

CFRP 積層板으로 補強된 鐵筋콘크리트보의 信賴性評價
Reliability Assessment of Reinforced Concrete Beams
Strengthened by CFRP Laminates

조 효 남* 최 영 민**
Cho, Hyo-Nam Choi, Young-Min

ABSTRACT

In general, the problems of strengthening and repairing of deteriorated or damaged reinforced concrete members are usually worked out in situ by externally bonding steel plates using epoxy resins, which has been recognized to be one of effective and convenient methods. But the disadvantages of strengthening/repairing concrete members with externally bonded steel plates include : (a) deterioration of the bond at the steel-concrete interface caused by the corrosion of steel ; (b) difficulty in manipulating the plates at the construction site ; (c) improper formation of joints, due to the limited delivery lengths of the steel plates ; and etc. Therefore these difficulties eventually have led to the concept of replacing the steel plates by fiber-reinforced composite sheets which are characterized by their light weight, extremely high stiffness, excellent fatigue properties, and outstanding corrosion resistance.

In the paper, for the reliability assessment of reinforced concrete beams externally strengthened by carbon fiber reinforced plastic(CFRP) laminates, an attempt is made to suggest a limit state model based on the strain compatibility method and the concept of fracture mechanics. And the reliability of the proposed models is evaluated by using the AFOSM method.

The load carrying capacity of the deteriorated and/or damaged RC beams is considerably increased. Thus, it may be stated that the post-strengthening of concrete beams with externally bonded CFRP materials may be one of very effective way of increasing the load carrying capacity and stiffness characteristics of existing structures.

1. 서 론

토목구조물의 보수, 보강은 그 작업기간에 있어서 많은 제약이 따르고 경비 또한 과다한 경우가 대부분이기 때문에 구조물의 형식별, 열화손상의 현상별로 합리적인 보수, 보강 공법에 관한 관심이 고조되고 있다. 기존에는 열화손상되거나 내하력이 부족한 보의 경우 재래적인 재료인 철

* 한양대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 한양대학교 토목공학과 박사과정

판등을 이용하여 보강하였으나 강재의 부식으로 인한 철판과 콘크리트 계면사이의 접착력 약화, 시공현장에서 무거운 강철판을 다루는데 따른 시공상의 문제점, 판 길이의 제약으로 인한 불연속부에서의 문제점 등 많은 단점을 내포하고 있어서 최근 고비강성, 고비강도이며 초경량이고 내부식성의 특성을 가지는 신소재에 의한 보강에 관심이 집중되고 있다. 이에 관한 연구를 살펴보면, 여러 첨단신소재섬유 플라스틱(FRP)으로 보강한 철근콘크리트보의 실험을 통한 구조적 거동과 수치적 해석방법이 Philip 등[1991]에 의해 연구되었으며 CFRP 적층판에 의한 철근콘크리트보의 구조적 보강 및 보강 전후의 균열에 대한 연구가 Meier and Kaiser[1991]에 의해 수행되었고 Thanasis 등[1991]에 의해 FRP로 보강된 철근콘크리트보의 파손기구와 이에 대한 식을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 첨단신소재인 CFRP 적층판을 사용한 노후 철근콘크리트보의 보강기법을 연구하기 위하여 우선 기존의 연구[Thanasis 등, 1991]에서 제시한 변형적합법(Strain Compatibility Method)에 기초하여 CFRP 적층판으로 보강된 철근콘크리트보의 한계상태모형을 제안하고 실용적인 신뢰성해석 기법인 AFOSM(Advanced First Order Second Moment)방법[Ellingwood 등, 1980]을 사용하여 보강 전후의 신뢰성평가를 수행하므로써 CFRP 적층판에 의한 보강방법의 효율성 여부를 고찰하였다. 뿐만아니라 CFRP에 의해 보강된 철근콘크리트보에 대해 설계변량의 변동성이 신뢰성지수 β 에 어느정도 영향을 미치는지를 파악하기 위하여 예민도분석을 실시하였다.

2. 한계상태방정식

2.1 개 설

여러 기존연구[Thanasis 등,1991; Philip 등,1991]에 의하면 CFRP 적층판으로 보강한 철근콘크리트보의 재하실험을 통해 살펴본 결과 철근항복-CFRP파괴, 철근항복-콘크리트파괴, 콘크리트 압축파괴, 박리와 같은 여러 파손기구를 확인할 수 있으며 박리에는 계면간 균열에 의한 박리, 전단균열에 의한 CFRP의 박리(peeling-off), 그리고 피복콘크리트의 박리 등이 있다. 본 연구에서는 각각의 파손기구에 대한 한계상태함수를 변형적합법에 기초하여 유도하였다. 특히 일방향 적층판의 탄성계수는 섬유와 모재의 탄성계수와 섬유함유율(V_f)의 함수로서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으므로 이를 이용하여 한계상태함수를 제안하였다.

$$E_f = E_f V_f + E_m(1-V_f) \quad (1)$$

여기서, E_f , E_f , E_m : 각각 적층판, 섬유, 모재의 탄성계수

2.2 한계상태모형

본 연구는 보강 전후의 철근콘크리트보의 극한내하력에 관심을 가지고 있으므로 한계상태모형은 극한저항모멘트로 모델링하였으며, 휨과 전단저항중에 교량 등과 같은 토목구조물에서 보는 보통 휨이 지배적이므로 휨저항에 대한 한계상태모형을 적용하였다. 휨에 의한 파괴만을 고려하면 한계상태방정식 $g(\cdot)$ 은 저항모멘트 S_R 과 고려해야 하는 실 작용하중에 의한 여러 하중효과 S_i 의 항으로 표현되는 다음과 같은 선형 한계상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$g(\cdot) = S_R - \sum_i S_i \quad (2)$$

2.2.1 저항모형

본 연구에서 제안하는 저항모형의 저항모멘트 S_R 은 재료강도, 제작시공, 해석 및 모델링, 노후손상계수 추정에 관련된 모든 불확실량 변수를 내포하는 변량 N_R 과 노후손상계수 D_F 를 도입하여 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$S_R = R_n \cdot N_R \cdot D_F \quad (3)$$

$$N_R = M \cdot F \cdot P \cdot D \quad (4)$$

여기서, R_n : 보강 전과 후의 각각에 대한 공칭저항모멘트

M : 재료강도 관련 불확실량 변수

F : 제작시공 관련 불확실량 변수

P : 해석 및 모델링 관련 불확실량 변수

D : 노후손상계수 추정 관련 불확실량 변수

공칭저항모멘트는 보강 전후와 파손기구에 따라서 결정되어야 하며 보강전에는 재래적 강도 설계법의 극한저항모멘트를 적용하고, 보강후의 경우에는 파손기구에 따라서 각각의 극한저항모멘트를 적용하여야 한다. 파손기구에 따른 극한저항모멘트는 식 (5)~(8)과 같으며 본 논문에서는 실 구조물에서 철근항복-콘크리트파괴의 파손기구가 평형설계 개념에 부합하므로 이 파손기구에 대해서만 식 (6)을 적용하였다.

● 철근항복 - CFRP파괴

$$R_n = bd^2 \sigma_{ck} \left\{ \frac{\sigma_y}{\sigma_{ck}} \rho_s \left(1 - \frac{\bar{y}}{d} \right) + \frac{E_f \varepsilon_f^*}{\sigma_{ck}} \rho_f \left(\frac{h}{d} - \frac{\bar{y}}{d} \right) \right\} \quad (5)$$

● 철근항복 - 콘크리트파괴

$$R_n = bd^2 \sigma_{ck} \left\{ 0.7225 \frac{c}{d} \left(\frac{h}{d} - 0.425 \frac{c}{d} \right) - \frac{\sigma_y}{\sigma_{ck}} \rho_s \left(\frac{h}{d} - 1 \right) \right\} \quad (6)$$

● 콘크리트 압축파괴

$$R_n = bd^2 \sigma_{ck} \left\{ 0.7225 \frac{c}{d} \left(\frac{h}{d} - 0.425 \frac{c}{d} \right) - 0.003 \frac{\left(1 - \frac{c}{d} \right)}{\frac{c}{d}} \frac{E_s}{\sigma_{ck}} \rho_s \left(\frac{h}{d} - 1 \right) \right\} \quad (7)$$

● CFRP 박리(Peeling-off)

$$R_n = bd^2 \sigma_{ck} \left\{ \frac{\lambda (\rho_s \bar{\gamma}_s + \rho_f \bar{\gamma}_f)}{\sigma_{ck}} \frac{1}{c_1 d} \right\} \quad (8)$$

여기서, b, d, h : 각각 보의 폭, 압축축 상단으로부터 철근까지의 깊이, 높이

- σ_{ck}, σ_y : 각각 콘크리트의 설계강도, 철근의 항복강도
- ρ_s, ρ_f : 각각 철근비(= A_s/bd), 섬유복합재비(= t/d)
- ε_f^* : CFRP의 인장과괴변형율
- G_s, G_f : 각각 철근과 CFRP의 전단탄성계수
- λ : 그림 1의 $(v/w)_{cr}$ 비로써 실험에 의해 산정($P = \lambda \Sigma GA$)
- c_1 : 하중재하와 관련된 상수($R_n = Pl/c_1$)
- c : 중립축의 위치로서 기본랜덤변량($E_m, E_f, V_f, \sigma_{ck}, d$ 등)으로부터 유도한 중간랜덤변량

2.2.2 하중모형

철근콘크리트보 구조물에 작용하는 실 적용하중은 사하중과 활하중인데 각각에 의한 하중모멘트 S_D, S_L 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_D = D_n N_D$$

$$S_L = L_n N_L$$
(9)

여기서, D_n, L_n : 각각 공칭사하중 및 활하중모멘트

N_D, N_L : D_n, L_n 의 추정에 관련된 제반 불확실량

2.3 통계적 불확실량

구조신뢰성 방법에서는 저항 및 하중관련 랜덤변량들의 불확실량을 합리적으로 추정하는 것이 매우 중요한 문제이다. 그러나 본 연구는 신뢰성해석 모형 및 방법의 제안과 CFRP 적층판 보 강전후의 상대적인 신뢰도 변화를 고찰하고자 하는 것이므로 정확한 통계적 자료의 추정자체는 목적이 아니다. 따라서 본 논문에서는 국내외의 관련문헌[ASM,1987; 日本複合材料學會,1989; 조효남외,1993 등]을 종합판단하여 통계적 불확실량을 추정하였다. 특히 저항불확실량의 경우 기본랜덤변량인 섬유, 모재의 탄성계수, 섬유함유율, 콘크리트와 철근의 강도, 제원관련 변수의 통계적 특성치를 적용하여 simulation에 의해 재료강도 관련 불확실량변수 M 과 제작시공 관련 불확실량변

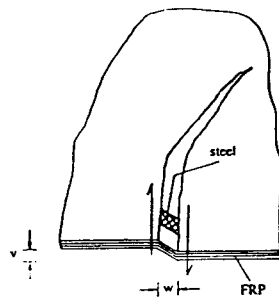


그림 1. CFRP 박리(peeling-off)로 인한 수평, 수직 균열

표 1. 저항 및 하중의 불확실량

	저 항			사 하 중			활 하 중		
	평균공칭비	변동계수	분포형	평균공칭비	변동계수	분포형	평균공칭비	변동계수	분포형
무손상	1.038	0.162	lognormal	1.05	0.1	normal	1.24	0.25	lognormal
손상	0.934	0.191							
보강	0.934	0.207							

수 F의 평균공칭비와 변동계수를 구하고 기타 불확실량변수(\bar{P} , \bar{D} , V_P , V_D)를 포함하여 최종적으로 아래식 (10)과 (11)과 같이 Taylor급수전개 기법을 이용하여 유도하였다. 최종결과를 정리하여 표 1에 저항 및 하중의 불확실량으로 나타내었다.

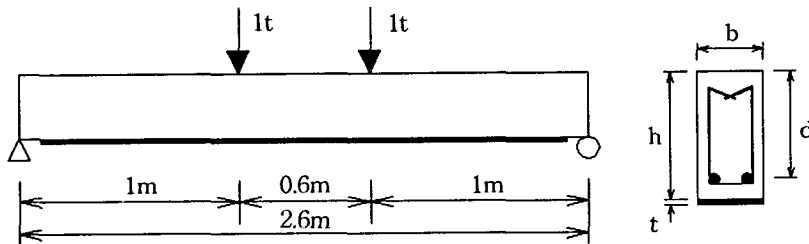
$$\bar{N}_R = \bar{M} \cdot \bar{F} \cdot \bar{P} \cdot \bar{D} \quad (10)$$

$$V_{NR} = \sqrt{V_M^2 + V_F^2 + V_P^2 + V_D^2} \quad (11)$$

여기서, \bar{M} , \bar{F} , \bar{P} , \bar{D} : M, F, P, D의 평균공칭비
 V_M , V_F , V_P , V_D : M, F, P, D의 변동계수

3. 신뢰성해석 및 예민도분석

본 연구의 적용예는 문헌 Meier et al.[1991]과 Pilip et al.[1991]을 참고하여 그림 2와 같이 모델링 하였다. 신뢰성지수 β 의 비교는 무손상 부재와 손상 부재(노후손상계수 $D_F=0.8$) 그리고 손상된 부재에 CFRP 적층판으로 보강한 부재에 대하여 각각 수행하였다. 또한 저항변동계수 Ω_R , 하중변동계수 Ω_D 와 Ω_L , 노후손상계수 D_F , 적층두께 t 및 섬유함유율 V_f 의 변화에 따른 예민도분석을 수행하였다.



$\sigma_{ck} = 240\text{kg/cm}^2$	$h = 30\text{cm}$	$E_f = 2.40 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$	$A_s = 2.534$
$\sigma_y = 4000\text{kg/cm}^2$	$b = 15\text{cm}$	$E_m = 3.57 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$	(D13)
$\gamma = 2.3\text{t/m}^3$	$d = 25\text{cm}$	$V_f = 0.72$	

그림 2. 적용 대상구조물 모델링

표 2. 보강 전후의 신뢰성지수 및 파괴확률

항 목 \ 부 재	무 손 상	손 상	보 강 후
신뢰성지수(β)	2.22	0.98	4.96
파 괴 확 률	0.013209	0.163543	3.53×10^{-7}

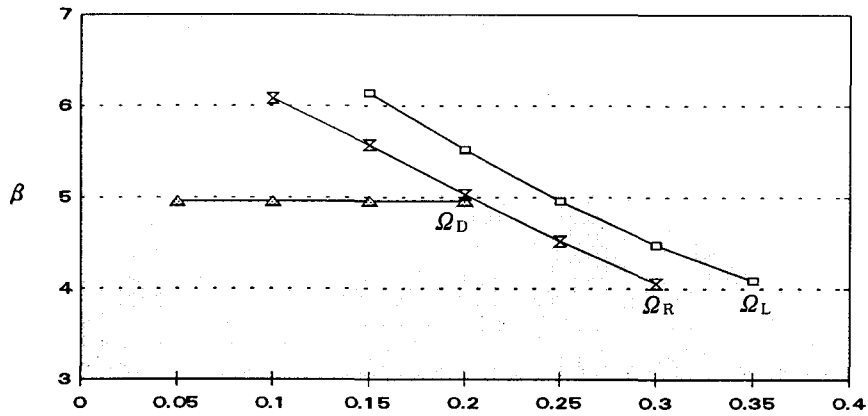


그림 3. Ω_R 과 Ω_D , Ω_L 변화에 따른 β 의 변화

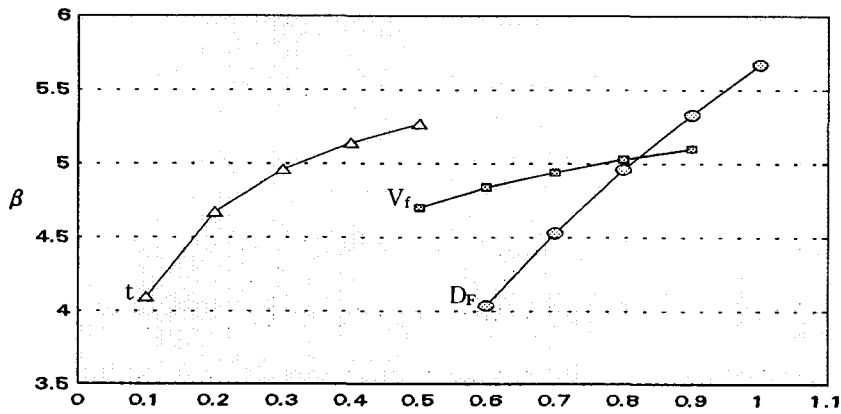


그림 4. D_F , t , V_f 의 변화에 따른 β 의 변화

표 2에서 알 수 있는 바와 같이 노후손상계수를 0.8로 보았을 때 신뢰성지수 β 가 4 이상 상당히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 뿐만 아니라 무손상 부재에 대해서도 CFRP 적층판을 효과적으로 사용할 수 있을 것이라고 사료된다. 그림 2에서 저항과 활하중의 변동성에 대한 신뢰성지수의 변화가 사하중에 의한 것보다도 더 민감함을 알 수 있다. 여기서 사하중의 경우 구배가 거의 없는 것을 확인할 수 있는데 이는 본 적용구조물이 사하중효과가 활하중효과 보다 상당히 작기 때문이라고 판단된다. 그림 3에서는 두께 t 와 섬유함유율 V_f 는 상관관계가 있는 변수이기는 하지만 공히

노후손상계수보다는 구배가 작음을 알 수 있는데 이는 구조물의 보수/보강시 재료 및 시공의 정확도도 상당히 중요하지만 노후손상도의 정확한 추정이 더욱 중요함을 알 수가 있다.

4. 고찰

철근콘크리트보의 CFRP 적층판으로 보강한 전과 후에 대하여 신뢰성평가를 수행하여 본 결과, 보강 전후에 있어서 내하력이 상당히 증가함을 알 수 있었으며 이는 첨단신소재인 CFRP를 이용하여 공용중에 열화손상된 철근콘크리트보를 보강하는 것은 CFRP의 대량 생산에 의해 경제성만 확보된다면 매우 실용적이고 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며 이에 심심한 사의를 표합니다.

5. 참고문헌

ASM(1987), Engineered Materials Handbook-Composites, Vol. 1.

Ellingwood, B., Galambos, T.V., MacGregor J.C. and Cornell C.A.(1980), "Development of a Probability-Based Load Criterion for the American National Standard A58," National Bureau of Standard SP-577, Washington D.C, June, 1980.

Meier U. and Kaiser H.(1991), "Strengthening of Structures with CFRP Laminates," Materials," Proceedings of the Specialty Conference, ASCE, Las Vegas, Jan., 1991, pp224-232.

Philip A.R., David A.T., Le-Wu L., and Guy M.C.(1991), "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics," Title No. 88-S52, ACI Structural Journal, July-August, 1991, pp490-500.

Thanasis C. Triantafillou and Nikolaos Plevris(1991), "Post-Strengthening of R/C Beam with Epoxy-bonded Fiber Composite Materials," Proceedings of the Specialty Conference, ASCE, Las Vegas, Jan., 1991, pp245-256.

日本複合材料學會(1989), 複合材料 핸드ブック, Sep., 1989.

조효남 외(1993), "Buckling Reliability of Laminated Composite Cylindrical Shells," Structural Safety & Reliability, Proceeding of ICOSSAR '93, Vol.2, pp.753-760.