

인장-압축상태의 철근콘크리트 면 부재를 위한 미소면 모델

Microplane Model for RC Planar Members in Tension-Compression

박 홍 근* 김 학 준**
Park, Hong Gun Kim, Hak Jun

ABSTRACT

The existing microplane models for concrete use three-dimensional spherical microplanes even in the analyses for two-dimensional members. Also, they can not describe accurately the post-cracking behavior of reinforced concrete in tension-compression. In this study, a new microplane model that is appropriate for the analyses of reinforced concrete planar members was developed to complement these disadvantages of the existing models. The proposed microplane model uses disk microplanes instead of the existing spherical ones. This new model is effective in numerical analysis because it uses less number of microplanes and two-dimensional stresses. Also, in this microplane model, a concept of strain boundary was introduced to describe compressive behavior of reinforced concrete in tension-compression.

1. 서 론

지난 20년 동안, Bazant와 그의 동료 연구자들(Oh, Gambarova, Ozbolt, Prat, Carol 등)은 다양한 응력상태의 콘크리트 거동을 나타내기 위한 미소면 모델(microplane model)을 개발해 왔다. 미소면 모델의 가장 큰 장점은 다른 재료모델과는 달리 변수를 최소화하고, 비국소 손상을 나타낼 수 있으며, 복잡한 수치계산 없이 비교적 정확히 다양한 상태의 재료거동을 나타낼 수 있다는 점이다. 그와 같은 장점에도 불구하고 다음과 같은 부분에서 미소면 모델의 개선이 필요하다.

모든 기존의 미소면 모델은 재료거동을 나타내기 위하여 공통적으로 그림 1에 나타난 바와 같은 구형 미소면을 사용한다. 따라서 모든 형식의 부재해석에서, 심지어 면 부재의 해석에서도 구형 미소면과 이에 관련된 3차원 응력의 적분을 사용하여야 한다. 이 구형 미소면이 미소면 모델의 본래의 개념에 적절하다고 할지라도, 2차원 응력(plane stress) 또는 2차원 변형율(plane strain) 문제에 대하여 3차원의 응력과 변형율을 다루는 구형 미소면이 사용되어야 하는가는 의문시 된다. 만약 2차원 응력을 다루는 미소면 모델이 있다면, 2차원 면 부재의 해석에서 수치계산이 간단해질 수 있을 것이다.

Bazant와 Ozbolt(1990)에 의하여 개발된 미소면 모델은 다축압축 또는 인장뿐만 아니라 인장-압축

* 정회원, 서울대 건축학과, 교수

** 정회원, 서울대 건축학과, 석사과정

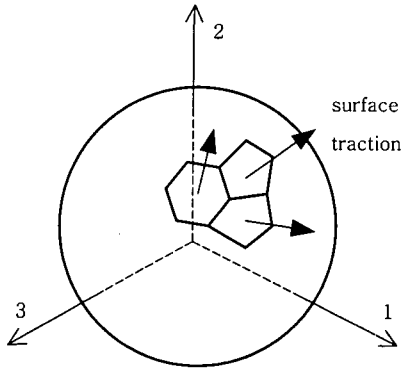


그림 1 구형 미소면

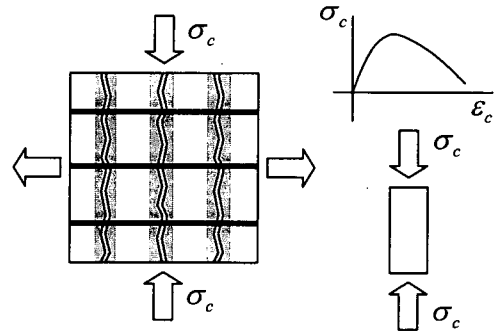


그림 2 인장-압축상태의 철근콘크리트

상태의 콘크리트에도 적용할 수 있도록 개발되었다. 이 미소면 모델은 인장-압축상태의 무근 콘크리트의 실험적 파괴면 즉, 압축파괴와 인장균열파괴와 잘 일치하고 있다. 그러나, 철근콘크리트에서는 인장균열 후에도 보강철근이 인장력을 지지할 수 있으므로 인장균열은 파괴가 아니며, 철근콘크리트의 파괴는 인장균열이 진전된 후 종국적으로 콘크리트의 압괴에 의하여 일어난다. 따라서 철근콘크리트의 해석에서는 인장균열 그 자체보다는 인장균열 후 거동이 더욱 중요하다.

그림 2는 인장균열 후 인장-압축상태의 철근콘크리트를 보여주고 있다. 콘크리트는 균열과 평행한 방향에서 압축력을 받는다. 여기서 방향이 일정하지 않은 인장균열이 압축력을 받는 콘크리트 스트럿의 면적을 감소시키는 영향을 고려하지 않는다면, 인장-압축상태에서 압축력을 받는 콘크리트 스트럿의 압축 응력-변형을 관계는 인장균열의 폭과 무관하게 순수하게 1축 압축력을 받는 콘크리트의 응력-변형을 관계와 거의 일치하여야 한다. 다시 말하면, 콘크리트의 압축 응력-변형을 관계는 인장균열변형률과 무관하게 정의되어야 한다. 또한 물리적으로도 인장균열에 의한 공간은 콘크리트의 압축응력에 아무런 영향을 주지 않는다. 그러나 기존의 미소면 모델은 응력을 정의하기 위하여 인장균열변형률을 포함하는 총 변형률을 사용하고 있다. 따라서 기존의 미소면 모델에서는 인장-압축을 받는 콘크리트의 압축응력은 인장균열변형률에 의하여 영향을 받으며, 그 결과 이 압축 응력-변형을 관계는 1축 압축상태의 콘크리트 응력-변형률과는 다르다.

인장균열에 대한 미소면 모델에서는 과도한 인장균열변형률이 인장응력을 나타내는데 문제점을 야기시키는데, Bazant와 Jirasek(1994)은 이러한 문제점을 인식하여 응력-변형률한계 개념을 도입하였다. 그러나 이는 인장균열응력에 관한 것으로서 인장-압축상태의 철근콘크리트에 대해서는 직접적으로 적용할 수 없다.

위에서 언급한 바와 같이 기존의 미소면 모델은 인장-압축을 받는 철근콘크리트 2차원 면 부재의 거동을 나타내는데 있어서 두 가지의 단점을 가지고 있다. 즉, 2차원 면 부재를 해석하는데 있어서 3차원의 미소면과 응력을 사용하기 때문에 수치계산에서 비효율적이며, 또한 인장-압축을 받는 콘크리트에서 인장균열후 압축거동을 정확히 나타내지 못한다. 따라서 본 연구에서는 2차원 면 부재의 해석에서 수치적으로 효율적이고 부재의 거동을 정확히 나타낼 수 있는 미소면 모델을 개발하고자 한다.

2. 재료모델

2차원 면 부재의 수치해석상 간편성을 위하여 본 논문에서 제안되는 미소면 모델은 기존의 구형 미소면이 아닌 원판형 미소면을 사용한다. 그림 3에 나타난 바와 같이 콘크리트의 단위부피는 단위길이

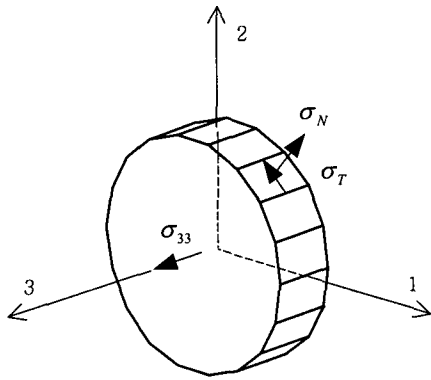


그림 3 제안된 원판형 미소면

의 반지름과 관련 부재의 두께를 갖는 원판으로 이상화 된다. 이 원판의 원주위를 따라 있는 표면은 각기 다른 방향 벡터를 갖는 미소면들로 구성된다. 이 미소면 모델의 응력-변형을 관계를 정의하기 위하여 구형 미소면 모델에서 사용된 것과 동일한 다음과 같은 가정을 사용한다.

(1) 미소면에는 표면응력이 존재하며, 미소면의 중앙에 위치한 표면응력이 미소면의 표면응력 상태를 대표한다. 이 표면응력은 수직응력과 접선응력(전단응력)으로 구성된다.

(2) 원판 안에는 원판의 부피에 걸쳐 일정한 대표응력(macrostress)과 대표변형율(macrostrain)이 존재한다. 이 대표응력은 표면응력과 평형을 이루고 있다.

(3) 변형을 불변성의 조건이 적용되며 따라서, 각 미소면의 수직변형율과 접선변형율(전단변형율)로 구성되는 표면변형율은 대표변형율의 축 변환에 의하여 구할 수 있다.

(4) 각 미소면에서 표면응력은 표면변형율의 함수로 정의된다.

가상일의 법칙을 사용하여 대표응력과 표면응력의 관계를 정의하면,

$$\sigma = \frac{1}{m} \sum T_{\theta}^T \sigma_{\theta} \quad (1)$$

여기서, m 은 총 미소면 개수의 1/4이며, θ 는 1/4 표면적에 있는 각 미소면의 수직벡터의 방향으로서, 전체좌표계(global axes)로부터 θ 만큼 회전된 국부좌표계(local axes)의 방향을 나타낸다. σ_{θ} 는 서로 직각인 두개의 수직성분과 전단성분으로 구성된 국부좌표계의 응력벡터를 나타낸다. T_{θ} 는 전체좌표계의 변형율과 국부좌표계의 변형율의 관계 ($\epsilon_{\theta} = T_{\theta} \epsilon$)를 나타내는 변환행렬이다. 식 (1)에서, 가상일의 법칙에 의하여 도출된 대표응력은 단순히 전체좌표계로 변환된 미소면에서 정의되는 모든 국부좌표계 응력의 평균이라는 사실을 알 수 있다.

미소면 모델에서 미소면의 수직응력은 체적성분과 비체적성분의 합으로 표현할 수 있다고 가정한다. 체적응력, 비체적응력, 전단응력에 대하여 본 연구에서는 원판형 미소면을 사용하여 2차원 압축상태의 콘크리트 거동을 잘 나타낼 수 있는 손상계수를 개발하였다.

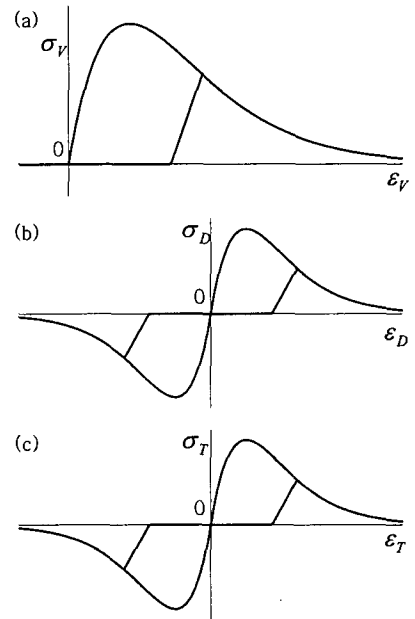


그림 4 제안된 미소면 모델의 (a) 체적 (b) 비체적 (c) 전단 응력-변형율 관계

$$\sigma_V = C_V \epsilon_V, \quad \sigma_D = C_D \epsilon_D, \quad \sigma_T = C_T \epsilon_T$$

$$\left(\epsilon_V = \frac{1}{3}(\epsilon_{11} + \epsilon_{22} + \epsilon_{33}), \quad \epsilon_D = \epsilon_N - \epsilon_V \right)$$

$$C_V(\epsilon_V) = C_V^0 \exp\left(-\left|\frac{\epsilon_V}{e_V}\right|^{K_V}\right)$$

$$C_D(\epsilon_D) = C_D^0 \exp\left(-\left|\frac{\epsilon_D}{e_D}\right|^{K_D}\right)$$

$$C_T(\epsilon_T) = C_T^0 \exp\left(-\left|\frac{\epsilon_T}{e_T}\right|^{K_T}\right) \quad (2)$$

이 체적, 비체적, 접선 응력-변형을 곡선은 그림 4에 나타나 있다. 이 곡선은 Kupfer et al.(1969)의 실험 결과와 일치하도록 조절되었다.

그림 5와 6은 2축 압축상태의 콘크리트에 대한 미소면 모델의 해석결과와 Kupfer의 실험을 비교하고 있다. 그림 5는 응력-변형을 곡선을 보여주고 있으며, 그림 6은 2축 응력 상태의 콘크리트의 파괴면을 보여주고 있다. 이 그림에 나타나 있듯이 수치해석 결과는 실험과 일치하고 있다. 이 미소면 모델에서는 9개의 국부좌표계, 즉 18개의 미소면이 사용되었다. 기존의 구형 미소면 모델을 사용할 경우, 보다 많은 미소면을 사용하여야 하며, 3차원 응력에 대한 적분(가우스적분)과 3차원 변형율의 변환을 수행하여야 한다. 그러나 이 미소면 모델에서는 Bazant가 사용하는 구에 대한 가우스적분보다 간단한 2차원 응력의 적분과 2차원 변형을 변환을 사용하고 있으며 1-2면에 존재하는 보다 적은 수의 미소면으로도 정확한 거동을 나타낼 수 있다.

3. 인장-압축상태의 철근콘크리트를 위한 모델의 개선

그림 7에 나타난 바와 같은 인장-압축상태의 철근콘크리트에서는 인장균열이 콘크리트에 이방성 손상을 일으키며 인장균열변형율이 증가함에 따라 인장균열에 직각방향의 인장응력이 감소한다. 따라서 인장균열과 나란한 방향에서 콘크리트영역의 응력은 인장균열의 폭과 무관하게 1축 압축상태에 가깝게 된다. 그림 5와 6에 나타난 바와 같이 이 논문에서 제시된 미소면 모델은 1축 또는 2축 압축상태의 콘크리트 거동을 나타내도록 개발되었다. 이 압축응력을 정의하는 변형율은 인장균열과는 무관하며, 따라서 변형율이 인장균열을 포함할 경우, 이 변형율은 1축 압축상태와 같은 콘크리트 영역의 응력을 정확히 나타낼 수 없다. 따라서 콘크리트 영역의 압축 응력-변형율 관계를 나타내기 위하여 인장균열 변형율은 총 변형율에서 배제되어야 한다.

이러한 목적을 위하여 그림 7에 나타난 바와 같이, 인장균열이 있는 콘크리트는 개념적으로 콘크리트 영역과 인장균열 영역으로 구분되며, 총 응력은 이 두 영역의 응력의 조합으로 표현된다.

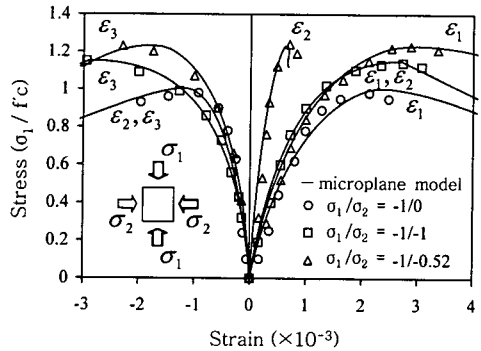


그림 5 해석결과와 실험의 비교 (Kupfer et al., 1969.)

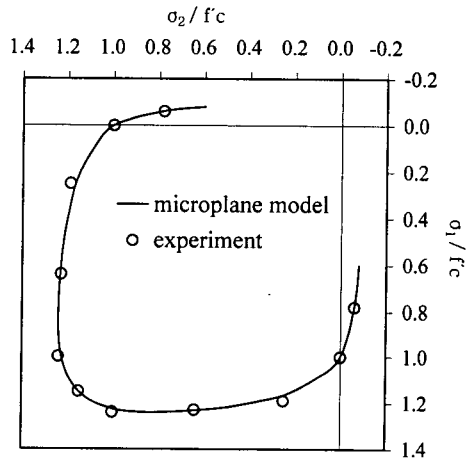


그림 6 2축 파괴면 (Kupfer et al., 1969.)

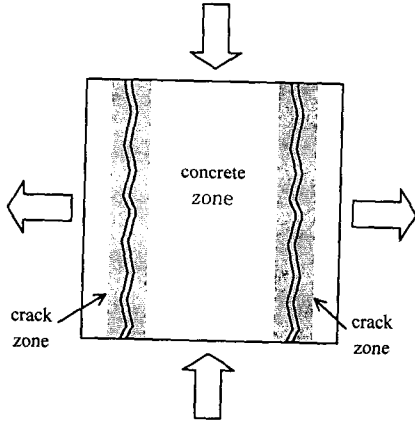


그림 7 콘크리트 영역과 인장균열 영역

$$\sigma = \sigma_c + \sum_1^m \sigma_{crack}$$

여기서, m 은 인장균열방향의 총 개수를 나타낸다. σ_c 는 1축 또는 2축 압축상태에 있는 콘크리트 영역의 응력을 나타낸다. 만약 인장균열이 발생한 경우 σ_c 는 인장균열의 이방성 손상의 영향을 받아서 1축 압축상태로 유지된다. 만약 2개 이상의 인장균열이 발생한 경우에는 $\sigma_c = 0$ 이 된다. 반면에 σ_{crack} 는 인장응력으로서 각 균열방향에서 인장연화, 인장경화, 전단미끄러짐 응력을 나타낸다.

본 연구에서는, 인장균열이 있는 경우 σ_c 를 1축 압축상태로 유지하기 위하여 변형율한계라는 개념을 도입한다. 그림 8에 나타난 바와 같이 σ_c 가 압축상태인 경우, 인장변형율은 일정한 한계값을 넘지 않는다. 이 인장변형율의 한계값은 압축상태의 콘크리트에서 허용되는 최대 횡방향 변형율이다. 이 변형율한계값은 압축변형율에 대한 비, 즉 포아송 비에 의하여 정의될 수 있다. 다차원 응력인 σ_c 을 압축상태로 유지하기 위하여, 주인장변형율은 이 변형율한계 즉, 주압축변형율에 대한 포아송 비를 초과하지 못하도록 제어된다.

변형율한계값은 그림 5에 나타난 바와 같은 압축실험결과에 근거한 포아송비로서 정의할 수 있으나, 일반적으로 다차원상태에서는 주응력축과 주변형율축이 일치하지 않으므로 단순압축실험에 근거한 포아송비는 적절하지 않을 수도 있다. 본 연구에서는 인장-압축상태의 콘크리트에 대한 Vecchio와 Collins의 실험결과에 근거하여 변형율한계로서 다음과 같은 포아송 비의 식을 제안한다. (그림 9)

$$\nu_b = 0.05 \times \epsilon_r + 0.55 : \epsilon_r \leq 1 \quad \nu_b = 0.15 \times \epsilon_r + 0.45 : \epsilon_r > 1 \quad (4)$$

여기서, $\epsilon_r = \epsilon_{c,max} / \epsilon_d$, $\epsilon_d = f_c / E$

식 (4)의 포아송 비는 단순압축실험에 근거한 값보다 조금 큰 값이며, 이는 주응력축과 주변형율축이 일치하지 않기 때문이다.

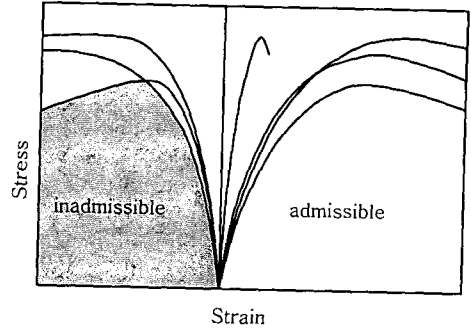


그림 8 압축 응력-변형율한계에서 허용 영역

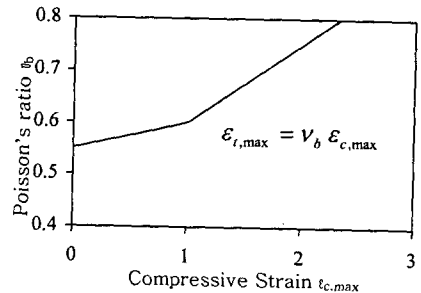


그림 9 변형율한계에 대한 포아송 비

인장응력 σ_{crack} 은 Bazant가 제안한 바와 같은 인장균열에 대한 미소면 모델에 의하여 정의할 수 있다. 본 연구에서는 수치계산의 간략화를 위하여 간단한 균열손상모델인 고정균열모델을 사용하였다.

4. 결 론

기존의 미소면 모델은 철근콘크리트 면 부재를 해석하는데 있어서 두 가지의 단점을 가지고 있다. 첫째, 기존의 모델은 면 부재와 같은 2차원의 문제에 대해서도 3차원의 구형 미소면을 사용한다. 또한 콘크리트의 응력-변형을 관계에서 인장균열을 포함하는 총 변형율을 사용하고 있는데, 이러한 총변형율로써 인장-압축상태의 철근콘크리트의 인장균열 후 콘크리트 스트럿의 압축거동을 정확히 나타낼 수 없다. 본 논문에서는 이러한 기존 미소면 모델의 단점을 보완하기 위하여 새로운 미소면 모델을 개발하였다. 우선, 본 논문에서 개발된 미소면 모델은 기존의 3차원 구형 미소면 대신에 2차원 문제에 효율적인 원판형 미소면을 사용한다. 이 새로운 미소면 모델은 작은 수의 미소면을 사용하고 보다 간단한 응력-변형을 계산을 사용하므로 수치계산에서 보다 효율적이다. 또한 인장균열 후 콘크리트의 압축응력을 정의하기 위하여 변형율한계의 개념을 도입하였다. 이 변형율한계에 의하여 콘크리트의 압축응력과 무관한 인장균열변형율이 총 변형율에서 배제되며, 이 방법을 사용하여 인장-압축상태에서 인장균열 후 콘크리트의 압축거동을 정확히 나타낼 수 있다.

감사의 글

이 논문은 두뇌한국21(BK21)의 2000년도 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. American Concrete Institute. (1995). "Building Code Requirements for Structural Concrete.", ACI 318-95, Detroit, pp. 118-121, 227-230.
2. Bazant, Z. P., and Oh, B. H. (1985). "Microplane Model for Progressive Fracture of Concrete and Rock.", J. Engrg. Mech., ASCE, 111(4), pp. 559-582.
3. Bazant, Z. P., and Ozbolt, J. (1990). "Nonlocal Microplane Model for Fracture, Damage, and Size Effect in Structures.", J. Engrg. Mech., ASCE, 116(11), pp. 2484-2504.
4. Bazant, Z. P., and Prat, P. C. (1988a). "Microplane Model for Brittle Plastic Material. I: Theory.", J. Engrg. Mech., ASCE, 114(10), pp. 1672-1688.
5. Bazant, Z. P., and Prat, P. C. (1988b). "Microplane Model for Brittle Plastic Material. II: Verification.", J. Engrg. Mech., ASCE, 114(10), pp. 1689-1702.
6. Bazant, Z. P., Xiang, Y., Adley, M. D., Prat, P. C., and Akers, S. A. (1996). "Microplane Model for Concrete. II: Data Delocalization and Verification.", J. Engrg. Mech., ASCE, 122(3), pp. 255-262.
7. Bazant, Z. P., Xiang, Y., and Prat, P. C. (1996). "Microplane Model for Concrete. I: Stress-strain Boundaries and Finite Strain.", J. Engrg. Mech., ASCE, 122(3), pp. 245-254.
8. Carol, I., Prat, P. C., and Bazant, Z. P. (1992). "New Explicit Microplane Model for Concrete: Theoretical Aspects and Numerical Implementation.", Int. J. Solids and Struct., 29(9), pp. 1173-1191.
9. Karan, I. D. and Jirsa, J. O. (1969) "Behavior of Concrete under Compressive Loadings", J. Struct. Engrg., ASCE, 95(12), pp. 2543-2563.
10. Ozbolt, J., and Bazant, Z. P. (1992). "Microplane Model for Cyclic Triaxial Behavior of Concrete.", J. Engrg. Mech., ASCE, 118(7), pp. 1365-1386.
11. Vecchio, F. J., and Collins, M. P. (1986). "The Modified Compression-field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear.", Structural Journal, ACI, 86(2), pp. 219-231.