

섬유보강 고강도 콘크리트 구조설계지침(안)의 저감계수에 대한 신뢰도 분석

Reliability Analysis of Reduction Factor for Structural Design Guideline(draft) of Fiber Reinforced High Strength Concrete

김아량¹ · 최정욱² · 백인열^{3*}

Ah-Ryang Kim¹ · Jungwook Choi² · Inyeol Paik^{3*}

(Received February 25, 2021 / Revised March 5, 2021 / Accepted March 8, 2021)

The purpose of this study is to analyze the reliability index of a design by applying the reduction factor of the recently developed fiber reinforced high strength concrete design guideline(draft). By collecting material and member test data performed for the development of the design guideline(draft), statistical characteristics of material strength and member strength analysis equations are obtained. A simulation that applies the material statistical characteristics and the member analysis equation of the design guideline(draft) is performed, and the statistical characteristics of the section strength are calculated by combining the statistical characteristics of the analysis equation. Reliability analysis was performed by applying the load combination of the domestic highway bridge design code and concrete structural code, and it was confirmed that the design that applies the reduction factor for materials and members suggested in the design guideline(draft) satisfies the target reliability index.

키워드 : 섬유보강 콘크리트, 저감계수, 통계특성, 신뢰도지수

Keywords : Fiber reinforced concrete, Reduction factor, Statistical characteristics, Reliability index

1. 서론

최근 국내에서 수행된 고성능 콘크리트 연구 과제를 통하여, 섬유보강 고강도 콘크리트 재료가 개발되고 이를 구조물 설계에 적용할 수 있는 섬유보강 고강도 콘크리트 구조설계지침(안)(이하 설계지침(안))이 작성되었다(KCI 2019). 개발된 섬유보강 콘크리트는 압축강도 120MPa~180MPa로 일반 콘크리트에 비하여 매우 큰 강도를 발휘하도록 고유한 배합에 따라 제작된다. 본 논문에서는 설계지침(안) 연구를 통하여 제시된 설계 안전계수인 저감계수로 확보할 수 있는 섬유보강 콘크리트 구조물의 신뢰도 수준을 분석하는 연구를 수행한다.

해외 섬유보강 고강도 콘크리트에 대한 설계기준은 대표적으로 프랑스 FSI(2016)에서 Eurocode에 추가하여 작성한 초고성능 섬유보강 콘크리트 규정이 있으며, 일본 JSCE(2004)의 초고강도 섬

유보강 콘크리트 설계 및 시공 지침(안)이 있다. 이들 설계기준 및 지침에서 채택하고 있는 저감계수의 형식을 보면, 프랑스의 섬유보강 기준은 Eurocode와 동일하게 재료강도에 저감계수를 적용하여 재료의 설계강도를 구한 후 이를 설계식에 대입하여 단면의 설계강도를 산정하는 방식을 사용하고 있다. 반면에 일본의 섬유보강 설계지침은 재료강도에 계수를 적용하면서 부재강도에도 저감계수를 복합적으로 적용하여 최종적으로 단면의 설계강도를 구하는 방식을 사용한다. 국내에서 개발한 설계지침(안)에서는 일본의 저감계수체계와 동일하게 재료와 부재에 저감계수를 복합적으로 적용하는 체계를 택하였다.

최근 국내외 설계기준에서는 확률 및 통계 개념에 기반한 신뢰도 지수를 이용하여 설계의 안전율을 나타낸다. 대표적으로 Eurocode는 CEN(2005)에 신뢰도기반 설계개념을 정의하고 있으며, Nowak(1999)은 미국 AASHTO 교량설계기준을 신뢰도분석을 통하

* Corresponding author E-mail: pinyeol@gachon.ac.kr

¹가천대학교 토목환경공학과 석사 (Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 13120, Korea)

²한국콘크리트학회 공학연구소 책임연구원 (Research Center, Korea Concrete Institute, Seoul, 06130, Korea)

³가천대학교 토목환경공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Gachon University, Gyeonggi-do, 13120 Korea)

여 하중저감계수를 보정하였고, Szerszen and Nowak(2003)은 ACI 콘크리트 구조기준에 대한 신뢰도기반 해석을 수행하였다. 국내 도로교설계기준-한계상태설계법은 Shin et al.(2006)과 Paik et al.(2009)의 신뢰도분석 연구를 통하여 하중계수 및 저감계수를 보정하였다.

섬유보강 설계지침(안)에서도 설계의 안전을 확보를 위하여 적용하는 저감계수들인 재료계수 및 부재계수의 크기를 신뢰도분석 결과를 참고하여 결정하였다. 본 논문에서는 설계지침(안)의 신뢰도분석 과정 및 결과를 제시하고, 분석을 위하여 필요한 강섬유 콘크리트 재료강도의 통계특성과 휨 및 전단에 대한 부재강도 해석식의 통계특성 및 시뮬레이션을 통하여 종합한 섬유보강 콘크리트 부재강도의 통계특성을 제시한다. 또한 재료계수와 부재계수의 크기를 변화시켰을 때 신뢰도지수에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료강도 및 부재 해석강도 통계특성

2.1 재료강도 통계특성

섬유보강 고강도 콘크리트의 재료강도 통계특성은 섬유보강지침(안) 개발에 참여한 재료연구진의 실험 데이터를 기반으로 구하였다.(KCI 2019) 섬유보강 고강도 콘크리트는 공칭압축강도 120MPa, 150MPa, 180MPa로 구분되며, 각각의 공칭인장강도는 7.0MPa, 9.0MPa, 11.0MPa이다.

일반적으로 통계변수의 통계특성을 나타내는 편심계수(bias factor) λ 와 변동계수(coefficient of variation) δ 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\lambda = \frac{\mu}{N} \tag{1}$$

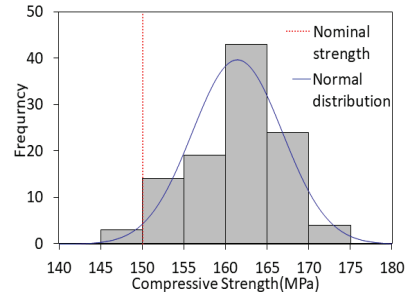
$$\delta = \sigma/\mu \tag{2}$$

여기서 μ 는 평균값, N 은 공칭값(nominal value)을 나타내며, σ 는 표준편차를 의미한다.

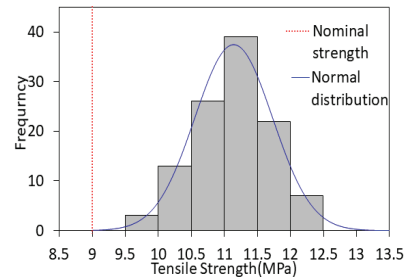
Fig. 1은 공칭압축강도 150MPa(공칭 인장강도 9MPa)에 대하여 실험 데이터의 빈도수 분포를 도시하였으며, 데이터와 동일한 평균과 표준편차를 가지는 정규분포 확률밀도함수를 참고로 함께 도시하였다. 그래프에서 수직선으로 나타낸 공칭강도(nominal strength)에 비하여, 실험 데이터 분포의 피크에 해당하는 평균강도는 큰 것을 알 수 있다.

Table 1과 Table 2에는 압축강도와 인장강도의 통계특성을 구

하여 나타내었으며, 압축강도를 구하기 위한 공시체의 개수는 강도 순서로 각각 130, 107, 180개이고, 인장강도를 구하기 위한 노치를 도입한 공시체의 개수는 119, 110, 124개이다. Table 1로부터 강도별 평균압축강도가 공칭압축강도를 상회하고 있으므로 압축강도에 대한 편심계수는 1보다 큰 것을 알 수 있으며, 평균적으로



(a) Compressive strength



(b) Tensile strength

Fig. 1. Frequency distribution of fiber reinforced concrete

Table 1. Statistical characteristics of compressive strength of fiber reinforcement concrete

| Comp. strength (MPa) | Mean, μ (MPa) | Standard deviation, σ (MPa) | Fractile (%) | Bias factor, λ | Coeff. of variation, δ |
|----------------------|-------------------|------------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------------|
| 120 | 132.7 | 5.42 | 0.97 | 1.106 | 0.041 |
| 150 | 161.4 | 5.43 | 1.76 | 1.076 | 0.034 |
| 180 | 189.4 | 5.11 | 3.29 | 1.052 | 0.027 |

Table 2. Statistical characteristics of tensile strength of fiber reinforcement concrete

| Tensile strength (MPa) | Mean, μ (MPa) | Standard deviation, σ (MPa) | Fractile (%) | Bias factor, λ | Coeff. of variation, δ |
|------------------------|-------------------|------------------------------------|--------------|------------------------|-------------------------------|
| 7 | 10.68 | 0.76 | 0.59E-04 | 1.526 | 0.071 |
| 9 | 11.14 | 0.59 | 0.14E-01 | 1.234 | 0.053 |
| 11 | 12.96 | 0.60 | 0.56E-01 | 1.178 | 0.046 |

1,078을 보인다. Table 2로부터 강도별 평균인장강도의 편심계수는 평균적으로 1,313로 압축강도에 비하여 더 큰 것을 알 수 있다.

일반강도의 콘크리트에서 공칭강도를 5~10%의 하위 분위수(lower fractile)로 정의한다고 볼 때, Table 1과 Table 2의 압축강도와 인장강도의 공칭값은 이보다 더 작은 분위수를 보이므로, 강도분포에 비하여 공칭강도는 보수적으로 작은 값을 알 수 있다. 특히 인장의 경우에 공칭강도의 분위수가 매우 작으므로 공시체의 인장강도가 공칭인장강도에 비하여 큰 값을 알 수 있다.

2.2 부재 해석강도 통계특성

이 절에서는 섬유보강 고강도 콘크리트 부재의 단면강도 해석식의 통계특성을 구한다. 섬유보강 지침(안) 개발에 참여한 힘(Yang et al, 2018) 및 전단(Lee and Hong 2017) 연구진의 연구결과를 사용한다. 섬유보강 지침(안)의 강도 해석 식으로 계산한 단면강도와 부재 연구진이 수행한 단면강도 실험값을 비교한다. 이 절에서 해석에 사용되는 재료강도는 공칭강도가 아닌 실험체의 실제 재료강도이다.

2.2.1 휨강도 해석 식 통계특성

섬유보강 고강도 콘크리트 부재의 휨강도는 변형률의 적합조건과 힘의 평형조건을 적용한 단면해석기법을 통하여 산정한다. Fig. 2와 같이 부재 단면을 층으로 분할하고, 분할된 각 층에 대해 변형률의 적합조건과 힘의 평형 조건을 적용하여 응력을 산정한 후, 식 (3)과 같이 전체 단면으로 적분하여 힘의 평형을 만족하도록 중립축의 위치를 정한다.

$$\int_{A_c} f_c dA_c + \int_{A_s} f_s dA_s = 0 \quad (3)$$

여기서 f_c , A_c 는 각각 실험체의 콘크리트 응력 및 단면적, f_s , A_s 는 각각 철근 응력 및 단면적을 나타낸다. Fig. 2에서 b_w 는 복부

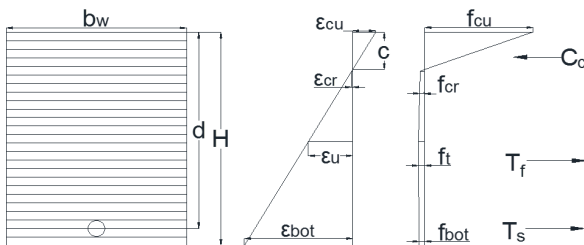


Fig. 2. Distribution of strain and stress of fiber reinforced concrete section in bending

의 폭, d 는 유효깊이, H 는 보의 높이, ϵ_{cu} 와 ϵ_{bot} 은 각각 상연과 하연의 변형률, ϵ_{cr} 은 균열 발생 시 변형률, ϵ_u 는 섬유보강 콘크리트 극한 변형률을 나타내며 f_{cu} 와 f_{cr} 는 각각 압축강도와 균열발생 강도, f_t 와 f_{bot} 은 각각 인장강도와 하연 강도를 나타낸다.

Fig. 2의 우측 그림에서와 같이 섬유보강 고강도 콘크리트단면에 작용하는 응력의 합력은, 중립축 위 콘크리트의 압축력 C_c 와 인장축 철근이 부담하는 인장력 T_s 에 추가하여, 중립축 아래 강섬유 콘크리트에 의하여 발생하는 인장력 T_f 로 구성된다. 이 세 항이 식 (4)와 같이 섬유보강 고강도 콘크리트의 휨에 대한 힘의 평형 조건 식을 이룬다.

$$C_c + T_f + T_s = 0 \quad (4)$$

단면의 휨강도는 단면 응력에 거리를 곱한 모멘트 식으로 식 (5)와 같이 산정한다.

$$M_r = \int_{A_c} f_c y dA_c + \int_{A_s} f_s y dA_s \quad (5)$$

여기서 y 는 응력 작용점에서 모멘트 축까지의 거리이다.

섬유보강 고강도 콘크리트 부재의 휨 강도 실험 데이터는 Yang et al.(2018)과 섬유보강지침(안)(KCI 2019)에 수록된 실험값을 사용하였다. 휨 강도 실험체의 b_w 는 200mm, d 는 250mm, 압축강도 f_c 는 120~180MPa, 인장강도 f_t 는 5.6~13.2MPa이며, 4점 하중 재하로 휨 실험을 수행하였다.

부재의 휨강도 해석값 M_{cal} 을 식 (5)를 적용하여 구하고, 실험값 M_{est} 와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 압축강도 뒤에 f(fiber)를 붙여 해당 압축강도가 섬유보강 콘크리트 부재임을 나타내었다. 압축강도별 실험체 개수와 통계특성인 편심계수와 변동계수를

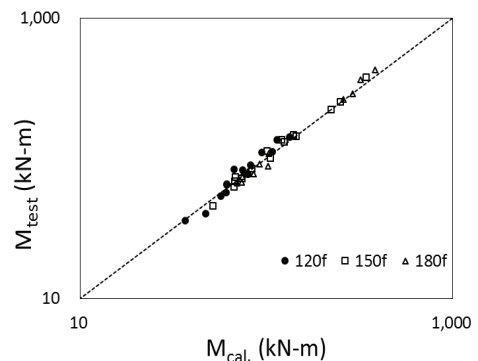


Fig. 3. Distribution of M_{test}/M_{cal} for fiber reinforced concrete

Table 3. Bias factor and coefficient of variation of flexural strength of fiber reinforced concrete

| | N | Bias factor, λ | Coefficient of variation, δ |
|--------|----|------------------------|------------------------------------|
| 120MPa | 14 | 1.043 | 0.098 |
| 150MPa | 15 | 1.013 | 0.066 |
| 180MPa | 15 | 1.000 | 0.070 |
| Total | 44 | 1.019 | 0.078 |

Table 3에 나타내었다. 편심계수는 전체적으로 1.0과 같거나 비슷한 수준으로, 실험값과 해석값이 매우 비슷하게 나타나는 것을 알 수 있으며, 변동계수는 평균 7.8%로 편차가 작게 나타났다.

2.2.2 전단강도 해석 식 통계특성

섬유보강 고강도 콘크리트의 전단강도 V_r 은 식 (6)과 같이 콘크리트, 강섬유, 전단보강재, 축방향 긴장재에 의한 전단강도 성분으로 구성된다.

$$V_r = V_c + V_f + V_s + V_{pe} \quad (6)$$

여기서 V_c 는 콘크리트 매트릭스의 분담분, V_f 는 강섬유의 분담분, V_s 는 전단보강재 분담분, V_{pe} 는 축방향 긴장재 성분을 나타낸다. 이 연구는 전단보강재가 없는 경우를 대상으로 하였으므로, 전단보강재 및 축방향 긴장재 성분은 고려하지 않는다.

실험값과 해석 값을 비교하기 위하여, 실험체의 재료강도를 사용하여 해석 값을 나타내면 다음과 같다. 섬유보강 고강도 콘크리트의 콘크리트 분담분 V_c 와 강섬유 분담분 V_f 는 각각 식 (7), (8)과 같이 계산한다.

$$V_c = 0.18 \sqrt{f_c} b_w d \quad (7)$$

$$V_f = (f_v / \tan \theta_u) b_w z \quad (8)$$

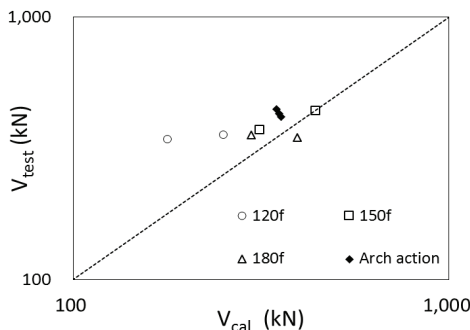


Fig. 4. Distribution of V_{test}/V_{cal} for fiber reinforced concrete

Table 4. Bias factor and coefficient of variation of shear strength of fiber reinforced concrete

| | N | Bias factor, λ | Coefficient of variation, δ |
|------------------------|--------|------------------------|------------------------------------|
| Eq. (6) | 120MPa | 2 | 1.461 |
| | 150MPa | 2 | 1.143 |
| | 180MPa | 2 | 1.092 |
| | Total | 6 | 1.261 |
| Eq. (9) Arch action | 3 | 1.218 | 0.041 |

여기서, f_c 는 콘크리트 압축강도, f_v 는 평균인장강도, θ_u 는 축방향과 사인장 균열면의 각도를 나타내며 30° 이상의 값으로 한다. z 는 일반적으로 $0.9d$ 를 적용한다. 평균인장강도 f_v 는 강섬유 콘크리트의 인장연화 특성과 밀접한 관계가 있으므로, 프랑스의 UHPFRC와 같이 시공의 변동성을 고려한 강섬유의 방향성계수 K_f 를 적용한다. K_f 의 값은 일반적으로 1.25를 사용한다.

전단파괴의 양상으로 아치 작용으로 인하여 복부 콘크리트의 압축파괴에 의해 파괴에 도달하는 경우의 전단강도는 식 (9)와 같다.

$$V_{wc} = [0.84 f_c^{2/3} \sin 2\theta_u] b_w z \quad (9)$$

섬유보강 고강도 콘크리트 부재의 전단 강도 실험 데이터는 Lee and Hong(2017)과 섬유보강지침(안)(KCI 2019)에 수록된 실험값을 사용하였다. 총 9개의 실험 부재를 대상으로 하였으며, 실험체의 b_w 는 40mm, d 는 445~625mm, 압축강도 f_c 는 160.2~170.1MPa, 인장강도 f_t 는 4.95~14.07MPa이며, 3점 정적재하로 전단실험을 수행하였다.

전단을 받는 부재의 해석값에 대한 실험값 V_{test}/V_{cal} 을 비교하여 도시한 그림은 Fig. 4와 같다. 전반적으로 데이터들의 실험값이 해석값보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있다. 편심계수와 변동계수를 나타낸 표는 Table 4와 같다. 식 (6)을 사용한 일반 전단강도인 경우 편심계수는 평균적으로 1.261이며, 변동계수는 0.262로 나타난다. 아치 작용에 대한 식 (9)를 사용하는 경우는 따로 구분하여 나타내었다.

3. 휨 및 전단 설계의 신뢰도지수 분석

3.1 단면강도 통계특성 종합

설계의 신뢰도지수를 구하기 위해서 필요한 단면 강도의 통계특성을 종합하여 구하는 과정은 크게 두 부분으로 설명할 수 있다. 첫 번째 과정에서는 재료강도 통계특성을 사용하여 시뮬레이션을

Table 5. Statistical characteristics of material and dimensions

| Variable | Bias factor, λ | Coefficient of variation, δ | Distribution type |
|----------|------------------------|------------------------------------|-------------------|
| f_y | 1.20 | 0.10 | Normal |
| A_s | 1.00 | 0.015 | Normal |
| b_w | 1.005 | 0.040 | Normal |
| d | 1.000 | 0.040 | Normal |

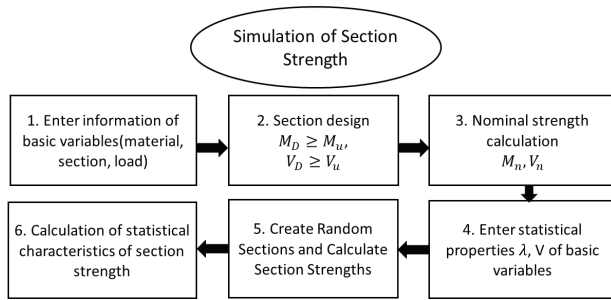


Fig. 5. Flowchart of simulation

통하여 랜덤 부재단면을 생성하고, 랜덤 부재의 해석강도를 구한다. 이 과정에서는 2장의 재료강도 통계특성과 Table 5에 나타난 철근 및 부재치수 통계특성을 적용한다. 이 단계에서 구한 통계특성인 편심계수와 변동계수에는 아래첨자 MF(Material and Fabrication)를 붙인다.

두 번째 단계에서는 3장의 결과인 부재 해석강도의 통계특성(전문성계수(professional factor)로 아래 첨자 P를 붙임)을 첫 번째 단계의 결과와 종합하여 최종적으로 섬유보강 콘크리트 부재 단면강도의 통계특성을 얻게 된다. 최종 종합된 부재 단면강도 통계특성은 아래 첨자 R을 붙인다. 식 (10), (11)과 같이 편심계수는 곱으로, 변동계수는 제곱합의 제곱근으로 구한다(Nowak and Collins 2000).

$$\lambda_R = \lambda_{MF} \times \lambda_P \quad (10)$$

$$\delta_R = \sqrt{\delta_{MF}^2 + \delta_P^2} \quad (11)$$

Fig. 5에 시뮬레이션을 통한 단면강도 통계특성을 구하는 과정을 요약하였다. Fig. 5의 1~3 과정을 통하여 설계조건에 맞는 최소 단면을 결정하고, 4, 5 과정은 위에서 설명한 첫 번째 과정으로 설계변수들의 통계특성을 적용하여 랜덤 단면들을 생성하고 단면의 해석강도를 계산하여 MF를 고려한 통계특성을 구한다. 6 과정은 위의 두 번째 과정으로 전문성계수 P와 종합하여 단면 강도 R에 대한 통계특성을 구하게 된다.

Table 6. Statistical characteristics of flexural strength of fiber reinforced concrete member

| | λ_{MF} | δ_{MF} | λ_P | δ_P | λ_R | δ_R |
|---------|----------------|---------------|-------------|------------|-------------|------------|
| 120MPa | 1.162 | 0.06 | 1.043 | 0.098 | 1.212 | 0.115 |
| 150MPa | 1.095 | 0.064 | 1.013 | 0.066 | 1.109 | 0.092 |
| 180MPa | 1.075 | 0.064 | 1.000 | 0.070 | 1.075 | 0.095 |
| Average | 1.111 | 0.063 | 1.019 | 0.078 | 1.131 | 0.100 |

Table 7. Statistical characteristics of shear strength of fiber reinforced concrete member

| | λ_{MF} | δ_{MF} | λ_P | δ_P | λ_R | δ_R |
|---------|----------------|---------------|-------------|------------|-------------|------------|
| 120MPa | 1.452 | 0.08 | 1.261 | 0.262 | 1.831 | 0.274 |
| 150MPa | 1.207 | 0.071 | 1.261 | 0.262 | 1.522 | 0.271 |
| 180MPa | 1.159 | 0.07 | 1.261 | 0.262 | 1.461 | 0.271 |
| Average | 1.273 | 0.074 | 1.261 | 0.262 | 1.605 | 0.272 |

Table 8. Statistical characteristics of shear strength(arch action) of fiber reinforced concrete member

| | λ_{MF} | δ_{MF} | λ_P | δ_P | λ_R | δ_R |
|-------------|----------------|---------------|-------------|------------|-------------|------------|
| Arch action | 1.298 | 0.061 | 1.218 | 0.041 | 1.580 | 0.073 |

Table 6은 휨 강도에 대한 통계특성을 종합한 결과를 보여준다. MF에 대한 편심계수와 변동계수를 보면, Table 1과 2의 재료강도의 편심계수와 변동계수가 가장 큰 120MPa의 경우가 가장 크게 나타났으며, 평균값은 편심계수가 1.111, 변동계수가 0.063을 보인다. 이를 전문성계수와 종합하면, 휨강도에 대한 편심계수는 평균 1.131, 변동계수는 평균 0.100을 보인다.

Table 7은 전단강도 통계특성을 종합한 결과를 나타낸다. MF에 대한 편심계수와 변동계수는 휨에서와 같이 재료강도의 통계값이 큰 120MPa의 경우가 가장 크고, 평균값은 편심계수 1.273, 변동계수 0.074로, 휨에 비하여 큰 값들을 보여준다. 전단에 대한 전문성계수는 실험체의 개수가 적어서 전체 실험체의 평균값을 동일하게 적용하여 전단강도에 대한 통계특성을 종합하였다. 전단강도에 대한 편심계수는 평균 1.605, 변동계수는 평균 0.272로, 휨에 비하여 큰 값들을 보여준다. 이는 전단 해석식의 값과 실험값과의 차이를 나타내는 통계특성인 P에 관한 값들이 휨에 비하여 크기 때문이다.

Table 8은 아치작용에 의한 전단강도 식 (9)로 계산한 부재통계특성을 적용하여 구한 아치 작용 전단강도의 통계특성으로 편심계수는 크고 변동계수는 작음을 알 수 있다.

3.2 섬유보강지침(안)의 신뢰도지수

단면 설계에서는 최소한의 안전율을 확보하기 위하여 식 (12)와 같이 저감계수와 하중계수를 적용하여, 구조물 설계강도가 하중효과보다 크도록 설계한다.

$$\phi S_r \geq \gamma_D D + \gamma_L L \quad (12)$$

여기서 D 와 L 은 고정하중(dead load)과 활하중(live load)을 의미하며, S_r 은 구조강도를 의미한다. γ_D 와 γ_L 은 각각 고정하중과 활하중 계수를 통칭하며, ϕ 는 저감계수를 통칭한다.(하중과 저항의 항목이 많으나 단순화하여 나타내었다.)

최신 국내의 구조설계기준에서는 신뢰도지수(reliability index)로 통계적인 안전율을 표시하고 있으며, 하중계수와 저감계수를 목표신뢰도지수를 확보하도록 보정한다. 이 절에서는 섬유보강지침(안)에서 제안하는 저감계수가 목표신뢰도지수를 만족하는지를 검토한다.

식 (12)를 만족하는 최소 단면강도를 s_n 이라고 하고, 하중효과에 대한 구조 성능의 안전 여유를 한계상태함수 g 라고 하면, 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g = S_n - (D + L) \quad (13)$$

한계상태함수의 안전여유를 나타내는 지수인 신뢰도지수는 일계신뢰도방법(first order second moment reliability method)인 Rackwitz-Fiessler 알고리즘(Nowak and Collins 2000)을 적용하여 구한다. 이 방법은 한계 상태 함수에서 변수의 비정규 분포를 고려하는 데 사용된다. 비정규 변수는 누적분포함수 및 확률밀도함수의 값이 설계 지점에서 정규 변수와 동일한 값을 갖도록 변환된다.

Table 9에는 이 연구에서 적용한 국내 도로교설계기준-한계상태설계법(Highway Bridge Design Code - Limit State Design Method, 이하 HBDC)(KIBSE 2015)과 콘크리트구조기준(Concrete Structural Code, 이하 CSC)(KCI 2012)의 대표 하중조합인 고정하중과 활하중에 대한 하중계수를 나타내었다. HBDC에서는 고정하중을 이루는 부재자중은 DC , 포장자중은 DW 로 구분한다.

섬유보강지침(안)은 Table 10과 같이 재료계수와 부재계수를 동시에 적용하는 저감계수 체계를 제안하고 있다. Table 10에서 재료계수는 콘크리트 ϕ_c , 철근 ϕ_s 로 나타내고, 콘크리트 중 압축 ϕ_{cc} , 인장 ϕ_{ct} 로 구분한다. 부재계수는 휨 ϕ_f , 전단 ϕ_v 로 나타내고, 전단 중 콘크리트 항은 ϕ_{vc} , 강섬유 항은 ϕ_{vf} 로 나타낸다. 재료계

수 및 부재계수를 적용하여 단면 설계강도를 구하는 설계식을 휨과 전단에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$M_d = \phi_f \left(\int_{A_c} \phi_c f_c y d A_c + \int_{A_s} \phi_s f_s y d A_s \right) \quad (14)$$

$$V_d = \phi_{vc} (0.18 \sqrt{\phi_{cc} f_{ck}} b_w d) + \phi_{vf} (\phi_{ct} f_v / \tan \theta_u) b_w z \quad (15)$$

설계식의 한계상태방정식에 대입할 최소 단면강도 s_n 을 구하기 위한 등가저감계수 ϕ 는 단면의 설계강도를 공칭강도로 나눈 비율로 구한다. 여기에서 단면의 설계강도는 식 (14), (15)로 구하며, Table 10의 저감계수들을 적용한 강도이다. 단면의 공칭강도는 식 (5), (7), (8)로 구할 수 있으며, 이는 식 (14), (15)의 저감계수들을 1로 두고 구한 값이다.

단면강도 s_n 에 대한 통계특성은 앞에서 구한 Table 6~8의 결과를 적용하고, D 와 L 의 통계특성은 Szerszen and Nowak(2003) 및 Paik et al.(2009)의 연구와 동일한 값을 적용하며 Table 11과 같다.

Table 9. Load combination of design code

| Design code | Load combination | |
|-------------|-----------------------|-------|
| | I | IV |
| HBDC | 1.25DC+ 1.50DW+ 1.80L | 1.50D |
| CSC | 1.20D+ 1.60L | 1.40D |

Table 10. Reduction factor of the structural design guideline of fiber reinforced concrete(draft)

| Material factor | Reduction factor | | |
|---------------------|-------------------|-------------------------|------|
| | Concrete ϕ_c | Compression ϕ_{cc} | |
| Tension ϕ_{ct} | | | 0.80 |
| Steel ϕ_s | | 1.0 | |
| Member factor | Flexure ϕ_f | | 0.90 |
| | Shear ϕ_v | Concrete ϕ_{vc} | 0.80 |
| | | Fiber ϕ_{vf} | 0.80 |

Table 11. Statistical characteristics of dead and live load

| Load | Bias factor, λ | Coefficient of variation, δ | Distribution type |
|------|------------------------|------------------------------------|-------------------|
| DC | 1.03 | 0.08 | Normal |
| DW | 1.00 | 0.25 | Normal |
| L | 1.00 | 0.18 | Extreme |

Fig. 6은 도로교설계기준과 콘크리트구조기준 하중조합을 적용하여 섬유보강 콘크리트 부재의 신뢰도지수를 나타낸 그래프이다. (a)는 휨강도, (b)는 전단강도에 대한 신뢰도지수를 고정하중비율(D/(D+L))에 대하여 도시한 그래프이다. 신뢰도지수 그래프는 휨 및 전단강도 통계특성의 평균값으로 구하여 나타내었다. HBDC의 목표신뢰도지수는 3.7로 정의하고 있으며 이를 그래프에 점선으로 나타내었다. CSC는 별도로 목표신뢰도지수를 정의하고 있지 않으나, Szerszen and Nowak(2003)의 ACI 구조기준의 신뢰도분석 연구에서 3.5로 적용하고 있으므로, 이 연구에서는 이를 준용하였으며 그래프에 점선으로 나타내었다.

휨강도와 전단강도의 신뢰도지수는 두 기준의 하중조합에 대하여 모두 목표신뢰도지수를 상회하여 만족하는 것을 볼 수 있다. 도로교설계기준의 하중계수가 콘크리트구조기준보다 크므로, 도로교설계기준의 신뢰도지수가 더 크게 나타난다. 대부분의 고정하중비율에 대하여 Table 9의 하중조합 I이 설계를 지배하며, 그래프의 우측부분인, 활하중에 비하여 고정하중이 증가하게 되면 하중조합 I에 의한 신뢰도지수는 감소하게 되지만, 고정하중 비율이 1에 근접하면, 하중조합 IV가 지배하게 되어 신뢰도지수가 다시 증가하여 목표신뢰도지수를 상회하게 된다.

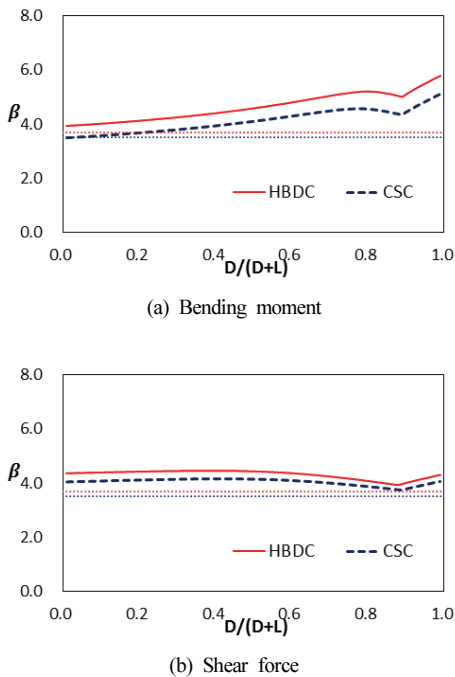


Fig. 6. Reliability index of fiber reinforced concrete guideline(draft)

전단강도에서만 나타나는 식 (9)로 구하는 아치작용에 의한 전단강도의 신뢰도지수는 최소 6.02, 최대 11.29로 매우 크게 구해졌으며 별도로 도시하지는 않았다. 아치작용에 대한 실험체의 개수가 매우 적었고, 실험값들 사이의 편차가 작아서 큰 신뢰도지수가 도출되었다. 추후 실험결과를 누적하여 안정적인 통계특성값을 구할 필요가 있다.

3.3 저감계수 변화에 따른 신뢰도지수의 영향

이 절에서는 Table 10과 같이 제시된 저감계수세트를 기본으로 하여, 재료계수와 부재계수를 변화시켰을 때 신뢰도지수에 미치는 영향을 분석한다.

Fig. 7은 저감계수를 변화시켰을 때 휨에 대한 신뢰도지수의 차이를 도시한 그래프이다. Table 10에 제시된 $\phi_c=0.80$ (ϕ_{cc} 와 ϕ_{ct} 가 동일한 값인 경우에는 통칭하여 ϕ_c 로 나타낸다), $\phi_s=1.0$, $\phi_f=0.90$ 을 기준 세트로 하여, 0.1씩 변화시킨다. Fig. 7(a)는 개별 저감계수를 변화시킨 경우이다. 콘크리트 재료계수 중 압축 항에 적용하는 ϕ_{cc} 를 0.90으로 증가시키면 신뢰도지수는 평균적으로 1.1% 감소하고, 인장 항에 적용하는 ϕ_{ct} 를 0.90으로 증가시키면 5.5% 감소하므로, 인장 항이 신뢰도지수에 미치는 영향이 더 큼을 알 수 있다. 철근 재료계수를 $\phi_s=0.90$ 으로 감소시키면 신뢰도지

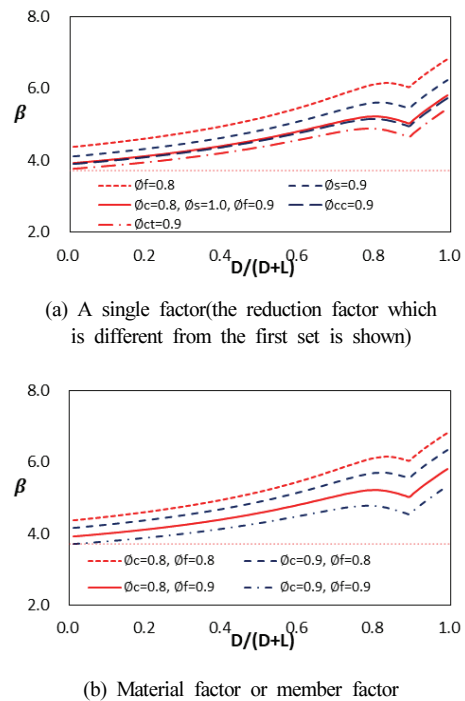


Fig. 7. Reliability Index of bending moment obtained by changing reduction factor

수는 5.9% 증가한다. 힘에 대한 부재계수를 $\phi_f=0.80$ 으로 감소시키면 신뢰도지수는 14.2% 증가한다. 따라서 재료계수에서는 철근 및 콘크리트인장에 의한 영향이 크고, 콘크리트압축에 의한 영향이 가장 작으며, 부재계수는 철근과 콘크리트 항에 모두 곱해지므로 이에 의한 영향이 가장 큼을 알 수 있다. 철근의 재료계수는 1.0으로 고정시키고, 콘크리트 재료계수(ϕ_c)와 힘에 대한 부재계수(ϕ_f)를 0.80과 0.90의 조합으로 비교한 그래프를 Fig. 7(b)에 나타내었다. (b)에서 재료계수를 변화시켰을 때는 평균 7.0%의 차이를 보이고, 부재계수를 변화시켰을 때는 평균 14.2%의 차이를 보이므로 휨강도 신뢰도지수에 미치는 영향은 재료계수보다 부재계수가 더 크다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 전단에 대한 신뢰도지수의 변화를 나타낸 그림이며, Fig. 8(a)는 개별 저감계수의 영향을 비교한 그림이다. 콘크리트 인장항에 대한 재료계수 ϕ_{ct} 와 전단 강섬유항에 대한 부재계수 ϕ_{vf} 를 각각 0.90으로 증가시킨 경우에 신뢰도지수는 동일하게 7.7%씩 감소함을 알 수 있다. 반면에 콘크리트 압축항에 대한 재료계수 ϕ_{cc} 와 전단 콘크리트항에 대한 부재계수 ϕ_{vc} 를 각각 0.90으로 증가시킨 경우에는 신뢰도지수가 각각 0.73%, 1.5% 만큼 감소한다. 즉, 전단에 대해서는 콘크리트 인장 항과 강섬유 전단 항이 신뢰도지수에 큰 영향을 줌을 알 수 있다. 이는 식 (15)의 전단강도 중

두 번째 항인 강섬유 항이 전체 강도의 83~85%를 차지하기 때문이다. Fig. 8(b)에는 콘크리트 재료계수(ϕ_c)와 전단에 대한 부재계수(ϕ_v)를 0.80과 0.90의 조합으로 변화시킨 경우의 신뢰도지수를 비교하였다.

Fig. 7(b) 맨 아래선인 ϕ_c, ϕ_f 모두 0.90인 경우와 Fig. 8(b) 중간선인 ϕ_c, ϕ_v 가 0.80과 0.90인 경우에서 목표신뢰도지수에 더 가깝지만 이 지침서는 강섬유 콘크리트를 처음으로 적용하는 지침이므로, 구조물 설계의 안전율을 확보하기 위하여, 저감계수를 보수적으로 제시하였다. 추후 자료가 축적되면 이 연구와 동일한 분석을 통하여 저감계수를 조정할 수 있다.

4. 요약 및 결론

이 논문에서는 국내 최초로 제안된 섬유보강 고강도 콘크리트 구조설계지침(안)에 따른 설계의 신뢰도지수를 구하였다. 재료강도의 통계특성과 부재 해석식의 통계특성을 각각 결정하고, 시물레이션을 통하여 단면강도의 통계특성으로 종합한 후에 신뢰도분석을 통하여 목표신뢰도지수와 비교하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재료강도의 실험 데이터를 통계분석한 결과 평균 압축강도와 인장강도는 공칭값을 충분히 상회하는 값을 알 수 있다.
- 2) 설계지침(안)의 휨 및 전단 해석식을 적용하여 구한 단면강도 해석값과 실험값을 비교하여 해석식의 통계특성을 구하였으며, 재료강도의 통계특성과 종합하여 단면강도의 통계특성을 구하였다.
- 3) 설계지침(안)의 부재 설계식에는 재료계수와 부재계수를 적용한다. 제안된 저감계수를 적용하고, 이 연구에서 구한 휨 및 전단강도에 대한 통계특성을 도로교설계기준 및 콘크리트구조기준의 하중조합에 적용하여 계산한 신뢰도지수는 하중조합에 관계없이 모든 경우에 대해서 목표신뢰도지수를 만족하는 것을 확인하였다.
- 4) 휨강도는 재료계수에서는 철근에 의한 영향이 크고, 콘크리트는 인장 항이 압축보다 영향이 크며, 부재계수는 철근과 콘크리트 항에 모두 곱해지므로 이에 의한 영향이 개별 재료계수들보다 크다. 전단강도의 경우는 강섬유콘크리트 인장 항의 영향이 크므로, 재료계수에서는 콘크리트 인장계수와 부재계수는 강섬유 항의 부재계수가 신뢰도지수에 미치는 영향이 크다는 것을 확인하였다.

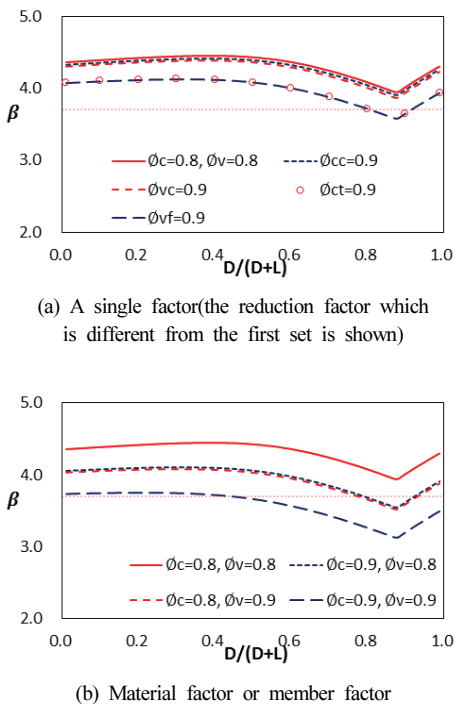


Fig. 8. Reliability Index of shear force obtained by changing reduction factor

Conflicts of interest

None.

감사의 글

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Comité Européen de Normalisation (CEN) (2005). Eurocode : Basis of Structural Design, EN 1990, English version, BSI.

French Standard Institute (FSI) (2016). National Addition to Eurocode 2 - Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, French Standard NF P, 18-710.

Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (2004). Design and Construction Guideline of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete (draft), Concrete Library 113.

Korea Concrete Institute (KCI) (2012). Concrete Structural Code and Commentary [In Korean].

Korea Concrete Institute (KCI) (2019). The Structural Design Guidelines of the Fiber Reinforced SUPER Concrete (draft) [In Korean].

Korea Institute of Bridge and Structural Engineers (KIBSE) (2015). Highway Bridge Design Code - Limite State Design (KHBDC-LSD) [In Korean].

Lee, J.H., Hong, S.G. (2017). Shear strength of ultra-high performance fiber-reinforced concrete(UHPFRC) i-shaped beams without stirrup, Journal of the Korea Concrete Institute, **29(1)**, 53-64 [In Korean].

Nowak, A.S. (1999). Calibration of LRFD Bridge Design Code, NCHRP Report 368, Transportation Research Board, Washington DC.

Nowak, A.S., Collins, K.R. (2000). Reliability of Structures, McGraw-Hill, 182.

Paik, I., Hwang, E.S., Shin, S. (2009). Reliability analysis of concrete bridges designed with material and member resistance factors, Computers and Concrete, **6**, 59-78.

Shin, D.K., Kim, C.Y., Paik, I.Y. (2006). Reliability analysis of composite girder designed by LRFD method for positive flexure, Journal of the Korean Society of Civil engineers, **26(3A)**, 539-546 [in Korean].

Szarszen, M.M., Nowak, A.S. (2003). Calibration of design code for buildings (ACI 318): part 2-reliability analysis and resistance factors, ACI Structural Journal, **100(42)**, 383-391.

Yang, I.H., Kim, K.C., Park, J.H. (2018). The effect of variation of design parameters on the flexural behavior of UHPFRC beams, Korean Recycled Construction Resource Institute, **6(2)**, 138-145 [In Korean].

섬유보강 고강도 콘크리트 구조설계지침(안)의 저감계수에 대한 신뢰도 분석

이 연구의 목적은 최근 국내에서 개발된 섬유보강 고강도 콘크리트 설계지침(안)의 저감계수를 적용하여 확보하는 설계의 신뢰도지수를 분석하는 것이다. 설계지침(안) 개발을 위하여 수행된 재료실험 및 부재실험 데이터를 수집하여 재료강도 통계특성 및 부재강도 해석식에 대한 통계특성을 구한다. 재료통계특성과 설계지침(안)의 부재 해석식을 적용한 시뮬레이션을 수행하고 해석식의 통계특성과 종합하여 단면강도에 대한 통계특성을 산출한다. 국내 도로교설계기준과 콘크리트구조기준의 하중조합을 적용한 신뢰도분석을 수행하였으며, 설계지침(안)에서 제시한 재료 및 부재에 대한 저감계수를 적용한 설계는 목표신뢰도 지수를 만족함을 확인하였다.