論文 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

竹内 寿文*1・森田 真由美*2・中塚 信*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(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針におけるひび割れ制御設 計式は,主として低強度小型試験体の実験データに基づいているため,部材のスケールやコンクリート強度の 影響が十分に考慮されていない。また,中立軸深さとひび割れ間引張コンクリート部挙動に大きく影響すると 思われるプレストレスの影響は殆ど考慮されていない。本研究は,中・大型のプレストレスト鉄筋コンクリート 梁および鉄筋コンクリート梁の曲げ試験を行い,ひび割れ制御設計に不可欠な引張コンクリート部のテンショ ンスティフニング効果におよぼす梁せい,プレストレスレベルおよびコンクリート強度の影響を検討した。 キーワード:ひび割れ幅,PRC,RC,テンションスティフニング,拘束コンクリートひずみ

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(III種 PC,以下 PRC と略記)構造設計・施工指針におけるひ び割れ制御設計では、ひび割れ断面での鉄筋応力(,) および引張側コンクリートのテンションスティフニン グ効果推定式から平均鉄筋ひずみ(tav)を算出し、同 値に平均ひび割れ間隔(lav)を乗じて平均ひび割れ幅 (wav),さらには最大ひび割れ幅(wmax)を算出するス トーリーが規定されている。従って、ひび割れ制御に関 する実験では通常、引張鉄筋位置での測定ひずみを通し て、t-tav関係、ならびに引張側コンクリートの拘束 ひずみ(cm)が調べられることが多い。しかし、ひび 割れ断面でのtを実験によって測定することは現実に は不可能であるため、同応力をどの様に定義してttav関係、t-cm関係を定式化するかがひび割れ制御設 計の1つの重要なポイントである。 本研究は、設計という視点から tを計算によって求め るスタンスと、中・大型 PRC 梁および鉄筋コンクリート (RC) 梁の曲げ試験によって得られた結果から、 ttav関係、 t- 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 を明らかにし、ひび割れ制御設計に資することを目的と するものである。

2. 実験概要

実験概要は、**表**-1に示す梁の中央部(3D)を等曲げ 区間として3等分点載荷する試験である。試験体断面の 一例および載荷方法を図-1に示す。全ての試験体で梁 幅、主筋の径および間隔ならびにコンクリートのかぶり 厚さは共通としている。取り上げたパラメーターは、平 均プレストレスレベル($_g$ =0, 2.3~3.0, 7.0 N/mm²)、 コンクリート強度(F_c =30, 80 N/mm²) および梁せい

	断面形状		コンクリート		主筋			PC鋼棒		
符号	梁幅:b	梁せい:D	F _c	Ec	本-径	Es	p _t	名称 径 Po g g/Fc		
	mm	mm	N/mm ²	N/mm^2		N/mm^2	%	mm kN N/mm ²		
R3-3-0	280	300	51.20	31753	3-D25 (強度, 名称: SD345)	205000	2.34	4		
R3-4-0		400	45.93	31961			1.64	4 F _c :コンクリート強度, E _c , E _s :弾性係数		
R3-5-0		500	45.79	34187			1.26	6 p.:引張鉄筋比, P.:プレストレス力		
R3-6-0		600	40.70	30294			1.02	2 : 平均プレストレスレベル		
R8-6-0		600	89.28	38809			1.02	2 g ^g + 1.3, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,		
R3-8-0		800	48.65	33592			0.74	4		
P3-5-1		500	50.34	34059			1.26	6 337.8 2.41 0.048		
P3-6-1		600	42.55	30125			1.02	2 390.8 2.33 0.055		
P3-6-2		600	37.93	28517			1.02	2 SBPR930 32 1180.3 7.03 0.185		
P3-8-2		800	38.14	32360			0.74	4/1080 696.5 3.11 0.082		
P8-6-1		600	84.33	34981			1.02	2 388.9 2.31 0.027		
P8-6-2		600	85.87	37704			1.02	2 1181.3 7.03 0.082		
[共通項目] $d_t = 68$ [試験体記号説明] \mathbb{P}_{2}^{3-3-0}										
		$p_e =$	3.99	%				└ <u>└PC鋼材本数</u> <u>☆せい/100</u> F /10		
							L			

表-1 試験体一覧と概要

*1 株式会社建研 大阪支店第1設計部 名古屋営業所勤務 (正会員)

*2 大和ハウス工業株式会社 (正会員)

*3 大阪工業大学 工学部 空間デザイン学科 教授 工博 (正会員)

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

(D=300, 400, 500, 600, 800mm)である。引張鉄筋位置の平均ひずみ(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 (1)の設定が不可欠であるが、実験から 1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、1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=a1.1j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、1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載荷方法



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(。- 。)関係モデルを作成した。図-2に結果の一例を 示す。

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 ($_c=a \ c^2+b \ c+c$) とする。

F_/3点での接線勾配はEcとする。

c- 。関係は、 F_c 時のひずみ($_o$)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、 。が過大評価とならないよう、 $_o=0.25\%$ とする。

図1に示す R3-6-0 等の F₆30 に対する 。- 。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, F₆80 シリーズは F₆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 tの算出

↓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 ↓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=205000N/mm² 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 。- 。関係を1次式お よび非線形を考慮した2次式とした場合で、 t- tav 関 係にどの様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 t- t関係も併記している。





-483-

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 _t段階で圧縮部コンクリート応力が $F_c/3 \epsilon$ 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, _t- _{tav}関係と鉄筋単体の _t- _t関係 との差は, _c- _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 _tが 200N/mm²程度以下であること を考えれば,1次式の仮定で _tの算出にはさほど問題は ないと考えられる。一方, F_c 80 の RC 試験体では, コン クリートの仮定 _c- _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 _t- _{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 。- 。関係を先述の2次 式と仮定した場合における、試験体の t- 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 tavの測定値が鉄筋の降伏ひずみに近 い 0.15%~0.2%の範囲で 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.80 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 tay が増加するため、t-tay 関係は急速に鉄筋単体の t- 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、t-tay関係は鉄筋単体のt-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, t- 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. wav と lav × tav の関係に対する実験的検証

図-5は、実験値 wavと実験結果に基づく $l_{av} \times tav$ 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まって発生し、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 wav は $l_{av} \times tav$ 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、 $l_{av} \times tav$ 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



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 $l_{av} \times t_{av}$ 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 t_{av} 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 (cm)

図-6は、ひび割れ断面における鉄筋応力(),鉄筋位置平均ひずみ($_{tav}$)および鉄筋付着がない場合の 鉄筋ひずみ($_{tav}$)および鉄筋付着がない場合の 鉄筋ひずみ($_{t}$)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 $_{t}$ の時、鉄筋にまと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 $_{tav}$ 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 $_{cm}$ (= $_{t}/E_{s}$ - $_{tav}$)だけ拘束される。この拘束 ひずみ $_{cm}$ 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、 $_{cm}=k_lk_2\cdot F_{l'}$ ($p_e\cdot E_s$) 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_lk_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_lk_2 で はなく、 $_{cm}$ に対し考察を進める。

5.2 引張コンクリート拘束ひずみ一鉄筋応カーひび割れ 高さ関係

図-7は、 cm が tの増大によってどの様に変化する か、ならびに 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、(cm - Hcr - t) 関係を図示したものである。なお Hcr 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 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 cm は減少するが、曲げひびわれの Hcr 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 t=200N/mm²付近から 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、 tの増大に対し Hcr は緩やか に進展するので $_{cm}$ は減少せず, $_{r}=150N/mm^2$ 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--鉄筋応力度関係

図-8は、RC 試験体および PRC 試験体の $_{cm}$ 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 $F_t=2.1$ N/mm² (=0.07F_c)として、PRC 指針により計算された $_{cm}$ 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 cm はピーク 値に達し、その後 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、 cm は 0.03~0.04%の値であった。一方、R3-3-0 試験体では の増加に対し 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 近いため、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 ,の増加と ともに cm が急減する現象は認められず, ,の増加に対 し cm は単調に増大した。また ,=130~150N/mm²付近 から ,=300N/mm²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 cm 値は RC 試験体のそれより大きく







図-9 (D-x_n)·D/2- _{cm}関係図(t=200N/mm²)

0.04~0.05%であった。PRC 試験体で見られた ,の増 加に対する _{cm}の単調増大現象ならびに大きな _{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伴に,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 _t- _{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 $w_{av}=l_{av} \times t_{av}$ とされ る。 w_{max} の算出には、 l_{av} および t_{av} の定量化が必要であ るが、ここでは t_{av} に直接関係する c_{m} 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 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-xn) 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-xn)・D/2 と 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、 cm がほぼ一定値 となる、 =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、 cm は (D-xn)・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 =200N/mm²における 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(t)-鉄筋位置引張コンク リート平均ひずみ(tav)関係、t-拘束コンクリート ひずみ(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。
- 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 wav と lav × tav の実 験値は、従来からの指摘のようにほぼ等しい。
- テンションスティフニング効果に関係する cm は, 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 (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-xn)×ひび割れ間隔(D/2)の増大と伴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, 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 佶)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,PC付着研究会(構成:大阪工業大学・ 中塚佶,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

- 吉田由美子,中塚佶,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
- 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(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説,2003
- 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