3차원 거동에 의한 원형 FRP-구속 콘크리트의 부재 비선형 모델

Nonlinear Model of FRP-Confined Concrete Members Considering with Three-Dimensional Behaviors

조 창 근* 권 민 호** 박 문 호*** 김 화 중**** 배 수 호*****
Cho, Chang-Geun Kwon, Minho Park, Moon-Ho Kim, Wha-Jung Bae, Soo-Ho

ABSTRACT

This study is concerning on modeling to predict the flexural behaviors of FRP-confined concrete structural members. For compressive behaviors of confined concrete by FRP jackets, the hypoelasticity-based constitutive law of concrete has been presented under the basis of three-dimensional stress states. The strength enhancement of concrete wrapped by FRP jackets has been determined by the failure surface of concrete in tri-axial states, and its corresponding peak strain is computed by the strain enhancement factor. The behavior of FRP jackets has been modeled using the mechanics of orthotropic laminated composite materials in two-dimensional stress states. To be based on the three-dimensional constitutive laws, an algorithm for the prediction of flexural bending behaviors of FRP-confined concrete structural member has been presented.

1. 서 론

삼축압축상태에서의 콘크리트의 강도와 연성 거동특성은 일축압축상태에 비해 크게 향상되는 것을 보여주었다(Cho 등, 2002, 2003). 만약 횡방향의 복합재료 섬유시트 보강재가 이러한 팽창을 구속하도록 놓여진다면, 부재 내 콘크리트 거동은 일축압축상태가 아니라 다축압축상태의 거동을 나타낼 것이다.

기존의 FRP-구속 콘크리트 압축거동에 관한 모델들은 Mander(1988)가 제안한 구속된 콘크리트의 압축 응력-변형률 관계식에 주로 기초하고 있다. 본 연구에서는, 3차원 구성관계를 고려한 FRP 콘크리트 복합 구조 부재 시스템의 휨 거동 예측을 위한 비선형 해석 알고리즘을 제시하였다. 기존의 연구와 비교하여 본 모델의 개선점 및 특징은, 3차원의 다축 응력 구성관계에 기초한 아탄성 재료로 콘크리트를 고려하였으며, 2축응력상태에 기초한 FRP 복합재료의 구성관계를 직접 해석 알고리즘에 적용하였다. 단면에서의 FRP 재료와 콘크리트 사이의 이론적 적합 및 평형조건을 고려하였다. 따라서 제안된 FRP 콘크리트의 구속모델은 하중 및 변형에 의존적인 비선형적 구속효과를 보다 합리적으로 고려하였다. 제안된 FRP 구속 콘크리트의 압축 및 인장 거동 관계 정식화를 기초로 비선형 층상화 단면해석에 의한 부재 휨거동 예측 알고리즘을 제시하였다.

2. FRP 적층 판의 응력 변형률 관계

* 정회원, 경북대학교 방재연구소 연구원
** 정회원, 경상대학교 토목공학과 조교수
*** 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수
**** 정회원, 경북대학교 건축공학과 교수
***** 정회원, 안동대학교 토목공학과 부교수

적층된 FRP 복합재료의 거동을 반영하기 위하여 고전적 적층판이론에 기초하여, 최종적으로 얻어진 적층의 직교이방성 판의 면내 거동에 의한 FRP재료의 축방향, 횡방향, 및 면내 전단 거동에 관한 등가재료상수를 산정할 수 있다. FRP 층의 파괴기준을 결정하기 위하여, 적층판 중의 하나가 섬유방향에 대해 최대 인장 및 압축강도를 초과할 경우 FRP 복합재료 판이 파괴되는 것으로 가정하였다.

3. 3축 압축응력상태에 기초한 FRP-구속 콘크리트의 압축 예측모델

그림 1와 같이, FRP 콘크리트 부재는 원형단면으로서 콘크리트가 내부에 충진되어 그 둘레에 여러 층의 FRP 복합재료로 둘러쌓여 있다. FRP 층이 단면의 반경에 비하여 매우 얇다고 가정하여 FRP 층의 두께방향 변형률 증감 및 휨 강성을 무시할 경우, 앞장에 유도된 적층판의 등가직교재료계수를 단면해석에 적용할 수 있다.

3축압축상태의 콘크리트는 강도와 연성거동에서 횡방향 구속력에 따라 크게 다르다. 3축응력의 일반화된 후크법칙으로부터, 응력 및 변형률 관계는 다음 식과 같이 유도된다.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_l \\ \sigma_r \end{Bmatrix} = \frac{1}{\Omega} \begin{bmatrix} E_l(1-\mu_{rh}^2) & 2\mu_{lr}\sqrt{E_l E_r}(1+\mu_{rh}) \\ \mu_{lr}\sqrt{E_l E_r}(1+\mu_{rh}) & E_r(1-\mu_{rh}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_l \\ \varepsilon_r \end{Bmatrix} \tag{11}$$

여기서, $\Omega = 1 - 2\mu_{lr}^2(1+\mu_{rh}) - \mu_{rh}^2$ (12), E_l, E_r, E_h는 각각 종방향, 반지름방향, 및 횡방향의 콘크리트 접선탄성계수이고, i-방향에 대한 j-방향의 콘크리트 포아송비 ν_{ij} 로 부터 $\mu_{lr}^2 = \nu_{lr}\nu_{rl}$, $\mu_{rh}^2 = \nu_{rh}\nu_{hr}$, $\mu_{lh}^2 = \nu_{lh}\nu_{hl}$ 과 같으며, 콘크리트의 반지름(radial)방향과 횡방향(hoop)방향의 응력, 변형률, 접선탄성계수, 및 포아송효과가 같다고 가정하에서 유도되었다. 위 식은 등가일축변형률개념을 적용할 수 있다.

FRP 적층판으로 둘러쌓인 콘크리트 실린더의 단면반지름이 R이고, FRP 층의 총두께가 t 인 경우, FRP와 콘크리트 사이의 미끄럼을 무시할 수 있다면, 콘크리트의 종방향 응력, FRP 층의 횡방향 응력, 및 콘크리트의 횡방향 변형률을 각각 유도할 수 있다.

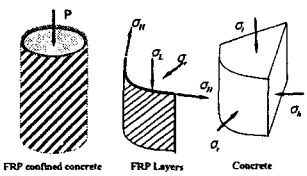

그림 1. FRP-구속 콘크리트의 응력

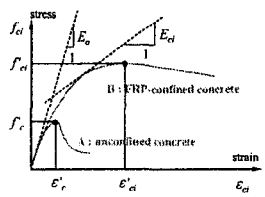

그림 2 압축응력관계

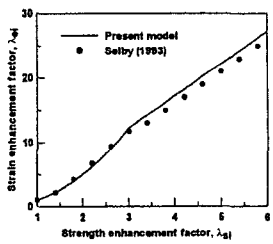

그림 3. 변형률증진계수

그림 2에서처럼, 구속되지 않은 콘크리트의 경우(A), 1축 압축응력상태에서의 콘크리트 응력-변형률 관계를 나타낸다. 최대압축응력점까지의 구속되지 않은 콘크리트의 1축압축 응력-변형률 관계 곡선으로 Saenz(1964)가 제안한 식을 사용하였다. 하지만 FRP 층으로 둘러쌓인 콘크리트의 경우 구속현상으로 인하여 1축 압축 거동이 아니라 3축 압축응력상태의 거동을 나타내게 된다. 본 연구에서는 압축 측 콘크리트의 종방향 구속 콘크리트의 최대 압축응력점을 구하기 위하여, σ_r, σ_l, 및 σ_r 의 콘크리트 압축응력상태에 대해서 Hsieh 등(1979)이 제안한 4개의 매개변수를 갖는 다음 식의 파괴 곡면을 적용하였다. 구속된 콘크리트의 압축변형률 ε_{ci}'를 구하기 위해서는 응력공간에서의 파괴곡면과는 달리 변형률공간에서의 파괴곡면이 필요하다. 본 연구에서는, 콘크리트의 2축 및 3축 실험결과로부터, 그림 4와 같이 강도증진계수의 함수로서 변형률증진계수를 제안하여 구속된 콘크리트의 연성증진효과를 나타낼 수 있도록 하였다. 콘크리트의 포아송비를 실험에 기초하여 3차 식의 다항식으로 가정하였다.

Mirmiran 등(1997)은, 지름 152.5 mm 높이 305 mm의 콘크리트 실린더에 GFRP 층으로 둘러쌓인 시험 공시체를 만들어 일축압축실험을 수행하였다. 실험자료들로부터 해석모델과 비교 대상으로 고려된 시험체는 E-glass 섬유와 폴리머 충진의 GFRP 판으로서 섬유배열방향은 ±15°로 배열되어 있다. 해석대상의 공시체는 각각 6 층 및 10 층의 FRP 층을 갖는 두 시험모델로서 각각 판의 총 두께가 1.3 mm 와 2.1 mm 이다. 본 예측모델이 실험결과와 비교해서, 축방향 응력

및 축방향 변형률 관계는 예측 결과가 실험과 잘 일치하고 있음을 보여준다. 축방향 응력 및 횡방향 변형률과의 관계는 초기 하중단계에서는 잘 일치하며, 파괴점 부근에 가까울수록 실험과 예측 결과에 다소 차이를 보였다.

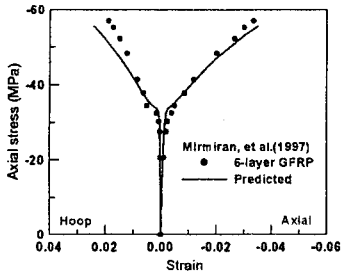

그림 4. 축방향 응력-변형률관계(6층 GFRP)

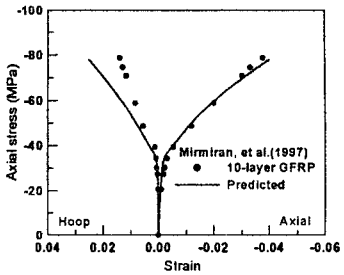

그림 5. 축방향 응력-변형률관계(10층 GFRP)

4. FRP-구속 콘크리트 부재의 휨 거동 예측 모델

앞장에서 소개된 FRP 구속 콘크리트의 압축거동 예측모델에 인장측 콘크리트가 인장강도 이후 인장응력을 부담하지 못하는 것으로 고려하여, 휨을 받는 CFRP 콘크리트 휨 부재의 층상화 비선형 해석알고리즘을 그림 6과 같이 제시하였다. 제안된 FRP 구속 콘크리트 부재에 관한 휨 해석 모델을 여러 실험결과와 비교하도록 하였다.

그림 7과 같이, 대상 실험은 미국의 UC, San Diego 대학에서 수행된 결과를 고려하였다(Burgueno, 1999). 실험대상 모델의 시험체는 지름 152 mm, 지간 1.83 m, 전단스팬길이 711 mm 로서, FRP 층은 부재 축방향인 종방향에 대해 ±10。의 섬유방향 층에 85%, 횡방향(90。 방향)의 섬유배치 층에 대해서 15%의 FRP 층으로 둘러 쌓인 것으로서, FRP 층의 총두께가 4.57 mm 이다. 실험모델에 대한 해석 및 실험결과 축방향 변형률과 모멘트관계 및 횡방향 변형률과 모멘트 관계를 그림 8 및 9에 나타내었다. 압축상연과 인장하연에서의 축방향 변형률 및 횡방향 변형률관계에 대한 예측치가 초기 하중단계에서부터 극한내력 단계까지 전 하중단계에 걸쳐서 실험치와 대체적으로 잘 일치하였다.

5. 결 론

본 연구에서는, FRP 층의 2차원 및 콘크리트의 3차원 구성관계를 이용하여 FRP 콘크리트 복합 구조 부재 시스템의 휨 거동 예측을 위한 1차원 비선형 휨 해석 알고리즘을 제시하였다. 기존의 연구와 비교하여 본 모델의 개선점 및 특징은, 콘크리트의 경우는 3차원의 다축응력 구성관계에 기초한 아탄성 재료로 고려하여 다축응력상태 하에서 콘크리트의 구속현상을 정식화하였으며, FRP 층의 경우는 2축응력상태에 기초한 FRP 복합재료의 2차원 구성관계를 고려하도록 한 것이다. 단면에서의 FRP 재료와 콘크리트 사이의 이론적 적합 및 평형조건을 고려하였다. 따라서 제안된 FRP 콘크리트의 구속모델은 하중 및 변형에 의존적인 비선형적 구속효과를 보다 합리적으로 고려하였다.

FRP로 구속된 콘크리트 실린더의 압축거동 예측 및 보 부재의 휨거동 예측 결과를 실험과 비교한 결과, 본 예측모델은 FRP 구속 콘크리트의 압축강도, 축방향 및 횡방향 변형률 관계와 FRP 구속 콘크리트 구조 부재의 휨 내력, 모멘트-곡률 관계, 부재 단면에서의 축방향 및 횡방향 변형률 관계를 초기 하중단계에서 극한 하중단계에 이르는 전 하중단계까지의 거동을 비교적 잘 예측해 주었다.

참 고 문 헌

1. Burgueno, R.(1999) *System Characterization and Design of Modular Fiber Reinforced Polymer (FRP) Short- and Medium-Span Bridges*, PhD Thesis, University of California, San Diego.
2. Cho, C.G. and Park, M.H.(2003) Finite Element Prediction of the Influence of Confinement on RC Beam-columns under Single or Double Curvature Bending, *Engineering Structures*, Vol. 25, pp. 1525-1536.

3. Cho, C.G. and Hotta, H.(2002) A Study on Compressive Strength of Concrete in Flexural Regions of Reinforced Concrete Beams Using Finite Element Analysis, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 13, No. 3, pp. 313-328.
4. Hsieh, S.S., Ting, E.C., and Chen, W.F.(1979) An elastic-fracture model for concrete, *ASCE Proc. 3d Eng. Mech. Div. Spec. Conf.*, pp. 437-440.
5. Mander, J.B., Priestley, M.J.N, and Park, R.(1988) Theoretical stress-strain model for confined concrete, *J. Structural Engineering, ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
6. Mirmiran, A., and Shahawy, M.(1997) Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites, *J. Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 5, pp. 583-590.
7. Saenz, L.P.(1964) Discussion of equation for the stress-strain curve of concrete by Desayi and Krishman, *Journal of ACI*, Vol. 61, No. 9, pp. 1229-1235.

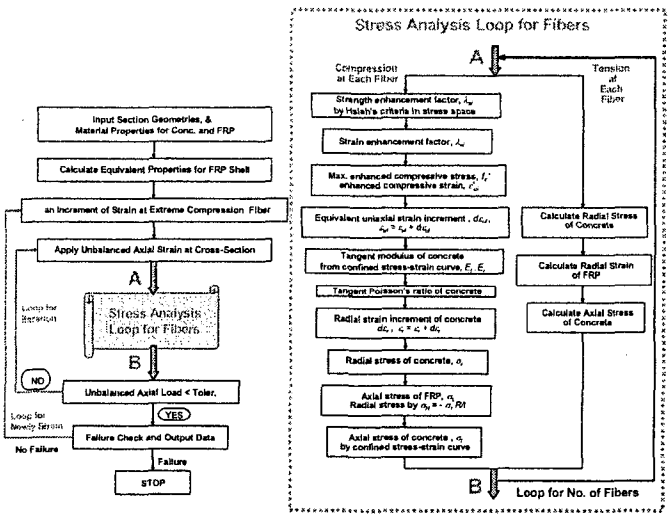

그림 6. 3차원 구성관계를 이용한 휨 예측 알고리즘

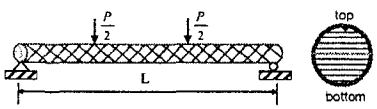

그림 7. 휨 거동 실험 모델

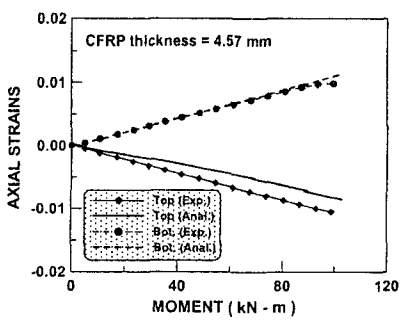

그림 8. 모멘트-축방향 변형률 관계

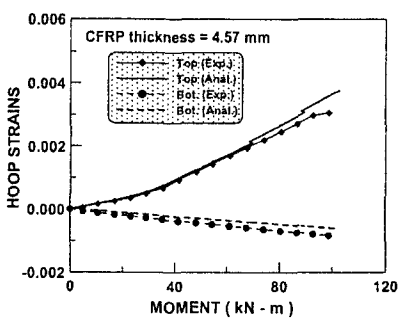

그림 9. 모멘트-횡방향 변형률 관계