

휨보강된 철근콘크리트보의 확률론적 고찰

Probabilistic Considerations on Strengthened Reinforced Concrete Beam for Flexural Loads

이차돈^{*} 최봉섭^{**} 김수정^{***}
Lee, Cha Don Choi, Bong Sub Kim, Soo Jung

ABSTRACT

Although there are strong needs for evaluating statistical characteristics of strengthened reinforced concrete beams under flexure, many researches have been performed mostly on the mechanical properties and failure mechanisms. Different material properties and resulting reinforcing effect could alter the probabilistic values of the strengthened beams. Existing equations suggested for predicting flexural strengthened reinforced concrete beam with CFRP and steel plate are selected and best-fitting one is used in evaluating probability of failure based on Monte-Carlo method. Influential factors are statistically examined and approximate strength reduction factors are suggested. It was found that the factor is more sensitively influenced by predictive equations as well as characteristics and amounts of strengthening materials.

1. 서론

철근 콘크리트 구조체는 시간이 경과함에 따라 예측하지 못했던 여러 가지의 변화를 받게 된다. 균열 발생 및 시간 경과에 따른 콘크리트 구조물의 결함으로 RC구조물의 안전성 확보 및 내용년수를 늘리기 위해서는 적절한 진단과 더불어 보수 보강이 이루어져야 한다.

구조적으로 손상을 입은 콘크리트 구조물에 대한 보강방법으로 강판, 탄소섬유쉬트, 아라미드섬유쉬트 등을 이용한 접착공법들이 있으며 이에 대한 실험 및 이론연구가 많이 진행되어 왔다. 그러나 기존의 이론식들은 재료 및 하중이 갖는 통계적 특성을 반영하지 아니하고 보강되지 않은 철근콘크리트보의 이론식에 적용되는 강도감소계수 및 하중계수를 적용하고 있다. 본 연구에서는 먼저 여러 연구자들에 의해서 발표된 기존의 CFRP 및 강판으로 보강된 철근콘크리트보의 휨강도 예측식의 정확성을 통계적으로 검토하였다. 그 결과에 따라 적절한 식을 선택한 후 이들 식에 근거하여 보강된 보의 공칭모멘트 강도에 통계적으로 영향을 많이 미치는 변수를 고찰하였다. 또한 파괴확률 및 강도감소계수를 Monte Carlo simulation 방법을 적용하여 산정하고자 하였다.

* 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 BK21 교수

*** 정회원, 중앙대학교 건축공학과 석사과정

2. 휨강도 예측식

일반적으로 CFRP로 보강된 철근콘크리트보의 휨 거동은 CFRP의 파단, 계면파괴, 박리 등으로 최대 하중에 이르기 전, 또는 최대하중에 이른 직후 취성적인 거동을 하게 된다. 한편 기존의 공칭 휨 강도 식은 보의 압축단 콘크리트가 변형을 0.003에 이룰때의 휨강도를 산정한다. 기존의 실험값들은 항복강도 또는 최대강도만을 측정함으로 인하여 이들 실험치로부터 압축단 콘크리트가 변형을 0.003에 이르렀을때의 휨강도를 산출하기에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 실험데이터에서 최대하중과 이론식의 공칭강도 예측치를 비교하였다. 본 연구에서 적용한 기존의 이론식은 다음과 같다.

보강된 철근콘크리트보의 휨강도 예측식

(1) 건축학회 제안식[2] (강판 및 CFRP로 보강된 RC보에 적용)

$$M_n = bd^2 \omega f_{ck} (1 - 0.59 \omega) \quad (1)$$

여기서, $w = \rho \frac{f_y}{f_{ck}}$

(2) Veneziano 제안식[1] (CFRP로 보강된 RC보에만 적용)

$$\frac{M_u}{bd^2 f_c'} = \frac{f_y}{f_c'} \rho_s \left(1 - \frac{\bar{y}}{d}\right) + \frac{E_{fc} \epsilon_{fc}^*}{f_c'} \rho_{fc} \left(\frac{h}{d} - \frac{\bar{y}}{d}\right) : \text{철근항복} - \text{CFRP 파단} \quad (2a)$$

$$\frac{M_u}{bd^2 f_c'} = 0.85 \beta_1 \frac{c}{d} \left(\frac{h}{d} - \frac{\beta_1 c}{2d}\right) - \frac{f_y}{f_c'} \rho_s \left(\frac{h}{d} - 1\right) : \text{철근항복} - \text{콘크리트 압괴} \quad (2b)$$

$$\frac{M_u}{bd^2 f_c'} = 0.85 \beta_1 \frac{c}{d} \left(\frac{h}{d} - \frac{\beta_1 c}{2d}\right) - 0.003 \left(1 - \frac{c}{d}\right) \frac{d}{c} \frac{E_s}{f_c'} \rho_s \left(\frac{h}{d} - 1\right) : \text{콘크리트 압괴} \quad (2c)$$

강판으로 보강된 철근콘크리트보의 휨강도 예측식은 건축학회에서 제안한 식을 적용하였다(식 1). 본 연구에서는 Oehler[8] 및 Robers[7]등이 단부 또는 계면에 발생하는 응력집중을 고려하여 국부파괴를 중심으로 한 예측식은 제외하였다.

3 보강된 RC보의 휨보강에 영향을 미치는 변수고찰

본 연구에서는 Veneziano[1]가 제시한 방법에 따라 보강된 RC보의 휨강도에 영향을 미치는 변수를 고찰하였다.

3.1 가정.

사용된 변수들의 평균과 표준편차 및 분포특성은 Ellingwood[3]와 Veneziano[1]가 제시한 값들을 적용하였다(표 1). 단, 보강강판의 경우 길이 및 단면치수는 deterministic 변수로 가정하였고 항복강도는 철근의 통계치와 동일하게 두었다.

표 1 분포특성에 따른 설계변수

Variable (1)	Nominal value A (2)	Mean and standard deviation for A (3)	Nominal value A (4)	Mean and standard deviation for B (5)	Distribution (6)	Comment (7)
b (m)	0.25	$\mu = b+0.00254$ $\sigma = 0.003658$	0.5	$\mu = b+0.00254$ $\sigma = 0.003658$	Normal	both
h (m)	1.25 b	$\mu = h-0.00305$ $\sigma = 0.00635$	2.0 b	$\mu = h-0.00305$ $\sigma = 0.00635$	Normal	both
d (m)	0.8 h	$\mu = d-0.0047$ $\sigma = 0.0127$	0.95 h	$\mu = d-0.0047$ $\sigma = 0.0127$	Normal	both
Steel area fraction ρ_s	0.005	-	0.015	-	Deterministic	both
CFRP area fraction ρ_{cf}	0.005	-	0.015	-	Deterministic	CFRP
Steel plate area fraction ρ_{sp}	0.005	-	0.01	-	Deterministic	Steel
Concrete f_{ck} (MPa)	20.7	$\mu = 24.2$ $\sigma = 4.36$	34.5	$\mu = 34.6$ $\sigma = 5.19$	Normal	both
Initial bottom strain ϵ_0	0.0002	$\mu = 0.0002$ $\sigma = 0.00005$	0.001	$\mu = 0.001$ $\sigma = 0.00025$	Normal	both
Steel strength f_y (MPa)	276	$\mu = 312$ $\sigma = 36.2$	414	$\mu = 466$ $\sigma = 45.6$	Beta	both
Steel plate strength f_{sp} (MPa)	276	$\mu = 312$ $\sigma = 36.2$	414	$\mu = 466$ $\sigma = 45.6$	Beta	Steel
CFRP strain at failure ϵ_{cf}^*	0.00311	$\mu = 0.00433$ $k = 11.5$	0.0113	$\mu = 0.0154$ $k = 45.6$	Extreme type III	CFRP
Strengthened length l (m)	8 h	-	16 h	-	Deterministic	both
$E_s = 200$ GPa $E_{cf} = 283$ GPa for $\epsilon_{cf}^* = 0.00311$, and $E_{cf} = 158$ GPa for $\epsilon_{cf}^* = 0.0113$ $l \geq 6$ m Subscript sp and cf mean steel plate and CFRP sheet, respectively.						

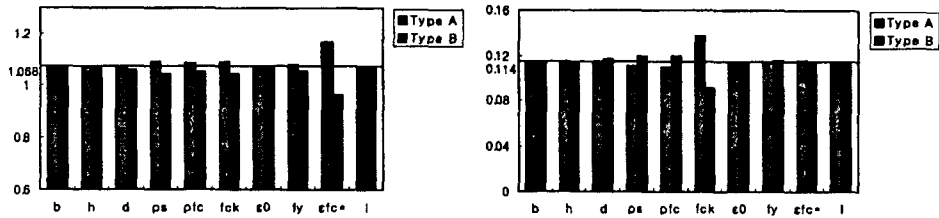
3.2 보강된 RC보의 휨보강에 영향을 미치는 변수고찰

본 논문에서는 신뢰성 해석에 근거한 변수고찰을 하기 위하여 주어진 공칭값들을 이용하여 공칭모멘트를 구하고 각각의 확률변수들의 밀도함수를 이용하여 각 확률변수의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 추출한다. 표 1에서는 두개의 변수그룹(A, B)에 대해 최소그룹 A와 최대그룹 B은 각각 10개의 변수와 통계적 특성을 갖고 있다. 각 경우는 2^{10} (1024)개의 경우의 조합으로 나눌 수 있으며, 조합된 경우에 대해서는 Monte Carlo Simulation을 이용하여 5000개의 난수를 발생시킨다. 발생시킨 난수들의 통계값(평균, 표준편차)값을 이용하여 산정한 모멘트 강도식과 공칭모멘트 강도식과 비교하여 $\frac{M}{M_n}$ 의 비를 산정하게 된다. 전체 1024×5000번의 simulation을 통한 $\frac{M}{M_n}$ 의 통계값은 CFRP로 보강된 RC보의 경우 건축학회식에 의하면 평균 1.102, 변동계수는 0.129, Veneziano식에 의하면 평균 1.068, 변동계수는 0.115로 산정되었으며 강판으로 보강된 RC보의 경우에는 평균 1.146, 변동계수는 0.069로 산정되었다. 그림 1 및 그림 2는 CFRP 및 강판으로 보강된 RC보의 휨강도에 미치는 영향을 통계적으로 고찰한 것을 정리하고 있다.

휨보강된 RC보에 영향을 미치는 변수를 고찰하기 위하여 두 그룹중 한 그룹의 변수를 고정하고 나머지 변수들을 조합시킨다. 그림 1과 그림 2는 한 개의 변수를 고정했을 때의 모멘트비를 나타낸다.

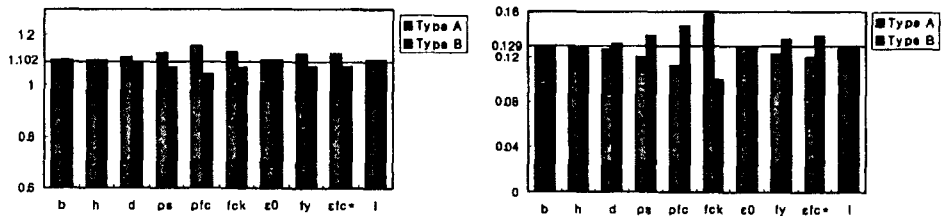
그림 1과 그림 2에 의하면 적용한 이론 모델식에 따라 고정된 변수들이 평균 및 변동계수값에 많은 영향을 줄 수 있다.

그림 1에 의하면 $\frac{M}{Mn}$ 의 평균값은 ϵ_{fc}^* 에 의하여 영향을 받음을 알 수 있다. 즉, 이 값을 3.11×10^{-3} 으로부터 1.13×10^{-2} 으로 변화시킬 때 $\frac{M}{Mn}$ 의 평균값은 CFRP로 보강된 RC보의 경우 CFRP에 관련된 변수인 보강비 (ρ_{cf}), Veneziano식에 의하면 ϵ_{cf}^* 의 영향이 평균치에 가장 큰 영향을 주는 것을 알 수 있고 변동계수의 경우에는 f_{ck} 와 ρ_{cf} 가 가장 큰 영향을 줄 수 있다. 한편, 강판으로 보강된 RC보의 경우에는 모든 변수가 평균값에 큰 영향을 주지 않았으나 변동계수에 관하여는 f_{ck} , ρ_s 및 ρ_{sp} 그리고 f_y 가 영향을 미침이 고찰되었다.



(a) Mean Value of M/Mn (Veneziano) -CFRP

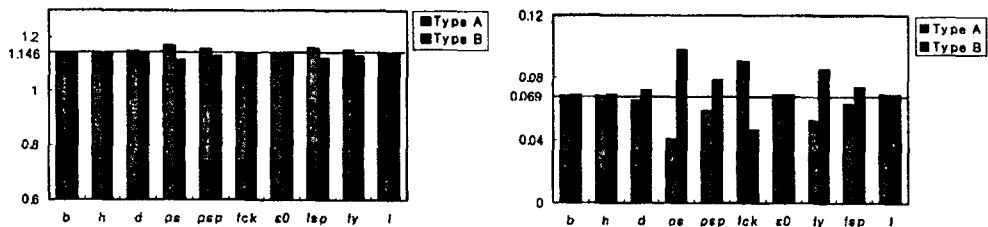
(b) COV of M/Mn (Veneziano) -CFRP



(a) Mean Value of M/Mn (건축학회) -CFRP

(b) COV of M/Mn (건축학회) -CFRP

그림 1 Effect of Design Variables - CFRP sheet



(a) Mean Value of M/Mn (건축학회) -STEEL

(b) COV of M/Mn (건축학회) -STEEL

그림 2 Effect of Design Variable - STEEL plate

4. 파괴확률 및 강도감소계수

Monte Carlo simulation은 확률변수들의 밀도함수를 이용하여 각 확률변수의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 추출하여 충분한 수(변수당 5000개)의 확률변수의 표본집단을 생성한 다음, 생성된 각 확률변수의 값을 차례로 한계상태식에 대입하여 파괴확률을 산정하였다. 한계상태식은 $g = \frac{M_n}{\phi} - M$ 이고, 파괴확률식은 $P_f = \frac{\text{경우의수}(g < 0)}{\text{모든경우의수}}$ 이다.

본 연구에서는 하중계수를 고정하중에 대하여는 1.4, 활하중에 대하여는 1.7로 고정하였으며 이들 하중에 대한 통계적 특성은 Ellingwood [3]로부터 표 2과 같이 가정하였다.

표 2 하중에 대한 통계적 특성

	Mean	Standard deviation	COV	Distribution	Comment
Dead Load	1.05 w_d	0.125 w_d	0.1	Normal	w_d : nominal value
Live Load	1.2 w_l	0.3 w_l	0.25	Extreme type I	w_l : nominal value

표 3 고정 및 활하중의 통계적 특성

연구자	ϕ	L/D = 0.5		L/D = 1		L/D = 1.5		평균	
		P_F	β	P_F	β	P_F	β	P_F	β
Veneziano -CFRP	0.7	0.000012	3.782	0.000084	3.687	0.000008	3.616	0.000035	3.695
	0.75	0.000041	3.524	0.000004	3.453	0.000561	3.327	0.000202	3.435
	0.8	0.000080	3.265	0.000541	3.148	0.001199	3.058	0.000607	3.157
	0.85	0.000479	2.967	0.001148	2.883	0.002811	2.811	0.001479	2.887
	0.9	0.000586	2.730	0.003473	2.638	0.005508	2.526	0.003189	2.631
	0.95	0.001486	2.481	0.006465	2.395	0.009908	2.321	0.005953	2.399
건축학회 -CFRP	1	0.002457	2.245	0.009789	2.136	0.017242	2.074	0.009829	2.152
	0.7	0.000342	3.122	0.000691	3.035	0.000871	3.074	0.000635	3.077
	0.75	0.000268	2.956	0.001355	2.835	0.001969	2.811	0.001197	2.867
	0.8	0.000877	2.715	0.001953	2.703	0.003184	2.616	0.002005	2.678
	0.85	0.001359	2.513	0.004529	2.452	0.005721	2.402	0.003870	2.456
	0.9	0.002885	2.286	0.007516	2.237	0.015568	2.200	0.008656	2.241
건축학회 -STEEL	0.95	0.005709	2.088	0.016656	1.996	0.019713	1.990	0.014026	2.025
	1	0.010688	1.879	0.023049	1.811	0.032197	1.770	0.021978	1.820
	0.7	0.000113	5.353	0.000086	5.140	0.000340	4.856	0.000180	5.116
	0.75	0.000141	4.998	0.000508	4.657	0.000445	4.528	0.000365	4.728
	0.8	0.000313	4.581	0.001023	4.265	0.001008	4.079	0.000781	4.308
	0.85	0.000385	4.203	0.002045	3.893	0.002205	3.725	0.001545	3.940
	0.9	0.001160	3.763	0.002945	3.534	0.003236	3.462	0.002447	3.586
	0.95	0.002166	3.438	0.003771	3.222	0.007000	3.049	0.004313	3.236
	1	0.002949	3.188	0.006854	2.910	0.010822	2.740	0.006875	2.946

표 3은 고정하중에 대한 활하중의 비, 보강방법과 제시된 기존의 보강이론식에 따른 파괴확률과 강도감소계수를 나타내고 있다. 표에 나타나 있는 신뢰도 지수(reliability index ; β)는 g 의 값을 정규분포로 가정하여 다음식으로 산정한 개략적인 값이다.

$$\beta = (\mu_{Mn} - \mu_M) / \sqrt{\sigma_{Mn}^2 + \sigma_M^2} \quad (3)$$

Simulation 결과에 의하면 L/D =0.5-1.5일때 CFRP로 보강된 RC보의 경우 신뢰도 지수 3.0을 중심으로 강도감소계수가 0.7 - 0.8, 강판으로 보강된 RC보의 경우에는 0.95-1.0정도로 적용되어야 함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다. (1) M/Mn 의 평균 및 변동계수는 CFRP로 보강된 RC보의 경우 CFRP의 파단률, 보강량 및 콘크리트의 강도가 영향을 많이 미치며, 강판으로 보강된 RC보의 경우에는 콘크리트의 강도와 Steel의 보강량이 영향을 많이 미침을 알 수 있다. (2) 적용된 이론식에 따라 이들 통계값들의 차이가 많음이 고찰되었으므로 정확한 예측식을 적용하여 강도감소계수를 산정할 필요가 있다. (3) CFRP로 보강된 RC보의 경우 신뢰도 지수 3.0을 중심으로 강도감소계수가 0.7 - 0.8 정도이며 강판으로 보강된 RC보의 경우 강도감소계수가 0.95-1.0에 가깝게 나타났다. 건축학회의 경우 보강방법에 따라 강도감소계수의 차이가 크게 남을 알 수 있다. (4) 정확한 강도감소계수를 산정하기 위하여는 추가적인 신뢰도 해석이 필요하다.

참고문헌

1. Nikolaos Plevris, Daniele Veneziano, "Reliability of RC Members Strengthened with CFRP Laminates," Journal of Structural Engineering, Vol.121, No.7, July, 1995 pp.1037-1044.
2. 대한건축학회, "콘크리트 구조물의 보수 보강", 1997
3. Bruce Ellingwood, Theodore V. Galambos, James G. MacGregor, C. Allin Cornell, "Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58 Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures", 1980
4. Alfredo H-S. Ang, Wilson H.Tang "Probability Concepts in Engineering Planning and Design", 1975
5. Reuven Y. Rubinstein, "Simulation and the Monte Carlo Method", 1981
6. ACI Committee 440, "Guide For the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthened Concrete Structures," January 2000
7. T. M. Roberts, "Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams", The Structural Engineer, Vol. 67, No.12, June 1989
8. Deric John Oehlers and John Paul Moran. "Premature Failure of Externally Plated Reinforced Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, Vol. 116, No.4, April, 1990
9. 김지영, 박형철, 김대영, 황진석, 박철립, "탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집, 제 14권 1호, pp. 319-326
10. 신영수, 홍기섭, 최완철, 홍영균, "탄소섬유쉬트로 밀면 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동", 대한건축학회 논문집, 제11권 8호, 통권 82호. 1995, pp.249~257
11. 박철립, 황진석, 박형철, 백명중, "탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 부착파괴거동에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회지, 제 9권 6호, 1997.12, pp.157~164