

1. まえがき

繰返し荷重下でのコンクリートの圧縮疲労に関して筆者らは、疲労限が $N=10^7$ までには存在しないこと、 2×10^6 回時間疲労限が、片振りで静的強度の約60%で、耐久線図は修正 Goodman の関係が成立すること、同一条件下での疲労寿命 N が大きくばらつき、その分布は大概、対数正規分布に近似されること、荷重繰返しにより弾性係数が低下する傾向などについて報告してきた。本報告では、この疲労破壊が確率過程であるという見地から、一定繰返し荷重下の N の分布および前繰返し荷重を受けコンクリートの残存強度について実験し、これらの結果から、疲労破壊機構について検討してみたものについて述べる。

2. 疲労破壊の確率課程

破壊の確率課程理論と繰返し疲労破壊に適用してみる。

$\mu(N)$: 任意繰返し回数 N において、次の1サイクルで破壊する確率、いわゆる非破壊状態から破壊状態への遷移確率

$g(N)$: N と $N+1$ の間で破壊する確率、いわゆる疲労寿命の確率密度関数

$P(N)$: 繰返し回数 N までに破壊しない確率、いわゆる N における生存確率 とすると、

$$P(N) = \int_N^{\infty} g(N) dN$$

$$P(N) \cdot \mu(N) \cdot dN = -dP(N) \quad \therefore \mu(N) = -d(\log P(N)) / dN$$

つまり、 $\log P(N)$ と N の関係式の勾配に(-)をつけたものが $\mu(N)$ となる。

3. $P(N)$ と N の関係について

コンクリートの圧縮疲労試験結果より求めた $P(N)$ と N の関係の例を図-1に示した。これより、コンクリートでは、 $\mu(N)$ が一定でないことがわかる。金属の場合には遅れを伴うもののほぼ一定となるといわれくあり、これは、コンクリートの疲労破壊機構が金属のそれと、本質的に差異があることを示すものである。

コンクリートの $\mu(N)$ が減少することは、コンクリート中の微細ひびわれ先端の集中応力に関して次のように考察される。コンクリートの破壊は、内部微細ひびわれの発生伝播過程で、そのひ

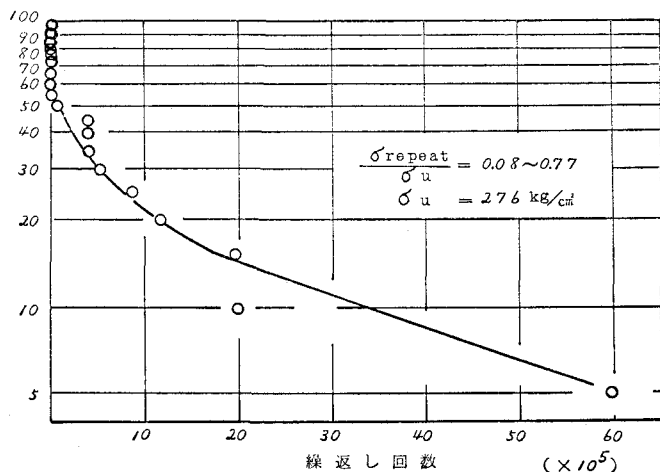


図-1. コンクリートの圧縮疲労寿命 N の分布

びわれ長さ、脆性材料に適用される Griffith の概念での限界ひびわれ長さに達したときにおこるものであると考へ、Kaplanが求めた限界ひびきエネルギー解放率を用いて、この限界ひびわれ長さを算出すると5mmを超えらる値となる。コンクリート内部は、載荷荷より、骨材周囲にボンドクラックが発生しており、またモルタルクラックの存在も確認されている。このようなクラックは、その先端に应力が集中する欠陥部と考えられるが、この分布は、大きさおよび長さとも確率分布していると考えられる。このようなコンクリートに外荷重が作用すると

微細ひびわれが発生伝播するが、一軸応力下での伝播方向は、モルタルクラックとは応力方向と同一方向のものが多いと観察される。(図-2)。このひびわれの発生伝播の機構は、欠陥部先端の応力集中から説明され、Ingilis によれば、欠陥部先端の最小半径 r_0 の $1/2$ 乗に反比例する応力が集中するといわれている。コンクリートの圧縮疲労試験結果で $M(N)$ が $B(N)$ とともに減少するのは、この r_0 の増大によると考えられる。ここで、 r_0 が増大するということは、必ずしもひびわれ長さが増大しないことを意味するものではなく、荷重繰返しにより、独立した微細クラックが多数発生することにより、 r_0 の増大と同様の傾向を示すものと解したほうが適当ではないうかと考える。荷重繰返し後に破壊に至るまではコンクリート内部に多数の微細ひびわれが観察されることは、ある程度この考え方を裏づけるものである。以上の考察では、コンクリートの疲労破壊機構は、荷重繰返しとともに内部ひびわれを増大するという連鎖的なものであるが、ひびわれ限界長さには達しない限り、内部ひびわれは応力緩和の役割をするということになる。このことを確認するため、荷重繰返し後のコンクリートの残存強度について試験してみた。

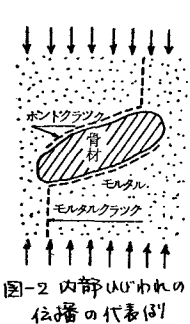


図-2 内部ひびわれの伝播の代表例

4. コンクリートの残存強度に及ぼす前荷重繰返しの影響について

欠陥部周辺の応力の理論解として、欠陥部を長さ $2a$ 、幅 $2b$ の階円形状と仮定すれば、 σ_1 , σ_3 が作用したときの階円周上の Tangential Stress σ_θ は(図-3)

$$\sigma_\theta = (\sigma_1 + \sigma_3) \frac{1 - m^2}{1 - 2m \cos 2\theta + m^2} + 2(\sigma_1 - \sigma_3) \frac{m \cos 2\theta - \cos 2(\theta + d)}{1 - 2m \cos 2\theta + m^2}$$

$$m = \frac{a-b}{a+b}, \quad d: \sigma_1 \text{ と階円長軸 } x \text{ とのなす角}, \quad \theta: \text{階円上の点と示すパラメータ}$$

と Muskhelishvili より報告されている。ここで $\sigma_3 = 0$ として一軸応力状態での σ_θ を求めると、 σ_1 が圧縮応力の場合、引張応力の最大値が $\theta = -d$ のときに生じることになり、 $\sigma_1 = -\sigma_\theta$ として表わされる(図-4)。これより、クラックの伝播方向は一軸応力状態では、その応力方向と同一方向に近くなることになり、これは先述した観察結果と一致する。クラックの伝播方向が応力方向とすれば、その方向に応力が加えられたときには、応力緩和の役割をするはずであるが、逆に、クラックの伝播した方向に直角な方向に応力が加えられた場合には、クラック周辺の応力緩和は期待できず、むしろ、クラック発生により、巨視的に断面減少が起きていると考えられる。このことと前提に基き、荷重繰返し後のコンクリートの残存強度を調べた。繰返し荷重の方向と残存強度試験の荷重方向を同一方向とした場合の試験結果を図-5に、残存強度試験の荷重方向と前繰返し荷重方向と直角な方向とした場合の試験結果を図-6に示す。図-5では、残存強度は静的圧縮強度よりむしろ大きくなっていくもの、荷重方向と変えれば図-6のように静的強度より小さいものとなり、前述した応力緩和の考え方と一致している。

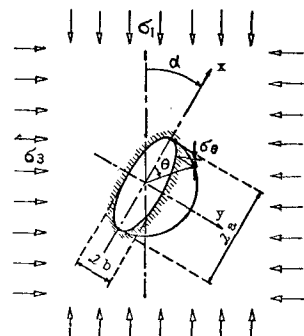


図-3 階円ひびわれ周面の Tangential Stress

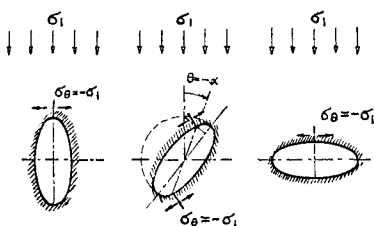


図-4 一軸圧縮応力下の引張応力

方向とした場合の試験結果を図-6に示す。図-5では、残存強度は静的圧縮強度よりむしろ大きくなっていくもの、荷重方向と変えれば図-6のように静的強度より小さいものとなり、前述した応力緩和の考え方と一致している。

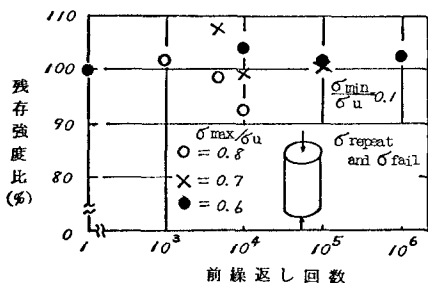


図-5 荷重繰返し後の残存強度比 (同一方向、 $\phi 7.5 \times 15 \text{ cm}$)

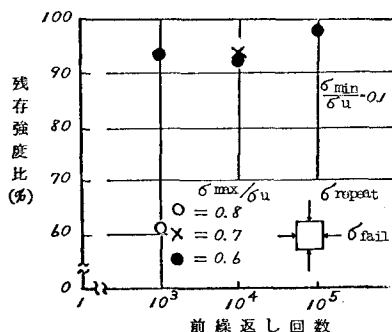


図-6 荷重繰返し後の残存強度比 (直角方向、 $10 \times 10 \times 7 \text{ cm}$)