

論文

[2007] FRP ロッドにより補強したプレストレスト レジンコンクリートはりの曲げ性状

正会員 ○福沢公夫（茨城大学工学部）

正会員 沼尾達弥（茨城大学工学部）

吉本 稔（茨城大学工学部）

塚本 博（茨城大学工学部）

1. 研究の目的

レジンコンクリート（以下RECと略す）を構造部材として適用するため、鉄筋、高張力鋼あるいはガラス繊維のプラスチック収束材を、鉄筋コンクリート（以下RCと略す）の補強材として用いた研究については、いくつか報告がある^{1)~6)}。RECには、不飽和ポリエステル樹脂が用いられるため、硬化収縮が大きいという問題があり、収縮の大きいことが曲げ性状に及ぼす影響²⁾³⁾あるいは、収縮の大きいことの影響を低減するための方法³⁾についての研究が行われてきた³⁾。しかし、RECの強度を損なうことなく、収縮量を著しく低減できる低収縮タイプの樹脂が開発され、この樹脂を用いることによりRCはりの曲げひびわれ耐力は、補強材の量の多少によりあまり変化しないこと、曲げ破壊耐力は、補強材の量の増加にともない増大することが明らかにされている¹⁾⁶⁾。しかし、RC部材として利用するのでは、RECの高い引張強度を有効に使うことはできない。また、荷重による変形量を小さくするためにもプレストレストコンクリート（以下PCと略す）として用いるのがよいと思われる。しかしRECは中性であり、鋼材を補強材として用いるとひびわれが生じた場合、発錆に伴う耐力低下が起こる。そこで鋼材の代わりにプラスチック収束材を緊張材として用いることが考えられる。また、プラスチック収束材を、緊張材として用いると、そのヤング係数が小さいため、クリープによるプレストレスのロスを小さくできるという利点もある。本研究は、緊張材として炭素繊維のプラスチック収束材（以下CFRPロッドと略す）を用いるプレテンション方式のREC PCはりの曲げ性状、とくに変形性状および曲げ強さについて述べるものである。実験にあたっては、補強材としてPC鋼棒を用いる場合との比較実験およびロッドの緊張量の影響実験を行った。

表-1 試験体の種類

2. 実験方法

2.1 試験体および試験方法

実験に用いたはりは、表-1に示すように補強材として直径9.5mmのCFRPロッドと直径9.2mmのPC鋼棒を用い、その緊張応力 σ_i を補強材の引張強度 f_u の0~0.5倍の範囲で変化させた計11体のはりを製作した。はりは、図-1に示すように、幅10cm、高さ15cmであり上縁より12cmの位置に補強材を1本配置した。RECの圧縮試験、引張試験には $\phi 10 \times 20$ cmの円柱供試体を、曲げ強度試験には

緊張応力比,*	0	0.17	0.33	0.5
補強材の種類				
CFRP ロッド	2	2	2	1
PC 鋼棒	2	—	—	2

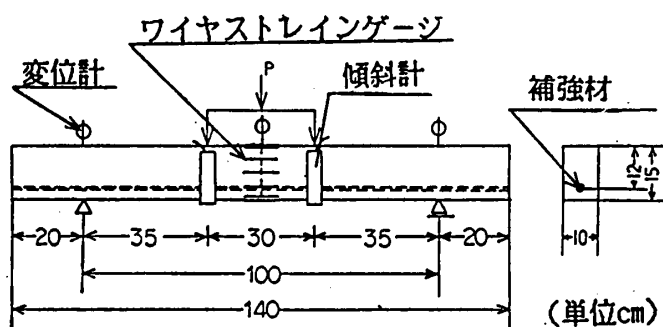
*初期緊張応力 σ_i の引張強さ f_u に対する比

図-1 はりの断面と曲げ試験方法

10×10×40cmの角柱供試体を使用した。曲げ試験は、図-1に示すように支持スパン100cm、載荷スパン30cmの4点載荷で行った。曲げ試験時には、載荷点位置に取り付けた傾斜計により曲率を、両支点および中央部に取り付けた変位計よりたわみを、また、コンクリート表面および緊張材に貼ったゲージよりひずみをそれぞれ測定した。なお、傾斜計は、ネジを切った鉄筋をあらかじめはりに埋め込んでおき、それに取り付けた。

2.2 使用材料および示方配合

本実験に用いたRECの使用材料は、低収縮タイプの不飽和ポリエステル樹脂、久慈川産の川砂利および川砂を用いた。また、充てん材として炭酸カルシウムを、触媒としてメチルエチルケトンパーオキサイドを、促進剤としてオクテン酸コバルトを用いた。RECの示方配合を表-2に示す。試験用はりとともに作製した円柱供試体および角柱供試体による強度試験結果の平均値を表-3に示す。また、荷重棒を用いて測定した、コンクリートの応力-ひずみ関係の測定例を図-2に示す。補強材の機械的性質を表-4に、応力-ひずみの関係を図-3に示す。CFRPロッドは破壊に至るまでの応力-ひずみ関係が直線的であり、PC鋼棒にみられるような降伏点がないことが特徴的である。

表-2 RECの配合

粗骨材の 最大寸法	単位量(kg/m ³)					
	樹脂	細骨材	粗骨材	炭カル	促進剤	触媒
15mm	250	1074	788	250	1.25	2.5

表-3 RECの強度試験結果

圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
856	98	170	2.27×10^5

表-4 補強材の機械的性質

補強材種別	鋼材径 (mm)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)	のび (%)
CFRP	9.5	166	1.51×10^2	1.1
PC	9.2	150	2.05×10^2	9.3

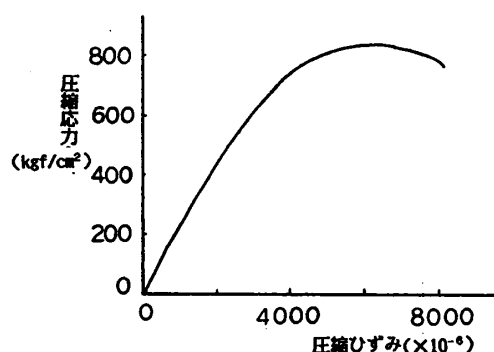


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

2.3 はりの製作方法

試験体の製作は、①CFRPロッドの緊張、②材料の練りませ、③打設、④養生、⑤脱型およびプレストレス導入の手順で行った。CFRPロッドの定着にはロッドの外側にエポキシ樹脂により鋼管を固定し、その鋼管をPC鋼より線用のくさび式定着具を用いて定着した。PC鋼棒を用いる場合の定着にはPC鋼棒転造ネジをナットにより固定した。また、CFRPロッドの表面には、RECとの付着が増すように、エポキシ樹脂を用いて0.85mmふるいを通過し、1.2mmふるいにとどまる砂をまぶした。結合材である樹脂が疎水性であるため水分の浸入によりRECの強度が低下するのを防止するため、骨材は絶乾状態となるまで乾燥させ、打設の際

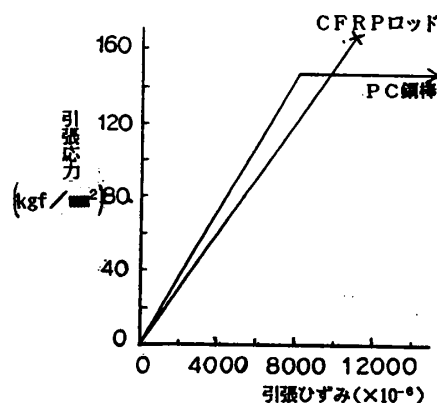


図-3 補強材の応力-ひずみ関係

も水分の浸入には十分に注意を払った。プレストレスの導入は、コンクリートの圧縮強度が600kgf/cm²以上であることを確認してから行った。その間の養生は、適宜温風を与え室内において約10日間程度とした。なお、プレストレス導入時の緊張量を、コンクリート表面および緊張具として用いたP C鋼棒にワイヤストレインゲージを貼付し測定した。導入時の補強材応力 σ_i と緊張時の補強材応力 σ_t の比の平均は、P C鋼棒の場合で0.88、CFRPロッドの場合で0.85であった。また、CFRPロッドで σ_i/f_u が0.5のはりのプレストレスは、上縁で21.0 kgf/cm²（引張）、下縁で87.0kgf/cm²（圧縮）であった。プレストレス導入後、気中に静置し、材令28日で曲げ試験を行った。

3. 実験結果

3.1 CFRPロッドとP C鋼棒の比較

CFRPロッドおよびP C鋼棒を補強材として、緊張しないでそのまま配置したRCはりとは、ロッドの引張強度の0.5倍の応力で緊張したP Cはりの、曲げモーメント-曲率関係、荷重-たわみ関係の実測値の一例を図-4および図-5に示す。図中の記号は、例えばP C-0.5-2とあるのは、補強材としてP C鋼棒を用い、緊張応力比(σ_i/f_u)を0.5とした2本目のほりを示す。なお、曲率は傾斜計より測定した角度の値から以下の式により算出した。

曲率 ϕ (rad/m) = 両載荷点での角度の和 (rad) / 載荷点間の距離 (m)

曲率、たわみに関するいずれの図からもCFRPロッドを補強材としたはりとP C鋼棒を補強材としたはりではひびわれ前まではどちらの場合も直線的な挙動をしており、補強材による影響は見られないこと、ひびわれ曲げモーメントは、RCよりP Cの方が大きいことがわかる。ひびわれが生ずると、ひびわれ迄コンクリートの受け持っていた力を補強材が負担するようになるため、変形が増大する。特にそれは、RCの場合に顕著である。ひびわれ時点における補強材の応力が、RCよりもP Cの方が大きいためと考える。

ひびわれ発生後の挙動については、CFRPロッドを補強材とした場合は荷重と変形量の関係がほぼ直線的であり、最大荷重に達して破壊するのに対し、P C鋼棒を補強材とした場合、最大荷重付近で荷重が増加することなく変形が増加する部分があり、比較的延性的である。P C鋼棒には塑性域が存在するうえに伸びが大きいことによると考えられる。なお、曲げ破壊耐力については、緊張の影響、補強材の種類の影響はみられずほぼ一定の値となった。

ひびわれは、おおむね曲げスパン内に1~2本生じた。補強材の種類、緊張の有無による影響はみられなかった。一部のはりでは、ひびわれが載荷点直下に生じ、傾斜計による測定が不能となったものもあった。

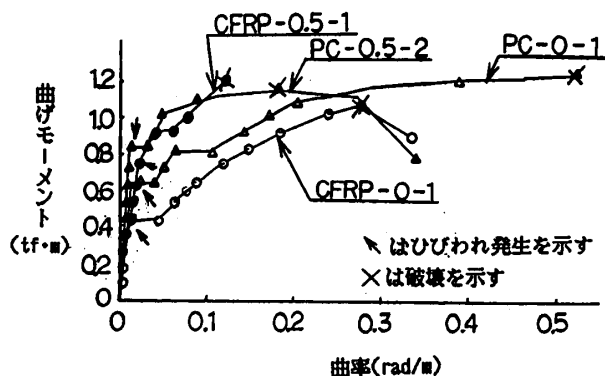


図-4 曲げモーメント-曲率関係
(補強材の比較)

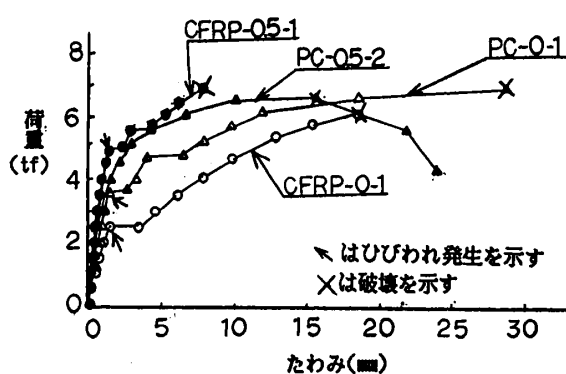


図-5 荷重-たわみ関係
(補強材の比較)

3. 2 緊張応力の影響

CFRPロッドを緊張材とし、その緊張応力を4段階に変化させたはりの荷重-たわみ関係の一例を図-6に示す。なお、緊張応力 σ_i が0および0.5 f_u のはりは、図-4および図-5におけるCFRPロッドを用いたRCはりおよびPCはりと同じのはりである。ひびわれ前までの挙動は、ほぼ同等の傾きで直線的であり、ひびわれ曲げモーメントは導入荷重の増加にともない増大している。破壊曲げモーメントは導入荷重によらずほぼ一定の値を示すことがわかる。これは、ひびわれは導入荷重により、破壊は補強材の強さで決まることを示している。また、図-6より導入荷重が増加するに従いはりの変形量が小さくなるが見られる。これは、はりの破壊がCFRPロッドの破断によるため、プレストレス量の多いものほどひびわれ以後破断までの変形量が小さくなるためと考えられる。

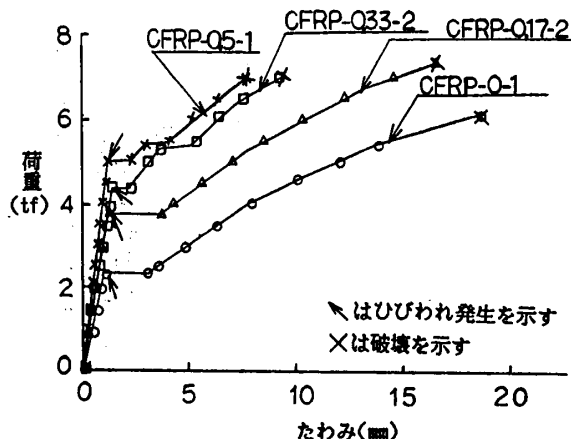


図-6 荷重-たわみ関係
(緊張量の影響)

3. 3 破壊時の曲率およびたわみ

破壊時の曲率およびたわみをプレストレス導入直後の補強材の緊張応力 σ_r を補強材の引張強度 f_u で除した比について整理した結果を図-7に示す。ただし、CFRP-0.17-1は、他のはりとは比べて、著しく小さい荷重で破壊しており、何らかの不都合が生じたと思われる。また、CFRP-0.33-2は、ひびわれが載荷点位置で生じたので曲率については正確な値が得られなかったことからこれらは、プロットするデータからとり除いた。図中の直線は、実測値の傾向を示したものであり、いずれの場合にも緊張応力の増加にともない、終局値が減少している。また、CFRPロッドを補強材としたはりとPC鋼棒を補強材としたはりでは、導入応力が0すなわちRCのときはほぼ等しいが、導入応力が増すとPC鋼棒を用いる場合の方が大きくなる傾向にある。

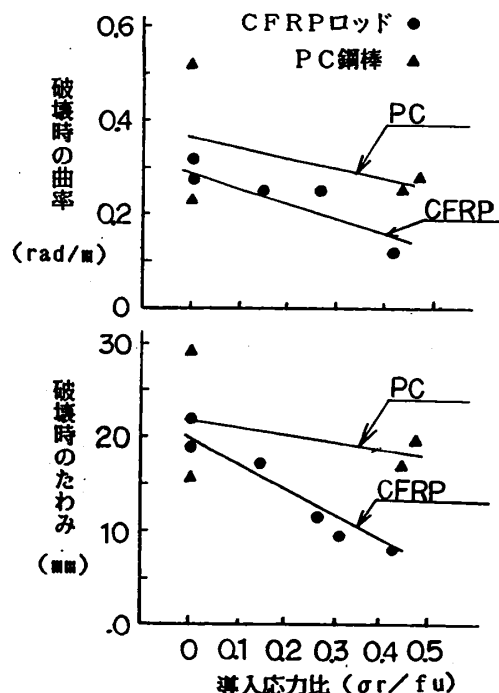


図-7 はり破壊時の曲率・たわみ
- 導入応力比関係

4. 考察

4. 1 曲げモーメントが作用するときのひずみの算定方法

曲げモーメントが作用するときの、ひずみ等の値を次の仮定により計算を行った。

- (1) ひびわれ発生までは、全断面が有効に作用するものとし、弾性体として求める。
- (2) ひびわれ曲げモーメント M_{cr} は、緊張具として用いたPC鋼棒のひずみから求めた荷重を緊張時荷重としてプレストレスを計算し、コンクリートの曲げ強度を考慮して求める。なお、プレストレス導入に伴うコンクリートの弾性変形についても考慮する。

(3) ひびわれ発生後は、コンクリートの引張強度を無視し、ひずみは中立軸からの距離に比例するという平面保持の法則に基づき、材料の応力は、実測で得られた、図-2あるいは図-3の關係に従うものとして求める。破壊は、コンクリートの圧縮縁ひずみが 8000×10^{-6} に達するか、補強材の引張ひずみが破断ひずみに達するときとする。

4. 2 計算値と実測値の比較

曲げモーメントと圧縮縁ひずみ、補強材ひずみおよび曲率との關係の計算値と実測値とを比較した例を図-8～図-10に示す。この図より、弾性範囲においては、弾性体として扱う計算値が実測値によく一致すること、また、ひびわれ発生以後もコンクリートの引張強度を無視した計算値は実測値の傾向を良く示していることがわかる。

4. 3 ひびわれ曲げモーメントおよび破壊曲げモーメントの検討

ひびわれ曲げモーメント M_{cr} と破壊曲げモーメント M_u の実測値と計算値をプロットした結果を図-11に示す。この図より、ひびわれ曲げモーメントはCFRPロッドを緊張材としたよりもPC鋼棒を緊張材としたよりも計算値のほう若干高いものの、RC部材の場合も含めて、実測値とほぼ一致していることがわかる。このように、コンクリートの硬化収縮を考慮しない計算式により推定した計算値と実測値が一致するということは、RECの硬化収縮の小さ

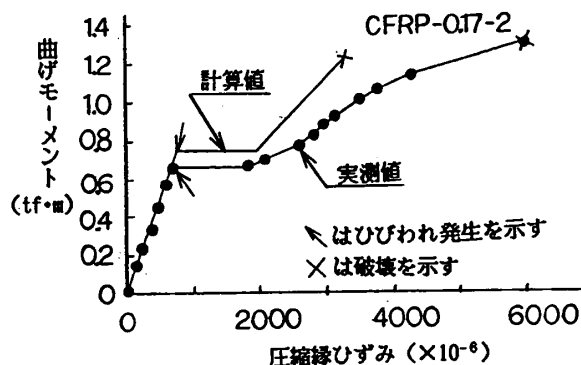


図-8 曲げモーメントー圧縮縁ひずみ関係

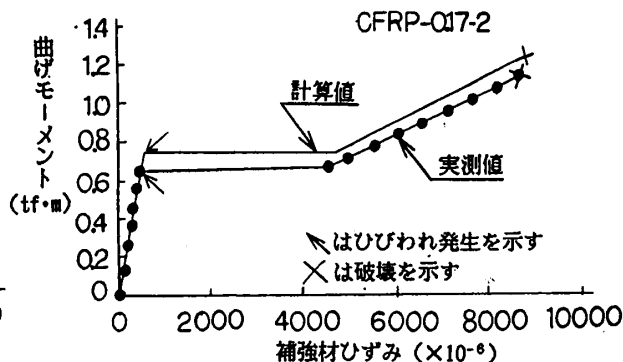


図-9 曲げモーメントー補強材ひずみ関係

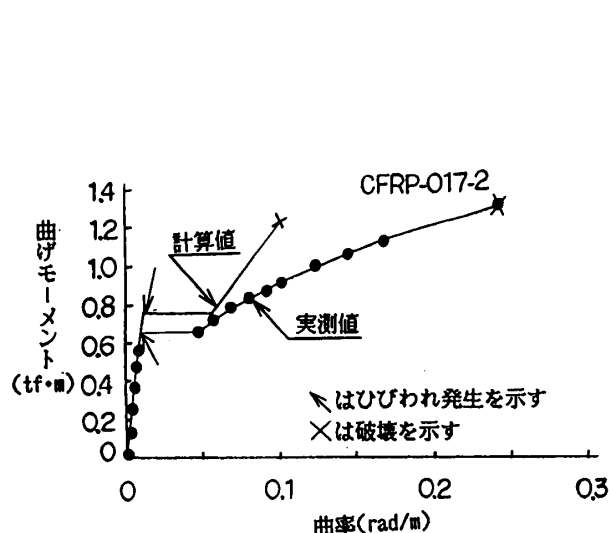


図-10 曲げモーメントー曲率関係

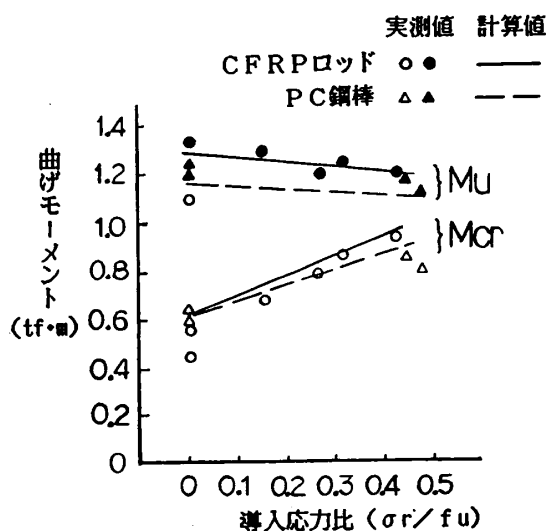


図-11 曲げモーメントー導入応力比関係

いことおよび、プレストレスを導入してから、曲げ試験を行う迄の期間（18日間）におけるプレストレスの減少量が小さいことを示すものといえよう。RECの常温におけるクリープは、レジンコンクリートと同等であることが報告されており⁷⁾、20日間程度では、クリープによる影響が表れなかったものと思われる。破壊曲げモーメントは、CFRPロッドを緊張材としたはりもPC鋼棒を緊張材としたはりも実測値と計算値がほぼ一致しており、またCFRPロッドを緊張材としたはりでは $1.2 \sim 1.3(\text{tf} \cdot \text{m})$ 、PC鋼棒を緊張材としたはりでは $1.1 \sim 1.25(\text{tf} \cdot \text{m})$ とほぼ一定の値を示していることがわかる。ここでCFRPロッドを用いたはりの方がPC鋼棒を用いたはりより若干大きな値となっているが、これは、はりの破壊がロッドの破断によるためであり、CFRPロッドの引張強さがPC鋼棒のそれより若干大きいためであると思われる。

5. 結論

CFRPロッドを用いた、プレテンション方式のレジンコンクリートPCはりの曲げ試験の結果から次のことがいえよう。

(1) ひびわれ曲げモーメントは、緊張応力の大きいほど大きい。その値は、レジンコンクリートの収縮量は考慮せずに、一般のプレストレストコンクリートと同様にコンクリートの曲げ強度、導入荷重から求めることができる。

(2) 破壊曲げモーメントは、緊張応力の大きさによらずほぼ一定値を示した。その値は、コンクリートの引張強度を無視し、緊張材の破断によりはりが破壊するという仮定で求めることができる。

(3) はりの終局の曲率・たわみは緊張応力の増大に伴い減少する。

(4) PC鋼棒を用いる場合と比較すると、次のことが言えよう。①ひびわれ・破壊曲げモーメントは計算値と一致しており両者の差はみられない。②プレストレスを導入しない場合は同等であるものの、プレストレスを導入する場合の変形能力は、PC鋼棒を用いる場合より劣っている。

6. 謝辞

実験にあたっては、日本コンクリート工業（株）、日本プレスコンクリート（株）、前田製管（株）および（財）茨城県建設技術管理センターから試験用材料および研究費についての援助を頂いた。また、試験体の製作にあたっては、日本大学 大浜嘉彦先生に助言を頂いた。付記して謝意を表する次第である。

引用文献

- 1) 岡田 清、小林和夫ほか：レジンコンクリートの補強に関する2,3の実験、セ技年報XXII、1968、pp502～506
- 2) 大浜文彦、小林和夫ほか：レジンコンクリートを用いた合成断面に関する研究、セ技年報XXVIII、1974 pp375～378
- 3) 小林 保、小林一輔：レジンコンクリートの補強に関する2,3の考察、コンクリート工学Vol.14、No.4、April、1976、pp123～128
- 4) 小柳 治ほか：高張力鋼で補強された高強度コンクリートはりとレジンコンクリートはりの挙動について、セ技年報33、1979、pp544～547
- 5) 小柳 治ほか：レジンコンクリート曲げ部材の最適設計に関する一考察、第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1981、pp353～356
- 6) 岡田 清、徳永博文：レジンコンクリートはりの力学的特性、材料Vol.29、No.318、Mar.1980、pp272～278
- 7) 大浜嘉彦：ポリマー結合材、コンクリート工学Vol.26、No.2、Feb.1988、pp70～78