

論文 RC 梁のひび割れ間拘束コンクリートひずみの定量化に関する研究

竹内 寿文^{*1}・中塚 信^{*2}・佐々木 克典^{*3}・坂田 博史^{*4}

要旨:日本建築学会プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針におけるひび割れ幅制御設計式では、平均曲げひび割れ幅を平均ひび割れ間隔(l_{av})と平均鉄筋ひずみ(ϵ_{tav})の積として算出している。一方 ϵ_{tav} は鉄筋単体ひずみから曲げひび割れ間拘束コンクリートひずみ(ϵ_{cm})を減じた形で与えられるので、 ϵ_{cm} を定量化することが不可欠である。本研究では断面大きさが同じで引張鉄筋比(p_t)のみが異なる中型鉄筋コンクリート梁試験体によって ϵ_{cm} の挙動に及ぼす p_t の影響を調べ、さらにそれら結果と前報における研究成果とから、筆者等の提案 ϵ_{cm} 定量化式が p_t に関わらず適用できることを明らかにした。

キーワード: RC, 曲げひび割れ幅, 推定式, 応力ジャンプ, 拘束コンクリートひずみ - 鉄筋応力関係

1. はじめに

日本建築学会プレストレスト鉄筋コンクリート(種 PC)構造設計・施工指針(以下 PRC 指針と略記)におけるひび割れ幅制御設計では、ひび割れ断面での鉄筋ひずみ($\epsilon_t = \epsilon_t / E_s$, E_s :鉄筋のヤング係数)と曲げひび割れ間の引張側コンクリートの拘束ひずみ(ϵ_{cm})とから $\epsilon_t / E_s - \epsilon_{cm}$ で得られるひび割れ間コンクリートの平均鉄筋ひずみ(ϵ_{tav})に平均ひび割れ間隔(l_{av})を掛けた積から平均ひび割れ幅(w_{av})を算出し、同値に倍率()

を乗ずることによって最大ひび割れ幅(w_{max})を求めるというストーリーが規定されている。

したがって、ひび割れ幅制御設計には ϵ_{cm} の定量化が不可欠であるが、一軸引張角柱 RC 試験体および小型 RC 梁試験体の実験結果に基づく現行の PRC 指針における ϵ_{cm} 推定値は、中・大型 RC 梁および PRC 梁の ϵ_{cm} - p_t 関係と大きく異なると指摘されている^{1,6)}。

本研究は、引張鉄筋が同一で梁せいのみが異なる試験体を用いた前報⁶⁾に引き続き、断面大きさが同じで引張鉄筋比(p_t)のみを変化させた中型 RC 梁を用いて、 ϵ_{cm} - p_t 関係におよぼす p_t の影響を明らかにする。同時に、筆者等の提案する同関係⁷⁾の妥当性について検討するものである。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体の概要を表-1に示す。試験体は断面($b \times D$)が 310 × 600 mm, およびかぶり厚さが 54 mm と共通の RC 梁試験体 3 体である。試験要因は引張鉄筋比 p_t で 1.17% (3-D29), 0.92% (3-D25), 0.70% (3-D22) の 3 種である。鉄筋の種

表 - 1 試験体一覧

試験体名		R3-6-D29	R3-6-D25	R3-6-D22	
梁幅	b(mm)	310			
梁せい	D(mm)	600			
コンクリート引張縁から 主筋までの距離	d _t (mm)	70.5	68	66.5	
有効せい	d(mm)	529.5	532.0	533.5	
	j(mm)	463.3	465.5	466.8	
コンクリートのかぶり厚さ (試験区間)	C _b (mm)	54			
	C _s (mm)	57.5	60	61.5	
試験間距離	3D(mm)	1800			
コンクリート計画強度	F _c (N/mm ²)	30			
主筋	径(断面積)	mm ²	D29(642)	D25(507)	D22(387)
	材料種別(強度)	c _y (N/mm ²)	SD390	SD345	
	断面積	a _t (mm ²)	1926 (3-D29)	1521 (3-D25)	1161 (3-D22)
	引張鉄筋比	p _t (%)	1.17	0.92	0.70
	有効鉄筋比	p _e (%)	4.41	3.61	2.82
せん断 補強筋	径(断面積)	mm ²	D13(127)		
	材料種別(強度)	c _y (N/mm ²)	SD295A		
	断面積 (配筋間隔)	a _w (mm ²) (mm)	254(D13) @150		

[試験体記号の説明] R3-6-D29 : RC, $F_c=30\text{N/mm}^2$ -梁せい/100-鉄筋径

*1 ㈱建研 大阪支店第1設計部 名古屋営業所 (正会員)

*2 大阪工業大学 工学部 空間デザイン学科 教授 工博 (正会員)

*3 ㈱建研 大阪支店第1設計部

*4 大阪工業大学大学院 社会人博士課程(㈱建研 大阪支店第1設計部) (正会員)

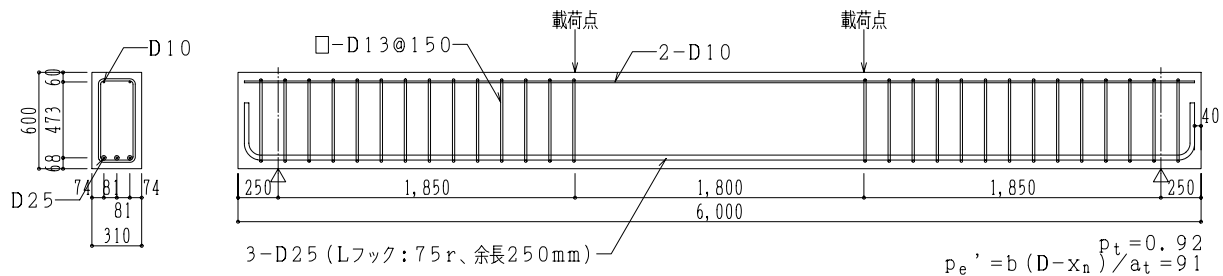


図 - 1 試験体配筋図 (R3-6-D25)

表 - 2 使用コンクリート及び鉄筋の力学的試験結果
コンクリート

試験体名	実験結果(N/mm ²)		
	圧縮強度	引張強度	弾性係数 ($\times 10^4$)
R3-6-D29	35.1	3.24	2.63
R3-6-D25	46.6	4.02	3.17
R3-6-D22	39.2	3.70	2.90

鉄筋

試験体名	実験結果(N/mm ²)	
	降伏強度	弾性係数 ($\times 10^5$)
D10	376.4	1.98
D22	372.4	1.99
D25	373.5	2.04
D29	372.4	2.03

類は、主筋がSD390 (D29), SD345 (D25, D22) で、せん断補強筋はSD295 (D13) である。なお、ひび割れ性状に及ぼす影響を除くため、試験区間にはせん断補強筋を設けず、また引張主筋にはひずみゲージを貼付していない。試験体配筋図の例 (R3-6-D25) を図 - 1 に、使用コンクリート及び鉄筋の力学的試験結果を表 - 2 に示す。

2.2 載荷および測定方法

載荷方法は、前報⁶⁾と同様の図 - 2 に示すような、梁中央部に等曲げ区間 (試験区間) を3Dとする2点単調載荷である。測定は、引張鉄筋の平均鉄筋ひずみ_{tav}を図 - 3 に示すようなインバーより線と滑車からなる測定方法によって行った。試験区間に発生したひび割れ幅は、精度0.01mmの高感度マイクロスコブを用いて、引張鉄筋位置から上下40mmの位置でひび割れ幅を測定し、同測定値の平均を引張鉄筋位置ひび割れ幅とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 ϵ_t - ϵ_{tav} 関係

図 - 4 に本実験のRC梁から得られた ϵ_t - ϵ_{tav} 関係図を示す。なお、同図における、ひび割れ断面位置での鉄筋応力度 (σ_t) は前報⁶⁾に倣い、コンクリートモデルに圧縮強度 (F_c) の1/3点以降は非線形性を考慮して算出した。すなわち ϵ_t は、 $F_c/3$ 以前では弾性式による一定 x_{n1} を用いて ($x_{n1}=x_n/d$, x_n : 中立軸深さ, d : 梁の有効せい), また $F_c/3$ 以降は収れん計算により算出した。

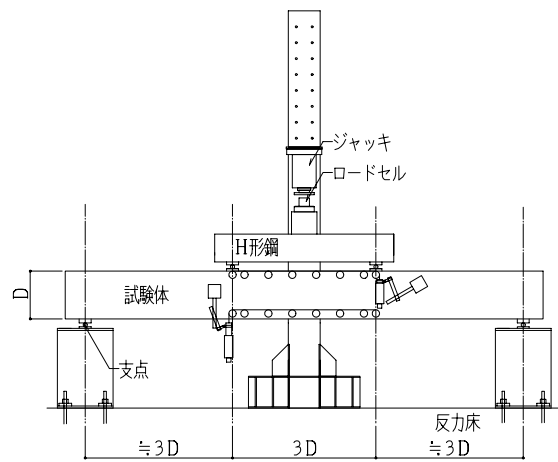


図 - 2 載荷方法

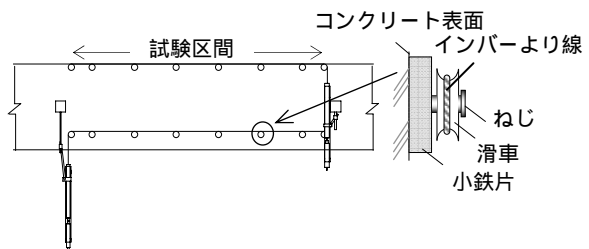


図 - 3 平均鉄筋ひずみの測定方法

図 - 4 によれば、いずれの試験体においても $\epsilon_t=110 \sim 150\text{N/mm}^2$ 付近で ϵ_{tav} が急激に増加し、鉄筋単体の応力 - ひずみ関係に漸近する。また、任意の ϵ_t での鉄筋単体ひずみから ϵ_{tav} の計測値を減じた値は、試験体記号における () 内の数字で示す引張鉄筋比 p_t が小さいほど大きいことが分かる。

3.2 ϵ_{cm} - ϵ_t 関係

3.2.1 ϵ_{cm} - ϵ_t 関係におよぼす諸要因の影響

図 - 5 は、試験体 R3-6-D29 を例にとって、曲げひび割れの発生に伴う ϵ_{cm} - ϵ_t - H_{cr} 関係の変化を示したものである (H_{cr} : ひび割れの高さ)。ここで、 $\epsilon_{cm} = \epsilon_t / E_s - \epsilon_{tav}$ である。また図 - 6 には試験体の ϵ_{cm} - ϵ_t 関係図をまとめて示している。なお、図 - 6 中には前報⁶⁾の試験体の結果も併記している。また試験体記号に続く () 内は試験体の p_t を示し、図中の PRC 規準の結果は、前報試験体で共通とした有効引張鉄筋比 $p_e = 4.0\%$ のものである。

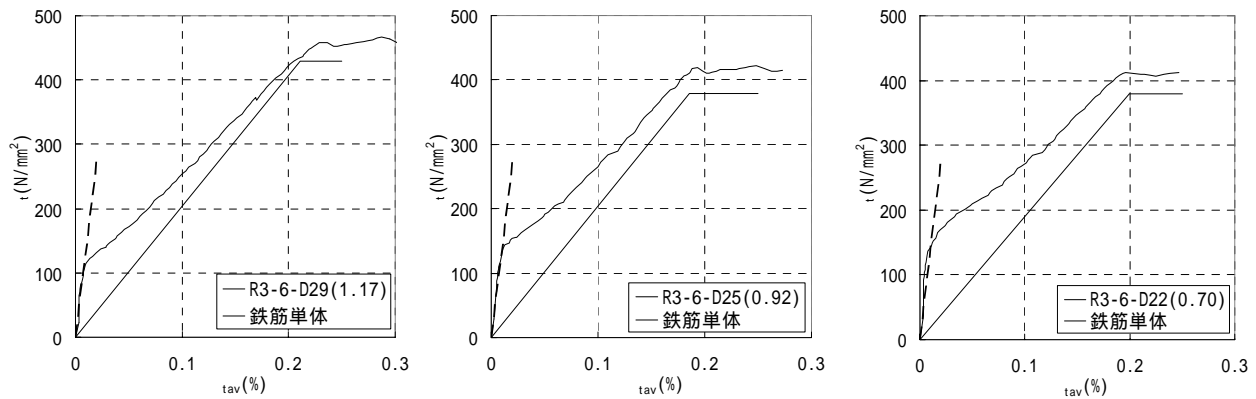


図 - 4 $\tau - \text{tav}$ 関係図

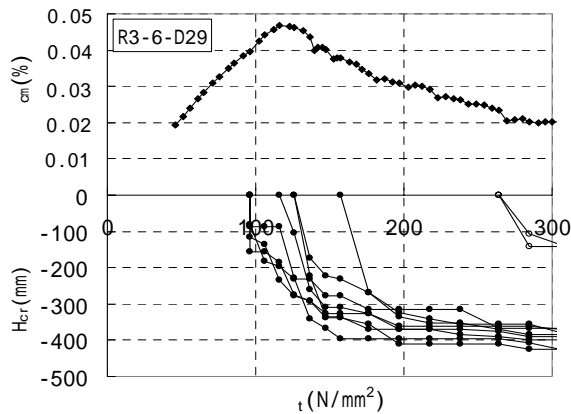


図 - 5 $\tau - \text{cm} - H_{cr}$ 関係図

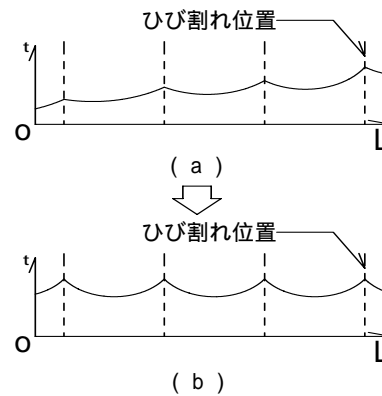


図 - 7 初期勾配時のひび割れ位置応力度状態

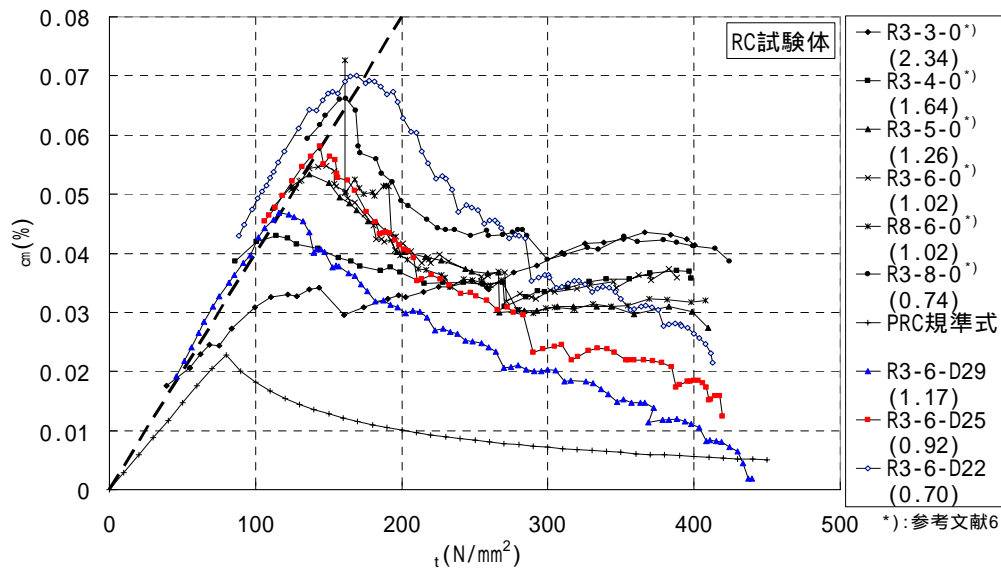


図 - 6 $\tau - \text{cm}$ 関係図

図 - 5 によれば、RC 試験体の $\text{cm} - \tau$ 関係は、上記の $\tau - \text{tav}$ 関係から推測されるように、試験区間に最初に発生する曲げひび割れまで τ の増加に対しほぼ直線的に増加し、その後荷重 (τ) のわずかな増加に対して順次発生する曲げひび割れがほぼ出揃った段階で cm が最大値に達する。さらにピーク後は τ の増加と伴に減少し、ほぼ一定値に収束する傾向が見られるが、これらの傾向は他の RC 試験体でも同様であった。

実験結果をまとめた図 - 6 によれば以下の \sim のようなことが読み取れる。

$\text{cm} - \tau$ 関係の初期勾配は p_t が小さくなるにしたがい大きくなる傾向が見られる。これは次のような理由であると推測される。断面およびコンクリート強度が同じであれば、ひび割れ直前では引張コンクリート合力はほぼ同じであるので、曲げひび割れ発生時の鉄筋応力 (τ) は p_t が小さければ大きくなる。同時に図 - 4 に見られる

ように、ひび割れが出揃うまでの鉄筋位置の平均ひずみ (ϵ_{tav}) はあまり変化しないので、結果として p_t が小なる場合の $\epsilon_{cm} (= \epsilon_t / E_s - \epsilon_{tav})$ は大きくなり、 $\epsilon_{cm} - \epsilon_t$ 関係の初期勾配は大きくなったと考えられる。

ϵ_{cm} のピ - ク点は、 ϵ_t と同様の理由から p_t が小さいほど大きい。ひび割れ発生時の ϵ_t は引張鉄筋量が少ないほど大きい。

ピ - ク点に達した以後、 ϵ_{cm} は急激に減少に転じるのではなく、なだらかな山の頂を形成し、その後減少している。これは、後述する鉄筋応力 σ_t のジャンピングが瞬時に同時に起きないことを示唆していると考えられる。例えば筆者等の FEM 解析による若干の結果では、ひび割れ発生段階における ϵ_t 分布は、図 - 7 (a) のようにコンクリート引張応力の鉄筋への移行にばらつきがあるため、ひび割れ位置によって ϵ_t のピ - ク値が違ふ。さらに同図 (b) のように、ひび割れ高さ (H_{cr}) の進展に伴い ϵ_t のピ - ク値が同程度になるプロセスを経て徐々に ϵ_{cm} が減少に転じていくものと思われる。

試験体 R3-3-0 を除けば、 $\epsilon_t - \epsilon_{cm}$ 関係は、 p_t が小さいほどあるいは F_c が大きいケースほど、ピ - ク点近傍で凸度の高い形状を示す傾向が見られる。これは、ひび割れ発生によるコンクリートの引張合力の移行、すなわち鉄筋応力のジャンピング現象が、 p_t が小さいあるいは F_c が大きい場合ほど急激に起きやすくなることを示唆している。また p_t が小さいほど ϵ_{cm} のピ - ク点での ϵ_t が大きいため、ひび割れ後の付着劣化の進展が早いことによると推測される。

ϵ_{cm} はピ - ク以降、 ϵ_t の増大にしたがって徐々に減少し、ある一定に収束していく傾向がある。図 - 5 においてこの現象をみると、 H_{cr} の進展と共に ϵ_{cm} も減少するが、 H_{cr} の進展がほぼ停止する $\epsilon_t = 250 \text{ N/mm}^2$ 近辺以降で、 ϵ_{cm} はほぼ一定値に収束する。その収束値は p_t が小さいほど大きい傾向がある。

現行の PRC 規準式と実験結果は形状および値が大きく相違している。これは、PRC 規準式が角柱試験体の実験結果に基づいたものであるためと考えられる。

3.2.2 応力ジャンピングの発生限界

前項までの考察から、通常の RC 試験体が表示 $\epsilon_{cm} - \epsilon_t$ 関係がピークをもつ現象は、図 - 8 の case1 のように、ひび割れ発生までコンクリート断面のみで保たれていた断面内の力のつり合いが、ひび割れ発生によって圧縮側コンクリート合力と鉄筋引張力のつり合いに移行する過程で、引張鉄筋の応力度が急激に増加する、すなわち応力ジャンピング現象に対応していると考えられる。一方、図 - 6 中の R3-3-0 試験体に注目すると、同試験体は ϵ_t の増大に対し ϵ_{cm} が単調に増大し $\epsilon_{cm} - \epsilon_t$ 関係はピークを示さない。このことは応力ジャンピング現象に

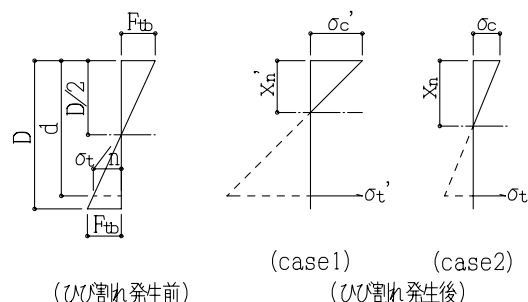


図 - 8 曲げひび割れ発生前後の応力度状態

は限界が存在することを示唆していると思われるので、以下ではその限界について考察する。なお、ジャンピング現象は精確には、曲げモーメント - 曲率関係においてひび割れ前後で曲率が急激に変化することと対応するが、本論では理解を容易にするため、従前からの考え方を踏襲して、ひび割れ発生直後に鉄筋応力が増大することとする。図 - 8 は曲げひび割れ前後の断面応力状態を模式的に示したものであるが、ジャンピングの発生限界は case2 に示すように、ひび割れ後の引張鉄筋応力がひび割れ直前と変化しない、すなわち、ひび割れ発生前応力分布での $\epsilon_t = 2 \cdot n \cdot F_{tb} \cdot (d - D/2) / D$ (ここに、 F_{tb} : 曲げ引張強度、 n : ヤング係数比) となる p_t であれば応力ジャンプは起こらないとすると、限界は次のように求められる。断面の軸方向力のつり合いから得られる式 (1) の x_{n1} を、曲げひび割れ直後の鉄筋応力が ϵ_t に等しく、かつ曲げひび割れモーメント M_{cr} がひび割れ発生前後で等しいとする条件を表す式 (2) に代入して整理すると p_t の三次方程式が得られ、同式において $d = 0.9 \cdot D$ 、 $n = 10$ とし、解を求めると $p_t = 0.0313$ を得る。この結果は、図 - 6 において唯一ジャンピング現象が顕著でなかった R3-3-0 試験体の p_t である 2.34% より若干大きい値となっているが、両者の差異は引張コンクリートの応力 - ひずみ特性に起因するものと考えられる。

$$x_{n1} = \sqrt{(n \cdot p_t)^2 + 2 \cdot n \cdot p_t} - n \cdot p_t \quad \dots (1)$$

$$F_{tb} \frac{b \cdot D^2}{6} = p_t \cdot b \cdot d^2 \cdot \sigma_t \cdot \left(1 - \frac{x_{n1}}{3}\right) \quad \dots (2)$$

3.3 $\epsilon_{cm} - \epsilon_t$ 関係の定量化

3.3.1 $\epsilon_{cm} - \epsilon_t$ 関係の初期勾配

初期勾配時は顕著なひび割れは発生していないので、ピ - ク点までコンクリート全断面が有効な状態と仮定する。またコンクリートの引張強度 (F_t) は圧縮強度 F_c の 1/10、 $F_{tb} = F_t \cdot 5/3$ として、ひび割れ前後での M_{cr} が等しい条件より初期勾配値を検討する。ひび割れ前の M_{cr} は式 (3) で、ひび割れ後は式 (4) で与えられるので、

両式を等値してひび割れ発生直後の $\sigma_{cr,t}$ を求めると式 (5) を得る。

$$M_{cr} = Z \cdot 5 / 3 \cdot 0.1 \cdot F_c \quad \dots (3)$$

$$M_{cr} = \sigma_{cr,t} \cdot a_t \cdot j \quad \dots (4)$$

$$\sigma_{cr,t} = \frac{\frac{b \cdot D^2}{6} \cdot \frac{5}{3} \cdot 0.1 \cdot F_c}{a_t \cdot 7/8 \cdot 0.9 \cdot D} = \frac{0.5 \cdot F_c}{14.2 \cdot p_t} \quad \dots (5)$$

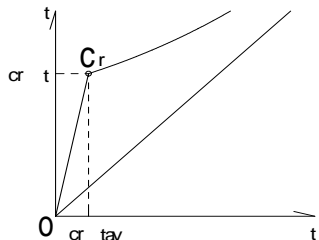


図 - 9 初期勾配時 $\varepsilon_t - \varepsilon_{tav}$ 関係概念図

ここに、 Z : 断面係数 ($b \cdot D^2/6$), $p_t = a_t/(b \cdot D)$, $j = 7/8 \cdot d$, $d = 0.9 \cdot D$ とする。

実務的には p_t は大きくても 1.0% 程度、コンクリート強度は本実験結果を参考に $F_c =$

40N/mm², 曲げひ

び割れ発生時平均鉄筋ひずみを $\varepsilon_{cr,tav} = 100 \mu$ とすると, $\sigma_{cr,t}$ の概数値は式 (6) のようになる。

$$\sigma_{cr,t} = \frac{0.5 \times 40}{14.2 \times 0.01} = 140 \text{ N/mm}^2 \quad \dots (6)$$

したがって、図 - 9 の $\varepsilon_t - \varepsilon_{tav}$ 関係図における原点 O と C_r 点を結ぶ直線式は、勾配 \bar{E} が式 (7) で与えられるので、この区間のひずみを $\bar{\varepsilon}_{tav}$ とすると、式 (8) となる。

$$\bar{E} = \frac{\sigma_{cr,t}}{\varepsilon_{cr,tav}} = \frac{140}{100 \times 10^{-6}} = 14 \times 10^5 \text{ N/mm}^2 \quad \dots (7)$$

$$\sigma_t = 14 \times 10^5 \cdot \bar{\varepsilon}_{tav} \quad \dots (8)$$

一方、 ε_{cm} はひび割れ位置での鉄筋ひずみから平均鉄筋ひずみを引くことにより求められるので、 $\varepsilon_{cm} - \varepsilon_t$ 関係の初期直線部は式 (9) で与えられる。

$$\varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_t}{E_s} - \bar{\varepsilon}_{tav} = \frac{\sigma_t}{E_s} - \frac{\sigma_t}{\bar{E}} = \left(\frac{1}{2 \times 10^5} - \frac{1}{14 \times 10^5} \right) \cdot \sigma_t$$

$$\varepsilon_{cm} = 4 \times 10^{-6} \cdot \sigma_t \quad \dots (9)$$

以上より求めた $\varepsilon_{cm} - \varepsilon_t$ 直線式を、図 - 4 および図 - 6 に太い破線で書き込んでいるが、実験結果を比較的良好に近似できている。

3.3.2 ピーク以降の $\varepsilon_{cm} - \varepsilon_t$ 関係

図 - 10 に模式的に示すように、 ε_{cm} は ε_t の増加とともに、曲げひび割れ発生前はほぼ直線的に増加し、RC

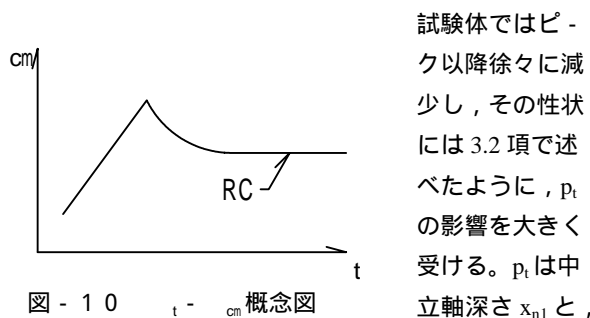


図 - 10 $\varepsilon_t - \varepsilon_{cm}$ 概念図

試験体ではピーク以降徐々に減少し、その性状には 3.2 項で述べたように、 p_t の影響を大きく受ける。 p_t は中立軸深さ x_{n1} と、

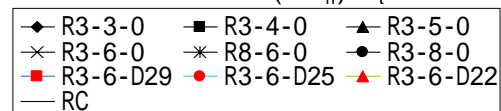
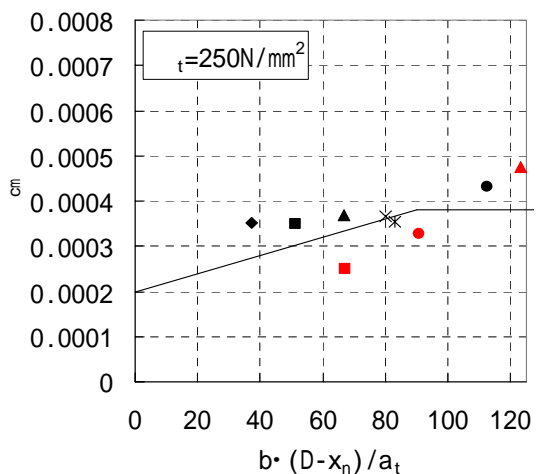
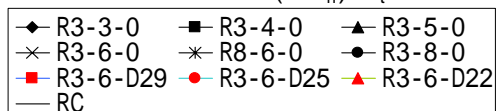
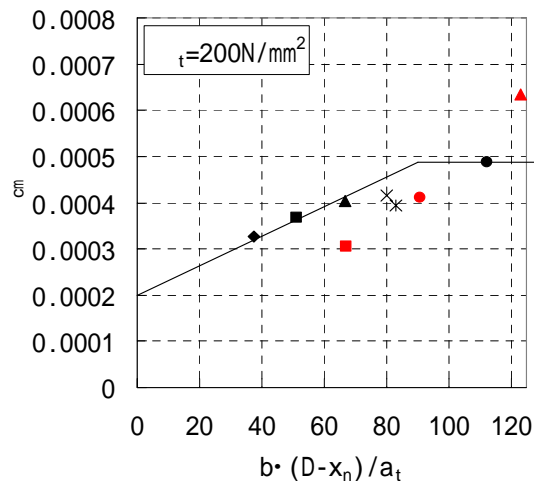
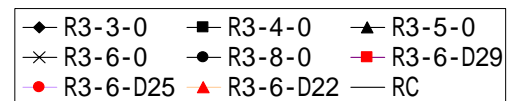
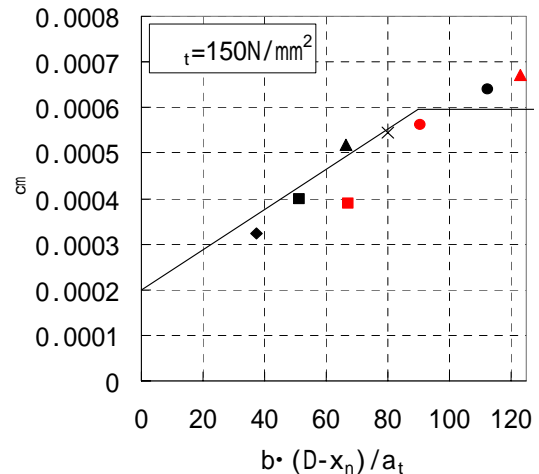


図 - 11 $\varepsilon_{cm} - b \cdot (D - x_n) / a_t$ 関係図

さらに x_{n1} は引張鉄筋を取り巻く曲げひび割れ間の引張コンクリートのボリュームと密接に関係して、引張コンクリートの拘束ひずみ (ϵ_{cm}) と関連する。この視点から筆者等は前報⁷⁾においてピーク以降の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係を、次式 (10) のような $a_t / \{b \cdot (D - x_n)\}$ の関数として表示することを提案した。なお、式 (10) は前報提案式での係数を若干丸めている。

$$\epsilon_{cm} = \left\{ (800 - 2.4 \cdot \sigma_t) \frac{b \cdot (D - x_n)}{a_t} + 20000 \right\} \times 10^{-8} \quad \dots (10)$$

なお、 $b \cdot (D - x_n) / a_t \geq 90$ とした。また、 σ_t 下限値は、初期勾配を設けているので削除し、 $\sigma_t \geq 250 \text{ N/mm}^2$ とする。

3.3.3 実験結果との対応

ひび割れ幅制御設計で主たる対象範囲となる、鉄筋応力 σ_t が 150, 200, 250 N/mm² の時の、本報および前報での RC 試験体の ϵ_{cm} 実験結果と、実線で表した式 (10) による推定結果を図 - 11 に示す。若干のバラツキは見られるものの、推定式は σ_t に対して減少していく ϵ_{cm} の性状を含めて実験結果を良好に推定でき、概ね妥当と判断できる。

4. まとめ

本報および前報での中・大型 RC 梁試験体の等曲げ試験結果を用いて、ひび割れ断面鉄筋応力 (σ_t) - 鉄筋位置引張コンクリート平均ひずみ (ϵ_{tav}) 関係、拘束コンクリートひずみ (ϵ_{cm}) - σ_t 関係、ならびに引張鉄筋応力のジャンピング挙動におよぼす引張鉄筋比 (p_t) の影響を調べた。同時に、RC および PRC 梁のひび割れ幅制御設計に不可欠な、 $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係の定量化式の検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係のひび割れ発生以前の初期勾配の概略値をコンクリートの曲げ引張強度、強度時ひずみおよび鉄筋比を仮定することによって式 (9) のように誘導し、実験結果を良好に推定することを示した。
- 2) ひび割れ発生時に生じる引張コンクリート合力の鉄筋への移行によって生じる応力ジャンピング現象は、 p_t やコンクリート強度と関連するひび割れの発生状況と密接に関係する。また、ジャンピングを生じる p_t に限界があり、その値は $p_t = 0.0313$ であることを理論的に実証した。
- 3) $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係のピーク点における ϵ_{cm} は、コンクリート強度が同じであれば初期勾配はほぼ同じであるので、 p_t が小さいほど大きくなる。
- 4) RC 梁のピーク以降の $\epsilon_{cm} - \sigma_t$ 関係は、 σ_t の増大に対し ϵ_{cm} は減少し、ほぼ一定値に収束する傾向を示す。 p_t が小さいものほどピーク値からの ϵ_{cm} の減少

量は大きい、その収束値は大きい傾向がある。

- 5) p_t は中立軸深さ x_{n1} と、さらに x_{n1} は引張鉄筋を取り巻く曲げひび割れ間の引張コンクリートのボリュームと密接に関係して、引張コンクリートの拘束ひずみ (ϵ_{cm}) と関連するという視点から誘導した、 $a_t / \{b \cdot (D - x_n)\}$ を関数とする前報⁷⁾ の推定式は、概ね妥当であることを明確にした。

謝辞

本研究に対し、平成 22 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、大阪工業大学空間デザイン学科卒論生、小林健太、雑賀ほか、および前川未貴子諸氏から多大な協力を得た。さらに、PC 付着研究会 (構成:大阪工業大学・中塚侑、株式会社ピーエス三菱、オリエンタル白石株式会社、株式会社建研、高周波熱錬株式会社、神鋼鋼線工業株式会社、住友電工スチールワイヤー株式会社) 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る。

参考文献

- 1) 吉田由美子, 中塚侑, 坂田博史: 中・大型試験体による RC 梁の曲げひび割れ性状に関する再考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, pp.241-246, 2009.7
- 2) 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリートコンクリート (種 PC) 構造設計・施工指針・同解説, 2003
- 3) 井畔 瑞人, 塩屋 俊幸, 野尻 陽一, 秋山 暉: 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, 1984 月 8 日
- 4) 角田 与史雄: 鉄筋コンクリート - トの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970.9
- 5) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.475-480, 2010.7
- 6) 竹内寿文, 森田真由美, 中塚侑, 坂田博史: PRC および RC 梁の曲げひび割れ幅推定に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.481-486, 2010.7
- 7) 中塚侑, 寒川勝彦, 古林桂太, 島田安章, 竹内寿文, 森田真由美, 坂田博史: 中・大型梁試験体に基づく PRC および RC 梁部材の曲げひび割れ幅推定に関する再考察 (その 1 ~ その 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010 年 9 月, 23413 ~ 23417