

강우재현 원심모형실험에 적용하기 위한 수평변위 계측장치의 개발

Development of Horizontal Displacement Sensor for Rainfall-simulated Centrifugal Model Test

이 충 원¹⁾ · 박 성 용²⁾ · 김 용 성[†]

Chungwon Lee · Sungyong Park · Yongseong Kim

Received: August 31st, 2014; Revised: September 3rd, 2014; Accepted: October 15th, 2014

ABSTRACT : Heavy rainfall induces many disasters including slope failure and infrastructure collapse. In this point of view, rainfall-simulated centrifugal model test can be a reasonable tool to evaluate the stability of geotechnical structure. In order to obtain the displacements of a model in centrifugal model test, in general, LVDT and laser displacement sensor are used. However, when the rainfall is simulated, the LVDT has the problem of excessive infiltration into the model ground, and the laser displacement sensor provides the measuring result with inaccuracy due to the dispersion of the laser radiation. Hence, in this study, horizontal displacement sensor for rainfall-simulated centrifugal model test was developed. This sensor produced with a thin elastic steel plate and gave the accurate relationship between the displacement and the strain.

Keywords : Rainfall, Centrifugal model test, Thin elastic steel plate, Strain gauge, Horizontal displacement sensor

요 지 : 집중호우는 사면의 붕괴와 사회 기반시설물의 파괴 등을 포함하는 다수의 재해를 유발한다. 이러한 관점에서 강우재현 원심모형실험은 지반구조물의 안정성을 평가하기 위한 합리적인 수단이 될 수 있다. 원심모형실험에서 모형의 변위를 취득하기 위하여 일반적으로 LVDT 또는 레이저 변위계가 사용된다. 그러나 강우 모사 시 LVDT는 모형지반으로의 과다 침윤의 문제가 있으며, 레이저 변위계는 레이저의 산란에 의해 계측치의 정확성이 저하된다. 따라서 본 연구에서는 강우재현 원심모형실험에 적용하기 위한 수평변위 계측장치를 개발하였다. 본 연구를 통하여 탄성의 박철판과 스트레인 게이지를 이용하여 제작된 본 장치는 관입을 위한 말단부를 고정시켜 수행한 검정 결과로부터 정확한 변위-변형률 관계를 나타냄을 확인하였다.

주요어 : 강우, 원심모형실험, 탄성 박철판, 스트레인 게이지, 수평변위 계측장치

1. 서 론

사면붕괴를 포함한 지반재해는 유지 관리적인 측면에서 중요한 문제로 지적되어 왔으며, 이는 지반구조물의 수분량 증가와 직접적인 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 수분량 증가의 원인으로는 지하수 침투에 따른 지반구조물 내의 수위상승, 세립분 다량 함유에 따른 모관상승 및 강우에 따른 침윤을 들 수 있다(Lee 2012). 또한 최근 들어 급격한 기후변화로 인해 총 강우량이 1,000 mm를 넘는 집중호우 및 이를 초과하는 극한 강우사상이 빈발함에 따라, 강우가 지반구조물의 안정성에 미치는 영향에 대한 심층적 연구가 필요한 상황이다.

강우에 의한 사면붕괴는 지반의 포화에 동반한 간극수압의 상승이 하나의 원인으로 생각되고 있다. 한편 불포화지반의 사면이 붕괴된 사례도 관찰되고 있으며(Sugii & Kato

2003), 이러한 사례에서는 사면내부의 포화도 상승에 의한 전단강도의 저하가 붕괴의 원인으로 사료되고 있다. 이와 같이 강우에 기인한 지반구조물의 붕괴거동을 고찰하기 위하여 강우를 재현한 원심모형실험이 최근 시도되고 있다.

Rahardjo et al.(2007)은 균질한 토사 사면을 대상으로 물성치, 강우강도, 초기수위 및 사면의 형상이 붕괴에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였으며, Tamate et al.(2007)은 지반의 투수성과 강우강도의 관계에 착안하여 사면의 표층붕괴 현상을 원심모형실험을 이용하여 고찰하였다. 또한 Henry & Hoe(2012)는 집중호우에 의한 사면붕괴 거동의 고찰을 위해 1 g상에서 분무기를 이용하여 사면을 침윤시킨 뒤 100 g의 원심장에서 강우량 및 성토사면의 물성치에 따른 사면 붕괴거동을 고찰하였다.

구조물의 거동을 평가하기 위하여 일반적으로 변위계가 활용되며, 변위계는 통상 접촉형 및 비접촉형의 변위계가

1) Institute for Advanced Construction Materials, Kangwon National University

2) Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

† Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University (Corresponding Author : yskim2@kangwon.ac.kr)

많이 이용된다. 접촉형은 지반구조물에 직경이 작은 봉을 접촉시켜 변위를 측정하며(LVDT 등), 비접촉형은 레이저 변위계와 같이 목적위치에 반사판을 두면 그곳을 반사하여 돌아오는 레이저를 통해 변위를 측정한다. 그러나 원심모형 실험에서 강우를 모사하는 경우, 접촉형은 봉을 타고 흘러 내리는 물이 지반구조물에 직접적으로 흡수되어 실험결과에 영향을 미치며, 비접촉형은 산란하는 물방울로 레이저의 난반사가 발생하여 정확한 거리 측정에 애로사항이 발생한다(Tamate et al., 2007; Park, 2014). 따라서 본 연구에서는 강우재현 원심모형실험에 적용하기 위한 수평변위 계측장치를 개발하고, 변위-변형률 응답의 고찰을 통해 본 장치의 적용성을 확인하고자 한다.

2. 수평변위 계측장치의 개발

2.1 원심모형실험의 원리

원심모형실험은 원심장치 내에 모형지반구조물을 거치하고 고속으로 회전시킬 경우, 가해지는 중력가속도에 비례하여 모형구조물의 크기가 증가하는 것으로 간주할 수 있다는 원리(상사법칙)에 의해 실제 구조물의 거동을 모사할 수 있는 물리적 실험이다. 본 실험을 수행하기 위해서는 대상 구조물의 축소모형을 제작할 필요가 있다. 축소모형의 설계에는 상사법칙이 적용되며, 각 실험의 목적이나 방법에 맞추어 적절한 상사법칙을 선정하여야 한다.

모형과 실물의 상사성은 모형과 실물에서 발생하는 현상에 포함되어진 변수 전체가 상사 관계에 있음을 의미하나, 실물과 모형의 완전한 상사관계를 달성하는 것은 불가능하다. 즉 실물의 크기를 1/N로 축소한 모형이 현장 조건과 같은 응력수준을 유지하려면 N g의 원심가속도가 필요하게 되나, 단순히 모형과 실물의 비례관계를 원심가속도의 비례인자인 N으로만 정의할 수 없으며, 응력 이외에도 모형의 경계조건에 따라 반응특성들이 상이한 경우가 많기 때문에 비례법칙은 더욱 복잡한 형태가 된다. 그러므로 상사성이란 여타 분야에서와 마찬가지로 지반공학 분야에서도 범위 내에서 요구되는 정도의 현상을 예측하는데 필요한 것이라고 할 수 있다(Im et al., 2005; Schofield, 1980).

지반의 역학적 거동은 지반의 응력상태에 따라 크게 변화하기 때문에 실물과 동일한 모형지반의 역학적 특성을 확인하기 위해서는 실물과 모형지반에 동일한 응력이 작용하여야 한다. 즉 원심가속도장에서의 모형지반의 자중에 의한 응력을 σ_m 이라 하고, 실물에서의 자중에 의한 응력을 σ_p 라

할 때 다음의 Eq. (1)이 성립하여야 한다.

$$\sigma_m = \sigma_p \quad (1)$$

여기서 중력상태에서의 가속도 a는 g이고 원심력장에서의 가속도 a는 rw^2 (r=반지름, w=각속도)이므로 원심력장의 가속도와 중력상태의 가속도의 비 $N(=rw^2/g)$ 을 Scale factor라고 하면, 실물에서의 자중에 의한 응력 σ_p 은 Eq. (2)와 같다.

$$\sigma_p = r \cdot h_p = \rho_p \cdot g \cdot h_p \quad (2)$$

또한 원심가속도장에서의 모형지반의 자중에 의한 응력 σ_m 은 Eq. (3)과 같다.

$$\sigma_m = r \cdot h_m = \rho_m \cdot a \cdot h_m = \rho \cdot N \cdot g \cdot h_m \quad (3)$$

한편 간극유체가 물인 경우 투수계수 k_w 는 $k_w = K \cdot r_w / \mu$ (여기서 K=절대투수계수, μ =물의 점성계수)와 같이 표현할 수 있으며, 재료정수는 응력이 달라져도 변하지 않으므로 실물과 모형의 상사성은 Eq. (4)의 관계가 성립한다.

$$\frac{(k_w)_m}{(k_w)_p} = \frac{(k \cdot (r_w)_m) / \mu}{(k \cdot (r_w)_p) / \mu} = N \quad (4)$$

또한 실물과 모형지반의 간극수압의 차, 수두차, Darcy의 법칙을 적용하면 유속은 Eq. (5)와 같은 상사성이 성립된다.

$$\frac{(v_w)_m}{(v_w)_p} = \frac{(k_w)_m \cdot (i_w)_m}{(k_w)_p \cdot (i_w)_p} = N \quad (5)$$

그리고 침투현상에 있어서의 시간 $t(=l/v)$ 는 Eq. (6)과 같은 상사관계를 갖는다.

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{l_m(w_w)_m}{l_p(w_w)_p} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{N} = \frac{1}{N^2} \quad (6)$$

위와 같은 원리가 원심모형실험의 상사법칙으로서 지진, 지반동역학, 기초, 사면안정, 굴착 및 가시성, 지반환경, 터널 및 지하구조물, 연약지반에서의 지반개량 및 지반보강, 기타 토목구조물의 안정성 검토 등에 이용된다. 각 물리량에 대한 상사법칙을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Similarity rules in centrifugal model test (Schofield, 1980)

Properties	Size of model	Size of soil particle	Soil density	Stress	Displacement
Scale factors (model/prototype)	1/N	1	1	1	1/N
Properties	Strain	Time (Dynamic condition)		Time (Consolidation and infiltration conditions)	
Scale factors (model/prototype)	1	1/N		1/N ²	

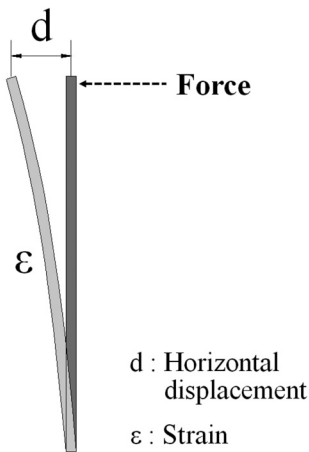
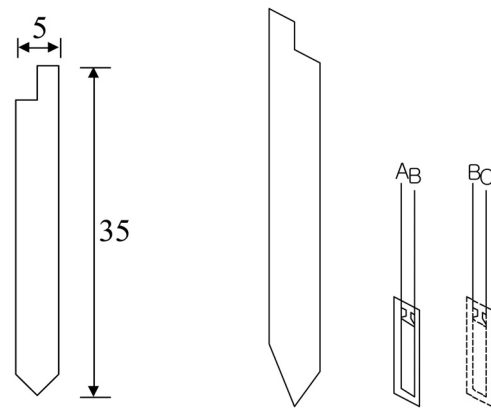


Fig. 1. Principle of horizontal displacement sensor



(a) Shape of sensor (unit: mm) (b) Component of sensor (Thin elastic steel plate and two strain gauges)

Fig. 2. Schematic diagram of horizontal displacement sensor

2.2 수평변위 계측장치

2.2.1 수평변위 계측장치의 원리

원심모형실험에서의 구조물 거동 계측에는 통상적으로 접촉형 및 비접촉형의 변위계가 많이 이용된다. 그러나 강우실험에서 접촉형인 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)형 변위계는 미스트의 응집 및 낙하로 인한 모형지반의 과다침윤 등의 문제로 인해 사용에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 강우 시 지반구조물의 변위를 계측하기 위한 수평변위 계측장치를 개발하였다. 수평변위 계측장치는 지반변형의 발생을 추종할 수 있는 유연한 재료의 탄성 금속박판에 변형률 게이지(Strain gauge)를 부착한 것이다. Fig. 1에 수평변위 계측장치의 원리를 나타내었다. 지반변형이 발생하는 경우, 금속박판 최하단에서의 변위가 상대적으로 미소하다면 탄성 금속박판에는 휨 변형이 발생하게 된다. 이때 수평변위(d)와 변형률(ε)의 관계를 실험을 통해 구하는 경우, 변형률의 응답에 의해 표준지반의 상대적 변위를 구할 수 있게 된다.

2.2.2 수평변위 계측장치의 제작

수평변위 계측장치의 모식도 및 구성 부품을 Fig. 2에 나타내었다. 수평변위 계측장치는 길이 35 mm, 폭 5 mm, 두께 0.3 mm의 소형 박철판(SUS 304N1)의 전면 및 후면에 변형률

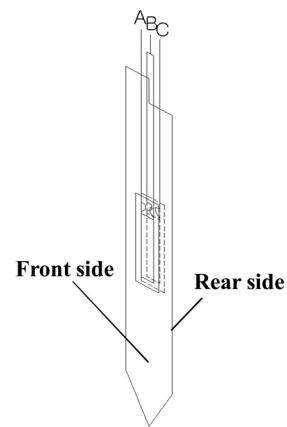


Fig. 3. Circuit diagram of two-gauge active method

게이지(Strain gauge, 일본 SHOWA N11-FA-1-350-11-L005)를 부착한 것이다. 변형률 게이지의 부착에는 순간접착제를 이용하였으며, 박철판의 한쪽 끝은 지반으로의 용이한 관입을 위해 삼각형을 이루도록 하였다. 또한 다른 한쪽 끝에는 2.5 mm의 돌기를 부여하였는데, 이는 라디오 펜치에 의한 수평변위 계측장치의 파지 및 모형지반으로의 삽입을 용이하게 함과 동시에 변형률 게이지의 리드선 파단을 방지하기 위한 것이다.

변형률 게이지의 리드선은 2게이지 액티브법(Two-gauge active method, Fig. 3)으로 접속 후 LAN 케이블 커넥터에 연



Fig. 4. Universal strain gauge module, SCXI-1520 (National Instruments, 2009)



Fig. 5. Front-mounting terminal block, SCXI-1314 (National Instruments, 2000)

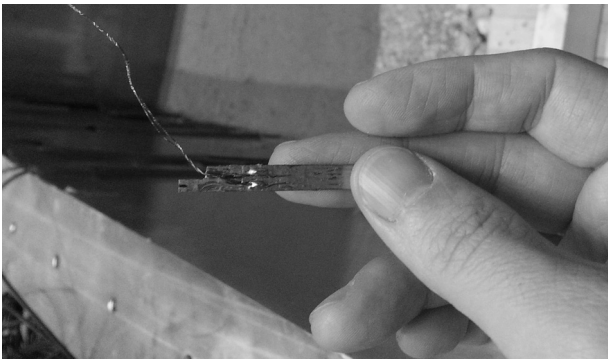


Fig. 6. Real shape of horizontal displacement sensor

결하고(Half-Bridge 방식), 이 커넥터는 유니버설 스트레인 게이지 모듈(Universal strain gauge module, National Instruments 2009)과 연결된 프론트 마운팅 터미널 블록(Front-mounting terminal block, National Instruments 2000)에 연결시킨다. 변형률은 이곳에서 설정한 시간 간격으로 취득하게 된다. 유니버설 스트레인 게이지 모듈을 Fig. 4에 프론트 마운팅 터미널 블록을 Fig. 5에 나타내었다.

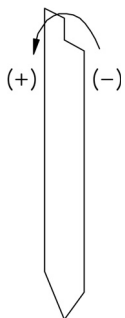
또한 강우에 의한 물의 영향이 우려되므로 수평변위 계측장치는 방수 처리를 하였으며, 미국 VISAY사의 M-Coat A로 1차 방수를 방수 페인트(은색)로 2차 방수를 시행하였다. 실제 제작된 수평변위 계측장치를 Fig. 6에 나타내었다.

본 수평변위 계측장치의 방향성을 Fig. 7(a)에 나타내었으며, 이에 따른 모형지반의 천층 및 심층변형 시에 대한 수평변위 계측장치의 거동 및 부호를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 즉 수평변위 계측장치의 관입을 위한 말단부가 반드시 부동점으로 작용하는 것은 아니나, 계측결과의 절대치 및 부호에 근거하여 지반 변형거동의 정성적 파악이 가능할 것으로 판단된다.

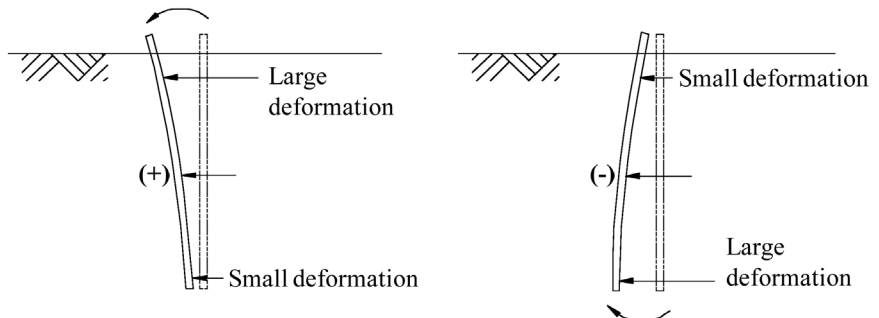
3. 수평변위 계측장치의 검정

3.1 수평변위 계측장치의 검정 과정

본 연구에서는 총 3개의 수평변위 계측장치를 제작하였으며(S1~S3), 각 장치의 변형률-변위 응답을 검정하였다. 여기서 변위는 Mitutoyo사의 마이크로미터(분해능 0.0001 mm)를 사용하여 -1.0 mm~1.0 mm의 범위로 4회 반복 측정하였으며(0.25 mm 간격), Data logger는 일본 TML사의 TC-31K를 이용하였다. 즉 마이크로미터를 통해 수평변위 계측장치에 변위를 부가하며, 이로 인해 발생한 변형률은 Data logger에 기록된다. Fig. 8에 수평변위 계측장치의 검정을 위한 장치의 구성을 나타내었으며, Fig. 9에 마이크로미터에 의한 변위의 부가 상황을 나타내었다.



(a) Sign convention of sensor



(b) Behavior of sensor with deformation of ground

Fig. 7. Sign convention and behavior of horizontal displacement sensor with deformation of model ground

3.2 수평변위 계측장치의 검정 결과

본 검정과정에서는 수평변위 계측장치의 삼각부분을 치구로 고정한 뒤 마이크로미터를 이용하여 변위의 부가를 진행하였다. 따라서 검정 중에 수평변위 계측장치의 관입을

위한 말단부는 부동점으로 간주된다. 수평변위 계측장치의 검정결과로서, 4회의 수평변위 반복 부가에 따른 응답변형률을 Table 2에 나타내었다. 또한 본 결과를 도식화하여 Fig. 10에 나타내었다.



Fig. 8. Equipment for calibration of horizontal displacement sensor

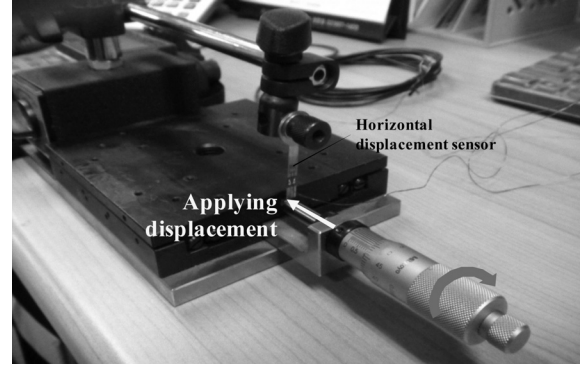


Fig. 9. Applying displacement using micrometer

Table 2. Applied horizontal displacement and responded strain

Number of times implemented	Horizontal displacement S_h (mm)	Responded strain		
		S1 ($\mu\epsilon$)	S2 ($\mu\epsilon$)	S3 ($\mu\epsilon$)
1	-1.00	-311	-396	-485
	-0.75	-249	-293	-365
	-0.50	-189	-177	-245
	-0.25	-103	-70	-127
	0.00	0	0	0
	0.25	125	49	108
	0.50	257	96	214
	0.75	392	146	327
2	1.00	528	197	438
	0.75	391	149	328
	0.50	255	99	214
	0.25	123	50	104
	0.00	0	1	-10
	-0.25	-105	-70	-120
	-0.50	-189	-174	-239
3	-0.75	-250	-289	-361
	-1.00	-309	-395	-480
	-0.75	-248	-291	-360
	-0.50	-186	-175	-240
	-0.25	-102	-65	-121
	0.00	0	0	0
	0.25	124	49	111
	0.50	257	99	217
4	0.75	392	152	329
	1.00	528	204	442
	0.75	390	153	331
	0.50	256	100	218
	0.25	123	50	108
	0.00	0	0	-5
	-0.25	-104	-70	-116
4	-0.50	-187	-174	-235
	-0.75	-249	-289	-356

검정 결과의 추세선은 2차 함수로 표현되었으며 선형에 근접하고 있는 것으로 보인다. 또한 수평변위 계측장치 두부의 변형방향에 따른 부호가 정확히 판별되어, 계측결과의 절대치 및 부호에 근거한 지반 변형거동의 정성적 파악에 적용이 가능할 것으로 판단된다. 여기서 수평변위의 부가에 따

른 변형률의 오차는 극히 미소하게 나타나 검정 중 수평변위 계측장치를 이루는 금속 박판은 탄성한계 내에서 거동한 것으로 판단된다. 본 장치를 통해 계측된 수평변위는 Table 1에서 제시한 상사법칙에 근거하여 실규모(prototype) 환산이 가능할 것으로 사료된다.

이와 함께 본 실험결과에서는 3개의 수평변위 계측장치의 변위에 따른 응답변형률이 다소 상이함이 확인되었다. 이러한 현상은 재료가 되는 금속 박판의 불균질성(heterogeneity)에 기인한 것으로 사료된다. 그러나 각 장치에 대한 개별적 검정식의 산출을 통해 강우 시 지반구조물의 수평변위를 효과적으로 측정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 원심모형실험에서 강우를 모사하는 경우 접촉형 및 비접촉형 변위계가 갖는 문제점을 극복하고, 모형 지반구조물의 거동을 더욱 합리적으로 평가하기 위하여 수평변위 계측장치를 개발하였으며, 변위-변형률 응답의 고찰을 통해 본 장치의 적용성을 확인하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 4회의 수평변위 반복 부가에 따른 응답변형률에 대한 추세선은 선형에 근접하는 것으로 평가되었다. 또한 수평변위 계측장치 두부의 변형방향에 따른 부호가 정확히 판별되어, 계측결과의 절대치 및 부호에 근거한 지반 변형거동의 정성적 파악에 적용이 가능할 것으로 사료된다.
- (2) 수평변위의 부가에 따른 응답변형률은 반복 시험 중에도 양호한 재현성을 보였으며, 그 오차는 극히 미소하였다. 따라서 검정 중 수평변위 계측장치를 이루는 금속 박판은 탄성한계 내에서 거동한 것으로 판단된다.
- (3) 제작된 3개의 수평변위 계측장치의 변위에 따른 응답변형률이 다소 상이하였으며, 이는 재료가 되는 금속 박판의 불균질성(Heterogeneity)에 기인한 것으로 사료된다. 그러나 각 장치에 대해 개별적으로 검정식을 산출함으로써, 원심장에서의 강우 재현에 따른 지반구조물 변위의 효과적 측정이 가능할 것으로 판단된다.
- (4) 향후 본 장치의 지반구조물에 대한 설치방법의 확립 및 원재료의 균질성 확보 등을 통해 수평변위 계측의 정밀도 향상이 가능할 것으로 전망되며, 원심모형실험에서 강우 모사 시 접촉형 및 비접촉형 변위계가 갖는 문제점을 극복하고 모형 지반구조물의 거동을 더욱 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

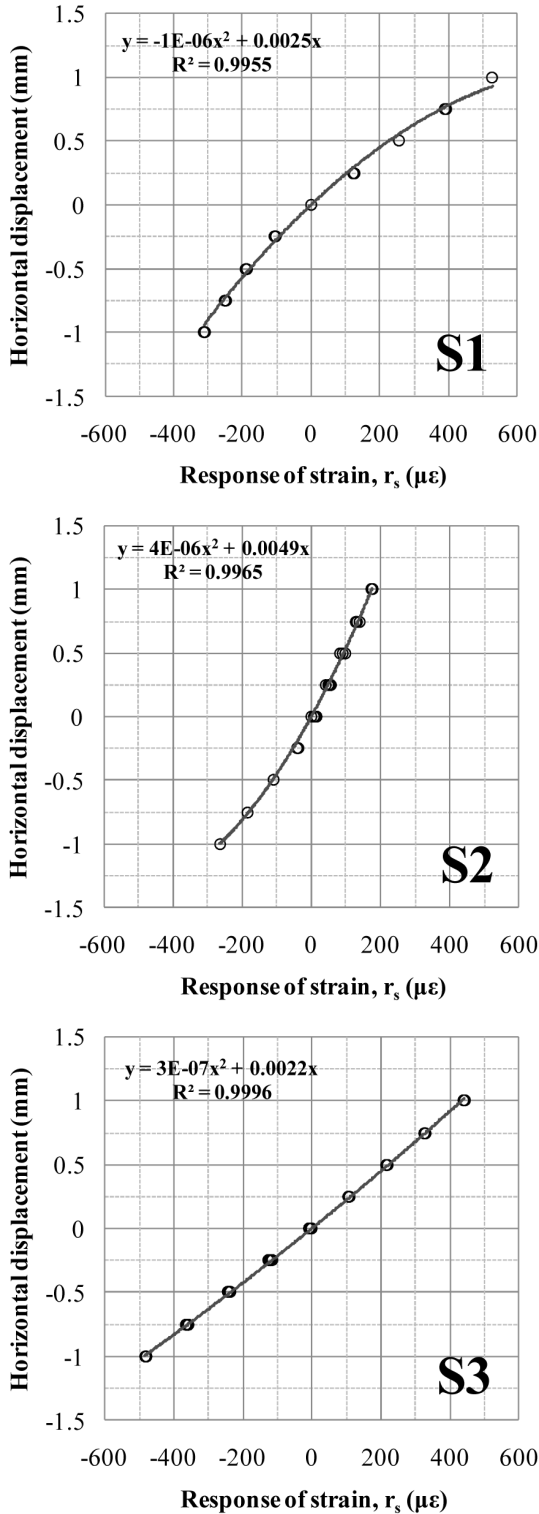


Fig. 10. Graphed results on calibration of horizontal displacement sensors

감사의 글

본 연구는 소방방재청 재난안전기술개발기반구축사업(NEMA-기반-2013-106)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Henry, L. and Hoe, I. L. (2012), Centrifuge model simulations of rainfall-induced slope instability, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol. 138, No. 9, pp. 1151~1157.
2. Im, E. S., Seo, M. W., Ha, I. K. and Kim, W. G. (2005), Simulation of earth-fill dam behavior subjected to water level variation using geotechnical centrifuge, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 2C, pp. 95~102.
3. Lee, C. W. (2012), A study on dynamic stability of unsaturated road embankments using dynamic centrifugal model tests, Ph.D. dissertation, Kyoto University, Japan, pp. 1~3.
4. National Instruments (2000), Installation guide, SCXI-1314 Universal strain terminal block, pp. 1~6.
5. National Instruments (2009), SCXI-1520 user manual, pp. 1-1~2-26.
6. Park, S. Y. (2014), Behavior of a tide embankment using rainfall-simulated centrifugal model tests, Ph.D. dissertation, Kangwon National University, Korea, p. 38 (in Korean).
7. Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B. and Leong, E. C. (2007), Factors controlling instability of homogeneous soil slopes under rainfall, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 12, pp. 1532~1543.
8. Schofield, A. N. (1980), Cambridge geotechnical centrifuge operation, *Geotechnique*, Vol. 20, No. 3, pp. 227~268.
9. Sugii, T. and Kato, S. (2003), 3. Mechanism of slope failure under heavy rain (Part 2), Mechanism and risk prediction of slope failure under heavy rain, *Soil mechanics and foundation engineering*, Vol. 51, No. 8, pp. 29~34 (in Japanese).
10. Tamate, S., Ito, N. and Endo, A. (2007), 4. Experimental analysis on shallow failure of slope in consideration of relationship between ground permeability and precipitation intensity, *Specific Research Reports of the National Institute of Occupational Safety and Health*, No. 35, pp. 33~58.