

비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 거더의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of Concrete Girders Strengthened with Unbonded Prestressed CFRP Plates

최규천* · 이재석**

Choi, Kyu-Chon · Lee, Jae Seok

Abstract

A study for the nonlinear analysis method of flexural behavior of concrete girders strengthened with unbonded prestressed CFRP plates is presented. The concrete girders strengthened with unbonded prestressed CFRP plates exhibit more complex nonlinear behavior due to the slip between the concrete girder and the CFRP plates than the case of bonded CFRP plates. The unbonded CFRP plate is modeled as an assemblage of the curved elements both ends of which are rigidly linked to the nodes of fibered frame elements. The slip effect of the unbonded CFRP plate is taken into account using the force equilibrium relationship at each node. To evaluate the validity and the capability of the proposed analysis method, the ultimate analysis results of the concrete beams strengthened with unbonded prestressed CFRP plate are compared with the experimental results obtained from other investigators. The proposed analysis method is found to predict ultimate behaviors of these beams fairly well. Additionally the time-dependent deformations of the concrete beam seems to have little influence on the ultimate behaviors of concrete beams strengthened with unbonded prestressed CFRP plate, and the cracks of the concrete beam which occurred before strengthening it with CFRP plate are found to have almost no influence on the ultimate capacity of the beam.

Keywords : *unbonded prestressed CFRP plate, slip, fiber frame element, concrete girder, nonlinear analysis, ultimate analysis*

요 지

이 논문에서는 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 거더의 비선형 휨거동에 대한 해석방법을 제시하였다. 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 거더는 CFRP 판의 슬립(slip)으로 인해 인장력이 재분배되어 CFRP 판이 콘크리트에 부착된 경우에 비해 복잡한 비선형 거동을 보이게 된다. 따라서 이 논문에서는 비부착 프리스트레스트 CFRP 판을 여러 개의 곡선 요소로 모사하고, 화이버 뼈대요소의 각 절점에서 힘의 평형 관계를 이용하여 CFRP 판의 인장력을 재분배함으로써 슬립효과를 고려하였다. 이 논문에서 제시한 해석방법을 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 보의 해석에 적용하여 해석방법의 정당성을 확인하였다. 또한 비부착 CFRP 판의 보강시점과 보강 전후에 발생한 콘크리트의 시간의존적 변형은 보의 처짐 거동에는 영향을 미치나 극한내력에는 영향을 미치지 않음을 확인하였고, 비부착 CFRP 판으로 보강하기 전에 발생한 콘크리트의 균열유무도 비부착 CFRP 판으로 보강한 후의 보의 극한거동에는 거의 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

핵심용어 : 비부착 프리스트레스트 탄소섬유 판, 슬립, 화이버 뼈대요소, 콘크리트 거더, 비선형 해석, 극한해석

1. 서 론

콘크리트 구조물에 있어서 노후화에 따른 재료의 열화와 손상 및 성능저하로 인하여 원래의 설계목적대로 기능을 발휘할 수 없는 경우나 최초의 설계하중보다 큰 하중을 지지할 필요가 발생할 경우에는 구조물을 새로 시공하거나 보강을 하게 된다. 구조물을 새로 시공할 경우에는 시간과 비용이 많이 소요될 뿐 아니라 폐자재에 의한 환경오염을 야기

하기 때문에 기존의 구조물을 유지하면서도 구조물의 안전성을 확보하고 구조수명을 연장하며 내하력을 증진하기 위한 다양한 보강공법이 국·내외에서 연구되어 왔다. 국내에서 사용되고 있는 콘크리트 구조물의 보강공법으로는 강판접착공법과 콘크리트 덧치기공법 및 FRP(Fiber Reinforced Polymer)를 이용한 보강공법 등이 있다. 강판접착공법은 구조물의 내하력을 크게 향상시키나 구조물의 지중증가와 부식 및 내구성에 대한 문제점이 야기될 수 있고, 콘크리트

*정회원 · (주)한화건설 토목기술팀 과장 · 공학박사 (E-mail : ckc0511@hanwha.co.kr)
**정회원 · 교신저자 · 충북대학교 토목공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : leejs@cbnu.ac.kr)

덧치기공법은 자중증가와 건조수축으로 인해 증설단면에 균열을 발생시킬 수 있기 때문에 높은 인장강도와 내부식성이 우수한 FRP 보강재를 이용한 보강공법에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다(심종성 등, 2005; Rabinovitch 등, 2003; Wu 등, 2003).

FRP를 이용한 보강공법으로 표면부착이나 표면매립공법은 콘크리트 부재의 휨 성능을 상당히 향상시키는 것으로 알려졌다. 그러나 보강재의 강성이 충분히 발휘되기 전에 조기파괴가 발생하는 문제점이 있다(Smith, 2002). 따라서 최근 들어 FRP로 보강된 구조물의 조기파괴를 막고 휨 성능을 향상시키기 위해 보강재에 긴장력을 도입하여 단부를 정착하는 공법에 대한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 진행되고 있으며 이 연구들에 대해 간략히 살펴보면 다음과 같다.

유영찬 등(2006)은 비부착 CFRP 판으로 긴장된 철근콘크리트 보의 재하실험을 통하여 CFRP 판의 긴장력에 따른 균열하중과 항복하중 및 극한하중의 변화를 검토하였다. 박재현 등(2005)과 홍성남 등(2006)은 긴장력을 도입한 CFRP 판을 표면매립방식으로 보강한 철근콘크리트 보에 대한 재하실험을 통하여 CFRP 판의 긴장력에 따른 거동 특성을 분석하였다. 한상훈 등(2006)은 긴장력을 도입한 CFRP 판으로 부착된 철근콘크리트 보의 재하실험을 통하여 콘크리트의 강도, CFRP 판의 긴장력 및 인장철근비에 따른 거동 특성을 분석하였다. 양동석 등(2007)은 비부착 및 부착 CFRP 판으로 긴장된 철근콘크리트 보의 재하실험과 상용 해석프로그램인 DIANA를 이용하여 CFRP 판의 부착 유무와 긴장력에 따른 거동 특성을 분석하였다.

이상의 연구들을 살펴보면, 대부분 CFRP 판의 긴장력과 부착 유무에 따른 거동 특성을 규명하기 위한 실험적 연구가 수행되었으며, 해석적 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 이 논문에서는 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 거더의 비선형 거동을 예측할 수 있는 해석방법을 제시하고, 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 극한해석에 적용하여 이 논문에서 제시한 해석방법의 타당성과 적용성을 검토하였다. 또한 비부착 CFRP 판의 보강시점과 비부착 CFRP 판으로 보강한 후에 발생하는 콘크리트의 시간의존적 변형이 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 극한거동에 미치는 영향을 검토하였고, 철근콘크리트 보에 집중하중을 재하하여 사전균열을 발생시킨 후에 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강한 경우에 대한 극한해석을 수행하여 균열로 인해 성능이 저하된 철근콘크리트 보에 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강한 경우에 대한 보강효과를 검토하였다.

2. 구조요소모델

2.1 뼈대요소

이 논문에서 사용한 화이버 뼈대요소에 대해서는 참고문헌(이재석 등, 2005)에 자세히 설명되어 있으며, 여기서는 간략히 살펴보기로 한다. 뼈대요소는 요소의 길이방향으로 단면의 변화가 없는 직선 요소로 가정하고, 임의의 단면형상을 표현하되 단면 내에서 두께 방향뿐만 아니라 폭 방향으로

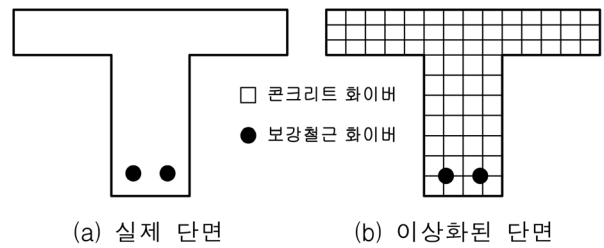


그림 1. 철근콘크리트 단면의 이상화

변화하는 재료상태를 정확히 고려하기 위해 그림 1과 같이 콘크리트와 보강철근 화이버로 이상화하였다. 뼈대요소 내의 각 화이버는 요소의 기준축(reference axis)으로부터 화이버 중심까지의 거리와 단면적으로 정의하였으며, 콘크리트와 보강철근은 완전히 부착되었다고 가정하여 부재 내에서 변위가 연속성을 유지하도록 하였다.

뼈대요소의 강성도 행렬을 구하는 과정에서 면적에 대한 적분은 다음과 같이 단면 내의 화이버별로 계산된다.

$$\int_A \phi_\epsilon dA = \sum_{i=1}^{n_c} \phi_{\epsilon_{ci}} A_{c_i} + \sum_{i=1}^{n_s} \phi_{\epsilon_{si}} A_{s_i} \quad (1)$$

여기서, ϕ_c , ϕ_s 는 콘크리트와 보강철근 화이버의 축방향 변위와 관련된 재료적, 기하학적 특성함수이고, n_c , n_s 와 A_c , A_s 는 콘크리트와 보강철근 화이버의 수와 단면적을 나타낸다.

2.2 CFRP 판요소

그림 2와 같이 비부착 CFRP 판으로 콘크리트 거더를 긴장할 경우에 뼈대요소와 CFRP 판요소의 강성을 별도로 고려해야 하고, 외부하중이 증가할 경우 콘크리트 거더와 CFRP 판 사이에서 슬립(slip)이 발생하여 CFRP 판의 인장력이 재분배된다. 이와 같이 비부착 CFRP 판으로 긴장된 콘크리트 부재의 복잡한 비선형 휨거동을 가능한 정확하게 예측하기 위해 비부착 CFRP 판은 그림 3과 같이 각 뼈대요소의 양 절점에 강제로 연결된 세그먼트로 이상화되고, 각 세그먼트는 절점이 2개에서 4개를 갖는 곡선요소로 이상화되었다. 뼈대 구조물의 변형으로 인한 CFRP 판요소의 새로

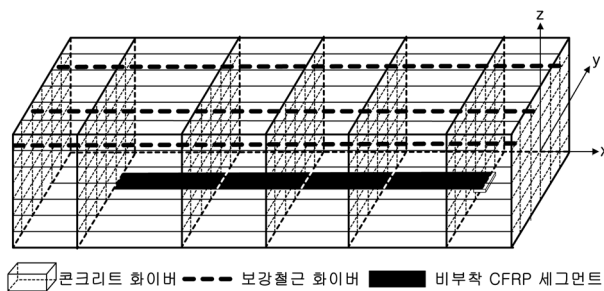


그림 2. CFRP 판으로 긴장된 부재의 이상화



그림 3. 비부착 CFRP 판의 이상화

은 절점좌표는 최초 절점좌표에 각 세그먼트가 강제로 연결된 뼈대요소의 절점변위와 강체의 회전으로 발생하는 변위를 더하여 구하였다. 또한 콘크리트 거더와 CFRP 판 사이 마찰을 무시하여 CFRP 판의 슬립은 자유롭게 일어나는 것으로 가정하였다. 즉, 외부하중에 의해 구조물의 변형이 발생할 경우 CFRP 판의 슬립으로 인하여 CFRP 판을 구성하는 각 세그먼트의 인장력은 모두 같다고 가정하였다.

3. CFRP 판의 인장력 계산

그림 4와 같이 절점 i 에 걸쳐 있는 두 CFRP 판 세그먼트의 인장력 F_{i-1} 과 F_i 가 같지 않은 경우, 두 세그먼트와 동일한 각(θ_i)을 이루는 직선방향으로 F_{i-1} 과 F_i 의 분력의 합인 driving force F_D^i 가 발생하게 되고, 이 driving force F_D^i 가 0이 될 때까지 CFRP 판은 슬립이 발생하게 된다. 이 논문에서는 비부착 CFRP 판의 슬립으로 인해 재분배되는 각 세그먼트의 인장력을 구하기 위해 먼저 슬립이 발생하지 않는다고 가정하여 각 세그먼트의 인장력을 구한 후에 각 절점에서 driving force를 구하고, 이 driving force를 여러 개로 나누어 각 절점에 걸쳐 있는 양 세그먼트에 driving force가 0이 될 때까지 반복해서 분배하였다.

여기서는 CFRP 판의 슬립으로 인한 각 세그먼트의 인장력을 구하는 과정에 대해 설명하기로 한다.

3.1 슬립발생 전 CFRP 판의 인장력 계산

비부착 CFRP 판의 각 세그먼트에 대한 인장력 F_i 는 콘크리트 부재와 CFRP 판 사이에서 슬립이 발생하지 않는다고 가정하여 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$F_i = \int_{V_i} B_i^T \tau_i dV_i \quad (2.a)$$

$$B_i = \frac{1}{J_i^2} x_i^T H_r^T \cdot H_r \quad (2.b)$$

$$H = [h_1 I_3 \dots h_N I_3], \quad I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.c)$$

$$x_i^T = \{x_1^1 x_2^1 x_3^1 \dots x_1^N x_2^N x_3^N\} \quad (2.d)$$

여기서, B_i 는 i 번째 세그먼트의 선형 변형률-변위 행렬, τ_i 는 i 번째 세그먼트의 축방향 응력, J_i 는 i 번째 세그먼트의 정규좌표계와 요소좌표계 간의 Jacobian, x_i^T 는 i 번째 세그먼트의 절점좌표벡터, H 는 형상함수 행렬, N 은 요소의 절점 수, r

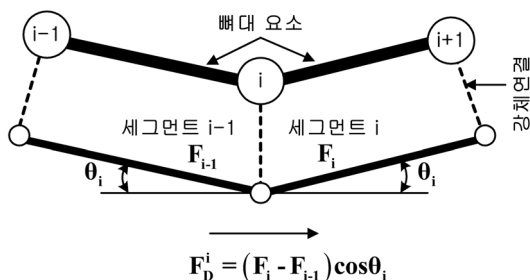


그림 4. 절점에서의 힘의 평형 관계

은 무차원 자연좌표계, h_k 는 형상함수이다.

비부착 CFRP 판은 단면의 연직방향으로만 응력을 전달하고 단면에 대한 연직응력은 단면에 균일하게 분포하며 변형 중에 단면의 형상은 변하지 않는다고 가정하면 식 (2.a)의 부피에 대한 적분은 다음과 같이 선적분으로 변환하여 Gauss 적분을 이용하여 각 세그먼트의 인장력 F_i 를 구할 수 있다.

$$F_i = \int_{-1}^1 B_i^T \tau_i A J_i dr \quad (3)$$

3.2 슬립발생 후 CFRP 판의 인장력 계산

그림 5와 같이 비부착 CFRP 판으로 긴장된 콘크리트 부재에 외부하중으로 인해 구조물에 변형이 발생할 경우, CFRP 판의 슬립으로 인해 각 세그먼트의 인장력은 재분배된다. 이 논문에서 사용한 CFRP 판의 슬립으로 인한 각 세그먼트의 인장력을 구하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

1) 먼저 슬립이 발생하지 않는다고 가정하여 각 세그먼트의 인장력 F_1, \dots, F_{n-1} 을 구한다.

2) 각 절점에서 세그먼트의 인장력 F_1, \dots, F_{n-1} 의 분력의 합인 driving force F_D^2, \dots, F_D^{n-1} 를 구한다. 여기서 driving force는 CFRP 판의 슬립을 유발하는 힘이 된다.

$$F_D^i = (F_i - F_{i-1}) \cos \theta_i \quad (4)$$

3) 만약 절점 i 와 $i+1$ 에서 슬립이 발생할 경우($F_D^i \neq 0$, $F_D^{i+1} \neq 0$), 세그먼트 i 의 인장력은 식 (5)를 이용하여 절점 i 와 $i+1$ 에서 슬립이 발생하지 않을 때까지 반복계산을 통해 구한다. 즉, driving force F_D^i 와 F_D^{i+1} 을 분배계수 M 으로 나눈 값을 식 (5)에 대입하여 세그먼트 $i-1, i, i+1$ 의 인장력 F'_{i-1}, F'_i, F'_{i+1} 을 구하고, 이 값들을 이용하여 다시 절점 i 와 $i+1$ 에서의 driving force를 계산하여 driving force가 0이 될 때까지 반복해서 세그먼트 $i-1, i, i+1$ 의 인장력을 구한다.

$$F'_i = F_i, \quad F'_i = F_i - \frac{F_D^i/M}{\cos \theta_i} I_i + \frac{F_D^{i+1}/M}{\cos \theta_i} I_{i+1} \quad (5)$$

여기서, I_i 는 F_i 가 F_{i-1} 보다 클 경우에는 1, 작을 경우에는 -1이 되며, I_{i+1} 도 I_i 와 같은 방법으로 정의된다.

분배계수를 작게 정의할 경우에는 반복계산 수를 줄일 수는 있으나 반복계산 중에 분배되는 세그먼트의 인장력 증분치가 커지기 때문에 반복계산을 통해 구한 인장력과 실제 인장력과의 오차는 증가하게 된다. 따라서 각 절점에서의 슬립으로 인한 CFRP 판의 인장력을 안전하게 분배하기 위해 M 의 크기를 적절한 값으로 정의해야 한다. 이 논문에서는

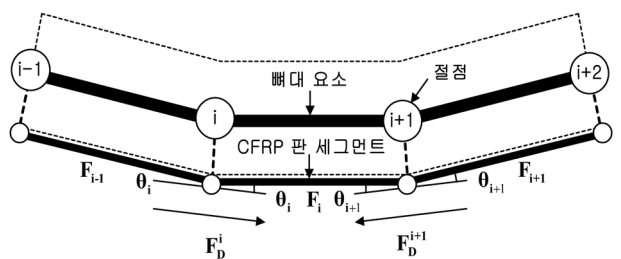


그림 5. 슬립으로 인한 CFRP 판의 인장력 재분배

M 값으로 2보다 큰 값을 입력 데이터로 조절할 수 있도록 하였다. 분배계수를 변화시키면서 예제 해석에 수행해 본 결과, 분배계수를 100 이상의 값을 적용한 경우에 CFRP 판의 인장력을 안정적으로 분배할 수 있었다. 따라서 이 논문에는 분배계수를 100으로 가정하여 예제 해석을 수행하였다.

4. 재료의 비선형 모델

비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 구조물의 시간의존적 비선형 거동을 정확히 예측하기 위해서는 각 재료의 비선형 응력-변형률 관계는 물론 재료의 시간의존적 특성의 영향을 고려할 수 있는 재료 모델이 필요하다.

콘크리트의 비선형 응력-변형률 관계로는 압축에서의 비선형 응력-변형률 관계와 인장균열 및 인장증강효과(tension stiffening effect)는 물론 하중반전까지 고려하였다. 압축에서의 응력-변형률 곡선은 그림 6과 같이 포물선-직선-직선(parabolic-linear-linear) 모델로 가정하였다. 콘크리트의 시간의존적 특성의 영향으로는 크리프와 건조수축 및 강도증가를 고려하였다.

보강철근은 콘크리트와 달리 환경적 요인이나 시간의 영향을 받지 않으므로 비선형 응력-변형률 관계만을 고려하여 이중직선(bilinear) 모델로 가정하였다.

CFRP 판은 콘크리트나 보강철근보다 큰 인장강도를 가지며 파단될 때까지 소성거동을 보이지 않는 특성이 있으므로 응력-변형률 관계는 그림 7과 같이 직선(linear) 모델로 가정한다.

콘크리트와 보강철근의 재료비선형 모델은 이재석 등(2005)의 연구결과를 적용하였다.

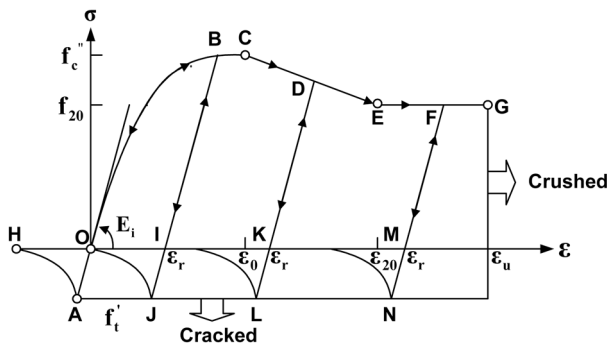


그림 6. 콘크리트의 응력-변형률 곡선

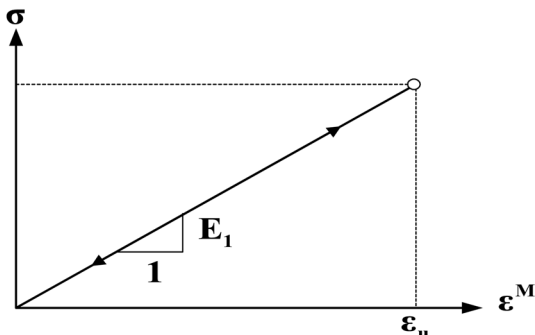


그림 7. CFRP 판의 응력-변형률 곡선

5. 시간의존적 비선형 해석방법

이 논문에서는 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 거더의 시간의존적 비선형 거동을 예측하기 위해 각 시간단계에서 구조물의 형상과 비선형 변위-변형률 관계 및 재료의 비선형성을 고려하여 유도된 증분평형방정식을 풀어서 변위와 변형률 및 응력 증분을 구하고, 이들을 최종 시간단계까지 누적시켜 나가는 순차적분법(step forward integration method)을 사용하였다.

임의의 시간단계 t_{n-1} 에서 구조물의 변위와 응력 및 재료상태를 알고 있을 때, 시간단계 t_n 에서의 해를 구하는 과정을 요약하면 다음과 같다.

1) 시간단계 t_{n-1} 과 t_n 사이에서 발생하는 비역학적 변형률(nonmechanical strain) 증분 $\Delta \epsilon_n^{NM}$ 을 구하고, 비역학적 변형률 증분에 의한 등가절점하중 증분 ΔR_n^{NM} 을 구한다. 비역학적 변형률에는 콘크리트의 크리프와 건조수축 및 온도 변화에 의한 변형률과 CFRP 판의 온도변화에 의한 변형률이 포함된다.

2) 시간단계에서의 외부절점하중 증분 t_n 에 이전 시간단계에서의 불평형력(unbalanced load) ΔR_{n-1}^U 과 비역학적 변형률에 의한 등가절점하중 증분 ΔR_n^{NM} 을 더하여 총 절점하중 증분 ΔR_n 을 구한다.

총 절점하중 증분 ΔR_n 을 적당한 수의 하중단계로 정의하고, 각 하중단계마다 불평형력이 수렴조건을 만족할 때까지 다음 과정을 반복적으로 계산한다.

3) 현재의 형상 및 재료성질을 기준으로 각 요소의 접선강성을 구하여 전체 구조물의 접선강성도 행렬 K_T 를 구하고, 아래의 증분평형방정식을 풀어 절점변위 증분 Δr 을 구한다. 여기서, ΔR 은 절점하중 증분이다.

$$K_T \cdot \Delta r = \Delta R \quad (6)$$

4) 절점변위 증분으로부터 각 요소의 변형률 증분 $\Delta \epsilon$ 을 구하여 이전 계산단계에서의 총 변형률에 더해 현재의 총 변형률을 구한다.

5) 절점변위 증분 Δr 을 이전 계산단계에서 구한 총 절점변위에 더해 현재의 총 절점변위 r 을 구하고 r 을 기준으로 각 요소의 변형된 형상을 새로 정의한다.

6) 총 변형률 ϵ 에서 총 비역학적 변형률 ϵ^{NM} 을 빼서 총 역학적 변형률(mechanical strain) ϵ^M 을 계산하고, 현재의 시간단계에서 정의된 비선형 응력-변형률 관계를 고려하여 각 요소의 응력 σ 를 구한다.

7) 각 요소의 응력에 의한 등가절점하중을 계산하며 각 절점별로 모두 더하여 전체 구조물의 절점별 내부지지하중(internal resisting load) F 를 계산한다.

8) CFRP 판의 슬립을 고려할 경우, 슬립으로 인한 CFRP 판의 내부지지하중은 단계 7)에서 CFRP 세그먼트가 각 절점에 강제로 연결되었다고 가정하여 구한 내부지지하중을 이용하여 각 절점에서의 driving force F_d^i 를 구한 후에 식 (5)를 이용하여 driving force가 0일 될 때까지 반복계산을 한다.

9) 현재의 총 절점하중 R^i 에서 내부지지하중 F 를 빼서 불평형력 F^U 를 계산하고, 불평형력 R^U 를 ΔR 로 하여 단계

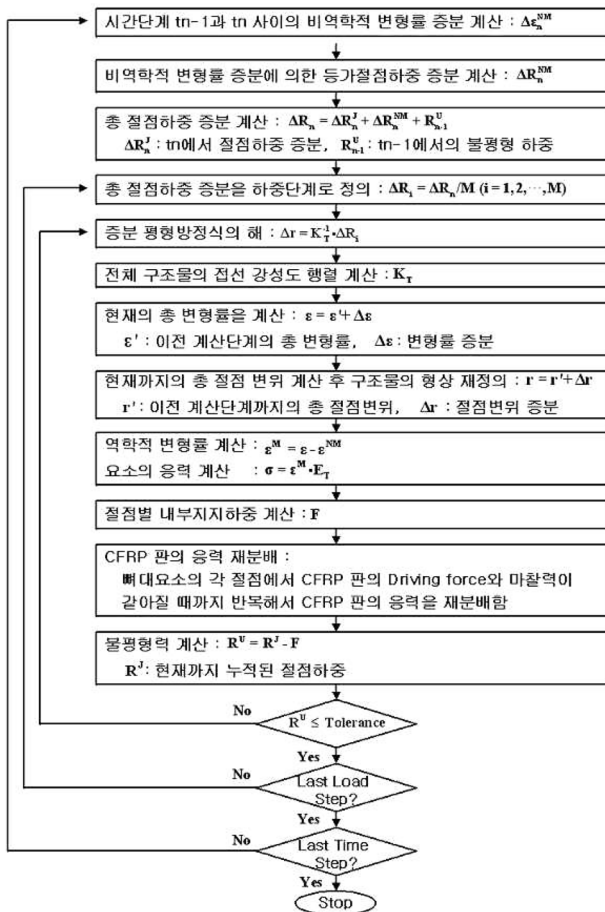


그림 8. 시간의존적 비선형 해석 절차

3)부터 다시 계산을 한다.

$$R^U = R^J - F \quad (7)$$

불평형력 R^U 가 주어진 수렴조건을 만족할 때까지 단계 3)부터 9)까지 반복계산을 하며 불평형력이 주어진 수렴조건을 만족하면 불평형력을 다음 하중단계의 절점하중 증분 ΔR 에 더하여 단계 3)부터 9)까지 반복계산을 한다. 마지막 하중단계까지 반복계산이 끝나면 다음 시간단계 t_{n+1} 에 대한 해를 단계 1)부터 계산한다.

그림 8에는 임의의 시간단계에서 해를 구하는 절차에 대한 흐름도를 나타냈다. 만약 극한해석을 수행할 경우에는 외부하중의 증분을 적당한 수의 하중단계로 정의하고, 각 하중단계마다 불평형력이 수렴조건을 만족할 때까지 단계 3)부터 단계 9)까지 반복계산을 한다.

6. 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 극한해석

이 논문에서 제시한 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 구조물의 비선형 해석방법의 타당성과 적용성을 검토하기 위해 그림 9와 같이 순경간이 2.4 m, 4.5 m, 6.0 m인 철근콘크리트 보를 표 1과 같이 비부착 CFRP 판으로 긴장하여 보강한 경우에 대한 극한해석을 수행하여 해석결과를 선행연구자(양동석 등, 2007)의 실험결과와 비교하였다.

또한 CFRP 판의 보강시점과 CFRP 판으로 보강한 후에

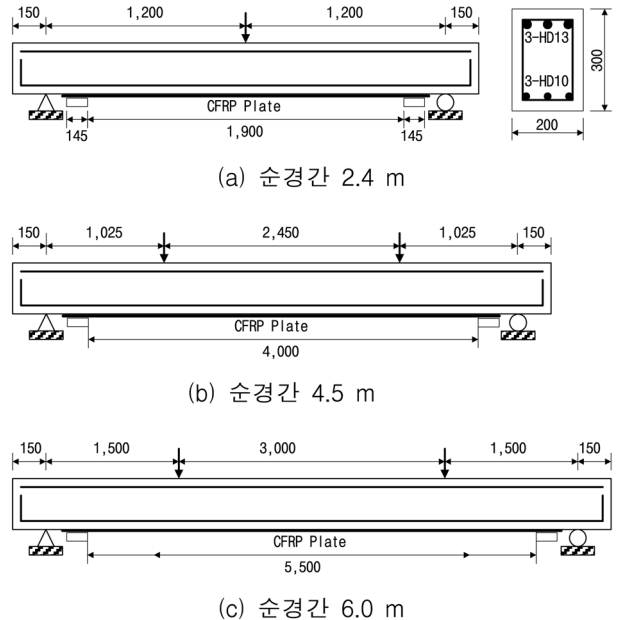


그림 9. 철근콘크리트 보의 형상 (단위 : mm)

발생한 콘크리트의 시간의존적 변형이 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 극한거동에 미치는 영향을 검토하였고, 철근콘크리트 보에 집중하중을 재하하여 사전균열을 발생시킨 후에 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강한 경우에 대한 극한해석을 수행하여 균열로 인해 성능이 저하된 철근콘크리트 보에 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강한 경우에 대한 보강효과를 검토하였다.

철근콘크리트 보는 200 mm×300 mm의 직사각형 단면이고, 콘크리트의 피복두께는 30 mm이다. 콘크리트의 압축파괴를 방지하기 위해 압축철근은 3-HD13을 배근하고, 인장철근은 3-HD10을 배근하였다. CFRP 판의 폭은 50 mm이고, 두께는 1.3 mm이다. 극한상태에서 저보강 PSC 보와 유사하게 인장파괴를 보장하기 위해 CFRP 판의 단면을 상대적으로 작게 하였다. 콘크리트와 보강철근 및 CFRP 판의 재료성질은 참고문헌(양동석 등, 2007)에 제시된 아래의 값들을 사용하였고, 제시되지 않은 자료는 통상적으로 사용되는 값으로 적절히 가정하였다.

콘크리트

28일 압축강도	$f_c = 16.4$ MPa
탄성계수	$E_c = 19.3$ GPa
극한변형률	$\epsilon_{cu} = 0.0035$

CFRP 판

인장강도	$f_{fu} = 2,350$ MPa
탄성계수	$E_f = 173.0$ GPa
극한변형률	$\epsilon_{fu} = 0.0136$

보강철근(HD10/HD13)

항복응력	$f_y = 475.2/466.2$ MPa
탄성계수	$E_s = 200.0/200.0$ GPa
극한변형률	$\epsilon_{su} = 0.2/0.2$

6.1 비부착 CFRP 판의 긴장력에 따른 거동 특성

순경간이 2.4 m인 철근콘크리트 보에 비부착 CFRP 판을

표 1. 해석 변수

보의 명칭	CFRP 판의 긴장력	순경간
CB	무보강	2.4 m
BSPC1-0	인장강도의 0%	
BSPC1-20	인장강도의 20%	
BSPC1-40	인장강도의 40%	
BSPC1-60	인장강도의 60%	
BSPC2-60	인장강도의 60%	4.5 m
BSPC3-60	인장강도의 60%	6.0 m

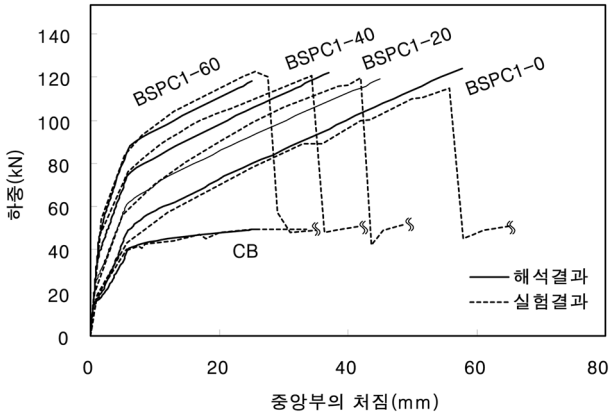


그림 10. CFRP 판의 긴장력에 따른 하중-처짐 곡선(보의 순경간 =2.4 m)

인장강도의 0%, 20%, 40%, 60%로 긴장한 경우에 대한 하중-처짐 곡선을 보면 그림 10과 같이 이 논문의 해석결과와 선행 연구자의 실험결과가 상당히 유사함을 알 수 있다. 실험의 경우 CFRP 판이 파단된 이후에도 철근콘크리트 보의 외부하중에 저항하는 것으로 나타났으나 극한지지력이 급격히 저하되기 때문에 해석에서는 CFRP 판의 파단 이후의 거동은 다루지 않았다.

이 논문에서 보의 균열하중은 콘크리트 화이버의 인장응력이 인장강도에 도달할 때까지 재하된 하중, 항복하중은 인장철근이 최초로 항복할 때까지 재하된 하중, 극한하중은 CFRP 판의 파단 등 국부파괴가 발생하기 직전까지 재하된 하중으로 정의하였다. 표 2에는 CFRP 판의 긴장력에 따른 보의 항복하중과 극한하중을 나타냈으며, 해석을 통해 구한 보의 항복하중 및 극한하중은 실험결과와 상당히 유사함을 알 수 있다. 보의 항복하중은 CFRP 판의 긴장력이 인장강도의 0%, 20%, 40%, 60%인 경우 CFRP 판으로 보강하지 않은 철근콘크리트 보(CB)보다 각각 17.5%, 50.0%, 85.0% 115.0% 증가하는 것으로 나타났으며, 극한하중은 각각 150.5%, 140.4%, 146.5%, 138.4% 증가하는 것으로 나타났다. 보의 극한하중이 CFRP 판의 긴장력에 관계없이 거의

표 2. CFRP 판의 긴장력에 따른 항복하중과 극한하중 비교 (단위:kN)

보	항복하중		극한하중	
	실험	해석	실험	해석
CB	40.4	40.0	49.4	49.5
BSPC1-0	43.0	47.0	115	124.0
BSPC1-20	56.4	60.0	119.8	119.0
BSPC1-40	75.9	74.0	120.7	122.0
BSPC1-60	83.6	86.0	122.5	118.0

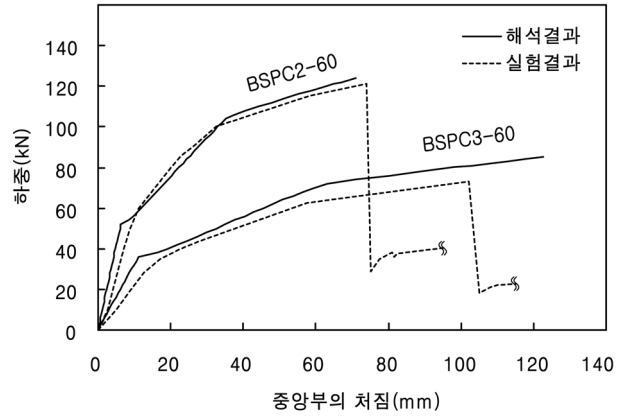


그림 11. 순경간의 길이에 따른 하중-처짐 곡선

유사하게 나타난 이유는 콘크리트에 균열이 발생하고 보강철근이 항복된 이후의 극한지지력은 CFRP 판의 강성에 의해 결정되기 때문이며, 저보강 프리스트레스트 콘크리트 보와 유사한 경향을 보였다. 보의 파괴는 모두 CFRP 판의 파단에 의해 발생하였다.

그림 11에는 순경간의 길이에 따른 하중-처짐 곡선을 나타냈다. 비부착 CFRP 판을 인장강도의 60%로 긴장한 순경간이 4.5 m인 보(BSPC2-60)의 항복하중과 극한하중은 각각 105.0 kN, 124.0 kN으로서 실험결과와 각각 3.6%, 2.1%의 차이를 보이며 잘 일치하였다. 또한 비부착 CFRP 판을 인장강도의 60%로 긴장한 순경간이 6.0 m인 보(BSPC3-60)의 항복하중과 극한하중은 각각 72.0 kN, 85.0 kN으로서 실험결과와 15.3% 18.4%의 다소 큰 차이를 보였으나 거동 양상은 거의 유사한 것으로 나타났다. 보의 순경간이 4.5 m에서 6.0 m로 증가한 경우에 항복하중과 극한하중은 각각 31.5% 정도 감소하였으며, 이 결과를 통하여 보다 안전한 CFRP 판의 보강설계를 위해서는 단면형상과 부재의 길이 및 재하조건 등에 따른 구조적 거동을 정확히 예측하여 CFRP 판의 보강량을 결정하는 것이 중요함을 확인하였다.

이상의 해석결과들을 통하여 이 논문에서 제시한 해석방법이 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 거더의 비선형 거동을 예측하는 데 정당함을 확인하였다. 또한 이 예제와 같이 작은 단면의 CFRP 판으로 보강하는 경우 CFRP 판의 긴장력이 증가할수록 보의 항복하중은 증가하나 극한하중은 거의 유사함을 확인하였고, 보의 순경간이 증가할수록 보의 극한지지력은 크게 감소함을 확인하였다.

6.2 콘크리트의 시간의존적 특성의 영향에 의한 거동 특성

비부착 CFRP 판의 보강시점에 따른 거동 특성을 검토하기 위해 먼저 순경간이 2.4 m, 4.5 m, 6.0 m인 철근콘크리트 보(BSPC1-60, BSPC2-60, BSPC3-60 실험체 모델)을 대상으로 재령 28일에 집중하중 10 kN을 재하하여 재령 365일까지 지속시킨 후에 CFRP 판으로 보강한 경우에 대한 극한해석을 수행하였다. 이후 재령 28일에 집중하중 10.0 kN을 재하하고 CFRP 판으로 보강한 후 즉시 극한해석을 수행하여 두 경우의 극한거동을 비교하였다.

또한 콘크리트의 시간의존적 특성의 영향이 CFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 극한거동에 미치는 영향을 검토하기 위해 BSPC1-60, BSPC2-60, BSPC3-60 실험체 모델

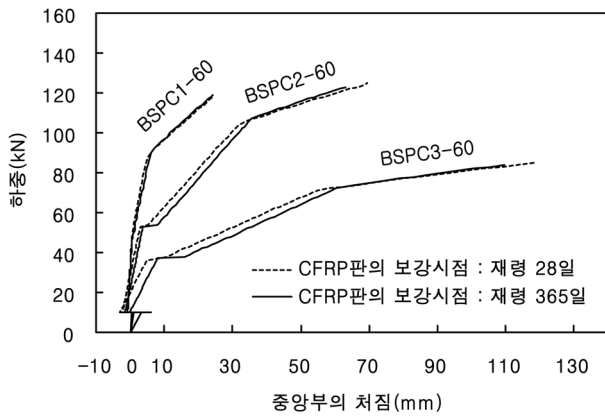


그림 12. CFRP 판의 보강시점에 따른 하중-처짐 곡선

표 3. CFRP 판의 보강시점에 따른 거동 비교(단위:kN)

보강시점 모델	균열하중		항복하중		극한하중	
	28일	365일	28일	365일	28일	365일
BS-PC1-60	47	47	86	86	118	119
BS-PC2-60	54	54	105	108	125	125
BS-PC3-60	37	38	72	73	85	85

을 재령 28일에 CFRP 판으로 긴장한 후 집중하중 10.0 kN을 재하하여 365일까지 지속시킨 시점에서 극한해석을 수행하고, 재령 28일에 CFRP 판으로 긴장한 후 시간경과 없이 즉시 극한해석을 수행하여 두 경우의 극한거동을 비교하였다. 극한 크리프 계수와 건조수축 계수는 ACI 209(2002) 모델에 제시된 표준조건에서의 값인 2.35와 0.00078을 적용하였다.

그림 12에는 CFRP 판의 보강시점에 따른 철근콘크리트 보의 하중-처짐 곡선을 나타냈다. 여기서 보의 처짐이 상향으로 발생하는 경우에는 음수로 표시하고, 하향으로 발생하는 경우에는 양수로 표시하였다. 재령 365일에 CFRP 판으로 보강한 경우의 처짐은 CFRP 판으로 보강하기 전에 콘크리트의 크리프와 건조수축에 의한 변형과 콘크리트의 강도증가로 인하여 재령 28일에 CFRP 판으로 보강한 경우보다 다소 증가하는 경향을 보였으나 보의 균열하중과 항복하중 및 극한하중은 표 3에 나타난 것과 같이 CFRP 판의 보강시점과 관계없이 거의 동일한 것으로 나타났다.

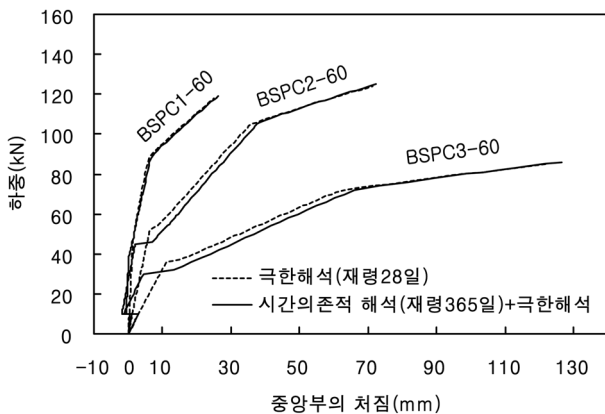


그림 13. 콘크리트의 시간의존적 특성의 고려 여부에 따른 보의 하중-처짐 곡선

그림 13에는 재령이 28일인 철근콘크리트 보를 비부착 CFRP 판으로 보강하고 집중하중 10.0 kN을 재하하여 재령 365일까지 지속시킨 시점에서 집중하중을 추가로 증가시킨 경우에 대한 하중-처짐 곡선을 재령 28일에 CFRP 판으로 보강한 후에 시간경과 없이 즉시 하중을 증가시킨 경우와 비교하였다. 그림 13에서 하중-처짐 곡선은 비부착 CFRP 판으로 보강한 직후 즉, 집중하중이 재하되기 직전의 처짐을 0으로 하여 나타냈다. BS-PC1-60, BS-PC2-60, BS-PC2-60 실험체 모델에서 10.0 kN의 집중하중을 재하하여 365일까지 지속시킨 경우에 보의 처짐은 재령 28일에 10.0 kN의 집중하중을 재하한 경우보다 콘크리트의 크리프와 건조수축으로 인해 각각 상향으로 0.9 mm, 3.1 mm, 4.4 mm 증가하였고, 보의 균열하중은 재령 28일에 CFRP 판으로 보강한 후에 10.0 kN의 집중하중을 재하하여 재령 365일까지 지속시킨 후에 집중하중을 증가시킨 경우가 재령 28일에 CFRP 판으로 보강한 후에 집중하중을 증가시킨 경우보다 각각 13.0%, 13.2%, 13.5% 작게 나타났다. 반면 콘크리트에 균열이 발생한 이후에는 콘크리트의 압축단면과 보강철근 및 CFRP 판의 강성이 보의 휨강성을 지배하기 때문에 콘크리트의 시간의존적 변형은 표 4와 같이 보의 항복하중 및 극한하중에 거의 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.

6.3 균열이 발생한 철근콘크리트 보의 보강효과

구조적 손상으로 인해 성능이 저하된 콘크리트 보를 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강한 경우의 보강효과를 검토하기 위해 순경간이 2.4 m, 4.5 m, 6.0 m인 철근콘크리트 보(BSPC1-60, BSPC2-60, BSPC3-60 실험체 모델)에 집중하중 17.6 kN을 가하여 사전균열을 발생시킨 후에 하중을 제거하고, 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강한 경우에 대한 극한해석을 수행하여 사전균열 없이 비부착 프

표 4. 콘크리트의 시간의존적 특성의 고려여부에 따른 거동 비교; A=극한해석(재령 28일), B=시간의존적 해석(재령 365일)+극한해석 (단위:kN)

실험체 모델	균열하중		항복하중		극한하중	
	A	B	A	B	A	B
BSPC1-60	46	40	86	86	118	119
BSPC2-60	53	46	105	106	124	125
BSPC3-60	37	32	72	73	85	86

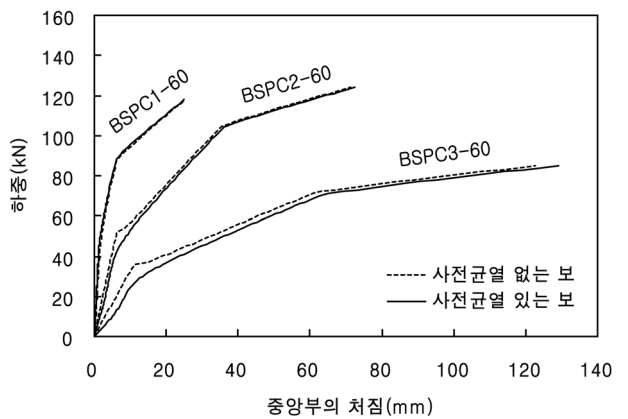


그림 14. CFRP 판의 보강 전 사전균열 유무에 따른 보의 하중-처짐 곡선

표 5. CFRP 판의 보강 전 사전균열 유무에 따른 거동 비교; A=사전균열이 없는 보, B=사전균열이 있는 보 (단위:kN)

실험체 모델	향복하중		극한하중	
	A	B	A	B
BSPC1-60	86	86	118	118
BSPC2-60	105	105	124	124
BSPC3-60	72	71	85	85

리스트레스트 CFRP 판으로 보강한 경우에 대한 극한해석 결과와 비교하였다.

그림 14에는 두 경우의 하중-처짐 곡선이 나타나 있다. CFRP 판으로 보강하기 전에 사전균열을 발생시킨 경우의 초기 휨강성은 사전균열을 발생시키지 않은 경우보다 BSPC1-60 모델은 47.1%, BSPC2-60 모델은 40.2%, BSPC3-60 모델은 43.9% 각각 작기 때문에 초기 거동은 다소 큰 차이를 보였다. 반면에 집중하중이 증가하면서 사전균열을 발생시키지 않은 보에도 인장균열이 발생하면서 보의 휨강성은 사전균열을 발생시킨 경우와 거의 유사하게 되었기 때문에 보의 향복하중 및 극한하중은 표 5에 나타난 것과 같이 거의 동일하게 나타났다.

7. 결 론

이 논문에서는 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 거더의 비선형 휨거동을 예측하기 위해 하이버 뼈대요소와 곡선요소를 사용하고 CFRP 판의 슬립을 고려한 비선형 해석방법을 제시한 후, 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 극한해석을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 철근콘크리트 보의 극한해석 결과와 선행 연구자의 실험결과가 유사함을 확인하였다. 따라서 이 논문에서 제시한 해석방법이 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 보의 비선형 거동 및 극한거동을 타당하게 예측할 수 있음을 확인하였다.
2. 비부착 CFRP 판의 보강시점에 따른 철근콘크리트 보의 극한거동을 검토해 본 결과, CFRP 판으로 보강하기 전에 발생한 콘크리트의 시간의존적 변형은 보의 처짐 거동에는 다소의 영향을 미쳤으나 보의 극한내력에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 CFRP 판으로 보강한 시점 이후의 시간 경과에 따라 콘크리트의 시간의존적 변형으로 인해 처짐은 증가하나 보의 극한내력은 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트의 시간의존적 변형은 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강된 콘크리트 보의 처짐 거동에는 다소의 영향을 미치나 극한내력에는 거의 영향을 주지 않는 것을 확인하였다.
3. 철근콘크리트 보를 비부착 CFRP 판으로 보강하기 전에 사전균열을 발생시킨 경우에는 초기 휨강성의 감소로 인해 사전균열을 발생시키지 않은 경우보다 보의 처짐은 증

가하였으나 사전균열을 발생시키지 않은 보에 인장균열이 발생한 이후의 거동은 CFRP 판으로 보강하기 전의 균열 발생 여부와 관계없이 거의 동일한 것으로 나타났다. 따라서 균열로 인해 구조적 성능이 저하된 콘크리트 보의 경우 비부착 프리스트레스트 CFRP 판으로 보강함으로써 균열이력에 큰 영향을 받지 않고 보의 극한내력을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(구 한국학술진흥재단)의 지원을 받아 수행된 연구(D00478)이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 박재현, 홍성남, 박선규, 정우태, 박중섭, 박영환(2005) 프리스트레스트를 도입한 표면매립 FRP 보강보의 휨 거동. **한국콘크리트학회 2005년도 가을 학술발표회 논문집**, 한국콘크리트학회, pp. 157-160.
- 심종성, 오홍섭, 박철우, 문도영(2005) 철근콘크리트 T형 교량 재하시험을 통한 FRP 외부부착공법의 보강성능 검토. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제1A호, pp. 143-151.
- 양동석, 박준명, 유영찬, 박선규(2007) 프리스트레스트 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동 및 해석. **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제19권, 제4호, pp. 467-474.
- 유영찬, 최기선, 박영환, 박중섭, 김공환(2006) 외부 프리스트레스트 탄소섬유판 정착장치의 콘크리트에 대한 정착성능. **한국콘크리트학회 2006년도 봄 학술발표회 논문집**, 한국콘크리트학회, pp. 226-229.
- 이재석, 최규천(2005) 3차원 프리스트레스트 콘크리트 뼈대의 비선형 해석. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제1A호, pp. 163-172.
- 한상훈, 홍기남, 김형진, 이상균(2006) CFRP 판으로 프리스트레스트 보강한 RC 보의 휨거동에 관한 실험적 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제2A호, pp. 301-310.
- 홍성남, 박준명, 박선규, 박중섭, 박영환(2006) 프리스트레스트를 도입한 FRP 표면매립 보강보의 휨거동에 관한 실험적 연구. **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제18권, 제6호, pp. 737-742.
- ACI Committee 209 (2002) *Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures*. ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute.
- Rabinovitch, O. and Frostig, Y. (2003) Experiments and analytical comparison of RC beams strengthened with CFRP composites. *Composites Part B: engineering*, Vol. 34, pp. 663-677.
- Wu, Z. and Yin, J. (2003) Fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete structures”, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, pp. 1339-1355.
- Smith, S.T. and Teng, J.G. (2002) FRP-strengthened RC Beams. I: review of debonding strength models. *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 385-395.

(접수일: 2010.3.22/심사일: 2010.4.27/심사완료일: 2010.4.27)