

報告

[1179] 格子状繊維強化複合材料の引張・圧縮特性

正会員 ○小李克巳 (福井大学工学部)

藤崎忠志 (清水建設㈱技術本部)

林 英樹 (福井大学大学院)

1. 序

本報告で対象とする繊維強化複合材料は、連続繊維を樹脂に含浸させながら、縦・横交互に積層し、平面あるいは立体の格子状に成形したものの(NFM)である。弾性的挙動しか示さない繊維でも、破断伸びの異なる 2種類の繊維をハイブリッドして用いれば、鉄筋の降伏に似た現象も示すようになる[1]。しかし、各繊維が歪レベルを異にして、順次破断していくことを前提としており、鋼材のような均質材料の降伏とは根本的に異なっている。そこで、NFMを構成する一部の繊維が破断を開始していくことが、繰返し応力度・歪度関係にどのような影響を及ぼすかも興味のあるところである。本報告は、ガラス繊維(GF)と炭素繊維(CF)を組合せた場合のハイブリッド型 GC-NFMの引張・圧縮繰返し応力度・歪度関係を検討することを目的として、GFあるいはCFの単一種類の繊維で構成されるG-NFMおよびC-NFMの引張・圧縮特性からはじめ、GC-NFMの引張・圧縮繰返し特性について実験を行った結果について述べるものである。

2. 試験方法

一般に連続繊維を一方向に束ね、樹脂等をマトリックスとして成形した材料の引張試験は、両端を補強して鉄筋の引張試験と同様に行い、単繊維あるいは繊維束の強度との関係で評価されることが多い。圧縮側においても同様の評価を行いたいが、単繊維あるいは繊維束の圧縮強度を求める方法が確立されているとは言い難く、単繊維1本の圧縮強度試験法の提案が試みられている段階であり、しかも確定的に強度が求められている段階にはない。そこで、現段階では、成形品としての NFMの圧縮試験を行い、引張側特性との比較でその特性を把握する以外にないと思われる。となれば、その試験方法・供試体は引張試験法と同様であるほうが望ましい。また、NFMを直接圧縮するには、偏心、加圧面、座屈などの問題があり、実際に使用される状態に近い形、例えば、コンクリートに埋込んだ状態で行わざるを得ないであろう。

試験体配筋を図-1に示す。使用した繊維の特性を表-1に示す。径(繊維束本数)と繊維体積含有率(Vf)をパラメータとした。Vfは34.3%~54.2%の範囲にあったが、結果的にデータのばらつきが大きくVfの影響が定量的に把握できなかった。

表-1 使用した繊維の特性

繊維名	密度( $\rho$ ) g/cm	テックス g/1000m	引張強さ kg/mm <sup>2</sup>	引張弾性率 kg/mm <sup>2</sup>	破断伸び %
E-ガラス	2.54	2220	148	7400	2.0
高強度炭素	1.77	810	327	24000	1.4

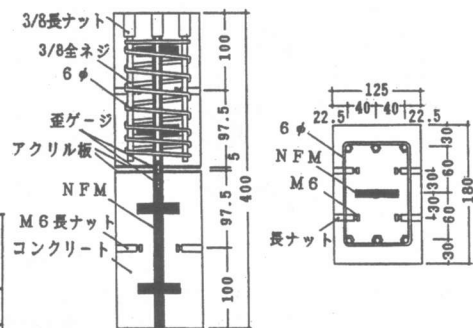


図-1 試験体配筋図

NFMが格子状であることより、コンクリート中に埋込んで直交筋を定着に利用し、コンクリートを引張・圧縮力を加えるためのつかみ部分とした。試験体中央部分には、幅 5mm のスリットを設け、NFMにのみ荷重が加わるようにし、さらにスリット部を含むNFMの1格子間隔内の付着をなくすことにより、一様な引張・圧縮歪状態となるようにした。

試験体は上下面の平行度を確保するため鋼製型枠を用いて製作し、球面支承を介さず直接試験機に固定し、アクチュエータにより変位制御で加力した。歪測定は試験体スリット部のNFMに歪ゲージを貼付してを行った。GC-NFMで一部の繊維の破断が始ると、歪ゲージは追従できなくなる。また、仮に追従できたとしても歪としての評価には疑問も残る。そこで、繰返し载荷を行った試験体においては、交点上に標点となるポイントを埋込み、外部からキャンチレバー型の変位計の先端を押しあてて、交点間の伸縮を測定し平均歪として評価することとした。

### 3. G-NFMの引張・圧縮特性

G-NFM を圧縮すると、圧縮破壊時まで、荷重と歪の関係は完全に線形関係を保ち、圧縮加力の途中で破断音と同時に急激な耐力低下を生じ、その後、引張りに転じると、もはや全く引張力を負担できず、圧縮破壊で完全にちぎれた状態となった。写真-1は1000倍に拡大した圧縮破壊面である。GF間に隙間無く十分に樹脂がつまり、単繊維の太さに比べて、問題となりそうな空隙は生じていないことが分かる。

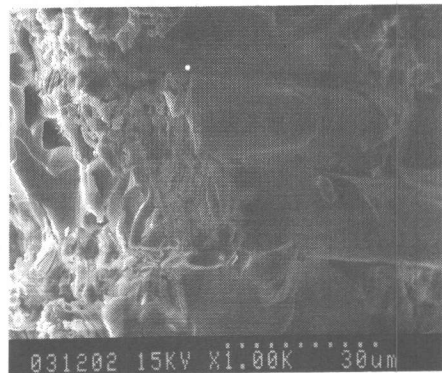


写真-1 G-NFM の圧縮破壊面

図-2 に、径(繊維束本数)と引張および圧縮強度との関係を示す。図中の引張強度のうち、△印はインストロン万能試験機を用いた鉄筋と同様の引張試験方法によるものである。本実験による引張強度は、インストロン万能試験機による引張強度より常に小さく、繊維束本数が増えるに従って、その差が大きくなり、引張試験方法による差が見られる。引張試験方法による差については、その理由は不明確である。NFM は数千~万の単位の単繊維からなる繊維束がさらに何本か束ねられてマトリックスで固められているため、強度の弱いものあるいは初期張力の大きいものから順に破断がおこる。従って、理論的には引張試験長さを大きくとったほうが最大強度は小さくなるはずであるが、コンクリート中に埋込まれ、ひびわ

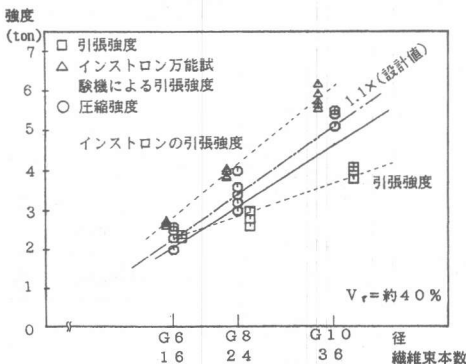


図-2 G-NFM の引張および圧縮強度

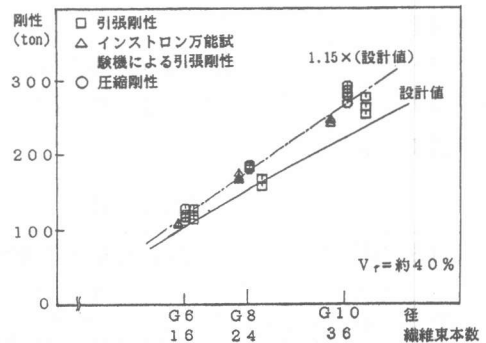


図-3 G-NFM の引張および圧縮剛性

れに対応するように、引張試験長さが短くなった場合には、破断箇所が一箇所に集中し、単繊維が各個撃破的に破断していくことも考えられる。

図-2 中の実線は1本の繊維束の引張強度を繊維束本数倍したもの(設計値と呼ぶ)である。引張強度は繊維束本数に比例はするが繊維束本数が多くなるほど設計値から離れる。これは、繊維が多くなるほど1本1本の繊維に均等な力がかかりにくくなり、繊維の引張り破断が同時に起こらなくなるためと考えられる。圧縮強度は、設計値に比べ10%ほど大きい。

図-3 は径(繊維束本数)と引張および圧縮剛性との関係である。図中の実線は、1本の繊維束の引張剛性を繊維束本数倍したもの(設計値と呼ぶ)である。引張剛性はほぼ設計値に一致する。圧縮剛性は繊維束本数には比例するが、設計値に比べると15%ほど大きい。

#### 4. C-NFMの引張・圧縮特性

G-NFMと同様の状況で破壊する。写真-2 は1000倍に拡大したC-NFMの圧縮破壊面である。樹脂で満たされてない空隙が観察され、細かく破壊されたCFが見られる。繊維が圧縮・せん断されたというよりも、まわりに補剛となる樹脂がないために、曲げ座屈をおこしたように思われ、後に述べるように、圧縮強度が引張強度に比べて小さくなる一因になるとも考えられる。

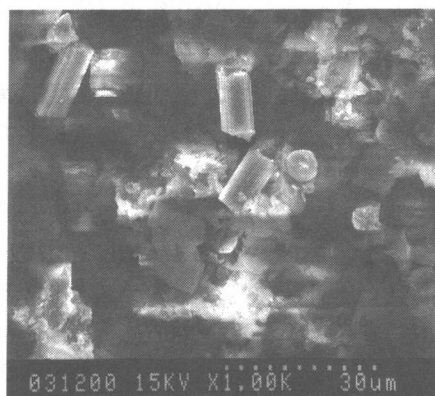


写真-2 C-NFMの圧縮破壊面

図-4 に径(繊維束本数)と引張および圧縮強度との関係を示す。図中の引張強度のなかで、

口印は、インストロン万能試験機によるものであるが、G-NFMの場合と異なり、試験方法の違いによる差は殆ど見られない。図中の実線は引張強度設計値である。引張強度は繊維束本数に比例はするが、G-NFMと同様、繊維束本数が多くなるほど設計値から離れる。一方、圧縮強度は設計値を0.4倍した線上にあり、引張強度とは必ずしも対応しない。

CFは高強度・高弾性化のために分子配列が一方向に向けられており、圧縮力に対して一種の分子鎖の座屈(キック)がおこりやすく、単繊維の理論圧縮強度は引張強度に比べて極めて小さい。しかし、C-NFMの圧縮強度が小さい理由が、このことだけによるとは考えられない。繊維とマトリックスのマクロ的構造、すなわち、単繊維の太さ、単繊維とマトリックスとの付着性、内部

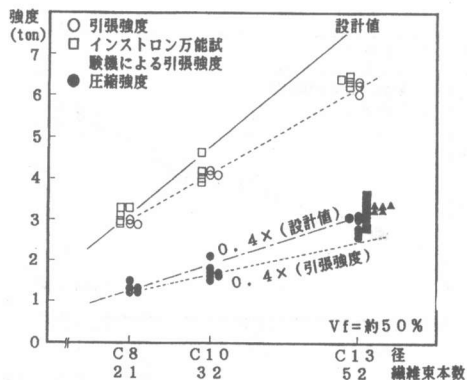


図-4 C-NFMの引張および圧縮強度

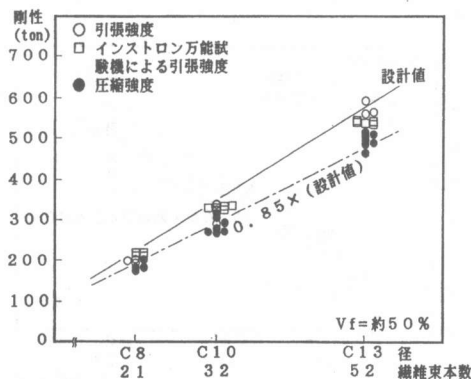


図-5 C-NFMの引張および圧縮剛性

にできる空隙、等も関係すると思われるが、現時点では、単繊維の圧縮強度を正確に求める手段もなく、引張、圧縮特性に差が生じる理由を明確にすることには限度があらうかと思われる。

図-5 は径(繊維束本数)と引張および圧縮剛性との関係である。縦軸は断面積を乗じた値である。図中の実線は設計値である。引張剛性は設計値よりわずかに小さいが、ほぼ一致するとみてもよいと思われる。圧縮剛性は引張剛性よりも常に小さいが、繊維束本数に比例しており、設計値あるいは引張剛性の 85%ほどである。

### 5. GC-NFMの引張・圧縮特性

GC-NFM の圧縮破壊状況も、C-NFM、G-NFMの圧縮破壊と同様である。圧縮載荷時には、C-NFMの結果から考えれば、CFの圧縮破壊が小さい歪レベルで先行するはずであるが、圧縮破壊時まで剛性の変化は見られず、弾性挙動を示した。

図-6 に径(繊維束本数)と引張および圧縮強度との関係を示す。横軸にGFだけの繊維束本数をとっており、図中の実線はCFを無視したガラス繊維束だけによる設計値である。引張強度はガラス繊維束だけによる設計値と比較的によく一致しており、破損点以降が正の剛性となるように材料設計を行った場合、GC-NFMの最終破断時強度(引張強度)が CFに影響されず GFの強度だけで決ることを示している。△印はインストロン万能試験機による引張強度であり、ガラス繊維束本数に比例しているが、ガラス繊維束だけによる設計値よりやや大きい。圧縮強度は、ガラス繊維束本数が多くなるほどばらつきが大きい、ガラス繊維束だけによる設計値に近い。

図-7 は、横軸に弾性係数および断面積の比で炭素繊維をガラス繊維束に置き換えた等価ガラス繊維束本数を取り、引張および圧縮剛性との関係を示したものである。図中の実線は、1本のガラス繊維束の引張剛性を等価ガラス繊維束本数倍した設計値である。引張剛性・圧縮剛性とも、設計値とよく一致している。

図-2~図-7の実験結果のばらつきに関連して、単繊維1本を見た時、分子間の結合力の差、表面あるいは内部の欠陥、太さの差、表面処理状態、等により一定強度は得られない。さらに、繊維束となった時には、各単繊維に加わる初期張力の差もあり、なおさら一定強度は得られない。繊維束の強度を確立的に求めようとする試みもあるが、NFM では繊維束がさらに何本か束ねられており、実験値にばらつきが生じるのは当然である。この他に NFM としてばらつきが生じる原因には、 $V_f$ の変動、試験片作成時の不揃い、試験条件、等があり、実験値のばらつき幅は相当に大きいと思われる。繊維そのものの強度・剛性等のばらつき幅が定量的に評価され

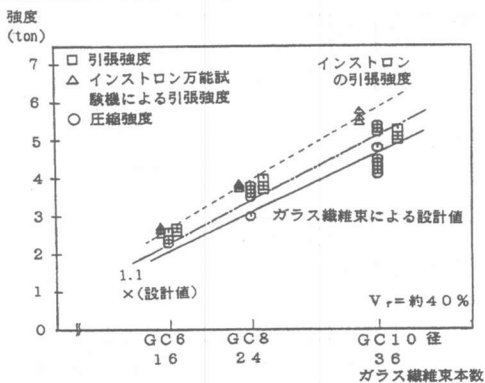


図-6 GC-NFM の引張および圧縮強度

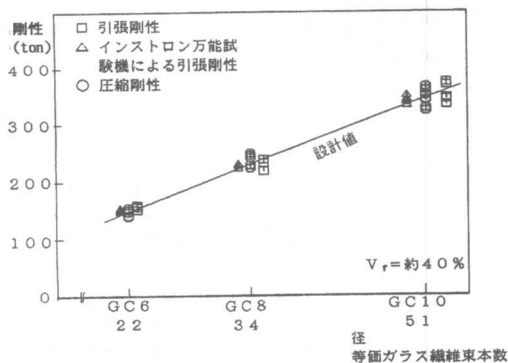


図-7 GC-NFM の引張および圧縮剛性

ていない現状で、引張、圧縮特性の実験値の差が、本来の差なのかばらつきによるものなのか、その評価は極めて難しい。

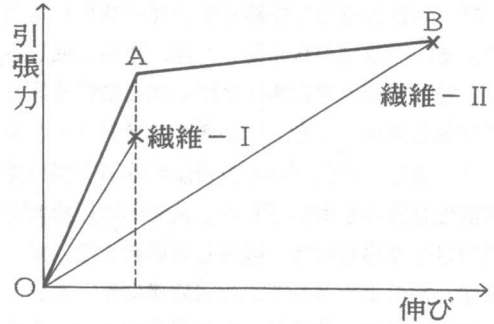


図-8 材料設計の考え方

#### 6. GC-NFMの応力度・歪度特性

一般に繊維は弾性材料である。しかし、破断伸びの異なる2種類の繊維をハイブリッドして用いると、図-8のO→A→Bのように、鉄筋の降伏に似た現象を示すことが分っている[1]。NFMは建築構造部材の構造材料としての利用が

考えられており、地震その他によって繰返し力を受ける場合もある。弾性材料としては繰返しによる強度、剛性低下だけ考えておけばよいが、伸び能力の大きく異なる2種類の繊維をハイブリッドした場合には、A→B区間が長くなりここからの除荷を含め繰返し力に対応した応力度・歪度関係の把握が必要となる。本報告で扱っているハイブリッド材は、GFとCFを組合せているため、破断伸びの差は0.6%程度しかなく、A→B区間は短い、本実験結果は破断伸びの差が大きい繊維の組合せでも、基本的には同じであろうと考えている。

繰返し荷重を行った中から、一例を図-9、図-10に示す。なお、NFMの交点間の平均歪を測定した結果は、一部の繊維が破断開始以前であれば、引張側においては歪ゲージによるものとよく一致した。圧縮側においては、交点間の有効距離を90mmと考えればほぼ対応した。

図-9は引張力を繰返し荷重した例である。弾性範囲の繰返しは引張強度、剛性に影響を及ぼさなかった。平均歪約12000 $\mu$ あたりから緩やかな曲線を描いており、文献[1]で示されているみかけの降伏点(破損点)と考えられる。最大荷重時以降、GFも順次破断を開始していくため負勾配が現れた。負勾配域では、材料としてはすでに破壊した状態であり、以後の繰返し荷重に意味はないが、一部の繊維が引張破断している状態からの除荷という意味では、図-8のA→B区間からの除荷と同じ意味を持っている。まだ破断していない繊維は弾性状態を保っているため、原点を指向するが、破断した繊維とマトリックスとの間の付着によって残留歪を生じた。再負荷すると、除荷した時とほぼ同じかやや剛性が低下した状態で荷重が上昇した。同様の荷重を圧縮側で行った場合にも、繰返しによる圧縮剛性、圧縮強度の変化は見られず、単調圧縮荷重を行ったものと同じであった。

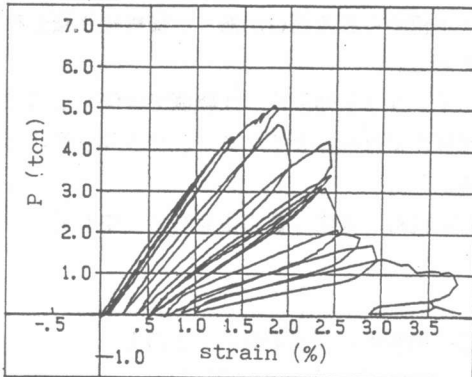


図-9 引張側歪漸増繰返し荷重の例

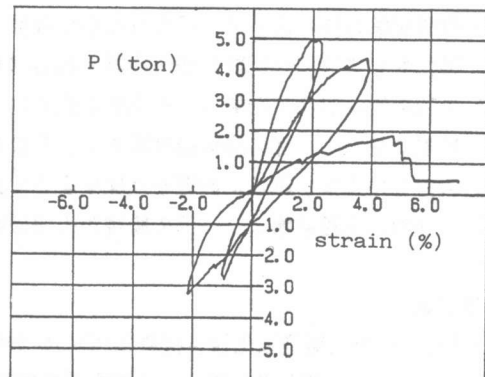


図-10 引張・圧縮交替繰返し荷重の例

図-10は引張力と圧縮力を交互に载荷した例である。引張側から除荷した後、圧縮に転じると、除荷時の引張側剛性とほぼ同じ剛性を持って圧縮力が増加した。圧縮側から除荷するとループを描き、引張側の再負荷剛性は引張側の除荷剛性に比べやや低下した。最終的に圧縮側で破壊させた場合には、繰返しの影響を受けず、ほぼ一定の歪レベルで、圧縮破壊に至った。

種々の繰返し载荷および単調载荷を行った結果に基づき、引張、圧縮繰返し応力度・歪度関係を考察すると、図-11のようにまとめられる。

引張側包絡線はCFおよびGFの破断点を結ぶ折線で表わされる。破損点までは完全に弾性で、破損点を過ぎてから除荷すると弾性的に戻り、破損点から除荷点までの歪の50%程度が残留歪となる。圧縮側の剛性は引張側の除荷剛性と同一である。圧縮側から除荷するとループを描き、引張側の再負荷剛性は引張側の除荷剛性に比べやや小さくなって包絡線に達する。圧縮側では一定歪レベルで圧縮破壊が生じる。

本実験では、CFとGFの破断伸びの差が0.6%程度であり、鉄筋の降伏棚に相当する部分が短く、そこからの除荷データが少ない。しかし、破断伸びの大きい繊維と組合せれば、棚部分の長さも大きくなり、そこから除荷した場合でも、基本的には図-11の挙動を示すと思われる。

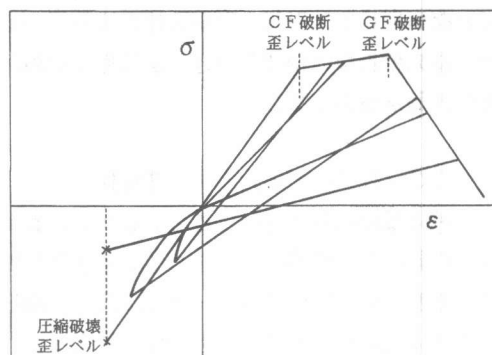


図-11 応力度・歪度関係の概略

## 7. まとめ

本実験によって得られた知見をまとめると以下ようになる。

- (1) NFM の引張・圧縮強度および剛性は繊維束本数に比例するが、1本の繊維束の引張・圧縮強度および剛性の倍数とはならない。
- (2) NFM の強度および剛性と繊維体積含有率との関係は、データのばらつきが大きく定量的に把握できなかった。
- (3) C-NFM のように圧縮強度が引張強度に比べて極端に小さくなる場合があり、繊維強化複合材料の特性は一軸引張方向と圧縮方向で異なることがある。これは、繊維のミクロ的な分子構造や繊維強化複合材料のマクロ的な構造に起因すると思われる。
- (4) 引張試験方法によって、得られる引張強度に差が認められる場合があり、繊維強化複合材料に対して適切な試験方法が検討されるべきである。
- (5) 異種繊維を組合せた場合、引張側で見られるハイブリッド効果は、圧縮側では同じようには現れない。一部の繊維が破断するとそれらは強度には関係なくなるが、マトリックスとの付着により、剛性に影響を及ぼすようである。
- (6) GC-NFMの圧縮破壊は、一部の繊維が引張破断した後も、ほぼ一定の歪レベルで生じる。

## 参考文献

- [1] 杉田 ほか：繊維強化複合材料(NFM)の建築構造への利用に関する研究 その1  
日本建築学会大会学術講演梗概集、昭和62年10月、pp.131-132