



전도성 재료 혼입 철근콘크리트 구조체의 파괴예측 자기진단 특성

박석균^{1)*} · 조성동¹⁾

¹⁾대전대학교 토목공학과

Self-Diagnosis Properties of Fracture in Reinforced Concrete Intermixed with Conductive Materials

Seok-Kyun Park^{1)*} and Sung-Dong Cho¹⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Daejeon University, Daejeon 300-716, Korea

ABSTRACT Two types of conductive materials are selected and their applicable properties are investigated so as to give the capability of self-diagnosis of fracture in composite mortar, concrete and reinforced concrete. In this study, for giving self-diagnosis capability, the powder of cokes and milled carbon fiber as conductive materials are selected and intermixed with mortar, concrete and reinforced concrete. After examining change in the value of electric resistance before and after the occurrence of cracks at each flexural load-stage in composite mortar, concrete or reinforced concrete, the relationships of each factors (electric resistance, crack and flexural load) are analyzed. As the results, it can be recognized that conductive materials with powder of cokes and milled carbon fiber can be applied for self-diagnosis of flexural fracture in composite mortar, concrete and reinforced concrete specimen.

Keywords : cokes, milled carbon fiber, conductive material, reinforced concrete, fracture

1. 서 론

최근, 보다 효과적인 콘크리트구조물의 유지관리기술에 대해 관심이 고조되면서, 새로운 진단기술의 개발이 절실히 요구되어지고 있다. 현재 재료의 파괴예측에 대해서는 주로 변형률계이지와 변위계가 많이 이용되고 있지만, 모르타르나 콘크리트 재료의 경우에는 균열전파의 형태에 따라 측정치가 크게 영향을 받는다. 이로 인해 재현성에 문제가 발생하여 초기조건이 제대로 설정되어 있지 않으면, 하중재하 후의 불연속 측정이 곤란하다. 특히, 큰 시험 부재에서는 파괴 위치와 측정 위치의 일치기가 어려워져 다수의 센서를 사용하게 되는데, 이렇게 되면, 계측오류가 더 커지게 되고 비용도 높아지는 등 많은 문제를 안게 된다. 따라서 구조물에 대한 새로운 파괴 예측 센서의 개발이 요구되고 있다.

이를 위한 하나의 유효한 방법은 구조물에 사용되고 있는 재료 자체가 파괴를 자기 스스로 진단할 수 있는 스마트 (또는 인텔리젠트)화 될 수 있으면 복잡한 회로와 다수의 센서 사용은 불필요하게 되고, 구조물을 강하고 중후한 설계로 해야 할 필요도 없어진다.

이와 관련한 기존 연구에서는 탄소섬유가 포함된 하이브리드 FRP 로드를 콘크리트 보강근으로 이용하여 탄소섬유로드를 자기진단센서로 활용한 사례의 연구가 다수 보고 되고 있다.¹⁻⁷⁾

그러나 이들 연구는 구조체 내의 보강부재에 대해서만 파괴 예측에 대한 자기진단센서로서의 기능을 검토한 것으로서, 실제 보강 재료를 둘러싼 콘크리트와 같은 모체 재료의 파괴손상에 대해서는 아무런 스마트 기능을 부여하고 있지 않다. 물론 보강근과 같은 구조적인 주요 부재에 대해서만 스마트 기능을 부여하는 것은 경제적 측면 등에서 가장 효율적인 센싱 방법이라 할 수 있다. 하지만 이는 수동적인 방법으로서 보다 재해예방수준을 높이는 능동적인 방법은 아니라 할 수 있다. 보다 능동적인 방법은 보강근의 이상을 알리기 전에 그 주변 재료의 이상을 먼저 발견해 냄으로써, 그 단계에서 보수·보강 등의 대책을 수립하면 훨씬 경제적이고 안전한 구조물 유지관리가 가능해진다.

더구나 휨 부재의 경우는 중립축 이하의 콘크리트의 강도를 무시하고 설계하지만, 대상 구조물이 균열발생을 허용하지 않는 설계등급의 프리스트레스트 콘크리트이거나, 해양콘크리트 등과 같이 강재의 부식 우려가 매우 큰 구조물에서는 모체 재료 자체의 균열도 내구성 측면 등에서 큰 문제를 일으킬 수 있다. 또한, 사람의 접근이

*Corresponding author E-mail : skpark@dju.ac.kr

Received December 10, 2007, Revised March 31, 2008, Accepted April 7, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

곤란한 특수 구조물 (방사선차폐 구조물 등)의 안전진단이나, 센서를 통한 은행 금고 등의 외벽파손에 의한 도난 방지를 위해서는 보다 사전예방 효과가 높은 모체 재료 자체의 스마트 기능 부여가 필요하다. 또한 이는 스마트 구조물의 최종 목표인 자기진단과 자기치료 (균열자기복구)의 복합 기능이 가능한 이상적 재료 개발에서 반드시 선행되어야 할 과제이다.

본 연구는 이와 같은 목적을 달성하기 위해 한 단계 더 높은 단계의 연구로서, 모체 재료 자체에 자기진단 기능을 부여할 수 있는 재료의 개발 및 그 적용 가능성에 대해 검토하였다. 그러나 같은 방식의 재료 및 개념을 철근콘크리트에 대해 적용한 사례의 연구는 아직 보고되고 있지 않다. 특히, 철근콘크리트에 적용하는 경우는 철근 자체가 전기전도성이 뛰어난 소재이므로, 콘크리트 모체 재료에 전도성을 부여하여 콘크리트 자체의 균열발생 등에 의한 파괴를 예측하는 데에는 많은 한계가 예상된다. 따라서 본 연구에서는 모르타르와 무근콘크리트 뿐 만 아니라, 철근콘크리트에 대해서도 동일한 개념의 모체 재료 파괴 예측 자기진단 센서로서의 적용 가능성에 대해서 검토하였다. 여기서 시험체에 대한 가압하중은 휨하중으로 하였다.

2. 전도성 자기진단 소재

자기진단용 시험체 제작 시에 첨가 혼합물로 사용 가능한 전도성 소재로는 탄소섬유, 코크스, 동슬래그, 인조 흑연, 미분쇄 탄소섬유 (milled carbon) 등이 있지만, 본 연구에서는 코크스와 미분쇄 탄소섬유를 선정하였다. 그 이유는 이들 재료가 본 연구의 목적에 부합하면서 경제성과 작업성이 우수할 것으로 판단하였기 때문이다. 이 두 재료에 대한 상세한 특징은 박석균⁸⁾ 논문을 참고하기 바란다.

3. 코크스와 미분쇄 탄소섬유 혼합재료의 자기진단 적용 특성

3.1 복합 모르타르 시험체

먼저, 본 연구의 예비 실험으로서 모르타르 시험체를 대상으로 하여 코크스와 미분쇄 탄소섬유 전도성 혼합재료의 자기진단 특성에 대해 서는 기 발표된 박석균⁸⁾의 논문에서 본 논문의 전체 구성 및 이해에 도움을 주기 위해 하기와 같은 일부 내용을 발췌하였다.

3.1.1 배합조건

자기진단 기능이 있는 전도성 복합 재료 모르타르의 배합조건은 Table 1과 같이 3가지 조건을 선정하여 실험하였다. 시험체 번호는 배합조건과 전기저항값에 따라 DJ1~DJ3로 하였다.

3.1.2 실험 개요

각 휨하중 재하 단계별 시험체의 균열발생 전후의 전기저항 및 변위 변화 특성을 조사하기 위한 실험 개요를 Fig. 1에 나타내었다. 비전도성인 Basalt 섬유시트를 보강재로 사용한 것은 무근 시험체의 급격한 취성과파괴를 방지하기 위해서 사용하였다.

3.1.3 실험 결과 및 고찰

이상의 시험조건에 의해 각 시험체 종류에 대해 하중 재하 단계별 균열발생 개시 시점은 DJ1인 경우 3.4 kN, DJ2인 경우 4.8 kN, DJ3인 경우 4.5 kN이며 (그래프에 표시), 개시 시점과 진전 상태에 따른 전기저항 (ohm)변화 및 변위 (displacement)변화의 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 변위 변화는 주 검토 대상은 아니고 다만 참고자료로 활용하기 위한 것이다.

이들 결과로부터 알 수 있는 바와 같이, 하중의 증가와 더불어 전기저항은 균열이 개시될 때부터 다소의 산포는 있지만, 거의 점증적으로 증가해 가고 있어 발생 균열량에 비례하여 전기저항 값이 변화함을 나타내고 있다. 특히, DJ1과 DJ3 시험체의 경우에는 이러한 현상이 더욱 뚜렷하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

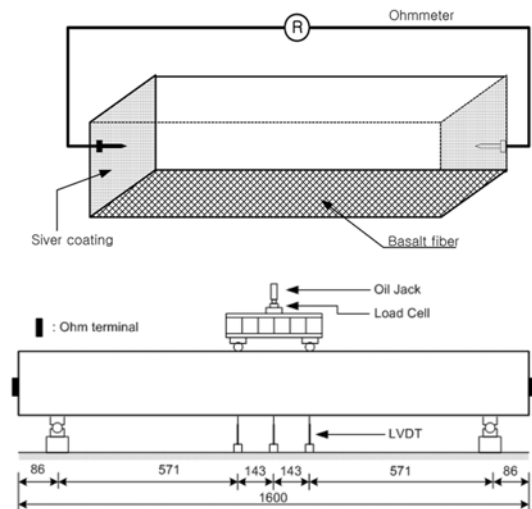


Fig. 1 Test specimen and layout

Table 1 Mixing condition of conductive mortar

Specimen no.	Flow (mm)	Mix proportion range (%)			Chemical agent	
		OPC	Water	Cokes and milled carbon	Plasticizer	Viscosity modifying admixture
DJ1	180	35~42	18~22	40~55	0.3-0.6	0.01~0.04
DJ2	120					
DJ3	160					

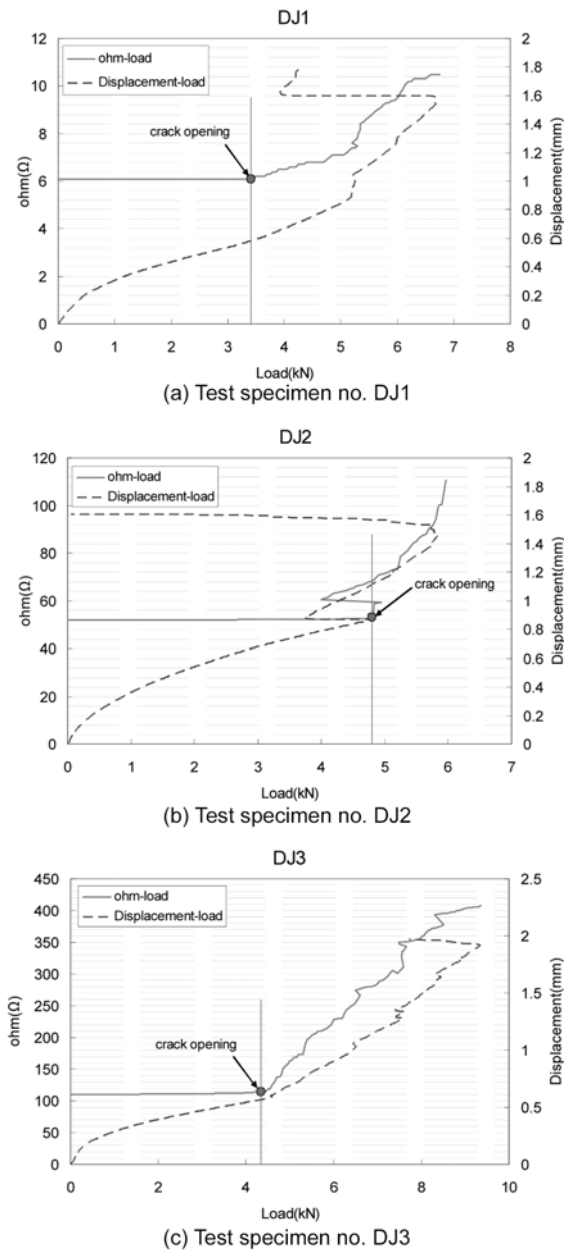


Fig. 2 Relationship between electrical resistance and displacement of conductive mortar (test specimen No. DJ1~DJ3)

참고로 각 하중재하 및 균열발생 단계에 따른 변위 (displacement) 변화는 전기저항 변화와 유사한 경향을 보이는 하였으나, 균열 개시 시점에서는 전기저항 변화와 같은 뚜렷한 변화는 포착할 수 없음을 알 수 있었다. 결국, 변위 만에 의한 센서 기능은 본 연구에서와 같은 정밀한 파괴 예측 거동 (특히 균열 발생 초기 단계)을 파

Table 2 Mixing condition of conductive concrete

Specimen type*	W/B (%)	s/a (%)	Slump (cm)	G _{max.} (mm)	Unit weight (kg/m ³)				Air content (%)
					W	B	S	G	
RCC (DJ4, DJ5)	60	48	10.0	25	165	275	892	972	4.5
NRCC (DJ6, DJ7)	60	48	10.0	25	165	275	892	972	4.5

*B : cement + cokes and milled carbon
 RCC : reinforced conductive concrete
 NRCC : non-reinforced conductive concrete

악하는 데에는 어느 정도 한계가 있음을 보여주고 있다고 할 수 있다.

3.2 무근 및 철근콘크리트 시험체

다음은 본 연구 개발 기술을 현장 구조물에 적용할 경우, 가장 중요도가 크고 적용빈도가 높을 것으로 예상되는 콘크리트 시험체를 대상으로 하여 코크스와 미분쇄 탄소섬유 전도성 혼입재료의 자기진단 특성에 대해 검토하여 보았다. 여기서는 무근과 철근콘크리트 양 조건을 선정하였고, 특히 전도성 문제로 전기저항 측정치에 큰 영향을 미칠 것으로 사료되는 철근콘크리트 시험체를 주 검토 대상으로 하였다.

3.2.1 배합조건

콘크리트의 배합조건은 무근과 철근콘크리트 모두 Table 2 같이 1가지 동일 배합조건을 선정하여 실험하였다. 여기서 B (binder)는 시멘트에 코크스와 미분쇄 탄소섬유 전도성 혼입재료가 혼합된 것이다.

또한, Table 2에는 명기되지 않은 추가 혼화제로서 유동화제와 증점제가 사용되었다. 시험체 수를 단순화 한 것은 앞의 모르타르 시험체에서 초기 전기저항값 변화에 따라 3가지 조건에 대해 실험한 바가 있어, 이에 대한 추가 비교를 생략하였기 때문이다. 여기서 무근과 철근콘크리트 시험체는 각각 3개씩 시험체를 제작하였고, 이들 각 3개 시험체 중, 대표적인 측정 결과를 나타내는 시험체를 한 가지씩 선정하여 결과를 분석하였다.

3.2.2 실험 개요

하중재하에 따른 시험체의 균열발생 전후의 전기저항 및 변위 변화를 조사하기 위한 철근 및 무근콘크리트 실험 개요도를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서 철근콘크리트는 엄밀히 철근보강 전도성 콘크리트 (reinforced conductive concrete 이하 RCC라 Fig. 등에 표기함)를 의미한다.

본 연구에서 철근은 콘크리트의 인장측에 먼저 발생 한 균열이 일부 압축 측까지 가급적 연이어서 발생되도록 유도하기 위해 1가닥 (D11)만을 인장 측에 배근하였으며, 시험체의 균열발생 전후의 전기저항 및 변위 변화를 압축 측과 인장 측으로 나누어 측정하였다. 이를 통해 시험체의 파괴 예측 거동과 이들 각 인자간의 변화 특성을 분석하였다. 또한, 동일한 규격과 배합을 가진 무근콘크리트 (non-reinforced conductive concrete 이하 NRCC라

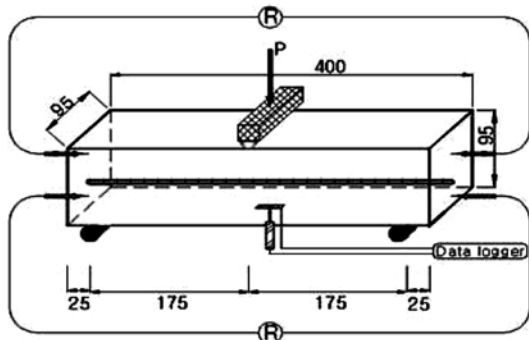


Fig. 3 Test specimen and layout of reinforced concrete (RCC and NRCC)

Fig. 등에 표기함)에 대해서도 같은 조건으로 실험하였다. 한편 Fig. 4에는 측정 장면 예를 나타내었다.

3.2.3 실험 결과 및 고찰

시험체의 하중재하 단계별 균열발생 개시 시점은 DJ4 인 경우 4.1kN, DJ5인 경우 14kN, DJ6, DJ7인 경우 1.3kN 이며 개시 시점과 진전 상태에 따른 전기저항 변화와 변위 변화를 인장력이 작용하는 부분은 Fig. 5에, 압축력이 작용하는 부분은 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 인장 측 측정 결과인 Fig. 5의 경우, 그림에서 나타나듯이 콘크리트가 진전한 상태인 초기 하중 재하상태에서는 비교적 일정시간 동안 전기저항값이 일정하다가 시험체의 변위가 조금씩 증가하면서 인장 측 균열이 발생하고 그 양이 증가하면서 전기저항값도 증가하기 시작함을 알 수 있다. 아울러 인장균열 발생 초기에서 급격한 전기저항 변화가

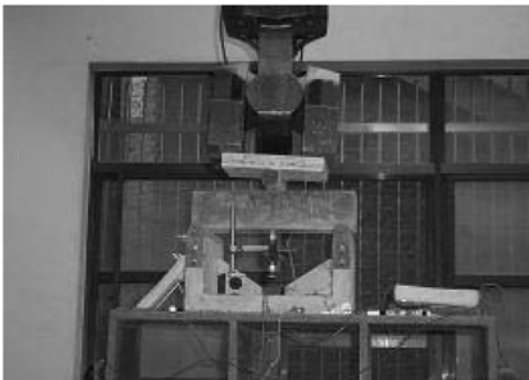


Fig. 4 Measurement situation of RCC

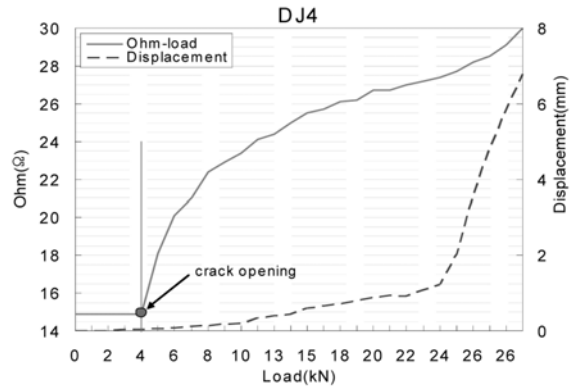


Fig. 5 Relationship between electrical resistance and displacement of RCC on tensile part

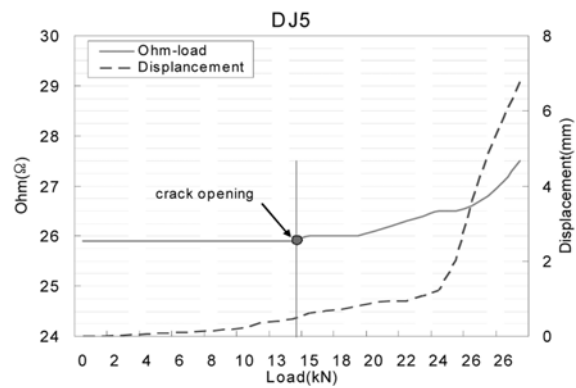


Fig. 6 Relationship between electrical resistance and displacement of RCC on compressive part

발생함으로써 파괴 예측을 조기에 감지할 수 있음을 확인할 수 있다. 이로부터 초기균열발생 단계에서는 철근이 전기저항 측정부인 인장 측에 가까이 위치하고 있음에도 전도성 콘크리트의 인장균열 (또는 파괴) 발생에 따른 전기저항 변화는 우선 철근 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 균열이 계속 중립축 쪽으로 진전하면서 철근 위치로 추정되는 부분을 지나는 경우에는 완만하게 점증적인 큰 값을 나타내고 있어 철근 영향이 일부 작용한 것이 아닌가하고 추측된다. 그럼에도 불구하고 철근콘크리트의 인장 측에 미세한 균열발생시 전기저항 변화를 뚜렷이 관측 할 수 있음을 알 수 있다. 다음으로 초기 압축부 측정 결과인 Fig. 6의 경우, 상부 측 부분 (중립축이 상부로 이동한 부분으로 초기 압축부임)은 균열개시 초기 단계에서는 약간의 증가 양상을 보이다가 갑자기 전기저항이 크게 커지는 양상을 나타내고 있는데, 이는 이 단계에서 균열진전이 하중재하 단계별로 각각 급속히 진행되었기 때문으로 판단된다.

이에 대해 인장철근을 사용하지 않아 취성파괴가 예상되는 무근콘크리트에 대해 동등한 하중재하 시험을 실시한 결과를 Figs. 7과 8에 나타내었다. 이들 그림에서 보는 바와 같이 변위와 전기저항 값이 비슷한 양상을 가지면서 변화되는 것을 확인할 수 있어 파괴 전 단계에서는 파괴예측이 가능하였으나, 최종 파괴 단계에서는 급

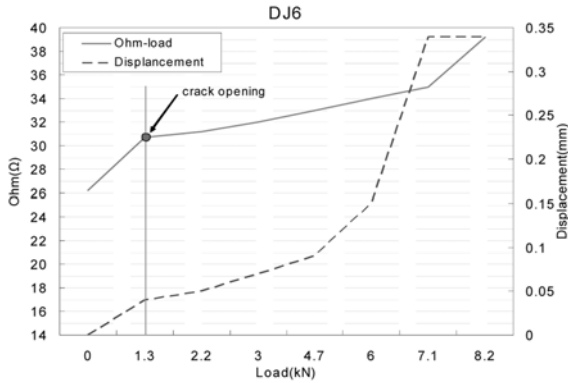


Fig. 7 Relationship between electrical resistance and displacement of NRCC on tensile part

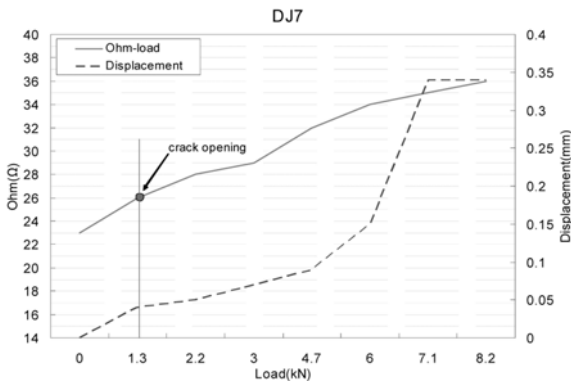


Fig. 8 Relationship between electrical resistance and displacement of NRCC on compressive part

격한 시험체의 파괴에 따른 측정치 획득에 문제가 있었다. 따라서 급격한 취성파괴가 이루어진 무근콘크리트 실험에서는 정확한 최종 파괴 예측 지점을 전기저항 값을 이용하여 찾기는 어렵다는 것을 알 수 있었지만, 최종 파괴 전 단계까지는 균열발생 양상을 비교적 뚜렷하게 알 수 있었다.

또한, 각 하중재하 및 균열발생 단계에 따른 변위 (displacement) 변화는 균열 개시 시점에서는 일부의 경우를 제외하고는 전기저항 변화와 같은 뚜렷한 변화는 포착할 수 없음을 알 수 있었다. 이는 배근상태와 코크스와 미분쇄 탄소섬유 혼입에 따른 콘크리트의 역학적 특성 변화 (탄성계수 변화 등)의 원인에 의한 것으로 사료되나, 앞서 실시된 모르타르 시험체의 경우에서도 유사한 경향이 발견되어, 변위 만에 의한 센서기능은 본 연구에서와 같은 정밀한 파괴 예측 거동 (특히 균열발생 초기 단계)을 파악하는 데에는 어느 정도 한계가 있음을 다시 한번 확인할 수 있었다. 이 분야는 앞으로의 연구 과제에서 실험 장비의 장비불확도, 측정자의 인지불확도, 재료의 품질불확도 등 실험 결과 값이 최종적으로 어느 정도 편차를 가지는지 파악하는 연구와 더불어 추가로 해결해야 할 분야라고 판단된다.

Figs. 9, 10에서는 철근콘크리트와 무근콘크리트 시험체의 대표적인 파괴 형태를 나타내고 있으며, Table 3에서는 주요 실험 결과값을 보여준다.



Fig. 9 Fracture pattern of RCC



Fig. 10 Fracture pattern of NRCC

Table 3 Measurement results of RCC and NRCC

Specimen type and no.		Flexural load (max.) (kN)	Electric resistance (min.) (Ω)	Electric resistance (max.) (Ω)
RCC	DJ 4	26.7 (12.6 N/mm)	25.9	27.9
	DJ 5		14.9	29.1
NRCC	DJ 6	8.2 (4.67 N/mm)	26.2	37.4
	DJ 7		22.9	32.8

4. 결 론

코크스와 미분쇄 탄소섬유를 전도성 재료로 첨가한 복합모르타르, 무근콘크리트, 철근콘크리트 휨시험체를 이용하여 재료의 파괴 예측 자기진단 소재로서의 적용 가능성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 휨 하중 재하 단계별 균열발생 양상과 전기저항 변화 관계를 검토한 결과, 본 연구에서 사용된 전도성 재료 (코크스와 미분쇄 탄소섬유분말)를 혼입한 시험체에 대해서는 복합모르타르, 철근콘크리트, 무근콘크리트에 관계없이 하중 단계별 균열 개시 시점의 파악이 가능함을 알 수 있어, 파괴 예측 정보로서의 자기진단 (스마트) 기능을 보유하고 있음을 알 수 있다.
- 2) 특히, 전도성 재료를 혼입한 철근콘크리트에 대해서는 철근 자체가 강한 전도성을 가지고 있어 인장측 균열발생 시에는 전기저항 측정 변화에 영향을 미쳐 계측에 문제가 클 것으로 예상되었으나, 철근 위치를 지나는 일부 균열 영역에서만 다소의 변화

가 나타났을 뿐 가장 중요한 균열발생 개시 시점에서는 전기저항 변화가 뚜렷이 계속되어 파괴 예측 자기진단센서로서 충분한 역할이 기대되고, 상부 측(중립축 이동 부분) 발생균열에 대해서도 균열진전 양상을 예측 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

1. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔 外, “CFGFRP複合材料とCFGFRP筋コンクリートの破壊自己診断,” 日本窯業學會紙, Vol. 100, No. 12, 1992, pp. 1429~1434.
2. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, “コンクリート損傷に對する自己診断,” セメント・コンクリート論文集, No. 47, 1993, pp. 826~831.
3. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, “CFGFRP筋によるコンクリート構造物の破壊検知,” セメント・コンクリート論文集, No. 48, 1994.
4. 武藤範雄, 柳田博明, 杉田稔, “炭素・ガラス複合纖維補強筋コンクリートにおける損傷の自己診断,” セメント・コンクリート論文集, No. 576, 1995.
5. Muto, N., Yanagida, H., Nakatsuji, T., Sugita, M., Ohtsuka, Y., Arai, Y., and Saito, C., “Materials Design of CFGFRP-Reinforced Concretes with Diagnosing Function for Preventing Fatal Fracture,” *Advanced Composite Materials*, Vol. 4, No. 4, 1995.
6. 박석균, 김대훈, “하이브리드 FRP보강근 콘크리트의 손상 자기진단,” 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 17권, 2호, 2005, pp. 233~237.
7. 박석균, 김대훈, “탄소섬유를 전기저항센서로 이용한 하이브리드 섬유보강근 콘크리트의 파괴거동 예측,” 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 2005, pp. 2278~2281.
8. 박석균, “탄소섬유 분말 모르타르 복합 구조체의 파괴예측 자기진단 특성”, 한국구조물진단학회 논문집, 11권, 1호, 2007, pp. 113~120.

요 약 두 가지 형식의 전도성 재료를 선정하고, 이들 재료를 모르타르, 무근콘크리트 및 철근콘크리트 시험체에 각각 배합 혼입한 후, 이들 구조체에 대해 파괴예측 자기진단 재료로서의 적용 특성을 검토하였다. 본 연구에서는 자기진단(스마트) 성능을 부여하기 위해 코크스와 미분쇄(微粉碎) 탄소섬유분말을 전도성 재료로 선정하였다. 각 휨 하중 재하단계에서 이들 시험체에 대한 균열발생 전후의 전기저항값과의 변화 특성 시험을 통해, 이들 각 측정 인자(전기저항, 균열, 휨 하중)의 상호 연관성을 검토하였다. 그 결과, 코크스와 미분쇄 탄소섬유분말의 전도성 재료는 복합모르타르, 무근콘크리트, 철근콘크리트 시험체의 휨 파괴 예측 자기진단에 사용이 가능함을 알 수 있었다.

핵심용어 : 코크스, 미분쇄(微粉碎) 탄소섬유, 전도성 재료, 철근콘크리트, 파괴