

강판 및 CFS를 사용한 단면증설된 보의 휨보강에 관한 해석적 연구

Analytical Study on the Flexural Behaviour of Beams with
Enlarged Section using Steel Plate or Carbon Fiber Sheets(CFS)

심종성*
Jongsung Sim

이차돈**
Cha-Don Lee

오홍섭***
Hong-Seob Oh

황성욱****
Sung-Uk Hwang

Abstract

An analytical method based on the nonlinear layered finite element method is developed to simulate the load-deflection behavior of strengthened beams. Beams considered in this study are the ones strengthened either with external steel plate or Carbon Fiber Sheets(CFS) bonded to the overlay soffit. The theoretically obtained load-deflections and strains of the strengthened beams are compared to the corresponding experimental values. Parametric studies are, then, performed using the developed model to investigate the effects of design variables on the flexural behavior of the strengthened beams. Simply supported beams under monotonically increasing loads are considered exclusively.

1. 서 론

철근콘크리트보는 설계시 예상치 못했던 과하중 또는 성능저하로 인하여 보의 강성 및 강도를 증진 시켜야 하는 경우가 발생한다. 보의 강성을 높일 수 있는 방법으로는 인장부위단면의 철근량을 증가시키는 방법, 강판 및 CFS(탄소섬유시트)로 보강하는 방법 등이다. 최근 비용이 많이 들지 않으며, 구조물의 원상태를 유지하고, 단기간내에 적용이 가능하다는 점에서 라텍스와 같은 보수재료로 증설된 보의 밑면에 철근량을 증대시키기보다는 강판이나 CFS로 보강된 보의 구조적 거동에 관해 많은 연구

* 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수
** 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수
*** 한양대학교 토목공학과 박사과정
**** 한양대학교 토목공학과 석사과정

가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 증설재료로 보수되고, 인장축 하단면에 강판이나 CFS로 보강한 철근콘크리트보의 하중-처짐에 대한 해석적 모델을 개발함으로써 여러 가지의 변수연구를 통해 보수·보강된 철근콘크리트보의 적절한 강도증진방법을 제안하는 것을 연구목적으로 한다.

2. 개발모델의 적용

보의 보강이 만약 강도증진에만 의존한다면 급작스런 취성과파괴에 의해 파괴될 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 취성과파괴가 일어나지 않는 상황에서 연성적인 휨파괴를 일으킬 수 있도록 최대철근비 이하로 보를 보강할 것이다. 또한 본 연구의 모델에서는 보강판과 인장철근이 콘크리트층과 분리가 일어나지 않도록 하였으며, CFS와 철근사이의 콘크리트층 전단면을 따라 CFS의 분리, 또는 박리에 의한 파괴가 일어나지 않도록 고려하였다. 본 연구와 같이 수행된 이전의 실험에서는 CFS로 보강된 보에 이와 같은 파괴를 막기 위해 CFS로 양쪽단을 구속하였다.

위의 내용을 기초로 하여 이번 해석에서는 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- (1) 강판이나 CFS로 보강된 유효면적은 무시된다. 그러므로, 보강판과 인장 철근을 따라 일어날 수 있는 콘크리트층의 전단파괴를 발생시키지 않을 만큼 강판이나 CFS의 극한강도는 충분히 작다.
- (2) 그 결과 평면인 단면은 변형후에도 평면을 유지하며, 변형을 적합방정식이 적용된다.

3. 비선형 layered 유한요소 방법

3.1 비선형 layered 유한요소 방법

본 연구에서는 비선형 layered 유한요소 방법을 사용하였으며, 변형률적합조건을 적용하였다. 비선형 거동의 해석은 보의 처짐을 미소량 증가시킨 후 이 처짐량에 대한 각 보요소(layered element)의 변형도를 산정하고, 이 변형도에 대한 각 요소별 응력과 새로운 secant modulus를 산정한 후 이에 대한 각 요소별 절점의 새로운 변형도가 전 step에서의 산출한 변형도와와의 오차가 허용오차내에 수렴 되도록 반복계산하는 방법을 사용하였다. 본 연구에서 개발된 모델은 단면의 layer수, tolerance, 처짐의 증가분, 그리고 보 요소의 수와 대체로 무관하게 수렴하였다.

3.2 비선형 재료모델

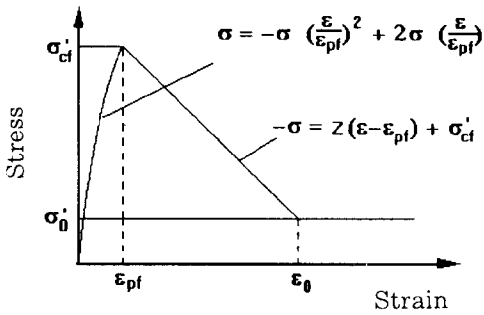
콘크리트와 철근 및 강판에 대한 비선형 재료모델은 그림 1, 2에 주어졌다. 인장부위에서 CFS는 파괴까지 선형탄성거동을 나타낸다고 가정하였다. 증설된 재료는 하중이 가해지는 동안 단지 인장응력에만 지배를 받으므로, 인장부위에 있는 일반 콘크리트의 응력-변형률선도와 동일한 모델을 사용하였다.

4. 실험결과와 개발된 모델의 비교

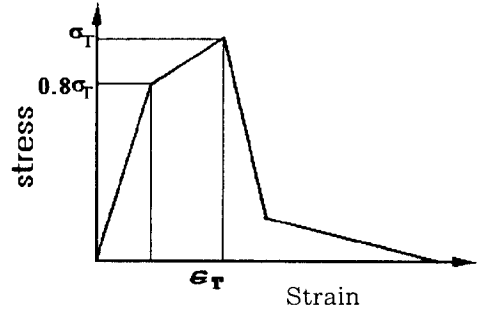
4.1 실험방법

총 14개의 시험체가 실험되었고, 철근상세와 하중가력방법은 그림 3에 나타내었으며, 표 1에는 실

험에 사용된 각 재료의 재료물성을 나타내었으며, 표 2에는 시험체의 상세에 대하여 요약하였다.



(a) 압축 응력-변형률 모델



(b) 인장응력-변형률 모델

그림 1 콘크리트와 철근의 재료모델

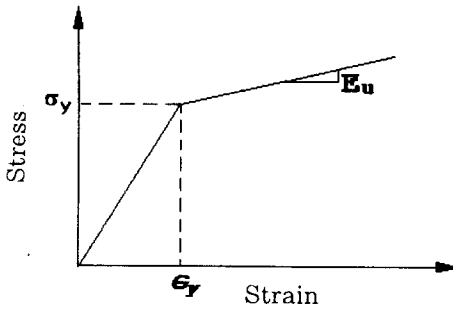


그림 2 강판에 대한 인장모델

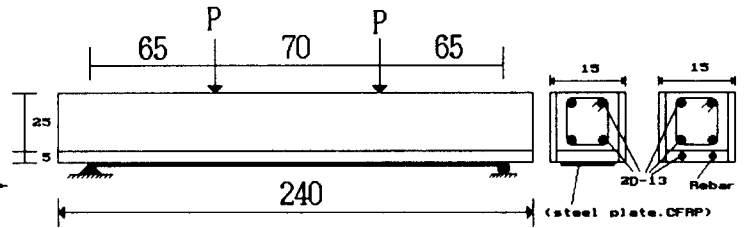


그림 3 하중과 증설 및 보강된 단면의 상세(unit : cm)

표 1 적용된 보수·보강재료의 물리적 성질

재료	강도(kg/cm ²)		최대변형률(%)		탄성계수(×10 ⁵)
	압축	인장	압축	인장	
콘크리트	220	22	0.0021	0.0002	2.3
라텍스	286	29	0.011	0.0011	1.52
프리믹스	383	33	0.0035	0.00035	2.01
철근	-	2800(항복)	-	0.0014	20.4
	-	3200(극한)	-	0.0016	
강판	-	2400(항복)	-	0.0013	18.0
	-	2800(극한)	-	0.0014	
CFS	-	34000	-	0.015	23.5

4.2 실험치과 모델예측치의 비교

그림 4~8은 실험결과와 본 연구에서 개발한 비선형 layered 유한요소 모델과의 비교를 나타낸다. 값들이 어느정도 일치함을 볼 수 있으며, 일반적으로 하중-변위 곡선의 최대값 부위에서는 모델예측치

표 2 시험체의 상세

보강방법	시험체명	보수단면치수	비고
Control	CON-S	15×5×240	CF : CFS RE : Rebar SP : Steel Plate L : Latex P : Premix CS : CFS Wing CU : CFS U-Jacket SS : Steel Strip SU : Steel Wing
증설부위에 철근이 삽입된 경우	RE-L-CS		
	RE-P-CS		
	RE-L-CU		
	RE-P-CU		
	RE-L-SS		
	RE-P-SS		
증설하단부에 강판이나 CFS로 보강된 경우	CF2-L-CS		
	CF2-P-CS		
	CF2-L-CU		
	CF2-P-CU		
	SP-L-SS		
	SP-P-SS		
강판 Wing	RE-L-SU		
전체 시험체수	14		

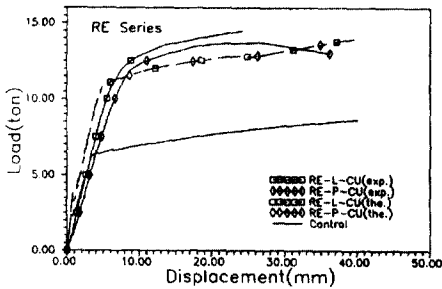


그림 4 실험값과 이론치의 비교(RE의 경우)

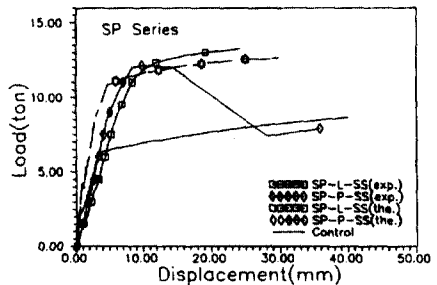


그림 5 실험값과 이론치의 비교(SP의 경우)

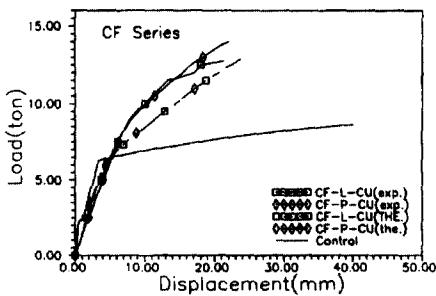


그림 6 실험값과 이론치의 비교(CF의 경우)

의 강성이 더 크게 나타남을 볼 수 있다. 이는 보의 각기 다른 층(layers)의 변형율적합방식을 가정할 때, 모델의 근사성으로 인하여 각 요소의 강성이 실제보다 크게 계산되었기 때문으로 판단된다.

5. 변수연구

개발된 모델을 이용하여 주요한 설계변수에 대한 영향을 하중-처짐곡선을 통하여 고찰하였다. 시험체는 8m의 지간에 30cm×60cm의 단면이며, 0.01의 인장철근비로 설계하였다. 하중가력은 4점 재하방식을 적용하였다. 표 3에는 각 설계변수와 채택된 값들을 요약하였다.

표 3 변수연구를 위해 채택된 값

고찰 변수	No.	보		증설		강판			CFS			
		f_c' (kg/cm ²)	ρ	보수재	d_a (cm)	f_{py}	$E(\times 10^6)$ (kg/cm ²)	ρ_p	f_{cf}	$E(\times 10^6)$ (kg/cm ²)	ϵ_y	t_c (cm)
f_c'	1	240	0.01	라텍스	5	-	-	-	-	-	-	-
	2	400	"	"	"	-	-	-	-	-	-	-
	3	240	"	"	"	2400	3.4	0.006	-	-	-	-
	4	400	"	"	"	"	"	"	-	-	-	-
	5	240	"	"	"	-	-	-	35500	2.35	0.015	0.11×2
	6	400	"	"	"	-	-	-	"	"	"	"
ρ_p	9	"	"	"	"	2400	3.4	0.002	-	-	-	-
	10	"	"	"	"	2400	"	0.012	-	-	-	-
	11	"	"	"	"	4800	6.8	0.002	-	-	-	-
	12	"	"	"	"	"	"	0.012	-	-	-	-
d_p	13	"	"	"	10	-	-	-	-	-	-	-
	14	"	"	"	5	-	-	-	-	-	-	-
	15	"	"	"	10	2400	3.4	0.006	-	-	-	-
	16	"	"	"	5	4800	"	0.006	-	-	-	-
	17	"	"	"	10	-	-	-	35500	2.35	0.015	0.11×2
	18	"	"	"	5	-	-	-	"	"	"	"
CFS	19	"	"	"	5	-	-	-	"	"	"	"
	20	"	"	"	"	-	-	-	30000	3.8	0.08	0.165×1.6

여기서, d_a =증설깊이, ρ_s =철근비(A_s/bh), ρ_p =강판(A_p/bh)
 ϵ_y =CFS 초대변형률, t_c =CFS의 두께

5. 1 콘크리트 압축강도의 영향

50mm의 라텍스로 인장부를 증설한 보에 대하여 모체콘크리트의 압축강도영향을 고찰하기 위해 f_c' 을 240과 400kg/cm²의 각기 다른 압축강도에 대하여 고려하였다. 그림 7은 각기 다른 방법으로 증설된 모든 보에 있어 휨강도가 증가하며, 압축강도가 증가함에 따라 강성이 증가함을 알 수 있다.

5. 2 증설깊이의 영향

그림 8는 보수깊이가 증가됨에 따라 internal moment arm이 증가함으로써 강판이나 CFS로 보강된 보의 휨강도와 강성이 증가됨을 알 수 있다.

5. 3 강판부착의 철근보강에 따른 영향

그림 9는 각기 다른 철근비와 탄성계수를 갖는 시험체의 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 강도 및 강성의 증가정도는 다른 변수들과 비교하여 그림 9에 나타난 것과 같이 철근비의 영향이 큰 것을 알 수 있으며, 강판의 항복강도와 보강철근비가 증가함에 따라 post-peak영역에서 취성적인 거동을 나타내는 것을 알 수 있다. 강판부착이 적용될 때 강판부착의 정도는 취성과괴양상을 피하기 위해서 조심스럽게 선택되어야 한다.

5.4 CFS변화의 영향

본 논문에서는 변수연구를 위하여 항복강도가 각각 35500과 30000kg/cm²인 서로 다른 두종류의 CFS를 사용하였으며, 설계시의 파괴하중은 동일하게 설계하였다. 후자는 전자보다 높은 파괴강도를 나타내고 있으며, 강성에 있어 높게 나타났다. 그림 10은 탄성계수가 높은 보강재를 사용할 경우 보강된 보의 휨강도와 강성에 유리하다는 것을 나타내고 있다. 이는 보의 강도 및 강성이 탄소섬유의 항복 강도보다는 강성의 영향을 받는다는 것을 나타내는 것이며, 설계시에 강성의 영향을 고려해야 할 것이다. 그리고 모든 CFS의 파괴양상은 취성파괴를 나타내었다.

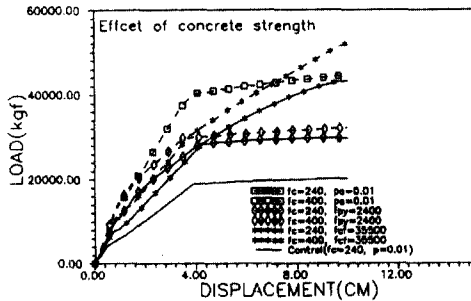


그림 7 콘크리트 압축강도의 영향

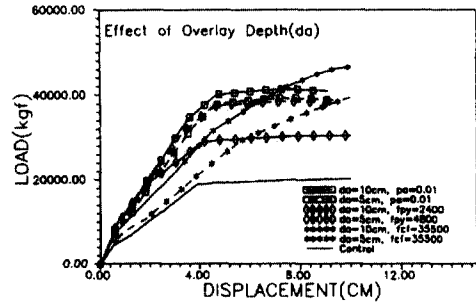


그림 8 증설깊이에 따른 영향

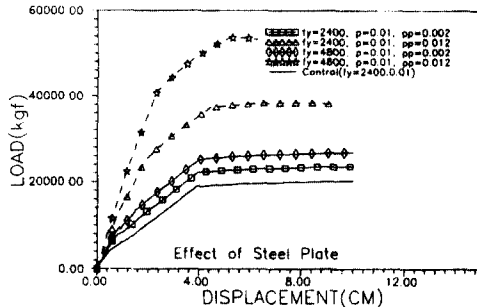


그림 9 강판부착의 철근비에 따른 영향

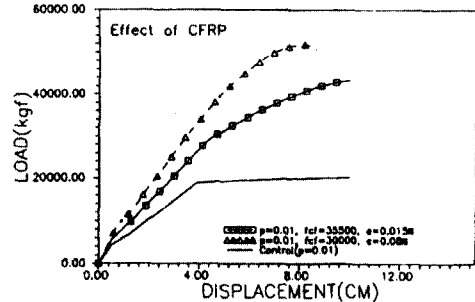


그림 10 CFS변화의 영향

6. 결 론

비선형 layered 유한요소를 적용하여 개발된 이 모델은 보수재료로 증설된 인장축하단면에 CFS와 같은 보강재료로 보강함으로써 나타나는 휨거동의 설계변수 영향을 근사적으로 측정함으로써 강도증진기술의 효율성을 측정하기 위해 개발되었다.

본 논문에서 개발된 모델을 사용하여 변수연구를 한 결과는 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 압축강도의 경우, 동일한 철근비와 강판 및 CFS로 보강한 2개의 모델에 각각 240와 400kg/cm²를 적용했을 때 강도 및 강성이 기본시험체에 비해 현저히 증가했음을 알 수 있다. 이는 증설깊이를 설계변수로 그 값을 증가시킬 때도 같은 결과를 나타내었다.

2) 강판보강의 경우 각각 2400과 4800kg/cm²을 갖는 2개의 모델에 강판보강비를 0.002와 0.012로 했을 경우에도, 초기강성이 기본시험체에 비해 향상되었음을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 CFS로 보강된 경우에 대해서도 비슷한 결과를 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 주관하는 건설기술 연구개발과제를 수행함으로써 얻어진 결과이며, 저자들은 건설교통부의 후원에 대한 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. D.J.Oehlers and J.P.Moran, "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams," *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.4, April 1990, pp. 978-995.
2. D.J Oehlers, "Reinforced Concrete Beam with Plates Glued to Their Soffits," *Journal of Structural Engineering*, Vol.118, No.8, Aug. 1992, pp.2023-2038.
3. H.Saadatmanesh, and M.R.Ehsani, "RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I:Experimental Study," *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.11, Nov.1991, pp.3417-3433.
4. M.Arockiasamy, R.Sowrirajan, M.Shahawy and T.E.Beitelman, "Repair of Damaged Pretensioned Solid Slab Using CFRP Laminates," *Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Edited by L.Taerwe. RILEM, 1995, pp.492-500.
5. N.Plevris, T.C.Triantafillou, and D.Veneziano, "Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates," *Journal of the Structural Engineering*, Vol.11, No.7, July 1995, pp.1037-1044.
6. R.N.Swamy, B.Hobbs and M.Roberts, "Structural Behavior of Externally Bonded, Steel Plated RC Beams after Long-Term Exposure," *The Structural Engineer*, Vol.73, No.16, Aug. 1995, pp. 255-261.
7. R.N.Swamy, R.Jones, and Charif, "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beams," *The Structural Engineer*, Vol.67, No.3/7, Feb. 1989, pp.45-58.
8. R.N.Swamy, R.Jones, and J.W.Bloxham, "Structural Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates," *The Structural Engineer*, Vol.65A, No.2, Feb. 1987, pp.59-68.
9. S.A.Hamoush and S.H.Ahmad, "Debonding of Steel Plate-Strengthened Concrete Beams," *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.2, Feb. 1990, pp.356-371.
10. T.M.Roberts, "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentration in the Adhesive Layer of Plated RC Beams," *The Structural Engineer*, Vol.67, No.12/20, June 1989, pp.229-233.
11. W.An, H.Saadatmanesh, and M.R.Ehsani, "RC Beams Strengthened with FRP Plates. II :Analysis and Parametric Study," *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.11, Nov. 1991, pp.3434-3455.
12. Y.N.Xiraba, M.H.Baluch, I.A.Basunbul, A.M.Sharif, A.K.Azad, and G.J.Al-Sulaimani, "Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates," *ACI Structural Journal*, Vol.91, No.8, Nov.-Dec. 1994, pp.639-646.
13. "Development of Repair and Rehabilitation Method of R/C Structures," Report No. R&D/94-0039, 1995. 10