バサルト繊維や鋼繊維を用いた短繊維補強コンクリートの一軸引張試験の再現解析

（公財）鉄道総合技術研究所　正会員　○笹田　航平　戸田建設（株）　正会員　田中　徹
（公財）鉄道総合技術研究所　正会員　仁平　達也　戸田建設（株）　非会員　井戸　康浩

１．はじめに

短繊維補強コンクリートを鉄道構造物に適用した事例は，高架橋[1]における剥落防止対策や，連続合成桁の床版（負曲げ区間）おけるひび割れ対策[2]等が挙げられる。しかし，現在，短繊維補強の効果を定量的に評価して混入率等を決定するには至っていない。また，実構造物に適用された短繊維は，鋼繊維や有機繊維であるが，鋼繊維は錆汁が生じること[2]，一部の有機繊維は紫外線により劣化すること[3]が懸念される。一方で，無機繊維であるバサルト繊維は，錆汁や紫外線劣化が生じない。

そこで本研究は，バサルト繊維および鋼繊維を用いた短繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果（ひび割れ本数）について定量的に評価することを目的とし，著者らが過去実施した短繊維補強コンクリートを用いた鉄筋コンクリートの一軸引張試験[4]について，有限要素解析（以下，解析）による再現を試みた。

２．解析の概要

図－１に本研究で解析の対象とした試験体の形状を示す。試験体は，角柱コンクリート（長さ 225mm，断面寸法 200×160mm）に，異形鉄筋（呼び径 D25，全長 3,000mm）を断面中心に１本配置したものであり，本試験体における一軸引張試験[4]を解析の対象とした。

解析は，平面応力場を仮定した２次元解析とし，汎用非線形構造解析コード（DIANA version 9.6）を用いた。**表－１**のように，解析モデルに用いた有限要素のタイプを設定した。ひび割れモデルは，分散ひび割れモデル（回転ひび割れモデル）とし，鉄筋は，離散鉄筋モデルを適用した。コンクリートの要素分割は，１辺が 20ｍｍの正方形の要素とした。

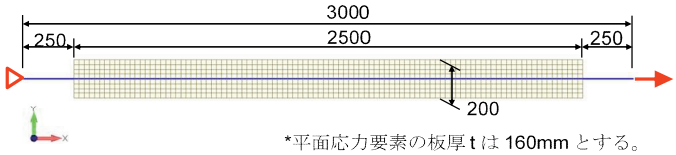
表－２に解析ケースを示す。短繊維補強の影響は，コンクリートの引張応力－仮想ひび割れひずみ関係（以下，引張軟化特性），鉄筋とコンクリート界面における付着応力－すべり関係（以下，鉄筋付着特性）の２つの構成則により解析に考慮した。短繊維補強しないコンクリート（比較対象）の引張応力－仮想ひび割れひずみ関係には Hordijk 式を，付着応力－すべり量関係 CEB-FIB モデル[5]を用いた。短繊維補強コンクリートの構成則については詳細を後述する。

３．短繊維補強コンクリートの構成則

(1) 引張軟化特性

図－２ (a)に短繊維補強コンクリートの引張応力－仮想ひび割れひずみ関係を示す。切欠き曲げ試験おける荷重－変位関係を逆解析し，引張応力－仮想ひび割れ幅関係を求めた。逆解析の結果は，仮想ひび割れ幅となっているため，仮想ひび割れ幅を等価検長で除して，仮想ひび割れひずみへ換算した。切欠き曲げ試験は，JCI-S-002-2003「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線試験方法」に従い，引張応力－仮想ひび割れ幅関係を求める逆解析は，JCI 規準（JCI-S-001-2003 付属書（参考）「コンクリートの引張軟化曲線の推定方法」）に従い実施した。等価検長は，試験結果の平均ひび割れ間隔[4]の値を用いた。

解析に用いた引張応力－仮想ひび割れひずみ関係は，逆解析した結果から，引張応力の最大点と最大点以降を補正したものである。構成則に用いた最大点の引張応力は，本試験の条件（水セメント比 50%，繊維混入率 1.0vol.%，繊維長さ 40mm）では，繊維混入の有無がよらず有意な差がなかったため，短繊維補強しないコンクリートの引張強度と同値とした。構成則に用いた最大点以降の引張応力は，逆解析の結果を短繊維の配向係数 1.57 [6]で除した値とした。配向係数により，一軸引張試験体と切欠き曲げ試験体での短繊維の配向状態の差異を考慮した。



*平面応力要素の板厚 t は 160mm とする。

図－１　対象とした試験体の形状（解析モデル）

表－１　解析モデルに用いた有限要素のタイプ

部位	有限要素のタイプ	備考
コンクリート	平面応力要素	材料非線形
鉄筋	トラス要素	材料非線形
鉄筋付着	インターフェース要素	材料非線形

表－２　解析ケース

CASE	繊維種	条件	
		引張特性	付着特性
1	繊維なし	Hordijk 式	完全付着
2			CEB-FIP モデル
3	鋼繊維	逆解析結果（繊維考慮）	完全付着
4			CEB-FIP モデル（繊維考慮）
5	バサルト繊維		完全付着
6			CEB-FIP モデル（繊維考慮）

キーワード　バサルト繊維，短繊維，一軸引張挙動，ひび割れ分散効果，非線形有限要素解析
連絡先　〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38　(公財)鉄道総合技術研究所　構造物技術研究部(鋼・複合構造)
TEL 042-573-7280

(2) 鉄筋付着特性

図－２ (b)に鉄筋とコンクリートの付着応力－すべり量関係を示す。**表－３**に鉄筋付着特性に及ぼす短繊維補強の効果を示す。鉄筋付着特性に及ぼす短繊維の効果は，著者らが別途実施した試験結果[7]を用いた。鉄筋付着特性に及ぼす短繊維の効果は，繊維補強しないコンクリートの鉄筋付着特性に対する付着応力の比・低下勾配の比・すべり量の比とみなし，これらの比を CEB-FIP モデル[5]に乗じることで解析に考慮した。

４．解析の結果および考察

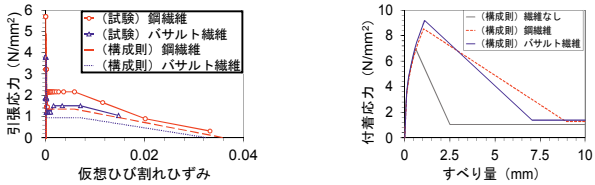
図－３に，荷重－変位関係を示す。変位は，解析モデルの中心から左右に 1,300mm 離れた位置を評点間とした鉄筋における変位および荷重である。

本検討に用いた付着応力－すべり量関係を用いることにより，完全付着の解析結果よりも試験結果の荷重－変位関係と近い形状となった。ただし，バサルト繊維補強した試験体の荷重－変位関係は，鋼繊維補強した試験体の荷重－変位関係に比べ，試験結果と解析結果の差異が大きい。本解析に用いた配向係数は，強度の異方性が無視できることが前提の値であるため，バサルトのように繊維の引張強度が角度に依存する場合には，配向係数が鋼繊維の配向係数よりも大きな値を用いることが必要であると考えられる。

図－４にひび割れ分散性の評価結果を，**表－４**にひび割れの発生本数を示す。一軸引張試験[4]におけるひび割れ発生本数は，ひび割れ幅が 0.2mm 以上であるものの本数とし，複数のひび割れが隣接する場合には，ひび割れ幅－鉄筋軸方向位置関係で上に凸の頂点を発生位置とする１本とみなした。試験と解析を比較すると，試験と解析のひび割れ発生本数が概ね一致したものの，ひび割れ発生位置については一致していない。これは，短繊維補強コンクリートの鉄筋付着特性を過小に評価していること，実際の引張軟化特性は試験体内で一様でないこと等が影響した可能性があると考えられる。

５．まとめ

本研究では，短繊維補強の効果を考慮した引張軟化特性および鉄筋付着特性を用いて，一軸引張試験の再現解析を試みた。短繊維補強の効果を考慮したことにより荷重－変位関係の評価精度が向上した。評価精度をさらに向上するには，配向角度が繊維の引張強度に及ぼす影響を明らかにする必要がある。また，本解析では，ひび割れ発生位置を適切に評価できていない。これは鉄筋付着特性を過小に考慮している可能性があるためと考えられ，考慮方法を改良することが今後の課題である。



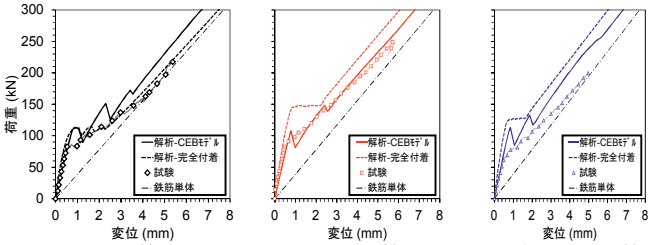
(a) 短繊維補強コンクリートの引張応力－仮想ひび割れひずみ関係　(b) 鉄筋とコンクリートの付着応力 - すべり量関係

図－２　ひび割れ分散の評価に用いる構成則

表－３　鉄筋付着特性に及ぼす短繊維補強の効果

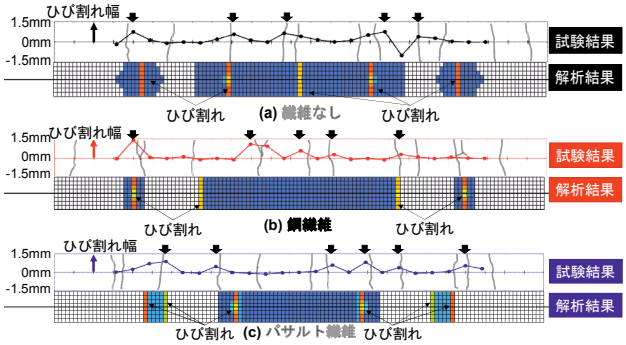
	付着応力の最大値点		付着応力の最大点以降
	付着応力／NC の付着応力	すべり量／NC のすべり量	低下勾配／NC の低下勾配
短繊維補強なし(NC)	- (3.78)	- (0.146)	- (-0.70)
鋼繊維	1.13 (4.26)	1.85 (0.270)	0.28 (-0.20)
バサルト繊維	1.09 (4.13)	1.74 (0.255)	0.35 (-0.25)

※かっこ内は，繊維なし（NC）の値で除する前の試験値



(a)短繊維補強なし　(b) 鋼繊維補強　(c) バサルト繊維補強

図－３　荷重－変位関係



図－４　ひび割れ分散性の評価結果

表－４　ひび割れの発生本数[4]

繊維種類	荷重（鉄筋のひずみ※※）	ひび割れ本数※	
		試験	解析
繊維なし	約 220 kN（約 2200×10⁻⁶）	5 本	5 本
鋼繊維	約 250 kN（約 2500×10⁻⁶）	5 本	4 本
バサルト繊維	約 200 kN（約 2000×10⁻⁶）	6 本	6 本

※ひび割れ本数：**図－４**のひび割れ幅が 0.2mm 以上で極大点数
※※鉄筋のひずみ＝荷重÷（鉄筋の公称断面積×弾性係数）

謝辞：本論文に示した試験を実施するに際して，竹本油脂株式会社 原田健二氏より貴重な助言を頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

1) 例えば，菅野貴浩：JR 東日本におけるコンクリート構造物の長寿命化への取り組み，コンクリート工学，vol.40，No.5，pp.74-81，2002
2) 例えば，南邦明ほか：北陸新幹線第４千曲川橋りょう（連続合成桁）の架設，橋梁と基礎，pp.41-47，2012
3) 山口明伸ほか：紫外線による各種繊維の劣化現象の評価方法に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.1161-1166，1996
4) 仁平達也ほか：バサルト繊維を用いた短繊維補強コンクリートのひび割れ性状，Vol.38，No.2，pp.1297-1302，2016
5) CEB-FIP：CEB-FIP model Code 1990，pp.51-58，1990
6) 小林一輔ほか:鋼繊維補強コンクリート，コンクリート工学，Vol.15，No.3，pp.7-21，1977.3
7) 笹田航平ほか：バサルト短繊維補強が鉄筋コンクリートの付着特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集（投稿中）