

영상 분석 기법을 이용한 RC 부재의 항복 후 휨 거동 분석(III): 인장부를 중심으로

김건수^{1*}, 박기태², 우태련³

Evaluation on the Bending Behavior After Yield of RC Beam by Using Image Processing Method(III): Focused on the Tensile Part

Kun-Soo Kim^{1*}, Ki-Tae, Park², Tae-Ryeon Woo³

Abstract: As the limit state design method is applied as a method of designing concrete structures, the ultimate state is considered in the analysis or design. In fact, when the reinforced concrete member bears tensile force, the force is transmitted from the rebar to the concrete, and the structure bears the tensile force to the ultimate state even after yield. Therefore, the accurate evaluation of behavior after yield, it is necessary to study the tension stiffening effect after yield of the flexural member. In this study, a 4-point bending test was conducted on the RC simple beam having a rectangular cross section of the double reinforcement, and the behavior of the member was analyzed in detail using the image analysis method. Using the analysis results, the estimation formula for the tension stiffening effect after yield was proposed, and the applicability of this was verified through the experimental results of existing study. The difference between the ultimate strain and the yield strain representing the ductile behavior of the member is similar to the experimental results. The prediction of the proposed formula is relatively accurate.

Keywords: Image processing method, Reinforced concrete, 4 point bending test, Tension stiffening effect

1. 서 론

콘크리트구조물의 설계 방법으로 한계상태설계법이 적용되면서 구조물의 항복 후 거동이 중요하게 대두되고 있다. 도로교설계기준(한계상태설계법)의 경우 콘크리트구조물을 해석이나 설계할 때, 적용하는 한계상태에 따라 부재의 항복 뿐만 아니라 극한상태까지 고려하도록 하고 있다. 따라서 구조물을 설계하는 데에 있어 재료의 실제 응력-변형률 관계 특성에 대한 파악 뿐만 아니라 설계에 반영하기 위한 응력-변형률 관계의 이상화 역시 중요하다.

실제로 철근콘크리트 부재가 인장력을 부담할 때 콘크리트에 매립된 철근은 부착을 통해 인장철근에서 콘크리트로 힘이 전달된다. 균열이 발생하면 균열면에서는 인장력을 철근이 부담하지만 균열과 균열 사이에는 철근과 콘크리트가 함께 인장력을 지지한다. Fig. 1과 같이 콘크리트에 묻힌 철근의 응력과 변형률은 철근만 인장을 받는 경우의 값보다 작게 되

는데 이를 인장강화효과(Tension stiffening effect)라고 하며, 이는 균열 발생 후 부재의 강성에 영향을 미친다.

하지만 균열과 균열 사이 구간에 인장응력이 콘크리트로 계속 전달되더라도 철근콘크리트 부재의 강도를 계산할 때 일반적으로 콘크리트의 인장력은 무시된다. 국내기준인 도로교설계기준(한계상태설계법)이나 CEB-FIP Model Code 1990 및 Eurocode 2와 같은 현행 기준에서는 인장강화효과를 휨 부재의 사용성을 검토할 때에만 중요한 변수로 이용하는데, 이는 부재가 항복하기 전까지의 인장강화효과만을 고려함을 뜻한다. 하지만 실제 콘크리트 구조물은 부재가 항복한 후에도 극한상태까지 콘크리트가 인장력을 부담하므로 한계상태 거동에 대한 정확한 평가를 위해서는 휨 부재의 항복 후 인장강화효과에 대한 연구가 필요하다.

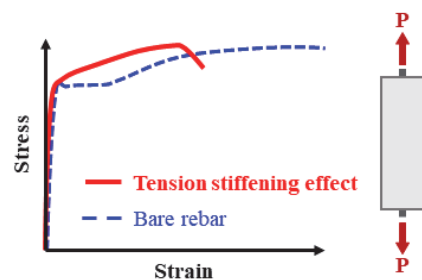


Fig. 1 Tension stiffening effect

¹정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구위원

³정회원, (주)파이래드 선임연구원

*Corresponding author: kunsookim@kict.re.kr

Korea Institute of Civil and Building Technology (KICT), Goyang, 10223, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2023년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

본 연구에서는 철근콘크리트 휨 부재의 항복 후 인장강화 효과가 고려된 철근콘크리트의 해석 모델을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 복철근 직사각형 단면을 가지는 철근콘크리트 단순보에 대하여 4점 휨 실험을 수행하고, 영상분석기법을 이용하여 부재의 거동을 분석하였다. 그리고 영상분석을 통하여 얻어진 부재의 표면 상세 변형을 분포도를 근거로 휨 부재의 항복 후 인장강화효과 계수가 적용된 철근의 인장력 추정식을 제안하였다. 마지막으로 제안식에 대한 검증을 위하여 다른 연구자들이 수행한 휨 실험결과와 비교하고, 제안식의 적용성을 확인하였다.

2. 철근 콘크리트 보의 4점 휨 시험

2.1 시험 개요 및 조건

본 연구에서는 철근콘크리트 휨 부재의 거동을 평가하기 위하여 복철근 직사각형 단면의 RC 부재에 대한 휨 시험을 수행하였고 실험 조건에 대한 상세한 내용은 동반논문[1]에 기술하였다. Fig. 3은 본 연구에서 대상으로 하는 실험체 제원 및 실험 방법을 나타낸 것이다. 실험체가 순수 휨을 받을 수 있도록

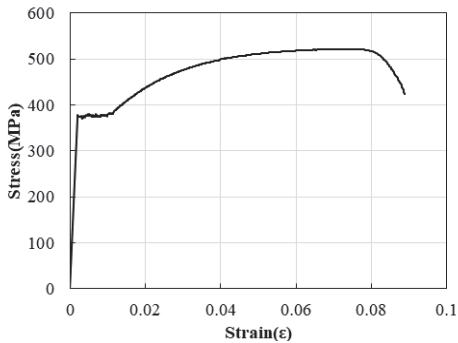


Fig. 2 Result of the rebar's tensile test

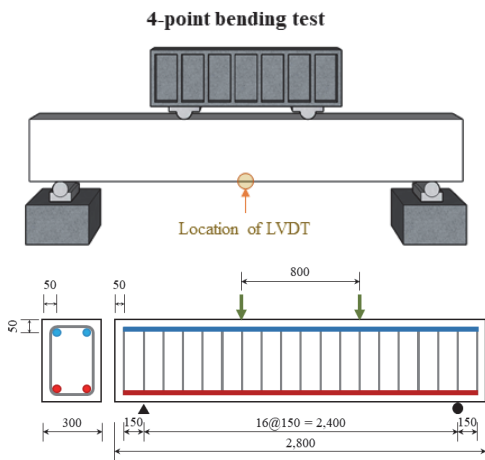


Fig. 3 Specimen shape [mm]

록 4점 휨 시험을 수행하였고, 가력은 2,000kN 용량의 액추에이터를 이용하여 변위제어로 수행하였으며 가력 속도는 2mm/min을 유지하였다. 재료실험 결과, 콘크리트의 평균 압축강도는 22.46MPa로 계측되었다. 인장철근의 경우 SD300 강종의 D19철근을 사용하였고, 항복강도는 370MPa, 극한강도는 547MPa로 계측되었다. Fig. 2는 철근의 1축 인장실험을 통한 응력-변형을 관계를 도시한 그래프이다.

본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 휨 거동을 보다 상세하게 분석하기 위하여 디지털 카메라를 이용한 영상분석기법 (Image processing method, IPM)을 이용하여 계측하였다. 영상분석기법에는 여러 종류가 있는데, 그 중 물체의 표면 변형을 이미지간 상관 관계를 이용하여 도출하는 디지털 이미지 상관법(Digital image correlation, DIC)을 적용하였다. 그리고 이와 비교하기 위하여 기존의 계측 방법인 변위계(LVDT)를 부재 중앙부에 설치하여 변위를 측정하였고, DIC 기법에도 활용할 수 있도록 하중표시장치(Indicator)를 촬영 영역 내에 위치시켰다. 영상 취득은 Sony Alpha 7R 디지털 카메라 1대를 사용하였고, 약 3,600만 화소(4,912×7,360 Pixel)의 크기로 4초마다 등 간격으로 촬영하였다. 부재가 휨을 받는 변형 형상을 보다 정확하게 측정하기 위하여 영상분석 관심 영역 (Region of interest, ROI)을 가력 지점 사이인 시험체 중앙부 600mm로 설정하였다.

2.2 실험결과 및 분석

본 연구에서는 DIC 기법의 타당성 검증을 위하여 기존 계측 방법으로 계측한 처짐 값과 DIC 기법으로 계측한 처짐 값을 비교하였다. Table 1는 각 방법에 대한 항복 시와 극한상태

Table 1 Deflection results

		LVDT	DIC	Ratio
Yield	Load [kN]	190.51	-	-
	Defl. [mm]	6.56	6.42	1.02
Ultimate	Load [kN]	253.5	-	-
	Defl. [mm]	37.82	38.57	0.98



Fig. 4 Crack at the end of experiment

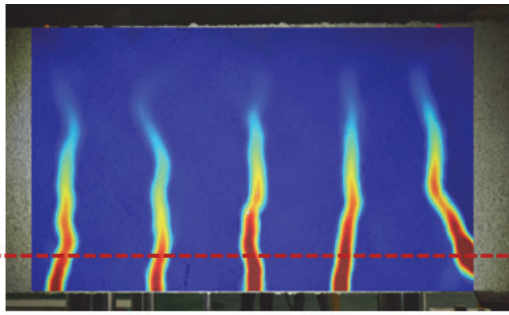


Fig. 5 Distribution of longitudinal strain according to the position of rebar in ultimate state

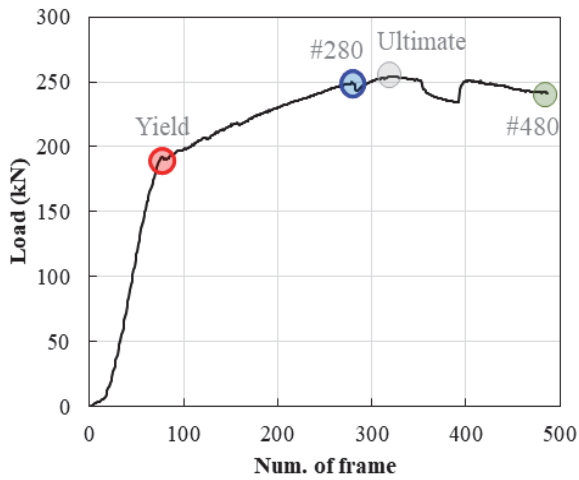


Fig. 6 Load according to frame number

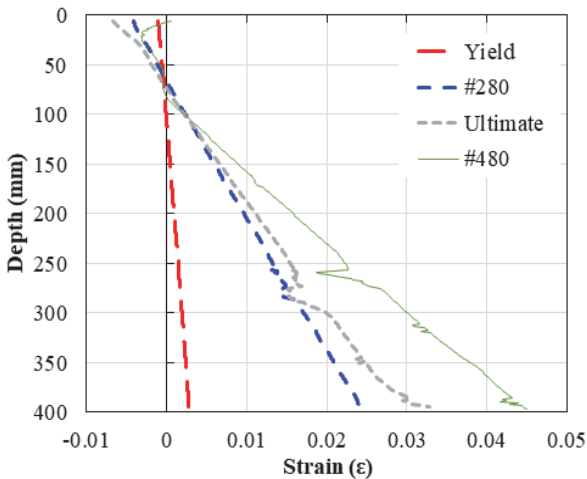


Fig. 7 Distribution of average strain by load step

에서의 처짐값을 나타낸 것이다. 두 방법 간 오차가 2% 이내로 나타나, 본 연구에서 계측에 적용한 DIC 기법은 비교적 정확한 계측이 가능하다고 판단하였다.

본 연구에서는 DIC 기법 분석 결과인 종방향 변형을 분포를 하중 단계에 따라 동반논문[1]에 도시하였다. Fig. 5는 부재의 극한상태에서 종방향 변형을 분포도와 인장철근 위치에 따른 종방향 변형을 분포도를 도시한 것이다. 본 연구에서는 종방향 변형을 분포도를 이용하여 휨 부재의 인장부 거동을 분석하고자 하였다. 종방향 위치에 따라 단면의 변형을 분포가 다르기 때문에, 균열 위치를 고려하여 평균 변형을 산정하였고 이를 Fig. 6에 표기한 하중 단계에 따라 Fig. 7에 나타내었다. 280번 프레임까지 평균 변형률 선도가 선형을 유지하여 설계 시 적용하는 평면 보존의 법칙이 성립함을 알 수 있었다. 하지만 280번 프레임을 넘어가면서 선형성이 떨어지게 되는데, 이는 변형이 커지면서 콘크리트 표피가 탈락하고 또한 콘크리트 압축 축 연단에서 압괴파괴가 발생하여 DIC 결과에 오차가 발생한 것으로 판단된다.

3. RC 휨 부재의 항복 후 인장강화효과 계수 산정

3.1 인장철근부 인장력 산정

본 연구의 목적은 철근콘크리트 휨 부재에서 철근의 인장강화효과를 규명하는 것이다. 따라서 인장강화효과가 고려된 인장부 단면력 합력(T)과 압축부 단면력 합력(C)가 같다는 힘의 평형조건과, DIC 분석으로부터 얻어진 종방향 평균 변형을 분포를 이용하여 휨 부재의 인장강화효과를 산출하고자 하였다. 아래 Fig. 8은 힘의 평형조건과 변형 적합조건을 이용한 복철근 직사각형 단면을 가지는 휨 부재의 단면력 산정을

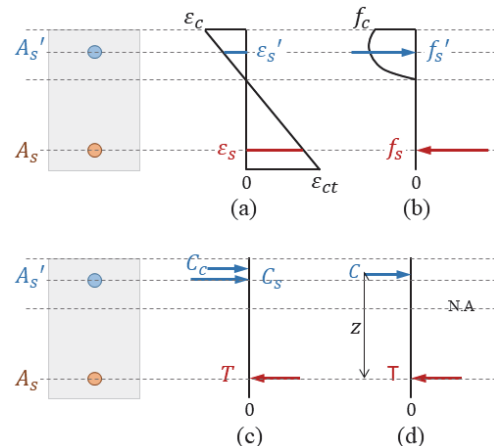


Fig. 8 Mechanical concept for calculating the cross-section force of rectangular sections

위한 역학적 개념도를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 Fig. 8(a)의 단면 변형을 분포를 구하는 과정에 Fig. 9와 같이 DIC 결과인 평균 변형을 분포를 적용하였다. 그 후 Fig. 8(b) 단계에서 재료의 응력-변형을 관계를 이용하여 단면의 응력 분포를 산출하였다. 철근의 응력-변형을 곡선은 재료실험 결과를 적용하였고, 콘크리트의 경우 동반논문(Kim et al., 2022)에서 비교를 위해 선정된 구속콘크리트 압축 모델들을 적용하였다. 그 중 대표적인 모델이며 실험 결과와 비교적 잘 일치했던 Scott et al.(1982)가 수정하여 제안한 Modified Kent and Park 구속 콘크리트 모델을 적용하였다. 이렇게 산출한 단면의 응력 분포를 이용하여 Fig. 8(c)와 같이 각 재료별 압축 합력(C)를 구하고 그 작용점을 구하였다. 작용점 위치로 구한 모멘트 팔길이(z)와 압축 합력을 평형 조건에 적용하여 인장철근의 인장력(T)을 산출하였다.

압축력과 모멘트 팔길이를 사용하여 산출된 단면의 휨모멘트와 UTM의 로드셀로부터 계속된 하중을 4점 휨 실험에 대한 모멘트로 환산하여 비교한 것을 영상분석 프레임에 따라 Fig. 9에 도시하였다. 그래프를 살펴보면 극한상태에 근접한 280번 프레임까지는 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있지만, 앞 절에서 살펴본 바와 같이 RC 보의 극한상태에서 콘크리트 표피 탈락 및 압괴 파괴 발생 등으로 인해 DIC 분석 결과의 정확도가 떨어지는 현상이 나타났다. 따라서 본 연구에서는 280번 프레임까지를 유효한 데이터로 간주하여 RC 부재의 휨 인장강화효과 분석을 수행하였다.

3.2 1축 인장부재의 항복 후 인장강화효과 추정식 분석

본 절에서는 RC 휨 부재의 인장강화효과와 기존 1축 인장부재의 인장강화효과 추정식을 비교하기에 앞서, 기존 연구의 인장강화효과에 대하여 살펴보았다. Yoon(2017)은 철근비에 따른 RC 1축 인장부재의 항복 후 인장강화효과를 산정하기 위하여 정사각형 단면을 가지는 부재에 대한 1축 인장실험을 수행하였다. 실험 결과를 바탕으로 RC 인장부재의 항복 후 인

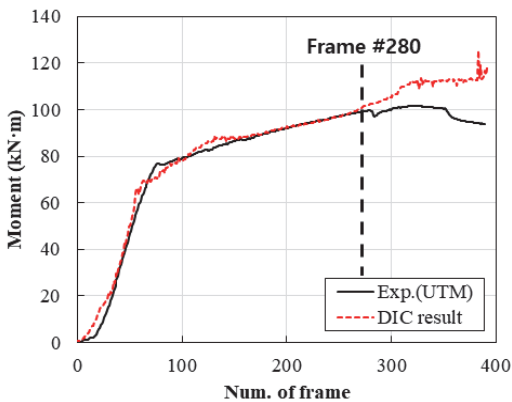


Fig. 9 Bending moment according to frame number

장강화효과 산정식을 제안하였고, 식 (1)과 같다. 여기서 ϵ_{x1} 와 ϵ_{x2} 는 Fig. 10과 같고 각각 $\epsilon_{x1} = \epsilon_{r1} - \frac{0.0016}{\rho^{0.45}}$, $\epsilon_{x2} = 2.6\epsilon_{r2}\rho^3$ 이다.

$$\Delta P = -\left(5800 + \frac{10}{\rho}\right)(\epsilon - \epsilon_1)^2 + \left(850 + \frac{1}{\rho}\right)(\epsilon - \epsilon_1) \quad (1)$$

기존 연구자의 제안 식을 살펴보면, 철근만 있는 경우와 인장강화효과가 적용된 경우 모두 극한강도는 동일하지만, 항복 이후의 강성 및 연성도가 변하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 해당 식은 SD400강종 중 극한강도/항복강도 비가 약 1.2인 경우만 고려되었다. 이는 본 연구에서 사용된 철근(SD300)의 극한강도/항복강도 비에 대한 차이를 고려할 수 없으므로 본 연구에 적용하기에는 다소 부족함이 있다. 또한 1축 인장부재와 휨 부재의 인장부 간의 유효 콘크리트 단면적에 대한 상관관계에 대한 정확한 규명이 이루어지지 않아 1축 인장강화효과 추정식을 휨 부재에 바로 적용하기에는 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 제안했던 1축 인장강화효과 추정식에서 인장철근의 재료보정계수 j 와 휨 인장강화효과계수 p 를 도입하여 휨 부재에 적용할 수 있는 휨 인장강화효과 추정식을 제안하였다.

3.3 휨 부재의 항복 후 인장강화효과 추정식 제안

기존 연구에서 제안한 인장부재의 항복 후 인장강화효과 산정식은 위로 볼록한 2차 함수의 형태를 띠고 있으므로 2차 함수의 기본 개념을 이용하여 재료보정계수와 휨 인장강화효과 계수를 적용하여 식을 유도하였다. 본 연구에서 제안하는 항복 후 휨 인장강화효과 추정식은 다음 식 (2)이다.

$$\Delta P = -\frac{j}{p^2}\left(5800 + \frac{10}{\rho}\right)(\epsilon - \epsilon_1)^2 + \frac{j}{p}\left(850 + \frac{1}{\rho}\right)(\epsilon - \epsilon_1) \quad (2)$$

재료보정계수(j)는 철근의 재료실험인 1축 인장실험에서 얻어진 극한강도와 항복강도의 차이를 30으로 나눈 값이다. 이는 기존 연구에서 적용한 철근의 극한하중과 항복하중의 차이인 30kN를 적용하여 철근의 극한/항복강도 비를 기존 연

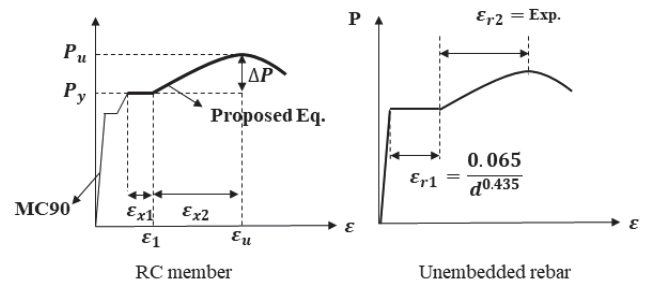


Fig. 10 Estimation of TSE after yield of existing research (Yoon, 2017)

구에 대비하여 보정할 수 있도록 한 것이다. 따라서 본 연구에서 사용한 SD300 강종의 재료보정계수 j 는 1.6이다.

휨 인장강화효과 계수(p)는 1축 인장강화효과 대비 연성거동이 얼마나 감소하는지를 의미한다. 따라서 이 값은 0과 1 사이 값을 가지게 되는데, 여기서 1은 휨 인장강화효과가 1축 인장강화효과와 동일한 상태를 나타낸다. 휨 인장강화효과 계수와 재료보정계수가 변화함에 따라 항복강도/극한강도 비와 강성이 변화하는 것을 알 수 있다. 휨 인장강화효과 계수가 고정된 상태에서 재료보정계수가 증가하게 되면, 하중 증가량은 증가하고, 반대로 재료보정계수가 고정된 상태에서 휨 인장강화효과 계수가 감소하게 되면 부재의 연성거동은 감소하

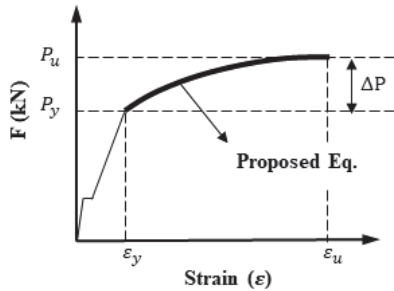


Fig. 11 Proposal of TSE after yield of RC flexural member

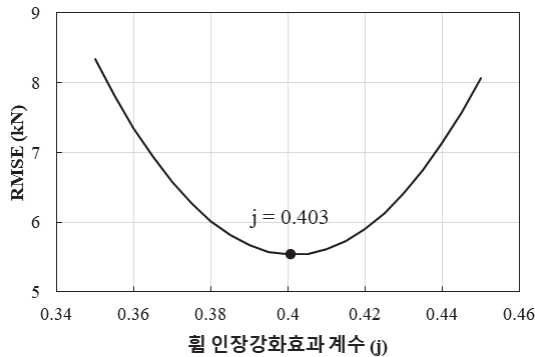


Fig. 12 RMSE according to flexural TSE factor

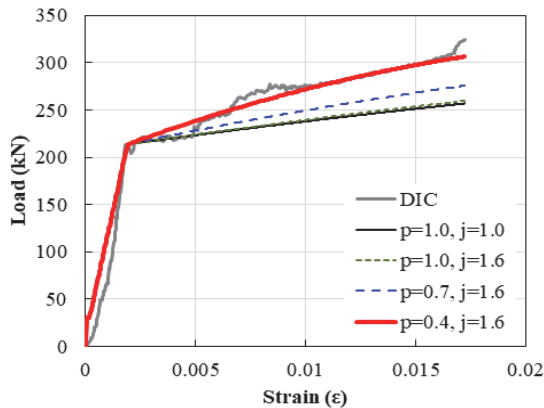


Fig. 13 Application results of proposed equation

게 되고, 이에 따라 강성은 증가하는 거동을 나타낸다.

Fig. 13은 임의의 휨 인장강화효과 계수와 재료보정계수 조합을 이용하여 항복 후 휨 인장강화효과가 고려된 인장철근의 인장하중을 산출한 것이다. 본 연구에서는 Fig. 12와 같이 휨 인장강화효과 계수(p)를 0에서 1까지 0.001씩 증가시켜 부재의 항복 후 구간에서의 적합성을 RMSE(Root mean square error) 평가를 통하여 0.403인 경우가 가장 잘 일치하는 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 계수의 간소화를 위하여 휨 인장강화효과 계수 p 에 0.4를 적용하였다.

4. RC 휨 부재의 항복 후 휨 인장강화효과 추정식 검증

4.1 추정식 검증을 위한 기존 연구 사례

본 연구에서 산출한 RC 부재의 휨 인장강화효과 계수를 적용한 추정식을 검증하기 위하여 다른 연구자들이 수행한 휨 실험 결과들을 조사하였다. 조사 대상에 대한 조건은 본 연구에서 수행한 휨 실험과 같이 직사각형 단면을 가지는 철근콘크리트 휨 부재에 대하여 4점 휨 실험을 수행한 연구이다. 그 중 철근의 1축 인장실험을 수행하여 극한하중까지 도시된 응력-변형률 곡선이 존재하고, 휨 실험의 결과로써 모멘트-곡률 관계나 하중-처짐 관계를 항복 후 구간까지 도시한 그래프가 존재하는 연구들을 조사대상으로 선정하였다. 다음 Table 2은 조사 대상 조건에 만족하는 기존 연구자들이 수행한 실험 개요이다.

Table 2 Summary of 4-point bending tests of existing studies

	b, h [mm]	d [mm]	f_{ck} [MPa]	Rebar	f_y [MPa]	f_u [MPa]	L [mm]	a [mm]	j
1	b300 h350	C50 T300	40	C 2-D10 T 3-D22	480.0 483.3	664.2	3,000	1,000	2.43
2	b125 h189	T154	60	T 2-D13	471	596	1,300	400	0.46
3	b119 h223	T183	60	T 1-D19	477	594	1,500	500	1.16
4	b230 h600	T540	150	T 2-D22	605	718	4,300	1,650	1.49
5	b300 h400	C40 T339	60	C 2-D13 T 4-D22	669	818	4,000	1,500	0.42

- b, h, d: Section width, height, effective depth
- f_{ck} : Compressive strength of concrete
- f_y : Yield strength of the rebar
- f_u : Ultimate strength of the rebar
- L: Span length
- a: Shear length
- Reference: Case 1(Kim, 2004), Case2, 3(Moon, 2021), Case 4(Kim, 2009), Case 5(Song, 2009)

4.2 기존 연구의 실험결과와 제안식 적용 결과 비교

본 연구에서 결과 분석을 위해 사용한 주요 기호를 Fig. 14에 나타내었다. 철근콘크리트 부재의 항복하중과 극한하중

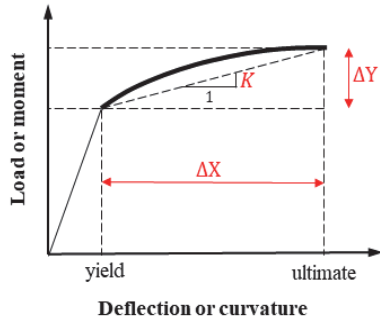


Fig. 14 Main result values for estimation proposed equation

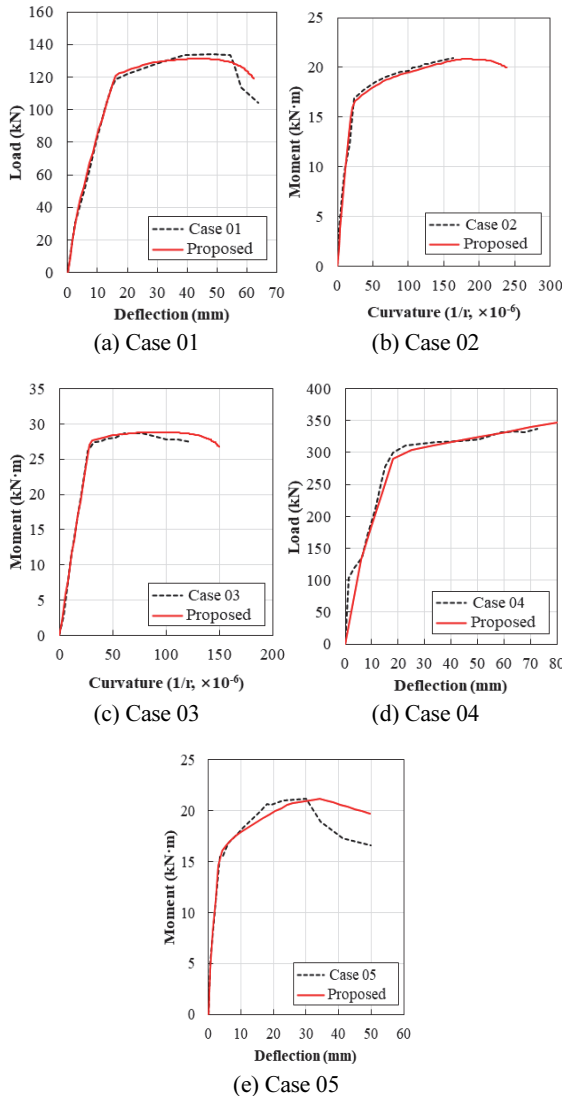


Fig. 15 Comparison of existing research experiment results and proposed equation results

간의 차이 및 그 때 발생된 변형량의 차이가 부재의 연성 거동을 대표하는 주요한 결과값이므로 본 절에서는 이를 이용하여 제안식의 적용성을 분석하였다. Fig. 14에서 $\Delta Y/\Delta X$ 는 부재의 항복 이후 변형 증가량에 대한 하중 증가량에 대한 비로써 하중-변형량 관계에서 항복 이후의 기울기를 나타낸다.

기존 연구사례 중 부재의 극한하중이 확인되지 않은 경우에 대해서는 실험 종료 시점에서의 결과를 이용하여 산출하였다. 기존 연구들의 4점 휨 실험 결과와 본 연구에서 제안한 휨 인장강화효과 추정식 적용 결과를 Fig. 15에 도시하였다. 대부분의 경우 부재가 항복한 후 구간에 대하여 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다. Table 3는 실험 결과와 추정식 적용 결과를 정리한 것이다. 추정식의 적용성을 비교하기 위해서 ΔX , ΔY , 그리고 $\Delta Y/\Delta X$ 에 대한 실험 결과 대비 추정식의

Table 3 Accuracy of the application of the proposed equation

(a) Results of the experimental values and estimated values						
Case	Experiment			Analysis		
	ΔX_{exp}	ΔY_{exp}	$\frac{\Delta Y_{exp}}{\Delta X_{exp}}$	ΔX_{prop}	ΔY_{prop}	$\frac{\Delta Y_{prop}}{\Delta X_{prop}}$
1	32.47	11.88	0.366	32.29	10.12	0.313
2	141.30	5.71	0.040	142.38	4.75	0.033
3	52.18	2.41	0.046	49.91	1.76	0.035
4	61.11	62.96	1.030	58.07	53.87	0.928
5	24.86	5.01	0.202	27.12	4.49	0.165

(b) Comparison of estimated values to experimental values			
Case	Estimated value / Experimental value		
	$\frac{\Delta X_{prop}}{\Delta X_{exp}}$	$\frac{\Delta Y_{prop}}{\Delta Y_{exp}}$	$\frac{(\Delta Y/\Delta X)_{prop}}{(\Delta Y/\Delta X)_{exp}}$
1	0.994	0.852	0.857
2	1.008	0.853	0.826
3	0.956	0.731	0.764
4	0.950	0.856	0.900
5	1.091	0.896	0.813
Average	1.000	0.833	0.834

· Units : ΔX - mm or radian, ΔY - kN or kN·m

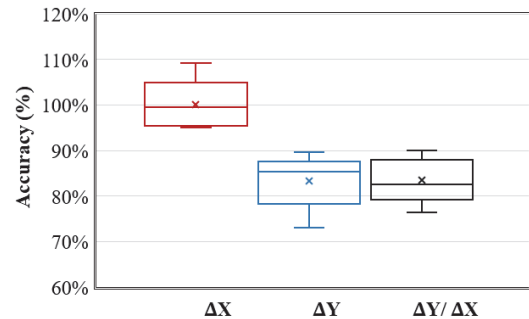


Fig. 16 Statistical analysis of accuracy by variable

비를 산출한 결과 평균적으로 ΔX 는 차이가 거의 없고, ΔY 는 약 16.7%, 그리고 $\Delta Y/\Delta X$ 는 약 16.6% 정도의 차이가 있음을 확인하였다. Fig. 16는 각 항목별 실험값 대비 추정식 정확도를 통계 분석한 그래프를 나타낸 것이다. 그래프의 \times 표기는 Table 3의 평균을 의미한다. ΔX 에 대한 정확도가 가장 우수한 것으로 나타나 부재의 항복 후 연성 거동에 대한 예측이 비교적 정확한 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 철근콘크리트 휨 부재의 항복 후 인장강화 효과가 고려된 철근콘크리트의 해석 모델을 제시하고자 하였다. 이를 위하여 복철근 직사각형 단면을 가지는 RC 단순보에 대하여 4점 휨 실험을 수행하였고, 영상분석기법을 이용하여 부재의 거동을 상세하게 분석하였다. 그리고 영상분석을 통하여 얻어진 부재의 표면 상세 변형률 분포도를 근거로 재료 물성을 보정할 수 있는 재료보정계수와 인장부재와 휨 부재의 거동 차이를 보정할 수 있는 휨 인장강화효과 계수를 도입한 항복 후 인장강화효과 식을 식 (2)와 같이 제안하였다.

재료보정계수는 기존 연구에서 사용된 철근의 극한하중과 항복하중의 비를 본 연구에서 적용한 철근의 비로 보정할 수 있도록 제시한 것이다. 휨 인장강화효과 계수는 휨 부재의 실험 결과와 비교하여 철근 위치에서의 변형률과 산출 인장력의 관계의 정확도가 가장 높은 0.4를 제시하였다.

본 연구에서 제안한 식에 대한 적용성 평가 결과 극한하중과 항복하중의 차이와 항복 후 변형률 대비 하중 증가량에 대한 비는 실험 결과보다 다소 작게 나타났지만, 부재의 연성거동을 대표하는 극한 변형률과 항복 변형률 차이는 실험 결과와 유사하게 나타나 제안식의 예측이 비교적 정확한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 2022 0134-001, 운송 조건이 개선된 프리캐스트 웅벽 연결부 및 프리캐스트 구조물 제작 모니터링 기술 개발).

References

1. Kim, K. S., Park, K. T., and Woo, T. R. (2022), Evaluation on the bending behavior after yield of RC beam by using image processing method(I): Focused on the compressive part, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 26(6), 1-10 (in Korean).
2. Moon, H. G. (2021), An experimental study on strength and deflection of RC flexural members with corroded reinforcements, Master dissertation, Seoul, Seokyeong University, Dept. of Urban Infra and Disaster Prevention Engineering.
3. Woo, T. R., Jung, C. Y., Kim, I. T., Lee, J. H., and Cheung, J. H. (2020), Evaluation of the bending behavior of RC beam by using color-based image processing method, *Journal of Korea Institute of Safety Inspection*, KSMI, 24(4), 48-54 (in Korean).
4. Lee, J. H., Jung, C. Y., Woo, T. R., and Cheung, J. H. (2019), Post-yielding tension stiffening of reinforced concrete members using an image analysis method with a consideration of steel ratios, *Advances in Concrete Construction*, 7(2), 117-126
5. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2015), Highway Bridge Design Standard(Limit State Design) (in Korean).
6. Yoon, D. W. (2017), Behavioral characteristics of RC tensile member depending on the steel ratio by using image processing method, Master dissertation, Busan, Pusan National University, Dept. of Civil Engineering.
7. Kim, J. I. (2009), A study on the flexural capacity of 150MPa ultra high-strength concrete beams, Master dissertation, Seoul, Hanyang University, Dept. of Architectural Environmental Engineering.
8. Song, H. S. (2009), Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with hybrid FRP sheet, Ph. D. dissertation, Seoul, Dongguk University, Dept. of Civil and Environmental Eng.
9. Kim, J. K. (2004), An experiment of influence of shear reinforcements on the flexural ductility of reinforced concrete members, Master dissertation, Busan, Dong-a University, Dept. of Civil Engineering.
10. Kent, D. C., and Park, R. (1971), Flexural members with confined concrete, *Journal of Structural Division*, ASCE, 97(7), 1969-1988.
11. Scott, B. D., Park, R., Prestley, M.J.N. (1982) Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high stress rate, *ACI Journal Proceedings*, 79(1), 13-27.

Received : 09/13/2022

Revised : 10/19/2022

Accepted : 11/01/2022

요 지 : 콘크리트구조물의 한계상태설계법이 적용되면서 구조물의 극한상태까지 고려하는 설계가 이루어지고 있다. 실제 철근콘크리트 부재가 인장력을 부담할 때 부재가 항복한 후에도 극한상태까지 콘크리트가 인장력을 부담한다. 따라서 한계상태 거동에 대한 정확한 평가를 위해서는 휨 부재의 항복 후 인장강화효과에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 복철근 직사각형 단면을 가지는 RC 단순보에 대하여 4점 휨 실험을 수행하였고, 영상분석기법을 이용하여 부재의 거동을 상세하게 분석하였다. 분석 결과를 이용하여 휨 인장강화효과 계수를 도입한 항복 후 인장강화효과 추정식을 제안하였고, 이를 기존 연구들의 실험 결과를 통해 적용성을 검증하였다. 부재의 연성거동을 대표하는 극한 변형률과 항복 변형률 차이가 실험 결과와 유사하게 나타나 제안식의 예측이 비교적 정확한 것으로 판단된다.

핵심용어 : 영상분석 기법, 철근콘크리트, 4점 휨 시험, 항복 후 인장강화효과