

大成建設株式会社 正 員 ○ 柏原 資和
 東北大学工学部 正 員 佐武 正雄
 同 正 員 新聞 茂

1. まえがき

A E による位置標定の研究や破壊面を微視的に観察した研究などからも明らかなように、モルタルのような脆性材料のき裂進展過程における限界エネルギー解放率を評価する場合には、巨視的なき裂面を形成するためのエネルギーだけでなく、巨視的き裂(主き裂)進展経路に沿って発生する微視的き裂の形成に費やされるエネルギーも考慮する必要がある。本文は、巨視的き裂近傍の微視的き裂の発生している領域、すなわち微視的破壊領域を3次元的にモデル化し、モルタル供試体の内部欠陥から発生する混合型き裂の進展過程を解析し、き裂進展経路及びき裂進展長と荷重との対応の2点に着目して実験結果と比較考察したものである。

2. 微視的破壊領域の3次元モデル

き裂進展過程を解析するには、次第で述べるように、材料の限界エネルギー解放率を必要とするが、破壊靱性試験から求められる限界エネルギー解放率は巨視的な主き裂ばかりでなく微視的破壊領域の形成に費やされたエネルギーも含んだ値である。従って、有限要素解析によってエネルギー解放率を求める場合にも微視的破壊領域から解放されたエネルギーを考慮しなければならない。このような観点から本

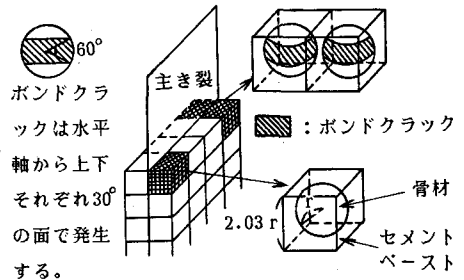


図-1 微視的破壊領域のモデル

解析では図-1に示すようにモルタル供試体中の細骨材と粗骨材の平均粒径に等しい球で置き換え、この球を大きさの等しい立方体の中に入れたものを規則的に配列してモデル化し、立方体から球を取り除いた残りの部分がセメントペーストであると考え、解析に用いたモルタル供試体の細骨材とセメントペーストの体積比が約1:1であることから、球の半径を r とした場合、立方体の一辺の長さは $2.03r$ となる。微視的破壊領域を観察した研究は非常に少ないが、微視的き裂の発生状況については次に述べる3つの研究結果を基礎として決定した。(i)新聞³⁾によるコンクリートの破壊機構を実験により調べた結果によれば、結合力が弱く、応力集中の生じている骨材の表面に沿って微視的き裂(ボンドクラック)が最も発生しやすい。細骨材に比較し、セメントペースト中の水和物の結晶は非常に小さいので、モルタル中でも同様な状況にあると考えられる。(ii)佐伯⁴⁾の川砂利を骨材に用いた実験によれば、ボンドクラックは水平軸から上下それぞれ30°の面で発生しやすい。(iii)橋田²⁾らの花こう岩の破壊面を微視的に観察した結果によれば、主き裂の進展初期では微視的き裂は、そのほとんどが主き裂面に隣接した界面でのみ発生している。以上3つの研究結果から、本解析では主き裂進展初期の微視的破壊領域の幅は非常に狭いので微視的き裂は図-1に示すように主き裂面と隣り合った骨材とセメントペーストの境界で発生するボンドクラックであり、そのボンドクラックは水平軸から上下それぞれ30°の面で発生すると考える。上述した微視的破壊領域のモデルにおいて、主き裂と微視的き裂が単位面積増加する場合の解放エネルギーが等しいものであるとすれば、主き裂が新たな破壊面を形成するための解放エネルギーに対する微視的き裂の発生に費やされる解放エネルギー γ' の比は、主き裂の新たな破壊面(立方体の1つの面)の面積に対する両側の骨材で発生するボンドクラックの面積の比であり、 γ と γ' との関係は $\gamma' = 3\gamma$ となる。この関係は骨材量には依存するが、骨材の平均粒径には無関係であることに注意する。

3. き裂進展過程の解析方法及び解析結果

アイソパラメトリック有限要素モデルによるき裂進展過程の解析に用いた

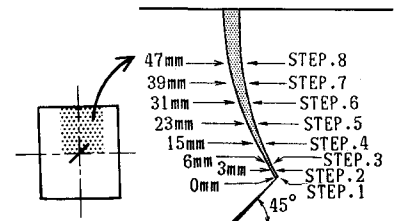


図-2 解析ステップ

条件及び解析方法は次のとおりである。(i) 主き裂は計算より求めたエネルギー解放率 J が実験より求めた限界エネルギー解放率 G_c に達したとき進展する。(ii) 主き裂は、主き裂先端近傍における応力場の最大主応力と直交する方向に進展する。(iii) 主き裂は有限要素モデルの節点の接続を解放することにより表現し、主き裂先端近傍の要素分割は(ii)の条件に合うように再分割し逐次変更する。(iv) エネルギー解放率の評価には前節の微視的破壊領域の3次元モデルを用いる。(v) 微視的破壊領域は非常に小さいので、供試体の巨視的材料特性に与える影響は無視できる。図-2に示すように8つのステップで、き裂の進展過程を評価する。図-3は要素分割を示したものであり、図-4は数値解析より求められた主き裂進展経路を実験結果と比較したものである。図-5は数値解析で微視的破壊領域を考慮して得られたエネルギー解放率と荷重の関係である。そして図-6は、図-5に実験より求めたモルタル材料の主き裂進展初期の限界エネルギー解放率 $G_c = 5.9 \times 10^{-4}$ (kgf/mm) を適用した各ステップ(各主き裂進展長)における荷重と実験より得られた荷重との対応を示したものである。

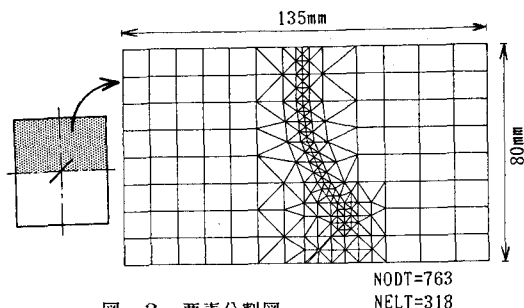


図-3 要素分割図

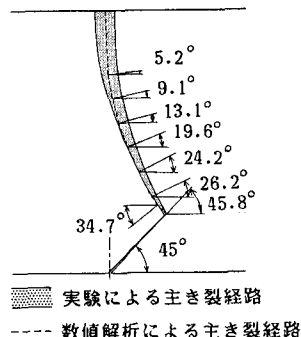


図-4 き裂進展経路の比較

4. 考察

図-4は数値解析より得られた主き裂進展経路を実験結果と比較したものであるが、主き裂は進展初期において実験より求めた領域から若干はずれ、その後は進展方向を逐次変えながら徐々に領域内に入りこむように進展し、最終的に供試体のほぼ中央部を貫通している。進展初期における領域からのずれは、主き裂が描く曲線の曲率がここでは特に小さいためにステップの取り方がやや荒かったことによると思われる。しかしながら、全体的に見れば数値解析より求められた主き裂進展経路は実験結果と良く対応していると考えられる。図-6の微視的破壊領域の3次元モデルを用いた数値解析より得られた荷重と実験結果との対応を見ると、主き裂が進展するにつれて解析値が実験値を徐々に上回る傾向はあるものの最大でも10%程度の違いであるため、主き裂進展長と荷重との対応は比較的良いのではないかと考えられる。

5. あとがき

微視的破壊領域をも3次元的にモデル化して、モルタルのエネルギー解放率も定量的に評価し、混合型き裂進展過程の解析を行った。主き裂進展経路及び主き裂進展長と荷重の関係は比較的良い対応が得られたが、微視的破壊領域のモデル化はコンクリートや岩石の非弾性挙動の解析に関して非常に重要であると同時に非常に困難な問題でもあり、さらに詳細な検討を進めてゆきたいと考えている。

参考文献 1) 西元宏任, 他, 土木学会第38回年次講演会講演概要集, I, 1983 p.267~p.268 2) T. Hashida, et al., Progress in Acoustic Emission, Jap. Soc. for NDI, 1982, p.78~p.89 3) S. Niiseki, et al., Progress in Acoustic Emission II, Jap. Soc. for NDI, 1984, pp.578~585 4) 佐伯昇, 土木学会第31回年次講演会講演概要集, V, 1976, p.22~p.23

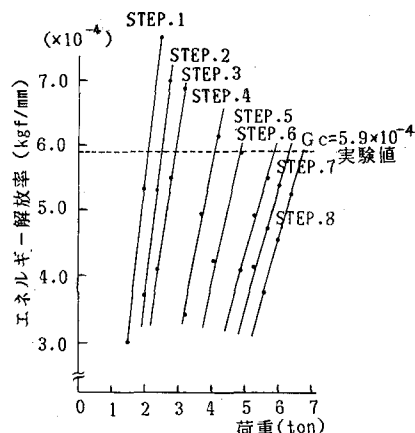


図-5 エネルギー解放率と荷重の関係

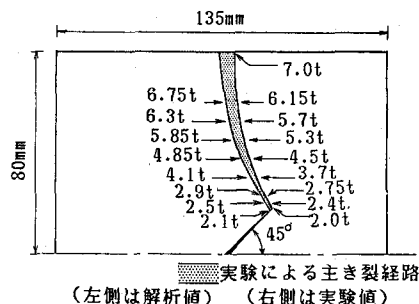


図-6 き裂進展長と荷重の対応