Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection
Vol. 26, No. 6, December 2022, pp.39-46
https://doi.org/10.11112/jksmi.2022.26.6.39

pISSN 2234-6937
eISSN 2287-6979

영상 분석 기법을 이용한 RC 부재의 항복 후 휨 거동 분석(I): 압축부를 중심으로

김건수[1], 박기태[2], 우태련[3], 김재환[4*]

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

Kun-Soo Kim[1], Ki-Tae Park[2], Tae-Ryeon Woo[3], Jaehwan Kim[4*]

Abstract: As the limit state design method is applied as the design method of reinforced concrete structure, the ultimate state is considered when analyses or designing. In fact, when the reinforced concrete member is bent, there is a confining effect by stirrup, but the material curve of unconfined concretes applied when designing. In this study, to evaluate the suitability of the confined concrete model for flexural members, a 4-point bending test was conducted on RC simple beam with a double-reinforced rectangular cross-section, and the behavior of the member after yield was analyzed in detail using image processing method. For detailed analysis, the DIC method was adopted as an image analysis method, and the validity of DIC method was verified by comparing the measurement results with the LVDT. The distribution of the strain on the concrete surface calculated as a result of the DIC method could be obtained, and the average strain distribution of the cross-section was calculated. Using the average strain distribution, the stress distribution applied existing confined concrete model as a material curve could be derived. Through the comparison of the experimental results and the existing model application results, the suitability of the confined concrete model for RC flexural members having a rectangular cross-section was evaluated.

Keywords: Image processing method, Reinforced concrete, 4 point bending test, Confined concrete

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.

압축을 받는 철근콘크리트 부재에서 횡철근 내에 위치한 콘크리트는 횡철근에 의해 구속을 받아 비구속 콘크리트에 비하여 큰 힘에 저항할 수 있게 된다. 마찬가지로 실제 휨을 받는 부재 역시 전단철근에 의하여 심부콘크리트는 구속을 받아 부재의 전체적인 거동에 영향을 미친다. 하지만 현행 설계기준은 휨 부재의 설계 시 콘크리트의 응력-변형률 관계에 비구속 콘크리트의 관계를 적용하도록 규정하고 있다. RC 휨 부재의 항복 후 거동에 대한 상세한 분석을 위해서는 RC 휨 부재에 적용 가능한 구속 콘크리트의 응력-변형률 관계에 대한 파악이 필요하다.

본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 휨 실험을 통해 압축부 콘크리트 거동을 상세하게 분석하고 이를 토대로 RC 휨 부재에 대한 기존 구속 콘크리트 모델의 적용성을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 복철근 직사각형 단면을 가지는 철근콘크리트 단순보에 대하여 4점 휨 실험을 수행하였고, 보다 상세한 분석을 위하여 영상분석기법으로 계측을 수행하였다.

2. 철근 콘크리트 보의 4점 휨 실험

2.1 실험 개요 및 조건

본 연구에서는 철근콘크리트 휨 부재의 거동을 평가하기 위하여 복철근 직사각형 단면의 RC 부재에 대한 휨 실험을 수행하였다. Fig. 1은 본 연구에서 대상으로 하는 실험체 제원 및 실험 방법을 나타낸 것이다. 4점 휨 실험을 수행하여 2개의 가

[1]정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원
[2]정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 선임연구위원
[3]정회원, ㈜파이래드 선임연구원
[4]정회원, 한국건설기술연구원 구조연구본부 수석연구원
***Corresponding author:** jaehwankim@kict.re.kr
Korea Institute of Civil and Building Technology (KICT), Goyang, 10223, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2023년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2023년 2월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Copyright Ⓒ 2022 by The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

력점 사이에 순수 휨 모멘트 구간이 형성되도록 하였다. 가력은 2,000kN 용량의 엑추에이터를 이용하여 변위제어로 수행하였으며 가력 속도는 2mm/min을 유지하였다.

실험체에 사용된 철근은 모두 SD300 강종으로 하였다. 인장철근은 D19 철근 2개, 압축철근은 D13 철근 2개를 배근하였다. 전단철근은 D13 철근을 폐쇄형으로 사용하였고, 150mm 간격으로 배근하였다. 콘크리트 설계 압축강도는 21MPa를 적용하였고, 압축강도 실험은 Table 1과 같다.

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. 본 연구에서 적용한 DIC 기법의 알고리즘은 Fig. 2로 이미지의 관심

Table 1 Result of material tests

(a) Concrete

Compressive strength [MPa]	Average [MPa]
23.6	
21.9	
23.1	22.46
21.4	
22.3	

(b) Rebar

	Diameter [mm]	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]
SD300	19	370	547

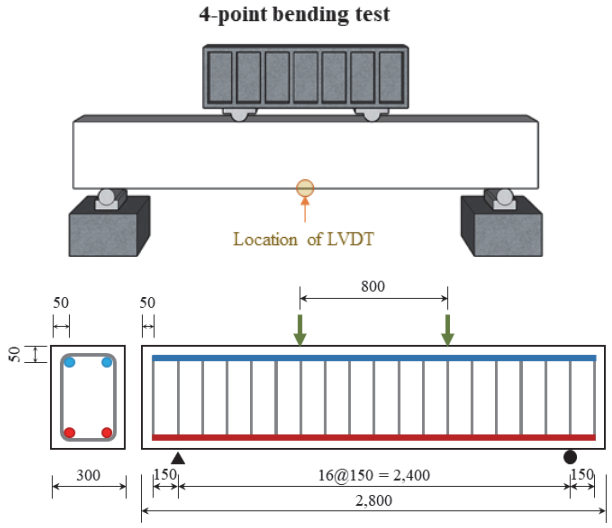


Fig. 1 Specimen shape [mm]

영역(ROI)에서 이미지간 상관관계가 가장 높은 서브셋의 변위를 구하고 이를 변형률로 변환하였다. 또한 같은 영상 내에 하중 값을 동시에 촬영하여 이를 광학문자인식(OCR) 알고리즘을 이용하여 수치화하였다.

또한 DIC 기법의 결과와 비교하기 위하여 기존의 계측 방법인 변위계(LVDT)를 부재 중앙부에 설치하여 변위를 측정하였고, DIC 기법에도 활용할 수 있도록 Fig. 3과 같이 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 등간격으로 촬영하였다. 부재가 휨을 받는 변형 형상을 보다 정확하게 측정하기 위하여 영상분석 관심 영역을 가력 지점 사이인 실험체 중앙부 600mm로 설정하였다. 또한 DIC 기법은 영상의 명암값을 이용하는 방법이므로 보다 명확한 구분을 위하여 콘크리트 표면 색상과 대비되도록 검은 색상의 랜덤한 패턴을 스프레이를 이용하여 칠하였다.

2.2 실험결과 및 분석

실험 종료 시의 실험체 형상을 Fig. 4에 나타내었다. 본 연구에서는 DIC 기법의 타당성 검증을 위하여 기존 계측 방법으로 계측한 처짐 값과 DIC 기법으로 계측한 처짐 값을 비교하였다. Fig. 5는 실험체 중앙부 관심 영역의 최하단 위치에 설치한 변위계의 수직 방향 처짐과 동일한 위치의 영상 내 좌표의 이동량을 분석하여 도출된 처짐을 나타낸 것이다. Table 2는 각 방법에 대한 항복 시와 극한상태에서의 처짐값을 나타

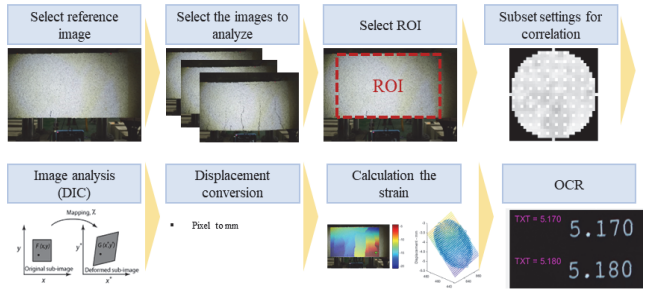


Fig. 2 Algorithm of digital image correlation

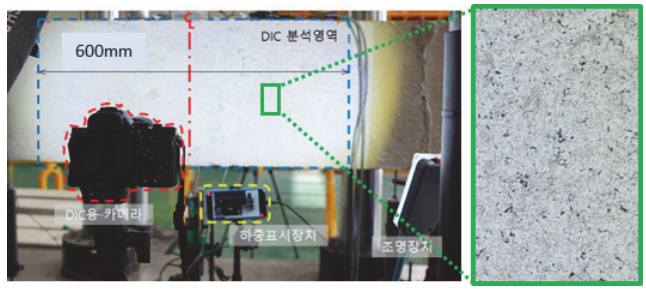


Fig. 3 Setting for measurement

낸 것이다. 두 방법 간 오차가 2% 이내로 나타나, 본 연구에서 계측에 적용한 DIC 기법은 비교적 정확한 계측이 가능하다고 판단된다.

DIC 기법을 이용하여 관심 영역의 변형을 분석하였고, 그에 따른 결과를 변형률 분포도로써 나타내었다. Fig. 6는 분석 대상 영역의 종방향 변형률 분포를 하중 단계별로 나타낸 것이다. 하중이 증가함에 따라 균열 발생 후 균열폭이 커지면서 종방향 변형률 역시 커짐을 확인할 수 있었다. 또한 주 균열 5개 모두 수직 방향으로 진전한 휨 균열인 것을 확인할 수 있었으며 콘크리트 압축부 연단의 압축파괴 현상을 확인할 수 있었다. 그리고 가장 우측에 위치한 균열은 인장측 최외단 부분이 50mm가량 DIC 분석 대상 영역 외에 있는 결과를 보였다.

Table 2 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

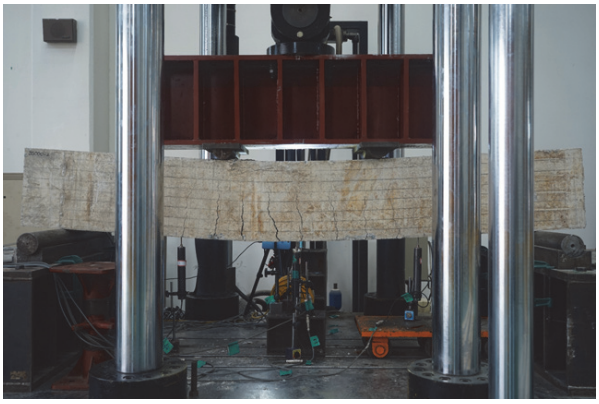


Fig. 4 Crack at the end of experiment

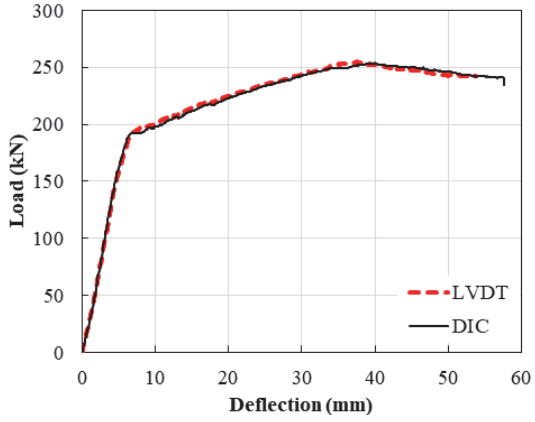
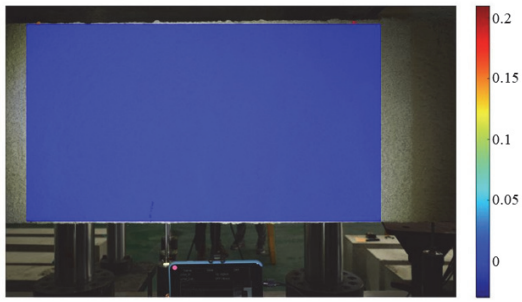
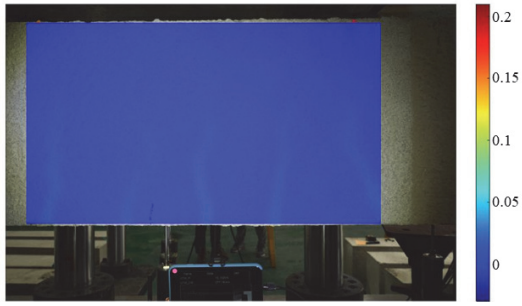


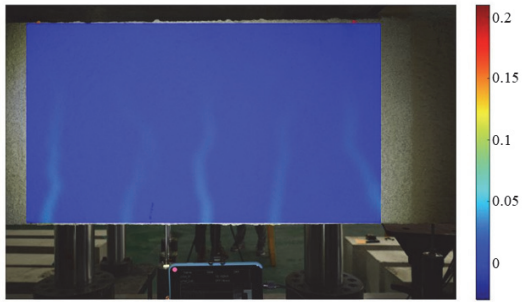
Fig. 5 Deflection measurement results (LVDT vs. DIC)



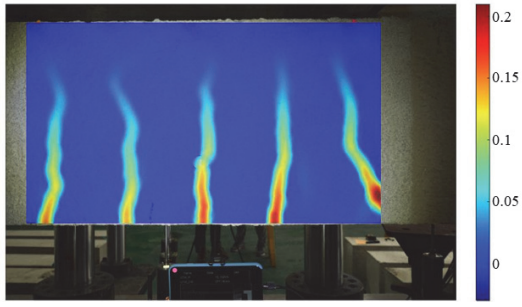
(a) Before the initial crack



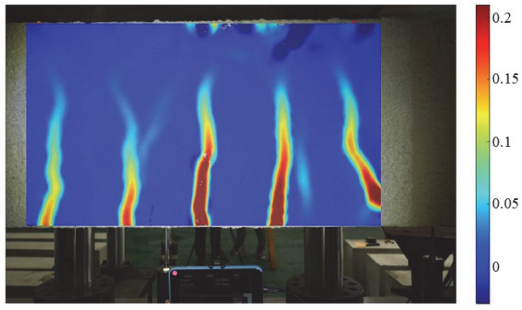
(b) After the initial crack



(c) Yield state



(d) Ultimate state



(e) Rupture

Fig. 6 Strain distribution according to load step

본 연구에서는 DIC 기법 분석 결과인 종방향 변형률 분포도를 이용하여 부재의 휨 인장강화효과를 분석하고자 하였다. Fig. 7은 부재의 극한상태에서의 종방향 변형률 분포도이고, 인장철근 위치에 따른 종방향 변형률 분포도를 도시한 것이다. 균열 위치에서 종방향 변형률이 집중된 것을 확인할 수 있었다. 또한 종방향 위치별 단면의 변형률 선도를 도시하기 위하여 균열면을 포함하여 임의 위치 5곳을 선정하였고, Fig. 7에 ①~⑤로 나타내었다.

Fig. 8은 ①~⑤ 위치에서 깊이에 따른 단면 변형률 선도를

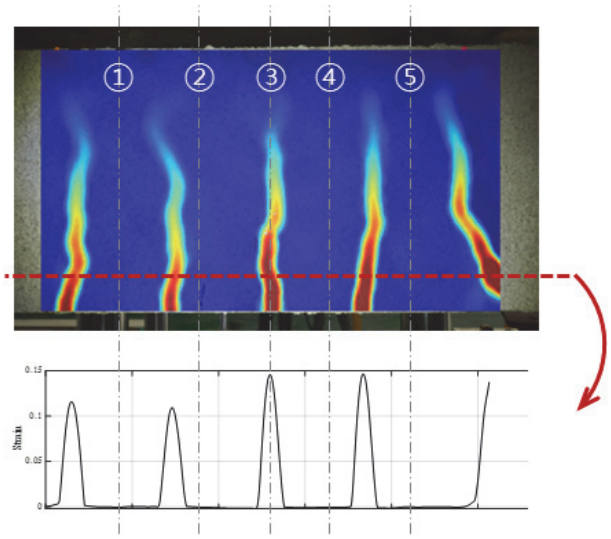
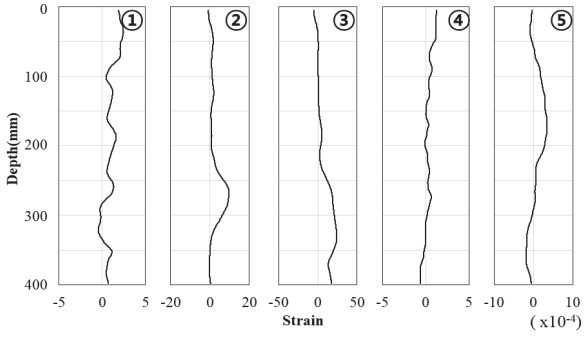
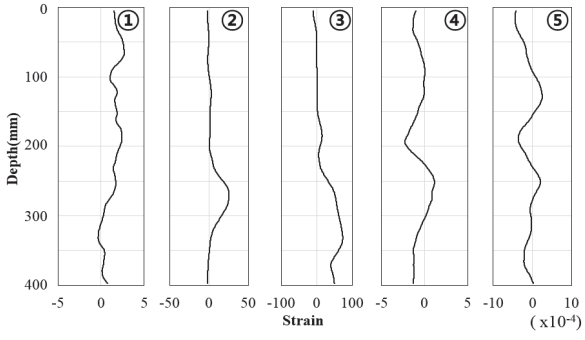


Fig. 7 Distribution of longitudinal strain according to the position of rebar in ultimate state

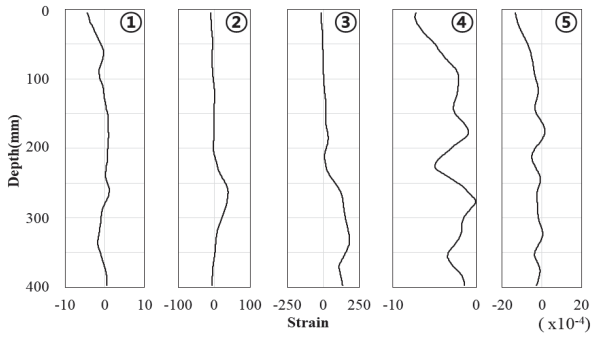


(a) Before the initial crack

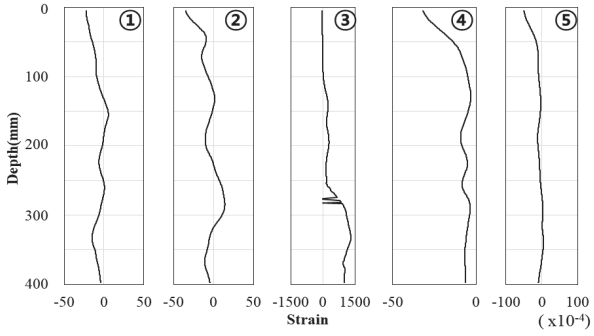


(b) After the initial crack

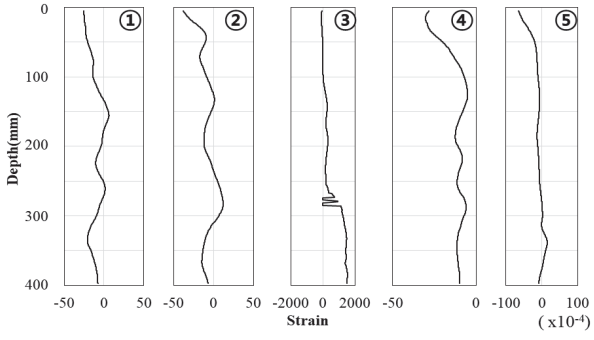
Fig. 8 Distribution of cross-sectional strain by load step



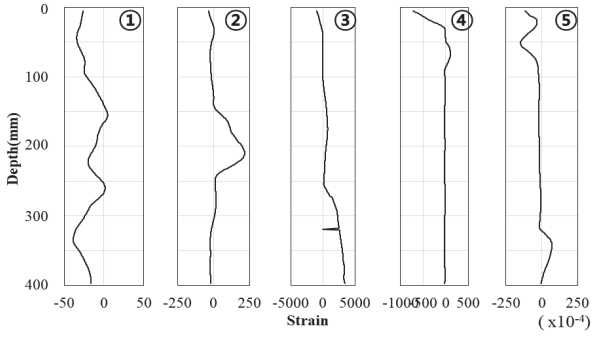
(c) Yield state



(d) Before the ultimate state



(e) Ultimate state



(f) Rupture

Fig. 8 (continued)

하중 단계별로 나타낸 것이다. 음수는 압축 변형을 의미하고 양수는 인장 변형을 나타낸다. Fig. 8을 통하여 각 하중단계마다 위치별 단면 변형률 분포를 확인할 수 있었다. 균열면인 ③의 변형률이 가장 크게 나타났는데, 극한상태 전후로 단면의 변형률이 0이 되는 부분이 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 균열로 인해 변형이 크게 발생하여 콘크리트 표피가 부분적으로 탈락하여 DIC 분석이 힘들었기 때문으로 판단된다. 또한 인장부 영역임에도 불구하고 압축 변형이 발생한 점도 확인할 수 있었다. 특히 위치 ④의 면에서는 전단면이 압축인 순간도 있음을 확인할 수 있다. 이는 철근에 부착된 콘크리트가 인장을 받아 균열이 생기면서 균열과 균열 사이 구간의 콘크리트 표면 변형이 회복되는 현상이 일어났기 때문으로 판단된다.

이와 같이 DIC 기법을 이용하여 실제 콘크리트 변형률 분포를 상세하게 분석해보았다. 실제 콘크리트 변형률은 균열 발생 위치에 따라 불규칙적인 양상을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 특정한 위치에서의 단면 변형률 분포만으로 단면력을 구하기에는 한계가 있다고 판단하여 균열 위치를 고려하여 종방향 변형률 분포를 구하기로 하였다.

평균 변형률을 산정하기 위한 구간은 균열과 균열 사이 변형이 0이 되는 지점을 찾은 후 해당 위치의 사이 구간으로 하였다. 본 연구에서는 DIC 분석 대상 영역 내 위치한 총 5개의

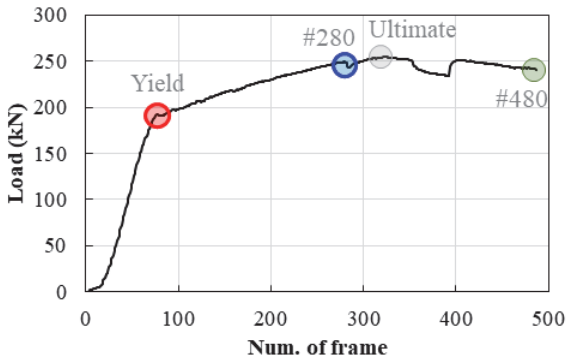


Fig. 9 Load according to frame number

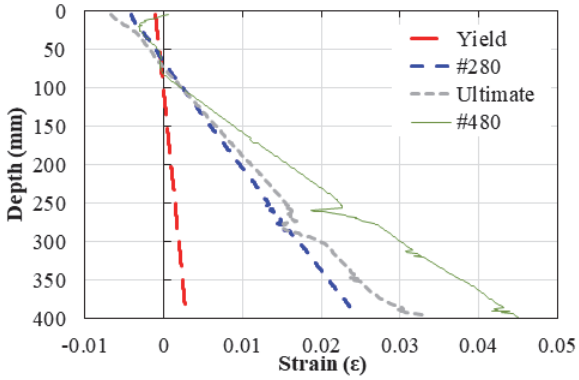


Fig. 10 Distribution of average strain by load step

균열 중 양 끝 가장자리에 발생한 균열 2개를 제외한 가운데 3개의 균열이 포함되도록 구간을 선정하였다. Fig. 9에 이미지 프레임별 하중 곡선과 평균 변형률 선도를 도시하기 위한 하중 단계를 표시하였고, Fig. 10에 하중 단계별 평균 변형률 선도를 도시하였다.

Fig. 10에서 확인할 수 있듯이 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 측 연단에서 압괴파괴가 발생하여 DIC 결과에 오차가 발생한 것으로 판단된다.

3. 콘크리트 압축 응력–변형률 관계를 이용한 RC 휨 부재의 압축부 거동 평가

본 연구의 목적은 철근콘크리트 휨 부재에서 압축부 거동을 상세하게 분석하고 압축 콘크리트의 구속 모델의 적합성을 평가하는 것이다. 따라서 인장강화효과가 고려된 인장부 단면력 합력(T)과 압축부 단면력 합력(C)가 같다는 힘의 평형조건과 DIC 분석으로부터 얻어진 종방향 평균 변형률 분포를 이용하여 휨 부재의 압축력을 산출하고자 하였다. 아래 Fig. 11는 힘의 평형조건과 변형 적합조건을 이용한 복철근 직사각형 단면을 가지는 휨 부재의 단면력 산정 알고리즘 위한 역학적 개념도를 나타낸 것이다. DIC 기법 결과인 평균 변형률 분포를 이용하여 기존의 여러 구속콘크리트 모델을 적용하여 응력 분포를 구한 후 이를 토대로 압축력을 산정하였다.

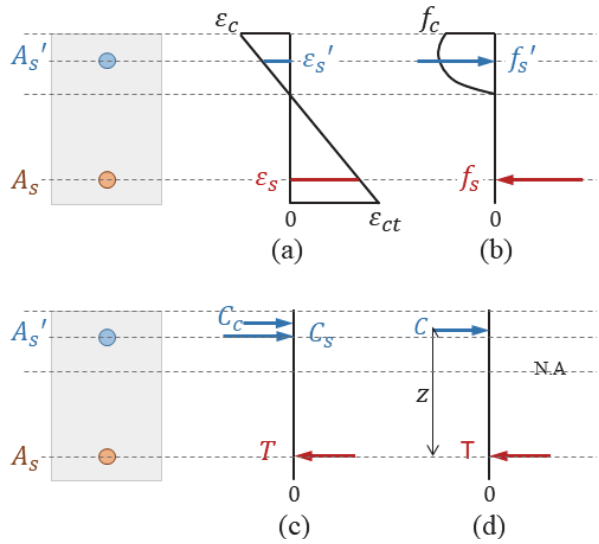


Fig. 11 Mechanical concept for calculating the cross-section force of rectangular sections

본 연구에서는 압축력을 산정하기 위한 기존의 구속 콘크리트 모델로 직사각형 단면에 대하여 적용이 가능한 모델들을 조사하였고 이를 Table 3에 정리하였다. Modified Kent and Park 모델은 사각 단면의 부재에 적용할 수 있는 모델로 2차 곡선 형태의 상승곡선과 직선의 하강곡선 구간으로 구성되어 있다(Scott et al., 1982). 최대응력의 크기와 그 때의 변형률을 정의하기 위하여 계수 K를 도입하고, Z_m과 최대응력 크기의 곱으로 하강곡선 기울기를 정의한다. Mander et al.(1988) 모델은 다른 모델들과 달리 상승구간과 하강구간의 구분 없이 하나의 식으로 구속콘크리트의 응력-변형률 관계를 정의한다. 원형단면, 사각단면, 그리고 벽체에 적용할 수 있도록 하였다. Hoshikuma et al.(1997)은 일본의 도로교설계기준에 적용되고 있는 구속콘크리트 모델이다. 이 역시 원형단면, 사각단면, 그리고 벽체에 적용할 수 있도록 단면 계수 α와 β를 적용하여 제안된 모델이다. 상승구간을 계수 n을 도입하여 포물 곡선을 나타내었고, 하강구간은 직선을 가지도록 하였다.

도로교설계기준(한계상태설계법)은 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 원형기둥과 사각기둥으로 구분하여 포물-직사각 곡선(p-r곡선)으로 제시하고 있다. 해당 식은 Eurocode 2 (2004)와 Fib MC 2010에 규정된 횡구속 콘크리트에 대한 압축응력-변형률 모델의 형태를 참조하고, 189개의 실험값을 분석한 결과로 제안된 모델이다. Mander et al.(1988)이 제안한 모델보다 안전측의 결과를 제공한다. 또한 본 연구에서는

Table 3 Stress-strain models for confined concrete

Model	Stress-strain relationship for confined concrete	
Modified Kent & Park (1982)	Ascending	$f_c = Kf_c'\left[\frac{2\varepsilon_c}{0.002}-\left(\frac{\varepsilon_c}{0.002K}\right)^2\right]$
	Descending	$f_c = Kf_c'\left[1-Z_m(\varepsilon_c-0.002K)\right]$
	Residual stress	20% of Kf_c'
Mander et al. (1988)		$f_c = \frac{f_{cc}xr}{r-1+x^r}$
Hoshikuma (1997)	Ascending	$f_c = E_c\varepsilon_c\left[1-\frac{1}{n}\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}}\right)^{n-1}\right]$
	Descending	$f_c = f_{cc}-E_{des}(\varepsilon_c-\varepsilon_{cc})$
	Residual stress	50% of f_{cc}
HBD (2015)	Ascending	$f_c = \rho_{r,\min}f_{yh}\times\left(1-\frac{s}{b_{cl}}\right)\left(1-\frac{s}{b_{cs}}\right)\left(1-\frac{\sum b_i^2/6}{b_{cl}b_{cs}}\right)$ $\varepsilon_{co,c} = \varepsilon_{co}(f_{ck,c}/f_{ck})^2$ $\varepsilon_{cu,c} = \varepsilon_{cu}+0.2f_2/f_{ck}$

· f_c : compressive strength of concrete[MPa]
· ε_c : compressive strain of concrete
· f_{cc} : strength of confined concrete[MPa]
· f_{yh} : yield strength of lateral confinement[MPa]

구속콘크리트 모델 적용의 타당성을 검증하기 위하여 도로교설계기준(한계상태설계법)에서 제시하는 비구속콘크리트의 비선형해석 재료 모델을 적용한 결과도 함께 비교 및 분석하였다. 도로교설계기준(한계상태설계법)의 비구속콘크리트 비선형 해석을 위한 재료 모델은 다음 식 (1)과 같다.

$$f_c = f_{cm}\left[\frac{k(\varepsilon_c/\varepsilon_{sco,r})-(\varepsilon_c/\varepsilon_{co,r})^2}{1+(k-2)(\varepsilon_c/\varepsilon_{co,r})}\right] \quad (1)$$

여기서 $k = 1.1E_c\varepsilon_{co,r}/f_{cm}$이고, $\varepsilon_{co,r}$은 최대하중 시 변형률, $\varepsilon_{cu,r}$은 극한한계변형률을 나타낸다.

본 연구에서 실험에 적용한 콘크리트 기준압축강도(f_{ck}) 21MPa에 따른 각 모델별 응력-변형률 곡선을 Fig. 12에 도시하였다. 최대 압축응력은 Mander et al.(1988)이 약 29.2MPa로 가장 높았고 그 다음으로 Modified Kent and Park 모델은 약 22.5MPa로 높았다. 구속콘크리트의 극한 변형률의 경우 Modified Kent and Park 모델이 약 1.5%로 가장 크게 나타났고, Mander et al.(1988)이 약 1.3%로 뒤따라 비구속콘크리트

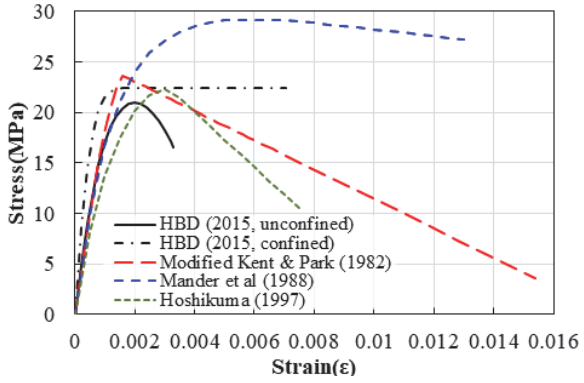
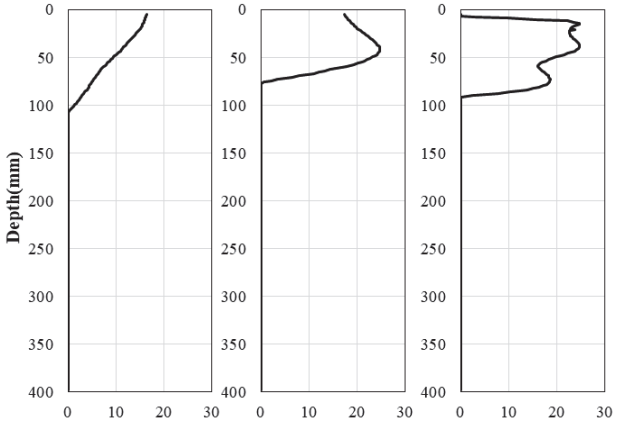


Fig. 12 Compressive stress-strain models of concrete



(a) Yield (b) Ultimate (c) Rupture

Fig. 13 Compressive stress distribution by load step [MPa]

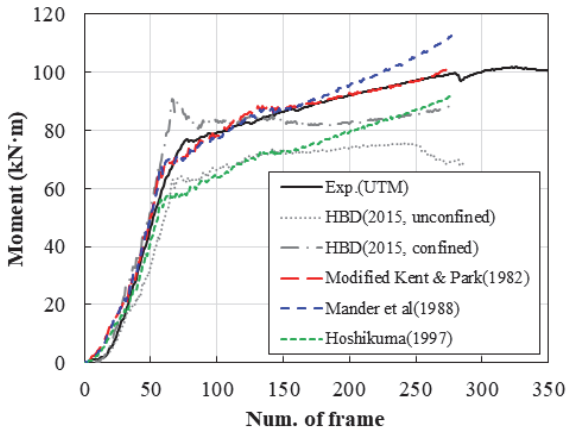


Fig. 14 Experimental result and existing model application results

의 극한변형률 기준인 0.33%를 크게 넘어서는 것을 알 수 있다.

앞 절에서 언급한 바와 같이 극한상태에 근접한 280번 프레임까지는 DIC 결과가 비교적 정확하였으므로 본 연구에서는 280번 프레임까지를 유효한 데이터로 간주하여 분석을 수행하였다. 각각의 구속 콘크리트 모델을 콘크리트 재료곡선으로 적용하였고, 대표적으로 Modified Kent and Park 모델을 적용한 콘크리트 압축응력 분포를 Fig. 13에 나타내었다. 각각의 모델을 적용하여 단면력을 산정하였고 Fig. 14에 도시하였다.

Hoshikuma(1997) 모델이 가장 낮게 나타났고, Modified Kent and Park 모델의 적용 결과가 실험 결과와 굉장히 비슷하게 나타났다. 비구속콘크리트 모델을 적용한 결과로는 항복모멘트가 실험 항복모멘트 대비 약 81.8%로 낮게 나타났고, 최대하중이 도달하기 전인 250번 프레임부터 극한한계변형률을 넘어서는 것을 확인할 수 있었다. 250번 프레임에서의 모멘트를 비교해보면 실험결과 대비 비구속콘크리트의 단면력의 차이가 약 26.4%로 가장 큰 것을 알 수 있었고, Modified Kent and Park(1982) 모델이 약 2.2%로 가장 적은 차이를 나타냈다.

따라서 본 연구에서는 휨 부재의 거동 분석 시 구속콘크리트 모델을 적용하는 것이 타당하다고 판단하였다. 또한 본 연구에서 비교 및 분석을 수행한 구속콘크리트 모델 중에서는 구성의 명료함과 해석의 정확성을 충분히 갖춘 모델로 평가받고 있는 Modified Kent and Park(1982) 모델이 직사각형 단면을 가지는 휨 부재에 적합한 구속콘크리트 모델로 판단하였고 인장부를 중심으로 연구한 동반논문(Kim et al., 2022) 역시 해당 모델을 적용한 결과를 기반으로 분석을 진행하기로 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 휨 부재의 항복 후 거동의 상세한 분석을 통하여 직사각형 단면을 가지는 휨 부재에 적합한 압축부 구속콘크리트 모델을 평가하고자 하였다. 이를 위하여 복철근 직사각형 단면을 가지는 RC 단순보에 대하여 4점 휨 실험을 수행하였고, 영상분석기법을 이용하여 부재의 휨 거동을 상세하게 분석하였다.

상세한 분석을 위하여 영상분석 기법 중 DIC 기법을 이용하여 계측하였고, 계측 방법의 타당성을 검증하기 위하여 지간 중앙 하부에 변위계를 설치하여 부재의 처짐을 계측하여 비교하였다. 그리고 영상분석기법을 통하여 콘크리트 표면 상세 변형률 분포도를 얻을 수 있었다. 이를 통해 실제 콘크리트 변형률은 균열 발생 위치에 따라서 불규칙적인 양상을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 특정한 위치에서의 단면 변형률 분포만으로 단면력을 구하기에는 한계가 있다고 판단되어 균열 위치를 고려하여 종방향 변형률 평균을 구하였다.

DIC 결과로 산출된 단면의 평균 변형률 분포를 통하여 평면 보존의 법칙이 성립함을 확인하였다. 다만 극한상태 전후부터는 선형성을 유지하지 않았는데, 이는 콘크리트 표피 탈락 및 압축측 콘크리트 압괴파괴로 인하여 DIC 오차가 발생한 것으로 판단된다.

단면의 평균 변형률 분포를 이용하여 기존 구속콘크리트 모델의 휨 부재에 대한 적합성을 평가하였다. 비구속콘크리트 모델과 실험 결과를 비교하여 구속콘크리트 모델 적용의 타당성을 검증하였다. 또한 구속콘크리트 모델들과 실험 결과의 비교를 통해 본 연구에서 비교한 모델들 중에서는 Modified Kent and Park(1982) 모델이 본 연구에서 수행한 실험결과와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 다만 복철근 직사각형 단면을 가지는 RC 단순보에 대해서 보편적으로 구속콘크리트 모델을 적용하기 위해서는 추후 다양한 변수를 가지는 실험을 수행하고 이에 대한 상세한 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20220217-001, DNA 기반 노후 교량 구조물 스마트 유지관리 플랫폼 및 활용기술 개발).

References

1. 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(II): Focused on the tensile part, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 26(6), 1-10 (in Korean).
2. 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 the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, 24(4), 48-54 (in Korean).
3. 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, Techno-Press*, 7(2), 117-126.
4. Ministry of Land, Infrastructure, and Transport (2015), Highway Bridge Design Standard (Limit State Design). (in Korean).
5. Jeong, H. C. (2015), Material model of confined concrete considering the mechanical properties change with lateral confinements, Ph. D dissertation, Ulsan, Ulsan university, Dept. of Civil Engineering.
6. British Standard Institution. (2004), Eurocode 2: Design of concrete structures.
7. Hoshikuma, J., Kawashima, K., and Nagaya, K. W. (1997), Stress-strain for reinforced concrete it bridge piers, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 123(5), 624-633.
8. Comite Euro-International Du Beton (1990), CEB-FIP Model code 1990.
9. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988), Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Division*, ASCE, 114(8), 1804-1826.
10. Mander, J. B., Priestley, M. J. N., and Park, R. (1988), Observed stress-strain behavior of confined concrete, *Journal of Structural Division*, ASCE, 114(8), 1827-1849.
11. Kent, D. C., and Park, R. (1971), Flexural members with confined concrete, *Journal of Structural Division, ASCE*, 97(7), 1969-1988.
12. Scott, B. D., Park, R., Preistley, 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 : 09/24/2022
Accepted : 11/07/2022

요 지 : 철근콘크리트 구조물의 설계 방법으로 한계상태설계법이 적용되면서 해석이나 설계 시 극한상태까지 고려하도록 하고 있다. 실제로 철근콘크리트 부재가 휨을 받을 때 전단철근에 의한 구속 효과가 존재하지만, 설계 시에는 비구속 콘크리트의 재료 곡선을 적용하도록 하고 있다. 본 연구에서는 휨 부재에 대한 구속콘크리트 모델의 적합성을 평가하기 위하여 복철근 직사각형 단면을 가지는 RC 단순보에 대하여 4점 휨 실험을 수행하였고, 영상분석기법을 이용하여 부재의 항복 후 거동을 상세하게 분석하였다. 상세한 분석을 위하여 DIC 기법을 영상분석 기법으로써 채택하였고, 기존 계측 방법과 계측 결과를 비교함으로써 DIC 기법의 타당성을 검증하였다. DIC 기법의 결과로 산출된 콘크리트 표면의 변형률 분포도를 얻을 수 있었고, 이를 통하여 단면의 평균 변형률 분포를 산출하였다. 평균 변형률 분포도를 이용하여 기존 구속콘크리트 모델을 재료곡선으로 적용한 응력 분포도를 도출할 수 있었다. 실험 결과와 기존 모델 적용 결과의 비교를 통하여 직사각형 단면을 가지는 RC 휨 부재에 대한 구속콘크리트 모델의 적합성을 평가하였다.

핵심용어 : 영상분석 기법, 철근콘크리트, 4점 휨 실험, 횡구속 콘크리트