

# 論文 疲労荷重を受けるRC部材のひび割れ成長

林 和彦\*1・椿 龍哉\*2・森竹 巧\*3

**要旨**：鉄筋コンクリート部材においてひび割れ幅の精度の良い算定が望まれているものの、繰返し荷重の影響を含めたひび割れ幅の算定式は無い。そこで鉄筋コンクリート梁に疲労荷重を与えてひび割れ成長を実験的に調べた。その結果、ひび割れ幅およびひび割れ深さは繰返し回数に応じて増加し、載荷開始直後に比べて200万回載荷後にはひび割れ幅が最大で約1.4倍に増加した。また、繰返し回数の影響を含めたひび割れ幅算定の実験式を求めた。

**キーワード**：疲労荷重, ひび割れ幅, 鉄筋コンクリート

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート部材の耐久性評価において塩化物イオンや二酸化炭素のコンクリートへの浸透が問題となる<sup>1)</sup>。その評価にはひび割れ幅が重要な要因となり、コンクリート標準示方書<sup>2)</sup>では塩化物イオンの拡散係数はひび割れ幅の関数として式(1)により評価されている。

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \left(\frac{w}{l}\right) \cdot \left(\frac{w}{w_a}\right)^2 \cdot D_0 \quad (1)$$

ここに、 $D_d$ :塩化物イオンの設計拡散係数[ $\text{cm}^2/\text{年}$ ]、 $\gamma_c$ :コンクリートの材料係数、 $D_k$ :コンクリート塩化物イオンの拡散係数の特性値[ $\text{cm}^2/\text{年}$ ]、 $D_0$ :定数[ $\text{cm}^2/\text{年}$ ]、 $w$ :ひび割れ幅[mm]、 $w_a$ :許容ひび割れ幅[mm]、 $l$ :ひび割れ間隔[mm]である。

鉄筋コンクリートの曲げひび割れは鋼材の付着劣化に密接に関わっているため、疲労による影響を受けると考えられるが、現在は鉄筋の応力度に応じた曲げひび割れ幅の算定式<sup>1)</sup>は式(2)により与えられているものの、繰返しの影響は考慮されていない。今後の耐久性評価のためにひび割れ幅の精度の良い算定が望まれている。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[ \frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (2)$$

ここに、 $k_1, k_2, k_3$ :係数、 $c$ :かぶり[mm]、 $c_s$ :鋼材の中心間隔[mm]、 $\phi$ :鋼材径、 $\sigma_{se}$ :鋼材応力度の

増加量[MPa]、 $E_s$ :鋼材の弾性係数[MPa]、 $\varepsilon'_{csd}$ :収縮・クリープ等の影響を考慮した数値である。

コンクリートを対象とした疲労によるひび割れの成長についての既往の研究としては、Bazantら<sup>3)</sup>や Horiiら<sup>4)</sup>による研究があるものの、コンクリート単体を対象としたものであり、鉄筋とコンクリートとの相互作用は考慮されていない。Matsumotoら<sup>5)</sup>は鋼繊維補強コンクリートを対象とし、Paris則を適用して架橋効果を表現している。しかし、実際の鉄筋コンクリート部材の曲げひび割れは、コンクリートと鉄筋との付着作用により生じるものであり、曲げひび割れに及ぼす疲労荷重による影響は明らかとなっていない。そこで、本研究では疲労荷重下での鉄筋コンクリートの曲げひび割れの成長について実験的な検討を行った。

## 2. 実験概要

鉄筋コンクリート梁の繰返し載荷における載荷回数とひび割れ成長との関係を把握するために、鉄筋コンクリート梁供試体を作製し、ひび割れ幅およびひび割れ深さを測定した。

実験要因は載荷荷重を3レベルとし、普通コンクリート(Aシリーズ)および比較のためのモルタル(Mシリーズ)の2種類、合計6体の供試体の実験を行った。供試体の一覧を表-1に示す。

\*1 横浜国立大学大学院 工学研究院助手 修(工) (正会員)

\*2 横浜国立大学大学院 工学研究院教授 Ph.D (正会員)

\*3 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻

表-1 供試体の一覧

供試体名	種類	荷重上限 応力度 [MPa]	荷重 周波数 [Hz]	実験時の 材料強度*1 [MPa]	荷重開始時 の材齢 [日]
A-1	コンクリート	100	15	32.3 (31.7-32.9)	12
A-2		200	12		16
A-3		300	10		20
M-1	モルタル	100	15	39.4 (38.8-39.9)	21
M-2		200	12		23
M-3		300	10		24

\*1: 実験シリーズ中の強度の平均値 [( )内は順に実験シリーズ開始時, 終了時の強度]

表-2 配合

種類	スランブ [cm]	水セメント比 [%]	空気量 [%]	細骨材率 [%]	単位量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
					水	セメント*1	細骨材*2	粗骨材*3	増粘剤
コンクリート	8	65	1	48	175	270	929	1007	-
モルタル	8	65	1	100	250	380	1622	0	0.05

\*1: 早強ポルトランドセメント, \*2: 千葉県君津産山砂 F.M.=2.34, \*3: 秩父産砕石(硬質砂岩) F.M.=6.80

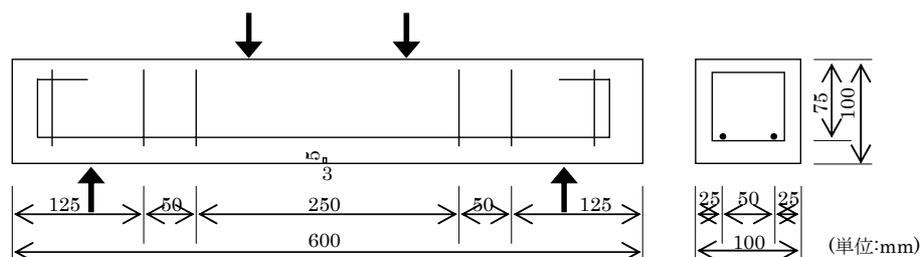


図-1 供試体形状

表-3 鋼材の力学特性

呼び名	規格	降伏点 [MPa]	引張強度 [MPa]	弾性係数 [GPa]
D6	SD295A	379	530	187
D10	SD345	389	571	187

分離の悪影響を防ぐ目的で単位水量の 0.2% の増粘剤 (セルローズ系) を添加した。材齢は 12 ~ 24 日で荷重を開始した。

供試体の断面は 100 × 100 mm, 有効高さが 75 mm で, 主鉄筋は D10 を 2 本配置した。スパンは 450 mm で三等分点荷重を行った。せん断破壊を避けるために D6 の少量のスターラップを配置している。供試体の形状を図-1 に, 鋼材の力学特性を表-3 に示す。

## 2.2 荷重概要

油圧サーボ式疲労試験機を用いて, 荷重制御により片側繰返し荷重を与えた。波形は正弦波とし, 最大荷重に応じて振動数 10 ~ 15 Hz で 200 万回の荷重を行った。1 回の荷重に要する時間は 1.5 ~ 2.3 日である。なお, 各供試体は初回荷重のみ上限荷重までを静的に荷重して安定したひび割れが形成できるようにした。荷重の状況を図

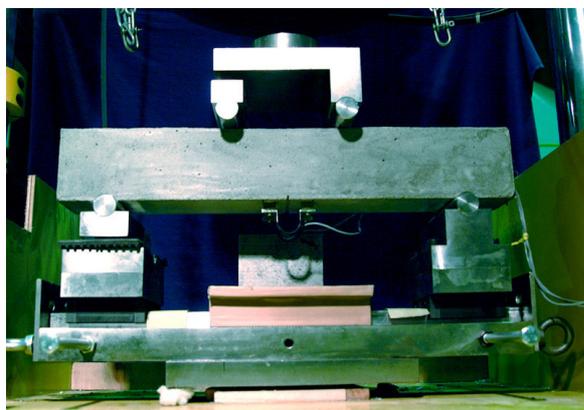


図-2 荷重状況

## 2.1 実験供試体

コンクリートおよびモルタルの配合を表-2 に示す。モルタルは単位水量が大きい材料

表-4 実験結果の一覧

	ひび割れ深さ [mm]			ひび割れ幅 [mm]			算定式による ひび割れ幅 [mm]
	初期載荷時	200万回時	増加率	初期載荷時	200万回時	増加率	
A-1	46	74	1.61	0.056	0.079	1.40	0.083
A-2	47	71	1.51	0.114	0.143	1.25	0.148
A-3	52	72	1.38	0.178	0.212	1.19	0.212
M-1	62	72	1.16	0.067	0.068	1.01	0.083
M-2	64	74	1.16	0.193	0.220	1.14	0.148
M-3	65	76	1.17	-	-	-	0.212

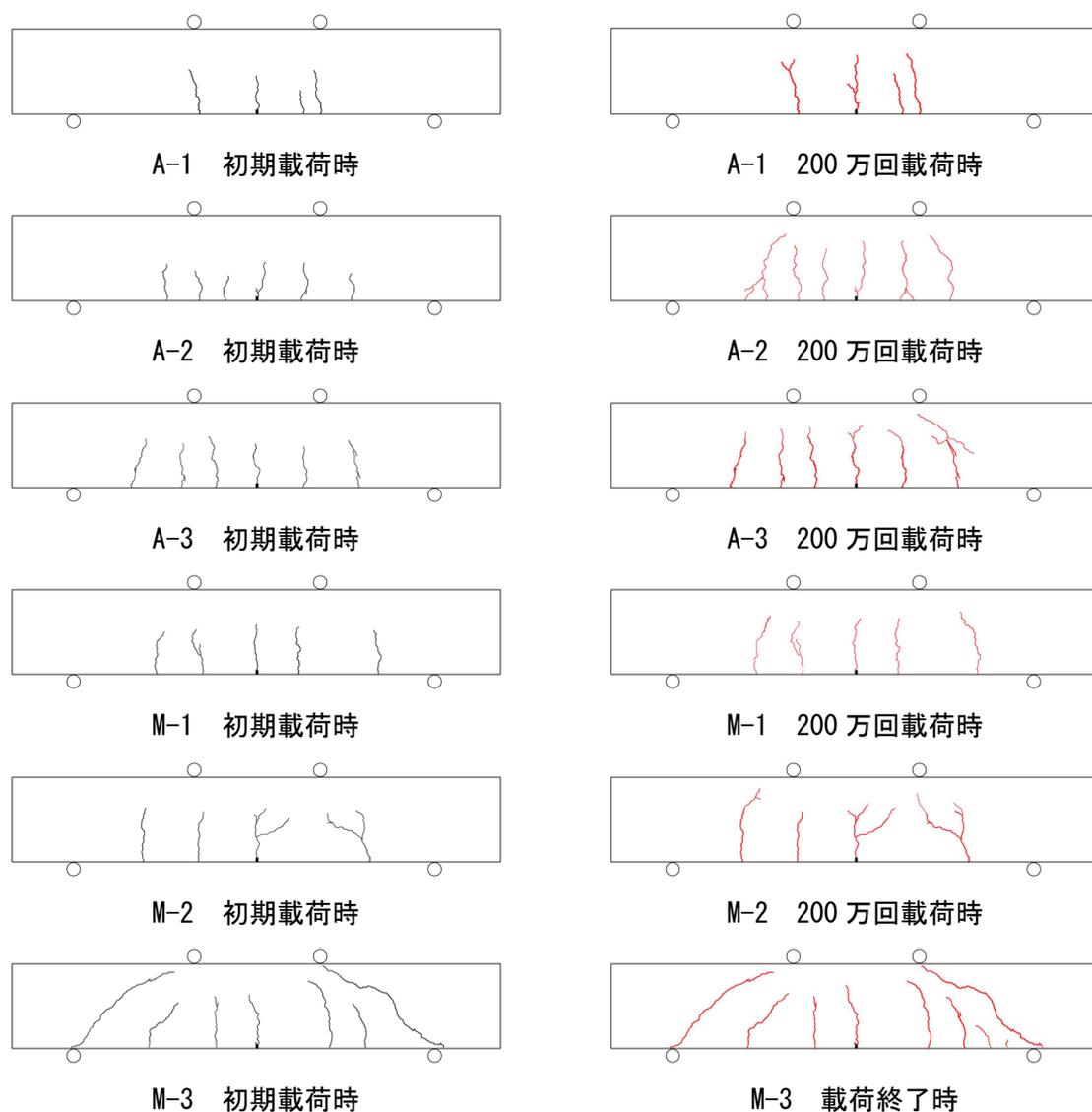


図-3 ひび割れ図

-2 に示す。

荷重振幅の設定は、道路橋示方書<sup>6)</sup>の床版の鉄筋の常時応力度および過積載の影響を考慮して、上限荷重はRC理論で計算した時の主鉄筋の応

力度が 100MPa (載荷荷重が 10.9kN), 200MPa (21.9kN), 300MPa (32.8kN) となるようにした。下限荷重は、制御の安定性のためにすべて 2kN (鉄筋応力度 18.3MPa) とした。なお、曲げひび

割れ発生荷重の計算値は 5.7kN である。

等曲げモーメント区間である供試体中央に曲げひび割れを安定して生じさせてひび割れ幅を計測するために、ダイヤモンドカッターを用いて供試体の下面中央に幅 3mm、深さ 5mm の切り欠きを作成し、切り欠きを跨ぐように 2 つのパイ型変位計を設置して、载荷中の曲げひび割れ幅の測定を行った。また、中央のコンクリートの圧縮縁のひずみを計測するためにゲージ長 30mm のひずみゲージを貼り付けた。

計測は動ひずみ計を介して AD コンバーターを用いサンプリング周波数 500Hz で载荷 10000 回毎にデータを 500 回取得した。

载荷開始直後と 200 万回到達後に、それぞれひび割れ図を作成してひび割れ深さを目視にて計測した。

### 3. 実験結果

実験結果の一覧を表-4 に示す。

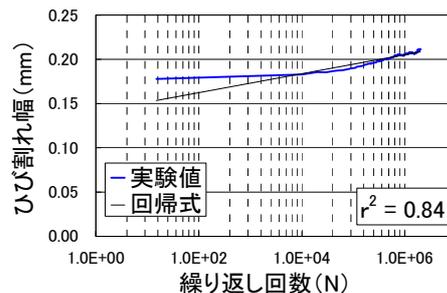
#### 3.1 ひび割れ状況

各供試体の载荷直後と 200 万回時のひび割れ図を図-3 に示す。各供試体とも中央の切り欠き部から曲げひび割れが発生すると共に、およそ 50mm 間隔で曲げひび割れが等間隔で発生している。载荷によるひび割れ本数の増加は無く、全てのひび割れでひび割れ深さが増加していることがわかる。表-4 においても、中央の曲げひび割れ深さは概ね 10~30mm 増加している。

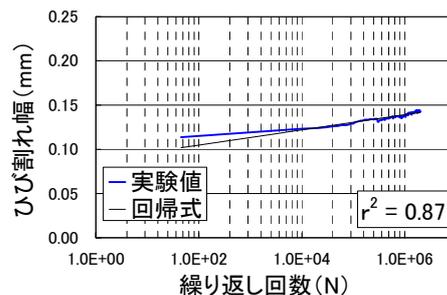
供試体 M-3 においては载荷開始直後から斜めひび割れが载荷点付近まで進展し、17 万回程度でせん断破壊となり、载荷が終了したため実験結果は示していない。これは粗骨材の噛み合わせが無いためせん断耐力が低かったものと考えられる。

#### 3.2 曲げひび割れ幅

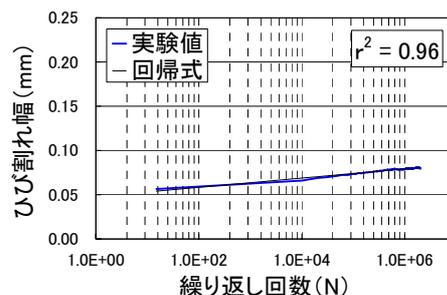
各供試体の曲げひび割れ幅-繰返し回数の関係を図-4 に示す。なお、曲げひび割れ幅は、2 つのパイ型変位計で計測された値の平均値を示す。繰返し回数の増加に伴い曲げひび割れ幅の増加が認められ、载荷開始直後を基準とした 200



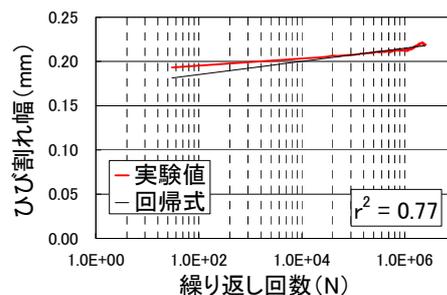
A-3



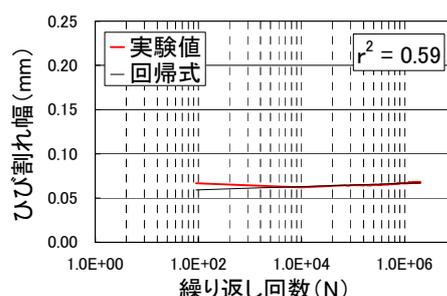
A-2



A-1



M-2



M-1

図-4 曲げひび割れ幅-繰返し回数関係

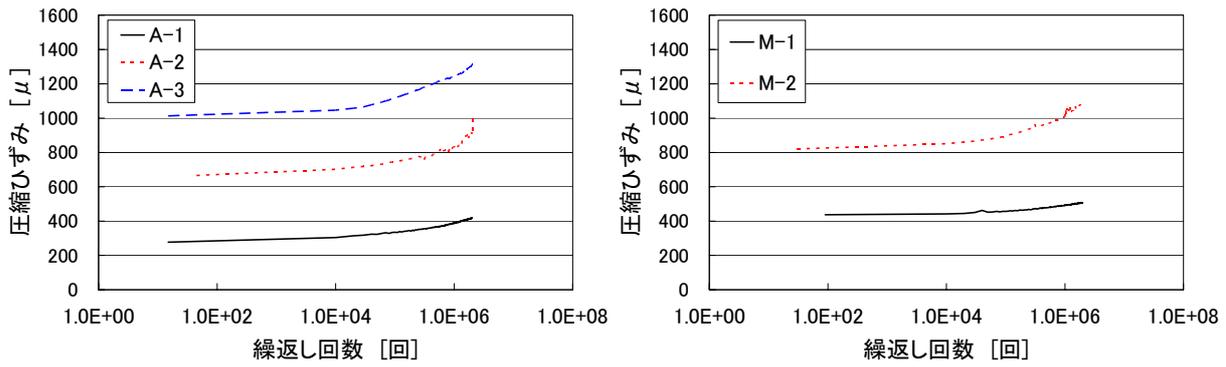


図-5 コンクリート圧縮縁のひずみ-繰返し回数関係

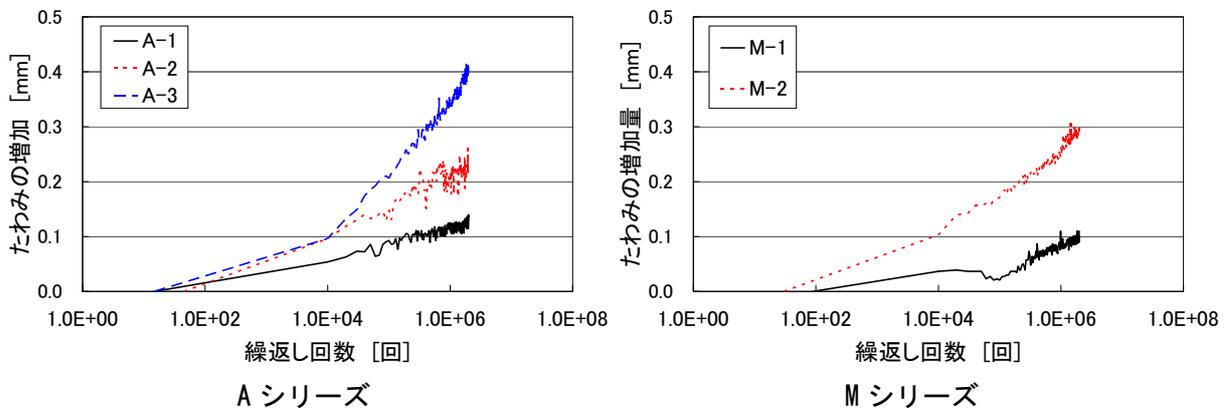


図-6 たわみの増加量-繰返し回数関係

万回載荷後の曲げひび割れ幅の増加率は 1.01～1.40 の範囲となった。実験結果を回帰した曲げひび割れ幅と載荷回数との関係式を式(3)～(7)に示す(図-4 参照)。

$$w = 0.0023 \ln(N) + 0.0481 \quad (\text{A-1}) \quad (3)$$

$$w = 0.0037 \ln(N) + 0.0877 \quad (\text{A-2}) \quad (4)$$

$$w = 0.0047 \ln(N) + 0.1408 \quad (\text{A-3}) \quad (5)$$

$$w = 0.0008 \ln(N) + 0.0557 \quad (\text{M-1}) \quad (6)$$

$$w = 0.0032 \ln(N) + 0.1704 \quad (\text{M-2}) \quad (7)$$

ここに、

w: ひび割れ幅[mm]

N: 繰返し回数[回]

### 3.3 コンクリートひずみ

コンクリート圧縮縁のひずみ-繰返し回数の関係を図-5に示す。載荷回数と共にひずみが増加し、さらに 200 万回に達してもなおひずみが増加する傾向があるのが特徴的である。繰返し

によりコンクリートの圧縮部も劣化しており、それが中立軸の上昇、ひび割れ幅やひび割れ深さの増加に寄与しているものと考えられる。

### 3.4 たわみ

図-6に初期載荷時のたわみを基準とした供試体中央のたわみの増加量と繰返し回数の関係を示す。繰返し回数に応じてたわみ量が増大し、鉄筋の応力度が上がるにつれて、その増加の程度は大きい。コンクリートひずみと同様に、200 万回経過しても増加し続けている。

## 4. 考察

### 4.1 ひび割れ幅の進展

図-4において同じ鉄筋応力レベルで比較すると、MシリーズのモルタルはAシリーズのコンクリートに比べ、初期ひび割れ幅が大きく、さらに 200MPa では実験終了時のひび割れ幅も

大きい。

ひび割れ幅の増加の理由としては、圧縮ひずみの増加は原因の1つと考えられるが、モルタルの初期ひび割れ幅および全体的なひび割れ幅が大きい理由としてはそれ以外にも原因が考えられる。その1つとして、鉄筋の節とその周囲の母材との付着領域が繰返し载荷により破壊され、鉄筋が伸び出すことが原因として挙げられる。これは、モルタルは骨材の最大寸法が小さく鉄筋の節との噛み合わせ作用が小さいため付着が劣化しやすいものと考えられる。そのため、高応力になるほど、繰返しの早期に付着が劣化し、200万回時の劣化の程度も大きいと考えられる。

#### 4.2 ひび割れ幅の算定式との比較

既往のひび割れ幅算定式(2)を用いてひび割れ幅を計算したものを表-4に示す。Aシリーズにおいては、200万回载荷終了時のひび割れ幅に計算ひび割れ幅がほぼ一致している。しかし、計算ひび割れ幅は乾燥収縮などの影響を受けた後のひび割れ幅であるのに対し、本供試体では材齢が小さく、今後も乾燥収縮等でひび割れ幅が拡大することが考えられるため、式(2)では過小評価を行う可能性も考えられる。

#### 4.3 繰返しの影響を含めたひび割れ幅の算定式

本実験において得られたひび割れ幅の回帰式を基にして、繰返し荷重下での鉄筋応力度の影響を含んだ算定式を式(8)に示す。

ただし、式(8)の適用範囲は、コンクリートの圧縮強度が35MPa程度、主鉄筋にD10を使用し、载荷回数は200万回までの場合に限られる。

$$w = \sigma (0.000019 \ln(N) + 0.000463) \quad (8)$$

ここに、

w: 曲げひび割れ幅[mm]

$\sigma$ : 鉄筋の最大応力度[MPa]

N: 繰返し回数[回]

## 5. 結論

鉄筋コンクリート梁の曲げひび割れ幅に及ぼす疲労荷重の影響を実験的に調べた。本研究の

範囲内で得られた結論を以下に示す。

- 1) 鉄筋コンクリート梁の繰返し载荷により中央の曲げひび割れのひび割れ幅が拡大することを実験的に示し、その増加率は最大1.4倍であった。
- 2) 梁の繰返し载荷の影響を含めた曲げひび割れ幅の実験式を求めた。

## 参考文献

- 1) 大即信明, 宮里心一, 柴田常德, 久田真, Tarek Uddin Md., 長瀧重義: 鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に生じる腐食の形成機構に及ぼす水セメント比の影響, 土木学会論文集, No.606, V-41, pp.63-73, 1998.11
- 2) 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], [施工編], 2002.3
- 3) Bazant, Z.P. and Schell, W.F.: Fatigue Fracture of High Strength Concrete and Size Effect, ACI Materials Journal, Vol.90, No.5, pp.472-478, 1993
- 4) Horii, H., Shin, H.C. and Pallewatta, T.M.: Mechanism of Fatigue Crack Growth in Concrete, Cement and Concrete Composites, Vol.14, No.2, pp.83-89, 1992
- 5) Matsumoto, T. and Li, V.C.: Fatigue Life Analysis of Fiber Reinforced Concrete with a Fracture Mechanics Based Model, Cement and Concrete Composites, Vol.21, No.4, pp.249-261, 1999
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, IIIコンクリート橋編, 2002.3