

# 횡변형률 이력에 근거한 FRP-구속 콘크리트의 해석

## Analysis of FRP-Confined Concrete According to Lateral Strain History

조 순 호\*

Cho, Soon Ho

---

### ABSTRACT

The proposed method, capable of predicting various stress-strain responses in axially loaded concrete confined with FRP (Fiber Reinforced Polymers) composites in a rational manner, is based on the fact that the volumetric expansion due to progressive microcracking in mechanically loaded concrete is an important measure of the extent of damage in the material microstructure. The elastic modulus expressed as a function of area strain and concrete porosity, the energy-balance equation relating the dilating concrete to the confining device interactively, the varying confining pressure, and an incremental calculation algorithm are included in the solution procedure. This procedure enables the evaluation of lateral strains consecutively according to the related mechanical model and the energy-balance equation, rather than using an empirically derived equation for Poisson's ratio or dilation rate as in other analytical methods.

### 요 약

FRP 합성재료로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 응답을 합리적으로 예측할 수 있는 해석모델이 제시되었다. 제안된 모델은 하중이 증가함에 따라 점진적으로 발생하는 미세균열에 의한 부피팽창이 미세재료구조의 손상을 나타내는 중요한 척도이며, 이에 손상정도에 따라 하중지지능력을 일관되게 산정할 수 있다는 기본개념에 근거한다. 이를 위하여 제안모델은 면적변형률 및 공극의 함수로 표시된 탄성계수, 팽창콘크리트와 구속매체의 상호작용을 나타내는 에너지 평형식, 변화하는 구속력 및 점증계산논리를 포함한다. 따라서 실험으로부터 유도된 팽창비 관계식으로부터 횡방향 혹은 부피팽창변형률을 산정하는 기존의 해석모델과는 달리 역학적 거동 및 에너지 평형식으로부터 연속적으로 변화하는 횡방향 변형률을 산정한다.

---

\* 정회원, 광주대학교 건축학과, 교수

### 1. 서 론

Pantazopoulou(1995) 등은 미세구조거동에 입각하여 구속된 콘크리트의 횡방향 및 축방향 변형률 관계를 합리적으로 묘사할 수 있는 단순식을 제안한 바 있으며, 이러한 모델은 3축 등가압축력(hydrostatic pressure)을 지지하는 일련의 고강도 콘크리트 실린더에서 물-시멘트비, 구속력의 크기 및 하중경로 등을 주요변수로 한 실험결과로부터 유도되었다. 미세균열에 의한 부피팽창거동이 콘크리트 강성의 약화 및 강도저하를 설명할 수 있는 핵심변수임을 확인하고 있다.

본 연구는 이러한 개념에 착안하여 축하중 작용 시 FRP 합성재료에 의하여 구속된 콘크리트의 전체 응력-변형률 관계를 합리적으로 예측할 수 있는 해석모델을 개발하고, 이의 검증에 위하여 실험으로부터 관측된 다양한 응답을 예측한다(조순호, 2007). 제시된 해석모델은 기존모델과는 달리 기계적 거동에 따라 콘크리트의 부피팽창을 산정하고, 이에 따라 변화하는 구속응력을 고려한다. 점증계산에 의하여 3축 응력하의 원형단면 콘크리트의 축방향 응력-축 혹은 횡방향 변형률 응답을 예측한다.

## 2. 제안모델

FRP로 구속된 콘크리트의 경우 Fig. 1과 같이 동일한 물리적, 기하학적 조건 및 단면손상특성을 보유했던 비구속된 등가시험체를 고려할 수 있는데, 구속된 콘크리트와 비구속된 등가 콘크리트 시험체를 비교하여 구속력 발동 시 구속매체가 흡수하는 일의 량을 표현할 수 있다. 제안모델은 면적변형률 및 공극의 함수로 표시된 탄성계수, 팽창콘크리트와 구속매체의 상호작용을 나타내는 에너지 평형식, 변화하는 구속력 및 점증계산논리를 포함한다. 보다 자세한 정보는 참고문헌 1과 같다.

## 3. 실험결과 예측

본 연구의 이론부분과 병행하여 수행한 일련의 FRP로 구속된 원형단주실험(150mm x 300mm)의 주요변수는 i) fiber 량 및 방향, ii) 단부 하중조건, iii) 연속 혹은 불연속 구속형태 등이다.  $f_{ck}$  혹은  $f'_{c0} = 21 MPa$ , 1-방향 및 2-방향 유리섬유 메쉬 사용, 단조가력 하중 하에서 실험을 수행하였으며, 실험에 관한 보다 자세한 정보는 본 연구의 실험부분을 기술한 참고문헌 2와 같다.

FRP로 구속된 시험체의 콘크리트 응력-변형률 응답을 예측하기 위하여 i) Samaan(1998)이 제안한 2선식 모델, ii) Samaan 및 Mirmiran(1997)이 제시하는 팽창변화를 식과 본 연구의 해석절차를 사용한 모델, iii) 본 연구에서 제안하는 모델 등을 사용하여 해석을 수행하였다. Mirmiran 등은 실험으로부터 관측된 전체 팽창변화를 응답에 대하여 분수로 표현된 곡선식을 제시하고 있는데, 이를 Pantazopoulou 등이 제시하는 기본식에 보다 간편하게 사용하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 선형화하였다(해석모델 ii)). 본 연구에서 제안하는 해석모델 iii)은 포아슨비를 재료의 고유특성치로 간주하여 전 하중구간에 일정한 단일 값을 사용하고 있으며, FRP가 파단할 때를 시험체가 파괴하는 시점으로 간주하고 있다. 제안된 해석모델은 축방향 응력-축방향 혹은 횡방향 변형률을 전술한 역학모델로부터 유도된 관련식에 따라 자연스럽게 산정한다.

3종류의 해석모델을 사용하여 시험체 CF22-1의 축방향 응력-축방향 혹은 횡방향 변형률, 부피팽창에 대한 응답을 산정한 결과는 Figs. 3 및 4와 같다.

횡방향 변형률 산정을 위한 재료상수  $c=1.1$  및  $\beta = -0.0024$ 를 포함하는 제안모델과 Samaan의 2선식 모델은 만족할 만한 범위 내에서 관측된 거동을 포착하고 있으며, 대체적으로 응력-변형률 관계는 실험결과와 유사하게 예측하고 있는 반면에, 부피팽창거동은 아직도 상당한 차이가 있음을 알 수 있다(Fig. 3). 여기서  $\beta = -0.0024$ 는 사용된 재료의 특성으로부터 산정된 값이다.

Samaan 모델에서 부피팽창은 초기 및 후기구간에서 각각 일정한 포아슨비 및 최종수렴 팽창변화를 값만을 채택하여 고려한다. 즉, Mirmiran은 실험으로부터 부피팽창에 대한 전체응답을 측정하고, 또한 이를 수학적으로 표현하는 관련식을 제시하고서도, 실제로 구속된 콘크리트의 응력-변형률을 예측하는 데는 단지 초기 포아슨비와 최종수렴 팽창변화만을 고려하였다.

한편, 해석모델 ii)에 따른 부피팽창거동은 어느 정도 하중크기에서 FRP의 구속작용이 발동함에 따라 부피가 축소하는 방향으로 역전하게 되는데, 이러한 형태의 응답은 실험결과와는 크게 상이함을 알

수 있다. 이러한 점에서 전체 응력-변형률 응답은 개개구성요소의 거동보다는 선택된 기본곡선이 보다 지배적인 것으로 판단된다.

$\beta$  및  $c$  값에 따른 제안모델 iii)의 특성을 알아보기 위하여 다양한  $\beta$  및  $c$  값에 대하여 예측한 결과는 Fig. 4와 같다. 동일한  $c$ 값에  $\beta$ 를 감소시키는 경우 하중지지능력이 향상됨을 알 수 있는데, 이는  $\beta$  값이 작을수록 페이스트에 자연공극이 많이 포함되었음을 의미하며, 이는 또 다시 부피팽창과 관련된 탄성계수( $E_1$ ) 값을 크게 결정한다. 이에 대하여 Fig. 4(b)는 공극이 많을수록 공극을 다 채우고 난 뒤에 부피팽창거동이 발동하므로, 이러한 지연된 거동이 하중증가의 주요 원인을 설명하고 있다. 동일한  $\beta$ 값에 대하여  $c$ 값을 변화시키는 경우 응답 곡선형태에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

이상과 같이 실험결과와의 조정단계(calibration)를 거쳐 최종적으로 본 연구에서는  $c=1.1$ 을 제안하고 있으며, 또한 2축 하중하의 FRP 응력상태를 간접적으로 고려하기 위하여 파단시의 FRP 변형률을  $0.7\epsilon_{fru}$ 로 제한할 때 실험결과에 보다 일치하는 경향을 획득하였다. 제안된 모델을 사용하여 전체 CF 그룹 시험체에 대한 예측결과 및 실험치와의 비교는, 최대변형률( $\epsilon'_{cc}$ ) 및 강도( $f'_{cc}$ )에 대한 실험치/예측치의 평균값은 각각 0.955 및 1.172이며, 변동계수는 각각 0.277 및 0.148이다. 또한, 파괴 시 관측된 횡방향 변형률/예측치의 평균값 및 변동계수는 각각 1.019 및 0.263이고, 최대하중에 도달할 때 이에 해당하는 팽창비는 대략 0.54~0.66 정도로 예측되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서 제안한 모델과 기존의 2선식 등의 관련모델을 사용하여 실험결과를 예측한 결과 다음과 같은 결론을 유도할 수 있었다.

- 1) 본 연구의 제안모델은 부피팽창변형률을 주요변수로 하고, 이를 실험식보다는 역학적 거동 및 에너지 평형식에 의하여 자연스럽게 산정한다. 횡방향 변형률 산정과 관련된 재료상수  $c=1.1$  및 FRP의 유효파단변형률  $0.7\epsilon_{fru}$ 을 고려할 때 실험결과와 매우 유사한 거동을 예측하였다.
- 2) Samaan 2선식 모델은 축방향 응력-축방향 변형률 응답은 만족스럽게 예측하고 있으나, 횡방향 변형률 응답은 매우 큰 오차 및 산란된 결과를 포함하고 있다. 이는 매단계마다 변화하는 팽창비 혹은 팽창변화률을 고려하기 보다는 단지 초기 포아슨비와 최종수렴 팽창변화률만을 고려하였기 때문인 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(R05-2003-11885-0)의 일부이므로 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 조순호, "GFRP로 구축된 원형단면 콘크리트 단주의 강도 및 변형능력," 콘크리트학회 논문집, Vol.19 No.1 2007, pp.121-130.
2. 조순호, "FRP 합성재료에 의하여 구축된 콘크리트의 응력-변형률 응답 예측," 콘크리트학회 논문집, Vol.19 No.6 2007, pp.803-810.
3. Pantazopoulou, S. J., "Role of Expansion on Mechanical Behavior of Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, V.121, No.12, Dec. 1995, pp.1795-1805.

4. Samaan, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete Confined by Fiber Composites," Journal of Structural Engineering, ASCE, V.124, No.9, Sept., 1998, pp.1025-1031.
5. Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Dilation Characteristics of Confined Concrete," Mechanics of Cohesive -Frictional Materials, V.2, 1997, pp.237-249.

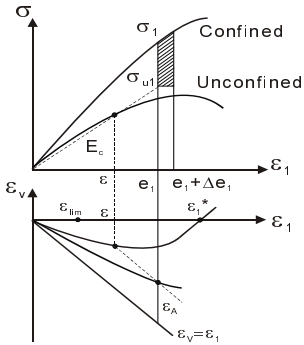


Fig. 1 Axial stress vs. axial strain and volumetric strain vs. axial strain for confined and unconfined concrete

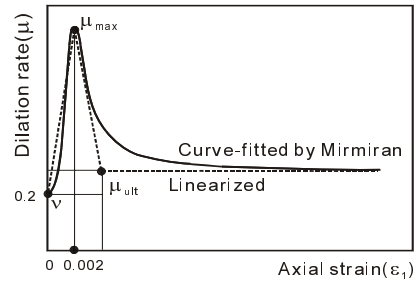


Fig. 2 Curve-fitted and linearized dilation rates to axial strain

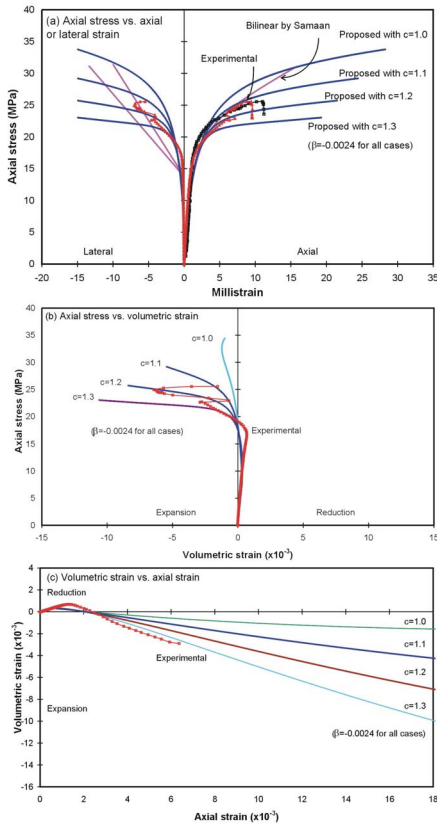


Fig. 3 Predicted responses for CF22-1 by Methods i) ii) and iii)

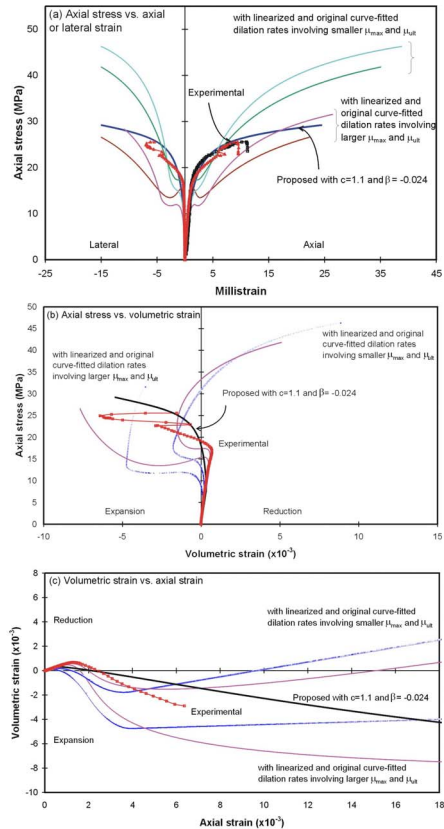


Fig. 4 Predicted responses for CF22-1 by Method