

시그모이드 함수를 이용한 다중 계측데이터 모니터링 시스템

송정호¹ · 신준우² · 한희수^{3*}

¹금오공과대학교 토목공학과 석사과정, ²금오공과대학교 토목공학과 박사과정,

³금오공과대학교 토목공학과 교수

Multimetric Measurement Data Monitoring System Using Sigmoid Function

Jeong-Ho Song¹ · Jun-Woo Shin² · Heui-Soo Han^{3*}

¹Master Student, Department of Civil Engineering, Kumoh Institute of Technology

²Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Kumoh Institute of Technology

³Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh Institute of Technology

Abstract

In order to intuitively grasp the earth pressure direction acting on the structure and displacement state, displacement data in the horizontal and vertical directions were processed using the sigmoid function. A displacement coordinate system was set up for each axis. The system can intuitively check the current displacement and assess the management stage of each point. A displacement path can be compiled from continuously recorded points, allowing trends in the displacement's history and stress direction to be known. Analysis of data measured for excavated ground, found that displacement occurred in the direction of destressing at all points, and that the points' management state steady. Similar behavior trends were found among measurement points with high spatial correlation, whereas differing behavior trends occurred among measurement points with low spatial correlation. If the correlation analysis of the precursor and behavior area is performed using the continuously distributed surface settlement data and displacement coordinate system, it will be possible to predict the failure time and area.

Keywords: measurement data, monitoring system, sigmoid function, displacement coordinate system, displacement path

OPEN ACCESS

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

Received: 13 December, 2022

Revised: 12 January, 2023

Accepted: 31 January, 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

구조물에 작용하는 토압의 방향과 장기변위상태변화를 직관적으로 파악하기 위해 수평, 수직방향의 변위 데이터를 시그모이드 함수를 이용하여 가공하고 각각 좌표계의 한 축으로 하여 변위좌표계 시스템을 설정하였다. 이러한 변위좌표계에 변위상태(압축 또는 팽창) 구분영역과 관리단계 구분영역 설정하여 각 계측지점의 변위상태와 관리단계를 직관적으로 확인할 수 있었다. 관측점을 연속적으로 나타내어 변위경로를 나타내었으며, 변위경로를 통해 변위이력, 변위추세, 지반에 작용하는 응력방향 등을 알 수 있었다. 흙막이 가시설의 실제계측데이터 분석 결과 모든 계측지점에서 응력해방 방향으로 변위가 일어났으며, 정상관리상태에 위치하였다. 또한 공간적 상관성이 높은 계측지점 간 거동은 비슷한 거동추세를 보였으며, 공간적 상관성이 낮은 계측지점 간에는 상이한 거동 추세를 보였다. 공간적으로 연속되어 분포하는 지표침하데이터를 변위좌표계를 이용하여 전조현상과 거동영역에 대한 상관성 분석을 수행하면

파괴시간, 영역 예측이 가능 할 것으로 판단된다.

주요어: 계측데이터, 모니터링 시스템, 시그모이드 함수, 변위 좌표계, 변위 경로

서론

일반적으로 토목구조물은 오차를 포함하는 재료물성치와 이상화된 거동해석 모델에 의해 설계되고 있으며 계산에 의한 지반 및 구조물의 변위는 지반 구성의 복잡성으로 인해 실제 변위량과는 일치하지 않는 경우가 대부분이다. 이에 대한 예로 Do et al.(2010)은 흙막이벽에 발생하는 수평변위 현장 계측데이터와 수치해석 예측치를 비교하였으며 그 결과 상당한 차이를 보인다고 하였다. 그러므로 시공 중 또는 시공완료 후 발생할 수 있는 문제들을 사전에 예방하기 위해 지반거동을 지속·상시적으로 파악하기 위한 다양한 계측기술 및 효과적인 분석기법이 필요하다.

Choo et al.(2010)은 계측데이터 기반 연약지반의 침하 예측 방법인 쌍곡선법을 회귀 방법 및 기간을 다양하게 바꾸어 기존 분석 방식의 최적화 방안을 제시하기도 하였으며, Byun et al.(2020)은 하나의 계측데이터만을 사용하거나 센서가 부착된 위치의 변위만을 추정하고 있어 건전도 모니터링 시스템에 적용하기에 한계가 있어 다중 계측데이터(변위, 각도, 변형률)를 활용하여 구조물 전체의 변형형상을 추정할 수 있는 알고리즘을 개발하여 유한요소 해석 결과로 유효성을 검증하였다. Park et al.(2011)은 비탈면의 다중 계측데이터로 TDR 센서와 지중경사계를 이용하여 함수비와 수평변위에 따른 횡방향 토압을 해석 하였다. Lee et al.(2020)은 구조물의 상태 변화를 모니터링하기 위한 방법으로 계측데이터의 모니터링 방법론을 제안하여 공용중인 교량의 상시 계측데이터를 활용하여 이에 대한 효용성을 검토한 바 있다. Lee et al.(2015)은 tension wire 데이터를 가공하여 (0, 1) 범위의 평균변위차지수와 평균상대변위차를 정의 및 계산하고 좌표계에 나타내어 계측지점간 상호관련성을 분석하였으며, Kim et al.(2014)은 실제 케이스 방파제에서 장기간 계측된 침하 자료를 분석하여 정성적인 측면에서 파동에 의한 케이스의 침하 경향과 그 원인을 분석하였다. Han and Song(2003)은 사진측량을 활용하여 사면지반의 지표변위를 계측하고 현장에 적용하여 사면의 지표변위를 검토 및 제시한 바 있다.

이와 같이 계측데이터 기반 모니터링 시스템에서 지반의 상태를 파악할 수 있는 대표적인 거동 응답 중에 하나로 변위 데이터를 이용하고 있다. 현장 계측을 통한 변위 데이터는 시계열 데이터로, 시계열 데이터는 가로축이 시간항으로 $(-\infty, \infty)$ 의 범위를 가진다. 지반 또는 구조물의 장기안정성 문제를 분석하기 위해서는 가로축(시간)의 축척조절이 불가피하다. 따라서 본 연구에서는 지반의 변위상태(압축 또는 팽창)를 고려할 수 있고, $(-\infty, \infty)$ 의 범위를 (0, 1)의 범위로 변환해주는 시그모이드 함수를 이용하여 흙막이 가시설 배면에 설치된 지중경사계와 지표침하계 데이터를 가공하였다. 지중경사계를 이용하여 수평변위를, 지표침하계를 이용하여 수직변위를 나타내었으며 이를 각각 변위좌표계의 한 축으로 하여 수평, 수직변위에 따른 지반거동상태를 분석하였다.

변위좌표계

시그모이드 함수

흙은 파괴 시 부피변화를 동반하며 주동토압을 받는 경우 Fig. 1a와 같이 변위가 $+\infty$ 방향(굴착방향)으로 발생할 것이며, 수동토압을 받는 경우 Fig. 1b와 같이 변위가 $-\infty$ 방향(배면방향)으로 발생할 것이다. 여기서 ∞ 의 공학적 의미는 무한한 변형을 말하며 이는 파괴에 해당한다.

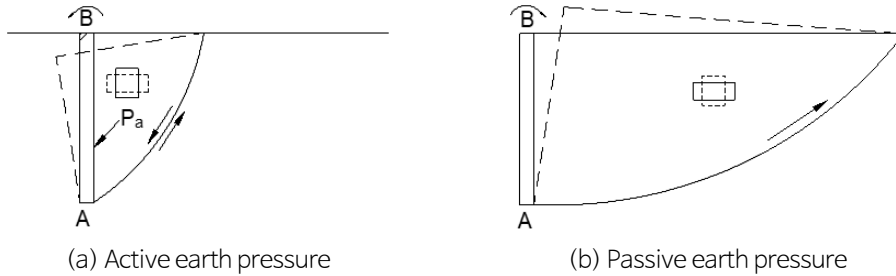


Fig. 1. Active and passive earth pressure.

시그모이드 함수는 $(-\infty, \infty)$ 범위의 값을 $(0, 1)$ 범위의 값으로 변환해 주며 독립변수가 0일 때 0.5의 값을 가진다. 독립변수가 양수일 경우 0.5보다 큰 값을 가지며, 독립변수가 음수일 경우 0.5보다 작은 값을 가진다. 기본적으로 식 (1)과 같은 형태를 가지며, 이를 좌표계 나타내면 Fig. 2와 같다.

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \begin{cases} x > 0, S(x) > 0.5 \\ x = 0, S(x) = 0.5 \\ x < 0, S(x) < 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

지중경사 데이터로 수평방향 변위량을 알 수 있으며, 식 (2)를 이용하여 변환하면 $(-\infty, \infty)$ 범위의 데이터를 $(0, 1)$ 범위로 변환할 수 있다. 변환된 값은 수평방향으로 변위가 없으면 $Sigmoid(\Delta h)$ 는 0.5가 된다. 지반이 수평방향으로 팽창하면 데이터는 양수로 표현되고 이를 시그모이드 함수를 이용하여 변환하면 $Sigmoid(\Delta h)$ 는 0.5보다 큰 값을 가진다. 반대로 수평방향으로 압축되면 $Sigmoid(\Delta h)$ 는 0.5보다 작은 값을 가진다.

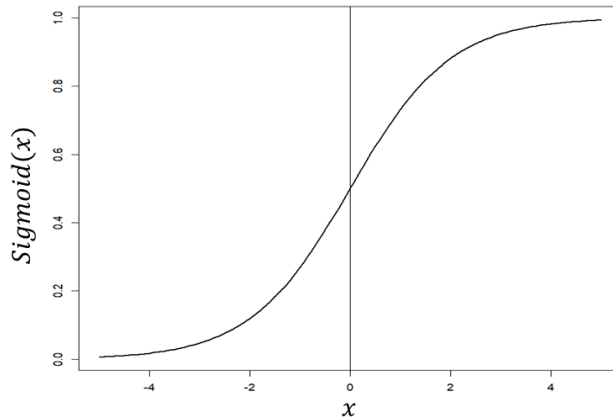


Fig. 2. Sigmoid curve.

지표침하 데이터로 수직방향 변위량을 알 수 있으며, 지표침하계 데이터를 식 (3)을 이용하여 변환하면 $(-\infty, \infty)$ 범위의 데이터를 $(0, 1)$ 범위로 변환할 수 있다. 독립변수가 수직변위일 경우 변위가 없으면 $Sigmoid(\Delta v)$ 는 0.5값을 나타낸다. 지반이 수직방향으로 팽창하면 $Sigmoid(\Delta v)$ 는 0.5보다 큰 값을 가지며, 수직방향으로 압축되면 $Sigmoid(\Delta v)$ 는 0.5보다 작은 값을 가진다. Table 1은 시그모이드 함수를 이용하여 변환한 값에 따른 지반거동상태를 보여준다. 지반의 수평변위 대푯값은 해당 계측지점의 최대수평변위량으로 하였다.

$$Sigmoid(\Delta h) = \frac{1}{1 + e^{-\Delta h_{max}}} \tag{2}$$

$$Sigmoid(\Delta v) = \frac{1}{1 + e^{-\Delta v}} \tag{3}$$

여기서, Δh_{max} 는 계측지점의 최대 수평 변위량이며, Δv 는 수직 변위량이다.

Table 1. Behavior state according to the value converted using a sigmoid function

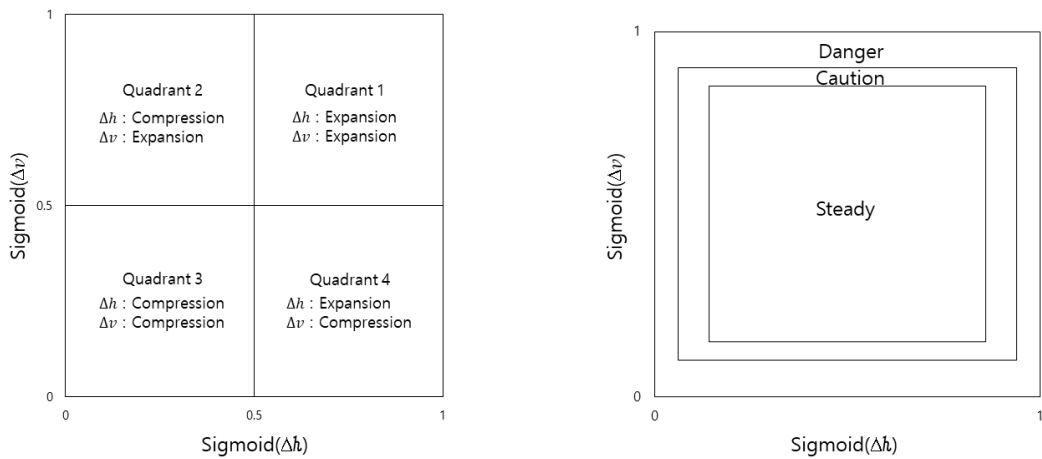
Metrics		Conversion value	Ground state
Inclinometer	Sigmoid(Δh)	< 0.5	Compressed horizontally
		= 0.5	At rest
		> 0.5	Expanded horizontally
Surface settlement	Sigmoid(Δv)	< 0.5	Compressed vertically
		= 0.5	At rest
		> 0.5	Expanded vertically

좌표시스템

지중경사계와 지표침하계 두 계측데이터를 따로 사용하는 것이 아니라 함께 사용하여 Fig. 3과 같은 좌표계에 도시하면 수평, 수직방향의 변위상태를 직관적으로 확인할 수 있으며, 해당 계측지점의 지반에 작용하는 응력방향 또한 알 수 있다. Fig. 3a는 원지반 조건에서 현재 지반변위상태를 구분하는 영역이며, Fig. 3b는 관리기준(정상, 주의, 위험)에 따라 구분한 영역이다.

Fig. 3a는 원지반 상태로 부터 현재지반의 변위상태를 구분해 주는 영역이다. 각 사분면에 따른 변위상태는 다음과 같다.

- 1사분면 : 현재지반이 원지반 조건에서 수평, 수직방향으로 팽창된 상태
- 2사분면 : 현재지반이 원지반 조건에서 수평방향으로 압축, 수직방향으로 팽창된 상태



(a) Displacement state classification area

(b) Management standard classification area

Fig. 3. Displacement and management standard classification areas.

- 3사분면 : 현재지반이 원지반 조건에서 수평, 수직방향으로 압축된 상태
- 4사분면 : 현재지반이 원지반 조건에서 수평방향으로 팽창, 수직방향으로 압축된 상태

Fig. 3b는 서울지하철 계측관리 요령 개선(Seoul, 2015)의 관리기준치를 적용하여 정상, 주의, 위험영역으로 나눈 것이다. Table 2는 서울지하철 계측관리 요령 개선의 보통 흙막이벽의 지중경사계와 지표침하계 관리기준을 나타낸 것이다.

Table 2. Management standard for inclinometer and surface settlement

Metrics	Steady (first management standard)	Caution (second management standard)	Danger (third management standard)
Inclinometer	0.001H	0.0015H	0.0025H
Surface settlement	Design estimate	125% of design estimate	25 mm

H: excavation depth.

정상영역과 주의영역 경계선과 주의영역과 위험영역을 구분하는 경계선을 이루는 4개 좌표는 각각 식 (4)와 (5)를 이용하여 구할 수 있다. 식 (4)와 (5)를 통해 생성된 경계선은 수평, 수직변위의 관리기준치가 다르기 때문에 직사각형 형태를 따르며, 시그모이드 함수가 비선형 함수이기 때문에 경계선의 좌표 또한 선형적인 거동을 따르지 않는다.

$$Sigmoid(\Delta h_{steady}) = \frac{1}{1 + e^{\pm 0.001H}}, \quad Sigmoid(\Delta v_{steady}) = \frac{1}{1 + e^{\pm \Delta v}} \tag{4}$$

$$Sigmoid(\Delta h_{caution}) = \frac{1}{1 + e^{\pm 0.0015H}}, \quad Sigmoid(\Delta v_{caution}) = \frac{1}{1 + e^{\pm 1.25\Delta v}} \tag{5}$$

여기서, H 는 굴착심도, Δv 는 설계단계에서 예상한 침하량 추정값이다(Table 2 참조).

Fig. 3a의 변위상태 영역구분선과 Fig. 3b의 관리단계 영역구분선을 한 좌표계에 함께 나타내면 Fig. 4와 같은 좌표계를 생성할 수 있다. Fig. 4와 같은 변위좌표계를 이용하여 지반의 변위상태와 관리단계를 동시에 확인할 수 있다.

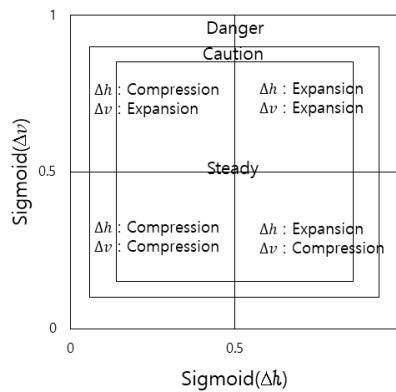


Fig. 4. Displacement coordinate system.

변위경로

변위상태가 변화하는 동안 각 변위 상태에 대한 변위좌표계의 ($Sig(\Delta h)$, $Sig(\Delta v)$)점을 연결하면 변위변화의 이력을 연속적으로 표시할 수 있다. 변위경로를 이용하여 변위이력, 변위추세 등을 확인할 수 있으며 이를 통해 현재 지반에 작용하는 응력방향을 알 수 있다(Fig. 5 참조).

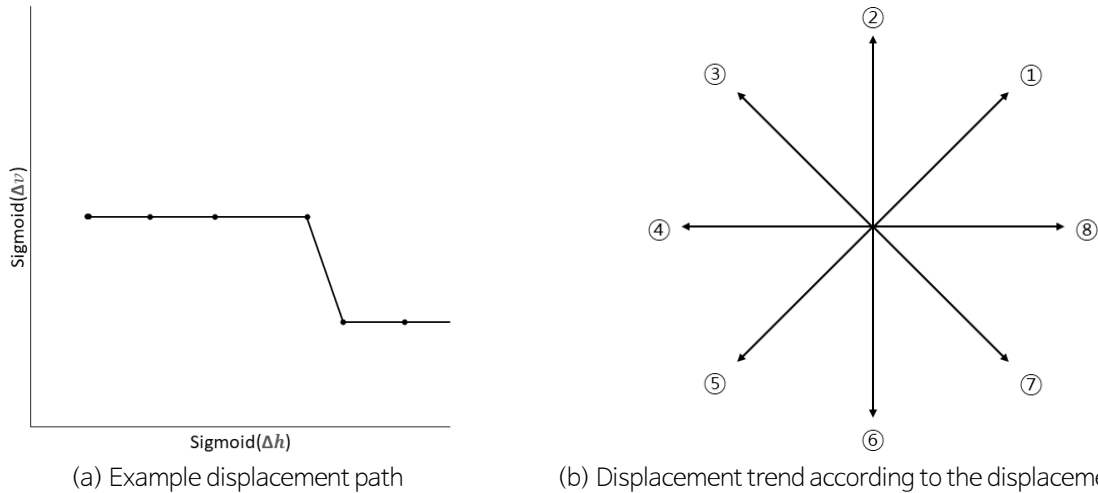


Fig. 5. Examples of displacement path and displacement trends.

수평, 수직방향 모두에서 변위가 발생하면 변위형태에 따라 경로 ①, ③, ⑤, ⑦과 같은 변위추세를 따를 것이고, 수평 또는 수직 한 방향에서만 변위가 발생하는 경우 변위형태에 따라 경로 ②, ④, ⑥, ⑧과 같은 변위추세를 따를 것이다.

횡방향 토압을 받는 구조물인 흙막이벽, 옹벽, 교대 등이 경로 ⑦과 같은 거동을 보이면 주동작용상태의 정상적인 거동을 따르는 지반이라고 할 수 있으며, 경로 ③과 같은 거동을 보이면 수동작용상태의 정상적인 거동을 따르는 지반이라고 할 수 있다. Fig. 5a의 경우 경로 ⑦과 같은 거동추세를 보이므로 주동작용상태의 지반이라고 할 수 있으며, 구조물 또는 지반에 우하향 방향으로 응력이 작용하고 있다. 변위경로에 따른 변위추세와 응력작용방향은 Table 3과 같다.

Table 3. Displacement trend and stress direction according to displacement path

Displacement path	Displacement trend	Stress direction
Path ①	$\Delta h > 0, \Delta v > 0$	Up right
Path ②	$\Delta h = 0, \Delta v > 0$	Up
Path ③	$\Delta h < 0, \Delta v > 0$	Up left
Path ④	$\Delta h < 0, \Delta v = 0$	Left
Path ⑤	$\Delta h < 0, \Delta v < 0$	Down left
Path ⑥	$\Delta h = 0, \Delta v < 0$	Down
Path ⑦	$\Delta h > 0, \Delta v < 0$	Down right
Path ⑧	$\Delta h > 0, \Delta v = 0$	Right

데이터 분석

현장 계측기배치

대상지반은 굴착 후 CIP 흙막이벽을 타설한 뒤 공동주택 신축하는 공사현장으로 본 해석 모델을 흙막이벽 배면의 계측 데이터에 적용하였다.

Fig. 6a는 시추조사 위치를 나타낸 것이다. 시추조사결과 분석대상 상하측으로 도로와 인접하고 있으며, 좌우측은 건물 들과 인접해 있음을 알 수 있다. 시추공별 시추조사 결과를 각각 Table 4에 나타내었다. Fig. 6b는 계측기 설치 단면도이다. 계측기 설치 단면도에서 S-1~18은 지표침하 계측지점이며, I-1~8은 지중경사 계측지점이다. 데이터 분석 시 현장과 가장 인접해 있는 지표침하 계측지점의 데이터를 사용하였다. 지표침하 계측지점 S-1과 지중경사 계측지점 I-6으로 이루어진 지점을 Point 1이라 하였으며, 나머지 7개 지점은 Fig. 6a에 나타낸 바와 같다. 이를 Table 5에 정리하였다. 지중경사계의 계측빈도는 터파기 진행 중 2회/1주, 완료 후 1회/1주이며, 지표침하계의 계측빈도도 동일하게 터파기 진행 중 2회/1주, 완 료 후 1회/1주이다.

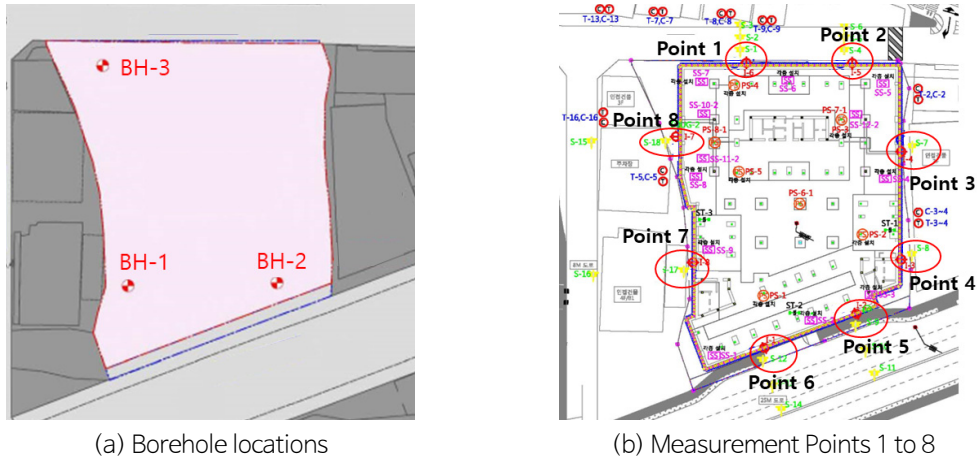


Fig. 6. Cross-sectional diagram showing measurement Points 1 to 8 and borehole locations.

Table 4. Result of stratum analysis by borehole

Borehole	Landfill layer (m)	Sedimentary layer (m)	Weathered soil (m)	Weathered rock (m)	Soft rock (m)	Common rock (m)	Depth (m)
BH-1	2.7	-	3.3	0.3	9	14.7	30.0
BH-2	3.5	1.5	1.5	0.2	3.3	-	10.0
BH-3	5.8	0.4	-	0.3	3.5	-	10.0

Table 5. Number of inclinometer and surface settlement gauges at each measurement point

Metrics	Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8
Inclinometer	I-6	I-5	I-4	I-3	I-2	I-1	I-8	I-7
Surface settlement	S-1	S-4	S-7	S-8	S-9	S-12	S-17	S-18

계측데이터 분석

Table 6은 100, 200, 300, 400일 경과에 따라 각 지점의 수평, 수직방향 누적변위량을 나타낸 것이다. 400일 경과 후 가장 많은 수평, 수직변위가 일어난 지점은 Point 2임을 알 수 있다. 또한 Point 5와 6은 계측도중에 흠막이벽 배면토 상부에서 용기 하였다가 시간이 경과하면서 다시 침하한 것을 확인할 수 있다. Table 6에서 양수는 팽창, 음수는 압축이다.

Table 6. Accumulated displacement data

Time (day)		Point 1 (cm)	Point 2 (cm)	Point 3 (cm)	Point 4 (cm)	Point 5 (cm)	Point 6 (cm)	Point 7 (cm)	Point 8 (cm)
100	Δh	0.116	0.221	0.2	0.152	0.448	0.107	0.365	0.406
	Δv	-0.2	-0.1	-0.1	-0.1	0.1	0	-0.1	-0.2
200	Δh	0.634	0.723	0.735	0.839	0.924	0.724	0.796	0.889
	Δv	-0.3	-0.3	-0.1	-0.1	0.1	0	-0.1	-0.2
300	Δh	0.902	1.041	0.95	1.108	1.334	1.016	1.232	1.25
	Δv	-0.3	-0.4	-0.1	-0.1	0	0.1	-0.1	-0.2
400	Δh	1.16	1.531	1.32	1.211	1.184	1.061	1.415	1.484
	Δv	-0.3	-0.4	-0.2	-0.2	-0.1	0	-0.1	-0.2

Table 7은 수평, 수직변위를 시그모이드 함수를 이용하여 변환한 결과이다. 이를 이용하여 변위좌표계에 Fig. 7과 같이 도시하였다.

Table 7. Accumulated displacement data converted using a sigmoid function

Time (day)		Point 1	Point 2	Point 3	Point 4	Point 5	Point 6	Point 7	Point 8
100	$Sigmoid(\Delta h)$	0.528968	0.555026	0.549834	0.537927	0.610164	0.526725	0.59025	0.600128
	$Sigmoid(\Delta v)$	0.450166	0.475021	0.475021	0.475021	0.524979	0.5	0.475021	0.450166
200	$Sigmoid(\Delta h)$	0.653396	0.673267	0.675902	0.698255	0.715856	0.673487	0.689118	0.708684
	$Sigmoid(\Delta v)$	0.425557	0.425557	0.475021	0.475021	0.524979	0.5	0.475021	0.450166
300	$Sigmoid(\Delta h)$	0.71136	0.739043	0.721115	0.751756	0.791502	0.734193	0.7773	0.774168
	$Sigmoid(\Delta v)$	0.425557	0.401312	0.475021	0.475021	0.5	0.524979	0.475021	0.450166
400	$Sigmoid(\Delta h)$	0.742882	0.765666	0.770476	0.789182	0.822153	0.761333	0.815176	0.804553
	$Sigmoid(\Delta v)$	0.425557	0.401312	0.450166	0.450166	0.475021	0.5	0.475021	0.450166

Fig. 7은 특정시간에서 각 계측지점의 수평, 수직 변위량을 시그모이드 함수로 변환하여 변위좌표계에 나타낸 것이다. 이를 통해 특정시간에서의 변위상태와 각 계측지점의 변위상태를 알 수 있으며 직관적으로 비교 가능하다.

Fig. 7a는 계측시점으로부터 100일 후의 지반 변위상태를 보여준다. 모든 계측지점의 수평변위가 응력이 해방된 방향(굴착방향)으로 초기지반상태보다 팽창하여 $sigmoid(\Delta h)$ 의 값이 0.5보다 큰 값을 보였다. Point 1, 2, 3, 4, 7, 8은 초기 지반상태보다 수평방향으로 팽창, 수직방향으로 침하하는 거동을 보여 굴착에 의해 응력이 해방된 방향으로 주동작용상태 지반의 정상적인 거동을 보였으며, Point 5의 경우 수직변위가 발생하지 않아 $sigmoid(\Delta h)$ 값이 0.5이다. 이와 다르게 Point 6은 수직방향으로 팽창하였다.

Fig. 7b는 계측시점으로부터 200일 후의 지반 변위상태를 보여주며, 모든 계측지점에서 시간경과에 따라 더 많은 수평 변위가 발생하였다. Point 6은 200일 후에도 수직변위가 발생하지 않았으며, Point 5는 계측초기 용기된 상태를 유지하고 있다.

Fig. 7c는 계측시점으로부터 300일 후의 지반 변위상태를 보여준다. Point 6은 1사분면에 위치하여 원지반 상태보다 수직 지반이 용기된 상태이며, Point 5는 수직변위가 발생하지 않았으므로 $\text{sigmoid}(\Delta v)$ 값이 0.5이다. Point 5와 6을 제외한 다른 계측지점에서는 굴착에 의한 응력해방 방향으로 수평변위가 증가함에 따라 수직변위 또한 증가하였다.

Fig. 7d는 계측시점으로부터 400일 후의 지반 변위상태를 보여준다. Point 6을 제외하고 모든 계측지점에서 침하가 발생하였으며 이 중 수직 방향으로 가장 많은 변위가 발생한 계측지점은 Point 2이며, 수평방향으로 가장 많은 변위가 발생한 계측지점은 Point 5임을 확인 할 수 있다.

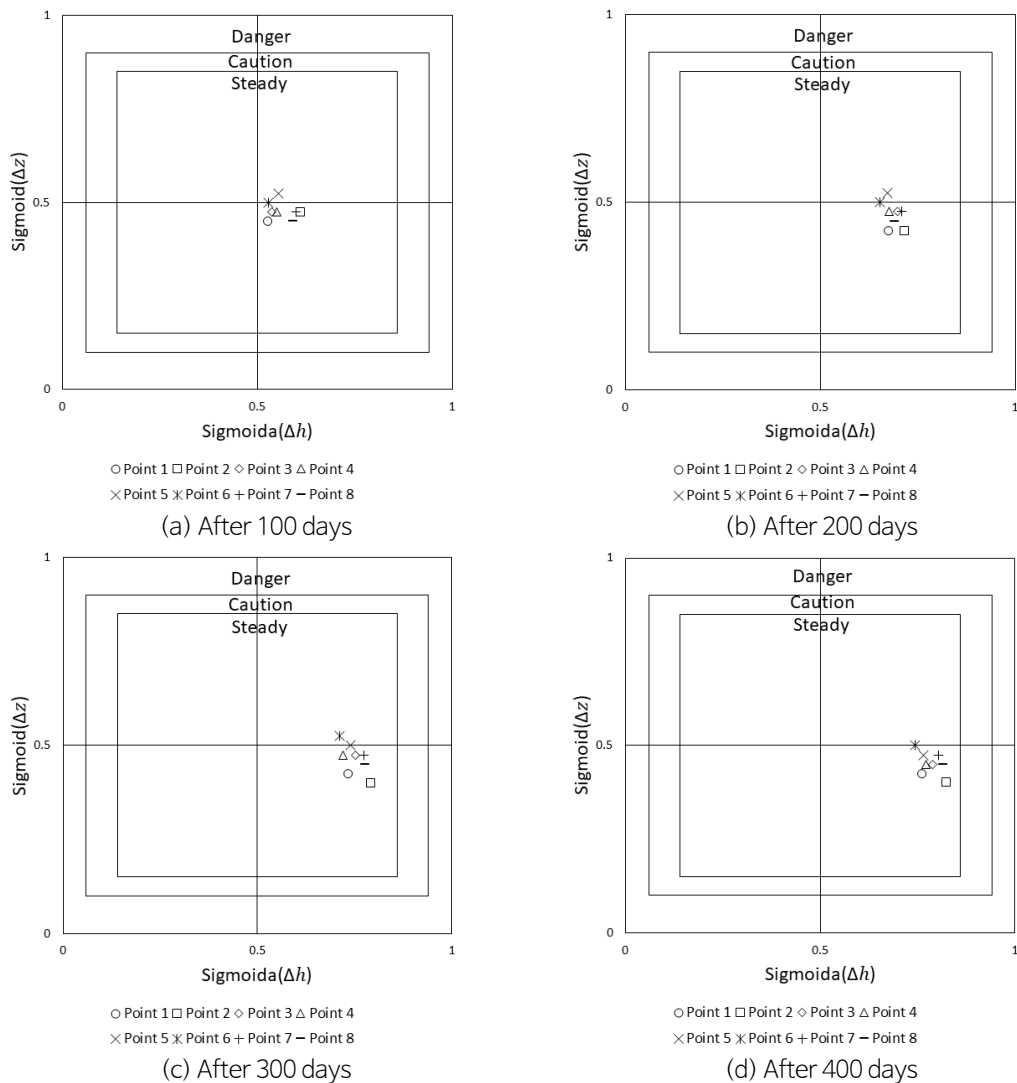


Fig. 7. Displacement coordinate system.

각 계측지점의 변위경로

Fig. 8은 시간경과에 따른 변위경로를 나타낸 것이다. 수평방향 직선거동은 수직변위가 발생하지 않고 수평변위만 발생한 상태이고, 우하향 거동은 수직방향으로 침하가 발생하고 수평방향으로 팽창하는 거동이다. 우상향 거동은 수직, 수평방향으로 팽창하는 상태의 거동을 보여준다. 계측빈도가 터파기 중 2회/1주, 완료 후 1회/1주이기 때문에 변위경로가 단계적으로 변화하는 형태를 띠고 있다.

Fig. 8a~d는 Point 1~4의 변위경로를 나타낸 것으로 우하향 거동을 보인다. 우하향 거동은 굴착에 따라 흙막이벽 배면에서 응력이 해방된 방향으로 주동토압이 작용하는 지반의 정상적인 거동이라고 할 수 있다. 또한, 계측시점으로부터 400일 후 까지 정상관리상태에 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8e와 f는 Point 5와 6의 변위경로를 나타낸 것으로 계측도중 수평, 수직방향으로 모두 팽창하여 이상거동을 보인 계측지점이다. 수직방향으로 팽창하는 거동을 보이긴 하였지만 그 양이 작고 한 번 발생한 이후에 더 이상 발생하지 않았으며, 다시 침하하는 거동을 보였기 때문에 계측오류로 판단할 수 있다.

Fig. 8g와 h는 Point 7과 8의 변위경로를 나타낸 것으로 초기에 수직방향으로 침하가 한번 발생한 이후 더 이상 침하가 발생하지 않았으며 응력이 해방된 방향으로 수평변위만 발생하여 직선거동을 보였다.

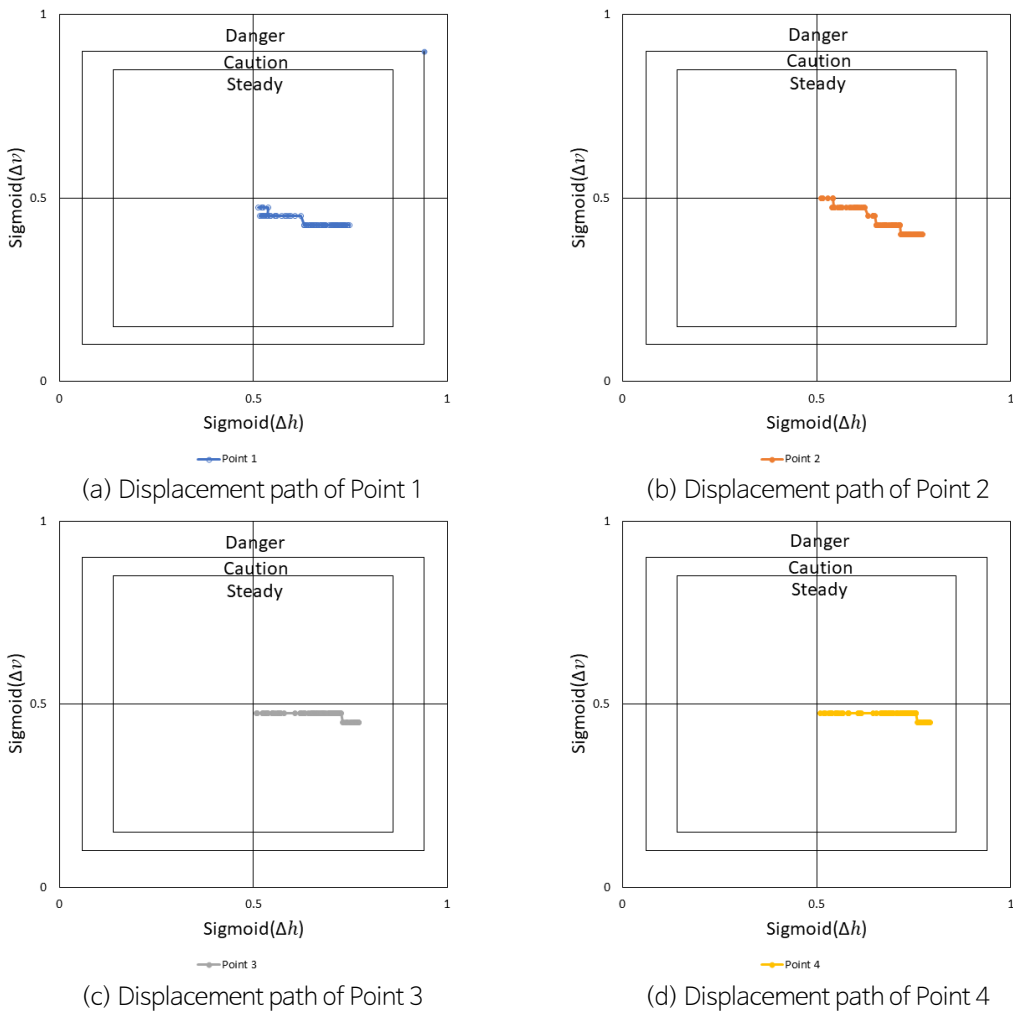


Fig. 8. Displacement paths of Points 1 to 8.

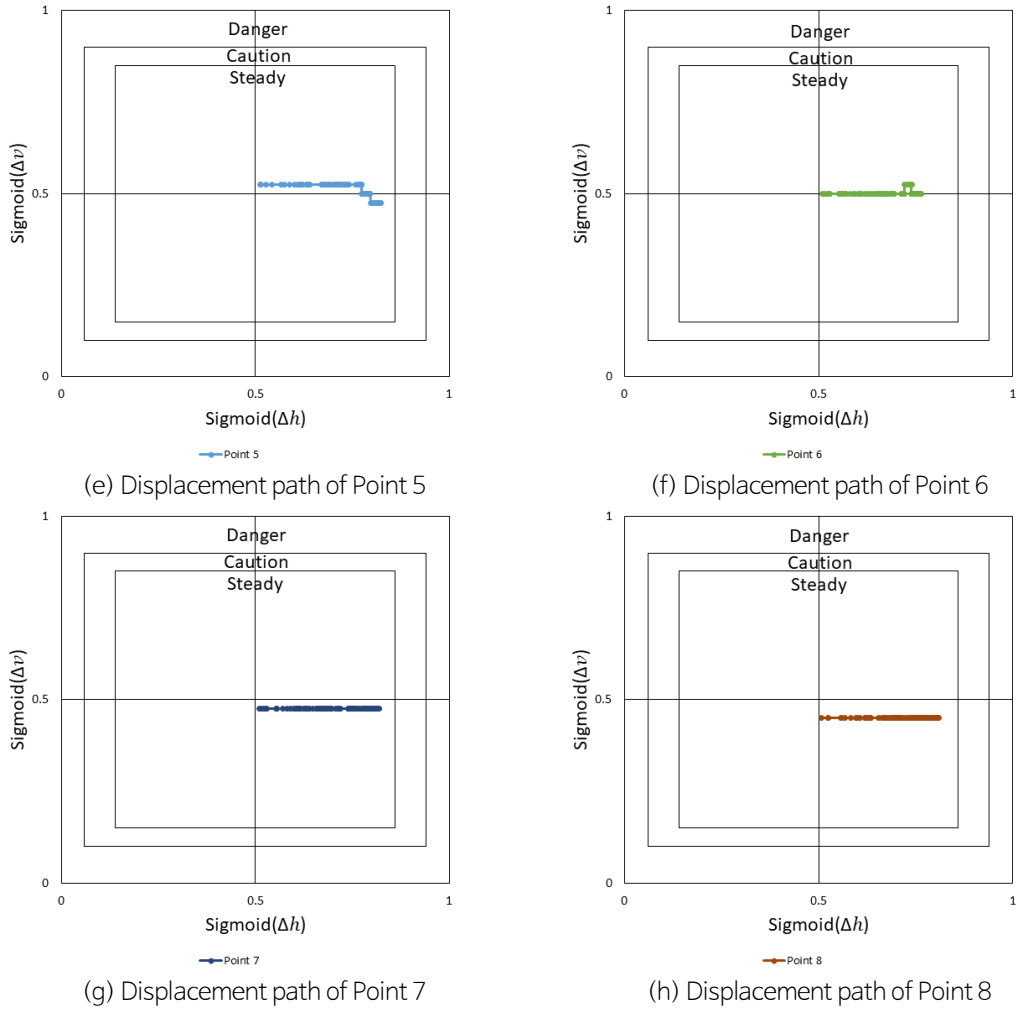


Fig. 8. Continued.

공간적 상관성이 높은 계측지점의 변위경로를 살펴보면 유사한 거동추세를 보이는 것을 알 수 있다(Fig. 9 참조). 공간적 상관성은 계측지점 간의 거리에 반비례한다. 즉, 계측지점이 서로 가까이 위치하면 상관성이 높다.

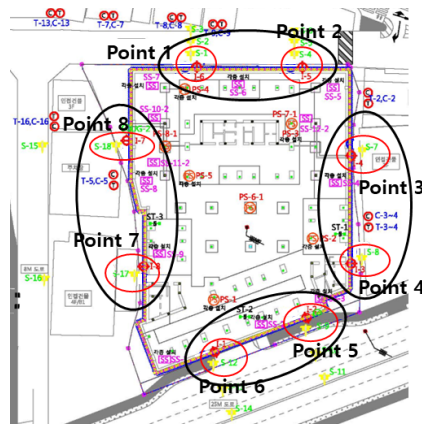


Fig. 9. Areas with identical displacement trends according to spatial correlation.

결론

본 연구에서는 시그모이드 함수를 이용하여 대표적인 거동 응답 중 하나인 변위데이터를 가공하였다. 지중경사계를 이용하여 수평변위를, 지표침하계를 이용하여 수직변위를 나타내었으며 이를 각각 변위좌표계의 한 축으로 하여 수평, 수직 변위에 따른 지반거동상태를 나타낼 수 있는 모니터링 시스템을 제안하였다. 이러한 모니터링 시스템을 이용하여 굴착지반에 시공된 CIP 흙막이벽체 배면에서의 실제측데이터를 분석하였으며 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) $(-\infty, \infty)$ 범위의 계측데이터를 시그모이드 함수를 이용하여 $(0, 1)$ 범위로 변환해 줌으로써 독립변수(시간)의 축척조절과 지반의 장기안정성 문제를 동시에 고려할 수 있다.
- (2) 지중경사계와 지표변위계를 하나의 좌표계(변위좌표계)에 도시하고, 각 계측지점의 변위상태 영역과 관리단계 영역을 구분해 줌으로써 지반의 변위상태와 현재 지반의 관리단계(정상, 주의, 위험)를 직관적으로 확인할 수 있다.
- (3) 데이터를 좌표계에 연속적으로 나타내어 변위경로를 확인할 수 있으며 이를 통해 변위이력, 변위추세 등을 바탕으로 현재 지반에 작용하는 응력방향을 알 수 있다.
- (4) 다중 계측데이터 모니터링 시스템을 이용한 굴착 지반 현장 계측데이터 분석결과 모든 계측지점의 수평, 수직 변위 모두 정상관리상태에 위치하였으며 Point 5와 6을 제외하고 주동토압이 작용하는 지반의 정상적인 거동을 보였다. Point 5와 6은 계측도중 흙막이벽 배면토에서 수평, 수직방향으로 팽창된 상태를 가진 이력이 있지만 그 양이 작고 다시 침하하는 거동을 보였기 때문에 계측오류로 판단할 수 있다.
- (5) 공간적 상관성이 높은 계측지점 간의 거동은 비슷한 거동추세를 보였으며, 공간적 상관성이 낮은 계측지점간의 거동은 상이한 거동 추세를 보였다.
- (6) 비탈면, 연약지반 등 계측지점이 공간적으로 연속되어 분포하는 다양한 지반에 대한 모형실험 또는 실제로 파괴된 지반의 데이터를 활용하여 변위경로, 변위이력 등을 이용한 상관성 분석을 통해 전조현상 분석, 거동영역 분석을 수행하여 파괴시간 예측, 파괴면 예측이 가능 할 것으로 판단된다.

사사

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비(202002060001) 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Byun, N.J., Lee, Y.W., Kang, Y.J., 2020, Development of estimation method for structural deformed shape using multi-metric measurement data, Proceedings of the KSCE 2020 Convention, Jeju, 657-658 (in Korean with English abstract).
- Choo, Y.S., Kim, J.H., Hwang, S.H., Chung, C.K., 2010, The optimization of hyperbolic settlement prediction method with the field data for preloading on the soft ground, Journal of the Korean Geotechnical Society, 26(7), 147-159 (in Korean with English abstract).
- Do, J.N., Wrryu, W.R., An, Y.H., Chun, B.S., 2010, Field measurement and numerical approach for lateral deformation of retaining wall, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 11(2), 61-68 (in Korean with English abstract).
- Han, J.G., Song, Y.S., 2003, Displacement measuring system for the slope stability analysis using the softcopy photogrammetry, Journal of the Korean Geotechnical Society, 19(4), 23-32 (in Korean with English abstract).
- Kim, T.H., Nam, J.M., Kim, I.S., Yun, S.K., 2014, Characteristics and causes of wave-induced settlement in caisson breakwater: Focusing on settlement data, Journal of the Korean Geotechnical Society, 30(7), 27-40 (in Korean with English abstract).

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).
- Lee, Y.W., Min, S.G., Byun, N.J., Jang, M.S., Kim, S.J., Kang, Y.J., 2020, A methodology for monitoring measurement data of structures based on the pattern analysis, Proceedings of the Annual Conference Korean Society of Steel Construction, 31(1), 107-108 (in Korean with English abstract).
- Park, M.C., Lee, K.S., Shin, B.C., Han, H.S., 2011, Analysis of lateral earth pressure according to change of water content using TDR sensor and inclinometer, Proceedings of the Korean Geo-Environmental Society Fall Conference, Incheon, 57-64 (in Korean with English abstract).
- Seoul, 2015, Improving Seoul metro metrology management guidelines, 226p.