

# 철근 콘크리트 보의 손상평가에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams

노원균\*                      심창수\*\*                      홍창국\*\*\*                      김기봉\*\*\*\*  
Roh, Won, Kyoun, Shim, Chang Su, Hong, Chang Kuk, Kim, Ki Bong

### Abstract

This paper deals with the damage assessment of the concrete beam using static displacements and the flexural stiffness reduction of the beam was evaluated. Simply supported concrete beams were loaded at the mid-span, and the applied load level ranged 20%, 40%, 80% of the flexural strength of the beam. When the displacements from the tests were increased more than 10% of the initial values, flexural cracks occurred. Judging from the observed cracks, damaged area of the beams were assumed and the stiffness reduction using the smeared-cracking concept was estimated to minimize the error between the test results and analytical results. Four stages of the behavior of a RC beam, which are uncracked, initial cracking, stabilized cracking and post-yielding, can be considered to assess the damage of RC beams. Main parameters for the assessment were cracking area and the stiffness reduction ratio. In each stage, damaged elements and their stiffness reduction were estimated to minimized the error.

### 1. 서론

교량구조물은 여러 가지 복합적인 특성 때문에 전체 구조계의 거동과악이나 국부적인 손상 탐지에 제약을 받는다. 최근 연구되고 있는 교량의 손상 탐지 기법은 결과의 정확성을 높이기 위해 System Identification, 신경망 등을 도입하고 있다. 기존의 연구 결과들은 손상 탐지에 대한 결과가 대체로 명확한 강구조물에 대하여 많이 진행되었다. 반면 강구조물보다 손상에 대한 메카니즘이 복잡하고 손상 지표로서 영향이 큰 균열에 대한 평가가 쉽지 않은 콘크리트는 연구가 많이 진행되지 않았다. 강구조물과는 달리 개개의 균열이 미치는 영향보다 균열의 증가와 균열부의 강성 감소가 큰 변수가 되는 RC구조물의 손상탐지를 위한 기초 연구로 RC보에 대하여 측정변위와 균열범위에 따른 강성감소에 주목하여 손상탐지를 시도하였다.

### 2. 이론적 배경

콘크리트 구조물에서 균열과정은 크게 두 단계로 구분할 수 있다. 하나는 균열형성단계이고 다른 하나는 안정화 균열단계이다. 균열형성단계에서는 변형의 증가에 의해 주균열이 발생되며 단지 몇 개의 단독 균열이 발생한다. 이 때 인장력과 균열폭은 변형값에 영향을 받지 않으며 균열수는 변형 값에 의해서 영향을 받는다. 안정화 균열단계에서는 하중에 의해서 주균열이 발생되며 균열폭이 일반적으로 커지게 된다. 이 때 균열수는 대체로 일정하고 균열폭은 하중의 단계에 따라 비례해서 나타난다. 이를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

콘크리트는 균열이 발생하면 각 균열에서만 강성이 감소하는 강제와는 달리 눈에 보이지 않는 미세균열들이 내부에 발생되어 강성이 감소하는 영역이 나타난다. 따라서 콘크리트에서는 Discrete 균열만으로 손상을 판단하기는 어렵다. 이 논문에서는 Smeared Cracking의 개념을 사용하여 손상 평가를 손상영역으로 고려하고자 하였다. 이를 그림으로 표현하면 그림 2와 같으며 본 연구에서는 각각의 균열에 대한 손상 탐지보다는 균열이 발생한 영역을 가정해서 그 영역의 강성 감소를 평가함으로써 손상을 판단하였다.

\* 정회원, 중앙대학교 일반대학원 토목환경공학과 석사과정

\* 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 전임강사

\*\* 정회원, 동해대학교 공과대학 건설시스템공학과 교수

\*\* 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수

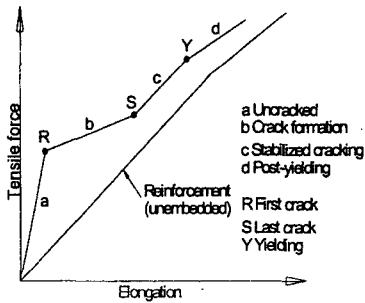
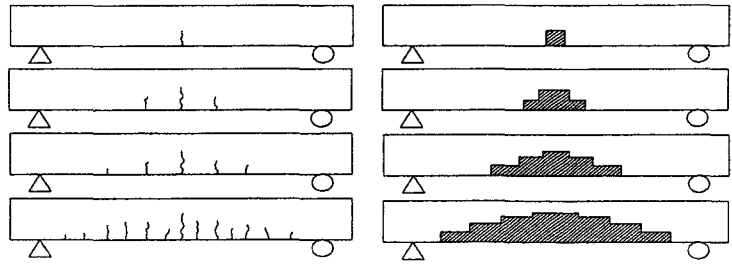


그림 1 콘크리트의 이상적 균열거동



(a) Discrete Crack Model (b) Smeared Crack Model

그림 2 균열 해석 모델 비교

### 3. 실험 및 수치해석

#### 3.1. 실험 개요

본 연구에서 사용한 실험체는 그림 3과 같이 양 지점이 힌지 조건을 가지는 단순보이다. 단순보에서 실험체와 수치해석 모델간의 offset 오차를 줄이기 위해서 지점부의 중립축 위치에 강봉을 설치하고 베어링으로 고정하였다. 실험체의 단면제원은 표 1과 같다.

실험체의 지간 중앙에서 하중을 재하하여 휨파괴를 유도하였다. 또한 실험체 하단부에 500mm간격으로 변위계를 설치하여 변위값을 측정하였다. 하중은 파괴하중(63.7kN)의 20%~80%범위에서 단계별로 재하하여 측정하였다. 균열의 측정은 실험체 표면에 100mm 간격으로 격자를 그리고 균열 위치와 크기를 표현하였다. 실험의 하중 재하와 측정점은 그림 3과 같다.

표 1 실험체 물성치

$f_{ck}$	$f_y$	$I$	$E_c$	$E_s$	주철근 포와송비( $\nu$ )	철근비( $\rho$ )
40 Mpa	300 Mpa	4.52E8 mm <sup>4</sup>	26,128 Mpa	196,140 Mpa	0.30	0.0234

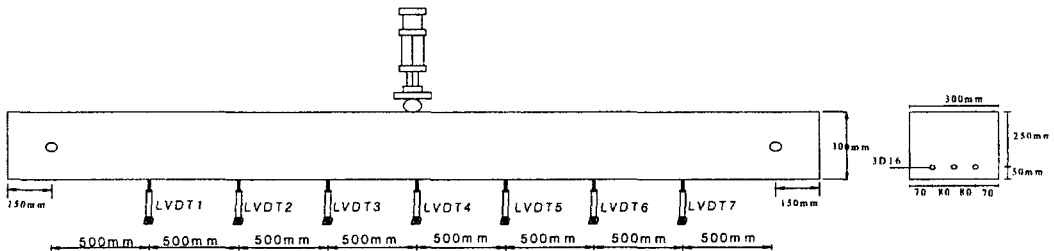


그림 3 실험체 형상

#### 3.2. 수치 해석

손상영역과 유효강성 평가를 위해서 범용유한요소프로그램을 사용하여 실험체에 발생한 균열에 대해 균열부를 가정하고 균열부요소의 강성을 감소시켜 해석하였다. 요소는 보요소를 사용하였으며 실험체의 균열을 측정하는 간격인 100mm보다 작은 50mm 간격으로 모델링하여 좀 더 정확한 손상범위를 가정하고자 하였다. 아래의 그림 4는 유한요소 해석모델을 표현한 것이다.

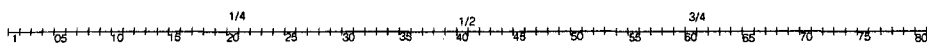


그림 4 유한요소 해석 모델

### 3.3 실험 결과와 분석

실험에서 최초의 균열 발생 시점은 8.92N이었고 파괴는 약 63.7kN 정도에서 일어났다. 실험결과를 이상적인 균열 거동에 맞추어 추정하면 그림 5에 나타낸 것과 같이 비균열 단계는 약 14%에 위치한다. 균열증가구간은 균열 폭이 선형적으로 증가하는 25.48kN(40%)까지로 설정하고 이후의 단계를 안정화 균열 단계로 설정하였다. 항복구간은 철근의 변형률값이 선형구간을 벗어나 항복의 형태를 나타내는 50.96kN(80%) 이후의 구간으로 설정하였다.

실험에서는 이상적인 균열 거동의 단계별로 하중을 재하하여 점하중에 대한 변위를 측정하였다. 각 하중에 대한 변위를 수치해석값과 비교 하여 실험값과 해석값의 오차가 10% 이상 발생한 경우에 균열이 발생 혹은 진전한 것으로 간주하여 실험체의 균열도를 확인하였다. 이렇게 확인한 균열의 범위는 수치해석에서 요소의 범위를 가정하고 강성값을 감소시키면서 수치해석을 재수행하여 실험값과 일치하도록 최적화하였다.

그림 6과 표 2는 균열 발생전의 하중-변위를 이용하여 Baseline이 되는 강성 값을 설정하고 이 강성값을 사용하여 수치해석을 수행하고 결과값과 실험값을 비교한 것이다.

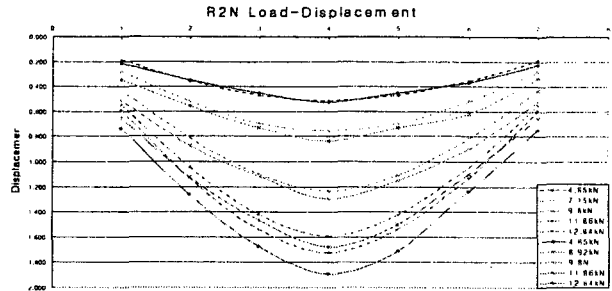
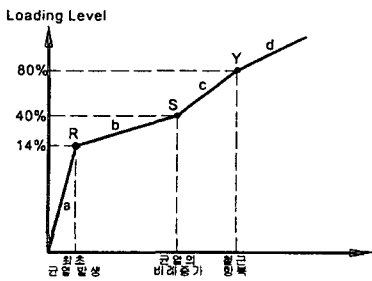


그림 5 실험값을 토대로 작성한 균열 거동

그림 6 비균열 단계의 처짐 비교(점선:수치해석값, 실선:실험값)

표 2 비균열 단계에서의 처짐 비교

처짐 측정 위치	1000mm	1500mm	2000mm	2500mm	3000mm	하중 (kN)
실험값(mm)	0.351	0.454	0.525	0.454	0.370	4.85 (비균열)
해석값(mm)	0.354	0.470	0.515	0.470	0.354	
오차(%)	-0.798	-3.610	1.977	-3.610	4.378	
실험값(mm)	0.771	0.977	1.120	1.013	0.810	8.92 (초기 균열 발생)
해석값(mm)	0.650	0.865	0.946	0.865	0.650	
오차(%)	15.639	11.487	15.529	14.633	19.701	

8.92kN 이상의 하중이 작용할 경우 실험값과 해석값의 오차가 10% 이상으로 커진다. 이것은 중앙부에 균열이 발생하여 나타난 결과로 실험체의 균열을 확인 해 보면 8.92kN 부근에서 균열이 다음의 그림 7과 같이 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이 균열을 수치해석 모델에서 6개의 요소(No. 39~44)에 대한 강성을 감소시켜 모델링하고 최적화를 수행한 결과 강성값을 47.36% 정도 낮추어 표 3과 같이 최적화 하였다. 중앙부 6개 요소의 강성을 47.36% 낮춘 해석값과 실험값이 11.86kN에서 다시 한번 10% 이상의 오차가 발생하는 것으로 미루어보아 이 하중 재하 시기에 또 다른 균열이 발생한 것으로 추정할 수 있다. 이에 12.84kN에서의 균열 형상을 확인해 보면 그림 98와 같이 2개의 새로운 균열이 발생하였음을 알 수 있다. 이를 중앙부 6개 요소(No. 39~44)까지의 강성을 52.63% 감소시키고 중앙부 요소에서 양쪽으로 6개 요소(No. 35~46)의 강성을 42.11% 감소시켜 수치해석을 통한 최적화를 수행하여 표 4와 같은 결과를 얻었다.

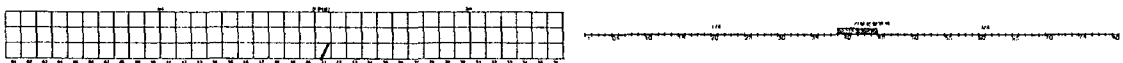


그림 7 8.92N에서 발생한 초기 균열 형상과 유한요소 해석을 위한 Smeared Crack Model

표 3. 중앙부 6개의 요소의 강성을 47.36% 낮춘 경우의 처짐 값

처짐측정위치	1000mm	1500mm	2000mm	2500mm	3000mm	하중(kN)
실험값(mm)	0.771	0.977	1.120	1.013	0.810	8.92 (초기균열)
해석값(mm)	0.740	0.999	1.222	1.006	0.744	
오차(%)	4.02	-2.27	-0.20	0.71	8.10	
실험값(mm)	0.877	1.117	1.296	1.153	0.900	9.8 (초기균열)
해석값(mm)	0.813	1.098	1.233	1.105	0.818	
오차(%)	7.27	1.70	4.85	4.15	9.11	
실험값(mm)	1.122	1.465	1.681	1.502	1.100	11.86 (추가균열발생)
해석값(mm)	0.984	1.329	1.492	1.337	0.990	
오차(%)	12.30	9.32	11.24	10.96	10.01	

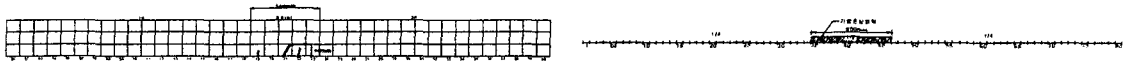


그림 8 1284N에서의 균열 형상과 유한요소 해석을 위한 Smeared Crack Model

표 4 중앙부 6개의 요소의 강성을 52.63%, 중앙부 외측 6개의 요소의 강성을 42.11% 낮춘 경우의 처짐 값

처짐측정위치	1000mm	1500mm	2000mm	2500mm	3000mm	하중(kN)
실험값(mm)	1.122	1.465	1.681	1.502	1.100	11.86 (추가균열)
해석값(mm)	1.091	1.490	1.682	1.492	1.093	
오차(%)	2.73	-1.68	-0.05	0.65	0.63	
실험값(mm)	1.262	1.675	1.891	1.712	1.240	12.84 (추가균열)
해석값(mm)	1.182	1.613	1.821	1.616	1.184	
오차(%)	6.38	3.72	3.71	5.63	4.56	

#### 4. 결론

기존의 SI(System Identification)기법은 개개의 손상을 찾아내는 것에 초점을 맞추었다면 본 논문에서는 손상의 범위와 그 범위의 강성감소를 통하여 손상을 규정하고자 하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

실험값과 Baseline 해석값의 차이를 비교하여 오차가 10%이상일 경우에 균열범위를 확인하여 수치해석 요소의 범위를 가정하고 강성값을 감소시키는 최적화를 수행한 결과 초기 균열이 발생한 경우 손상영역과 그 영역에서의 유효강성을 평가한 결과 해석과 실험이 잘 일치하였다. 균열이 진전하고 새로운 균열이 발생함에 따라 측정된 정적 데이터로부터 새로운 손상영역과 유효강성을 도출하는 평가절차를 통해 초기균열단계, 안정화균열단계 등에 적합한 유한요소해석 모델의 업데이트가 가능하였다. 철근콘크리트 구조물의 육안관찰균열과 수치적인 해석모델에서 손상영역 및 손상정도에 대한 평가의 연관성을 높일 수 있는 실험적 연구가 지속될 경우 구조물 상태 평가가 좀 더 정확하게 수행될 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00163-0)지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

1. 정인근, "System Identification 기법을 이용한 RC Beam의 손상탐지에 관한 실험적 연구", 중앙대학교 토목공학과 박사학위논문, 2003.
2. Johan Maeck, "Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring", Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
3. Progress report, "Serviceability Models", CEB(Bulletin d'Information No.235), 1997.