

プレストレストコンクリート部材の曲げひび割れ幅算定に関する実験的検討

独立行政法人土木研究所 正会員 ○青山 尚
 独立行政法人土木研究所 正会員 渡辺 博志
 独立行政法人土木研究所 正会員 古賀 裕久
 川田建設株式会社 正会員 北野 勇一

1. はじめに

プレストレストコンクリート (以下、PC) 道路橋は、これまでコンクリート断面に圧縮応力を導入し、長期にわたってもひび割れを生じさせないように設計・施工されてきた。一方、このような設計手法は、より多くのプレストレスをコンクリート部材に付与する必要がある、その結果、プレストレス導入時の変形やクリープ変形が過大となる場合もあった。このような観点より、架設時にはPCとして施工し、その後の供用中には、ひび割れの発生を許容するプレストレストコンクリート (以下、PRC) の導入が近年増加している。しかしながら、今後、PRC構造をより広く適用していくためには、PRC部材の曲げひび割れ性状について、より高い精度で評価できる設計手法を確立する必要があると考えられる。そこで、本研究では、載荷試験を実施し、ひび割れ幅算定精度の確認を行った。

2. 実験概要

2. 1 供試体

供試体の諸元を表-1に、供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体は、プレストレス導入度 k を 0, 30, 60% と変化させたものを各1体作製した。供試体 PRC0 とはPC鋼材を配置しないRC梁であり、供試体 PRC30 と PRC60 はPRC梁である。また、PRC梁供試体に関しては、設計曲げモーメント M_d が作用した際に、供試体 PRC30 ではひび割れが発生し、供試体 PRC60 ではひび割れが発生しないように、両者のプレストレス

表-1 供試体諸元

供試体の種類	PC鋼材	導入力 (kN)	鉄筋	引張鋼材比 (%)	λ (%)	k (%)
PRC0	—	0	3@D22	1.69	0	0
PRC30	2- ϕ 9.2	80	3@D19	1.10	29	29
PRC60	2- ϕ 13	159	3@D16	0.96	55	58

※ λ はパーシャルプレストレス比であり、 $\lambda = A_p \cdot f_{py} / (A_p \cdot f_{py} + A_s \cdot f_{sy})$ から算出される。ただし、 A_p : PC鋼材の断面積 (mm^2)、 f_{py} : PC鋼材の降伏点強度 (N/mm^2)、 A_s : 鉄筋の断面積 (mm^2)、 f_{sy} : 鉄筋の降伏点強度 (N/mm^2) である。

※ k はプレストレス導入度であり、 $k = M_0 / M_d$ から算出される。ただし、 M_0 : プレストレス力および軸方向力によるコンクリート応力度が部材引張縁でゼロとなる曲げモーメント (デコンプレッションモーメント)、 M_d : 設計曲げモーメント (=27.5kN・m)

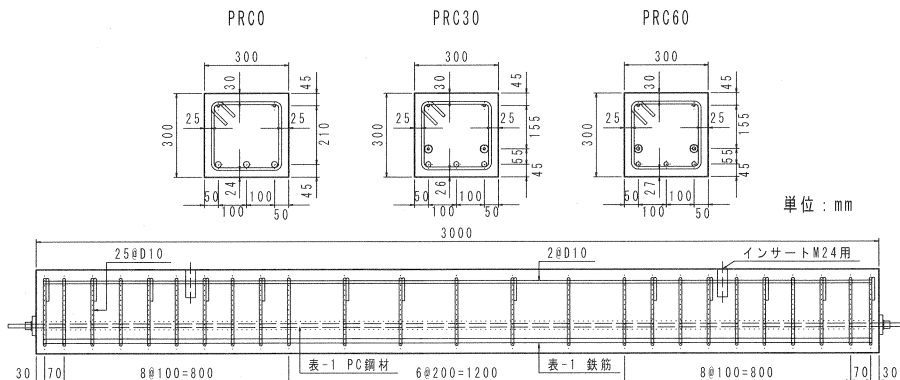


図-1 供試体の形状寸法

導入度を設定した。

ここで、設計曲げモーメント M_d とは、本実験シリーズでは $M_d=27.5\text{kN}\cdot\text{m}$ と設定した。これは、プレストレス導入度 k を 100% とした類似の供試体で引張縁のコンクリート応力度が概ねゼロとなることを想定した荷重である。この供試体では、曲げ荷重により引張側となる上縁に $6.0\text{N}/\text{mm}^2$ となるプレストレスを導入した。

なお、各供試体の鉄筋量は、設計曲げモーメント M_d の 2 倍のモーメントを荷重した際に、鉄筋に生じる引張応力度がいずれも約 $200\text{N}/\text{mm}^2$ となるように定めた。

2. 2 使用材料

コンクリート配合および材料試験結果を表-2 に、鋼材の材料特性値を表-3 に示す。ここで、コンクリートは、目標強度 $40\text{N}/\text{mm}^2$ が得られる配合を選定し、全ての供試体で同一バッチのものを用いた。また、PC 鋼材は SBPR930/1030 (B 種 1 号)、鉄筋は SD345 の規格品を用いた。

2. 3 荷重方法

供試体は所定の形状寸法となるように作製し、材齢 10 日でプレストレスを導入した後、材齢約 28 日で荷重試験を行った。

荷重試験にあたり、供試体は上面が引張縁となるように上下反転させ、図-2 に示す鋼製の荷重治具に固定した。また、この状態で端部の荷重用 PC 鋼棒を油圧ジャッキで緊張することで荷重を行った。荷重状況を写真-1 に示す。

荷重試験は、等曲げモーメント区間に設置した 10 箇所の鉄筋の引張応力度をモニタリングしながら、その最大値が荷重前より $200\text{N}/\text{mm}^2$ 増加するまで行った。

2. 4 測定方法

供試体中の等曲げモーメント区間で、引張鉄筋のひずみおよび引張縁のひび割れ幅 (ϵ ゲージ) を測定した。これらの測定位置を図-3 に示す。また、コンクリート表面にコンタクトゲージ測定用チップを設置して、荷重の前後に生じた 100mm の標点間の伸びを測定した。荷重荷重は、4 本の荷重用 PC 鋼棒にそれぞれ設置したロードセルの平均値とし、 2.5kN ずつ荷重を増加

表-2 コンクリート配合および材料試験結果

水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m^3)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
49.0	148	42.5	4.5	39.7	28.6

※材齢 28 日に試験を実施 (各供試体同一養生)

表-3 鋼材の材料特性値

供試体の種類	P C 鋼棒			異形鉄筋		
	径	弾性係数 kN/mm^2	降伏強度 N/mm^2	径	弾性係数 kN/mm^2	降伏強度 N/mm^2
PRC0	—	—	—	D22	186	386
PRC30	$\phi 9.2$	200	1262	D19	185	379
PRC60	$\phi 13$	201	1055	D16	188	365

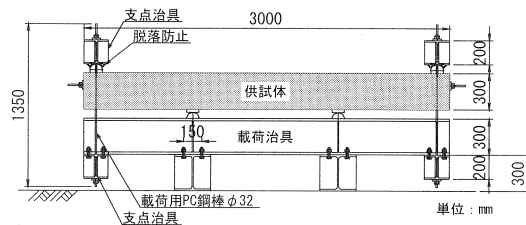


図-2 荷重方法



写真-1 荷重状況

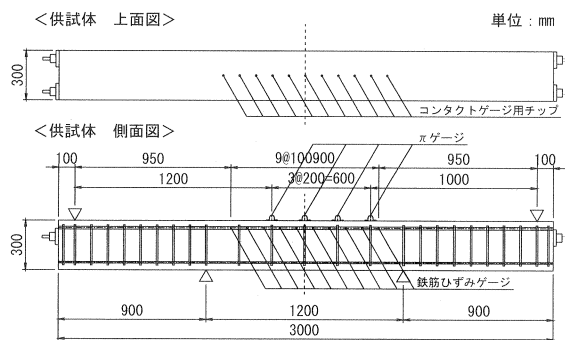


図-3 ひずみゲージ等の設置箇所

させ、測定値をモニタリングするとともにひび割れ発生状況の目視観察を行った。

3. 既往のひび割れ幅算定式

PRC部材の曲げひび割れ幅の照査は、コンクリート標準示方書の方法¹⁾によると、式(1)を用いて曲げひび割れ幅を算出(以下、土木学会式)し、これが許容ひび割れ幅よりも小さくなることを検討するものとされている。

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

ここに、 w : 照査に用いるひび割れ幅

k_1, k_2, k_3 : 鉄筋の付着性状やコンクリートの品質、鉄筋段数を考慮するための係数

c : かぶり (mm)

c_s : 鋼材の中心間隔 (mm)

ϕ : 鋼材の径 (mm)

σ_{sc} : 鋼材位置のコンクリート応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)

E_s : 鉄筋の弾性係数 (N/mm²)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等を考慮するための数値

この土木学会式は、ひび割れ幅やひび割れ間隔の分布を統計的に考慮して定められた式であるが、概ね起こりうるひび割れ幅の最大に近い値を算出するための評価式と考えることができる²⁾。そこで、本研究では、実験により観察されたひび割れ幅の最大値と、この土木学会式で与えられるひび割れ幅 w を比較することにした。この際、ひび割れ幅 w の設計用値として表-2、3 に示した材料特性値を用い、係数 k_3 については、PC鋼材の影響を考慮せず、1.0とした。また、式(1)中のひずみ項のうち、弾性ひずみ項である σ_{sc} は、測定された鉄筋引張応力の最大値とした。塑性ひずみ項である ε'_{csd} に関しては、本研究では0とした。

4. 実験結果

4.1 ひび割れ状況

載荷試験後のひび割れ状況を図-4に示す。ひび割れ本数及び間隔は、等曲げモーメント区間に入ったひび割れのみを対象に測定した。また、ひび割れ幅は、図-3に示す4つのπゲージ及び10点のコンタクトゲージで測定した結果を用いた。各供試体の等曲げモーメント区間に入ったひび割れ本数は、9~10本で供試体による違いは著しくはなかった。

曲げモーメントとひび割れ本数の関係を図-5に示す。供試体PRC0では、載荷途中からひび割れ本数がほとんど変化しておらず、ひび割れ発生が概ね定常状

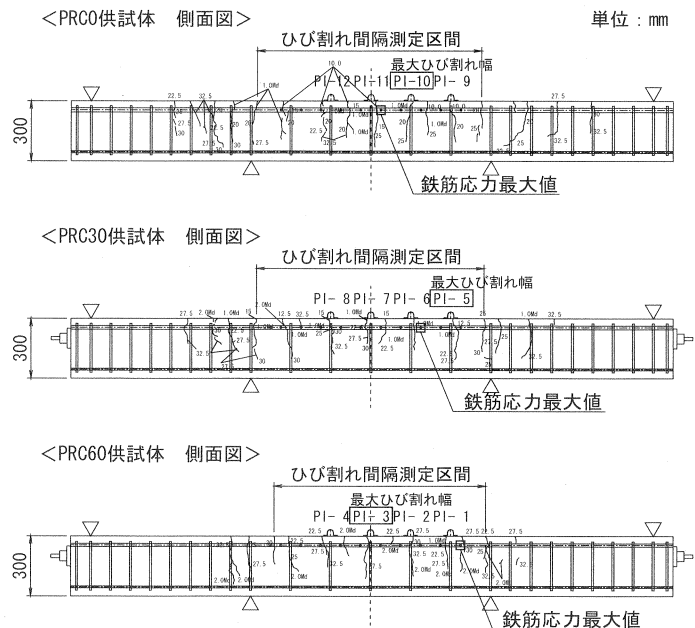


図-4 ひび割れ状況図

態となっている。また、供試体 PRC30 も定常に近い状態となっている。一方、供試体 PRC60 では、荷重を終了した曲げモーメント付近でもひび割れの増加が続いており、定常状態に達していない可能性がある。

曲げモーメントと鉄筋の引張応力の関係を図-6 に示す。ここで、本実験では、曲げ荷重による鉄筋応力の最大増加量が $200\text{N}/\text{mm}^2$ となるまで荷重した。また、式(1)に代入する鉄筋応力 σ_{sc} は曲げ荷重によって生じた鉄筋応力から、RC 計算で求められるデコンプレッションモーメント時の発生鉄筋応力(表-4)を差し引いた値とした。この図-6 より、供試体 PRC0 と比べ、プレストレスト導入度を大きくした供試体 (PRC30, 60) ほど、鉄筋の最大引張応力が小さくなったが、荷重する曲げモーメントの増加とともに発生応力の差は小さくなる傾向であった。

4. 2 曲げひび割れ間隔

(1) 最大ひび割れ間隔と平均ひび割れ間隔の関係

曲げモーメントと最大ひび割れ間隔の関係を図-7 に示す。供試体 PRC0 と PRC30 は、荷重途中から最大ひび割れ間隔の変化が少ないが、供試体 PRC60 では、荷重終了に近くなっても最大ひび割れ間隔の変化が継続しており、これはひび割れ本数の増加と同様な傾向であった。

次に、設計曲げモーメントの2倍の荷重を荷重した最終の最大ひび割れ間隔と平均ひび割れ間隔の比を図-8 に示す。これより、供試体 PRC0 と比較し、PRC 梁供試体も概ね同様な値となった。このことから、プレストレスト導入度の大小が最大ひび割れ間隔と平均ひび割れ間隔の比率に及ぼす影響は、今回の実験では明確ではなかった。

また、式(1)の基本となった趙、丸山の研究³⁾では、ひび割れ間隔の分布が概ね正規分布に従い、5%の超過確率で考えると、最大ひび割れ幅は平均ひび割れ幅の約1.5倍になるとされているが、今回の実験結果では約1.4と近い値となった。

(2) スターラップ間隔の影響について

今回の供試体ではスターラップを配置していることから、スターラップがひび割れ発生に与える影響も懸念され、例えば、供試体 PRC0 に注目すれば、等曲げモーメント区間のひび割れ発生位置はスターラップの位置で多くなっているようにも見える(図-4)。

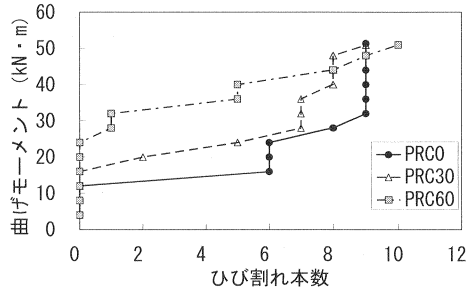


図-5 曲げモーメントとひび割れ本数の関係

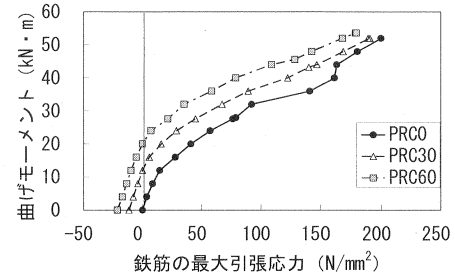


図-6 曲げモーメントと鉄筋の最大引張応力の関係

表-4 デコンプレッションモーメントと鉄筋応力

供試体の種類	デコンプレッションモーメント kN·m	鉄筋の圧縮応力 N/mm ²
PRC0	—	—
PRC30	6.4	11.5
PRC60	12.8	21.8

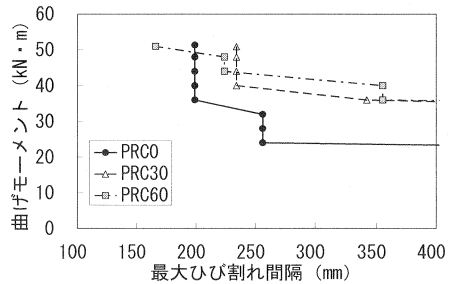


図-7 最大ひび割れ間隔測定結果

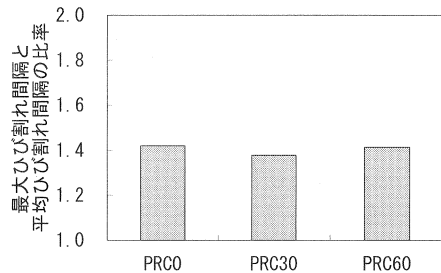


図-8 最大ひび割れ間隔と平均ひび割れ間隔の関係

しかし、上述した検討結果などから、本実験の範囲では、等曲げモーメント区間のスターラップがひび割れ定常時のひび割れ間隔に与えた影響は、顕著ではないものと考えた。一方、等曲げモーメント近傍のせん断スパンにおけるひび割れ間隔は、等曲げモーメント区間の最大ひび割れ間隔より小さい(等曲げ区間 199mm > 左側せん断スパン区間 120mm)。このように、スターラップの配置間隔(100mm ピッチ)が定常状態におけるひび割れ発生間隔より小さくなる場合には、スターラップの影響が現れる可能性があると考えられる。

4. 3 曲げひび割れ幅

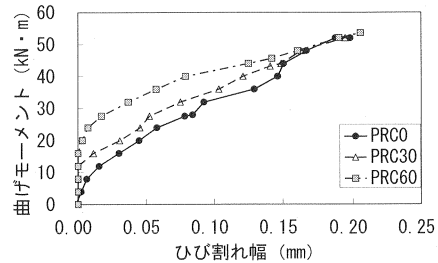
(1) π ゲージ測定結果

供試体に4箇所設置した π ゲージのうち最終的なひび割れ幅が最大の値となる1箇所を選定して、载荷中のひび割れ幅の変化を検討することにした。ここで、鉄筋の最大引張応力と最大ひび割れ幅は、図-4の位置より抽出した。なお、最大ひび割れ幅が観測される位置の近傍で、鉄筋の引張応力が最大となると予想されるが、今回の測定結果よれば必ずしも両者は一致しなかった。曲げモーメントとのひび割れ幅の関係を図-9に示す。なお、ここで選定した箇所の最終的なひび割れ幅は、いずれの供試体でも約0.2mmとなった。

ひび割れ幅の実測値と、実験で得られた鉄筋の最大引張応力から土木学会式を用いて算出したひび割れ幅を比較して図-10に示す。いずれの供試体でも、载荷中のひび割れ幅の増大は、鉄筋の最大引張応力の増大と概ね良好な関係があった。このことから、PRC梁に生じる曲げひび割れ幅も、鉄筋の引張応力度が明らかであれば、RC梁の曲げひび割れ幅算定式を用いて評価できると考えられる。

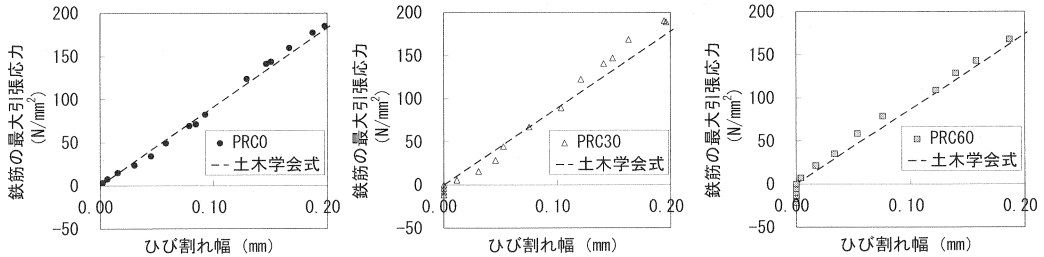
(2) コンタクトゲージ測定結果

次に、载荷前後に測定したコンタクトゲージ標点伸びを頻度分布として表した結果を図-11に示す。供試体PRC0では、ひび割れの生じた場合、標点伸びが0.12~0.18mmの範囲となる頻度が高く、等曲げ区間内の部位によるひび割れ幅の相違は小さかった。一方、供試体PRC30とPRC60では、測定した標点伸びの違いが大きかった。



* ひび割れ幅は、 π ゲージで測定した4箇所のうち最大のものを示した。

図-9 曲げモーメントとひび割れ幅の関係



* ひび割れ幅は、 π ゲージで測定した4箇所のうち最大のものを示した。

図-10 各供試体における実験値と土木学会式との関係

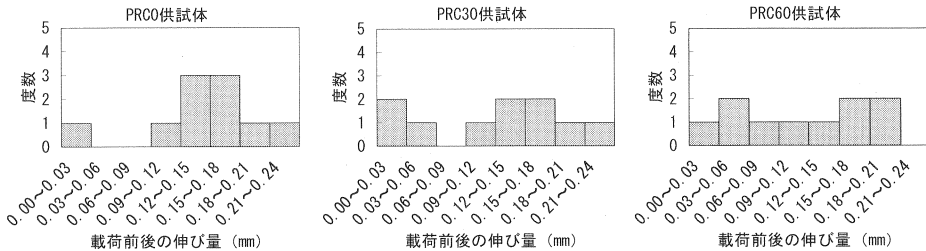


図-11 コンタクトゲージ標点伸びの頻度分布

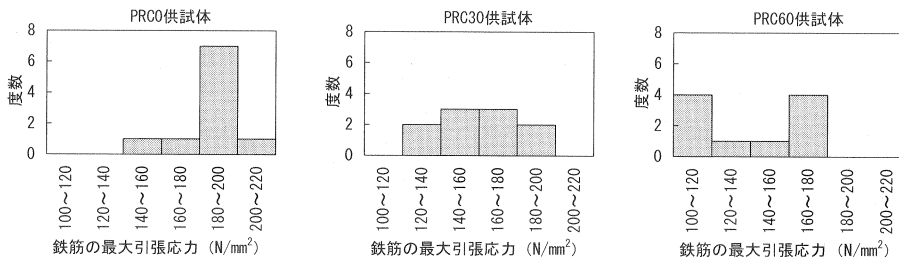


図-12 鉄筋の引張応力の頻度分布

また、鉄筋引張応力についても、供試体 PRC0 と供試体 PRC30 及び PRC60 では分布状況が大きく異なり、プレストレスを導入した供試体では、測定位置による応力の違いが大きかった (図-12)。

コンタクトゲージ標点伸びの最大のものを最大ひび割れ幅と考えると、供試体による違いは顕著ではなく、結果としてゲージ測定結果の最大値とも同程度であり、土木学会式から得られるひび割れ幅と概ね一致した (図-13)。

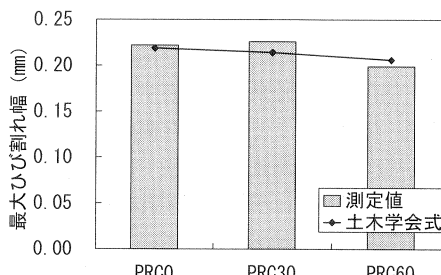


図-13 土木学会式と最大ひび割れ幅の関係

5. まとめ

本実験で得られた結果を要約すると、以下の通りである。

- (1) 今回作製した供試体の等曲げモーメント区間に生じたひび割れ状況を確認した結果、 $2.0M_d$ 荷重時で RC 梁ならびに PRC 梁供試体とも概ね同様な曲げひび割れ間隔となった。ただし、PRC 供試体では、鉄筋の応力の増加量が 200N/mm^2 に達する付近まで、ひび割れ本数は増加しており、発生するひび割れが定常状態に達していない可能性があった。
- (2) 上記(1)のひび割れ発生状況より算定した最大曲げひび割れ間隔と平均ひび割れ間隔の比率は、RC 梁ならびに PRC 梁供試体とも 1.4 倍程度になり、既往の研究結果に概ね一致していた。
- (3) 最大ひび割れ幅の測定値は、RC 梁ならびに PRC 梁供試体とも引張鉄筋の最大応力を用いて、土木学会式から算出した結果と同程度であった。
- (4) 等曲げモーメント区間におけるひび割れ幅および鉄筋引張応力のばらつきは、RC 梁供試体にくらべ、PRC 梁供試体の方が大きかった。ただし、最大ひび割れ幅に着目すると、各供試体でほぼ同程度の値であった。
- (5) 上記(1)~(4)より、各供試体の最大ひび割れ幅については、概ね既往の曲げひび割れ幅算定式に一致したが、ひび割れ幅や鉄筋引張応力の分布性状に関しては RC 梁と PRC 梁で異なる可能性があることが示された。

今後、今回の供試体を持続的に荷重し、コンクリートのクリープや乾燥収縮によるひび割れ幅の変化を計測して、PRC 部材の長期変形性状を検討する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.100~102，2002
- 2) 土木学会：コンクリートライブラリー108号コンクリート標準示方書改訂資料，pp.38，2002
- 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.490/V-23，pp.147-156，1994.5