

# 경계면 요소를 사용한 강·콘크리트 혼합 거더의 비선형 거동 해석

## Nonlinear Analysis of Steel-concrete Composite Girder Using Interface Element

권희정\* · 김문겸\*\* · 조경환\*\*\* · 원종화\*\*\*\*

Kwon, Hee-Jung · Kim, Moon Kyum · Cho, Kyung Hwan · Won, Jong Hwa

### Abstract

In this study, an analysis technique of hybrid girder considering nonlinearity of steel-concrete contact surface is presented. Steel-concrete hybrid girder shows partial-interaction behavior due to the deformation of shear connectors, slip and detachment at the interface, and cracks under the applied loads. Therefore, the partial-interaction approach becomes more reasonable. Contact surface is modeled by interface element and analyzed nonlinearly because of cost of time and effort to detailed model and analysis. Steel and Concrete are modeled considering non-linearity of materials. Material property of contact surface is obtained from push-out test and input to interface element. For the constitutive models, Drucker-Prager and smeared cracking model are used for concrete in compression and tension, respectively, and a von-Mises model is used for steel. This analysis technique is verified by comparing it with test results. Using verified analysis technique, various analyses are performed with different parameters such as nonlinear material property of interface element and prestress. The results are compared with linear analysis result and analysis result with the assumption of full-interaction.

**Keywords :** hybrid girder, interface element, nonlinear, partial interaction

### 요 지

혼합구조체의 강-콘크리트 경계면은 하중이 증가함에 따라 합성작용 저하, 미세균열, 슬립 및 분리 등으로 비선형 거동을 나타내어 부분합성에 적합한 해석기법이 필요하다. 스티드의 상세해석을 통하여 이를 실현할 수 있으나 이는 해석 결과의 실효성에 비해 시간과 비용이 많이 투입되기 때문에 본 연구에서는 접합부의 경계비선형과 강-콘크리트의 재료비선형을 고려하여 더욱 정확한 강·콘크리트 혼합구조 해석기법을 제안하였다. 접합부의 경계면의 비선형성은 인터페이스 요소를 이용하여 모델링한다. 이를 위해 먼저 경계면의 비선형 거동 물성치를 산정하여야 한다. 경계면의 물성은 push-out test 등을 통하여 얻을 수 있는데 이는 기존에 연구되었던 실험결과를 이용하였다. 강과 콘크리트의 재료비선형을 고려하기 위해 콘크리트의 압축부는 Drucker-Prager 모델을 이용하고, 강재는 von-Mises 모델과 2개의 직선으로 이상화된 응력-변형률 관계를 적용하였다. 해석의 검증을 위해 프리스트레스트 콘크리트-강 혼합구조를 갖는 혼합거더의 정적 휨 거동에 관해 해석하여 기존의 실험결과와 비교하였다. 제안된 혼합구조 해석 기법을 이용하여 경계면의 비선형 모델을 변화시켜가면서 해석을 수행하여 강-콘크리트 혼합구조체의 거동을 분석하였다. 이후 경계면의 선형 해석방법과 완전부착을 가정하는 해석방법의 결과와 비교·분석하여 제안한 비선형 해석기법의 타당성을 검증하였다.

**핵심용어 :** 혼합구조, 경계면 요소, 경계비선형, 합성작용

### 1. 서 론

복합구조는 다른 종류의 재료가 결합하여 기능을 발휘하는 구조로서 토목분야에서는 주로 강과 콘크리트를 사용하여 구성한다. 복합 구조체는 강과 콘크리트의 재료적 장점을 살리면서 이들의 결합에 의해 각 재료의 단점을 보완하여 단일 재료 또는 단일 부재에서 얻을 수 없는 우수한 구조적 특성을 갖게 되어 최근 많은 분야에서 적용과 시도가 이루어지고 있다.

복합구조는 시대의 요구에 따라 다양하게 발전되어 왔으며, 그 정의나 분류에 대해 아직까지 명확한 기준이 없는 실정이다. 일본토목학회에서 정의한 바에 따르면 복합구조를 총칭으로 하고 이것을 합성구조와 혼합구조로 구별한다. 합성구조는 부재의 단면이 이종재료의 조합으로 구성되고 그들이 일체로 작용하는 구조를 말하며, 혼합구조는 이종부재가 이음부에 의해 결합한 구조시스템을 의미한다. 특히 교량 상부구조에 사용되는 복합구조에는 합성 I형교, 합성 박스 거더교, 합성 트러스교, 합성 바닥판교, 합성 라멘교, 합성 아

\*연세대학교 토목공학과 응용역학연구실 · 공학석사 (E-mail : agnes\_and@hotmail.com)

\*\*정희원 · 연세대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : applymkk@yonsei.ac.kr)

\*\*\*GS건설(주) 기술연구소 선임연구원 · 공학박사 (E-mail : khcho2@gsconst.co.kr)

\*\*\*\*정희원 · 교신저자 · 연세대학교 토목공학과 응용역학연구실 박사과정 (E-mail : examve@yonsei.ac.kr)

치교와 같이 기존에 많이 사용되어 오던 합성구조와 복합 PC교 또는 복합 사장교와 같이 근래에 그 사용이 늘어난 혼합구조가 있다.

혼합구조란 이종재료로 이루어진 부재를 조합하여 전체를 구성하는 구조 형식으로 예를 들어, 주경간을 강구조로 하고 측경간을 철근 콘크리트 또는 프리스트레스트 콘크리트 구조로 하여 사장교 또는 3경간의 연속 거더에 적용하면 구조면에서 큰 이점이 생긴다. 이러한 구조에서는 강 거더와 콘크리트 거더의 자중차이에 의해 중앙경간의 휨모멘트가 경감되며, 중앙 경간에 비해 측 경간이 짧은 경우 문제가 되는 단지점의 부분력 문제를 해결할 수 있다.

본 연구는 효율적인 교량 설계를 위하여 강·콘크리트 혼합 거더를 사용한 교량의 접합부 거동 해석 방법 제안을 그 목적으로 하며, 본 연구에서는 단일 혼합 거더에 대한 실험 및 수치해석을 통하여 해석 기법에 대한 연구 및 검토를 수행하였다.

강-콘크리트 합성 구조체의 거동과 구조성능을 보다 정확하게 규명하기 위해서는 이러한 비선형의 경계면 거동특성을 고려한 해석이 필요하지만, 지금까지는 경계면을 고려하는 해석방법의 어려움으로 완전합성으로 가정하거나 경계면 거동을 고려하더라도 경계면의 비선형 거동특성 규명이 어려워 선형-탄성으로 가정하였다. 이러한 해석방법은 합성구조체의 실제 거동을 정확하게 규명하기에 어려움이 있었고, 따라서 합성 구조체의 구조설계는 대부분 실험을 통한 경험적 방법에 의존하였다. 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.

강과 콘크리트를 연결하기 위해서는 스티드 전단연결재를 사용한다. 따라서 스티드의 부분합성 거동에 관한 연구가 많이 이루어졌다. Ohelers과 Johnson(1987)은 수많은 push-out test를 통해 스티드 전단연결재의 하중-슬립 관계를 연구했다. 이 데이터의 통계학적 분석을 통해 전형적인 하중-슬립 관계를 규명하였다. Oehlers *et al.*(2000)은 강-콘크리트 합성 보의 단면 휨 응력에 대한 스티드 전단연결재와 합성 정도의 영향에 대해 연구하였다. 그는 스티드가 있음에도 불구하고 강-콘크리트 합성구조체가 부분 합성 거동을 보이고, 같은 하중 하에서 부분합성 상태의 휨 응력이 완전 합성 상태일 때보다 더 크다고 설명하였다. 국내에서는 이갑중(1997)과 김용희 등(1997)이 스티드의 간격과 위치가 합성 바닥판의 거동에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 그들은 스티드의 간격이 구조물의 거동에 중요한 영향을 미친다는 것을 알고 합성 바닥판의 스티드 배치를 위한 기초적인 설계 지침을 제안하였다.

강-콘크리트 경계면에 대해 Soh *et al.*(1999, 2002)는 첫

번째로 인터페이스 요소를 이용하여 부분합성 거동에 대한 수치해석 연구를 수행하였다. Soh *et al.*은 push-out test를 위해 3D 인터페이스 요소를 이용하여 비선형 해석을 수행하였다. push-out test를 통해 얻은 인터페이스의 거동에 대한 실험결과는 유한요소 모델링에 적용하였다. 명백히 인터페이스 요소를 이용한 수치해석 방법은 토목 구조물에서 널리 발견되는 강-콘크리트 합성구조체의 해석에 적합하다고 동의되어 왔다. 그러나 이 연구는 전단 연결재가 없는 자연접합에 대해서만 다루었고, 일축 하중 하의 push-out test에 대해서만 고려하였다.

이와 같은 연구들을 바탕으로 복합구조분야에서는 합성바닥판에 관한 연구가 주종을 이룬다. Veljkovic(1998, 2000, 2001)는 pull-out test를 통한 경계면 거동 모델만을 이용한 해석적 방법으로 부분합성 거동 특성을 나타내는 합성 바닥판의 휨 설계방법에 대해 연구하여 연구결과를 euro-code4에 제안하였다. 그리고 정연주(2005)는 push-out test를 통해 강-콘크리트 경계면의 부분합성 거동을 규명하고 휨과괴실험과 피로실험을 통해 단순화된 합성바닥판의 설계방법을 제안하였다.

대부분의 연구는 콘크리트와 강의 합성단면에 대한 해석이 주로 이루어졌다. 합성구조 즉, 합성바닥판, 합성형 및 합성기둥에 관한 연구가 주종을 이룬다. 콘크리트와 강 이종재료로 이루어진 부재를 조합하여 전체를 구성하는 혼합구조에 관한 연구는 극히 소수에 의해 이루어졌다. 이 또한 경계면을 고려하는 해석방법의 어려움으로 완전합성으로 가정하거나 경계면의 거동을 고려하더라도 선형 탄성으로 가정하여 단순한 해석만을 하고 있다.

본 연구에서는 경계면의 비선형성을 고려하여 복합구조형식 교량의 접합부 거동 해석기법을 제안한다. 접합부의 경계면의 비선형성은 인터페이스 요소를 이용하여 모델링한다. 제안된 접합부 해석 기법을 이용하여 경계면의 비선형 모델을 변화시켜가면서 해석을 수행하여 강-콘크리트 혼합거더의 거동을 분석하였다. 그리고 경계면의 선형 해석방법과 완전부착을 가정하는 해석방법의 결과와 비교·분석하여 제안한 혼합거더 해석기법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 경계면 비선형 모델을 이용한 혼합구조 해석기법

### 2.1 접합부 경계면의 거동

전단 연결재는 두 재료, 강-콘크리트를 연결하고 있고, 강-콘크리트 합성부재는 하중에 의해 변형되고 파괴에 이른다. 합성부재가 변형함에 따라 강-콘크리트 연결부위는 분리되거나 슬립이 일어난다. 그 결과 합성작용이 저하되며, 하중이 점점 커지면 접촉면은 파괴된다. 그림 1과 같이 구조물의 접합부가 완전합성일 때는 두 부재가 하나의 부재처럼 거동한다. 그러나 합성작용이 저하되기 시작하면 두 부재는 상대적으로 변위를 갖게 되고 합성작용이 작아질수록 변위가 더욱 커진다. 낮은 합성력에서는 콘크리트의 균열 발생과 확대로 강판 상부의 인장력은 크게 감소하여 압축 상태를 나타낸다. 즉, 각각의 강, 콘크리트 모두 상부는 인장되고 하부는 압축되는 거동을 하며, 두 부재의 변형률이 다르게 된다.

이러한 현상으로 발생하는 경계면에 접한 콘크리트와 강판

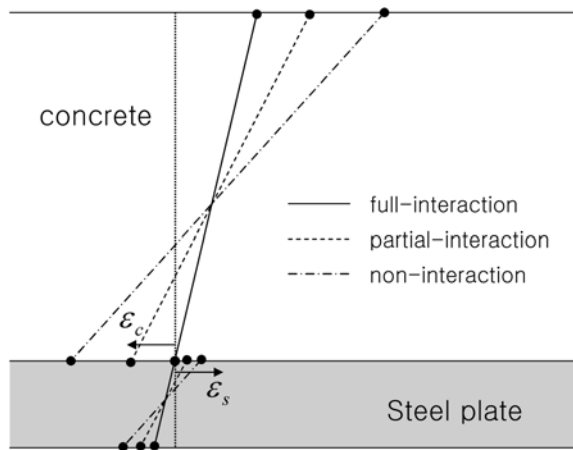


그림 1. 강-콘크리트 경계면 거동

의 상대적 움직임이 슬립(s)이고, 슬립과 슬립 변형률(ds/dx)은 콘크리트와 강의 변형률( $\epsilon_c, \epsilon_s$ )로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다(Veljko, 1996).

$$s = \int_0^x \epsilon_c dx - \int_0^x \epsilon_s dx \quad (1)$$

$$\frac{ds}{dx} = \epsilon_c - \epsilon_s \quad (2)$$

이와 같이 두 재료의 합성정도는 부재의 전단흐름과 접합면의 변형률 분포를 변화시키고, 강도, 강성, 파괴모드와 같은 구조물의 거동에 영향을 미친다. 따라서 접합부 거동을 분석하기 위해서는 두 재료의 합성 정도를 고려해야 한다.

두 부재, 강판과 콘크리트는 전단연결재에 의해 접합되고 합성정도는 전단연결재 즉 스티드의 강성과 강과 콘크리트의 자연적인 부착에 의해 결정된다. 그러나 여러 연구결과들에 의하면 합성작용은 주로 스티드에 의해 이루어지고 자연적인 부착이 합성작용에 기여하는 정도는 스티드의 역할에 비해 미미한 것으로 알려져 있다. 따라서 합성정도를 결정하기 위해 스티드의 거동 분석이 선행되어야 한다.

스티드의 거동을 분석하기 위해 강과 콘크리트의 인터페이스를 특수한 요소로 모형화할 수 있으며, 그림 2는 스티드로 연결되어 있는 경계면의 거동을 이상화하여 나타내었다. 이는 구조역학적 관점에서 등분포하중을 다수의 집중하중으로 치환하는 방법의 역의 개념으로 실제 다수의 스티드에 작용하는 집중하중(힘)을 경계면 전체에 대한 가상의 등분포하중(힘)으로 치환하는 개념이다. 따라서 인터페이스 요소의

물성과 이에 따른 해석결과는 스티드에 작용하는 힘뿐만 아니라 강과 콘크리트의 자연적인 부착에 의한 힘도 포함된다. 여기서 인터페이스의 물성치는 push-out test 결과로부터 얻을 수 있다.

### 2.2 경계면의 비선형 거동

강-콘크리트 경계면의 접선방향에 대한 응력-슬립 관계에 대해서는 다양한 경계면 조건(콘크리트-철근, 모르타르-골재, 콘크리트-강판)에 대해 많은 실험이 실시되었으며, 이들 실험 결과 경계면의 형상과 합성정도에 따라 초기 접선강성( $k_t^0$ )과 최대 접선응력( $t_t^m$ )-슬립( $u_t^m$ )의 기울기 간의 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).

여기서,  $u_t^0$ 는 접선방향 초기 슬립,  $u_t^m$ 는 최대 응력시의 슬립,  $u_t^u$ 는 접선방향 유사한계(quasi-limit)슬립,  $u_t^l$ 는 접선방향 한계(limit)슬립을 의미한다.

### 2.3 인터페이스 요소의 물성

인터페이스 요소의 물성은 주로 접선 방향 강성( $k_t$ )을 의미한다. 인터페이스 요소를 이용하여 강-콘크리트 경계면의 거동을 모형화할 경우 인터페이스 요소의 물성은 단위 길이에 대한 응력으로 적용할 수 있다(Frits 등, 1998). 따라서

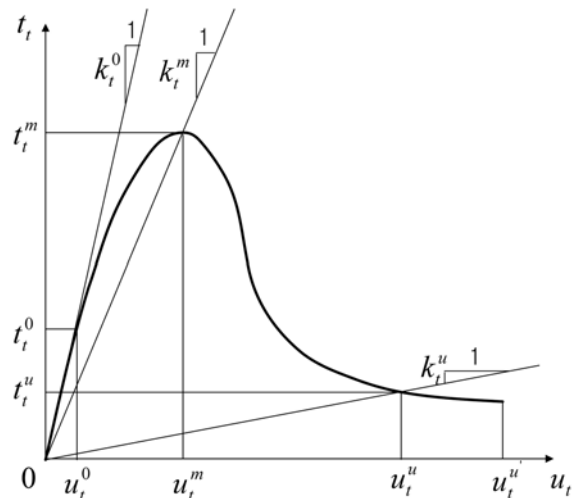
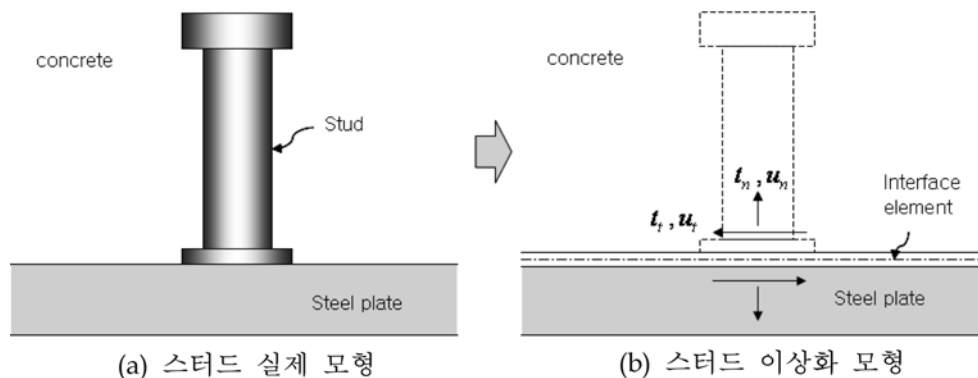


그림 3. 경계면의 접선방향 응력-슬립 관계



(a) 스티드 실제 모형

(b) 스티드 이상화 모형

그림 2. 강-콘크리트 경계면의 해석 모델

표 1. Push-out test 결과(정연주, 2005)

| No.  | $S_s$<br>(mm) | Load (kN) |       | Relative Slip (mm) |         |         |
|------|---------------|-----------|-------|--------------------|---------|---------|
|      |               | $P_p$     | $P_u$ | $u_t^P$            | $u_t^m$ | $u_t^f$ |
| P-D1 | 150           | 200.1     | 219.7 | 2.49               | 4.21    | 11.01   |
| P-D2 | 250           | 160.8     | 175.5 | 2.47               | 4.20    | 12.80   |
| P-D3 | 450           | 97.1      | 107.9 | 2.78               | 5.76    | 13.01   |
| Mean |               |           |       | 2.58               | 4.72    | 12.27   |

push-out test 결과의 하중-상대슬립 관계는 접선응력-상대슬립 관계로 변환되어야 한다. 하중과 접선응력의 관계는 다음과 같다(Soh 등, 2002).

$$t_t = \frac{P}{A_t} \quad (3)$$

여기서  $P$ 는 하중,  $A_t$ 는 강-콘크리트 경계면의 접합 면적,  $t_t$ 는 접선응력이다.

Push-out 시료의 축방향 거동의 경우 식 (3)의 결과는 인터페이스 요소의 물성치로 사용가능하다. 그러나 휨거동의 경우 하중-슬립 곡선이 휨거동과 push-out 경우간의 단면응력분포의 차이에 의해 영향을 받는다. 따라서 휨거동의 경우 push-out 결과는 서로 같은 슬립변형률 값을 갖기 위해 다음과 같이 변환되어야 한다.

$$\int_A (\epsilon_c - \epsilon_s)_a dA = \omega \int_A (\epsilon_c - \epsilon_s)_f dA \quad (4)$$

여기서, 첨자  $a$ 와  $f$ 는 축방향 거동과 휨거동을 가리킨다.  $\omega$ 는 각 경우의 단면 슬립변형률에 대한 계수이다.

식 (4)에서 휨거동에 대한 단면 슬립변형률은 등가 변형률  $\epsilon_{c,eq}$  와  $\epsilon_{s,eq}$  과 곡률에 대한 상대 변형률,  $\xi = \epsilon_{c,eq} / \epsilon_{s,eq}$  을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega \int_A (\epsilon_c - \epsilon_s)_f dA = \omega \xi \int_A (\epsilon_{c,eq} - \epsilon_{s,eq})_f dA \quad (5)$$

계수  $\omega$ 는 휨거동에 대한 변형률  $\epsilon_c$  와  $\epsilon_s$  의 크기를 축방

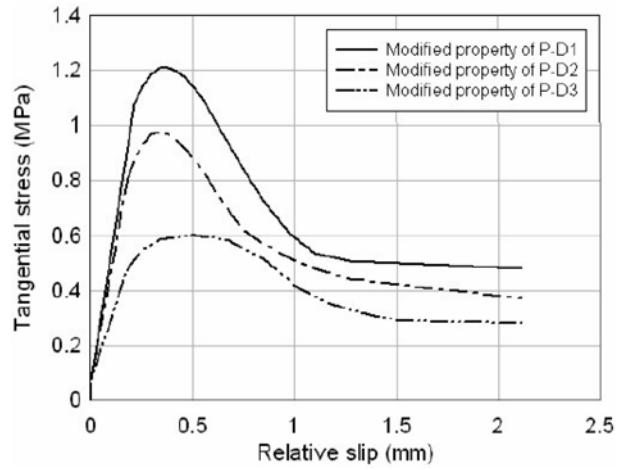


그림 4. 휨거동을 위해 변환된 접선방향 응력-변형률 곡선(정연주, 2005)

향 거동의 경우와 같게 조정하는 역할을 한다. 즉, 접선 방향 응력-슬립 관계에서 상대 슬립과 강성을 비례적으로 조정하는 것이다.

Push-out test를 통해 주로 측정하는 것은 하중-슬립 관계이다.  $P_p$ 와  $P_u$ 는 비례한계하중과 극한하중을 나타내고,  $u_t^P$ ,  $u_t^m$ ,  $u_t^f$ 는 각각 비례한계, 극한, 파괴하중에 대응하는 상대 변위를 나타낸다. 실험 결과는 다음 표 1에 요약하였다(정연주, 2005).

Push-out test 결과를 인터페이스 요소에 사용하기 위해서는 실험결과와 하중-상대슬립 관계는 접선응력-상대슬립 관계로 변환되어야 한다. 실험결과(표 1)는 식 (3)을 이용하여 변환할 수 있고 휨거동의 경우 push-out 결과는 서로 같은 슬립변형률 값을 갖기 위해 식 (4)와 (5)를 이용하여 표 2와 같이 구할 수 있다. 그림 4는 변환된 push-out 결과를 나타낸다.

본 연구에서는 인터페이스 요소(그림 5)를 사용하여 강-콘

표 2. 수정된 인터페이스 요소의 물성(정연주, 2005)

| No.            | Slip Strain |          | $\xi$  | $\omega$ | $t_t^m$<br>(MPa) | $u_t^m$<br>(mm) | $k_t^0$<br>(MPa/mm) |      |
|----------------|-------------|----------|--------|----------|------------------|-----------------|---------------------|------|
|                | push-out    | flexural |        |          |                  |                 |                     |      |
| Full-inter.    | -           | -        | -      | -        | 2.22             | 0.40            | 17.73               |      |
| Partial-inter. | D1          | 36.20    | 160.30 | 2.66     | 0.085            | 1.21            | 0.36                | 5.08 |
|                | D2          | 59.62    | 263.63 | 2.66     | 0.085            | 0.98            | 0.36                | 4.61 |
|                | D3          | 72.33    | 322.13 | 2.67     | 0.084            | 0.60            | 0.49                | 2.72 |
| Non-inter.     | -           | -        | -      | -        | 0.40             | 0.40            | 2.60                |      |
| Mean           | -           | -        | -      | 0.085    | -                | 0.40            | -                   |      |

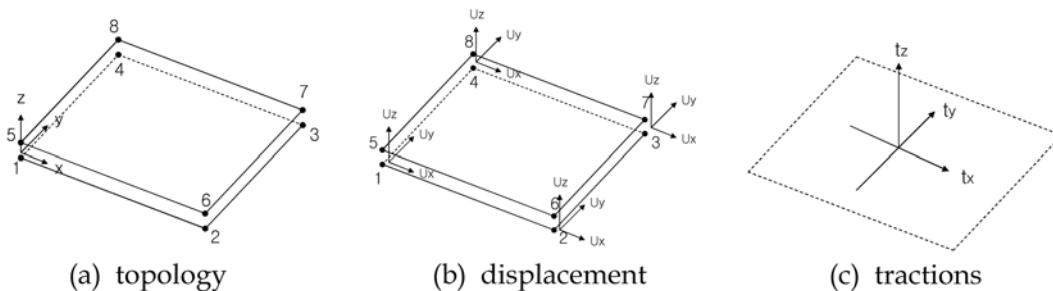


그림 5. 인터페이스 요소

크리트 경계면을 모형화하였다. 인터페이스 요소는 0의 두께를 가지며, 경계면에서 응력( $t$ )-변위( $u$ ) 관계를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다(Frits 등, 1998).

$$t = \begin{pmatrix} t_n \\ t_t \end{pmatrix} \text{ and } u = \begin{pmatrix} u_n \\ u_t \end{pmatrix} \quad (6)$$

여기서  $n$ ,  $t$ 축은 각각 경계면에 대한 수직방향(normal), 접선방향(tangential)을 나타낸다. 강-콘크리트 합성구조체의 스티드 전단연결재는 두 재료의 경계면에 작용하는 전단응력( $t_t$ )과 두 재료를 분리하려는 인장응력( $t_n$ )으로 구성된다. 경계면에 대한 구성방정식은 경계면에서의 응력을 전체 상대변위의 함수로 나타내는 전체 변형이론(total deformation theory)을 바탕으로 하며, 2차원 문제에서 응력  $\Delta t$ 와 상대변위  $\Delta u$  상이의 선형구성관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Frits 등, 1998).

$$\begin{pmatrix} \Delta t_n \\ \Delta t_t \end{pmatrix} = \mathbf{K}_I \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{K}_I$ 는 인터페이스 요소의 강성행렬이고,  $k_n$ 과  $k_t$ 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).

### 3. 혼합구조체 거동 해석

본 장에서는 본 연구에서 제안한 강·콘크리트 혼합구조체에 대한 비선형 경계요소법을 이용한 간략 해석 기법을 검증하기 위해 실증 실험과 유한요소 해석 결과를 비교하였다. 실증 실험 구조체는 그림 6과 같이 H형강과 콘크리트가 스티드에 의해 합성되고 구조성능을 향상시키기 위해 콘크리트에 보강과 프리스트레싱이 도입된 강·콘크리트 혼합구조체이며 H형강과 콘크리트 블럭은 300 mm(폭)×482 mm(높이)×1700 mm(길이)로서 형강에 의해 서로 맞붙여 있다. 이때 하중은 1점재하로 파괴 양상을 관측하며 하중을 증가하였으며, 거더의 양단은 단순지지로 하였다.

#### 3.1 인터페이스 요소를 이용한 비선형 해석모델 및 물성

접합부의 비선형 거동해석은 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 이용하였다. 3차원 유한요소 모델에서 강재는 4-node shell요소를, 콘크리트는 8-node solid요소를 사용하고, 강재와 콘크리트 경계면의 인터페이스 요소로 콘크리트 접

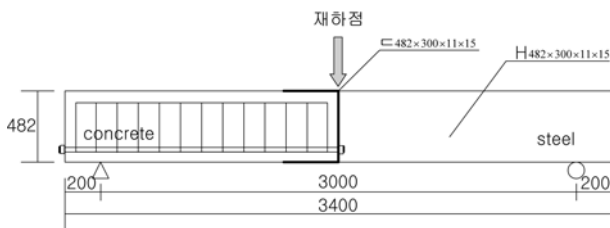


그림 6. 혼합구조체 거동 실증 실험 모델 (단위 : mm)

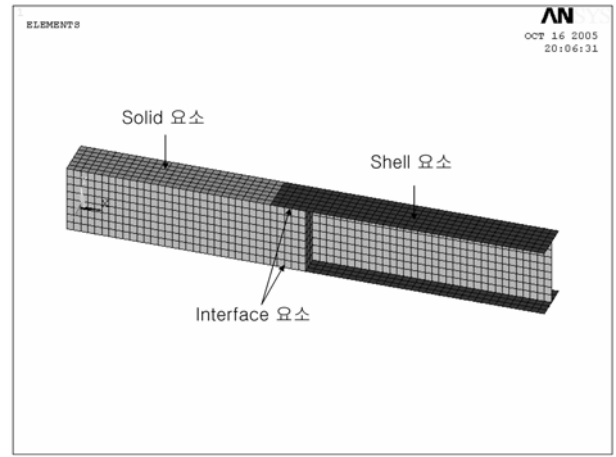


그림 7. 해석기법 검증을 위한 모델

촉면은 8-node contact요소를, 강 접촉면은 8-node target요소를 사용하였다. 그림 7은 설명한 요소들은 사용하여 그림 6의 실증 실험에 사용된 강-콘크리트 복합거더를 모형화한 것이다.

인터페이스 요소는 강판과 콘크리트의 사이에 0의 두께를 가지는 요소로 모형화된다. 인터페이스 요소를 구현하기 위해 강판을 나타내는 shell요소와 콘크리트를 나타내는 solid 요소 사이에 target요소와 contact 요소를 사용하였다.

비선형 해석에 사용된 강-콘크리트 재료별 물성은 표 3과 같고 콘크리트는 압축부는 Drucker-Prager 모델, 인장부는 분산균열모델을 사용하고, 강재는 von-Mises 모델을 사용하였다(정연주, 2005).

#### 3.2 혼합구조체 거동 해석결과

경계면의 비선형성과 재료비선형을 고려하여 혼합구조체의 거동을 해석하였다. 해석모델은 그림 6과 같고 거더의 중앙에 집중하중을 가하였다. 인터페이스 요소에 적용될 경계 비선형 물성은 push-out test결과를 이용하여 구할 수 있다. 구한 값은 앞서 표 2에 나타내었다. 표 2의 결과 중 검증에 사용된 경계면 모델은 스티드 배치간격이 150 mm인 P-

표 3. 해석에 사용된 재료물성

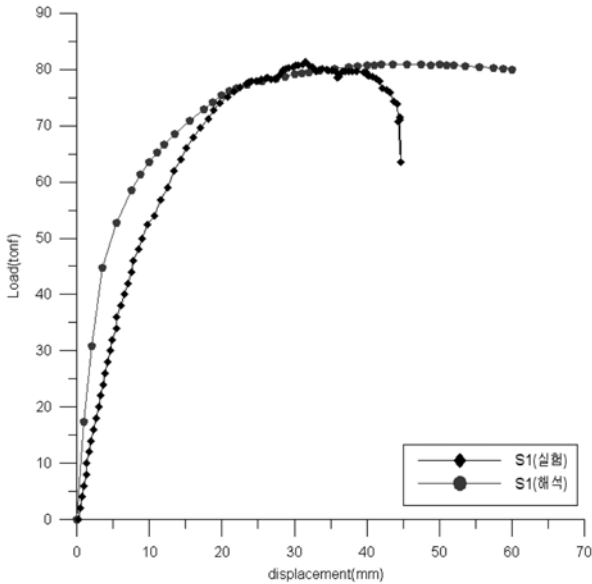
| Concrete                     | Compressive strength, $f_{ck}$  | 39.2 MPa  |
|------------------------------|---------------------------------|-----------|
|                              | Tensile strength, $f_t$         | 3.0 MPa   |
| Modulus of elasticity, $E_c$ | 27.4 GPa                        |           |
| Steel plate                  | Yielding strength, $f_{y1}$     | 245 MPa   |
|                              | Modulus of elasticity, $E_{s1}$ | 197.0 GPa |
| Rebar                        | Yielding strength, $f_{y2}$     | 392 MPa   |
|                              | Modulus of elasticity, $E_{s2}$ | 197.0 GPa |
| Prestressing bar             | Yielding strength, $f_{y3}$     | 1580 MPa  |
|                              | Modulus of elasticity, $E_{s3}$ | 197.0 GPa |

표 4. 혼합구조체 해석모델 종류별 변수

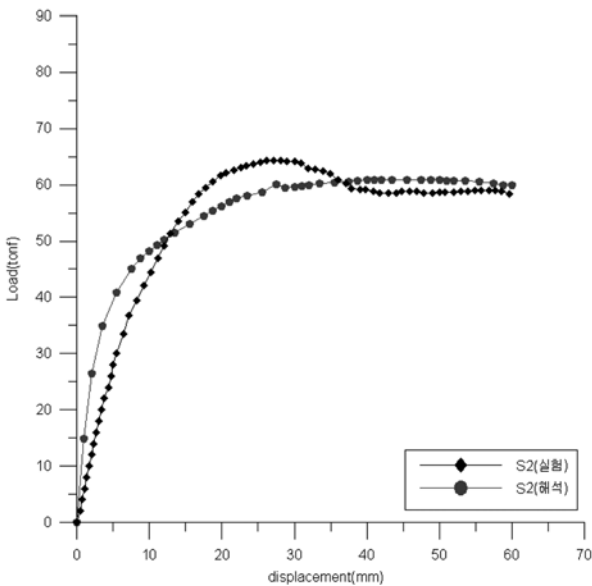
| ID | 스티드 배치간격 | 경계면 모델 | 접합길이 (mm) | 긴장응력     |
|----|----------|--------|-----------|----------|
| S1 | 150mm    | P-D1   | 250       | 1200 MPa |
| S2 | 150mm    | P-D1   | 250       | 800 MPa  |

표 5. 혼합구조체 해석모델별 주요 부재의 항복하중과 최대하중

| 해석모델  | 하중(kN)  |        |         |        |          | 최대하중(kN) |
|-------|---------|--------|---------|--------|----------|----------|
|       | 콘크리트 균열 | H형강 항복 | 보강철근 항복 | 긴장재 항복 | 인터페이스 항복 |          |
| S1    | 170.44  | 439.63 | 602.42  | 747.66 | 782.86   | 793.65   |
| S2    | 146.51  | 341.86 | 451.69  | 564.27 | 582.71   | 597.71   |
| 변이(%) | 14.04%  | 22.23% | 25.02%  | 24.53% | 25.56%   | 24.69%   |



(a) 긴장력이 큰 경우 하중-처짐



(b) 긴장력이 작은 경우 하중-처짐

그림 8. 혼합구조체 거동 실험결과와 해석결과 비교

D3이다. 해석모델 종류별 변수는 표 4에 정리하였다.

해석 모델에 따라 주요 부재가 항복할 때 하중과 최대하중은 표 5, 그림 8에 나타난 바와 같다. 혼합구조체의 거동은 가장 먼저 콘크리트 인장부에 균열이 발생하며, 다음으로 해석모델에 따라 341.86, 439.63 kN에서 강판의 항복이 시작된다. 다음으로 602.42, 451.69 kN에서 보강철근의 항복이 시작되며, 인터페이스 요소의 항복은 582.71, 782.86 kN에서 시작된다. 해석모델에 따른 혼합구조체의 최대하중은 597.71, 793.65 kN이다. 긴장력 증가에 따른 콘크리트 보강철근과 인

터페이스의 항복하중 및 최대하중 증가분(약 24.53~25.56%)은 혼합구조체의 콘크리트 균열 하중 및 H형강의 항복하중의 긴장력에 따른 증가분(약 14.04%, 22.23%) 보다 다소 큰 값을 가지며 이는 긴장력이 커질수록 콘크리트의 균열하중이 커지고 잇따른 보강철근과 H형강의 항복하중이 커지므로 긴장력이 커질수록 전체 구조체가 받는 하중이 커진다고 할 수 있다.

정적 하중에 의한 실험 부재들의 균열, 스티드 탈락 및 최대하중과 해석결과와 비교하여 분석하면, 실험의 균열하중은 218.10 kN이고 해석결과 콘크리트 균열하중은 146.51, 170.44 kN로 나타났고 오차 27.58~32.09%이다. 스티드의 탈락 하중의 경우 실험결과는 513.87, 170.44 kN의 분포를 보였고 해석결과는 782.86, 587.91 kN로 오차는 8.8, 34.36%이다. 파괴하중의 경우 해석결과의 최대하중과 비교했을 때 0.03, 5.2%의 차이를 보였다. 동일한 조건에서 긴장력의 차이를 둔 경우를 비교해 보면 긴장력을 크게 하는 것이 최대하중을 증가시키는 것으로 나타났다. 균열하중과 스티드 탈락하중에서 오차가 많이 생기는 것을 볼 수 있다. 이는 콘크리트 균열하중의 경우 균열이 생기는 응력지점이 어떤 값으로 보느냐에 따라 실제와 많이 달라질 수 있기 때문이다. 해석에서는 콘크리트의 최대 인장응력인 3 MPa에 도달하였을 때를 균열하중으로 가정하고 결과 값을 산출한 것이다. 스티드 탈락하중의 경우에도 스티드를 모델링하지 않고 인터페이스 요소로 이상화하여 모델링했기 때문에 실제와는 달라질 수 있다. 본 연구에서는 인터페이스 요소의 응력-슬립 곡선에서 최대 응력에 도달했을 때를 인터페이스의 항복하중으로 보고 결과 값을 산출했다. 그림과 표에서 알 수 있듯이 혼합구조체의 거동이 전체적인 형상이나 최대하중 등은 거의 유사하게 나타나 수치해석 기법의 타당성을 검증할 수 있었다.

#### 4. 경계면 비선형 모델에 따른 혼합구조체 거동해석

##### 4.1 경계면 비선형 해석모델 및 물성

해석모델은 3장에 설명한 강-콘크리트 혼합거더를 사용하였으며, 다음의 인터페이스 요소의 물성에 대해 긴장력의 변화에 따른 해석을 수행하였다. 긴장력은  $0.4 f_{pu}$ ,  $0.6 f_{pu}$ 를 적용하였다.

인터페이스 요소의 강성은 기존의 실험과 해석을 통해 알려진 초기 접선강성,  $k_t^0$ 는  $10^0$ ,  $10^1$  MPa/mm의 선형-탄성 모델(Hajjar 등, 1998; 정연주 등, 2002)과 정연주(2005)의 해석모델에 따라 최대 접선응력,  $t_t^m$ 을 0.4~2.22 MPa로 변화시킨 4가지 비선형 모델(접선응력-슬립 관계)을 적용하여 휨 거동을 받는 혼합구조체에 대해 합성작용의 차이와 경계면의 비선형 거동 특성에 따른 보다 정밀한 구조거동 차이

표 6. 경계면 선형 및 비선형 해석모델의 주요 변수

| 해석모델       | $t_t^m$<br>(MPa) | $u_t^m$<br>(mm) | $k_t^0$<br>(MPa/mm) | 슬립-연화 |
|------------|------------------|-----------------|---------------------|-------|
| Linear1    | -                | -               | $10^1(10.0)$        | 미고려   |
| Linear2    | -                | -               | $10^0(1.0)$         |       |
| Nonlinear1 | 2.22             | 0.40            | 17.73               | 고려    |
| Nonlinear2 | 1.21             | 0.36            | 5.08                |       |
| Nonlinear3 | 0.98             | 0.36            | 4.61                |       |
| Nonlinear4 | 0.40             | 0.40            | 2.60                |       |

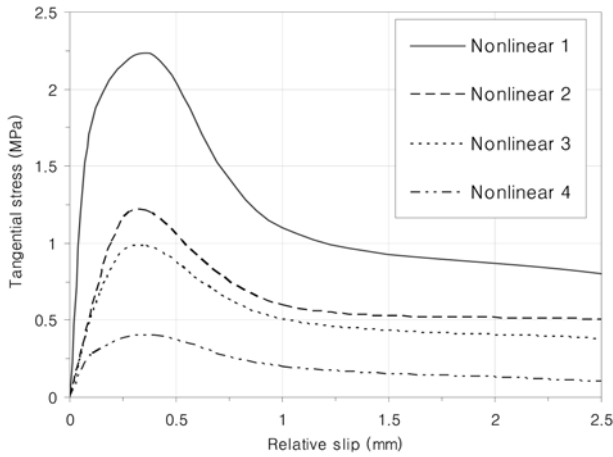


그림 9. 인터페이스 요소의 비선형 접선강성 모델

를 규명하였다. 그림 9는 인터페이스 요소의 비선형 접선강성 모델이고, 경계면 해석모델의 주요 변수는 표 6에 나타내었다.

이때, 정연주(2005)가 강판과 콘크리트가 스티드에 의해

합성된 시험체에 대해 실시한 전단부착 실험(push-out test) 결과에 의하면 강판-콘크리트 경계면에서 전단연결재를 사용하지 않은 자연접합인 경우의 최대 접선응력은 0.4 MPa이고 전단연결재 사용에 따른 합성작용의 증가에 따라 0.6~2.22 MPa까지 증가된다. 최대 접선응력이 2.22 MPa 일때는 강판-콘크리트 경계면이 완전접합 거동을 타나낸다.

비선형 경계면 모델의 초기 접선강성,  $k_t^0$ 은 2.6~17.73 MPa/mm으로 선형-탄성 모델의  $10^0\sim 10^1$  MPa/mm와 유사한 값을 갖는다. 이에 대해서도 기존의 연구결과 강판과 콘크리트 경계면의 초기 접선강성은 약 1.0~50.0 MPa/mm의 범위 내에 있는 것으로 알려져 있어 타당한 것으로 생각된다 (Hajjar 등, 1998; 정연주 등, 2002).

## 4.2 경계면 모델별 해석결과 및 분석

### 4.2.1 경계면 모델별 해석결과

강-콘크리트 경계면의 응력-변위(슬립) 관계를 3장에 나타난 비선형 모델로 가정하여 비선형 해석을 하였다. 그리고 이에 대한 해석결과와 하중-처짐 곡선은 그림 10에 나타난 바와 같다. 경계면 비선형 모델의 특징은 최대 접선응력과 이후의 슬립-연화(Slip-softening) 현상을 고려한 것으로 이에 대한 혼합거더의 거동 변화를 규명하는 것이 중요하다.

해석결과 긴장력이 큰 경우와 작은 경우 모두 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 경화현상이 지속되는 반면, 비선형 모델의 경우 구조체의 항복이후 뚜렷한 연화현상(softening)을 나타내어 실제 구조체의 거동에 근접한 거동을 나타내었다. 이러한 현상은 최대 접선응력이 상대적으로

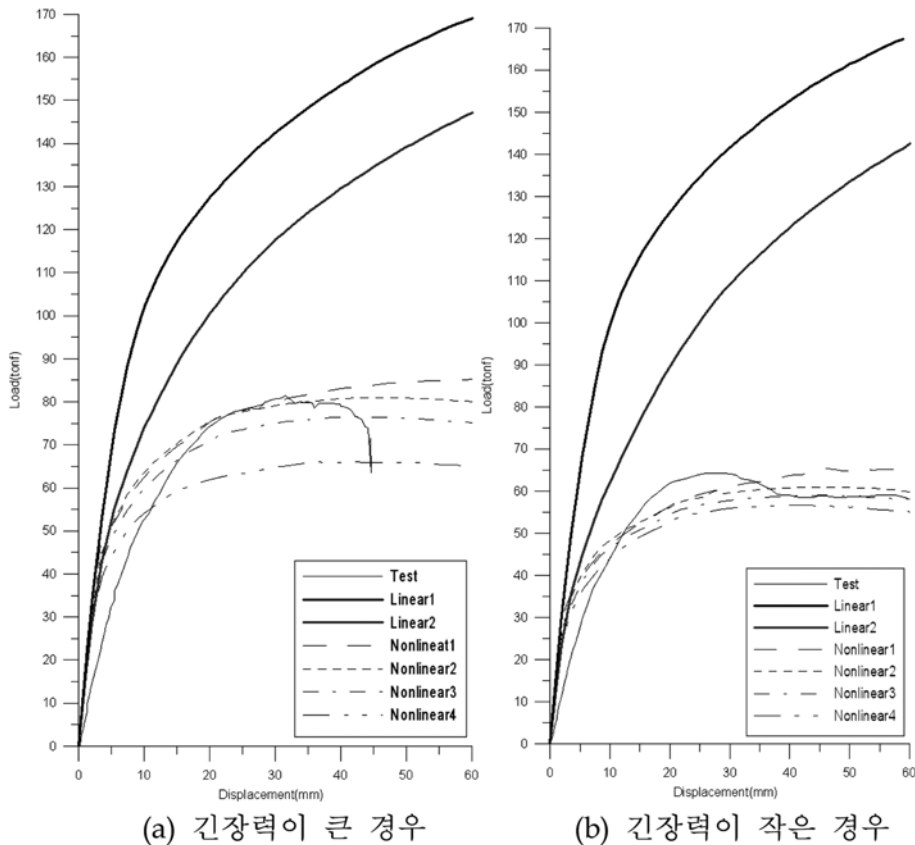


그림 10. 경계면 비선형 모델별 하중-처짐

표 7 경계면 비선형 모델별 주요 부재의 항복하중과 최대하중(큰 긴장력)

| 해석모델       | 하중(kN)  |        |         |        |          | 최대하중(kN) |
|------------|---------|--------|---------|--------|----------|----------|
|            | 콘크리트 균열 | H형강 항복 | 보강철근 항복 | 긴장재 항복 | 인터페이스 항복 |          |
| Nonlinear1 | 187.70  | 474.15 | 644.69  | 792.86 | 820.72   | 835.33   |
| Nonlinear2 | 170.44  | 439.63 | 602.42  | 747.66 | 782.86   | 793.65   |
| Nonlinear3 | 167.99  | 420.80 | 564.57  | 711.47 | 723.43   | 750.60   |
| Nonlinear4 | 157.49  | 385.60 | 492.78  | 586.24 | 602.03   | 648.51   |
| 변이(%)      | 16.09%  | 18.68% | 23.56%  | 26.06% | 26.64%   | 22.36%   |

표 8 경계면 비선형 모델별 주요 부재의 항복하중과 최대하중(작은 긴장력)

| 해석모델       | 하중(kN)  |        |         |        |          | 최대하중(kN) |
|------------|---------|--------|---------|--------|----------|----------|
|            | 콘크리트 균열 | H형강 항복 | 보강철근 항복 | 긴장재 항복 | 인터페이스 항복 |          |
| Nonlinear1 | 152.10  | 332.35 | 460.13  | 589.77 | 638.70   | 643.12   |
| Nonlinear2 | 146.51  | 322.25 | 451.69  | 564.27 | 582.71   | 597.71   |
| Nonlinear3 | 144.26  | 312.14 | 441.89  | 546.52 | 557.31   | 579.18   |
| Nonlinear4 | 140.33  | 305.67 | 415.60  | 499.45 | 534.75   | 556.23   |
| 변이(%)      | 7.73%   | 8.02%  | 9.67%   | 15.31% | 16.26%   | 13.51%   |

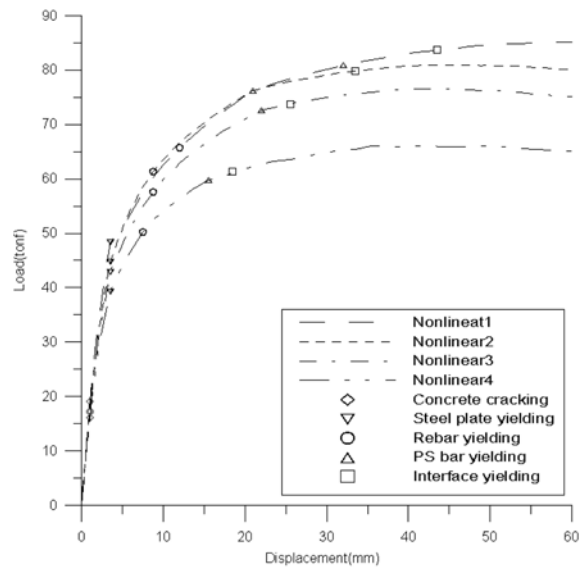
낮을수록 보다 명백하게 발생하여 최대 접선응력이 낮아질수록 항복 이후의 거동이 상이하여 항복하중과 극한하중에서 상당한 차이를 나타내었다. 이에 대한 실제 실험결과도 해석결과를 뒷받침하고 있다.

따라서 비선형 모델의 경우 선형-탄성 모델에 비해 구조체의 항복 이후 거동을 보다 정확하게 모사할 수 있는 것으로 나타났으며, 이 때 구조체의 항복 시점은 합성작용의 차이를 나타내는 비선형 모델의 최대 접선응력 크기에 크게 의존적인 것으로 나타났다.

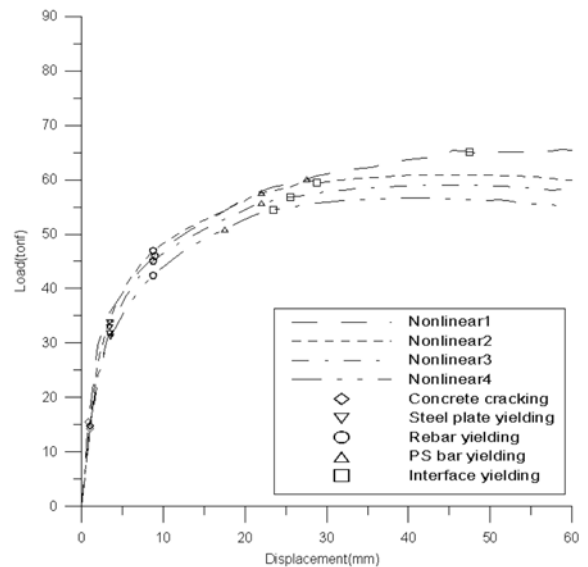
4.2.2 경계면 모델별 주요부재의 하중분석

경계면 모델에 따라 주요 부재가 항복할 때 하중과 최대 하중은 표 7, 8과 그림 11에 나타난 바와 같다. 긴장력이 큰 경우 혼합거더의 거동은 가장 먼저 콘크리트 인장부에 균열이 발생하며, 다음으로 경계면 모델에 따라 약 358.60~474.15 kN에서 강판의 항복이 시작된다. 다음으로 경계면 모델에 따라 약 492.78~644.69 kN에서 보강철근의 항복이 시작되며, 인터페이스 요소의 항복은 약 602.03~817.77 kN에서 시작된다. 경계면 모델에 따른 혼합거더의 최대하중은 약 648.51~835.33 kN이다. 따라서 혼합거더의 콘크리트 균열하중과 H형강은 경계면 모델에 따라 큰 차이가 발생하지 않지만(약 16.09~18.68%), 콘크리트 보강철근 및 인터페이스 요소의 항복하중과 혼합거더의 최대하중은 경계면 모델에 따라 큰 차이를 갖는 것으로 나타난다(약 22.36~26.64%). 긴장력이 작은 경우 전체적으로 작은 하중에서 항복하는 것으로 나타난다.

이상의 결과를 종합하면 경계면 비선형 해석 모델 Nonlinear4에서는 긴장재의 항복과 인터페이스 요소의 최대 접선응력 도달이 거의 동시에 발생하여 이후 슬립-연화 현상이 진행되지만, 이외의 해석모델에서는 긴장재의 항복이후에 인터페이스가 최대 접선응력에 도달하는 것을 알 수 있다. 따라서 강판과 보강철근 항복하중의 차이는 경계면 해석모델별 최대 접선응력과 슬립-연화현상의 차이이기보다는 주로



(a) 긴장력이 큰 경우



(b) 긴장력이 작은 경우

그림 11. 경계면 모델별 주요하중



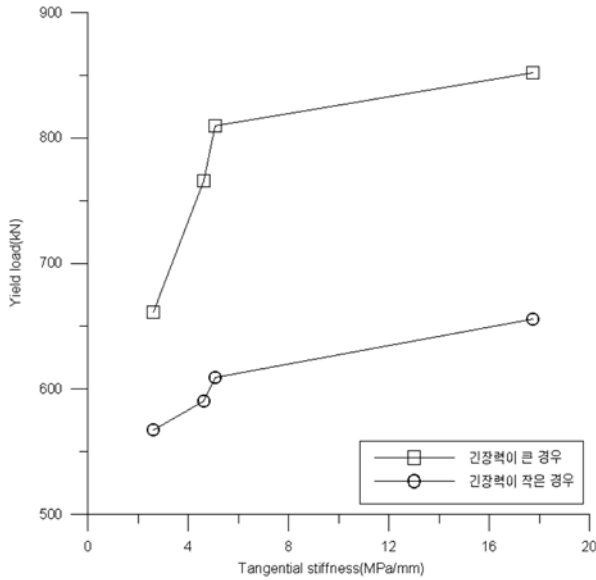


그림 12. 초기 접선강성-하중저항성능의 민감도

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(Veljkovic, 1996). 따라서 혼합거더의 구조성능은 인터페이스 요소의 초기 접선강성, 최대 접선응력, 슬립-연화현상을 망라하는 강-콘크리트 경계면의 합성력에 크게 의존적인 것으로 나타난다.

인터페이스 요소의 초기 접선강성,  $k_t^0$ 를 2.60~17.73 MPa/mm으로 변화시키며 비선형 해석을 수행한 결과 인터페이스 요소의 초기 접선강성이 항복하중, 극한하중 등과 같은 구조체의 하중저항성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 12). 전체적으로 접선강성을 증가시키면 하중저항성능이 증가하지만 특히 접선강성이 4.61~5.08 MPa/mm 일 때 더욱 민감하게 증가하는 특성을 나타내었다. 이는 합성작용이 매우 작을 때와 완전합성일 때는 접선강성이 하중저항성능에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다(정연주,

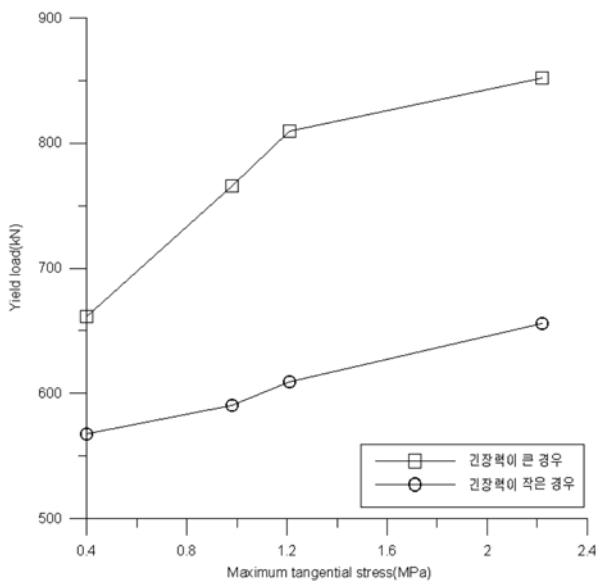


그림 13. 최대 접선응력-하중저항성능의 민감도

2002). 그리고 인터페이스 요소의 최대 접선응력,  $t_t^m$ 의 변화 (0.40~2.22 MPa)에 대해서는 역시 비슷한 결과를 나타내었다(그림 13). 인터페이스 요소의 초기 접선강성과 최대 접선응력은 구조체의 하중저항성능에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

혼합거더의 접합부 설계에서 경계면에 대한 비선형 모델이 필요한 분야는 휨 설계와 전단연결재 설계인 것으로 생각된다. 그림 11에 나타난 바와 같이 혼합거더는 경계면 해석모델에 따라 구조성능이 상이하게 나타나므로(합성방법과 합성 크기에 따른 구조성능 변화) 혼합거더의 휨 설계에서는 경계면 특성을 고려한 부분합성 휨 설계가 필요하다. 또한 인터페이스항복(최대 접선응력 지점, 상대슬립 0.4 mm) 이후 접선응력이 저하되는(합성작용의 저하) 슬립-연화 현상으로 하중-처짐 곡선의 기울기가 보다 완만해지는 것을 알 수 있으며, 실제 설계에서는 특정하중단계까지 두 재료 사이의 원활한 합성작용이 이루어지도록 전단연결재를 설계할 필요가 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 강-콘크리트 혼합구조체에 대해 노력 및 시간이 소비적인 상세 모델링 기법을 대체하기 위하여 강판과 콘크리트 경계면의 비선형 모델을 이용하여, 인터페이스 요소의 초기 접선강성과 최대 접선응력을 변화시키며 비선형 해석을 수행한 결과 인터페이스 요소의 초기 접선강성과 최대 접선응력이 항복하중, 극한하중 등과 같은 구조체의 하중저항성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 스테드의 상세 모델링은 보다 정확한 결과를 나타내겠지만 모델링과 해석에 너무 많은 노력이 소요되므로, 인터페이스 요소를 이용한 강-콘크리트 경계면의 모델링은 합성 구조체의 경계면 거동을 적절히 모사할 수 있어 합성 구조체에 효율적 해석기법인 것으로 평가되었다.
2. 긴장력 증가에 따른 콘크리트 보강철근과 인터페이스의 항복하중 및 최대하중 증가분(약 24.53~25.56%)은 혼합구조체의 콘크리트 균열 하중 및 H형강의 항복하중의 긴장력에 따른 증가분(약 14.04%, 22.23%) 보다 다소 큰 값을 가지며 이는 긴장력이 커질수록 콘크리트의 균열하중이 커지고 잇따른 보강철근과 H형강의 항복하중이 커지므로 긴장력이 커질수록 전체 구조체가 받는 하중이 커진다고 할 수 있다.
3. 경계면을 모사하는 인터페이스 요소에 대한 선형-탄성 모델은 최대 접선응력 이후의 슬립-연화 현상을 반영하지 못하여, 휨 거동을 나타내는 혼합구조체의 항복 이후 거동에 대해 과대평가의 결과를 나타내었다.
4. 경계면에 대한 비선형 모델은 최대하중 등과 같은 항복 이후의 거동을 보다 정확하게 나타내며, 초기 접선 강성은 부재의 항복하중에 최대 접선응력과 슬립-연화 현상은 혼합구조체의 최대하중과 같은 항복이후의 거동에 주로 영향을 미치는 것으로 나타났다.
5. 인터페이스 요소의 초기 접선강성과 최대 접선응력을 변화시키며 비선형 해석을 수행한 결과 인터페이스 요소의

초기 접선강성과 최대 접선응력이 항복하중, 극한하중 등과 같은 구조체의 하중저항성능에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

## 참고문헌

- 김광수, 정광희, 심정욱, 유성원(2004(a)) PSC-강 혼합거더의 연결부 거동 해석, **한국콘크리트학회 복합술대회논문집**, 한국콘크리트학회, 제16권, 제1호(통권 제30호), pp. 766-769.
- 김광수, 정광희, 심정욱, 유성원(2004(b)) 프리스트레스트 콘크리트-강 혼합구조를 갖는 복합거더의 정적 휨 거동, **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 48-53.
- 김용희, 이갑중, 문태경(1997) 강-콘크리트 합성바닥판에 있어서 전단연결재 설계에 관한 기초적 연구, **대한토목학회 1997년도 학술발표회 논문집(1)**, 대한토목학회, pp. 153-156.
- 양석규(1998) Push-out Test에 의한 스티드와 고정력 볼트의 역학적 거동에 관한 연구, 석사학위논문, 경남대학교 대학원.
- 연세대학교 건설공학연구소(2004) **복합구조형식 교량의 접합부 거동분석 및 안전성 검토에 관한 연구**.
- 이갑중(1997) 스티드를 사용한 합성 바닥판의 실험적 연구, 석사학위논문, 경남대학교 대학원.
- 정연주, 정광희, 김병석(2003) 강·콘크리트 경계면의 비선형성에 따른 합성구조체의 거동(I) 비선형 경계면 모델에 따른 매개변수 연구-, **한국강구조학회논문집**, 한국강구조학회, 제15권 제5호(통권 66호), pp. 499-507.
- 정연주, 정광희, 김병석(2003) 강·콘크리트 경계면의 비선형성에 따른 합성구조체의 거동(II) 강·콘크리트 경계면의 거동 특성-, **한국강구조학회논문집**, 한국강구조학회, 제15권 제5호(통권 66호), pp. 509-518.
- 정연주, 정광희, 구현본, 김병석(2004) 교량용 강·콘크리트 합성 바닥판의 실험적 정적거동 특성, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1A호, pp. 17-25.
- 한국건설기술연구원(2002) *Development of Long-Life Deck System for Bridge (I)*, KICT 2002-049.
- 한국건설기술연구원(2003) *Development of Long-Life Deck System for Bridge (II)*, KICT 2002-053.
- European Committee for Standardization (2002) Eurocode 4-1: *Design of Composite Steel and Concrete Structures*. prEN-1994-1-1.
- Herrmann, L.R. (1978) Finite element analysis of contact problems. *J. of the Engineerin Mechanics Division*, Vol. 104, No. EM5, pp. 1043-1057.
- Jeong, Y.J, Kim, H.Y., and Kim, S.H. (2005) Partial-interaction analysis with push-out tests. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, No. 9, pp. 1318-1331.
- Jeong, Y.J, Kim, H.Y., Koo, K.B., and Kim, S.T. (2005) Steel-concrete interface behavior and analysis for push-out. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 9, No. 2, pp. 119-124.
- Jeong, Y.J. (2005) *Partial-Interaction Behavior of Steel-Concrete Composite Bridge Deck.*, Ph.D. Thesis Dept. of Civil Eng., Yonsei University, Korea.
- Johnson, R.P. (1994) *Composite Strictures of Steel and Concrete*. Blackwell Scientific Publications, London.
- Kantona, M.G. (1983) A simple concrete-friction interface element with application to buried culverts. *Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 7, pp. 371-384.
- Kayyali, O.A. and Yeomans, S.R. (1995) Bond and slip of coated reinforcement in concrete. *Constr. and Building. Mater.*, Vol. 9, No. 4, pp. 219-226.
- Kim, B., Wright, H.D., Cairns, R., and Bradford, M.A. (1999) The numerical simulation of shear connection. *Prog. of the 16th Australasian Conf. on the Mechanics of Struct. and Mater.*, pp. 341-346.
- Konke, P. (1994). *ANSYS Theory Reference-Release 5.5*. ANSYS, Inc.
- Oehlers, D.J. (2001) Some new concepts in the assessment of composite steel and concrete vehicular bridge beams. *Steel Structr.*, Vol. 1, pp. 133-139.
- Oehlers, D.J. and Bradford, M.A. (1999) *Elementary Behavior of Composite Steel & Concrete Structural Members*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Oehlers, D.J. and Johnson, R.P. (1987) The Strength of stud shear connections in composite beams. *The Structural Engineer*, Vol. 65B, No. 2, pp. 44-48.
- Oehlers, D.J., Seracino, R., and Yeo, M.F. (2000) Fatigue behavior of composite steel & concrete beams with stud shear connections. *Prog. Struct. Engng. Mater.*, pp. 187-195.
- Oven, V.A., Burgess, I.W., Plank, R.J., and Wali, A.A. (1997) An analytical model for the analysis of composite beams with partial interaction. *Computers & Struct*. Vol. 62, No. 3, pp. 493-504.
- Seracino, R., Oehlers, D.J., and Yeo, M.F. (2002) Partial-interaction fatigue assessment of stud shear connectors in composite bridge beams. *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 13, No. 4, pp. 455-464.
- Soh, C.K., Chiew, S.P., and Dong, Y.X. (1999) Damage model for concrete-steel interface. *J. of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 125, No. 8, pp. 979-983.
- Soh, C.K., Chiew, S.P., and Dong, Y.X. (2002) Concrete-steel bond behavior under repeated loading. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, No. 1, pp. 35-46.
- Veljkovic, M. (1993). *Development of a New Sheeting Profile or Composite Floors*. Research Report TULEA1993:47, Lulea University, Sweden.
- Veljkovic, M. (1995) Longitudinal shear capacity of composite slab. *Proc. of Nordic Steel Construction Conference '95*, Molmo, Sweden, pp. 547-554.
- Veljkovic, M. (1996). *Behavior and Resistance of Composite Slabs*. Ph.D. Thesis, Lulea University, Sweden.
- Veljkovic, M. (1998) Design of composite slab based on small scale tests. *Proc. of Nordic Steel Construction Conference*, Bergen, Norway, pp. 415-427.
- Veljkovic, M. (1998) Influence of load arrangement on composite slab-behavior and recommendations for design. *J. of Constructional Steel Research*, Vol. 45, No. 2, pp. 149-178.
- Veljkovic, M. (2000) Behavior and design of shallow composite slab. *Proc. of Composite Construction-*, Alberta, Canada, pp. 12.
- Veljkovic, M. (2001) *Behavior of Shear Studes under Repeated Load*. Report 2001-02, Univ. of Lulea, Sweden.
- Veljkovic, M. and Johansson, B. (2001) *Partial Interaction in Composite Slab-Final Report for BFR Project.*, No.2001:03, TU-Lulea, Sweden.
- Veljkovic, M. and Johansson, B. (2004) Residual static resistance of welded stud shear connectors. *Prog. of Composite Construction in Steel and Concrete-V*, South Africa, pp. 100-120.
- Wang, S.P. and Nakamachi, E. (1997) The inside-outside contact search algorithm for finite element analysis. *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 3665-3685.

(접수일: 2008.10.28/심사일: 2009.2.11/심사완료일: 2009.6.29)