「繊維複合構造材」特集

コンクリート補強用繊維複合材料

藤 崎 忠 志

1. はじめに

近年、コンクリート構造の弱点を克服することを目的に、鋼より引張強度が高く、軽量でしかも錆びない新素材繊維をコンクリートの補強材に利用する研究開発が活発に行われている。その研究開発の方向は大きく二つに分類できる。

一つの方向が短繊維を用いた補強コンクリートに関する研究開発である。コンクリートには、引張強度やひびわれ強度が低く伸び能力が劣るという脆性材料としての弱点がある。コンクリート中に短繊維を一樣に分散させることによりこれらの弱点を克服し、コンクリート部材の軽量化、高耐久性を図っている。使用繊維としては、金属繊維、有機繊維、ガラス繊維や炭素繊維などがある。短繊維補強コンクリートは、主に建物のカーテンウォールに利用されている。なお、短繊維補強コンクリートに関しては、「コンクリート工学」の1977年3月号¹⁾などに詳しく解説されている。

もう一つの方向が鉄筋やPC鋼材の代わりに連続繊維で補強したコンクリートに関する研究開発である。建築構造の一つである鉄筋コンクリート造には、鉄筋が錆びるという弱点がある。鉄筋が錆びる原因には、ひびわれから浸透した雨水に溶け込んだ大気中の炭酸ガス、コンクリートの骨材として用いられる海砂中の残留塩分などの作用が挙げられる。連続繊維を補強筋として使用することにより、コンクリート構造物の補強筋の発錆に伴う劣化を防止し、その構造物の耐久性を向上させることを主目的としている。使用繊維としては、有機繊維、ガラス繊維や炭素繊維などがあり、補強筋の形態としては、一次元棒状、二次元、三次元格子状や三次元立体織物状などがある。これらは、主に有機系の樹脂を含浸させた

繊維複合材料であり、無機系の特殊セメントをマトリックスとしているものもある。なお、これらに関しては、「コンクリート工学」の1991年11月号²⁾などに詳しく紹介されている。

本稿で紹介する新しいコンクリート補強用繊維複合材料は後者の立場で開発されたものであり、高性能連続繊維を耐酸、耐アルカリなどの耐薬品性に優れた樹脂に含浸させながらピンワイディング法によって縦横交互に積層し、格子状に成形した繊維強化プラスチックである（以下、格子状 FRP 筋と呼ぶ）³⁾。図1に成形例として平面状及び曲面状に一体成形された格子状 FRP 筋を示す。

2. 格子状 FRP 筋の特徴

表1に格子状 FRP 筋の特徴を整理して示す。格子状 FRP 筋の開発目的にはコンクリート構造物の耐久性の向上の他に、次のようなものが挙げられる。

図1 格子状 FRP 筋

Fiber Composite Material for Reinforcing Concrete

筆者紹介 TADASHI FUJISAKI

New Construction Material Department, Technology Division, Shimizu Corporation

清水建設株式会社 技術開発本部 建設新素材開発グループ

筆者は建築構造、建設新素材の研究開発に取組んでおられる。

本稿では、表題のうち特に格子状FRP 筋の特徴、材料特性および適用例を解説していただいた。

表1 格子状FRP筋の特徴

錆びない	塩害・薬品の害を受けるような苛酷な条件下で使用されるコンクリート構造物の耐久性向上
耐酸・耐アルカリなど優れた耐薬品性	
非磁性	非磁性を要求される構造物に適用可能
連続繊維を数軸に配置	繊維の有効利用
格子交差部の強度確保	コンクリートとの付着・定着性確保 重ね継手が可能
軽量 (比重=1.3~1.7)	現場での生産性向上
複雑な形状が成形可能	

表2 格子状FRP筋の物性

タイプ	補強繊維	樹脂	比重	引張強度 (kg/mm ²)	引張弾性率 (kg/mm ²)
G	ガラス	ビニルエステル	1.70	60	3,000
H	ガラス 炭素	ビニルエステル	1.65	53	3,700
C	炭素	ビニルエステル	1.42	120	10,000
A	アラミド	ビニルエステル	1.28	130	5,700

(a)高強度な連続繊維を適切に配置することにより、高価な繊維を有効に使用する。

(b)軽量な繊維複合材料で複雑な形状の補強筋を工場生産することにより、施工時の作業性を向上させ、工期の短縮・工費の削減を図る。

(c)非磁性であることを積極的に利用し、電子機器施設や磁気誘導交通システムなど非磁性を要求されるコンクリート構造物の補強筋として使用する。

(d)繊維を縦横交互に積層し、樹脂の接着強度と繊維同志の拘束効果を併せた充分な交差部強度を確保することにより、コンクリートとFRP筋の付着・定着をとる。また、これにより、各補強筋間の継手として、単純な重ね継手を可能とする⁴⁾。

3. 格子状FRP筋の材料特性

3.1 格子状FRP筋の引張特性

表2に示すように、格子状FRP筋の素材には、補強繊維としてガラス繊維(G)、炭素繊維(C)やアラミド繊維(A)を、樹脂として熱硬化性のビニルエステル

を使用している。繊維体積含有率は約40%である。Hタイプは補強繊維にガラス繊維と炭素繊維をハイブリッドしたものであり、こうすることにより、Gタイプより引張弾性率の高いものが成形できる。

コンクリートの補強筋として格子状FRP筋を使用するには、まずその引張特性を明確にする必要がある。図2に格子状FRP筋の応力-ひずみ曲線を示す。Gタイプ、CタイプやAタイプのものは破断まではほぼ弾性挙動を示すが、Hタイプでは破断伸びがガラス繊維より小さい炭素繊維が先に破断するため、鉄筋における降状のように応力-ひずみ曲線が折れ曲がる現象(以下、破損と呼ぶ)が生じている。図3に引張耐力(Gタイプ、Cタイプでは破断時、Hタイプでは破損時)の推定値と材料試験値の関係を示す。推定値は樹脂の項を無視して「FRPの複合則」により算出したものである。引張耐力についてはほぼ安全側に推定できることがわかる。

3.2 格子状FRP筋の付着・定着特性

格子状FRP筋では主に直交筋により断続的にコンクリートとの付着・定着を確保する機構になっている。そ

図2 格子状FRP筋の応力-ひずみ曲線

図3 引張耐力の推定値と試験値の関係

図4 引張耐力と引き抜き最大耐力の関係

図5 格子状FRP筋の温泉雰囲気中での耐久性

ここで、コンクリート中に埋込んだ格子状FRP筋の引抜き試験を行い、その付着・定着性能を検討した⁵⁾。図4に引張耐力と引抜き試験で最大耐力の関係を示す。軸筋破断の場合は格子状FRP筋の(直交筋一つによる)付着・定着力が軸筋の引張強度以上であることを表しており、直交筋破断の場合でも軸筋の引張耐力の80%以上あることがわかる。

3.3 格子状FRP筋の耐久性

格子状FRP筋の耐久性については、JISに基づいた応力緩和試験など数多くの試験を実施しているが、ここでは、温泉雰囲気中での耐久性試験結果について紹介する⁶⁾。温泉場での気中及び平均40℃、pH1.7の地中に長期暴露した試験体の所定時間経過後の引張強度保持率を図5に示す。鋼材は地中では殆ど溶失し、気中では4φが約50%、D10が約90%の強度保持率であるが、格子状FRP筋は地中でG4が約60%、G10が約70%、気中でG4が約90%、G10が約100%の強度保持率である。温泉雰囲気中での格子状FRP筋の高耐久性が実証され、このような場所でのコンクリート構造物の補強筋としての使用可能性が示された。なお、本試験はGタイプで行ったが、耐久性は使用している樹脂によるところが大きいので、他のタイプに関しても同様の結果となると考えられる。

3.4 格子状FRP筋の耐熱特性

火災時など高温を受ける際の格子状FRP筋の耐熱特性を検討するために、加熱中および自然冷却後の引張強度保持率をHタイプについて検討した⁷⁾。加熱中の引張試験は試験温度到達10分後から約10分かけて加力し、自然冷却後の引張試験は試験温度到達20分後から冷却を開始し、常温に達した後に加力した。加熱せずに常温で引張ったものの耐力を100とした結果を図6に示す。加熱中では徐々に耐力が低下し、100～250℃で約60%の耐力となることがわかる。また、自然冷却後では耐力が100%に復帰していることがわかる。従って、加熱中の

図6 格子状FRP筋の耐熱特性

図7 地磁気観測施設の基礎の配筋

図8 カーテンウォールの配筋

耐力低下を考慮すれば、格子状FRP筋はコンクリート構造物の補強筋に十分使用可能であるといえる。

4. コンクリート構造物の構造特性

格子状FRP筋で補強されたコンクリート構造物の構造特性を把握するために、耐震壁や柱・梁の補強筋への適用の検討、床スラブの補強筋への適用の検討、カーテンウォールの補強筋への適用の検討やプレストレストコンクリート用緊張材への適用の検討などの研究開発が、現在積極的に実施されている。その結果詳細は、各年度

発行の「日本建築学会大会学術講演梗概集」、「コンクリート工学年次論文報告集」や「土木学会年次学術講演会講演概要集」などを参照されたい。

5. コンクリート構造物への適用例

5.1 土木構造への適用

格子状FRP筋の実構造物への適用は1986年から開始された。最初はGタイプの細径のものがその軽量性や吹付け面へのなじみやすさから、トンネル構造物の吹付けコンクリート用補強網として使用された。さらに、これらの細径のものは、LPG地下式貯槽の山留め吹付けコンクリートやのり面(斜面)の吹付けコンクリートの補強網などにも使用されている。また、太径のものは、トンネルライニングの補強筋として使用されたものを皮切りに、その耐久性が着目され、栈橋防衝版などの沿岸構造物の補強筋に適用されている⁸⁾。

5.2 非磁性の要求されるコンクリート構造への適用

格子状FRP筋の特徴のひとつとして、非磁性であることがあげられる。建築分野への適用はこの特徴をいかにすることから始まった。その一例がGタイプの格子状FRP筋で補強したガラス繊維補強コンクリート製のフリーアクセスフロアである。格子状FRP筋で補強することにより、フリーアクセスフロアの非磁性、力学性能や諸寸法を保ちながら、通常ガラス繊維補強コンクリート製のフリーアクセスフロアでは必ずしも充分ではない耐衝撃性・破壊靱性を向上させることができた⁹⁾。また、もう一つの例が伊豆大島の地磁気観測施設3棟の布基礎および土間コンクリートなどの補強筋にGタイプの格子状FRP筋を使用した例である¹⁰⁾。格子状FRP筋の配筋状況を図7に示す。この場合、格子状FRP筋同志の結束にも非磁性材であるビニル紐が用いられた。

5.3 コンクリート製カーテンウォールへの適用

海風の影響を受けやすいビルでは、塩害によりカーテンウォールの補強筋が腐食する恐れがある。格子状FRP筋は耐食性に優れ、軽量かつ一体成形が可能であることから、プレキャストコンクリート製カーテンウォールの補強筋に使用することにより、カーテンウォールの耐久性の向上、プレキャストコンクリート工場での生産性の向上がはかれる。上記の考えに基づき、日本で初めて横浜市内の事務所ビルで、FRP筋をカーテンウォールの補強筋に採用した。採用に際しては、建設大臣の認定を受け法的規制をクリアさせているが、その認定に先立っては、格子状FRP筋で補強したカーテンウォールが鉄筋で補強したもの以上の曲げ耐力を有していること、十分な耐火性能を有していることを実験で実証し、日本建築センターの防災性能評定を受けている⁷⁾。図8

図9 南極昭和基地管理棟基礎ばりの配筋

に格子状 FRP 筋の配筋状況を示す。補強筋にはひびわれ幅を制御するため、G タイプより剛性の高い H タイプを使用した。

5.4 極地のコンクリート構造への適用

南極で各種建築物の整備は夏場に越冬隊員の手で実施されている。従って、建築工事に関しては未熟な者が短期間で必要施設を建設することが要求されている。そこで、南極昭和基地の管理棟建設に際し、軽量の格子状 FRP 筋を予め必要寸法に成形して南極に輸送することにより、現地での運搬や施工作業を軽減させた。図9に格子状 FRP 筋の配筋状況を示す。C タイプの格子状 FRP 筋が2階コンクリートスラブ下端鉄筋以外のコンクリートの補強筋に用いられている¹¹⁾。

6. あとがき

以上、新しいコンクリート補強用繊維複合材料—格子状 FRP 筋—について、その特徴、材料特性および適用例を紹介した。1986年に初めて実構造物に格子状 FRP 筋が適用されて以来、約6年半の年月が経過している。ガラス繊維からなるものの適用から、ガラス繊維と炭素

繊維からなるものや炭素繊維からなるものの適用へと、在来の材料と共存しながらも徐々にではあるが格子状 FRP 筋の適用範囲が広がってきている。また、現在では、格子状 FRP 筋を地盤補強に適する様に改良した FRP 系ジオテキスタイルが開発され、ガラス繊維と炭素繊維からなるものの破壊予知機能（インテリジェント機能）の研究にも着手している。

参考文献

- 1) 特集＝繊維補強コンクリート，コンクリート工学，Vol.15，No.3（1977）。
- 2) 特集＊新素材—連続繊維によるコンクリートの補強—，コンクリート工学，Vol.29，No.11（1991）。
- 3) 平賀，強化プラスチック，Vol.32，No.10（1986），P.23
- 4) 藤崎，杉田，中辻，日本建築学会大会学術講演梗概集，北海道（1986），P.611
- 5) 松崎，中野，中沢，藤崎，日本建築学会大会学術講演梗概集，近畿（1987），P.135
- 6) 中辻，中野，杉田，藤崎，日本建築学会大会学術講演梗概集，中国（1990），P.961
- 7) 杉田，中辻，藤崎，日本建築学会北陸支部研究報告集，（1990），P.1
- 8) 関島，池田，関根，土木施工，31巻，9号（1990），P.29
- 9) 桜井，加藤，旭硝子研究報告，Vol.38，No.1（1987），P.155
- 10) 中辻，工業材料，第38巻，第6号（1990），P.76
- 11) 平居，コンクリート工学，Vol.29，No.11（1991），P.64

（平成4年10月14日受理）

正会員・学生会員会費払込みのお願い

会費をお払込み願う時期になりました。お手数でも事務局から送付いたします振替用紙をご利用のうえお払込みくださいますようお願いいたします。（銀行振込みの場合には会員番号・氏名を必ずご連絡下さい。）

領収書の発行を省略させていただいております。郵便局でご送金の際発行される振込票を各自保管下さいますように。なお当学会の領収証が必要の方には、ご連絡いただければ従来通り発行致します。