



프리텐션 PSC I형 거더의 설계기준에 관한 고찰

Review of Design Criteria for Pretension PSC I Type Girder

신성진 Shin, Sung-Jin
(주)한맥기술 기술개발부 이사

이종관 Lee, Jong-Kwan
(주)한맥기술 기술개발부 전무

이재훈 Lee, Jae-Hoon
영남대학교 건설시스템공학과 교수

1. 머리말

PSC I형 거더교는 우수한 경제성으로 인하여 오늘날까지 많이 사용하고 있는 형식이다(그림 1). 과거 35m 이하의 경간장을 갖는 교량에만 사용하던 PSC I형 거더교는 2000년대에 들어서 단면 최적화, 단계별 긴장, 고강도 콘크리트 사용 등으로 적용 경간장을 최대 60m까지 늘려 고가의 강교를 대체하는 수준까지 이르렀으나 포스트텐션 방식이 갖는 특성으로 인하여 더 이상 경제성을 증진시키기에는 한계에 이른 것으로 평가된다. 이러한 점에 주목하여 (주)한맥기술과 영남대학교에서는 PSC I형 거더의 경제성을 향상시키고자 국토교통부의 지원을 받아 ‘이동식 반력대 및 부분 비부착을 적용한 단부 형고 증대형 프리텐션 거더 표준화 및 생산기술 개발’ 연구 과제를 수행하였다.

이 기사에서는 국내에서 다소 생소한 이동식 반력대를 이용한 프리텐션 PSC I형 거더를 개발하면서 검토한 주요 설계기준과 실험 결과에 대하여 소개함으로써 경제성이 우수함에도 국내에 널리 사용되지 못하고 있는 프리텐션 구조를 활성화하는데 조금이나마 도움을 주고자 한다.



(a) 교량 재료 분석 (b) 콘크리트 교량 중 PSC 거더교 비율

그림 1. PSC I형 거더교 비율

2. 이동식 반력대를 사용한 프리텐션 거더의 특성

프리텐션 PSC I형 거더는 포스트텐션 PSC I형 거더에 비해 쉬스관, 정착구, 그라우팅 작업 등이 불필요하며, 복부 폭이 얇고 더욱 경제적이다. 그러나 국내에서는 중량물 운반에 관한 도로 운송 조건이 까다로워(총중량 40 tonf 이하, 길이 16m 이하) 널리 사용되지 못하고 있다. 이를 극복하고자 현장 생산을 목적으로 이동식 반력대가 고안되었다(사진 1). 이동식 반력대는 이동, 조립, 해체 등이 용이하도록 반력대의 규모를 축소하기 위하여 강연선을 직선으로만 배치하는 특징이 있다. 직선으로 배치된 강연선은 전달달이



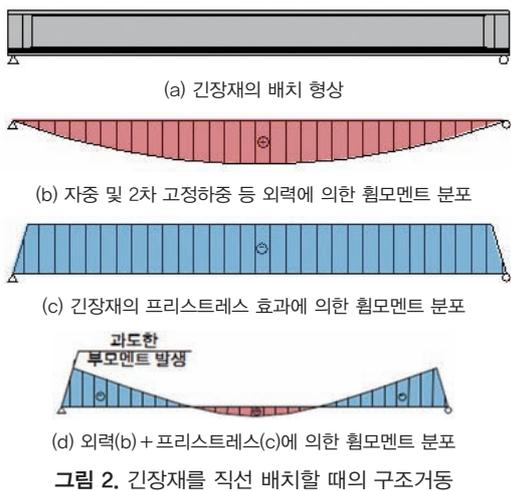
사진 1. 이동식 반력대

(transfer length) 구간을 제외하면 거의 전구간 동일한 긴장력을 가지게 된다. 따라서 긴장력을 도입한 직후 부재에 발생하는 휨모멘트 분포는 <그림 2>와 같이 되며, 중앙부에 발생하는 모멘트에 초점을 맞추어 긴장력을 도입하면 단부 상단에는 과도한 인장응력이 발생하여 균열이 발생하게 된다. 이에 대한 가장 경제적인 해결책으로는 단부 강연선의 일부를 테이핑 등의 방법으로 콘크리트와 부착을 억제하여 긴장력을 도입하지 않는 부분 비부착 기법<그림 3>이 있다. 부분 비부착율을 크게 적용하면 거더 단부 상단에 발생하는 인장응력을 용이하게 제어할 수 있으나 국내외의 설계기준에서는 부분 비부착율을 제한하고 있다. 따라서 부분 비부착을 적용한 프리텐션 부재를 사용하기 위하여서는 프리텐션 부재에 적용되고 있는 설계기준과 거동에 대하여 면밀히 검토할 필요가 있다.

3. 설계기준 및 거동 고찰

3.1 설계기준

부분 비부착을 적용하고 있는 프리텐션 부재에서 고려하여야 할 주요 설계기준은 다음과 같다.



- 1) 부분적으로 부착안된 강연선의 수는 총 강연선 수의 25%를 넘지 않아야 한다^{1,2)}.
- 2) 강연선의 부착이 부재 단부까지 연속되어 있지 않고, 사용하중이 작용할 때 미리 압축력을 가한 인장구역에 허용인장응력을 설계에 고려하는 경우는 계산된 정착 길이를 2배로 증가시켜야 한다³⁻⁵⁾.
- 3) 부분 비부착 강연선을 배치할 때 같은 위치에서 비부착 강연선의 40% 또는 4개 중 큰 값 이상의 비부착을 시작하지 않아야 한다²⁾.
- 4) 프리텐션 보에 있어서 프리텐션 정착영역의 파열 저항력은 프리텐션 단부의 수직철근에 의해 발휘되며, 사용한계상태에서 다음과 같이 산정한다.

$$P_r = f_{yd} A_s \dots\dots\dots (1)$$

여기서, f_{yd} = 철근의 설계 항복강도, 140 MPa 이하
 A_s = 보의 단부에서 $h/4$ 이내에 배치되는 횡방향 철근의 총면적(mm²)
 h = 프리캐스트 보의 높이(mm)

저항력은 전달 긴장력의 4% 이상이어야 하고, 단부 수직철근은 가능한 한 보의 단부에 근접하여 배치하여야 한다^{1,2,4)}.

3.2 거동 고찰

3.2.1 부분 비부착율 기준

강연선의 부분 비부착 기법은 유효 긴장력을 조절하여 균열 발생을 억제하는데 효과적이지만 유효 긴장력이 과도하게 저하될 경우에는 부재가 전단파괴 또는 부착파괴 등에 의하여 취성 파괴될 위험이 있어 부분 비부착율을 제한하고 있다. 그러나 실제 구조물에 있어 비부착율을 25% 이하로 하면서 단부 상단의 인장응력을 제어하는 것은 쉽지 않다. 따라서 Russell 등⁶⁾은 이러한 제한이 과도하므로 33%까지 완화할 것을 주장하였으나 현재까지는 설계기준에 반영되지 않고 있다. 따라서 비부착율에 따른 부재 거동을 실험적으로 고찰하였다.

<사진 2>는 각각 강연선의 비부착율 0, 25, 50, 75%에서 거더 단부의 파괴모드를 관찰한 실험 결과이다. 비부착율 0, 25%의 경우는 하중 재하점 아래에서 최초 휨

균열이 발생한 후 점차 균열 영역이 확대되다가 콘크리트 압축 연단 변형률이 극한 변형률에 도달하는 연성 파괴모드를 보였다. 50%의 경우 휨전단 균열이 발달하여 휨강도에 도달하기 전에 전단파괴되는 경향을 보였으며, 75%의 경우는 하중 재하점이 아닌 강연선 비부착 구역의 휨 균열이 발달하여 부재의 공칭강도에 도달하기 전에 단부에서 부착파괴 되는 경향을 보였다. 따라서 설계 기준을 준수할 경우 연성파괴를 유도할 수 있음을 알 수 있었다.

3.2.2 비부착 강연선의 정착길이 기준

이 기준은 비부착 강연선에 의한 부착파괴를 방지하기 위하여 제안된 것으로 정착 길이가 충분하지 않아 강선의 부착파괴가 발생할 경우 급격한 취성파괴가 발생함을 관찰하였다(사진 3). 따라서 부분 비부착된 강연선의 정착 길이를 2배로 증가시킬 경우 단면이 공칭강도에 도달하기 전에 부착파괴 위험성이 감소되므로 보다 안전측의 설계를 제공할 수 있다.

3.2.3 비부착 방식 기준

비부착 강연선의 부착이 시작되는 점에서는 응력 집중으로 인하여 균열 발생의 위험이 있으므로 이를 방지하기 위한 비부착 방식⁶⁾이 제안되었다. 실물실험에서 비부착을 동일하게 하고 비부착 강연선을 단일 지점에서 일괄 비부착(concurrent debond)한 경우와 여러 단면에서



사진 3. 정착길이 미확보로 인한 취성파괴



사진 4. 비부착 방식에 따른 균열 모드

분산하여 부착시키는 다단 비부착(staggered debond) 방식에 대하여 비교 실험을 수행한 결과 일괄 비부착한 쪽에서 먼저 복부 전단 균열이 발생함이 관찰되었다(사진 4). 따라서 다단 비부착을 적용할 경우 균열에 대하여 보다 안전측의 결과를 나타냄을 확인할 수 있었다.

3.2.4 단부 보강 기준

프리텐션 거더 단부의 보강 철근에 관한 기준으로 강연선의 파열력(bursting force)에 대한 수직 전단철근의 보강에 관한 기준이 있다. 이 기준은 파열력뿐 아니라 콘크리트 단면에 긴장력을 도입하는 과정(de-tensioning, transfer)에서 강연선 절단순서에 따라 발생하는 편심력에 의한 다양한 종류의 균열을 억제하는데도 효과가 있으며, 이러한 단부 균열을 방지하기 위한 방안이 최근까지도 연구되고 있다. 실물 실험에서는 이동식 반력대 양단에 큰 용량의 인장기를 설치하여 전체 강연



(a) 완전 부착 (b) 25% 비부착

휨균열 발생 ⇒ 연성 파괴



(c) 50% 비부착(정착부 전단 파괴) (d) 75% 비부착(정착부 부착 파괴)

사진 2. 부분 비부착율에 따른 파괴모드

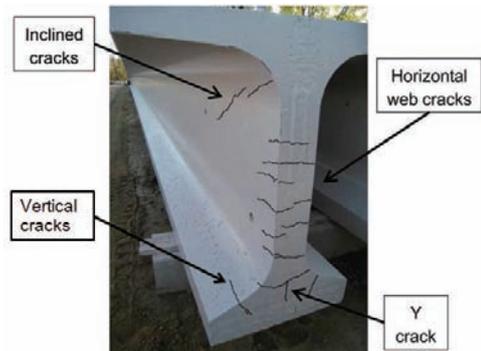


사진 5. 거더 단부 균열⁷⁾



사진 6. 긴장력 도입 장비

선을 동시에 이완(release, de-tensioning)시킴으로써<사진 6> 이러한 균열을 미연에 방지하였다.

4. 맺음말

현재 국내에서는 경제성 향상을 위하여 다양한 형태의 거더가 개발되고 상용화 되고 있다. 그러나 개발된 제품의 장점에도 불구하고 제품과 관련된 설계기준에 대한 올바른 이해 및 이를 입증할 엄밀한 검증이 있지 않고서는 제품 개발 후 큰 문제를 야기할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 제품개발 후 시장의 확대와 제품 보급 증대를 위하여서도 연구단계에서 보다 면밀한 검증이 필요할 것으로 판단되며, 향후 학계와 관련 기술자들의 많은 관심을 기대한다. □

담당 편집위원 : 진남희((재)한국건설품질연구원) nhjin70@hanmail.net

참고문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교설계기준(한계상태설계법), 2012.
2. AASHTO, "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications", 5th Edition, 2010.
3. 한국콘크리트학회, 「콘크리트구조기준 해설」, 2012.
4. 대한토목학회, 교량설계핵심기술연구단, 「도로교설계기준 해설」, 2008.
5. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2008.
6. Bruce W. Russell and Bed H. Burns, "Design Guidelines for Transfer, Development and Debonding of Large Diameter Seven Wire Strands in Prestressed Concrete Girders", Research Report No. 1210-5F, Texas DOT, 1993, pp. 464
7. P. Okumus and M. G. Oliva, "Evaluation of Crack Control Methods for End Zone Cracking in Prestressed Concrete Bridge Girders", PCI Journal, Spring, 2013, pp. 91 ~ 105.



신성진 이사는 영남대학교 토목공학과에서 FRP RC보의 전단거동에 관한 연구로 박사학위를 취득하였고, 유신코퍼레이션과 DM엔지니어링을 거쳐 2010년부터 (주)한맥기술 기술개발부에서 근무하며, 프리캐스트 PSC 제품과 건설신소재 개발에 전념하고 있다.
sungjin@hanmaceng.co.kr



이종관 전무는 인하대학교 토목공학과에서 석사학위를 취득하였고, 삼우기술단과 DM엔지니어링을 거쳐 2004년부터 (주)한맥기술에 재직하고 있다. 토목구조기술사로서 서해대교, 광안대교 등의 설계에 참여하였고, (주)한맥기술에서는 설계와 더불어 프리캐스트 PSC 제품 개발 사업에 참여하고 있다.
jmslee@dreamwiz.com



이재훈 교수는 University of Wisconsin-Madison에서 철근콘크리트 장주설계를 주제로 박사학위를 취득하였고, 삼성건설 근무를 거쳐 1994년부터 영남대학교 교수로 재직하고 있다. 토목구조기술사, 미국 PE이며, 주 관심 연구 분야는 고강도 철근콘크리트구조, 내진설계, 프리캐스트 RC 및 PSC, FRP 합성구조 및 강 합성구조이다.
jhl79@ynu.ac.kr