

측정변형률을 이용한 RC 구조물의 균열검출에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Crack Detection of RC Structure using Measured Strain

박 기 태* 박 흥 석** 이 규 완***

Park, Ki-Tae Park, Hung-Seok Lee, Kyu-Wan

Abstract

Structural crack of RC structure generally occurs when the tension stress by applied load is larger than tension resistance of concrete, and it means deterioration of structure and the decrease of load resistance. Because structural crack of structure can occur critical damage to structure occasionally, the research on crack detection algorithm of RC structure is needed for assurance of structural safety and effective maintenance of structure. In this paper, we executed the laboratory test on measuring strain of RC beam's tension and compression zone, using strain gauge which is widely used on strain measurement of civil structure. By using measured strain, we analyzed strain change, elastic modulus change, and neutral axis change to detect crack of RC beam. As a result, we proposed the simple and effective crack detection algorithm using trends of neutral axis position change.

keywords : crack detection, strain, neutral axis, RC structure

요 지

콘크리트 구조물에 발생하는 구조적인 균열은 재하하중에 의하여 콘크리트가 저항할 수 있는 인장강도보다 더 큰 인장강도가 가해졌을 때 콘크리트의 인장영역에서 발생하며, 이는 구조물의 노후화 또는 재하하중에 대한 저항능력이 감소되었음을 의미한다. 그러므로 콘크리트에 발생한 구조적 균열은 구조물에 치명적인 손상을 유발시킬 수 있으며, 구조물의 안전성 확보와 효과적인 유지관리를 위해서는 이를 검출하는 기법에 대한 연구가 반드시 필요한 실정이다. 본 연구에서는 토목계측 분야에서 가장 널리 활용되고 있는 변형률 센서를 철근 콘크리트 보에 부착하여 보의 인장부와 압축부의 변형률을 측정하는 실내실험을 수행하였으며, 하중 재하에 따른 변형률의 변화, 측정부위의 탄성계수 변화, 그리고 중립축의 변화 등을 비교·분석하였다. 분석 결과로부터, 측정된 변형률을 이용하여 중립축의 변화 추이를 추정함으로써 가장 효과적으로 균열을 검출할 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

핵심용어 : 균열검출, 변형률, 중립축, RC구조물

* 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

** 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, 공박

*** 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원

E-mail : ktpark@kict.re.kr 031-910-0134

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트는 콘크리트와 철근을 합리적으로 조합한 내구적인 구조재료로서, 형상과 치수에 크게 제약 없이 경제적으로 구조물을 만들 수 있으므로 대부분의 토목, 건축구조물에 널리 사용되고 있다. 그러나 압축에 비하여 인장에 취약한 콘크리트의 특성으로 인하여 콘크리트 구조물에는 균열 및 부분적인 파손이 발생할 확률이 매우 높고, 비균질적인 재료라는 단점을 갖고 있다. 콘크리트의 균열은 콘크리트가 저항할 수 있는 하중을 초과하여 재하되었을 때 발생하며, 이 시점부터는 콘크리트가 받는 하중의 일부를 철근이 부담하게 되는 것과 동시에 균열 발생 부위의 변형률은 균열이 발생하기 전에 비하여 상대적으로 급격한 변화 양상을 보이게 된다.(박기태 등, 2001)

본 연구에서는 철근콘크리트보를 대상으로 변형률 측정을 위한 실내실험을 수행하였으며, 측정위치에서의 변형률, 탄성계수, 그리고 중립축의 변화 등에 대한 분석을 통하여 구조물에 치명적인 손상을 야기시킬 수 있는 구조적인 균열이 발생한 시점을 효과적으로 검출할 수 있는 알고리즘을 제시하고자 하였다.(김재권 등, 2000)

2. 실내실험

2.1 개요

본 실험에서 적용한 계측센서는 대상 시험체의 인장부와 압축부에 발생하는 변형률을 측정하기 위한 전기저항식 변형률게이지이며, 정적계측용 데이터로거인 TDS303을 이용하였다. TDS303은 효율적인 데이터 수집을 위하여 RS232C 케이블을 이용하여 컴퓨터에 연결하여 측정자료를 저장하였으며, 10초 간격으로 측정을 수행하였다. 액추에이터에 의하여 가해지는 하중 및 변위는 액추에이터 운용장치와 정적 데이터로거인 TDS303을 연결하고, 운용장치로부터 액추에이터로 전달되는 출력전압의 수준을 이용하여 계측시 측정된 변형률과 동시에 저장되도록 하였다.

2.2 실험방법

Photo 1 및 Photo 2는 각각 실험결과로 도출된 액추에이터의 하중-변위 곡선, 그리고 실험장면을 나타내고 있다. 실험은 500kN 용량의 액추에이터를 사용하여 3점 재하방식으로 진행되었으며, 철근의 항복 직전까지는 하중조절방식, 항복점 이후에는 변위조절방식에 의하여 재하 형태를 변화시키면서 파괴 직전까지 실험을 실시하였다.

하중단계는 10kN에서 100kN까지 5kN씩 증가시키며 재하(load), 제하(unload)를 각 3회 반복하여 실시하였으며, 100kN 이후부터 항복점 이전까지는 10kN씩 증가시키며 동일한 방법으로 실험을 실시하였다.

Fig. 1은 대상 시험체에 부착한 센서의 위치를 나타내고 있다.

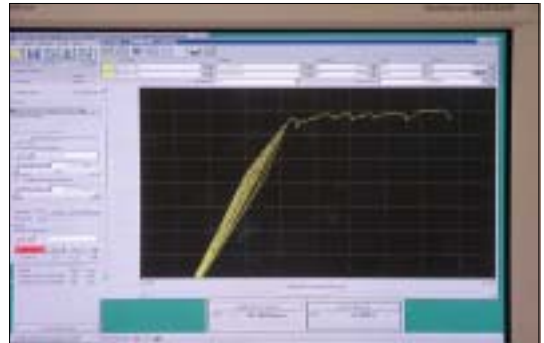


Photo 1 액추에이터의 하중-변위 곡선



Photo 2 실험 전경

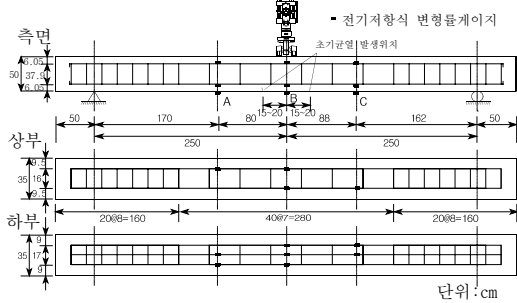


Fig. 1 센서부착위치

3. 실험결과 분석

하중재하시 발생하는 균열을 육안으로 확인한 결과, 25kN에서 30kN으로 재하하중을 증가시킬 때 L/2 지점(250cm 위치)으로부터 양측으로 15~20cm 떨어진 곳에서 초기균열이 발생하였다.(Fig. 1 참조)

초기균열이 발생하였을 때 내부 철근에 부착된 변형률계이지로부터 측정된 변형률은 급격히 증가하였으며, 콘크리트 하단에 부착한 외부 전기저항식 변형률계이지의 경우 균열발생으로 인하여 발생한 인장응력에 저항하지 못하여 급격히 변형률이 저하되는 양상을 보이고 있었다. 본 실험에서는 균열 발생 위치에서의 변형률 변화 추이를 분석하기 위하여 실제 변형률계이지 부착위치(Fig. 1의 A, B, C 위치)에서 균열이 발생하였을때의 재하하중을 조사하였다.

본 연구에서는 변형률계이지를 이용하여 변형률을 측정된 후, 이로부터 균열 발생 위치 및 시점을 추정하는 방안을 제시하기 위하여 측정 변형률 변화, 변형률 변화를, 탄성계수 변화, 그리고 중립축의 변화 상태 등에 대하여 각각 분석을 수행하였다.

3.1 변형률 변화

하중단계 f_i 에서 변형률계이지로부터 측정된 변형률을 SC(Strain Change)라고 정의할때, Fig. 2~Fig. 4에는 단순보 시험체에 하중을 재하한 경우, 시험체의 인장부 내외부에 매설 또는 부착한 변형률계이

지로부터 측정된 변형률의 변화추이인 SC를 각 위치별(A, B, C)로 나타내었다. x축은 재하하중을, 그리고 y축은 측정변형률을 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 각 측정위치별로 철근과 콘크리트의 변형률이 재하하중의 증가에 따라 유사한 양상으로 증가하다가 어느 시점부터 서로 다른 변형률의 양상을 보이게 된다. 이 시점이 바로 균열이 측정 위치에 가까운 곳에서 발생한 상태라고 판단된다.

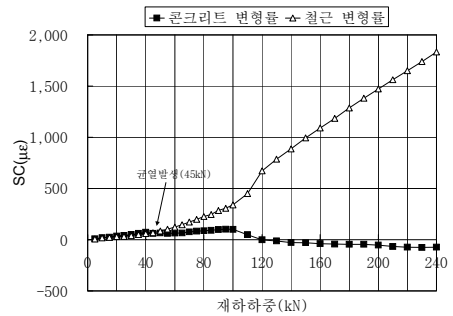


Fig. 2 SC-재하하중 관계(위치A)

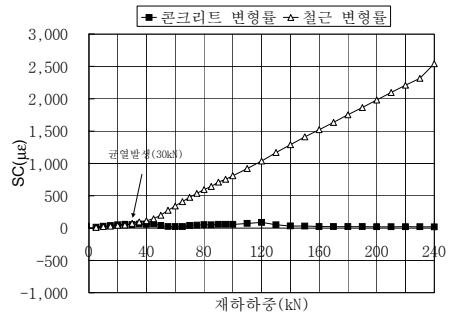


Fig. 3 SC-재하하중 관계(위치B)

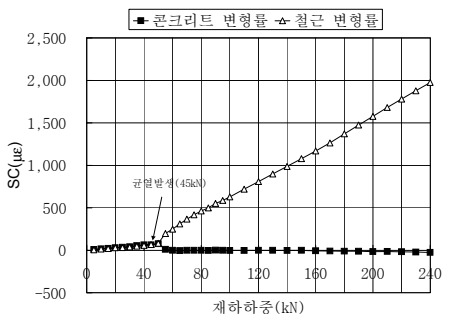


Fig. 4 SC-재하하중 관계(위치C)

3.2 변형률 변화율

하중증가에 따른 변형률 측정시 균열이 발생한 부위에 부착된 변형률게이지로부터 측정되는 변형률은 급격하게 증가하거나 감소한다. 측정 변형률의 변화율을 SCR(Strain Change Rate)이라고 할때, 하중단계 f_i 에서의 SCR는 식(1)과 같이 정의되며, 재하하중에 대한 SCR을 도식화하므로써 균열이 발생하는 시점을 추정하고자 하였다.

$$SCR_i = \left| \frac{SC_i - SC_{i-1}}{SC_{i-1}} \right| \times 100 \quad (1)$$

Fig. 5~Fig. 7에는 인장부 내외부에 매설 또는 부착한 변형률게이지로부터 측정된 변형률을 이용하여 SCR을 각 위치별(A, B, C)로 나타내었다. 해당위치에서 균열이 최초로 발생되었다고 가정한 변화율은 측정된 변형률의 변화 추이를 고려하여 40%로 규정하였다.

그림에 나타난 바와 같이 철근에 비하여 콘크리트의 변형률 변화율이 최초로 40% 이상 되는 재하하중이 비교적 높거나 동일하게 나타났다.

측정변형률에 의한 균열 발생 하중 예측값은 육안으로 관찰한 균열 발생 하중에 비하여 작았으며, 철근과 콘크리트에서 발생하는 변형률(SC)의 직접적인 비교보다는 하중변화에 따른 변형률의 변화(SCR)를 이용하는 것이 효과적으로 균열이 발생하는 시점의 예측이 가능하였다.

3.3 탄성계수 변화

콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 비구조적 균열과 구조적인 균열로 구분된다. 비구조적인 균열이란 건조수축, 수화열, 동결융해, 화학작용, 염해 등 대부분 재료적인 특성이 원인이 되어 발생하는 균열이며, 구조적인 균열은 작용하중의 증대에 의하여 부재의 저항능력이 저하되어 발생하는 균열을 의미한다. 대상시험체에 대한 사전 조사 결과 재료적인

특성이 원인이 되어 발생하는 비구조적인 균열은 발견하지 못했으므로, 실험 수행시 발생하는 모든 균열은 구조적인 균열이라고 가정하였다.

구조적인 균열이 발생하였다는 것은 하중에 저항하는 강성이 저하되었다는 것을 의미하므로 재하하중의

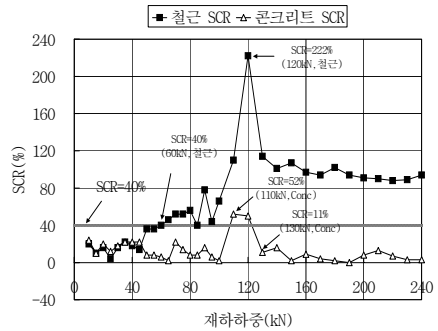


Fig. 5 SCR-재하하중 관계(위치A)

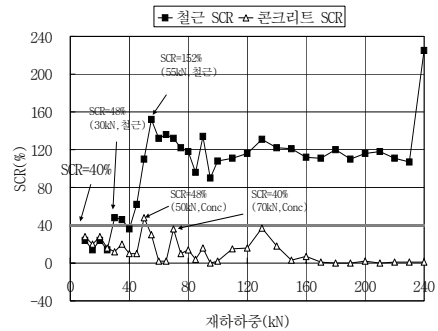


Fig. 6 SCR-재하하중 관계(위치B)

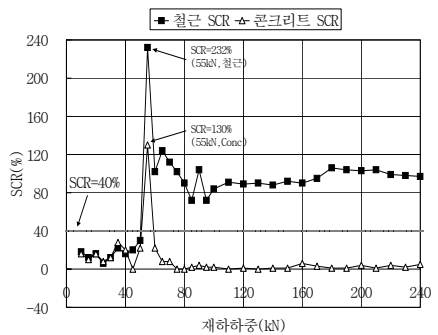


Fig. 7 SCR-재하하중 관계(위치C)

증가에 따라 콘크리트 구조물의 휨강성을 나타내는 인자인 탄성계수(E) 또는 단면2차모멘트(I)가 감소한 것이라고 추정할 수 있으며, 본 실험에서는 미세한 균열로 인한 단면2차모멘트의 감소보다는 재료특성 변화를 충분히 고려할 수 있는 탄성계수의 변화가 더 크다고 가정하였다.

탄성계수의 변화를 고려하기 위하여 적용한 탄성영역에서의 식을 나타내면 식(2)와 같다. 균열 발생에 의한 대상 시험체의 비선형 거동은 모두 측정변형률을 적용하므로써 보정이 이루어진다는 전제하에 탄성계수를 나타내는 식의 단면2차모멘트인 I와 중립축의 위치를 나타내는 y는 일정하다고 가정하였다.

$$f = E\epsilon = \frac{My}{I} \quad (2)$$

$$E = \frac{My}{\epsilon I}$$

하중단계 f_i 에서 인장부 철근에 부착된 변형률계이지로부터 측정한 변형률을 ϵ_i , 탄성계수의 변화율을 ECR(Elastic Modulus Change Rate, 식(3) 참조), 그리고 ECR의 변화율을 ECRR(ECR Rate, 식(4) 참조)이라고 정의할 때, E, ECR, 그리고 ECRR과 재하하중과의 관계를 Fig. 8~Fig. 10에 나타내었다.

$$ECR_i = \left| \frac{\epsilon_i - \epsilon_{i-1}}{\epsilon_{i-1}} \right| \times 100 \quad (3)$$

$$ECRR_i = \left| \frac{ECR_i - ECR_{i-1}}{ECR_{i-1}} \right| \times 100 \quad (4)$$

그림에서 보는 바와 같이 탄성계수의 변화 추이를 판단해서는 실제 균열이 발생한 시점을 파악하기는 어려우나, ECR, 또는 ECRR과 재하하중의 관계를 도식화한 그림을 보면, 변화율이 급격히 증가 또는 감소되어 균열이 발생하였다고 판단되는 재하하중을 추정하는 것이 비교적 가능하다고 판단된다.

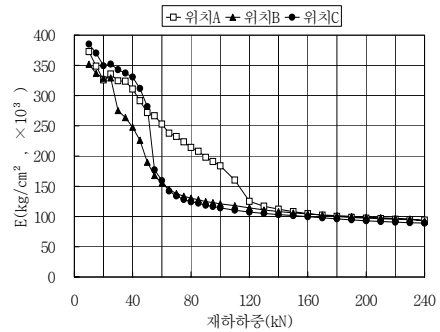


Fig. 8 E-재하하중 관계

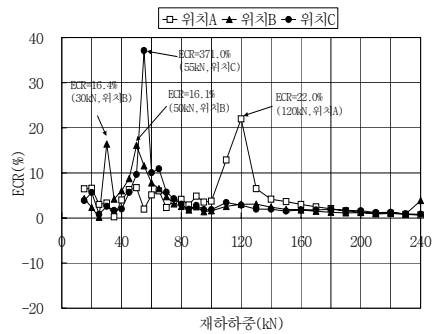


Fig. 9 ECR-재하하중 관계

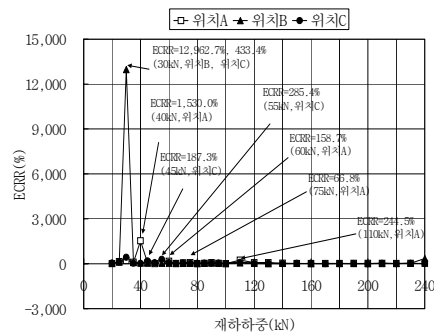


Fig. 10 ECRR-재하하중 관계

3.4 중립축 변화

구조물이 건전한 상태를 유지하면 중립축이 항상 일정하게 유지되지만, 균열이 발생하여 인장부의 콘크리트가 더 이상 인장응력에 저항하지 못하게 되면 중립축의 위치가 점차 상승하게 된다.(Fig. 11 참조)

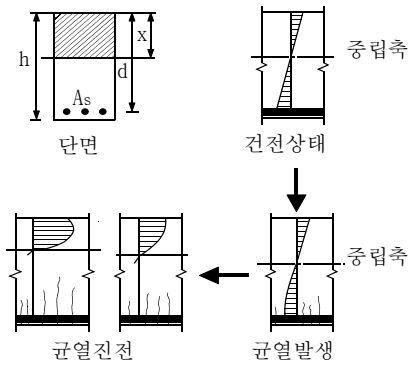


Fig. 11 균열로 인한 중립축 변화

이러한 원리를 이용하여 본 절에서는 대상 시험체의 인장부와 압축부 철근에 부착되어 있는 변형률계 이지로부터 측정된 변형률을 이용하여 중립축을 추정하고, 중립축 위치 변화 추이를 분석하여 효과적인 균열 발생 시점을 예측하는 방안을 제시하고자 하였다.

하중단계 f_i 에서 인장부와 압축부로부터 측정된 변형률을 이용하여 산정한 중립축 위치를 NP (Neutral Axis Position), 하중단계에 따른 중립축 위치 변화율을 NPCR(Neutral Axis Position Change Rate, 식(5) 참조), 그리고 NPCR의 변화율을 NPCRR(NPCR Rate, 식(6) 참조)이라고 할 때, NP, NPCR, 그리고 NPCRR과 재하하중의 관계를 Fig. 12~Fig. 14에 도식화하여 나타내었다.

Fig. 12에서 중립축 위치가 급격하게 변할 때 균열이 발생하였다고 가정하면 재하하중 50kN 전후에서 균열이 발생하였다고 예측할 수 있었지만, 균열 발생 하중단계를 정확히 파악하는 것은 어려웠다.

그러나 중립축 위치의 변화를 나타내는 NPCR과 NPCRR에서 비율이 급격하게 증가하거나 감소하는 하중단계에서 균열이 발생하였다고 정의하면 그림으로부터 균열이 발생한 하중단계의 추정이 가능하였다.

$$NPCR_i = \left| \frac{NP_i - NP_{i-1}}{NP_{i-1}} \right| \times 100 \quad (5)$$

$$NPCRR_i = \left| \frac{NPCR_i - NPCR_{i-1}}{NPCR_{i-1}} \right| \times 100 \quad (6)$$

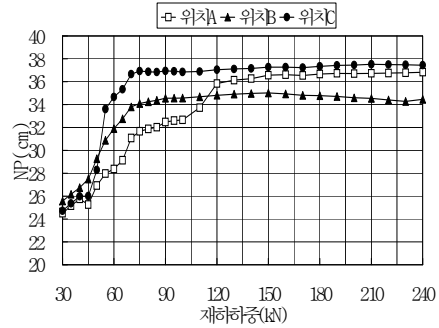


Fig. 12 NP-재하하중 관계

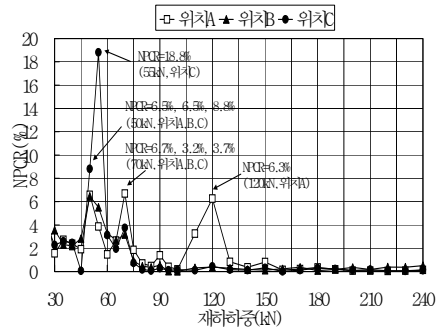


Fig. 13 NPCR-재하하중 관계

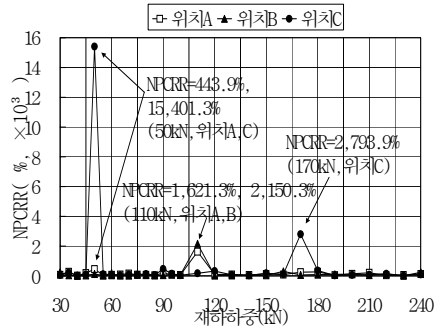


Fig. 14 NPCRR-재하하중 관계

3.5 균열발생 하중 추정결과 비교

3.1~3.4에서 추정한 균열발생시점과 실제 육안으로 조사한 균열 발생 하중 단계를 비교하여 위치별로 Table. 1에 나타내었다. 표에서 음영으로 처리된 부분은 육안조사 결과의 10% 이내로 균열 발생 하중단계를 추정할 수 있는 부분을 의미한다.

SCR, ECR, NPCR계수로부터의 균열 발생 하중단계 추정은 Table. 1에서 보는 바와 같이 비교적 안정적으로 균열 발생 하중단계를 실제 육안조사 결과의 ±10% 이내로 추정할 수 있었으며, ECR과 NPCRR을 이용한 균열 발생 하중단계 추정은 정확성이 매우 떨어지는 것을 알 수 있었다.

그러나, 실구조물의 경우에는 일반적으로 상시하중에 의한 미지의 하중이 재하되기 때문에 변형률을 측정하거나, 이로부터 탄성계수의 변화를 유추하여 균열 발생하중을 추정하기에는 어려움이 있다. 그러므로 상시하중이 가해지고 있는 구조물의 균열 발생하중을 추정하기 위해서는 구조물의 인장부와 압축부의 변형률을 안정적으로 측정할 수 있도록 콘크리트 내부에 변형률 측정용 센서를 매설하는 방식을 취하여 이로부터 중립축 위치의 변화 추이를 분석하는 것이 가장 이상적인 균열 발생시점 예측 방법이라고 판단된다.

Table 1 균열발생시점 추정하중 비교 (단위 : kN)

구분	위치A	위치B	위치C				
육안조사	120	50	55				
변형률 변화	SC	45	30	45			
	SCR(철근)	60	120	30	55	55	
	SCR(Conc)	110	130	50	70	55	
탄성 계수 변화	E	판단 불가					
	ECR	120	30	50	55		
	ECRR	40	60	30	30	45	
		75	110		55		
중립축 변화	NA	30~50					
	NPCR	50	70	50	70	50	55
		120			70	70	
	NPCR	50	110	110	50	170	

4. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트보의 인장·압축부의 변형률을 측정하여 합리적으로 균열발생시점을 예측할 수 있는 방안에 대한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) SC, E, NA계수의 변화율에 의한 SCR, ECR, NPCR계수를 이용하면 비교적 안정적으로 균열 발생 하중을 실제 육안조사 결과의 ±10% 이내로 추정할 수 있었다.
- 2) 실내실험 및 상시하중에 의한 공용구조물의 균열발생시점 예측시 동시에 적용이 가능한 방법은 중립축 변화 추이를 분석하는 것이며, 외부 환경의 영향으로 변형률계이지에 손상이 발생하지 않는다면 가장 효과적으로 균열발생시점 추정이 가능하다고 판단된다.
- 3) 본 연구에서는 다양한 항목(변형률, 탄성계수, 중립축 등의 변화)에 대한 분석을 수행하여 균열발생시점을 예측하는 기법에 대한 검토를 수행하였으며, 향후에는 균열의 진전상태를 추정하는 기법에 대한 연구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 '99 산학연 공동연구개발사업의 연구내용중 일부이며, 이에 대한 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김재권 등, 광섬유센서를 이용한 교량 안전진단 기술개발(I) 연구보고서, R&D /99토목I-09, 2000., 건설교통부.
2. 박기태 외 3인, “매개변수 변화를 고려한 철근콘크리트 구조물의 균열 검출 알고리즘 연구”, 한국구조물진단학회 2001년도 가을학술발표회 논문집, 제5권 2호(통권 제8집), 2001., pp. 311-316.

(접수일자 : 2002년 4월 3일)