

論文

[1090] コンクリート梁の曲げ疲労特性の切欠き深さ依存性

正会員○金子林爾（名城大学建築学科）

正会員 大岸佐吉（名古屋工業大学社会開発工学科）

1. はじめに

コンクリート梁の疲労強度特性に関しては、平滑材（無切欠き材）を対象に作用応力と破壊までの繰返し回数や疲労強度について多くの研究[1]が行なわれているが、切欠き材の疲労強度や亀裂進展に関する研究は少ない[2], [3], [4]。従って、コンクリート梁の切欠き比が疲労寿命に及ぼす影響を明らかにし、切欠き部の強度評価と亀裂進展挙動を解明することは重要な課題である。本研究は、コンクリート梁の曲げ疲労特性を明らかにすることを目的とし、平滑材と切欠き材の相対切欠き比が梁の疲労寿命に及ぼす影響を実験的に調べた。また、一定振幅における設定荷重と破壊までの繰返し回数、開口変位の増大変化、切欠き部の開口変位に基づく亀裂進展の状況、繰返し疲労による亀裂進展速度と応力拡大係数との関係を各荷重段階について検討することを試みた。

2. 実験方法

2.1 切欠き材と平滑材の供試体作製

本実験に用いたコンクリートには、普通ポルトランドセメント（材令28日圧縮強度 40.2MPa）、細骨材（山砂、比重 2.51、 $f.m.=2.92$ ）と粗骨材（山砂利、比重 2.59、 $f.m.=7.23$ ）を使用した。単位コンクリートの重量調合比は、セメン

ト/水/細骨材/粗骨材=1.0/0.55/2.54/3.40 であり、細骨材率 42.7%、A E減水剤（セメント重量に対して 0.2%）を使用した。コンクリートの練り混ぜは、強制練りミキサー（容量0.1 m^3 ）によった。実測スランプ値は 15cm、空気量は 4.5%/vol であった。

供試体の寸法は 75x75x300mmの梁を採用した。切欠きのある供試体の作製には、厚さ 0.5mmの亚克力板を用いて切欠きを形成し、切欠き深さ(a) 10mm, 20mm, 30mm, 40mm となるように型枠の側面に取りつけた。切欠き材の相対切欠き深さ比は $a/W=0.13, 0.27, 0.4, 0.53$ の4種類とし、切欠きのない平滑材を含めて計5種類とした。ここに、 W は供試体の高さを表す。

供試体は、すべて材令28日まで水中養生とし、それ以後室内養生(20°C, RH=60%)とした。試験は材令170日以後で実施した。

2.2 試験装置と試験方法

曲げの静的試験および疲労試験ともに、電気油圧式サーボバルブ機構の材料試験装置（810-13型、最大荷重 25t, 12.5t, 5t, 2.5tの4段階切り替え可能）を使用した。曲げ疲労の載荷速度は5サイクル/秒とし、荷重波形は正弦波である。曲げ供試体の載荷要領、ひずみ測定、および変位測定概念を図-1に示す。

疲労載荷下の曲げ供試体の引張縁ひずみは、梁中央の引張側に貼ったワイヤーストレンゲージ（測長60mm）により測定し、また切欠き部の開口変位は切欠き部を中心として等間隔にアルミ板

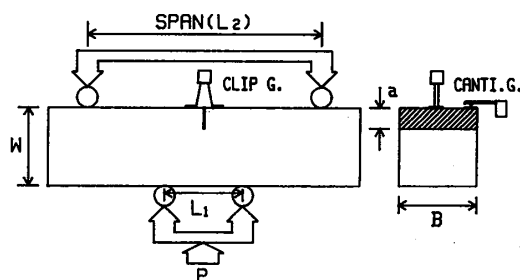


図-1 載荷方法と供試体の変位測定

 $G_{max} = 25mm$

を供試体に接着固定し、それに取り付けたクリップ型変位計（632.13C-20）により測定した。他方、梁中央部のたわみ変形の測定にはキャンチレバ型変位計（CE-2）を使用した。これら測定計の出力データはすべて7チャンネル・アナログ入力インターフェイスを介して、コンピュータにより集録し、かつデータ処理を行なった。

2.3 曲げの静的試験および疲労試験の方法

曲げの静的試験および疲労試験は、平滑材および切欠き材ともに4点曲げ方式（図-1参照）を採用した。切欠き材の切欠き形状は、SEN（Single Edge Notched）法で行なった。繰返し荷重は各シリーズごとに疲労試験開始時での終局曲げ荷重の平均値（ P_b ）を基準として、上限荷重比（ $S_{max}=P_{max}/P_b$ ）と上下限荷重比（ $R=S_{min}/S_{max}$ ）を一定の組合せで上限設定荷重（ P_{max} ）と下限設定荷重（ P_{min} ）を定めて実験した。すなわち、曲げ疲労試験の設定荷重の範囲は、 $R=0.25$ 一定下で、 $S_{max}=0.85, 0.8, 0.75, 0.7$ とし、繰返し回数 200万回まで生存の可能性がある場合は、 $S_{max}=0.75$ までの設定とした。表-1中の数値は同一設定条件下の疲労試験の供試体個数を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 静的曲げ強度および疲労試験結果

疲労試験の設定荷重を決定するにあたり、平滑材および切欠き材の相対切欠き比ごとに供試体6～8個の終局荷重の平均値（ P_b ）と有効梁せいの強度平均値（ σ_b ）を求めた。平滑材では $P_b=12.2\text{ kN}$ と $\sigma_b=6.5\text{ MPa}$ 、切欠き材の相対切欠き比（ $a/W=0.13, 0.27, 0.4, 0.53$ ）では、それぞれ $P_b=6.8\text{ kN}, 6.3\text{ kN}, 4.5\text{ kN}, 2.5\text{ kN}$ と、 $\sigma_b=6.51\text{ MPa}, 4.82\text{ MPa}, 6.2\text{ MPa}, 6.65\text{ MPa}, 6.1\text{ MPa}$ を得た。平滑材の荷重値は切欠き材に比較してばらつきが大きい、これは3等分点載荷での荷重点間の領域に存在する最弱要素のためと考えられる。切欠き材の終局荷重点の開口変位量の平均値（ δp ）を求めると、それぞれ $0.041\text{ mm}, 0.037\text{ mm}, 0.048\text{ mm}, 0.083\text{ mm}$ を得た。 $a/W=0.53$ の δp は他に比較して大きく、ばらつきも大きいのは、骨材寸法に比べて、有効断面の厚さが小さいためと考える（図-2）。

3.2 疲労強度と切欠き深さの関係

平滑材と切欠き材について、 $S_{max}=0.85\sim 0.70$ 間での4段階または $S_{max}=0.85\sim 0.75$ 間での3段階の設定で試験を行った破壊までの繰返し回数（ N_f ）の対数平均値の結果を図-3に示す。この図における各荷重段階での疲労破壊回数の対数平均値（ $\log N_f$ ）を最小2乗法により回帰式の係数を決定すると、次の5式を得る。

$$\text{平滑材の場合、} \quad S_{max}=0.968-0.054 \cdot \log N_f \quad \text{----- (1)}$$

$$\text{切欠き材 (a/w=0.13) の場合、} \quad S_{max}=0.968-0.055 \cdot \log N_f \quad \text{----- (2)}$$

表-1 切欠き材と平滑材の疲労試験数

Specimens	Relative Notch Depth, a/W				
	Unnotch	0.13	0.27	0.4	0.53
0.85	5	5	5	6	5
0.80	6	5	6	5	5
0.75	6	5	5	5	5
0.70	6	6	-	-	-

$S_{max}=P_{max}/P_b$, P_b : Mean value, P_{max} : Setup maximum load (kN), a : Notch depth, W : Beam depth

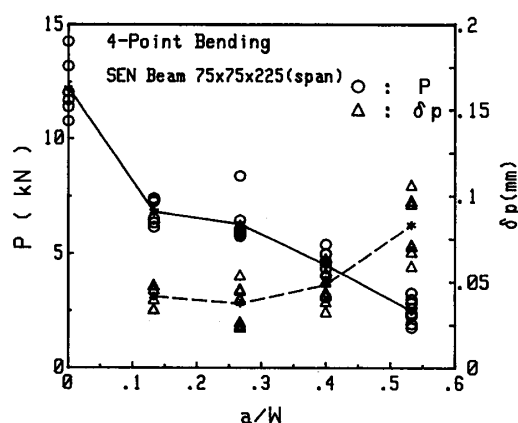


図-2 終局曲げ荷重・開口変位と切欠き比

切欠き材($a/w=0.27$)の場合、 $S_{max}=0.983-0.046 \cdot \log N_f$ ----- (3)

切欠き材($a/w=0.40$)の場合、 $S_{max}=1.0-0.044 \cdot \log N_f$ ----- (4)

切欠き材($a/w=0.53$)の場合、 $S_{max}=0.998-0.048 \cdot \log N_f$ ----- (5)

平滑材と切欠き材の回帰式($S_{max}=A+B \cdot \log N_f$)を図-4にまとめた。この図において切片の値は、 $a/w=0.27$ 以上の切欠き材の方が平滑材より大きく、また疲労寿命も増大する。上の5式から、繰返し回数 200万回の曲げ疲労強度は、平滑材($a=0$)と $a/W=0.13, 0.27, 0.4, 0.53$ の切欠き材から、それぞれ静的曲げ強度の 0.63倍と 0.63, 0.69, 0.72, 0.70倍が得られた。すなわち、切欠き深さを大きくすると疲労強度が高くなる傾向にある。このことは幅に対して有効せいが小さく厚さの薄い部材の方が、繰返し荷重が作用しても疲労破壊を生じにくいことを示している。また平滑材を基準とした切欠き材の切欠き深さに対する影響を知るため、各切欠き材の基準荷重(P_b)を平滑材の基準荷重(P_{b0})に換算した上限荷重比($S'_{max}=P_{max}/P_{b0}$)での回帰式($S'_{max}=C+D \cdot \log N_f$)を求めた(図-5)。これらの切欠き比によるパラメータの変化を図-6に示す。

3.3 疲労下の開口変位と亀裂進展挙動

一定繰返し荷重下における開口変位の履歴曲線を載荷時の初回から疲労破壊回数までの一例を図-7に示す。試験条件は図中記載のとおり。

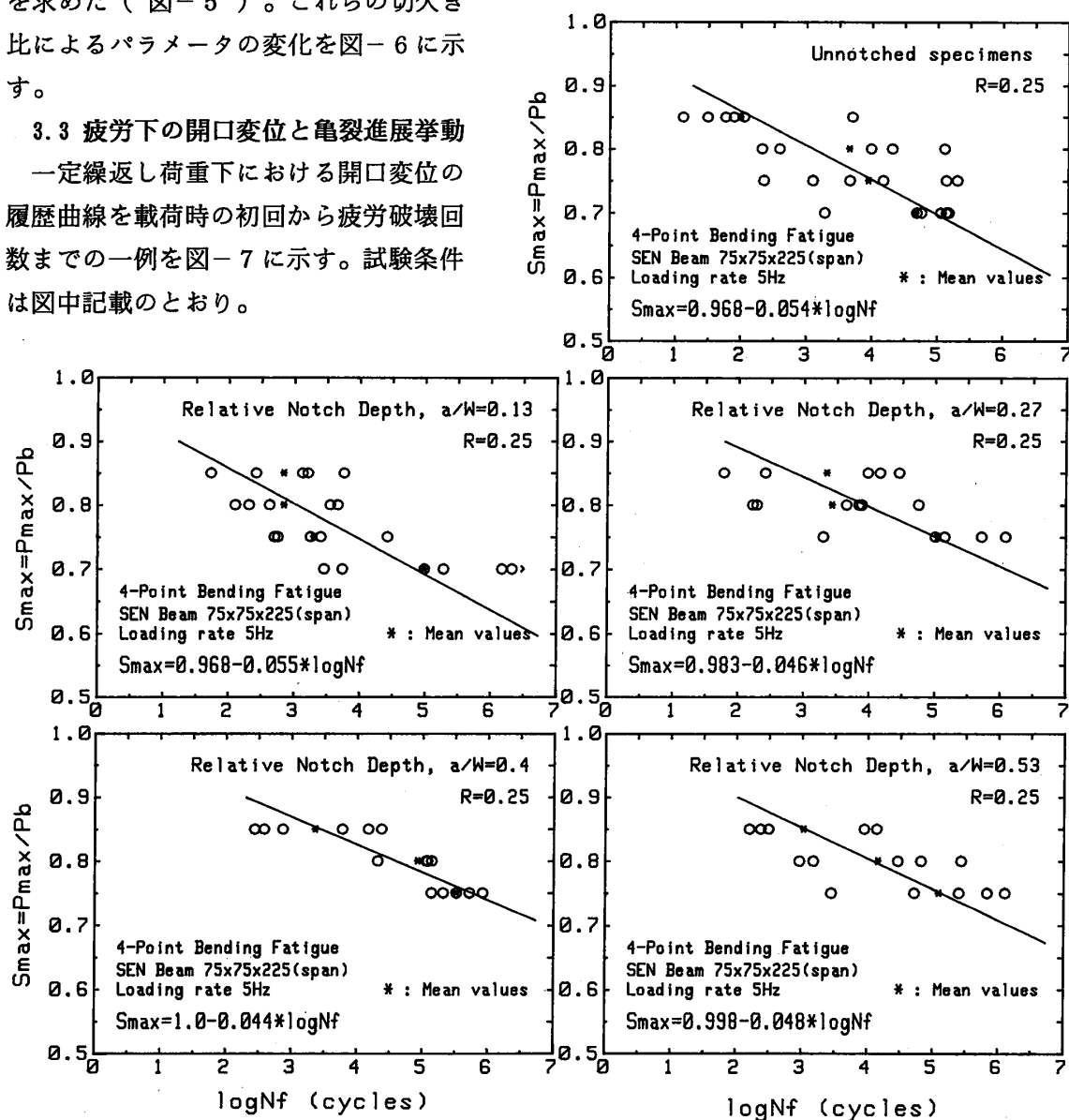


図-3 設定荷重比と疲労破壊回数

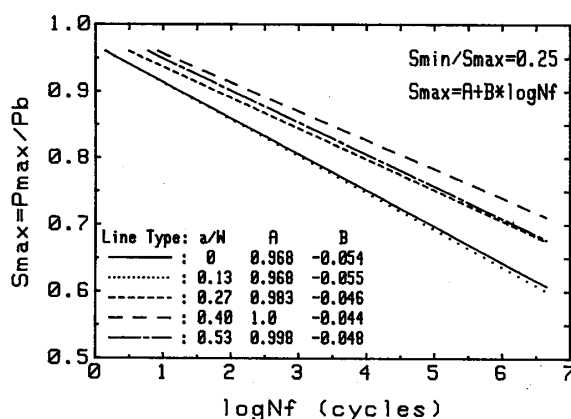


図-4 (1)式～(5)式の比較

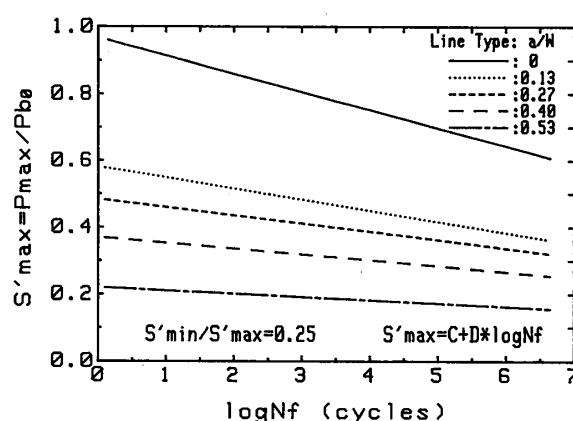


図-5 平滑材を基準とした式の比較

図中の中間空白部はデータ集録条件の変更によるものである。図-8は、 $a/W=0.4$ と 0.53 の2種類の切欠き梁の代表的な例として、 $S_{max}=0.85, 0.8$ と $S_{max}=0.8, 0.75$ について繰返しの上限荷重点における開口変位量(δ_{max})と繰返し回数(N)の関係を示す。疲労破壊時の開口変位量(δ_f)は、 $a/W=0.53$ では $\delta_f=0.12\sim0.20\text{mm}$ 、 $a/W=0.40$ 以下では $\delta_f=0.08\sim0.15\text{mm}$ であった。これは切欠き深さ、設定荷重の大きさなどによって相違する。この図を、それぞれ無次元化表示すれば図-9を得る。この結果、高荷重疲労を与えると、繰返し回数が増加するにしたがって、亀裂が発生・成長する。 δ/δ_f と $\log N/\log N_f$ が漸増する範囲は疲労破壊回数(寿命)の約 $0.7\sim0.8$ である。この値を過ぎると切欠き材の亀裂先端が塑性変形によって亀裂進展速度を高める。図に示されているように、亀裂進展による開口変位が繰返し回数に対して必ずしも連続的に漸増しないことがわかる。亀裂進展を目視で知ることは精度的に不適切であるので、本実験ではビデオカメラを採用した。

供試体表面を観察する限りでは、切欠き部からの亀裂進展は繰返し回数の増加に対して連続的に進展することではなく、漸増・停滞を繰り返すことが観察され、次の段階で離れた位置に亀裂が生成することが認められた。

3.4 疲労亀裂進展速度と応力拡大係数幅

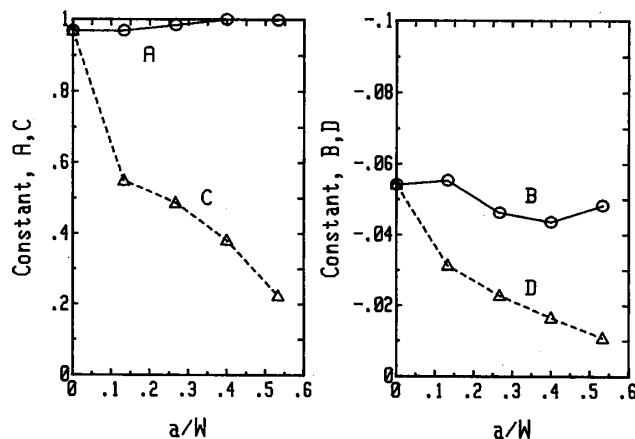


図-6 切欠き材の上限応力比と疲労破壊回数

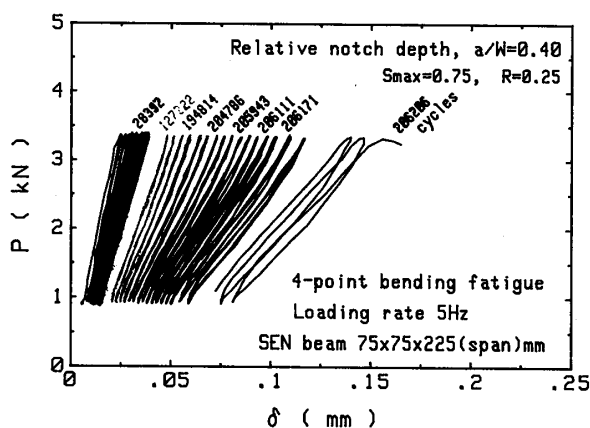


図-7 繰返し荷重と開口変位曲線

コンクリートの SEN 梁供試体による一定繰返し荷重下での疲労亀裂進展挙動(da/dN) を亀裂長さ(a)と繰返し回数(N)の関係から求める。この進展速度の算定法には、セカント法を採用した。この方法は繰返し荷重が P_{max} と P_{min} の範囲(ΔP)で変動するとき、応力拡大係数も K_{max} と K_{min} の幅(ΔK)で変動するので、そのときの平均亀裂長さ(a_{avr})から近似的に応力拡大係数幅を求めるものであり、式(6)の関係に立脚する。同式中の Y は、試験片の形状と試験方法で定まる係数であり、Srawley[5]の解析値によりえられる。

$$\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{a_{avr}} \cdot Y \quad \text{----- (6)}$$

ここに、 $\Delta \sigma = 3\Delta P(L_2 - L_1)/(2BW^2)$

$$\Delta P = P_{max} - P_{min}$$

$$a_{avr} = (a_{n+1} + a_n)/2$$

$$Y = 1.99 - 2.47\alpha + 12.97\alpha^2$$

$$- 23.17\alpha^3 + 24.8\alpha^4$$

$$\alpha = a_{avr}/W$$

L_1 : 荷重点間距離(mm)、 L_2 : 支点間距離(mm)、 W : 供試体高さ(mm)、 B : 供試体幅(mm)である。

$a/W=0.40$ と 0.53 の場合について、 $R=0.25$ 一定下で $S_{max}=0.85, 0.80$ と $S_{max}=0.80, 0.75$ の疲労条件での ΔK と da/dN の関係を図-10に示す。 ΔK に対する切欠き先端の da/dN の変化の様子は、図上で直線的に安定成長の段階に入って、 da/dN は漸増の状態になる。そして、 S_{max} が大きい場合ほど、高い進展速度をとっている。図に示すように供試体すべてが順調に亀裂が成長するとは限らず、亀裂の成長が開始しても途中で停留したのち再び亀裂進展する場合もある。一般に、 da/dN は ΔK と強い相関関係があり、両者は式(7)のべき関数で表示される。この式は通常 Paris則とよばれる。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad \text{----- (7)}$$

$$\log(da/dN) = \log C + m \cdot \log(\Delta K) \quad \text{---- (8)}$$

ここに、 $da/dN = (a_{n+1} - a_n)/(N_{n+1} - N_n)$

このようにしてコンクリートの疲労亀裂進展に対する抵抗性は、 da/dN と ΔK の関係

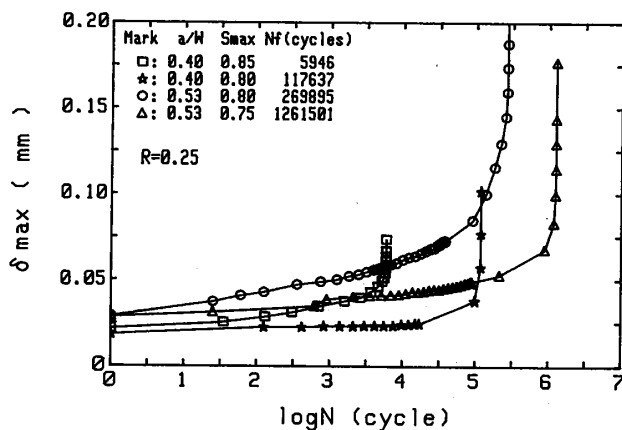


図-8 開口変位と繰返し回数

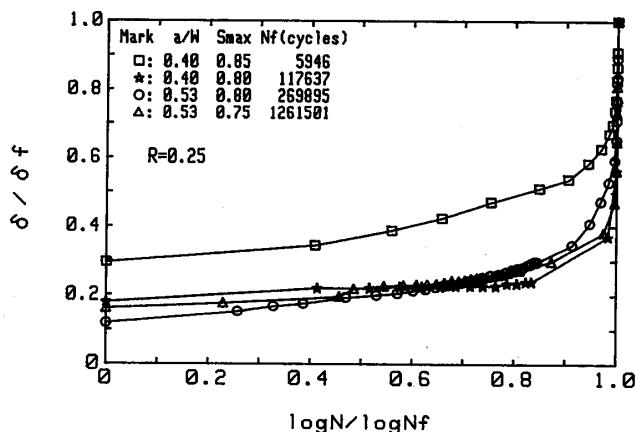


図-9 破壊までの相対変位と繰返し回数

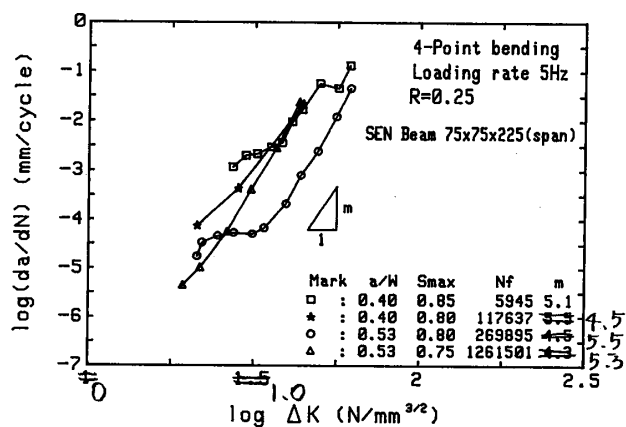


図-10 亀裂進展速度と応力拡大係数幅

で整理され、靱性を反映させることができる。 ΔP を一定とした実験を行なう限り、亀裂進展および ΔK の増加に伴って da/dN は急激に増大して疲労破壊に至る。その関係は両対数図上で直線となり、前記の式(8)で表示される。この亀裂安定成長域での da/dN と ΔK の関係を求めた結果、 $a/W=0.4$ において $m=5.1$ と 5.5 、 $a/W=0.53$ において $m=4.5$ と 4.3 であった。また C は、 $\log C=-8.0$ と -7.4 、 $\log C=-10.3$ と -9.0 であった。つまり $C=1.0 \times 10^{-8}$ と 3.98×10^{-8} 、 $C=5.0 \times 10^{-11}$ と 1.0×10^{-9} である。以上の結果から、 da/dN は S_{max} が大になるほど高くなる。

4. まとめ

コンクリート梁による一定荷重振幅($R=0.25$)の曲げ疲労試験結果から、平滑材と切欠き材($a/w=0.13, 0.27, 0.4, 0.53$)の $S-N$ 関係、疲労強度の比較、疲労下の亀裂進展速度に及ぼす影響などについて得られた知見は以下のように結論づけられる。

1) 上下限荷重比が $R=0.25$ における疲労強度の回帰式は次式で与えられる。

平滑材の場合、 $S_{max}=0.968-0.054 \cdot \log N_f$

切欠き材($a/w=0.13$)の場合、 $S_{max}=0.968-0.055 \cdot \log N_f$

切欠き材($a/w=0.27$)の場合、 $S_{max}=0.983-0.046 \cdot \log N_f$

切欠き材($a/w=0.40$)の場合、 $S_{max}=1.0-0.044 \cdot \log N_f$

切欠き材($a/w=0.53$)の場合、 $S_{max}=0.998-0.048 \cdot \log N_f$

2) 繰返し回数200万回の曲げ疲労強度は、平滑材で終局強度の0.63倍、また切欠き材(上記4種類の切欠き比)で終局強度の0.63, 0.69, 0.72, 0.7倍であった。この結果、切欠き比(a/W)が0.27以上で、平滑材よりも疲労強度が大となった。

3) 切欠き部からの亀裂進展は、ビデオカメラでの観察結果、繰返し回数の増加に対して連続的に進行することなく、漸増・停滞を繰り返す、突然離れた位置に亀裂が生成することもある。このことは表面観察で亀裂進展を知る方法では、不十分であることを意味する。

4) 切欠き材の疲労亀裂進展速度(da/dN)と応力拡大係数幅(ΔK)との間には、安定亀裂成長領域が存在し、Paris則が成立する。そして、設定荷重が大きいほど da/dN 極小値は高くなる。

5) Paris則で表示できる安定亀裂の進展速度は、図上でほぼ一定の勾配を示すが切欠き比によって若干の相違を示す。この勾配(定数) m は、 $a/W=0.4$ において $m=5.1$ と 5.5 、 $a/W=0.53$ に対して $m=4.5$ と 4.3 である。

「参考文献」

- 1) Murdock, J.W. and Kesler, C.E.: Effect of Range of Stress on Fatigue Strength of Plain Concrete Beams, ACI Journal, Vol. 30, No. 2, pp. 221-231, 1958.
- 2) Swartz, S.E., et al.: Crack Growth and Fracture in Plain Concrete - Static Versus Fatigue Loading, ACI Publication SP-75, pp. 47-69, 1983.
- 3) Baluch, M.H., et al.: Fatigue Crack Propagation in Plain Concrete, SEM/RILEM International Conference on Fracture of Concrete and Rock, pp. 80-87, June, 1987.
- 4) 金子林爾、大岸佐吉: コンクリート梁の切欠き有無による曲げ疲労強度と亀裂進展速度、日本建築学会構造系論文報告集、No. 428, pp. 17-24, 1991.
- 5) Brown, W.F. and Srawley, J.E.: Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials, ASTM STP 410, 1966.