

[2046] FRP で補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状

正会員 ○ 小沢 一雅 (東京大学工学部)
 正会員 関島 謙蔵 (清水建設技術開発部)
 正会員 岡村 甫 (東京大学工学部)

1. はじめに

近年、コンクリート中の鋼材の腐食によるコンクリート構造物の劣化が問題となっている。これを抜本的に解決するために、鋼材の代わりに耐食性、耐薬品性に優れたFRP (Fiber Reinforced Plastics) 筋をコンクリート補強材に使用する方法が開発された〔1, 2〕。このFRP筋は、(1)各種の連続繊維をハイブリッド化することによって、応力-ひずみ関係を任意に設定できるが、一般に鉄筋よりも弾性係数が小さい、(2)素材自体の付着は小さいけれども、格子状に成形することによって交差部でコンクリートとの付着を確保している、等の特徴を持っている。また、FRPの疲労特性は金属などの均質材料とは異なるとの報告もあり〔3〕、橋梁床版のように自動車荷重等の繰り返し荷重を受けるコンクリート部材にFRP筋を補強材として使用するためには、静的特性だけでなく、その疲労特性も把握しておく必要がある。

そこで、スターラップにもFRP筋を使用し、主筋とともに3次元構造に一体成形した立体格子型のFRP筋を鉄筋の代わりに補強材として用いたコンクリートはりの静的曲げ試験および疲労試験を行い、FRP筋の材料特性がはりの疲労特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験の概要

2.1 使用材料および供試体

使用したFRP筋は、炭素繊維とガラス繊維から成る連続繊維束にビニルエステル樹脂を含浸させ、主筋用繊維束とスターラップ用繊維束を交互に数回交差させながら3次元構造に一体成形したものである(図-1)。FRP筋は軸方向のみ繊維強化されていて、また主筋とスターラップの交差部の強度も確保されている。従って、主筋と直交するスターラップがコンクリートとの付着の役割を果たし、はり供試体の端部においては定着の役割を果たしている。FRP筋の特性および主筋の荷重-ひずみ曲線を、それぞれ表-1および図-2に示す。

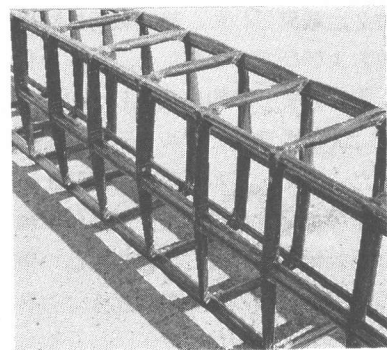


図-1 FRP筋の形状

表-1 FRP筋の特性

	繊維束の本数		基材含有率 VF (%)	断面積 Af (cm ²)	破断荷重 Tfu (kN)	最大ひずみ ε fu (%)	弾性係数 Ef (GPa)
	ガラス繊維 R2220	炭素繊維 HTA-7- 12000					
主筋	48	24	25.5	2.071	78.6	1.36	27.1
スターラップ	26	13	25.5	1.122	—	—	—

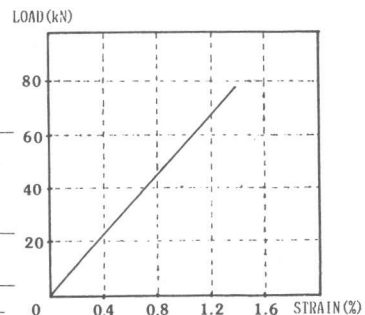


図-2 主筋の荷重-ひずみ関係

注) スターラップの引張試験は行っていない。

一般に、炭素繊維は弾性係数が大きいが破断ひずみが小さく(約 1.4%)、ガラス繊維は弾性係数が小さいが破断ひずみが大きい(2%以上)。両者をハイブリッド化すると、炭素繊維が切れた後にガラス繊維に引張力が乗り移り、ガラス繊維の破断まで伸びると言われている〔4〕。しかし、今回の主筋の引張試験では、図-2に示すように、炭素繊維の破断と同時にガラス繊維も破断した。

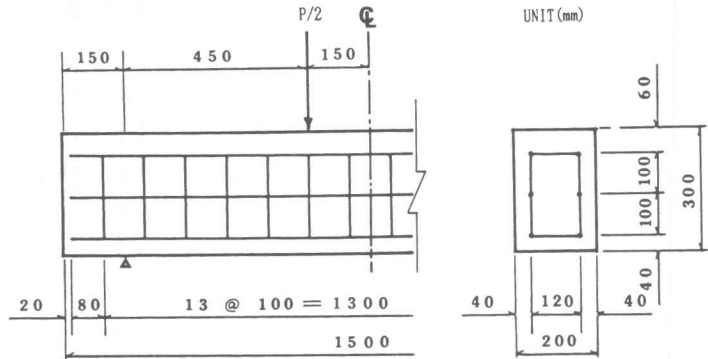


図-3 供試体の形状および荷重方法

る〔4〕。しかし、今回の主筋の引張試験では、図-2に示すように、炭素繊維の破断と同時にガラス繊維も破断した。

供試体の形状は、図-3に示すとおりであり、静的荷重試験用に2体、疲労試験用に8体製作した。コンクリートは、早強ポルトランドセメント、鬼怒川産細骨材および粗骨材(最大寸法25 mm)を用い、コンクリートの打設後7週間以上気中養生を行った。シリンダーの圧縮強度は、試験開始時に 39.4 MPa であり、その後の強度増加はわずかであった。また、弾性係数は30.4 GPa であった。

2. 2 荷重方法および測定項目

荷重方法は、図-3に示すようにスパン長さ 120cm、等曲げモーメント区間 30cm の単純ばり対称2点荷重とした。静的荷重試験においては、荷重を段階的に増加させ、破壊に至るまで荷重、変位およびひずみを測定し、ひびわれ状況を観察した。疲労試験においては、最初の2サイクルを上限荷重まで静的に荷重し、以降下限荷重との間で、毎分 200回 の速度でパルセータにより繰り返し荷重を行った。また、パルセータを適時止め、静的に荷重して荷重のチェック、およびひびわれ幅の測定を行った。ひびわれ幅の測定は、下段の主筋の重心位置における標点間距離10cmの長さの変化をコンタクトゲージまたはπゲージで行った。

3. 静的荷重試験結果および考察

試験結果を表-2に、ひびわれ状況を図-4に示す。

3. 1 ひびわれおよび破壊性状

曲げひびわれのほとんどは、スターラップに沿って発生し、最大ひびわれ間隔はスターラップの間隔のほぼ2倍の約20cmである。また、ひびわれは通常の鉄筋コンクリートはりに比べて上方までのびる。

破壊性状について見ると、

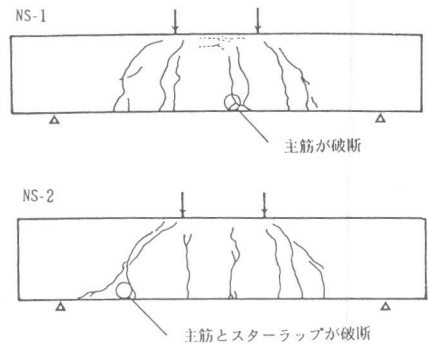


図-4 静的荷重試験後のひびわれ状況

表-2 静的荷重試験結果

供試体	曲げひびわれ発生荷重 (kN)	斜めひびわれ発生荷重 (kN)	破壊荷重 P_u (kN)	破壊形式
NS-1	34.3	88.3	234	等モーメント区間の主筋の破断
NS-2	29.4	98.1	225	せん断スパンの主筋とスターラップの破断

供試体NS-1は、等曲げモーメント区間において、ひびわれ近傍のスターラップとの交差部で下段の主筋が2本とも破断すると同時に、圧縮側コンクリートが圧壊した。この時の破壊荷重は、引張側コンクリートを無視して下段の主筋が引張破断するとして計算した終局耐力にほぼ等しい。一方、供試体NS-2は、せん断スパン内の斜めひびわれ発生箇所におけるスターラップと下段の主筋の交差部で、はり前面側のスターラップとはり後面側の主筋が破断してせん断破壊を生じた。スターラップの破断荷重を土木学会のコンクリート標準示方書〔5〕に従ってトラス理論が適用できるとして計算すると約470kNとなるが、実験値はその半分以下である。その原因として、中立軸の位置が高いためコンクリートの圧縮部分が小さく、コンクリートの負担するせん断力が小さいこと、せん断ひびわれの幅が大きいため骨材のかみ合わせの影響が小さいことや、主筋の剛性が小さいためほぞ作用が小さい等が考えられる。これらを無視して、スターラップのみでせん断力を負担するとして計算しても約382kNとなり、実験値はまだこれよりも小さい。この原因は、スターラップは下段の主筋との交差部でほぼ直角に曲げられているので、せん断力によってスターラップに引張力が作用するとスターラップの下端には局部的に曲げ応力が生じ、引張耐力が低下するためと思われる。

3.2 荷重-ひずみ関係

図-5に、荷重と等曲げモーメント区間の下段の主筋および圧縮縁コンクリートの平均ひずみをそれぞれ示す。曲げひびわれ発生前は、全断面有効と仮定した弾性計算値とほぼ等しく、曲げひびわれ発生後は、引張側コンクリートを無視して求めた弾性計算値にほぼ等しくなる。FRP筋自体は付着が小さいけれども、10cm間隔に配置したスターラップとの交差部でコンクリートとの付着を確保しているため、曲げに関しては、従来の鉄筋コンクリートの曲げ理論の考え方が適用できる。なお、FRP筋は鉄筋に比べると弾性係数が小さい(鉄筋の約1/8)ので、曲げひびわれ発生後に中立軸がかなり上昇し(コンクリート上縁から約3.7cm)、曲げ剛性の低下が大きく(曲げひびわれ発生前の約1/18に低下)、下段の主筋の応力増加も大きい(曲げひびわれ発生前から約60MPaの応力増加)。

3.3 曲げモーメント-曲率関係

図-6に、スパン中央と両載荷点下の変位より求めた曲率と曲げモーメントとの関係を示す。測定区間に発生する曲げひびわれの本数によって曲率は大きく変化するので2本の供試体に違いが見られるが、曲げひびわれ発生前は全断面有効と仮定した計算値とほぼ等しく、曲げひびわれ発生後は、供試体NS-2は引張側コンクリートを無視した計算値に近い値となっている。供試

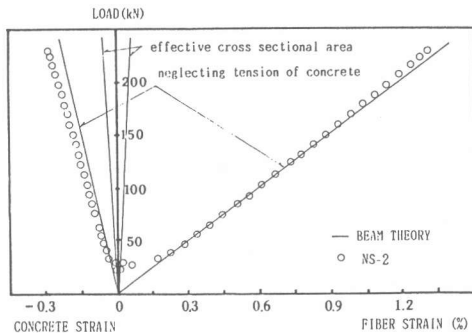


図-5 下段の主筋および圧縮縁のコンクリートの荷重-ひずみ関係

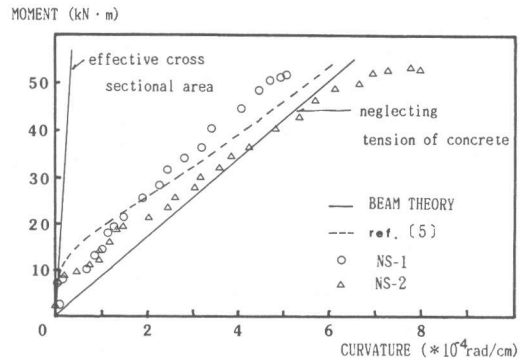


図-6 曲げモーメント-曲率関係

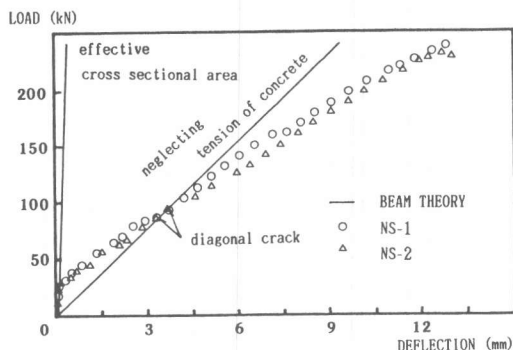


図-7 荷重-たわみ関係

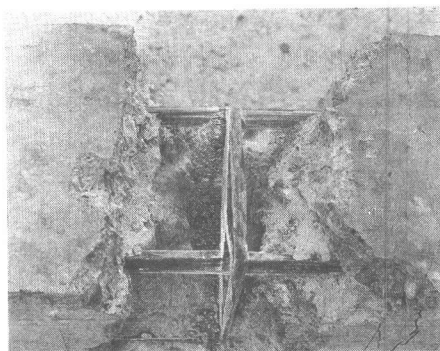


図-8 主筋の疲労破断箇所 (NC-1)

体NS-1については、曲げひびわれ発生後も計算値よりも剛性が若干大きいので、コンクリートも引張力を若干負担していることを示している。また、土木学会のコンクリート標準示方書に従って換算断面二次モーメントを用いた計算値も示した。ただし、ひびわれ発生モーメントは実験値に合わせた。

3. 4 荷重-たわみ関係

図-7に、スパン中央のたわみと荷重との関係を示す。曲げひびわれ発生前は全断面有効と仮定した弾性計算値とほぼ等しく、曲げひびわれ発生後は引張側コンクリートを無視した計算値に近づくが、せん断スパン内に斜めひびわれが発生すると実験値は計算値よりもさらに大きくなる。これは、計算値ではせん断変形を考慮していないことが原因であり、せん断スパンと有効高さの比が小さいこと ($a/d = 1.73$)、FRP筋の弾性係数が小さいためせん断剛性が小さいこと等に起因するものと思われる。

4. 疲労試験結果および考察

試験結果を表-3に示す。試験結果は、非常にばらついているが、破壊は等曲げモーメント区間の下段の主筋の疲労破断、せん断スパンの下段の主筋あるいはスターラップの疲労破断によって決り、破断はすべてひびわれの発生した近傍の主筋とスターラップの交差部で生じた。等曲げモーメント区間の下段の主筋が疲労破断した供試体の疲労破断箇所を図-8に示す。

4. 1 ひびわれ幅について

曲げひびわれは、ほとんどがスターラップに沿って発生し、スターラップの間に生じたひびわれはわずかであった。スターラップの間に生じたひびわれの幅は、スターラップ間(10cm)の主筋ののび量にはほぼ等しく、スターラップに沿って生じたひびわれの幅は、スターラップ間隔の2倍の長さ(20cm)の主筋ののび量にはほぼ等しくなった(図-9)。これは、FRP筋が交差部で付着を確保してい

表-3 疲労試験結果

供試体	上限荷重	P_{max}	T_{fmax}	疲労破断回数	FRP筋の 破断箇所(*)
	P_{max} (kN)	P_u	T_{fu}		
NC-1	122	0.519	0.517	1.43×10^6	下段の主筋(等)
NC-2	147	0.627	0.620	8.53×10^4	下段の主筋(等)
NC-3	134	0.573	0.569	$> 2.81 \times 10^6$	破壊せず
NC-4	141	0.602	0.594	4.50×10^4	スターラップ, 主筋(せ)
NC-5	141	0.602	0.594	1.30×10^5	下段の主筋(等)
NC-6	129	0.547	0.543	1.78×10^6	下段と中段の主筋(せ)
NC-7	129	0.547	0.543	1.68×10^5	スターラップ, 主筋(せ)
NC-8	129	0.519	0.517	7.53×10^5	下段の主筋(等)

注) P_u : はりの曲げ耐力 (= 234kN), T_{fmax} : 上限荷重時の下段の主筋の引張力
 T_{fu} : 主筋の引張耐力 (= 78.6kN), 下限荷重 $P_{min} = 18.1kN$, $T_{fmin} = 8.53kN$

*) 等: 等モーメント区間, せ: せん断スパン内

ることによる。

荷重の除荷、再載荷におけるひびわれ幅を見ると(図-10(a)(b)), 曲線の描くループの面積は、等曲げモーメント区間よりもせん断スパン内のひびわれの方が大きく、繰り返し回数の増加とともにその面積は減少する。これは、せん断力が作用する所では、ひびわれ間のせん断ずれが生じているため、等曲げモーメント区間よりも除荷時にひびわれが閉じにくく、繰り返しによってひびわれ部分のコンクリートが劣化しやすいことが原因であると思われる。

従って、繰り返し回数が増加しても、等曲げモーメント区間のひびわれ幅はほとんど変化しないが、せん断スパン内のひびわれ幅は次第に増加した(図-11)。

4.2 FRP筋の疲労強度について

下段の主筋にかかる上限荷重時の引張力と疲労破断回数の関係を図-12に示す。FRP筋の疲労特性を表す場合、成形時の樹脂の量がFRP筋の引張荷重-ひずみ関係に及ぼす影響が小さいとすると樹脂を含めた見掛けの断面積はあまり意味がないので、応力よりも引張力やひずみで疲労特性を表す方がよいと思われる。

そこで、FRP筋の疲労強度を異形鉄筋と比べてみるために、主筋のFRP筋と等しい引張耐力を持つ等価な異形鉄筋を想定すると、材質がSD30の場合は直径が約15.1mm, SD35の場合は約14.3mmとなる。これらの2種類の異形鉄筋について、土木学会のコンクリート標準示方書に基づいて求めた上限引張荷重と疲労破断回数の関係を図-12に示す。これらの曲線は異形鉄筋の疲労強度の平均値を表していると考えられるが、本実験の範囲ではFRP筋の疲労強

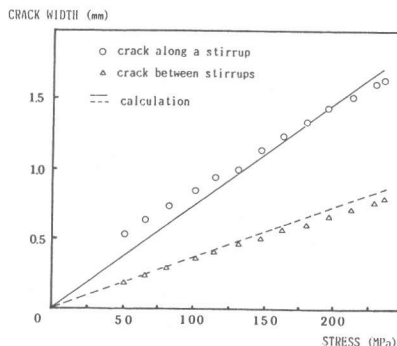


図-9 ひびわれ幅-下段の主筋の応力関係

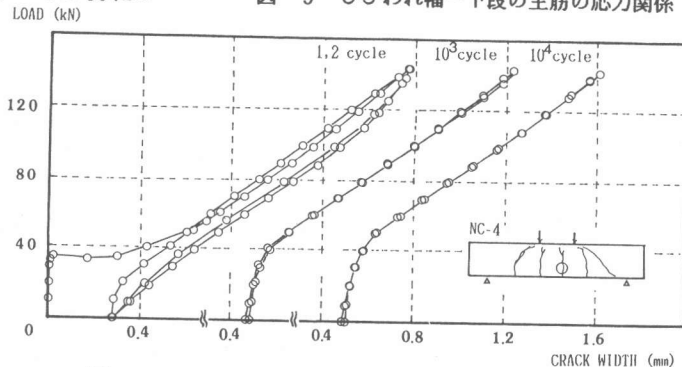


図-10(a) 荷重-ひびわれ幅関係(等曲げモーメント区間)

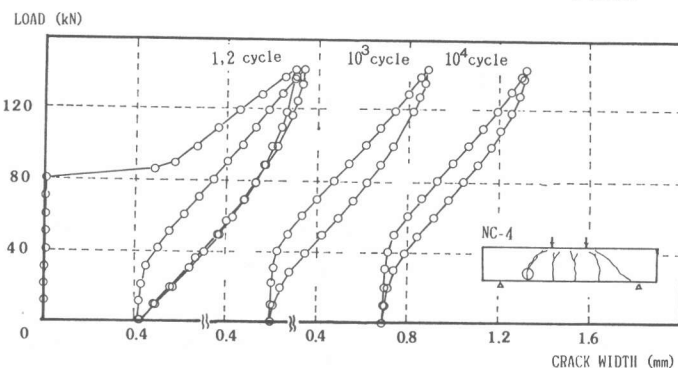


図-10(b) 荷重-ひびわれ幅関係(せん断スパン内)

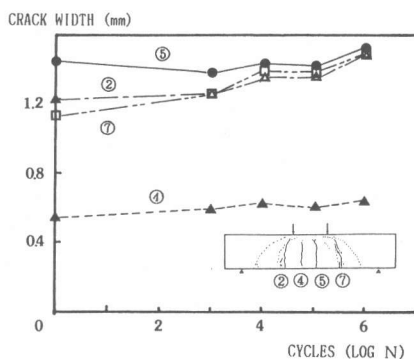


図-11 上限荷重時のひびわれ幅-繰り返し回数関係

度は異形鉄筋よりも若干高い傾向を示している。

主筋のFRP筋の疲労破断は、スターラップとの交差部における断面急変による応力集中によって生じた。従って、スターラップの間隔やスターラップとの交差部の形状等が変わると、FRP筋の疲労特性が変わる可能性がある。また、鉄筋は均質材料であるのに対して今回使用したFRP筋は、炭素繊維とガラス繊維、および樹脂の弾性係数と引張強度の異なる材料の複合材料であり、その疲労機構は複雑であると思われる。従って、今後はスターラップの間隔を変えたり、炭素繊維とガラス繊維の配合比を変えたFRP筋の疲労試験も実施して、データを蓄積する必要がある。

なお、今回の実験ではコンクリートの圧縮疲労破壊は生じなかったが、FRP筋を使用すると中立軸の位置が上昇し、圧縮域が狭くなりコンクリートの平均応力が大きくなるため、鉄筋コンクリートはりの場合に比べてコンクリートの曲げ圧縮疲労破壊が生じやすくなると予想される。

5. 結論

本研究の結果から得られた結論をまとめると以下のようになる。

(1) FRP筋自体の付着は小さいけれども、主筋とスターラップの交差部でコンクリートとの付着を確保しているため、従来の鉄筋コンクリートの曲げ理論が適用できる。

(2) 曲げひびわれはほとんどがスターラップに沿って生じ、ひびわれ幅は主筋の位置ではスターラップ間隔の2倍の長さの主筋ののび量にほぼ等しい。また、FRP筋の弾性係数が小さいため、異形鉄筋に比べるとひびわれ幅が大きくなる。

(3) 上記と同様にFRP筋は弾性係数が小さいので、曲げひびわれ発生後に中立軸がかなり上昇し、曲げ剛性が低下し、たわみが大きくなる。

(4) 静的載荷および繰り返し載荷によってFRP筋が破断する場合は、断面急変による応力集中により主筋とスターラップの交差部で破断が生じた。

(5) FRP筋の疲労強度は、等しい引張耐力を持つ等価な異形鉄筋の疲労強度と同等以上の結果を示した。しかし、今後はスターラップの間隔やガラス繊維と炭素繊維の配合比等をパラメータとして、さらにデータの蓄積を行う必要がある。

〔参考文献〕

- [1] 平賀寿雄：新しいコンクリート補強材 タフティワインド・ニューファイバーメッシュ (NFM)，強化プラスチック，Vol.32，No.10，昭和61年10月
- [2] 藤崎忠志，杉田 稔，中辻照幸：鉄筋に代わるFRP構造材料の開発（その1）重ね継手性能確認実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），昭和61年 8月
- [3] 谷本敏夫，星出敏彦：新材料の疲労挙動（講座 疲労—基礎と設計への展開），材料，第35巻，第 394号，昭和61年 7月
- [4] 植村益次，福田 博：ハイブリッド繊維強化複合材料，(株)シーエムシー，昭和61年 5月
- [5] コンクリート標準示方書，設計編，土木学会，昭和61年10月

TENSILE FORCE AT THE MAXIMUM LOAD
(T_{fmax}/T_{fu})

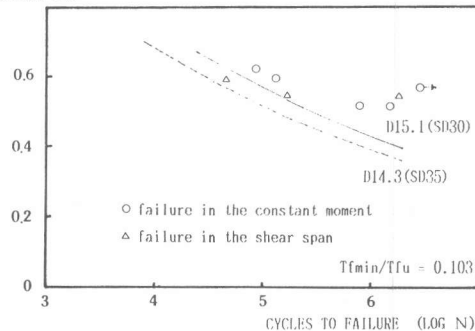


図-12 FRP筋の疲労強度