

論文

[1214] ファイバーコンクリートの耐久性に関する研究

正会員 ○幸左賢二 (阪神高速道路公団)

A. E Naaman (ミシガン大学工学部)

1. まえがき

近年コンクリートの曲げ強度、引張り強度およびじん性を増すために、繊維補強コンクリートを用いる試みがなされている。繊維補強コンクリートには鋼繊維を代表として、ガラス繊維やポリプロピレンなどの合成繊維が多く用いられている。また近年新しいファイバーの混合方法としてSIFCON (Slurry Infiltrated Fiber Concrete) が注目されている。これは、従来のファイバーコンクリートにおいてはファイバーを粗骨材等と同時に攪拌するのに対して、SIFCONにおいては、まず型枠中にファイバーを充填させたのちモルタルやスラリーをファイバー間の空隙間に流し込む方法を用いる。この方法によれば従来の鋼繊維ファイバーが、体積比数パーセントしかコンクリート中に充填出来ないのに対して配合条件によっては最大20%近くまで充填することが可能である。今後ファイバーコンクリートが益々使われるようになれば、その耐久性が問題となってくるのが考えられる。個々のファイバー材料についてその耐久性を実験したものは多いが、同一腐食環境下において、それぞれのファイバーコンクリートの耐久性を比較し評価した実験はない。本報告の目的は次の二点である。

- 1) 代表的4種類のファイバーコンクリート(スチールファイバー、SIFCON、グラスファイバー、ポリプロピレン)に対して同一腐食環境下におけるその耐久性を評価する。
- 2) 実験結果に基づく、SFRM(スチールファイバーモルタル)の劣化モデルから長期耐久性を予想する。

2. 実験方法

図-1に実験計画を示す。実験は4種類のファイバーの60通りの組み合わせからなり、それぞれの組み合わせについて12から36個の同一供試体総計1600個の供試体から成り立つ。

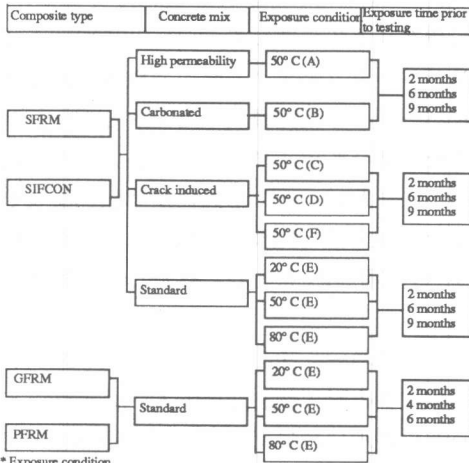
2.1 供試体形状

配合条件を表-1に示すが、`標準(水セメント比:0.42)`、`高含水比(水セメント比:0.70)`の2種類の供試体を用意した。また、腐食を促進するために、中性化および曲げひびわれを生じさせた供試体も作成した。ポルトランドセメントタイプ1 (ASTM C-105) および細骨材としてはオタワ標準砂 (ASTM C-109) を用いた。スチールファイバーとしては、フック付タイプ(直径0.5mm、長さ30mm)を体積比2%添加した。曲げひびわれ供試体を除く供試体寸法は3x0.5x12 in. (75x12.5x300mm)と短期間に耐久性を評価するために比較的薄い寸法とした。曲げひびわれ供試体はクラック幅が腐食速度に与える影響を調べるために、2種類の形状(75x12.5x300および75x38.1x450mm)を用意した。標準および高含水比タイプ供試体は、一昼夜型枠内で養生脱型後、6日間水中養生しその後、7日間気中養生した。曲げひびわれ試験用供試体は6日間水中養生後、21日間気中養生した。総計28日間の養生後、供試体は曲げひびわれ(ひびわれ幅:0.2-0.3mm)を生じさせるために、最大荷重点あるいは、支点中央において3.0mmのたわみ点まで載荷された。GFRM(グラスファイバーモルタル)の材料としては長さ12.5mmの200本の単繊維からなる耐

アルカリファイバーを用いた。ポリプロピレンは長さ19mmのモノフィラメントを用いた。

2. 2 暴露および試験条件

養生後すべての供試体は乾湿繰り返し促進腐食環境下に晒された。乾湿繰り返し一周期は3日間の3.5%塩水中への浸漬および3日間気中養生とした。その際浸漬温度が耐久性に与える影響を調べるために20°C、50°C、80°Cの3種類の塩水温度を用いた。2、6、9ヶ月（標準供試体では10ヶ月）後、スチールファイバーおよびSIFCON供試体は曲げ試験を実施した。これに対して、グラスファイバーおよびポリプロピレン供試体は2、4、6ヶ月の乾湿繰り返し試験後曲げ試験を実施した。曲げ試験供試体はスパン長250mm（大型曲げびびわれ供試体は400mm）とし、曲げモーメント一定区間が100mmの2点集中荷重とした。荷重速度は0.254cm/分とし中央点のたわみと荷重の関係は自動的にX-Yレコーダーに記録された。



* Exposure condition
 Three days saturated in sodium-chloride water at the indicated temperature, and three days of drying at room temperature
 Specimen (A): High permeability specimen
 Specimen (B): Carbonated specimen
 Specimen (C): Crack induced specimen loaded up to a 0.12 in. deflection point for the SFRM specimen
 Specimen (D): Crack induced specimen loaded to its peak strength
 Specimen (E): Standard specimen
 Specimen (F): High permeability specimen exposed to three days of saturation in sodium-chloride water, and two days of drying in the oven at 50° C for the SIFCON specimen

図-1 促進腐食実験概要

3. 実験結果

3.1 SFRMの曲げ試験結果

表-2にSFRMの試験結果を示す。表-2における修正ピーク応力は回帰曲線（破断面におけるファイバー混入率と曲げ応力度の関係）から求めた1%ファイバー混入時における弾性曲げ応力度を示す。すなわち、ファイバーの分布のばらつきから、破断面におけるファイバー混入率は1%程度となるので、ファイバー混入率を1%と仮定し弾性生応力度を求めた。じん性(I*)はファイバー供試体の荷重-中央たわみ曲線下での0.5in. (12.5mm)までの面積をモル

表-1 供試体の配合条件

Specimens type	SFRM		SIFCON		GFRM and PFRM
	Standard and crack induced	Carbonated and high permeability	Standard and crack induced	Carbonated and high permeability	Standard
Cement	1	1	1	1	1
Flyash	-	-	0.2	-	-
Water	0.42	0.7	0.36	0.5	0.42
Sand	1.5	3.0	-	-	1.0
Superplasticizer	-	-	0.03	-	-
Fibers	2%	2%	14%	14%	2%

表-2 スチールファイバー供試体曲げ試験結果

Specimen type	Initial crack stress ^{#1} (Mpa)	Peak stress ^{#2} (Mpa)	Modified ^{#3} peak stress (Mpa)	Toughness index ^{#4}	Average reduction of minimum fiber diameter
1) Standard specimens cured in laboratory air for 28 days	993.0 (6.85)	1711.0 (11.80)	1584.0 (10.92)	15 5.98 I* 56.9	-
2) Standard specimens saturated at 80° C for 2 months	1651.6 (11.39)	1814.2 (12.51)	1807.0 (12.46)	15 4.90 I* 54.5	1.0%
3) Standard specimens saturated at 50° C for 2 months	1394.0 (9.61)	1589.8 (11.02)	1902.5 (13.12)	15 4.85 I* 49.0	0.5%
4) Standard specimens saturated at 20° C for 2 months	1096.0 (7.56)	1783.0 (12.29)	1937.5 (13.36)	15 5.46 I* 49.0	0.5%
5) Standard specimens saturated at 80° C for 6 months	1597.5 (11.01)	1650.2 (11.38)	1748.7 (12.06)	15 4.40 I* 37.2	11.1%
6) Standard specimens saturated at 50° C for 6 months	1621.0 (11.18)	1742.7 (12.02)	1803.8 (12.44)	15 4.32 I* 39.4	9.9%
7) Standard specimens saturated at 20° C for 6 months	1405.5 (9.69)	1671.3 (11.52)	1828.9 (12.61)	15 4.90 I* 50.2	5.4%
8) Standard specimens saturated at 80° C for 10 months	1526.5 (10.53)	1535.1 (10.58)	1709.1 (11.78)	15 3.98 I* 35.6	28.7%
9) Standard specimens saturated at 50° C for 10 months	1825.5 (12.61)	1895.7 (13.07)	1863.0 (12.85)	15 4.68 I* 50.2	12.1%
10) Standard specimens saturated at 20° C for 10 months	1430.7 (9.86)	1529.9 (10.55)	1645.4 (11.35)	15 4.31 I* 35.6	15.2%
11) High permeability specimens cured in laboratory air for 2 months	601.6 (4.15)	912.4 (6.29)	930.6 (6.42)	15 5.37 I* 94.4	-
12) High permeability specimens cured in laboratory air for 6 months	573.6 (3.95)	975.6 (6.73)	982.0 (6.77)	15 5.37 I* 103.0	-
13) High permeability specimens saturated for 2 months	1007.0 (6.94)	1174.2 (8.10)	1163.9 (8.03)	15 5.28 I* 102.6	2.3%
14) High permeability specimens saturated for 6 months	922.0 (6.36)	1040.3 (7.17)	1068.5 (7.37)	15 5.12 I* 83.0	15.7%
15) High permeability specimens saturated for 9 months	1085.4 (7.48)	1147.0 (7.91)	1135.8 (7.83)	15 4.94 I* 94.0	25.5%
16) Carbonated specimens cured in laboratory air for 2 months	1086.2 (7.49)	1567.9 (10.81)	1566.2 (10.82)	15 5.27 I* 36.9	-
17) Carbonated specimens saturated for 2 months	1048.0 (7.25)	1467.0 (10.11)	1549.8 (10.69)	15 5.31 I* 30.3	8.5%
18) Carbonated specimens saturated for 6 months	1180.0 (8.14)	1423.8 (9.82)	1439.1 (9.92)	15 5.27 I* 24.1	24.0%
19) Carbonated specimens saturated for 9 months	1225.2 (8.45)	1349.2 (9.30)	1292.5 (8.91)	15 4.63 I* 23.2	69.9%

* 1000 psi = 6.85 Mpa
^{#1} Initial crack stress is defined as the initial crack moment divided by the section modulus.
^{#2} Peak stress is defined as the peak moment divided by the section modulus.
^{#3} Modified peak stress is defined as the peak stress calculated from the regression line at one percent of the local volume fraction of fibers.
^{#4} Toughness index (I5) is defined as the area under the curve up to a deflection of 3.0 times of first crack deflection, divided by the area up to the first crack point.
 Toughness index (I*) is defined as the area under the load deflection curve for the SFRM specimens up to a 0.5 in. deflection point divided by the area for the plain concrete specimens.

タル供試体の破壊までの荷重-中央たわみ曲線の面積で除した値で評価する。またじん性(15)は、荷重-たわみ曲線下で初期ひびわれ値の3倍のたわみ値に達するまでの面積を初期ひびわれ荷重時までの曲線によって囲まれる面積で除した値で評価した。実験の結果、4種類の供試体は次のような同様の傾向を示す。すなわち、28日間気中養生された供試体に比較し、2ヶ月間促進腐食された供試体は、曲げ強度、じん性とも増加する。これは供試体の長期塩水浸漬によるファイバーとセメントマトリクス界面の付着強度の増加によるものと考えられる。これに対して6ヶ月以上促進腐食させた場合曲げ強度、じん性とも2ヶ月間促進腐食させたものに対して著しく減少する。たとえば10ヶ月促進腐食させた標準供試体は、2ヶ月間促進腐食させたものに対して、曲げ強度は8%じん性は27%減少する。6ヶ月以上促進腐食させた供試体は5.4%から70%ファイバー最小直径を減少させるが、供試体表面には腐食によるひびわれは観察されなかった。腐食供試体と非腐食供試体の破壊形式を対比すると、非腐食供試体がファイバーとセメントマトリクス間の付着破壊によるのに対して、腐食供試体の破壊形式は、腐食による局部断面減少に伴うファイバー自身の引張り破壊であった。ファイバー直径の減少と強度およびじん性の関係を示すと、ファイバー直径の減少につれて曲げ強度の減少はなだらかであるのに対してじん性は大きく減少する。たとえば最小直径が20%減少した場合、曲げ強度は10%減少するのに対してじん性は25%減少した。

3.2 SIFCONの曲げ試験結果

SIFCONの曲げ試験結果を表-3に示し、代表的な荷重-応力曲線を図-2に示す。SIFCONの試験結果はスチールファイバーの場合と同様の傾向を示す。すなわち、2ヶ月間促進腐食させたものは、28日間気中養生させたものに対して曲げ強度およびじん性を増すのに対して、6ヶ月以上促進腐食させたものの中にはファイバー最小直径を30%減少させるものもあり、曲げ強度、じん性とも減少するが、スチールファイバーに比べるとその減少率は少ない。これはSIFCONの場合単位セメント量大きいことおよび水セメント比が小さいため腐食速度が緩やかであり腐食による直径の減少が小さいためと考えられる。

表-3 SIFCON供試体の曲げ試験結果

Specimen type	Peak stress psi (Mpa) *1	Toughness index (I*) *2	Average reduction of minimum fiber diameter
1) Standard specimens cured in laboratory air for 28 days	7409 (51.1)	600.0	-
2) Standard specimens saturated at 80° C for 2 months	9291 (64.1)	701.4	2.3 %
3) Standard specimens saturated at 50° C for 2 months	9651 (66.5)	740.8	1.7 %
4) Standard specimens saturated at 20° C for 2 months	8187 (56.4)	602.8	0.7 %
5) Standard specimens saturated at 80° C for 6 months	8927 (61.6)	656.3	11.4 %
6) Standard specimens saturated at 50° C for 6 months	9054 (62.4)	684.5	12.2 %
7) Standard specimens saturated at 20° C for 6 months	7168 (49.4)	571.8	10.1 %
8) Standard specimens saturated at 80° C for 10 months	7923 (54.6)	609.0	28.1 %
9) Standard specimens saturated at 50° C for 10 months	8269 (57.0)	589.9	21.1 %
10) Standard specimens saturated at 20° C for 10 months	8051 (55.5)	587.0	12.6 %
11) High permeability specimens cured in laboratory air for 28 days	5786 (39.9)	458.7	-
12) High permeability specimens saturated for 2 months	6340 (43.7)	436.5	5.7 %
13) High permeability specimens saturated for 6 months	6255 (43.1)	445.5	7.1 %
14) High permeability specimens saturated for 9 months	5797 (40.0)	427.2	21.1 %
15) Carbonated specimens cured in laboratory air for 2 months	8337 (57.5)	605.4	-
16) Carbonated specimens saturated for 2 months	9956 (68.6)	663.1	14.3 %
17) Carbonated specimens saturated for 6 months	9702 (66.9)	625.6	15.4 %
18) Carbonated specimens saturated for 9 months	9882 (68.1)	608.4	33.4 %

* 1000 psi = 6.895 Mpa

*1 Peak stress is defined as the peak moment divided by the section modulus

2 Toughness index (I) is defined as the area under the load deflection curve for the SIFCON specimen up to a 0.5 in. deflection point divided by the area for the plain concrete specimens

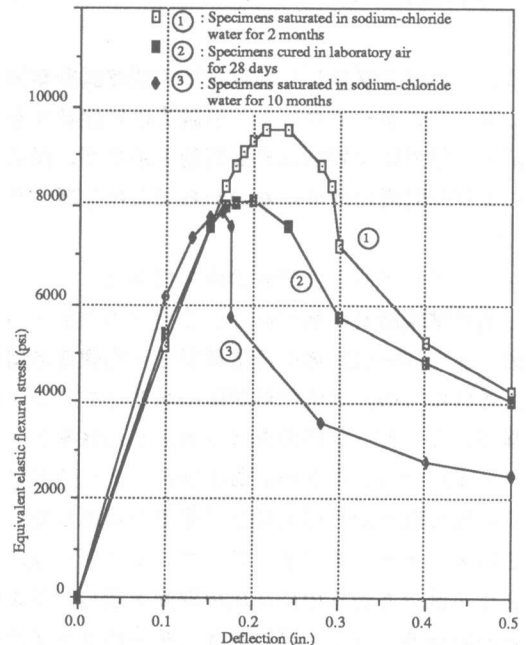


図-2 SIFCON供試体の荷重-たわみ曲線

3. 3 グラスファイバー供試体の曲げ試験結果

グラスファイバー供試体の試験結果を表-4に示し、代表的な応力-たわみ曲線を図-3に示す。表-4に示すように6ヶ月間気中暴露されたものは荷重、じん性ともに変化しない。しかしながら、6ヶ月間塩水中に浸漬させたものは、曲げ強度、じん性とも著しく減少する。たとえば80℃の塩水中に4ヶ月間浸漬させたものは初期ひびわれ発生と共に崩壊に至る。これらの結果は、グラスファイバーにおけるストランド間の空隙中にカルシウム成分が浸透することによってファイバーを劣化させ強度およびじん性が減少するためと考えられる。また、高温度はファイバーとセメントとの化学反応を促進させると考えられる。

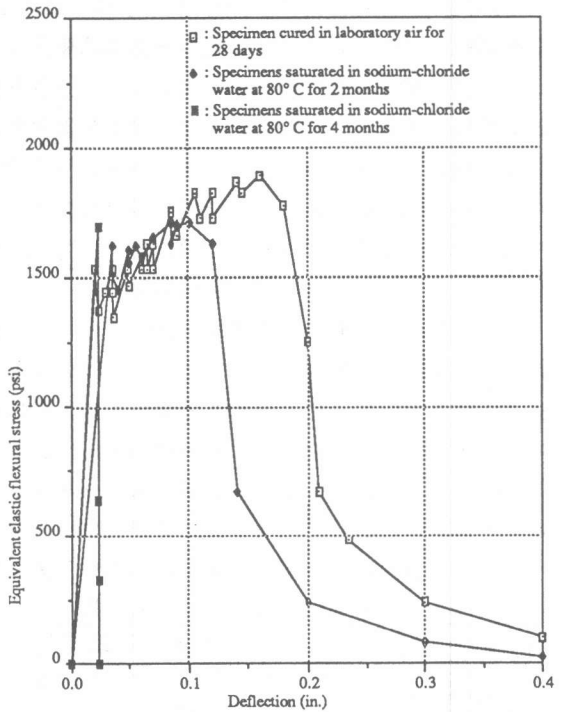
表-4 グラスファイバー供試体の曲げ試験結果

Specimen type	Peak stress ^{*1} psi (Mpa)	Toughness index (I*) ^{*2}
1) Specimens cured in laboratory air for 28 days	1972 (13.60)	34.7
2) Specimens cured in laboratory air for 6 months	1873 (12.91)	37.3
3) Specimens saturated at 80° C for 2 months	1558 (10.74)	8.95
4) Specimens saturated at 50° C for 2 months	1461 (10.07)	12.0
5) Specimens saturated at 20° C for 2 months	1508 (10.40)	19.8
6) Specimens saturated at 80° C for 4 months	1693 (11.67)	2.0
7) Specimens saturated at 50° C for 4 months	1728 (11.91)	12.1
8) Specimens saturated at 20° C for 4 months	1783 (12.29)	15.1
9) Specimens saturated at 80° C for 6 months	1605 (11.07)	1.6
10) Specimens saturated at 50° C for 6 months	1708 (11.78)	10.2
11) Specimens saturated at 20° C for 6 months	1437 (9.91)	14.2

1000 psi = 6.895 Mpa

*1 Peak stress is defined as the peak moment divided by the section modulus

2 Toughness index (I) is defined as the area under the load-deflection curve for the GFRM specimens up to a 0.4 in. deflection point divided by the area for the plain concrete specimens



3. 4 ポリプロピレン供試体の曲げ試験結果

表-5にポリプロピレン供試体の試験結果を示す。結果は比較的大きな変動を示すが、長期

図-3 グラスファイバー供試体の荷重-たわみ曲線および高温度の浸漬にかかわらず曲げ強度、じん性の低下は認められなかった。

4. ファイバー供試体の耐久性対比

曲げ試験結果に基づいて、4種類のファイバー供試体の耐久性を対比させた。図-4は4種類のファイバー供試体の浸漬期間と平均強度の関係を示す。ピーク強度比は基準供試体(28日養生されたもの)と劣化供試体の強度比である。図-5は浸漬時間とじん性比を示す。実験結果に基づいて、ピーク応力を20%、じん性を30%減少させるまでの期間を対比させた。スチールファイバーコンクリートおよびSIFCONについてはファイバー直径の減少と曲げ強度およびじん性の減少から得られた予想値を使用した。表-6に4種類のファイバーの長期耐久性の対比を示す。スチールファイバーコンクリートは、グラスファイバーコンクリートに比べて、強度を20%減少させるのに3倍の期間を要し、じん性を30%減少させるのに5倍の期間を要することがわかる。SIFCONはスチールファイバーよりさらに耐久性に優れていることがわかる。中性化および曲げひびわれ供試体は標準供試体に比べて2-3倍早い劣化速度を示す。

表-5 ホリアロレン供試体の曲げ試験結果

Specimen type	Peak stress psi (Mpa) *1	Toughness index (I*) *2
1) Specimens cured in laboratory air for 28 days	1181 (8.14)	10.7
2) Specimens cured in laboratory air for 6 months	913 (6.30)	13.2
3) Specimens saturated at 80° C for 2 months	1461 (10.07)	9.8
4) Specimens saturated at 50° C for 2 months	1567 (10.80)	11.4
5) Specimens saturated at 20° C for 2 months	1210 (8.13)	8.0
6) Specimens saturated at 80° C for 4 months	1396 (9.63)	12.8
7) Specimens saturated at 50° C for 4 months	1179 (8.13)	13.9
8) Specimens saturated at 20° C for 4 months	1102 (7.60)	12.0
9) Specimens saturated at 80° C for 6 months	1530 (10.55)	10.8
10) Specimens saturated at 50° C for 6 months	1286 (8.87)	13.3
11) Specimens saturated at 20° C for 6 months	856 (5.90)	12.9

1000 psi = 6.895 Mpa

*1 Peak stress is defined as the peak moment divided by the section modulus

2 Toughness index (I) is defined as the area under the load-deflection curve for the PFRM specimens up to a 0.5 in. deflection point divided by the area for the plain concrete specimens.

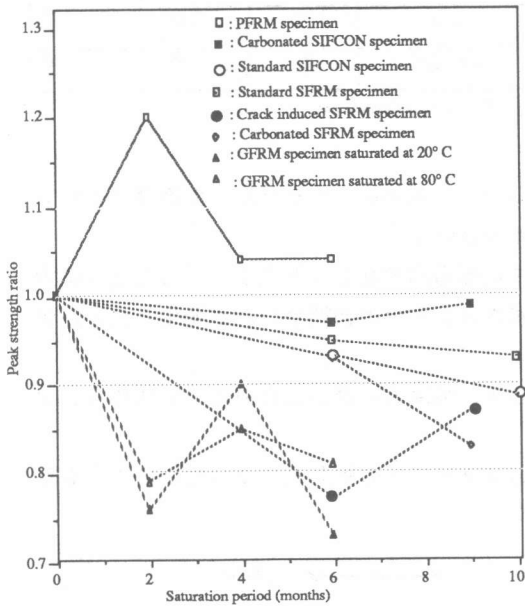


図-4 ファイバー供試体の浸漬時間と強度の関係

表-6 ファイバーの長期耐久性の対比

Period of saturation	Peak strength ratio (toughness index ratio)		Period of saturation for peak strength to reduce 20 %	Period of saturation for toughness index to reduce 30 %
	6 months	9 months (10 months for standard)		
Standard SFRM specimen	0.95 (0.80)	0.93 (0.73)	* 21 months	10 months
Carbonated SFRM specimen	0.93 (0.80)	0.83 (0.77)	7 months	* 11 months
Crack induced SFRM specimen	0.77 (0.61)	0.87 (0.76)	6 months	6 months
Standard SIFCON specimen	0.93 (0.93)	0.89 (0.87)	* 23 months	* 27 months
Carbonated SIFCON specimen	0.97 (0.94)	0.99 (0.92)	* 13 months	* 23 months
PFRM specimen	1.04 (1.15)	-	Not deteriorated	Not deteriorated
GFRM specimen saturated at 20° C	0.73 (0.41)	-	6 months	2 months
GFRM specimen saturated at 80° C	0.81 (0.05)	-	6 months	2 months

* Predicted value

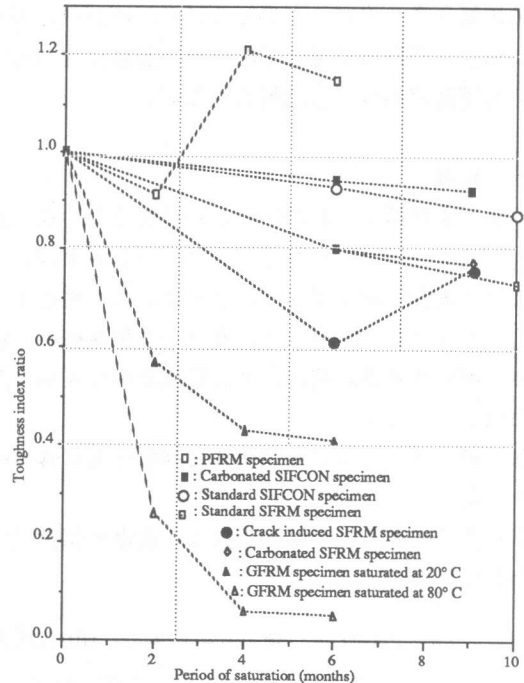


図-5 ファイバー供試体の浸漬時間とじん性の関係

5. スチールファイバーコンクリートの長期劣化予想

実験においては、腐食が構造物の強度およびじん性に与える影響を短期間に調べるために比較的薄い厚さ (0.5 in. = 12.5 mm) の供試体を用いた。しかしながら、スチールファイバーが用いられる実構造物は部材断面が厚いことから劣化に至るまでには長期間要するものと考えられる。そのためスチールファイバーコンクリートの長期劣化予想モデルを提案した。詳細は参考 1 に示すが、強度比 (腐食ファイバーの強度を健全ファイバーの強度で除したもの) は次式のように表わせる。

$$S = \left\{ \int_0^{L_{ecr}} (U \times \pi \times D \times L \, dL) + \int_0^{L_f/2 - L_{ecr}} (U \times \pi \times D \times L \, dL) + \int_0^{L_f/2 - L_{ecr}} (f_s \times A \times dL) \right\} / (L_f/2 \times U \times \pi \times D \times L_f/4)$$

$$L_{ecr} = L_f/4 + (D_{min}^2 \cdot f_s) / (8UD)$$

ここで、S=強度比 L_{ecr} =限界長 (mm) D_{min} =ファイバーの最小直径

U=平均付着力 (N/mm²) D=ファイバーの直径 (mm)

f_s =ファイバーの引張り強度 (N/mm²) A=腐食による最小ファイバー断面積

サンプル解析として、断面深さの異なったファイバー供試体の長期強度を予想する。実験結果等より次の値を用いる。a=7.7 (percent/months), b=0, U=7.8 (N/mm²), D=0.5 (mm), L_f=30 (mm), f_s =1172.4 (N/mm²), r=0.0036 (in./month) 表-7に、3種類の断面深さ0.5, 2.0, 4.0 in. (12.5, 50, 100mm) における暴露期間と長期劣化予測を示す。表-7によれば、断面深さが薄い場合、腐食による劣化の影響を受やすい。しかしながら、断面深さが厚い場合、長期間の腐食環境下での暴露に関わらず、曲げ強度の低下は比較的少ない。

表-7 暴露期間と長期劣化の関係

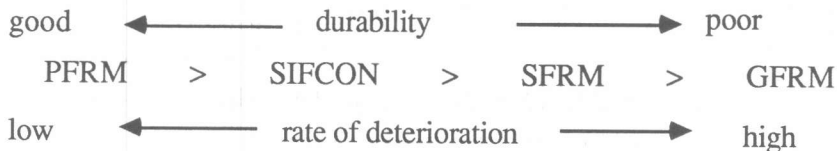
Depth of the specimen \ Saturation period	1 year	5 years	50 years
d = 0.5 in.	0.98	0.63	-
d = 2.0 in.	1.00	0.99	0.73
d = 4.0 in.	1.00	1.00	0.94

* d : Depth of the specimen

6. 結論

実験および解析の結果次のことが明らかになった。

- 1) スチールファイバーコンクリートおよびSIFCON供試体は、6ヶ月以上促進腐食させると強度を若干減少させるとともに、じん性を大きく減少させる。
- 2) グラスファイバーコンクリート供試体は、塩水中に促進腐食させると強度、じん性ともに大きく減少させる。特に、80℃塩水中に4ヶ月間浸漬させたものは初期ひびわれ発生と共に崩壊に至る。
- 3) ポリプロピレン供試体は長期の促進腐食に関わらず、強度およびじん性の低下は認められなかった。
- 4) 実験結果および解析結果は、長期の腐食環境下のファイバーの耐久性について次のような評価となった。



5) スチールファイバーコンクリートの長期劣化予想解析結果は、断面の薄い構造物は腐食による強度劣化が大きいことを示した。しかしながら、断面が厚い構造物は長期間の腐食環境下への暴露にかかわらず、強度劣化は少ないと考えられる。

参考文献1 : Kosa, K., and Naaman, A.E. Hansen, W. `Durability of Fiber Reinforced Concrete` Submitted to ACI Material Journal.