

콘크리트강도에 따른 CEB-FIP Model Code의 인장강성 평가

Evaluation of Concrete Strength Effects on Tension Stiffening of CEB-FIP Model Code

양 준 호*
Yang, Jun-Ho

염 환 석**
Yum, Hwan-Seok

김 우***
Kim, Woo

ABSTRACT

This paper describes an experimental investigation on the influence of concrete strength on tension stiffening behavior. Total 6 direct tension specimens were tested with variation of concrete strengths such as 260, 620, and 820kgf/cm². These test results were compared with tension stiffening models of CEB-FIP Model Code. It was appeared that, as concrete strength was increasing, CEB-FIP models estimated much more tension stiffening than these test results. As the result, it would be said that the influence of concrete strength on tension stiffening was not properly taken account for in CEB-FIP models.

1. 서 론

철근콘크리트 인장부재에서 균열이 발생하면 균열 단면에서 콘크리트는 인장력을 분담하지 못하고 모든 인장력을 철근만이 분담한다. 그렇지만, 인접한 균열사이에서는 부착에 의해 인장력이 철근으로부터 주위 콘크리트로 전달된다. 이러한 결과로 균열사이의 콘크리트가 철근의 변형률을 감소시키고 부재의 인장강성을 증가시키는 현상을 인장강성효과(tension stiffening effect 또는 tension stiffness effect)라 한다⁽¹⁾⁻⁽⁵⁾.

직접인발실험에 관한 연구에 의하면 그림 1과 같이 고강도 콘크리트일수록 최대 부착응력이 증가하며 하중단 쪽으로 집중하는 현상이 나타난다고 알려져 있다⁽⁶⁾⁻⁽⁸⁾.

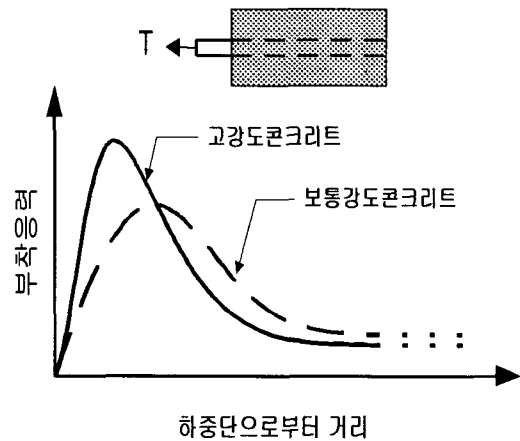


그림 1 직접인장실험의 부착응력 분포도

* 정회원, 전남대 토목공학과 석사과정

** 정회원, 광주대 건축학부 교수

***정회원, 전남대 토목공학과 교수

이러한 거동을 탄성이론으로 살펴본다면, 콘크리트의 탄성계수는 강도의 함수로 콘크리트 강도에 따라 변하는 반면에 철근의 탄성계수는 일정하기 때문에, 철근과 콘크리트로 구성된 합성구조체가 콘크리트의 강도에 따라 변한다는 것을 알 수 있다. 더욱이, 고강도 콘크리트일수록 재료적 취성이 증가하기 때문에 극한상태에서의 응력재분배 능력이 감소한다. 이러한 고강도 콘크리트에서의 응력집중 현상의 증가와 응력재분배 기능의 감소 경향은 철근콘크리트 부재의 전체적 거동에 영향을 미친다.

CEB-FIP MC-85와 90에는 직접인장을 받는 철근콘크리트 구조부재에서 콘크리트 인장강성효과를 나타내는 모델이 있다. MC-85의 인장강성은 그림 2와 같다. 이 그림에 나타나 있듯이 ①단계는 균열이 없는 상태이고, ②+③단계는 균열형성단계와 균열안정화단계를 동시에 나타내고 있다. 이 단계에서 철근의 평균변형률 ϵ_{sm} 을 다음의 (1)식과 같이 철근만 있을 때의 변형률에 1보다 작은 계수를 곱하여 구함으로써 인장강성효과를 반영하고 있다. ④단계는 철근이 항복한 상태를 나타내고 있다.

여기서, f_s 는 작용하중으로 인한 균열 위치에서의 철근응력이고, f_{sr} 은 첫 번째 균열하중을 철근 단면적으로 나눈 응력이다. α_1 은 철근의 부착특성을 고려한 계수로서 이형철근일 때 1.0이고, 원형철근일 때 0.5이다. α_2 는 하중특성을 고려한 계수로서 단조하중일 때 1.0이고, 지속 또는 반복하중일 때 0.5이다.

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_s}{E_s} \left[1 - \alpha_1 \alpha_2 \left(\frac{f_{sr}}{f_s} \right)^2 \right] \leq 0.4 \frac{f_s}{E_s} \quad (1)$$

MC-90의 인장강성은 그림 3과 같다. MC-90에서는 MC-85에서 2차식으로 나타낸 ②+③단계의 인장강성을 보다 단순화시킨 것으로 균열형성단계인 ②단계와 균열안정화단계인 ③단계를 구별하여 각각 1차식으로 나타내고 있다. 초기 균열이 발생한 후 ②단계가 끝나고 ③단계가 시작하는 점은 다음과 같다.

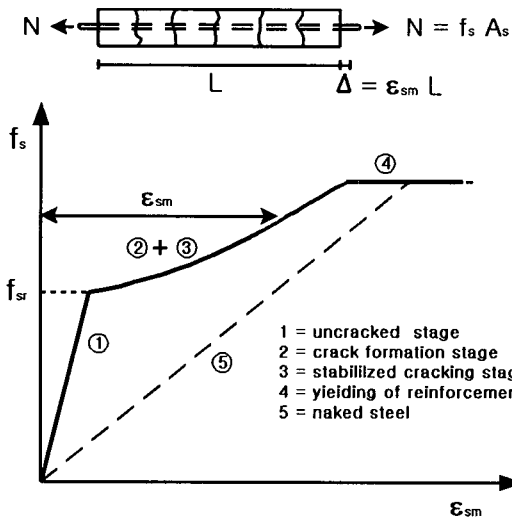


그림 2 CEB-FIP MC-85의 인장강성 개념도

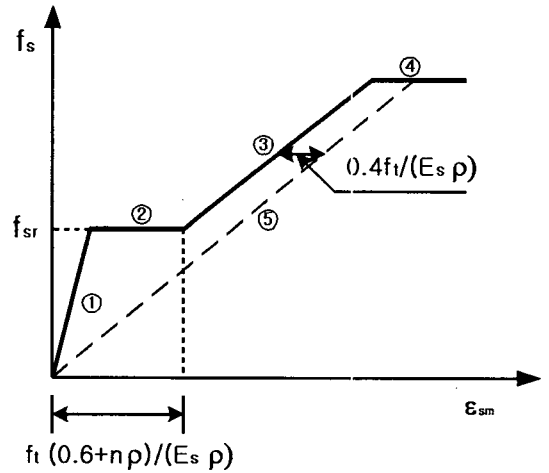


그림 3 CEB-FIP MC-90의 인장강성 개념도

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_t(0.6 + n\rho)}{E_s \rho} \quad (2)$$

균열안정화단계인 ③단계는 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$f_s = E_s (\epsilon_{sm} + 0.4 \frac{f_t}{E_s \rho}) \quad (3)$$

MC-85의 인장강성을 나타내는 (1)식에서 f_{sr} 은 콘크리트의 인장강도를 고려하고 있고, MC-90의 인장강성을 나타내는 (3)식에서 f_t 는 콘크리트의 인장강도이다. 콘크리트 인장강도는 압축강도의 함수이므로 CEB-FIP 모델식은 MC-85와 90은 모두 콘크리트 강도를 고려하고 있다고 할 수 있다. 그러나, 이 모델식에서는 근본적으로 단순히 압축강도의 증가만을 고려한 것으로 고강도 콘크리트를 사용할 때 나타나는 부착응력의 집중 현상, 응력재분배 기능의 감소 현상 등을 적절히 고려하고 있는가에 대해서는 모호한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 실험을 통하여 콘크리트 강도에 따른 인장강성효과를 조사하고 이 실험 결과와 CEB-FIP 모델식에 의한 계산치와 비교 분석하여 이 모델식의 인장강성을 평가하였다.

2. 실험

2.1 실험 계획

본 연구의 시험체는 길이 11.5cm×20cm×150cm(H×W×L)이며, D19철근 1개를 중심에 위치시켰다. 쪼갬균열의 발생을 억제하고 횡균열이 인장강성 거동을 지배하도록 시험체의 콘크리트 최소 피복두께와 철근 직경의 비 c/d_b 는 2.5로 하였고, 철근비는 0.0124 이다. 본 실험의 주변수인 콘크리트 압축강도는 보통강도(260kgf/cm²), 중간강도(620kgf/cm²), 고강도(820kgf/cm²)인 세 가지 강도로 각각 실험체 2개씩을 제작하였다. 철근의 항복강도는 4460kgf/cm²이고, 콘크리트의 배합 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

표 1 콘크리트의 배합 및 물리적 성질

목표압축강도 (kgf/cm ²)	W/C	S/A (%)	단위 중량(kgf/cm ³)						실험결과	
			C	W	S	G	SF	M-150	압축강도 (kgf/cm ²)	슬럼프 (cm)
1000	0.20	38	650	153	578	950	115	20.8	820	9
600	0.25	37	550	138	662	1105	0	12.1	620	10
240	0.60	45	385	229	810	991	0	0	260	22

2.2 실험 방법

본 연구의 실험 방법으로는 그림 5와 같이 전동기식 가력기를 사용하여 변위제어식으로 직접인장실험을 수행하였다. 로드셀을 이용하여 시험체에 가해진 인장하중을 측정하였고, 시험체 양단사이의 길이방향 신장량 ΔL 은 4개의 전기식 변위계를 설치하여 측정된 후 그 평균치를 이용하여 하중-변형 관계를 조사하였다.

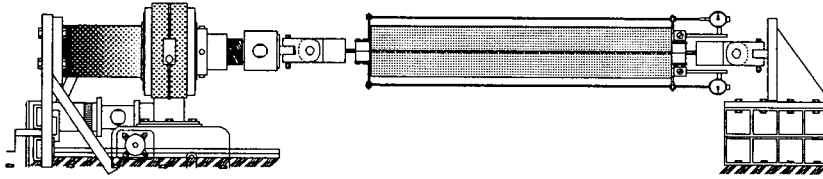


그림 5 실험장치

3. 실험 결과 및 분석

3.1 균열 형상

각 시험체에서 관찰된 인접 균열 간격과 균열하중은 표 2에 나타내었다. 횡균열과 조깅균열이 발생하는 하중은 콘크리트의 강도가 증가할수록 높게 나타나는 경향이 보였다. 보통강도는 조깅균열보다 횡균열이 먼저 발생하였고 횡균열은 하중이 증가하면서 점진적으로 증가함을 보였다. 그러나 중간강도와 고강도에서는 횡균열과 조깅균열이 거의 동시에 발생하였다. 또한, 평균 균열 간격은 보통강도에 비해 중간강도와 고강도에서 균열 간격이 좁게 나타났고, 중간강도와 고강도에서는 비슷한 값들을 나타내고 있다. 이는 콘크리트 강도가 증가할수록 균열면에서 인접 콘크리트로 철근력을 효과적으로 전달되어서 새로운 균열이 발생할 수 있는 위치가 균열면에서 가까워지기 때문이라고 판단된다.

표 2 균열하중과 간격

시험체명	콘크리트 압축강도 (kgf/cm ²)	횡균열 발생하중 (ton)	횡방향 균열갯수 (EA)	조깅균열 발생하중 (ton)	평균균열 간격 (cm)
N-1	260	5.3	10	6.2	13.8
N-2		4.4	10	6.4	13.1
M-1	620	7.4	14	7.4	9.8
M-2		6.2	13	6.6	10.8
H-1	820	8.8	11	8.8	10.5
H-2		8.3	13	8.3	9.7

3.2 콘크리트 강도에 따른 인장강성

콘크리트 강도에 따른 작용하중으로 인한 균열 위치에서의 철근응력과 시험체의 평균 변형률 관계를 그림 6에 나타냈다. 이 그림에 의하면 ①단계(비균열단계)에서는 탄성적인 거동을 보이고, 초기 균열하중은 콘크리트의 강도가 증가할수록 증가하고 있다. ②단계(균열형성단계)에서는 보통강도는 이 단계에 해당하는 구간이 짧으므로 균열안정화단계와 뚜렷하게 구별되지 않으나 고강도일수록 균열형성단계가 길고 분명하게 나타나므로 균열안정화단계와 뚜렷하게 구별된다. 이와 같이 고강도일수록 균열형성단계에서 하중의 증가없이 변형이 크게 나타나는 이유는 고강도일수록 응력집중 현상이 증가하고 응력재분배 기능이 감소하므로 단부와 균열면 부근에서 부차손상이 심하여 철근만의 변형이 증가하기 때문이라 판단되었다. ③단계(균열안정화단계)는 인장강성을 나타내어 주는 구간으로서 균열이 형성된 이후 철근콘크리트 부재의 거동이 순수 철근의 거동에 접근하는 구간이다. 이 단계에서 인장강성은 중간강도와 고강도가 보통강도보다 오히려 조금 작게 나타났다.

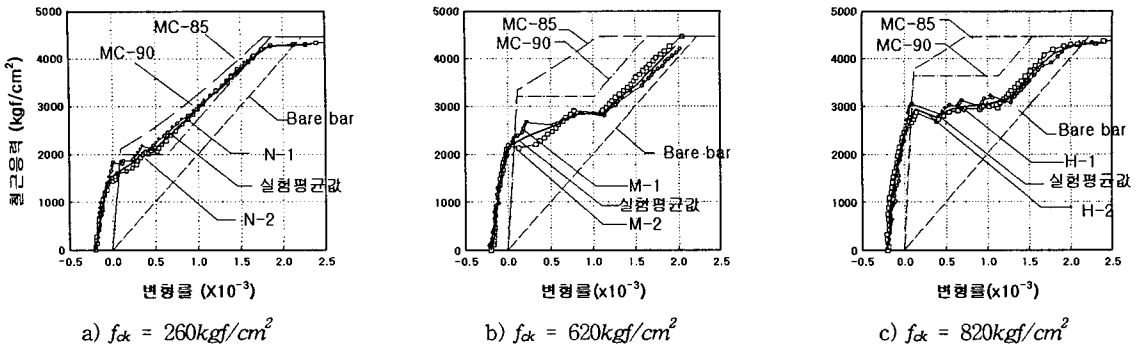


그림 6. 철근응력과 변형률 관계

4. CEB-FIP MC의 평가

본 연구의 실험 결과와 CEB-FIP MC의 인장강성을 비교하기 위하여 같은 응력(작용하중을 철근단면적으로 나눈 응력)일 때 철근단의 변형에서 인장부재의 변형률을 뺀 변형률(이것이 인장강성이다)을 응력의 함수로 나타내면 그림 7, 8과 같다. 그림 7은 MC-85와 실험결과를 비교한 것이다. MC-85는 보통강도의 인장강성과 비교적 잘 일치하고 있으나, 중간강도와 고강도의 균열형성단계와 균열안정화 단계를 과대 평가하고 있었다. 특히 고강도일수록 이 경향은 심화되었다. 그림 8은 MC-90과 실험결과를 비교한 것이다. MC-90도 보통강도와 비교적 잘 일치하고 있었다. 중간강도와 고강도에서 균열형성 단계는 MC-90과 비교적 잘 일치하고 있으나, 균열안정화단계는 MC-90이 과대 평가하고 있었고 고강도일수록 이 경향은 심화되었다. 다만, MC-90은 MC-85에 비해서 과대평가한 정도가 적었다. 이와 같이 실험결과와 MC의 인장강성을 비교한 결과 MC-90이 MC-85에 비해서 균열발생단계를 개선하고 있으나 중간강도와 고강도에서는 MC-85, 90 모두 균열안정화단계의 인장강성을 2배 이상 과대 평가하고 있으므로 콘크리트 강도의 영향을 적절히 반영하지 못하고 있다고 판단된다.

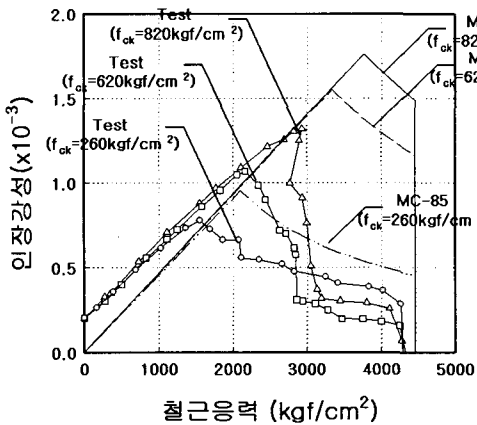


그림 7 MC-85 인장강성

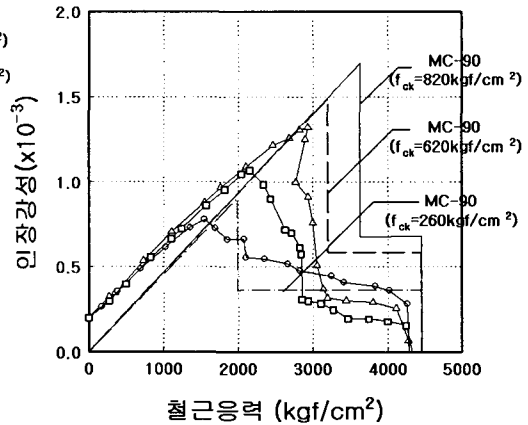


그림 8 MC-90 인장강성

5. 결 론

본 연구에서 콘크리트 압축강도가 보통강도(260kgf/cm²), 중간강도(620kgf/cm²), 고강도(820kgf/cm²)이고, 피복두께와 철근 직경의 비가 2.5일 때 직접인장실험을 통하여 콘크리트 강도에 따른 CEB-FIP MC의 인장강성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) MC-85는 보통강도의 인장강성과 비교적 잘 일치하고 있으나, 중간강도와 고강도의 균열형성단계와 균열안정화단계를 과대 평가하고있었다. 특히 고강도일수록 이 경향은 심화되었다.

2) MC-90도 보통강도에서는 비교적 잘 일치하고 있었다. 중간강도와 고강도에서 균열형성단계는 MC-90과 비교적 잘 일치하고 있으나 균열안정화단계는 MC-90이 과대 평가하고 있었고 고강도일수록 이 경향은 심화되었다. 다만, MC-90은 MC-85에 비해서 과대평가한 정도가 적었다.

3) 이와 같이 MC가 콘크리트 강도의 영향을 적절히 반영하지 못하고있는 것은 고강도일수록 응력집중현상이 증가하고 응력재분배기능이 감소하므로 단부와 균열면 부근에서 부착손상이 심하여 철근만의 변형이 증가하기 때문이라 판단된다.

4) 평균균열간격은 보통강도에서 13.5cm, 중간강도에서 10.3cm, 고강도는 10.1cm으로 이는 고강도가 보통강도에 비해 약 20퍼센트 정도 감소하였다. 이는 고강도일수록 철근력이 균열면에서 인접콘크리트로 효과적으로 전달되므로 고강도일수록 인접 균열이 균열면에서 더 가까운 위치에 발생한다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 '99년도 특정기초연구과제(과제번호 1999-1-311-004-3)의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code 1990," Third Edition, CEB, Paris, 1991, pp. 87-92.
2. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures," Third Edition, CEB, Paris, 1978, pp. 348.
3. ACI Committee 224, "Cracking of Concrete Member in Direct Tension," ACI Manual of Concrete Practice Part 3, ACI, 1994, pp. 224.2R-1-12.
4. Homayoun H. Abrishami and Denis Mitchell, "Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening," ACI Structural Journal, Nov-Dec. 1996, pp. 703-710.
5. Ajaya K. Gupta, and Sergio R. Maestrini, "Tension-Stiffness Model for Reinforced Concrete Bars," Journal of Structural Engineering, 1990, pp. 769-790.
6. Atorod Azizinamini, Mark Stark, John J. Roller, and S. K. Ghosh, "Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete," ACI structural journal, Sep-Oct., 1993, pp.554-561.
7. 염환석, 윤성호, 김 우, "콘크리트강도가 인장증강에 미치는 영향에 관한 연구", 한국콘크리트학회논문집, 제12권 제1호, 2000. 2, pp. 13-22.
8. 이준구, "고강도 콘크리트의 부착거동에 관한 연구", 전남대 석사학위논문, 1996. 2.