

V-33

局部応力下における連続繊維補強材の強度低下について

北海道大学工学部 学生員 石原 一伸
前田建設(株) 正員 小原 孝之
北海道大学工学部 正員 佐藤 靖彦
北海道大学工学部 正員 上田 多門

1. はじめに

連続繊維補強材は高強度かつ軽量でしかも耐食性、非帯磁性に優れコンクリート構造物への適用が期待される新素材である。しかしその反面、一方向性強化材、異方性材料でありその破壊は脆性的である。特にせん断補強筋として連続繊維補強材を用いた場合、その曲げ成形部では一軸引張強度よりも低い引張力で破断することが報告されている^{1,2)}。この現象を解明するため様々な研究が行なわれてきた^{3,4)}が、明確な耐力低下のメカニズムは明らかにされていない。そこで本研究では、連続繊維補強材の曲げ内半径、弾性係数、定着・附着性に着目し、連続繊維補強材の曲げ成形部における耐力低下のメカニズムを明らかにし、定量的に評価することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 材料特性

実験に使用した連続繊維補強材は FiBRA であり、連続繊維を組紐状に編み樹脂を含浸させたものである。実験には公称直径 9mm のアラミド繊維、炭素繊維の二種類を用いた。アラミド繊維の引張強度は 100.3kN、炭素繊維は 143.8kN であった。また、コンクリートには早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法は 25mm、単位水量は 160kgf/m³、粗骨材率は 41% とした。また目標コンクリート強度は 35MPa である。

2.2 実験供試体と実験方法

供試体図を図-1 に示す。連続繊維補強材をせん断補強筋として用いた場合を想定したもので、斜めひび割れをまたぐ位置でのせん断補強筋の挙動をモデル化している。用いた連続繊維補強材の曲げ成形部における曲げ内半径は両繊維ともに 9mm、27mm、45mm であり、以降これらの値を補強筋径で除した値を用いて 1R、3R、5R と定義する。表-1 に供試体の各諸元を示す。供試体中には連続繊維補強材のせん断補強筋が一周半、配置されており、その内側の四隅に主筋に見立てた公称径 13mm の連続繊維補強材を配筋した。供試体中央には人工ひび割れを設けておりひび割れ間を補強筋がまたいでいる。図-1 においてひび割れ面から下側の曲げ成形部直前の間の附着応力を取り除き(連続繊維補強材の表面にグリースを塗り、その上にビニルテープを巻き、さらにその上からグリースを塗りコンクリートとの附着を取り除いた)、曲げ成形部に作用する引

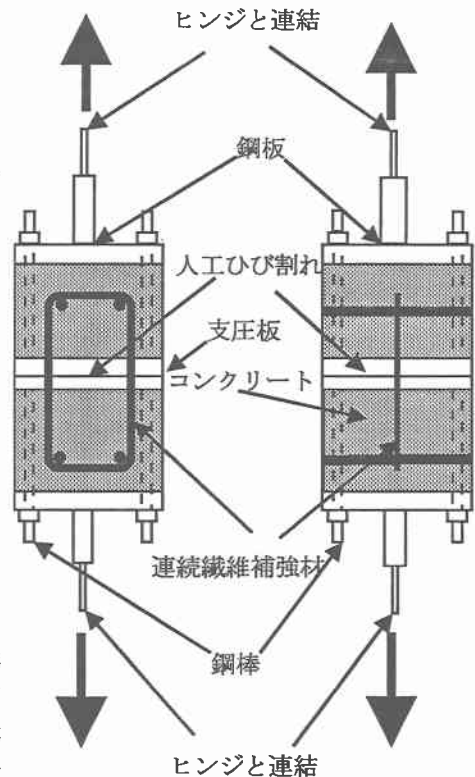


図-1 供試体図

力を受ける。図-1 においてひび割れ面から下側の曲げ成形部直前の間の附着応力を取り除き(連続繊維補強材の表面にグリースを塗り、その上にビニルテープを巻き、さらにその上からグリースを塗りコンクリートとの附着を取り除いた)、曲げ成形部に作用する引

Study on strength weakness of CFRM(Conposite Fiber Reinforced Material) subjected Local Stress
by Kazunobu Ishihara ,Takayuki Obara ,Yashuhiko sato ,Tamon Ueda

張力が減少しないようにした。これは曲げ成形部での破壊を確実に起こすためである。なお、アラミド、炭素繊維共に R1 に関しては共に付着性状の影響を見るために、上のように作製した供試体とにひび割れ面から下側の補強筋のすべての区間において付着を取り除いた供試体の、二種類を作製した。引張荷重はヒンジ、鋼版、鋼棒を経て支圧版に伝わり、人工ひび割れを上げることにより連続繊維補強材の曲げ成形部に伝達するようになっている。また人工ひび割れは 0.5mm のプラスチック板で完全に仕切られている。載荷は 1MN 万能試験機を用いて 2.5kN ずつ引張荷重を加えることで行なった。同時にひずみゲージを配置しひずみを測定し、人工ひび割れ開口変位を供試体の両側面において変位計により測定した。

3. 実験結果

3.1 連続繊維補強材の曲げ成形部の耐力

各供試体の曲げ成形部の耐力並びに強度維持率を表-1 に示す。両供試体とも一軸引張強度に対する曲げ成形部の耐力の低下が見られ、その低下率はアラミドに比べ炭素の方が大きかった。また、両供試体共に曲げ内半径が小さくなると耐力低下も大きくなった。

表-1 供試体諸元ならびに実験結果

供試体名	繊維名	曲げ内半径	付着区間	コンクリート強度	最大引張荷重	強度維持率 f_{fb}/f_{fu}
AUR1	アラミド	1R	非付着	34.2MPa	47.8N kN	46.57%
ABR1		1R	付着	35.0MPa	61.8 kN	60.16%
ABR3		3R		28.4MPa	80.0 kN	77.93%
ABR5		5R		36.2MPa	88.3 kN	85.97%
CUR1	炭素	1R	非付着	34.6MPa	61.0 kN	42.42%
CBR1		1R	付着	35.0MPa	70.8 kN	49.20%
CBR3		3R		36.2MPa	85.0 kN	66.06%
CBR5		5R		28.4MPa	89.3 kN	62.07%

f_{fb} : 曲げ成形部における引張強度

f_{fu} : 一軸引張強度

曲げ内半径と強度維持率の関係を図-2 に示す。図-2 の計算値は連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計施工指針 (案) ⁷⁾ の曲げ成形された連続繊維補強材の強度設計式である。また既往の実験データの平均値をとるように回帰すると $\alpha=0.092$ となり、この値を用いた式を平均強度式とする。

$$f_{fb} = \left(\alpha \frac{r}{h} + 0.3 \right) f_{fu} \leq f_{fb} \quad \text{式-1}$$

f_{fb} : 曲げ成形部強度 f_{fu} : 一軸引張強度

r : 曲げ内半径 h : 連続繊維補強材の断面高さ

$\alpha : 0.05, \alpha : 0.092$ (平均強度式)

設計強度式は実験結果と比較してかなり安全側の評価になった。変数が曲げ内半径のみで繊維の違いや定着、付着性状の違いを考慮していないためであると考えられる。それに対し平均強度式は実験結果を設計強度式と比較するとよく評価できたが、二つの式は共に直線で表わされるため、強度維持率の曲線的な変化をとらえることができなかった。

3.2 破壊位置と破壊性状

実験において終局はアラミド、炭素の両繊維共に、連続繊維補強材の曲げ成形部で破壊を迎えた。いずれも人工ひび割れに近い側の曲げ成形部と直線部の境目で脆性的に

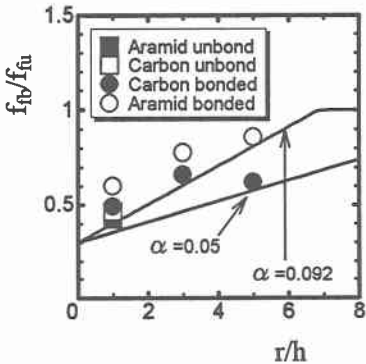


図-2 実験値と設計強度式・平均強度式との比較

破壊した。連続繊維補強材の破壊面の状況を図-3 に示す。アラミド繊維の連続補強材が軸方向におおよそ直角に破断面を形成しているのに対し、炭素繊維の連続繊維補強材では破断面が竹ぼうき状にささくれて軸方向に広がりをもった破断面となった。

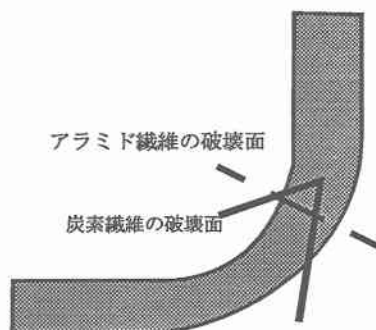


図-3 曲げ成形部の破壊状況

3.3 ひずみ性状

曲げ成形部を有する連続繊維補強材が引張力を受ける場合曲げ成形部周辺で局部変形しその位置の引張ひずみは卓越する。しかしながら、曲げ成形部において局部変形はごく短い区間で起こりひずみはその区間で急変するためその位置を特定することは困難であり、連続繊維補強材とコンクリートとの支圧力によりひずみゲージが破壊してしまう現象が起きたため曲げ成形部に働く局部応力のひずみ性状をひずみゲージから測定することは困難である⁸⁾。ひずみの測定箇所を図-4 に示すようであったが、測点 1, 3 に関しては連続繊維補強材の外側と内側でひずみ勾配は観測されなかった。引張力と測点 2 におけるひずみの関係を繊維の種類ごとに図-5 に示す。各供試体において連続繊維補強材の外側と内側の平均ひずみはおおよそ一致していることから、測点 2 に伝わる引張力は曲げ内半径の大小によらないことが示された。

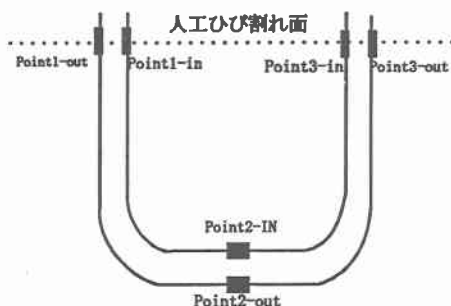


図-4 ひずみ測定位置

4. 有限要素解析による検討

4.1. 有限要素解析概要

有限要素解析にはコンクリート材料非線形構成則の導入された 2 次元非線形解析プログラム「COMM2」⁸⁾を用いた。また同プログラムに連続繊維補強材の直交異方向性が考慮できるように修正を加えた。コンクリート要素と連続繊維補強材要素を設けコンクリートと連続繊維補強材の間には接合要素を設けた。また計算されたひずみの値が最大ひずみもしくは Tsai-Hill 則に基づく破壊基準のどちらか一方に達したところで解析上の終局と判断し計算を終えた。

4.2. 解析結果

終局時の連続繊維補強材のひずみについて図-6, 7 に示す。図-6 には ABR1 の結果を、図-7 には ABR5 の結果を示しているが、すべての供試体においてせん断ひずみが小さく軸方向ひずみが大きな値となり破壊基準に達した。従って、曲げ成形部の局部変形による破壊は一軸の破壊基準とした検討で判断できると思われる。また両繊維とも曲げ内半径が小さいときは、局部変形が大きくひずみ分布は楕円状に広域にわたって分布したが、曲げ内半径が大きいきは局部変形は小さくなり広がりを持たない小さな円状に分布した。

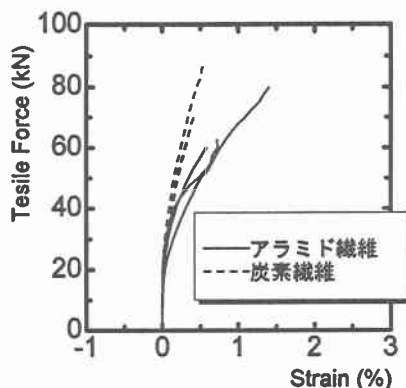


図-5 引張力と測点2の平均ひずみの関係

すなわち曲げ内半径が大きくなると一軸引張の状態に近くなり強度維持率は高くなることが示された。

Tsai-Hill 則に基づく連続繊維補強材の破壊基準を用いた解析により得られた耐力と実験結果の関係を表-2 に示す。表-2 に示すように曲げ内半径の違いによる強度維持率の違いは表わすことができたが、繊維の違い、付着性状の違いによる強度維持率の違いは表わすことができなかった。

表2 解析結果

供試体名	最大引張荷重	f_b/f_u	実験値/解析値
AUR1	45.58kN	0.444	1.049
ABR1	50.99 kN	0.497	1.210
ABR3	64.94 kN	0.636	1.225
ABR5	79.33 kN	0.773	1.112
CUR1	76.31 kN	0.531	0.799
CBR1	76.25 kN	0.530	0.928
CBR3	93.16 kN	0.648	1.019
CBR5	107.79 kN	0.750	1.0

5. 曲げ内半径が耐力低下に及ぼす影響の定量化

有限要素解析で得られた Tsai-Hill 則の判定による終局時、最もひずみの卓越したガウスポイントを通り軸直角方向に切った断面を破壊断面とし、断面内の位置として最も内側を原点とし外側に向かって X 軸をとった。この破壊断面におけるひずみ分布を図-8 に示す。縦軸には一軸引張破壊ひずみに対するガウスポイントのひずみの比を、横軸には断面高さに

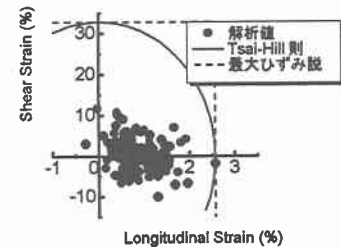


図-6 終局時の繊維軸方向ひずみとせん断ひずみの関係 (ABR1)

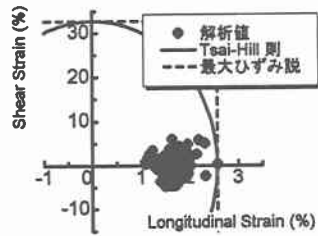


図-7 終局時の繊維軸方向ひずみとせん断ひずみの関係 (ABR5)

対する曲げ成形部内側からの距離の比をとった。断面高さは補強筋径とする。どの曲げ内半径の場合も同じ様な関係を示したが紙面の都合上、図-8 には曲げ内半径 3R のものを示す。断面内の各位置におけるひずみの値をひずみ分布に合うように関数を選び、定数 λ を設定し、曲げ内半径をパラメータ一にとった以下の式に示す。

$$\varepsilon_x / \varepsilon_u = \frac{1}{1 + \lambda(X/D)} \quad \text{式-2}$$

式-2 を各曲げ内半径のひずみ分布に合うように λ を決めると

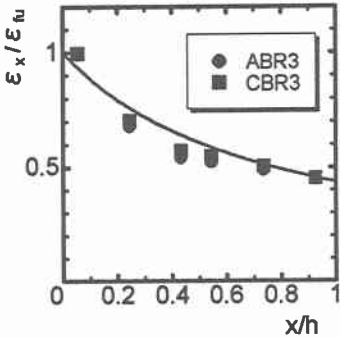


図-8 曲げ内半径 3R のひずみ分布

曲げ内半径 1R のとき $\lambda=2.35$
 曲げ内半径 3R のとき $\lambda=1.29$
 曲げ内半径 5R のとき $\lambda=0.89$ となる。
 これらの λ の値と曲げ内半径の関係を図-9に示す。
 この図より、 λ と曲げ内半径の逆数が比例すると考
 え、以下に λ と曲げ内半径の関係を示す。

$$\lambda = 1.974 \times D/R + 0.4013 \quad \text{式-3}$$

以上より得られたひずみ分布を断面に対して積分
 を行うことにより終局時の耐力をを求めることが
 出来た。それを以下に示す。ただしこの時連続繊維
 補強材の断面を短形断面とした。

$$\frac{f_{fb}}{f_{fu}} = \frac{1}{\lambda} \ln(1 + \lambda) \quad \text{式-4}$$

ここに

ϵ_x : 位置 X におけるひずみ ϵ_u : 一軸引張破壊ひずみ

D: 補強筋径

X: 断面内の位置

R: 曲げ内半径

f_{fb} : 曲げ成形部の耐力

f_{fu} : 一軸引張強度

式-4 と実験結果を比較したものを図-10 に示す。

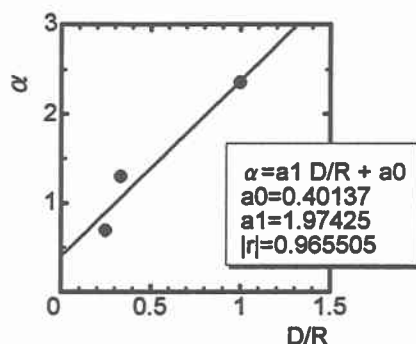


図-9 α と曲げ内半径との関係

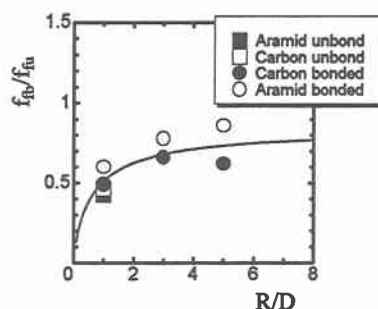


図-10 実験値と耐力評価式との比較

6. 既往の研究との比較

前章で得られた評価式が汎用性があるものであるか

検討するために本検討で得られた強度維持率の評価式と以下の文献の実験結果を比較検討してみた。

連続繊維補強材研究小委員会、「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計施工指針(案)」、コンクリートライブラリー88号、土木学会、1996年⁷⁾

実験結果の内、炭素繊維とアラミド繊維について検討を行
 なった。その材料特性値並びに実験結果を表-3に示す。実
 験結果と本検討で得られた強度維持率の評価式との比較を
 図-11に示す。アラミド繊維については評価式は実験値を
 若干高めに評価している。炭素繊維に関してはかなり高く
 評価している。この実験方法においては定着の取り方が直
 角フックとなっており本実験の定着に比べ定着状況が悪く、
 連続繊維補強材の抜け出しが大きくなったため曲げ成形部
 の変形が大きくなり低い耐力を示したと思われる。しかし
 ながらアラミド繊維が本実験結果に比べて耐力低下が比較的小さいのは炭素繊維に比べアラミドの付着能力が
 高いためと思われる。

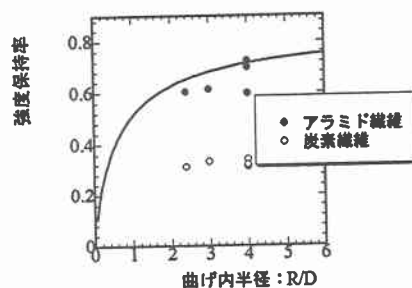


図-11 既往の研究との比較

表3 材料特性値

連続繊維補強材		径	曲げ半径	ヤング係数	直線部強度	曲げ成形部強度
種類	形状	(mm)	(mm)	(tf/mm ²)	(tf)	(tf)
アラミド	組紐状	8	16	6.50	7.02	4.16
		6	12	6.40	3.30	2.30
		8	12	6.50	7.02	4.31
		10	12	6.30	10.29	6.21
		6	12	6.40	3.30	2.38
PAN 系炭素	螺旋糸巻き	8	16	12.47	9.20	2.86
		6	12	11.80	4.67	1.59
		8	16	12.47	9.20	3.05
		10	12	12.72	18.10	4.43
		6	12	11.80	4.67	1.49

7. まとめ

1). 実験結果より曲げ内半径の違い、繊維の違い(弾性係数の違い)、付着性状の違いが連続繊維補強材曲げ成形部の耐力低下に及ぼす影響因子であると思われる。特に曲げ内半径の違いは有限要素解析の解析結果にも現われたことから曲げ内半径の違いが耐力低下の影響因子であることは明らかである。しかし、繊維の違い、付着性状の違いを二次元的解析では表わすことはできなかった。

2). 解析結果より得られたひずみ分布より曲げ内半径の違いをパラメーターにとった評価式は本実験結果における強度保持率の変化を良く評価できた。しかし繊維の違い、付着性状の違いを評価式に盛り込むことができなかった。

今後は繊維の違い、付着性状による違いを解析結果に表わし、評価式に盛り込むことでより汎用性のある評価式を構築したい。

参考文献

1. 小沢、関島、岡村、FRP で補強したコンクリートはりの曲げ疲労性状、コンクリート工学年次論文集、1987
2. 涌井、鳥取、寺田、原、FRP 棒材を緊張材ならびに螺旋状せん断補強筋として用いたはりのせん断試験、コンクリート工学年次論文集、1989
3. 丸山武彦、本間雅人、岡村甫、FRP ロッドの曲げ加工部の引張耐力に対する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、1990
4. 宮田尚彦、鳥取誠一、寺田年夫、関島謙蔵、曲げ加工した FRP 筋の引張耐力に対する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、1989
5. 大原英史、本田勉、FRP スターラップの曲げ加工部の引張耐力に関する研究、土木学会第 45 回年次学術講演会、1990
6. 小原孝之、佐藤靖彦、上田多門、角田典史雄、局部応力を受ける連続繊維補強材の曲げ成形部の力学的性状について、土木学会北海道支部学術講演会、1995
7. 連続繊維補強材研究小委員会、連続補強材を用いたコンクリート構造物の設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー-88 号、土木学会、1996
8. 前川宏一、二羽淳一郎、岡村甫、鉄筋コンクリート用解析プログラム「OCMM2」、第二回 RC 構造物のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム、1982