

피복두께에 따른 인장강성 거동에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Tension Stiffening Behavior with Variation of Cover Thickness

이 기 열*
Lee, Ki Yeol

염 환 석**
Yum, Hwan Seok

김 우***
Kim, Woo

ABSTRACT

This paper describes an experimental investigation on the influence of concrete cover thickness on tension stiffening behavior. Total 36 direct tension specimens were tested with variation of cover thickness. Three different concrete compressive strengths were also considered. After cracking, as the cover thickness becomes thinner and the concrete strength becomes higher, tensile stiffness is decreased. Thereby an increase in cover thickness results in increase of the tensile cracking load and tension stiffening effect. Also the increase in concrete strength results in sudden decrease in tension stiffening effect. Hence, the cover thickness and concrete strength are proved to be important factors in tension stiffening behavior.

1. 서 론

철근콘크리트 구조물에서 균열이 발생하면 구조물의 강성이 저하되고, 균열면에서 응력의 재분배를 일으키게 된다. 균열이 발생한 단면에서 모든 인장력은 철근이 부담하지만, 하중이 증가함에 따라 균열이 계속적으로 형성되면서 균열단면사이에서의 콘크리트는 부착에 의해 철근으로부터 전달되는 인장력을 어느 정도 부담하게 된다. 이러한 결과로 인하여 철근콘크리트 구조물의 강성이 증가하는 현상을 인장강성효과(tension stiffening effect)라 한다.

피복두께에 대한 설계기준의 개념은 철근의 산화방지, 내화구조, 부착응력의 확보를 위한 최소한의 두께로서 접근하고 있다. 또한 현 설계기준에서는 고강도콘크리트를 사용할 경우에 피복두께를 감소시킬수 있다고 제안하고 있다. CEB-FIP Model Code 90에서는 인장강성효과를 평가할 때 콘크리트 강도가 증가함에 따라서 인장강성 효과는 커진다고 제시하고 있다. 그러나, 고강도콘크리트를 사용할 경우 취성적인 재료특성과 부착응력의 단부 집중화 경향, 급격한 균열진전 및 균열수의 증가에 따른 균열간격의 감소와 변형의 증가로 인하여 인장강성효과는 감소할 것이고, 부착응력 확보와 철근콘크리트 구조물의 내구성 향상을 위한 최소피복두께의 증가가 필요하게 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 피복두께와 콘크리트 강도에 따른 철근콘크리트 구조물의 인장강성거동을 보다 정확하게 파악하고자 콘크리트 강도별로 피복두께에 대한 철근직경의 비(c/d_b)를 주 변수로 하여 인장강성시험을 수행하고 실험결과에 대하여 하중증가에 따른 균열거동과 인장강성효과를 비교 분석하고자 한다.

* 정회원, 전남대학교 토목공학과 석사과정

** 정회원, 광주대학교 건축학부 교수

*** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

2. 실험계획 및 방법

2.1 시험체

인장강성시험체는 길이가 150cm인 직접인장시험체로, 단면은 피복두께에 따라 변하며 D19(SD40)철근을 단면의 중심에 위치시켰다(Fig. 1, Table 1). 철근비($\rho=0.0124$)와 단면적($A_c=230\text{cm}^2$)을 일정하게 하였고 최소피복두께 C_x 가 철근 공칭직경의 1.0배에서 3.5배까지 0.5배씩 증가되도록 하였다.

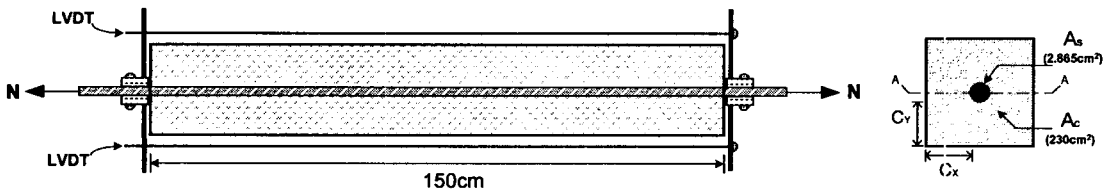


Fig. 1 Direct tension test specimen

각각의 피복두께에 대하여 압축강도를 보통강도(NSC, 260kgf/cm^2), 중간강도(MSC, 620kgf/cm^2), 고강도(HSC, 820kgf/cm^2)로 하여 총 36개의 시험체를 제작하였다. 건조수축의 영향을 배제하기 위하여 타설 후 거푸집 탈형까지는 습윤양생을 하였고, 거푸집 탈형 후부터 시험 전까지 수증양생을 하였다.

Table 1 Section dimensions and crack behavior

Specimen	Cross Sectional Dimensions $b \times h$ (mm)	Compressive Strength (kgf/cm^2)	Tensile Strength (kgf/cm^2)		Initial Cracking Load		Number of Transverse Crack (개)	Average Crack Spacing (cm)
			f_{sp}	$\frac{f_{sp}}{f_{ck}}$	Transverse Crack (ton)	Splitting Crack (ton)		
NSC 10	60 × 385	260	20.05	0.077	4.5	4.2	10	15.2
NSC 15	80 × 290				4.2	4.0	12	12.3
NSC 20	100 × 230				4.6	5.4	12	12.6
NSC 25	115 × 200				5.0	5.9	11	14.3
NSC 30	135 × 170				5.1	8.5	7	20.0
NSC 35	150 × 155				5.2	8.8	6	25.4
MSC 10	60 × 385	620	34.06	0.055	5.1	4.0	13	11.0
MSC 15	80 × 290				5.7	3.8	14	10.4
MSC 20	100 × 230				5.7	4.2	16	9.6
MSC 25	115 × 200				6.8	6.7	12	12.0
MSC 30	135 × 170				6.9	7.7	12	12.6
MSC 35	150 × 155				6.4	8.0	10	14.8
HSC 10	60 × 385	820	35.97	0.044	5.6	4.7	16	9.6
HSC 15	80 × 290				5.8	5.0	17	8.8
HSC 20	100 × 230				7.3	7.0	17	8.7
HSC 25	115 × 200				8.1	7.9	13	11.1
HSC 30	135 × 170				9.6	9.6	12	12.0
HSC 35	150 × 155				9.6	9.6	12	12.7

2.2 측정

본 실험에서는 변위제어방식의 전동식가력기를 이용하여 직접인장시험을 실시하였으며 20ton 용량의 로드셀(Load Cell)을 이용하여 시험체에 가해진 인장하중을 측정하였다. 시험체 양단 사이의 길이방향신장량은 Fig. 1과 같이 인장시험체의 양쪽 하중단에 철근과 같이 거동을 할 수 있는 변위계 지지판 설치용 클램프를 부착하고 4개의 전기식변위계(LVDT)를 상단과 하단에 각각 2개씩 설치하여 시험체의 길이방향 변형을 측정한 후 그 평균값을 이용하여 하중-변위 관계를 조사하였다. 그리고, 수중양생시 발생하는 시험체의 자가수축과 실험 전 시험체를 건조시키는 과정에서 발생하는 건조수축 양을 $200\mu\epsilon$ 고려하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 균열거동

콘크리트의 피복두께에 따른 균열발생을 살펴보면 Fig. 2에서처럼 같은 인장강도를 갖는 시험체일지라도 피복두께에 따라서 균열발생하중이 달라지는 것으로 나타났다. 피복두께가 작을 경우 철근응력의 감소분에 해당하는 내력을 철근 주위의 콘크리트가 저항하지 못하기 때문에 낮은 하중에서 균열이 발생하고, 피복두께가 증가함에 따라 철근 주위의 콘크리트가 충분한 내력을 확보하게 되고 균열이 발생할 때까지 철근을 구속하며 철근과 콘크리트가 일체거동을 하기 때문에 균열발생하중이 커지는 것이라 판단된다. 탄성이론으로 구할 수 있는 예상균열하중을 CEB-FIP MC-90에서 제시하고 있는 두 가지의 콘크리트 인장강도를 고려하여 계산한 결과를 Fig. 4에서 실험결과와 비교하였다.

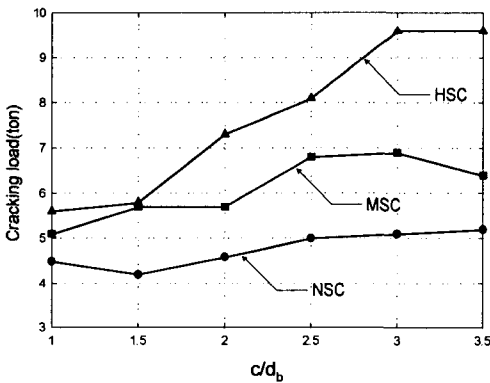


Fig. 2 Initial cracking load

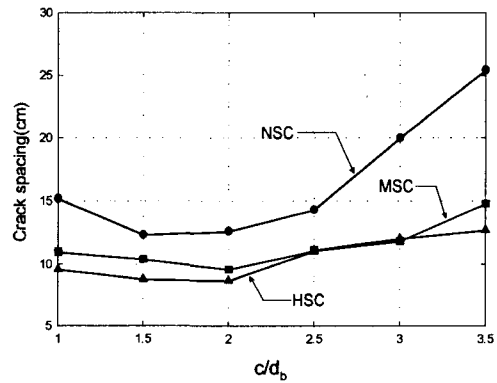


Fig. 3 Average crack spacing

균열간격은 Fig. 3과 Table 1에서처럼 피복두께가 증가함에 따라서 콘크리트강도에 관계없이 증가하는 것으로 나타났다. 피복두께가 작을 경우에는 균열수의 증가와 균열간격의 감소에 따라서 설계기준에서 제시하는 구조물의 내구성 확보를 위한 피복두께의 기준을 만족하지 못할 것이라 판단된다.

Fig. 4에서 알 수 있듯이 횡방향균열 발생의 경우, NSC에서는 피복두께에 따른 균열하중의 변화가 크지 않지만, MSC와 HSC에서는 피복두께의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 또한 부착능력 손실

에 큰 영향을 미치는 조깅균열은 피복두께가 작은 경우에는 횡방향균열보다 낮은 하중에서 발생하고, 피복두께가 큰 경우에는 횡방향균열보다 높은 하중에서 발생하였다. 따라서 철근변형에 대한 구속효과가 크고 부착능력 손실의 주된 원인이 되는 조깅균열을 제어하면서 균열발생 후에도 인장강성효과가 유지될 수 있는 피복두께는 NSC에서 c/d_b 가 2.0이상, MSC에서 c/d_b 가 3.0이상, HSC에서 c/d_b 가 3.5 이상 확보되어야한다고 판단된다.

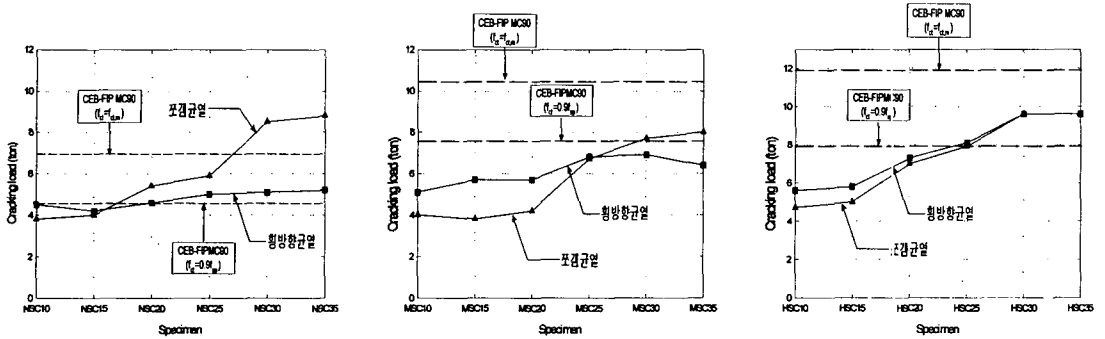


Fig. 4 Transverse crack and splitting crack

특히 MSC, HSC의 경우에는 NSC에 비하여 많은 수의 균열이 발생하며 균열간격이 감소하기 때문에 현 설계기준에서 제시하는 고강도콘크리트 사용시 피복두께를 감소시킬 수 있다는 기준과는 반대로 고강도화 될수록 최소피복두께를 보통강도보다 훨씬 증가시켜야 한다고 사료된다.

3.2 인장강성효과

CEB-FIP MC-90에서는 인장하중을 받고 있는 구조물의 하중-변형률 곡선과 순수철근만의 하중-변형률 곡선에서 구조물의 거동이 균열안정화 단계에서의 변형률의 차이를 인장강성효과로 정의하며,

$0.4 \frac{f_c \alpha}{E_s \cdot \rho}$ 의 수식으로 표현하고 있다.

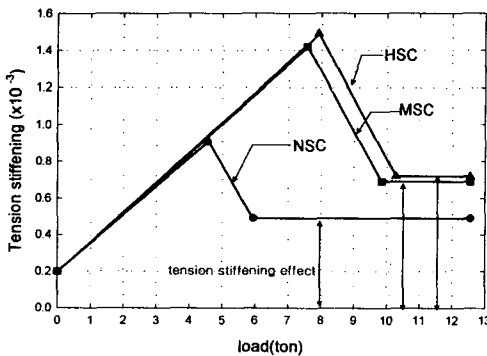


Fig. 5 Tension stiffening effect(CEB-FIP MC-90)

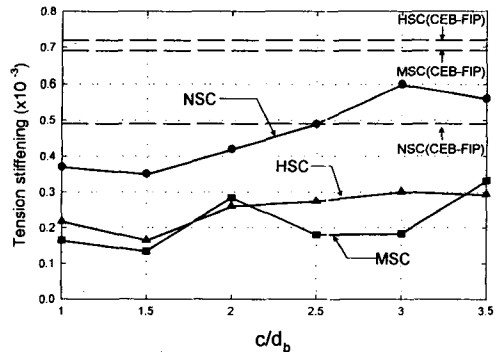


Fig. 6 Tension stiffening effect on stage III

여기서 인장강성효과는 단순히 콘크리트의 인장강도에 지배되므로 Fig. 5에서처럼 콘크리트 강도가 증가할수록 인장강성효과가 커지는 것으로 제시하고 있으며 피복두께에 대한 고려는 되어 있지 않다. 그러나, Fig. 6에서 알 수 있듯이 피복두께가 증가할수록 균열발생하중과 균열간격의 증가, 균열과 균열 사이의 부착성능 및 인장강성의 손실에 커다란 영향을 미치는 조깅균열이 제어되기 때문에 인장강성효과는 증가할 것이라 판단된다.

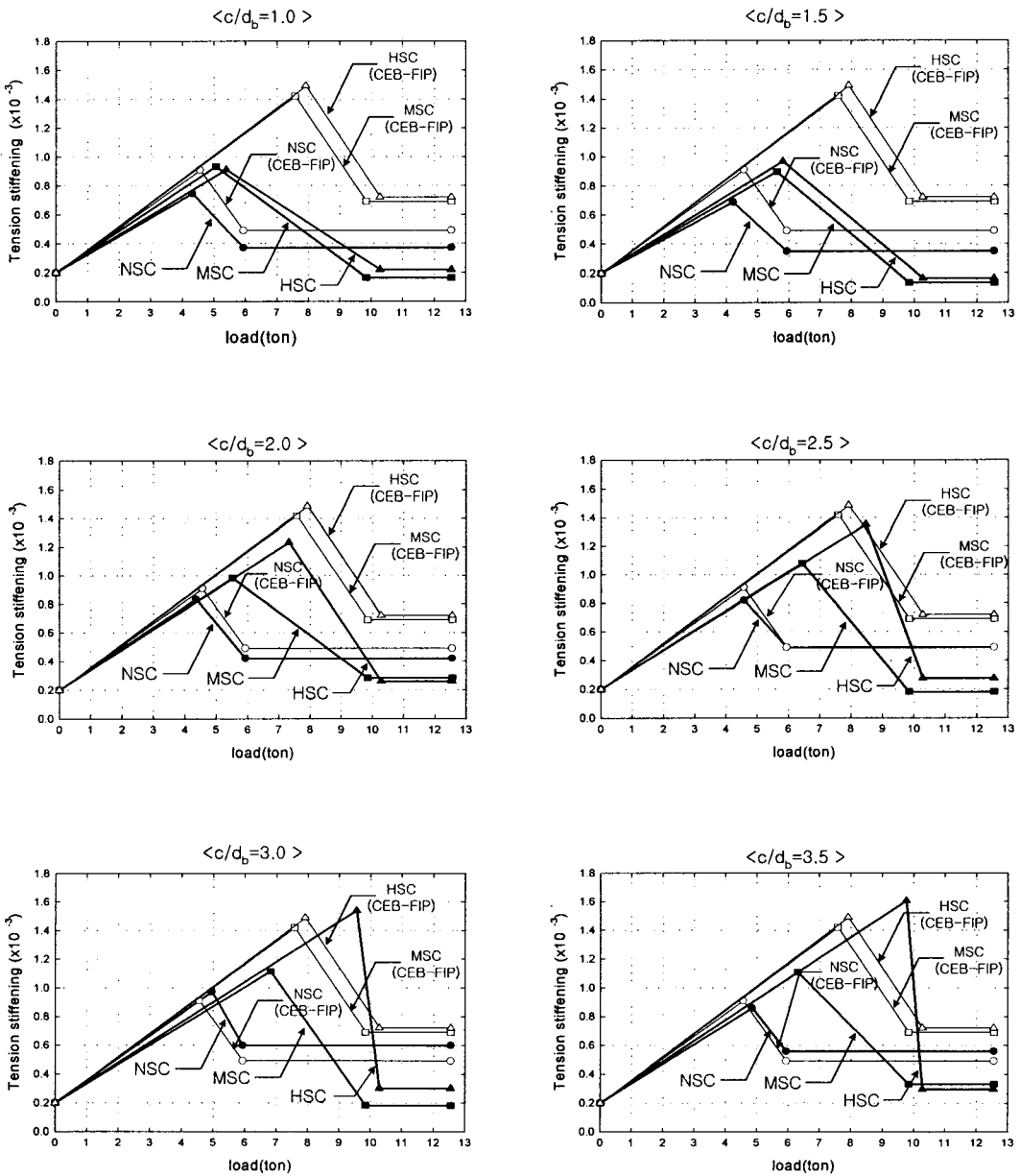


Fig. 7 Tension stiffening effect on cover thickness

또한 고강도콘크리트에서 균열발생하중은 NSC보다 증가하지만 균열발생 후 급격한 균열수의 증가에 따른 균열간격의 감소와 변형의 증가, 균열면에서의 부착응력 집중에 따른 쪼갬균열의 진전등에 의하여 인장강성효과는 NSC에 비하여 훨씬 감소할 것이라 판단된다. 또한, 콘크리트 강도가 증가함에 따라 인장강도는 증가하지만, Table 1에서 알 수 있듯이 압축강도에 대한 인장강도의 비는 고강도가 될수록 작아지며, 탄성계수 또한 강도에 비례하여 증가하지 않는 등 극히 취성적인 경향을 보인다. 인장강성 실험을 통해 얻은 피복두께와 콘크리트 강도에 따른 인장강성효과는 Fig. 7에 나타내었다. 실험 결과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 인장강성효과는 피복두께가 증가할수록 증가하였고, 콘크리트 강도가 증가할수록 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 인장강도의 증가만을 고려하여 인장강성효과를 평가하고 있는 CEB-FIP MC-90을 위에서 언급한 고강도콘크리트의 취성적인 특성들과 본 연구에서 수행한 인장강성 실험결과를 고려하여 비교하였을 때 콘크리트의 강도가 고강도가 될수록 인장강성효과가 급격히 감소한다는 반대의 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 피복두께의 영향이 고려되지 않고, 콘크리트 강도가 증가함에 따라 인장강성효과가 증가한다는 현재의 설계기준은 피복두께의 증가에 따른 인장강성효과의 증가와 고강도콘크리트 사용시 인장강성효과의 급격한 감소를 고려하여야 할 것이라 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트의 강도의 종류를 보통강도(260kgf/cm²), 중간강도(620kgf/cm²), 고강도(820kgf/cm²)로 하여 각 강도별로 피복두께를 주변수로 하는 인장강성시험을 수행하여 인장강성거동에 관한 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고강도콘크리트는 보통강도콘크리트에 비하여 많은 수의 균열이 발생하며 균열간격이 감소하기 때문에 현 설계기준에서 제시하는 고강도콘크리트 사용시 피복두께를 감소시킬 수 있다는 기준과는 반대로 고강도화 될수록 최소피복두께를 보통강도보다 훨씬 증가시켜야 한다.
- 2) 피복두께의 영향이 고려되지 않고, 콘크리트 강도가 증가함에 따라 인장강성효과가 증가한다는 현재의 설계기준은 피복두께의 증가에 따른 인장강성효과의 증가와 고강도콘크리트 사용시 인장강성효과의 급격한 감소를 고려하여야 할 것이다.
- 3) 균열안정화단계에서 인장강성효과가 유지되기 위한 피복두께는 NSC에서 c/d_b 가 2.0이상, MSC에서 c/d_b 가 2.5이상, HSC에서 c/d_b 가 3.5이상 확보되어야 한다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 한국콘크리트학회-대한건축학회, "건설교통부 제정, 콘크리트구조설계기준", 한국콘크리트학회, 1999
2. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code 1990", Third Edition, CEB, Paris, 1991, pp. 87-92.