

東京大学 正員 堀井 秀之
アジア工科大学 Hak Chul Shin

1. まえがき 近年の研究により、コンクリートにおける静的荷重下のクラック進展現象を解析的に予測することは可能となったが、繰り返し荷重の作用による疲労クラックの進展についてはそのメカニズムさえ明かではない。本研究では、疲労クラック進展のメカニズムを解明することを目的とし、疲労クラック進展の解析的モデルを提案する。モデルの構築においては、引張軟化域における繰り返し荷重に対する材料の挙動に着目する。コンクリート供試体に対して疲労破壊試験を行い、レーザースペックル法によりクラック開口変位の分布を計測し、各荷重サイクルにおけるクラック進展長を求め、結果をモデルによる解析結果と比較する。ここでは、荷重が比較的大きい低サイクル疲労を主に考える。

2. 疲労クラック進展のメカニズム 静的荷重下のクラック進展現象はクラック先端のフラクチャープロセスゾーンの存在に支配されており、静的破壊挙動はDugdale-Barenblatt型のモデルにより記述される。クラックの進展を支配する材料の挙動は引張軟化曲線によって表わされる。静的破壊に対する知見を拡張すれば、疲労クラックの進展は引張軟化域における繰り返し荷重に対する材料の挙動に支配されているものと考えられる。図1[1]は引張繰り返し荷重下の応力変位曲線であるが、挙動は非常に複雑である。その特徴のひとつとして、再載荷時の挙動が挙げられる。すなわち、応力と変位はほぼ比例して増加するが、その勾配は破壊の進行（除荷開始時の応力の低減）に従って減少する。再載荷時の応力の最大値は除荷開始時の応力の85%程度に低減される。ここでは、この応力の低減を疲労クラック進展のメカニズムと考へ、解析的モデルを構築する。

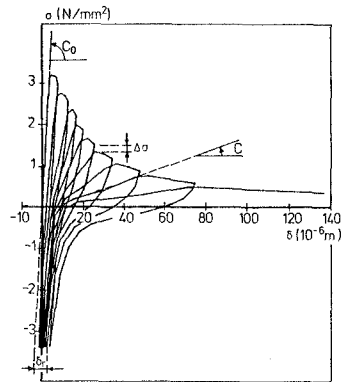


図1 繰り返し引張荷重下の
応力変位関係

3. 疲労クラック進展の解析的モデル ブリッジングゾーン(BZ)を応力伝達のあるクラック先端部としてモデル化する。まず、初期荷重によるBZの形成を考える；図2a。BZの長さ・伝達応力の分布は図3の引張軟化関係AB、応力拡大係数がゼロの条件を満足するよう、積分方程式を解いて求まる[2]。次に除荷後の再載荷を考える；図2b。進展したBZのある部分（載荷部）では引続き破壊が進行し、引張軟化関係ABが満足される。それ以外の部分（除荷部）では除荷・再載荷が起こり、伝達応力と開口変位は比例するものと仮定する。例えば、図3で

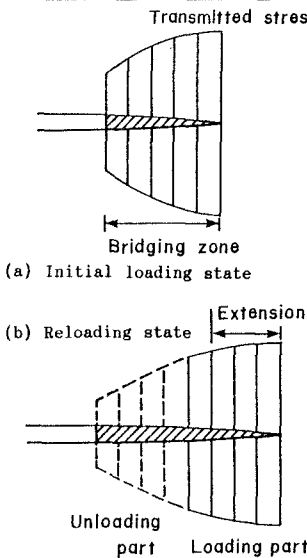


図2 疲労クラック進展モデル

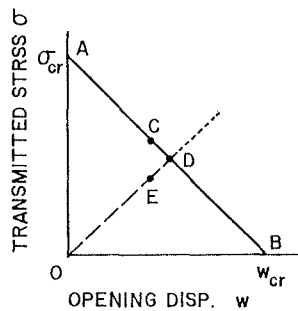


図3 載荷部・除荷部の材料挙動

除荷開始の状態が点Cであったとすると、再載荷ではODの関係が満足される。点Eにおける応力と点Cにおける応力の比は一定で、応力低減係数 α で与えられるものとする。除荷部の各点は除荷開始時にそれぞれ異なる状態にあり、再載荷においても異なる勾配の比例関係を満たすが、その勾配は除荷開始時の伝達応力の分布と応力低減係数 α より定めることができる。これらの条件とBZ先端で応力が有限と

いう条件より、伝達応力に関する積分方程式が得られ、これを数值的に解くことによりクラックの進展長・伝達応力の分布が得られる。除荷部は、再載荷時に解が引張軟化曲線を越えない（図3のOD上で点Dを越えない）という条件を満足するように選択される。従って、解析には繰り返し計算が必要となる。以後の荷重サイクルにおいても、同様の手順で解析を繰り返す。

4. 解析結果 図4に荷重サイクル数の増加に伴うBZ長の増加を表わす。 K_{IA} は一定の繰り返し荷重に対する荷重応力拡大係数（弾性体とした時の応力拡大係数）、 $q_{pc0} = 0.366E'w_{cr}/\sigma_{cr}$ は材料の特性長を表わす； σ_{cr} = 引張強度、 w_{cr} = 限界開口変位（図3）、 $E' = E/(1-\nu^2)$ 。荷重サイクル数の増加に伴いクラック進展速度は減少し、荷重が小さい場合数回のサイクルの後に進展を停止する。荷重の増加に伴いクラックの進展速度は増加し、進展停止までのサイクル数も増加する。荷重が大きく静的破壊に対する最大荷重に近い場合には、数回の繰り返し荷重の後にクラックは不安定成長する。図5に異なる応力低減係数 α に対する疲労クラック進展挙動を示す。 α の減少に伴い、クラック進展速度・進展停止までのサイクル数は増加する。

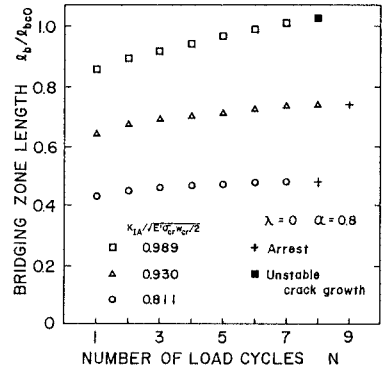


図4 荷重サイクル増加とBZ長の変化

5. レーザースペckル法による観察との比較 図6のコンクリート供試体(W:C:FA:CA=0.45:1:2:3.5, $f_c = 26.1\text{MPa}$, $f_t = \sigma_{cr} = 3.39\text{MPa}$)に対して疲労試験を行い、レーザースペckル法によりクラック開口変位の分布を各荷重サイクルで計測した。一定繰り返し荷重 $P_{max} = 2470\text{N} = 252\text{kgf}$ は静的最大荷重の80%である。結果を図7に示す。この開口変位の分布よりクラックの進展長を求め、図5で解析結果と比較した。 $\alpha = 0.75$ に対する結果は実測値と良好な一致を示している。

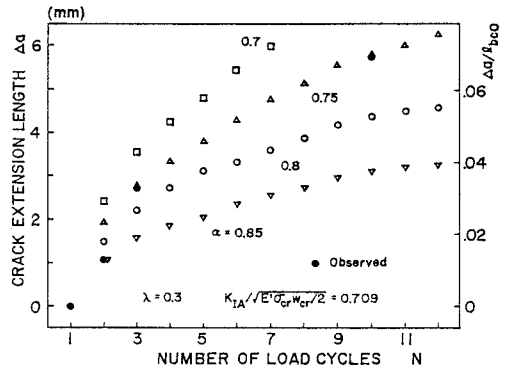


図5 クラック進展長の予測と計測の比較

6. おわりに 簡略化されたモデルにもかかわらず、モデルは疲労クラック進展挙動を再現しているということが出来る。コンクリートにおける疲労クラックの進展の主なメカニズムは、繰り返し引張軟化挙動における応力の低減にあると結論される。BZの除荷

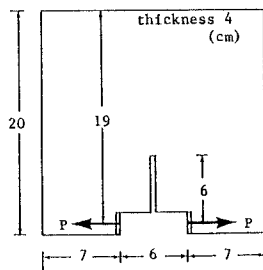


図6 くさび載荷型供試体

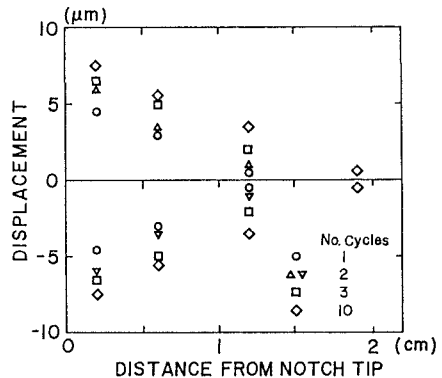


図7 レーザースペckル法による開口変位の分布

部において再載荷により破壊が進行しない場合（図3でOD上の点が引張軟化関係ABに到達しない場合）の応力低減は考慮に入れていないが、高サイクル疲労に範囲を広げる場合には、そのメカニズムが重要であると考えられる。

参考文献 [1] H.W. Reinhardt et al., J. Struct. Eng., ASCE, 112 (1986) 2352.

[2] H. Horii et al., Fracture of Concrete and Rock, Springer-Verlag (1989) 205.