콘크리트의 노치 및 비노치 구역에서의 균열폭 및 국부 변형률 정밀 측정기법

최석환¹⁾ · 임법묵¹⁾ · 오창국¹⁾ · 조창빈^{2)*}

¹⁾국민대학교 건설시스템공학부 ²⁾한국건설기술연구원 SOC성능연구소

Technique for the Measurement of Crack Widths at Notched / Unnotched Regions and Local Strains

Sokhwan Choi,¹⁾ Bubmook Lim,¹⁾ Chang Kook Oh,¹⁾ and Changbin Joh^{2)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea

²⁾SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

ABSTRACT Crack widths play an important role in the serviceability limit state. When crack widths are controlled sufficiently, the reinforcement corrosion can be reduced using only existing concrete cover thickness due to low permeability in the region of finely distributed hair-cracks. Thus, the knowledge about the tensile crack opening is essential in designing more durable concrete structures. Therefore, numerous researches related to the topic have been performed. Nevertheless accurate measurement of a crack width is not a simple task due to several reasons such as unknown potential crack formation location and crack opening damaging strain gages. In order to overcome these difficulties and measure precise crack widths, a displacement measurement system was developed using digital image correlation. Accuracy calibration tests gave an average measurement error of 0.069 pixels and a standard deviation of 0.050 pixels. Direct tensile test was performed using ultra high performance concrete specimens. Crack widths at both notched and unnotched locations were measured and compared with clip-in gages at various loading steps to obtain crack opening profile. Tensile deformation characteristics of concrete were well visualized using displacement vectors and full-field displacement contour maps. The proposed technique made it possible to measure crack widths at arbitrary locations, which is difficult with conventional gages such as clip-in gages or displacement transducers.

Keywords : digital image correlation, DIC, tensile crack measurement, crack mouth opening displacement

1. 서 론

콘크리트 구조물의 내구성을 확보하기 위해서는 콘크리트의 인장 균열폭을 제어하는 것이 중요하다. 균열폭을 일정값 이하로 유지할 수 있다면, 피복두께를 확보하는 것만으로도 염화물 침투로 인한 철근의 부식을 방지할 수 있기 때문이다. 따라서 각종 설계기준에서는 구조물이 건설되는 위치에서의 환경조건을 기준으로, 직접 혹은 간접적인 방법을 통하여, 콘크리트의 허용 균열폭을 제시하고 있다.¹⁾

실험적으로 콘크리트의 인장균열폭을 정량적으로 측정하는 것이 중요한 부분이지만 그리 간단하지 않으며, 그 이유는 다음과 같다. 먼저 변형률게이지(strain gages)는

게이지의 탄성 범위 내에서만 변형률을 측정할 수 있으며, 균열이 생성되면 게이지가 손상을 입기 때문에 균열폭을 직접 측정할 수 없다. 변위계를 사용하는 경우에는 균열이 발생하게 되면, 균열 자체가 변위계의 설치 위치를 교란시키기 때문에 정확한 데이터를 얻기가 어렵고, 시편이 작은 경우에는 공간적인 제약 때문에 많은 수의 게이지를 붙이기도 곤란하다. 그렇지 않다 하더라도 실험을 시작하기 전에 균열의 잠재적 생성 위치를 미리 알 수가 없기 때문에 게이지 설치 위치를 정할 수도 없다. 균열 생성 위치를 예측할 수 있다 하더라도 측정값은 균열폭뿐만 아니라 균열 주위의 탄성변형도 포함하게 된다. 노치(notch)를 만드는 경우는 클립인게이지(clip-in gages)를 삽입해서 측정할 수도 있지만 이것도 설치 위치에서의 균열개구변위(crack mouth opening displacement)를 측정하는 것만 가능하다. 흔히 사용하는 방법 중에는 재하를 임시로 중단한 상태에서 균열게이지(crack gage)를 생성된 균열 위에 포개놓고 유사한 폭의 눈금선을 시각

*Corresponding author E-mail : cjoh@kict.re.kr

Received February 1, 2012, Revised March 15, 2012,

Accepted March 15, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

적으로 찾는 방법도 있다. 그러나 이러한 방법은 정확도가 낮을 뿐만 아니라 하중 단계별 균열 진전 상황을 파악하기도 어렵다. 더욱이 균열의 형상이 굴곡진 경우에는 정확한 값을 판단하기도 쉽지 않다.

이와 같이 접촉식 게이지를 사용해서 인장균열을 측정하는 것이 어려운 경우 시편의 표면 이미지 혹은 임의로 생성해서 부착한 패턴 등을 이용한 변위 측정 방법을 사용할 수 있다. 이러한 방법을 디지털 화상상관기법(digital image correlation, DIC) 혹은 좀 더 넓은 범위의 용어로 컴퓨터비전(computer vision)기법이라 일컫는다. 이미지를 이용한 측정 방법은 표면에 물리적으로 직접 게이지를 부착하지 않는 비접촉(non-contact)방식이므로 균열이 발생하더라도 데이터가 손상을 입지 않는다. 또한 균열의 생성위치를 미리 알 필요가 없는 전면측정(full-field measurement)방식이다.

이미지를 이용해서 표면의 균열을 탐지하거나 특정 지점을 기준으로 변위를 측정하는 기법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 균열을 탐지하거나 균열의 폭을 측정하는 방법이다. 균열은 머리카락 형상의 음영으로 표현되므로, 이를 임계화법(thresholding)을 이용하여 추출할 수 있다.²⁾ 어두운 색으로 표현되는 부분이 균열에 해당하므로 균열폭을 측정하는 것이 가능하기는 하지만, 임계화법의 특성상 픽셀 단위 이하의 정밀도를 얻는데는 한계가 있다. 또 다른 하나는 패턴매칭(pattern matching) 혹은 화상상관기법을 적용하여 두 점 사이의 변위를 측정하는 방법이다.³⁻⁷⁾ 화상상관기법에서는 균열의 음영을 직접 추출하지 않는 대신, 작은 크기의 이미지 영역(ROI, region of interest)을 선택한 후 알고리즘을 통해서 이를 추적해서 이동하는 값, 즉 변위를 구한다. 따라서 직접적으로 균열의 폭을 측정하지는 않는다.

지금까지 임계화법을 통해서 균열폭을 제시한 연구는 있었지만, DIC를 이용하여 균열폭을 직접 계측하는 방법을 제시한 연구는 없었다. DIC에서는 이미지에서 직접적으로 균열을 추출해서 분석하지 않는다. 현재 상태의 균열폭을 측정하는 것이 아니라 재하조건이 변하면서 달라지는 균열폭의 변화량을 ROI의 추적을 통해서 지속적으로 측정하는 것이다. ROI의 위치는 수학적인 합성(convolution)을 이용해서 계산하기 때문에 픽셀 단위 이하(subpixel)의 높은 정밀도를 얻는 것이 가능하므로 콘크리트 미세 균열폭을 의미있는 수준까지 측정하는 것이 가능하다. 이 논문에서는 DIC를 이용하여 하중 단계별로 여러 위치에서의 균열폭 및 변위를 측정하는 방법을 제시하고 실험을 통해서 검증하였다.

2. DIC 기본 이론

디지털 화상상관기법은 적용이 비교적 용이하기 때문에 마이크로 혹은 나노영역의 실험에서 많이 사용되었다. DIC는 1980년대 초반에 개발되었으며,^{8,9)} 최근까지도 지속적으로 발전하고 있다.¹⁰⁻¹³⁾ 그러나 이러한 이론은 전부

Fig. 1 Concept of digital image correlation⁵⁾

Fig. 2 24×24 pixel ROI(subset image) generated with a random speckle pattern

변위를 측정하고, 이를 바탕으로 변형률을 측정한 것이며, 콘크리트 균열과 같이 취성적인 재료의 불연속면 개구변위를 측정하지는 않았다.

디지털 화상상관기법에서는 서로 다른 재하상태 혹은 변형상태를 나타내는 두 개의 이미지를 이용한다. 둘 중 임의의 하나를 기준 이미지로 정하고, 여기에서 1%~2%에 해당하는 작은 영역(ROI)을 선택한 후 같은 모양을 가지는 ROI를 나머지 하나의 이미지에서 찾는다(Fig. 1). Fig. 2가 실제 시편 표면에서 취득한 ROI의 예이다. 정규상관계수(normalized coefficient of correlation, COC)를 이용하였는데, 이 계수를 최대화시키는 위치가 이동한 ROI의 위치다(식 (1)). 상관계수는 이미지의 형상 및 위치가 유사할수록 1.0에 가까운 값을 보인다.

$$r(m, n) = \frac{N \sum_i \sum_j F T - \left(\sum_i \sum_j F \right) \sum_i \sum_j T}{\sqrt{\left[N \sum_i \sum_j F^2 - \left(\sum_i \sum_j F \right)^2 \right] \left[N \sum_i \sum_j T^2 - \left(\sum_i \sum_j T \right)^2 \right]}} \quad (1)$$

식에서 F , T 는 $F(i, j)$, $T(i-m, j-n)$ 을 의미하는데, 각각 기준 이미지와 비교 이미지의 명암값을 나타낸다. m , n 은 ROI의 이동량이고, i, j 는 ROI 내부 영역에 대한 합지표(summation index)이다. 픽셀과 픽셀 사이에는 선형적인 변환을 가정한다. 또한 연산을 빨리 하기 위해서 처음에는 낮은 해상도에서 시작하여 단계별로 점점 높은 해상도의 이미지를 사용하는 알고리즘을 적용하였다.

계측된 ROI의 위치는 시편의 국부적인 변위를 대표할 수 있을만큼 작다. 예를 들어서, 40 microns/pixel의 상대적인 크기를 가지는 시편에서 ROI의 크기가 24×24픽셀

이라면, ROI의 실제 시편 상에서의 크기는 $0.96\text{ mm} \times 0.96\text{ mm}$ 에 불과하다.

3. DIC 계측 시스템 및 비교 실험

호스트 컴퓨터를 중심으로 여러 장치들을 결합하여 계측시스템을 개발하였다(Fig. 3). 이미지를 얻는 데는 Vieworks VM-16 고해상도 CCD(charge coupled device)를 사용하였으며, 해상도는 $4,872 \times 3,248$ 픽셀이고 센서에서 한 픽셀의 실제 물리적인 크기는 $7.4\text{ }\mu\text{m}$ 다. CCD에 부착하는 렌즈로는 Carl Zeiss Makro-Planar T* 2/100를 사용하였고, 이미지를 저장하는 데는 Matrox Solios eCL/XCL 프레임그래버(frame grabber), 그리고 프로그래밍을 위해서 Matrox image library(MIL) 및 Microsoft Visual C++를 사용하였다. MIL은 이미지 취득, 분석, 해석 등 여러 처리기능을 제공하는 라이브러리(library)다.

변위 계측 시스템을 검증하기 위해서, 실험 시편을 제작하여 직접 인장 실험을 수행하였다. 재료는 강섬유 2%가 포함된 UHPC(ultra high performance concrete, UHPFRC)를 사용하였다. UHPC는 보통강도 콘크리트(OC)와 비교해서 높은 압축강도 및 강성을 가지고 있을 뿐만 아니라, 강섬유의 응력 전달 작용으로 인해서 큰 인성을 보인다(Fig. 4). 따라서 균열폭이 지속적으로 증가

Fig. 3 Developed system for measurement

Fig. 4 Tensile behavior in UHPC(UHPFRC), ECC, FRC, and OC¹⁶⁾

하게 되므로 이미지 분석을 통해서 시편의 변형을 측정하고, 또한 재하진행에 따른 균열폭을 측정할 수 있으므로, 이 논문에서 제시하는 계측방법의 적용성 평가가 용이한 시편이다.¹⁴⁻¹⁵⁾

두 개의 배치를 타설해서 인장실험을 수행하고, 각 배치에서 하나씩 시편을 선택하여 이미지 분석을 실시하였다(Table 1). 실험 시편의 두께는 25 mm 이고, 시편 양단에 노치를 형성하고 클립인게이지를 설치하여(Fig. 5), 균열개구변위를 측정하였다(Fig. 6). 스트로크(stroke)는 균열부 변위 이외에도 비 균열부에서의 탄성변형, 재하장치 자체의 변형 등이 모두 포함된 값이므로 변형이 훨씬 크다.¹⁷⁾

4. 변위측정 오차 검증

측정 정밀도에 영향을 미치는 요소는 여러가지다. 이미지의 형상 및 품질, 이미지의 선명도, 조명의 변화, 광학렌즈의 이미지 왜곡, 실험시 관측 영역의 크기, CCD의 해상도, 해석시 ROI 모델 이미지의 크기, 재하시 진동, 시편의 면외 변위 등에 영향을 받는다.

실험 중에 시편에 가해지는 국부적인 조명의 강도가 변해서는 안된다. 시편 일부에서 명암이 변하게 되면

Table 1 Direct tensile test specimens

Batch	Obtained images	Analyzed images
ID_A	182	14
ID_B	185	18

Fig. 5 Specimens for the tensile test (unit: mm)

Fig. 6 Load-displacement curves from various gages

COC가 작아지면서 계측의 정확도도 떨어지기 때문이다. 그러나 실험 중 날씨 변화 등으로 인해서 시편 전체에 걸쳐서 일정하게 밝기가 변하는 것은 COC에 영향을 미치지 않는다. 시편 표면에서 국부적으로 명암이 변하는 것을 방지할 수 있는 하나의 방안은 인공조명을 설치해서 이용하는 것이다. LED 혹은 메탈할라이드 램프 등을 이용해서 충분한 강도의 조명을 일정하게 가해주면, 외부적인 명암요인을 최소화하거나 제거할 수 있다.

실험에 영향을 미칠 수 있는 또 하나의 요인은 이미지 선명도이다. CCD는 초점을 자동으로 맞추는 기능이 없으므로 렌즈의 초점 조절링을 이용해서 실험 시작 전에 초점을 맞추어야 한다. 선명도가 최대가 되도록 맞추어야 하는데, 이를 위해서는 이미지를 최대한 확대하여 픽셀이 완전히 보이는 단계에서 수행하는 것이 더 정확하다. 렌즈의 구경(aperture)을 줄이고 노출시간을 늘여서 심도를 깊게 만들면 이미지의 선명도를 높일 수 있고, 실험 장비에서 전해지는 진동의 영향도 최소화할 수 있다. 또한 화각이 작은 매크로렌즈를 사용하면 렌즈 왜곡을 줄일 수 있다. 왜곡이 있는 렌즈를 사용할 경우는 보정 알고리즘을 적용해야 한다. 사용 렌즈에 대한 이미지 테스트 결과 가장자리의 왜곡을 거의 볼 수 없었다.

DIC를 이용해서 절대변위를 측정하는 경우에는 임의의 기하학적인 모양을 선택해서 대상 물체에 부착하는 방법을 사용할 수도 있다. 그러나 이 연구에서처럼 시편 표면의 전면적인 변위를 측정하는 경우에는 시편 표면 자체의 이미지를 이용해야 한다. 부재가 크고 골재의 색깔이 다양하게 표출되는 경우는 표면을 연마해서 이미지를 생성할 수 있지만, 이 연구 시편은 표면의 색이 어둡고 일정하기 때문에 여러 톤의 스프레이 페인트를 이용해서 분산된 반점형태의 무늬(random speckle pattern)를 임의로 생성해주는 방법을 택하였다(Fig. 2, Fig. 5).¹⁸⁾

ROI의 크기는 임의로 정할 수 있다. 그러나 하나의 ROI 내에서는 대표 변위값이 하나이기 때문에 국부적인 변위를 측정하는 위해서는 ROI가 작은 것이 더 유리하다.

서로 다른 ROI 크기를 사용하여 변위측정 정밀도를 분석하였다(Table 2). 정밀 스테이지를 이용하여 이미지를 100 μm 단위로 지속적으로 2 mm까지 이동시키면서, 스테이지의 변위와 DIC를 이용해서 계산한 변위와 비교하였다. 회귀분석에 의해서 계측에 사용할 이미지 픽셀과 실제 이동거리 단위 관계값($\mu\text{m}/\text{pixel}$)을 구하고, 이를 기준으로 이동 변위에 대한 오차를 구하였다. ROI가 크기

가 8×8픽셀보다 작을 때는 의미 있는 결과를 얻을 수 없었고, 다른 경우에 대해서는 오차의 평균이 0.069픽셀, 표준편차가 0.050픽셀이었다. ROI가 일정 크기 이상이면, 크기가 더 증가하더라도 COC가 증가하지는 않았다. 따라서 계측의 정밀도를 높일 목적으로 ROI를 크게 설정하는 것은 필요하지 않다. 실험의 분석에서는 ROI의 크기를 24×24픽셀로 선택하였다.

실험에서는 CCD와 시편 사이의 거리 및 렌즈의 배율에 따라서 이미지의 실제 크기가 정해진다. 렌즈는 별도의 초점거리 조절링을 사용하지 않아도, 이미지 폭이 75 mm 정도까지 근접촬영할 수 있었으며, 이 경우 75 mm/4,872 pixel = 15.4 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 이므로 예상되는 측정 오차는 1.1 μm 이다. 만약 이미지의 폭이 500 mm라면, 비율은 103 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 이고, 측정 오차는 7.1 μm 정도다.

5. 노치 구역에서의 균열폭 측정 기법

노치 구역에서는 절단한 균열면과 가까운 위치의 상하에서 ROI를 선택한 후, 두 영역 사이의 거리 변화를 측정한다. Fig. 7에서 측정위치 4-4, 5-5, ..., 그리고 9-9가 선택한 지점이다. 위치1 및 2는 균열개구변위 측정용 클립인게이지이다.

실험에서 두 시편 모두 오른쪽 노치 부분이 왼쪽 노치 부분보다 먼저 더 많이 벌어지는 것이 관찰되었으며, 이는 계측된 균열폭에서도 확인할 수 있었다(Fig. 8). 그림에서 보듯이 노치의 각 부분에서 각 재하단계마다 균열폭의 증가량을 정확하게 계측할 수 있다. 클립인게이지에서 측정한 변위값을 그림에 같이 포함시키지 못한 것은 클립인게이지의 초기 변위가 불안정하기 때문이다. 유압 장비로부터 오는 진동의 영향으로 인해서 지속적으로 떨림이 생기는 것을 볼 수 있다(Fig. 9). 그러나 DIC를 이용한 계측에서는 상대적으로 안정적인 값을 얻을 수 있었다.

6. 비노치 구역에서의 균열폭 측정 기법

노치가 없는 일반적인 영역에서는 균열이 생성되는 위치를 미리 알기도 어렵고, 또한 균열 바로 위에서는 낮

Table 2 Size of ROI and errors

ROI size (pixels)	Average error (pixels)	Standard deviation (pixels)	Average COC (%)
16×16	0.061	0.048	97.18
24×24	0.059	0.053	96.76
48×48	0.070	0.032	97.28
96×96	0.084	0.065	96.67
Average	0.069	0.050	96.97

Fig. 7 Crack opening measurement locations in notched and unnotched locations

(a) ID_A

(b) ID_B

Fig. 8 Crack opening displacements according to applied loads

Fig. 9 Comparison of clip-in gage output and DIC measurement at an early stage (ID_A)

은 COC를 얻게 되어 정확한 값을 구할 수 없기 때문에
간접적인 방법으로 균열폭을 구한다. 임의의 측정방향으
로 기준선을 정하고(Fig. 10(a)), 기준선을 따라 연속된 일

련의 절점에서 DIC에 의거하여 변위를 구한다. 이를 이
용하여 균열면 상하 콘크리트에 대한 변형률을 각각 구
한 후, 균열위치로 변형률 값을 외삽법(extrapolation)으로
연장하여 균열 발생위치에서의 균열폭을 구한다(Fig 10b).
균열과 균열 사이의 영역에서는 변형률이 일정하다고 가
정하고 해석을 수행하였다. 그림에서 균열부(near cracks)
의 의미는 ROI가 균열 생성으로 인해서 직접적으로 영
향을 받아서, 상대적으로 낮은 값의 COC가 계산되는 범
위를 말한다. ROI의 크기가 24×24픽셀이면, ROI의 중심
이 균열에 다가갈 수 있는 최대값은 그 반인 12픽셀이다.

실험 시편의 해석에서는, 가로 방향으로 생성되는 균
열의 폭을 측정하기 위해서, 기준선을 시편의 중앙부에서
세로방향으로 정하였다. 해석 결과 ID_A는 3개의 복
수 균열이 그리고, ID_B의 경우는 1개의 균열이 확인되
었다(Fig. 11).

ID_A에서는 균열을 경계로 4개의 영역(아래로부터 Zone

(a) Direction of crack opening measurement

(b) Definition of crack width

Fig. 10 Method of crack opening measurement

A~D)으로 구분하여 각 영역의 변형률을 계산하고, 이를 기준으로 각 영역 사이에 형성되는 균열의 폭을 계산할 수 있다. 3개의 균열은 재하 변위가 증가함에 따라 폭이 달라지는데, 균열 2만 지속적으로 증가하여 주균열을 형성하고, 균열 1, 3은 일정 폭까지 증가한 후 같은 균열 폭을 유지하였다(Fig. 11(b)). 균열을 기준으로 구분되는 시편의 각 영역은 하중 단계별로 서로 다른 변형률을 보이는데, 이를 각각 계산한 것이 Fig. 12이다. 균열 생성과 응력의 재분배로 인해서 각 부분이 서로 다른 변형률을 보인다.

7. 전면 변위 및 국부 변형률

변위 해석 지점을 늘려서 시편의 전 영역에 대한 변위를 계측하고 전면적인 변형률의 변화를 파악할 수 있다. 계측 영역에서 약 11만개의 절점을 일정한 간격의 격자 형태로 선택하여 변위를 계측한 다음 변위벡터로 표시하고 재하단계별로 표시하였다(Fig. 13). 그림의 그래프에서 사용한 균열폭은 시편 중앙에서의 주균열이다.

Fig. 14는 실험에서 나타날 수 있는 등변위도의 형상이다. 이상적인 경우는 인장응력 하에서 변형이 대칭적으로 일어나며 Fig. 14(a)와 같다. x방향 변위 u 는 포아송비에 따른 변위값을 나타내게 된다. y방향 변위인 v 값은 인장 재하 장비의 아랫부분이 고정되고 액추에이터가 윗부분에 달려있는 경우는 위쪽의 변위가 크게 나타난다. 실

(a) Displacement variation along a reference line (ID_A)

(b) Widths of cracks (ID_A)

(c) Displacement variation along a reference line (ID_B)

(d) Width of the crack (ID_B)

Fig. 11 Crack width computation in unnotched locations

제 실험 시편에서는 좌우 어느 한쪽에서 더 큰 변위가 일어나는 것이 일반적이다(Fig. 14(b)). 이것도 단일 균열

(a) ID_A

(b) ID_B

Fig. 12 Strain changes at each local section

(a) For ideal behavior

(b) At actual specimen

Fig. 14 Displacement contours and vectors

(a) Tensile stress vs. crack width

(b) Image 5

(c) Image 15

(d) Image 22

(e) Image 30

(f) Image 35

(g) Image 40

Fig. 13 Displacement vectors at different loading steps (ID_A)

이 오른쪽에서부터 단순히 먼저 벌어지는 경우에 해당하며, 실제로는 국부적인 변형, 복수의 균열 생성 등으로 인해서 더 복잡한 형상을 띌 수 있다. Fig. 15가 실제 실험(ID_A)에서 구한 등변위도이다. Fig. 15(a), (b)에서 확인할 수 있는 선의 노이즈에서 측정오차의 수준을 가늠할 수 있다.

균열 발생 전후에 해당하는 전면 변형률 중 몇 개가 Fig. 16이다. 괄호안은 최고 하중에 도달하기 전 현재 하중의 상대적인 크기다. 시편 전면에서 변형률을 구할 때는 국부적인 변위값을 이용해서 변형률을 구해야하기 때문에 변위 정밀도가 더 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 Fig. 12에서처럼 기준선을 따라 변형률을 구하는 경우보다 노이즈가 많은 변형률도를 얻게 된다.

8. 결 론

노치 구역에서 균열개구변위 이외 구역 혹은 임의의 비노치 구역에서 생성되는 균열을 일반적인 전기저항식 게이지를 이용해서는 측정하기는 쉽지 않다. 이 논문에서는 DIC를 이용하여 이러한 균열에 대한 균열폭을 측정하는 기법을 제시하였다. 실험에서는 직접 인장시편을 사용하였지만, 보의 휨인장균열, 전단에 의한 사인장균열 뿐만아니라 일반적인 부재의 전면변위 측정 등 광범위하게 적용될 수 있다. 균열폭 계산을 더욱 자동화할 수 있는 프로그램을 개발하는 연구가 추후 필요하다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고해상도 CCD와 화상상관기법(DIC)을 이용한 균열 폭 및 변위 측정시스템을 개발하였다. DIC를 이용한 측정기법은 평균 변위오차가 0.069픽셀, 표준편차가 0.050픽셀에 불과할 정도로 높은 정밀도를 보였다. 이미지의 크기가 작을수록 단위 픽셀당 실제 길이는 줄어들므로 보다 정밀한 측정이 가능하다.
- 2) 노치 및 비노치 구역으로 구분해서 서로 다른 방식의 균열폭 계측 방법을 제시하였다. 노치 구역에서는 ROI의 추적에 따른 직접적인 측정 방법을 이용할 수 있고, 비노치 구역에서는 균열면 상하의 탄성변형 영역을 배제하고 균열폭만을 측정하는 기법을 적용할 수 있다.
- 3) 단일 균열뿐만 아니라 임의의 위치에 생성되는 복수의 균열도 재하 단계별로 균열폭을 계측할 수 있다. 또한 균열로 인해서 분리되는 시편의 각 영역별에 대한 변형률을 개별 계측할 수도 있다.
- 4) x, y방향 변위벡터, 등변위도를 통해서 재하 단계마다 시편 전체의 변형 및 균열 진행을 시각적으로 표현할 수 있다.
- 5) DIC를 이용한 비접촉식 변위 계측 방법은 균열의 생성위치를 미리 알 필요가 없으므로 임의의 균열을 계측할 수 있다. 따라서 클립인게이지의 적용 영역을 비노치 구역까지 확장시켰다고 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 국민대학교 교내연구비 및 한국건설기술연구원 Super Bridge 200의 연구지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 국토해양부제정 콘크리트 구조설계기준, 한국콘크리트학회, 기문당, 2007, 328 pp.
2. 김정용, 조운호, “이미지프로세싱기법을 이용한 균열 인식 알고리즘 및 프로그램 개발,” 대한토목학회 논문집, 22권, 4-D호, 2002, pp. 639~647.
3. Franke, E. A., Wenzel, D. J., and Davidson, D. L., “Measurement of Microdisplacements by Machine Vision Photogrammetry (DISMAP),” *Review of Scientific Instruments*, Vol. 62, No. 5, 1991, pp. 1270~1279.
4. Xi, Y., Bergstrom, T. B., and Jennings, H. M., “Image Intensity Matching Technique: Application to the Environmental Scanning Electron Microscope,” *Computational Materials Science*, Vol. 2, No. 2, 1994, pp. 249~260.
5. Choi, S. and Shah, S. P., “Deformation Measurement in Concrete under Compression Using Image Correlation,” *Journal of Experimental Mechanics*, Vol. 37, No. 3, 1997, pp. 307~313.
6. Choi, S. and Shah, S. P., “Fracture Mechanism in Cement-Based Materials Subjected to Compression,” *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, Vol. 124, No. 1, 1998, pp. 94~102.
7. 김성완, 김남식, “Digital Image Correlation 기법을 이용한 구조물의 다중 동적변위응답 측정,” 한국지진공학회 논문집, 13권, 3호, 2009, pp. 11~19.
8. Peters, W. H. and Ranson, W. F., “Digital Imaging Techniques in Experimental Stress Analysis,” *Optical Engineering*, Vol. 21, No. 3, 1982, pp. 427~431.
9. Chu, T. C., Ranson, W. F., Sutton, M. A., and Peters, W. H., “Applications of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics,” *Experimental Mechanics*, Vol. 25, No. 3, 1985, pp. 232~244.
10. James, M. R., Morris, W. L., and Cox, B. N., A, “A High Accuracy Automated Strain-Field Mapper,” *Experimental Mechanics*, Vol. 30, No. 1, 1990, pp. 60~68.
11. Smith, B. W., Li, X., and Tong, W., “Error Assessment for Strain Mapping by Digital Image Correlation,” *Experimental Techniques*, Vol. 22, No. 4, 1998, pp. 19~21.
12. Sutton, M. A., McNeill, S. R., Helm, J. D., and Chao, Y. J., *Photomechanics*, Springer-Verlag, Edited by PK Rastogi, Berlin Heidelberg, 2000, pp. 323~372.
13. Tiwari, V., Sutton, M. A., and McNeill, S. R., “Assessment of High Speed Imaging Systems for 2D and 3D Deformation Measurements: Methodology Development and Validation,” *Experimental Mechanics*, Vol. 47, No. 4, 2007, pp. 561~579.
14. Bolander, J. E., Choi, S., and Duddukuri, S. R., “Fracture of Fiber-Reinforced Cement Composites: Effects of Fiber Dispersion,” *International Journal of Fracture (IJF)*, Vol. 154, No. 1~2, 2008, pp. 73~86.
15. Leutbecher, T. and Fehling, E., “Crack width Control for Combined Reinforcement of Rebars and Fibres Exemplified by Ultra-High-Performance Concrete,” *fib Task Group, Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete - UHP-FRC*, Varenna, 2008.
16. Li, V. C. and Fischer, G., “Reinforced ECC - An Evolution from Materials to Structures,” *Proceedings of the 1st fib Congress - Concrete Structures in the 21st Century*, 2002, pp. 105~122.
17. Choi, S., Kim, J. H., and Chang, S. P., “Stability and Sensitivity of Fracture in Experiments with Concrete,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 2, No. 3, 1998, pp. 253~263.
18. Choi, S. and Shah, S. P., “Propagation of Microcracks in Concrete Studied with Subregion Scanning Computer Vision (SSCV),” *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 2, 1999, pp. 255~260.

요 약 균열폭은 콘크리트 구조물의 사용성을 평가하는 측면에서는 매우 중요하다. 균열폭을 일정값 이하로 유지할 수 있다면 낮은 투수성을 유지할 수 있으므로 콘크리트의 피복만으로도 염소이온에 의한 부식을 방지할 수 있다. 따라서 내구적인 구조물을 설계하기 위해서는 인장 균열에 대한 충분한 정보가 필요하다. 그러나 균열폭을 정확하게 계측하는 데는 몇 가지 어려움이 있다. 먼저, 균열의 생성 위치를 미리 알기 어렵다. 또한 변형률 게이지 등 탄성영역에서 사용되는 게이지는 사용할 수 없다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 화상상관기법 및 고해상도 CCD를 이용한 균열 및 변위계측 시스템을 개발하였다. 이를 통해서 임의의 위치에 생성되는 인장균열폭을 측정하는 방법을 제시하였다. 변위계측 정밀도 검증을 실시한 결과 평균오차는 0.069 픽셀, 표준편차는 0.050 픽셀이었다. UHPC를 이용하여 직접인장 실험을 수행하였다. 노치 구역과 비노치 구역에서 각각 균열을 측정하는 방법을 제시하고, 하중단계에 따라서 클립인 게이지의 결과와 비교하여 설명하였다. 시편의 전면에서 변위벡터를 구성하고, 등변위도 및 변형률도를 작성하였다. 다양한 실험에 적용할 수 있는 범용의 기법이기 때문에 임의의 균열폭 혹은 전면변위 측정 분야에서 많이 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 화상상관기법, DIC, 인장균열 측정, 균열개구변위