

論文 ピアノ線混入 BFRP シート緊張接着補強 RC 梁の曲げ構造性能

岩下 健太郎*1・呉 智深*2・橋本 拓也*3・金光男*4

要旨: 高伸度で比較的低価格な玄武岩繊維複合材 (BFRP) と、引張弾性率に富み安価なピアノ線を組み合わせ、材料価格を抑えつつ引張弾性率、強度、伸度を総合的に高めたハイブリッド緊張・補強シート材 (PW-BFRP シートと呼称) を作製し、引張特性および付着特性を実験的に検討したうえで、RC 梁への緊張接着による曲げ補強効果を実験的に検討した。混入ピアノ線量の増加や導入緊張力の増加による曲げ構造性能の向上効果を実験的に検討し、既存の曲げ理論に基づく簡易算定手法により各種曲げ性能指標に対する評価を行った。

キーワード: 玄武岩繊維複合材 (BFRP)、ピアノ線、緊張接着、RC 梁、曲げ補強

1. はじめに

経年劣化や荷重条件、交通量増加により補強を必要とする既設の RC、PC 構造物に対し、外部からプレストレスを導入する緊張補強技術は、死荷重の補強、プレストレス導入量の調整による補強効果の制御もできて効果的である。著者らは高度な引張特性を有し、耐腐食性にも優れる連続繊維複合材 (Fiber Reinforced Polymers, FRP と呼称) を緊張・補強材に用い、コンクリート表面にエポキシ樹脂等の接着材を用いて接着することで RC、PC 構造物に外部からプレストレスを導入する補強技術の開発を進めてきた^{主に1)~3)}。最近では FRP に用いられる繊維材の内、主に中国やウクライナで生産規模が増大している比較的低価格で 3% を超える伸度を有する玄武岩繊維を採用し、緊張・補強材の低コスト化および耐腐食性やより大きな変形に対する追従性の向上を図っている。本研究では、安価で高い引張弾性率を有するピアノ線を玄武岩 FRP (BFRP と呼称) の内部に混入させる (PW-BFRP シートと呼称) ことで、耐腐食性を維持しつつ引張弾性率を高めることにより、緊張補強材の物性を総合的に向上させる。そして、PW-BFRP シートの引張特性、付着特性、そして緊張接着した RC 梁の曲げ構造性能を実験的に検討するとともに、既存の曲げ理論に基づく簡易算定手法の適用性を検討する。

2. 実験方法

2.1 PW-BFRP シートの引張試験

本研究で使用した PW-BFRP シートは、常温硬化型のエポキシ樹脂を含浸させた一方向材の玄武岩繊維シート 2 枚で上下からピアノ線を挟み、養生・硬化させることで作製した (図-1)。そして、繊維方向を長手に取り、幅 25mm×長さ 330mm で切り出し、両端部にガラスクロ

ス製のタブをエポキシ樹脂で接着して引張試験片を作製した (図-2)。ここで、本研究では引張弾性率と断面積の積を補強量の指標とし、 $\phi 0.25\text{mm}$ のピアノ線混入本数について、30 本、60 本 (それぞれ BFRP シート 1、2 層に相当)、そして 90 本 (BFRP シート 3 層に相当) の 3 ケース各 3 本の引張試験を行った (表-1)。BFRP シートおよびピアノ線の物性値は表-2 に示す。引張試験は 500kN 万能試験機により 1mm/min の変位制御で試験片が完全に破断するまで行い、試験機に接続されたロードセルにより引張荷重を測定するとともに、試験片に取り付けた検長 5mm のひずみゲージおよび検長 100mm の π 型変位計により試験片に生じる引張ひずみを測定した。



図-1 PW-BFRP シートの積層方法

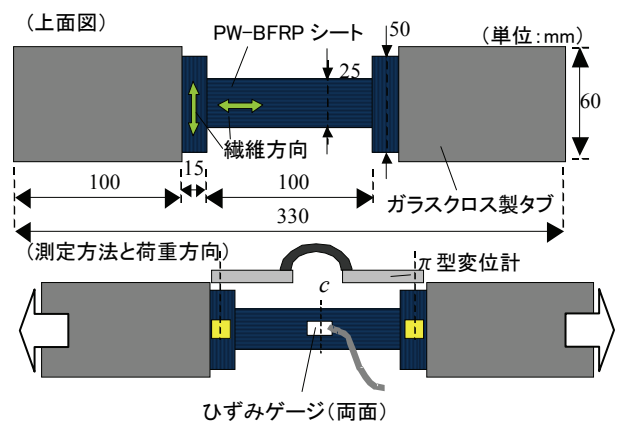


図-2 PW-BFRP シートの引張試験片の詳細

*1 名城大学 理工学部建設システム工学科助教 工博 (正会員)

*2 茨城大学 工学部都市システム工学科教授 工博 (正会員)

*3 茨城大学 工学部都市システム工学科

*4 名城大学 大学院理工学研究科建設システム工学専攻

表-1 PW-BFRP シート引張試験片の仕様

試験片名	BFRP シート層数	ピアノ線径と本数	BFRP シート換算層数
T-B2-P1	2層	φ0.25mm×30本	3層
T-B2-P2	2層	φ0.25mm×60本	4層
T-B2-P3	2層	φ0.25mm×90本	5層
T-B3-P0	3層	なし	3層
T-B5-P0	5層	なし	5層

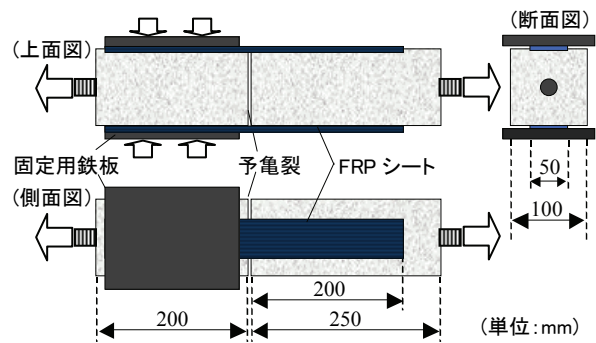


図-3 両引き付着供試体の詳細

表-2 各種材料の物性値一覧

BFRP シート		
引張強度 (N/mm ² , 実測平均値)	2392	
引張弾性率 (kN/mm ² , 実測平均値)	91	
実測目付量 (g/m ²)	365	
換算厚さ (mm, 目付量, 密度から)	0.138	
ピアノ線		
引張強度 (N/mm ² , メーカー値)	2200	
引張弾性率 (kN/mm ² , メーカー値)	200	
公称断面積 (mm ² /本) : 0.25mm 径	0.049	
コンクリート		
圧縮強度 (N/mm ²)	両引き付着試験供試体	34.2
	RC 梁供試体	35.8
割裂強度 (N/mm ²)	両引き付着試験供試体	3.82
	RC 梁供試体	3.96
圧縮弾性率 (kN/mm ²)	両引き付着試験供試体	28.5
	RC 梁供試体	29.9
異形鉄筋 (RC 梁)		
引張降伏強度 (N/mm ²) (引張試験による)	D13	472
	D16	483
引張弾性率 (kN/mm ² , メーカー値)	210	

表-3 両引き付着供試体の仕様

供試体名	BFRP シート層数	ピアノ線径と本数	BFRP シート換算層数
S-B3-P0	3層	なし	3層
S-B2-P1	2層	φ0.25mm×60本	3層
S-B2-P2	2層	φ0.25mm×120本	4層

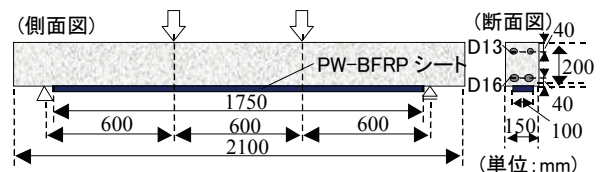


図-4 PW-BFRP シート緊張接着 RC 梁供試体の詳細

2.2 PW-BFRP シートとコンクリートの両引き付着試験

鋼ボルトを事前に埋め込んだ直方体のコンクリート塊 2 体を付け合わせる形で配置し、この 2 体の間に跨るように PW-BFRP シートを常温硬化型のエポキシ樹脂を用いて接着した供試体を作製した (図-3)。供試体の作製手順としては、まず、ダイヤモンドサンダーで骨材が露出するまでコンクリート表面を削り、アセトンを含ませた布で削りくずを拭き取った上で 0.5kg/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を行った。その後、12 時間経過後に常温硬化型のエポキシ樹脂を用いて PW-BFRP シートを接着した。接着する PW-BFRP シートにおいて、混入させるピアノ線本数 (φ0.25mm×60 本, 120 本 (それぞれ BFRP シー

ト 1 層, 2 層に相当)) を考慮し、ピアノ線混入量と付着強さの関係を検討する (表-3)。シートの接着後、7 日間の室温養生を行ったうえで 1mm/min の変位制御でシートが完全に剥離するまで両引き付着試験を行った。

2.3 PW-BFRP シート緊張接着補強 RC 梁の 4 点曲げ試験

全長 2.1m の RC 梁を 6 体作製した (図-4)。これらの梁には D10 帯鉄筋を 80mm 間隔で配置し、十分なせん断耐力を確保できるように設計した。ここで、コンクリートの設計圧縮強度 30N/mm², スランブ 80mm として配合し、セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。コンクリートや鉄筋の物性値は表-2 に示す。まず、PW-BFRP シートに 50% の繊維含有率 (V_f) 相当量の常温硬化型のエポキシ樹脂を含浸させ、1 日程度室温環境下 (20°C±4°C 程度) で硬化・成形した。成形は手作業で樹脂含浸・積層し、脱泡ローラーで気泡を抜きつつピアノ線と玄武岩繊維を良く密着させた。緊張装置については、過去の研究で使用したものと同様のものを使用したため、ここでは割愛する¹⁾。このシートを所定の緊張力で緊張し、FRP の表面に 0.25kg/m² 相当量のエポキシ樹脂でコンクリートの表面に接着した。なお、コンクリートの表面処理は事前に実施し、その方法は両引き付着

表-4 PW-BFRP シート緊張接着 RC 梁供試体の仕様

供試体名	導入緊張レベル*	BFRP シート層数	ピアノ線径と本数	BFRP シート換算層数
RC	なし	なし	なし	なし
RC-B2-P1-0%	0%	2層	φ0.25mm ×120本	3層
RC-B2-P1-25%	25%	2層	φ0.25mm ×120本	3層
RC-B2-P1-33%	33%	2層	φ0.25mm ×120本	3層
RC-B2-P2-25%	25%	2層	φ0.25mm ×240本	4層
RC-B3-P0-25%	25%	3層	なし	3層

*導入緊張力の破断強度に対する割合



図-5 PW-BFRP シートの破断後の様子

試験時と同様に行った。供試体の補強について、①PW-BFRP シートへの導入緊張レベル(0%, 25%, 33%)および②ピアノ線混入量(なし, φ0.25mm×120本(引張弾性率×断面積でBFRPシート1層に相当), φ0.25mm×240本(BFRPシート2層に相当))を考慮し, これらの要因と補強効果の関係を実験的に検討した(表-4)。

載荷試験の方法は4点曲げとし, 支点, 載荷点の間隔をそれぞれ1800mm, 600mmに設定し, 2000kN加圧試験機を用いて2kN/minの速度で載荷した。たわみ計測は50mm変位計を支間中央の梁両側面に設置して, 両者の値を平均化した値を梁の最大たわみとして採用した。また, FRPひずみはPW-BFRP表面に設置した検長5mmのひずみゲージで測定した。ひずみゲージは幅方向中央部に, 長手方向100mm間隔で設置した。さらに, 鉄筋ひずみは支間中央及び両載荷点に相当する位置における1本の引張鉄筋に設置した検長5mmのひずみゲージで測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 PW-BFRP シートの引張特性の検討

引張試験片の破断後の様子を図-5に示す。幅方向に3mm程度間隔で段階的に繊維方向のマトリックスクラックが生じ, 部分破断しながら次第に破断が進行した。ピアノ線はBFRPシートの部分破断とともに破断しており, 現状のピアノ線量ではBFRPシートの脆性的な破断を抑制するには至らなかった。引張試験より得られた荷

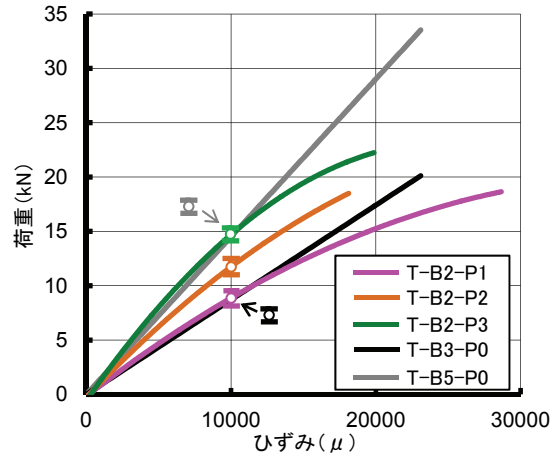


図-6 PW-BFRP シートの荷重-ひずみ関係



図-7 両引き付着試験でのBFRP剥離の様子(S-B2-P2)

重-ひずみ関係を10000μにおける荷重のばらつきとともに図-6に示す。各ケース3本の引張試験を行い, ひずみ100μごとに荷重の平均を取って荷重-ひずみ関係とした。BFRPシートは弾性体のため, 曲線の傾き変化はピアノ線の剛性変化によるところが大きい。ピアノ線には明確な引張降伏点は無いが, 若干の剛性低下はある。コンクリート標準示方書[設計編]⁵⁾にあるPC鋼材のモデル化された応力-ひずみ関係では, 9000μ程度からやや剛性変化があり, 15000μから傾きがほとんどないように描かれている。図-5においても同様の箇所でも剛性変化が見受けられる。一方, 初期の剛性については, 引張弾性率×断面積について同等とした, T-B3-P0とT-B2-P1およびT-B5-P0とT-B2-P3で同程度の値となっており, また, 10000μ近傍での荷重のばらつきもある程度小さいことから, PW-BFRPシートについて, 想定された引張挙動がある程度得られることが確認された。

3.2 PW-BFRP シートの付着強さに関する検討

両引き付着試験におけるBFRPシート剥離の様子(S-B2-P2)を図-7に示す。剥離は予亀裂近傍からシート端部に向かって進展した。剥離後, ピانو線混入の有無に関わらずシート表面にコンクリート表層部が5mm程度の厚みで付着しており, 強い付着が得られたことが確認された。ただし, S-B2-P2では, 予亀裂から50mm程度のコンクリートが40mm程度深さから剥離しており, 特に強い付着力が得られたことが確認された。

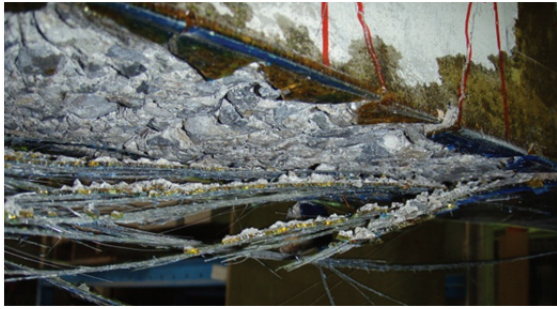


図-8 BFRP シート破断の様子 (RC-B2-P1-33%)

土木学会編, 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⁾に基づき, 下記の式 (1), (2) から求めた最大せん断応力 τ_y および剥離破壊エネルギー G_f を用いて付着強さを評価する。

$$\tau_y = \Delta \varepsilon_f E_f A_f / s_g / b \quad (1)$$

$$G_f = \frac{P_{max}^2}{8b^2 E_f t} \quad (2)$$

ここで, $\Delta \varepsilon_f$: 最大荷重時のひずみ増加区間での隣り合うゲージひずみ値の差, E_f : FRP シート (+ピアノ線) の引張弾性係数(N/mm²), A_f : FRP シート (+ピアノ線) の断面積(mm²), s_g : ひずみゲージの貼り付け間隔(mm), b : FRP シートの幅(mm), P_{max} : 最大荷重(N), t : FRP シートの厚さ(mm)である。

付着強さに関する指標である τ_y と G_f を算定した結果, S-B3 で τ_y が 1.84 (N/mm²), G_f が 0.83 (N/mm), S-B2-P1 では τ_y が 4.62 (N/mm²), G_f が 1.33 (N/mm), S-B2-P2 では τ_y が 10.16 (N/mm²), G_f が 2.15 (N/mm) であり, ピアノ線の混入によりコンクリートに対する付着強さが向上し, 混入量が多いほど付着強さがさらに向上する傾向が見受けられた。

3.3 PW-BFRP シート緊張接着による補強効果の検討

(1) PW-BFRP シート緊張接着による補強効果

いずれの供試体でもひび割れが分布して発生した後, 引張鉄筋の降伏が生じ, その後, RC では圧縮破壊, RC-B2-P1-0%ではシート剥離, 緊張接着供試体ではシート破断が生じた。RC-B2-P1-25%における BFRP シート破断後の写真を図-8 に示す。RC-B3-25%, RC-B2-P1-25%, そして比較用に RC の荷重-変位関係を図-9 に示す。ピアノ線の混入有無によらず, 鉄筋降伏までの挙動はほぼ一致しており, 想定通りの剛性が得られていることが示された。最大荷重については, ピアノ線を混入させた RC-B2-P1-25%の方が RC-B3-25%より 6.5%程度大きく, 破壊モードは RC-B3-25%でシートの剥離モードなのに対し, RC-B2-P1-25%でシートの破断モードとなっており, 両引き付着試験結果と同様, 同等の補強量であっても, ピアノ線の混入によりシートの付着強さが向上し, 最大

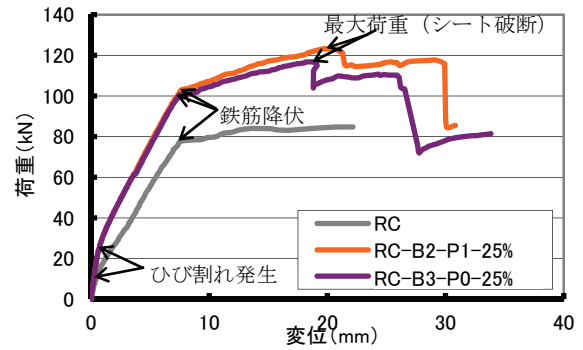


図-9 荷重-変位関係 (ピアノ線混入の有無)

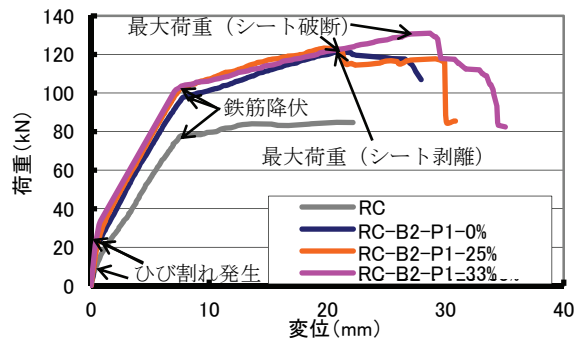


図-10 荷重-変位関係 (導入緊張力の違い)

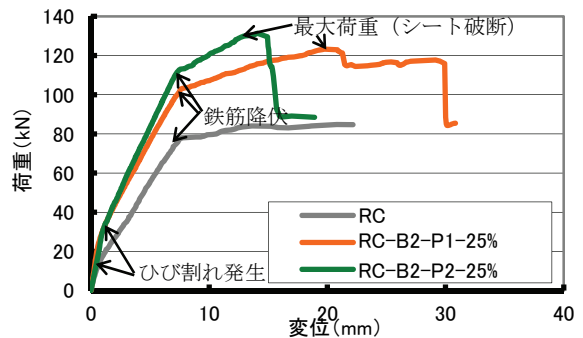
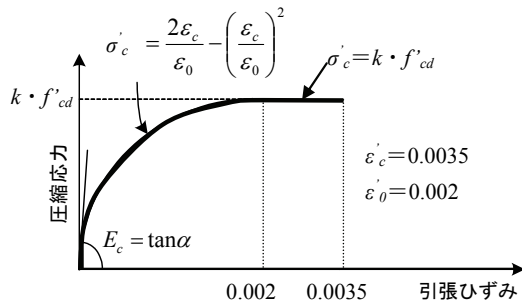


図-11 荷重-変位関係 (ピアノ線混入量の違い)

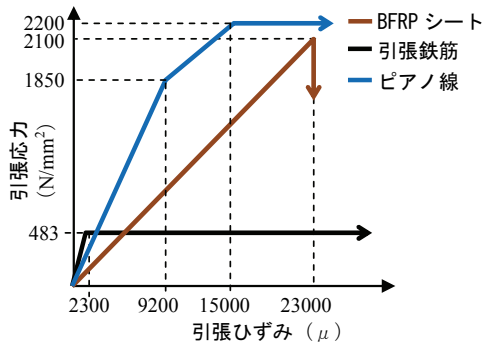
荷重が増加することが実験的に明確となった。ただし, BFRP の破断後にピアノ線が残り, 靱性が高まることに期待したが, BFRP の破断時に散逸する衝撃でピアノ線も同時に破断してしまい, 終局破壊状況はやや脆性的であった。補強構造物の安定性向上を見据え, 脆性的な破壊を抑え, 構造物の靱性を高めることを目的として, ピアノ線混入量を検討することを今後の重要課題の一つとしたい。

(2) PW-BFRP シートへの導入緊張力の違いについて

導入緊張力の違いに関する荷重-変位関係を図-10 に示す。PW-BFRP シートに対する導入緊張力が大きいほど, ひび割れ発生荷重, 鉄筋降伏荷重, 最大荷重が大きくなる傾向が確認された。また, 破壊モードは RC-B3-25%はシートの剥離破壊モード, 緊張力導入供試



(a) コンクリートの圧縮挙動



(b) 異形鉄筋とBFRPの引張挙動

図-12 使用材料の応力-ひずみ関係

体ではいずれもシートの破断破壊モードであり、緊張力の導入によって、PW-BFRP シートの高い引張強度をより有効に活用できることが示された。

(3) ピアノ線混入量の違いについて

ピアノ線混入量の違いに関する荷重-変位関係を図-11に示す。ピアノ線混入量が大きいほど、ひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、最大荷重が大きくなる傾向が確認された。破壊モードについては、RCを除くすべての供試体でシートの破断破壊モードであり、PW-BFRP シートの高い引張強度を有効に活用できることが示された。

(4) 簡易算定式に基づく荷重-変位関係の同定

曲げ理論によるひび割れ発生荷重の算定を行った。各種材料の弾性係数をコンクリートの弾性係数で除した値(弾性係数比)を各種材料の断面積に乘じ、コンクリートに換算する。ここで、弾性係数比は異形鉄筋では $n_s = E_s / E_c$ 、そして、PW-BFRP シートでは $n_f = E_f / E_c$ とした。次に、式(3)から中立軸位置 h_c を求める。

$$h_c = \frac{A_c d_c + A_{s1} d_1 (n_s - 1) + A_{s2} d (n_s - 1)}{A_{total}} \quad (3)$$

ここで、 A_{total} は以下の式(4)から求められる。

$$A_{total} = A_c + A_{s1} (n_s - 1) + A_{s2} (n_s - 1) + A_f n_f \quad (4)$$

そして、ひび割れ発生荷重 P_{cr} は式(5)から算出される。

$$P_{cr} = \frac{2 \cdot I_g \cdot (f_b + \sigma_{yf})}{L \cdot h_c} \quad (5)$$

ここで、 I_g は中立軸に対する断面2次モーメント、 f_b

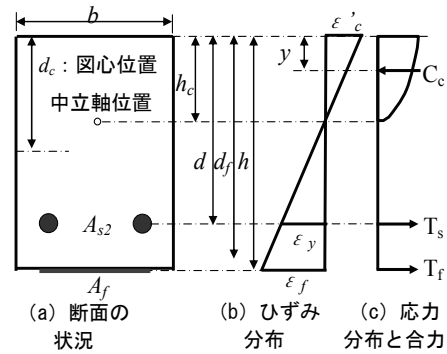


図-13 断面諸元

はコンクリートの引張強度、そして、 σ_{yf} は PW-BFRP シートへの導入緊張応力により梁の下縁に生じる圧縮応力、そして、 L は支点と載荷点の間隔を意味する。なお、PW-BFRP シートに導入された緊張力 P_{yf} を用いて σ_{yf} は式(6)のように表される。

$$\sigma_{yf} = \frac{P_{yf}}{A_c} + \frac{P_{yf}}{I_g} (d - h_c) \quad (6)$$

次に、鉄筋降伏荷重を算定した。各種材料の応力ひずみ関係を前出の文献⁵⁾を参照して図-12に示すように、断面諸元を図-13に示すようにそれぞれ仮定する。平面保持の仮定のもと、ひずみ分布は線形分布とした。まず、引張鉄筋のひずみは引張降伏ひずみ ϵ_y であるため、相似則からPW-BFRPシートおよび圧縮縁ひずみのひずみ ϵ_f および ϵ'_c は以下の式(7)、式(8)のように算出される。

$$\epsilon_f = \frac{d_f - h_c}{d - h_c} \epsilon_y \quad (7)$$

$$\epsilon'_c = \frac{h_c}{d - h_c} \epsilon_y \quad (8)$$

図-13(c)における力のつり合い条件から、式(9)が成り立つ。

$$C_c - T_s - T_f = 0 \quad (9)$$

C_c 、 T_s 、および T_f はそれぞれ式(10)~(12)のように算出される。

$$C_c = \int_0^{h_c} f_c b f(\epsilon'_c) dy \quad (10)$$

$$T_s = \epsilon_y E_s A_s \quad (11)$$

$$T_f = \epsilon_f E_f A_f \quad (12)$$

ここで、 ϵ_f は導入緊張力によるひずみを曲げによるひずみに加算したものとする。式(10)~(12)を式(9)に入力して中立軸位置 h_c が算出される。 C_c の作用位置 y を求める。コンクリートの応力分布に対する断面一次モーメント G_c は、以下の式(13)に示すとおりである。

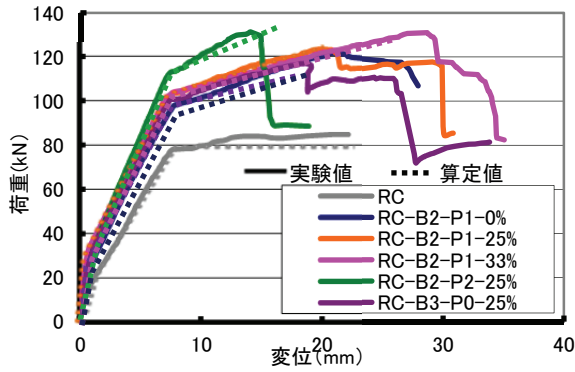


図-14 荷重-変位関係 (算定値-実験値比較)

$$G_c = \int_0^{h_c} f'_c b f(\epsilon'_c) y dy \quad (13)$$

T_s と T_f の合力で除することで y が算出される。

以上の算出結果を式 (14) に入力することで、引張鉄筋降伏時の最大モーメントが算出され、荷重に換算することで引張鉄筋降伏荷重が算定される。

$$M_{sy} = T_s(d-y) + T_f(d_f-y) \quad (14)$$

上記の ϵ_f に BFRP シートの破断ひずみ (-緊張ひずみ) を入力し、式 (8) を式 (15) に変形して、同様の手順で破断破壊モードの最大荷重を算定する。

$$\epsilon'_c = \frac{h_c}{h-h_c} \epsilon_f \quad (15)$$

剥離破壊モードの最大荷重については、以下の式 (16) より得られる ϵ_f を用いて算定する。

$$\epsilon_f = \sqrt{\frac{2G_f}{E_f t_f}} + \epsilon_{f1} \quad (16)$$

ϵ_{f1} は載荷点から有効付着長だけ離れた箇所におけるひずみであり、算出手順は紙面の都合によりここでは割愛する (過去の研究³⁾ を参照)。 G_f には両引き付着試験から得られた値 (3.2 を参照) を用いた。

一方、たわみについては、式 (17) ~ 式 (19) よりひび割れ発生時、鉄筋降伏時、最大荷重時のそれぞれの曲率 ϕ_c 、 ϕ_y 、 ϕ_u を算出する。

$$\phi_c = \frac{\epsilon_c}{h-h_c} \quad (17)$$

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{d-h_c} \quad (18)$$

$$\phi_u = \frac{\epsilon_f}{h-h_c} \quad (19)$$

仮想仕事の定理によりひび割れ発生時 δ_c 、鉄筋降伏時 δ_y 、そして最大荷重時 δ_u は梁の支点間距離 L を用いてそれぞれ $\delta_c = 23\phi_c L^2/216$ 、 $\delta_y = 23\phi_y L^2/216$ 、 $\delta_u = (\phi_y/27 + 5\phi_u/72) L^2$ により求めた。

以上の手順により求めた荷重-変位関係を実験値とともに図-14 に示す。無補強、無緊張、そして緊張接着補強した RC 供試体について実験値と算定値は類似しており、本研究で示した簡易な算定手法により、荷重-変位関係のある程度表現できることを実験的に示した。

4. 結論

本研究では、PW-BFRP シートの引張特性、付着特性、そして緊張接着した RC 梁の曲げ構造性能を実験的に検討するとともに、既存の曲げ理論に基づく簡易算定手法の適用性を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) PW-BFRP シートの引張試験を行い、ピアノ線および BFRP シートの引張特性から想定される剛性が得られることを確認した。
- (2) PW-BFRP シートの両引き付着試験を行い、ピアノ線の混入量が多いほど、コンクリートに対する付着強さが向上する傾向が確認された。
- (3) PW-BFRP シート緊張接着補強 RC 梁の曲げ構造性能について、同等の補強量であっても、ピアノ線の混入によりシートの付着強さが向上し、最大荷重が増加することが実験的に明確となった。
- (4) 導入緊張力およびピアノ線混入量が大きいほど、ひび割れ発生荷重、鉄筋降伏荷重、最大荷重が大きくなる傾向が確認された。
- (5) PW-BFRP シート緊張接着補強 RC 梁の曲げ構造性能について、本研究で示した簡易な算定手法により、荷重-変位関係のある程度表現できることを実験的に示した。

参考文献

- 1) 呉 智深, 岩下健太郎, 林 啓司, 樋口哲郎, 村上信吉, 小関徳昭, PBO 連続繊維シート緊張接着による RC 曲げ部材の補強法, 日本複合材料学会誌, Vol.28, No.4, pp.146-155, 2002.7
- 2) Z.S. Wu, K. Iwashita, K. Hayashi, T. Higuchi, S. Murakami, Y. Koseki: Strengthening Prestressed-concrete Girders with Externally Prestressed PBO Fiber Reinforced Polymer Sheets, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.22, No.14, pp.1269-1285, 2003.11
- 3) 呉 智深, 岩下健太郎, 孫 曉荷, 小林 朗: FRP ケーブルの埋め込み緊張補強技術の確立, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.56A, pp.630-643, 2010.3
- 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, コンクリートライブラリー 101, 2000
- 5) コンクリート標準示方書 [設計編], 土木学会, 2007.