도심지 아파트 L형 옹벽의 장기 경사거동 예측모델

Long-term Tilt Prediction Model for the L-type Retaining Wall Adjacent to Urban Apartments

구 기 영^{1)*} 성 주 현²⁾
Koo, Ki Young Seong, Joo Hyun

Abstract

This paper presents a study of system identification on the tilt response of the L-type retaining wall located at Tanhyun 11th ACE Apartment, Ilsan in order to understand mechanism how the structure behaves in operational conditions and to provide a reference tilt values for assessing structural abnormality. The retaining wall was extraordinarily tall (14m) in urban area so the long-term monitoring system had been installed with 3 tilts-meters and 9 temperature sensors operational from Oct 2004 upto Nov 2007. By using 5-months continuous data in which all the 12 channels were up and running, the two prediction models, 1) the linear model, and 2) the state-space equation (SSE) model, have been identified by finding the best fitness model among all possible 511 combinations of input temperatures out of the 9 temperatures. The linear model which was simple in the model structure achieved the validation fitness of 68% due to the fact that the static model wasn't able to represent thermal dynamics. The SSE model achieved the validation fitness of 90% which was quite accurate considering various unexpected noises happening in field measurements.

Keywords : Structural health monitoring, L-type retaining wall, Tilt measurements, State space equation model, Thermal responses

1. 서론

옹벽은 경사지가 많은 국내 지반환경으로 인하여 도로, 건축물, 사면의 부대시설로서 흔하게 볼 수 있는 구조물이다. 해빙기, 장마철의 집중호우, 태풍 등에 의한 옹벽 붕괴사고가 빈번히 발생하여 많은 인적·물적 피해를 야기하고 있어서, 육안 조사를 통한 현장점검 외에 사전에 옹벽의 이상상태를 감지하여 붕괴를 미연에 방지할 수 있는 정량적이고 합리적인 기법이 필요하다.

옹벽의 안전성에 영향을 미치는 요인으로는 상재하중, 지하수위변화 등과 같은 외적인 요인과 시간의 경과에 따른 열화 및 계절적 변화에 따른 동해 등의 내적인 요인으로 나눌 수 있다. 일반적으로 각변위가 이러한 옹벽의 내

외적 요인에 의한 구조체의 안전성에 대한 평가기준으로 사용될 수 있고 (Skempton and MacDonald, 1956; Polshin and Tokar, 1957; Burland and Wroth, 1974; Son, 2003), 일반적으로 각변위 1/300을 구조물 손상의 한계로 사용한다.

경사는 옹벽이 정상운용 되는 상황에서도 외적인 요인으로 인해 변할 수 있는데, 이러한 외적인 요인을 규명하고 경사응답을 결정하는 메커니즘을 이해하는 것이 경사를 사용한 안전성 평가에 필수적이다 (Yang et al, 2009; Wood et al, 2009; Dey et al, 2011). 특히 옹벽 내외부의 온도변화가 가장 큰 외적요인이라고 알려져 있는데, 이를 규명하기 위하여 장기계측 온도-응답 데이터에 대한 신호처리(Battista et al. 2012)가 필요하다.

1) 정회원, 경일대학교 건설공학부 조교수, 교신저자
2) 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소 대리

* Corresponding author : kykoo@kiu.ac.kr 053-850-7221

• 본 논문에 대한 토의를 2012년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2013년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 일반적으로 많이 시공되는 옹벽형태인 L형 콘크리트 옹벽의 장기계측데이터에 대한 신호처리를 통해 장기경사거동을 예측할 수 있는 모델을 수립하고자 한다. 수립된 모델은 차후에 본 옹벽에 대한 이상상태감지를 판단하는 기준으로 사용될 수 있다.

2. 일산 탄현 아파트 옹벽

2.1 개요

본 연구의 대상구조물로 선정된 옹벽 시설물(Fig. 1)은 경기도 고양시 일산구에 위치한 아파트 부대옹벽으로써, 도심지 아파트 옹벽으로는 보기 힘들게 매우 높고 아파트 건물과의 이격거리 또한 짧으며, “시설물의 안전관리에 관한 특별법”상 2종 시설물인 동시에 “재난 및 안전관리 기본법”상 특정관리대상시설로 지정되어 있어 입주민 및 시설관리자에게 항시 주의가 요구되는 구조물이다. 현재까지 옹벽에 대한 문제점은 발생하지 않는 상황이나 옹벽 높이가 매우 높고 배면지반이 흙으로 구성되어 있어 내외적 요인에 의한 옹벽의 변형 발생량이 커 계측자료 분석이 용이할 것으로 사료되어 모니터링 시스템을 설치하였다. 옹벽의 현황은 다음 Table 1과 같다.

Fig. 1 Overview of the Tanhyun Retaining Wall

Table 1 Tanhyun Retaining Wall Description

Item	Description
Location	The 11th ACE Apartment, Tahyun-dong, Ilsan-gu, Seoul
The time of Completion	1997
Height of the structure	14m
Structural Type	L-type retaining wall

2.2 모니터링 시스템

옹벽에 설치된 경사계는 Figs. 1 & 2에서 보는바와 같이 높이별로 상, 중, 하 3개소에 1축 경사계가 설치되었다. 경사계의 (+) 방향은 옹벽이 전면으로 휘는 방향으로 설정하였다. 경사변화를 일으키는 주된 원인은 온도로 예상되었고, Fig. 2에 나타난 바와 같이 각 경사계 센서함 내부에 온도계 3개 [대기온도계 ($T_{j,air}$, $j=1,2,3$)], 경사계 높이에서 옹벽 5cm 깊이 아래에 매설 온도계 3개 [표면온도계($T_{j,ext}$, $j=1,2,3$)], 20cm 깊이 아래에 매설 3개 [내부온도계($T_{j,int}$, $j=1,2,3$)], 총 9개의 온도계가 설치되었다. 계측은 1시간마다 1회 수행되었고, 계측된 데이터는 CDMA Module이 제공하는 Mobile Internet을 이용하여 현장에서 사무실로 전송되었다. CDMA Module은 RS232 Interface를 지원하는데, 이것이 데이터로거의 RS232 Interface와 연결되어 현장에 직접 방문하지 않고 원격지에서 데이터 로거를 운용할 수 있었다. 구성요소의 상세는 Table 2에 있다.

3. 장기 경사응답에 대한 이해

Fig. 3은 2005년 2월부터 2007년 7월까지의 경사응답을 보여주는데, 계절적인 변화와 일간변화의 패턴을 볼 수 있다. 계절적인 변화로써 옹벽은 여름이 되면 배면방향으로 휘어지고(Fig. 3(above)), 일간변화로써 낮 동안의 온도상승으로 인해 배면방향으로 휘어짐이 계측되었다(Fig. 3(below)). 계절적인 변화는 옹벽의 높이 방향 팽창과 뒷채움 지반의 높이방향 구속력으로 설명될 수 있

Fig. 2 Sensor configuration

Table 2 Specification of Tilt Monitoring System

Item	Model	Specification	# of Items
Single axis Tilt-meter	801-S, Applied Geomechanics	Electrolytic Type Range: ± 3 degree Resolution: 0.0006 degree	3
Temperature sensor	Thermocoupler Type T Element packaging	Range: -185 to $+300$ Resolution: ± 0.5 between -40°C and 125°C	6
Data Logger	CR 10X, Campbell Scientific	12 channel Resolution: 0.33 mV RS-232	1
CDMA module	EK001B, Growell Telecom,	Rate: 9600 BPS RS232	1

다. 옹벽의 전체적인 온도증가는 옹벽을 높이방향으로 늘어나게 하는 힘을 발생시키고, 뒷채움 지반은 옹벽 배면

표면에서 높이방향 늘어남을 구속하는 구속력을 발생시킨다. 두 힘의 합력은 옹벽을 배면으로 휘어지게 만든다. 일간변화는 옹벽 전면부와 배면부의 온도차이로 설명될 수 있는데, 전면부는 배면부보다 온도가 높고 이로 인해 전면부가 더 늘어나면서 옹벽은 배면부로 휘어지게 된다.

TL1은 Fig. 3(below)에서 보는바와 같이 오전 6-7시 경에 배면부로 휘기 시작하고 오후 4-5경에 최대로 휘 뒤, 다음날 오전6-7시 경까지 다시 전면부로 휘는 사이클을 가진다. TL2와 TL3은 TL1에 비해서 6시간 정도의 delay를 가진다. 이는 TL1이 상부표면에 가까운 관계로 TL2와 TL3에 비해 빨리 데워지고 식혀지기 때문으로 보이고, 옹벽이 Thermal dynamics system 임을 보여준다.

Fig. 4는 온도 계측치를 나타낸다. Fig. 4(a)에서 보는

Fig. 3 Tilt time history (above) and zoomed view (below)

Fig. 4 Temperature time history (a) and zoomed view (b)

바와 같이 온도가 비슷한 계절적 변화 경향을 가지나, Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 외부온도, 대기온도는 큰 변화폭을 가지고, 내부온도는 작은 변화폭을 가짐을 알 수 있다. 내부온도의 작은 변화폭은 지반의 온도가 연중 크게 변하지 않고, 콘크리트의 열전도성이 낮기 때문에 발생한다.

3.1 온도간의 상관관계

대기온도($T_{\text{air}}, j=1,2,3$) 간의 상관관계가 Fig. 5에 나타나 있다. 세 위치에서는 대기온도는 기울기 1에 가까운 높은 선형상관관계를 가지고, hysteresis를 가지지 않는다. 이는 온도계의 오차범위를 고려하였을 때, 실질적으로 세 온도 값이 동일한 값으로 같이 움직인다고 볼 수 있다.

표면온도($T_{\text{ext}}, j=1,2,3$) 간의 상관관계가 Fig. 6에 나타나 있다. 표면온도들은 대기온도 경우보다 더 선형상관관계를 가지고, 대기온도와 마찬가지로 표면온도들은 실질적으로 동일한 값으로 같이 움직인다고 볼 수 있다.

내부온도($T_{\text{int}}, j=1,2,3$) 간의 상관관계가 Fig. 7에 나타나 있다. “ $T_{3\text{int}}$ vs $T_{2\text{int}}$ ”이 높은 선형상관관계를 가지는 것으로 보아 같이 움직인다고 볼 수 있다. 반면 “ $T_{2\text{int}}$ vs $T_{1\text{int}}$ ”와 “ $T_{3\text{int}}$ vs $T_{1\text{int}}$ ”는 상당한 hysteresis를 가지고 있는데, 이는 $T_{1\text{int}}$ 가 $T_{2\text{int}}$ 및 $T_{3\text{int}}$ 과 상이하게 움직인다는 것을 의미한다. 그 이유는 Fig. 2에서 보는바와 같이 $T_{1\text{int}}$ 이 상부표면에 가까이 위치하고 있어서 직사광선과 전도에 의한 온도상승/하강이 급속하게 발생하기 때문

Fig. 5 Relationship between air temperatures T_{air} ($j=1, 2, 3$)

Fig. 6 Relationship between external temperatures T_{ext} ($j=1,2,3$)

Fig. 7 Relationship between internal temperatures T_{int} ($j=1,2,3$)

으로 보인다.

3.2 대기온도, 표면온도, 내부온도 간의 상관관계

대기온도, 표면온도, 내부 온도간의 상관관계가 Fig. 8에 나타나 있다 [그래프의 가독성을 위하여 $T_{1\text{int}}$ 와 $T_{2\text{ext}}$ 에 10°C 의 offset이 의도적으로 더해졌다]. “ $T_{1\text{ext}}$ vs $T_{1\text{air}}$ ”의 관계로부터 외기온도가 대기온도와 특정한 기울기를 가지는 강한 선형상관관계를 가짐을 알 수 있다. 즉,

Fig. 8 Relationship among Air, External and Internal Temperatures

외부온도는 대기온도에 비해서 몇 $^{\circ}\text{C}$ 더 높은 경향이 있으며 이는 온도가 낮을수록 뚜렷하다. “ $T_{1\text{int}}$ vs [$T_{1\text{ext}} + 10^{\circ}\text{C}$]”의 그래프로부터 외부온도와 내부온도는 상당한 hysteresis를 가지고 움직임을 알 수 있고 이 경향은 “ $T_{2\text{int}}$ vs [$T_{2\text{ext}} + 10^{\circ}\text{C}$]”에서도 마찬가지다. 대기와 표면온도는 높은 선형상관관계가 있지만, 표면온도와 내부온도는 옹벽콘크리트의 낮은 열전도성과 연중변화량이 적은 지반온도로 인해 그렇지 않음을 알 수 있다.

(a) $T_{1\text{air}}$, $T_{1\text{ext}}$, and $T_{1\text{int}}$

(b) $(T_{1\text{ext}}) - (T_{1\text{int}})$

Fig. 9 TL1 vs. Temperatures

3.3 온도와 경사간의 상관관계

Fig. 9는 경사 $TL1$ 과 대표적 온도간의 상관관계를 보여준다. 네 가지 온도변수 $T_{1\text{air}}$, $T_{1\text{ext}}$, $T_{1\text{int}}$, $\Delta T = (T_{1\text{ext}} - T_{1\text{int}})$ 모두 $TL1$ 과 선형상관관계를 가지고 있지 않으며, 특히 $T_{1\text{int}}$ 은 매우 복잡한 hysteresis를 보여주고 있다. 이는 $TL1$ 이 온도와 간단한 선형관계가 아닌 복잡한 형태의 모델링이 필요할 가능성을 보여준다.

4. Thermal Modeling

본 연구에서는 두 가지 모델, 1) 선형 모델과 2) 상태 방정식 모델에 대하여 system identification을 수행하였다. 선형 모델은 Eq. (1)에 나타난 바와 같이 경사계측치가 온도계측치와 선형관계를 가진다고 가정한다. 이 모델은 모델구조가 매우 간단하나, 옹벽의 thermal dynamics를 잘 표현하지 못할 가능성이 있다. 상태방정식 모델은 Eq. (2)에 나타난 바와 입력온도와 출력경사 간에 dynamic 관계를 가진다고 가정한다. 모델 구조가 상대적으로 복잡하나 일반적인 dynamic systems을 표현할 수 있다.

system identification을 위하여 입력의 개수를 정하여야 하는데, 총 9개의 온도채널 중에서 몇 개의 온도입력을 사용해야 하는지, 입력개수가 정해지면 어느 온도채널을 선택해야 하는지 알 수 없으므로, 모든 입력조합에 대해서 system identification을 수행하였다. 9개의 계측온도로부터 i ($i = 1, \dots, 9$)개의 온도입력을 선택하는 경우

Fig. 10 Data sets for Identification and Validation

의 수 511 ($= \sum_{i=1}^9 ({}_9C_i)$) 가지 경우에 대해 모델구명을 하였다. Fig. 10에 나타난 바와 같이 2월부터 4월 중순까지의 데이터를 규명데이터 (Data Set for Identification)로 설정하고 시스템구명을 수행하였고, 4월 중순부터 6월까지의 데이터를 검증데이터 (Data Set for Validation)로 설정하여 규명된 모델의 예측성능을 평가하였다.

4.1 선형 Model

본 연구에서 사용된 선형 모델은 다음과 같은 n 개 입력-1개 출력간의 선형관계를 가정하였다.

$$\theta_{TL1}(t_k) = [T_1(t_k) \cdots T_n(t_k)] \begin{Bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{Bmatrix} + b \quad (1)$$

여기서 $\theta_{TL1}(t_k)$ 는 시간 $t = t_k$ 에서의 TL1 경사값, $T_i(t_k)$ 는 i 번째 온도센서에서 측정한 시간 $t = t_k$ 에서의 온도이고, n 은 차수 혹은 모델에서 사용된 온도센서의 개수이고, a_j 와 b 는 추정하고자하는 계수 ($j = 1, \dots, n$)이다.

모델 계수 a_j 와 b 는 규명데이터를 사용하여 least-square방법으로 구하였고, 다음과 같은 Fitness를 사용하였다.

$$(Fitness) = \left(1 - \frac{\| \theta_{TL1}(t_k) - \widehat{\theta}_{TL1}(t_k) \|}{\| \theta_{TL1}(t_k) - \theta_{TL1} \|} \right) \times 100(\%)$$

Fig. 11 Fitness values of Best Static Model on Identification dataset and validation dataset for a given number of input variables

여기서 $\theta_{TL1}(t_k)$ 는 시간 $t = t_k$ 에서의 TL1 실측치, $\widehat{\theta}_{TL1}(t_k)$ 는 규명된 모델이 예측한 시간 $t = t_k$ 에서의 TL1, $\overline{\theta_{TL1}}$ 는 TL1의 평균값이다.

일반적으로 규명데이터로 시스템구명을 한 뒤 검증데이터에 대한 Fitness를 구하여 최대인 모델을 최적모델로 선택한다. 이는 규명데이터만 사용해서 최적모델을 선택하는 경우 발생할 수 있는 over-fit문제를 제거할 수 있다.

각각의 입력변수의 개수를 기준으로, 가장 높은 검증데이터 Fitness를 가지는 모델을 구하였고, 그 모델의 규명데이터 Fitness를 함께 나타내면 Fig. 11과 같다. 입력변수의 개수를 증가시키면 규명데이터에 대한 Fitness는 증가하지만, 변수개수가 3을 초과하는 경우 검증데이터 Fitness가 감소함을 관찰하였다. 즉, 변수개수 4이상인 경우에는 규명데이터를 사용한 경우 over-fit된다. 변수의 개수가 3개인 경우의 최대 검증데이터 Fitness 모델을 최적모델로 선택하는 것이 합리적인 선택이고 다음 식으로 얻어졌다.

$$\theta_{TL1}(t_k) = [T_{1air} \ T_{2int} \ T_{3ext}] \begin{Bmatrix} 12.5 \\ 17.1 \\ -38.9 \end{Bmatrix} + 140.2$$

이에 대하여 측정한 값과 예측된 값을 비교하면 Fig. 12와 같다. 검증데이터에 대한 Fitness는 68.2%이다.

Fig. 12 Measured TL1 vs Predicted TL1 by Static Model

4.2 상태방정식 모델 (State Space Equation Model)

본 연구에서 사용된 상태방정식 모델 (SSE Model)은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{K}\mathbf{e}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) + \mathbf{e}(k) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{x}(k)$, $\mathbf{y}(k)$, $\mathbf{u}(k)$, $\mathbf{e}(k)$ 는 각각 $t = t_k$ 에서의 상태벡터, 출력벡터, 입력벡터, 오차벡터,

Fig. 13 Identification Fitness and Validation Fitness of Best SSE Model for a given number of input variables

$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$ 는 시스템 matrix,

$\mathbf{K}$ 는 Kalman Gain,

n 는 system order,

$$\mathbf{y}(t) = \theta_{TL1}(t) - \theta_{TL1}(t_0),$$

$$\mathbf{u}(k) = \{u_1(k) \ u_2(k) \cdots u_p(k)\}^T$$

$$u_i(t) = T_i(t) - T_i(t_0), i = 1, 2, \dots, p,$$

$\theta_{TL1}(t_0)$, $T_i(t_0)$ 는 기준시간 $t = t_0$ 에서의 값.

SSE 모델 규명은 MATLAB system identification toolbox의 n4sid 함수를 사용하였고, 511개의 입력온도

(a) Full record

(b) Zoomed

Fig. 14 Time history of Measured TL1 and Predicted TL1 by the SSE Model

Fig. 15 Measured TL1 vs. Predicted TL1 by the SSE Model

조합 경우에 대하여 SSE의 system order n 을 1부터 8까지 변화시키면서 모델규명을 수행하였다. 각각의 입력변수개수에 대하여, 가장 높은 검증데이터 Fitness를 가지는 모델을 구하였고, 그 규명데이터 Fitness를 함께 나타내면 Fig. 13과 같다. 입력변수의 개수가 5인 경우와 6인 경우의 Fitness값들이 거의 비슷한데, order가 낮은 5변수 경우가 더 간단하므로 최적모델로 선택되었다. 최적모델의 system order는 2, 입력변수는 T_{1air} , T_{1ext} , T_{2int} , T_{2ext} , T_{3ext} 였다.

최적모델을 사용하여 예측한 경사와 실측치를 Figs. 14 and 15에서 비교하였다. 선형모델에 비해 Fitness가 22% 개선되면서 실측치와 매우 유사한 예측결과를 얻을 수 있다.

5. 결론

본 연구는 일산 탄현 에이스 11차 아파트에 있는 L형 옹벽의 경사를 예측할 수 있는 Prediction Model을 1) 선형 모델과 2) SSE모델 두 가지 경우 대해서 장기 모니터링 결과를 사용하여 규명하였다. 규명된 모델은 옹벽의 구조적 건전성을 평가하기 위한 기준으로 사용될 수 있고, 얻어진 결론은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- (1) 온도입력과 경사출력이 선형관계를 가진다고 가정하는 선형모델에 대해서 511가지 온도 입력조합

에 대해서 최적모델을 규명하였고, 검증데이터에 대한 Fitness는 68%였다. 선형 모델은 모델구조가 간단하나, thermal dynamics를 고려하지 못하는 한계로 인해 높은 정확도를 주지 못하였다.

- (2) 온도입력과 경사출력이 SSE모델을 따른다고 가정하고 511가지 온도입력조합에 대하여 최적모델을 규명하였고 검증데이터에 대한 Fitness는 90.3%였다. SSE 모델은 모델구조가 복잡하나, thermal dynamics를 표현할 수 있고 따라서 높은 Fitness를 얻을 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국시설안전공단의 연구결과를 활용하여 수행하였습니다.

참고문헌

1. Battista, N., Brownjohn, J. M. W., Koo, K. Y. and Tan, H. P., "Measuring and modelling the thermal performance of the Tamar Suspension Bridge using a wireless sensor network", Submitted to Engineering Structures, 2012.
2. Burland, J. B. and Wroth, C. P., "Settlement of buildings and associated damage", Proceedings of a conference on settlement of structures, Cambridge, 1974, pp.611-654.
3. Dey, A., Lanzano, G., Rainieri, C., Di Tullio, M., Laorenza, C., de Magistris, F. A. and FABBROCINO, G., "A Full Scale Instrumented Retaining Wall: Interpretation of the Measurements Using Numerical Tools", 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Chile, 2011.
4. Polshin, D. E. and Tokar, R. A., "Maximum allowable non-uniform settlement of structures", 4th Int. Conf. on soil Mech. and Found. Eng., vol. 1, 1957, pp.402-406.
5. Skempton, A. W. and MacDonald, D. H., "Allowable settlement of buildings", Proc. Int. Civ. Engrs, Part III, vol. 5, 1956, pp.727-768.
6. Son, M., "The response of buildings to excavation-induced ground movements", Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL. USA. 2003.
7. Wood, T. A., Jayawickrama, P. W., Lawson, W. D., Maged, I., Debra, F. and Mohamad, H., "Instrumentation and Monitoring of an MSE/Soil Nail Hybrid Retaining Wall", Proceedings of International Foundation Congress and Equipment Expo 2009, pp.177-184.
8. Yang, G., Zhang, B., Peng, L. and Zhou, Q., "Behaviour of geogrid reinforced soil retainingwall with concrete-rigid facing", Geotextiles and Geomembranes, vol. 27, No. 5, 2009, pp.350-356.

Received : 08/06/2012

Revised : 09/25/2012

Accepted : 09/28/2012

요 지

본 연구는 탄현 에이스 11차 아파트에 위치한 14m 높이의 L형 옹벽의 장기 경사 계측치에 대한 System Identification 연구로써, 옹벽구조물이 운용 중에 어떤 하중상태에서 어떻게 거동하는지를 이해하고, 이를 바탕으로 최적 모델을 규명하고, 최종적으로 옹벽의 이상상태를 판단할 수 있는 기준치를 제시하고자 하였다. 본 옹벽은 도심에 위치한 옹벽으로써는 보기 드물게 높고 (14m), 인접한 건물과의 거리가 짧아서 붕괴 발생 시 큰 피해 가능성이 있다. 3개의 경사계로와 9개의 대기, 표면, 내부온도계로 구성된 경사 모니터링 시스템이 2004년 10월에 설치되어 2007년 7월까지 운용되었다. 모든 12 채널의 센서가 정상적으로 계측된 5개월 간의 연속된 데이터를 사용하여 두 가지 모델 1) 선형모델과 2) 상태방정식모델에 대하여 system identification을 수행하였다. 가용한 입력온도는 총 9이고, 이로부터 조합 가능한 총 511개의 입력온도 경우의 수에 대하여 규명데이터를 사용하여 시스템규명을 수행하고, 검증데이터에 대한 Fitness를 사용하여 최적모델을 선정하였다. 선형모델은 모델구조가 간단하지만 thermal dynamics를 표현하지 못하고, 약 68%의 Fitness를 얻을 수 있었고, 상태방정식 모델은 모델구조가 상대적으로 복잡하지만 thermal dynamics를 표현할 수 있고, 약 90%의 Fitness를 얻었다.

핵심 용어 : 구조건전도모니터링, L형 옹벽, 경사계측, 상태방정식 모델, 열거동