

I-41 コンクリートにおける混合モード荷重下のクラック進展の計測と解析

電源開発 正員 今田 守夫 東京大学 学生員 小山 健
 東京大学 正員 堀井 秀之

1. はじめに

モードⅠ荷重条件下のコンクリートの破壊においては、クラック先端にフラクチャプロセスゾーンが存在し、大きな役割を果たしていることが知られている。このとき、破壊現象を支配しているメカニズムは巨視クラック面における応力伝達（ブリッジング）であることが明らかにされている。フラクチャプロセスゾーンに対してDugdale-Barenblatt型モデルを用いることによりコンクリートの破壊現象が再現されることが示されている。そのとき解析に用いられる材料特性は一軸引張試験より得られる引張軟化曲線である（図1）。しかし、混合モード荷重条件下の破壊メカニズムについては、モードⅠの時と同様の解析手法で破壊現象を再現できるかは明らかではない。本研究の目的は混合モード荷重条件下における破壊現象のメカニズムが、モードⅠの時と同じであるか、モードⅠに対する解析手法が混合モード時にも適用できるか、を明らかにすることである。

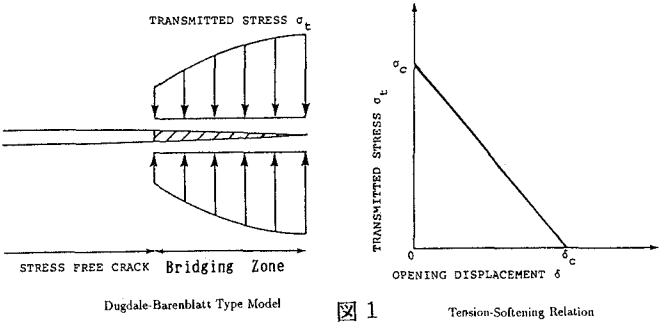


図1 Tension-Softening Relation

2. 実験方法

本研究では標準的な配合のコンクリート梁に対して4点載荷曲げ試験を行い、同寸法(10*10*40cm)同材料でノッチ位置がスパン中央（モードⅠ）と側方（混合モードⅡ）にそれぞれ設けた二通りの梁の場合について、進展するクラックの各荷重段階における開口変位分布やクラック長を求めた（図2）。コンクリート表面の変位の測定には、1/1000 mm程度の精度で計測できるレーザースペックル法を用いた。

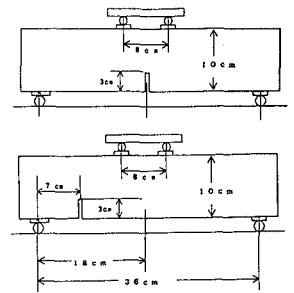


図2 geometries of two specimens

3. 結果

中央にノッチを有するモードⅠの梁について、クラック先端のブリッジングゾーンをモデル化したDugdale-Barenblatt型モデルに、伝達応力と開口変位が直線的な関係を持つ引張軟化特性を用いて境界要素法で解析し、結果を実験結果と比較する。引張軟化曲線の限界開口変位は既往の研究成果により25 μmとする。図3は荷重-クラック長を、図4は最大荷重時におけるクラック開口変位の分布を示している。これを見ると最大の関心事である最大荷重値の予測については、解析結果はほぼ良好な値を示していることがわかる。変位については実験値が大きい値を示しているが、本実験においても、モードⅠ荷重条件下における破壊の主要メカニズムがブリッジングであり、Dugdale-Barenblatt型モデルに引張軟化曲線を用いてモデル化されるという従来の考え方の妥当性が改めて確認された。

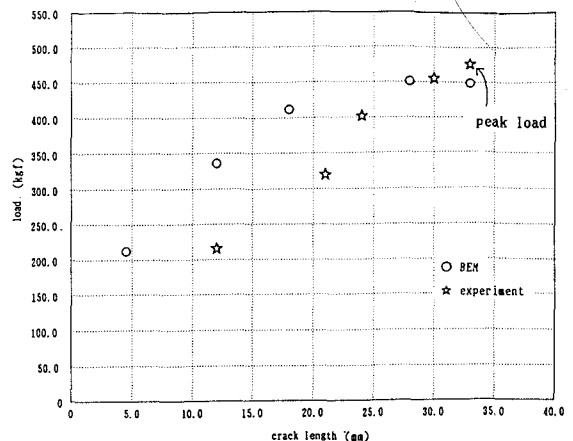


図3 load - crack length (mode I)

側方にノッチを有する混合モード荷重状態の問題について、モードⅠの時と同様、クラック進展の観察を行った。図5は、クラックの観察結果の一例でありクラックの上面に対する下面の相対変位を矢印で

表した。クラック進展方向は最大引張応力方向に直交しており、クラック進展のモードはモードⅠであると予測される。ところが、クラック発生当初はクラック面に対しせん断方向の変位成分が垂直方向の開口変位成分に対して無視できない。荷重を進めるにつれて垂直方向成分が卓越してくる。コンクリートは不均質材料であるので、クラックパスは実験毎に多少異なるが、最大荷重値に対する影響は小さいようである。

モードⅠの時と同様の方法で解析を行い、実験結果と比較する。最大荷重値について、モードⅠと同じ引張軟化曲線を用いると、解析値が実験値に対してかなり大きいことがわかる（図6）。これは、混合モード荷重条件下の破壊現象がモードⅠと同様な解析方法では再現できないことを示している。この原因としては、混合モード荷重条件下では、生じるせん断方向の開口変位成分の存在によって、モードⅠの場合において作用していた伝達応力がほぼ切れて、ブリッジングが生じないということが考えられる。この考えを確かめるために引張軟化曲線の限界開口変位の値に大幅に小さい値（ $2\mu\text{m}$ ないし $3\mu\text{m}$ ）を用いて解析を行ったところ、得られた最大荷重の値は実験結果とほぼ一致する（図6）。これは以前に行われたアンカーボルト引抜試験⁽³⁾における結果と一致しており、前述の考えをサポートするものである。

限界開口変位がこのように小さい場合、ブリッジングゾーンの寸法は非常に小さくなる。そのような場合には、線形破壊力学（LEFM）が適用可能であると予想される。図6に線形破壊力学による結果を合わせて示したが、前の研究と同様に混合モード荷重条件下のクラック進展挙動は線形破壊力学で再現できることが示された。コンクリートの破壊に対して、線形破壊力学が適用できないことが動機となって研究が行われ、その原因がブリッジングにあることが明らかにされたが、そのブリッジングが発揮されるのはモードⅠの場合であり、より一般的な荷重条件下では線形破壊力学が適用できるという可能性を本研究は示唆している。また、モードⅠの場合においても常にブリッジングの効果が保証されているわけではないので、線形破壊力学の適用が有効である可能性が考えられ、その値は安全側の結果を与える。

（参考文献）

- [1]一ノ宮 利通；フラクチャープ ロセソ ンのモデル化とレーザースペックル法での観測，1989
- [2]多田 勝； Observation of crack growth behavior in concrete and mortar with the laser speckle method and measurement of tension-softening curve with the J-integral method,1990
- [3]Cheung Chiu Lun; Observation of crack growth from anchor bolt by laser speckle method and application of fracture mechanics,1990

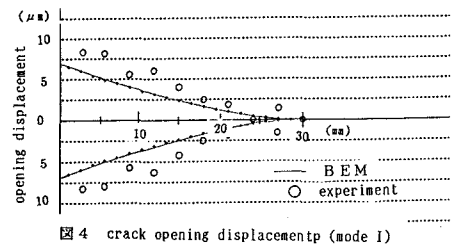


図4 crack opening displacement (mode I)

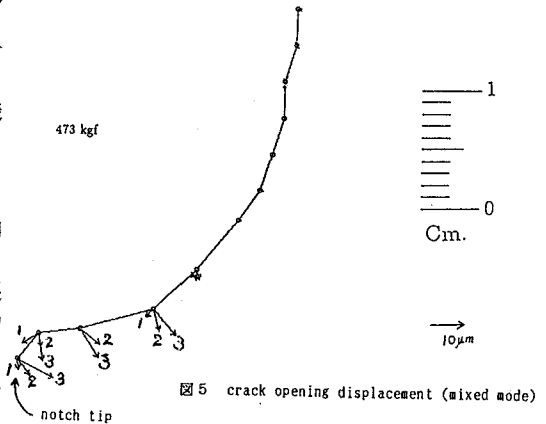


図5 crack opening displacement (mixed mode)

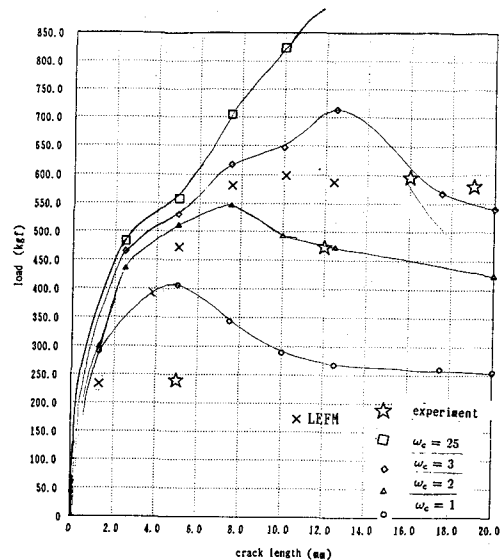


図6 load - crack length (mixed mode)