박리된 콘크리트의 진동 모드 형상을 이용한 콘크리트 구조물 박리 손상 영역 가시화 (I) : 모드 시험

오태근 · 신성우^{*,*}

인천대학교 안전공학과 · ^{*}부경대학교 안전공학과
(2013. 5. 29. 접수 / 2013. 9. 2. 채택)

Visualization of Delamination Region in Concrete Structures using Mode Shapes of Delaminated Concrete Section (I) : Modal Test

Taekeun Oh · Sung Woo Shin^{*,*}

Department of Safety Engineering, Incheon National University

^{*}Department of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received May 29, 2013 / Accepted September 2, 2013)

Abstract : Delamination of cover concrete due to re-bar corrosion is a critical damage reducing structural safety of reinforced concrete structures. Therefore, it should be detected and evaluated to provide appropriate maintenance to recover structural integrity. Impact-echo method, which utilizes thickness vibration characteristics of delaminated concrete section, is effective for detection and evaluation of small areal size delamination. However, it may not be applicable for large areal size delamination in which flexural vibration modes are dominated. In this study, applicability of vibration mode shapes of delaminated concrete section is investigated for visualization of delamination region in concrete structures. Numerical and experimental modal tests are performed to estimate mode shapes of delaminated concrete section and linear absolute summation technique is proposed for effective visualization of delamination region based on estimated mode shapes.

Key Words : delamination of concrete, mode shape, damage visualization, safety inspection

1. 서론

콘크리트 구조물의 철근(Re-bar)이 부식될 경우 철근 표면에는 부식 생성물(rust)이 누적되고, 이로 인해 철근을 둘러싼 콘크리트에는 팽창압이 작용하게 된다. 철근 부식에 의한 팽창압은 콘크리트의 균열을 유발하며 부식이 심화될수록 균열도 진전되어 종국에는 Fig. 1과 같이 피복 콘크리트가 박락(spalling)되거나 또는 박리(delamination)되는 손상이 발생하게 된다¹⁾.

피복 콘크리트의 박리 또는 박락은 철근과 콘크리트의 부착력을 약화시키며 이를 방지할 경우 구조물의 붕괴로 이어질 수 있는 내하력 저하가 발생할 수 있기 때문에, 이러한 손상을 탐지 및 평가하는 것은 콘크리트 구조물의 안전성 확보를 위해 매우 중요하다. 그러나, 손상 부위가 외부에 노출되어 육안으로 탐지가 가능한 박락과는 달리, 박리의 경우 손상의 발생 및 진전이 구조물 내부에서 이루어지기 때문에 이를 육안으로 탐지하기 어려운 문제점이 있으며, 따라서 이를 효과적으로 탐지하고 손상의 크기를 평가할 수 있는 비파괴검사 방법이 필요하다²⁾.

Fig. 1. Spalling(left) and delamination(right) damages of cover concrete due to re-bar corrosion¹⁾.

콘크리트 구조물 내부 박리 손상을 탐지 및 평가할 수 있는 대표적인 비파괴검사 기법으로는 충격-반향 기법이 있다³⁾. 충격-반향 기법에 의한 박리 손상 탐지 원리는 다음과 같다. 구조체 상부 표면을 충격하여 탄성파를 발생시키면 탄성파 성분의 일부는 상부 및 하부 경계면 사이에서 반복적인 반사가 일어나고 이로 인해 구조체는 두께 방향으로 공진하게 된다. 이 때 응답을 측정하여 주파수 영역으로 변환하면, 크기가 최대인 성분의 주파수는 반복 반사가 일어나는 탄성파 성분의 주파수와 같으며, 또한 이 주파수는 구조체 상하부 경계면 사이의 두께에 대한 두께 방향 진동 모

^{*}Corresponding Author: Sung Woo Shin, Tel: +82-51-629-6473, E-mail: shinsw@pknu.ac.kr
Department of Safety Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-Gu, Busan 608-739, Korea

드의 고유주파수와 일치 한다. 만약, 구조체의 상부 충격 면과 하부 경계면 사이에 박리가 있으면 탄성파의 반복 반사는 상부 경계면과 박리면 사이에서 일어나기 때문에 두께 방향 진동 모드의 고유주파수가 변화되며, 이에 따라 계측된 응답의 주파수 영역 신호에서 최대 크기를 갖는 성분의 주파수도 마찬가지로 변화하므로 박리 손상의 유무를 알 수 있다³⁾.

한편, 박리 손상의 크기가 상대적으로 작은 경우에 박리된 콘크리트 표면의 여러 위치에서 충격-반향 시험을 실시하면, 충격 위치에 따른 두께 방향 진동 모드의 차수(order)에 변화가 거의 없기 때문에 박리 손상 영역 내에서는 일정한 고유주파수를 얻을 수 있으며, 따라서 고유주파수의 분포를 이용하면 손상 영역과 비손상 영역을 구분할 수 있는 박리 영역의 가시화가 가능하고 박리 영역의 크기를 평가할 수 있다⁴⁾. 그러나, 박리 손상의 크기가 상대적으로 큰 경우에는 이러한 방법으로 박리 영역의 가시화가 어려운데, 이는 박리 손상의 크기가 클 경우 박리된 콘크리트의 충격에 대한 거동 특성이 박리 손상의 크기가 작거나 또는 없는 경우와는 다르기 때문이다⁵⁾.

박리 손상의 크기가 클 경우 박리된 콘크리트 표면에 충격을 가하면, 콘크리트는 단부가 구속된 평판의 휨 진동과 유사한 거동 양상을 보인다⁶⁾. 이 경우 응답을 계측하여 주파수 영역으로 변환하면, 두께 진동 모드의 고유주파수 성분보다는 상대적으로 저주파 대역에 존재하는 평판 휨 진동 모드의 고유주파수 성분이 지배적인 응답 성분으로 나타난다⁵⁾. 충격-반향 응답에서 저주파 대역 성분이 지배적일 경우 이는 시험 위치에서 상대적으로 큰 크기의 박리가 존재하고 있다는 것을 의미하며 따라서 이러한 박리의 유무에 대한 탐지는 가능하다고 볼 수 있다^{4,5)}. 그러나, 충격 위치에 따라 가진되는 모드의 차수가 일정한 두께 진동 모드와는 달리, 휨 진동 모드는 여러 차수의 모드가 동시에 가진될 수 있을 뿐만 아니라 충격 위치에 따라 각 모드의 진동 기여도가 서로 다르기 때문에 응답에서 최대 크기를 갖는 성분의 주파수가 시험 위치에 따라 다를 수 있고, 따라서 손상 영역 가시화에 최대 크기를 갖는 주파수 성분을 이용하기 어려운 문제점이 있다⁵⁾.

특정 진동 모드의 특성에 대한 지표에는 고유주파수 뿐만 아니라 모드 형상(mode shape)도 있다. 고유주파수가 특정 진동 모드의 시간적 특성을 나타낸다면, 모드 형상은 특정 고유주파수에 해당하는 진동 모드의 공간적 특성을 나타낸다. 고유주파수가 중복되지 않는 이상 특정 고유주파수에 해당하는 진동 모드의 모드 형상은 유일하기 때문에, 다양한 진동 모드가 동시에 가진되더라도 특정 고유주파수에 해당하는 진동 모드의 모드 형상은 여러 위치에서의 응답 계측 자료로부터 유일하게 추정할 수 있다⁷⁾.

본 연구에서는 박리 손상 영역 가시화에 있어서 고유주파수 분포를 이용하기 어려운 박리 손상에 대해 모드 형상의 적용 가능성을 알아보고자 한다. 이를 위해 박리 손상이 모사된 콘크리트 구조물에 대한 실험적 및 수치해석적 모드 시험을 실시하여 박리부 콘크리트의 모드 형상을 구하고, 모드 형상으로 가시화된 박리 영역과 실제 박리 영역

을 비교 분석하여 제안된 방법의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 실험 모델에 대한 모드 시험

본 연구를 위해 두께가 25 cm이고, 가로와 세로가 각각 100 cm와 150 cm 인 콘크리트 슬래브 실험체를 제작하였다. 슬래브 제작에 사용된 콘크리트는 물/시멘트비가 0.38 이고, 28일 압축 강도는 약 30 MPa이다. 한편, 실제 콘크리트 구조물에서 박리 손상이 발생할 경우 박리 손상의 모양과 크기는 임의적이어서, 이러한 박리 손상을 실험체에 구현하기는 어렵다. 본 연구의 목적은 박리된 콘크리트의 모드 형상을 이용하여 박리 영역의 가시화가 가능한 지를 알아보는 것에 있으므로, 실제 박리 대신 콘크리트 실험체 제작 과정에서 Fig. 2와 같이 원형 (직경 300 mm), 정사각형 (300 mm×300 mm), 직사각형 (400 mm×600 mm) 플라스틱 판 (두께 5 mm)을 슬래브 상부 표면으로부터 깊이 50 mm 위치에 삽입하여 크기와 모양이 서로 다른 박리 손상을 인공적으로 모사하였다.

박리된 콘크리트의 모드 형상을 실험적으로 구하기 위해, 박리 영역부를 가로/세로 간격이 각각 25 mm인 grid로 분할하고(Fig. 2), 각 grid의 교점을 계측 자유도로 하는 모드 시험을 실시하였다. 모드 시험 방법은 충격을 가하는 입력 자유도의 위치는 고정하고, 응답을 계측하는 출력 자유도의 위치를 바꿔가면서 각 자유도에 대한 주파수 응답 함수를 구하는 시험 방법인 Moving Sensor Test 방법을 이용하였다⁸⁾. 모드 시험 과정에서 입력은 tip size가 5 mm인 충격 해머를 이용하였고, 응답 계측은 이동 계측이 편리한 비접촉 방식의 air-coupled sensor (Frequency Range: 1-20 kHz, Sensitivity: 1.8 mV/Pa)를 이용하였다. 각 자유도 별 출력 응답은 1 μ s 간격으로 4 ms 동안 계측하였으며, 계측된 신호는 Fourier 변환하여 각 자유도 별 주파수 응답 함수 계산에 이용하였다. 한편, 각 자유도 별로 계측된 응답 신호로부터 해당 자유도에 대한 주파수 응답 함수를 계산하기 위해서는 입력에 대한 정규화가 필요하다. 본 연구에서는 Fig.

Fig. 2. Concrete slab specimen with artificial delaminations.

Fig. 3. Experimental setup for modal test.

3과 같이 reference sensor를 특정 자유도 위치에 고정 설치하고 각 자유도 별 응답 계측 시 입력을 동시에 계측하여 주파수 응답 함수의 정규화에 이용하였다.

마지막으로 특정 고유주파수에 해당하는 진동 모드의 모드 형상은, 정규화된 주파수 응답 함수에서 특정 고유주파수 성분의 크기가 해당 진동 모드의 모드 변위에 비례한다는 점을 이용하여⁸⁾, 각 자유도별 모드 변위를 구하고 이를 좌표계에 대입하여 구하였다.

2.2. 수치 모델에 대한 모드 시험

박리부 콘크리트의 모드 형상 특성을 분석하고, 이로부터 모드 형상을 이용한 박리 영역 가시화 방법을 알아보기 위해 직사각형 박리에 대한 수치 해석적 모드 시험을 실시하였다. 상용 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Fig. 4와 같이 3차원으로 직사각형 박리를 포함한 구조체를 유한요소로 모델링하였다. 유한요소모델링 과정에서 해석 대상 영역은 mesh 간격을 5 mm로 하여 가로 800 mm, 세로 1200 mm, 두께 250 mm의 영역을 8-node solid 요소를 이용하여 모델링하였으며, 해석 대상 영역의 외부는 무한요소를 이용하여 모델링하였다. 한편, 상부 표면에서 50 mm 아래에 가로 400 mm, 세로 600 mm, 두께 5 mm인 빈 공간을 만

Fig. 4. Finite element model of concrete slab specimen with rectangular delamination.

들어 직사각형 박리를 모사하였으며, 박리 영역은 해석 대상 영역의 중앙부에 위치하도록 모델링하였다. 해석 대상 영역 중심 위치의 상부 표면에 최대 크기가 1 N이고 duration이 60 μ s인 cubic half-sine 함수 형태의 충격 하중을 가하고, 표면에서의 변위 응답을 각 노드별로 (노드간 간격 10 mm) 구하였다. 변위 응답은 1 μ s간격으로 8 ms 동안 구하였으며, 노드별 변위 응답으로부터 모드 형상을 구하는 과정은 앞서 실험적 방법에서와 동일한 방법을 이용하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 모드 형상의 가시화 특성

모드 형상을 이용한 박리 영역 가시화 방법을 알아보기 위해 수치해석적으로 구한 박리부 콘크리트의 모드 형상에 대한 가시화 특성을 우선 분석하였다.

직사각형 박리의 특정 진동 모드에 대한 각 자유도별 모드 변위를 contour 형태로 표현한 모드 형상은 Fig. 5와 같다. 1300 Hz의 고유주파수를 갖는 1차 휨 진동 모드의 경우 모드 형상이 박리 영역 내부는 단일 영역으로 명확하게 가시화하고 있으나, 모드 형상으로부터 박리 영역의 외부 경계를 명확하게 구분하는 것은 어려운 것이 확인된다. 반면에 2250 Hz와 2700 Hz에 해당하는 2차와 3차 휨 모드의 모드형상은 박리 영역 내부를 각각 2개와 3개의 분할된 영역으로 가시화하여 마치 내부에 다중 박리가 있는 것으로 표현되지만, 박리 영역의 외부 경계는 1차 모드에 비해 보다 뚜렷하게 확인되며, 특히 2차 모드에 비해 3차 모드가 더욱 경계를 명확하게 가시화하고 있는 것을 알 수 있다. 2차와 3차 휨 모드의 경우 박리 영역의 내부가 분할되어 가시화되는 이유는 내부 nodal point의 존재 때문인 것으로 판단된다. 즉, Fig. 6에 나타낸 바와 같이 1차 휨 모드의 경우 모드 변위의 크기가 0인 nodal point가 모드 형상의 외부 경계에만 위치하고 있으나, 2차와 3차 휨 모드의 경우 모드 형상의 외부 경계 뿐만 아니라 내부에도 nodal point가 존재하고 있음이 확인된다. 한편, Fig. 6에서는 고차 모드일수록 박리 영역 외부 경계 nodal point에서의 모드 변위 기울기가 더욱 큰 것을 확인할 수 있으며, 박리 영역 외부 경계가 고차 모드일수록 더욱 명확하게 보이는 이유는 이러한 모드 변위의 급격한 공간적 변화에 기인하는 것으로 판단된다.

3.2. 모드형상을 이용한 박리 영역 가시화 기법

1차 휨 모드의 경우는 박리 영역을 단일 영역으로 가시화 할 수 있는 장점은 있으나 박리 영역의 외부 경계를 가시적으로 확인하기 어려운 단점이 있으며, 반면에 2차 이상의 고차 모드는 다중 박리가 존재하는 것처럼 박리 영역을 가시화하는 단점은 있으나, 박리 영역의 외부 경계는 명확하게 구분할 수 있는 장점이 있다는 것을 앞선 결과로부터 알 수 있다. 따라서, 모드 형상을 이용하여 박리 영역을 보다 정확하게 가시화하기 위해서는 1차 모드의 장점과 2차 이상 고차 모드의 장점을 모두 고려할 수 있는 가시화 방법이 필요하다.

Fig. 5. Mode shapes for rectangular delamination.

Fig. 6. Modal displacement across the centerline of delaminated concrete section.

Fig. 7은 각 자유도의 모드 변위 절대값을 모든 차수의 모드에 대해 선형 합산하고 이를 contour 형태로 나타낸 것이다. 그림으로부터 모든 차수의 모드 형상에 절대값을 취한 뒤 선형 합산하면, 단일의 모드 형상을 이용하는 경우보다 훨씬 더 정확하게 박리 영역을 가시화할 수 있음을 알 수 있으며, 이는 모드 형상을 이용한 박리 영역 가시화에 있어서 여러 차수 모드의 선형 절대값 합산(Linear Absolute Summation)방법이 효과적인 방법임을 입증한다.

3.3. 박리 영역 가시화 기법의 실험적 검증

모드 형상을 이용한 박리 영역 가시화 방법의 타당성을 검증하기 위해 실험을 통해 구한 박리부 콘크리트의 모드형상을 비교 분석하였다.

Fig. 7. Linear absolute summation of mode shapes.

Fig. 8은 정사각형 박리에 대한 모드 형상이며, Fig. 9와 10은 각각 원형과 직사각형 박리에 대한 결과이다. 앞서 수치해석적 연구에서와 마찬가지로 1차 휨 모드의 경우 박리 영역 내부를 단일 영역으로 가시화 하지만, 외부 경계는 2차 휨 모드에 비하여 명확하지 않은 것을 확인할 수 있으며, 반면에 2차 휨 모드의 경우 내부 영역은 2개의 영역으로 가시화되지만 외부 경계는 1차 모드에 비해 보다 뚜렷하게 가시화되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 박리 영역 가시화를 위한 박리부 콘크리트의 특정 고유 주파수에 대한 유일한 모드 형상을 모드 시험 자료 (주파

Fig. 8. Mode shapes for square delamination (Left) 1st flexural mode(2500 Hz), (Right) 2nd flexural mode(4750 Hz).

Fig. 9. Mode shapes for circular delamination (Left) 1st flexural mode(3000 Hz), (Right) 2nd flexural mode(5250 Hz).

Fig. 10. Mode shapes for rectangular delamination (Left) 1st flexural mode(1400 Hz), (Middle) 2nd flexural mode(2250 Hz), (Right) 3rd flexural mode(2950 Hz).

Fig. 11. Linear absolute summation of mode shapes (Left) square delamination case, (Middle) circular delamination case, (Right) rectangular delamination case.

수 응답 함수)로부터 효과적으로 구할 수 있음을 의미한다.

Fig. 11은 각 자유도의 1차와 2차 모드 변위 절대값을 선형 합산한 결과이다. 단일 모드 형상을 이용한 경우에 비해 보다 정확하게 박리 영역을 가시화하고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 모드 형상을 이용한 박리 영역 가시화에 있어서 여러 차수 모드의 선형 절대값 합산(Linear Absolute Summation)방법이 실제에서도 유효하게 적용할 수 있는 방법임을 입증한다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 구조물 박리 손상 영역의 가시화에 있어서 고유주파수 분포를 이용하기 어려운 박리 손상에 대해 모드 형상을 이용하여 박리 영역을 가시화하는 방법에 대해 알아보았으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 1차 휨 모드의 모드 형상은 박리 영역을 단일 영역으로 가시화 하지만 박리 영역의 외부 경계는 뚜렷하게 구분할 수 없음을 알 수 있었다.

2) 2차 이상 고차 모드의 모드 형상은 다중 박리가 존재하는 것처럼 박리 영역을 가시화하지만 박리 영역의 외부 경계는 1차 모드에 비해 명확하게 구분 가능함을 알 수 있었다.

3) 여러 차수의 모드에 대한 모드 변위 절대값을 선형 합산하면 단일 모드 형상을 이용하는 경우보다 훨씬 더 정확하게 박리 영역을 가시화할 수 있음을 알 수 있었으며, 또한 실험을 통하여 이 방법이 실제적으로도 유효한 방법임을 검증할 수 있었다.

감사의 글: 본 연구는 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) Z. P. Bazant, "Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures-Application", *Journal of the Structural Division*, Vol. 105, No. 6, pp. 1155~1166, 1979.
- 2) M. G. Stewart and D. V. Rosowsky, "Structural Safety and Serviceability of Concrete Bridges Subject to Corrosion", *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 146~155, 1998.
- 3) M. J. Sansalone and W. B. Streett, "Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry", Bullbrier Press, 1997.
- 4) J. Zhu and J. S. Popovics, "Imaging Concrete Structures Using Air-coupled Impact-Echo," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 133, No. 6, pp. 628~640, 2007.
- 5) S. W. Shin, J. S. Popovics and T. Oh, "Cost Effective Air-coupled Impact-Echo Sensing for Rapid Detection of Delamination Damage in Concrete Structures", *Advances in Structural Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 887~896, 2012.
- 6) T. Oh, J. S. Popovics and S. H. Sim, "Analysis of Vibration for Regions above Rectangular Delamination Defects in Solids", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332, No. 7, pp. 1766~1776, 2013.
- 7) L. Meirovitch, "Principles and Techniques of Vibrations", Prentice-Hall, 1997.
- 8) D. J. Ewins, "Modal Testing : Theory, Practice, and Application", Research Studies Press, 2000.