고각의 단층이 굴진 방향을 따라 위치하고 있으며, 암반 내 점토와 토사가 충전된 절리가 조밀하게 발달되어 Ø3~5 cm 내외의 암편 상태로 파쇄되어 있는 상태이다. 또한, 세일과 이암이 교호하는 지반으로 층리가 발달되어 있으며, 화강암

Table 2. The geology and status of sections showing abnormal behavior

Tunnel	Geology	Status of sections	
		Type	Cause
A	Shale	Collapse in rock	Fault zone
B-1	Granite	Collapse in rock	Fault zone
B-2	Granite (weatherd rock & soil)	Collapse in soil	Fault zone & ground water
B-3		Soil loss	Fault zone & ground water
C	Gneiss (weatherd rock)	Crack in the structure	Fault zone

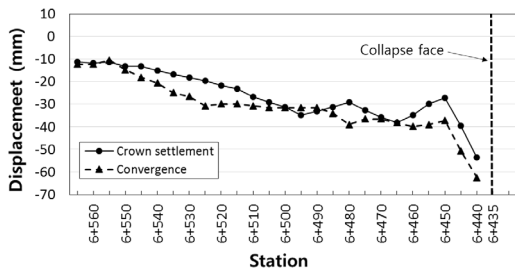
의 관입으로 인해 혼펠스화 되어 있는 등 암반 내 파쇄가 심하게 관찰된다.

Tunnel A의 천단침하와 내공변위는 굴착 및 보강이 완료된 각 굴진면에서 측정된 최대 변위로 STA. 6+435에서 낙반이 발생하기 전 약 130 m 구간의 변위를 분석하였다. Fig. 3의 (a)를 보면 붕괴 지점에 가까워질수록 천단침하와 내공변위가 지속적으로 증가하고 있으며, 붕괴지점으로부터 15 m 전인 STA. 6+450에서 급격한 변위의 증가를 보이고 있다. 이 계측 데이터를 이용하여 이동범위(k)를 달리하면서 x-MR

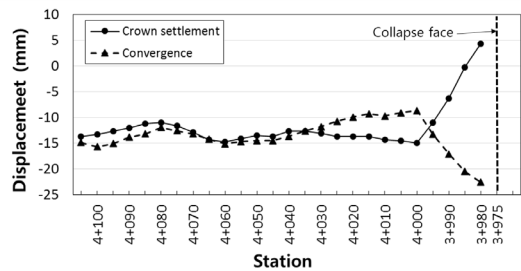
관리도를 작성하여 변위의 이상 지점을 분석하였다.

Fig. 4는 Tunnel A의 천단침하를 이용하여 각 이동범위(k)에 따른 x-MR 관리도를 작성한 것으로 상단의 그래프가 천단침하 값과 관리 한계선을 나타낸 x 관리도이며, 하단의 그래프는 MR 관리도이다. 관리 한계선의 작성은 초기에 계측 데이터의 수가 k만큼 필요하기 때문에 k가 증가할수록 관리 한계선 작성이 늦어진다.

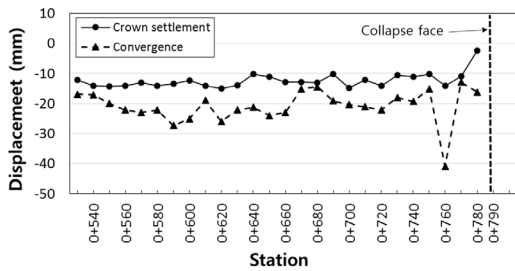
관리 한계선을 기준으로 천단침하의 변화 양상을



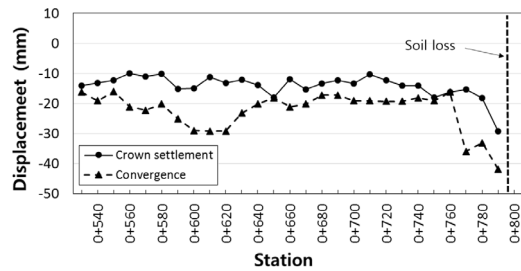
(a) Tunnel A



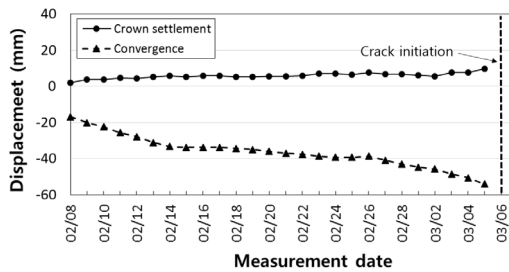
(b) Tunnel B-1



(c) Tunnel B-2



(d) Tunnel B-3



(e) Tunnel C

Fig. 3. The displacement in each of the tunnel. (a)~(d) is the maximum crown settlement and convergence with station at each of the face behind the collapse face in tunnel A and B. (e) is crown settlement and convergence with date at the face of crack initiation in tunnel C.

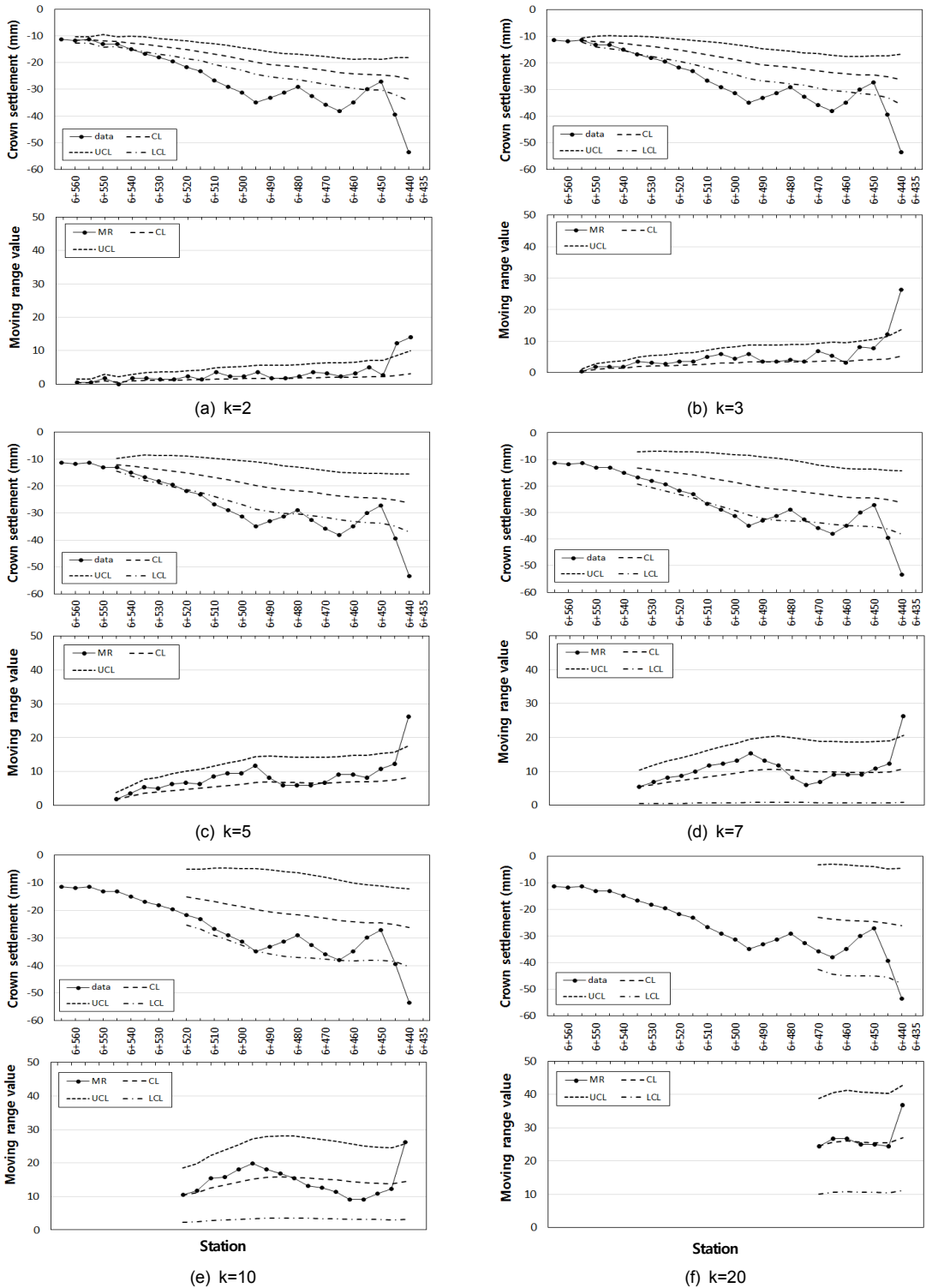


Fig. 4. x-MR control charts for the crown settlement of tunnel A

살펴보면 $k=20$ 일 때의 MR 관리도를 제외하고 대부분 붕괴지점 약 5~13 m 이전인 STA. 6+440~447에서 관리 한계선을 벗어나는 것을 알 수 있다. 이는 붕괴 지점 이전에 이미 변위의 이상 징후가 나타난 것으로 x-MR 관리도의 관리 한계선 작성을 통해 이상 구간에 대한 예측이 가능함을 의미한다.

또한 관리 한계선은 k 가 증가함에 따라 범위가 점점 넓어져 MR 관리도의 경우 $k=10$ 일 때 붕괴 지점에 근접해서 MR 값이 관리 상한선 위에 타점되며, $k=20$ 일 때는 붕괴 지점 이전에 관리 한계선을 벗어나는 구간이 없어 MR 관리도만으로는 붕괴에 대한 예측이 불가능한 것을 알 수 있다. 그러나 x 관리도는 $k=20$ 인 경우에도 붕괴 지점에서 약 7 m 전에 관리 한계선을 벗어나는 것으로 나타나며, 전반적으로 x 관리도가 MR 관리도보다 이른 시점에 관리 한계선을 벗어나 Tunnel A에서는 x 관리도가 이상 거동에 대한 민감성이 더 높은 것으로 나타났다.

한편, k 가 10 이하인 x-MR 관리도를 살펴보면, x 관리도에서만 관리 한계선을 벗어나는 구간을 확인할 수 있다. 이렇게 x 관리도와 MR 관리도에서 관리 한계선을 벗어나는 구간이 일치하지 않는 경우 이상 징후에 대한 판단이 어려울 수 있다. 그러나 Fig 4에서 알 수 있듯이 붕괴지점에 가까워질수록 x 관리도와 MR 관리도에서 동일하게 관리 한계선을 벗어나는 영역이 나타나므로 어느 한 관리도에서만 관리한계선을 벗어나는 구간에 대해서는 신중히 변위의 변화 양상을 지켜볼 필요가 있으며, 보다 객관적인 예측을 위해서는 x-MR 관리도에서 관리한계선을 벗어나는 구간이 일치하는 지점을 파악하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

3.2 굴진면에서의 내공변위 분석: Tunnel B-3

Tunnel B는 화강암 지반에 시공된 도로 터널로 굴착 중 낙반, 토사붕괴 및 토사유출 등이 발생한

터널이다. 이 중 토사유출이 발생한 Tunnel B-3의 굴진면은 전반적으로 조립질의 사질토 및 풍화토로 구성되어 있으며, 붕괴 당시 다량의 지하수가 함께 유출되었다. 굴진면의 천단부는 다량의 점토를 수반한 단층이 토사화되어 굴진 방향과 수직으로 분포하며, 하부는 단층에 의한 차별풍화의 영향으로 핵석 형태의 풍화암이 관찰된다.

Tunnel B-3의 천단침하와 내공변위는 굴착이 진행됨에 따라 각 굴진면에서 측정된 최대 변위로 붕괴가 발생한 STA. 0+796 이전까지의 변위를 분석하였다 (Fig. 3의 (d)). Fig. 5는 Tunnel B-3의 내공변위에 대한 x-MR 분석 결과로, 대부분 붕괴 지점으로부터 약 6~30 m 이전에 관리 한계선을 벗어나고 있어 붕괴에 대한 예측이 가능함을 보여주고 있다. 그러나 Fig 5의 (a)를 보면, $k=2$ 와 3인 경우 MR 관리도에서 MR의 값이 붕괴 지점 약 30 m이전에서 관리 한계선을 벗어났다가 붕괴 지점에 가까워질수록 다시 관리 한계선 영역 내로 타점되는 것을 볼 수 있다. 이는 이동범위의 수가 작기 때문에 인접해 있는 측정 변위의 값이 비슷할 경우 차이가 작아 범위 내의 차이값을 나타내는 MR 값의 특성상 관리 한계선 영역 안에 타점되는 것으로 판단된다. 또한 계측 시 오차나 주변 환경의 요인으로 인해 오류가 발생할 경우 비정상적인 변위 값이 측정될 수 있어 일시적으로 관리 한계선을 벗어나는 구간이 발생될 수 있다. 따라서 k 가 작을 때는 x-MR 관리도 상에서 불분명한 판단을 내릴 수 있어 계측 변위를 관리하는 데 있어 신중할 필요가 있다. 한편, Tunnel B의 경우도 Tunnel A와 동일하게 k 가 증가할수록 관리 한계선의 범위가 넓어지며, 계측 변위값과 MR 값이 관리 한계선 영역 내에 가까워지는 것을 알 수 있다.

3.3 붕괴 지점에서의 시간에 따른 내공변위 분석: Tunnel C

C 터널은 편마암 지반에 시공된 철도 터널로 굴진이

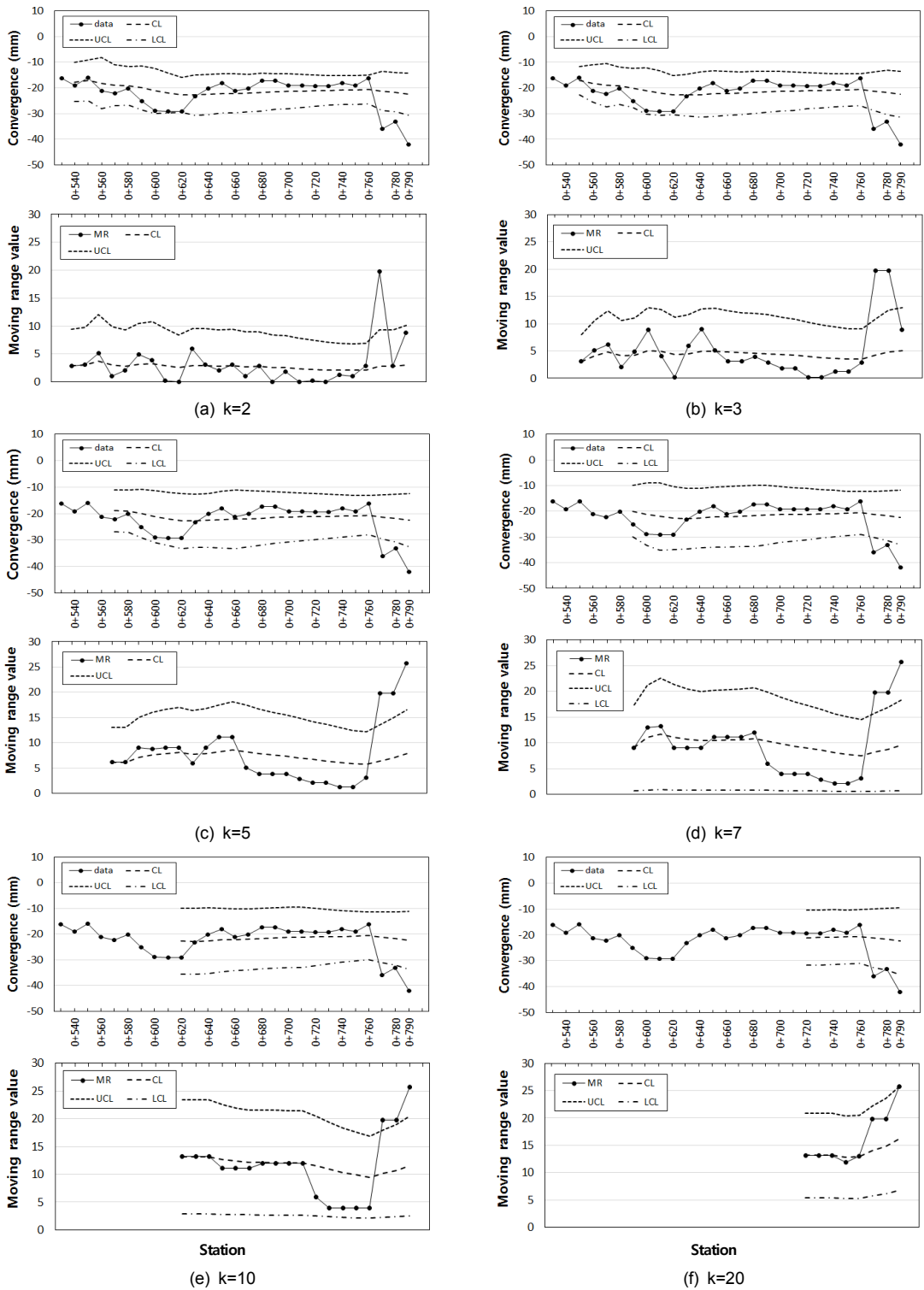


Fig. 5. x-MR control charts for the convergence of tunnel B-3

진행됨에 따라 지속적인 변위가 발생하여 숏크리트 내 균열이 발생한 현장이다. 균열이 발생한 굴진면은 우측부에 굴착 방향과 평행한 단층이 폭 1 m 내외로 발달하고 있으며, 전반적으로 심한풍화의 상태를 보인다. 단층 주변으로는 파쇄대가 넓게 분포하여 절리가 불규칙하게 발달하고 있으며, 절리면 내 점토 및 단층활면이 관찰되는 등 자립이 어려운 상태이다.

Tunnel C의 변위는 균열이 발생한 굴진면에서 굴착 후 날짜별로 측정된 변위로서 3월 6일 균열이 관찰되기 전까지 26일간의 변위 경향을 분석하였다. Fig. 3의 (e)에 나타난 바와 같이 내공 변위는 굴착 초기에 급격한 변위속도를 보이다 수렴하는 경향을 보이나, 시간이 경과함에 따라 지속적으로 변위가 증가하고 있어 어느 시점에 이상 여부를 판단할지 쉽지 않다. 따라서 이상 징후가 나타나는 지점을 파악하기 위해 내공변위에 대한 x-MR 관리도를 통해 관리 한계선을 작성하여 Fig. 6에 나타내었다.

x 관리도를 보면 중심선(CL)과 관리 한계선이 변위가 증가함에 따라 비슷한 양상으로 타점되는 것을 확인할 수 있으며, MR 관리도 상에서는 MR 값이 관리 한계선을 벗어나는 지점이 없는 것을 알 수 있다. 이는 변위가 지속적인 양상을 보이며 변화하는 경우, 비정상적으로 타점되는 구간이 없고, 이동 범위(k) 내 측정값에 대한 분산의 범위가 작아 MR 관리도만으로는 예측이 어려운 경우이다. 그러나, x 관리도 상에서는 k에 관계없이 붕괴일 이전에 관리 한계선을 벗어나고 있어 이상 거동에 대한 분석이 가능하다. 즉, Tunnel C의 경우는 x 관리도나 MR 관리도 어느 하나만을 분석하여 이상 거동을 예측 할 수 없는 사례에 속한다.

3.4 결과 분석

Fig. 7은 10개의 계측 데이터에 대한 x-MR 관리도를 분석을 통해 이동범위(k)에 따른 붕괴 예측 지점을 나타낸 것으로 붕괴 지점으로부터 관리 한계선을 벗

어나는 이상 변위 지점까지의 거리를 도시한 것이다. k에 대한 합리적인 범위를 정하기 위해 이상 징후가 나타나지 않는 경우는 그래프에 도시하지 않았으며, 일시적으로 관리 한계선을 벗어나는 구간은 제외하였기 때문에 x 관리도와 MR 관리도 중 거리가 작은 값이 이상 거동을 명확히 예측할 수 있는 기준이 될 수 있다.

Tunnel A의 천단 침하 분석 결과를 보면, k에 따라 예측 가능 지점이 붕괴 지점으로부터 5.2~12.3 m이며, 내공 변위의 분석 결과에서는 8.3~13.0 m로 나타났다. 천단침하와 내공변위에 대한 x-MR 분석 결과를 종합하면, Tunnel A의 경우는 x-MR 관리도 작성을 통해 최소 5.2 m 이전에 이상 거동을 예측 할 수 있는 것으로 나타났다. Tunnel B-1의 경우는 천단 침하 분석결과, 붕괴지점으로부터 16.5~20.5 m 이전에 예측이 가능하였으며, 내공 변위의 경우는 약 7.3~16.3 m 이전에 이상 거동에 대한 예측이 가능하여 최소 7.3 m 이전에는 이상 거동에 대한 예측이 가능함을 알 수 있다. 같은 방법으로 Tunnel B-2와 B-3의 경우는 붕괴지점으로부터 각각 13.5 m, 6.1 m 전에 이상 거동에 대한 예측을 할 수 있으며, 시간에 따른 변위를 분석한 Tunnel C의 경우는 최소 1일 전에 예측이 가능한 것으로 나타났다.

이동범위(k)에 따른 결과를 보면, Tunnel A의 경우 변위의 종류에 관계없이 k=2~10일 때 x-MR 관리도 상에서 예측이 가능하며, Tunnel B의 경우는 B-1과 B-2, B-3의 천단침하 분석에서 k=20까지 증가하여도 예측이 가능한 것으로 나타났다. 또한 Tunnel B-3의 내공변위와 Tunnel C의 천단침하에서는 k=5~20일 때 이상 거동에 대한 예측을 할 수 있었다. Tunnel A를 제외하고 대부분의 경우에 k를 20까지 설정하여도 x-MR 관리도를 통한 분석이 가능한 것으로 나타났으나, 앞서서도 언급하였듯이 k가 증가할수록 관리 한계선의 범위가 넓어져 이상 거동에 대한 민감도가 떨어지게 된다. 또한 관리 한계선의 범위를 k=2나 3처럼 좁게 설정하면 계측 시 오차가 발생한 지점에서

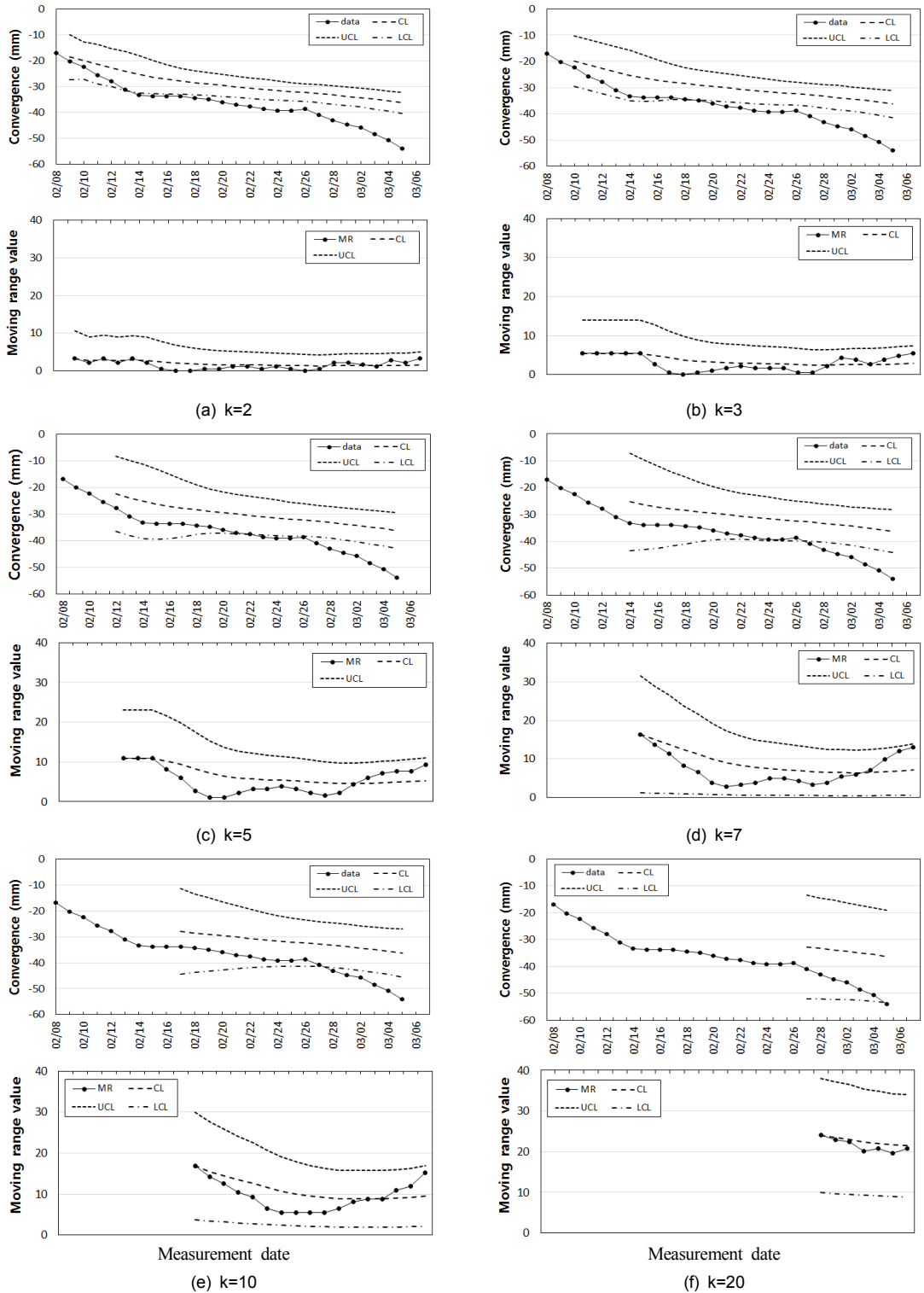


Fig. 6. x-MR control charts for the convergence of tunnel C

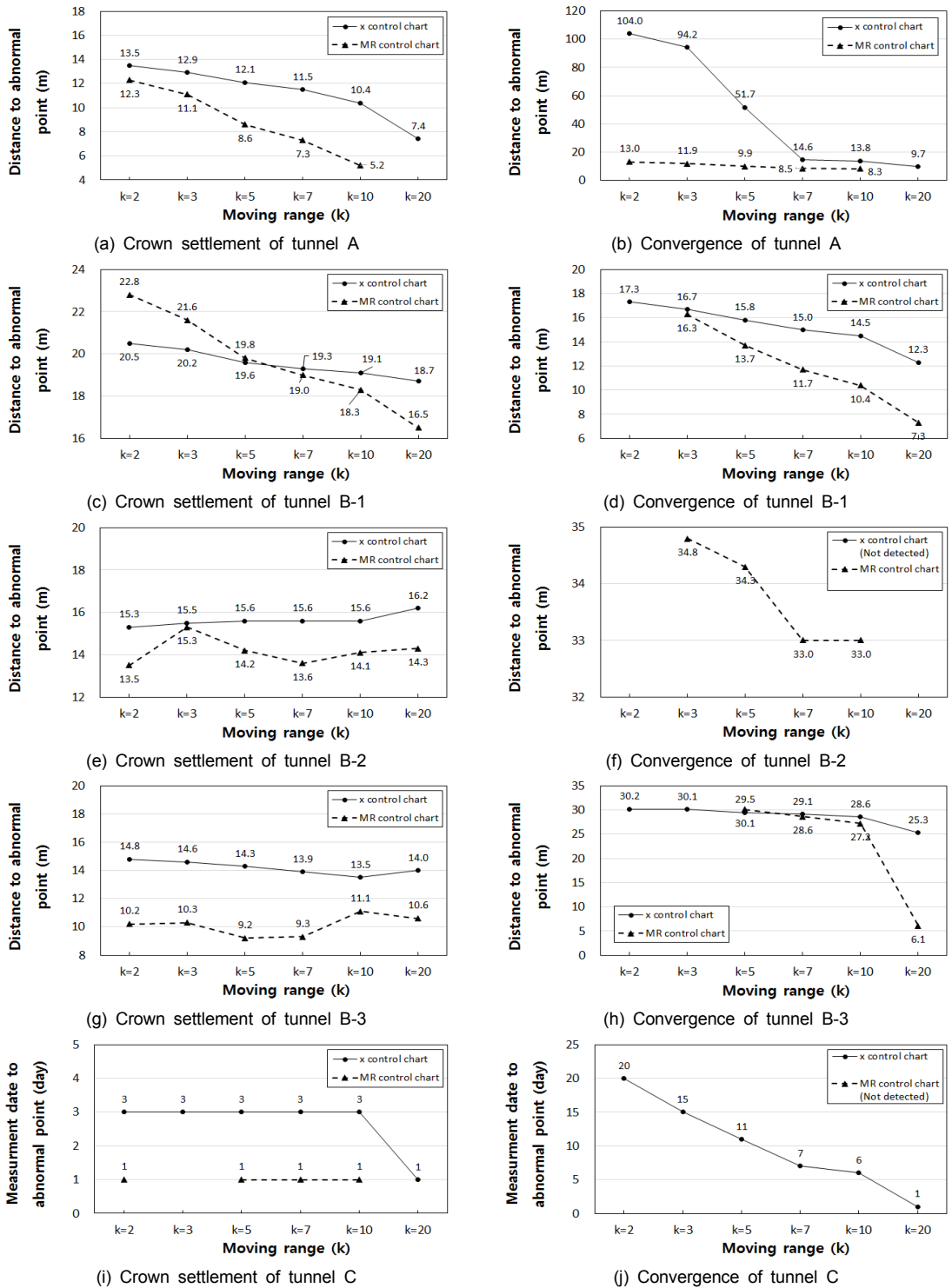


Fig. 7. Predictable distance and date with moving range (k). (a) ~ (h) is the distance from collapsed face to abnormal point. (i) and (j) is the date from collapse day to abnormal point.

관리한계선을 벗어나 오류가 발생할 가능성이 높다. 따라서 이동범위(k)의 값은 Fig. 7의 여러 실 계측 데이터에 대한 x-MR 관리도의 종합적인 분석 결과를 바탕으로 5~10으로 설정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 실제 현장에서는 굴착초기에 동일한 지질 상태에서 5 내지 10회 정도의 계측자료를 이용하여 분석에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, Fig. 7의 (f)와 (j)에서 나타나듯이 Tunnel B-2와 Tunnel C의 내공변위 분석에서는 각각 x 관리도와 MR 관리도에서만 붕괴에 대한 예측이 가능하여 이상 거동에 대한 명확한 판단을 하는데 어려움이 있으나, 분석대상 모든 터널의 천단변위에 대한 x-MR 관리도에서는 붕괴에 대한 명확한 예측이 가능함을 알 수 있다. 따라서 x-MR 분석 시 굴진면에서의 여러 계측 자료를 이용하면 효과적일 것으로 판단되며, x-MR 관리도가 서로 일치하지 않을 경우 주의 단계로 설정하여 지속적인 변위의 변화 양상을 관찰할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 터널에서 측정된 계측 데이터를 대상으로 x-MR 관리도분석을 실시하여 터널 거동의 정상 여부를 신속하고 객관적으로 판단할 수 있는 분석 방법을 제시하였다. 다양한 종류의 지반에서 시공되는 터널을 대상으로 낙반 및 토사유출, 구조물의 균열 등 여러 형태의 이상 거동에 대한 변위를 분석하였으며, 이동범위 k에 따른 관리 한계선의 변화 양상을 비교하여 굴착이 진행됨에 따라 굴진면 전방에 위치하는 위험 지반과 터널의 이상 거동에 대한 예측이 가능한지 검토하였다.

1. x-MR 분석 결과, 붕괴 지점으로부터 최소 약 5~13 m 이전에 터널의 이상 거동을 감지할 수 있었으며, 시간에 따른 변위의 분석 결과, 최소 1일전에 이상 거동에 대한 예측이 가능하였다.

- 이동 범위(k)에 따른 관리 한계선의 변화를 분석한 결과, 1회에 1개씩 획득되는 계측 데이터의 특성상 오차 및 오류가 발생할 수 있는 점을 감안하여 x-MR 관리도 작성시 k는 5~10에서 설정하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.
- x-MR 관리도 작성 시 동일한 구간에서 측정된 다양한 계측 자료와 거리 및 시간 등 동일한 조건을 두고 측정된 양질의 자료를 이용하면 이상 거동을 보다 명확히 판단할 수 있으며, x 관리도와 MR 관리도 상에서 이상 구간이 일치하지 않는 경우 주의 단계로 설정하여 지속적인 변위의 변화 양상을 관찰할 필요가 있다.
- 국내의 경우 터널 시공 시 계측에 대한 관리 기준이 명확하지 않으며, 현장마다 각각 다른 관리 기준을 적용하고 있어 종합적인 분석에 한계가 따른다. 또한 굴착이 진행됨에 따라 측정된 변위의 변화폭이 작거나, 지속적으로 미세한 변위의 변화가 일어날 경우 현장에서 신속하게 이상 징후를 판단하기 어렵다. 따라서 응용통계관리기법의 일종인 x-MR을 이용하여 굴착이 진행됨에 따라 관리 한계선을 설정하면 보다 신속하고 객관적인 판단과 굴진면 전방의 위험지반 및 터널의 이상 거동에 대한 예측에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

- Kim, K.Y. (2009), “Characteristics of tunnel convergence behaviour based on variation of rock mass rating”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 18, No. 4, pp. 545-553.

2. Kim, J.G., Um, S.J., Kim, S.K., Choi, S.W., Song, J.M. (2010), "Research results and trends analysis on process control charts for detecting small shift", The Spring Conference of the Korean Institute of Industrial Engineers, pp. 834-842.
3. Kwon, O.I., Baek, Y., Seo, Y.S. (2008), "Development of slope displacement data analysis system using control chart theory", Conference of the Korean Society of Engineering Geology, pp. 137-143.
4. Park, S.H., Lee, T.J., Park, C.S. (2008), "A study on evaluation of tunnel stability by ground displacement under construction", Conference of the Korean Society of Engineering Geology, pp. 95-103.
5. Park, S.H., Park, Y.H. (2013), "Statistical quality control", Minyoungsa, pp. 574-578.
6. 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.
7. The Japanese Geotechnical Society (1999), "Prediction and practice in NATM", pp. 239-242.
8. Yim, S.B., Kim, S.K., Seo, Y.S., Park, S.H. (2007), "A study on convergency of tunnel displacement using control chart method", The Journal of Engineering Geology, Vol. 17, No. 2, pp. 197-204.
9. 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.
10. Yim, S.B., Kim, K.Y., Kim, C.Y., Seo, Y.S. (2010), "New approach on prediction of fault zone ahead of tunnel face by using x-Rs control chart for RMR parameters", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 12, No. 6, pp. 463-473.
11. Yun, H.S., Seo, Y.S., Kim, K.Y. (2014), "Prediction of fault zone ahead of tunnel face using x-Rs control chart analysis for crown settlement", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 4, pp. 361-372.