

복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선 예측

Stress-Strain Curve of Concrete Confined with both Steel Ties and FRP Composites

이 정 윤*
Lee, Jung-Yoon

황 현 복**
Hwang, Hyun-Bok

오 영 준***
Oh, Young-Jun

ABSTRACT

In recent years, the use of FRP composites to repair and strengthen existing reinforced concrete (RC) structures has been widely used. When the columns of existing RC structures are wrapped with FRP composites, the core concrete of such columns is confined not only by the FRP composites but also by the existing steel reinforcing ties (or spirals). Therefore, it is necessary to understand correctly the compressive response of concrete confined with both steel spirals and FRP composites in order to predict the behavior of such RC columns. This paper proposes a model to predict the compressive stress-strain curves of concrete confined with FRP and steel reinforcing ties.

1. 서론

강판 보강법에 비하여 자중이 가볍고, 시공이 간편하며, 부식에 강한 탄소섬유쉬트(Carbon Fiber Sheet, 이하 CFS)는 철근콘크리트 구조물의 보강재로 널리 사용되고 있다. CFS를 이용하여 기존의 철근콘크리트 기둥을 보강할 경우에 철근콘크리트 기둥은 이미 존재하는 횡보강 철근과 새롭게 추가된 CFS에 의하여 이중으로 횡보강 된다.

두 가지 재료에 의하여 횡보강된 기둥의 거동은 한 가지 재료 만에 의하여 보강된 기둥과 상이한 거동을 나타낸다. 횡보강 철근에 비하여 CFS 횡구속압이 클 경우에 기둥의 거동은 CFS만에 의하여 구속된 기둥의 거동과 유사하지만, CFS 횡구속압이 횡방향 철근의 횡구속보다 작을 경우에는 기둥의 거동이 횡방향 철근만으로 구속된 기둥의 거동과 유사하게 된다. 특히, 두 재료의 구속압이 유사할 경우에는 먼저 어느 한 재료가 항복(또는 파단)한 후에 기둥의 휨강성은 현저하게 저하한다.

* 정회원, 성균관대학교 건축공학과 조교수

** 정회원, 성균관대학교 건축공학과 석사과정

*** 정회원, (주)원우구조기술사 사무소

이 연구에서는 횡방향 철근과 CFS에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형을 곡선을 예측하기 위한 모델을 48개의 콘크리트 실린더 실험결과에 근거하여 제안하였다.

2. 실험계획 및 결과

2.1 실험체 계획

복합재료로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형을 관계를 고찰하기 단면의 형태(원형, 사각형), 횡구속 재료 (CFS, 철근, CFS+철근), 횡구속압을 변수로 하는 48개의 실험을 수행하였다. 원형 실험체는 지름 150mm이며 높이 300mm인 24개의 실린더를 제작하였고, 사각형 단면 실험체는 단면 148mm × 148mm이며 높이 300mm인 24개의 실험체를 제작하였다. 제작된 실험체의 재료 특성, 횡구속압, 압축강도 및 최대변형률은 참고문헌 1, 2에 상세히 기술되어 있다.

2.2 실험결과 및 고찰

횡방향구속철근과 탄소섬유로 동시에 구속된 콘크리트의 응력-변형을 곡선은 어느 한 재료만으로 구속된 콘크리트의 구속거동과 상이한 특성을 나타내었다. Fig. 1(a)는 f_{ls} 와 f_{lf} 의 합이 유사한 S2F1 ($f_{ls} + f_{lf} = 21.42$ MPa)과 S0F3 ($f_{ls} + f_{lf} = 19.8$ MPa)을 비교하였다. S2F1과 S0F3의 구속압의 합은 유사하지만, S2F1 시험체는 f_{ls} 가 f_{lf} 보다 크며($f_{ls} + f_{lf} = 14.81 + 6.61$), S0F3 시험체는 f_{ls} 이 f_{lf} 보다 작다($f_{ls} + f_{lf} = 0.0 + 19.8$). Fig. 1(a)에서 탄소섬유만으로 구속된 S0F3에 비하여 철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 S2F1의 최대변형률이 매우 크다. S0F3은 탄소섬유의 응력-변형을 특성에 의하여 최대점에 도달하기까지 압축응력이 일정하게 증가하지만, S2F1에서는 탄소섬유의 파단이 예측되는 변형률 $\epsilon_c = 0.02$ 이후에는 압축응력의 큰 증가 없이 변형률만이 증가하였다. 따라서 어느 한 재료를 기준으로 다른 재료의 구속효과를 중첩하여 평가하는 현재의 평가법은 실제의 구속효과와 상당한 차이를 나타낼 것으로 판단된다.

Fig. 1(b)는 시험체 S0F0, S4F0, S0F4 및 S4F4의 응력-변형을 관계를 비교하고 있다. Fig.2의 S0F0와 S4F0의 비교에서 4cm 간격으로 보강된 횡방향철근에 의하여 구속된 시험체 S4F0의 강도증가 (Δf_s)는 9.57MPa이다. 횡방향 구속철근이 없이 탄소섬유만에 의하여 구속된 S0F0와 S0F4의 비교에서 4매의 탄소섬유에 의하여 구속된 시험체 S0F4의 강도증가 (Δf_f)는 49.2MPa이다. 4cm 간격으로 보강된 횡방향구속철근과 4매의 탄소섬유에 의하

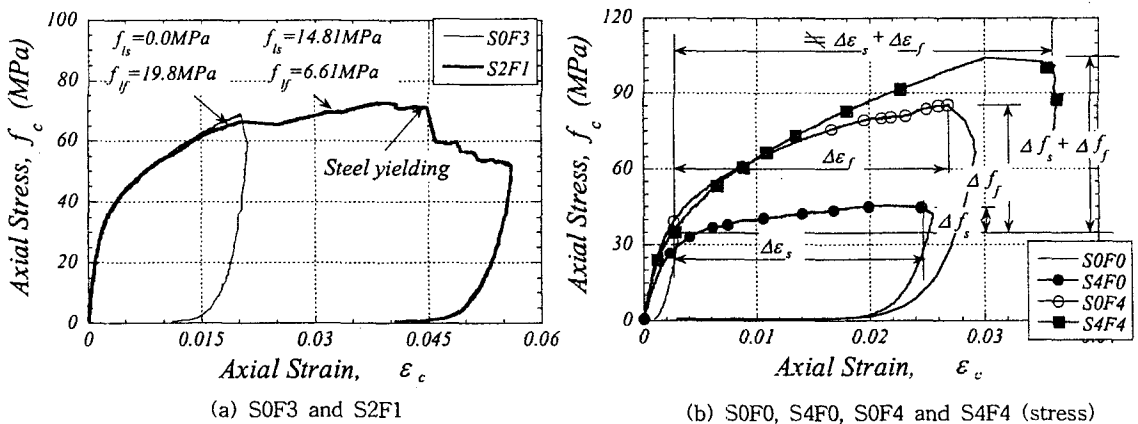


Fig. 1 Comparison of the axial stress-axial strain curves of cylinders

여 보강된 S4F4의 강도증가($\Delta f_s + \Delta f_f$)는 67.95MPa이며, 이 값은 S4F0와 S0F4 시험체의 강도증가인 9.57MPa와 49.2MPa를 합한 값과 유사하다. 그러므로 두 가지 재료에 의하여 구속된 시험체의 압축강도는 현재 일반적으로 사용하고 있는 방법과 같이 각각의 재료에 의하여 증가된 압축강도를 중첩하여 사용할 수 있다.

Fig. 1(b)에서 S2F4의 최대변형률은 S2F0의 구속변형률($\Delta \epsilon_s$)과 S0F4의 구속변형률($\Delta \epsilon_f$)를 더한 값과 큰 차이를 나타내며, S2F4의 구속변형률은 S2F0의 구속변형률($\Delta \epsilon_s$)과 S0F4의 구속변형률($\Delta \epsilon_f$)중에서 큰 값인 $\Delta \epsilon_s$ 와 유사하다. 실험결과는 횡방향 철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 최대변형률은 각각의 재료에 의하여 구속된 시험체의 최대변형률 중 큰 값에 의하여 지배받고 있음을 나타내었다.

사각형 단면의 실험체도 원형단면의 실험체와 유사한 결과를 나타냈다.

3. 구속된 콘크리트의 압축응력-변형률 관계

띠철근(또는 나선형철근)과 CFS에 의하여 동시에 구속된 40개의 콘크리트 압축실험에 근거하여 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$f_c = f_{ck} + \frac{(f_{cs} - f_{ck})(\epsilon_c - \epsilon_{cs})^{0.7}}{(\epsilon_{cs} - \epsilon_{co})^{0.7}} \quad \epsilon_c > \epsilon_{cs} \quad (1-a)$$

$$f_c = f_{cs} + \frac{(f_{cu} - f_{cs})(\epsilon_c - \epsilon_{cs})^{0.7}}{(\epsilon_{cu} - \epsilon_{cs})^{0.7}} \quad \epsilon_c > \epsilon_{co} \quad (1-b)$$

여기서, $f_{fY} \leq f_{fs}$ 일 때, $\epsilon_{cs} = \epsilon_{cu}(1 - 2(f_{fY}/f_{fs}) + 2(f_{fY}/f_{fs})^2)$, $f_{fY} > f_{fs}$ 일 때 $\epsilon_{cs} = \epsilon_{cu}$ 이다. 또한, $f_{cs} = (\epsilon_{cs}/\epsilon_{cu})^{0.1} f_{cu}$. Fig.1(a)에서 두 가지 재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 어느 한 재료가 항복함에 의하여 곡선의 기울기가 감소하여, 식(1)에서는 두 재료의 횡구속압의 비(f_{fY}/f_{fs})에 의하여 응력-변형률곡선을 구분하였다.

Fig. 1(b)에서 횡방향 철근과 탄소섬유에 의하여 동시에 구속된 콘크리트의 최대변형률은 각각의 재료에 의하여 구속된 시험체의 최대변형률 중 큰 값과 유사하였다. 따라서 두 가지 재료에 의하여 구속된 콘크리트의 최대변형률을 횡구속압의 비(f_{fY}/f_{fs})의 영향을 고려하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\epsilon_{cu} = \epsilon_{co} \left(2 + 13 \frac{k_f f_{fY} + k_s f_{fs}}{f_{ck}} \right) \quad (2)$$

원형단면 또는 사각형 단면이며 $f_{fY} \leq f_{fs}$ 일 때 $k_s = (2 - f_{fY}/f_{fs})$, $f_{fY} > f_{fs}$ 일 때 $k_s = 1$ 이다. 원형단면일 때 $k_f = 1$ 이며, 사각형 단면이며 $f_{fY} \leq f_{fs}$ 일 때 $k_f = (f_{ck}/f_{fY})^{0.3}$, $f_{fY} > f_{fs}$ 일 때 $k_f = 1$ 이다.

두 가지 재료에 의하여 구속된 시험체의 압축강도는 각각의 재료에 의하여 증가된 압축강도를 중첩한 것과 유사하였으므로, Lam 등³⁾에 의하여 제안된 평가식을 사용하였다.

$$f_{cu} = f_{ck}(1 + 2(f_{fs} + f_{fY})/f_{ck}) \quad (3)$$

Fig. 2는 원형단면시험체 S2F2와 사각형단면 시험체H2F2의 축방향응력-변형률관계를 식(1)과 기존 평가식의 계산결과와 비교하고 있다. Fig.2에서 철근 횡구속압에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률관계를 예측하기 위하여 제안된 Mander 등의 식⁴⁾, 섬유에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 예측하기 위하여 제안된 Mirmiran 등의 식⁵⁾ 및 Lam 등의 식³⁾은 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률곡선과 차이가 있었다. 이는 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력 기울기는 철근이 항복한 후에 감소하기 때문이다. Saafi 등⁶⁾은 횡방향변형률(ϵ_l)에 의하여 축방향응력과 축방향변형률을 예측하였다. Saafi 등의 식은 기존식에 비하여 계산

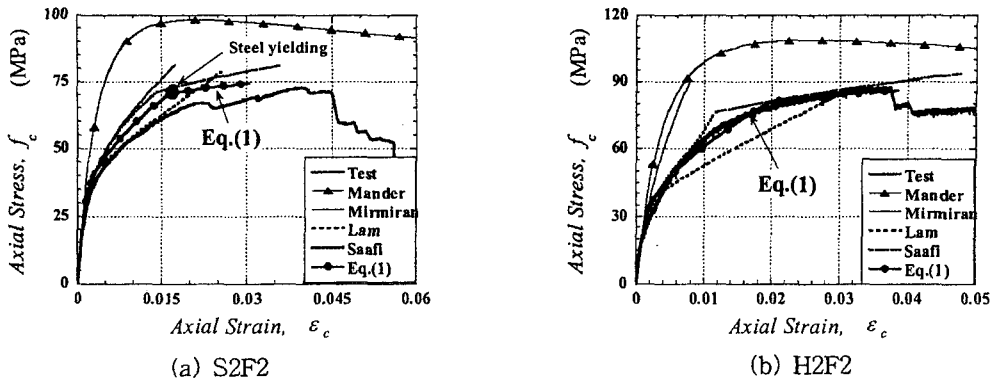


Fig. 2 Comparison between observed and predicted axial stress-axial strain curves of specimens

과정이 복잡하지만 구속재료의 응력-변형률 관계의 특성을 반영할 수 있다. Saafi 등의 식에서는 ϵ_l 을 점차 증가시키면서 각 단계의 ϵ_l 에 상응하여 변화하는 횡구속압(f_l)을 계산한다. 따라서 횡방향철근의 항복점을 예측하여 Fig. 2와 같이 횡방향철근이 항복한 후에 감소하는 복합재료로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 실험결과에 유사하게 예측하였지만, 계산과정이 복잡하였다.

최대변형률을 횡구속압의 비(f_{lf}/f_{ls})의 영향을 고려한 식(1)은 Saafi 등의 식보다 계산과정이 간단하며 Fig. 2와 같이 복합재료로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 유사하게 예측하였다.

4. 결론

띠철근과 CFS로 동시에 구속된 48개의 콘크리트 시험체의 실험결과에 근거하여 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선을 예측하였다.

(1) 최대변형률을 횡구속압의 비(f_{lf}/f_{ls})의 영향을 고려한 식(1)은 복합재료로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 유사하게 예측하였다.

(2) Mander 등의 식, Mirmiran 등의 식 및 Lam 등의 식은 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력-변형률곡선과 차이가 있었다. 이는 복합재료에 의하여 구속된 콘크리트의 응력 기울기는 철근이 항복한 후에 감소하기 때문이다. Saafi 등의 식은 기존식에 비하여 계산과정이 복잡하지만 구속재료의 응력-변형률 관계의 특성을 반영하였다.

감사의 글

본 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다. (과제번호 : KRF-2002-003-D00400)

참고문헌

- 이정운, 오영준, 정훈식, "나선형 철근 및 섬유에 의하여 동시에 구속된 원형 콘크리트 실린더의 거동", 한국콘크리트학회 논문집, 제16권 2호, 2004. 4, 출판예정
- 오영준, 황현복, 이정운, "복합재료에 의하여 구속된 콘크리트 기둥의 응력-변형률 관계에 대한 실험적 연구," 콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제 15권 2호, 2003, pp.194~197.
- Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T., and Lam, L., "FRP-Strengthened RC Structures," John Wiley & Sons, Ltd, 2002, 245pp.
- Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, Aug. 1988, pp. 1804-1826.
- Samman, M., Mirmiran, A., and Shahawy, M., "Model of Concrete by Fiber Composites," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 124, No. 9, Sep. 1998, pp. 1025-1031.
- Saafi, M., Toutanji, H. A., and Li, Z., "Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes," *ACI Material Journal*, ACI, Vol. 96, No. 4, July-Aug. 1999, pp. 500-509.