

철근 콘크리트 부재의 인장강성 효과에 관한 연구

Tension Stiffening Effect for Reinforced Concrete Members



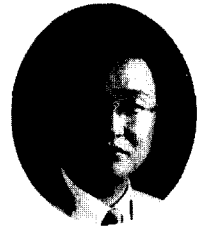
이 봉 학*

Lee, Bong-Hak



윤 경 구**

Yun, Kyong-Ku



홍 창 우***

Hong, Chang-Woo

ABSTRACT

This paper presents tension stiffening effects of reinforced concrete members obtained from experimental results on direct tension and bending. From the direct tension test program, crack patterns were investigated with tension softening behaviors of concrete. Tension stiffening effects and losses of strain energy were, also, analyzed from the load-deflection curve with the main experimental variables such as concrete strength, yielding stress and reinforcement ratio of rebar.

Tension stiffening effect of RC members increase linearly until the first crack initiate, decrease inversely with number of cracks, and then decrease rapidly when splitting cracks are happened. The tension stiffening effect is shown to be more important at the member of lower reinforcement than that of higher. Therefore, it necessitates to consider the tension stiffening effects at a nonlinear analysis. From the above analysis, a tension stiffening model of concrete is proposed and verified by applying it to bending members. From the numerical analysis by finite element approach, it is shown that the proposed model evaluates a little higher in analyzing at nonlinear region of high strength concrete, but, perform satisfactorily in general.

Keywords : tension stiffening effect, RC members, nonlinear analysis

* 정회원, 강원대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

*** 정회원, 강원대학교 산업기술연구소 연구원

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2000년 2월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

철근콘크리트 부재에서 콘크리트에 균열이 발생된 상태에서도 균열과 균열사이의 콘크리트 응력 및 부착응력이 실제로 존재함으로써 콘크리트에 의한 인장강성 효과가 발생되고 있다. 이러한 인장강성 효과는 균열이 발생되었다 할지라도 부재가 항복되는 시점까지 엄연히 존재함이 실험을 통하여 증명되었다.^{1, 2, 4)} 따라서 콘크리트에 균열이 발생함으로써 콘크리트의 인장응력이 모두 소멸된 것으로 해석하거나 처음부터 콘크리트의 인장응력이 유효하지 않은 것으로 해석했을 때는 해석결과의 차이가 상당히 크다.^{5, 6, 9)} 인장강성 효과는 균열형상, 콘크리트 강도, 콘크리트 피복 두께, 철근비, 철근의 표면형상, 골재의 크기 등 여러 가지 인자가 복합적으로 영향을 미치는 복잡한 거동을 나타낸다.^{6, 10, 11, 12)} 그러나 기존에 제안된 인장강성 모델은 콘크리트강도에 관한 영향을 포함하고 있지 않다. 따라서, 본 논문에서는 철근콘크리트 부재의 인장강성 효과에 영향을 주는 주요 요인 중 콘크리트강도에 대한 영향을 분석하였다. 그리고 철근콘크리트부재에 대한 직접 인장실험으로부터 콘크리트 강도에 따른 인장강성 모델을 제안하고, 이것이 휨부재에 미치는 영향을 검토하고자 휨부재 실험을 실시하고 유효요소법에 의한 수치해석결과와 비교분석하였다.

2. 실험

실험은 직접인장실험과 휨부재실험으로 나누어 수행하였으며, 콘크리트 설계강도는 3종류로 하였다. Table 1은 콘크리트 배합 및 압축강도 측정결과이다.

2.1 직접인장부재 실험

이 실험의 목적은 직접 단순인장을 받는 철근콘크리트 부재에서 균열과 균열 사이의 콘크리트가 인장강성에 미치는 영향을 고찰하고, 인장강성의 감소와 하중단계에 따른 균열형상과의 관계를 분석하는 것이다. 주요 실험변수로는 콘크리트의 압축강도(200, 400, 600kgf/cm²)와 철근강도(3000, 4000kgf/cm²) 및 직경(D22, D29)으로 선정하였다. 또한 균열발생에 따른 인장강성의 변화를 고찰하기 위해 시험체 형상을 균열간격에 따라 3가지 형상으로 제작하여 실험을 수행하였다. A-Type은 비균열 단면으로 제작된 시험체이며, B-Type은 균열발생이 예상되는 3곳에 미리 균열을 삽입한 부재이고, C-Type은 7곳에 균열을 삽입한 부재이다. Table 2는 실험변수별 직접 인장 시험편의 분류를 나타낸 것이며, 형상과 단면은 Fig. 1에 나타내었다.

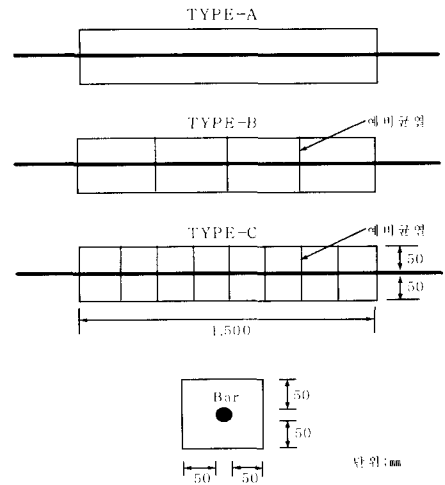


Fig. 1 Section of direct tension specimen

Table 1 Concrete mix proportion and compressive strength test results.

Design strength (kgf/cm ²)	G _{max} (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Elastic modulus (kgf/cm ²)
				W	C	SF	S	G			
200	19	56	45	180	320	-	820	1,002	215	21	202,457
400	19	35	40	175	500	-	673	1,013	371	32	294,845
600	19	25	35	170	558	62	579	1,073	605	52	340,304

주) SF : 분말형 실리카흄

Table 2 Experimental specimen series of direct tension test

Concrete strength (kgf/cm ²)	Rebar		Type	Section (b×d×ℓ) (mm)	Specimen
	Strength	Diameter			
200	SD30	D22	A	120×120×1500	L3-D22-A
			B	120×120×1500	L3-D22-B
			C	120×120×1500	L3-D22-C
	SD40	D29	A	129×129×1500	L3-D29-A
			A	122×122×1500	L4-D22-A
			A	129×129×1500	L4-D29-A
400	SD30	D22	A	122×122×1500	M3-D22-A
			B	122×122×1500	M3-D22-B
			C	122×122×1500	M3-D22-C
	SD40	D29	A	129×129×1500	M3-D29-A
			A	122×122×1500	M4-D22-A
			A	129×129×1500	M4-D29-A
600	SD30	D22	A	122×122×1500	H3-D22-A
			B	122×122×1500	H3-D22-B
			C	122×122×1500	H3-D22-C
	SD40	D29	A	129×129×1500	H3-D29-A
			A	122×122×1500	H4-D22-A
			A	129×129×1500	H4-D29-A

실험방법은 철근 인장실험과 철근콘크리트 부재의 직접인장 실험으로 수행되었다. 철근콘크리트 부재의 직접인장 실험은 만능시험기를 이용하여 실시하였으며 하중과 변위를 측정하였다. 부재 변위는 콘크리트 양단에 거치용 판을 예폭시로 부착하여 LVDT를 통해 측정하여 평균치를 이용하였다. 철근의 인장실험은 철근콘크리트 부재와 동일한 길이에 대한 LVDT를 통해 변위를 측정하였다.

2.2 휨부재 실험

휨부재의 실험을 위하여 단면이 가로25cm, 세로46cm이고 유효높이가 40cm, 단순지지 간격이 3m가 되도록 단철근 직사각형 보를 제작하였다. 휨부재 시험체의 형상 및 제원은 Fig.2와 같다. 시험체는 콘크리트의 설계강도(200,400, 600kgf/cm²)와 시험체의 형상(A, B, C)을 변수로 하고 철근비를 0.57%로 한 9개와 A-Type에 대한 철근비(1.52%, 2.57%)와 3종류의 콘크리트 강도를 변수로 6개를 제작하여 총15개의 시험체를 대상으로 실험을 수행하였다. 여기서, A-Type과 B-Type의 정의는 직접인장부재의 경우와 동일하나, C-Type의 휨부재는 휨인장을 받

는 구간에서 철근만이 인장응력을 부담하도록 유도하기 위하여 시험체 하단의 중앙부분에 철근이 노출되도록 콘크리트를 절개한 시험체이다. Fig.3은 시험체의 철근배근 측면도와 단면도를 재하형태와 함께 나타낸 것이며, 시험체에 대한 구성은 Table 2와 같다. 실험은 200톤 용량의 만능시험기로 2점가력 휨실험을 실시하여 하중과 처짐을 측정하였다.

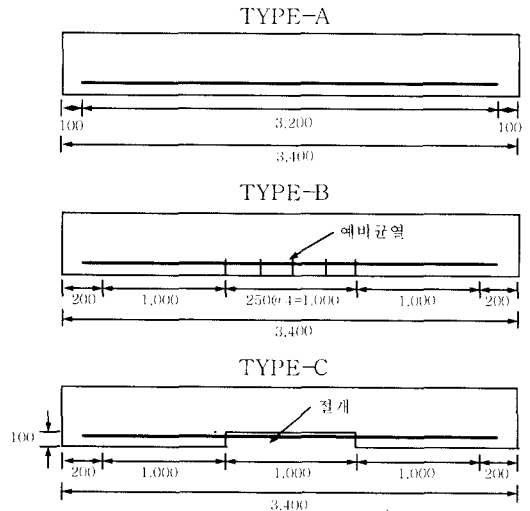


Fig. 2 Section of bending specimen (unit: mm)

Table 3 Experimental specimen series of bending test

Specimens	Rebar			ρ_b (%)	ρ / ρ_b	Shear reinforcement (mm)
	Rebar Dia.	Each	ρ (%)			
L-0.5-A	D19	2	0.57	3.227	0.1766	D10@100
L-0.5-B		2	0.57		0.1766	D10@100
L-0.5-C		2	0.57		0.1766	D10@100
L-1.5-A	D25	3	1.52		0.4710	D13@100
L-2.5-A	D29	4	2.57		0.7964	D13@100
M-0.5-A	D19	2	0.57		5.827	0.0978
M-0.5-B		2	0.57	0.0978		D10@100
M-0.5-C		2	0.57	0.0978		D10@100
M-1.5-A	D25	3	1.52	0.2609		D13@ 70
M-2.5-A	D29	4	2.57	0.4411		D13@ 70
H-0.5-A	D19	2	0.57	7.160		0.0796
H-0.5-B		2	0.57		0.0796	D10@100
H-0.5-C		2	0.57		0.0796	D10@100
H-1.5-A	D25	3	1.52		0.2123	D13@ 65
H-2.5-A	D29	4	2.57		0.3589	D13@ 59

주) L, M, H : 콘크리트 설계강도(200, 400, 600kgf/cm²)
 0.5, 1.5, 2.5 : 철근비(%), A, B, C : 시험체 형상

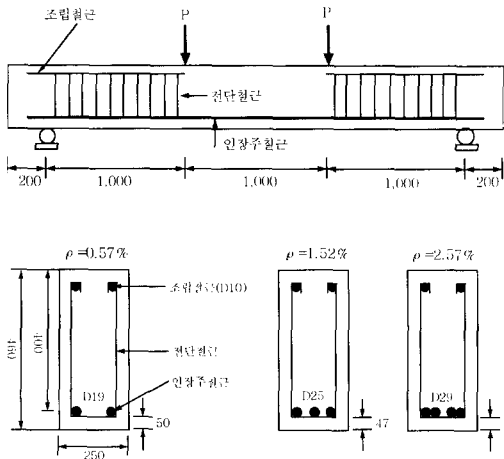


Fig. 3 Reinforcement details and loading scheme (unit : mm)

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 직접인장 실험

3.1.1 인장강성에 영향을 미치는 인자분석

Fig. 4는 철근콘크리트 인장부재의 인장강성효과를 균열간격에 따라 나타낸 것이다. 실험결과에

의하면 균열이 발생하기 전에는 탄성적인 거동을 보이거나 균열발생 후에는 하중이 점차 증가함에 따라 철근만의 거동으로 접근함을 알 수 있다. 콘크리트의 인장강성은 균열이 발생한 이후 균열 사이의 유효인장응력에 의해 발생되며 횡방향 균열수의 증가에 따라 이것이 감소하여 철근만의 거동에 접근하게 된다. 철근콘크리트 부재의 변형에너지에서 철근만의 에너지를 제외한 콘크리트만의 변형에너지는 Table 4에서와 같이 강도 200kgf/cm² 콘크리트의 경우 SD30-D22-A를 기준 했을 때 SD30-D29-A의 경우 31.2%, 동일한 철근의 직경일 때 SD40-D22-A의 경우는 16.5%, 철근의 강도와 직경이 커진 SD40-D29에서는 36.1%가 증가하였다. 즉, 철근직경(철근비)이 작을수록 콘크리트가 차지하는 상대강성비율이 크게 되어 인장강성 효과의 영향이 크게 작용된다는 것을 알 수 있다. 그리고 동일한 철근 직경일 경우 철근강도가 낮을수록 인장강성의 영향은 커지는 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트의 인장강성효과는 전체단면의 강성에 대한 콘크리트만의 상대적인 강성 비율에 크게 의존함을 알 수 있으며, 철근비가 낮은 부재일수록 비선형 해석시 콘크리트의 인장강성을 고려해야 한다. 콘크리트의 강도는 부재의 초기균열 및 항복하중에 영향을 미치며 이것은 콘크리트의 인장강도와 밀

Table 4 Strain energy of direct tension test members.

Specimens	Strain energy (ton · mm)			Strain energy ratio (C/RC)	Ratio of A-type (%)
	RC	Rebar	Concrete		
L3-D22-A	16.683	13.492	3.190	0.191	100.0
L3-D22-B	15.844	13.492	2.352	0.148	73.7
L3-D22-C	14.525	13.492	1.033	0.071	32.4
L3-D29-A	31.545	27.360	4.185	0.133	-
L4-D22-A	28.107	24.390	3.717	0.132	-
L4-D29-A	41.191	36.848	4.343	0.105	-
M3-D22-A	17.893	13.492	4.401	0.246	100.0
M3-D22-B	16.906	13.492	3.414	0.202	77.6
M3-D22-C	15.365	13.492	1.873	0.122	42.6
M3-D29-A	32.118	27.360	4.758	0.148	-
M4-D22-A	29.429	24.390	5.039	0.171	-
M4-D29-A	42.894	36.848	6.046	0.141	-
H3-D22-A	19.086	13.492	5.594	0.293	100.0
H3-D22-B	17.956	13.492	4.464	0.249	79.8
H3-D22-C	16.016	13.492	2.524	0.158	45.1
H3-D29-A	33.631	27.360	6.271	0.186	-
H4-D22-A	30.360	24.390	5.970	0.197	-
H4-D29-A	43.741	36.848	6.893	0.158	-

주) L, M, H : 콘크리트 설계강도(200kgf/cm², 400kgf/cm², 600kgf/cm²)

3, 4 : 철근의 인장강도(SD30, SD40)

A, B, C : 시험체 형상

접한 관련이 있다. SD30-D22-A부재의 철근이 항복될 때의 범위를 기준으로 한 변형에너지는 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 3.190 t·mm, 4.401 t·mm 및 5.594 t·mm로서 약 7%씩 증가를 나타냈다. 반면 SD40-D22의 부재에서는 3.717 t·mm, 5.039 t·mm 및 5.970 t·mm를 나타내어 약 4%씩 증가됨으로서 철근의 강도가 증가할수록 이에 대한 증가폭이 감소되었다. 따라서 인장강성은 콘크리트의 강도에 크게 의존함을 알 수 있으며, 콘크리트 강도가 커질수록 초기 균열하중이 증가하기 때문에 콘크리트가 부담하는 인장강성의 영향은 큰 것으로 나타났으나 균열발생 이후에는 변형에너지의 감소율은 증가하였다. 시험체의 균열간격에 따른 콘크리트 강도별 하중-변위의 관계는 Fig. 4~6과 같다. 균열간격이 375mm인 Type-B의 시험체는 하중에 의한 초기균열이 발생될 때까지 선형적인 거동을 나타내며, 그 이후의 거동은 Type-A시험체와 유사한 거동을 보였다. 그러나, 균열간격이 188mm인 Type-C 시험체는 초기하중단계부터 항복하중까지 철근만의 거동과 유사한 선형적인 거동을 나타내었는데, 이것은 유효강성이 콘크리트의 균열 발생에 크게 의존하기 때문이다. 각 시험체의 형

상에 대한 콘크리트 강도별 변형에너지의 상대값은 콘크리트의 설계강도 200kgf/cm² 콘크리트에서 A-Type을 기준 하면 B-Type은 73.7%를 나타냈으며 C-Type은 32.4%를 나타내었다. 콘크리트 강도가 증가함에 따라 B-Type이 77.6%와 79.8%, C-Type에서는 각각 42.6%와 45.1%로 나타났다. 이러한 결과들로부터 콘크리트의 인장강성은 철근의 강도 및 비율, 콘크리트의 강도와 균열간격에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

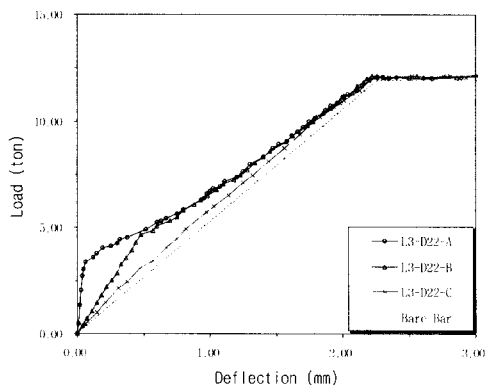


Fig. 4 Tension stiffening effect of low strength concrete

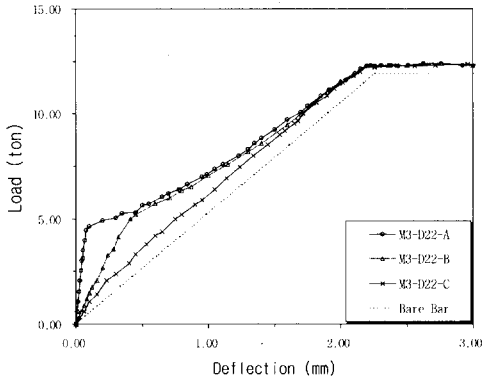


Fig. 5 Tension stiffening effect of medium strength concrete

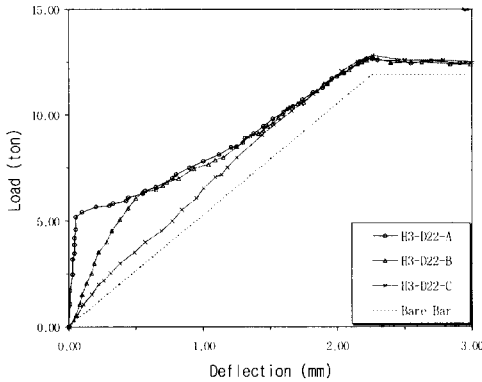


Fig. 6 Tension stiffening effect of high strength concrete

3.1.2 균열 콘크리트의 인장강성 모델

균열발생 이후 콘크리트의 인장강성효과를 응력-변형률 비의 관계로 콘크리트 강도에 따라 Fig. 7~9에 나타내었다. 여기서 종축은 초기 균열 발생응력에 대한 상대 비율이고, 횡축은 초기 균열 발생변형률로 감소한 변형률로 표시하였다. 콘크리트 강도별 실험치를 나타냈으며 이를 회귀 분석하여 표시하였다. 이때 R^2 가 각각 0.9713, 0.9570, 0.9624로 실험치와 회귀분석이 상당히 연관성을 유지하고 있음을 알 수 있다. 회귀분석에 의해 제안된 콘크리트 인장강성모델은 다음 식(1)~(3)과 같다.

$$Y = -6 \times 10^7 X^3 + 478,313X^2 - 1,188.4X + 1 \quad (1)$$

for (200kgf/cm²)

$$Y = -4 \times 10^7 X^3 + 350,508X^2 - 996.72X + 1 \quad (2)$$

for (400kgf/cm²)

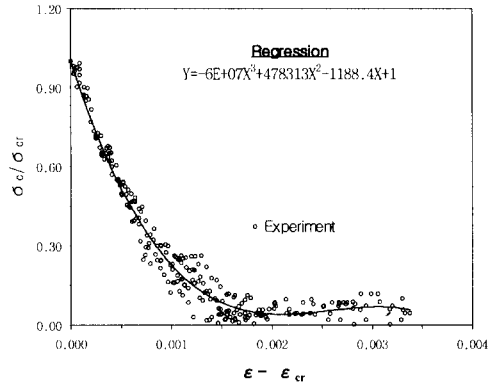


Fig. 7 Tension stiffening model of low strength concrete (200kgf/cm²)

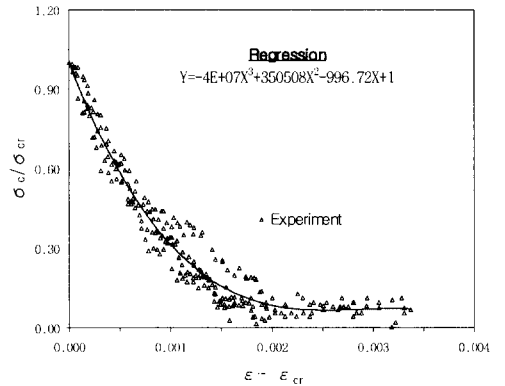


Fig. 8 Tension stiffening model of medium strength concrete (400kgf/cm²)

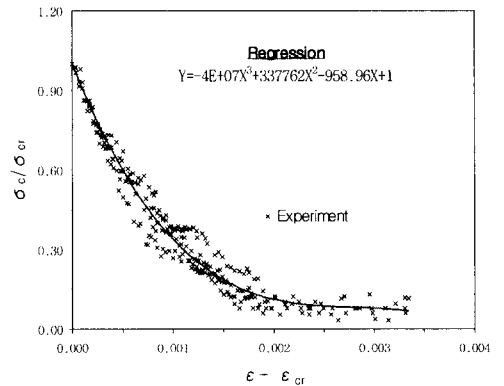


Fig. 9 Tension stiffening model of high strength concrete (600kgf/cm²)

$$Y = -4 \times 10^7 X^3 + 337,762X^2 - 958.96X + 1 \quad (3)$$

for (600kgf/cm²)

3.2 휨실험

Fig. 10은 저강도 콘크리트이고 인장철근비가 0.57% 일 때 시험체의 형상에 따른 인장강성효과를 나타낸 것이다. Type-A에서 최초의 균열이 발생하기 전까지는 선탄성 거동을 보이다가 균열이 발생한 이후부터는 하중의 증가함에 따라 처짐의 증가와 더불어 균열이 계속적으로 발생하고 부재가 항복된 이후에는 연성 파괴의 거동을 보였다. Type-B 시험체는 초기균열 발생하중이 작을 뿐만 아니라 항복시의 하중도 작게 나타나며, Type-C 시험체에서는 처음부터 항복 시까지 철근만의 선형 거동을 보였다. 각 시험체에 따라 하중-처짐의 관계로부터 계산된 변형에너지의 값은 Type-C를 100%로 기준 했을 때 강도별 평균값이 Type-B에서는 19%, Type-A에서는 35% 정도 증가하였다. 이것은 인장측의 콘크리트를 고려할 때 항복시 까지 대략 35%의 강성차이를 나타내는 것이다. Fig. 11은 철근비 2.57%인 Type-A 시험편의 인장강성효과를 콘크리트의 강도에 따라 나타낸 것이다. 콘크리트의 강도가 200kgf/cm²인 경우에는 항복시 까지 2차 포물선 형태의 하중-처짐 곡선을 나타내며 처짐이 약22mm에서 압축파괴가 시작되었다. 콘크리트의 강도가 400 kgf/cm²인 시험체의 거동을 살펴보면 콘크리트 강도가 증가함에 따른 거동은 초기균열하중 이후 강성이 다소 증가하였으며 부재의 항복강도도 증가하는 것으로 나타나 콘크리트의 강도가 인장강성 효과에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Fig. 12는 저강도 콘크리트 Type-A 시험편의 인장강성효과를 철근비에 따라 나타낸 것이다. 철근비가 0.57%에서는 시험체의 Type에 따라 인장강성효과의 구분이 명확히 나타남을 볼 수 있었다. 철근콘크리트 부재에서 인장측의 콘크리트를 무시한 해석과 고려한 해석의 차이는 해석의 결과에 미치는 영향이 클 것으로 판단된다. 철근비가 1.52%에서는 하중-처짐 곡선의 기울기를 초기에서 항복시 까지 철근만의 거동으로 가정하여 선형적으로 증가한다고 표현할 때 인장강성효과는 철근비가 0.57%인 경우에 비하여 현저히 작게 나타났다. 철근비가 2.57%에서는 인장강성효과는 콘크리트의 강도가 600kgf/cm²

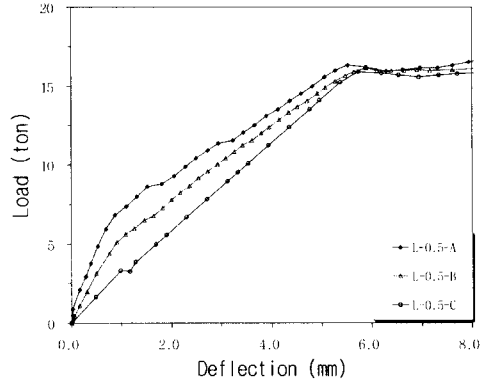


Fig. 10 Effect of pre-cracking into tension stiffening at beam

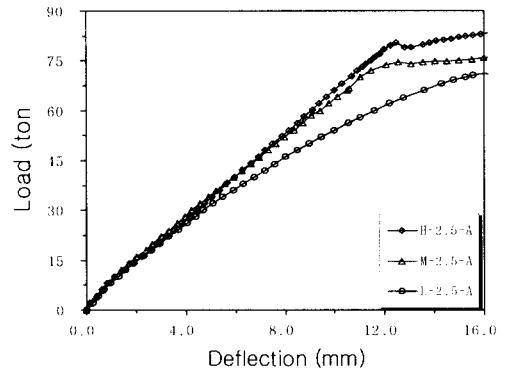


Fig. 11 Effect of concrete strength into tension stiffening at beam

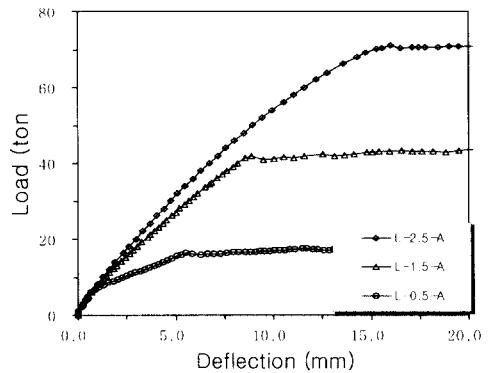


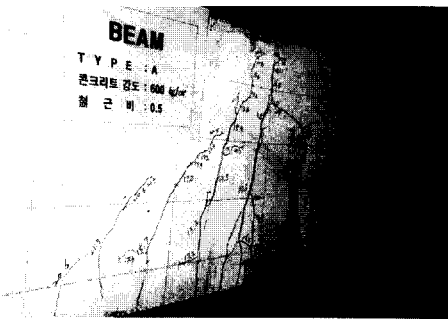
Fig. 12 Effect of reinforcement into tension stiffening at beam

일 때는 거의 영향이 없는 것으로 나타났고 콘크리트의 강도가 낮을 때에 영향이 있을 것으로 판단되었다.

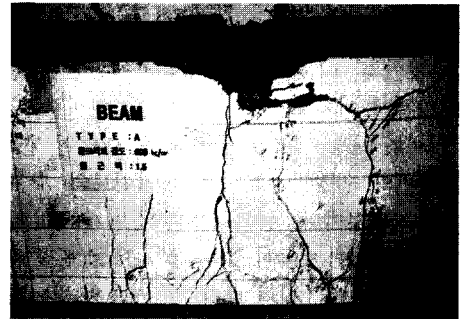
시험체의 초기균열 발생하중과 항복 및 극한

Table 5 Initial cracking load and strain energy for beam

Specimens	Initial cracking load (ton)	Yielding load (ton)	Ultimate load (ton)	Strain energy (ton·mm)
L-0.5-A	7.366	16.533	22.400	63.747
L-0.5-B	5.599	16.133	22.766	57.348
L-0.5-C	3.300	15.900	18.600	47.322
L-1.5-A	11.400	41.866	45.533	213.693
L-2.5-A	16.366	71.066	71.066	466.743
M-0.5-A	8.099	17.200	23.800	68.575
M-0.5-B	6.533	16.800	24.400	59.631
M-0.5-C	4.866	16.600	20.366	51.031
M-1.5-A	11.600	44.166	48.966	214.067
M-2.5-A	16.566	74.499	74.499	518.004
H-0.5-A	8.599	18.200	23.933	71.967
H-0.5-B	6.600	17.600	23.066	62.103
H-0.5-C	6.299	16.800	19.733	52.785
H-1.5-A	12.266	46.599	48.900	220.933
H-2.5-A	17.033	80.366	83.266	520.479



(a) $\rho = 0.57\%$



(b) $\rho = 1.52\%$

Fig. 13 Crack pattern of beam with different reinforcement

하중을 Table 5에 나타내었으며, Fig. 13은 A-Type 시험체의 철근비 0.57%, 1.52%인 경우의 균열형상을 나타낸 것이다. 콘크리트의 강도에 따라 C-Type의 시험체에 대한 변형에너지로서 비교하면 B-Type에서는 19%, A-Type에서는 35% 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 인장영역의 콘크리트에 의한 영향으로 대략 35%의 강성이 증가된다는 것을 의미한다. 또한 콘크리트의 인장강성 효과는 철근비가 낮은 경우에 이에 대한 영향이 더욱 더 증대되는 것을 알 수 있다.

3.3 휨실험과 유한요소해석 결과의 비교

철근콘크리트 휨부재를 실험한 결과와 유한요소법으로 콘크리트의 인장강성을 고려하여 비선

형 해석한 결과를 비교 분석하였다. 수치해석은 콘크리트의 균열발생 이후의 거동을 해석하기 위하여 인장강성 모델을 적용할 수 있으며 비선형 유한요소해석 기능이 뛰어난 ABAQUS를 이용하였다. 기본적인 모델의 성상은 2차원의 평면모형을 사용하였으며, Fig. 14는 재하된 하중의 위치와 경계조건 및 요소분할을 나타낸 것으로서 실

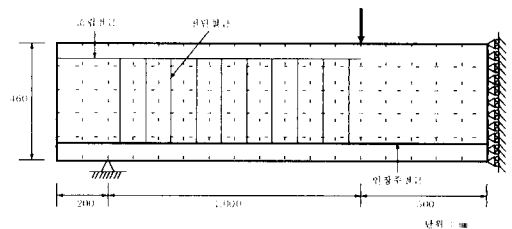


Fig. 14 2-D Finite element model of beam specimen.

재부재의 1/2만 고려하여 모델링하였다. 사용된 콘크리트의 요소는 8절점 solid 평면응력요소를 사용하였으며, 철근은 콘크리트 속의 보강재를 모델링하기 위해 ABAQUS³⁾ 내의 Rebar option 을 사용하여 모델링을 하였다. 입력된 콘크리트 재료특성은 콘크리트의 실제 응력-변형율의 관계로부터 탄성범위와 경화현상을 고려하였으며, 인장강성모델을 이용하여 연화현상을 고려하였다. 이때 사용한 인장강성모델은 콘크리트 강도에 따라 본 연구에서 제안한 식(1), 식(2), 식(3)을 적용하였다. 철근의 재료특성은 탄성범위 이후 일정한 비율로 증가하는 bi-linear형태로 가정하는 탄소성(elastic rigid plastic)모델을 사용하였다.

Fig. 15~17은 콘크리트강도별로 철근비가 0.57%와 1.52%인 경우의 실험결과와 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 철근비가 0.57%인 경우 저강도 콘크리트에서는 실험결과와 해석결과가 선형구간 및 비선형 구간에서 거의 일치하는 것으로 나타났다. 해석결과가 선형 구간에서는 거의 일치하나 콘크리트의 강도가 증가할수록 비선형 구간에서는 다소 높게 평가하고 있으나, 실험결과에 잘 부합하는 것을 알 수 있다. 철근비가 1.52%인 경우 콘크리트의 강도증가에 따른 실험결과와 해석결과는 저강도 콘크리트 시험체의 해석결과는 선형 및 비선형 구간에서 비교적 일치하며, 부재의 항복강도도 일치하는 것으로 나타났다. 그러나, 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 선형 구간 및 비선형 구간에서 해석결과가 실험결과에 비해 다소 높게 평가되었으며, 부재의 항복강도는 다소 높게 나타났다.

이와 같은 해석의 결과를 종합하여 볼 때 본 연구에서 제안한 인장강성모델을 사용한 철근콘크리트 휨부재의 비선형해석은 실험결과와 대체적으로 부합하여 제안된 모델의 타당성을 입증할 수 있었으며 정확한 비선형 해석을 위해서는 콘크리트의 강도특성을 고려한 인장강성을 반드시 고려해야 함을 입증하였다. 또한, 철근콘크리트를 비선형 해석하기 위해서는 철근과 콘크리트 각각의 비선형적인 거동만을 이용하는 것은 불충분하고 콘크리트 균열과 균열 사이의 유효콘크리트에 의한 인장강성거동을 고려해야 함을 알 수 있다.

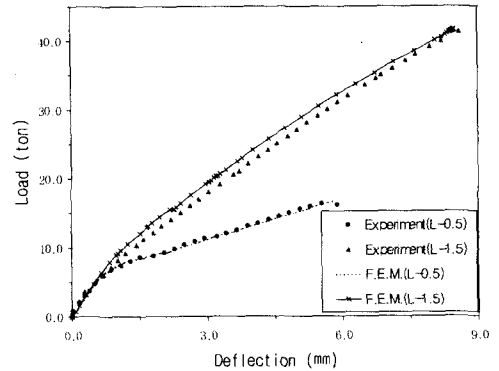


Fig. 15 Comparison of experimental and analysis results of low strength concrete

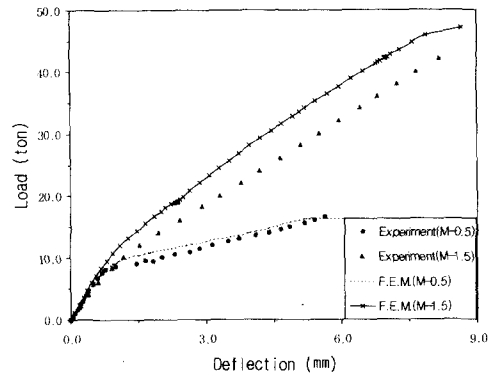


Fig. 16 Comparison of experimental and analysis results of medium strength concrete

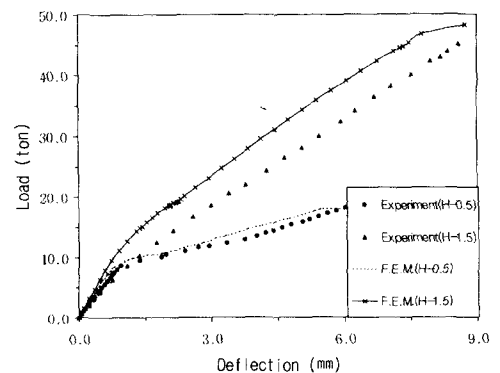


Fig. 17 Comparison of experimental and analysis results of high strength concrete

4. 결 론

본 연구에서는 철근콘크리트 부재의 인장강성 효과를 분석하기 위하여 콘크리트의 강도 및 철근의 종류와 직경을 주요변수로 직접인장실험을 수행하여 인장강성에 미치는 인자를 분석하고 제안식을 도출하였다. 또한, 휨부재에 대한 콘크리트 강도, 철근비, 시험체 형상에 따른 인장강성 효과에 대하여 실험을 통하여 검토하고, 제안된 모델을 적용하여 비선형 유한요소해석한 결과와 비교 분석한 결과 다음과 같다.

1. 인장을 받는 철근콘크리트 부재는 균열이 발생한 이후에도 철근과 콘크리트의 부착력 등의 영향에 기인한 콘크리트의 인장강성 효과를 실험을 통하여 확인하였다.
2. 기존에 제안된 인장강성 모델은 보통강도 콘크리트에 관한 것이 대부분이므로, 콘크리트 강도에 대한 영향을 고려한 모델을 실험적으로 제안하였다.
3. 철근콘크리트 부재에서 철근비가 낮을수록 콘크리트가 차지하는 상대강성 비율이 크게되어 콘크리트의 인장강성 영향은 증가하였으며, 동일한 철근직경일 경우 철근강도가 낮을수록 인장강성의 영향은 커지는 것으로 나타났다.
4. 콘크리트의 인장강성효과는 전체단면의 강성에 대한 콘크리트만의 상대적인 강성 비율에 크게 의존함을 알 수 있으며, 철근비가 낮은 부재일수록 비선형 해석시 콘크리트의 인장강성을 고려해야 한다.
5. 콘크리트 강도가 커질수록 초기 균열하중이 증가하기 때문에 콘크리트가 부담하는 인장강성의 영향은 큰 것으로 나타났으나 균열발생 이후에는 변형에너지의 감소율은 증가하는 것으로 나타났다.
6. 제안된 콘크리트의 인장강성모델을 적용한 비선형 유한요소해석을 수행하여 하중-처짐 관계를 실험결과와 비교한 결과 콘크리트 강도와 철근비가 증가함에 따라 비선형 구간에서는 해석치의 하중이 다소 높게 평가되고 있으나 전반적으로 잘 일치하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교 부설 "석재 복합 신소재 제품연구센터"지원에 의하여 이루어진 것입니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이봉학, 홍창우, 장동일, "철근콘크리트 인장부재의 파괴거동과 인장강성", 대한토목학회 논문집, 제18권 4호, pp.483~494, 1998. 7.
2. 홍창우, 이봉학, 윤경구, 박세선, "철근콘크리트 인장부재의 인장강성 및 파괴거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회, 제10권 1호, pp.737~742, 1998. 5.
3. "ABAQUS, Finite Element Computer Program, Version 5.7, Hibbitt, Karissson and Dorensen, Inc., 1997.
4. Abrishami, H. H., and Mitchell, D., "Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening", ACI Structural Journal, pp.703~710, 1996.
5. ACI Committee 224, "Cracking of Concrete Members in Direct Tension", 224. 2R-92, ACI Manual of Concrete Practice, Part 3, Use of Concrete in Buildings-Design, Specifications, and Related Topics, ACI Publication., 1996.
6. Ahn, T. S., "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membranes", Ph. D. Thesis, Missouri-Columbia University, 1995.
7. Belarbi, A. and Hsu, T. T. C., "Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete". ACI Structural Journal, Vol. 91, No.4, pp.465~474, July, 1994.
8. Chan, H. C., Cheung, Y. K., and Huang, Y. P., "Crack Analysis of Reinforced Concrete Tension Members", Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 8, August, 1992.
9. Gupta, A.K., and Maestrini, S.R., "Tension-Stiffness Model for Reinforced Concrete Bars", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No., pp.769~790, 1990.
10. Massicotte, B., Elwi, A. E., and MacGregor, J. G., "Tension Stiffening Model for Planar Reinforced Concrete Members", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 11, pp.3039~3058, Nov., 1990.

11. Russo, G., and Romano, F., "Cracking Response of RC Members Subjected to Uniaxial Tension", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, pp.1172~1190, 1992.

12. Wu, Z., Yoshikawa, H., and Tanabe, T., "Tension Stiffness Model for Cracked Reinforced Concrete", J. of Struc. Eng., Vol. 117, No. 3, pp.715~732, March, 1991.

요 약

이 논문에서는 철근 콘크리트 직접인장부재와 휨부재를 실험하여 철근 콘크리트 부재의 인장강성의 효과 및 영향을 분석하고 고찰하였다. 직접 인장부재의 실험에서는 콘크리트의 연화기동시 하중 단계에 따른 균열형상과 하중과의 관계를 고찰하고 하중-변위관계로부터 콘크리트의 강도, 철근 종류 및 철근비가 인장강성 효과와 변형에너지 손실에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 철근 콘크리트 인장부재에서 초기 균열이 발생될 때까지는 인장강성이 선형적으로 증가하나 균열발생 후에는 균열과 균열사이의 콘크리트 유효인장응역이 유지될때까지 균열발생과 비례적으로 인장강성이 감소되며 할렬균열이 발생되면서 인장강성은 급격히 저하되는 것으로 나타났다. 철근 콘크리트 인장부재에서 철근비가 낮을수록 콘크리트의 인장강성은 더욱 중요한 영향을 끼치고 있음을 확인한 바, 철근비가 낮은 부재의 비선형 해석시에는 콘크리트의 인장강성 효과를 고려할 필요가 있다고 판단된다. 이러한 결과를 바탕으로 철근콘크리트 부재나 PS콘크리트 부재의 유한요소법을 이용한 비선형 해석시 이용되는 콘크리트의 인장강성 모델을 제시하였으며, 이를 휨부재에 적용하여 검증하였다. 유한요소해석을 수행하여 하중-변위 관계를 비교한 결과, 콘크리트 강도가 높을수록 비선형 구간에서 수치해석치가 다소 높게 평가되고 있는 점을 제외하고는 전반적으로 잘 일치되고 있다.

(접수일자 : 1999. 3. 9)