

충전 및 합성조건 변화에 따른 콘크리트 충전강관 거더의 휨거동에 관한 연구

A Study on the Flexural Behavior of Concrete Filled Steel Tube Girder in Parametrically Varied Filling and Composition

진원종* · 강재윤** · 최은석*** · 이정우****

Chin, Won Jong · Kang, Jae Yoon · Choi, Eun Suk · Lee, Jung Woo

Abstract

A new bridge system described in this paper uses concrete-filled steel tube (CFT) girders as a replacement for conventional girders. Experimental investigations were carried out to comprehend the flexural behavior of CFT girder. Specimens were manufactured considering several parameters such as the strength of filling material, the eventual presence and number of inner shear connectors to evaluate the bending bearing capacity of CFT girder. The experimental investigation consisted of designing and constructing a test specimen and loading it to collapse in bending to check the applicability of the system. Test results showed that concrete filled steel tube girders have good ductility and maintain their strength up to the end of the loading. The stiffening effect of the Γ -shaped perfbond rib is determined to contribute relatively to the increase of the bending bearing capacity.

Keywords : CFT girder bridge, composite, new bridge system, flexural behavior

요 지

이 연구에서는 CFT부재를 거더로 사용하는 신형식 강합성 교량 시스템 개발을 최종목표로 하고, CFT부재의 휨거동 특성을 규명하기 위한 부재실험을 수행하였다. 실험체는 충전재 강도 및 합성조건 변화 등 설계에 영향을 미치는 주요 매개변수를 고려하여 제작하였고, 휨재하 실험의 결과분석을 통해 CFT부재가 갖는 내력성능을 효율적으로 설계에 반영하기 위한 방안을 고찰하였다. 충전강관은 중공강관에 비해 휨강도 및 연성이 크게 증가함을 확인할 수 있었으며, 콘크리트의 취성적 재료 특성이 강관의 구속효과로 보완되는 결과를 확인하였다. 내부 전단연결재를 둠으로써 충전재와 강관 사이의 미끄러짐을 억제하여 완전합성단면으로 거동하였고, Γ 형 전단연결재의 보강재 효과가 휨내력 증가에 다소 기여하고 있음을 알 수 있었다.

핵심용어 : 콘크리트 충전 강관거더, 강합성, 신형식 교량, 휨거동

1. 서 론

콘크리트 충전강관구조(CFT구조)는 강관 내부를 콘크리트계 재료로 충전하는 구조형식으로서, 콘크리트계 충전재는 압축영역에서 강관의 좌굴을 방지하는 역할을 하고, 강관은 충전재를 구속하여 재료강도를 향상시키게 된다. 단일 재료에 의한 구조부재의 거동에 비해 CFT부재의 내력 및 변형 성능이 우월하다는 것은 기존의 여러 연구에서 검증되었다. 그러나 연구 대상의 대부분은 축력을 받는 기둥부재에 국한되어 왔으며, 최근에 일본, 중국 및 유럽에서 CFT구조를 활용한 교량 시공이 시도되긴 하였으나, 휨부재로서의 거동특

성을 설계에 최대한 반영하기 위한 실험연구는 매우 부족하다. 그 결과, 현재의 설계법으로는 강관내부 충전 및 바닥판과의 합성을 통한 부재내력의 증가 효과를 고려하지 않고, 정모멘트 구간에서는 충전재의 강성을 무시하거나 부모멘트 구간에서는 바닥판과의 합성을 무시하는 비효율적인 설계 결과를 얻게 되며, CFT부재의 거동특성 및 장점을 제대로 반영하지 못하는 소극적인 설계를 하게 되는 단점이 있다. 기존 강재 거더 교량은 많은 용접개소에 의한 경제성 및 피로 하중에 대해 노출되어 있고, 중량의 증가로 인한 고비용 문제가 발생하며, 진동과 소음 환경문제 및 콘크리트 거더 교량의 시공성 문제가 발생한다. CFT부재를 교량의 거더에 적

*정회원 · 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구원 (E-mail : wjchin@kict.re.kr)

**정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 구조교량연구실 선임연구원 (E-mail : jykang@kict.re.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구원 (E-mail : eschoi@kict.re.kr)

****정회원 · 한국건설기술연구원 구조교량연구실 연구원 (E-mail : duckhawk@kict.re.kr)

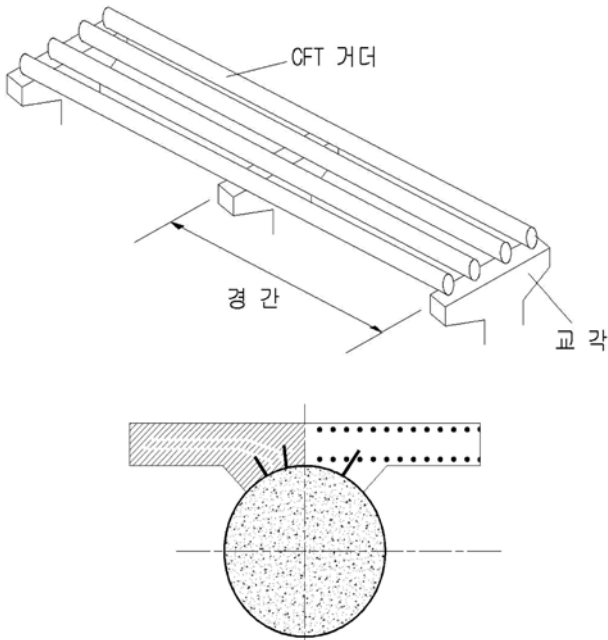


그림 1. CFT거더 교량의 구조 및 단면 형상

용할 경우 이러한 문제점들을 어느 정도 해결할 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 교량건설경비 절감과 구조물의 경제성 및 내구성을 부여할 수 있고, 시공 품질의 확보, 유지관리 비용 절감, 교량 거더의 높이를 낮추어 형하 공간을 확보할 수 있다. 콘크리트 충전 강관 거더를 이용한 합성형교형식의 설계법 개발 및 실용화를 위해서는 거동 특성에 대한 실증적 연구와 함께 실험적 검증이 선행되어야 한다. 이 연구에서는 CFT부재를 거더로 사용하는 신형식 강합성 교량 시스템의 개발을 최종 목표로 하고, CFT부재의 휨거동 특성을 규명하기 위한 부재실험을 수행하였다. 실험체는 설계에 영향을 미치는 주요 매개변수를 고려하여 제작하였고, 실험결과 분석을 통해 CFT부재가 갖는 내력성능을 효율적으로 설계에 반영하기 위한 방안을 모색하고자 한다. 그림 1은 콘크리트 충전강관거더를 이용한 강합성교량의 개념도 및 구조형상이다(이홍수, 2006, 정철현 등, 2004, 한국건설기술연구원, 2004).

2. CFT거더의 역학적 특성

축하중을 받는 CFT부재는 충전재가 3축 압축 상태가 되어 강도가 현저히 증가하게 되며, 충전재의 강도증가는 다시 강관의 구속력으로 작용하여 재료간의 상호 보완효과가 상승하게 된다. 반면, 휨하중을 받는 CFT부재는 충전재의 전단면이 3축 응력 상태에 있지 않으며, 중립축을 중심으로 인장 영역과 압축영역에서의 응력 상태가 다르며 부재 축방향에 대해서도 위치에 따라 다른 응력상태에 놓이게 되므로 충전재와 강관의 상호작용을 고려한 부재내력을 예측하기는 어렵다. 그러나, 순수휨을 받는 CFT거더부재에서도 축압축상태와 마찬가지로 강관에 대한 충전재의 구속력이 작용하며, 이러한 구속력은 휨거동시 강관의 압축영역에서 발생하는 국부좌굴을 지연 또는 억제시키는 역할을 하게 된다. 이러한 충전재의 구속효과 또는 휨보강 효과는 강관의 단면형상 및 강관과 충전재간의 합성작용력에 따라 다르며, 일반

표 1. 충전효과 검토를 위한 각형강관 및 원형강관의 단면제원

	정사각형 단면	원형 단면
폭 또는 지름	b=435 mm	r=508 mm
두께	t=9 mm	t=9 mm
단면 2차 모멘트	I=464×10 ⁶ mm ⁴	I=439×10 ⁶ mm ⁴
단면계수	Z=2,133,608 mm ³	Z=1,729,464 mm ³

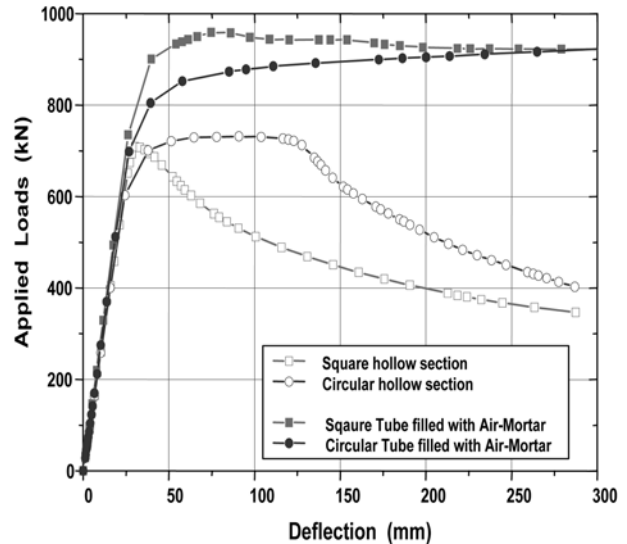
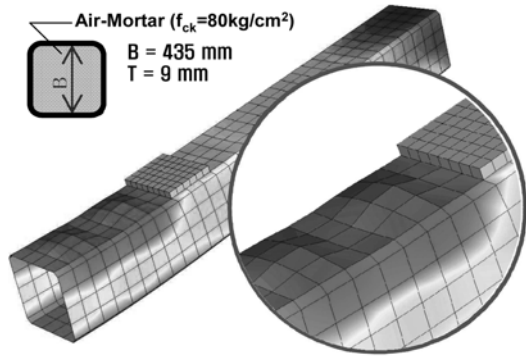


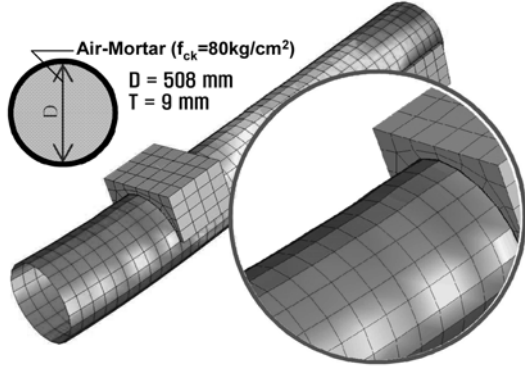
그림 2. 원형강관과 각형강관의 휨거동 비교

적으로 원형이 휨을 받는 CFT부재의 단면형상으로 우위에 있다고 알려져 있다. 이러한 사실을 확인하기 위하여 판두께 및 단면계수가 비슷한 원형강관과 각형강관을 저장도 충전재로 충전했을 때, 압축영역에서의 좌굴거동을 해석적으로 검토하였다. 원형단면은 이 연구에서 사용한 지름 508 mm의 원형강관 단면을 사용하였고, 이 원형강관의 단면제원을 기준으로 비슷한 단면 2차모멘트와 단면계수를 갖는 각형강관의 단면제원을 가정하였다.

표 1의 단면치수를 갖는 각형 및 원형강관에 대해서 충전하지 않은 상태의 휨거동을 해석한 결과, 그림 2에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 약 710 kN에서 압축부의 국부좌굴에 의해 더 이상 하중이 증가하지 않는 것으로 나타났으며, 각형강관의 경우에는 압축측 국부좌굴과 동시에 소성힌지가 발생하여 내력이 급격하게 저하하는 것으로 나타났다. 반면, 원형강관의 경우에는 국부좌굴 이후에 하중은 증가하지 않았으나 응력재분배에 의해 급격한 내력저하 없이 어느 정도 변형 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 충전재의 구속효과를 검토하기 위한 해석모델에서는 압축강도 약 8 MPa의 저장도 모르타르를 충전한 경우를 가정하였고, 충전재와 강관 사이의 마찰력 및 합성작용은 무시하고 충전재는 강관의 타원변형(ovalization)만을 구속하는 것으로 가정하였다. 충전재를 고려한 해석결과, 각형 충전강관의 최대하중이 원형 충전강관의 경우보다 다소 큰 것으로 나타났으나, 그림 3에서와 같이 각형 충전강관은 압축측에 응력이 집중되어 좌굴이 서서히 진행되었으며 그에 따라 내력도 점차 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 원형 충전강관의 경우는 항복이후에 강성이 크게 저하되었으나 국부좌굴에 의한 내력감소는 나타나지 않았으며, 압축측에 응력이 집중되지



(a) 내부충진된 각형강관



(b) 내부충진된 원형강관

그림 3. 충전 강관의 휨재하시 좌굴 변형

않고 원주를 따라 응력이 분포되고 있음을 알 수 있었다.

일반적으로 교량거더 단면을 결정할 때는 I형 또는 상자형 단면이 효율면에서 우수한 것으로 인식되어 있고, 원형단면은 휨부재 단면의 기본적인 개념에 역행하는 비효율적인 단면이라고 할 수 있으나, 위의 해석결과로부터 강관 내부를 충전하는 경우에는 원형단면이 오히려 휨거동에서 더 유리한 단면형상임을 알 수 있었다. 충전 강관 부재가 휨거동을 할 때, 인장영역의 콘크리트계 충전재는 합성단면으로서 내력에 기여를 거의 하지 못하게 된다. 특히, 강관과 충전재간의 합성 부착력이 크지 않을 때는 재하 초기에 부착력을 잃게 되고 합성단면으로서의 장점을 발휘할 수 없게 된다. 따라서, 충전재와 강관간의 부착력을 증대시키고 합성단면으로서의 거동을 최대한 발휘하도록 하기 위해서 강관내부에 기계적 합성을 얻을 수 있는 연결재를 두는 것이 부재 성능향상 측면에서 도움이 될 것으로 판단된다.

3. CFT 거더 실험체 휨실험

3.1 개요

원형의 강관내부를 콘크리트계 재료로 충전한 CFT부재의 거동 특성을 규명하고 부재 내력을 평가하기 위하여 휨재하 실험을 수행하였다. 충전재 강도에 따른 거동을 평가하기 위하여, 압축강도 27 MPa의 보통 콘크리트와 압축강도 8 MPa의 저강도 경량 모르타르, 즉 Air-Mortar를 충전한 경우로 구분하고, 내부 합성연결재의 유무에 따른 내력 변화를 비교하였다. 실험에 사용한 강관은 SS400 강종의 기성 강관 제품으로, 지름 508 mm, 두께 9 mm의 원형강관(φ508)으로 사용하였으며, D/비는 56.4이다.일본을 제외한 대부분의 국

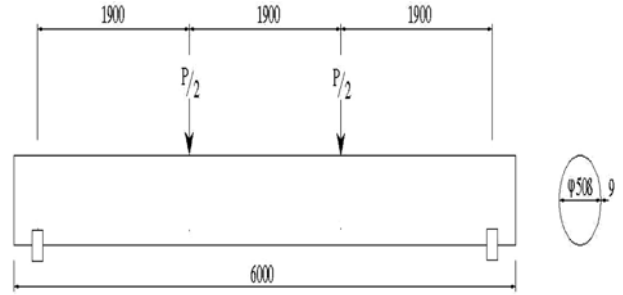


그림 4. φ508 CFT 거더 실험체 가력 위치 및 제원

가의 설계기준에서는 D/비의 상한을 70으로 제한하고 있고, 일본에서는 D/비의 상한을 최대 120까지 크게 하고 있으나, 이러한 기준은 보-기둥 실험을 통해서 얻어진 결과이며 CFT 단면의 전체 소성강도를 확보하는 개념에서 전체 소성 모멘트에 도달하기 전에 단면이국부적으로 좌굴함을 의미한다.

Elchalakani등의 연구결과에 의하면, $D/t \leq 40$ 의 범위에서 충전재가 강관의 국부좌굴과 큰 휨 변위를 방지하였고, $74 < D/t \leq 110$ 의 범위에서는 비탄성 영역에서 다수의 소성 주름현상(plastic ripple)이 나타났다고 조사되었다(한국건설기술연구원 2006).

이 연구에서는 CFT 거더 단면을 조밀단면(compact section)으로 하기 위한 D/비를 55 내외로 설정하고, 이를 기준으로 기성제품 강관 중에서 $D/t=56.4$ 의 F508 강관을 선택하였다. 이 장의 CFT거더 부재의 휨실험은 바닥판과의 합성을 고려하지 않은 CFT거더 본체의 휨내력 및 변형 능력을 평가하기 위한 것이며, 이 연구에서 개발하고자 하는 CFT거더 강합성 교량에 적용하기 위한 기본적인 CFT거더 단면의 구성요소를 결정하고자 하는 데에 실험 목적을 두고 있다.

3.2 실험체 명칭과 특징

실험체의 명칭은 그림 5와 같고, 신형식 전단연결재인 ㄱ형 perFOBOND plate는 그림 6과 같다. 이 연구에서 제안하는 시공성, 구조안전성, 경제성을 갖는 새로운 전단연결재이다. 국내에서 신형식 전단연결재의 성능에 관한 연구가 수행되었고, 연구결과 ㄱ형 perFOBOND 리브 전단 연결재는 정적 극한내력이 매우 우수한 것으로 평가되었다. 수평전단력이

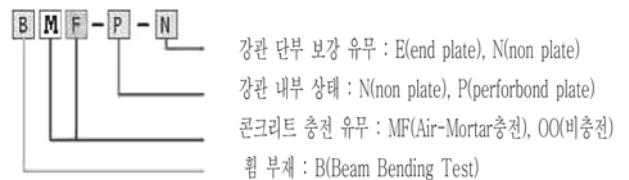


그림 5. 실험체의 명칭

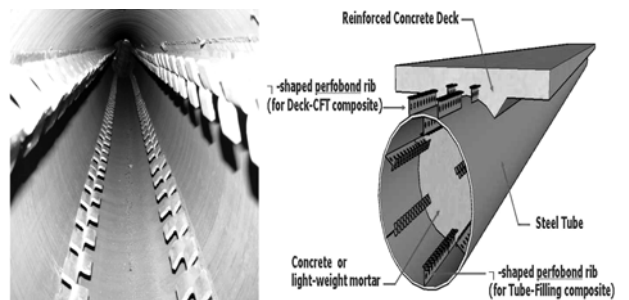


그림 6. 신형식 내부합성 연결재 형상(ㄱ형 perFOBOND)

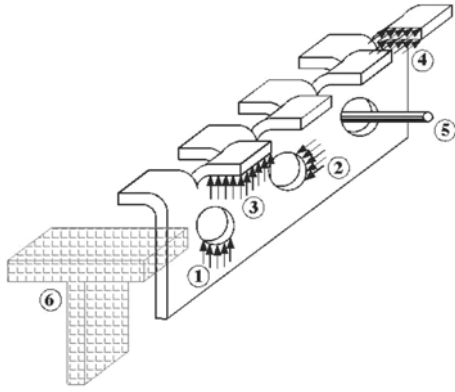


그림 7. ㄱ형 perfo-bond 전단연결재의 저항메카니즘

- 1) 콘크리트와 강판 부착면에 의한 부착강도
- 2) 홀 설치로 인한 다웰작용
 - 수직전단응력(그림 7의 ①)
 - 수평전단응력(그림 7의 ②)
- 3) 정착효과
 - 수직전단응력(그림 7의 ③)
- 4) 플랜지에 의한 다웰작용
 - 수평전단응력(그림 7의 ④)
- 5) 철근의 전단강도
 - 관통형 보강철근의 전단저항(그림 7의 ⑤)
- 6) 전단연결재 밑에 있는 콘크리트의 활렬인장력의 저항
 - 수평지압응력(그림 7의 ⑥)

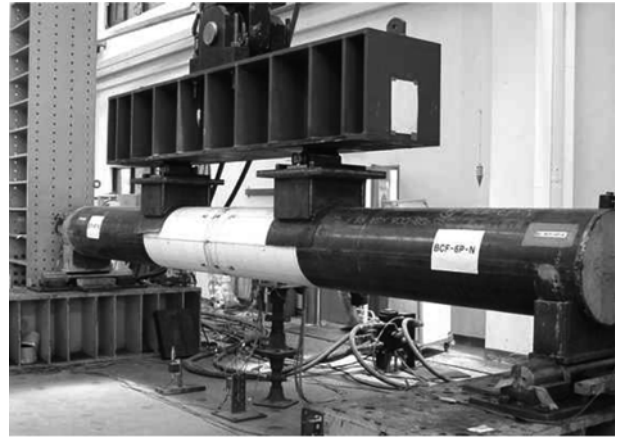


그림 9. 실험 전경

표 2. 실험체 종류 및 실험매개변수(φ508실험체군)

실험체 종류	충전재 종류	단면제원 (단위 : mm)		
		지름	두께	길이
B00-N-N	충전안함	508	9	6000
BCF-N-N	보통 콘크리트 (f _{ck} =27 MPa)			
BMF-N-N	경량 기포 모르타르 (f _{ck} =8 MPa)			

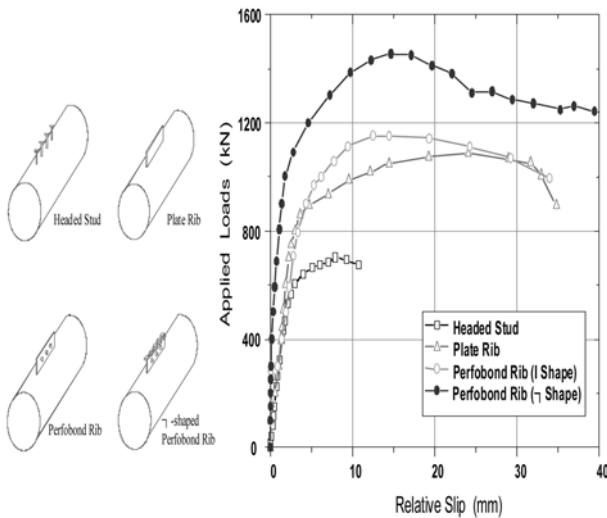


그림 8. 전단연결재 형상에 따른 Push-out 실험결과

크게 발생하는 거더 형식에 효과적으로 적용이 가능하며, 스테드 전단연결재의 시공이 매우 어려운 CFT거더와 같은 합성형 교량에서 새로운 전단연결재로 적용이 가능할 것으로 판단되었다. 내부구조조건 변화에 따른 CFT거더의 실험내용은 뒤의 3.4절에 기술하였다. 그림 7은 ㄱ형 perfo-bond 연결재의 저항메카니즘을 나타내었고, 그림 8은 전단연결재 형상에 따른 push-out 실험 결과이다. 이 연구에서는 CFT거더 실험체 강관내부에 형 신형식 전단연결재를 합성연결재로 적용하여 실험을 수행하였다(Hosaka *et al.*, 1997, Nakamura 2000, Matsumura *et al.*, 2003).

3.3 충전재강도에 따른 CFT거더의 휨거동

원형강관의 충전재 강도에 따른 내력을 평가하기 위하여

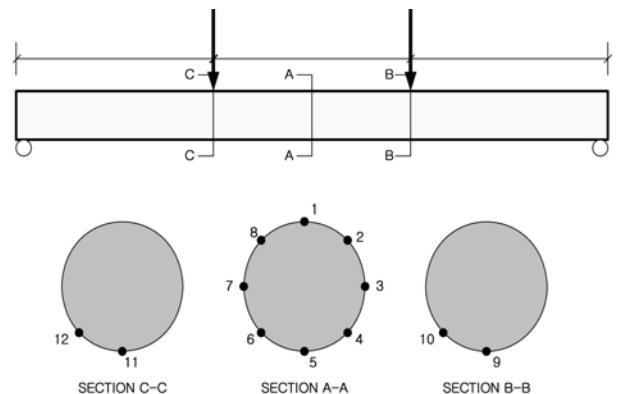


그림 10. 실험체의 강제 변형을 게이지 위치

보통 콘크리트를 충전한 경우와 경량 기포 모르타르(Air-Mortar)를 충전한 경우에 대해서 휨실험을 수행하였다. 가력은 3500 kN용량의 액츄에이터를 사용하였고, 순수 휨 구간의 거동을 보기 위해 4점 재하방법을 사용하였다. 그림 9는 실험전경을 나타내고 표 2는 실험체의 종류를 나타낸다. 그림 10은 측정게이지의 위치도이고, 그림 11은 충전재 강도 변화에 따른 휨재하 실험결과이다(Elchalakani *et al.*, 2001, Veldanda, 1992).

경량기포 모르타르는 압축강도가 약 8 MPa로 부재 내력에는 큰 영향을 미치지 못하지만, 충전재가 강관의 타원형 변형을 막고 그림 11에 나타난 바와 같이 국부좌굴을 지연 시킴으로써 보강재의 역할을 한 것으로 판단된다. 또한, 충전효과에 의해 변형성능, 즉 연성(ductility)이 빈강관에 비해 크게 증가하였다. 국부좌굴 등의 불안전성이 발생하지 않는 휨부재는 하중이 증가하면서 탄성적인 거동을 보이고 부재 응력이 잔류응력을 포함하여 항복응력에 도달하면 비선형적인 거동을 보이게 된다. 한계상태설계법(Limit State Design)

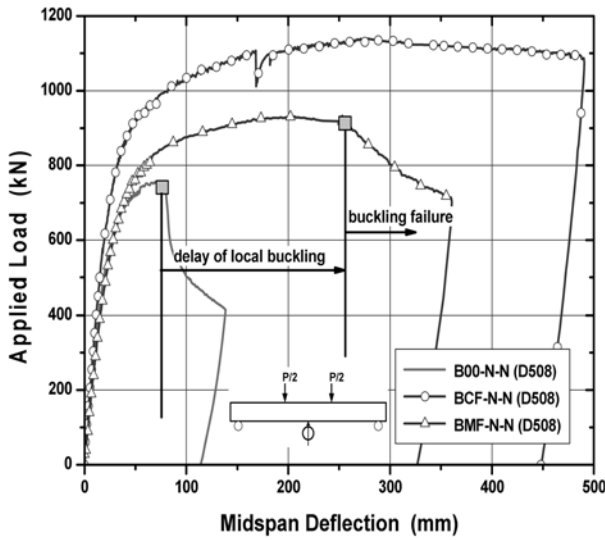


그림 11. 충전재 강도 변화에 따른 휨실험결과 (φ508)

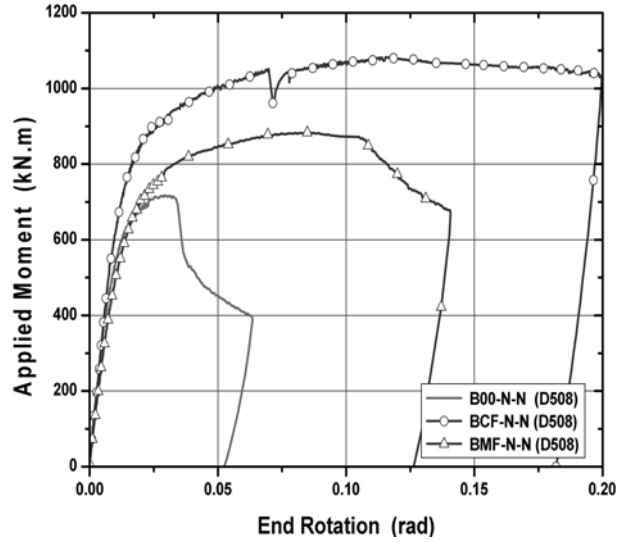


그림 12. 충전 조건에 따른 모멘트-회전각 곡선

개념으로 구조물을 설계하는 경우, 소성구조해석이나 모멘트 재분배를 수행하기 위해서는 단면이 충분한 소성변형능력 (plastic rotation capacity)을 가지고 있어야 한다. 일반적으로 소성변형능력은 곡률(ϕ), 회전각(θ) 및 처짐(Δ) 등과 같은 변형량의 비로 정량적 평가를 할 수 있으며, 이를 식 1 과 같은 연성지수(ductility index, μ)로 나타낸다. 식에서 첨자 u 및 y 는 각각 극한상태 및 항복상태의 변형량을 의미한다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad \text{또는} \quad \mu_{\theta} = \frac{\theta_u}{\theta_y} \quad \text{또는} \quad \mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (1)$$

식 1을 이용하여, 충전재 강도 변화를 고려한 실험체군의 연성지수를 계산하고, 변형능을 평가하였다. 연성지수를 구하기 위하여 실험에서 구한 하중(P), 모멘트(M), 처짐 및 회전각 등의 값은 실험체 지간 중앙부에 해당하는 값들로 생각한다. φ508 실험체에 대한 연성지수 계산 결과를 표 3 및 표 4에 정리하였다. 표에서 보는 바와 같이 빈 강관에 대해서는 항복하중의 약 1.4배가 최대내력을 발현할 수 있는 한계였으며, 연성지수는 약 3.0~3.5의 범위에 있는 것으로 나타났다. 그림 12는 충전 조건에 따른 모멘트-회전각 곡선을 나타내었다. φ508 실험체의 중앙부 단면내에서의 하중단계별 변형률 분포를 그림 13~그림 15에 나타내었다. 그림에서 P_y 는 강관이 항복응력에 도달하였을 때의 재하하중을 의

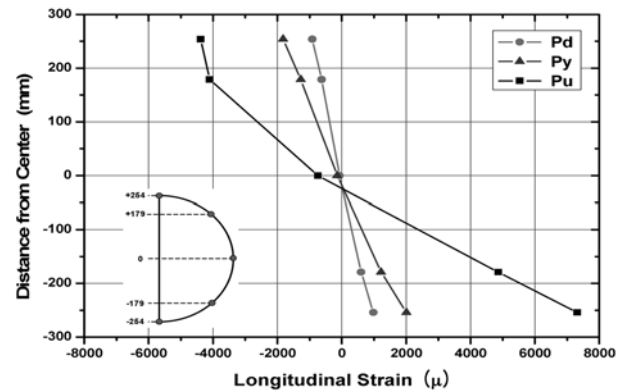


그림 13. 하중단계별 변형률 분포 (B00-N-N, φ508)

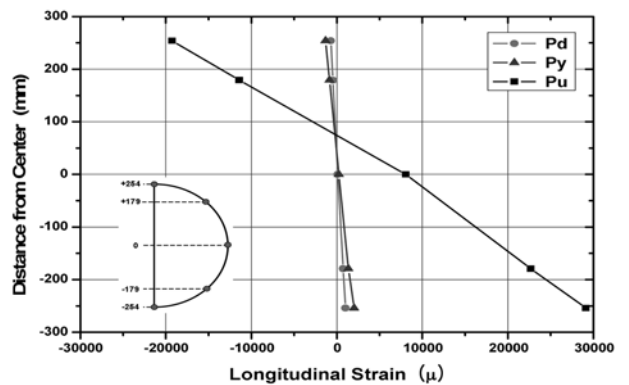


그림 14. 하중단계별 변형률 분포 (BCF-N-N, φ508)

표 3. 충전 조건에 따른 변위연성도 비교 (φ508)

	P_y (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	P_u/P_y	Δ_u/Δ_y
B00-N-N	556.1	755.4	23.0	69.0	1.36	3.00
BCF-N-N	679.1	1139.7	23.8	168.4	1.68	7.08
BMF-N-N	589.4	930.7	27.4	206.2	1.58	7.53

표 4. 충전 조건에 따른 회전연성도 비교 (φ508)

	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	θ_y (radian)	θ_u (radian)	M_u/M_y	θ_u/θ_y
B00-N-N	528.3	717.7	0.00979	0.02925	1.36	2.99
BCF-N-N	645.2	1082.8	0.01084	0.11538	1.68	10.64
BMF-N-N	559.9	884.1	0.01221	0.08558	1.58	7.01

미하고, P_d 는 설계하중으로서 $0.67P_y$ 의 값에 해당하는 재하하중이며, P_u 는 최대하중을 의미한다. 변형률 분포에서 알 수 있듯이 속채움을 하지 않은 빈강관은 최대하중단계에서 비선형의 변형률 분포를 보였고, 이는 압축부에서의 좌굴로 인한 것이다. 반면, 보통 콘크리트 및 경량 기포 모르타르를 충전한 실험체(BCF-N-N 및 BMF-N-N)는 최대하중 단계까지 선형의 변형률 분포를 보임으로써 합성단면으로서 거동하고 있음을 알 수 있으며, 보통 콘크리트를 충전한 실험체는 인장영역에서의 강제 변형률이 크게 증가하여 중립축이 중심 위쪽으로 다소 이동하는 경향을 보였다. 반면, 경량 기포 모르타르를 충전한 경우에는 중립축의 이동이 거의 없었고, 강관중심을 기준으로 상하연단에서 동일한 응력을 보였다.

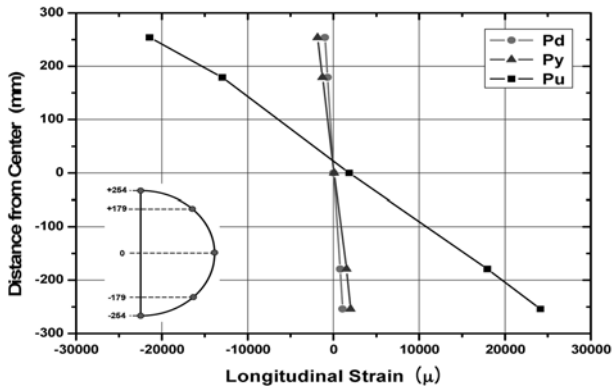


그림 15. 하중단계별변형률 분포 (BMF-N-N, φ508)

3.4 합성조건에 따른 CFT거더의 휨거동

3.4.1 F355 실험체군의 휨거동평가

내부구속조건 변화에 따른 CFT거더의 휨거동을 확인하기 위하여 충전재 강도를 달리하고 강관내부의 합성 연결재를 두거나 프리스트레싱을 가해 인위적으로 충전재에 압축력을 가하는 경우에 대해서 실험체를 제작, 휨재하 실험을 수행하였다. 재하 방법 및 가력 위치는 그림 16과 같다. 실험초기에 제작여건상 실험에 사용된 강관은 SS400 강종의 355 mm 기성 강관제품을 사용하였고, 실험체의 종류 및 제작상의 특징을 표 5에 정리하였다. 355 mm 강관의 D/비는 50.7로서 508 mm 강관의 56.4와 유사한 수준임을 알 수 있다.

φ355 실험체군 중에서 BCF-R-N 실험체는 두께 6 mm의 강관 절편을 150 mm 간격으로 강관내부에 용접 부착하여 강관절편의 단면에서 발생하는 지압응력에 의해 마찰저항력이 발생하도록 함으로써 단면합성을 유도한 실험체이며, 실험체 단면도를 그림 17에 나타내었다. 또한 BCF-P-N 실험체는 충전재에 프리스트레싱을 가하여 인위적으로 압축력을 가하고, 콘크리트의 부피 팽창으로 인해 콘크리트와의 마찰면에 마찰저항이 더해지도록 하였으며, 충전재를 압축응력 상태에 두으로써 축력과 휨을 동시에 받는 CFT부재로 거동하도록 한 실험체이다. 프리스트레싱은 PS강연선(7연선)을 3 가닥을 사용하였고, PS 강연선당 긴장력은 약 198 kN으로 하여 긴장응력은 약 42 MPa이다. 이 때 PS 강선은 강관의 중심축을 따라 직선 배치하였다. 휨재하 실험결과는 표 6 및 그림 18과 같다. 강관 절편 리브를 부착하여 합성작용을 강화한 실험체(BCF-R-N)의 경우에는 빈 강관에 비해 38%의 내력 증가를 보였고, 프리스트레싱을 도입한 실험체(BCF-P-N)의 경우에는 내력이 약 57% 증가하였다. 두 경우 모두 강관내부를 충전만 한 경우(BCF-N-N)에 비해서 우수한 내력을 보였고, 특히 BCF-R-N 실험체의 경우에는 조각 절편의 지압응력에 의한 합성력이 매우 강해서 충전재와 강관이 거의 완벽한 합성거동을 하였다고 판단되며, 두께가 얇

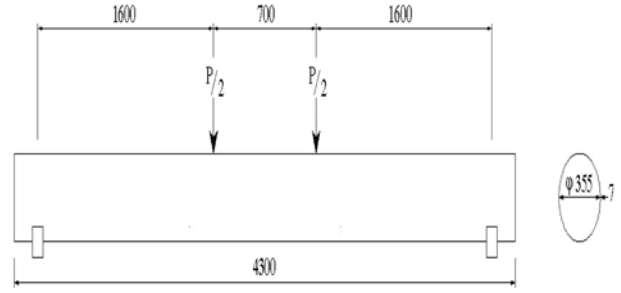


그림 16. φ355 CFT 실험체의 가력 위치 및 제원

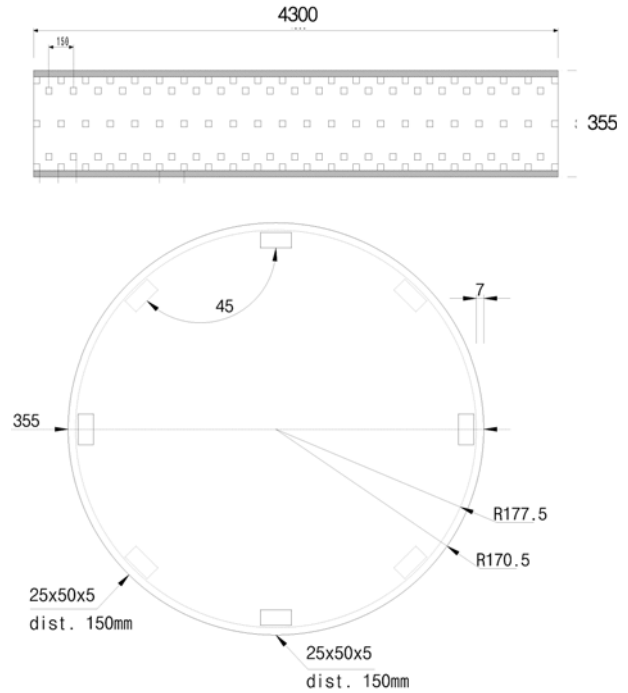


그림 17. BCF-R-N 실험체의 단면도

표 6. 내부구속조건에 따른 최대하중비교(φ355)

D355	P_{max} (kN)	D_{max} (mm)	$\frac{P_{max}(CFT)}{P_{max}(void)}$	Failure Mode
B00-N-N	418.2	45.1	1.00	Buckling Failure
BCF-N-N	548.4	172.0	1.31	Tension Failure
BCF-R-N	575.2	138.1	1.38	Tension Failure
BCF-P-N	657.2	168.2	1.57	Tension Failure

은 강관의 인장부에 응력이 집중되어 그림 19에 보인 파괴형상과 같이 인장부 파단이 일어난 후에 압축축의 좌굴로 최종 파괴되었다. 충전재에 프리스트레싱으로 압축력을 도입한 실험체(BCF-P-N)의 경우에는 충전만 한 경우에 비해서 항복하중이나 최대하중이 크게 증가하였으나, PS강선을 직선 배치함으로써 프리스트레싱 효율이 다소 떨어지는 구조이며,

표 5. 실험체 종류 및 특징 (φ355 실험체군)

실험체 종류	충전재 종류	내부 합성방법	단면제원 (단위 : mm)		
			지름	두께	길이
B00-N-N	없음	없음	355	7	4300
BCF-N-N	보통 콘크리트 (fck=27 MPa)	없음			
BCF-R-N	보통 콘크리트 (fck=27 MPa)	강관 절편 리브			
BCF-P-N	보통 콘크리트 (fck=27 MPa)	prestressing			

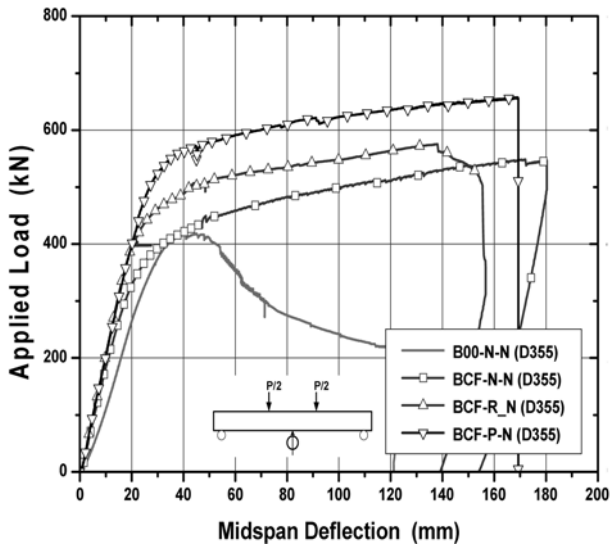


그림 18. 내부의 기계적 합성조건에 따른 휨재하 실험 결과 (φ355)

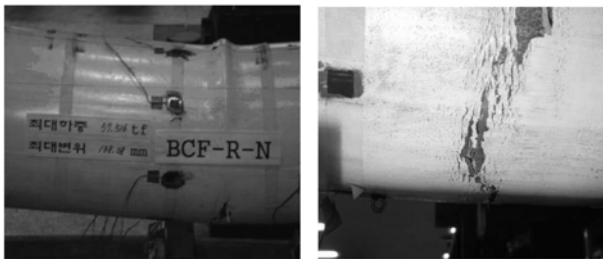


그림 19. BCF-R-N 실험체의 파괴 형상

실 교량에서는 CFT거더를 보수·보강하는 방법으로 채택하는 것이 바람직하다고 판단된다(Nakamura *et al.*, 2004).

3.4.2 φ508 실험체군의 휨거동평가

φ355 실험체군에서 리브설치로 마찰저항을 증가시켜 강관과 충전재간의 합성거동을 강화시키는 것이 휨내력을 높이는 방안을 알았다. 이 점에 착안하여 경량 기포 모르타르를 충전하는 경우에도 동일한 방법으로 마찰저항을 높이는 방안을 고려하였으나, 압축강도가 낮은 경량 기포 모르타르의 경우에는 리브 단면에서 발생하는 큰 지압응력에 대해서 충분히 저항하지 못할 가능성이 있고 강관내부를 강관 절편으로 용접 부착하는 것이 시공상 비경제적이라는 점을 고려하면 바람직한 방법은 아닌 것으로 판단된다. 따라서, 이를 보완하는 방안으로 3.2절에서 기술한 ㄱ형 perfbond 리브 전단연결재를 강관내부에 등간격 배치함으로써 충전재에 대해서 합성 연결재로서 작용하도록 합과 동시에 강관에 대해서는 일부 보강재의 역할을 하는 부수적 효과를 얻을 수 있도록 하였다. 강관내부의 ㄱ형 perfbond 리브 전단연결재의 배치 형태는 6개의 전단연결재를 60°로 등간격 배치하는 것으로 하였다. 실험체는 표 7에 보인 바와 같이, 충전재를 보통 콘크리트와 경량 기포 모르타르로 분류하고 내부전단 연결재의 배치유무에 따른 거동을 비교하였다. 실험체 종류에서 BCF-6P-N 및 BMF-6P-N 실험체는 강관내부에 ㄱ형 전단연결재를 6개 배치한 실험체로서, 실험체 및 사용한 ㄱ형 perfbond 리브 전단연결재의 제작도면은 그림 20과 같다.

CFT 거더의 실험을 수행하기 전에, 먼저 강관면에 수직하게 용접 배치된 내부 전단연결재가 보강재로서 어느 정도 기여하는지를 평가하기 위하여 내부에 전단연결재만 배치하고 충전하지 않은 실험체(B00-6P-N)를 제작하여 휨재하 실험을 수행하였다. 실험결과, 그림 21에 보인 바와 같이 전단연결재를 배치함으로써 내력과 연성이 다소 증가하는 것으로

표 7. 내부구속조건에 따른 변위연성도 비교(φ355)

	P_y (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	P_u/P_y	Δ_u/Δ_y
B00-N-N	274.6	418.2	13.0	45.0	1.52	3.46
BCF-N-N	267.0	548.4	13.0	172.0	2.05	13.19
BCF-R-N	404.3	575.2	21.1	138.2	1.42	6.51
BCF-P-N	451.9	657.2	23.0	168.2	1.45	7.30

표 8. 내부구속조건에 따른 회전연성도 비교(φ355)

	M_y (kN·m)	M_u (kN·m)	Δ_y (radian)	Δ_u (radian)	M_u/M_y	θ_u/θ_y
B00-N-N	219.7	334.6	0.00667	0.02307	1.52	3.46
BCF-N-N	213.6	438.7	0.00667	0.08798	2.05	13.19
BCF-R-N	323.5	460.2	0.01322	0.08609	1.42	6.51
BCF-P-N	361.5	525.8	0.01436	0.10476	1.45	7.30

표 9. 실험체 종류 및 특징

실험체 종류	충전재 종류	내부 합성방법	단면재원 (단위 : mm)		
			지름	두께	길이
BCF-N-N	보통 콘크리트 (fck=27 MPa)	없음	508	9	6000
BMF-N-N	경량 기포 모르타르 (fck=8 Mpa)	없음			
BCF-6P-N	보통 콘크리트 (fck=27 Mpa)	형전단연결재 (6개×60° 배치)			
BMF-6P-N	경량 기포 모르타르 (fck=8 Mpa)	형전단연결재 (6개×60° 배치)			

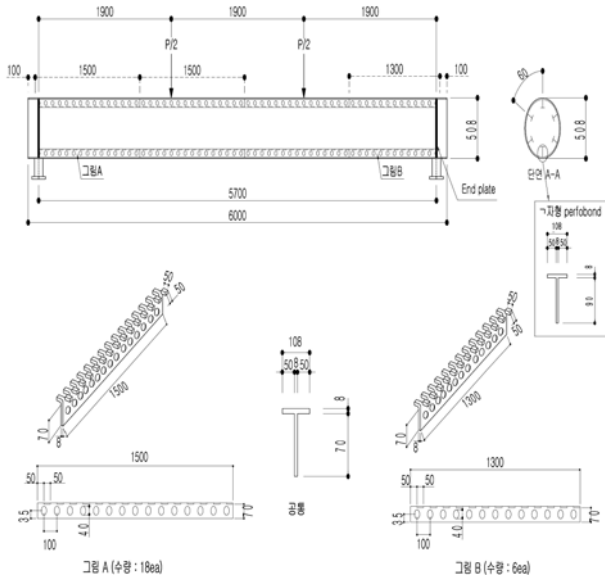


그림 20. 강관 내부에 ㄱ형 perfobond 리브를 적용한 실험체 제작 도면

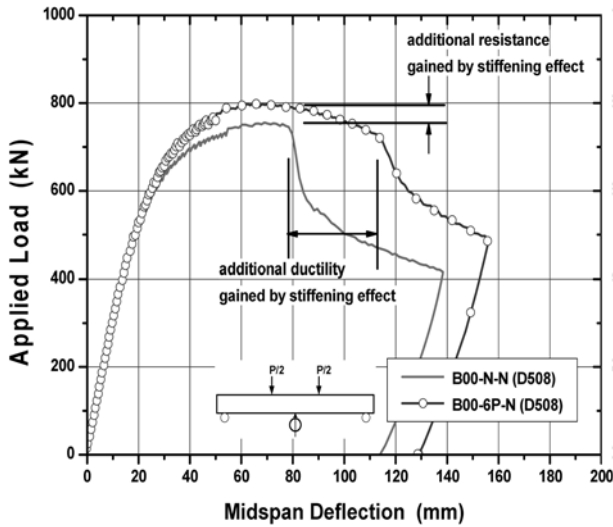


그림 21. ㄱ형 Perfobond 리브의 보강재 효과 (φ508)

로 나타났다. 이는 전단연결재가 6개 배치되었으나, 실제로 보강재로서의 역할을 한 부재는 강관의 상하 단면에 부착된 2개의 전단연결재에 국한되며, 그 외의 전단연결재는 보강재로서의 역할에는 그다지 기여하지 않기 때문이라고 판단된다. 그러나, 이와 같은 단면내에 충전재를 두면 횡방향 또는 경사각으로 배치된 전단연결재가 충전재에 앵커와 같이 작용하여 강관 변형을 구속하는 역할을 할 것이라고 생각되며, 모든 전단연결재가 보강재로서의 부수적인 기능을 보일 것으로 예상된다.

보통 콘크리트를 충전한 경우와 경량 기포 모르타르를 충전한 경우의 실험결과를 각각 그림 22와 그림 23에 나타내었다. 두 실험 결과에서 나타난 바와 같이 강관 내부를 충전만 한 경우, 보통 콘크리트를 충전하면 내력이 약 50% 증가하였고, 경량 기포 모르타르를 충전하면 약 25%의 내력 증가가 나타났으나, 강관 내부에 전단연결재를 둔 경우에는 각각 약 75% 및 45%의 내력증가를 보였다. 이렇게 내력이 크게 증가한 이유는 앞에서 설명한 바와 같이 충전효과, 합성작용 보강효과, ㄱ형 perfobond 리브의 보강재 효과가 복합적으로 작용하였기 때문이라고 판단된다. 즉, 하중-변위 곡

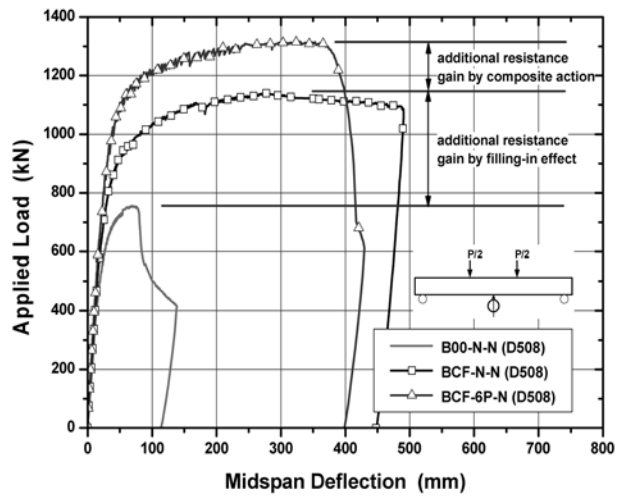


그림 22. 보통 콘크리트 충전시 내부 합성에 따른 내력 비교 (φ508)

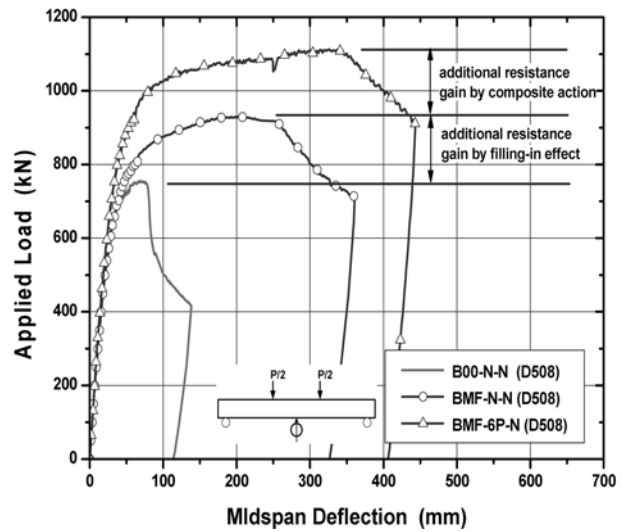


그림 23 Air-Mortar 충전시 내부 합성에 따른 내력 비교 (φ508)

표 10. 내부 구속 조건에 따른 최대하중 비교(φ508)

D508	P_{max} (kN)	Δ_{max} (mm)	$\frac{P_{max}(CFT)}{P_{max}(void)}$	Failure Mode
B00-N-N	755.4	69.0	1.00	Buckling Failure
BCF-N-N	1139.7	277.2	1.51	Tension Failure
BMF-N-N	930.7	206.2	1.23	Buckling Failure
BCF-6P-N	1316.5	329.0	1.74	Buckling Failure
BMF-6P-N	1112.6	326.4	1.47	Buckling Failure

표 11. 내부구속조건에 따른 변위연성도 비교(φ508)

	P_y (kN)	P_u (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	P_u/P_y	Δ_u/Δ_y
B00-N-N	556.1	755.4	23.0	69.0	1.36	3.00
BCF-N-N	679.1	1139.7	23.8	277.2	1.68	11.65
BMF-N-N	589.4	930.7	27.4	206.2	1.58	7.53
BCF-6P-N	736.1	1316.5	22.6	329.0	1.79	14.56
BMF-6P-N	643.8	1112.6	25.8	326.4	1.73	12.65

선에서 단순 비교하여 유추하면 그림 22~23에 표시한 바와 같이 충전 합성단면에 의한 내력증가분에 ㄱ형 perfobond 리브의 부가적 합성효과 및 보강재 효과에 의한 내력증가분

표 12. 내부구속조건에따른회전연성도비교($\phi 508$)

	M_y (kN.m)	M_u (kN.m)	Δ_y (radian)	Δ_u (radian)	M_u/M_y	Δ_u/Δ_y
B00-N-N	528.3	717.7	0.00979	0.02925	1.36	2.99
BCF-N-N	645.2	1082.7	0.01084	0.11538	1.68	10.64
BMF-N-N	559.9	884.1	0.01221	0.08558	1.58	7.01
BCF-6P-N	699.3	1250.7	0.01043	0.13806	1.79	13.23
BMF-6P-N	611.7	1057.0	0.01189	0.13992	1.73	11.77

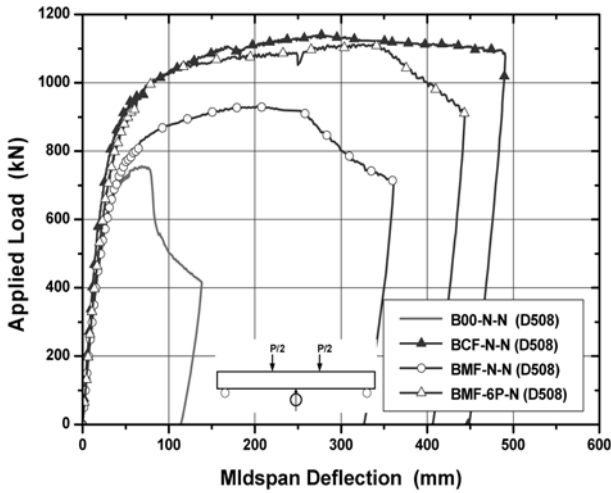


그림 24. 충전재 강도 및 합성 조건에 따른 내력 비교

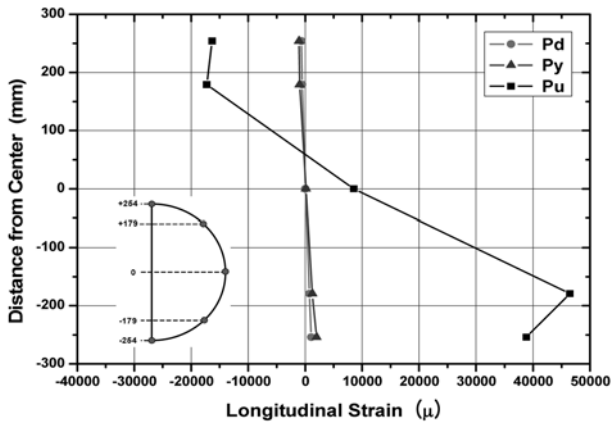


그림 25. 하중단계별 변형률분포(BCF-6P-N, $\phi 508$)

이 더해진 결과라고 할 수 있다. 특히, 내부 전단연결재를 두고 경량 기포 모르타르를 충전한 실험체가 보통 콘크리트를 충전한 실험체의 내력에 가까운 거동을 보였으며, 연성도 크게 증가한 것으로 나타났다. 따라서, 이 실험 수행전에 가정한 바와 같이 저장도 경량 충전재를 사용하고 내부에 기계적 합성 기구를 두면 일반 콘크리트 충전의 경우와 유사한 휨내력을 얻을 수 있다는 사실을 확인할 수 있었다. 이를 비교한 결과를 그림 24에 나타내었다.

휨재하 하중 단계에 따른 중앙 단면에서의 변형률 분포를 비교하면, 보통 콘크리트를 충전하고 기형 perfobond 리브를 배치한 경우에는 그림 25와 같이 변형이 계속되면서 최대하중에 도달하면 비선형 변형률 분포를 보이는 것으로 나타났으며, 이는 인장측 강관의 파단과 압축측 강관의 좌굴이 거의 동시에 일어나고 있기 때문인 것으로 판단된다. 반면, 경량 기포 모르타르를 충전한 경우에는 그림 26과 같이 중립

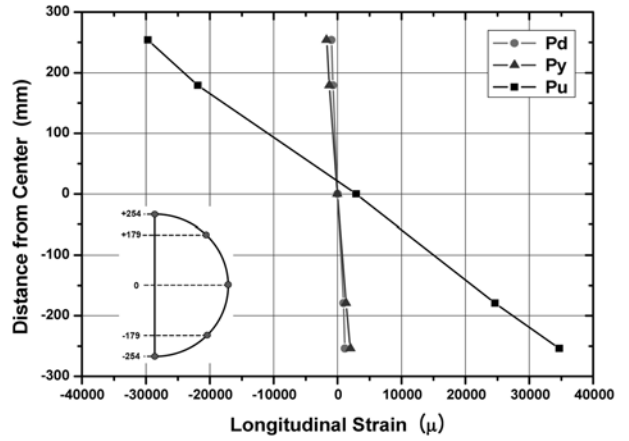


그림 26. 하중단계별 변형률분포(BMF-6P-N, $\phi 508$)

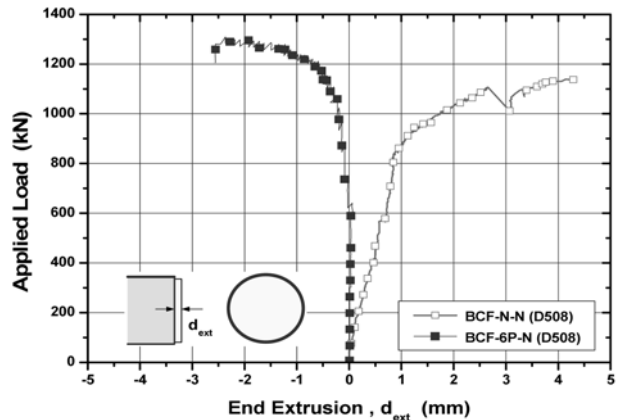


그림 27. 보통 콘크리트 충전시 충전재 압출량 비교

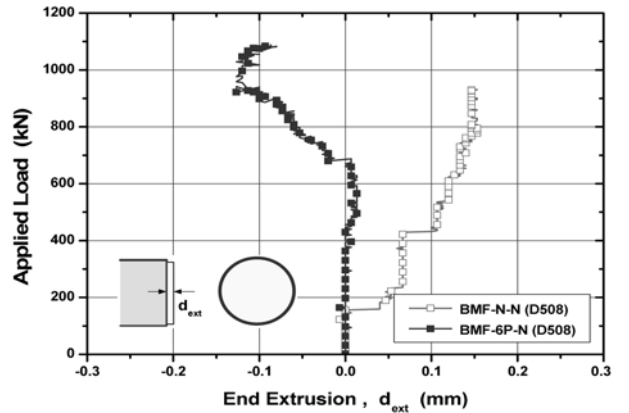


그림 28. Air-Mortar 충전시 충전재 압출량 비교

축의 이동이 거의 없이 최대하중 단계에서도 선형적인 변형률 분포를 보임으로써 합성단면으로 거동하고 있음을 알 수 있었다. 내부 전단연결재의 합성 강화 효과를 살펴보기 위하여, 부재 단부에서의 충전재 압출량을 계측하였는데, 보통 콘크리트를 충전한 경우에는 그림 27과 같이 최대 압출량이 약 2.5 mm로서 비교적 양호한 합성 거동을 확보하고 있음을 알 수 있었다. 경량 기포 모르타르를 충전한 경우는 내부전단연결재의 유무와 무관하게 0.2 mm 이하의 극히 작은 압출량을 보이고 있는데, 이는 충전재 내부 기포가 부재축 방향 변형을 흡수하기 때문인 것으로 판단된다(그림 28 참조).

3.5 합성조건에 따른 휨거동 평가

이 연구에서 결정된 CFT 거더 강합성 교량 단면구성 및

제안사항을 기술하면 ①, ②와 같다.

① 정모멘트 구간 : 저장도 경량 충전재 + 강관내부 ㄱ형 전단연결재 도입

← 정모멘트 구간에서는 거더 단면 대부분이 인장응력 상태에 있으므로 충전재 강도의 영향이 적음

← 지중 감소를 위해 저장도 경량 충전재를 사용하되, 단면 합성효과를 높이기 위해 강관 내부에 기계적 연결장치를 설치함

← 기계적 연결장치로서 이 연구에서 개발된 ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재를 사용하면, 마찰 및 지압면적이 확대됨에 따라 큰 마찰 저항력을 얻을 수 있으며, 보강재로서의 부수적 기능을 얻을 수 있음

② 부모멘트 구간 : 콘크리트 충전재 + 강관내부 ㄱ형 전단연결재 도입

← 부모멘트 구간에서는 거더 단면내에 중립축이 위치하게 되므로 높은 강도의 충전재를 사용하여 충전효과에 의해 내력확보가 가능함

← 충전재 강도가 크면 휨거동시에 상대슬립이 크게 발생하여 합성단면으로서의 효율이 감소하므로 단부 격벽 또는 내부 합성 연결재를 두어 충전재를 구속하는 것이 바람직함

4. 결 론

CFT거더 강합성 교량에서 CFT거더의 기본 단면 형상을 결정하기 위한 CFT거더의 휨거하 실험을 수행하였다. 충전재의 강도에 따른 영향을 평가하기 위하여 보통 콘크리트 또는 경량 기포 모르타르를 충전한 실험체를 제작하여 실험하였고, 강관내부에 합성작용 및 마찰저항력을 높이기 위한 합성 연결재를 둔 경우에 대해서 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다.

실험 결과, CFT거더 단면 결정을 위해 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 강관내부를 충전함으로써 휨거동에 대해서도 내력 증가와 연성 증가를 얻을 수 있다.
2. 강관과 충전재간의 합성작용을 돕고 상대 슬립을 억제할 수 있는 기계적 장치를 도입하면 저장도 충전재를 사용해도 큰 휨내력을 확보할 수 있다.
3. CFT부재에 프리스트레싱을 도입하면 내하력이 더욱 증가하나 제작상의 어려움이 있고, 지름이 작은 강관에서 PS 강선의 프로파일 확보하기 어려움 등의 비효율적인 면이 있으므로, 프리스트레싱은 CFT거더교의 보수·보강 목적으로 도입하는 방안을 고려할 수 있다.
4. 거더 지중을 줄이기 위해서는 저중량 충전재를 사용하는

것이 바람직하지만, 이 경우 충전재의 압축강도가 크지 않아서 내력 확보에 미치는 영향이 적으므로 강관 내부에 ㄱ형 perfobond 리브를 합성 연결재로서 도입하고 합성효과와 함께 보강재 효과를 동시에 얻어내면 보통 콘크리트를 충전한 경우와 유사한 휨내력을 얻을 수 있다고 사료된다.

5. 향후 기본적으로 교량 현장에서 적용되는 단부에 격벽을 설치한 경우의 CFT거더교에 대한 휨거동 및 동적거동 평가가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 건설기술혁신사업인 “콘크리트 충전 강관거더를 이용한 강합성 교량구조 개발”과제 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

이홍수(2006) ㄱ형 Perfobond 리브 전단연결재의 전단거동.
 정철현, 이홍수, 박종면, 김영호(2004) 합성작용을 위한 새로운 Perfobond 전단연결재, *대한토목학회 논문집*, 대한토목학회, 제24권 제3A호, pp. 525-532.
 한국건설기술연구원(2004) 콘크리트 충전 강관거더의 설계 및 시공에 관한 연구.
 한국건설기술연구원(2006) 콘크리트 충전 강관거더를 이용한 강합성 교량구조 개발(1차년도).
 Nakamura, S., Hosaka, T., and Nishiumi, K. (2004) Bending behavior of steel pipe girders filled with ultralight mortar, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 9, No. 3, pp. 297-303.
 Elchalakani, M., Zhao, X.L., and Grzebieta, R.H. (2001) Concrete-filled circular steel tube subjected to pure bending. *Journal of Constructional Steel Research* 57, pp. 1141-1168.
 Hosaka, T., Nakamura, S., Umehara, R., and Nishiumi, K. (1997) Design and experiments on a new railway bridge system using concrete filled steel pipes, *International Conference of IABSE in Innsbruck*.
 Matsumura, T., Hosaka, T., Hiraoka, C., and Nishiumi, K. (2003) Practical application of composite bridge for Shinkansen using CFT, *IABSE Symposium in Antwerp*, Vol. 87, pp. 136-137.
 Nakamura, S. (2000) New Structural forms for steel/concrete composite bridges, *Structural Engineering International, Journal of IABSE*, Vol. 10, No. 1, pp. 45-50.
 Veldanda, M.R. and Hosain, M.U. (1992) Behavior of perfobond rib shear connectors in composite beams : push-out tests, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-10.

(접수일: 2007.12.27/심사일: 2008.2.26/심사완료일: 2008.12.28)