

## 인장증강효과를 고려한 철근콘크리트 보의 유효휨강성 평가

이승배<sup>1)</sup>, 장수연<sup>1)</sup>, 김상식<sup>1)</sup>, 이진섭<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> 인하대학교 건축학부 <sup>2)</sup> 연우건축구조기술사사무소

(2005년 8월 2일 원고접수, 2005년 10월 4일)

### Experimental Evaluation of Effective Flexural Rigidity in Reinforced Concrete Beams Considering Tension Stiffening Effect

Seung-Bea Lee<sup>1)</sup>, Su-Youn Jang<sup>1)</sup>, Sang-Sik Kim<sup>1)</sup>, and Jin-Seop Lee<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Architectural Engineering, Inha University, In-cheon, 402-751 Korea

<sup>2)</sup> Yunwoo Structural Engineers Co., Ltd., Seoul, 135-010 Korea

(Received August 2, 2005, Accepted October 4, 2005)

#### ABSTRACT

Until recently tensile stresses in concrete have not been considered, since it does not affect the ultimate strength of reinforced concrete flexural members significantly. However, to verify the load-deflection relationship, the effect of tensile stresses between reinforcing bars and concrete, so-called tension stiffening effect must be taken into account. Main parameters of the tension stiffening behavior are known as concrete strength, and bond between concrete and reinforcing bars. In this study total twenty specimens subjected to bending were tested with different concrete strength, coverage, and de-bonding length of longitudinal bars. The effects of these parameters on the flexural rigidity, crack initiation and propagation were carefully checked and analyzed.

**Keywords :** tension stiffening effect, flexural rigidity, crack spacing, de-bonding

#### 1. 서 론

근래에 들어 철근콘크리트 구조물이 대형화되고 장스팬의 적용이 늘어남에 따라 고강도 재료의 사용이 증가되고 있으며, 더욱이 강도 설계법 및 한계상태 설계법 등의 정밀한 설계기준의 적용으로 인해 철근콘크리트 부재의 단면은 최소화되고 있는 추세이다. 이에 따라 휨 응력을 주로 받는 철근콘크리트 부재에는 과도한 처짐이나 균열의 발생 우려가 높아지게 되어, 구조물의 사용성 측면에서 이들 처짐이나 균열에 대한 정확한 평가가 더욱 중요하게 대두되고 있다. 그러나 현행 콘크리트 구조설계기준에서는 인장을 받는 부분에서의 콘크리트 역할이 무시되고, 균열발생에 따른 균열 면에서의 철근과 콘크리트의 응력 재분배와 같은 효과가 충분히 반영되어 있지 못하고 있어, 구조물의 사용성 평가를 위한 정확한 예측이 어려운 실정이다. 특히 현행 기준의 처짐에 관한 경우에는 철근과 콘크리트 사이의 부착 특성을 직접적으로 반영하고 있지 않

으며, 단순히 균열 발생에 따른 부재의 휨강성 변화를 고려하여 유효단면 2차모멘트  $I_e$  만을 계산에 반영하고 있다. 그러나 실제의 휨 부재에서는, 균열이 발생한 단면에 작용하는 인장력은 모두 철근이 부담하지만, 발생한 균열 사이에서의 부착력에 의해 콘크리트가 철근으로부터 전달되는 인장력의 일부를 부담하여, 콘크리트가 철근의 인장강성을 증가시켜주는 현상을 보이게 된다. 이러한 현상을 인장증강효과(tension stiffening effect)라 하며 이 효과는 부재의 극한강도에 미치는 영향은 거의 없으나, 사용성 평가의 근간이 되는 하중-처짐 관계 및 실제 부재의 휨강성 등에는 큰 영향을 미치므로, 처짐이나 균열 폭을 산정하는 경우에는 반드시 고려되어야 한다.

이 연구에서는 철근콘크리트 보를 대상으로 인장증강 효과에 영향을 미치는 것으로 알려진 콘크리트의 압축강도, 피복두께 및 철근의 표면 형상 등을 주요 구조 변수로 하여, 균열 특성, 하중-처짐 관계 등을 규명하고, 이를 통해 철근콘크리트 휨부재의 사용성과 관련된 유효휨강성 등을 재평가하고자 한다.

\* Corresponding author

E-mail : blueskyelf79@hotmail.com

©2005 by Korea Concrete Institute

## 2. 유효단면 2차모멘트 및 인장증강효과에 대한 이론적 고찰

### 2.1 유효단면 2차모멘트 $I_e$

휨을 받는 철근콘크리트 부재의 하중-처짐 관계를 단순화하면 Fig. 1과 같이 3 단계로 표현할 수 있는데, 영역 I은 최초의 휨균열 발생 이전 단계, 영역 II는 균열 이후의 사용하중 단계, 영역 III은 사용성이 지난 단계 및 휨에 의한 처짐 거동의 한계 상태로 나타낼 수 있다. 철근콘크리트 부재에서 사용성이 중요시 되는 구간은 Fig. 1의 영역 II에 해당하는 부분인 균열 이후의 사용하중 단계라 할 수 있다. 현행 국내 콘크리트 구조설계기준 및 ACI 318-02의 보 처짐 계산에 있어서는 균열로 인한 단면손실을 고려하기 위하여 Branson<sup>7)</sup>이 제안한 유효단면 2차모멘트  $I_e$ 를 사용하고 있으며, 일방향 휨을 받는 철근콘크리트 부재의 처짐 계산을 위한 유효단면 2차모멘트  $I_e$ 는 다음과 같이 정의되고 있다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (1)$$

여기서,  $M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$  : 균열모멘트

$M_a$  = 단면 2차모멘트가 계산되는 부분에서의 최대 모멘트

$I_{cr}$  = 균열단면의 단면 2차모멘트

$I_g$  = 보의 전단면에 대한 단면 2차모멘트

$f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$  : 파괴계수

$y_t$  = 도심에서 인장축 외단까지의 거리

그러나 위의 식 (1)은 한정된 실험 결과에 근거한 경험적인 값으로서, 철근과 콘크리트 사이의 부착 특성을 직접적으로 고려하고 있지 않으며 균열후의 인장증강효과 등을 정확히 반영하고 있지 못하다. 따라서 식 (1)에서 산정되는 유효휨강성 만으로는 실제 휨부재의 정확한 처짐을 예측하는 데에는 한계가 있기 때문에, 실제 휨부재의 실험을 통해 유효휨강성을 재평가할 필요가 있다.

유효단면 2차모멘트를 평가·분석하는 방법으로는 보의 처짐으로부터 얻은 곡률과 모멘트의 관계로부터 실험에 의한  $I_e$  값을 도출하고, 식 (1)에 의한 설계기준값을 산정하여 두 관계를 비교하는 방법을 취할 수 있으며, 이러한 과정을 요약하면 Fig. 2에서와 같이 나타낼 수 있다. 다른 방법으로 CEB-FIP MC-90<sup>5)</sup>에서는 철근의 변형률과 콘크리트의 변형률로부터 곡률을 산정하여 이를 통해 부재의 실제 휨강성을 얻는 방법을 설명하고 있으며 이때의 곡률  $R$ 은 식 (2)를 통해 산정할 수 있다.

$$\frac{1}{R} = \frac{\epsilon_{s,m} - \epsilon_{c,m}}{d} \quad (2)$$

여기서,  $\epsilon_{s,m}$  : 철근의 변형률,  
 $\epsilon_{c,m}$  : 콘크리트 상부면의 변형률  
 $d$  : 보의 유효 층

### 2.2 인장증강효과

철근콘크리트 부재에 대한 인장증강 효과의 연구는 Scanlon과 Murray<sup>6)</sup>가 응력-변형률 관계를 통해 인장증강 효과를 설명한 이후 현재에 이르기까지 다양한 형태의 실험 및 이론 연구가 진행되어 오고 있다. Collins과 Mitchell<sup>8)</sup>은 균열 후 콘크리트의 평균응력을 이용하여 인장증강효과를 나타냈으며, 이를 식으로 나타내면 아래와 같다.

$$f_c = \frac{\alpha_1 \alpha_2 f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \epsilon_{cf}}} \quad (3)$$

여기서,  $f_c$  = 균열 후 콘크리트의 평균응력

$\alpha_1$  = 철근의 부착 특성을 고려한 계수

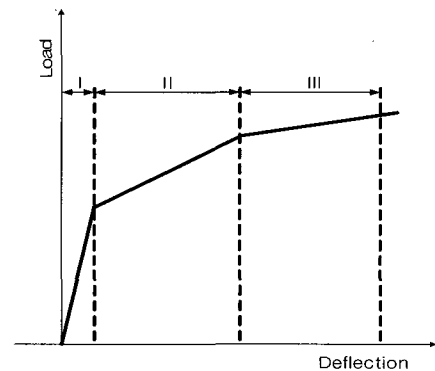


Fig. 1 Idealized load-deflection relationship

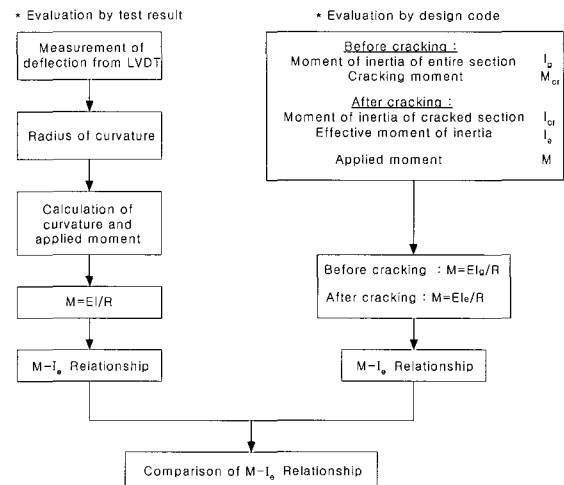


Fig. 2 Evaluation flow of flexural rigidity

$\alpha_2$  = 하중 특성을 고려한 계수  
 $f_{cr}$  = 콘크리트의 압축강도  
 $\epsilon_{cf}$  = 콘크리트 변형률

한편 CEB-FIP Model Code에서는 직접인장을 받는 RC 구조부재에 작용하는 인장력과 부재의 변형관계를 통해서 콘크리트 인장증강효과를 설명하고 있으며, 이를 모델화한 것이 Fig. 3에 나타나 있다.

Fig. 4는 직접 인장을 받는 철근콘크리트 부재에서 하중단계별로 철근과 콘크리트의 응력 분담 상황을 도시한 것으로서, 인장증강효과는 하중이 가려지는 시점에서부터 발생하여 더 이상의 응력 재분배가 일어나지 않을 정도의 균열 발생단계까지 진행된다.

### 3. 실험 계획 및 방법

#### 3.1 실험 계획

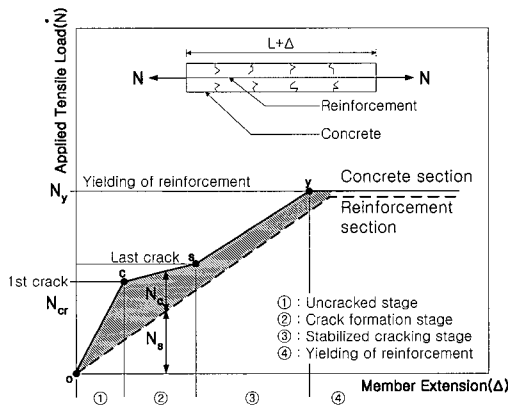


Fig. 3 Tension stiffening effect

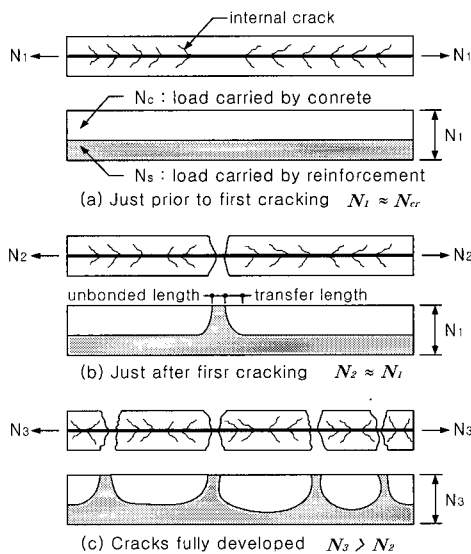


Fig. 4 Load distribution between reinforcing bars and concrete

기존의 연구에 따르면 인장증강효과에 영향을 미치는 주요 인자는 콘크리트의 압축강도, 철근과 콘크리트의 부착 응력, 주인장 철근비 및 철근의 장부작용, 철근의 직경 및 표면 형상, 피복두께, 균열 간격 등으로 알려져 있다. 이 연구에서 사용된 시험체는 모두 20개이며, Table 1의 시험체 제원에서 보이는 바와 같이 주요 변수는 콘크리트의 압축강도, 주인장 철근의 피복두께 및 비부착 길이로 하였다. 콘크리트 강도는  $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$ 의 일반강도와  $f_{ck} = 50 \text{ MPa}$ 의 고강도로 나누었으며, 주인장 철근의 피복두께는 40 mm 및 60 mm로 하였다. 세번째 실험변수는 철근의 비부착 길이 및 개수로서, 부재의 중앙부에서 1,600 mm 또는 800 mm의 구간에 주인장 철근을 비부착화하였다.

시험체의 표기에서 맨 앞의 문자는 콘크리트의 강도를 나타내며, 두 번째 문자는 철근의 피복두께, 세 번째 문자 및 숫자는 비부착 철근의 길이 및 개수를 표시하고 있다. 예를 들어 G-X-A3 시험체는 일반강도 콘크리트에 피복 두께가 40 mm 이고 주근 3개 모두가 비부착 길이 1,600 mm를 갖는 시험체임을 나타낸다.

시험체 단면의 크기는 Fig. 5와 같이 폭 250 mm, 높이 350 mm로 하였으며 시험체의 전체 길이는 4,800 mm로 제작하였다. 주인장철근으로는 SD40 재질의 3-D19를 사용하였고, 압축철근으로는 2-D13을 사용하였으며, 휨파괴에 선행되는 전단파괴를 방지하기 위하여 Fig. 6과 같이 전단력 작용구간에는 D10 @150의 스티럽을, 전단력이 없는 부분에는 D10 @300의 스티럽을 배근하였다. 또한 시험체의 주인장 철근에는 Fig. 7의 위치에 와이어스트레인게이지를 부착하여 철근의 변형률을 측정할 수 있도록 하였다.

Table 1 Specification of specimens

Specimens	Notation	$f_{ck}$ (MPa)	Concrete cover at the center of bar(mm)	Number & Length of de-bonded bar(mm)	
G	A0	27.5	40	0	
	A1			1 EA-1600	
	A2			2 EA-1600	
	A3			3 EA-1600	
	B1			1 EA-800	
	B2			2 EA-800	
	Y		A0	60	0
			A2	2 EA-1600	
			B2	2 EA-800	
H	A0	44.9	40	0	
	A1			1 EA-1600	
	A2			2 EA-1600	
	A3			3 EA-1600	
	B1			1 EA-800	
	B2			2 EA-800	
	X		B3	3 EA-800	
			A0	60	0
			A2	2 EA-1600	
	B2		2 EA-800		

**Table 2** Mix proportion of concrete

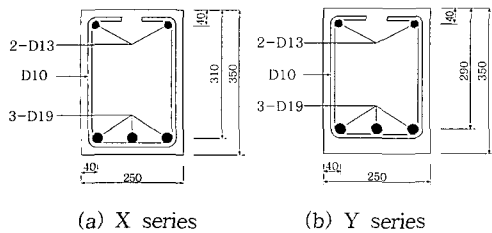
Types	$f_{ck}$ (MPa)	$E_c$ (MPa)	W/C (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
				Cement	Water	Sand	Coarse aggregate	Admixture
G type	27.5	20,790	47.2	347	164	877	950	1.04
H type	44.9	21,950	24.8	633	157	702	907	1.90

사용된 콘크리트의 배합 조건은 Table 2에 보이는 바와 같으며, 압축강도 측정용 공시체는 시험체의 양생 조건과 동일하게 대기 중 양생하였다. 공시체의 시험결과 일반강도 시험체는 27.5MPa, 고강도 시험체는 44.9MPa의 평균 압축강도를 보이는 것으로 나타났으며, 50% 할선탄성계수는 일반강도 시험체의 경우 20,790 MPa, 고강도 시험체의 경우는 21,950 MPa로 측정되었다.

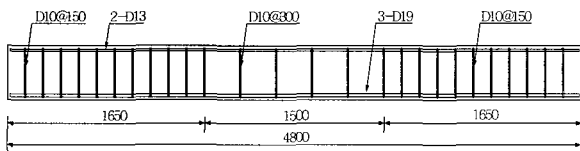
철근과 콘크리트 사이의 응력전달을 없애기 위한 비부착 가공은 Fig. 8에서 보이는 바와 같이 주인장 철근의 리브와 마디를 석고를 사용하여 요철이 없도록 매운 후, 그 위에 테이프를 감아 철근과 콘크리트 사이의 부착작용을 없앴으며, 인장증강효과를 인위적으로 제어하는 방법을 취하였다.

### 3.2 실험 방법

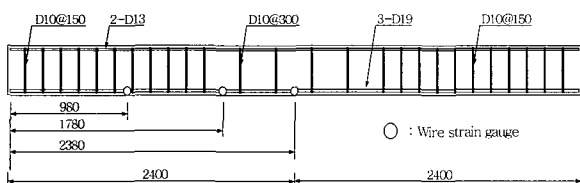
시험체는 Figs. 9 및 10에서 보이는 바와 같이 1,000 kN 용량의 오일잭 및 가력용 형강을 사용하여 시험체의 상부에 2점 집중하중으로 단조가력하였으며, 가력속도는 분당 5 kN을 기준으로 하였다. 시험체의 지점 중심간 거리는 4,400 mm이며, 하중이 작용하는 위치는 양 지점에서 1,400 mm



**Fig. 5** Cross section of specimen



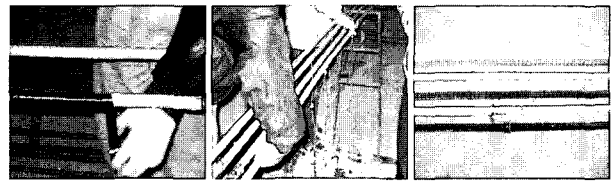
**Fig. 6** Reinforcing detail of specimen



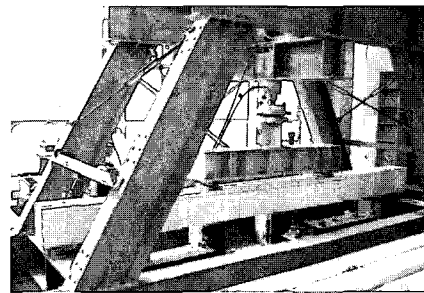
**Fig. 7** Location of wire strain gauge

떨어진 곳으로 하였다. 시험체의 변위 측정을 위해 Fig. 11과 같이 지점, 가력점 및 중앙부에 자동변위계를 설치하였으며, 주인장철근의 중앙부 및 가력점에 부착된 스트레인게이지를 통해 철근의 변형률을 측정하였다. 실험 자료의 취득은 매 초당 중앙부의 하중 및 변위, 철근의 변형률 등을 데이터로거를 통해 수집하였으며, 각 하중단계마다 균열의 발생 및 진전 상황을 표면에 가로 100 mm 세로 50 mm 간격의 선이 그어진 시험체에 직접 표기하였다.

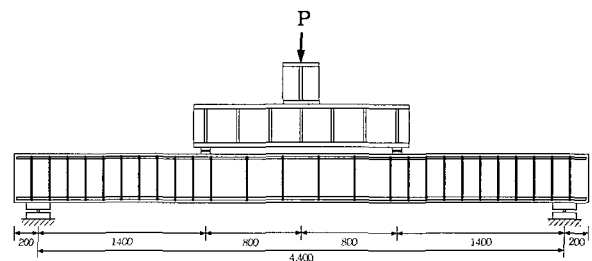
## 4. 실험 결과



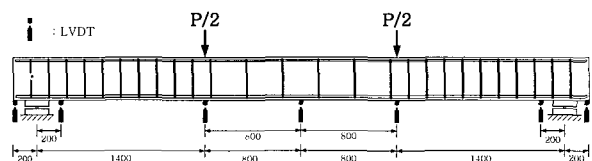
**Fig. 8** De-boding process of longitudinal bars



**Fig. 9** Test set-up



**Fig. 10** Support and loading condition



**Fig. 11** Loading and displacement acquisition point

**Table 3** Summary of test result

Specimen	Initial crack load (kN)	Maximum load (kN)	$P_y$ (kN)		$P_n$ (kN)
			Mid point	Loading point	
G X	A0	9	147.7	126.8	128.0
	A1	21	155.5	131.7	130.5
	A2	13	145.5	133.0	132.2
	A3	14	132.2	124.3	126.2
	B1	9	137.2	129.3	125.8
	B2	18	145.7	118.2	125.2
G Y	A0	13	132.0	127.8	125.5
	A2	7	131.5	113.7	120.0
	B2	8	132.8	109.2	125.5
H X	A0	8	163.3	134.5	132.7
	A1	6	158.0	*	*
	A2	14	170.0	139.7	135.7
	A3	5	160.7	130.3	130.5
	B1	7	170.5	135.5	134.7
	B2	8	163.2	133.5	134.7
H Y	A0	5	152.7	121.8	119.8
	A2	5	155.3	133.5	126.7
	B2	6	144.0	132.5	118.8

\* : data acquisition error  
 $P_y$  : Load at yielding of longitudinal bar

4.1 시험체의 최고 하중 및 하중 변위 곡선

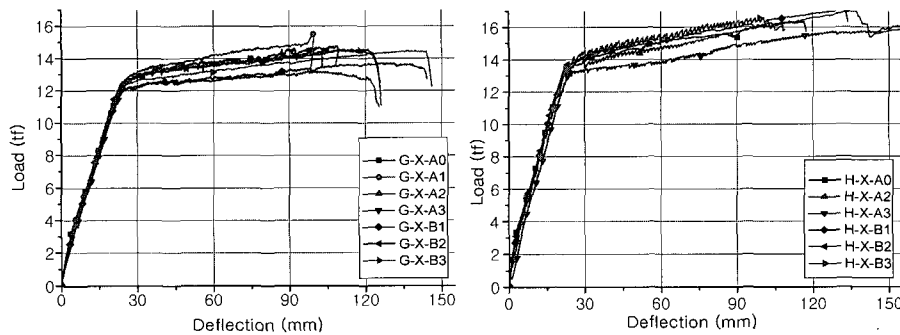
Table 3은 총 20개의 시험체에 대한 실험 결과를 요약한 것이며, Figs. 12~13은 각 시험체의 하중-변위 곡선 및 주철근의 하중-변형률 곡선을 보여주고 있다. Table 3

에서 보이는 바와 같이 시험체의 주근 항복시 하중 및 최고 하중은 주근의 비부착 길이 및 개수의 변화와 무관한 것으로 나타났다. 그러나 피복두께의 증가에 따라 Y 계열 시험체가 X 계열 시험체에 비해 최고하중 및 주근 항복시 하중이 감소하였음을 알 수 있다. 여기에서의 최고하중은 보가 압괴로 인해 파괴될 때의 하중 또는 가력을 계속 하여도 하중의 증가없이 계속해서 처짐량이 급격히 증가하는 시점의 하중을 의미한다. 중앙부 및 가력부는 모두 일정한 모멘트를 받는 구간으로 주철근 항복시의 하중은 서로 비슷한 값을 나타내고 있다.

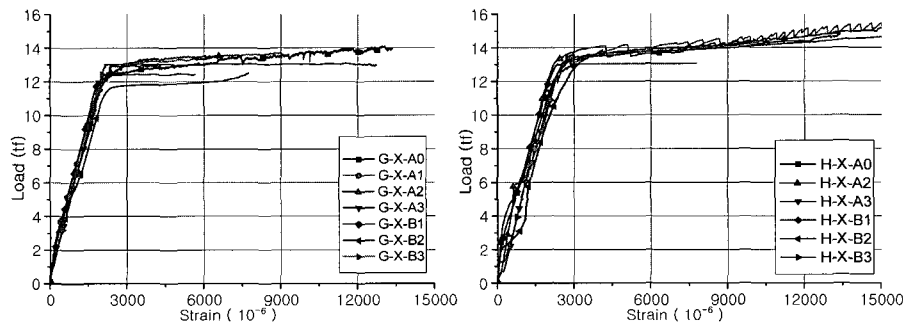
시험체의 거동은 Figs. 12 와 13에서 보이는 바와 같이 주철근의 응력-변형률 관계에 의해 지배되고 있음을 알 수 있었다. 또한 주근 항복시의 하중과 강도저감계수를 고려하지 않은 설계기준 상의  $M_n$  값에 해당하는 이론적 극한하중  $P_n$ 은 실험값에 대해 최대 8.3% 이내의 오차범위 내에 있는 것으로 나타났다.

4.2 균열 양상

시험체의 파괴시 균열 양상은 Fig. 14에 나타나 있으며, Table 4는 가력점 사이 구간 즉 일정한 모멘트를 받는 구간에서 비부착 길이에 따른 평균 균열 간격을 나타낸 것이다. Fig. 14 및 Table 4에서 보이는 바와 같이 균열 발생 간격은 비부착 철근의 개수 증가할수록 일반강도에서는 1.25~3.2 배, 고강도에서는 1.1~ 3.05 배까지 넓어지고 있



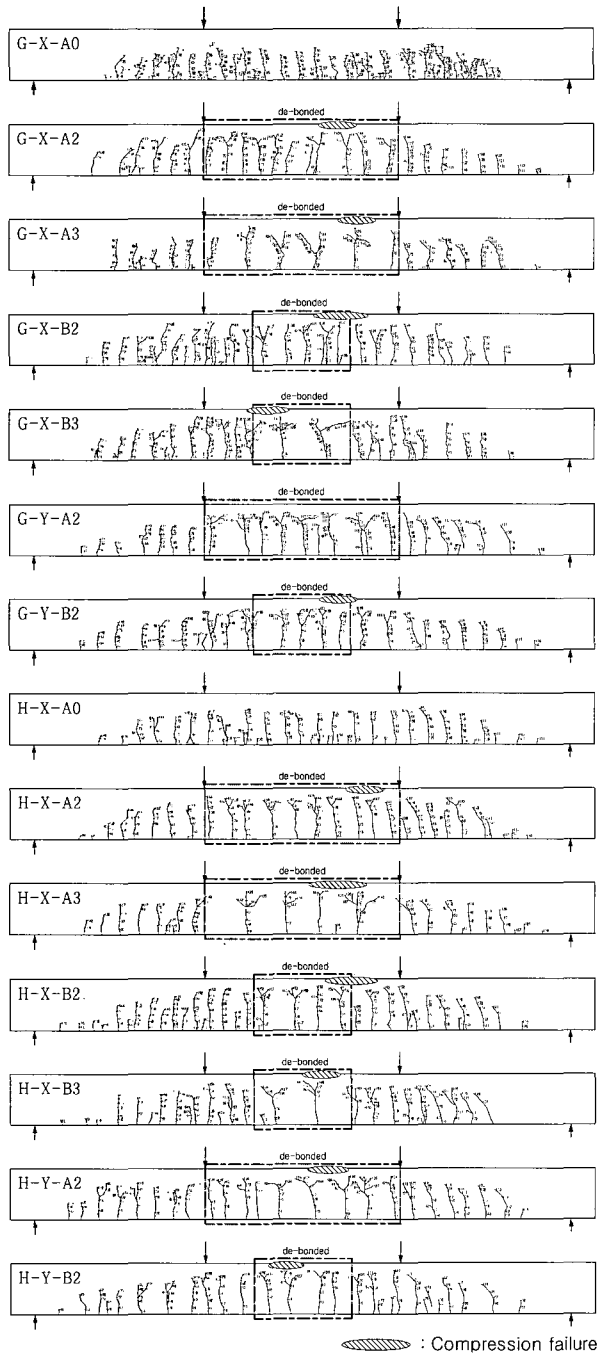
**Fig. 12** Load-deflection curve



**Fig. 13** Load-strain curve

**Table 4** Comparison of crack spacing

Types	Crack spacing(mm)		Types	Crack spacing(mm)	
	Bonded	De-bonded		Bonded	De-bonded
G-X-A0	100	-	H-X-A0	105	-
G-X-A1	-	125	H-X-A1	-	115
G-X-A2	-	160	H-X-A2	-	160
G-X-A3	-	320	H-X-A3	-	320
G-X-B1	135	135	H-X-B1	90	135
G-X-B2	90	200	H-X-B2	115	200
G-X-B3	115	265	H-X-B3	135	265
G-Y-A0	145	-	H-Y-A0	125	-
G-Y-A2	-	160	H-Y-A2	-	200
G-Y-B2	160	200	H-Y-B2	115	200



**Fig. 14** Crack patterns of tested specimens

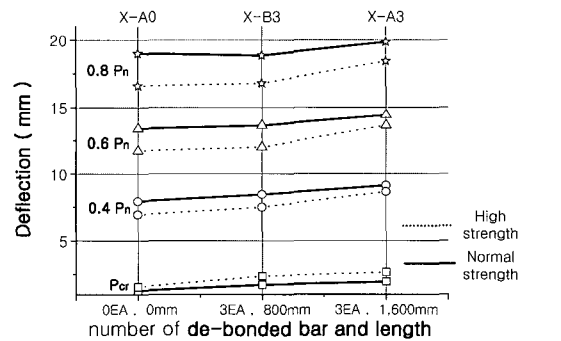
음을 알 수 있으며 또한 같은 보에서도 비부착 구간이 부착 구간에 비해 일반강도에서는 1~2.2 배, 고강도에서는 1.5~2.0 배까지 균열 발생 간격이 넓은 것으로 조사되어 인장증강효과와 연관된 주근과 콘크리트의 부착 작용이 균열의 발생 간격에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 또 다른 구조 변수인 콘크리트의 강도 및 피복 두께에 대한 변수별 균열 양상의 차이는 현저하지 않았다.

## 5. 실험 결과의 분석 및 고찰

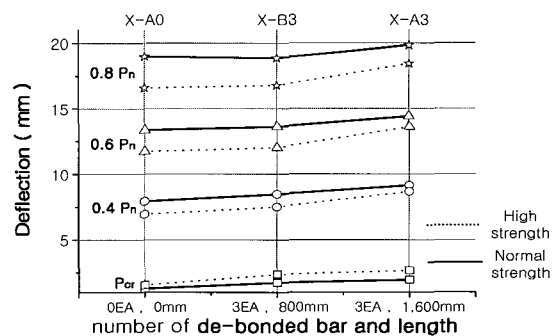
### 5.1 하중-처짐 관계

#### 5.1.1 중앙부의 하중-처짐 관계

주인장 철근의 비부착 길이 및 개수에 따른 중앙부의 최대 처짐비교는 Fig. 15와 같으며, 검토되고 있는 각 하중 구간은 사용성이 중시되는 단계인 Fig. 1의 구간II를 기준으로 하여, 국내 설계기준에서의  $M_{cr}$ 과  $M_n$ 에 대응하는 중앙부의 집중하중  $P_{cr}, P_n$ 에 대해 초기 균열발생부터  $0.8P_n$ 에 이르기까지의 처짐량의 변화를 고찰하였다. 일반강도 시험체의 경우 비부착 길이가 없는 상태에서 비부착 길이 및 개수가 증가하면 중앙부 처짐량은  $0.4P_n$  이하에서 최대 51.6%까지 증가하며, 고강도 시험체의 경우에는 최대 70.9%까지 증가하는 것으로 나타났다. 0.4

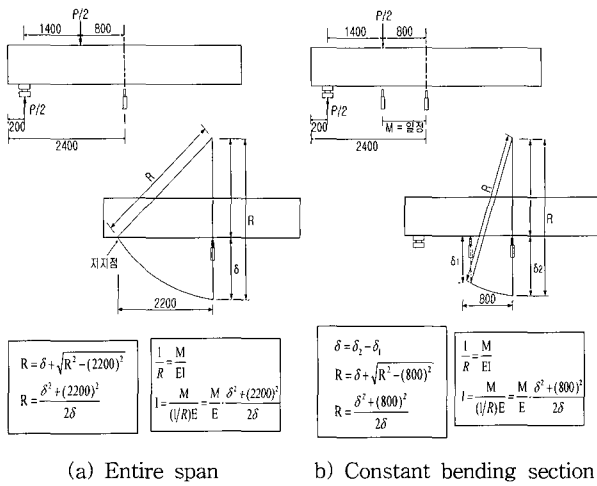


(a) Entire span



(b) Constant bending section

**Fig. 15** Comparison of deflection at each loading stage



**Fig. 16** Calculation of flexural rigidity with test results

$\sim 0.8P_n$  구간에서는 중앙부 처짐량이 10~30% 정도 증가하였다.

이러한 현상은 비부착 철근의 길이 및 개수가 증가할수록 현저하였으나, 피복두께의 차이 및 콘크리트의 압축강도 증가에 따른 현저한 변화는 발견할 수 없었다.

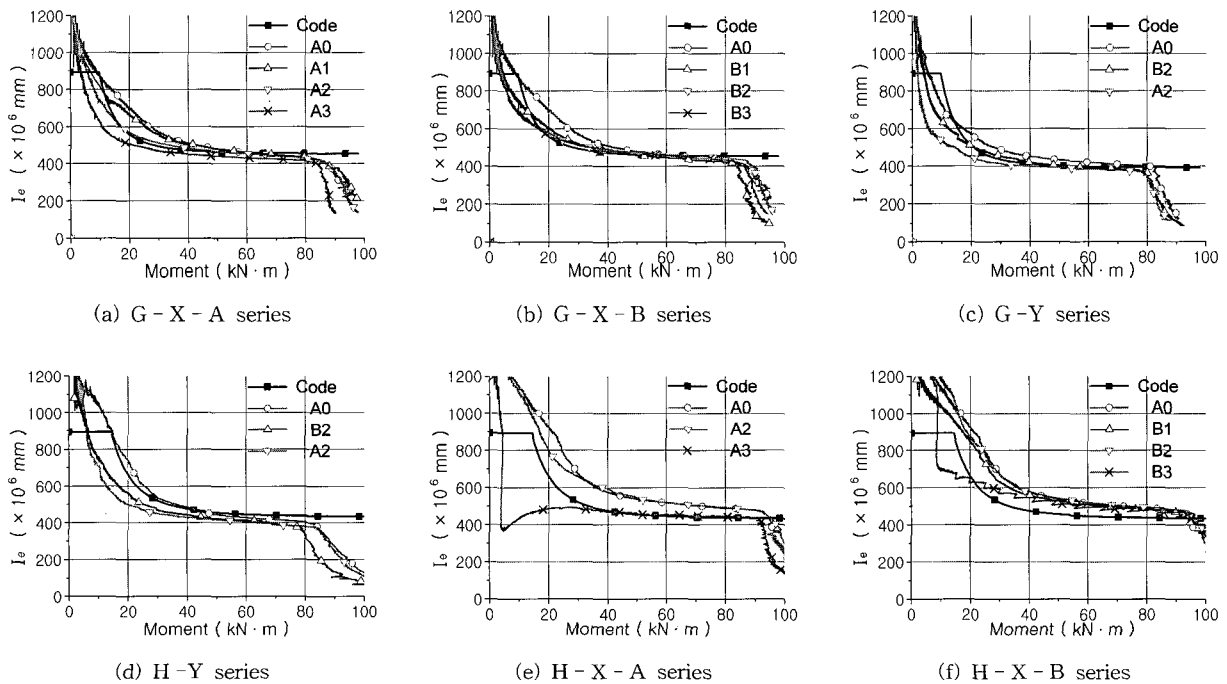
### 5.1.2 순수휨 구간의 하중-처짐 관계

보의 가력점 사이의 부분은 전단력이 작용하지 않는 순수휨 구간이라고 할 수 있다. 이 순수휨 구간에 있어서는 전단력이나 모멘트의 변화 등이 없고, 주근의 비부착 길이 및 개수에 의한 영향만이 존재하므로, 인장증강효과에 따른 거동의 차이를 정확히 파악할 수 있다. 순수휨 구간의

처짐 측정은 중앙부 처짐에서 가력부 처짐량을 감하여 산정하였다. 순수휨 구간의 처짐 역시 중앙부 처짐과 비슷한 양상을 나타나고 있으며, 순수휨 구간만의 처짐량은 전체 처짐량 비교시에 비해, 비부착 길이 및 개수의 증가에 따른 처짐량의 증가 현상이 현저하게 나타났다. 특히 고강도 콘크리트 시험체에서 전체 비부착 철근으로 되어있는 보인 H-X-A3에 있어서는 Fig. 15 (b)에서와 같이 비부착 길이가 없는 시험체에 비해 하중구간에 따라 처짐량이 1.1 배 ~ 3.0 배까지 급격히 증가하는 양상을 볼 수 있었다.

### 5.2 유효휨강성의 고찰

Fig. 16은 유효휨강성의 고찰 방법을 나타낸 것으로서, 유효휨강성의 이론값은 국내 설계 기준식인 식(1)을 이용하여 산정하였다. 유효휨강성의 실험값은 Fig. 19에서 보이는 바와 같이, 전 스패의 평균 곡률을 이용한 방법과 순수휨 구간에서의 곡률을 이용한 방법으로 나누어 산정하였다. 이 때 사용된 탄성계수는 실험에 의하여 구해진 값을 사용하였다. 이 과정을 통해 얻어진 유효단면 2차모멘트의 이론값과 실험값의 비교가 Figs. 17 및 18에 나타나 있다. 사용성이 중시되는 단계 즉, 초기균열 발생시점인  $M_{cr}$ 로부터 얻어진  $P_{cr}$ 에서부터 최고하중의 약 80%까지의 구간에서 실험값에 의해 유도된 유효휨강성과 식 (1)에 의해 산정된 유효휨강성이 전반적으로 유사한 추이를 보이고 있다. 또한 Figs. 17 및 18에서 공히 알 수 있듯이, 철근의 비부착 길이 및 개수가 증가할수록 시험체의 유효휨강성이 순차적으로 감소하고 있어, 인장증강효과가



**Fig. 17** Relationship of Moment -  $I_e$  in entire span

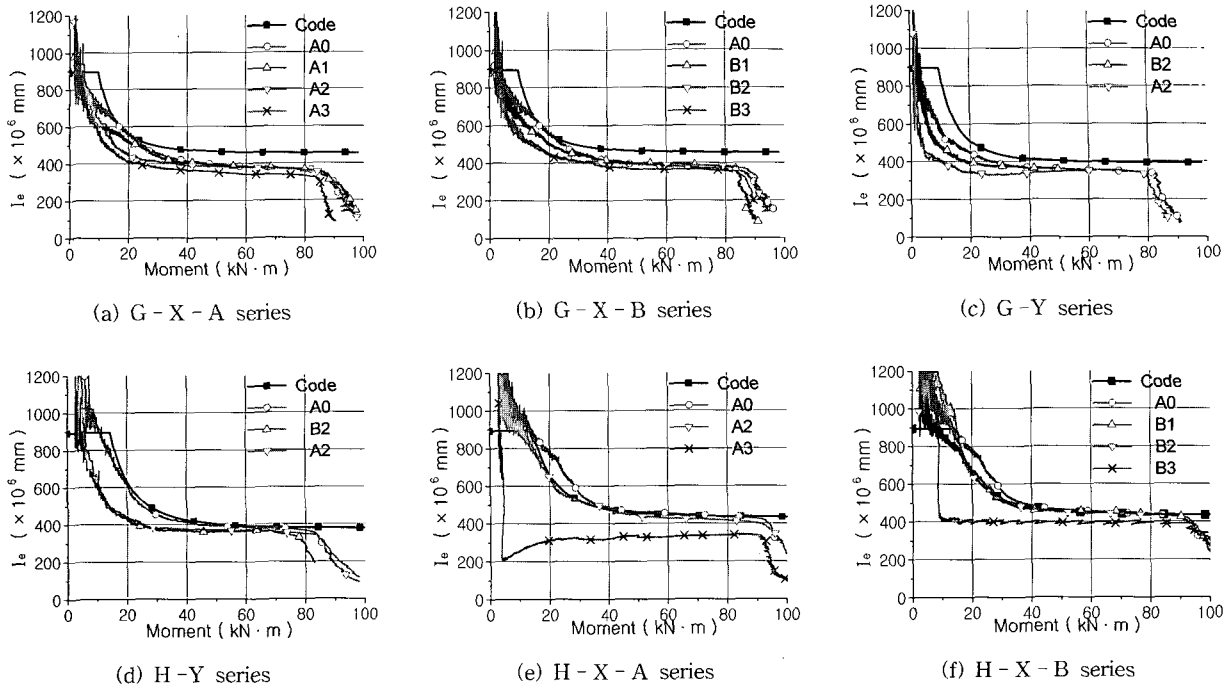


Fig. 18 Relationship of Moment -  $I_e$  in pure bending section

시험체의 처짐 거동에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 단, 고강도 시험체 중 모든 주근을 비부착 한 시험체에서는 하중 초기에 급격한 균열과 함께 하중의 감소가 발생하여 다른 시험체에 비해 유효휨강성 실험값이 급격히 저하되는 양상을 보이고 있다.

인장증강효과에 의한 실험값과 규준식에 의한 유효단면

2차모멘트의 비교는 Fig. 19 와 같다. 여기서 균열 모멘트 전의 유효단면 2차모멘트는 초기에 처짐 측정의 신뢰성 문제로 그래프 상에서 다른 모습을 보여주고 있다.

일반강도 시험체의 경우 비부착 길이가 없는 상태에서 비부착 길이 및 개수가 증가하면 유효휨강성은 균열모멘트 부근에서 최대 47.0% 까지 감소하였으며 그 이후에는

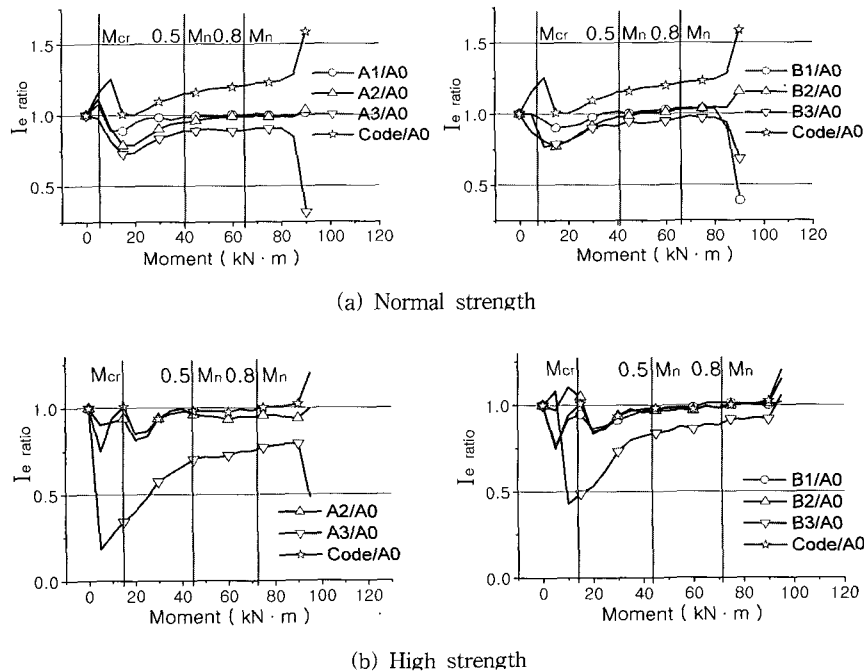


Fig. 19 Comparison of  $I_e$  by test results and code provision



차이가 점점 감소하여  $0.5M_n$  이후로는 차이가 거의 일정한 양상을 보이고 있다. 특히 전체 비부착한 시험체의 경우에는  $0.5M_n$  이후에도 유효단면 2차모멘트 값이 10% 내외의 차이를 계속 보이고 있다. 또한 (1) 식에 의한 유효단면 2차모멘트의 값과 비부착 길이가 없는 시험체의 유효단면 2차모멘트 값은 균열 이후 오차가 점점 증가하여 최고하중의 약 70% 까지의 구간에서는 20% 이내의 오차를 보이고 있다.

고강도 시험체의 경우 비부착 길이가 없는 상태에서 비부착 길이 및 개수가 증가하면 유효휨강성은 균열모멘트 부근에서 20% 정도 감소하였으며 특히 전체 비부착 시험체의 경우에는 초기균열 발생 후에 급격한 유효단면 2차모멘트의 감소현상을 보이고 있다. 이런 현상이 발생한 이유는 균열모멘트 부근에서 급격한 균열이 보 축의 2/3 지점까지 발생하여 보에 가력하는 하중이 급격히 감소한 이유로 인한 것이라 여겨진다. 고강도 시험체 역시 균열모멘트 이후에 차이가 점점 감소하여  $0.5M_n$  이후로는 차이가 거의 일정한 양상을 보이고 있다. 또한 (1) 식에 의한 유효단면 2차모멘트의 값과 비부착 길이가 없는 시험체의 유효단면 2차모멘트 값은 균열 이후 15% 정도의 오차에서 점점 감소하여 최고하중의 약 50% 구간부터는 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 이는 일반강도 시험체의 오차가 점점 증가하는 것과 다른 현상을 나타낸다.

따라서 사용성이 증시되는  $0.8M_n \sim M_{cr}$  사이의 구간에서 철근콘크리트 보의 사용성에 의한 유효휨강성의 평가시에는 이러한 인장증강효과가 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

- 1) 균열 발생 간격은 비부착 구간이 부착구간에 비해 넓으며 특히 비부착 길이 및 비부착 철근의 개수가 증가할수록 일반강도에서는 1.25~3.2 배, 고강도에서는 1.1 ~ 3.05 배까지 넓어졌다. 또한 같은 보에서도 비부착 구간이 부착 구간에 비해 일반강도에서는 1~2.2 배, 고강도에서는 1.5~2.0 배까지 균열 발생 간격이 넓어지는 것으로 나타났다. 그러나 콘크리트의 강도 및 피복두께 변화에 따른 균열양상의 차이는 현저하지 않았다.
- 2) 비부착 길이가 증가할수록 처짐이 증가하는 현상을 관찰할 수 있었는데, 특히 순수 휨구간에서 비부착 철근의 길이 및 개수가 증가할수록 처짐량이 증가하는 현상이 뚜렷하게 나타났다.
- 3) 사용하중 단계인 초기균열 발생시점  $M_{cr}$ 에서부터 최고하중의 약 80% 까지의 구간에서 실험값에 의해 유도된 유효휨강성과 식 (1)에 의해 산정된 유효휨강성이 전반

적으로 유사한 추이를 보이고 있고, 철근의 비부착 길이 및 개수가 증가할수록 시험체의 유효휨강성이 순차적으로 감소하고 있어, 인장증강효과가 시험체의 처짐 거동에 큰 영향을 미치고 있음이 확인되었다.

- 4) 인장증강효과가 발휘되지 않는 시험체의 경우에는 인장증강효과가 발휘되는 시험체에 비해  $0.8M_n \sim M_{cr}$  사이의 구간에서 유효휨강성이 최대 47% 까지 감소하는 것으로 평가되어, 철근콘크리트 보의 사용성과 관련된 유효휨강성의 평가시에는 이러한 인장증강효과가 반드시 고려되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 한국콘크리트학회, 콘크리트 구조설계기준, 2003, 한국콘크리트학회.
2. 김상식, 철근콘크리트 구조설계, 문운당, 2005.
3. 이기열, 철근콘크리트 휨부재의 성능기반 사용성 모델 개발, 박사학위논문, 전남대학교, 2005.
4. ACI Committee 318, *Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.
5. CEB-FIP, *CEB-FIP Model Code*, 3rd Edition, CEB, Paris, 1991, pp.87~92.
6. Scanlon Andrew and Murray, David W., "Time Dependent Reinforced Concrete Slab Deflection", *ASCE Proceedings*, Vol.100, ST9, Sept., 1974, pp. 1911~1924.
7. Branson, Dan E., "Design Procedures for Computing Deflection", *ACI Journal*, Vol.65, No.9, Sept. 1968, pp. 736~742.
8. Collins, M. P. and Mitchell, D., *Response of Members Subjected to Axial Load(Ch 4)*, Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, 1991, pp.124~167.
9. Abrishami, H. H. and Mitchell, D., "Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening", *ACI Structural Journal*, Vol.93, No.6, 1996, pp.703~710.

---

## 요 약

최근에 이르기까지 철근콘크리트 휨부재에 있어 콘크리트의 인장응력은 극한강도에 현저한 영향을 미치지 못하기 때문에 그 역할이 고려되어지지 않았다. 그러나 하중-처짐 관계의 구명을 위해서는, 인장증강효과라고 불리는 콘크리트와 보강철근 사이의 인장응력에 의한 강성증가 효과가 반드시 고려되어야 한다. 이러한 인장증강효과에 영향을 주는 주요 구조변수는 콘크리트의 강도 및 콘크리트와 철근의 부착 등으로 알려져 있다. 이 연구에서는 휨을 받는 보를 대상으로, 각기 다른 콘크리트 강도, 피복 두께 및 주근의 비부착 길이를 갖도록 모두 20개의 시험체를 제작하여 실험하였다. 이를 통해 각 구조변수들이 시험체의 휨강성, 균열발생 및 진전 등에 미치는 영향 등을 주의 깊게 관찰하고 분석하였다.

**핵심용어** : 인장증강효과, 휨강성, 균열간격, 비부착

---