

PRCとRC梁の曲げひび割れ幅推定に関する研究

(株)建研
大阪工業大学 正会員 工博

○竹内 寿文
中塚 信

Abstract : Evaluation of crack widths is one of key points for performance design of prestressed reinforced concrete (PRC) beams and reinforced concrete(RC) beams. Though estimations of spacing of flexural cracks and strains of confining concrete around tensile reinforcement are necessary to evaluate crack widths, equations provided in standards and guidelines are usually based on data of small sized reinforced concrete prism and beams.

In this study, to investigate equations for estimating flexural crack spacing and strains of confining concrete, tests were carried out using large scale PRC and RC beams with experimental factors, that is, depths of beams, tensile reinforcement ratios, concrete strength, and average prestress. Following main results are obtained. (1) Equations to calculate spacing of flexural cracks and strains of confining concrete using a new tensile reinforcement ratio which considers neutral axis depth of beam sections are induced. (2) A new definition to classify RC and PRC is proposed from analytical examinations on stress jumping occurred in RC and PRC beam sections.

Key words : Crack width, Spacing of flexural crack, Strain of confining concrete around re-bar, Definition of PRC

1. はじめに

プレストレスト鉄筋コンクリート（以下PRCと略記）や鉄筋コンクリート（同RC）梁の性能設計ではひび割れ幅の制御設計が一つのキーポイントである。それ故、わが国をはじめ各国の基・規準においても、平均ひび割れ幅を平均曲げひび割れ間隔と平均鉄筋ひずみの積として与え、それにバラツキを考慮する係数を乗ずるというストーリーのひび割れ幅制御設計が多く行われている。しかし、同設計法の要であるひび割れ間隔と鉄筋まわりの拘束コンクリートひずみの評価が、主にRC角柱の一軸引張試験や小型RC梁試験体に基づいているため、スケールの効果が明確でなく、またPRCの評価をRCに準じて行うなど両者の区分が十分に考慮されていない。

本研究は、梁せい、コンクリート強度、引張鉄筋比やプレストレスレベルをパラメータとした中・大型のRCおよびPRC梁の曲げ試験を行い、ひび割れ間隔と拘束コンクリートひずみにおよぼすこれらの影響を実験的に調べ、ひび割れ幅制御設計に必要な諸特性値がRCとPRCでは異なることを明らかにするとともに諸特性値の推定式の提案を行った。同時に、引張鉄筋応力のジャンピング現象に着目した考察から、RCとPRCを区分する境界条件の試案を提示した。

2. 実験概要

筆者等がこれまで行ってきた曲げひび割れ幅に関する実験での試験体概要を表-1に再録する。実験Ⅰの試験体は梁幅 (b) が280mmのRC試験体で、PRC指針式¹⁾によって算出される平均ひび割れ間隔 l_{av} が等しくなるように引張鉄筋とその配置を全く同じにした、梁せいのみが異なる (D=300, 400, 500, 600, 800mm) 試験体とコンクリート強度 ($F_c=30, 80\text{N/mm}^2$) を実験要因に取り上げたもので、6体から構成される。実験Ⅱは断面**b**×**D**が310×600mmの梁で引張鉄筋量のみを変化 ($p_t=0.7, 0.92, 1.17\%$) させたRC試験体の3体。実験Ⅲは実験Ⅰと同じ断面をもつPRC試験体で梁せい(D=500, 600, 800mm)、プレストレスレベル ($\sigma_0=2.3\sim 3.1, 7.0\text{N/mm}^2$) およびコンクリート強度 ($F_c=30, 80\text{N/mm}^2$) を変数とした6体で、試験体総数は計15体である。

試験体配筋図の一例を図-1に示す。ひび割れ性状におよぼす影響を除くため、試験区間にはせん断補強筋を配筋していない。鉄筋位置平均伸びひずみ ε_{tav} の計測は、コンクリート表面に貼付した滑車とインバー

より線を用いた方法で、また、ひび割れ幅は精度 $0.01\mu\text{m}$ のマイクروسコープで測定した。なお、載荷および測定方法の詳細は既報³⁾を参照されたい。

表-1 試験体概要

シリーズ	符号	断面形状		コンクリート		主筋				PC鋼棒			
		梁幅:b mm	梁せい:D mm	F_c N/mm ²	E_c N/mm ²	本径	E_s N/mm ²	p_t %	p_{te} %	径 mm	ΣP_o kN	σ_o N/mm ²	σ_o/F_c
I	R3-3-0	280	300	51.20	31753	3-D25 (強度, 名称: SD345)	205000	2.34	2.68	32	1181.3	7.03	0.082
	R3-4-0		400	45.93	31961			1.64	1.95				
	R3-5-0		500	45.79	34187			1.26	1.50				
	R3-6-0		600	40.70	30294			1.02	1.25				
	R8-6-0		600	89.28	38809			1.02	1.20				
	R3-8-0		800	48.65	33592			0.74	0.89				
II	R3-6-D29	310	600	35.08	26344	3-D29	203390	1.17	1.49	32	1181.3	7.03	0.082
	R3-6-D25		600	46.56	31692	3-D25	204212	0.92	1.10				
	R3-6-D22		600	39.20	28980	3-D22	189985	0.70	0.81				
III	P3-5-1	280	500	50.34	34059	3-D25 (強度, 名称: SD345)	205000	1.26	1.79	32	1181.3	7.03	0.082
	P3-6-1		600	42.55	30125			1.02	1.52				
	P3-6-2		600	37.93	28517			1.02	1.94				
	P3-8-2		800	38.14	32360			0.74	1.16				
	P8-6-1		600	84.33	34981			1.02	1.46				
	P8-6-2		600	85.87	37704			1.02	1.78				

[記号説明]

F_c :コンクリート強度 E_c, E_s :ヤング係数
 p_t :引張鉄筋比 $p_t = a_t / (b \cdot d)$ p_{te} :拘束コンクリートに対する引張鉄筋比 $p_{te} = a_t / \{b(D - x_n)\}$
 a_t :引張鉄筋断面積 d :圧縮縁から引張鉄筋中心までの距離
 x_n :圧縮縁から中立軸までの距離 ΣP_o :プレストレス力 σ_o :平均プレストレス力
 $p_e = a_t / A_{ce}$ A_{ce} :コンクリートの有効引張断面積(引張鉄筋重心とその重心が一致する引張側コンクリート断面積)
 試験体: R 3-3-0

PC鋼材本数, または鉄筋径 梁せい/100 $F_c/10$ R:RC、P:PRC

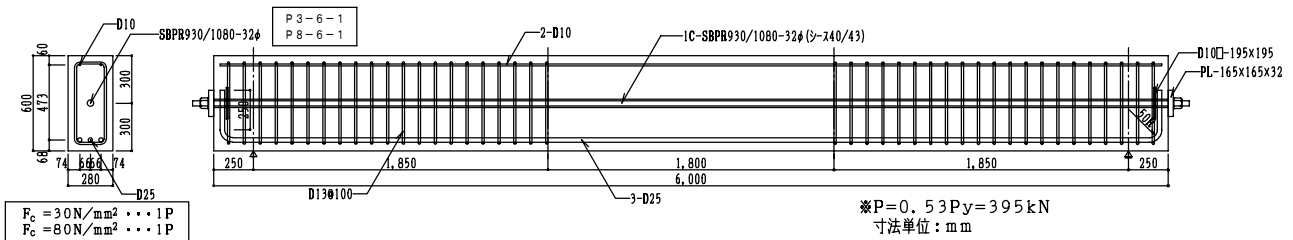


図-1 試験体配筋例 (P3-6-1, P8-6-1)

3. 実験結果および考察

3.1 平均ひび割れ間隔

筆者等の研究³⁾によれば、試験区間の曲げひび割れには次の2種類が観察された。一つは、曲げモーメントがひび割れモーメント (M_{cr}) 近傍でまとまって発生し、ひび割れ高さおよびひび割れ幅を急激に進展させるグループ。他の一つは、 M_{cr} より大きなモーメントが作用したときに、既発生の曲げひび割れ間に発生し、ひび割れの進展が緩やかなグループ。前者は梁下縁の応力がコンクリートの引張強度 (σ_t) を超えて発生する、主に曲げモーメントに起因するものと考えられるので、ここでは便宜的にMひび割れと呼ぶ。後者はMひび割れ位置の鉄筋応力が、付着によってMひび割れ間コンクリートに伝達されることに起因すると考えられるもので、ここではBひび割れと呼ぶ。

本実験の結果では、設計で重要となる最大ひび割れ幅はMひび割れで確認された。また、大型梁の既往の研究²⁾では、進展が大きいひび割れの間隔はおおよそ $0.5 \cdot D$ であったと報告されていることなどから、ここではMひび割れの間隔 (l_{avm}) におよぼす梁せいの影響について調べた。図-2は本研究での実験結果を示したものである。 p_t や F_c 等の違いにより若干バラツキはあるものの、 D が大きくなるに従いひび割れ間隔も大きくなる傾向が見られ、回帰直線を求めると式(1) (図-2中の直線)を得た。なお、 l_{avm} の“m”はMひび割れに起因することを表している。

$$l_{avm} = 0.25 \cdot D + 100 \quad \text{単位:mm} \quad (1)$$

なお本報告では、後述のひび割れ幅に関係する拘束コンクリートひずみ ϵ_{cm} がBひび割れを含む形で計測されているため、式(1)による l_{avm} が大きくなる梁せいが大なる場合、 w_{av} を過大評価してしまう恐れがある。すなわち、Mひび割れ間隔が理論上のBひび割れ間隔の2倍以上のケースでは、平均ひび割れ間隔をBひび割れも含めて評価する必要がある。それ故、本提案では、Bひび割れ間隔 l_{avb} が式(2)のPRC指針式¹⁾ によるとして、ひび割れ間隔 l_{av} を式(3)で与えることとした。なお、本研究での試験体の m はすべて1であった。

$$l_{avb} = 2(c+s/10) + k \cdot \phi / p_e \quad \text{単位: mm} \quad (2)$$

$$l_{av} = l_{avm} / m \quad (3)$$

$m: l_{avm} \leq m \times l_{avb}$ を満足する最大整数。ただし、 $m \geq 1$ とする。

ここに、 $c: (c_s + c_b)/2$, c_s, c_b : 側面および底面のかぶり厚さ、 s : 引張鉄筋間隔、 k : 梁の場合 $k=0.1$, スラブの場合 $k=0.00025 \cdot t (k \leq 0.1)$, ϕ : 鉄筋径。

3.2 $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係における特徴と定式化

図-3および図-4は、横軸に鉄筋応力 σ_t を、縦軸に平均拘束コンクリートひずみ ϵ_{cm} をとって、RCおよびPRCにおける $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係を例示したものである。これらの図より以下のことが分かる。(a) 図-3でのピーク点近傍、図-4での屈曲点近傍のいずれもMひび割れ発生時に対応するので、それ以前での $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係は、同図の一部からも推測されるように、直線関係と考えられる。したがって、RC、PRCの同領域における $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係を、図-3、4中の点線で示す式(4)で表すこととした⁵⁾。

$$\epsilon_{cm} = 4 \times 10^{-6} \cdot \sigma_t \quad (4)$$

(b) RC試験体では、 p_t が極めて大きい試験体 (R3-3-0) の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係は、後述するPRCと同様に単調

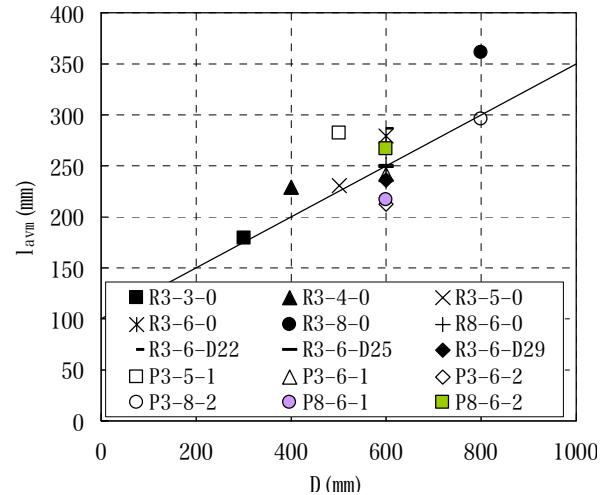


図-2 梁せいと平均ひび割れ間隔の関係

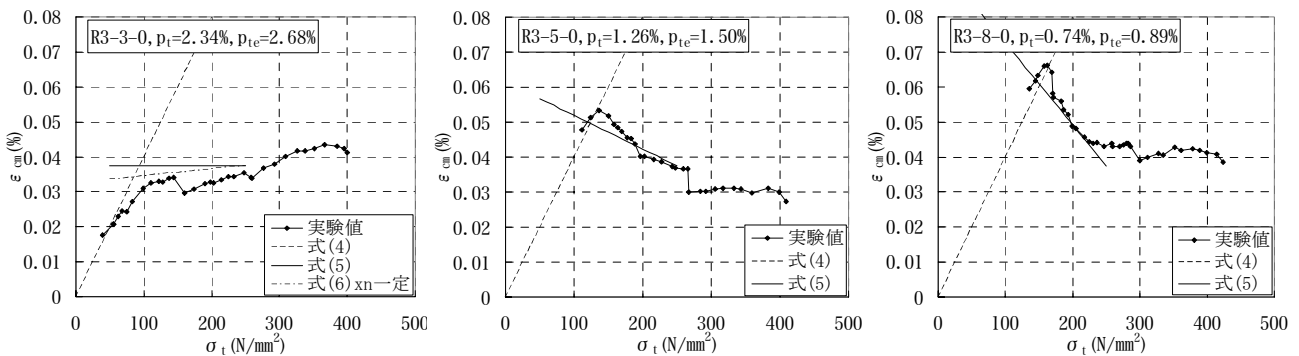


図-3 RC梁の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係図

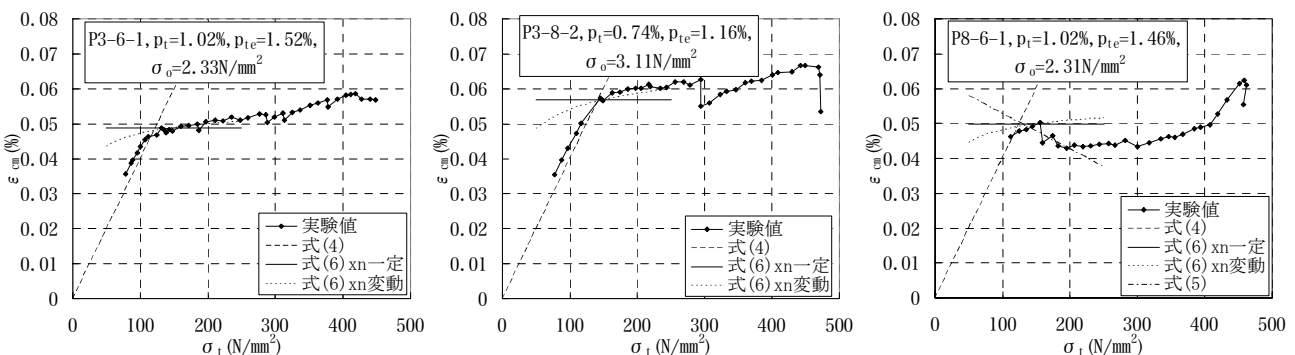


図-4 PRC梁の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係図

増大した。それ以下の p_t をもつ試験体では、 p_t の小さいほうが大きな ϵ_{cm} 値をもつピークとなり、ピーク以降では σ_t の増加に対し ϵ_{cm} が減少して、 $\sigma_t=250\text{N/mm}^2$ 付近以降ではほぼ一定値に収束する傾向を示した。この理由として次のようなことが考えられる。RC試験体では曲げひび割れが発生すると、ひび割れは p_t が小さい試験体ほど高くなる中立軸位置まで一気に進展して弾性域ではそれ以降あまり変化しない。それ故、引張鉄筋まわりの拘束コンクリート部分の体積は変わらない状態で鉄筋応力が増加するので、拘束コンクリートひずみは鉄筋の付着劣化によって減少し収束すると考えられる。

(c) PRCの F_c30 試験体の $\epsilon_{cm}-\sigma_t$ 関係は、ひび割れ発生前の直線区間の後に屈曲しながら単調に増大し、RC試験体の $\epsilon_{cm}-\sigma_t$ 関係とは全く異なる性状を示したが、屈曲部での ϵ_{cm} 値は、RCと同様、 p_t が小さいほうが大きい傾向であった。これはPRCの場合、曲げひび割れ発生後 σ_t の増加に従って、中立軸位置が徐々に浅くなって拘束コンクリート部の体積が増加したことが一因と考えられる。なお、 F_c80 試験体では、 F_c30 と同じ p_t の場合でもピークを示した後低下する、RC試験体と同様の傾向が見られた。

(b)および(c)の考察によれば、曲げひび割れ発生(ピーク近傍)以降の $\epsilon_{cm}-\sigma_t$ 関係には、RC、PRCのいずれの場合でも引張鉄筋量(a_t)と鉄筋まわりの拘束コンクリート部分、具体的には中立軸深さ x_n が関係すると推測される。それ故、 $\epsilon_{cm}-\sigma_t$ 関係のピーク以降の定式化を拘束コンクリートに対する鉄筋比 $p_{te}=a_t/\{b(D-x_n)\}$ と関連付けて行う。すなわちRC試験体では、 ϵ_{cm} が $\sigma_t=250\text{N/mm}^2$ でほぼ一定値 $\epsilon_{cm}=375 \times 10^{-6}$ に収束すると仮定し、同点とピーク点を結ぶ直線の勾配(θ)が p_{te} に関する式(5)で $\epsilon_{cm}-\sigma_t$ 関係が与えられるとした。PRC試験体では屈曲部以降の ϵ_{cm} におよぼす $1/p_{te}$ の影響を、縦軸に ϵ_{cm} 、横軸に $1/p_{te}$ を取り調べると、 $1/p_{te}$ の増大に対しほぼ線形的に増加する傾向が見られたので、式(6)で与えられるとした。

式(5)および(6)による推定結果を図-3、4中に実線で示しているが、曲げひび割れ幅が問題となる実際の σ_t の範囲で実験結果をほぼ推定できていると判断される。なおPRC試験体では、 x_n が σ_t の増大によって変動するが、 x_n の変化が一定値 ϵ_{cm} におよぼす影響は大きくない。それ故、本提案式では簡単化のために $\sigma_t=150\text{N/mm}^2$ 時の x_n を用いてよいとしている。また、図-3、4中の $\sigma_t=250\sim 300\text{N/mm}^2$ で ϵ_{cm} が減少しているのは、繰り返し载荷を行ったことによる。

$$\text{RC} : \epsilon_{cm} = (250 - \sigma_t) \theta + 375 \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$\theta = 5.65 \times 10^{-7} / \sqrt{p_{te}} - 3.65 \times 10^{-6}$$

$$\text{PRC} : \epsilon_{cm} = 4 \times 10^{-6} / p_{te} + 225 \times 10^{-6} \quad (6)$$

3.3 w_{max} 推定式

ひび割れ幅制御設計では最大ひび割れ幅が重要である。既報⁴⁾より、 $w_{av}=l_{av} \times \epsilon_{tav}$ は概ね成り立っていることが確認されているので、本報告で提案する式(1)、(4)、(5)、(6)により計算された平均ひび割れ幅(c_w_{av})を横軸に、実験より得られた最大ひび割れ幅(e_w_{max})を縦軸に取って比較したものが図-5である。同図を概観すると、RC試験体では、 p_t が極めて過大なR3-3-0試験体および F_c が大きいR8-6-0を除くと、図中に実線で示した原点と(0.05, 0.15)点を結ぶ直線、および破線で示した同点を通る45°線の実験結果がほぼ包絡されている。

PRC試験体でも、同2直線で包絡される同様の結果が得られているので、本研究では、 e_w_{max} に対する w_{av} の倍率を式(7)、(8)で与えることとした。なお、 $w_{av} \leq 0.05\text{mm}$ の区間でのバラツキの大きさは、同区間が大略 $\sigma_t < 100\text{N/mm}^2$ に対応することから、図-3、4からもわかるように、通常、曲げひび割れ発生付近であ

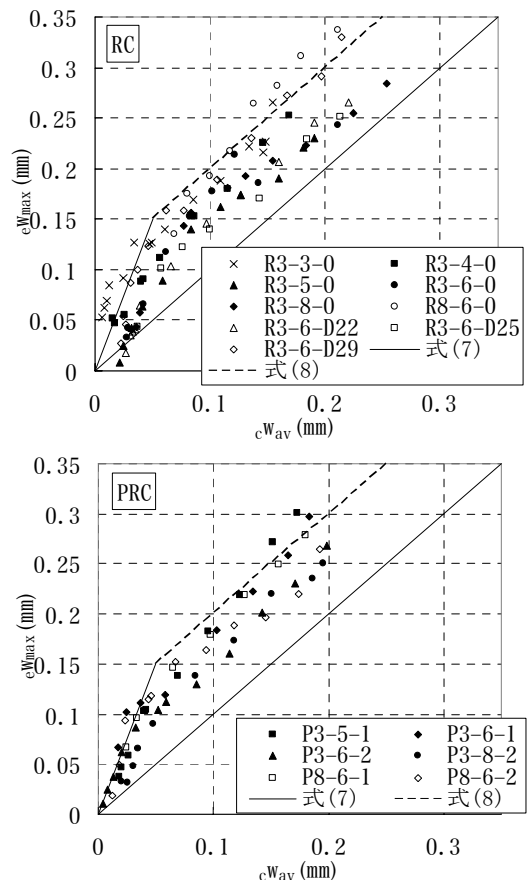


図-5 $e_w_{max}-c_w_{av}$ 関係図

ることによると考えられる。また、R8-6-0は F_c に対して p_t が小さく、大きなジャンピングが起こったことにより、他よりも大きなひび割れ幅になったものと思われる。

$$w_{max} = 3 \cdot w_{av} \quad (w_{av} \leq 0.05\text{mm}) \quad (7)$$

$$w_{max} = w_{av} + 0.1 \quad (w_{av} > 0.05\text{mm}) \quad (8)$$

3.4 最大ひび割れ幅推定式 (c_w_{max}) の検証

図-6は、3.3節までに提案された推定式を用いて、各試験体における $\sigma_t \leq 250\text{N/mm}^2$ の範囲の実験データについて、最大ひび割れ幅の計算値 c_w_{max} と実験データ e_w_{max} と比較したものである。同図によると、若干危険側に評価している箇所も見受けられるが、計算結果は実験結果を良好に評価している。

4. RCとPRCの境界に関する考察

3.2節では、初期勾配ピーク以降の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係推定式を提案したが、同関係はRCとPRCで大きく異なるため、推定式の適用にあたっては両者の区分を明確にする必要がある。ここでは $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係の相違がいわゆる応力ジャンピング現象に関係しているとの推測から、RCとPRCの境界について考察する。

4.1 曲げモーメント-曲率におけるジャンピング現象

図-7は、 p_t を0.75%と2.47%に変化させたRC梁断面の曲げモーメント(M)-曲率(ϕ)関係の解析結果を示したものである。なお、解析条件は参考文献⁵⁾を参照されたい。同図においてA点はひび割れ発生 M_{cr} 点を示すが、 $p_t = 0.75\%$ の場合、ひび割れ後、断面の力のつり合い条件を満足するMは、 ϕ の増加に対していったん低下するが、 σ_t および x_n の増加に伴い再増加して、 $M = M_{cr}$ となるB点を超える領域にまで急激に移行する。AB区間は通常「虚の部分」と呼ばれる領域で、ここでは鉄筋応力がジャンプするように急激に増大するため、「応力ジャンピング現象」とも呼ばれる。これに対し $p_t = 2.47\%$ の場合、ひび割れ直前直後での(M, ϕ)点に差がほぼ無くなり「ジャンピング現象」は生じないと推測される。同様に図-8は $p_t = 0.75\%$ のPRC断面に0~8 N/mm^2 の平均プレストレス(σ_0)を加えたM- ϕ 関係である。 σ_0 が小さくてRCに近い場合、ジャンピング現象は見られるが、 σ_0 の増大に伴いひび割れ直前直後での(M, ϕ)点の差が小さくなる傾向が見られる。

4.2 ジャンピング発生の境界条件

図-7, 8の解析的検討より、ジャンピング発生の境界条件は p_t および σ_0 に依存していると推測される。一方実験において、通常の p_t を有するRC梁では、曲げひび割れは

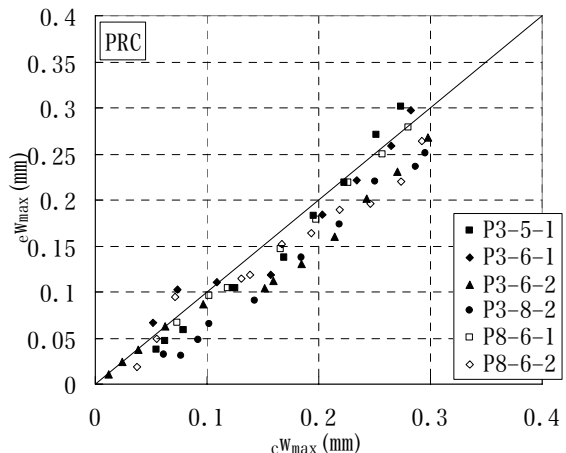
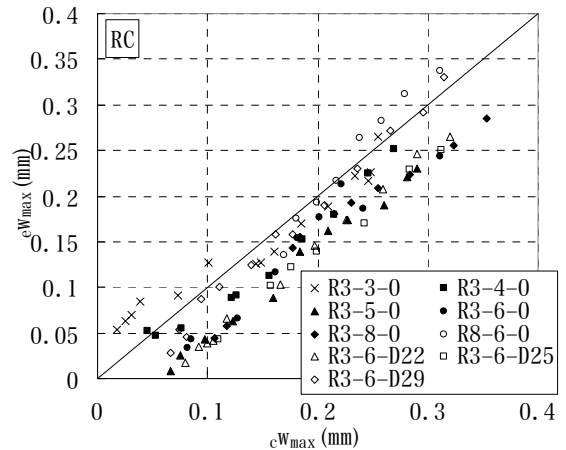


図-6 $e_w_{max} - c_w_{max}$ 関係図

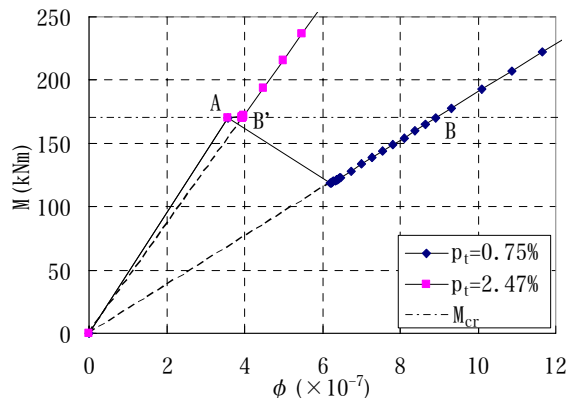


図-7 RC, M- ϕ 関係図

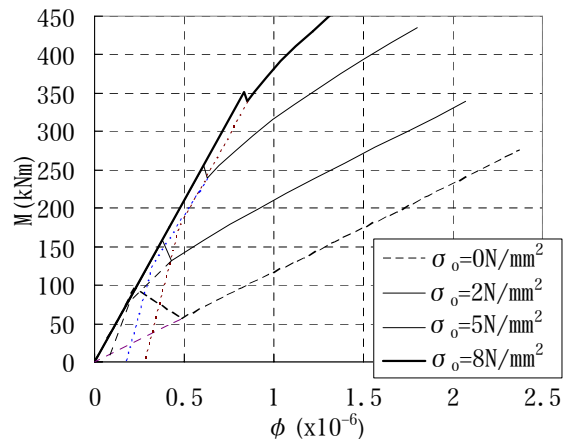


図-8 PRC, M- ϕ 関係図

発生するとともに引張鉄筋位置を越えて進展したのに対し、過大な p_t を持つRC梁やPRC梁の曲げひび割れは、発生と同時に引張鉄筋に達するが、その位置で一旦停止し、荷重レベルがさらに上昇する段階で引張鉄筋位置を越え、進展する傾向が見られた。それ故、RCとPRCの境界条件を推測する仮定として、図-9(a)に示すように、断面引張縁応力が $c\sigma_t$ となった時の M_{cr} と、同図(b)のように引張鉄筋位置コンクリート応力が $c\sigma_t$ となったときのMが等しくなる条件から、ジャンピングの発生限界が与えられると仮定した。

4.3 解析結果と実験結果の比較

図-10は縦軸に $\sigma_0/c\sigma_t$ 、横軸に p_t を取って前項の条件より得られた曲線を示したものである。なお、解析には試験体の $c\sigma_t$ および E_c の平均値を使用した。同図によれば、限界曲線近傍上部に位置しているP3-6-1とP3-8-2試験体(図中◆、●印)は図-4よりPRCと判断できるが、RC梁で過大な p_t を有し、ジャンピングの未発生が推測されたR3-3-0試験体(図中×印)とPRC梁でジャンピング発生の可能性が推測されたP8-6-1試験体(図中□印)は限界曲線近傍下部に位置し、RCとPRCの境界としての妥当性をうかがわせる。しかし、コンクリートの引張強度は、断面スケール、乾燥収縮等に影響を大きく受けるため、定量的に明確化するのには困難で、図中のようなグレーゾーンを考える必要がある。

5. まとめ

- (1) 最大曲げひび割れ幅推定のために必要な諸算定式を提案した。また、計算結果と実験結果を比較し、 $\sigma_t \leq 250N/mm^2$ の範囲では、最大ひび割れ幅をほぼ安全側に評価できることを確認した。
- (2) RCとPRCの境界条件を応力ジャンピング現象に関連づけて説明する試みから、実験結果ともほぼ符合する境界曲線を提示した。

謝辞

本研究に対し、平成21~23年度科学研究費補助金(課題番号: 21560602, 代表者: 中塚 侑)を受けた。また、PC付着研究会(構成: 大阪工業大学, オリエンタル白石(株), 建研, 高周波熱錬(株), 神鋼鋼線工業(株), 住友電工スチールワイヤー(株), (株)ピーエス三菱)の皆様には有益な議論を頂いた。ここに記して心より謝意を表す。

参考文献

- 1) プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説; 日本建築学会, 2003. 2
- 2) 井畔瑞人, 塩屋俊幸ほか2名: 等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究; 土木学会論文集, 第348号/V-1(報告)1984. 8
- 3) 森田真由美, 竹内寿文, 中塚 侑, 坂田博史: PRCおよびRC梁の曲げひび割れの間隔と幅に関する実験研究; 日本コンクリート工学年次論文集, pp. 475-480, 2010. 7
- 4) 竹内寿文, 森田真由美, 中塚 侑, 坂田博史: PRC梁およびRC梁の曲げひび割れ幅推定に関する基礎研究; 日本コンクリート工学年次論文集, pp. 481-486, 2010. 7
- 5) 中塚侑ほか8名: 大型RC梁の曲げひび割れ挙動におよぼす鉄筋比および付着の影響に関する研究(その1~その4); 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 865-872, 2011. 8

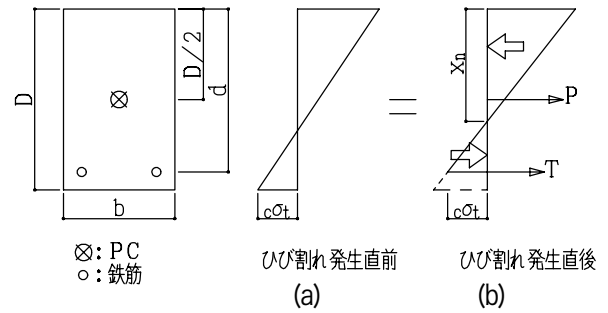


図-9 解析仮定

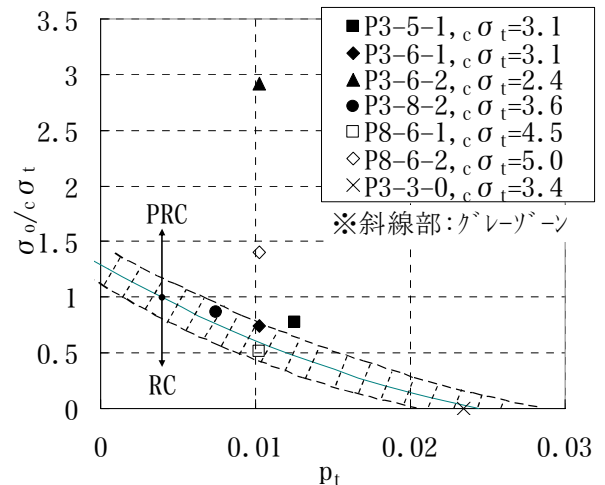


図-10 境界条件曲線