

# 강·콘크리트 경계면의 비선형성에 따른 합성구조체 거동(I)

## -비선형 경계면 모델에 따른 매개변수 연구-

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

#### -Parametric Study for Nonlinear Model of Interface-

정 연 주<sup>1)</sup> . 정 광 회<sup>2)</sup> . 김 병 석<sup>3)</sup>

*Jeong, Youn Ju Jung, Kwang Hoe Kim, Byung Suk*

**요 약** : 합성 구조체에서 강·콘크리트 경계면은 하중이 증가함에 따라 합성작용 저하, 미세균열, 슬립 및 분리 등으로 비선형 거동을 나타내어 부분합성에 적합한 해석기법이 필요하다. 그러나 경계면을 고려하는 해석방법과 경계면 비선형 해석 모델 구성의 어려움으로 지금까지 합성 구조체에 대한 해석적 연구는 경계면 거동을 완전합성, 또는 선형-탄성으로 가정하여 정확한 거동 규명이 어려웠다. 따라서 합성 구조체의 설계는 대부분 실험적 방법에 의존하였지만, 이것은 사용환경에 따라 매번 실험을 수행해야 하는 비효율성이 있다. 본 논문에서는 합성작용의 변화에 따른 다양한 강·콘크리트 경계면의 비선형 해석 모델을 바탕으로 최대 접선응력과 슬립-연화 현상에 따르는 보다 정밀한 구조성능과 거동 특성을 규명하였다. 연구결과 경계면에 대한 비선형 모델은 최대하중 등과 같은 항복 이후의 거동을 보다 정확하게 나타내며, 이때 인터페이스의 초기 접선강성은 부재의 항복하중에, 최대 접선응력과 슬립-연화 현상은 합성 구조체의 최대하중과 같은 항복이후 거동에 주로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 합성 구조체의 구조성능은 강·콘크리트 경계면의 합성작용, 즉 인터페이스 요소의 초기 접선강성, 최대 접선응력과 슬립-연화현상에 크게 의존적인 것으로 나타났다.

**ABSTRACT** : As the load is increased on the steel-concrete composite structure, its interface begins to show nonlinear behavior due to the reduction of interaction, micro-crack, slip and separation, and it causes slip-softening. Therefore, it is essential to consider the partial-interaction analysis technique. Until now, however, full-interaction or, in some instances, the linear-elastic model, which are insufficient to simulate accurate behavior, are assumed in the analysis of composite structure since the analysis method and nonlinear model for interface are very difficult and complicated. Therefore, the design of composite structure is followed by the experimental method, which is inefficient because a number of tests have to be carried out according to the design environments. In this study, we carried out the nonlinear analysis according to various interface nonlinear models by interaction magnitude, and analyzed more accurate structural behavior and performance by maximum tangential traction and slip-softening at the interface. As a result of this study, we were able to prove that the nonlinear model of interface more exactly represents behavior after yielding, such as ultimate load; that initial tangential stiffness of interface has a significant effect on the yielding load of structural members or parts; and that the maximum tangential traction and slip-softening mainly affects structural yielding and ultimate load. Therefore, the structural performance of composite structure is highly dependent on the steel-concrete interface or interaction, which may result in initial tangential stiffness, maximum tangential traction and slip-softening in nonlinear model.

**핵심용어** : 강-콘크리트 합성, 경계면, 비선형 모델, 구조성능, 합성작용

**KEYWORDS** : Steel-concrete composite, Interface, Nonlinear model, Structural performance, Interaction

## 1. 서론

강·콘크리트 합성 구조체에서 강재와 콘크리트 사이 경계

면 특성은 합성구조체 해석에서 중요한 사항중 하나이며, 합성 구조체의 구조성능은 경계면의 하중전달 메카니즘에 크게 의존적이다. 강·콘크리트 경계면에 대해 수행된 여러 실험결

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

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

과들을 분석하면 합성 구조체에서 강·콘크리트 경계면은 하중이 증가함에 따라 합성작용 저하, 미세균열, 슬립 및 분리 등으로 비선형의 응력-슬립 거동을 나타내며, 이것은 점차 진행되어 경계면에서의 합성작용이 저하되는 슬립-연화(slip-softening) 현상을 유발한다. 이러한 강재와 콘크리트 경계면의 비선형 거동 특성은 두 재료 사이의 하중전달 메카니즘을 변화시켜 합성 구조체의 구조성능에 직접적인 영향을 미치게 된다(Soh 등, 1999; Chiew 등, 1999; Veljkovic, 1996).

따라서 강·콘크리트 합성 구조체의 거동과 구조성능을 보다 정확하게 규명하기 위해서는 이러한 비선형의 경계면 거동 특성을 고려한 해석이 필요하지만, 지금까지는 경계면을 고려하는 해석 방법의 어려움으로 완전합성으로 가정하거나 경계면 거동을 고려하더라도 경계면의 비선형 거동 특성 규명이 어려워 선형-탄성으로 가정하였다(Salari 등, 2001; 정 등, 2002). 이러한 해석방법은 합성 구조체의 실제 거동을 정확하게 규명하기에 어려움이 있었고, 따라서 합성 구조체의 구조설계는 대부분 실험을 통한 경험적 방법에 의존하였다(Veljkovic, 1996). 또한 합성 구조체의 거동 특성에 대한 기존의 연구들은 전단부착 실험을 통한 강-콘크리트 경계면의 초기 접선강성이나 부착 특성에 대한 연구가 주종을 이루며 휨 거동을 할 때 경계면의 특성이 구조성능에 미치는 영향에 대한 연구는 극히 소수에 지나지 않는다.

그러나 최근 인터페이스 요소의 개발을 비롯한 구조해석 툴(tool)의 발전과 다양한 강-콘크리트 경계면 조건에 대한 전단부착 실험(pull-out test)을 통한 강-콘크리트 경계면의 거동 특성 규명과 해석 모델의 정립이 이루어지고 있으므로 해석적 방법에 의한 합성 구조체의 설계도 그 바탕이 마련되어 가고 있는 실정이다. 해석적 방법에 의한 합성 구조체의 설계를 위해서는 먼저 경계면에 대한 정확한 해석모델이 구성되어야 하며, 다음으로 경계면 조건이 합성 구조체의 거동에 미치는 영향이 규명되어야 한다. 이러한 배경에서 Veljkovic (1996)은 전단부착 실험을 통한 경계면 거동 모델만을 이용한 해석적 방법으로 부분합성 거동 특성을 나타내는 합성 바닥판의 휨 설계방법에 대해 연구하여 연구결과를 euro-code4에 제안하기도 하였다.

본 논문에서는 Soh 등(1999)이 다양한 실험을 통해 제안한 강판·콘크리트 경계면의 비선형 모델을 바탕으로 합성작용의 차이에 따른 다양한 경계면 비선형 모델을 구성하였으며, 이를 바탕으로 강판·콘크리트 구조된 교량용 합성 바닥판에 대한 비선형 해석을 수행하였다. 또한, 이에 대한 해석결과를 바탕으로 기존의 완전합성, 선형-탄성 해석결과 및 실험결과와의 차이점을 비교·분석하였으며, 다양한 경계면 비선형 모

델에 따른 합성 구조체의 구조성능, 부재별 거동 특성을 분석하였다.

## 2. 강·콘크리트 경계면 해석모델

### 2.1 경계면 Global 해석모델

강·콘크리트 합성 구조체는 하중이 증가할수록 인접한 재료 사이의 경계면에서 손상이 발생하며, 손상이 심각하게 진행되면 미세균열이 형성되어 분리, 슬립이 발생하고 경계면에서의 하중전달 능력이 급격히 저하되는 경계면 파괴에 도달한다. 지난 몇 년간 경계면의 파괴현상, 하중전달 특성, 부착 메카니즘을 고려하는 다양한 실험이 보고되었으며, 이를 바탕으로 경계면의 파괴 메카니즘과 합성작용에 대한 수학적 표현에 대한 많은 노력이 있었다. 지금까지의 연구에서 경계면의 합성작용을 고려한 주요 해석 모델은 lumped 모델과 distributed 모델이다(Soh 등, 1999). Lumped 모델에서는(그림 1) 경계면의 손상, 비선형성 및 파괴 특성이 0의 두께를 갖는 특정 요소에 함축되어지며, distributed 모델에서는 경계면의 손상과 다른 영향들이 콘크리트와 같은 특정 재료의 일정 층(layer)에 분산되어진다. 따라서 distributed 모델에서는 일상적인 모델 요소가 사용되는 반면, lumped 모델에서는 서로 상이한 재료 사이의 합성작용을 적합하게 모사하기 위해 인터페이스 요소라

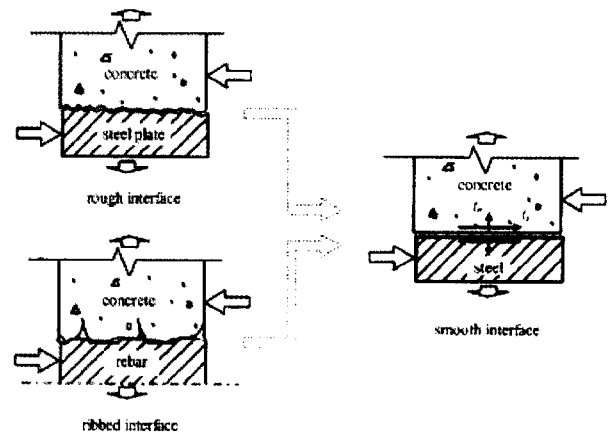


그림 1. Lumped 해석모델

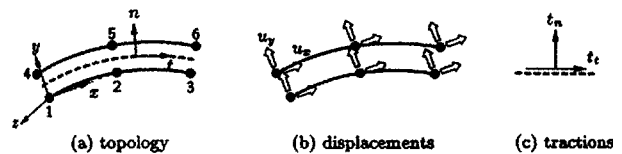


그림 2. 인터페이스 요소(2차원)

는 특정 해석 요소가 사용된다(그림 2).

본 연구에서는 Interface 요소를 이용하는 Lumped 모델을 이용하였으며 이는 구조역학적 관점에서 등분포하중을 다수의 집중하중으로 치환하는 방법의 역의 개념으로 실제 다수의 스티드에 작용하는 집중하중(힘)을 경계면 전체에 대한 가상의 등분포 하중(힘)으로 치환하는 개념이다. 따라서 Interface 요소의 물성과 이에 따른 해석결과는 스티드에 작용하는 힘뿐만 아니라 강과 콘크리트의 자연적인 부착에 의한 힘도 포함된다. 여러 연구결과들에 의하면 합성작용은 주로 스티드에 의해 이루어지고 자연적인 부착이 합성작용에 기여하는 정도는 스티드의 역할에 비해 미미한 것으로 알려져 있다. 따라서 Lumped 모델에 따라 전단연결재를 설계한다면 실제 스티드의 힘뿐만 아니라 자연적인 부착에 의한 힘까지도 포함하는 스티드 설계가 되므로, 실제 경우 보다 다소 안전 측면의 스티드 설계가 될 것이다.

Lumped 모델에서의 인터페이스 요소는 0의 두께를 가지며, 경계면에서의 응력(t)-변위(u) 관계를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Frits 등, 1998).

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

여기서 n, t축은 각각 경계면에 대한 수직방향(normal), 접선방향(tangential)을 나타낸다. 경계면에 대한 구성방정식은 경계면에서의 응력을 전체 상대변위의 함수로 나타내는 전체 변형이론(total deformation theory)을 바탕으로 하며, 2차원 문제에서 응력 Δt와 상대변위 Δu 사이의 선형 구성관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Frits 등, 1998).

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

여기서, [K<sub>I</sub>]는 인터페이스 요소에 대한 강성행렬이고, k<sub>n</sub>과 k<sub>t</sub>는 각각 인터페이스 요소에 대해 경계면에 수직방향의 응력-변위 관계를 나타내는 수직강성과 접선방향의 응력-슬립 관계를 나타내는 접선강성을 나타낸다. 일반적으로 이들 두 계수는 단위길이에 대한 응력(N/mm<sup>3</sup> 또는 MPa/mm)으로 나타내며, 인터페이스 요소의 수직강성은 선형탄성으로, 접선강성은 비선형 함수로 가정된다(Frits 등, 1998).

### 2.2 경계면의 비선형 거동

인터페이스 요소의 구성방정식 구성은 간단하지 않다. 이

것은 미세 구조해석이나 실험자료를 이용하여 구성할 수 있으며 실험자료를 이용하는 것이 보다 직접적인 방법이다. 또한 적용의 관점에서 구성방정식은 간단하고 명백한 물리적 의미를 갖는 것이 중요하다. 강·콘크리트 경계면의 수직방향에 대한 응력-변위(분리) 관계는 수직방향 부착력이 아주 약하고 실험결과를 측정하기가 매우 어려워 실험에 의한 규명은 어렵고, 일반적으로 인장측은 무시하고 압축측은 민감도 분석을 통해 거동에 영향을 미치지 않을 정도의 큰 강성으로 정의한다(Soh 등, 1999; Hajar 등, 1998; 정 등, 2002).

강·콘크리트 경계면의 접선방향에 대한 응력-슬립 관계에 대해서는 다양한 경계면 조건(콘크리트-철근, 모르타르-골재, 콘크리트-강판 등)에 대해 많은 실험이 실시되었으며, 이들 실험결과 경계면의 형상과 합성정도에 따라 초기 접선강성(k<sub>t</sub><sup>0</sup>)과 최대 접선응력(t<sub>t</sub><sup>m</sup>)-슬립(u<sub>t</sub><sup>m</sup>)의 차이가 발생하며 공통적으로 슬립-연화(slip-softening) 현상이 나타난다. 기존에 보고된 실험결과로부터 강·콘크리트 경계면 접선방향의 응력-슬립 관계는 공통적으로 그림 3의 경향을 갖는다(Soh 등, 1999; Chiew 등, 2002).

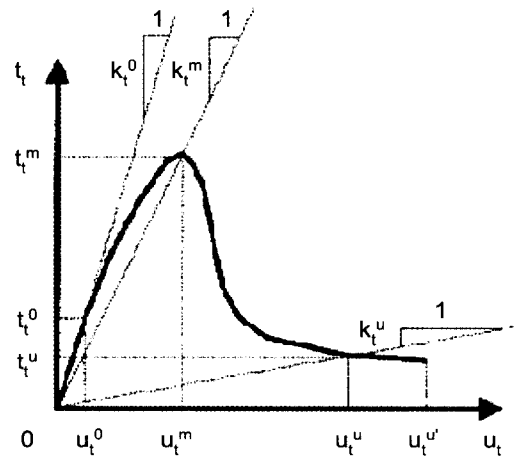


그림 3. 접선방향 응력-슬립 관계

### 2.3 경계면의 응력-슬립 비선형 모델(Soh 등, 1999)

그림 3의 실험결과에 따라 강판·콘크리트 경계면의 접선방향 구성방정식(응력-슬립 관계)은 다음과 같이 나타낼 수 있다(Soh 등, 1999).

$$t_t = k_t^0(1 - D_t)u_t$$

여기서 t<sub>t</sub>는 경계면 접선방향에서의 응력(traction)을,

$u_t$ 는 슬립을,  $D_t$ 는 강성저하계수를,  $k_t^0$ 는 초기 접선강성을 나타낸다. 그림 3의 곡선은 많은 이론식이 제안된 콘크리트에서의 응력-변형률 곡선과 매우 유사하며, 이중 대표적인 Saenz(1964)와 Wang(1996)의 제안식을 따르면 강판-콘크리트 경계면에 대해서는 다음과 같은 응력-슬립 관계 도출이 가능하다.

$$D_t = \begin{cases} 0 & \text{for } u_t \leq u_t^0 \\ 1 - \frac{1}{A + d_t} & \text{for } u_t^0 < u_t < u_t^u \\ 1 & \text{for } u_t \geq u_t^u \end{cases}$$

$$A = a_t x_t^3 + b_t x_t^2 + c_t x_t$$

여기서,  $x_t = u_t / u_t^m$ 이며,  $u_t^0$ 와  $u_t^m$ 는 각각 접선방향의 초기 슬립과 최대 응력시의 슬립을,  $u_t^u$ 와  $u_t^u'$ 은 각각 접선방향의 유사한계(quasi-limit)슬립과 한계(limit)슬립을 나타낸다. 초기 슬립  $u_t^0$ 에 이르기까지는 경계면에 강성저하가 발생하지 않으며, 슬립은 경계면 접선방향 응력에 비례하여 선형적으로 증가한다. 이후부터 경계면에 손상이 발생하기 시작하여 강성이 저하하며 한계슬립  $u_t^u$ 에 이르게 되면 경계면의 완전 파괴로 간주한다. 그림 3으로부터 슬립이  $u_t^0$ 에 도달하였을 때( $u_s = u_t^0 = \beta_0 u_t^m$ ) 강성저하계수  $D_t$ 는 0이고, 이것을 위 식에 대입하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$d_t = 1 - a_t \beta_0^3 - b_t \beta_0^2 - c_t \beta_0$$

$$D_t = \begin{cases} 0 & \text{for } u_t \leq u_t^0 \\ 1 - \frac{1}{A + 1} & \text{for } u_t^0 < u_t < \bar{u}_t^u \\ 1 & \text{for } u_t \geq \bar{u}_t^u \end{cases}$$

$$A = a_t (x_t^3 - \beta_0^3) + b_t (x_t^2 - \beta_0^2) + c_t (x_t - \beta_0)$$

그림 4로 부터 다음과 같은 사실을 알 수 있으며, 계수  $a_t$ ,  $b_t$ ,  $c_t$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

- $u_t = u_t^m$  일때,  $x_t = 1$ ,  $dt_t/du_t = 0$
- $u_t = u_t^m$  일때,  $x_t = 1$ ,  $t_t = t_t^m = k_t^m u_t^m$
- $u_t = u_t^u$  일때,  $x_t = \beta_u$ ,  $t_t = t_t^u = k_t^u u_t^u$

$$\begin{bmatrix} 2 + \beta_0^3 & 1 + \beta_0^2 & \beta_0 \\ 1 - \beta_0^3 & 1 - \beta_0^2 & 1 - \beta_0 \\ \beta_u^3 - \beta_0^3 & \beta_u^2 - \beta_0^2 & \beta_u - \beta_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a_t \\ b_t \\ c_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \gamma_m - 1 \\ \gamma_u - 1 \end{pmatrix}$$

$$-\beta_0 = \frac{u_t^0}{u_t^m}, \quad \beta_u = \frac{u_t^u}{u_t^m}$$

$$\gamma_m = \frac{k_t^0}{k_t^m}, \quad \gamma_u = \frac{k_t^0}{k_t^u}$$

$$k_t^0 = \frac{t_t^0}{u_t^0}, \quad k_t^m = \frac{t_t^m}{u_t^m}, \quad k_t^u = \frac{t_t^u}{u_t^u}$$

여기서 각 계수들은 실험결과로부터 결정되므로 실제 경계면의 물리적 합성작용을 나타내는 분리, 합성거동, 미세균열 등은 모두 이 모델에 함축적으로 포함되지만 콘크리트 쪼개짐 등과 같은 국부적인 파괴는 이 모델에서 고려할 수 없다.

일정한 경계면 수직응력( $t_n$ )하에서 강판-콘크리트 경계면에 대한 실험결과로부터 초기 접선강성  $k_t^0$ 와  $\beta_0$ 는 수직응력에 따라 다음과 같이 변화하는 것으로 나타난다.

$$k_t^0 = 12t_n, \quad \beta_0 = 0.3 - 0.02t_n$$

최대 접선응력에서의 슬립  $u_t^m$ 과 유사 한계슬립  $u_t^u'$ 은 경계면 수직응력에 관계없이 각각 0.4, 6.0mm의 일정한 값을 나타내며, 최대 접선응력  $t_t^m$ 와 한계 접선응력  $t_t^u$ 는 수직응력의 합수로 각각 다음의 값을 나타낸다(Soh 등, 1999).

$$t_t^m = 0.065 + 1.449t_n$$

$$t_t^u = 0.143 + 0.7t_n \text{ (MPa)}$$

이상의 해석모델은 그림 4에 나타난 바와 같이 실제 실험결과와 비교적 잘 일치하며, 강판-콘크리트 경계면의 슬립-경화, 슬립-연화 현상을 포함하는 비선형 거동을 적절하게 묘사할 수 있다.

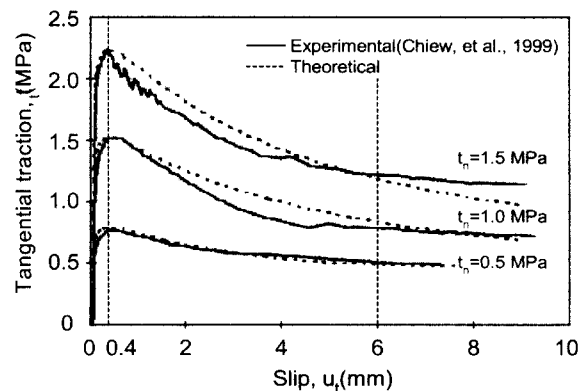


그림 4. 경계면 응력-슬립 곡선

### 3. 수치해석 및 고찰

#### 3.1 해석모델 및 물성

본 해석에서는 강판과 콘크리트가 스티드에 의해 합성되고 구조성능을 향상시키기 위해 T형강이 삽입된 교량용 강·콘크리트 합성 바닥판을 대상으로 하였으며(그림 5), 합성 바닥판의 크기는 1.00(폭)×2.2m(길이)×0.19m(두께)이다. 이때, 하중은 3점 재하이며 양단은 단순지지로 하였다.

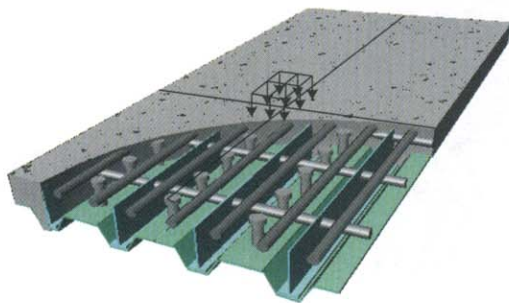
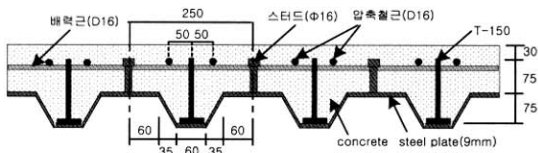
강·콘크리트 합성 바닥판에 대한 해석모델은 해석상의 편의를 위해 전체 구조체의 1/4 모델링(3D)을 실시하였으며, 이때 콘크리트, 강재는 8절점의 Solid 요소로, 강·콘크리트 경계면은 3차원 인터페이스 요소로 모델링하였다. 해석은 범용 구조해석 프로그램인 DIANA를 이용하였다.

재료별 물성은 콘크리트의 압축강도( $f_{ck}$ )는 약 300 kg/cm<sup>2</sup>, 하부강판과 T형강의 강재 거꾸집 항복강도( $f_y$ )는 약 2400 kg/cm<sup>2</sup>(SS 400)이다. 이때, 콘크리트 인장부는 분산균열모델

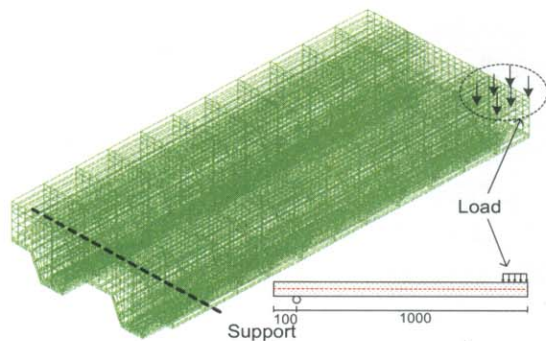
(smeared cracking model), 압축부는 Drucker-Prager 모델을 이용하였으며, 강재는 von-Mises 모델과 2개의 직선으로 이상화한 응력-변형률 관계를 적용하였다(Chen 등, 1988; Frits 등, 1998). 하부강판에는 스티드(φ16×80mm)를 150(D4S6), 250mm(D4S4) 간격으로 설치하여 강재 거꾸집과 콘크리트의 합성작용을 도모하였으며, 압축철근과 배력철근은 D16의 이형 철근을 이용하였다.

인터페이스 요소의 강성은 기존의 실험과 해석을 통해 알려진 초기 접선강성( $k_t^0$ )은  $10^0$ ,  $10^1$ MPa/mm의 선형-탄성 모델(Hajjar 등, 1998; 정 등, 2002)과 Soh 등(1999)의 해석모델에 따라 최대 접선응력( $t_t^m$ )을 0.43~2.24MPa로 변화시킨 5가지 비선형 모델(접선응력-슬립 관계)을 적용하여(표 1, 그림 6), 휨 거동을 받는 합성 구조체에 대해 합성작용의 차이와 경계면의 비선형 거동 특성에 따른 보다 정밀한 구조거동 차이를 규명하였다.

이때, 강판·콘크리트 경계면에서 전단연결재를 사용하지 않은 자연접합인 경우의 최대 접선응력은 0.43MPa 내외로 알려져 있고(Chiew 등, 1999), 전단연결재 사용에 따른 합성작용 증가에 따라 최대 접선응력을 차별적으로 0.78~2.24MPa 까지 증가시켰다. 이에 대해 양(1998)이 강판과 콘크리트가 스티드(φ19×130mm)에 의해 합성된 시험체(30(너비)×15(폭)×33(높이)cm)에 대해 실시한 전단부착 실험(push-out test) 결과에 의하면 최대 접선응력시의 상대슬립은 약 0.4~0.7mm 내외이고, 시험체에 스티드를 2개 설치한 경우의 최대 접선응력은 약 2.67MPa로 나타나고 스티드를 1개 설치한 경우는 약 1.33MPa로 예상되므로, 본 연구의 경계면 해석모델은 스티드를 이용한 실제의 강판·콘크리트 합성상태를 잘 반영하는 것으로 생각된다. 다만, T-형강의 경계면은 스티드가 설치되지 않아서 자연접합에 가까울 것으로 생각되었으나 본 연구에서는 고려하지 않았다.



(a) 강·콘크리트 합성 바닥판



(b) 해석모델

그림 5. 강·콘크리트 합성 바닥판과 해석모델

표 1. 경계면 해석모델의 주요 변수

해석모델	$t_t^m$ (MPa)	$u_t^m$ (mm)	$k_t^0$ (MPa/mm)	슬립-연화
Linear1	-	-	$10^0$ (1.0)	미고려
Linear2	-	-	$10^1$ (10.0)	
Nonlinear1	0.43		3.0	
Nonlinear2	0.78		6.0	
Nonlinear3	1.15	0.4	9.0	고려
Nonlinear4	1.51		12.0	
Nonlinear5	2.24		18.0	

비선형 경계면 모델의 초기 접선강성( $k_t^0$ )은 3.0~18.0 MPa/mm으로 선형-탄성 모델의  $10^0$ ~ $10^1$ MPa/mm와 유사

한 값을 갖는다. 이에 대해서도 기존의 연구결과 강판과 콘크리트 경계면의 초기 접선강성은 약 1.0~50.0MPa/mm의 범위 내에 있는 것으로 알려져 있어 타당한 것으로 생각된다 (Hajjar 등, 1998; 정 등 2002).

### 3.2 경계면 모델별 해석결과

#### 3.2.1 하중-처짐 곡선

강-콘크리트 경계면의 응력-변위(슬립) 관계를 2.3절에 나타난 비선형 모델로 가정하여(그림 6) 비선형 해석을 실시하였고, 이에 대한 해석결과의 하중-처짐 곡선은 그림 7에 나타난 바와 같다. 경계면 비선형 모델의 특징은 최대 접선응력과 이후의 슬립-연화(slip-softening) 현상을 고려한 것으로 이에 대한 합성 구조체의 거동 변화를 규명하는 것이 중요하다.

해석결과 선형-탄성과 비선형 모델의 가장 큰 차이점은 구조체 항복 이후의 경화, 연화 거동인 것으로 나타났다. 선형-탄성 모델의 경우 구조체 항복 이후 하중이 계속 증가하는 경화현상(hardening)이 지속되는 반면, 비선형 모델의 경우 구조체 항복 이후의 뚜렷한 연화현상(softening)을 나타내어

실제 구조체의 거동(Test1, 2)에 근접한 거동을 나타내었다. 이러한 현상은 최대 접선응력이 상대적으로 낮을수록 보다 명백하게 발생하여, 최대 접선응력이 높은 경우에는 선형-탄성 모델에 의한 해석결과와 유사한 거동을 나타냈지만 최대 접선응력이 낮아질수록 항복 이후의 거동이 상이하여 항복하중과 극한하중에서 상당한 차이를 나타내었다.

따라서 비선형 모델의 경우 선형-탄성 모델에 비해 구조체의 항복 이후 거동을 보다 정확하게 모사할 수 있는 것으로 나타났으며, 이때 구조체의 항복 시점은 합성작용의 차이를 나타내는 비선형 모델의 최대 접선응력 크기에 크게 의존적인 것으로 나타났다. 이에 대한 실제 실험결과도 전단연결재를 150mm 간격으로 배치한 시험체가(D4S6, Test1) 250mm 간격으로 배치한 경우(D4S4, Test2)보다 높은 구조성능을 나타내어 해석결과를 뒷받침하고 있다.

#### 3.2.2 강재(T형강, 하부강판) 거동 특성

강-콘크리트 합성 바닥판의 구성 요소 중 T형강은 하중 지탱에서 가장 큰 역할을 담당하는 부재이고, 하부강판은 시공시 거푸집의 역할뿐만 아니라 구조부재로서 인장력을 부담하는 역할을 담당한다. 따라서 강재의 하중단계별 변형률과 응력의 변이를 하부강판은 인장부에 대해, T형강은 압축부-중립부-인장부에 대해 분석하였으며, 그 결과는 그림 8, 9에 나타난 바와 같다.

분석 결과 T형강과 하부강판은 모두  $0.0012\epsilon$  ( $f_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$ ,  $E_s = 2.0 \times 10^6$ )에서 항복이 시작되며 최대 접선응력이 낮을수록 콘크리트 균열 후 응력과 변형률이 빨리 증가하였다. T형강 인장부에서 응력 증가 경향이 변화하는 하중단계 A, B, C지점은 각각 콘크리트 균열 발생(A, 약 25.0tonf), 하부강판 인장부 항복(B, 약 46.2~53.3tonf), T형강 인장부 항복(C, 약 53.6~61.0tonf) 시점으로, 각 부재의 균열과 항복에 의해 하중 분담률이 변화함을 알 수 있다. 또한 강판과 콘크리트 경계면의 슬립 거동은 콘크리트 균열발생(A) 이후에 시작됨을 알 수 있다 (Veljkovic, 1996).

그러나 경계면의 비선형 해석 모델에 따라 하부강판과 T형강의 항복하중은 각각 약 46.2~53.3tonf, 약 53.6~61.0 tonf으로 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있다. 이것은 경계면 비선형 해석 모델별 최대 접선응력과 슬립-연화 현상의 차이라기 보다는 주로 경계면 해석 모델별 초기 접선강성의 차이(3.0~18.0MPa/mm)에 따른 응력 분담율의 차이이고, 어느 정도의 합성작용이 제공된 상태에서 경계면 해석 모델의 최대 접선응력과 슬립-연화 현상의 차이는 항복이후의 거동 즉, 최대하중 등에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

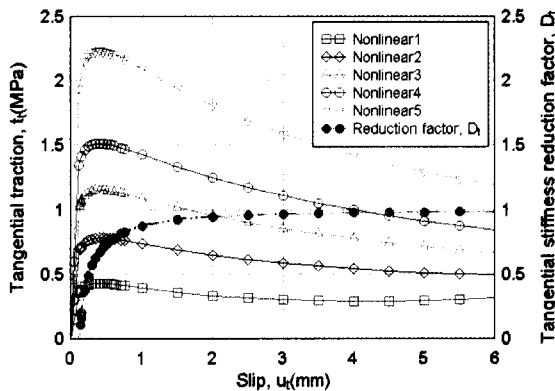


그림 6. 인터페이스 요소의 비선형 접선강성 모델

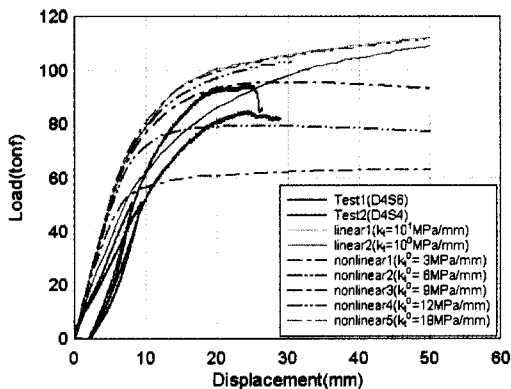
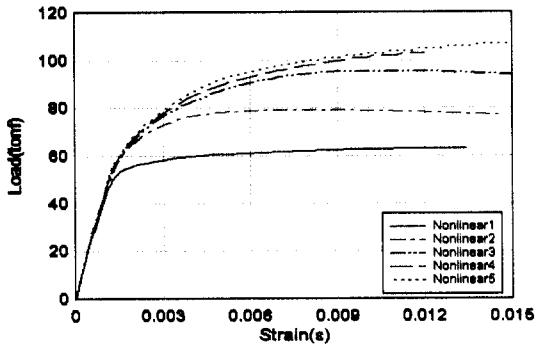
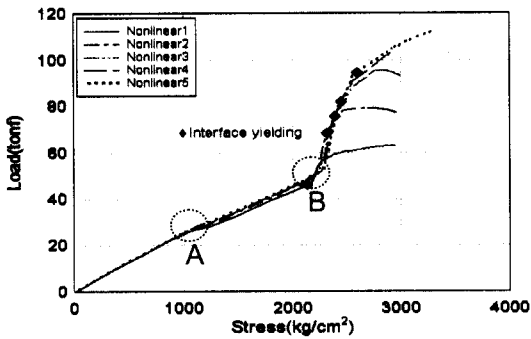


그림 7. 경계면 모델별 하중-처짐 곡선



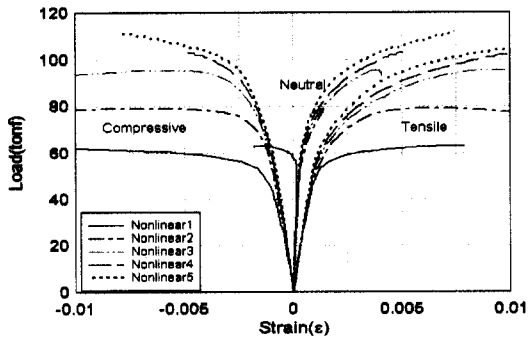


(a) 변형률

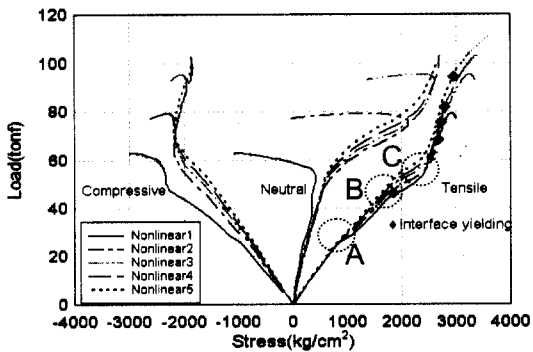


b) 응력

그림 8 하부강판 거동(인장부)



(a) 변형률



(b) 응력

그림 9. T형강 거동(압축-중립-인장부)

### 3.2.3 콘크리트 거동 특성

콘크리트의 하중단계별 변형률과 응력의 변이를 인장부-중립부-압축부에 대해 분석하였으며, 그 결과는 그림 10, 11에 나타난 바와 같다.

콘크리트의 인장부는 경계면 비선형 해석모델별로 동일하게 약 12 tonf에서 최대 인장응력(최대 압축응력의 약 10%, 30 kg/cm<sup>2</sup>)에 도달하여 균열이 발생하고(A-1), 중립부는 비선형 해석 모델별로 약 15~30 tonf에서 최대 인장응력에 이

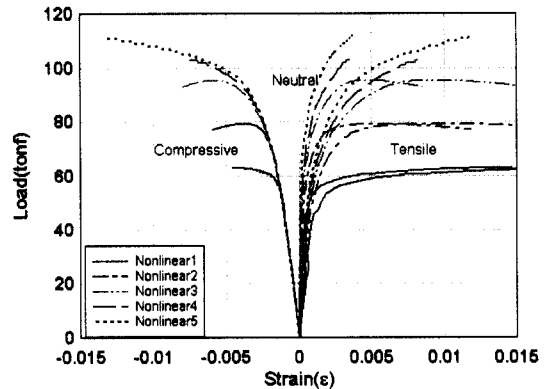
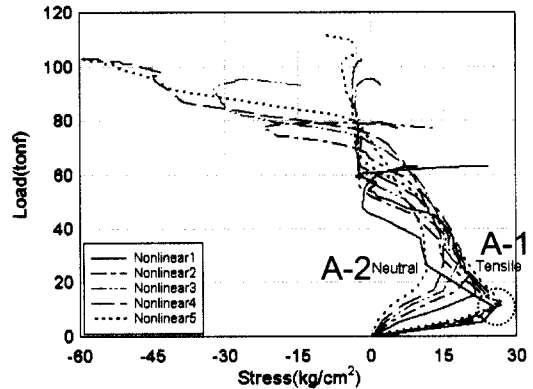
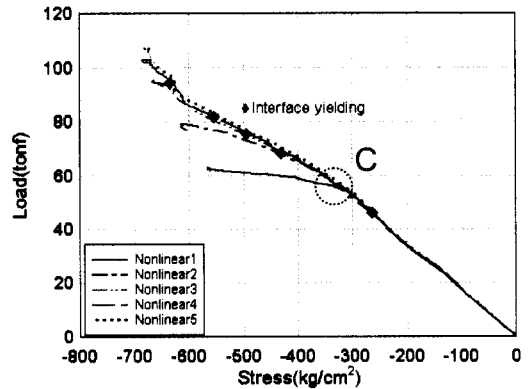


그림 10. 콘크리트 변형률(압축-중립-인장부)



(a) 인장-중립부



(b) 압축부

그림 11. 콘크리트 응력

르지만(A-2) 균열응력으로 발전하지 않고 감소하는 것으로 나타났다. 인장부 균열의 중립부 진전 여부는 실험시 시험체 측면의 균열진전 상태 관측으로도 확인할 수 있는데, 본 시험체의 실험시 외부 측면에서 중립부로의 균열진전은 발생하지 않았다. 따라서 본 시험체는 횡방향 강성이 커 일방향에 가까운 거동을 나타내므로 내측도 외측과 동일하게 인장부의 균열이 중립부로 진전되는 것은 아니며, 콘크리트 인장부의 균열 발생과 중립부의 최대 인장응력 도달이 종합적으로 T형강과 하부강판의 거동에 영향을 미치는 것으로 판단된다(그림 8(b), 9(b) 참조). 콘크리트 압축부는 경계면 해석 모델별로 T형강 인장부 항복 후(C) 응력과 변형률이 증가하기 시작하며, 최대 접선응력이 낮을수록 빠른 증가가 이루어진다.

### 3.3 분석

#### 3.3.1 경계면 비선형 모델별 주요 하중

경계면 모델에 따라 주요 부재가 항복할 때 하중과 최대하중은 표 2, 그림 12에 나타난 바와 같다. 합성 구조체의 거동은 가장 먼저 콘크리트 인장부에 균열이 발생하며, 다음으로 경계면 모델에 따라 약 46.2~53.3tonf에서 중앙부 하부강판의 항복이 시작된다. 다음으로 경계면 모델에 따라 약 53.6~61.0tonf에서 중앙부 T형강의 항복이 시작되며, 인터페이스 요소의 항복은 약 46.2~94.6tonf에서 시작된다. 경계면 모델에 따른 합성 구조체의 최대하중은 약 63.0~112.0tonf이다. 따라서 합성 구조체의 콘크리트 균열 하중과 하부강판, T형강 항복하중은 경계면 모델에 따라 큰 차이가 발생하지 않지만(약 13.8~15.4%), 인터페이스 요소의 항복하중과 합성 구조체의 최대하중은 경계면 모델에 따라 큰 차이를 갖는 것으로 나타난다(약 77.8~104.8%).

이상의 결과를 종합하면 경계면 비선형 해석 모델 Nonlinear1에서는 T형강 항복과 인터페이스 요소의 최대 접선응력 도달이 동시에 발생하여 이후 슬립-연화 현상이 진행되지만, 이외의 비선형 해석 모델에서는 T형강의 항복이후에 인터페이스가 최대 접선응력에 도달하는 것을 알 수 있다. 따라서 하부강판과 T형강 항복하중의 차이는 경계면 해석 모델별 최대 접선응력과 슬립-연화현상의 차이라기보다는 주로 경계면 해석 모델별 초기 접선강성의 차이에 따른 응력 분담율의 차이에 기인하는 것이며, 어느 정도 합성작용이 제공된 상태에서 최대 접선응력과 슬립-연화 현상은 최대하중과 같은 항복 이후의 거동에 보다 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다(Veljkoic, 1996). 따라서 합성 구조체의 구조성능은 인터페이스 요소의 초기 접선강성, 최대 접선응력, 슬립-연화현상을 망라하는 강-콘크리트 경계면의 합성력에 크게 의존적인 것으로

나타난다.

표 2. 경계면 모델별 주요 부재의 항복하중과 최대하중

경계면 모델	하중(tonf)			최대하중(tonf)	비고	
	균열	하부강판 항복	T형강 항복			
Nonlinear1		46.2	53.6	46.2	63.0	
Nonlinear2		48.9	55.8	68.3	79.3	
Nonlinear3	12.0	51.0	58.3	75.4	95.6	
Nonlinear4		52.2	59.7	82.0	103.0	
Nonlinear5		53.3	61.0	94.6	112.0	
변이(%)		15.4%	13.8%	104.8%	77.8%	

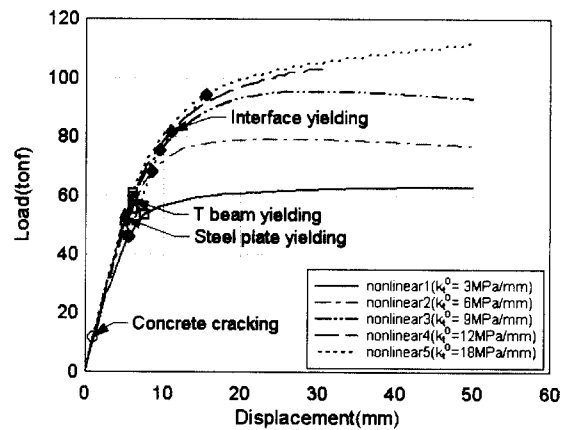


그림 12. 경계면 모델별 주요 하중

#### 3.3.2 합성 구조체의 설계

합성 구조체의 설계에서 경계면에 대한 비선형 모델이 필요한 분야는 휨 설계와 전단연결재 설계인 것으로 생각된다. 그림 12에 나타난 바와 같이 합성 구조체는 경계면 해석 모델에 따라 구조성능이 상이하게 나타나므로(합성방법과 합성크기에 따른 구조성능 변화) 합성구조체의 휨 설계에서는 경계면 특성을 고려한 부분합성 휨 설계가 필요하다. 또한 인터페이스 항복(최대 접선응력 지점, 상대슬립 0.4mm) 이후 접선응력이 저하되는(합성작용의 저하) 슬립-연화 현상으로 하중-처짐 곡선의 기울기가 보다 완만해지는 것을 알 수 있으며, 실제 설계에서는 특정 하중단계까지 두 재료 사이의 원활한 합성작용이 이루어지도록 전단연결재를 설계할 필요가 있다.

실제로 euro-code에서는 이러한 현상을 반영하여 최대하중에서 0.5mm(+여유치 10%)의 상대슬립을 기준으로 취성 설계와 연성 설계를 구분하고 있다(Veljkoic, 1996). 이것은 전단부착실험에 의한 경계면 접선응력-슬립 관계의 규명과 이를 이용한 비선형 구조해석에 의해 가능하며, 앞으로 해석적 방법에 의한 합성 구조체의 휨 설계와 전단연결재 설계의 바탕을 제공할 것으로 생각된다.



4. 결론

본 논문에서는 강·콘크리트 합성 구조체에 대해 강판과 콘크리트 경계면의 비선형 응력-슬립 거동을 고려한 비선형 구조해석을 다루었으며 결론은 다음과 같다.

- (1) 강·콘크리트 합성 구조체는 부분합성 거동을 나타내고 완전합성을 가정한 일반 해석기법은 구조성능 측면에서 과대평가 결과를 나타내므로 부분합성에 적합한 적합한 해석기법이 필요하다.
- (2) 이 경우 스티드의 모델링은 보다 정확한 결과를 나타내겠지만 모델링과 해석에 너무 많은 노력이 소요되므로, 인터페이스 요소를 이용한 강·콘크리트 경계면의 모델링은 합성구조체의 경계면 거동을 적절히 모사할 수 있어 합성 구조체에 효율적 해석기법인 것으로 평가되었다.
- (3) 이때 경계면을 모사하는 인터페이스 요소에 대한 선형-탄성 모델은 최대 접선응력 이후의 슬립-연화 현상을 반영하지 못하여, 휨 거동을 나타내는 합성 구조체의 항복 이후 거동에 대해 과대평가의 결과를 나타내었다.
- (4) 경계면에 대한 비선형 모델은 최대하중 등과 같은 항복 이후의 거동을 보다 정확하게 나타내며, 초기 접선강성은 부재의 항복하중에 최대 접선응력과 슬립-연화 현상은 합성 구조체의 최대하중과 같은 항복이후 거동에 주로 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (5) 따라서 합성 구조체의 구조성능은 인터페이스 요소의 초기 접선강성, 최대 접선응력, 슬립-연화현상 등과 같은 강·콘크리트 경계면의 합성작용에 크게 의존적인 것으로 나타났다.
- (6) 이상의 연구 결과는 해석적 방법에 의한 합성 구조체의 휨 설계와 전단연결재 설계의 바탕을 제공할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

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)