

비선형 유한요소법에 의한 에폭시 피막된 철근의 부착에 관한 연구

Bond Strength Evaluation of Epoxy-Coated Reinforcement using Nonlinear Finite Element Analysis

○ 최완철*
Choi, Wan Chul

Finite element analysis is used to study the role of interfacial properties on the bond strength of reinforcing steel to concrete. Specifically, the role played by epoxy coatings on the failure of standard beam-end specimens is explored. Experimental results show that epoxy coatings reduce bond strength, but that the effect is dependent on the bar size and the deformation pattern. The finite element model for the beam-end specimen includes representations for the deformed steel bar, the concrete, and the interfacial material. The interface elements can be varied to match the stiffness and friction properties of the interfacial material. Cracking within the concrete is represented using Hillerborg's fictitious crack model. The model is used to study important aspects or behavior observed in the tests and to provide an explanation for the effect of the various test parameters

1. 서론

철근콘크리트 구조물에서 철근부식의 방지책의 하나로, 에폭시피막된 철근의 사용이 급증하고 있다. 이러한 에폭시피막은 내구성증대에 효과적이나 철근과 콘크리트사이의 부착력이 감소라는 구조적인 결함을 초래한다.

이러한 에폭시피막에 의한 부착력감소는 실험에 의한 연구에서 밝혀지고 있고 이중 최근연구는 부착력감소가 철근의 마디모양에 관계된다고 관찰되어 주목을 받고있다. 부착에 대한 실험연구에서 부착력은 콘크리트의 강도, 철근의 형상, 또한 철근의 주위에 의한 구속정도에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며 부착길이, 피복두께 증가에 따라 증가되는 것으로 관찰되고 있다. 부착의 대표적 파괴는 쪼개짐 파괴(splitting failure)의 형태로, 콘크리트에 정착된 철근위치에서 균열이 발생되어 수직방향인 피복두께로 진행된다.

본 논문에서는 에폭시피막을 사용함으로써 철근과 콘크리트사이의 부착력이 감소됨을 유한요소법을 이용하여 설명하고자 한다. 구체적 목표는 실험에 사용된 보단부시험체(그림 1)의 부착파괴를 컴퓨터에 의해 재현하고자 한다. 시험체는 그림에서 보듯이 부착길이를 한정하기 위하여 또한 시험체 전면의 콘크리트 cone type파괴를 방지하기 위하여 "bond breaker"를 사용하고 있다. 그림 2는 부착실험에서 얻은 하중-슬립곡선으로 에폭시피막에 의한 부착력 감소현상을 보여주고 있다

며 이러한 부착력 감소현상은 에폭시피막에 의한 상대적으로 적은 점착력(adhesion) 및 마찰력에 기인되는 것으로 관찰되었다.

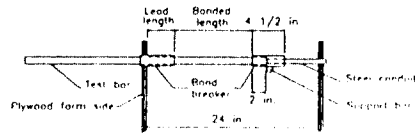


그림 1 보 단부 시험체

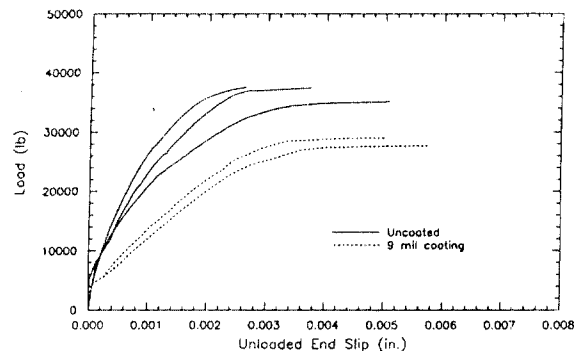


그림 2 부착-슬립곡선 (No. 11 철근)

본 연구에서는 철근과 콘크리트 두재료의 특성을 포함한 모델을 최대한 단순히 시립과 동시에, 시험체의 주요부착거동을 가능한 정확하게 묘사하고자 한다. 즉, 철근과 주위의 콘크리트 사이의 비선형 슬립 현상 및 부착파괴인 시험체의 상부에 형성된 쪼개짐균열(splitting crack)의 재현이 해석모델의 주요특성이 된다. 나아가 본 해석모델

* 정희원, 숭실대학교 건축공학과 조교수

은 이형철근의 형상 및 콘크리트의 특성 등 부착력에 대한 주요인들 연구에 활용하게 된다.

2. 콘크리트 균열 (splitting crack)의 재현

실험에서 관찰된 부착파괴인 쪼개짐 (splitting) 균열은 비선형 파괴역학 (non-linear fracture mechanics)의 개념을 도입한 Hillerborg의 fictitious 균열모형을 이용하였다. 균열면에 수직으로 rod 요소를 사용하여 시험체 균열면을 정의한다. 이 rod 요소는 초기의 탄성하중, 즉 균열에 필요한 강도를 갖기 이전에는 높은 강성을 갖게 되며, 일단 인장강도에 도달시에는 가정된 응력-변위 (stress-displacement) 곡선을 따르게 하여 균열을 발생하는 과정을 표현한다.

실험에 사용된 콘크리트의 압축강도에 따라 인장강도와 파괴 (fracture) 에너지를 추정하고 응력-변위곡선의 면적은 파괴에너지와 같다는 파괴역학의 기본개념에 따라 콘크리트 인장강도가 소멸하는 위치를 얻는다. 이러한 관계식은 비선형 유한요소법의 재료모델의 응력-변형도 함수 (그림 3)에 이용되었다.

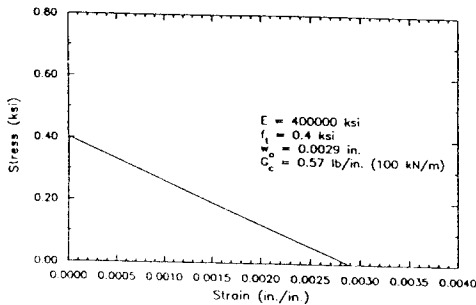


그림 3 rod요소의 비선형 재료모델

3. 경계면 (interface)의 표현

철근과 콘크리트사이의 경계면은 3차원의 경계면요소 (interface element)를 사용하여 표현하였다. 이 요소는 경계면에 대해서 접선방향으로 두개의 자유도와 법선방향으로 하나의 자유도를 갖도록 되어있으며 접촉면에서 서로 슬립이 발생될 수 있게 되어있다. (그림 4)

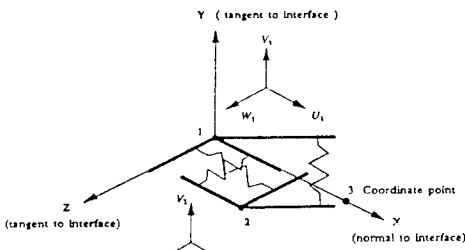


그림 4 3차원 경계면 요소

본 연구에서는 경계면요소의 탄성계수를 피막되지 않는 경우에 비해 에폭시 피막된 경우 상대적으로 적은 강성의 재료로 표현하였다.

경계면요소의 주요 특성은 정의된 슬립면 (slip surface)으로 경계면에 따라 비선형의 미끄러짐을 발생시킨다. 수직응력도와 접선응력도의 조합에 따른 이러한 슬립면은 3차원의 경계요소에 대해 원추형 (그림 5)으로 표현된다. 원추형의 축이 수직응력도이며 원추의 경사각을 마찰계수 μ 로, 또한 수직응력이 없을 때의 원추의 반경을 경계요소의 점착력 (cohesive strength) c 로 각각 나타낸다.

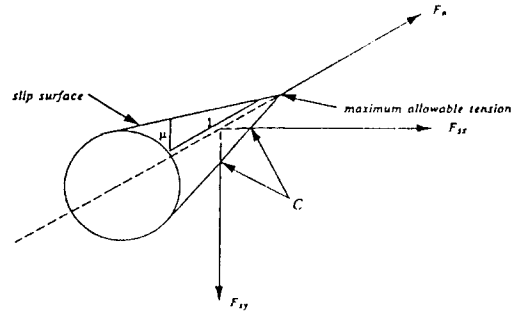


그림 5 3차원 Mohr-Coulomb 슬립면

경계면의 전단응력도는 다음과 같이 표현된다.

$$|F_s| = (F_{sy}^2 + F_{sz}^2)^{1/2}$$

경계면상에서의 전단응력도가 그때의 대응되는 정의된 슬립면상의 값을 초과할때 슬립이 발생된다. 본 연구에서는 피막되지 않는 철근에 대해서는 $c = 0.25 \text{ ksi} (17.5 \text{ kg/cm}^2)$, $\mu = 0.3$ 또한 피막된 철근은 이들값의 1/10, 즉 $c = 0.025 \text{ ksi} (1.75 \text{ kg/cm}^2)$, $\mu = 0.03$ 의 값을 사용하였다.

4. 해석모델

보 단부 시험체의 대칭성을 이용하여 시험체의 절반을 해석모델로 한다. 이형철근을 단순화 하여 각형으로하고 그 한면에 마디모양을 나타낸다.

3차원의 유한요소모델은 3개의 substructure로, 즉 철근substructure, 내부콘크리트substructure, 그리고 외부콘크리트substructure로 구성된다. 내부콘크리트substructure와 철근substructure는 경계면요소 (interface element) (그림 6)를 통하여 상호 연계된다. 외부콘크리트substructure는 또한 콘크리트의 쪼개짐 균열 (splitting crack)을 재현시키도록 대칭면에 따라서 재료의 비선형을 나타내는 rod의 요소가 붙어있다.

이러한 각 substructure의 고유한 기능으로 모델이 필요에 따라 쉽게 조정될 수 있다. 또한 substructure의 사용은 데이터의 준비 및 컴퓨터

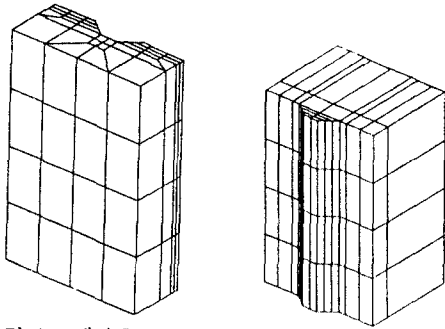


그림 6 내부콘크리트 및 철근 substructure

계산시간 절약에 활용되었다. 즉, substructure는 내부의 절점의 자유도를 condense-out함으로서 균열면의 절점 및 경계면의 절점만이 최종 구조물로 남게된다. 그림 7은 이러한 기본적인 모델을 만드는 과정을 보여준다.

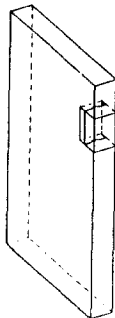


그림 7 유한요소 모델의 기본 단위

5. 비선형 해법

Newton-Raphson법이 해법에 사용되었으며 모델의 incremental방법으로 철근에 변위하중이 작용되었다. 철근과 콘크리트사이의 경계면요소의 비선형 슬립 및 콘크리트균열에 의한 평형에 남는 힘(unbalanced force)은 수렴이 될 때까지 연속적으로 반복되었다.

해를 얻는 과정에서 안정수렴을 위해 구조물의 강성 매트릭스를 얻는 과정에서 초기의 재료의 상수를 사용하였고, 5회반복 이후 수정하였다. 수렴은 비교적 잘 되어 5회이내에 만족되었다.

6. 해석결과

해석의 결과로부터 부착력에 대한 주요 변수의 영향이 하중-슬립곡선에 의해 평가되고 실험결과와 비교된다. 본 연구에서는 경계면요소의 재료상수에 의한 부착강도에 대한 영향, 즉 아폭시 피막된 철근과 피막되지않은 철근의 부착력이 비교된다.

그림 8의 두개의 곡선은 피막된철근, 피막되지않은 철근의 부착력-슬립의 대표적인 비선형곡선은

로 최대하중의 1/10의 하중단계로 초기의 슬립현상을 보여준다. 이그림은 경계면요소의 재료성질이 하중의 초기부터 부착력에 영향을 줌을 보여주고 있으며 하중초기에서 점착력이 소멸되고 마찰력이 중요하게 됨을 나타낸다. 이형철근의 마디에 작용되는 압축력에 의한 마찰력이 주로 부착력에 영향을 주게된다.

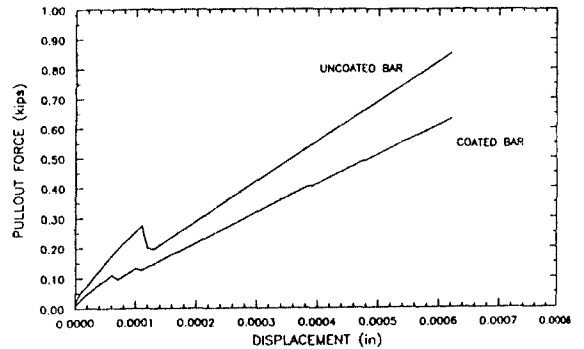


그림 8 부착-슬립곡선(1 kips 이하)

즉 하중초기에는 점착력이 유지되나, 일단 슬립이 발생된에 따라 점착력이 없어지게 된다. 또한 피막되지않은 상대적으로 점착력이 크므로 부착력의 급격한 변화를 보여주며 결과적으로 피막되지않은 철근이 피막된 철근보다 높은 부착력을 보여주고있다.

점착력이 소멸된후 마찰력의 차이로부터 피막된 철근은 피막되지 않은 철근에 비해 상대적으로 낮은 부착강도와 하중-슬립의 강성(stiffness)을 보여주고있다. (이 축척에서 볼때 점착력의 영향은 무시될 정도로 적다.)

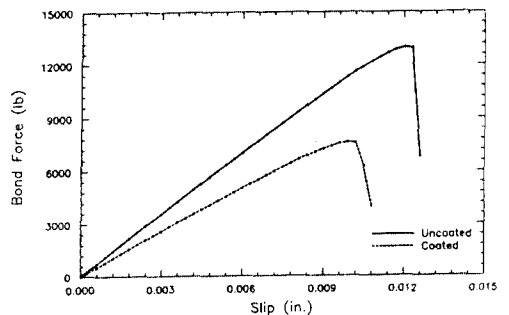


그림 9 부착-슬립곡선

그림 9에서 보듯이 최대하중이후, 대표적인 취성파괴인 "급격한 부착파괴"를 보여주고있다. 이러한 취성파괴는, 콘크리트재료의 취성의 특성뿐만 아니라 쐐기모양의 작용(wedging action)의 조개짐파괴시 콘크리트의 구조적파괴(fracture)로 설명되어진다. 즉 쐐기의 적은 벌어짐으로 인해 슬립이 증가되고 증가된 슬립은 더욱 쐐기의 조개짐을 가속시켜 급격한 파괴로 이르게한다. 이

에 따라 콘크리트의 구속정도(confinement)가 최대 부착력의 주요원인의 하나라고 관찰되었다.

이들 해석결과에 의한 고찰 및 하중슬립곡선은 실험에서 얻어진 하중슬립곡선(그림 2)과 유사한 거동을 보여주고 있으며 대체로 일치한다. 이와 같이 본 연구의 유한요소 모델은 모아-쿨롬(Mohr-Coulomb)면을 적용하여 부착력에 대한 경계요소의 재료상수에 의한 영향을 정확히 예측하고, 더불어 fictitious crack 모델을 이용하여 콘크리트의 취성파괴인 쪼개짐파괴(splitting failure)를 성공적으로 재현시킨다.

이러한 일치된 결과로 부터 본 연구의 유한요소 해석모델이 부착거동을 정확하게 재현함이 확인되었고 나아가 부착력에 영향을 주는 재료인의 해석적 연구조사에 응용될 수 있는 가능성을 보여주고 있다.

7. 결 론

1. 비선형유한요소에 대하여 경계면요소의 상이한 재료상수를 적용, 에폭시피막된 철근에 의한 부착력 감소현상을 재현시켰다.
2. 철근과 콘크리트사이의 경계면요소의 재료계수인 점착력 및 마찰계수가 부착성능의 주요인이다.
3. 콘크리트 구속정도(confinement)가 최대 부착력의 주요인자의 하나이다.
4. 모아-쿨롬면 및 fictitious crack 이론을 이용한 본 유한요소 부착모델에 의한 결과는 실험결과와 대체로 일치되며 부착의 해석적 연구에 활용될 가능성을 보여준다.

참 고 문 헌

최완철, 에폭시피막된 철근의 부착에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표 논문집, 1990.10.

최완철, 철근과 콘크리트의 부착력에 관한 에폭시피막의 영향, 한국콘크리트학회, 1990.11.

Choi, Oan Chul, Hadje-Ghaffari, Hossain, Darwin, David, and McCabe, Steven L. (1990). "Bond of Epoxy-Coat Reinforcement to Concrete: Bar Parameters," SL Report 90-1, University of Kansas Center for Research, Lawrence, Kansas, January, 43 pp.

Choi, Oan Chul. (1990). "Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcement of Concrete," Ph.D. Dissertation, University of Kansas, Lawrence, Kansas, July, 217 pp.

Choi, Oan Chul, Hadje-Ghaffari, H., Darwin, D., McCabe, S.L. "Bond of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete : Bar Parameter," ACI Material Journal, in press.

Darwin, D., McCabe, S.L., Choi, O.C. (1990). "Evaluation of Bond Performance of Epoxy-Coated Reinforcing Steel Using Nonlinear Finite Element Analysis," Proceeding, ASCE Material Congress, Denver, CO, August, pp.135-44.

Darwin, D., McCabe, S.L., Hadje-Ghaffari, H., Choi, O.C. (1990). "Bond Strength of Epoxy-Coated Reinforcement to Concrete-An Update," Proceeding, ASCE Material Congress, Denver, CO, August, pp.115-124.

Herrmann, L.R. (1978). "Finite Element Analysis of Contact Problems," Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.104, No.EM5, October, pp.1043-1057.

Hillerborg, A., Modeer, M. and Petersson, P-E, (1976). "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Mean of Fracture Mechanics and Finite Element." Cement and Concrete Research, Vol.6, No.6, Vol., pp.773-782.

Lopez, L.A., Dodds, R.H. Jr., Rehak, D.R. and Schmidt, R.J. (1989). Polo-Finite: A Structural Mechanics System for Linear and Nonlinear Analysis. A technical report by the University of Illinois at Urbana-Champaign.

Petersson, P-E, (1981). "Crack Growth and Development of Fracture Zone in Plain Concrete and Similar Materials," Report TVBM-1006, Div. of Bldg. Materials, University of Lund, Sweden, 174 pp.