

다축거동을 고려한 FRP 콘크리트 부재의 층상화 하중-기초 유한요소모델 개발

Development of Force-Based Fiber Frame Finite Element for FRP Concrete Members with Multi-axial Behaviors

조창근* 하기주** 박문호***
Cho, Chang-Geun Ha, Gee-Joo Park, Moon-Ho

ABSTRACT

In the current study, a force-based fiber frame finite element model of FRP concrete structural members has been developed. For compressive behaviors of confined concrete wrapped by FRP jackets, the multiaxial behavior of concrete has been considered with the equivalent tangent modulus of concrete. The behavior of FRP jackets has been modeled using the mechanics of orthotropic laminated composite materials in two-dimensional stress states. The force-based finite element formulation is based on the force-interpolation functions within the element without using the displacement shape functions to satisfy the equilibrium in element levels.

1. 서 론

재료공학 기술의 발전과 더불어, 기존 콘크리트 및 강재를 주로 사용하는 구조부재 시스템에서 첨단소재를 적용하는 첨단 구조부재 및 성능개선에 관한 새로운 시도가 1990년대 초반부터 큰 관심으로 대두되어 왔다. 본 연구에서는, 첨단소재 활용 구조 부재의 비선형 예측기술 개발에 주안을 두어, FRP 층 및 콘크리트 재료의 다축거동을 고려한 FRP 콘크리트 복합 보-기둥 구조 부재의 비선형 거동을 예측하기 위한 층상화 하중-기초 보-기둥 유한요소 모델을 제시하였다. 제안된 FRP 콘크리트 부재 비선형 유한요소모델은 콘크리트와 복합재료간의 구속 효과를 합리적으로 고려하였으며, 층상화 하중-기초 유한요소모델에 의해 정식화 하므로써, 기존의 변위법에 의한 유한요소모델에 비해 부재 단면, 요소, 및 전체 구조시스템에 대한 비선형 거동을 보다 정확하게 예측할 수 있어, 성능개선 구조물의 거동예측 및 성능-기반설계를 위한 정확한 해석기법이 될 것이다.

2. FRP 적층 판의 2축 구성관계

적층 FRP 복합재료의 거동을 반영하기 위하여 적층의 면내 거동만을 나타내는 등가의 직교 이방성 판에서, 대칭의 적층판인 경우, 적층 직교이방성 판의 변형률-면내력 관계는 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/tE_x & -\nu_{xy}/tE_x & 0 \\ -\nu_{xy}/tE_x & 1/tE_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/tG_{xy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서, FRP 적층 판의 등가직교재료계수는 각각 다음과 같이 유도 된다.

* 정희원, 경북대학교 방재연구소 연구교수/강사
** 정희원, 경일대학교 건축공학과 교수
*** 정희원, 경북대학교 토목공학과 교수

$$E_x = (A_{11}A_{22} - A_{12}^2)/tA_{22}, \nu_{xy} = A_{12}/A_{22}, A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\overline{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (2)$$

$$E_y = (A_{11}A_{22} - A_{12}^2)/tA_{11}, \nu_{yx} = A_{12}/A_{11}, G_{xy} = A_{66}/t$$

FRP 층의 파괴기준을 결정하기 위하여, 적층판 중의 하나가 섬유방향에 대해 최대 인장 및 압축강도를 초과할 경우 FRP 복합재료 판이 파괴되는 것으로 가정하며, 또한 최대전단강도를 초과하는 경우에 전단파괴로 가정하였다.

3. 다축거동하의 FRP-구속 콘크리트의 압축 예측모델

FRP 구속으로 인한 다축거동하 콘크리트는 강도와 연성거동에서 횡방향 구속력에 따라 크게 다르다(Cho 등, 2005). 3축응력의 일반화된 후크법칙으로부터, 콘크리트의 증분 변형률 및 증분 응력 관계는 다음 식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} d\epsilon_l \\ d\epsilon_r \\ d\epsilon_h \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_c - \nu_c/E_c - \nu_d/E_c & & \\ & 1/E_c - \nu_d/E_c & \\ sym. & & 1/E_c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\sigma_l \\ d\sigma_r \\ d\sigma_h \end{Bmatrix} \quad (3)$$

그림 1에서, 반지름방향과 횡방향 응력이 같다고 가정하고, FRP와 콘크리트면이 완전부착이라면, FRP 콘크리트 단면에서의 평형 및 적합조건으로부터, 콘크리트의 횡방향 응력 및 변형률, FRP의 종방향 응력을 각각 유도하여 산정할 수 있다.

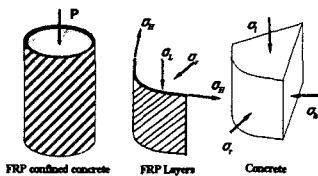


그림 1. FRP 콘크리트의 응력

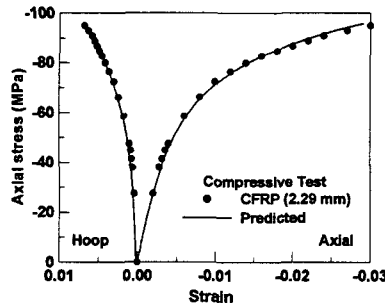


그림 2. 압축거동실험(2.29mm)

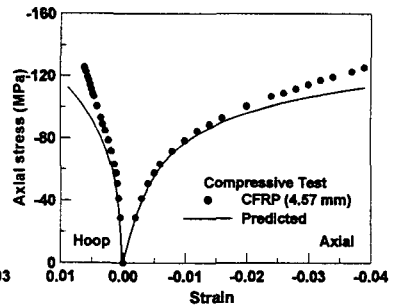


그림 3. 압축거동실험(4.67mm)

FRP 층의 구속효과에 따른 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 위하여, 구속된 콘크리트의 접선탄성계수를 현 상태의 팽창비 또는 코어 콘크리트의 손상상태로 정의하도록 하여, 구속된 콘크리트의 접선탄성계수는 다음 식으로 정의하였다(조창근 외, 2002).

$$E_c = E_o \frac{1 + \alpha R_c}{1 + \beta R_c + \gamma R_c^2} \quad (4)$$

여기서, E_o 는 초기탄성계수, $R_c = \epsilon_r/\epsilon_o$, ϵ_o 는 최대압축변형률이며, 매개변수 α , β , γ 는 실험상수이며, 포아송비의 비선형 관계를 고려하였다. 지름 152.5 mm, 콘크리트 1축압축강도 45.5 MPa 에 CFRP 두께가 2.29mm 및 4.67mm 로 둘러 쌓인 FRP 콘크리트 실린더의 압축실험 결과(Burgueno, 1999), 제안된 해석모델 및 실험 결과를 각각 그림 2 및 3에 나타내었다. 축방향 응력, 축방향 및 횡방향 변형률 관계의 예측 결과가 실험과 잘 일치하고 있음을 보여준다.

4. FRP 콘크리트 부재의 응상화 하중-기초 유한요소 모델

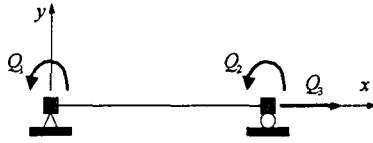


그림 4. 강제운동이 제거된 보-기둥 요소

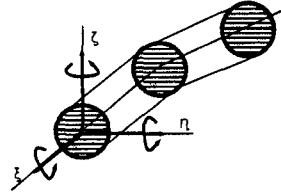


그림 5. FRP 콘크리트 부재 층상화 등매개 유한요소모델

하중-기초법에 의한 보-기둥 요소의 정식화는 평형조건, 구성관계, 적합조건의 순서에 의해 이루어진다. 보의 임의 단면에서의 단면력 벡터분은 보 요소의 절점에 발생하는 절점력증분과의 평형조건으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta D(x) = B_0(x) \Delta Q \quad (5)$$

위 식에서 $B_0(x)$ 는 단면력-절점력 관계행렬로서, 보 요소내의 임의 단면에 대한 단면력과 요소 절점력과의 평형관계를 나타낸다. 요소 내 단면형상 또는 재료특성값의 변화, 비선형 문제를 고려할 경우, 변위-기초법에 의한 정식화의 $B(x)$ 는 변위 형상함수의 가정된 값을 정식화에 고려하고 있으므로 단면변형-절점변위 관계 및 단면력-절점력 관계에서 정확 해를 제공해주지 못하는 단점이 있다. 반면에 하중-기초법에 의한 정식화에서 $B_0(x)$ 는 변위 형상함수의 가정된 값을 사용하지 않고 요소 내 단면과 절점에서의 평형조건식을 고려하고 있으므로 단면변형-절점변위 관계 및 단면력-절점력 관계에서 정확 해를 제공해준다. 그림 4와 같이, 강제운동이 제거된 경우 요소절선 연성도행렬 및 요소절선 강성행렬은 각각 다음 식과 같이 유도된다.

$$F_i = \int_0^L B_0^T(x) f_i(x) B_0(x) dx, \quad K_i = F_i^{-1} \quad (6),(7)$$

강성도법과 달리, 요소 내 평형 조건을 만족하면서 요소 절선 강성행렬을 산정하는 하중-기초법의 요소상태결정 과정에서는 요소내 반복수렴 절차가 요구되며, 위 식은 그림 5와 같이, 단면의 층상화 및 등매개 요소를 사용하여 수치적분을 통하여 단면 및 요소 내 임의 위치에서의 단면력 및 단면변형 값을 산정할 수 있다. 이상과 같이 FRP 콘크리트 보-기둥 부재의 층상화 등매개 하중-기초 유한요소 정식화에 의한 요소 절선강성행렬을 산정토록 하여, 증분-반복법의 비선형 유한요소 해석 모델을 제시하였다.

5. FRP 콘크리트 보의 4점 실험 유한요소 해석

그림 6과 같이, 대상 실험은 미국의 UC, San Diego 대학에서 수행한 것으로서(Burgueno, 1999). 실험대상 모델의 시편체는 지름 345 mm, 지간 7.92 m, 전단스팬길이 2.74 m 로서, FRP 층은 부재 축방향인 종방향에 대해 $\pm 10^\circ$ 의 섬유방향 층에 85%, 횡방향(90° 방향)의 섬유배치 층에 대해서 15%의 FRP 층으로 둘러 쌓인 것으로서, FRP 층의 총두께가 9.7 mm 이다. 실험모델에 대한 해석 및 실험결과, 지간 중앙에서의 하중-변위관계, 축방향 변형률과 모멘트관계 및 횡방향 변형률과 모멘트 관계를 각각 그림 7, 8 및 9에 나타내었다. 전체적인 하중 및 변위 관계, 압축상면과 인장하면에서의 축방향 변형률 및 횡방향 변형률관계에 대한 예측치가 초기 하중단계에서부터 극한내력 단계까지 전 하중단계에 걸쳐서 실험치와 대체적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

6. 결 론

본 연구에서는, FRP 층의 2차원 및 콘크리트의 다축 거동하 구성관계를 이용하여 FRP 콘크리트 복합 구조 부재 시스템의 층상화 등매개 하중-기초 유한요소 해석 모델을 제시하였다. 기존의 FRP 콘크리트 부재 유한요소모델과 비교하여 본 모델의 개선점 및 특징은, 콘크리트의 경우는 다축거동 구성관계에 기초하였으며, FRP 층의 경

우는 2축응력상태에 기초한 FRP 복합재료의 2차원 구성관계를 고려하도록 한 것이다. 단면에서의 FRP 재료와 콘크리트 사이의 이론적 적합 및 평형조건을 고려하였다. 강성도법에서 보다 개선된 하중-기초법에 의한 보-기둥 부재 유한요소 모델을 적용함으로써 단면, 요소 및 구조 단계에서의 평형조건이 만족하는 유한요소 정식화 및 알고리즘 개선이 제시되었다. FRP로 구속된 콘크리트 보의 휨거동 예측 결과를 실험과 비교한 결과, FRP 콘크리트 보의 휨 내력, 모멘트-곡률 관계, 부재 단면에서의 축방향 및 횡방향 변형을 관계를 초기 하중단계에서 극한 하중단계에 이르는 전 하중단계까지의 거동을 비교적 잘 예측해 주었다.

참 고 문 헌

1. 조창근 외(2002) 다축응력상태의 구성관계를 기초한 FRP 콘크리트 부재의 충분할 단면해석모델, 콘크리트학회 논문집, Vol. 14, No. 6, pp. 892-899.
2. 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.
3. Cho, C.G. et al. (2005) Analytical Model of Concrete-Filled Fiber-Reinforced Polymer Tubes Based on Multiaxial Constitutive Laws, *J. Structural Engineering, ASCE*, Vol. 131, No. 9, pp. 1426-1433.
4. 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.

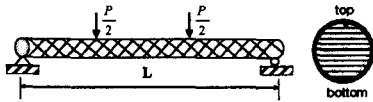


그림 6. 3차원 구성관계를 이용한 휨 예측 알고리즘

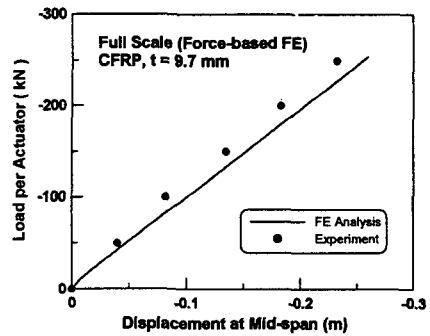


그림 7. 하중-변위 관계

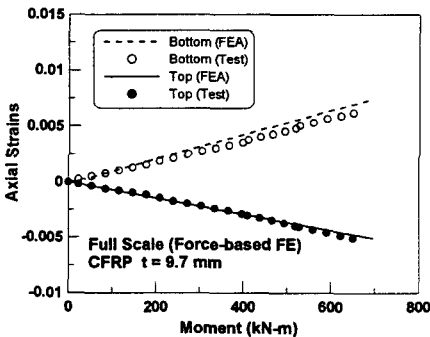


그림 8. 모멘트-축방향 변형률 관계

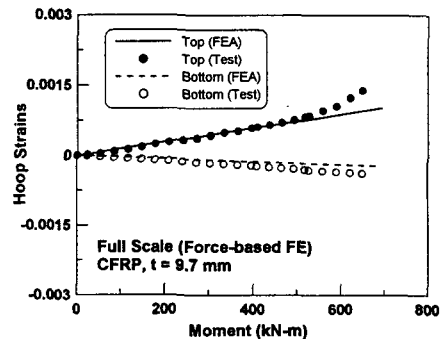


그림 9. 모멘트-횡방향 변형률 관계