

군집분류를 이용한 흙막이 벽체 배면 지반의 상대적 침하거동 분석

곽영준¹ · 한희수^{2*}

¹금오공과대학교 토목공학과 박사과정, ²금오공과대학교 토목공학과 교수

Analysis of Relative Settlement Behavior of Retaining Wall Backside Ground Using Clustering

Young-Jun Kwack¹ · Heui-Soo Han^{2*}

¹Ph.D. Course, Department of Civil Engineering, Kumoh Institute of Technology

²Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh Institute of Technology

Abstract

As urbanization and industrialization increase development in downtown areas, damage due to ground settlement continues to occur. Building collapse in urban has a high risk of leading to large-scale damage to life and property. However, there has rarely been studied on measurement data analysis methods when uneven loads are applied to the excavated ground and no prior knowledge of the ground. Accordingly, it was attempted to analyze the relative settlement behavior and correlation by processing the time-series surface settlement of construction sites in the urban. In this paper, the average index of difference in settlement and average of relative difference in settlement are defined and calculated, then plotted in the coordinate system to analyze the relative settlement behavior over time. In addition, since there was no prior knowledge of the ground, a standard to classify the clusters was needed, and the observation points were classified into using k-means clustering and Dunn Index. As a result of the analysis, it was confirmed that all the clusters moved to the stable region as the settlement amount converges. The clusters were segmented. Based on the analysis results, it was possible to distinguish between the independent displacement area and same behavior area by analyzing the correlation between measurement points. If possible to analyze the relative settlement behavior between the stations and classify the behavior areas, it can be helpful in settlement and stability management, such as uplift of the surrounding area, prediction of ground failure area, and prevention of activity failure.

Keywords: surface settlement data, k-means clustering, average index of difference in settlement, average of relative difference in settlement

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Heui-Soo Han
E-mail: hanhs@kumoh.ac.kr

Received: 31 January, 2023

Revised: 16 March, 2023

Accepted: 22 March, 2023

© 2023 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

도시화와 산업화에 따라 도심지에 개발이 늘어나면서 지반침하로 인한 피해가 지속적으로 발생되고 있으며, 도심지에서의 건물붕괴는 대규모 인명 및 재산 피해로 이어질 위험이 크다. 굴착지반에 균등하지 않은 하중이 작용하고, 대상지반의 사전지식이 없는 경우의 지반거동에 대해서는 연구가 거의 이루어지지 않았다. 이에 따라 지반 조사 정보가 없는 흙막이 공사의 굴착 과정에서 발생하는 배면 지반의 침하거동을 분석하는 방법이 기존에는 없었고, 본 연구에서는 시계열 데이터를 가공하여 상대적 침하거동과

상호관련성을 분석하여 흙막이 벽체 배면 지반의 침하거동을 분석하고자 하였다. 본 논문에서는 평균침하량차지수와 평균상대침하량차지수의 및 계산하였으며, 이를 좌표계에 도시하여 시간경과에 따라 측정점간의 상대적 침하거동을 분석하였다. 또한 관측점들의 군집을 분류할 수 있는 기준이 필요하여 k-평균군집분석과 Dunn Index를 이용하여 분류하였다. 분석결과 계측지점의 침하량이 일정한 값으로 수렴하면서 모든 군집들이 안정영역으로 이동한 것을 확인할 수 있었으며, 군집은 세분화되었다. 이러한 분석결과를 바탕으로 연구대상의 각 측정점 간 상관관계를 분석하여 연구대상 지반의 독자거동영역과 동일거동영역을 구분할 수 있었다. 이처럼 측정점 간의 상대적 침하거동을 분석을 통해 거동영역을 구분할 수 있다면, 주변지역의 용기, 지반파괴영역 예측, 터파기 공사 시 활동파괴의 방지 등 침하관리와 안정관리에 도움을 줄 수 있다고 판단된다.

주요어: 지표침하계, k-평균 군집분석, 평균침하량차지수, 평균상대침하량차

서론

도심지에서의 개발이 지속적으로 증가함에 따라 지반침하로 인한 피해가 지속되고 있다. 지반침하는 흙막이 공사로 인한 침하나 하수관로 등으로 인한 침하 등이 있다. 특히, 2017년에서 2021년 6월 까지 5년간 공사부실에 의한 침하 발생 건은 87건이었으며 이 중 47% 비율을 차지하는 41건은 굴착공사 중 발생하였다. 도심지의 굴착공사로 발생하는 지반침하로 인한 붕괴사고는 대규모 인명 및 재산 피해로 이어질 위험이 크다(Kim, 2022). 이러한 붕괴사고를 사전에 예방하기 위해 계측을 실시하고, 계측관리를 통해 획득한 데이터를 바탕으로 안전한 시공이 이루어 질 수 있도록 관리한다. 또한 계측 데이터 역해석을 통해 지반거동을 사전에 예측하기도 한다.

굴착 중 지반 침하 특성에 관해 평면변형률과 실제 사례를 기반으로 지반 침하 특성을 분석하고 예측을 위한 실험식을 제안하였으며(Ou et al., 1993), 고속도로의 침하거동을 분석하기도 하였다(Shi et al., 2018). 또한, 인공지능망을 활용하여 지하연속벽의 거동을 분석한 바 있다(Jan et al., 2002). 굴착된 지반의 실시간 거동을 지표변위계 데이터의 침하량만을 이용하여 실시간 거동을 분석하였으나(Ran et al., 2011), 계측지점간 상호관련성 분석은 이루어지지 않았다. 계측지점간 상대적 침하거동 및 상호관련성에 대한 분석방법을 제안한 바 있으며(Park et al., 2015), 이를 사면의 계측데이터를 이용하여 사면거동을 지속적/상시적으로 파악하기 위해 시계열 변위와 사면 계측 구역의 상호관련성을 분석하기도 하였다(Lee et al., 2015). 서로 다른 두 사면(Section 1과 Section 3)의 상호관련성 분석 결과 Section 1의 계측지점들은 Section 1의 계측지점들끼리, Section 3의 계측지점들은 Section 3의 계측지점들끼리 서로 가까이 위치하여 군집을 이루었다. 이와 같은 결과를 보인 것은 사전에 각 계측지점들이 서로 다른 사면에 설치되어 있음을 인지하여 서로 다른 구역에 있는 계측지점간의 상호관련성 분석을 위한 평균 변위차 지수와 평균 상대 변위차를 계산하지 않았기 때문이다.

본 연구의 지반은 굴착 후 흙막이 벽체를 설치한 지반으로 연속적으로 분포한다. 시추조사 결과를 활용할 수 있지만, 흙막이 벽체 배면 지반의 시추조사는 이루어지지 않기 때문에 흙막이 벽체 배면 지반을 대표하는 정보라고 할 수 없다. 흙막이 벽체 배면 지반의 상호관련성 분석을 하기 위해서는 관측점들이 이루는 군집을 구분해주는 기준이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 연구대상에 대한 사전지식이 없는 상태의 지반의 상호관련성을 분석하기 위해 지표변위 시계열 계측데이터를 가공하여 평균 침하량차 지수와 평균 상대 침하량차를 구하였다. 이를 각각 한 축으로 하는 좌표계에 관측점들을 나타내었으며, 좌표계의 관측점들을 K-평균군집분석을 이용하여 군집을 분류하였으며 Dunn 지수와 Hubert 통계량을 활용하여 최적의 군집수를 결정하였다. 군집을 이루는 관측점들의 관계를 이용하여 각 계측지점간의 상대적인 침하거동과 상호관련성에 대해 분석하고자 하였다.

분석 방법

평균침하량차지수(AS_{ij})

대상지반에 계측지점이 N 개 있다고 가정하면 각각의 시간에 따른 침하량을 $S_i(t_1), S_i(t_2), \dots, S_i(t_k)$ 로 표현할 수 있다. 시간이 t_k 일 때 두 계측지점 (i, j)의 침하량차는 식 (1)과 같이 정의하고, 두 지점 간 침하량의 차이이므로 절대값으로 계산한다.

$$S_{i,j}(t_k) = |S_i(t_k) - S_j(t_k)|, k = 1, 2, \dots, p \quad (1)$$

여기서, $S_{i,j}(t_k)$ 는 k 일(day)에서의 두 지점 간 침하량 차이를 절대값으로 계산한 값이다. 관찰된 두 측정점의 침하량 차이 평균값은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^p S_{i,j}(t_k) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^p |S_i(t_k) - S_j(t_k)| \quad (2)$$

절대값을 사용하지 않으면 t_k 시간에서의 침하량 차이 $S_{i,j}(t_k)$ 는 영역이 $[-\infty, +\infty]$ 사이의 거리차원을 가지게 되어 침하량 차이가 $-\infty$ 혹은 $+\infty$ 범위를 가질 수 있고, $S_{i,j}(t_k)$ 계산 시 기준을 어떤 측정점으로 잡는지에 따라 부호가 달라진다(Lee et al., 2015). 두 측정점 간 침하량차이는 절대값으로 표현되어 $[0, \infty]$ 사이에서 움직이고 있으므로, $[0^\circ, 90^\circ]$ 사이에서 $[0, \infty]$ 로 움직이는 tan함수의 특성을 이용하여 함수를 식 (3)과 같이 무차원 상수로 변환할 수 있다. 변환된 무차원 상수는 (0,1) 구간에서 움직인다.

$$\begin{aligned} \tan \alpha_{i,j} &= \bar{S}_{i,j}, \quad 0^\circ \leq \alpha_{i,j} \leq 90^\circ \\ \therefore \alpha_{i,j} &= \tan^{-1} \bar{S}_{i,j} \end{aligned} \quad (3)$$

$\alpha_{i,j}$ 의 영역은 $0^\circ \leq \alpha_{i,j} \leq 90^\circ$ 이므로, $\sin^2 \alpha_{i,j}$ 은 (0, 1) 구간 내의 상수로 계산된다. 따라서 식 (4)의 $\sin^2 \alpha_{i,j}$ 은 두 측정점 침하량 데이터의 차이를 거리차원이 아닌 무차원 상수로 나타낼 수 있다(Park et al., 2015).

$$\begin{aligned} \sin^2 \alpha_{i,j} &= \frac{\tan^2 \alpha_{i,j}}{\sec^2 \alpha_{i,j}} = \frac{\tan^2 \alpha_{i,j}}{1 + \tan^2 \alpha_{i,j}} \\ \therefore \frac{(\bar{S}_{i,j})^2}{1 + (\bar{S}_{i,j})^2} &= AS_{i,j} \end{aligned} \quad (4)$$

이를 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)라 하면, $AS_{i,j} = 0$ 일 경우 침하량 차이가 없는 것을 의미하고, $AS_{i,j} = 1$ 이면 침하량 차이가 크다는 것을 의미한다. 이 지수는 대상지반 측정점의 평균침하량차이 자료에서 구한 값으로, 일시적인 침하에 대한 값이 아니라 계측구간 전체에 대한 침하량 차이값이 된다.

평균상대침하량차($\overline{RS}_{i,j}$)

평균 침하량 차이 지수를 이용하여, 계측구간 전체에 대한 침하량의 평균 침하량자료에서 대상지반의 두 측점 사이의 전반적인 침하량차를 구하였으나, 각 지점이 시간별로 얼마나 같이 연동하는가의 여부를 알면 대상지반의 어느 구역이 상대적으로 침하량이 큰지 알 수 있다. 같은 시간동안 두 측점의 침하량 차이가 크면 두 측점은 서로 다른 영역에서 따로 움직이고 있는 것이고, 침하량 차이가 적거나 거의 없다면, 두 측점은 같은 영역에서 움직이고 있으므로 침하량의 크기와 변화속도 등을 유추할 수 있다. 그러므로 시간에 따른 침하량의 연동에 관한 지수를 추가 도입할 필요가 있다(Park et al., 2015).

상대 침하량 차는 두 측점 사이의 최대 침하량 차($M_{i,j}$), 최소 침하량 차($m_{i,j}$)와 해당시점(t_k)의 침하량 차를 이용하여 구할 수 있다. 절대값을 이용한 두 측점의 최대 침하량 차와 최소 침하량 차의 차이가 침하량 차 사이의 최대값이 될 것이며, 이는 두 관측 데이터를 이용한 침하량차 그래프의 최대간격이 될 것이다. Fig. 1은 최대침하량차와 최소침하량차를 보여준다.

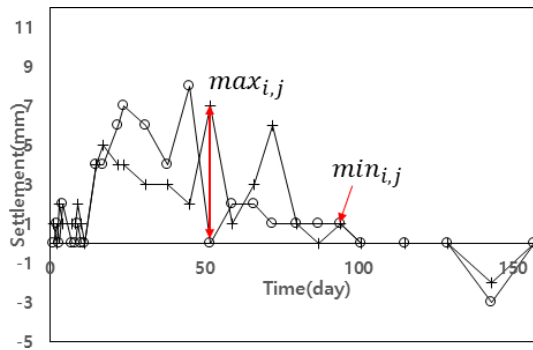


Fig. 1. Maximum and minimum settlement difference between two instrument points.

최대 침하량차 값을 해당시간의 침하량차 값으로 빼면 이는 침하량차가 그래프의 해당 시점의 간격이 되며($M_{i,j} - D_{ij}$), 해당간격을 최대간격으로 나누면 이는 상대 침하량 차가 된다. 최대 및 최소 침하량차는 식 (5)로 정의된다(Weiss and Indurkha, 1998).

$$\begin{cases} M_{i,j} = \max[S_{i,j}(t_k)] \\ m_{i,j} = \min[S_{i,j}(t_k)] \end{cases} \quad (5)$$

상대침하량차는 t_k 시간의 침하량차($D_{i,j}(t_k)$)가 최대값($M_{i,j}$)에 가까울수록 0에 가까운 값을 보이고, 이는 두 측점 사이의 침하량차가 크며 다른 거동영역임을 의미한다. 그리고 $D_{i,j}(t_k)$ 가 최소값($m_{i,j}$)에 가까울수록 1에 근접하며, 이는 두 측점 사이의 침하량 차이가 작음을 의미한다. 이는 i 지점의 데이터와 j 지점의 데이터의 차이에 따라 상대침하량차가 달라질 것이나, 작은 상대침하량차 값이 안정된 상태임을 알 수 있다. 지속적인 상대침하량차를 알기위해 두 측점의 시간에 따른 상대침하량차의 평균값은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다(Park et al., 2015).

$$\overline{RS}_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^p RS_{i,j}(t_k) \quad (6)$$

여기서, $\overline{RS}_{i,j}$ 는 평균 상대 침하량차, $RS_{i,j}(t_k)$ 는 계측지점 i 와 j 의 상대 침하량차이다.

상대 침하량차($RS_{i,j}(t_k)$)는 $[0, 1]$ 범위의 무차원수이므로 평균값인 평균 상대 침하량차($\overline{RS}_{i,j}$) 또한 $[0, 1]$ 사이의 무차원수이다. $\overline{RS}_{i,j}$ 값이 크거나 1에 근접하면 i, j 구간의 데이터 series는 변위가 없는 안정된 모양을 갖게 되고, $\overline{RS}_{i,j}$ 값이 작거나 0에 근접하면 i, j 구간의 데이터 series는 침하량차가 큰 불안정한 모양을 가지게 된다.

다시 말해 평균 상대 침하량차는 평균치라는 개념을 이용하고 있으므로, 안정적인 데이터와 불안정한 데이터 모두 평균치는 같을 수 있으나, 계측 데이터를 시간별 그래프로 그려보면 유사한 거동을 보이는 각 측정점의 시간별 데이터는 같은 거동 영역이며, 거동이 다른 경우 다른 영역임을 쉽게 알 수 있다(Berry and Linoff, 2011; Lee et al., 2015).

정리하자면 평균 침하량 차이 지수는 $(-\infty, \infty)$ 값을 가지는 두 측정점간의 침하량차이를 $(0, 1)$ 사이의 값을 가지도록 가공한 뒤 시간이력을 고려할 수 있도록 평균값을 취해준 것이다. 이러한 평균 침하량 차이 지수는 두 측정점 간 침하량차이가 커지면 커질 것이고, 침하량 차이가 작아지면 작아질 것이다. 따라서, 평균 침하량 차이 지수는 평균 상대 침하량차는 시공 시점부터 해당 시점까지의 두 측정점 간 침하량차이의 최대값과 최소값을 사용하여 $(0, 1)$ 사이의 값으로 가공한 뒤 평균을 취하여 구한다. 만약, 두 측정점 간 변위차이의 이력에 없던 최대변위차이가 발생하면 분모가 커지므로 평균 상대 침하량차는 작아질 것이다. 따라서 평균 상대 침하량차는 최대변위차, 즉 변위이력을 고려할 수 있다.

좌표시스템

두 측정점의 침하량 차이인 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)와 데이터 series의 시간별 그래프 형상의 크기 및 유사성인 평균 상대 침하량차($\overline{RS}_{i,j}$)를 따로 사용하는 것이 아니라 함께 사용하면 두 측정점의 시계열 데이터의 침하량차의 정도 및 모양의 비슷한 정도를 동시에 나타낼 수 있다. 평균 침하량 차이 지수가 0.5보다 작으면 두 측정점 간 침하량 차이가 작다는 것이며, 0.5보다 크면 침하량 차이가 크다는 것이다. 반대로 상대 평균 침하량차가 0.5보다 작으면 최근 변위이력 중 최대변위차가 발생하였거나, 발생시점으로부터 시간이 많이 경과하였음에도 불구하고 최대변위차가 크기 때문일 것이다. 본 연구에서는 모든 측정점의 침하거동이 안정하다는 것을 알기 때문에 후자의 경우는 고려하지 않았다. Fig. 2와 같이 평균 침하량

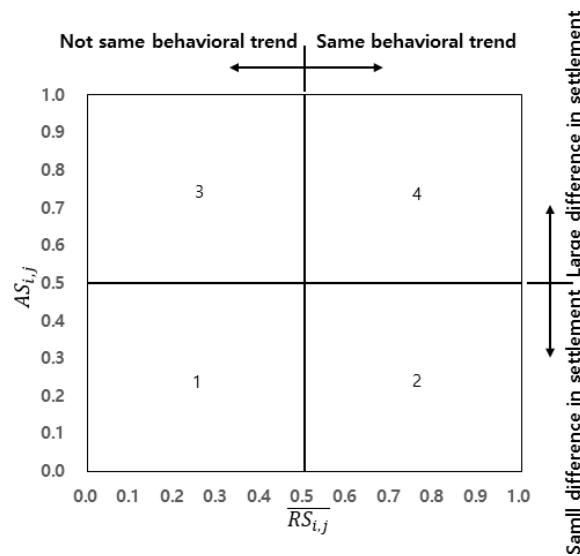


Fig. 2. $\overline{RS}_{i,j} - AS_{i,j}$ coordinate system.

차이 지수와 평균 상대 침하량을 각각 좌표의 한 축으로 하여 도표화 할 수 있다(Bae et al., 2004). 변위계의 각 구역이 가지는 의미는 Table 1과 같다.

Table 1. Settlement behavior state according to zone

Classification	Value	Settlement behavior State
Zone 1	$\overline{RS}_{i,j} < 0.5, AS_{i,j} < 0.5$	Over displacement history, Small displacement difference
Zone 2	$\overline{RS}_{i,j} > 0.5, AS_{i,j} < 0.5$	Over displacement history, Large displacement difference
Zone 3	$\overline{RS}_{i,j} < 0.5, AS_{i,j} > 0.5$	Normal displacement history, Large displacement difference
Zone 4	$\overline{RS}_{i,j} > 0.5, AS_{i,j} > 0.5$	Normal displacement history, Small displacement difference

K-평균군집분석

좌표계에 표시된 각 점들은 두 측정점간의 관계를 보여준다. 만약 두 측정점간의 관계를 나타내는 점들이 비슷한 관계를 가지면 \overline{RS} - AS 좌표계상에서 서로 가까이 위치하게 될 것이고 가까이 위치하는 점들이 모여 군집을 이루게 될 것이다. 따라서 본 논문에서는 두 측정점간의 관계가 비슷한 점들의 군집을 분류하기 위하여 유클리드 거리를 이용하는 k-평균군집분석을 이용하였다.

k-평균 방법은 첫 번째 단계로 사전에 결정된 군집 수 k에 기초하여 각 관측 값을 선택하여 초기값으로 정하는 것이다. 두 번째로 초기값은 초기 군집의 중심이 된다. 초기값은 단순히 처음 k개의 관측 값을 선택할 수도 있고, 전체 관측 값에서 랜덤하게 k개를 뽑아 결정할 수도 있다. 세 번째 단계는 모든 관측 값에 대해서 관측 값과 군집의 중심들과의 거리를 계산하여 가장 가까운 중심의 군집에 관측 값을 할당한다.

유클리드 거리를 사용하는 경우는 각 군집의 중심을 연결하는 선분을 수직이등분하는 직선들에 의해서 할당된다. 네 번째 단계는 이렇게 형성된 새로운 군집의 중심을 계산하는 것이다. 이것은 단순히 군집에 있는 점들을 각 차원에 따라 평균을 구하는 것이다. 새로운 군집이 얻어지면, 각 관측 값들은 가장 가까운 중심의 군집으로 다시 한 번 할당된다. 관측 값들을 할당하고 중심을 다시 계산하는 과정은 군집의 중심에 변화가 없을 때까지 또는 군집의 경계가 변하지 않을 때까지 계속된다(Bae et al., 2004).

k-평균군집분석은 가장 단순한 군집화 방법 중 하나로, 데이터에 대한 군집을 찾기 위해 전체 데이터 세트에서 서로 유사한 데이터를 군집화하고 분류한다. 또한 k-평균군집분석은 직관적이고 구현이 쉽기 때문에 복잡한 계산이 필요하지 않아 대용량 데이터에도 적용 가능하다는 장점이 있다. 하지만 k-평균군집분석은 군집중심의 개수를 사전에 정해주어야 한다는 문제점이 있다. 이는 Dun index, Hubert statistics와 같은 지표를 이용하여 최적 군집 개수를 정할 수 있다. 본 논문에서는 최적 군집 개수를 정하는데 있어 Dunn Index와 Hubert statistics를 이용하여 다수결의 원칙에 의해 최적군집수를 구하였다.

Dunn Index는 군집분석에서 군집화 결과를 평가하기 위한 통계량 중 하나이다. 군집의 분리도와 응집도를 고려한 지표로, 분리도가 크고 응집도가 작아질수록 높은 값을 갖는다. 동일한 군집에 있지 않은 관측치 간의 가장 작은 거리와 가장 큰 군집 내 거리의 비율로 정의할 수 있다. m개의 군집에서 Dunn Index(DI)는 식 (7)과 같다.

$$DI_m = \frac{\min_{(1 \leq i \leq j \leq m)} \delta(C_i, C_j)}{\max_{(1 \leq k \leq m)} \Delta_k} \quad (7)$$

Hubert Statistics는 군집분석에서 군집화 결과의 일치도를 측정하기 위한 통계량 중 하나이다. 군집 내부의 관측치 간 거리와 클러스터 중심점 간 거리의 차이를 이용하여 구한다. -1에서 1사이의 값을 가지며, 값이 1에 가까울수록 군집화 결과가 일치한다. 보통 0.7 이상이면 군집화 결과가 최적군집수를 만족한다고 판단한다. Hubert 통계량은 식 (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$H = (P - Q) / (1 - Q) \tag{8}$$

$$P = \frac{n_0 a_0 + n_1 a_1 + n_2 a_2 + \dots + n_m a_m}{n \text{ choose } 2} \tag{9}$$

$$Q = \frac{b_0 a_0^2 + b_1 a_1^2 + b_2 a_2^2 + \dots + b_m a_m^2}{n \text{ choose } 2} \tag{10}$$

여기서, n : 관측치 수, m : 군집의 수

좌표계에 형성된 군집은 비교적 가까운 거리에 위치하므로 비슷한 상태를 가지는 관측점들의 집합이라고 할 수 있다. 따라서 군집을 이루는 관측점들은 상호관련성이 높고 상대적인 침하거동이 같다고 할 수 있다.

데이터 분석

현장 계측기배치

본 논문에서 사용한 데이터는 00시 주상복합 신축건설 공사의 굴착된 지반의 지표침하계 데이터이다. Fig. 3은 계측기



Fig. 3. Instrument installation point.

설치지점 평면도이다. 현장 인근에는 각종 건물 및 도로가 인접하여 위치하고 있으며, 굴착에 의한 영향거리인 굴착고의 2배에 해당하는 40~60 m 범위 안에 위치해 있는 건물은 26개소가 있으며 준공년도는 1973년도부터 2016년도까지 다양하게 분포한다. 대부분 1~2층의 건물과 최대 36층의 건물이 위치해 있으며 건물의 구조형식은 대부분 철근콘크리트조이며 일부 시멘트 벽돌조 및 일반철골구조로 이루어져 있다. 지표침하 시계열 계측데이터 분석 시 S-1, S-4, S-7, S-8, S-17, S-18 지점의 계측데이터를 사용하였다.

계측데이터 분석

Table 2는 분석 시 사용한 각 측정점들의 누적침하량을 보여주며 Table 3은 각 측정점들의 일침하량을 보여준다. 본 현장의 흙막이 벽체 배면 지반의 지표침하계 데이터는 336일 까지 터파기 진행 중 일 때이며, 그 이후로는 터파기 완료 후의 데이터이다. 데이터 분석 시 모든 측정점에서 침하량 변화가 없는 날의 데이터는 고려하지 않았다. 따라서 본 연구대상 지반은 터파기가 거의 완료된 시점부터는 변위가 거의 발생하지 않았다.

Table 2. Accumulated settlement data

Time (day)	S1 (mm)	S4 (mm)	S7 (mm)	S8 (mm)	S17 (mm)	S18 (mm)
1	28	197	-538	-534	362	186
5	28	198	-538	-533	362	186
8	29	198	-539	-534	362	187
12	28	198	-538	-535	361	186
15	28	197	-539	-535	361	185
19	28	197	-540	-533	362	186
22	27	198	-539	-534	361	184
26	28	197	-540	-534	362	185
29	27	197	-539	-535	361	184
89	26	196	-539	-535	361	184
158	26	195	-539	-535	361	184
162	25	195	-539	-535	361	184
176	25	194	-539	-535	361	184
267	25	193	-539	-535	361	184
320	25	193	-540	-536	361	184

Table 3. Daily settlement data

Time (day)	S1 (mm)	S4 (mm)	S7 (mm)	S8 (mm)	S17 (mm)	S18 (mm)
1	0	0	0	0	0	0
5	0	1	0	1	0	0
8	1	0	-1	-1	0	1
12	-1	0	1	-1	-1	-1
15	0	-1	-1	0	0	-1
19	0	0	-1	2	1	1
22	-1	1	1	-1	-1	-2

Table 3. Continued

Time (day)	S1 (mm)	S4 (mm)	S7 (mm)	S8 (mm)	S17 (mm)	S18 (mm)
26	1	-1	-1	0	1	1
29	-1	0	1	-1	-1	-1
89	-1	-1	0	0	0	0
158	0	-1	0	0	0	0
162	-1	0	0	0	0	0
176	0	-1	0	0	0	0
267	0	-1	0	0	0	0
320	0	0	-1	-1	0	0

Table 4는 Dunn Index 최대값과 최적군집 수를 나타낸 것이다. Dunn Index 계산 시 최대 군집 개수는 4개로 설정하였는데 이는 한 계측지점과 양옆으로 인접해 있는 계측지점 끼리의 그룹을 하나의 섹션으로 보았을 때 나올 수 있는 경우의 수가 4가지이기 때문이다. 경우의 수는 Table 5와 같다.

Table 4. Optimal number of cluster according to the majority rule

Time (day)	Dunn	Hubert	Optimal number of cluster
89	0.696	0.082	2
162	0.313	0.092	4
267	0.258	0.084	4
320	0.652	0.071	2

Table 5. Measurement point component by section

Section	Component		
Section 1	S - 18	S - 17	S - 1
Section 2	S - 17	S - 1	S - 4
Section 3	S - 1	S - 4	S - 7
Section 4	S - 4	S - 7	S - 8

Table 6은 Table 3의 일침하량 데이터를 이용하여 시간경과에 따라 평균침하량차지수(AS_{ij})와 평균상대침하량차(\overline{RS}_{ij})를 계산한 결과이다. $D_{1,8}$, $D_{4,18}$, $D_{7,17}$, $D_{7,18}$, $D_{8,17}$, $D_{8,18}$ 는 서로 같은 Section을 이루지 않기 때문에 고려하지 않았다.

Table 6. \overline{RS}_{ij} and AD_{ij} value of D1,4 to D17,18

Time		D_1,4 (cm)	D_1,7 (cm)	D_1,17 (cm)	D_1,18 (cm)	D_4,7 (cm)	D_4,8 (cm)	D_4,17 (cm)	D_7,8 (cm)	D_17,18 (cm)
89	\overline{RS}_{ij}	0.278	0.167	0.556	0.222	0.333	0.167	0.222	0.426	0.556
	AS_{ij}	0.448	0.628	0.083	0.138	0.265	0.500	0.500	0.590	0.083
162	\overline{RS}_{ij}	0.318	0.273	0.545	0.273	0.364	0.273	0.318	0.530	0.636
	AS_{ij}	0.457	0.576	0.100	0.148	0.254	0.457	0.457	0.500	0.059
267	\overline{RS}_{ij}	0.423	0.423	0.692	0.462	0.308	0.346	0.423	0.679	0.769
	AS_{ij}	0.463	0.534	0.075	0.113	0.338	0.500	0.463	0.424	0.044
320	\overline{RS}_{ij}	0.346	0.385	0.615	0.385	0.308	0.308	0.346	0.603	0.692
	AS_{ij}	0.463	0.500	0.075	0.113	0.292	0.463	0.463	0.424	0.044

Fig. 4는 최적군집 수를 이용하여 시간경과에 따라 평균침하량지수(AS_{ij})와 평균상대침하량차(\overline{RS}_{ij}) 계산결과를 $\overline{RS}-AS$ 좌표계에 도시한 것이다. 좌표계의 X표시는 군집의 중심점이다. 초기에 두 개의 군집을 확인할 수 있으며 시간이 경과함에 따라 네 개의 군집을 이루고 320일 부터는 다시 두 개의 군집으로 돌아왔다. 또한, 시간 경과에 따라 침하량이 일정한 값으로 수렴하여 영역2로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 분석결과에서는 군집 형성을 통해 거동영역을 구분하였으며, 시간이 지남에 따라 측정된 데이터가 변화하여 군집 구성원이 변경됨을 확인할 수 있다.

굴착시작 후 89일 뒤의 측정점 간의 관계를 Fig. 4a에서 확인할 수 있다. 89일 뒤의 좌표계에서는 두 개의 군집으로 분류하였으며 평균 침하량 차이 지수의 값에 따라 분류되었다. 즉, Cluster 1은 침하량 차이가 작은 관측점들의 군집이며 Cluster 2는 침하량 차이가 큰 관측점들의 군집이다. Cluster 1에는 침하량 차이가 작고 변위이력이 정규변위차인 Zone 2에 위치해 있는 관측점 $D_{1,17}$ 과 $D_{17,18}$ 이 있다.

Fig. 4b는 계측시점으로부터 162일 경과 후의 두 측정점 간의 상태를 보여준다. 각각의 군집들은 평균 상대 침하량차 값이 달라져 분리되어 총 4개의 군집을 이룬다. Cluster 1-2와 2-2는 89일에서부터 162일 까지 변위이력이 기존의 최대변위차 보다 작기 때문에 평균 상대 침하량차가 커져 유클리드 거리가 벌어져 2개의 군집에서 4개의 군집으로 분리되었다.

Fig. 4c는 계측시점으로부터 267일 후의 두 측정점 간의 상태를 보여준다. 162일이 경과(Fig. 4b)하였을 때보다 관측점들이 Zone 2 방향으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 거동을 보인 것은 각 측정점들의 변위가 일정한 값으로 수렴하면서 침하량차이가 작아지고 더 이상 변위차가 최대로 일어나지 않고 있기 때문이다.

Fig. 4d는 계측시점으로부터 320일 후의 두 측정점 간의 상태를 보여준다. 모든 관측점들이 Zone 2 방향으로 이동하면서 Cluster 1-1과 1-2, Cluster 2-1과 2-2가 병합되었음을 확인할 수 있다. $D_{1,17}$ 과 $D_{17,18}$ 은 Zone 2에 위치하며 같은 군집을 이루고 있다. 즉, $D_{1,17}$ 과 $D_{17,18}$ 은 Zone 2에 위치하여 침하량차이가 작고 정규변위차 이력을 가지며 같은 군집을 이루어 거동추세가 같다. 따라서 동일 거동영역으로 판단할 수 있다. $D_{1,18}$ 은 같은 군집을 이루기는 하지만 측정점 1과 18의 상대 평균 침하량차가 작아 약한 상호관련성을 가진다고 할 수 있다. 이는 공간 분포를 고려하였을 때에도 합리적이라고 할 수 있다. Cluster 2를 이루는 관측점 중 유일하게 Zone 2에 위치한 $D_{7,8}$ 은 측정점 7과 8의 관계로 위와 동일하게 동일거동영역으로 판단할 수 있다. 측정점 4는 Cluster 2에서 측정점 1, 7, 8 및 17과의 관계를 확인할 수 있는데 모두 같은 군집을 이루고 있지만 상대 평균 변위차가 작기 때문에 비교적 약한 상호관련성을 가진다고 할 수 있다. 이러한 분석결과를 바탕으로 320일 경과 후의 거동영역은 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

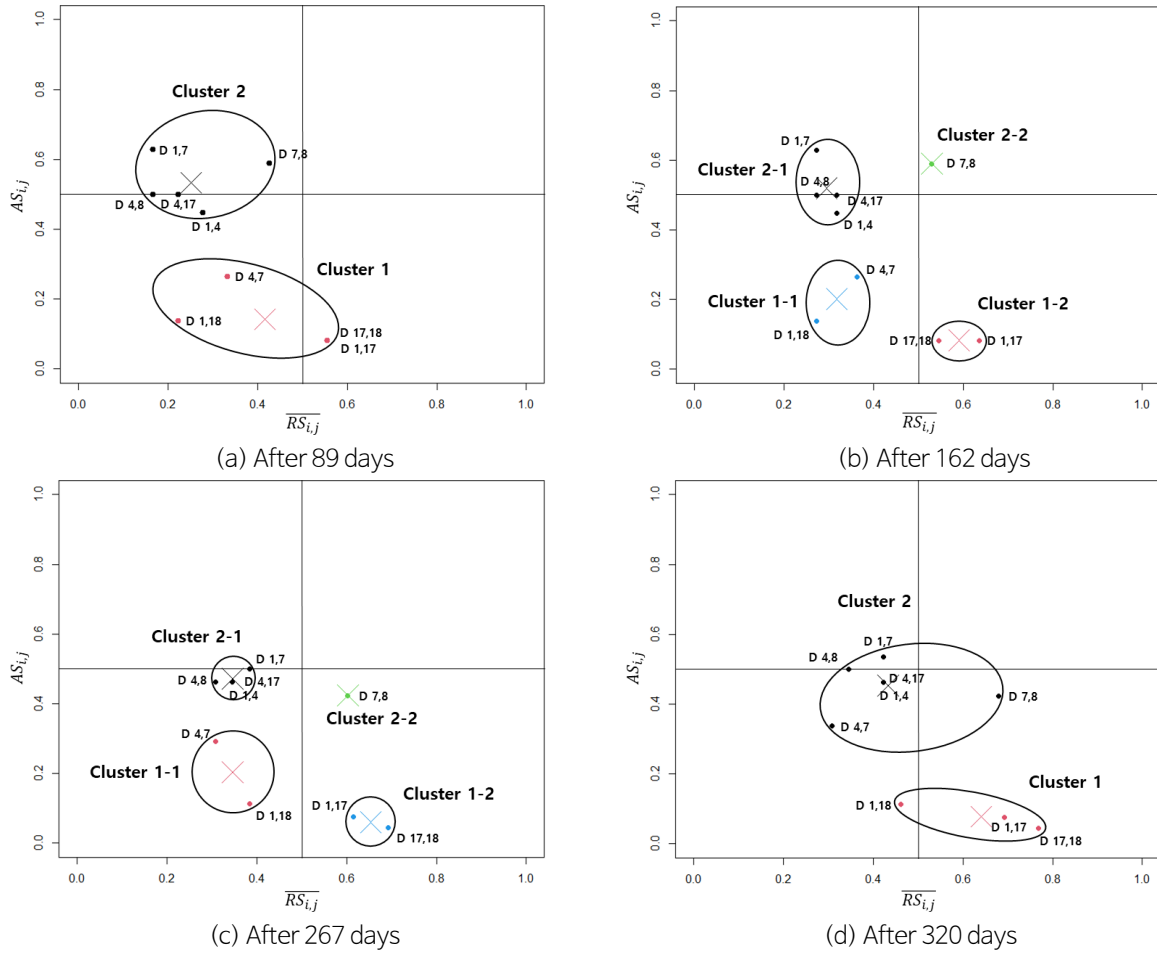


Fig. 4. Time-lapse \overline{RS} - \overline{AS} coordinate system.

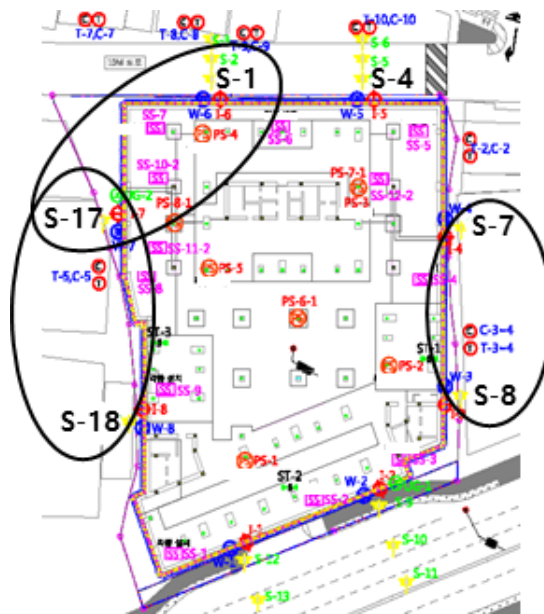


Fig. 5. Classification of settlement behavior areas.

결론

현장의 지표침하계 시계열 데이터를 평균침하량차지수와 평균상대침하량차를 계산하여 측점 간의 상대적 침하거동 분석을 수행하고 좌표계에 나타내었다. 좌표계에 나타난 관측점들을 k-평균군집분석을 이용하여 군집을 구분하였으며 측점 간의 상대적인 침하거동과 상호관련성을 분석하여 거동영역에 대해 해석하였다. 본 연구의 분석결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 평균 침하량 차이 지수를 계산하여 침하량 차이를, 평균 상대 침하량차를 계산하여 두 측점간의 변위차이력을 알 수 있었으며, 이를 통해 상대적으로 안정한 측점을 알 수 있었다.
- (2) k-평균군집분석과 Dunn 지수 및 Hubert 통계량을 이용하여 관측점들의 군집을 구분하였고, 이를 바탕으로 거동 추세가 같은 관측점들의 군집을 분류할 수 있었다. 군집을 이루는 관측점들 간의 관계를 평균 침하량 차이 지수와 평균 상대 침하량차값을 의사결정에 활용함으로써 거동영역을 추론할 수 있었다.
- (3) 시간경과에 따라 측점 간 침하량차가 작아지고, 모든 측점의 침하량이 일정한 값으로 수렴하면서 같은 거동양상을 보여 관측값들이 상대적으로 안정하다고 판단할 수 있는 영역인 Zone 2로 이동하는 것을 확인 할 수 있다.
- (4) 초기에 관측점들은 평균 침하량 차이 지수의 차이로 인해 2개의 군집을 이루었다가 시간이 경과함에 따라 평균 상대 침하량차값의 차이가 커지며 군집이 분리되어 4개의 군집을 이루었다. 하지만, 굴착이 완료 단계에 이르며 각 측점의 침하거동은 일정한 값으로 수렴하여 평균 상대 변위차가 커지며 군집이 병합되어 초기와 같은 2개의 군집을 보였다.

References

- Bae, H.S., Cho, D.H., Seok, K.H., Kim, B.S., Choi, K.R., Lee, J.E., Noh, S.W., Lee, S.C., Son, Y.H., 2004, Data mining, Kyowoo, 315p.
- Berry, M.J.A., Linoff, G., 2011, Data mining techniques, John Wiley & Sons, 821p.
- Jan, J.C., Hung, S.L., Chi, S.Y., Chern, J.C., 2002, Neural network forecast model in deep excavation, Journal of Computing in Civil Engineering, 16(1), 59-65.
- Kim, J.S., 2022, Causes and countermeasures for ground settlement, NARS Current Issues and Analysis, National Assembly Research Service, Korea, 1-4.
- Lee, S.Y., Jang, S.Y., Kim, T.S., Han, H.S., 2015, Analysis of slope safety by tension wire data, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 16(4), 5-12 (in Korean with English abstract).
- Ou, C.Y., Hsieh, P.G., Chiou, D.C., 1993, Characteristics of ground surface settlement during excavation, Canadian Geotechnical Journal, 30(5), 758-767.
- Park, M.C., Lee, S.C., Ryu, H.S., Han, H.S., 2015, A study on the method of slope stability based on the measured data, Proceedings of the Korean Geo-Environment Society 15th Conference, Seoul, 160-163 (in Korean with English abstract).
- Ran, L., Ye, X.W., Zhu, H.H., 2011, Long-term monitoring and safety evaluation of a metro station during deep excavation, Procedia Engineering, 14, 785-792.
- Shi, Y.J., Li, M.G., Chen, J.J., Wang, J.H., 2018, Long-term settlement behavior of a highway in land subsidence area, Journal of Performance of Constructed Facilities, 32(5), 04018063.
- Weiss, S.M., Indurkha, N., 1998, Predictive data mining, Morgan Kaufmann, 225p.