손상영역을 이용한 철근 콘크리트 보의 손상평가

DamageAssessmentofReinforcedConcreteBeamsusingDamage-areaconcept

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

Abstract

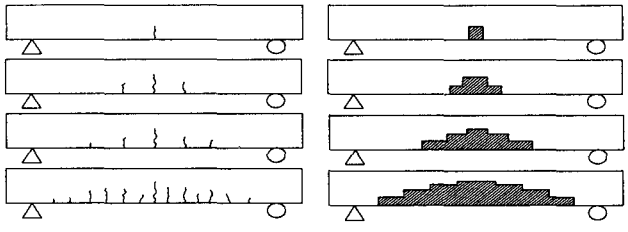
This paper deals with the damage assessment of the concrete beam using Damage-area concept and the modulus of elasticity reduction of the beam was evaluated. Simply supported concrete beams were loaded at the mid-span. When the displacements from the tests were increased more than 10% of the initial values, flexural cracks occured. Judging from the observed cracks, damaged area of the beams were assumed and the modulus of elasticity reduction using the smeared-cracking concept was estimated to minimize the error between the test results and analytical results. Main parameters for the assessment were height of the crack area, length of the crack area, position of the crack area and the modulus of elastic reduction ratio. In each stage, damaged elements and their stiffness reduction were estimated to minimized the error.

1. 서론

콘크리트 구조물에서 손상은 균열의 형태로 나타난다. 콘크리트 구조물에서의 균열은 육안으로 보이는 균열뿐 아니라 육안관찰이 불가능한 미세균열 및 내부 균열이 함께 발생한다. 이 경우 육안관찰로는 손상을 탐지하기 어렵다. 이와같은 육안관찰로는 판단하기 어려운 콘크리트의 손상을 균열영역과 균열영역에서의 강성(탄성)의 감소로써 판단해보고자 한다.

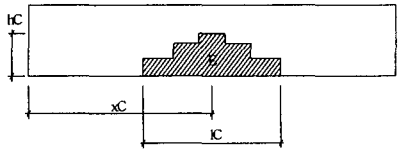
2. 이론적 배경

보의 중앙에서 하중이 재하된 경우 콘크리트의 파괴형상은 그림 1.의 (a)와 같은 형상을 나타낸다. 이를 본 연구에서 수행한 균열영역(Smeared model)을 이용하여 나타내면 (b)와 같은 형태로 나타낼 수 있다. 균영영역을 이용하여 손상탐지를 하기 위해 그림 2에 나타낸 것과 같은 매개변수를 설정하고 모델화 하였다.



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

그림 1. 균열 해석 모델 비교



hC ... height of the crack area,
lC ... length of the crack area,
xC ... position of the crack area and
E ... modulus of elasticity

그림 2. 수치해석을 위한 모델화

* 정회원, 중앙대학교 일반대학원 토목환경공학과 석사과정
** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 조교수
*** 정회원, 중앙대학교 건설대학 토목공학과 교수
**** 정회원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 박사수료
***** 정회원, 동해대학교 토목공학과 교수

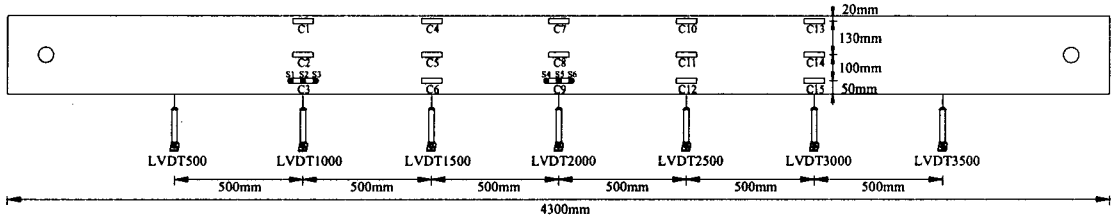
3. 실험 및 수치해석

3.1. 실험 개요

본 연구에서 사용한 실험체는 그림 5와 같이 양 지점이 힌지 조건을 가지는 단순보이다. 단순보에서 실험체와 수치해석 모델간의 offset 오차를 줄이기 위해서 지점부의 중립축 위치에 강봉을 설치하고 베어링으로 고정하였다. 실험체의 단면은 그림 4., 물성치는 표 1.과 같다.

실험체의 지간 중앙에서 하중을 재하하여 휨파괴를 유도하였다. 또한 실험체 하단부에 500mm간격으로 변위계를 설치하여 변위값을 측정하였다. 하중은 파괴하중(63.7kN)의 20%~80%범위에서 표 2.와 같이 단계별로 재하하여 측정하였으며 중앙부 하중·변위 그래프는 그림 6과 같다. 균열의 측정은 실험체 표면에 100mm 간격으로 격자를 그리고 균열 위치와 크기를 표현하였다. 실험의 하중 재하와 측정점은 그림 3.과 같다.

실험체 별 손상위치 및 손상의 정도는 표 3에서 나타낸 것과 같으며 손상은 알루미늄 바를 설치하여 콘크리트를 타설한 뒤에 알루미늄바를 제거하였다.



C : concrete strain gage , S : steel strain gage , LVDT : equipment to take a measurement of the displacement

그림 3. Measured Location

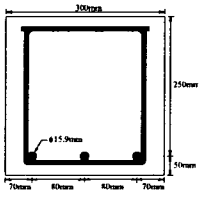


그림 4 실험체 단면

표 1. 실험체 물성치

콘크리트			철근		
물성	기호	크기	물성	기호	크기
압축강도	f_{ck}	40 MPa	항복강도	f_y	300 Mpa
탄성계수	Ec	26,128 MPa	탄성계수	Es	196,140 MPa
			포와송비	υ	0.30
			철근비	ρ	0.0234

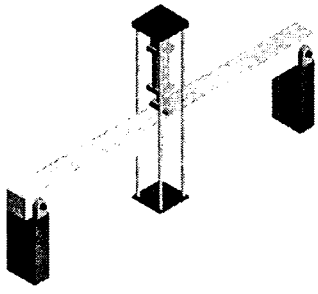


그림 5. Test Setup

표 2. Static load steps

Static load	RC Beam(kN)
Step 0 (reference)	0
Step 1	9.8
Step 2	12.74
Step 3	19.11
Step 4	25.48
Step 5	31.85
Step 6	50.96
Step 7	63.7

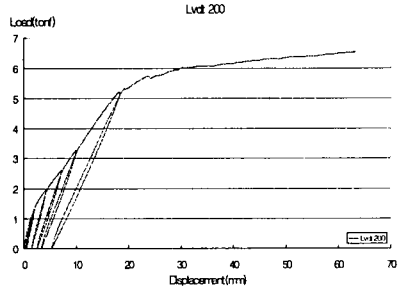


그림 6. Load vs. displacement

표 3. 각 실험체 비교

실험체명	손상유도위치	손상의 크기
R1N, R2N	손상 없음	손상 없음
R1C, R2C	1/2지점	2cm
R1Q, R2Q	1/4지점	2cm
R1CQ, R2CQ	1/2지점과 1/4지점	각 2cm

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 6은 유한요소 해석모델을 표현한 것이다.

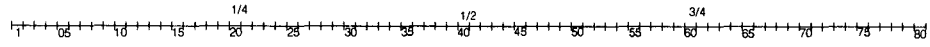


그림 6 유한요소 해석 모델

3.3 실험 결과와 분석

실험체는 표2에 표기한 것과 같은 하중단계에 따라 재하되었으며 각각의 경우에 대하여 변위와 변형률을 Data Logger(TDS 601)을 통해 취득되었고 균열의 형상을 체크하여 비교하였다. 손상탐지를 위하여 그림 7과 같은 순서로 실험값들은 분석하였다.

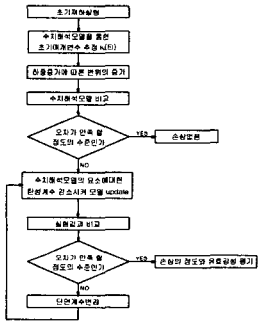


그림 7. 손상탐지과정

표 4. 초기 균열발생 하중에 대한
수치해석 결과와 실험결과 비교

구분	육안관찰 초기균열 하중(kN)	초기치 수치해석 값을 이용한 추정 초기균열하중(kN)	오차(%)
R1N	17.64	16.66	5.56
R1C	14.994	14.504	3.27
R1Q	17.64	16.513	6.39
R1CQ	9.8	11.172	-13.98
R2N	12.74	8.92	29.98
R2C	6.86	7.84	-12.5
R2CQ	14.7	13.769	6.33

각 하중별로 계측한 실험 변위 값을 수치해석 값과 비교 하였다. 수치해석은 균열이 발생하기 전 탄성구간에서 측정된 변위값을 토대로 수치해석을 위한 초기치 값을 가정하였고 이 초기치 값으로 해석한 해석값과 계측된 실험값의 오차가 10% 이상 발생한 경우에 균열이 발생 혹은 진전한 것으로 간주하였다. 또한 실험체의 균열도상에 기록된 균열하중과 그 결과를 비교하였다. 그 결과 표 4와 같은 결과를 나타내며 이는 수치해석을 판단한 손상시점이 눈으로 판단한 균열시점보다 빠르거나 거의 같은 시점임을 알 수 있다. 또한 이렇게 확인한 균열 영역은 수치해석에서 요소의 범위를 가정하고 강성 값을 감소시키면서 수치해석을 재수행하여 측정된 변위값과 일치하도록 최적화하여 손상 평가를 해보고자 하였다.

R2N의 실험값으로 최적화하여 판단한 손상을 살펴보면, 8.92kN 이상의 하중이 작용할 경우 실험값과 Baseline

으로 해석한 값과의 오차가 10%이상으로 커진다. 이것은 중앙부에 균열이 발생하여 나타난 결과로 실험체의 균열을 확인 해 보면 8.92kN 부근에서 균열이 다음의 그림 8과 같이 나타난 것을 확인할 수 있었다. 이 균열을 수치해석 모델에서 2개(No. 41,42), 4개(No. 40~43), 6개의 요소(No. 39~44)에 대한 강성을 감소시켜 모델링하고 최적화를 수행한 결과 6개의 강성을 감소시켰을 경우가 가장 타당한 값을 나타내는 것으로 판단된다. 같은 방법으로 7개의 실험체에 대한 초기손상을 추정한 결과는 다음의 표 5와 같으며 진하게 표시된 것이 타당하다고 판단된 것이며 R2C에서는 4개요소수정과 6개요소수정의 비교에서 차이가 크지 않았다.

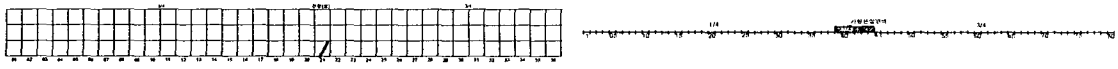


그림 8. R2N test에서 8.92kN에서 발생한 초기 균열 형상과 유한요소 해석을 위한 Smeared Crack Model

표 5. 실험값과 수치해석 값의 비교를 통한 초기손상 추정 결과

구분	초기 균열하중	Element 2개 수정		Element 4개 수정		Element 6개 수정	
		탄성감소율	유효강성	탄성감소율	유효강성	탄성감소율	유효강성
R1N	16.66KN	62.86%	537245kN · ㎟	**47.62%**	**757653kN · ㎟**	38.10%	895408kN · ㎟
R1C	14.504KN	68.26%	502806kN · ㎟	50.00%	792091kN · ㎟	**41.30%**	**929846kN · ㎟**
R1Q	16.513KN	63.80%	551020kN · ㎟	**47.51%**	**798980kN · ㎟**	37.56%	950510kN · ㎟
R1CQ	11.172KN	68.75%	447704kN · ㎟	52.88%	675000kN · ㎟	**43.27%**	**812755kN · ㎟**
R2N	8.92kN	73.68%	396900kN · ㎟	55.26%	529200kN · ㎟	**47.36%**	**661500kN · ㎟**
R2C	7.84KN	66.67%	413265kN · ㎟	51.11%	606122kN · ㎟	41.67%	723214kN · ㎟
R2CQ	13.769KN	65.29%	406378kN · ㎟	**49.41%**	**592347kN · ㎟**	40.00%	702551kN · ㎟

4. 결론

기존의 SI(System Identification)기법은 개개의 손상을 찾아내는 것에 초점을 맞춘 것과는 달리 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 분석해본결과 실험체 7개에서 대략 육안으로 확인한 균열시점과 비슷하던지 더 빠르게 나타냈다. 또한 육안 관찰된 균열범위를 기준으로 하여 수치해석 요소의 범위를 가정하고 강성값을 감소시키는 최적화를 수행한 결과 초기 균열이 발생한 경우 손상영역과 그 영역에서의 유효강성을 평가한 결과 해석과 실험이 잘 일치하였다. 철근콘크리트 구조물의 육안관찰균열과 수치적인 해석모델에서 손상영역 및 손상정도에 대한 평가의 연관성을 높일 수 있는 실험적 연구와 이를 최적화하는 프로그램을 제작할 경우 구조물 상태 평가가 좀더 정확하게 수행될 수 있을 것이다.

감사의 글

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

참고 문헌

정인근, "System Identification 기법을 이용한 RC Beam의 손상탐지에 관한 실험적 연구", 중앙대학교 토목공학과 박사학위논문, 2003

Johan Maeck, "Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring", Katholieke Universiteit Leuven, 2003

Progress report, "Serviceability Models", CEB(Bulletin d'Information No.235), 1997

Thomas Jahn and Gerhard Mehlhorn,"System Identification of Damage in Reinforced Concrete Structures by Measured Modal Test Data", 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering 1998 Budapest

Lars Krex and Gerhard Mehlhorn, "System Identification of Crack Damage in Reinforced Concrete Structures", 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering 1998 Budapest