

콘크리트 합성 유리섬유 강화 복합소재 파일의 실험적 거동분석

Experimental Study of Concrete Filled GFRP Composite Pile

이성우* 최석환** 김병석*** 조남훈**** 홍종삼*****
Lee, Sung Woo Cho, Sok Hwan Kim, Byung Suk Cho, Nam Hoon Hong, Jong Sam

ABSTRACT

Structural characteristics of concrete filled glass fiber reinforced composite pile was studied. Confinement model of composite pile was derived from experimental data, and numerical method to find P-M diagram of composite pile was developed. The flexure-compression test results were compared with analytical P-M diagram and it is demonstrated that they agree well each other. Utilizing these results, pilot composite pile was designed fabricated, and flexural test were conducted.

1. 서 론

강재의 부식과 철근콘크리트의 열화로 인한 노후화는 구조물의 내구성 저하와 유지관리 비용의 상승을 유발하므로 이러한 문제를 근원적으로 해결할 수 있는 복합소재를 건설분야에 이용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서는 경량 내부식 고강도 특성을 보유한 유리섬유를 이용하여 고부식 해양환경 하에서 기존 재료의 문제점을 극복할 수 있는 복합소재 해상파일 개발^[1]의 일환으로 설계에 필요한 콘크리트 합성 복합소재 파일의 구속효과를 분석하였고, 복합소재 파일 P-M 상관도의 수치해석적 방법을 개발하였으며, 이를 실험결과와 비교·분석하여 해석적 방법의 타당성을 입증하였다.

2. 콘크리트 합성 복합소재 파일의 구속모델

콘크리트 충전 복합소재 파일은 복합소재 튜브의 구속효과로 인해 콘크리트의 파괴강도가 훨씬 증가한다. 그림 2.1에는 콘크리트 충전 복합소재 파일의 구속효과를 보여주고 있다.

복합소재 튜브로 구속된 콘크리트 구속모델의 추정강도곡선식은 식(2.1)과 같이 나타낼 수 있으며^[2,3] 본 연구에서 설계, 제작한 파일에 적합한 구속모델의 특성은 다양한 적층방법으로 제작한 복합소재 튜브에 콘크리트를 충전한 단주 압

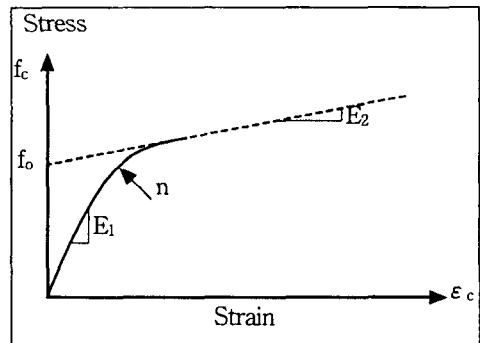


그림 2.1 콘크리트 충전 복합소재 파일의 구속모델

*정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-910-4696 (E-mail:swlee@kookmin.ac.kr)
**정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-910-4648 (E-mail:shchoi@kookmin.ac.kr)
***정회원 · 건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사 · 031-910-0124(E-mail:bskim@kict.re.kr)
****정회원 · (주)국민씨아이 · 차장 · 02-910-4652 (E-mail:namhoon@kookminci.com)
*****정회원 · 국민대학교 건설시스템공학부 · 공학석사 · 02-910-4652(E-mail:octagon3@hanmail.net)

축실험을 통해서 구하였다.

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{\left[1 + \left(\frac{(E_1 - E_2) \varepsilon_c}{f_o}\right)^{n-1/n}\right]} + E_2 \varepsilon_c \quad (2.1)$$

여기서, f_c = 콘크리트의 일축압축 응력, ε_c = 콘크리트의 일축압축 변형률, $E_1, E_2 = 1, 2$ 차 탄성계수, $f_o = 2$ 차 탄성곡선의 y절편 응력값, n = 곡률보정계수 이다. 위의 추정강도곡선식에 대하여 일차탄성계수 E_1 은 다음의 콘크리트의 할선탄성계수 식(2.2)^[4]를 이용하여 구한다.

$$E_1 = 12,610 \sqrt{f_{ck}} \quad (2.2)$$

2차 탄성계수 E_2 는 복합소재 튜브(내경 100mm)의 성형공정, 튜브 두께, 횡방향 탄성계수를 각각 달리하여 제작한 합성 압축 공시체들을 단주 압축실험^[5]을 하여 구속효과를 분석한 결과, 강성비(stiffness ratio = ($E_2/f_c D$)) 대 탄성계수비(slope ratio = (E_2/E_1))로 비교한 선형회귀분석 추세식을 통해 구할 수 있었다.

실험결과를 분석한 추세식에 따른 E_1 과 E_2 의 관계식은 다음의 식(2.3)과 같다.

$$E_2 = E_1 \left(0.0007 \frac{E_j t}{f_{ck} D} + 0.0278 \right) \quad (2.3)$$

여기서, E_j 는 복합소재 튜브의 횡 방향 탄성계수로 각각의 적층설계에 EASAcamp^[6]를 이용하여 계산하였고, t = 복합소재 튜브의 횡방향 두께, f_{ck} = 콘크리트 설계기준 강도, D = 복합소재 튜브의 내경이다. $f_o =$ 실험 결과의 회귀분석을 통하여 다음의 식(2.4)로 구하였다. 여기서, $f_r =$ 구속압력이다.

$$f_o = 1.3 f_{ck} + 0.63 f_r + 17.9 \quad (2.4)$$

3. 콘크리트 합성 복합소재 파일의 P-M 상관도

축력과 휨을 동시에 받는 콘크리트 충전 복합소재 파일의 내력은 P-M 상관도를 통하여 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 다양한 적층구조를 갖는 콘크리트 충전 복합소재 파일의 성능을 예측하고, 표준화하기 위하여 콘크리트 충전 복합소재 파일의 P-M 상관도 산출 프로그램을 개발하였다. 그림 3.1은 P-M 상관도를 계산하기 위해 파일단면을 이산화한 모습을 보여주고 있다. P-M 상관도를 도출하기 위해 사용한 중립축 거리에 따른 콘크리트 충전 복합소재 파일의 압축내력과 휨내력을 구하는 연산식은 식(3.1)~(3.6)과 같다.

구간 i의 변형률(ε_i)에 대한 콘크리트 구간 i의 응력(f_{ci})을 구하기 위하여 식(2.1)의 콘크리트 충전 복합소재 파일의 구속모델 추정강도곡선식을 사용하였다. P-M 상관도에서 인장 파괴영역과 압축파괴 영역을 구분하기 위하여 평형과파 상태의 중립축 길이를 산출한 후, 중립축 길이 변화에 따라 극한 압축내력(P)과 극한

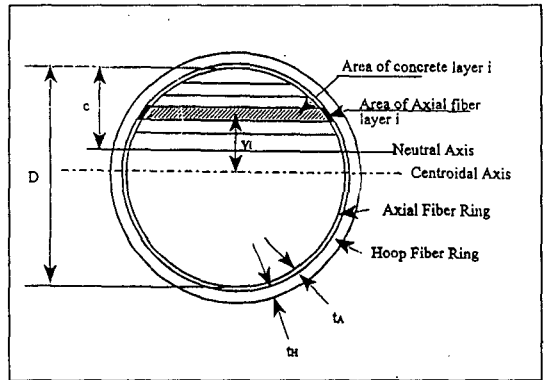


그림 3.1 수치적분을 위한 단면의 이산화 모습

휨내력(M)을 구하는 방법을 이용하였다.

$$\text{복합소재 튜브에 충전된 콘크리트의 극한 압축력}(P_c) \quad P_c = \sum_{i=1}^n f_{ci} A_{ci} \quad (3.1)$$

$$\text{유리섬유 복합소재 튜브의 극한 압축력}(P_s) \quad P_s = \sum_{i=1}^n E_s \epsilon_i A_{si} \quad (3.2)$$

$$\text{복합소재 파일의 극한 압축내력}(P) \quad P = P_c + P_s \quad (3.3)$$

$$\text{복합소재 파일의 콘크리트의 극한 휨내력}(M_c) \quad M_c = \sum_{i=1}^n f_{ci} A_{ci} y_i \quad (3.4)$$

$$\text{유리섬유 복합소재 튜브의 극한 휨내력}(M_s) \quad M_s = \sum_{i=1}^n E_s \epsilon_i A_{si} y_i \quad (3.5)$$

$$\text{복합소재 파일의 극한 휨내력}(M) \quad M = M_c + M_s \quad (3.6)$$

여기서 f_{ci} = 추정강도곡선식으로 계산한 콘크리트 구간 i 의 응력, A_{ci} = 콘크리트 구간 i 에서의 면적, E_s = 복합소재 튜브의 부재길이방향 탄성계수, ϵ_i = 구간 i 의 변형률, A_{si} = 복합소재 튜브의 구간 i 에서의 면적, y_i = 구간 i 의 중심에서 소성중심(단면중심)까지의 거리이다.

4. 콘크리트 합성 복합소재 파일 P-M 상관도의 실험을 통한 검증

3절의 P-M 상관도 해석 프로그램에 필요한 추정강도 곡선 도출을 위해 단주 압축실험을 실시하였으며, 실험 결과를 P-M 상관도 해석 프로그램에 의한 이론값과 비교·분석하였고, 단주 압축실험과 휨성능 실험^[1]을 통해 성능이 입증된 Ø165mm 해상파일의 P-M상관도를 산출하여 비교하였다. 또한 Ø600mm 대구경 복합소재 해상파일의 휨성능 실험 결과^[7]와도 비교하여 P-M 상관도 해석 프로그램의 유효성을 검증하였다.

본 연구의 복합소재 해상파일은 휨에 대한 저항을 위해 축방향으로 유리섬유 직포를 배치하였고, 충전 콘크리트의 구속을 위해 원주방향으로 필라멘트 와인딩하여 제작하였다.

복합소재 파일의 강화재료로 E-클래스 유리섬유를 사용하였고, 축방향으로는 종방향으로 직조한 직포섬유를 배치하였고, 원주방향으로는 2200tex 로빙사를 필라멘트 와인딩으로 배치하였다.

사용된 수지는 열악한 해양환경에 맞추어 내식성과 내화학성이 뛰어난 비닐에스터를 사용하였다. 각 적층 설계시에는 적층해석 프로그램인 ESAComp를 이용하여 적층판의 방향별 강성과 두께, 및 방향별 섬유량을 계산하였다.

4.1 단주 압축실험에 의한 검증

추정강도 곡선을 도출하기 위해 Ø100mm 복합소재 합성압축 강도시험을 실시하였으며 표 4.1에는 공시체의 적층구조와 충전 콘크리트의 설계강도, 공시체의 물성치를 보여주고 있다. 표 4.1의 적층구조에 따른 물성치를 이용하여 추정강도곡선을 추정하였으며, 추정강도곡선을 이용하여 P-M 상관도를 도출하였고, 해석 P-M 상관도와 단주 압축 강도 실험결과를 비교하여 압축내력에 대한 검증을 실시하였다. 그림 4.1에서는 P-M 상관도에 의한 이론값과 실험결과를 비교하여 보여주고 있으며, 100H511 시험체의 경우 P-M 상관도에 의한 이론값과 비교하여 0.8~1.1배의 실험값을 예측하였고, 100H522 시험체의 경우 이론값과 실험값이 거의 비슷함을 알 수 있었다.

표 4.1 단주압축 실험 공시체의 적층구조 및 물성치

I.D		100H511	100H522
내경 (mm)		100	100
셀 두께 (mm)		5.7	7.0
적층 구조	L900(PLY)	5	5
	FW(90°)	1	2
	FW(45°)	1	2
E_x (kgf/cm ²)		2.35×10^9	1.87×10^9
E_y (kgf/cm ²)		1.61×10^9	1.75×10^9
G_{xy} (kgf/cm ²)		5.11×10^8	5.24×10^8
콘크리트 파괴강도 (kgf/cm ²)		314.2	314.2
수지		비닐 에스터	

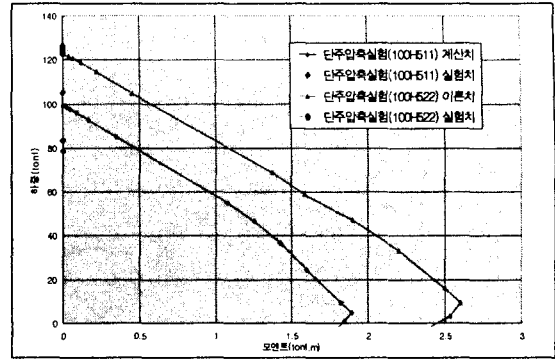


그림 4.1 단주 압축실험 P-M 상관도

4.2 Ø165 모델파일의 휨-압축실험에 의한 검증

P-M 상관도의 휨-압축 내력에 대한 적정성은 휨-압축 성능실험^[1]을 실시한 모델파일(Ø165.2mm)의 물성치를 입력하고 P-M 상관도를 산출하여 이를 휨-압축 실험결과와 비교하였다. 표 4.2에서는 모델파일의 물성치를 정리하였으며, 이를 통하여 그림 4.2에서는 모델 파일의 P-M 상관도를 도시하였고 이를 휨-압축 실험을 통해 얻어진 실험값과 비교하였다. 표 4.3에서는 모델파일의 실험값과 이론값의 비교를 보여주고 있다. 압축력을 기준으로 휨모멘트를 비교해 본 결과 0.9~1.2배의 실험값을 예측하였다.

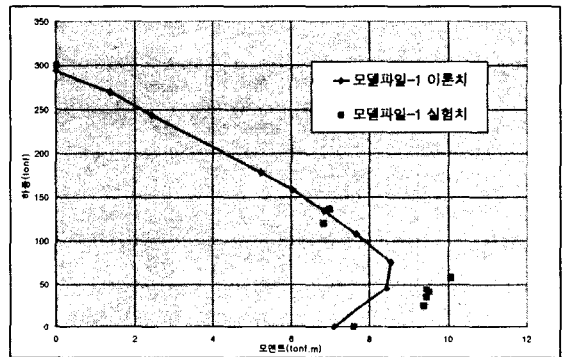


그림 4.2 모델파일(Ø165.2mm)의 P-M상관도

표 4.2 모델 파일의 물성치

구분		모델파일
내경(mm)		165.2
셀 두께 (mm)		6.7
적층 구조	L900(PLY)	5
	FW(90°)	2
E_x (kgf/cm ²)		2.37×10^5
E_y (kgf/cm ²)		1.76×10^5
콘크리트 파괴강도 (kgf/cm ²)		496.6

표 4.3 모델파일의 실험값과 이론값의 비교

압축력(P) (tonf)	휨모멘트(M) (tonf·m)		
	실험값	이론값	실험값/이론값
0	7.6	7.1	1.1
24.0	9.4	7.8	1.2
34.4	9.4	8.2	1.1
40.9	9.5	8.4	1.1
43.5	9.4	8.5	1.1
58.1	10.1	8.5	1.2
119.8	6.8	7.3	0.9
136.2	7.0	6.7	1.0

5. Ø600 파일의 휨 성능 실험

5.1 목표 강관파일 선정

복합소재 파일의 극한 내력설계를 위하여 SS400 강재를 사용한 KS D3566 일반구조용 탄소강관을 목표 강관파일로 선정하였다. 목표 강관파일의 단면성질, 물성치, 극한구조내력은 표 5.1에 보여주고 있다.

5.2 Ø600 복합소재 파일의 적층설계 및 내력계산

고강도 콘크리트($f_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$)를 충전한 콘크리트 충전 복합소재 파일 튜브의 물성치, 추정강도곡선을 사용하여 복합소재 해상파일의 P-M상관도를 도출하였다. 그림 5.1에서는 Ø600 시험체에 따른 콘크리트 충전 복합소재 파일의 P-M상관도를 도시하였다. 표 5.2에서는 내력 계산을 위한 튜브의 적층 설계를 보여주고 있다. 표 5.3에서는 설계안과 목표 강관파일의 극한구조내력을 비교하였다.

표 5.1 목표 강관파일의 단면성질, 물성치, 극한구조내력

구분	설계안
내경 (mm)	600
강관 두께 (mm)	20
단면적 (cm ²)	390
단면계수 (cm ³)	5849
단면 2차 모멘트 (cm ⁴)	187182
인장강도 (kgf/cm ²)	4100
항복강도 (kgf/cm ²)	2400
허용강도 (kgf/cm ²)	1400
탄성계수 (kgf/cm ²)	2.1×10^6
휨 내력 (tonf · m)	140
압축 내력 (tonf)	935
전단 내력 (tonf)	270

표 5.2 Ø600 복합소재 해상파일 적층 설계

구분	설계안	
내경 (mm)	600	
셸 두께 (mm)	10.4	
수지	비닐에스터 수지	
적층구조	L900(PLY)	7
	FW(90°)	3
	FW(45°)	1
섬유	Hand lay-up	$V_f=35\%$
	Filament winding	$V_f=50\%$
부피비		
Ex (kgf/cm ²)	2.05×10^5	
Ey (kgf/cm ²)	1.78×10^5	

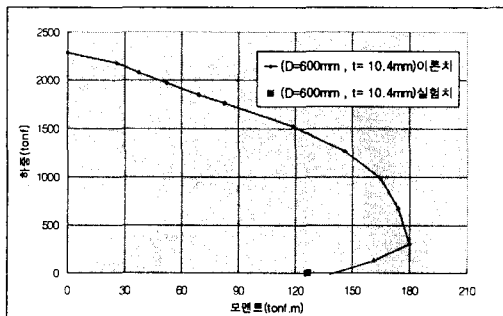


그림 5.1 P-M상관도와 실험치 비교(Ø600mm)

표 5.3 Ø600 시험체의 극한구조내력 비교

구분	두께 (cm)	휨내력 (tonf · m)	압축내력 (tonf)
목표 강관파일	20	140	935
Ø600 시험체	10.4	140(1.0)	2289(2.5)

(주) ()의 수치는 목표 강관파일 내력 대비

5.3 복합소재 해상파일의 휨 성능 실험

고강도($f_{ck}=400\text{kg/cm}^2$) 콘크리트로 충전한 Ø600mm 해상파일의 휨성능 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 장비는 최대하중을 350tonf까지 가할 수 있는 MTS System사에서 제작한 실험기로 실험

시 하중은 4점 휨 시험(B법)을 선택하였으며, 재하속도는 5mm/min으로 변위 제어를 실시하였다.

사진 5.1에서는 Ø600mm 시험체의 실험 모습을 보여주고 있다. 표 5.4에서는 Ø600mm 파일의 실험 결과 값과 P-M상관도에 의한 이론값과의 비교를 보여주고 있다. Ø600mm 시험체 경우 0.9배의 실험값을 예측하였다. 이에 P-M 상관도에 의한 휨내력 해석은 거의 비슷한 값을 예측하였다. 앞서 나타낸 그림 5.1에서는 Ø600mm 시험체에 대한 P-M 상관도의 이론값과 휨 성능 실험값을 보여주고 있다.

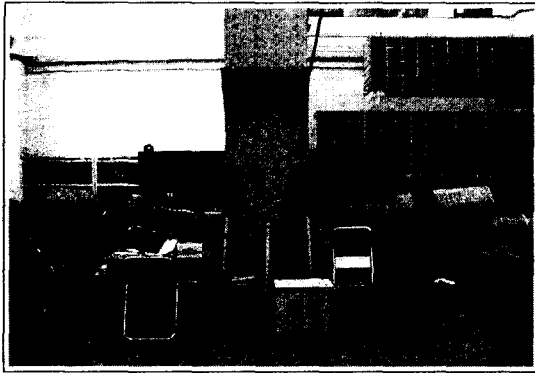


사진 5.1 D600mm 시험체의 실험 모습

표 5.4 P-M상관도와 실험값 비교

구분	이론값 (tonf · m)	실험값 (tonf · m)	실험값/이론값
Ø600 시험체	140.5	126.1	0.9
		126.5	0.9

6. 연결부 파일의 휨 성능 실험

6.1 연결부 설계

복합소재 해상파일의 연결부는 강관을 삽입하여 연결하는 방식인 강관 집합방식 연결부를 설계하였다. 그림 6.1과 그림 6.2에는 복합소재 해상파일의 연결부 상세를 보여주고 있으며, 연결부는 복합소재 튜브 안쪽에 강관 튜브를 에폭시로 부착하여 복합소재 튜브와 일체 거동을 할 수 있도록 설계하였다.

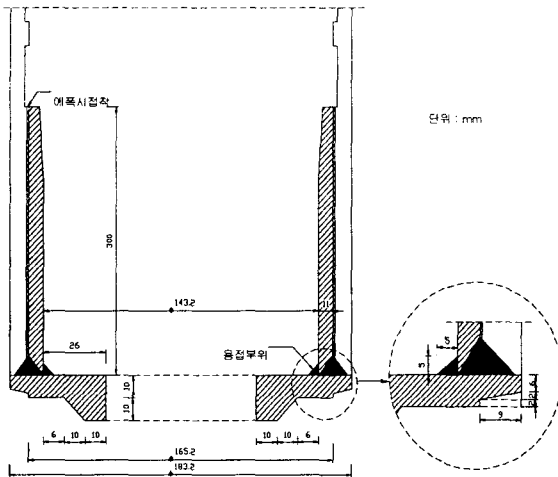


그림 6.1 해상파일 연결부 설계(상)

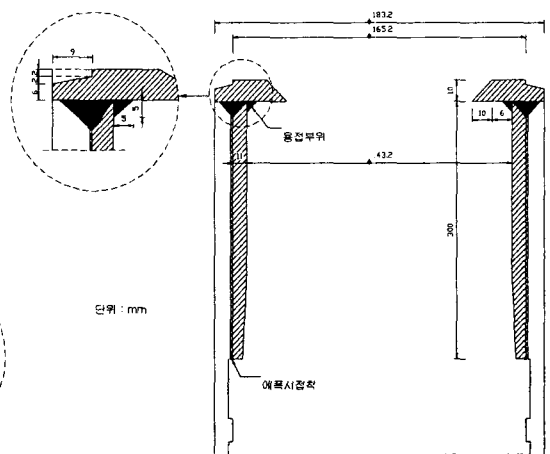


그림 6.2 해상파일 연결부 설계(하)

6.2 Ø165mm 복합소재 파이프의 적층설계 및 내력계산

콘크리트($f_{ck}=310\text{kgf/cm}^2$)를 충전한 복합소재 파이프 튜브의 물성치, 추정강도곡선을 사용하여 복합소재 해상파이프의 P-M상관도를 도출하였다. 그림 6.3에서는 Ø165.2 시험체에 따른 콘크리트 충전 복합소재 파이프의 P-M상관도를 도시하였다. 표 6.1에서는 내력 계산을 위한 튜브의 적층 설계를 보여주고 있다.

표 6.1 Ø165.2 복합소재 해상파이프 적층 설계

구분		설계안
내경 (mm)		165.2
셸 두께 (mm)		7.55
수지		비닐에스터 수지
적층구조	L900(PLY)	5
	FW(90°)	2
	FW(45°)	1
섬유 부피비	Hand lay-up	$V_f=35\%$
	Filament winding	$V_f=50\%$
Ex (kgf/cm^2)		2.04×10^5
Ey (kgf/cm^2)		1.76×10^5

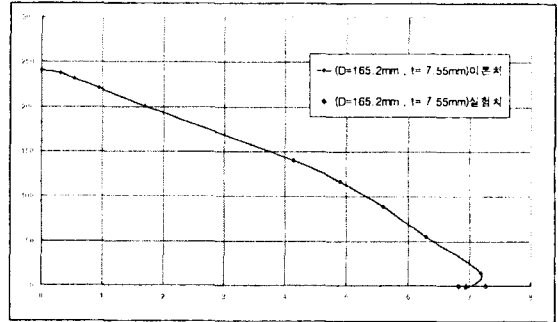


그림 6.3 P-M상관도와 실험치 비교

6.3 휨 성능 실험결과와 P-M 상관도와의 비교

Ø165.2mm 복합소재 해상파이프 연결부의 구조성능을 검증하기 위해 휨성능 실험을 실시하였다. 사진 6.1과 사진 6.2에서는 Ø165.2mm 시험체와 연결부 시험체의 최종 파괴 모습을 보여주고 있다. 표 6.2와 그림 6.3에서는 Ø165.2mm 실험 결과값과 P-M 상관도에 의한 이론값과의 비교를 보여주고 있다. Ø165.2mm 시험체 경우 연결부의 유,무에 관계없이 1.0배의 거의 비슷한 실험값을 예측하였다.



사진 6.1 D165.2mm 시험체의 최종 파괴 모습

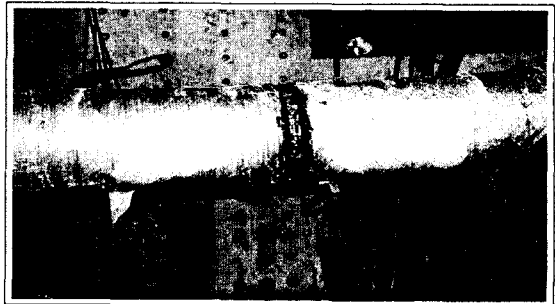


사진 6.2 D165.2mm 연결부 시험체의 최종 파괴 모습

표 6.2 휨성능 실험 결과(Ø165.2mm)와 P-M상관도와의 비교

구분	파괴시하중(tonf)	최대모멘트(tonf · m)	중양부최대처짐(cm)	이론값(tonf · m)	실험값/이론값
D165mm-1	16.5	7.3	16.0	7.0	1.0
D165mm-C1	15.5	6.8	16.9		1.0
D165mm-C2	15.8	7.0	16.2		1.0
D165mm-C3	16.5	7.3	15.8		1.0

6. 결 론

본 논문에서는 콘크리트 충전 복합소재 해상파일의 구조적 특성을 분석하기 위해 실험적으로 콘크리트 구속 모델을 유도하였고, P-M상관도 수치해석 프로그램을 개발하였으며, Ø100mm, Ø165mm, Ø600mm 해상파일 모델에 대한 압축성능, 휨-압축 성능, 휨성능 실험을 실시하여 실험값과 비교를 통해 개발된 P-M상관도의 유효성을 검증하였다. 또한 파일의 연결부를 설계, 제작하여 휨성능 실험을 실시하였다.

Ø100mm, Ø165mm, Ø600mm 해상파일 모델에 대한 압축성능, 휨-압축 성능, 휨성능 실험결과를 비교한 결과 단주 압축실험을 실시한 Ø100mm, 165mm 파일의 경우 P-M 상관도 이론값의 0.8~1.1배의 압축 성능을 예측하였고, 휨-압축실험을 실시한 모델 파일(Ø165mm)의 경우 1.1배의 휨 성능, 0.9배의 압축 성능, 0.9~1.2배의 휨-압축 성능을 예측하였다. Ø600mm 복합소재 파일의 휨성능 실험을 실시한 결과도 0.9배의 휨 성능을 예측하였다. Ø165mm 연결부 파일 휨성능 실험 결과도 1.0배의 성능을 예측하였다. 따라서, 본 연구에서 개발된 P-M상관도는 향후 콘크리트 충전 복합소재 파일 설계에 사용할 수 있을 것으로 평가된다.

감사의 글

본 연구는 해양수산부의 지원으로 수행되었으며, 해양수산부의 연구지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 이성우 외, (2002), 고내구성 신소재 해상파일 개발연구(IV), 국민대학교 구조안전연구소 연구보고서 KMU/ SSRC - 2002/03, 해양수산부
- [2] Mirmiran, A.(1997), Analytical and Experimental Investigation of Reinforced Concrete Columns Encased in Fiberglass Tubular Jackets and Use of Fiber Jacket for Pile Splining, Final Report, Contract No. B-9135, Florida Department of Transportation. Tallahassee, Fla.
- [3] Mirmiran, A., Shahawy, M., Samaan, M., (1997), Behavior of concrete columns by fiber composite, J. Struct. Engrg., ASCE, 123(5), 583-590
- [4] Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., (1998), Model of concrete confined by fiber composites. ASCE Structural Engineering, V. 124, No. 9 pp. 1025-1031
- [5] 이 명, (2002), 콘크리트충진 복합소재 합성부재의 거동분석과 세장비 특성에 관한 연구, 국민대학교 건설시스템공학부 석사논문
- [6] European Space Agency, (2002), EASAComp (Analysis and Design of Composite Material Systems) Ver 2.0, Helsinki University of Technology
- [7] 홍종삼, (2002), 유리섬유 복합소재 파일의 휨-압축 내력특성 연구, 국민대학교 건설시스템공학부 석사논문