

V-18

連続繊維で補強したコンクリートはりの力学性状について

—現状と今後の問題点—

北海道大学工学部 正 員 古 内 仁

" 正 員 角 田 与史雄

北海道大学大学院 学生員 佐 藤 靖 彦

1. まえがき

近年、コンクリート用補強材として繊維強化プラスチック（FRP）による棒材（ロッド）の開発が急速に発展してきた。FRPロッドは、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維およびビニロン繊維などの連続繊維をエポキシ樹脂をマトリックスとして形成されたもので、その形状は付着性を発現させるため、格子状にしたもの、組紐状またはより線状に編んだもの、表面に繊維を巻き付けたものなどがある。その特性として、軽量かつ高強度で、耐食性、非磁性を有していることから、設計面あるいは施工面においても魅力ある材料である。最近において、トンネル覆工やPC歩道橋等いくつかの使用例があるが、将来は、これらの特性を生かせる海洋構造物やリニアモーター施設、また既存RC構造物の補修・補強等において鉄筋等に代わる補強材として期待することができる。

現在、このFRPロッドに対しては、RC構造およびPC構造の両者において曲げ性状およびせん断性状の研究報告がいくつかなされている。そこで、これらの報告を参考にFRPロッドの補強によるコンクリートはり（以下、FRP筋コンクリートはり）の基本的な力学性状を、従来の鉄筋コンクリートはりと比較を行い、計算例を示して検討を行ってみることにした。

2. FRPロッドの特徴

検討を行うFRPロッドとして、最も代表的な炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維の3種類を取りあげることにした。炭素繊維は、原料にレーヨン、石油（または石炭ピッチ）、ポリアクリルニトリル（PAN）の3つがあり、それぞれ独自の性質がある。これらの使用により、高弾性率から低弾性率までの汎用性のあるロッドを作製することが可能である。アラミド繊維は、前芳香族ポリアミド繊維として開発されたもので他の有機合成繊維に比べると、引張強度、弾性率がともに大きい。また、新たに分子構造中にエーテル結合を持ったものも開発されており、耐化学薬品性、耐湿性、耐熱性にも優れている。ガラス繊維は、古くからセメント系複合材料の補強用として使われている。FRPロッドに広く用いられているE-ガラス繊維（珪酸ガラス系）およびA-ガラス繊維（アルカリ金属系酸化物含有）は、密度、引張強度、弾性率についてそれらとほとんど差がないが、耐アルカリ性が非常に大きい。

また、これらのFRPロッドは、繊維含有率の大きさによってヤング率を変化させたり、他繊維との併用によって、設計において基準となる降伏点を擬似的につくり出すことも可能である。一般的に、繊維を単独で用いて作製したロッドには、図-1に示すような応力-ひずみ関係を有している。図中には、参考のために鉄筋も示したが、FRPの力学的特性として鉄筋と比べると、引張強度が大きいこと、降伏点を有していないこと、破断に至るまで変形がほとんど直線的であること等があげられる。

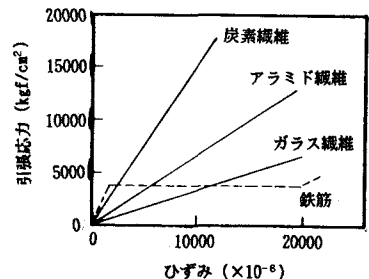


図-1 各種ロッドの特性

3. 曲げモーメントに対する挙動

FRP筋コンクリートはりの曲げ理論は、従来の鉄筋コンクリートはりの理論が適用できると報告されている。小沢ら¹⁾は、FRPで補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状について実験的研究を行い、曲げモーメントに対して次のことを示している。単純ばり対称2点荷重における荷重とひずみの関係は、曲げひびわれ発生前は全断面有効と仮定し

た弾性計算値とほぼ等しく、曲げひびわれ発生後は引張側コンクリートを無視して求めた弾性計算値に等しい。

ここで、例として図-2に示すようなはりを用いて上記の理論による計算を行ってみる。主筋にはFRP筋を用いた場合と、鉄筋を用いた場合についての比較を行うことにし、また主筋の配置について

は、鉄筋の降伏荷重とFRP筋の引張破断荷重ができるだけ同一となるように径と本数を決定した。計算に用いる材料の詳細は、表-1に示すとおりである。

図-3は、はりに作用する荷重と主筋のひずみの関係を示したものである。ひびわれ発生前の計算値（全断面有効）は差が少ないので省略し、ひびわれ発生後の計算値（引張側コンクリート断面の応力無視）についてののみ示した。いずれのFRP筋も鉄筋に比べてひずみの増加が非常に大きい。この例では、破壊時において鉄筋の7倍から11倍程度に達している。これについては、FRP筋の弾性係数が鉄筋に比べて小さいため、曲げひびわれ発生後に中立軸がかなり上昇し、曲げ剛性の低下が大きいためであるようだ。

また、主筋ひずみと曲げひびわれ幅の関係は辻ら²⁾によれば、鉄筋と同様に両者に比例関係が認められ、その直線の傾きはほぼ等しいか若干大きいとされている。よって、ひびわれ幅の算定にあたっては、ひびわれ間隔とひずみの積で表すことが可能であり、土木学会コンクリート標準示方書³⁾の算定式を用いることができるようだ。現象面からみると、最大ひびわれ間隔は、鉄筋を主筋とした場合に比べて2倍程度⁴⁾、またスターラップが存在する場合はその間隔の2倍程度になる。^{1) 4)}

同時にはりにおけるスパン中央のたわみを求めると図-4に示すような関係が得られた。計算において、ひびわれ発生前は全断面有効の断面2次モーメントを用い、ひびわれ発生後は示方書7.4.3項による換算断面2次モーメントを用いた。主筋のひずみと同様に、ひびわれ発生後は、鉄筋を用いた場合に比べるといずれのFRPについてもたわみの増加が非常に大きく、破壊時には鉄筋の3倍程度以上となる。ただし、実際には斜ひびわれの発生によってせん断変形も加わるので、たわみはさらに大きくなるよ

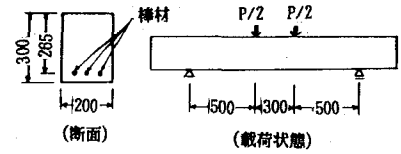


図-2 計算に用いたはり

表-1 使用材料の特性

主筋の特性						コンクリートの特性 (仮定)			
材 質	降伏強度 kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²	ヤング率 kgf/cm ²	本数×径 mm	断面積 cm ²	圧縮強度 kgf/cm ²	ヤング率 kgf/cm ²	鉄筋ひずみ	引張限界 ひずみ
炭素繊維	—	17700	1.5×10^5	3×6	0.849	300	2.3×10^5	0.0035	0.0002
アラミド繊維	—	12800	6.8×10^5	5×6	1.250				
ガラス繊維	—	6600	3.3×10^5	3×10	2.140				
鉄筋	3900	—	2.1×10^5	2×16	3.972				

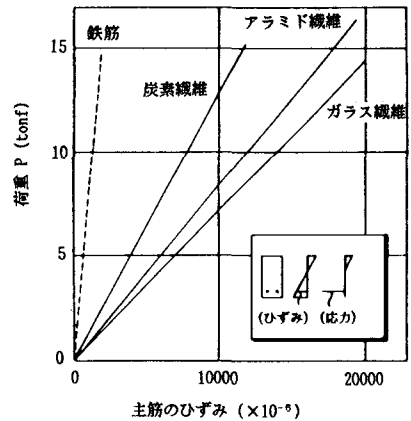


図-3 主筋のひずみと荷重の関係

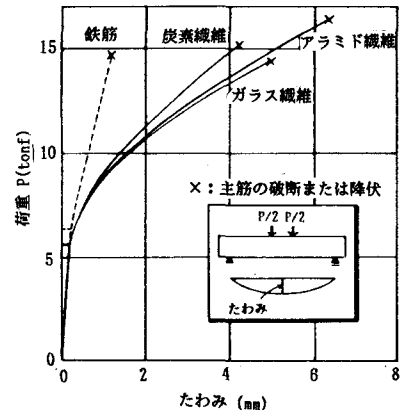


図-4 はりのたわみと荷重の関係

うだ。¹⁾

ここで、破壊時における靱性評価をするため、ひびわれ後の応力に対する一般理論を用いて計算を行ってみた。コンクリートの応力-ひずみ曲線は、図-5に示す関係を用い、最大圧縮強度に対応するひずみは、0.22%と仮定した。この結果、曲げモーメントとコンクリートの圧縮縁ひずみの関係は、図-6に示すような曲線で得られる。鉄筋コンクリートはりでは、降伏による引張型破壊の後に頂点を向かえてさらにひずみの増加が続いている。それに比べて、FRPロッドを用いた場合はいずれのはりにおいても、同一モーメントで圧縮縁ひずみは大きく、主筋の破断によって破壊が生ずる。この例においては、引張補強筋比 p （主筋量と有効断面の比）は、鉄筋の0.79%に比べて、炭素、アラミド、ガラス繊維の各種ロッドは、それぞれ0.16%、0.24%、0.40%とかなり小さい。ここでアラミド繊維を主筋とした場合をとりあげて、 p を変化させてその変形をとらえてみた。その曲線は図-7に示すとおりで、 p を増加させることによってひずみの増加がより曲線的となってくる。また、 p がある値を越えると、はりには圧縮型破壊となり頂点を越えてから破断することになり、ある程度靱性を高めることはできる。

以上の曲げ挙動に対する計算の結果から問題点となることは、構造物の変形が大きくなること、それによって生じるたわみおよび曲げひびわれ幅の増大で美観を損ねること、また、設計面においては、地震時等の過大荷重に対して脆性的な破壊挙動を如何に防ぐかが挙げられる。

4. せん断力に対する挙動

寺田ら⁴⁾は、主筋に鉄筋とFRP筋を用いたはりのせん断耐力について比較検討を行っている。せん断補強筋以外の受け持つせん断耐力は、同一断面の鉄筋を主筋としたはりに比べて、小さくなるとされている。これは、中立軸の位置が高くなり、ひびわれ幅も大きくなるので、コンクリートの負担するせん断力、骨材のかみ合わせ、主筋のダウエル作用が小さくなるためであるとされている。

また、辻ら²⁾は、せん断耐力算定式において、耐力の低下分をFRP筋断面積にヤング率比（FRP筋/鉄筋）を乗じた換算断面を用いて計算を行っている。はりの耐力低下が、ヤング率だけに依存するとは限らないが、重要な因子となっていることは確かなようである。

ここでは、この方法を用いて主筋に鉄筋を用いた場合とFRP筋を用いた場合のせん断耐力を算定してみることとした。なお、耐力算定にあたっては、はりに対しては示方書の算定式の元となった二羽⁵⁾らの式、ディープビームに対しては二羽⁶⁾の式を用いた。図-8は、前述のはりでせん断スパン比を変化させて耐力との関係を算定したものである。これらのはりは、主筋の引張耐力を近似させているため、各々の断面の大きさに相違がある。そのため、せん断耐力がヤング率の影響だけでなく主筋の断面積を乗じた引張靱性と相関がある。計算の結果、鉄筋を用いた場合に比べてFRP筋を用いた場合の低下率はディープビームよ

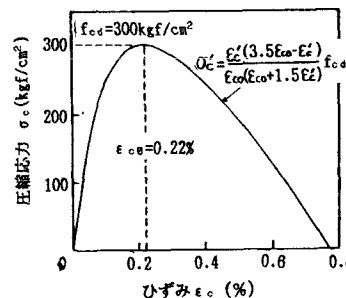


図-5 コンクリートの応力-ひずみ関係

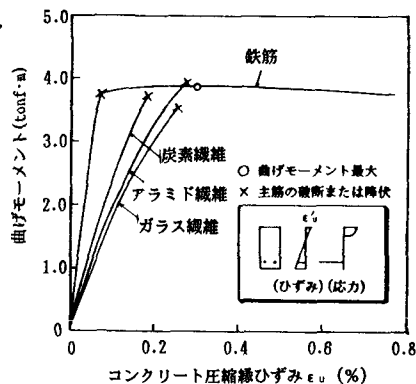


図-6 各種ロッドの補強によるはりの圧縮縁ひずみと曲げモーメントの関係

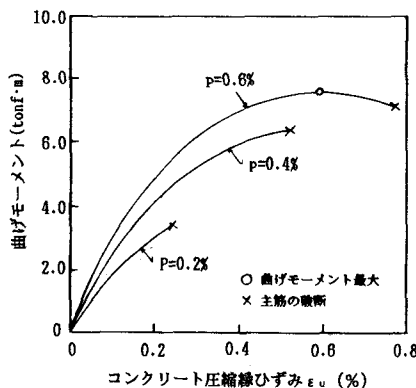


図-7 アラミド繊維ロッドはりにおける圧縮縁ひずみと曲げモーメントの関係

りもはりの方が大きい傾向となった。

一方、FRPロッドをせん断補強（スターラップ）として用いた場合、その補強効果は不十分であるとされている。¹⁾³⁾ 丸山ら⁷⁾は、FRPロッドをせん断補強として用いた場合を想定して斜引張特性を実験的に調べている。その結果、FRPロッドの強度は交差する斜ひびわれの角度に大きく影響されていることを明かにし、強度低下の割合を角度に対しての1次関数として表している。

いずれの場合においても、FRPロッドは鉄筋と比較するとせん断力に対しては有利ではないようである。FRPロッドは軸方向に繊維を配置していること、結合材との複合材料であることなどから、脆性的な材料である。そのため、ひびわれの開口部の増大や相対的なずれによって生じるロッドの急激的な変形が問題となり、実用化のためには2次応力の挙動を早急に解明しなければならないと思われる。また、せん断耐力式についても設計に生かせるよう今後より多くの研究が必要である。

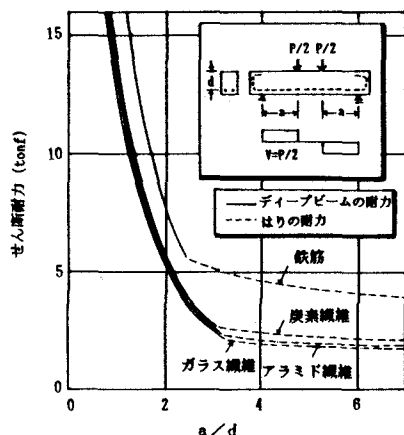


図-8 各種ロッドの補強によるせん断耐力

5. まとめ

上記の計算から明らかにされた結果を以下に示す。

- 1) FRPロッドで補強されたコンクリートはりの曲げ理論は、従来の鉄筋コンクリートはりの理論が適用できると仮定すれば、次のことが言える。
- 2) ひびわれ後のFRPロッドの応力は、鉄筋の場合に比べるとかなり大きくなる。
- 3) ひびわれ後のはりのたわみは、鉄筋の補強による場合に比較してかなり大きくなる。
- 4) 破壊時において、適切な引張補強筋比を設定すれば圧縮型破壊の後に主筋の破断が生じ、ある程度の靱性を得ることができる。
- 5) FRPロッドで補強されたコンクリートはりのせん断耐力は、RCはりの耐力式の主筋断面積にヤング率比（FRP/鉄筋）を乗じて算出できると仮定すれば次のことが言える。
- 6) 鉄筋補強の場合に比べると、ディープビームより通常のはりの方が耐力低下が激しい。

参考文献

- 1) 小沢、関島、岡村 『FRPで補強したコンクリートはりの曲げ疲労強度』 コンクリート工学年次論文報告集9巻2号、1987年、P.269-275
- 2) 辻、斉藤、関島、小川 『FRPで補強したコンクリートはりの曲げおよびせん断性状』 コンクリート工学年次論文報告集10巻3号、1988年、P.547-552
- 3) 『コンクリート標準示方書（設計編）』 土木学会、1986年
- 4) 寺田、鳥取、涌井、宮田 『FRPをせん断補強に用いたRCはりの破壊性状について』 コンクリート工学年次論文報告集10巻3号、1988年、P.541-546
- 5) 二羽、山田、横沢、岡村 『せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度の再評価』 土木学会論文集第372号/V-5、1986年、P.167-176
- 6) 二羽 『FEM解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式』 第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、1983年、P.119-126
- 7) 丸山、本間、岡村 『各種FRPロッドの斜め引張特性に関する実験的研究』 コンクリート工学年次論文報告集11巻1号、1988年、P.771-776