

## 論文 二軸応力下におけるコンクリートの引張軟化曲線

石黒 覚\*<sup>1</sup>

要旨：多直線近似法と有限要素法を組合わせた引張軟化曲線の推定法の概要ならびに本推定法の適用結果について述べた。くさび挿入試験法に基づく一軸および二軸応力下のモード I 破壊試験結果から、圧縮と引張を受けるコンクリートの引張軟化曲線の推定を試みた。天然および再生骨材コンクリートに対して、異なる載荷応力レベルの引張軟化曲線の推定結果を示し、二軸応力下におけるコンクリートの引張軟化曲線の特徴について検討および考察を行った。また、一軸および二軸応力下の引張軟化曲線の推定結果から、本推定法の適用性は良好であることが確かめられた。

キーワード：コンクリート、ひびわれ、破壊力学、引張軟化曲線、数値解析

## 1. はじめに

二軸応力下におけるコンクリートの破壊力学パラメータを求めた研究としては、Tschegg らにより開発されたくさび挿入試験法に基づいた実験的研究 [1,2,3] はあるが、研究事例は比較的に少ないように思われる。これらの研究では、切欠き角柱供試体に対して、鉛直方向の圧縮荷重とくさび挿入による水平方向の割裂引張荷重を作用させ、圧縮および引張を受ける二軸応力下のモード I 破壊挙動を検討している。また、二軸応力下の引張軟化曲線は、一軸応力下の場合と同様に、実測の荷重—開口変位関係より、二直線近似による逆解析法を適用して推定されている [2]。

最近、引張軟化曲線の推定法として、橋高らにより多直線近似法 [4,5] が提案され、また、内田および栗原らにより有限要素法に組み入れられて、各種コンクリートの引張軟化曲線の推定に用いられている [6,7]。この多直線近似法は、引張軟化特性を組み入れた解析モデルにおいて、ひびわれ幅に対応する軟化勾配を仮定して数値解析を行い、荷重—変位関係における解析結果と実測結果が良好に一致するように引張軟化曲線を推定する点に特徴がある。この方法は、任意点で測定された開口変位やたわみを、荷重—変位関係の実測結果として採用することができるため、種々の破壊試験法と組合わせて引張軟化曲線を求めるのに有効な推定法と考えられる。

本研究では、多直線近似法と有限要素法を組合わせた引張軟化曲線の推定法を、一軸および二軸応力下のくさび挿入試験結果に適用することを試みた。そして、圧縮と引張を受ける二軸応力下におけるコンクリートの引張軟化曲線の特徴と本推定法の適用性を検討したものである。

## 2. 引張軟化特性を組み入れたひびわれ進展解析法

鉛直方向に分布荷重を受けるくさび挿入コンクリート供試体の右半断面 (図—1 および 2 参照) を解析領域として想定する。ひびわれの進展は、左端の節点 (供試体中心断面) を解放して表現する。その際、限界開口変位に達していないひびわれ面上の節点には、材料の引張軟化特性から与えられる結合力が作用しているものとする。引張軟化特性を組み入れたひびわれ進展解析法の概要と FEM 解析プログラムが、文献 [8] に示されており、本研究では、このひびわれ進展解析法を基本とした。さらに、二軸応力下における分布荷重および自重の影響を考慮できるように拡張し、FEM 解析プログラムを作成した。本解析法の概略は以下になる。

\* 1 三重大学助教授 生物資源学部 農博 (正会員)

まず始めに、図一1(a)のような限界開口変位に達しない破壊進行領域が進展する直前の状態において、供試体上下面に圧縮分布荷重  $F_d$  を载荷させた場合を弾性解析する。そして、ひびわれ先端のまだ解放されていない節点での結合力  $CRD$ 、およびすでに解放されているひびわれ面上の節点  $i$  での開口変位  $BKD_i$  を求める。同様に、供試体の自重  $F_g$  を载荷させた場合を弾性解析し、ひびわれ先端のまだ解放されていない節点での結合力  $CRG$ 、およびすでに解放されているひびわれ面上の節点  $i$  での開口変位  $BKG_i$  を求める（図一1(b)参照）。

次に、図一1(c)に示すように载荷点に単位荷重  $F_h=1$  を载荷させた場合を弾性解析する。そして、ひびわれ先端のまだ解放されていない節点での結合力  $CR$ 、およびすでに解放されているひびわれ面上の節点  $i$  での開口変位  $BK_i$  を求める。また同様に、図一1(d)に示すようにひびわれ面上の節点  $j$  に閉口方向に単位荷重  $F_j=1$  が作用している場合について弾性解析し、ひびわれ先端での結合力  $CI_j$ 、およびひびわれ面上の節点  $i$  での開口変位  $AK_{ij}$  を決定する。

ところで、ひびわれ面上の各節点  $i$  では、開口変位( $W_i$ )と結合力( $F_i$ )との間に、以下のような引張軟化則が成立する。

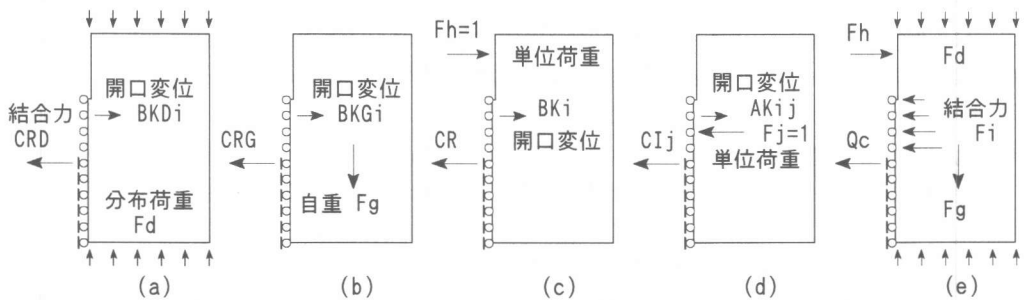
$$F_i = f(W_i) \quad (1)$$

このとき、ひびわれ先端での結合力を  $Q$  とすれば、ひびわれ面上の節点  $i$  での開口変位  $W_i$ 、結合力  $F_i$  および载荷荷重  $F_h$  との間には以下のような関係が成立する。

$$Q = CR \cdot F_h + \sum_i (CI_i \cdot F_i) + CRD + CRG \quad (2)$$

$$W_i = BK_i \cdot F_h + \sum_j (AK_{ij} \cdot F_j) + BKD_i + BKG_i \quad (3)$$

ここで、 $CRD$  および  $CRG$  は、それぞれ、分布荷重および自重がひびわれ先端での結合力に及ぼす影響、 $BKD_i$  および  $BKG_i$  は、それぞれ、分布荷重および自重がひびわれ面上の節点  $i$  の開口変位に及ぼす影響を表している。



図一1 引張軟化特性を組入れた解析モデル

いま、ひびわれ先端での結合力  $Q$  が、引張軟化則で与えられる限界値  $Q_c$  に等しくなった場合にひびわれは進展すると考え、式(2)の左辺の  $Q$  として  $Q_c$  を代入する。なお、この破壊基準は、ひびわれ進展がかなり進んだ状態、すなわち、実測の荷重—開口変位関係の最大荷重以降の軟化領域においても成り立つものとする。これより、既に開口しているひびわれ節点の個数を  $N$  とすれば、式(1)から式(3)は、 $2N+1$  個の未知量、すなわち  $F_h$ 、 $W_i$ 、 $F_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) を持つ  $2N+1$

個の連立方程式を構成する。この方程式を解くことにより、載荷荷重、ひびわれ面上の各節点における開口変位および結合力が求まる。そして、求められた結合力および載荷荷重、これらに加えて所定の分布荷重および自重を解析モデルに作用させて弾性解析を行い、あるひびわれ進行段階での解を求める（図-1(e)参照）。

### 3. 多直線近似法による引張軟化曲線の推定手順

本推定法は、文献[7]の方法および手順を基本とし、ステップ1において弾性係数と軟化開始点応力（引張強度）の推定、さらに、ステップ2において引張軟化曲線の推定を行うものとした。

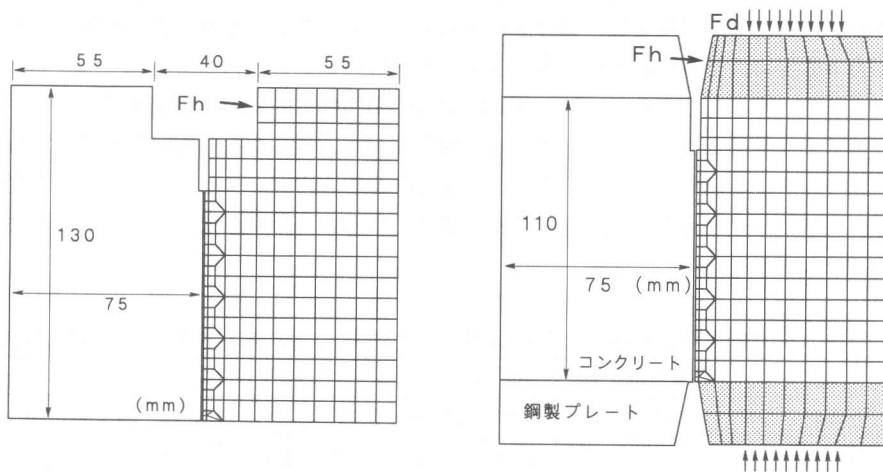
<ステップ1>：完全塑性型の引張軟化曲線を仮定し、弾性係数と引張強度を変化させて上述の引張軟化特性を組入れたFEM解析を行う。この解析で得られた荷重—開口変位曲線が、実測の荷重—開口変位曲線とある一定の許容誤差（ここでは、0.5%を設定）の範囲内で一致するものの中で、ひびわれ進展長さが最も長くなる場合、あるいは同じひびわれ進展長さのものが複数あるときは誤差の最も小さい場合の引張強度を軟化開始点応力とした。

<ステップ2>：ステップ1で決定した軟化開始点応力と弾性係数を用いて引張軟化曲線の推定を行う。この際、解析で得られた荷重—開口変位曲線と実測の荷重—開口変位曲線とが一定の許容誤差（ここでは、0.1%を設定）以下となるまで計算を繰り返した。なお、解析による荷重—開口変位曲線には、自重と分布荷重による初期の変位を差し引いたものを用いた。

### 4. 二軸応力下における引張軟化曲線の推定

#### 4.1 実験および解析方法

くさび挿入法に基づく二軸応力下のモードI破壊試験の詳細は、文献[3]に述べられているので、ここでは、一軸および二軸応力供試体の概略について、それぞれ、図-2(a)および(b)に示す。二軸応力供試体では、コンクリートに一樣な圧縮応力が生じるように、鋼製プレートを通じて鉛直方向に圧縮分布荷重を載荷した。供試体の厚みは150mm、リガメント長さは90mmである。また、同図の右半断面には、引張軟化曲線の推定に用いたFEMメッシュ分割図を示しており、ひびわれの進展は、供試体中心断面に対応する節点を解放させて表現する。



(a)一軸応力供試体

(b)二軸応力供試体

図-2 くさび挿入試験用供試体の概略およびメッシュ分割

実験に使用したコンクリートの配合および圧縮強度を表一1に示す。天然骨材コンクリート（NC）および再生骨材コンクリート（RC）は、それぞれ、天然粗骨材（川砂利）および再生粗骨材を使用したものである。二軸応力下における圧縮分布荷重の大きさは、コンクリートの圧縮強度比率(%)で15,30,45および60になるような4ケースの載荷応力レベルとした。以下では、NCおよびRCの一軸応力試験結果を、それぞれNC00およびRC00と記述する。また、NCおよびRCの各載荷応力レベル（15,30,45,60%）に対する二軸応力試験結果を、それぞれNC15,NC30,NC45,NC60およびRC15,RC30,RC45,RC60と記述する。ここでは、試験より得られた数本の荷重—開口変位曲線を平均し、これを実測の荷重—開口変位曲線とした。

表一1 コンクリートの配合および圧縮強度

種類	水セメント比 (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材の種類と最大寸法(mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )
天然骨材コンクリート(NC)	50	190	380	天然骨材 (12)	46.1
再生骨材コンクリート(RC)	50	190	380	再生骨材 (12)	35.0

#### 4. 2 結果および考察

表一2は、NCおよびRCの弾性係数と引張強度（軟化開始点応力）の推定値、ならびに破壊エネルギー（Gf）の実測値を示している。なお、一軸および二軸応力供試体は、切欠き先端からほぼ鉛直線上にひびわれ破壊しており、したがって、RILEMで提唱されたモードI破壊時における破壊エネルギーの定義を、これらのくさび挿入試験結果に適用し、Gfを算定するものとした。これによると、二軸応力下におけるNCおよびRCのGfは、同一コンクリートであっても各載荷応力レベルで異なった値を示している。つまり、低い圧縮応力を受けた場合のGfは、圧縮応力を受けない場合より低下し、圧縮応力が大きくなるにつれてGfが増加している。このような非線形な挙動を定性的に説明するために、載荷応力レベルと破壊進行領域の広がりとの関係模式図が、Tscheggらにより示されている[2,3]。

また、二軸応力下のコンクリート、特に、NC60およびRC60の弾性係数および引張強度の推定値は、一軸応力下のそれら(NC00およびRC00)に比べて著しく低下している。したがって、引張軟化特性を組入れたFEM解析は、弾性解析を基本としているが、二軸応力下の解析においては、圧縮応力の影響による弾性係数や引張強度の変化を考慮したことになる。

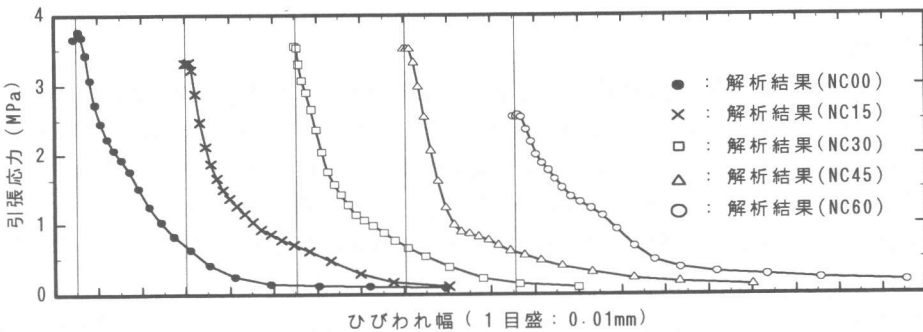
図一3および図一5は、それぞれ、NCおよびRCの引張軟化曲線の推定結果を示している。多直線近似法により求めた各コンクリートの引張軟化曲線は、滑らかな曲線として推定されている。また、図一4および図一6は、得られた引張軟化曲線を入力データとして荷重—開口変位曲線を解析し、実測データと比較したものである。当然であるが、解析結果は、実測データとよく一致した結果を与えている。

表一2 コンクリートの弾性係数と引張強度の推定値および破壊エネルギー(Gf)の実測値

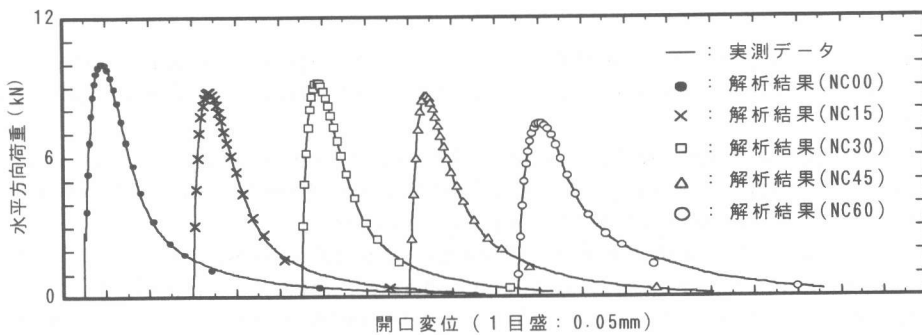
	天然骨材コンクリート(NC)					再生骨材コンクリート(RC)				
	NC00	NC15	NC30	NC45	NC60	RC00	RC15	RC30	RC45	RC60
弾性係数 (GPa)	33.5	29.0	29.5	24.0	21.5	20.0	23.0	24.0	21.5	17.0
引張強度 (MPa)	3.70	3.30	3.55	3.50	2.55	3.25	3.30	2.80	2.50	2.10
Gf (N/m)	118	90.9	98.7	102	116	76.2	70.2	79.0	93.8	101

これらの推定結果から、二軸応力下の引張軟化曲線においては、載荷応力レベルが大きくなるにつれて軟化曲線の後半部分の引張応力（伝達応力）は、一軸応力下のそれらに比べて大きくなっているのが特徴と思われる。特に、NC60 および RC60 においてこの傾向が顕著である。二軸応力下の引張軟化曲線の後半部分の引張応力が、一軸応力下のそれよりも大きくなる傾向は、文献[2]において引張軟化曲線を二直線近似した推定結果においても認められている。

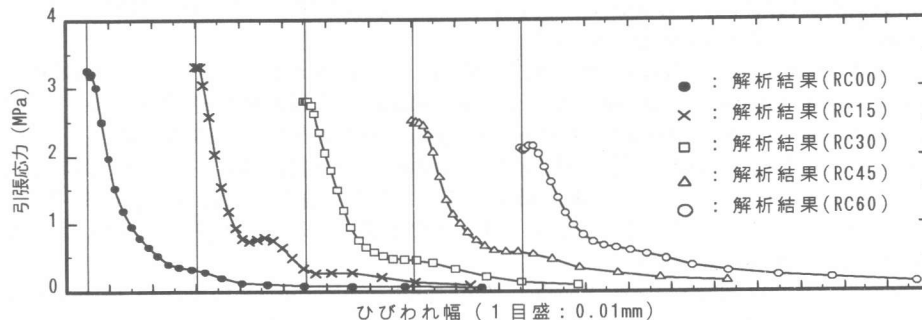
引張軟化曲線の前半部分は、不連続な微細ひびわれの発生および進展している領域に対応し、軟化曲線の後半部分は骨材のかみ合い効果による力の伝達が行われている領域に対応しているとする考え方が示されている[9]。この考え方に従うと、二軸応力下の引張軟化曲線は、圧縮分布荷重の作用により、骨材のかみ合い効果が増大していることを示していると考えられる。



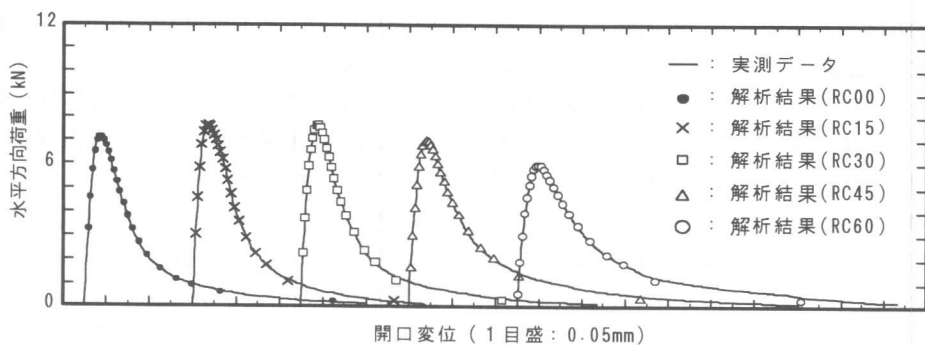
図一三 引張軟化曲線の推定結果 (NC)



図一四 荷重—開口変位曲線 (NC)



図一五 引張軟化曲線の推定結果 (RC)



図一6 荷重—開口変位曲線 (RC)

## 5. まとめ

多直線近似法と有限要素法を組合わせた解析法により、天然および再生骨材コンクリートに対して異なる載荷応力レベルの引張軟化曲線を推定した。これらの推定結果から、二軸応力下における引張軟化曲線の後半部分の引張応力（伝達応力）は、一軸応力下のそれに比べて大きくなる特徴が認められた。これは、圧縮分布荷重の作用により、骨材のかみ合い効果が増大したことによると考えられる。また、一軸および二軸応力下の引張軟化曲線の推定結果から、本解析法の適用性は良好であることが確かめられた。

本研究で用いたくさび挿入試験による実測データは、著者が在外研究員として、Tschegg 博士の指導のもとで得られた研究成果の一部である。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- [1] H.Kreuzer, E.K.Tschegg and W.Wilk : Fracture Energy of Concrete Under Biaxial Loading, Dam Fracture(Proceedings from the International Conference),pp.447-457, 1991
- [2] E.K.Tschegg, H.Kreuzer and M.Zelezny : Fracture in Concrete under Biaxial Loading - Numerical Evaluation of Wedge Splitting Test Results - ,Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-1, pp.455-460,1992
- [3] E.K.Tschegg,M.Elser and S.E.Stanzl-Tschegg : Biaxial Fracture Tests on Concrete - Development and Experience, Cement and Concrete Composites, 17, pp.57-75, 1995
- [4] Y.Kitsutaka : Fracture Parameters for Concrete Based on Poly-linear Approximation Analysis of Tension Softening Diagram, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2 , pp.199-208,1995
- [5] 橘高義典・上村克郎・中村成春：コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析，日本建築学会構造系論文報告集,453号, pp.15-25,1993
- [6] Y.Uchida, N.Kurihara, K.Rokugo and W. Koyanagi : Determination of Tension Softening Diagrams of Various Kind of Concrete by Means of Numerical Analysis, Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings FRAMCOS-2 , pp.17-30,1995
- [7] 栗原哲彦・安藤貴宏・国枝 稔・内田裕市・六郷恵哲：多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状，土木学会論文集, No.532, pp.119-129,1996
- [8] (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊力学に関するコロキウム，第一部（委員会報告書），pp.55-65, 1990
- [9] H.Horii : Models of Fracture Process Zone and a System of Fracture Mechanics for Concrete and Rock, Proc. of Int. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy, Sendai, pp.325-337, 1988