

組紐状 AFRP ロッドで補強したコンクリートはりの 疲労特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON FATIGUE CHARACTERISTICS OF CONCRETE BEAMS REINFORCED BY BRAIDED AFRP RODS

三上 浩*・武富幸郎**・石橋一彦***・能町純雄****

By Hiroshi MIKAMI, Yukio TAKETOMI, Kazuhiko ISHIBASHI and Sumio NOMACHI

There are many studies on application of fiber reinforced plastic rods (FRP rods) to the reinforcement of concrete members. Those fibers have high tensile strength, light weight and excellent corrosion resistance. But, they have also some defects such as low modulus of elasticity and low bond strength.

The authors have conducted the researches to utilize braided AFRP rods made from aramid fiber as PC tendons under static loading. It would be effective to improve the composite action between rod and concrete by means of braiding the fibers and using them as PC tendons. In addition, application of spirally formed shear reinforcement keeping the continuity of fibers have also investigated. On the other hand, there are few past researches on the fatigue characteristics of members reinforced by FRP rods, subjected to shear force under cyclic loading.

In this paper, fatigue characteristics of concrete beams reinforced by braided AFRP rods are discussed from the experiments.

Keywords: FRP rods, aramid fiber, PC tendon, fatigue, cyclic load

1. はじめに

最近、耐食性や非帯磁性に優れ軽量で引張強度の高い新素材繊維をコンクリートの補強材として用いる研究が盛んである。特に、各種長繊維（たとえば炭素、ガラス、アラミド繊維など）を束束して樹脂を含浸硬化させた FRP ロッドを鉄筋や PC 鋼材の代替として用いる研究が多くみられる^{1)~4)}。

これら FRP ロッドは前述した長所を有する反面、鋼材よりも弾性係数が低いことや引張力以外の力には比較的弱いなどの短所を有している。また、コンクリートとの付着および定着に関する強度は異形鉄筋に比べて低いと考えられる。そのためコンクリートの補強材に FRP ロッドを用いる際には、これらの短所がどのような問題点を生じさせるかについて詳細に検討する必要がある。

すでに著者らはアラミドの長繊維を組紐機で編み上げた後樹脂を含浸硬化して成形した組紐状 AFRP ロッド

（以後、ロッドと称する）のコンクリート補強材への適用性に関する基礎的研究を行った^{5)~6)}。本ロッドの特徴は組紐構造のためロッド表面に凹凸がありコンクリートとの機械的な付着が期待できることにある。

上記の適用性の検討はロッドを PC 緊張材に用いる場合とスパイラル状に加工してせん断補強筋に用いる場合について行った。前者は弾性係数の低い欠点が補われることに着目し、後者は繊維の連続性を損なわずかつ施工性が良好であることに着目した。また、コンクリートとの付着追従性はロッド表面の粗度を高めることにより向上すると考えられ、ロッド表面に珪砂を接着したものの適用性についても合わせて検討してきた。

これらの検討から、PC 緊張材としてのロッドの付着長は PC 鋼材よりも短いことや所要のプレストレスをはり部材に導入できることを確認した⁵⁾。また、ロッドをスパイラル状のせん断補強筋に用いたはりのせん断ひびわれ幅は異形鉄筋を用いたはりよりも大きくなるが比較的良好に斜め引張力を負担することなどが確認された⁶⁾。さらに、ロッド表面に珪砂を接着することで付着長がより短くなることやひびわれの分散性が良好になりコンクリートとの付着追従性をはりの軸方向において広範囲に確保できることを確認した⁵⁾。

一方、道路、鉄道、海洋構造物など頻繁に変動荷重を

* 正会員 工修 三井建設(株)土木設計部主任
(〒101 千代田区岩本町 3-10-1)

** 正会員 工修 三井建設(株)土木設計部(同上)

*** 千葉工業大学助教授 建築学科
(〒275 習志野市津田沼 2-17-1)

**** 正会員 工博 日本大学教授 生産工学部
(〒275 習志野市泉町 1-2-1)

受ける構造物では、静的耐荷挙動のみならず繰り返し荷重下における疲労特性の把握も重要と考えられる。しかし、新素材を用いた構造部材の繰り返し荷重下における疲労特性や素材自身の疲労特性に関する研究例はきわめて少ないように思われる^{7),8)}。ここで既往の研究結果を要約すると、FRPの弾性係数が低いため中立軸が上昇しやすくコンクリートの曲げ圧縮疲労が懸念されることやせん断スパン内のひびわれ幅が繰り返しで増加することおよびFRPの疲労破断が断面急変部において生じることなどが挙げられる⁷⁾。また、本ロッドの200万回繰り返しでの疲労限界は下限荷重を引張耐力の50%として応力振幅を変化させた結果では38 kgf/mm²程度であったがS-N線図はまだ得られていない⁸⁾。

以上から、疲労特性に与える未知の要因としてロッドの付着特性が異形鉄筋と異なることやロッドに与える初期緊張力の大きさにより(RCはりまたはPCはり)ロッドの付着特性が異なる⁵⁾ことが挙げられる。また、ロッドの弾性係数が異形鉄筋の1/3程度と低いことや繰り返しの上下限荷重の大きさも未知の要因と考えられる。さらに、FRP特有の引張力以外の力に対する弱さやロッドが繊維と樹脂の複合体であることに関連してひびわれ部におけるコンクリートとのこすれ破断が懸念されることなども要因として考慮すべきと考えられる。

そこで著者らは上述した未知の要因に着目し、ロッドで補強したコンクリートはりの繰り返し疲労特性に関する基礎資料を得るため以下のように実験を計画した。ロッドで補強したはりの耐荷特性はまだ十分に把握されていないため、RCはりの補強筋の構成要素の一方には特性が明確である異形鉄筋を用いることにし、2種類の試験体で補強筋の組合せを変化させ、同時に異形鉄筋との比較により補強筋としての適用性の検討が可能になるようにした。また、ロッドを緊張材に用いたPCはり3種類を製作し2種類でせん断補強筋の材質を変化させ、同一の補強筋構成の試験体では繰り返しの上、下限荷重の大きさを変化させてこれらの影響が比較検討できるようにした。

本論文ではまず実験方法や結果の概要を述べ、次におのおの変形、ひびわれ、補強筋のひずみからみた繰り返し疲労について詳述した。最後に、土木学会のコンクリート標準示方書設計編⁹⁾(以下、示方書と称する)の疲労強度式をもとにコンクリートの曲げ圧縮疲労および緊張材の引張疲労に対する安全性の観点から本実験結果の位置づけおよび考察を行い、これらを踏まえた今後の研究課題について述べた。

2. 試験体と実験方法

(1) 試験体の形状と種類

試験体は図-1に示すような20×25×240 cmの矩形はりで、加力はせん断スパンとはりの有効高さの比が3の2点荷重で行った。

試験体の種類を表-1に示す。補強筋の組合せを変えた試験体の種類はRCはり、PCはりともに2種類である。その他、補強筋を同様に組み合わせたPCはりでせん断ひびわれ発生荷重(12.0 tf)以上を繰り返し荷重の上限荷重とした1種類があり、合計は5種類である。

試験体はおのおの2体製作し、単調荷重と繰り返し疲労試験を行った。また、繰り返し疲労で破壊しない試験体は後日荷重を単調に載荷し(以後、この試験を残留耐力試験と称する)、破壊形式や耐力および曲げモーメントとたわみの関係を把握した。なお、各試験体は単調荷重試験における破壊形式をNR-1は鉄筋降伏後の曲げ圧縮破壊、NR-2はせん断破壊、PCはりにはコンクリートの曲げ圧縮破壊を想定して計画した。

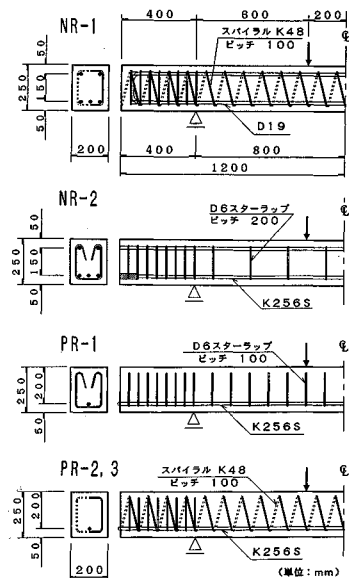


図-1 試験体の形状

表-1 試験体の種類

試験体名	曲げ補強材の材質と本数(本)	せん断補強筋の材質とピッチ(mm)	繰り返し荷重(tf)		上限荷重の静的耐力との比
			上限荷重	下限荷重	
NR-1	異形鉄筋 D19 N=3	スライムロッド K48@100	9.8	2.0	0.50
NR-2	AFRPロッド K256S N=3	スターラップ D6 @200	2.5	0.5	0.28
PR-1	K256S N=1 (0.45P _u)	スターラップ D6 @100	10.4	2.1	0.67
PR-2	K256S N=1 (0.45P _u)	スライムロッド K48@100	11.0	2.2	0.67
PR-3	K256S N=1 (0.45P _u)	スライムロッド K48@100	14.1	7.0	0.88

PC はりはロッド1本を緊張材に用いたプレテンション方式のPCはりで、せん断補強筋はD6 スターラップまたはスパイラルロッドとした。プレストレスはロッドをコンクリート打設前にセンターホールジャッキにて引張耐力 (P_u) の約 45 % で初期緊張し、コンクリート材令 7 日で緊張力を開放して導入した。

主筋および PC 緊張材に用いたロッドの表面には珪砂を接着し、スパイラルロッドは無処理とした。緊張材の定着は鋼管パイプに樹脂を注入して硬化させた樹脂型の定着具にて行った。また、NR-2 はロッドの定着長がまだ十分な精度で確認されていないため樹脂型の定着具を取り付けて定着部の補強を行った。

NR-1 の上限荷重は主筋の応力度が約 2000 kgf/cm² になるように静的耐力の 1/2 程度とし、PR-1, 2 の上限荷重は NR-1 と同程度になるようにおのおの静的耐力の 2/3 程度とした。また、ロッドを主筋に用いた NR-2 はたわみ振幅が大きくなることが予想されたため曲げひびわれ発生荷重 (2.1 tf) 程度以上の静的耐力の 1/4 を上限荷重とした。なお、下限荷重は荷重を完全に除荷すると試験体と加力点間あるいは支点間にずれが生じることが予想されたため上限荷重の約 20 % とした。ただし、PR-3 は上限荷重が大きくその 20 % を下限荷重とするとたわみ振幅が大きくなり試験期間の制約を受けるので上限の 50 % を繰り返し载荷の下限荷重としたが計測は約 20 % を下限荷重として行った。

(2) コンクリートおよび補強材の力学的性質

コンクリートの配合と疲労試験中の材令における力学的性質を表-2 に示す。早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材の最大寸法は 13 mm とした。単調载荷試験の材令は RC はりで 13 日と 55 日、PC はりで 14~15 日である。なお、残存耐力試験はすべての曲げ繰り返し疲労試験が終了した後にまとめて行い、材令は NR-2 が 159 日で他は 92 日~94 日である。

表-2 コンクリートの性質

試験体名	配合 (kg/m ³ , l/m ³)					材料試験材令 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 X10 ⁵	割裂強度	曲げ強度	疲労試験材令 (日)
	セメント	水	細骨材	粗骨材	湿和剤						
NR-1	308	178	880	925	0.77	17	321	2.42	26.9	41.0	15-23
NR-2	284	178	837	994	0.71	45	223	1.85	14.0	38.7	45-54
PR-1											24-33
PR-2	483	171	756	966	1.08	41	393	2.58	26.0	57.9	35-48
PR-3											49-51

表-3 補強材の性質

補強材の材質	断面積 (cm ²)	弾性係数 X10 ⁵ (kgf/cm ²)	引張耐力 (tf)	降伏耐力 (tf)
異形鉄筋 (SD35) D19	2.87	2.00	15.2	11.1
異形鉄筋 (SD35) D6	0.32	2.00	1.7	1.4
AFRPuff K256S	2.00	0.85	23.3	-----
スパイラルロッド K48	0.38	0.81	4.9	-----

* 弾性係数および耐力は3試験体の実測値の平均値

表-3 に補強材の力学的性質をまとめた。主筋や PC 緊張材に用いたロッド (K 256 S) は直径 12 μ のアラミド繊維を 6000 デニール (1 d=1g/9000 m) 束ねたロッド 32 本を 1 組とし、8 組を組紐織で編み上げた。スパイラルロッド (K 48) も同様にロッド 6 本を 1 組とし、8 組を使用した。繊維の重量含有率はともに約 65 % で、組紐の凹凸はロッド径の 10 倍の区間内に 4 回生じている。なお、添字 S は珪砂を接着したことを示し、珪砂は相馬産の 5 号珪砂の乾燥品とした。

(3) 実験方法

疲労試験機は荷重能力が 50 tf の油圧式疲労試験機 (サーボパルサ) を使用した。载荷は表-1 に示す荷重を上下限荷重とする正弦曲線の片振り繰り返し载荷で、繰り返しは 2 サイクルまで静的に行い以後の载荷速度を 3 Hz として最高 200 万回まで行った。途中、所定回数で試験機を止め静的に 2 回载荷して計測およびひびわれの観測を行った。

下部の支点は試験体の軸方向の変形を拘束しないようにテフロンを挿入したローラー支承とし、上部の荷重分配点および加力点は振動によるずれを少なくするためにピン支承とした。たわみの測定は変位計 (ダイヤルゲージとパイゲージを併用) にて行い、変位計と試験体および基準面 (テーブル) との接続部にはユニバーサルジョイントを用いた。

曲げひびわれ幅の測定は等曲げ区間におけるはり側面の主筋あるいは PC 緊張材高さでコンタクトゲージにより行った。スパン中央のコンクリート圧縮縁のひずみはストレインゲージで測定し、補強材のひずみは同一測定位置の表裏 2 枚のストレインゲージで測定した。

3. 実験結果概要

(1) 疲労試験体の破壊経過

図-2 に疲労試験体のひびわれ状況を示す。図中、回数の添記がないひびわれ箇所は繰り返し回数が 1~2 回で生じたひびわれである。

上限荷重の大きい NR-1 は曲げひびわれが初载荷において载荷点下部に発生し、さらに载荷点と支点を結ぶ位置のはりの腹部にはせん断ひびわれが発生した。これらは繰り返しによって载荷点方向へ進展した。

上限荷重が小さく、ロッドを主筋とした NR-2 の初载荷では等曲げモーメント区間に 4 本の大きなひびわれが発生し、せん断区間にも数本の小さなひびわれが発生した。等曲げ区間のひびわれは 40 万回までの繰り返しによりはり上部へ進展したが以後の進展は少ない。また、せん断区間のひびわれは繰り返しにより上昇し、新たなひびわれも 1 本発生した。

ロッドを緊張材に用いた PR-1, 2 のひびわれは等曲

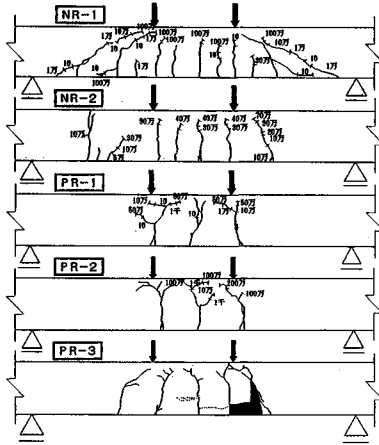


図-2 ひびわれ状況

表-4 耐力と最大たわみおよび破壊形式

試験体名	単調載荷試験			最大たわみ (mm)	破壊形式	繰り返し試験		実測耐力 (tf)	最大たわみ (mm)	破壊形式
	実測耐力 (tf)	曲げ	せん断			破壊形式	破壊形式			
NR-1	19.5	18.8	16.9	22.3 (12.0)	圧壊	200万回で破壊せず	23.7	28.3 (14.2)	圧壊	
NR-2	9.6	12.9	10.1	18.0 (12.3)	せん断	200万回で破壊せず	10.9	22.6 (11.6)	せん断	
PR-1	15.5	15.8	21.8	24.4 (21.5)	圧壊	200万回で破壊せず	18.9	27.9 (27.8)	圧壊	
PR-2	16.5	同上	21.4	26.7 (27.9)	圧壊	200万回で破壊せず	20.2	31.4 (31.4)	せん断	
PR-3	16.0	同上	同上	26.0 (23.7)	圧壊	229,000回でロード破断	—	—	—	

* 残存耐力試験の最大たわみには残留たわみを含む。

- 式1)-1 NR-1、2の曲げ耐力の算定方法:
 耐力 $P = M / 0.8 = C(d - 0.4x) / 0.8$
 NR-1: $C = 0.68 f_{cc} b x = f_y A_s$ よりxを求める。
 NR-2: $C = 0.68 f_{cc} b x = f_y A_s$ よりxを求める。
 ここで、 $f_y = 3657 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $f_{cc} = 0.325 \times 11650 = 3784 \text{ kgf/cm}^2$
 なお、添字Sは鋼材、Fはロッド、Cはコンクリートを示す。
- 式1)-2 NR-1、2のせん断耐力の算定方法:
 耐力 $P = 2(V_{cs} + V_{csd})$
 コンクリートのみの耐力 $V_{csd} = f_{vcs} b d$
 $f_{vcs} = 0.8 \beta_s \beta_p \sqrt{f_{cc}}$ 、 $\beta_p = \sqrt{100 \rho_w}$
 $\beta_s = 1.405$
 NR-1: $\rho_w = (A_s / b d)$
 NR-2: $\rho_w = (A_p / b d) \cdot (E_p / E_s)$
 せん断強度の負担する耐力 V_{cs}
 NR-1: $f_{wp} = 12895 \text{ kgf/cm}^2$ として算出し、
 $\sqrt{E_p / E_s} = 0.55$ を乗ずる。
 NR-2: $f_{wp} = 4449 \text{ kgf/cm}^2$ として算出。
- 式1)-3 PR-1~3の曲げ耐力の算定方法:
 耐力 $P = M / 0.8 = C(d - 0.4x) / 0.8$
 $\sigma_F = \epsilon_{F1} + (d-x) \epsilon_{cu} / x$ 、 $0.68 f_{cc} b x = A_p \sigma_F$
 $\sigma_F = \tau E_{F1} \epsilon_{F1} + E_{F2} (d-x) \epsilon_{cu} / x$ 、以上3式から ϵ_F を求める。
 ここで、 ϵ_F : ロッドの最終ひずみ、 ϵ_{F1} : ロッドの初期ひずみ
 ϵ_{cu} : コンクリートの終局ひずみ、 $\tau = 0.8$ (リラクゼーション率を10%とした)
 $E_{F2} / E_{F1} = 1.2$ (ロッドの引張弾性の増加割合を20%とした)
- 式1)-4 PR-1~3のせん断耐力の算定方法:
 耐力 $P = 2(V_{cs} + V_{csd} + V_{csa})$
 式1)-2よりRC梁としてのせん断耐力 $V_{csd} + V_{csa}$ を求める。
 これにプレストレスの効果を $V_{csa} = 2M_p / a$ として加算する。
 ここで、a: せん断スパン、 M_p : デンプレッションモーメント

げモーメント区間だけに発生し、初載荷ですではりの上部に達した。このひびわれは繰り返し回数が増加すると水平方向のひびわれに連結する傾向がみられた。以上の試験体は200万回の繰り返しでも破壊しなかった。

PR-3は高い上限荷重としたため、PR-1、2にない曲げせん断ひびわれが初載荷において載荷区間の外側に発生した。初載荷における等曲げモーメント区間のひびわれ発生傾向はPR-1、2と類似しているがひびわれはす

べて1~2サイクルに発生し、繰り返しにより進展する傾向はみられない。その後、約23万回の繰り返しで初載荷に生じた載荷点に接するひびわれ位置で緊張材が破断して破壊した。原因はひびわれ部でのこすれによるものと推察される。また、緊張材破断時に緊張材より下端のかぶりコンクリートが大きく剥落した。

(2) 耐力と最大たわみおよび破壊形式

表-4に耐力の実測値と計算値および最大たわみの実測値と破壊形式をまとめた。また、示方書に準拠した各試験体の終局耐力の算定方法を示す。

ここで、ロッドを主筋に用いたNR-2の計算曲げ耐力は付着追随性の低下を考慮し、弾性係数比をもとにロッドの引張耐力を低減した式1)-1により算定し、せん断耐力はロッドと鋼材の弾性係数比を考慮した鉄筋比を用いた式1)-2より算定した。また、スパイラルロッドが負担するせん断耐力は文献6)と同様な方法で弾性係数の影響を考慮した式1)-2より算定した。

PCはりの曲げ耐力はロッドの組構構造に関連する荷重保持後の引張剛性の増加を文献5)と同様に考慮しコンクリートの圧縮破壊を想定して算定した。ロッドのリラクゼーションは本実験では調査していないがその影響は無視できないと考えられるので文献5)と同様に考慮した。一方、PCはりのせん断耐力はRCはりとしてのせん断耐力を式1)-2より求めこれにプレストレスの効果を文献10)を参考に加算した式1)-4より算定した。

なお、コンクリートの材料試験は表-2に示すように疲労試験の材令下でしか実施していないが耐力の算定には単調載荷試験と材料試験で材令が異なる影響を考慮すべきと考えられる。しかし、早強ポルトランドセメントを使用したことや単調載荷の材令が2週程度以上であることから、本検討では材令の影響はさほど顕著ではないものとして表-2の値を用いた。

単調載荷試験におけるNR-1の曲げおよびせん断耐力の計算値は同程度となったが、実験では想定した曲げ圧縮破壊を示し実測耐力と比較的良好一致した。NR-2の破壊形式は想定したせん断破壊であり、計算耐力と実測耐力は比較的良好一致した。一方、PR-1とPR-3は想定した曲げ試験破壊をほぼ計算耐力で示したがPR-2はロッド破断で破壊したため計算耐力よりも若干大きな実測耐力を示した。

次に、単調載荷と残存耐力試験結果を比較するとすべての試験体の耐力は残存耐力試験が単調載荷よりも20~25%程度大きく、PCはりでは破壊形式が両者で異なっている。これは、単調載荷が材令約2週と8週で行われたのに対し、残存耐力試験の材令が約3か月と5か月であることやPC緊張材に用いたロッドの引張剛性が増加することなどに関連するものと考えられる。

表-5 主要な応力とひずみ

試験体名	下縁応力度 (kgf/cm^2)	ひびわれ発生 の割合 (%)		せん断ひびわれ 発生割合 (%)		補強材のひずみ (%)		コンクリート圧縮ひずみ (%)		
		実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	実測値	計算値	
NR-1	—	—	0.30	0.85	2.75	2.88	0.127	0.102	0.095	0.082
NR-2	—	—	0.62	0.81	—	—	0.106	0.197	0.039	0.041
PR-1	60.8	1.27	2.14	2.47	—	—	0.385	0.465	0.141	0.141
PR-2	45.8	0.95	2.18	2.18	—	—	0.383	0.730	0.152	0.178
PR-3	55.2	1.15	2.40	2.38	3.81	3.59	0.648	0.979	0.232	0.230

試験体名	ひびわれ発生 の割合 (%)	
	実測値	計算値
NR-1	0.087	0.094
NR-2	—	—
PR-1	—	—
PR-2	—	—
PR-3	0.115	0.145

式②-1 RC梁の曲げひずみの算定方法：
力の釣合いと平面変位の仮定より中立軸の位置 x を求め、モーメントの釣合いから C 、 T を求める。 $M=C(d-x)/S$

式②-2 PC梁の曲げひずみの算定方法：
 $\epsilon_p = \epsilon_{ps} + (d-x)\epsilon_c / x$ 、 $C=0.5\epsilon_c E_c b x$ 、 $T=A_p \epsilon_p E_p$
 $M=C(d-x)/S$ 、以上の式から x に関する3次式が得られ x が決定される。

式②-3 スパイラルロッドのひずみの算定方法：
式1)-2または4からコンクリートのせん断耐力を求め、上限荷重の1/2との差による発生応力をひずみに変換する。
 $\epsilon_w = ((V_p - V_{c1}) \text{または } V_p - V_{c1} - V_{c2}) s / A_w Z (\sin \alpha + \cos \alpha) \cdot \sqrt{E_p / E_c} / E_p$ 、 $(\sqrt{E_p / E_c} = 0.55)$
ここに、 V_p ：上限荷重の1/2、 s ：螺絲筋の間隔、 Z ： $d/1.15$
 α ：螺絲筋の角度、 ϵ_w はスパイラルロッドを示す。

ここで、表中の最大たわみの中で () 内に示したものは最大荷重におけるたわみである。RC はりの最大荷重におけるたわみと最大たわみの差は単調荷重と残留耐力試験でともに大きい。一方、PC はりの両者のたわみの差は単調荷重および残留耐力試験でともに小さい。すなわち、RC はりの塑性変形量は大きいが PC はりでは少なく、PC はりの破壊は脆性的である。

(3) 疲労試験体の主要な応力および変形

表-5に疲労試験体の主要な応力とひずみの実測値および計算値をまとめた。また、示方書の使用限界状態における応力度の算定方法に準拠した各試験体のコンクリートおよび補強材のひずみの算定方法を示す。

はり下縁応力度はプレストレスを導入した翌日の緊張材の実測ひずみをもとに算出した。ロッドの初期緊張力に差が生じたためにはり下縁応力度とそれに基づくデコンプレッションモーメントが試験体によって異なっている。

曲げひびわれ発生モーメント M_{CR} の実測値は曲げモーメント-たわみ曲線の変曲点とした。 M_{CR} の計算値はRC はりでは表-2に示す曲げ強度をもとに求めPC はりでは曲げ強度にプレストレスによるはり下縁の応力度を加算して求めた。ともに比較的良く実測値と一致する。

コンクリートと曲げ補強材のひずみの実測値は初載荷の上限荷重におけるスパン中央の値である。コンクリートのひずみはRC、PC はりともに実測値と式2)-1または2より求めた計算値が良く一致している。一方、曲げ補強材のひずみはRC はりでは比較的良く一致するがPC はりでは計算値が実測値よりもかなり大きい。これは、組紐構造である本ロッドの引張剛性が文献5)に示されているように緊張力を保持した後で増加することなどに関連すると考えられる。

NR-1とPR-3のせん断ひびわれ発生モーメントの計算値は式1)-2または4からせん断補強筋の負担する耐

表-6 主要なたわみ

試験体名	上限荷重の大きさ (tf)	① 初載荷最大たわみ (mm)	最終計測最大たわみ (mm)	たわみの差 ②-① (mm)	たわみの比 ②/①
NR-2	2.5	1.32	200万回 3.94 (100万回) 3.10	2.22	2.68
PR-1	10.4	5.54	100万回 * 7.39	1.85	1.33
PR-2	11.0	7.10	100回 * 9.03	1.98	1.27
PR-3	14.1	12.62	10万回 19.50	6.88	1.55

* は実計測に繰り返し途中で異常があり以後のデータは採用していない。

力を除いたコンクリートのみが負担するせん断耐力より求めたが実測値と計算値は良く一致した。一方、スパイラルロッドの実測ひずみは初載荷の上限荷重におけるせん断区間の全計測ひずみの平均値であり、これと式2)-3より求めた計算値はせん断ひびわれ発生モーメントほどは一致せず、特にPR-3の実測値は計算値に比べてかなり小さい。

表-6に疲労試験体の主要なたわみを示す。最大たわみとは上限荷重でのたわみであり、ロッドを主筋に用いたNR-2の100万回および200万回繰り返し後のたわみと初載荷のたわみの比は M_{CR} をわずかに超えた上限荷重でおのおの2.4と2.7程度である。

一方、NR-1とPR-1は上限荷重がほぼ等しく、100万回繰り返し後のたわみと初載荷のたわみの比はおのおの1.4と1.3程度と大差がない。このように、NR-1およびPR-1のたわみの比はNR-2よりも上限荷重が4倍ほど大きいにもかかわらず小さく、鋼材に比べて弾性係数が低いロッドでもPC緊張材として用いることにより異形鉄筋と同等な割合で繰り返しによるたわみの増加を抑制できると考えられる。

(4) 疲労試験体の曲げモーメントとたわみの関係

図-3に曲げモーメントとたわみの関係を示す。異形鉄筋を主筋としたNR-1の上下限荷重におけるたわみ差は200万回の繰り返し後も2.5mm程度でありモーメントとたわみのなす勾配の変化は少ない。また、下限荷重におけるたわみは1.5mmから2.7mm程度と約1mm増加している。一方、ロッドを主筋としたNR-2は上限荷重が小さいにもかかわらず上下限荷重におけるたわみ差は初載荷で0.9mm程度が200万回では約1.3mmと増加しておりモーメントとたわみのなす勾配は繰り返しにより徐々にゆるやかになっている。

次に、PR-1の下限荷重におけるたわみは初載荷で1mm程度が100万回の繰り返し後も2mm程度とNR-1と同様に約1mmの増加である。すなわち、プレストレスによる残留たわみの抑制効果は異形鉄筋と同等に100万回の繰り返し後も残っていたと考えられる。

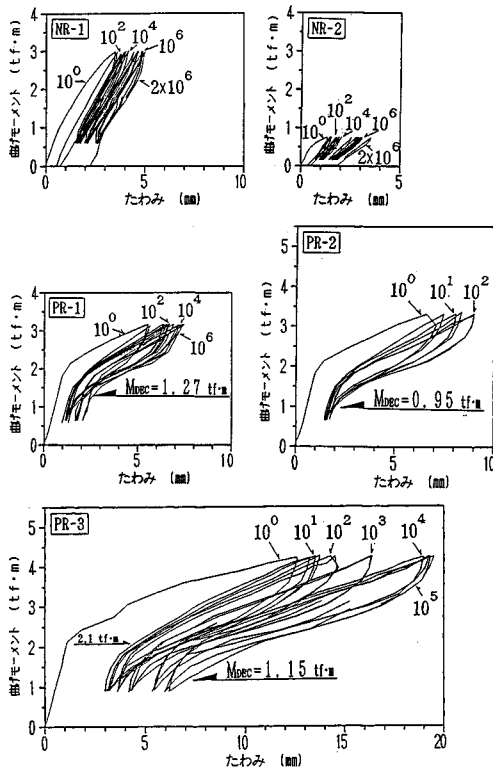


図-3 曲げモーメントとたわみの関係

また、PC はりでは M_{DEC} において明瞭な変曲点が現れており M_{DEC} はロッドを緊張材に用いたはりの繰り返し載荷においても重要な指標であると考えられる。なお、繰り返し途中で破壊した PR-3 の上下限荷重におけるたわみは繰り返し回数とともに増加しており、ひびわれ部周辺のロッドの付着が繰り返しによって劣化したことを示すものと考えられる。

4. 変形からみた繰り返し疲労

(1) 単調載荷および残存耐力試験結果

図-4 で単調載荷および残存耐力試験におけるモーメントとたわみの関係を比較した。異形鉄筋を主筋とした NR-1 の残存試験には単調載荷にみられる M_{cr} での変曲点がみられない。初期剛性および鉄筋の降伏による変曲点の曲げモーメントはともに残存試験の方が大きく、単調載荷に比べて 20 % 程度耐力が増加している。残留たわみを除いた最大たわみは残存試験の方が大きい。一方、ロッドを主筋とした NR-2 の初期剛性と最大たわみも残存試験の方が大きい。また、両試験の載荷途中で荷重が低下し以後の変形の進展が大きいことから付着追従性が途中で低下したのと考えられる。

PR-1, 2 ともに初期剛性と変曲点の曲げモーメントは残存試験の方が小さいが第 2 勾配は逆に残存試験の方

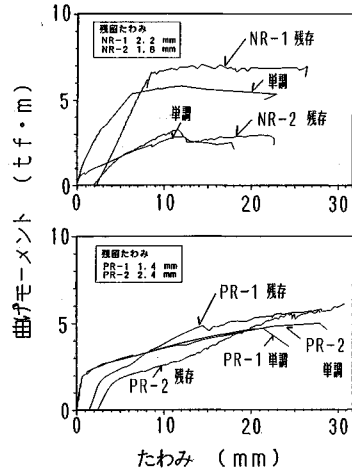


図-4 単調載荷および残存耐力試験結果

が大きく、最大耐力は第 2 勾配が大きい影響を顕著に受けて残存試験の方が 20 % 程度大きい。ただし、最大たわみは PR-1 の単調載荷が小さいのを除き他はほぼ同様である。ここで、残存試験での第 2 勾配の増加は前述したように本ロッドの組紐構造に関連すると考えられる。このように、残存試験の耐力および残留たわみを除いた最大たわみは単調載荷と比べて同程度以上であることから、200 万回の繰り返しによる耐力および変形性能の低下は材令の増加に伴うコンクリート強度の増加で補われる程度のものであることが推察される。

(2) 曲率と繰り返し回数の関係

はり中央の変位計が繰り返し途中で異常となった試験体もあるが、支点付近のたわみは PR-3 を除いて 200 万回近くまで良好に測定されている。そこで、PR-3 を除く試験体のはり中央のたわみを支点付近のたわみを用いて類推した。類推方法を以下に示す。

たわみ曲線を 4 次曲線とすると、たわみが良好に測定された回数までは支点付近の測点 4 点と中央のたわみより 4 次曲線の 5 つの未定係数が求まる。得られた未定係数のうち、係数マトリクスが解法できかつ高い相関関係にあったのは 2 次と 0 次の係数であり、この 2 次と 0 次の係数の相関係数は各試験体で 0.959 から 0.999 の間であった。相関係数が各試験体で不変であると仮定して、改めて初載荷より最終繰り返し回数までのはり中央のたわみを類推した。また、このようにして求めたはり中央のたわみと良好に測定された回数までの実測たわみは全試験体で相関係数 0.989 以上で一致した。

次に、この結果を用いた曲率と繰り返し回数の関係を図-5 に示す。曲率は 4 次曲線の極大値を与える軸方向位置での 2 回微分値とした。図-5 に示すように PR-1 を除いて曲率は増加傾向にあり特に PR-2 の曲率は他

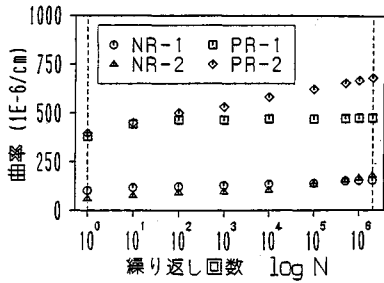


図-5 曲率と繰り返し回数の関係

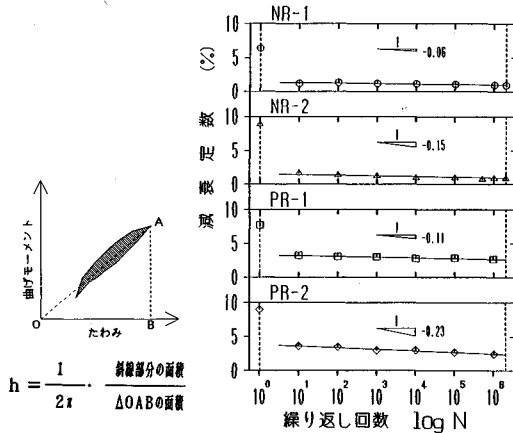


図-6 等価粘性減衰定数

図-7 減衰乗数の変化

の試験体に比べ大きく増加している。ロッドを主筋にした NR-2 の曲率は繰り返し回数が大きい段階で増加する傾向にあるが曲率の大きさは NR-1 と同程度である。これは、NR-2 の上限荷重が NR-1 の 1/4 程度と小さいものの、主筋の弾性係数も 1/3 程度と小さいことに関連すると考えられる。NR-2 を除く試験体の上限荷重はほぼ等しいが特に PR-2 の曲率が PR-1 に比べて大きく増加するのは PR-2 のデコンプレッションモーメントが PR-1 の 75% 程度と小さいためと考えられる。

(3) エネルギー吸収能に関する検討

エネルギー吸収能を示す指標として、図-6 の面積割合で定義される日本建築学会の両振りでの等価粘性減衰定数の算定方法¹³⁾を本実験の片振りに応用した。図-7 に等価粘性減衰定数と繰り返し回数との関係を片対数上に示す。曲げモーメントとたわみの関係は (2) の曲率と繰り返し回数の関係で類推した結果を使用した。

全試験体の減衰定数は初載荷では 6~9% 程度であるが繰り返し回数の増加とともに低下する傾向を示している。RC はりの減衰定数は繰り返し回数が 200 万回で約 1% であり PC はりは 100 万回で約 3% である。このように、PC はりの減衰定数は大きな繰り返し回数において RC はりよりも大きく PC はりのエネルギー吸収

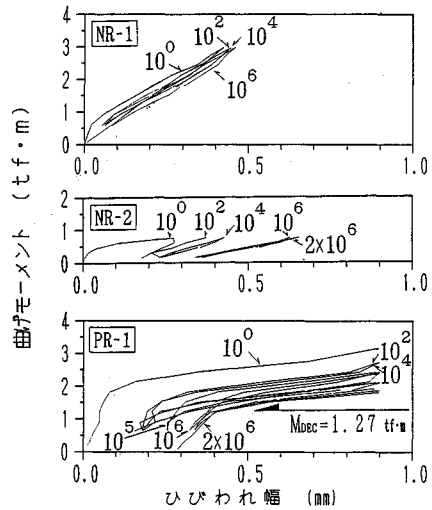


図-8 曲げモーメントとひびわれ幅の関係

能は RC はりよりも優れている。また、減衰定数の低下勾配は PR-2 が最も大きく曲率の増加が特に PR-2 で顕著であることに関連すると考えられる。

5. ひびわれからみた繰り返し疲労

図-8 に NR-1, 2 と PR-1 の曲げモーメントとひびわれ幅の関係を示す。ひびわれ幅は等曲げモーメント区間に配置した 10 cm 間隔の 4 測点の合計値である。

NR-1 の曲げモーメントとひびわれ幅の関係は線形的であり、単位曲げモーメント (1 tf·m) 当たりのひびわれ幅は初載荷と 200 万回でおのおの 0.19~0.16 mm 程度と繰り返しによらずほぼ一定である。また、下限荷重におけるひびわれ幅も 0.04 mm 程度で一定である。これは、異形鉄筋のひびわれ拘束効果が高く、繰り返しによって低下しにくいことを示すと考えられる。

NR-2 も NR-1 と同様に線形的であるが、単位曲げモーメント当たりのひびわれ幅は 0.35~0.5 mm 程度と繰り返しにより増加している。また、下限荷重におけるひびわれ幅は NR-1 と比較して大きく、繰り返しにより 0.2 mm 程度から 0.35 mm 程度に増加している。ただし、100 万回と 200 万回では大差がない。

PR-1 は M_{DEC} を超えるとひびわれ幅が急増するが M_{DEC} を超えた領域のモーメントとひびわれ幅の関係はほぼ線形的である。単位曲げモーメント当たりのひびわれ幅は 0.7~0.8 mm 程度であり繰り返しによる変化は少ない。下限荷重におけるひびわれ幅は 0.18~0.35 mm 程度と繰り返しにより増加している。このように、PR-1 の下限荷重でのひびわれ幅は NR-1 と比べて変化量も絶対量も大きい。これは、NR-1 と NR-2 の比較から推察されるように、ロッドのひびわれ拘束効果が異形

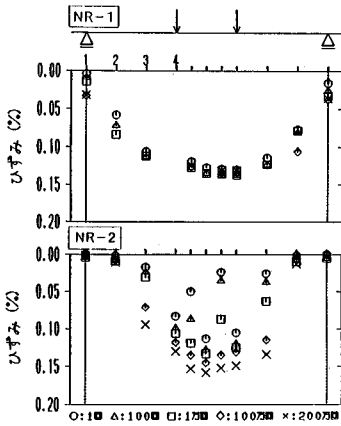


図-9 主筋のひずみの変化

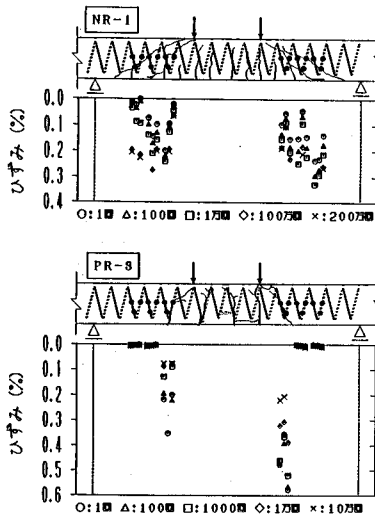


図-10 スパイラルロッドのひずみの変化

鉄筋よりも低いことや NR-1 と比べて PR-1 の曲げ補強材の量が少ないことおよび補強材の弾性係数が低いことなどに関連すると考えられる。

6. 補強筋のひずみからみた繰返し疲労

(1) 補強筋のひずみの軸方向分布の変化

NR-1, 2 の主筋のひずみの繰返しによる変化を図-9 に示す。NR-1 は初載荷でせん断ひびわれが発生し繰返しによりせん断区間の主筋のひずみが増加しさらに支点部分にもひずみが徐々に発生した。しかし、等曲げ区間のひずみの繰返しによる増加はわずかである。一方、NR-2 は上限荷重が小さく定着部を補強したため支点付近のひずみは繰返し回数が増加しても顕著には増加していない。しかし、等曲げ区間および載荷点に近いせん断区間のひずみは繰返しによって大きく増加した。

次に、スパイラルロッドのひずみの繰返しによる変化を図-10 に示す。異形鉄筋を主筋とした NR-1 のスパイラルロッドの全計測点にはひずみが発生し、ひずみは繰返しによって増加した。また、ひずみはゲージ位置（たとえば、はりせい中央、はり下端のロッド隅角部、ひびわれ方向に対するスパイラルロッドの角度）によっても変化している。これに対し、ロッドを PC 緊張材に用いた PR-3 は載荷区間外側のひびわれの幅が拡大したため、この付近のスパイラルロッドにのみひずみが発生している。しかし、計測されたひずみの最大値は破断ひずみの 2.1% に比べて 1/4 程度と小さく、ひずみは繰返し回数が 1000 回で減少し始め 10 万回では初載荷の 1/2 程度に減少した。これはスパイラルロッドにそったひびわれが発生し、はりせい中央でひびわれがスパイラルロッドを横切らないためロッドのせん断補強効果が初載荷から十分に有効でなく、前述したように初載荷における PR-3 のスパイラルロッドのひずみの実測値が計算値よりも小さく、さらに繰返しにより低下したことが要因と考えられる。

(2) 付着係数の繰返しによる変化

はりの中立軸が変化する要因の 1 つに主筋の付着性能の低下が考えられる。ここでは、RC はりの主筋のひずみとコンクリート圧縮縁のひずみの繰返しによる変化に着目して付着性能の低下を検討した。

初載荷で平面保持が成立したと仮定すると、はりの中立軸は実測のコンクリート圧縮縁ひずみと主筋のひずみより決定される。この中立軸の位置をもとに 200 万回繰返し後のコンクリート圧縮縁の実測ひずみからスパン中央における主筋位置でのひずみが求まる。ここでは、このようにして求められたひずみと実測の主筋のひずみとの割合を付着係数と定義した。

なお、RC はりの中立軸は断面に対して力のつり合いと平面保持を仮定すると材料試験結果より応力にかかわらず決定され、その値は NR-1 で 8.89 cm, NR-2 で 5.52 cm であり、実測値をもとにして平面が保持されると仮定したときの値と 3~4% 程度の差で一致した。

NR-1, 2 の 200 万回繰返し後の上限荷重での付着係数を表-7 に示す。異形鉄筋は大きな上限荷重の繰返しによっても付着係数が低下せず、ロッドは M_{Cr} をわずかに超える荷重でも 200 万回の繰返しにより初載

表-7 付着係数の変化

試験体名	中立軸の位置 (cm)	実測コンクリート圧縮縁ひずみ (%)		実測主筋ひずみ (%)		同算定値 (%)	付着係数 ①/②
		初載荷	200 万	初載荷	200 万		
NR-1	8.56	0.085	0.091	0.127	0.125	0.122	1.02
NR-2	5.34	0.039	0.071	0.106	0.158	0.195	0.81

荷の付着係数の 80 % 程度に低下する。これは曲率や等曲げ区間の主筋のひずみが繰り返により増加することに密接に関連するものと考えられる。

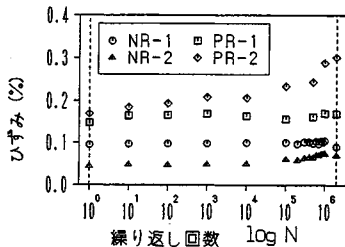
7. 疲労に対する安全性の検討

(1) コンクリートの曲げ圧縮疲労に対する検討

ロッドを主筋や緊張材に用いたはりのひびわれは荷重区間とその周辺に集中しはり上縁にまで進展して圧縮域が減少するため、コンクリートの曲げ圧縮疲労の検討も重要であると考えられる。図-11 に 200 万回の繰り返して破壊しなかった試験体のコンクリート圧縮縁の実測ひずみと繰り返回数との関係を示す。

異形鉄筋を主筋とした NR-1 のひずみは 0.1 % 程度で繰り返しによらずほぼ一定である。これに対し、ロッドを主筋とした NR-2 のひずみは 0.04~0.07 % と log N に対し単調増加傾向にある。M_{DEC} が PR-2 より大きくスターラップでせん断補強した PR-1 のひずみは 0.16~0.17 % でほぼ一定である。一方、M_{DEC} が小さくスパイラルロッドで補強した PR-2 のひずみは 0.17~0.30 % と増加し、特に大きな繰り返回数での増加が顕著である。これら NR-2 と PR-2 の繰り返によるひずみの増加は付着係数の低下や曲率の増加と密接に関連すると考えられる。

次に、示方書のコンクリートの設計疲労強度式をもとに曲げ圧縮疲労の観点からロッドを緊張材に用いたはりの実験結果を検討した。検討は上限荷重が大きく、200 万回の繰り返しても破壊しなかった PR-1, 2 について行った。実験結果は実測の永久荷重による応力度を用いた 200 万回での計算疲労強度 f_{rd} と実測変動応力 σ_{srd} との比で整理した。ここで、 σ_{srd} は初載荷の上限荷重におけるコンクリートの実測ひずみから減力時の下限荷重におけるひずみを差し引いて、式 3) の永久荷重による応力度 σ_p は初載荷の減力時における下限荷重での実測ひずみにプレストレスによるひずみを加えて、おのおの矩形応力分布として応力度に変換した。弾性係数と f_u は



式 3) : コンクリートの疲労強度式
 $f_{rd} = \alpha_1 \cdot f_d \cdot (1 - \sigma_p / f_d) \cdot (1 - \log N / K)$
 ここで、 α_1 : 0.85, f_d : コンクリートの圧縮強度, K : 17, σ_p : 永久荷重による応力度, N : 繰り返回数

図-11 コンクリートのひずみの変化

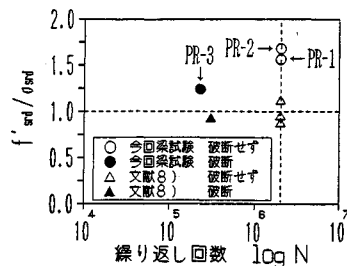
表-2 の値を用いた。

f_{rd} / σ_{srd} の計算結果は PR-1, 2 でおのおの 0.83 と 0.75 となり 1.0 を下回ったが、実験では疲労破壊していない。また、短期的な繰り返疲労試験であることを考慮し、試みとしてコンクリートの強度低下などに関する係数 α_1 を 1.0 と大きくしても比率はおのおの 0.98 と 0.88 となり 1.0 を下回る。以上より、ロッドを緊張材に用いたはりの実験結果は示方書のコンクリートの疲労強度式で安全側に包括されていると考えられる。なお、安全係数はすべて 1.0 とした。

(2) ロッドの引張疲労に対する検討

ロッドの引張疲労の観点から、文献 8) でのロッド単体での引張疲労試験結果と PC はりの緊張材に用いた結果 (PR-1, PR-2, PR-3) を同一の尺度のもとで位置づけし比較検討することを試みた。本来、ロッドの疲労に関する検討はロッド自身の S-N 線図をもとに行われるべきであるが S-N 線図がまだ得られていないので示方書の鋼材式を補正して用いることにした。示方書式にロッドを対応させるために補正係数として鋼材とロッドの弾性係数比を乗じた。これは示方書の応力式をひずみで評価したことにほかならない。実験結果は実測の永久荷重による応力度を用いた当該繰り返回数における計算疲労強度 f'_{srd} と実測変動応力 σ_{srd} との比で整理した。実測変動応力 σ_{srd} は初載荷の上限荷重におけるスパン中央のロッドの実測ひずみから減力時における下限荷重でのひずみを差し引いて、式 4) の永久荷重による応力度 σ_{sp} は初載荷の減力時における下限荷重での実測ひずみに初期緊張によるひずみを加算して求めた。弾性係数と f_u は表-3 に示す値を用いた。

各試験体の f'_{srd} / σ_{srd} と N の関係を図-12 に示す。引張疲労試験では 2 体が比率 1.0 以下でも破断しておらず、同試験結果は本方法で安全側に包括されていると考えられる。はりの試験では比率が 1.0 以上の PR-3 が



式 4) : ロッドの疲労強度式

$$f'_{srd} = n \cdot 1900 \cdot \frac{10^{\alpha}}{N^{\alpha}} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_u} \right)$$

ここに、 α : 0.82~0.003 ϕ , ϕ : ロッドの直径 (16 mm), f_u : ロッドの引張耐力, N : 繰り返回数, n : 弾性係数比 (E_s / E_r), α : 0.12, σ_{sp} : 永久荷重による応力度

図-12 f'_{srd} / σ_{srd} と N の関係

破断しており、同試験結果は本方法では安全側に包括されないことがあると考えられる。この要因としてPR-3のひびわれがスパイラルロッドにそって発生したためスパイラルロッドのせん断補強効果が十分に有効でなく、緊張材に大きなグボ力が作用し、ロッドがひびわれ面のコンクリートとこすれて疲労破断したことが考えられる。なお、安全係数はすべて1.0とした。

8. ま と め

主筋やせん断補強筋に用いたロッドの付着追随性は繰り返しにより異形鉄筋よりも低下すると考えられ、これは曲率やコンクリート圧縮縁のひずみおよび補強筋のひずみの増加に密接に関連していると考えられる。

次に、ロッドを緊張材として用いると弾性係数が低くても異形鉄筋と同様な割合で繰り返しによるたわみの増加を抑制できる。また、 M_{DEC} はロッドを緊張材に用いたはりの曲げ繰り返し載荷でも重要な指標であり、繰り返しによる曲率や単位曲げモーメント当たりのひびわれ幅の増加は M_{DEC} が大きければ抑制されると考えられる。

なお、ロッドのひびわれ拘束効果は弾性係数や付着追随性の低さに関連して異形鉄筋よりも低いと考えられるが繰り返し後のPCはりのエネルギー吸収量はRCはりよりも大きく、PCはりの優位性は保たれている。

また、疲労試験で破壊した試験体を除き、200万回の繰り返し疲労を経た試験体の終局耐力や変形性能は材令は異なるが疲労を経験しない試験体と比べて同程度以上であった。これから、本実験における繰り返しによる損傷は材令の増加に伴うコンクリート強度の増加で補われる程度のもので推察され、本ロッドの疲労条件下でのコンクリート補強材への適用は荷重条件によっては可能であると考えられる。

コンクリートの曲げ圧縮疲労の観点からPCはりの安全性を検討した結果、本実験結果は示方書式で安全側に包括されていると考えられる。同様に、ロッドの引張疲労の観点から安全性を検討した結果、引張疲労試験結果は鋼材の疲労強度式をひずみで評価する方法で安全側に包括されるがはりの繰り返し疲労試験結果は安全側に包括されないこともあると考えられる。これはコーナー筋が配置されていないことやロッド1本のみを緊張材に用いたことなどに関連すると考えられる。

今回の実験からPC緊張材に用いたロッドの引張疲労条件下における安全性ははりの配筋などに関連して大

きく変化することが考えられ、今後は試験体の配筋や形状およびせん断スパン比などを変化させた実験を行いデータをさらに蓄積することが必要と考えられる。

また、スパイラルロッドのせん断補強筋としての適用性を静的および繰り返し疲労の両面からさらに詳細に検討する必要があると思われる。

最後に、本研究を行うにあたり千葉工業大学助手の渡邊一弘氏ならびに卒論生の白井美穂子さん（現・東京消防庁）と山崎正子さん（現・構造計画研究所）の多大なご協力を得ました。深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 長滝重義・佐藤良一：GFRP-BARで緊張したPC部材の力学的特性，東京工業大学土木工学研究報告，No.17，pp.33～46，1974.12.
- 2) 石田・小林・趙・則武：FRPロッドを用いたプレストレストコンクリート用緊張材の開発研究，コンクリート工学年次論文報告集8，pp.657～660，1986.
- 3) 古川・辻・大谷・小島：CFRCロッド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11-2，pp.849～854，1989.
- 4) 福沢・沼尾・吉本・野崎：FRPロッドを緊張材としたレジンコンクリートはりの曲げ性状，土木学会第42回年次学術講演会講演概要集，V-75，pp.188～189，1987.
- 5) 三上・加藤・田村・能町：組紐状AFRPロッドのPC緊張材としての定着および付着特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.36A，pp.1191～1202，1990.
- 6) 遠藤・石橋・岡本・谷垣：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はりのせん断性状，コンクリート工学年次論文報告集11-1，pp.807～812，1989.
- 7) 小沢一雅・関島謙蔵・岡村 甫：FRPで補強したコンクリートはりの曲げ疲労特性，コンクリート工学年次論文報告集9-2，pp.269～274，1987.
- 8) 岡本・田村・松原・谷垣：アラミド繊維による組紐状棒材の基本的特性，コンクリート工学年次論文報告集10-2，pp.659～664，1988.
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編（昭和61年制定），pp.15～32，43～87.
- 10) 寺田年夫・涌井 一，島取誠一：FRP棒材を緊張材に用いたコンクリートはりのせん断耐力について，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集，V-264，pp.582～583，1989.
- 11) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料，鉄筋コンクリート柱の強度と靱性，pp.75～76，1987.9.

（1990.5.30・受付）