

電子處理 및 Laser干涉에 의한 構造物의 Strain 測定에 관한 研究

A Study on the Strain Measuring of Structure Object

by Electronic Process and Laser Interferometry

* 김경석, 최형철(*), 양승필, 정현철, 김정호

- * 조선대학교 기계설계공학과
- ** 조선대학교 대학원

Abstract: This paper presents the performance and problems in analysis method and testing system of Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) method, in measuring two-dimensional in-plane displacement. The analysis result of measurement by ESPI is quite comparable to that of measurement by strain gauge method, this implies that the method of ESPI is a very effective tool in non-contact two-dimensional in-plane strain analysis. But there is a controversial point, measurement error. This error is discussed to be affected not by ESPI method itself, but by its analysis scheme of the interference fringe, where the first-order interpolation has been applied to the points of strain measured. in this case, it is turned out that the more errors would be occurred in the large interval of fringe. so, this paper describes a computer method for drawing when the height is available only for some arbitrary collection of points. the method is based on a distance-weighted, least-squares approximation technique, with the weight varying with the distance of the data points.

제 I 장 서 론

양자전자학의 성과로 LASER(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)가 개발되어 온지 20여년이 지나서 그 우수한 성질과 응용 범에 있어서의 가능성으로 응용회의 연구가 진행되고 있다. Laser광은 단색성, 가시집성(Coherency)이며, 지향성, 집중성이 좋고, Energy의 공간적, 시간적인 집중, 짧은 Pulse광의 발생이 가능하다는 등의 특징이 있다. 따라서 Laser의 응용은 이러한 특징을 이용한 것으로써 주요한 응용 분야로는 계측, 정보처리, 통신, 재료가공, 의료, 분광 등이 있지만, 특히 계측은 전보가 두드러지고 매우 넓은 범위에서 응용되고 있다. 그중 구조나 재료의 다양한 역학적 거동 해석에는 Holography간섭이나 Speckle Pattern법이 광범위하게 적용되고 있다. 최근에는 한 방향의 변위성분을 직접 얻을 수 있는 Speckle Pattern 간섭법(SPD)에 화상처리 장치를 조합한 전자처리식 스펙클 패턴 간섭법 (Electronic Speckle Pattern Interferometry)을 이용하여 안정화중을 받는 평판을 면내변위의 측정이 가능하다는 것을 확인 하였다. 본 논문에서는 ESPI법에 의해 얻은 등변위 줄무늬를 분산된 데이터의 집합으로 고려하고, Error의 한이 최소가 되게 하는 최소자승법(Least Square Method)을 이용하여 보간 방법을 지금과 같이 1차원적으로부터 2차원적으로 바꾸어 오차를 줄여 변위 줄무늬의 정도(精度) 향상에 그 목적을 두었다.

제 II 장 전자처리 스펙클 패턴 간섭법(ESPI)의 원리

Speckle의 위상 변화에 의해 Speckle의 휘도가 변화하므로 Speckle 휘도를 감산하여 간섭줄무늬를 발생시킬 수 있다. 면내변위의 측정 방향을 포함한 평면내에서 평행인 두개의 Laser광을 $\pm \theta$ 인 입사각으로 피측정면에 조사하고, 조사면을 렌즈에 의해 상면위에 감산한다. 이들의 관계를 Fig. 1에 나타낸다. a)의 경우를 렌즈를 사용하지 않는 경우의 회절계의 스펙클 패턴(Objective speckle pattern)이라고 하고, b)의 경우를 렌즈를 사용하여 물체표면을 스크린에 감산할때 발생하는 Speckle pattern를 像界의 스펙클 패턴(Subjective speckle pattern)이라 부른다. 피측정면에 변위가 발생할 때, 변위 전후에서의 정미 광로길이 변화는 면내 변위 u 와 입사각 θ 만에 의존하며, 그 값 $\Delta = 2u \cos \theta$ 가 Laser광의 파장 λ 의 정수배 일때 Speckle의 휘도는 변형 전후에서 동일하게 되며, 이와 같은 점의 케치는 간섭 줄무늬의 이두운 부분에 상당한다. 그 이외의 부분에서는 Δ 값에 대응한 밝은 줄무늬가 되며, 물체상 위에 형성되는 간섭 줄무늬는 변위 줄무늬를 나타낸다. ESPI는 CCD카메라와 전자식 Image Sencer를 이용하여 회상신호를 전자식 신호로 처리하는 것이다. 물체의 변형전의 speckle pattern을 화상처리 장치의 memory에 digital data로 기억시키고, 변형후 speckle pattern을 카메라에 수록하고, 2개의 화상의 차를 감산하면 real time으로 변위 줄무늬를 얻을 수 있다.

제 III 장 실험장치 및 측정방법

3.1 시험편

본 실험에서 사용한 시험편으로는 7075-T6 aluminum 합금을 사용하였다. 이 시험편의 E는 young's modulus이며, ν 는 poisson's ratio이며, 그 값은 $E = 7.53372 \times 10^3$ (kg/mm²), $\nu = 0.321162$ 이다. 또한 시험편의 형상으로는 평판과 원공편을 이용하였다. 시험편의 치수는 50 mm × 100 mm × 0.4 mm이고, 원공편은 직경12 mm의 원이 같은 시험편 중앙에 위치하고 있다. 측정편(레이저 조사편)에는 금속광택을 제거하기 위해 백색도료를 칠하였다. 시험편의 뒷면에는 ESM과 비교하기 위해서 strain gauge를 부착하였다. Fig. 2에 시험편의 형상과 gauge의 위치를 나타내었다. 사용된 gauge는 모두 단축이며, 길이는 1 mm이다.

3.2 광학계·화상처리장치 및 시스템 구성

광학계의 평면배치도를 Fig. 3에 나타냈다. 수평면내에서 시험편에 대해 좌우로 배치된 mirror 6, mirror 7과 수직면내에서 시험편에 대해 상하로 배치된 mirror 10, mirror 11에 의해 반사된 laser beam에 의해 시험편의 피측정면을 조사한다. 단, 이때는 상하 또는 좌우의 어느 한쪽만이 동시에 조사된다. 광원으로는 출력 200mW, 파장 514.5nm인 연속파(CW) 아르곤 레이저를 이용하였다. 회상처리장치를 이용하여, 변형 전후의 speckle pattern을 각각 화소수 512×480, 8비트(휘도 256개조)인 디지털 회상 데이터로 수록하여, 이들 회상을 감산처리하여 간섭 줄무늬를 얻었다.

제 IV 장 해석법

4.1 해석법의 개요

주어진 data (x, y)가 $S(x, y) = f$ 의 성질을 지닌 완전한 2계변수 함수 S를 구성할 때 발생하는 data 적용 문제를 해결하기 위한 방법이다. 그리고 간섭 줄무늬 면내의 회산 점들에 주어진 값을 취하는 완전한 2계변수 함수를 이루는 2가지 방법이 있다. 포괄적인 방법 즉 $S(x, y)$ 가 (x, y)로 부터 그들의 거리에 관계없이 모든 data점에 의존한다는 것과, 부분적인 방법 즉 $S(x, y)$ 가 data점 보다 (x, y)로 부터의 일정한 거리에 의존한다 라는 두가지 방법이 있지만, 큰 data 집합에 대해서는 부분적인 방법을

이용하는 것이 필요하다. 그래서 본 논문에서는 후자의 방법을 택하여 거리에 반비례하여 영향을 미치는 거리-가중 최소제승법(Distance-weighted least squares interpolation)을 이용하여 해석을 하였다.

4.2 평활화

이상적인 간섭 줄무늬의 휘도분포는 정현파형(물결과 같은 현상)인 경우이고, 그 위상을 구하는 것은 모든점의 변위 분포를 구할 때 가능하다. 그래서 줄무늬의 휘도 분포 1주기의 기준대에서 위상차 π 의 2점(휘도의 최대값과 최소값)을 구하여 그 후 보간을 하는 방법을 취하였다. 이런 과정을 하고 나서 휘도의 최대값과 최소값을 구하였다. 평활화의 algorithm은 같은 한반의 길이가 기수개의 최소 mesh를 만들어서 그 mesh내의 휘도평균은 mesh의 중심의 화소(실선부의 화소)휘도로 해서 대입한 것이다. 이 작업을 면내 전체에 적용하여 해석한 것이고, 면 전체를 평활화 하였다.

4.3 변위 줄무늬의 추출

그 연속화한 휘도분포의 최대값과 최소값이 존재하는 좌표를 2차원적으로 연결하면 이것이 바로 변위 줄무늬가 된다. 이들의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 이 algorithm은 어떤 line상의 휘도의 평균을 구해서 그 점에서의 휘도와의 차의 절대값을 취해서 그값의 최대값이 존재하는 좌표를 순차적으로 구해가는 것이다. 그리고 동시에 변위 줄무늬의 직수도 검정하였다.

4.4 보간(Interpolation)

변위 줄무늬간의 변위의 차 ΔU 는 1주기에서 두개의 변위 줄무늬를 가지기 때문에,

$$\Delta U = \lambda / (4 \cos \theta) \dots \dots \dots (1)$$

식 (1)이 된다. 변위 줄무늬를 구한 회상의 변위 분포는 Fig. 5와 같이 분산적인 data로 해서 나타내진다. strain은 변위의 좌표에 의해 미계수로 나타내기 때문에 이 분산적 data의 보간이 필요하다. 변위 줄무늬를 보간해서 변위분포를 구하고, 그 미계수를 구한후(이때 strain 분포는 분산적인 값을 취한다) 다시 한번 보간해서 strain분포를 얻는다. 그리고 error의 제곱의 합이 최소가 되도록 하는 거리-가중 최소제승법(Distance-weighted least squares interpolation)을 이용하여 strain값을 구하였다.

4.5 거리-가중 최소자승법을 이용한 보간법

분산 data가 N개 존재하고, 이 값이 구해져 있다고 생각 되는 함수를 f라 하면, 분산 data는 $f_i = f(x_i, y_i)$,

$i = 1, \dots, N$ 로 나타낸다. 보간법의 기본정식은,

$$P[f](x, y) = \sum_{j=1}^m \bar{a}_j(x, y) \phi_j(x, y) \dots \dots \dots (2)$$

로 표시 된다. 단 $\bar{a}_j(x, y)$, $j = 1, \dots, m$ 인 때, 주어진 (x, y) 에 대한 식

$$\min_{a_1, \dots, a_m} \sum_{i=1}^N \left\{ \frac{a_1 \phi_1(x_i, y_i) + \dots + a_m \phi_m(x_i, y_i) - f_i}{\rho_i(x, y)} \right\}^2 \quad (3)$$

의 해를 나타낸다. 위의 정의에 의하여, 식 (2)는 최소 자승 근사법에서

$$(x, y) \rightarrow (x_i, y_i) \quad \text{인때} \quad \frac{1}{\rho_i^2(x, y)} \rightarrow \infty \quad \text{이므로,}$$

$$(x, y) \rightarrow (x_i, y_i) \quad \text{인때} \quad P[f](x, y) \rightarrow f_i \quad \text{가 된다.}$$

$$A[\bar{a}_j](x_i, y_i) = \bar{a}_j(x_i, y_i), \quad i = 1, \dots, N$$

일 때, 연산자
$$Q[f](x, y) = \sum_{j=1}^m A[\bar{a}_j](x, y) \phi_j(x, y) = P[f]$$

의 보간 특성치를 지니고 있다. 여기에 사용된 근사법의 형태는 \bar{a}_j , $j = 1, \dots, m$ 에서

$$A[\bar{a}_j](x, y) = \sum_{i=1}^N \bar{a}_j(x_i, y_i) W_i(x, y) \text{로 표시된다.}$$

$$W_i(x, y) = \delta_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, N \quad \dots \dots (4)$$

으로 한다. 그러므로 Q에 대한 윗식을 다시 쓸 수 있다.

$$Q[f](x, y) = \sum_{i=1}^m W_i(x, y) Q_i(x, y) \dots \dots \dots (5)$$

이게에서 $Q_i(x, y) = \sum_{j=1}^m \bar{a}_j(x_i, y_i) \phi_j(x, y)$ 는 집

(x_i, y_i) 에 적용 되는 거리에 반비례하여 영향을 받는 최소 자승 함수이다.

$$Q_i(x_i, y_i) = f_i, \quad i = 1, \dots, N \text{이면, } Q_i(x, y)$$

는 $f(x, y)$ 에 대해 거의 (x_i, y_i) 에 근접하는 국부적 근사치(a local approximation)이다. 보간함수 $Q[f]$ 가 nodal

function의 국부적인 고유값을 유지하기 위하여 식 (4)에 대한 것 이외에 W_i 에 대한 어떠한 특성치를 필요

로 하게 된다. 이런 까닭에

$$\frac{\partial Q[f]}{\partial x}(x_i, y_i) = \frac{\partial Q_i}{\partial x}(x_i, y_i) \dots \dots \dots (6)$$

$$\frac{\partial Q[f]}{\partial y}(x_i, y_i) = \frac{\partial Q_i}{\partial y}(x_i, y_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

이므로, 윗 식을 만족 시키기 위해서 다음과 같은 조건식이 필요하다.

$$\frac{\partial W_i}{\partial x}(x_j, y_j) = \frac{\partial W_i}{\partial y}(x_j, y_j) = 0, \quad i, j = 1, \dots, N \quad (8)$$

이게에서, $Q_i(x, y)$, $i = 1, \dots, N$ 에 대한 2개 변수를 가진 2차 방정식을 구할 수 있다

$$Q[f](x, y) = \sum_{i=1}^m W_i(x, y) Q_i(x, y) = f(x, y) \sum_{i=1}^m W_i(x, y) \quad (9)$$

다시 말하면 변형된 보간함수 $Q[f]$ 의 2차적인 식을 얻기 위해서는 다음과 같은 부가조건이 필요하다.

$$\sum_{i=1}^m W_i(x, y) = 1 \quad \dots \dots \dots (10)$$

앞의 두 조건식 1/ ρ 를 변경하기 위해 영향반경 R_q 를 도입하였다. 이 R_q 를 도입한 이유는, xy평면상의 임의의 분산점

(x_k, y_k) 에서 반경 R_q 내에 있는 n 의 분산 data만큼을 취하고, 그것을 이용하여 거리-가중 최소자승법의 해를 해결하기 위함이다. 두 조건식은 아래의 식과 같다.

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{(R_q - d_i)_+}{R_q d_i} \dots \dots \dots (11)$$

이게에서,

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

$$(R_q - d_i) = \begin{cases} R_q - d_i, & R_q - d_i \geq 0 \\ 0, & R_q - d_i < 0 \end{cases} \dots \dots (12)$$

로 한다. 또한 보간함수는 다음과 같다.

$$Q(x, y) = f + a_2 x + a_3 y + a_4 x^2 + a_5 xy + a_6 y^2$$

따라서 해석해야 할 최소자승의 해는,

$$\min_{a_1, \dots, a_6} \sum_{i=1, i \neq k}^N \frac{1}{\rho_i^2(x_k, y_k)} [f_k + a_{2j}(x_i - x_k) + a_{3j}(y_i - y_k) + a_{4j}(x_i - x_k)^2 + a_{5j}(x_i - x_k)(y_i - y_k) + a_{6j}(y_i - y_k)^2 - f_i]^2 \quad (13)$$

이코, (x_k, y_k) 의 근처에서의 보간함수는,

$$Q_k(x, y) = f_k + \bar{a}_{2j}(x - x_k) + \bar{a}_{3j}(y - y_k) + \bar{a}_{4j}(x - x_k)^2 + \bar{a}_{5j}(x - x_k)(y - y_k) + \bar{a}_{6j}(y - y_k)^2 \quad (14)$$

로 나타낸다. 여기서, $\bar{a}_{ij}, j = 2, \dots, 6$ 은 식(13)의 해이다. 그래서 거리함수 ρ_{ij} 는 nodal function Q_k 와 weight function W_k 의 규명에서 사용된다. 즉 nodal function을 규정하는데 있어서 $R = R_q$ 라고 하고, weight function을 규정하는데 있어서 $R = R_w$ 라 하였다. R_q 는 nodal function상에서 data점들의 영향반경을 나타내고, R_w 는 보간함수 $Q[f](x, y)$ 상의 nodal function의 영향반경을 나타내기 때문에 $R_w < R_q$ 라는 식을 유도할 수 있다. R_q 와 R_w 의 식을 나타내었다. 그리고 이들의 관계를 Fig. 6에 나타낸다.

$$R_q = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{N_q}{N}}, \quad R_w = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{N_w}{N}}$$

여기서 $D = \max_{i,j} d_i(x_i, y_i)$ 라는 위의 관계식에 따라 영향반경을 계산할 수 있다. 그리고 두지 함수는 다음과 같다.

$$\frac{1}{\rho_i} = \frac{(R_w - d_i)_+}{R_w d_i} \quad \dots \dots \dots (15)$$

$$D[f](x, y) = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{Q_k(x, y)}{\rho_k^2(x, y)}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{\rho_k^2(x, y)}} \quad \dots \dots \dots (16)$$

제 V 장 실험결과 및 고찰

5.1 실험결과

본 연구에서는, 현재의 실험으로 얻어진 결과와 지금까지의 실험에서 1차 보간에 의해 얻은 결과값을 비교해 보았다. 이 결과값은 평판과 위공판에서 인장방향의 변위 증부

로부터 얻은 것이다. 판의 가장자리에 존재하는 변위 증부들의 보간의 평균 Δx 를 취해서, 변위 증부들이 존재하는 방향에 간격이 Δx 의 증부들을 증이시, 그것과 변위 증부들의 교집을 분산 data로 해서 추출 하였다. 그때의 오차는 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$\text{Error} = [(\epsilon_E - \epsilon_G) / \epsilon_G] \times 100 (\%) \quad \dots \dots (17)$$

5.2 고찰

ESPI법에 의해 얻은 등변위 증부들을 분산된 data의 집합으로 고려하고, 거리-가중 최소자승법으로 보간하여 함수의 계수를 구하여 각 점의 변위를 구하였다. 본 실험에서 이용한 보간법은 임의의 구간에서 보간한 영역을 이용하여 x방향에 분포된 많은 data를 해석하였고, y방향에 관해서는 고려하지 않았다. 반면에 x방향의 data를 감소시키면, 전체적인 정밀도가 떨어지는 문제점이 발생하였다. 이것을 극복하기 위해서 영향반경 R_q, R_w 으로 표시되는 함수의 구간을 원형으로 하지않고, 타원형을 이용하는 것이 적절한 방법으로 사용된다. 즉 정밀도 향상을 위해 data를 감소시키지 않는 방법을 고려하여야 한다.

제 VI 장 결론

ESPI법을 이용하여 변위 스트레인 측정법의 일환으로 2차원적인 보간법을 도입하여 거리-가중 최소자승법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ESPI법에 의해 얻은 변위 증부들을 분산된 data의 집합을 고려하여 거리-가중 최소자승법을 이용한 결과 변위 증부들의 사이를 1차 보간을 하였을 때보다는 많은 data수의 영향을 고려할 수 있기 때문에 오차를 상당히 줄일 수 있었다.
2. 보간한 각기의 점들 사이를 거리-가중 최소자승법을 이용하면 계산량이 방대해지는 문제점이 있었다.
3. 정밀도 향상을 위하여 각기의 증부들의 data수를 줄여야 하는 문제점이 있다. 왜냐하면 영향반경의 5개의 변위 증부들의 data점 보다 적은수를 피해야 하기 때문이다. 그래서 드문드문 분포되어 있는 구멍과 data들이 비교적 조밀한 상태로 있는 영역의 data수가 $N < 25$ 인 data에 대해서는 반드시 그 값(N)을 증가시켜야 할 것이다.

4. 본 논문의 해석결과 변위중부의 사이에 균일하게 분포되어져 있는 data의 경우에 있어서 $N_x = 18$ 인때 가장 정밀한 data를 얻을 수 있었다.

參考文獻

1. D. H. McLain, "Drawing contours from arbitrary data points", The Computer Journal, Vol. 17, pp. 318-324, 1974
2. D. H. McLain, "Two dimensional interpolation from random data", The Computer Journal, Vol. 19, pp. 178-181, 1976
3. R. Franke and G. Nielson, "Smooth interpolation of large sets of scattered data" International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 15, pp. 1691-1704, 1980
4. Archbold, B. E. and Bruch, J. M. and Ennos, A. E, "Recording of In-plane Displacement by Double Exposure Speckle Photography", Optics Acta, Vol. 19, pp. 253-271, 1972
5. Leendertz, J. A, "Interferometric Displacement Measurement on Scattering Surfaces Utilizing Speckle Effect", J. Phys. E, Vol. 3, pp. 214-218

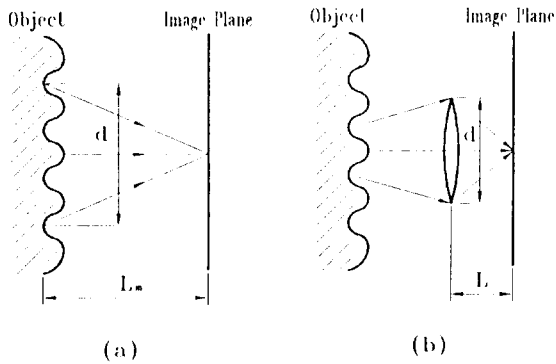


Fig. 1 The basic optical system of speckle pattern

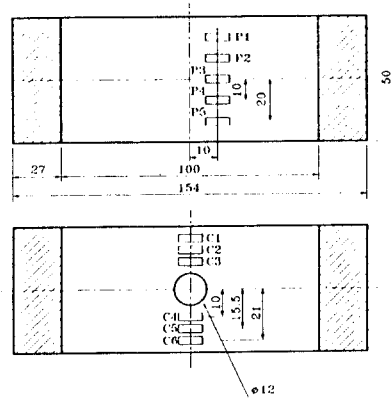


Fig. 2 The dimension of specimen

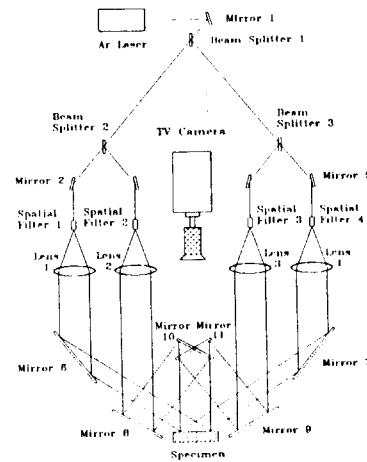


Fig. 3 Arrangement of the ESPI optical system

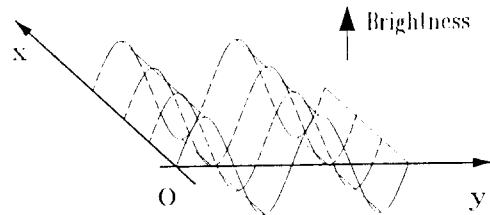


Fig. 4 The relationship between brightness and interference fringes

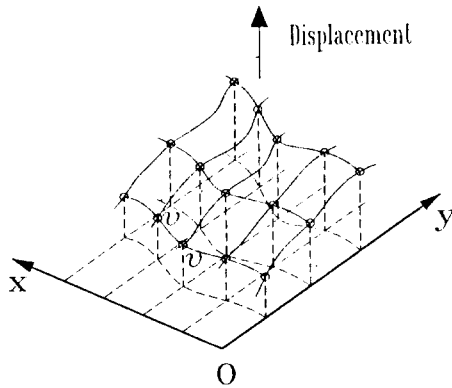


Fig. 5 The scattering in displacement distribution

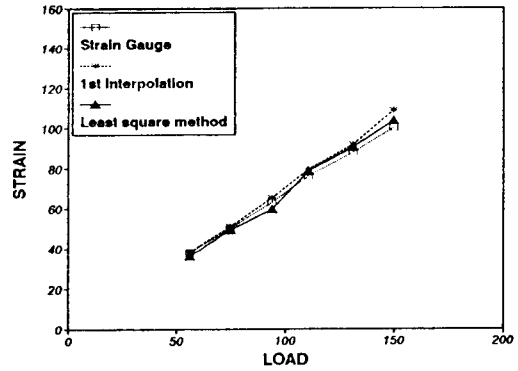


Fig. 7 The measuring results of plate(P1 gauge)

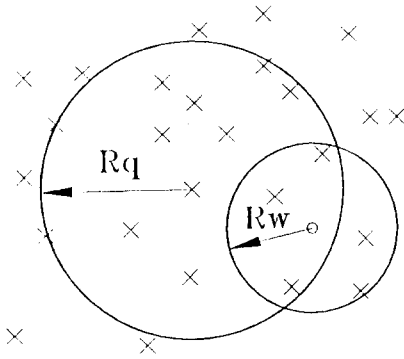


Fig. 6 The relationship between R_q and R_w

Table. 2 The measuring results of plate with a circular hole (C1 gauge)

	Load(N)	Strain Gauge	1st Interpolation	Least square method	Error
C1	72.90	47	54.52	47.59	1.26
	93.49	60	70.33	61.60	2.67
	112.13	75	86.19	79.00	5.33
	130.80	94	100.87	103.12	9.57
	149.51	105	111.95	109.76	4.53

Table.1 The measuring results of plate(P1 gauge)

	Load(N)	Strain Gauge	1st Interpolation	Least square method	Error
P1	56.10	38	37.93	36.21	-4.71
	74.70	50	50.85	49.08	-1.84
	93.40	63	65.17	59.43	-5.66
	110.33	76	79.34	78.36	3.10
	130.80	88	91.79	90.40	2.72
	149.50	100	108.69	103.53	3.53

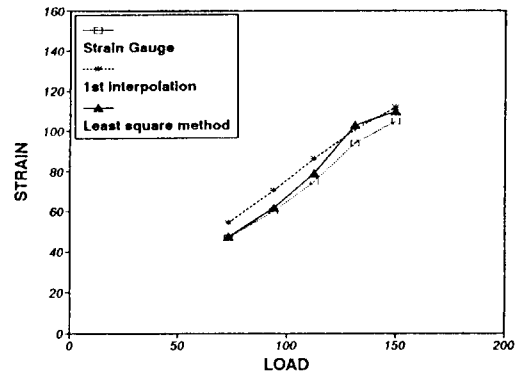


Fig. 8 The measuring results of plate with a circular hole (C1 gauge)