

초고강도 섬유보강 시멘트 복합체 I형 프리스트레스트 보의 거동 해석

Analysis of the UHP-SFRCC (Ultra High Performance Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites) I section Prestressed beam.

한 상 목* 김 성 욱** 강 수 태*** 강 준 형****
Han, Sang Mook Kim, Sung Wook Kang, Su Tae Kang, Jun Hyung

ABSTRACT

The objective of this paper is to investigate and analyze the behaviour of prestressed I section structural members constructed with ultra high performance steel fiber reinforced cementitious concrete (SFR-UHPC). This material is known as reactive powder concrete (RPC) mixed with domestic materials and its compressive strength is over 150MP. The parameters of test specimens were span to depth ratio, prestressing force, prestressing wire placement and web width. Most influential parameter to determine the failure mode between shear and flexural action was proved to be shear span ratio. The characteristics of ultra high-strength concrete is basically brittle, but due to the steel fiber reinforcement behaviour of this structure member became ductile after the peak load. As a result of the test, the stress block of compressive zone should be redefined. The proposed analytical calculation of internal force capacity based by plastic analysis gave a good prediction for the shear and flexural strength of specimens. The numerical verification of the finite element model which constitutive law developed for Mode I fracture of fiber reinforced concrete correctly captured the overall behaviour of the specimens tested.

1. 서론

초고강도 섬유보강 콘크리트는 재료 개발 단계를 지나서 이를 이용한 응용 구조물의 개발 단계로 접어들고 있다. 콘크리트 구성요소 중 굵은 골재를 제외하고 PVA를 보강섬유로 사용하는 ECC (Engineered Cementitious Composites)는 뛰어난 연성거동과 향상된 인장 변형률을 가지고 있으며 주로 보수보강재로 사용되어 왔다. 최근에는 교량의 연결부재로 사용되는 등 구조부재로서 활용 연구가 미국에서 활발하게 진행되고 있다. 이러한 DFRCC(Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites)중 RPC(Reactive Powder Concrete)는 150Mpa 이상의 압축강도, 15Mpa 정도의 인장강도를 가진 초고성능 연성 콘크리트로서 구조부재로서 적용 예가 증가되고 있다. 1997년 캐나다 퀘벡주 Sherbrook 인도교, 2002년 국내의 선유교는 보행자 교량으로 건설되었으며, 2003년 호주 Shepherd's Gully Creek에 세계 최초의 차량 통행용 교량이 건설되었다. 포르투갈에서는 방파제로 사용되었으며, 네델란드에서는 바닷물 유입을 막는 방벽의 대형 방조문을 시공하였고, 캐나다에서는 2005년에 경전철 역의 지붕셀을 DFRCC로 시공하였다. 이렇듯 세계 여러나라에서 다양한 구조물에 대한 적용예가 증가하면서 DFRCC에 대한 구조설계 방법에 대한 정립과 필요성이 대두되고 있다. 본 연구에서는 2004년 직사각형 및 I형 DFRCC 휨보강보에 대한 실험과 해석에 이어 프리스트레스트 I형 DFRCC보를 제작하고 이에 대한 해석법을 제안하고자 한다.

*정회원, 금오공과대학교 토목환경공학부 교수

**정회원, 한국건설기술연구소 구조연구부 수석연구원

***정회원, 한국건설기술연구소 구조연구부 연구원

****정회원, 금오공과대학교 토목환경공학부 석사과정

2. 초고강도 섬유보강 I형 콘크리트보의 실험

본 연구에서는 경간형고비, 프리스트레스 힘, 복부폭을 변수로 하여 12개의 실험체를 제작하였다. 시험체의 종류와 실험번호 값은 표1과 같고 표2는 UHP-SFCC의 기본배합이며, 그림1은 실험체의 단면형상이다. 4점 재하방식을 사용하여 하중을 가하였다.

구분		초기 긴장력 (P, tonf)	강선의 배치	경간 형고비
A 단면 7mm web	FP-W7-L15	60	하부플랜지	15
	HP-W7-L15	30	하부플랜지	15
	NP-W7-L15	0	하부플랜지	15
	FP-W7-L15-B	30(상),60(하)	상·하부플랜지	15
	FP-W7-L10	60	하부플랜지	10
	FP-W7-L10-B	30(상),60(하)	상·하부플랜지	10
B 단면 5mm web	FP-W5-L10	60	하부플랜지	10
	HP-W5-L10	30	하부플랜지	10
	NP-W5-L10	0	하부플랜지	10
	FP-W5-L5	60	하부플랜지	5
	HP-W5-L5	30	하부플랜지	5
	NP-W5-L5	0	하부플랜지	5

표 1. 실험체의 종류와 실험번호 값

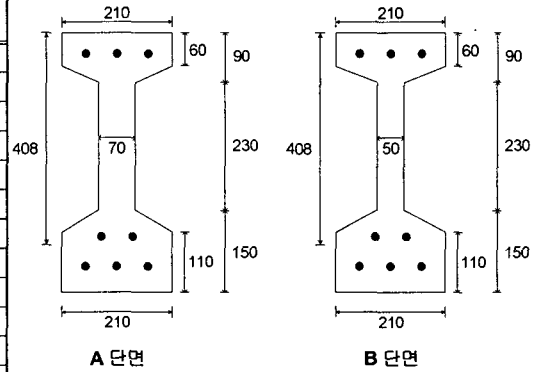


그림 1 실험체의 단면치수 및 형상

W/B	시멘트	실리카흄	충전재	잔골재	고성능감수제
0.2	1	0.25	0.3	1.1	0.016

표 2. UHP-SFRCC 시험체의 기본 배합표(중량비)

3. 내하력 산정

3.1 전단력

Plastic theory에 의해 UHP-SFRCC 시험체의 전단에 대한 그 파괴하중을 계산하였다. 프리스트레스 힘을 받는 UHP-SFRCC 시험체의 전단력은 보의 지점에서 발생하는 극한 하중과 사인장 균열 하중이 같다는 가정하에 x 를 구하여 V_u 와 V_{cr} 를 계산하였다⁽¹⁾. V_u : 극한 하중, V_{cr} : 사인장 균열 하중

$$V_u = \frac{A_{cw} f_c^*}{a'} \left[\frac{0.118}{\frac{x'}{a}} + \frac{0.25 \xi \beta_{ef} \frac{t}{h}}{1 - \frac{x'}{a'} \left(1 - \frac{t}{h}\right)} \right]$$

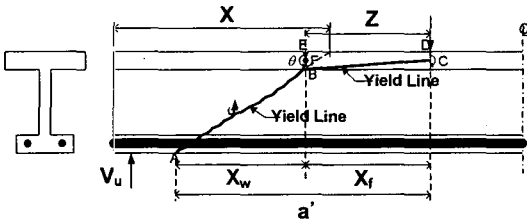


그림 5. Yield Line

$$V_{cr} = \frac{f_t^* A_c \frac{e}{h} \left[\left(\frac{a'}{h} \right)^2 \left(\frac{x}{a'} \right)^2 + 1 \right] + \frac{1}{h} \sum P_{e,i} d_{pi}}{\frac{a}{h} + \frac{a'}{h} \left(\frac{x}{a'} - 1 \right)}$$

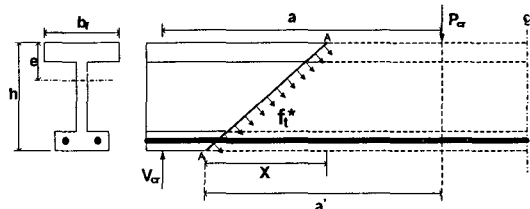


그림 6. Cracking load

3.2 모멘트

UHP-SFRCC 시험체의 휨모멘트는 그림4의 응력블럭 모델을 이용하여 산출하였다. UHPCC의 압축구역의 응력 블록은 공시체 실험 및 보의 실험시 부차한 스트레인을 볼 때 삼각형 모양을 형성하고

있다. UHPCC는 초고강도의 압축강도 뿐만아니라 강섬유 혼입으로 인해 상당한 인장강도를 지니고 있으므로 중립축 하부의 UHPCC 인장 응력 블록을 복부부분과 플랜지 부분을 고려하여 아래의 식으로 휨모멘트를 산정하였다.

$$M = A_p f_{sp} (d_p - u) + f_{tc} (h - e) b_w \left(\frac{h}{2} + \frac{e}{2} - u \right) + f_{tc} t_b (b - b_w) \left(h - \frac{t_b}{2} - u \right)$$

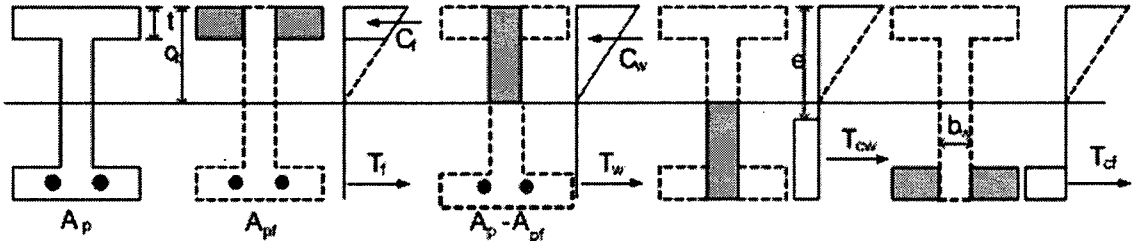


그림 7 휨모멘트 산정모델

3.3 파괴하중 비교

각 시험체에 대해서 휨모멘트와 전단력에 상응하는 파괴하중과 파괴모드는 표3과 같으며, 실험결과와 Plastic analysis와 비교하였다. 실험결과와 해석결과 모두 전단파괴를 하였다. 경간 형고비가 15라 하더라도 휨파괴가 아닌 복부 전단균열 파괴를 하였다. 경간형고비가 10, 15인 경우 실험치와 해석치가 근접한 결과를 보여주고 있으나 경간형고비가 5인 경우는 해석치가 실험치보다 현저하게 적게 산정되었다. 이는 경간형고비가 5인 경우 높은보와 같이 수직 및 수평 구속효과가 있어 사인장 균열하중보다 큰 하중에 파괴를 보였다. 이를 정확히 산정하기 위해서 경간형 고비가 작은 경우를 고려하는 전단 파괴식이 필요할 것으로 본다.

구분	실험결과		Plastic analysis			
	파괴하중 (tonf)	파괴모드	전단파괴 하중 (tonf)	휨파괴 하중 (tonf)	파괴모드	
A 단면	FP-W7-L15	32	Shear	32.5	40.1	Shear
	HP-W7-L15	27	Shear	30.3	33.8	Shear
	NP-W7-L15	26	Shear	20.8	30.5	Shear
	FP-W7-L15-B	33.6	Shear	33.6	41.3	Shear
	FP-W7-L10	46.2	Shear	39.0	60.6	Shear
	FP-W7-L10-B	47	Shear	40.0	62.3	Shear
B 단면	FP-W5-L10	41	Shear	30.0	59.0	Shear
	HP-W5-L10	27	Shear	26.3	49.3	Shear
	NP-W5-L10	28	Shear	17.3	45.2	Shear
	FP-W5-L5	125	Shear	64.4	118	Shear
	HP-W5-L5	82	Shear	56.3	99.2	Shear
	NP-W5-L5	70	Shear	40.5	95.5	Shear

표 3. UHPCC 실험체의 파괴하중과 파괴모드

4. 유한요소 해석

유한요소 모델링에 있어서 콘크리트 요소는 2차원 평면 응력 요소, 즉 등방일축변형율을 이용하여 2축 응력을 받는 철근콘크리트 평면 응력 해석⁽²⁾을 수행하였다. 불규칙한 방향으로 불연속적으로 배치되어 있는 강섬유에 의한 콘크리트 인장응력을 VEM으로 모델링 하였다⁽³⁾. 철근은 선형/비선형 탄성/소성 특성을 지닌 2절점 트러스 요소로 모델링 하였다. 기하학적 비선형 방정식을 해석하는 해법으로 arclength 방법을 사용하였다. 그림5~8은 실험치와 유한요소해석치를 비교하여 도시하였다.

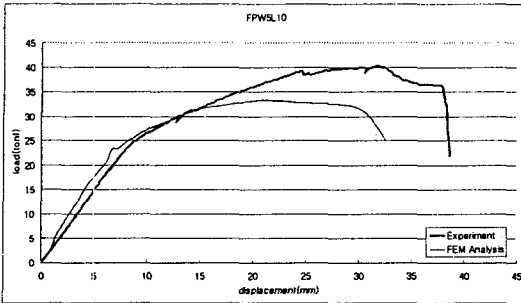


그림 5 FPWSL10의 하중처짐곡선

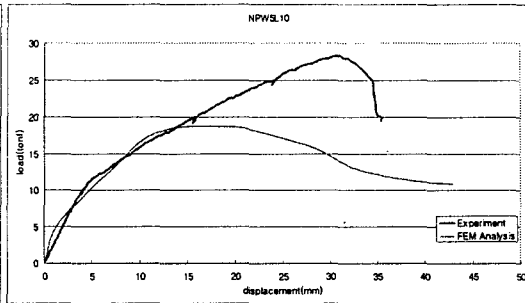


그림 6 NPWSL10의 하중처짐곡선

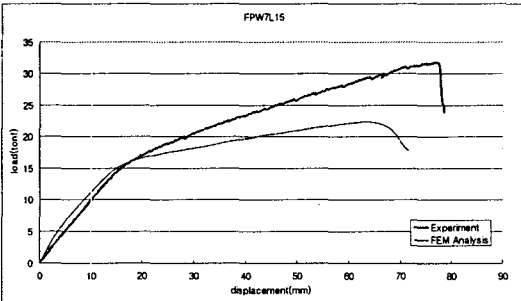


그림 7 FPWL15의 하중처짐곡선

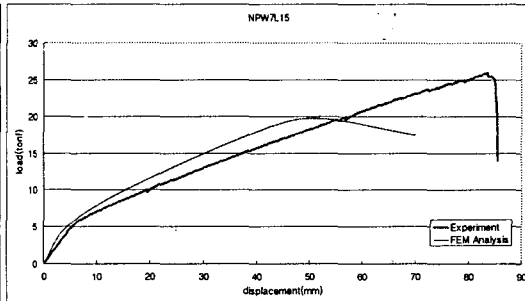


그림 8 NPWL10의 하중처짐곡선

5. 결론

(1) 복부폭이 50mm인 경우 휨철근 보강 I형보는 경간 형고비가 15인 경우 휨파괴 거동을 보였는데 프리스트레스트 I형 보는 복부폭이 70mm라 하여도 경간 형고비가 15인 경우 전단파괴 거동을 하였다. 프리스트레스트 보인 경우 복부폭과 단면의 높이를 변화시켜 더 큰 내하력을 받을 수 있는 단면의 선정이 중요하다.

(2) 소성이론에 근거한 전단강도식은 경간형고비가 10, 15인 경우 실험 파괴하중과 근접한 결과를 보이고 있으나 경간 형고비가 5인 경우 사인장 균열하중을 구하는 데 있어서 수평구속을 고려할 수 있는 식을 포함시켜야 할 것으로 판단된다.

(3) 유한요소 해석에서 강섬유의 혼입으로 인한 콘크리트 인장강도의 증진을 VEM모델을 사용하여 반영하였으며 최대하중이후의 강성연화 효과를 비교적 근사하게 해석하였다.

감사의 글

본 연구는 건교부 2004년도 산·학·연 과제 '초고성능 시멘트 복합재료를 활용한 교량거더 개발'에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Jin-Ping, Zhang., " Strength of Cracked Concrete", ABK Department of Structural Engineering Danmarks Tekniske Universitet - Technical University of Denmark, 1994
2. Foster, S.J., 1992a. "An Application of the Arc Length Method Involving Concrete Cracking", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 33, No. 2, pp: 269-285
3. J Y L.Voo, S J Foster., " Variable engagement model for fibre reinforced concrete in tension", UNICIV REPORT No. R-420, The university of new south wales sydney 2052 australia, June, 2003