

I-216 フラクチャープロセスゾーンの力学モデルとレーザースペックル法による観察

鹿島建設 正員○一宮 利通 東京大学 正員 堀井 秀之
清水建設 藤井 寛 丸 紅 徳永 貴司

1 まえがき

コンクリートのクラック先端部には非線形領域であるフラクチャープロセスゾーンが存在しており、その破壊現象を支配している。フラクチャープロセスゾーンは、マイクロクラックの発生・成長が生じているマイクロクラッキングゾーンと、巨視的クラック面において骨材境界面の摩擦や補強繊維材による応力伝達が生じているブリッジングゾーンからなる。ここでは、くさび載荷型供試体に対して破壊実験を行い、レーザースペックル法により供試体表面の変位を測定し、各荷重段階における巨視クラックの先端位置とクラック開口変位の分布を求める。モルタルとコンクリートについて結果を比較し、破壊挙動の違いを調べる。次に、

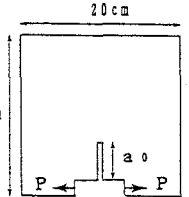


Fig. 1 Wedge loaded type specimen

kgf/cm² フラクチャープロセスゾーンモデルの1つであるDugdale型モデルに基づく簡便なモデルによる結果、及び境界積分方程式法による解析結果と実験結果とを比較することにより、Dugdale型モデルの妥当性を検討し、支配的なメカニズムについて考察する。

2. 実験方法

fig. 1 に示す様なくさび載荷型供試体においてノッチ先端に安定なクラックを進展させ、同時にレーザースペックル法を適用する。レーザースペックル法はレーザの干渉を利用して物体の変位を測定する方法である。1本のレーザ光線に対物レンズで広げ、ピンホールで波面をクリアーにし、供試体表面に照射すると、供試体表面に小さな斑点模様であるスペックルパターンが現れる。まず、このスペックルパターンを撮影し、次に、供試体に荷重を加え変形させた後で同じフィルムに二重露光撮影をする。このフィルムを現像して得られたネガに細いレーザビームを照射すると、ネガから離れたスクリーンに平行な直線干渉縞が現れる。このヤング縞は、わずかにずれた2つのスペックルパターンからの回折光が干渉し合うために生じる。このヤング縞の間隔と方向を測定すれば、レーザビームを照射した点における変位の大きさと方向を求めることができる。（縞は変位方向と直行し、その間隔は変位量に反比例する。）最終的に得られる破面の上側・下側における変位を測定し、その差をとることによって変位の不連続な面、すなわち巨視クラックの長さ、及び巨視クラックにそった開口変位分布を測定する。

3. 実験結果

Fig. 2 はモルタルにおけるノッチ先端の開口変位と荷重の関係を示し、実験の過程においてクラックは安定に発生・成長した。Fig. 2 に示す各荷重段階において二重露光撮影を行なった。各フィルムから求められる開口変位部分は、そのフィルムを二重露光撮影する間に増加した開口変位の分布であり、それらを順番に足し合わせることによってそれぞれの

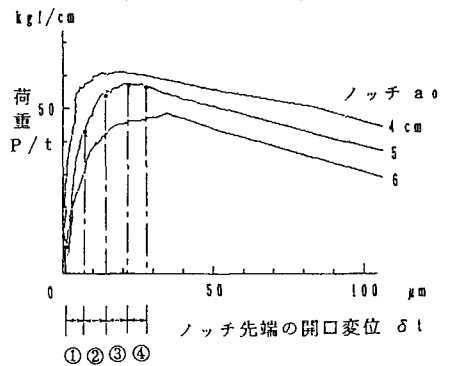


Fig. 2 Load vs. notch tip opening displacement

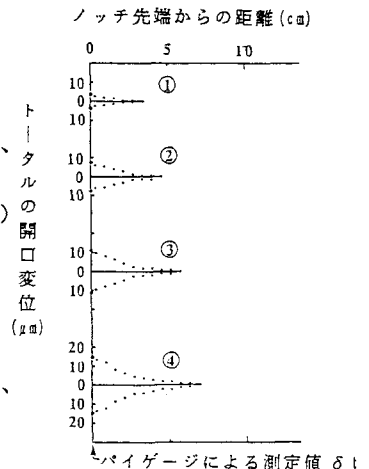


Fig. 3 Distribution of crack opening displacement

荷重段階における開口変位分布が求められる。

各荷重段階における開口変位分布をFig. 3に示す。レーザースペックル法により測定した開口変位の分布は、パイゲージにより測定したノッチ先端開口変位と一致している。レーザースペックル法によって測定されるのは巨視クラック（ブリッジングゾーン）における開口変位と、材料の変形による変位である。（変位の差を調べる2点の間隔は約5 mm）クラック先端付近ではマイクロクラッキングにより変形が大きくなっているために、開口変位と変形による変位が区別できないという可能性がある。

コンクリートとモルタルでは引張強度・最大荷重はほぼ同じであった。しかし、Fig. 4から分かるように、最大荷重におけるコンクリートとモルタルで、ノッチ先端の開口変位は $40\text{ }\mu\text{m}$ と $20\text{ }\mu\text{m}$ 、巨視クラックの長さは9 cmと6 cmと大きく異なっている。これは引張軟化曲線の違いによるものと考えられる。

4. モデルによる計算結果と実験結果の比較

Dugdale型モデルはFig. 5に示す様にクラックを延長し、その延長部分において伝達応力が作用しているとするモデルである。伝達応力と開口変位の関係として、ここでは引張軟化曲線を直線近似したものを用いる（Fig. 5）。引張軟化曲線のどの点で破面が形成されるかによるが、その点が引張強度に近い点であるとすれば、このモデルはブリッジングゾーンを主に表していると考えられる。

Dugdale型モデルがマイクロクラッキングゾーンをも含めてモデル化しているのかは検討を要する。解析に用いる材料定数（ kgf/cm ）は、 σ_c 、 δ_c 、弾性係数Eの3つだけである。 σ_c に関しては、実験で測定した引張強度を用い、 δ_c は既往の引張軟化曲線から求め、弾性係数は示方書に載っている値を採用する。

有限供試体中のフラクチャープロセスゾーンの問題は境界値問題となり、解は境界積分方程式法により数値的に求められる。支配的な要因がクラック先端の応力分布形であるとして無限体中の半無限クラックを考える簡便なモデルはその近似解を与える。

簡便なモデルにより計算した巨視クラック長と荷重の関係を実線で、実験値を○印でそれぞれFig. 6にプロットした。また、境界積分方程式法による解析から求めた開口変位分布を破線で、実験結果を○印でFig. 7に示した。簡便なモデル及び境界積分方程式法による解析結果と実験結果は良好な一致を示している。このことよりDugdale型モデルによって破壊現象を再現・予測できることが分かる。また、Dugdale型モデルは広がりを持ったマイクロクラッキングの効果を含んでおらず、ブリッジングの効果を中心に表すモデルであると考えられるが、本研究の結果はコンクリートの破壊における支配的メカニズムがブリッジングであることを示しているものと考えられる。

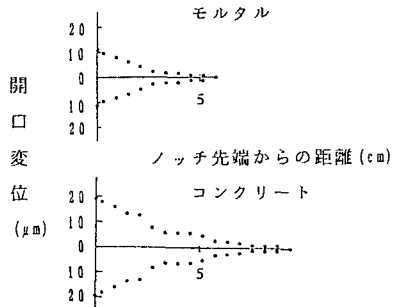


Fig. 4 Distribution of crack opening displacement at peak load

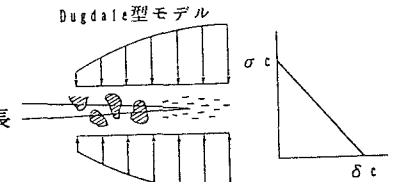


Fig. 5 Dugdale-type model and linear tension-softening relation

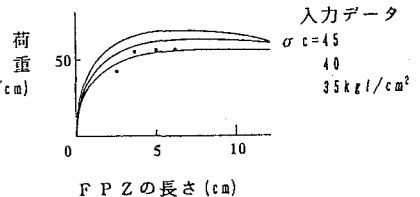


Fig. 6 Load vs. length of fracture process zone

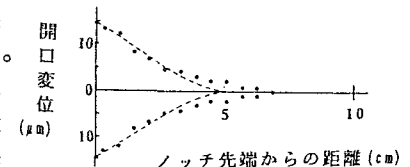


Fig. 7 Distribution of crack opening displacement