

수치근접사진측량을 이용한 모형지반 거동량 측정

The Behavior Measurement of Simulated Ground by Digital Close-Range Photogrammetry

이 효 성¹ Lee, Hyo-Seong

주 재 우² Ju, Jae-Woo

정 재 성³ Jung, Jae-Sung

안 기 원⁴ Ahn, Ki-Won

Abstract

Digital close-range photogrammetric technique can measure and describe 3D geometric form from 2D image. This technique is increasingly applied in the field of sciences. In the fields of civil and mechanical engineering, which need precise measurements for design, expensive measuring equipments are widely used. In occasions where visual inspection is required in addition to other forms of measurements, appropriate measuring equipments have not been yet available. This study utilizes digital close-range photogrammetric technique to quantitatively analyze behavior patterns before and after destruction from test model of reinforced-soil wall. Then the results are compared with the measurements obtained using digital theodolite to verify the reliability of the proposed method.

요 지

수치근접사진측량은 사진상에 나타난 대상물의 2차원적 형상으로부터 3차원적 기하형상을 측정하고 묘사하는 기술로서 여러 과학 분야에서 그 활용가능성이 증대되고 있다. 그럼에도 불구하고 정밀을 요하는 건설·기계분야에서 수치사진측량 방법 대신 값비싼 계측장비를 이용하는 경우가 많고, 마땅한 계측장비가 없어 시각적인 방법으로 분석하는 경우도 발생한다. 따라서 본 연구에서는 보강토 옹벽 실험장치로부터 수치근접사진측량기법을 적용하여 모형옹벽 파괴전과 파괴 후에 대한 모형지반 거동양상을 정량적으로 제시하고자 한다. 그리고 모형지반 내에 설치한 기준점 변형량을 각 측정기를 이용하여 측정한 후, 수치근접사진측량 결과 값과 비교하였으며, 이를 통해 적용방법의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

Keywords : Behavior patterns, Digital close-range photogrammetric technique, Reinforced-soil wall

1. 서 론

보강토공법은 보강기초, 보강성토 및 보강토 옹벽 등의 토류 구조물로서 다양하게 개발되어 오고 있다. 이중 보강토 옹벽은 보강재가 파단 되면 위험한 구조물이지만 지진 등의 동적하중에 대한 저항력은 큰 것으로 밝혀져 있다. 보강토 옹벽의 안정성에 대한 중요 요소

는 사용 보강재의 포설길이와 연직간격이라 볼 수 있다 (사용보강재의 포설길이 길고, 연직간격이 짧을수록 더욱 안정적이다). 그러나 보강재가 길고, 보강간격이 짧으면, 사용 보강재의 면적이 늘어날 수 있다(주재우 등, 2004). 주재우 등(2004)과 김성태(2005)는 보강토 옹벽의 경제적 설계를 위해 알루미늄 봉을 이용한 보강 옹벽모형시험 장치를 이용하여 똑같은 높이를 갖는

1 순천대학교 공과대학 토목환경공학부 조교수 (Assistant Prof. Dept. of Civil & Environmental Eng., Suncheon National Univ., hslee@suncheon.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 순천대학교 공과대학 토목환경공학부 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil & Environmental Eng., Suncheon National Univ.)

3 순천대학교 공과대학 토목환경공학부 부교수 (Associate Prof. Dept. of Civil & Environmental Eng., Suncheon National Univ.)

4 경상대학교 공과대학 토목공학과 교수, 경상대학교 공학연구원 책임연구원 (Prof. Dept. of Civil Eng., Gyeongsang National Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문에 게재하여 드립니다.

보강토 옹벽에 있어서, 보강재의 길이 및 연직간격을 바꾸어 가며 자립상태(안전율 1)가 되는 조건을 찾는 실험을 실시하였다. 이때 보강토 옹벽내부의 거동모습과 파괴형상은 저속 단사진 촬영방법인 B-shutter촬영을 통해 관찰하였다. 그러나 이 방법은 보강옹벽 모형시험 장치 내에 있는 알루미늄봉의 파괴전·후에 대한 이동경로를 시각적으로만 분석하였기 때문에 보강재의 길이와 간격에 따른 정량적 거동양상(거동방향과 거동량)에 대한 조사는 이루어지지 못했다.

만일 보강재의 파괴 전·후에 대한 거동양상도 정확히 측정된다면 보강재 길이와 간격은 보다 경제적이고 정확하게 설계되어질 수 있을 것이다. 거동양상을 정량적으로 측정하기 위해선 각 측정기나 토털스테이션(Total Station), 레이저 측정 장비 등을 활용할 수 있겠으나 이들 장비들은 기계 셋업(Set-up) 시간, 측정시간과 비용이 많이 소요될 뿐만 아니라 수치자료만을 제공하므로 시각적 분석을 동시에 할 수 없다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완할 수 있는 대안적 계측방법으로 수치근접사진측량방법을 제안하고자 한다. 수치근접사진측량은 사진측량의 기본원리를 이용하여 사진상에 나타난 대상물의 2차원적 기하형상으로부터 3차원 형상을 측정하고 묘사하는 기술로서 정밀성, 안전성, 경제성, 일관성과 자동화가 요구되는 여러 과학 분야에서 활용되고 있는 추세이다. 그 중에서도 정밀산업 기계부품분야의 외형적 품질검사와 건설 분야의 구조물 안전진단을 위한 변형 모니터링분야 등에 값비싼 계측장비를 대체하고 자동화 할 수 있다는 장점 때문에 그 활용가능성이 증대되고 있다.

이와 관련한 연구로는 Fraser등(1995)이 DCS 200, CRC-1 측정용 디지털 카메라를 이용한 수치근접사진측량시스템으로 보잉777 항공기 방향타 탭(tab)을 제조하는 기계설비의 치수를 획득하였으며, 석탄 준설선의 작동상황을 관측한 후, 변동차를 모니터링 하였다. Forlani 등(1996)은 측정용 Rolleiflex 6006카메라로 촬영거리 0.7m에서 취득한 알루미늄 판의 변형전과 변형 후에 대한 수치영상을 최소제곱법으로 매칭하여 3차원 위치를 결정한 후, 유한요소법으로 변형량을 측정하고 해석하였다. Jessell 등(1995)은 암석표면을 필름용 카메라로 입체촬영하고, 수치사진측량기법을 적용한 후, 수치표고모형을 작성하였다. 그리고 이로부터 표면 거칠기의 이방성을 측정한 후, 레이저 프로파일러(정밀 3차원 측정기) 측정결과와 비교한 결과 큰 차이가 없음을 제시하

였다. Butler 등(1998)은 약 2.2m의 높이에서 초점거리 80mm 렌즈가 부착된 Hasselblad ELX 500 비측정용 카메라로 취득한 흙 표면의 수치영상을 이용하여 수치표고모형을 작성한 후, 표면 상태를 파악하였다. Merel 등(1998)은 P32 카메라를 이용하여 약 2.4m 높이에서 주기적으로 반복 촬영한 면적 3×1.5m 흙 표면의 수치영상을 DSR14 해석도화기로 3차원 위치를 결정한 후, 흙 표면의 거칠기 변화를 모니터링 하였다. Lascelles 등(2002)은 강우로 인한 지면의 침식작용과 육지에서의 골짜기 형성에 관한 모의실험을 위해, 수치근접사진측량기법을 이용하여 가상의 강우 발생 전과 발생 후의 지면에 대한 수치표고모형을 분석하고, 소규모 지역에 대한 지면변화 양상을 파악하였다. Lee 등(2004)은 Rolleiflex 6006 측정용 카메라와 DCS 420 디지털 카메라로부터 촬영된 입체영상을 이용하여 수치근접사진측량 기법으로 암석의 표면 거칠기를 제시하고, 이들 결과를 레이저 프로파일러로부터 획득한 거칠기 값과 비교하여 제안기법의 신뢰성을 확보하였다.

이진덕 등(1996)은 스틸비디오 카메라를 이용한 비전 측정시스템으로 콘크리트 사일로 지지구조물의 변형을 높은 정밀도로 모니터링 하였다. 신봉호 등(1997)은 DCS 200 디지털 카메라를 사용하여 구조물의 변형측정과 수치영상의 정확도 향상을 위하여 윈도우 환경의 수치영상분석시스템을 구축한 후, 하중변화에 의한 모의교량의 순간거동을 파악하였다. 강준목 등(2000)은 수치근접사진측량기법을 이용하여 건설과 산업구조물의 안전진단을 위한 변형 및 순간거동을 보다 효율적으로 해석하기 위해 CCD 카메라를 이용한 순간동기입체영상 획득시스템을 구축하였으며, 콘크리트 공시체의 하중변화에 따른 변위량을 알아낸 후, 휨 변형량을 해석하였다. 한중근 등(2007)은 수치영상을 이용한 3차원 자동화 비주얼 모니터링 시스템을 개발하였으며, 이로부터 콘크리트 벽면의 강체변위와 보강토 옹벽블록의 변위계측 실험을 실시하였다. 그리고 실험결과를 토털스테이션의 측정결과와 비교하여 개발한 시스템의 활용 가능성을 확인하였다. 그러나 기존연구 사례에서 수치근접사진측량 기법을 지반 공학적 측면에서 활용한 사례는 극히 드물며, 특히 모형지반의 거동량을 효과적으로 측정하기 위한 실험은 거의 시도되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 주재우 등(2004)의 선행연구를 통해 제작된 보강토 옹벽 실내모형 시험 장치로부터 수치근접사진측량기법을 적용하여 모형옹벽 파괴전과 파괴 후에 대한

모형지반 거동양상을 정량적으로 제시하고자 한다. 그리고 모형지반 내에 설치한 기준점 변형 량을 각 측정기를 이용하여 삼각측량 원리로 측정된 후, 수치근접사진측량 결과 값과 비교하였으며, 이를 통해 적용방법의 신뢰성을 확보하고자 하였다.

2. 계측방법

수치사진측량 기법으로 모형지반 거동양상을 측정하기 위해선 우선적으로 한 쌍의 입체영상을 획득하고, 이로부터 분석하고자하는 지점들의 3차원 위치를 획득해야만 한다. 좌우 입체영상으로부터 3차원 위치를 결정하기 위한 순서는 다음과 같다.

첫 번째, 촬영 당시의 좌우측 카메라 위치($X_L, Y_L, Z_L, X_R, Y_R, Z_R$)와 자세($\omega_L, \phi_L, \kappa_L, \omega_R, \phi_R, \kappa_R$) 즉, 외부표정요소(Exterior Orientation Parameters; EOPs)를 구해야 한다. 이를 위해 그림 1(우측 그림)에서 보는바와 같이, 카메라 렌즈중심과 사진 상의 점, 대상점이 일직선상에 있다는 공선조건을 기본으로 최소제곱법을 이용한 번들조정 기법을 적용할 수 있다. 식 (1)은 카메라 렌즈 중심의 3차원 위치와 자세, 임의 점에 대한 3차원 위치, 이에 대응하는 영상좌표에 대한 관계식을 표현한 것이다 (Moffitt 등, 1980).

$$\begin{aligned} x_L &= -f_L \frac{m_{L11}(X - X_L) + m_{L12}(Y - Y_L) + m_{L13}(Z - Z_L)}{m_{L31}(X - X_L) + m_{L32}(Y - Y_L) + m_{L33}(Z - Z_L)} \\ y_L &= -f_L \frac{m_{L21}(X - X_L) + m_{L22}(Y - Y_L) + m_{L23}(Z - Z_L)}{m_{L31}(X - X_L) + m_{L32}(Y - Y_L) + m_{L33}(Z - Z_L)} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, x_L, y_L 는 임의 점의 좌측 영상좌표, X_L, Y_L, Z_L 는

좌측 카메라 렌즈중심의 3차원 위치, X, Y, Z 는 임의 점의 3차원 위치, f_L 은 좌측영상의 초점거리이다. 그리고 $m_{L11} \dots m_{L33}$ 은 $\omega_L, \phi_L, \kappa_L$ 이 포함되어 있는 좌측영상의 회전행렬이다.

두 번째, 실험 대상물을 두 장 이상 중복시켜 촬영한 좌·우 입체영상에서 원하는 지점의 동일 사진좌표(또는 영상좌표)를 획득해야 한다. 동일한 지점의 영상좌표를 획득하는데 있어선 시각적인 방법 또는 수치적 영상처리에 의한 자동화 방법이 있다.

세 번째, 결정된 EOPs와 좌·우 영상의 동일점을 이용하여 3차원 위치를 계산하기 위해선 공간교차이론을 적용한다. 공간교차이론은 중복된 좌·우 영상에서 임의의 동일점을 찾았을 경우, 그때의 좌·우 카메라 투영중심에 의하여 두 개의 직선(또는 공선)이 형성된다는 원리에 근거한다(Moffitt 등, 1980). 그림 1(우측 그림)에서 이론적으로는 두 공선이 한 점에서 만나야 하지만, 일반적으로 EOPs를 결정할 때와 좌·우 영상의 동일지점(또는 매칭위치) 결정에서 피할 수 없는 오차들로 인하여 두 공선은 서로 $d(=[d_x, d_y, d_z]^T)$ 만큼 교차하지 않는다. 따라서 실제에 있어서는 두 직선의 최단 거리인 벡터 $k \cdot d$ 를 찾아 이것의 중간점을 교차점으로 간주하여 3차원 위치를 계산한다. 이는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_L \\ Y_L \\ Z_L \end{bmatrix} + \lambda_{L1} \cdot M_L^T \cdot \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ -f_L \end{bmatrix} + \frac{1}{2} k \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, λ_{L1} 은 그림 1(우측그림)에서 임의지점에 대한 좌측영상 면과 대상 면까지의 공선에서 렌즈중심으로부터 영상 면까지의 벡터와 렌즈중심으로부터 대상 면까지의 벡터 비, κ 는 최단 거리 d 에 대한 방향벡터 \vec{d} 의 스칼라

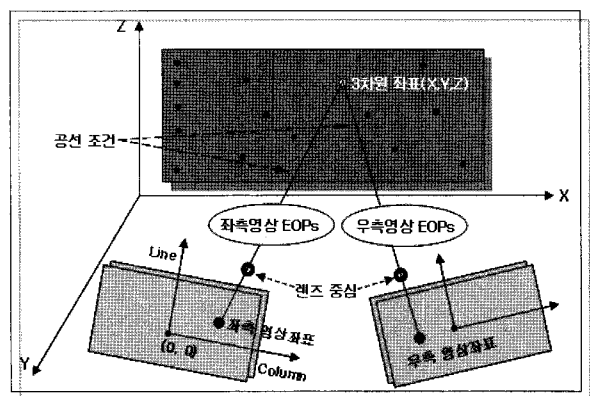
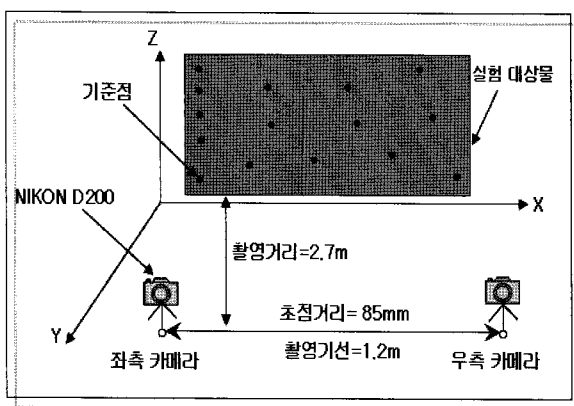


그림 1. 사진측량을 위한 대상물과 카메라 셋업 모습(좌측그림), 대상물 임의 지점과 이에 대응하는 좌·우 영상 지점 각각에 대한 공선조건 및 좌·우 영상 동일 영상지점의 공간교차 이론(좌·우 공선이 대상물임의 지점에서 교차하는 이론)에 의한 3차원 위치 추출 개념도(우측그림)

라(Scalar), M_L^T 은 회전행렬 $\begin{bmatrix} m_{L11} & m_{L12} & m_{L13} \\ m_{L21} & m_{L22} & m_{L23} \\ m_{L31} & m_{L32} & m_{L33} \end{bmatrix}$ 의 전치행렬이다.

이 방법은 근사적인 방법이지만 실용적인 면에서 가장 많이 사용된다. 정확한 해를 구하기 위하여 공선조건식을 이용한 최소제곱법을 사용하기도 하지만, 이것은 계산시간이 많이 소요되고, 반복계산을 요구하므로 주로 셋 이상의 직선을 교차시킬 때 사용한다.

3. 적용실험과 비교분석

본 연구에서 사용한 실내모형 시험 장치는 그림 3에서 보는바와 같이 가로×세로×폭이 각각 500×260×50mm의 크기로서 직경이 각각 1.6mm와 3.0mm의 소형 알루미늄 봉을 일정 중량비로 포설하여 모형지반으로 활용하였고, 옹벽(또는 벽체)은 높이 24cm의 나무막대를 이용하였다. 그리고 보강재로는 비교적 인장강도가 큰 한지를 사용하였으며, 보강재 내부를 그림 2에서와 같이 일부를 격자형으로 도려내어 보강재 상·하부 알루미늄 봉이 맞닿아 있도록 하였다. 보강재로 사용한 한지는 인장강도시험을 행한 결과 최대 인장강도가 약 205kg/m이었다. 또한 실험장치(그림 5)에서 모형벽체와 보강재는 왼쪽 잠금장치를 풀면 보강재 길이나 연직 포설간격 등 포설조건에 따라서 자랍하기도 하고 파괴되기도 하

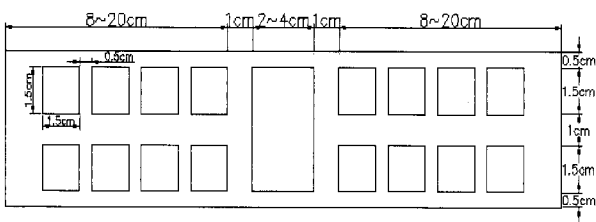


그림 2. 격자형 보강재의 형태

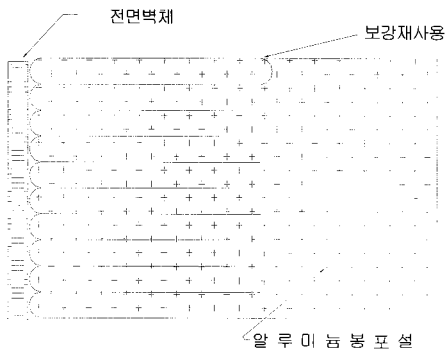


그림 3. 보강옹벽, 보강재와 지반으로 구성된 실내모형 시험장치

지만 본 실험에서는 모형지반 파괴 시 거동 량 측정을 위한 것이므로 자동적으로 파괴현상이 일어나도록 설치하였다.

실험에 사용된 카메라는 CCD 크기가 가로 23.6mm×세로 15.8mm(한 화소 크기 : 0.006mm)인 NIKON D200 디지털 비측정용 카메라를 이용하였으며(그림 4), 3,872×2,592 화소와 초점거리 85mm로 수평 촬영하여 입체영상을 획득하였다. 촬영기선은 1.20m, 촬영거리는 약 2.7m로 하였다(그림 1에서 좌측그림). 좌표축은 X축이 좌·우 카메라의 기선방향, Y축이 카메라 촬영방향이 되도록 하였으며, Z축은 XY 평면과 직각방향이 되도록 설정하였다. 외부표정요소 초기 값으로 사용될 회전요소 중 X, Z축 회전요소는 카메라 중심과 임의 기준점간의 기하학



그림 4. NIKON D200 디지털 카메라

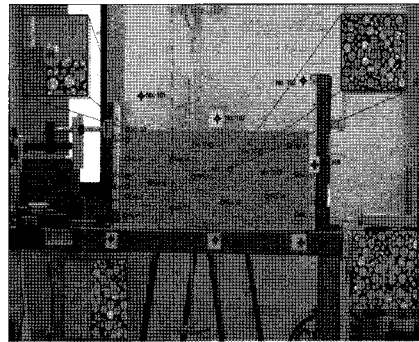


그림 5. 모형시험 장치와 기준점 배치도 및 일부 기준점 확대모습



그림 6. 모형시험 장치의 거동 전·후 변화량 측정모습

적 관계를 이용하여 구하였고, Y축은 회전이 거의 없는 것으로 설정하였다.

입체영상은 모형지반 거동 전, 거동 후 각각에 대하여 획득하였으며(그림 7), 이때 카메라의 흔들림을 방지하고, 거동 전·후 입체영상의 동일한 외부표정요소를 획득할 수 있도록 무선 리모컨을 이용하여 촬영하였다. 그리고 포설된 알루미늄 봉에 20점, 시험장치 주변에 7점의 타겟(또는 측정점)을 설치하였으며(그림 5), 27점의 3차원 위치는 모형지반 거동 전·후 각각에 대하여 5초읽기 데오돌라이트(DT5S 각 측정기)를 이용한 삼각측량 원리로 구하였다(그림 6). 사용한 각 측정기는 정밀도가 5초 내외이고, 거리 약 4.5m 정도에서 각 측정이 이루어졌으므로 각 측정기의 위치결정 정밀도는 0.1mm 정도가 된다고 볼 수 있으나 이는 측정자의 숙련도에 따른 개인 오차 등을 제외한 수치이다. 시험장치 주변 7점을 모형지반 거동 전·후에 대한 영상의 내·외부표정요소 결정을 위한 기준점으로 활용하였고, 알루미늄 봉에 설치된

20점 중 측량오차가 큰 측점을 제외한 나머지 점들은 모형지반 거동 량 및 측정정확도 파악을 위한 검사 점으로 활용하였다(그림 5).

기준점의 3차원 위치와 영상좌표, 카메라 렌즈중심의 대략적 위치와 회전요소를 이용하여 번들조정을 수행한 후, 입체영상의 외부표정요소를 결정함과 동시에 내부표정요소(초점거리 등)를 조정하였다. 이로부터 모형지반 거동 전·후에 대한 검사 점의 3차원 위치를 구하고, 각 측정기로 실측한 결과 값과 비교하였다(표 1). 외부표정요소 결정정확도(촬영된 사진으로부터 대상물의 위치를 계산하는데 있어서 정확도의 척도가 되는 부분 즉, 외부표정요소 결정정확도가 낮으면 위치계산의 정확도도 떨어지게 된다)는 표 1에서 보는바와 같이 모형지반 거동전이 거동후보다 비교적 높게 나타났다. 리모컨으로 촬영한 카메라는 거의 움직임이 없다고 봤을 때, 모형지반 거동 후 측량한 검사 점의 정확도가 측정자의 개인적 피로 등에 의해 측정 정밀도가 상대적으로 떨어

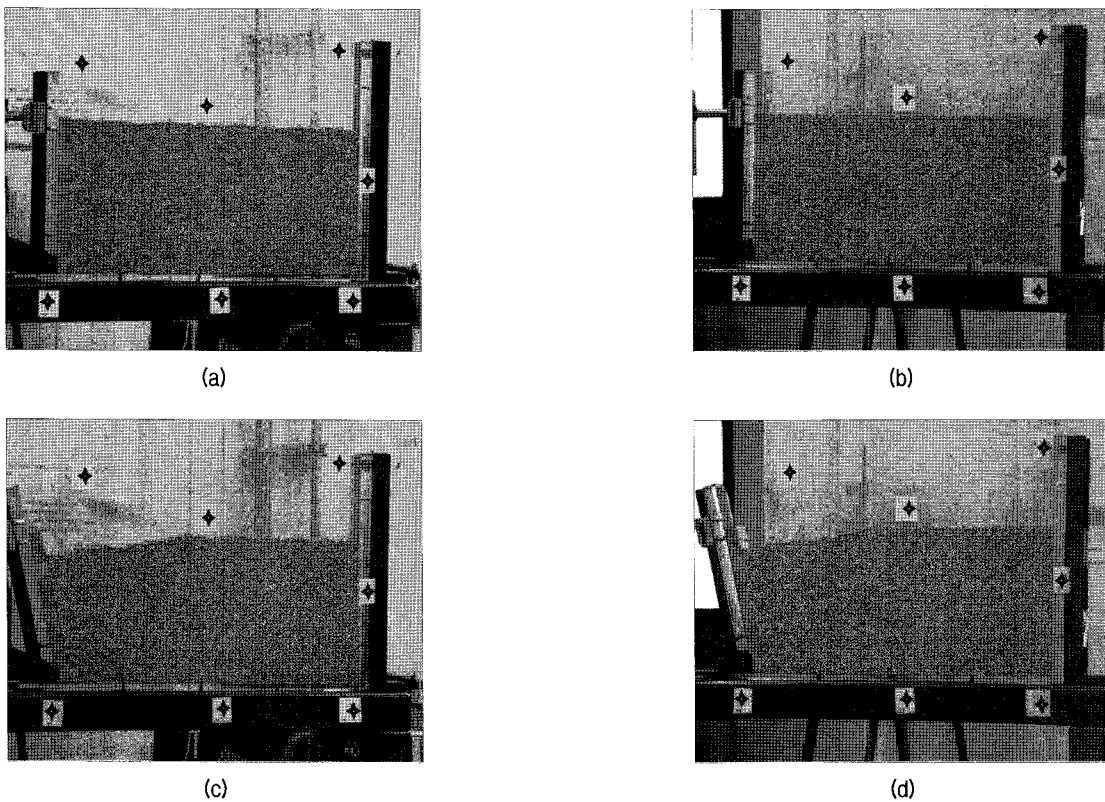


그림 7. 모형지반 거동전의 좌·우 입체영상(a, b)과 보강토 응벽 파괴에 의한 거동후의 좌·우 입체영상(c, d)

표 1. 모형지반 영상의 외부표정요소 결정 정확도(단위: mm)

Case	RMSE X	RMSE Y	RMSE Z
거동 전 영상	0.78	1.06	0.36
거동 후 영상	1.11	1.33	1.12

졌기 때문인 것으로 판단된다.

표 2는 각 측정기와 수치사진측량으로 획득한 검사 점의 모형지반 거동 전·후 변화량을 비교한 것이다. 비교 결과, 두 방법에서 12번의 Z방향 변화량 차이가 3mm 정도로 가장 크게 나타났으며, 나머지 점들은 대부분 2mm 내외의 변화량 차이를 보였다. 두 방법에 대한 전체적인 평균제곱근 오차는 X방향이 0.51mm, Y방향이 1.69mm, Z방향이 0.92mm의 결과를 보였다. 여기서 Y방향(촬영방향)의 오차가 X, Z방향에 비해 상대적으로 큰 이유는 기준점 배치가 평면적(X, Z방향)으로는 골고루 분포되는 반면에 촬영방향에 대해선 평면적 분포만큼 배치시킬 수 없고(그림 5), 촬영기선에 비해 촬영거리가 상대적으로 길기 때문이다(그림 1에서 좌측그림).

이로부터 결정된 외부표정요소는 위치결정 정확도에 있어서 직접적인 영향을 주게 된다. 그리고 촬영한 카메라의 초점거리가 85mm, 촬영거리가 2700mm이면 영상 축척(초점거리/촬영거리)은 약 1/32이 되고, 촬영된 영

상의 한 화소크기는(원래 한 화소크기×축척 분모 수) 0.2mm 정도가 된다. 측정용 카메라를 사용할 경우 평면 위치(본 연구에서 X, Z방향) 측정 정확도가 일반적으로 1~2 화소크기 내에 들어오나, 본 연구에서 사용한 카메라는 측정용이 아니기 때문에 초점거리의 부정확성과 렌즈왜곡 등으로 인한 오차를 감안하면 계산한 화소크기보다 더 큰 오차가 발생할 가능성이 크다고 볼 수 있다.

결론적으로 NIKON D200 디지털 비측정용 카메라로부터 수치근접사진측량을 적용하여 보강토 옹벽 실내 모형 시험장치의 거동량을 약 3m 거리에서 측정할 경우 평면위치는 ±1mm 범위, 평면과 직각방향은 ±2mm 범위내외에서 계측이 가능할 것으로 판단된다. 그리고 그림 8에서 보는바와 같이 모형지반은 옹벽 부근 지반들의 변형이 많이 일어난 것에 비해 다른 지점들은 보강재에 의해 거의 변형이 일어나지 않은 것을 알 수 있다.

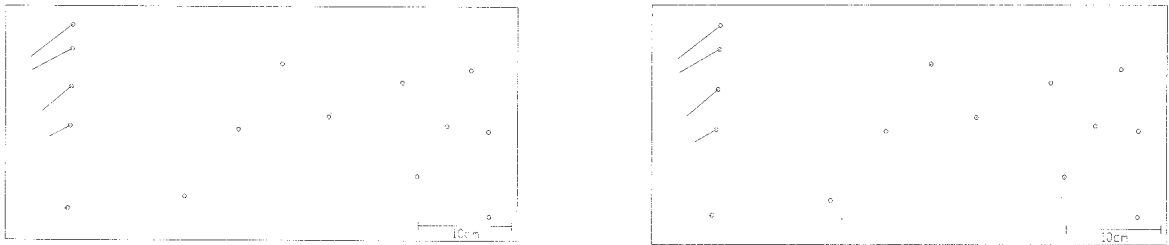


그림 8. 측정기(좌)와 사진측량(우)에 의한 모형지반 검사 점의 거동방향과 거동 량

표 2. 각 측정기와 사진측량으로 획득한 검사 점의 거동 전·후 변화량 비교(단위: mm)

No.	X방향 변화량		Y방향 변화량		Z방향 변화량		두 방법의 차이 값		
	각 측정기	사진측량	각 측정기	사진측량	각 측정기	사진측량	X 차	Y 차	Z 차
1	3.64	4.05	-0.06	1.84	0.71	0.25	0.41	1.90	0.46
2	-0.28	0.37	-0.20	0.66	0.21	-0.19	0.65	0.86	0.30
5	21.82	22.41	-0.11	1.78	11.34	11.17	0.58	1.89	0.17
6	42.65	42.14	4.14	0.47	24.07	22.64	0.51	1.70	1.43
7	31.92	32.62	-1.01	1.52	26.12	25.54	0.70	2.53	0.58
8	-0.20	0.17	-0.51	0.56	0.21	0.03	0.37	1.07	0.18
10	44.35	45.32	-1.90	0.64	33.46	32.75	0.97	2.54	0.71
11	0.05	0.25	-0.39	0.35	-0.26	-0.08	0.20	0.74	0.18
12	0.20	0.48	-0.59	0.68	0.71	0.18	0.28	1.27	0.53
17	-0.76	0.34	-1.48	0.79	-0.16	0.03	1.10	2.27	0.19
19	-0.35	0.29	-0.78	1.25	0.36	-0.17	0.64	2.03	0.53
20	-0.19	0.22	0.13	0.26	-2.99	-0.04	0.41	0.13	2.95
25	1.61	2.05	-0.57	0.36	0.37	0.47	0.44	0.93	0.10
42	-0.06	0.12	-0.74	1.50	0.01	-0.11	0.18	2.24	0.12
54	-0.21	0.35	-0.05	0.85	0.10	-0.04	0.56	0.90	0.14
RMSE							0.59	1.69	0.92

4. 결론

본 연구에서는 보강토 옹벽 실내모형 시험 장치로부터 모형옹벽 파괴전과 파괴 후에 대한 모형지반 거동량을 수치근접사진측량기법으로 측정된 후, 측량기기에 의한 실측값과 비교해 보았다. 그 결과, 최대오차는 3mm, 평균제곱근 오차는 2mm를 넘지 않았다. 따라서 수치근접사진측량으로 보강토 옹벽 실내모형 시험장치의 거동량 예측가능성을 제시할 수 있었으며, 보다 빠른 자동화가 가능하다면 고가의 예측장비가 요구되는 기계·건설 분야의 구조물 측정에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 강준복, 배연성, 주영은, 엄대용 (2000), CCD 영상획득 시스템에 의한 피사체의 변위 측정, *한국측량학회지*, 제 18권, 제 1호, pp.25-32.
2. 김성태 (2005), *보강재의 길이와 간격을 고려한 보강토옹벽의 한계파괴조건 연구*, 순천대학교 석사학위논문.
3. 신봉호, 엄재구, 양승용, 송왕재 (1997), 구조물의 변형측정을 위한 수치영상의 정확도 향상, *대한토목학회논문집*, 제 19권 제 3-4호, pp.677-685.
4. 주재우, 김성태, 김재영, 장용채, 조삼덕 (2004), 사진촬영을 통한 보강토옹벽의 파괴조건 연구, *2004 한국지반공학회 춘계학술대회논문집*.

5. 이진덕, Fraser. C. S. (1996), 비전측정시스템을 이용한 구조물의 변형 모니터링, *대한토목학회논문집*, 제 16권, 제 3-4호, pp.343-350.
6. 한중근, 홍기권, 김영석, 조삼덕, 박기석 (2007), 수치사진영상을 이용한 자동변위계측시스템의 개발과 적용, *한국지반공학회논문집*, 제 23권, 제 5호, pp.53-62.
7. Butler, J. B. and Lane, S. N. (1998), Assessment of DEM quality for characterizing surface roughness using close range digital photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 16, pp.271-291.
8. Forlani, G., Guzzetti, F., Pinto, L. (1996), Reconstruction of the Deformation Surface of CFER Panels, *IAPRS*, Vol. 31, B5, pp.209-214.
9. Fraser, C. S. and Shortis M. R. (1995), Metric Exploitation of Still Video Imagery, *Photogrammetric Record*, Vol.15, No.85, pp.107-122.
10. Jessell, M. W., Cox, S. J. D., Schwarze, P. and Power. W. (1995), The anisotropy of surface roughness measured using a digital photogrammetric technique. *Geological Society of London Special Publication*, 92, 27-37.
11. Lascelles, B., David, F. M., Parsons, T. and Boardman, J. (2002), Automated Digital Photogrammetry: A Valuable Tool for Small-scale Geomorphological Research for the Non-photogrammetrist?, *Transaction in GIS*, Vol. 6, No.1, pp.5-15.
12. Lee, H. S. and Ahn, K. W (2004), A prototype of digital photogrammetric algorithm for estimating roughness of rock surface, *Geosciences Journal*, Vol.8, No.3, pp.333-341.
13. Merel, A. P., Farres, P. J. (1998), The monitoring of soil surface development using analytical photogrammetry. *Photogrammetric Record*, 16, 331-345.
14. Moffitt, F. H. and Mikhail, E. M. (1980), *Photogrammetry*, 3rd ed., Happer & Row, New York.

(접수일자 2007. 11. 14, 심사완료일 2008. 2. 29)