

生研公開講演

コンクリート用 FRP 緊張材の特性と耐久性

Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for Prestressing Tendons of Concrete

魚 本 健 人*

Taketo UOMOTO

ただいまご紹介にあずかりました魚本です。本日は、コンクリートそのものではございませんけれども、コンクリートの補強材として使われております FRP の補強材につきましてご説明をさせていただきます。この道のことについて非常に詳しい方もおられるでしょうし、そうでない方もおられるかもしれませんが、今日ご説明する FRP 補強材は、3 種類のロッド状のものです。写真 1 に示すように、右の黒いのが炭素繊維でできている FRP ロッド、白のがガラス繊維を使った FRP ロッド、茶色っぽいのがアラミド繊維を使った FRP ロッドです。これを鉄筋や PC 鋼材のようなコンクリート用補強材として用いようという研究です。

本日ご説明するのは、主に FRP ロッドをコンクリート用緊張材として利用した場合の特性と耐久性ということです。実はコンクリート構造物の設計・施工上の問題点というのはいろいろございます。つい 2 年ほど前の 1 月 16 日に、神戸のほうで非常に大きな地震がございまして、そのときにいろいろな構造物が壊れました。その時には、コンクリート構造物だけではなくて鋼構造物や土構造物

も、いろいろ破壊いたしました。こういうことがあったため、今、学協会では、高強度コンクリートばかりでなく、構造物の耐震特性、地震を考慮した構造設計などについていろいろな角度で見直したり、新たに指針を作ったりされております。土木学会、日本建築学会等においてはかなり多くの検討がなされ発表されていることは、皆さんご存じのとおりかと思えます。

コンクリート構造物の劣化と耐久性

もう一つのコンクリート構造物の問題点は、構造物の耐久性の問題です。構造物の耐久性を考える上で、取り上げなければいけない劣化の問題は、種々あります。一つは、コンクリート中の補強鋼材の腐食という問題です。これはコンクリートの中酸化や塩害が原因で生じるもので、いろいろな構造物に見受けられます。海上に設けられたシーバースのスラブでは、側部ほうから見ますとわりと立派な構造物でして、何も問題がないように見えますけれども、下側に回りますと、かぶりコンクリートが全部剥落して、鉄筋もみんな落ちてしまっているというような状況にあります。当然これは設計時の耐力を持っていないということになります。

2 番目にアルカリ骨材反応という問題があります。これはコンクリートに使っております骨材、砂・砂利等が、セメントから主に供給されておりますアルカリと反応し、生成物が吸水し膨張するというようなことが起こります。結果的に、構造物が局部的に膨張する、またはきれいに点在しているときには全体的に膨張するということが起こります。その結果として、亀甲上のひび割れと言っておりますけれども、そういうひび割れがたくさんできてしまうというようなことが起こります。

3 番目に、例えば凍結融解ですけれども、これは北海道だけではなくて、東北地方、それから北陸地方等々でたくさん見られますが、例えば普通ではあまり見られな

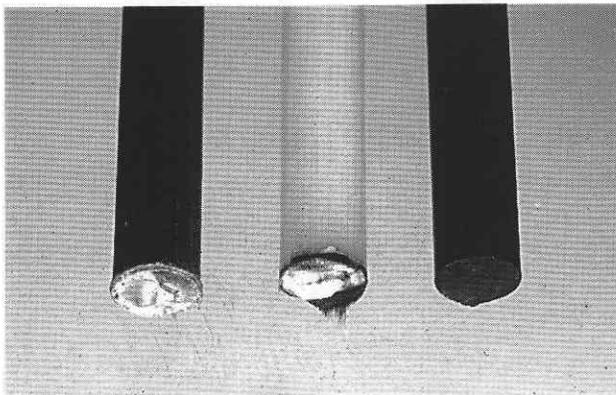


写真 1 各種 FRP ロッド

*東京大学生産技術研究所 第 5 部

い縁石、道路のところに使っている 2 次製品ですけれども、こういうコンクリートであっても、冬場、雪が降って凍結する、それから陽が当たって融解する、これの繰り返しによって表層部分から劣化するという現象が起きます。時間がたつにつれ表面からコンクリートが崩れてくることになります。

4 番目ですが皆さんのお住まいのお家、またはビルディングの中にもいろいろなひび割れが発生しております。その中で一番多いのが乾燥収縮のひび割れです。窓枠部などの角っこの部分で応力収縮が発生するものですから、コンクリートが収縮しようとした時に拘束されているためにひび割れが発生するということが起きます。

次に、化学廃液等による劣化ということですが、下水は皆さん使っておるわけですが、中にはいろいろなものが含まれております。特に硫化水素等が発生し、最終的には硫酸となってコンクリートの表層部分のコンクリートが全部溶けてしまって、内部の鋼材まで部分的に溶けてしまうというようなことが起こっております。

鋼材腐食とその対策

以上説明しましたように、いろいろな劣化現象がありますが、ここでは塩害によるコンクリート構造物の防止ということについて若干ご説明します。写真 2 に示した栈橋は、実は上側を歩いている人はわからないのですが、下側を見ますと、著しい損傷を受けています。これは凍結融解と海からの塩化物による鉄筋の腐食の両方が同時に発生している場合にこのようなことが起こっております。

こういうような腐食が生じますと、当然のことですけれども、鉄筋の断面積が小さくなるというようなことが起きます。その場合にご注意いただきたいのは、全体的にやせ細るのだとまだ良いのですが、塩化物イオンに代表されるハロゲンイオンがある場合には、かなり局所的な孔蝕が起きます。そのために、例えば疲労試験を

行いますと、著しく強度が下がりますし、通常の荷重を受けた場合でも、この鉄筋に発生する応力が局所的に異なりますので、構造物としての耐力がかなり低下することになります。

こういうものに対処する方法として、例えば土木学会、もしくは日本コンクリート工学協会等で推奨されているのは、エポキシ樹脂塗装鉄筋というものです。黒皮つきの鉄筋をプラスト処理しまして、ニアホワイトメタルのレベルまで表層処理をして、その上にエポキシ樹脂を塗装するというようなものです。実際にこういう鉄筋はどのようなところで使われているかということ、通常の鉄筋の 2 倍近い値段がするということもございまして、どんな構造物にでもというわけにはいかないのですが、関西国際空港の中央建屋や地下構造物に使われています。

一方、当然こういう鉄筋が腐食しないようにするためには、非常にアグレッシブな環境のところでは使いたくないということもございまして、広島県の内海大橋の床版に使った例を写真 3 でお見せします。この橋梁では鉄筋が全部エポキシ樹脂塗装鉄筋でして、こういう状態にしておきますと、万が一海から塩分が供給された場合でも、内部の鋼材が腐食しないということが期待されます。

我が国でつくっておりますエポキシ樹脂塗装鉄筋は、表層部分の塗料のグクティリティとか、伸び性というものもかなり考慮しております。ですから、現場での曲げ加工が行われても大丈夫なものということになっています。基本的には 200 ミクロン以上の厚さが確保されることが必要になっております。

写真 4 に非常に極端な例をお見せします。同じようなエポキシ樹脂塗装鉄筋ですが、下側のものは実は我々が土木学会でつくった品質基準に合格するものであります。こちらのほうはこういう曲げ加工をしましても表層部分に割れその他が一切出ません。しかしながら、そうでないものは、上側の鉄筋で見ると、塗膜と鉄筋がはがれてしまう、割れてしまう、こういうようなことが起こ



写真 2 凍結融解と塩化物による鉄筋腐食が生じた栈橋の例



写真 3 エポキシ樹脂塗装鉄筋で施工された内海大橋の床版

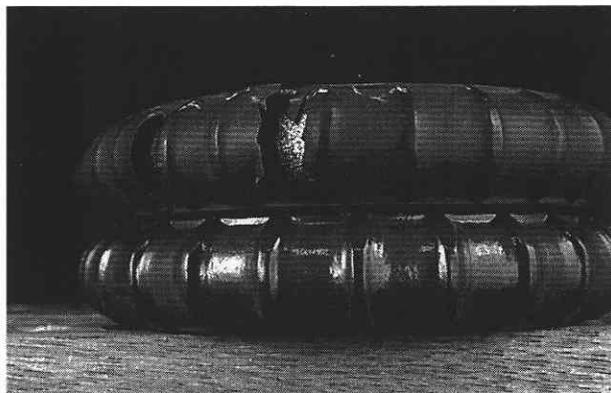


写真4 曲げ試験後のエポキシ樹脂塗装鉄筋

鋼材腐食と FRP

先ほどの話に戻って申し訳ないのですが、プレストレストコンクリートの場合には防食方法としてその他にもいろいろな方法が考えられますが、そのうちのひとつとして、鋼材のような腐食を生じないFRPの材料を使った補強材を利用したらどうかという考え方が出されました。この考えは、そんなに新しいことではありません。実は1970年頃、アメリカ、それからかつてのソ連等でいろいろ研究されておったわけですが、なかなかうまくいかなかった。それを近年になりましてドイツが最初、それから日本が後を追って、FRPを緊張材として使う、もしくは補強材として使うということが行われるようになってきました。

現在使用されているFRP補強材にはロッド状のものと、井桁に組んだ類のものまたはシート状にしたものがあります。現在主に使われているのは炭素繊維、ガラス繊維、アラミド繊維、それからビニロン繊維等で作られたものです。こういうものを使ったFRP補強材は、長いものになれば、東京製鋼で作っているように、通常のスチールのワイヤーと同じ姿で出すことができます。

FRP 補強材の特徴と利用

こういう材料はどういうところが特徴かと言いますと、表1に示しますように、鋼材と比べると非常に軽いということ、それから、塩分などによる腐食はほとんど起こらない、それから非磁性材料として使えるというようなところがございます。例として我が国では人道橋などに、また、アメリカ大陸のほうでは、道路橋に実際にFRPを使用するというようなことが行われています。

それから、トンネルの中で、通常ですと鉄筋を中に組む、もしくは網鉄筋を埋設するということがありますけれども、その代わりにこういうFRPでできた格子状の補強材をうまく利用して、これをそのままトンネルライニングの補強材に使うというような方法があります。人が、わりと簡単に（軽いものですから）設置することができます。

表1 コンクリート用FRP補強材の利点と欠点

利点

- ・鋼材等に比べ著しく軽量
- ・塩分等による耐食性が著しく大きい
- ・非磁性材料（リニアール・モーターカー）

欠点

- ・鋼材に比べ耐火性に劣る
- ・鋼材に比べ高価
- ・鋼材等に比べ長期使用経験が少ない

ります。

その他の防食方法としては、電気防食というような方法も使われております。これはまだ我が国では試験的な段階でございすけれども、特にアメリカ等では実際の構造物の防食ということで、こういう方法もとられております。我が国では建設省が試験的に実施しておりますけれども、アメリカ等でやられているのは、電話ケーブルを使って、常時モニタリングをしながら制御するという方法がとられておりますが、我が国ではまだあまりたくさん行われてはおりません。

なお、いまご説明したのは全部鉄筋コンクリート構造物の鉄筋の防食ということですが、プレストレストコンクリート構造物の場合には、一つは樹脂系のコーティングを表層に用いたアンボンド工法、それから、アウトケーブル工法（これは特にイギリスではいま、プレストレストコンクリート構造物は、そのあとのメンテナンスを考えると、アウトケーブルでないかだめだということになっておまして）こういう方法がとられております。

既設構造物にも適用できる対策としてコーティング方法があります。例えば先ほど見せた栈橋ですが、コンクリートがアルカリ骨材反応を起こしますし鉄筋の腐食も起こします。そういう構造物の補修方法の一つとしてコーティングという方法が使われております。これは、結局表層部分でアグレッシブな、外から入ってくるイオンその他を防止しようという方法です。私どものほうでも委員会と一緒に研究をさせていただきました。私どものほうで使っております伊豆の海洋暴露場、そちらのほうでいろいろなコーティングを施したものの調査をしております。非常に健全な場合には、例えば4.5年間暴露したものですけれども、その場合でも何も変状は起こりません。しかしながら、ものによっては、トップコートの部分が完全にやられてしまうというように、表層部分からどんどん劣化が進行するというようなことが起こっています。

ることが非常に大きなメリットです。

一方では、今回の大地震の後で注目されましたけれども、コンクリート構造物を外部から補強するという一つの方法として、構造物の周りを炭素繊維またはアラミドの繊維を用いたシートを貼って、そしてせん断耐力を上げる、こういう方法がとられております。

FRPの特徴の一つである非磁性を利用することも行われています。非磁性材料ということで、例えばリニアモーターカーのガイドウェイの部分ですけれども、この材料に鋼材を使うとどうしても電力のロスが大きいものですから、それを防止するために、FRP補強材が使われています。なお、表1にちょっとあげてありますが、鋼材に比べると耐火性が劣るという欠点がございます。それから、鋼材に比べると値段が高い。ちょっとやそっとじゃなくて約10倍。それから、鋼材と比べて長期の使用経験がないので、どんなことが起こるかまだよくわかっていない部分がある、というようなことがございます。

FRPとはどんなものか

FRP緊張材の、例えばロッド、その断面を写真5に示します。写真の中に見える丸い形状をしたもの一つ一つが繊維一本一本です。カーボン繊維の場合ですと、繊維の直径は6ミクロン程度。ガラスとかアラミド繊維ですと、直径がだいたい十数ミクロンのオーダーになります。こういうような繊維が配置され、その間に樹脂が入っている、こういう構造になります。

いま我々のほうで使おうとしている材料は、軸方向の引張り補強というために使っておりますので、ほとんどが同じ方向、一軸方向に繊維が向いているようなものです。ですから、例えば航空機、自動車、船舶その他に使われているようなFRPの板材とはかなり様子が違いました。基本的には引張材として使うという考え方で作っているものですから、写真6に示したように軸方向だけに強化しているようなFRPです。

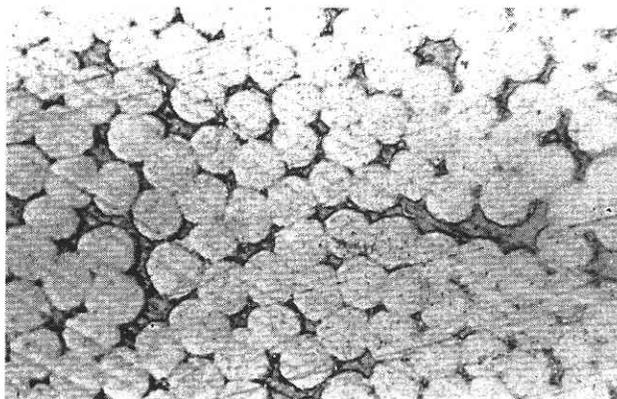


写真5 FRPロッドの断面

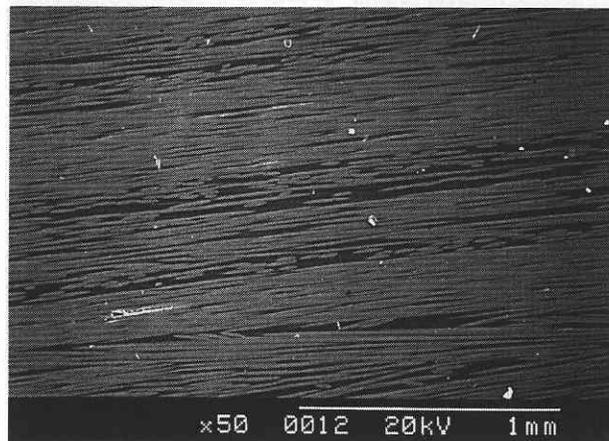


写真6 FRPロッドの軸方向断面

この棒材を、例えば引張試験をやるということになりますと、実は鋼材に比べて非常に試験が難しいのは、柔らかいということが原因です。樹脂で囲ってありますので、通常の引張りを加えようとしましてもなかなかうまくつかめません。

小林一輔名誉教授が開発されました、2つ割りのチャックというのを我々のところでは使っておりますけれども、こういうチャックを使って、写真7に示すように実際にロッドを引っ張るといふようなことが必要になります。これは特にFRPを緊張材として使う場合には、緊張したり、それを定着したりするときにも、非常に大事な部分でございます。実際上は、メーカーさんのほうでは、それぞれ独自の治具を開発されております。

私どものところで使っているのが、写真8に示したような、通常のスチールのチャックよりもはるかに角度の小さいチャックです。これは何故こういう格好になるかと言いますと、実は伸びが非常に小さくて表面が柔らかいものですから、ちょっとした応力集中で簡単に破断してしまう可能性があります。そういうことがございまして、生研の試作工場でいろいろ検討してもらって、最終的に出来上がったという経緯がございます。

このようなFRP緊張材の強度、変形を表2に示します。この強度、変形を見ますと、図1に示しますように、横軸が歪みで縦軸に応力を表しますと、通常の鋼材と非常に違うのは、まっすぐ伸びていって、プツッと切れてしまう。こういうような現象があります。Cと書いたのは、これはカーボン繊維を使っているものです。Gがガラス繊維、Aがアラミド繊維です。ぱっとみるとわかりますが、カーボン繊維の場合が最もヤング率が高い。しかしながら歪み量としては1%前後くらいしかなくて、歪みの伸び能力には限界があります。ガラス繊維、アラミド繊維の場合には3、4%あるのですが、これも通常の鋼

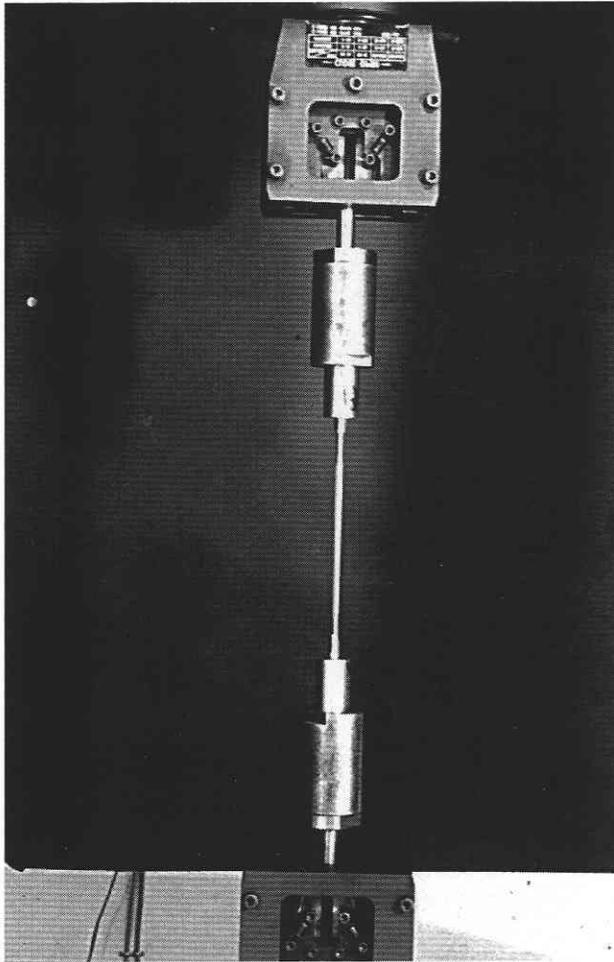


写真7 FRP ロッドの引張試験

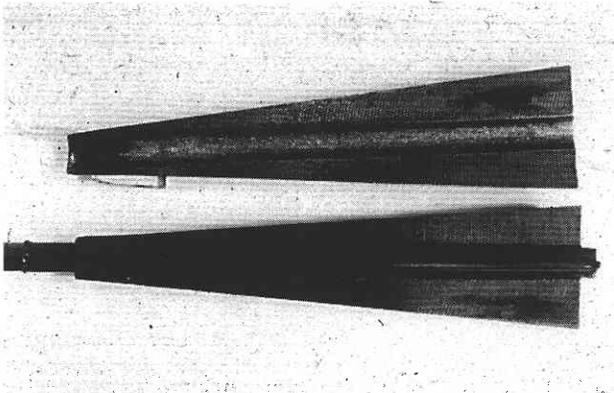


写真8 クサビ定着具

材, すなわち PC 鋼材等 10% 以上あるのに比べると, はるかに伸び能力が小さいということがわかります. 弾性係数が小さいとか, 伸びが小さいという以上に, 特にこういう材料を我々土木・建築分野で使おうとなりますと大事なのは, 鋼材と違って降伏現象が見られません. 応力を加えていくとまっすぐ歪みが伸びていって, 特に

表2 コンクリート用 FRP 緊張材の強度・変形

- ・高張力鋼と同等以上の高強度
- ・鋼材のような降伏現象が認められない(→安全率)
- ・弾性係数が小さい(→リラクゼーションでは有利)
- ・伸びが小さい
- (1% : CFRP、4% : GFRP、AFRP)
- 局所的な応力集中に弱い(特別な定着治具の必要性)
- ・環境温度による特性の変化

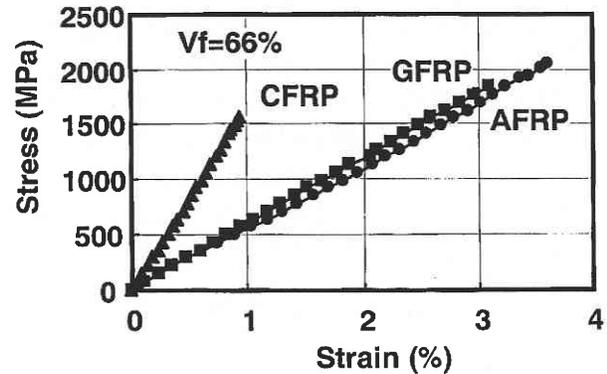


図1 各種 FRP ロッドの応力-ひずみ曲線

前兆がなくてそのまま切れてしまうというようなことが起こります. 確かに FRP は高張力鋼と同等以上の強度はありますが, このことが, 補強材として FRP を利用する上で難しい点であります. 具体的には, 設計上で安全率というものをどのように考えなければいけないかという問題になります.

ロッドの周りを全然補強していない, 一軸だけの強化した状態において, 破壊するときは, 実は一本の中に何十万本という繊維が入っているわけですが, これに力を加えるとバラバラになって切れるというようなことが起こってしまいます. このことも注意を要する点です.

FRP とクリープ破壊

FRP ロッドはどういうふうにしてつくるかという, 糸巻の糸をずっと引っ張って行って, どんどん収束して行って, 大体 6 ミリの直径程度に成形します. その中には, 10 万本以上の繊維が入っております. 実は, 1970 年代等で最初に研究をやられたけれどももうまうまうなかった最大の理由は何かという, 静的疲労という現象があります. それは荷重をずっと加えておくと, 繊維が 1 本 1 本徐々に切れていって, 結局は長い時間もたないということが起こります. しかし, その後, 図 2 に示したようなブルルージョン法という成形方法が考案されて, これでいま言われた静的疲労という問題はかなり解決した

ということが言えます。

FRPをコンクリート用補強材として利用する場合に問題となるのは、実は通常のFRP、航空機その他に使っているものに比べると非常に違っているのは、高い応力を加えた状態で使用しますが、土木構造物、建築構造物、いずれも50年から100年もってもらわないと困ります。その長い期間、果たしてこの状態で最後までもつかどうかという問題がございます。

それを具体的に調べていくと、一つの問題は、クリープ破壊という現象があります。これは鋼材の場合でも温度が高い場合には、クリープ破壊という現象が起きますけれども、実はFRPの場合、常温でやってみてもそういう現象が見られます。通常のスチールの場合ですと、例えば応力を加えておくと、縦軸がひずみで横軸が時間ですけれども、弾性変形が生じて、そのあと時間とともにだんだん歪みが増えていくということが起こります。しかしながら、あるところから急激に増えていって、あるところで破壊してしまうという現象が起こります。このクリープ破壊がもし起こるとすると、どの程度の応力だと起こるかということをはっきりさせないとFRPを緊張材として使うことはちょっとできません。

こちらの図3にイグザンプルとして、例えばこれはアラミド繊維を使った場合ですが、FRPロッドに荷重を持続的に加えた場合の変形と時間との関係を示します。アラミド繊維の場合には、弾性変形がありますが、その後ひずみは時間とともに増えていって、先ほどのスチール

の場合と同じようにカクッと上がるんですね。実はこの点で何万本もある繊維のうちの何本かが切れてしまうものですから、切れたあとはまたしばらく小康状態を保ちますが、また応力がそれだけ高くなりますので切れる、というような現象が起こります。このような荷重に耐えられなくなりますと、破断するということが起こります。図4に示したとおりガラス繊維の場合、いまいったようなクリープ変形はほとんど見られないのですが、やはり同じように、こういうカクッと、カクッと増えていくような現象が起こります。こういうようなことがあるものですから、高応力下でのクリープ破壊を起こさないための限界条件をはっきりつかまえた上でないと使えないということになります。

このような現象を調べるための試験方法は、土木学会等で審議をさせていただきました。最終的に決まったものの考え方は、10の6乗時間、すなわち100万時間後、年数で言いますと約100年後にどの程度の応力だったら壊れないかということ、ある程度の期間までやった実験で推定しようというような考え方が使われています。このときの応力、例えば、炭素繊維の場合ですと、そういうクリープ破壊の応力はかなり高い。静的強度と比べほとんど落ちません。しかしながらアラミド繊維、カーボン繊維の場合にはかなり落ちます。アラミド繊維の場合には、静的強度の約半分くらい。ガラス繊維ですと、もっと下になります。こういうような応力以下で使わないと、100年後にはひよっとすると破壊してしまうかもしれないということが起こります。

私の研究室では、こういうロッドの実験ばかりでなくて、ちょっと細かい繊維の実験もやってもらっています。この実験では、繊維1本1本がどういう時間で切れるかということ予測するためのもので、大学院の学生さんにやってもらっています。

この実験はどんなものかという、写真9に示す台紙の真ん中に実は繊維が1本だけ張ってあります。この台

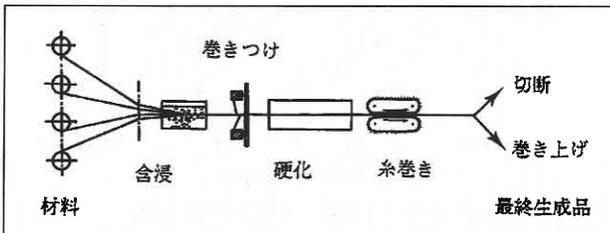


図2 Pultrusion 方法の概念図

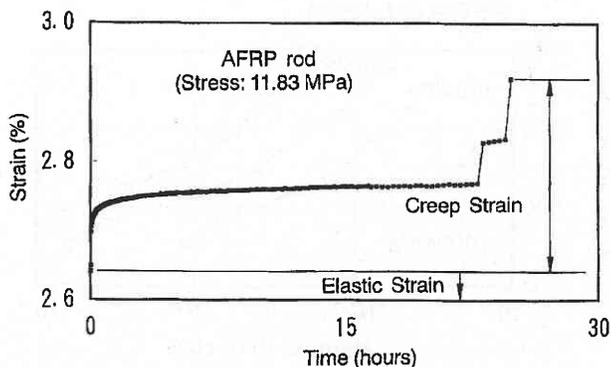


図3 AFRP ロッドのクリープ試験結果

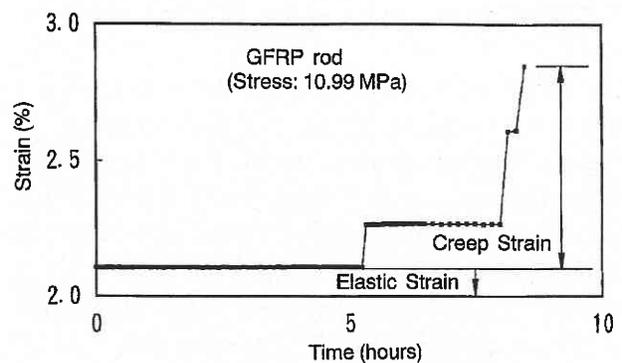


図4 GFRP ロッドのクリープ試験結果

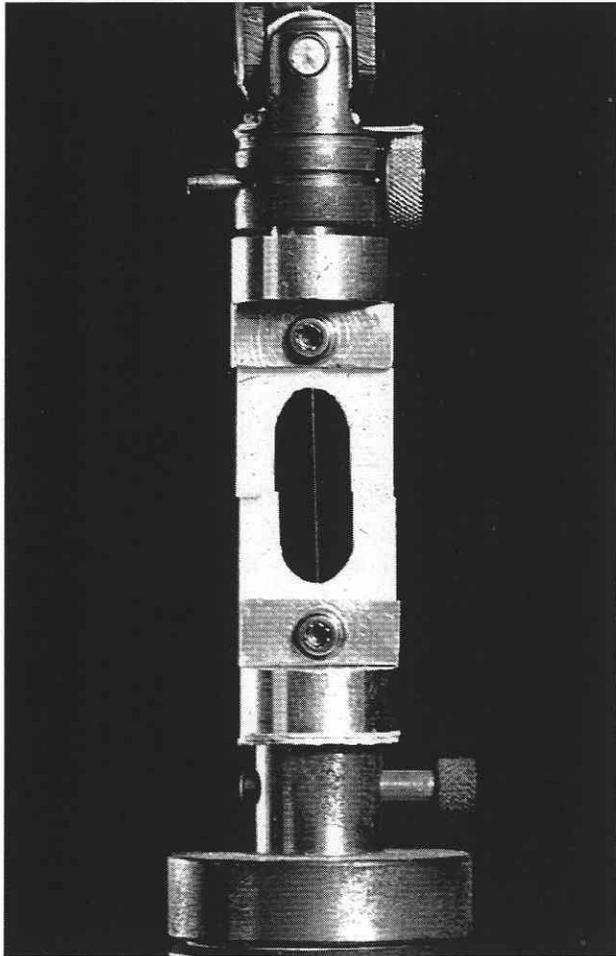


写真9 繊維の引張試験

紙を試験機にかけ、両側の紙を切断しますと、台紙に荷重がかかれば、この繊維1本だけに荷重がかかることとなります。こういう状態で所定の荷重をかけておいて、一体どれくらいの時間で壊れるかというような実験です。どういうやり方かというと、こういう繊維が張ってある台紙におもりをぶら下げてあります。おもりと装置は非常に小さなものです。我々の研究室にこの試験片を展示しておりますので、帰りに皆さんに見ていただく良いのですが。

この試験結果を示したものが図5と図6です。例えば図5のガラス繊維の場合には、生存確率の推定値は、荷重レベルが静的荷重の70%，80%いずれの場合もほぼ同じライン上に乗ってまいります。しかしながら、図6に示したアラミド繊維の場合には、荷重レベルを小さい値からから大きい値までだんだん増やしていきますと、生存確率がどんどん減ってまいります。繊維の種類によってこういう違いが出るということがわかります。

FRP と動的疲労特性

次に動的疲労の問題ですけれども、FRP ロッドに限らずどんな材料であっても、繰り返し荷重を例えば何百万回かけたときに、どんなことが起こるかといいますと、その荷重が静的耐力より小さな荷重であっても繰り返し荷重が作用すると破壊することがあります。これを動的

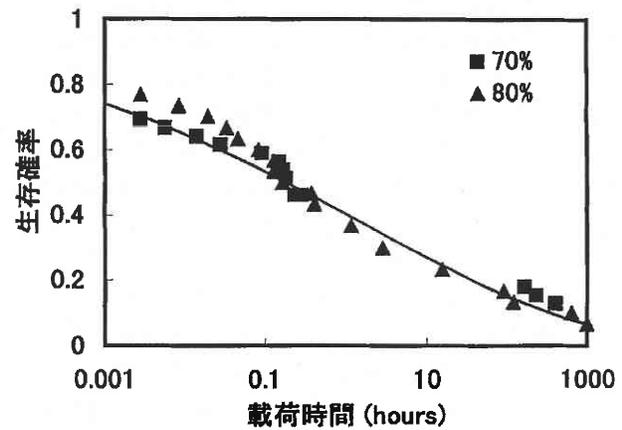


図5 ガラス繊維の生存確率推定曲線

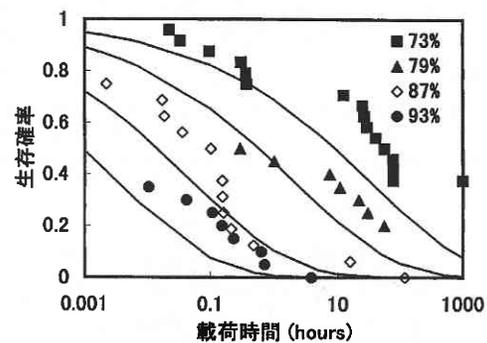


図6 アラミド繊維の生存確率推定曲線

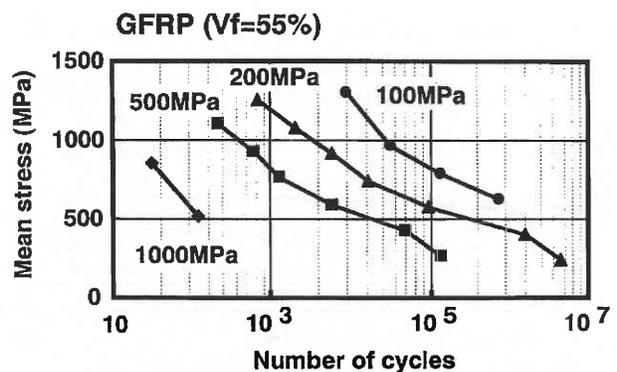


図7 GRP ロッドの载荷数と载荷応力の関係

疲労破壊といいます。また、FRP ロッドの場合には、ロッドそのものは耐力があっても、表面からはがれたりするような現象が起こる場合もあります。

図7は動的疲労荷重を受けた場合に、FRP ロッドが破壊した時の繰り返し载荷数と载荷応力との関係を示したものです。これは横軸に载荷回数の対数、縦軸に平均応力をとっておりますけれども、ガラス繊維の場合です。実は、载荷平均応力を同じにしても、振幅応力を変えて大きくしていくと、どんどん平均応力は下がって早く壊れるということになります。図8に示すようにアラミド繊維とカーボン繊維の場合には、その傾向がまだ顕著には出てはおりませんが、少なくともカーボン繊維の場合にはほとんど応力が変わっておりません。アラミド繊維の場合にはかなり急激に落ちてきていることがわかります。

このようなことで、通常の例えば疲労設計では、200万回疲労というようなものが使われておりますけれども、FRP の場合には、ただ単に振幅だけではなくて、かかっているときの応力の大きさということもかなり大きな影響を及ぼすということがわかります。

FRP ロッドの耐アルカリ性

次に、コンクリート用 FRP 緊張材の耐久性について表3に示しました。先ほど言いましたように、塩化物イオンによる劣化は生じないことがわかりました。しかしなが

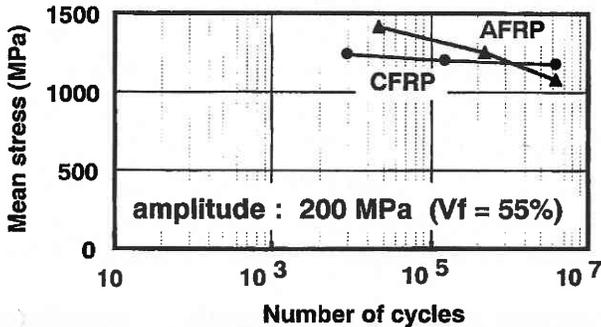


図8 AFRP, GFRP ロッドの繰り返し载荷回数と载荷応力との関係

表3 コンクリート用 FRP 緊張材の耐久性

- ・塩化物イオンによる劣化は生じない
- ・ガラス繊維の場合には耐アルカリ性に問題がある
→耐アルカリ性を著しく高めた AGFRP の開発
- ・紫外線による劣化(樹脂および AGFRP)
→日照を受ける部位への使用を避ける
- ・凍結融解、摩耗などによる物理的な劣化等
- ・その他

ら、ガラス繊維の場合は、耐アルカリ性というものにも問題がありそうだ。なんで問題かという、コンクリートは非常に高いアルカリ環境下でございまして、pH でいうと、12.5から13というようなところ。pH の上限値は14というふうに学校では習っていますから、非常にアルカリが高いということがわかります。そういう環境で使う場合には、ガラス繊維の場合にはどうも問題があるかもしれないということで、次のような実験をしました。

カーボン繊維、アラミド繊維、ガラス繊維を用いた FRP ロッドを、アルカリ溶液を入れた容器の中に入れ、そして時間がたったときにどうなるかを調べています。この状態で溶液に浸けておいて、長時間たってから試験体を取り出して、その荷重と変形の関係調べてみました。そうしますと、通常ですとまっすぐ一本の線ですと上がっていくのですが、アルカリに浸けておいたガラス繊維を使った GFRP だけは、一回とんと荷重が落ちます。それからまた上がって行って、最終的な破断を起こします。

これがいったいなぜ起こったかと調べてみますと、実はちょうど荷重が一回とんと落ちたときには、写真10に示したように、外側の皮が……りんごの皮をむいたようなものですけれども……外側の部分だけが切れていて、中の芯の部分はそのまま残っていました。先ほどの荷重が落ちたのは、この外側の部分が切れたために起こった現象だということがわかります。

これはいったいどういうことが原因であるかということで、EPMA を使いまして、ターゲットをナトリウムにして、その断面の EPMA 分析をしました。ロッドは水酸化ナトリウム溶液に浸けていたものですから、このナトリウムがどこまで入っているかを調べれば、ひょっとすると原因がわかるのではないかと調べてみました。ロッド1本の大きさは大体6mmですが、この6mmのロッドの中にナトリウムがどういうふう

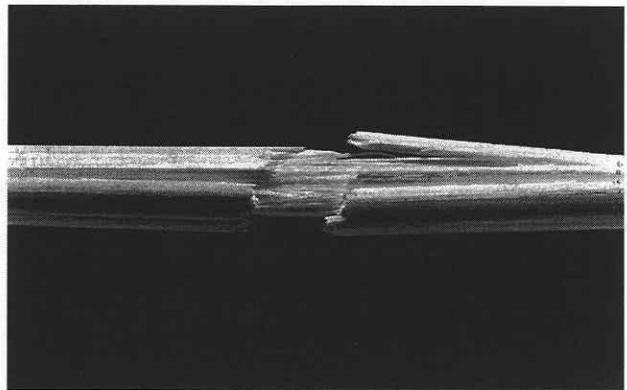


写真10 GFRP ロッドの破断状況

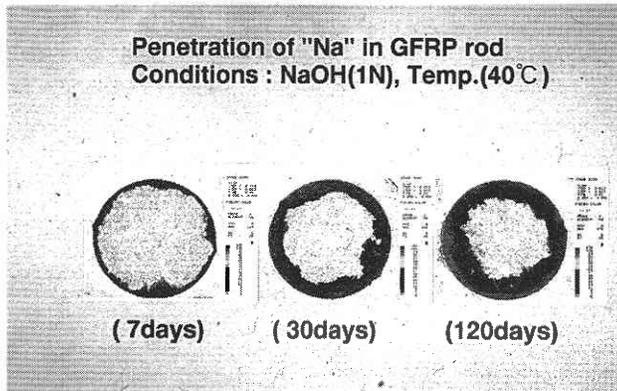


写真11 GFRP ロッドの断面の Na 分布測定結果

ているかを調べたわけです。

写真11はGFRP(ガラス繊維)を使ったロッドの場合に調べたものです。これは、浸漬日数が7日間、30日間、120日間、NaOHが1規定で温度が40℃の条件で行った実験です。そのときのFRPロッド断面の、いま言ったEPMAでとったナトリウムの分布です。白もしくは赤で表示されているのが、非常に濃度が高い場合で、青というのは濃度が低い場合です。これを見るとわかりますが、中央部分は濃度が低いですが、表層部分には高い濃度のナトリウムが存在しています。

これを見ますと、時間がたつにつれてだんだん内部までナトリウムの分布が入っていることがわかります。一方、アラミド繊維とカーボン繊維を使った場合には、浸ける前はまったくないのですが、浸けた後、2ヶ月(60日間)間たった場合には表層部分に少しナトリウムの分布が見られますが、中央部分は全く認められませんし、先ほどのガラスの場合とは全然違った様子をしていることがわかります。

繊維そのもので同じような実験をやってみますと、(ナトリウム溶液の中に例えば繊維をつけておきますと)だんだん粉状になります。すなわちこの繊維1本1本が溶け出していることがわかります。SEM写真で見ますと、まったく浸けていない時に比べ7日間、14日間浸けておくと、繊維はもともと十数ミクロンの直径であったものが、だんだんやせ細って行って、外側に反応生成物が出てきます。実はこういうことが原因でガラス繊維を用いたFRPロッドの劣化が生じているのではないかと思います。

FRP ロッドの耐候性

次に、こういうFRPを土木構造物に使用する場合、屋外で使うことがあります。そうすると、材料の紫外線による劣化はどうなんだという疑問が生じます。ここで問題になるのは樹脂の劣化、それからアラミド繊維を使っ

た場合の劣化の二つが考えられます。アラミド繊維は有機繊維なものですから、紫外線による劣化を受ける可能性があります。そこで、私どもの千葉実験所のほうで、一つは暴露させていただきました。

その結果、一例としてFRPロッドがどのようなかを示したものが写真12です。左が炭素繊維、中央がアラミド繊維、右がガラス繊維です。この表層のテカテカしているところ。これはカバーしてあったものですから、お日様の影響を受けていません。中央部がお日様が直接当たる部分です。これを見ますと、実は表層部分の樹脂がなくなっているばかりでなくて、繊維が表にとび出していることがわかります。こういうことが起こる可能性があります。

3年間まで実際に暴露したときに、アラミド繊維、ガラス繊維、カーボン繊維を使ったときのロッドの強度がどうなったかということ調べた結果、変わったと言えば言えるし、変わらないと言えば言えますけれども、少なくともまったく暴露していないものに比べると、若干の強度低下を示していることがわかりました。ということは、こういうような日照の影響を受けるようなところでの使用の場合には、ロッドの劣化のことを考えなければいけないということがわかります。伊豆の暴露場で暴露した場合にも同様な結果が得られました。

一方、紫外線の問題ですから、促進試験をやろうということで、紫外線による劣化のための促進試験を実施しております。その結果、強度の低下が認められました。FRPロッドの実験結果を図9にプロットしてみました。こちらの四角で塗ってあるのが促進試験でやったものです。横軸は紫外線の照射時間で、縦軸は引張強度です。ここに一点だけ四角い点がありますが、これは実際に屋外で暴露して得たデータです。これを全部プロットしますと、だいたいこういう曲線になります。そうすると、先ほどお示しましたように、どうもFRPを使うときには紫外線による劣化も起こり得る。ですからそれは注意

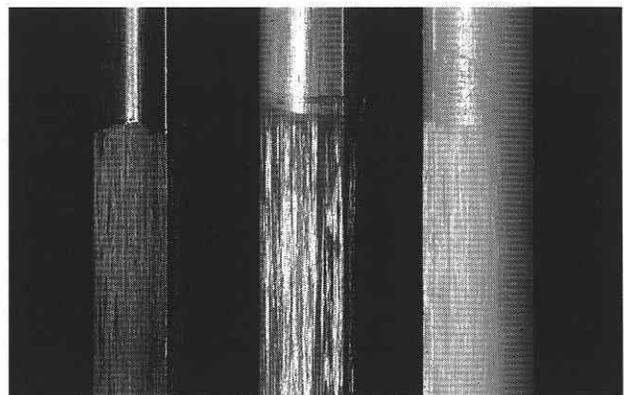


写真12 各種FRP ロッドの暴露3年後の性状

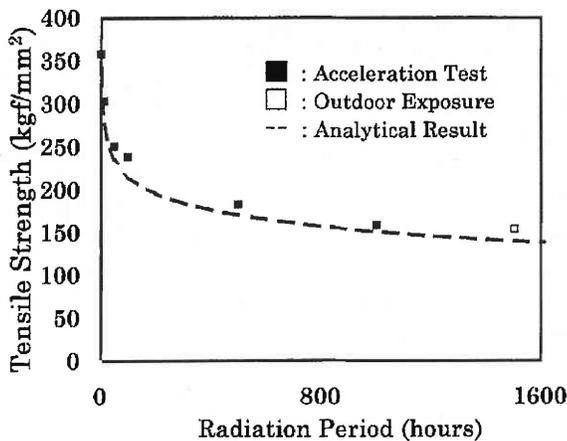


図9 アラミド繊維の紫外線促進試験結果

しなければならない。

FRP ロッドの耐久性と利用

ということで、少なくとも FRP を使う場合には、例えばガラス繊維の場合には、対アルカリ性に問題があり得るから、少なくともこういうものを使わないか、または逆にいま我々のところで開発しております、AGFRP ロッド（これはアラミド繊維とガラス繊維を組み合わせたロッドをつくっております）こういうものを使うとか、または紫外線による劣化を受ける場合、これは当然樹脂とアラミド繊維の場合には問題が生じますので、日照を受けるような場所には使用しないということが必要になるかと思えます。

当然、これ以外にも凍結融解とか摩耗とかいう問題もありますが、凍結融解の場合には、一応いままでも得られているデータでは特に大きな問題はないのではないかと想定はされておりますが、まだ何とも言えない部分があります。摩耗は当然だめです。ですから、外にそのまま出ているような使い方をする場合には、この点についての注意が必要であろうということになります。

もう一つ、言わなかったことがあります。耐久性ではないのですが、耐火性です。実は、FRP は耐火材ではありません。火に対しては弱い。ですから、どうしても鋼材のようなわけにはいきません。火災が想定されるような場所には使わないとか、もしくは何とかそれをかぶりコンクリートで対処することが必要です。しかし、特に建築の場合ですと、設計体系をある程度いじらないと使えません。これがちょっと大きな問題になります。

何故そんなことを言うかといいますと、たとえばアパートで火事があった場合、もし消火がちょっと遅れると、かぶりコンクリートが全部落ちてしまいます。鉄筋を使用した場合でも、とてもその後使えない状態になるわけですが、FRP の場合には、その後、補強材としての役目を果たすとはちょっと思えません。ということもありまして、耐火材としての使用を期待するのであれば、それは無理だろうということになります。以上、だいたい FRP の特徴と、塩分による劣化ということはいずれ問題がないということがわかりいただけたと思います。

今後の展望

今後の展望ということで、少し説明します。一つは土木学会や日本建築学会等で基準や指針が整備されてきております。例えば、建設省の大臣官房技術調査室監修で「連続繊維補強コンクリート」の指針的なものが出されております。それから、土木学会のほうでは、FRP 補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針を出版しております。こういうものを利用して、順次、設計の仕方とか施工の仕方、考え方、そういうものをいろいろ検討すると同時に、実際の構造物による検証が必要でしょう。

それから、もう一つ話したいことは、今こういうものに対して非常に関心が深いのは、塩分によるコンクリート構造物の劣化問題が大きいところ、すなわちヨーロッパ、カナダ、アメリカがそういうものに非常に関心があります。そういう国との連携を行って（共同研究等でも）現実にも動いておりますけれども）全世界的な検討というものがなくなるのではないかと思います。

今まで、この分野でいろいろなワークショップとかシンポジウムということをやっております。実は私のところで、日本とカナダのワークショップをやらせていただきましたが、1995年にはベルギーで FRP の国際会議が開かれました。今年は、札幌で第3回目の国際会議が開かれますが、こういうようなところで、いろいろな情報の交換をすると同時に、やはりどのように対処したら良いかということをお互いにうまく連携しようということが必要になるかと思えます。

時間でございますので、以上で私の説明を終わらせていただきます。どうもありがとうございました。

(1997年6月5日講演)