

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幅に関する実験的研究

倉岡 希樹^{*1}・睦好 宏史^{*2}・Eakarat 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）の曲げひび割れ幅に影響を及ぼすと考えられる，PC 鋼材位置，鉄筋径及び鉄筋量，鉄筋段数を実験要因とした載荷実験を行い，既往の曲げひび割れ幅算定式に対し，その精度，適用性について比較検討を行った。

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

近年，RC の耐久性向上が大きな問題となっており，その中で RC 部材のひび割れ幅を如何に制御するかが重要な課題である。PRC はひび割れ幅を制御するために優れた構造形式であり，これまでにいくつかの構造物に適用されている。

一方，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 桁と同等であることが明らかにされている。さらに趙，丸山らによる研究²⁾成果をもとにして，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において，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ている³⁾。しかし，PRC において PC 鋼材や鉄筋の多段配筋や径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，鉄筋径，鉄筋段数，PC 鋼材位置（プレストレスによる偏心モーメント）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について検討を行った。

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 10 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，C 種 1 号 SBPR1080/1230-φ11，φ13，φ15 を用いた。

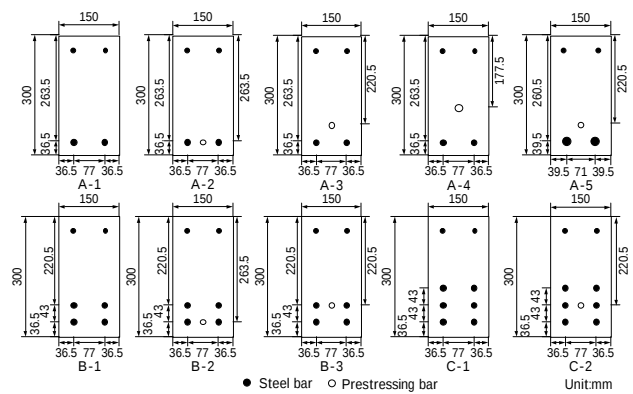


図 - 1 供試体断面寸法と配筋図

表 - 1 に示すように，各供試体は，鉄筋を 1 段配筋（A-series），2 段配筋（B-series），3 段配筋

*1 東日本旅客鉄道株式会社 工修（正会員）〔元埼玉大学大学院〕

*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 工博（正会員）

*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻

表 - 1 供試体諸元

Beam No.	Main reinforcements bar						Prestressing bar			Concrete strength (N/mm2)
	Number of layer	φ s	d1 (mm)	d2 (mm)	d3 (mm)	As/bd (%)	φ p (mm)	dp (mm)	σ c,ps (N/mm2)	
A-1	1	D13	263.5	-	-	0.641	-	-	-	36.6
A-2							11	263.5	4.35	43.1
A-3							13	220.5		42.1
A-4							15	177.5		46.6
A-5		D19	260.5			1.47	13	220.5		45.4
B-1	2	D13	263.5	220.5		1.396	-	-	-	43.3
B-2							11	236.5	4.35	46.7
B-3							13	220.5		48.3
C-1	3				177.5	2.298	-	-	-	45.7
C-2							13	220.5	4.35	45.7

$\phi s, \phi p$: 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
 $\sigma c,ps$: 引張縁におけるプレストレス導入量

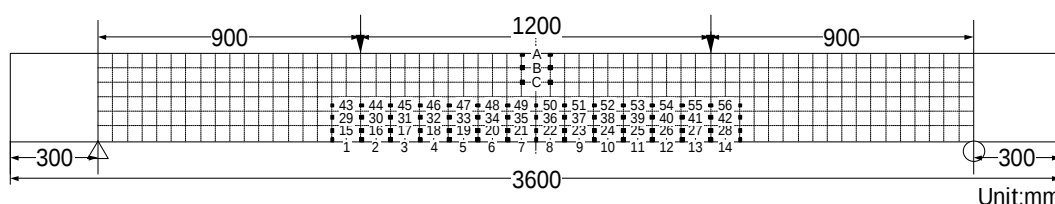
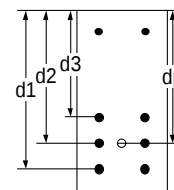


図 - 2 荷重方法及びひび割れ測定位置

(C-series) とし, A-1, B-1, C-1 供試体は 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 供試体は PRC 部材 (PC 鋼材同位置) における鉄筋段数の影響, A-2, A-3, A-4 と B-2, B-3 供試体は, それぞれ 1 段配筋と 2 段配筋における PC 鋼材位置の影響, A-3, A-5 供試体は鉄筋径 (鉄筋比) によるひび割れ幅への影響を明らかにするために製作された。

プレストレス導入量は, 全ての供試体において引張縁応力 (4.35N/mm^2) が等しくなるように導入した。コンクリートの圧縮強度は表 - 1 に示す通りで, 養生は荷重の準備直前まで湿布養生をした。PRC 部材に関しては荷重 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。鉄筋は SD345 の異形鉄筋で D10, D13, D19 を使用した。その機械的性質を表 - 2 に示す。

表 - 2 鉄筋の機械的性質

Bar		f _{sy}	E _s
D10	SD345	395.5	150.1
D13		380.1	201.2
D19		400.8	204.8

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い, 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。また同位置で精度 1/100mm のマイクロスコプを用いたひび割れ幅の測定も行った。ひび割れ間隔はひび割れ幅と同様, 各段の鉄筋位置と底面より 10mm の位置で測定した。荷重方法及びひび割れ測定位置を図 - 2 に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 荷重 - 変位関係

A-series, B&C-series の荷重 - 変位関係を図 - 3, 図 - 4 にそれぞれ示す。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。

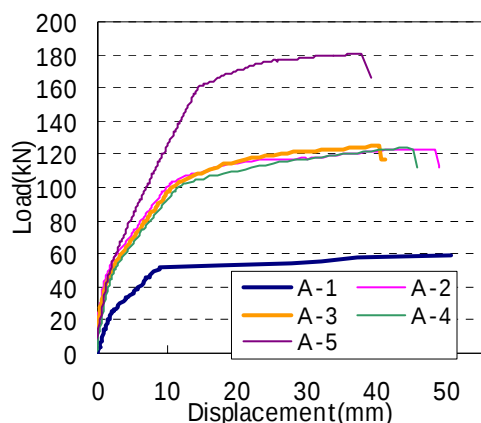


図 - 3 A-series 荷重 - 変位関係

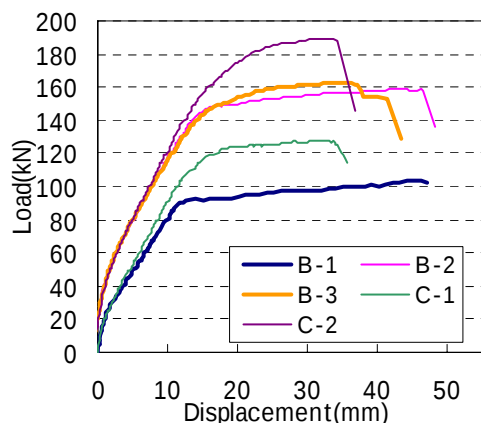


図 - 4 B&C-series 荷重 - 変位関係

3.2 曲げひび割れ間隔

図 - 5 に定常状態後の等曲げモーメント区間のひび割れ図を示し、表 - 3 にひび割れ間隔の実測値を示す。

これらより、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、すなわち B-3、C-2 供試体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。

また A-2、B-2 のように、PC 鋼材が最下段鉄

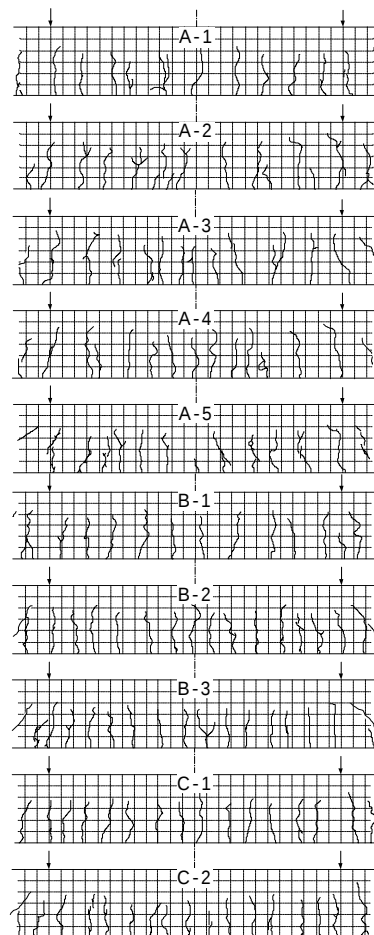


図 - 5 ひび割れ図

表 - 3 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	13	10.1	18.2	1.81
A-3	12	11.1	15.4	1.38
A-4	13	10.1	19	1.87
A-5	12	10.8	13.7	1.26
B-1	13	11	16.4	1.48
B-2	14	9	13.9	1.53
B-3	14	9	11.7	1.29
C-1	14	10.1	16.2	1.6
C-2	14	8.9	13.2	1.47

筋と同じ高さにある場合、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 鋼材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こと、ひび割れ挙動は主として普通鉄筋によるところが大きことから、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。

また、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。算定式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強いと言える。

PRC 供試体の方が RC 供試体よりもひび割れ間隔が小さい。すなわち PC 鋼材も引張鋼材の一種として機能していると考えられるが，鈴木らの研究⁵⁾によれば，PRC のような付着性能の異なる鋼材が混在する場合も考慮すべきとされている。しかしながら，ひび割れ挙動は普通鉄筋によるところが大きく，PC 鋼材と異形鉄筋の付着強度の割合などが明確でないため，今後の検討事項の一つと言える。

3.3 曲げひび割れ幅

A-series, B&C-series の荷重 - 平均ひび割れ幅関係(実験値)を図 - 6、図 - 7 にそれぞれ示し，図 - 8 に 1 段目の鉄筋ひずみが 1200 μ の時の最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の実験値の比較を示す。平均ひび割れ幅は 1 段目の鉄筋位置において測定された全てのひび割れ幅を用いた。最大ひび割れ幅は，測定されたひび割れの中から最も大きい 3 つひび割れの平均値を用いた。この場合，最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の比は 1.2~1.5 倍となっている。また，乾燥収縮量は，コンタクトチップを貼付した直後から計測したが，ほとんど無視できる量であった。従って以下に述べるひび割れ幅には乾燥収縮を考慮していない。

これより，B-3 と C-2 の平均ひび割れ幅にはほとんど差がないことがわかる。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。そして図 - 9 に示すように，B-3 と C-2 の 1 段目鉄筋ひずみの増加量にはほとんど差がなく，3 段目鉄筋の影響が見られない。ひび割れ間隔で述べたように，3 段目の鉄筋が中立軸に近いために，その影響が 1 段目鉄筋ひずみの増加量に表れず，ひび割れ幅に差が出なかったと考えられる。

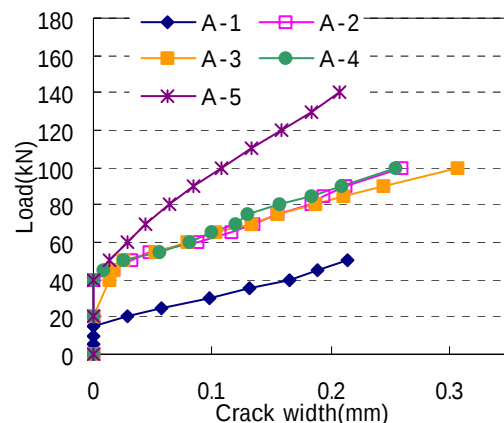


図 - 6 A-series 荷重 - 平均ひび割れ関係

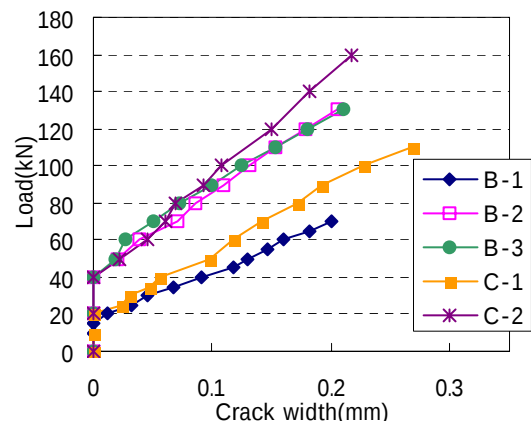


図 - 7 B&C-series
荷重 - 平均ひび割れ関係

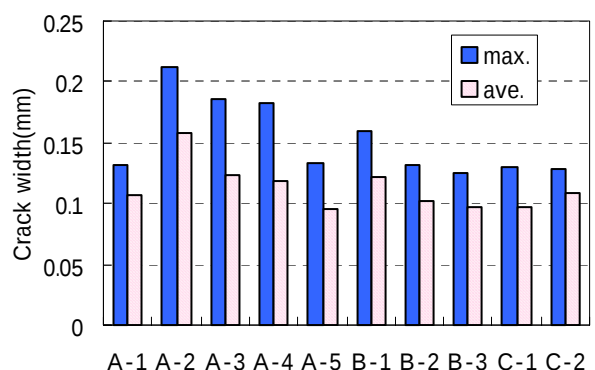


図 - 8 ひび割れ幅の比較

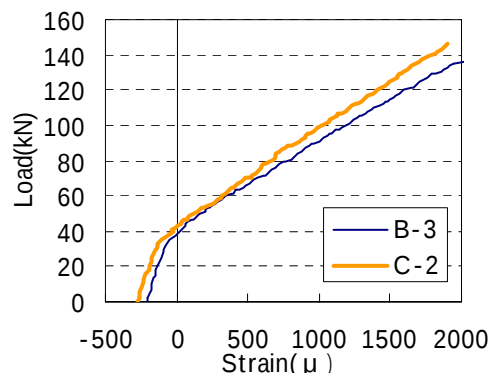


図 - 9 荷重 - 1段目鉄筋ひずみ関係

図 - 10 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, PC 鋼材によるモーメント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 鋼材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である

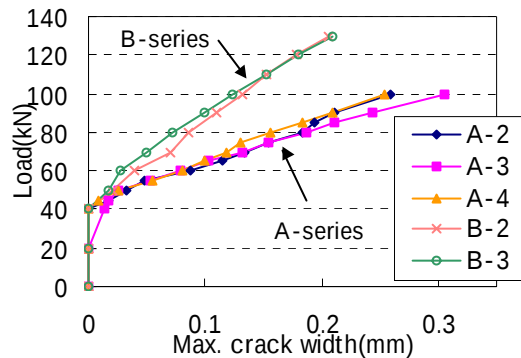
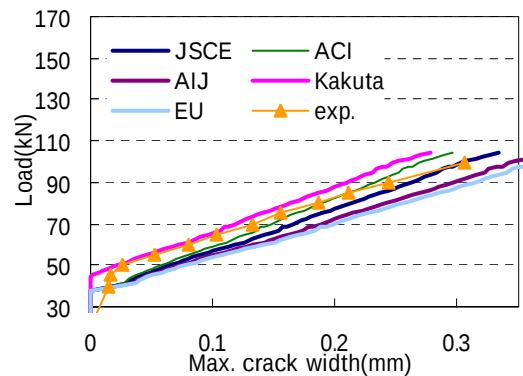


図 - 10 PC鋼材位置の違いによる荷重 - 最大ひび割れ幅関係

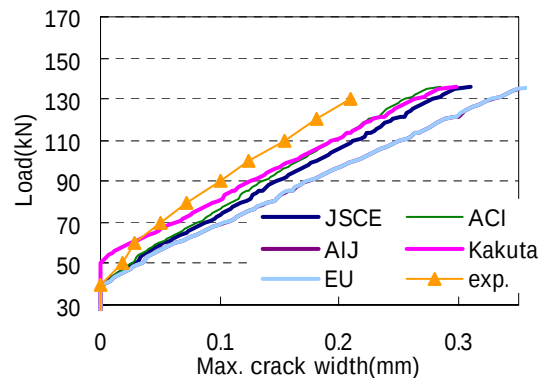
4. 既往の曲げひび割れ幅算定式の検討

図 - 11 は既往の曲げひび割れ幅算定式 (土木学会式³⁾, ACI Code⁶⁾, 建築学会 PRC 式⁷⁾, 角田の式⁴⁾, EURO Code⁸⁾) を用いて, A-3, B-3, C-2 供試体を取り上げて, 最大ひび割れ幅の実験値と計算値の比較を示す。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, はり側面主筋位置としている。鉄筋の応力度は, 実験で得られた鉄筋ひずみの値を用いて算定した。また乾燥収縮及びクリープの影響 ε'_{cs} は 0 とした。

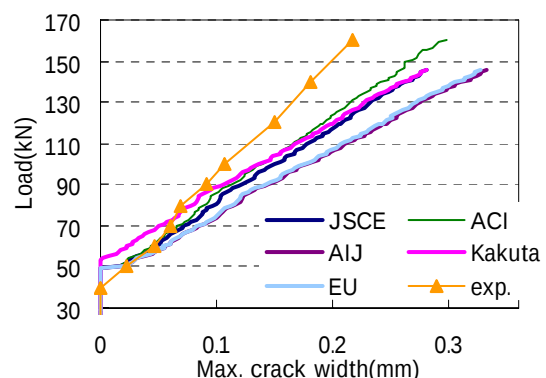
図 - 11 (a) A-3 供試体を見ると, すべての既往の算定式は, 実験値と比較的精度良く一致していることがわかる。しかし (b) B-3, (c) C-2 供試体を見ると, 荷重が増大するにつれて過大に評価する傾向が強くなっている。また, 建築学会式と EURO Code は他の算定式と比べ大きな評価をしているが, これはひび割れ間のコンクリート拘束作用による平均鉄筋ひずみの減少分を考慮せずに算定したためである。一方, 土木学会式は角田らによる式の理論をもとに制定されているので, 両者はほぼ同等の評価をしている。ACI Code は算定位置が梁引張縁位置であるため, 主筋位置と比べるとひび割れ幅は過大になる。そこで, B-3 供試体を例に引張縁におけるひび割れについて比較してみると図 - 12 のようになる。図に示すように, ACI Code は実験値と比較的よく一致していると言える。ちなみに本実験における 1 段目鉄筋位置と引張縁位置とのひび割れ幅の比の平均値はおおよそ 0.83 となっ



(a) A-3供試体



(b) B-3供試体



(c) C-2供試体

図 - 11 既往の算定式による比較

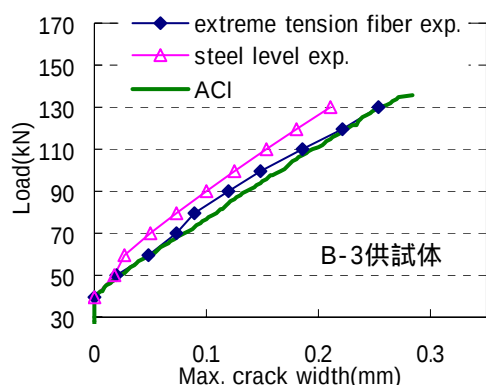


図 - 12 引張縁位置での最大ひび割れ幅

ている。以上のように既往の算定式により安全側で、比較的精度良く PRC の曲げひび割れ幅を推定できると言える。

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 梁の PC 鋼材によるモーメントが等しい場合、PC 鋼材高さの違いによる曲げひび割れ性状への影響は見られない。
- 3) 既往の各種算定式と実験値を比較、その適用性を検討したところ、PRC においても適用できることが確認できた。

謝辞

本研究は、日本道路協会道路橋示方書（コンクリート橋編）における PRC の設計・施工マニュアル作製の一環として行われたものである。同小委員会の委員の方々から貴重な御助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

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，June.1973
- 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) 鈴木 計夫，大野義照：プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れに関する研究 - その 1 初期ひびわれについて -，日本建築学会論文報告集，第 303 号，pp9～19.1981
- 6) American Concrete Institute, “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95),” Farmington Hills, MI, 1995, 369 pp.
- 7) 日本建築学会：プレスト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
- 8) British Standards Institution, “Design of Concrete Structures Part 1: General Rules and Rules for Buildings (DD-ENV1991-1-1 Eurocode 2),” BSI Milton Keynes, UK, 1992, 254 pp.