

플랙탈 이론을 이용한 흙막이 벽체 수평변위 분석

An Analysis on the Lateral Displacement of Earth Retaining Structures Using Fractal Theory

이 창 노 ¹	Lee, Chang-No	정 경 식 ²	Jung, Kyoung-Sik
고 형 선 ³	Koh, Hyung-Seon	박 현 상 ⁴	Park, Heon-Sang
이 석 원 ⁵	Lee, Seok-Won	유 찬 ⁶	Yu, Chan

Abstract

Nowadays, the importance of the information management of construction sites to achieve the goal of safety construction. This management uses the collaborated analysis of in-situ monitoring data and numerical analysis, especially of an earth retaining structures of excavation sites. In this paper, the fractal theory was applied to actually monitored data from various excavation sites to develop the alternative interpolation technique which could predict the displacement behavior of unknown location around the monitoring locations and the future behavior of the monitoring locations with the steps of excavation. Data, mainly from inclinometer, were collected from various sites where retaining structures were collapsed during construction period, as well as from normal sites with the characteristics of geology, excavation method etc. In the analyses, Hurst exponent (H) was estimated with monitored periods using the Rescaled range analysis (R/S analysis) method applying the H in simulation processes. As the results of the analyses, Hurst exponents were ranged from 0.7 to 0.9 and showed the positive correlation of $H > 1/2$. The simulation processes, then, with the Hurst exponent estimated by Rescaled range analysis method showed reliable results. In addition, it was also expected that the variation of Hurst exponents with the monitoring period could instruct the abnormal behavior of an earth retaining structures to directors or operators. Therefore it was concluded that fractal theory could be applied for predicting the lateral displacement of unknown location and the future behavior of an earth retaining structures to manage the safety of construction sites during excavation period.

요 지

최근 국내에서는 굴착현장의 안전성에 대한 중요성 때문에 현장계측과 수치해석을 활용한 시공 관리방안에 대한 관심이 점점 더 높아지고 있다. 따라서 본 연구는 이를 위한 대안으로서 국내 다양한 굴착현장의 계측(경사계)자료들

1 비회원, (주)에스텍컨설팅그룹 부장 (General Manager, S-TECH Consulting Group)

2 정회원, (주)에스텍컨설팅그룹 전무 (Member, Executive Director, S-TECH Consulting Group)

3 정회원, 삼성물산 건설부문 파트장 (Member, Head of Civil ENG, Civil & Landscape Team, SAMSUNG C&T Corporation)

4 비회원, 삼성물산 건설부문 차장 (Deputy General Manager, Civil Eng. Dept., SAMSUNG C&T Corporation)

5 정회원, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental System Engrg., Konkuk Univ.)

6 정회원, 경상대학교(농과원) 지역환경기반공학전공 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Agricultural Engrg., Gyeongsang Nat'l Univ. (Inst. of Agri. & Life Sci.), Tel: +82-55-772-1932, Fax: +82-55-772-1939, chanyu@gnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

을 활용하여 미지점에 대한 변위값 추정과 기지점에서 향후 발생될 것으로 예상되는 변위값 예측을 위해 프랙탈(Fractal) 이론의 적용성을 검토하였다. 계측자료는 일반현장과 붕괴사고가 발생된 현장의 자료를 분석하였는데, 분석 시에는 계측 주기에 따른 수평변위의 변화 양상에 대해서 Hurst 지수를 산정하여 예측값을 모사하는데 사용하였으며, 그 결과를 실측값과 비교·검토하였다. 그 결과, 일반현장의 계측결과의 Hurst, $H=0.7\sim 0.8$ 의 범위로 나타났다. 이는 $H > 1/2$ 로서 양의 상관성을 나타내 자기 유사성(self-similarity)을 확인할 수 있었으며, Hurst 지수로 모의된 예측값들은 계측값들과 매우 높은 상관성을 나타내었다. 또한 붕괴가 발생된 현장의 계측자료들에 대한 분석결과에서는 붕괴 발생 수주일 전부터 Hurst 지수의 이상 변화가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 추가적인 자료축적을 통하여 굴착현장 흠막이 벽체의 안전관리에 프랙탈 이론을 활용성을 확인할 수 있었다.

Keywords : Fractal theory, Hurst exponent, Earth retaining structure, Inclinator, Lateral displacement

1. 서론

굴착에 의한 지반거동의 예측은 아직 정립되어 있지 않고, 복잡하고 다양한 변수를 가지고 있어서 정확한 예측이 용이하지 않다. 이와 같은 흠막이공사 설계 시 입력데이터(Input Data)로 사용되는 토질정수들은 대부분 실내시험 및 현장시험 등으로부터 추정하게 되는데 설계 시 가정한 지반조건과 토질정수가 실제 지반조건과 정확히 일치하지 않은 요인과 설계에서는 통상 상세한 시공 과정을 모두 고려할 수 없기 때문에 구조물의 인접 부분을 굴착하거나 연약지반에 시공할 경우 주위 지반 및 기존 구조물의 정확한 거동을 예측하기란 불가능하다. 따라서 최근 국내에서는 현장계측과 수치해석을 이용한 정보화 시공의 활용방안이 더욱 중요성 및 효용성이 증가 추세에 있다.

이에 본 연구는 기 계측시스템의 계측결과를 활용한 미지점의 추정방법과 향후 예측방법의 확립을 위하여 프랙탈(Fractal) 이론을 따르는 Hurst 지수 산정방법을 적용하여 그 활용 가능성을 검토하고 분석결과를 제시하였다.

2. 프랙탈이론과 허스트 지수

Mandelbrot은 1960년대 초반부터 비정규적인 패턴에 대한 체계적인 연구를 시작하여 1970년대 후반에 ‘프랙탈 기하학(fractal geometry)’을 정립하여 비선형 혹은 불규칙적인 현상과 모양을 이해하고 기술할 수 있는 새로운 이론을 제공한 바 있다(Mandelbrot, 1983). 프랙탈 이론은 자료의 불규칙성을 해석 시 반영할 수 있는 기법으로서(Gleick, 1993), 특히 자연현상 속에서 나타나

는 매우 복잡한 현상들 중 그 안에 일정한 질서가 존재하며, 이를 ‘자기유사성(self-similarity)’이라 하는데, 기하학적 방법이나 통계 혹은 확률적인 방식으로 확인할 수 있다. 특히 확률적인 방법을 이용하는 경우는 실제 자연 상태에서의 프랙탈 성질을 판별하는데 매우 유용하게 활용될 수 있는 방법이다(Baveye and Boast, 1998; Kim, 2011). 대표적인 경우가 우리에게 익히 알려져 있는 브라운 운동(Brownian motion)을 통계적인 관점에서 접근한 것이다. 브라운 운동은 ‘무작위성 혹은 불규칙성(randomness)’의 대표적인 사례로서, 1922년 Robert Brown에 의해서 처음 그 이론적 원리가 소개되었으며, 1923년에 Wiener에 의해서 임의 두 시간 t 와 t_0 사이의 브라운 운동에 대한 난수함수(random function) $X(t)$ 가 다음의 식 (1)과 같은 형태로 발표되었다(Mandelbrot, 1968).

$$X(t) - X(t_0) \sim r |t - t_0|^H \quad (t \geq t_0) \quad (1)$$

식 (1)은 장기간에 걸쳐 축적된 임의의 시계열 자료의 상관관계를 정량적으로 나타내는 방법으로 이해할 수 있으며, 여기서, r 은 축척 비(scale ratio)이고, H 는 ‘허스트 지수(Hurst exponent)’이다. 허스트 지수는 영국의 수학자 Hurst(1951)가 이집트 나일강의 홍수자료를 분석하는 과정에서 처음 제안하였으며, 그 이후에 Mandelbrot(1983)에 의해서 구체적으로 이론화되어 널리 활용되고 있는 지수이다(실제로 Wiener에 의해서 제안된 식에서는 $H=0.5$ 로 제시되었다).

Mandelbrot(1983)는 식 (1)의 난수함수 $X(t)$ 에서 Hurst 지수(H)의 값을 $0 < H < 1$ 으로 확장하여 fBm(fractional Brownian motion)으로 정의하였는데, $H > 1/2$ 의 경우는 자료 간에 양의 상관성을 가지고 $H < 1/2$ 의 경우에는

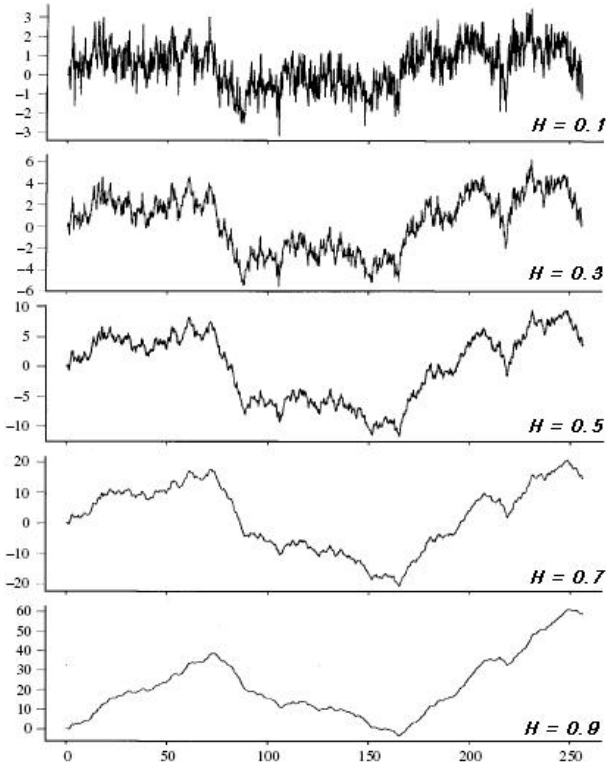


Fig. 1. Form of fBm according to Hurst exponent (Mandelbrot, 1983)

자료 간에 음의 상관성을 가진다(Fig. 1 참조).

3. 흠막이 벽체 수평변위에 대한 허스트지수 평가

계측된 자료를 활용해 미지점 혹은 미지구간의 값을 예측하기 위해서는 기존의 자료를 과학적으로 분석하고 평가하여 일정한 경향을 제시할 수 있어야 한다. 지반공학 분야의 건설현장에서 얻어지는 자료들에 대해서는 일반적으로 최소사승법과 같은 단순 선형방법이나 좀 더 복잡한 경우에는 크리깅(Kriging) 등의 보간법으로 그 경향을 분석해 오고 있다. 그러나 이러한 보간법들은 지반의 비등방 그리고 비균질적인 특성을 충분히 반영하지 못하고 있다. 따라서 설계와 시공과정 중에는 항상 어느 정도의 오차를 수반할 수밖에 없는 한계가 있다.

본 연구에서는 플렉탈 이론 중에서 불규칙한 시계열 자료들의 보간 기법으로 소개되어 있는 R/S(Rescaled Range)기법을 이용하여 굴착현장에서 계측된 경사계(Inclinometer) 값을 대상으로 플렉탈 이론의 적용성을 판정하고, 향후 보간 및 예측과정에서 활용될 수 있도록 굴착현장의 지층별 영향지수(Hurst 지수)값을 제시하고

자 하였다. R/S 분석에서 R은 정규화(Normalized)된 값의 최대값에서 최소값을 뺀 범위(Range)이며, S는 표준편차이다. 실제로 R/S분석법의 기본 과정은 앞서 언급 하였던 플렉탈의 기본성질은 자기유사성의 원리를 그대로 이용하는 것이며, 기본적인 분석과정은 다음과 같은 단계를 거친다.

- (1) 분석구간(혹은 시간, 주기), Δt 를 정한다.
- (2) 각 구간의 측정값(경사계 계측값)을 정규화 한다.
- (3) 정규화한 값들 중 최대값에서 최소값을 빼서 범위(R)을 구한다.
- (4) 범위(R)를 측정값들의 표준편차(S)로 나눈다 : R/S
- (5) 분석구간(Δt)을 1/2(혹은 임의의 수치 ; self-affinity)로 줄여 가면서 앞서 (1)~(4) 과정을 반복 한다.
- (6) 이러한 과정을 몇(n) 단계 반복한다. 이때 n은 클수록 좋다.
- (7) 분석이 종료되면 양대수 그래프상에 $\log(\Delta z)$ - $\log(R/S)$ 관계를 그린다.
- (8) (7)단계에서 선형관계가 얻어지며, 이 직선의 기울기가 Hurst 지수(H)가 된다.

한편 실제로 경사계 자료를 대상으로 위의 과정을 수행하는 과정에서는 다음과 같은 사항이 고려되었다. 우선 기존의 계측자료들은 보통 일주일에 2회 측정하여 계측 주기가 3일 혹은 4일 간격으로 일정하지 않았고 어떤 경우에는 일주일에 1회만 계측된 경우도 있어 자료정리를 위한 계측주기 결정이 필요하였다. 따라서 연구에서는 일주일 단위로 자료를 정리하였으며. 또한 자료의 정규화를 위해서는 일주일 단위로 정리된 자료들의 시간에 따른 측정값의 차이(difference)를 구하여 해석에 사용하였다(이는 fGn(fractional Gaussian noise)이라고 해서, fBm에서 샘플간의 차이를 구하면 fGn이 되고 Gaussian 분포를 따른다고 알려져 있다). R과 S값의 계산은 아래의 식 (2)와 식 (3)을 적용하여 계산할 수 있다. 여기서, i_{fGn} 은 정규화한 경사계 계측값, t는 측정 시간 그리고 u는 전체자료 중 고려한 지점이다.

$$\begin{aligned}
 R(t, n \cdot \Delta t) = & \max(i_{fGn}(t+u) - [i_{fGn}(t) \\
 & + \frac{u}{n \cdot \Delta t}(i_{fGn}(t+n \cdot \Delta t) - i_{fGn}(t))]) \\
 & - \min(i_{fGn}(z+u) - [i_{fGn}(t) \\
 & + \frac{u}{n \cdot \Delta t}(i_{fGn}(t+n \cdot \Delta t) - i_{fGn}(t))]) \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$S(t, n \cdot \Delta t) = \left(\frac{\sum i_{fGh}^2(t+u)}{n \cdot \Delta t - 1} - \frac{(\sum i_{fGh}(t+u))^2}{(n \cdot \Delta t)^2 - n \cdot \Delta t} \right)^{1/2} \quad (3)$$

분석에 사용된 자료들은 기존에 축적된 자료들을 최대한 많이 수집하였으며, 국내 지반특성을 대표할 수 있

는 지점들의 자료들을 선정하여 분석을 실시하였다. 수집된 자료들에 대한 기본적인 사항들은 Table 1에 요약하였다.

먼저 굴착현장에서 계측된 경사계 자료의 자기유사성(self-similarity 혹은 self-affinity)을 확인하기 위하여

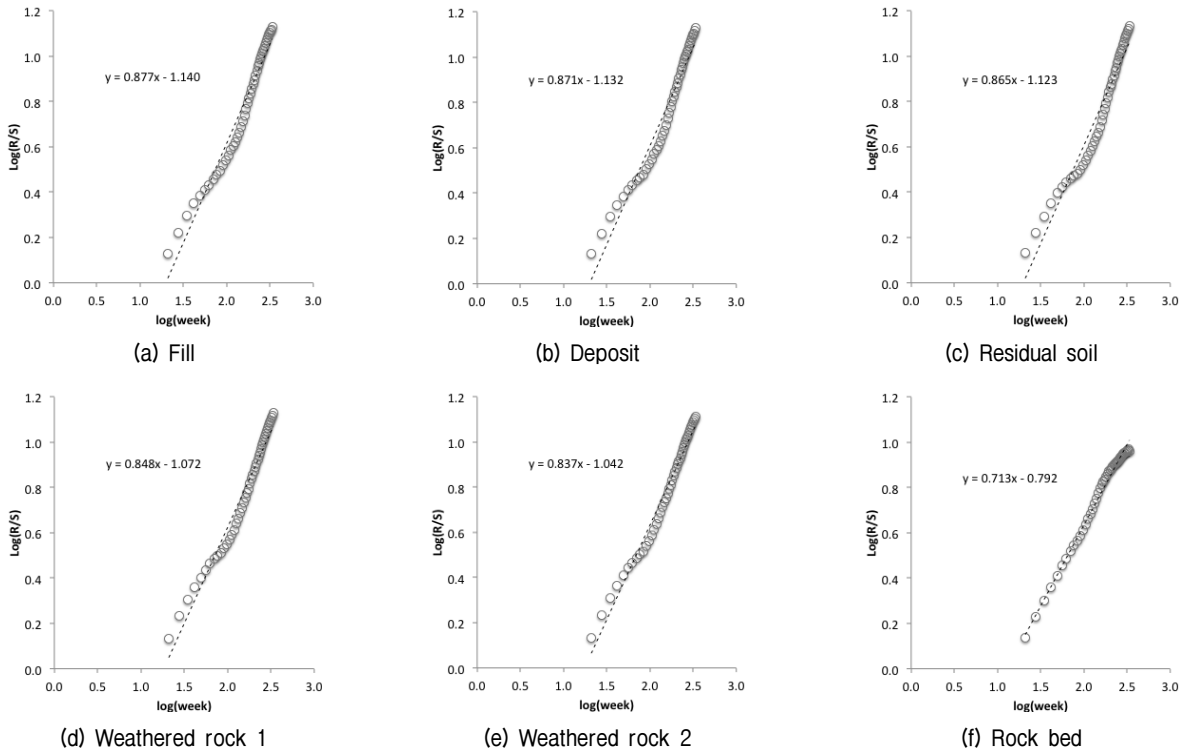


Fig. 2. Analysis result to confirm self-similarity of datum collected

Table 1. Summary of datum collected

No.	EA	Profile(m)							Groud water level (m)	Depth (m)	Area (m ²)	Excavation method	Grouting	Remark
		Fill	Deposit	Residual soil	Weathered rock	Soft rock	Moderated rock	Hard rock						
1	4	2	-	10.75	3.35	9.3	-	-	8.5	25.4	1144.8	H-Pile+CIP H-Pile+Shotcrete	LW grouting	
2	22	2	20	2	3	6	6	9	10	48	11420.42	D/Wall	D/WALL	Top-down
3	10	1.3	3.79(+) 2.19	6.1	12.9	1.9	0.8	0.2	10.2	23.2	31158.37	S.C.W, H-Pile+Timber, Shotcrete	S.C.W S.G.R grouting J.S.P grouting	
4	12	4.2	1.8	9.7	3.5	3.6	-	3.2	5.3	26	1949.28	H-Pile+CIP H-Pile+Timber H-Pile+Shotcrete	LW grouting	
5	11	4.3	1	4.7	2.6	2.8	-	13.7	5.3	34.4	20830.74	H-Pile+CIP H-Pile+Shotcrete	LW grouting	
7	9	1.34	-	0.89	0.24	6.05	5.24	-	5.51	13.76	20463.97	H-Pile+Timber, Shotcrete		
9	6	2.23	3.87	9.1	3.4	-	-	10.8	7.37	29.4	4423.5	H-Pile+CIP, Shotcrete	LW grouting	
10	9	8.41	7.08(+)	3.06	1.6	9.86	-	-	19.83	22.93	5764	H-Pile+CIP D/WALL	LW grouting	Top-down
21	2	9	-	-	-	-	-	-		9	632.15	H-Pile+Timber		
22	1	7	-	1	1.5	1.43	-	-		10.93	433.37	H-Pile+Timber		

임의 두 시간 t 와 t_0 사이의 변위 값이 식 (1)과 같은 'fBm'의 관계를 가지는지 분석하였다. 수집된 경사계 자료들 중 몇 가지 경우에 대해서 분석을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

한편 굴착과정에서 붕괴가 발생된 현장의 계측자료들을 별도로 분석한 결과, 붕괴 발생까지의 계측자료들을 단순히 변위(displacement)의 크기만을 비교했을 때, 안전했던 일반현장과 붕괴가 발생된 현장사이에 뚜렷한 차이를 찾기가 어려웠다. 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 (a)와 (b)는 일반 현장이고 (c)와 (d)는 붕괴가 발생된 현장의 변위자료를 최소, 최대 그리고 평균 값으로 정리한 것이다. 그런데 그림에서 일반현장인 (b)의 경우에는 붕괴가 발생된 현장의 자료인 (c)와 (d)보

다 변위발생의 정도가 더 컸던 것으로 나타났지만 붕괴에 도달하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 (c)의 경우에는 (b)와 비교해서 매우 적은 양의 변위가 발생했고, (a)의 경우와 비교해도 큰 차이가 없는 것으로 보이지만, 실제 현장에서는 붕괴가 발생하였다. 즉 이러한 결과에 의하면 현장에서는 단지 변위량의 상대적 크기만으로 굴착진행에 따른 위험도를 예측하기 어렵다는 사실을 알 수 있었다. 본 논문에서는 같은 자료들에 대해서 R/S 분석을 실시하여 Hurst 지수를 구하였으며, 그 결과를 계측 심도별로 나타내었다(Fig. 5 참조).

Fig. 4(a)는 일반 현장의 경우인데, 깊이별 Hurst 지수 값이 유사한 나타나고 큰 차이가 없는 것으로 나타나고 있다. Fig. 5(b)는 붕괴가 발생된 현장의 경우인데, 심도별로 Hurst 지수값에 차이가 발생되었으며, Hurst 지수

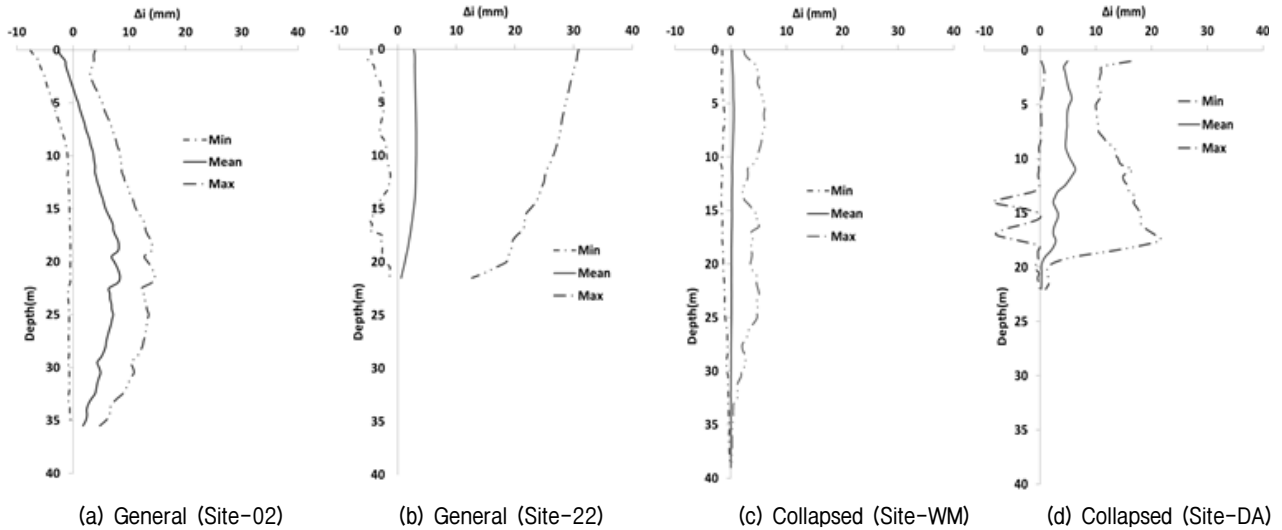


Fig. 3. Comparison of displacement measured between general and collapsed sites

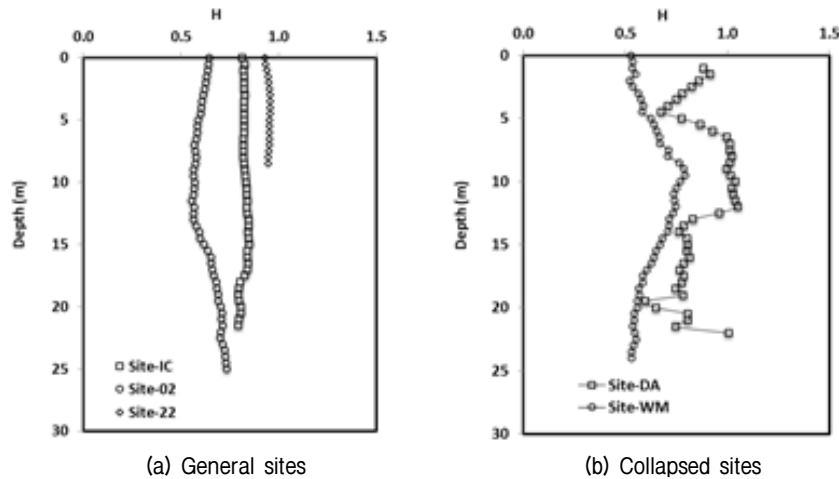
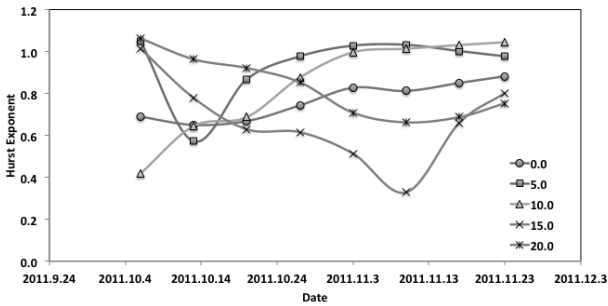


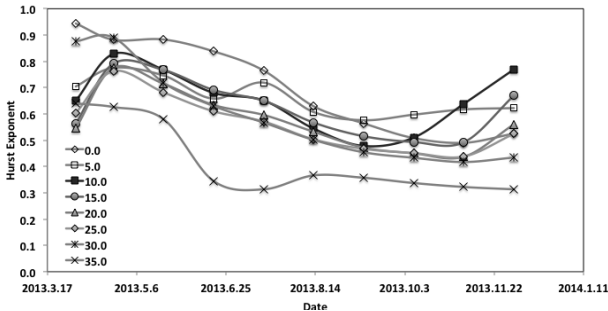
Fig. 4. Comparison of Hurst exponents between general and collapsed sites

값이 급격히 증가하는 구간은 실제로 붕괴가 발생된 것으로 확인된 지점들이었다.

이러한 사실에 대해서 좀 더 자세히 분석해 보면 Fig. 5는 실제 붕괴가 발생한 지점에서 심도별 경사계 계측 자료를 굴착 경과시간에 따른 Hurst 지수의 변화로 다시 나타낸 것이다.



(a) Site-DA



(b) Site-WM

Fig. 5. Variation of Hurst Exponents with the period of excavation at each depths in collapsed sites

Fig. 5(a)에서 붕괴가 발생된 지점(I-2)에서 심도 10m 지점까지 Hurst 지수값은 붕괴발생 시점(2011년 11월 26일)보다 훨씬 이전부터 증가하는 경향을 보이고 동일한 지점이라도 붕괴가 발생되지 않은 15m 이하지점들은 Hurst 지수의 변화가 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 5(b)의 경우에도 2013년 12월 5일 붕괴가 발생되었고, 실제로 붕괴가 발생되었던 심도 약 17m 부근의 자료인 10m~25m 구간의 분석결과들이 4주전부터 증가하고 있는 것으로 나타나고 다른 심도의 자료들은 감소한 것으로 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

즉 현장 계측 값에 대한 주기적인 R/S 분석을 실시하여 Hurst 지수 값의 변화를 관찰한다면 현장에서 발생될 수 있는 이상 징후 예측기법으로 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

4. Hurst 지수를 활용한 미지점 변위 예측

4.1 Hurst 지수를 활용한 미지점 변위 예측 함수

산정된 Hurst 지수를 활용하여 기지점 사이의 미지점에 대해서 변위값은 다음과 같이 추정해 볼 수 있다. 즉, fBm 특성을 가지는 시계열 데이터는 그 증가되는 값의 분산이 다음과 식 (4)와 같은 관계가 있다고 알려져 있다(Voss, 1985).

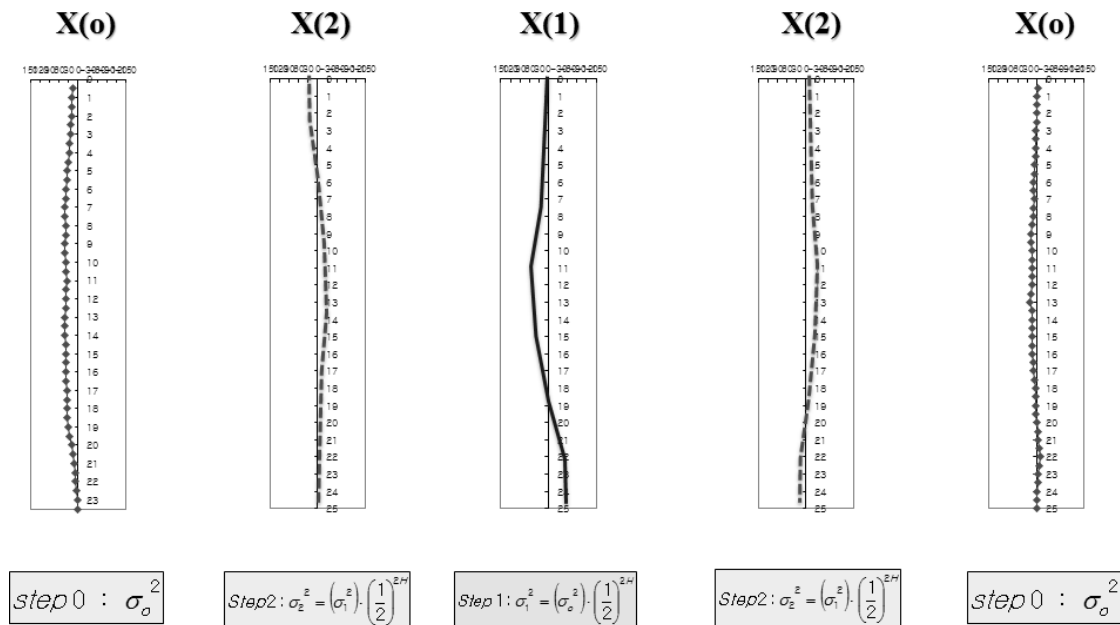


Fig. 6. Simulation processes of the behavior of displacement of unknown location by MSM (carpenters, 1981)

$$V(L) = |dL|^{2H}(\sigma_o^2) \quad (4)$$

또한 Carpenter(1981)가 제안한 방법(Midpoint Subdivision Method; MSM)을 활용하면 미지점에 대한 분산(variance) 값을 Hurst 지수를 이용하여 Fig. 6과 같은 개념으로 산정하여 미지점 변위 예측도 가능하다.

미지점에 대한 변위예측은 Fig. 7에서와 같이 이미 알고 있는 두 기지점(X(o))의 중간지점에 1차 미지점 'X(1)'을 설정하고 두 기지점의 평균 분산값(σ_o^2)을 이용하여 그림의 Step 1 단계의 분산값(σ_1^2)을 구하여 Monte-Carlo 모사법 등을 활용하여 정규분포(평균=0)를 가지는 난수(random variable)를 발생시켜 두 X(o) 지점의 변위값의 평균값에 더해 줌으로써 X(1)지점의 변위값을 추정할 수 있다. 2차 미지점(X(2))에 대해서는 그림과 같이 지점들 사이에 새로운 2차 지점들을 선정하고, 이때는 분산값(σ_2^2)을 이용하여 Step 2 단계의 분산값(σ_2^2)으로 난수(random variable)를 발생시켜 X(o)와 X(1) 지점의 변위값의 평균값에 더해 줌으로써 X(2)지점의 변위 값으로 추정할 수 있다. 그 다음 단계도 이와 유사하게 진행할 수 있으며, 미지점의 개수는 기지점의 간격에 따라 달라질 수 있기 때문에 현장의 자료 축적을 통하여 효율적인 미지점 간격의 결정과정이 필요하다.

4.2 미지점 변위 예측함수 검증

앞서 언급된 미지점 예측방법을 검증하기 위하여 굴

착이 진행 중인 현장에 적용하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

4.2.1 현장개요

현장 개요와 공사구역의 단면도는 다음 Fig. 7과 같다.

- ① 사업명 : ○○ 현장
- ② 대지위치 : 서울특별시
- ③ 굴착고 : E.L(-)10.3m~E.L(-)26.4m(상부 E.L(+)
12.2m 기준)
- ④ 적용공법 : D/Wall + Anchor공법 및 Top Down공법(지하철 구간)
- ⑤ 사용자재 :

Type	Detail
• Ground Anchor	PC Strand ϕ 12.7mm (6~8ea)
• Rock Bolt	HD25, L=4.0m
• D/Wall Concrete 강도	t=1.0m fck \geq 310kgf/cm ²

4.2.2 기지점 측정변위

Fig. 8에서와 같이 경사계 3번 지점을 미지점이라고 했을 때, 2번과 4번 지점의 측정결과(Table 2)를 이용, 상기의 식 (4)를 통해 3번 지점에서 변위를 예측하고, 그 결과를 실제 측정결과와 비교하였다.

계산 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 3번 지점에서 예측된 변위량은 2번과 4번 지점에서 실측된 변위량의 중간 정도의 변위분포를 보이고 있다.

Fig. 10은 경사계 2번 지점의 실측변위와 예측변위를

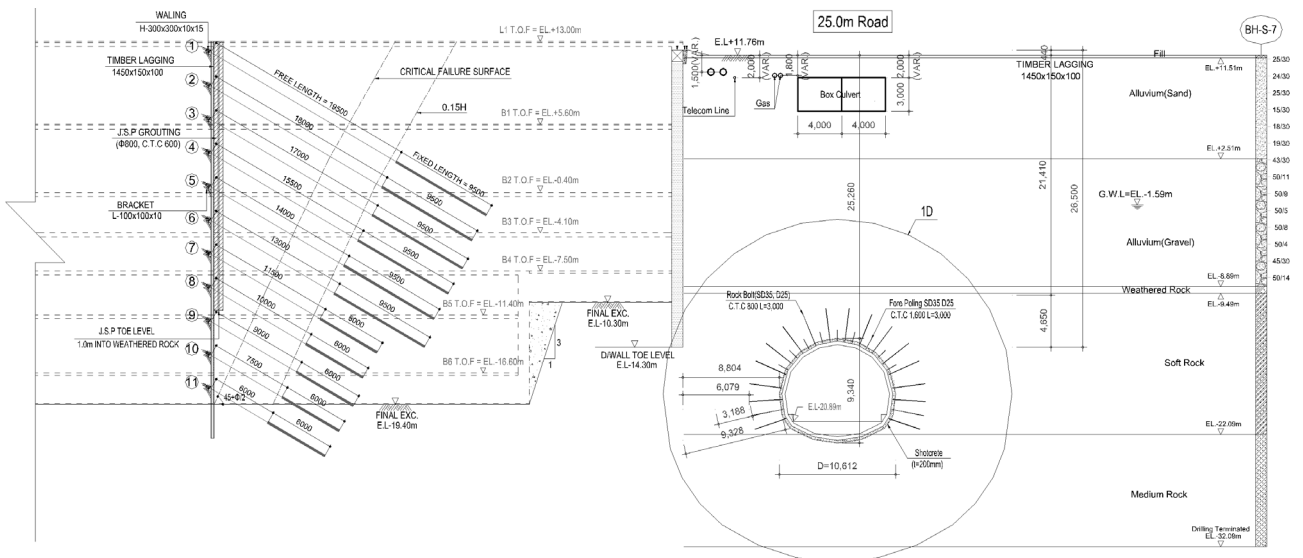


Fig. 7. Excavation section of test site

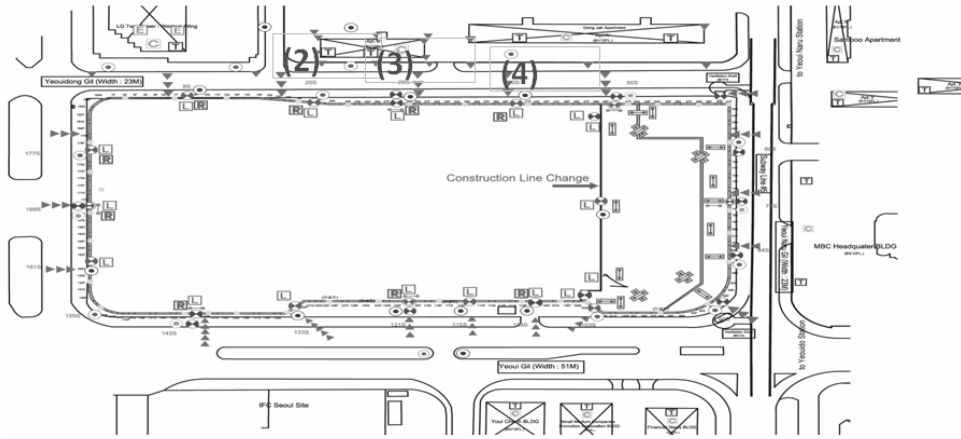


Fig. 8. Installed location of Inclinometers

Table 2. Actual data measured from inclinometer No.2 and No.4

Depth (m)	I-2 (mm)	I-4 (mm)	Depth (m)	I-2 (mm)	I-4 (mm)	Depth (m)	I-2 (mm)	I-4 (mm)	Depth (m)	I-2 (mm)	I-4 (mm)
0.0	2.69	0.3	10.0	12.82	2.81	20.0	20.36	0.62	30.0	6.23	-1.46
0.5	3.15	0.27	10.5	13.98	3.01	20.5	19.88	0.7	30.5	6.18	-1.18
1.0	3.64	1.96	11.0	14.69	3.07	21.0	19.64	0.93	31.0	6.53	-1.03
1.5	3.97	1.97	11.5	14.98	3.17	21.5	19.27	0.09	31.5	6.11	-0.67
2.0	4.14	1.86	12.0	15.72	3.14	22.0	18.24	-0.27	32.0	5.37	-0.45
2.5	4.35	1.74	12.5	16.42	3.13	22.5	17.9	0.42	32.5	4.85	-0.12
3.0	4.68	1.63	13.0	17.29	3.33	23.0	18.04	0.21	33.0	5.14	0.13
3.5	5.26	1.51	13.5	17.93	3.51	23.5	18.1	0.42	33.5	4.78	0.2
4.0	5.65	1.4	14.0	18.65	3.56	24.0	18.37	0.76	34.0	4.68	0.31
4.5	6.21	1.48	14.5	19.08	3.22	24.5	18.38	0.64	34.5	3.89	0.34
5.0	6.66	1.48	15.0	19.57	2.58	25.0	17.03	0.43	35.0	3.15	0.31
5.5	7.27	1.45	15.5	19.76	2.3	25.5	16.48	0.41	35.5	2.65	0.31
6.0	7.9	1.54	16.0	20.01	1.77	26.0	15.59	0.51	36.0	1.99	0.34
6.5	8.27	1.63	16.5	20.04	0.4	26.5	14.04	-0.02	36.5	2.09	0.24
7.0	8.97	1.8	17.0	20.62	0.88	27.0	12.51	-0.73	37.0	1.54	0.3
7.5	9.49	1.96	17.5	21	0.75	27.5	11.17	-1.37	37.5	1.07	-0.18
8.0	10.2	2.21	18.0	21.09	0.54	28.0	9.56	-1.77	38.0	1.13	-0.13
8.5	10.65	2.33	18.5	21.11	0.2	28.5	8.5	-1.9	38.5	1.06	0.04
9.0	11.18	2.43	19.0	21.14	0.01	29.0	7.26	-1.8	39.0	0.86	0.08
9.5	12.07	2.67	19.5	21.21	0.88	29.5	6.49	-1.85	39.5	0.52	0.03

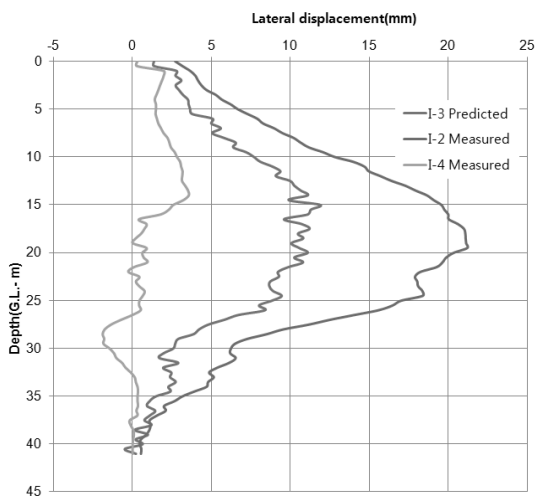


Fig. 9. Prediction of displacement of unknown location by Voss's (1998) method

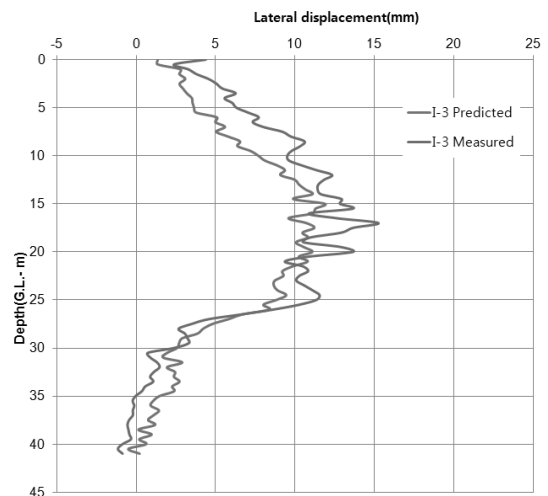


Fig. 10. Comparison between predicted and measured datum

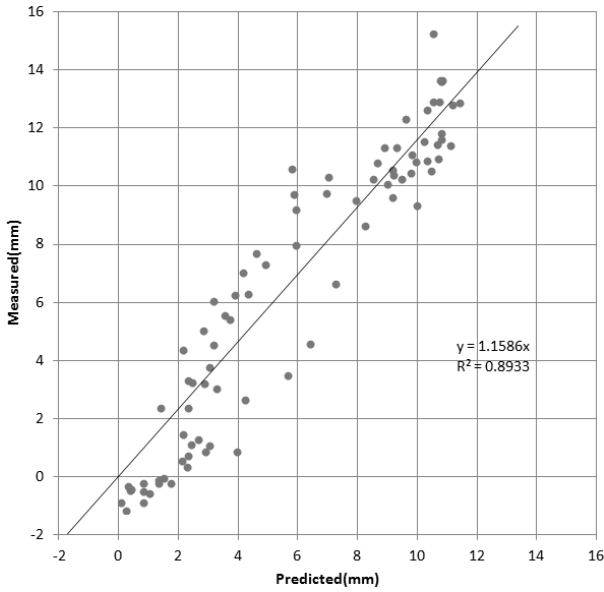


Fig. 11. Correlation between predicted and measured datum

비교한 그림이다. 실측변위와 예측변위와의 차이는 -2.44~4.79mm의 범위를 갖으며, 심도에 따른 변위양상이 매우 유사하다는 사실을 알 수 있었다. 이들 결과에 대한 상관분석을 실시하여 Fig. 11에 그 결과를 나타내었으며, 상관성은 89.3%로 높은 수준으로 나타났다.

4.3 Hurst 지수를 활용한 단계별 발생변위 예측

4.3.1 단계별 발생변위 예측 함수

한편 본 연구에서 제안하는 기법은 설계과정에서 굴착단계(시간)별 변위발생량(Δi_n)의 예측이나 측정 지점간 미측정 지점에 대한 변위량 예측을 위해 기법으로 활용될 수 있다. fBm특성을 가지는 시계열 데이터는 Hurst 지수가 구해지면 다음의 식 (5)를 이용하여 임의의 시간에서의 변위량($\Delta i_{t(n)}$)을 이전의 변위량($\Delta i_{t(n-1)}$)을 근거로 추정할 수 있다(Feder, 1988).

$$\Delta i_{t(n)} = \Delta i_{t(n-1)} |dt|^{2H-1} \quad (5)$$

여기서, dt = 계측주기(week, 주)이다.

4.3.2 발생변위 예측

앞서 적용된 현장을 대상으로 경사계 2번에 대하여 굴착단계별 변위예측과 실제 측정결과(Table 3)를 분석한 결과는 Fig. 12에 나타내었다. 분석결과는 매우 유사한 변위양상을 보이고 있었으며, Fig. 13에 나타낸 바와

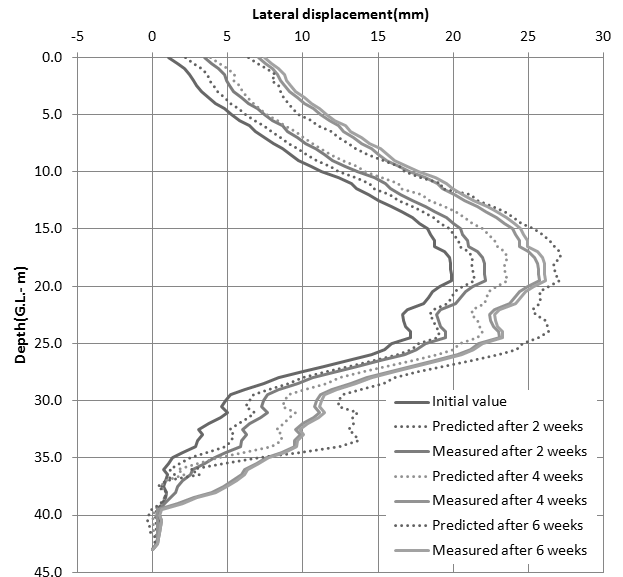


Fig. 12. Comparison between predicted and measured datum with steps of excavation by Feder's method (1988)

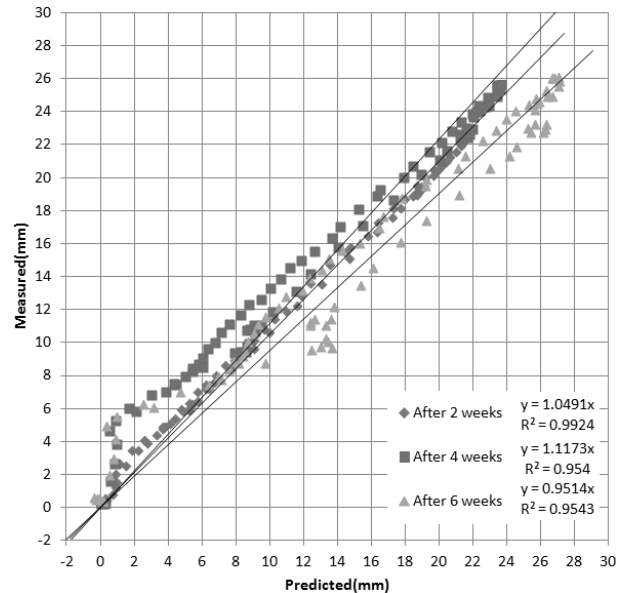


Fig. 13. Correlation between predicted and measured datum with steps of excavation by Feder's method (1988)

같이 95.0% 이상의 높은 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다.

따라서 실제 시공과정에서는 계측 값에 대해서 R/S 분석법을 활용하면, 굴착단계별 변위 값 예측이 가능할 수 있을 것으로 판단되었다. 그러나 이상의 결과는 아직 적용성을 확인하는 수준이므로, 본격적으로 현장에 활용하기 위해서는 향후 더 많은 자료들에 대한 조사와 분석이 이루어져야 할 것이다.

Table 3. Actual data measured from test site (inclinometer No.2)

Depth (m)	Lateral displacement (mm)				Depth (m)	Lateral displacement (mm)			
	2008/12/12	2009/1/2	2009/1/16	2009/1/30		2008/12/12	2009/1/2	2009/1/16	2009/1/30
0.0	0.36	3.45	7.05	7.48	21.5	16.98	20.16	23.75	24.14
0.5	0.92	3.9	7.51	7.94	22.0	15.85	19.17	22.7	23.03
1.0	1.39	4.42	7.98	8.41	22.5	15.39	18.89	22.41	22.74
1.5	1.7	4.76	8.31	8.75	23.0	15.42	18.99	22.49	22.79
2.0	2	4.92	8.48	8.89	23.5	15.54	19.14	22.66	22.96
2.5	2.17	5.1	8.77	9.18	24.0	15.89	19.45	22.98	23.29
3.0	2.54	5.4	9.11	9.53	24.5	16.01	19.47	23.03	23.28
3.5	3.05	5.94	9.65	10.09	25.0	14.69	18.15	21.66	21.92
4.0	3.51	6.37	10.08	10.55	25.5	14.22	17.58	21.13	21.35
4.5	4.16	7.01	10.7	11.11	26.0	13.37	16.75	20.27	20.57
5.0	4.66	7.46	11.18	11.58	26.5	11.83	15.12	18.72	18.98
5.5	5.16	8	11.75	12.12	27.0	10.3	13.55	17.16	17.42
6.0	5.8	8.62	12.35	12.8	27.5	8.92	12.24	15.81	16.1
6.5	6.12	8.97	12.68	13.18	28.0	7.3	10.62	14.21	14.58
7.0	6.81	9.65	13.37	13.91	28.5	6.25	9.64	13.15	13.51
7.5	7.33	10.14	13.89	14.43	29.0	5.03	8.4	11.93	12.21
8.0	8	10.84	14.58	15.14	29.5	4.16	7.64	11.14	11.43
8.5	8.47	11.41	15.05	15.6	30.0	3.84	7.38	10.89	11.23
9.0	8.95	11.95	15.57	16.07	30.5	3.5	7.24	10.79	11.08
9.5	9.8	12.86	16.39	16.96	31.0	3.77	7.63	11.12	11.44
10.0	10.51	13.61	17.07	17.67	31.5	3.35	7.2	10.72	11.04
10.5	11.65	14.74	18.16	18.81	32.0	2.38	6.45	9.99	10.28
11.0	12.39	15.5	18.93	19.53	32.5	1.73	5.96	9.51	9.77
11.5	12.76	15.81	19.3	19.91	33.0	1.92	6.26	9.81	10.06
12.0	13.42	16.48	20.05	20.6	33.5	1.56	5.91	9.47	9.67
12.5	14.11	17.26	20.74	21.31	34.0	1.58	5.84	9.42	9.57
13.0	14.96	18.17	21.61	22.26	34.5	0.96	4.89	8.58	8.75
13.5	15.59	18.74	22.16	22.88	35.0	0.56	4.1	7.58	7.74
14.0	16.34	19.53	22.86	23.56	35.5	0.57	3.45	6.9	7.04
14.5	16.86	20	23.4	24.05	36.0	0.53	2.67	6.1	6.29
15.0	17.28	20.44	23.93	24.46	36.5	0.73	2.53	5.89	6.11
15.5	17.44	20.6	24.1	24.65	37.0	0.85	2.03	5.33	5.56
16.0	17.68	20.92	24.37	24.92	37.5	0.76	1.64	4.7	4.95
16.5	17.68	21	24.42	24.94	38.0	0.92	1.56	3.92	4.19
17.0	18.34	21.59	24.99	25.58	38.5	0.86	1.22	2.71	2.96
17.5	18.72	21.95	25.4	25.9	39.0	0.71	0.83	1.68	1.99
18.0	18.87	22.06	25.56	26.04	39.5	0.43	0.5	0.36	0.58
18.5	18.9	22.08	25.63	26.04	40.0	0.43	0.49	0.26	0.49
19.0	18.92	22.09	25.67	26.05	40.5	0.49	0.58	0.34	0.59
19.5	18.91	22.11	25.7	26.09	41.0	0.42	0.53	0.35	0.53
20.0	18.1	21.29	24.94	25.29	41.5	0.38	0.47	0.35	0.47
20.5	17.62	20.82	24.4	24.82	42.0	0.37	0.41	0.33	0.42
21.0	17.31	20.47	24.08	24.49	42.5	0.29	0.31	0.31	0.37

5. 결론

본 연구는 흙막이 벽체의 수평변위 계측결과에 대하여 플랙탈 이론에 기초한 Hurst 지수 평가방법을 적용하여 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 일반적인 현장의 계측결과들을 Hurst 지수로 평가한 결과 $H=0.7\sim 0.8$ (Fig. 3)의 범위로 나타났다. 이는 $H > 1/2$ 의 양의 상관관계를 보이며 자기 유사성의 성질, 즉 플랙탈 이론을 따르는 것으로 평가될 수 있으며 이는 축척된 자료를 통해 향후의 변화 양

상에 대한 예측이 가능할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

- (2) 안정적인 현장의 시간에 따른 Hurst 지수의 변화가 일정 수준에서 변화가 없는 반면, 붕괴 현장의 Hurst 지수의 변화는 수 주(week)전부터 뚜렷하게 증가하는 양상을 보이며 붕괴에 이르고 있는 것으로 나타났다. 이는 Hurst 지수의 변화 양상이 흠막이 벽체의 안정성을 대변할 수 있으며, 불안정성에 대한 예측도 가능하다는 것을 보여주고 있다.
- (3) 시간에 따른 심도별 흠막이 벽체의 수평변위가 플랙탈 이론을 따르며 $1/2 < H < 1$ 의 양(+)의 상관관계를 갖는 경우, 제안된 방법에 의하여 계측지점 사이의 미지점에 대한 수평변위의 추정이 가능하다. 이에 따라 계측된 일련의 3개소의 계측결과를 이용하여 계측지점 사이값의 추정값과 계측값을 비교한 결과, 그 상관계수(R)가 89.3%로 높은 상관성을 갖으며 심도에 따라 유사한 분포양상을 보이는 것을 알 수 있었다.
- (4) (3)의 제안된 방법을 반복 적용하므로써, 기지의 계측점 사이의 모든 위치에서의 추정이 가능하므로 소수 개소의 계측만으로도 전 굴착면의 모든 지점에 대하여 그 변위양상을 파악할 수 있을 것이다.
- (5) 또한, 임의의 시간에서의 변위량을 이전 변위량을 근거로 추정(Feder, 1988)하는 굴착단계에 따른 향후 변위예측 결과를 실제측치와 비교한 결과도 역시 그 상관계수(R)가 95.0% 이상으로 높은 상관성을 갖으며 심도에 따라 매우 유사한 변위 양상을 나타내고 있어 Hurst 지수에 의한 변위예측도 가능한 것으로 판단된다.
- (6) 본 연구에서는 일반적으로 안정적인 현장에 대하여 수행되어 그 결과, 추정치 및 예측치가 일반 통계적·수치적 범위를 크게 벗어나지 못하고 있다. 향후 보다 많은 계측데이터 특히, 붕괴된 현장에 대한 데

이터를 축척하고 이를 분석하면 이 같은 범위의 한계를 넘어서 보다 현실적인 결과를 보일 것으로 기대된다. 또한, 본 연구를 바탕으로 전산화 시스템을 구축하면 현재보다 경제적이며 시간 효율적인 계측 시스템을 구축할 수 있으며 계측데이터의 축척이 보다 용이할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(건설부문) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Baveye, P. and C. W. Boast (1998), Fractal Geometry, Fragmentation Processes and the Physics of Scale-Invariance: An Introduction, in Baveye, P., J.-Y. Parlange and B. A. Stewart (1998), "Fractals in Soil Science", CRC press, pp.1-54.
2. Carpenter, L. C. (1981), Computer rendering of fractal curves and surfaces, proceeding of ACM siggraph conference, Seattlem Washington, July 1980.
3. Feder, J. (1988), "Fractals", Plenum, pp.149-183.
4. Gleick, J. (1993), "Chaos : Making a New Science", ABACUS, pp.23.
5. Kim, H.-R. (2011), A Study on the Tree-Dimensional Design Education Using Fractal Geometry, Master Thesis, Kookmin University, pp.54.
6. Mandelbort, B. B. (1983), "The Fractal Geometry of Nature", Macmillan, pp.22-27.
7. Mandelbort, B. B. and J.W. Van Ness (1968), "Fractional Brownian Motions, Fractional Noises, and Application", SIAM Review, Vol.10, pp.422-437.
8. Voss, R. F. (1985), "Random Fractals: Characterization and Measurement. in Scaling Phenomena in Disordered Systems (Editors P. Pynn & A. Skjeltorp)", Plenum Press, New York, pp.1-11.

Received : December 29th, 2014

Revised : April 2nd, 2015

Accepted : April 6th, 2015