

RC보의 휨 균열폭 및 균열간격에 관한 실험 및 이론 연구

Assessment of Flexural Crack Width and Crack Spacing of Reinforced Concrete Beams

오 병 환* 김 세 훈**
Oh, Byung Hwan Kim, Se Hoon

ABSTRACT

With exact analysis of cracks in RC beam, present or past stress states can be traced. For analysis of Flexural cracks, experiments are carried out focusing on variation of crack widths and crack spacing due to stress, beam properties. the crack width expectation formulas of each code are compared and initial crack spacing expectation formula is proposed.

1. 서론

RC보의 하중에 대한 대표적인 성능저하 형태는 균열로써 나타나게 된다. 철근콘크리트 휨부재의 하중에 따른 균열폭, 균열간격, 균열깊이 등의 균열특성들을 정확히 해석할 수 있으면 부재의 균열특성을 통하여 현재와 과거의 응력상태를 추정할 수 있다. 현재 RC 휨부재의 철근응력에 따른 균열폭의 변화에 대한 연구들은 많이 수행되어 왔지만 균열간격과 균열깊이를 포함한 전체적인 균열거동을 예측하는 연구들은 거의 수행되고 있지 않다. 본 연구는 부재특성을 고려한 균열폭, 균열간격 등의 균열거동 특성을 규명하기 위해서 보부재를 제작하여 하중단계별 균열폭, 균열간격, 균열깊이, 철근의 변형률, 콘크리트의 변형률, 처짐 등을 측정하였다. 본 연구에서 측정값을 토대로 각국의 균열폭 예측식을 비교 분석하고, 초기 균열간격식을 제안하였다.

2. 실험

2.1 시험체 제원

보 시험체의 형상 및 크기는 그림1에 주요 변수는 표1에 나타내었다.

2.2 사용재료

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사수료

사용한 콘크리트의 압축강도는 $f_c = 270 \text{ kgf/cm}^2 (26.46\text{MPa})$ 이며, 사용한 철근의 인장강도는 $4000 \text{ kg/cm}^2 (392\text{MPa})$ 이다. 주철근의 지름은 주요변수로 사용되었고 스티럽은 지름 $\phi 10\text{cm}$ 철근을 이용하였다.

2.3 재하 방법 및 측정 방법

하중재하 장치는 그림1과 같이 4점 재하하였다. 등모멘트 구간은 120cm이며, 전단지간 비 $a/d=4.12\sim 4.67$ 로 등모멘트 구간에서 순수 휨 수직균열만 발생하도록 재하하였다. 재하 장치로는 자동제어 재하시스템(최대 정격하중 200ton)을 이용하여 하중단계별로 나누어 각 하중 단계별 철근의 변형률, 균열폭, 균열간격, 콘크리트 변형률, 처짐을 측정하였다. 균열폭은 주요 균열위치에서 보의 연단과 철근위치에 균열게이지를 부착하여 하중변화에 대해 실시간으로 측정하고, 철근에서 거리별로 optical microscope을 이용하여 균열폭을 측정하였다. 균열간격과 균열깊이(육안으로 식별 가능한 깊이)은 하중단계별로 균열의 위치를 표시하여 측정하였다. 균열발생에 따른 철근의 변형률을 측정하기 위하여 등모멘트 구간의 주철근에 10~15cm 간격으로 변형률 게이지를 부착하여 측정하였으며, 콘크리트 변형률은 휨부재 중앙부에 높이별로 콘크리트 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 처짐값은 LVDT를 보의 중앙에서 지점까지 50cm 간격으로 설치하여 측정하였다.

표1. 제작 부재의 주요변수

부재번호	철근유효 깊이(cm)	인장철근 지름(mm)	인장철근 갯수	압축철근 갯수
C5-D13-4	34	13	4	2
C5-D16-4	34	16	4	2
C5-D19-3	34	19	3	2
C5-D22-3	34	22	3	2
C5-D22-2	34	22	2	2
C5-D22-2R	34	22	2	2
C5-D25-2	34	25	2	2
C5-D25-2R	34	25	2	2
C7-D19-3	32	19	3	2
C7-D22-3	32	22	3	2
C7-D25-2	32	25	2	2
C7-D25-2R	32	25	2	2
C9-D19-3	30	19	3	2
C9-D22-3	30	22	3	2
C9-D25-2	30	25	2	2
C9-D25-2R	30	25	2	2

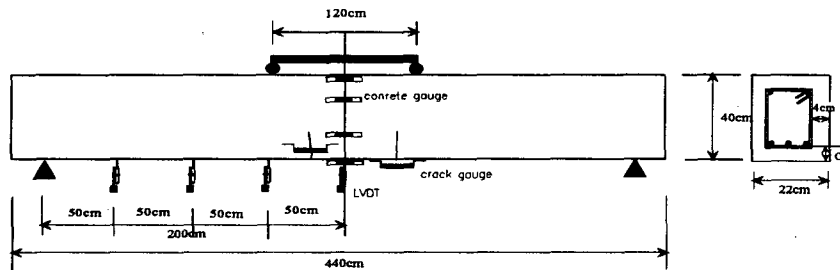


그림1. 시험체 형상, 측정장치 및 재하 방식

3. 결과분석 및 고찰

3.1 각 국의 균열폭 예측식 비교 분석

그림 2와 그림3에서 보는 바와 같이 실험결과와 각 국의 균열폭 예측식을 비교할 때 ACI 기준은 균열폭을 과소평가하고 있음을 알 수 있다. 또한 CEB 기준은 초기 균열폭에서 오차가 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. Balazs(1999)가 제시한 해석해 값과 비교했을 때 실험 결과 값은 전 시험부재

에 걸쳐 유사한 거동을 보여주었다. 하지만 Balazs의 균열폭 예측식은 철근항복응력의 1/3(130MPa)까지는 오차가 적게 발생하지만 철근응력 값이 증가할수록 오차가 크게 발생함을 알 수 있다. 오차의 원인은 하중이 증가함에 따라 균열간격 s 가 $L_t \sim 2 L_t$ 가 되도록 하는 안정화된 균열의 발생빈도가 높아지는 것에 있는 것으로 사료된다. 현재 Balazs의 연구결과를 살펴보면 안정화된 균열 각각의 균열폭 해석은 가능하지만 안정화된 균열의 균열폭식은 제안하고 있지 않으며 또한 균열폭 예측식에 안정화된 균열폭의 영향을 고려하지 못하고 있다. 보다 정밀한 균열폭 예측식을 위해서는 안정화된 균열폭의 영향을 고려할 수 있는 방법이 연구되어야 할 것으로 사료된다.

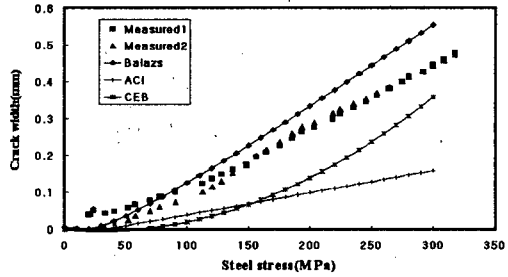
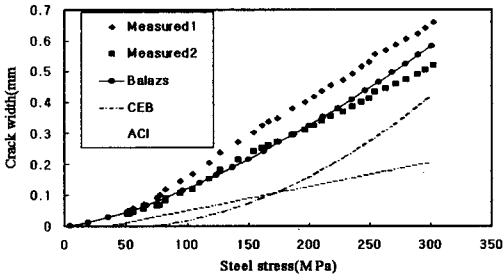


그림 2. C9-D25-2 부재의 균열폭 예측식과 측정값 비교 그림 3. C7-D22-3 부재의 균열폭 예측식과 측정값 비교

3.2 초기 균열간격식

현재 철근콘크리트 휨부재에서 초기 균열이 발생할 때 균열간격을 제시한 연구들을 살펴보면 균열간격은 부착에 의해 철근에서 콘크리트로 응력이 전달되는데 필요한 거리, 즉 전달거리 L_t 보다 크다는 것만을 제시하고 있다. 그러나 실제 초기 균열 발생시 응력상태에서 계산되는 전달길이는 실제 균열간격에 비해 너무 작은 값을 보인다. 그러므로 초기균열 발생시에 강도에 기초한 균열간격을 제시할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 에너지 개념을 도입하여 초기균열간격식을 제시하였다.

균열이 발생하기 위해서는 콘크리트의 균열전후의 변형에너지 차이가 균열이 발생하는데 필요한 파괴에너지와 철근을 따라 슬립을 일으키는데 필요한 부착에너지의 합보다 커야 한다. 따라서 그림1과 같은 콘크리트 응력상태를 가정하면 콘크리트의 변형에너지차 ΔU , 파괴에너지 ΔW_f , 부착에너지 ΔW_b 는 다음과 같다.

$$\Delta W_f = G_f \times A_{c,ef} \quad (1) \qquad \Delta W_b = \pi \phi \tau_{bk} L_t \frac{w}{2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta U &= A_{c,ef} \frac{f_r}{2E_c} \frac{s}{2} - A_{c,ef} \frac{\sigma_{c1}^2}{2E_c} (\frac{s}{2} - L_t) + A_{c,ef} \frac{\sigma_{c1}^2}{4E_c} L_t \\ &= \frac{A_{c,ef}}{4E_c} [f_r - (\frac{\rho}{1+n\rho})^2 \sigma_{c2}^2] \times s + \frac{3A_{c,ef}}{4E_c} L_t \times (\frac{\rho}{1+n\rho})^2 \sigma_{c2}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, G_f = 콘크리트의 단위 면적당 파괴에너지, L_t : 전달길이, $A_{c,ef}$ = 콘크리트의 유효인장면적, σ_{c2} = 균열면의 철근의 응력, f_r = 콘크리트 휨인장강도 (modulus of rupture), $n = E_s/E_c$: 탄성비, $\rho = A_s/A_{c,ef}$: 유효인장철근비, $w = L_t(\epsilon_{c2} - f_r(1+n\rho)/\rho E_s)$: 균열발생초기의 균열폭이다.

파괴가 일어나기 위해서는 아래와 같은 조건이 수반되어야 하므로 초기균열발생시의 균열간격은 식 5와 같다. 실제 휨부재의 거동실험을 수행하여 비교한 결과 표1과 같이 유사한 결과를 보이고 있음을

알 수 있다.

$$\Delta U \geq \Delta W_f + \Delta W_b \quad (4) \quad s \geq \frac{[G_f \times A_{c,ef} + \pi \phi \tau_{bk} L_t \frac{w}{4} - \frac{3A_{c,ef}}{4E_c} L_t \times (\frac{\rho}{1+n\rho})^2 \sigma_s^2]}{\frac{A_{c,ef}}{4E_c} [f_r^2 - (\frac{\rho}{1+n\rho})^2 \sigma_s^2]} \quad (5)$$

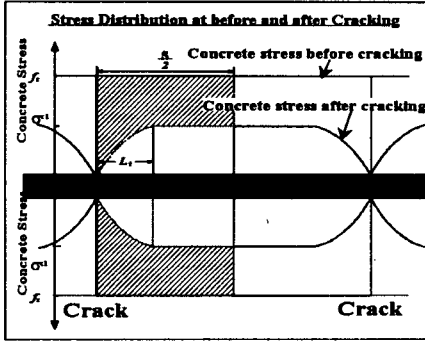


그림 4. 균열전후의 콘크리트의 인장응력 변화

표2. 초기균열간격 실측값과 해석값 비교

부재번호	실측값(mm)	해석값(mm)	해석값/실측값
C5-D13-4	295.5	377.4	1.28
C5-D19-3	470.0	384.4	0.82
C5-D22-3	470.0	387.0	0.82
C5-D22-2	330.0	377.0	1.14
C5-D25-2	450.0	382.0	0.85
C7-D19-3	280.0	383.0	1.37
C7-D22-3	370.0	388.0	1.05
C7-D25-2	375.0	381.0	1.39
C9-D19-3	450.0	383.0	0.85
C9-D22-3	335.0	388.0	1.16
C9-D25-2	377.5	384.0	1.02
평균			1.06

4. 결론

본 연구는 RC 휨부재의 균열거동 특성을 분석하기 위하여 균열거동 측정 시험을 수행하고 각국의 균열폭 예측식들과 비교분석하였다. 또한 균열거동해석을 위해서 필수적인 초기 균열간격 예측식을 제시하였다. 분석결과 현재의 각국의 균열폭 기준들은 실제 측정값과 차이를 나타내고 있지만 정밀 해석해를 이용하면 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있었다. 또한 제시한 초기 균열간격 예측식은 RC휨부재의 균열거동 해석에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국표준과학연구원의 인위재해방재기술개발사업 중 과제 99-J-HD-01-B-01 '교량구조물의 결함 및 노화도 평가기술 개발 사업'의 2분야 균열 및 손상을 가진 콘크리트 교량부재의 거동평가에 의해 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 인위재해방재기술개발사업단에 감사드립니다.

참고문헌

1. Bazant, Z. P., and Oh, Byung Hwan "Spacing of Cracks in Reinforced Concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, v.109, September 1982, pp.2066-2085
2. Fantilli, A.P., Ferretti, D., Iori, I. and Vallini, P.. "Flexural Deformability of Reinforced Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, ASCE, September 1998, pp.1041-1049
3. Balazs, G. "Cracking Analysis Based on Slip and Bond Stresses", ACI Materials Journal, July-August 1993, pp.340-348