

다축응력상태의 구성관계에 기초한 FRP 콘크리트 부재의 충분할 단면해석모델

조창근^{1)*} · 김영상²⁾ · 배수호²⁾ · 김환석²⁾

¹⁾경북대학교 방재연구소 ²⁾안동대학교 토목환경공학과
(2002년 4월 9일 원고접수, 2002년 10월 21일 심사완료)

Model for Fiber Cross-Sectional Analysis of FRP Concrete Members Based on the Constitutive Law in Multi-Axial Stress States

Chang-Geun Cho^{1)*}, Young-Sang Kim²⁾, Soo-Ho Bae²⁾, and Whan-Suk Kim²⁾

¹⁾ Research Institute for Disaster Prevention, KyungPook National University, Daegu, 702-701, Korea

²⁾ Dept. of Civil & Environmental Engineering, Andong National University, Andong, 760-749, Korea

(Received April 9, 2002, Accepted October 21, 2002)

ABSTRACT

Among the methods for enhancement of load-carrying capacity on flexural concrete member, recently, a concept is being investigated which replaces the steel in a conventional reinforced concrete member with a fiber reinforced polymer(FRP) shell.

This study focuses on modeling of the structural behavior of concrete surrounded with FRP shells in flexural bending members. A numerical model of fiber cross-sectional analysis is proposed to predict the stress and deformation state of the FRP shell and concrete. The stress-strain relationship of concrete confined by a FRP shell is formulated to be based on the constitutive law of concrete in multi-axial compressive stress state, in assuming that the compression response is dependent on the radial expansion of the concrete. To describe the FRP shell behavior, equivalent orthotropic properties of in-plane behavior from classical lamination theory are used.

The present model is validated to compare with the experiments of 4-point bending tests of FRP shell concrete beam, and has well predicted the moment-curvature relationships of the members, axial and hoop strains in the section, and the enhancement of confinement effect in concrete surrounded by FRP shell.

Keywords : FRP concrete, fiber cross-sectional analysis, confined concrete, classical lamination theory

1. 서 론

첨단 복합재료 개발과 더불어, 건설 재료에 대표적으로 사용되는 콘크리트의 취성적 성질을 개선하고, 높은 구속력에 따른 콘크리트 강도 및 부재 내력의 증진 효과를 기대하기 위한 연구로서, 콘크리트에 유리 또는 탄소 섬유를 보강하여 부재의 인장강도, 휨강도, 및 변형능력을 대폭 개선하려는 연구가 최근에 활발히 이루어지고 있다. 더불어, 철근콘크리트 구조에 비해 탄소 및 유리 섬유보강폴리머(fiber reinforced polymer, FRP) 복합재료를 사용한 콘크리트 부재의 이론적 자중 감소 효과는 동일한 활하중에 저항할 수 있는 경우 몇 배에 달한다.

한편, 삼축압축상태에서의 콘크리트의 강도와 연성 거동 특성은 일축압축상태에 비해 크게 향상되는 것을 보여주고 있다^{1~2)}. 만약 횡방향의 복합재료 섬유시트 보강재가 이

러한 팽창을 구속하도록 놓여진다면, 부재 내 콘크리트 거동은 일축압축상태가 아니라 다축압축상태의 거동을 나타내며, 구속된 콘크리트 강도로서 설계에 고려되어야 할 것이다.

FRP 복합재료 판에서 섬유배열방향과 배열 층의 구성은 설계 방향에 따라서 요구되는 강도와 강성을 충분히 발휘하도록 하기 위해서 설계된다. 기존에 주로 사용되던 철근 대신에 FRP 복합재료 판으로 둘러 쌓인 FRP 콘크리트 부재의 경우, 인장 및 압축 휨 강도 및 연성증진과 더불어 인접 요소의 결합을 돕는 동시에 내부에 채워진 콘크리트가 압축력에 대해서 부재가 좌굴되는 것을 방지하게 함으로서, 기존의 철근콘크리트 부재에 비하여 큰 강도와 연성거동특성을 기대할 수 있다.

콘크리트 구조물에 대한 FRP 복합판을 이용한 보강법이 발전되면서 FRP 로 보강된 콘크리트 부재에 관한 해석모델이 연구되어 왔다. Saadatmanesh 등³⁾은 FRP 콘크리트 부재의 해석모델을 위한 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 제시하였으나 띠철근 영향에 의해 구속된 콘

* Corresponding author

Tel : 053-950-6445 Fax : 053-950-6428

E-mail : chocg70@hanmail.net

크리트의 응력-변형률 관계식을 수정하여 제시하였다. Hosotani 등⁴⁾은 FRP 콘크리트 시험체 단면형상의 변수에 따른 실험으로부터 FRP 층으로 구속된 콘크리트의 극한 압축 변형률을 찾아내고, 이로부터 FRP 층으로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 모델링 하였다. Hosotani 등의 연구를 보완하여, 이상호 등⁵⁾은 FRP 층으로 구속된 콘크리트의 최대압축강도를 5-매개변수의 콘크리트 파괴 기준을 이용하여 산정 하도록 하였다.

본 연구에서는, FRP 복합재료로 둘러 쌓인 콘크리트 단면 부재의 합리적인 단면 해석 알고리즘을 제시하는데 있다. FRP 복합재료로 인하여 콘크리트는 다축응력상태의 거동특성을 나타내어 구속 효과가 증진되게 되고, FRP 복합재료 판은 이축응력상태의 거동특성을 나타내게 된다. 따라서 기존의 연구와 비교하여 본 모델의 개선점 및 특징은, 다축응력상태에 기초한 콘크리트 재료와 이축응력상태에 기초한 FRP 복합재료의 구성관계를 직접 부재단면 해석 알고리즘에 적용하고, FRP 재료와 콘크리트 사이의 이론적 적합 및 평형조건을 직접 적용함으로써, 보다 합리적인 FRP 콘크리트 부재단면해석 알고리즘을 제시하였다. 본 해석모델을 실험결과와 비교하여 해석모델을 검증하였으며, FRP 복합재료의 배열 층 및 방향에 따른 거동특성을 비교하였으며, 이로서 보다 합리적인 FRP 복합재료의 설계가 가능토록 하는데 있다.

2. FRP 적층판의 구성관계

2.1 FRP 복합재료 판의 구성요소

본 연구에서 적용하고자 하는 복합재료는 연약한 지지체(matrix) 재료에 삽입된 상대적으로 큰 강성과 강도를 발휘하는 섬유(fiber) 보강재료로 구성된 FRP 복합재료이다. 독립적인 판이나 여러 판들을 조합하여 구성된 적층판 형태의 FRP 복합재료를 구조물에 적용한 경우에 대하여 고려하였다. 한 층으로 구성된 적층판은 균질한 지지체에 단일 방향으로 배열된 섬유로 구성되며, 여러 층으로 구성된 복합재료의 판은 요구되는 특성을 얻기 위해 각 층에 따라서 섬유의 방향을 다양하게 배열할 수 있다.

2.2 고전적 적층판이론

고전적 적층판이론은 적층재료의 판 거동을 예측하기 위한 해석법으로서, 인접한 판 사이에 완전한 결합을 가정하여 두 층 간의 미끄러짐이 없는 완전부착으로서 적층의 두께방향에 대하여 연속적인 변위를 갖는 것으로 가정한다. 이때 얇은 판 이론은 전단변형을 무시할 수 있으며, 판의 중립면은 변형 전과 후에도 직선이 유지되며, 두께 방향의 변형률은 무시해도 좋다고 가정한다.

복합재료 판이 x, y평면에 놓여있다고 가정할 경우, 단면의 중립면 상에 있는 한 점이 x, y, z 방향으로 초기 변위 u_0, v_0, w_0 로부터, 일반적인 변형률은 중립면의 축방향 변형률과 곡률 κ 의 영향으로 인한 변형률의 합으로서 다음 식과 같다.

$$\begin{pmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{pmatrix} - z \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{pmatrix} \quad (1)$$

기지체에 삽입된 일 방향의 섬유로 구성된 각 층의 개별 판은 섬유 방향에 수직인 등방성의 재료이다. Fig. 1과 같이, 만약 섬유 방향이 국부좌표(1, 2, 3) 상에서 1방향에 평행이고 2, 3방향에 수직이라고 가정하며, FRP 복합재료를 평면응력 문제로 고려하면, 국부좌표에서의 개별 판에 대한 면내 응력-변형률 관계는 다음과 같다.

$$\{\sigma\} = [Q] \{\epsilon\} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 응력벡터는 $\{\sigma\} = \{\sigma_1 \sigma_2 \tau_{12}\}^T$ 이고, 변형률벡터는 $\{\epsilon\} = \{\epsilon_1 \epsilon_2 \gamma_{12}\}^T$ 이고, 면내 거동에 대한 3x3 강성 행렬 $[Q]$ 의 영이 아닌 부분은 다음 식과 같다.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= E_1 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}), & Q_{22} &= E_2 / (1 - \nu_{12} \nu_{21}), \\ Q_{12} &= E_2 \nu_{12} / (1 - \nu_{12} \nu_{21}), & Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 각 상수는 복합재료의 재료값으로서, E_1 는 섬유배열방향 탄성계수, E_2 는 섬유배열방향에 수직인 방향의 탄성계수, ν_{ij} 는 포아송비, 그리고 G_{12} 는 면내전단계수이다.

재료의 국부좌표(1, 2, 3)로 정의된 응력-변형률 관계는 구조물에 대한 전체좌표계(x, y, z)로 나타낼 경우 다음 식과 같이 유도된다.

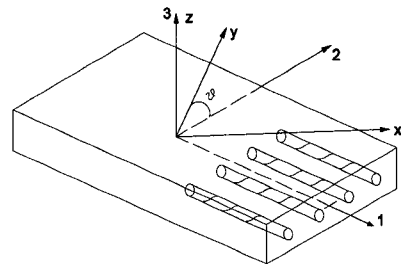


Fig. 1 Local and global coordinates

$$\{\sigma\} = [\bar{Q}]\{\varepsilon\} \quad (4)$$

여기서, 응력벡터는 $\{\sigma\} = \{\sigma_x \sigma_y \tau_{xy}\}^T$ 이고, 변형률벡터는 $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x \varepsilon_y \gamma_{xy}\}^T$ 이고, 강성행렬 $[\bar{Q}]$ 는 다음 식과 같다.

$$[\bar{Q}] = [T]^{-1} [Q] [T]^{-T} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{21} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{61} & \bar{Q}_{62} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

판의 응력-변형률 관계는 두께방향의 적층되는 판으로부터 힘과 모멘트를 나타낼 수 있다. FRP 복합재료 판의 경우는, 단면에서 FRP 판이 차지하는 두께는 비교적 작으므로, 면내 특성만을 고려할 경우, FRP 적층판의 휨 거동은 무시할 수 있으므로 곡률과 모멘트를 제외하면, 각 층 두께 h_k 의 n 층으로 적층된 면내 거동을 갖는 등가 직교이방성 재료의 전체좌표에 대한 면내력-변형률 관계를 나타내는 $[A]$ 행렬(3×3)의 계수 값은 다음 식과 같다.

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (\bar{Q}_{ij})_k (h_k - h_{k-1}) \quad (7)$$

2.3 FRP 적층판의 등가직교재료계수

적층의 면내 거동만을 나타내는 등가의 직교 이방성 판에서, 대칭의 적층판인 경우 $A_{16} = A_{26} = 0$ 가 되어 전단 커플링을 일으키지 않게 된다. 이를 고려하여 적층의 직교이방성 판의 변형률-면내력 관계는 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/tE_x & -\nu_{xy}/tE_x & 0 \\ -\nu_{xy}/tE_x & 1/tE_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/tG_{xy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서, 적층판의 등가직교재료계수는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_x &= (A_{11}A_{22} - A_{12}^2)/tA_{22}, & \nu_{xy} &= A_{12}/A_{22} \\ E_y &= (A_{11}A_{22} - A_{12}^2)/tA_{11}, & \nu_{yx} &= A_{12}/A_{11} \\ G_{xy} &= A_{66}/t \end{aligned} \quad (9)$$

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. 원형단면 FRP 콘크리트 부재의 충분할 해석모델

FRP 콘크리트 부재는 원형단면으로서 콘크리트가 내부에 충전되어 그 둘레에 여러 층의 FRP 복합재료로 둘러싸여 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.

3.1 압축거동

FRP 복합재료 판이 부재 길이 방향의 종방향응력 σ_L 과 횡방향 σ_H 인 2축응력상태에 있을 경우, FRP 판의 종방향 및 횡방향 변형률은 각각 다음 식과 같다.

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_L} - \nu_{HL} \frac{\sigma_H}{E_H}, \quad \varepsilon_H = \frac{\sigma_H}{E_H} - \nu_{LH} \frac{\sigma_L}{E_L} \quad (10)$$

여기서, E_L, E_H 는 종방향 및 횡방향 탄성계수, ν_{LH} 는 포아송비를 나타낸다.

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

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_l \\ \varepsilon_r \\ \varepsilon_h \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_c & -\nu_c/E_c & -\nu_c/E_c \\ & 1/E_c & -\nu_c/E_c \\ sym. & & 1/E_c \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_l \\ \sigma_r \\ \sigma_h \end{pmatrix} \quad (11)$$

반지름방향과 횡방향 응력이 같다고 가정하면, 콘크리트의 종방향 및 횡방향의 변형률은 각각 다음 식과 같다.

$$\varepsilon_l = \frac{1}{E_c}(\sigma_l - 2\nu_c\sigma_r), \quad \varepsilon_r = \frac{1}{E_c}[(1 - \nu_c)\sigma_r - \nu_c\sigma_l] \quad (12)$$

FRP와 콘크리트가 완전부착이라면, $\varepsilon_L = \varepsilon_h$, $\varepsilon_H = \varepsilon_r$, 및 $\sigma_H = -\sigma_r R/t$ 관계가 성립하며, 이로부터 콘크리트의 횡방향 응력 및 변형률, FRP의 종방향 응력은 각각 다음 식과 같이 유도된다.

$$\sigma_r = -\frac{(\nu_{LH}\varepsilon_l + \varepsilon_r)E_H t}{(1 - \nu_{HL}\nu_{LH})R} \quad (13)$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_l \left[\frac{\nu_c E_c R(1 - \nu_{HL}\nu_{LH}) + \nu_{LH} E_H t(1 - \nu_c - 2\nu_c^2)}{-E_H t(1 - \nu_c - 2\nu_c^2) - E_c R(1 - \nu_{HL}\nu_{LH})} \right] \quad (14)$$

$$\sigma_L = E_L(\epsilon_L - \sigma_r \frac{\nu_{HL}}{E_H} \frac{R}{t}) \quad (15)$$

여기서, R 은 단면반경, E_c, ν_c 는 각각 콘크리트의 접선탄성계수 및 접선포아송비를 나타낸다.

FRP 층의 구속효과에 따른 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 합리적으로 고려해 주기 위하여, 구속된 콘크리트의 접선탄성계수를 현 상태의 팽창비 또는 코어 콘크리트의 손상상태로 정의하도록 하였다. 구속된 콘크리트의 실린더 실험으로부터⁶⁾, 축방향 변형률에 따른 팽창비의 관계식을 정의하여, 구속된 콘크리트의 접선탄성계수는 다음 식으로 정의하였다.

$$E_c = E_o \frac{1 + \alpha R \epsilon_r}{1 + \beta R \epsilon_r + \gamma R \epsilon_r^2} \quad (16)$$

여기서, E_o 초기탄성계수, $R \epsilon_r = \epsilon_r / \epsilon_o$, ϵ_o 는 최대압축 변형률이며, 매개변수 α, β, γ 는 Fig. 2와 같이, 구속된 콘크리트의 실린더 실험으로부터 얻어진 평균접선탄성계수로부터⁷⁾, 각각 다음과 같은 값을 사용하였으며, Fig. 2에 실험과 비교하여 나타내었다.

$$\alpha = -0.0664, \beta = 3.868, \gamma = 3.138 \quad (17)$$

동일한 실험결과에서⁷⁾, Fig. 3과 같이, 횡방향 변형률이 대략 0.002 이상에 도달할 때 콘크리트의 포아송비가 최대에 도달한다. 횡방향변형률이 0.0023을 넘으면 콘크리트의 최대포아송비가 0.45로 가정하여 횡방향 변형률로부터 접선 포아송비를 다음의 다항식으로 가정하였으며, 그 결과는 실험과 비교하여 Fig. 3에 나타내었다.

$$\nu_c = \nu_o + 198.0 \epsilon_r - 3.9 \times 10^4 \epsilon_r^2 + 7 \times 10^4 \epsilon_r^3 \quad (18)$$

3.2 인장거동

인장이 작용하는 경우, 콘크리트 및 FRP 판의 재료관계는 모두 선형으로 가정한다. 콘크리트 코어에 종방향 응력은 콘크리트 인장균열강도 이후 인장응력을 부담하지 못하는 것으로 가정하며, FRP 판은 포아송비로 인하여 횡 방향으로 수축하게 된다. 이때 횡방향 수축은 콘크리트 코어에 의해 저항하게 된다. 인장거동시 콘크리트의 횡방향 응력은 따라서 다음의 식과 같이 표현된다.

$$\sigma_r = E_o \epsilon_H \quad (19)$$

식(10)과 $\sigma_H = -\sigma_r R/t$ 관계로부터, 인장거동시의 FRP 판의 횡방향 변형률은 다음 식으로 유도된다.

$$\epsilon_H = \epsilon_L \left[\frac{t E_H \nu_{LH}}{\nu_{LH} \nu_{HL} E_o R - t E_H - E_o R \nu_{LH}} \right] \quad (20)$$

3.3 FRP 콘크리트 부재의 휨 해석

한편, 본 연구에서는 FRP 콘크리트 단면의 순수 휨 상태에서의 거동에 주안을 두어, 단면의 전단거동특성을 단순화하였다. ACI 1989 의 간편식으로 부터, 콘크리트가 부담하는 나머지 전단력을 FRP 층이 부담하도록 하여 부재가 전단에 저항하도록 하였다. 앞장에서 소개된 FRP 적층판의 구성관계와 본 장에서 소개된 원형단면 FRP 콘크리트 부재의 압축, 인장, 및 전단거동에 기초하여, 휨을 받는 FRP 콘크리트 부재의 해석알고리즘을 제시하였다.

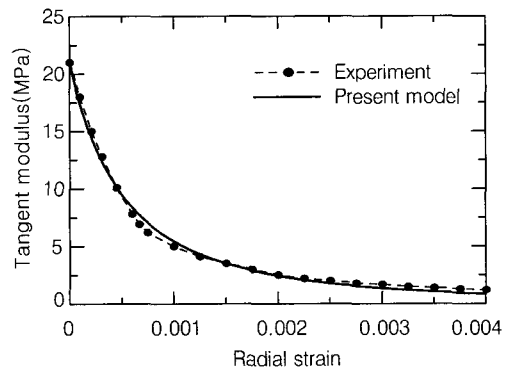


Fig. 2 Tangent modulus with radial strain in concrete

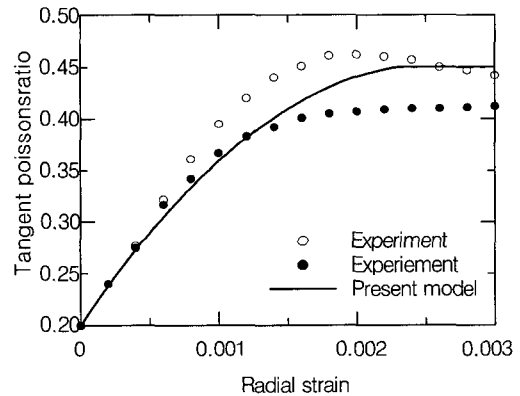


Fig. 3 Tangent Poisson's ratio with radial strain

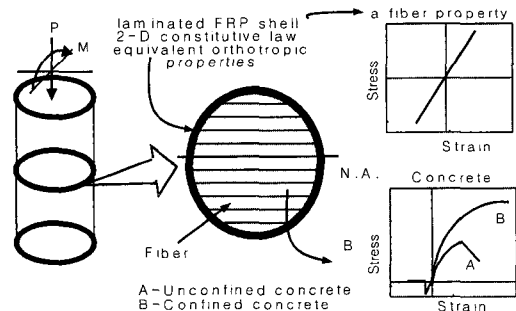


Fig. 4 Fiber approach for FRP concrete section

Fig. 4와 같이, 부재의 모멘트-곡률 관계를 산정하기 위하여, 500층으로 분할한 층상화 모델을 적용하여⁸⁾, 부재단면에서의 불평형력에 대한 수렴치를 만족할 때까지 반복 해석과정을 수행하도록 하여 수렴하도록 하였다. FRP 층의 각 판이 최대 인장 및 압축 강도와 전단강도에 대하여 파괴에 도달했는지를 매 하중단계마다 검토하여, 해석은 FRP의 임의 섬유층의 파단 또는 전단파괴가 일어날 때까지 계속되며, 그 이후 부재는 내력을 잃은 것으로 간주하였다. 이상에 대한 수치해석 알고리즘을 Fig. 5에 도시하였다.

본 모델은 기존의 모델과 비교하여, 첫째, 2축응력에 기초한 FRP 적층판의 구성관계를 부재내 단면해석에 고려하여 FRP 적층판의 배열방향, 층수, 재료배열방식에 관계없이 해석이 가능하며, FRP 판의 횡방향 거동의 예측도 보다 합리적으로 고려하고 있다. 둘째, 다축응력상태에 기초하여 콘크리트의 구성관계를 고려하고 있어 단면치수 및 FRP층의 두께에 관계없이 FRP내 콘크리트의 구속현상으로 인한 내력 및 휨 변형능력을 보다 타당하게 고려하였다.

4. FRP 콘크리트 휨 부재의 해석 예

4.1 실험모델

본 연구에서 소개된 FRP 콘크리트 단면의 해석모델을 비교하기 위하여, 휨 부재 실험결과와 비교하도록 하였다⁷⁾.

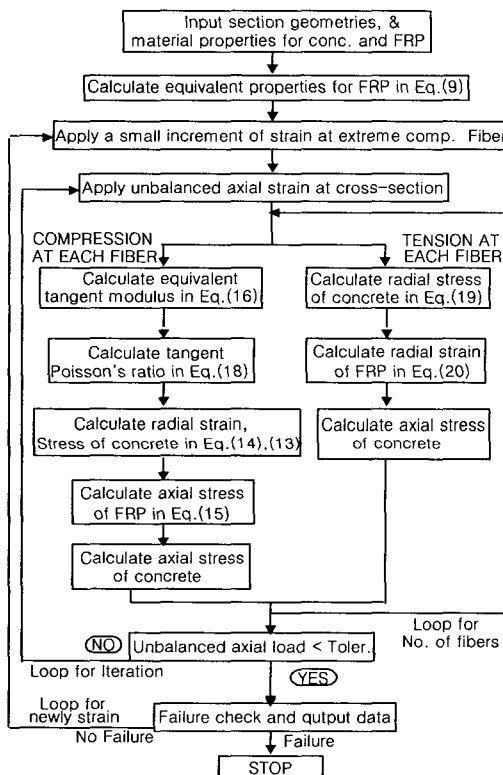


Fig. 5 Algorithm for fiber sectional analysis

본 실험은 미국의 UC, San Diego 대학에서 행해진 것으로서, Fig. 6과 같이, 탄소섬유시트(CFRP)로 둘러 쌓인 원형단면 콘크리트 부재를 대상으로, 부재 중앙의 순수 휨 단면에 대해서 비교·검토하였다.

대상 시험체 1, 2(spec. 1 & 2)는 지름 6 inch, 지간 6 ft, 전단스팬길이 28 inch 로서, FRP 층은 2층 배치로서 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, 시험체 1은 FRP의 총두께가 0.09 inch, 시험체 2는 총두께가 0.18 inch 이다. 시험체 3(spec. 3)은 지름 14 inch, 지간 26 ft, 전단스팬길이 9 ft 로서, FRP 층의 배치형태는 시험체 1, 2와 동일하며 총두께가 0.38 inch 이다.

세 시험체에 사용된 CFRP 각 층의 재료특성값은 다음과 같다. 탄성계수 E_1 및 E_2 는 각각 17.5 msi 및 1.0 msi, 전단탄성계수 G_{12} 및 G_{23} 는 각각 0.7 msi 및 0.38 msi, 포아송비 수 ν_{12} 는 각각 0.3이다. 복합재료의 섬유방향 인장 및 압축강도는 198.0 ksi, 섬유방향에 수직한 방향의 인장 및 압축강도는 3.6 ksi, 면내 전단강도는 8.0 ksi이다. 시험체 1 및 2의 콘크리트 재료특성값은, 일축압축강도가 6.6 ksi 및 이에 대응하는 압축변형률이 0.003, 초기탄성계수가 2.99 msi이다. 시험체 3의 콘크리트 재료특성값은, 일축압축강도가 3.0 ksi 및 이에 대응하는 압축변형률이 0.003, 초기탄성계수가 2.23 msi이다. 초기포아송비는 모두 0.2이다.

4.2 해석 및 고찰

앞 절에 소개된 3가지 부재의 휨 실험모델에 대한 500층으로 층분할한 단면해석을 수행하였다.

시험체 1에 대한 해석 결과, Fig. 7은 중앙지간 단면의

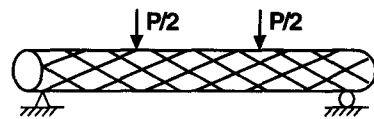


Fig. 6 Bending test of FRP shell concrete beam

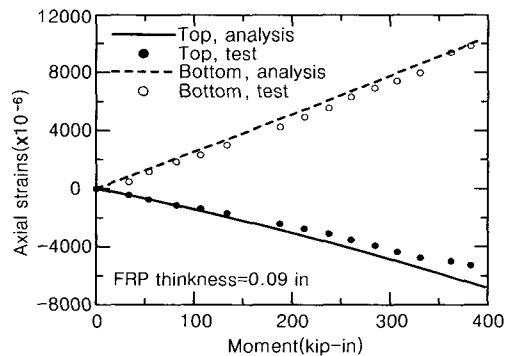


Fig. 7 Axial strain with moment in spec. 1

압축상연(top)과 인장하연(bottom)에서의 부재 축방향 변형률과 모멘트 관계를 실험결과와 비교하여 나타내고 있다. 해석결과는 실험결과와 비교해서, 인장 및 압축 측에 대한 축방향 변형률 및 모멘트 관계가 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다. Fig. 8은 시험체 1의 동일 위치에 대한 횡방향 변형률과 모멘트 관계를 나타내고 있다. 압축상연에서의 횡방향 변형률관계는 실험과 잘 일치하고 있으나, 인장하연에서의 횡방향 변형률은 실험치와 다소 일치하지 않는다. 이는 시험체 2와 3의 실험결과에서 확인할 수 있는 것처럼, 인장하연의 횡방향 변형률은 축방향이 인장인 경우 압축으로 나타남을 감안할 때 실험결과에 다소 오차가 있는 것으로 이해할 수 있다.

시험체 2에 대한 해석 및 실험결과 축방향 변형률과 모멘트관계 및 횡방향 변형률과 모멘트 관계를 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다. 압축상연과 인장하연에서의 축방향 변형률 및 횡방향 변형률관계에 대한 해석치가 실험치와 잘 일치하고 있으나, 부재의 극한내력에 근접하여서 축방향 및 횡방향 변형률값이 다소 실험치와 차이를 나타내었다.

시험체 1 및 2에 대한 해석치와 실험치의 비교에서 알 수 있듯이, 본 모델은 기존의 해석모델과 비교해, 횡방향 변형률에 대한 예측을 가능하도록 함으로서 FRP 내 콘크리트의 구속현상을 보다 합리적으로 고려하고 있다.

시험체 1과 2에 대한 모멘트-곡률관계 및 축방향 변형률과 횡방향 변형률 관계의 해석결과를 각각 Fig. 11 및

Fig. 12에 나타내었다. 모멘트-곡률관계의 비교에서, FRP 층의 두께를 증가함으로써 최대 부재내력 및 이에 대응하는 휨 곡률 증대로 인한 최대 변형능력의 증대 효과를 두 시험체의 해석에서 비교·평가할 수 있으며, 압축상연 및 인장하연에서의 축방향 및 횡방향 변형률의 증대에서도 그 효과를 비교·평가할 수 있다.

시험체 3에 대한 휨 실험 및 해석 결과, 중앙단면에서의 축방향 변형률과 모멘트 관계를 Fig. 13에 도시하였다. 인장하연 및 압축상연 측의 축방향 변형률과 모멘트 관계가 실험치와 대체로 일치하는 경향을 보이고 있으나, 극한내력에 가까울수록 다소 실험과의 차이가 있다. Fig. 14은 중앙단면에서의 횡방향 변형률과 모멘트 관계를 실험 및

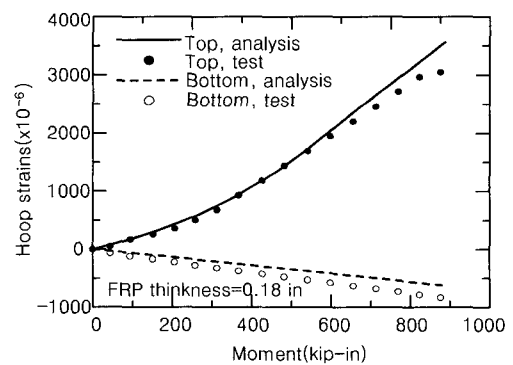


Fig. 10 Hoop strain with moment in spec. 2

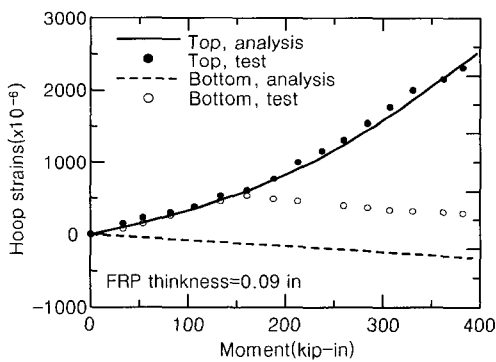


Fig. 8 Hoop strain with moment in spec. 1

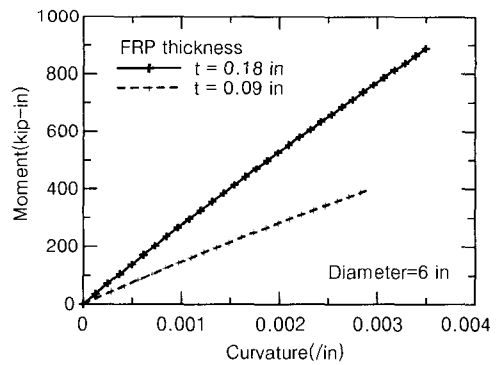


Fig. 11 Moment-curvature relations in spec. 1 & 2

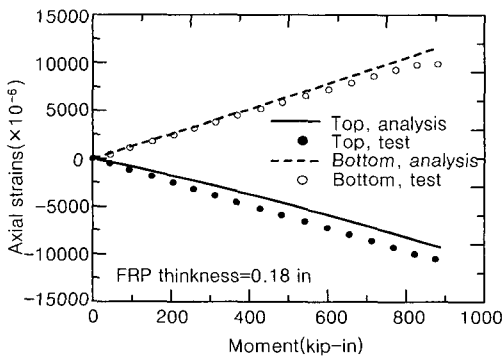


Fig. 9 Axial strain with moment in spec. 2

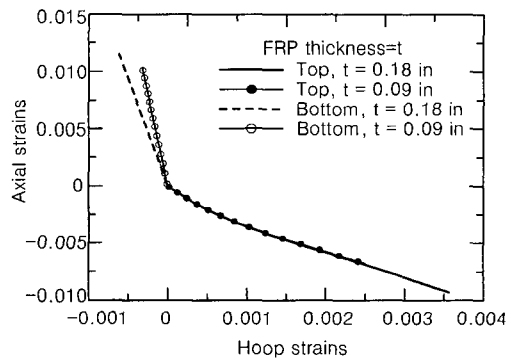


Fig. 12 Axial strain vs. hoop strain in spec. 1 & 2

해석과 비교하여 도시하였다. 인장하연 측 횡방향 변형률과 모멘트 관계는 실험과 매우 일치된 양상을 나타내고 있으며, 압축상연 측에서는 하중이 증가하면서 실험치와 간격이 차이를 보이며 극한하중에 도달했을 때는 다소 큰 차이를 보였다. 세 시험체의 휨 부재해석에서 나타난 것처럼, 원형단면 FRP 복합재료 층의 보강은 내부충진 콘크리트의 구속효과에 우수한 것으로 평가할 수 있다.

보강재의 섬유배열방향 및 배열 층의 분포에 따른 휨 모멘트 및 연성거동 특성에 대해서 비교하기 위하여, 시험체 3과 동일한 콘크리트 단면에 대하여 CFRP 층의 총 두께가 0.7 inch로서 2층으로 배치하여, 종방향 섬유배치($\pm 0^\circ$ 방향)와 횡방향 섬유배치(90° 방향)의 분포율을 종방향 섬유배치가 40%~90%로 10%씩 증가하도록 보강재를 분포시킴으로서, 그에 따른 모멘트-곡률 관계에 관한 해석 결과를 Fig. 15에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 종방향 섬유배치의 분포율이 증가할수록 부재의 모멘트 내력 및 연성거동능력이 증대되고, 부재의 강성이 증대된 것을 확인할 수 있다. 따라서 부재의 내력 및 연성을 증진시키기 위해서는 가능한 한 FRP 층의 섬유배열방향을 종방향에 가깝게 배치하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

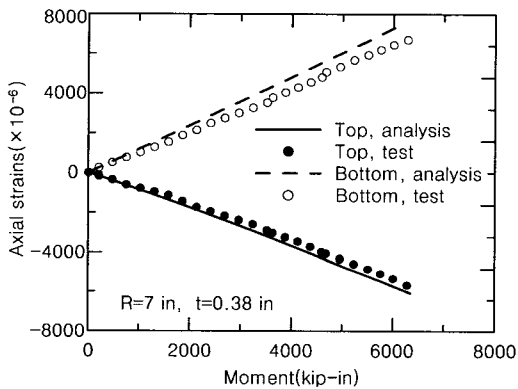


Fig. 13 Axial strain with moment in spec. 3

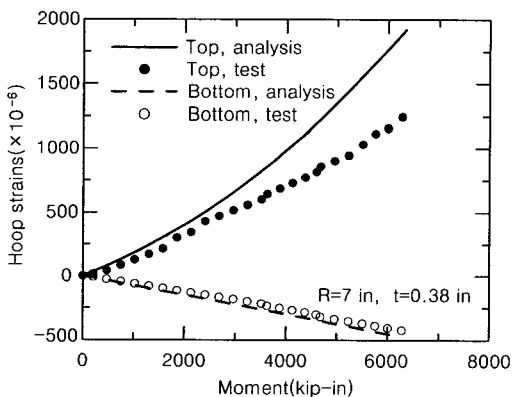


Fig. 14 Hoop strain with moment in spec. 3

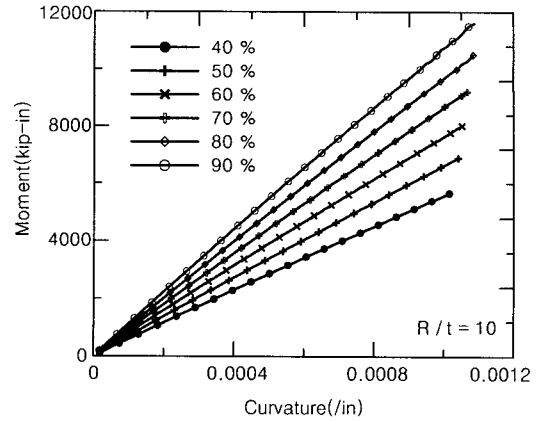


Fig. 15 Moment-curvature with fiber placement

5. 결 론

본 논문에서는 원형단면 FRP 콘크리트 휨 부재에 관한 부재 단면 해석 모델을 제시한 것으로서, 해석과 실험의 비교·고찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 제시된 모델은 FRP 적층 복합재료의 2차원 구성관계와 콘크리트의 다축 압축응력상태의 구성관계를 이용하여, 원형단면 FRP 콘크리트 휨 부재의 단면 해석 알고리즘을 제안한 것으로서, FRP 복합층으로 인한 콘크리트 구속 효과와 FRP 복합재료의 2차원 거동을 보다 합리적으로 고려하였다.

2) 따라서 본 모델은 FRP 층의 두께 및 배열 등을 다르게 함으로써 콘크리트 구속 조건이 변화하는 경우에 대해서도 적용 가능하며, FRP 복합재료 판의 층수, 두께, 배열방향, 재료, 및 단면치수 등의 변수들을 달리 한 경우에 대해서도 적용 가능하다.

3) 원형단면 FRP 콘크리트 휨 부재의 단면해석 및 실험과의 비교에서, 본 부재 단면 해석 모델은 부재의 축방향 거동뿐만 아니라 횡방향 거동 특성까지 잘 예측해 주었다.

4) 휨 거동은 부재 축방향 섬유배열에 의해 크게 지배되는 것으로 관찰되었고, 원형단면 FRP 복합재료 층은 내부충진 콘크리트의 구속효과에 우수한 것으로 나타나, 동일한 단면적의 철근콘크리트 단면에 비교해서 우수한 강도를 제공할 만큼 휨 거동 특성이 우수한 것으로 평가된다.

5) 본 연구는 FRP 복합재료 판의 두께에 따른 좌굴 문제, FRP 복합재료 층과 콘크리트 면과의 전단 및 미끄럼 거동문제, 온도팽창효과로부터 발생 가능한 응력변화 등에 대한 고려가 향후 추가적으로 연구되어야 할 것으로 판단된다.

단위환산

1 lb = 0.4536 kgf, 1 in = 2.54 cm

참고문헌

1. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural Members with Confined Concrete," *J. of Struct. Div., ASCE*, Vol. 97, ST7, pp.1969~1990, 1971.
2. Cho, C. G. and Hotta, H., "A Study on Compressive Strength of Concrete in Flexural Regions of Reinforced Concrete Beams Using Finite Element Analysis," *Structural Engineering and Mechanics, An International Journal*, Vol. 13, No. 3, pp.313~328, 2002.
3. Saadatmanesh, H., Ehsani, M. R., and Li, M. W., "Strength and Ductility of Concrete Columns Externally Reinforced with Fiber Composite Straps," *ACI Structural Journal*, Vol. 91, No. 4, pp.434~447, 1994.
4. Hosotani, M., Kawashima, K., and Hoshikuma, J., "A Stress-Strain Model for Concrete Cylinders Confined by Carbon Fiber Sheets," *Journal of Materials, Concrete Structures, and Pavement, JSCE*, Vol. 39, No. 592, pp.37~52, 1998.
5. 이상호, 허원석, "적층성을 띤 CFS로 보강된 원형 콘크리트 기둥의 보강효과 해석," 한국콘크리트학회 논문집, 제11권, 3호, pp. 89~100, 1999.
6. Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites," *J. Structural Engineering, ASCE*, Vol. 123, No. 5, pp. 583~590, 1997.
7. Burgueno, R., McKinley, J., Seible, F., and Hegemier, G., "Carbon Shell Systems for Concrete Piers - Design of Pilot Test Specimens," Advanced Composite Technology Transfer Consortium Report No. ACTT-95-01, Univ. of California, San Diego, Jan. 1995.
8. Mander, J. B., "Seismic Design of Bridge Piers," Ph.D. Dissertation. Dept. of Civil Eng., Univ. of Canterbury, New Zealand, 1984.

요 약

콘크리트 휨 부재의 내하능력을 개선하는 방법들 중에서, 최근에 와서, 기존의 철근콘크리트 부재에서 사용하는 철근을 대신하여 섬유보강폴리머(FRP) 복합재료 층으로 보강한 콘크리트 부재에 관한 연구가 이루어지고 있다.

본 연구는 휨을 받는 원형단면 FRP 콘크리트 부재의 거동을 예측하기 위한 해석모델에 중점을 두고 있다. FRP 층과 내부에 충전된 콘크리트로 이루어진 부재의 응력 및 변형을 예측하기 위하여 층분할 단면해석 모델이 제시되었다. 콘크리트의 압축거동이 횡방향 팽창에 의존한다는 가정과 다축 압축 응력상태의 구성관계에 기초하여 FRP 층으로 둘러 쌓인 콘크리트의 응력-변형률 관계를 정식화하였다. 고전적 적층이론에서, FRP 층의 거동은 2차원 적층의 면내거동의 응력-변형률 관계에 기초한 등가직교재료특성에 기초하여 정식화하였다.

소개된 해석모델의 검증을 위하여 원형단면 FRP 콘크리트 휨 부재의 4점 실험과 비교한 결과, 본 모델은 부재의 모멘트-곡률 관계, 단면에서의 축방향 변형률 뿐만 아니라 횡방향 변형률, 그리고 FRP 층으로 인한 콘크리트의 구속효과의 증진에 관한 거동 특성들을 잘 예측해 주었다.

핵심용어 : FRP 콘크리트, 층분할 단면해석, 구속된 콘크리트, 고전적 적층이론
