

[111] 鋼繊維補強オートクレープ養生コンクリートの暴露試験

正会員 ○福地 利夫 (日本大学工学部)
 渡沢 正典 (日本大学工学部)
 岡田 教和 (日本大学大学院)

1. はじめに

本文は、鋼繊維で補強したオートクレープ養生コンクリート供試体（以下「SFRACT」という）の鋼繊維の腐食挙動を調べることを目的として行った暴露試験報告である。オートクレープ養生硬化体の組織構造は、普通コンクリートに比較して、ち密性は高くなる¹⁾が、pHは低くなるということが知られている²⁾。そこで、脆性改善に有効な鋼繊維が、前述のような性質のコンクリート中で、どのような挙動を示すかが、本研究の主題である。暴露試験場は、海水中（JCI規準案の「区分B」）および大気中（同、「区分D」）である。暴露期間は、まだ3年と短い³⁾が、鋼繊維で補強した比較用の普通コンクリート（以下「SFRC」という）と比べて、その腐食挙動に相違が生じはじめている。なお、鋼繊維の腐食程度は、従来、目視および写真による方法が用いられているが、本報告では、腐食の定量化を試みている。

2. 使用材料

2.1 セメント 普通ポルトランドセメントを使用した。化学成分および物理試験結果を表1に示す。

2.2 シリカ ガラス製造用高純度シリカを使用した。化学成分および物理的性質を表2に示す。

2.3 骨材 細骨材および粗骨材共、産地は阿武隈川のもので、最大粒径は細骨材2.5mm、粗骨材15mmのものを用いた。表3および表4に、それらの物理的性質を示す。

2.4 鋼繊維 鋼繊維は、市販の薄板剪断方法によるものを使用した。形状は、ストレートで、その物理的性質を表5に示す。

2.5 減水剤 ポリアルキルアリルスルホン酸塩系高性能減水剤を使用した。

2.6 錆落し剤 くえん酸二アンモニウム[(NH₄)₂HC₆H₅O₇]

3. 試験方法

3.1 調合および練り混ぜ 表6に、SFRACTおよびSFRCの調合を示す。

SFRACTにおけるシリカ混入率は、同表に示すようにセメント重量の40%、CaO/SiO₂モル比換算0.79である。減水

表1 セメントの化学成分および物理試験結果

| 化学成分 (%) | | | | | | | | |
|----------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|-------|
| ig.loss | insol | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | Total |
| 0.6 | 0.1 | 22.1 | 5.2 | 3.1 | 65.3 | 1.3 | 1.9 | 99.6 |

| 比重 | 粉末度 | | 凝結 | | 安定性 | 強さ [kgf/cm ² (N/cm ²)] | | | | | |
|------|---------------------------|------------|----------|----------|-----|---|----|-----|------|-----|-----|
| | 比表面積 (cm ² /g) | 88μm残分 (%) | 始発 (時-分) | 終結 (時-分) | | 曲げ強さ | | | 圧縮強さ | | |
| | | | | | | 3日 | 7日 | 28日 | 3日 | 7日 | 28日 |
| 3.17 | 3290 | 1.3 | 2-35 | 3-29 | 良 | 35 | 49 | 74 | 141 | 240 | 429 |

表2 シリカの化学成分および物理試験結果

| 化学成分 (%) | | | | | | | |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|------------------|-----|--|
| ig.loss | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | CaO | K ₂ O | MgO | |
| 0.07 | 99.8 | 0.008 | 0.01 | 微量 | 微量 | 微量 | |

| 比重 | pH | 粒度 (μ) | 比表面積 (cm ² /g) | 熱膨張率 (1/°C×10 ⁻⁷) | 白色度 | 水分 (%) |
|------|-----|--------|---------------------------|-------------------------------|-----|--------|
| 2.60 | 6.9 | 3.5 | 4620 | 5 | 95 | 0.5 |

表3 細骨材の物理試験結果

| 種類 | 比重 | | 単位容積重量 (kg/l) | 実積率 (%) | 吸水率 (%) | 粒度分布 (通過%) | | | | | 粗粒率 |
|----|------|------|---------------|---------|---------|------------|-----|-----|-----|------|------|
| | 表乾 | 絶乾 | | | | 2.5 | 1.2 | 0.5 | 0.3 | 0.15 | |
| 川砂 | 2.63 | 2.56 | 1.69 | 52.7 | 2.67 | 100 | 79 | 51 | 23 | 10 | 2.43 |

表4 粗骨材の物理試験結果

| 種類 | 比重 | | 単位容積重量 (kg/l) | 実積率 (%) | 吸水率 (%) | 粒度分布 (通過%) | | | | 粗粒率 |
|-----|------|------|---------------|---------|---------|------------|----|----|-----|------|
| | 表乾 | 絶乾 | | | | 15 | 10 | 5 | 2.5 | |
| 川砂利 | 2.58 | 2.56 | 1.60 | 62.8 | 1.09 | 100 | 88 | 12 | 7 | 6.00 |

剤添加率は、セメント重量の0.6%である。

コンクリートの練り混ぜは、SFRACの場合予め混合調整（ボールミル使用）したセメント

とシリカに骨材を加え、アイリッヒ型強制練りミキサにより3分間空練りした後、水を注いで2分30秒間練り混ぜ、さらに鋼繊維を投入しながら30秒間練り混ぜた。なお、SFRCの練り混ぜは、SFRACに準じて行った。

3.2 供試体寸法 形状は角柱で、寸法は、10×10×40cmである。

3.3 養生 SFRACの養生は、図1に示す装置を用い、図2に示すダイヤグラムで行った。なお、前養生の24時間は、恒温恒湿室（20°C、R.H.80%）内に置いた。なお、SFRCは、材令28日まで標準養生を行った。

3.4 暴露試験場

3.4.1 海中暴露試験場の環境 海中暴露試験用供試体は、勿来常磐火力発電所、小名浜取水口の海面下に暴露した。暴露試験場は、コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法のJCI規準案（4）の環境区分「B」に相当する。

3.4.2 大気暴露試験場の環境 大気暴露試験用供試体は、福島県郡山市内に所在する日本大学工学部の実験棟屋上に暴露した。暴露試験場は、前述のJCI規準案の環境区分「D」に相当する。

3.4.3 暴露試験場の気象 郡山及び小名浜（直接関係ないが、郡山との比較として）における年平均の気象条件は、図3、図4および図5に示すようである。なお、図5のウィンド・ローズ（Wind・Rose）とは、各風向別の回数を全観測で割って、百分率であらわし、これを図にしたものである。

3.5 鋼繊維の腐食量の定量 試験手順は以下のものである。（1）曲げ強度試験の折片のうちの1片（他の1片はJIS A 1114「はりの折片によるコンクリートの圧縮試験方法」に使用）を図6に示すとおり、コンクリートソーにより切断し、（2）この各片を、ハンマーを使用して打砕き、原長の鋼繊維をひとつの供試体から合計600本採取した。（3）くえん酸二アンモニウム $[(NH_4)_2HCO_3]$ 10%溶液をビーカーに適量入れ、加熱沸とうさせ、この中に100本単位に仕切った鋼繊維を入れ、10分間煮沸した。（4）煮沸後、鋼繊維を取り出して、ていねいに拭い、次式により、その重量変化率wを求め、それを腐食量とした。

$$w = \frac{W_o - W_t}{W_o} \times 100 \quad (\%)$$

表5 鋼繊維の物理的性質

| 寸法 | | | アスペクト比 | 比重 | ヤング係数 (kgf/cm ²) | 引張強度 (kgf/mm ²) | 用途 |
|--------------|-------------|-----------------------------|--------|------|---------------------------------|--------------------------------|-----|
| 公称長さ (mm) | 幅×厚 (mm) | 公称断面積 (mm ²) | | | | | |
| 30 | 0.50×0.50 | 0.250 | 60 | 7.85 | 2.1×10 ⁶ | 45.0以上 | 打込み |

表6 コンクリートの調合

| コンクリートの種類 | W/C (%) | スラブ厚 (cm) | 単位水量 (kg/m ³) | シリカ混入率 (%) | 重量 (kg/m ³) | | | | s/a (%) | 繊維混入率 (%) |
|-----------|---------|--------------|------------------------------|---------------|-------------------------|-----|------|-----|---------|--------------|
| | | | | | セメント | シリカ | 細骨材 | 粗骨材 | | |
| SFRAC | 45 | 4 | 229 | 40 | 305 | 203 | 1158 | 378 | 75 | 2.0 |
| SFRC | 45 | 8 | 229 | - | 508 | - | 1195 | 378 | 76 | 2.0 |

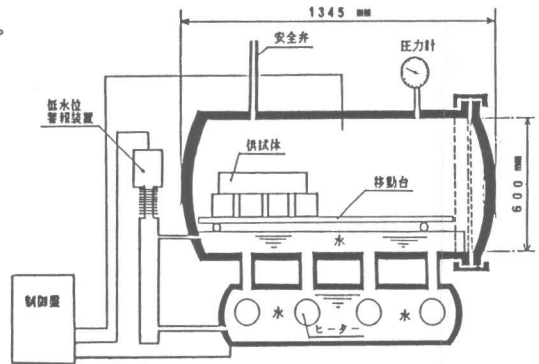


図1 オートクレーブ養生装置

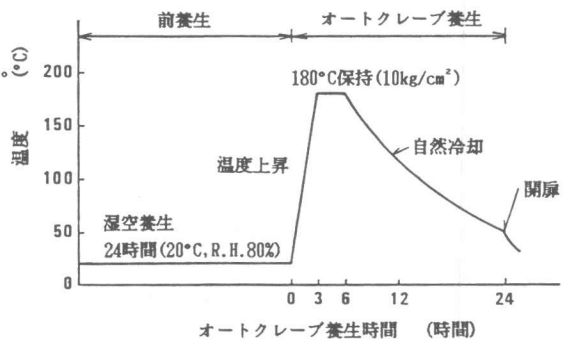


図2 オートクレーブ養生ダイヤグラム

ここに、 W_0 : 材令 0 箇月における鋼繊維の重量 (g)

W_t : 材令 t 箇月における鋼繊維の重量 (g)

3.6 pH 値の測定 試料は、鋼繊維を採取したコンクリート片を微粉碎 (0.15mm以下) したものをを用いた。この試料約 400g を 105℃ で恒量となるまで乾燥し、100g ずつ 3 個のビーカにとり、その中へ約 200ml の精製水を加え、時々攪拌しながら約 90℃ で 3 時間湯煎した。ろ紙により抽出液を分離して、pH メータによって測定した。

3.7 塩分含有量の測定 モール法に従って行った。pH を測定した抽出液に、 HNO_3 を過剰添加して、pH を下げ、さらに $NaHCO_3$ を添加し、pH 7 程度に調整した。 K_2CrO_4 を指示薬として、 $AgNO_3$ (N/10) で滴定した。この滴定量から Cl^- イオンを定量し、次式により塩分含有率 p を求めた。

$$p = 0.00584 \frac{W'}{W} \left(\frac{A}{V} - \frac{B}{100} \right) \times 100 \quad (\%)$$

- ここに、 W : 試料の絶乾重量 (g)
- W' : 適定液の全重量 (g)
- V : 適定に要した抽出液の量 (ml)
- A : 適定に消費した 1/10 規定硝酸銀溶液の量 (ml)
- B : 抽出に用いた水 100ml の、塩素イオン定量に消費した硝酸銀溶液の量 (ml)、ただし、本試験では 0ml とした。

4. 試験結果

4.1 鋼繊維の腐食挙動 暴露期間 3 年間における SFRAC および SFRC の鋼繊維の腐食挙動を図 7 に示す。図によれば、鋼繊維の腐食は、SFRAC では、暴露期間 12 箇月までは、大気および海中暴露とも直線的に進行し、その後、36 箇月までは、わずかに変化がみられる程度である。なお、どの暴露期間をとっても、海中暴露における腐食量 (重量変化率) は大気暴露のそれよりも、当然のことながら大きい。これに対して比較用の SFRC は、腐食が徐々に進行し暴露期間 36 箇月では、SFRAC の腐食量を、やや上回る挙動を示す。SFRAC と SFRC ともこのような対照的な相異は、後述の pH (図 8 参照) および塩分含有量 (図 9 参照) の試験結果により、説明することが出来る。すなわち、SFRAC の場合、初期は pH の低下により腐食は進行するが、その後は、SFRAC の組織のち密性が腐食の進行を抑制したと考えられる。なお、海中暴露供試体の目視による鋼繊維の発錆状況は、次のようである。SFRAC および SFRC とも、深さ約 10mm の鋼繊維は、著しく錆び、コンクリートへの錆のしん出も認められた。しかし、そ

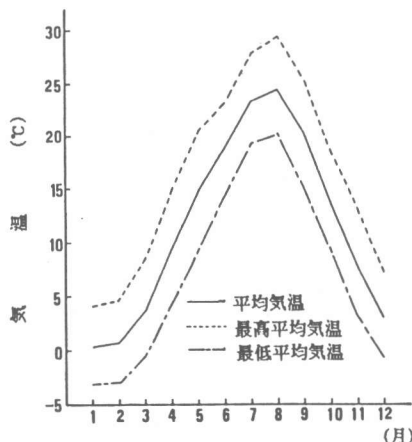


図 3 郡山における月別平均気温

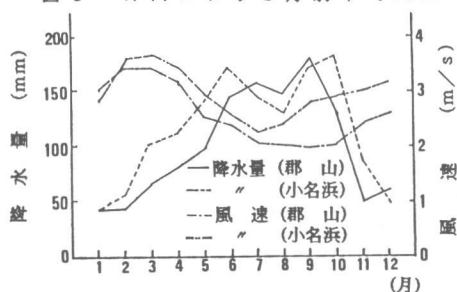


図 4 2 地区の月別降水量及び風速

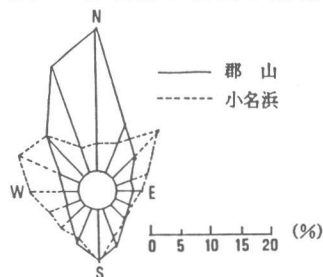


図 5 2 地区のウィンド・ローズ

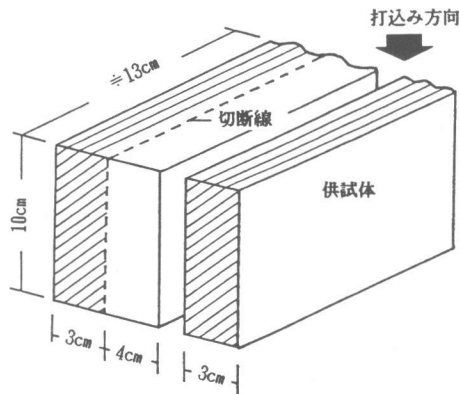


図 6 供試体の切断方法

れより内部では、錆は認められなかった。なお、発錆の程度は、SFRACがSFRCより多少進行しているようである。

4.2 暴露期間とpH 図8に示すようである。図によれば、暴露前のpHは、SFRCの12.3に対してSFRACは11.0と低い。暴露期間36箇月目におけるpHの低下割合は、SFRACはSFRCより大である。暴露試験場の相異によるpHへの影響は、SFRACおよびSFRCとも、ほとんど認められない。なお、36箇月目において、SFRACのpHが、かなり低下しているが、原因は、明らかでない。

4.3 暴露期間と塩分含有量 図9に示すようである。図から明らかなように、SFRACの場合、暴露期間3箇月以降、塩分含有量の増加はほとんどみられない。これに対して、SFRCのそれは、ほぼ直線的に増加し、36箇月目の暴露では、SFRACの約3倍に達する。

5. むすび

以上3年間の暴露試験結果を要約すると、つぎのようである。

(1) SFRACの鋼繊維の腐食は、海中に暴露した場合、始めの1年間は直線的に進行するが、その後の腐食は、極めて僅少になる。大気中に暴露した場合も、傾向は同様である。ただし、腐食量は、海中の場合よりも小で、特に1年以降は、腐食がほとんど進まない。この理由は、オートクレーブ養生硬化体の特質から説明できる。すなわち、腐食の進行に対して、長期的には、pHの低下分が、その密性にカバーされたためと考えられる。

(2) SFRCの鋼繊維の腐食は、海中に暴露した場合、暴露期間が長くなるに従って、徐々に進行し、3年目では、SFRACのそれを、やや上回る。大気中に暴露した場合も、傾向は、同様である。

(3) 目視による鋼繊維の腐食は、SFRACおよびSFRC共、深さ約10mm以内で生じており、それ以上の深部では、認められない。これは、海中および大気暴露を問わず、同様である。

(4) くえん酸二アンモニウムによる腐食量の定量化は、目視との併用が望ましい。

(5) SFRACの暴露前のpHの実測値は11.0、SFRCは12.3である。環境区分(海中、大気)の相違によるpHへの影響は認められない。

(6) 海中暴露によるSFRACの塩分含有量は、3箇月以降、ほとんど増加はみられない。しかし、SFRCは、ほぼ直線的に増加する。

最後に、長期にわたり、暴露試験場を提供していただいている常磐共同火力株式会社に対して、心から謝意を表します。

(参考文献) 1) 福地, 渡沢, "オートクレーブ養生モルタルの細孔分布", 日本建築学会東北支部発表会, 1983.3, pp.121-124.

2) G.W.Washa, "High Pressure Steam Curing: Modern Practice and Properties of Auto-claved Products", Journal of ACI, Aug. 1965, pp.902-903.

3) 日本気象学会福島支部, 福島県の気候, 1974.

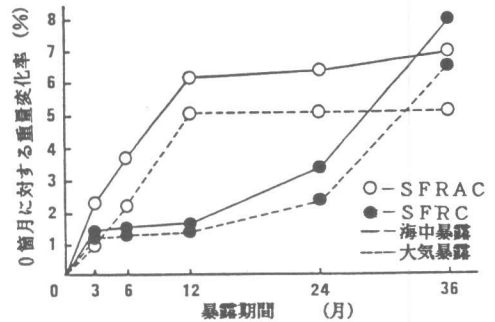


図7 暴露期間と鋼繊維の重量変化率

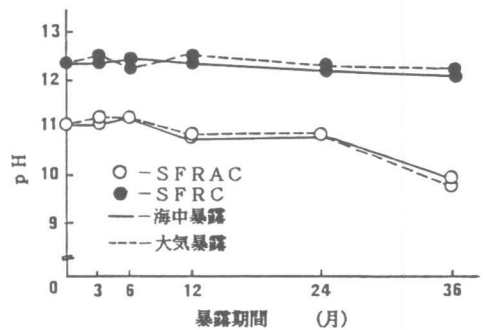


図8 暴露期間とpHの関係

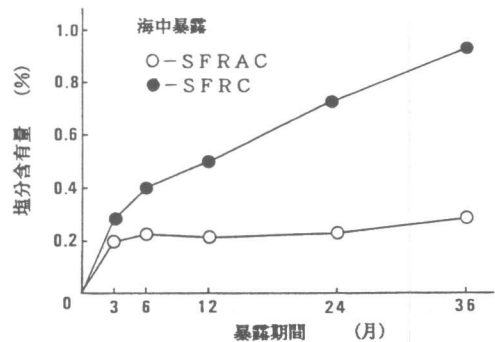


図9 暴露期間と塩分含有量の関係