

Prepacked DFRCC 재료로 제작된 휨 부재의 휨 거동 및 내구성 평가

Flexural behavior and durability evaluation of flexural members manufactured using prepacked DFRCC material

김장호* 임윤묵** 홍종석*** 이경민*** 김윤호***

Kim, Jang-Ho Lim, Yoon-Mook Hong, Jong-Seok Lee, Kyung-Min Kim, Yoon-Ho

ABSTRACT

The purpose of this study is to assess performance of prepacked DFRCC material compared with the DFRCC material which is made by using general mixing method. From 4r-point bending test, bond strength test and chlorine ion penetration test, flexural stress,-deflection relations, bond strengths, and durability assessment have been obtained. From the experiments, premixed DFRCC shows relatively good performance.

1. 서론

최근 토목·건축 구조물에 사용되는 건설재료의 변화 및 발전은 매우 빠르게 진행되고 있으며, 특히 시멘트를 주원료로 하는 재료의 변화속도는 강재와 같은 건설재료의 변화 속도보다 빠르게 진전되고 있다. 시멘트를 원료로 하는 건설재료의 단점인 취성적 파괴거동을 보완하기 위해서 연성이나 강도가 일반 콘크리트보다 월등한 고기능성 시멘트계 복합재료인 DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite)에 대한 연구가 현재 활발히 진행 중에 있으나 국내에서는 아직 미비한 수준이다. 또한 콘크리트 구조물의 보강에 가장 적합한 재료로서 DFRCC의 현장 적용성이 확대되고 있다. 그러나 DFRCC를 기존 배합·타설 방법으로 현장에 적용할 경우 배합되지 않은 모든 재료를 타설 현장까지 운반하여 이를 숙련자가 배합순서에 따라 배합한 뒤 타설해야 하는 등 작업성이 상당히 떨어지게 된다. 따라서 DFRCC의 현장적용을 위해서는 모든 재료가 건조 배합되어진 제품 개발이 요구되고 있으나 DFRCC의 특성상 fiber의 투입 방법, 투입시기에 따라 타설 후 성능차이가 매우 크기 때문에 타설 방법 및 제품화시 성능에 미치는 영향에 대한 검토가 필요하다. 또한 현재 사용되고 있는 고가의 수입 PVA fiber를 대체하는 저가의 fiber를 이용한 DFRCC에 대한 검토도 필요하다. 본 연구에서는 과거 실험으로 최적 배합비가 검토된 DFRCC의 상용화 및 실용화를 목적으로, 복잡한 타설 과정 간소화 및 재료 원가의 절감에 초점을 맞추고 실험을 실시하였다.

2. 실험

2.1 실험개요

*정회원, 세종대학교 토목환경공학과 조교수, E-mail : jjhkim@sejong.ac.kr

**정회원, 연세대학교 토목환경공학과 부교수

***정회원, 세종대학교 토목환경공학과 석사과정

본 실험에서는 최적 배합비로 설계된 DFRCC의 배합절차 간소화 및 제품화가 재료의 역학적 특성 및 내구성에 미치는 영향에 대한 평가를 하기 위하여 휨 부재실험, 부착강도실험 그리고 염소이온침투실험을 실시하였다. 부재 휨 실험의 경우 변위제어 방식을 이용하여 0.005mm/sec의 속도로 공시체가 파괴에 도달하기까지의 거동변화와 파괴양상을 파악하여 휨 부재의 응력-치짐 관계를 실험적으로 도출하였으며, 내구성 실험은 부착강도 실험과 염소이온 침투실험을 각각 KS F 4716 (시멘트계 바탕 바름재)과 ASTM C 1202 (Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration)에 준하여 실시하였다.

2.2 재료 및 배합비

실험 재료로 1종 보통 포틀랜드 시멘트(국산 L사), 잔골재(구사), 플라이 애쉬가 사용되었다. 섬유는 일본 K사의 고인성 PVA섬유를 사용하였으며 혼화제로 유동화제(SP, 미국 W사)와 증점제(MC, 국산 S사)를 사용하였다. 배합비에서는 기존 DFRCC 실험에서 최적 배합비로 검증된 물-시멘트비(W/C) 0.3과 0.45가 사용되었다. 그리고 DFRCC의 연성거동을 관찰하기 위하여 일반 모르타르시편과 단가가 저렴한 PP(폴리프로필렌) fiber를 이용한 시편을 제작하였다. 배합비는 표 1과 같다. 시편의 표기는 배합방법에 따라 NP(일반 배합), P(Premixed 배합), PT(Prepacked 배합)로 하였으며 앞의 숫자는 W/C를 나타낸다. 시편은 총 8종으로 표기는 표 2와 같다.

표 1 배합비

	0.3	0.45	PP fiber	Mortar
Cement	1	1	1	1
Water	0.3	0.45	0.45	0.45
Fly Ash	0.11	0.15	0.15	0.15
Sand	0.5	0.7	0.7	0.7
SP	0.02	0.01	0.01	0
MC	0.002	0.0018	0.0018	0
Fiber(Vol %)	2	2	2	0

표 2 제작 시편의 표기

분류	일반	Premix	Prepack	PP	Mortar
W/C	DFRCC	DFRCC	DFRCC	fiber	
0.3	0.3NP	0.3P	0.3PT	-	-
0.45	0.45NP	0.45P	0.45PT	0.45PP	0.45PM

2.3 배합순서

일반 배합(NP시편)은 20리터 용량의 회전형 믹서에서 시멘트, 플라이 애쉬, 잔골재, 증점제(분말)를 마른 형태로 고르게 2~3분 정도 배합하고, 여기에 유동화제를 투입한 물을 조금씩 첨가한다. 약 3분간 배합한 뒤 fiber를 손으로 고르게 투입하고 이후 적어도 2분, 3분 그리고 5분 이하로 배합을 한다. Premix 배합(P시편)은 일반 배합 과정에서 마지막에 손으로 투입하였던 fiber를 초기의 건조 배합과정에 미리 투입한 뒤 이후 동일한 방법으로 유동화제를 첨가한 물을 부어 배합한다. Prepack 배합(PT시편)은 Premix 배합된 재료들을 비닐팩에 포장한 뒤 2~3일 후 개봉하여 동일한 방법으로 배합하며 이후의 배합 과정은 Premix 배합과 동일하다.

2.4 시편제작 및 실험

2.4.1 휨 실험

휨 실험에 사용된 거푸집은 가로 8cm 세로 35cm 두께 1cm인 시편을 3개씩 타설할 수 있는 투명 아크릴로 제작하였다. 시편은 배합별 6개씩 타설하여 재령 28일간 20±1°C 온도에서 수중 양생하였다. 부재의 휨 실험에는 MTS-810 10ton 용량의 시험기를 사용하였고 4점 휨 실험을 실시하였다. 지점은 시편 양끝에서 2.5cm 떨어진 지점에 위치하고 가력시험을 하였다.

2.4.2 부착강도 실험

부착강도 시험용 밀판을 제작하기 위하여 KS L 5105에 따라 배합한 모르타르를 안쪽 치수 70×70×20mm의 철제 거푸집에 타설하여 양생하였다. 그 후 연마지로 시험용 밀판을 연마한 후 배합한 시료를 5mm 두께가 되도록 윗면을 평탄하게 마무리하여 성형하였다. 성형 후 온도 20±2°C, 습도 65±10%의 양생실 내에서 재령 14일까지 기건 양생 시켰다. 양생된 시편은 중앙에 40×40mm의 정사각형의 크기로 시료 도포면을 절단한 후 예폭시 수지로 에테치먼트를 부착하여 14일간 경화시켰으며 시료별로 6개의 시편을 제작하였다. 제작이 완료된 부착강도 실험 공시체를 인장용 지그(강철제) 및 강철제 받침판을 사용하여 시료면에 대해 수직방향으로 인장력을 가해 최대 인장하중을 구하였다. 이때 파단 할 때까지의 하중 속도는 1500~2000N/min으로 한다. 측정된 최대 인장하중 값 T(Newton)을 1600으로 나눈 값을 부착 강도(N/mm²)로 사용하였으며, 소수점 이하 첫째자리로 끝맺음 한다.

2.4.3 염소이온침투실험

Φ100×200mm 실린더형 공시체에 DFRCC를 타설한 후 재령 28일간 20±1°C에서 수중 양생한 뒤 시편 중간 부분을 Φ100×50mm로 절단하였다. 절단한 공시체 내부의 갇힌 공기를 제거하기 위해 데시게이터 안에 넣고 진공펌프를 3시간동안 작동시킨 후, 다시 공시체를 물로 포화시키기 위하여 데시게이터 안에 물을 넣어 1시간 동안 펌프를 작동시켰다. 그 후에 진공펌프의 작동을 중지시키고 공시체를 물속에서 완전히 포화시킨 상태로 18±1 시간 동안 유지하여 실험전처리를 하였다. 실험 전처리 과정이 완료된 공시체의 투수성을 시험하기 위하여 공시체를 A.V.Cell(Applied Voltage Cell) 에 고정시켰다. A.V.Cell의 (+)전극에는 0.3N의 NaOH 용액을 채우고, (-)전극에는 3%의 NaCl 용액을 채운 후 직류 60V를 공급하여 6시간 동안 흐른 전류값을 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 휨 실험 결과

휨 부재 실험의 일반 모르타르 부재와의 비교를 통하여 DFRCC의 신뢰도 높은 연성 및 강성거동을 다시 한 번 확인할 수 있었다. W/C 0.3시편의 경우 0.45시편과 비교하여 상대적으로 타설 과정의 워커빌리티가 좋지 않아 많은 공극과 기포를 내포하였으며, 공극과 기포 부위에서 초기 균열이 발생함을 확인할 수 있었다.

배합방법에 따른 DFRCC부재의 휨 실험 결과 강도측면에서는 Premix, Normal, Prepack 순으로, 연성 측면에서는 Normal, Premix, Prepack순으로 성능이 우수한 것으로 확인 되었다. Prepack 배합된 시편의 경우 일반 배합된 시편의 85~88% 수준의 강도를 발현하였다. W/C 0.45 시편의 최대 처짐은 배합 방법에 따라 Normal 25~35mm, Premix 10~20mm, Prepack 5~10mm로 측정되었다.

투입된 fiber의 종류에 따른 실험 결과에서는 PVA fiber를 이용한 시편의 경우 fiber와 모르타르가 완전히 일체 거동하여 높은 응력 상태에서 시편 전체에 미세한 균열들이 고르게 분산되며 U자 형태로 휨이 발생함을 확인할 수 있었으나, PP fiber를 이용한 시편에서는 재하 초기에 발생한 균열부의 fiber들이 모르타르와 일체거동하지 못하였고 균열이 분산되지 못하여 응력을 크게 받지 못한 채 서서히 초기 균열부의 fiber들이 인발되며 V자 형태로 꺾이는 휨이 발생하였다.

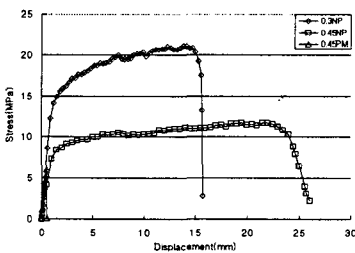


그림 1 DFRCC·모르타르 휨 실험결과

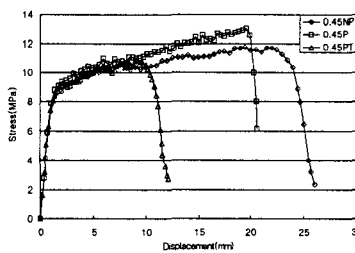


그림 2 배합 방법에 따른 휨 실험결과

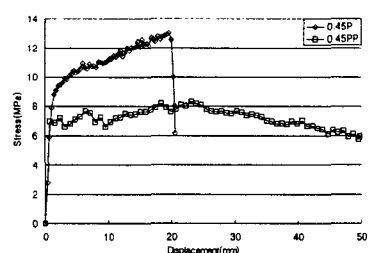


그림 3 Fiber 종류에 따른 휨 실험결과

3.2 부착강도 실험 결과

DFRCC의 부착강도 실험결과 배합방법에 관계없이 부착강도가 전체적으로 낮았으며 모르타르 0.45PM의 평균보다도 낮은 수치를 기록하였다. 모르타르가 시멘트의 결합력에 의존하여 부착강도가 생기는 것을 감안하였을 때 DFRCC의 경우 fiber의 투입으로 공극이 발생하며, 시멘트 부착면이 줄어들어 이와 같이 부착강도가 저하된 것으로 판단된다. 그림 4는 부착강도 실험결과로 편차가 심한 측정값은 결과에서 제외하였다.

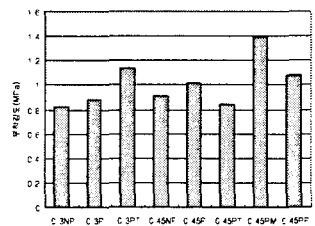


그림 4 부착강도 평균

3.3 염소이온 침투실험 결과

염소이온 투과실험의 결과를 보면 그 값의 차이는 있으나 W/C, 배합방법, fiber의 종류에 관계없이 모두 High를 기록하였다. DFRCC의 경우 구조적으로 더욱 높은 성능을 보이지만 fiber로 인한 통로가 생겨 근본적으로 내

부의 미세구조가 느슨해 질 수밖에 없는 현상이 발생하였다. 실험의 평균값을 비교하였을 때 배합방법에 따른 우월은 판단하기 힘들었다. 따라서 Premix 및 Prepack 배합된 DFRCC의 경우에도 기존 배합 DFRCC수준의 성능을 발휘 할 것으로 사료된다. 다만 W/C 0.3에서 W/C 0.45의 경우보다 조금 더 적은 염소이온 투과전하량이 측정 되었다.

4. 결론

본 연구에서 실시한 DFRCC의 배합방법 및 fiber종류에 따른 부재 휨 실험, 부착강도 실험, 염소이온 침투실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) DFRCC는 Premix 및 Prepack 배합 시에도 연성측면에서 우수한 거동을 보였으며 취성적인 파괴를 막을 수 있는 복합 재료로서 그 타당성을 확인하였다. 또한 배합방법과는 관계없이 물-시멘트비 0.45의 경우 0.3에 비교하여 더욱 우수한 연성거동을 나타내어 최적의 물-시멘트비로 판단된다.
- 2) Premix 및 Prepack 타설된 재료의 휨 실험결과 일반 배합방법으로 타설된 재료에 근접하는 높은 성능을 보여주어 추후 제품화에 매우 긍정적으로 판단된다.
- 3) PP fiber를 사용한 휨 실험결과 fiber와 모르타르와의 부착력이 낮아 fiber가 모르타르에서 인발된 것으로 판단되며 추후 PP fiber 이용 시 표면에 부착력 증가를 위한 코팅처리 등을 하여 부착성능을 보완해야 될 것으로 판단된다.
- 4) Premix 및 Prepack 타설된 재료의 부착강도 실험결과 강도 면에서 큰 차이를 보이지 않아 배합방법에 따른 부착 강도저하는 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나 fiber로 인해 공극이 발생한 DFRCC의 부착강도가 모르타르의 부착강도보다 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 따라서 DFRCC를 사용할 경우 계면문제가 발생할 수 있는 부재에 적용해서는 안 될 것으로 판단되며, 이를 현장에 적용 시 RC 콘크리트 보 부재의 경우 전단철근 보강을 하여 DFRCC와 일반 콘크리트가 일체 거동할 수 있도록 설계·시공하여야 할 것이다.
- 5) 염소이온 침투실험 결과 Premix, Prepack배합된 재료와 일반 배합된 재료의 이온 투과량 차이가 크지 않았다. DFRCC의 경우 fiber통로로 인해 모르타르 시편보다 이온 투과량이 증가함을 확인할 수 있었다. 그러나 DFRCC를 실제 구조물에 적용할 경우 부재 내부로 수분 침투가 염려되는 미세균열을 fiber가 효과적으로 제어하므로 내구성 측면에 문제가 없을 것으로 판단된다.

표 3 염소이온 투과실험 결과

시편	시편번호		평균	판정
	1	2		
0.3NP	6108	6236	6172	High
0.3P	9633	10212	9923	High
0.3PT	4069	9628	6849	High
0.45NP	O.F	10389	10695	High
0.45P	7800	9256	8528	High
0.45PT	10020	9964	9992	High
0.45PP	10563	10573	10568	High
0.45PM	10276	10214	10245	High

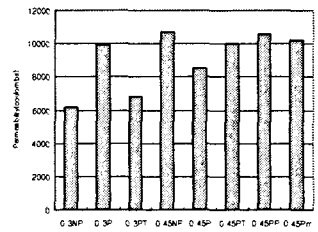


그림 5 염소이온 투과전하량 평균

감사의 글

본 연구는 한국과학재단이 지원하는 특정기초과제 '재활용 PET병에서 추출한 화이버를 이용한 수축균열 제어용 화이버 콘크리트 개발'에 관한 일련의 연구로 수행 되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

1. Geoff Mays ed. 1992 *Durability of Concrete Structures: Investigation, Repair, Protection*, E&FN Spon, 1992
2. Burrows, R.W., 1998 *The Visible and Invisible Cracking of Concrete*, *ACI Monograph*, ACI, No.11, Farmington Hills, Mich., pp.79
3. Shah, S.P., Weiss, W.J, and Yang, W. 1998 *Shrinkage Cracking Can It be Prevented?*, *Concrete International*, April, pp.51-55.
4. Li, V.C., 2000 *When a Crack is Not a Crack*, *Proc. Int. Symp. Brittle Matrix Composites 6*, ZTUREK RIS and Woodhead Publ., Warsaw.
5. Tsukamoto, T., 1990 *Tightness of Fiber Concrete*, *Darmstadt Concrete*, Vol.5, pp.215-225.
6. Kejin Wang, Daniel C. Jansen, Surendra P. Shah, and Alan F. Karr, 1997 *Permeability Study of Cracked Concrete*, *Cement and Concrete Research*, Vol.27, No.3, pp.381-393.
7. "The round robin test for the ECC", JCI International Workshop
8. Kazuo Suzuki, Yoshiteru Ohno, Somnuke Praparatanatom, and Hiroshi Tamura, 1994 *Mechanism of Steel Corrosion in Cracked Concrete*, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.6, No.1, pp.120-129.