

論文 コンクリート強度が鋼繊維補強コンクリートの曲げ性能におよぼす影響

田邊 裕介*1・石川 裕次*2・木村 秀樹*2

要旨：鋼繊維補強コンクリートにおける圧縮強度が、曲げ性能におよぼす影響を把握する為に、100×100×400mmの角柱曲げ試験体を用いた3等分点2点載荷曲げ実験を行った。実験因子としてコンクリートの圧縮強度を30～200N/mm²、鋼繊維量 V_f を0～1.0Vol.%とした。繊維補強コンクリートの圧縮強度の増加に伴い、曲げ実験から求めた最大曲げ応力度は線形に上昇した。また同一の繊維量 V_f に対して圧縮強度を増加させていくと、最大曲げ応力度が頭打ちになった。繊維量 V_f を1.0Vol.%とした場合では、圧縮強度が80N/mm²の時、最大曲げ応力度は頭打ちとなった。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート、圧縮強度、曲げ性能評価、曲げ試験

1. はじめに

繊維をコンクリートに混入することでコンクリートの高性能化を目指した繊維補強コンクリートには、火災時の爆裂防止効果があり¹⁾、実建物へ適用されている。さらに繊維補強コンクリートには、繊維の架橋効果により引張性能を期待することができ、構造的に利用しようとする研究も多く行われている^{2),3),4)}。しかし実用化するには、繊維補強コンクリートの引張性能を適切に評価する必要がある。そこで清水ら^{5),6)}は、繊維補強モルタルの性能評価手法として比較的容易に行える曲げ試験を提案している。曲げ試験結果と一軸引張試験を比較し、曲げ試験から引張性能を適切に評価できることを示し、この結果はJCI標準⁷⁾としてもまとめられている。また繊維補強コンクリートの性能に関しては、繊維量 V_f や水セメント比などの因子が及ぼす影響など、様々な検討が行われている^{8),9)}。

そこで本稿では、性能評価法として曲げ試験を想定し、繊維補強コンクリートのコンクリート強度に着目した。実験は、コンクリート強度を30～200N/mm²、繊維量 V_f を1.0Vol.%とした繊維補強コンクリートを対象とし、3等分点2点載荷曲げ載荷を実施して検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体一覧

試験体一覧を表-1に示す。混入した鋼繊維の仕様を図-1、表-2に示す。試験体は、コンクリートの圧縮強度(30～200N/mm²)をパラメータとした計14水準で、各水準3体ずつ試験体を製作した。試験体の寸法は、100×100×400mmの角柱曲げ試験体とした。鋼繊維は端部

表-1 試験体一覧

シリーズ	試験体名	コンクリート強度 σ_B [N/mm ²]	繊維種	繊維量 V_f [Vol.%]
1	N-30	32.9	—	0.0
	F-30	32.2	普通	1.0
	N-60	56.9	—	0.0
	F-60	60.3	普通	1.0
	N-70	72.6	—	0.0
	F-70	72.6	普通	1.0
	F-70-0.5	70.9	普通	0.5
	N-80	81.1	—	0.0
	F-80	88.4	普通	1.0
	N-110	111.8	—	0.0
2	F-110	114.6	普通	1.0
	F-170	172.2	高強度	0.6
	N-210	207.4	—	0.0
	F-210		高強度	0.6

試験体名の付け方

コンクリート種類 → F - 60 ← コンクリート強度
N: プレーン, F: 繊維

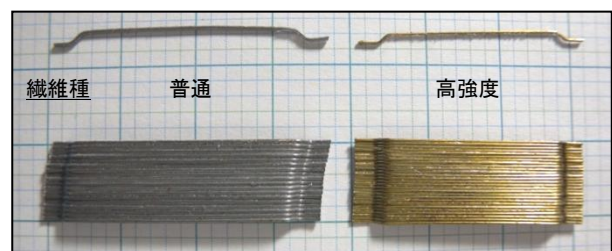


図-1 混入した鋼繊維

表-2 鋼繊維の性質

繊維種	径 [mm]	長さ [mm]	アスペクト比	ヤング係数※ [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]
普通	0.55	35	64	210000	1345以上※
高強度	0.38	30	79	210000	3070±15%

※メーカー規格値

*1 竹中工務店 横浜支店 作業所 修士(工学) (正会員)

*2 竹中工務店 技術研究所 構造部門 博士(工学) (正会員)

にフックを有するものを使用し、繊維量 V_f はシリーズ 1 では標準として 1.0Vol.%, F-70-0.5 のみ V_f を 0.5Vol.% とした。超高強度コンクリートを使用したシリーズ 2 では繊維量 V_f を 0.6Vol.% とした。シリーズ 2 の F-170 および F-210 には、鋼繊維に細径高強度のものを使用した。

繊維補強コンクリートのフレッシュ性状は、繊維投入後しっかりと攪拌し、繊維が分散していることを確認した。F-30 はスランプで 14.5cm, F-60~F-210 はフローで 60cm±10cm の範囲内であった。

2.2 実験方法

建築構造部材へ繊維補強コンクリートの適用を考えた場合、引張性能を評価しなくてはならない。ただし試験方法は圧縮試験のように、ある程度容易に行えることが求められる。よって本稿では、JCI 規準「繊維補強セメント系複合材料の曲げモーメントー曲率曲線試験方法 (JCI-S-003-2007)⁷⁾」による性能評価を想定し、実験を行った。荷重はアムスラー試験機を用いて行い、曲率は試験体に取り付けた変位計から計測した。荷重図を図-2 に示す。曲げ応力度は、荷重荷重から求めたモーメントを、試験体の全断面が弾性応力状態と仮定した断面係数で除した引張縁の応力である。また実験時には、1 秒毎に計測データとリンクさせた画像データを計測し、破壊経過を確認した。

び割れ幅が卓越しながら、緩やかに耐力が低下した。ポストピーク時には、鋼繊維がマトリクスから抜け出していると推察される音が連続的に発生したが、圧縮強度が高いほど音は顕著であった。超高強度繊維補強コンクリートを使用した F-170 および F-210 では、最初に発生したひび割れが拡大し、そのまま大きく伸展していった。

プレーンコンクリート ($V_f=0$ Vol.%) における破壊は、ひび割れ発生直後に最大応力に達し、急激に応力低下する極めて脆性的な破壊を示した。

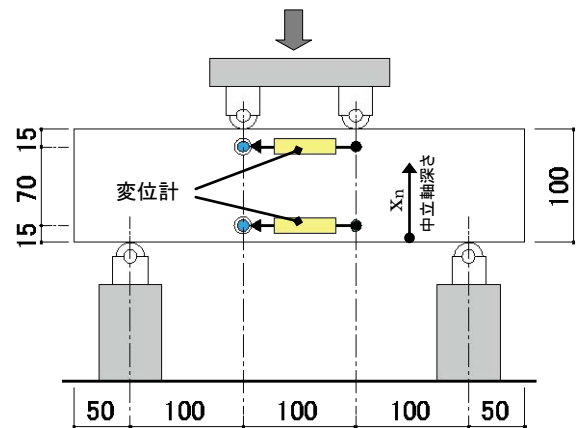


図-2 実験方法

3. 実験結果

3.1 曲げ応力度ー曲率関係

シリーズ 1, シリーズ 2 の曲げ応力度ー曲率関係をそれぞれ図-3, 図-4 に示す。シリーズ 1 では、荷重の増加と共に曲率が進み、初期ひび割れが発生すると剛性が低下した。その後最大曲げ応力度に達した後、緩やかに荷重が低下していき、高い靱性を示した。シリーズ 2 では、それぞれ初期ひび割れ発生後、一度耐力が低下した。繊維の架橋効果で再び耐力が上昇して最大曲げ応力度に達し、それぞれ応力曲線上における 1 次ピークと 2 次ピークを形成した。最大曲げ応力度をみると F-30~F-80 の間では、圧縮強度の上昇に伴い、最大曲げ応力が高くなった。さらにコンクリート強度が高い F-110 では、F-80 と同程度の最大曲げ応力度であった。シリーズ 2 の F-170 と F-210 は、それぞれ同程度の最大曲げ応力度であった。シリーズ 1 のポストピークでは、圧縮強度が高いほど耐力の低下が速く、大きい傾向を示した。

3.2 破壊経過

図-5 に F-60 の破壊経過、図-6 に F-210 の破壊経過を示す。鋼繊維を混入した試験体の共通した破壊性状として、まず視認できる程度の微細なひび割れ (0.04~0.06mm) が複数発生し、その内 2~4 本のひび割れが成長して最大曲げ耐力に到達した。その後は特定の 1 本のひ

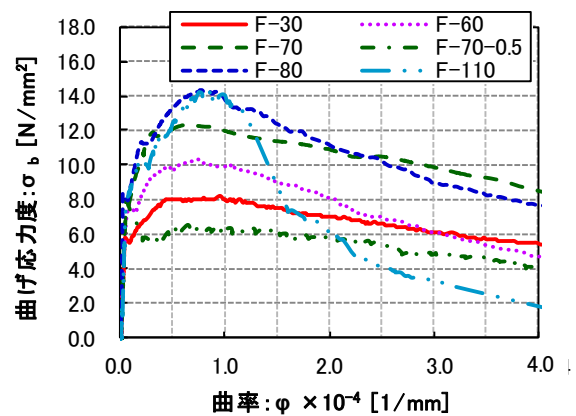


図-3 曲げ応力度ー曲率関係 (シリーズ 1)

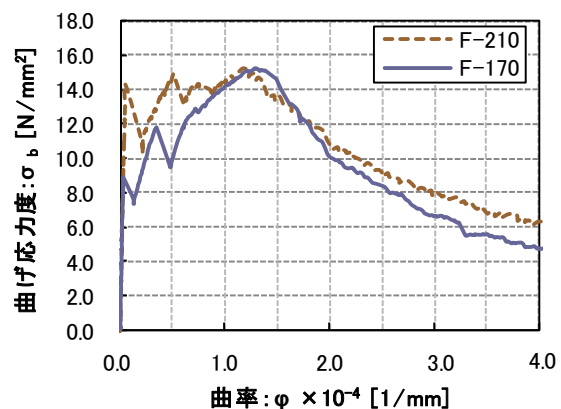
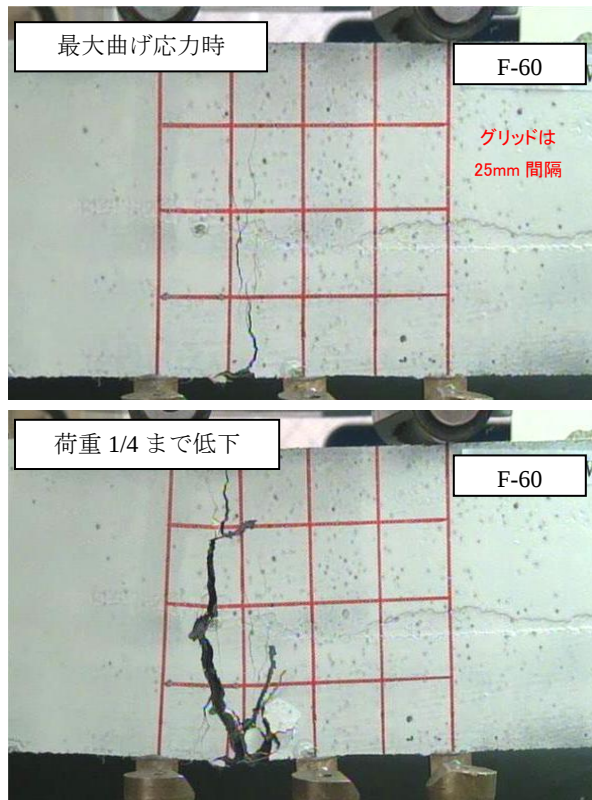


図-4 曲げ応力度ー曲率関係 (シリーズ 2)

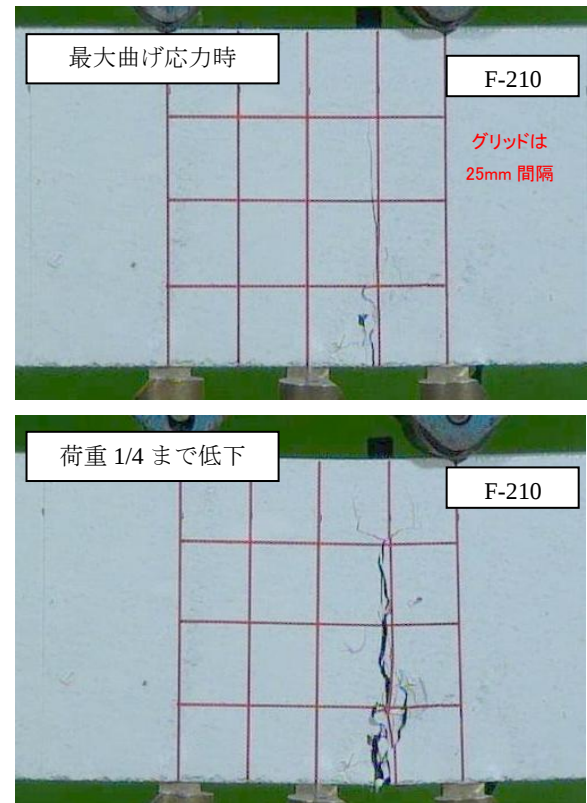
3.3 中立軸深さ

図－7、図－8に中立軸深さ x_n の変化を示す。中立軸深さは試験体に取り付けた変位計から、平面保持を仮定し、ひずみが 0 となる所を中立軸と定めた。F-60 では、初期ひび割れまでは、一定の値(引張縁から 60mm)にあり、初期ひび割れとともに、中立軸深さは徐々に上部にシフトした。最大曲げ応力時には、圧縮領域は 13mm(0.13D) となった。

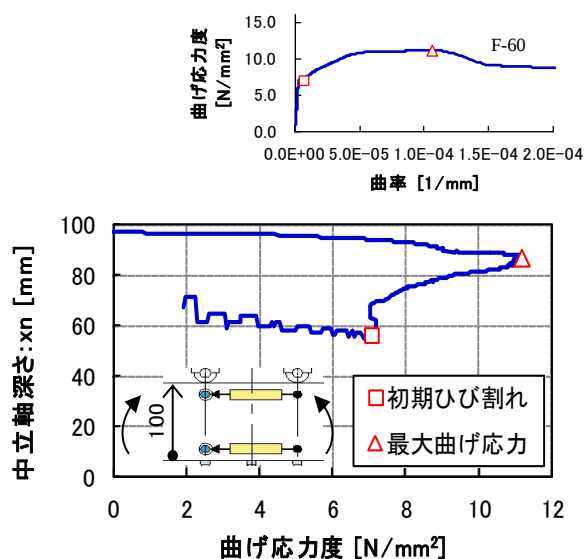
超高強度繊維補強コンクリートである F-210 では、初期ひび割れと同時に中立軸深さが 56mm から 81mm へと急激にシフトした。これは、曲げ応力度－曲率関係の 1 次ピークの位置(図中□)に相当する。そこから再度応力が上昇し始め、中立軸深さが上部へと移動して最大曲げ応力度(図中△)に達した。この時圧縮領域は 11mm(0.11D) となった。



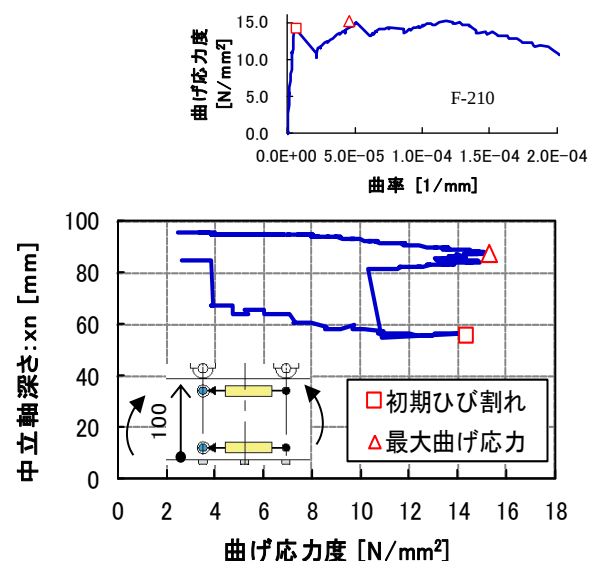
図－5 破壊経過 (F-60)



図－6 破壊経過 (F-210)



図－7 中立軸深さの変化 (F-60)



図－8 中立軸深さの変化 (F-210)

4. 実験結果の検討

4.1 最大曲げ応力度への影響

図-9、図-10にコンクリートの圧縮強度と最大曲げ応力度の関係を示す。なお結果は各水準3体の供試体の平均を示している。また、等曲げ区間にひび割れが発生しなかったデータは除外した。シリーズ1のプレーンコンクリートでは、圧縮強度の上昇とともに曲げ応力度が微増している。グラフに、参考としてプレーンコンクリートの曲げひび割れ時の引張縁応力として $0.56\sqrt{\sigma_B}$ のラインを合わせて示すと¹⁰⁾、このラインはおよそプレーンコンクリートの下限を表した。

一方、繊維補強コンクリートでは、F-30はN-30の1.7倍程度の最大曲げ応力度となった。コンクリート強度の上昇に伴いF-70まではほぼ線形に繊維補強コンクリートの最大曲げ応力度が上昇した。この最大曲げ応力度の増加は、コンクリート強度の増加に伴い鋼繊維とマトリクスの付着が高くなることに起因する^{11),12),13)}と考えられる。一方、F-80、F-110ではほぼ同じ最大曲げ応力度となり繊維混入による補強効果が頭打ちとなった。F-30～F-80までは繊維とマトリクスの付着が徐々に低下して荷重が低下したのに対し、F-80よりコンクリート強度が高くなると、繊維とマトリクスの付着力が高くなり、繊維自体の破壊もしくは繊維フック部での定着破壊へと変化し、繊維量1.0Vol.%で補強可能な上限に達したと考えられる。

シリーズ1の繊維補強コンクリートで繊維量 $V_f=1.0\text{Vol.}\%$ では、圧縮強度 80N/mm^2 付近に変化点が見られ、圧縮強度が 80N/mm^2 以上の繊維補強コンクリートで、最大曲げ応力度をさらに上昇させるには、繊維量 V_f を割増す必要があると考えられる。

超高強度繊維補強コンクリートであるシリーズ2では、F-170とF-210で同程度の最大曲げ応力度であった。両試験体とも繊維量 V_f が $0.6\text{Vol.}\%$ （高強度鋼繊維）で補強可能な、上限値に達していると考えられる。

4.2 最大曲げ応力時の曲率および中立軸深さへの影響

図-11にシリーズ1のコンクリート強度と最大曲げ応力時の曲率の関係を示す。繊維補強コンクリートでは、コンクリート強度が高くなると、最大曲げ応力時の曲率が微増した。この上昇倍率は、図-9の最大曲げ応力度の上昇倍率と比較すると小さかった。図-12にコンクリート強度と最大曲げ応力時の中立軸深さ x_n の関係を示すと図-11と同様の傾向を示した。これは、繊維量が一定の範囲では、引張縁で繊維補強コンクリートが許容できるひずみが決まっている為と考えられる。中立軸深さ x_n は、コンクリート強度の上昇とともに大きくなり、圧縮領域はF-30では15mm、F-110で9mmと変化した。

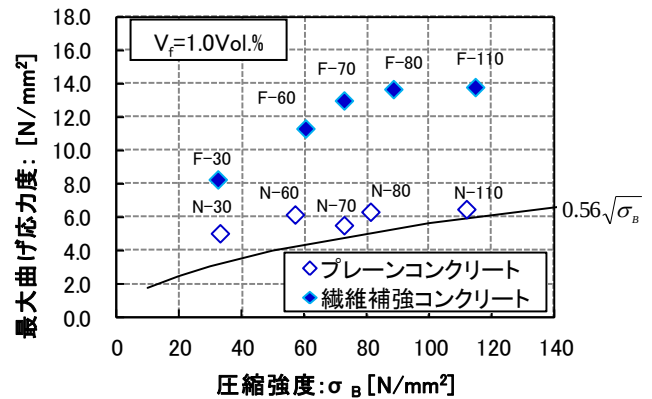


図-9 最大曲げ応力度への影響(シリーズ1)

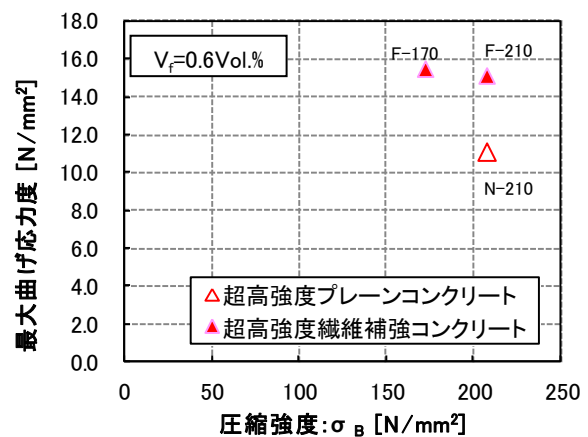


図-10 最大曲げ応力度への影響(シリーズ2)

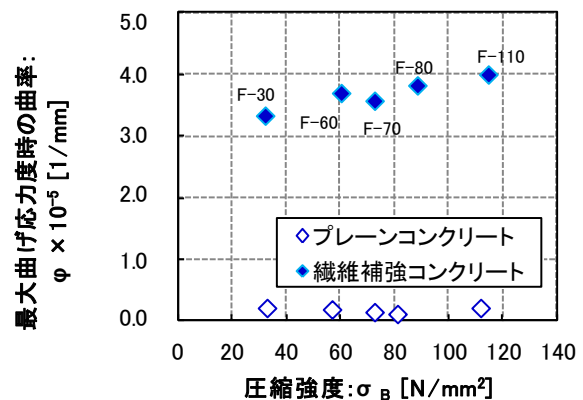


図-11 最大曲げ応力時の曲率への影響

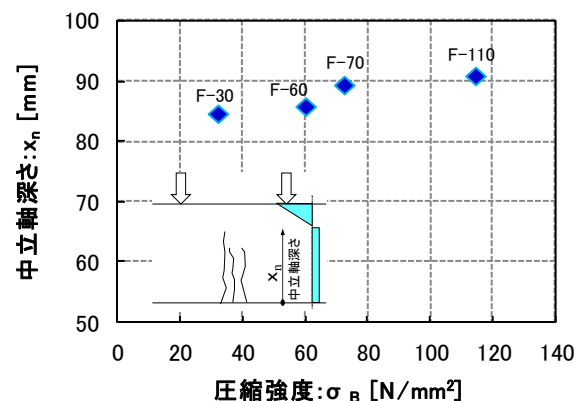


図-12 中立軸深さへの影響

4.3 ひずみエネルギーへの影響

繊維補強コンクリートは、最大曲げモーメントに達したあとも徐々に荷重が低下し、高い靱性能を示した。この靱性能を評価する為に、モーメント M と曲率 ϕ の曲線に囲まれた面積を等曲げ区間で積分した値をひずみエネルギーと定義し、各試験体について算出した(図-13)。繊維補強コンクリートでは最大曲げモーメント M_{MAX} の0.8倍まで耐力が低下した所を終局点 $0.8M_{MAX}$ と定義した。図-14にシリーズ1のコンクリートの圧縮強度とひずみエネルギーの関係を示す。繊維を混入することで、プレーンコンクリートと比較し 10^3 倍単位でひずみエネルギーが大きくなった。繊維補強コンクリートでは、圧縮強度の上昇と共に F-30 から F-70 までひずみエネルギーが大きくなった。しかし F-70 をピークに F-80、F-110 ではひずみエネルギーは低下した。これは、圧縮強度が高いほどポストピークでの荷重低下が大きく、 M_{max} から $0.8M_{max}$ までの面積区間が小さかった為である。今回の繊維量 $V_f=1.0\text{Vol.}\%$ の範囲内では、圧縮強度 70N/mm^2 で高いひずみエネルギーとなることが分かった。

4.4 限界最大曲げ応力度の評価

繊維量 V_f に対し、繊維が全て引張強度に達するという簡易な仮定を用いて頭打ちとなる限界最大曲げ応力度 σ_u を算出した。この時の断面の応力状態を、図-15のように仮定した。引張側にある鋼繊維が全て引張強度に達したと仮定して T_{fiber} を算出し、応力中心間距離 l_h を乗じて最大応力時のモーメント M_u を求めた。また繊維の配向性を考慮する為に、文献 14) を参考に配向係数 α を 0.405 とした。この配向係数は、1 方向に投影した繊維長さを全繊維の長さの合計で除した値である。中立軸深さ x_n は 4.2 章を参考に今回は 85mm 一律と仮定した。また、算出した σ_u がプレーンコンクリートのひび割れ強度 σ_{cr} より小さい場合は、最大曲げ応力度はひび割れ強度 σ_{cr} となるよう設定した。

- 1) $\sigma_u > \sigma_{cr}$ の時

$$\sigma_u = \frac{M_u}{Z}, \quad M_u = T_{fiber} \cdot l_h$$

$$T_{fiber} = a_{fiber} \cdot \sigma_t = \alpha \cdot b \cdot x_n \cdot V_f \cdot \sigma_t = C_c$$

- 2) $\sigma_u \leq \sigma_{cr}$ の時

$$\sigma_u = \sigma_{cr}$$

σ_u : 限界最大曲げ応力 (N/mm^2), σ_{cr} : ひび割れ応力 (N/mm^2),
 M_u : 限界最大モーメント ($\text{N}\cdot\text{mm}$), Z : 断面係数,
 T_{fiber} : 繊維が負担する引張力, C_c : コンクリートが負担する圧縮力
 l_h : 応力中心間距離, a_{fiber} : 引張側にある繊維の全面積 (mm^2)
 σ_t : 繊維の引張強度 (N/mm^2), α : 配向係数 (0.405)
 b : 幅 (mm), x_n : 中立軸深さ (mm), V_f : 繊維量 ($\text{Vol.}\%$)

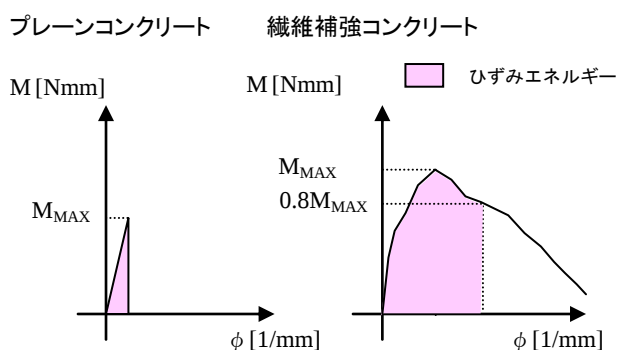


図-13 ひずみエネルギーの定義

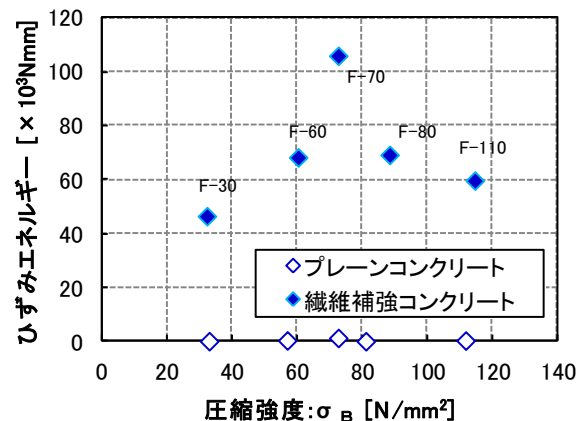


図-14 ひずみエネルギーへの影響

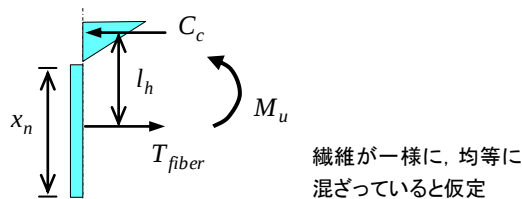


図-15 応力度分布

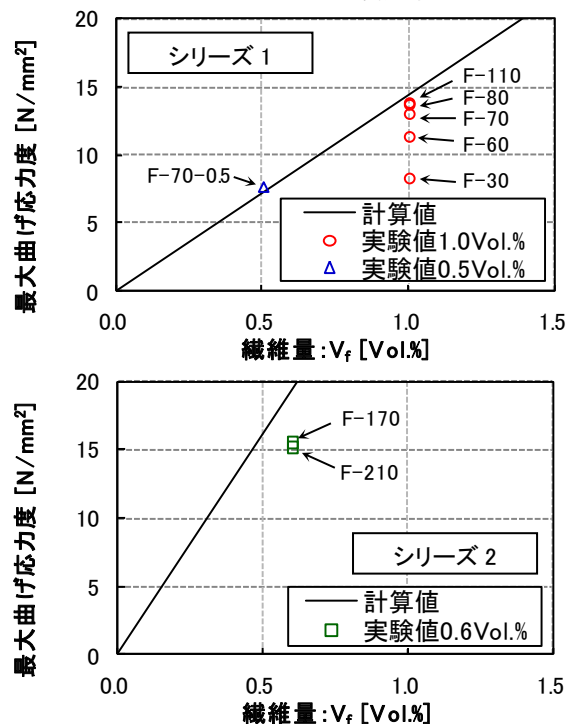


図-16 計算値との比較

図－１６に計算結果と実験結果の比較を示す。図は繊維量 V_f と最大曲げ応力度の関係を示す。図からシリーズ 1 では、計算値は各繊維量に対する実験値の最大値である F-70-0.5 ($V_f=0.5\text{Vol.}\%$) と、F-110 ($V_f=1.0\text{Vol.}\%$) と概ね一致し、各繊維量に対する最大曲げ応力度の上限を表現出来たと考えられる。シリーズ 2 でも、計算値は F-170、F-210 ($V_f=0.6\text{Vol.}\%$) より大きな値となった。

今後の課題として、今回の実験データは繊維量 V_f が 1.0%Vol. までと限られている為、繊維量 V_f が 1.0%Vol. 以上の繊維量に対しても同様の傾向を示すか把握する必要がある。また、より詳細な検討をする為にはコンクリートの圧縮強度の違いにより、繊維単体とマトリクスの付着の関係がどのように推移するか把握する必要がある。

5. まとめ

コンクリートの圧縮強度が 30～200N/mm²、繊維量 V_f が 1.0Vol.% までの鋼繊維補強コンクリートの 3 等分点 2 点載荷曲げ実験を行い、以下のような知見を得た。

- (1) 圧縮強度の上昇に伴い、繊維補強コンクリートの最大曲げ応力度が線形に上昇した。
- (2) 同一繊維量でコンクリートの圧縮強度が上昇すると、最大曲げ応力度が一定なり、繊維の補強効果が頭打ちとなった。繊維量 V_f が 1.0Vol.% では、圧縮強度が 80N/mm² 程度付近にこの変化点があった。
- (3) ひずみエネルギーという評価手法において、今回の実験の範囲では、コンクリートの圧縮強度が 70N/mm² 付近で大きな値となった。
- (4) 繊維の引張強度を用いた簡単な仮定から、限界最大曲げ応力度を算出した。計算結果は概ね頭打ちとなる圧縮強度を表現出来た。

参考文献

- 1) 三井健郎, 米澤敏男, 小島正朗, 三橋博三: 設計基準強度 80～200N/mm² 超高強度コンクリート柱の耐火性能に及ぼす有機繊維および鋼繊維の影響に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.648, pp.461-468, 2010.2
- 2) 木村秀樹, 高津比呂人, 石川裕次: 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱梁接合部に関する実験的研究, 学術講演梗概集 C-2, pp.389-390, 2009.7
- 3) 前田匡樹, 鶴飼和也, 中村 匠, 迫田丈志: ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料を用いた柱

部材のせん断耐力と変形性能, コンクリート工学論文集, Vol.22, No.1, pp.1-10, 2011.1

- 4) 諏訪田晴彦, 福山 洋: 高靱性セメント系複合材料を用いたダンパー部材のせん断耐力と変形性能に影響を及ぼす要因に関する実験および解析的検討(その 1), 日本建築学会構造系論文集 第 612 号, pp.171-178, 2007.2
- 5) 清水克将, 金久保利之, 関田徹志, 永井 寛: 曲げ試験による PVA-ECC の引張性能評価, 日本建築学会構造系論文集, No.604, pp.31-36, 2006.6
- 6) 清水克将, 金久保利之, 関田徹志, 永井 寛: HPFRCC の一軸引張および曲げ性状に及ぼす打設方向の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.281-286, 2003.7
- 7) 日本コンクリート工学協会: 繊維補強セメント系複合材料の曲げモーメントー曲率曲線試験方法 (JCI-S-003-2007), 2007
- 8) 石原誠一郎, 三橋博三, 福山 洋, 諏訪田晴彦: ハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の破壊特性に及ぼす水セメント比の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, 2006.7
- 9) 山名 慧, 八十島章, 白井一義, 菅野俊介: 曲げ試験による UFC の引張性能評価, 学術講演梗概集 C-2, 構造 IV, pp.55-56, 2007.7
- 10) 菅野俊介: 鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究, コンクリートジャーナル, Vol.11, No.2, pp.1-9, 1973
- 11) 越 力采, 小林一輔, 西村次男: 鋼繊維の付着特性と鋼繊維補強コンクリートの曲げ性状との関係, 東京大学生産技術研究所, 生産研究 33(1), pp.22-25, 1981.1
- 12) 中村 裕, 三橋博三, 桐越一紀, 平井和喜: 各種モルタルに埋め込まれた鋼繊維の付着強度特性に関する基礎的研究, 学術講演梗概集 A, pp.867-868, 1993.7
- 13) 和地正浩, 三橋博三, 金子佳生, 川又 篤: ハイブリッド型繊維補強セメント系複合材料におけるコード繊維の付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.229-234, 2001.7
- 14) 小林一輔, 和泉意登志, 越 力采: 鋼繊維補強コンクリート, コンクリート工学 Vol.15, No.3, 1977.7