

광탄성 기법을 이용한 얇은 기초 하중을 받는 입상체의 응력 및 변위장 측정

변보현* · 정영훈**

Byeon, Bo-Hyeon*, Jung, Young-Hoon**

Measurement of Stress and Displacement Fields in Particle Assembly subjected to Shallow Foundation Loading via Photoelasticity Technique

ABSTRACT

The purpose of this paper is to present an photoelasticity technique for measuring the displacement and stress distribution in particle assembly subjected to shallow foundation loading. Photoelastic measurement technique was employed to visualize the force transmission of a particle assembly. A model assembly bounded by a steel frame was built by stacking bi-dimensional circular particles made of polycarbonate elastomer. Each particle was coated by a thin photoelastic sheet so that the force transmission represented by bright light stripes can be visualized. In a contacted particle, both magnitude and orientation of principal stress difference can also be measured via the photoelasticity technique. The different distributions of the contact stresses at the initial loading and near the failure were quantitatively compared. The photoelastic patterns and displacement fields observed in the pre-failure state disappears immediately after the buckling of confined force chains.

Key words : Photoelasticity, Contact forces, Displacement, Force chains, Buckling

초 록

본 논문의 목적은 얇은 기초 하중을 받는 입상체 내의 응력의 분포와 변위를 측정하는 광탄성 기법의 적용 방안을 제시하는 데 있다. 광탄성 측정 기법은 입자 집합체의 힘 전달을 시각화하기 위해 사용 되었다. 실내 모형시험은 스틸 프레임으로 경계면을 만들고 폴리카보네이트 탄성중합체로 만들어진 이차원 원형 입자들을 적층하여 구성하였다. 광탄성 시트를 원형 입자에 코팅함으로써 힘 전달의 패턴을 밝은 빛의 줄무늬 형태로 확인할 수 있었고, 광탄성 측정 기법을 통해 접촉되어 있는 입자들에서의 주 응력차의 크기, 방향 또한 측정 할 수 있었다. 변위장은 디지털 이미징 해석 기법을 사용하여 측정 하였다. 하중 재하 초기 상태와 파괴 근처의 상태에서 서로 다른 접촉력의 분포를 정량적으로 분석하였다. 파괴 이전 단계에서 관측된 광탄성 패턴과 변위장은 접촉력 사슬의 좌굴 발생 이후 즉시 사라짐을 확인하였다.

검색어 : 광탄성, 접촉력, 변위, 힘 연결고리, 좌굴

1. 서론

얇은 기초 하중에 받는 지반을 해석하는 경우, 파괴 이전 상태에서는 연속체 탄성이론을 이용하여 하중-변위 관계를 예측하고 파괴 이후에는 소성 한계 이론에 근거하여 지반 안정성을 평가하기 위한 지지력(bearing capacity)을 산정하는 것이 일반적이다. 하지만 이러한 접근 방법은 금속과 같이 연속체로 간주할 수 있는 고체 재료에 대해서는 적절한 방법일 수 있지만, 입상체로 이루어진 지반

* 경희대학교 사회기반시스템공학과 대학원생 (bohyun85@khu.ac.kr)

** 정회원·교신저자·경희대학교 사회기반시스템공학과 부교수 (Corresponding Author·Kyung Hee University·jyounghoon@khu.ac.kr)

Received May 27, 2013/ revised July 4, 2013/ accepted July 10, 2013

재료의 하중-변위 관계를 정밀하게 예측하기에는 부적절한 방법이다. 일례로 다양한 입경의 토질 재료로 다져진 성토지반 상에서 실시되는 평판 재하 시험을 생각해 보자. 파괴 하중에 도달하기 훨씬 이전의 초기 하중에서도 평판 근처의 지반은 이미 국부적으로 파괴가 일어날 것이고 이는 초기의 비선형적인 하중-변위 관계로 나타날 것이다. 이후 재하가 진행되더라도 파괴 전후의 하중-변위 곡선에서 뚜렷한 기울기의 차이를 찾기 힘든 것이 일반적이는데, 이러한 문제점은 지반 재료를 국부적인 파괴가 연속적으로 일어나는 입상체 재료로 이해한다면 해결될 수 있는 사항이다. 따라서 간단한 얇은 기초 하중에 대해서도 지반을 입상체로 구성하고 실험한다면 소성 한계 이론에 근간하여 가정된 기존의 지반 거동과 차이를 확인해 볼 수 있다.

알루미늄봉 또는 탄소봉을 이용하여 입상체 지반을 조성하여 기초의 극한지지력을 평가하거나(최명진, 1992), 매설관 상재하중의 영향(문창열과 김희동, 2004), 또는 디지털 이미지 해석 기법을 이용하여 옹벽 배면 지반의 변형(김성수 등, 2011)을 분석하는 연구는 이미 상당한 진전을 이루었다. 이러한 기존의 연구는 입자의 이동을 관찰하여 입상체 지반의 변형 거동을 확인할 수 있다는 점에서 중요하지만, 내부 응력의 관찰이 불가능하다는 점이 시험의 한계이다. 대부분의 지반공학적인 문제가 응력을 설계 변수로 사용하고 있으므로, 변위 측정만이 가능한 입상체 모형 지반에 대한 실험은 분명 제한적인 연구 결과만을 도출할 수 있다.

입상체 모형 지반의 응력 전달 패턴을 관찰하기 위해서 광탄성 기법(photoelasticity technique)을 도입할 수 있다. 광탄성이란 탄성체가 외력에 의해서 변형하면 광학적인 복굴절을 일으키며 줄무늬 패턴이 나타나는 현상을 의미한다. 광탄성 재료의 줄무늬 패턴색은 재료가 받고 있는 응력과 연관되며 이 특성을 이용하여 재료의 응력 상태를 관찰할 수 있다. 광탄성 원리를 이용하여 입상체를 구성하면 입자의 한 점이 아닌 대상 영역 전체의 응력 분포와 그 변화 양상을 한 눈에 파악할 수 있다는 장점이 있다. 광탄성 원리가 지반공학에 처음 도입되었을 때, 원판 모양의 광탄성 디스크를 이용하여 토립자를 표현하였다(Drescher and de Josselin de Jong, 1972; Rossmannith and Shukla, 1982). 광탄성 디스크는 입상체의 힘 전달 연결고리에 대한 연구를 위해 최근 다시 사용되었다(Da Silva and Rajchenback, 2000; Howell 등, 1999a, 1999b). 토립자를 표현하기 위해 다양한 재료들이 사용되었는데, 그 예로 부서진 유리조각(Allersma, 1982; Dantu, 1957; Drescher, 1976; Dyer, 1985; Wakabayashi, 1958) 또는 유리구슬(Lesniewska and Sklodowski 2005)을 사용한 예가 있다. 터널 근처의 깊은 기초 주변부에서 발생한 응력 분포의 해석을 위해 광탄성 기법이 적용되기도 하였다(Standing and Leung, 2006). 국내에서는 지반 소실 혼합재의 용해과정 모니터링을 위해 광탄성 기법이 적용된

사례(Tuong, 2009)가 있다. 지반 내 응력 전달 패턴 해석과 토목섬유-흙 경계면 힘 전달 측정을 위해 광탄성 원리를 적용하는 연구가 제안된 바 있다(변보현 등, 2012; 정영훈 등 2012; Jung et al. 2012).

본 논문에서는 빛의 반사를 이용하는 광탄성 코팅 재료를 활용하여 토립자를 제작하고 이를 이용하여 입상체 지반을 구성한 후 얇은 기초 하중을 가하였다. 기존의 연구와 동일하게 힘의 전달 과정을 관찰함과 동시에 광탄성 측정 이론을 이용하여 입자에 가해지는 응력의 크기를 정량적으로 평가하였다. 또한 디지털 이미지 해석 기법을 이용하여 입자 변위를 측정하여 얇은 기초 재하 중 입상체의 이동을 정량적으로 평가하였다.

2. 광탄성 측정 원리 및 방법

2.1 광탄성 측정의 원리

광탄성 기법은 몇 가지 투명한 재료의 독특한 광-물리적 특성을 이용하는 기법이다. 응력을 받는 광탄성 재료에 편광된 빛(polarized light)이 통과하면 빛은 서로 수직인 2개의 성분으로 나뉜다. Fig. 1은 각기 다른 속도를 가지고 주면을 따라 진행하는 빛을 보여준다.

공기나 진공상태에서 빛은 3×10^{10} cm/sec의 속도(C)로 전파된다. 다른 매질 안에서 빛의 속도(V)는 달라지며 C와 V의 비, 즉 C/V를 굴절률(index of refraction, n)이라고 한다. 각각의 매질들은 자신만의 고유한 굴절률을 가지고 있으며 이 굴절률은 빛의 편광 평면이나 진행 방향에 상관없이 변함없다. 그러나 결정질 물체(crystal material)의 굴절률은 방향에 따라 달라진다. 광탄성 재료는 응력을 받지 않는 조건에서 광학적 등방성을 띄지만 응력을 받게 되면 이방성을 띄게 된다.

두께 t 를 가지는 광탄성 재료에서 발생한 두 개의 주변형틀을 각각 ϵ_1 와 ϵ_2 라 하고, 주변형틀 방향으로 진동하는 빛의 속도를

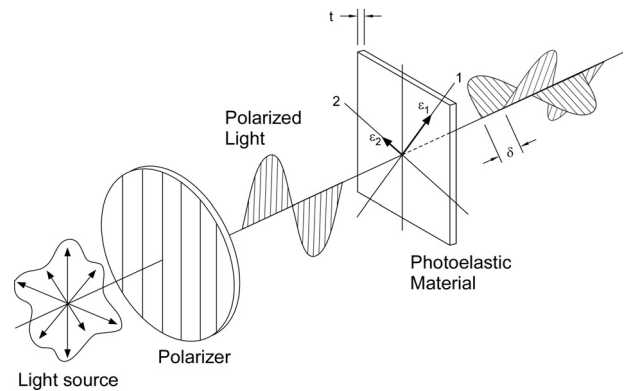


Fig. 1. Polarization of Light Passing Through Photoelastic Material

각각 V_1 와 V_2 이라고 하자. 주변형률 방향으로 진행하는 두 개의 편광된 광파(light wave)가 판을 통과하는데 걸리는 시간은 각각 t/V_1 와 t/V_2 이며, Fig. 1에 보인 광파 간의 상대 지연(relative retardation, δ)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta = C \left(\frac{t}{V_1} - \frac{t}{V_2} \right) = t \left(\frac{C}{V_1} - \frac{C}{V_2} \right) = t(n_1 - n_2) \quad (1)$$

여기서 $n_1 = C/V_1$ 와 $n_2 = C/V_2$ 는 각각 주변형률 방향의 굴절률이다.

1853년 Maxwell에 의해 굴절률의 차이가 주변형률의 차이와 비례 관계가 있음이 밝혀졌다. 즉,

$$(n_1 - n_2) = K(\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (2)$$

Eq. (2)에서 K 는 변형률-광학 계수(strain-optical coefficient)이며 매질의 광학-물리적 특성을 나타내는 값이다. Eq. (2)를 Eq. (1)에 대입하여 정리하면 Eq. (3)과 같이 상대 지연을 주변형률의 차이와 연관시킬 수 있다.

$$\delta = tK(\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (3)$$

본 연구에서 사용한 반사형 광탄성 기법에서는 Fig. 2와 같이 두께가 t 인 광탄성 재료의 투명판을 한번 통과한 후 다시 반사되어 나오면서 광탄성 투명판을 한 번 더 통과하게 되므로 Eq. (4)와 같이 두께를 $2t$ 로 수정해야 한다.

$$\delta = 2tK(\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (4)$$

따라서 반사형 광탄성 기법에서 주변형률 차는 상대 지연 값을

측정한 후 Eq. (5)를 이용하여 측정할 수 있다.

$$\epsilon_1 - \epsilon_2 = \frac{\delta}{2tK} \quad (5)$$

2.2 반사형 광탄성 측정 방법

반사형 광탄성 기법을 활용하기 위해 Fig. 3에 제시한 Vishay사의 반사형 편광기, LF/Z-2 Reflective polariscope 장비를 사용하였다 (Vishay, 2012a). 광탄성재료에 가해지는 응력은 타디 보정법(Dally and Riley, 1967)으로 구한 등색프린지 차수(isochromatic fringe order, N)를 이용하여 측정할 수 있다. 타디 보정법에서는 암시야 배열의 원형 편광 상태에서 시편에 하중을 가한 후 편광자(polarizer)가 주응력 방향과 일치하거나 또는 평행이 되도록 검광자(analyzer)를 회전시키고, 프린지가 이동하여 광강도가 영(zero)이 되면 등색프린지 차수 N 을 얻을 수 있다(백태현과 김명수, 2004). 반사형 편광기에 부착된 보상기(compensator)를 이용하면 등색프린지 차수 N 을 정밀하게 측정할 수 있다 (Vishay, 2012b). N 값을 측정하면 Eq. (6)을 통해 상대 지연 δ 를 구할 수 있다.

$$\delta = N\lambda \quad (6)$$

여기서 λ 는 빛의 파장(wave length)으로 가시광선 영역(380nm ~ 770nm)의 중간 값인 575nm가 선택되는데, 이는 $\lambda = 575\text{nm}$ 는 백색광 파장의 크기이며 일곱 가지 가시광선이 혼합되면 백색광이 되기 때문이다. Eq. (6)을 Eq. (5)에 대입하면 주변형률차, $\epsilon_1 - \epsilon_2$ 를 구할 수 있으며, Hooke의 법칙을 이용하여 주응력차, $\sigma_1 - \sigma_2$ 를 구할 수 있다.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{E_s}{1 + \nu_s} (\epsilon_1 - \epsilon_2) = \frac{E_s}{1 + \nu_s} N \frac{\lambda}{2tK} = \frac{E_s}{1 + \nu_s} Nf \quad (7)$$

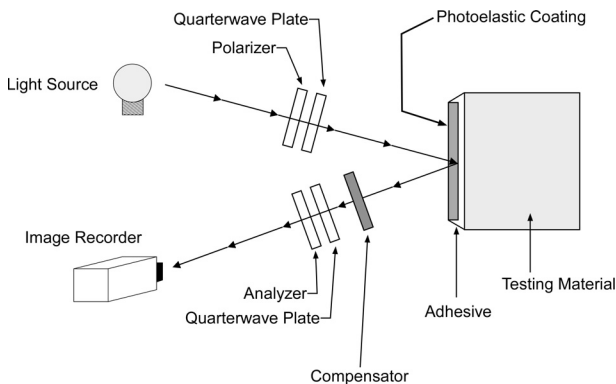


Fig. 2. Schematic Representation of Reflection Polariscope



Fig. 3. LF/Z-2 Reflective Polariscope

여기서 E_s 와 ν_s 는 광탄성 재료의 영 탄성계수(Young's modulus)와 포아송비이며, f 는 광탄성 재료의 프린지값(fringe value, f)이다.

3. 광탄성 실내 모형 시험

3.1 토립자 시편 제작

토립자 모형 시편은 폴리카보네이트(polycarbonate, PC) 재료를 가공하여 원주로 제작하였다. 여러 형태에 대해 시험한 결과 최적의 시편 크기는 직경 20mm와 높이 15mm임을 찾았다. 원주의 한 쪽 표면에 두께 0.5mm의 반사형 광탄성 재료 시트를 부착하였다. Fig. 4는 PC 원주에 광탄성 시트를 부착하여 제작한 시편을 보여준

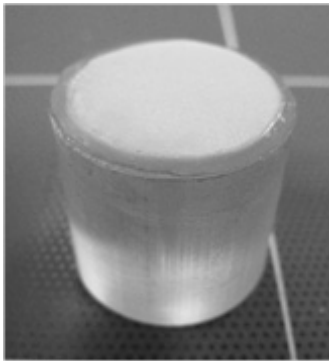


Fig. 4. A Particle Specimen Coated by Photoelastic Sheet

다. PC의 탄성계수는 일반적으로 1.6~2.4 GPa의 범위이며 포아송비는 0.38으로 알려져 있고, 본 연구에서는 평균값인 2.0GPa를 탄성계수로 정하여 Eq. (7)을 사용하였다. 광탄성 재료의 광학적-물리적 성질은 Table 1에 정리하였다. 광탄성 재료는 탄성 범위에서 재료가 겪을 변형을 또는 응력 수준을 고려하여 광탄성 물질의 종류와 판의 두께를 선택해야 한다(Vishay, 2012c).

제작된 시편의 적합성을 확인하기 위해 단일 입자에 대해 압축 실험을 실시하였다. Fig. 5는 단계적으로 671.2N까지 하중을 재하할 때 입자 내부에서 발생하는 응력의 변화 양상을 반사형 편광기를 이용하여 촬영한 사진을 보여준다. 입자 내부에서 응력은 접촉면에서 집중되기 시작되며 점차 중심으로 전달된다. 재하와 재하 과정에서 동일 하중 크기에서 일치하는 색 패턴을 확인하였고, 이로부터 제작된 시편은 가해진 하중 범위에서 탄성 성질을 유지하고 있으며 반복적으로 사용하기에 적합함을 확인하였다.

3.2 시험 방법

대량으로 시편을 제작하고 1m 폭의 철제 프레임에 원주 시편을 쌓아 Fig. 6과 같이 입상체 지반을 모사하였다. Fig. 6에 표시된 L1~L4와 R1~R4의 위치에 있는 입자의 광탄성 반응을 반사형 편광기를 통해 관찰하여 입자 내부의 응력 변화를 시험 중 측정하였다. 입상체 모형 지반 위에 폭 10cm의 모형 기초를 이용하여 하중을 단계적으로 가하였다. 하중의 크기는 51.6, 103.0, 181.5, 207.0, 232.5, 그리고 284.0 N이다. 모형 기초 상부면에 다이얼 게이지를 부착하여 재하 중 모형 기초의 침하량을 측정하였다.

Table 1. Physical Properties of Photoelastic Material

Strain Optical Coefficient K	Elongation (%)	Elastic Modulus E(GPa)	Poisson's Ratio ν	Thickness		Fringe Value f
				mm	Tolerance	
0.15	5	2.5	0.38	0.5	±0.06	3790

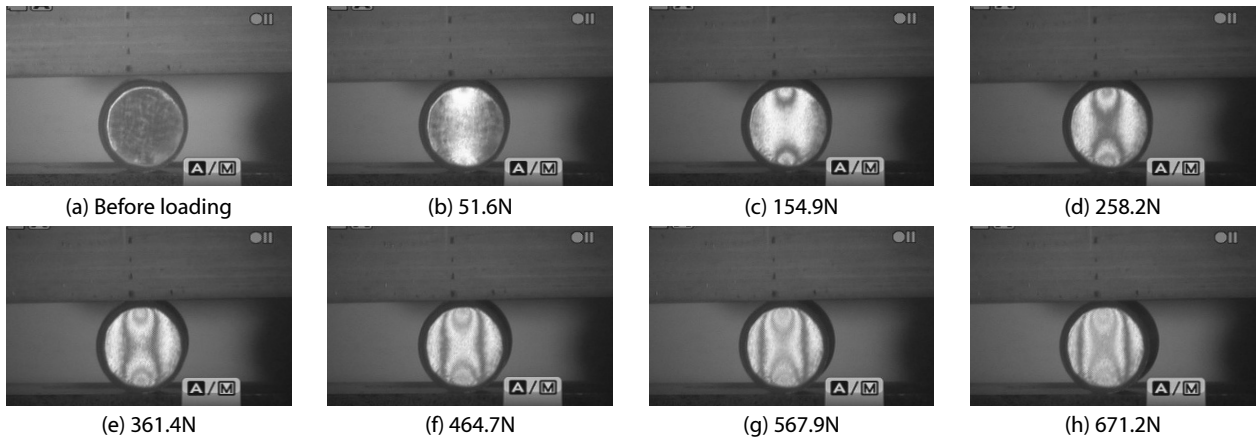


Fig. 5. Change in Stress Pattern During Uniaxial Loading

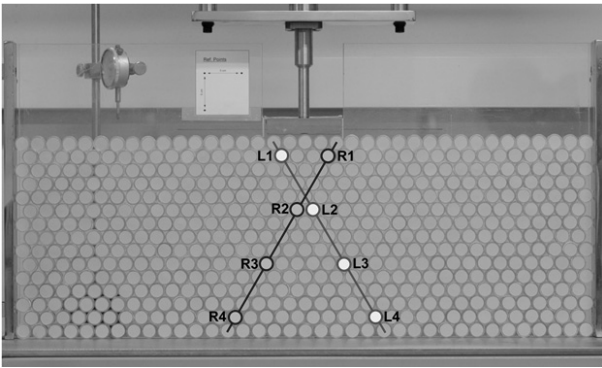


Fig. 6. Model Test of Particle Assembly Subjected to Shallow Foundation Loading

3.3 시험 결과 및 분석

Fig. 7은 하중단계 동안 쌓여진 입자에서 생긴 광탄성 패턴 이미지들을 연속적으로 보여주고 있다. Fig. 7을 살펴보면 기초 아래에 썩기 모양으로 형성되어 아래로 이동하는 입자군을 관찰할 수 있는데, 입자군 내부의 입자에서는 뚜렷한 밝기의 응력 증가 패턴을 확인하기 어렵다. 단계 2와 3에서 하중 재하가 진행되는 동안 썩기 모양의 입자군 아래 부분에서 입자 접촉력의 연결고리가 사선 형태의 밝은 입자 패턴으로 관찰된다. 단계 4에서는 모형 기초의 우측 부분에 사선 형태의 패턴이 추가로 발생함을 확인할 수 있다. 단계 5에서는 이전 단계에서 형성된 사선 패턴의 밝기가 더욱 뚜렷해진다. 마지막 재하 단계인 단계 6에서는 하중을 지탱하던 사선 형태의 입자 접촉력 연결 고리가 순간적으로 무너지면서

기초의 우측으로 전반적인 입자의 이동이 관측된다.

이러한 형태의 입자 이동과 응력 분포의 변화 양상은 얇은 기초 하중을 받는 지반의 거동에 대한 일반적인 이해, 즉 초기 탄성 거동 이후 항복 응력에 도달하면 완성 소성 상태에 이르는 과정과는 차이가 있다. Fig. 7의 과정을 근거로 지반 거동을 설명하면 다음과 같다. 재하 초기에는 재하관 아래의 영역에서 상대적으로 낮은 구속압으로 인해 전단 접촉력을 극복하고 쉽게 입자가 이동할 수 있으며, 이는 썩기 모양 입자군의 이동으로 나타난다. 썩기 입자군의 이동이 끝나면 본격적으로 입자 접촉에 의한 하중의 전달이 이루어진다. 입자 접촉은 매우 일부의 입자에 대해서만 일어나며, Fig. 7과 같이 사선 형태로 접촉력 사슬(contact force chain)이 형성된다. 단계 2에서 단계 5까지 접촉력 사슬의 밝기, 즉 응력의 크기를 살펴보면 모형 지반 바닥부에서 가까운 입자에서 가장 큰 응력(가장 큰 밝기)이 발생하고 기초 바닥면 방향으로 갈수록 응력의 크기가 작아져서 점차 밝기가 어두워진다. 이는 모형 지반의 하부로 갈수록 입자 구속력이 커지고 이로 인해 하중을 전달하는 접촉력 사슬이 주위 입자들의 구속으로 인해 안정적으로 지탱할 수 있음을 보여준다. 접촉력 사슬은 단계 2와 3에서는 썩기 입자군의 양편에 하나씩 형성되지만, 단계 4와 5에서는 입자군 우측에 한 개의 접촉력 사슬이 추가로 발생함을 관찰할 수 있다. 하지만 단계 6이 되면 접촉력 사슬을 이루고 있던 밝은 색의 입자는 모두 사라지고 썩기 입자군의 우측으로 입자가 급격하게 이동하며 파괴에 이르게 된다. 즉 파괴 이전에 탄성 에너지로 입자에 축적된 에너지는 파괴 시점에서 급격한 소성 변위와 함께 저장된 탄성에너지가 소실된다.

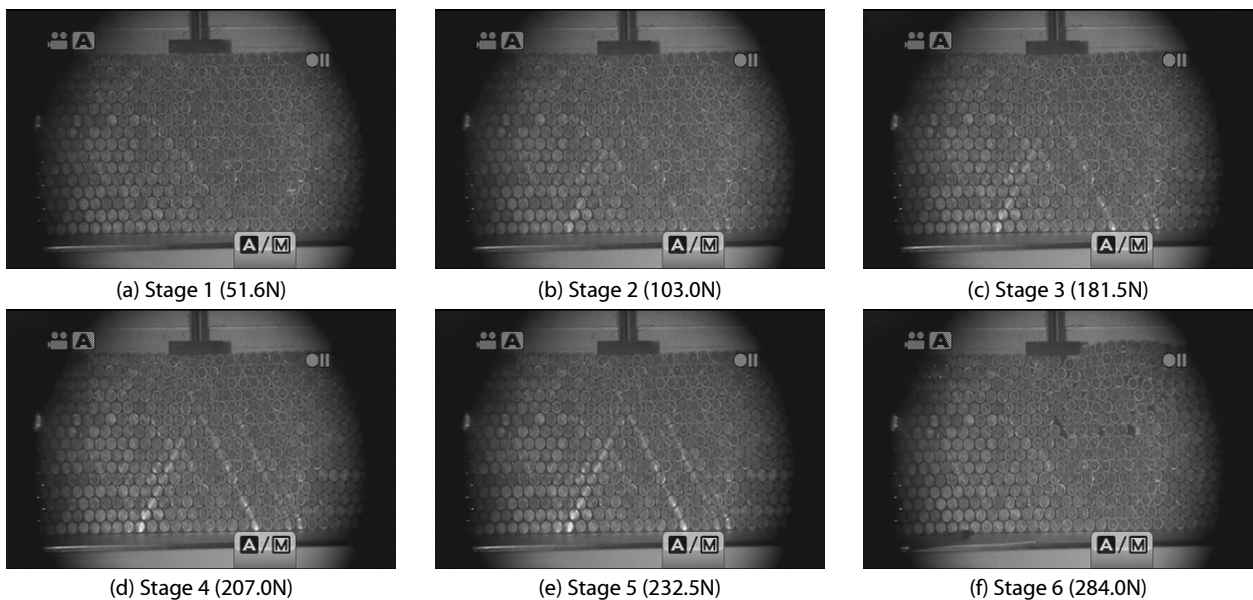


Fig. 7. Particle Stress Distribution During Loading

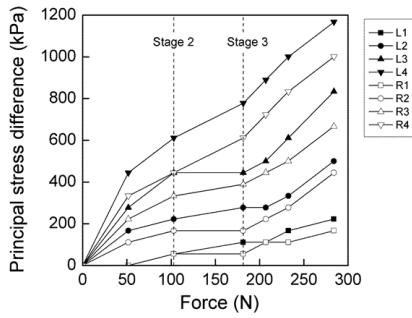
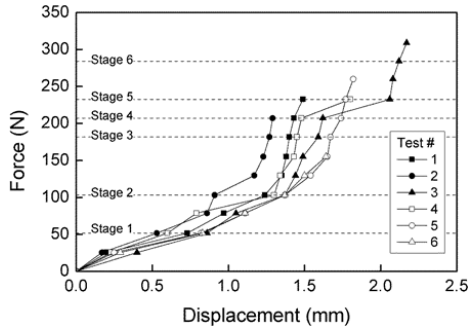
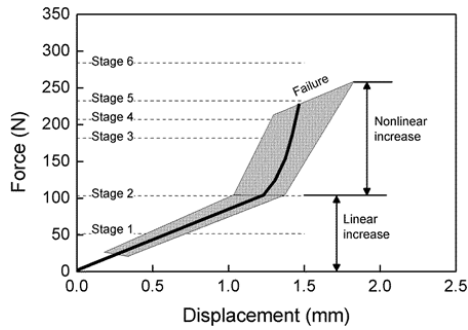


Fig. 8. Variation of Principal Stress Difference at Observation Points



(a)



(b)

Fig. 9. Force-Displacement Relationship During Loading

Fig. 8은 광탄성 측정 기법을 이용하여 재하 하중 단계별 대표 입자에서 관측된 주응력차 $\sigma_1 - \sigma_2$ 의 변화를 보여준다. 대표 입자의 위치는 앞서 Fig. 6에 표시하였다. Fig. 8에서 알 수 있듯이 주응력차의 크기는 L4와 R4 위치, 즉 입상체의 가장 아래쪽에 위치한 관측점 위치에서 가장 큰 값을 가지는데, 이는 이미 Fig. 9에서 아래쪽 입자가 가장 밝다는 사실로 확인할 수 있다. 재하판에서 가장 가까운 L1과 R1에서는 재하 중 가장 작은 주응력차가 발생하였고, 재하 하중과 주응력차는 선형의 관계를 가진다. 입상체 모형 지반의 중간 부분에 위치한 L2와 R2 그리고 L3와 R3의 경우, 하중단계 2와 3에서 주응력차의 증가가 거의 없다가 하중단계 3 이후에 다시 증가하는 양상을 보인다.

Fig. 9(a)는 재하판 위치에서 측정된 변위와 재하 하중의 관계 곡선을 보여준다. Fig. 6과 같이 동일하게 실험 조건을 구성하여 6번의 실험을 반복했지만, 6번의 실험에서 재하 하중-변위간의 관계는 항상 일정하지 않았으며 하중-변위 곡선의 분포를 Fig. 9(b)에서 회색으로 표시하였고, 분포의 대략적인 양상을 굵은 선으로 표시하였다. Fig. 9(b)에서 도시한 바와 같이 하중-변위 곡선은 재하 초기에는 선형 관계를 보이다가 일정 값 이후에 곡선의 기울기가 증가하는 비선형적인 관계를 보인다. 이러한 패턴은 곡선의 기울기가 파괴 시까지 감소하는 일반적인 하중-변위 관계와는 다르다. 또한 Fig. 9의 하중-변위 관계에서는 하중 단계 2 이후에 하중이 비선형적으로 증가하는 반면, Fig. 8에서 재하 중 입자에 발생한 주응력차의 변화는 하중 단계 2와 3 사이에서 증가가 지연되고 있다. 즉 재하 하중의 변화가 미시적인 입자 응력에 즉각적인 영향을 주지 않을 수 있음을 알 수 있다. Fig. 7의 입자 응력의 반응을 다시 살펴보면, 재하 초기에 재하 하중이 전체 입상체 지반에 균질하게 전달되는 것이 아니며, 재하판 하부의 국부적인 입자군이 이동하고 입자군을 지탱하는 소수의 접촉력 사슬이 생성됨을 확인할 수 있다. 즉 선형의 하중-재하 곡선이 관찰된다고 하며 지반의 재료 특성이 선형 탄성 이론을 따른다고 볼 수 없으며, 연속체 관점으로는 설명하기 힘든 접촉력 사슬(contact force chain)을 통해 지반이 재하 하중에 대해 저항한다.

Fig. 9의 하중-변위 곡선이 일반적으로 기울기가 감소하는 곡선의 형태와 다른 이유는 본 시험 조건이 매우 제한적인 경우에 대해 이루어졌기 때문이다. 입상체를 구속하는 프레임의 크기가 입자 및 기초의 크기에 비해 상대적으로 작으며 이는 실제 조건과 다른 구속 조건을 야기시킨다. 과도한 구속 조건은 입상체의 파괴가 진전되기 전에는 입자에 등방압 형태의 하중이 지배적으로 전달되며 이로 인해 입자 접촉점에서 접촉력-접촉변위의 관계는 접촉면에 수직인 접촉력에 의해 지배된다. 따라서 지수 함수 형태의 Hertz 이론이 원형 입자의 접촉 거동을 결정하게 되고 이는 거시적인 하중-변위 곡선 역시 기울기가 증가하는 지수함수 형태로 나타내게 함을 간접적으로 알 수 있다.

4. 이미지 해석 시험

4.1 시험 방법과 이미지 촬영

앞서 설명한 실내 모형 재하 시험 중에 이미지 해석(digital image analysis)을 통한 변위 측정 시험을 수행하였다. 고해상도 디지털 카메라를 사용하여 모형 기초에서 전달되는 하중에 의해 변화된 입자들의 움직임을 촬영하여 각 재하 단계별 발생한 변위를 측정하였다. 변위를 계산하기 위해 먼저 재하 전(변형 전)과 하중 단계 1(변형 후)의 이미지를 비교하여 변위 증분량을 산출한다.

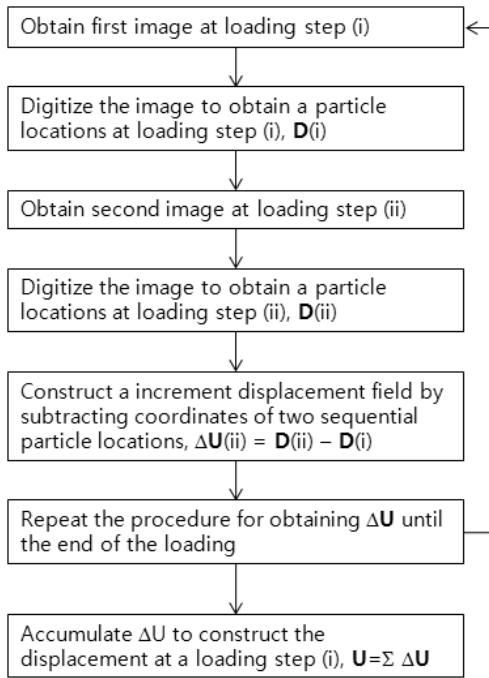


Fig. 10. Flowchart for Image Analysis Procedure

그 후 다음 단계인 하중단계 2(변형 후)를 재하한 후 그 이미지를 하중 단계 1(변형 전)의 이미지와 비교하여 다음 단계의 변위 증분량을 얻을 수 있다. 이러한 과정을 통해 얻은 변위 증가량을 누적하면 해당 재하 단계에서의 변위량을 구할 수 있다.

입자의 이동을 관찰하기 위해 시험 전 각각의 입자 시편 중앙부에 마커로 기준점을 표시한 후 이미지를 촬영하였다. 재하 및 촬영이

끝난 후 각 하중 단계 별 입상체의 이미지를 디지털라이저(digitizer) 프로그램에서 불러와 모든 입자의 위치를 수치화하였다. 변위 발생 분포와 그 크기를 확인하기 위하여 수치화된 변위 발생량을 등고선으로 도식화하였다. 디지털 이미지 측정 및 해석 절차는 Fig. 10에 정리하였다.

4.2 이미지 해석 시험 결과 및 분석

Fig. 11은 각 하중 단계에서 측정된 연직방향 변위량의 분포를 보여준다. Fig. 11(b), 11(d), 11(f)와 11(g)의 변위량 분포는 앞서 재하 하중-변위 관계에서 선정한 재하 단계 1, 2, 3, 6에 각각 해당한다. Fig. 11에서 연직 변위가 하향이면 붉은 색으로 표시하였고, 상향이면 파란 색으로 표시하였다. Fig. 11(b)와 11(c)를 살펴보면 하중 초기 단계에서는 기초 왼쪽 저면에서 사선으로 오른쪽 아랫방향까지 연직 변위가 먼저 뚜렷하게 발생됨을 알 수 있다. 하중의 단계가 높아질수록 먼저 변위가 발생되었던 위치에서는 그 크기가 점차 커지며 이와 함께 원편 상부의 입자들이 조금 부풀어 오르는 양상을 확인할 수 있다. Fig. 11(b), 11(c)와 11(d)의 과정, 즉 재하 단계 1에서 단계 2까지의 연직 분포 양상은 기초 하부 썩기 모양의 영역의 이동이 서로 유사하다. 하지만 재하 단계 2와 3, 즉 Fig. 11(d)와 11(f)를 비교해보면 11(f)에서는 연직방향의 입자 이동 영역이 좀더 뚜렷해지고 전단 중 팽창으로 인한 기초 좌우측 입자의 연직 상향 이동이 본격화된다. 이는 기초면 하단에서 형성된 썩기 영역이 연직방향으로 이동하면서 발생한 사선 형태의 전단면 근처의 체적이 팽창하기 때문이다.

앞서 Fig. 8에서 재하 단계 2와 3의 과정 중 입자 내부 응력

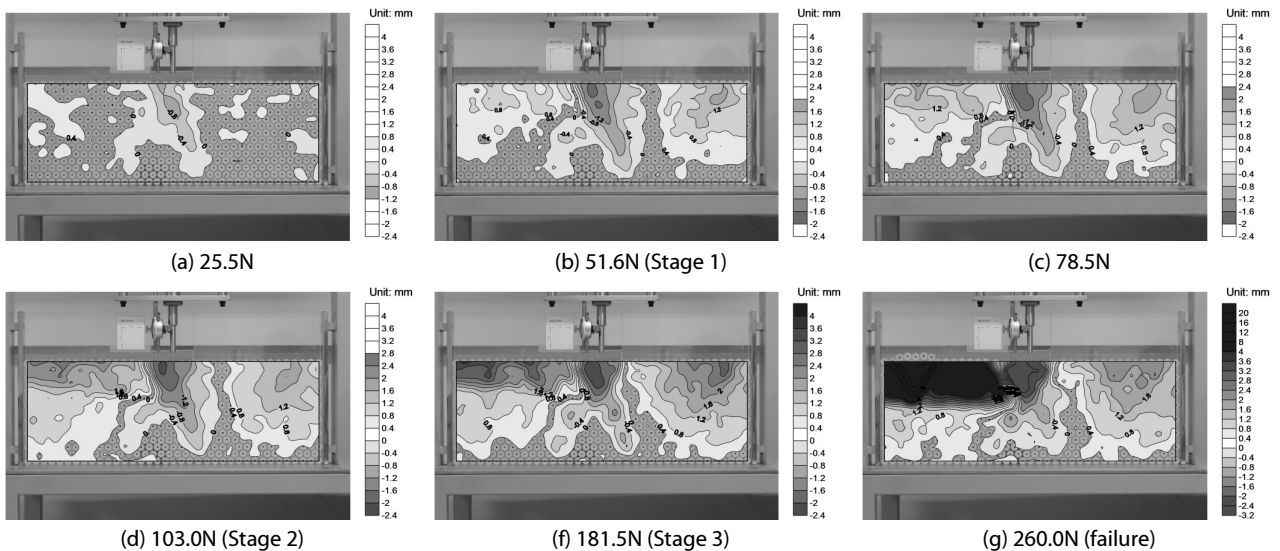


Fig. 11. Vertical Displacement Field Obtained DIA During Loading

증가가 지연됨을 밝혔는데, 이는 Fig. 10에서 관찰된 입자의 이동 양상과도 연관시켜볼 수 있다. 즉 Fig. 11(d)까지는 입상체가 초기 재하 하중을 받으면서 썪기 모양의 입자군 하부에 힘 전달 사슬을 구성하는 과정이다. 이 과정 동안 기초 하중은 지속적으로 증가한다. Fig. 11(d)에서 11(f)의 과정, 즉 재하 단계 2와 3의 과정에서는 더 이상 힘 전달 사슬이 기초 하중을 견디지 못하고 좌굴되며, 입자 내부 응력의 증가 역시 지연된다. 이후 Fig. 11(f)에서 11(g)의 과정, 즉 재하 단계 3에서 파괴까지 이르는 동안 좌굴된 힘 전달 사슬은 더 이상 기초 하중을 견디지 못하지만, 기초 좌우측 입자의 상향 이동을 위해 기초 하중은 전반 파괴가 일어날 때까지 다시 지속적으로 증가한다.

5. 결론

본 논문에서는 광탄성 기법을 활용한 실내 모형 시험을 통하여 얇은 기초 하중을 받는 입상체 지반의 응력 분포의 변화를 측정하였다. 또한 디지털 이미지 해석을 통해 입상체 지반의 변위장을 구성하고 이를 입자 응력의 분포 변화와 비교하였다. 일련의 분석을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 얇은 기초의 힘을 받는 지반의 지지거동을 이해하기 위해 광탄성 측정 기법을 이용하여 입상체의 응력 전달 과정을 측정하였다. 폴리카보네이트 재질의 원주를 이상적인 토립자로 가정하고 이를 규칙적인 패턴으로 쌓아서 입상체 지반을 구성하였다. 각 입자의 단면에 반사형 광탄성 코팅 재료를 부착하였고 편광된 빛을 쏘아 반사되는 빛의 편광 성질을 분석하여 입자 접촉으로 인한 힘의 전달과정을 가시화시키고 입자 응력을 측정하였다.
- (2) 광탄성 이미지 분석을 통해 기초의 모서리 부분에 사선 방향의 힘 전달 구조가 발생함을 가시적으로 확인하였다. 재하 하중이 커질수록 모서리 부분으로 연결되는 힘 전달 구조가 뚜렷해지며 일정 크기 이상의 재하 하중이 발생하면 추가의 힘 전달 구조가 생성됨을 알 수 있다. 힘을 전달하는 사선 구조의 입자에 대해 입자 축응력을 측정된 결과, 입자에 가해지는 힘은 재하 하중의 크기와 선형적 관계를 가지지 않음을 확인하였다. 동일한 입경의 입상체 지반에서 상부에서 전해지는 하중은 하중 작용 범위의 모든 입자들이 분담하는 것이 아니라 모형 얇은 기초 양 끝단에서 사선방향으로 교차하며 아래로 이어지는 일련의 힘 전달 구조, 즉 입자 간의 힘 전달 사슬에 의해 외부 하중을 지지한다.
- (3) 광탄성 시험과 더불어 이미지 해석을 수행하여 단계별 하중에 따른 입자의 움직임, 즉 변위를 측정하기 위해 재하 전과 재하 후의 이미지를 촬영한 뒤 그 이미지들의 변화를 수치화하여

변위의 발생과 분포, 누적된 변위량 결과를 구하여 변위장을 구성하였다. 초기 변위의 발생은 기초 하부의 썪기 영역의 하향 이동으로 나타나지만, 일정 단계 이후에는 기초 좌우측 입자들의 팽창으로 인한 상향 이동이 뚜렷하게 나타난다. 초기의 썪기 입자군의 이동은 입자 응력이 사선 형태의 힘 전달 사슬 구조의 형성과 연계되며 이후 팽창으로 인한 상향 이동은 힘 전달 사슬의 좌굴과 연계될 수 있음을 밝혔다.

- (4) 얇은 기초 하중을 받는 입상체 지반에서 가해진 외부 하중은 입자 내부에서 탄성 에너지로 축적되며 광탄성 재료의 밝은 빛으로 표시된다. 이후 입상체 지반이 파괴에 이르면 입자 내부에 축적된 탄성 에너지는 소성 변위와 함께 급격하게 소실되며 광탄성 재료에서 나타난 밝은 빛은 모두 사라지게 된다.
- (5) 본 연구에서는 직경 2cm의 단일 입경의 입자들을 규칙적으로 배열하여 입상체를 구성하였고 상부면에 하중을 가하였기 때문에 매우 제한된 조건에서 실험이 진행되었다. 따라서 사선 형태의 입자 전달력 구조에 대한 결론 등을 실제 사질토 지반의 거동으로 일반화시키기에는 많은 제약이 따른다. 현재 재료와 직경을 달리하여 입자를 추가 제작 중에 있으며 이에 대한 실험 결과가 도출되면 보다 현실적인 조건에서 입상체의 거동을 분석할 수 있으리라 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝힙니다 (No. NRF-2012R1A1B4002488). 본 연구의 실험 및 논문 작성에 도움을 준 경희대학교 정재우에게 감사의 뜻을 밝힙니다.

References

- Allersma, H. G. B. (1982). "Determination of the stress distribution in assemblies of photoelastic particles." *Exp. Mech.*, Vol. 22, No. 9, pp. 336-341.
- Baek, T. H. and Kim, M. S. (2004). "Construction and calibration test of a transmission-type circular polariscope for photoelastic stress measurement." *J. Korean Soc. Precision Eng.*, Vol. 21, No. 3, pp. 38-43 (in Korean).
- Budwig, R. (1994). "Refractive index matching methods for liquid flow investigations." *Exp. Fluids*, Vol. 17, No. 5, pp. 350-355.
- Byeon, B.-H., Jung, Y.-H. and Mok, Y.-J. (2012). "Analysis of stress patterns in soil using photoelasticity." *KGS Spring Conference 2012*, pp. 1724-1733 (in Korean).
- Byeon, B.-H., Jung, Y.-H. and Mok, Y.-J. (2012). "Reflective photoelastic measurement of force transmission in geosynthetic-soil interaction." *2012 Spring Geosynthetics Conference*, pp.

- 67-72 (in Korean).
- Choi, M.-J. (1992). *A study on ultimate bearing capacity of eccentrically loaded footing by model test using carbon rods*, Master Thesis, Seoul National University (in Korean).
- Da Silva, M. and Rajchenback, J. (2000). "Stress transmission through a model system of cohesionless elastic grains." *Nature*, Vol. 406, No. 6797, pp. 708-710.
- Dally, J. W. and Riley, W. F. (1967). *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, Inc.
- Dantu, P. (1957). "Contribution to the mechanical and geometrical study of crushed media." *Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 12-24 August, Butterworth, London, pp. 144-148.
- Dijkstra, J. and Broere, W. (2010). "New method of full-field stress analysis and measurement using photoelasticity." *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 33, No. 6, pp. 469-481
- Drescher, A. and de Josselin de Jong, G. (1972). "Photoelastic verification of a mechanical model for the flow of a granular material." *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 20, No. 5, pp. 337-340.
- Drescher, A. (1976). "An experimental investigation of flow rules for granular materials using optically sensitive glass particles." *Geotechnique*, Vol. 26, No. 4, pp. 591-601.
- Dyer, M. R. (1985). *Observation of the stress distribution in crushed glass with applications to soil reinforcement*, Ph.D Dissertation, Magdalen College, Oxford.
- Howell, D. W., Behringer, R. P. and Veje, C. T. (1999a). "Stress fluctuations in a 2D granular couette experiment: A Continuous Transition." *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 82, No. 26, pp. 5241-5244.
- Howell, D. W., Behringer, R. P. and Veje, C. T. (1999b). "Fluctuations in granular media." *Chaos*, Vol. 9, No. 3, pp. 559-572.
- Jung, Y.-H., Byeon, B.-H. and Mok, Y.-J. (2012). "Photoelastic measurement of stress distribution in particle assembly subjected to shallow foundation loading." *2012 KGS Fall National Conference*, pp. 342-351 (in Korean).
- Jung, Y.-H., Byeon, B.-H. and Mok, Y.-J. (2012). "Photoelastic visualization of stress distribution in particle assembly under elastic and plastic deformations." *Proceedings of International Joint Symposium on Urban Geotechnics for Sustainable Development*, 2-3 November 2012, Seoul, pp. 123-126.
- Kim, S.-S. Mok, Y.-J. and Jung, Y.-H. (2011). "Behavior of dry-stone segmental retaining wall using physical modeling and numerical simulation." *J. of the Korean Geotech. Soc.*, Vol. 27, No. 9, pp. 25-36 (in Korean).
- Lesniewska, D. and Sklodowski, M. (2005). "Photoelastic investigation of localization phenomena in granular materials." *Proc., Int. Conf. on Powders and Grains*, 18-22 July, Stuttgart, Germany, pp. 69-72.
- Moon, C.-Y. and Kim, H. D. (2004). "A study of external loads acting on the flexible buried pipe for carbon rod." *Korean Geo-Environmental Society 04' Conference*, Cheong-Ju, Korea, pp. 305-316 (in Korean).
- Rossmannith, H. P. and Shukla, A. (1982). "Photoelastic investigation of dynamic load transfer in granular media." *Acta Mech.*, Vol. 42, No. 3-4, pp. 211-225.
- Standing, J. R. and Leung, W. Y. M. T. (2006). "Investigating stresses around tunnels and piles using photo-elasticity techniques." *Proceedings of the Fifth International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Amsterdam, Netherlands, pp. 171-177.
- Thruong, Q. H., Byeon, Y. H., Eom, Y. H., Shim, Y. J. and Lee, J. S. (2009). "Dissolution monitoring of geo-soluble mixture." *J. of the Korean Geotech. Soc.*, Vol. 25, No. 10, pp. 111-122 (in Korean).
- Vishay (2012a). *LF/Z-2 Reflection Polariscopes Instruction Manual*. Vishay (2012b). *Introduction to stress analysis by the photostress method*, received at May 5, 2012 from http://www.vishaypg.com/docs/11212/11212_tn.pdf.
- Vishay (2012c). *Photostress Coating Materials and Adhesives*, received at May 5, 2012 from <http://www.vishaypg.com/docs/11222/pscoat.pdf>.
- Wakabayashi, T. (1958). "Photoelastic method for determining of stress in powdered mass." *Proceedings of the Seventh Japanese National Conference on Applied Mechanics*, Tokyo, Japan, pp. 153-158 (in Japanese).