콘크리트 충전 유리섬유 복합소재 기둥의 세장비 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Slenderness Effects in Concrete-Filled Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Columns

최 석 환* 이 성 우** 손 기 훈*** 이 명****
Choi, Sok Hwan Lee, Sung Woo Sohn, Ki Hoon Lee, Myung

ABSTRACT

The structural characteristics of concrete-filled glass fiber reinforced polymer tubes were studied. The concept of concrete-filled composite columns was introduced to overcome the corrosion problems associated with steel and concrete piles under severe environments. Other benefits of composite columns include low maintenance cost, high earthquake resistance, and long expected endurance period. Several experiments were conducted; 1) compression test for short-length composite columns, 2) uniaxial compression tests on a total of 7 columns with various slenderness ratios. Short-length columns give higher strength and ductility revealing high confinement action in concrete. Failure strengths, failure patterns, confinement effects, and stress-strains relations were analyzed for slender columns. Current study will show the feasibility of concrete-filled glass fiber reinforced polymer composite columns in corrosive environments, and will provide an experimental database for columns that are externally reinforced by multidirectional fibers.

1. 연구의 목적 및 범위

콘크리트충전 유리섬유복합소재 파일(concrete-filled glass fiber reinforced polymer tubes; CFFT)은 강재 혹은 콘크리트 파일이 해양환경이나 기타 나쁜 환경적 조건에서 보이는 부식 및 성능 저하 현상, 그리고 이에 관련된 높은 유지관리비에 대처하기 위한 하나의 방안으로 연구되고 있다 [1,2]. CFFT의 장점으로는 낮은 유지관리비, 연성적인 거동으로 인한 높은 내진성능, 긴 수명 등을 들 수 있을 것이다. 본 연구에서는 콘크리트 충전 GFRP(glass fiber reinforced polymer) 파일에서 세장효과를 포함한 여러 역학적 거동특성을 파악하기 위한 실험을 수행한다.

본 연구의 목적은 콘크리트와 튜브의 역학적 거동 파악, 역할분담 특성파악, 세장비에 따른 거동특성 규명, 그리고 해석모델 개발을 위한 실험적 데이터 확보 등이다. 이를 위해서 짧은 부재 및 세장효과를 보일 긴 부재에 대한 거동실험으로 파괴강도, 파괴양상, 튜브의 구속효과로 인한 강도증진효과, 시편의 단부조건이 응력-변형률 관계에 미치는 영향 등을 분석한다.

* 정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 조교수
** 정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 교수
*** 정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 박사과정
***** 정회원, 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정

2. 부재 제작 및 실험 내용

2.1 튜브 제작

콘크리트 충전 유리섬유 복합소재 기둥을 제작하기 위해서 복합소재 튜브(tube, shell)를 먼저 제작한다. 콘크리트충전 복합소재 기둥은 휨과 압축을 동시에 받게되는데, 튜브의 구속효과로 인해서 압축강도 및 변형률이 크게 증가한다. 튜브가 구속효과를 발휘하기 위해서는 횡방향으로 배치된 유리섬유가, 그리고 휨에 대해서 저항하기 위해서는 종방향으로 배치된 유리섬유가 각각 필요하다. 먼저 안쪽 층에는 수적층 성형공법으로 유리섬유(E-glass)를 배치한 후(L900-5ply), 수지가 완전 경화하기 전에 필라멘트 와인딩 성형 공정을 이용하여 원주방향으로 유리섬유(2ply)를 감았다. 레진(resin)으로 비닐에스터를 사용하였다. 튜브는 경화가 끝날 때까지 30분 정도 와인딩 기계 위에서 천천히 회전시킨다. 튜브와 같은 구조를 가진 인장시험시편 시험에서 축방향 인장강도로는 4604.2 kgf/cm^2, 원주방향 인장강도로는 3524.9 kgf/cm^2를 얻었고, 축방향 탄성계수는 $2.27 \times 10^5 kgf/cm^2$, 원주방향 탄성계수는 $1.57 \times 10^5 kgf/cm^2$로 측정되었다.

2.2 충전 콘크리트의 배합비

튜브가 제작되면 그 안에 콘크리트를 충전하게 된다. 충전 콘크리트의 배합설계는 표 1과 같다. 모든 부재는 비닐로 밀봉한 후 상온 양생하였다.

표 1 충전 콘크리트의 배합설계

설계강도 (kgf/㎠)	굵은골재 최대치수(㎜)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/B (%)	s/a (%)	단위재료량(kg/㎥)					
						W	C	S	G	fly ash	AE
270	25	12.0	4.5	44.8	44.1	176.3	363	744	940	50	4.13

2.3 실험 부재의 종류 및 실험 장비

실험 부재로는 다음 세 종류가 준비되었다; 1) 세장비 실험시편인 CFFT부재 8개, 2) 30cm CFFT부재 9개, 3) 10cm x 20cm 콘크리트 공시체 다수. 모든 시편은 초기의 과다한 변형으로 인해서 생기는 강성이 낮은 부분을 제거하기 위해서 일차 재하(preloading)을 실시하였는데, 콘크리트 공시체는 7.9톤, 그리고 모든 CFFT부재는 21.4톤까지 미리 재하하였다. 콘크리트 공시체를 포함하여 이 연구에 사용된 모든 시편은 일정한 변형률 0.001/분의 속도로 실험을 수행하였다.

30cm CFFT부재는 세 가지 서로 다른 단부조건에 대해서 실험이 수행되었다; 1) GR: 시편 양단의 튜브 부분을 각 1cm 제거한 시편, 2) GT: 시편 양단의 튜브부분을 각 1cm 잘라내고, 재하면에 Teflon 쉬트(sheet)와 스테에르산(stearic acid)을 이용한 윤활제를 사용해서 전단구속을 줄인 경우[3], 3) NG: 양단 연마 외에는 따른 처리를 하지 않은 기본 시편. 세 가지 경우 모두 재하면을 연마처리하였다.

모든 CFFT부재의 내경은 165mm이고, 두께는 6.5mm이다. 세장비 실험 부재는 양단 재하판 고정형태의 재하 상황을 목표로 하였으므로, 비록 재하면은 연마하였으나, 사용된 고정식 재하판과 부재의 재하면 사이에 생길 수 있는 틈은 석고를 반죽해 넣은 후 작은 하중을 가해서 짜내는 형식으로 굳

게 만들어서 캡핑하였다.

실험장비로는 500톤 자동유압시험기를 사용하였다. 양단의 재하판은 고정단이었고, 최종 변위 측정값으로도 장비 재하단에서의 회전은 거의 없는 것으로 확인되었다.

3. 실험결과 정리 및 분석

3.2 콘크리트 공시체 및 30cm CFFT 시편 실험

콘크리트 공시체 시험 결과, 콘크리트의 강도는 평균적으로 292 kgf/cm^2 (288.1, 304.5, 283.4)를 얻었다(양생기간 71일).

30cm CFFT시편 실험은 단부의 조건이 시편의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해서 수행되었다. 실험 결과는 표 2에 정리되어있다.

표 2 30cm CFFT시편의 실험결과

L(㎜)	I.D.	변위제어 (㎜/분)	양생기간 (일)	E (kgf/cm^2)	P_u(tf)	f_u (kgf/cm^2)	ε_u
300	NG-1	0.3	71	90307	214.9	1005	0.0167
	NG-2	0.3	71	163671	227.2	1063	0.0141
	NG-3	0.3	71	121007	220.9	1033	0.0144
	GR-1	0.3	72	100178	222.1	1039	0.0467
	GR-2	0.3	72	111504	220.9	1033	0.0490
	GR-3	0.3	72	93053	219.0	1024	0.0516
	GT-2	0.3	72	146150	207.0	968	0.0440
	GT-3	0.3	72	131618	210.5	984	0.0422

상하부 재하면 사이의 변위를 재하면에 직접 변위계를 직접 부착하여 측정하였는데, 부재의 좌우 맞은 편에서 각기 측정한 변위를 평균해서 그린 응력-변형률 곡선이 그림 1이다. 여기서 볼 수 있듯이 거동은 크게 두 부류로 나누어진다. 튜브가 직접하중을 받는 경우(NG)와 달리 GR, GT시편은 콘크리트가 일차적으로 하중을 받아서 튜브로 전달하기 때문에 튜브는 횡방향 인장구속을 담당하고 축하중을 직접전달하는 역할은 상대적으로 작다고 할 수 있다. 부재 양단의 튜브부분을 제거한 시편(GR, GT)은 단부구속이 적어져서 NG시편보다 횡방향 변위가 크게 되고, 따라서 축방향 압축변형도 많이 일어나게 된다. 따라서 그림에서 보듯이 연성이 매우 큰 거동을 보이게 된다. 이러한 거동은 튜브 위에서 측정한 축방향 변형률 (시편의 단부에서 3cm 떨어진 위치에서)로 보아서도 알 수 있다(그림 2). 시편 단부에서의 변형률을 보면 NG의 경우는 상당한 양의 변형을 일으키는데 반해 GR, GT의 경우에서는 큰 변형이 일어나지 않는다. 이것은 콘크리트가 압축을 받는 동안에 튜브는 콘크리트와 일체로 거동하지 않는다는 것을 보여준다. 그림 3은 시편 중앙부에서의 변형률인데, 여기서 GR, GT가 단부보다 상당히 큰 변위를 보이지만 NG의 경우보다는 작은 변형을 일으킨다. 이로써 튜브와 콘크리트 사이의 부착은 단부조건에 따라서 단부 근처에서는 제대로 이루어지지 않는다는 것을 알 수 있다. 횡방향 변위을 살펴봐도 NG의 경우가 전체적인 부피팽창이 가장 작다는 것을 알 수 있다(그림 4). 부재는 최종적으로 튜브의 인장파괴로 파괴되므로 압축강도는 단부조건에 무관하게 일정한 값을 보인다(그림 2~3).

콘크리트 공시체에서는 단부의 전단구속을 줄이면, 최고응력 이후 연화현상이 일어나는 구간에서

훨씬 취성적인 거동을 나타낸다[3]. 그러나 본 연구에서는 튜브부분을 제거한 경우는 윤활제를 사용하지 않은 경우(GR)나 사용한 경우(GT)에서 거동 상의 차이가 별로 없다. 이것은 응력이 일차적으로 콘크리트를 통해서 튜브의 구속작용이 일어나는 하중전달 과정으로 인한 것으로 보인다. NG의 경우도 윤활제를 사용하여 단부 구속을 제거하면 거동이 달라질 것이다.

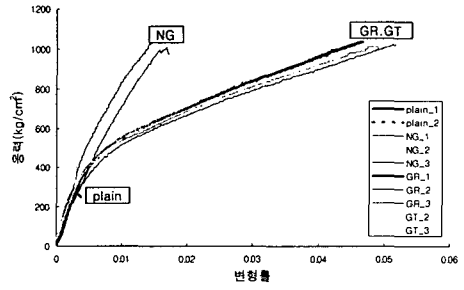

그림 1 30cm CFFT의 응력-변형률 관계

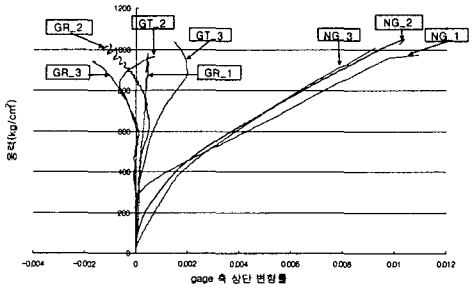

그림 2 30cm CFFT의 튜브 표면 축방향 변형률(단부)

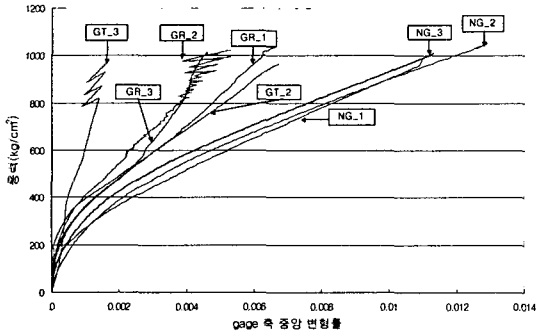

그림 3 30cm CFFT의 튜브 표면 축방향 변형률(중앙)

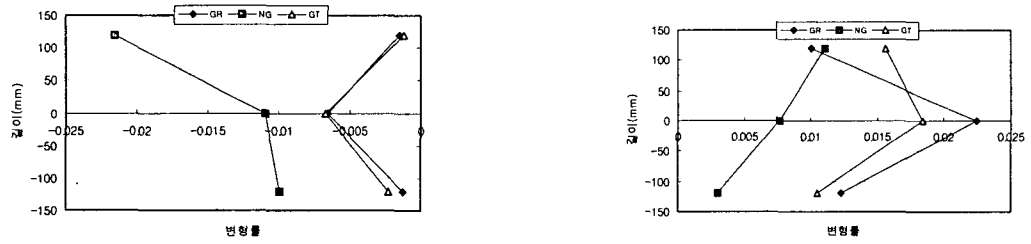

그림 4 파괴 시에 30cm CFFT의 튜브 표면 축방향 변형률(좌)과 횡방향 변형률(우)

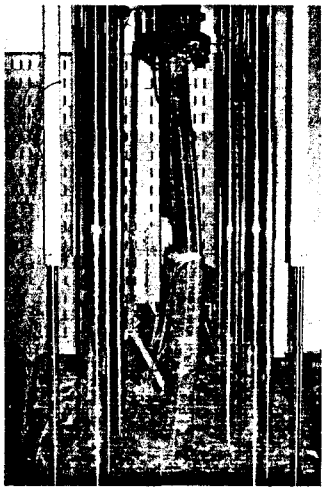

그림 5 전형적인 세장비 실험시편

3.3 세장비 실험

그림 5는 세장비 실험에서 볼 수 있는 전형적인 파괴형상 사진이다. 모든 세장비 시험부재의 파괴는 부재 중앙부의 압축면에서 튜브의 압축파괴 형태로 일어났다. 표 3은 결과를 정리한 것이다. 여기서 세장비는 $k=0.5$로 두고 계산한 값이다.

표 3 세장비 실험 결과

L(㎜)	세장비 λ	I.D	재하속도 (㎜/분)	양생기간 (일)	E (kgf/cm^2)	P_u(tf)	f_u (kgf/cm^2)	ε_u
590	6.7	590_1	0.59	63	79030	213.8	1000	0.0412
		590_2	0.59	63	59348	208.3	974	0.0442
1260	14.3	1260_1	1.26	64	81174	188.1	880	0.0252
		1260_2	1.26	64	101255	203.7	953	0.0278
1920	21.8	1920_2	1.92	64	111499	153.6	718	0.0178
2590	29.4	2590_1	2.59	65	134398	114.1	533	0.0115
		2590_2	2.59	65	143828	114.9	537	0.0094

그림 6은 재하판과 재하판 사이의 변위를 기준으로 그린 응력-변형률 곡선이고, 그림 7은 세장비에 따른 압축강도를 표시한 것이다. 여기서 300_1, 300_2, 300_3는 각기 GR_1, GR_2, GR_3를 의미한다. 세장비는 기둥의 강성에 영향을 미친다. 세장비가 큰 기둥에서 강성이 높게 나타나는 것은 단부에서 보이는 큰 변형이 전체 변형률에 미치는 영향이 긴 시편에서 상대적으로 작기 때문일 것이다. 세장비에 따라서 극한강도의 차이가 분명하게 나타나는데, 세장비가 6.7에서 29.0으로 증가하면 극한강도는 단주와 비교해서 96%에서 52%로 감소한다. 세장비의 증가는 연성(ductility)의 감소도 가져온다. 세장비가 6.7에서 29.0으로 증가하면 축방향 최대 변형률은 단주의 87%에서 43%로 줄어든다.

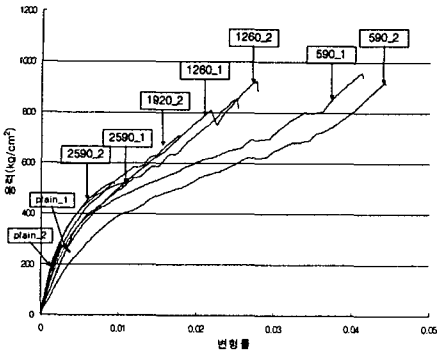

그림 6 여러 세장비에 대한 응력-변형률 곡선

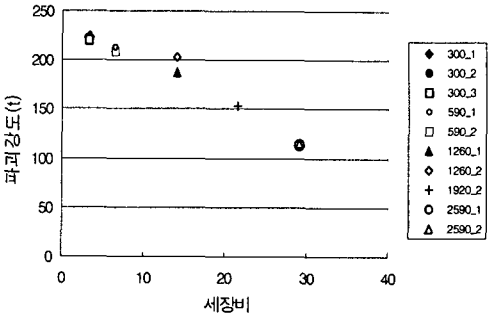

그림 7 여러 세장비에 대한 파괴강도

4. 토의 및 결론

콘크리트 충전 유리섬유 복합소재 기둥(CFFT)의 거동에 영향을 미치는 요소는 단부의 조건, 튜브의 인장강도, 세장비 등을 들 수 있다. 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다; 1) 단부의 조건에 따라서 단주거동에서부터 많은 차이를 보인다. 단주(30cm CFFT시편)의 경우 단부의 튜브부를 제거한 경우가 제거하지 않은 경우보다 훨씬 큰 연성을 보인다. 그러나 윤활제를 사용한 경우는 튜브부를 제거한 경우나 그렇지 않은 경우나 연성에서 유사한 거동을 보였다. 2) 단부조건에 무관하게 단주의 압축강도는 일정한 값을 보인다. 이는 최종 파괴형상이 튜브의 인장파괴로 귀결되기 때문으로 보이므로 튜브의 적층설계에서 원주방향 섬유량이 직접적인 영향을 미칠 것이다. 3) 세장비가 증가하면 극한강도 뿐만 아니라 연성도 크게 감소한다. 따라서 세장비가 큰 CFFT 부재에서는 튜브의 구속효과로 인해서 얻어지는 강도증진효과를 충분히 사용하지 못한다.

앞으로 충분히 연구가 되어야 하는 부분으로는 건조수축 및 크리프 등을 고려한 장기거동, 반복하중이 가해질 때의 피로거동, 콘크리트와 튜브 사이의 부착특성이 거동에 미치는 영향, 휨과 압축을 동시에 받는 쉘(shell)부분의 구조적 설계기법 등을 들 수 있고, 실 구조물에 적용하기 위해서는 설계기법에 관해서도 많은 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 연구지원으로 수행되었으므로, 이에 감사드린다. 실험 장비를 사용할 수 있도록 지원해 준 청운대학교 양주경 교수께도 감사드린다.

참고문헌

1. Mirmiran, A., "FRP-Concrete Composite column and Pile jacket Splicing-Phase II", Final Report, Florida DOT, Tallahassee, Fla., 1997

2. Mirmiran, A. Shahawy, M. and Samaan, M., "Behavior of Concrete Columns by Fiber Composite", J. Struc. Engrg., ASCE, Vol. 124, No. 5, 1997, pp. 583-590

3. Choi, S., Thienel, K.-C., and Shah, S. P., "Strain softening of concrete in compression under different end constraints", Magazine of Concrete Research, Vol. 48, No. 175, 1996, pp. 103-115