

연약지반의 상대적 침하 거동 분석

곽영준¹ · 한희수^{2*}

¹금오공과대학교 토목공학과 박사과정, ²금오공과대학교 토목공학과 교수

Relative Settlement Analysis of Soft Ground

Young-Jun Kwack¹ · Heui-Soo Han^{2*}

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

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

Abstract

Instruments are installed in soft ground improvement projects to manage economic and safe construction. When analyzing data, the amount of settlement data over time can be used to understand the overall ground settlement behavior, but it is difficult to analyze the interrelatedness between measurement points. Therefore, to analyze the relative compressive settlement behavior between measurement points, the settlement amount and velocity were processed and defined as the mean settlement difference index ($AS_{i,j}$) and the slope difference index ($SDI_{i,j}$). Plotted in the mean settlement difference index - slope difference index ($AS_{i,j} - SDI_{i,j}$) coordinate system. As a result of the analysis of the relative compaction subsidence behavior between the measuring points, the relationship between the measuring points in the average subsidence difference index - slope difference index coordinate system moved to area 1 as the compaction was completed. By continuously plotting the movement path of the observation point in the corresponding coordinate system, the relative settlement behavior between the measurement points was analyzed, and it was possible to check whether the settlement behavior of the two measurement points was stable or unstable depending on the direction of the path.

Keywords: soft ground, surface settlement gauge, average settlement difference index, slope difference index, relative settlement behavior

초 록

연약지반 개량공사 시 계측기를 설치하여 경제적이고 안전한 시공이 이루어지도록 관리한다. 데이터 분석 시 시간에 따른 침하량 데이터를 활용하여 전체적인 지반 침하 거동을 파악할 수 있지만, 계측지점 간 상호관련성을 분석하기에는 어려움이 있다. 따라서 계측지점 간의 상대적인 압밀침하 거동을 분석하기 위하여, 침하량과 속도를 가공하여 평균 침하량 차이 지수와 기울기 차이 지수로 정의한 후, 평균 침하량 차이 지수 - 기울기 차이 지수($AS_{i,j} - SDI_{i,j}$) 좌표계에 도시하였다. 계측지점 간 상대적인 압밀침하 거동 분석결과 평균 침하량 차이 지수 - 기울기 차이 지수 좌표계에 나타난 계측지점 간의 관계가 압밀이 완료됨에 따라 영역 1로 이동하였다. 관측점의 이동 경로를 해당 좌표계에 연속적으로 나타냄으로써 계측지점 간의 상대적인 압밀침하 거동관계를 분석하였으며, 이동경로 방향에 따라 두 계측지점의 압밀침하 거동관계가 안정한 상태인지 불안정한 상태인지 확인할 수 있었다.

주요어: 연약지반, 지표침하판, 평균 침하량 차이 지수, 기울기 차이 지수, 상대적 침하 거동

OPEN ACCESS

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

Received: 14 February, 2023

Revised: 17 May, 2023

Accepted: 19 May, 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.

서론

연약지반 개량공사에 있어서 경제적이고 안전한 시공이 이루어지도록 계측기를 설치하여 관리한다. 계측데이터는 허용잔류침하량 관리, 주변 지역의 측방유동 방지, 단계 성토시의 지반파괴 방지, 지하매설물 터파기 공사 시 활동파괴의 방지, 성토하중 제거 시기 판단 등에 이용된다. 실측데이터를 시각화 할 때 성토고에 따른 침하량 곡선으로 나타내거나 누적 침하량곡선을 그려 전체적인 지반의 거동상태를 파악할 수 있다. 추가적으로 각 측정점간의 상대적인 거동상태를 파악하고 동일 변위 영역을 구분하면 측방유동, 성토체 파괴, 지반파괴 관리 등에 유의미한 도움을 줄 수 있다. 실측데이터를 시각화 할 때는 지표침하계 데이터를 이용하여 성토고에 따른 침하량 곡선으로 나타내거나 누적침하량 곡선을 그려 전체적인 지반의 거동상태를 파악할 수 있다. 또한, 시공 중의 계측관리를 통하여 침하량, 지반의 변형 및 간극수압 등의 실제 지반 거동을 판단하는 유용한 정보를 수집하게 되며, 이후의 시공 단계에서 발생할 수 있는 지반 거동을 사전에 파악하여 연약지반 상의 침하안정과 시공관리 문제점을 파악하고 개선할 수 있다. 계측관리를 통해 설계 시 예상한 지반 거동 특성과 실제 지반 거동과의 차이를 보완하여 시공 중 안정성과 경제성을 확보하도록 하고 있다(Bjerrum, 1967). 성토하중에 의한 연약지반 개량공사의 계측 관련 연구는 기존의 추정방법(Arulrajah et al., 2003)을 활용하여 비교 분석하거나 인공신경망(Kang and Jang, 2010), 시계열 분석모델(Lim et al., 2011; Kang, 2019) 등 다양한 분석기법을 활용하여 장래침하량을 예측하는 연구가 주를 이루고 있으며, 계측관리, 계측기기, 데이터 정리 및 분석과 관련된 연구는 상대적으로 미비하다(Nomura et al., 2008; Jang et al., 2021).

Lee et al.(2015)은 비탈면의 tension wire의 시계열 변위와 계측지점 간의 상호관련성을 분석하여 사면 안정성을 예측할 수 있는 해석기법을 제안한 바 있다. 사면의 실제측데이터를 가공 및 분석하여 계측지점 간 상호관련성 분석결과 계측지점 간 상대적 변위, 거동추세 등을 알 수 있었다. 동일 시점에서의 변위 차이와 변위 이력 중 최대 및 최소 변위 차이를 이용하여 계측지점 간의 상대적인 거동을 분석하였다. 하지만 이와 같은 분석방법을 연약지반 데이터를 분석하고 시각화하는 것에 적절하지 않다. 압밀거동을 따르는 연구대상 지반의 지표침하판 계측데이터를 압밀거동 특성에 맞는 물리량에 관련된 지수들로 최적화할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 계측데이터 활용에 도움을 줄 수 있도록 지표침하판 데이터를 활용하여 계측지점별 상대적 거동관계를 직관적으로 파악하고자 계측데이터 데이터마이닝을 통한 분석방법을 제안하고자 한다. 데이터마이닝은 데이터베이스의 내부구조에 대한 아무런 사전 지식이 없을 때에도 적용될 수 있고 직접적인 방법에 의해서 효능을 향상시킬 수 있는 숨겨진 구조를 얻는데 사용될 수 있다(Bae et al., 2004; Linoff and Berry, 2011). 두 계측지점 간의 상대적인 압밀침하 거동 분석에 필요한 대표적인 물리량에는 압밀 침하량과 압밀 속도가 있다. 두 물리량을 가공하여 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)와 기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$)를 정의하였으며 계측데이터를 활용하여 상대적 압밀침하 거동을 분석하였다.

상대적 침하 거동 분석

두 계측지점의 침하량 차이

대상지반에 계측지점이 N개 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 침하량 차이는 식 (1)과 같이 정의하고, 두 계측지점 간 침하량의 차이이므로 절대값으로 계산한다.

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

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. ∞ 의 공학적 의미는 대상지반의 파괴에 해당한다(Lee et al., 2015; Park et al., 2015). 두 측정지점 간의 침하량 차이는 절대값으로 표현되어 $[0, \infty]$ 사이에서 움직이고 있으므로, $[0^\circ, 90^\circ]$ 사이에서 $[0, \infty]$ 로 움직이는 tan함수의 특성을 이용하여 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. 그러므로 $\sin^2 \alpha_{i,j}$ 은 두 측정점 침하량 데이터의 차이를 거리 차원이 아닌 무차원 상수로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있는 값이다. 이를 평균 침하량 차이 지수(Average index of difference in settlement, $AS_{i,j}$)라 하면, $AS_{i,j} = 0$ 일 경우 침하량 차이가 없는 것을 의미하며, 1이면 침하량 차이가 크다는 것을 의미한다. 이 지수는 대상지반 측정점의 침하량 차이의 평균 침하량 차이 자료에서 구한 값으로, 일시적인 침하에 대한 값이 아니라 계측구간 전체에 대한 침하량 차이 값이다(Lee et al., 2015; Park et al., 2015).

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

두 측정지점의 침하속도 차이

평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)를 이용하여, 계측구간 전체에 대한 침하량자료에서 대상지반의 두 측정지점 사이의 전반적 침하량 차를 구하였으나, 각 지점이 시간별로 얼마나 같이 연동하는가의 여부를 알면 대상지반의 어느 구역이 상대적으로 침하속도가 큰지 알 수 있다. 같은 시간 동안 두 측정점의 침하속도 차이가 크면 두 측정점은 서로 다른 영역 위에서 따로 움직이고 있는 것이고, 침하속도의 차이가 작거나 거의 없다면, 두 측정점은 같은 영역에서 움직이고 있으므로 침하량의 크기와 변화속도 등을 유추할 수 있다. 그러므로 시간에 따른 침하속도의 연동에 관한 지수를 추가 도입할 필요가 있다. 두 측정지점의 침하량 차이를 평균 침하량 차이 지수를 활용하였다면, 침하 그래프의 기울기를 이용하여 두 측정지점의 침하

속도 차이를 정의할 수 있다. Fig. 1의 어떤 한 계측 시점 t_k 에서의 누적 침하량 $S_i(t_k)$ 와 직전의 계측 시점 t_{k-1} 에서의 누적 침하량 $S_i(t_{k-1})$ 을 이용하면 t_k 에서 계측지점 i 와 j 의 침하속도는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$a_i(t_k) = \frac{S_i(t_k) - S_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}, \quad a_j(t_k) = \frac{S_j(t_k) - S_j(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}}, \quad k = 1, 2, \dots, p \quad (5)$$

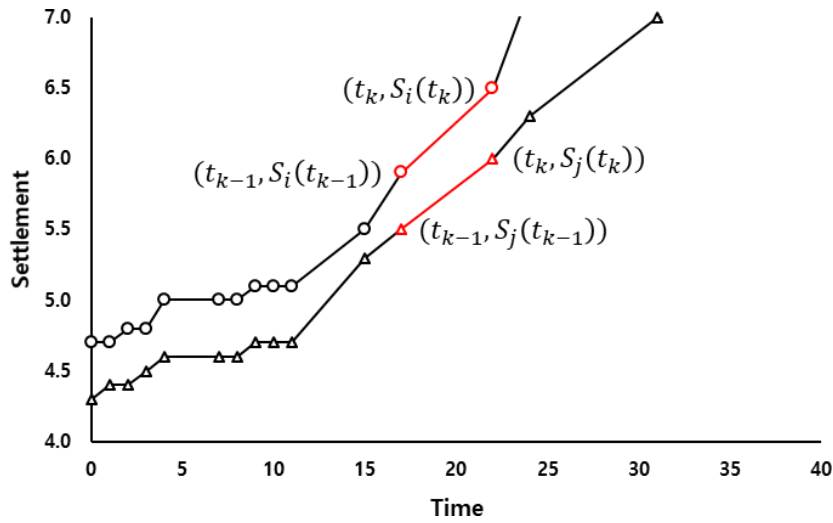


Fig. 1. Slope of measurement points i and j at times t_{k-1} and t_k .

압밀침하 그래프에서 두 계측지점 i 와 j 의 계측 시점(t_k)과 직전의 계측 시점(t_{k-1})의 기울기 차이(Slope Difference, $SD_{i,j}$)는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$SD_{i,j}(t_k, t_{k-1}) = a_i(t_k) - a_j(t_k) = \frac{S_i(t_k) - S_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} - \frac{S_j(t_k) - S_j(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} \quad (6)$$

기울기 차이는 t_k 와 t_{k-1} 에서의 기울기차($SD_{i,j}(t_k - t_{k-1})$)가 작을수록 0에 가까운 값을 보이고, 이는 두 계측지점 사이의 침하속도 차이가 작다는 것을 의미한다. 그리고 $SD_{i,j}(t_k - t_{k-1})$ 값이 클수록 1에 근접하며, 이는 두 측정점 사이의 침하속도 차이가 크다는 것을 의미한다. 이는 i 지점의 데이터와 j 지점의 데이터의 차이에 따라 기울기 차이가 달라질 것이나, 작은 기울기 차이 값이 안정된 상태임을 알 수 있다. 지속적인 기울기 차이를 알기 위한 두 측정점의 시간에 따른 기울기 차이의 평균값은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며 이는 평균 기울기 차이이다.

$$\overline{SD_{i,j}} = \frac{1}{n} \sum_{k=2}^p SD_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=2}^p \left\{ \frac{S_i(t_k) - S_i(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} - \frac{S_j(t_k) - S_j(t_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} \right\} \quad (7)$$

앞 절의 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)를 구할 때와 마찬가지로 식 (8)과 같이 $[0, 1]$ 구간 내의 상수로 바꿀 수 있으며, 이를 기울기 차이 지수(Slope Difference Index, $SDI_{i,j}$)라 정의하며 식 (8)과 같다.

$$SDI_{i,j} = \frac{(\overline{SD}_{i,j})^2}{1 + (\overline{SD}_{i,j})^2} \quad (8)$$

기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$)는 [0, 1] 사이의 무차원수이다. $SDI_{i,j}$ 값이 작거나 0에 근접하면 i, j 구간의 데이터 series는 침하속도의 차이가 없는 유사한 거동 추세를 보이고, $SDI_{i,j}$ 값이 크거나 1에 근접하면 i, j 구간의 데이터 series는 침하속도가 큰 불안정한 모양을 가지게 된다. 다시 말해 기울기 차이 지수는 평균치라는 개념을 이용하고 있으므로, 안정적인 데이터와 불안정한 데이터 모두 평균치는 같을 수 있으나, 계측데이터를 시간별 그래프로 그려보면 유사한 거동을 보이는 각 측정점의 시간별 데이터는 같은 거동 추세를 따른다.

좌표시스템

두 측정점 침하량의 차이인 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)와 데이터 series의 시간별 압밀 속도 유사성인 기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$)를 따로 사용하는 것이 아니라 함께 사용하면 두 측정점의 시계열 데이터의 침하량차의 정도 및 추세의 비슷한 정도를 동시에 나타낼 수 있다. Fig. 2와 같이 평균 침하량 차이 지수와 기울기 차이 지수를 각각 좌표의 한 축으로 하여 그래프로 표현할 수 있고 4개의 영역으로 나눌 수 있다(Weiss and Indurkha, 1988; Linoff and Berry, 2011).

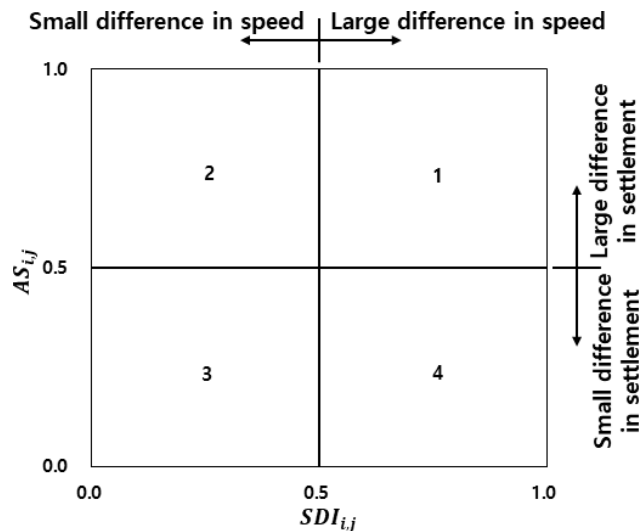


Fig. 2. $SDI_{i,j}$ - $AS_{i,j}$ coordinate system.

Fig. 2의 영역 1은 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)와 기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$)가 0.5보다 큰 영역으로, 두 계측지점이 침하량과 침하속도가 큰 차이를 가지는 관측점이 위치할 것이다. 영역 3은 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)와 기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$)가 0.5보다 작은 영역이다. 영역 2는 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)가 0.5보다 크고 기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$)가 0.5보다 작은 영역이다. 관측점이 영역 2에 위치하면 두 계측지점의 관계는 침하량 차이가 상대적으로 크지만, 침하속도 차이는 작다고 할 수 있다. 하지만 침하량 차이가 크고 침하속도 차이는 작은 거동은 거의 불가함으로 관측점이 위치할 수 없는 영역이다. 두 계측지점의 관계를 나타내는 관측점이 영역 3에 위치하면 영역 1과 반대로 두 측정점은 상대적으로 작은 침하량과 속도 차이를 가진다고 할 수 있다. 영역 4는 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)가 0.5보다 작고 기울기 차이 지수

($SDI_{i,j}$)가 0.5보다 큰 영역으로, 관측점이 영역 4에 위치하면 두 계측지점의 침하량 차이는 상대적으로 작고 침하속도 차이가 상대적으로 큰 관계를 띤다.

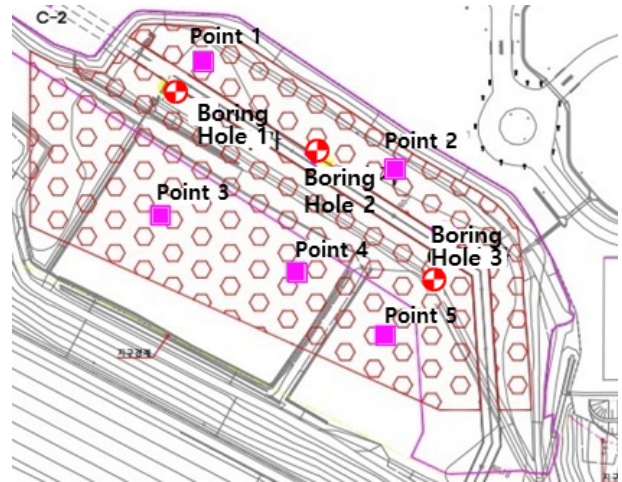
현장적용 및 데이터분석

현장 계측설치

본 연구는 연약지반 개량공사현장의 지표침하계측데이터를 이용하였다. Fig. 3a는 연약지반 개량공사현장을 보여주며 지표침하계의 설치 위치는 Fig. 3b의 Point 1~5이다. 각 계측지점의 최종성토고는 Table 1과 같다.



(a) Soft ground improvement site



(b) Cross-section of instrument installation points

Fig. 3. Soft ground improvement site and cross section.

Table 1. Embankment height for each measuring point

Classification	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5
Embankment height (m)	6.13	6.83	6.51	6.63	6.56

Table 2와 Table 3은 각각 Fig. 3b의 Boring Hole 1~3의 지층분포와 연약층 실내시험 결과를 나타낸 것이다.

Table 2. Stratum distribution

Classification	Fill layer			Alluvium			Soft rock
	Depth	Composition	N - value (TCR/RQD)	Depth	Composition	N - value (TCR/RQD)	Depth
Boring Hole 1	0.0~5.8	Sand	5~13/30	5.8~17.8	Silt (ML)	1~5/30	17.8~19.8
Boring Hole 2	0.0~5.3	Sand	5~12/30	5.3~16.4	Clay (ML)	1~5/30	16.4~18.0
Boring Hole 3	0.0~2.5	Sand	6~7/30	2.5~16.7	Clay (CL)	1~7/30	16.7~18.7

Table 3. Analysis result of soft layer laboratory test

Classification	Soft layer depth (m)	Soft layer thickness (m)	Wn (%)	LL (%)	PI (%)	U.S.C.S.
Boring Hole 1	7.0~8.0	12.0	30.3	31.9	8.1	ML
Boring Hole 2	6.0~7.0	11.1	29.4	33.5	9.5	ML
Boring Hole 3	5.0~6.0	13.5	30.3	38.3	13.7	CL

계측데이터 분석

Table 4는 성토가 끝난 시점에서부터 143일 후의 누적침하량 데이터를 나열한 것이며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 4와 같다. Table 5는 일침하량을 나열한 것으로 성토 완료 후 45일과 52일 사이 일주일간 침하가 크게 발생한 것을 확인할 수 있다. 침하량 변화가 없는 날의 데이터는 계측지점 간의 연관성 분석을 위해 고려하지 않았다. 이를 통해 분석대상 전체 지반에서 부등침하가 발생하는 것을 알 수 있으며, 압밀이 진행됨에 따라 일정 값으로 수렴함을 알 수 있다.

Table 4. Accumulated settlement data

Time (day)	Point 1 (mm)	Point 2 (mm)	Point 3 (mm)	Point 4 (mm)	Point 5 (mm)
1	47	44	33	42	42
2	48	44	34	42	42
3	48	45	35	44	42
4	50	46	35	45	44
7	50	46	36	46	45
8	50	46	37	47	46
9	51	47	38	49	47
10	51	47	39	50	48
11	51	47	40	50	48
15	55	53	44	54	52
17	59	55	48	59	57
22	65	60	54	63	61
24	72	63	58	67	64
31	78	70	64	70	67
38	82	75	70	73	69
45	90	77	73	75	70
52	90	88	84	82	74
59	92	92	86	83	75
66	94	98	88	86	79
72	95	100	90	92	83
80	96	101	91	93	84
87	97	101	92	93	86
94	98	102	93	94	87
101	98	102	94	94	88
115	98	103	94	94	88
129	98	103	94	94	88
143	95	101	91	92	84

Table 5. Daily settlement data

Time (day)	Point 1 (mm)	Point 2 (mm)	Point 3 (mm)	Point 4 (mm)	Point 5 (mm)
1	0.0	1.0	0.0	1.0	1.0
2	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0
3	0.0	1.0	1.0	2.0	0.0
4	2.0	1.0	0.0	1.0	2.0
7	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
8	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
9	1.0	1.0	1.0	2.0	1.0
10	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0
11	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0
15	4.0	6.0	4.0	4.0	4.0
17	4.0	2.0	4.0	5.0	5.0
22	6.0	5.0	6.0	4.0	4.0
24	7.0	3.0	4.0	4.0	3.0
31	6.0	7.0	6.0	3.0	3.0
38	4.0	5.0	6.0	3.0	2.0
45	8.0	2.0	3.0	2.0	1.0
52	0.0	11.0	11.0	7.0	4.0
59	2.0	4.0	2.0	1.0	1.0
66	2.0	6.0	2.0	3.0	4.0
72	1.0	2.0	2.0	6.0	4.0
80	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
87	1.0	0.0	1.0	0.0	2.0
94	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
101	0.0	0.0	1.0	0.0	1.0
115	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0
129	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
143	-3.0	-2.0	-3.0	-2.0	-4.0

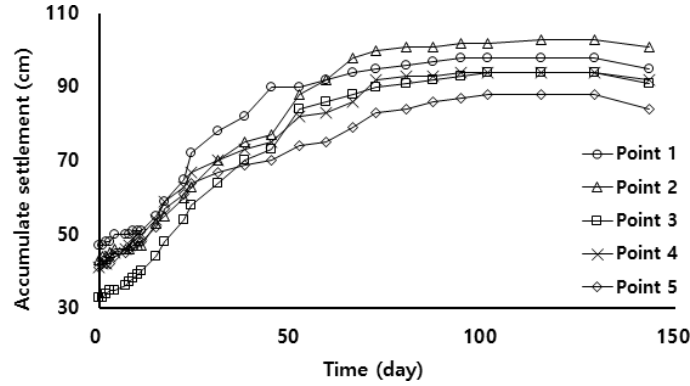


Fig. 4. Accumulate settlement graphs of point 1 to 5.

각 계측지점의 연관성을 찾기 위해 성토종료 후 22일, 52일, 101일과 143일의 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)와 기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$) 계산 결과를 Table 6에 나타내었으며 이를 Fig. 5와 같이 $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ 좌표계에 도시하였다. 이처럼 시간에 따른 분석결과를 좌표계에 나타내어 연약지반의 상재 하중에 의한 상대적인 침하 거동상태를 확인할 수 있다. Table 6의 $S_{i,j}$ 는 Point i와 j의 관계를 보여준다.

Table 6. $\overline{RS}_{i,j} - AS_{i,j}$ table at 22, 52, 101 and 143 day

Time (day)		$S_{1,2}$ (mm)	$S_{1,3}$ (mm)	$S_{1,4}$ (mm)	$S_{1,5}$ (mm)	$S_{2,3}$ (mm)	$S_{2,4}$ (mm)	$S_{2,5}$ (mm)	$S_{3,4}$ (mm)	$S_{3,5}$ (mm)	$S_{4,5}$ (mm)
22	$SDI_{i,j}$	0.56514	0.61604	0.77325	0.52279	0.72078	0.63064	0.63064	0.65570	0.65570	0.39024
	$AS_{i,j}$	0.12440	0.61985	0.08649	0.16125	0.44751	0.03566	0.01881	0.48438	0.41281	0.01681
52	$SDI_{i,j}$	0.68371	0.68331	0.77542	0.64362	0.61550	0.58799	0.60005	0.58853	0.65154	0.35145
	$AS_{i,j}$	0.19291	0.61811	0.18233	0.32535	0.38027	0.04484	0.06899	0.40336	0.34971	0.04706
101	$SDI_{i,j}$	0.57287	0.53444	0.67537	0.53533	0.50521	0.49929	0.50756	0.48527	0.52865	0.27242
	$AS_{i,j}$	0.17214	0.52910	0.18726	0.42059	0.39735	0.13793	0.29830	0.28800	0.35136	0.12156
143	$SDI_{i,j}$	0.52062	0.47562	0.62408	0.47982	0.45347	0.44419	0.45920	0.43049	0.47318	0.23654
	$AS_{i,j}$	0.17734	0.49461	0.17958	0.43162	0.40498	0.17062	0.36000	0.24615	0.34453	0.14006

초기에 $S_{1,3}$ 와 $S_{4,5}$ 를 제외한 관측점들이 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)가 0.5보다 작고 기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$)가 0.5보다 커 영역 4에 속해 있다. 따라서 초기에 전체적으로 두 계측지점의 관계가 침하량 차이는 크지 않지만, 침하속도에 차이가 있음을 알 수 있다. 압밀이 진행됨에 따라 관측점들이 영역 3으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 계측지점 1과 3은 공간적인 분포로 보았을 때 비교적 가까이 위치하여 있다. 하지만 초기에 침하량과 속도의 차이가 커 영역 4에 위치하고 있다. 이와 다르게 $S_{4,5}$ 는 계측지점 4와 5의 침하량과 침하속도 차이가 작아 하중 재하 3~15일 후를 제외한 시간에서 영역 1에 위치하고 있다.

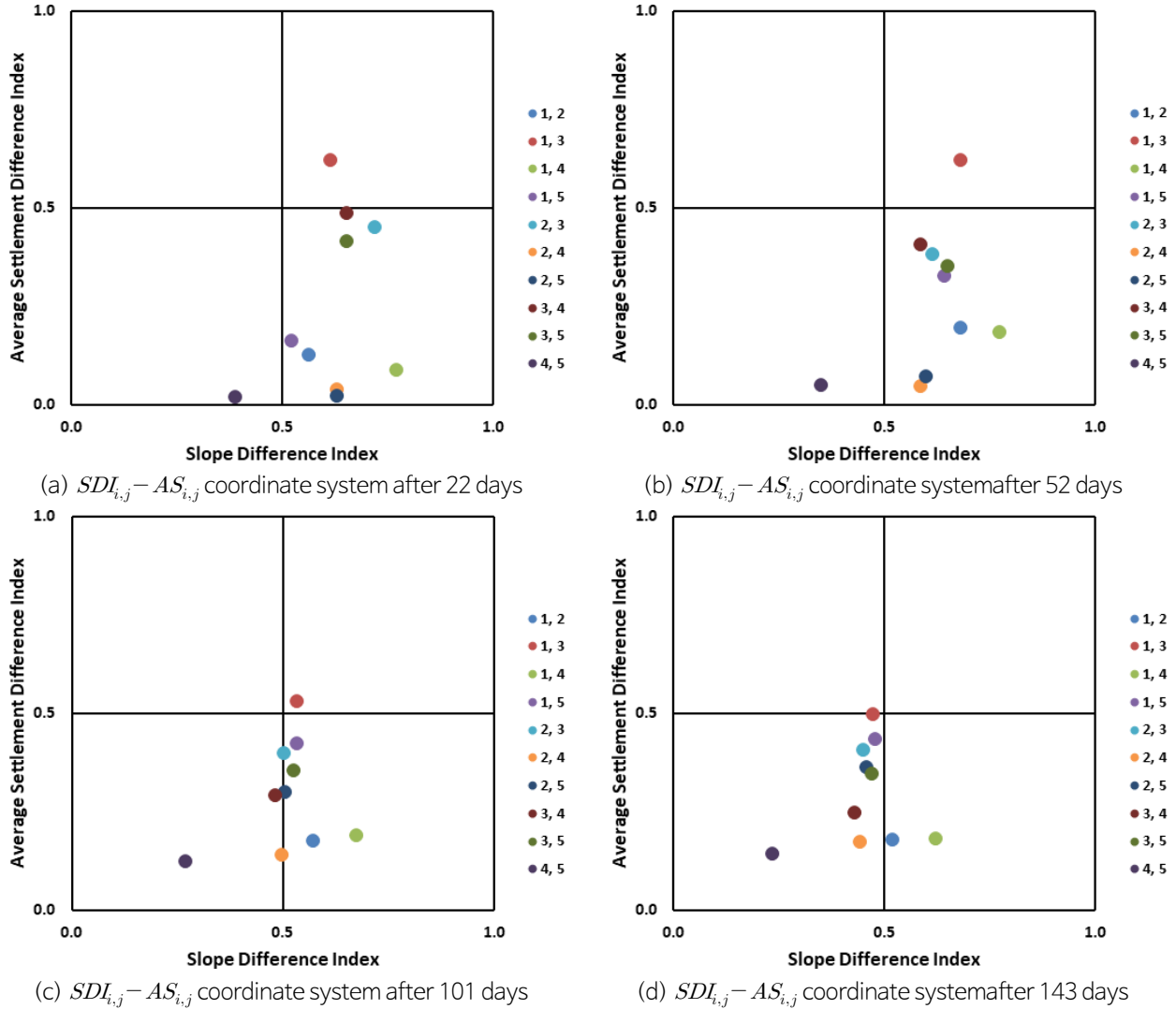


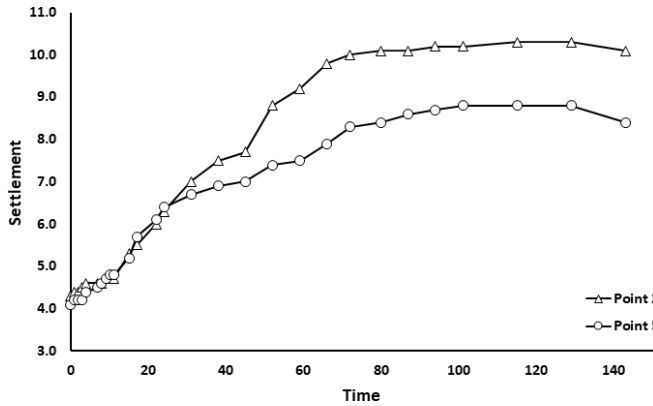
Fig. 5. $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ coordinate system application.

$SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ 좌표계에 두 계측지점의 상대적인 침하 거동을 표현한 관측점 $S_{i,j}$ 의 자취를 시간 경과에 따라 표현하면 관측점의 이동 방향에 따라 두 계측지점의 상대적인 침하 거동을 확인할 수 있다.

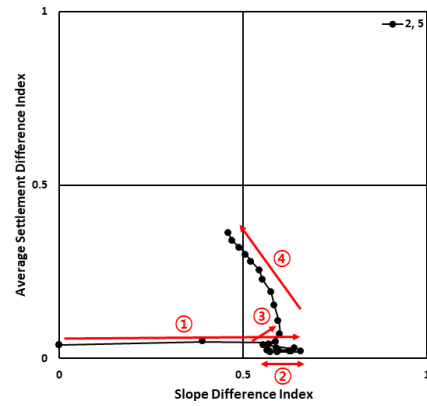
Fig. 6a는 두 계측지점의 누적 침하량 그래프를 나타낸 것이며, Fig. 6b는 두 계측지점 2와 5의 관계를 나타내는 관측점인 $S_{2,5}$ 을 $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ 좌표계에서의 이력을 나타낸 것이다. 계측지점 2와 5는 초기에 비슷한 거동을 보이다가 31일 후부터 침하량 차이가 벌어지는 것을 Fig. 6a를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 6b에서 초기 관측점이 영역 1에 위치하여 있다. 하지만 두 계측지점의 압밀침하속도가 서로 다른 거동을 보이면서 영역 4로 이동하였다. 그 후, 압밀이 진행됨에 따라 두 계측지점의 침하속도는 일정해졌지만, 침하량 차이가 벌어지기 시작하면서 관측점이 좌상향하는 거동을 보였다. Fig. 6b의 경로 ①은 하중 재하 후 1~6일 경과하였을 때의 이동 경로이다. 초기에 두 계측지점의 침하량 차이의 변화는 거의 없지만, 침하속도 차이가 커지며 관측점($S_{2,5}$)이 우측으로 이동하여 영역 4에 위치하게 되었다. 경로 ②는 하중 재하 후 7~56일 경과하였을 때의 이동 경로이다. 경로 ②에 해당하는 기간은 1단 성토 완료 후 방치기간으로 압밀침하량과 침하속도의 차이가 작은 폭으로 커졌다 작아졌다가 반복하였다. 경로 ③은 하

중 재하 후 57~78일 경과하였을 때의 이동 경로이다. 이 기간은 2단 성토 기간에 해당한다. 이 기간 동안 두 계측지점의 성토고가 같음에도 불구하고 침하량과 속도 차이가 커져 우상향 거동을 보였다. 경로 ④는 78~143일 경과 후의 경로로, 성토 완료 후 방치 기간에 해당한다. 두 계측지점의 최종 성토고가 달라 압밀침하량이 수렴하는 값이 달라졌지만 압밀이 완료됨에 따라 침하가 거의 발생하지 않아 침하속도 차이는 줄어들며 좌상향 거동을 보였다.



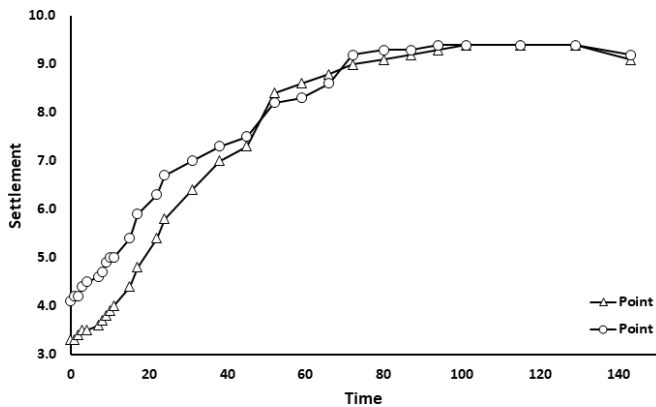
(a) Accumulate settlement graph of Point 2 and 5



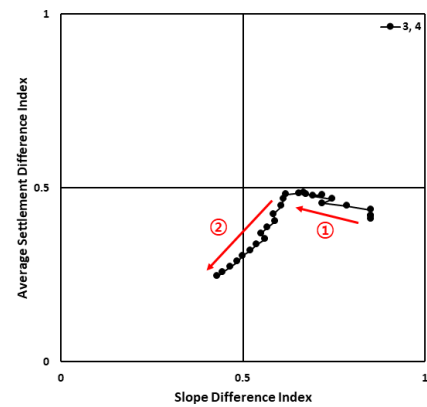
(b) History of $S_{2,5}$ on $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ coordinate system

Fig. 6. $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ coordinates and settlement graph.

Fig. 7은 Fig. 6과 반대되는 거동을 보이는 두 계측지점의 압밀침하 거동 관계를 보여주는 그림이다. Fig. 7a에서 두 계측지점 3과 4는 하중 재하 초기에 비교적 큰 침하량 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 하지만 압밀이 진행되면서 침하량 차이가 점점 작아지면서 하중 재하 101일 후에는 압밀침하량이 같아졌다. Fig. 7b의 경로 ①은 하중 재하 후 1~23일 경과 하였을 때의 이동경로이다. 이 기간 동안 두 계측지점 간의 침하량 차이가 커지며 평균 침하량 차이 지수 값이 커졌으며, 변위속도 차이도 작아지며 기울기 차이 지수 또한 감소하여 좌상향하는 거동을 보였다. 즉, Point 3과 4는 하중재하 초기에 큰 탄성 침하량 차이를 보였으며(Table 4 참조) 이후의 시공 단계에서 적절한 조치를 취해야할 필요가 있음을 알 수 있다. Fig. 7b의 경로 ②는 하중 재하 24~143일 후의 계측지점 3과 4의 관계를 보여준다. 24일 후부터 침하량과 속도의 차이가 작아지면서 좌하향하는 거동을 보여 두 계측지점의 침하 거동이 상대적으로 안정된 관계를 보였다.



(a) Accumulate settlement graph of point 3 and 4



(b) History of $S_{3,4}$ on $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ coordinate system

Fig. 7. Settlement graph and $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ coordinates of $S_{3,4}$.

결론

본 연구에서는 연약지반에 설치된 지표침하판 데이터에 대해 데이터마이닝을 이용하여 계측지점 간 상대적 침하 거동 분석을 수행하였다. 시계열 데이터로 표현하여 분석하는 것이 아니라 평균 침하량 차이 지수와 기울기 차이 지수를 정의하고 산출하여 이러한 본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 상재 하중에 의한 연약지반 압밀거동 양상 중 각 계측지점의 시계열 데이터의 전반적인 차이를 침하량 차이 지수를, 침하속도 차이를 나타내기 위하여 기울기 차이 지수를 정의하여 계측지점 간 상대적인 압밀침하 거동 관계를 수치로 나타내었다.
- (2) 계측지점 간 상대적인 압밀침하 거동 관계를 수치화하기 위해 정의한 평균 침하량 차이 지수($AS_{i,j}$)와 기울기 차이 지수($SDI_{i,j}$)를 각각 좌표계의 한 축으로써 에 도시하여 계측지점 간의 상대적 침하 거동을 확인할 수 있었다. 압밀이 진행됨에 따라 침하속도와 침하량이 일정해 지면서 대부분의 관측점이 영역 1 방향으로 이동하였다.
- (3) 관측점($S_{i,j}$)들의 이동 경로, 즉 상대적 침하 거동 이력을 $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ 좌표계 나타내었을 때 이동 방향에 따라 두 계측지점의 압밀침하 거동 관계를 파악할 수 있었다. $SDI_{i,j} - AS_{i,j}$ 좌표계에 도시한 관측점의 이동 경로가 좌하향 거동을 보이면 침하량과 속도 차이가 줄어들어 두 계측지점의 침하 거동이 상대적으로 안정한 상태라고 할 수 있으며, 침하량과 속도 차이가 늘어나 두 계측지점의 압밀침하 거동 관계가 상대적으로 불안정한 상태라고 할 수 있다.

평균 침하량 차이 지수와 기울기 차이 지수를 이용하여 각 계측지점 간 변위량 차이 및 변위속도 차이를 수치화하여 좌표계에 도시함으로써 두 계측지점 간의 상대적 침하 거동을 직관적으로 확인할 수 있었으며, 좌표계에 도시한 관측점을 시간 경과에 따라 경로를 분석하여 연약지반 개량 시 침하안정 관리와 시공관리 문제점을 찾아 이후의 시공 단계 조절의 사결정에 유용할 것으로 판단된다.

References

- Arulrajah, A., Nikraz, H., Bo, M.W., 2003, Factors affecting field settlement assessment and back-analysis by the Asaoka and hyperbolic methods, *Australian Geomechanics*, 38(2), 29-37.
- 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.
- Bjerrum, L., 1967, Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings, *Géotechnique*, 17(2), 83-118.
- Jang, J.G., Son, S.W., Hong, S.W., 2021, A study on the analysis of monitoring settlement considering the history of the groundwater level in the dredged landfill area affected by algae, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 37(7), 13-23 (in Korean with English abstract).
- Kang, S.Y., 2019, A comparative study on the prediction of the final settlement using preexistence method and ARIMA method, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 20(10), 29-38 (in Korean with English abstract).
- Kang, Y.K., Jang, W.I., 2010, A study on subsidence of soft ground using artificial neural network, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, 34(6), 914-921 (in Korean with English abstract).
- 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).
- Lim, E.S., Kim, J.H., Lee, J.W., 2011, A prediction method of settlement based on field data using ARIMA model,

- Proceedings of the Korean Geo-Environmental Society, Incheon, 247-250 (in Korean with English abstract).
- Linoff, G.S., Berry, M.J., 2011, Data mining techniques: For marketing, sales, and customer relationship management, John Wiley & Sons, 821p.
- Nomura, S., Ikeda, T., Katagiri, M., Terachi, M., 2008, Consolidation settlement prediction of reclaimed land with dredged clay case record of Kita-Kyushu airport, Journal of the Japanese Geotechnical Society, 56(9), 10-13.
- 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 Conference (15th Anniversary), Seoul, 160-163 (in Korean with English abstract).
- Weiss, S.M., Indurkha, N., 1998, Predictive data mining, Morgan kaufmann, 225p.