

교량용 강·콘크리트 합성 바닥판의 단위모델에 대한 비선형 해석

A Nonlinear Analysis on the Unit Model of Steel-Concrete Hybrid Deck for Bridges

정 광 회* 정 연 주** 구 현 본* 김 정 호** 김 병 석***
Jung, Kwang-Hoe Jeong, Young-Ju Koo, Hyun-Bon Kim, Jung-Ho Kim, Byung-Suk

ABSTRACT

This paper presents a 3D nonlinear analysis with slip in steel-concrete hybrid deck. In this study, it was founded that the limit slip modulus could classify the states of steel-concrete hybrid deck into three parts as full-composite, partial-composite, and non-composite, considering the longitudinal behavior and end-slip as well as the yield load and ultimate load of it. Also, it proved that the stress of lower steel plate at the support was increased, because of frictional forces by reaction forces in the steel-concrete hybrid deck. The end-slip did not occur near the full-composite state, but it was largely increased as the slip modulus decreased. On the basis of the EC 4, the state of steel-concrete hybrid deck classified into brittle behavior and ductile one using the end-slip of it

1. 서 론

합성 구조체의 하나인 강·콘크리트 합성 바닥판은 강재와 콘크리트사이의 전단연결재의 설치 유무, 전단 연결재의 휨 변형 등에 의해 슬립(slip)이 발생하는 부분합성의 거동을 나타내므로 이러한 부분합성 거동에 대한 보다 정확한 예측을 위해서는 강·콘크리트 경계면의 슬립을 고려한 해석방법이 필수적으로 필요하다.⁽⁶⁾ 그러나 슬립에 대한 해석방법과 적합한 슬립물성의 결정은 어려운 사항이어서 슬립을 고려한 비선형 해석을 통하여 부분합성 구조체의 거동 및 성능을 정확히 분석하기에 많은 어려움이 따르며, 기존의 연구들은 전단부착강도 실험(pull-out test)을 통해 경계면의 형상에 따른 하중-슬립 거동을 통해 슬립물성을 규명 하는데 주력하였다.⁽¹⁾

한편, 강·콘크리트 경계면에 대한 해석방법으로 Matsuishi 등과 Link는 스프링 요소(spring linkage element)와 갭 요소(gap element)를 제안하였으며, Veljkovic은 인터페이스 요소(interface element)를 이용하여 3차원 비선형 해석을 수행하였다. 또한 정연주 등은 다양한 슬립물성에 대한 비선형 해석 결과를 바탕으로 슬립물성이 샌드위치형 강·콘크리트 합성 구조체의 거동과 성능에 미치는 영향을 분석하여 완전합성(full-composite), 부분합성(partial-composite), 비합성(non-composite) 등 합성거동 특성에 따른 슬립물성의 입계치를 규명하였다.

본 연구에서는 기존에 국내외에서 개발된 강·콘크리트 합성 바닥판의 특성을 종합적으로 비교·분석하여 I형강 매입형과 데크 플레이트형을 결합한 새로운 형식의 Hybrid 강·콘크리트 합성 바닥판의 기본 형상을

* 정희원, 한국건설기술연구원 연구원

** 정희원, 한국건설기술연구원 선임연구원

*** 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원

개발하였다. 이렇게 개발된 Hybrid 강·콘크리트 합성 바닥판의 슬립물성에 따른 거동특성을 해석적으로 규명하기 위해, 휨 거동이 지배하도록 전체단면 중에서 절곡된 폭 25cm의 단위모델을 선정하여 이에 대한 3차원 비선형 해석을 수행하였다. 해석결과로 선정된 바닥판 모델에 대하여 완전합성, 부분합성, 비합성 등 합성거동 특성에 따른 슬립물성의 임계치를 규명하였으며, Eurocode 4(EC 4)에서 규정에 따라 단부에서 발생한 슬립량을 통해서 구조체의 거동을 취성거동(brittle behavior)과 연성거동(ductile behavior)으로 구분할 수 있는 슬립물성의 한계점을 밝혀냈다.

2. 강·콘크리트 합성 바닥판의 거동

2.1 강·콘크리트 합성 바닥판의 거동 특성

일반적으로 강·콘크리트 합성 바닥판은 강판의 형태가 다양하고 하중전달 메카니즘이 다르기 때문에 일률적으로 똑같은 해석 및 설계방법을 적용할 수 없다. 따라서, 강·콘크리트 합성 바닥판의 거동 특성을 규명하기 위한 실험적 연구가 반드시 수행되어야 한다. ASCE, Eurocode 4(EC 4)등에서는 강·콘크리트 합성 바닥판에 대한 실물(full-scale) 휨 실험을 통해서 하중전달 메카니즘을 규명하여 그 결과에 따라 설계하도록 하고 있으며, 강·콘크리트 합성 바닥판의 거동을 크게 취성거동과 연성거동의 두 가지 거동으로 구분하고 있다. 강·콘크리트 합성 바닥판에 재하할 수 있는 최대하중 즉, 극한하중이 양 단부에서 0.5mm의 슬립을 일으키는 하중보다 10%이상 더 크다면 연성거동으로 규정하고, 이외의 모든 경우에는 취성거동으로 규정한다. 취성거동을 나타내는 강·콘크리트 합성 바닥판의 설계는 m-k 방법으로 불려지는 실물 휨 실험 바탕으로 경험적 방법에 의해 극한한계상태로 설계하는 방법만이 사용되는 반면에, 연성거동을 나타내는 강·콘크리트 합성 바닥판의 설계에는 EC 4의 부분합성 강도(partial connection strength) 설계법이 사용된다.⁽⁸⁾

인발시험(pull-out test)과 같은 모형(small-scale)실험 보다 실물 휨 실험이 더 정확한 거동을 나타낼 수 있는 것은 지지점에서의 마찰, 곡률, 콘크리트 균열 등과 같은 현상이 현실적으로 실물 휨 실험을 통해서만 규명될 수 있기 때문이다. 그러나 모든 강·콘크리트 합성 바닥판에 대한 실물 휨 실험을 수행할 수 없으므로 본 연구와 같이 각종 형태의 모형 실험을 통해서 강판과 콘크리트 경계면 사이의 슬립물성을 파악하여 FE모델을 통한 수치해석의 방법으로 구조물의 거동을 규명하려는 연구도 필요하다.

2.2 강·콘크리트 합성 바닥판의 하중전달 메카니즘

강·콘크리트 합성 바닥판에 적합한 해석모델의 구성과 해석결과의 분석 및 검증을 위해서는 먼저 필수적으로 단면을 구성하는 각 요소들에 대한 하중전달 메카니즘이 규명되어야 한다. 그림 1은 본 연구에서 적용한 굴곡진 형태의 합성 바닥판에서의 횡방향 단면에 작용하는 힘들의 상호관계를 나타낸 것이며, 크게 나누어 가해진 하중에 의해서 강판에 작용하는 힘들(V_1 , V_2 , V_3), 그리고 강판과 콘크리트의 경계면에 발생하는 마찰력들(μV_1 , μV_2 , μV_3)로 구분할 수 있다.

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})보다 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 2는 강·콘크리트 합성 바닥판의 지점부 거동을 나타낸 것이다. 중앙부에서 종방향으로 전달되는 인장응력은 중앙부에서 가장 크게 나타나며 지점부로 갈수록 작아지게 되지만, 지점부 부근에서는 가해진 하중(V)에 대한 지점부의 마찰력(μV)인하여 인장응력이 증가하게 되는 하중전달 메카니즘이 존재한다.⁽⁸⁾

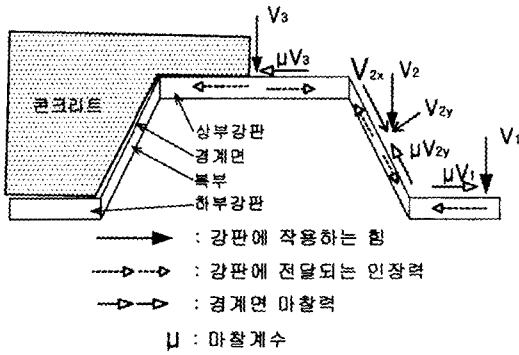


그림 1 하중전달 메카니즘

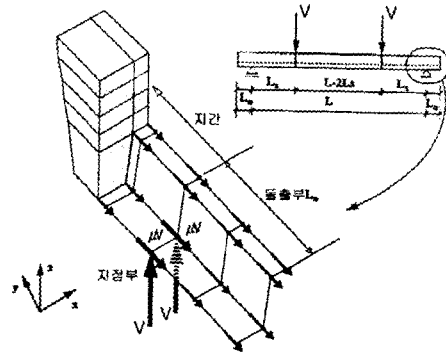


그림 2 지점부 하중전달 메카니즘

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 단위모델(셀: 폭 25 cm, 길이 2.0 m)을 강·콘크리트 합성 바닥판의 일부를 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.

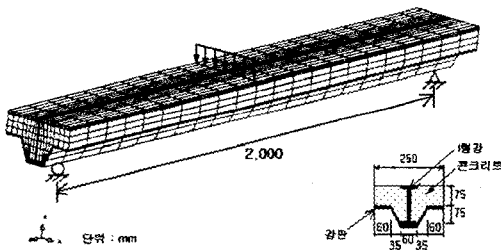


그림 3 해석모델 및 제원

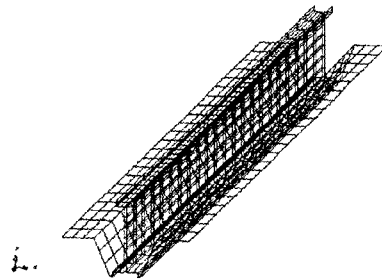


그림 4 인터페이스 요소

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(f_{ck}), 인장강도(f_t) 및 탄성계수(E_c)는 각각 29.4 MPa, 2.94 MPa 및 25.5 GPa이고, 강재의 항복강도(f_y), 인장강도(f_u) 및 탄성계수(E_s)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, 강

재는 von-Mises 모델과 2개의 직선으로 이상화한 응력-변형률 관계를 적용하였다.^{(2),(3)}

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 있으며, 경계면에서의 힘(t)-변위(u) 관계를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

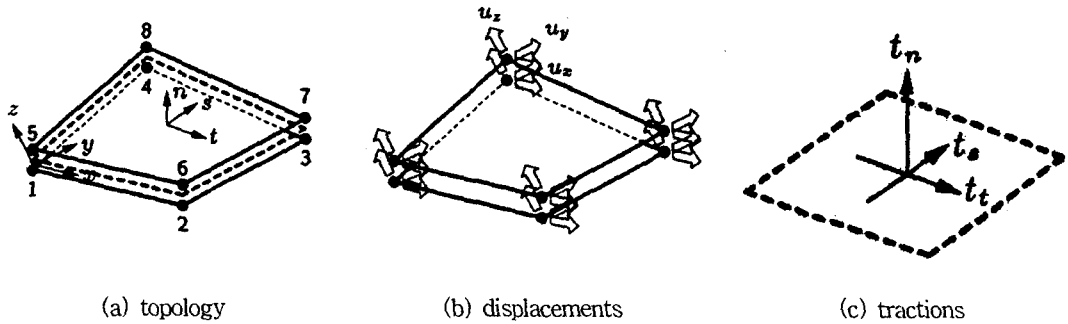


그림 5 인터페이스 요소

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

여기서, n축은 경계면에 대한 수직방향, t축과 s축은 접선방향을 나타낸다. 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 (2)와 같이 나타낼 수 있다.^{(2),(3)}

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

여기서, $[K_I]$ 는 강-콘크리트 경계면의 인터페이스 요소에 대한 강성행렬이고, k_n 는 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 단위 길이에 대한 응력(N/mm³)으로 나타내며, 인터페이스 요소의 수직강성은 선형탄성으로, 접선강성은 비선형항수로 가정된다.^{(2),(3)} 그러나 본 구조체에서는 접선강성도 수직강성과 동일하게 선형-탄성으로 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.

또한, 슬립계수는 경계면에서의 콘크리트 강도와 강재의 형상 및 재료적 성질에 따라 다른 특성을 나타낸다.⁽⁴⁾ 콘크리트 충전 강관(CFT, concrete filled tube), 콘크리트/원형철근 등과 같이 콘크리트와 강재사이에 접촉제와 요철을 적용하지 않고 평면(smooth)을 이루는 경우의 슬립계수는 약 10~50 MPa/mm이며, 콘크리트/이형철근 등과 같이 경계면에 요철(ribbed)을 적용한 경우는 100~500 MPa/mm, 주로 손상된 콘크리트면의 보강에 이용되는 탄소섬유쉬트와 같이 접촉제(에폭시)를 적용한 경우는 1000~5000 MPa/mm의 슬립계수를 나타내었다.⁽¹⁾

4. 슬립을 고려한 강·콘크리트 합성 바닥판의 3차원 비선형 해석

4.1 하중-처짐 곡선

그림 10는 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. 이때 슬립물성에 따라 항복강도는 약 7.0~12.0 tonf을 나타내었으며 극한강도는 약 10.0~16.0 tonf을 나타내었다. 그림 11는 항복강도와 극한 강도를 슬립계수에 따라 나타낸 것으로 슬립계수가 클수록 하중저항성능이 우수하다는 것을 알 수 있으며 반대로 작을수록 하중저항성능도 작아지는 것을 알 수 있었다. 그러나, 슬립계수가 10^1 MPa/mm이상인 경우에는 항복강도나 극한강도가 더 이상 증가하지 않으며, 슬립계수가 10^{-3} MPa/mm이하인 경우에는 항복강도나 극한강도가 더 이상 감소하지 않았다.

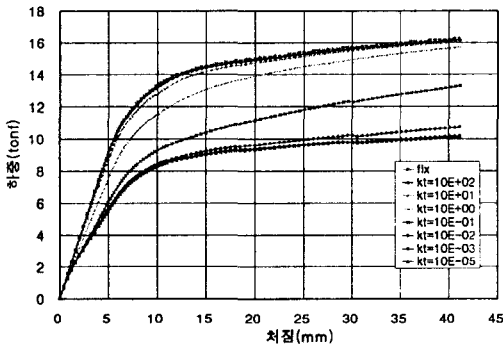


그림 10 슬립물성에 따른 하중-처짐 곡선

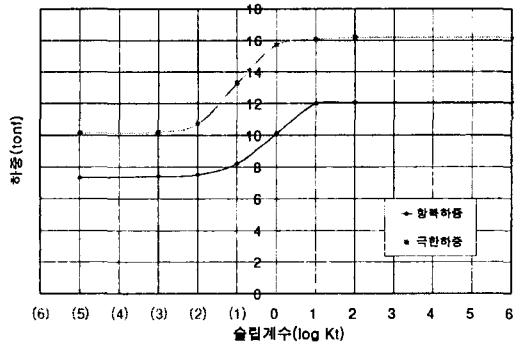


그림 11 슬립물성의 임계치

4.2 증방향 거동

강·콘크리트 합성 바닥판의 증방향 거동 특성을 보다 정확하게 규명하기 위하여 슬립계수에 관계없이 모두 선형탄성 구간에 있는 4 tonf 재하시와 선형탄성 구간을 지나서 비선형 구간으로 접어든 구간에 있는 8 tonf 재하시의 위치별 처짐과 하부강판의 응력을 각각 비교해 보았다. 그림 12와 그림 14는 각각 4 tonf 재하시와 8 tonf재하시의 위치별 처짐을 나타낸 것이고, 그림 13과 그림 15는 각각 4 tonf 재하시와 8 tonf재하시의 위치별 하부강판의 응력을 나타낸 것이다.

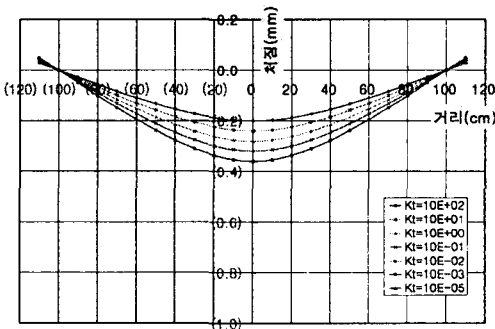


그림 12 위치별 처짐(4tonf)

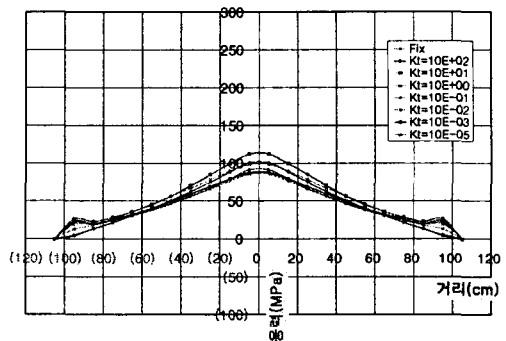


그림 13 위치별 하부강판 응력(4tonf)

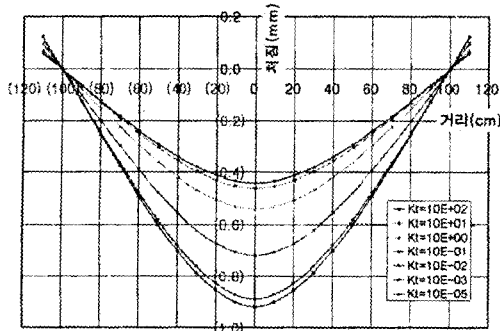


그림 14 위치별 처짐(8tonf)

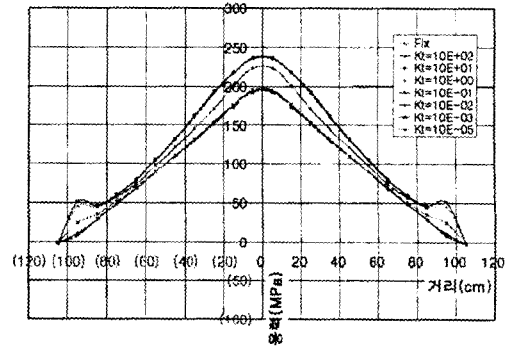


그림 15 위치별 하부강관 응력(8tonf)

그림 12와 그림 14의 위치별 처짐은 모두 중앙부에서 가장 크고 지점부로 갈수록 작아지는 전형적인 휨부재의 하중-처짐 곡선으로 슬립계수에 따라 각각 약 0.2~0.35mm, 약 0.45~0.9 mm의 처짐의 나타내어 4 tonf 재하시보다 8 tonf재하시에 약 0.25~0.45 mm 증가한 것을 알 수 있었다. 또한, 그림 13과 그림 15의 위치별 하부강관 응력을 보면 역시 중앙부에서 가장 큰 응력을 나타내고 있으며 슬립계수에 따라 각각 약 80~120 MPa, 약 195~240 MPa의 응력 분포를 나타내어 4 tonf 재하시보다 8 tonf재하시에 약 115~120 MPa 증가한 것을 알 수 있었다. 그러나 하부강관 지점부 즉, 중앙부에서 양방향으로 95cm지점의 응력은 오히려 85cm지점의 응력보다 크게 나타났으며, 이러한 현상은 슬립계수가 작을수록 더 뚜렷하게 나타났다.

4.3 단부 슬립

그림 16은 강·콘크리트 합성 바닥판의 3차원 비선형 해석을 통해서 얻어진 단부 슬립(end-slip)의 형상을 보여주고 있으며, 그림 17은 단부에서 강관과 콘크리트 사이의 상대변위 즉, 단부 슬립을 슬립물성에 따라 정리하여 나타낸 그래프이다. 그림 17에서 완전합성인 경우에는 단부 슬립이 발생하지 않는 것을 알 수 있으며, 비합성에 가까운 경우일수록 단부 슬립이 기하 급수적으로 크게 증가하는 것으로 나타났다.

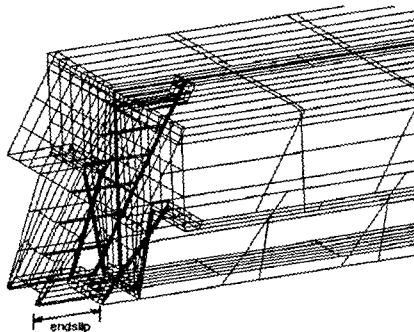


그림 16 단부 슬립(slip) 형상

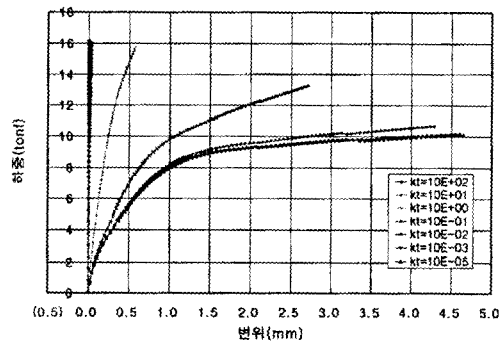


그림 17 슬립물성에 따른 단부 슬립(slip)

4.4 해석결과 분석

하중-처짐 곡선에 의한 항복하중과 극한하중 뿐만 아니라 종방향 거동과 단부 슬립 등을 종합적으로 비교·검토해 보면 강·콘크리트 합성 바닥판이 슬립계수가 10^2 MPa/mm이상인 경우에는 완전합성, 슬립계수가 10^2 MPa/mm이하이고 10^{-3} MPa/mm이상인 경우에는 부분합성, 그리고 슬립계수가 10^{-3} MPa/mm이하인

경우에는 비합성 거동을 나타내는 것으로 판단된다.

하부강판 지점부 즉, 중앙부에서 양방향으로 95cm지점의 응력은 오히려 85cm지점의 응력보다 크게 나타났으며, 이러한 현상은 슬립계수가 작을수록 더욱 뚜렷이 나타났다. 이와 같은 현상은 그림 3을 통해 설명한 바와 같이 지점 반력에 의한 마찰력으로 지점부에 응력이 집중되기 때문이며 슬립계수가 작을수록 하부강판의 응력이 콘크리트에 잘 전달되지 않아서 더욱 응력이 증가하였다.

2.1절에서 설명한 바와 같이 EC 4에서는 휨 실험에서 바닥판에 재하되는 최대하중이 양 단부에서 0.5mm의 슬립을 일으키는 하중보다 10%이상 더 크다면 연성거동으로 규정하고, 이외의 모든 경우에는 취성거동으로 규정한다. 이 규정에 따르면 슬립계수가 $10^0 \sim 10^2$ MPa/mm인 경우에는 취성거동을 나타내게 되고, 슬립계수가 $10^{-1} \sim 10^{-5}$ MPa/mm인 경우에는 연성거동을 나타내게 된다는 것을 쉽게 알 수 있다. 즉, 슬립계수가 클수록 취성거동에 가까워지며 한계 슬립계수는 10^0 MPa/mm이다.

5. 결 론

강·콘크리트 합성 바닥판에 대한 슬립을 고려한 3차원 비선형 해석을 통해서 얻어진 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 강·콘크리트 합성 바닥판에 대하여 완전합성(full-composite), 부분합성(partial-composite), 비합성(non-composite)을 구분하는 슬립계수의 임계치를 각각 10^2 MPa/mm과 10^{-3} MPa/mm으로 판단된다.
- 2) 강·콘크리트 합성 바닥판에서 하부강판 응력은 지점 반력에 의한 마찰력으로 인해 증가한다는 것을 해석적으로 규명하였다.
- 3) EC 4에 따라 강·콘크리트 합성 바닥판의 단부 슬립량으로, 취성거동과 연성거동을 구분할 수 있는 한계 슬립계수는 100 MPa/mm임을 알아내었다.

참고문헌

1. 정연주, 정광희(2002), "슬립을 고려한 합성구조체의 비선형해석", 대한토목학회논문집, 제22권, 제1-A호, pp. 31-42.
2. Chen, W.F., Dan, D.J.(1988), Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag.
3. Frits, C.W., Peter, H.F.(1998), DIANA User's Manual: Nonlinear Analysis-Release 7, TNO.
4. Hajjar, J.F., Schiller, P.H., Molodan, A.(1998), "A Distributed Plasticity Model for Concrete-filled Steel Tube Beam-columns with Interlayer Slip", Engng. Struct., Vol.20, No.8, pp.663-676.
5. Link, R.A.(1992) "Finite Element Analysis of Composite Ice Resisting Walls", thesis of Ph.D., Univ. of Alberta, Canada.15. Link, R.A., Elwi, A.E.(1995), "Composite Concrete-Steel Plate Walls: Analysis and Behavior", J. of Struct. Engrg., Vol.121, No.2, pp.260-271.
6. Matsuishi, M., Hattori, Y., Iwata, S., Ishihama, T., Yamamoto, T., Kitazono, M.(1985), "Ultimate Strength of Composite Steel-Concrete Structures of Sandwich System", J. SNA., Japan, Vol.157, pp.233-240.
7. 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.
8. Veljkovic, M.(1996), "Behavior and Resistance of Composite Slabs", thesis of Ph.D., Univ. of Lulea, Sweden, pp. 1-36.