

($D=300, 400, 500, 600, 800\text{mm}$)である。引張鉄筋位置の平均ひずみ (ε_{tav}) は、鉄筋位置のコンクリート表面で図-1に示すインバーより線と滑車からなる新考案変位測定治具と高感度変位計にて測定された伸びを、試験区間長で除することから得た。

3. ひび割れ断面における引張鉄筋応力

ひび割れ制御設計にはひび割れ断面の引張鉄筋応力 (σ_t) の設定が不可欠であるが、実験から σ_t を測定することは、ひずみゲージの貼付がひび割れ発生位置、ひび割れ性状に影響を与えるため、現実には不可能であろう。従って、 σ_t を計算によって知ることが必要になるが、鉄筋比の小さいRC梁ではひび割れ後は理論上中立軸が殆ど一定となるため、曲げモーメントの略算式である $M = a_t \cdot \sigma_t \cdot j$ から比較的精度良く推定できる。これに対し鉄筋比の大きなRCや、プレストレスを加えられたPRCでは、曲げモーメントの増大によりコンクリートの圧縮応力が非線形性を考慮すべき大きさになることが予想される。それ故、 σ_t の算出に以下のように非線形性を考慮することとした。

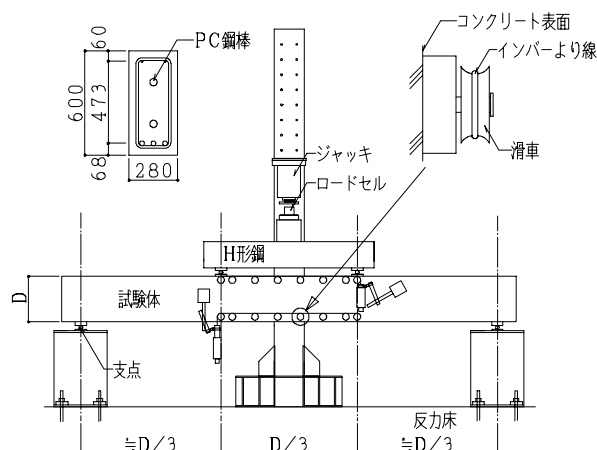


図-1 試験体断面一例および荷重方法

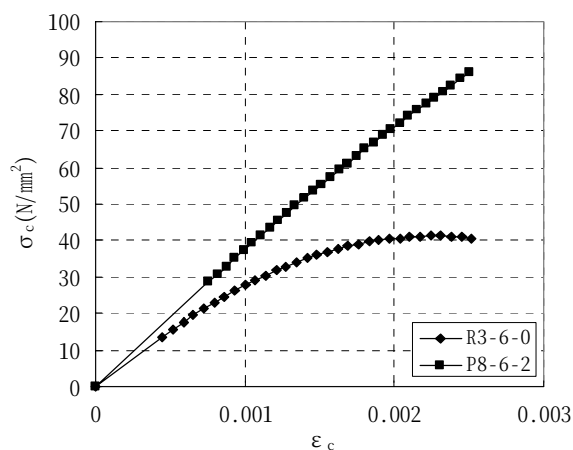


図-2 コンクリートモデル

3.1 コンクリートモデル

以下の仮定に基づくコンクリートの応力-ひずみ ($\sigma_c - \varepsilon_c$) 関係モデルを作成した。図-2に結果の一例を示す。

- ① 圧縮強度 (F_c) の 1/3 点まではテストピースより得られた弾性係数 (E_c) をもつ直線、 $F_c/3$ 点以降は二次曲線 ($\sigma_c = a \varepsilon_c^2 + b \varepsilon_c + c$) とする。
- ② $F_c/3$ 点での接線勾配は E_c とする。
- ③ $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係は、 F_c 時のひずみ (ε_o) は実験値を用いる。しかし、 F_c が高くて計測不能であった場合は、 ε_o が過大評価とならないよう、 $\varepsilon_o = 0.25\%$ とする。

図1に示す R3-6-0 等の $F_c/30$ に対する $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係は、二次曲線部のピークが実際のコンクリート強度より大きくなるものの、誤差はさほど大きくない。また、 $F_c/80$ シリーズは F_c 点までほぼ直線となっている。

3.2 ひび割れ断面における鉄筋応力 σ_t の算出

σ_t の算出は、実務設計を考慮し、引張側コンクリートを無視した梁断面の曲げ解析によった。すなわち、実験におけるある荷重階の曲げモーメントを満足する σ_t を、断面内の力のつり合いが規定誤差範囲内で成立するまで圧縮縁コンクリートひずみと中立軸を変化させる収斂計算を行うことによって算出した。なお、主筋の弾性係数は $E_s = 205000 \text{ N/mm}^2$ とした。

3.3 コンクリート応力-ひずみモデルの影響

図-3はコンクリートの仮定 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係を1次式および非線形性を考慮した2次式とした場合で、 $\sigma_t - \varepsilon_{\text{tav}}$ 関係にどのような影響を与えるかを調べた例である。なおPRCの場合にはプレストレス導入による鉄筋の圧縮応力を考慮するので、負の領域(圧縮側)より始まっている。また図中には圧縮縁コンクリート応力が $F_c/3$ を越える点、ならびに鉄筋単体の $\sigma_t - \varepsilon_t$ 関係も併記している。

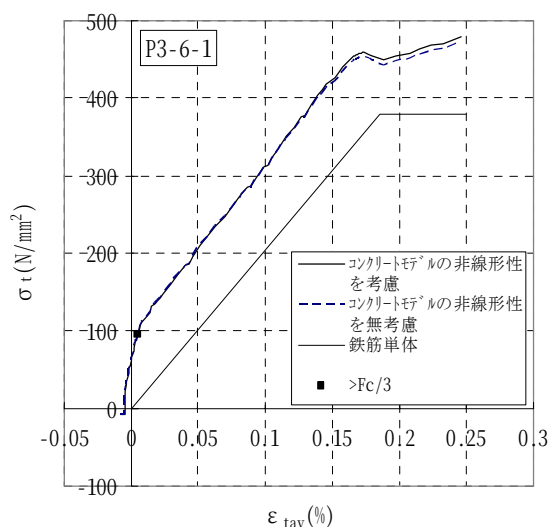


図-3 $\sigma_t - \varepsilon_{\text{tav}}$ 関係におよぼすコンクリートモデルの影響

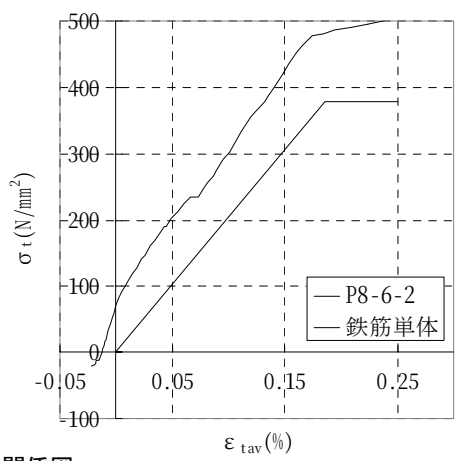
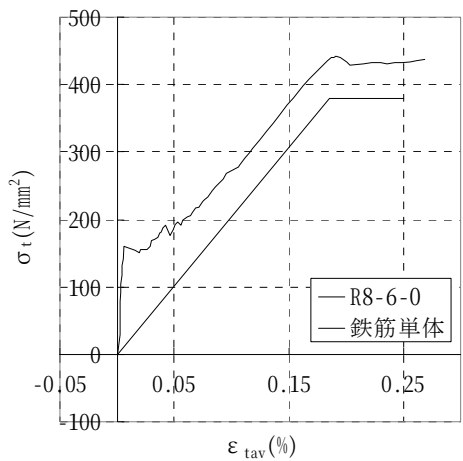
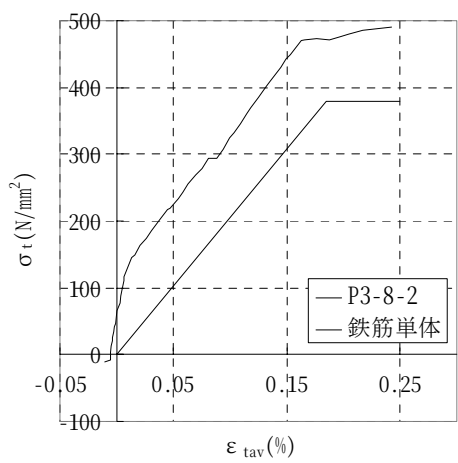
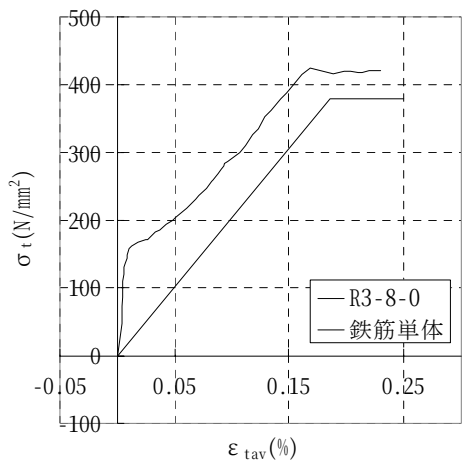
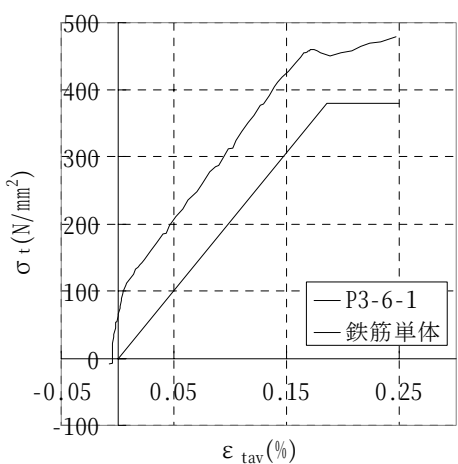
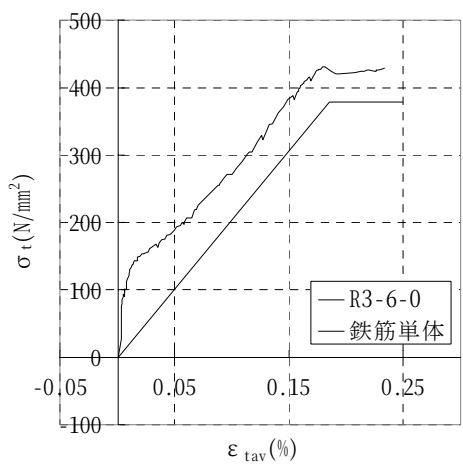
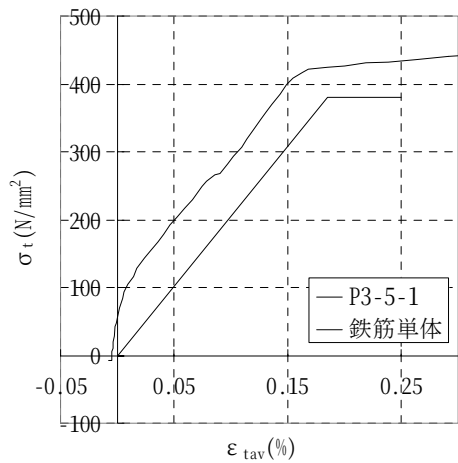
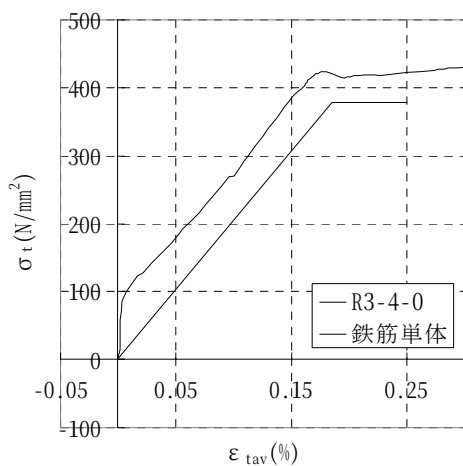


図-4 $\sigma_t - \varepsilon_t$ 関係図

図-3でのP3-6-1試験体はプレストレスがあるため、かなり低い σ_t 段階で圧縮部コンクリート応力が $F_c/3$ を越え、鉄筋降伏時に圧縮縁コンクリート応力は F_c に近い値となるので、 $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係と鉄筋単体の $\sigma_t - \varepsilon_t$ 関係との差は、 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係を1次式とした場合よりも2次式とした場合の方が若干大きくなる傾向が見られる。しかし、長期設計での σ_t が 200N/mm^2 程度以下であることを考えれば、1次式の仮定で σ_t の算出にはさほど問題はないと考えられる。一方、 F_c80 のRC試験体では、コンクリートの仮定 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係ならびに圧縮縁コンクリート応力のレベルからも予想されるように、1次式と2次式の場合とで $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係に大きな違いは見られなかった。

図-4は、コンクリートの $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係を先述の2次式と仮定した場合における、試験体の $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係を比較した例であるが、以下のような特徴が見られる。①いずれの試験体でも ε_{tav} の測定値が鉄筋の降伏ひずみに近い $0.15\% \sim 0.2\%$ の範囲で σ_t の増加は頭打ちとなり、新考案変位測定治具と高感度変位計による測定が良好であることを示している。②RC試験体、とくに梁せいが大きい試験体および F_c80 の試験体では、曲げひび割れ発生後、引張鉄筋応力のジャンピング現象によって急激に ε_{tav} が増加するため、 $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係は急速に鉄筋単体の $\sigma_t - \varepsilon_t$ 関係に漸近する。これに対し、PRC試験体ではプレストレスによって、曲げひび割れ発生後にRCのようなジャンピングによる中立軸深さの急激な減少が生じないので、 $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係は鉄筋単体の $\sigma_t - \varepsilon_t$ 関係に対しほぼ平行、もしくは離れていく傾向が見られた。

なお、 $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係は鉄筋の降伏応力よりも大きな値を示しているが、この原因として、ひび割れ位置でのひずみ硬化現象、ひび割れ断面解析における引張コンクリート応力の無視および上述した圧縮部コンクリートの非線形の影響などが考えられる。

4. w_{av} と $l_{av} \times \varepsilon_{tav}$ の関係に対する実験的検証

図-5は、実験値 w_{av} と実験結果に基づく $l_{av} \times \varepsilon_{tav}$ との関係を調べたものである。なお、ここでの l_{av} は、ひび割れ発生直後にまとも発生し、ひび割れ高さ(H_{cr})が一気に進展していく、曲げモーメントによる引張応力に起因するひび割れ(Mひび割れ)のみに基づく値である。同図によるとPRCおよびRC試験体のいずれでも w_{av} は $l_{av} \times \varepsilon_{tav}$ によってほぼ推定できること分かる。しかし詳細に検討すると、RC試験体では、 $l_{av} \times \varepsilon_{tav}$ が w_{av} をR3-3-0およびR8-6-0試験体では過小評価、その他の試験体では過大評価している。これは l_{av} を、Mひび割れに遅れて発生し、その後あまり進展しない、鉄筋とコンクリートの付着に起因するBひび割れを考慮せずに算

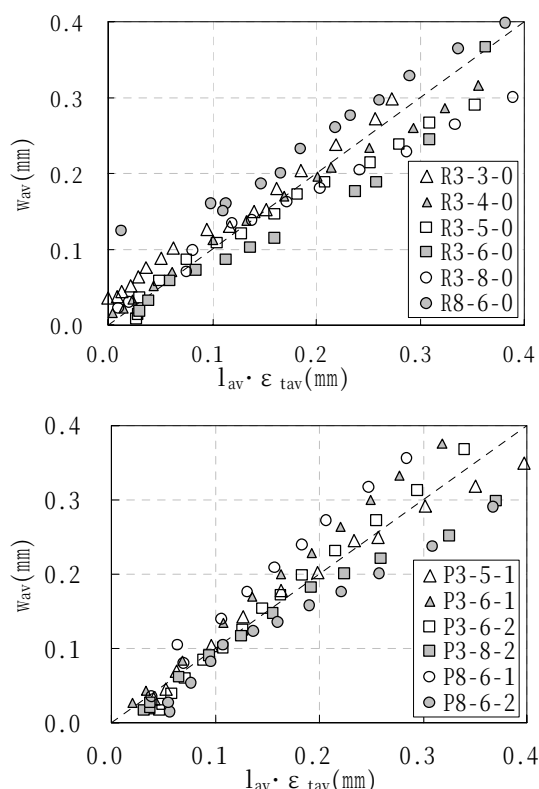


図-5 実験による $w_{av} - l_{av} \times \varepsilon_{tav}$ 関係図

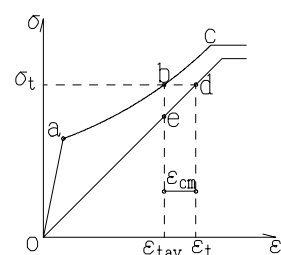


図-6 $\sigma_t - \varepsilon_{tav}$ 関係図

出したことによると思われる。一方PRC試験体では、プレストレスレベルが高いP3-8-2、およびP8-6-2試験体で $l_{av} \times \varepsilon_{tav}$ が w_{av} を過大評価する傾向が見られる。この原因として、プレストレスによって中立軸が深くなり ε_{tav} が小さくなったことが推測されるが、今後の課題である。

5. 引張コンクリートの拘束ひずみと鉄筋応力の関係

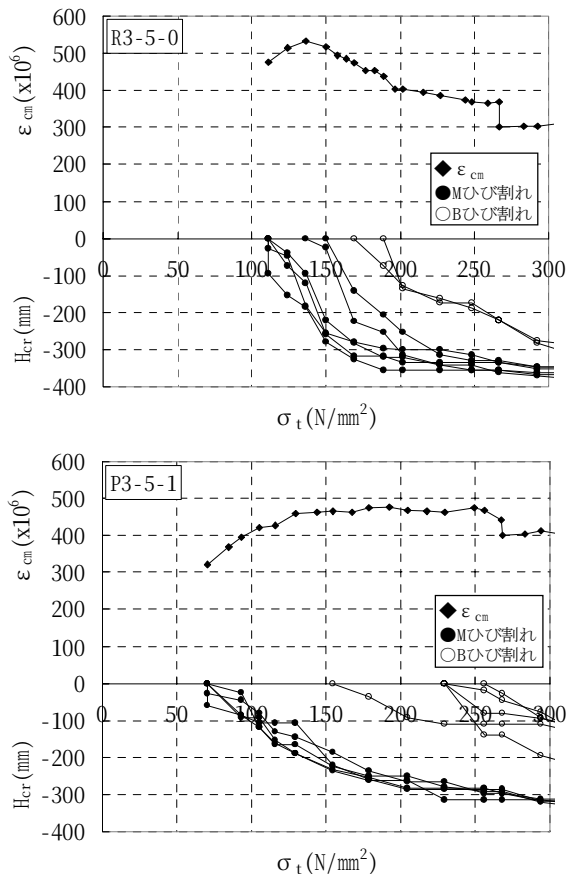
5.1 引張コンクリートの拘束ひずみ(ε_{cm})

図-6は、ひび割れ断面における鉄筋応力(σ_t)、鉄筋位置平均ひずみ(ε_{tav})および鉄筋付着がない場合の鉄筋ひずみ(ε_t)との関係に対する、従前からのイメージを示したものである。同図において、鉄筋応力が σ_t の時、鉄筋にまわりついているコンクリートの引張力分担によってひび割れ間コンクリートは ε_{tav} までしか伸びない。逆に見れば、鉄筋伸びが引張コンクリートによって $\varepsilon_{cm} (= \sigma_t / E_s - \varepsilon_{tav})$ だけ拘束される。この拘束ひずみ ε_{cm} は、これまでのプリズム試験体の単軸引張試

験の概念を用いると、 $\varepsilon_{cm}=k_1k_2 \cdot F_t / (p_e \cdot E_s)$ として表される（ここで、 F_t ：コンクリートの引張強度、 p_e ：引張有効鉄筋比、 E_s ：鉄筋の弾性係数、 k_1k_2 ：コンクリートの引張寄与係数）。しかし、梁試験体では中立軸位置の影響を受けてひび割れ間コンクリートが引張強度に達していないことも考えられるため、本稿では係数 k_1k_2 ではなく、 ε_{cm} に対し考察を進める。

5.2 引張コンクリート拘束ひずみ—鉄筋応力—ひび割れ高さ関係

図－7 は、 ε_{cm} が σ_t の増大によってどの様に変化するか、ならびに ε_{cm} の変化がひび割れ状況とどの様に関係しているかを調べるため、RC 試験体（R3-5-0）および PRC 試験体（P3-5-1）を例にとって、 $(\varepsilon_{cm}-H_{cr}-\sigma_t)$ 関係を図示したものである。なお H_{cr} はスケールにて測定した。同図から以下のようなことが考えられる。①RC 試験体では、曲げひび割れが連続して発生する状況時に ε_{cm} は最大値をとる。その後、曲げひび割れの深さの増大によって鉄筋に対するコンクリート拘束が急激に小さくなって ε_{cm} は減少するが、曲げひび割れの H_{cr} の進展がほぼ停止して、ひび割れ面の深さが殆ど変化しなくなる $\sigma_t=200\text{N/mm}^2$ 付近から ε_{cm} はほぼ一定値を示す。これに対し、②PRC 試験体では、曲げひびが発生した後、RC 試験体とは異なって、 σ_t の増大に対し H_{cr} は緩やか



図－7 $\varepsilon_{cm}-H_{cr}-\sigma_t$ 関係図

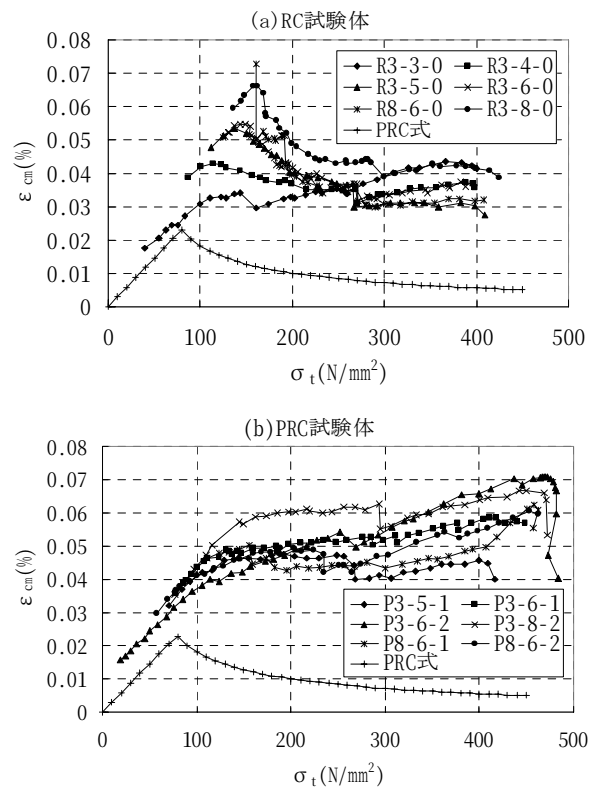
に進展するので ε_{cm} は減少せず、 $\sigma_t=150\text{N/mm}^2$ 付近からほぼ一定値を示した。

5.3 引張コンクリート拘束ひずみ—鉄筋応力関係

図－8 は、RC 試験体および PRC 試験体の $\sigma_t-\varepsilon_{cm}$ 関係をそれぞれまとめて示したものである。また、同図中にはコンクリートの引張強度を $F_t=2.1\text{N/mm}^2$ ($=0.07F_c$) として、PRC 指針により計算された ε_{cm} も併記している。

同図によると、R3-3-0 を除く RC 試験体では、図 7 で述べたように曲げひび割れ発生後、すぐに ε_{cm} はピーク値に達し、その後 σ_t の増加とともに小さくなる傾向を有する。収束値に梁せいの影響が若干認められるものの、コンクリート強度による影響は殆ど認められず、 ε_{cm} は $0.03\sim 0.04\%$ の値であった。一方、R3-3-0 試験体では σ_t の増加に対し ε_{cm} が、後述の PRC 試験体と同様、単調に増大する傾向が見られた。これは梁せいが小さいので引張鉄筋比が大きくなって中立軸位置が引張鉄筋位置に近い、曲げひび割れ後の応力ジャンプが顕著に起こらなかったためと推測される。

一方 PRC 試験体では、RC 試験体のように σ_t の増加とともに ε_{cm} が急減する現象は認められず、 σ_t の増加に対し ε_{cm} は単調に増大した。また $\sigma_t=130\sim 150\text{N/mm}^2$ 付近から $\sigma_t=300\text{N/mm}^2$ までの区間でほぼ一定値を示して、その後再度上昇する傾向が見られた。上記の一定値に対する梁せいおよびコンクリート強度の影響は明確でないが、一定値域での ε_{cm} 値は RC 試験体のそれより大きく



図－8 $\sigma_t-\varepsilon_{cm}$ 関係図

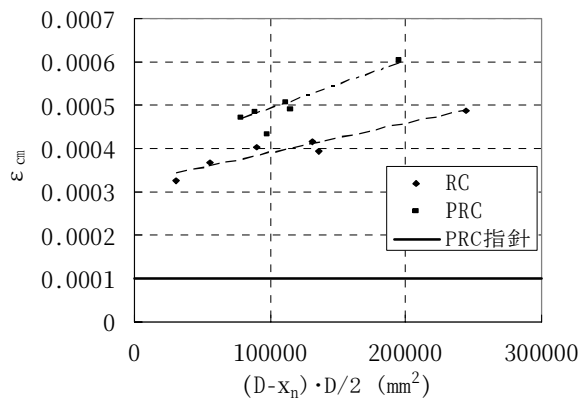


図-9 (D-x_n) · D/2 - ε_{cm} 関係図 (σ_t=200N/mm²)

0.04~0.05%であった。PRC 試験体で見られたσ_tの増大に対するε_{cm}の単調増大現象ならびに大きなε_{cm}一定値に対する原因として、プレストレス力による中立軸深さの増大が応力ジャンピング現象を抑制すると共に、引張鉄筋の付着性状に影響を与えたことなどが推測される。

本論で得られたσ_t-ε_{cm}関係と PRC 指針から算定されるものとを比較すると、RC および PRC 試験体のいずれの場合でも両者は大きく異なっていることが分かる。

5.4 鉄筋位置引張コンクリート平均ひずみの定式化

ひび割れ制御設計での目標値となるw_{max}は、PRC 指針および文献1)によれば、w_{av}の1.5倍と考えて良く、また4節で示された結果から、大略w_{av}=l_{av}×ε_{tav}とされる。w_{max}の算出には、l_{av}およびε_{tav}の定量化が必要であるが、ここではε_{tav}に直接関係するε_{cm}の定量化について考える。

引張コンクリートの拘束ひずみε_{cm}は、ひび割れ間引張コンクリート部の体積に関係すると推測されるので、ひび割れ断面のひび割れ高さ(D-x_n)とひび割れ間隔に関係すると考えられる。又、ひび割れ間隔は現実的なせいをもつ梁部材ではほぼD/2に比例すると見られる³⁾ので、(D-x_n) · D/2とε_{cm}との関係を調べた結果が図-9である。同図は5.3で示したように、ε_{cm}がほぼ一定値となる、σ_t=200N/mm²の時のものである。PRC および RC 試験体のいずれの場合も、ε_{cm}は(D-x_n) · D/2の増大に対しほぼ線形的に増加する傾向が有り、PRC の場合の方が大きい値を示した。また同図には PRC 指針でのσ_t=200N/mm²におけるε_{cm}も示しているが、本実験結果に比べかなり小さい。

6. まとめ

中・大型 PRC と 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、σ_t—拘束コンクリートひずみ(ε_{cm})関係を算出して、同関係におよぼす梁せ

い、プレストレスレベル、コンクリート強度の影響を調べ、以下の結果を得た。

- 1) ひび割れ断面における鉄筋応力計算値は、コンクリートの応力—ひずみ関係を弾性としてほぼ計算できる。
- 2) 梁せい、プレストレスなどの影響を若干受けるが、実験で得られた平均ひび割れ幅w_{av}とl_{av}×ε_{tav}の実験値は、従来からの指摘のようにほぼ等しい。
- 3) テンションスティフニング効果に係るε_{cm}は、σ_tの増大に対し、RC ではひび割れ発生後、急激に減少してほぼ一定値を示すが、PRC では単調増加後ほぼ一定値となる。その一定値は PRC の方が RC に比べ大きかった。
- 4) 拘束コンクリートひずみ(ε_{cm})は、梁の引張部コンクリートの体積に関係する傾向が見られた。すなわち、PRC および RC いずれの場合も、ひび割れ深さ(D-x_n)×ひび割れ間隔(D/2)の増大と共に線形的に大きくなる傾向があり、PRC の方が大きい値を示した。このことは、ε_{cm}が引張側コンクリートの量に依存すること、又、プレストレスによりその効果が増大することを示していると考えられる。

謝辞

本研究に対し、平成 21 年度科学研究費補助金(課題番号:21560602、代表者:中塚 信)を受けた。また、大阪工業大学建築学科卒論生、中村哲徳氏、空間デザイン学科卒論生、石崎誠氏および佐々木克典氏から多大な協力を得た。さらに、P C 付着研究会(構成:大阪工業大学・中塚信、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、株式会社ピーエス三菱)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る。

参考文献

- 1) 吉田由美子、中塚信、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:プレストレス鉄筋コンクリートコンクリート(Ⅲ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