

[117] 鋼繊維補強鉄筋コンクリートの変形およびひびわれ性状

正会員○金津 努 (電力中央研究所構造部)
 正会員 青柳 征夫 (電力中央研究所構造部)
 中野 毅弘 (電力中央研究所構造部)

1. まえがき

最近、コンクリートの引張抵抗性能の改善を目的として開発された鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の力学的特性に関する基礎実験研究、あるいは実際の施工上の問題を対象とした研究が数多く行なわれており、それらの成果の反映として、道路舗装やトンネルのライニング等への適用が図られるようになって¹⁾いる。無筋コンクリートに鋼繊維を混和することにより、コンクリートの物性が大巾に改善されることはすでに知られているが、在来の鉄筋コンクリートに添加することによる変形・ひびわれ性能の改善については未だ十分な研究がなされていないとは言えない。鋼繊維を鉄筋コンクリート部材へ混和した場合に得られると思われる効果を列記すれば以下のようになる。 (1) 部材の剛性と靱性の向上 (2) 部材のせん断耐力の向上 (3) ひびわれの分散化と拡大の抑制

本研究は、鋼繊維コンクリートの鉄筋コンクリート部材への有効利用をはかるため、鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材(SFRC部材)の力学的性状を明らかにすることを目的として実施したものである。すなわち、SFRCはり部材の変形性状を把握するための一軸引張試験、および変形拘束荷重に対する抵抗性能を把握するための軸方向変形拘束試験を実施し、在来のRC軸引張部材の変形・ひびわれ性状と比較検討した結果をとりまとめたものである。²⁾

2. 実験概要

2.1 鋼繊維コンクリート：使用した鋼繊維は0.25mm×0.55mm×25mmのS社のせん断ファイバーおよびφ0.6×60mmのK社の異形加工切断ファイバーである。鋼繊維コンクリートの配合は表1に示すとおりで、通常のRC構造物への適用を念頭において最大骨材寸法を25mmとし、各配合とも同

表1 コンクリートの配合

試験体	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C	S/A	単 位 量 (kg/m ³)						
					水 (W)	セメント (C)	鋼繊維 (S.F)	細骨材 (S.A)	粗骨材 (G.A)	減水剤 (W.R.A)	
N-R-0-0	10±2	5±1	59	41	147	250	0	796	1,119	0.625	
N-R-25-1.0				58	179	303	78.5	1,037	734	0.758	
N-R-60-0.5				65	178	302	39.3	1,156	608	0.755	
N-R-60-1.0				70	203	344	78.5	1,148	481	0.860	

一水セメント比、同一スランブとなるように配合選定を行なった。

2.2 鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材：全長380cm、試験区間210cm、断面12.5×20cmの試験体で、主鉄筋としてSD35D10(降伏点; 4357kgf/cm², 弾性係数; 2.09×10⁶kgf/cm²)を4本使用した。各試験体の諸元を表2に示した。軸引張試験は各試験体の圧縮強度が300kgf/cm²となった時点で実施した。各試験体の強度試験結果を表3に示す。

2.3 練り混ぜおよび締め固め：練り混ぜは容量約230ℓの可傾式ドラムミキサーを使用した。鋼繊維の混入は人為的に分散投入により行な

したが、60mm繊維1.5%の場合に若干のファイバーボールがみられた。ファイバーボールは手でほぐしてねり返しを行なった。³⁾締め固めはSFRCを直接に振動締め固めすることを避け、型枠に震動を与えて間接的に行なった。

2.4 軸引張試験：試験体への加力は、なじみ載荷の後ひびわれ発生、許容荷重、降伏荷重の各段階ごとに載除荷した後、再び載荷を行ない約3%の変形に達するまで引張った。

2.5 変形拘束試験：温度荷重の作用する場合を想定して変形拘束試験を実施した。試験体断面内の銅パイプにLN₂ガスを通して試験体を冷却しこの時の収縮変形を拘束して試験を実施した。温度は常温〜-20℃まで6〜7

表2 試験体の諸元

試験体	鉄筋 (mm)(本)	鉄筋比 (%)	鋼繊維 (mm)	繊維量 (%)	温度条件
N-0-0	D10(4)	1.14	—	—	常温
R-0-0	D10(4)	1.14	—	—	常温 ~-60℃
N-60-0.5	D10(4)	1.14	φ0.6×60	0.5	常温
N-60-1.0	D10(4)	1.14	φ0.6×60	1.0	常温
N-25-1.0	D10(4)	1.14	0.25×0.55×25	1.0	常温
R-60-1.0	D10(4)	1.14	φ0.6×60	1.0	常温 ~-60℃
R-25-1.0	D10(4)	1.14	0.25×0.55×25	1.0	常温 ~-60℃

N：常設試験、R：変形拘束試験

段階で降下させた。拘束試験ではこの後常温に戻し約10tの荷重を与えた後-60℃に冷却し、降伏・塑性変形段階の実験を行なった。

2.6 計測：軸方向変形は試験体上下面に取付けた2台の変位計(500 μ/mm , 25 mm ストローク, 又は2000 μ/mm , 5 mm ストローク)により測定した。ひびわれ幅は、標点距離10 cmのコンタクトポイントを200 cmの区間にわたって試験体側面に設け、コンタクトゲージにより測定した。また、一部試験体では四つの断面のそれぞれ四本の鉄筋にゲージを貼付し、鉄筋ひずみの測定を行なった。

3. 鋼繊維コンクリートの耐荷性能

鋼繊維のブリッジ効果の引張抵抗への寄与の程度の検討するため、

図1にひびわれ断面におけるSFRCの引張荷重分担割合と鉄筋応力度の実測値との関係を示した。鉄筋応力度は、鉄筋ゲージを貼付した断面で、そこにひびわれの発生が確認された箇所のみずみ測定値を応力度に換算したものでD10 mm鉄筋四本の平均応力度である。

図1から明らかなように、各試験体とも引張荷重の増加とともにSFRCが分担する引張荷重抵抗力が小さくなってゆく挙動を示し、また、荷重分担能力は繊維量および繊維長さにより若干相違することが示されている。例えば、鉄筋応力度が2000 kgf/cm^2 の時、全荷重に対するSFRCの荷重分担率は、N-25-1.0とN-60-1.0で約40%、N-60-0.5で約25%である。これは鉄筋の許容応力度近傍においては、鋼繊維量や種類を考慮して、荷重分担の点で鋼繊維の貢献をある程度期待できることを示している。

ここで繊維量および繊維長さの影響を検討するため、図2、図3、図4に個々の試験体における鉄筋応力比と荷重比の関係を示した。図中の実線はRC部材の場合($P/P_y = \sigma_s / \sigma_{sy}$, P:軸引張荷重, σ_s :実測鉄筋応力度, σ_y :降伏点, $P_y = A_s \cdot \sigma_{sy}$, A_s :鉄筋断面積)を示している。点線は、鉄筋ひずみを測定した各試験体の荷重比が0.47以上の荷重での実測値を、最小自乗法により直線にあてはめたものである。したがって、実線と点線の差がSFRCにより寄与される抵抗力であることがわかる。

これらの図より鋼繊維の混入量や繊維長の相違が引張抵抗性能に与える影響を明らかにすることができる。N-60-1.0とN-25-1.0の比較から、鉄筋応力比の小さい領域、つまりひびわれ発生初期($\sigma_s = 1600 kgf/cm^2$ まで)ではN-25-1.0の方が引張抵抗への寄与が大きく、反対に鉄筋応力比が大きい領域、つまりひびわれが安定した状態となる荷重段階ではN-60-1.0の方が引張抵抗への寄与は大きい。これは、ひびわれ発生初期においては鋼繊維とコンクリート間の付着性能が健全であるため、ひびわれ断面での荷重伝達に寄与する鋼繊維の本数の多い方が引張抵抗は大きくなり、一方、比較的荷重の大きい段階ではひびわれも大きくなるの

で短い繊維ではコンクリートとの付着性能が長い繊維の場合と比較して劣り、ひびわれ断面における荷重伝達能力が長い繊維の場合より小さくなるためと考えられる。このように鋼繊維のひきぬけながら抵抗する対荷重抵抗

表3 強度試験結果

試験体	試験条件	引張強度 kgf/cm^2	曲げ強度 kgf/cm^2	割裂強度 kgf/cm^2	引張強度 kgf/cm^2	降伏係数 $\times 10^5 kgf/cm^2$
N-0-0	常温	294	30.2	23.1	—	2.45
	-60℃	260	42.5	23.1	17.9	2.83
R-0-0	常温	655	113.7	71.1	47.4	3.85
	-60℃	655	113.7	71.1	47.4	3.85
N-60-0.5	常温	292	69.5	32.1	17.1	2.64
N-60-1.0	常温	339	107.4	47.1	—	2.53
N-25-1.0	常温	354	74.0	38.6	—	2.75
	-60℃	281	82.3	47.7	24.0	2.91
R-60-1.0	常温	670	163.1	84.7	67.8	3.52
	-60℃	670	163.1	84.7	67.8	3.52
R-25-1.0	常温	314	59.3	26.7	26.3	3.02
	-60℃	594	—	—	71.5	3.26

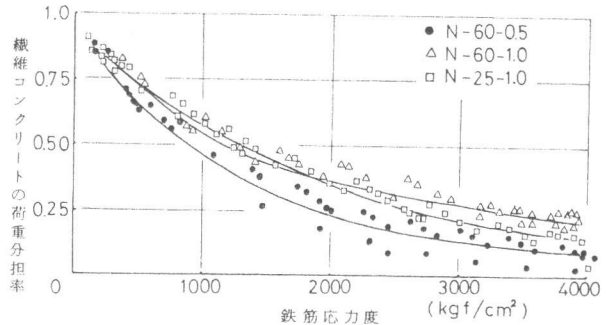


図1 鋼繊維コンクリートの荷重分担率

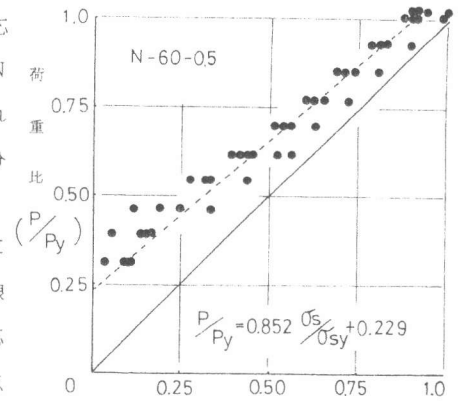


図2 鉄筋応力比と荷重比の関係

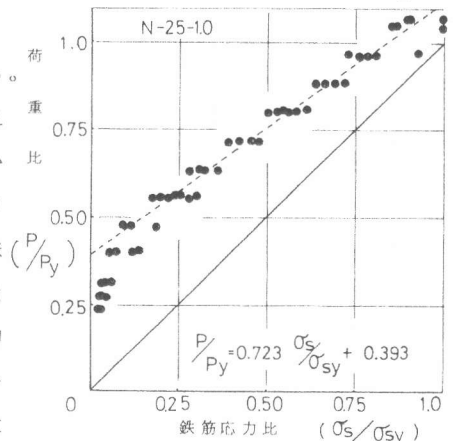


図3 鉄筋応力比と荷重比の関係

特性が、鋼繊維長の長短により明確に現われたものと考えられる。

N-60-0.5とN-60-1.0の比較から、同一繊維の場合には、混入量の多い方がひびわれ断面における荷重伝達能力も卓越しており、引張抵抗性能が優れていることがわかる。

設計荷重段階で考えれば、同一混入量の場合長い繊維を用いた方が有利であると思われる。

4. 変形拘束荷重に対する補強効果

収縮変形を拘束する状態でSFRRC部材の剛性変化および鉄筋応力度変化をRC部材の場合と比較し検討を行なった。図5、図6はそれぞれ温度降下量と剛性比の関係および温度降下量と鉄筋応力度の関係を示した。図中実線は実際に温度変化を与えた試験体の測定値であり、点線はコンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ とし、常温下の試験で測定された変形量を温度降下量に換算したものである。

図5に示されるように、変形拘束試験体では零度以上の温度領域における剛性変化は常温の場合とほとんど同じであるが、零度以下の領域ではコンクリートの物性変化が著しいので、温度が降下して拘束変形量が増加しても剛性は低下せず0.40～0.47の剛性比を維持している。また、RC部材に比較してSFRRC部材の方が剛性が大きく、拘束荷重が大きくなる結果が得られた。一方、コンクリートの物性変化がほとんど生じない温度領域を対象に検討した試験体では、剛性比が0.8～0.3の領域では鋼繊維補強の効果が認められるものの、剛性比0.3以下では鋼繊維の混入の有無が剛性変化に与える影響はほとんど認められない。これらの結果から、SFRRC部材に生ずる変形拘束荷重はRC部材と同等かそれ以上で、温度が零度以下の場合にはRC部材より大きくなる。

図6は(3)で述べたSFRRCの荷重分担を考慮して鉄筋応力度を計算し、温度降下量との関係を示したものである。Rで示す変形拘束試験体では温度降下に伴い物性変化が生ずるので、SFRRCによる荷重分担は図2～4で示される常温の場合より大きくなると考えられるが、Nシリーズの常温下の場合と全く同じであるとして計算を行なった。

図から明らかなように、Rシリーズの場合同一温度降下量に対するSFRRC部材の鉄筋応力度はRC部材より小さくなっている。また、Nシリーズの場合には、SFRRC部材はRC部材に比較して相当小さな鉄筋応力度に抑制することができる。

このように拘束変形という観点からは、SFRRC部材はRC部材と比較して大きい変形拘束荷重を生ずることになるが、鉄筋応力度は相当小さく抑制することができることが明らかとなった。

5. ひびわれ性状

5.1 ひびわれ状況：SFRRC部材のひびわれ性状がRC部材と異っている点は、(1) ひびわれ間隔に規則性がない。(2) 枝分れする細かなひびわれが多数みられる。(3) 一本のひびわれで断面を貫通するひびわれとはならない。(4) 部材降伏から塑性変形の段階では変形が数ヶ所のひびわれ断面に集中する。などがあげられる。

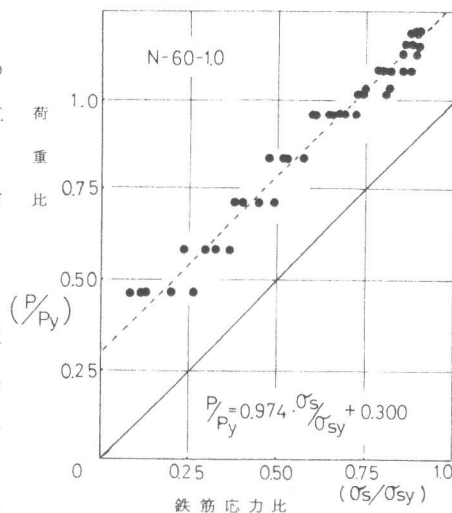


図4 鉄筋応力比と荷重比の関係

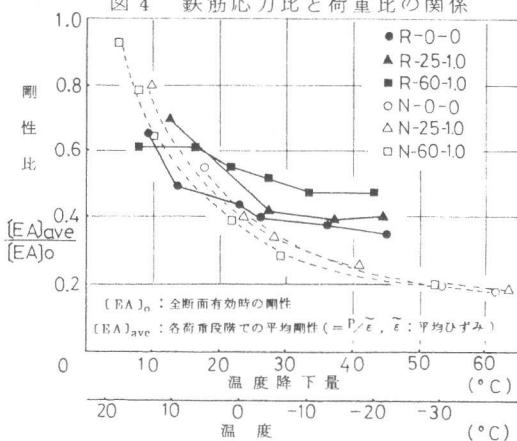


図5 温度降下量と剛性比の関係

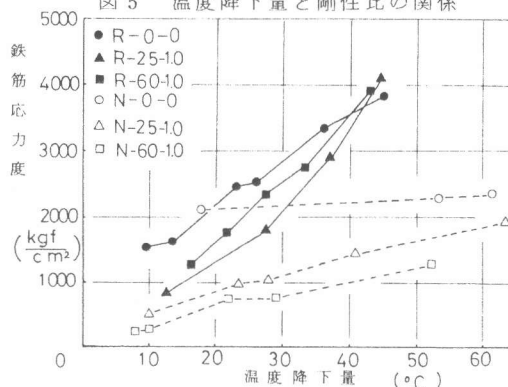


図6 温度降下量と鉄筋応力度の関係

部材降伏に対して余裕のある荷重段階では、RC部材に見られるような主ひびわれという観点からは、鋼繊維混入量の増加とともにその発生が抑制される傾向にある。反対に、鋼繊維混入量の増加とともに細かなひびわれが多数発生するようになる。そして、部材の降伏近くから塑性変形の荷重段階では、鋼繊維の分散の良好でない強度的に弱い断面に変形が集中し、ひびわれが大きく開いて好ましくない変形状態を呈するようになる。

5.2 ひびわれ幅：本実験では10cmの標点間に生ずる総ひびわれ幅をもってSFRC部材のひびわれ幅とした。全測定箇所の平均値および最大値をそれぞれ平均ひびわれ幅、最大ひびわれ幅とした。

図7、図8はそれぞれRシリーズの常温および-60℃における荷重とひびわれ幅の関係を示している。同一荷重ではSFRC部材の方がRC部材に比較して最大、平均ひびわれ幅ともに小さく、また、-60℃の場合には繊維長さの相違の影響も明確に現われている。RC部材は一本のひびわれに対する値であるが、SFRC部材は標点10cmの間のすべてのひびわれの総計であるので、個々のひびわれ幅はSFRC部材の方が相当に小さいことが推察される。

一方、SFRCの荷重分担を考慮して鉄筋応力度とひびわれ幅の観点から検討すると、図9に示されるようにSFRC部材とRC部材とのひびわれ幅に差はなくなるものと思われる。むしろ、部材の降伏に近い荷重段階や繊維の分散が良好でない強度的に弱い部材断面で変形の集中がおり、最大ひびわれ幅はRC部材の方が小さくなる場合のあることが推察される。

これらの結果から、SFRC部材では部材の降伏に対して余裕のある荷重段階において、ひびわれ幅を抑制する効果を期待できるものと考えられる。

6. まとめ

SFRC引張部材の変形およびひびわれ性状に関して、本実験範囲で得られた結果は次のとおりである。

- (1) 設計荷重の領域でSFRC部材を考える場合、SFRCによる耐荷能力をある程度期待することができる。また、鋼繊維長の長いファイバーを使用したSFRCの方が、耐荷性能が優れている。
- (2) 変形拘束荷重を受けるSFRC部材は、RC部材に比較して鉄筋応力度を抑制する効果がある。
- (3) 降伏に対して余裕のある荷重段階では、RC部材へ鋼繊維を混入することにより、ひびわれ幅を抑制する効果を期待することができる。

本研究を実施するにあたり、住友金属工業(株)中央研究所山川氏、神戸製鋼(株)高見氏より鋼繊維の提供を頂いた。実験ならびにデータ整理に協力頂いた金子雅史君(東京理大)、石原義彦君(東洋大)に謝意を表します。

参考文献 1) 小林；繊維補強コンクリート—特性と応用— 1981.6, オーム社

2) 中野他；鋼繊維補強鉄筋コンクリート部材に関する基礎的研究, 土木学会年次講演概要集 1981.10

3) 金津他；低温下における鉄筋コンクリート部材の力学的特性, 電力中央研究所報告 No.379016, 1979.10

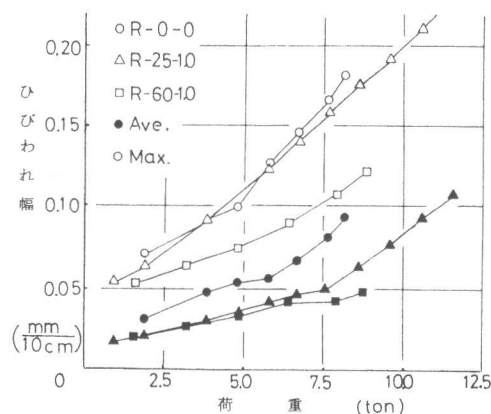


図7 荷重とひびわれ幅の関係(常温)

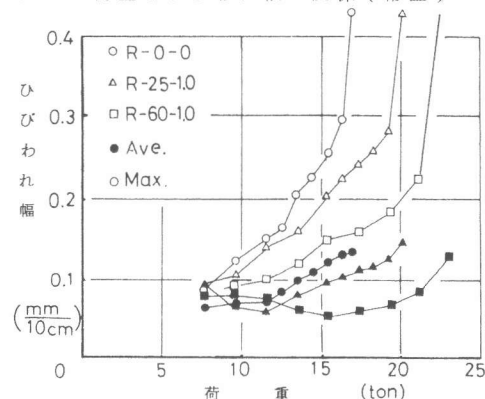


図8 荷重とひびわれ幅の関係(-60℃)

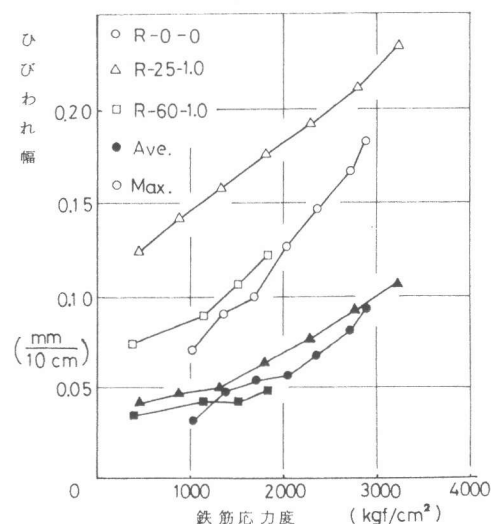


図9 鉄筋応力度とひびわれ幅の関係