

FRP로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 해석모델

Modeling Stress-Strain Relations for FRP-Confined Concrete

조 순 호* 방 세 환**

Cho, Soon Ho Bang, Se Hwan

ABSTRACT

The analytical model capable of predicting stress vs. strain relations for circular FRP-confined concrete in a rational manner is proposed. The underlying idea is that the volumetric expansion due to progressive microcracking is an important measure of the extent of damage in the material microstructure. Various existing analytical models including the proposed were also investigated, and compared each other and with test results.

1. 서 론

콘크리트 기둥의 강도 및 변형 능력을 향상시키기 위하여 FRP 합성재료를 사용하여 콘크리트를 구속하는 기술은 이미 많은 건설 기술자들의 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 축하중 작용 시 FRP에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 합리적으로 예측할 수 있는 해석모델을 제시하고, 이의 검증을 위하여 예측된 응답을 실험결과와 비교하였다. Mirmiran(1998), Rizkalla(2001), Sheikh(2004) 등이 제시한 다양한 기존모델을 비교, 검토하였으며 또한 이의 장단점을 분석하였다. 제시된 해석모델은 기계적 거동 및 기본역학 이론에 따라, 변화하는 구속응력을 고려하여 3축 응력하의 원형단면 콘크리트의 응력-변형률 관계를 예측한다.

2. 기존모델

FRP로 구속된 원형단면 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 일반적으로 2선 형태로 응력 및 변형률의 관계가 서로 선형적으로 비례, 증가하는 양상을 나타낸다. 또한, 수동형 구속(Passive Confinement)은 구속매체의 재료성능에 따라 콘크리트가 팽창함에 따라 점증적으로 그 크기가 증가한다. 따라서 기존의 일정한 구속력에 근거한 해석모델은 파단 시까지 탄성거동을 나타내면서 변화하는 구속력을 유발하는 FRP 구속거동을 실제적으로 묘사할 수 없다.

*정회원, 광주대학교 건축학부 부교수, **광주대학교 석사과정

(본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R05-2003-000-11885-0)지원으로 수행되었음).

이러한 구조적 특성을 묘사하기 위하여 Mirmiran 등은 4개 변수에 근거한 Menegotto-Pinto 식을 채택하여 FRP로 구속된 콘크리트의 축응력-축방향 변형률, 축응력-수평방향 변형률 관계를 예측할 수 있는 일련의 관계식을 제시하였다. 실험으로부터 FRP에 구속된 콘크리트의 팽창비변화률(Dilation Rate, 후프변형률 변화량 / 축방향 변형률 변화량)의 전체응답을 측정하고, 최종적으로는 일정한 값에 수렴한다는 사실에 근거하여 팽창비 변화를 전체적으로 고려하기 보다는 최종구속력 및 FRP의 강성만을 채택하여 점증계산(Incremental Calculation)논리의 사용을 배제하였다. 또한 응력-변형률 곡선을 정의하기 위한 여러 변수의 값은 실험결과로부터 유도하였다.

한편, Rizkalla 등은 힘의 평형조건 및 변형률 적합조건으로부터 구속력에 대한 관계식을 유도하고 Mander의 응력-변형률 관계식을 사용하여 구속콘크리트의 전체응답을 예측하였다. FRP에 대하여서는 2축 응력 파괴기준을 사용하였으며, 또한 하중단계마다 변화하는 콘크리트의 탄성계수 및 포아손비를 고려하였다. 콘크리트 탄성계수는 이전 단계에서 산정한 구속콘크리트의 응력 및 변형률로 표시하며, 포아손비는 이전 단계의 구속응력 및 최대변형률로부터 산정하게 되는데, 이러한 해석논리상 이들의 방법은 점증계산을 요구한다. Sheikh 등은 축방향 변형률을 변화시키면서 이에 해당하는 수평방향 변형률을 산정하고, 이를 다시 Mander 식에 대입하여 구속 콘크리트의 전체 응력-변형률 관계를 산정하는 고전적인 점증 계산법을 채택하고 있다. 수평방향 변형률을 산정하기 위하여 팽창비의 변화를 대신에 팽창비(Dilation Ratio)를 콘크리트의 변형률의 함수로 표시하고, 또한 최대 팽창비를 수평구속계수(Confinement Modulus)의 함수로 표시하여 제한하였다. 이외에도 최대하중 도달 이후 Fiber 가닥의 점증적 파단에 따른 Softening 거동을 묘사하기 위하여 유효한 FRP Layer수를 조정할 수 있는 관계식을 제시하였다.

이상에서 본바와 같이 FRP로 구속된 콘크리트의 전체응답을 예측하기 위하여 제시된 상기모델은 하중단계마다 변화하는 구속력을 실질적으로 묘사하는 것이 핵심사항인데, Mirmiran의 경우에는 실험으로부터 관측된 팽창비 변화율에 대한 전체응답을 고려하기보다는 최종 값만을 고려하여 실험관계식에 Fitting하였으며, Rizkalla 및 Sheikh 등은 팽창비변화율 대신에 팽창비를 사용하고 있으며, 또한 최대 팽창비 값으로 전체응답을 제한하고 있다. 따라서 하중단계에 따른 팽창비 및 최대 팽창비를 얼마나 정확히 정의하느냐에 따라 해석의 정확도가 크게 좌우되는데, 이들은 일련의 실험결과를 Fitting한 팽창비 관계식을 사용하고 있으며, 최대 팽창비를 대략 0.5정도로 제한하고 있다. 하지만, 콘크리트의 다양한 특성상 팽창비를 정확히 신뢰성 있게 정의하는 일은 그렇게 쉽지 않으며, 또한 기존 구속 콘크리트에 대한 실험결과에 의하면 최대하중 부근에서 0.5보다 큰 팽창비를 나타내는 것을 종종 관측할 수 있으므로, 아직도 이들의 접근방법은 보다 향상시킬 필요가 있다. 이에 본 연구는 실험적으로 유도된 팽창비변화률 혹은 팽창비 관계식을 사용하지 않고, 대신에 콘크리트 기본 재료특성에 근거하여 이들의 거동을 포함하는 보다 합리적인 구속콘크리트 응력-변형률 예측모델을 제안하고자 한다.

3. 제시모델

Pantazopoulou(1995)는 3축 응력을 지지하는 고강도 콘크리트의 거동에 대하여 점증적으로 발생하는 내부균열에 의한 부피팽창은 재료의 미세구조에서 손상정도(Degree of Damage)를 나타낼 수 있는 중요한 척도가 되며, 이를 이용하여 손상정도에 따라 변화하는 콘크리트의 지지능력을 일관되게 산정할 수 있다고 보고하고 있다. 따라서 구속된 콘크리트의 경우, 경계조건으로부터 주어지는 구속정도 및 부피팽창만 알 수 있다면 어떤 응력조건 하에서도 내부 응력상태, 잔류강성 및 강도를 산정할 수 있으며, 또한 콘크리트는 재료특성 상 내부에 공극 및 수분이 항상 존재하므로 구속응력이 작용할 경우 이러한 공극을 다 채우고 난 뒤 실질적으로 구속을 유발할 수 있는 변형률을 발동하며, 이를 위하여 공극 채움 변형률(Compact Strain)을 별도로 고려하여 3축 압축응력하의 시험체에서

확인할 수 있는 소성흐름(Plastic Flow)과 같은 연성거동을 설명하였다. 본 연구는 이러한 배경이론을 근거로 FRP로 구속된 콘크리트의 전체응답을 예측할 수 있는 일련의 관계식 및 절차를 개발하였다.

내부 미세균열에 의하여 발생하는 손상의 정도를 하중을 지지하는 면의 면적변형률(ϵ_A)로 표시할 때, 축방향 변형률(ϵ_1)에 대한 축방향응력(f_1)은 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$f_1 = E_1 \epsilon_1 = \frac{E_0 \epsilon_1}{1 + \frac{\epsilon_A}{\beta}}, \quad E_1 = \frac{E_0}{1 + \frac{\epsilon_A}{\beta}}, \quad \beta = -\frac{V_p^3 v_c}{\beta} \quad (1)$$

$$v_c = 3.22 \frac{w_0 - 0.3064 \alpha_\infty}{1 + 3.22 w_0}, \quad \alpha_\infty = \frac{1.031 w_0}{0.194 + w_0} \quad (2)$$

여기서 β = 단위면적당 공극, E_0 = 초기탄성계수, V_p = 페이스트의 부피비(Volume Fraction), v_c = 페이스트의 자연 모세관 공극(Natural Capillary Porosity), w_0 = 물-시멘트 비, α_∞ = 최종 수화정도이다.

FRP로 구속된 콘크리트의 경우 동일한 물리적 및 기하학적 성능(E_{fr}, t_{fr}, H)과 동일한 단면손상(ϵ_A^1)을 갖는 1축 응력을 지지하는 등가시험체를 고려(σ_{u1}), 비교하여 구속력 발동 시 구속매체가 흡수하는 일의 량을 아래 식과 같이 표시할 수 있다.

$$(2\pi \epsilon_{lat} E_{fr}) \Delta \epsilon_{lat} \cdot t_{fr} H = (\sigma_1 - \sigma_{u1}) \Delta e_1 \pi R^2 H \quad (3)$$

$$\epsilon_1 = e_1 + \epsilon_1^p, \quad \epsilon_{lat} = -\nu \epsilon_1 - \left(\frac{1-2\nu}{2}\right) \epsilon_1^* \left(\frac{\langle \epsilon_1 - \epsilon_{lim} \rangle}{\epsilon_1^* - \epsilon_{lim}}\right)^c, \quad \epsilon_1^* = 0.9 \epsilon_0 \quad (4)$$

여기서 $\langle \rangle$ 는 내부 수식이 -값 일 경우 0으로 간주한다. 식(1), (2) 및 (3)을 사용하여 전체응답을 산정하기 위한 해석논리는 i) 초기 증분량 Δe_1 가정, ii) $\Delta \epsilon_{lat}$ 산정, iii) σ_{u1} 산정, iv) 연속 증분량 $\Delta \epsilon_1$ 가정, v) 에너지 식으로부터 $\Delta \epsilon_{lat}$ 산정, vi) $\epsilon_{lat} + \Delta \epsilon_{lat}$ 산정, vii) σ_1 산정 등 이다.

4. 실험결과와의 비교

본 연구의 이론부분과 병행하여 수행한 일련의 단주실험은 i) FRP Shell로 구속, ii) 원형단면 (150x150x 300 mm), iii) 수평 및 수직방향의 Glass Fiber 량 변화 등의 내용을 포함하고 있다. 이러한 구속콘크리트의 응력-변형률 관계를 예측하기 위하여 i) Samann 등의 2선식 모델, Pantazopolou의 배경이론에 근거하여 본 연구에서 제안하는 모델에 ii) Mirmiran 등이 제시한 전체 팽창비 변화율을 포함한 경우, iii) 다양한 β 및 c 값을 포함하는 경우 등이다(그림 1). 한편, 제안모델은 포아슨비를 재료의 고유 특성치로 간주하여 단일 값을 사용하고 있으며, FRP가 파단 할 때를 시험체가 파괴하는 시점으로 간주하고 있다. 이를 이하에 인장시험편으로부터 획득한 값의 70%에 해당하는 유효파단 변형률을 채택하였다. 이외에도 제안모델은 축방향 응력-축방향 변형률, 축방향 응력-수평방향 변형률을 기본역학이론 및 구속기구에 따라 자연스럽게 산정하고 있다.

5. 결론

3축 응력을 지지하는 콘크리트의 응답을 묘사하기 위하여 부피팽창변형률을 주요한 변수로 사용한 본 제안모델은 관계상수 $c=1.2$, FRP 유효파단변형률= $0.7\epsilon_{fr}$ 을 사용하였을 때 실험결과와 매우 유사한

거동을 예측하였다. 또한, 본 해석결과에 의하면 최대하중에 도달할 때 이에 해당하는 팽창비는 대략 0.4~0.7 정도를 나타내었으며, β 가 증가함에 따라 보다 Stiff한 거동을 보여주고 있는데, 이는 공극이 많이 포함됨을 의미하므로 이에 대한 보다 자세한 검토가 요구된다. 그럼에도 불구하고 제안된 모델은 기본역학이론에 근거하여 관련된 다양한 응답을 산정할 수 있는데 큰 이점이 있다.

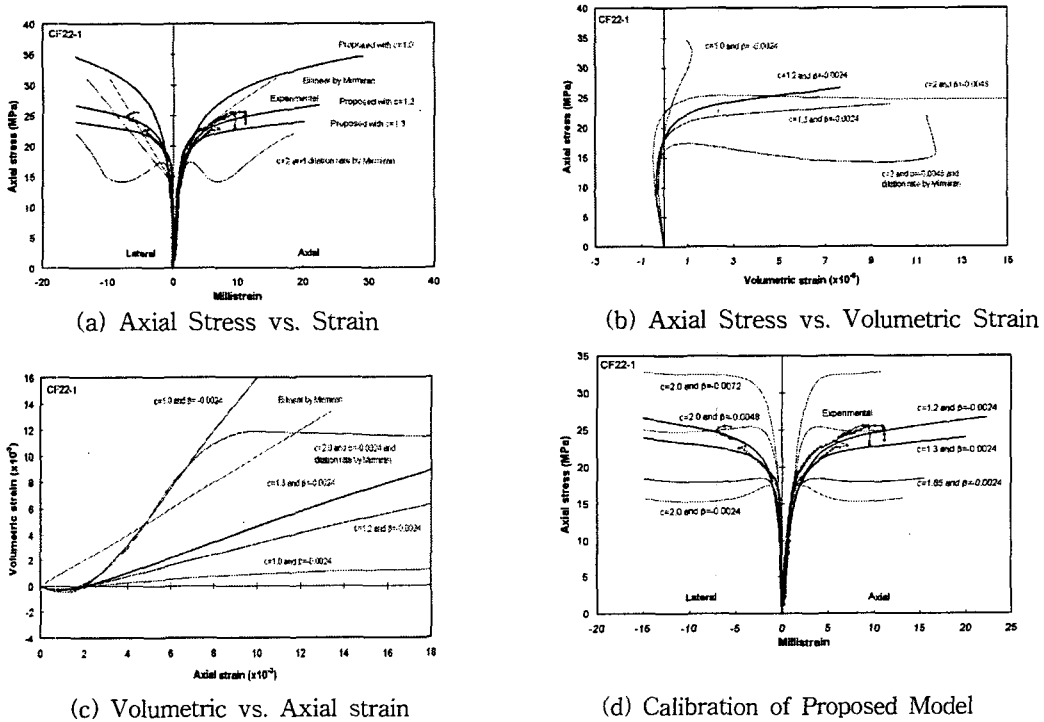


Fig. 1 Various Predicted Responses

참고문헌

1. Samaan, M., Mirmiran, A. and Shahawy, M. (1998) "Model of Concrete Confined by Fiber Composites," J. of Structural Engrg., ASCE, 124(9), pp. 1025-1031.
2. Fam, A. Z. and Rizkalla, S. H. (2001) "Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-reinforced Polymer Tubes," ACI Structural J., ACI, 98(4), pp. 451-461.
3. Samdani, S. and Sheikh, A. S. (2004) "Analytical Study of FRP-Confined Concrete Columns," Proc., 4th Conf. on Concrete under Severe Conditions: Environment & Loading, CONSEC'04, B. H. Oh ed., Seoul Korea, pp. 1122-1129.
4. Pantazopoulou, S. J., (1995) "Role of Expansion on Mechanical Behavior of Concrete," J. of Structural Engrg., ASCE, 121(12), pp. 1795-1805.