

(52) アラミド製短繊維補強コンクリートの力学性能に関する高温暴露試験による長期耐久性評価

保倉 篤¹・宮里 心一²・岡村 脩平³・吉本 大士⁴

¹正会員 金沢工業大学 革新複合材料研究開発センター (〒924-0838 石川県白山市八束穂2-2)

E-mail: hokura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

²正会員 金沢工業大学教授 環境・建築学部環境土木工学科 (〒924-0838 石川県白山市八束穂2-2)

E-mail: miyazato@neptune.kanazawa-it.ac.jp

³帝人株式会社 アラミド事業本部 (〒791-8536 愛媛県松山市西垣生町2345)

E-mail: s.okamura@teijin.co.jp

⁴帝人株式会社 アラミド事業本部 (〒100-8585 東京都千代田区霞が関3丁目2番1号霞が関コモンゲート西館29F)

E-mail: d.yoshimoto@teijin.co.jp

短繊維補強コンクリートは、外力作用下においても引張力に耐え、またひび割れが分散する特長があり、これまでに多くの研究事例がある。しかしながら、いずれもコンクリート作製直後の力学性能を明らかにしたものであり、長期を想定した経時変化を評価した検討はなされていない。そこで本研究では、アレニウス則に基づき、暴露温度と暴露期間が長期の曲げ強度および曲げタフネスに及ぼす影響を評価した。すなわち、20℃環境下で1ヶ月に亘り暴露した時の曲げタフネスを基準とし、40℃、60℃および80℃の環境下で所定の期間に亘り暴露した時の保持率を算定した。さらに、20℃の環境下における時間を換算し、保持率が0.7、0.8および0.9になる暴露年数を推定した。

Key Words : *aramid fiber, arrhenius law, bending strength, bending toughness*

1. はじめに

我が国では、1970年代からコンクリートの補強工法の一つとして、鋼繊維を主流とした短繊維補強コンクリートが実用化されてきた。また、1980年代以降は、様々な種類の繊維が用いられるようになってきた。これまでも、繊維自体に着目した多くの研究事例がなされている。例えば、西村らの研究¹⁾や帝人の技術資料²⁾では、アラミド繊維（テクノーラ）の場合、吸水性に対する抵抗性は高いが、アルカリ性に対する抵抗性は若干低下することなどが報告されている。

ところで、短繊維補強コンクリートは、不連続の短い繊維がコンクリート中に均一に混入されることで、外力作用下においても引張力に耐え、またひび割れが分散する特長がある。これまでも、短繊維補強コンクリートに着目した多くの研究がなされている。例えば、川俣らの研究³⁾では、繊維種類および混入量の違いが圧縮靱性および引張靱性に及ぼす影響などが報告されている。また、堂地、大久保、村上らの研究では^{4)~6)}、ポリエチレ

ン繊維、POB繊維の単体あるいは合成とした時のコンクリートの補強効果が報告されている。さらに、鈴木らの研究⁷⁾や森田らの研究^{8)・9)}では、衝撃性能に着目した検討が報告されている。しかしながら、いずれもコンクリート作製直後の力学性能を明らかにしたものであり、10～100年後を想定した経時変化を評価した研究は無い。また、社会基盤として長期に亘り供用するにあたり、部材の耐久性（安全性および使用性）を適切に評価することが重要とされている。

以上の背景を踏まえて本研究では、アラミド製短繊維補強コンクリートに着目し、温度が40℃、60℃および80℃の環境下に暴露して、所定の期間の経過後における曲げ強度および曲げタフネスを測定した。次に、20℃の環境下に1ヶ月間に亘り暴露した時の曲げタフネスに対する、任意の温度で所定の期間が経過した時の曲げタフネスの保持率を算定した。さらに、保持率が0.7、0.8および0.9になる暴露期間を、アレニウス則に基づき20℃の環境下における時間へ換算した。

表-1 コンクリートの配合

No.	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)									スランプ (cm)	空気量 (%)
			W	C	FA	S	G	繊維	Ad	SP	AE		
1	30	56.8	175	496	88	858	650	14	0.000	2.917	0.000	7.5	3.3
2	55	51.0	185	336	0	860	823		3.364	0.000	0.013	6.5	4.3
3		46.0	175	318		806	943		1.159		0.000	0.0	測定不能
4								0				10.0	4.7

表-2 使用材料の種類と物性値

材料	種類	特性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3340cm ² /g
フライアッシュ (FA)	七尾大田火力発電所産 (Ⅱ種, 分級灰)	密度:2.43g/cm ³ , 比表面積:4620cm ² /g
細骨材	陸砂	表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率2.49%
粗骨材	碎石	表乾密度2.57g/cm ³ , 吸水率2.10%
繊維	アラミド繊維	表-3 参照
混和剤	AE 減水剤(Ad)	リグニンスルホン酸塩, オキシカルボン酸塩, ポリカルボン酸系化合物
	高性能 AE 減水剤(SP)	ポリカルボン酸コポリマー
	消泡剤(AE)	ポリアルキレングリコール誘導体

2. 実験概要

(1) 使用材料

表-1にコンクリートの配合を、表-2に使用材料の種類と物性値を、表-3にアラミド繊維の材料特性を示す。No.2を基準のケースとし、No.1ではフライアッシュを混和した低水セメント比のケースを、No.3では未集束タイプの短繊維を用いたケースを実験した。また、No.4には短繊維を混合していないケースを設けた。写真-1に集束および写真-2に未集束の短繊維を示す。ここで、集束タイプにおいては、繊維径12μmの繊維1000本をエポキシ系樹脂により集束した。

表-3 アラミド繊維の材料特性

No.	繊維タイプ	繊維径 (μm)	繊維長 (mm)	引張強度 (MPa)
1	集束	500	30	3410
2				
3	未集束	12	6	



写真-1 集束タイプ



写真-2 未集束タイプ

(2) 打設方法

図-1に繊維補強コンクリートの練混ぜ方法を示す。すなわち、未集束タイプの場合、繊維が多量の水分を吸収するため、繊維量の3倍の質量の水に、予め24時間に亘り浸漬させた。また練混ぜは、容量60リットルの水平二軸型強制練りミキサを使用し、繊維の混合時は、コンクリートを攪拌しながら30秒間かけて投入した。その後、コンクリートを型枠に流し込み、テーブルバイブレータを用いて締固めを行った。なお、供試体を打設した翌日に脱型を行い、20℃の湿潤環境下(90%RH)に28日目まで初期養生した。

(3) 暴露方法

表-4に暴露温度と暴露期間を示す。すなわち、28日間の初期養生後、20℃、40℃、60℃および80℃の湿潤環境下(90%RH)に所定の期間に亘り暴露した。

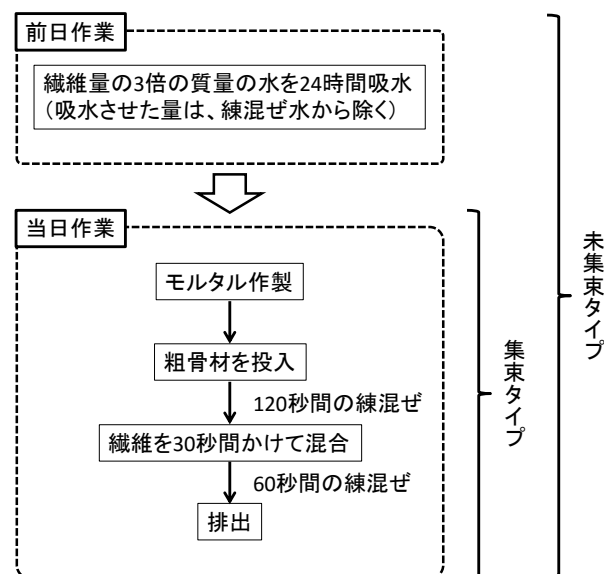


図-1 繊維補強コンクリートの練混ぜ方法

表-4 暴露温度と暴露期間

暴露温度(°C)	暴露期間 (ヶ月)				
	1	2	3	6	12
20	○	-	-	-	-
40	○	-	-	○	○
60	○	-	○	○	-
80	○	○	○	-	-

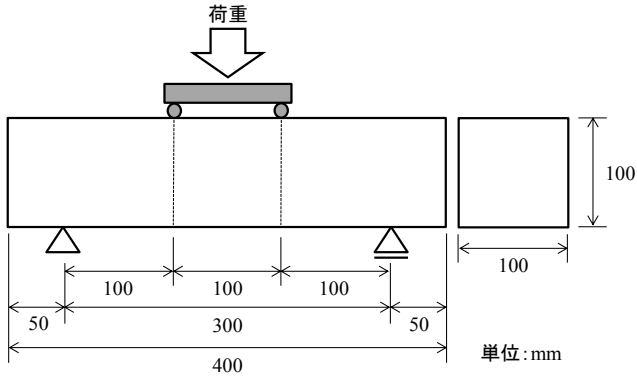


図-2 曲げ載荷試験の概要

(4)測定方法

曲げ試験時における供試体の含水状態を統一するべく、20℃の乾燥環境下(60%RH)で7日間に亘り乾燥させた後、JCI-SF4に準拠して曲げ試験を行った。図-2に曲げ載荷試験の概要を示す。なお、4点曲げ載荷により試験を行い、変位計を供試体中央部に設置した。曲げ強度の算定式を式(1)に示す。

$$\sigma_b = \frac{Pl}{bh^2} \quad (1)$$

ここで、 σ_b ：曲げ強度(N/mm²)、P：最大荷重(N)、l：スパン(mm)、b：断面の幅(mm)、h：断面の高さ(mm)を表す。

また、曲げタフネスは、変位が4mmに至るまでの「荷重－変位」曲線における面積から算定した。ここで、本研究では短繊維の効果としての靱性の影響を比較しやすくするため、JCI-SF4に対して2倍の変位で評価した。図-3にNo.1(暴露期間1ヶ月、暴露温度20℃)における曲げタフネスの計算方法の概要を示す。なお、繊維が混入されていないNo.4においては、靱性が小さく変位が4mmまで達しなかったため、曲げタフネスの評価は実施しなかった。

3. 実験結果

図-4、図-5、図-6および図-7に各ケースの曲げ強度を、図-8、図-9および図-10に各ケースの曲げタフネスを示す。

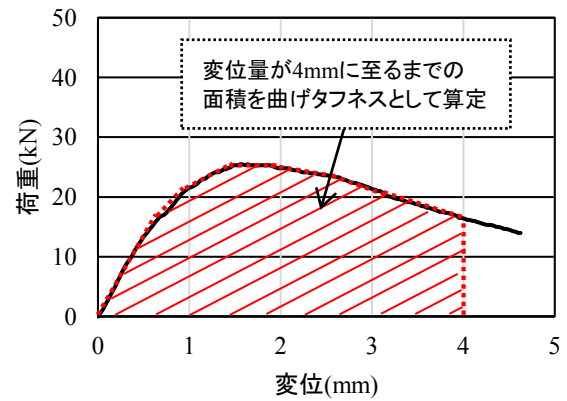


図-3 曲げタフネス計算方法の概要

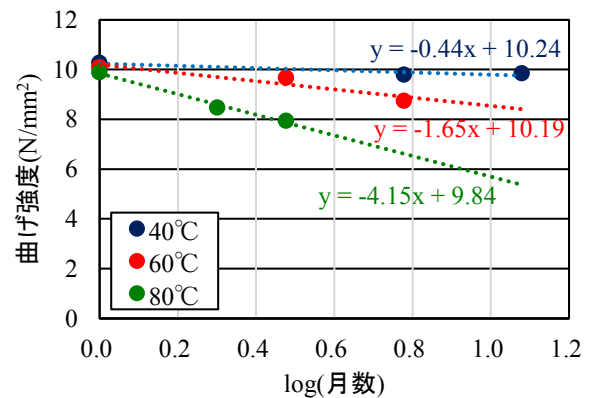


図-4 曲げ強度と暴露期間の関係(No.1)

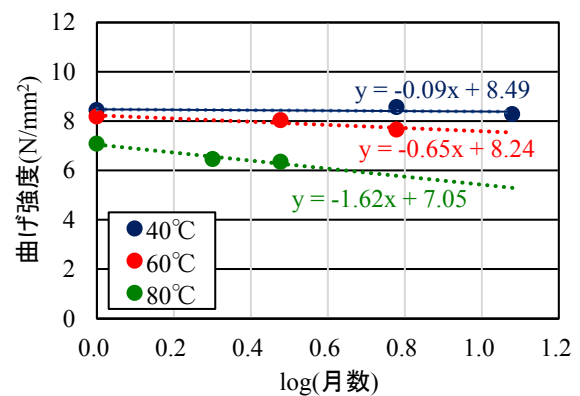


図-5 曲げ強度と暴露期間の関係(No.2)

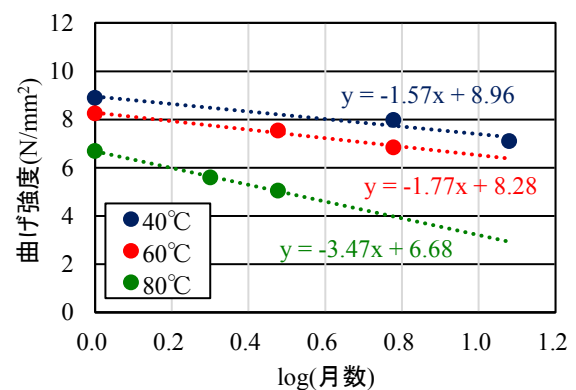


図-6 曲げ強度と暴露期間の関係(No.3)

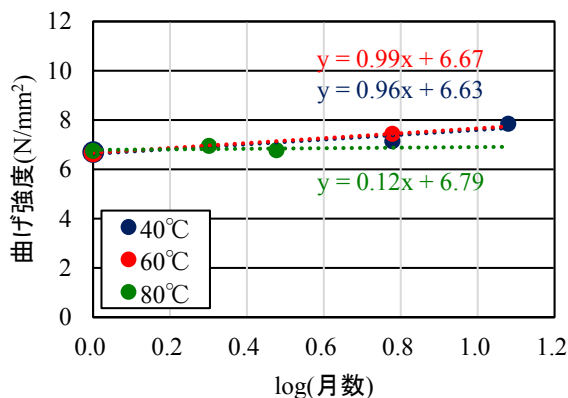


図-7 曲げ強度と暴露期間の関係(No.4)

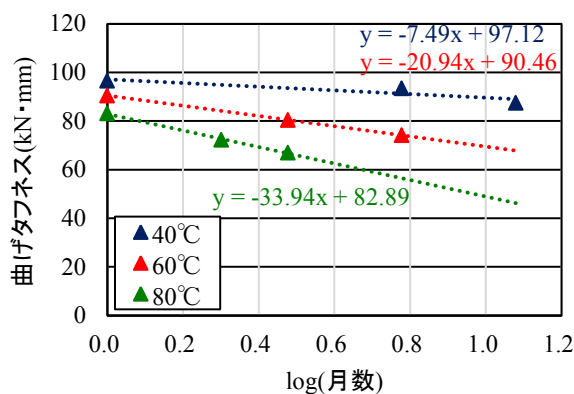


図-8 曲げタフネスと暴露期間の関係(No.1)

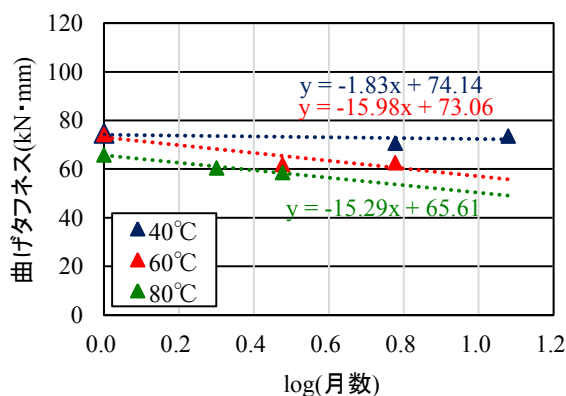


図-9 曲げタフネスと暴露期間の関係(No.2)

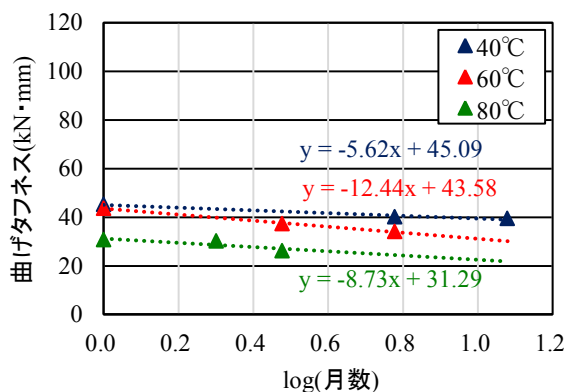


図-10 曲げタフネスと暴露期間の関係(No.3)

これらによれば、No.1、No.2およびNo.3において、暴露期間が長い程、また暴露温度が高い程、曲げ強度および曲げタフネスは低下することを確認できた。すなわち、アラミド製短繊維補強コンクリートの力学性能は、高温で長期に亘り暴露することにより、低下することを明らかにできた。したがって、次章では、アレニウス則により、評価する。なお、繊維が混入されていないNo.4において、暴露期間および暴露温度に拘わらず、曲げ強度は同程度になることを確認できた。

4. 長期の力学性能の推定

(1) 保持率の推定方法

40℃、60℃および80℃の環境下における時間を、アレニウス則を踏まえて、20℃の環境下における時間に換算し、曲げタフネスの保持率を算定するための式を式(2)に示す。すなわち、20℃の環境下で1ヶ月間に亘り暴露した時の曲げタフネスの値に対する、40℃、60℃および80℃の環境下で所定の期間に亘り暴露した時の曲げタフネスの値の保持率を算定した。

$$\text{保持率} = \frac{\sigma_b x}{\sigma_b 20} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_b x$ ：40℃、60℃あるいは80℃の環境下で所定の期間に亘り暴露した時の曲げタフネス(kN・mm)、 $\sigma_b 20$ ：20℃の環境下で1ヶ月間に亘り暴露した時の曲げタフネス(kN・mm)を表す。なお、 $\sigma_b 20$ を表-5に示す。

表-5 $\sigma_b 20$ の値

	No.1	No.2	No.3	No.4
曲げタフネス(kN・mm)	85.8	79.5	45.5	—

(2) 保持率の推定結果

図-11、図-12、図-13に各ケースにおける曲げタフネスに関する保持率と暴露期間の関係を示す。次に、これらの図において、繊維の保持率が0.7、0.8および0.9になる暴露期間を読み取る。その結果を表-6に示す。

(3) アレニウス則に基づく20℃の環境下における保持率の推定

表-6より保持率が0.7、0.8および0.9になる暴露月数と絶対温度の逆数の関係を図-14、図-15、図-16に示す。次に、これらの図において暴露温度が20℃における各暴露年数を読み取る。すなわち、横軸が0.003413における、縦軸の値を読み取り、月から年に換算する。結果を図-

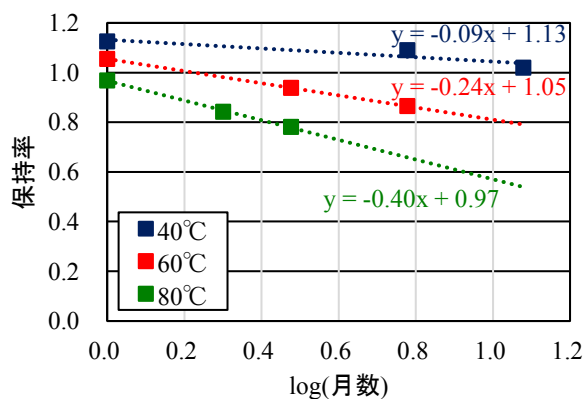


図-11 保持率と暴露期間の関係(No.1)

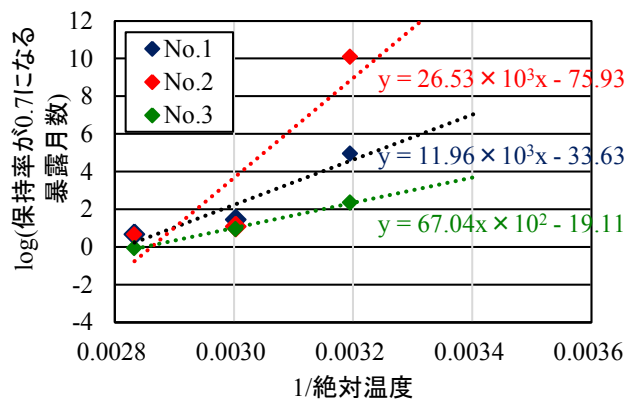


図-14 保持率が0.7になる暴露月数と絶対温度の逆数の関係

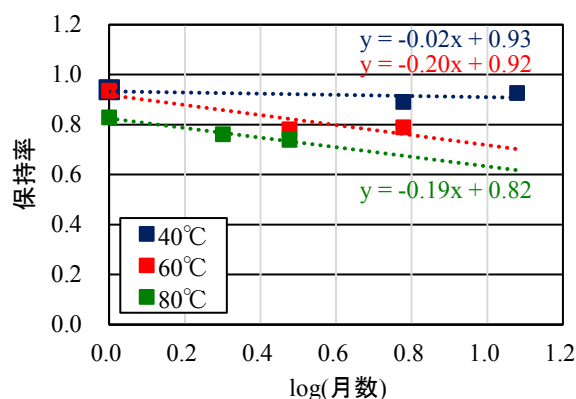


図-12 保持率と暴露期間の関係(No.2)

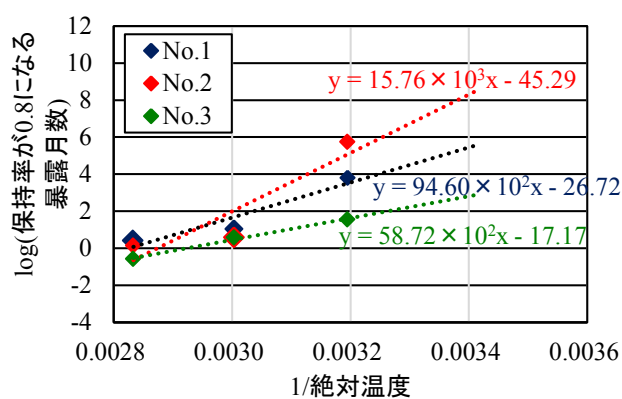


図-15 保持率が0.8になる暴露月数と絶対温度の逆数の関係

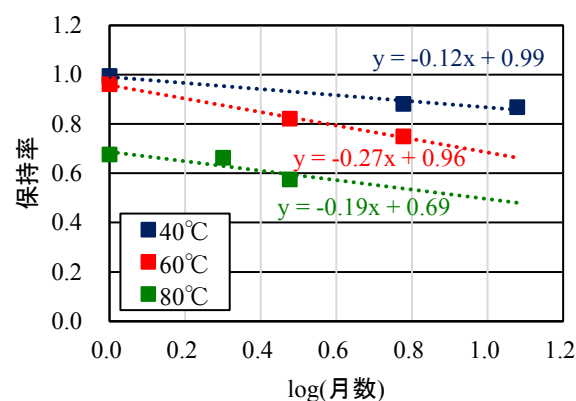


図-13 保持率と暴露期間の関係(No.3)

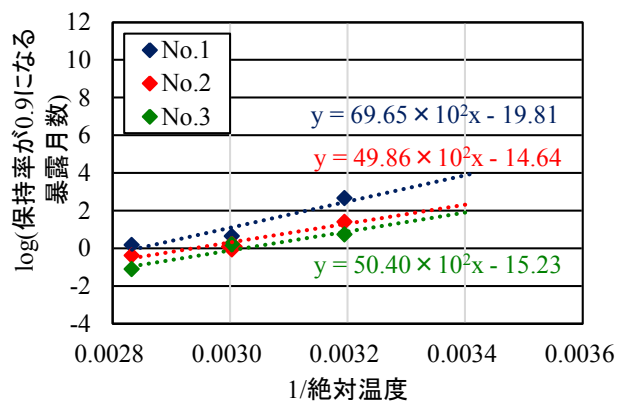


図-16 保持率が0.9になる暴露月数と絶対温度の逆数の関係

表-6 所定の保持率になる暴露期間

No.	暴露温度(°C)	保持率 [log(月数)]		
		0.7	0.8	0.9
1	40	5.0	3.8	2.7
	60	1.5	1.0	0.6
	80	0.7	0.4	0.2
2	40	10.1	5.7	1.4
	60	1.1	0.6	0.1
	80	0.6	0.1	-0.4
3	40	2.4	1.5	0.7
	60	0.9	0.6	0.2
	80	-0.1	-0.6	-1.1

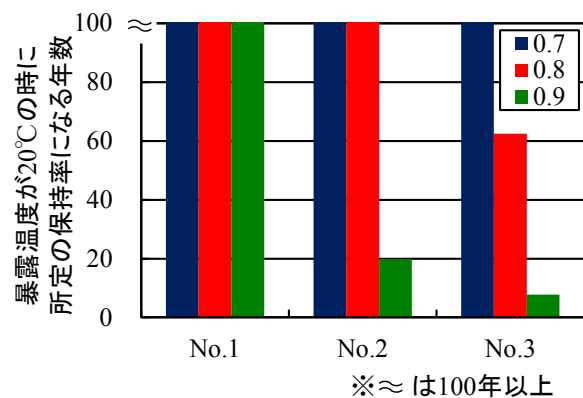


図-17 暴露温度が20°Cの時に所定の保持率になる年数

17に示す。この図によれば、No.2に比べてNo.3では、保持率の低下が早いことを確認できる。この要因として、次の2つが挙げられる。1つ目の要因では、曲げ破壊に至るまでに、繊維長30mmの集束タイプでは繊維が抜けたのに対して、繊維長6mmの未集束タイプでは繊維が破断したことが考えられる。2つ目の要因では、集束タイプの場合、エポキシ樹脂により繊維がコーティングされているため、コンクリート中のアルカリ分に繊維が直接触れなかったと考えられる。一方で、未集束タイプの場合、コンクリート中のアルカリ分に繊維が直接触れたため、繊維の表層が劣化したことから曲げ強度および曲げタフネスは低下する傾向になったと考えられる。

以上のことから、アレニウス則に基づき、20℃の環境下における保持率が0.7、0.8および0.9になる暴露年数を算定できた。すなわち、100年後の曲げ靱性を想定した場合、No.1では保持率90%以上、No.2では保持率80%以上、No.3では保持率70%以上になることを推定できた。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 曲げ強度および曲げタフネスに及ぼす影響を評価した。すなわち、集束タイプおよび未集束タイプに拘わらず、暴露期間が長い程、また暴露温度が高い程、曲げ強度および曲げタフネスは低下する傾向になることを確認できた。
- (2) 集束の有無が曲げタフネスに及ぼす影響を評価した。すなわち、集束タイプと比較して、未集束タイプは保持率の低下が早いことを確認できた。なお、本研究では、集束の有無で繊維長が異なるため、今後、同一の繊維長で検討する必要があると考えられる。

- (3) アレニウス則に基づき、20℃の環境下における保持率0.7、0.8、0.9になる暴露年数を算定した。すなわち、100年後の曲げ靱性を想定した場合、No.1では保持率90%以上、No.2では保持率80%以上、No.3では保持率70%以上になることを推定できた。

参考文献

- 1) 西村次男, 魚本健人, 加藤佳孝, 山口明伸: 高温環境下における各種繊維の引張強度特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.265-270, 1998.
- 2) 帝人, https://www.teijin.co.jp/products/advanced_fibers/aramid/contents/aramid/technora/pdf_1/technora_Jp.pdf, (2017/8/17アクセス)
- 3) 川又篤, 高橋貴蔵, 堀越哲郎, 松岡茂: 繊維種及び混入量が繊維補強セメント系複合材料の靱性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.295-300, 2005.
- 4) 堂地利弘, 三井宜之, 村上聖, 大久保仁之: PBO繊維補強コンクリートの各種力学的特性, Cement Science and Concrete Technology, No.53, pp.867-872, 1999.
- 5) 大久保仁之, 三井宜之, 村上聖, 堂地利弘: ポリエチレン繊維補強コンクリートの強度性状に及ぼす繊維タイプの影響, Cement Science and Concrete Technology, No.53, pp.887-892, 1999.
- 6) 村上聖, 三井宜之, 浦瀬誠, 元村春雄: 合成繊維補強コンクリートの最適調合と各種力学的特性, Cement Science and Concrete Technology, No.54, pp.737-743, 2000.
- 7) 鈴木雅博, 酒井博士, 孕石孝平, 六郷恵哲: 短繊維補強PCはりの衝撃特性に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.121-126, 2001.
- 8) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 剛飛翔体の高速衝突に対する短繊維補強コンクリート板の破壊性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.661-666, 2012.
- 9) 森田武, 別府万寿博, 鈴木誠: 高速衝突を受けるポリプロピレン短繊維補強コンクリートの耐衝撃性能, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第684号, pp.319-327, 2013.

EVALUATION OF LONG TERM STRUCTURAL PERFORMANCE OF ARAMID SHORT FIBER REINFORCED CONCRETE USING HIGH TEMPERATURE EXPOSURE TEST

Atsushi HOKURA, Shinichi MIYAZATO, Shuhei OKAMURA and Daishi
YOSHIMOTO

Short fiber reinforced concrete has merits that it withstands tensile force and cracks are dispersed, and there are many study cases so far. However, any of them clarified the mechanical performance soon after the concrete was made, and there is no study assuming long term. Therefore in this study, based on the Arrhenius rule, bending toughness when exposed for one month under 20°C environment as a reference, retention rates were calculated when exposed for a predetermined period of time in environments of 40°C, 60°C and 80°C. Furthermore, the time under the environment of 20°C was converted to estimate the exposure years at which the retention rate was 0.7, 0.8 and 0.9.