CFFT구조의 설계프로그램 개발

Development of Design Program for CFFT Structure

최 영 민* • 황 윤 국** • 이 영 호*** • 이 중 환**** • 김 동 찬*****
Choi, Young-Min • Hwang, Yoon-Koog • Lee, Young Ho • Lee, Jung Howan • Kim, Dong Chan

요 약

본 논문에서는 재료적 성능이 우수하며 경량재료로서 최근 건설구조물에 활용하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있는 섬유보강재료(FRP : Fiber Reinforced Polymer)를 이용한 합성구조인 CFFT(Concrete Filled FRP Tube)의 설계프로그램을 개발하여 제안하고자 하였다. 먼저, CFFT구조는 FRP관에 의해 철근콘크리트가 구속되는 구조로서 기둥과 같이 축력이 도입되는 경우 포아송효과에 의한 변형을 FRP관이 구속효과를 줌으로써 콘크리트의 역학적 거동을 개선하게 되는데 본 연구에서는 실험에 의해 검증된 식을 제시하였으며 이를 바탕으로 CFFT구조를 설계하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 CFFT구조는 FRP관의 구속으로 인해 고강도콘크리트와 긴장재의 도입이 가능한 구조로서 이에 대한 설계도 포함하였다. 그러나 이방성재료인 FRP의 설계와 동시에 FRP관에 의한 구속효과를 고려하는 CFFT구조의 설계는 일반 실무설계자들에게는 다소 난해한 작업으로써 전산화 설계프로그램의 필요성이 대두되어 본 연구에서 CFFT구조의 설계프로그램을 개발하였다. 개발된 설계프로그램의 검증을 위해 일반 철근콘크리트기둥, CFFT기둥, 고강도콘크리트와 PS긴장재를 도입한 CFFT기둥을 설계한 결과, 매우 실용적이며 타당한 설계가 수행될 수 있음을 확인하였다.

keywords : CFFT구조, 설계프로그램, 구속효과, 이방성재료, FRP

1. 서 론

첨단산업분야에서 주로 사용되었던 신소재로서 섬유보강재료(FRP : Fiber Reinforced Polymer)는 경량이면서 재료적 성능이 우수하여 최근 건설구조물에 활용하고자 하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그 중의 하나로서 기존재료인 철근콘크리트구조와 FRP를 복합하여 사용하는 CFFT(Concrete Filled FRP Tube)구조가 경량전철 등과 같이 기존 도심지의 교각구조를 최소단면으로 설계하고자 할 때 제안되고 있다. 그러나 이방성재료인 FRP관과 FRP관에 의한 구속효과를 고려하는 철근콘크리트기둥을 설계하는 것은 실무자에게 다소 난해한 일이다. 따라서 본 연구에서는 실무에서 쉽게 사용할 수 있는 CFFT구조 전용 설계프로그램을 개발하였다. 본 논문에서는 실험에 의해 검증, 제안된 구속효과식(송재준 외, 2007)을 바탕으로 개발된 설계프로그램을 설명하고 프로그램을 검증하기 위해 일반 철근콘크리트기둥, CFFT기둥, 고강도콘크리트와 PS긴장재를 도입한 CFFT기둥에 대해 설계를 수행하여 그 결과를 비교, 검토하였다.

* 정회원 • 자람기술(주) 대표이사 choijaram@jaram-tech.com
** 정회원 • 한국건설기술연구원 구조교량연구실 책임연구원 ykhwang@kict.re.kr
*** 한국건설기술연구원 구조교량연구실 선임연구원 lyh205@kict.re.kr
**** 자람기술(주) 기술연구소 이사 jhlee@jaram-tech.com
***** 자람기술(주) 시스템개발부 과장 baddog00@jaram-tech.com

2. CFFT구조의 역학적 특징

CFFT구조는 FRP관으로 구속된 철근콘크리트로서 FRP는 이방성재료이며 적층각, 적층두께, 적층순서 등에 따라 역학적 거동이 변하는 매우 복잡한 구조일 뿐만 아니라 FRP관으로 구속된 철근콘크리트는 구속효과로 인하여 내부 콘크리트의 역학적 거동이 통상적인 거동과 다른 그림 1과 같이 나타난다. 즉, CFFT구조는 콘크리트가 압축하중을 받게 되면 포아송효과에 의한 변형이 발생하고 이 변형을 FRP관이 수동적으로 구속하게 되어 결과적으로 콘크리트의 강도 및 연성이 증가하는 효과를 얻을 수 있다. 이와 같은 관계식은 식 1과 같다.

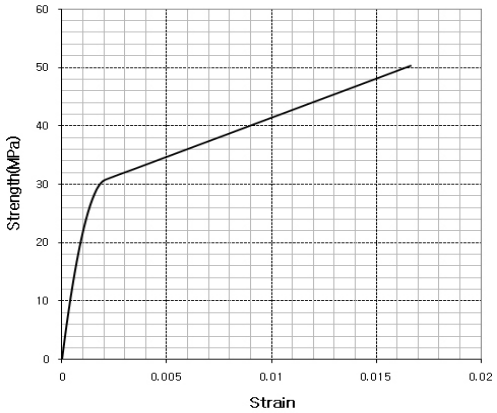


그림 1 구속된 콘크리트의 응력-변형율 곡선

$$\begin{cases} \sigma_c = E_c\epsilon_c - \dfrac{(E_c - E_2)^2}{4f_{co}}\epsilon_c^2 & 0 \le \epsilon_c \le \epsilon_t \\ \sigma_c = f_{co} + E_2\epsilon_c & \epsilon_t \le \epsilon_c \le \epsilon_{cc} \end{cases} \quad (1)$$

여기서,

$\epsilon_t = \dfrac{2f_{co}}{E_c - E_2}$: FRP관으로 구속된 콘크리트의 응력-변형율에서 두 번째 곡선이 시작되는 변형률

$E_2 = \dfrac{f_{cc} - f_{co}}{\epsilon_{cc}}$: 변곡점을 지난 곡선의 기울기, $f_{cc} = 0.5f_{co} + 2.0f_L$: 콘크리트의 압축강도 예측식

$f_L = \dfrac{2f_{ju}t_j}{D} \le 0.0015E_j$: FRP의 인장강도, 두께, 기둥의 직경에 따른 횡방향 유효 구속응력

$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}\left\{4.25 + 14.32\left(\dfrac{f_L}{f_{co}}\right)\right\}$: CFFT구조가 파괴될 때의 축방향 극한변형률

f_{co} : 콘크리트의 설계기준강도

3. CFFT구조의 설계프로그램

CFFT구조의 설계는 먼저, 적층각, 적층두께에 의한 FRP관의 재료물성을 추정하고, 이 FRP관에 의해 구속된 콘크리트의 응력-변형율 관계식을 통한 콘크리트의 압축강도를 추정함으로써 저항강도를 산정하여 최종적으로 설계하중에 대한 비교를 실시한다. 설계의 흐름도는 그림 2와 같다. 설계를 위한 기본 가정사항은 다음과 같다.

- 기둥은 부재의 길이방향으로 등단면이며 연속이고, 콘크리트의 압축에 대한 최대변형률은 0.003이다.
- 철근과 PS강재는 항복응력에 도달하기 전에는 철근의 응력은 변형률에 비례하고 항복이 도달한 후에는 완전소성거동을 한다.
- PS강재는 콘크리트와 부착되어 있지 않다.

3.1 제원 및 물성 입력

설계하중에 대한 단면을 가정하여 기둥의 단면제원을 입력한다. 그림 3의 좌측 상단에 입력내용이 있으며

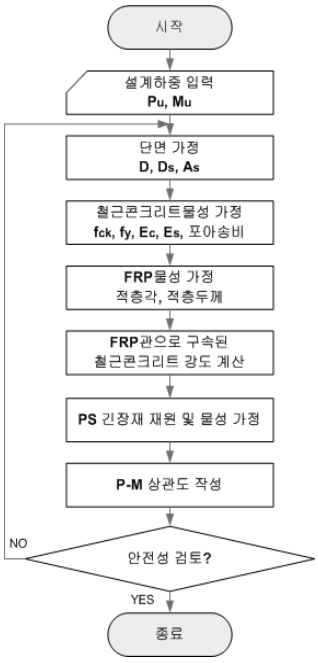


그림 2 프로그램 흐름도

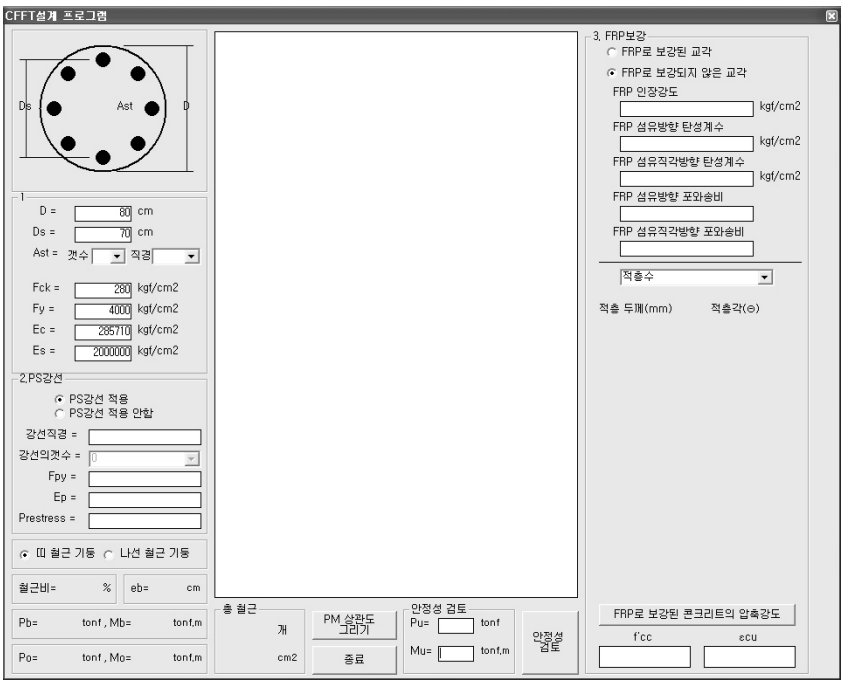


그림 3 프로그램의 입력화면

내용은 기둥직경, 철근 개수, 콘크리트의 압축강도, 철근의 항복강도, 콘크리트 및 철근의 탄성계수 등이다.

3.2 FRP관의 제원 및 물성 입력

FRP관로 보강된 콘크리트의 압축강도를 계산하기위하여 FRP관의 제원을 입력한다. FRP관의 특성상 섬유방향의 강도와 섬유 직각방향의 강도가 상이하므로 각 방향에 대한 정보를 따로 입력하게 된다. 이때 입력되는 내용은 FRP섬유의 인장강도, FRP의 섬유방향 및 섬유 직각방향의 탄성계수와 포와송비 그리고 각 층의 두께와 FRP의 적층각이다. FRP의 척층수는 1~10까지 선택을 할 수 있으며, 각 층에 대해서 각각 입력이 가능하다.

3.3 PS긴장재의 제원 및 물성 입력

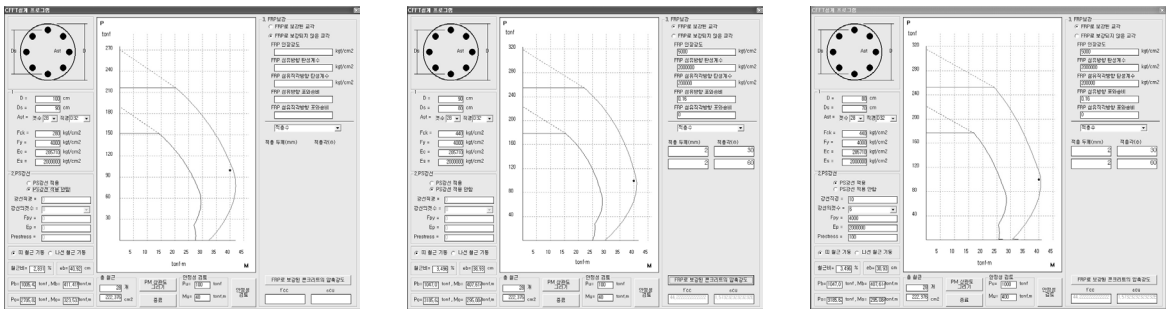
고강도콘크리트와 PS긴장재를 적용할 때 사용하게 되며 이를 위해 긴장재의 직경 및 개수, 강선의 항복강도, 탄성계수와 도입되는 긴장력을 입력할 수 있다. 그림 3의 좌측 중간화면이 입력내용이다.

3.4 P-M 상관도의 작도 및 안전성 검토

위의 모든 정보를 입력한 뒤 P-M 상관도 작도 버튼을 누르면 P-M 상관도를 작도 할 수 있으며 외부하중을 P-M상관도 내의 점으로 표현하여 외부하중에 대한 설계된 단면의 안전성을 판별할 수 있다.

4. 설계예 및 고찰

동일한 설계 축하중 및 모멘트에 대해 철근콘크리트기둥, CFFT기둥, 고강도콘크리트와 PS 긴장재를 도입한 CFFT기둥에 대한 단면설계를 수행하여 결과를 비교, 검토하였다. 각 단면에 가해지는 외부하중은 축력과



(a) 일반 철근콘크리트 (b) CFFT (c) PS긴장재를 적용한 CFFT

그림 4 설계결과의 P-M상관도

모멘트가 각각 100tonf과 40tonf·m로 가정하였다. 설계시 일반 철근콘크리트의 단면의 직경은 100cm로 가정하였으며 설계결과 CFFT는 동일 하중에 대해 단면의 축소 가능하며 프로그램의 타당성을 확인되었다.

4.1 일반 철근콘크리트 기둥

일반 철근콘크리트 기둥의 경우 단면의 직경을 100cm로 가정하였고 필요한 최소의 철근량으로 단면을 설계하였다. 콘크리트 피복의 두께는 5cm이며 콘크리트의 압축강도는 28MPa, 탄성계수는 28GPa이고 철근의 항복강도 및 탄성계수는 400MPa, 200GPa이다. 이러한 조건 내에서 외부하중을 만족하는 최소철근량은 28-D32로 그림 4의 P-M상관도에서 설계가 적합한 것으로 판정되었다.

4.2 CFFT 기둥

CFFT 기둥의 경우 일반 철근콘크리트 기둥에 사용된 재원과 동일한 물성값을 갖도록 설계에 반영하였다. FRP관의 인장강도는 500MPa이며 FRP의 섬유방향 및 섬유직각방향의 탄성계수는 각각 200GPa, 20GPa이다. FRP관의 적층수는 2층으로 각각 2.0mm의 두께로 래핑되어 있으며 배향각은 각각 30°, 60°이다. FRP관의 구속으로 콘크리트 압축강도는 44MPa까지 향상되었으며, 이로 인하여 단면의 직경이 90cm까지 축소할 수 있음을 그림 4와 같이 확인할 수 있다.

4.3 PS긴장재를 적용한 CFFT 기둥

CFFT기둥의 단면 설계시 향상된 콘크리트의 압축강도가 44MPa이므로 PS강선을 적용할 수 있으므로 단면의 직경을 80cm로 축소 할 수 있었다. 이때 강선의 개수는 6개이며 강선에 도입된 긴장력은 100tonf이다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부의 건설기술혁신사업의 연구비 지원(05건설핵심D09-차세대 시설물용 신재료 활용기술 개발연구)에 의해 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

송재준, 이영호, 황윤국, 권태규 (2006) 콘크리트 충전 FRP관의 일축압축 파괴거동에 관한 실험연구, 대한토목학회 정기학술대회 논문집 pp. 1426~1429

주형중, 이승식, 김영호, 박종화, 윤순종 (2008) 콘크리트 충전 FRP원통관의 압축거동에 관한 실험적 연구, 한국복합재료학회 21(3) pp.24~30