

論 文

CFRP ロッドを主筋に用いた連続繊維補強コンクリート
梁の曲げ破壊性状に関する実験的研究

三井 宜之* ・村上 聖** ・坂井 廣道***

谷木 謙介**** ・久部 修弘***** ・武田 浩二*****

Experimental Study on Flexural Fracture Behavior of
Reinforced Concrete Beam with CFRP RodYoshiyuki MITSUI*, Kiyoshi MURAKAMI**, Hiromichi SAKAI***,
Kensuke YAGI****, Nobuhiro HISABE***** and Koji TAKEDA*****

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の使用寿命に悪影響を及ぼす要因は、主として鉄筋の腐食に起因している。そこで、高耐食性の連続繊維を鉄筋代替として利用するための用途開発が現在盛んに行われており¹⁾⁻²⁶⁾、海洋構造物・地下構造物など過酷な腐食環境下の構造物への適用が期待されている。連続繊維として、アラミド、耐アルカリ性ガラス、炭素繊維などが利用されているが、それらは軽量、高強度、高耐食性などすぐれた特性を有している。特に、炭素繊維は、耐火・耐熱性、長期強度の安定性などにもすぐれている。

ところで、これらの連続繊維を鉄筋代替として使用する際に問題になる点として、これらの連続繊維は高強度ではあるが、破断に至るまでほぼ線形弾性的に挙動し、鉄筋のように明瞭な降伏挙動をもたないために、部材に ductility をもたせることが難しいこと、また弾性係数が鉄筋よりも小さいために、ひび割れ発生後

の剛性低下や変形が大きくなることなどが上げられる。後者に関して、炭素繊維は、他の繊維に比べて弾性係数が大きいことから、炭素繊維の利用が特に有効である。前者に関して、部材の終局的破壊性状として、連続繊維の破断、連続繊維とコンクリート間の付着破壊、圧縮側コンクリートの圧壊、せん断破壊が想定されるが、いずれにしても従来の鉄筋コンクリート部材に比較して、脆性的破壊は避けられない。

連続繊維補強コンクリート部材の設計思想として、従来の鉄筋コンクリート部材とは別の設計体系を確立するか、あるいは従来の設計体系の延長上で考慮するかで設計方法は大きく異なってくることは当然である。即ち、連続繊維の破断による脆性的破壊を許容し、連続繊維の高強度を最大限に発揮させることにより部材を高強度化するか、脆性的破壊を何らかの方法で抑制する、例えば、連続繊維を多段配置することにより、破断時期をずらし、破壊のモニターとしての役割をもたせる、付着すべりを積極的に利用し、疑似的な降伏挙動をもたせる、横補強筋によるコンファインド効果を利用し圧縮側コンクリートの靱性を高め、コンクリートの脆性的圧壊を遅延させるなど、採用する設計方法に対応して、今後解明されなければならない研究対象は異なってくるものと考えられる。

本研究では、いずれの設計思想を対象にするかは今後の課題として、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) ロッドを主筋に用いた連続繊維補強コンクリート梁に

平成6年9月7日受付

* 教授 工博 建築学科

** 助教授 工博 建築学科

*** 三菱化学 工博 黒崎工場エンジニアリング部

**** 三菱化学 本社コンポジット部

***** 三菱化学 黒崎工場エンジニアリング部

***** 大学院生 工修 自然科学研究科

ついて、引張補強筋量を変化させ、そのときの曲げ破壊性状を実験的に検討した。

2. 実験方法

2.1 使用材料

使用したレディーミクストコンクリートの仕様を表-1に、主筋に用いたCFRP ロッドの形状寸法及び特性を表-2に示す。コンクリートには、早強ポルトランドセメントを用い、材令1週の呼び強度が400 kgf/cm²の特注品を使用した。また、CFRP ロッドには、ロッド径が異形鉄筋D10相当で、付着強度を高めるために表面にインデント加工を施した最高引張強度のものを使用した。なお、あばら筋には、SD295A, D13を使用した。

2.2 素材試験

コンクリートの圧縮試験には、φ10×20cmの円柱供試体を用いて、圧縮応力-ひずみ関係を測定し、圧縮強度、ヤング係数(1/3割線弾性係数)、強度時のひずみを求めた。供試体は6個作製し、材令7日まで現場水中養生後、試験時まで気乾とした。

2.3 連続繊維補強コンクリート梁の曲げ試験

図-1に、連続繊維補強コンクリート梁の断面形状寸法及び配筋を示す。梁寸法は、幅18cm×せい30cm×長さ250cm、圧縮補強筋は2-D10一定、引張補強筋は2, 3, 4-D10の3種類とし、合板型枠によりそれぞれ2個ずつ作製した。また、あばら筋は、圧縮側コンクリートが圧壊するまでせん断破壊を生じないように、□D13@100とした。なお、梁は材令7日まで現場散水養生とし、試験時まで気乾とした。

図-2に、載荷形式及び変位・ひずみの測定位置を示す。載荷形式は4点曲げ(スパン長さ200cm、載荷点間隔30cm)とし、35tonfの油圧ジャッキにより加力し、荷重はロードセルにより検出した。また、スパン

中央点、載荷点の変位及び支持点のめり込み変位、図に示す位置でのCFRP ロッド及びコンクリート表面のひずみを測定した。なお、ひずみの測定には、ロッドについては上下面の2箇所にゲージ長3mmのワイヤストレーンゲージを、コンクリート表面についてはゲージ長30mmのワイヤストレーンゲージを貼付けた。

表-2 CFRP ロッドの形状寸法及び特性

公称断面積	67.9mm ² (D10相当)
溝形状	溝幅 0.5mm、溝深さ 0.25mm
溝深さ	0.25mm
溝ピッチ	10mm
引張強さ	20000kgf以上 (引張引張時)
引張弾性率	1.5×10 ⁶ kgf/cm ²
破断伸び	1.6%
単位重量	0.118kg/m
比重	1.6
引張率	2~3% (at 20℃)
熱膨張係数	0.66×10 ⁻⁶ /℃
耐久性	促進蒸気試験 良好 塩水噴霧試験 良好 70%相対湿度試験 良好
疲労性状	良好

表-1 レディーミクストコンクリート仕様

呼び強度 (kgf/cm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	所要スパン (cm)	実測スパン (cm)	空気量 (%)
400	20	18	17.6	1.8

* 呼び強度は材令1週強度、早強* * * * *使用。

表-3 コンクリートの圧縮試験結果

f _o (kgf/cm ²)	E (kgf/cm ²)	s _{oo}
401 (5.49%)	2.86×10 ⁵ (6.65%)	2.36×10 ⁻³ (9.46%)

* f_o: 圧縮強度、E: ヤング係数(1/3割線弾性係数)、s_{oo}: 強度時のひずみ
* ()内の数値は、変動係数を表す。

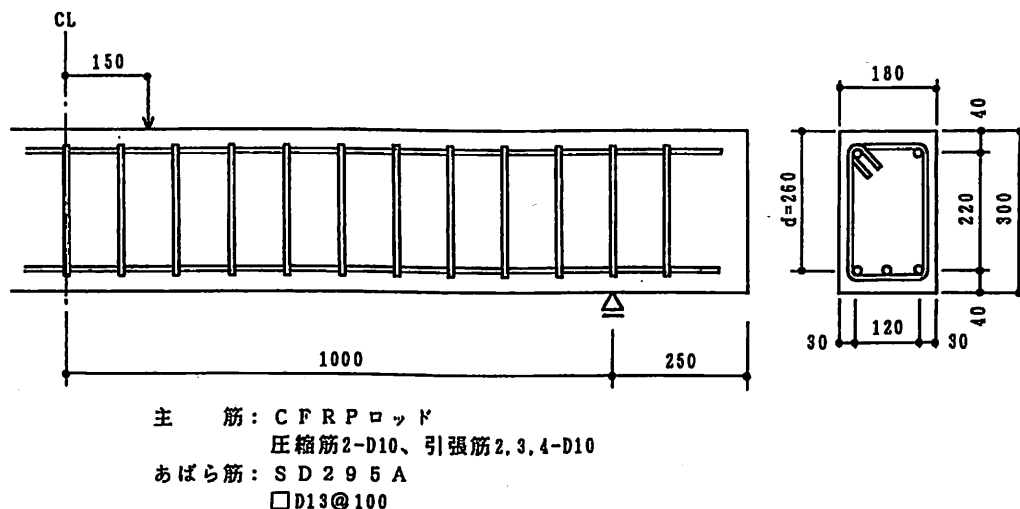


図-1 連続繊維補強コンクリート梁の断面形状寸法及び配筋

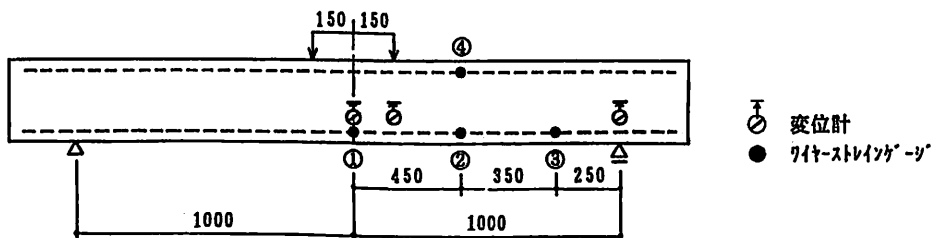


図-2 載荷形式、変位・ひずみの測定位置

3. 実験結果及び考察

3.1 素材試験結果

コンクリートの圧縮強度試験結果を表-3に示す。表中の値は、供試体6個の測定値の平均であり、()内に変動係数を示している。後述の解析では、表中の値を使用した。鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説に示されているヤング係数及び強度時のひずみの実験式により計算された値と良い対応を示している。

$$\begin{aligned}
 E &= 2.1 \times 10^5 (\gamma/2.3)^{1.5} \sqrt{f_c/200} \\
 &= 2.97 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2 \text{ (測定値, } 2.86 \times 10^5) \\
 \epsilon_{co} &= 4.9 \times 10^{-4} f_c^{0.23} \times 1.15 \\
 &= 2.24 \times 10^{-3} \text{ (測定値, } 2.36 \times 10^{-3})
 \end{aligned}$$

ここに、 E :ヤング係数、 γ :気乾比重(ここでは、 $\gamma = 2.3$ とした)、 f_c :圧縮強度、 ϵ_{co} :強度時のひずみ(ここでは、乾燥状態における値とした)。

3.2 ひび割れ状況と終局的破壊性状

図-3に、引張補強筋が2, 3, 4-D10のそれぞれに関する最終的ひび割れ状況を示す。純曲げ区間での曲げひび割れ、せん断スパン内での曲げひび割れからせん断ひび割れの移行、引張補強筋に沿った付着割裂ひび割れ、圧縮側コンクリートの圧壊によるコンクリートの層状剝離が観察され、引張補強筋量が多いものほどその様相が顕著であり、ひび割れの分散も大きいことが分かる。また、写真-1に示すように、すべての梁について終局的破壊は圧縮側コンクリートの圧壊により決まり、引張補強筋量が多いものほどマクロ的なクイドアーチ作用により引張補強筋の付着割裂ひび割れやコンクリートの圧壊が激しく、中には最大荷重以降

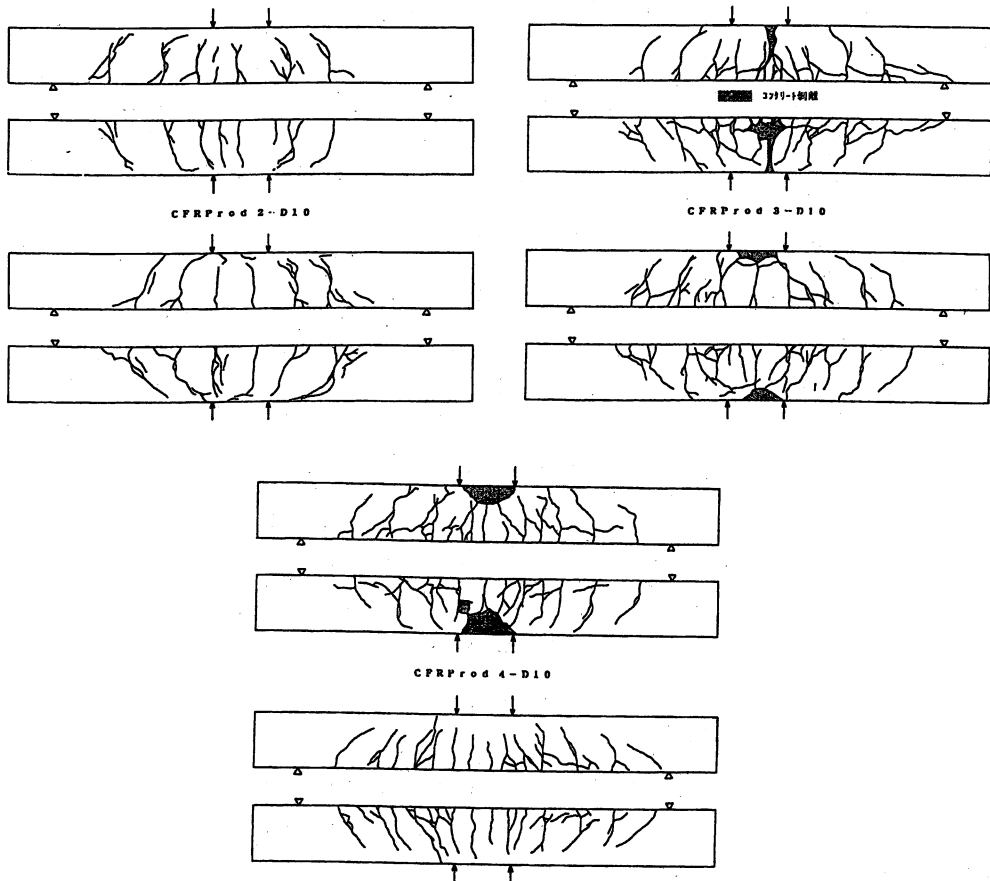


図-3 最終的ひび割れ状況

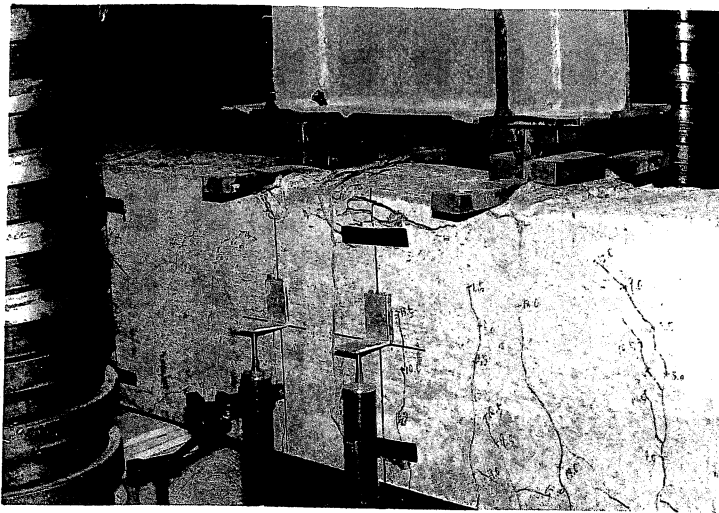


写真-1

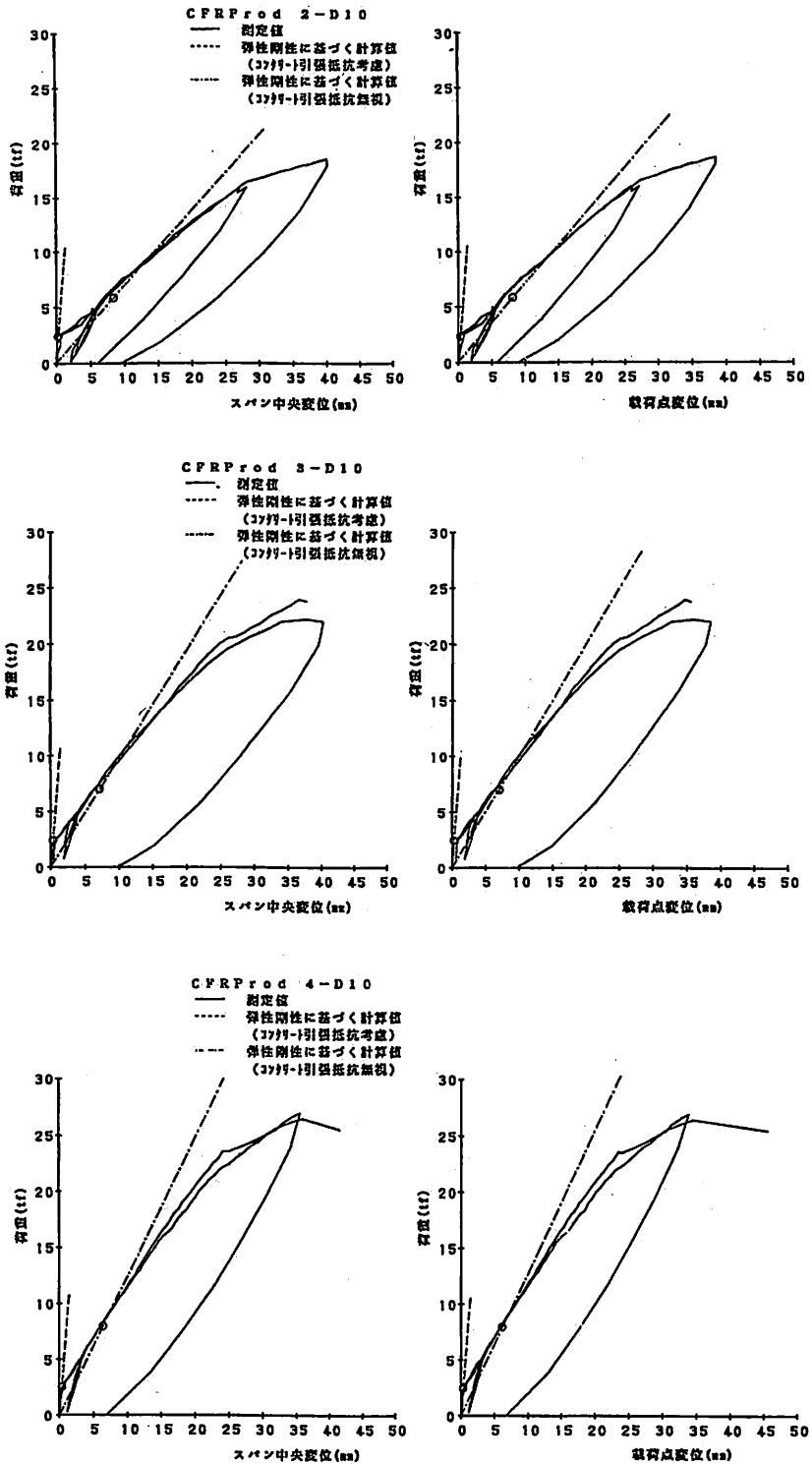


図-4 荷重-スパン中央及び載荷点変位関係

の除荷段階でCFRP ロッドの顕著な復元力により、圧縮補強筋がせりあがって、座屈によると思われる破断を起こしたものが数体見られた。

3. 3 荷重—変位関係と耐力

図-4 に、引張補強筋が2, 3, 4-D10 のそれぞれに関する荷重—スパン中央及び載荷点変位関係の測定値を示す。図中には、コンクリートの引張抵抗を考慮した場合と無視した場合の弾性剛性に基づく荷重—変位関係の計算値を併記している。また、それぞれの計算値において、コンクリートの引張縁応力が引張強度（鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説中の $1.8\sqrt{f_c}$ を採用）に達した時点及びコンクリートの圧縮縁応力が弾性限（短期許容圧縮応力度、 $2/3f_c$ とした）に達した時点をお印で示している。なお、計算に必要なヤング係数比の値は、CFRP ロッド及びコンクリートの測定値に基づき、 $n = 5.24$ とした。図より、コンクリートの応力が弾性とみなせる範囲では、弾性剛性に基づく計算により荷重—変位関係を精度良く記述することができること、コンクリートの圧縮応力が弾性限を超え、非線形となるにつれて、荷重—変位関係の測定値も弾性剛性による計算値から逸脱し、非線形になって行くことが分かる。また、引張補強筋量が増加するほど、初期剛性はあまり変わらないが、ひび割れ発生後の剛性低下が小さくなっている。さらに、最大荷重後の除荷による弾性回復変位は、最大荷重時の変位の約75~80%に達し、非常に復元力が大きいことも連続繊維補強コンクリート部材に共通の特徴である。

表-4 に、ひび割れ発生荷重及び最大荷重の測定値を示す。また、表中には、参考までに鉄筋コンクリー

表-4 ひび割れ発生荷重及び最大荷重

引張補強筋量	P _{cr} (tf)		P _{max} (tf)	
	測定値*1	計算値**	測定値*3	計算値**4
2-D10	2.5 (1.03)	2.43	17.3 (4.58)	3.79
3-D10	2.3 (0.93)	2.48	23.1 (4.34)	5.32
4-D10	2.3 (0.91)	2.53	26.8 (4.91)	6.85

* P_{cr} : ひび割れ発生荷重、P_{max} : 最大荷重

*1 ひび割れ発生荷重の測定値の平均を示す。

*2 SD390について、弾性剛性に基づくひび割れ発生荷重の計算値。

*3 最大荷重の測定値の平均を示す。

*4 SD390について、等価ストレスブロック法による最大荷重の計算値。

** () 内の数値は、計算値に対する測定値の比を示す。

ト構造計算規準で適用対象の鉄筋のうち最大降伏点のSD390について、弾性剛性に基づくひび割れ発生荷重（コンクリートの引張強度は、 $1.8\sqrt{f_c}$ とした）とACIの等価ストレスブロック法による最大荷重（コンクリートの終局ひずみは、0.003とした）計算値を併記している。表より、ひび割れ発生荷重は、SD390について計算された値とほぼ同じぐらいであるが、最大荷重は、SD390について計算された値の約4倍となっていることが分かる。これより、コンクリートの圧壊の遅延、高強度・超高強度コンクリートの併用などによる圧縮側コンクリートの補強が、連続繊維補強コンクリート部材の耐力の増加に直接結び付くことが予想される。

3. 4 CFRP ロッドとコンクリートの一体性

鉄筋コンクリートの断面算定では、平面保持を仮定した断面解析が常用されているが、連続繊維補強コンクリート部材への断面解析の適用には、同一位置のコンクリートと補強筋のひずみが等しいとする平面保持の仮定がどの程度成立するかを調べる必要がある。

図-5には、せん断スパン内にある図-2中の位置②、④の同一断面における補強筋とコンクリート表面のひずみの変化を示す。引張側では、ひび割れ発生時点まで引張補強筋とコンクリート表面のひずみはほぼ一致している。しかし、ひび割れ発生後は、ひび割れがゲージを外れて進展した場合には、ひび割れ間のコンクリートが除荷されるので、コンクリート表面ひずみは減少し、ゲージをまたいで進展した場合には増加している。一方、圧縮側では、図-4中の○印で示す圧縮縁応力が弾性限に達する荷重レベルまで、圧縮補強筋とコンクリート表面のひずみはほぼ一致し、補強筋とコンクリートの一体性が十分に保たれている。それ以降では、圧縮補強筋とコンクリート表面のひずみの間にずれを生じているが、変化の傾向は概ね類似している。これより、コンクリートの応力が弾性とみなせる範囲では、平面保持を仮定した断面解析の適用は、連続繊維補強コンクリート部材においても十分有効であると考えられる。

図-6には、図-2中の位置①、②、③における曲げモーメントと引張補強筋ひずみの関係を示す。図より、ひび割れ発生点まで位置①、②、③における曲げモーメント—引張補強筋ひずみ関係はほぼ一致しているが、それ以降では、スパン中央から離れるにつれて、同一曲げモーメントに対して引張補強筋ひずみは増加する傾向が見られる。この原因として、せん断スパン内でのせん断ひずみ、ひび割れ間付着の影響や、マクロ的なタイドアーチ作用により引張補強筋に作用するスラ

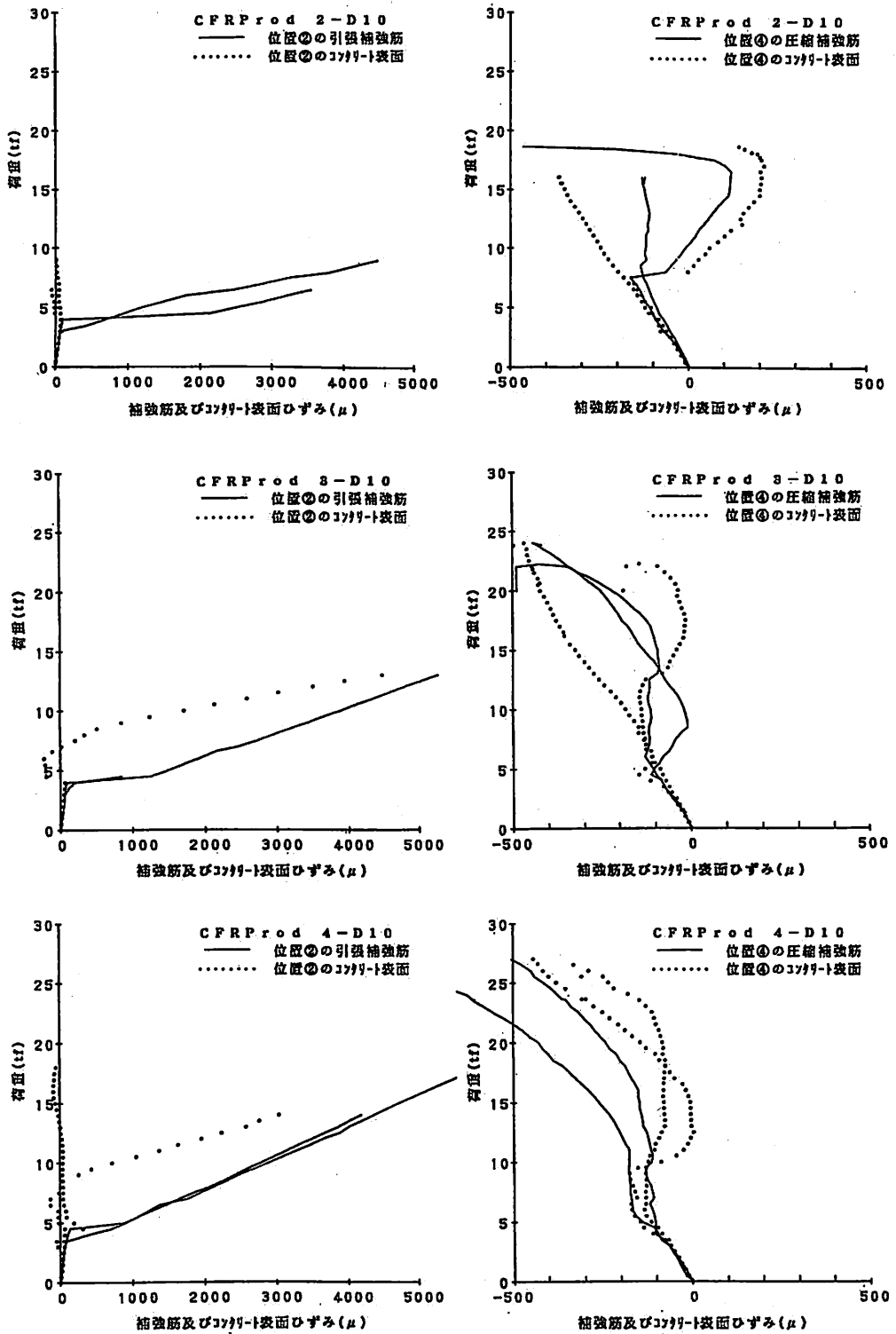


図-5 同一断面における補強筋とコンクリート表面のひずみの変化

ストの分布が位置によって異なることなどが考えられるが、現時点では定かでない。

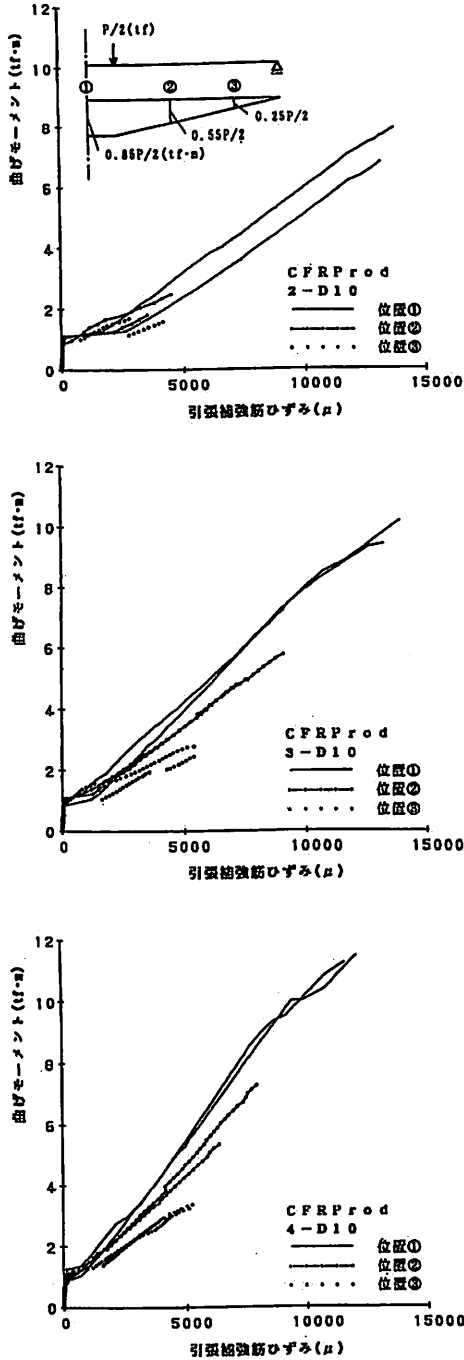


図-6 曲げモーメント-引張補強ひずみ関係

3.5 荷重-引張補強ひずみ関係の測定値と計算値の比較

コンクリートの応力が弾性範囲では、連続繊維補強コンクリート梁の曲げ挙動を弾性剛性に基づく計算により精度良く記述することができるものと考えられる

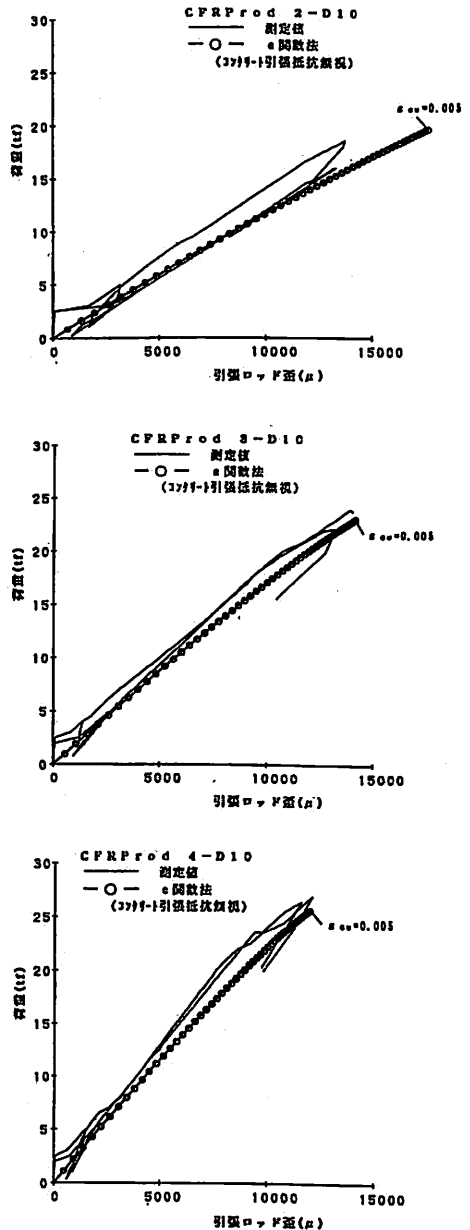


図-7 荷重-引張補強ひずみ関係の測定値と計算値の比較

が、それ以降の挙動には、コンクリートの圧縮応力—ひずみ関係の非線形表示が必要になる。そこで、ここでは、次式に示す e 関数表示により、荷重—スパン中央の引張補強筋ひずみ関係の非線形解析を行い、測定値との対応を検討した。

$$\sigma/f_c = 6.75 (e^\alpha - e^\beta)$$

ここに、 σ : 圧縮応力, f_c : 圧縮強度 (ここでは、測定値を用いた), $\alpha = -0.812(\epsilon/\epsilon_{co})$, $\beta = -1.218(\epsilon/\epsilon_{co})$, ϵ : 圧縮ひずみ, ϵ_{co} : 強度時のひずみ (ここでは、測定値を用いた)。

図-7に、引張補強筋が2, 3, 4-D10に関する荷重—引張補強筋ひずみ関係の測定値の比較を示す。ただし、計算には、コンクリートの引張抵抗を無視した。図より、 e 関数法により妥当な精度で終局時までの挙動を記述することができ、コンクリートの圧壊ひずみを $\epsilon_{co} = 0.005$ としたときに、最大荷重の測定値と計算値の間に良い一致が得られた。ただ、計算値の方が同一荷重に対する引張補強筋ひずみが若干大きくなる傾向がすべての梁について見られる。

4. ま と め

本研究では、CFRP ロッドを主筋に用いた連続繊維補強コンクリート梁に関して、引張補強筋量を変化させたときの曲げ破壊性状について実験的検討を行った。その結果として、次のような知見が得られた。

梁の終局的破壊は、すべてコンクリートの圧壊により決まり、引張補強筋量が増加するほど、最大荷重もひび割れの分散性も大きくなり、ひび割れ発生後の剛性低下も小さくなった。コンクリート応力が弾性とみなせる範囲では、弾性剛性に基づく計算によりその曲げ挙動を記述することができる。また、その範囲では、補強筋とコンクリートの一体性が保たれ、平面保持の仮定が十分な精度で成り立つ。また、 e 関数法による非線形解析により、梁の終局時までの曲げ挙動を妥当な精度で記述することができる。

謝 辞

本実験を行うにあたって、熊本大学工学部甲斐定夫技官、建築材料・施工研究室の修士及び卒論生の諸氏に協力を頂きました。ここに記して感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 福田幹夫ほか3名: 炭素繊維強化プラスチック筋で補強されたコンクリートに関する基礎的研究—その2. 帯スラブの実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 143-144, 1989. 10.
- 2) 松原澄行ほか3名: アラミド繊維による組紐状棒材で補強したコンクリート梁の曲げ疲労特性—その1. 実験概要および実験結果の要約, その2. たわみおよびひびわれ特性, 同上, pp. 995-996, pp. 997-998, 1990. 10.
- 3) 永坂具也ほか1名: 組紐状炭素繊維棒で補強材とするコンクリート梁の曲げ挙動に関する基礎的研究, 同上, pp. 971-972, 1990. 10.
- 4) 永坂具也ほか1名: 組紐状炭素繊維棒で補強されたコンクリート梁の曲げ挙動に関する実験的研究, 同上, pp. 973-974, 1990. 10.
- 5) 木村耕三ほか1名: 新素材の構造部材への適用に関する研究—その3. 炭素繊維補強筋のみを用いた部材の曲げせん断性状, 同上, pp. 975-976, 1990. 10.
- 6) 遠藤克彦ほか4名: 組紐状 FRP ロッドによるスパイラル筋を用いたコンクリート梁のせん断性状—その3. せん断耐力の算定, 同上, pp. 977-978, 1990. 10.
- 7) 田中博昭ほか1名: 炭素繊維補強材を使用した鉄筋コンクリート梁の開発に関する基礎的研究, 同上, pp. 979-980, 1990. 10.
- 8) 本間雅人ほか1名: CFRP ロッドを主筋およびスタースラップに用いた RC はりのせん断耐荷性状, 同上, pp. 981-982, 1990. 10.
- 9) 園部泰寿ほか2名: 連続繊維による補強コンクリート部材の付着性状—その1. 横補強筋の効果 概要, 同上, pp. 983-984, 1990. 10.
- 10) 野村俊郎ほか2名: 組紐状アラミド繊維で補強されたコンクリート梁の繰返し挙動に関する研究, 同上, pp. 985-986, 1990. 10.
- 11) 谷垣正治ほか4名: アラミド繊維による組紐状棒材の研究—その10. PRC 梁の曲げ性状V 小梁の設計法について, その11. PRC 梁の曲げ性状VI 実大梁の曲げ破壊試験および長期載荷試験, その12. 付着性状II 両引き付着試験結果, その13. コンクリート角柱の中心圧縮試験, 同上, pp. 987-988, pp. 989-990, pp. 991-992, pp. 993-994, 1990. 10.
- 12) 木村耕三ほか1名: 新素材の構造部材への適用に関する研究—その4. 炭素繊維を曲げ補強筋とした部材の曲げせん断性状, 同上, pp. 853-854, 1991. 9.
- 13) 梅林一貴ほか3名: 新補強材を用いた RC 梁の曲げ性

- 状に関する実験研究, 同上, pp. 855-856, 1991, 9.
- 14) 米村啓介ほか4名: 連続繊維補強筋を用いたはり部材の繰返し曲げせん断応力下の曲げ性状—その2. 実験結果と検討, 同上, pp. 143-144, 1992, 8.
- 15) 亀井 隆ほか1名: 長繊維棒材で補強されたコンクリート梁のせん断挙動に関する研究—その3. せん断圧縮破壊モードによる耐力, 同上, pp. 145-146, 1992, 8.
- 16) 中野克彦ほか2名: 長繊維補強材を用いたプレストレストコンクリート梁の曲げ性状に関する実験研究, 同上, pp. 147-148, 1992, 8.
- 17) 山田 守ほか2名: 連続繊維棒材を梁主筋とした柱梁内部接合部に関する実験的研究—その1. 実験の概要, その2. 実験結果および考察, 同上, pp. 149-150, pp. 151-152, 1992, 8.
- 18) 福山 洋ほか3名: 連続繊維補強コンクリートのひびわれ性状, 同上, pp. 153-154, 1992, 8.
- 19) 岡本 直ほか4名: 組紐状アラミド連続繊維筋を用いたPRC梁の長期載荷実験—その1. 実験概要およびたわみ性状, その2. 曲げひびわれ性状, 同上, pp. 155-156, pp. 157-158, 1992, 8.
- 20) 中辻照幸ほか3名: インテリジェント構造材料—その1. CFGFRPの破壊予知機能, 同上, pp. 159-160, 1992, 8.
- 21) 園部泰寿ほか4名: 連続繊維補強筋を用いた部材の繰返し曲げせん断応力下の曲げ性状—その1. 実験概要, 同上, pp. 141-142, 1992, 8.
- 22) 小林克巳ほか1名: 長繊維補強材の引張・圧縮特性, 同上, pp. 139-140, 1992, 8.
- 23) 園部泰寿ほか5名: 長繊維補強材を用いたコンクリート架構の水平加力実験—その1. 研究計画概要および試験設計, その2. 試験体および実験方法, その3. 実験結果および考察, 同上, pp. 5-6, pp. 7-9, pp. 9-10, 1993, 9.
- 24) 藤沢正規ほか4名: 連続繊維による補強コンクリート部材の付着性状—その7. 簡易型試験の評価, その8. 付着割裂強度評価式の提案, 同上, pp. 11-12, pp. 13-14, 1993, 9.
- 25) 入沢郁雄ほか3名: 面・立体新補強材を用いたRC部材における曲げ性能に関する実験研究—その1. 実験概要及び結果, その2. 桁筋効果と曲げ終局強度, 同上, pp. 15-16, pp. 17-18, 1993, 9.
- 26) 岡本 直ほか2名: 組紐状FRPロッドの拘束効果に関する研究, 同上, pp. 21-22, 1993, 9.