有効高さが異なる RC 梁と CPC 梁の曲げひび割れ幅

栖原健太郎^{*1} 岡村雄樹^{*2} 辻幸和^{*3} 吉野亮悦^{*4}

^{*1} 電気化学工業株式会社 青海工場セメント・特混研究部(〒949-0393 新潟県糸魚川市青海 2209)

^{*2} 前橋工科大学 社会環境工学科(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番地 1)

^{*3} 前橋工科大学(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番地 1)

^{*4} 電気化学工業株式会社 青海工場特殊混和材部(〒949-0393 新潟県糸魚川市青海 2209)

要旨：有効高さのみを 145mm と 185mm に変化した鉄筋コンクリート梁(RC 梁)と膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリート梁(CPC 梁)の曲げ載荷実験を行い、引張鉄筋のひずみと曲げひび割れ幅の関係を検討した。併せて、土木学会コンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅の算定式と対比した。その結果、引張鉄筋のひずみが同一の場合、RC 梁および CPC 梁ともに、梁の有効高さが大きいものほど曲げひび割れ幅が大きな値となる傾向が認められた。また、この傾向は、曲げひび割れ幅の最大値、ならびに CPC 梁よりも RC 梁においてより顕著となることを確認した。

キーワード：曲げひび割れ幅、有効高さ、引張鉄筋のひずみ、膨張コンクリート、ケミカルプレストレイン

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の曲げひび割れ幅の評価は、数多くの研究成果に基づき、種々の算定式が提案されてきた。その中で、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は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き、平均ひび割れ幅は、平均ひび割れ間隔とひび割れ間の鉄筋の平均ひずみの積で表すことができるとされている。そして、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。

角田は、異形鉄筋の付着強度がコンクリートの引張強度だけでなく、かぶり、鉄筋径および有効コンクリートの断面積にも関係するようにひび割れ間隔を一般化した表示式を用いることで、鉄筋の配置のみをパラメータとした簡易なひび割れ間隔の算定式を提案した¹⁾。土木学会は、この研究成果を受けて、1986 年および 1991 年のコンクリート標準示方書の中で曲げひび割れ幅の算定式を定めた。その後、引張鋼材の段数の影響を表す係数^{2, 3)}、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^{4, 5)}が提案され、2002 年制定のコンクリート標準示方書[構造性能照査編]⁶⁾に採り込まれ、2007 年制定版のコンクリート標準示方書[設計編]⁷⁾に引き継がれている。

本論では、有効高さのみを 145mm と 185mm と変化した鉄筋コンクリート梁(以下、RC 梁と略称する)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 梁と略称する)の曲げ載荷実験を行って、曲げひび割れ幅を計測し、土木学会コンクリート標準示方書⁷⁾の

曲げひび割れ幅の算定式(以降、JSCE 式と略称する)と対比して示す。また、引張鉄筋のひずみが同一の場合、梁の有効高さが大きいものほど曲げひび割れ幅が大きな値となる傾向が認められた。また、この傾向は、曲げひび割れ幅の最大値、ならびに CPC 梁よりも RC 梁においてより顕著になることを報告する。

2. 実験概要

Fig. 1 に各シリーズの梁供試体の断面形状寸法と曲げ載荷方法を、Table 1 に載荷条件を示す。供試体は、梁の有効高さのみを 145mm と 185mm の二通りとして、それぞれ普通コンクリートを用いた RC 梁と膨張コンクリートを用いた CPC 梁を 3 体ずつ作製し、合計 12 体の梁供試体を実験の対象とした。Fig. 1 に示すようにシリーズ A とシリーズ B とで、梁の有効高さは異なるが、かぶり、鉄筋径、鉄筋量、鉄筋の配置方法は同一であり、後述する JSCE 式に基づけば、同一の鉄筋のひずみであれば、曲げひび割れ幅は同じ値を示すことになる。

コンクリートの配合を Table 2 に示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用した。また、膨張材にはエトリンガイト系の膨張材を用いて、セメントの内割で 60kg/m³ を混和した。

供試体の養生は蒸気養生を施した後、材齢 28 日における載荷実験まで気乾養生とした。蒸気養生は、コンクリートを打ち込んでから 4~5 時間後に開始し、昇温速度は 1 時間当たり 20℃とした。また、65℃で 4 時間保持した後、自然冷却し、材齢 1 日で脱型した。

測定項目は、ワイヤストレインゲージによる等曲げモーメント区間内での引張鉄筋および圧縮鉄筋のひずみ、圧

Fig. 1 Cross section of Specimens and flexural test

Table 2 Mix proportions

	W/B (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
			W	C	Ex	S	G
RC	47	49	168	357	0	904	955
CPC	45	48	168	313	60	879	967

Gmax : 25mm、Air : 4.0 %

縮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。

3. 外力を作用させる前のひずみ分布

Fig. 2 に、外力を作用させる前の鉄筋のひずみを示す。CPC 梁では、膨張コンクリートにより導入されたケミカルプレストレインの引張ひずみを示す。なお、図中の破線は、CPC 梁におけるケミカルプレストレインを仕事量一定則の概念⁸⁾により推定した値である。

RC 梁では、シリーズ A および B とともに、 0×10^{-6} 付近のひずみを示している。一方、CPC 梁では、シリーズ A で $200 \sim 300 \times 10^{-6}$ 、シリーズ B で $300 \sim 400 \times 10^{-6}$ のケミカルプレストレインが導入されたことが確認でき、拘束の小さい圧縮鉄筋のケミカルプレストレインが大きくなる。また、シリーズ B は、シリーズ A に比べて鉄筋比が小さく、全体的にケミカルプレストレインが大きくなった。

4. 引張鉄筋のひずみ

シリーズ A および B の引張鉄筋のひずみについて、供試体 3 体の個々の値と、その平均値をまとめて Fig. 3 a) および b) に示す。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。曲げひび割れ発生後にお

Table 1 Condition of flexural test

Series	A		B	
	RC	CPC	RC	CPC
Number of beams	3	3	3	3
Span l (mm)	2,100	2,100	2,400	2,400
Effective depth d (mm)	145	145	185	185
Distance of loading point c (mm)	700	700	800	800
Shearing span a (mm)	700	700	800	800
Ratio of shearing span a/d	4.83	4.83	4.32	4.32
Compressive strength (N/mm ²)	38.3	41.7	41.0	47.0
Length change ^{*1} ($\times 10^{-6}$)	—	600	—	670

*1 : JIS A 6202 Annex 2 method 'A'

a) Series A

b) Series B

Fig. 2 Chemical pre-strain

いては、同一の曲げモーメントが作用しているときの 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インが導入されているため、RC はりに比べてほぼその値だけ小さくなる。また、供試体 3 体のひずみのばらつきも小さいことが確認できる。

Fig. 3 c) は、3 体の供試体の引張鉄筋のひずみの平均値をとりまとめたものである。図より、曲げモーメントが同一の場合、いずれの有効高さにおいても、CPC 梁

Fig. 3 Strain of tensile rebar

の引張鉄筋のひずみは RC 梁に比べてほぼケミカルプレストレイン分だけ小さくなっている。

Fig. 4 は、3 体の供試体の引張鉄筋のひずみの平均値を、曲げモーメントの終局値 M_u に対する作用曲げモーメント M の比をとって無次元化して整理したものであり、解析値を併記した。解析値は、Fig. 2 で示したケミカルプレストレインを考慮した積層モデル⁹⁾を用いて算定した値である。積層モデルは、部材断面を梁の高さ方向に有限の微小要素に分割したモデルで、微小要素の力の釣合い条件およびモーメントの釣合い条件から、断面応力度および断面耐力の算定を行うものである。Fig. 4 より、 M/M_u として無次元化した場合、RC 梁および CPC 梁ともに、有効高さが異なっても、引張鉄筋のひずみは同一の曲線状にプロットされる。

5. 曲げひび割れ幅

5.1 曲げひび割れ幅の評価指標

曲げひび割れ幅の評価として、曲げひび割れ幅の最大値、曲げひび割れ幅の代表値および曲げひび割れ幅の平均値を、それぞれ検討の対象とした。

曲げひび割れ幅の最大値は、曲げモーメントの一定区間内に発生した曲げひび割れの中から最も大きい曲げひび割れ幅を示したものの値である。曲げひび割れ幅の代表値は、発生した曲げひび割れの中から、曲げひび割れ幅の大きい順に 3 本を選択して、それらの平均値である。また曲げひび割れ幅の平均値は、曲げモーメントの一定区間内に発生したすべての曲げひび割れを対象とした平均値である。

2007 年制定版のコンクリート標準示方書に示されている曲げひび割れ幅の算定式を、式[1]に示す。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left\{ \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon'_{csd} \right\} \quad [1]$$

ここに、 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

Fig. 4 Relationship between Strains of tensile rebar and M/M_u with analysis curve

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で、今回は、引張鉄筋のひずみとの関係に着眼するため零とした。積層モデルを用いることで、載荷前のひずみ(Fig. 2)は、 σ_{se} に内包されるためである。

Fig. 5 Flexural crack widths

Fig. 6 Relationship between flexural crack widths and M/M_u

5.2 曲げひび割れ幅と曲げモーメント

Fig. 5 は、曲げひび割れ幅の平均値、代表値および最大値と、曲げモーメントの関係について、3 体の供試体の個々の値とそれらの平均値で整理したものである。

有効高さの大きいシリーズ B の曲げひび割れ幅の平均値は、Fig. 3 c) で示した引張鉄筋のひずみと同様に、同一の曲げモーメントでは小さくなる。一方、RC 梁の曲げひび割れ幅の最大値では、曲げひび割れ幅が 0.3mm を超過してから鉄筋が降伏するまでに、有効高さの大きいシリーズ B の値が、シリーズ A よりも大きくなっている。

Fig. 6 は、Fig. 5 の縦軸を、 M/M_u で無次元化して整理したものである。Fig. 4 の引張鉄筋のひずみでは、同一の M/M_u において、有効高さの違いによる引張鉄筋のひずみに差は認められなかったが、Fig. 6 では、同一の M/M_u において、有効高さの大きいシリーズ B の曲げひび割れ幅は、シリーズ A に比べて大きくなること、そして平均値、代表値、最大値の順番に著しくなることが、それぞれ確認できる。また、その差は、曲げひ

び割れ発生後ではわずかな差であるが、 M/M_u の増加に伴い大きくなっている。

6. 引張鉄筋のひずみと曲げひび割れ幅

Fig. 7 は、曲げひび割れ幅の平均値、代表値および最大値と引張鉄筋のひずみの関係について、3 体の供試体の個々の値とそれらの平均値で整理したものである。また、式[1]で示した JSCE 式の曲げひび割れ幅と引張鉄筋のひずみの関係を併記した。

JSCE 式は、かぶりや鉄筋の中心間隔をパラメータとして曲げひび割れ幅を求める算定式である。今回のシリーズ A と B の梁供試体は、これらのパラメータが同じである。すなわち、引張鉄筋のひずみが同じ場合、シリーズ A と B とで、曲げひび割れ幅は同じに算定されることになる。

一方、Fig. 7 に示した実験値では、RC 梁および CPC 梁ともに、引張鉄筋のひずみが同一の場合、有効高さの大きいシリーズ B の曲げひび割れ幅が、有効高さの小さいシリーズ A の値よりも大きくなっていることが確

Fig. 7 Relationship between strains of tensile rebar and flexural crack widths

かめられる。特に引張鉄筋のひずみが 500×10^{-6} 近辺を超過してから、シリーズ A と B の曲げひび割れ幅の差が大きくなる。

JSCE 式に対して、曲げひび割れ幅の平均値では、RC 梁および CPC 梁ともに、いずれも安全側に評価しているが、曲げひび割れ幅の代表値や最大値では、JSCE 式を上回る曲げひび割れ幅を示した。そしてこの傾向は、CPC 梁に比べて RC 梁のほうが顕著になっている。CPC 梁には引張鉄筋に導入された引張ひずみのケミカルプレストレインが存在しており、その値からの所定のひずみの増加率は、ケミカルプレストレインが無い RC 梁よりも小さいためである考えられる。今後検討を進めていきたい。

7. まとめ

有効高さをのみを 145mm と 185mm に変化させた RC 梁と CPC 梁の曲げ荷重実験を実施し、曲げひび割れ幅と引張鉄筋の関係について検討した。その結果、次のことが認められた。

- 1) RC 梁および CPC 梁ともに、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。
- 2) そのように曲げひび割れ幅が大きくなることは、平均値、代表値、最大値の順番で、著しくなる。
- 3) CPC 梁に比べて RC 梁のほうが、梁の有効高さが大きくなると曲げひび割れ幅が大きくなる傾向が顕著になる。

謝辞：

本文の作成にあたり、供試体の作製など、全国ボック

スカルバート協会の皆様より多大なご助力をいただきました。記して御礼申し上げます。

参考文献：

- 1) 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, Sept, pp. 1-10 (1970)
- 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検討、土木学会論文集、No. 492/V-23, pp. 137-145 (1994)
- 3) 趙唯堅、丸山久一：鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅算定式の再評価、土木学会論文集、No. 492/V-23, pp. 147-156 (1994)
- 4) 五角亘、下村匠、丸山久一：コンクリートの品質が RC 部材のひび割れ幅に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 23, No. 3, pp. 1333-1338 (2001)
- 5) 土木学会：2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料、コンクリートライブラリー 108, pp. 32-35 (2002)
- 6) 土木学会：2002 年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] (2002)
- 7) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編] (2008)
- 8) 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 XXVII, pp. 340-344 (1973)
- 9) 栖原健太郎ほか：膨張コンクリートを用いた CPC はりの曲げひび割れ幅の評価、コンクリート工学年次論文集、第 31、第 2 号, pp. 229-234 (2009)

FLEXURAL CRACK WIDTHS OF RC AND CPC BEAMS HAVING DIFFERENT EFFECTIVE DEPTH

Kentaro SUHARA^{*1}, Yuki OKAMURA^{*2}, Yukikazu TSUJI^{*2} and Ryoetsu YOSHINO^{*3}

*1 DENKI KAGAKU KOGYO K.K., Cement & Special Cement Additives Research Laboratory
(2209, Omi, Itoigawa-shi, Niigata 949-0393, Japan)

*2 MAEBASHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY (460-1, Kamisadori-machi, Maebashi-shi,
Gunma 371-0816, Japan)

*3 DENKI KAGAKU KOGYO K.K., Omi Plant (2209, Omi, Itoigawa-shi, Niigata 949-0393, Japan)

ABSTRACT : It presents evaluation results of relationship between flexural crack widths and strains of tensile rebar in reinforced concrete beams having different effective depth (145mm and 185mm) made by expansive concrete and normal concrete. For the purpose of comparing the measured flexural crack widths with the calculated values according to the Concrete Standard Specification of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), main factors of the comparison are assumed an effective depth of beam. As a result, flexural crack width of the beam which has high effective depth is clearly larger than one of low effective depth beam at the same strain of tensile rebar. This behavior is more clear in the case of a normal reinforced concrete beam (RC beam) compared to a chemically pre-stressed concrete beam (CPC beam) due to an introduction of chemical pre-strain in the tensile rebar made by the expansive concrete.

KEY WORDS : Flexural crack width, Effective depth, Strain of tensile rebar, Expansive concrete, Chemical pre-strain