

PSC-강 혼합거더의 연결부 거동 해석

Analysis of the Composite Section in PSC-Steel Hybrid Girder

김 광 수* 정 광 회** 심 정 욱*** 유 성 원****
Kim, Kwang Soo Jung, Kwang Hoe Shim, ChungWook Yoo, Sung Won

ABSTRACT

This paper presents 3D nonlinear analysis considering the slip of composite section as well as the static load tests of PSC-Steel hybrid girders. According to the slip modulus, the nonlinear analysis shows that the behavior of hybrid girders could be divided into three parts as full-composite, partial-composite and non-composite. However, the experimental results show that the PSC-Steel hybrid girders with shear connectors take the part of partial composite action in ultimate load stage. In addition, the load test results give that stud shear connectors and welded reinforcements have contributed to improve the ultimate strength of hybrid girders for about 20%.

1. 서론

혼합구조의 일종으로 강구조와 PSC구조를 연결한 구조시스템이 프랑스의 노르망디교나 일본의 생구교, 타타라대교 등과 같은 장대교량의 가설에 최근 많이 적용되고 있으며, 국내에도 곧 적용될 전망이다. 이와 같이 혼합구조를 사용하는 것은, 중앙경간을 강구조로 측경간을 PSC구조로 가설함으로써 중앙지간을 장대화할 수 있기 때문이다. 이때 강구조와 PSC구조의 연결부 거동은 매우 중요하며 전체 구조의 사용성 및 극한내력에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 강구조와 PSC구조의 연결부재에 대한 정적재하실험을 통해 접합방법에 따른 거동을 분석하였으며, 강과 콘크리트 경계면의 슬립을 고려한 3차원 비선형해석을 실시하여 실험결과와의 비교는 물론 부재의 전체적인 거동을 해석적으로 구현하는데 그 목적이 있다.

2. 정적재하실험

2.1 실험개요

본 실험에서는 그림 1과 같이 부재의 중앙부에 강과 PSC 접합부를 둔 단면치수 300mm×482mm×3400mm인 실험부재를 제작하였다. 실험부재의 접합방법은 크게 3가지로 스테드에 의한 접합(S), 용접철근에 의한 접합(R), 스테드와 용접철근을 동시에 사용한 접합(SR)을 적용하였으며, 전단연결재가 없는 경우(P)도 비교를 위해 추가하였다. 또한, 접합부의 매입깊이, 정

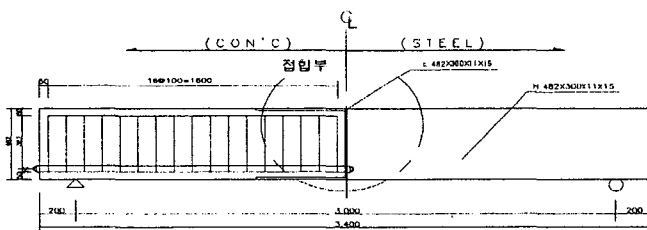


그림 1. 실험체 일반도

- * 정회원, (주)현대건설 기술개발원(기술연구) 선임연구원
- ** 정회원, (주)현대건설 기술개발원(기술연구) 주임연구원
- *** 정회원, (주)현대건설 기술개발원(기술연구) 연구원
- **** 정회원, 우석대학교 토목공학과 조교수

착철근량, 스테드 개수 및 긴장량을 변수로 14가지의 실험 부재를 제작하였다. 콘크리트는 설계기준 강도 400 kgf/cm²인 콘크리트를 사용하였으며 공시체에 대한 압축강도 실험결과는 456 kgf/cm²를 나타내었다. 그리고, 철근은 항복강도가 4,000 kgf/cm², 강재는 H-482×300×11×15로서 SS400 강재, 긴장을 위한 PS 강연선은 SWPC7B를 4개씩 2개소에 사용하였다. 한편, 강재, 스테드, 철근 및 콘크리트에 변형률을 측정하기 위한 변형률 게이지 33~51개를 각 실험부재에 부착하였으며, 부재의 중앙점 및 양쪽 1/2지점에 LVDT를 설치하여 처짐을 측정하였다. 그리고, 하중은 변위제어를 방식으로 부재의 중앙부에 재하하여 접합방식에 따른 부재의 거동과 파괴모드를 비교·분석하였다.

2.2 실험 결과

2.2.1 파괴모드

접합방식에 따른 실험체 파괴모드를 비교해 보면 표 1과 같다. 전단연결재가 없는 경우(P)는 접합부 C형강이 크게 변형을 일으키며 파괴하중에 도달하였으나, 나머지 경우에는 용접철근 또는 스테드가 탈락한 후 C형강이 변형을 일으켜 파괴에 도달하였으며 파괴하중도 약 14~20tonf 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한, 전단연결재로 용접철근을 사용한 경우(R)보다 스테드를 사용한 경우(S, SR)가 약 6tonf 파괴하중이 증가하는 것을 알 수 있었다. 아울러, 스테드와 용접철근을 동시에 사용한 경우(SR)는 용접철근이나 스테드의 탈락되는 하중이 약 21~23ton 증가되는 경향을 나타내었다.

2.2.2 하중-처짐 관계

그림 2는 접합방식에 따른 실험체 중앙부의 처짐을 나타낸 것이다. 전단연결재가 없는 경우(P)를 제외한 모든 경우들(P, S, SR)에서는 스테드나 용접철근에 의해 일정수준 이상의 부착이 확보되어 약 50tonf부근까지 그래프 기울기가 거의 동일하게 나타났으며, 그 이후에는 용접철근 또는 스테드의 탈락에 의해 서로 다른 거동을 나타낸 것을 볼 수 있으며 이때부터 C형강의 변형이 일어났음을 알 수 있다. 반면에 부착이 확보되지 못한 경우(P)는 강성이 크게 저하되는 것으로 나타났다.

3. 경계면 슬립을 고려한 3차원 비선형 해석

3.1 강·콘크리트 경계면에 대한 해석기법

강과 콘크리트 혼합구조체는 일반적으로 전단연결재의 유무나 종류, 또는 전단연결재의 휨 변형 등에 의해 슬립(slip)이 발생하는 부분합성 거동을 나타내며 Euro-code4에서는 이러한 부분합성 거동을 설계시 반영하도록 하고 있고, 혼합구조체의 보다 정확한 거동을 예측하기 위해서는 강·콘크리트 경계면의 슬립을 고려한 해석기법이 필요하다. 이러한 강·콘크리트 경계면을 Matsuishi 등(1985)은 스프링 요소(spring linkage element)로 모델링하여 샌드위치식 합성 실험체를 해석하였으며, Link(1992)는 전단연결재를 갖지 않는 샌드위치식 시험체에 대해 갭 요소(gap element)를 이용하여 비선형 해석을 수행하였다.

한편, 정연주 등(2002)은 샌드위치식 합성구조체에 대해 인터페이스(interface) 요소를 이용하여 강·콘크리트 경계면의 슬립을 고려한 비선형 해석을 수행하였으며, 슬립물성과 합성구조체의 거동에 대한 민감도 분석을 통해 완전합성(full-composite), 부분합성(partial-composite), 비합성(non-composite)으

표 1. 접합방식에 따른 파괴모드 비교(tonf)

ID	P	R	S	SR
파괴모드	C형강	용접철근 C형강	스테드 C형강	용접철근 스테드 C형강
균열하중	32	18.0	24.0	30
용접철근 탈락하중	-	51.9	-	73.0
스테드 탈락하중	-	-	52.4	75.4
파괴하중	60.5	74.1	80.9	80.4

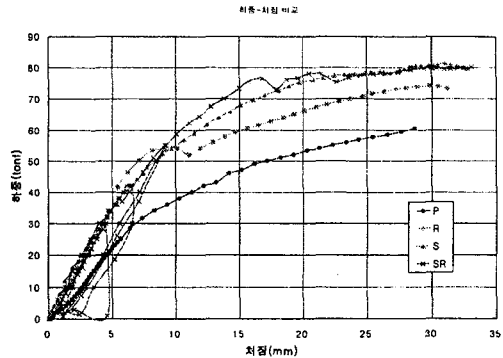


그림 2. 하중-처짐 곡선(실험값)

로 합성거동 특성에 따른 슬립물성의 임계치를 규명하였다. 본 연구에서도 이와 같은 슬립물성의 임계치를 바탕으로 강-PSC 혼합거동의 거동을 비교·분석하였다.

3.2 인터페이스 요소를 이용한 경계면 모델링과 슬립물성

본 연구에서는 그림 3과 같이 3차원 8절점 인터페이스 요소를 사용하여 강·콘크리트 경계면의 슬립을 모사하였다. 인터페이스 요소는 두께가 0이며, 경계면에서의 힘(t)-변위(u)관계를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다(Frits 등, 1998).

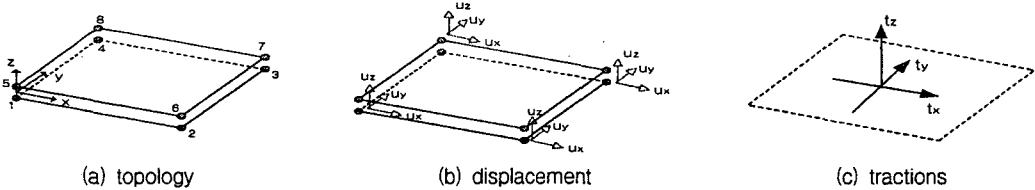


그림 3. 인터페이스요소

$$t = \begin{pmatrix} t_n \\ t_t \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad u = \begin{pmatrix} u_n \\ u_t \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, n , t 축은 각각 경계면에 대한 수직방향, 접선방향을 나타낸다. 슬립에 대한 구성방정식은 경계면에서의 힘을 전체 상대변위의 함수로 나타내는 전체변형이론(total deformation theory)을 바탕으로 하며, 3차원에서 힘 Δt 와 상대변위 Δu 사이의 선형구성관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다(Frits 등, 1998).

$$\begin{pmatrix} \Delta t_n \\ \Delta t_t \end{pmatrix} = [K_I] \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, $[K_I]$ 는 강·콘크리트 경계면 인터페이스 요소에 대한 강성행렬이고, k_n 과 k_t 는 각각 수직방향의 응력-변위 관계를 나타내는 수직강성과 접선방향의 응력과 슬립관계를 나타내는 접선강성을 의미한다. 일반적으로 이들 두 계수는 단위길이에 대한 응력(N/mm 또는 MPa/mm)으로 나타내며, 일반적으로 인터페이스 요소의 수직강성은 선형탄성으로, 접선강성은 비선형함수로 가정된다(Frits 등, 1998). 그러나, 본 구조체에서는 경계면의 상대변위가 π 형강과 강연선에 의해 구속되어 탄성한도 내에 있을 것으로 판단되어 접선강성도 수직강성과 동일하게 선형탄성으로 가정하였다. 한편, 인터페이스 요소의 수직강성 10^4 MPa/mm의 강성이 요구되어지며, 접선강성이 10^{-1} MPa/mm이하에서는 비합성 거동을, $10^{-1} \sim 10^3$ MPa/mm에서는 부분합성 거동을, 10^3 MPa/mm이상에서는 완전합성 거동을 하는 것으로 나타났다(정연주 등, 2002). 따라서, 본 연구에서도 인터페이스 요소의 수직강성은 10^4 MPa/mm으로 고정하고 접선강성에 따른 구조체의 거동 특성을 비교하였다.

3.3 해석결과

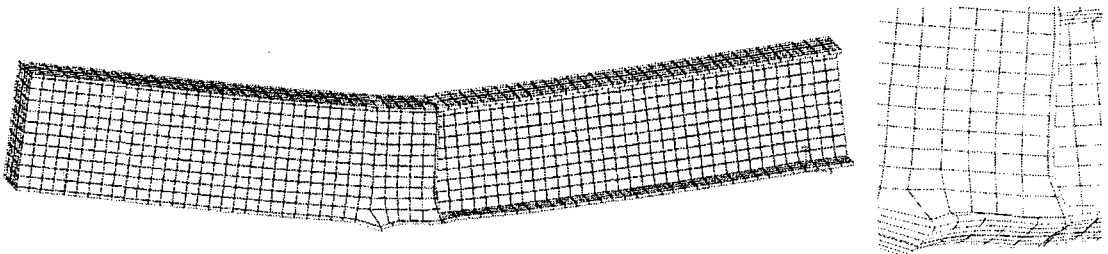


그림 3. 변형도

해석시 콘크리트와 강재는 8절점 Solid요소를, 텐던은 2절점 Bar요소를, 강재와 콘크리트의 경계면에서는 위에서 설명한 8절점 interface요소를 사용하였다. 또한 콘크리트의 최대 압축강도(f_{ck})와 인

장강도 (f_t) 및 탄성계수 (E_c)는 각각 456kgf/cm², 42.71kgf/cm², 및 2.94×10^5 kgf/cm²이고, 강재와 텐던의 항복강도 (f_y)는 각각 4,000kgf/cm², 19,000kgf/cm²이며 탄성계수 (E_s)는 2.0×10^6 kgf/cm²이다. 이때 콘크리트의 인장부와 압축부는 각각 분산균열모델(Smeared Cracking Model)과 Drucker-Prager 모델을 이용하였으며, 강재와 텐던은 von-Mises 모델과 2개의 직선으로 이상화한 응력-변형률 관계를 적용하였다.

그림 3은 해석결과 최대처짐을 일으켰을 때의 변형도를 나타낸 것으로, 특히 접합부 하단의 콘크리트와 강재 사이에서 큰 슬립이 일어나고 있음을 알 수 있다. 그림 4는 경계면을 고려한 비선형 해석을 통해서 얻어진 슬립계수에 따른 하중-처짐 곡선으로, 정연주 등(2002)에서의 해석결과와 마찬가지로 접선강성이 10^{-1} MPa/mm이하에서는 비합성 거동을, $10^{-1} \sim 10^3$ MPa/mm에서는 부분합성 거동을, 10^3 MPa/mm이상에서는 완전합성 거동을 하는 것으로 나타내었다. 한편, 그림 5는 해석결과와 실험결과를 비교한 그래프로, 전단연결재가 있는 경우들(R, S, SR)은 모두 부분합성 거동을, 전단연결재가 없는 경우(P)는 비합성 거동을 나타내었다. 다만, 전단연결재가 용접철근인 경우(R)는 용접철근의 탈락 후 비합성 거동을 나타내었는데, 이러한 거동을 보다 잘 표현하기 위해서는 접선강성을 선형탄성으로 가정하지 않고 비선형으로 고려하는 추가적인 해석이 필요할 것으로 판단된다.

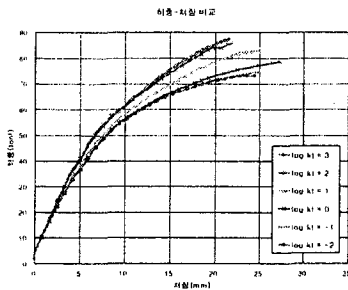


그림 4. 하중-처짐 곡선(해석값)

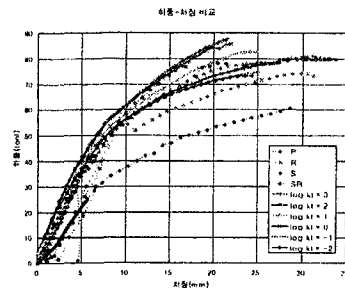


그림 5. 하중-처짐 곡선(실험값 vs. 해석값)

4. 결론

- (1) 강-PSC 혼합거더의 거동은 전단연결재(스터드, 용접철근)의 탈락 후, C형강의 변형에 의해 파괴에 도달하였다. 또한, 전단연결재(스터드, 용접철근)에 의해 약 17.5~20%의 극한강도가 증가되며, 스테드에 의한 접합방법이 용접철근에 의한 접합방법보다 극한강도가 약 7.5% 증가하였다.
- (2) 강-PSC 혼합거더의 거동은 접선강성이 10^{-1} MPa/mm이하에서는 비합성 거동을, $10^{-1} \sim 10^3$ MPa/mm에서는 부분합성 거동을, 10^3 MPa/mm이상에서는 완전합성 거동을 하는 것으로 나타내었다.
- (3) 해석결과와 실험결과를 비교해 보면, 전단연결재가 있는 경우들(R, S, SR)은 모두 부분합성 거동을, 전단연결재가 없는 경우(P)는 비합성 거동을 나타낸다는 것을 검증하였다.
- (4) 전단연결재가 용접철근인 경우(R)는 용접철근의 탈락 후 비합성 거동을 나타내었는데, 이러한 거동을 보다 잘 표현하기 위해서는 접선강성을 선형탄성으로 가정하지 않고 비선형으로 고려하는 추가적인 해석이 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 정연주, 정광희(2002), "슬립을 고려한 합성구조체의 비선형해석", 대한토목학회논문집, 제22권, 제1-A호, pp. 31-42.
2. 정연주, 정광희, 김병석(2003), "강·콘크리트 경계면의 비선형성에 따른 합성구조체의 거동(I) - 비선형 경계면 모델에 따른 매개변수 연구-", 한국강구조학회논문집, 제15권 5호(통권 66호), pp. 499-507.
3. Frits, C.W., Peter, H.F.(1998), DIANA User's Manual: Nonlinear Analysis-Release 7, TNO.
4. Veljkovic, M.(1996), "3D Nonlinear Analysis of Composite Slabs", Ph. D. Dissertation, Univ. of Lulea, Sweden