

I - A295

モルタル供試体の引張亀裂進展時のX線 CT 画像解析

熊本工業大学工学部 正会員 平田篤夫
 熊本工業大学工学部 正会員 上杉真平
 熊本大学工学部 正会員 吉永 徹
 北海道大学工学部 正会員 金子勝比古

はじめに

X線を用いたコンピュータ断層（Computed Tomography）解析装置は医療用よりもX線エネルギーを大きくした産業用が開発されている。そこで、本装置を用いて静的破碎時の亀裂進展状況を観察した。測定領域内の試料に一定強度のX線を照射すると、物体内を透過してX線エネルギーが吸収される。検出器でX線の透過強度を測定したデータは、各画素（ $0.293 \times 0.293\text{mm}$ ）毎のX線吸収係数（CT値）をフィルター補正逆投影法により画像データとして再構成される。

実験概要

モルタル供試体は直径125mm、高さ100mm、円孔径31mmの寸法を有する円盤状である。標準タイプの静的破碎剤を水と練り混ぜた後で円孔内に注入して破碎実験を行った。水和反応を生じた静的破碎剤が円孔壁に徐々に圧力を作用させると、供試体の円孔周辺には半径方向応力とともに接線方向応力が主応力として作用する。接線方向応力が供試体の引張強度に達すると供試体には引張亀裂が生じる。実験は破碎剤の注入から最終的に巨視的な破断が生じるまでの約10時間にわたって行った。内圧力値をモニターするためのひずみゲージ式の多チャンネル圧力変換器を製作して、これを静的破碎剤注入孔に挿入した。X線CT計測中の室内は強いX線が照射されるため、ひずみ測定器は鉛製のX線防護ケースにに入れてX線から防護した。図1はX線照射室内の実験状況であり、供試体は円筒形アクリルケースに入れて、試料テーブルに固定されている。実験時の円孔内圧の時間変化は、図2に示すように、3時間程度の初期水和反応時間の後に直線的な圧力増加を示す。最後に供試体が巨視的な破断をすると急激に圧力が低下する。供試体の割裂引張強度は5MPaであるが、引張強度を超えても巨視的な破断は生じていない。また、図2の内圧力-時間曲線では微小亀裂の成長を確認することはできない。

引張亀裂の生成

供試体の一つは、図3に示すような巨視的な破断を生じた。図の濃色部が供試体であり、淡色部が亀裂部分に相当している。中央部には圧力測定用のセンサーの断面も確認することができる。以下では、円孔中心を原点にとり、図中の右水平方向から時計回りに回転角 θ 、半径方向 r の極座標系で考えることにする。巨視的な破断時には $\theta = 75^\circ$ の亀裂が一気に生じて、 $\theta = 220^\circ$ および $\theta = 310^\circ$ の亀裂がそれから1時間程度後にほぼ同時に生じた。初生亀裂以外の亀裂は肉眼では徐々に進展して30分程度をかけて外周部に到達した。

そこで、円孔周囲供試体のCT値分布について分析することにした。図4は円孔壁から半径方向に5mmの測線

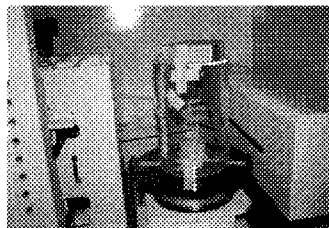


図1 実験状況

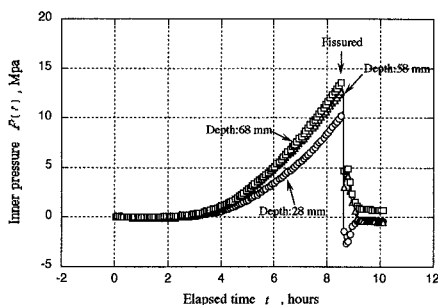


図2 経過時間と円孔内圧の関係

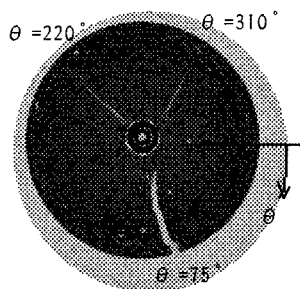


図3 巨視的破断後のCT断面画像

を設定して、 0.5° おきに 720 本の測線上に存在する画素の平均 CT 値が 500 以下となる θ を測定開始からの時間毎にプロットしたものである。破砕前の供試体の CT 値は 200～1000 であり、CT 値が 500 以下の部分は気泡などの供試体中の欠陥部分に相当するものと考えられる。なお、1 回の断面画像撮影には 6 分の撮影時間を要し、この供試体では 63 回の撮影が行われた。

$\theta = 75^\circ$ の初生亀裂については実験開始から 8.5 時間経過後に巨視的な破断が生じているが、供試体の引張強度に相当する 5MPa が内圧として作用し始める 6 時間経過後からこの部分で CT 値が低下する傾向がある。一方で、初生亀裂の位置とは原点から対称の位置の潜在的な欠陥と考えられる部分では亀裂として成長することなく、他の部分が破断してしまったために構造的な欠陥になり得なかった部分も認められる。

次に、引張亀裂が進展する過程における亀裂幅について検討してみる。図 5 (a) は円孔壁から 5mm 区間 (zone A) の平均 CT 値分布を $\theta = 60^\circ \sim 90^\circ$ の円弧区間について時系列で示したものである。さらのその外側の 5mm 区間 (zone B) についても同様の処理を行ってみると図 5 (b) が得られる。領域 A では時間経過に伴って内圧が増大するとともに $\theta = 75^\circ$ 付近の亀裂が開口していく様子がうかがえるが、領域 B では巨視的破断まで顕著な変化は認められない。

亀裂の幅 w をスキャンライン法によって $w = L \cdot (C_s - C_m) / (C_s - C_i)$ と定義すると、領域 A および領域 B における初生亀裂の幅は、図 6 のような変化を示す。ここで、 L はスキャンラインの長さ、 C_s は固体部分の平均 CT 値、 C_m はスキャンライン上で測定される平均 CT 値、 C_i は開口亀裂内の平均 CT 値であり、亀裂内は空気で満たされているとして、 $C_i = 1000$ とした。供試体の引張強度の 5MPa に内圧が達した 6 時間経過した頃から両領域では w に変化が生じ始める。領域 A では開口幅が増大傾向を示すが、巨視的破断の 1 時間前から一旦 w が減少傾向に転じる。一方、領域 B では $w < 0$ の時間帯を経た後に巨視的破断が起こる。これらの現象は供試体に作用する半径方向応力によって円孔周囲部分が圧密されたことが原因であると考えられる。

おわりに

肉眼やひずみゲージなどでは観察することが容易ではない亀裂の進展状況を X 線 CT スキャナーを用いて視覚的に観察した。比較的単純な引張亀裂の生成についても材料の不均一性、応力裁荷過程の複雑さなどに起因して供試体内部の破断に至る過程は相当に複雑であることを確認した。

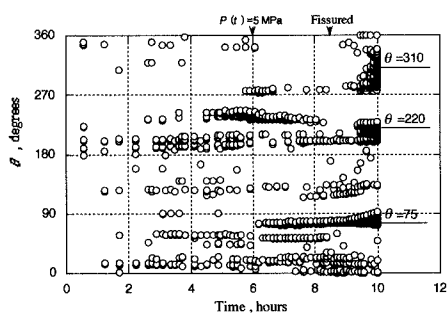


図 4 経過時間と領域 A の測線上の平均 CT 値が 500 以下の位置の関係

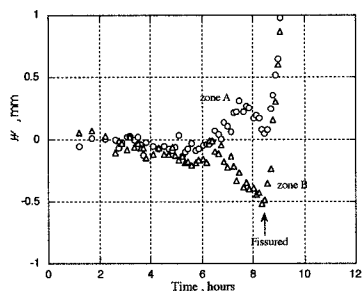


図 6 時間経過に伴う亀裂幅の変化

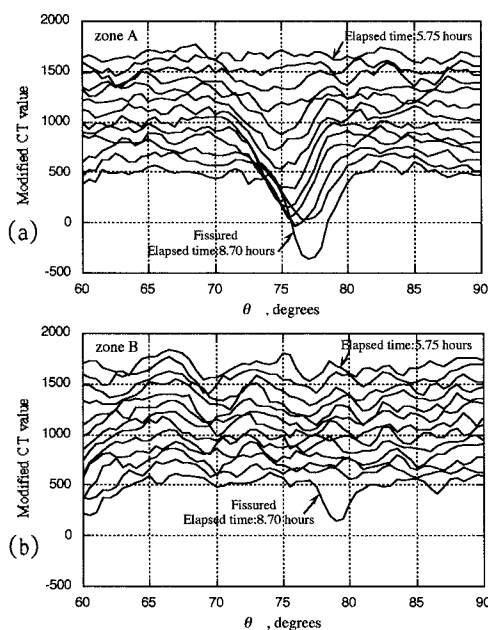


図 5 領域 A および領域 B における初生亀裂部分付近の CT 値の時間変化