

V-12

連続繊維補強材の二次応力問題

北海道大学大学院 学生員 兼松 秀行

北海道大学大学院 学生員 佐藤 靖彦

北海道大学工学部 正 員 上田 多門

北海道大学工学部 正 員 角田与史雄

1. はじめに

連続繊維補強材（以下、FRPロッド）は、軽量、高強度かつ耐食性に優れている点から、コンクリート構造物への適用に関する数多くの研究が行われている。しかし、FRPロッドは鉄筋とは異なり、塑性域をもたない一方向性補強材であり、その破壊は脆性的であるため、コンクリート構造物の補強材として用いる場合には、限界状態の設定が重要な検討課題である。

本研究では、FRPロッドのひび割れ交差部における強度低下問題に対し、三次元弾性有限要素解析を用いることで、局所的な変形状、異方性材料としての特性、および複合材料としての破壊特性に関する検討をおこなう。

2. 解析概要

2-1 解析方法

解析供試体を図-1に示す。これは我々が過去におこなった実験によるものであり、その詳細は文献¹⁾に詳しい。ここで用いられているFRPロッドは、アラミド繊維を組紐状に編み樹脂で硬化させたFRP棒材である。FRPロッドの二次応力問題等の局所的な変形、および破断を詳細に捉えるには、コンクリートの非線形特性、FRPロッドの付着特性の影響を詳細に考慮した非線形解析が必要とされるが、本研究では、局所的な変形状、異方性としての特性の影響を考慮するために三次元弾性有限要素解析を用いた。図-2に要素分割図を示す。本解析は、ひび割れ幅とせん断変位を強制変位で与えることによって、FRPロッドに引張力とせん断力をあたえている。また、コンクリートとFRPロッドとの間のすべり関係を考慮するために、コンクリートとFRPロッドの間にせん断剛性を低下させた厚さ1mmのコンクリート要素を入れて解析をおこなった。ただし、本解析では、谷垣ら²⁾の実験結果と一致するようにせん断剛性値を決定した。また、実験ではひび割れ面においてロッド周辺のコンクリートに剥離（円錐状の破壊）が観察されたが、本解析上では考慮していない。

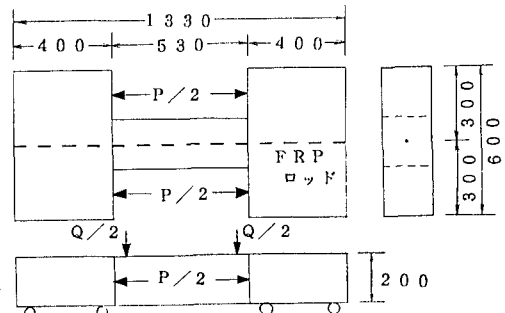


図-1. 解析供試体

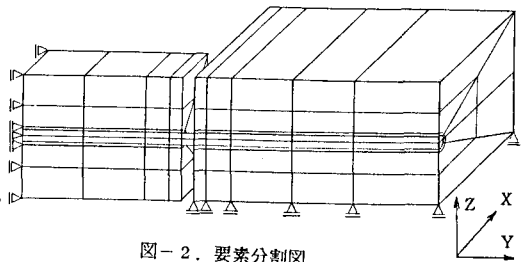


図-2. 要素分割図

Secondary Stress of Fiber Reinforced Plastic Rods

by Hideyuki KANEMATSU, Yasuhiko SATO, Tamon UEDA and Yoshio KAKUTA

2-2 材料定数

FRP ロッドは一方方向強化材であるため、鉄筋とは材料特性が異なる異方性材料である。よって本解析におけるFRP ロッドの材料定数は、異方性を考慮したものとすることとした。異方性複合材料の材料定数の推定法は数多く提案されているが、本解析では複合則および Halpin - Tsai の式³⁾ (式(1)) を用いることとした。

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$
$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)$$
$$\eta = (M_f / M_m - 1) / (M_f / M_m + \xi)$$
$$M = M_m (1 + \xi \eta V_f) / (1 - \eta V_f)$$

E_f : 繊維の弾性係数
 V_f : 繊維の体積含有率
 E_m : 母材の弾性係数
 E_L : 繊維方向弾性係数
 M : 繊維直角方向弾性係数 E_T ($\xi = 2$)

および面内せん断弾性係数 G_{LT} ($\xi = 1$)

表-1. 材料定数

	アラミド FRP 異方性	アラミド FRP 等方性	コンクリート
弾性係数 (GPa)	L 67.4 T 16.1 Z 16.1	67.4	20.0
せん断弾性係数 (GPa)	LT 4.95 TZ 4.95 ZL 5.96	25.9	8.3
ポアソン比	LT 0.30 TZ 0.35 ZL 0.07	0.30	0.20

L: 繊維方向 T, Z: 繊維垂直方向

本解析では、FRP ロッドの異方性を考慮した解析とともに、等方性材料とした場合の解析を行った。これは、FRP ロッドに作用する応力および変形に関して両者の比較を行うためである。

表-1 に、本解析に用いたアラミドFRP ロッド、およびコンクリートの材料定数の諸元を示す。

2-3 破壊則の適用方法

異方性複合材料における破壊則は、各方向の応力に支配される最大応力説、各方向のひずみに支配される最大ひずみ説、降伏応力と破壊応力はほぼ同じであると考え、応力の二次式で降伏条件を考える Mises の手法を用いた相互作用説に大別される³⁾。その中で本研究では、各方向に対して引張強さ、圧縮強さが考慮できる Hoffman によって提案された相互作用説⁴⁾ (式(2)) を用いることとした。

$$C_1 (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2 (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_3 (\sigma_1 - \sigma_2)^2$$
$$+ C_4 \sigma_1 + C_5 \sigma_2 + C_6 \sigma_3 + C_7 \tau_{23}^2 + C_8 \tau_{31}^2 + C_9 \tau_{12}^2 = 1$$
 式(2)

$C_1 \sim C_9$: 材料強度試験から求める定数

表-2. アラミドFRPの破壊強度

繊維方向 0°	引張強さ	1400 MPa
	圧縮強さ	280 MPa
繊維方向 90°	引張強さ	28 MPa
	圧縮強さ	140 MPa
面内せん断強さ		45 MPa
面外せん断強さ		70 MPa

また、破壊則に用いる材料強度の諸元⁵⁾ を、表-2 に示す。

3. 解析結果および考察

3-1 ひび割れ幅Wと引張力Pの関係

ひび割れ幅と引張力の関係を表-3 に示す。ひびわれ幅が1 mmにおいては、解析値と実験値の引張力はおおむね一致している。このことは、FRP ロッドのすべりを考慮するために用いたコンクリートとFRP ロッドとの間の要素に用いたせん断剛性の妥当性を示している。しかし、ひび割れ幅が3 mmにおいては、解析による引張力が実験値の約四倍と非常に大きくなっている。これは、実験においてはコンクリートとFRP ロッドのすべ

表-3. ひび割れ幅Wと引張力Pの関係

	W (mm)	P (kN)
実験値	1.02	22.5
	3.00	29.4
解析値	1.00	28.8
	3.00	111.3

り関係が、非線形性を示すことをあらわしている。

3-2 セン断力Qとせん断変位 δ の関係

せん断力とせん断変位の関係を図-3に示す。ひびわれ幅が増加するとともにせん断変位の増加割合がわずかながら大きいことがみうけられる。実験値に比較して解析値におけるせん断力が非常に大きい、これは、FRPロッド周辺の局部破壊、つまり剥離による影響が大きいと考えられる。また、FRPロッドの材料係数が等方性と異方性で大きく異なるため、等方性と異方性とはせん断力Qに大きな相違がみられる。

3-3 ひび割れ部分における変形性状

引張力とせん断力を作作用させた場合のFRPロッドの変形性状を図-4に示す。FRPロッドを異方性で解析した場合、等方性として解析した場合に比較して、FRPロッドが局部的に変形していることがわかる。これは、異方性としてFRPロッドにあたえた繊維直角方向の材料定数の値が、等方性の場合と比較して低いことが原因と考えられる。しかしながら、FRPロッドとコンクリート間のすべり層が変形性状に大きく影響をあたえており、今後の課題である。

3-4 FRPロッド内部の応力分布

ひび割れ部分におけるFRPロッド断面Aおよび断面B(図-5)において、顕著な変化のみられた引張応力 σ_Y 、せん断応力 τ_{YZ} の応力分布をそれぞれ図-6、図-7に示す。いずれの場合も、せん断変位を受けることによって断面A下部および断面B上部に σ_Y の増加がみられる。また、FRPロッド中央部を頂点としてひび割れ部分断面全体に τ_{YZ} の増加がみられる。

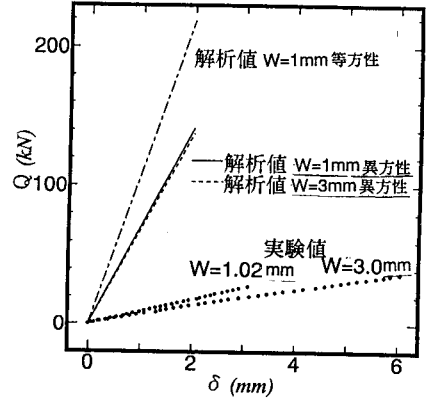


図-3. セン断力とせん断変形の関係

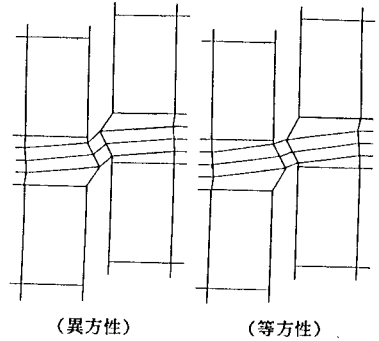


図-4. FRPロッドの変形性状

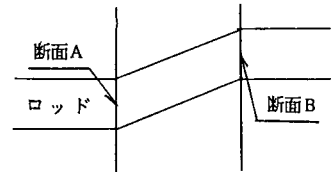


図-5 検討断面

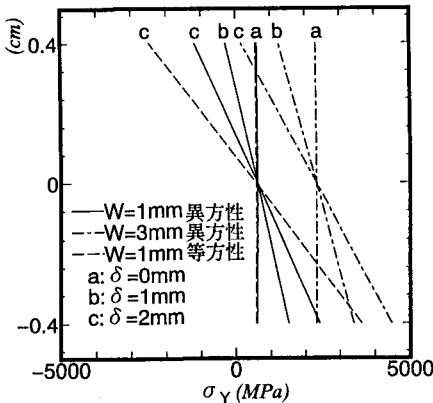


図-6. 引張応力 σ (断面A)

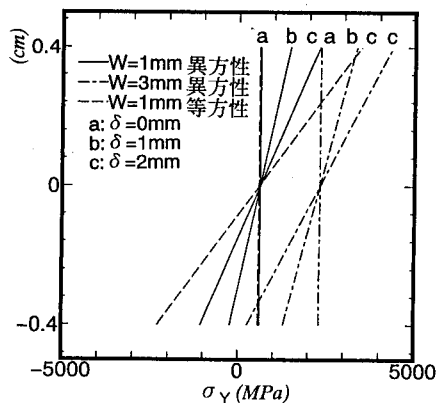


図-6. 引張応力 σ (断面B)

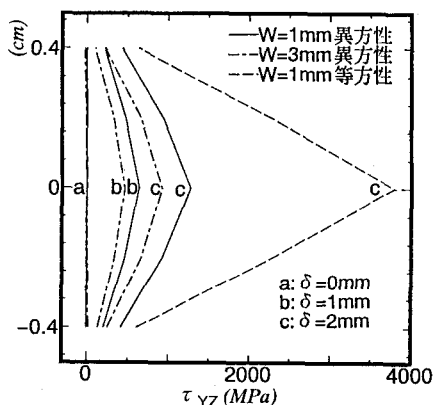


図-7. せん断応力 (断面A)

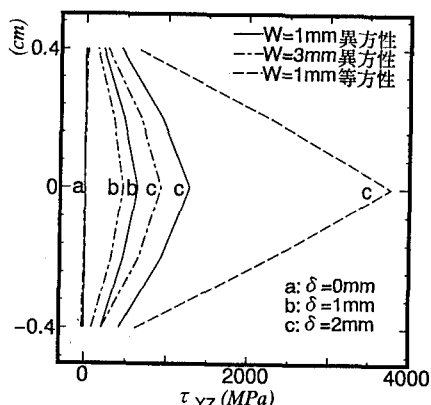


図-7. せん断応力 (断面B)

3-5 破壊則の適用

ひび割れ幅を3mmあたえた場合、せん断力を加える前にFRPロッドは本破壊則において破断に至っていた(この時の引張応力は2300MPaで破壊応力に達していた。)。しかし、実験においては、FRPロッドは破断していない。これは先に述べたようにひび割れ幅が3mmの場合には、コンクリートとFRPロッドのすべり性状を的確に評価できていない為であると思われる。一方、ひび割れ幅1mmの場合は、本破壊則において、せん断変位が0.7mmにおいて、図-8の×で示すFRPロッドの断面A下部、および断面B上部で破断している。実験では、せん断変位が3mmで破断に至っている。破壊則により得られた破断位置より破壊面を推測すると図-8に示すようになり、これは実験結果と一致している。

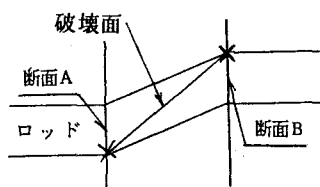


図-8 破壊性状

4. まとめ

- (1) ひび割れ部分におけるFRPロッドの破断問題を考える場合には、ひび割れ幅 W とせん断変位 δ の関係および引張力 P とせん断力 Q の関係のみならず、コンクリートとFRPロッドのすべり関係および剥離による影響を考慮する必要がある。
- (2) FRPロッドの破断は、おもに引張力の作用する軸方向における引張応力と、せん断力が作用する軸直角方向のせん断応力が大きな要因となる。このことから、材料係数、破断強度ともに著しい方向性を有するFRPロッドの破断問題は、材料異方性を考慮する必要がある。

[参考文献]

- 1) 平賀、佐藤、上田、角田：AFRPロッド製スターラップの二次応力問題に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集 pp933-936 平成3年度
- 2) 谷垣、岡本、蓮尾：繊維補強材の付着性状に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集 pp831-836 1991
- 3) 座古 勝、藤井 太一：“複合材料の破壊と力学”、実教出版(1978)
- 4) J.R.Vinson, R.L.Sierakowski：“複合材料の構造力学”、日刊工業新聞社(1987)
- 5) 奥田 謙介：“炭素繊維と複合材料”、共立出版(1988)