

철도교 적용 콘크리트 충전 원형강관 거더의 휨성능

The flexure capacity of CFT girder with concrete slab and its application to Railway

조선규* 김성일** 정철현*** 주환중**** 이흥수****
Cho, Sun-Kyu Kim, Sung-il Chung, Chul-Hun Joo, Hwan-Joong Lee, Heung-Su

ABSTRACT

The appliance of the material characteristic of steel and concrete to the composite bridges is generalized in these day. As general rule, the steel plate girder bridge is the typical structure of the composite bridges, and the design codes is established. The several experimental programs regarding CFT composite section and non-CFT composite section are performed to obtain the flexure capacity and the performance of the filled-concrete in order to propose the new way of designing the composite bridge. Also, the specification of the CFT composite bridge for railway is not yet established and proposed, therefore, the concerning the specific characteristic of the CFT composite bridge, the design specification is proposed for the railway.

1. 서론

강합성 거더는 강과 콘크리트의 합성에 의한 극한내력의 향상과 환경에 적합한 저소음화, 경량화, 시공성 향상 등 여러 가지 장점을 갖는 강재를 주재료로 한 합성구조이며, 콘크리트 거더에 비교해서 가벼우면서도 가설 시공성이 좋고 시공기간이 짧다는 장점을 가지고 있어 강합성 거더는 앞으로 적용범위를 확대해 나갈 것으로 판단된다.

기존의 합성거더 교량들은 구조적인 기능성, 경제성, 미관에 있어 각기 다른 장·단점들을 갖고 있으며, 이를 보완할 수 있는 경제적이고 합리적인 신형식 교량 시스템, 특히 형하공간 확보가 충분하고 미관이 수려한 저형고 강합성 교량의 개발과 검증이 필요하다.

콘크리트 충전 원형 강관(CFT) 거더 교량은 새롭게 개발된 강합성거더 교량으로서 원형의 강관에 콘크리트를 채워 우수한 내력, 탁월한 변형 성능, 소음 및 진동억제 효과 등의 장점을 갖고 있는 교량이다. 또한, 초기비용의 절감과 공용 후 유지관리의 최소화를 포함하여 비용절감에 우수하며, 하중저항능력 및 비틀림 강성에서 우수할 뿐만 아니라 사용성 및 수려한 외관으로 최근 교량 설계 시 새로운 설계요소로 자리 잡고 있는 환경 친화적인 교량 공법이라고 볼 수 있다. 시공성 측면에서도 공장제작된 부재를 현장으로 운반하여 최소 작업량으로 거더 제작 작업을 실시할 수 있으므로 유리한 공법이다.

현재 CFT 거더를 활용한 사례가 있는 일본 등의 경우 한계상태설계법에 기초한 설계를 수행하고 있으며, 국내에서는 이와 같은 새로운 형식의 강합성거더 교량인 CFT 거더에 대한 설계기준이 마련되어 있지 않은 바 국내설계기준에 맞는 CFT 거더의 설계에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 CFT

* 서울산업대학교 철도전문대학원 부교수, 정회원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 단국대학교 토목환경공학과 교수

**** (주)교량과 고속철도 대표

***** 비비엠코리아(주) 기술연구소 실장

거더-바닥판 합성단면과 비충전강관 거더-바닥판 합성단면의 재하실험을 통하여 각각의 경우 휨성능과 충전콘크리트의 역할을 확인하고자 하였다. 또한, 허용응력설계법으로 CFT 거더 철도교 설계를 위해 실제 반영되어야 할 항목을 파악하고 작성된 설계 요구 항목을 검토하여 CFT 거더 철도교량을 설계하였다.

2. CFT 거더의 개요

2.1 CFT 거더의 일반적 특징

CFT 거더는 강관의 양단을 강관으로 밀폐하고 강관내부에 콘크리트계 재료를 충전한 구조이다. 즉, 이종재료인 강관과 콘크리트의 역학적 장점을 도입하여 휨, 전단, 압축 등 작용하중에 대한 저항성능을 향상시키고 진동, 처짐 등에 대한 사용성을 강화한 구조이다. CFT 거더의 특징은 대표적으로 다음과 같다.

- 강관내에 콘크리트를 충전함으로써 복합효과에 의해 내력향상과 효율적인 단면 구성으로 형고를 크게 감소시킬 수 있다.
- 거더에 사용되는 강관을 별도 가공없이 사용함에 따라 제작일수의 저감을 도모할 수 있다.
- SRC 거더와 비슷한 수준의 소음저감효과를 기대할 수 있다.
- 강관은 콘크리트 거푸집으로써 역할을 가질 수 있으므로 기존의 SRC 거더 등과 비교하여 가설 시공이 매우 편리하며, 보강재의 최소화를 통하여 제작비용을 절감할 수 있다.
- 원형단면에 의한 미학적 장점이 우수하다.

2.2 CFT 거더의 제작

CFT 거더의 제작은 크게 강관 제작공정, 내외부 전단연결재 설치, 현장용접에 의한 강관이음, 내부 콘크리트 충전 및 최종 상부 바닥판 설치로 나누어지며 세부 공정은 그림 1과 같다.

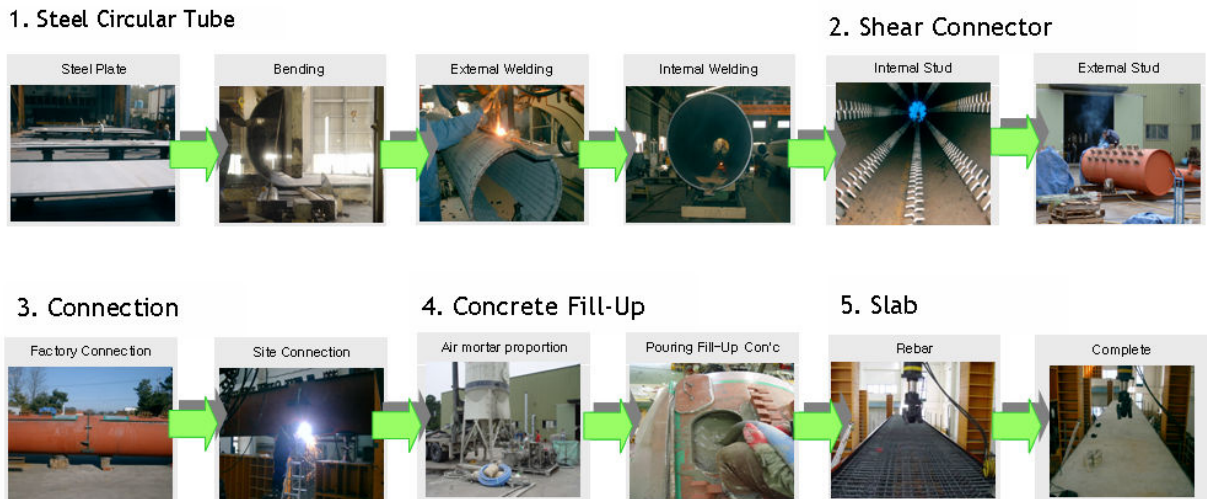


그림 1. CFT 거더의 제작순서

2.3 CFT 거더의 휨성능 평가

CFT 부재의 휨성능을 평가하기 위하여 휨재하실험을 수행하였다. 강관 내부를 설계강도 약 8.0 MPa의 경량기포모르타르를 충전하는 경우와 비충전인 경우로 구분하였고, 충전재와 강관간의 합성거동을 향상시키기 위하여 강관내부에 전단연결재를 두는 경우를 가정하였다. 재하방법은 그림 2와 같이 중앙 부분에는 순수 휨모멘트만 작용하도록 하였다. 실험에 사용된 강관은 지름 508mm, 두께는 9mm이고, 강종은 SS400 이다.

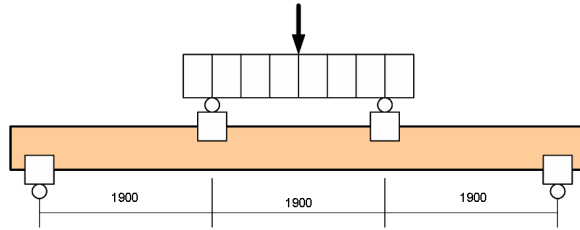


그림 2. CFT거더 바닥판 합성단면 부재 휨재하 실험의 재하방법

CFT 거더와 콘크리트 바닥판간의 합성단면에 대한 재하실험에 앞서, 강관내부의 충전여부에 따른 휨재하 실험을 먼저 수행한 결과를 그림 3에 나타내었다. 이미 알려진 바와 같이 강관내부를 충전하므로써 내력의 증가와 함께 부재 거동도 국부좌굴에 의한 취성거동에서 연성거동으로 파괴거동도 바뀌어 있음을 알 수 있다. 비록 저장도의 경량기포모르타르를 충전하였음에도 불구하고, 충전재에 의한 강관의 국부좌굴 제어 효과가 충분히 나타나고 있음을 알 수 있었다. 특히 강관내부에 기계적인 부착기구를 둔으로써 합성효과 및 보강효과를 통한 내력향상을 얻었고, 이때의 극한내력은 설계강도 27 MPa의 일반 콘크리트를 충전한 경우와 거의 동일한 결과였다.

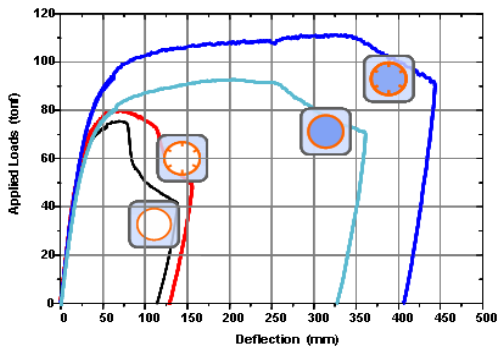


그림 3. 내부충전에 따른 극한내력 및 거동 비교

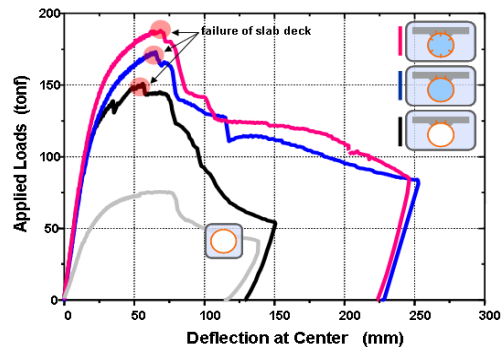


그림 4. CFT거더-바닥판 합성단면의 휨거동

CFT 거더와 콘크리트 바닥판을 합성한 부재의 경우에는, 그림 4에서 보는 바와 같이 빈강관-바닥판 합성단면에 비해 충전강관-바닥판 합성단면의 극한내력이 약 17% 증가하였으며, 강관내부에 기계적 합성기구를 둔 경우에는 약 30% 까지 극한내력이 증가하는 결과를 얻었다. 특히, 강관내부를 충전하지 않은 경우에는 거더 중앙부에서 강관의 좌굴이 발생하였고, 바닥판 파괴이후에 내력이 급격히 감소하여 빈강관의 파괴거동과 비슷한 양상을 보였으나, 강관내부를 충전한 CFT거더의 경우에는 바닥판 파괴 이후에 CFT 거더 만의 연성거동으로 저항하는 파괴양상을 보였다.

휨재하실험을 통해 CFT거더 강합성 교량의 휨성능과 내력증가 효과 및 파괴거동을 알 수 있었으며, 강관 내부를 충전함에 따른 내력증가와 바닥판과의 합성을 통한 내력증가가 각각 설계에 반영되어야 함을 알 수 있었다. 또한, 효율적인 CFT 거더 강합성 교량의 설계를 위해서는 기존의 압축부재로서의 설계개념을 응용한 것이 아닌, CFT 부재의 휨거동에 대한 실험연구를 통해 설계법을 개선할 필요가 있다고 판단된다.

3. CFT 거더 철도교의 설계

3.1 CFT 거더 철도교의 설계방법

국내에서는 CFT 거더 철도교 설계를 위한 설계기준이 별도로 정립되지 않으므로 CFT 거더 철도교 설계를 위한 설계기준을 제시하였다. 공통적인 설계항목은 철도설계기준을 적용하는 것을 원칙으로 하였으며, CFT 거더 철도교의 특성을 고려하여 추가적으로 필요한 항목에 대하여 설계기준을 제시하였다.

CFT 거더는 그림 5와 같이 단면의 구성이 내부 콘크리트계 충전재와 외부 원형강관으로 구성되며, 일

반 I형 거더의 복부로 판단할 수 있는 CFT 거더의 현치부 거리(d) 대 강관직경(e)의 비율이 0.7 정도로 상당히 큰 값을 나타내고 있다. 철도설계기준에서 바닥판 설계지간에 대한 강교의 규정은 복부가 얇은 I형 거더에 대한 것이며 콘크리트교의 규정은 복부가 두꺼운 콘크리트 거더를 기본으로 하여 정해진 것이다. 철도설계기준의 강교와 콘크리트교에 대한 기준을 참고하여 CFT 거더의 바닥판 설계지간은 순지간에 지간 중앙 바닥판의 두께를 더한 값을 설계지간으로 산정하였다. 그림 5에서 a는 순지간이며, b는 순지간+바닥판 두께이며, c는 지지보의 중심간격을 나타낸다.

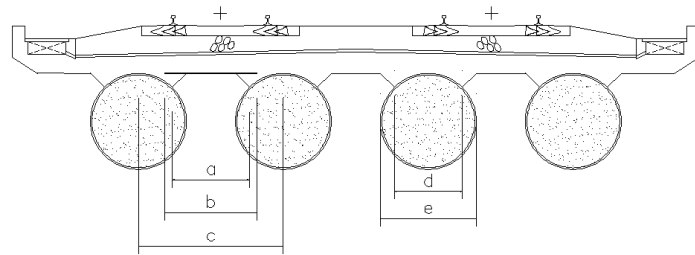


그림 5. CFT 거더의 바닥판 설계지간

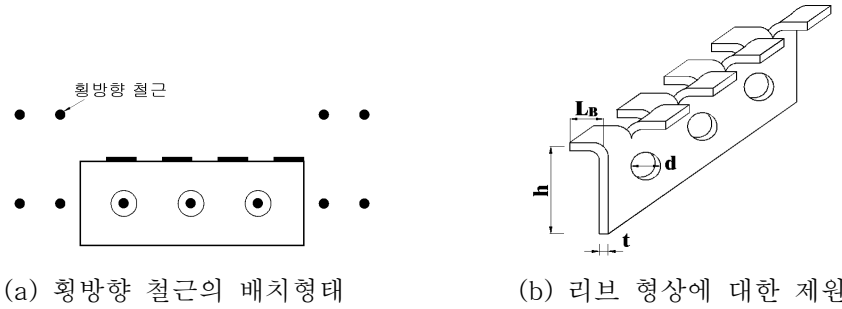
단면검토는 합성 전과 합성 후로 구분하여 수행하였다. 임시중간지점이 없는 경우를 고려하여 강관과 충전재, 현치 콘크리트, 슬래브 콘크리트의 자중이 거더에만 작용한다고 고려하고, 합성 후의 모든 후속 하중은 합성단면에 작용한다고 고려하였다.

CFT 거더에서 사용되는 전단연결재는 ㄱ형 Perforbond 리브 전단연결재를 사용하였다. CFT 거더는 단면의 형상이 원형을 갖기 때문에 전단연결재 사용에 주의할 해야하는 형식이다. 전단연결재는 바닥판과 거더와의 사이에 작용하는 교축방향의 가장 큰 전단력에 대하여 설계하였으며, 바닥판 콘크리트와 거더 사이의 부착응력은 무시하고, 콘크리트의 건조수축 및 바닥판과 거더와의 온도차에 의해 발생하는 전단력을 고려하여 설계하였다. ㄱ형 Perforbond 리브 전단연결재는 식 (1)의 강도평가식에 따라 극한강도를 계산하였으며, 계산된 극한강도를 안전율 3으로 나누어 허용전단저항력을 계산하여 배치하였다.

$$Q(\text{kN}) = 4.5 h t f_{ck} + 1.1 n d^2 \sqrt{f_{ck}} + 1.1 A_{tr} f_y + 1.6 m t L_B f_{ck} \quad (1)$$

여기서, $Q(\text{kN})$ 는 ㄱ형 perforbond 리브 전단연결재의 개당 전단저항능력, $h(\text{mm})$ 은 리브의 높이, $t(\text{mm})$ 는 리브의 두께, $f_{ck}(\text{MPa})$ 는 콘크리트 설계기준강도, n 은 홀 개수, $d(\text{mm})$ 는 홀 지름, $A_{tr}(\text{mm}^2)$ 은 횡방향 철근 단면적, $f_y(\text{MPa})$ 는 횡방향 철근의 항복응력, m 은 보강된 머리 개수, $L_B(\text{mm})$ 는 보강된 머리의 내민 길이이다.

강도평가식에 적용되는 횡방향 철근의 적용방법과 ㄱ형 Perforbond 리브 전단연결재의 제원을 그림 6에 표시하였다. 강도평가식에서 횡방향 철근의 단면적 $A_{tr}(\text{mm}^2)$ 은 홀에 삽입된 횡방향 철근만의 면적이 아니라 전단연결재 앞뒤와 위에 배치된 모든 횡방향 철근의 단면적을 나타내는 것으로 그림 6(a)에서는 횡방향 철근 11개의 단면적을 나타낸다. 그림 6(b)에서 보면 홀의 개수 n 은 3개이며, 보강된 머리의 개수 m 은 8개가 된다. 강도평가식은 홀의 중심간 거리 대 홀 직경의 비가 2.22 이상인 경우에 적용이 가능하다.



(a) 횡방향 철근의 배치형태

(b) 리브 형상에 대한 제원

그림 6. 7형 Perforbond 리브 전단연결재의 제원

3.2 CFT 거더 철도교의 설계

제시된 CFT 거더 철도교 설계방법에 따라 단순교 형식의 지간 35m 철도교를 설계하였다. 설계시 고려된 설계사항은 아래와 같다.

교량형식 : 단경간 CFT 합성거더교

교량등급 : LS-22 (1급선)

교량연장 : $L = 1 @ 35 = 35\text{m}$ (계산지간 : 34.1m)

교량폭원 : $B = 10.9\text{m}$ (복선)

거더제원 : 1.700m, $t = 38\text{mm}$, SM570

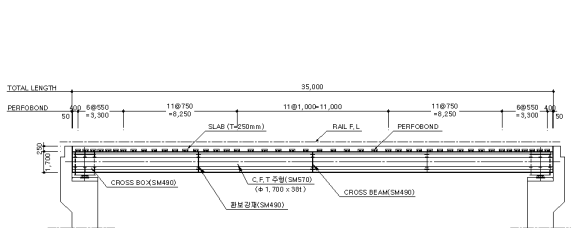
바닥판 두께 : 0.25m

거더개수 : 4개

바닥판 콘크리트 : 설계기준강도 27MPa, 단위중량 25kN/m^3

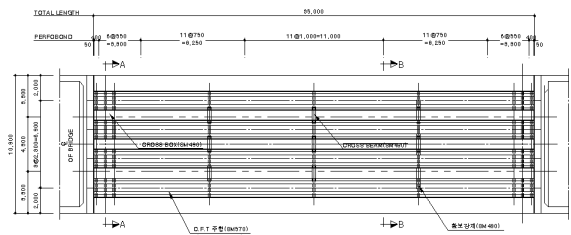
경량기포 충전모르터 : 설계기준강도 8MPa, 단위중량 10kN/m^3

제시된 설계법에 따라 계산된 CFT 거더 철도 교량의 형상은 그림 7과 같다.



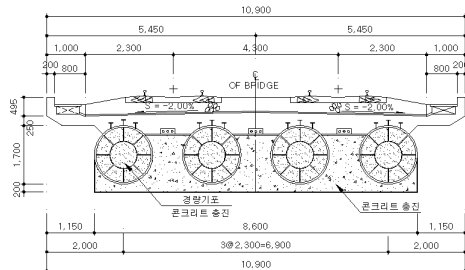
(a) 종단면도

단면 "A-A"
SCALE=1:50

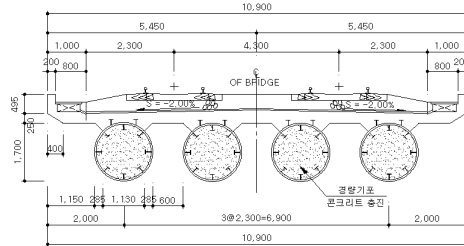


(b) 평면도

단면 "B-B"
SCALE=1:50



(c) 단면 A-A의 단면도



(d) 단면 B-B의 단면도

4. 결 론

CFT 거더의 적용성 파악을 위해 CFT 거더-바닥판 합성단면과 비충전강관 거더-바닥판 합성단면의 재하실험을 통하여 각각의 경우 휨성능과 충전콘크리트의 역할을 확인하였다. 재하실험을 통해 CFT거더 강합성 교량의 휨성능과 내력증가 효과 및 파괴거동을 알 수 있었으며, 강관 내부를 충전함에 따른 내력증가와 바닥판과의 합성을 통한 내력증가가 있음을 확인하였다.

국내 철도교량 설계기준에 준하여 허용응력설계법에 의한 CFT 거더 철도교 설계를 위해 실제 반영되어야 할 항목을 파악 제시하였다. 제시된 설계방법에 따라 지간 35m 단순지지된 CFT 거더 철도교량을 설계하였다. 강관과 바닥판 콘크리트의 전단연결재는 저항성능이 크고 피로성능이 우수한 ㄱ형 perforbond 리브 전단연결재를 사용하였다.

설계는 CFT 충전재의 강성을 고려하지 않고 설계에 반영하였다. 그러므로 실제 보다는 설계내력이 과소평가되었으나 국내에서 철도교의 신형식 교량인 점을 고려할 때 안전측 설계로 적용하였다. 연속경간을 가지는 교량의 경우 중간지점부의 부멘트에 대한 설계시 CFT 충전재의 강성을 고려하여 설계가 이루어진다면 더욱 효율적인 설계가 될 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도시설공단 (2004), 철도설계기준 (철도교편), 한국철도시설공단.
2. (사)한국강구조학회 (2003), 콘크리트충전 강관구조 설계 및 시공지침, (사)한국강구조학회.
3. 조선규 외 (2005), 콘크리트 충전 원형강관 거더의 철도교 적용성에 관한 연구, 서울산업대학교
4. 정철현, 이흥수 (2005) ㄱ형 Perforbond 리브 전단연결재의 전단강도 평가. 대한토목학회논문집, 제25권 제5A호, pp. 879~888.
5. Matsumura, T., Hosaka, T., Hiraoka, C. and Nishiumi, K. (2003) Practical application of composite bridge for Shinkansen using CFT, *International Conference of International Association for Bridge and Structural Engineering(IABSE), Antwerp.*

