

バサルト短繊維の耐アルカリ性に関する一考察

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

1. はじめに

短繊維補強コンクリートの土木構造物への利用が始まっている¹⁾。これまでに、鋼繊維やポリプロピレン繊維等の有機繊維の適用事例はあるが、無機繊維の事例はない。その理由の一つとして、無機繊維自体の耐アルカリ性が低いことが挙げられる。これを解決する方法として、短繊維表面をコーティングする手法が考えられる。本稿では、この手法が耐アルカリ性に及ぼす影響について検討した。また、実構造物での使用が想定される鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性係数の下限値を確保する、玄武岩由来のバサルト繊維を用いた短繊維を開発したので以下に報告する。

2. 検討に用いた短繊維

短繊維の原料は玄武岩由来の新材料であるバサルト繊維である。原糸は玄武岩を 1500℃で溶融し、直径 13μm での遠心紡糸により製作されている。短繊維補強コンクリートの短繊維の適切な形状として試行錯誤的に、264tex (1tex : 1000m あたりの重さが 1g) の繊維を 3 本束ね 792tex とし、繊維長は 40mm とした。これについて、短繊維の一体性および耐アルカリ性の向上を目的とし、ビニルエステル樹脂またはエポキシ樹脂をコーティングした。以降、前者を BF-A、後者を BF-B とする。図-1 および表-1 に検討に用いた繊維の概要を示す。

3. 耐アルカリ性に関する検討

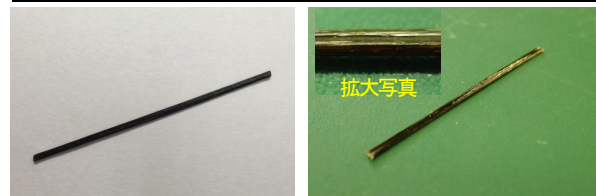
3.1 検討概要

コンクリート内の短繊維は、常時高アルカリ環境下に供される。これに類する試験として、JIS A 1193 (コンクリート用連続繊維補強材の耐アルカリ試験方法) がある。60℃のアルカリ溶液に繊維自体を供し、試験前と試験後との破断強度の比較によりその性能を評価する方法である。アルカリ溶液は、セメント飽和水溶液相当の溶液 (A 液) と水酸化ナトリウム 10% 水溶液 (B 液) のいずれかで浸漬することとなっている。図-2 に JIS A 1193 の B 液による促進試験前後の繊維の表面状況の例を示す。コーティングされた繊維表面からアルカリ溶液が浸漬して、茶色の原糸が露出し溶解していることが分かる。このように JIS A 1193 により繊維自体のアルカリ溶液に浸漬した影響を把握することは出来るものの、A 液と B 液は pH、すなわちアルカリ濃度が異なっていることや、高温かつ高アルカリ環境下の促進期間を、短繊維補強コンクリートの性能を踏まえて短繊維がコンクリート中に供される期間を換算する手法がないこと等により、短繊維同士の相対的な比較や、定性的な評価に留まるものと考えられる。

そこで、魚本・勝木²⁾が提案した無機繊維の耐アルカリ性能評価法を参考に、図-3 に示すように、繊維断面を円形としアルカリ溶液が均等に浸透すると仮定して、フィックの拡散方程式を簡略化する方法、すなわち、反応速度を示す拡散係数 (k) はコーティング材で異なると考え、繊維の引張強度を式 (4) で推定し、促進試験における温度の影響を考慮する評価法により検討した。また、アルカリ溶液は促進試験における pH と実構造物で想定する pH²⁾の差異を考慮した。温度と pH の差異から促進試験の実環境に対する促進倍率を算定し、経年に伴う引張強度残存率の低下率を推定

表-1 検討に用いた短繊維の概要

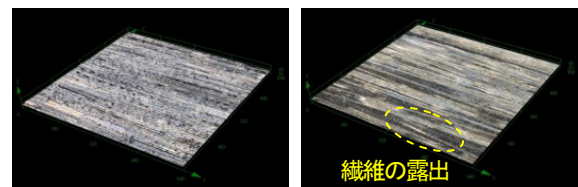
繊維	平均 断面積 (mm ²)	密度 (g/cm ³)	引張 強度 (N/mm ²)	被覆 樹脂
BF-A	0.65	1.68	882	ビニル エステル
BF-B	0.5	1.9	1450	エポキシ



a) BF-A

b) BF-B

図-1 検討に用いた短繊維の概形



a) 試験前

b) 試験後 (4 週)

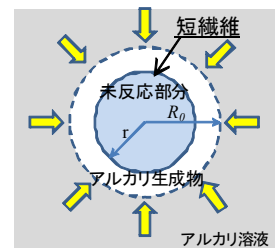
図-2 促進試験前後の例 (JIS A 1193 溶液 A)
(繊維: BF-A, 拡大顕微鏡: 倍率 400 倍)

$$\frac{dx}{dt} = k \frac{C}{x} \quad (\text{式1})$$

$$x = \sqrt{2 \cdot k \cdot C \cdot t} \quad (\text{式2})$$

$$\sigma_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{P_t}{S_t} \quad (\text{式3})$$

$$\sigma_t = \frac{P_t}{S_0} = \sigma_0 \cdot \frac{P_t}{S_t} = \left(1 - \frac{\sqrt{2 \cdot k \cdot C \cdot t}}{R_0}\right)^2 \cdot \sigma_0 \quad (\text{式4})$$



ここで、 S_0 : 浸漬前の繊維断面積 (mm²)
 σ_0 : 浸漬前の繊維強度 (N/mm²) S_t : 浸漬t日の繊維断面積 (mm²)
 σ_t : 浸漬t日の繊維強度 (N/mm²) R_0 : 浸漬前の繊維半径 (mm)
 P_0 : 浸漬前の引張破断荷重 (N) C : アルカリ濃度 (mol/l)
 P_t : 浸漬t日の引張破断荷重 (N) k : 拡散係数 (mm²/hr)

図-3 アルカリ反応モデル

キーワード バサルト繊維, 耐アルカリ性, エポキシ樹脂

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 鋼・複合構造 Tel : 043-573-7280

した。また、促進劣化させた短繊維をコンクリートに混入し、実鉄道構造物の連続桁負曲げ区間での配合実績³⁾を参考にW/C=50%、繊維混入率=1.0Vol%とした短繊維補強コンクリートの曲げ靱性係数を曲げ試験(JSCE-G552)により算出した。なお、混入率は促進劣化前の繊維本数(重量)で設定した。

3.2 検討結果および考察

表-2に引張破断強度の変化を示す。BF-Aの強度残存率は促進4週20℃で66%、60℃で11%となり、BF-Bの強度残存率は促進4週20℃で96%、60℃で58%となった。図-4に示すように、式(4)の拡散係数(k)を近似曲線より算出すると、温度差に起因した促進倍率はBF-Aは約26倍、BF-Bは約280倍となった。

図-5に示すように、ある限定された範囲ではあるが、短繊維の表面状態を観察した結果、a)にみられる原糸の露出がb)にはみられず、BF-AとBF-Bの表面状態に差異がみられた。また、BF-Aについて曲げ試験を実施し、曲げ靱性係数は、促進前の繊維を用いた場合は4.9N/mm²、促進4週後の繊維を用いた場合は2.0N/mm²となった。これは、促進後の値は実構造物で想定している鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性係数の下限値程度⁴⁾となった。

図-6に曲げ試験結果の例を示す。促進試験前と比べると、最大荷重にほとんど差異がなく、最大荷重以降の負勾配がより急勾配になった。同様の曲げ靱性係数を有した0.5Vol%の荷重-変位関係と比較すると、0.6mm程度で同一変位時における荷重値の大小関係が逆転し、変位が大きい範囲で値が小さくなった。試験終了後のコンクリート破断面における繊維の破断割合は促進前が6.1%、促進4週が55.8%に増加したことから、繊維自体がアルカリ浸透の影響を受け、繊維の破断割合が増加したことが、変位の大きな範囲で荷重値が小さくなった原因であると考えられる。

図-7に実構造物の供用期間内の強度残存率の推定値を示す。既往の文献²⁾と同様に、普通コンクリートの環境はpH=12.7(促進倍率(pH:13.25/12.7)=3.6倍)、温度20℃とした。曲げ靱性係数2.0N/mm²を確保できるのは、BF-Aで5~10年程度、BF-Bは100年以上と推定された。本手法は、経年に伴う短繊維とコンクリートの付着性状の変化は考慮できない。しかしながら、曲げ試験の結果等より、繊維自体の破断が短繊維補強コンクリートの引張性能を決定する主要因であることが推測されるため、評価方法として妥当であると考えられる。

4. おわりに

無機繊維を用いた場合、コンクリートのアルカリ環境下に供されることで、繊維自体の引張強度が低下することから、これを踏まえた促進試験により、供用期間中の引張強度から短繊維補強コンクリートの曲げ靱性係数を推定する手法について検討し、その妥当性を確認した。また、実構造物において実績ある配合において、供用期間中に鋼繊維補強コンクリートの曲げ靱性係数の下限値程度の確保できる、玄武岩由来のバサルト繊維をエポキシ樹脂でコーティングした短繊維を開発した。

参考文献 1) 例えば、土木学会：繊維補強コンクリートの構造利用研究小委員会成果報告書、コンクリートエンジニアリングシリーズ106,2015 2) 魚本健人,勝木太：各種繊維の耐アルカリ性の評価法に関する基礎研究,土木学会論文集, No.490, V-23,pp.167-174,1994 3) 南邦明,下津達也,斉藤雅充：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,Vol.2012-4,pp.41-47,2012 4) 徳富恭彦,南邦明,斉藤雅充,下津達也：鋼鉄道橋連続合成桁で用いる鋼繊維補強コンクリートの性能特性,土木学会第67回年次学術講演会, I-454,pp.907-908,2012

表-1 検討に用いた繊維の概要

種類	温度(℃)	破断強度(N)				
		0週	1週	2週	3週	4週
	pH(20)	13.8	13.1	13.0	13.1	13.2
	pH(60)	13.8	13.1	13.0	13.2	13.2
BF-A	20	554 (—)	518 (93.5)	496 (89.5)	386 (69.7)	354 (65.9)
	60	554 (—)	171 (30.5)	121 (21.8)	75 (23.5)	58 (10.5)
BF-B	20	739 (—)	733 (99.2)	719 (97.3)	734 (99.3)	710 (96.1)
	60	739 (—)	526 (71.2)	719 (63.6)	466 (63.1)	429 (58.1)

※浸漬溶液の平均値(pH=13.25), JIS A 1193 B 液相当で作成
※括弧内0週からの引張強度残存率(%)

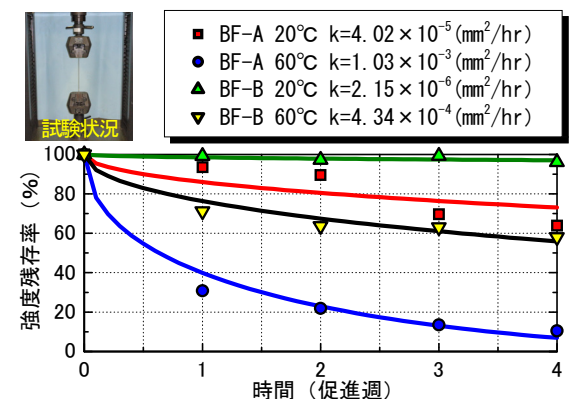


図-4 繊維単体の強度残存率(k :拡散係数)

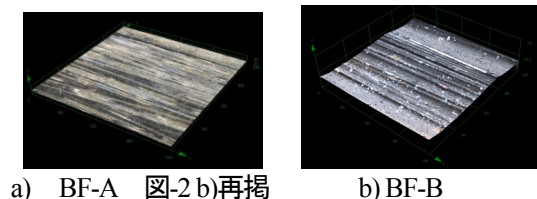


図-5 促進試験4週後の表面状況(倍率400倍)

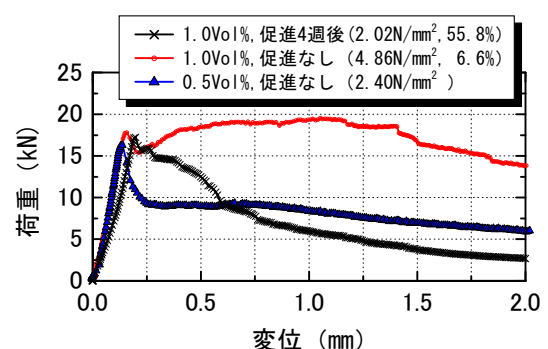


図-6 曲げ試験結果(値:右:曲げ靱性係数, 左:コンクリート破断面における繊維の破断率)

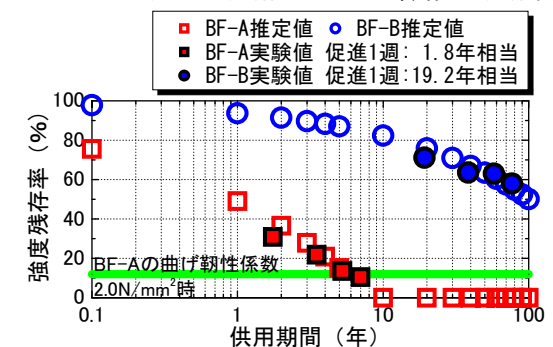


図-7 強度残存率の推定値