多量に鋼繊維を混入したコンクリートの破壊力学特性

長岡技術科学大学　学生会員　○嶌田　聖史
太平洋セメント（株）　正会員　石田　征男，河野　克哉，川口　哲生，田中　敏嗣

１．はじめに

近年，コンクリートの高じん性化を目的として，繊維補強コンクリートに関する検討が数多く行われているが，その多くが繊維量 3%程度以下である．一般に，繊維補強コンクリートは繊維混入率が高いほど，引張強度やじん性などの力学特性が向上する．多量に繊維を混入した例としては，予め型枠内に繊維を充てんした後にグラウトを注入して製造する Slurry Infiltrated Fiber Concrete（以下 SIFCON）がある[1)]．国内でも，SIFCON の実用化に向けて検討した例はあるが[2)]，注入グラウトの品質向上や施工性の改善などが課題として挙げられ，実用化には至っていない．本研究では，品質と施工性を確保可能な材料および配合を選定して SIFCON を製造し，力学特性について検討した．

２．実験概要

(1) 使用材料ならびに配合

使用材料を表-1 に，繊維を含むコンクリートの配合条件を表-2 に示す．本研究では，型枠内に繊維を充てんした後にグラウト（セメントペースト）を注入して供試体を作製した．このため，鋼繊維を型枠内に投入した際に高い充てん率を実現可能であり，かつ繊維を充てんした状態でもグラウトを注入可能な間隙を有する繊維を選定した．その結果，本研究では立体波形の繊維を 15vol%まで充てんすることが可能であった．注入するグラウトの材料および配合は，繊維の間隙を通過可能であり，かつ注入後に材料分離が生じない条件として，JP ロートの流下時間 3 秒以下，ブリーディング率 1%以内を目標に選定した．その結果，低熱セメントを使用した場合は水結合材比（以下 W/B）を 35%，結合材中へのシリカフューム混合率（以下 SF/B）を 10mass.%とした．早強セメントを用いた場合は，W/B を 40%，SF/B を 20mass.%とした．また，早強セメントを使用した場合においては，SIFCON の力学特性向上を目的として，膨張材をセメントの内割りで混合し，その混合量は，15，30 および 45kg/m³ の 3 水準とした．

表-1　使用材料

材　料	種類/名称
練混ぜ水	上水道水
セメント	早強ポルトランドセメント(記号：H,密度 3.14g/cm³)
	低熱ポルトランドセメント(記号：L,密度 3.22g/cm³)
混和材	シリカフューム(記号 SF､密度 2.37g/cm³,BET10.48m²/g)
	石灰系早強性膨張材(記号 EX,密度 3.19g/cm³)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤(記号 SP)
補強繊維	立体波形鋼繊維（寸法 φ0.6×25mm,密度 7.85g/cm³）

表-2　コンクリートの配合条件

名称	ｾﾒﾝﾄの種類	繊維混入率(vol.%)	W/B (%)	SF/B (%)	EX (kg/m³)	SP (B×%)
L35-EX0	L	15	35	10	0	1.00
H40-EX0	H		40	20	0	1.15
H40-EX15					15	
H40-EX30					30	
H40-EX45					45	

(2) SIFCON 供試体の作製方法

SIFCON の供試体の作製方法は，100×100×400mm の型枠内に繊維を 15vol.%分充填した後に，別途練り混ぜたグラウトを注入する方法とした．グラウトは，底面まで挿入したロートを用いて型枠の最下部から上方に向かって注入した．また，グラウトが型枠全体に行き渡り，打込み面まで注入された後に，テーブルバイブレータによる振動締固めを行い，脱泡した．成形した供試体は，気温 20℃の試験室内で 24 時間封かん養生した後に脱型し，材齢 28 日まで 20℃水中養生した．なお，今回の一連の実験において，練り混ぜたグラウトの性状は目標としたスペックをほぼ満足し，供試体の見かけの充てん率も 98%以上と良好であった．

(3) 試験項目および方法

試験は，JCI-S-002-2003 に準拠し，切欠きはりの 3 点曲げ載荷試験を行い，荷重-CMOD 関係を測定した．圧縮強度試験は，切欠きはりの 3 点曲げ載荷試験後の供試体よりひび割れが発生していない端部を切り出して供試体とした．なお，供試体寸法は 100×100×100mm とし，打込み面より毎秒 0.6±0.4N/mm² の速度で載荷した．

キーワード　鋼繊維，プレパックド，注入グラウト，膨張材，破壊エネルギー，引張軟化曲線
連絡先　〒940-2137　新潟県長岡市上豊岡町 1603-1　長岡技術科学大学　TEL. 0258-47-1611

3．実験結果

(1)圧縮強度

圧縮強度試験結果を図-1 に示す. SIFCON の圧縮強度は, すべての配合で繊維未混入の場合の 3～4 倍となり, 繊維を混入したことによるコンファインド効果が認められた．また、SIFCON の圧縮強度は，使用したセメントの種類や膨張材の添加量にかかわらず，すべての配合で同等であった.

(2)切欠きはり試験体の荷重-CMOD 曲線

材齢 28 日における荷重－CMOD 曲線を図-2 に示す. また，図中には各配合の破壊エネルギーもあわせて示す. 最大荷重は，H40-EX0 がやや低く，膨張材を使用することで向上し，膨張材を使用した水準内では同等であった．また，最大荷重以降の低下勾配は，いずれの配合においても非常に緩やかであり、繊維を多量混入することによって大幅に変形性能が向上した. SIFCON の破壊エネルギーは，すべての配合で 50N/mm 以上であり，鋼繊維補強コンクリート（10.00N/mm）[3] や超高強度繊維補強コンクリート（27.12N/mm，以下 UFC）[4] の値を大きく上回った.

(3)引張軟化曲線

図-2 に示した荷重-CMOD を多直線近似解析法により, 逆解析して求めた引張軟化曲線を図-3 に示す. 引張軟化曲線における引張強度は，H40-EX0 が最も低く，L35-EX0 が最も高い値となった. 早強セメントを使用した場合は，膨張材を混入することにより引張強度が高くなり，膨張材の使用による引張強度増進効果を確認することができた．しかし，今回得られた実験結果は，UFC の標準的な引張強度（11.3N/mm²）[4] と比較するといずれの配合も同等以下の値となることを確認した．これは, 繊維を拘束しているマトリクスの強度が UFC よりも低いため，破壊形態が異なることによると考える．すなわち, UFC において繊維が引き抜ける強度よりも SIFCON のマトリクス強度の方が低く，繊維表面からマトリクスが剥離しながら供試体全体の破壊が進行するため，最大引張応力に関しては多量に繊維を混入した効果が認められなかったものと推察する．最大引張応力以降の応力低下勾配は，荷重-CMOD 関係と同様に非常に緩やかであり，今回適用した配合では，多量に繊維を混入した効果は，変形性能の向上に表れたと考える.

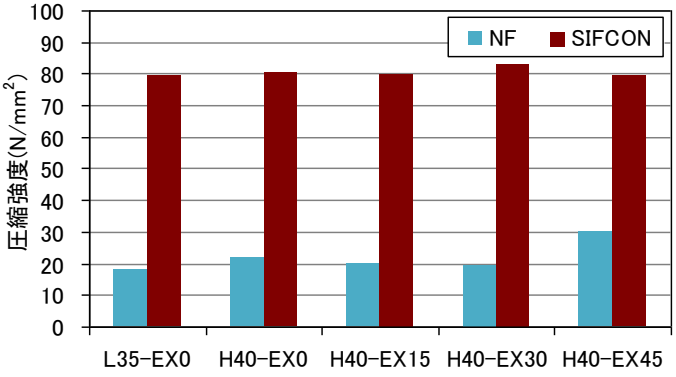

図-1　圧縮強度

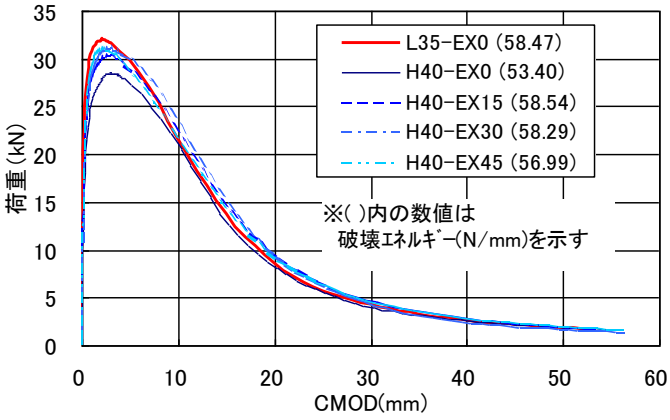

図-2　荷重-CMOD 曲線

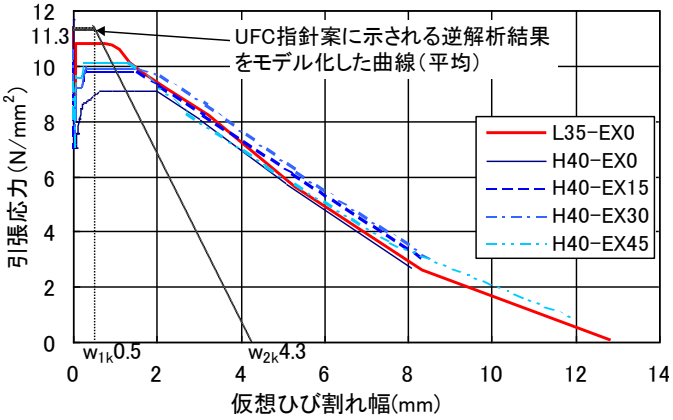

図-3　引張軟化曲線

4．まとめ

(1)SIFCON の圧縮強度は, すべての配合で繊維未混入の場合よりも大幅に強度が増大することを確認した.

(2)SIFCON の引張強度は, 膨張材の混入により向上する.

(3)SIFOCN は，従来の繊維補強コンクリートおよび超高強度繊維補強コンクリートと比較して, 変形性能に優れ, 破壊エネルギーが非常に高い.

[参考文献]

1) David R. Lankard : Slurry Infiltrated Fiber Concrete (SIFCON), Concrete International, Vol.6 No.12, pp.44-47、December 1984.

2)新村ら：繊維高含有コンクリート SIFCON の基礎性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告書，Vol.19，No.1，pp.1207-1212、1997

3) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー第 97 号，1999.

4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー第 113 号，2004.