

강·콘크리트 경계면의 비선형성에 따른 합성구조체 거동(II)

-강·콘크리트 경계면의 거동 특성-

Behavior of Composite Structure by Nonlinearity of Steel-concrete Interface(II)

-Behavior of Steel-Concrete Interface-

정 연 주¹⁾ · 정 광 회²⁾ · 김 병 석³⁾
Jeong, Youn Ju · Jung, Kwang Hoe · Kim, Byung Suk

요 약 : 본 논문에서는 강·콘크리트 경계면에 대한 비선형 해석 모델을 바탕으로 합성 구조체에 대한 비선형 구조해석을 실시하여 강·콘크리트 경계면을 모사한 인터페이스 요소에 발생하는 접선응력과 상대슬립 분포 등 합성 구조체의 경계면 거동 특성을 해석적으로 규명하였다. 연구결과 본 논문의 해석 모델인 합성 바닥판에서는 T형강-콘크리트 경계면 보다는 하부강판-콘크리트 경계면에서 접선응력과 슬립의 증가가 빠르게 나타났으며, 하부강판-콘크리트 경계면에서도 인장부 보다는 중립부 경계면에서 접선응력의 증가가 빠르게 진행되었다. 횡방향으로는 하중재하 위치에서 외부 측면으로 갈수록 접선응력이 완화되는 현상을 나타내었으며, 종방향으로는 중앙부에서 최소, 지지점에서 0.6~0.7L 지점에서 최대를 나타냈으며 이후 지지점으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었고, 하중이 증가하면서 경계면의 파괴가 최고 접선응력 지점에서 전체 영역으로 점차 확대되는 경향을 나타내었다. 이상의 연구결과는 합성 구조체의 경계면 거동 특성과 하중전달 메커니즘을 이해하고 합리적인 전단연결재 설계를 위한 바탕을 제공할 것으로 기대된다.

ABSTRACT : In this study, we carried out nonlinear analysis according to various interface nonlinear models by interaction magnitude, and analyzed interface behavior such as distribution of tangential traction and relative slip in steel-concrete composite structure. As a result of this study, tangential traction and relative slip of interface is rapidly increased at the steel plate-concrete interface, especially at the neutral region, rather than tensile, as opposed to the T beam-concrete interface. In transverse direction, it has gradually reduced to go outside from loading position. In longitudinal direction, it was minimum at the central region near the loading point, maximum at 0.6-0.7L from support and gradually reduced as it nears support. Moreover, as the load is increased, the failure of interface gradually expands from the maximum tangential traction position to the entire region. It is expected to provide fundamentality for interface behavior and load-carrying mechanism, and for the design of bending and shear connection of steel-concrete composite structure.

핵심용어 : 경계면 거동, 비선형 모델, 접선응력, 상대슬립, 전단연결재

KEYWORDS : Interface behavior, Nonlinear model, Tangential traction, Relative slip, Shear connector

1. 서론

강·콘크리트 합성 구조체에서 강재와 콘크리트는 적절한 전단연결재에 의해 합성되고, 전단연결재의 설치 방법은 강재와 콘크리트의 경계면 특성을 변화시키고 이는 두 재료 사이의 하중전달 메커니즘을 변화시켜 합성 구조체의 구조성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 전단연결재의 설계는 합성 구조체에서 매우 중요한 의미를 지닌다고 할 수 있다. 즉, 합

성 구조체의 거동 특성은 경계면 특성에 크게 의존적이어서 합성 구조체의 합리적 설계를 위해서는 경계면의 거동과 이것이 합성 구조체의 거동에 미치는 영향이 규명되어야 한다.

그러나 합성 구조체의 경계면에 작용하는 응력분포(특히 휨 거동시 경계면의 특성이 합성 구조체의 거동에 미치는 영향)를 해석적으로 규명하기에 기술적으로 어려움이 존재했기 때문에, 합성 구조체와 전단연결재의 설계는 대부분 실험에 의한 경험적인 방법에 의존하여 왔다. 그러나 실험을 바탕으로 하는

1) 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원
(Tel: 031-910-0136, Fax: 031-910-9121, E-mail: yjjeong@kict.re.kr)
2) 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 연구원(jkh@kict.re.kr)
3) 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원(bskim@kict.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 4월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

경험적 방법에 의한 설계는 다양한 사용환경에 대한 실험을 필요로 하므로 이에 따라 수많은 실험이 수행되어야 하는 불편함이 있다(Veljkoic, 1996).

또한 합성 구조체의 전단연결재 설계를 위해서는 경계면 조건에 따라 경계면에 발생하는 접선응력과 상대슬립의 분포가 규명되어야 한다. 그러나 전단부착 실험을 통한 경계면 거동 모델만을 이용한 해석적 방법으로 부분합성 거동 특성을 나타내는 합성 바닥판의 휨 설계방법에 대해 연구한 Veljkoic(1996)의 연구도 합성 구조체의 휨 구조성능에 초점을 맞추었고 경계면에 발생하는 접선응력과 상대슬립 분포 등과 같은 전단연결재 설계를 위한 바탕은 아직까지 그 해석적 접근이 이루어지고 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 Chiew 등(1999)이 제안한 강·콘크리트 경계면에 대한 비선형 해석 모델을 바탕으로 합성 구조체에 대한 비선형 구조해석을 실시하여 강·콘크리트 경계면을 모사한 인터페이스 요소에 발생하는 접선응력과 상대슬립 분포를 분석하여, 합성 구조체의 경계면 거동 특성을 규명하고 합리적인 전단연결재 설계를 위한 바탕을 마련하고자 한다.

2. 경계면의 거동

강·콘크리트 합성 구조체에 적합한 해석모델의 구성과 해석 결과 분석 및 검증을 위해서는 먼저 필수적으로 단면을 구성하는 각 요소들의 힘-응력 관계가 규명되어야 한다. 합성 구조체 단면의 응력과 변형률 상태는 균열과 같은 콘크리트 상태에 의해 지배되고 이 조건은 최대하중 상태에서도 유효하다. 이때, 합성 구조체의 경계면 특성에 대한 탄성적 접근은 콘크리트가 최대 인장응력에 도달하여 균열이 발생하는 시점까지만 유용하므로, 전체 거동특성을 규명하기 위해서는 콘크리트 균열 등의 재료적 비선형성을 고려한 비선형적 해석 접근이 필요하다(Veljkoic, 1996).

합성 구조체의 지지점에서 x 만큼 떨어진 지점의 미소길이 dx 에 해당하는 요소 단면에서의 응력과 변형률 분포는 그림 1에 나타난 바와 같으며, 바닥판에 수직으로 분포된 힘 q_x 는 콘크리트에 의해 q_{xc} , 강판에 의해 q_{xs} 만큼 부담된다. 이때 응력 분포는 인장부의 비선형 거동과 고정되지 않은 중립축 위치에 의해 결정된다. 합성 구조체에 휨 변형이 발생하면 강판의 상부는 수축하고 하부는 팽창하려는 변형이 발생하며, 강판 상부의 응력 상태는 강판과 콘크리트의 합성정도에 의해 결정된다. 중간 이상의 합성력에서는 휨 변형에 의해 강판 상부의 인장응력이 다소 감소하는 정도이지만(그림 1 참조), 낮은 합성력에서는 콘크리트의 균열 발생과 확대로 강판 상부의 인장력은 크게 감소하여 압축상태를 나타낸다. 이러한 현상으로 발생하는 경계면에 접한 콘크리트와 강판의 상대적 움직임이 슬립(s)이고, 슬립과 슬립 변형률(ds/dx)은 콘크리트와 강판의 변형률(ϵ_c, ϵ_s)로 부터 다음과 같이 나타낼 수 있다(Veljkoic, 1996).

$$s = \int_0^x \epsilon_c dx - \int_0^x \epsilon_s dx$$

$$\frac{ds}{dx} = \epsilon_c - \epsilon_s$$

이때 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 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 길이 방향으로 경계면 접선응력의 분포는 슬립(s)과 강판 변형률의 분포에 의존한다.

$$F_m = \mu V_s + \int_0^x \Delta F_m dx$$

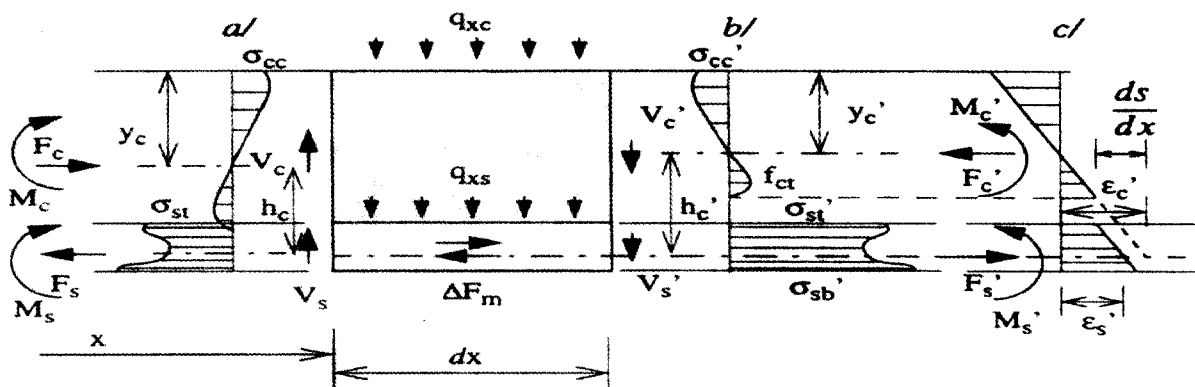


그림 1. 합성 구조체의 종방향 단면력 분포

3. 수치해석 및 분석

3.1 인터페이스 요소

본 연구에서는 강판-콘크리트 합성바닥판에 대해 강판-콘크리트 경계면의 비선형 거동을 고려한 비선형 구조해석을 실시하였다. 본 해석모델에서 강-콘크리트 경계면의 구성은 그림 2에 나타난 바와 같으며 크게 하부강판-콘크리트 경계면과 T형강-콘크리트 경계면으로 구분된다. 이들 경계면은 스티드의 유무에 따라 접합강성 차이가 있을 것으로 생각되었으나 본 연구에서는 이를 고려하지 않고 인터페이스 요소를 이용하여 동일한 경계면 특성으로 모델링 하였으며, 합성작용의 저하, 미세균열, 슬립, 분리 등의 강판-콘크리트 경계면의 비선형 거동 특성은 인터페이스 요소의 물성으로 함축하였다.

경계면의 비선형 거동을 나타내는 인터페이스 요소의 물성은 Chiew 등(1999)의 해석모델에 따른 비선형 모델(nonlinear3, $k_t^0=9.0\text{MPa/mm}$, $t_t^m=1.15\text{MPa}$, $u_t^m=0.4\text{mm}$)을 적용하였으며, 해석결과에 따라 단면높이, 횡방향, 종방향에 따른 경계면의 접선응력과 강판-콘크리트의 상대 슬립 분포 등의 경계면 거동 특성을 분석하였다.

강-콘크리트 경계면의 비선형 거동을 고려한 해석 결과의 하중-처짐 곡선은 그림 3과 같으며, 경계면의 거동 특성은 A(탄성, 23.2tonf), B(탄성⇒항복, 46.3tonf), C(항복, 75.4tonf), D(극한, 95.3tonf)의 하중단계에 대해 분석하였다. 이때 탄성상태의 A 지점은 콘크리트 인장부의 균열 발생, 항복상태의 C 지점은 인터페이스 요소의 최대 접선응력 발생 시점과 유사한 하중단계이기도 하다.

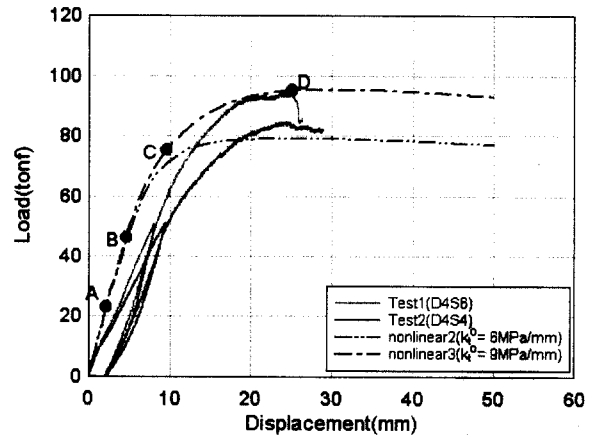


그림 3. 하중-처짐 곡선

3.2 경계면 거동 특성

3.2.1 인터페이스 요소의 접선응력 분포

비선형 경계면 모델에 대한 해석 결과 실험결과에 가장 근접한 Nonlinear3 경우에 대해 하부강판-콘크리트 경계면과 T형강-콘크리트 경계면을 모사한 인터페이스 요소에 발생한 접선응력의 하중단계별 분포는 각각 그림 4에 나타난 바와 같다.

하부강판-콘크리트 경계면에서는 하중단계가 낮은 탄성상태에서 하중재하점 길이방향으로 지지점에서 0.6~0.7L 근처에서 가장 큰 접선응력이 발생하며 지지점과 외부 측면으로 갈수록 접선응력이 저하되는 것으로 나타났다. 하중이 증가할수록 접선응력은 지지점과 외부 측면으로 확대되며, 항복상태와 극한상태에서는 중앙부 일부를 제외한 하부강판-콘크리트 전체 경계면이 최대 접선응력에 도달하면서 동일해지는 것으로 나타난다.

이러한 현상은 T형강-콘크리트 경계면에서도 동일하게 나타난다. T형강-콘크리트 경계면에서도 지지점에서 0.6~0.7L 근처에서 최대 접선응력이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 T형강-콘크리트 경계면에서는 압축부 보다는 중립부와 인장부에서 더 큰 접선응력이 발생하며, 특히 접선응력 분포 폭은 인장부 보다 하부강판 상부 플랜지와 동일한 위치에 있는 중립부에서 광범위하게 분포하는 것으로 나타났다.

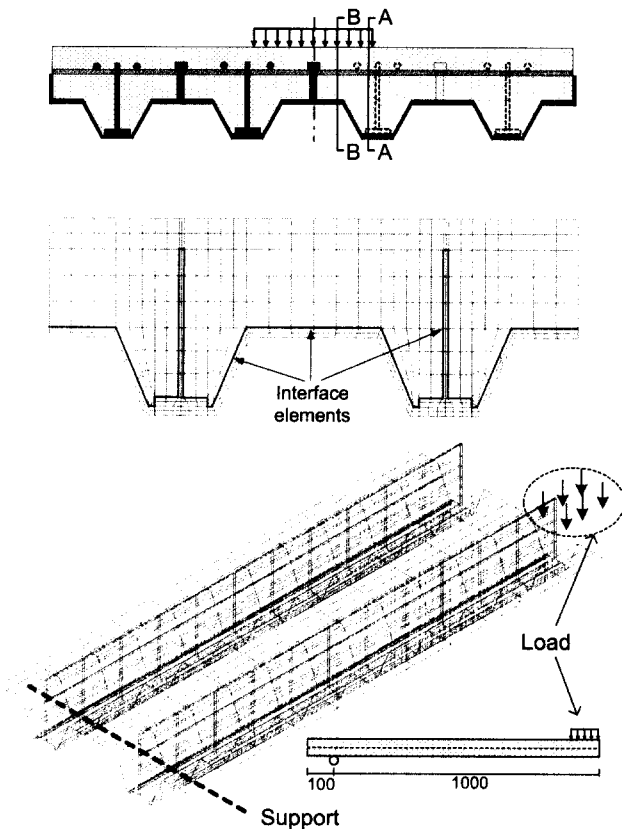


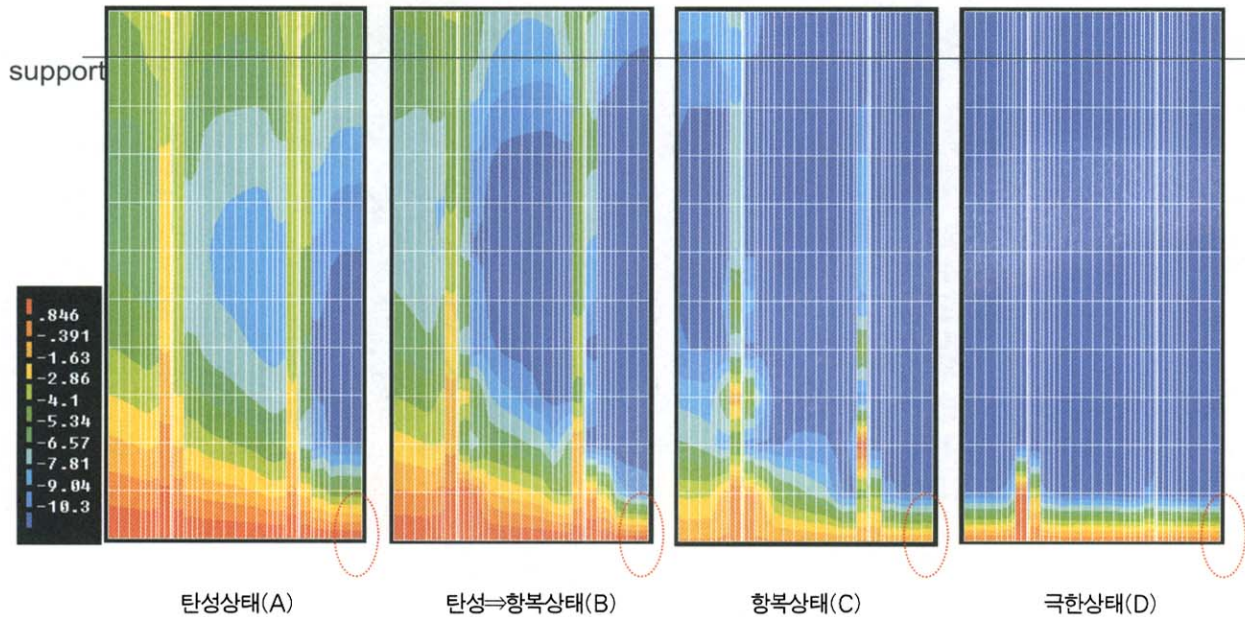
그림 2. 인터페이스 모델링

3.2.2 단면높이에 따른 접선응력 분포

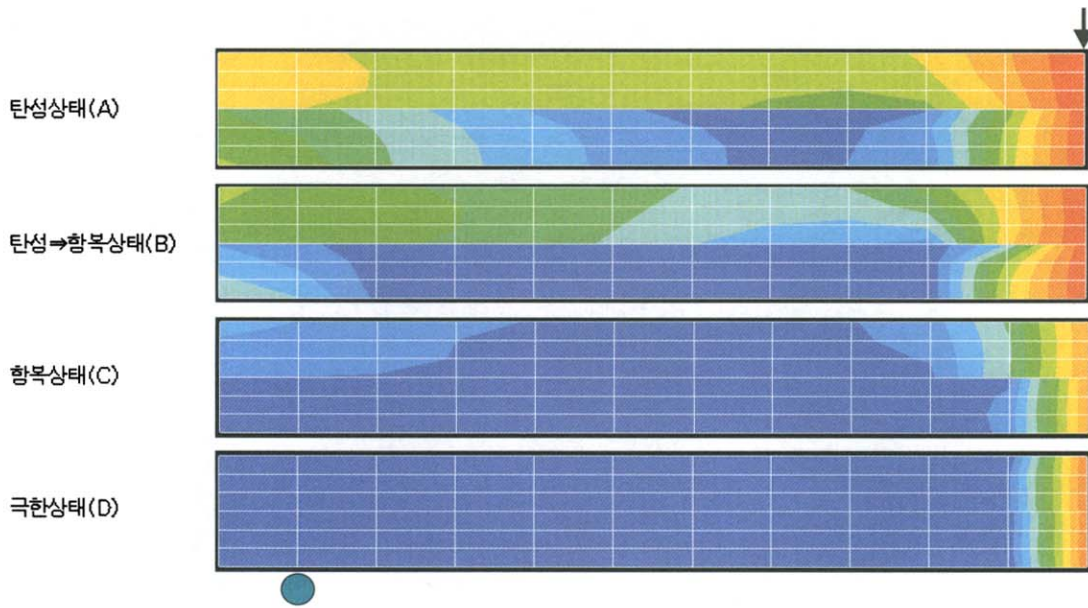
그림 4(b)의 T형강-콘크리트 경계면의 접선응력 분포는 압축부 보다 중립부와 인장부에서 보다 큰 접선응력이 발생함을 보여준다. 이에 대한 보다 자세한 규명을 위해 그림 5에 나타난 T형강-콘크리트 경계면과 하부강판-콘크리트 경계면에서 최대 접선응력이 발생하는 0.7L 지점에 대해 단면 높이에 따른 하중단계별 접선응력 변화를 분석하였으며 그 결과는 그림

6에 나타난 바와 같다.

T형강-콘크리트 경계면의 단면 높이에 따른 접선응력 분포는 항복상태 이전(A, B 지점)에는 압축부에서 최소, 인장부에서 최대의 접선응력이 발생한다. 그러나 하중이 증가할수록 접선응력은 중립부와 압축부로 점차 확대되어 항복상태(C 지점)에서는 압축-중립-인장부에 동일한 접선응력이 분포하는 것으로 나타났다(그림 6 참조).



(a) 하부강판-콘크리트 경계면 인터페이스 요소



(b) T형강-콘크리트 경계면 인터페이스 요소

그림 4. 하중단계별 인터페이스 요소의 접선응력 분포

하부강판-콘크리트 경계면의 단면 높이에 따른 접선응력 분포는 T형강-콘크리트 경계면 경우와는 달리 항복상태 이전(A, B 지점)에는 중립부에서 인장부 보다 다소 큰 접선응력이 발생하며, 하중이 증가할수록 접선응력은 인장부로 점차 확대되어 항복상태(C 지점)에서는 중립-인장부에서 동일한 접선응력이 분포하는 것으로 나타났다(그림 6 참조).

동일한 하중단계에서 T형강-콘크리트 경계면과 하부강판-콘크리트 경계면에서의 접선응력 크기는 하부강판-콘크리트 경계면에서 더욱 크게 나타나며, 하부강판-콘크리트 경계면의 중립부에서 가장 큰 접선응력이 발생하는 것으로 나타났다.

T형강-콘크리트 경계면의 인장부에서는 콘크리트 균열 발생으로 접선응력이 일시적으로 변화하는 경향을 나타내었다.

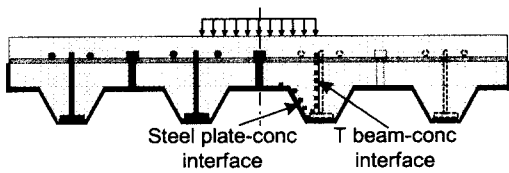
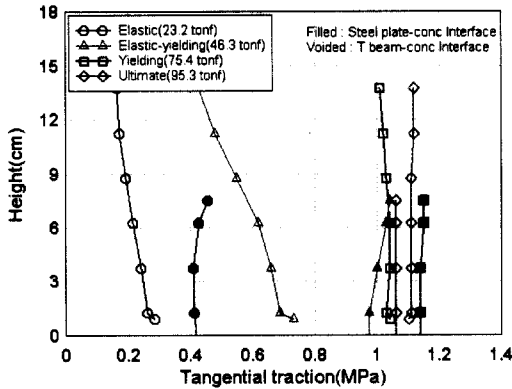
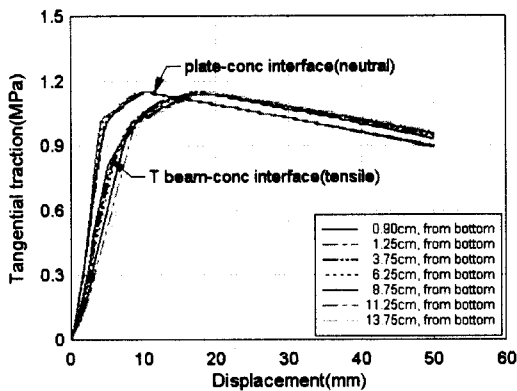


그림 5. 단면높이에 따른 경계면



(a) 하중단계별 접선응력 분포



(b) 접선응력-변위 관계

그림 6. 단면높이에 따른 접선응력 분포

3.2.3 횡(너비)방향 접선응력 분포

그림 4(a)에 나타난 강판-콘크리트 경계면의 횡(너비)방향 접선응력 분포는 외부 측면보다 내부에서 큰 접선응력이 발생함을 보여준다. 이에 대한 보다 자세한 규명을 위해 그림 7에 나타난 바와 같이 최대 접선응력이 발생하는 0.7L 지점의 하부강판-콘크리트 경계면과 T형강-콘크리트 경계면의 중립부에 대한 횡방향 거리별 접선응력 분포를 분석하였으며, 그 결과는 그림 8에 나타난 바와 같다.

전체적으로 하중재하 위치에서의 접선응력이 가장 크고 외부 측면으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 하중재하 위치로부터 다소의 거리 차이(12.5cm)가 있는 B와 C에서 접선응력의 증가 경향은 서로 유사하고 E는 오히려 D보다 접선응력의 증가가 빠른 점으로 판단하면, 결과적으로 동일한 중립부일지라도 T형강-콘크리트 경계면 보다는 하부강판-콘크

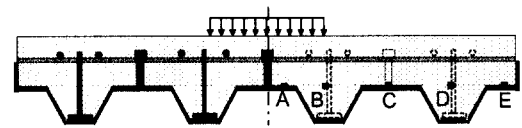
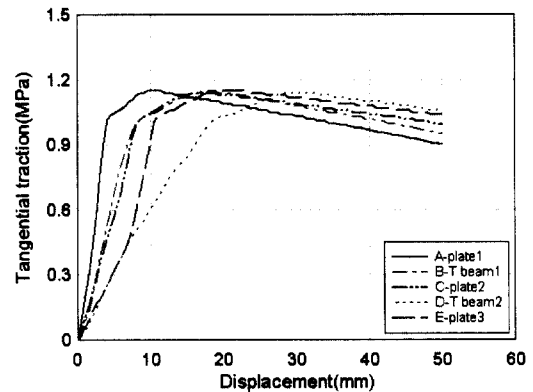
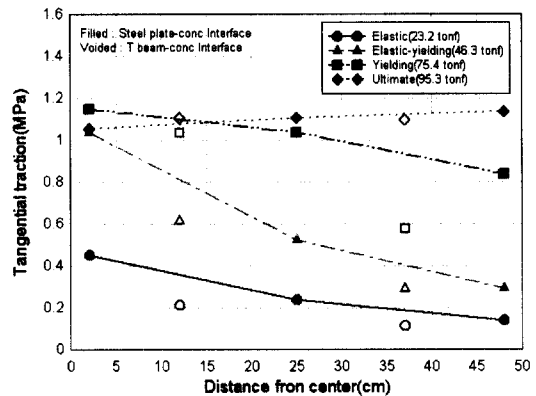


그림 7. 횡(너비)방향에 따른 경계면



(a) 접선응력-변위 관계



(b) 하중단계별 접선응력 분포

그림 8. 횡방향에 따른 접선응력(0.7L지점)

리트 경계면에서 접선응력의 증가가 크게 발생하는 것으로 나타났다.

3.2.4 종(길이)방향 접선응력 분포

종방향 접선응력 분포는 합성구조체의 휨 설계와 전단연결재 설계에 중요한 역할을 담당한다. 그림 4(a)에 나타난 강판-콘크리트 경계면의 종방향(길이방향) 접선응력 분포는 중앙부에서 최소이고 0.6~0.7L에서 최대이며 지지점으로 갈수록 감소하는 경향을 나타낸다(이, 1997; Seracino 등, 2002). 이에 대한 보다 자세한 규명을 위해 최대 접선응력이 발생하는 하부강판-콘크리트 경계면의 중립부와 인장부에(그림 9 참조) 대해 종방향으로 지지점에서의 거리별 접선응력 분포를 분석하였으며, 그 결과는 그림 10에 나타난 바와 같다.

전체적으로 종방향의 접선응력 분포는 하중단계별로 다소의

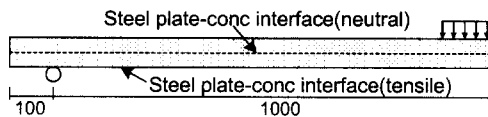
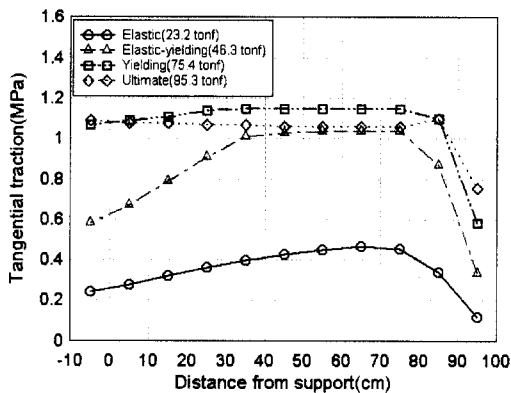
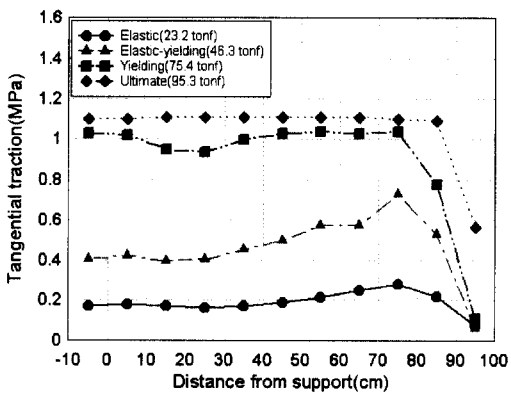


그림 9. 종(길이)방향에 따른 경계면



(a) 중립부



(b) 인장부

그림 10. 종방향 접선응력 분포(하부강판-콘크리트 경계면)

차이는 있지만 중앙부에서 최소, 지지점에서 0.6~0.7L에서 최대이고 지지점으로 갈수록 감소하는 경향이 유지되는 것을 알 수 있다. 그림 10(a)의 경우 탄성⇒항복상태에서는 0.4~0.7L 지점의 접선응력이 최대 접선응력에 도달하였고, 항복상태에서는 중앙부와 지지점 근처 일부를 제외한 모든 영역이 최대 접선응력에 도달하였으며, 극한상태에는 이 부위에서 슬립-연화 현상으로 인하여 접선응력이 다소 감소하면서 지지점 부근도 최대 접선응력 범위에 확대되었음을 나타내고 있다.

그러나 하부강판-콘크리트 인장부 경계면의 경우(그림 10(b)) 지지점으로 갈수록 감소하는 접선응력이 지지점 근처에서 부분적으로 다소 증가하는 경향을 나타내는데, 이것은 지지점과의 마찰에 따른 접선응력의 국부적인 증가현상(그림 11) 때문이다(Seracino 등, 2002; Veljkovic, 1996). 또한 항복상태 이전의 하중단계에서(A, B 지점) 하부강판-콘크리트 중립부 경계면에서는 최대 접선응력이 0.4~0.7L에 걸쳐 폭넓게 분포하는 반면, 인장부 경계면에서는 0.7L 근처에서만 최대 접선응력을 나타내었다. 동일한 하중단계에서 중립부는 인장부 보다 접선응력이 더욱 크게 발생하였다.

수직응력도 경계면의 거동에 중요한 역할을 담당한다. 수직응력이 크게되면 이에 따른 마찰력(μt_n)도 증가하게 되어 동일한 슬립 발생에 보다 큰 접선응력이 필요하게 된다(Chiew 등, 1999; Link, 1992). 하부강판-콘크리트 경계면의 종방향 수직응력 분포는 그림 12와 같다.

중립부의 경우 중앙부에서는 하중초기 단계에 압축응력이 발생하지만 하중이 증가할수록 점차 압축응력이 감소하거나 인장응력으로 전환되며, 하중단계별로 다소 불규칙적이지만 접선응력과 동일하게 중앙부에서 최소, 0.5~0.7L에서 최대이고 지지점으로 갈수록 감소하는 경향을 나타냈다.

인장부에서는 지지점 근처만 제외하고 전체적으로 인장응력

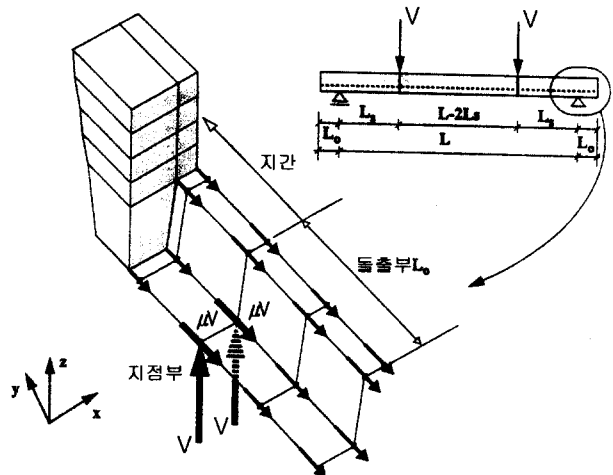


그림 11. 지지부의 마찰 거동

을 받는 것으로 나타났으며(지지점 근처는 지지점 설치에 따른 압축효과를 반영함), 중앙부에서 최대이고 이외의 지점에서는 대체적으로 유사한 크기를 나타내었다. 그러나 전체적으로 수직응력은 접선응력에 비해 매우 작은 값을 나타내어(접선응력의 약 1/100~1/10 수준) 합성 바닥판의 경계면 거동에 지배적인 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

3.2.5 상대슬립 거동

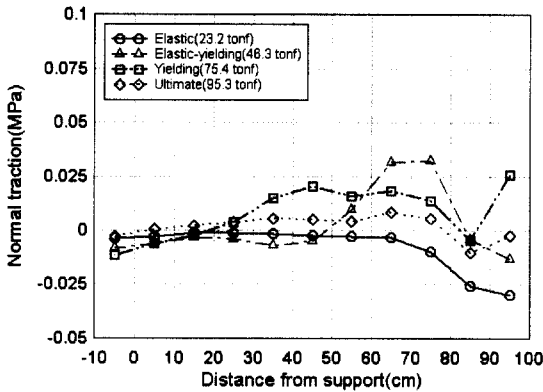
접선응력이 최대로 발생하는 하부강판-콘크리트 경계면 중립부(A)에서의 종방향 상대슬립 분포는 그림 13에 나타난 바와 같다. 슬립발생량도 접선응력의 분포와 동일하게 중앙부에서 최소, 지지점에서 0.6~0.7L에서 최대이고 지지점으로 갈수록 감소하는 경향이 유지되는 것을 알 수 있다. 그림 13(b)의 경우 항복상태에서는 0.5~0.7L 지점에서 최대 접선응력시의 슬립 0.4mm에 근접하지만, 극한상태에는 모든 지역에서 0.4mm를 초과하여 모든 부위에서 슬립-연화 현상이 진행되고 있음을 알 수 있다.

3.3 분석

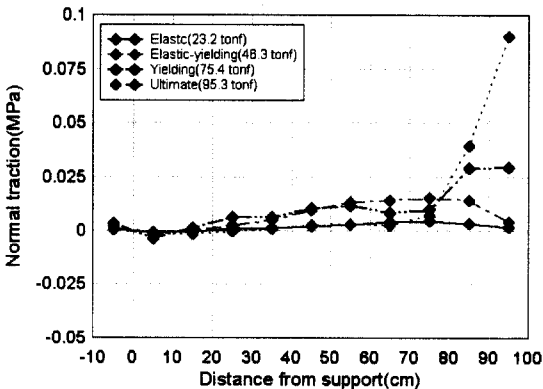
3.3.1 경계면 거동과 전단연결재 설계

강-콘크리트 합성 구조체에서 단면 높이에 따른 경계면 접선응력은 T형강-콘크리트 경계면 보다는 하부강판-콘크리트 경계면에서 빠른 증가를 나타내었고, 하부강판-콘크리트 경계면에서도 인장부 보다 중립부에서 가장 빠른 증가를 나타내었다. 따라서 전단연결재도 T형강에 설치(perfobond 등)하기 보다는 하부강판의 상부 플랜지에 설치하는 것이 보다 효율적인 것으로 생각된다.

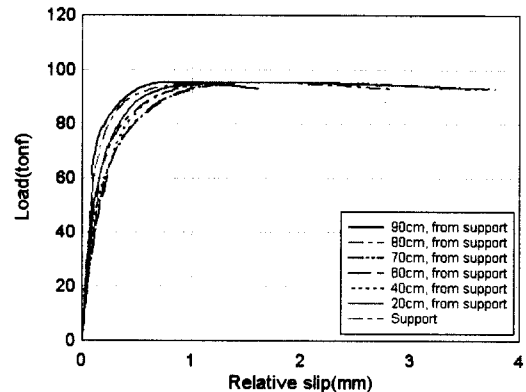
종방향에 따른 경계면 접선응력의 분포는 중앙부에서 최소, 지지점에서 0.6~0.7L에서 최대를 나타내며 지지점으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향을 나타내는 것은 하중 작용점이 위치하는 중앙부는 다른 부위에 비해 수직응력이 상당히 크게 작용하므로 이에 따라 마찰력도 크게 발생하여 상대적으로 상대슬립이 억제되는 경향을 갖는다. 그러나 바닥판 상부의 하중이 45°방향으로 전파된다고 가정할 때 45°로 전파된 하중이 바닥판 하면과 직접적으로 만나는 부위 근처(즉, 지지점에서 0.7~0.8L 지점)에서는 45°방향 하중의 직접적인 작용으로 상당히 큰 접선응력이 발생하게 되므로 이 부위에서 가장 큰 접선응력이 발생하는 것으로 생각할 수 있



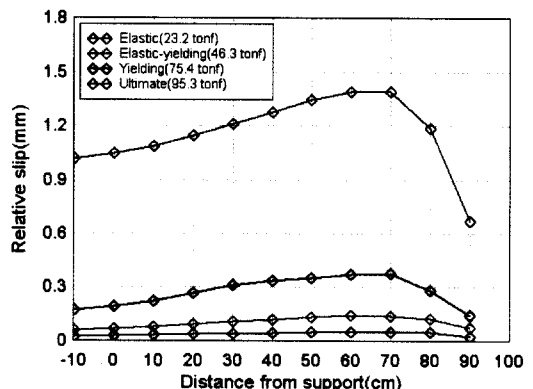
(a) 중립부



(b) 인장부



(a) 종방향 슬립(A)



(b) 하중단계별 슬립분포(A, 0.7L)

그림 12. 종방향 수직응력 분포(하부강판-콘크리트 경계면)

그림 13. 상대슬립 거동

다(그림 14 참조). 또한 이 부위에서의 큰 접선응력을 스티드가(해석에서는 인터페이스 요소) 부담하고 지지점으로 갈수록 하중의 직접적 작용과 휨 거동이 현저히 감소하므로 지지점에서 0.7L을 기준으로 지지점으로 갈수록 접선응력의 크기와 상대슬립은 감소하는 것으로 생각할 수 있다.

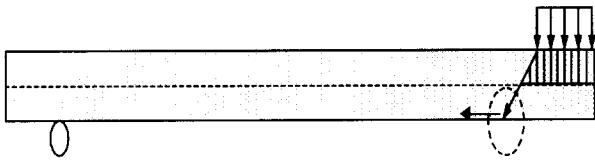


그림 14. 종방향 접선응력 발생

따라서 지지점에서 0.6~0.7L 지점부터 전단연결재를 설치하는 것이 바람직할 것으로 생각되며, 휨 거동에 가장 취약한 중앙부에 전단연결재 설치는 균열 발생을 촉진하므로 바람직하지 않은 것으로 생각된다. 이때 전단연결재의 간격은 해석결과에 따른 발생 전단력과 전단연결재의 허용 전단력을 바탕으로 소요 구조성능을 만족하도록 적절히 배치하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

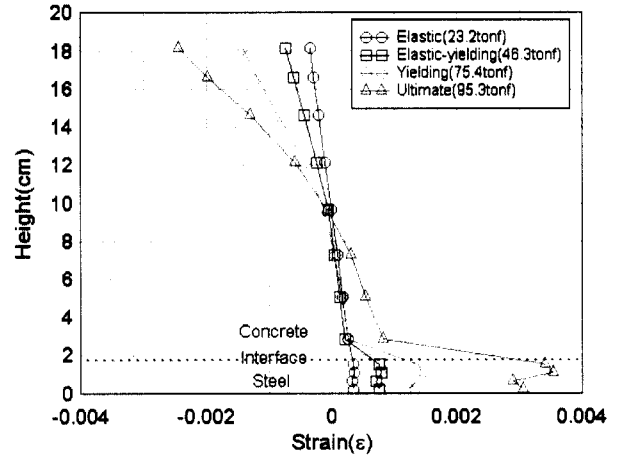
그러나 본 해석에서는 구조체의 전체적 거동 평가를 주목적으로 콘크리트 인장부에 대해 이에 가장 적합한 분산균열(smearred cracking)모델을 적용하였는데(Chen 등, 1988), 이는 균열 발생 후에도 콘크리트는 여전히 연속체라는 가정을 바탕으로 균열을 요소의 강성저하 현상으로 모델링한 것으로, 실제 균열발생에 따르는 요소간 불연속성(이격현상)을 고려하지 못하는 단점이 있다. 따라서 콘크리트 인장 균열에 대해 가장 취약한 중앙부에서의 접선응력과 상대슬립 거동에 대해 과소평가 결과를 나타낼 수도 있으며, 중앙부에 대한 보다 정확한 경계면 거동은 이산균열(discrete cracking) 모델을 이용한 경우의 결과에 대해서도 검토하는 것이 바람직할 것으로 생각된다. 이 경우에도 중앙부에 전단연결재 설치의 피하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

전체적으로 경계면에 발생하는 접선응력과 상대슬립의 분포 규명은 합성 구조체의 경계면 거동 특성을 이해하고 합리적인 전단연결재 설계의 바탕을 제공할 것으로 생각된다.

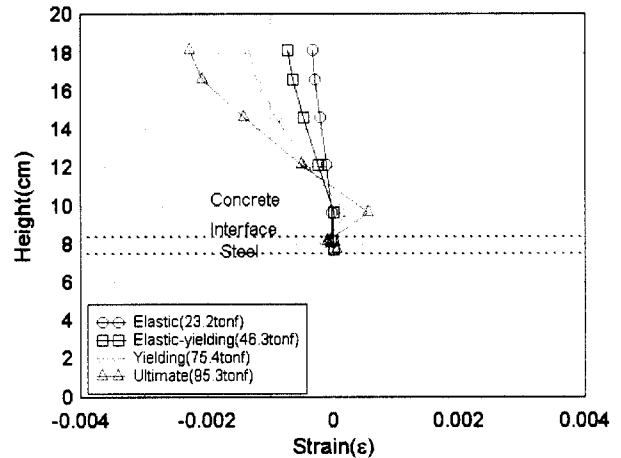
3.3.2 단면 변형을 분포

강-콘크리트 경계면의 부분합성 특성에 따른 합성 구조체 단면의 변형을 분포를 그림 2의 A-A, B-B 단면에 대해 분석하였으며 그 결과는 그림 15에 나타난 바와 같다. 전체적으로 하중 초기단계에서는 콘크리트와 강재가 일체 거동을 나타내지만, 하중이 증가할수록 경계면에서의 합성작용 저하에 따른 부분합성 특성으로 경계면을 기준으로 변형률이 점차 차이가

발생함을 알 수 있다.



(a) A-A 단면



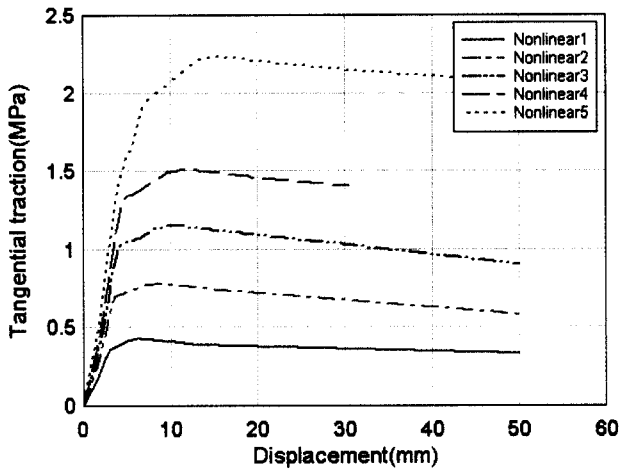
(b) B-B 단면

그림 15. 경계면에 따른 단면 변형을 분포

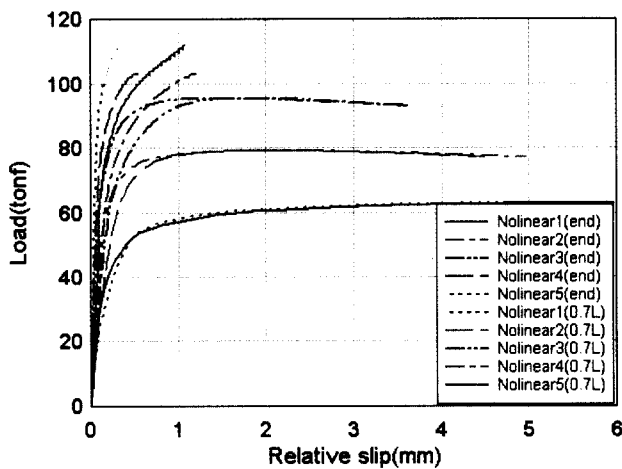
3.3.3 경계면 해석모델별 설계방법

경계면에 대한 5가지 비선형 해석모델에 대한 해석결과와 그림 16에 나타난 바와 같다. 최대 접선응력이 발생하는 하부 강관-콘크리트 경계면 0.7L지점의 접선응력은 그림 14(a)와 같고, 최대 접선응력의 크기는 각각의 경계면 비선형 해석모델과 일치함을 알 수 있다. 또한 지지점에서 0.7L 지점과 단부에서의 하부강관-콘크리트의 상대슬립 분포는 그림 14(b)와 같고, 슬립-연화현상의 시작이 모두 상대슬립 0.4mm 근처로 슬립-연화현상도 시작점이 각각의 비선형 해석모델과 일치함을 알 수 있다.

최대하중하에서의 슬립량(0.5mm+10%)으로 설계방법을 구분하는 euro-code4를 따를 경우(Veljko, 2000) 최대 슬립이 발생하는 0.7L 지점을 기준으로 하면 모든 경우 최대



(a) 접선응력(A, 0.7L)



(b) 하중단계별 슬립분포(A, 단부-0.7L)

그림 16. 경계면 비선형 해석 모델별 접선응력, 슬립거동

하중하에서 슬립량이 0.55mm를 초과하여 연성설계(부분합성)를 해야하며, 단부슬립을 기준으로 하면 경계면 비선형 해석 모델 nonlinear4, 5의 경우는 최대하중하에서의 슬립량이 각각 0.54, 0.32mm으로 취성설계(완전합성)를 따라야 할 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 강·콘크리트 경계면에 대한 비선형 해석 모델을 바탕으로 합성 구조체에 대한 비선형 구조해석을 실시하여 강·콘크리트 경계면을 모사한 인터페이스 요소에 발생하는 접선응력과 상대슬립 분포 등 합성 구조체의 경계면 거동 특성을 해석적으로 규명하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 본 논문의 해석 모델인 합성 바닥판에서는 T형강-콘크리트 경계면 보다는 하부강판-콘크리트 경계면에서 접선응력과 상대슬립의 증가가 빠르게 나타났으며, 하부강판-콘크리트 경계면에서도 인장부 보다 중립부 경계면에서 접선응력의 증가가 빠르게 진행되었다.

둘째, 횡방향으로는 하중재하 위치에서 외부 측면으로 갈수록 접선응력이 완화되는 현상을 나타내었으며, 종방향으로는 중앙부에서 최소, 지지점에서 0.6~0.7L 지점에서 최대를 나타냈으며 이후 지지점으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다.

셋째, 하중이 증가할수록 접선응력의 크기는 최고 지점을 바탕으로 점차 주변으로 확대되며, 항복상태와 극한상태에서는 전체 영역으로 경계면의 파괴가 확대되는 경향을 나타내었다.

넷째, 이상의 연구결과는 합성 구조체의 경계면 거동 특성과 하중전달 메카니즘을 이해하고 합리적인 전단연결재 설계를 위한 바탕을 제공할 것으로 기대된다.

참고 문헌

양석규(1998) Push-out Test에 의한 스티드와 고장력 볼트의 역학적 거동에 관한 연구, 석사학위논문, 경남대
 정연주, 정광희(2002) 슬립을 고려한 합성구조체의 비선형해석, 대한토목학회논문집, 제22권, 제1-A호, pp. 31-42.
 Chen, W.F., and Dan, D.J.(1988), Plasticity for Structural Engineers, Springer-Verlag.
 Chiew, S.P., Dong, Y.X., and Soh, C.K.(1999) Concrete-Steel plate Interface Characteristics for Composite Construction, *Proc., 7th Int. Conf. on Civil and Struct. Engrg. Computing (CIVIL-COM 99)*, pp. 35-40.
 Frits, C.W., and Peter, H.F.(1998) *DIANA User's Manual : Nonlinear Analysis-Release 7*, TNO.
 Hajjar, J.F., Schiller, P.H., and 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.
 Salari, M.R., and Spacone, E.(2001) Finite Element Formulations of One-Dimensional Elements with Bond-Slip, *Engng. Structures*, 23, pp. 815-826.
 Soh, C.K., Chiew, S.P., and Dong, Y.X.(1999) Damage Model for Steel-concrete Interface, *J. of Engng. Mechanics*, Vol. 125, No.8, pp. 979-983
 Veljkovic, M.(2000) Behavior and Design of Shallow

Composite Slab, *Engng. Foundation Conference of Composite Slabs*, pp. 12

Veljkovic, M.(1996) 3D nonlinear analysis of composite slabs, Ph.D. Dissertation, Univ. of Lulea, Sweden

(접수일자 : 2003. 6. 23 / 심사일 2003. 7. 23 /
심사완료일 2003. 10. 6)