

論文

[1201] 組紐状AFRPロッドで補強したコンクリート梁の疲労性状

正会員 〇三上 浩 (三井建設土木設計部)

正会員 加藤正利 (三井建設土木設計部)

正会員 田村富雄 (三井建設技術開発推進部)

正会員 石橋一彦 (千葉工業大学建築学科)

1. はじめに

最近、各種の新素材繊維（例えば、炭素、ガラス、アラミ繊維等）を収束したFRPロッドを、コンクリートの曲げおよびせん断補強材として用いる研究が盛んに進められている。すでに筆者らも、組紐状AFRPロッド（組紐状に成形したアラミ繊維製のFRPロッド、以下ロッド）をPC緊張材として用いた際の、定着および付着特性¹⁾やスパイラル状のロッドをせん断補強筋として用いたRC梁のせん断性状を報告した。²⁾

一方、道路、鉄道、海洋構造物等では、静的耐荷挙動のみならず、繰返し荷重下における疲労性状の把握も重要であると考えられる。しかし、新素材の引張疲労性状や新素材を用いたコンクリート梁の繰返し荷重下における疲労性状の研究例は少ない様に思われる。³⁾⁴⁾そこで、本研究では、ロッドを主筋やPC緊張材およびスパイラルせん断補強筋に用いたコンクリート梁の、曲げ繰返し載荷試験を行い、組紐状AFRPロッドで補強した梁の疲労性状の把握を試みた。

2. 試験体の概要

試験体は表-1 に示すように、RC梁 2種類とPC梁 3種類で、各々 2体製作し、単調載荷と繰返し載荷試験を行った。

RC梁の主筋とせん断補強筋は、それぞれ異形鉄筋またはロッドとし、各試験体で異種材料を構成材料として組合わせた。

PC梁はロッド1本を緊張材に用いたプレテンション方式PC梁で、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。ロッドは、コンクリート打設前に、引張耐力(P_u)の約45%

表-1 試験体の一覧

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)	繰返し荷重 (tf)		上限荷重の静的耐力との比
			上 限	下 限	
NR-1	異形鉄筋 D19 N=3	スパイラルロッド 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	0.26
PR-1	K256S N=1 (0.45 P_u)	スターラップ D6 @100	10.4	2.1	0.67
PR-2	K256S N=1 (0.45 P_u)	スパイラルロッド K48@100	11.0	2.2	0.67
PR-3	K256S N=1 (0.45 P_u)	スパイラルロッド K48@100	14.1	7.0	0.88

表-2 コンクリートの配合と力学的性質

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 $\times 10^4$ (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)	疲労試験材令 (日)
	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤						
NR-1	308	178	880	925	0.77	17	321	2.42	26.9	41.0	15~23
NR-2	284	179	837	994	0.71	45	223	1.85	14.0	38.7	45~54
PR-1	433	171	756	966	1.08	41	393	2.58	26.0	57.9	24~33
PR-2											35~48
PR-3											49~51

で初期緊張し、プレストレスは材令 7 日に導入した。繰返し載荷の上限荷重は静的耐力の30~90%程度とし、下限荷重は上限の約20%とした。ただし、PR-3は試験機の能力の制約のため、下限荷重を上限の約50%とした。

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13mmとした。単調載荷試験の材令はRC梁で13日と55日、PC梁で14~15日である。表-3 に補強材の力学的性質を示す。ロッドは、直径12μ

表-3 補強材の力学的性質

補強材の材質	断面積 (cm ²)	弾性係数 $\times 10^4$ (kgf/cm ²)	引張耐力 (tf)
異形鉄筋 D19	2.87	2.00	15.2
異形鉄筋 D6	0.32	2.00	1.7
ロッド K256S	2.00	0.65	23.3
スパイラルロッド K48	0.38	0.61	4.9

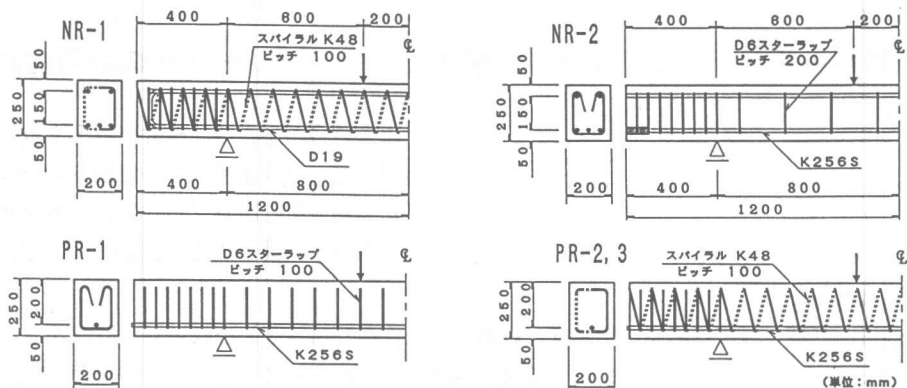


図-1 試験体の形状寸法

のアラミ繊維を6000フィラ束ねた糸（K256Sで32本、K48で6本）を1組とし、8組を組紐機で編み上げ、樹脂を含浸硬化して成形した。ともに、組紐の凹凸はロッド径の10倍の区間内に4回生じ、繊維の体積含有率は約65%である。末尾のSはロッド表面に5号珪砂を接着したことを示す。

図-1に示すように、試験体は20X25X240cmの矩形梁であり、加力はせん断部と梁の有効高さの比が3.0の2点荷重で行った。

3. 試験方法

疲労試験は荷重能力が50tfの油圧式疲労試験機（サポルサ）で行った。荷重は、表-1に示す荷重を上下限值とする正弦曲線の片振り繰返し荷重とした。繰返しは2サイクルまで静的に行い、以後荷重速度を3Hz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回荷重し、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た。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（ダイヤルゲージとバイゲージを併用）にて行った。変位計と試験体および基準面（テフル）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、梁側面の主筋およびPC緊張材高さでコンタクトゲージによって行った。また、補強材および梁中央のコンクリート圧縮縁のひずみはワイヤー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枚のゲージで測定した。

4. 試験結果および考察

4.1 試験結果の一覧

表-4に試験結果をまとめた。梁下縁応力度は、フルスリを導入した翌日の緊張材の実測ひずみを基に算出した。ロッドの初期緊張力に差が生じたため、梁下縁応力度とそれに基づくデコンプレッション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梁では表-2に示す曲げ強度より、PC梁では曲げ強度にフルスリによる梁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。

表中の最大たわみは上限荷重でのたわみである。ロッドを主筋に用いたNR-2の、200万回および100万回繰返し後のたわみと初荷重のたわみの比は、 M_{CR} をわずかに超えた上限荷重において、各々約2.7と2.3である。一方、NR-1とPR-1は上限荷重がほぼ等しく、100万回繰返し後のたわみと初荷重のたわみの比は各々1.4と1.3程度と大差がない。また、NR-2よりも上限荷重が4倍程大きいにも関わらず、たわみの比はNR-2の60%程度である。これらから、鋼材に比べて弾性係数が低いロッドでも、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返しによるたわ

表-4 試験結果の一覧

試験体名	疲労試験								単割載荷試験	
	梁下縁 応力度 (kgf/cm ²)	デンプラッシュ ンメント M _{DEC} (tf・m)	M _{OR} の 実測値 (tf・m)	M _{OR} の 計算値 (tf・m)	① 初載荷 最大たわみ (mm)	② 最終計測 最大たわみ (mm)	最大たわ みの比 ② / ①	破 壊 形 式	最大 耐力 (tf)	最 大 たわみ (mm)
NR-1	—	—	0.90	0.85	3.50	200 万回 5.03 (100万回) 4.32	1.44 1.41	200 万回で 破壊せず	19.5	22.9
NR-2	—	—	0.62	0.81	1.32	200 万回 3.54 (100万回) 3.10	2.68 2.35	200 万回で 破壊せず	9.6	18.0
PR-1	60.8	1.27	2.14	2.47	5.54	100 万回 * 7.39	1.33	200 万回で 破壊せず	15.5	24.4
PR-2	45.6	0.95	2.16	2.16	7.10	100 回 * 9.03	1.27	200 万回で 破壊せず	16.5	28.7
PR-3	55.2	1.15	2.40	2.38	12.62	10万回 19.50	1.55	229000回で UPD 破断	16.0	26.0

*は変位計に繰返し途中で異常があり、以後のデータは採用していない。

みの増加を抑制できる。

PR-3は、約23万回の繰返しで、初載荷に生じたせん断ひびわれ位置でロッドが疲労破断したが、他は200万回の繰返しでも破壊しなかった。また、表には単調載荷試験の結果も示した。

4.2 ひびわれ発生状況

NR-1、2とPR-1のひびわれ状況を図-2に示す。

図中、回数の添記がないひびわれ箇所は、繰返し回数が1~2回で生じたものである。上限荷重の大きいNR-1では、せん断ひびわれが、初載荷で加力点と支点を結ぶ方向に発生し、これは曲げひびわれとともに繰返しによって梁上縁にまで進展した。

上限荷重が小さく、ロッドで補強したNR-2の初載荷でのひびわれは、等曲げモーメント区間に集中するが、せん断区間にも小さなひびわれが発生した。等曲げ区間のひびわれは、40万回までの繰返しにより梁上縁にまで上昇するが、以後は進展してないひびわれが1本発生した。

上限荷重の大きいPR-1のひびわれは、等曲げモーメント 区間に集中する傾向が見られ、初載荷から梁の上部にまで達した。さらに、上部にまで達したひびわれは、繰返し回数が増加すると、水平方向に発生したひびわれに連結する傾向が見られる。

4.3 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。異形鉄筋で曲げ補強したNR-1の、上下限荷重におけるたわみ差は、200 万回の繰返し後も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、ワッドを主筋としたNR-2は、上限荷重が小さいにも関わらず、上下限荷重におけるたわみ差は初載荷で0.9 mm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徐々にゆるやかになっている。PR-1の下限荷重におけるたわみは、初載荷で1mm 程度が100 万回の繰返し後でも2mm 程度と、NR-1と同様に、わずかに約1mm の増加である。すなわち、プラスチックによ

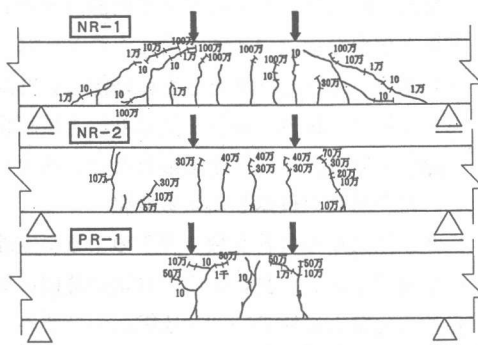


図-2 ひびわれ状況

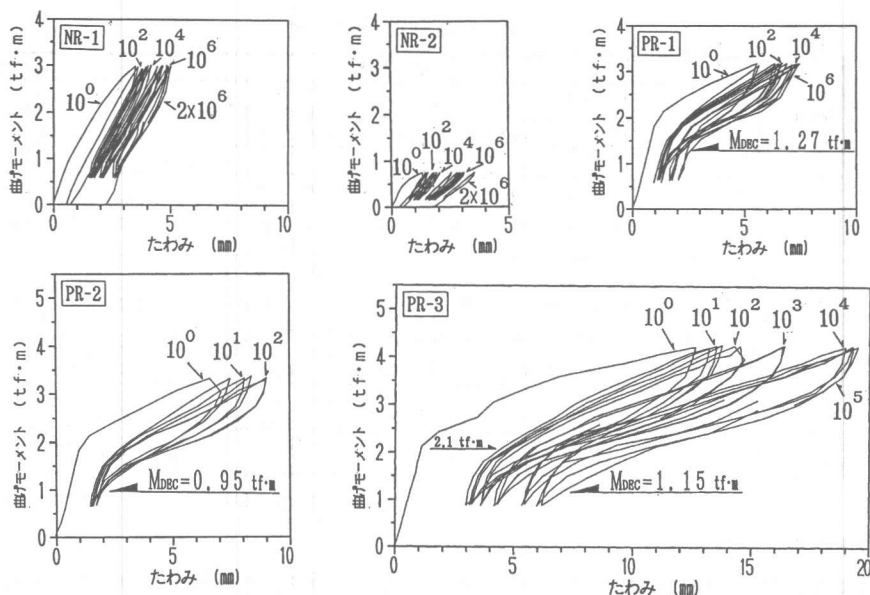


図-3 曲げモーメント とたわみの関係

る残留たわみの抑制効果は、100 万回の繰返しでも残っていたと考えられる。

また、PR-1は、 M_{DEC} において変曲点が表れており、 M_{DEC} はRFD を緊張材に用いた梁の繰返し載荷後も重要な指標であると考えられる。なお、繰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、繰返し回数とともに増加し、フルスパンの効果が損なわれてきたことが判る。ここで、PR-3の計測は、繰返し載荷と異なり、上限荷重の約20% を下限荷重として行った。PR-1,2は、繰返し途中で変位計に異常があったため、各々 10^0 、 10^2 回までの結果を示した。

4.4 付着係数の繰返しによる変化

曲げ補強筋の付着係数は以下のように定義した。試験体の断面に対して、力の釣合いと平面保持を仮定すると、RC梁の中立軸の位置は材料試験結果より応力に関わらず決定される。この中立軸の位置と実測のコンクリート圧縮縁のひずみより、スパン 中央における補強筋位置でのひずみが計算できる。ここでは、この計算ひずみと実測の補強筋ひずみとの割合を付着係数と定義した。

NR-1,2の、各繰返し回数における上限荷重での付着係数を表-5 に示す。異形鉄筋の付着係数は大きな上限荷重を繰返して

表-5 付着係数の繰返しによる変化

も低下せず、RFD は M_{CR} をわずかに超える荷重でも、200 万回の繰返しによって初載荷の付着係数の0.8 程度に低下する。

試験体名	中立軸の位置 (cm)	コンクリート圧縮縁ひずみ (%)		① 主筋ひずみ (%)		② 同 計算値 (%)		付着係数 ①/②	
		初載荷	200回	初載荷	200回	初載荷	200回	初載荷	200回
NR-1	8.56	0.095	0.091	0.127	0.125	0.127	0.122	1.00	1.02
NR-2	5.34	0.039	0.071	0.106	0.158	0.107	0.195	0.99	0.81

4.5 曲げモーメント とひびわれ幅の関係

図-4 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10cm間隔のコンタクトゲージの合計値である。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 あたりのひびわれ幅は、初載荷と200 万回で0.19~0.16mm 程度と、繰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、0.04mm程度でほぼ一定である。これらは、異形鉄筋のひびわれ拘束効果が高く、繰返しによって低下しにくいことを示

ずものと考えられる。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あたりのひびわれ幅は0.35~0.5mm程度と繰返しにより増加している。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。ただし、この図は、各ゲージの0.6mm程度以上の計測値が大きく変動するため、これらの値を除いて示したものである。単位曲げモーメントあたりのひびわれ幅は、0.7~0.8mm程度であり、繰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0.18~0.35mm程度と繰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、 $\square$ のひびわれ拘束効果が異形鉄筋よりも低いことや、NR-1とPR-1で曲げ補強材の量と弾性係数が異なること等に関連するものと考えられる。

4.6 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

前述したように、 $\square$ を主筋や緊張材に用いた梁のひびわれは等曲げ区間に集中し、梁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-5に、200万回の繰返しで破壊しなかった試験体の、上限荷重におけるコンクリート圧縮縁の実測ひずみ度と繰返し回数の関係を示す。異形鉄筋を主筋としたNR-1のひずみ度は、0.1%程度で繰返しによらずほぼ一定である。一方、 $\square$ を主筋としたNR-2のひずみ度は、0.04~0.07%と $\log N$ に対して単調増加傾向にある。

D6スターラップでせん断補強した、PR-1のひずみ度は、0.16~0.17%でほぼ一定であるが、スパイラル $\square$ で補強したPR-2は0.17~0.30%と増加しており、特に大きな繰返し回数での増加が顕著である。

次に、土木学会コンクリート標準示方書、設計編⁵⁾（以下示方書）に準拠して、PR-1、2の200万回繰返し後の疲労強度 f_{rd} と変動応力 σ_{rd} の比を求めた。 σ_{rd} 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、(1)式の 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 κ_1 によるひずみを加えて、各々矩形応力分布として応力度に変換した。弾性係数と f_d は表-2の値を用いた。計算結果は、PR-1、2で各々0.83、0.75となり、1.0を下回ったが、実験では疲労

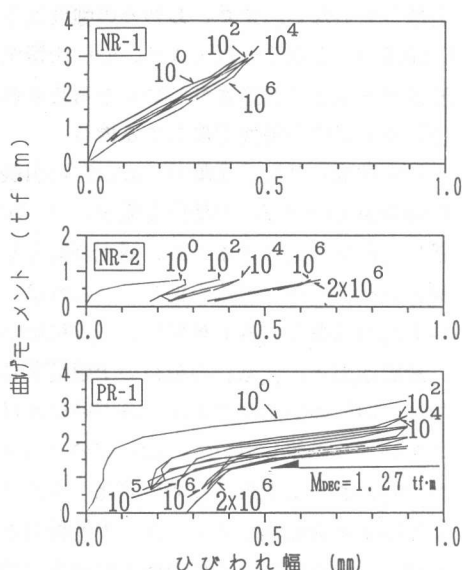


図-4 曲げモーメントとひびわれ幅の関係

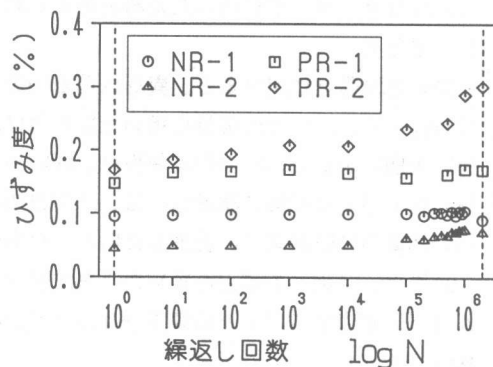


図-5 コンクリートのひずみ度とNの関係

$$f_{rd} = \kappa_1 \cdot f_d \cdot (1 - \sigma_p / f_d) (1 - \log N / K)$$

ここに、 κ_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 : 繰返し回数

(1) 式： コンクリートの疲労強度式

破壊していない。また、コンクリートの強度低下などに関する係数 κ_1 を1.0とすると、比率は各々0.98、0.88となる。以上より、ロッドを緊張材に用いた梁の試験結果は、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

示方書式を基に、文献3)でのロッドの引張疲労試験結果とPR-1、2、3の結果を検討した。示方書式にロッドを対応させるため、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。

変動応力 σ_{srd} は、初载荷の上限荷重におけるM/C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、(2)式の σ_{sp} は、初载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_{ud} は表-3に示す値を用い、 ϕ は表面の珪砂を無視したロッド径とした。

各試験体の f'_{srd} / σ_{srd} とNの関係を図-6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。梁の試験では、比率が1.0以上のPR-3が破断しており、同試験結果は本方法では安全側に包括されないこともあると考えられる。これは、スパイラル筋でせん断補強したPR-3のひびわれが、載荷点近くに集中し、ロッドに大きなせん断力が作用したためと考えられる。なお、安全係数はすべて1.0とした。

5. まとめ

- (1)ロッドを緊張材に用いると、異形鉄筋と同等な割合で繰返しによるたわみの増加を抑制できる。
- (2) M_{DEC} は、ロッドを緊張材に用いた梁の曲げ繰返し試験においても、重要な指標と考えられる。
- (3)主筋に用いたロッドの付着係数は、200万回の繰返しで、初载荷の0.8程度に減少する。
- (4)ロッドを用いたPC梁の試験結果は、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。
- (5)PC梁の試験結果は、提案したロッドの疲労強度式では安全側に包括されないこともある。

最後に、多大なご協力を頂いた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)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1)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、1990、pp1191~1202
- 2)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梁のせん断性状」コンクリート工学年次論文報告集 11-1、1989、pp807~812
- 3)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、1988、pp659~664
- 4)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、1987、pp269~274
- 5)土木学会コンクリート標準示方書(設計編) 主に、pp15~33 およびpp74~88

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

ここに、 α : 0.82-0.003 ϕ ϕ : ロッドの直径(18mm)
 f_{ud} : ロッドの引張耐力 N : 繰返し回数
 n : 弾性係数比 (E_s / E_{AFRP})
 κ : 0.12 σ_{sp} : 永久荷重による応力度

(2) 式：ロッドの疲労強度式

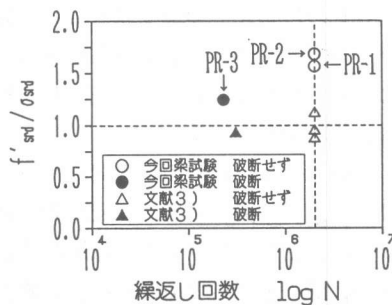


図-6 f'_{srd} / σ_{srd} と N の関係