

九州大学 工学部 正員 松下 博通

1. 概要

繰返し圧縮応力を受けるコンクリートの疲労現象について、疲労寿命の分布、生存確率を考慮したS-N-P曲線、変形特性、変形特性と疲労寿命の関係、前繰返し応力を受けた後の残存強度などについて数回にわたって報告してきた。今回も、本報告のほか、繰返し応力から考えた内部ひびわれの発生に関する報告と、変動荷重を受ける場合の疲労寿命についての報告を述べているが、これらの結果を大まかにとりまとめることにより、コンクリート一軸繰返し圧縮応力を受ける場合の疲労破壊機構について考察を加えてきた。

2. コンクリートの材料特性と破壊

一軸圧縮応力を受けるコンクリートの破壊は一般に脆性破壊といわれている。しかしながら、コンクリートはそれ以前に至るまでは、変形量のなかにはかなりの塑性変形を含み、応力-ひずみ曲線も直線にはならないことは同知の通りである。このことは、コンクリートが、いわゆるガラスのような完全脆性材料と考えられないことを示すものである。完全脆性材料の強度理論は、Griffithによって始めて展開され、Orowan, Irwinらによっておしめられている。この理論の基礎概念は、供給されるエネルギーが内部欠陥部に発生する内部ひびわれの表面エネルギーに変換されるとき、エネルギーの供給速度が、表面エネルギーへの消費速度より大になれば脆性材料は破壊するとして材料強度を求めるのである(図-1, 2)。

Kaplanは、Irwinの理論がコンクリートにも適用できるとし、その後 G_c の値もRomualdiらによって求められている。

3. 疲労破壊機構の考察

コンクリートの疲労破壊機構を考察するには、まずガラスのような完全脆性材料との区別を明らかにしなければならぬ。完全脆性材料であるならば、欠陥部に生じたひびわれの最端部をもっとのひび

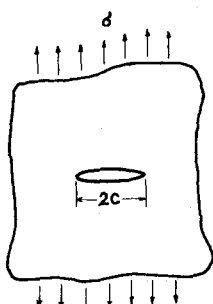


図-1. Griffith's 模型

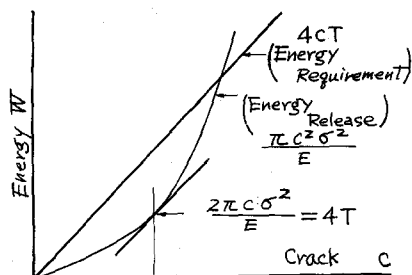


図-2. Griffith's 理論

われが破壊に寄与するものであり、その強度分布が Weak link theory から導かれる Weibull 分布に近うのである。しかし、コンクリートの場合、繰返し疲労破壊とあるような応力レベルでは、たとえ静的に加えられる荷重であっても、無数の微細ひびわれが内部に存在していることが Thomas, T.C.Hsu, Slate, Taylor, Shan, 加藤, 小阪ら多数の研究者によって観察されている。すなわち、コンクリートの破壊は、一つのひびわれによって生じるのではなく、多くの微細クラックの集合体という形で、それが連結することにより生じると考えなければならぬ。このことは、表面エネルギー W_0 とクラック1本の長さ C の関係は直線にはならず、2次の曲線となることを示す。 $(W_0 = \int 4cT \, dV)$ 。すなわち、Energy Requirement は図-3に示す通りである。次に Energy Release について考える。一軸圧縮応力下において、ひびわれの伝播方向が、その応力方向と一致することはすでに報告した通りであり、この理論解析については今回の講演概要でも述べている。また、小林昭一氏らの研究報告でも同様の結果が得られている。このため、図-4に示されるように、欠陥部周辺の微細クラックの進展がある。これから、一軸圧縮応力下における Energy Release を求めると、図-3のようなものになり、2次の形となる。

$$\Delta W_e = \pi b c \sigma^2 / 2E$$

繰返し荷重によるひずみ量の変化の一例は先の報告の通り図-5に示されるようになる。これより、ひずみの増大はほとんど残留ひずみによるものである。このことは、残留ひずみ量が内部微細ひびわれの発生伝播した全長におかえられることから、繰返し回数に比例して内部微細ひびわれの量が增大すると考えてもよいことになる。また、ひずみの進行度合を模式して描くと、図-6のようになり、疲労寿命 N のうち、遷移領域、加速領域の比率は少なく、疲労寿命はほぼ定常領域によって支配される。このうち、遷移領域は、荷重による内部の応力集中部の緩和のために多数の微細クラックが発生伝播する領域であり、定常領域では、加えられるエネルギーにより、安定したひびわれの伝播する領域、加速領域は、これに安定した微細ひびわれが連なりはじめ、急激な破壊に至る領域と考えられる。このひびわれの伝播過程は、加振法によって報告された観察結果とも一致する。また、前繰返し力を受けたコンクリートの残存強度試験結果を図-7に示しているが、各領域の性質と合致する。このほか、今回報告する変動荷重下の疲労寿命についても同様のことが考えられる。

次に、内部微細ひびわれの発生伝播過程より、コンクリートの疲労寿命が正規分布することから導かれる σ と ϵ に示して置く。

今、疲労寿命までの繰返し回数と等回数ごとに多段階で分割する。このとき、コンクリート内部には、新たに発生したり伝播したりする多数の微細クラックが存在し、それらの全長は、個々のひびわれ長が非常に短いことから、その回数に比例し、また増加量はその回数に比例すると思えばならない。このことは、図-4の σ —一定からも説明できよう。このひびわれ全長は、分割した荷重繰返しにより、長くはるが、このとき $\Delta C_i = C_i \times S_i$ (S_i : 各段階部を受けるエネルギー) が成立する。 $\sum S_i$ は中に恒定定理より正規分布するため、 C_i は対数正規分布となる。また、図-8に示したように、ひずみ速度(これはそのまま、コンクリート内部の微細ひびわれの全長の増加速度と考えてもよい)と疲労寿命 N が逆比例の関係にあることは報告済である。したがって N は C に反比例することが導かれる。このことより、 N は対数正規分布となることになる。本報告作製に関しては、多数の論文を参考にさせて頂いた。紙面の都合上、一々挙げることはできない。厚くお礼申し上げる次第である。

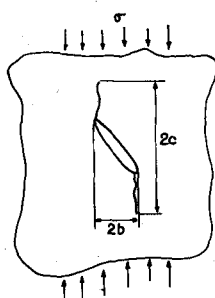


図-4. 微細クラックの進展 (圧縮応力場)

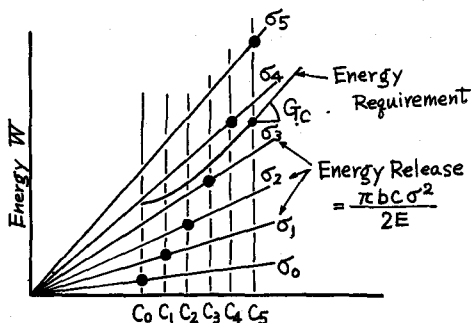


図-3. Energy Requirement & Energy Release

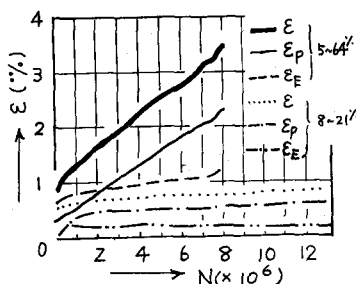


図-5. 繰返し回数とひずみの関係

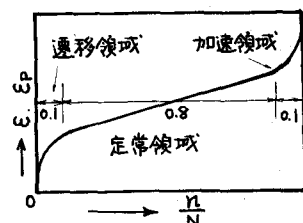


図-6. ひずみ変化の模式

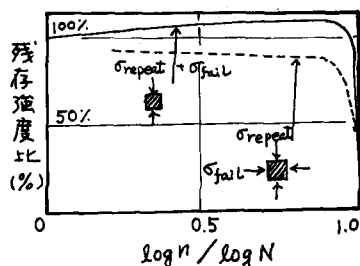


図-7. 荷重繰返し後の残存強度比

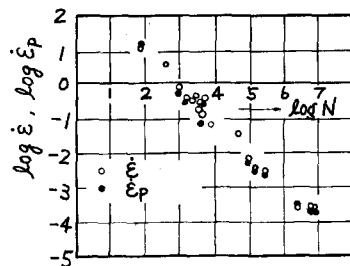


図-8. ひずみ速度と疲労寿命