

論文 BFRP シートを接着した遠心力鉄筋コンクリート管のせん断耐力の評価に関する研究

岩下 健太郎*¹, 稲葉 有里*²

要旨：遠心力鉄筋コンクリート管（以後、RC ヒューム管と呼称）の側面にバサルト繊維シート（以後、BFRP シートと呼称）を接着することによるせん断補強効果について、青山の研究¹⁾において実験的に検証された。また既報^{2), 3)}において FEM による耐荷力解析を行い、概ね実験結果と同様の結果を得たが、せん断耐力についてはやや過大に評価される傾向にあった。そこで本研究では、新たに BFRP シートの異方性を考慮して既存のせん断耐力に関する設計式を変形した式を用いてせん断耐力の算定を行い、一方では FEM による耐荷力解析を行った。これらを比較して、本研究で提案した設計式の適用性を検証した。

キーワード：BFRP シート、プリプレグ、RC ヒューム管、せん断耐力、耐荷力解析

1. はじめに

遠心力鉄筋コンクリート管（以後、RC ヒューム管と呼称）の周囲に FRP シートを巻き立て、接着するせん断補強工法があり、多くの施工実績がある。しかし、その補強効果に関する研究はほとんど行われていない状況にあったため、青山¹⁾は高強度、高弾性で高伸度性において特長を有するバサルト繊維シート（以後、BFRP シートと呼称）に着目し、そのせん断補強効果について実験的に検証した。また、既報^{2), 3)}において BFRP シートを接着した RC ヒューム管の耐荷力を FEM により検証した結果、ひび割れ発生荷重や鉄筋降伏荷重、そして剛性について実験と概ね同様の傾向にあった。しかし、BFRP シートの異方性を十分に考慮できていなかったため、せん断耐力についてはやや過大に評価される傾向にあった。また、土木学会の連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針⁴⁾および FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案）⁵⁾（以後、土木学会指針と呼称）に掲載されている、連続繊維シートによりせん断補強された RC 構造物のせん断耐力に関する設計式は、CFRP シートおよび AFRP シートにのみ適用可能な式とされており、他の種類の連続繊維シートに適用する場合には、その都度実験等による検証が必要とされている。

そこで本研究では、新たに BFRP シートの異方性を考慮して既存のせん断耐力に関する設計式を変形した式を用いてせん断耐力の算定を行い、一方では既報^{2), 3)}の FEM 解析モデルを用いて耐荷力解析を行い、BFRP シートの異方性を考慮して低減した破断ひずみを用いてせん断耐力の解析値を得た。そして、実験値、算定値、そして FEM による解析値を比較することで、本研究で提案した BFRP シート接着補強 RC ヒューム管のせん断耐力に関する設計式の適用性を検証した。

2. BFRP シート補強 RC ヒューム管の耐荷性能に関する実験の概要¹⁾

2.1 実験方法

青山の研究¹⁾において実施された実験の方法および結果の概要について述べる。図-1 に示すように、本体径 $\phi 200\text{mm}$ 、壁厚 40mm 、全長 2000mm の中空円筒形状の RC ヒューム管が使用された。軸方向鉄筋には直径 7mm の鉄筋 8 本がかぶり厚 17.5mm の位置に配置され、RC 供試体中央部、図内の点線枠部に BFRP シートが巻き付けられ、エポキシ樹脂により接着された。なお、BFRP シート補強部以外の箇所には直径 6mm の帯筋が 50mm 間隔で配置されており、BFRP シート接着箇所でのせん断破壊が先行する。使用された鉄筋は実際の RC ヒューム管製品に使用されるものであり、物性値を表-1 に示す。

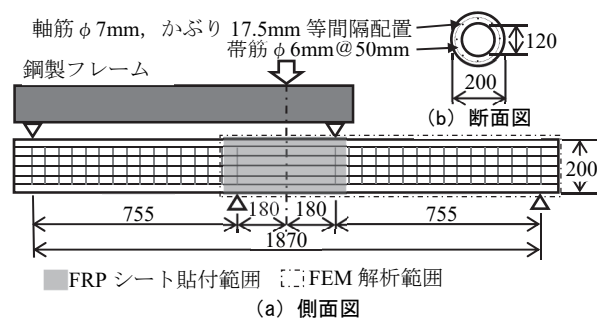


図-1 RC ヒューム管供試体の詳細

表-1 鉄筋の物性値一覧

特性	軸筋	帯筋
直径 (mm)	7	6
引張降伏強度 σ_s (N/mm ²)	1275	440
引張強度 σ_s (N/mm ²)	1420	540
ヤング係数 E_s (kN/mm ²)	200	200

*1 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科准教授 工博（正会員）

*2 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科

コンクリートは遠心締固めにより中空円筒形状に成形され、最高温度 70℃を 4 時間保持する蒸気養生が行われた。その設計圧縮強度は 45.0N/mm²、載荷試験時における圧縮強度の測定値は平均 50.2N/mm²、ヤング係数は 35.9kN/mm²であった。

使用された BFRP シートはエポキシ樹脂による現場含浸のものと、事前含浸、成形されたプリプレグ BFRP シートであった。現場含浸 BFRP シートには一方向材が用いられ、繊維方向は RC 管の軸直交方向とされた。プリプレグ BFRP シートには RC 管の軸方向を 0° として 0° と 90° の方向に等繊維量が配向された二方向材が用いられた。BFRP シートの物性値一覧を表-2 に示す。

表-3 に示すようにこの実験では、BFRP シートの種類（現場含浸 BFRP シート、プリプレグ BFRP シート）と、現場含浸 BFRP シートについては BFRP シートの層数（1 層、2 層）がパラメータとして考慮された。なお、1 ケース 1～2 体の実験が行われ、本研究では、BFRP シート 1 層、2 層接着供試体をそれぞれ B1,B2、プリプレグ BFRP シート接着供試体を BP-1,2、そして比較対象として無補強供試体は NB-1,2 とそれぞれ呼称した。

供試体の表面処理手順としては、サンドペーパーでコンクリート表面を擦り、メチルエチルケトン（MEK）を含ませた布で削りくずを拭き取った上で 0.2kg/m²相当量のエポキシプライマーを塗布する手順によりコンクリートの表面処理が行われた。その後、1.2kg/m²相当量の常温硬化型のエポキシ樹脂を用いて BFRP シートが接着された。プリプレグ BFRP シートは事前に半円形上に熱加工で成形されたものであり、有効付着長を考慮して両端 100mm のラップ長を確保して接着された。

2.2 実験結果

青山の研究¹⁾における実験結果より荷重－変位曲線を図-2 に、最大荷重とせん断ひび割れの角度一覧を表-3 にそれぞれ示す。ここで、本研究では載荷点位置における変位を採用しているが、変位測定を途中で終了しているため、別途最大荷重一覧表をまとめた。

NB 供試体の実験結果においていずれの供試体でも変位 0.4mm と 1mm 前後に変曲点があり、前者は曲げひび割れの発生、後者はせん断ひび割れの発生によるものと思われる。ただし、せん断ひび割れ発生後も荷重の急激な低下はなく、斜め引張破壊ではなくせん断圧縮破壊のモードと考えられる。

BFRP シート接着補強供試体においては、中央付近の載荷点と支点の間をつなぐように発生したせん断ひび割れと、その近傍に生じた BFRP シートの破断により荷重低下して実験が終了された。ただし、実験中は BFRP シートにより内部のコンクリートが隠され視認できないため、両者の発生タイミングは観察されていない。BFRP

表-2 BFRP シートの物性値一覧

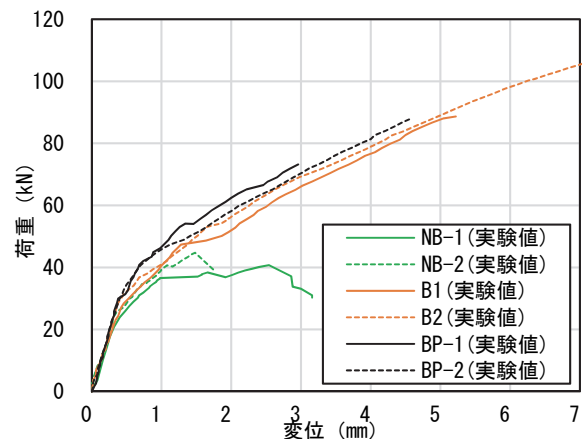
特性	BFRP シート	プリプレグ BFRP シート
ヤング係数 E_f (N/mm ²)	90,000	90,000
引張強度 σ_f (N/mm ²)	1,900	1,900
目付量 (g/m ²)	300	600*
換算厚み t_f (mm/1 層)	0.114	0.228**
繊維方向	1 方向	2 方向* (0° /90°)

*目付量：0° 方向 300 g/m²、90° 方向 300 g/m²

**換算厚み：0° 方向 0.114mm、90° 方向 0.114mm

表-3 試験条件および載荷試験結果

供試体 No.	BFRP シート 層数	最大荷重の実験値 (kN)	供試体軸方向とせん断ひび割れの成す角 θ
NB-1	無補強	40.7	36°
NB-2	無補強	42.0	36°
B1	軸直交方向 1 層	88.5	35°
B2	軸直交方向 2 層	121.4	33°
BP-1	二方向 1 層	115.2	34°
BP-2	二方向 1 層	127.4	34°



※変位測定終了まで掲載、荷重はその後も測定

図-2 荷重－変位関係

シートで補強した供試体では NB 供試体とは異なりせん断ひび割れ発生後も荷重増加があり、耐荷力に関する補強効果が見られた。また、BFRP シートの破断ひずみの測定値は 14,000μ～17,000μ 程度であった。

供試体軸とせん断ひび割れの成す角を θ とすると、いずれの供試体でも 33°～36° とほぼ同程度であった。

3. 土木学会指針⁴⁾に基づく BFRP シート補強 RC ヒューム管のせん断耐力の評価

3.1 既存のせん断耐力評価方法

二羽らの研究⁶⁾において、せん断補強筋のないディーブビームのせん断耐力 (V_{ci}) は式 (1) で精度良く算定できることが報告されている。

$$V_{ci} = \frac{0.24 f_c^{2/3} (1 + \sqrt{100 p_w}) \cdot (1 + 3.33 r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w \cdot d \quad (1)$$

ここで、 f_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²), p_w : 引張鉄筋比 (%), r : 載荷板の部材軸方向長さ(mm), d : 有効高さ(mm), a/d : せん断スパン有効高さ比, b_w : 断面幅(mm)である。

土木学会コンクリート標準示方書[設計編]⁷⁾ (以後、土木学会示方書と呼称) によれば、中空円形断面 RC 梁の算定においては、引張側鋼材の断面積 (A_s) に引張側 1/4(90°)部分に配置された鋼材断面積の合計値を用い、 b_w には等積正方形箱形に換算した腹部の合計幅、そして d は等積箱形の圧縮縁から A_s として考慮した鋼材の図心までの距離として定められている。本研究で対象とした RC ヒューム管の等積箱形の断面図を図-3 に示す。また、直接支持される棒部材でせん断スパン比 a/d が小さい場合は斜めひび割れ発生後も引張鉄筋をタイとしたタイドアーチ的な性状を示すことから、破壊はタイに相当する鉄筋の降伏 (曲げ破壊) あるいはアーチリブに相当するコンクリートの圧壊 (せん断破壊) により生じるため、せん断補強鋼材が配置されていない場合、式 (1) を a/d が 2.5 程度で通常の棒部材のせん断耐力式に漸近するようにせん断圧縮破壊耐力の式 (2) を定めたとされている。

$$V_{dd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{cb} \quad (2)$$

ここで、 V_{dd} : 設計せん断圧縮破壊耐力(N), $\beta_d = \sqrt[4]{1000/d}$, $\beta_p = (1 + \sqrt{100p_w})/2$, ただし、 $\beta_d > 1.5$, $\beta_p > 1.5$ となる場合は 1.5 とする。 $\beta_a = 5/(1 + (a/d)^2)$, $f_{dd} = 0.19 \sqrt{f_{cd}}$ (N/mm²), f_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²), γ_{cb} : 部材係数であり一般に 1.3 としてよいとされている。本研究の RC ヒューム管供試体は $a/d = 2.19$ とディープビームであり、前述の青山の研究¹⁾ における NB 供試体の実験結果においてもせん断圧縮破壊モードの傾向が見られたことから、本研究ではせん断耐力を式 (2) から求める。

次に、BFRP シート補強供試体における BFRP 負担分のせん断耐力 (V_f) を土木学会指針に示される式 (3) に基づき算出する。この式は Khalifa ら⁸⁾, Triantafillou ら⁹⁾, 松尾ら¹⁰⁾, 丸山, 睦好ら¹¹⁾, 岸ら¹²⁾ の他多くの研究成果を基に CFRP シートおよび AFRP シートを用いた場合について定められた式である。

$$V_f = K \{ A_f \cdot f_{fud} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f \} \cdot z / \gamma_b \quad (3)$$

ここで、 K : 連続繊維シートのせん断補強効率, 式 (4) より求められる。

$$K = 1.68 - 0.67R \quad \text{ただし, } 0.4 \leq R \leq 0.8 \quad (4)$$

R は式 (5) より求められる。

$$R = (\rho_f \cdot E_f)^{1/4} (f_{fud} / E_f)^{2/3} (1 / f_{cd})^{1/3}, \quad 0.5 \leq R \leq 2.0 \quad (5)$$

ρ_f は式 (6) より求められる。

$$\rho_f = A_f / (b_w \cdot s_f) \quad (6)$$

ここで、 A_f : 区間 s_f における連続繊維シートの総断面積, s_f : 連続繊維シートの配置間隔, f_{fud} : 連続繊維シートの設計引張強度 (N/mm²) であり引張強度を材料係数 γ_{mf} で

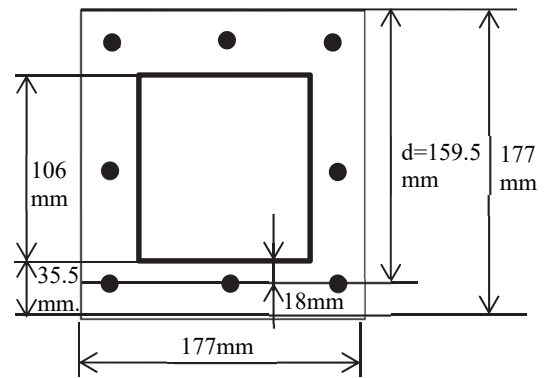


図-3 等積正方形箱形の断面図

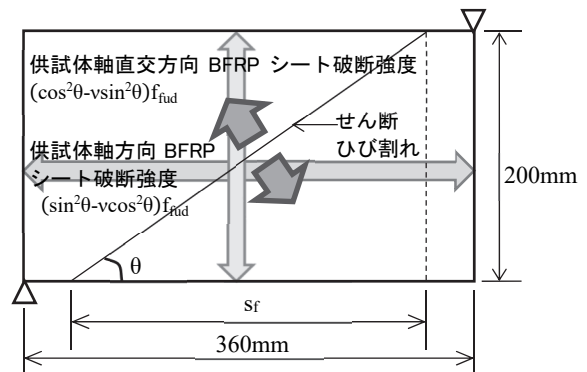


図-4 BFRP シート補強部の応力状態

除したものを、 γ_{mf} : 連続繊維シートの引張強度のばらつきを反映した材料係数で一般に 1.2, E_f : 連続繊維シートの弾性係数 (kN/mm²), α_f : 連続繊維シートが部材軸となす角度, γ_b : 部材係数で一般に 1.25 である。BFRP シート補強部近傍における応力状態を図-4 に示す。供試体軸とせん断ひび割れの成す角を θ とするとき、せん断ひび割れはその直交方向に開口するが、BFRP シートの繊維方向と異なるため、式 (3) において考慮する必要がある。材料力学の教科書^{一例として 13)} によれば、供試体軸直交方向の BFRP シートの破断強度は式 (7) の σ_1 , 供試体軸方向の BFRP シートの破断強度は式 (8) の σ_2 となる。

$$\sigma_1 = (\cos^2 \theta - v \sin^2 \theta) f_{fud} \quad (7)$$

$$\sigma_2 = (\sin^2 \theta - v \cos^2 \theta) f_{fud} \quad (8)$$

ここで、 v は BFRP シートのポアソン比であり、前記の文献¹³⁾ によれば、通常の FRP では 0.5 程度であることが示されている。二方向 BFRP シートを用いた場合には、式 (3) に式 (7) と式 (8) を考慮した式 (9) から BFRP シートにより受け持たれるせん断耐力を求める。

$$V_f = K \{ A_f (1 - v) f_{fud} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f \} \cdot z / \gamma_b \quad (9)$$

なお、一方向 BFRP シートを用いた場合の破断強度は式 (7) から求められるため、せん断耐力は式 (10) から求められる。

$$V_f = K \{ A_f (\cos^2 \theta - v \sin^2 \theta) f_{fud} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f \} \cdot z / \gamma_b \quad (10)$$

表－4 セン断耐力の算出値一覧 (γ_b, γ_{mf} 未考慮)

供試体 No.	実験値 (kN)	K 未考慮		K 考慮	
		算出値 (kN)	実験値/算出値	算出値 (kN)	実験値/算出値
NB-1	40.7	38.9	1.05	38.9	1.05
NB-2	42.0	38.9	1.08	38.9	1.08
B1	88.5	89.1 (110.6)	0.99 (0.80)	74.8 (83.7)	1.18 (1.06)
B2	121.4	139.3 (182.4)	0.87 (0.67)	92.3 (99.9)	1.32 (1.22)
BP-1	115.2	114.2 (146.4)	1.01 (0.78)	79.0 (84.6)	1.46 (1.36)
BP-2	127.4	114.2 (146.4)	1.12 (0.87)	79.0 (84.6)	1.61 (1.50)

*() 外は $\theta=35^\circ$ とした場合, () 内は $\theta=45^\circ$ とした場合

表－5 セン断耐力の算出値一覧 (γ_b, γ_{mf} 考慮)

供試体 No.	実験値 (kN)	K 未考慮		K 考慮	
		算出値 (kN)	実験値/算出値	算出値 (kN)	実験値/算出値
NB-1	40.7	38.9	1.05	38.9	1.05
NB-2	42.0	38.9	1.08	38.9	1.08
B1	88.5	72.4 (86.7)	1.22 (1.02)	66.5 (74.5)	1.33 (1.19)
B2	121.4	105.8 (134.4)	1.15 (0.90)	83.3 (93.3)	1.46 (1.30)
BP-1	115.2	89.1 (110.6)	1.29 (1.04)	72.2 (79.7)	1.60 (1.45)
BP-2	127.4	89.1 (110.6)	1.43 (1.15)	72.2 (79.7)	1.76 (1.60)

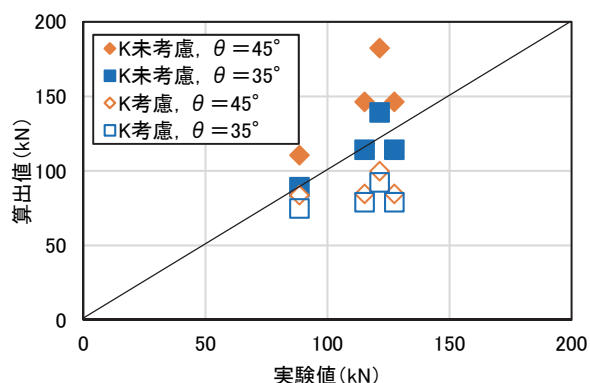
*() 外は $\theta=35^\circ$ とした場合, () 内は $\theta=45^\circ$ とした場合

3.2 既存のせん断耐力評価結果

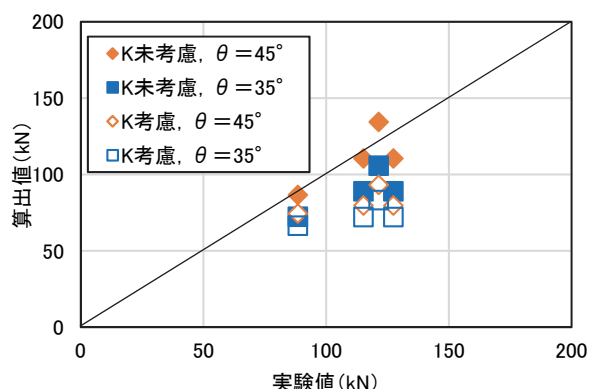
前節の式 (2) と式 (9) あるいは式 (10) よりせん断耐力を算出した。ここで、考慮されている。また、が考慮されている。本章では部材係数 γ_b 、材料係数 γ_{mf} 、そして連続繊維シートの補強効率に関する係数 K と BFRP シートにより受け持たれるせん断耐力の関係について検討した。算出値と実験値の一覧および両者の関係を γ_b, γ_{mf} 考慮の有無ごとに表－4、表－5、図－5、そして図－6 に示す。ここで、供試体軸とせん断ひび割れの成す角 θ については、通常トラス理論において考慮する 45° と土木学会指針において定められる 35° の 2 種類について検討した。なお、後者については青山の研究¹⁾の写真から読み取った前出の表－3 に示した値の平均値と同程度であった。

まず、NB 供試体については実験値と算出値は同程度の値であり、既存の式 (2) により本研究で対象とした RC ヒューム管のせん断耐力が精度よく評価されることが確認された。

次に、BFRP シート補強供試体について実験値と算出値を比較検討する。連続繊維シートの補強効率に関する



図－5 実験値と算出値の比較 (γ_b, γ_{mf} 未考慮)



図－6 実験値と算出値の比較 (γ_b, γ_{mf} 考慮)

係数 K の考慮の有無について検討する。 K 考慮、 γ_b, γ_{mf} 未考慮の場合には、 $\theta=35^\circ$ の場合に実験値/算出値は 1.18 ～ 1.61、 $\theta=45^\circ$ の場合に 1.06 ～ 1.50 である。一方、 K, γ_b, γ_{mf} 未考慮の場合には、 $\theta=35^\circ$ の場合に実験値/算出値は 0.87 ～ 1.12 であり、 $\theta=45^\circ$ の場合に 0.67 ～ 0.87 である。よって、 K を考慮することでやや安全側にせん断耐力が算出されるが、 K を考慮しない場合にはせん断耐力が過大評価される場合がある可能性が示唆された。

γ_b, γ_{mf} 考慮の影響について検討する。 K, γ_b, γ_{mf} 考慮の場合には、 $\theta=35^\circ$ の場合に実験値/算出値は 1.33 ～ 1.76 であり、 $\theta=45^\circ$ の場合に 1.19 ～ 1.60 である。一方、 K 未考慮、 γ_b, γ_{mf} 考慮の場合には、 $\theta=35^\circ$ の場合に実験値/算出値は 1.15 ～ 1.43 であり、 $\theta=45^\circ$ の場合に 0.90 ～ 1.15 である。よって、 γ_b, γ_{mf} 考慮することで安全側にせん断耐力が評価される傾向にあった。さらに、せん断ひび割れの角度 θ について上記の値を比較すると、 θ をより実態に即した角度とすることで、せん断耐力がより安全側に評価される傾向が見られた。

4. 耐荷力解析による実験結果の検証

4.1 使用した解析コードの概要

前述の実験における RC 供試体に関して、日本コンクリート工学会の解析プログラム JCMAC3-U を用いて 3 次元 FEM モデルを作成し、解析的検討を行った。

JCMAC3-U については既報^{2), 3), 14)}において参照しており、ここでは概要についてのみ述べる。JCMAC3-U は FEM 温度解析、FEM 湿気移動解析、FEM 応力解析コードの 3 つで構成されている¹⁵⁾。まず FEM 温度解析が行われ、計算された温度履歴や既知外力・変位履歴を基に FEM 応力解析が実施され、変位、ひずみ、応力などが計算される流れで解析が行われる¹⁶⁾。

4.2 実験と算定の結果に対する解析的検討：解析モデル

前述の実験に用いられた RC ヒューム管供試体を模した解析モデルを作成した。モデル化した箇所は前出の図-1 に示した。全体形状を図-7 (a) に、配筋状況と境界条件を図-7 (b) に、BFRP シートと接着層の状況を図-7 (c) にそれぞれ示す。RC ヒューム管については x 軸方向に 20mm メッシュ、y, z 軸方向には 15mm 程度のメッシュとした。BFRP シートと接着層の厚みは要素のアスペクト比を考慮して 1mm と設定したが、実際の厚みとは異なるため、その是正のために、実際の厚みを解析モデルにおける厚み (1mm) で除した値をヤング係数に乘じ、低減することとした。BFRP シートの実際の厚みは前掲の換算厚みとし、接着材の実際の厚みは使用した接着材量と比重から算出した値 (0.926mm) とした。なお、節点数は 12550 となった。なお、コンクリートと鉄筋の材料モデルはマスコンクリートのひび割れ制御指針 2016 (日本コンクリート工学会)¹⁷⁾によるものを用いた。主鉄筋については埋め込み鉄筋要素を用いた。BFRP シートと接着層については、青山の実験³⁾において BFRP シートの剥離は確認されず破断に至ったため、弾性体としてモデル化した。コンクリートについては支点、載荷点周辺には応力集中の可能性があるので弾性構成則を用い、それ以外の箇所については非線形構成則を用いてモデル化した。

各種材料の物性値については表-6 に示す。コンクリートの物性値について、本研究で用いた解析コードには遠心力締固めや蒸気養生を考慮することができないため、水セメント比やヤング係数、引張強度に対するこれらの影響を考慮する必要があり、既報^{2), 3)}において、水セメント比として実験における水セメント比 0.475 としたケースで実験値に対して妥当な結果が得られたため、本稿でもこれを採用した。また、ヤング係数と引張強度についても既報^{2), 3)}と同様に同指針¹⁷⁾に掲載されているヤング係数および引張強度と圧縮強度の関係式における係数を、実測値に基づき修正して使用した。なお、セメントの種類と単位量は実験同様、普通セメントで 324 kg/m³とした。熱膨張係数および破壊エネルギーについても同示方書に基づき 10μ/℃および 0.084N/mm とした。鉄筋については引張降伏強度の値を採用した。BFRP シートは弾性体としてモデル化したため、解析においては破断し

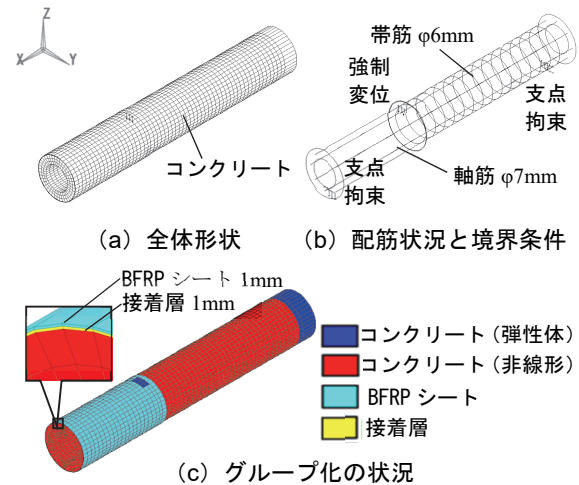


図-7 解析モデル概要

表-6 解析に用いた物性値一覧

材料特性	解析で用いた値
圧縮強度 f_c (N/mm ²)	$44.66(t-0.37)/(3.447+0.875(t-0.37))$ (コンクリート, W/C=47.5%)*
ヤング係数 (N/mm ²)	$6300 f_c^{0.555}$ (コンクリート) 200,000 (鉄筋), 1,667 (接着層) 10,275 (BFRP シート 1 層あたり)
引張強度 (N/mm ²)	$0.177 f_c^{0.85}$ (コンクリート) 50 (接着層)
破壊エネルギー (N/mm)	0.084 (コンクリート)
圧縮強度時のひずみ	0.002 (コンクリート)
引張降伏強度 (N/mm ²)	1,275 (鉄筋)
ポアソン比	0.2 (コンクリート, 鉄筋, BFRP, 接着層)

* t は経過日数

表-7 最大荷重の解析値一覧

供試体 No.	実験値(kN)	解析値(kN)	実験値/解析値
B1	88.5	90.5	0.98
B2	121.4	121.0	1.00
BP-1	115.2	121.0	0.95
BP-2	127.4	121.0	1.05

ないが、実験における最大荷重は BFRP シート破断直前であったため、BFRP シートのひずみが破断ひずみに到達した時点の荷重を最大荷重とした。破断ひずみは前出の式 (7) と式 (8) に示される破断強度を BFRP シートのヤング係数で除して求めた。コンクリート打ち込み時を解析開始時間とし、強制変位を与える直前までは一定温度 (20℃) とした。遠心力締固めと蒸気養生から平均 20 日経過後に載荷試験を行っているが、前述のようにコンクリートの物性値については別途考慮し、解析上は 28 日養生後に強制変位を与える設定とした。強制変位は

1/30mm ごとに最大 14mm まで加えた。既報^{2), 3)}においてノルムに対する不平衡力のノルムの割合を検討した結果から、応力解析および耐荷力解析の収束判定におけるノルムの閾値は 0.001, 反復回数は 500 回とした。

4.3 実験と算定の結果に対する解析的検討：解析結果

解析の結果よりせん断耐力を表-7 に示す。実験値/解析値は 0.95~1.05 であり、概ね類似した値である。よって、せん断ひび割れの開口方向と BFRP シートの繊維方向の違いを破断ひずみに考慮することで、概ね実験値と同程度の解析値が得られることが示された。

5. 結言

本研究では BFRP シート接着補強 RC ヒューム管のせん断耐力に関する既存の設計式を、BFRP シートの異方性を考慮して変形した式を提案し、その適用性を検証した。得られた知見を以下に纏める。

- 1) 土木学会指針に定められている既存式をせん断ひび割れの開口方向と BFRP シートの繊維方向の違いを考慮して変形し、BFRP シート補強供試体における BFRP 負担分のせん断耐力の評価式を提案した。
- 2) 連続繊維シートの補強効率に関する係数 K を考慮することでやや安全側にせん断耐力が算出されるが、K を考慮しない場合にはせん断耐力が過大評価される場合がある可能性が示唆された。
- 3) 部材係数と材料係数を土木学会指針に定められた値として考慮した場合に、せん断耐力がより安全側に評価される傾向が見られた。また、せん断ひび割れの角度 θ をより実態に即した角度とすることで、せん断耐力がより安全側に評価される傾向が見られた。
- 4) FEM 解析を行い最大荷重を求めたところ、せん断ひび割れの開口方向と BFRP シートの繊維方向の違いを破断ひずみに考慮することで、概ね実験値と同程度の解析値が得られることが示された。

謝辞：日本コンクリート工業株式会社 of 青山裕之氏より実験データ等の提供と貴重な助言をいただいた。また、本研究の一部は「名城大学 自然災害リスク軽減研究センター（代表者：小高 猛司）」の助成を受けて実施したものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 青山裕之：バサルト繊維プリプレグシートによるコンクリート柱のせん断補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.42, No.2, pp.1093-1098, 2020
- 2) 岩下健太郎：BFRP シート接着により補強した遠心力鉄筋コンクリート管の耐荷性能に関する解析的

研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 43, No. 1, pp. 1049-1054, 2021

- 3) 岩下健太郎：BFRP シートを部分接着した遠心力鉄筋コンクリート管の耐荷性能に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 44, No. 1, pp. 1480-1485, 2022
- 4) 土木学会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000.7
- 5) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09，2018
- 6) 二羽淳一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐力算定式，第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp. 119-126, 1983
- 7) 土木学会コンクリート委員会：2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]，2018
- 8) Khalifa, A., Gold, W. J., Nanni, A., and Abdel, Aziz, M. I.: Contribution of Externally Bonded FRP to Shear Capacity of Flexural Members, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol.2, No.4, pp.195-202, 1998
- 9) Triantafillou, T. C., and Antonopoulos, C.P.: Design of Concrete Flexural Members Strengthened in Shear with FRP, Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol.4, No.4, pp.198-205, 2000
- 10) 松尾庄二，松岡茂，益田彰久，柳博文：FRP で補強した梁のせん断補強効果に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 19, No. 2, pp. 261-266, 1997
- 11) 中井裕司，岡野素之，睦好宏史，丸山久一：連続繊維シートで補強した棒部材のせん断耐力の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 1, pp. 493-498, 2000
- 12) 張広鋒，岸徳光，三上浩，栗橋祐介：AFRP シートせん断補強 RC 梁の耐荷性能に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28, No. 2, pp. 1441-1446, 2006
- 13) 邊吾一，石川隆司：先進複合材料工学，培風館，2005
- 14) 岩下健太郎，石川靖晃：環境温度変化による初期応力と高温度環境が FRP シート補強 RC 梁に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.1619-1624, 2019
- 15) 土木学会：コンクリートにおける水の挙動研究小委員会（349 委員会）委員会報告書，コンクリート技術シリーズ 112，2017
- 16) 田辺忠顕ほか：初期応力を考慮した RC 構造物の非線形解析法とプログラム，技法堂出版，pp.201-314, 2004
- 17) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016，JCI-R-1-2016，2016