

# 論文 片引試験による連続繊維棒材のアルカリに対する耐久性の検討

森 寛晃<sup>\*1</sup>・服部 篤史<sup>\*2</sup>・宮川 豊章<sup>\*3</sup>・藤井 学<sup>\*4</sup>

要旨: 本研究では、コンクリート強度を要因とした健全棒材の片引試験により、連続繊維棒材の付着性状を把握するとともに、アルカリ溶液中に浸漬した後の棒材の片引試験を実施することにより、付着に与えるアルカリ環境の影響を検討した。得られた結果から、自由端変位が0.05mmと小さい引抜き初期には、付着界面におけるモルタル部の破壊よりも棒材表面樹脂部の変形、破壊の割合が大きいこと、全般的には良好な耐久性を示したものの、劣化促進のための高温浸漬では、棒材の表層部が劣化する場合があることが明らかとなった。

キーワード: 連続繊維棒材、繊維結合材、耐アルカリ性、付着

## 1. はじめに

コンクリート中のアルカリ環境が、緊張または非緊張状態で使用される連続繊維補強材の引張挙動に与える影響に関する既往の研究では、アラミド繊維や炭素繊維を用いたものでも、60℃のアルカリ溶液への浸漬による促進環境下では引張強度、弾性係数やリラクセーションが影響を受ける[1]が、実環境ではその程度は小さく供用期間中で十分に耐久すると予測した研究[2]もある。これらの繊維は比較的高い耐アルカリ性を有している[3]と考えられるため、連続繊維補強材の力学特性の経時変化については繊維結合材に用いる樹脂の耐久性を併せて明らかにする必要がある。

棒状の連続繊維補強材(以下、連続繊維棒材)で、コンクリートとの付着を期待するものでは、表面が樹脂で覆われている場合、その樹脂のアルカリ劣化が付着に与える影響が大きいと考えられる。本研究では、比較的に優れた耐アルカリ性を有すると考えられている連続繊維棒材2種類について、最長6ヶ月までのアルカリ溶液への緊張あるいは非緊張状態での浸漬を行った上で、棒材の目視観察を行うとともに、片引試験を実施することにより付着性状の経時変化を測定し、樹脂のアルカリ劣化の検出を試みることにした。

## 2. 実験概要

実験に使用した連続繊維棒材の表面形状および諸元をそれぞれ写真—1、表—1に示す。

### 2.1 健全棒材の片引試験

アルカリ溶液へ浸漬した棒材の試験に先立ち、連続繊維棒材の付着性状を把握するため、浸漬を行わない棒材(以下、健全棒材)を対象として、コンクリート強度を要因とした片引試験を行い、異形鉄筋D10(記号:S)との比較を行った。試験方法は、文献[4]の試案を準用し、いずれの棒材についても、1辺が100mmのコンクリート立方体中に付着長を64mmとして埋設(水平筋)することにより作成した供試体を使用した。供試体中には割裂補強のためスパイラル筋を配置した。載荷

\*1 京都大学大学院 工学部土木工学科 (正会員)

\*2 京都大学助手 工学部土木工学科、工修 (正会員)

\*3 京都大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

\*4 京都大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

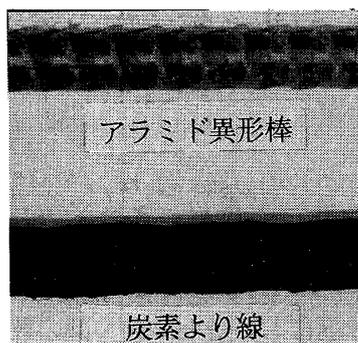


写真-1 連続繊維棒材

は自由端変位がおよそ6mmになるまで行い、引抜き荷重および自由端変位の2つを測定した。

## 2.2 アルカリ溶液浸漬棒材の片引試験

環境剤としての浸漬溶液には、コンクリートの細孔溶液中に存在し得るいくつかの成分を含むアルカリ溶液[5]を用いることとした。その組成を表-2に示す。樹脂の劣化は温度と作用応力により促進される[6]ことを考慮して、劣化促進を目的として表-3の項目を浸漬条件とした。所定の緊張、浸漬期間経過後、棒材を溶液中から取り出して表面を乾布で拭き、翌日、健全棒材と同様にして供試体を作成し、片引試験を行った。

健全棒材、アルカリ溶液浸漬棒材のすべての供試体の一覧を、試験要因ごとに、試験時のコンクリート強度と併せて表-4に示す。供試体は各要因に対して5ないし6体作成した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 健全棒材の付着性状

健全な連続繊維棒材と異形鉄筋の片引試験の結果を、平均付着応力—自由端変位曲線( $\bar{\tau} - d$  曲

表-1 連続繊維棒材の諸元

| 連続繊維棒材  | 繊維結合材     | 公称直径<br>(mm) | 周長<br>(mm) | 記号 |
|---------|-----------|--------------|------------|----|
| アラミド異形棒 | ビニルエステル樹脂 | 6            | 18.8       | A  |
| 炭素より線   | エポキシ樹脂    | 7.5          | 19.5       | C  |

表-2 アルカリ溶液の組成

| pH        | 組成 (g/l)            |      |      |
|-----------|---------------------|------|------|
|           | Ca(OH) <sub>2</sub> | NaOH | KOH  |
| 12.5~13.0 | 2.0                 | 10.0 | 14.0 |

表-3 アルカリ溶液浸漬条件

|      |                             |
|------|-----------------------------|
| 浸漬温度 | 標準温度 20℃ および 促進温度として 60、80℃ |
| 緊張荷重 | 非緊張 および 0.65Pu              |
| 浸漬期間 | 1、3 および 6ヶ月                 |

表-4 供試体一覧

| 供試体名  | 棒材種類  | アルカリ溶液浸漬条件 |            |          | コンクリート強度 (MPa) |
|-------|-------|------------|------------|----------|----------------|
|       |       | 浸漬温度 (°C)  | 緊張荷重 (×Pu) | 浸漬期間 (月) |                |
| 健全    | A、C、S |            |            |          | 26.6           |
|       |       |            |            |          | 28.5           |
|       |       |            |            |          | 30.0           |
|       |       |            |            |          | 47.7           |
| AI2-1 | A     | 20         | 0          | 1        | 29.2           |
| AI6-1 |       | 60         |            |          |                |
| AI8-1 |       | 80         |            |          |                |
| AI2-3 |       | 20         | 0.65       | 3        | 32.1           |
| AI6-3 |       | 60         |            |          |                |
| AI8-3 |       | 80         |            |          |                |
| AI6-6 | 60    | 0.65       | 6          | 31.8     |                |
| AP-1  | 20    |            |            |          |                |
| AP-3  |       |            |            |          |                |
| AP-6  |       |            | 6          | 30.4     |                |
| CI2-1 | C     | 20         | 0          | 1        | 38.7           |
| CI6-1 |       | 60         |            |          |                |
| AI8-1 |       | 80         |            |          |                |
| CI2-3 |       | 20         | 0.65       | 3        | 34.3           |
| CI6-3 |       | 60         |            |          |                |
| CI8-3 |       | 80         |            |          |                |
| CI6-6 | 60    | 0.65       | 6          | 31.8     |                |
| CP-1  | 20    |            |            |          |                |
| CP-3  |       |            |            |          |                |
| CP-6  |       |            | 6          | 30.4     |                |

線)で表すとともに、最大平均付着応力および文献[4]を参考にして自由端変位が0.05、0.1 および 0.25mm となる時の平均付着応力の値を読み取り、コンクリート強度の影響を検討した。コンクリート強度  $f_c' = 30.0\text{MPa}$  の供試体について得られた  $\bar{\tau} - d$  曲線を図-1に、また、最大平均付着応力  $\bar{\tau}_{\max}$  および自由端変位が 0.05mm 時の平均付着応力  $\bar{\tau}_{0.05}$  のコンクリート強度との関係をそれぞれ図-2、図-3に示す。なお、図-2では異形鉄筋が降伏した  $f_c' = 47.7\text{MPa}$  のデータは除外している。

(a) アラミド異形棒

図-1から、繊維巻き付けによる異形化の顕著な効果が伺えるが、応力上昇域の勾配は異形鉄筋ほど小さくなく、最大時以降に荷重を若干維持して曲線がなだらかになる傾向が認められた。試験終了後に供試体を割裂して付着界面を目視観察したところ、コンクリート側の破壊も進行しているが、巻き付け繊維や樹脂が削られ、剥離は見られなかったものの、巻き付け繊維が露出している箇所が確認できた。アラミド異形棒では、異形鉄筋と同様表面の凹凸による機械的付着作用が大きな割合を占めると考えられるが、コンクリート側のモルタル部分の破壊のみでなく、棒材表面の変形、破壊も併せて起こったことを示している。さらに、図-2、図-3に示すように、 $\bar{\tau}_{0.05}$  にはコンクリート強度の影響はほとんど見られないことから、引抜き初期にはコンクリート側のモルタル部分よりも棒材表面の樹脂部の変形、破壊の割合が大きいと考えられる。その後、付着破壊の最終段階になると前者の割合も大きくなり、 $f_c' = 20 \sim 50\text{MPa}$  程度の範囲内では  $\bar{\tau}_{\max}$  はコンクリート強度にほぼ比例して増加することとなった。

(b) 炭素より線

表面形状の違いから、図-1に示すように、アラミド異形棒や異形鉄筋とは曲線の形状が異なるものとなった。すなわち、初期の傾きは同等となるが、最大時以降、平均付着応力は低いレベルでほぼ一定値を保ち、自由端

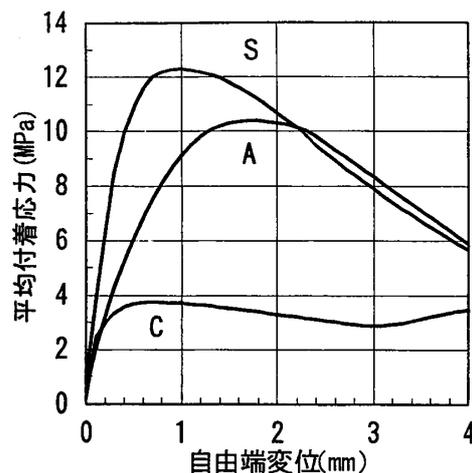


図-1  $\bar{\tau} - d$  曲線(健全、 $f_c' = 30.0\text{MPa}$ )

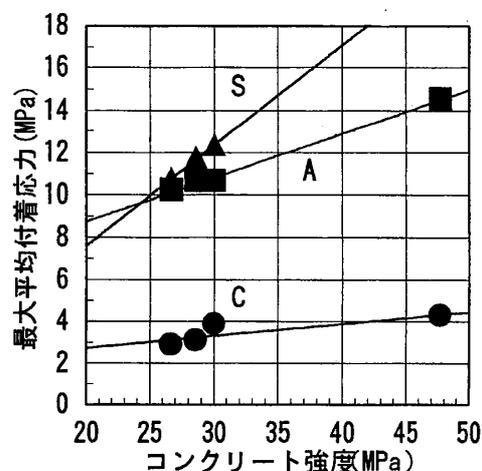


図-2 最大平均付着応力

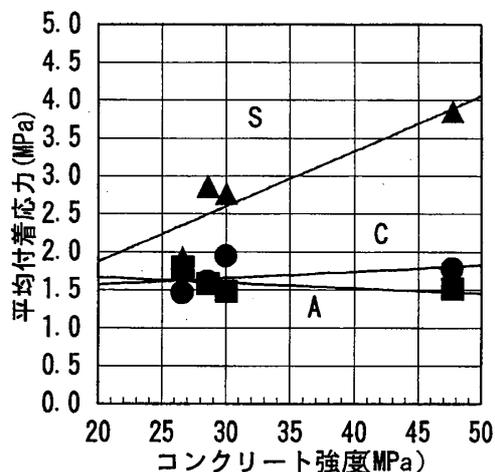


図-3  $d = 0.05\text{mm}$  時の平均付着応力

変位が 3mm 程度を超えると再度上昇する傾向が見られた。アラミド異形棒と同様、試験終了後に供試体を割裂して付着界面を目視観察したところ、よりの溝はほとんど破壊されずに残っており、一方棒材表面には骨材により付けられたと思われる細かい傷がより合わせた単線の軸方向に確認された。炭素より線では、すべり量が小さい間は、より線を構成する単線周囲の繊維巻きによる機械的作用により付着力が発揮されるものの、その後は棒材とコンクリート界面における摩擦作

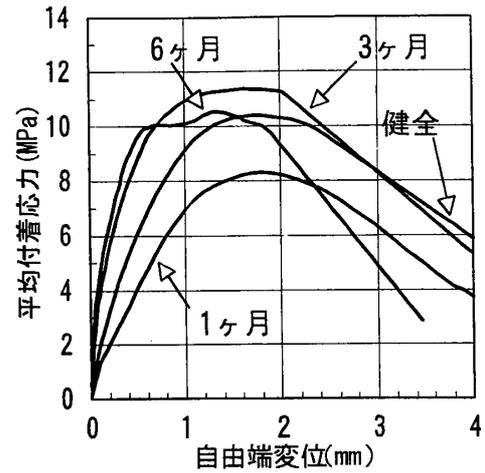
用による付着力が主となって、コンクリート界面に形成された溝に沿って棒材が抜け出したものと推察できる。図一2、図一3に示すように、 $\bar{\tau}_{max}$ 、 $\bar{\tau}_{0.05}$ のいずれの値もコンクリート強度の影響は顕著でなく、アラミド異形棒と同様、初期には棒材表面の変形、破壊の割合が大きいと推察できるが、付着破壊の最終段階においても、よりの効果によるコンクリート側のモルタル部分の大きな破壊は起こらず、 $\bar{\tau}_{max}$ についてもコンクリート強度の影響は小さく抑えられることとなったと考えられる。

以上のように、両棒材とも $\bar{\tau}_{0.05}$ についてはほとんどコンクリート強度の影響は見られず、またその大きさも1.5~2.0MPa程度(棒材の引張応力で60~85MPa、引張強度の2.5~4.5%)と異形鉄筋よりも小さいことから、これらの連続繊維棒材では、引抜き初期においてはコンクリート側モルタル部分の破壊よりも棒材表面樹脂部の変形、破壊の割合が大きいのと考えられる。これは、この付近で発生する平均付着応力が、表層部の樹脂の強度や剛性に依存する割合が多いことを表しており、そのアルカリ劣化の検出には $\bar{\tau}_{0.05}$ の変化に着目することが有効であると考えられる。

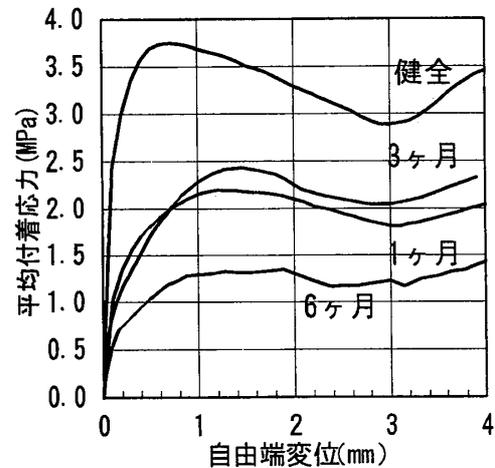
3.2 アルカリ溶液浸漬棒材の付着性状

浸漬温度 60℃、非緊張で浸漬した棒材の $\bar{\tau}-d$ 曲線を、健全棒材のもの( $f'_c=30.0\text{MPa}$ )と併せて棒材種類ごとにそれぞれ図一4、図一5に示す。コンクリート強度に多少の差があるが、ここでは実験結果をそのまま示した。また、アルカリ溶液への浸漬が $\bar{\tau}-d$ 曲線に与える影響を数値化するため、 $\bar{\tau}_{max}$ 、その時の自由端変位 $d_{max}$  および先に述べた $\bar{\tau}_{0.05}$ を読み取った。得られた値を、健全棒材の値とともに表一5に示す。なお、 $\bar{\tau}_{max}$ についてはコンクリート強度の違いを考慮して、

図一2に示す各棒材の直線回帰に基づいて $f'_c=29.4\text{MPa}$ の値 $\bar{\tau}_{max}^*$ に換算することによりコンクリート強度の影響を排除し、他の2者については実験結果そのものを用いた。さらに、これらの値を健全棒材の値に対する比で表し、浸漬時間の対数に対してプロットしたものを棒材ごとにそれぞれ図一6、図一7に示す。なお、便宜上、健全棒材の値(1.0)を1時間の位置にプロッ



図一4  $\bar{\tau}-d$  曲線(アラミド異形棒、60℃)



図一5  $\bar{\tau}-d$  曲線(炭素より線、60℃)

表一5 片引試験結果

| 供試体名  | $\bar{\tau}_{max}$ (MPa) | $d_{max}$ (mm) | $\bar{\tau}_{0.05}$ (MPa) | 供試体名  | $\bar{\tau}_{max}^*$ (MPa) | $d_{max}$ (mm) | $\bar{\tau}_{0.05}$ (MPa) |
|-------|--------------------------|----------------|---------------------------|-------|----------------------------|----------------|---------------------------|
| 健全 A  | 10.5                     | 1.78           | 1.45                      | 健全 C  | 3.81                       | 0.600          | 1.92                      |
| AI2-1 | 7.60                     | 1.77           | 1.67                      | CI2-1 | 1.90                       | 0.640          | 1.80                      |
| AI6-1 | 8.44                     | 1.83           | 1.07                      | CI6-1 | 1.63                       | 1.22           | 0.817                     |
| AI8-1 | 8.52                     | 1.52           | 1.73                      | CI8-1 | 1.59                       | 1.23           | 0.825                     |
| AI2-3 | 13.5                     | 1.47           | 4.74                      | CI2-3 | 6.07                       | 0.580          | 3.38                      |
| AI6-3 | 11.7                     | 1.42           | 3.65                      | CI6-3 | 2.16                       | 1.48           | 0.633                     |
| AI8-3 | 13.2                     | 1.74           | 3.53                      | CI8-3 | 0.504                      | 1.21           | 0.409                     |
| AI6-6 | 11.2                     | 1.34           | 3.63                      | CI6-6 | 1.18                       | 1.39           | 0.457                     |
| AP-1  | 9.10                     | 1.59           | 2.23                      | CP-1  | 2.84                       | 0.510          | 2.22                      |
| AP-3  | 11.4                     | 1.59           | 2.57                      | CP-3  | 4.69                       | 0.490          | 2.93                      |
| AP-6  | 10.9                     | 1.56           | 1.50                      | CP-6  | 4.64                       | 0.600          | 2.72                      |

トした。以下では、 $\bar{\tau} - d$  曲線の形状およびこれらの値の経時変化等から、棒材のコンクリートからの抜け出し性状の変化の様子を調査することにより、そのアルカリに対する耐久性について検討した。

(a) アラミド異形棒

60、80℃で浸漬した棒材の表面を浸漬終了後に目視観察したところ、樹脂が透明度を失い白く変色しているのが観察された。一方、引抜き後の表面は、健全時にもかなり破壊が見られたため違いは不明瞭であった。

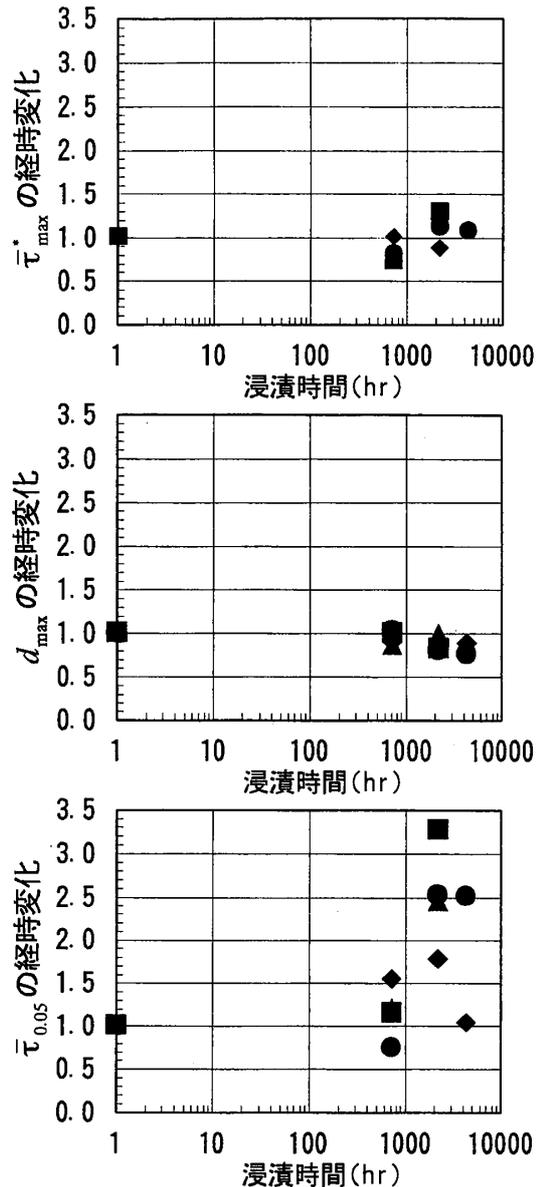
図一4に示すように、浸漬期間の経過に伴って最大付近がややなだらかとなり、ついでややぜい性的な引抜き性状となった。しかし、図一6に示すように、 $\bar{\tau}_{max}^*$ 、 $\bar{\tau}_{0.05}$  ともにむしろ健全棒材の値を上回る値となった。 $\bar{\tau}_{max}^*$  については、異形化の凹凸が大きいため表面の変質が与える影響は小さかったものと考えられる。また、 $\bar{\tau}_{0.05}$  が小さくならないことから、環境剤が収着[6]してゆく腐食層形成型に近いと推察でき、そのため樹脂の硬度が変化している可能性もある。一方  $d_{max}$  にはほとんど変化が見られなかった。

(b) 炭素より線

60、80℃で浸漬した棒材の表面を浸漬終了後に目視観察したところ、1ヶ月の浸漬で巻き付け繊維が露出している箇所も見られた。引抜き後の観察では、コンクリート側に棒材の被覆と思われる黒色のものが残る場合もあった。

図一5に示すように、高温浸漬により、なだらかな曲線形状となった。全体的に発生する付着応力はやや低下するようであり、図一7に示すように、60または80℃で浸漬した場合、温度によらず1ヶ月以降で  $\bar{\tau}_{max}^*$  が60%以下、 $\bar{\tau}_{0.05}$  が40%以下程度となって、これに伴い  $d_{max}$  が増加した。しかし、低下の絶対値は小さく、また1ヶ月以降の低下の進行はさらに小さかった。 $\bar{\tau}_{max}^*$  およびそれ以降の摩擦抵抗による区間の付着応力が減少したことから、炭素より線では棒材そのものの表面の変質が付着挙動に現れやすいものと考えられる。 $\bar{\tau}_{0.05}$  については、表層部の軟化あるいは溶出による若干の断面減肉が起こったと推察できるが、炭素より線では表面に被覆が施されており、1ヶ月以降の結果によれば、繊維結合材そのものの劣化程度は小さく引張挙動に与える影響は小さい可能性もある。

いずれの棒材についても、20℃、0.65Puでの緊張浸漬によって、期間内では緊張により付着挙動が劣化した傾向は見られず、むしろ  $\bar{\tau}_{max}^*$  や  $\bar{\tau}_{0.05}$  を大きくする場合が見られた。



■: 20℃、●: 60℃、▲: 80℃、◆: 20℃/0.65Pu  
 図一6 各値の経時変化(アラミド異形棒)

#### 4. まとめ

本研究で得られた主な結果を以下に示す。

(1) 本研究で用いた連続繊維棒材の付着滑りの進行過程においては、引抜き初期では棒材表面の樹脂部の変形、破壊の割合が大きく、コンクリート強度の影響が小さかった。棒材表面の樹脂の耐アルカリ性を検討する場合は、64mmの付着長とした片引試験において、自由端変位が0.05mm程度となる時の平均付着応力による評価が可能と考えられる。

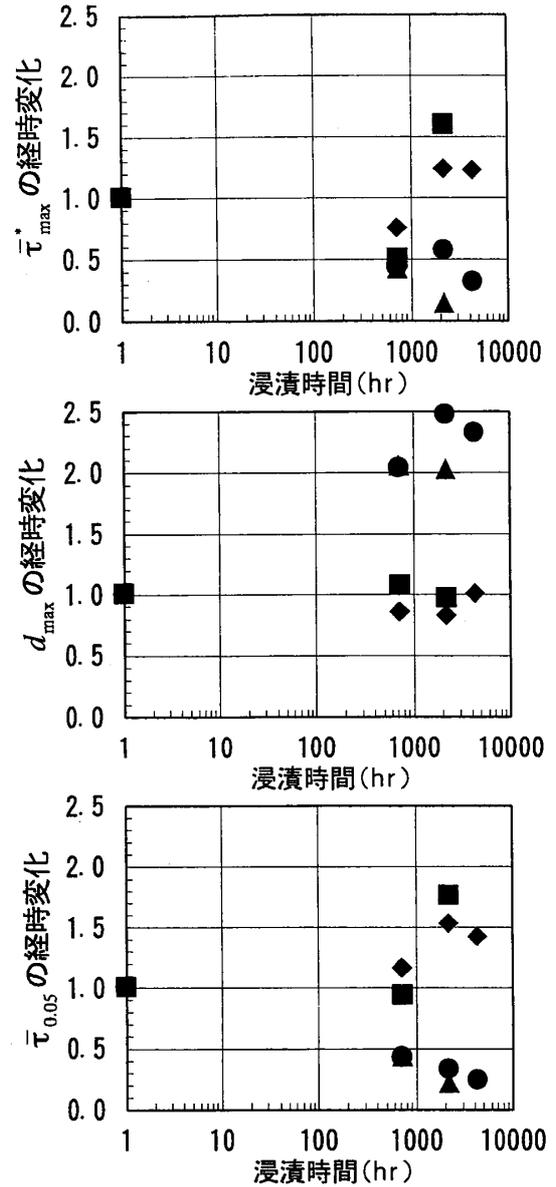
(2) 劣化促進のため20~80℃のアルカリ溶液へ緊張、非緊張状態で浸漬した棒材の片引試験結果によると、アラミド異形棒では6ヶ月間にわたる浸漬でも顕著な付着の劣化は認められなかった。一方、炭素より線では60℃以上の浸漬1ヶ月程度で表層部(皮膜)の劣化と思われる若干の付着力低下の傾向が認められたが、それ以降では顕著な付着の劣化は認められなかった。

以上のように、アラミド異形棒および炭素より線の促進環境下での表面劣化については、コンクリート中よりも厳しいと考えられるアルカリ溶液浸漬を行った棒材の片引試験によりマクロ的にある程度把握できたものの、実験データ数も少なく、今後は温度、作用応力による劣化促進程度の把握、樹脂の物理的、機械的性質の変化の詳細や、その引張挙動の変化との関連等を引き続き検討する必要がある。

本研究を遂行するにあたり、連続繊維棒材はそれぞれ各メーカーに御提供いただいた。ここに記して謹んで謝意を表します。

#### 【参考文献】

- [1] 吉田真樹、岩本勲、川東龍夫、服部篤史、宮川豊章: 連続繊維補強材のアルカリ耐久性について、土木学会第48回年次学術講演概要集第5部、pp.356—357、1993
- [2] 例えば、A. Gerritse: Durability Criteria for Non-Metallic Tendons in an Alkaline Environment, Proc. of 1st Intl. Conf. on ACMBS, pp.129—137, 1992
- [3] 魚本健人、勝本太: 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
- [4] 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、コンクリートライブラリー72、土木学会、pp.26—27、1992
- [5] 丸山武彦: 炭素繊維を中心とする繊維強化プラスチック(FRP)ロッドのコンクリート補強材としての利用に関する実験的研究、東京大学学位論文、1991
- [6] 奥田聰: プラスチックによる防食技術、日刊工業新聞社、1978



■: 20℃、●: 60℃、▲: 80℃、◆: 20℃/0.65Pu  
 図—7 指標値の経時変化(炭素より線)