

論文

[1177] 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

正会員 ○魚本健人 (東京大学生産技術研究所)

正会員 西村次男 (東京大学生産技術研究所)

1. はしがき

新素材の開発にとともに、各種の新素材を利用する方法に関して様々な研究が実施されている。コンクリートの分野においても、厳しい塩分環境下における鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリート構造物の鋼材腐食が大きな問題となっている今日、従来使用されている鉄筋やPC鋼材の代わりに、腐食を生じない繊維補強プラスチック材(FRPロッド)を利用する方法が注目されている。中でも、FRPロッドをプレストレストコンクリート用緊張材として用いる方法については、わが国でも1984年以降小林ら¹⁾²⁾³⁾の研究結果が発表されており、その利点、問題点、対策等の多くについてはすでに明らかにされている。

FRPロッドは複合材料であり、同じFRPロッドと呼ばれているものであっても、その品質は使用する補強繊維の種類、繊維混入率、樹脂の種類等によって異なったものとなる。FRPロッドをプレストレストコンクリート用緊張材として使用する場合には、種々の条件を満たすことが必要であり、例えば何十年という長い年月の間高い引張応力下におかれ、また、これらのプレストレストコンクリート構造物は、常時自動車等の繰り返し荷重を受けることになる。以上のことを考慮すると、FRPロッドをPC用緊張材として使用するためには、このロッドの諸特性を十分把握した上で利用することが大切で、安易に使用して後で問題が生じたりしないようにすることが肝要である。

そこで、本研究ではFRPロッドが長期間の使用に耐えられるか否かを明らかにすることを究極的な目的として、各種繊維で補強されたFRPロッドの静的疲労試験(持続荷重下における破壊性状)および動的疲労試験(変動荷重下における破壊性状)を実施し、その特性を明らかにするとともに載荷期間中のAE計測を行った。

2. 実験概要

実験に用いたFRPロッドの補強用繊維は、アラミド繊維、カーボン繊維、ガラス繊維の3種類で、いずれもφ6mmのロッドに成形されている(以下AFRP、CFRP、GFRPと略す)。試験に供した各種FRPロッドはいずれも1方向強化FRPロッドで、その品質は表1の通りである。

表1 実験に使用したFRPロッドの品質

	AFRPロッド	CFRPロッド	GFRPロッド
ロッドの径	φ6mm	φ6mm	φ6mm
繊維の種類	アラミド テクノーラ	カーボン T300B 6000-50B	T-ガラス RST 110PA-535
繊維の引張強度 (kg/mm ²)	310	350	300
繊維の引張弾性率(kg/mm ²)	7100	24000	8600
繊維の破断伸度 (%)	4.4	1.4	5.5
マトリックスの種類	ビニールエステル樹脂	ビニールエステル樹脂	ビニールエステル樹脂
繊維の体積含有率 V_f (%)	66.0	66.1	66.8
FRPロッドの理論耐力 (kg)	5780	6540	5660

FRPロッドの載荷方法は写真1に示すように、1軸引張試験とした。載荷用治具は東京大学生産技術研究所第5部小林研究室で開発された2つ割れチャック（写真1）を使用した。載荷時のAE計測を行うために、写真2に示すように2個のAEセンサーを上下のチャック部に取り付けた。なお、使用したAEセンサーは140kHz共振型である。

静的載荷試験では、ひずみ測定ならびにAE計測を行ったが、静的疲労試験ならびに動的疲労試験においてはAE計測を中心とし、AEイベントカウンント、AE位置標定等を行った。載荷試験に先立ち、ノイズの計測を行い、いずれのFRPロッドの場合にもAE計測時のしきい値を46dBとした。なお、FRPロッドのひずみ測定には塑性ひずみゲージを用いた。

実験は、静的試験、静的疲労試験、動的疲労試験の3種類とし、各疲労試験は次の方法で行った。静的疲労試験では、引張荷重を所定荷重まであげた後、ロッドが破断するまでその荷重を維持させた。静的疲労載荷荷重は、FRPロッドの静的引張耐力の87～98%とした。動的疲労試験では、AFRPロッドを対象とし、まず静的に上限値まで載荷して、計測されるAE発生量がほぼ0となるまで載荷を継続した後一旦載荷荷重を0まで下げ、その後繰り返し正弦波載荷とした。動的疲労載荷荷重は、応力振幅を $20\text{kg}/\text{mm}^2$ と一定に保ち、上限荷重を $175\text{kg}/\text{mm}^2$ （静的強度の87%）から $160\text{kg}/\text{mm}^2$ （静的強度の80%）の範囲とした。なお、載荷サイクルは3Hzとし、各載荷荷重段階で8～10本の試験を実施した。

3. 静的引張試験結果

図1は、FRPロッドと鉄筋（SD30）の荷重変形曲線を示したものである。この図から、いずれの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わかる。破壊荷重はAFRPが最も大きく、CFRP、GFRPはやや小さい。また表1に示したように、例えば繊維混入率がほぼ一定であっても、FRPロッドの変形量は繊維のヤング率による違いが明瞭に現れており、ヤング率はCFRPが最も大きく、GF

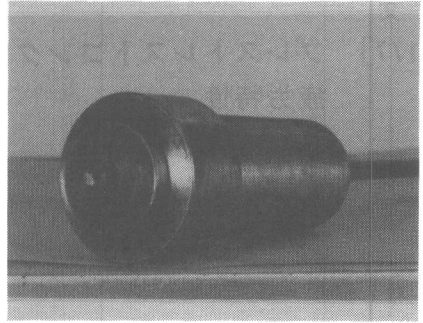


写真1 FRPロッド定着用治具

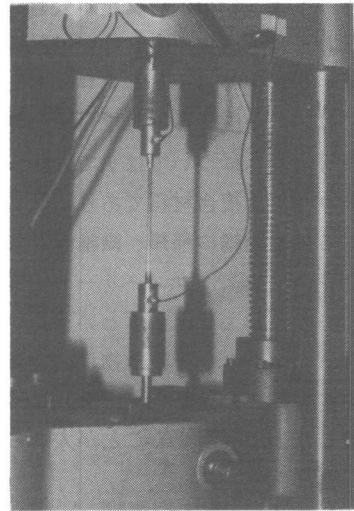


写真2 FRPロッド載荷試験

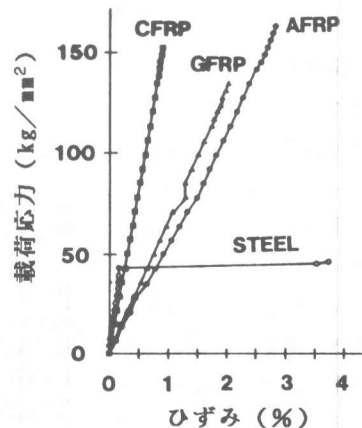


図1 引張応力-変形曲線

FRP、AFRPは小さい。なお、伸び能力はAFRPが最も大きく、CFRPの数倍になっていることが低いヤング率にもかかわらず高い強度を示した原因である¹⁾。

FRPロッドが破壊するまでの引張荷重と総AE数との関係を図2に示す。この図から明かなように、FRPロッドの場合には荷重の増大に伴ってAEの発生が認められる。しかし、AEの発生はGFRP、CFRP、AFRPの順に多く、特にAFRPは他の2種類のロッドに比べAEの発生が少ない。

各ロッドのAE発生傾向をよりわかりやすく示すため、最大ひずみに対するひずみの割合とAEの累積発生割合との関係を図3に示す。なお、横軸を最大荷重に対する割合で表示しても、荷重と変形との関係がほぼ比例しているため同じ傾向を示す。この図より、CFRPおよびGFRPの傾向とAFRPとは、AEの発生傾向が異なっている。いずれも載荷荷重またはひずみの増大にともなってAEが発生しているが、前者の方が載荷初期段階におけるAEの発生が多く、AFRPの場合には破壊直前に急激にAEが発生している。

載荷時におけるFRPロッドのAE位置標定結果の一例を、図4に示す。図4(a)はAFRPの場合であり、(b)はCFRPの場合を示したもので、荷重レベルにわけて表示してある。いずれも載荷荷重の増大にともない広い範囲でAEの発生が認められる。なお、鉄筋の場合についてはここに図示していないが、AEの発生が狭い範囲に限定され、その部分が降伏によるネッキング現象が生じた。

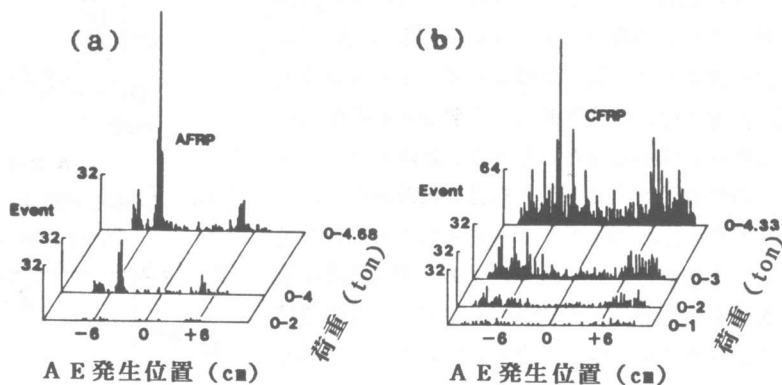


図4 各荷重レベルにおけるAFRPとCFRPのAE発生位置

これらの結果から判断すると、FRPロッドの場合、載荷荷重の増大と共に各断面で繊維とマトリックスの付着破壊や繊維の破断等が生じているものと考えられる。図4のAFRPとCFR

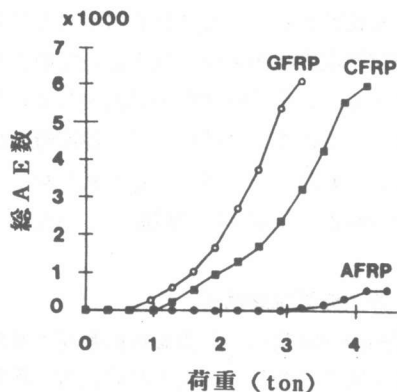


図2 引張荷重と総AE数の関係

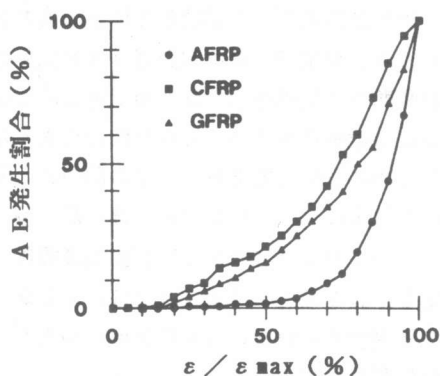


図3 ひずみレベルとAE発生割合

Pとを比較すると、AFRPに比べCFRPの方が荷重初期段階からかなり広範囲でのAEの発生が認められ、破壊が各断面で進展していると考えられる。このことは各ロッドの破壊時の状況とも一致しており、破断時にはCFRPロッドは試験区間の繊維が十数カ所で破断していた。

4. 静的疲労試験結果

静的疲労試験は、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¹⁾³⁾が生じるか否かを調べるもので、PC用緊張材として利用する場合には非常に重要な特性の一つである。

図5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。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、時間が経過すると急激にAE発生率が増大し、ロッドの破断が生じている。

図6は、載荷荷重4.95tonでのAE位置標定結果の例である。この図ではそれぞれ1,000秒間に発生したAEを示しており、2,000秒まではほぼ試験体中央にAEの集中が見られるが、破壊直前では中央左側にAEの発生が集中している。試験体表面の観察では、破壊直前にこの部分では繊維に沿った割れが認められたことから、繊維とマトリックスの付着破壊とその後の繊維の破断がこのようなAEの発生原因であると考えられる。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。

AFRPロッドの静的疲労試験時における載荷荷重（応力）と、ロッド破断時までの荷重時間との関係を図7に示す。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

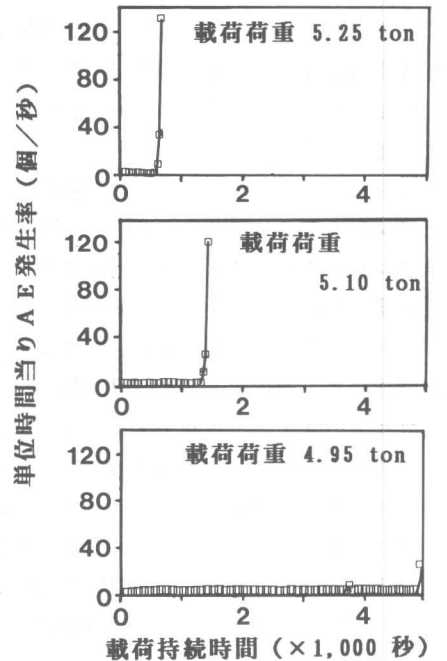


図5 静的疲労載荷時のAE発生率
(AFRPロッド)

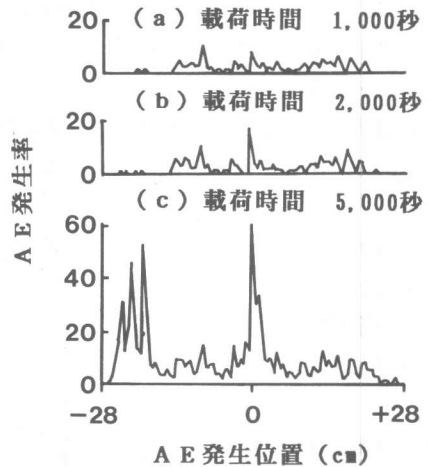


図6 静的疲労試験時のAE発生位置
(AFRPロッド)

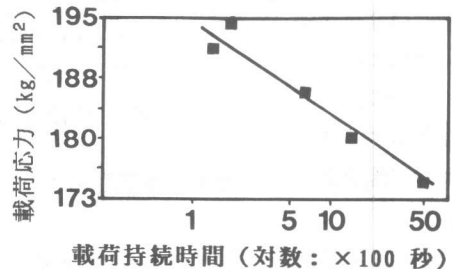


図7 静的疲労荷重と荷重時間

荷応力が 195kg/mm^2 から 170kg/mm^2 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。この傾向はCFRP、GFRPロッドの場合にも認められる。この傾向がどの程度の荷重まで認められるのかは不明であるが、「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てはPC緊張材として使用することができないことを意味するため、このような破壊の生じない限界荷重（応力）を明らかにすることは特に重要である。

5. 動的疲労試験結果

AFRPロッドの動的疲労試験における各載荷荷重毎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8に示す。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。

上記図8で得られた破壊までの平均載荷回数と載荷応力（上限値）との関係を図9に示す。この図から明らかなように、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応力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。しかし、鋼材のように疲労破壊を生じない疲労限界が存在するか否かについてはまだ明かでない。

動的疲労載荷試験時における載荷回数と1サイクル当りのAEイベント発生数との関係を図10に示す。この図から明らかなように、載荷初期はAEの発生が多いが、ある程度載荷回数が増大するとほとんどAEの発生が認められなくなるという現象（例えば1万回載荷で数百個のAE）が生じる。その後、若干AEの発生が増大するとロッドの破壊が生じている。AEの発生がほとんど認められなくなってからロッドの破壊に至るまでの繰返し載荷回数は、疲労荷重の振幅が大きいほど少なく、また1サイクル当りのAE発生数の増大もわずかである。

静的疲労試験の場合と同様にAEの発生位置標定結果を見ると、AEの発生箇所は1箇所では

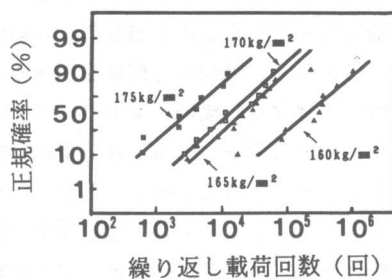


図8 動的疲労試験時の破壊回数

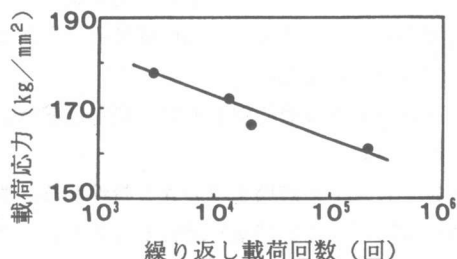


図9 動的疲労荷重と破壊時回数

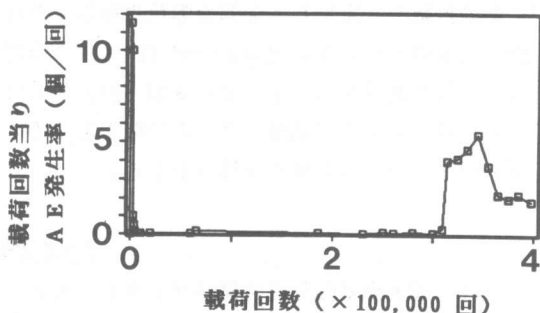


図10 動的疲労載荷時のAE発生率
(AFRPロッド)

なく、かなり広範囲にわたっている。しかし、A E の発生が卓越する場所は数カ所に限定され、最終的な破壊箇所もこれらの A E 発生位置のいずれかに限定されている。

以上述べたことから、動的疲労荷重を受ける F R P ロッドでは載荷当初必ずしも各繊維に作用する荷重が均一ではなく、繊維とマトリックスの付着破壊などが生じているものと考えられる。この現象が止まると各繊維による荷重分担がほぼ均等に行われ、結果的に A E の発生がほとんど認められなくなるものと考えられる。しかし、その後繊維の付着破壊などが進行し、いずれかの繊維の破断が生じるようになると、他の繊維で分担している荷重が増大するためその強度限界を越え、順次繊維が破断し、結果的にロッド全体の破壊にいたるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、F R P ロッドをプレストレストコンクリート用緊張材として用いるための基礎実験としてロッドそのものの静的および動的疲労特性を明らかにするために A E 計測を含めた検討を実施したが、F R P ロッドを P C 用緊張材として実用化するためにはさらに多くのことを検討する必要があるといえよう。本研究で用いた F R P ロッドについて明らかになったことをまとめると以下の通りとなる。

- ① F R P ロッドの静的引張応力－変形曲線は、ほぼ直線で近似することができ、塑性変形は認められない。
- ② F R P ロッドの破壊までの A E 特性から、載荷時における C F R P と G F R P は載荷応力が小さい段階から局部破壊が進行しており、A F R P では最終破壊近くになって急激な破壊の進行が生じているものと考えられる。
- ③ 高い応力の持続引張荷重を与えた場合の A E 測定結果から、F R P ロッドの「静的疲労破壊」は生じていないと考えられるが、「クリープ破壊」が生じており P C 用緊張材として F R P ロッドを用いる場合には、このような破壊が生じない条件を明らかにすることが必要である。
- ④ 応力振幅を一定にして動的疲労荷重を与えた A F R P ロッドの試験結果から、 175kg/mm^2 （静的強度の 87％）から 160kg/mm^2 （80％）の範囲では、載荷上限荷重と破壊までの載荷回数はほぼ直線で表示することができるが、疲労限界はまだ明かでない。
- ⑤ F R P ロッドの破壊時の挙動を把握するためのモニタリング方法として、A E 計測はひずみゲージとは異なった情報を提供できる。

《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（S. 60. 3）
- 2) 趙、小林、西村：繊維強化複合材料製プレストレストコンクリート用緊張材の開発研究、土木学会第 40 回年次学術講演会講演概要集、第 5 部門（S. 60. 9）
- 3) 石田、小林、趙、則武：F R P 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）
- 4) 魚本、西村、加藤：A E 計測による F R P 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）
- 5) 魚本、西村：A E 計測による F R P 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）