

FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 신뢰성 해석

Reliability Assessment of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars

남 호 윤* 서 대 원* 한 범 석** 신 성 우***
Nam, Ho Yun Seo, Dae Won Han, Byum Seok Shin, Sung Woo

ABSTRACT

Fiber reinforced polymer(FRP) bars are proving to be a valuable solution in the corrosion problem of steel reinforced concrete structures. As such, a number of guidelines for their use have been developed. These guidelines are primarily based on modifications to existing codes of practice for steel reinforced concrete structures. These guidelines are also similar in that though the design equations are presented in the partial factor formats that are often used in probability based design, they are not true probabilistic codes. Instead, they typically make use of already existing design factors for loads and resistances. Thus, when concrete structures reinforced FRP bars are designed, the structural reliability levels are not known.

This paper investigates uncertainties of concrete beams reinforced with GFRP bars. Also, the structural reliability levels are evaluated for the flexural failure mode.

요 약

FRP 보강근은 철근부식의 근본적인 대책으로서 높은 인장강도와 내부식성이 우수한 재료이다. 그러나 낮은 탄성계수로 인해 부재의 처짐 및 균열이 철근콘크리트를 사용한 부재에 비하여 크게 발생하는 문제점이 있으며, 취성적인 성질로 인하여 파괴가 급격히 발생할 우려가 있다. 이러한 FRP 보강근을 구조부재에 사용하기 위해서는 기존의 철근콘크리트 부재설계와는 다른 개념이 필요하며, 이미 구조부재에 FRP 보강근을 사용하고 있는 외국의 경우 기존의 FRP 보강근을 사용한 구조부재의 설계를 위한 제안식들은 실험에 의한 계수의 추가 등으로 철근콘크리트 구조설계식을 수정하는 형태로서 제안되어지고 있다.

그러나 이러한 방법은 설계식을 복잡하게 하며, 철근콘크리트와 다른 FRP 보강근의 특성을 적절히 반영하고 있다고 할 수 없다. 또한, 기존의 설계식의 수정된 형태에서는 하중저감계수와 같은 안전계수(safety factor)를 제안하고 있으나, 정확한 신뢰성레벨은 알지 못하며, 실험에 의한 경험적 값의 성격이 강하다. 따라서 본 연구에서는 FRP bar를 사용한 보의 불확실성을 조사하고, FRP bar를 사용한 부재의 신뢰성지수를 평가하였다.

*정회원, 한양대학교 대학원

**정회원, 동부건설 기술지원실, 공학박사

***정회원, 한양대학교 건축학부 교수, 공학박사

1. 서론

FRP 보강근은 철근부식의 근본적인 대책으로서 높은 인장강도와 내부식성이 우수한 재료이다. 그러나 낮은 탄성계수로 인해 부재의 처짐 및 균열이 철근콘크리트를 사용한 부재에 비하여 크게 발생하는 문제점이 있으며, 취성적인 성질로 인하여 파괴가 급격히 발생할 우려가 있다. 이러한 FRP 보강근을 구조부재에 사용하기 위해서는 기존의 철근콘크리트 부재설계와는 다른 개념이 필요하다. 이미 구조부재에 FRP 보강근을 사용하고 있는 외국의 경우 기존의 FRP 보강근을 사용한 구조부재의 설계를 위한 제안식들은 실험에 의한 계수의 추가 등으로 철근콘크리트 구조설계식을 수정하는 형태로서 제안되어지고 있다^{1,2}.

그러나 이러한 방법은 설계식을 복잡하게 하며, 철근콘크리트와 다른 FRP 보강근의 특성을 적절히 반영하고 있다고 할 수 없다. 또한, 기존의 설계식의 수정된 형태에서는 하중저감계수와 같은 안전계수(safety factor)를 제안하고 있으나, 정확한 신뢰성레벨은 알지 못하며, 실험에 의한 경험적 값의 성격이 강하다. 따라서 본 연구에서는 FRP bar를 사용한 보의 불확실성을 조사하고, FRP bar를 사용한 부재의 신뢰성지수를 평가하였다.

2. 신뢰성 이론

신뢰성 해석은 구조물의 설계 또는 해석시 사용되는 특성값의 불확실성에 따른 해석모델의 불완전성, 확률론적 분포특성을 갖는 외부하중 등과 같은 불확실성의 존재를 고려하여 구조물의 신뢰도를 결정한다. 구조물의 안전성은 저항 R이 작용외력 Q보다 작을 때 파손된다고 할 수 있으며 그림 1에서 나타낸 바와 같이 빗금친 부분의 면적이 파괴확률로서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = P(R - Q \leq 0) = \int_{g(x) \leq 0} f_x(X) dx \quad (1)$$

그림 1에서 신뢰성지수 β 는 0으로부터 확률변수 Z 까지의 평균 μ_Z 까지의 거리와 표준편차 σ_Z 의 비이며, β 가 커질수록 파괴확률은 감소하므로, 구조물의 안전성은 증가한다. 신뢰성지수 β 는 표준편차에 대한 평균의 비로 정의되며, 근사해법에서는 그림 2에서와 같이 원점으로부터 한계상태식까지의 길이를 최소화하는 점으로 나타낼 수 있다.

본 연구에서는 FRP bar를 사용한 콘크리트 보의 파괴확률을 산정하기 위하여 Crude Monte-Carlo 방법을 사용하였다. 이 방법은 식(1)과 같이 정의되는 파괴확률을 직접 적분하지 않고, 확률밀도함수의 특성을 반영하여 각 확률변수를 추출하고 충분한 횟수만큼 모의실험(simulation)을 수행하여 근사적인 파괴확률의 추정치를 다음과 같이 산정하게 된다.

$$P_f = \frac{N_g(g < 0)}{N} \quad (2)$$

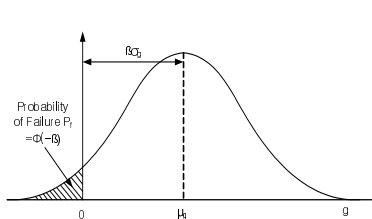


그림 1 신뢰도지수의 확률론적 개념

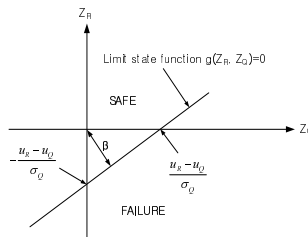


그림 2 신뢰도지수의 기하학적 개념⁴

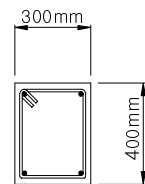


그림 3 보 단면 상세⁷

3. 신뢰성 해석

3.1 통계적 특성값

FRP bar를 사용한 콘크리트 보의 성능함수에서 많은 변수들의 불확실성이 존재한다. 각 변수들의 통계적 특성은 문헌조사^{4,5,6} 및 실험연구⁷에서 수집되었다. 변수들의 통계적 특성값은 표 1에 나타내었으며, 해석대상은 기 수행된 GFRP 보강근을 사용한 콘크리트 보⁷에 대해 Crude Monte-Carlo법을 사용하여 신뢰성해석을 수행하였다.

표 1 FRP bar를 사용한 부재의 변수들의 통계적 특성

Variance	Mean	cov	Distribution
f_{ck} (MPa)	28	0.11	Normal
	46	0.15	
f_f (MPa)	690	0.05	Normal
E_f (MPa)	40,800	0.05	Normal
b (mm)	Nominal-3.04	0.01	Normal
d (mm)	Nominal-10.16	0.03	Normal

표 2 하중변수들의 통계적 특성

	Mean	cov	Distribution
Dead Load	$1.05w_D$	0.1	Normal
Live Load	$1.2w_L$	0.25	Gamma

3.2 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 신뢰성 해석

본 연구에서는 ACI 440.1R-03에서 제안한 휨강도식을 사용하여 한계상태를 제안하였다. 이는 기존 실험연구들에서 균형보강비 이상의 부재에서 휨강도식이 실험결과를 비교적 정확히 예측하였기 때문이다⁵. 사용된 한계상태식은 식 (3), (4)와 같다.

$$G_1 = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f_{ck}} \right) b d^2 - M_{DL} - M_{LL} \leq 0 \quad (3)$$

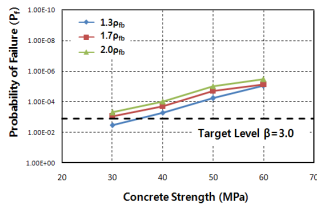
$$G_2 = f_f - f_{fu} \leq 0 \quad (4)$$

여기서, ρ_f =FRP bar의 보강비, f_f =FRP 보강근의 응력($f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f_{ck}}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \right) \leq f_{fu}$ (MPa))
 f_{ck} =콘크리트 압축강도(MPa) b =보의 폭(mm), d =보의 춤(mm)이다.

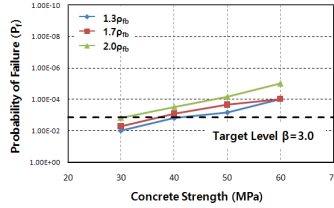
FRP bar를 사용한 콘크리트 보의 파괴확률은 앞서 정의된 변수들을 조합한 보 단면들에 대해서 한계상태 방정식을 산정한 후, 한계상태방정식이 음수가 되는 경우의 수를 계산하여 산정하였다. 본 연구에서는 이전연구에서 실험되었던 FRP bar를 사용한 콘크리트 보⁷중에서 압축측 콘크리트의 압축파괴가 확인된 균형보강비의 1.4배 이상의 실험체들에 대해 신뢰성 평가를 수행하였다. 실험체의 단면은 그림 3과 같으며, 각 부재의 산정된 파괴확률에 대하여 신뢰성 지수를 구하였다. 해석에서 하중은 고정하중에 대한 활하중의 비를 0.5, 1.0, 1.5의 세 경우를 고려하였으며, 콘크리트의 강도는 30, 40, 50, 60MPa의 네 가지 경우를 고려하여 강도의 증가에 따른 파괴확률의 변화를 검토하였다.

3.3 결과 및 분석

그림 4는 콘크리트의 강도변화 및 보강비의 증가에 따른 파괴확률의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 보강비의 증가, 콘크리트의 강도증가에 따라 파괴확률이 크게 줄어들며, 보강비의 증가에 따른 효과보다 콘크리트의 강도증가에 따른 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 이는 해석이 수행된 FRP bar를 사용한 콘크리트 보의 파괴모드가 콘크리트의 압축파괴가 지배적인 때문으로 판단된다. 사용하중하에서 목표신뢰도인 3.0을 모두 넘는 것으로 나타났으나 그림 5에서와 같이 균형보강비의 1.3배의 실험체에서 FRP bar의 변형이 허용한계를 넘는 경우가 발생하였다.



(a) LL/DL=1.0



(b) LL/DL=1.5

그림 4 콘크리트 강도 및 보강비의 효과

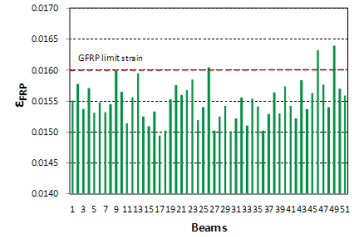


그림 5 GFRP bar의 변형(LL/DL=1.5)

4. 결론

본 연구에서는 FRP bar를 사용한 콘크리트 보의 신뢰성해석을 수행하여 안전성평가를 수행하였으며, FRP bar를 사용한 휨부재의 휨강도에 영향을 크게 미치는 주요 변수는 보강비, 콘크리트 강도이며, 콘크리트의 강도의 증가에 따른 파괴확률의 감소가 가장 크게 나타남으로 콘크리트 강도가 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 판단된다. FRP bar의 보강비가 1.4배 이상의 부재에서 파괴확률은 사용하중 하에서 국내 철근콘크리트 구조의 목표신뢰도를 만족하고 있으나, FRP bar의 파단이 일부 발생하는 것으로 나타남으로 FRP bar의 취성적인 성질을 고려할 때 목표 신뢰도 지수를 상향조정할 필요가 있는 것으로 판단된다. Crude Monte-Carlo 법은 많은 추출회수를 필요로 하며, 이에 따라 낮은 파괴확률의 산정에 어려움이 있는 것으로 나타났다. 따라서 정확한 파괴확률을 구할 수 있으며, 추출회수를 감소시킬 수 있는 기법의 연구가 추후 필요하다.

감사의 글

이 논문은 공공기술연구회 2004 정책사업 “FRP 복합재료 보강재개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술개발”, 과학기술부 우수연구센터 육성사업인 한양대학교 친환경건축연구센터 (R11-2005-056-01003-0) 및 한국 학술진흥재단 (KRF-2006- 511-D00405)의 연구비 지원에 의한 결과의 일부임.

참고문헌

1. ACI 440.1 R-01. "Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars", ACI Committee 440, American Concrete Institute, 2001
2. ISIS Cannad Design Manual 3, "Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers", The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, 2001
3. 양영순, 서용석, 이재욱, "구조신뢰성공학", 서울대학교 출판부, 1999
4. Andrzej S. Nowak, Kevin R. Collins, "Reliability of Structures", McGraw Hill, 1995
5. Ellingwood, B. et al., "Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58", NBS SP 577, U.S. Department of Commerce, June, 1980
6. Atsuhiko Machida and Kyuichi Maruyama, "Design Code Development for Fiber-Reinforced Polymer Structures and Repairs", Prog. Struct. Engng. Mater., 2002, Vol.4, pp.149-160
7. 신성우, 안중문, 한범석, 서대원, "FRP 보강근을 주근으로 사용한 콘크리트보의 보강비 효과", 대한건축학회 논문집 구조계 22권 2호, 2006. 2, pp.19-26