

鋼纖維콘크리트의 直接引張 舉動 特性

Direct Tensile Behavior of Steel-Fiber Reinforced Concrete

李 信 昊* · 高 在 君*
Rhee, Shin Ho · Koh, Chae Koon

Summary

The aims of this study was to determine the mechanical properties of steel-fiber reinforced concrete under direct tensile loading, and also to investigate the mechanism fiber reinforcement in order to improve the possible applications of steel-fiber reinforced concrete.

In this study the major variables of experimental investigation were fiber contents, and the lengths and diameters of fibers.

The major results obtained are summarized as follows :

1. The strength, elastic modulus and energy absorption capability of steel-fiber reinforced concrete under direct tensile loading were improved as increasing of fiber contents.
2. The direct tensile strength of steel-fiber reinforced concrete was not influenced by the lengths of fiber, but was decreased as increasing of fiber diameters.
3. The direct tensile strength of steel-fiber reinforced concrete was not influenced by the fiber aspect-ratio, but this was because the fiber contents were below the critical value of fiber content.
4. The correlation of direct tensile strength and combined parameter, $V_f \cdot l/d$, was not good.
5. Multiple cracking and post-crack resistance were investigated at stress-strain curves in direct tensile test.
6. The effect of fiber reinforcement can be influenced by fiber orientation and the bond strength between fiber and matrix.
7. The improvement of mechanical properties of steel-fiber reinforced concrete under direct tensile loading can be theoretically explained by the concept of composite materials.

I. 緒 論

콘크리트는 가격이 저렴하고 壓縮強度가 크며 耐火, 耐水, 耐久的인 장점을 지니고 있다. 그러나 인장이나 動的荷重하에서는 脆性を 띠고 龜裂

을 막기 어려운 단점도 있다. 이러한 콘크리트의 본질적인 단점은 시멘트 및 골재의 품질개선이나 배합비의 변화 등에 의해서 改善하기는 어렵다. 따라서 콘크리트의 취성을 보완하거나 인장강도를 증가시키고 균열에 의한 破壞를 방지할 목적

*서울대학교 農科大學

으로 短狀의 纖維質 材料를 분산시켜 넣어 만든 콘크리트를 생산하게 되었는데, 이를 纖維補強콘크리트 (fiber reinforced concrete) 또는 纖維콘크리트 (fiber concrete or fibrous concrete) 라고 한다.

섬유콘크리트에 사용되는 섬유는 나일론 (nylon) 폴리프로필렌 (polypropylene), 폴리에틸렌 (polyethylene) 등의 低彈性 高伸張 섬유와, 鋼 (steel), 유리 (glass), 석면 (asbestos), 炭素鋼 (carbon steel) 등의 高彈性 高強度 섬유가 있다. 이들 중 鋼섬유의 보강은 콘크리트의 본질적인 결점인 인장균열 (tensile cracking)을 억제할 수 있는 것으로 알려져 있다. 7.13.14)

강섬유콘크리트의 성질과 파괴형상에 영향을 미치는 인자는 纖維形態 (fiber geometry), 纖維形狀比 (fiber aspect ratios), 纖維混入量 (fiber orientations), 配合設計方法 (mix design method) 등이다.²⁾ 지금까지 섬유의 龜裂抑制概念 (crack arrest mechanism), 混合材料概念 (composite mechanism) 등과 앞서 언급한 여러가지 변수에 대한 실험적 연구가 진행되어 오고 있으나 아직도 섬유보강에 대한 확실한 개념이 定立되지 못하고 있다. 그 이유로서 콘크리트는 굳기 전에 粘性을 띠고 굳은 후에는 공극을 지니고 있으며 콘크리트와 강섬유 사이의 응력 전달은 塑性 變形으로 일어나기 때문이다. 2.5.6.11)

강섬유콘크리트는 1960년대 후반에 시험연구와 병행하여 도로, 바닥슬래브, 耐火 材料 등으로 이용되었으며, 근래에는 수리구조물, 항만 및 해양 구조물, 터널, 고온구조물, 공항 활주로, 고속도로 포장 등에 이용하여 衝擊에 대한 균열저항 효과를 인정받고 있다. 국내에서는 강섬유콘크리트의 力學의 特性에 대한 연구실적이 一淺할 뿐만 아니라 기술적인 蓄積도 거의 되어 있지 않은 실정이다.

따라서, 이 연구는 강섬유콘크리트의 直接引張舉動에 대한 特性을 實驗的으로 究明하여 建設材料로서의 이용성을 높이는 데 그 목적이 있다.

II. 直接引張強度의 補強 原理

인장하중을 받을 경우 脆性材料인 매트릭스 (matrix)와 高強度섬유의 應力-變形率 곡선은 Fig.1과 같다. 따라서 纖維콘크리트인 混合체가 하중을 받으면 섬유가 파괴되기 전에 매트릭

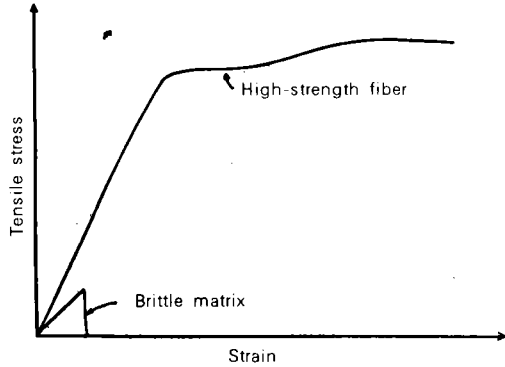


Fig. 1. Tensile stress-strain curves for fibers with ductile and brittle matrices (Ref. 11)

스에 먼저 균열이 발생하고, 섬유의 종류나 혼입 상태에 따라 後龜裂抵抗 (post-crack resistance) 이나 複合龜裂 (multiple cracking)이 발생한다.¹¹⁾

1. 매트릭스 電裂前 舉動

매트릭스 균열이 발생하기 전의 거동은 다음과 같은 基本 假定下에 분석된다. ㉠ 材料는 彈性的으로 거동한다. ㉡ 섬유는 매트릭스에 완전하게 附着되어 미끄럼 현상은 없다. ㉢ 섬유와 매트릭스는 軸과 直角方向의 변형율이 "0"이다 ($\mu = 0$).

임의의 狀態로 들어 있는 섬유가 수직축과 θ 의 角度로 기울어져 있고, 축방향으로 인장력 T가 作用하면, 混合體는 전체적으로 Δh 만큼 늘어난다.⁵⁾ (Fig. 2) 그러므로 혼합체의 變形率 $\epsilon_c = \Delta h/h$ 이고, 섬유의 변형율 $\epsilon_f = (\Delta h \cdot \cos \theta) /$

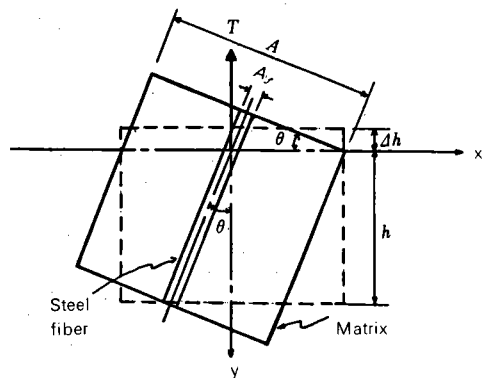


Fig. 2. Fiber in θ of orientation (Ref. 5)

$(h/\cos\theta) = \epsilon_c \cos^2\theta$ 이다.

섬유의 斷面積과 面積을 A_f , σ_f , 그리고 매트릭스 단면적과 응력을 A_m , σ_m 이라 하면, 引張力 $T = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \cos\theta$.

섬유를 중심으로 한 混合體의 단면적과 응력을 A_c , σ_c 라 하면 $T = \sigma_c \cdot A_c / \cos\theta$ 이고, 섬유의 彈性係數를 E_f 라 하면 $\sigma_f = \epsilon_f E_f$ 이다.

따라서.

$$\sigma_c A_c = \sigma_m (A_c - A_f) + \epsilon_c E_f A_f \cos^4\theta \dots \dots \dots (1)$$

혼합체의 단위체적을 고려하면, $A_f/A_c = V_f$ 식 (1)의 양변을 A_c 로 나누고 정리하면,

$$\sigma_c = \sigma_m (1 - V_f) + \beta_e \epsilon_c E_f V_f \dots \dots \dots (2)$$

여기서 β_e 는 작용응력에 유효하게 작용하는 纖維有效配向係數로서 $\cos^4\theta$ 이다.

매트릭스의 변형율과 탄성계수를 ϵ_m , E_m 이라 하면, $\sigma_m = \epsilon_m E_m$ 이고, $\epsilon_m \approx \epsilon_c$ 이므로 $\sigma_m = \epsilon_c E_m$ 이다. 식 (2)로부터 混合體의 탄성계수 E_c 를 유도하면,

$$E_c = E_m (1 - V_f) + \beta_e E_f V_f \dots \dots \dots (3)$$

2. 龜裂 發生後 舉動

混合體에 균열이 발생하고 나면 파괴표면에 걸쳐 있는 섬유만이 인장력을 받게 되고, 龜裂이 계속되면 균열을 억제하고 있던 섬유는 작용하중 방향으로 구부러지게 된다.⁵⁾ (Fig. 3) 그러므로, 균열을 뚫고 있는 섬유는 1차원 配列형태로 되므로 $\beta_e = 1$ ($\theta = 0$)이 되고, 섬유에 발생하는 응력은 균열 후에 현저하게 증가됨으로써 균열 발생전의 가정인 섬유의 완전 부작은 불분명하고, 대신 섬유의 파단원인이 되는 纖維有效附着係數 η 가 관련된다.

따라서, 龜裂 發生後 混合體의 應力 σ_c 는 다음 식과 같다.

$$\sigma_c = \eta \sigma_f V_f \dots \dots \dots (4)$$

섬유는 매트릭스에 θ 의 각도로 경사져 있으므로 最大應力 $\sigma_{fu} = \sigma_f / \cos\theta$ 이다.

따라서 混合體의 최대응력 σ_{cu} 는 식 (5)와 같다.

$$\sigma_{cu} = \eta \beta_u \sigma_{fu} V_f \dots \dots \dots (5)$$

여기서 β_u 는 $\cos\theta$ 로서 최대응력시 섬유의 配向係數이다.

3. 纖維의 臨界混入率

섬유의 임계혼입률은 混合體가 균열전에 받았

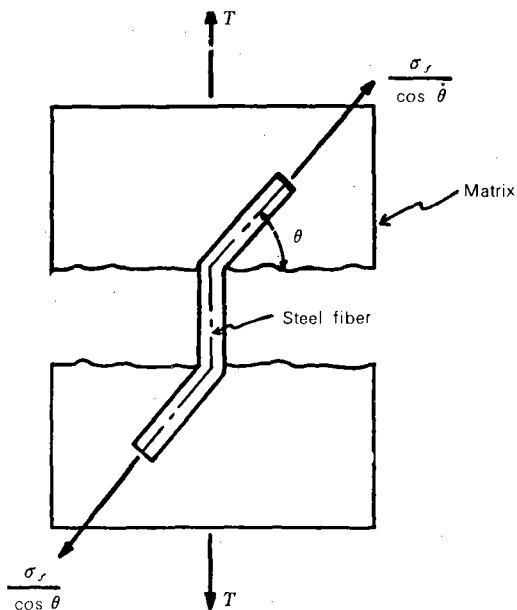


Fig. 3. Behavior of fiber after cracking (Ref.5)

던 荷重을 龜裂이 發生한 後에도 계속 維持할 수 있는 纖維體積으로 定義된다. 즉, 섬유의 혼입율이 臨界值 이하면 龜裂前 舉動, 그 이상이면 龜裂 發生後의 舉動 양상을 띤다.

龜裂 發生時 매트릭스의 변형율 및 응력을 ϵ_{mc} , σ_{mc} 라 하면, 식 (2)와 식 (5)로부터 纖維의 臨界混入率 V_{fcrit} 는 다음식과 같다.

$$V_{fcrit} = \sigma_{mc} / (\eta \beta_u \sigma_{fu} - \beta_e \epsilon_{mc} E_f + \sigma_{mc}) \dots \dots \dots (6)$$

III. 材料 및 方法

1. 材 料

供試體를 만드는 데 사용한 시멘트는 국내에서 생산된 보통 포틀랜드 시멘트로서 그 物理的 性質은 Table-1과 같다.

골재는 영산강 지류에서 채취한 모래와 자갈을 사용하였다. 잔骨材는 No. 4 체를 통과한 것으로서 그 성질은 Table-2와 같고, 굵은 骨材는 공시체의 크기와 강섬유콘크리트의 전형적인 사용성을 고려하여 최대치수를 10mm로 하였으며¹⁾ 그 性質은 Table-3과 같다. 또한 굵은 骨材 및 잔骨材의 粒度曲線은 Fig. 4와 같다.

콘크리트 補強材料로 사용할 섬유는 단면이 원형인 것으로서 직경 0.4, 0.5, 0.75mm의 鋼線을

Table-1. Physical property of normal portland cement

Specific gravity	Finness cm^3/g	Normal Consistency %	Soundness	Time of setting min		Comp. strength N/mm^2		Tensile strength N/mm^2	
				Initial	Final	σ_3	σ_7	σ_3	σ_7
				3.14	3115	25.7	0.38	160	344

Table-2. Quality of fine aggregate

Specific gravity	Absorption %	Unit weight kg/m^3	Soundness	Clay lump	Finness modulus	No. 200 sieve passing, %
2.54	2.56	1.436	good	0.54	2.98	0.6

Table-3. Quality of coarse aggregate

Specific gravity	Absorption %	Unit weight kg/m^3	Abration, %		Soundness	Clay lump
			100R	500R		
2.48	5.61	1.453	11.1	44.0	good	0.10

20, 30, 40mm 크기로 잘라 사용하였으며, 이들의 物理的, 力學的 性質은 Table-4와 같고, 그 形狀은 Fig-5와 같다.

2. 供試體 製作

配合設計는 ACI에서 권장하는 배합설계법²⁾을 참조하여 Table-5와 같이 하였다.

材料의 混合은 삼비비기로 하였는데, 먼저 시멘트와 잔골재를 섞은 다음 鋼纖維와 잘 섞여 있는 굵은 골재를 넣고 물을 부어 혼합하였다.

공시체는 Fig. 6과 같은 規格으로 KS F2403에 준하여 제작 양생하였고, 각각의 경우에 대하여 3개씩 만들었다.

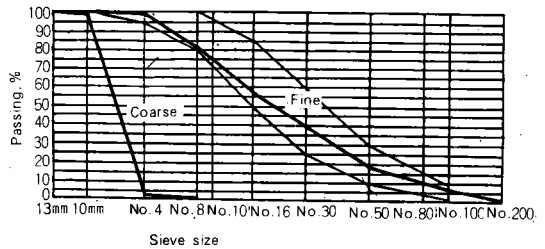


Fig. 4. Gradation curves of fine and coarse aggregates

섬유의 混入率은 供試體의 全体積에 대한 섬유 的 體積百分率로서 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%의 5가지로 하였다.

Table-4. Typical property of steel fiber

Specific gravity	Young's modulus KN/mm^2	Tensile strength N/mm^2	Typical volume in composite, %
7.83	199	451	0.5 - 2.5

Table-5. Specified mix of concrete composites

Cement kg/m^3	Water kg/m^3	W/C %	S/A %	Sand kg/m^3	Gravel kg/m^3	Air Content %
350	166	55	60	1061	707	2.0

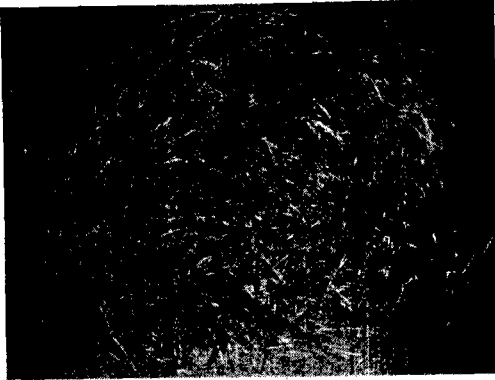


Fig. 5. Fiber configurations used during the investigations

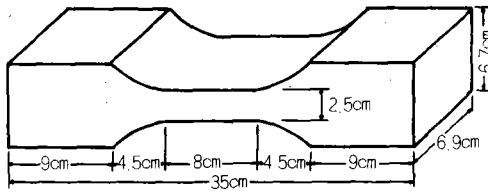


Fig. 6. Specimen for direct tensile test

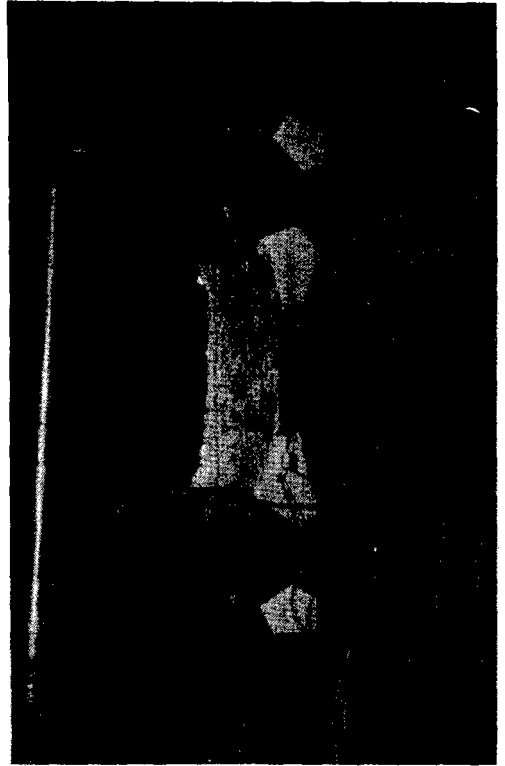


Fig. 7. Direct tensile test by using friction grips

콘크리트의 다짐은 판 진동기(table vibrator : MARUTO 모델명 CE-62B, weight degree 140 진동수 3,000RPM, 원심력 310kg, 진폭치 0.57)로 하였다.

공시체는 室温狀態(23~30℃)에서 20시간 이상 유지시킨 후, 24시간 이내에 脱型하여 水中에서 표준양생을 실시하였다.

3. 試驗 方法

直接引張試驗은 금속이나 모르터에 사용하고 있는 인장시험방법을 응용하였다. (Fig. 7 參照) 시험기는 용량 100t의 萬能試驗機(SHIMADZU UH-100形)를 사용하였으며, 荷重載荷速度는 0.5mm/min으로 하였다.

直接引張強度 σ_t 는 공시체 파괴시 최대하중 P_{max} 을 測定하여 다음식으로 계산하였다.

$$\sigma_t = P_{max}/bt \dots\dots\dots (7)$$

여기서 b , t 는 各各 공시체 中央의 斷面 幅과 두께이다.

引張彈性係數는 공시체의 중앙에 작용하중 방

향과 平行하게 strain gage(길이 67mm, 콘크리트用)를 부착하여 측정한 應力-變形率 관계로부터 구한 시컨드 계수(secant modulus)로 하였다.

직접인장시험에 대한 主要因子는 纖維混入量, 纖維의 直徑과 길이, 形狀比 등이다.

IV. 結果 및 考察

1. 纖維混入量에 따른 變化

섬유혼입량에 따른 직접인장강도의 변화는 Fig. 8과 같이 혼입량이 증가함에 따라 인장 강도가 증가하였는데, 섬유혼입량 2.0%의 경우 0%에 비하여 약 20% 정도 증가하였다.

이러한 결과는 Henry(1974)와 Johnston(1974)의 試驗 結果와 비슷하였고, II章의 理論式으로 推定한 結果와 比較하면 다음과 같다.

理論的인 값 決定에 必要한 鋼纖維의 性質은 Table-4로부터 $E_f = 199,000\text{N/mm}^2$, $\sigma_{fu} = 451\text{N/mm}^2$ 이고, 섬유혼입량 0%인 콘크리트의 性質은 E_m

鋼纖維 콘크리트의 直接引張學動 特性

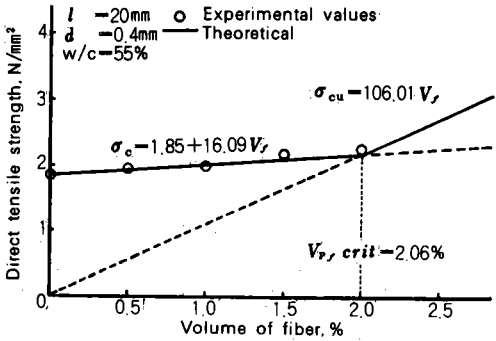


Fig. 8. Variation of tensile strength as a function of fiber content

$\sigma_c = 1.85 + 16.09 V_f$, $\sigma_m = 1.85 \text{ N/mm}^2 \approx \sigma_{mc}$, $\epsilon_{mc} = \sigma_{mc} / E_m = 0.000131 = \epsilon_c$ 이다.

纖維有效配向係數 β_e 와 最大應力時 섬유 의 配向係數 β_u 는 공시체의 폭이 좁고, 시험후 破壞斷面을 관찰한 결과로 판단하면 1次元 配列에 가까운 2次元 配列로 되어 있었다. 따라서 β_e 와 β_u 는 1차원과 2차원 배열의 중간 값인 $\beta_e^* = (0.375 + 1.0) / 2 = 0.688$, $\beta_u^* = (0.637 + 1.0) / 2 = 0.819$ 로 계산된다.

纖維有效附着係數 η 는 Kal·Pal(1972)의 유도 식에 의하면 0.369로 계산된다.

따라서, 龜裂前과 龜裂 發生後의 引張 強度는 各各 식 (2)와 (5)로부터 식 (8), (9)와 같다.

$$\sigma_c = 1.85 + 16.09 V_f \dots\dots\dots (8)$$

$$\sigma_c = 106.01 V_f \dots\dots\dots (9)$$

섬유 의 臨界混入率은 식 (6)으로부터 $V_{f,crit} = 0.0206 = 2.06\%$ 이다.

推定한 理論値는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 實驗値와 잘 부합되고 있다. 따라서 鋼纖維 콘크리트의 直接引張強度는 섬유 의 配合程度와 附着程度를 파악하면 충분히 이론적으로 섬유 混入量에 따른 補強效果의 程度를 추정할 수 있다.

2. 纖維의 形狀에 따른 變化

鋼纖維 콘크리트의 直接引張強度는 Fig. 9에 나타난 바와 같이 섬유 의 길이 變化에 거의 무관하 * 1차원 배열 : $\beta_e = \beta_u = 1.0 (\because \theta = 0)$, 2차원 배열 : $\beta_e = \int_0^{\pi/2} \cos^4 \theta d\theta / \int_0^{\pi/2} d\theta = 0.375$, $\beta_u = \int_0^{\pi/2} \cos \theta d\theta / \int_0^{\pi/2} d\theta = 0.637$.

+ $\eta = l/2kd \cdot (1 - l/6kd)$ 여기서 l , d 는 각각 섬유 의 길이 (20mm)와 直徑 (0.4mm)이고, k 는 附着 길이 係數 (58)이다.

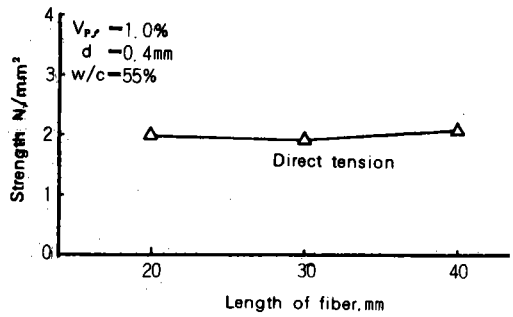


Fig. 9. Variation of tensile strength as a function of length of fiber

었다. 이 결과는 Shah·Naaman(1976)의 발표내용과 비슷하다.

섬유 의 直徑이 커지면 Fig. 10과 같이 직접인장 강도가 감소하는 경향이였다.

그리고, 섬유 의 形狀比 (길이÷直徑)에 따른 強度 變化를 조사한 결과, Fig. 11과 같았다. 이 그림에서 섬유 形狀比의 增加에 따른 직접인장 강도의 일정한 變化 양상은 찾아보기 어렵다. 그러나

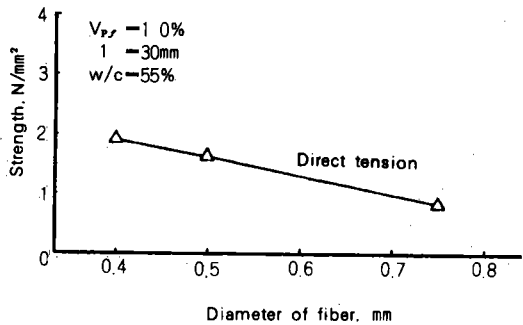


Fig. 10. Variation of tensile strength as a function of diameter of fiber

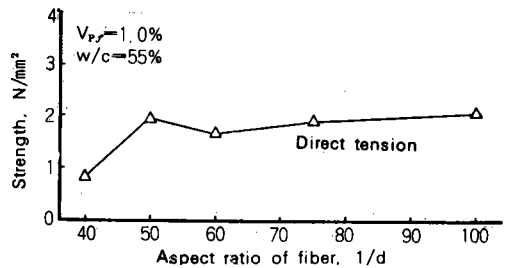


Fig. 11. Variation of tensile strength as a function of aspect ratio of fiber

Johston·Coleman(1974)의 시험결과를 섬유형상비가 증가하면 直接引張強度가 증가하였다.

이러한 양상은 전술한 바(II章)와 같이 섬유혼입량이 臨界值 보다 작은 경우는 섬유형상비와 거의 관계없는 섬유의 配向程度에 관계되지만, 임계치 이상인 경우는 附着係數의 영향을 받기 때문에 섬유形狀比가 증가하면 直接引張強度가 증가하게 된다.

따라서, 이러한 結果로 볼 때 本 試驗에서 사용한 섬유混入量 1.0%는 臨界值 以下이었고, Johston·Coleman의 研究結果는 임계치 以上の 섬유혼입량에 대한 것이 다수 포함되었기 때문에 판단된다.

3. 纖維混入量과 纖維形狀比의 組合變化에 따른 變化

섬유혼입량과 섬유형상비의 조합변수, $V_f \cdot l/d$ 와 直接引張強度와의 관계는 Fig. 12와 같다. 이들 관계에서 相關性이 높지 못한 것은 前項의 내용과 같이 섬유의 臨界混入量에 關聯되는 것으로 판단된다.

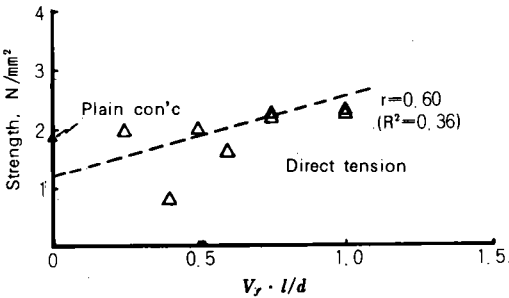


Fig. 12. Relationship between tensile strength and combined parameter

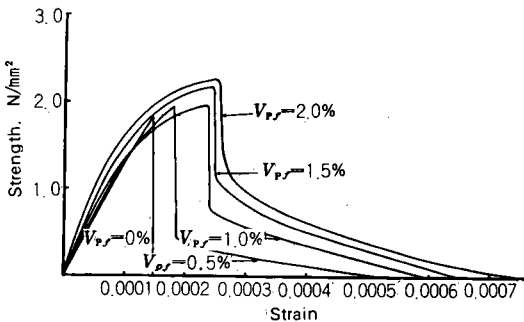


Fig. 13. Stress-strain curves in direct tensile test

4. 應力—變形率 曲線

직접인장시험에서 測定된 應力—변형율 곡선은 Fig. 13과 같다. 섬유混入率 0.5%에서는 最大應力까지 0%인 상태와 類似한 舉動 양상을 하였고, 그 후 應力이 갑자기 低下한 다음 섬유의 뽑힘저항(pull-out resistance)에 의해 後龜裂 低抗이 일부 나타났다. 섬유혼입율 1.0% 이상에서는 最大應力 前에 複合龜裂 현상을 보였고, 最大應力에 도달한 후 섬유가 뽑혀 나오면서 應力이 低下한 다음 後龜裂低抗이 나타났다. 이러한 현상은 最大應力 前에는 섬유와 콘크리트의 적절한 상호작용이 이루어 졌으나, 最大應力 後에는 섬유와 콘크리트의 附着力이 상대적으로 떨어졌기 때문 이라고 판단된다.

섬유混入量이 增加하면 變形率과 後龜裂低抗이 增加하여 應力—변형율 곡선 아래의 面積이 增加하므로 鋼纖維콘크리트의 直接引張荷重에 대한 에너지 吸收能力(energy absorption capability) 즉 韌性이 增加되었다. 섬유의 混入으로 인성이 增加된 것은 Chen·Carson(1971)의 直接인장 시험 결과와도 일치된다.

5. 引張彈性係數

시퀀트 계수로 계산한 引張彈性係數는 纖維混入量이 增加하면 Fig. 14에 나타난 바와 같이 增加하였다.

이러한 結果를 II項의 理論式으로 推定한 結果와 比較하면 다음과 같다.

理論值의 推定에 필요한 매트릭스의 彈性係數는 $E_m=14,080\text{N/mm}^2$ 이고, 섬유의 탄성계수 E_f 와 섬유有效配向係數 β_0 등은 섬유混入量에 따른 理論值 推定(1項)時와 同一하다. 따라서 식 (3)

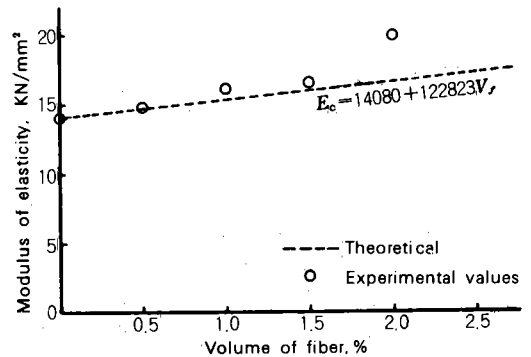


Fig. 14. Variation of tensile elastic modulus as a function of fiber content

에 의하여 鋼纖維콘크리트의 引張彈性係數는 다음과 같다.

$$E_c = 14,080 + 122,832 V_f (N/mm^2) \dots\dots\dots (10)$$

이 식은 纖維混入量 2.0%인 경우를 제외하고 대체로 實驗値와 잘 符合되고 있다(Fig. 14 참조).

섬유혼입량 2.0%에서 차이가 많이 나는 것은 實驗의인 오차에 의해 발생하였거나, 그렇지 않으면 섬유 臨界混入率 以上에 대한 直接引張彈性係數의 變化가 예상된다.

V. 結 論

本 研究는 建設材料로서 鋼纖維콘크리트의 利用性을 높이기 위해서 直接引張舉動에 대한 特性을 實驗의으로 究明하고, 纖維 補強에 의한 概念을 調査한 것이다. 直接引張試驗의 主要因子는 纖維의 混入量, 纖維의 길이 및 直徑등이다.

그 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 纖維混入量이 增加할 수록 直接引張強度, 에너지 吸收能力, 彈性係數 등의 直接引張 舉動特性이 改善되었다.

2. 纖維의 길이는 直接引張強度에 영향을 미치지 못하였으나, 섬유 直徑이 커지면 強度는 다소 감소하였다.

3. 纖維形狀比는 直接引張強度에 영향을 미치지 못하였으나 이는 理論의 分析 結果 섬유 混入率 臨界值 以下였기 때문이었다.

4. 纖維混入量과 纖維形狀比의 組合變數와 直接引張強度間의 相關性은 높지 못하였다.

5. 鋼纖維콘크리트의 直接引張에 대한 應力-變形率 舉動은 複合龜裂現象이 있었고, 最大應力에 도달한 후는 섬유 引張力에 의해 後龜裂 低抗이 發生하였다.

6. 直接引張 補強效果는 纖維混入量 뿐만 아니라 섬유 配向과 附着程度에도 크게 좌우됨을 확인할 수 있었다.

7. 直接引張에 대한 補強程度는 混合材料概念에 의해 理論의으로 推定이 可能하다.

參 考 文 獻

1. ACI Committee 544, 1978. Measurement of properties of fiber reinforced concrete. J.

ACI, 75(7) : 283-289.
 2. ACI Committee 544, 1985. State-of-the-Art report on fiber reinforced concrete. ACI Manual of Concrete Practice, Part 5 : 544. IR-82 or ACI Pub. 1984, SP 81 : 411-432.
 3. Brandt, A. M., 1984. On the optimization of the fiber orientation in cement based composite materials. FRC, ACI, SP81-13, pp267-285.
 4. Chen, W-F and J. L. Carson, 1971. Stress-strain properties of random wire reinforced concrete. J. ACI, 68(12) : 933-936.
 5. Edington, J., 1973. Steel fiber reinforced concrete. Unpublished data(Ph. D thesis in University of Surrey).
 6. Hannant, D. J., 1978. Fibre cement and fibre concretes. John Wiley & Sons.
 7. Henager, C. II, and T. J. Doherty, 1976. Analysis of reinforced fibrous concrete beams ASCE, J. St. Div. 102(ST1) : 177-188.
 8. Henry, R. L., 1974. An investigation of large diameter fiber reinforced concrete pipe. FRC, ACI, SP44-25, pp435-454.
 9. Johnston, C. D. and R. A. Coleman, 1974. Strength and deformation of steel fiber reinforced mortar in uniaxial tension. FRC, ACI, SP 44-10, pp177-193.
 10. Kar, J. N. and A. K. Pal, 1972. Strength of fiber-reinforced concrete. ASCE, J. St. Div. 98(ST5) : 1053-1068.
 11. Shah, S. P., 1983. Fiber reinforced concrete. Handbook of structural design. Edited by F. K. Kong, R. H. Evans, E. Cohen, and F. Roll, Vol. 1, Chap.6.
 12. Shah, S. P. and A. E. Naaman, 1976. Mechanical properties of glass and steel fiber reinforced mortar. J. ACI, 73(1) : 50-53.
 13. Shah, S. P. and B. V. Rangan, 1970. Effects of reinforcements on ductility of concrete. ASCE, J. St. Div. 96(ST 6) : 1167-1184.
 14. Shah, S. P. and B. V. Rangan, 1971. Fiber reinforced concrete properties. J. ACI, 68 (2) : 126-135, Discussion 68(8) : 626-633.