論文 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

森田 真由美*1・竹内 寿文*2・中塚 佶*3・坂田 博史*4

要旨:プレストレスト鉄筋コンクリート(PRC)及び鉄筋コンクリート(RC)構造における設計のキーポイントはひび割れ制 御設計である。しかし,現行設計指針等における規定は,主として小型試験体の実験データに基づいているため,ス ケール効果に対する考慮が不十分と考えられる。本研究は中・大型の PRC および RC 梁の曲げ試験を行い,ひび 割れ制御設計に不可欠な曲げひび割れ間隔及び幅に及ぼす梁成,プレストレスレベル,コンクリート強度の影響 を調べ,ひび割れが曲げモーメントによる引張応力に起因するひび割れと鉄筋とコンクリートの付着よるひび割れに分 類出来ること,さらに前者の曲げひび割れの間隔および幅が推定できることを示した。

キーワード: PRC 梁, RC 梁, 曲げひび割れ, 付着ひび割れ, ひび割れ間隔, ひび割れ幅

1. はじめに

プレストレスト鉄筋コンクリート(III種 PC,以下 PRC と 略記)および鉄筋コンクリート(以下 RC と略記)構造では, ひび割れ制御設計が重要なキーポイントである。しかし,現 行の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・同解説(以下 PRC 指針と略記)では,曲げひび 割れ幅の算定に必要なひび割れ間隔と引張鉄筋位置の平 均伸びひずみなどのデータを,主に鉄筋を中央に埋め込ん だプリズム型の単軸引張試験体,ならびに梁せいが 300mm 程度以下の小型梁試験体の実験結果に基づいているため, スケールに対する考慮が十分でないと考えられる。

本研究は、中・大型の PRC および RC 梁の曲げ試験を 行い、ひび割れ制御設計に不可欠な曲げひび割れ間隔お よび幅に及ぼす、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実験的に明らかにしようとす 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、PRC 梁試験

	試験体名		R3-3-0	R3-4-0	R3-5-0	R3-6-0	R3-8-0	R8-6-0	P3-5-1	P3-6-1	P3-6-2	P3-8-2	P8-6-1	P8-6-2
梁幅 b(mm)			280											
梁せい D(r		D (mm)	300	400	500	600	800	600	500	600	600	800	600	600
コンクリート引張縁から 主筋までの距離		d_t (mm)	68											
有効せい d(m		d (mm)	232	332	432	532	732	532	432	532	532	732	532	532
		j(mm)	203	291	378	466	641	466	378	466	466	641	466	466
コンクリートかぶり厚さ (試験区間)		$c_b(mm)$	60											
		cs(mm)	54											
試験間距離		3D(mm)	900	1200	1500	1800	2400	1800	1500	1800	1800	2400	1800	1800
コンクリート計画強度 Fc (N/mm ²		$Fc (N/mm^2)$	30	30	30	30	30	80	30	30	30	30	80	80
	径(断面積)	mm^2	D25 (507)											
主筋	品質(実強度)	σ_{cv} (N/mm ²)	SD345											
	断面積	$at(mm^2)$	1521 (3-D25)											
	引張鉄筋比	р _t (%)	2.34	1.64	1.26	1.02	0.74	1.02	1.26	1.02	1.02	0.74	1.02	1.02
	有効鉄筋比	р _е (%)						3.	99					
	径(断面積)	mm^2						D13(127)					
せん断 補強筋	品質(実強度)	$\sigma_{cv}(N/mm^2)$	SD345A											
	断面積	$a_w(mm^2)$	254 (D13)											
	(配筋間隔)	(mm)	@55	@80	@100	@150	@150	@200	@100	@100	@100	@70	@70	@150
PC鋼棒	径(断面積)	mm^2	\$ 32(804)											
	品質		-						B種1号 SBPR930/1080					
	プレストレス力	P ₀ (kN/本)	-					338	391	590	348	381	591	
	平均プレストレス	$\sigma_{g}(N/mm^{2})$			-	-	-		2.4	2.3	7.0	3.1	2.3	7.0

表-1 試験体一覧

【試験体記号の説明】 R_{3-3-0} : プレストレスレベル(0), 梁せい(300mm), コンクリート強度(Fc=30), RC(R)

*1 大和ハウス工業株式会社 (正会員)

*2 株式会社 建研 大阪支店 第一設計部 名古屋営業所 (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 第一設計部) (正会員)



表-2 使用コンクリートの力学的試験結果

	夫缺杧未(N/mm)									
試験体名	圧縮強度	引張強度	曲げ強度	弹性係数 (×10 ⁴)						
R3-3-0	51.2	3.1	4.3	3.2						
R3-4-0	45.9	4.0	5.6	3.2						
R3-5-0	45.8	3.8	6.2	3.4						
R3-6-0	40.7	3.5	6.5	3.0						
R3-8-0	48.6	3.8	5.7	3.4						
R8-6-0	89.3	4.4	9.5	3.9						
P3-5-1	50.3	3.1	5.3	3.4						
P3-6-1	42.5	3.1	5.6	3.0						
P3-6-2	37.9	2.4	5.3	2.9						
P3-8-2	38.1	3.6	5.2	3.2						
P8-6-1	84.3	4.5	7.3	3.5						
P8-6-2	85.9	5.0	8.3	3.8						

体が6体,および RC 梁試験体が6体の計12体である。 試験要因は、梁せい(D=300,400,500,600,800mm)、 プレストレスレベル(0,1,2: σ_g =0,2.3~3.1,7.0 N/mm²)、 コンクリート強度(Fc=30,80 N/mm²)である。すべての 試験体において、PRC 指針によって算出されるひび割れ 間隔が等しくなるように、梁幅(280mm)、有効鉄筋比 (4.0%)、主筋の径(D25)、および鉄筋間隔(66mm)ならび にコンクリートのかぶり厚さ(68mm)は共通とした。鉄 筋の径は、上端筋:2-D10、下端筋 3-D25、せん断補強筋: D13 で、種類は SD345 とした。PC 鋼棒は SBPR1080/1230-32¢をアンボンド仕様で用い、鋼棒が1 本の場合は、梁断面図心位置に、2本の場合は、図心か ら上下 120mm の位置に配置した。なお、ひび割れ性状に 及ぼす影響を除くため、試験区間には横補強筋は配筋サ ず,また引張主筋にはひずみゲージを添付していない。試験体配筋図の例(P3-62 試験体)を図-1に,使用コンクリートの力学的試験結果を表-2に示す。

2.2 載荷方法および測定項目

梁には、図-3に示すような等曲げ区間を3Dとする2 点に単調荷重を載荷した。また、測定は以下の項目につ いて行った。(1)鉄筋位置での伸び(インバーより線によ る伸び計)(2)圧縮側のコンクリートひずみ(同縮み計), (3)ひび割れ間隔,(4)ひび割れ幅,ならびに(5)梁中央お よび試験区間端部のたわみ変位

ここで,鉄筋位置での伸びひずみ,および圧縮縁より 15mm 梁中央側の位置における圧縮側コンクリートひず みは,コンタクトゲージ,パイゲージや主筋にひずみゲ ージを貼付する従来の離散的な測定方法ではなく,測定 区間全域の変形量をまとめて測定できる方法で行った。 すなわち,図-4 に示す様に,試験区間でコンクリート 表面にほぼ等間隔に貼付した鉄片に接合した滑車に,一 端を固定し他端に錘を取りつけたインバーより線を巻 きつけ,錘に生じる上下変位を高感度ひずみ変位計で測 定し,同変位を試験区間長で除する方法で行った。

試験区間

コンクリート表面

インバーより線



15mm

曲げひび割れ幅は、梁中央部の試験区間内に発生した 個々のひび割れに対し、精度 0.01mm の高性能マイクロスコ ープを用い、引張鉄筋位置から上下 40mm の位置でひび割 れ幅を測定し、鉄筋位置ひび割れ幅はその平均値とした。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れの分類

図-5(a)~(c)に、試験体の曲げモーメント(M) ーひび割 れ高さ(H_{cr})関係およびひび割れ状況の例を示す。図ー 5(a)は、 $M-H_{cr}$ 関係に及ぼすプレストレスレベル(σ_{g})とコ ンクリート強度(F_{c})の影響を、図-5(b)は、M-Hcr関係に 及ぼすは梁せい(D)の影響を、図-5(c)は、ひび割れ状 況に及ぼす梁せい(D)の影響を調べたものである。これ らの図を概観すると、いずれの試験体においても、以下 のような特徴がある次の2種類のひび割れが観察され た。すなわち、(1)曲げひび割れモーメント時(M_{cr})以降にま とまって発生した後、曲げモーメントの増加により一気に ひび割れ高さ H_{cr}を進展させるひび割れグループ。(2)そ れらのひび割れグループに遅れてより大きい曲げモーメ ント時に発生し、その後のひび割れ進展が緩やかなひび割 れグループ。それ故本論では、M_{cr}時以降に一気に発生す るひび割れは、曲げモーメントによるコンクリート引張応 力に起因するものと考え、以下、M ひび割れとよび、記号 を●で表す。一方、M ひび割れに遅れて発生し、その後 あまり進展しない傾向をもつひび割れは、鉄筋とコンクリ ートの付着によるものと考えられるので、以下 B ひび割れと 呼び、記号〇で表す。なお、ごく少数であるが、M か B かの ひび割れ種別の判別が困難なものは記号△で表示する。







図-5(b) M-Hcr に及ぼす梁せいの影響



図-5(c) ひび割れ性状に及ぼす梁せいの影響

以下に、各要因の影響を考察する。まず、図-5(a)は 梁せいが 600mm 試験体を用いて、 プレストレスレベルの影 響を調べたものであるが、プレストレスレベルが大きいほ ど、当然であるが、ひび割れ発生荷重(M_{cr})が大きくな り、ひび割れ高さが小さくなっていることがわかる。ま た、プレストレスがゼロの RC 試験体では、M ひび割れが 一気に進展するものの、その後の Hcr の進展は緩やかに なる。これに対し、プレストレスレベルが大きくなると、 M ひび割れの Hcr は曲げモーメントに対する増加割合が緩 やかとなり、ひび割れが徐々に進展する。これらは、プ レストレス力によって中立軸深さが大きくなることに起因 する現象と考えられる。次に、図-5(a)でコンクリート強 度が Fc=80N/mm² と大きい場合, M ひび割れが発生後一 気に進展する傾向がみられ、とくに RC 試験体ではその 傾向が顕著であった。これは,高強度コンクリートになるほ ど M ひび割れ発生前後で生じる引張鉄筋応力の変化(応 カジャンプ現象)が激しく起こることによるためと思われ る。また、図-5(b)に示す梁せいの影響は、梁せいが小 さい場合ほど、B ひび割れが観察されない。これは、M ひび割れ間隔が、Bひび割れ間隔より小さくなったためと考 えられる。図-5(c)は、ひび割れの進展状況を引張鉄筋応 力(σ_t)が,ほぼ 150, 200, 250N/mm²となる曲げモーメント時 をとって示したものであるが、図-5(a)、(b)での記述と良好 に対応している。以上のことより, M ひび割れのみに着目 して、ひび割れ間隔および幅の検討を行うことで、等曲げ モーメントを受ける PRC および RC 梁のひび割れ制御設 計に関する重要なデータを得ることができると考えられる。

3.2 ひび割れ間隔

3.1 で示したとおり、等曲げモーメントを受ける PRC および RC 梁では、曲げモーメントに起因する M ひび割 れと、鉄筋とコンクリートの付着に起因する B ひび割れ にひび割れが分類できる。従って以下では、曲げひび割 れのみに着目してひび割れ間隔の検討を行う。 図-6は、曲げモーメントによる断面下縁引張応力に起因 するMひび割れの間隔1について、全試験体のデータをヒス トグラムに表したものである。同図によれば1/D(D:梁せい) はばらつきを示すが、平均値は0.44で標準偏差は0.30であ った。この結果は、大型試験体を用いた既往の研究^{1,6}で、 ひび割れ間隔の平均値1avは梁せいDの0.5程度とする 結果と符合している。図-7は、横軸にDを取って、各試験 体の1avを縦軸にとって示したものである。同図中には現行 の建築学会 PRC 指針による1av 推定値も示している。同図 によれば、本試験体に対し一定値を示す PRC 指針推定値と 大きく異なり、RC 試験体の1av はDの増加に対しほぼ比例



図-7 曲げひび割れ間隔に及ぼす梁せいの影響

的に増加していることが分かる。D に対する増加傾向は、梁 せいのみが異なる PRC 試験体では RC の場合と異なった。 また、D=600mm で比較すると、F c=80N/mm²の RC 試験体 の1 av は RC 試験体と同様な値を、プレストレスレベルおよ び Fc に対し異なった1 av を示したが、いずれ試験体の1 av も PRC 指針値より大きかった。また、梁せいが小さくなっ て、Dに比例する M ひび割れ間隔が B ひび割れ間隔の 2倍以下になると、理論上付着ひび割れは入らなくなる。 PRC 指針による1 av が、その試験法からコンクリートと鉄筋 の付着に起因するものと考えると、図-7 でBひび割れ間隔 がMひび割れ間隔より小さくなった D=300mm 試験体で、B ひび割れが観察され難かった結果は、この推論を実験的に 実証していると考えられる。

3.3 最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅

図-8 は、マイクロスコープによって測定したひび割 れ幅(w)が載荷重の増大によってどの様に進展するかを、 横軸に引張鉄筋位置で測定した平均ひずみ(ε_{tav})をとって 示した例である。同図によれば、図-5のM-Hcr関係 と同様に、曲げモーメントに起因するMひび割れと付着 に起因するBひび割れが明確に区分されること、また、 いずれの試験体においても、Bひび割れが最大ひび割れ 幅(w_{max})となることはないこと、などが分かる。従って、 設計で必要となる最大ひび割れ幅(w_{max})の整理をMひ び割れのみに着目して行う。現行PRC指針では、平均鉄 筋ひずみ(ε_{tav})に平均ひび割れ間隔 lav を乗じた平均ひび 割れ幅(w_{av})から最大ひび割れ幅算出する手法をとって







図-8(b) ひび割れ幅に及ぼす梁せいの影響

いるので、本論でも(w_{max}/w_{av})が載荷重の変化によってど の様に変化するかを、縦軸に平均鉄筋ひずみ(ε_{tav})をとっ て図-9 に示した。なお、ひび割れ幅は、梁両側面で発 生したひび割れの幅を平均化したものである。PRC およ び RC 試験体のいずれにおいても、 ε_{tav} の増大に伴い、 (w_{max}/w_{av})は減少する傾向を示すが、 ε_{tav} が 0.05%程度(ひ び割れ位置での平均鉄筋応力がほぼ 150N/mm²程度と推 定される)以降になると一定値に収束する傾向が見られ た。その一定値は PRC 試験体では、平均で 1.3、最大で 1.5 程度となり、また、RC 試験体では、梁せいが小さい 場合に 1.5 を若干越えるものも見られるが、(w_{max}/w_{av})を 1.5 とする現行の PRC 指針での提示式は大略妥当である ことがわかった。



図-9 $W_{max}/W_{av} - \varepsilon_{tav}$ 関係

4. まとめ

中・大型の PRC および RC 梁を用いて,ひび割れ制御 設計に不可欠な曲げひび割れ間隔および幅に及ぼす,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 響を実験的に調べ,以下の結果を得た。

 等曲げモーメントを受ける PRC および RC 梁に生ず る曲げひび割れには、曲げモーメントによるコンク リート引張応力に起因する M ひび割れと、主筋の付 着に起因する B ひび割れに分類できることを示した。

- B ひび割れが最大ひび割れ幅を示すことはないので、 設計は M ひび割れの最大ひび割れ幅に着目して行 えば良いと考えられる。
- 3) M ひび割れの平均間隔 l av は梁せい D に依存して 大きくなることが分かった。全試験体に対する l av の平均値は 0.44D (標準偏差σ=0.3) で与えられ, 既往の大型試験体による実験で指摘・示唆されてい る 0.5D 程度とほぼ一致した。
- 4) M ひび割れの最大ひび割れ幅は、PRC 梁および RC 梁のいずれの場合も、平均ひび割れ幅の 1.5 倍程度 以下となり、現行の PRC 指針式が妥当であることが 分かった。

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,PC 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

- 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 (Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説,2003
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書(設計編), pp.102-104, 2002
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート建物の耐久設計施 工指針(案)・同解説, pp.79-86, 2004
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 六車 熙,森田 伺郎,富田 幸次郎:曲げひび割れを 生じた鉄筋コンクリートはり材の応力状態と変形に関す る研究,日本建築学会論文報告集,第 200 号, pp.27-34, 1972.10