

報告 曲げひび割れ幅算定式の適用性の評価

栖原 健太郎*1・辻 幸和*2・吉野 亮悦*3・岡村 雄樹*4

要旨：有効高さが異なる4種類の鉄筋コンクリート梁と、膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリート梁の曲げ載荷試験を行い、代表的な曲げひび割れ幅の算定式（土木学会コンクリート標準示方書，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，ACI 318-05，BS EN1992-1-1:2004）との比較を行った。いずれの算定式も、曲げひび割れ幅の最大値を過小に評価する傾向にあった。また、曲げひび割れ幅の支配因子として、かぶりや鉄筋の中心間隔以外に、有効高さの影響を考慮することが精度の高い算定式を構築する上での今後の課題であることを提示する。

キーワード：鉄筋コンクリート梁，曲げひび割れ幅，曲げひび割れ幅の算定式，有効高さ

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の曲げひび割れ幅の算定方法の多くは、力の釣合い条件において、鉄筋とコンクリートの付着強度がコンクリートの引張強度に比例するとの仮定を用いて導かれたひび割れ間隔の理論式に基づいている。ひび割れ幅は、鉄筋の引張ひずみにコンクリートのひずみが追従できなくなり、そのひずみの差がひび割れ位置に集中して現れるものである。すなわち、曲げひび割れ幅は、ひび割れ間隔に関する項と、鉄筋とコンクリートのひずみの差に関する項の積で表現される¹⁾。平均ひび割れ間隔や鉄筋の平均ひずみの求め方において、対象とする予測モデルの具体的な境界条件により、各種の算定式が導かれている。

曲げひび割れ幅の評価において、RC梁の有効高さを要因とした既往の研究²⁾では、RC梁の有効高さが大きくなると、同一の引張鉄筋のひずみであっても曲げひび割れ幅が大きくなることが示された。

本文では、有効高さが異なる4種類の鉄筋コンクリート梁（以下、RC梁）と、膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリート梁（以下、CPC梁）の曲げ載荷試験を行い、代表的な曲げひび割れ幅の算定式の適用性について検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 実験概要

梁供試体は、有効高さを4水準、膨張材の使用の有無の2水準として、合計8水準とした。また、同一の水準について3体の供試体を作製し、合計24体を実験対象とした。供試体の断面形状を図-1に、コンクリートの配合を表-1に示す。

膨張コンクリートには、標準混和量が30kg/m³のエト

リンガイト系の膨張材を60kg/m³混和した。JIS A 6202 附属書2における材齢7日の一軸拘束膨張率は、約600×10⁻⁶であった。

曲げ載荷方法は、曲げモーメントの一定区間を有する三等分点載荷とした。載荷条件を図-2および表-2に

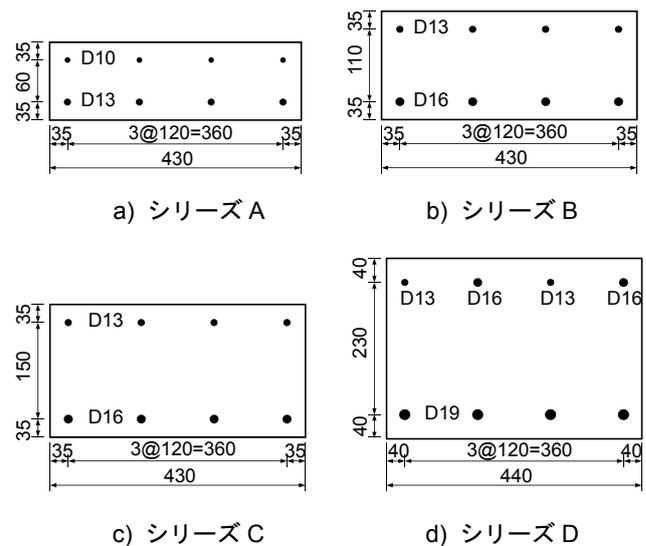


図-1 梁供試体の断面図

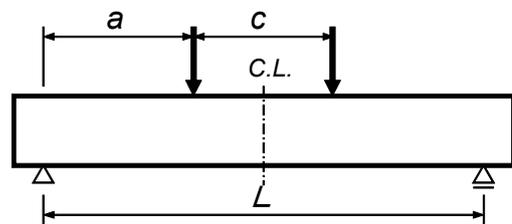


図-2 曲げ載荷実験

*1 電気化学工業株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 博士（工学）（正会員）

*2 前橋工科大学 学長 工学博士（正会員）

*3 電気化学工業株式会社 青海工場 特殊混和材部

*4 前橋工科大学 社会環境工学科 工学博士（正会員）

表-1 コンクリートの配合

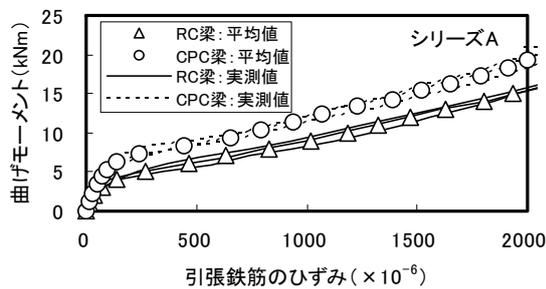
	Gmax	スランブ	空気量	W/C+Ex	s/a	
	(mm)	(cm)	(%)	(%)	(%)	
RC 梁	20	8	2.0	47	49	
CPC 梁	20	8	2.0	45	48	
	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	Ex	S	G	Ad.
RC 梁	168	357	0	904	955	1.97
CPC 梁	168	313	60	879	967	2.05

表-2 曲げ載荷実験の条件

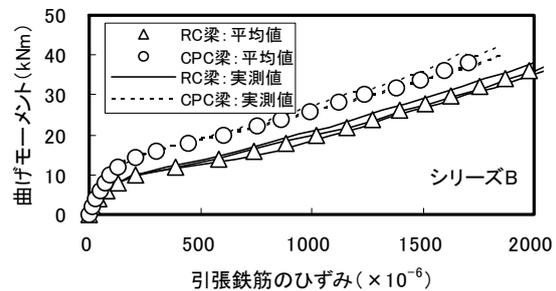
シリーズ	A	B	C	D
供試体数	3	3	3	3
支点間距離 c (mm)	600	700	800	1000
せん断スパン a (mm)	600	700	800	1000
せん断スパン比 a/d	6.32	4.83	4.32	3.70
圧縮強度 (N/mm ²)	RC	46.4	38.7	43.3
	CPC	40.9	40.9	47.0
長さ変化率 ^{*1} ($\times 10^{-6}$)	600	600	670	650
仕事量 ($\times 10^{-5}$ N/mm ²) ^{*2}	7.6	9.1	11.2	12.3

*1 JIS A6202 附属書2 材齢7日の一軸拘束膨張率

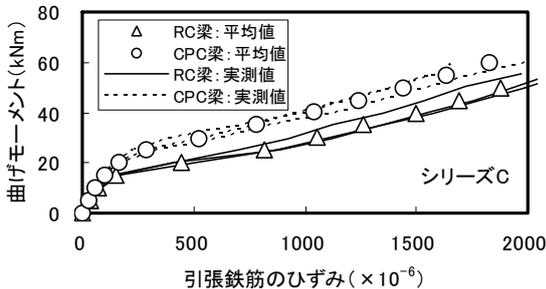
*2 CPC 梁の曲げ載荷試験時の仕事量 U ³⁾ の平均値



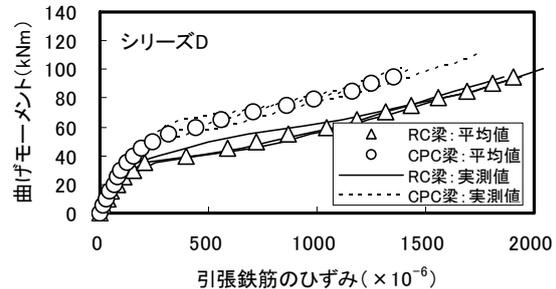
a) シリーズA



b) シリーズB



c) シリーズC



d) シリーズD

図-3 引張鉄筋のひずみと曲げモーメント

示す。

測定項目は、ワイヤストレーンゲージによる曲げモーメントの一定区間内での引張鉄筋および圧縮鉄筋のひずみ、圧縮縁および引張縁のコンクリートのひずみとした。また、曲げひび割れ幅は、梁供試体側面の曲げモーメントの一定区間内における引張鉄筋の有効高さの位置に連続して設置した標点距離が 100mm のパイ型変位計を用いて計測した。測定した曲げひび割れ幅は、等曲げモーメント区間内に発生したものの中から最大の値を示したものを最大値、曲げひび割れ幅が大きいものから3本を選定してこれらを平均したものを代表値、すべての曲げひび割れ幅を平均したものを平均値として整理した。

2.2 引張鉄筋のひずみ

各シリーズの引張鉄筋のひずみと曲げモーメントの関

係を図-3 に示す。供試体3体の個々の値と、その平均値を併記した。CPC 梁の曲げひび割れ発生荷重は、導入されたケミカルプレストレスにより、RC 梁よりも大きな値を示した。また、曲げひび割れ発生後、同一の曲げモーメントの作用時における CPC 梁の引張鉄筋のひずみは、外力を受ける前に引張鉄筋には引張ひずみであるケミカルプレストレスが導入されているため、RC 梁に比べてほぼその値だけ小さくなった。

3. 各曲げひび割れ幅の算定式

検討対象とした曲げひび割れ幅の算定式は、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾ (以下、JSCE 式)、EN1992-1-1:2004⁵⁾ (以下、EN 式)、ACI Building Code⁶⁾ (以下、ACI 式)、プレストレス鉄筋コンクリート (III

表-3 曲げひび割れ幅の算定式

JSCE 式	ACI 式
$w = 1.1 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right]$ <p> w : 曲げひび割れ幅 (mm) k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す定数 k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数 c : 引張鉄筋のかぶり (mm) c_s : 引張鉄筋の中心間隔 (mm) ϕ : 引張鉄筋の径 (mm) σ_{se} : 引張鉄筋の引張応力度 (N/mm²) E_s : 引張鉄筋の弾性係数 (N/mm²) ε'_{csd} : コンクリートの乾燥収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 </p>	$w = 76 \beta \sigma_s (c_0 A_e)^{1/3} \times 10^{-6}$ <p> w : 曲げひび割れ幅 (in) β : コンクリートの引張力を無視して計算した中立軸から引張縁の距離と中立軸から引張鉄筋までの距離の比率, 一般にはりの場合 1.2 として良い σ_s : 引張鉄筋の引張応力度 (ksi) c_0 : 引張縁から引張鉄筋の中心までのかぶり (in) A_e : コンクリートの有効断面積で, 鉄筋の重心とその重心が一致するようにとった引張部の断面積を鉄筋の数で除した値 (in²) </p>
EN 式	PRC 式
$w_k = S_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$ $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \cdot \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}$ <p> 区間 C : $S_{r,max} = k_3 \cdot c + k_1 \cdot k_2 \cdot k_4 \cdot \frac{\phi}{\rho_{p,eff}}$ 区間 D : $S_{r,max} = 1.3(h - x)$ </p> <p> w_k : 曲げひび割れ幅 (mm) σ_s : 引張鉄筋の応力度 (N/mm²) E_s : 鉄筋の弾性係数 (N/mm²) α_e : 弾性係数比 $\rho_{p,eff}$: 有効鉄筋比 $A_s/A_{c,eff}$ $A_{c,eff}$: コンクリートの有効断面積で, 鉄筋の重心とその重心が一致するようにとった引張部の断面積 (mm²) $f_{ct,eff}$: コンクリートの引張強度 (N/mm²) k_t : 荷重の持続期間に関する係数, 長期で 0.4, 短期で 0.6 ϕ : 鉄筋径 (mm) c : かぶり (mm) k_1 : 付着に関する係数で, 異形鉄筋は 0.8, PC 鋼棒などは 1.6 k_2 : ひずみ分布に関する係数 k_3 および k_4 : 推奨値は, それぞれ 3.4 と 0.425 </p>	$w_{max} = 1.5 w_{av}, \quad w_{av} = l_{av} \cdot \varepsilon_{t-av}$ $l_{av} = 2 \left(c + \frac{s}{10} \right) + k \frac{\phi}{p_e}, \quad \varepsilon_{t-av} = \frac{1}{E_s} \left(\sigma_t - k_1 k_2 \frac{F_t}{p_e} \right)$ $k_1 k_2 = \frac{1.25}{2.5 \times 10^3 \varepsilon_{t-av} + 1.0}$ <p> w_{max} : 最大ひびわれ幅 (cm) w_{av} : 平均ひびわれ幅 (cm) l_{av} : 平均ひびわれ間隔 (cm) ε_{t-av} : 平均鉄筋ひずみ σ_t : ひびわれ断面における鉄筋応力 (kgf/cm²) F_t : コンクリートの引張強度 (kgf/cm²) p_e : コンクリートの有効断面積に対する引張鉄筋比 k : 係数 (はりが 0.1, スラブが 0.0025t) ϕ : 鉄筋径 (cm) c : 鉄筋のかぶり厚さ (cm) s : 鉄筋間隔 (中心距離) (cm) E_s : 引張鉄筋の弾性係数 (kgf/cm²) $k_1 k_2$: 係数, 実験式 </p>

種 PC) 構造設計・施工指針・同解説⁷⁾ (以下, PRC 式) に示されている 4 つの式とした。それぞれの算定式の概略を表-3 に示す。

いずれの算定式も, ひび割れ間隔に相当する項とひずみ差に相当する項の積で表現される。JSCE 式は, ひび割れ間隔の支配因子としてかぶりや鉄筋の中心間隔を与えている。ACI 式は, かぶりの他に有効鉄筋比や中立軸からの距離を支配因子として表現している。EN 式や PRC 式では, 鉄筋とコンクリートのひずみの差を, 付着理論における力の釣合いから求め, 付着強度はコンクリート

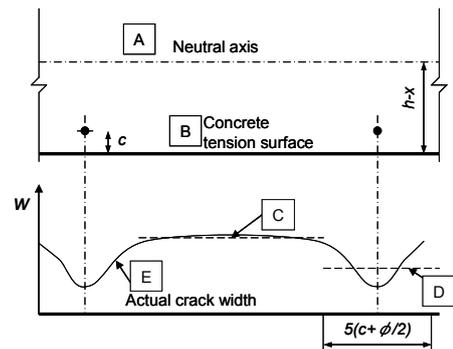


図-4 区間 C と区間 D (EN 1992-1-1)

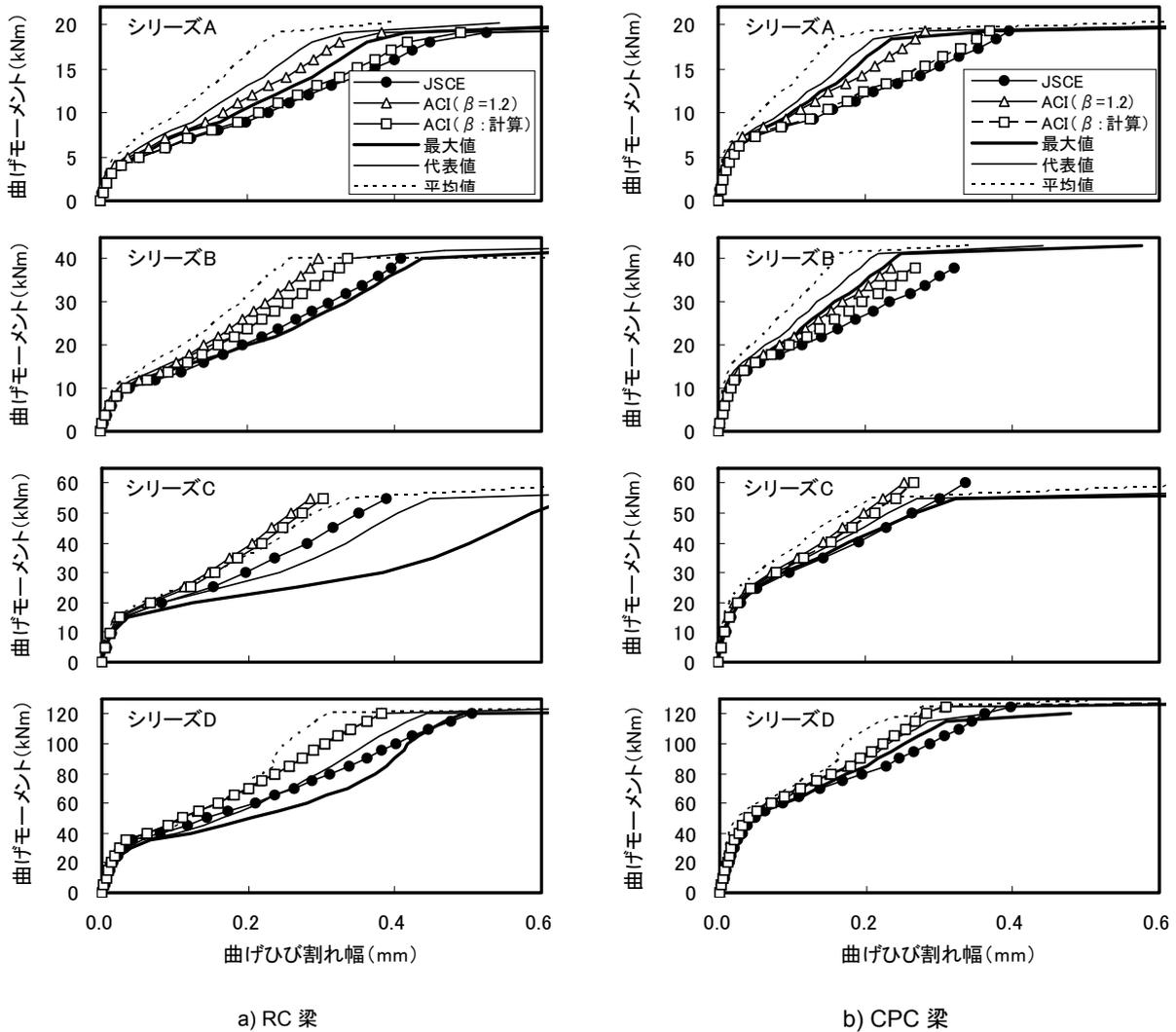


図-5 曲げひび割れ幅の比較 (JSCE 式および ACI 式)

引張強度に比例するとの仮定から、引張強度を因子として加えている。なお、EN 式における最大ひび割れ間隔 $S_{r,max}$ は、図-4 に示す鉄筋間の中央付近 (区間 C) と鉄筋近傍 (区間 D) とで区別しており、実際のひび割れは、この両者の間の値をとることになる。

4. 曲げひび割れ幅の比較

4.1 JSCE 式との比較

図-5 は、曲げひび割れ幅の最大値、代表値および平均値と、引張鉄筋のひずみの実測値から求まる JSCE 式による算定値を比較したものである。

RC 梁において、JSCE 式は、有効高さが小さい場合には実測値に対して過大評価 (安全側) となるが、有効高さが大きい場合には過小評価 (危険側) となる傾向がある。また、シリーズ B とシリーズ C は、JSCE 式の断面形状や鉄筋の配置に関する項目を同一としており、鉄筋のひずみが同一の場合、曲げひび割れ幅は同じ算定値と

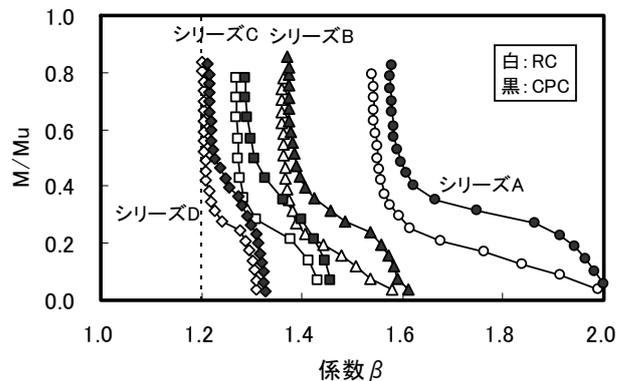


図-6 係数 β (ACI 318)

なる。しかし、シリーズ B では実験値に対して過大評価 (安全側)、シリーズ C では実験値に対して過小評価 (危険側) となった。曲げひび割れ幅は、かぶりや鉄筋の中心間隔など以外にも、梁の有効高さの影響を受けること

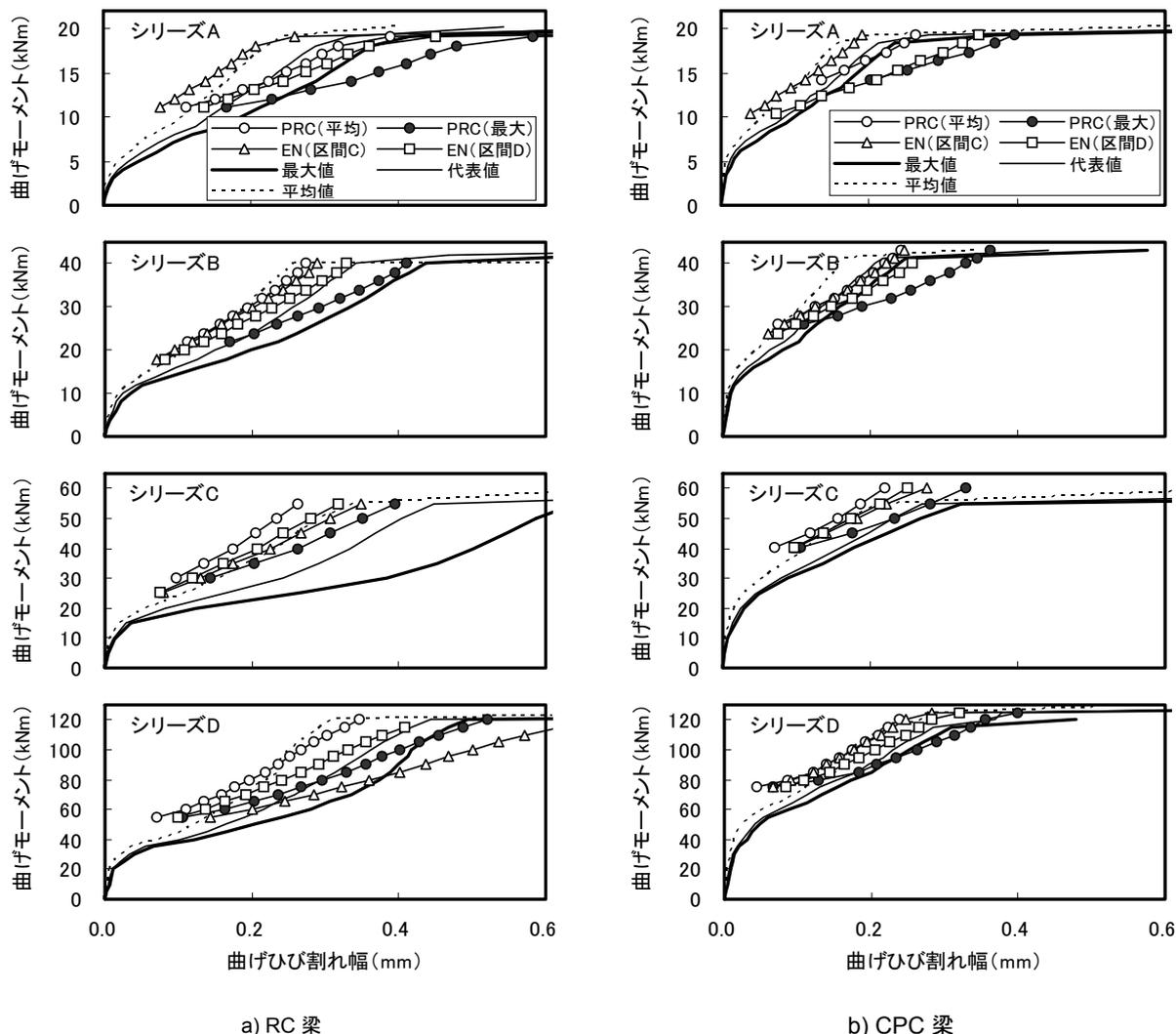


図-7 曲げひび割れ幅の比較 (EN 式および PRC 式)

が示唆される。

一方、CPC 梁では、RC 梁よりも安全側の評価を示しているが、有効高さの違いによる算定値との差異は、RC 梁と同様の傾向があるといえよう。

4.2 ACI 式との比較

前節と同様に、図-5 に ACI 式による算定値を併記した。なお、ACI 式における係数 β は、「コンクリートの引張力を無視して計算した中立軸から引張縁の距離と中立軸から引張鉄筋までの距離の比率、一般にはりの場合 1.2 として良い」と解説されているが、この β を 1.2 とした場合と、梁断面内の圧縮鉄筋および引張鉄筋のひずみの測定値から平面保持の仮定を適用して求めた中立軸をもとに β を算定した場合を「 β : 計算」として併記した。

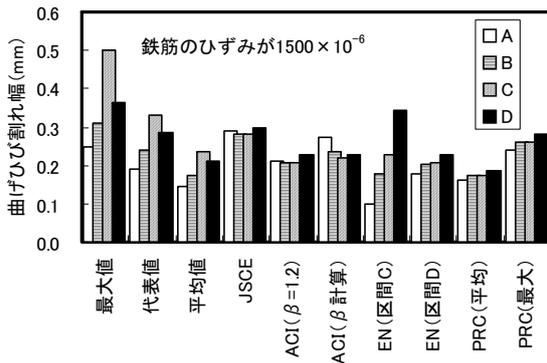
全体として JSCE 式と同様の傾向を示すが、同一の曲げモーメントにおける曲げひび割れ幅の絶対値は JSCE 式よりも小さい。また、有効高さが大きくなるにしたがい、算定値は曲げひび割れ幅の平均値に一致する傾向が

認められる。

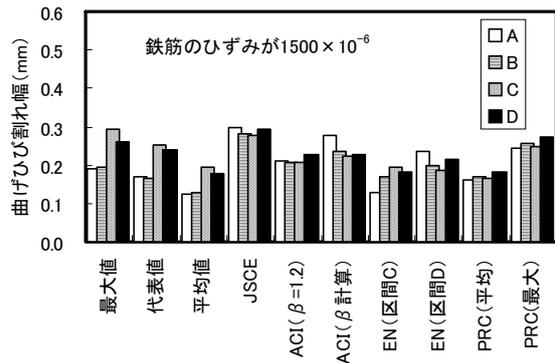
ACI 式において係数 β を算定したものは、有効高さが小さい場合には過大に評価し、JSCE 式にはほぼ一致する。一方、有効高さが大きい場合には、過少に評価し、係数 β を一定として算定した ACI 式にはほぼ一致する。図-6 に、実験から得られた中立軸の位置を用いて算定した係数 β を、曲げ耐力に対する作用曲げモーメントの比 (M/M_u) で整理したものを示す。有効高さの小さい梁の係数 β は、曲げひび割れの発生後においても大きな値を示し、逆に有効高さの大きい梁では、1.2 に近づいていることがわかる。ACI 式では、有効高さが小さい場合には、曲げひび割れ幅を過少に評価する傾向があるといえる。ACI 式において係数 β を 1.2 と一定にして算定した値は、有効高さが比較的大きな梁を対象にした場合であるといえよう。

4.3 EN 式

図-7 に、曲げひび割れ幅の実測値と EN 式による算



a) RC 梁



b) CPC 梁

図-8 各算定式の曲げひび割れ幅の比較 (鉄筋のひずみの増加分が 1500×10^{-6})

定値を示す。なお、EN 式は、曲げひび割れが区間 C および区間 D にそれぞれ生じた場合を併記した。

EN 式では、有効高さが小さい場合、いずれも実測値に対して過小評価 (危険側) となる。そして、同一の曲げモーメントでは、区間 C よりも区間 D の曲げひび割れ幅が大きい。一方、有効高さが大きくなると、区間 C の曲げひび割れ幅が区間 D よりも大きくなる傾向が認められた。

4.4 PRC 式

同様に、PRC 式における平均ひび割れ幅、最大ひび割れ幅の算定値を図-7 に併記した。

PRC 式では、有効高さが小さい場合、実測値に対して過大評価 (安全側) となるが、シリーズ B、C および D では、過小評価 (危険側) の傾向が認められる。

4.5 各算定式のまとめ

図-8 は、鉄筋のひずみの増加分が 1500×10^{-6} のときの曲げひび割れ幅を各算定式で整理したものである。JSCE 式および ACI 式は、有効高さが違っても算定値に及ぼす影響は小さい。EN 式 (区間 D)、PRC 式では、有効高さが大きくなることで、曲げひび割れ幅が大きくなる傾向が認められる。特に、RC 梁における EN 式 (区間 C) では、有効高さが大きくなるに従い、曲げひび割れ幅が大きくなることを確認できる。

全体として、RC 梁における各算定式による算定結果は、実測の曲げひび割れ幅の最大値よりも小さく危険側の評価にあるといえる。一方、CPC 梁では、JSCE 式で実測値よりも算定値が大きく安全側の評価といえる。

5. まとめ

有効高さが異なる RC 梁および CPC 梁の曲げひび割れ幅を測定し、各算定式との対比を行った結果、以下の知

見を得た。

- (1) 各算定式は、RC 梁の曲げひび割れ幅の最大値を過小に評価する傾向がある。
- (2) 曲げひび割れ幅の支配因子は、かぶりや鉄筋の中心間隔以外に、有効高さの影響がある。有効高さの影響を考慮することが精度の高い算定式を構築する上で課題といえよう。

参考文献

- 1) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状，土木学会論文集，第 384 号，V-7，pp.21-32，1987.8
- 2) 栖原健太郎，岡村雄樹，辻幸和，吉野亮悦：有効高さが異なる RC 梁と CPC 梁の曲げひび割れ幅，セメント・コンクリート論文集，No.66/2012，pp.326-331，2013
- 3) 辻幸和：ケミカルプレストレスの推定方法について，セメント技術年報 XXV II，pp.340-344，1973
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 (設計編) 2007 年制定，2008
- 5) British Standard Institution：Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings，BS EN1992-1-1:2004
- 6) American Concrete Institute: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)，2005
- 7) 日本建築学会：プレストレス鉄筋コンクリート (III種 PC) 構造設計・施工指針・同解説，1986