

하중이력에 따른 탄소섬유로 보강된 RC보의 휨 거동

윤태호¹, 김진상^{2*}

¹창원대학교 건축학부, ²인제대학교 건축학과

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beam Strengthened with Carbon Fiber Sheet under Load History

Tae-Ho Yoon¹, Jin-Sang Kim^{2*}

¹School of Architecture, Changwon National University

²Department of Architecture, Inje University

요약 본 연구에서는 합리적인 보강설계를 위하여 기존 철근콘크리트 보에 탄소섬유시트 보강시 하중이력에 따른 휨보강 효과를 분석하였다. 실구조물에서는 다양한 하중이력을 겪은 철근콘크리트보에 보강을 하게 되나 보강시기에 따른 구조물과 보강재료의 초기상태가 고려되지 않으므로 구조물의 안전적 측면과 경제적 측면으로 문제점을 발생시킬 수 있는 요인이 된다. 다양한 하중이력을 거친 RC 보의 변형률 상태를 고려하여 탄소섬유시트 보강에 따른 거동변화를 분석하였다. 휨보강후 거동에 영향을 미치는 변수들에 대하여 보강대상 부재의 하중이력의 영향을 고려한 비선형 단면해석결과 탄소섬유 휨보강보의 보강 후 구조적 성능은 하중이력에 따라 달라지는 것으로 나타났다. 탄소섬유 휨보강보의 휨강도는 하중이력에 크게 영향을 받으므로 설계시 반드시 고려하여야 한다.

Abstract This study examined the flexural strength of CFS reinforced concrete beams with various load histories. The RC beams to be reinforced by CFS have undergone various loading histories but neglecting the loading history results in a few problems in structural safety and cost. Structural behavior of CFS-strengthened RC beams were analyzed considering the strain status of RC beams under loads at the time of CFS strengthening. Nonlinear section analysis showed that the flexural strength of CFS-strengthened RC beams depends on the load history of the RC beams. From the result of this analysis, the flexural strength of a CFS-strengthened concrete beam is affected considerably by the load history and should be considered in CFS reinforcement.

Key Words : CFS reinforcement, flexural strength, load history, nonlinear section analysis

1. 서론

경제성, 시공성, 내구성, 조형성 등의 장점을 가진 철근콘크리트 구조는 가장 널리 사용되는 구조용 재료이며, 각종 건축물 외에도 교량, 항만, 해양 구조물, 지하 구조물 등에 널리 사용되고 있다. 그러나 철근콘크리트 구조물의 설계 시 시공 중의 설계변경, 시공불량, 용도변경, 지역의 환경변화, 재료의 노후화 등 설계 시 예측치 못한

원인으로 내구성이 감소하게 되는 것이 일반적이다. 특히 최근에 발생된 철근콘크리트 구조물의 붕괴 및 부실 사고 등으로 인해 보수 및 보강공법에 대한 관심이 고조되어, 기존 철근콘크리트 구조물의 안전성과 보수·보강에 대한 연구가 다각적으로 진행 중에 있다. 철근콘크리트 구조물에 대한 보수 및 보강공법은 안전성과 구조적인 적절성, 사용성 및 미관, 균열 및 박리과파 등 내구성 저하의 정도에 따라 선택, 적용된다. 철근콘크리트 구조

본 논문은 2013학년도 인제대학교 학술연구조성비 보조에 의한 것임.

*Corresponding Author : Jin-Sang Kim(Inje Univ.)

Tel: +82-55-320-3556 email: archkjs@inje.ac.kr

Received July 31, 2014

Revised August 21, 2014

Accepted January 8, 2015

물의 보강공법에는 강재를 이용한 포스트텐션 공법, 강판부착공법, 복합재료판의 부착공법, 숏크리트에 의한 합성공법, 프리스트레스 도입공법, 단면증설공법 등 다양한 기술이 개발되어 적용되고 있다[1,2]. 또한 최근에는 탄소, 아라미드, 유리 등의 신소재를 섬유형태로 가공한 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet), 아라미드섬유시트(Aramid Fiber Sheet), 유리섬유시트(Glass Fiber Sheet)의 에폭시 접착 보강공법들이 많이 적용되고 있다[3]. 특히 부착식 보강공법의 경우 신뢰성 있는 보강효과를 기대할 수 있을 뿐 아니라, 보수시공이 타 공법에 비해 수월하고 시공 후에도 부재치수의 변화가 적기 때문에 토목 및 건축구조물에 널리 적용되고 있다. 이러한 부착식 보강공법 중 최근까지 많이 사용되고 있는 강판보강공법은 1964년 남아프리카 공화국에서 처음 적용된 공법으로, 재료의 구입이 용이하고 경제적인 뿐 아니라 잘 알려진 기존 재료의 성질로 인하여 적용하기 쉬운 측면이 있으나, 넓은 면적을 보강해야 할 경우에는 강판의 자중으로 인하여 취급의 불편, 시공상의 문제점, 내화성능의 저하, 강판의 부식 등에 의해 보강판의 탈락현상에 의해 내구성에 큰 영향을 미치는 단점이 있다[4].

이에 반해 FRP계 섬유판인 탄소섬유시트는 철근 함복강도의 약 10배 정도의 높은 인장강도를 가지면서 탄성계수는 유사하며, 철에 비해 경량이면서 부식의 염려가 없으며, 시공이 간단하며 내후성이 우수한 장점이 있다.

탄소섬유보강보의 휨강도를 산정함에 있어 많은 방법들이 제시되어 왔으나, 실구조물에서는 다양한 하중이력을 겪은 철근콘크리트보에 보강을 하게되나 부착시기에 따른 구조물과 보강재료의 초기변형률 차이가 고려되지 않으므로 기존의 보강량 산정식은 적절치 못한 보강재의 보강량을 제시할 가능성이 높다. 이는 구조물의 안전적 측면과 경제적 측면으로 상당한 손실을 발생시킬 수 있는 요인이 된다[5].

따라서 본 연구에서는 합리적인 보강설계를 위하여 기존 철근콘크리트 보의 하중이력에 따라 탄소섬유시트의 보강시 휨보강효과를 분석하고자 한다.

이를 위하여 휨보강후 거동에 영향을 미치는 변수들에 대하여 보강대상 부재의 하중이력의 영향을 고려한 비선형 단면해석을 수행하여 탄소섬유 휨보강시 하중이력에 따른 보강보의 거동특성 및 보강 효과를 분석하였다.

2. 해석모델

2.1 해석의 가정

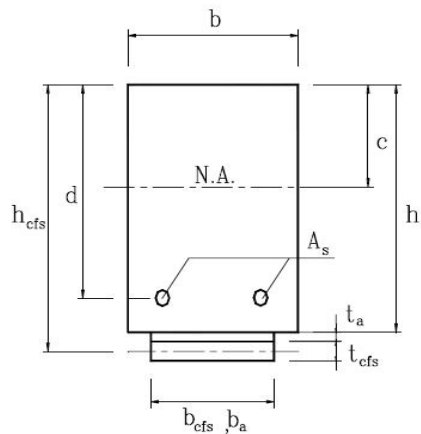
탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보강보의 하중이력에 따른 구조적 거동의 차이는 잔류변형률로 고려하여 보강전 인장철근과 압축콘크리트의 응력상태에 따라 다음의 4가지 보강단계로 구분하여 해석을 수행하였다.

- 1) 비가력 보강단계 ($\epsilon_s = 0, \epsilon_c = 0$)
- 2) 인장철근 항복전 보강단계
($\epsilon_s < \epsilon_y, \epsilon_c < \epsilon_0$)
- 3) 인장철근 항복후 보강단계
($\epsilon_s > \epsilon_y, \epsilon_c < \epsilon_0$)
- 4) 손상이 심한 상태의 보강단계
($\epsilon_s > \epsilon_y, \epsilon_c > \epsilon_0$)

단, ϵ_0 는 Hognestad[6]의 모델에서 콘크리트의 응력이 f_{ck} 일 때의 변형률이다. 탄소섬유시트와 보는 완전히 부착하여 거동하는 것으로 가정하였다.

2.2 재료의 적용모델

본 연구에서 사용된 콘크리트와 철근의 재료모델은 선행연구[9]와 동일한 모델을 사용하였으며, Table 1과 같다. 탄소섬유는 Fig. 1과 같이 보의 하부에 부착하여 휨보강하는 것으로 가정하였다.



[Fig. 1] Section of beam reinforced by CFS

[Table 1] Material models

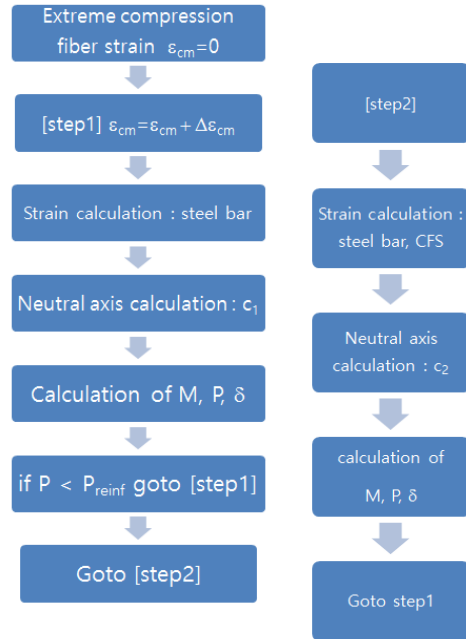
Material/ reference	model curve
concrete (compression)/ Hognested[6]	
concrete (tension)/ Scordelis[7]	
re-bar/ Hu[8]	
CFS/ Yoon[9]	

2.3 비선형 해석 알고리즘

비선형 해석에 의한 보강시점에 따른 보강단면의 해석 알고리즘은 선행연구[9]를 참고하였으며, 이를 요약하면 Fig. 2와 같다.

먼저 무보강 콘크리트의 압축연단에서의 변형률 ϵ_{cm} 을 가정 한 후 변형률 적합조건을 이용하여 철근 및 탄소섬유시트의 변형률을 구한다. 계산된 변형률로부터 콘크리트의 응력블록계수(α, k_3) 및 도심계수(γ, k_4),

그리고 콘크리트, 철근과 탄소섬유의 내력을 계산하고, 반복해석기법을 이용하여 평형조건식을 만족하는 중립축 c_1 을 구한다. 계산된 중립축을 이용하여 공칭모멘트 M , 중앙부 처짐 δ , 외부하중 P 를 계산하고 출력한다.



[Fig. 2] Flow chart of section analysis

여기서 계산된 외부하중 P 가 보강재 보강시의 하중 P_{reinf} 이상이면, 보강 후 거동으로 해석된다.

보강 후 해석에서는 무보강보에서와 마찬가지로 변형률 적합조건을 이용하여 구성요소들의 변형률을 구하고, 내력에 대한 평형조건식에서 반복해석기법으로 중립축 c_2 을 구한다. 단, 보강시 하중에 따라 인장철근의 항복유무와 압축콘크리트의 변형률이 항복변형률 ϵ_{cy} 이상인지 확인하고, 잔류변형이 발생한 경우는 구성방정식에 의해 응력을 계산한다. 계산된 중립축을 이용하여 공칭모멘트 M , 중앙부 처짐 δ , 외부하중 P 를 계산하고 출력한다.

또한 각 하중단계에서 외부하중 P 가 탄소섬유시트의 극한변형률에 도달할 시의 하중에 도달하면, 탄소섬유시트가 하중을 받지 못하는 것으로 가정하여 탄소섬유

의 응력 σ_{cfs} 를 0으로 두고 해석한다.

이후 보강 전 해석과 동일한 과정으로 콘크리트의 압축연단 변형률 ϵ_{cm} 을 최대변형률 0.0038까지 일정한 증가량 $\Delta\epsilon_{cm}$ 으로 증가시켜 해석을 수행한다.

3. 보강단면해석

3.1 해석대상

해석 대상 보는 현재 일반적인 설계 범위의 치수로써 폭 B는 400mm로 고정하고 전체 높이를 600mm, 700mm, 800mm로 하였으며, 콘크리트 압축강도 $f_{ck} = 24MPa$, $f_y = 400MPa$, 인장철근비는 0.2%, 0.6%, 1.0%, 1.4%로 실용적인 범위를 포함하도록 결정하였다. 또한, 보강 후 탄소섬유시트의 보강량을 포함한 보강철근비가 최대 철근비 $\rho_{max} = 0.75\rho_b$ 를 넘지 않도록 하여 인장철근의 항복이 압축콘크리트의 압축파괴보다 선행하도록 하였다.

보강에 사용될 탄소섬유시트의 치수와 물성치 또한 현재 실무적으로 가장 널리 적용되는 값으로 결정하였으며, Table 2와 같다.

[Table 2] Properties of CFS

thickness of CFT(mm)	width (mm)	Young's Modulus (MPa)	Max. strain (%)	Tensile strength (MPa)
1.1	400	235,000	1.5	3550

보강 단계에 따른 탄소섬유시트 보강보의 보강후 거동특성과 보강효과를 비교·분석하기 위해 Table 3과 같이 해석 변수들을 설정하고, 변수해석을 실시하여 해석 결과를 고찰하였다.

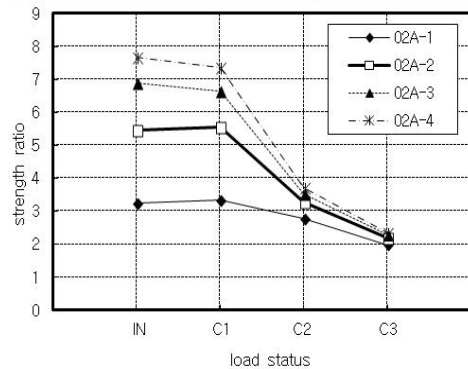
[Table 3] Analysis models

tensile steel ratio	section (b×h(mm))	No. of sheets	load status
0.2 %	A type (400×600)	1~4	no load(IN) before yield(C1) after yield(C2) severe load(C3)
0.6 %	B type (400×700)		
1.0 %	C type (400×700)		
1.4 %	C type (400×800)		
model example	0.2 A - 1 - IN		

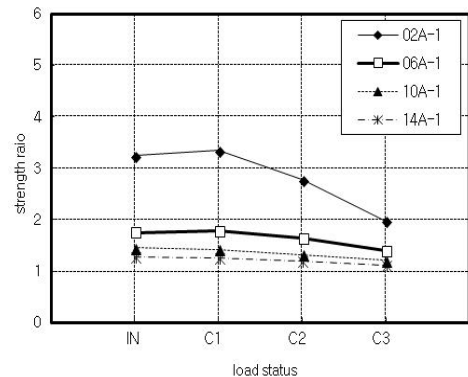
3.2 보강단계별 보강효과 비교

3.2.1 보강단계별 최대내력비

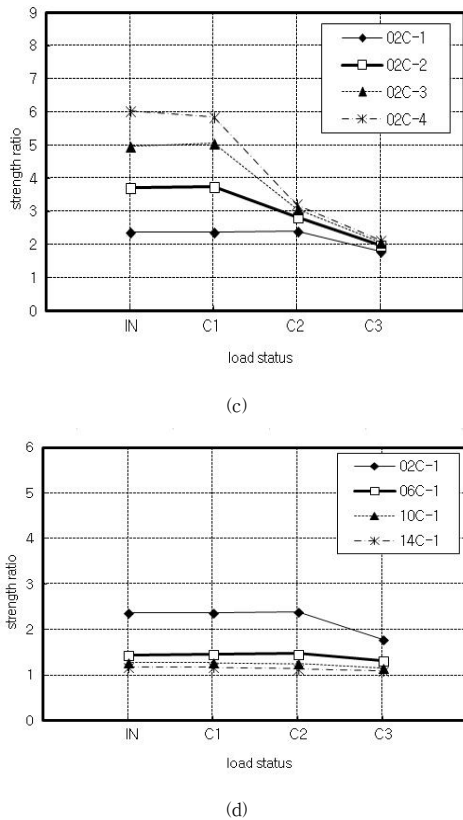
다양한 하중이력을 거친 철근콘크리트보의 탄소섬유 함보강시 휨내력의 변화를 Fig. 3에 도시하였다. 무보강 보에 대한 보강단계별 최대내력비는 보강단계에서 시트의 파단으로 파괴될 경우, 최대내력이 다소 증가하였으나, 전체적으로 보강단계가 늦을수록 감소하며, 특히 철근 항복후 보강시 급격한 내력의 저하를 나타내었다. 또한 이러한 보강단계별 최대내력의 저하는 보강 겹수가 많을수록, 인장철근비가 낮을수록 증가하였으며, 전체 해석변수의 범위에서 보강겹수에 따른 내력저하폭이 더 크게 나타나, 인장철근비와 보강겹수에 따른 보강단계별 내력저하는 보강겹수의 영향을 더 받는 것으로 나타났다. 또한 인장철근비가 높을 경우, 보강단계별 최대내력이 거의 근접한 값을 나타내었는데, 이는 인장철근비가 높아질수록 보강시점 이후 압축파괴까지의 탄소섬유시트가 내력을 부담하는 범위가 감소하기 때문이다.



(a)



(b)



[Fig. 3] Flexural Strength ratio
 (a) strength ratios with no. of sheets(section A)
 (b) strength ratios with steel ratio(section A)
 (c) strength ratios with no. of sheets(section C)
 (d) strength ratios with steel ratio(section C)

한편, 단면치수비에 따른 내력비는 단면치수비가 증가할수록 비가력시와 가력단계별 동일한 하중비(보강시 가력하중/무보강보의 항복하중)에서 내력비가 낮아지며, 보강단계에 따른 내력비의 변화폭은 감소하였다.

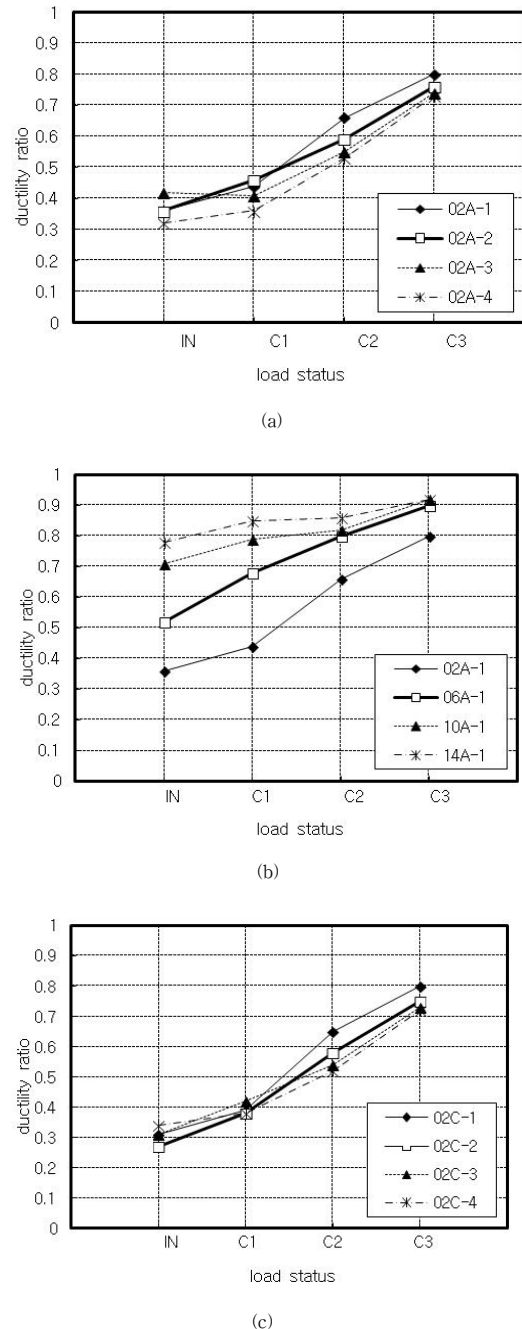
3.2.2 보강단계별 연성지수비

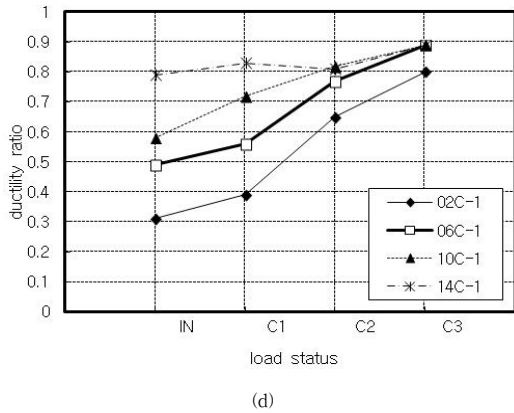
인장철근비와 보강접수 변화에 따른 무보강보에 대한 보강단계별 연성지수비를 Fig. 4에 나타내었다.

보강단계별 보강보의 연성지수는 무보강보에 비해 모두 감소하며, 보강단계에 따른 연성지수는 보강단계가 늦어질수록 증가하였다.

동일한 보강단계에서의 연성지수는 보강접수가 많을수록, 인장철근비가 적을수록 감소비가 크게 나타났다. 또한 보강단계가 늦어질수록 보강접수에 따른 연성지수

의 차이는 근사한 값을 나타낸 반면, 인장철근비에 따른 연성지수의 차이는 감소하였으며, 인장철근비가 낮을수록 보강단계에 따른 연성지수의 증가비율이 높게 나타났다. 한편, 단면치수비에 따른 연성지수의 변화는 단면치수비가 증가할수록 감소비가 다소 증가하나, 그 증가량은 미소하였다.





[Fig. 4] Flexural ductility ratio
 (a) CFS strain ratios with no. of sheets(section A)
 (b) CFS strain ratios with steel ratio (section A)
 (c) CFS strain ratios with no. of sheets(section C)
 (d) CFS strain ratios with steel ratio (section C)

3.2.3 탄소섬유시트의 변형률

다양한 하중이력을 거친 철근콘크리트보의 탄소섬유 휨보강 후 파괴하중에 이르렀을 때 탄소섬유시트의 변형률의 변화를 Fig. 5에 도시하였다.

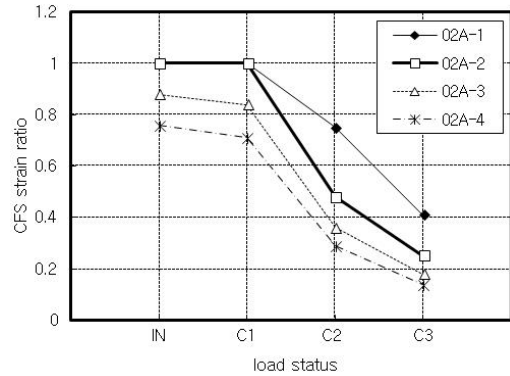
Fig. 5(a)는 A type에서 인장철근비 0.2%일 때 보강겹수 변화와 보강겹수 1겹일 때 인장철근비 변화에 따른, Fig. 5(b)는 보강겹수 1겹일 때 인장철근비 변화에 따른 보강단계별 탄소섬유시트의 변형률비(파단시 변형률/최대내력시 변형률)를 나타낸다. Fig. 5(b)에서 보이듯이 보강단계가 늦어질수록 시트의 변형률비가 감소하며, 동일 보강단계(동일 가력비)에서의 시트 변형률비는 보강겹수와 인장철근비가 적을수록 높게 나타난다.

Fig. 5(c),(d)는 인장철근비가 0.2%이고, 보강겹수가 1겹과 4겹일 때, 단면치수비에 따른 보강단계별 시트의 변형률비를 나타낸다. Fig. 5(d)에서 단면치수비가 높을수록 시트의 파단에서 압축파괴로 파괴모드가 변화하는 보강단계(가력비)가 증가하므로, 동일한 인장철근비에 대해 동일 보강단계에서의 변형률비가 증가하였다. 또한, 보강겹수가 많을수록 보강단계에 따른 변형률비의 감소 폭이 증가하는 것을 알 수 있다.

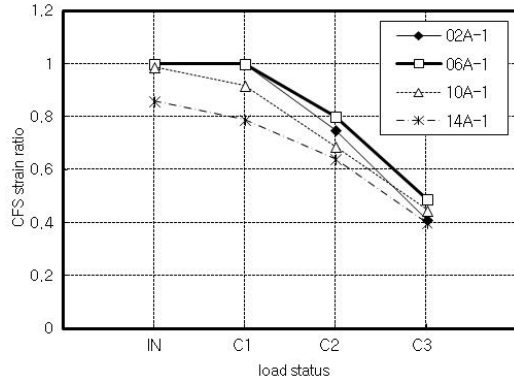
시트의 변형률비가 높다는 것은 동일한 보강량에 대해 사용 효율이 높은 것으로 판단할 수 있다.

따라서, 이러한 보강량의 사용 효율을 고려할 때, 동일 보강량에 대해 보강시기가 늦을수록 변형률비가 낮아지므로, 이러한 보강단계에 따른 초기변형률과 잔류용력을

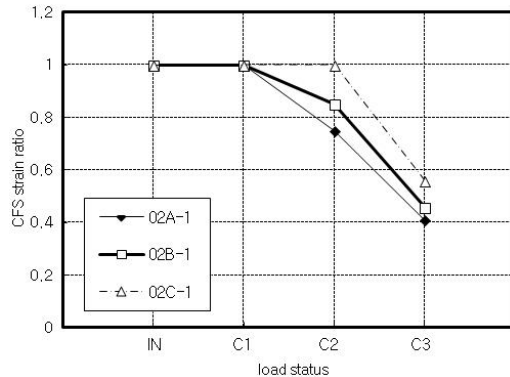
고려하지 않은 설계 보강량은 실제 소요 보강량에 비해 과보강의 우려가 있는 것을 알 수 있다. 특히 보강단계에 따라 파괴모드가 시트의 파단에서 압축콘크리트의 압축 파괴로 변화할 경우, 이러한 사용 효율을 고려하여 보강량을 감소시킬 필요가 있는 것으로 사료된다.



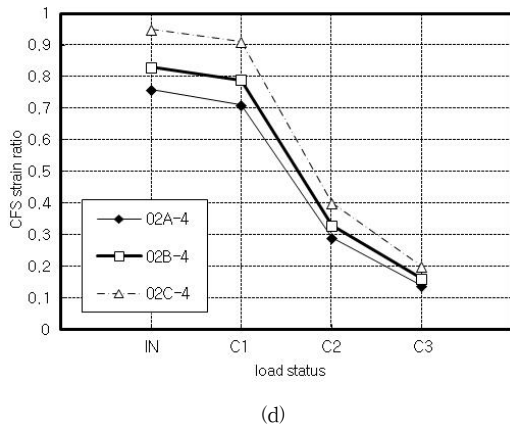
(a)



(b)



(c)



[Fig. 5] Strain ratios of CFS
 (a) CFS strain ratios with no. of sheets(section A)
 (b) CFS strain ratios with steel ratio (section A)
 (c) CFS strain ratios with section type(sheet 1)
 (d) CFS strain ratios with section type(sheet 4)

4. 결론

본 연구에서는 합리적인 탄소섬유 휨보강설계를 위하여 기존 철근콘크리트 보의 하중이력에 따라 탄소섬유시트의 보강시 휨보강 효과를 분석하였다.

철근콘크리트 보의 탄소섬유시트 보강시 보강대상 부재의 하중이력의 영향을 고려한 비선형 단면해석 프로그램을 사용하여, 보강 후 거동에 영향을 미치는 변수들을 고려한 해석을 수행하고, 보강시 하중이력에 따른 보강보의 거동특성 및 하중상태에 따른 휨강도를 계산하고 휨보강 효과를 분석하였다.

보강겹수, 인장철근비, 단면치수비를 변수로 한 변수 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보강단계별 최대내력의 저하는 보강 겹수가 많을수록, 인장철근비가 낮을수록 증가하였으며, 전체 해석변수의 범위에서 보강겹수에 따른 내력저하폭이 더 크게 나타나, 인장철근비와 보강겹수에 따른 보강단계별 내력저하는 보강겹수의 영향을 더 받는 것으로 나타났다.
2. 단면치수비에 따른 내력비는 단면치수비가 증가할수록 비가력시와 보강단계별 동일한 하중비(보강시 가력하중/무보강보의 항복하중)에서 내력비가 낮아지며, 보강단계에 따른 내력비의 변화폭은 감소

하였다.

3. 보강단계별 보강보의 연성지수는 무보강보에 비해 모두 감소하며, 보강단계에 따른 연성지수는 보강단계가 늦어질수록 증가하였다.
동일한 보강단계에서의 연성지수는 보강겹수가 많을수록, 인장철근비가 적을수록 감소비가 크게 나타났다. 또한 보강단계가 늦어질수록 인장철근비가 낮을수록 보강단계에 따른 연성지수의 증가비율이 높게 나타났다.
4. 보강단계가 늦어질수록 시트의 변형률비가 감소하며, 동일 보강단계(동일 가력비)에서의 시트 변형률비는 보강겹수와 인장철근비가 적을수록 높게 나타났다. 단면치수비가 높을수록 동일한 인장철근비에 대해 동일 보강단계에서의 변형률비가 증가하였다. 또한, 보강겹수가 많을수록 보강단계에 따른 변형률비의 감소폭이 증가하는 것을 알 수 있다.
5. 보강단계에 따라 파괴모드가 시트의 파단에서 압축 콘크리트의 압축파괴로 변화할 경우, 이러한 사용효율을 고려하여 보강량을 감소시킬 필요가 있는 것으로 사료된다.

References

- [1] Wan-Chul Choi, et al., "Repair and rehabilitation of concrete structures", Journal of Korean Concrete Institute, Vol.47 No.6, pp. 5-12, Dec., 1995.
- [2] Jong-Yeol Lee, et al., "Recent development of structural repair and rehabilitation materials", Journal of Korean Concrete Institute, Vol.47 No.4, pp. 34-45, April, 1995.
- [3] Jong-Sung Shim, "The Currency of Recent Studies for the Repair and Rehabilitation of R/C Structures ", Journal of Korean Concrete Institute, Vol.7 No.6, pp. 64-73, Dec., 1995.
- [4] T. M. Roberts, and H. Haji-Kazemi, "Theoretical Study of the Behaviour of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Binded Steel Plates", Proceedings, The Institution of Civil Engineers, Vol. 87, Part 2, pp 39~55, 1989.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1680/iicep.1989.1452>
- [5] Yeong-Soo, Shin., and Geon-Ho, Hong., "Flexural Behaviour of RC Beams Strengthened with Steel Plates/Carbon Fiber Sheets(CFS) under Pre-Loading Conditions", KCI Concrete Journal, Vol. 12, NO. 1, pp 69~

- 77, 2000. 1.
- [6] E. Hognestad, N. W. Hanson, "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", ACI Journal, Vol. 52, No. 4, pp. 475~479, December 1955.
- [7] Scordelis, C. Alexander, C. S. Lin, "Nonlinear Analysis of RC Sheels of Gernal Form Proceeding", ASCE, Vol. 101, DT3, pp. 523~538, Mar., 1975.
- [8] Hu, M. T., and Schmobrich, W. C., "Nonlinear finite element analysis of Reinforced Concrete and Sheels under Monotonic Loading", Computer & Structure, Vol. 38, No. 516, pp. 637~651, 1991.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949\(91\)90015-E](http://dx.doi.org/10.1016/0045-7949(91)90015-E)
- [9] Yoon, T. H., Kang K. S., "Analytical Study on the Flexural Strength of CFS Reinforced Concrete Beams under Service Loads", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation society, Vol.12, No.8, pp.3745~3751, 2011
-

윤 태 호(Tae-Ho Yoon)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 건축학부 교수

<관심분야>

내진설계, 비선형해석

김 진 상(Jin-Sang Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 건축학과 (공학사)
- 1989년 8월 : 서울대학교 건축학과 (공학석사)
- 1997년 8월 : 서울대학교 건축학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 인제대학교 건축학과 교수

<관심분야>

건축구조 시스템, 내진설계