膨張材が高強度繊維補強コンクリートの力学特性に及ぼす影響

(株) IHI　正会員　　○今村　紅音　　塩永　亮介　　山口　隆一

１．目的

著者らは、圧縮強度 70N/mm^2 を超える高強度コンクリートに鋼繊維を混入した高強度繊維補強コンクリート(以下 HSFRC)の流動性の改善および基本的な力学性能の把握を図ってきた[1)、2)]。本材料は特殊な養生設備を必要とせず、優れたポンプ圧送性をも有することから、現場施工に対応できる高性能材料として今後の利用が期待できる。一方でシリカフュームの添加やセメント量の増大に伴う過大な自己収縮の発生が予想されるため、収縮ひずみの低減を目的とした膨張材の添加が必要である。膨張材は、水和反応により生成物中に微細な空隙を発生させることで体積を確保し収縮を補償する混和材であるが、膨張材の混入が HSFRC の力学特性に与える影響については未だに明らかとなっていない。本研究では HSFRC において、膨張材の混入による自己収縮ひずみの低減効果を確認するとともに、力学特性のうち曲げじん性・圧縮じん性への影響を調査した。

２．実験概要

表-1　実験ケース

ケース名	目標強度 (N/mm^2)	水粉体比 (%)	鋼繊維混入率 (vol.%)	膨張材混入量 (kg/m^3)
N	70	33.0	1.0	0
E				30

２．１　材料特性及び実験ケース

本研究で基準とした HSFRC は、目標強度を 70N/mm^2、鋼繊維混入率を 1.0vol.%とした。鋼繊維は、長さ 30mm、径 0.6mm で両端がフック形状となるものを用いた。また、シリカフュームの添加量や細骨材率を適度に調整し、練り上がり時のスランプが 20±2 cm、かつ材料の分離抵抗性に優れた配合とした。本研究の実験ケースを表-1 に示す。使用した膨張材は石灰系で、密度 3.19g/cm^3、粉末度 4520 cm^2/g のもので、単位混入量は 30kg/m^{3}としてセメントの一部として置き換えた。

２．２　試験項目及び方法

・自己収縮ひずみ計測

日本コンクリート工学協会（以下、JCI）が定める「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法（案）(JCI-1996)」に準拠し、100×100×400 ㎜の角柱試験体を使用した。ひずみの計測には、低弾性型埋込みひずみゲージを用いた。

・圧縮じん性試験

土木学会が定める「鋼繊維補強コンクリートの圧縮試験および圧縮タフネス試験方法（JSCE-G 551-1999)」に準拠し、φ100×200 mm の円柱試験体にコンプレッソメーターを取り付け、油圧式万能試験機にて圧縮載荷した。

・曲げじん性試験

JCI が定める「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重-変位曲線試験（JCI-S-002)」に準拠し 100×100×400mm の角柱試験体を用いた三点曲げ試験を実施した。上記の試験によって得られた荷重-開口変位関係を、同じく JCI で定める多直線近似法による逆解析法（JCI-S-001　付属書）によってその材料の引張軟化曲線（結合応力-仮想ひび割れ幅関係）を算出した。さらに、仮想ひび割れ幅 2mm までの引張軟化曲線下の面積を「有効破壊エネルギー」として算出し、膨張材の有無の影響を評価した。

３．　試験・解析結果

３．１　自己収縮ひずみ計測

自己収縮ひずみ計測結果を**図-1** に示す。どちらのケースも凝結始発後に急激な収縮が生じ、N はそのまま-200 μ まで収縮を続けたが、E は材齢 5 時間から 12 時間の間は膨張側に転じ、収縮ひずみがほぼ 0 μ となるまで膨張

キーワード　高強度繊維補強コンクリート、膨張材、引張軟化特性、圧縮じん性
連絡先　　〒235-8501　神奈川県横浜市磯子区新中原町 1 番地　（株）IHI 基盤技術研究所　TEL：045-759-2864

した。その後はどちらのケースも緩やかに収縮を続け、材齢 168 時間で、E の N に対する自己収縮ひずみの差分はおよそ 100μ であった。

３．２　圧縮じん性試験

圧縮じん性試験結果から算出した応力-ひずみ曲線を**図-2** に示す。どちらのケースもほぼ同じ性状を示し、ひずみ 3000μ 付近でおよそ 80MPa の圧縮強度に達した。圧縮強度到達後は鋼繊維の効果により圧縮軟化挙動を示し、ひずみ 8000μ で圧縮強度の 50%の応力を保持した。膨張材の有無による差は見られなかった。

３．３　曲げじん性試験

曲げじん性試験から得られた荷重-CMOD 曲線を**図-3** に示す。曲げひび割れ発生荷重には有意な差が見られなかったが、最大荷重は N で 9.6kN、E で 11.1kN と 20%の差が生じた。最大荷重発生後、およそ 2.0kN の差を保持したまま荷重は推移した。

曲げ試験結果の逆解析により算出した引張軟化曲線（結合応力-仮想ひび割れ幅関係）を**図-4** に示す。引張応力はどちらのケースも 5 N/mm^2 前後であったが、その後は E の結合応力が高い水準で推移したため、E の有効破壊エネルギーは N と比較して大きく向上した(**図-5**)。

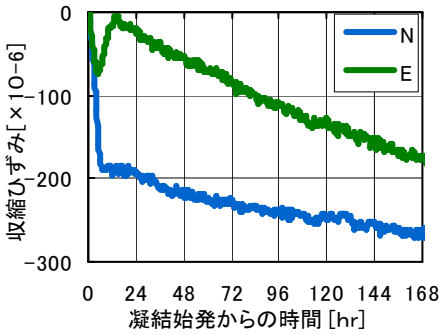

図-1　自己収縮ひずみ計測結果

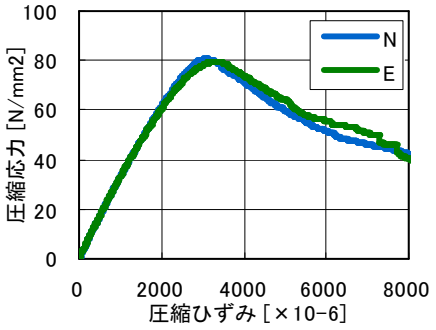

図-2　圧縮じん性試験結果

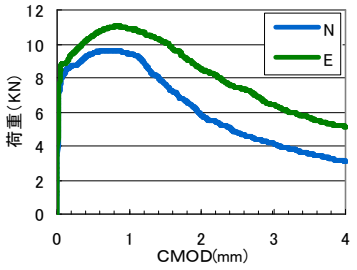

図-3　曲げじん性試験結果

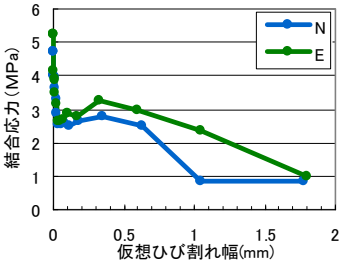

図-4　引張軟化曲線

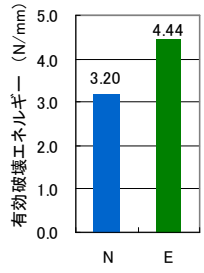

図-5　有効破壊エネルギー

４．　考察

３．２の圧縮強度、３．３のひび割れ発生荷重に差が生じなかったことから、E の有効破壊エネルギーが N を大きく上回ったのは鋼繊維の引抜き強度に差が生じたためと考えられる。これは、試験体を脱型した材齢 24 時間までに発生した E の膨張ひずみが鋼製型枠により拘束され、鋼繊維にケミカルプレストレスが作用したことが要因と考えられる。

一方で、３．２における応力－ひずみ曲線は N と E でほぼ同じ挙動を示した。これは、圧縮時の試験体の破壊は主にせん断方向に進行し、鋼繊維の架橋効果が繊維のせん断方向に対して発揮されるため、鋼繊維の引抜き強度を向上させたケミカルプレストレスの影響が少なかったことが要因と考えられる。

５．　まとめ

- 圧縮強度 80MPa、水粉体比 33%の HSFRC において、膨張材を 30kg/m^{3}混入することで材齢 168 時間での収縮ひずみを 100μ 低減した。
- 膨張材の混入は HSFRC の圧縮軟化挙動に影響を与えない。
- 膨張材を混入した HSFRC の有効破壊エネルギーは、膨張材無混入のものよりも約 40%向上した。これは、膨張材の作用による膨張ひずみが鋼製型枠で拘束されたことにより、鋼繊維にケミカルプレストレスが作用し繊維の引抜き強度を高めたためと考えられる。

〔参考文献〕

1)増田，塩永，山口：高強度繊維補強コンクリートの引張軟化特性，第 63 回年次学術講演会講演概要集，V-258，pp515-516，2008 年 9 月

2)山口，塩永，増田：高強度鋼繊維補強コンクリートのポンプ圧送実験，第 63 回年次学術講演会講演概要集，V-319，pp637-638，2008 年 9 月

3)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）