

論文 フック付き鋼繊維補強コンクリートの曲げ特性の検討

富田 耕基*1・蓬田 千晶*2・石川 裕次*3・掛 悟史*4

要旨：鋼繊維補強コンクリートは、次世代のコンクリートとして建築分野でも適用事例が増えている。本研究では、鋼繊維補強コンクリートの利用拡大を目標とした基礎研究として曲げ試験を実施した。実験変数は、2種類のフック形状、鋼繊維混入量、切欠き有無とした。21体の曲げ試験結果から、ひび割れ発生後ではフック2段の鋼繊維を0.5Vol.%混入したSF5試験体では、フック1段の鋼繊維を1.0Vol.%混入したSF3試験体よりも多くひずみエネルギー（最大耐力後にひび割れ荷重まで低下した区間の曲げモーメントー曲率関係の積分値）を負担できることを確認した。

キーワード：鋼繊維補強コンクリート, 曲げ試験, 中立軸, 累積ひずみエネルギー

1. はじめに

近年では、鉄筋コンクリート造建築物の柱梁接合部に鋼繊維補強コンクリートを混入し、機械式定着を取り付けた梁主筋を定着する新しい工法¹⁾や、超高層RC造建物の下層階には、鋼繊維補強コンクリートを適用して地震や火災時におけるコンクリートの爆裂防止や損傷低減を目的とした実験的研究²⁾が行われ、鋼繊維補強コンクリートの利用が拡大している。

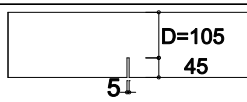
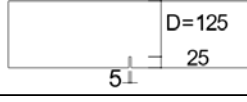

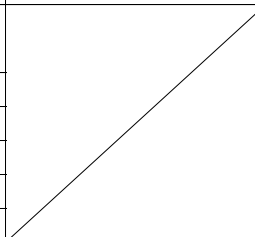


しかしながら、現行の建築基準法(2018年改正)では、指定建築材料として鋼繊維補強コンクリートの記載がないため、建築物に適用するためには指定評価機関において材料認定を取得する必要がある。

本研究では、鋼繊維補強コンクリートの利用拡大を目標とし、建築構造部材として必要な基礎研究を実施した。

これまでの既往研究における鋼繊維補強コンクリートの曲げ試験では、様々な鋼繊維の種類を実験変数とした研究は行われているが、フックの段数に関する検討や、曲げ特性を検討する上で重要となる切欠き深さを検討した研究が少ない。

そこで鋼繊維補強コンクリートの性能を検討するために、曲げ試験を国内外の標準^{3,4)}に準拠して実施した。本研究における実験変数は、鋼繊維混入量と切欠き有無、および鋼繊維形状と設定して、鋼繊維補強コンクリートの適正な曲げ試験方法について検討を行った。

表-1 本研究の試験体一覧表

試験体名称	試験体図	N-70	SF3-70	SF5-70
鋼繊維混入量: V_f [Vol.%]		0	1.00	0.50
切欠き有: T 45mm		T_No.1	T_No.1	T_No.1
		T_No.2	T_No.2	T_No.2
切欠き有: TS 25mm		TS_No.1	TS_No.1	TS_No.1
		TS_No.2	TS_No.2	TS_No.2
切欠き無: TN 0mm		TN_No.1	TN_No.1	TN_No.1
		TN_No.2	TN_No.2	TN_No.2
		TN_No.3	TN_No.3	TN_No.3
圧縮強度: f_c [N/mm ²]		68.9	72.2	71.8
ヤング係数: E_c [N/mm ²]		3.4×10^4	3.5×10^4	3.5×10^4
鋼繊維: SF *ヤング係数及び引張強度は製品規格値	形状			
	直径: D[mm]		0.55	0.90
	長さ: L[mm]		35	60
	アスペクト比		65	65
	*ヤング係数[N/mm ²]		2.1×10^5	2.1×10^5
	*引張強度[N/mm ²]		1345	2300

*1 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 修士課程2年 (学生会員)

*2 (株)大成有楽不動産 東京本店

*3 芝浦工業大学 システム理工学部 環境システム学科 教授 博士(工学) (正会員)

*4 (株)竹中工務店 技術研究所 研究員 修士(工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 実験変数

表-1 に、本研究で検討する実験変数を示す。試験体名称：N はプレーン，SF3 は鋼繊維の形状が1段フックで鋼繊維量 1.0% (1m³あたり 80kg)，SF5 は鋼繊維の形状が2段フックで鋼繊維量 0.5% (1m³あたり 40kg) とした。なお各試験体の繊維量は、試験体の最大強度が同程度となるように決定した。

本研究で実施した試験体一覧を表-1 に示す。試験体数については、鋼繊維混入量（体積比）で3種類×7体（切欠き有 45mm：2体，切欠き有 25mm：2体，切欠き無 0mm：3体）合計 21 体とした。切欠き深さは、JCI-S-002-2003 規準³⁾および Europe Code 規準⁴⁾に準拠した。

使用したコンクリートの材料試験結果を表-1 に示す。各試験体のコンクリート諸値は、各実験時に材料試験を行い、供試体各 3 本の平均値とした。

調査計画を表-2 に示す。調査は同一バッチではなく、鋼繊維混入量（体積比）毎に3回に分けてコンクリートを打込みした。なお養生条件は、封緘養生とした。

表-2 コンクリートの調査計画

G _{max} [mm]	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	AE
13	40.3	185	459	776	851	5.02

G_{max}：最大粗骨材径 (mm) W/C：水セメント比 (%)

W：水 (kg/m³) C：セメント (kg/m³)

S：細骨材 (kg/m³) AE：単位混和材量 (kg/m³)

2.2 試験体計画

試験体は、JCI-S-002-2003 規準³⁾に準拠して製作した (B：150mm，H：150mm，L：550mm)。

試験体に混入する鋼繊維は2種類とし、SF3 では全長 35mm，径 0.55mm，アスペクト比が 65 で端部のフックが1段，SF5 は全長 60mm，径 0.9mm，アスペクト比が 65 で端部のフックが2段のものを使用した(表-1 参照)。

2.3 実験方法

本研究では、図-1 に示す 2000KN 万能試験機 (UH-2000knI) を用いて、3 等分点荷重方法を実施した。

曲率は、試験体に設置した変位計 (CDP-25M) から、各荷重における変形角度を求めて計算をした。

本研究では曲率から計測した計算値から中立軸を算定するために、中立軸が圧縮側に移動することを考慮して変位計を4段設置した。変位計は切欠き有無に関わらず圧縮側では共通とし、圧縮縁から 15mm，45mm，75mm に設置した。引張側では、TN 試験体では、圧縮縁の変位計設置点と対象となるように引張縁から 15mm に設置し、T 試験体では引張縁から 45mm，TS 試験体では引張縁から 25mm の位置に変位計を設置した。

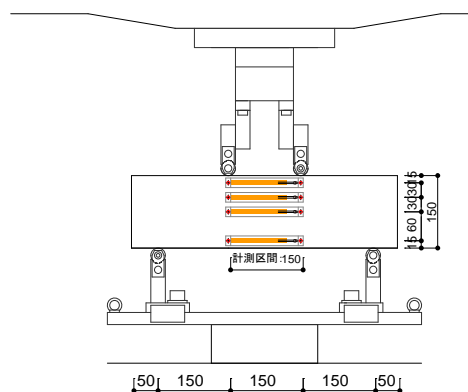


図-1 実験装置図

3. 実験結果

3.1 荷重-曲率関係

図-2 から図-4 に、各実験変数の荷重-曲率関係および各試験体の破壊状況を示す。切欠き無：0mm 試験体 No.3 にはモールドゲージを埋設したが、モールドを埋設していない試験体に比べて 30%程度全体的に耐力が低下して明確な理由が不明なため、実験データから除外した。

(1) 切欠き有：45mm (T) 試験体

N-70-T：No.1 試験体(図-2 (a))では、荷重：15kN で、切欠き先端部にひび割れが発生し、ひび割れ発生直後に急激な耐力低下を生じて、試験体は破断した。

SF3-70-T：No.2 試験体(図-2 (b))では、荷重：22.66kN 付近で切欠き先端の中央部にひび割れが発生した。ひび割れ発生直後は耐力が一時低下し、切欠き側面部からも新たなひび割れが発生して試験体上面に伸展し、荷重：26.21kN で最大耐力を迎えた。

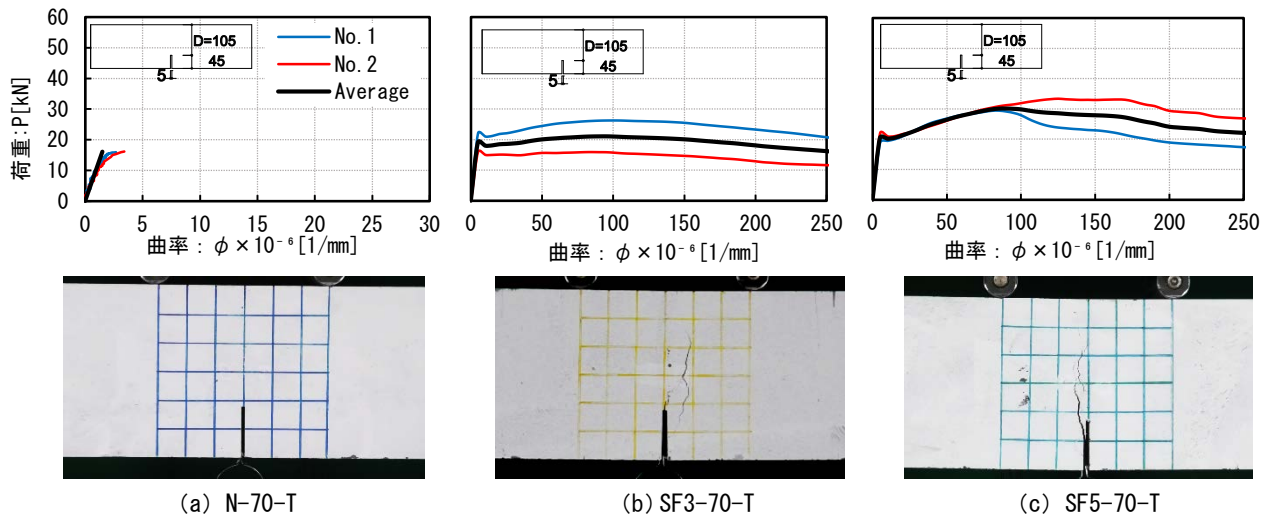
SF5-70-T：No.2 試験体(図-2 (c))では、荷重：22.17kN 付近で、切欠き側面よりひび割れが発生した。ひび割れ発生後は耐力が一時低下し、切欠き側面から入ったひび割れが分散しながら試験体上面に垂直に進展し、荷重：33.36kN で最大耐力を迎えた。なお最大耐力後に、試験体内部で鋼繊維がブツンと切れる破断音が聞こえ、実験後のひび割れ面において複数本の繊維の破断が確認された。

(2) 切欠き有：25mm (TS) 試験体

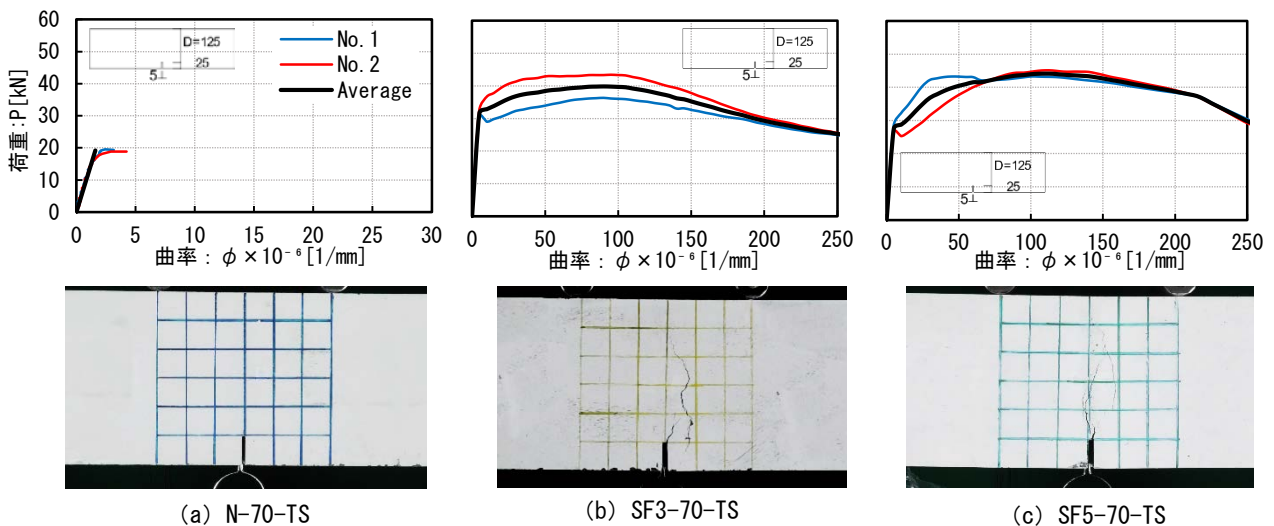
N-70-TS：No.1 試験体(図-3 (a))では、荷重：20kN で切欠き先端部からひび割れが発生し試験体は破断した。

SF3-70-TS：No.2 試験体(図-3 (b))では、荷重：36.27kN 付近で切欠き先端部分にひび割れが発生した。ひび割れ発生直後は、T 試験体と異なり耐力低下せずに曲率の増加と共に耐力が増加し、ひび割れも試験体上面に垂直に伸展して、荷重 43.35kN で最大耐力を迎えた。

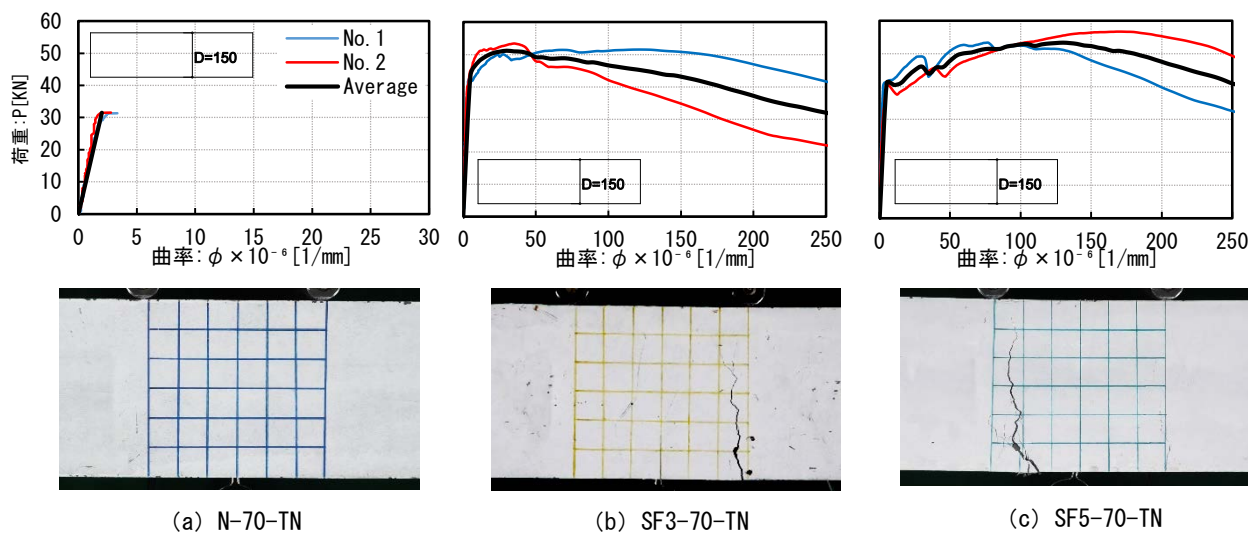
SF5-70-TS：No.2 試験体(図-3 (c))では、荷重：26.87kN 付近で切欠き先端部よりひび割れが発生した。ひび割れ発生直後は耐力が一時低下し、切欠き先端よりひび割れが分散し、荷重：45.19kN で最大耐力を迎えた。



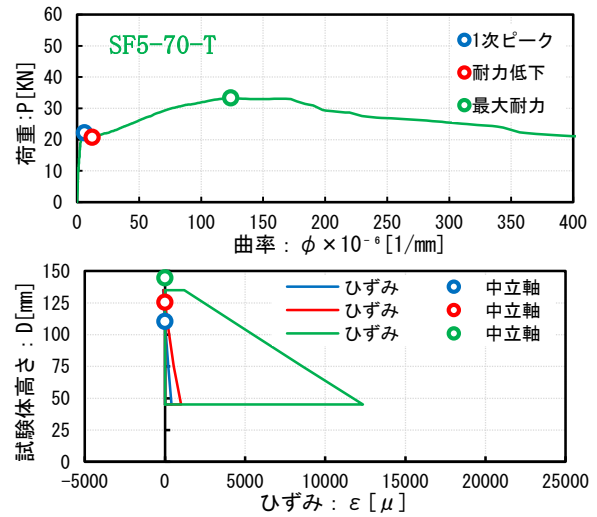
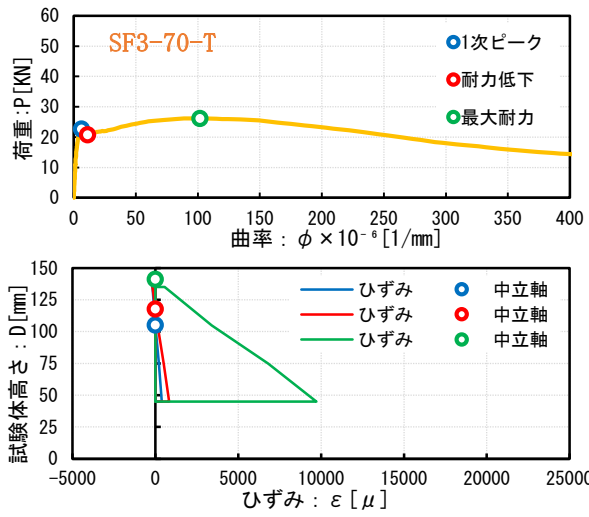
上段：荷重-曲率関係図 下段：最大耐力時写真
 図-2 Tシリーズ 荷重-曲率関係図および最大耐力時破壊



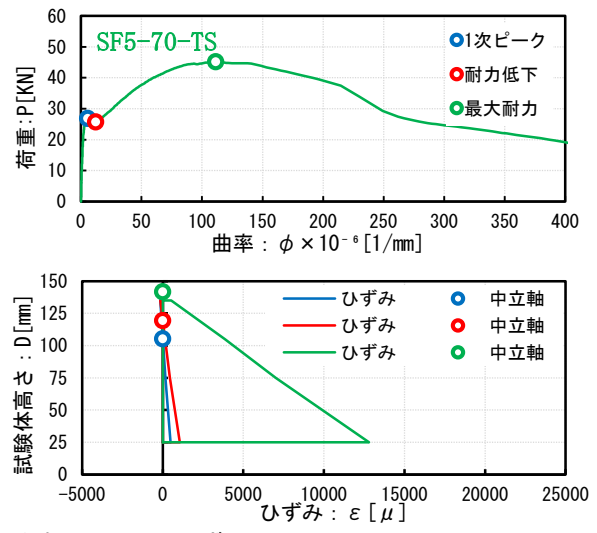
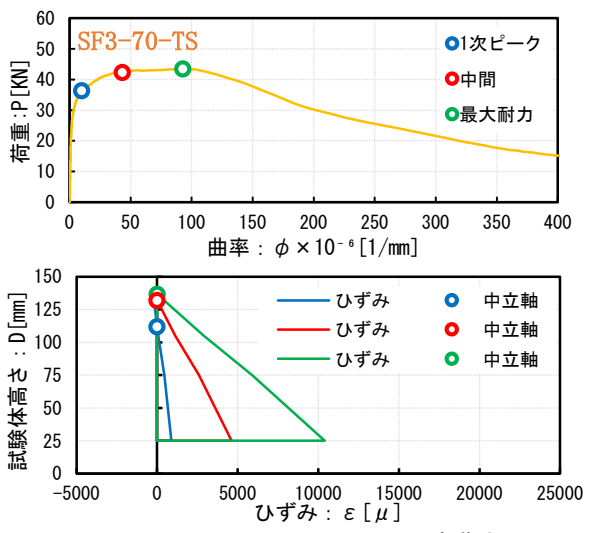
上段：荷重-曲率関係図 下段：最大耐力時写真
 図-3 TSシリーズ 荷重-曲率関係図および最大耐力時破壊



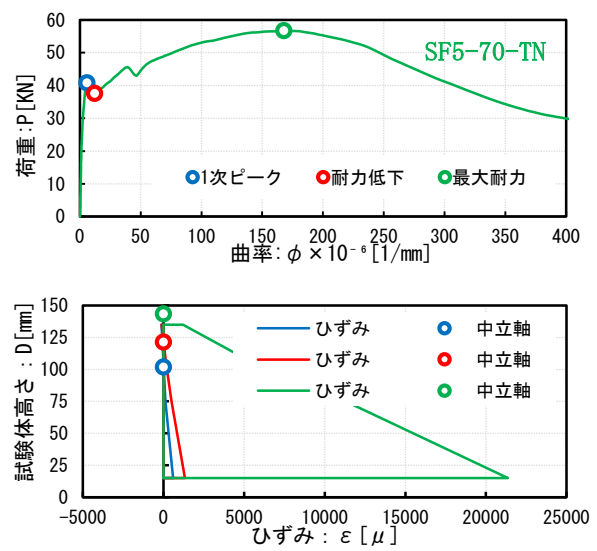
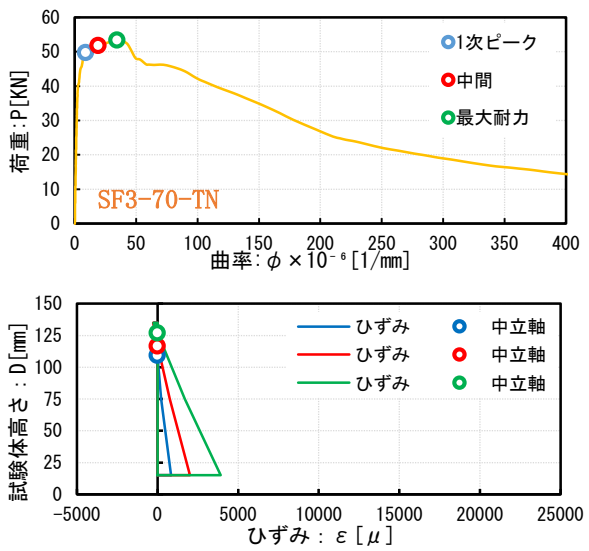
上段：荷重-曲率関係図 下段：最大耐力時写真
 図-4 TNシリーズ 荷重-曲率関係図および最大耐力時破壊



上段：変曲点位置図 下段：試験区間の平均ひずみ分布
 図-5 Tシリーズ 各変曲点における試験区間の平均ひずみ分布の推移



上段：変曲点位置図 下段：試験区間の平均ひずみ
 図-6 TSシリーズ 各変曲点における試験区間の平均ひずみ分布の推移



上段：変曲点位置図 下段：試験区間の平均ひずみ
 図-7 TNシリーズ 各変曲点における試験区間の平均ひずみ分布の推移

表-3 ひび割れ荷重における実験値と計算値 (単位[kN])

試験体名	N-70				SF3-70				SF5-70			
	実験値	実験平均値	計算値	aveP _{crack}	実験値	実験平均値	計算値	aveP _{crack}	実験値	実験平均値	計算値	aveP _{crack}
	expP _{crack}	aveP _{crack}	calP _{crack}	calP _{crack}	expP _{crack}	aveP _{crack}	calP _{crack}	calP _{crack}	expP _{crack}	aveP _{crack}	calP _{crack}	calP _{crack}
T_No.1	16.0	16.1	17.1	0.94	22.7	19.4	17.5	1.11	19.9	21.0	17.4	1.21
T_No.2	16.2				22.2				22.2			
TS_No.1	19.5	19.2	24.2	0.79	30.8	33.5	24.8	1.35	32.2	29.5	24.7	1.20
TS_No.2	18.9				36.3				26.9			
TN_No.1	31.3	31.5	34.9	0.90	42.4	46.1	35.7	1.29	41.3	40.9	35.6	1.15
TN_No.2	31.6				49.8				40.5			

(補足) expP_{crack} : ひび割れ荷重 (実験値) [kN] aveP_{crack} : ひび割れ荷重平均値 (実験値) [kN]

calP_{crack} : ひび割れ荷重 (計算値) [kN]

(3) 切欠き無 : 0mm (TN) 試験体

N-70-TN : No.1 試験体(図-4 (a))では, T, TS 試験体と同様にひび割れ直後に急激な耐力低下を生じて, 試験体は破断した。

SF3-70-TN : No.2 試験体(図-4 (b))では, 荷重:49.84kN 付近で試験区間外からひび割れが発生した。ひび割れ発生直後は TS 試験体と同様に耐力低下せず試験区間外から発生したひび割れが試験区間左斜め上に伸展し, 荷重 : 53.43kN で最大耐力を迎えた。

SF5-70-TN : No.2 試験体(図-4 (c))では, 荷重:40.48kN で試験区間中央よりも左側にひび割れが発生した。ひび割れ発生直後は耐力が一時低下し, 鋼繊維の架橋効果で再び耐力が増加した。荷重 : 45.59kN 直後に試験区間右側に新たなひび割れが発生し, T, TS 試験体と異なり 2 度の耐力低下を生じた。その後再び耐力が増加して, 切欠き先端部のひび割れ幅を抑制しながらひび割れが左右に分散し, 荷重 : 56.65kN で最大耐力を迎えた。

3.2 試験区間の平均ひずみ分布

図-5 から図-7 に, SF3 試験体 (鋼繊維量 1.0Vol.%, フック 1 段) および SF5 試験体 (鋼繊維量 0.5Vol.%, フック 2 段) における試験区間の中立軸および平均ひずみ分布を示す。中立軸は, 試験体に取り付けた変位計からひずみと曲率を求めて算出した計算値である。

(1) 切欠き有 : 45mm (T) 試験体

1 次ピーク時では, ひび割れ発生時の中立軸の位置とひずみを指し, SF3, SF5 試験体共に切欠き先端部分よりひび割れが発生し, 中立軸は試験体せいで 100mm 付近に位置している。耐力低下時では, ひび割れが圧縮側に伸展して, 最大耐力を迎えた。中立軸とひずみは, SF3, SF5 試験体共に同じ挙動を示した。

(2) 切欠き有 : 25mm (TS) 試験体

1 次ピーク時では, T 試験体と同様にひび割れ発生時の中立軸の位置とひずみを指し, SF3, SF5 試験体共に切欠き先端部分よりひび割れが発生し, 105mm 付近に位置している。SF3 試験体では耐力は低下せず上昇し, 荷重一定に保ってひび割れが圧縮域に伸展した。SF5 試験体では一旦耐力低下するが鋼繊維の効果で耐力が上昇し,

最大耐力時の中立軸は, SF5 試験体では中立軸は SF3 試験体と同等だが, SF5 試験体の方が少し多くひずみを負担していることを確認した。

(3) 切欠き無 : 0mm (TN) 試験体

最大耐力点では, SF5 試験体では鋼繊維混入量が少ないが, 試験体内部で鋼繊維の稼働領域が SF3 試験体よりも広く, ひび割れ伸展時に架橋効果によって試験体の耐力が向上し, 試験体内部で鋼繊維がブツンと切れる破断音が聞こえた。中立軸は圧縮域から 5mm に移動した。

4. 実験結果の検討

4.1 ひび割れ荷重における実験値と計算値の比較

表-3 に, ひび割れ発生における実験値と計算値結果を示す。計算値は, 日本建築学会が発行している計算規準書⁹⁾に準拠して, 曲げひび割れ強度を求めて各試験体の断面係数を算定した計算値である。

$$M = Z \times \sigma \quad (1)$$

$$\sigma = 0.56\sqrt{\sigma_B} \quad M = \frac{PL}{6} \quad Z = \frac{bh^2}{6} \quad (2)$$

$$\frac{PL}{6} = \frac{bh^2}{6} \times \sigma \quad \therefore P = \frac{bh^2 \times \sigma}{L} \quad (3)$$

σ_B : 圧縮強度 (N/mm²) L : 等曲げ区間 (mm)

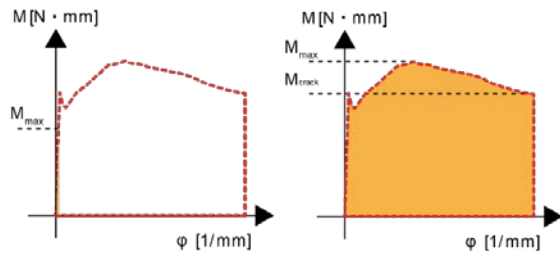
b : 試験体幅 (mm) h : 試験体高さ (mm)

Z : 断面係数 (mm³) P : ひび割れ荷重 (N)

結果として, SF3, SF5 試験体共にひび割れ発生荷重は実験値が計算値を上回り, 計算結果も SF3, SF5 試験体共に概ね一致することを確認した。

4.2 ひずみエネルギー

鋼繊維補強コンクリートのひずみエネルギーについて, 図-8 に示すように最大耐力を迎えてひび割れ荷重まで低下した区間の曲げモーメント-曲率関係の積分値を, ひずみエネルギーと定義した。その計算結果を図-9 に示す。図中の計算値は各試験変数 2 体の平均値とした。SF5 試験体では, 切欠き有無に影響せずに SF3 試験体よりもひずみエネルギーが大きくなった。これはひび割れ幅が拡大する際, 鋼繊維の架橋効果によって生じる試



(a) プレーンコンクリート (b) 鋼繊維補強コンクリート

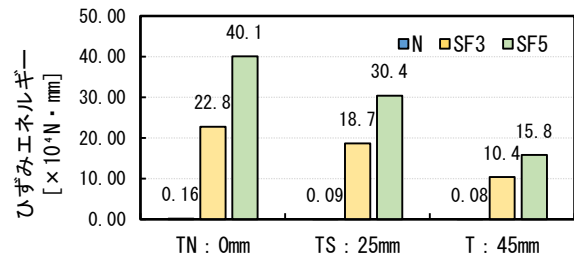
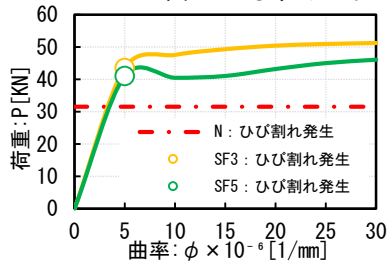
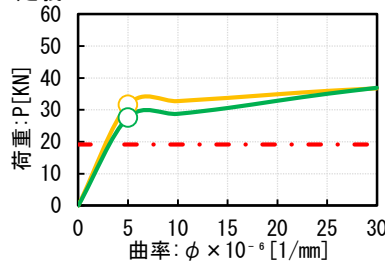


図-9 各試験体のひずみエネルギー

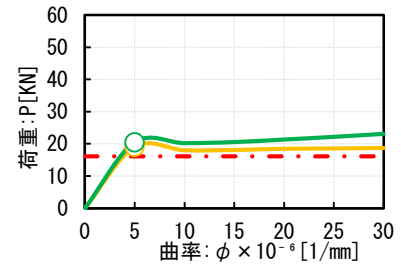
図-8 ひずみエネルギー定義



(a) TN : 0mm



(b) TS : 25mm



(c) T : 45mm

図-10 ひび割れ荷重の比較

験体のアンカー区間が SF3 試験体よりも長かった事で、試験体の引張力を多く負担することができ、ひずみエネルギーも大きくなったと考えられる。そのため SF5 試験体の方が、ひび割れ後の靱性能力が向上した。

4.3 ひび割れ発生荷重の比較

鋼繊維補強コンクリートの効果を許容応力度レベルから考慮するためには、部材の変形レベルに置換した場合に、部材角 $R=10\sim 20\times 10^{-3}[\text{rad}]$ 程度に相当する曲率 $20\sim 30\times 10^{-6}[1/\text{mm}]$ までの範囲において、鋼繊維補強の効果に関する検討が必要である。その結果として図-10に、SF3、SF5 試験体における切欠きを実験変数としたひび割れ荷重を示す。図-10に示すひび割れ荷重については、各試験体の平均値とした。

鋼繊維を混入した SF3 試験体および SF5 試験体では、いずれの試験体においても N 試験体と比較してひび割れ荷重が増加した。これは文献⁹⁾において、鋼繊維は引抜き量が小さい領域から引張応力を負担することが確認されており、ヘアクラックに対しても鋼繊維が応力を負担することで、ひび割れ荷重が上昇したと考えられる。

また TN、TS 試験体は、SF3 試験体の方が SF5 試験体よりもひび割れ発生荷重が大きいことを確認した。これはヘアクラックを横切る鋼繊維の本数が SF3 試験体の方が多く、ひび割れ発生時のような引抜き量が小さい領域から、引張応力を負担する鋼繊維の本数が多いためと考えられる。

5. まとめ

鋼繊維の形状、長さ、径、引張強度および混入量が異なる 2 種類の鋼繊維補強コンクリートを用いて、鋼繊維量および切欠き有無を実験変数として以下の知見を得た。

- (1) 検討した曲率の範囲を制限しない場合、鋼繊維混入量が少ない SF5 (0.5Vol.%) 試験体では、ひび割れ発生後においては SF3 試験体 (1.0Vol.%) よりも曲率の増加と共に耐力および靱性の向上を確認した。
- (2) ひずみエネルギーの計算結果では、切欠き無試験体では SF5 試験体では SF3 試験体の 1.75 倍のエネルギー吸収能力が高くなることを確認した。
- (3) SF3 試験体では、SF5 試験体よりも、ひび割れ発生直後の鋼繊維の補強効果による耐力上昇の発現が早いことを確認した。

参考文献

- 1) 石川裕次ほか：鋼繊維補強コンクリートを用いた省人化型接合部工法の実用化，コンクリート工学，Vol54，No.7，pp694-701，2016.7
- 2) 掛悟史，太田義弘，小倉史崇，麻生直木，石川裕次：高強度 SFRC 柱の曲げ性能に関する実験的研究その 2：復元力特性および曲げ性能の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），pp.307-308，2018.9
- 3) 日本コンクリート工学会：切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法（JCI-S-002-2003）
- 4) fib - federation internationale du beton：fib Model Code for Concrete Structures 2010
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準（案）・同解説，2016.4
- 6) 小林楓子，本間大輔，田邊裕介，チャオディ：フック形状が異なる鋼繊維の引抜き特性と曲げ性能に関する基礎的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，（北陸）pp.151-152，2019.9