

# 근거리 사진측량을 이용한 사면모형 진동 변위 측정 Vibration Displacements Measurement of Slope Models using Close Range Photogrammetry

정성혁<sup>1)</sup> · 이재영<sup>2)</sup> · 최석근<sup>3)</sup>

Jung, Sung Heuk · Lee, Jae Young · Choi, Suk Keun

## Abstract

The purpose of this study is to measure displacements that occurs on a surface and interior of slope model and the shape when the slope is destroyed at vibration experiment of the slope model using close range photogrammetry. The circle targets and sphere targets are installed on a chamber and a slope model, while the earthquake wave are applied in regular time interval. The close range photogrammetric images are acquired in each displacements step until the slope model is destroyed. Those photos are processed by image processing method and the center points of targets are automatically extracted. Furthermore, the three-dimensional coordinates of targets are calculated by image orientation and bundle adjustment processing. As a result, amount of displacement at each level is precisely measured and provided the basic information for assessing the slope stability using three-dimensional measurement of the target movement and slope destruction.

Keywords : Close Range Photogrammetry, Image Processing, Slope Model, Vibration Displacements

## 초 록

본 연구는 근거리 사진측량기법을 이용하여 사면모형 진동실험시 사면모형 지표부 및 내부에 발생하는 변위와 사면파괴시 형상을 측정하는 것을 목적으로 한다. 사면모형 챔버와 사면모형에 원형타겟과 구형타겟을 설치하고 일정 시간간격으로 지진파를 가하였으며 사면모형이 파괴될 때 까지 각 단계별로 사진을 촬영을 실시하였다. 촬영된 사진은 영상처리기법을 이용하여 타겟의 중심점을 자동으로 추출하였으며 표정 및 광속조정을 통해 타겟의 3차원 좌표값을 계산하였다. 실험결과 각 실험단계에서 변위량을 정밀하게 측정할 수 있었으며 타겟의 거동 및 파괴형상을 3차원으로 표시함으로써 사면 안정성 평가를 위한 모형실험시 기초자료로 활용할 수 있었다.

핵심어 : 근거리 사진측량, 영상처리, 사면모형, 진동 변위

## 1. 서 론

2008년 5월 중국 쓰촨성에서 발생한 리히터 규모 8.0의 지진으로 6만 9천명의 사망자 피해를 입었으며 2010년 1월 중앙아메리카 아이티에서 규모 7.3의 강진으로 22만 명이상의 사망자 피해를 입었다. 최근에는 2011년 3월 일본에서 규모 9.0의 대지진 및 해일이 발생하여 1만 5천명이

상의 사망자가 발생하고 후쿠시마 제1 원자력발전소 설비가 손상되어 방사능 물질이 유출되는 사상 초유의 사태가 발생하였다.

우리나라는 지난 90년대 초까지 한 해 20차례 정도의 지진이 발생하였으나 2000년대에 들어서 지진 횟수가 연 평균 40차례를 넘어서고 있으며 지진피해를 최소화하기 위한 체계적인 대책이 필요한 시점이다.

1) 교신저자 · 정회원 · 충북대학교 토목공학과 겸임교수, 공학박사(E-mail:idealharry@gmail.com)

2) 정회원 · 충북대학교 토목공학과 박사과정(E-mail:jylee@sngis.com)

3) 정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수(E-mail:shckoi@cbnu.ac.kr)

지진으로 인한 피해증 사면붕괴를 방지하기 위하여 사면안정성을 평가하고 다양한 사면보강기법을 평가하는 것이 중요하게 인식되고 있으며 관련 연구가 국내외에서 활발히 이루어지고 있는 실정이다(정지수 외, 2011; 이용주 외, 2010; 유창호 외, 2008).

현재 진동에 의한 사면붕괴를 모의 실험하기 위하여 진동대(shaking board)에 사면모형을 설치하고 지진파를 가하여 사면모형에서 발생하는 변위를 측정하고 있다. 이와 같은 사면 모형실험시 침하계 등과 같은 센서를 부착하여 실험하기 때문에 정밀한 측정을 위해 많은 센서의 설치가 필요하고 사면 지표부 및 내부의 3차원 거동과 파괴형상을 정밀하게 측정하기에는 한계가 있다(안광국 외 2007; 조태진 외, 2008).

이러한 이유로 사면의 3차원 형상 및 변위를 측정하기 위해 근거리 사진측량 및 레이저스캐너를 도입하려는 연구가 진행 중에 있다(K. D. Lee, 2008; 오석훈과 서백수, 2010; 한중근과 송영석, 2003).

본 연구에서는 기존의 센서를 설치하여 측정하는 방식과 비교하여 설치 및 계측에 제약이 상대적으로 적고 3차원 변위를 정밀하게 측정할 수 있는 사진측량기법을 이용하여 사면모형에서 발생하는 변위와 파괴형상을 측정하는데 목적을 두고 수행하였다.

연구를 위하여 진동대를 이용하여 사면모형에 지진파를 일정 시간간격으로 부가함으로써 사면 파괴 시까지 실험을 진행하고 각 단계별로 촬영된 사진을 이용하여 사면모형 지표부 및 내부에 설치한 측정점의 3차원 변위와 파괴부의 형상을 정밀하게 측정함으로써 사면변형 및 파괴를 해석하기 위한 기초자료로 활용할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 2장에서 사면모형 챔버(chamber), 타겟 설치, 기준점 측량 등 사면모형 실험준비와 3장에서 영상 취득, 이진 영상처리, 타겟 자동추출, 타겟 중심점 좌표계산 등 자료처리과정에 관하여 기술하고, 4장에서 실험결과를 분석하며 마지막 5장에서 결론을 제시한다.

## 2. 사면모형 실험 준비

### 2.1 사면모형 챔버와 타겟설치

근거리 사진측량을 이용한 정밀 계측분야에서 보다 정밀한 측정을 위해 원형 타겟이 일반적으로 이용되고 있으며 원형 타겟의 중심점을 자동으로 추출한 뒤 여러 사진에 촬영된 동일한 점을 매칭시키는 과정과 표정 및 광속 조정을 통하여 타겟의 3차원 좌표값을 계산한다(J. O.

Otepka, 2004, 정성혁 외, 2006).

본 연구에서는 사면모형 진동실험을 위하여 사면모형 챔버 및 진동대에 직경 5mm의 원형타겟을 부착하였으며 사면모형의 지표부 및 내부측면에 57개의 구형타겟을 설치하였다.

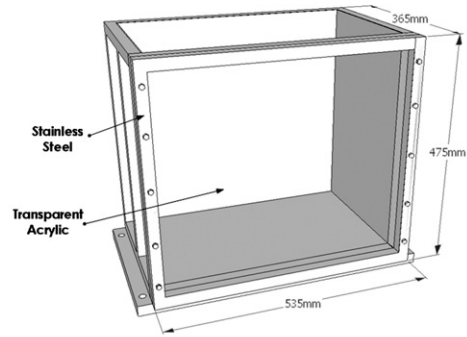


그림 1. 사면모형 챔버

사면모형 챔버는 스테인레스 스틸과 투명 아크릴로 제작되었으며 형상 및 크기는 그림 1과 같다. 또한, 실험에서 사용한 원형타겟 및 구형타겟은 빛반사 재질로 제작하였으며 형상은 그림 2, 그림 3과 같다.

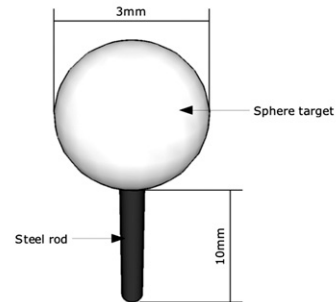


그림 2. 구형타겟(직경 3mm)

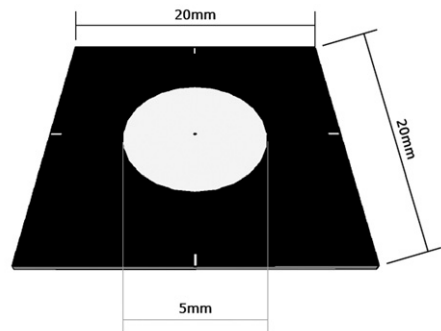


그림 3. 원형타겟(직경 5mm)

그림 4, 그림 5와 같이 원형타겟은 사면모형 챔버 프레임에 설치하였으며 구형타겟은 사면 지표부 및 내부 측면에 설치하였다.

지진파에 의한 사면의 진동변위를 실험하기 위한 실험 환경은 그림 6과 같이 진동대, 진동모터(shaker), 사면모형 챔버로 구성하였다.

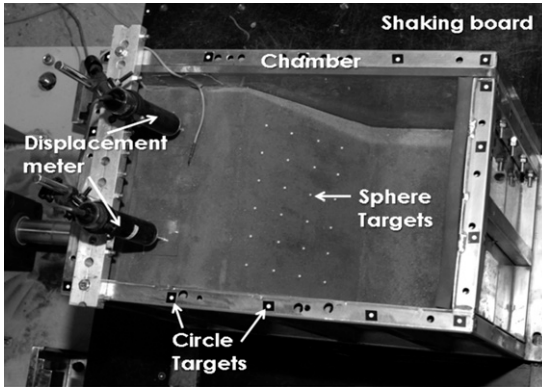


그림 4. 사면 지표부 타겟 설치

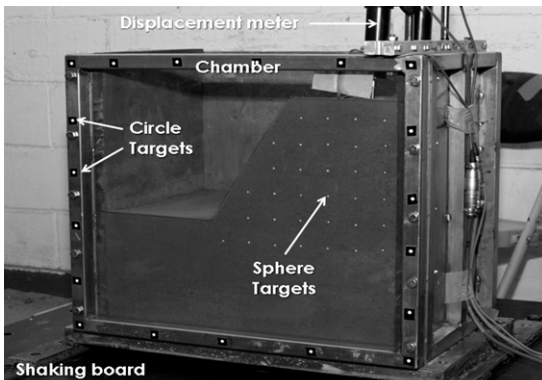


그림 5. 사면 내부측면 타겟 설치

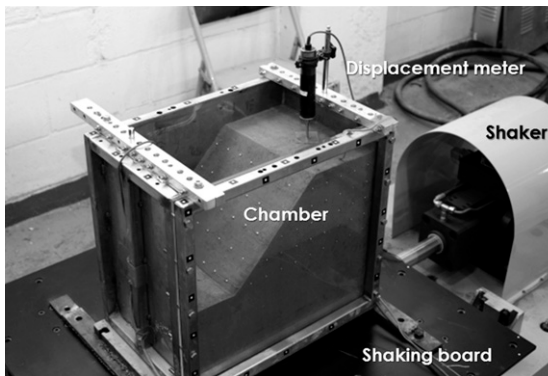


그림 6. 실험 환경

## 2.2 카메라 검정 데이터 및 기준점 측량

사진촬영에는 카메라 검정이 이루어진 Canon EOS 5D 카메라와 Canon EF 50mm f/1.4 USM 렌즈를 이용하였으며 실험에 이용한 카메라 내부표정요소는 표 1과 같다.

표 1. 카메라 내부표정요소

Remark	Factor	Calibration value
Focal length(mm)	f	52.8820
Principle point(mm)	Xp	18.0501
	Yp	11.7004
Distortion of lenses (radial direction)	K1	5.366e-005
	K2	-2.477e-009
Distortion of lenses (tangential direction)	P1	-1.184e-006
	P2	-1.672e-006
Image size(pixel)	X	4368
	Y	2912
Format size(mm)	X	35.8425
	Y	23.9268
Pixel size(mm)	X	0.0082
	Y	0.0082

진동대를 이용한 지진파 실험에 앞서 데이터 처리시 정확도를 높이기 위하여 사면모형 챔버에 설치된 원형타겟 중 7점을 선정하여 기준점 측량을 실시하였다. 기준점 측량은 대상물에 인바 스케일바를 설치하고 총 30매의 사진을 촬영하여 사진측량에 의해 계산하였으며 진동 실험시 사면모형의 변위를 측정하기 위한 기준점으로 이용하였다(S. H. Jung, 2008).

또한, 기준점의 좌표축은 CP04를 원점으로 하고 CP05를 X축으로 고정한 뒤, CP01 방향을 -Y축, CP07 방향을 Z축으로 설정하여 좌표변환을 실시하였다. 기준점 성과 및 위치는 표 2, 그림 7과 같다.

표 2. 기준점 성과 (단위 : mm)

Control Points	X	Y	Z
CP01	-11.159	-360.824	0.846
CP02	-7.571	-231.649	0.678
CP03	-4.455	-103.686	0.211
CP04	0.000	0.000	0.000
CP05	294.435	0.000	0.000
CP06	297.288	11.234	130.873
CP07	-1.286	16.886	138.121

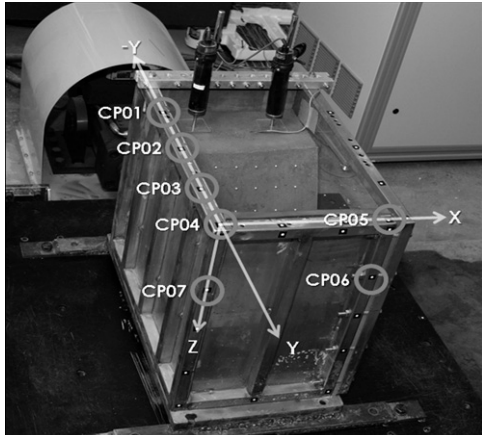


그림 7. 기준점 배치 및 좌표축 설정

### 3. 실험 및 자료처리

#### 3.1 사진촬영

진동실험은 4m/s<sup>2</sup>의 진동가속도로 14초 간격으로 실시하였으며 진동 실험전 초기상태를 측정하기 위하여 사진촬영을 실시(실험1)하고 사면과파괴시까지 각 단계별로 6회(실험2~실험7) 사진촬영을 하여 총 7회(실험1~실험7)를 진행하였다.

대상물의 사진촬영은 그림 8과 같이 사면모형 주위로 수렴 촬영을 하였으며 촬영거리는 약 1.5~2.0m로 하였다.

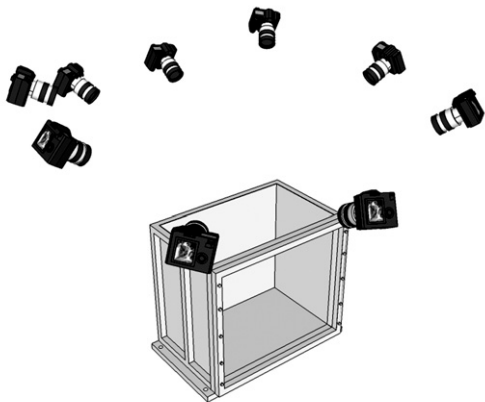


그림 8. 사진촬영 위치

#### 3.2 이진영상처리 및 영상좌표 측정

반사타겟의 중심 영상좌표를 효과적으로 추출하기 위하여 촬영된 영상을 영상처리기술을 이용하여 원형타겟과 구형타겟의 형태 추출을 위한 히스토그램 분석을 실시하고 이진영상처리를 실시하였다. 이진영상처리는 영상

데이터의 경계값(threshold)을 처리하는 과정으로 경계값 처리는 입력 영상의 각 화소에 대해서 명도가 있는 일정 값 이상이 경우에 대응하는 출력 영상의 화소값을 1로서, 그 외의 경우는 0으로 처리하였다.

분석결과 그림 9와 같이 원형타겟의 경우 경계값이 120에서 160으로 처리된 이진영상에서 명확히 원형의 형상을 추출할 수 있었으며 구형타겟의 경우 120에서 140 사이에서 대부분 추출 할 수 있었다.

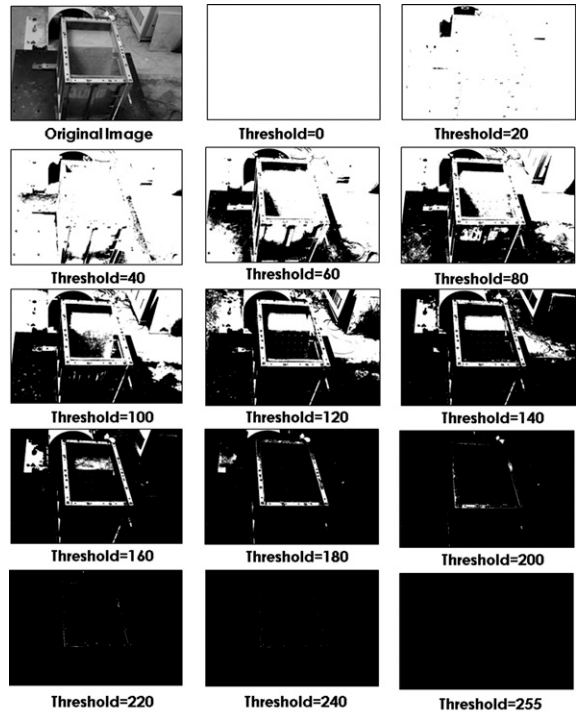


그림 9. 타겟검출을 위한 이진영상

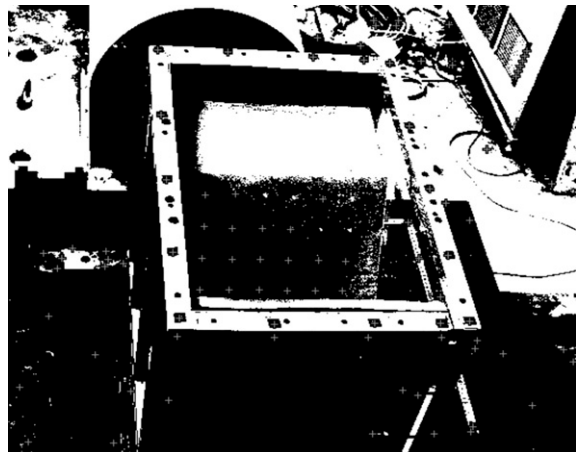


그림 10. 영상좌표 추출

촬영한 영상은 경계값을 120, 140, 160으로 구분하여 이진화하고 이진영상에서 원형 형상의 중심좌표를 추출하였다.

또한, 영상좌표 취득시 원형 형상에 대한 크기를 제한하여 잡음 성분이 추출되는 것을 방지하였으며 경계값 120에 의해 처리된 이진영상에서 원형크기를 최소 20, 최대 40픽셀로 제한하여 추출한 원형타겟의 중심점은 그림 10과 같다.

### 3.3 표정 및 자료처리

촬영된 영상에서 이진영상처리에 따라 추출된 타겟의 중심점은 그림 11과 같이 촬영된 9매의 사진상에서 같은 번호를 부여함으로써 동일점으로 매칭시켰다.

또한, 타겟 중심점의 영상좌표, 기준점 측량성과와 내부표정요소를 초기값으로 하여 표정 및 광속조정(standard deviation of unit weight: 0.1 pixel)을 수행함으로써 실험 1~실험 7의 타겟 중심점에 대한 3차원 좌표값을 모두 계산하였다. 실험 1의 3차원 측정 위치는 그림 11과 같다.

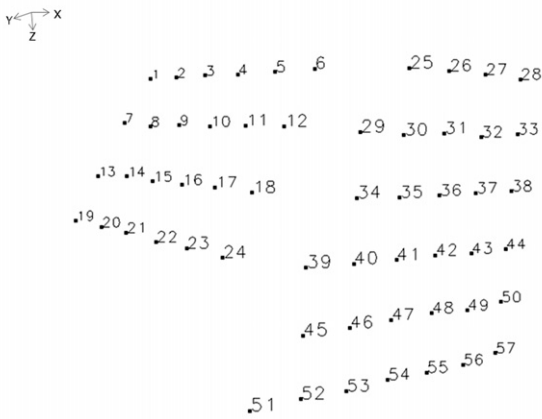


그림 11. 측정점의 3차원 위치(실험 1)

### 4. 실험 결과 및 분석

실험은 사면이 파괴될 때 까지 총 7회 실시하였으며 실험 1과 실험 7의 측정 변위벡터는 그림 12와 같다.

각 실험간 발생한 X, Y, Z 방향별 변위량은 그림 13 ~ 그림 18과 같으며 진동대의 진동방향인 Y축 방향으로 변위량이 일반적으로 크게 발생되었음을 알 수 있다.

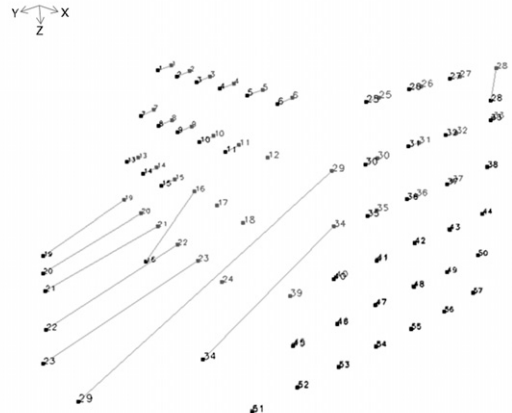


그림 12. 측정 변위 벡터(실험1-실험7)

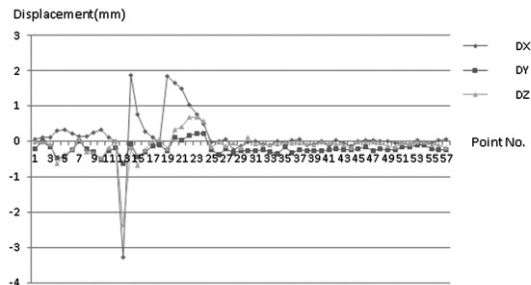


그림 13. 실험 1-2 변위량

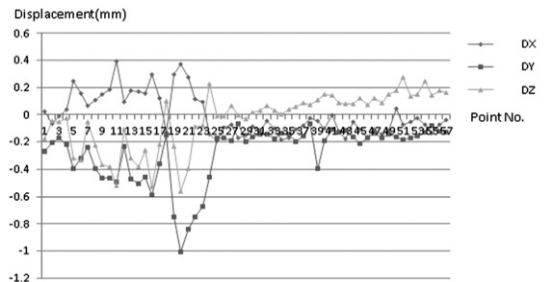


그림 14. 실험 2-3 변위량

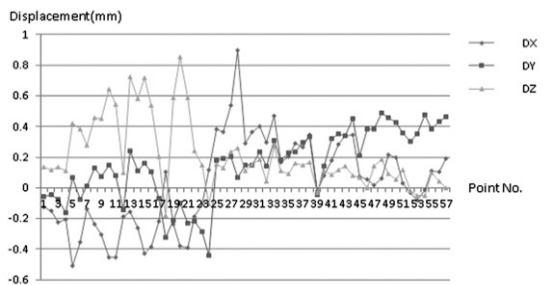


그림 15. 실험 3-4 변위량

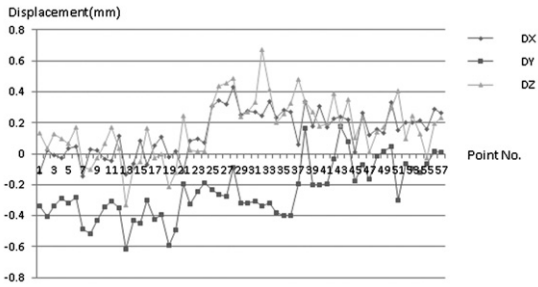


그림 16. 실험 4-5 변위량

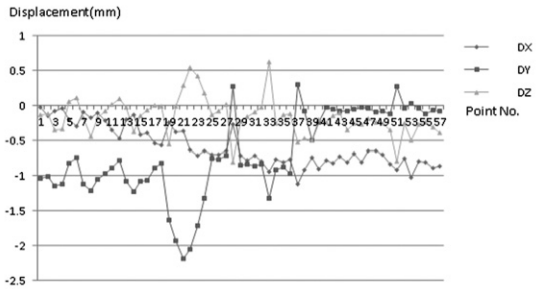


그림 17. 실험 5-6 변위량

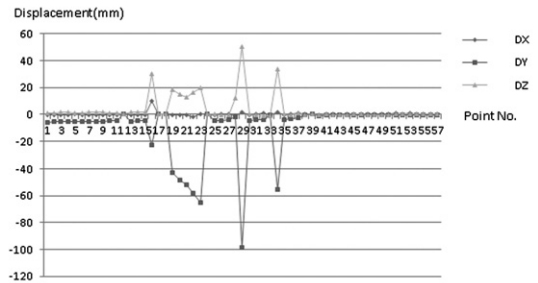


그림 18. 실험 6-7 변위량

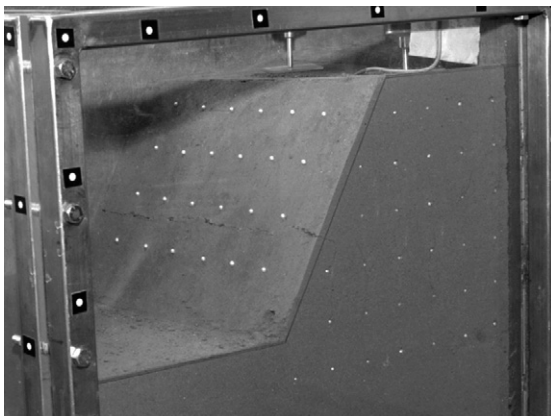


그림 19. 사면 파괴 사진(실험 5)

실험시 촬영한 동영상 자료와 비교한 결과 초기 진동이 후 실험 2에서 실험 5(그림 19)까지 사면은 미세한 크랙만 발생할 뿐 안정적으로 유지가 되었으나 실험 6(그림 20)에서 뚜렷한 변위가 발생하기 시작하여 실험 7(그림 21)에서 사면이 파괴가 되었으며 실험결과와 일치하고 있음을 확인하였다.

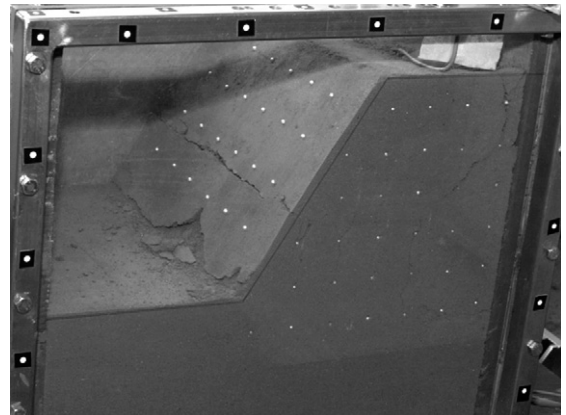


그림 20. 사면 파괴 사진(실험 6)

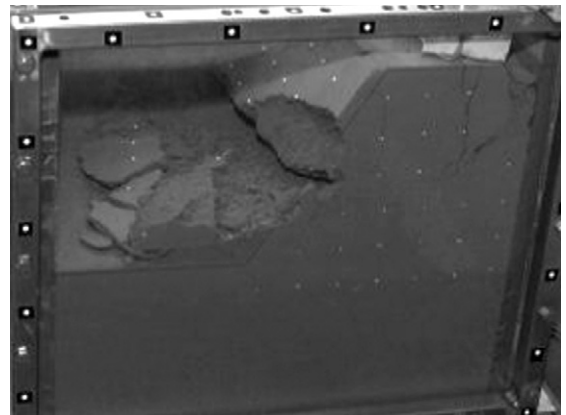


그림 21. 사면 파괴 사진(실험 7)

실험에서 사용된 57개의 구형타겟은 실험 1에서 실험 6까지 모두 추출 되었으며 사면파괴가 발생한 실험 7에서 토사에 매몰된 5개의 구형타겟을 제외한 52개의 구형타겟이 추출되었다.

실험별 발생한 변위량으로 평균제곱근오차(RMSE)를 계산한 결과 표 3과 같이 실험 6-7에서 가장 많은 변위가 발생하였으며 X방향으로 1.495mm, Y방향으로 23.328mm, Z방향으로 10.910mm이었다.

표 3. 실험별 변위량 RMSE (단위: mm)

Test	DX	DY	DZ	Total
1-2	0.672	0.265	0.397	0.824
2-3	0.150	0.351	0.212	0.437
3-4	0.294	0.268	0.308	0.503
4-5	0.198	0.305	0.249	0.440
5-6	0.652	0.920	0.314	1.170
6-7	1.495	23.328	10.910	25.797

실험 1에서 실험 7까지 자료처리를 통해 각 실험 단계 별로 사면 및 내부측면에서 발생한 파괴 형상을 도화할 수 있었으며 실험 7의 크랙 발생위치 및 파괴형상은 그림 22와 같다.

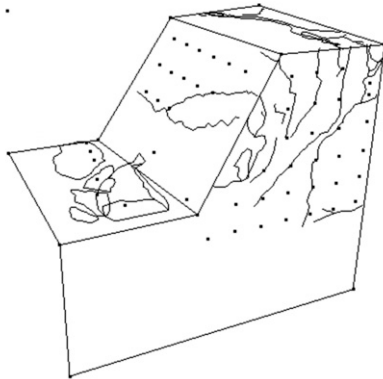


그림 22. 사면 파괴형상(실험 7)

## 5. 결론

본 연구는 사면 안정성을 평가하기 위한 진동실험시 사면모형의 3차원 변위 및 파괴 형상을 근거리 사진측량 기법을 이용하여 측정하였으며 기준점 측량, 이진영상처리를 통한 영상좌표 추출, 진동실험 후 구형타겟의 3차원 좌표 측량, 실험별 변위량 산출 및 파괴 형상 도화 순으로 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 이진영상처리를 실시하여 타겟의 중심 영상좌표를 효과적으로 자동 추출하였으며 원형 형상크기를 제한함으로써 타겟 이외의 잡음성분이 추출되는 것을 줄일 수 있었다.

둘째, 실험에서 사용된 57개의 구형타겟은 실험 1에서 실험 6까지 모두 추출 되었으나, 사면파괴가 발생한 실험

7에서 토사에 매몰된 5개의 구형타겟을 제외한 52개의 구형타겟이 추출되었다.

셋째, 각 실험별 평균계급근오차를 계산한 결과 실험 6-7에서 X 방향 1.495mm, Y 방향 23.328mm, Z 방향 10.910mm로 가장 큰 변위가 발생하였으며 진동방향인 Y 축 방향에서 변위가 크게 발생하였다.

이상과 같이 연구를 통해 근거리 사진측량을 이용하여 진동으로 인한 모형사면의 지표부 및 내부에서 발생한 3차원 변위와 파괴부의 형상을 정밀하게 측정함으로써 사면변위 및 파괴형상을 해석하기 위한 기초자료로 활용할 수 있었으며, 향후 다양한 조건 및 환경에서 실험을 통해 측정 정확도를 평가하고 사면 유형별 측정방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단한다.

## 참고문헌

안광국, 김정열, 정소전, 이처근(2007), 준설 점토사면의 변형양상에 관한 원심모델링, 한국지반환경공학회 논문집, 한국지반환경공학회, 제8권 2호 pp.19-27.

오석훈, 서백수(2010), 사면변형 측정을 위한 3차원 레이저스캐너의 적용, 한국지구과학회지, 한국지구과학회, 31권 6호 pp.555-562.

유창호, 최운수, 김재명(2008), 지상라이다를 이용한 사면 파괴 거동분석, The Journal of GIS Association of Korea, Vol. 16, No. 3, pp.279-290.

이용주, 송기정(2010), 평면변형을 진단시험과 근거리 사진측량기법을 통한 알루미늄 봉의 진단특성, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제26권 8호 pp.5-14.

조태진, 석재욱, 이성임, 엄정기(2008), 모형실험을 통한 암반사면의 파괴거동에 대한 연구, 지질공학, 대한지질공학회, 제18권 4호 pp.447-457.

정성현, 이재기(2006), 타겟 검정에 의한 산업사진측량의 자동 모델링 기법, 한국지형공간정보학회 논문집, 한국지형공간정보학회, 제24권 제1호, pp.73-78.

정지수, 정춘교, 이종인, 이승호(2011), 인공강우에 의한 모형토조사면의 붕괴메카니즘 결정, 한국지반공학회 논문집, 한국지반공학회, 제27권 2호 pp.27-34.

한중근, 송영석(2003), 사면안정해석을 위한 사진측량을 이용한 사면변위계측시스템, 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제19권 제4호, pp.23-32.

J. O. Otepka, C. S. Fraser(2004), Accuracy Enhancement of Vision Metrology Through Automatic Target Plane

*Determination*, Proceedings of the ISPRS Congress, ISPRS, Volume XXXV, Part B, pp873-879

Kyedong Lee, Sunghuek Jung, Jaekee Lee (2008), *3D Rock Slope Analysis Using Low-Cost Camera with Zoom*, 3D Geoinfo 2008, The Proceeding of 3rd International Workshop on 3D Geo-information, p.167-172, 13 November, 2008, Seoul, KOREA

S. H. Jung, J. H. Yu, J. K. Lee, L. Ge(2008), *AUTOMATIC MODELLING METHOD FOR STEEL STRUCTURES USING PHOTO-GRAMMETRY*, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. ISPRS Congress Beijing 2008, pp.169-pp. 174, 3-11 Jul 2008 Beijing, CHINA

---

(접수일 2011. 10. 06, 심사일 2011. 10. 31, 심사완료일 2011. 11. 03)