

강-콘크리트 계면파괴에 관한 비선형 유한요소해석

Nonlinear Finite Element Analysis of Considering Interface Behaviors between Steel and Concrete

주영태* 이용학**

Joo, Young Tae Lee, Yong Hak

ABSTRACT

In general, the nonlinear behavior of composite structures composing of steel and concrete is analyzed on the basis of the assumption of the perfect bond actions in steel-concrete interface in which the interface slip or separation is not allowed. The assumption is based on the fact that the full interface bond behavior is provided with the mechanical connectors of studs. However, since the number and spacing of the studs are determined by the stress resultants calculated in the interface area, the interface analysis is required to evaluate the stress resultants. This paper describes the nonlinear steel-concrete interface behavior considering the two interface failure mechanisms of slip and separation. Elastoplastic constitutive relation is developed thru the formulation framework using the two energy dissipation mechanisms. As the result, the steel plate push-out tests sandwiched between concrete blocks are analyzed and compared with the test results with which the good agreements are observed.

1. 서 론

일반적으로 강-콘크리트 합성형 구조에서 순수 강-콘크리트만으로 이루어진 계면은 외력에 저항하지 못하는 것으로 가정하며 이로 인해 시방서 등에서는 스티드나 리브 등을 사용하여 합성거동을 확보하도록 규정하고 있다. 그러나 이러한 규정은 일반적인 경우에서의 계면 거동을 정의한 것이 아니라 특정 경우에 대한 계면의 평형식과 실험결과들을 토대로 확립된 것이며 보다 복잡하고 일반적인 형태의 합성형 구조에 대한 해석과 거동예측을 위한 해를 제공하지는 못한다. 현재, 단면이 작고 복잡한 형상의 합성형 구조들이 개발/적용되면서 강-콘크리트 계면 상에서의 정교한 거동 해석이 요구되어지고 있음에도 불구하고 이러한 영역에서의 연구는 미미한 실정이다.

본 논문에서는 강-콘크리트 합성형 구조물에 외력이 작용할 때 강-콘크리트 계면에 발생하는 하중 전달 메커니즘을 정의하고 이를 실험결과와 비교함으로써 일반적인 강-콘크리트 계면의 거동예측에 관한 해석알고리즘을 탄소성론에 근거하여 개발한다.

* 정회원, 건국대학교 토목공학과 박사과정

** 정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수

2. 강-콘크리트 계면요소

계면요소는 여러 분야에서 다양한 용도로 사용되어져 왔다. 그 중 기계분야의 마찰 및 마모를 규정하기 위해 많이 쓰여 왔으며 토목 분야에서는 암반의 절리 및 지반과 구조물의 상호작용으로 인한 계면거동을 수치모델하기 위하여 사용하여 왔으며 최근에는 콘크리트의 quasi-brittle 모델이나 적층구조물의 비선형 메커니즘을 규명하기 위해 사용되고 있다. 지금까지 사용된 계면요소의 형상은 크게 미소 두께를 가지는 일반요소를 사용하는 경우와 상대되는 절점들을 단순히 연결요소(linkage elements)를 이용하여 연결하는 모델, 구속방정식(constraint equation)을 이용하여 두께가 0이거나 0에 아주 가까운 미소한 두께를 가지는 요소의 절점과 절점 또는 절점과 면을 연결하는 모델로 분류한다. 본 논문은 두께가 0인 절점 대 절점 모델을 채택하여 강-콘크리트 계면의 파괴거동을 예측한다.

2.1. 유한요소 정식화

계면의 유한요소는 일반적인 연속체 모델과의 호환성을 위해 절점변위를 토대로 요소좌표계에서의 절점 간 상대변위 \mathbf{u} 를 사용하여 요소강성을 정의하며 이를 일반적인 연속체의 강성과 산술적으로 더하여 전체 구조물 강성을 구성하면 다음과 같다.

$$(\mathbf{K}_S + \mathbf{K}_I) \cdot \mathbf{d} = \mathbf{P} \quad (1)$$

여기서 연속체 강성 \mathbf{K}_S 과 계면 강성 \mathbf{K}_I 는 각각 $\mathbf{K}_S = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} dV$, $\mathbf{K}_I = \int_\Gamma \mathbf{B}_I^T \mathbf{D} \mathbf{B}_I d\Gamma$ 이며 \mathbf{B}_I 는 절점 간 상대변위 \mathbf{u} 와 절점 변위 \mathbf{d} 와의 관계를 통해 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{upp} - \mathbf{u}_{bot} = \mathbf{N} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{d} = \mathbf{B}_I \cdot \mathbf{d} \quad (2)$$

계면 응력과 절점 간 상대변위의 관계인 $\boldsymbol{\sigma}_I = \mathbf{D} : \mathbf{u}$ 를 규정하는 \mathbf{D} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_M & 0 \\ 0 & 0 & D_N \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2. 구속방정식

계면에 발생하는 탈/부착-슬립거동은 계면의 마찰각과 부착 및 점착을 나타내는 세 계수로 규정하며 이를 사용한 쌍곡선 파괴포락선은 다음과 같다.

$$F = \sigma_T^2 + A^2 \{ (\sigma_N - c)^2 - (b - c)^2 \} \quad (4)$$

식 (4)에서 $\sigma_T = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_M^2}$, b 는 부착력과 관련한 부착계수, c 는 점착력을 정의하는 점착계수이며 A 는 부착을 고려했을 경우의 마찰각으로써 다음과 같다.

$$A = \phi + \alpha \cdot b \quad (5)$$

여기서 ϕ 는 비부착상태에서 강제와 콘크리트에 발생하는 고유 마찰각을 정의하고 α 는 부착상태에서의 부착력 b^{\max} 에 의해 증가되는 부수적 마찰각을 정의하기 위한 비례상수이다.

최대응력점 이후의 거동을 정의하는 연화는 파괴에너지에 근거한 소성일-연화가정을 도입하여 정의하며 소성일의 증가에 따른 세 계수 ϕ , b , c 의 감소는 다음과 같이 정의한다.

$$\phi = \phi^{\text{res}} + (\phi^{\text{max}} - \phi^{\text{res}}) \times \left(1 - \alpha \frac{W_p T}{G_{II}} \right)$$

$$b = b^{\text{res}} + (b^{\text{max}} - b^{\text{res}}) \times (1 - \beta_1 \frac{W_{\rho N}}{G_I} - \beta_2 \frac{W_{\rho T}}{G_{II}}) \quad (6)$$

$$c = c^{\text{res}} + (c^{\text{max}} - c^{\text{res}}) \times (1 - \gamma \frac{W_{\rho T}}{G_{II}})$$

여기서 ϕ^{res} , b^{res} , c^{res} 은 연화가 끝나는 점의 최종 값이며 α , β_1 , β_2 , γ 는 연화곡선의 형상을 결정하는 상수이다. 또한 G_I , G_{II} 은 각각 계면에서 Mode I과 Mode II 파괴에 대한 각 단위면적당 에너지 방출률이며 $W_{\rho T}$, $W_{\rho N}$ 은 각각 계면 내 접선방향과 수직방향의 소성 일을 정의한다.

$$dW_{\rho T} = (\sigma_T - \sigma_T^{\text{res}}) \cdot du_{\rho T}, \quad dW_{\rho N} = \begin{cases} \sigma_N \cdot u_{\rho N} & \sigma_N > 0 \\ 0 & \sigma_N \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

이 때 σ_T^{res} 은 접선방향의 최종 응력을 나타낸다.

2.3. 탄-소성 접선연산자

Taylor 급수의 1차 확장에 의해 파괴포락함수 F 는 다음의 증가율 형태로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{\partial F}{\partial \sigma} : \dot{\sigma} + \frac{\partial F}{\partial u_p} \cdot \dot{u}_p = 0 \quad (8)$$

탄-소성 구성방정식에 의해 총 슬립 \mathbf{u} 를 탄성슬립 \mathbf{u}_e 와 소성슬립 \mathbf{u}_p 로 분리한 $\mathbf{u} = \mathbf{u}_e + \mathbf{u}_p$ 의 관계를 응력과 탄성변형의 증가율 관계인 $\dot{\sigma} = \mathbf{D} : \dot{\mathbf{u}}_e$ 에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{\sigma} = \mathbf{D} : (\dot{\mathbf{u}} - \dot{\mathbf{u}}_p) \quad (9)$$

여기서 소성변형벡터 $\dot{\mathbf{u}}_p = \lambda \mathbf{m}$ 이며, λ 는 소성승수, \mathbf{m} 은 소성변형의 방향을 각각 정의한다.

식 (11)에 (12)와 $\partial F / \partial \sigma = \mathbf{n}$, $\partial F / \partial u_p = H$, $\dot{\mathbf{u}}_p = \lambda \|\mathbf{m}\| \mathbf{m}$ 을 대입하여 λ 에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{D} \cdot \dot{\mathbf{u}}}{-H \|\mathbf{m}\| + \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{m}} \quad (10)$$

식(10)을 (9)에 대입하여 탄-소성 접선 연산자 \mathbf{D}_{ep} 를 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{D}_{ep} = \mathbf{D} - \frac{\mathbf{D} \cdot \mathbf{m} \otimes \mathbf{n} \cdot \mathbf{D}}{-H \|\mathbf{m}\| + \mathbf{n} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{m}} \quad (11)$$

상관 소성흐름법칙을 사용할 때 수치해석에서 발생하는 과도한 체적팽창을 제어할 목적으로 상관 소성흐름 소성방향의 계면에 수직한 방향성분을 수정한 다음의 비상관 소성흐름법칙을 적용한다.

$$\mathbf{m} = \frac{\partial Q}{\partial \sigma} = \frac{\partial Q}{\partial \sigma_L} \mathbf{i} + \frac{\partial Q}{\partial \sigma_M} \mathbf{j} + \frac{\partial Q}{\partial \sigma_N} \mathbf{k} \quad (12)$$

여기서 $\frac{\partial Q}{\partial \sigma_L} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_L}$, $\frac{\partial Q}{\partial \sigma_M} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_M}$, $\frac{\partial Q}{\partial \sigma_N} = \frac{\partial F}{\partial \sigma_N} \times \frac{(\sigma_N - \sigma_d)^2}{\sigma_d^2} \times \frac{(c - c^{\text{res}})}{(c^{\text{max}} - c^{\text{res}})}$ 이며, σ_d 는 비상관 소성흐름방향을 제어하는 수직 구속응력에 대한 상수이다.

3. 수치해석

개발된 구성 방정식의 수행능력을 평가하기 위하여 Chiew 등(1999) 에 의해 수행된 콘크리트 속에 매

입한 강판의 0.5MPa, 1.0MPa, 1.5MPa 세 종류 구속응력에 대한 push-out 실험결과와 비교한다. 수치해석에 사용된 요소는 콘크리트를 8절점 brick 요소, 강판은 4절점 쉘 요소를 사용하였고 전후 및 좌우 대칭형상을 고려하여 1/4 부분을 유한요소 모델링하여 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 각 재료의 물성값은 콘크리트 : $E_c=36,500\text{MPa}$, $\nu=0.18$, $f_{ck}=64\text{MPa}$ 강재 : $E_s=196,100\text{MPa}$, $\nu=0.3$, $f_y=340\text{MPa}$ 이다.

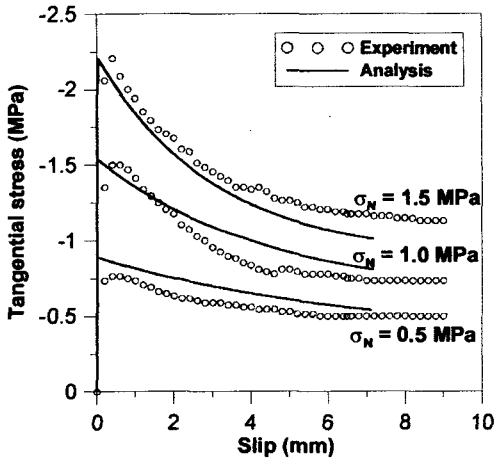


그림 1. 부착상태에서 구속에 따른 슬립거동

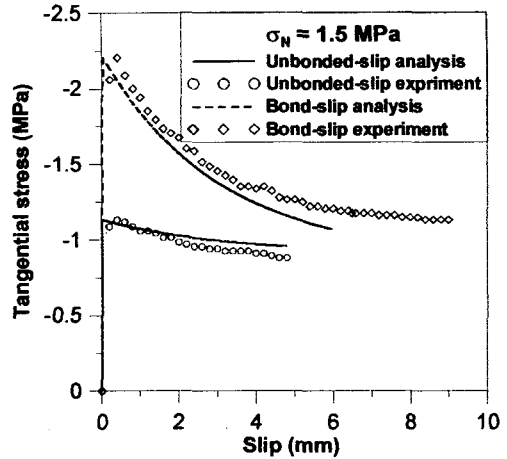


그림 2. 구속응력 1.5에서 부착 및 비부착 슬립거동

4. 결 론

강재-콘크리트 계면의 탈/부착-슬립거동을 정의하기 위해 마찰각, 부착 및 점착을 정의하는 세 계수를 이용한 쌍곡선형상의 파괴포락선을 사용하여 탄-소성론에 근거한 두께 0의 3차원 계면요소를 개발하였다. 연화거동은 소성 일이 증가함에 따라 연화가 진행되는 소성일연화 가정과 파괴에너지 이론에 근거하여 정의하였다. 수치해석에서 발생하는 계면의 과도한 팽창을 제어하기 위해 상관소성흐름에 의한 소성흐름방향 수정함으로써 비상관소성흐름을 결정하는 비상관소성흐름법칙을 사용하였다. 개발된 계면모델을 기존의 네 계수 파괴포락선에 근거한 콘크리트 3차원 구성모델 및 von Mises 파괴규준을 사용한 강재의 탄-소성 모델과 결합하여 Chiew의 실험과 비교하였으며 매우 잘 일치하는 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

- 1) Carol, I., Prat, P. C., and Lopez, C. M. (1997). Normal/shear cracking model: Application to discrete crack analysis, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 8, pp.
- 2) Chiew, S. P., Dong, Y. X., and Soh, C. K., (1999). Concrete-steel plate interface characteristics for composite construction, *International conference on civil and structural engineering*, pp.35-40
- 3) Hamid, R. Lotfi, P., and Benson, Shing, (1994). Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 1, pp. 63-79
- 4) Stankowski, T., Runesson, K., and Sture, S. (1993). Fracture and slip of interfaces in cementitious composites. I & II : Characteristics, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 119, No. 2, pp. 292-327.