論文 鋼繊維補強コンクリートの乾燥収縮特性と RC 部材の挙動

内田 裕市^{*1}·矢島 秀治^{*2}·六郷 恵哲^{*3}

要旨:本研究は,鋼繊維補強コンクリート(SFRC)の乾燥収縮特性ならびに SFRC を用いた RC はりの乾燥を受けた後の力学挙動について検討したものである。実験の結果,繊維の 混入率が 1%の SFRC の乾燥収縮特性はプレーンコンクリートとほとんど差がないことが明 らかとなった。SFRC を用いた鉄筋コンクリートはりのひび割れ幅はプレーンコンクリート を用いたはりに比べ小さくなり,膨張材を併用することで低減効果がさらに高まることが明 らかとなった。

キーワード:鋼繊維補強コンクリート,乾燥収縮, RC はり,ひび割れ,曲げ剛性

1. はじめに

SFRC (鋼繊維補強コンクリート) はマトリッ クスにひび割れが発生した後も,ひび割れ面で の繊維の架橋効果により,ひび割れの拡大を低 減することが可能な材料である。しかし,我が 国では鋼繊維補強コンクリート (SFRC) が登場 してすでに 30 年近くが経過しているが,構造部 材への利用はあまり行なわれていないのが実情 である。一方,近年,コンクリート構造物の耐 久性が問題となり,建設直後ならびに供用期間 中に発生するひび割れの制御が課題となってい る。そこで,構造部材のひび割れの低減を目的 に SFRC を利用することが試みられている¹⁾。

コンクリートに発生するひび割れの原因とし ては様々なものがあるが,その一つとして乾燥 収縮が挙げられる。これまでの研究によれば鋼 繊維の混入により,乾燥収縮自体が低減される とした報告²⁾もあるが,必ずしもその効果が明確 ではないデータも報告されている³⁾。また,乾燥 収縮が外部拘束されることにより発生するひび 割れに関しては,繊維の架橋効果によりひび割 れ幅の拡大が低減されることが報告されている が^{2),3)},鉄筋コンクリート部材におけるひび割れ 幅に関しては十分なデータが得られているとは 言えない。

そこで、本研究では、SFRC を鉄筋コンクリー ト構造物のひび割れ制御の目的で利用するため の基礎資料を得ることを目的として、コンクリ ート自体の乾燥収縮特性について検討するとと もに、乾燥を受けた後の鉄筋コンクリートはり の挙動について実験的に検討した。

2. 実験概要

本実験ではプレーンコンクリート(以下, PL と記す), PLに鋼繊維を1%混入したコンクリート(SF)および SF に膨張材を添加したコンク リート(EF)の3種類のコンクリートに関して, コンクリート単体の乾燥収縮を計測した。さら に,これらのコンクリートを用いた鉄筋コンク リートはりに関して乾燥収縮を計測するととも に,乾燥後に曲げ載荷試験を行い鉄筋コンクリ ートはりのひび割れ性状ならびに曲げ剛性の計 測を行なった。

2.1 SFRC の乾燥収縮特性に関する実験

実験に使用したコンクリートの示方配合およ び材料を表-1に示す。繊維補強コンクリートの 配合は水セメント比を 50%,単位水量を 180kg/m³,繊維混入率を体積で 1.0%とした。こ

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助教授 工博 (正会員) *2 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株)土木設計部技師長付部長 *3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

\setminus	W/C	空気量 (%)	繊維 混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)						
	(%)			W	C ¹⁾	S ²⁾	G ³⁾	Fib ⁴⁾	Ad. ⁵⁾	Exp. Ad. ⁶⁾
PL	50	5.0	-	182	364	885	821	-	3.24	-
SF			1.0	180	360	876	813	80	3.24	-
EF				180	330	870	813	80	3.24	30

表-1 コンクリートの配合

1) 普通ポルト(密度 3.15g/cm³), 2) 川砂(2.60g/cm³), 3) 玉砕石 Gmax=15mm(2.63g/cm³)

4) φ0.6×30mm 両端フック付き,5) 高性能 AE 減水剤,6) CSA 系

こで、繊維混入率を1%で1種類としたのは、通 常、鋼繊維の効果を期待するには最低でも0.5% 以上とする必要があるが、ワーカビリティーの 点から多量に混入することは困難であり、実施 工ではおおよそ1%程度とされているためであ る。膨張材に関してはセメントの9%とした。な お、PLの配合はSFの配合から鋼繊維を除いた ものであり、したがってPLとSFのコンクリー トマトリックスは同一の配合である。表-2に各 コンクリートの強度試験結果を示す。

乾燥収縮用供試体として各コンクリートに対 し、10×10×40cmの角柱供試体をそれぞれ3本 ずつ作製した。供試体は実際の現場での養生を 模擬するため材齢1日で脱型し、ただちにラッ プをして1週間、構造実験室内で養生を行なっ た。その後ラップをはずし、構造実験室内で乾 燥させた。なお、乾燥期間中の実験室内の環境 は日変化はあるが、温度については乾燥開始直 後の20℃から材齢100日で6℃までほぼ単調に 減少し、また、湿度は期間中50%から80%の間 で変化し、平均的には60%から70%であった。

計測は、供試体を剛性の高い鋼製フレーム内 に鉛直に設置し、供試体ごとに 1/1000mm ダイヤ ルゲージのスピンドルの先端を供試体上面の中 央に垂直に当て、試験期間中固定したままの状 態で長さの経時変化を計測した。なお,温度変 化による長さ変化を補正するために,上記9本 の供試体の他に,1年間以上実験室内で十分に乾 燥させた供試体3本についても同様の計測方法 により長さ変化を計測した。

2.2 SFRC を用いた RC はりに関する実験

前節で述べた PL, SF および EF と同一の配合の コンクリートに対し,複鉄筋コンクリートはり 試験体をそれぞれ 2 体ずつ作製した。使用した コンクリートの強度試験結果を表-2 に示すが, 角柱と RC はりで強度差があるのは,打設時なら びに養生期間の雰囲気温度が異なっているため である。はり試験体の寸法は図-1 に示すように 断面を 10×20cm とし全長を 180cm としたもの である。主鉄筋には引張, 圧縮ともにD16

\backslash	角柱		RCはり					
	材齢 28日	材齢 28日	載荷試験時材齢					
	f'c	f'c	f'c	fb	fcr	fcr/fb		
PL	43.2	51.5	56.1	7.05	2.99	0.42		
SF	40.4	48.4	52.9	6.28	3.95	0.62		
EF	45.2	58.9	63.9	7.85	4.80	0.61		

表-2 コンクリートの強度

f'c: φ10×20cm による圧縮強度(N/mm²) fb: 10×10×40cm による曲げ強度(N/mm²) fcr: はり試験体のひび割れ発生強度(N/mm²)



図-1 RC はりの寸法

(SD345) を1本用い,かぶりは15mmとし, 上下左右対称となるように配置した。鉄筋比は 圧縮,引張ともに1.1%である。試験体は材齢3 日で脱型し,ただちにラップをして構造実験室 内で1週間養生を行った。その後ラップをはず し,構造実験室内に静置して材齢70日まで乾燥 させた。

乾燥中のはり試験体の乾燥収縮ひずみは,試 験体中央断面における圧縮,引張鉄筋ならびに コンクリート表面にひずみゲージを貼り付けて 計測した。

材齢 70 日まで乾燥させた後に, ビーム試験機 を使用して曲げ載荷試験を行った。載荷はスパ ンを 1500mm として 3 等分点載荷とした。計測 項目は荷重,鉄筋ひずみ,載荷点に対する供試 体中央断面の相対変位、およびひび割れ幅の 4 項目とした。

荷重の計測には容量 98kN のロードセルを用 いた。鉄筋ひずみの計測には乾燥収縮の計測に 用いたひずみゲージをそのまま利用した。変位 の計測は,容量 10mm の高感度変位計を取り付 けた変位測定器具を試験体の載荷点位置の側面 に直接固定して計測した。ひび割れ幅の計測に は容量 5mm の π 型ゲージを用いた。

載荷は,まず初期剛性を計測するために弾性 範囲内で3等分点載荷をし,一度除荷した後に 中央断面にひび割れを発生させるため中央集中 載荷をした。供試体中央でひび割れを確認した 時点で除荷をし,π型ゲージを取り付けて再度3 等分点載荷を行った。ひび割れ幅の計測は,任 意のひび割れ3本に対して供試体側面鉄筋位置 で行なった。なお,載荷はせん断破壊が生じた 時点あるいは鉄筋が降伏した時点で終了するこ ととした。

3. 結果と考察

3.1 SFRC の乾燥収縮特性

図-2に10×10×40cm 角柱供試体の乾燥収縮 ひずみを示す。なお,同図は各コンクリートの3 本の供試体で得られた計測結果の平均値である。



図-2 角柱供試体の乾燥収縮

図-2によれば、PLとSFの乾燥収縮ひずみ はともに乾燥後90日で700µを越え、経時変化 にもほとんど差はみられなかった。一方、EFは 封緘養生のために材齢初期において水分の補給 が十分でなかったために、膨張材を使用したに もかかわらず、膨張ひずみが発生するまでには 至ってはいないが、その後は収縮ひずみの発現 が遅れ、材齢100日でのひずみ量は600µ程度と なり、PL、SFと比較して明らかに収縮量が小さ くなった。

以上より、コンクリートマトリックスが同一 の場合、乾燥期間が 100 日程度では乾燥収縮に 対して混入率 1%の鋼繊維はほとんど影響しな いと考えられる。また、膨張材を添加した場合、 材齢初期に十分な膨張が得られなくても、その 後の収縮ひずみの増加割合が小さく、膨張材を 用いない場合にくらべ乾燥収縮が低減すること がわかった。

なお、鋼繊維の乾燥収縮への影響は長期材齢 において顕著になるという報告があり²⁾,この点 に関しては計測を継続し検討する必要があると 考えている。

3.2 SFRC を用いた RC はりの乾燥収縮

図-3に各RCはり試験体において計測された 収縮ひずみを示す。いずれのコンクリートの場 合でも鉄筋ひずみとコンクリートひずみは材齢 70日において100µ程度の差が見られた。これ は、供試体の内部と表面の乾燥の違い、および 弾性変形を含む付着すべりによるものと考えら れる。



コンクリートの種類ごとのはり試験体の収縮 ひずみを比べると、前節で示した $10 \times 10 \times 40$ cm 角柱供試体の場合と同様、PL と SF ではほとん ど差がなく、EF は PL と SF に比べ乾燥後 70 日 で 100μ 程度小さくなった。このことからも、乾 燥期間が 100 日程度の範囲では鋼繊維が乾燥収 縮を低減する効果はほとんどないもとの言える。

なお, 図-2 に示した 10×10×40 c m角柱供 試体の材齢 70 日における収縮ひずみは 600 μ を 越えているのに対して、はり供試体の鉄筋ひず みは 300μ程度である。これは鉄筋による拘束, コンクリートのクリープ,鉄筋の付着すべり. および供試体寸法の違いによる収縮ひずみの差 によるものであると考えられる。また、いずれ の供試体においても、乾燥期間中、鉄筋とコン クリートのひずみはほぼ単調に変化(収縮)し ていることから,供試体には鉄筋の拘束による 貫通ひび割れは発生していなかったものと考え られ、目視観察によっても貫通ひび割れは観測 されなかった。ただし、PLとSFではアセトン で拭くことにより確認できる程度の微細な表面 ひび割れが発生しおり、その割合は PL の方が多 く見られた。また、EF ではこのような微細な表 面ひび割れもほとんど観察されなかった。

3.3 乾燥を受けた後の RC はりの曲げ挙動

(1) 弾性剛性およびひび割れ発生強度

図-4 に各供試体の等モーメント区間のモー メントー曲率関係を示す。曲率は等モーメント



図-4 はり試験体のモーメントー曲率関係

区間のたわみ形状を円弧として試験体中央の変 位より換算したものである。弾性剛性はいずれ の試験体もほぼ一致しており、これより、いず れの試験体においても乾燥期間中には曲げ剛性 に影響を与えるようなひび割れは発生していな かったものと考えられる。

各試験体の初期剛性の変化点から乾燥収縮の 影響を考慮せずに求めた曲げひび割れ発生強度 を表-2に示す。いずれの試験体においても,10 ×10×40cm曲げ供試体から求められる曲げ強度 より明らかにひび割れ強度は低下しており,乾 燥による初期応力が大きく影響している。曲げ 強度に対するひび割れ強度の比率は,鋼繊維を 混入すると大きくなっている。また,SF と EF を比較すると強度の比率には差はみられないが, 膨張材の使用することで曲げ強度自体が高くな っているため,ひび割れ強度に対して膨張材も 有効に機能しているものと考えられる。

(2) ひび割れ発生後の剛性

ひび割れ発生後の剛性は、図-4に示すように PL<SF<EFの順に大きくなった。ただし、PL とSFでは剛性に大きな差は見られず、また両試 験体では、コンクリートの引張を無視して求め られる、いわゆる RC 断面の剛性よりもさらに剛 性が低下する結果となった。

そこで、はり試験体の見かけの剛性が RC 断面 の剛性より低下する原因を明らかにするために、 乾燥収縮による初期応力を考慮した簡単な RC 断面の曲げ解析を行なった。解析では、乾燥収 縮による初期応力を鉄筋のプレストレスとして 考えることとし、鉄筋ひずみの計測結果より、 鉄筋の初期圧縮応力を 50N/mm² (ひずみで 250 µ)として計算を行なった。また、比較のため に初期応力がない場合と初期応力を引張で 50N/mm² とした場合について計算を行なった。 なお、コンクリートの引張の応力-ひずみ関係に は図-5 に示すものを用い、断面の寸法は実験で 用いた試験体と同一とした。

図-6 に計算で求められたモーメントー曲率 関係を示す。同図より乾燥収縮による初期応力 が存在する場合(図中 ε_{s-ini} = - 50N/mm²)には, 荷重の増加にともない見掛けの剛性が初期応力 を無視した RC 断面(ε_{s-ini} =0,引張無視)の剛 性より小さくなることが示され,乾燥による初 期応力が RC はりの曲げ剛性にも影響すること が明らかとなった。

(3) ひび割れ性状

図-7 に載荷試験終了後のひび割れ状況を示 す。同図より鋼繊維を混入した SF および EF 試 験体のひび割れ間隔は PL 試験体より小さくな る傾向が読み取れる。

図-8には荷重と鉄筋ひずみの関係を示す。同 図より同一荷重に対して鉄筋ひずみは PL>SF >EFの順となっており、これはひび割れ面にお ける鋼繊維の架橋効果ならびに膨張材による初 期応力の低減効果により、鉄筋応力が低減され ることとを示していると考えられる。

図-9 には鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係を



図-7 RC はりのひび割れ状況

示す。同図より鉄筋ひずみが等しいときのひび 割れ幅は,SFとEFでは差がなく膨張材による 差は見られないが,PLと比べると明らかにひび 割れ幅は小さくなっている。これより,鋼繊維 補強コンクリートでは,鉄筋ひずみが同一の場 合でも,ひび割れ面の鋼繊維の架橋効果により プレーンコンクリートに比べひび割れ幅が小さ



くなるものと考えられる。

図-10には荷重とひび割れ幅の関係を示す。 同図より,同一荷重で比べるとひび割れ幅は明 らかに PL>SF>EF の順となっており,特に膨 張材を添加した EF では PL の半分程度となって おり,ひび割れ幅の制御に鋼繊維および膨張材 が非常に有効であることがわかる。

以上より,鋼繊維補強コンクリートを用いた RC はりでは,同一荷重を受けるプレーンコンク リートはりに比べ,ひび割れ面の鋼繊維の架橋 効果により鉄筋応力が低減されるとともに,さ らに同一鉄筋ひずみであったとしても鋼繊維の 架橋効果によりさらにひび割れ幅が小さくなる と考えられる。

4. まとめ

本実験で得られた主な結果をまとめると以下の 通りである。

- (1) 乾燥期間 100 日以内では, 混入率 1%の鋼繊 維は乾燥収縮にほとんど影響を与えない。
- (2) 乾燥を受けた RC はりにおいては、乾燥による初期応力により見掛けの剛性が引張を無視した曲げ剛性より小さくなる場合のあることが実験と計算で示された。
- (3) RC はりのひび割れ幅の低減に鋼繊維が有効 であり、また膨張材の併用がさらに効果的で あることが示された。



参考文献

- 例えば、西村康之、下野一行、紀伊昌幸、矢 島秀治:奈良線鴨川橋梁の設計と施工-SRC 床板の採用により低い床高と鋼重の低減を 可能にした鉄道鋼トラス橋-,橋梁と基礎, 2000-11, pp.181-193, 2000.
- 小林一輔,魚本健人,峰松敏和:鋼繊維補強 コンクリートの乾燥収縮に関する研究,第2 回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.209-212, 1980.
- 大岡督尚,橘高義典,渡部 憲:短繊維補強 コンクリートの収縮ひび割れ特性:日本建築 学会構造系論文集,第544号,pp.7-13,2001.6

謝辞

本実験で使用した鋼繊維は(株)ブリヂスト ンから提供していただきました。ここに記して 感謝の意を表します。

-1524-