

교량용 강·콘크리트 합성 바닥판 단위모델의 부재별 거동 특성

Behavior of Members in the Unit Model of Steel-Concrete Hybrid Deck for Bridges

정 광 회* 정 연 주** 김 병 석***
Jung, Kwang Hoe Jeong, Young Ju Kim, Byung Suk

ABSTRACT

The 3D nonlinear analysis for steel-concrete hybrid deck is carried out by utilizing 2D plane interface element. The effect of the slip occurred between steel and concrete can be modeled by this element. This analysis focuses on not only global behavior of steel-concrete hybrid deck but also local behaviors of members of it such as lower steel plate, I-beam, and concrete which are varied by slip modulus. In this analysis, it was founded that the limit slip modulus could classify the states of steel-concrete hybrid deck into three parts such as full-composite, partial-composite, and non-composite, considering the behavior of lower steel plate, I-beam, and concrete at the mid span and the support as well as the yield load and ultimate load of it.

1. 서론

일반적으로 강·콘크리트 합성 바닥판은 강재와 콘크리트 사이에 전단연결재의 설치 유무, 전단연결재의 휨 변형 등에 의해 슬립(slip)이 발생하는 부분합성의 거동을 나타내므로 이러한 부분합성 거동에 대한 보다 정확한 예측을 위해서는 강·콘크리트 경계면의 슬립을 고려한 해석기법이 필수적으로 필요하다(Roberts 등, 1998). 강·콘크리트 경계면에 대한 해석방법으로 Matsuishi 등(1985)과 Link(1992)는 스프링 요소(spring linkage element)와 갭 요소(gap element)를 제안하였으며, Veljkovic(1996)은 인터페이스 요소(interface element)를 이용하여 3차원 비선형 해석을 수행하였다. 또한 정연주 등(2002)은 샌드위치형 강·콘크리트 합성 구조체에 대하여 완전합성(full-composite), 부분합성(partial-composite), 비합성(non-composite) 등 합성거동 특성에 따른 슬립물성의 임계치를 규명하였다.

본 연구에서는 기존에 국내외에서 개발된 I형강 매입형과 데크 플레이트형을 결합한 새로운 형식의 Hybrid 강·콘크리트 합성 바닥판의 기본 형상을 개발하였다. 이렇게 개발한 바닥판의 슬립물성에 따른 거동특성을 해석적으로 규명하기 위해, 휨 거동이 지배하도록 전체단면 중에서 절곡된 폭 25 cm의 단위모델을 선정하여 이에 대한 3차원 비선형 해석을 수행하였다. 본 연구의 해석결과로 슬립물성에 따른 바닥판의 전체적인 거동뿐만 아니라 부재별(하부강판, I형강, 콘크리트) 거동 특성을 규명하였고, 완전합성, 부분합성, 비합성 거동으로 구분할 수 있는 슬립물성의 임계치를 결정하였다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 연구원
** 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원
*** 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

2. 강·콘크리트 합성 바닥판의 거동

2.1 횡방향 거동

그림 1은 본 연구에서 적용한 굴곡진 형태의 합성 바닥판에서의 횡방향 단면에 작용하는 힘들의 상호관계를 나타낸 것이다. 하부강판에 작용하는 힘(V_1)은 휨 응력으로 작용하여 하부강판에 인장력을 발생시키고, 이 인장력이 강판과 콘크리트 사이에 작용하는 마찰력(μV_1)보다 더 크게 되면 슬립이 발생하게 된다. 이와 마찬가지로 상부강판에 작용하는 힘(V_3)도 휨 응력으로 작용하여 상부강판에 인장력을 발생시키고, 이 인장력이 강판과 콘크리트 사이에 작용하는 마찰력(μV_3)보다 더 크게 되면 슬립이 발생하게 된다.

또한 복부에 작용하는 힘(V_2)은 수평분력(V_{2x})과 수직분력(V_{2y})으로 나뉘어지며, 수평분력(V_{2x})은 마찰 저항력으로 작용하고 수직분력(V_{2y})은 휨 응력으로 작용하여 복부에 인장력을 발생시킨다. 이 인장력과 수평분력(V_{2x})의 합이 강판과 콘크리트 사이에 작용하는 마찰력(μV_{2y})이 더 크게 되면 슬립이 발생하게 된다. 일반적으로 슬립은 하부강판에서 가장 크게 발생하여 복부와 상부강판으로 전달되게 되는데, 이때 상부강판과 복부가 만나는 모서리 부분은 이 슬립의 흐름에 저항하는 전단연결재로서의 역할을 하게 된다.

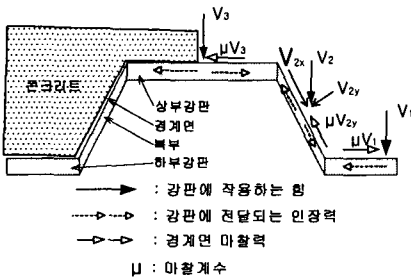


그림 1 합성 바닥판의 횡방향 단면력 분포

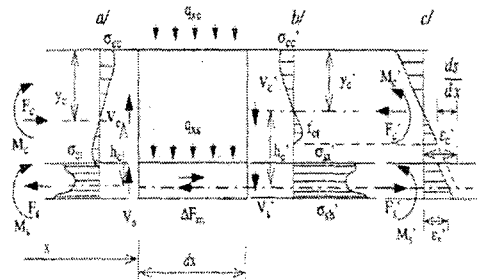


그림 2 합성 바닥판의 종방향 단면력 분포

2.2 종방향 거동

합성 바닥판의 지지점에서 x 만큼 떨어진 지점의 미소길이 dx 에 해당하는 요소 단면에서의 응력과 변형을 분포는 그림 2에 나타낸 바와 같으며, 바닥판에 수직으로 분포된 힘 q_x 는 콘크리트에 의해 q_{xc} , 강판에 의해 q_{xs} 만큼 부당된다. 합성 바닥판에 휨 변형이 발생하면 강판의 상부는 수축하고 하부는 팽창하려는 변형이 발생하며, 강판 상부의 응력 상태는 강판과 콘크리트의 합성정도에 의해 결정된다. 중간과 높은 합성력에서는 휨 변형에 의해 강판 상부의 인장응력이 다소 감소하는 정도이지만(그림 2 참조), 낮은 합성력에서는 콘크리트의 균열 발생과 확대로 강판 상부의 인장력은 크게 감소하여 압축 상태를 나타낸다. 이러한 현상으로 발생하는 경계면에 접한 콘크리트와 강판의 상대적 움직임이 슬립이고, 슬립(s)과 슬립 변형률(ds/dx)은 콘크리트와 강판의 변형률(ϵ_c, ϵ_s)로부터 각각 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \int_0^x \epsilon_c dx - \int_0^x \epsilon_s dx \quad \text{또는} \quad \frac{ds}{dx} = \epsilon_c - \epsilon_s \quad (1)$$

이때, 간단한 단면 평형조건으로부터 콘크리트에 작용하는 힘은 강판과 경계면에 작용하는 힘과 같다. 경계면에 작용하는 힘(F_m)은 지지점의 마찰에 의한 힘(μV_s)과 지지점에서 x 거리에서의 합성작용에 의한 힘(ΔF_m)으로 구분하여 식(2)와 같이 나타낼 수 있으며, 길이 방향으로 경계면 전단응력의 분

또는 슬립(s)과 강판 변형률의 분포에 의존한다.

$$F_m = \mu V_s + \int_0^x \Delta F_m dx \quad (2)$$

3. 강·콘크리트 합성 바닥판의 해석모델과 경계면 요소

3.1 강·콘크리트 합성 바닥판의 해석모델

본 연구에서는 슬립물성이 강·콘크리트 합성 바닥판의 거동 및 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 그림 3과 같이 휨 거동이 지배하도록 전체 구조물에서 한 개의 셀(셀폭 25 cm, 길이 2.0 m)을 해석모델로 선정하여 슬립을 고려한 3차원 비선형 해석을 실시하였다. 모델링은 횡단면이 사각형 단면이 아닌 굴곡진 형태의 합성 바닥판이므로 2차원 모델링으로는 구조체의 휨 거동방향인 종방향 거동의 특성(종방향 응력분포, 종방향 단부슬립 등)을 알 수가 없기 때문에 3차원으로 모델링하였다.

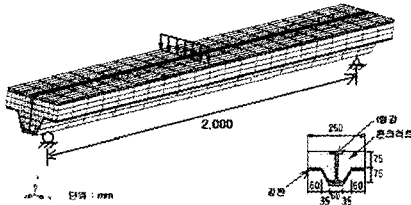


그림 3 해석모델 및 제원

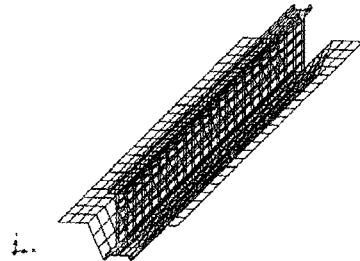
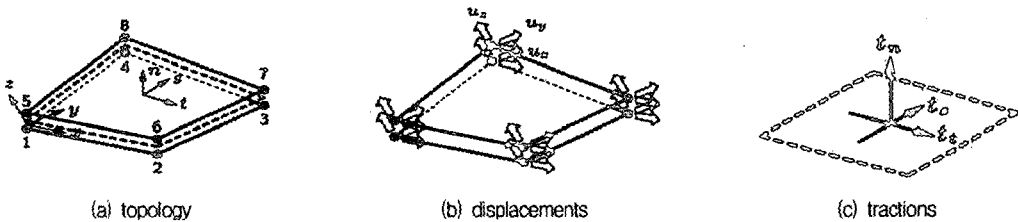


그림 4 인터페이스 요소

그림 3에서 사용한 유한요소 모델을 살펴보면 강판과 I형강, 콘크리트 모두 2×2의 가우스 적분점 (gauss integration order)을 갖는 8절점 연속체(Solid)요소를 이용하였으며, 강·콘크리트 경계면에는 그림 4와 같이 두께를 갖지 않는 4절점 평면 인터페이스 요소를 이용하여 모델링하였다. 한편, 해석에 사용된 콘크리트의 최대 압축강도(fck), 인장강도(ft) 및 탄성계수(Ec)는 각각 29.4 MPa, 2.94 MPa 및 25.5 GPa이고, 강재의 항복강도(fy), 인장강도(fu) 및 탄성계수(Es)는 각각 235.5 MPa, 353.3 MPa 및 196.3 GPa이다. 이때 콘크리트의 인장부와 압축부는 각각 분산균열모델(smearred cracking model)과 Drucker-Prager 모델을 이용하였으며, 강재는 Von-Mises 모델과 2개의 직선으로 이상화한 응력-변형률 관계를 적용하였다.

3.2 경계면 요소와 슬립물성

본 연구에서 사용한 경계면 요소는 그림 5와 같이 두께가 0인 4절점 평면 인터페이스 요소로 강·콘크리트 경계면의 슬립을 모사할 수 있다.



(a) topology
(b) displacements
(c) tractions
그림 5 인터페이스 요소

슬립에 대한 구성방정식은 경계면에서의 힘을 전체 상대변위의 함수로 나타내는 전체변형이론(total deformation theory)을 바탕으로 하며, 3차원 문제에서 힘 Δt 와 상대변위 Δu 사이의 선형구성관계는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \Delta t_n \\ \Delta t_t \\ \Delta t_s \end{pmatrix} = [K_I] \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \\ \Delta u_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & k_t & 0 \\ 0 & 0 & k_s \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \\ \Delta u_s \end{pmatrix} \quad (3)$$

여기서, $[K_I]$ 는 강-콘크리트 경계면의 인터페이스 요소에 대한 강성행렬이고, k_n 은 인터페이스 요소에 대해 경계면에 수직방향의 힘-상대변위 관계를 나타내는 수직강성을, k_t 와 k_s 는 접선방향의 힘-상대변위 관계를 나타내는 접선강성을 각각 나타낸다. 일반적으로 이들 k_t 와 k_s 계수를 슬립계수 또는 슬립물성이라 하고 단위길이에 대한 응력(N/mm³)으로 나타내며, 인터페이스 요소의 수직강성은 선형탄성으로, 접선강성은 비선형함수로 가정된다. 그러나 본 구조체에서는 접선강성도 수직강성과 동일하게 선형탄성으로 가정에 따라 인터페이스의 물성을 적용하였다. 인터페이스 요소의 수직강성은 10⁴ MPa/mm으로 고정하고, 접선강성은 10⁻⁵~10² MPa/mm으로 설정하여 각 슬립물성에 대한 슬립을 고려한 3차원 비선형 해석을 실시하였다.

4. 강·콘크리트 합성 바닥판의 거동

4.1 하중-처짐 곡선

그림 6은 슬립물성에 따른 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. 슬립물성에 관계없이 하중-처짐 곡선은 처짐이 약 7.0 mm미만인 탄성구간에서는 선형으로 증가하여 항복강도에 이르게 되며, 처짐이 약 7.0 mm이상인 비탄성구간에서는 비선형으로 완만하게 증가하다가 처짐이 약 40.0 mm되는 지점에서 극한강도에 도달하는 것을 알 수 있었다. 그림 7은 항복강도와 극한강도를 슬립계수에 따라 나타낸 것으로 슬립계수가 클수록 하중저항능력이 우수하다는 것을 알 수 있으며 반대로 작을수록 하중저항성능도 작아지는 것을 알 수 있었다. 그러나, 슬립계수가 10¹ MPa/mm이상인 경우에는 항복강도나 극한강도가 더 이상 증가하지 않으며, 슬립계수가 10⁻³ MPa/mm이하인 경우에는 항복강도나 극한강도가 더 이상 감소하지 않았다.

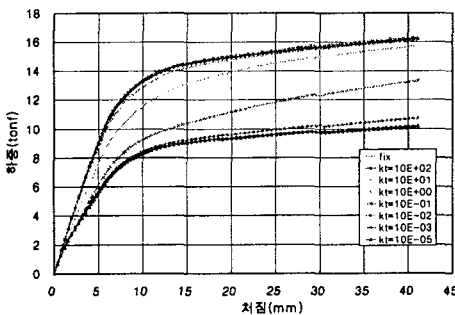


그림 6 슬립물성에 따른 하중-처짐 곡선

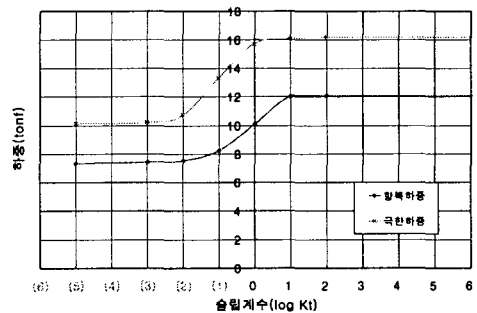


그림 7 슬립물성의 임계치

4.2 부재별 거동

4.2.1 하부강판

그림 8과 그림 9는 슬립물성에 따른 하부강판의 중앙부와 지점부에서의 응력을 나타낸 것이다. 인

터페이스가 없는 완전고정(fix)인 경우와 슬립계수가 $10^1, 10^2$ MPa/mm인 경우 하부강판 지점부에서의 응력은 약 25~60 MPa이지만, 중앙부에서의 응력은 약 320 MPa로 약 5.3~12.3 배의 차이를 나타내었다. 또한 슬립계수가 $10^{-2} \sim 10^0$ MPa/mm인 경우 하부강판 지점부에서의 응력은 약 110~135 MPa이지만, 중앙부에서의 응력은 약 320 MPa로 약 2.4~2.9 배의 차이를 나타내었다. 마지막으로 슬립계수가 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ MPa/mm인 경우 하부강판 지점부에서의 응력은 약 70~75 MPa이지만, 중앙부에서의 응력은 약 290 MPa로 약 3.9~4.1 배의 차이를 나타내었다.

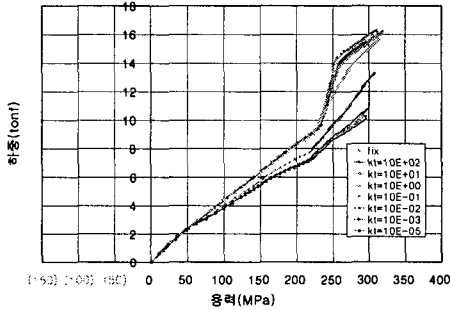


그림 8 하부강판의 중앙부 응력

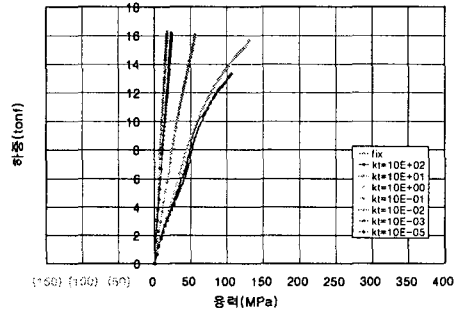


그림 9 하부강판의 지점부 응력

4.2.2 I형강

그림 10과 그림 11은 슬립물성에 따른 I형강의 중앙부와 지점부에서의 응력을 나타낸 것이다. 완전고정(fix)인 경우와 슬립계수가 $10^1, 10^2$ MPa/mm인 경우 I형강 지점부에서의 응력은 약 -25~25 MPa이지만, 중앙부에서의 응력은 약 340~360 MPa로 약 315~385 MPa의 차이를 나타내었다. 또한 슬립계수가 $10^{-2} \sim 10^0$ MPa/mm인 경우 I형강 지점부에서의 응력은 약 -115~-95 MPa이지만, 중앙부에서의 응력은 약 290~315 MPa로 약 385~430 MPa의 차이를 나타내었다. 마지막으로 슬립계수가 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ MPa/mm인 경우 I형강 지점부에서의 응력은 약 -55~-60 MPa이지만, 중앙부에서의 응력은 약 290 MPa로 약 345~350 MPa의 차이를 나타내었다.

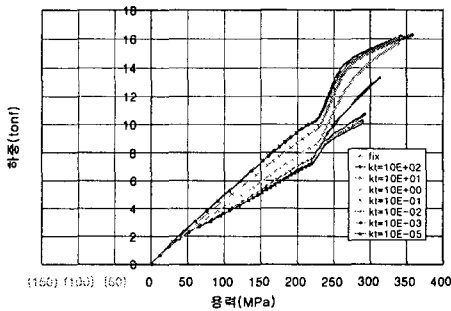


그림 10 I형강 플랜지의 중앙부 응력

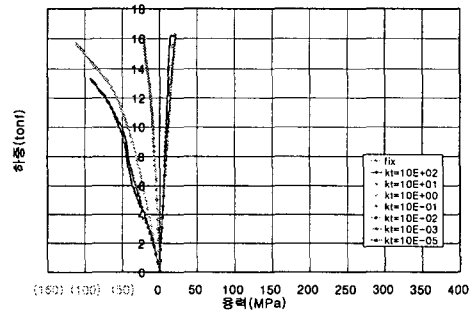


그림 11 I형강 플랜지의 지점부 응력

4.2.3 콘크리트

그림 12와 그림 13은 슬립물성에 따른 I형강 바로 위에 위치한 콘크리트 중앙부와 지점부에서의 응력을 나타낸 것이다. 그림 12에서 I형강 바로 위에 위치한 콘크리트 중앙부에서의 응력은 슬립물성에 관계없이 모두 약 1.7~1.9 tonf (약 2.5~2.8 MPa)에서 균열이 발생하여 그 후에는 콘크리트의 응력이

급격히 감소하는 경향으로 나타났다. 이때 완전고정(fix)인 경우와 슬립계수가 10^1 , 10^2 MPa/mm인 경우에는 균열이후 콘크리트의 응력이 서서히 감소하여 압축응력을 나타내는 반면에, $10^{-5} \sim 10^0$ MPa/mm인 경우에는 균열이후 콘크리트 응력이 급격히 감소하여 0에 도달한 이후에 다시 서서히 증가하는 경향으로 나타났다. 그러나, 그림 13에서 I형강 바로 위에 위치한 콘크리트 지점부에서의 응력은 슬립물성에 따라 큰 차이를 나타내었다.

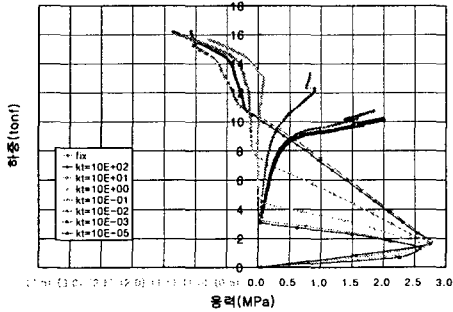


그림 22 콘크리트의 중앙부 응력

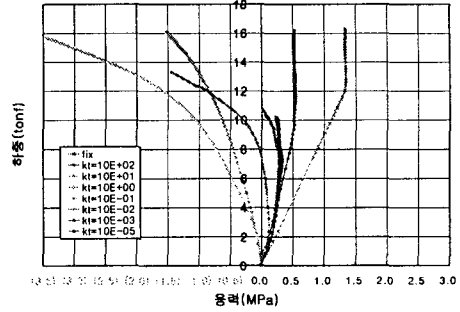


그림 23 콘크리트의 지점부 응력

5. 해석결과 분석 및 결론

1) 하중-처짐 곡선에 의한 항복하중과 극한하중 뿐만 아니라 하부강판, I형강, 콘크리트의 중앙부와 지점부에서의 응력을 종합적으로 검토해 보면, 지점에서 반력에 의한 마찰력의 증가로 인해 슬립계수 10^1 MPa/mm인 경우에는 지점부의 응력이 완전고정(fix)인 경우와는 다른 거동을 나타냈다. 반면에 슬립계수가 10^2 MPa/mm인 경우에는 지점부의 응력을 포함한 모든 부분에서 완전고정(fix)인 경우와 거의 동일한 거동을 나타내었다. 따라서, 합성 바닥판의 완전합성, 부분합성, 비합성을 구분하는 슬립계수의 임계치를 각각 10^2 MPa/mm과 10^{-3} MPa/mm로 구분하는 것이 바람직하다고 판단된다.

2) 하부강판과 I형강에서 지점부와 중앙부에서의 응력분포를 분석해 보면 지점부에서는 부분합성인 경우가 비합성인 경우와 거의 같은 거동을 나타내고, 중앙부에서는 부분합성 경우가 완전합성인 경우에 가까운 거동을 나타냈다. 이것은 중앙부에서는 하부강판과 I형강이 모두 중립축 아래에 위치하여 인장응력만을 받게 되지만 지점부에서는 반력과 마찰력에 의해서 중립축의 위치가 내려가서 I형강에 위치하게 되기 때문인 것으로 생각된다.

3) 콘크리트의 균열하중은 슬립물성에 관계없이 약 1.7~1.9 ton이며 콘크리트의 응력은 균열이후 슬립계수가 작을수록 콘크리트와 I형강 사이에서 슬립이 크게 일어나서 하중이 제대로 전달되지 않기 때문에 급격히 증가하다가 강·콘크리트 합성 바닥판의 전체거동이 비선형 단계에 접어들면서 마찰력 등에 의한 응력의 재분배로 인해 콘크리트의 응력이 0에서 다시 증가하는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 정연주, 정광희(2002), "슬립을 고려한 합성구조체의 비선형해석", 대한토목학회논문집, 제22권, 제 1-A호, pp. 31-42.
2. Roberts, T.M., Edwards, D.N., Narayanan, R.(1996), "Testing and Analysis of Steel-Concrete-Steel Sandwich Beams", J. Construct. Steel Res., Vol.38, No.3, pp.257-279.
3. Veljkovic, M.(1996), "Behavior and Resistance of Composite Slabs", thesis of Ph.D., Univ. of Lulea, Sweden, pp. 1-36.