

근거리사진측량에 의한 구조물 변형측정  
- 터널구조물을 대상으로 -  
**Deformation Measurement of Structures by Close - Range  
Photogrammetry**  
- A Target for Tunnel Structures -

김감래\* · 김명배\*\*

Kim, Kam-Lae · Kim, Myung-Bae

요 旨

구조물의 안전성확보가 이루어지기 위해서는 구조물의 계획·시공으로부터 관리에 이르기까지 각종 측정이 먼저 실행되어야 하며, 이를 통해 당초설계의 타당성을 검증하고 데이터를 축적함으로써 오랜시간이 경과함에 따른 이상현상이나 붕괴 위험에 대해 사전에 예측할 수 있어야 한다. 최근 측량기술의 향상과 개발에 따른 구조물의 유지관리에 대한 자료를 제공하기 위한 방법으로 근거리사진측량방법을 이용, 구조물의 변형측량을 실시하여 기존 구조물 변형량 계측방법의 신뢰성 문제를 해결하고, 구조물 형태변화에 대한 자료를 제시하여 구조물 유지관리에 활용할 수 있도록 하였다.

ABSTRACT

In order to ensure the safety of a structure, it is essential to put in practice all sorts of measurement from the plan and execution to the management by stages. These measurements make it possible to verify a propriety of a plan and forecast an accident or a collapse caused by long lapse of time, making use of accumulated data. Close-Range Photogrammetry is a method to meet improvement and development of surveying technique, which offered data for maintenance and management of a structure. Dus to applying this way, reliance on measuring a variation of structure. Besides, data of variation will be utilized for maintenance and management of a structure.

1. 서 론

경제성장에 따른 교역량의 증대와 더불어 교통량이 늘어남에 따라 수송물량이 늘어나게되고, 운송차량이 대형화, 과적화 및 고속화됨에따라 구조물의 파손과 노후화현상의 급격히 상승함에따라 이를 관리하기 위한 효율적인 유지관리방법이 마련되어야 한다. 이를 위해서는 구조물의 계획, 시공으로부터 관리에 이르기까지 각종 측정이 먼저 선행되어야 한다. 그러나 지금까지 시행되어온 구조물의 변형에 대한 측정방법으로는 추정정밀도가 낮고 측정값에 대한 검증이 안되는 등 많은 문제가 내포되어왔다. 이와 관련하여 Herret(1954)에

의해 근거리사진측량을 이용하여 물체에 대한 변형측정에 관한 연구가 최초로 시작된 이래 말뚝시공에 대한 용벽의 운동량 결정에 관한 연구를 통해 사진측량방법과 경사계에 의한 계측결과를 비교하여 사진측량방법의 구조물에 대한 응용성을 제시한바 있다.<sup>6)</sup> 또한 교량의 변형측정에도 사진측량을 이용하여 변형량측정의 이용가능함을 제시하였고<sup>9)</sup>, 모형터널주변 토립자의 변위측정에 사진측량방법을 적용한 예가 있으나<sup>7)</sup>, 국내에서는 고정된 물체의 도화나 모델링에 의한 해석에 그치고 있는 실정이다. 이에 최근 측량기술의 향상 및 개발에 따른 구조물 유지관리에 대한 활용자료를 제공하기 위해 근거리사진측량방법을 이용하여 기존구조물 변형량 계측방법에서의 신뢰성문제를 해결하고 구조물 형태변화에 대한 자료를 제시하여 구조물 유지관리에 활

\* 명지대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원

용할 수 있도록 하는 데 있다. 촬영방법은 직각수평촬영방법과 경사촬영방법을 적용하여 촬영방법에 대한 일반화를 이루도록 하여 어떠한 위치에 있어서도 촬영이 가능하도록 하여 최적의 결과를 얻을 수 있도록 하였고, 오차의 일반화를 통한 해석을 수행하였다.

## 2. 근거리사진측량방법에 의한 촬영

근거리사진측량방법은 일반적으로 촬영대상물과의 거리가 기선길이에 대하여 1/5~1/20정도가 가장 양호한 해석결과를 얻을 수 있고, 촬영각이 카메라 광축방향에 대해 직각수평인 상태에서 촬영되어 측정점의 교회각이 촬영각에 대해 90°에 가까울수록 정확한 측정이 가능하다.<sup>2)</sup> 그러나 특정지역에 시공되어 있는 구조물을 촬영하여 원하는 정도의 값을 얻어내기 위해서는 구조물 시공지역에 따른 촬영시의 제약을 최소화할 필요가 있다. 이에 대한 해결방법으로 직각수평촬영이 곤란한 대상물에 대해 경사사진촬영방법을 적용하였다. 일반적으로 경사사진은 촬영범위가 넓고 접근하기 불가능한 대상물 측정이 가능할 뿐 아니라 직각수평사진의 경우처럼 대상물과 촬영방향이 정확히 수직을 유지하여야 하는 조건이 필요 없으므로 촬영이 수월하다. 그러나 사진측척이 사진면에서 다르게 나타나므로 수치적 분석이 어렵고 지형 및 구조물의 일부가 사진상에 촬영이 안되는 경우가 있으므로 산이나 건물의 이면을 측정할 수 없다. 그리고 기복이 심한 대상물은 위치변화에 의한 오차가 크므로 적당하지 못하다. 또한 주점에서 먼 부분은 상이 선명하지 못하므로 수직사진에 비해서 정밀도가 낮은 단점이 있다. 이에 경사사진은 기복이 적고 넓은 지역의 측정이나 높은 정밀도를 요구하지 않은 소측척의 지도작성에 이용되며, 높은 지역에 위치하고 있는 구조물의 측정이나 여러 제약조건에 의해서 수직촬영이 불가능한 경우에만 이용된다.<sup>2)</sup> 본 연구에서는 경사촬영방법에 의해 얻어진 사진에 대한 정밀도를 높이기 위해 경사사진면을 수직사진면으로의 해석적 편위수정을 실시한 후 정확한 3차원공간좌표를 얻기위한 변환을 실시하였으며, 그에 따른 해석이론은 다음과 같다.<sup>10)</sup>

그림 1에서 O는 투영점이고 주면은 평면이 OWA이며, 수직사진면과 경사사진면에 대해 수직사진좌표에 대응하는 경사사진면으로 변환시키므로 투영관계가 성립된다.

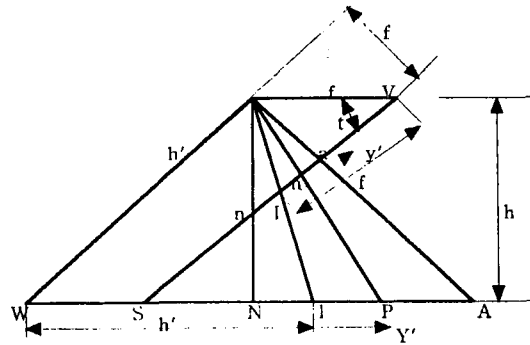


그림 1. 경사사진과 수직사진의 투영관계

주면에서  $\triangle aVO \sim \triangle OWA$  이므로

$$\frac{Y_{A'} + h'}{h'} = \frac{f}{f - y_{a'}}$$

점 a와 A에 대해서

$$Y_{a'} = \frac{h' y_{a'}}{f - y_{a'}}$$

이고, 임의점에 대해서 적용하면

$$Y' = \frac{h' y'}{f - y'} \quad (1)$$

이다. 주면에 수직인 면에 대해서

$$X' = \frac{h' x'}{f - y'} \quad (2)$$

이다.

그림 2는 기준좌표계에서 경사사진좌표계와 수직사진좌표계의 관계를 나타내고 있다.

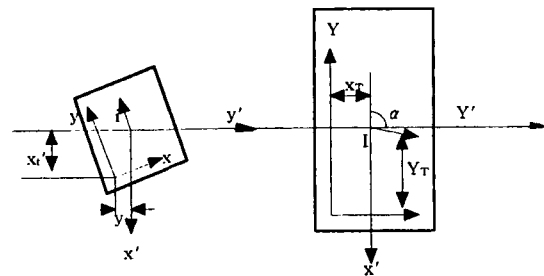


그림 2. 경사사진과 수직사진 좌표계

경사사진면과 수직사진면에 대해 좌표변환하면 다음과 같다.

경사사진면에 대해서

$$\begin{aligned} x' &= x'_i - x \cos \beta + y \sin \beta \\ y' &= y'_i - x \sin \beta - y \cos \beta \end{aligned} \quad (3)$$

수직사진면에 대해서

$$\begin{aligned} X &= X'_T + X' \cos \alpha + Y' \sin \alpha \\ Y &= Y'_T - X' \sin \alpha - Y' \cos \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

식 (1), 식 (2), 식 (3)을 식 (4)에 대입하면 다음의 투영변환식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} X &= \frac{a_1'x + b_1'y + d_1'}{a_3'x + b_3'y + 1} \\ Y &= \frac{a_2'x + b_2'y + d_2'}{a_3'x + b_3'y + 1} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식 (5)를 선형화하여 정리하고 행렬식으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$[A][X] = [\rho] \quad (6)$$

여기서 투영변환계수  $[X]$ 는 4개의 기준점만 있으면 구할 수 있지만  $N$ 개점이 사용되면 최소제곱법으로 8개의 미지계수를 계산해야 한다. 계산된 8개의 계수들은 두 평면사이의 투영관계를 결정하므로 경사사진좌표를 수직사진좌표로 변환시키는데 이용되고, 투영변환식은 해석적 편위수정의 기본이 된다. 투영변환된 좌표는 사진좌표이므로 사진좌표를 식 (7)에 의해 보정한 후 모델좌표를 결정하고 모델좌표값을 기준좌표계로 변환하여 절대좌표를 계산한다.

$$\begin{aligned} X_m &= X_1 + \lambda_1 X_1 \\ Y_m &= \frac{1}{2} [(Y_2 - \lambda_2 Y_2) + (Y_1 - \lambda_1 Y_1)] \\ Z_m &= Z_1 + \lambda_1 Z_1 \\ Y_{\text{parallax}} &= (Y_2 - \lambda_2 Y_2) + (Y_1 - \lambda_1 Y_1) \end{aligned} \quad (7)$$

절대좌표에 대해 선형화하여 관측방정식으로 나타내면

$$V = AX - L \quad (8)$$

이다.

### 3. 구조물의 변형량 산출

사진측량방법을 이용하여 구조물의 변형량을 측정하려고 할 경우에 가장 기본적인 사항은 좌표계의 설정이다. 일반적으로 구조물의 변형측정에 있어서 단시간에 촬영이 끝나는 사항일 경우나 기선변화 및 카메라의 위치변화가 없는 대상일 경우에는 기준좌표계의 변화가 일어나지 않으므로 해석에 있어서 기준좌표계로의 변환이 불필요하다. 그러나 장기간에 걸쳐 촬영을 해야 하는 경우나 기선이 변하는 경우 및 카메라 위치가 변하게 되는 경우에 있어서는 사진촬영된 값들에 있어서 사진촬영위치 및 기선변화에 따른 임의좌표계로 추출된 좌표값들을 얻을 수 밖에 없기 때문에 임의 좌표계로부터 기준좌표계로의 변환이 요구된다. 임의 좌표계에서 얻어진 각 미지점의 3차원좌표를 다음 식을 이용하여 기준좌표계로 변환을 통한 좌표계의 구성 및 원점 등을 일치시키고 각 단계별로 변환된 미지점의 3차원좌표를 상호 비교함으로써 대상물에 대한 변형량을 산출한다.<sup>10)</sup>

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} = \lambda [R] \begin{bmatrix} \ddot{X}_r \\ \ddot{Y}_r \\ \ddot{Z}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

여기서  $\lambda$ : 축척계수,  $[R]$ : 회전변환요소

각좌표에 대한 좌표차를 통해 구조물의 변형여부를 판단하는 방법외에 각지점간상호거리를 산출하여 단계별 비교를 통해 변형여부를 판단하는 방법이 있다. 본 연구에서는 각 구조물에 대해 해석된 좌표값을 이용하여 좌표차에 의한 방법과 다음 식 (10)에 의한 각 상호거리비교에 의한 방법을 통해 구조물의 변형여부를 판단하였다.

$$\Delta = (\sqrt{X_2^2 \dots N + Y_2^2 \dots N + Z_2^2 \dots N} - \sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}) \quad (10)$$

### 4. 변형량 측정 해석

#### 4.1 측정 정밀도 해석

본 연구에서 구조물의 변형량 측정에 대한 응용가능성을 판단하기 위해 보수보강주입액을 터널단면에 주입하여 보강하는 현장에 적용하여 보았다. 이 현장은 1966년도에 준공된 터널로서 누수 및 박리·박락현상이 많고 내구성이 약하여 터널붕괴위험가능성이 내포되어 있는 현장으로 지금은 사용되지 않은 구간으로서



그림 3. 터널내 변위측량

다른 터널에 대한 보수보강공법개발차원으로 시험하고 있는 현장이다.

보수보강공법에 적용되는 각종의 방법에 따라 터널내의 내공변위가 발생되는 것을 판단하기위해 중방향으로 5m간격을 두고 총 7개단면을 선정하여 시간에 대한 주

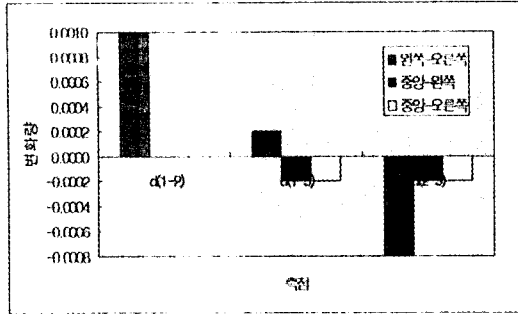
표 1. 터널단면에 대한 평균표준편차 (단위 : mm)

단면	왼쪽	중앙	오른쪽
1	0.00400	0.00097	0.00302
2	0.00246	0.00412	0.00277
3	0.00028	0.00229	0.00175
4	0.00259	0.00190	0.00132
5	0.00332	0.00253	0.00251
6	0.00197	0.00123	0.00212
7	0.00205	0.00112	0.00174

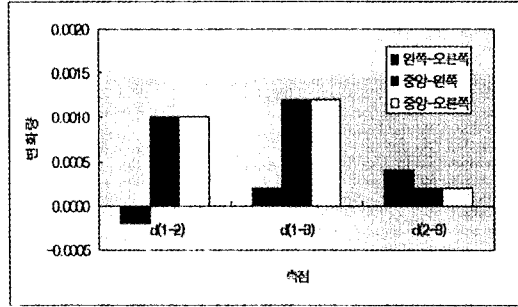
기를 1일, 2일, 3일 간격으로 다음 그림과 같이 각 단면에 대한 내공변위와 침단침하에 대한 변형측정을 실시하였다. 이때 내공변위와 침단침하를 측정하기 위한 측정점의 배치는 그림 3에서와 같으며, 터널단면에 대해 직각으로 타켓을 부착하여 측정 교회각이 90°에 가깝도록 한후 P31측정용카메라와 TC2002 3차원측량기를 이용하여 촬영·측정하였다. 해석에 필요한 기준점을 확

표 2. 단면별 상호지점에 대한 변위값 ( 단위 : mm )

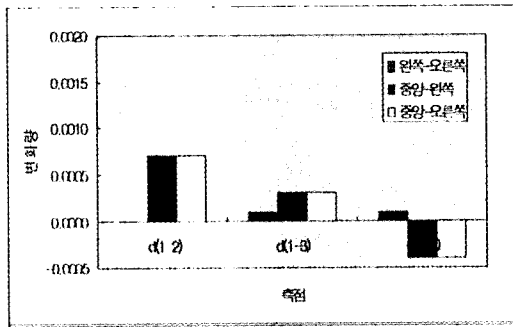
구분		1차	2차	3차	변화량	변화량	변화량
		상호거리	상호거리	상호거리	$\Delta(1-2)$	$\Delta(1-3)$	$\Delta(2-3)$
단면1	왼쪽-오른쪽	5.3527	5.3517	5.3525	0.0010	0.0002	-0.0008
	중앙-왼쪽	3.6500	3.6500	3.6498	0.0000	-0.0002	-0.0002
	중앙-오른쪽	3.6500	3.6500	3.6498	0.0000	-0.0002	-0.0002
단면2	왼쪽-오른쪽	5.3569	5.3571	5.3567	-0.0002	0.0002	0.0004
	중앙-왼쪽	3.4203	3.4193	3.4191	0.0010	0.0012	0.0002
	중앙-오른쪽	3.4203	3.4193	3.4191	0.0010	0.0012	0.0002
단면3	왼쪽-오른쪽	5.3347	5.3347	5.3346	0.0000	0.0001	0.0001
	중앙-왼쪽	3.7371	3.7364	3.7368	0.0007	0.0003	-0.0004
	중앙-오른쪽	3.7371	3.7364	3.7368	0.0007	0.0003	-0.0004
단면4	왼쪽-오른쪽	5.3476	5.3472	5.3468	0.0004	0.0008	0.0004
	중앙-왼쪽	3.6869	3.6867	3.6862	0.0002	0.0007	0.0005
	중앙-오른쪽	3.6869	3.6867	3.6862	0.0002	0.0007	0.0005
단면5	왼쪽-오른쪽	5.3492	5.3495	5.3493	-0.0003	-0.0001	0.0002
	중앙-왼쪽	3.8721	3.8721	3.8717	0.0000	0.0004	0.0004
	중앙-오른쪽	3.8721	3.8721	3.8717	0.0000	0.0004	0.0004
단면6	왼쪽-오른쪽	5.3491	5.3495	5.3495	-0.0004	-0.0004	0.0000
	중앙-왼쪽	3.8406	3.8406	3.8407	0.0000	-0.0001	-0.0001
	중앙-오른쪽	3.8406	3.8406	3.8407	0.0000	-0.0001	-0.0001
단면7	왼쪽-오른쪽	5.3698	5.3700	5.3701	-0.0002	0.0003	-0.0001
	중앙-왼쪽	3.7417	3.7419	3.7421	-0.0002	-0.0004	-0.0002
	중앙-오른쪽	3.7417	3.7419	3.7421	-0.0002	-0.0004	-0.0002



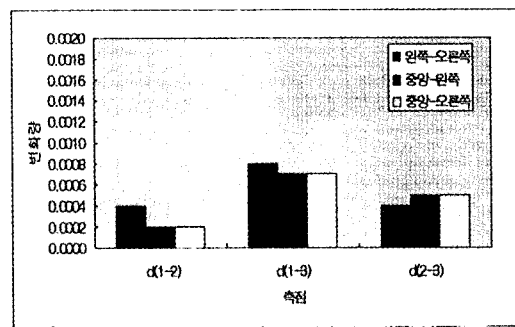
(a)1단면



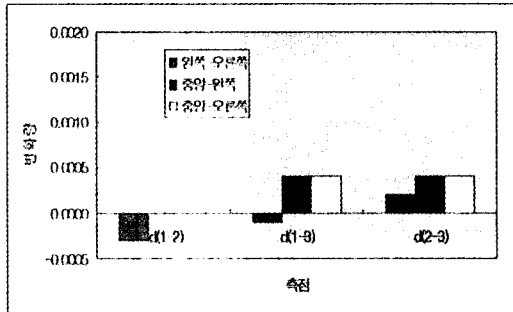
(b)2단면



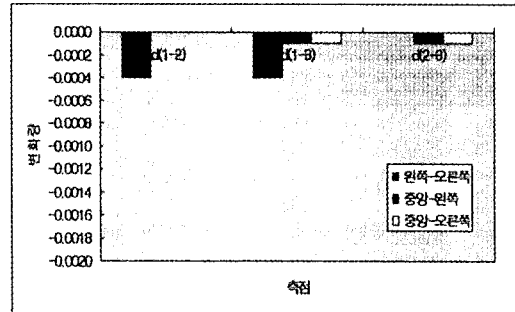
(c)3단면



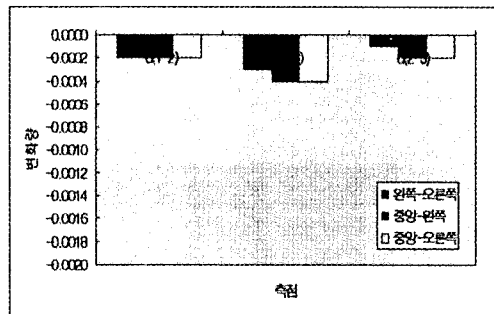
(d)4단면



(e)5단면



(f)6단면



(g)7단면

그림 4. 각 단면별 변화량

보하기 위하여 원점기준점은 터널밖에 3점을 설치한후 정밀기준점측량방법에 의해 터널내 자기기준점으로 점이 설을 실시한 후 해석에 이용하였다. 해석방법은 번들조정법에 의해 해석을 실시한 후 각각의 주기별로 촬영해석을 통해 얻어진 좌표값들에 대해 원점기준점의 변환을 실시하고 이들 값으로부터 각단면에 대한 변형량을 산출하였으며, 3차원측량방법에 의해 각단면별로 계산된 절대좌표와 비교하여 평균표준편차를 산출하였다.

구조물의 변형량에 대해 원하는 정도의 정밀도로 측정이 가능한가의 판단을 위해 해석된 결과에 대한 각 지점의 평균표준편차를 계산하여 본 결과 표 1과 같은 결과를 얻었다.

표 1에서 보는 바와 같이 각 측정점에 대한 평균표준편차의 값이 0.004 mm이하로 측정되었음을 알 수 있다. 보통 터널단면의 내공변위측정기인 인장기의 측정정밀도가 1/100 mm인 경우를 고려할 때 측정정확도가 높음을 알 수 있다. 이들 결과를 토대로 각 단면에 대한 상호지점의 거리를 산출하여 내공변위에 대한 변형여부를 판단하였다.

#### 4.2 구조물 변형량 측정 및 분석

이상의 정밀도에 의해 산출된 좌표값을 이용하여 각 단면별 상호지점간의 거리를 계산하고, 단계별로 산출. 계산된 결과를 거리별로 비교함으로써 각지점간의 시간경과에 따른 변화량을 산출하여 본 결과 다음 표 2와 같다.

표 2에서 보는 바와 같이 각 단면에 대한 상호지점의 변위를 계산하여 본 결과, 그림 4에서 보는 바와 같이 측정점간의 상호변화값에 대한 비교를 통해 왼쪽지점, 오른쪽지점, 중앙지점에서의 변위값이 1 mm이하의 변형이 발생되고 있음을 볼수 있는데 이는 터널보강공사에 대한 변형이 발생되지 않고 있음을 보여주고 있는 것이다. 이들자료의 분석을 통해 각 단면별 각지점간의 상호거리를 단계별로 산출하여 비교함으로써 단면변화에 대한 추정이 가능함을 알수 있다. 이를 토대로 각 구조물의 보수.보강시 특정부위 및 방향에 대해 필요적절히 대책을 수립할 수 있음이 판단되었다.

이러한 방법을 이용하여 구조물의 중요지점에 대한 변형유무를 확인하고 모니터링을 하기위해서는 주기적인 측정과 많은 측정점이 필요로하는데 이의 방법으로 근거리 사진측량방법에 의한 해석이 적합한 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 터널단면별 상호지점간의 변위값을 결정하여 비교함으로써 단면변화에 대한 정확한 변형유무를 판단할 수 있었다.
2. 구조물의 변형량 산출에 대한 측정방법 및 신뢰성 있는 정도의 변형량 측정결과를 산출할 수 있었다.
3. 이를 토대로 근거리사진측량방법에 의한 시간경과에 따른 구조물 변형유무에 대한 확인 자료와 구조물 변형측정 및 유지관리에 활용할 수 있는 자료추출방법을 제시할 수 있었다.

## 참고문헌

1. 강준목 "공선조건에 의한 구조물의 기하학적 변형해석에 관한 연구," 한국측지학회, 제4권제2호, 1986, pp.77-87
2. 유복목, 조기성, "번들조정법에 의한 지상시설물 경사면 해석의 정확도향상에 관한 연구," 한국측지학회, 제7권제1호, 1989, pp.59-66
3. 이진디, "다중근점사진측량에 의한 구조물 전면의 3차원 해석," 충남대학교 박사학위, 1992
4. 土木工事の計測と實際, Tokoyo Kenkyou Co., 1991
5. 日本寫眞測量學會編, "寫眞による3次元測定", 共立出版
6. Ed. Dauphin & Kennert Torlegard, "Measurement of Displacement Using the Time-Parallax Method," Congress of the International Society for Photogrammetry HELSINKY, 1976
7. Kam W. Wong, Alan P. Vonderohe, "Photogrammetric Measurement of Displacements Around Tunnels in Sandy Soils," Photogrammetric Engineering, 1978, pp.373-388
8. S. A. Veress, C. Jackson & J.N. Hazopoulos, "Analysis of Monitorion the Gabion Wall by Inclinator and Photogrammetry," ASCE Surveying Engineering, 1979, pp. 216-237
9. J. Risager Christensen, "observation of Displacement of a Bridge Loaded to Failure Using Analytical Photogrammetry," 14th Congress of the International Society of Photogrammetry Hamburg Commission, 1980, pp. 129-136
10. Hakim B. Papo, "Deformation Analysis by Close-Range Photogrammetry," PE & RS, Vol.51, No.10, 1989, pp. 1561-1567