

## 論文

## [2126] FRP緊張材を用いたプレストレストコンクリート梁の曲げ終局限界状態について

正会員○中井裕司（住友建設技術研究所）

迎 邦博（住友建設技術研究所）

正会員 浅井 洋（住友建設技術研究所）

正会員 熊谷紳一郎（住友建設 土木部）

## 1. まえがき

著者らは、高い引張強度、非磁性、非電導性、高い耐蝕性などのFRP材料の特性およびコストを鑑み、FRP材料をプレストレストコンクリートの緊張材（以下FRP緊張材）に適用する研究を中心に進めてきた。本論では、設計上の課題の一つとして残されている曲げ終局限界状態について述べる。

FRP緊張材を用いた部材の曲げ性状は、ほぼ従来の曲げ理論に従うことが実験的に明らかにされている[1]。そして、曲げ終局破壊性状は、FRP緊張材の破断、もしくは、コンクリートの圧縮破壊で規定され、急激な破壊に至る可能性を指摘している[2]。さらに、あるFRP緊張材を利用したPC橋梁で曲げ終局限界状態の設計においてFRP緊張材を破断させず、コンクリートの圧縮破壊に導く試設計例、および、設計思想が報告されている[3][4]。しかし、従来の弾塑性材料の緊張材を対象とした設計思想を踏襲したかたちで、これまで、コンクリート構造物の急激な破壊と規定されていた緊張材の降伏を伴わないコンクリートの圧縮破壊を完全弾性緊張材の曲げ終局限界状態とすることは、破壊の予見、構造物の破壊エネルギーの吸収能力を勘案すると無理があると思われる。

そこで著者らは、緊張材として弾塑性材料であるPC鋼材と完全弾性材料であるFRP緊張材を用いた場合におけるプレストレストコンクリート梁の終局曲げ性状についてシミュレーションを行い、FRP緊張材を用いた場合の各構成材の限界状態および部材の破壊性状について考察し、曲げ終局限界状態についての一設計思想を提案する。

## 2. シミュレーションの方法

各部材断面の抵抗曲げモーメントは、昭和61年制定コンクリート標準示方書に従い、次の仮定より算出するものとした。

- ① 維ひずみは、中立軸からの距離に比例する。
- ② コンクリートの引張強度は無視する。
- ③ コンクリートの圧縮応力度の分布は、図-1のコンクリートの応力-ひずみ曲線によりコンクリートの圧縮応力度を算出するものとする。
- ④ 各緊張材の応力-ひずみ曲線は、図-2の通りとする。
- ⑤ コンクリートと緊張材の付着は、曲げ終局時まで完全なものとする。
- ⑥ 材料安全係数および部材安全係数は、1.0とした。

シミュレーションに使用した緊張材の力学特性を表-1に示す。シミュレーションの対象とする部材は矩形断面で、緊張材の図心は1点で代表でき、上縁から桁高の0.92倍の位置に有るものと

した。また、たわみ量計算時の構造系は単純梁、支間長は有効高の10倍とした。載荷荷重は等分布満載荷重である。

シミュレーションのパラメーターは実緊張材比、および、有効緊張応力比とした。ここでの実緊張材比、有効緊張応力比は次式によって定めた。

$$\text{実緊張材比 } p = \frac{f_{pu} * A_p}{f'_{ck} * b * d} \quad (1)$$

$$\text{有効緊張応力比 } a = \frac{\sigma_{pe}}{f_{pu}} \quad (2)$$

ここに、 $f_{pu}$ ：緊張材の製造者保証引張強度       $f'_{ck}$ ：コンクリートの設計基準強度  
 $\sigma_{pe}$ ：緊張材の有効導入応力度               $A_p$ ：緊張材の断面積  
 $b$ ：部材断面の幅                                       $d$ ：部材断面の有効高さ

シミュレーションの手順は次の通りである。パラメーターの設定後、逐次計算により部材の曲げ終局限界状態を求め、破壊性状、破壊抵抗モーメント $M_u$ 、終局部材曲率 $\phi_u$ 、および、各構成材の応力状態を得る。次に、部材の曲げひび割れモーメント $M_{cr}$ 、曲げひび割れ時の部材曲率 $\phi_{cr}$ を求める。たわみ量の算定は、 $\phi_u$ と $\phi_{cr}$ 間を15分割し、ある曲率 $\phi_i$ に相当する梁断面位置を計算し、梁長手方向に曲率を逐次積分することによりたわみ曲線を求めた。シミュレーション結果は全て無次元量にて表されている。各緊張材のシミュレーション結果を図-3に示す。なお、本シミュレーションは、コンクリートと緊張材のみで構成されている部材を対象としているために、使用状態においてはひび割れが発生しないことを前提としている。

表-1 緊張材の力学特性

材料	引張強度 (kg/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kg/mm <sup>2</sup> )	破断伸度 (%)
PC鋼より線 [5]	175	20000	6.00
AFRPR ロッド [6]	180	5400	3.33
CFRP スtrand [7]	184	14000	1.32

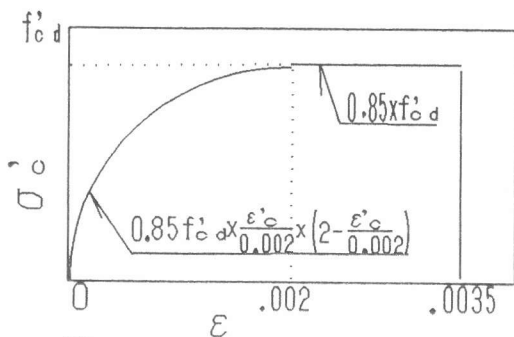


図-1 コンクリートの応力-歪み曲線

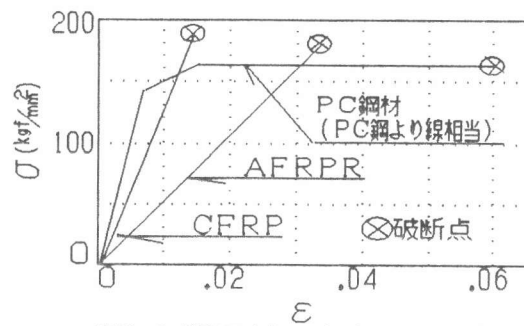


図-2 緊張材の応力-歪み曲線

### 3. シミュレーション結果

#### 3.1 終局曲げ性状

曲げ終局限界状態の破壊性状に関する釣合緊張材比曲線を、図-4に示す。PC鋼材を緊張材とした場合、緊張材の降伏後コンクリートの圧縮破壊に至る形式は、有効緊張応力比に関わらず実緊張材比0.045程度から発生し、コンクリートの圧縮破壊が先行する形式は、一般に利用されている有効緊張応力比 $a=0.6$ で図中には示されていないが実緊張材比 $p=0.51$ にて発生する。なお、PC

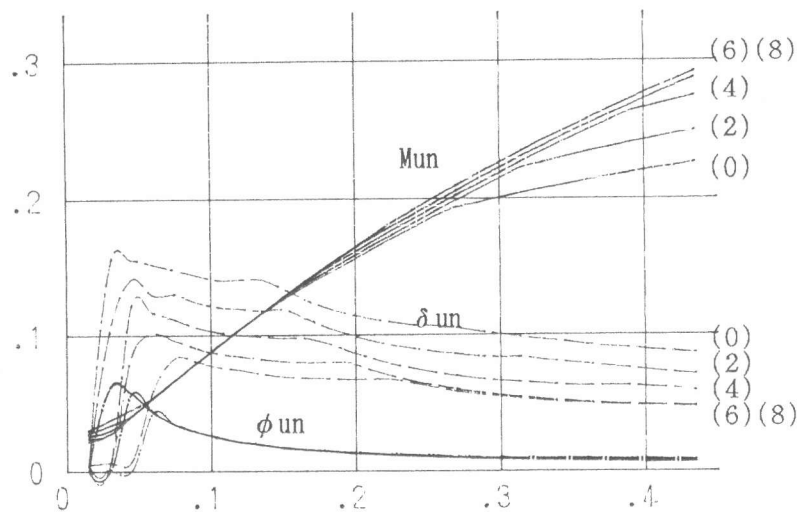
$$M_{un} = M_u / f'_{ck} d^2 / b$$

$$\phi_{un} = \phi_u \times d$$

$$\delta_{un} = \delta_u / d$$

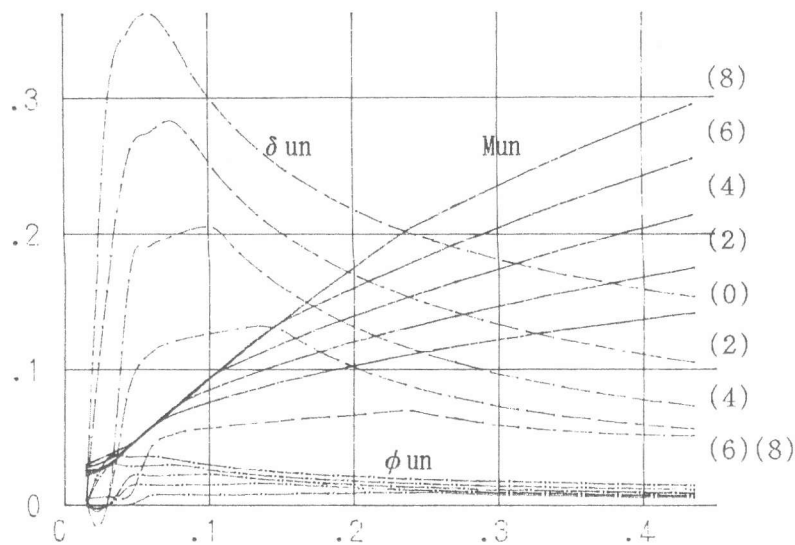
PC鋼材

$M_{un}$ 、 $\phi_{un}$ 、 $\delta_{un}$



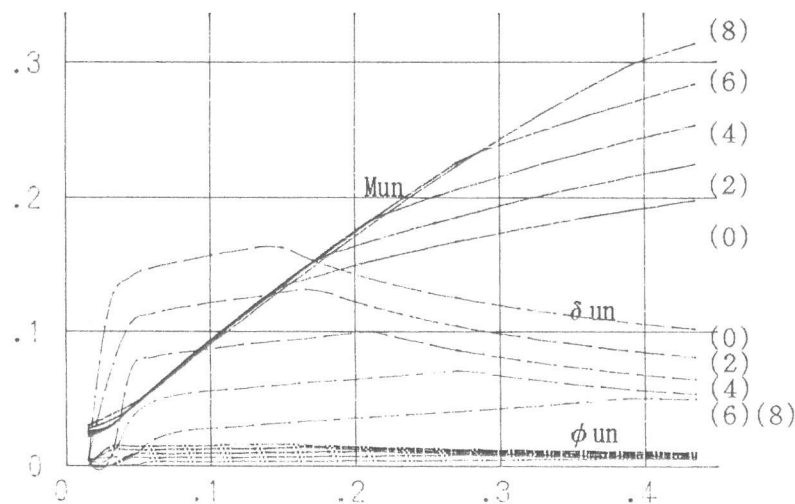
AFRPロッド

$M_{un}$ 、 $\phi_{un}$ 、 $\delta_{un}$



CFRPストランド

$M_{un}$ 、 $\phi_{un}$ 、 $\delta_{un}$



有効緊張応力比 (0)  $a=0.0$  (2)  $a=0.2$  (4)  $a=0.4$  (6)  $a=0.6$  (8)  $a=0.8$

実緊張材比  $p$

図-3 各緊張材のシミュレーション結果

鋼材の一般的利用範囲は、図中斜線部分で示した。一方、AFRPロッド、CFRPストランドの場合、緊張材の破断からコンクリートの圧縮破壊による終局限界状態に移行するのは、有効緊張応力比 $a=0.6$ でそれぞれ実緊張材比 $p=0.15, 0.27$ である。

完全弾性体であるFRP緊張材を用いた部材の終局曲げ性状は、FRP緊張材の破断もしくはコンクリートの圧縮破壊であるが、その内のコンクリートの圧縮破壊を先行させるには多量のFRP緊張材の実緊張材比が必要となり経済性に劣る。また、使用状態の各構成材の応力状態を鑑みても不合理な設計となると推測できる。例えば、CFRPストランドを緊張材とした場合、使用状態において合理的な各構成材の応力状態が $a=0.6, p=0.1$ で作りに出せるとする。曲げ終局限界状態においてコンクリートの圧縮破壊に導くためには、導入有効緊張力を一定にし、 $a=0.32, p=0.19$ に変更しなければならない。

### 3.2 終局曲げ耐力

図-3に示すように、PC鋼材を緊張材とした場合、破壊抵抗モーメントは有効緊張応力比に関わらずほぼ同じ性状を示し、実緊張材比に依存している。これは、終局時において緊張材が塑性域にあるためである。一方、FRP緊張材の場合、破壊抵抗モーメントは有効緊張応力比、実緊張材比の両方に依存している。特にAFRPロッドを緊張材とした場合、実緊張材比が大きくなるにしたがい有効緊張応力比に対する依存度が大きくなる。これは、AFRPロッドの破断伸度が大きく、弾性係数が低いために、有効緊張応力比の低い領域でコンクリート圧縮破壊が先行し、AFRPロッドの高い引張強度を十分に利用できないことによる。

有効緊張応力比 $a=0.6$ における破壊抵抗モーメントのデコンプレッションモーメント $M_0$ および曲げひび割れモーメント $M_{cr}$ に対する割合を図-5に示す。一般に、破壊抵抗モーメントは、部材の使用状態における設計曲げモーメントの1.7倍以上である。FRP緊張材の場合も、使用状態においてコンクリートの応力度が引張強度を越えない設計曲げモーメントに対して、適当な大きさの破壊抵抗モーメントの設定が可能であることがわかる。

### 3.3 変形性状

部材の曲げひび割れ後、曲げ終局限界状態に至る変形性状は、各緊張材の力学特性に依存している。図-3に示すように、終局曲率は、PC鋼材を緊張材とした場合、緊張材が塑性域にあるため有効緊張応力比に関わらず実緊張材比に依存しているが、FRP緊張材の場合、有効緊張応力

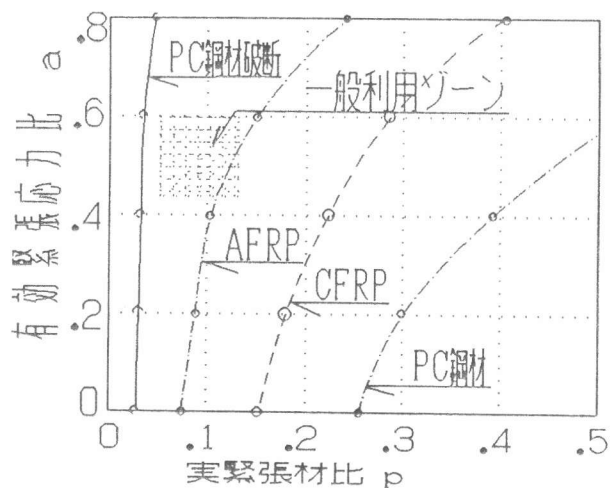


図-4 破壊性状に関する鈎合緊張材比曲線

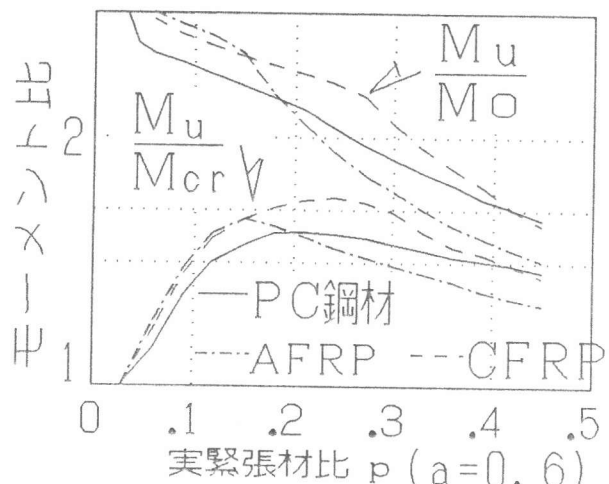


図-5 曲げ耐力に関する図

比、実緊張材比の両因子に依存している。そして、部材長手方向の曲率分布は、P C鋼材においては部材一部のP C鋼材の降伏域で大きい弾性域では少ない、一方、F R P緊張材においてはひび割れ区間全域に渡り曲げモーメントに対して線形である。また、A F R PロッドとC F R Pストランドの曲率はそれらの弾性係数に反比例している。P C鋼材を緊張材とした場合、終局たわみ量は実緊張材比、有効緊張応力比に対して比較的安定した性状を示す。F R P緊張材の場合、終局たわみ量は実緊張材比の低い領域つまりF R P緊張材の引張破壊領域にて、有効緊張応力比に対して高い依存性を示す。また、その程度は各緊張材の弾性係数に反比例している。P C鋼材の一般的利用範囲内における各緊張材を用いた部材のたわみ性状の模式図を、図-6に示す。終局たわみ量は、A F R Pロッド、P C鋼材、C F R Pストランドの順に少なくなる。有効緊張応力比 $a=0.6$ における終局たわみ量の曲げひび割れ時におけるたわみ量に対する割合を、図-7に示す。A F R Pロッドを緊張材とした場合、P C鋼材以上の変形性能を有している。C F R Pストランドを緊張材とした場合は、その実緊張材比が少ない部分でP C鋼材の50%程度であり、実緊張力比が高くなるにしたがいほぼ等しくなる。つまり、P C鋼材の一般的な利用範囲内で最大耐力までの粘り強さは、A F R Pロッド、P C鋼材、C F R Pストランドの順に少なくなる。

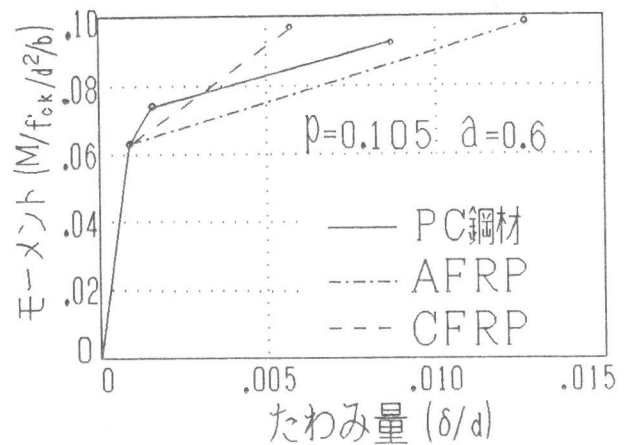


図-6 モーメントたわみ量模式図

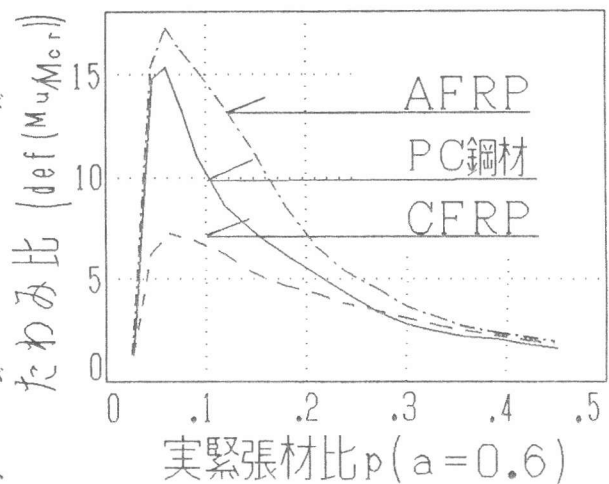


図-7 粘り強さに関する図

#### 4. 終局曲げ状態設計思想の提案

緊張材の違いによる曲げ終局限界状態の破壊性状、曲げ耐力、たわみ量について、使用状態と比較しつつ述べてきた。完全弾性材料であるF R P緊張材を用いた部材は、最大曲げ耐力に至るまでに部材としての靱性を与えることは可能である。しかし、最大曲げ耐力以降の粘り強さは、各構成材の力学特性上、期待できない。そこで、最大曲げ耐力に至るまでのたわみ性状に対する制限、および、最大耐力以降の脆性的な挙動に対する設計上の安全係数を設けることが合理的であると考え、F R P緊張材を用いた部材の曲げ終局限界状態の設計思想を次のように提案する。

- ①靱性率に相当するものとし、部材の曲げひび割れ変位に対する終局曲げ変位の比に制限値を設ける。
- ②終局曲げ状態における安全係数のうち、部材安全係数を一般曲げ部材より割増し設定する。
  - ①は主に最大曲げ耐力以前の曲げ性状に制限を加え、設計曲げ終局モーメントに対してきわめ

て脆性的な曲げ破壊を防止するものである。最大曲げ耐力にいたるまでの過程において、同一緊張材比、有効緊張応力比のPC鋼材とAFRPロッドを緊張材とした部材では、曲げ耐力および曲げひび割れ後の部材の粘り強さは、ほぼ等しい挙動を示す。したがって、AFRPロッドを緊張材として用いた部材の終局たわみ量は曲げ破壊の予知が十分可能なレベルであり、また、曲げ破壊エネルギーの吸収能力も、PC緊張材を用いた部材とほぼ等しいと考えられる。CFRPストランドを緊張材とした部材は、たわみ性状の改善のために、有効緊張力を低下させ、実緊張材比を増加させる必要があると思われる。つまり、①は高い弾性率を有するFRP緊張材の使用 방법에制限を加えることになる。シミュレーション結果より、PC鋼材を緊張材とした部材の一般使用範囲における部材の曲げひび割れ変位にたする終局曲げ変位の比は8程度であり、一つの目安になる。

②はFRP緊張材を用いた場合の最大曲げ耐力以降の脆性的挙動に対する安全係数である。コンクリートが圧縮破壊した場合、耐衝撃性に劣る緊張材は同時に破壊する可能性もあり、さらに、それ以降の曲率の増大による緊張材の破断は避けられない。また、最下段緊張材が破断した場合、一般橋梁ではその曲げ耐力は最大耐力の半分以下になると推定される。予知し得ない荷重による最大曲げ耐力以降の必要曲げ耐力については明確でないが、FRP緊張材を用いた部材は、塑性域を有するPC鋼材を緊張材とした部材より幾分劣ることは明かである。したがって、設計終局曲げ耐力の算定にあたり、破壊性状に対する安全係数を組み込む必要がある。その安全係数の設定値については今後慎重な検討が必要であると考えられる。

## 5. まとめ

FRP緊張材を用いた部材の曲げ終局限界状態の基本的性状を明らかにし、その設計思想を提案できた。

- ① AFRPロッド、PC鋼材を緊張材とした部材の最大曲げ耐力および曲げひび割れ後の部材の粘り強さは、ほぼ等しい。
- ② FRP緊張材を用いた部材の終局曲げ性状は、その使用状態の合理的な設計、経済性を考慮すれば、FRP緊張材の曲げ引張破壊形式を排除することは出来ない。
- ③ FRP緊張材を用いた部材の終局曲げ設計においては、最大耐力以前のたわみ量に対する制限と、最大耐力以降の急激な破壊に対する設計上の配慮が必要である。

## 参考文献

- 1) 迎邦博ほか：AFRPロッドを用いたPC構造物に関する研究（その3）、住友建設技術研究所報、NO.16、pp.33-48、1989.10
- 2) 同上：AFRPロッドを用いたPC構造物に関する研究、同上、NO.14、pp.33-38、1987.10
- 3) 山下武秋ほか：新素材によるPC橋、プレストレストコンクリート、Vol.31、No.21、pp71-78、1989.3
- 4) 睦好宏史ほか：CFRPで補強したコンクリート部材の力学的性状及び設計手法、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp1117-1122、1990.8
- 5) 昭和61年制定 コンクリート標準示方書、土木学会、pp30、
- 6) PC緊張材としてのAFRPロッド技術資料、住友建設 帝人、pp5、1990.3
- 7) CFC技術資料、エー.エム.エンジニアリング、pp2-3、1990.3