

FRPロッドのコンクリート構造物への適用

Application of Fiber Reinforced Plastic Rods for Concrete Reinforcement

魚本 健人*
Taketo UOMOTO

コンクリート構造物の補強材として、従来の鋼材の代わりに非磁性材料であり腐食の生じないFRPロッドが注目されている。しかし、FRP材は鋼材とはかなり異なった特徴を有しているため、本文では、現在までに明らかにされている諸特性について説明すると同時に、今後検討しなければならない問題点について概説した。

1. なぜFRPか

この数年来、わが国のみならず諸外国においても、多くの鉄筋コンクリート構造物の鉄筋やプレストレストコンクリート(PC)構造物の緊張材(高張力鋼材)が腐食し、社会的にも問題となっている。これらはいずれも沿岸、海洋構造物などの海洋環境下に建設されている構造物か、または融氷剤が多量に散布される橋梁などで、その原因は主に塩分腐食である。鉄筋の場合にはエポキシ樹脂塗装鉄筋等を用いることでこれらの腐食に対処することがある程度可能となったが、PC用緊張材の場合には実用的な対策が確立されていない。そこで、このような厳しい腐食環境下に建設されるPC構造物の抜本的な腐食対策として、現在の高張力鋼製緊張材を、これとほぼ同等の引張耐力を有する一方向強化繊維補強プラスチック(FRP)製緊張材で置き換える方法に関する研究が1980年から小林ら^{1,2)}によって始められた。

一方、近年では磁気浮上型のリニアモーターカーの実用化に関する研究が進んでおり、磁気による構造物への影響や電力消費量を考えると構造物の補強材として従来の鉄筋やPC鋼材ではなく、非磁性体である材料が必要とされている。各種補強材料の中でもこの条件を満たすコンクリート用補強材としては、一方向強化FRPが最も利用可能性の高い材料として有望視されている。

このように従来の鋼材では対処できなかった問題を解決する1つの方法として、一方向強化FRPは主にプレストレストコンクリートの分野で注目され、実用化が図られている。事実、小林らの研究が発端となり、1986年以降、わが国でも多くの研究者によって研究が進められている³⁾。1987年6月にはカーボン繊維を用いたFRP緊張材による道路橋PCげたの載荷試験が公開され⁴⁾、1988年に

*東京大学生産技術研究所 第5部

はプレテンション方式による単純桁橋が石川県で建設されている⁵⁾。また、1988年からは建設省、土木学会、日本建築学会においてより広範な調査研究が実施されている。

2. コンクリート補強用FRPロッドの研究開発過程

一方向強化FRPをコンクリート用補強材として用いることに関する開発研究は、主に1950年代から1960年代にわたり、米国、ソ連および英国において行われた。FRPは鋼材に比べはるかに高価であるため、これらの研究は鉄筋の代替品としてではなくPC用緊張材として利用することが目的とされていた²⁾。

これらの国々がPC用緊張材としてFRPに着目した主な理由は、繊維が鋼材に比べて著しく高い引張強度を与える可能性を秘めていたからである。すなわち、もしFRPの性能が十分引き出せれば、たとえ高価であっても、その高強度、耐食性などを上手に利用することで将来的には利用できる可能性が大きいと判断したためであろう。しかし、その研究途中においてFRPに持続荷重を加えた場合の引張強度の低下現象、すなわち「静的疲労」が大きな問題となり、実用化の段階まで至らなかった。

1970年代に入ってから西独において実用化を目指した研究が進められ、ガラス繊維(容積混入率:68%)とポリエステル樹脂からなるFRP緊張材を用い、1980年にはデュッセルドルフ市郊外にスパンが6.50mの実験橋が建設された。また、1986年には橋長46.9mの2車線の道路橋(2径間連続桁)が同じくデュッセルドルフ市内に建設された。このように研究が大きく進展した原因は、1970年代に英国で開発されたPultrusion方式と呼ばれるFRPの成形方法を導入したことである。これは等断面のFRP製品を、強化用繊維に一定の張力を加えつつ成形するもので、この技術の開発により上記の「静的疲労」による荷重低下は大幅に改善された。

3. わが国で用いられているコンクリート補強用FRP

コンクリート用補強材として現在わが国で使用されているFRPにはさまざまなものがあるが、大きく分類すると一方向強化FRPロッドと2次元または3次元の格子状FRP材である。いずれも補強繊維としては主にガラス繊維、カーボン繊維、アラミド繊維などが用いられている。また、写真1に示したように、ロッド状のものでコンクリートとの付着改善等を目的としてさまざまな形状寸法のものも製造されている。

現在、わが国でコンクリート補強材として用いられているFRPは、鉄筋の代替品またはPC用緊張材としての利用である。鉄筋の代替品としての利用は、FRPの有する耐食性や非磁性性を利用することを目的とするばかりでなく、近年の熟練現場作業員の不足や高齢化に対処することも目的とされている。すなわち、FRPは鋼材に比べ軽量であり、たとえば、2次元配置された格子状FRP材(写真2参照)であれば現場での運搬・配筋作業は、従来の鉄筋よりはるかに容易に行えるからである。しかし、現在製造されているFRPのヤング率は鋼材よりかなり小さいため、コンクリートの補強効果が小さく、鉄筋代替品としての利用には限界がある。

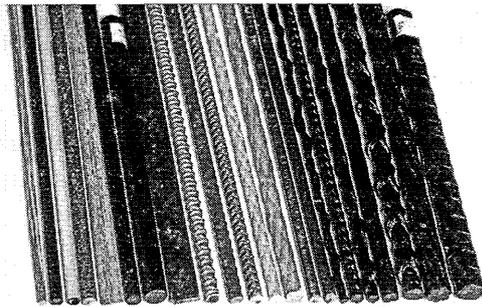


写真1 各種のコンクリート補強用一方向強化FRPロッド

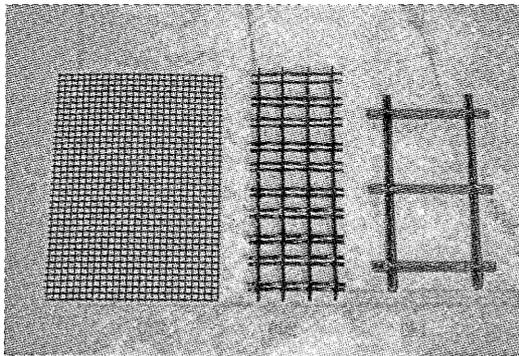


写真2 コンクリート補強用2次元又は3次元格子状FRP材

高張力鋼の代わりにFRPロッドを緊張材として用いることの利点は、その耐食性、非磁性のほかに、PC構造物では重要な特性として要求されるコンクリートの時間依存性の塑性変形による応力損失が小さくなることとあげられる。たとえば、GFRPのヤング率は鋼材の1/4程度になるので、コンクリートに時間依存性の塑性変形が生じても応力損失は少なくすむ^{1),2)}。これらのことから、コンクリート用補強材としてFRPを用いる場合、緊張材としての利用が最も有望視されている。これは最初にコンクリート用補強材としてFRPロッドが実構造物に利用されたのは、ドイツならびに我が国の橋梁の緊張材であることから明らかである。しかし、鉄筋代替の場合と異なり、緊張材はより高い応力を常時受けることになるため、材料、構造、施工のさまざまな面からの十分な検討が必要となる。

4. FRPロッドの諸特性

FRPロッドをコンクリート用補強材として用いる場合、明確にしておかなければならない諸特性としては、FRPロッドの引張強度、ヤング率、疲労強度、レラクセーション、付着特性などがある。ここでは今まで当研究室で行われた研究結果に基づいて、現在までに明らかにされているこれらの特性とその問題点について概説する。

(1) 荷重変形曲線とヤング率

図1は、カーボン繊維、アラミド繊維、ガラス繊維の3種類の繊維を用いた一方向強化されたFRPロッド(繊維混入率:66%,直径:6mm,丸棒)と鉄筋(SD30)の荷重変形曲線を示したものである。この図から、い

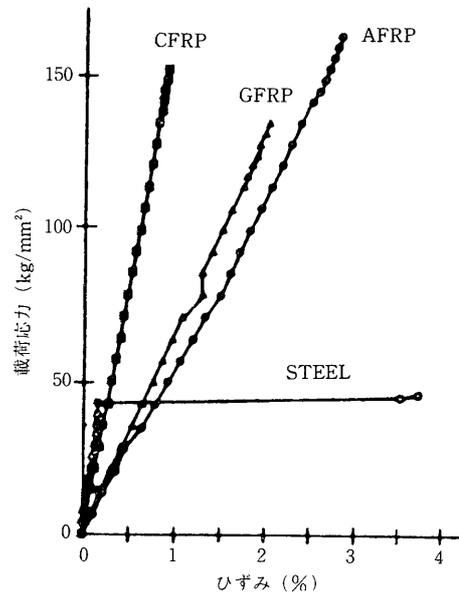


図1 FRPロッドの引張応力-変形曲線³⁾

れのFRPロッドも鋼材とは異なり、明瞭な降伏点が認められず、ほぼ弾性状態のまま破断していることが明らかである。これら3種類の繊維素材の諸元を示したものが表1であるが、当然のことながら、図1の傾向とよく一致している。これらの結果から明らかなように、カーボン繊維補強プラスチック(CFRP)は伸びが小さいのに対して、ガラス繊維補強プラスチック(GFRP)やアラミド

表1 補強繊維の諸元¹¹⁾

Material	diameter (μm)	Strength (kg/mm ²)	Max. strain (×10 ⁶)	Elasticity Modulus (kg/mm ²)
Aramid	12.15	389	44116	8355
Carbon	6.68	335	13880	22730
Glass	12.77	251	28871	8551

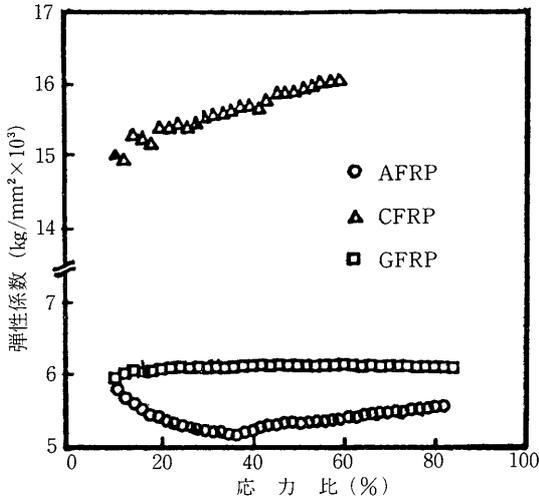


図2 単調載荷時の応力比と弾性係数との関係¹²⁾

繊維補強プラスチック(AFRP)は伸びが大きく韌性が高い。なお、いずれのFRP緊張材の場合にも、程度の違いはあれ環境温度が低くなるにつれヤング率が大きくなり、また破断時伸びもやや小さくなる傾向がある¹⁾。

FRPロッドの荷重変形曲線は、図1に示すように最大応力時まではほぼ直線で近似することができるが、各応力レベルにおける割線ヤング率を求めると図2に示すようにならずしも一定ではない¹²⁾。すなわち、GFRPロッドの場合にはいずれの応力(荷重を全断面積で割った値)でもほぼ同じ値を示しているが、CFRPおよびAFRPロッドの場合には応力レベルが増大するとそれともないヤング率は変化している。これらのことから、CFRPおよびAFRPロッドの場合にはどの応力レベルで使用するかによって、ヤング率が異なることを考慮しなければならないことになる。

(2) 静的引張強度とバラツキ

図3および図4は、静的引張応力を受けた体積繊維混入率66%のFRPロッドの破壊確率を示したもので、図4は正規確率紙にプロットしたものである¹⁰⁾。いずれのロッドも直径6mmで、使用されている樹脂はビニルエステル樹脂である。なお、載荷試験においては小林らの開発した2つ割れチャック¹¹⁾を使用している。

図3から明らかなように、同じ破壊確率で最も高い強度を示すのはAFRPロッドであり、CFRPロッドが最も低い。すなわち、同じ破壊確率10%であっても、AFRPでは約200kg/mm²、GFRPでは約160kg/mm²、CFRPでは約120kg/mm²となっている。

図4に示すAFRPロッドおよびGFRPロッドでは、バラツキの違いはあるもののほぼ直線関係が得られており、これらの破壊強度はいずれも正規分布であるといえよう。

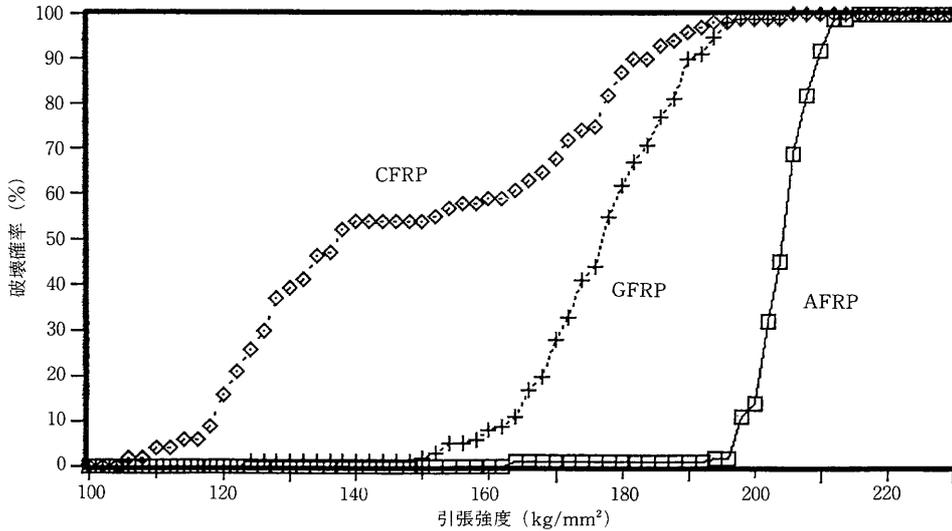


図3 各種FRPロッドの引張強度の破壊確率¹⁰⁾

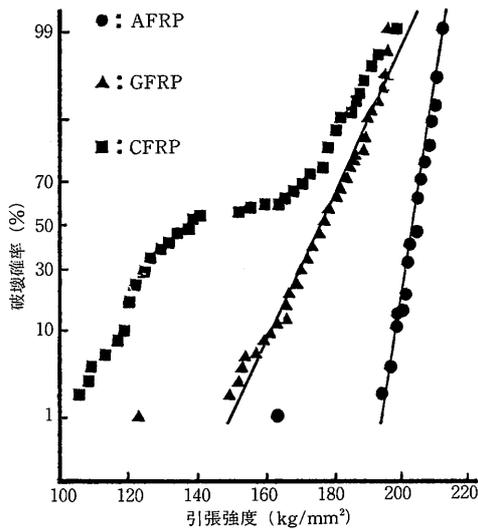


図 4 各種FRPロッドの引張強度と破壊確率との関係 (正規確率プロット)

特に、AFRPロッドではバラツキも少なく (標準偏差5.7 kg/mm²), 平均引張強度は理論強度とほぼ等しい204 kg/mm²となっている。また、GFRPロッドはAFRPロッドに比してバラツキの幅は大きく (標準偏差12.2kg/mm²), 引張強度として理論耐力に匹敵する値も得られているが、平均引張強度は177kg/mm²となり理論耐力の約90%である。しかし、CFRPロッドは他のロッドと異なり直線関係がみられず、図5に示すような2種類の破壊形式が存在している¹⁰⁾。

CFRPロッドの場合に2種類の破壊形式が現れた原因は、繊維の破断以外に、チャック部における応力集中の影響を受けたためである¹¹⁾。図5に示した右側のピーク

は繊維の破断による破壊が生じたロッドであり、左側のピークはチャック部の応力集中による影響を受けたロッドである。このような現象が生じた原因は、CFRPの場合にはAFRPやGFRPに比べ繊維の伸び能力が小さいことであり、CFRPロッドを使用する場合には、このような応力集中の生じにくい定着方法の開発と構造形式の選定が重要であることを示している。なお、いずれの繊維を用いた場合でも、FRPロッドをPC用緊張材として設計する場合には、ロッドの強度のバラツキを考慮した許容値の選定が大切となる。

(3) 静的疲労試験とクリープ破壊

荷重を持続荷重させた場合に繊維が順次破断していく「静的疲労」現象^{11,12)}が生じるか否かを調べる目的で実施したFRPロッドの静的疲労試験の結果とクリープ破壊について述べる。

図6は持続荷重を載荷した場合のAFRPロッドのAE発生率 (単位時間当たりAE発生数) と荷重時間との関係を示したものである⁹⁾。この図では、所定荷重載荷までのAE発生率は大きくなりすぎるために省略してあるが、この間のAE発生率は載荷荷重により変化しておりほぼ数十個/秒である。いずれの場合にも載荷荷重到達後数十秒で安定し、AE発生率はほぼ0となる。しかし、時間が経過するとある時間で急激にAE発生率が増大し、ロッドの破断が生じている。一方、AEの位置標定結果の例を示したものが図7で、この図はそれぞれ1,000秒間に発生したAEを示している⁹⁾。図でみられるように、2,000秒まではほぼ試験体中央にAEの集中が見られるが、破断直前では中央左側にAEの発生が集中している。これらのAE測定結果は、これらのロッドが順次繊維の破断を生じる「静的疲労破壊」を生じているのではなく、「クリープ破壊」を生じていることを示していると言えよう。

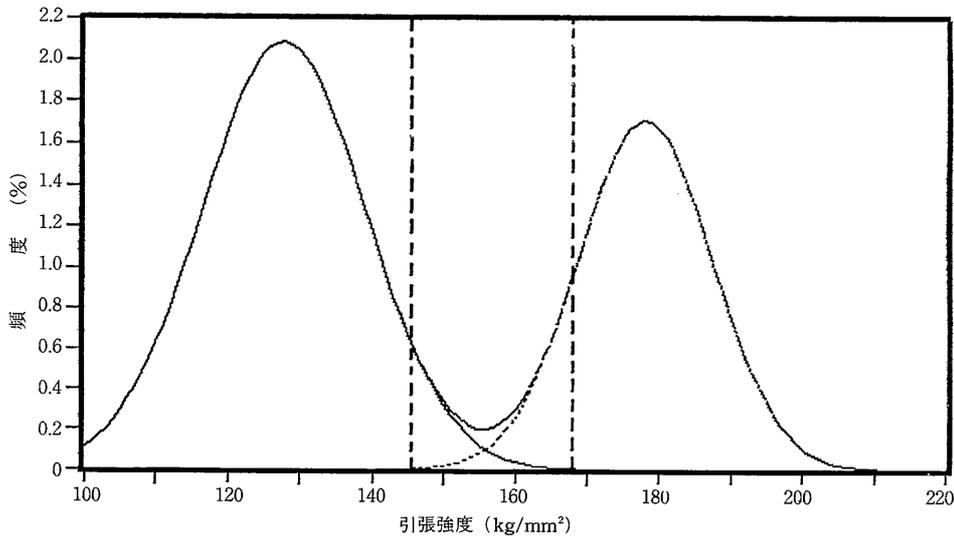


図 5 CFRPロッドの引張強度の頻度分布¹⁰⁾

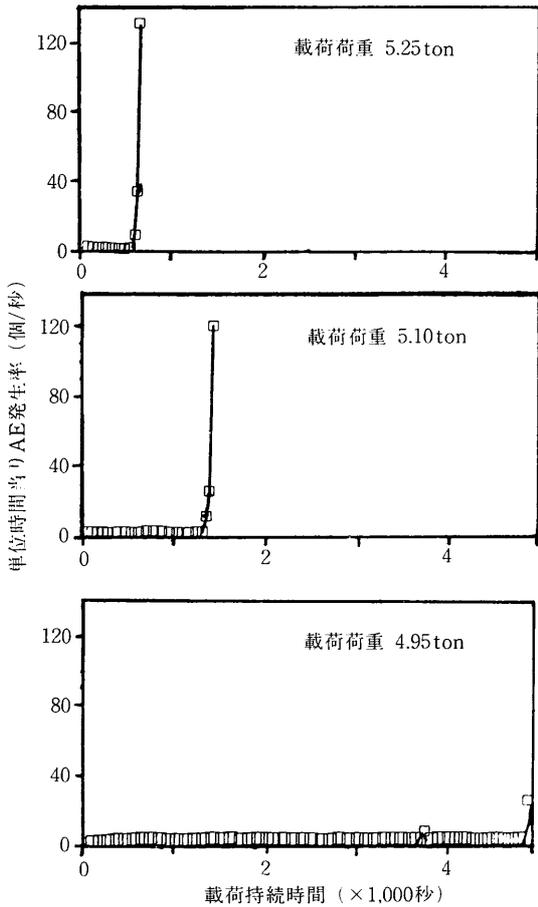


図6 持続荷重下におけるAFRPロッドのAE発生率⁹⁾

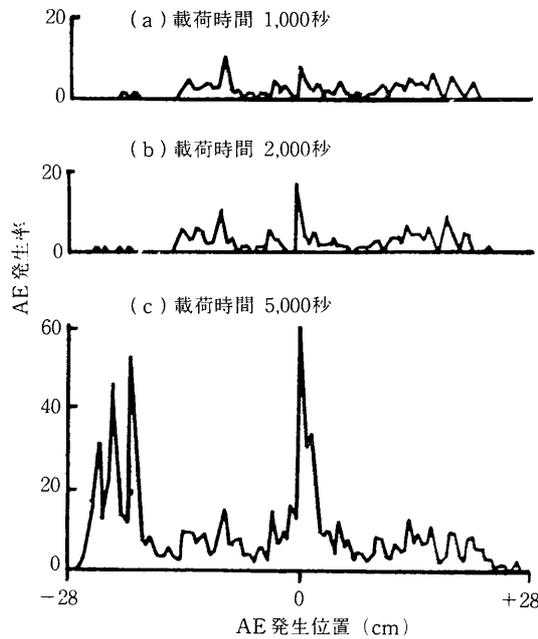


図7 持続荷重下におけるAFRPロッドのAE発生位置⁹⁾

AFRPロッドに一定荷重を持続的に作用させた場合における載荷荷重(応力)と、ロッド破断時までの載荷時間との関係を図8に示す⁹⁾。なお、載荷継続時間は対数で表示してある。この図から明らかなように、載荷荷重が5.5tonから4.9tonまでの範囲では、載荷荷重が増大するにつれほぼ直線的に載荷時間が減少している。この傾向がどの程度の荷重まで認められるのかはまだ明らかでないが、この破壊が「静的疲労破壊」でなく「クリープ破壊」であるにしても、持続荷重下でのロッド破壊が生じればPC用緊張材として使用することができない。FRPロッドを緊張材として利用するためには、少なくとも、このような破壊の生じない限界荷重(応力)を明らかにしなければならないことになる。

(4) FRPロッドの動的疲労特性

AFRPロッドの動的疲労試験における各載荷荷重ごと

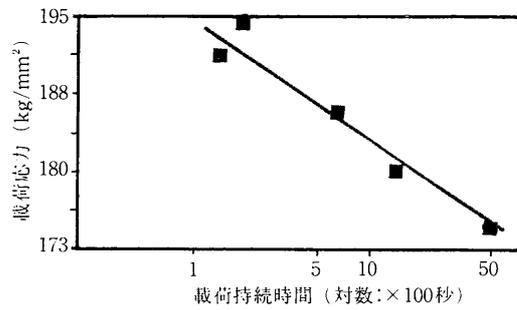


図8 持続荷重下における載荷応力と破壊時間⁹⁾

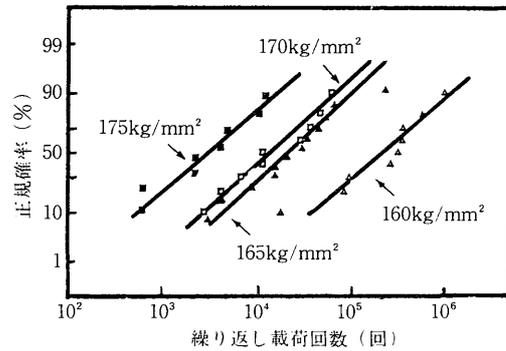


図9 動的疲労試験時の破壊回数⁹⁾

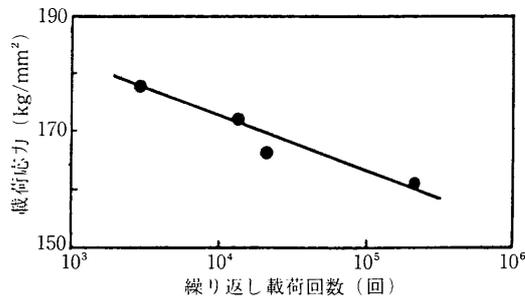
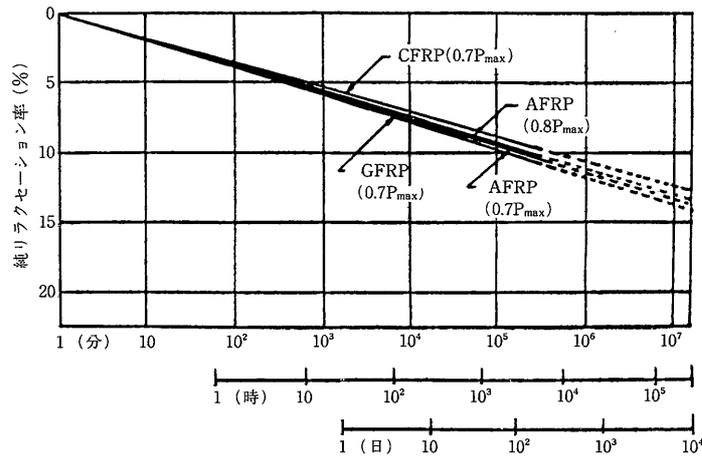


図10 動的疲労荷重と破壊回数⁹⁾

図11 純リラクセーション率と時間との関係(20°C)^{1),2)}

の破壊までの載荷回数を正規確立紙にプロットした結果を図9に示す⁹⁾。いずれの載荷荷重においても8~10本の試験体で載荷したが、試験結果はほぼ直線上にプロットでき、正規分布をしているといってもよい。またいずれの場合も同じ勾配の直線であることから、標準偏差の等しい分布であると言える。

この図9で得られた破壊までの平均載荷回数と載荷荷重(上限値)との関係を図10に示す⁹⁾。この図から明らかのように、FRPロッドの場合においても鋼材と同様、疲労破壊までの載荷回数は載荷荷重が減少するにつれ増大し、ほぼ直線で表示することができる。CFRPロッドの場合には200万回載荷させても疲労破壊が生じなかったという報告もあるが、鋼材のように疲労破壊を生じない疲労限界の存在の有無、また存在する場合の応力レベル等について明らかにすることが必要である。

(5) FRPロッドのリラクセーション

初期荷重をそれぞれの最大引張荷重の70~80%に相当する荷重として、CFRP、AFRPおよびGFRPロッドの常温時の純リラクセーション率と時間との関係を示したものが図11である²⁾。

いずれの繊維を用いた場合でも、FRPロッドの純リラクセーション率と時間(対数表示)との関係が直線関係にあることは、一般に用いられるPC鋼材の場合と同様である。また、この図から明らかのように、もしこの関係が30年後までも成立すると仮定した場合、FRP緊張材の純リラクセーション率は約14%程度であることになる。一般のPC鋼棒の純リラクセーション率は約7%程度、またPC鋼線の場合には約15%程度であることから、FRP緊張材の純リラクセーション率はPC鋼線とほぼ等しく、PC鋼棒の約2倍となる。なお、AFRPロッドの場合には形状記憶現象が認められるため、これを有効に利用することでリラクセーションを減少させる方法などが提案さ

れている²⁾。

5. 今後の課題

FRPは、コンクリート用補強材として今後さまざまな構造物に適用される可能性があるが、汎用の補強材として実用化されるためには、本文で示したようにまだまだ多くのことをつめなければならない。特に大切な点は、FRPは航空機をはじめ多くのものに適用されているが、コンクリート構造物に適用する場合にはそれらとは異なった条件で使用されるため、それに見合った性能が要求されることである。

今後明らかにしなければならない課題は、本文で記述したような材料特性に関する問題以外にも多くのものがある。それらを列記すると次のようになる。

- ① 塑性変形の認められないFRPロッドを使用する場合のコンクリート構造物の設計方法(許容値の選定、安全性の確保等を含む)
- ② FRPロッドを施工する場合に生じる各種問題の解明(施工時のロッドの損傷等を含む)⁶⁾
- ③ コンクリート中に埋め込まれたFRPロッドそのものの耐久性とこれを用いたコンクリート構造物の耐久性(許容ひび割れ幅、耐火性等を含む)
- ④ コンクリート補強用FRP(ロッド、格子状FRPを含む)の品質基準、試験方法等

これらの問題については、現在土木学会、日本建築学会等でも検討されており、数年以内に一つの考え方が提案されるものと思われる。(1991年10月21日受理)

参考文献

- 1) 小林一輔：繊維強化複合材料プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究、昭和59年度科学研究費(試験研究2)研究成果報告書

- 2) 小林, 魚本, 趙: FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリート構造, プレストレストコンクリート, pp. 19-26, プレストレストコンクリート技術協会, Vol. 30, No. 5, 1988. 9.
- 3) 高木, 内藤, 佐藤: FRPロッドを用いたプレストレストコンクリートはりの曲げ性状に関する研究, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集, 日本コンクリート工学協会, pp. 661-664, 1986
- 4) 犬飼晴雄: CFRP製緊張材による道路橋PCげたの載荷試験 (ニュース), コンクリート工学, pp. 94-95, Vol. 25, No. 8, 日本コンクリート工学協会, 1987. 8
- 5) 山下, 木内, 犬飼, 岩崎: 新素材によるPC橋—新宮橋の建設—, プレストレストコンクリート, プレストレストコンクリート技術協会, pp. 71-78, Vol. 31, No. 2, 1989. 3
- 6) 石田, 小林, 趙, 則武: FRPロッドを用いたプレストレストコンクリート構造に関する研究, 第8回コンクリート工学年次講演会論文集 (1986)
- 7) 魚本, 西村, 加藤: AE計測によるFRPロッドの引張特性の評価, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, 第5部門 (S.63.10)
- 8) 魚本, 西村: AE計測によるFRPロッドの疲労特性評価, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集, 第5部門 (H.1.10)
- 9) 魚本, 西村: プレストレストコンクリート用FRPロッドの静的および動的疲労特性, コンクリート工学年次論文報告集, 第12巻1号 (1990. 6)
- 10) 魚本, 西村: プレストレストコンクリート用FRP緊張材の特性(1), 一引張強度とバラツキ, 生産研究, 第42巻5号 (1990. 5)
- 11) H. HODHOD, T. UOMOTO: Experimental Model for Ideal Tensile Failure of FRP Rods, コンクリート工学年次論文報告集, 第13巻1号 (1991. 6)
- 12) 西村, 魚本: プレストレストコンクリート用FRP緊張材の応力—ひずみ曲線と弾性係数, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, 第5部門 (1991. 9)