

CFRP 보강근 보강 콘크리트 슬래브 휨설계의 효율성에 관한 연구

강수태^{1*}, 양은익², 최명성³

Investigation for the Efficiency in Flexural Design of CFRP Bar-Reinforced Concrete Slab

Su-Tae Kang^{1*}, Eun-Ik Yang², Myung-Sung Choi³

Abstract: In this study, for one-way concrete slabs, the flexural strength, deflection, and crack width according to the amount of reinforcing bars were compared for the cases of using steel reinforcing bars and CFRP reinforcing bars. Critical performance dominating the flexural design was investigated and how to design the CFRP-reinforced concrete slab with efficiency was also discussed. It was found that CFRP-reinforced concrete slabs could achieve greater design flexural strength with the same amount of reinforcing bars compared to those using steel rebar, while deflection and crack width were relatively much larger. In concrete slabs using CFRP reinforcing bars, it was confirmed that the maximum crack width acts as a dominant factor in the design. For more efficient flexural design, it is necessary to mitigate the allowable crack width to 0.7 mm and to apply smaller diameter reinforcing bars to control the crack width.

Keywords: One-way slab, CFRP bar, Flexural design, Deflection, Crack width

1. 서 론

철근 콘크리트 구조물은 경제적이고, 부재의 형상과 치수를 자유롭게 제작할 수 있는 이점과 함께 상대적으로 구조강성이 우수하며, 유지관리가 편리하여 가장 많이 적용되는 구조물 형태이다. 따라서 항상 콘크리트와 철근은 건설공사에서 가장 필수적인 재료로 인식되고 있다. 다른 한편으로, 철근 콘크리트 구조물은 균열이 발생하기 쉽고, 고부식성 환경 하에서 철근이 부식되는 경우 구조물의 안전성을 저하시킬 수 있다는 점 등의 단점도 가지고 있다(Angst et al., 2012; Han et al., 2021) 외기 중의 공기와 물과 접촉하여 진행되는 철근 부식은 염소이온의 침투, 탄산화 등으로 더욱더 촉진되기도 하고, 철근부식에 따른 콘크리트 부착 저하, 철근 단면손실에 따른 단면 저항력 감소, 철근의 부식팽창에 이어 발생하는 콘크리트의 균열 및 파손 등으로 인해 구조물의 성능저하를 유발할 수 있다(Oh et al., 2016; Stefanoni et al., 2018; Woo and Lee, 2014). 특히 항만 또는 해양 구조물과 같이 철근 부식이 쉽게 발생하는 열악한 환경에 노출되는 경우에는 짧은 기간

에 철근부식으로 인한 심각한 구조적 손상을 유발하기도 하고, 잦은 유지관리 공사와 많은 비용이 소요되는 등 철근부식에 따른 문제가 크게 부각되고 있다(Abbas and Shafiee, 2020).

FRP(Fiber-Reinforced Polymer) 보강근은 철근의 부식 문제를 해결하기 위한 대안으로 제시되었으며, 현재 GFRP(Glass FRP) 보강근, AFRP(Aramid FRP) 보강근, CFRP(Carbon FRP) 보강근 등 다양한 형태의 FRP 보강근의 개발 및 적용이 활발히 진행되고 있다(Nanni et al., 2014). 일반적으로 FRP 보강근은 파단 시까지 선형탄성거동을 보이는 특징을 가지며, 철근과 비교했을 때 상대적으로 높은 인장강도와 낮은 탄성계수를 나타낸다(ACI Committee 440, 2015). FRP 보강근의 높은 인장강도는 내하력 관점에서 볼 때 보강근 사용량을 줄일 수 있는 효과를 기대할 수 있지만, 상대적으로 낮은 탄성계수로 인해 큰 처짐과 균열폭을 유발할 수 있는 문제점도 내포하고 있다(Barris et al., 2017; Cho et al., 2015). CFRP 보강근은 FRP 보강근 중에서 상대적으로 매우 높은 탄성계수(120 GPa 이상)를 나타내기 때문에 처짐이나 균열폭 제어 관점에서 가장 효과적일 것이다.

이 연구에서는 휨부재 중 일방향 슬래브를 대상으로 하여, 철근을 사용한 경우와 CFRP 보강근을 사용한 경우에 대해 보강근 사용량에 따른 휨강도와 처짐 및 균열폭에 대한 비교를 실시하고자 하였으며, 휨설계의 지배적인 성능과 효율적인 휨설계 방안에 대해 검토해 보고자 하였다.

¹정회원, 대구대학교 건설시스템공학과 정교수

²정회원, 강릉원주대학교 토목공학과 정교수

³정회원, 단국대학교 토목환경공학과 부교수

*Corresponding author: stkang@daegu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan, 38453, Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2022년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2. RC 휨부재의 해석 방법

2.1 휨강도

2.1.1 CFRP 보강근을 사용한 경우

CFRP 보강근을 사용한 일방향 콘크리트 슬래브의 휨강도는 국내에서 제안된 ‘FRP 보강근 콘크리트 구조설계지침’(KCI, 2019) 및 ACI 440.1R-15(ACI Committee 440, 2015) 설계 가이드라인에 따라 평가할 수 있다.

철근 콘크리트 구조물의 설계는 연성거동을 확보하기 위해서 철근이 먼저 항복하도록 설계하고 있다. 반면에 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 휨부재는 콘크리트 압축파괴 또는 FRP 인장파괴를 모두 허용하며, 대신에 FRP 보강근의 취성파괴 특성으로 고려하여 상대적으로 낮은 강도감소계수를 적용하고 있다. FRP 보강근의 보강근비(ρ_f)에 따라 압축파괴 또는 FRP 인장파괴가 발생하며, 각각의 경우에 대해 휨강도는 보강근비의 크기에 따라 식 (1) 또는 (2)로 구할 수 있다.

$$\rho_f \geq \rho_{fb} \text{ 일 때, } M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

$$\rho_f < \rho_{fb} \text{ 일 때, } M_n = A_s f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (2)$$

위 식에서, ρ_{fb} 는 균형보강비를 나타내며 다음의 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (3)$$

식 (1)에서 a 와 f_f 는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$a = \frac{A_s f_f}{0.85 f'_c b} \quad (4)$$

$$f_f = \sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu} - 0.5 E_f \epsilon_{cu}} \leq f_{fu} \quad (5)$$

그리고 식 (2)에서 c_b 는 다음 식으로부터 구해진다.

$$c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + f_{fu}/E_f} \right) d \quad (6)$$

휨에 대한 강도감소계수는 FRP 보강근의 보강근비에 따라 식 (7)에 따라 결정된다.

$$\begin{aligned} \rho_f \leq \rho_{fb} \text{ 일 때, } & \phi = 0.55 \\ \rho_{fb} < \rho_f \leq 1.4\rho_{fb} \text{ 일 때, } & \phi = 0.3 + 0.25(\rho_f/\rho_{fb}) \\ \rho_f > 1.4\rho_{fb} \text{ 일 때, } & \phi = 0.65 \end{aligned} \quad (7)$$

2.1.2 철근을 사용한 경우

철근 보강 콘크리트 휨부재는 연성파괴가 일어나도록 균형 철근비(ρ_b)보다 적은 양의 철근을 사용하여 설계하며, 휨강도는 KDS 14 20 20: 2022 콘크리트구조 휨 및 압축 설계기준 (MOLIT, 2022)에 따라 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right), \quad a = \frac{A_s f_y}{\eta 0.85 f'_c b} \quad (8)$$

위 식에서 η 는 등가직사각형 압축응력블럭계수로서, 압축 강도의 크기에 영향을 받는다.

강도감소계수는 최외단 인장철근의 순인장변형률에 따라 0.65에서 0.85의 값을 적용한다.

2.2 처짐

2.2.1 CFRP 보강근을 사용한 경우

FRP 보강근 콘크리트 일방향 슬래브의 처짐은 ACI 440.1R-15(ACI Committee 440, 2015)에서 제시하고 있는 유효 단면2차 모멘트(I_e)에 관한 모델식을 이용하여 계산할 수 있으며, I_e 는 식 (9)와 같다.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \leq I_g \quad (9)$$

여기서, $\gamma = 1.72 - 0.72(M_{cr}/M_a)$ 이다.

2.2.2 철근을 사용한 경우

국내의 콘크리트 구조기준(KDS 14 20 30: 2021 콘크리트 구조 사용성 설계기준)(MOLIT, 2021)을 적용하여 식 (10)의 I_e 계산식을 적용하여 처짐을 계산할 수 있다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (10)$$

2.3 균열폭

CFRP 보강근을 사용한 휨부재의 인장 연단에서의 최대균열폭은 아래의 식 (11)을 이용하여 계산할 수 있다. 이 식은 Frosch(1999)가 균열현상에 근거하여 이론적으로 도출한 식으로, ACI 318-19(ACI Committee 318, 2019) 및 ACI 440.1R-15(ACI Committee 440, 2015)에 제시하고 있는 균열폭 제어를 위한 보강근 간격에 대한 규정이 이 식으로부터 유도되었으며(Min, 2012), 국내 ‘FRP 보강근 콘크리트 구조설계지침’(KCI, 2019)에서도 최대 균열폭 계산식으로 제시되고 있다.

$$w_c = 2 \frac{f_{fs}}{E_f} \beta k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (11)$$

여기서 f_{fs} 는 보강근의 인장응력을 나타내고, d_c 는 인장연단으로부터 가장 가까운 보강근의 중심까지의 거리를 의미한다. 그리고 s 는 보강근의 간격을 나타내며, β 는 중립축으로부터 인장연단까지의 거리와 중립축으로부터 보강근의 중심까지의 거리의 비를 나타낸다. k_b 는 FRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착특성을 고려한 부착계수이며, 일반적으로 실험에 의해 결정되지만, 그렇지 않은 경우에는 규사코팅 FRP 보강근은 0.8, 이형 FRP 보강근은 1.0, 그 이외의 보강근에는 1.4를 적용할 수 있다(KCI, 2019). 이 연구에서는 k_b 의 값으로 1.0을 적용하였다.

철근을 사용한 경우에도 위의 식 (11)을 수정하여 적용할 수 있다. 철근을 사용한 경우에는 CFRP 보강근의 부착특성을 고려한 부착계수, k_b 를 고려하지 않으며, f_{fs} 와 E_f 대신 각각 f_s (사용하중 상태에서의 철근의 인장응력)와 E_s 를 적용하여 최대 균열폭을 계산할 수 있다.

3. 해석조건

지간 2,000 mm, 폭 1,000 mm, 높이 240 mm의 단순지지된 콘크리트 슬래브를 대상으로 CFRP 보강근을 사용한 경우와 철근을 사용한 경우에 대해 보강근 사용량에 따른 일방향 슬래브의 휨강도, 처짐 및 균열폭의 변화를 살펴보고자 하였다. 콘크리트의 설계기준압축강도(f_{ck})는 30 MPa이고, 슬래브의 인장연단으로부터 인장철근 중심까지의 거리는 50 mm로 가정하였다. 해석에 적용한 CFRP 보강근 및 철근의 기계적 특성값은 Table 1과 같다. 처짐과 균열폭은 보강근 사용량에 따른 설계휨강도($M_d = \phi M_n$)의 100%에 해당하는 작용모멘트(M_u)가 작용하는 경우의 하중조건에서의 값과, 실제 사용하중에 따른 값으로 구분하여 해석을 수행하였다. 처짐 계산 시 하중 재하조건 중 활하중은 편의상 중앙부 집중하중으로 작용하는 상황으로 가정하였다. 해석 시 보강근의 중심간격은 슬래브 두께의 2배 또는 300 mm를 초과하지 않는 조건 내에서 검토하였으며, 배력철근은 'FRP 보강근 콘크리트 구조설

Table 1 Mechanical properties of steel rebar and CFRP rebar

Rebar type	Tensile strength [MPa]	Tensile strain [%]	Tensile modulus of elasticity [MPa]
Steel rebar	400*	0.002**	200,000
CFRP rebar	2,300***	0.018	130,000

*yield strength, **yield strain, ***guaranteed tensile strength

계지침'(KCI, 2019) 및 ACI 440.1R-15(ACI Committee 440, 2015) 설계 가이드라인을 만족하도록 배근하는 상태로 가정하였다. CFRP 보강근과 철근 사용에 따른 성능 비교평가는 기본적으로 호칭 D13의 동일한 치수의 보강근을 사용하는 조건을 적용하였으며, CFRP 보강근 사용에 따른 처짐 및 균열폭 변화 검토 시에는 D13 이외에 D10, D8, D6 호칭의 CFRP 보강근도 함께 고려하였다.

4. 결과 및 분석

4.1 휨강도

일방향 슬래브에서의 보강근 사용량에 따른 설계휨강도의 변화를 CFRP 보강근을 사용한 경우와 철근을 사용한 경우에 대해 비교하였으며, 그 결과는 Figs. 1~3과 같다. Fig. 1은 보강근 사용량에 따른 설계휨강도의 변화를 나타낸 것이다. 보강근량 3,000 mm² 이하의 구간에서는 CFRP 보강근을 사용하였을 때가 동일 양의 철근을 사용한 경우보다 더 큰 설계휨강도를 보이며, 특히 1,000 mm² 이하의 적은 보강근량의 구간에서는 철근을 사용한 경우에 비해 2배 이상의 설계휨강도를 보이고 있다. 한편 그 이상의 보강근량을 사용한 경우에는 철근 보강 슬래브의 설계휨강도가 CFRP 보강근을 사용한 경우에 비해 더 큰 값을 보이고 있다. Fig. 2는 보강근 사용량 대신 상대보강근비(ρ/ρ_b)에 따른 설계휨강도 변화를 나타낸 것으로, 철근 보강 슬래브의 휨강도는 최소 철근비(ρ_{min})로부터 균형철근비(ρ_b)까지의 범위에서 살펴보았으며, CFRP 보강근 보강 슬래브의 휨강도는 콘크리트 압축과괴 또는 FRP 보강근 인장과괴 지배 단면 모두 설계가 가능하기 때문에 최소 보강근비로부터 균형보강근비(ρ_{fb})의 3배까지의 범위에서 살펴본 것이다. CFRP 보강근의 균형보강근비에 해당하는 보강근량은 304 mm²으로 균형보강근비의 3배에 해당하는 보강근량은

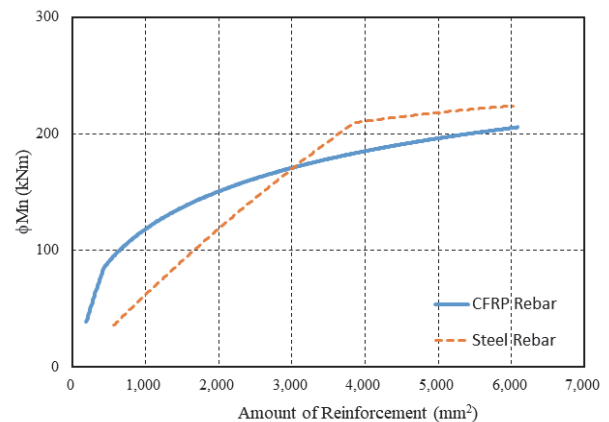


Fig. 1 ϕM_n vs. amount of reinforcement

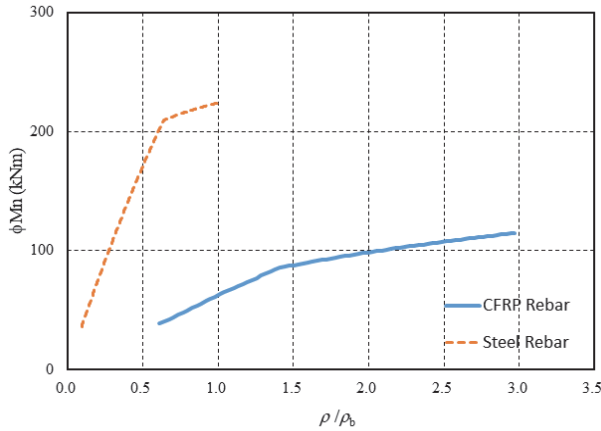


Fig. 2 ϕM_n vs. reinforcement ratio

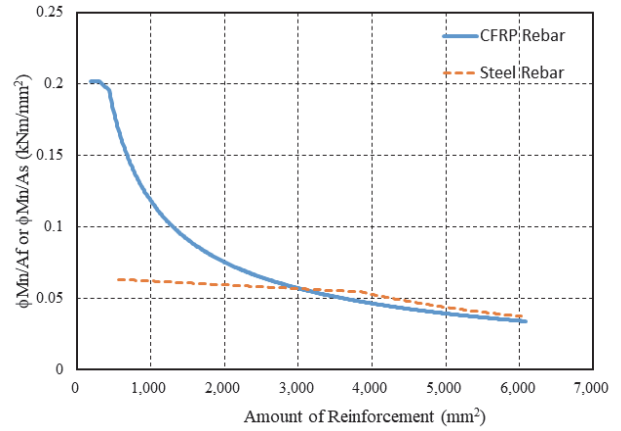


Fig. 3 $\phi M_n / A_{\text{reinf}}$ vs. amount of reinforcement

912 mm²이다. Fig. 1에서 검토한 최대 보강근량 6,000 mm²는 철근 보강 콘크리트 슬래브에서는 균형철근비에 해당하고, CFRP 보강근 보강 슬래브에서는 균형보강근비의 약 20배에 해당하는 값이다. 철근 보강 휨부재의 균형철근비는 0.0318 이고 CFRP 보강근 보강 휨부재의 균형보강근비는 0.0016으로, CFRP 보강근의 높은 인장강도와 낮은 탄성계수로 인해 CFRP 보강근 보강 휨부재의 균형보강근비가 철근 콘크리트 휨부재에 비해 훨씬 작다. 보강근량에 따른 설계휨강도가 CFRP를 사용한 경우가 철근을 사용한 경우보다 큰 구간인 보강근량 3,000 mm² 이하의 구간은 FRP 보강근의 파단파괴 또는 콘크리트 압축파괴 양상을 모두 포함하며, 304 mm² 이상의 대부분의 구간에서는 콘크리트 압축파괴가 단면력을 지배한다. 실제 설계에서 적용하는 철근 콘크리트 휨부재의 철근비는 균형철근비의 50%에도 훨씬 못미치는 경우가 대부분이므로 CFRP 보강근을 사용한 경우가 철근을 사용한 경우에 비해 동일한 보강근량에 대해 설계휨강도가 더 크다고 볼 수 있다. Fig. 3은 보강근량 대비 설계휨모멘트의 비율을 나타낸 것

으로, 휨모멘트에 대한 보강근 사용의 효율성을 보여주고 있다. 보강근량 대략 3,000 mm² 정도까지의 구간에서는 CFRP 보강근을 사용한 경우가 철근을 사용한 경우에 비해 초기 2배 이상을 나타내다 점차 줄어들며, 그 이후에는 철근과 거의 유사한 효과를 보이는 것을 알 수 있다.

4.2 $M_a = 0.65 M_d$ 조건에서의 처짐 및 균열폭

4.2.1 처짐

Fig. 4는 콘크리트 슬래브의 보강근량에 따른 슬래브 중앙부 처짐의 변화를 보여주는 것으로, 설계휨강도($M_d = \phi M_n$)의 100%에 해당하는 작용모멘트(M_u)가 작용하는 경우에 대해 사용하중에 의한 처짐을 계산한 것이며, 사용하중은 M_u 의 65%가 M_a 로 작용하도록 하는 집중하중으로 가정하였다. 모든 보강근량 범위에서 철근을 사용한 경우에 비해 CFRP 보강근을 사용한 경우에서 처짐이 크게 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이와 같은 결과는 CFRP 보강근의 상대적으로 작은 탄성계수와 동일한 보강근량에서 더 큰 휨모멘트 저항력 때

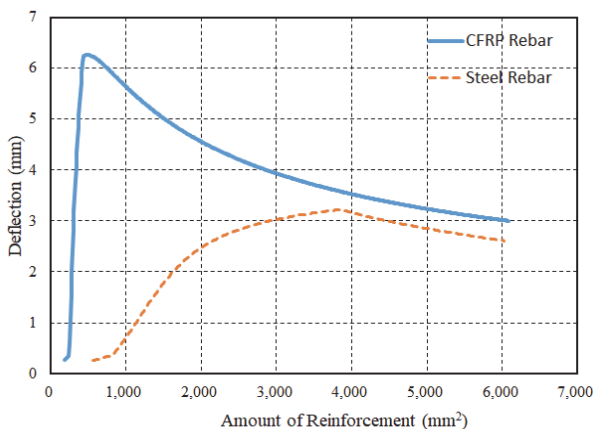


Fig. 4 Deflection vs. amount of reinforcement when $M_a = 0.65 M_d$

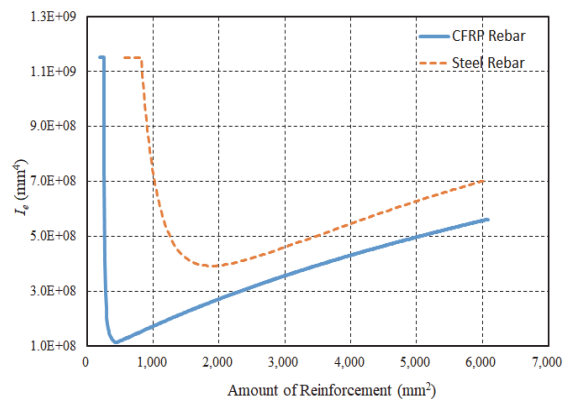


Fig. 5 Effective moment of inertia vs. amount of reinforcement when $M_a = 0.65 M_d$

문이다. 보강근량 3,000 mm² 이하의 적은 보강근량을 사용하는 구간에서는 저항 모멘트가 철근을 사용한 경우에 비해 훨씬 크기 때문에 처짐량도 크게 나타난다. 또한 Fig. 5에서 보는 바와 같이 식 (9)와 식 (10)으로 각각 계산된 유효 단면2차 모멘트(I_e)의 크기가 서로 다른 영향도 크게 나타났다. CFRP 보강근을 사용한 경우 보강근량 250~300 mm² 구간에서 사용하중상태 I_e 값이 급격히 변하는 것을 볼 수 있으며, 단순히 최소 I_e 값을 비교해도 CFRP 보강근을 사용한 경우의 I_e 값이 철근을 사용한 경우와 비교했을 때 1/4 정도 밖에 되지 않음을 알 수 있으며, 이러한 차이가 처짐량의 큰 차이로 나타났다. 철근을 사용한 경우와 비교해서 CFRP 보강근을 사용한 경우의 상대적으로 매우 큰 처짐량은 슬래브 설계에서 휨강도보다는 처짐량이 설계의 지배적 요인이 될 수 있음을 보여준다. 보강근량 3,000 mm² 이상에서는 사용하중에 의한 작용 모멘트가 오히려 철근을 보강한 경우가 더 큰 구간으로, 탄성계수 차이에 의한 처짐량 차이가 지배적으로 나타나고 있다.

4.2.2 균열폭

Fig. 6은 CFRP 보강근을 사용한 경우와 철근을 사용한 경우의 콘크리트 슬래브에서 발생하는 최대 균열폭을 나타낸 것이다. 두 경우 모두 보강근은 동일하게 D13 이형보강근을 사용하는 경우로 고려하였다. 앞서 처짐 계산에서와 마찬가지로 설계휨강도($M_d = \phi M_n$)의 100%에 해당하는 작용모멘트(M_u)가 작용하는 경우에 대해, 사용하중에 의한 모멘트(M_a)를 M_u 의 65%로 가정하여 최대 균열폭을 계산하였다. 또한 이 때 철근의 배근간격은 균일하다고 가정하였다. CFRP 보강근을 사용한 경우 슬래브에서 발생하는 최대 균열폭이 철근을 사용한 경우에 비해 보강근량 대략 3,000 mm² 이하 구간에서 뚜렷하게 더 크게 발생하고 보강근량이 적을수록 최대 균열폭의 차이가 더 커지는 것을 볼 수 있으며, 특히 설계휨

강도 측면에서 CFRP 보강근을 사용하였을 때 훨씬 큰 휨강도를 얻을 수 있는 1,000 mm² 이하 구간에서는 최대균열폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 국내에서 철근 콘크리트 휨부재에서 일반적인 허용 균열폭을 0.3 mm로 제한하고 있음을 감안하면 철근을 사용한 경우는 대부분 최대 균열폭이 허용 균열폭 범위 내에 있다. 반면에 CFRP 보강근 보강 콘크리트 휨부재는 국내 ‘FRP 보강근 콘크리트 구조설계지침’(KCI, 2019)에서는 0.5 mm를 적용하고 있으며, ACI 440.1R-15(ACI Committee 440, 2015)에서도 배근간격 범위에 의한 간접적인 균열폭 제한 방법을 제시하지만 이 기준 또한 허용균열폭 0.5 mm 내외에 해당한다. 그리고 CAN/CSA-S6-14(CSA, 2014)에서는 심한 노출환경에서는 0.5 mm, 일반환경에서는 0.7 mm를 허용 균열폭으로 제시하고 있다. 하중조건이 정확하지는 않더라도 대략적으로도 보강근량 1,500 mm² 이하 또는 1,000 mm² 이하에서는 허용 균열폭 0.5 mm 또는 0.7 mm 이상의 균열이 발생하는 것으로 보이며, 이와 같은 상황은 처짐에서와 마찬가지로 슬래브 설계에서 휨강도보다 최대 균열폭의 제한이 설계의 지배적 요인이 될 수 있음을 보여준다.

한편, 최대 균열폭에 관한 식 (11)에서 보는 바와 같이 균열폭에 크게 영향을 미치는 요인은 보강근의 배근간격(s)과 사용하중상태에서의 보강근의 인장응력(f_{fs})이다. 주어진 하중재하 조건에서 최대 균열폭을 줄일 수 있는 방법은 동일한 보강근량을 만족하면서 직경이 작은 보강근을 사용하여 배근간격(s)을 줄이는 것이다. 따라서 D10, D8, D6의 직경이 작은 보강근을 적용하였을 때의 최대균열폭을 살펴보았으며, 그 결과는 Fig. 7과 같다. D10 CFRP 보강근을 사용하면 1,100 mm² 이상의 보강근량 구간에서 최대 균열폭을 0.5 mm 이하로 제어할 수 있으며, D8의 경우에는 990 mm² 이상, D6의 경우에는 900 mm² 이상의 보강근량 구간에서 균열폭을 0.5mm 이하로 제어할 수 있는 것으로 나타났다.

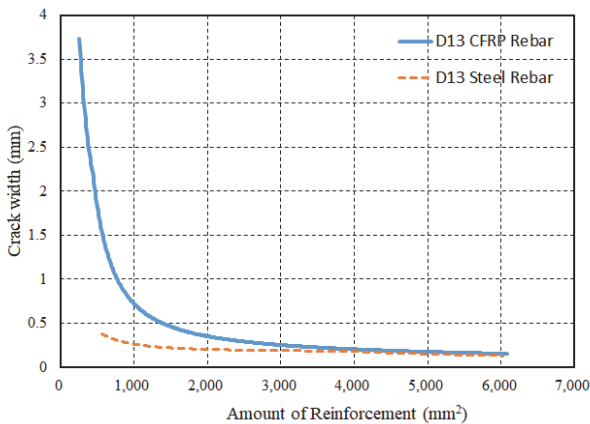


Fig. 6 Crack width vs. amount of reinforcement for D13 CFRP and steel rebar when $M_a = 0.65M_d$

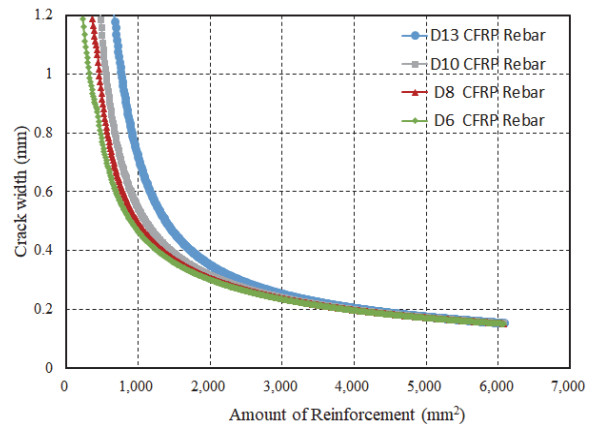


Fig. 7 crack width vs amount of reinforcement for D13, D10, D8, D6 CFRP rebars when $M_a = 0.65M_d$

4.3 실제 하중상태에서의 처짐 및 균열폭

앞에서는 하중특성이 결정되지 않은 상태에서, 사용하중에 의한 모멘트를 설계모멘트의 65%로 가정하여 처짐 및 균열폭에 대하여 대략적인 비교검토를 실시하였다. 여기에서는 슬래브의 실제 설계 시 적용되는 사용하중을 고려하여 처짐 및 최대 균열폭을 검토하였다. 실제 하중상태는 한 예로서 일반적으로 교량 바닥판 설계 시 고려되는, 자중 및 포장을 고려한 고정하중과 차량 후륜하중 및 충격을 고려한 활하중으로 반영하였다. 고정하중에 의한 모멘트(M_{DL})는 3.94 kN·m이고, 활하중에 의한 모멘트(M_{LL})은 32.5 kN·m으로 계산되며, 따라서 사용하중에 의한 모멘트(M_u)는 36.44 kN·m이다.

4.3.1 처짐

KDS 14 20 30: 2021 콘크리트구조 사용성 설계기준 (MOLIT, 2021) 및 ‘FRP 보강근 콘크리트 구조설계지침’(KCI, 2019)에 따르면, 철근 또는 CFRP 보강근 보강 콘크리트 구조에 대해 동일하게 순간처짐에 대해 활하중에 의한 처짐을 $L/800$ 이내가 되도록 제한하고 있으며, 장기처짐에 대해서는 모든 지속하중에 의한 장기처짐과 추가적인 활하중에 의한 순간처짐의 합인 총 처짐량이 $L/240$ 이내가 되도록 규정하고 있다. 활하중에 의한 처짐은 활하중에 의한 모멘트(M_{LL})가 중앙부 집중하중에 의해 발생하는 것으로 가정하여 해당하는 집중하중에 의한 처짐으로 계산하였다. 또한 지속하중에 의한 장기처짐 계산 시 활하중의 20%를 지속하중으로 고려하였다. Fig. 8과 9는 보강근 사용량에 따른 슬래브에서 발생하는 순간처짐량 및 장기처짐량을 나타낸 것으로, 철근을 사용한 경우에 비해 CFRP 보강근을 사용한 경우 처짐량이 더 크지만 모든 구간에서 순간처짐 및 장기처짐 발생량이 모두 허용 최대처짐량보다 작음을 알 수 있다.

실제 하중상태에 대한 설계하중을 고려한 설계휨모멘트는

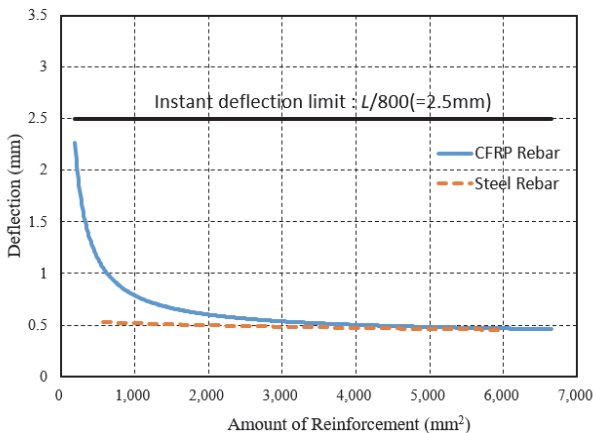


Fig. 8 Instant deflection vs. amount of reinforcement with actual load condition

63.66 kN·m이고, 이를 만족하기 위한 최소 보강근량은 CFRP 보강근 보강 콘크리트 슬래브에서는 314 mm² 이고, 철근 보강 콘크리트 슬래브에서는 1,028 mm² 이다. 이 값에 해당하는 보강근량에서의 처짐량을 Fig. 8과 9에서 살펴보면, CFRP 보강근에 대해서는 순간처짐이 1.56 mm, 장기처짐 2.13 mm이고, 철근을 사용한 경우에는 순간처짐 0.52 mm, 장기처짐 0.71mm로 최대 허용처짐에 비해 크게 작다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 실제 사용하중 상태에 근거한 CFRP 보강근 보강 슬래브의 휨설계 시 처짐은 크게 문제가 되지 않는다고 볼 수 있다.

4.3.2 균열폭

이미 언급한 바와 같이 CFRP 보강근 보강 콘크리트 휨부재의 최대 균열폭은 ‘FRP 보강근 콘크리트 구조설계지침’(KCI, 2019)에서는 0.5 mm를, CAN/CSA-S6-14(CSA, 2014)에서는 0.5 mm(심한 노출환경) 또는 0.7 mm(일반환경)를 허용 균열폭으로 제시하고 있으며, 철근 콘크리트 휨부재에 대해서는 국내에서 일반적으로 직·간접적으로 허용 균열폭을 0.3 mm를 적용하고 있다. Fig. 10은 D13 철근을 사용하였을 때 철근 콘크리트 슬래브에서의 철근량에 따른 최대 균열폭을 나타낸 것이며, 설계모멘트 63.66 kN·m를 만족하는 철근량 1,028 mm²을 적용할 경우에 균열폭은 0.23 mm로 허용값 이내임을 알 수 있다. 반면, CFRP 보강근을 사용한 경우에는 균열폭이 상대적으로 매우 크게 발생하기 때문에, 균열 제어 관점에서 D13, D10, D8, D6의 네 가지 호칭의 보강근을 고려하였으며, 보강근량에 따른 최대 균열폭은 Fig. 11과 같다. 설계모멘트를 만족하는 CFRP 보강근량 314 mm²를 적용하였을 때, D13 보강근을 사용하면 최대균열폭이 2.65 mm 만큼 크게 발생하며, 가장 작은 직경의 D6 보강근을 사용하여도 최대균열폭이 0.90 mm로 허용 균열폭 이상 크기로 발생하는

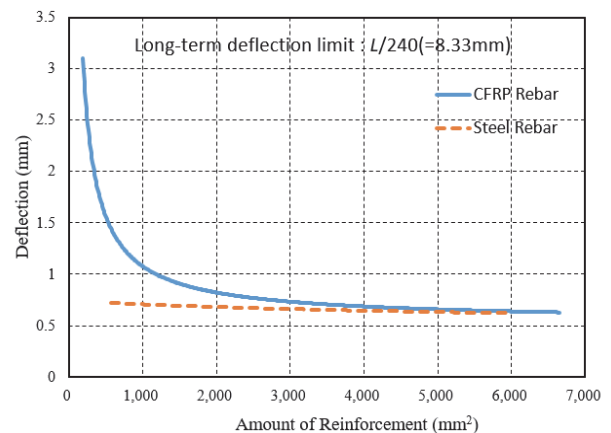


Fig. 9 Long-term deflection vs. amount of reinforcement with actual load condition

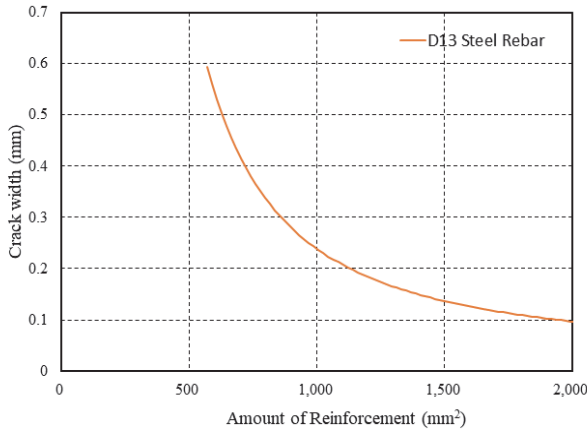


Fig. 10 Crack width vs. amount of reinforcement for D13 steel rebar with actual load condition

것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 CFRP 보강근 보강 슬래브의 휨설계에서는 휨모멘트나 처짐보다는 균열폭이 설계를 지배함을 의미한다.

4.4 CFRP 보강근 보강 슬래브의 효율적 휨설계

앞서 살펴본 바와 같이 CFRP 보강근 보강 콘크리트 슬래브의 설계에서는 균열폭이 설계의 지배적 인자로 작용할 수 있다. 철근 콘크리트 구조의 균열폭과 관련한 여러 연구결과에서는 표면 균열폭에 대한 제한은 단지 미적인 관점이지 철근부식에 미치는 영향은 거의 없다고 밝혀 왔으며(Gergely 1981; Darwin et al., 1985, Oesterle, 1997). 최근에서는 허용균열폭을 완화하고자 하는 움직임도 있다(Mousa et al., 2020). 현재 ACI 318-19(ACI Committee 318, 2019)이나 KDS 구조설계기준(MOLIT, 2022)에서는 균열폭을 간접적으로 제어할 수 있도록 배근간격을 규정하는 방법을 채택하고 있으며, 기준이 되는 허용균열폭은 전자의 경우 0.5 mm, 후자에서는 0.3 mm이다. FRP 보강근 보강 콘크리트 슬래브의 경우에는 보강근의 부식에 대한 염려가 없으므로 강제 부식 관점에서의 허용균열폭은 의미가 없으며 따라서 균열폭 제한으로부터 좀 더 자유로울 여지가 있다. 현재 ‘FRP 보강근 콘크리트 구조설계지침’(KCI, 2019)에서는 철근 콘크리트 구조에 보편적인 기준이 되는 허용균열폭 0.3 mm보다 큰 0.5 mm를 허용균열폭으로 제시하고 있다. AASHTO(2009)나 JSCE(1997)에서도 FRP 보강근 휨부재의 허용균열폭을 0.5 mm로 정하고 있다. 또한 CAN/CSA-S6-14(CSA, 2014)에서는 보다 완화된 기준으로 일반환경에서 0.7 mm를 허용 균열폭으로 제시하고 있다. 앞서 Fig. 11에서 보인 바와 같이, 실제 하중상태에서 설계휨모멘트 기준의 보강근량에 대해서 D6에서 D13까지 크기의 CFRP 보강근 모두 허용균열폭 0.5 mm를 만족하지 못하는 것을 보았다. 따라서 슬래브의 경제적인 설계를 위해서는

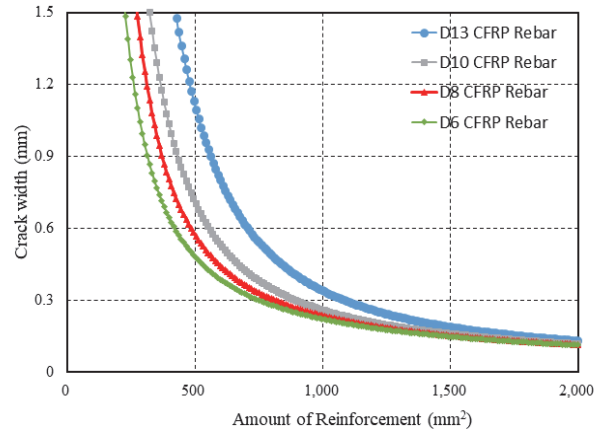


Fig. 11 Crack width vs. amount of reinforcement for D13, D10, D8, D6 CFRP rebar with actual load condition

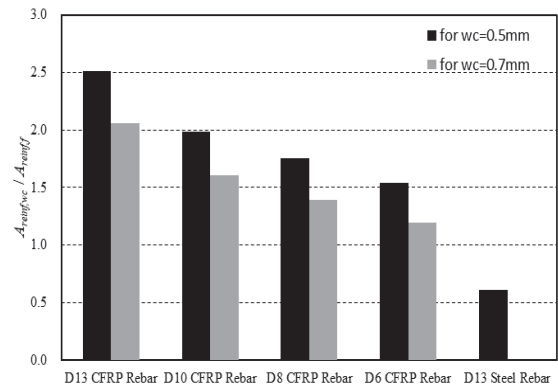


Fig. 12 Ratio of amount of reinforcement required for limited crack width and flexural strength with different reinforcing bars

CSA의 허용균열폭 0.7 mm 적용을 적극적으로 검토해 볼 필요가 있을 것이다. Fig. 12는 네 가지 직경 크기의 CFRP 보강근과 철근을 사용한 경우에 대해 설계휨모멘트에 대한 보강근량과 허용균열폭을 만족하기 위해 필요한 보강근량의 비를 나타낸 것이다. 허용균열폭을 0.5 mm로 했을 때, D13 보강근을 사용한 경우에는 휨모멘트 저항에 필요한 보강근량의 약 2.5배를 사용하여야 허용균열폭을 만족할 수 있으며, D10은 약 2.0배, D8은 약 1.8배, D6은 약 1.5배의 보강근량이 허용균열폭을 만족하기 위해 필요로 한다. 허용균열폭을 0.7 mm로 하게 되면, D13은 2.0배, D10은 1.6배, D8은 1.4배, D6은 1.2배의 보강근량을 필요로 한다. 따라서 휨모멘트에 의한 보강근량 결정이 설계를 지배하기 위해서는 D6 미만의 아주 작은 직경의 CFRP 보강근 사용이 요구된다. 시공 실무에서는 동일 보강근량에 대해 작은 직경의 보강근을 사용하면 수량의 증가로 인해 작업량이 증가하고, 또한 작업 중 보강근의 변형 또는 손상이 발생할 가능성이 높아지기 때문에 D13 미만의 보강근은 거의 사용되지 않는다. 하지만 CFRP 보강근의 경

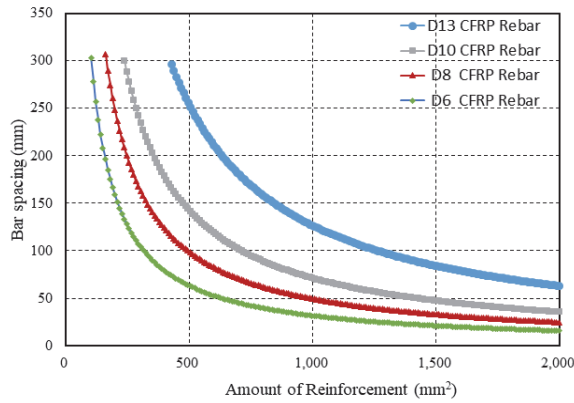


Fig. 13 Bar spacing vs. amount of reinforcement for D13, D10, D8, D6 CFRP rebar

우에는 균열폭을 제어하기 위해서는 작은 직경의 보강근 사용이 필요하다. 콘크리트 슬래브에서는 횡방향으로의 배력철근이 배근되는 점을 고려하면 작은 직경의 매쉬 또는 그리드 형태의 CFRP 보강근 사용이 균열폭도 제어하면서 현장의 어려움도 어느 정도 대응할 수 있는 좋은 대안이 될 수 있을 것으로 생각된다. 작은 직경의 보강근 사용으로 인해 보강근의 배근간격이 최소 배근간격을 만족하지 못할 염려가 있을 수 있으나, Fig. 13에서 보는 바와 같이 필요한 보강근량의 범위에서는 D6에서 D13의 보강근이 모두 최소 배근간격을 만족하고 있다.

Fig. 14는 4.3절에서 검토한 동일한 하중조건에 대해 슬래브의 휨강도 및 사용성을 모두 만족하도록 하는 철근량 또는 CFRP 보강근량에 대해 소요 철근량 대비 CFRP 보강근량의 비를 살펴본 것이다. 허용균열폭이 0.5 mm인 경우에 D13 CFRP 보강근은 철근량의 약 77%를 필요로 하며, 가장 작은 직경의 D6 CFRP 보강근은 철근량의 약 47% 정도만을 사용하고도 설계가 가능한 것으로 나타났다. 허용균열폭을 0.7 mm로 완화하게 되면 D13 CFRP 보강근은 철근량의 약 63%, D6 CFRP 보강근은 철근량의 약 36%만을 사용하여도 되는 것으로 나타났다.

그동안 경제적인 관점에서 CFRP 보강근의 가격이 철근에 비해 매우 비쌌기 때문에 고부식성 환경 등의 아주 제한적인 상황에서만 사용되어 왔지만, 최근 철근 가격이 몇 배로 급격하게 상승하면서 가격 격차가 많이 줄게 되면서 경제적인 관점에서도 다시 바라볼 수 있는 환경으로 변하고 있다. 단순히 생각하여 동일한 휨설계에 대해 철근을 사용한 경우에 비해 CFRP 보강근의 사용량이 3분의 1 밖에 되지 않는다면, CFRP 보강근의 가격이 철근 가격의 3배 이내라면 경제성을 확보할 수 있는 셈이다. 장기적인 관점에서 강재부식으로 인해 발생하는 보수보강 및 유지관리 비용 부담이 줄어드는 점을 고려하면 오히려 경제적으로 유리한 설계가 될 수 있다고 하겠다.

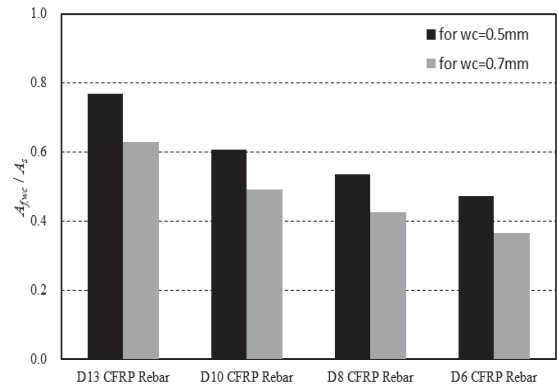


Fig. 14 Ratio of amount of CFRP rebar required for limited crack width and amount of steel rebar for flexural design

5. 결론

이 연구에서는 일방향 콘크리트 슬래브를 대상으로 하여, 철근을 사용한 경우와 CFRP 보강근을 사용한 경우에 대해 보강근 사용량에 따른 휨강도와 처짐 및 균열폭을 비교하여 평가하였으며, CFRP 보강근 콘크리트 슬래브의 휨설계의 지배적인 성능과 효율적인 휨설계 방안에 대해 검토하였다. 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 보강근량에 따른 콘크리트 슬래브의 설계휨강도는 적은 보강근량을 사용하는 경우에는 CFRP 보강근을 사용하는 경우가 철근을 사용하는 경우에 비해 훨씬 큰 설계휨강도를 보이지만, 보강근량이 많아질수록 두 경우 사이의 설계휨강도 차이가 줄어들다가 철근을 사용한 경우에 비해 더 작은 설계휨강도를 보인다. 처짐과 균열폭은 CFRP 보강근을 사용한 경우가 철근을 사용한 경우보다 더 크게 나타났으며, 특히 보강근량이 적을수록 차이가 크게 나타난다.
- (2) 실제 하중상태를 고려한 슬래브 설계에서는 설계 휨모멘트에 대해 필요한 CFRP 보강근량은 철근량의 1/3 수준으로 크게 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 철근 콘크리트 슬래브는 처짐 및 균열폭이 모두 허용값 이내로 만족하는 것으로 나타났다. CFRP 보강근 슬래브는 사용 하중 상태에서의 처짐량은 허용처짐량을 만족하는 반면, 최대균열폭은 D6에서 D13까지 크기의 보강근을 사용하는 모든 경우에서 허용균열폭을 초과하는 것으로 나타났다.
- (3) CFRP 보강근을 사용한 콘크리트 슬래브에서는 최대균열폭이 설계의 지배적인 요인으로 작용하는 것으로 확인하였으며, 효율적 휨설계를 위해서는 허용균열폭을 0.7mm로 완화하여 적용할 필요가 있으며, 작은 직경의 보강근을 실무에서 효율적으로 사용하기 위하여 보강근

매쉬 또는 그리드 형태의 적용을 검토할 필요가 있겠다.
 (4) 최대균열폭이 설계의 지배적인 요인이 되지 않도록 제어한다면, CFRP 보강근을 사용하면 콘크리트 슬래브에서 철근 대비 보강근량 사용량을 크게 줄일 수 있으며, 유지관리 비용의 절감 및 최근 철근가격의 급격한 상승으로 인한 CFRP 보강근과의 가격 격차 감소를 고려하면 CFRP 보강근의 활용이 확대될 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CFRP-C163392-01).

References

1. Angst, U. M., Hooton, R. D., Marchand, J., Page, C. L., Flatt, R. J., Elsener, B., Gehlen, C., and Culikers, J. (2012), Present and Future Durability Challenges for Reinforced Concrete Structures, *Materials and Corrosion*, 63(12), 1047-1051.
2. Han, M. S., Park, J. H., Lee, J. H., and Min, J. Y. (2021), Analysis of structural safety for rebar exposure and corrosion in PSC I-girder bridge slab, *Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 25(1), 67-74.
3. Oh, K. S., Park, K. T., and Kwon, S. J. (2016), Evaluation of Anti-Corrosion Performance of FRP Hybrid Bar with Notch in GGBFS Concrete, *Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 20(4), 51-58.
4. Stefanoni, M., Angst, U., and Elsener, B. (2018), Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review, *Cement and Concrete Research*, 103, 35-48.
5. Woo, S. K. and Lee, Y. (2014), Probabilistic Estimation of Service Life of Box Culvert for Power Transmission Considering Carbonation and Crack Effect, *Journal of the Korea Institute of Structural Maintenance and Inspection*, 18(6), 30-40.
6. Abbas, M. and Shafiee, M. (2020), An Overview of Maintenance Management Strategies for Corroded Steel Structures in Extreme Marine Environments, *Marine Structures*, 71, 102718.
7. Nanni, A., De Luca, A., and Zadeh, H. J. (2014) Reinforced Concrete with FRP Bars: Mechanics and Design, CRS Press, FL, USA, 35-63.
8. ACI Committee 440 (2015), Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer(FRP) Bars (ACI 440.1R-15), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI., USA.
9. Barris, C., Torres, L., Vilanova, I., Miàs, C., and Llorens, M. (2017), Experimental study on crack width and crack spacing for Glass-FRP reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 131, 231-242.
10. Cho, J. R., Park, Y. H., Park, S. Y., Cho, K. H., and Kim, S. T. (2015), Governing Design Factors of GFRP-Reinforced Concrete Bridge Deck, *Journal of the Korean Society of Safety*, 30(6), 70-77.
11. KCI(Korea Concrete Institute), Design Guideline of FRP-Reinforced Concrete Structure (KCI-M-19-001), Korea Concrete Institute, Korea.
12. MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2022), KDS 14 20 20: Design Standard for Flexure and Axial Load, MOLIT, Korea.
13. MOLIT(Ministry of Land, Infrastructure and Transport) (2021), KDS 14 20 30: Design Standard for Serviceability of Concrete Structure, MOLIT, Korea.
14. Frosch, R. J. (1999), Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete, *ACI Structural Journal*, 96(3), 437-442.
15. ACI Committee 318 (2019), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA.
16. Min, C. S. (2012), Crack Control in Beams and One-Way Slabs, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 24(4), 381-390.
17. CSA(Canadian Standards Association) (2014), Canadian Highway Bridge Design Code (CAN/CSA-S6-14), CSA Group, ON, Canada.
18. Gergely, P. (1981), Role of Cover and Bar Spacing in Reinforced Concrete, Significant Developments in Engineering Practise and Research: A Tribute to Chester P. Siess, SP-75, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 133-147.
19. Darwin, D., Hognestad, E., Beeby, A., and Rice, P. (1985), Debate: Crack Width, Cover, and Corrosion, *Concrete International*, 8(5), 20-35.
20. Oesterle, R. G. (1997), The Role of Concrete Cover in Crack Control Criteria and Corrosion Protection, PCA R&D Serial No. 2054, Portland Cement Association, IL, USA.
21. AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials) (2009), AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete Bridge Decks and Traffic Railings, DC, USA.
22. JSCE(Japan Society of Civil Engineers) (1997), Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Concrete Engineering Series No. 23, Japan, 325.

Received : 08/01/2022

Revised : 08/22/2022

Accepted : 08/29/2022

요 지 : 이 연구에서는 일방향콘크리트 슬래브를 대상으로 하여, 철근을 사용한 경우와 CFRP 보강근을 사용한 경우에 대해 보강근 사용량에 따른 휨강도와 처짐 및 균열폭을 비교하여 평가하였으며, CFRP 보강근 콘크리트 슬래브의 휨설계의 지배적인 성능과 효율적인 휨설계 방안에 대해 검토하였다. CFRP 보강근을 사용한 콘크리트 슬래브는 철근을 사용한 경우에 비해 동일한 보강근량에서 더 큰 설계휨강도를 얻을 수 있는 반면, 처짐 및 균열폭은 상대적으로 훨씬 크게 발생한다. CFRP 보강근을 사용한 콘크리트 슬래브에서는 최대균열폭이 설계의 지배적인 요인으로 작용하는 것으로 확인하였으며, 효율적 휨설계를 위해서는 허용균열폭을 0.7 mm로 완화하여 적용할 필요가 있으며, 작은 직경의 보강근 적용을 검토할 필요가 있음을 제시하였다.

핵심용어 : 일방향 슬래브, CFRP 보강근, 휨설계, 처짐, 균열폭
