

# 腐食によるスチールファイバーコンクリートの力学的性質の劣化 DETERIORATION MECHANISM OF FIBER REINFORCED CONCRETE DUE TO CORROSION

幸左賢二\*・Antoine NAAMAN\*\*

By Kenji KOSA and Antoine NAAMAN

Two types of tests of fibers were conducted to investigate the deterioration mechanisms of conventional fiber reinforced concrete due to corrosion. The results of accelerated corrosion tests indicated that severe corrosion would result in a significant reduction in minimum fiber diameter, leading to a noticeable reduction in peak stress and a dramatic reduction in toughness whether the specimens were tested in tension or bending. Results from the accelerated exposure tests of fibers showed a behavior similar to the accelerated corrosion tests. To assess the results obtained from the experimental program, two analytical evaluations (Approximation method and Non-linear numerical analysis) were conducted. Both methods supported the experimental observations that deterioration of stress-strain response in the tension zone of flexural specimens leads a moderate reduction in peak-load and dramatic reduction in toughness.

*Keywords: durability, stress strain relation, ductility, fracture mechanism*

## 1. ま え が き

鋼繊維補強コンクリートとは、鋼繊維（直径約0.5 mm程度、長さ約30 mm程度）をコンクリート中に分散させることによって、曲げ強度、引張り強度、靱性等の強化を図ったものである。

現在鋼繊維は、その力学的特性からトンネルライニング、道路舗装、パネルウォールなどの方面に広く利用されつつある。しかしながら、土木構造物への使用上重要な問題であるところのその耐久性、特に耐腐食性については、2, 3の研究成果はあるものの、強度および靱性の劣化機構を評価した研究はほとんどない<sup>1)~3)</sup>。

スチールファイバーは、耐腐食性について次のような相反する特性をもっていると考えられる。スチールファイバーは、従来の鉄筋に比べ非常に小さな直径（0.3~0.5 mm）をもつために、腐食による断面欠損を受けやすい。しかしながら、鉄筋腐食の場合、酸化鉄の生成による膨張圧によりコンクリートのひびわれが生じるのに対し、ファイバーにおいては、断面積が小さいことから、

腐食による体積増加は小さく、膨張圧によるコンクリートのひびわれ発生の可能性は少ない。

本研究の主目的は、次の2点である。

- ① 腐食が、ファイバーコンクリート供試体の靱性および強度に与える影響を評価する。
- ② 劣化機構がファイバーとセメントマトリックス間の付着強度の低下によるものか、あるいは、局部断面減少に伴うファイバー自身の引張り破壊に支配されるのかを明らかにし、その破壊機構を評価する。

この目的のために、まず供試体による次の腐食試験を実施した。

① 促進腐食試験 ファイバーモルタル供試体を促進腐食させた後、曲げ、引張り、圧縮試験を行う。

② 腐食ファイバー供試体の曲げ試験 腐食試験により局部的に断面の減少させたファイバーを用いて供試体を作成し、曲げ試験を行う。

この2種類の試験法の違いは、①のタイプでは、劣化する要因として付着強度の低下およびファイバーの局部断面減少による引張り強度の低下の影響が考慮されるのに対して、②のタイプでは、断面を減少させたファイバーを用いた実験であり腐食によるコンクリートとファイバー界面の付着強度の低下はなく劣化がファイバーの局部断面減少によってのみ支配されることにある。次に実

\* 正会員 Ph. D. 阪神高速道路公団神戸建設部  
(〒650 神戸市中央区新港町16-1)

\*\* Ph. D. Professor, University of Michigan  
(Ann Arbor, Michigan 48109-2125)

験結果を評価するために2種類の解析方法を用いた。

① 数値計算による曲げ破壊過程の評価 圧縮、引張り試験から求めた応力-ひずみ分布を用いて曲げ試験における荷重-たわみ関係を数値計算により評価する。

② 概略手法による強度劣化の評価 ファイバーの腐食による断面減少が曲げ強度に与える影響を単純化した応力分布仮定を用いて評価する。

## 2. 実験方法

### (1) 促進腐食試験

Fig. 1 に促進腐食試験の実験概要を示す。供試体は4種類の手法、すなわち、①供試体の断面を比較的薄くする、②含水比を高める、③中性化させる、④曲げひびわれを生じさせる、により腐食を促進させた。また、20°C、50°C、80°Cの3水準の浸漬暴露温度を用意し腐食速度に与える影響を調べた。

供試体は2~10か月間乾湿繰り返し状態において促進腐食後、曲げ、圧縮、引張り試験を実施した。組合せ数41種類、供試体断面が薄いことによる強度等のばらつきを考慮し同一条件供試体を12から36体ずつ、合計約

1200個の供試体が用意された。

Table 1 に供試体の配合条件を示す。セメントは、普通ポルトランドセメント (ASTM C-150) を用い、細骨材はオタワ産標準砂 (ASTM C-109) を用いた。フック付きファイバー (直径0.5 mm、長さ30 mmのうち両端4 mm ずつがかぎ状に曲がったもの、降伏強度1190 MPa) は体積比2%の割合で混合した。曲げ試験用供試体の寸法は、腐食の影響を評価しやすいうように比較的厚さを薄くし、曲げひびわれ供試体を除いて12.5×75×300 mmとした。曲げひびわれ供試体は、ひびわれ深さの影響を調べるために、12.5×75×300 mmと38.1×75×450 mmの2水準とした。また引張り供試体寸法は9.5×51×300 mm、圧縮シリンダー供試体はφ75×150 mmとした。

次に供試体作成方法および腐食試験手順を示す。

① セメント、砂を JIS R 5201 および ASTM C 305 に規定されているホーパート型ミキサーで約2分間空練りする。

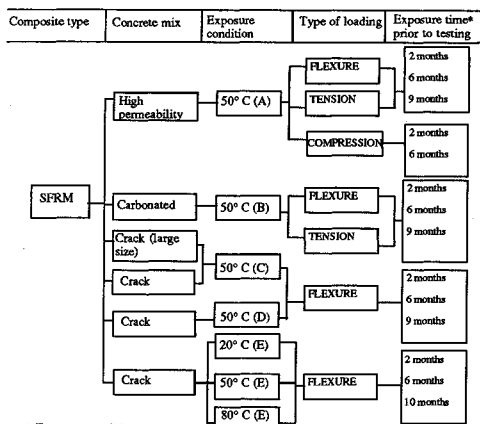
② 水、ファイバーをゆっくり混入し、約2分間攪拌する。

③ 混合されたモルタルを、パイレックスガラス製型枠中に、ゆっくり振動させながら打設する。

④ 標準および高含水タイプ供試体は、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3.0 mmのたわみ点まで載荷された。

⑤ 養生後、すべての供試体は乾湿繰り返しの促進腐食環境下にさらされた。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日間の気中養生とした。その際浸漬温度が腐食速度に与える影響を調べるために、Fig. 1 に示すように3種類の塩水温度を用いた。

⑥ 2, 6, 9か月間(標準供試体では10か月間)の乾湿繰り返し試験後、曲げ、引張り、圧縮試験を実施した。曲げ試験供試体はスパン長250 mm(大型曲げひびわれ供試体は400 mm)とし、曲げモーメント一定区間が100 mmの2点集中載荷とした。載荷速度は0.254 cm/分とし、中央点のたわみ(ダイヤルゲージおよびクロスヘッド間距離測定)と荷重の関係は、自動的にX-Yレコーダーに記録された。引張り試験は両端をくさび形グリッパで固定し、載荷速度は0.0508 cm/分とした。また、ひびわれを一定位置に生じさせるために供試体側面中央両側に切欠き部(深さ1 cm×幅2 mm)を設けた。伸びは、クロスヘッド間の距離および切欠き部に位置した電気式ひずみ測定器(長さ2.54 cmのExtensometer)の



\* Exposure condition  
Each cycle consists of three days of saturation in sodium-chloride water at the indicated temperature, and three days of drying at room temperature  
Specimen (A): High permeability specimens  
Specimen (B): Carbonated specimens  
Specimen (C): Pre-cracked specimens loaded to a 0.12 in. deflection point  
Specimen (D): Pre-cracked specimens loaded to peak strength  
Specimen (E): Standard specimens

Fig. 1 Flow chart for the accelerated corrosion tests of SFRM specimens.

Table 1 Mix design for SFRM specimens.

Specimen type	Standard and crack induced	Carbonated and high permeability
Cement	1	1
Water	0.42	0.70
Sand	1.5	3.0
Fibers	2.0 %	2.0 %

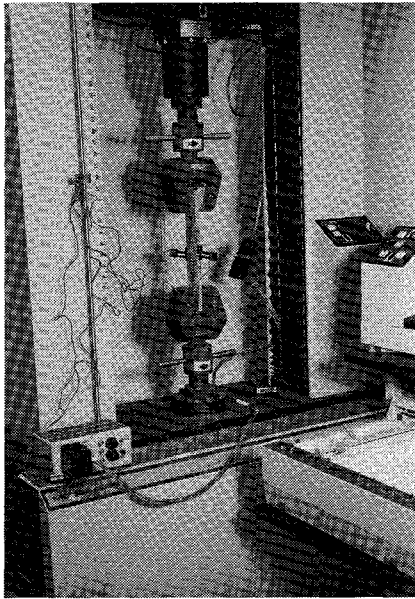


Fig.2 Tensile load test set-up.

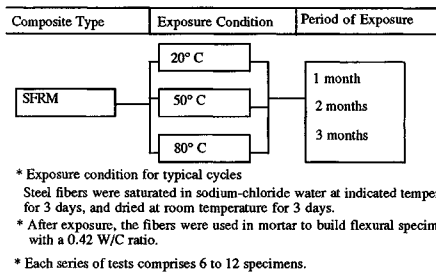


Fig.3 Flow chart for the tests using precorroded fibers.

左右の伸びの平均値により測定した (Fig.2)。圧縮試験は油圧式インストロン社製 8000 型タイプを用い、載荷速度 0.30 cm/分 で実施した。変形量はクロスヘッド間距離および供試体周辺に等間隔で取り付けられた 3 個の電気式ひずみ計 (Linear Voltage Differential Transducer) の平均値で測定された。

⑦ 載荷試験後、鋼ファイバーを供試体から取り出し、ファイバー直径の減少、破壊断面における引き抜き長さ (残存ファイバーの破壊面からの距離) を、マイクロメーターおよび顕微鏡を用いて測定した。ファイバーの腐食量と供試体の強度および靱性の低下を評価するために、腐食量はファイバーの平均最小直径 (取り出したファイバーのうち、40 本を代表サンプルとし、それぞれのファイバーを長さ方向に 10 等分し、それぞれの区分における最小直径) を測定した。

(2) 腐食ファイバー供試体の曲げ試験

腐食ファイバー供試体の曲げ試験の実験概要を Fig.3 に示す。まず、フック付きスチールファイバーを促進腐食試験と同様の 3 日間周期の乾湿繰り返し状態にさら

す。1, 2, 3 か月促進腐食期間ごとに、平均最小直径を測定する。測定後、腐食ファイバーを用いて、Table 1 で示される標準配合に従い、曲げ供試体を作成した。供試体は、6 日間水中養生後、21 日間気中養生された。28 日養生後、曲げ試験を実施し、ファイバー直径の減少と強度および靱性の低下との関係を把握した。

3. 実験結果

(1) 促進腐食試験結果

a) ファイバー直径の減少

Fig.4 は、曲げ試験における促進腐食試験期間とファイバー直径の減少の関係を示すが、乾湿繰り返し期間とファイバー直径の減少との間にはほぼ直線的な関係が成り立つことを示している。標準供試体は 2 か月の促進腐食の結果ファイバー表面の数 % でさびが確認されたが最小直径の減少はわずかであった。これに対して 6 か月促進腐食ではファイバー表面の 30 % にさびが確認され最小直径は 5~11 % 減少した。10 か月促進腐食ではファイバー表面さびは 30 % 程度と変化がないのに対し最小直径は 12~29 % 減少した。80°C に浸漬された供試体は 20°C の 2 倍程度の腐食速度 (最小直径の減少) を示した。また、高含水比および中性化タイプ供試体は当然のことながら標準供試体に比べて、さらに大きな腐食度を示す。たとえば、9 か月促進腐食させた中性化供試体は、70 % の平均最小直径の減少を示す。

b) 曲げ試験結果

Table 2, 3 は曲げ試験結果を示す。表における、おのこの値は 12 から 24 個の同一条件供試体実験結果の平均値である。Table 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

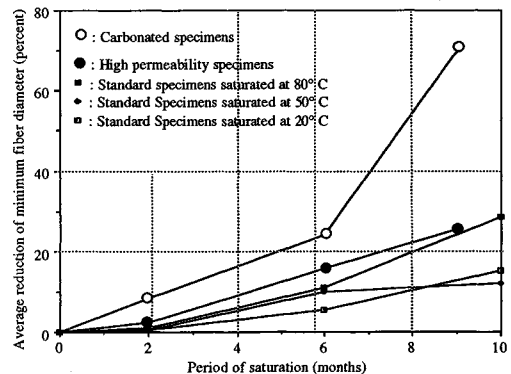


Fig.4 Relationship between the average reduction of minimum fiber diameter and saturation period for the flexural specimens.

Table 2 Results of flexural load tests for the standard, high permeability, and carbonated specimens.

Specimen type	Initial crack stress <sup>#1</sup> (Mpa)	Peak <sup>#2</sup> stress (Mpa)	Modified peak stress <sup>#3</sup> (Mpa)	Toughness index <sup>#4</sup>	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)	15.598 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)	15.490 I* 54.5	1.0 %
3) Standard specimens saturated at 20° C for 2 months	1394.0 (9.61)	1589.8 (11.02)	1902.5 (13.12)	15.485 I* 49.0	0.5 %
4) Standard specimens saturated at 20° C for 2 months	1095.0 (7.56)	1783.0 (12.29)	1937.5 (13.36)	15.546 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)	15.440 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)	15.432 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)	15.490 I* 50.2	5.4 %
8) Standard specimens saturated at 80° C for 10 months	1526.5 (10.33)	1535.1 (10.58)	1709.1 (11.78)	15.398 I* 35.6	28.7 %
9) Standard specimens saturated at 50° C for 10 months	1828.5 (12.61)	1895.7 (13.07)	1863.0 (12.85)	15.468 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)	15.431 I* 35.6	15.2 %
11) High permeability specimens cured in laboratory air for 2 months	601.6 (4.12)	912.4 (6.29)	930.6 (6.42)	15.537 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)	15.537 I* 103.0	-
13) High permeability specimens saturated for 2 months	1007.0 (6.94)	1174.2 (8.10)	1163.9 (8.03)	15.528 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)	15.512 I* 83.0	15.7 %
15) High permeability specimens saturated for 9 months	1085.4 (7.48)	1147.0 (7.91)	1135.5 (7.83)	15.494 I* 94.0	25.5 %
16) Carbonated specimens cured in laboratory air for 2 months	1086.2 (7.49)	1567.9 (10.81)	1569.2 (10.82)	15.527 I* 36.9	-
17) Carbonated specimens saturated for 2 months	1048.0 (7.23)	1467.0 (10.11)	1549.8 (10.69)	15.531 I* 30.3	8.5 %
18) Carbonated specimens saturated for 6 months	1180.0 (8.14)	1423.8 (9.82)	1439.1 (9.92)	15.527 I* 24.1	24.0 %
19) Carbonated specimens saturated for 9 months	1235.5 (8.45)	1349.2 (9.30)	1292.5 (8.91)	15.463 I* 23.2	69.9 %

\* 1000 psi = 6.85 Mpa  
<sup>#1</sup> Initial crack stress is defined as the initial crack moment divided by the section modulus.  
<sup>#2</sup> Peak stress is defined as the peak moment divided by the section modulus.  
<sup>#3</sup> Modified peak stress is defined as the peak stress calculated from the regression line at one percent of the total volume fraction of fibers.  
<sup>#4</sup> Toughness index (I\*) 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.

Table 3 Results of flexural load tests for the precracked specimens.

Specimen type	Maximum stress <sup>#4</sup> (Mpa)	Peak stress (Mpa)	Toughness <sup>#5</sup> pound. in.	Corroded area of the fracture section
1) Type 1 specimens cured in laboratory air for 2 months	1555.5 (10.73)	1402.4 (9.67)	38.7	-
2) Type 1 specimens cured in laboratory air for 6 months	1510.6 (10.42)	1350.7 (9.31)	32.0	-
3) Type 1 specimens saturated in sodium-chloride water for 2 months	1477.0 (10.18)	1534.1 (10.58)	32.9	5.0 %
4) Type 1 specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months	1516.5 (10.46)	1180.5 (8.14)	20.1	25.6 %
5) Type 1 specimens saturated in sodium-chloride water for 9 months	1574.9 (10.86)	1337.2 (9.22)	25.3	27.0 %
6) Type 2 specimens cured in laboratory air for 6 months	1815.9 (12.52)	1708.7 (11.78)	178.0	-
7) Type 2 specimens saturated in sodium-chloride water for 2 months	1659.1 (10.78)	1890.3 (13.03)	167.5	1.0 %
8) Type 2 specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months	1552.7 (10.71)	1540.5 (10.62)	155.0	19.9 %
9) Type 2 specimens saturated in sodium-chloride water for 9 months	1532.5 (10.37)	1309.5 (9.03)	142.9	20.8 %
10) Type 3 specimens cured in laboratory air for 6 months	1588.7 (10.95)	1569.7 (10.82)	175.8	-
11) Type 3 specimens saturated in sodium-chloride water for 2 months	1392.6 (9.60)	1418.6 (9.79)	149.0	1.0 %
12) Type 3 specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months	1466.1 (10.11)	1232.0 (8.49)	139.2	34.2 %

\* 1000 psi = 6.895 Mpa  
<sup>#1</sup> Type 1 specimens had dimensions of 1/2 x 12 x 3 in., and were loaded to deflect up to 0.12 in. at the midspan.  
<sup>#2</sup> Type 2 specimens had dimensions of 1.5 x 18 x 3 in., and were loaded to deflect up to 0.12 in. at the midspan.  
<sup>#3</sup> Type 3 specimens had dimensions of 1.5 x 18 x 3 in., and were loaded to deflect up to its ultimate strength.  
<sup>#4</sup> Maximum stress indicated the maximum stress for the crack induced tests.  
<sup>#5</sup> Toughness was calculated from the load-deflection curve up to 0.5 in. deflection point.  
<sup>#6</sup> Each series of tests comprises 12 to 18 specimens.

なったので、ファイバー混入率を1%と仮定し弾性曲げ応力度を求めた。また靱性はファイバー供試体の荷重-中央たわみ曲線下での0.5 in. (12.5 mm) までの面積

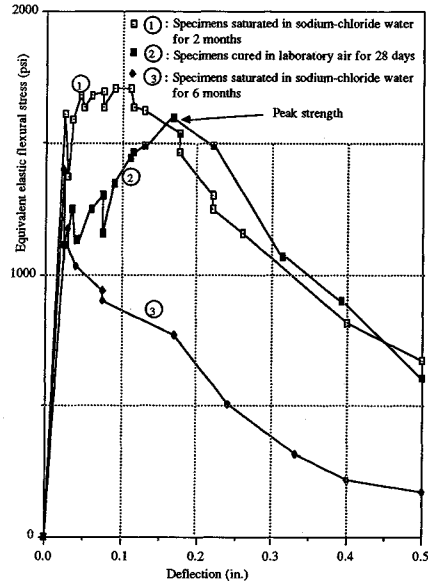


Fig. 5 Typical load-deflection curves for standard SFRM specimens.

で評価する。Fig. 5は標準タイプ供試体に対する典型的な荷重-たわみ曲線の一例を示す。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日間空气中養生された供試体に比較し、2か月間促進腐食された供試体はピーク応力、靱性とも増加する。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ッ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か月以上促進腐食させた場合ピーク応力、靱性とも2か月間促進腐食させたものに比べて著しく減少する。たとえば10か月間促進腐食させた標準供試体は、2か月間促進腐食させたものに比べて、ピーク応力度は8%、靱性率は27%減少する。顕微鏡観察の結果、ファイバーは腐食によりその直径を大幅に減少させるが、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。

Fig. 6は、腐食供試体と非腐食供試体の典型的破壊形式の対比を示す。非腐食供試体がファイバーとセメントマトリッ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る。破断面を観察すると非腐食供試体は、ファイバーとセメントマトリックス間の付着破壊であり平均引抜き長さは7.9 mmであった。これに対して、腐食供試体は腐食による断面減少に伴うファイバー自身の引張り破壊により平均引抜き長さは4.2 mmとなった。このことは、促進腐食期間が長くなるにつれて、破壊形式がファイバーとセメントマトリックスの付着破壊からファイバーの引張り破壊に変わることを証左している。Fig. 7は、ファイバーの平均最小直径と

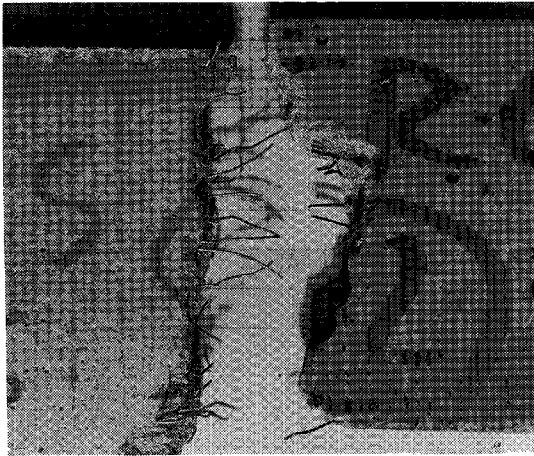


Fig.6 Comparison of the failure section on the standard specimen cured in laboratory air for 28 days (left) and carbonated specimen saturated in sodium-chloride water for 6 months.

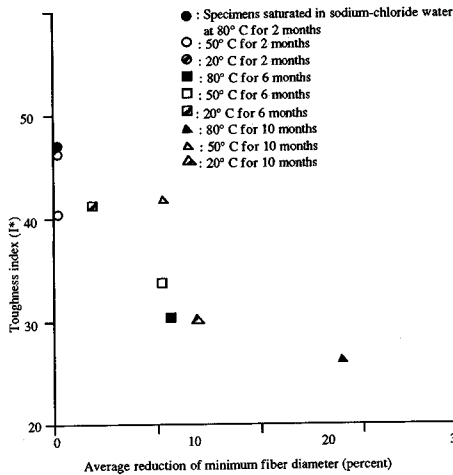


Fig.7 Toughness index ( $I^*$ ) versus average reduction of minimum fiber diameter for the standard flexural specimens.

靱性率の低下の関係を示すが、腐食による断面減少に伴い、靱性が大きく低下することがわかる。

c) 引張り試験結果

Table 4 に引張り試験結果を示す。Table 4 において応力は載荷荷重を切欠き部の純断面積 (4.1×0.95 cm) で除した値とした。靱性係数は、ファイバー供試体の荷重-伸び曲線下での 0.06 in. (0.15 cm) までの面積をモルタル供試体の荷重-伸び曲線下での面積で除した値である。初期弾性係数は、50 pounds (222.4 N) における荷重-伸び関係から算定した。最大応力値到達後、供試体全面にわたって微小ひびわれが発生し電気式ひずみ測定器のひずみ量は不安定な挙動を示した。このため最大

Table 4 Results of tensile load tests.

Specimen type	Initial tangent modulus psi (Mpa)	Peak stress psi (Mpa)	Toughness*1	Average reduction of minimum fiber diameter
1)High permeability specimens saturated in sodium-chloride water for 2 months	-	472.1 (3.26)	96.1	10.7 %
2)High permeability specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months	2.55 x 10 <sup>6</sup> (17.6 x 10 <sup>3</sup> )	412.8 (2.85)	83.5	30.0 %
3)High permeability specimens saturated in sodium-chloride water for 2 months	2.39 x 10 <sup>6</sup> (16.5 x 10 <sup>3</sup> )	410.2 (2.83)	86.6	25.3 %
4)High permeability specimens cured in laboratory air for 28 days	-	352.4 (2.43)	86.0	-
5)High permeability specimens cured in laboratory air for 6 months	2.30 x 10 <sup>6</sup> (15.9 x 10 <sup>3</sup> )	331.2 (2.28)	89.0	-
6)Carbonated specimens saturated in sodium-chloride water for 2 months	-	374.3 (2.63)	63.2	10.3 %
7)Carbonated specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months	2.83 x 10 <sup>6</sup> (19.5 x 10 <sup>3</sup> )	374.6 (2.58)	31.7	75.0 %
8)Carbonated specimens saturated in sodium-chloride water for 9 months	2.68 x 10 <sup>6</sup> (18.5 x 10 <sup>3</sup> )	429.9 (2.96)	33.5	75.0 %
9)Carbonated specimens cured in laboratory air for 2 months	2.79 x 10 <sup>6</sup> (19.2 x 10 <sup>3</sup> )	426.9 (2.94)	59.2	-

\* 1000 psi = 6.895 Mpa

\* Toughness index ( $I^*$ ) is defined as the area under the load-elongation curve up to 0.06 in. elongation for SFRM specimens, divided by the area for plain concrete specimens.

\* Each series of test comprises 12 to 24 specimens.

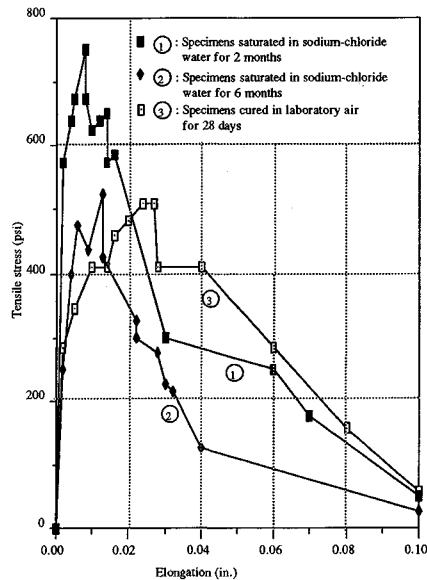


Fig.8 Typical load-elongation curves for carbonated specimens.

荷重値到達後のひずみ量はクロスヘッド間距離により評価した。Fig.8 に中性化タイプ供試体における典型的な荷重-伸び曲線の一例を示す。曲げ供試体試験と同様に 6 か月間以上促進腐食させた供試体は、2 か月間促進腐食させた供試体に比べて著しくピーク応力、靱性とも低下した。しかしながらいずれの場合も初期弾性係数の減少は起こらず、腐食によるひびわれが生じないことを示している。

d) 圧縮強度試験結果

Table 5 は、圧縮強度試験結果を示す。6 か月間塩水浸漬した供試体は表面に著しいさびを生じるとともに、10 % の平均ファイバー直径の減少を示したが、圧縮強

Table 5 Results of compression load tests.

Specimen type	Peak stress psi (Mpa)	Toughness psi (Mpa) *1	Average reduction of minimum fiber diameter
1) High permeability specimens cured in laboratory air for 28 days	3192.1 (22.01)	42.0 (0.28)	-
2) High permeability specimens cured in laboratory air for 6 months	3405.0 (23.48)	50.2 (0.35)	-
3) High permeability specimens saturated in sodium-chloride water for 2 months	3264.3 (22.51)	49.0 (0.34)	5.5 %
4) High permeability specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months	3329.4 (22.96)	52.6 (0.36)	10.9 %

\* 1000 psi = 6.895 Mpa  
 \*1 Toughness was computed as the area under the stress-strain curve up to a 0.025 strain point.  
 \* Each series of tests comprises 12 specimens.

Table 6 Results from the SFRM accelerated exposure tests prepared with corroded fibers exposed for one, two and three months.

Specimen type	Initial crack <sup>#1</sup> stress psi (Mpa)	Peak stress <sup>#2</sup> psi (Mpa)	Modified <sup>#3</sup> peak stress psi (Mpa)	Toughness index <sup>#4</sup>	Average reduction of minimum fiber diameter
1) Specimens prepared with normal fibers	993.0 (6.85)	1711.0 (11.80)	1584.0 (10.92)	I5 5.98 I* 56.9	-
2) Specimens prepared with fibers saturated at 20° C for 1 month	1128.0 (7.78)	1467.0 (10.11)	1642.0 (11.32)	I5 4.68 I* 36.1	7.0 %
3) Specimens prepared with fibers saturated at 50° C and 80° C for 1 month	880.0 (6.07)	1223.0 (8.43)	1315.0 (9.07)	I5 5.23 I* 30.4	17.8 %
4) Specimens prepared with fibers saturated at 20° C for 2 months	1152.0 (7.94)	1463.0 (10.09)	1510.0 (10.41)	I5 5.21 I* 29.8	25.4 %
5) Specimens prepared with fibers saturated at 50° C and 80° C for 2 months	1098.0 (7.57)	1323.0 (9.12)	1313.0 (9.05)	I5 5.02 I* 25.7	33.8 %
6) Specimens prepared with fibers saturated at 20° C for 3 months	1088.0 (7.50)	1428.0 (9.84)	1433.0 (9.88)	I5 5.37 I* 29.8	30.7 %
7) Specimens prepared with fibers saturated at 50° C and 80° C for 3 months	1164.0 (8.03)	1462.0 (10.08)	1459.0 (10.06)	I5 5.13 I* 32.4	34.5 %

\* 1000 psi = 6.895 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 load-deflection curve up to a deflection of 3.0 times first crack deflection, divided by the area up to the first crack point.  
 \*5 Toughness index (I\*) is defined as the area under the load-deflection curve for the SFRM specimen up to a 0.5 in. deflection point divided by the area for the plain concrete specimen.

度や靱性の低下は認められなかった。このことは、ファイバーコンクリートに対する腐食が圧縮よりも、引張りや曲げ特性すなわち、ファイバーの引張り強度に対して大きく影響することを示している。

(2) 腐食ファイバー供試体の曲げ試験結果

Table 6 に腐食ファイバー供試体の曲げ試験の結果を示す。また Fig. 9 に典型的な荷重-たわみ曲線例を示すが、腐食の進行にかかわらず、初期弾性係数については変化がみられなかった。Table 6, Fig. 9 に示すようにファイバー直径が減少するとともにピーク応力、靱性の劣化が顕著になる。

(3) 促進腐食試験と腐食ファイバー供試体の曲げ試験の比較

(1) で述べた促進腐食試験結果と (2) の腐食ファイバーの曲げ試験の対比を行った。(1) で示したとおり、促進腐食供試体は、著しい腐食を示したにもかかわらず、ひびわれや初期弾性係数の減少を生じなかった。このことは、ファイバーとコンクリート界面においてひびわれ発生に伴う付着強度の低下は生じず、強度や靱性の低下がファイバー断面の減少に支配されていることを示唆し

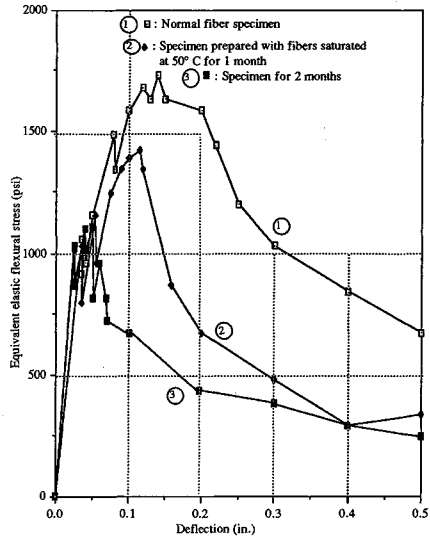


Fig. 9 Typical load-deflection curves of specimens using precorroded fibers.

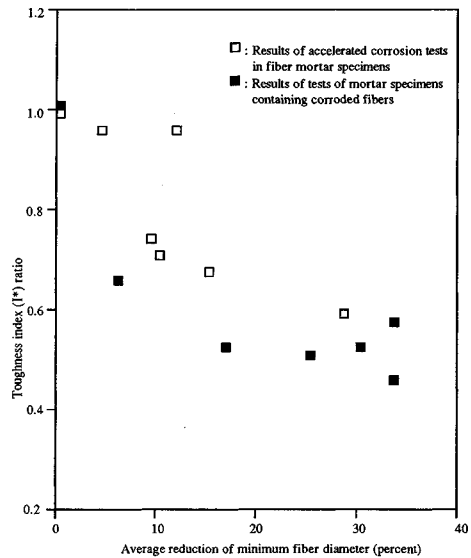


Fig. 10 Toughness index (I\*) ratio versus average reduction of minimum fiber diameter.

ている。Fig. 10 は両試験における靱性比（腐食供試体における靱性を非腐食供試体の靱性で除した値）と、ファイバー直径断面の減少の関係を示している。図はファイバー直径の減少と靱性の低下に密接な関係があることを示す。また 2 種類の供試体が同様の傾向にあることは、ファイバーコンクリートにおける強度および靱性の低下がファイバー断面の減少に一義的に支配されることを示している。

#### 4. ファイバーコンクリートの曲げ破壊過程の評価

##### (1) 評価の方法

本解析の目的は、非腐食および腐食供試体の曲げ破壊過程を実験より求めた圧縮および引張部の応力-ひずみ関係を用い数値計算により解析し、実験結果と比較し劣化の要因を評価することにある。Fig. 11 に、数値計算のための解析モデル、Fig. 12 に流れ図を示す。数値計算は次のステップから成り立っている<sup>4)-6)</sup>。

①  $\phi 7.5 \times 15 \text{ cm}$  (3×6 in.) の円柱コンクリート供試体の圧縮試験から圧縮域における応力-ひずみ関係を求める。同様に  $5.1 \times 0.95 \times 30 \text{ cm}$  (2×3/8×12 in.) のコンクリート供試体の引張り域における応力-ひずみ関係を求めた。

これらの結果を用いて、まず圧縮力と引張り力が、つり合う中立軸を求める。圧縮力(引張り力)は、仮定した中立軸から圧縮側縁端(引張り側縁端)までの応力を積分することによって求め、圧縮力と引張り力のつり合い条件から中立軸を求めた。

② 次に、中央点における曲げモーメントおよびたわ

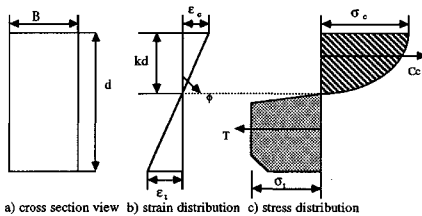


Fig. 11 Theoretical model for the numerical analysis.

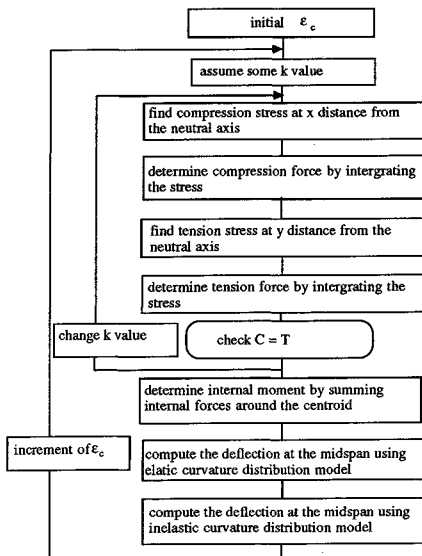


Fig. 12 Flow chart for the numerical analysis.

みを求めた。曲げモーメントは引張り域の重心位置における内部モーメントのつり合いより求めた。中間点におけるたわみを求めるために、次の2種類の弾性曲率モデルおよび非弾性曲率モデルを考えた。

##### ③ 弾性曲率モデル

曲率はスパン長全域にわたって弾性的に分布すると仮定すると中央点のたわみは式(1)のように表わせる。

$$DF1 = \phi_{mid} (3L^2 - 4b^2) / 24 \dots \dots \dots (1)$$

ここで、DF1:弾性モデルによる中間点のたわみ

$\phi_{mid}$ :中央点における曲率、L:スパン長

b:支点から荷点までの距離

##### ④ 非弾性曲率モデル

曲率分布を弾性領域および非弾性領域の2つに区分し、非弾性領域においては、曲率の増加は、塑性ヒンジ領域( $L_p$ )に集中するものと仮定する。この場合中央点のたわみは式(2)のようになる。

$$DF2 = \phi_y (3L^2 - 4b^2) / 24 + (\phi_m - \phi_y) L_p (L - L_p) / 4 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、DF2:非弾性モデルによる中間点のたわみ

$L_p$ :塑性ヒンジ長、 $\phi_m$ :最大曲率

$\phi_y$ :ファイバー降伏時の中央点の曲率

式(2)において、引張り縁端部のひずみが0.0015に達したときの曲率を、ファイバー降伏時の曲率と仮定した。荷重試験結果によると1本の主ひびわれが生じたのち、このひびわれから拡大する数本のひびわれを生じ、ほぼ荷重支点間全体にわたりひびわれが分布した。これに対し荷重支点間以外においてはほとんどひびわれは認められなかった。このため塑性ヒンジ長( $L_p$ )は4 in.(荷重支点間距離)と仮定した。

##### (2) ファイバーコンクリートにおける荷重-たわみ曲線の解析

28日間気中養生された標準供試体の圧縮および引張り試験結果を用いて、曲げ試験における荷重-たわみ曲線を求めた。実験結果に基づいて圧縮ゾーンにおける応力-ひずみ関係は次のように評価された。

①  $0 \leq \epsilon < 0.0045$

$$\sigma = (E_c/2)\epsilon(2 - \epsilon/\epsilon_{peak}) \dots \dots \dots (3)$$

②  $0.0045 \leq \epsilon < 0.012$

$$\sigma = A_1\epsilon + A_2 = -671875\epsilon + 10562.5 \dots \dots \dots (4)$$

③  $0.012 \leq \epsilon$

$$\sigma = A_3\epsilon + A_4 = -39470\epsilon + 2974 \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $\sigma$ :応力、 $E_c$ :弾性係数、 $\epsilon$ :ひずみ

$\epsilon_{peak}$ :圧縮域におけるピーク応力時のひずみ

$A_1, A_2, A_3, A_4$ :定数

同様に実験結果に基づいて、引張り部における応力-ひずみ関係は引き抜け開始後0.004までは一定の応力で引き抜け、その後クラックが増大するとともに引き抜け

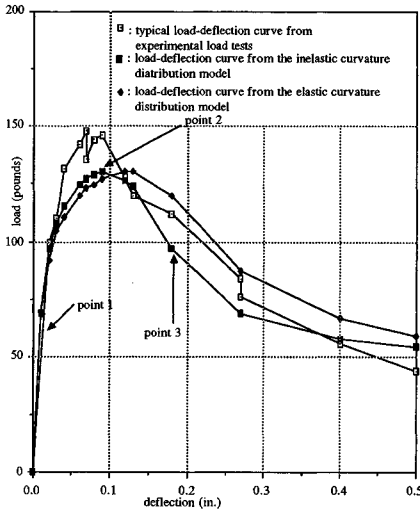


Fig. 13 Theoretical and experimental load-deflection curves for standard SFRM specimens with dimensions of 3×0.5×12 in. cured in laboratory air for 28 days.

力は減少すると仮定し次のように評価された。

- ①  $0 \leq \epsilon < 0.000183$        $\sigma = E_c \epsilon = 3\,500\,000 \epsilon$  ..... (6)
- ②  $0.000183 \leq \epsilon < 0.004$        $\sigma = 640$  ..... (7)
- ③  $0.004 \leq \epsilon < 0.01125$        $\sigma = -67\,585 \epsilon + 910$  ..... (8)
- ④  $0.01125 \leq \epsilon$        $\sigma = 150$  ..... (9)

式 (3) から (9) の圧縮領域および引張り領域の応力-ひずみ関係を用いて、中央点における曲げモーメントおよびたわみを求めた。Fig. 13, 14 は、12.5×75×300 mm (1/2×3×12 in.) および 38.1×75×450 mm (1.5×3×18 in.) の供試体に対する荷重-たわみ曲線解析結果と実験結果の対比を示す。Fig. 13, 14 は供試体寸法が違ってもかかわらず、数値解析に基づく荷重-たわみ応答と、実験に基づく荷重-たわみ曲線とが比較的一致していることを示しておりこの解析法の妥当性を示す。Fig. 13 における主要な荷重点における応力分布を Fig. 15 に示すが以下のことが推定できる。①ポイント1は、引張り部縁端が初期ひびわれに達した状態を示す。荷重ポイント1までは、応力-ひずみ関係は弾性状態を示す。②荷重ポイント2は最大載荷点を示す。この地点においては、断面の77%が引張り領域となる。圧縮部縁端でのひずみは0.00135でありピーク応力値におけるひずみよりも小さいが、引張り部縁端でのひずみ量は、0.00457となり応力-ひずみ曲線の下降領域に入っている。簡略的には、最大載荷点における引張り領域の応力-ひずみ関係は、断面の77%が引張り域に属し、平均応力640 psi (4 412.8 kPa) の長方形分布とみなすこと

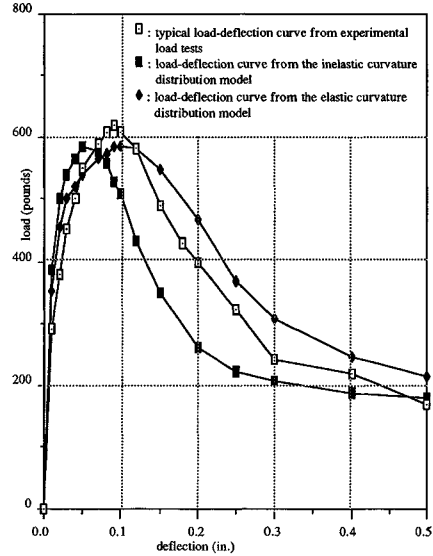


Fig. 14 Theoretical and experimental load-deflection curves obtained from standard SFRM specimens with dimensions of 3×1.5×18 in. cured in laboratory air for 28 days.

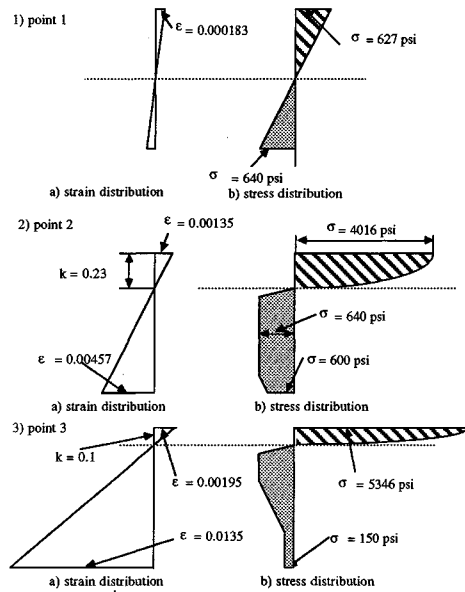


Fig. 15 Stress-strain distribution of SFRM specimens representing particular states of behavior.

ができる。③荷重ポイント3は、応力-ひずみ曲線の下降領域の例を示す。下降領域では、断面の約90%が引張り域になる。圧縮部縁端のひずみ量は0.00195となりピーク応力値のひずみ量に達していない。このことは、スチールファイバーコンクリート供試体の曲げ破壊機構が、引張り領域の破壊によって支配されることを示している。



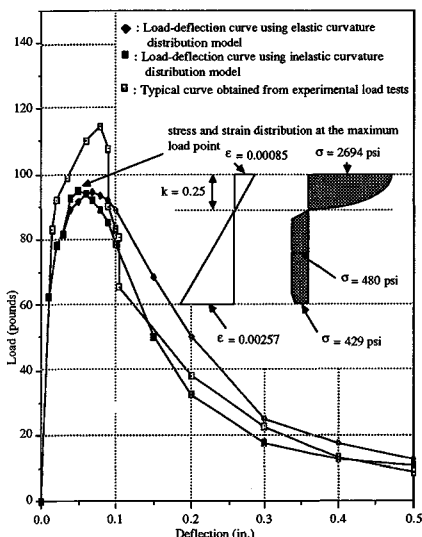


Fig. 16 Theoretical and experimental load-deflection curves obtained from carbonated SFRM specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months.

(3) 腐食供試体における荷重-たわみ曲線の解析

前節で述べたと同様の方法で、代表的な腐食供試体(中性化した供試体を6か月間塩水中で促進腐食させたもの)を用いて、荷重-たわみ曲線を求め、実験から求めた曲線値と比較した(Fig. 16)。腐食した供試体を用いた荷重-たわみ曲線は、初期の段階においては非腐食供試体と同様の傾向を示した。しかしながら95 pounds(422.7N)の最大荷重に達した後に、急激な支持荷重の低下を示すとともに、靱性の低下が認められる。解析結果によれば、最大荷重時においては、断面の75%が引張り領域に属しており、曲げ試験における腐食供試体の最大荷重および靱性の低下が引張り領域における応力-ひずみ応答値の低下によるものであることを示している。

5. 断面減少が強度に及ぼす影響の概略法による評価

(1) 概略法について

本章においては、腐食によるファイバー直径の減少が曲げ強度に与える影響を、Hannant<sup>(7),8)</sup>らによって導かれた概略法をもとに考察した。概略法によれば強度の低下は、平均ファイバー直径の減少の分布および平均付着強度から決定される。

a) ファイバーとマトリックス間の平均付着力の算定

前章の解析結果は、最大荷重状態において引張り領域が約80%を占め、引張り領域内では均一の平均応力状態であると仮定でき、また圧縮領域内においては弾性的な応力-ひずみ関係が成り立つことを明らかにした。

Hannant らの解析によると最大応力発生時、中立軸が圧縮縁から0.2dの位置とし、引張力が引張側全域にわたって一定であると仮定式(10)が成立する。

- ① 抵抗モーメント = 8Td/15
- ② 曲げモーメント = Pb/2.....(10)

ここで、T:引張り力、d:供試体の厚み、P:載荷荷重、b:荷重作用点から支点までの距離

引張り力(T)はファイバー1本当たりの引張力に、引張領域のファイバー数を掛けて次式で表わされる。

$$T = N\pi UDL_f/4.....(11)$$

ここで、N:引張り領域におけるファイバーの数

U:ファイバーの平均付着力

D:ファイバーの直径、L<sub>f</sub>:ファイバー長  
ファイバーの平均付着力を式(10)、(11)より求める。

b) ファイバーの限界長の検討

最も重要な劣化の指標として、ファイバーの最小直径を取り上げ、ファイバーの腐食による強度低下について考察する。簡略のためフック形状を考慮せず、また腐食によるファイバーの最小直径はファイバーの中央部に生じると仮定する。ファイバーの腐食により、付着破壊から引張り破壊に変わる場合限界長は次の式で表わせる。

$$\pi D_c^2 f_s / 4 + (L_f / 2 - L_{ecr}) U \pi D = U \pi D L_{ecr}.....(12)$$

ここで、D<sub>c</sub>:ファイバーの最小直径

f<sub>s</sub>:ファイバーの引張り強度

L<sub>ecr</sub>:ファイバーの破壊が付着から引張りに変わる限界長

c) ファイバー直径の減少を考慮した強度の計算

腐食したファイバー1本当たりの平均引張り強度はファイバーの引抜け破壊とファイバー自身の引張破壊の2種類を考慮し次式で表わせる。

$$N_{mean} = \sum_{i=1}^n P_i \left[ \int_0^{L_{ecr,i}} U \pi D L dL + \int_0^{L_f/2 - L_{ecr,i}} U \pi D L dL + \int_0^{L_f/2 - L_{ecr,i}} f_s A_i dL \right] / [L_f / 2].....(13)$$

ここで、A<sub>i</sub>:ファイバー腐食部における最小面積

P<sub>i</sub>:腐食ファイバーが最小面積A<sub>i</sub>をもつ確率

L<sub>ecr,i</sub>:腐食ファイバーが最小面積A<sub>i</sub>をもつ場合の限界長

前章の解析により、腐食によって引張り領域の応力-ひずみ関係に劣化が起こっても、中立軸の変化はほとんどないことが明らかになった。

この仮定を適応すると、強度比S(腐食供試体の強度を普通供試体の強度で除したものは、次式で表わせる。

$$S = \sum_{i=1}^n P_i \left[ \int_0^{L_{ecr,i}} U \pi D L dL + \int_0^{L_f/2 - L_{ecr,i}} U \pi D L dL + \int_0^{L_f/2 - L_{ecr,i}} f_s A_i dL \right] / \left[ \frac{L_f}{2} U \pi D \frac{L_f}{4} \right].....(14)$$

Table 7 Comparison of analytical predictions versus the experimental results for flexural load tests.

specimen type	average bond strength (N/mm <sup>2</sup> )	average reduction of minimum diameters	strength ratio from analytical predictions	strength ratio from experimental results
1) standard SFRM specimens saturated in sodium-chloride water at 80° C for 6 months	7.8	11.1 %	0.98	0.93
2) standard SFRM specimens saturated in sodium-chloride water at 50° C for 6 months	7.8	9.9 %	0.95	0.96
3) standard SFRM specimens saturated in sodium-chloride water at 20° C for 6 months	7.8	5.4 %	1.00	0.97
4) standard SFRM specimens saturated in sodium-chloride water at 80° C for 10 months	7.8	28.7 %	0.88	0.91
5) standard SFRM specimens saturated in sodium-chloride water at 50° C for 10 months	7.8	12.1 %	0.95	0.99
6) standard SFRM specimens saturated in sodium-chloride water at 20° C for 10 months	7.8	15.2 %	0.94	0.93
7) carbonated SFRM specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months	6.9	24.0 %	0.93	0.93
8) carbonated SFRM specimens saturated in sodium-chloride water for 9 months	6.9	69.9 %	0.71	0.83
9) high permeability specimens saturated in sodium-chloride water for 6 months	5.2	15.7 %	0.95	0.92
10) high permeability specimens saturated in sodium-chloride water for 9 months	5.2	25.5 %	0.93	0.98

式 (14) に腐食したファイバーの最小直径の分布を代入することによって強度比を求めることができる。

#### (2) 概略法による解析結果

Table 7 は、曲げ試験における解析結果と実験結果の対比を示す。Table 7 において平均付着応力度は、2 か月間乾湿繰り返し試験を行った供試体の曲げ試験結果より求めた。実験結果から求めたファイバー最小直径を式 (14) に代入し求めた解析結果は実験結果とほぼ同様の傾向を示す。この同一傾向は、ファイバー供試体の腐食による劣化機構が、付着応力度の減少によるものではなく、ファイバー直径の減少によるものであることを証左している。また、式 (13) から (14) は、強度比が限界長、ファイバーの最小直径および平均付着力に支配されることを示している。また、限界長は付着強度およびファイバーの最小直径によって支配されるので、強度比は付着強度およびファイバーの最小直径によってのみ決まることを証左している。

## 6. 結 論

今回の実験および解析から次の結論が導きだされる。

(1) ファイバー供試体の長期間の乾湿繰り返し試験は、ファイバーの局所的な断面の減少をもたらした。しかしながら、供試体表面には腐食によるひびわれは生じず、初期弾性係数の変化も認められなかった。

(2) 腐食による局所的な断面減少は引張りおよび曲げ試験において著しい靱性および強度の低下をもたらす。

(3) 腐食供試体の引張りおよび曲げ試験の結果および破壊面の観察は、ファイバーの局所的断面の減少により破壊形式がファイバーの付着破壊からファイバーの引張り破壊に変化することを示唆した。

(4) 腐食したファイバーを用いた曲げ試験結果は、促進腐食供試体による曲げ試験結果と同様の傾向を示し、強度および靱性の低下がファイバーの局部断面の減少によることを明らかにした。

(5) 数値計算結果は、腐食による引張り部の応力-ひずみ関係の劣化が曲げ試験における強度および靱性の低下に導くことを明らかにした。また最大荷重時において断面の 80 % が引張り域に属することも明らかにした。

(6) 腐食による断面積の減少を考慮した概略法による解析結果は実験結果とよく一致した。またこの結果は、強度低下がファイバーの引張り強度の低下によるものであることを明らかにした。

#### 参 考 文 献

- Hannant, D. J. and Edgington : Durability of Steel-Fibre Concrete, Fibre Reinforced Cement and Concrete, RILEM Symposium, Construction Press, London, pp. 159~169, 1975.
- Schupack, M. : Durability of SFRC Exposed to Severe Environments, in Proceeding of U.S.-Sweden Joint Seminar on Steel Fibre Concrete, S. P. Shah and A. Skarendahl, Editors, Stockholm, June 1985, Published by the Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Hoff, G. C. : Durability of Fibre Reinforced Concrete in a severe Marine Environment, Proceedings, Katharine and Bryant Mather International Symposium on Concrete Durability, American Concrete Institute, Detroit, SP-100, Vol. 1, pp. 997~1041, 1987.
- Kosa, K. : Corrosion of Fibre Reinforced Concrete, Ph. D. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 1988.
- Sakai, M. and Nakamura, N. : Analysis of Flexural Behavior of Steel Fiber Reinforced, RILEM Symposium, Fibre Reinforced Cement and Concrete, 1986.
- Craig, R. J., Decker, J., Dombrowski, et al. : Inelastic Behavior of Reinforced Fibrous Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 113, No. ST4, pp. 802~817, April, 1987.
- Hannant, D. T. : Additional Data on Fibre Corrosion in Cacked Beams and Theoretical Treatment of the Effect of Fibre Corrosion on Beam Load Capacity, RILEM Symposium, Fibre Reinforced Cement and Concrete, 1975.
- 小林一輔 : 繊維補強コンクリート, オーム社, 1981.

(1989.11.8・受付)