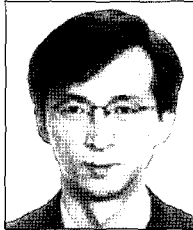


콘크리트 충전강관 거더를 이용한 교량구조

Bridge System with Concrete Filled Steel Tube Girder



이 흥 수*



강 재 윤**



김 병 석***



정 철 현****



손 유 식*****

*비비엠코리아(주) 기술연구소 실장
 **한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
 ***한국건설기술연구원 구조연구부 연구위원
 ****단국대학교 토목환경공학과 교수
 *****비비엠코리아(주) 기술연구소 상무

1. 개 요

최근 들어 건설재료가 갖는 고유의 단점을 상호보완하고 각각의 구조재료가 갖는 장점을 극대화하기 위하여 부재의 거동특성에 부합하도록 합성 및 복합구조를 활발히 적용하고 있으며, 이러한 요건을 만족하는 구조형식 중의 하나로서 제안된 콘크리트 충전강관(Concrete Filled Steel Tube, CFT) 합성거더교는 폐쇄된 강관에 콘크리트를 충전한 충전강관 거더와 콘크리트 바닥판을 합성한 합성구조로서 강관이 콘크리트 타설용 거푸집 역할도 하고,

충전콘크리트와 합성되는 새로운 구조이다. 그림 1은 충전강관을 이용한 합성형 교량의 조감도로서 경량으로 투시성이 우수하고 경제성 및 유지관리 효율성 측면에서도 장점을 갖고 있어 현대 교량에서 요구되는 미적측면과 환경친화적인 측면을 포용하고 있다.

원형 강관을 활용한 CFT 부재는 강관을 용접해 조립하는 종래의 강관 타입의 강주형에 비해서 제작가공공수가 대단히 작기 때문에 제작경비 절감의 효과가 있으며, 표면적이 작아 부식과 도장 면적이 최소화되며, 강관은 충전재인 콘크리트 타설시의 거푸집 대체가 가능하여 시공성의 간편화, 철근의 대체로 철근 가공과 조립공수가 생략되어 건설경비의 저감효과를 갖는다.

CFT 합성거더교의 사용은 형고가 제한되는 구간에 적합하며, 시공성이 뛰어나 단기간 가설이 요구되는 급속시공에 유리하고, SRC 구조와 동등한 정도의 소음 및 진동에 대한 저항성능을 가지므로 철도교에도 효율적인 적용이 가능하다. 그림 2는 일본의 북륙신간선에 2000년도에 건설된 3경간 연속복합거더교량으로서 CFT를 거더로 활용한 철도교이다. 이 교량은 직경 1320mm, 두께 32mm를 갖는 강관에 기포콘크리트와 경량골재콘크리트를 충전하였으며, 총연장이 104.95m(34.95+36+34)로서 소음과 진동

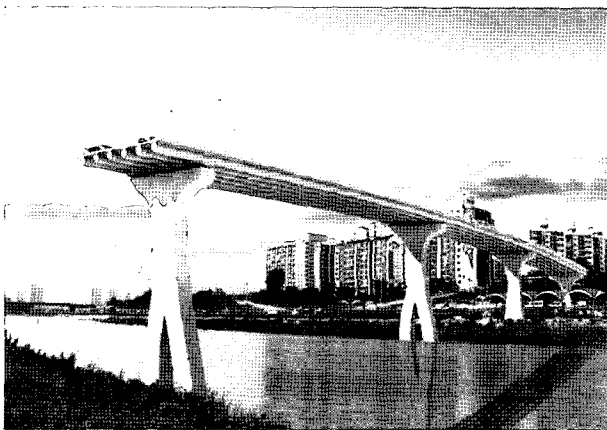


그림 1 CFT 합성거더교 조감도

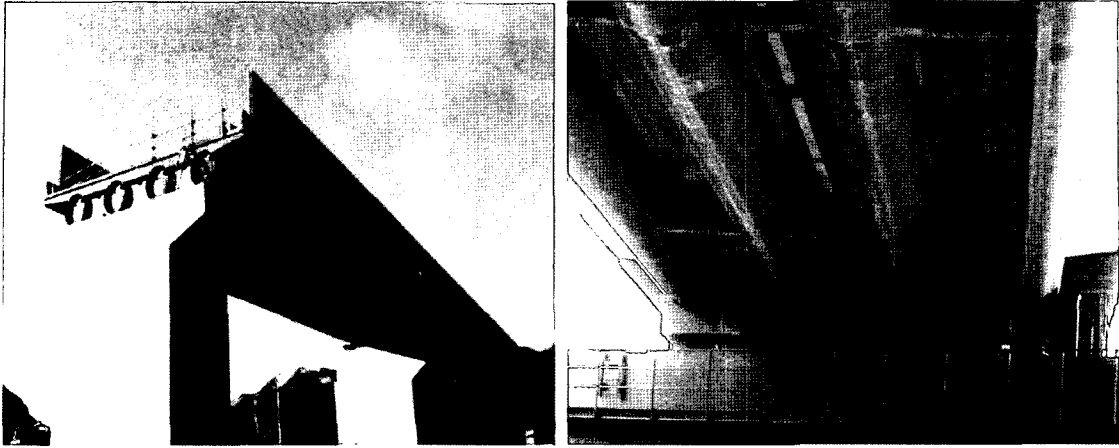


그림 2 3경간 연속복합거더교량(CFT 거더)

에 대한 저항특성과 콘크리트계 재료를 충전함에 따른 우수한 내력 및 변형성능에 착안하여 CFT 거더를 채용하였다. CFT 합성거더교에서 CFT 거더와 바닥판 콘크리트 사이의 전단연결 또는 강관과 충전재 사이의 기계적 합성을 위해서 그림 3과 같은 Γ 형 perfobond 리브 전단연결재를 사용하였다. Γ 형 perfobond 리브 전단연결재는 시공성과 피로특성이 우수한 것으로 알려진 perfobond 리브 전단연결재의 장점을 그대로 갖으면서 리브 상단에 간단한 절단작업으로 플레이트 형상의 두부를 형성하여 보완한 전단연결재이다. 이 전단연결재는 기존에 사용되던 perfobond 리브 전단연결재에 비해서 리브 머리부분을 보강한 플랜지의 다웰작용으로 인해 수평전단내력이 한층 증가함으로서 적은 수의 전단연결재로 합성단면에서 요구되는 수평전단내력을 확보하는 것이 용이한 전단연결재이며, 거더에 설치된 후 연결재의 형상 및 크기 특성으로 스티드 전단연결재가 설치된 거더와는 달리 운반 도중에 발생할 수 있는 손상을 방지할 수 있으며, 표준화가 손쉽고

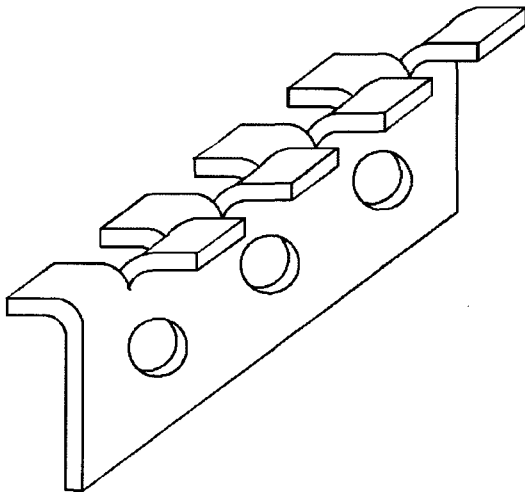


그림 3 Γ 형 perfobond 리브 전단연결재



그림 4 CFT 거더에 적용된 Γ 형 perfobond 리브 전단연결재 대량생산이 가능하다.

Γ 형 perfobond 리브 전단연결재는 파형강관 거더나 스티드 전단연결재의 시공이 매우 어려운 그림 4와 같은 콘크리트 충전강관(CFT) 거더에 적용시 시공성 및 구조물의 성능을 향상시키는 것이 가능하다.

2. CFT 부재의 역학적 거동 특성

충전재의 구속효과 또는 휨보강 효과는 강관의 단면 형상 및 강관과 충전재간의 합성작용력에 따라 다르게 나타난다. 따라서, 충전부재로서 실용적으로 사용가능한 단면인 각형단면과 원형단면에 대해서 단면 형상에 따른 거동 특성을 파악하기 위해서 해석적인 검토를 수행하였다. 관 두께 및 단면계수가 비슷한 원형강관과 각형강관을 저항도 충전재로 충전했을 때, 압축영역에서의 좌굴거동을 해석적으로 검토하였다. 강관은 지름 508mm의 원형강관을 사용하였고, 이 원형강관의 단면제원을 기준으로 비슷한 단면적과 단면2차모멘트를 갖는 각형강관의 단면제원을 가정하였다. 해석에 사용된 부재의 단면제원은 표 1과 같다.

표 1 각형강관 및 원형강관의 단면제원

	각형강관	원형강관
폭 또는 지름	b= 435 mm	r= 508 mm
두께	t= 9 mm	t= 9 mm
단면적	A= 15,660 mm ²	A= 14,110 mm ²
단면 2차 모멘트	I= 464×106 mm ⁴	I= 439×106 mm ⁴
단면계수	Z= 2,133,608 mm ³	Z= 1,729,464 mm ³

표 1의 단면치수를 갖는 각형 및 원형강관에 대해서 충전하지 않은 상태의 휨거동을 해석한 결과, 그림 5에서 보는 바와 같이 두 경우 모두 약 710kN에서 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.

충전재의 구속효과를 검토하기 위한 해석모델에서는 압축강도 약 8MPa의 저장도 모르터를 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 6에서와 같이 각형 충전강관은 압축측에 응력이 집중되어 좌굴이 서서히 진행되었으며 그에 따라 내력도 점차 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 원형 충전강관의 경우는 항복 이후에 강성이 크게 저하되었으나 국부좌굴에 의한 내력감소는 나타나지 않았으며, 압축측에 응력이 집중되지 않고 원주를 따라 응력이 분포되고 있음을 알 수 있었다.

일반적으로 교량거더 단면을 결정할 때는 I형 또는 상자

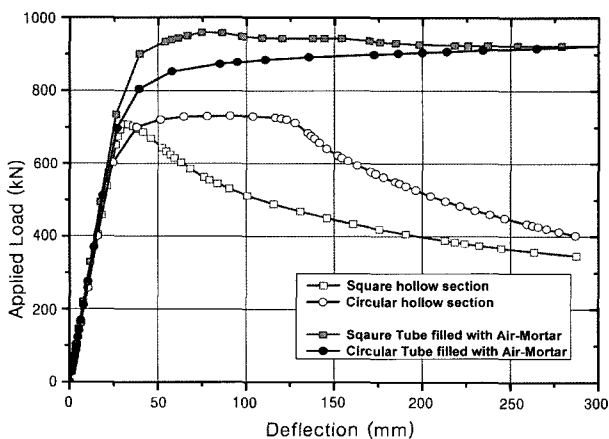
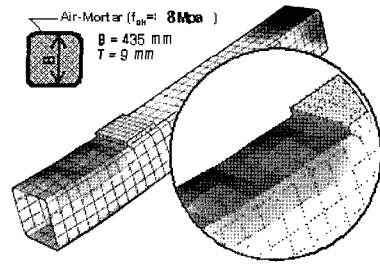
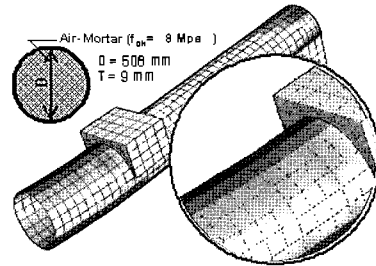


그림 5 원형강관과 각형강관의 휨거동 비교



(a) 내부 충전된 각형강관



(b) 내부충전된 원형강관

그림 6 저장도 충전재로 충전된 강관의 휨재하시 좌굴 변형 단면이 단면효율면에서 좋은 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.

또한, 원형강관은 단면에 방향성이 없으므로 설계가 간편하고 편심이 없어 압축과 인장에도 유리한 형상이며, 비틀림 강성이 강하며, 비틀림이 발생하여도 뒤틀림이 발생하지 않으므로 이에따른 2차응력이 발생하지 않는다. 충전강관 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 성능향상면에서 도움이 될 것으로 판단된다.

3. 실물실험체 재하실험

3.1 실물실험체 제작

축소실험체의 크기 효과를 배제하고 실교량에 적용되는 CFT거더의 부재내력을 알아보기 위해 실제 거더 크기의

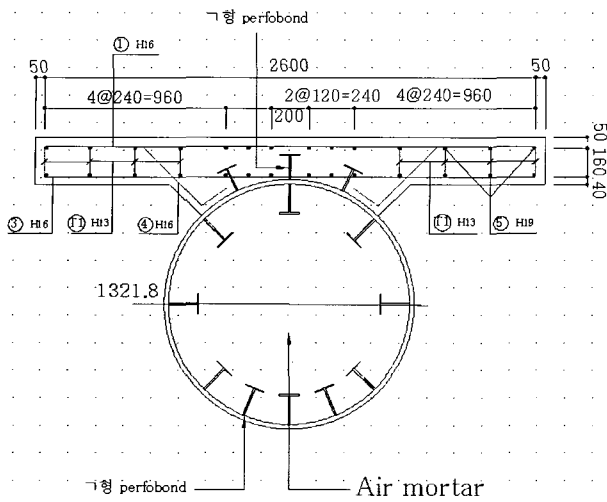


그림 7 실물실험체 단면제원



그림 8 CFT 합성거더의 제작과정

실험체를 제작하여 단순지지 상태에서의 휨재하 실험을 실시하였다. 실험량 크기로 제작된 실험체의 길이는 41m 이고, 직경 1321.8mm, 두께 24mm로서 d/t비는 55.1이며, 단면제원은 그림 7과 같다.

실물실험체의 제작 순서는 그림 8과 같다. 강관은 SM490B 강종으로 그림 8(b)와 같이 press forming으로 제작하였고, 강관 내부와 상부 바닥판과의 전단연결재는 (e)와 (f) 처럼 ㄱ형 prefobond 리브 전단연결재를 사용하였다. 강관의 연결은 (g)와 같이 공장에서 보조장치를 이용하여 연

결 위치 및 camber를 조정한 후에 (h)와 같이 현장에서 원주방향 용접을 수행하여 연결하였으며, 강관 내부에는 (i)와 같이 압축강도 8MPa, 단위중량 10kN/m³인 경량기포모르터를 충전하였다. (k)는 완성된 실물실험체 형상을 나타내고 있다.

그림 9는 CFT 합성거더의 충전 전과 충전 후의 단면 형상을 나타낸 그림이다.

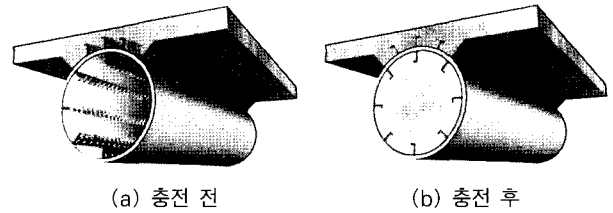


그림 9 CFT 합성거더의 단면 형상

3.2 실험결과

실물실험체의 실험결과를 그림 10에 나타내었다. 실험체 단면에 대한 사용상태 활하중 수준은 약 480kN이고, 이 사용 활하중 수준에 대한 처짐량은 약 47.8mm로 예측되었다. 이는 현행 도로교설계기준에서 제시하고 있는 판형교 형식에 대한 사용하중 상태의 허용처짐량인 80mm 또는 기타 형식에 대한 처짐량 제한치인 67mm 수준을 크게 밑도는 처짐량으로서 CFT 거더 강합성 형식의 교량이 우수한 사용성을 갖고 있는 것으로 나타났다. 파괴시 최대하중은 약 3,076kN까지 도달하였으며, 이때 중앙 단면에 작용하는 극한 휨모멘트는 약 23,835kN·m이고, 최대 처짐은 약 817.4mm였다.

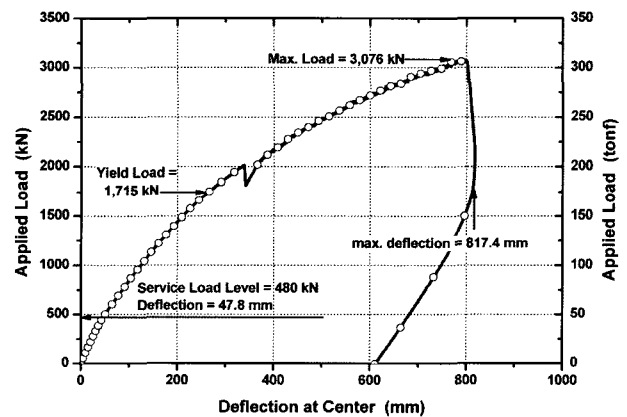


그림 10 실물실험체의 하중-처짐 곡선

그림 11과 같이 재하초기의 단면 중립축은 바닥판 헌치부 부근에 위치하고 있었으며, 헌치부 위쪽의 강관거더 단

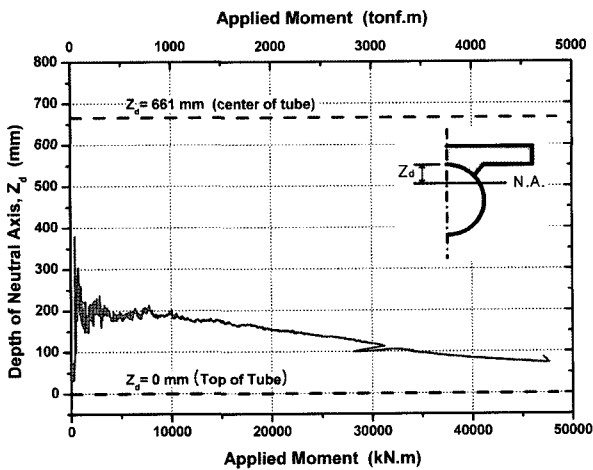


그림 11 재하중 중립축 이동 경로

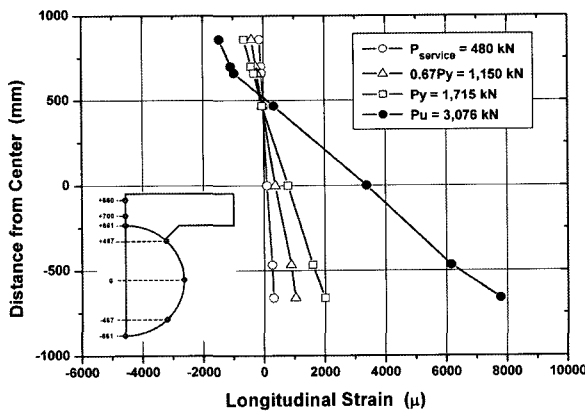


그림 12 하중단계별 변형률 분포

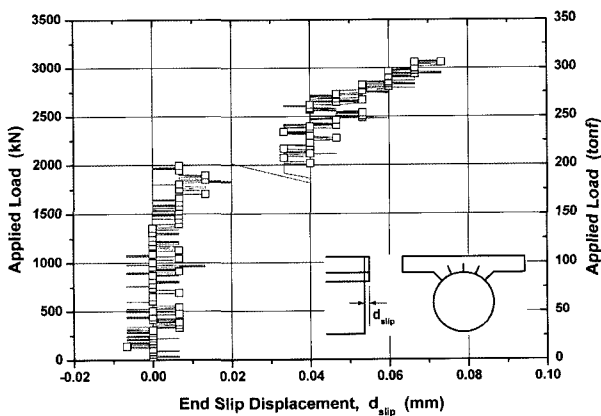


그림 13 바닥판과 강관의 단부 상대변위

면이 바닥판 단면과 압축축으로서 응력을 분담하고 있는 것으로 나타났다. 그림 12에서 보여지는 바와 같이 설계하중, 항복하중 및 최대하중에 대한 각각 하중 단계에서의 중앙단면의 변형률 분포는 거의 선형분포를 보여 CFT거더와 바닥판이 일체 거동을 하고 있음을 알 수 있으며, 그림 13에 나타난 바와 같이 바닥판과 강관간의 상대변위량

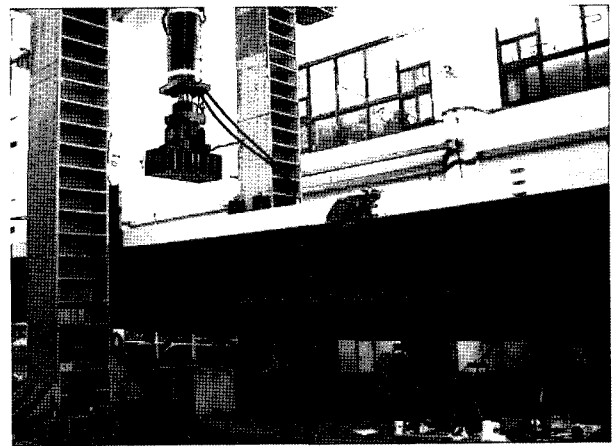


그림 14 지간 중앙부에서의 바닥판 압축 파괴

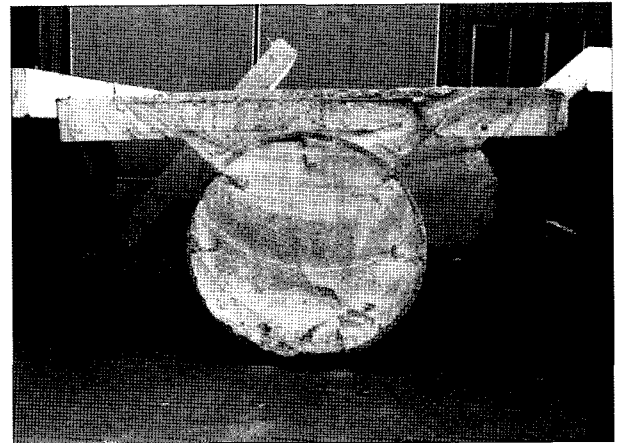


그림 15 CFT 부재 단면의 충전 상황

도 0.1mm에도 미치지 않을 만큼 완전 합성구조체로서의 성능을 보였다.

그림 14는 실험 종료 후의 바닥판 파괴 형상을 나타낸 것이며, 그림 15는 실험 후 절단된 단면을 나타낸 것으로 밀실하게 충전된 것을 볼 수 있다.

4. ㄱ형 Perfobond 리브 전단연결재의 전단내력 평가

CFT 합성거더 제작에 사용된 ㄱ형 perfobond 리브의 전단성능과 전단내력을 평가하기 위해서 그림 16과 같이 스티드, plate 리브, perfobond 리브, ㄱ형 perfobond 리브를 전단연결재로 갖는 전단실험체를 제작하여 전단실험(push-out test)을 수행하였다. 연결재 중에서 plate 리브에는 홀이 설치되지 않았고, perfobond 리브와 ㄱ형 perfobond 리브에는 홀이 3개 설치되었다.

실험결과 각 전단연결재의 전단내력을 평가한 결과는

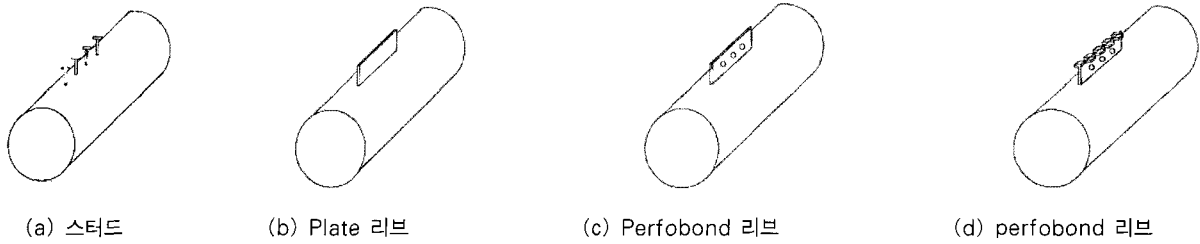


그림 16 충전강관 거더에 적용된 전단연결재의 종류

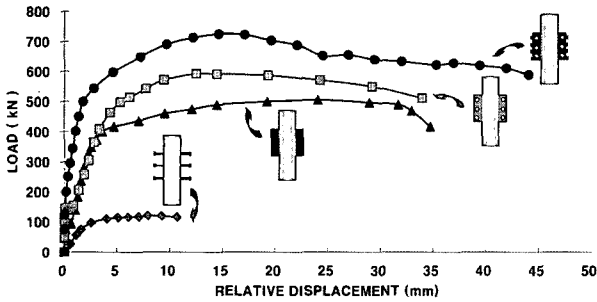


그림 17 전단연결재에 따른 전단내력

그림 17과 같다. Perfobond 리브 실험체는 plate 리브 실험체보다 약 17%정도 전단내력이 증가하였다. 이것은 plate 리브에 홀을 뚫어 따라 홀 안에서 형성되는 콘크리트 다웰에 의해 전단내력이 상승하는 것으로 판단된다. 또한, ㄱ형 perfobond 리브 실험체는 plate 리브 전단연결재보다 약 42% 전단내력이 증가하고, perfobond 리브 전단연결재에 비해서는 약 22% 전단내력이 증가되어 ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재가 상당히 높은 수준의 전단내력을 발휘하는 것으로 확인되었다. 일반적으로 사용되고 있는 스티드 전단연결재나 perfobond 리브에 비해서 ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재가 보다 우수한 전단내력을 보이는 것을 알 수 있다. 스티드 전단연결재는 용접부 파단에 의해서 파괴가 발생하는 반면에 리브형 전단연결재들은 콘크리트에 의해서 파괴모드가 결정되었다.

ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재 실험체가 perfobond 리브 실험체보다 전단내력이 월등히 증가하는 것은 리브 머리 부분에 플레이트 형상을 줌으로서 전단파괴면이 증가하고 전단연결재 밑에 있는 콘크리트의 지압력에 대한 저항면적이 증가되기 때문인 것으로 판단된다. 그림에서 보면, ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재는 선형구간에서는 다른 전단연결재보다 큰 강성을 보이며, 선형구간 이후에는 큰 연성능력을 보유하여 강성과 연성 전단연결재의 특성을 모두 나타내어 우수한 역학적 성능을 발휘함을 알 수 있다.

ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재의 전단저항 메카니즘

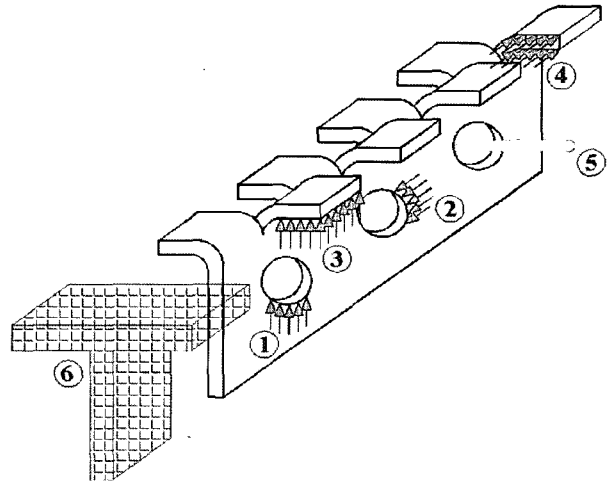


그림 18 ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재의 전단저항 메카니즘

은 그림 18과 같으며, 전단내력의 증가는 기본적으로는 전단파괴면의 증가에 의한 것으로, 이 전단내력은 강제 표면부와 콘크리트의 접촉면에서의 부착력과 리브에 설치된 홀에서의 다웰작용(①, ②), 정착효과(③), 리브 머리 부분의 플랜지 설치로 인한 다웰효과(④), 홀에 횡방향 철근배근시의 철근의 전단강도(⑤), 콘크리트 슬래브의 지압저항(⑥) 등에 의해서 결정된다.

5. 결 론

원형강관의 단면효율은 각형강관보다 나쁘지만, 강관 내부를 충전하는 경우에는 원형 단면이 오히려 휨거동에서 더 유리한 형상임을 알 수 있었다. 이러한 충전된 원형강관을 거더로 활용한 CFT 합성거더교는 CFT 부재의 우수한 내력, 탁월한 변형성능(연성도), 소음 및 진동억제 효과 등의 장점에 착안하여 교량 거더로 활용하는 방안이 모색된 것으로 경간장 40m의 실물 실험체 실험결과 최대변위 약 800mm에 이르기 까지 최대하중 3000kN을 견딜 수 있는 내력이 우수한 교량구조임을 확인하였다. 또한, 구조적 성능 뿐만 아니라 교량 형고 측면에서도 강관 지름 정

도의 형고를 갖게 되므로 미관설계가 가능하며, 완전합성 단면에 가까운 거동을 보이므로 해석이나 설계가 간단하게 이루어 질 수 있게 된다.

CFT 거더 제작에 사용되는 Γ 형 perfobond 리브 전단 연결재는 선형구간에서는 다른 전단연결재보다 큰 강성을 보이며, 선형구간 이후에는 큰 연성능력을 보유하여 강성과 연성 전단연결재의 특성을 모두 나타내었으며, 스티드 전단연결재는 스티드 파단에 의해서 파괴가 발생하는 반면에 리브형 전단연결재는 바닥판 콘크리트에 의해서 파괴가 발생하였다. 또한, Γ 형 perfobond 리브 전단연결재는 perfobond 리브 전단연결재에 비해서 약 22% 전단내력이 증가되어 상당히 높은 수준의 전단내력을 발휘하는 것으로 확인되었다.

이와같이 Γ 형 perfobond 리브 전단연결재를 적용한 CFT 합성거더는 구조적 성능이 우수하며, 미관성, 저형고 실현 등의 장점이 있으며, Γ 형 perfobond 리브 전단연결재는 큰 초기강성과 뛰어난 연성능력을 발휘함에 따라 적은 수의 전단연결재로 합성단면에서 요구되는 수평전단내력을 확보하는 것이 용이한 전단연결재임을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 정철현, 이홍수, 유성근, 최외호 (2005) 원형강관 거더와 콘크리트 바닥판 사이 Γ 형 perfobond 리브 전단연결재의 실험적 연구. 대한토목학회논문집, 제25권 제1A호, pp. 201~212.
2. 한국건설기술연구원 (2005) 콘크리트 충전 강관거더의 설계 및 시공에 관한 연구.
3. Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1994) A parametric study of perfobond rib shear connectors, Can. J. Civ. Eng. 21, pp. 614~625.
4. Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1997) Numerical analysis of push-out specimens with perfobond rib connectors, Computers & Structures Vol. 62, No. 4, pp. 617~624.
5. Nakamura, S. et al.(2002) New technologies of steel/concrete composite bridges, Journal of Constructional Steel Research, Vol.58, pp.99~130. 