

論文 プレストレスト鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ性状に関する実験的研究

高木 真由子^{*1}・睦好 宏史^{*2}・Eakarath Witchukreangkrai^{*3}・浦松 達也^{*4}

要旨：プレストレスト鉄筋コンクリート（PRC）の曲げひび割れ性状に影響を及ぼすと考えられる、配筋段数、鉄筋径、PC 鋼材位置及び付着性状を実験要因とした載荷実験を行い、その影響を明らかにするとともに、既往の各種曲げひび割れ幅算定式の精度、適用性についての比較検討を行った。

キーワード：PRC，ひび割れ幅，ひび割れ間隔，鉄筋段数，PC 鋼材位置

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは劣化と耐久性の観点から制御しなければならず、その予測・制御技術が重要な課題である。RC と PC の中間的な領域を幅広くカバーする PRC はひび割れの制御に非常に優れた構造形式である。

RC あるいは PRC の曲げひび割れに関しては古くから研究が行われており、角田らによる研究¹⁾では、PRC 桁のプレストレスの影響は鉄筋応力度の減少としてとらえ、それ以外のひび割れ性状は RC 桁と同等であるとしている。さらに趙、丸山らによる研究²⁾成果をもとに、2002 年制定の土木学会コンクリート標準示方書構造性能

照査編では鉄筋段数などを考慮した曲げひび割れ幅算定式が制定された³⁾。しかし PRC において、鉄筋の多段配筋や径、PC 鋼材が曲げひび割れ幅に及ぼす影響は明らかにされていない。

本研究では PRC 部材の曲げひび割れ幅に影響を及ぼすと考えられる、鉄筋段数、鉄筋径、PC 鋼材位置及び付着性状を実験要因とした載荷実験を行い、ひび割れ性状を実験的に検証し、既往の算定式の適用性を解析的に検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体の断面寸法及び PC 鋼材と鉄筋の配置

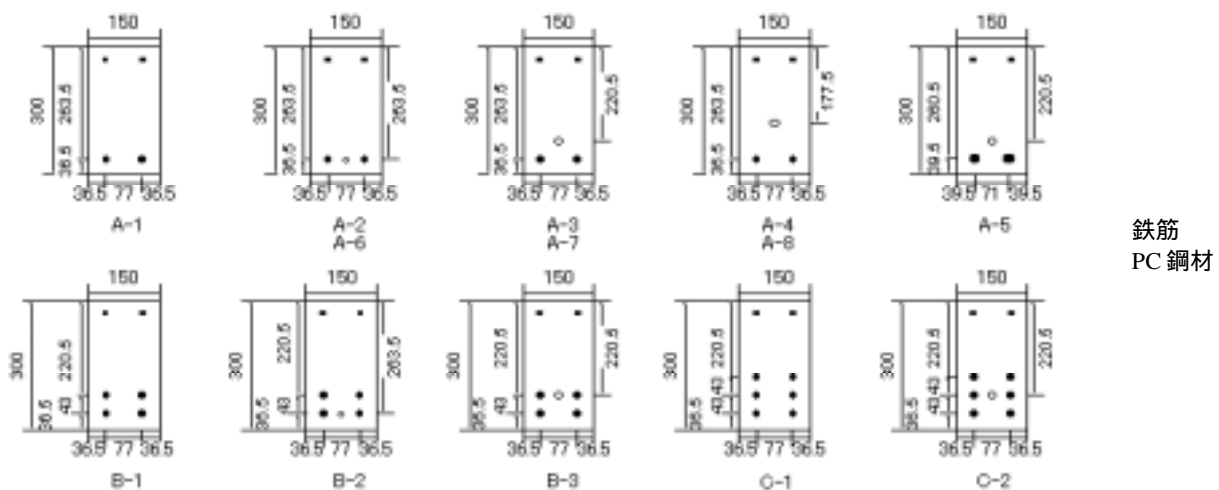


図 - 1 供試体断面寸法と配筋図

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

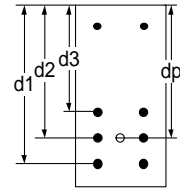
*2 埼玉大学 建設工学科 教授 工博 (正会員)

*3 埼玉大学 建設工学科 Post doctoral fellow Ph.D (正会員)

*4 (株)大林組 工修 [元埼玉大学大学院]

表 - 1 供試体諸元

Beam No.	Main reinforcements Bar					Prestressing Bar				Concrete strength (MPa)			
	Number of Layer	s	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	As/bd (%)	type	p (mm)	dp (mm)		c.ps (MPa)		
A-1	1	D13	263.5	-	-	0.641	Round bar	-	-	-	36.6		
A-2								11	263.5	43.1			
A-3								13	220.5	42.1			
A-4								15	177.5	46.6			
A-5		D19	260.5			-	-	1.47	Strand bar	13	220.5	4.35	45.4
A-6										10.8	263.5	37.5	
A-7										12.4	220.5	38.8	
A-8										15.2	177.5	38.0	
B-1	2	D13	263.5	220.5	1.396	Round bar	-	-	-	43.4			
B-2							11	236.5	4.35	46.7			
B-3							13	220.5	48.3				
C-1	3	-	-	177.5	2.298	Round bar	-	-	-	45.7			
C-2							13	220.5	4.35	45.7			



s, p: 鉄筋径, PC鋼材径 d1, d2, d3, dp: 梁上縁からの各段鉄筋及びPC鋼材高さ
c.ps: 引張縁におけるプレストレス導入量

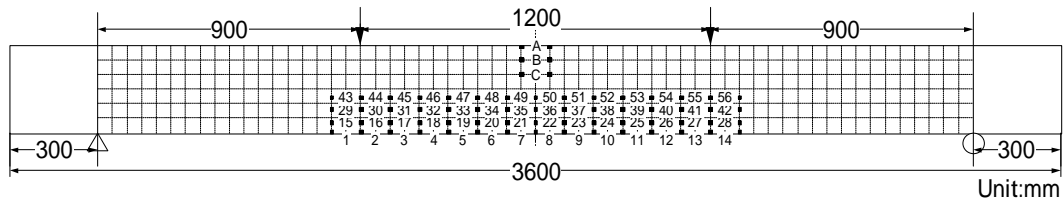


図 - 2 荷重方法及びひび割れ測定位置

を図 - 1, 供試体諸元を表 - 1 に示す。供試体は高さ 300mm, 幅 150mm の矩形断面で, 長さ 3600mm の梁を計 13 体作製した。また, 十分なひび割れ本数を得るために等曲げモーメント区間を 1200mm とした。引張鉄筋比は 0.641 ~ 2.298% で, せん断破壊が生じないように, せん断スパン内にスターラップ (D10 鉄筋) を 100mm ピッチで配置した。PC 鋼材には, PC 丸鋼 C 種 1 号 SBPR1080/1230 (各 11, 13, 15) 及び PC 鋼より線 SWPR7AL (各 10.8mm, 12.4mm, 15.2mm) を用いた。

表 - 1 に示すように, 各供試体は 1 段配筋を A-series, 2 段配筋を B-series, 3 段配筋を C-series としている。鉄筋段数は下から 1 段目, 2 段目, 3 段目としている。A-6 から A-8 には PC 鋼材に PC 鋼より線を用い, 他の供試体には PC 丸鋼を用いた。よって A-1, B-1, C-1 は RC 部材における鉄筋段数の影響, A-2, B-2 と A-3, B-3, C-2 は PRC 部材における鉄筋段数の影響, A-3, A-5 は鉄筋径 (鉄筋比) の影響, A-2, A-3, A-4 と B-2, B-3 及び A-6, A-7, A-8 は, それぞれ 1 段配筋と 2 段配筋及び PC 鋼材を PC 鋼より線にし

表 - 2 鉄筋の機械的性質

bar	fsy (MPa)	Es (GPa)
D10	395.5	150.1
D13	380.1	201.2
D19	400.8	204.8

表 - 3 PC 鋼材の機械的性質

Type	p (mm)	fpy (MPa)	fpu (MPa)	Eps (GPa)
Round bar	11	1231	1262	201
	13	1258	1296	201
	15	1199	1290	200
Strand bar	10.8	1464	1722	200
	12.4	1464	1722	200
	15.2	1471	1730	200

た場合の, PC 鋼材位置の影響を見るための供試体である。プレストレスは, 全供試体で引張縁応力 (4.35N/mm²) が等しくなるように導入した。荷重の準備直前まで湿布養生を行い, コンクリートの圧縮強度は表 - 1 に示す通りである。PRC 供試体に関しては荷重試験 2 日前にプレストレスを導入し, 特殊セメント系無収縮注入材によるグラウト注入を行った。鉄筋及び PC 鋼材の機械的性質をそれぞれ表 - 2, 表 - 3 に示す。

2.2 荷重及び測定方法

荷重は油圧ジャッキによる単調荷重とし, 計

測は荷重ステップ毎に行った。供試体表面及び鉄筋に貼り付けたひずみゲージにより圧縮域コンクリートと引張鉄筋のひずみを測定した。また供試体側面の各段鉄筋位置と底面より 10mm の位置に貼り付けたコンタクトチップ (100mm 間隔) により, 精度 1/1000mm のコンタクトゲージを用いて等曲げモーメント区間のひび割れ幅を測定した。同位置でひび割れ間隔を測定した。載荷方法とひび割れ測定位置を図 - 2 に示す。

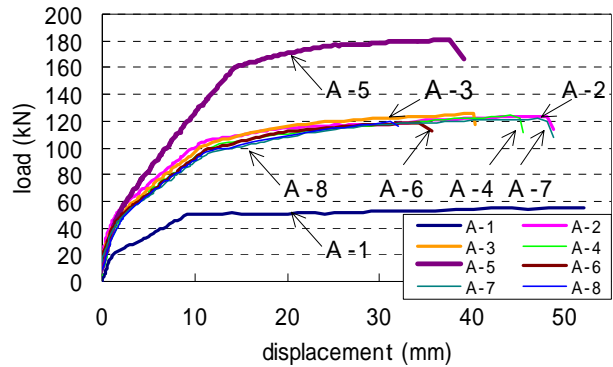


図 - 3 A-series 荷重 変位関係

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重 - 変位関係

A-series の荷重 - 変位関係を図 - 3 に示す。全ての供試体は曲げ挙動が卓越し, 曲げ引張破壊であった。各供試体の曲げひび割れ発生荷重は RC 供試体で 20kN ~ 25kN, PRC 供試体で 40 ~ 50kN であった。PRC 部材はプレストレスにより曲げひび割れの発生荷重が高くなり, その後の曲げ剛性は RC と同様に主筋比に応じて変化している。

3.2 曲げひび割れ間隔

表 - 4 にひび割れ間隔の実測値を示す。これより, RC 供試体においても PRC 供試体においても, 1 段配筋と多段配筋を比較すると多段配筋の方がひび割れ間隔は小さくなる。ただし, PRC 供試体における 2 段配筋と 3 段配筋 (B-3, C-2) を比較すると差が見られない。これは, 2 段目以上の鉄筋が中立軸に近いほど, 全鉄筋に生じる総付着応力は小さくなること⁴⁾, さらにプレストレスが鉄筋の応力度を減少させることでコンクリートとの付着応力が減少したことにより, 3 段目鉄筋の応力貢献が小さくなったためと考えられる。

次に, 鉄筋径の違い (A-3, A-5) がひび割れ間隔に及ぼす影響はほとんど認められなかった。これは A-5 も他の供試体とかぶりが等しく, 鉄筋間隔が小さいためである。土木学会による算定式³⁾におけるかぶりと鉄筋間隔に対する係数からも, ひび割れ間隔に及ぼす影響はかぶりの方が大きいと言える。また, 同程度の鉄筋比で

表 - 4 曲げひび割れ間隔実測値

Beam No.	Number of crack	Ave. (cm)	Max. (cm)	Max./Ave.
A-1	11	12.2	17.9	1.47
A-2	12	11.0	18.2	1.66
A-3	12	11.1	15.4	1.38
A-4	12	11.0	19.6	1.78
A-5	12	10.8	14.6	1.34
A-6	12	10.4	20.4	1.97
A-7	10	13.0	15.3	1.17
A-8	11	12.3	19.0	1.54
B-1	11	11.5	16.4	1.42
B-2	14	9.0	13.9	1.53
B-3	14	9.2	11.7	1.28
C-1	13	10.1	16.2	1.60
C-2	14	8.8	13.2	1.50

ある A-5 と B-3 を比較すると, 2 段配筋である B-3 の方がひび割れ間隔は小さい。すなわち, ほぼ同一鉄筋量であれば, 鉄筋径を小さくし多段配筋にした方が, ひび割れ間隔は小さくなる。したがって, ひび割れ制御においてより有効だと言える。

また, A-2, B-2 は PC 鋼材が最下段鉄筋位置にあるため PC 鋼材を引張鋼材 (ここでは, 通常の異形鉄筋と同様に, 引張力を受け持ち, 十分な付着性状を有する鋼材と定義する) の一つと考えれば, 鋼材の中心間隔が小さくなるためにひび割れ間隔に変化が生じると考えたが, その影響は見られなかった。これは異形鉄筋と PC 丸鋼では付着性状が異なり, PC 鋼材の付着の影響が異形鉄筋に比べ小さいため, 結果としてひび割れ間隔に差が出なかったと考えられる。しかしながら A-6 は, A-7, A-8 と比較してひび割れ間隔が小さくなっている。これは, PC 丸鋼より PC 鋼より線の方が付着性状に優れているため,

PC 鋼より線が引張鋼材として働いていることを示している。

3.3 曲げひび割れ幅

図 - 4 に鉄筋段数の違いによる荷重 - 最大ひび割れ幅関係を示す。なお、本稿において最大ひび割れ幅は、1 段目の鉄筋位置において測定されたひび割れの中から最も大きい 3 つのひび割れの平均値を用いた。図より RC 供試体においても PRC 供試体においても多段配筋の影響は明らかであるが、B-3 と C-2 の間に差が生じていない。各種算定式におけるひび割れ幅の算定には鉄筋の応力増加量を用いるが、これは最外縁の鉄筋、すなわち本研究における 1 段目鉄筋を対象としている。

図 - 5 に鉄筋径の違いによる荷重 - 最大ひび割れ幅関係を示す。鉄筋径は顕著に異なるが、ひび割れ間隔で述べたようにひび割れ間隔そのものには大きな差がないため、鉄筋径の違いによる影響は、引張鋼材の応力度増加量、すなわち鉄筋ひずみの増分として表れると言える。(図 - 4 参照)

図 - 6 に PC 鋼材位置の違いによる荷重 - 最大ひび割れ幅関係を示す。1 段配筋 (A-2, A-3, A-4) および 2 段配筋 (B-2, B-3) においても、PC 鋼材位置による影響は見られない。これはひび割れ間隔で述べたことに加え、引張縁でのプレストレス導入量を等しく設計しているため、鉄筋ひずみの増加量が等しくなったためである。このことから、PC 丸鋼の曲げひび割れ幅に対する主な役割は、引張鉄筋応力度の制御にあるといえる。しかしながら、PC 鋼材に PC 鋼より線を用いた場合、A-7, A-8 には PC 丸鋼の場合と同様に差は生じなかったが、最下段鉄筋位置に PC 鋼より線を配置した場合 (A-6), 同荷重時におけるひび割れ幅を小さく抑えられていることが確認できた (図 - 7)。これは、PC 鋼より線が PC 丸鋼よりも付着強度が高いため、ひび割れ間隔が小さくなったことによると考えられる。すなわち、PC 鋼より線は曲げひび割れ性状において引張鉄筋応力度の制御に加えて、ひび割れ

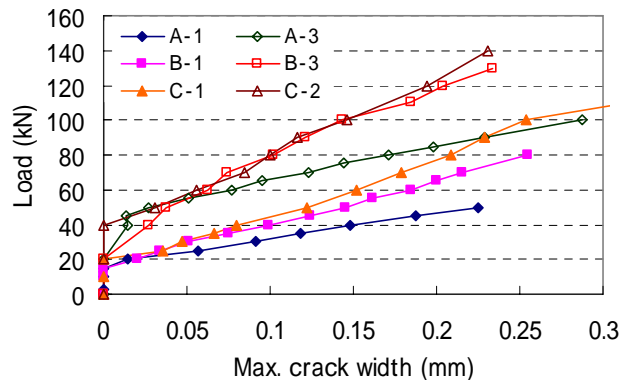


図 - 4 鉄筋段数の違いによる荷重 - 最大ひび割れ幅関係

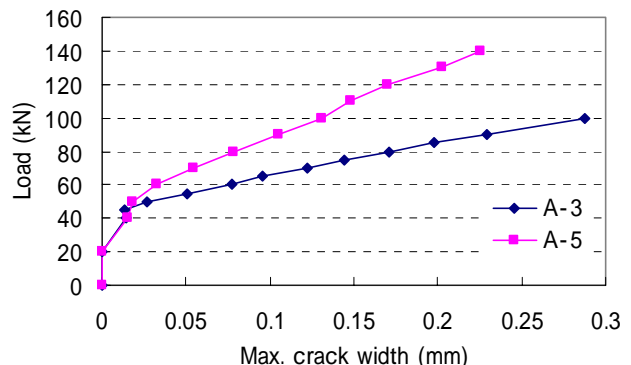


図 - 5 鉄筋径の違いによる荷重 - 最大ひび割れ幅関係

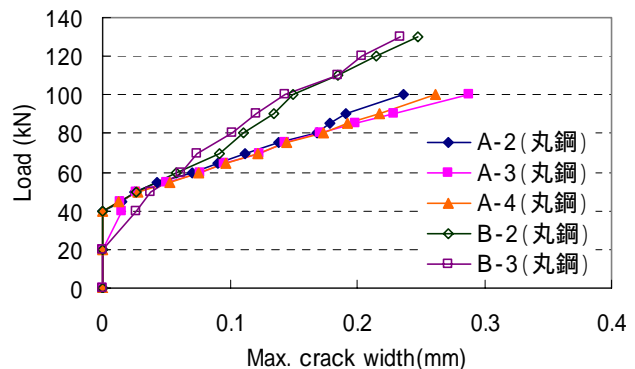


図 - 6 PC 鋼材位置の違いによる荷重 最大ひび割れ幅関係 (丸鋼)

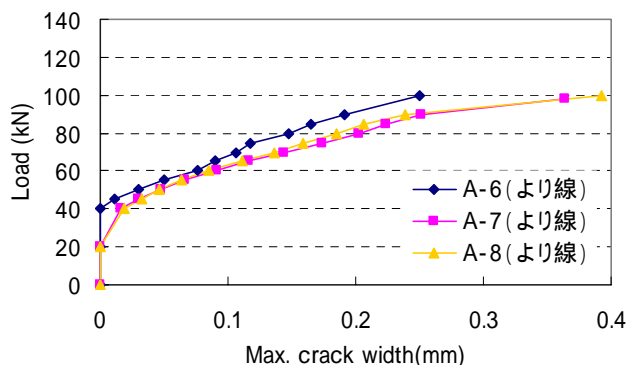


図 - 7 PC 鋼材位置の違いによる荷重 最大ひび割れ幅関係 (より線)

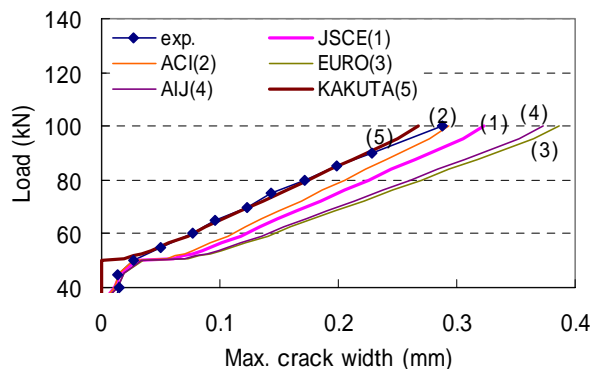
幅を制御する鋼材として働いたものと考えられる。なお、今回の実験では、PC 鋼より線と PC 丸鋼を用いた供試体のコンクリートの圧縮強度が異なったため、ひび割れ幅の大小に関して明確には結論づけることができず、今後の検討課題である。

4. 既往の曲げひび割れ幅算定式の検討

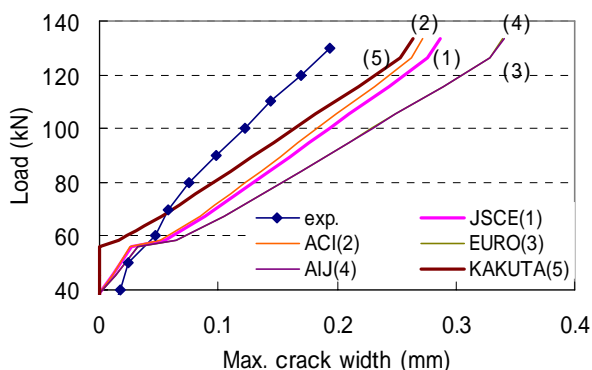
既往の研究により、実験で得られた鉄筋ひずみの値を用いて各算定式にてひび割れ幅を算出した結果、PRC 梁においても既往の曲げひび割れ幅算定式は PC 鋼材に丸鋼を用いた場合に概ね適用可能であることがわかった⁸⁾。しかしながら、設計手法としての見地に立つと計算により鉄筋ひずみを求め、算定式に代入し、それにより求めたひび割れ幅と実験値を比較する必要がある。そこで Fiber Model⁹⁾ により計算される鉄筋の平均ひずみを各ひび割れ算定式に代入し、荷重 - 最大ひび割れ幅の関係を求め、各算定式の比較検討を行った。なおクリープ及び乾燥収縮は考慮していない。図 - 8 に A-3, B-3, C-2 供試体について、最大ひび割れ幅の実験値と計算値の比較を示す。今回比較に用いた算定式は、土木学会式³⁾、ACI Code⁵⁾、建築学会 PRC 式⁶⁾、角田の式⁴⁾、EURO Code⁷⁾である。ひび割れ幅の位置は ACI 式が梁引張縁位置としている以外は、梁側面主筋位置としている。

図 - 8(a) A-3 供試体を見ると、すべての既往の算定式は、実験値と比較的精度良く一致していることがわかる。しかし(b) B-3, (c) C-2 供試体を見ると、荷重が増大するにつれて過大に評価する傾向が強くなっている。その点は今後の課題であり、更なるデータの蓄積を要するが照査設計では、効率よく安全側に算定することが重要である。したがって、本研究の解析のように実務レベルに合わせた手法により、ひび割れ幅の精度良い推定が可能であると判断される。

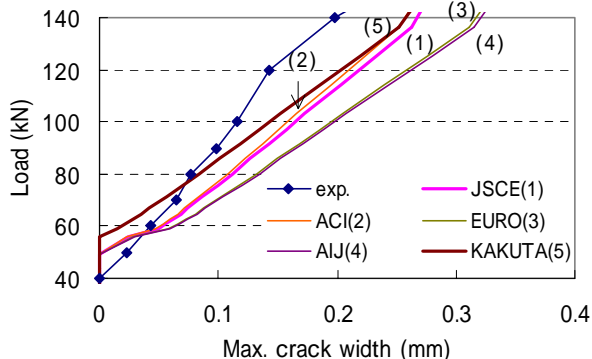
次に、PC 鋼材を引張鋼材として考慮するかという課題があるが、実験結果の考察で述べたとおり、PC 鋼より線を最下段に配置した場合は PC



(a) A-3 供試体



(b) B-3 供試体



(c) C-2 供試体

図 - 8 既往の各算定式の比較

鋼材が引張鋼材として働き、ひび割れをより小さく抑えられることが分かった。図 - 9 に A-6 において PC 鋼材を引張鋼材として考慮した場合の荷重 - 最大ひび割れ幅関係を示す。これより、PC 鋼より線を最下段主鉄筋位置に配置する場合、PC 鋼材を引張鋼材として考慮してひび割れ幅を算定した方が精度よくひび割れ幅を算定できると考えられる。

5. まとめ

PRC 梁の曲げひび割れ性状に関する実験を行い、実験結果の検討により、以下の結論を得た。

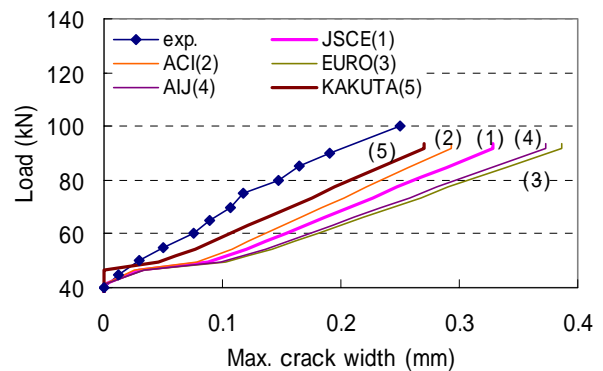
- 1) PRC 梁の曲げひび割れ性状は多段配筋の影響を受ける。ただし、2 段目以上の鉄筋が中立軸に近いほど、その影響が薄れる。
- 2) PRC 梁において、プレストレスによる引張縁応力が等しい場合、PC 鋼材高さの違いによる曲げひび割れ性状への影響は PC 鋼より線では見られるが、PC 丸鋼では見られない。
- 3) 断面解析より求めた鉄筋ひずみを用いて既往の各種算定式と実験値を比較し、その適用性を検討したところ、PC 丸鋼は引張鋼材として考慮せずに適用可能であることが確認できた。しかし、PC 鋼より線は引張鋼材として働くためひび割れ制御に有効であることが明らかとなった。

謝辞

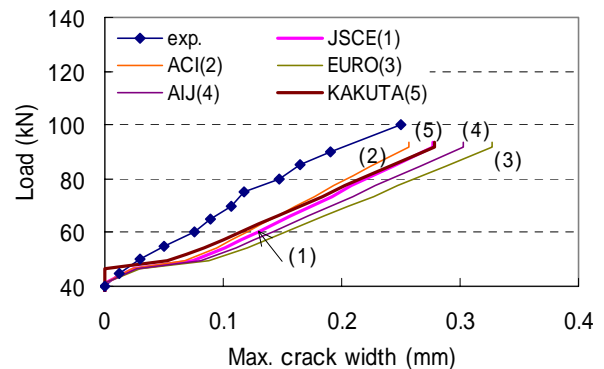
本研究は日本道路協会の PRC 設計マニュアル作成委員会の一環として行われたものである。同委員会委員から貴重な助言を頂いた。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 角田 与史雄:PRC 桁の曲げ特性に関する実験, プレストレストコンクリート, Vol.15, No.3, 1973.6
- 2) 趙 唯堅,丸山 久一:多段配筋を有する鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ性状に関する実験的研究,土木学会論文集, No.490/V-23, pp.137~145, 1994.5
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書構造性能照査編, 2002
- 4) 趙 唯堅,丸山 久一:鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ性状算定式の再評価,土木学会論文集, No.490/V-23, pp.147~156, 1994.5
- 5) American Concrete Institute, "Building Code



(a) PC 鋼より線を非考慮



(b) PC 鋼より線を引張鋼材として考慮

図 - 9 PC 鋼より線の考慮 (A-6 供試体)

Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95),” Farmington Hills, MI, 369 pp., 1995

- 6) 日本建築学会:プレレスト鉄筋コンクリート(種 PC)構造設計・施工指針・同解説, 1986
- 7) British Standards Institution, “Design of Concrete Structures Part 1: General Rules and Rules for Buildings (DD-ENV1991-1-1 Euro code 2),” BSI Milton Keynes, UK, 254 pp., 1992
- 8) 倉岡希樹,睦好宏史:プレレスト鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1663~1668, 2004
- 9) 睦好 宏史, 土田 一輝, Matupayont S., 町田 篤彦:外ケーブル PC 部材の曲げ性状および曲げ耐力算定法に関する研究,土木学会論文集, No.508/V-26, pp.67-77,1995