

引張軟化曲線を利用したひび割れ進展過程解析の一例

東北工業大学 正会員 ○ 秋田宏 フェロー会員 小出英夫 非会員 松本昌浩

1. まえがき

コンクリート構造物の設計において、壊れるか壊れないだけでなく、どこまで壊れるか、補修の可否は、などを問題にするには、構造物のポストピーク挙動を知る必要がある。その際、直接引張試験から得られる引張軟化曲線は、コンクリートのひび割れ進展過程解析のため、あるいは引張に対する構成則として利用されるが、まさに直接引張試験そのものがプレーンコンクリートの引張荷重に対するポストピーク挙動を捕らえたものである。本稿は、実際に試験から得られた引張軟化曲線を利用して直接引張試験をシミュレーションし、当該曲線利用の実例を示したものである。

2. 直接引張試験と引張軟化曲線の概要

写真1に示すように切欠き(幅 3mm 深さ 10mm)をつけた角柱供試体(100×100×400mm)を用い、荷重の偏心を防ぐため上下にユニバーサルジョイントを介し、ひずみ制御可能な試験機(インストロン 8800)で載荷し、 π ゲージにより切欠きをまたいで伸びを測った。引張る過程で供試体は必ず曲がるため、4本の鋼棒で伸びすぎた側に圧縮を与え、0.0001mmの誤差で両面の伸びを揃えながら試験を進めた。得られた荷重-変形(伸び)曲線から引張軟化曲線を求め、最小二乗近似により平均的な数式に置き換えた。引張軟化曲線とは、実際のひび割れに先行する破壊進行領域を仮想ひび割れで表わし、ひび割れ幅と伝達応力の関係を表わしたものである。

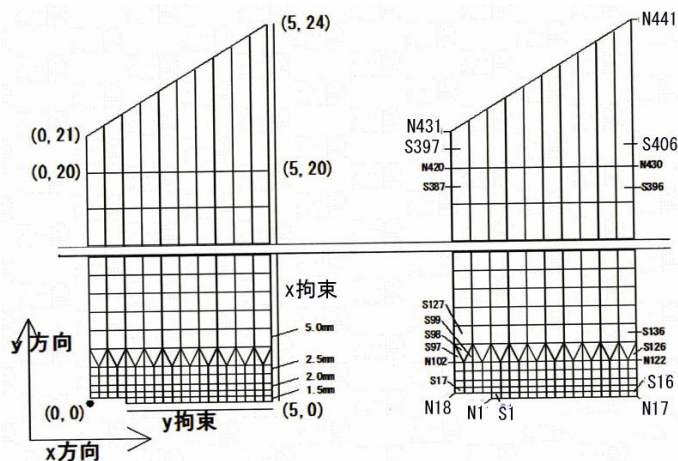
3. 解析方法

供試体を含む上下のユニバーサルジョイント間を、対象性から全体の四分の一を有限要素によりモデル化した。2次元平面応力とし、厚さは切欠きを考慮して 80mm、四角形要素と三角形要素を組み合わせ、図1に示すように節点数 441、要素数 406 である(Nが節点番号、Sが要素番号)。ヤング係数は試験から得られた 20759N/mm²、ポアソン比は一般的な値 0.2 を用い、均質な連続体と仮定している。ひび割れはx軸に沿った直線(厚さ方向を考えれば平面)と仮定し、仮想ひび割れの進展にともないx軸上の支点(y方向拘束支点)を取り払うのである。

節点1~17のy方向変位と引張荷重Pを目的変数として、適当な初期値を定めれば結合応力が決まり、全体の変形が計算できる。初期値と計算値の二乗平均誤差が0.0001以下になるまで繰返し法により収束させた。仮想ひび割れが節点17まで進む荷重増加過程は力学的安定状態であり、解析上も容易に収束し一般的な逐次近似法で解析可能である。節点17に達した後の荷重減少過程は不安定状態であり、いくつかの変数を同時に収束させる必要があるため最急降下法(勾配法)を用いた。さらに収束可能な初期値の範囲がきわめて狭いため、その適切な選択に多くの時間を費やした。



写真1 試験装置



座標、支点

節点番号、要素番号

図1 有限要素モデル

4. 解析結果

図2は荷重－変形曲線の試験値と解析値を比較したものである。この試験値から得られた引張軟化曲線を用いたのだから一致して当然であるが、全体的に良く一致しているものの、若干のずれは見られる。ずれの原因として、三次元の供試体と二次元解析モデルの差が変形の大きさに、実際のリガメント(切欠きにより減少した断面)とモデルの差が最大荷重に、引張軟化曲線の平均化が曲線の形状に影響していると考えられる。なお、試験では荷重0.5kNで供試体が破断しているが、荷重ゼロまでの引張軟化曲線を外挿して用いた。

図3は切欠き断面内の y 方向軸応力分布である。 n は仮想ひび割れ先端の節点番号であり、そこでは常に引張強度(仮想ひび割れ発生直前)になっている。仮想ひび割れ内では、切欠き先端(節点1)に向かって伝達応力が緩やかに低下しているが、切欠き近傍では計算誤差としての振動が見られる。 $n=17$ で仮想ひび割れが中心線まで達し、このとき最大荷重となるが、全断面引張強度とした場合の2.8%減となっている。すなわち切欠きによる応力集中が現れるのは弾性範囲内(荷重上昇過程)だけであり、引張強度の算出時(全断面軟化後)には応力集中が無くなり、ほぼ正確な引張強度が求まることも知られる。

最大荷重以降は、おおそポストピークステート1、2、3に準じた解析を行なった。 $P/P_{max}=0.36$ がステート2に対応するが、試験中にひび割れが肉眼で検出できる前後である。このとき仮想ひび割れ幅は約0.03mmであり、この近傍から実際のひび割れと対応していると考えられる。ただし、プレーンコンクリートでもこの状態でまだ最大荷重の36%を負担しているのである。

図4は切欠き断面内の仮想ひび割れ幅分布である。限界仮想ひび割れ幅まで示すスケールでは、仮想ひび割れ発生からポストピークステート1までの値およびその変化が小さくて十分に判別できない。すなわち、その範囲で破壊進行領域を表わす仮想ひび割れ幅はきわめて小さく、実際の数値は0.002～0.008mmである。

5. あとがき

直接引張試験から得られた引張軟化曲線を用い、引張試験そのもののひび割れ進展解析をした結果、当然のことながら解析による荷重－変形曲線は試験結果と良く一致し、ポストピーク挙動も自在に求まり、仮想ひび割れモデルと関連付けた現象の理解に役立つ数々の結果が得られた。

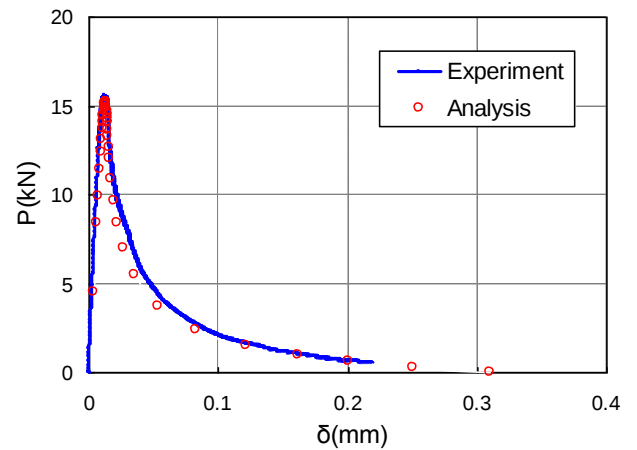


図2 荷重－変形曲線の比較

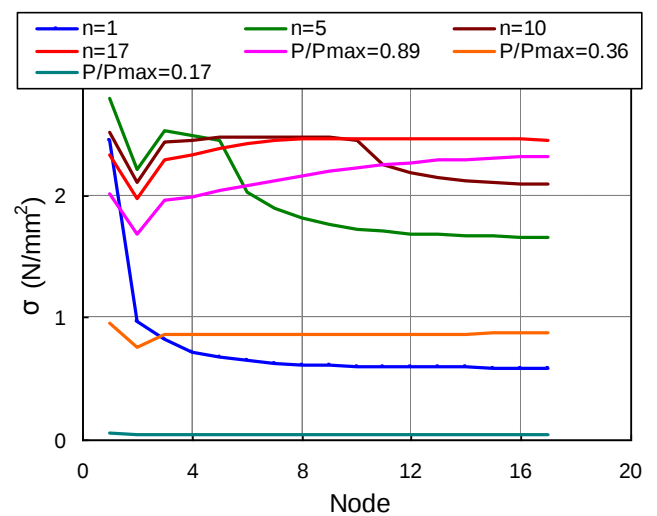


図3 切欠き断面内応力分布

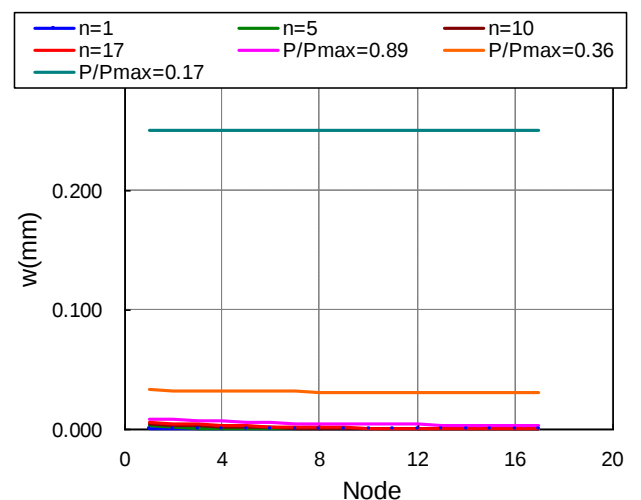


図4 切欠き断面内仮想ひび割れ幅分布

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のポストピーク挙動, P.277, 2003
- 2) 秋田、小出、三橋：コンクリートの直接引張試験における4つの誤解、コンクリート工学論文集, pp.77-86, 2005