

섬유보강 콘크리트와 보통콘크리트로 합성된 이중 콘크리트 보의 휨 강도

Flexural Strength of Dual Concrete Beams Composed of Fiber Reinforced Concrete and Normal Concrete

박 대 효^{*} 부 준 성^{**} 조 백 순^{***}
Park, Tae Hyo Bu, Jun Seong Cho, Baik Soon

ABSTRACT

The reinforced concrete(RC) beam is developed cracks because the compression strength of concrete is strong but the tensile strength is weak. The structural strength and stiffness is decreased by reduction of tension resistance capacity of concrete due to the developed cracks. Using the fiber reinforced concrete that is increased the flexural strength and tensile strength at tensile part can enhance the strength and stiffness of concrete structure and decrease the tensile flexural cracks and deflection. Therefore, The reinforced concrete used the fiber reinforced concrete at tensile part ensure the safety and serviceability of the concrete structures. In this study, analytical model of a dual concrete beam that is composed of the normal strength concrete at compression part and the high tensile strength concrete at tensile part is developed by using the equilibrium condition of forces and compatibility condition of strains and is parted into elastic analytical model and ultimate analytical model. Three group of test beam that is formed of one reinforced concrete beam and two dual concrete beams for each steel reinforcement ratio is tested to examine the flexural behavior of dual concrete beams. The comparative study of total nine test beams is shown that the ultimate load of a dual concrete beams relative to the reinforced concrete beams have an increase in approximately 30%. In addition, the initial flexural rigidity, as used here, refer to the slope of load-deflection curves in elastic state is increased and the deflection is decreased.

1. 서론

콘크리트의 압축강도에 비해 낮은 인장강도로 인하여 발생하는 콘크리트의 균열은 구조물의 강성을 저하시켜 과도한 처짐을 발생시킨다. 이로 인해 구조적 일체성이 훼손되어 구조물의 기능을 심각하게 저하시킨다. 최근 들어 고강도 콘크리트와 고기능성 시멘트기저 재료는 놀라운 발전을 거듭해오고 있다. 시멘트기저 재료의 강도는 공극 다공성에 크게 영향을 받으므로 이를 줄이기 위한 방법으로 Macro-Defect-Free(MDF) 시멘트와 고밀도입자(Densified with Small Particles)를 사용한 고기능성 시멘트 기저재료가 연구되고 있다(Jenning(1992), Park(1998)). 보통 콘크리트 압축강도의 약 10분의 1에 불과한 인장 및 휨강도를 증가시키고 콘크리트의 균열을 억제하기 위하여 유리섬유, 탄소섬유, 강섬유 등을 콘크리트 또는 시멘트 모르타르에 보강함으로써 인장 및 휨강도를 압축강도의 3분의 1까지 증가시킬 수 있다(Lin, 1992). 그러나 이러한 고강도 콘크리트 및 고기능성 시멘트기저 재료의 사용은 경제성 및 시공성의 문제로 그 활용 범위가 제한적이다.

Brandt and Glinicki(1992)는 섬유보강 콘크리트를 사용한 콘크리트 보의 휨시험을 통해 휨강성과 극한강도의 증가를 확인

* 정회원, 한양대학교 토목공학과 조교수
** 정회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정
*** 정회원, 인제대학교 토목공학과 조교수

하였으며, 극한강도의 경우 휨강성의 증가에 비해 큰 증가는 없었다. Bayasi(1992)는 탄소섬유를 보강한 시멘트 모르타르를 강상판 위에 약 3cm 두께로 타설한 후 다시 보통 콘크리트를 약 8cm 타설한 합성 콘크리트 슬래브를 실험적으로 연구하여 탄소섬유의 보강이 균열을 억제시키는 효과가 있음을 입증하였다. Dwaranath and Nagaraj(1992)는 단철근 콘크리트보의 전체단면과 단면의 하단에서 1/2의 높이까지 강섬유를 함유한 두 경우에 대해서 휨성능을 비교하기 위한 실험을 실시하였다. 섬유보강 철근 콘크리트보는 보통 철근 콘크리트보에 비해 균열하중과 극한하중이 증가되었으며, 균열의 발생이 억제되고 처짐이 감소하였다. 그리고 강섬유를 1/2높이까지 강섬유를 함유한 단면의 균열하중, 최대하중, 휨강성은 전단면의 강섬유보강 철근콘크리트보에 비해 큰 차이 없이 유사한 결과를 보였다. 이는 전단면이 아닌 인장영역부분에만 강섬유를 포함하는 철근 콘크리트보 역시 휨 성능을 향상시키는데 효과적으로 활용될 수 있음을 보여주는 결과이다.

본 연구에서는 콘크리트 약한 인장강도에 의해 발생하는 철근 콘크리트보(Reinforced Concrete Beam)의 휨균열을 제어하고 강도 및 강성을 향상시키기 위해 인장영역의 섬유보강 고인장강도 콘크리트와 압축영역의 보통강도 콘크리트의 합성으로 이루어진 이중 콘크리트보(Dual Concrete Beam)의 휨 거동에 대해 연구한다.

2. 이중 콘크리트 보의 휨 해석

인장철근의 항복후 압축부 콘크리트의 변형률이 극한변형률에 도달하면 철근 콘크리트 보의 인장파괴로 보지만, 이중 콘크리트 보의 경우는 인장영역의 고인장강도 콘크리트에서 발생한 휨균열의 진전이 인장철근에 의해 억제된 상태에서 지속적인 하중의 증가에 의해 인장철근이 항복하면 이중 콘크리트보가 파괴되는 것으로 가정한다. 인장철근의 항복후 인장영역 휨균열이 확산되어 콘크리트는 인장력을 상실하게 되므로, 단지 항복상태의 인장철근과 압축파괴상태의 보통강도 콘크리트만이 증가된 하중에 저항하게 된다.

인장균열 발생이전의 상태에서는 모든 구성재료들은 탄성거동을 하며, 단면의 압축 및 인장응력의 분포는 선형을 유지한다. 하중의 증가로 인장영역의 고인장강도 콘크리트의 인장응력이 휨인장강도에 도달하면 인장균열이 발생되어 중립축 방향으로 진행된다. 고인장강도 콘크리트에서 발생한 균열은 인장철근에 의해 확산이 억제된다. 인장철근이 항복하면 고인장강도 콘크리트에서의 균열이 다시 진행되어 콘크리트는 인장에 대한 저항성을 완전히 상실하게 된다. 이 시점에서 콘크리트의 압축균열이 발생되어 이중 콘크리트보는 파괴에 이르게 된다. 이중 콘크리트 보의 휨 거동 해석에 있어 다음의 가정이 적용된다.

- 1) 콘크리트 휨 균열 발생시점의 인장응력은 고인장강도콘크리트의 휨인장강도와 같다.
- 2) 인장부의 고인장강도 콘크리트는 파괴계수에 도달하기 전까지는 선형거동을 한다.
- 3) 철근이 항복할 때 철근 하단의 고인장강도 콘크리트는 균열로 인해 인장에 저항하지 못하지만 인장철근 상단의 콘크리트는 인장에 저항한다고 가정한다.
- 4) 철근이 항복할 때 철근부위의 콘크리트의 인장응력이 파괴계수에 도달한다고 가정한다.
- 5) 압축부 보통강도 콘크리트는 고인장강도 콘크리트의 인장응력이 파괴계수에 도달하기 전에는 선형 거동을 하고, 파괴계수를 초과하면 비선형 거동을 한다.
- 6) 보통강도와 고인장강도 콘크리트 및 철근은 완전부착되어 일체화 거동을 한다고 가정한다.

위의 가정을 바탕으로 하여 인장철근이 항복한 후의 극한상태에 대해서 이중 콘크리트보를 해석한다.

콘크리트 최하단부의 휨인장응력이 파괴계수에 도달하면 균열이 발생하여 인장철근 방향으로 진전되다가 인장철근에 의해 균열의 진행이 억제된다. 지속적인 하중의 증가로 철근이 항복되고 철근주위의 콘크리트 인장응력이 파괴계수에 도달될 때 압축부의 콘크리트의 거동은 비선형 거동을 나타내므로 그림1(a)와 (b)와 같이 변형률 분포도와 응력 분포도를 나타낼 수 있다. 그리고 압축부의 비선형 응력분포를 직사각형 응력분포로 가정하면 보통강도 콘크리트의 압축력 C_c 은 아래와 같다.

$$C_c = 0.85f'_c b a \quad (1)$$

여기서 f'_c 은 보통강도 콘크리트의 압축강도, b 는 단면의 폭, a 는 등가 직사각형 응력분포의 깊이이다. 인장철근이 항복된 경우의 철근의 인장력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_s = A_s f_y \quad (2)$$

여기서 A_s 는 인장철근의 단면적, f_y 는 철근의 항복강도이다. 또한 콘크리트의 인장응력 분포 역시 압축응력 분포와 같이 직사각형으로 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{ch} = \alpha_5 f_r [b(h_h - d') - A_s] \quad (3)$$

여기서 α_5 는 고인장강도 콘크리트의 파괴계수에 적용되는 상수를 나타낸다. 철근의 인장력과 고인장강도 콘크리트의 인장력의 합력을 인장합력 T_R 로 나타내면 다음과 같다.

$$T_R = A_s f_y + \alpha_5 f_r [b(h_h - d') - A_s] \quad (4)$$

콘크리트의 압축력과 인장합력의 평형조건에 의해 아래의 식이 성립되며,

$$C_c = T_R \quad (5)$$

식(1)과 (4)을 식(5)에 대입하여 정리하면 직사각형 압축응력 깊이 a 를 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$a = \frac{A_s f_y + \alpha_5 f_r [b(h_h - d') - A_s]}{0.85 f_c' b} \quad (6)$$

극한상태에서의 단면의 저항모멘트 M_u 는 인장합력과 콘크리트의 압축력의 우력에 의해 그림1(c)로부터 아래와 같다.

$$M_u = T_R j d = C_c j d \quad (7)$$

여기서 $j d$ 는 콘크리트의 압축력과 인장합력 사이의 거리이며, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$j d = H - 0.5 a - d'' \quad (8)$$

여기서 d'' 은 단면의 하단에서 인장합력 작용점까지의 거리이며 단면의 모멘트 평형관계에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d'' = \frac{T_s}{T_R} d' + \frac{T_{ch}}{T_R} \left[d' + \frac{(h_h - d')}{2} \right] \quad (9)$$

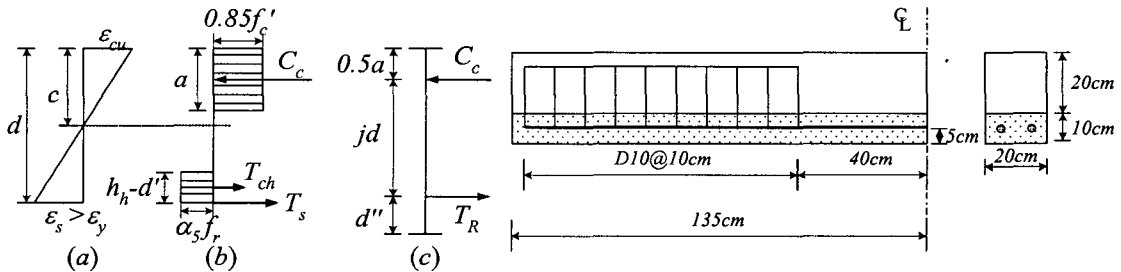


그림 1 이중 콘크리트:(a)변형률 (b)응력 (c)힘

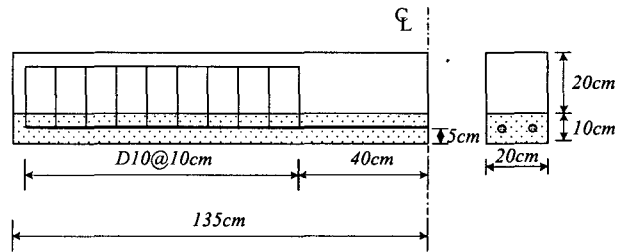


그림 2 Dimensions and section of test beam

3. 실험

3.2 시험체 제작 및 실험 방법

콘크리트의 압축강도, 휨인장강도, 할렬인장강도와 같은 재료 특성을 파악하기 위하여 콘크리트 공시체를 제작하여 시험하였으며, 시험 결과를 표1에 나타내었다. 콘크리트의 압축실험은 지름 10cm, 높이 20cm의 공시체 6개를 제작하였으며, 실험결과 평균 보통강도 콘크리트와 고인장강도 콘크리트의 압축강도는 각각 23.5 MPa, 70.3 MPa이다. 고인장강도 콘크리트의 휨인장강도를 측정하기 위하여 ASTM C78과 ASTM C1018 규정을 준수하여 3등분점 재하시험을 실시하였다. 실험결과 시편 6개의 평균 휨 인장강도(파괴계수)는 12.4 MPa이다. 할렬인장실험은 간접적으로 고인장강도 콘크리트의 인장강도를 측정하기 위한 실험으로 ASTM C496의 규정을 준수하여 실험하였다. 시편 6개의 평균 할렬인장강도는 11.8 MPa이다. 콘크리트의 탄성계수는 ACI Code에서 규정한 아래의 식을 이용하였다.

$$E_c = 0.043 w_c^{1.5} \sqrt{f_c'} \quad (10a)$$

$$E_c = (3320\sqrt{f_c'} + 6895) \left(\frac{w_c}{2320} \right)^{1.5} \quad (10b)$$

여기서 w_c 는 콘크리트 단위중량이다. 압축강도가 42 MPa이내일 경우는 식(10a), 83 MPa이내일 경우는 식(10b)를 사용한다. 실험에 사용된 보통강도 콘크리트(Normal Strength Concrete)와 고인장강도 콘크리트(High Tensile Strength Concrete)의 단위중량은 각각 2,244.5 kg/m³와 2,489.2 kg/m³이며, 계산된 탄성계수는 각각 22,166 MPa, 38,600 MPa이다.

콘크리트 보시험체는 길이 270cm, 폭 20cm, 높이 30cm인 직사각형으로 인장철근은 보의 하단에서 5cm 떨어진 곳에 배치하였다. 이중 콘크리트보의 성능을 평가하기 위해 항복강도 343 MPa의 철근에 대해 3가지 인장철근비를 선택하였다.

- ① 0.50 ρ_{max} 의 철근비 : 철근 D19 2본 ($A_s=573.0 \text{ mm}^2$)
- ② ρ_{min} 의 철근비 : 철근 D13 2본 ($A_s=253.4 \text{ mm}^2$)
- ③ ①과 ②의 중간값 : 철근 D16 2본($A_s=397.2 \text{ mm}^2$)

각각의 철근비에 대하여 압축강도 23.5 MPa인 철근콘크리트보 1개와 보의 하단에 두께 10cm의 고인장강도 콘크리트를 타설한 동일한 물성치 및 치수의 이중 콘크리트보 2개, 합계 9개의 시험보를 제작하였다. 전단파괴를 방지하기 위하여, 전단보강철근은 철근D10을 10cm간격으로 중앙부의 순수 휨구간을 제외한 구간에서 수직방향으로 배근하였다. 전단철근의 위치를 확보하기 위하여 보의 상부에 길이 방향으로 전단철근 위치까지 상부철근을 설치하였으며, 시험보의 형상 및 치수는 그림2에 있다.

MTS 액츄에이터(actuator)를 사용하여 휨 실험을 실시하였다. 시험보의 양쪽 단부에서 각각 10cm 떨어진 곳에 강재로올러를 설치하여 시험보를 지지하였으며, 순수 지지점간의 거리는 250cm이다. 강재로올러는 수직방향 변위와 회전에 대한 구속이 없도록 제작되었고, 하중가력점은 시험보의 중심에서 각각 40cm씩 떨어진 곳에 위치시켰다. 따라서, 지지점에서 가력점까지 거리는 85cm이며 두 가력점 사이의 80cm 구간은 순수 휨 구간이 되도록 설치하였다. 가력중심은 추를 이용하여 유지하였고, 수평기로 시험체의 수평을 유지하여 시험보에 편심이 발생하지 않도록 하였다. 특별히 제작된 강제가력보를 액츄에이터에 볼트와 너트를 연결하여 하중을 가력하였다. 하중을 균등하게 분포시키기 위하여 강제가력점과 시험보 사이에 고무판을 사용하였다. 액츄에이터를 변위 제어방식으로 1.0mm/min의 속도로 가력하였다. 작용하중은 액츄에이터에 부착된 하중계에 의해 측정되었으며, 작용하중에 대한 처짐을 측정하기 위해 보의 중앙부에 변위계(LVDT)를 설치하였다.

표 1 콘크리트의 역학적 성질

Property	Compression Strength	Flexural Tension Strength	Split Tension Strength	Modulus of Elasticity
NS Concrete	23.5 MPa	3.04 MPa	2.86 MPa	22.2 GPa
HTS Concrete	70.3 MPa	12.4 MPa	11.8 MPa	38.6 GPa

3.2 실험결과

보통강도 콘크리트와 고인장강도 콘크리트를 합성한 이 중 콘크리트보의 하중-처짐 곡선을 각각의 철근비에 대하여 Fig.9에 나타내었다. 철근 콘크리트보는 항복이전에는 탄성거동을 하며, 항복 후 보의 중앙부 처짐이 20mm에 도달할 때까지 하중의 변화가 미세한 것으로 나타났다. 이중 콘크리트보는 항복 이전 구간에서는 철근 콘크리트보와 마찬가지로 탄성 거동을 하지만, 항복 후에는 처짐의 증가에 대한 하중은 지속적으로 감소하는 것으로 나타나 항복하중이 이중 콘크리트보의 최대하중임을 알 수 있다. 그 이유는 인장철근의 항복 후에는 하중저항 능력이 급속도로 감소하기 때문이다.

표2에 실험결과에 의한 항복하중, 최대하중 및 초기휨강성을 나타내었다. 그림3에 나타난 바와 같이 D13, D16, D19의 철근비에 대한 이중 콘크리트보의 항복하중과 최대하중은 거의 일치하는 것으로 나타났다. 구조물의 최대하중 증가는 구조물의 안전성을 높여주는 중요한 인자이다. 이중 콘크리트보의 철근 콘크리트보에 대한 최대하중 증가량은 철근비가 클수록 높게 나타나며, 최대하중 증가율은 각각의 사용 철근비에 크게 관계없이 약 30% 정도의 증가를 보여 우수한 최대하중 증진 효과를 나타내었다. 초기 휨강성은 하중-처짐곡선의 초기 기울기를 나타내며, 휨강성의 증가는 같은 크기의 외력에 대한 구조물의 변형감소를 의미한다. 사용 철근비에 따라 18%에서 48%까지 초기 휨강성의 증가를 보여 우수한 휨강성 증진 효과를 나타내었다.

표 2 실험결과

Beam	Flexural Rigidity [kN/mm]	Yield Load [kN]	Max. Load [kN]
D13 RC	17.13	42.08	62.84
D13 DC I	24.03	59.35	66.46
D13 DC II	26.46	69.16	69.66
D16 RC	20.35	60.33	70.37
D16 DC I	32.81	87.11	87.11
D16 DC II	32.11	87.31	89.81
D19 RC	17.79	88.78	91.76
D19 DC I	24.74	116.74	116.79
D19 DC II	29.95	115.76	117.55

표 3 실험결과와 해석결과와의 비교

Beam	Experiment	Analysis	
		α_5	Max. Load
D13 DC I	66.46 kN	0.3	65.05 kN
		0.4	70.28 kN
D13 DC II	69.66 kN	0.5	75.43 kN
D16 DC I	87.11 kN	0.3	89.60 kN
		0.4	94.43 kN
D16 DC II	89.81 kN	0.5	99.18 kN
D19 DC I	116.79 kN	0.3	117.71 kN
		0.4	122.06 kN
D19 DC II	117.55 kN	0.5	126.33 kN

4. 해석과 실험 결과의 비교

인장철근이 항복한 상태에 대해서 앞절의 극한해석을 이용하여 얻은 하중과 실험결과와의 최대하중을 표3에 나타내었다. 이중 콘크리트 보의 극한해석에 사용된 계수 α_5 는 섬유보강 콘크리트의 이상화된 인장응력-변형률 선도에서 균열이 발생된 후의 인장강도를 파괴계수를 이용하여 표현하기 위해 사용한 계수이다. ACI code(1998)에서는 사용된 강섬유의 종류와 부피의 향으로 균열후 인장강도를 표현하고 있다. 그리고 Hannant(1975)는 이상화된 응력-변형률선도에서 균열 후 섬유보강 시멘트

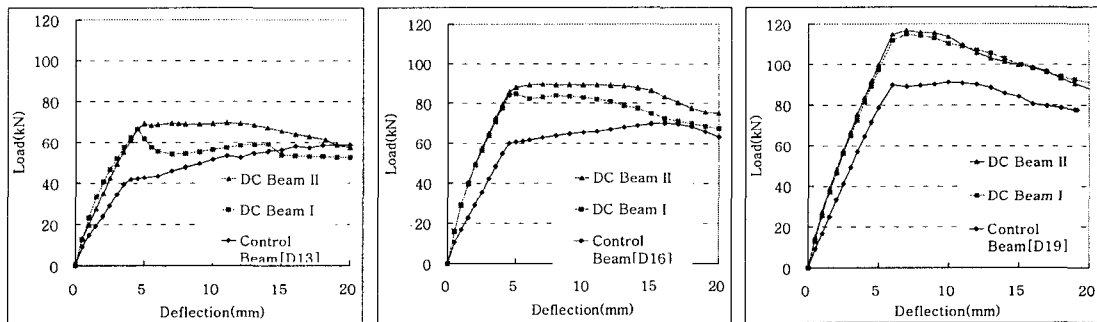


그림 3 시험체의 하중-처짐 곡선

와 콘크리트의 휨인장 강도를 파괴계수의 0.41로 제안하였다. 본 연구에서는 이중 콘크리트보의 극한해석 모델에서 고인장강도 콘크리트의 인장응력 분포를 직사각형으로 가정하고, 인장에 저항하는 두 재료인 인장철근과 강섬유보강 콘크리트의 관계를 파악하기 위해 α_5 를 0.3, 0.4, 0.5로 가정하여 각각의 시험체에 적용하여 해석하였다. 철근비 D13, D16, D19의 이중 콘크리트보의 해석값과 실험값을 비교한 결과, 계수 α_5 가 각각 0.4, 0.3, 0.3 이용하여 계산된 값이 실험값과 잘 일치하며, 표3에 결과를 나타내었다.

5. 결론

인장부의 고인장강도 콘크리트와 보통 콘크리트의 합성으로 이루어진 이중 콘크리트보를 평형방정식을 이용하여 탄성 및 극한 휨 거동의 해석 모델을 유도하였다. 유도된 이중 콘크리트보의 해석모델은 3개의 기준시험체와 6개의 이중 콘크리트를 실험한 결과와 큰 차이 없이 일치하였다. 인장영역에 고인장강도 콘크리트를 합성한 이중 콘크리트보는 철근 콘크리트보에 비해 최대하중이 증가되었다. 그리고 인장영역의 보강섬유는 사용하중 상태에서 인장 휨균열의 폭을 줄이고 균열의 진행을 억제시키는 효과를 나타내었다. 그리고 하중-처짐곡선의 탄성구간에서의 기울기를 나타내는 초기 휨강성이 증가되어 철근 콘크리트보에 비해 이중 콘크리트보의 처짐이 감소하였다. 이중 콘크리트보의 최대하중의 증가, 균열제어, 처짐감소 효과는 소량의 고인장강도 콘크리트를 인장영역에 배치함으로써 얻어진 결과로서 콘크리트 구조물의 구조성능의 향상뿐만 아니라 내구성 증대에도 효과적이다.

감사의 글

“이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-99-041-E00592)” 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Jenning, H.M., Advanced Cement-Based Matrices Composites," High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by Reinhardt, H.W. and Naaman, A.E., Proceedings of the International RILEM/ACI Workshop, E & FN SPON, 1992, pp. 3-17.
2. Park, Choon-Keon, "Characterization of Fiber Reinforced Macro-Defect-Free Cementitious Materials" Journal of Ceramic Society of Japan, Vol. 106, No. 3, 1998, pp. 268-271
3. Lin, Wei-Lin, "Toughness Behavior of Fibre- Reinforced Concrete," Fibre Reinforced Cement and Concrete, Edited by Swamy, R.N., E & FN SPON, 1992, pp. 299-315.
4. Brandt, A.M. and Glinicki, M.Z., "Flexural Behaviour of Concrete Elements Reinforced with Carbon Fibres," High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by Reinhardt, H.W. and Naaman, A.E., E & FN SPON, 1992, pp. 288-299.
5. Bayasi, M.Z., "Application of Carbon Fiber Reinforced Motar in Composite Slab Construction," High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Edited by Reinhardt, H.W. and Naaman, A.E., E & FN SPON, 1992, pp. 507-517.
6. Dwarakanath, H.V. and Nagaraj T.S., "Deformational Behavior of Reinforced Fiber Reinforced Concrete Beams in Bending," Journal of Structural Engineering, Vol.118, No. 10, October, 1992, pp. 2691-2698.
7. ACI Committee 544, "Design Consideration for Steel Fiber Reinforced Concrete," ACI Structural Journal, September-October, 1988, pp. 563-580.
8. Hannant, D.J., "The Effect of Post Cracking Ductility on Flexural Strength of Fibre Cement and Fibre Concrete," Fibre-Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, Volume 2, Construction Press Ltd., 1975, pp. 499-508.