

복합신소재를 이용한 노후 철근콘크리트구조물 보강공법 소개

Introduction of Strengthened Method for Deteriorated Reinforced Concrete Structures by Advanced Composite Materials



지효선(Hyo-Seon Ji) 부회장 | 대원대학교 철도건설공학과 부교수 | hsji@mail.daewon.ac.kr

1. 서론

노후된 철근콘크리트 구조물의 보강기술은 다양하게 개발되어 적용되고 있으며, 최근에는 복합신소재(ACM; Advanced composite materials)를 이용한 철근콘크리트 구조물의 보강공법의 기술개발이 증가하고 있다. 건설분야에서 가장 많이 적용하고 있는 복합신소재로 FRP(Fiber reinforced polymer)재료이다. 철근콘크리트 구조물의 휨 및 전단부재 보강을 위해 사용되는 FRP재료는 CFRP(Carbon fiber reinforced polymer; 탄소섬유보강폴리머) 시트(Sheet)가 주로 사용된다. CFRP시트는 뛰어난 물리적 특성을 지닌 탄소섬유를 고성능 에폭시 수지에 함침시켜 만든 프리프레그(Prepreg)의 일종이다. CFRP의 단위면적당의 강도는 강재의 10배에 상당하며, 강재의 1/5의 비중으로 상대적으로 경작업 만으로 뛰어난 보강효과를 나타낼 수 있다. 기존 보강공법에설 요구되는 증량물의 운반장치나 가공, 용접 작업을 필요로 하지 않고, 소음의 문제가 없다. 또한 천정면이나 완곡면에 대한 시공성이 좋고 구조물의 여러 가지 형태에 대해서 폭넓게 적용할 수 있다. 그리고 가혹한

환경하에 대해서도 우수한 내구성을 보이고 있다.

CFRP시트에 의한 철근콘크리트구조물의 보강은 대부분 접착제의해 기존 콘크리트 표면에 CFRP시트를 부착하는 방법으로 Fig.1, 2와 같이 이루어지고 있다. 이러한 CFRP시트 보강공법은 매우 우수한 보강효과를 발휘하는 것에서, 종래공법에서는 얻을 수 없었던 폭넓은 공법 적용성 및 시공성, 경제성을 실현한 공법이라 할 수 있다.



Fig. 1. Flexural strengthening of a reinforced concrete slab



Fig. 2. Flexural(and shear) strengthening of a reinforced concrete beam

그 공법의 용도는 다음과 같다.

- 교량이나 건축물의 보, 기둥, 상판보강
- 터널라이닝, 항만시설, 싸일로, 창고, 수조의 보강
- 염해피해 콘크리트 구조물
- 하천 구조물의 제방보호 보강

2. 복합신소재로 보강된 RC보 휨해석

일반적으로 복합신소재인 CFRP쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 휨거동을 해석할 때에는 단면내에서의 변형률 분포를 선형으로 가정하는 Bernoulli-Navier의 가정을 적용한다. 또한, 해석에 있어서 균열부에서의 국부적인 부착 슬립이나 박리에 의한 영향은 무시한다. CFRP로 보강된 철근콘크리트보의 휨 파괴 모드는 극한하중 상태에서 인장철근이 항복과 콘크리트 압축파괴 후 CFRP쉬트 파단에 의한 인장파괴로 거동을 나타낼 수 있다. 이처럼 파괴모드를 기초로 하여 CFRP와 콘크리트가 일체 거동을 하는 것으로 가정하고 변형률 적합조건을 이용해서 CFRP로 보강된 철근콘크리트보의 휨강도를 해석한다.

극한하중 상태에서 인장철근이 항복과 콘크리트 압축파괴 후 CFRP쉬트 파단에 의한 인장파괴에 기초한 CFRP로 보강된 단면에서의 변형률 분포 및 응력상태는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

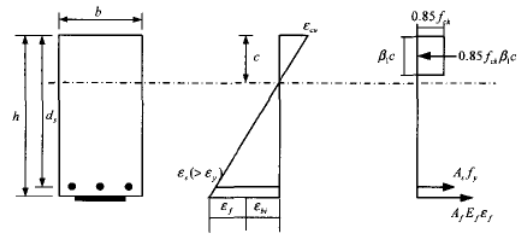


Fig. 3. Strain, stresses, and force resultants in strengthened section at the ultimate state

ACI 440.2R-02의 설계지침서에 제안된 사항으로 Fig. 3으로부터 극한상태에서의 CFRP쉬트의 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_f = \epsilon_{cu} \frac{(h - c)}{c} - \epsilon_{bi} \quad (1)$$

여기서, ϵ_{cu} 는 콘크리트의 최대 압축변형률, h 는 보의 높이, c 는 보의 중립축 위치를 나타내낸다. 그리고 ϵ_{bi} 는 보강 전하중에 의해 발생한 콘크리트 하면의 변형률을 나타내며 다음과 같다.

$$\epsilon_{bi} = M \frac{(h - kd_s)}{I_{cr} E_c} \quad (2)$$

여기서, M 은 CFRP쉬트로 보강된 보의 사용하중 하에서 휨모멘트, I_{cr} 는 보의 환산균열단면 2차 모멘트, h 는 보의 높이, d_s 는 보의 유효높이, k 는 유효높이 계수, E_c 는 콘크리트의 탄성계수값을 나타낸다.

또한, 인장철근의 변형률은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_s = (\epsilon_f + \epsilon_{bi}) \frac{(d_s - c)}{(h - c)} \quad (3)$$

Fig. 3으로부터 힘의 평행방정식을 이용하여 중립축 위치(c)를 다음과 같은 식으로부터 구할 수 있다.

$$0.85f_{ck}\beta_1cb - A_sE_s\epsilon_s - A_fE_f\epsilon_f = 0 \quad (4)$$

여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도, β_1 는 등가응력직사각형깊이 계수, c 는 보의 중립축 위치, b 는 보의 폭, A_s 는 철근의 단면적, E_s 는 철근의 탄성계수, ϵ_s 는 철근의 변형률, A_f 는 CFRP의 단면적, E_f 는 CFRP의 탄성계수, ϵ_f 는 CFRP의 변형률을 나타낸다.

식(4)에 식(1)을 대입하여 중립축 c 에 대해 정리하면 식(5)와 같은 이차방정식으로 나타낼 수 있으며, 이 식의 해를 구하면 CFRP로 보강된 철근콘크리트보의 중립축 c 를 구할 수 있다.

$$Ac^2 + Bc + C = 0 \quad (5)$$

여기서, $A = 0.85f_{ck}\beta_1b$

$$B = -A_sE_s\epsilon_s + A_fE_f(\epsilon_{cu} + \epsilon_{bi}) \quad (6)$$

$$C = -(A_fE_f\epsilon_{cu}h)$$

식(5)로부터 구한 중립축 위치 c 를 식(1)에 대입하여 극한상태에서 CFRP쉬트의 변형률을 구할 수 있다.

최종적으로 CFRP쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 공칭모멘트 M_n 은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_n = A_sE_s\epsilon_s(d_s - \frac{\beta_1c}{2}) + \Psi_f A_fE_f\epsilon_f(h - \frac{\beta_1c}{2}) \quad (7)$$

설계휨모멘트 ϕM_n 는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi M_n = \phi[A_sE_s\epsilon_s(d_s - \frac{\beta_1c}{2}) + \Psi_f A_fE_f\epsilon_f(h - \frac{\beta_1c}{2})] \quad (8)$$

CFRP쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 파괴모드는 극한하중 상태에서 인장철근이 항복과 콘크리트 압축파괴 후 CFRP쉬트 파단에 의한 인장파괴에 기초하고 있다. 이러한 파괴모드를 유지하기 위해서는

CFRP쉬트의 보강량의 제한을 규정하고 있다. 이것은 균형상태의 CFRP쉬트의 보강량을 기준으로 삼고 있으며, 이 균형상태는 콘크리트와 인장철근 및 CFRP쉬트가 동시에 파단하도록 설계되는 상태이다. 이러한 CFRP쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 균형상태의 변형률 분포를 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다.

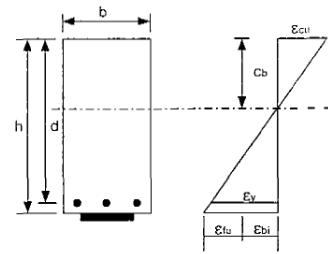


Fig. 4. Strain in strengthened section at the balanced condition state

균형상태의 보강비는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\rho_{fb} = \frac{A_{fb}}{bd} \quad (9)$$

균형상태에서의 중립축 위치 c_b 는 변형률 적합조건으로부터 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_b = \frac{\epsilon_{cu}h}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu} + \epsilon_{bf}} \quad (10)$$

Fig. 3에서 균형상태의 힘의 평형방정식으로부터 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$0.85f_{ck}\beta_1c_b b - A_s f_y - A_{fb} f_{fu} = 0 \quad (11)$$

식(11)에 식(10)을 대입하여 A_{fb} 에 대해서 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{fb} = \frac{0.85f_{ck}\beta_1bh\epsilon_{cu}}{f_{fu}(\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu} + \epsilon_{bi})} - \frac{A_s f_y}{f_{fu}} \quad (12)$$

식(12)로부터 구한 값과 보강면적 A_f 를 비교하여 파괴모드를 제어할 수 있다.

3. 복합신소재로 보강된 RC보 전단해석

노후된 철근콘크리트 보의 전단 내하력을 높이는 데 복합신소재인 CFRP쉬트로 보강하는 공법이 Fig. 5와 같이 사용되고 있다.

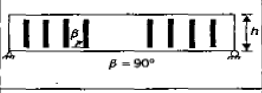



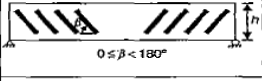



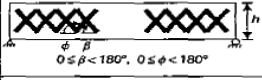



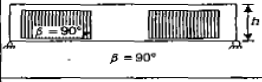



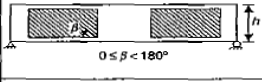



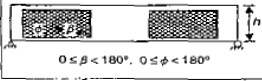



Fibre orientations and distributions	Bonding scheme and notation		
			
			
			
			
			
			

Fig. 5. FRP shear strengthening

ACI 440.2R-02의 설계지침서에서는 CFRP 전단보강 콘크리트 보의 전단강도 V_n 를 다음과 같이 정의하고 있다.

$$V_n = V_c + V_s + \Psi_f V_f \quad (13)$$

여기서, V_c 는 콘크리트의 전단강도 기여분, V_s 는 전단철근의 전단강도 기여분, V_f 는 CFRP의 전단강

도 기여분, Ψ_f 는 CFRP 강도감소계수를 나타낸다. CFRP쉬트의 전단강도 기여분 V_f 는 다음과 정의한다.

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin\alpha + \cos\alpha) d_f}{s_f} \quad (14)$$

여기서, A_{fv} 는 CFRP쉬트의 면적, f_{fe} 는 CFRP쉬트의 유효응력, s_f 는 CFRP쉬트의 간격, d_f 는 CFRP쉬트의 유효깊이를 나타낸다.

CFRP쉬트의 면적 A_{fv} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (15)$$

여기서, n 은 CFRP쉬트의 적층 수이며, t_f 는 CFRP쉬트의 두께이며, w_f 는 CFRP쉬트 폭의 길이를 나타낸다.

부재의 극한상태에서 CFRP쉬트의 인장유효응력 f_{fe} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \quad (16)$$

여기서, E_f 는 CFRP쉬트의 탄성계수이며, ϵ_{fe} 는 부재의 극한상태에서 CFRP쉬트의 변형률을 나타낸다.

4. 결론

본 기사에서는 복합신소재인 탄소섬유쉬트를 이용한 노후 철근콘크리트구조물 보강공법에 대해서 기술하였으며, 탄소섬유쉬트로 보강한 철근콘크리트보에 대해서 휨해석과 전단해석 방법을 개략적으로 소개하였다. 복합신소재의 여러 가지 장점을 가지고 있어, 최근에 탄소섬유 보강 쉬트를 이용한 철근콘크리트 구조물 보강공법의 효과는 많은 국내외 연구를 통해서 입증되었다. 이러한 연구는 대부분 건전

한 철근콘크리트 구조물에 대해서 탄소섬유쉬트를 보강한 구조체에 대한 실험 및 해석 연구결과이다. 향후 실제 노후 및 파손된 철근콘크리트 구조물에 대한 탄소섬유쉬트를 보강한 연구결과를 통해서 이러한 휨 및 전단해석 방법들이 보완되어야 할 것으로 사료된다. 앞으로 우리학회가 이러한 현실성 있는 연구 및 해석방법을 실험을 통하여 제시하여 복합신소재를 이용한 보강공법에 대한 설계지침을 제시하여야 할 것이다.

참고문헌

1. ACI 440 Committee, "Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP systems for Strengthening Concrete Structures"
2. Lawrence C. Bank (2006) "Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials", John Wiley & Sons, Inc.
3. 건설교통기술혁신사업최종보고서 (2003) "콘크리트교량의 보수·보강 재료 품질기준 및 공법 평가기준 개발 연구보고서", 건설교통부 한국건설교통기술평가원
4. 박종섭, 정우태, 유영준, 박영환 (2005) "탄소섬유쉬트에 의해 휨보강된 RC보의 휨강도 추정", 한국콘크리트학회 논문집, 제17권 2호, pp. 213~220.
5. 임동환, 남민희 (2008) "탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 부재의 전단경동", 한국콘크리트학회 논문집, 제 20권 3호, pp. 299~305.