

# 論文 PPC と CFRP 格子筋により上面増厚補強した RC 梁の負曲げ挙動に関する研究

櫻井 俊太\*1・文屋 遼太郎\*2・栗原 哲彦\*3

**要旨:** PPC を用いた床版上面増厚工法において、張出部等の負曲げ領域において PPC の曲げひび割れを許容しない設計が必要になると考えられる。本研究では、PPC の引張材料特性を把握および PPC の曲げひび割れ発生荷重の高度算定手法、設計手法の提案を目的とし、切欠き梁を用いた破壊エネルギー試験および PPC を用いて上面増厚補強した RC 梁の負曲げ試験結果から PPC 曲げひび割れ発生荷重の算定方法の検討を行った。その結果、切欠き試験から PPC の引張軟化挙動および静弾性係数が推定され、推定された結果から上面増厚された PPC の曲げひび割れ発生荷重を精度よく算定できることが確認された。

**キーワード:** 床版上面増厚工法, PPC(Polyester Polymer Concrete), CFRP 格子筋, 補修・補強

## 1. はじめに

我が国の道路橋は高度経済成長期に建設されたものが多く、老朽化により劣化・損傷した道路橋 RC 床版が増加しており、補修・補強が必要な RC 床版が増加している。床版の補修・補強工法の一つに上面増厚工法がある。一般に上面増厚工法は、アスファルト舗装部および床版上面 10mm 程度の切削した後、必要に応じて接着剤を塗布し、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 等で増厚し既存床版と一体化させ、再舗装する補強工法である<sup>1)</sup>。

近年の米国ではポリエステルポリマーコンクリート (以下、Polyester Polymer Concrete : PPC という) を用いた舗装部の補修が行われている<sup>2)</sup>。PPC は不飽和ポリエステル樹脂に細骨材・粗骨材を混ぜて硬化させたものであり、道路橋の RC 床版に使用されるセメントコンクリート (以下、コンクリートという) と比較し、引張強度、圧縮強度ともに高く、耐摩耗性に優れる材料である。また、接着剤を使用せずコンクリートと良好な付着性を示し、かつ硬化時間が約 4 時間と速硬性があるため急速な施工も可能である<sup>2)3)</sup>。

著者らは PPC の機械的性質および施工性が優れることに着目し、PPC および PPC 内に補強材として薄層増厚内でも補強できる格子状炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP 格子筋という) を用いた床版上面増厚工法を提案し、RC 梁曲げ試験を行うことにより、その補強効果を確認してきた<sup>3)4)5)</sup>。S39 道路橋示方書準拠で設計された床版を模した RC 梁に対し、CFRP 格子筋を用いずに PPC のみで上面増厚した RC 梁の負曲げ試験においては、コンクリートのひび割れ発生後、PPC にひび割れが生じ、PPC が負担していた引張応力が引張鉄筋に即時に再分配されることにより、PPC ひび割れ発生直後に引張鉄筋が

降伏する挙動を示した<sup>3)5)</sup>。すなわち、CFRP 格子筋を用いずに PPC を用いた床版上面増厚工法において、引張鉄筋を降伏させないためには張出部等の負曲げ領域において PPC の曲げひび割れを許容しない設計が必要になると考えられる。

そこで本研究では、PPC の引張材料特性の把握および PPC の曲げひび割れ発生荷重の高度算定手法および設計手法の提案を目的とし、切欠き梁を用いた破壊エネルギー試験および PPC を用いて上面増厚補強した RC 梁の負曲げ試験結果から PPC 曲げひび割れ荷重の算定方法の検討を行った。本稿では CFRP 格子筋を用いない場合の検討を主としているが、PPC 曲げひび割れ荷重の算定では既往の研究<sup>3)5)</sup>で評価された PPC 内に CFRP 格子筋を用いた場合についても併せて検討した。

## 2. 使用材料

### 2.1 PPC

PPC は不飽和ポリエステル樹脂を結合材に用いたレジンコンクリートであり、コンクリートと比較して圧縮強度、引張強度が高い材料である。本研究で用いた PPC は粗骨材および細骨材は絶乾状態で使用し、最大粗骨材寸法  $G_{max}$  は実施工で想定される範囲である 8mm もしくは 13mm、樹脂量は 13~15wt% の範囲で製作した。

### 2.2 CFRP 格子筋

表-1 に補強材として用いた CFRP 格子筋の材料特性値の規格値を示す。高強度型と高弾性型の格子間隔 100 × 100mm ピッチの格子筋を用いた。CFRP 格子筋は腐食せず、断面積が小さいため、PPC が薄層増厚の場合も PPC 内の補強筋として使用できる。

\*1 日鉄ケミカル&マテリアル (株) コンポジット事業部 工修 (正会員)

\*2 日鉄ケミカル&マテリアル (株) コンポジット事業部 工修 (正会員)

\*3 東京都市大学 建築都市デザイン学部都市工学科 准教授 工博 (正会員)

### 3. 切欠きはりをを用いた破壊エネルギー試験

#### 3.1 試験概要

PPCの曲げひび割れ強度算定に必要な材料特性の把握を目的とし、切欠きはりをを用いたコンクリート破壊エネルギー試験方法(JCI-S-001-2003)に準じた試験を行った。

切欠きはり供試体概要を図-1に示す。断面100×100mm、長さ400mmの角柱を製作し、中央部分にコンクリートカッターを用いて約30mm深さの切欠きを入れた。製作後に供試体の質量、供試体サイズおよび切欠きの深さを測定した。

試験は支間長300mmの三点曲げとし、両支点はローラー支持とした。切欠き部にはチップを接着させたうえでクリップゲージを取り付け荷重-ひび割れ肩口開口変位(CMOD)を計測した。

表-2に切欠きはり供試体一覧を示す。本試験ではコンクリート種類をPPCとコンクリートの2種類とした。また、最大粗骨材寸法を4章に示す梁試験で検討した8mmと13mmとした。

#### 3.2 引張軟化曲線推定方法

試験から得られた荷重-CMOD曲線をもとに、多直線近似解析法<sup>9)</sup>を用いた逆解析により引張軟化曲線を推定した。本解析は日本コンクリート工学会(JCI)より公開されている多直線近似解析プログラム(FEM FT法)を用いて行った。

#### 3.3 試験結果および考察

##### (1) 荷重-CMOD曲線

図-2に試験から得られた荷重-CMOD曲線を示す。Case2-3供試体はひび割れ発生後、急激にCMODが増加し、他の供試体と大きく異なる挙動であったため破壊エ

ネルギーの考察からは除外した。PPCを使用したCase1, 2供試体は最大荷重時まで概ね線形に荷重が増加し、切欠き部にひび割れが生じると1~3kN程度まで急激に荷重が低下する挙動を示した。コンクリートを使用したCase3供試体はPPC供試体と比較すると、ひび割れ後の荷重低下が緩やかであり、カーブを描きながら荷重が低下する挙動であった。最大荷重は、Case1, 2は15~18kN、Case3は4~5kN程度であり、PPCのほうが約3倍高い荷重を示した。最大粗骨材寸法で比較すると、 $G_{max}=13\text{mm}$ であるCase2供試体は、 $G_{max}=8\text{mm}$ であるCase1供試体と比較し最大荷重が平均で約1.6kN高い結果であった。

##### (2) 破壊エネルギー算出結果一覧

破壊エネルギーは式(1)および式(2)を用いて算出した。

$$G_F = \frac{0.75W_0 + W_1}{A_{lig}} \quad (1)$$

$$W_1 = 0.75 \frac{S}{L} m_1 g \cdot CMOD_c \quad (2)$$

ここで、

$G_F$  : 破壊エネルギー (N/mm)

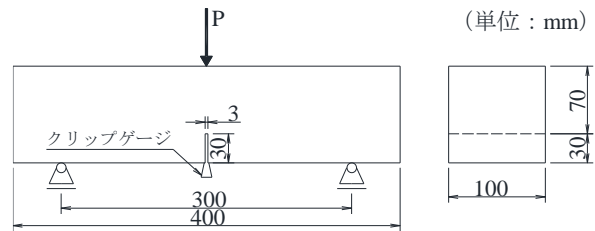


図-1 切欠き梁供試体概要

表-2 切欠きはり供試体一覧 (n=4)

Case	コンクリート種類 (圧縮強度試験値)	最大粗骨材寸法 $G_{max}$ (mm)
1	PPC (61.4N/mm <sup>2</sup> )	8
2	PPC (63.5N/mm <sup>2</sup> )	13
3	コンクリート (25.7N/mm <sup>2</sup> )	13

表-1 CFRP 格子筋の材料特性値 (規格値)

種類	筋断面積 (mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )
高強度型	39.2	1,400	100,000
高弾性型	39.2	1,200	165,000

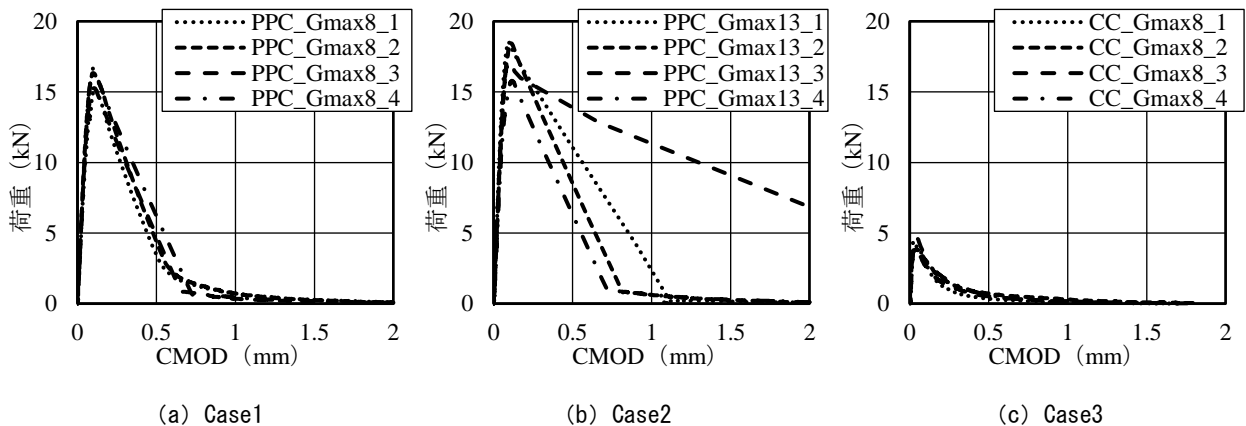


図-2 荷重-CMOD曲線

表-3 試験結果一覧

Case	No.	$W_0$ (N・mm)	$W_1$ (N・mm)	$A_{lig}$ (mm <sup>2</sup> )	$m_l$ (kg)	$CMOD_c$ (mm)	$G_F$ (N/mm)	$G_F$ 平均 (N/mm)
1	1	5,802	215	7,854	9.85	3.953	0.581	0.622
	2	6,385	149	7,813	9.35	2.892	0.632	
	3	5,852	122	7,559	9.15	2.414	0.597	
	4	6,745	137	7,681	9.26	2.684	0.676	
2	1	10,766	142	7,940	9.36	2.753	1.035	0.845 (No.3 は平均から除外)
	2	8,518	164	8,178	9.43	3.159	0.801	
	3	29,507	221	8,146	9.45	4.243	2.744	
	4	6,956	215	7,788	9.30	4.191	0.698	
3	1	873	86	7,848	9.13	1.698	0.094	0.116
	2	1,287	105	7,762	9.23	2.071	0.138	
	3	1,030	98	7,737	9.08	1.963	0.113	
	4	1,186	77	8,193	9.39	1.494	0.118	

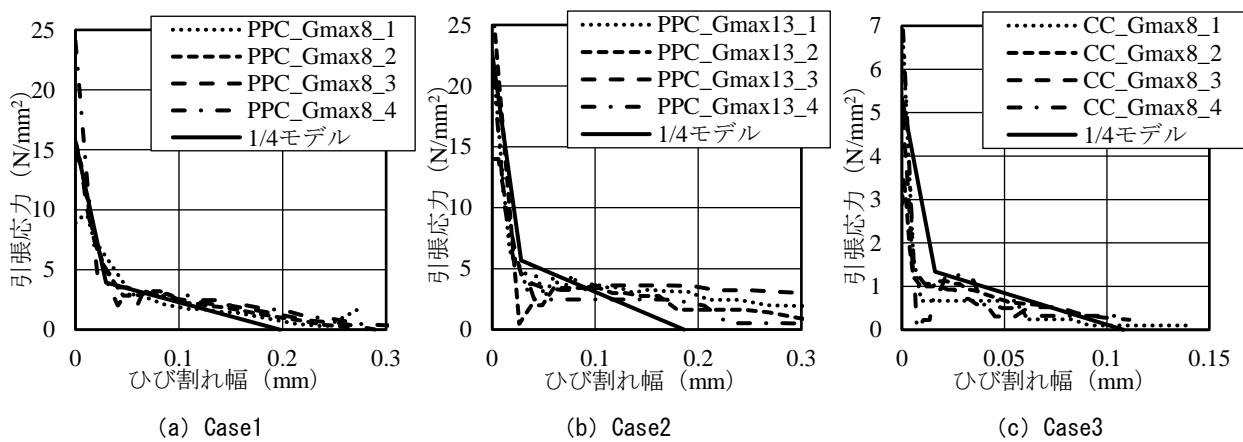


図-3 引張軟化曲線の推定値

- $W_0$  : 供試体が破断するまでの荷重-CMOD 曲線下の面積 (N・mm)
- $W_1$  : 供試体の自重がなす仕事 (N・mm)
- $A_{lig}$  : リガメントの面積 (mm<sup>2</sup>)
- $m_l$  : 供試体の質量 (kg)
- $S$  : 載荷スパン (mm) (=300)
- $L$  : 供試体の全長 (mm) (=400)
- $g$  : 重力加速度 (9.807m/s<sup>2</sup>)
- $CMOD_c$  : 破断時のひび割れ開口変位 (mm)

計算結果一覧を表-3 に示す。PPC 供試体の破壊エネルギーは Case1 で平均 0.622N/mm, Case2 で 0.845N/mm であり, コンクリートである Case3 供試体と比較し約 6 ~8 倍程度大きいことが確認された。

(3) 引張軟化曲線および静弾性係数

図-3 に荷重-CMOD 曲線, 破壊エネルギーから多直線近似解析により推定された引張軟化曲線を示す。また, コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>に示されるコンクリートの引張軟化曲線(1/4 モデル)を図中に合わせて示す。図より, 本試験に用いた PPC においてひび割れ後の軟化挙動が

表-4 PPC の静弾性係数の推定値

Case	No.	静弾性係数の推定値 (kN/mm <sup>2</sup> )	
		推定値	平均値
1	1	14.2	14.8
	2	15.7	
	3	15.4	
	4	14.0	
2	1	16.0	13.7
	2	12.0	
	3	13.8	
	4	12.9	

コンクリートでモデル化されている 1/4 モデルに近い挙動を示すことが確認された。

表-4 に荷重-CMOD 曲線の初期勾配から推定された PPC の静弾性係数を示す。G<sub>max</sub>=8mm の場合は平均で 14.8kN/mm<sup>2</sup>, G<sub>max</sub>=13mm の場合は平均で 13.7kN/mm<sup>2</sup> あった。

4. PPC の曲げひび割れ発生荷重の算定

4.1 試験概要および結果

PPC を用いて上面増厚した RC における, PPC の曲げひび割れ発生荷重の高度算定を目的とし, PPC で上面増

表-5 供試体諸元および PPC ひび割れ結果一覧

供試体名	母材高さ (mm)	PPC 増厚高さ (mm)	PPC 最大粗骨材寸法 (mm)	引張鉄筋 (降伏強度)	圧縮鉄筋 (降伏強度)	CFRP 格子筋	PPC ひび割れ発生荷重 (kN)	PPC ひび割れ発生ひずみ ( $\times 10^{-6}$ )	備考
8-17	150	20	8	2D13 $A_s=253\text{mm}^2$ (350N/mm <sup>2</sup> )	2D10 $A'_s=142.7\text{mm}^2$ (350N/mm <sup>2</sup> )	-	30.2	721	
13-17	150	20	13			-	29.7	743	
8-18	150	30	8			-	39.1	846	
13-18	150	30	13			-	41.0	854	
8-22	200	20	8			-	48.1	677	
13-22	200	20	13			-	40.0	540	
8-23	200	30	8			-	60.9	817	
13-23	200	30	13			-	55.0	713	
NRP	200	25	8	2D13 $A_s=253\text{mm}^2$ (350N/mm <sup>2</sup> )	2D10 $A'_s=142.7\text{mm}^2$ (350N/mm <sup>2</sup> )	-	57.7	817	文献 3)
NPS	200	25	8			2 高強度型	50.4	773	
NPE	200	25	8			2 高弾性型	60.5	860	
N	160	40	13	2D13 $A_s=253\text{mm}^2$ (394N/mm <sup>2</sup> )	2D10 $A'_s=142.7\text{mm}^2$ (394N/mm <sup>2</sup> )	-	52.1	834	文献 5)
S	160	40	13			2 高強度型	46.9	669	
E	160	40	13			2 高弾性型	48.9	781	

\*供試体幅 150mm, 主筋芯かぶり 30mm, せん断スパン 500mm, 等曲げ区間 200mm は全供試体共通

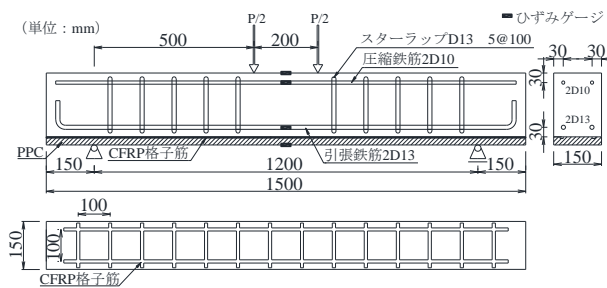


図-4 負曲げ供試体概要図

厚補強した RC 梁の負曲げ試験を実施した。表-5 に供試体諸元および PPC ひび割れ荷重結果の一覧を、図-4 に負曲げ供試体概要図を示す。本試験では母材高さ、PPC 厚さおよび PPC の最大粗骨材寸法をパラメータとした 8 体の試験を実施した。また、既往の研究<sup>3),5)</sup>で実施した梁試験についても計算検討を行ったので表-5 に併せて示す。試験は PPC で上面増厚補強した RC 梁供試体を天地反転させ、上部から載荷することで、PPC が引張側となる負曲げ試験を行った。コンクリートの設計圧縮強度はすべての供試体 24N/mm<sup>2</sup>であり、PPC の圧縮強度の試験値は平均で 65.8N/mm<sup>2</sup>であった。

試験結果はすべての供試体で母材コンクリートのひび割れ発生後、PPC にひび割れが発生した。その直後に鉄筋が降伏し、無補強 RC と同様の挙動となり、コンクリート上縁の圧壊により終局した。PPC ひび割れ荷重およびひび割れ発生時のひずみは表-5 に示す通りである。検討した供試体の PPC 曲げひび割れ発生ひずみの平均値は  $777 \times 10^{-6}$  であった。ただし、13-22 供試体の PPC 曲げひび割れ発生ひずみは他の供試体と比較して低かった

ため平均値の計算では除外して計算した。これは 13-22 供試体では PPC の曲げひび割れが載荷点直下付近で発生したため、供試体中央に設置されたひずみゲージでは正しく PPC の曲げひび割れ発生ひずみを測定できていなかったためであると考えられる。

#### 4.2 計算仮定および曲げひび割れ算定に使用した材料値

表-6 に PPC の曲げひび割れ算定に使用した材料値および 4.4 節に示す設計条件案における PPC の曲げひび割れ算定に使用した材料値を示す。図-5 に PPC 曲げひび割れ算定時に使用したコンクリートの構成則を示す。本検討ではコンクリート標準示方書<sup>7)</sup>に示される材料モデルで検討した。PPC の曲げひび割れ発生時は母材のコンクリートには既にひび割れが生じているため、PPC の曲げひび割れ荷重の高度算定においてはコンクリートのひび割れ後の引張軟化挙動を考慮して計算した。PPC、鉄筋および CFRP 格子筋は線形材料とし、弾性係数比は各材料の静弾性係数をコンクリートの静弾性係数で除すことで求めた。PPC の静弾性係数は 3 章に示した切欠きはり試験から得られた表-4 に示す値を用いた。また、曲げひび割れ強度は、表-5 に示す補強 RC 梁負曲げ試験から得られた PPC ひび割れ発生ひずみの平均値  $777 \times 10^{-6}$  に静弾性係数を乗じることで求め、PPC の引張縁の応力度が PPC の曲げひび割れ強度に達した時の荷重を PPC の曲げひび割れ荷重とした。

曲げひび割れ荷重の算定は平面保持を仮定し、断面の力のつり合い、曲げモーメントのつり合い式から収束計算を行うことにより算出した。

表-6 PPCの曲げひび割れ算定に使用した材料値

	記号	単位	算定時	設計時	備考	
コンクリート	圧縮強度	$f'_{cd}$	N/mm <sup>2</sup>	30	24	算定時は図-5の構成則, 設計時は線形材料
	引張強度	$f_t$	N/mm <sup>2</sup>	2.22	-	$=0.23 f'_{cd}{}^{2/3}$
	静弾性係数	$E_c$	N/mm <sup>2</sup>	28,000	25,000	圧縮強度から算出
PPC (線形材料)	曲げひび割れ強度	$f_{pb}$	N/mm <sup>2</sup>	11.5 10.6		$=E_p (G_{max}=8mm) * \epsilon_{pb}$ $=E_p (G_{max}=13mm) * \epsilon_{pb}$
	曲げひび割れ発生ひずみ	$\epsilon_{pb}$	$\times 10^{-6}$	777		補強RC梁負曲げ試験から得られたPPC曲げひび割れ発生ひずみの平均値
	静弾性係数	$E_p$	N/mm <sup>2</sup>	14,800 13,700		$G_{max}=8mm$ $G_{max}=13mm$ (表-4)
	弾性係数比	$n_p$	-	0.53 0.49	0.59 0.55	$=E_p (G_{max}=8mm) / E_c$ $=E_p (G_{max}=13mm) / E_c$
鉄筋 (線形材料)	静弾性係数	$E_s$	N/mm <sup>2</sup>	200,000		
	弾性係数比	$n_s$		7.1	8.0	$=E_s / E_c$
CFRP格子筋 (線形材料)	静弾性係数	$E_{cf}$	N/mm <sup>2</sup>	106,500 180,700	100,000 165,000	高強度型 (算定時は試験値, 設計時は規格値) 高弾性型 (算定時は試験値, 設計時は規格値)
	弾性係数比	$n_{cf}$	-	3.8 6.5	4.0 6.6	$=E_{cf} (高強度型) / E_c$ $=E_{cf} (高弾性型) / E_c$

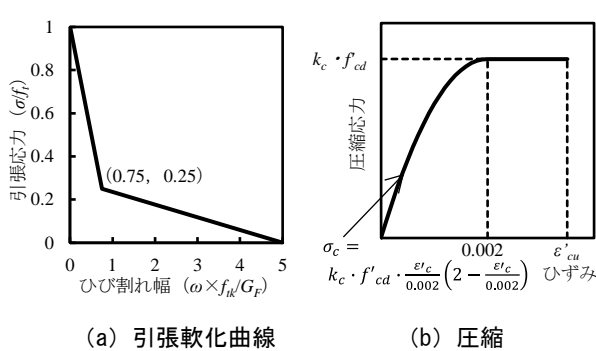


図-5 コンクリートの材料構成則

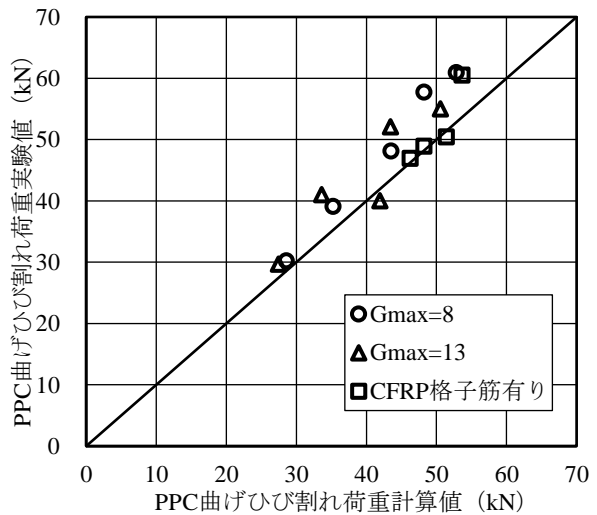


図-6 PPC曲げひび割れ荷重算定結果

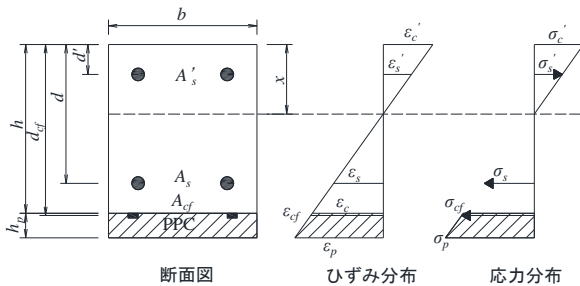


図-7 設計断面応力分布

4.3 PPCの曲げひび割れ荷重算定結果

図-6に前節に示す条件で求めたPPCの曲げひび割れ荷重算定結果と試験値との比較を示す。図より、実験値に対する計算値の比(計算値/実験値)が0.82~1.05の範囲で算定できることが確認された。また、全体的にやや計算値のほうが低い傾向が確認された。今回計算に用いたひび割れ発生ひずみは試験時にひずみゲージから得られた値の平均値であり、ひび割れ発生位置がひずみゲージが設置されている中央でない場合、PPCのひび割れ発生ひずみを正しく測定できていない。そのため、PPCの曲げひび割れ発生ひずみを実際より低く評価している可能性があると考えられる。また、CFRP格子筋有り供試

体は無し供試体と比較し実験値に対する計算値の比が高い傾向を示した、これはPPC硬化時にCFRP格子筋による拘束があるため、PPCの収縮に対してCFRP格子筋が抵抗するためPPCに残留引張強度が生じていたためと考えられる。

4.4 設計条件案および算定式

前節に示した計算条件ではコンクリートの材料非線形およびひび割れ後の引張軟化挙動を考慮した計算であり、やや煩雑である。実務における設計においてはより簡易的な計算手法が求められる。そこでコンクリートを線形材料とし、かつ引張側コンクリートを無視したRC断面として再度曲げひび割れ算定を行った。ここで、図-7に設計における断面応力分布を、表-6に使用した材料値を示す。PPCと鉄筋の材料値は4.2節の曲げひび割れ算定時と同様とした。コンクリートは設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>を用い、CFRP格子筋は表-1に示す規格値を使用した。PPCの曲げひび割れ発生荷重は式(3)により中

立軸を求め、式(4)を用いて曲げひび割れ発生モーメントを算出することにより算出した。式中の文字は図-7 および表-6 に示す。A：断面積，d：上縁からの距離であり添え字は各部材を示す。

$$x = \frac{1}{b} \left( -k_1 + \sqrt{k_1^2 + 2bk_2} \right) \quad (3)$$

ここに、
$$k_1 = \sum n_i A_i + n_p b h_p$$

$$k_2 = \sum n_i d_i A_i + \frac{1}{2} n_p b h_p (2h + h_p)$$

$$M_{pb} = k_3 \left\{ \frac{1}{3} b x^3 + \sum n_i A_i (x - d_i)^2 + k_4 \right\} \quad (4)$$

ここに、
$$k_3 = \frac{f_{pb}}{(h + h_p - x) n_p}$$

$$k_4 = \frac{1}{3} b n_p \{ (x - h)^3 - (x - h_p)^3 \}$$

ここで、

x : 上縁から中立軸までの距離

M<sub>pb</sub> : PPC 曲げひび割れ発生モーメント

図-8 に本条件を用いて得られた PPC の曲げひび割れ荷重算定結果と試験値の比較を示す。コンクリートを線形材料とし、RC 断面として計算することで、検討した全ての試体において実験値が計算値を上回り、安全側の評価となることが確認された。したがって、PPC 曲げひび割れ発生ひずみを  $777 \times 10^{-6}$  とし、コンクリート線形材料、RC 断面として設計することで PPC の曲げひび割れ発生を安全側に評価でき、PPC 曲げひび割れ発生を限界状態とした設計、もしくは合理的な PPC の許容応力度の設定が可能となると考えられる。

## 5. まとめ

切欠きはりをを用いた破壊エネルギー試験および PPC の曲げひび割れ発生荷重の算定検討により、以下の知見が得られた。

- (1) 切欠きはりをを用いた試験結果より、PPC のひび割れ後の軟化挙動がコンクリートでモデル化されている 1/4 モデルに近い挙動を示すことが確認された。また、PPC の静弾性係数も推定された。
- (2) 本研究で検討した PPC で増厚補強した供試体において、切欠き梁試験から得られた静弾性係数および補強梁試験から得られた PPC の曲げひび割れ発生ひずみを用いて、かつコンクリートの非線形性を考慮し

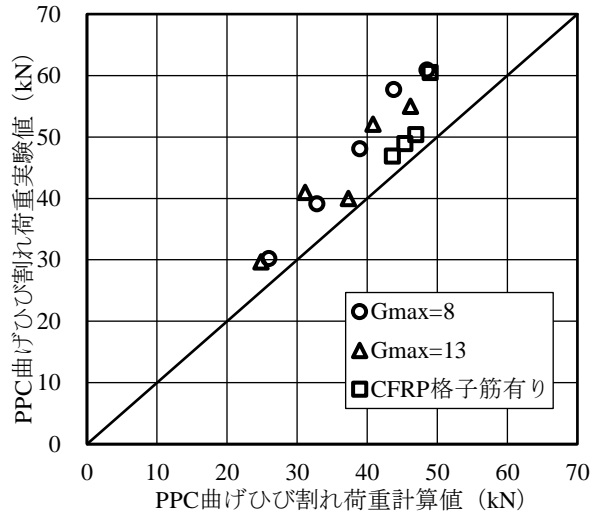


図-8 PPC 曲げひび割れ荷重算定結果 (設計)

て PPC の曲げひび割れ発生荷重を計算することにより、18%以下の差で PPC の曲げひび割れ発生を予測することができた。

- (3) PPC ひび割れ発生ひずみを  $777 \times 10^{-6}$  とし、コンクリートを線形材料、RC 断面として設計することで PPC の曲げひび割れ発生を安全側に評価でき、PPC 曲げひび割れ発生を限界状態とした設計、もしくは合理的な PPC の許容応力度の設定が可能となると考えられる。

## 参考文献

- 1) (財) 高速道路調査会：上面増厚工法設計施工マニュアル，1995
- 2) 土木学会：道路橋床版の長寿命化を目的とした橋面コンクリート舗装ガイドライン，2020
- 3) 吉田拓矢ほか：PPC と CFRP 格子筋によって補強した RC 梁の負曲げ試験，土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会，V-130，2020.9
- 4) 文屋遼太郎ほか：PPC を用いた道路橋 RC 床版の上面増厚補強に関する梁型モデルによる実験的研究，第九回道路橋床版シンポジウム論文報告集，pp.133~136，2016
- 5) 文屋遼太郎，立石晶洋，栗原哲彦：PPC と CFRP 格子筋によって補強した RC 梁の負曲げ耐力，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，V-400，2017.9
- 6) 橋高義典，上村克郎，中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析，日本建築学会構造系論文報告集，No.453，pp.643~648，1993.11
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編：標準]，2017