
콘크리트강도가 인장증강에 미치는 영향에 관한 연구

Influence of Concrete Strength on Tension Stiffening



염 환 석*

Yum, Hwan-Seok



윤 성 호**

Yun, Sung-Ho



김 우***

Kim, Woo

ABSTRACT

This paper describes the results obtained from 11 direct tension tests to explore the influence of concrete strength on tension stiffening behavior in reinforced concrete axial members. Three different concrete compressive strengths, 250, 650, and 900 kgf/cm^2 , were included as a main variable, while the ratio of cover thickness-to-rebar diameter was kept constant to be 2.62 to prevent from splitting cracking. As the results, it was appeared that, as higher concrete strength was used, less tension stiffening effect was resulted, and the residual deformation upon unloading was larger. In addition, the spacing between adjacent transverse cracks became smaller with higher concrete strength. The major cause for those results may be attributed to the fact that nonuniform bond stress concentration at both loaded ends and crack sections becomes severer as higher concrete is used, thereby local bond failure becomes more susceptible. From these findings, it would be said that increase in flexural stiffness resulting from using high-strength concrete will be much smaller than that predicted by the conventional knowledge. Finally, a factor accounting for concrete strength was introduced to take account for the effect of HSC on tension stiffening. This proposed equation predicts well the tension stiffening behavior of these tests.

Keywords : axial tension, bond stress, cracks, high-strength concrete, reinforced concrete, stiffness, tension stiffening effect

* 정회원, 광주대학교 건축공학과 부교수

** 정회원, 전남대학교 토목공학과 석사

*** 정회원, 전남대학교 토목공학과 교수

·본 논문에 대한 토의를 2000년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2000년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

인장을 받는 철근콘크리트구조 부재에 균열이 발생하면 일반적으로 구조계산이나 설계시 인장측 콘크리트는 무시된다. 그러나 균열위치에서 모든 인장력은 철근에 의해서 전달되지만 균열과 균열사이에서는 부착에 의해 인장력이 철근으로부터 콘크리트로 전달된다. 이러한 결과로 콘크리트가 철근의 인장강성을 증가시키는데 기여하는 현상을 인장증강효과(tension stiffening effect)라 한다. 인장증강효과를 무시하면 부재의 강성은 과소평가 되므로 정확한 변형을 예측해야 할 구조물에서는 인장증강효과를 고려하여 해석하여야 한다.^(4~6,8)

인장증강효과에 영향을 미치는 변수들은 주철근비 ρ , 콘크리트 피복두께와 철근직경의 비 c/d_b , 콘크리트강도 f_{ck} , 철근강도 f_y 등이 있다. 일반적으로 철근비가 작을수록 콘크리트 피복 두께와 철근직경의 비가 커지게 된다. 변수 ρ 와 c/d_b 는 상관관계가 있으므로 한 종류의 변수로 다룰 수 있고, 인장증강거동에 영향을 주는 횡방향 균열(transverse crack)과 쪼갬균열(splitting crack)에 직접적인 관계가 있다. c/d_b 가 크면 횡방향 균열만 발생하며 횡방향 균열 발생 후 콘크리트의 인장증강효과는 상당히 유지되나 c/d_b 가 작으면 쪼갬균열이 발생하여 인장강성을 크게 감소시킨다. 즉, c/d_b 가 2.5를 초과하면 쪼갬균열의 영향을 배제할 수 있으며 c/d_b 가 2.5이하이면 횡방향 균열과 쪼갬 균열의 영향이 혼합된 거동을 나타낸다.⁽³⁾

Fig. 1과 같은 직접인발실험에 관한 연구에서 고강도 콘크리트일수록 최대부착응력이 증가하며 하중단쪽으로 집중하는 현상이 나타난다고 알려져 있다. 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 재료 취성이 증가하기 때문에 극한상태에서의 응력재분배 능력이 감소한다. 이러한 고강도 콘크리트

에서의 응력집중현상의 증가와 응력재분배기능의 감소경향은 철근콘크리트 부재의 전체적 거동에 영향을 미친다.^(9,10)

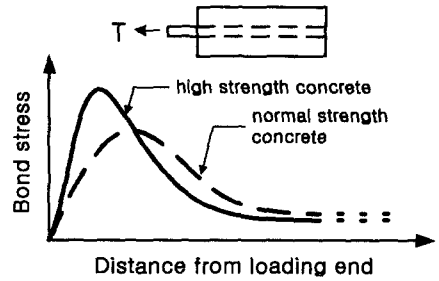


Fig. 1 Bond stress distribution of pullout test

ACI 위원회 224와 CEB-FIP 매뉴얼에는 직접인장을 받는 RC 구조부재에서 콘크리트 인장증강과 균열에 대한 연구결과들이 요약되어 있다. 인장증강효과를 고려하는 여러 방법 중 하나는 CEB-FIP 모델 코드⁽¹⁾에 제안되어 있는 방법이다. 이 코드에 의하면 Fig. 2와 같이 균열 후 철근의 평균변형률 ϵ_{sm} 계산할 때 균열위치의 철근 변형률에 1보다 작은 계수를 곱하여 구함으로써 인장증강효과를 반영하였다. 이 때의 철근의 평균 변형률은 다음 (1)식과 같다.

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

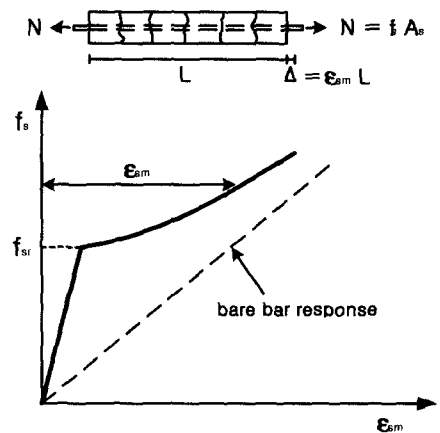


Fig. 2 Concept of tension stiffening, adapted from CEB-FIP model code

여기서, f_s 는 작용하중으로 인한 균열위치에서의 철근응력이고, f_{sr} 은 첫 번째 균열하중을 철근단면적으로 나눈 응력이다. a_1 은 철근의 부착특성을 고려한 계수로서 이형철근일 때 1.0, 원형철근일 때 0.5를 사용하고, a_2 는 하중특성을 고려한 계수로서 단조하중일 때 1.0, 지속 또는 반복하중일 때 0.5를 사용하고 있다.

위 (1)식에서 f_{sr} 은 균열하중을 고려한 것으로 균열하중은 콘크리트의 인장강도와 관계가 있으므로 CEB-FIP 모델식은 콘크리트강도의 영향을 고려하고 있다. 그러나 CEB-FIP 모델식은 근본적으로 단순히 인장강도의 증가만을 고려한 것으로 고강도 콘크리트를 사용할때 나타나는 부착응력의 집중현상, 응력재분배기능의 감소현상 등을 적절히 고려하고 있는가에 대해서는 모호한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 위와 같은 현상을 파악하기 위한 기초적 연구의 일환으로 실험을 통하여 인장증강에 미치는 콘크리트강도의 영향을 조사하고, 이 실험결과를 이용하여 CEB-FIP 모델식이 콘크리트강도의 영향을 적절히 고려하고 있는가를 평가한 후 콘크리트강도의 영향을 고려한 인장증강 예측방법을 제안하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험체

직접인장시험체는 Fig. 3과 같이 길이는 120 cm이고, 단면은 10cm×10cm이고, D16(SD40)철근을 중심에 위치시켰다. 쪼갬균열의 발생을 방지하고 횡균열만을 유도하도록 모든 시험체의 콘크리트 피복 두께와 철근직경의 비 c/d_b 는 2.62로 하였다. 모든 시험체에서 철근비는 0.0199이다.

본 실험의 주변수인 콘크리트 압축강도는 보통 강도 250 kgf/cm² (TS-N계열), 중간강도 650 kgf/cm² (TS-M계열), 고강도 900 kgf/cm² (TS-H계열)인 세 가지 강도로 각각 3개, 3개, 4개씩 제작하였다. 본 실험에서 사용한 SD40 철근의 항복강도는 4450 kgf/cm² 이고, 콘크리트의 배합 및 물리적성질은 Table1과 같다.

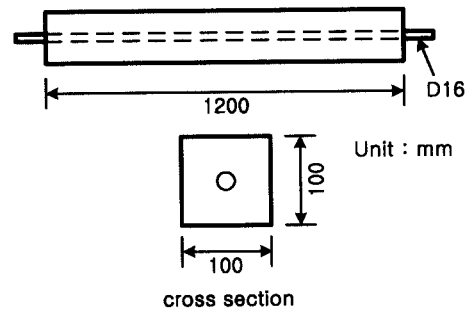


Fig. 3 Geometry of tension specimens

2.2 측정

본 실험에서는 윈기어식 가력기를 사용하여 변위제어식으로 직접인장실험을 수행하였다. 로드셀을 이용하여 시험체에 가해진 인장하중을 측정하였고, 시험체 양단사이의 길이방향 신장량 Δl 은 4개의 전기식 변위계를 설치하여 측정한 후 그 평균치를 이용하여 하중-변형 관계를 조사하였다(Fig. 4 참조).

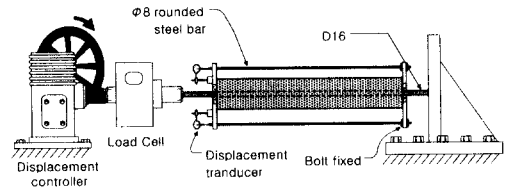


Fig. 4 Test apparatus

Table 1 Mix design of concrete

Target compressive strength (kgf/cm ²)	W/C (%)	S/A (%)	Unit weight (kgf/m ³)						Test results	
			C	W	S	G	SF	M-150	Compressive strength (kgf/cm ²)	Slump (cm)
1000	0.20	38	650	153	578	950	115	20.8	900	9
600	0.25	37	550	138	662	1105	0	12.1	650	10
240	0.60	45	385	229	810	991	0	0	250	22

철근의 항복강도 90%까지 재하한 후 하중을 완전히 제거했을 때의 잔류변형을 측정하였고, 재재하시의 콘크리트의 인장증강 기여도는 하중을 제거한 후 다시 철근 항복강도의 90% 하중까지 재하했을 때의 기여도로 하였으며, 반복하중에 의한 콘크리트와 철근의 경계면에서 국부적 손상의 누적정도를 조사하기 위해 4~5회 반복하중을 가하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열하중 및 균열형상

실험에서 조사한 균열하중과 균열상태를 Table 2에 정리하였다. 최초 횡균열 발생하중은 보통강도에서 낮고 고강도에서 높게 나타나는 경향을 보였지만 압축강도에 비례하여 증가하지는 않았다. 몇 개의 시험체는 고강도이지만 보통강도보다 낮은 하중에서 초기균열이 관찰되었다.

Table 2 Cracking load and pattern

Specimen	Compressive strength (kgf/cm ²)	Initial transverse crack load (ton)	Splitting crack load (ton)	Number of transverse cracks	Average transverse crack spacing (cm)
TS-N-1	250	2.7	6.3	5	20.0
TS-N-2		2.6			
TS-N-3		2.4			
TS-M-1	650	4.2	6.3	6	17.1
TS-M-2		3.2			
TS-M-3		2.9			
TS-H-1	900	4.0	6.6	10	10.9
TS-H-2		2.4			
TS-H-3		3.3			
TS-H-4		3.2			

Table 2에 나타난 각 시험체에서 관찰한 인접 횡균열 간격을 Fig. 5에 정리하였다. 이 결과에 의하면, 횡균열의 간격은 콘크리트 강도가 증가할수록 현저하게 작아지는 것으로 나타났다. 각 계열별 평균 균열간격은 보통강도인 TS-N에서 16.7

cm, 중간강도인 TS-M에서 15.1 cm, 고강도인 TS-H에서 12.8 cm이었다. 즉, 보통강도인 250 kgf/cm²에 비해 강도가 900 kgf/cm²인 고강도콘크리트에서의 평균균열간격은 대략 25% 짧아졌다. 더욱이 Fig. 5를 살펴보면 균열간격이 콘크리트 강도에 거의 1차 함수관계를 갖고 있다는 사실도 알 수 있었다.

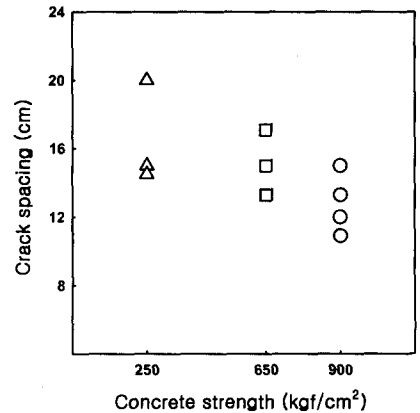


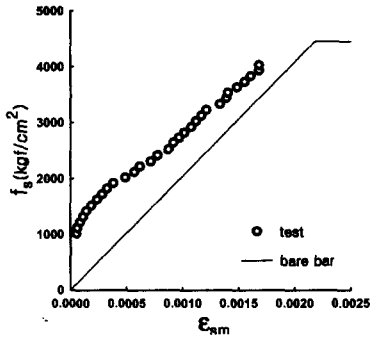
Fig. 5 The effect of concrete strength on crack spacing

이러한 결과는 최근에 발표된 Homayoun, et. al.⁽³⁾의 연구결과와는 크게 상반되는 것이다. 이들의 실험 결과에 의하면 고강도콘크리트가 저강도콘크리트보다 횡균열간격이 더 크다고 결론지었다. 이러한 차이는 이들의 시험체는 c/d_s 를 2.06까지 포함한 경우로서 철근을 싸고있는 콘크리트의 피복두께가 상대적으로 얇아서 쪼갬균열이 낮은 하중단계에서 발생되고, 결국 횡균열과 쪼갬균열이 혼재되어 발생한 현상으로 횡균열면에 인접하여 종방향 쪼갬균열이 발생하면 횡균열면 인접 콘크리트에서 부착력의 손상이 발생하므로 그만큼 횡균열 간격이 크게 나타날 수 있다고 여겨졌다.

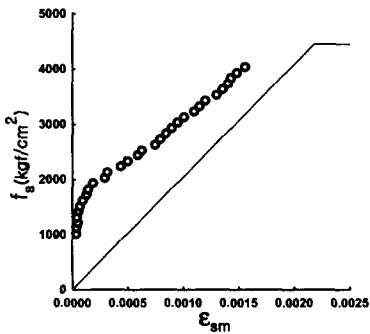
3.2 인장증강 효과

각 계열별로 3~4개의 실험결과를 평균하여 구한 응력-변형을 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 응력은 전체하중을 철근 단면적으로 나눈 값이고, 변형률은 시험체 철근의 평균변형률이다. 균열발생 후에 순수 철근의 강성을 빼고서 구한

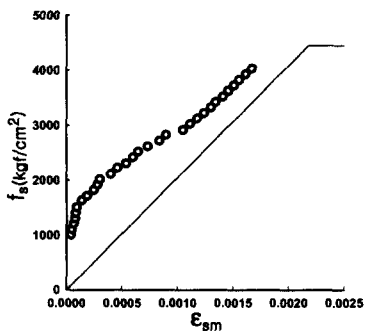
콘크리트만의 인장증강량을 Fig. 7에 하중과 변형을 관계로 나타내어 비교하였다. 전체적으로 균열이 발생한 후 비교적 큰 인장증강을 보였는데 이것은 당초 의도했던 바대로 시험체에 종방향 조깅균열이 거의 발생하지 않았기 때문이다.



(a) $f_{ck} = 250 \text{ kgf/cm}^2$



(b) $f_{ck} = 650 \text{ kgf/cm}^2$



(c) $f_{ck} = 900 \text{ kgf/cm}^2$

Fig. 6 Stress-strain relation of tension stiffening test

실험에서 나타난 인장증강효과는 TS-M이 가장 크게 나타났으나 TS-H는 TS-N에 비해 크지 않았고, 균열이 발생한 이후의 하중단계에서는 고강도콘크리트일수록 콘크리트의 인장증강의 감소율이 현저해지는 것을 관찰할 수 있었다.

위와 같은 균열 이후의 콘크리트의 연화거동을 자세히 조사하기 위하여 초기균열하중에 대한 백분율로 콘크리트의 인장증강효과를 Fig. 8에 나타내었다. 이 그림에 의하면 TS-N과 TS-M은 인장증강 감소율이 비슷하나 TS-H에서는 인장증강 감소율이 보다 크게 나타났다. 이는 고강도일수록 횡균열의 수가 많고, 부착응력 집중현상의 증가와 응력재분배 기능의 감소경향이 균열면 인접 콘크리트 부착손상을 크게 하기 때문이라고 판단되었다.

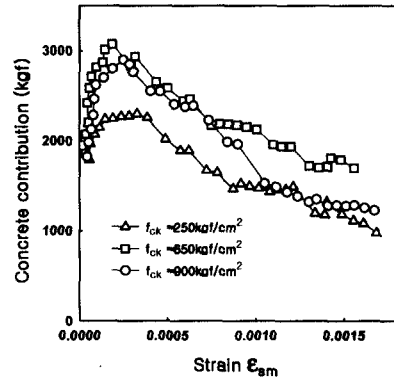


Fig. 7 Relation between concrete contribution and strain

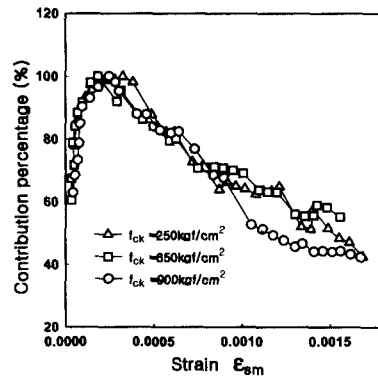


Fig. 8 Relation between contribution percentage and strain

3.3 반복하중의 영향

균열이 발생한 철근콘크리트 인장시험체에서 하중을 제거하면 콘크리트에는 잔류압축응력이 발생하고 철근에는 잔류인장응력이 발생한다. 이 잔류응력들은 하중을 제거 한 후에 서로 평형을 이루며, 반복하중이 작용할 때의 응력과 변형률에 크게 영향을 미친다⁽⁵⁾. 이와 같은 관점에서 횡균열이 안정되었을 때 반복하중에 의한 부재의 잔류변형량, 콘크리트의 잔류변형에너지, 콘크리트의 인장증강 기여도는 콘크리트 강도에 따른 인장증강 손상정도를 평가하는 중요한 자료라고 판단되었다.

Fig. 9는 철근항복강도의 90% 하중까지 재하한 후 하중을 완전히 제거했을 때의 시험체의 잔류변형, 콘크리트의 잔류변형에너지, 반복하중을 가했을 때 에너지량으로 표시한 콘크리트의 인장증강효과의 정의를 나타낸 것이고, 이를 콘크리트 강도에 따라 분석한 결과는 Fig.10~12와 같다. 하중을 제거한 후의 잔류변형과 잔류변형에너지는 고강도일수록 크게 나타났으며, 반복하중을 가했을 때의 콘크리트의 인장증강효과는 고강도인 900 kgf/cm²에서 현저하게 작았다.

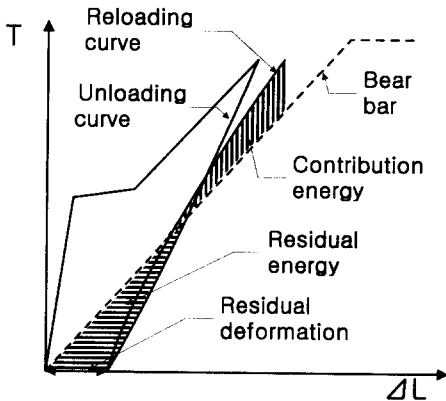


Fig. 9 Terminology when repeated loading

Fig. 13는 TS-H-2의 반복하중에 의한 하중-변위 관계를 소개한 것이고, Fig. 14은 철근항복강도의 90% 하중까지 재하시의 반복하중 횟수에 따른 변위량의 차를, Fig. 15는 반복하중에 따른 누적변위량을 나타낸 것이다.

실험결과에 의하면 고강도일수록 반복하중초기에 변위량의 차가 크게 나타났으며, 이에 따른 누적변위량도 크게 나타났다.

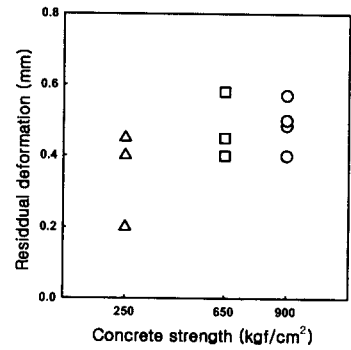


Fig. 10 The effect of concrete strength on residual deformation

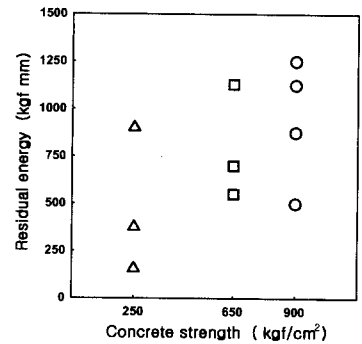


Fig. 11 The effect of concrete strength on residual energy

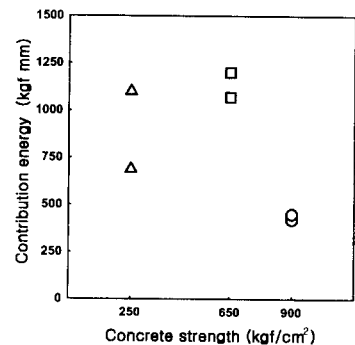


Fig. 12 The effect of concrete strength on contribution energy when reloading

이러한 현상의 근본적 원인은 앞 절에서 언급한 바와 같이, 부재에 균열이 발생하면 균열면에서는 Fig. 1에 보인 것처럼 하중단에서와 같이

철근과 콘크리트 경계면에서의 부착응력집중 현상이 나타나기 때문이다.

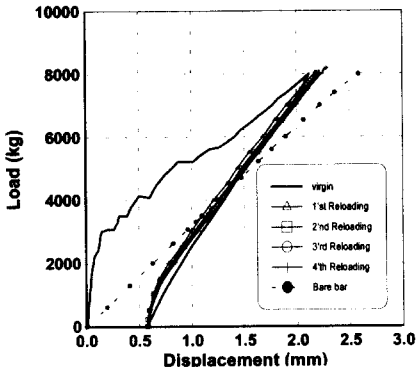


Fig. 13 Load-displacement relation when repeated loading

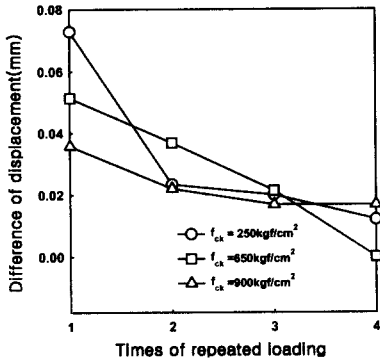


Fig. 14 Relation between difference of displacement and times of repeated loading

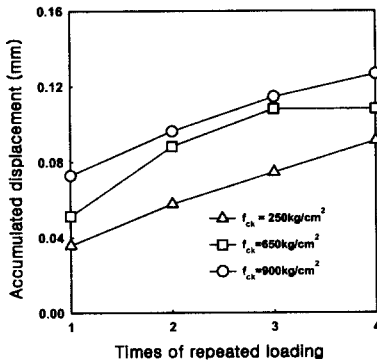


Fig. 15 Relation between accumulated displacement and times of repeated loading

더욱이, 고강도콘크리트일수록 양쪽 하중단면 균열단면 부근에서 철근과 콘크리트 경계면의 부착응력 집중현상이 심화되어, 이로 인한 철근과 콘크리트 부착면의 국부손상(local damage)이 크게되며, 반복하중이 작용하면 이 손상이 누적되기 때문이라고 판단되었다.

지금까지 기술한 본 연구의 제한된 실험 결과를 일반적인 콘크리트 구조물에 적용한다면, 고강도콘크리트를 사용한 구조물에서의 하중-변위 관계, 예를 들면, 고강도콘크리트 휨부재에서 휨강성의 증가량은 기존의 인식에 기초하여 판단한 값보다 훨씬 작을 것이라고 예상되었다.

4. 인장증강 예측식의 제안

본 절에서는 상기와 같은 실험결과를 이용하여 CEB-FIP 모델식이 콘크리트강도의 영향을 적절히 고려하고 있는가를 평가한 후 콘크리트강도의 영향을 적절히 고려한 인장증강 예측식을 제안하고자 하였다.

CEB-FIP 모델식, 즉 (1)식에서 초기 횡균열이 발생할 때 균열하중 P_{cr} 을 철근단면적 A_s 로 나눈 응력은 다음과 같다.

$$f_{sr} = \frac{P_{cr}}{A_s} = \left(\frac{1}{\rho} - 1 + n \right) f_t \quad (2)$$

여기서, ρ 는 철근비이고, n 은 탄성계수비 E_s/E_c 이다. 철근의 탄성계수 E_s 는 2.04×10^6 kgf/cm²이고, 콘크리트의 탄성계수 E_c 는 압축강도가 $f_{ck} < 300$ kgf/cm² 일 때 $15000 \sqrt{f_{ck}}$ kgf/cm², $f_{ck} > 300$ kgf/cm² 일 때 $10500 \sqrt{f_{ck}} + 70000$ kgf/cm² 이다^(7,11). 콘크리트 인장강도 f_t 를 $1.72 \sqrt{f_{ck}}$ kgf/cm² 로 가정하여 콘크리트 압축강도에 따른 f_{sr} 값을 산정하여 정리하면 Table 3과 같다.

여기서, f_t 를 $1.72 \sqrt{f_{ck}}$ kgf/cm² 로 가정한 이유는 첫째로 250 kgf/cm²에 대한 a_3 의 값이 1.0에 가까운 숫자가 되도록 한 것으로, 보통강도 250 kgf/cm²에 대한 a_3 의 값과 650과 900 kgf/cm²에 대한 a_3 의 값을 쉽게 비교하고자 하였고, 둘째로 콘크리트의 인장강도는 $1.0 \sim 2.0 \sqrt{f_{ck}}$ kgf/

cm²의 범위에서 변하므로 $1.72 \sqrt{f_{ck}}$ kgf/cm² 로 가정하여도 무방하다고 판단하였기 때문이다.

Table 3 f_{sr} value according to concrete strength

Compressive Strength f_{ck} (kgf/cm ²)	Ration of Modulus n	Tensile strength f_t (kgf/cm ²)	Steel stress at a crack f_{sr} (kgf/cm ²)
250	8.60	27.2	1576
650	6.04	43.9	2432
900	5.30	51.6	2820

본 실험의 철근은 이형철근을 사용하고, 하중은 단조하중인 경우만을 대상으로 하므로 a_1 과 a_2 를 각각 1로 할 수 있고, (1)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_s}{E_s} \left[1 - \left(\frac{f_{sr}}{f_s} \right)^2 \right] \quad (3)$$

여기서, 콘크리트 강도의 영향을 평가하기 위하여 식의 $1 - (f_{sr}/f_s)^2$ 을 λ 라 하고 $1 - \lambda$ 와 $(f_{sr}/f_s)^2$ 의 관계를 맺어주는 계수를 a_3 라 하였다. Table 3의 f_{sr} 을 이용하고, $1 - \lambda$ 와 $(f_{sr}/f_s)^2$ 의 관계를 콘크리트 강도별로 회귀분석하여 a_3 를 구하면 Fig. 16과 같다.

Fig. 16에서 보통강도 $f_{ck} = 250$ kgf/cm²일 때 a_3 는 0.92이지만 중간강도 $f_{ck} = 650$ kgf/cm², 고강도 $f_{ck} = 900$ kgf/cm²일 때 a_3 는 각각 0.53, 0.33으로 보통강도에 비해서 크게 감소하고 있다. 이는 CEB-FIP 모델식이 콘크리트 강도의 영향을 적절히 반영하지 못하고 있음을 나타내고 있다. 콘크리트강도의 영향을 적절히 고려하고자 Fig. 17과 같이 a_3 와 콘크리트 압축강도와의 관계식을 회귀분석하여 도출하고, 이 a_3 를 이용하여 CEB-FIP 모델식을 개선하면 다음과 같다.

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_s}{E_s} \left[1 - a_1 a_2 a_3 \left(\frac{f_{sr}}{f_s} \right)^2 \right] \quad (4)$$

여기서, $a_3 = -9.13 \times 10^{-4} f_{ck} + 1.14$

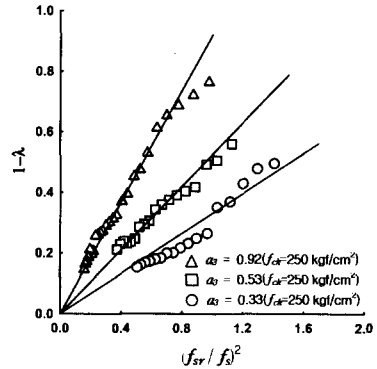


Fig. 16 $(1 - \lambda) - (f_{sr}/f_s)^2$ relation

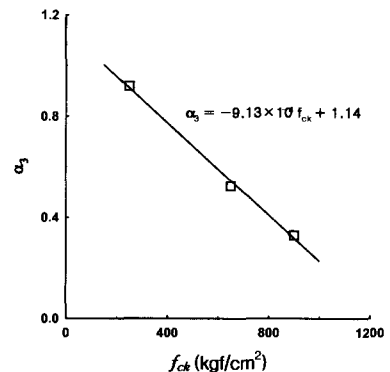
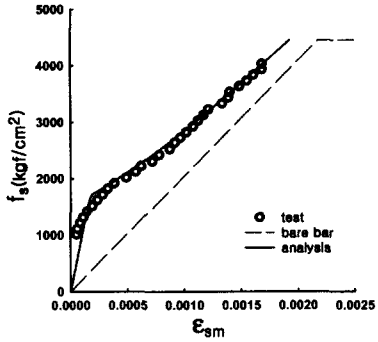


Fig. 17 $a_3 - f_{ck}$ relation

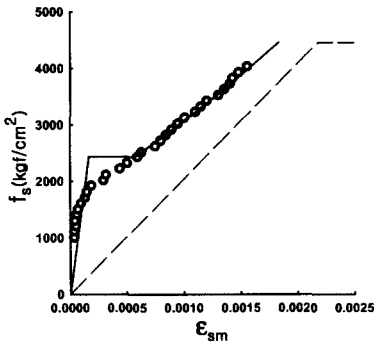
많은 실험에 의하면 균열발생 단계에서 초기균열 발생하중과 최종균열 발생하중의 차이는 그다지 크지 않으므로, 콘크리트 응력이 인장강도에 도달하면 균열이 발생하고 초기균열 발생하중과 최종균열 발생하중은 같다고 가정할 수 있다. 이와 같이 가정하면 예측한 값을 나타낼 때 무균열 단계, 균열발생 단계, 안정된 균열 단계로 구분하여 나타낼 수 있고, (4)식으로 예측한 값과 실험값이 비교는 Fig. 18과 같다.

이 그림을 살펴보면 균열발생 단계에서 예측값과 실험값이 차이를 발견할 수 있으나 이는 시험체의 건조수축, 시험체의 정밀도, 실험장비의 편심, 콘크리트 인장강도의 변동에 등에 의한 것이고, 안정된 균열 단계, 즉, 균열 후에는 예측값이 실험값과 잘 일치하고 있었다.

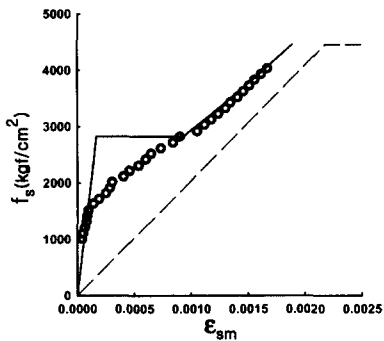
일반적으로 실제 구조물에서 사용하중은 철근 항복하중의 약 50%에 해당되고 평균균열이 거의



(a) $f_{ck} = 250 \text{ kgf/cm}^2$



(b) $f_{ck} = 650 \text{ kgf/cm}^2$



(c) $f_{ck} = 900 \text{ kgf/cm}^2$

Fig. 18 Comparison between test results and predicted response

발생하여 균열이 안정된 단계에 해당한다. 본 연구에서는 균열이 안정된 단계의 인장증강효과에 주요점을 두었고 CEB-FIP 모델식을 개선한

(4)식이 직접인장실험의 균열 후 거동을 잘 예측하고 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 피복두께와 철근 직경의 비가 2.62인 시험체의 직접인장실험을 통하여 고강도콘크리트의 인장증강효과에 관해 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 콘크리트 강도가 증가하면 콘크리트의 인장증강효과가 감소하였다. 고강도콘크리트에서는 하중을 제거한 후의 잔류변형량이 크게 나타났으며, 또한 반복하중이 작용하면 잔류변형량이 누적하여 인장증강효과가 크게 감소하였다.
- 2) 고강도콘크리트에서는 보통강도콘크리트에 비해 인접 횡균열간의 간격이 작게 나타났다. 압축강도가 900 kgf/cm² 인 고강도콘크리트의 균열간격은 12.8 cm로 나타났는데 이는 보통강도 콘크리트의 간격 16.7 cm 보다 대략 25%정도 작은 간격이었다.
- 3) 위의 현상들은 고강도콘크리트일수록 하중단과 균열단면 부근의 콘크리트와 철근의 경계면에서 부착응력 집중현상이 심화되어 콘크리트의 국부적 부착손상이 크게되기 때문이라고 판단되었다.
- 4) 균열 후 평균변형률을 구하기 위하여 CEB-FIP 인장증강 모델식에 콘크리트 압축강도를 고려하는 계수 a_3 를 도입한 식을 유도하였다.

$$\epsilon_{sm} = \frac{f_s}{E_s} \left[1 - a_1 a_2 a_3 \left(\frac{f_{sr}}{f_s} \right)^2 \right]$$

$$\text{여기서, } a_3 = -9.13 \times 10^{-4} f_{ck} + 1.14$$

참고문헌

1. CEB-FIP, "CEB-FIP Model Code for Concrete Structures," Third Edition, CEB, Paris, 1978., pp. 348
2. ACI Committee 224, "Cracking of Concrete Member in Direct Tension," ACI Manual of

- Concrete Practice, Part 3, ACI, 1994., pp. 224.2R-1-12.
3. Homayoun H. Abrishami and Denis Mitchell, "Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening," ACI Structural Journal, Nov.-Dec. 1996., pp. 703-710.
 4. Ajaya K. Gupta and Sergio R. Maestrini, "Tension-Stiffening in Reinforced Concrete Bars," ASCE, Vol. 116, No. 3, 1990., pp. 769-790.
 5. Domingo J. Carreira and Kuang-Han Chu, "Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Tension," ACI Journal, Jan.-Feb. 1986., pp. 21-28.
 6. Yukimasa Goto, "Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars," ACI Journal, April 1971., pp. 244-251.
 7. R. L. Carrasquillo, A. H. Nilson, and F. O. Slate, "Properties of High Strength Concrete Subject to Short Term Loads," ACI Journal, Vol. 78, No. 3, 1981., pp. 171-178
 8. 이봉학, 홍창우, 장동일, "철근콘크리트 인장부재의 파괴거동과 인장강성", 대한토목학회 논문집, 1998년 7월, pp. 483-494.
 9. 김준성, 김대중, 김 우, "고강도 콘크리트 휨부재의 철근 접이음에 대한 연구", 대한토목학회 논문집, 1998., pp. 411-421.
 10. 김우외 5명, "고강도콘크리트의 부착거동에 관한 실험적 연구", 1999년도 봄 학술발표회 논문집, 제 11권 1호, pp. 774-780.
 11. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준", 1999년 6월, pp. 66-67

요 약

본 연구에서는 축력을 받는 철근콘크리트 부재에서 콘크리트 강도가 인장강도거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 11개의 직접인장실험을 하였다. 주변수는 콘크리트 압축강도 250, 650, 900 kgf/cm² 이고, 콘크리트 피복두께와 철근 직경의 비는 조깅균열을 방지하기 위하여 2.62로 일정하게 하였다. 콘크리트강도가 증가할수록 인장증강효과는 감소하고, 하중을 제거할 때 잔류변형이 크게 나타났다. 또한 콘크리트강도가 증가할수록 인접하는 횡균열 간격이 작아졌다. 이는 콘크리트 강도가 증가할수록 하중단과 균열면에서 비균등한 부착응력의 집중이 더 심해지고, 이로 인해서 국부 부착파괴가 더 쉽게 발생하기 때문이라고 판단되었다. 이와 같은 사실로부터 고강도 콘크리트를 사용할 때의 휨강성의 증가량은 기존의 인식에 기초하여 판단한 것보다 훨씬 작을 것이라고 사료되었다. 마지막으로, 고강도 콘크리트가 인장증강에 미치는 영향을 반영하기 위하여 콘크리트 강도를 고려하는 계수를 도입하였다. 이 제안식은 본 실험의 인장증강거동을 잘 예측하였다.

(접수일자 : 1999. 8. 28.)