

曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測

DETERMINATION OF TENSION SOFTENING DIAGRAMS OF CONCRETE BY MEANS OF BENDING TESTS

内田裕市*・六郷恵哲**・小柳 洽***

By Yuichi UCHIDA, Keitetsu ROKUGO and Wataru KOYANAGI

The establishment of test methods for determination of the tension softening diagrams of concrete has been desired. In this contribution, following the discussions on the existing J -integral approaches a simple and handy test method for determination of the tension softening diagrams from bending tests on notched beams is proposed. The method has the following features: (1) the tension softening diagrams can be determined from a single beam specimen, (2) the method can be combined with the RILEM method for determination of the fracture energy G_F , (3) only the load, the loading point displacement and the crack opening at the notch tip are necessary to be measured, (4) the second derivative of the potential energy is introduced to improve the accuracy of the estimation of the diagrams. The proposed method is applied to concretes including high strength concrete and light weight concrete to determine tension softening diagrams, and the validity of the method is certified.

Keywords: tension softening, fracture mechanics, bending test, fracture energy

1. まえがき

近年、コンクリートの破壊に関するより詳細な議論や破壊についての高精度な予測手法の確立が必要となり、圧縮強度や引張強度などの強度特性ばかりでなく、より多くの材料特性が数値解析に組み込める形で必要とされている。

ひびわれの進展によって生じるコンクリートの破壊の特徴は、巨視的に完全に開口したひびわれの先端に微細なひびわれが累積した破壊進行領域 (fracture process zone) とよばれる非線形領域が存在することである¹⁾。ひびわれの生じていない弾性領域と完全なひびわれ部分との中間にあるこの破壊進行領域では、引張ひずみ (あるいは、その領域におけるひびわれ幅の総和) の増大に伴って、伝達される引張応力が減少するいわゆる引張軟化現象が生じる。

引張応力下のコンクリートの破壊エネルギー G_F (fracture energy, 単位投影面積のひびわれの形成に必要なエネルギーであり、引張軟化曲線下の面積) や、引張軟

化曲線 (tension softening curve, ひびわれの成長に伴って減少する引張伝達応力と引張ひずみまたはひびわれ幅との関係) などの引張軟化特性を数値解析や理論に組み込み、ひびわれの進展によるコンクリートの破壊現象について検討しようとする、いわゆるコンクリートの破壊力学に関する研究が最近盛んになっている。このコンクリートの破壊力学の分野では、破壊進行領域の実態把握、脆性破壊現象や強度の寸法効果の合理的解釈、コンクリートの性能評価などへの引張軟化現象の応用に加え、引張軟化特性の計測方法の確立が特に重要とされている¹⁾。

コンクリートの破壊エネルギーを求めるための試験法としては、切欠きを付けたはりの3点曲げ試験法がRILEMから提案されている²⁾。一方、コンクリートの引張軟化曲線は直接引張試験から求めることが望ましいが、一般にコンクリートの引張試験を完全に制御し、最大耐力点以降の荷重-変位曲線を安定に計測することは容易でない。引張軟化曲線を求める方法としては、直接引張試験法³⁾、数値解析と実験を併用する方法⁴⁾、多重切断法⁵⁾等が提案されているが、これらは、特殊な試験装置、解析プログラム、あるいは高度な技巧を要し、設備の整った試験機関においてさえ決して容易な試験方法とはいえないと考えられる。

* 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科(同上)

*** 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科(同上)

一方、Liら⁶⁾が提案した切欠きはりの曲げ試験から J 積分を介して引張軟化曲線を求める方法、あるいはこれを簡略化した新 J 積分法⁷⁾は精度上検討すべき点はあるものの、試験自体は、特殊な試験装置や計測装置を必要とせず、比較的簡便で実用的な方法であると考えられる。

本研究は、切欠きはりの曲げ試験から J 積分値を介して引張軟化曲線を求める試験法について検討したものである。すなわち、Liらの J 積分法やこれを改良した著者らの新 J 積分法について理論的に考察し、さらにこれらを改良した修正 J 積分法を提案した。また、普通強度コンクリート、高強度コンクリートおよび軽量コンクリートについて修正 J 積分法により引張軟化曲線を求めるとともに、その妥当性について数値解析結果と試験結果をもとに検討したものである。

2. 引張軟化曲線と切欠きはりの荷重-変位曲線

コンクリート部材の巨視的なひびわれの進展過程を解析するために、有限要素法あるいは境界要素法に仮想ひびわれモデルを組み込む方法がある¹⁾。これは、ひびわれの進展を要素節点の分離でモデル化し、分離された節点にその節点間距離（ひびわれ開口変位）に応じて引張軟化曲線から定まるひびわれ間の伝達力を等価節点力として作用させるものである。この方法は一本の主ひびわれの進展が部材の挙動を支配しているような場合に有効であり、特に部材の最大耐力以降のいわゆる下降域の解析も可能である。以下に、この方法を用いて切欠きを有する曲げ供試体について、引張軟化特性をパラメーターにとって解析した結果を示す。

図-1には供試体の要素分割図を示す。供試体は10×10×84 cm（載荷スパン80 cm）であり、スパン中央に深さ5 cmの切欠きを設けたものである。なお、この供試体は曲げ試験から破壊エネルギーを求める RILEM の試験法で使用される供試体を想定したものである。

図-2は仮想ひびわれの構成式として用いた引張軟化曲線を示したものである。引張軟化曲線のモデルとしては種々のものがある。2直線モデルでは折れ点の応力を引張強度の1/3としたモデル³⁾や1/4としたモデル⁸⁾などが提案されている。また、図-2中に示した-3乗モデル⁹⁾を含む種々の曲線モデルも提案されている。ここでは特に、実験結果との適合が比較的よいといわれている1/4モデルと-3乗モデルをとりあげ、さらに比較の

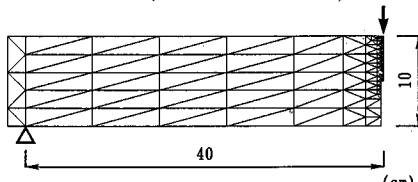


図-1 要素分割図

ために1直線モデルも用いた。

図-3は図-1に示す供試体のスパン中央に載荷した場合の荷重-変位曲線を、破壊エネルギー G_F を0.15 kgf/cmとして図-2の-3乗モデルを用い、引張強度を20, 35, 50 kgf/cm²と変化させて求めた解析結果である。引張強度が増加するに従って供試体の最大耐力は増加している。しかし、引張強度が高くなるにつれて引張強度に対する曲げ強度（最大曲げモーメントを切欠き断面の断面係数で除した値）の比率は小さくなっている。図-4は-3乗モデルを用い引張強度を35 kgf/cm²とし

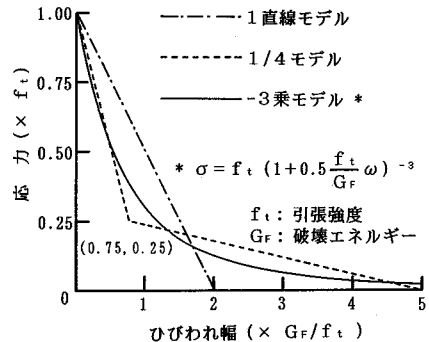


図-2 引張軟化曲線のモデル

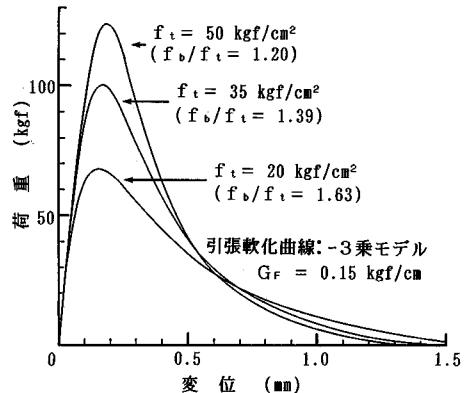


図-3 引張強度とはりの荷重-変位曲線の関係

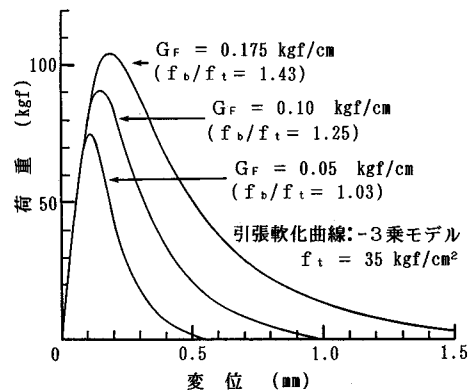


図-4 破壊エネルギーとはりの荷重-変位曲線の関係

て破壊エネルギー G_F のみを変化させた場合の荷重-変位曲線である。 G_F の値は、小さい値として軽量コンクリートを想定して 0.05 kgf/cm を採用し、また大きい値として普通コンクリートで得られる値より若干大きめの 0.175 kgf/cm を、さらにそれらの中間の値として 0.10 kgf/cm を採用した。 図-4 に示すとおり G_F が大きくなるにつれて耐力が大きくなっており、コンクリートの曲げ強度に対して破壊エネルギーが影響していることがわかる。 図-5 は引張強度、破壊エネルギーが等しく引張軟化曲線の形状のみが異なる場合の結果を示したものである。 特に1直線モデルの場合は2直線モデルあるいは曲線モデルの場合に比べて荷重が大きく、荷重-変位曲線の形状も全く異なっており、部材の破壊挙動を推測するうえで引張軟化曲線の形状も重要なパラメーターであることがわかる。 なお、2直線モデルと曲線モデルを比べると最大耐力点以降に多少の差は認められるがほぼ同一の荷重-変位曲線が得られている。 したがって、モデル化した引張軟化曲線を用いて解析を行う場合には比較的単純な2直線モデルでも十分に実験結果を追跡できると考えられる。

以上のように、引張り域においてひびわれを伴うコンクリート部材の挙動に対しては、コンクリートの強度ばかりでなく破壊エネルギーあるいは引張軟化曲線の形状が影響している。 したがって、部材の破壊挙動を推測する場合、破壊エネルギー、引張軟化曲線といったコンクリートの引張軟化特性をどのように定めるか、あるいは計測するかは重要な課題と考えられる。 そこで、以下にコンクリートの引張軟化曲線を実験的に計測する方法について述べる。

3. 引張軟化曲線の推定方法

(1) 曲げ試験から引張軟化曲線を求める理論

いま、一様引張を受けるコンクリートの引張軟化曲線が次式で表わされるとする。

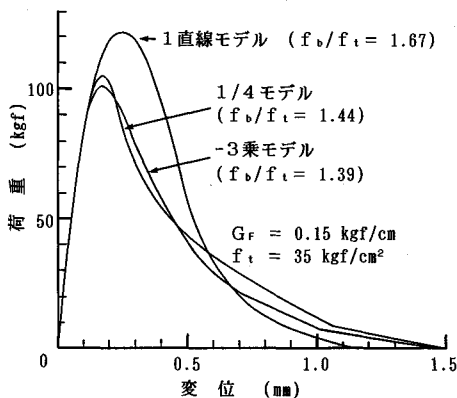


図-5 引張軟化曲線の形状とはりの荷重-変位曲線の関係

$$\sigma = \sigma(\omega) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 σ :引張応力、 ω :ひびわれ幅

単位面積当たりのひびわれが、ひびわれ幅 ω に達するまでに必要とするエネルギー $e(\omega)$ は引張軟化曲線下の面積で表わされるので $e(\omega)$ は次式で表わされる (図-6)。

$$e(\omega) = \int_0^\omega \sigma(\omega) d\omega \dots \dots \dots (2)$$

なお、引張応力がちょうど0になるときのひびわれ幅を ω_{cr} とすれば $\sigma(\omega_{cr}) = 0$ であり、 $e(\omega_{cr})$ は破壊エネルギー G_F に一致する。 式 (2) を逆に読みかえと、 $e(\omega)$ が実験的に求められれば、それを微分することで $\sigma(\omega)$ が求まることになる。 すなわち、

$$\sigma = \sigma(\omega) = \frac{de(\omega)}{d\omega} \dots \dots \dots (3)$$

したがって、引張軟化曲線を求めるためには $e(\omega)$ が計測されればよい。

いま、図-7 に示すように、ひびわれの長さが a 、ひびわれ幅の分布が $\omega(y)$ の状態を考える。 この状態に至るまでにひびわれ部のみで消費されるエネルギー E は、式 (2) をさらにひびわれ深さ方向に積分して

$$E = b \cdot \int_0^a e(\omega(y)) dy \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 b :供試体の幅。
となる。 したがって、 E 、 a および $\omega(y)$ がそれぞれ実験的に計測されれば上式より $e(\omega)$ が求められ、さらに微分して引張軟化曲線が決定される。

(2) J積分法

Liら⁶⁾のJ積分法では、図-8 に示すように切欠き長

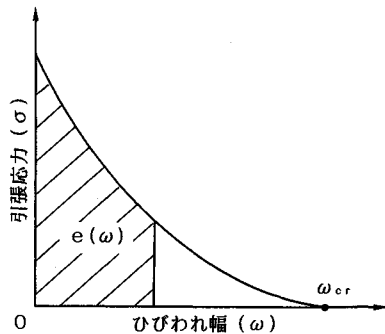


図-6 引張軟化曲線と消費エネルギー

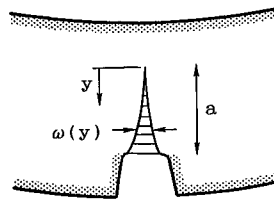


図-7 切欠き先端部

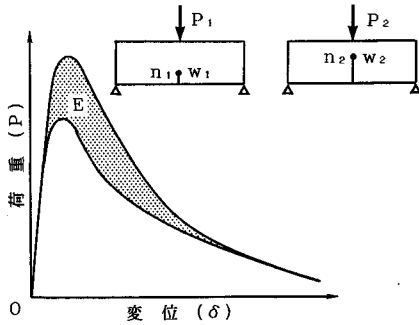


図-8 LiらのJ積分法

さのみがわずかに異なる2体の曲げ供試体(切欠き長さ $n_1 < n_2$)について载荷試験を行い、式(4)中の E , a , および $\omega(y)$ を計測,あるいは仮定して $e(\omega)$ を求めている. なお, J積分法では $e(\omega)$ を J積分値としている. J積分法で対象としているひびわれは両供試体の切欠き長さの差の部分であり, そのひびわれ長さは $a = n_2 - n_1$ である. この対象とするひびわれ部で消費されるエネルギー E は, 両供試体の荷重-変位曲線 $(P_1(\delta), P_2(\delta))$ の面積の差として求められる. ひびわれ幅の分布については, 切欠き長さの差を微小にすることで, この区間では一様分布を仮定し, ひびわれ幅 ω を両供試体の切欠き先端の開口変位 (w_1, w_2) の平均値 $(\omega = (w_1 + w_2)/2)$ としている. したがって, 式(4)から

$$e(\omega) = E(\omega) / (b \cdot a) \tag{5}$$

ここに, $\omega = \omega(\delta) = (w_1(\delta) + w_2(\delta)) / 2$

$$E(\omega) = E(\omega(\delta)) = \int_0^{\omega} (P_1(\delta) - P_2(\delta)) d\delta$$

$$a = n_2 - n_1$$

となり, 式(5)を微分すれば引張軟化曲線が推定される.

J積分法を検証する目的で, 有限要素法による切欠きはりの解析結果にJ積分法を適用した結果, 同方法は解析上は非常に精度がよいが, 実測値にJ積分法をそのまま適用すると, ばらつきの大きい引張軟化曲線が推定される傾向のあることが明らかとなっている¹⁰⁾. その原因は式(5)に示すように, J積分法では2つの供試体の試験結果の差を用いるために, 計測値のばらつきを拡大して取り入れてしまう可能性があるためである. すなわち, J積分法の欠点は1本の引張軟化曲線を推定するために, 2体の計測結果を必要とすることであり, このことが試験を繁雑にするばかりでなく, 不安定な試験結果を導く原因ともなるのである.

(3) 新J積分法

著者らはJ積分法を簡略化して, 1体の供試体の計測結果のみから引張軟化曲線を推定する方法を提案し

た⁷⁾. すなわち, J積分法において, 2種類の切欠きのうち1種類の切欠きの長さを大きくして, 供試体の上縁まで切欠きを入れた仮想の供試体を考え, これと実際の供試体との間にJ積分法を適用しようとしたものである. この簡略化が, 式(4)を解くうえでどのような操作に対応しているかを以下に示す.

ひびわれ長さ a は両供試体の切欠き長さの差であるから, 実際の供試体のリガメント長さ(供試体の高さから切欠きの長さを引いたもの)を a_0 とすれば $a = a_0$ となる. ひびわれ幅 ω については切欠き先端の開口変位の平均値であるから, 仮想の供試体の開口変位は常に0であるので, 実際の供試体の開口変位を w とすれば $\omega = w/2$ である. また, ひびわれ部で消費されるエネルギー E は, 実際の供試体の荷重-変位曲線下の面積となり, 供試体に加えられるエネルギーはすべてひびわれ部で消費されることになる. 以上の操作により, 式(4)は次式ようになる.

$$E(\omega) = A_{lig} \cdot e(\omega) \tag{6}$$

ここに, A_{lig} はリガメント面積 $(= b \cdot a_0)$.

一方, ひびわれ幅が ω に達するまで, すなわち切欠き先端の開口変位が $w (=2\omega)$ に達するまでに供試体に加えられるエネルギーは, 開口変位が w のときの荷重点変位を δ_w とすると, 荷重-変位曲線を積分して,

$$E(\omega) = \int_0^{\delta_w} P(\delta) d\delta \tag{7}$$

であるから, $e(\omega)$ は次式で与えられる.

$$e(\omega) = 1/A_{lig} \cdot \int_0^{\delta_w} P(\delta) d\delta \tag{8}$$

なお, 式(7)中の荷重-変位曲線 $P(\delta)$ には供試体の自重による影響を補正するために, 付加的な荷重として供試体重量の半分を加えたものを用いる.

さらに, 新J積分法を簡単に表わすならば, 図-9のようになる. すなわち, 新J積分法は, はり供試体の破壊をひびわれ幅がはり供試体の切欠き先端の開口変位の半分でしかもひびわれ部以外は剛体である架空の一軸引張供試体の破壊に置き換え, その両方でひびわれ部で消費されるエネルギーが等しいとしたものである.

新J積分法を検証するために, 切欠きはりの有限要素法による解析結果に対して新J積分法を適用してみた. 供試体は図-1に示したものと同様のものである. 有限要素解析で入力した引張軟化曲線は図-2の2直線モデルと曲線モデルである. 図-10, 11に入力した引張軟化曲線と新J積分法で推定された軟化曲線を示す. 曲線モデルの場合には, ひびわれ幅が小さい領域で, 入力値に比べ応力が低く推定されている. また, 2直線モデルの場合には, 推定された曲線は, 折れ点の座標が図中左上方向に移動した形状になっている. さらに, いず

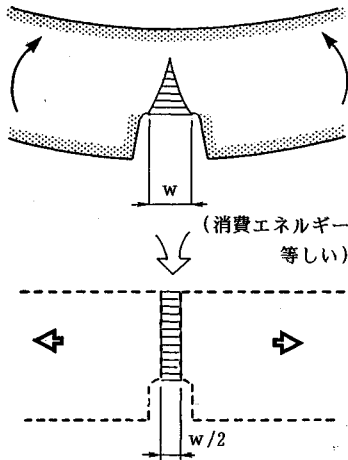


図-9 新 J 積分法のモデル化

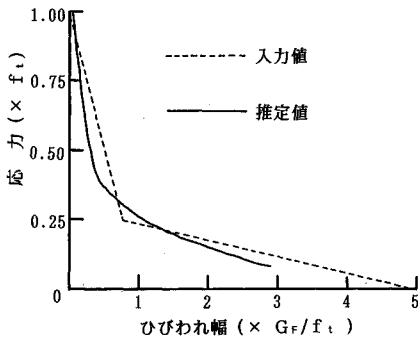


図-10 新 J 積分法による推定 (2直線モデル)

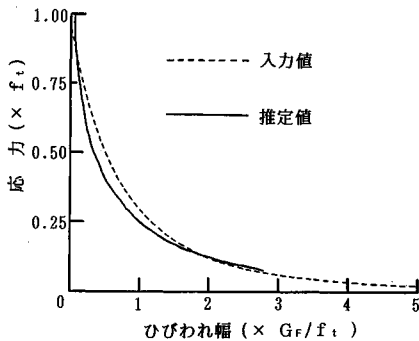


図-11 新 J 積分法による推定 (曲線モデル)

このモデルの場合でも、引張強度は入力値と一致していない。これらの誤差の原因としては、リガメント内における圧縮域とひびわれがまだ発生していない領域を無視していること、ひびわれ部以外の領域で蓄えられる弾性ひずみエネルギーを考慮していないこと、およびひびわれ幅の分布を一様として、しかもその幅を切欠き先端の開口変位の半分としていることが挙げられる。

しかしながら、新 J 積分法は、実験値に適用した場

合でも J 積分法に比べてばらつきの少ない安定した軟化曲線が得られ、軟化曲線の概略を求める場合、あるいは材料の引張軟化曲線を相対的に比較するような場合には有効な方法と考えられる。また、新 J 積分法の試験は破壊エネルギーを求める RILEM の試験法に準じて行うことができるので破壊エネルギーも同時に計測することができる点が合理的である。

(4) 修正 J 積分法

上述の新 J 積分法において設けた仮定をまとめると以下ようになる。

- i) ひびわれ長さはリガメント長さとする。
- ii) 供試体に加えられたエネルギーはすべてひびわれ部でのみ消費されるとする。
- iii) ひびわれ幅は切欠き先端の開口変位の半分で分布は一様とする。

これら3つの仮定はいずれも誤差の原因であり検討を要する事項である。ここで、推定精度の向上を目的として、新 J 積分法を一部修正した修正 J 積分法を提案する。修正に際して上記3つの仮定について検討した結果、i) と ii) については修正せず、iii) のみを修正することとした。すなわち、ひびわれ長さを実験的に検出すること、および弾性ひずみエネルギーだけを加力エネルギーから分離して求めることは、特殊な計測装置あるいは繰返し载荷のような繁雑な操作を要することになり、試験の実用性を考えた場合、現状では困難であると判断し、i) と ii) の仮定については変更しないものとした。一方、iii) については、新 J 積分法では図-9 に示したように曲げ変形モードを一軸引張モードにモデル化したのに対して、修正 J 積分法では図-12 に示すように変形モードを切欠き真上の供試体縁を回転中心とした剛体回転とすることで、より実際に近いモードを採用することとした。このことにより、新 J 積分法においては引張軟化曲線のひびわれ幅が曲げ供試体の切欠き先端の開口変位の半分と結び付けられていたため、その物理的意味があいまいであったが、修正 J 積分法により軟化曲線のひびわれ幅は切欠き先端の開口変位と直接的に結び付けられることになる。

図-12 において、切欠き先端の開口変位が w に達するまでにひびわれ部で消費されるエネルギー E は、式

$$(4) \text{ において } \omega(y) = w/a_0 \cdot y \text{ として}$$

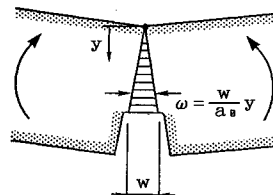


図-12 修正 J 積分法のモデル化

$$E(w) = \frac{A_{11g}}{w} \int_0^w e(w) dw \dots\dots\dots (9)$$

上式の両辺を w で2階微分して、式(3)の関係を用いると次式が得られる。

$$\sigma(w) = (wE''(w) + 2E'(w)) / A_{11g} \dots\dots\dots (10)$$

一方、 $E(w)$ は新 J 積分法の場合と同様、供試体の加力エネルギーに等しいとして、切欠き先端の開口変位が w のときの荷重点変位を δ_w とすれば、荷重-変位曲線を積分して次式のように与えられる。

$$E(w) = \int_0^{\sigma_w} P(\delta) d\delta \dots\dots\dots (11)$$

以上、式(10)と式(11)より $\sigma(w)$ を求め、 w を ω に読み変えれば引張軟化曲線が得られる。なお、式(11)中の荷重-変位曲線 $P(\delta)$ は供試体の自重による影響を補正するために、付加的な荷重として供試体重量の半分を加えたものを用いる。

図-13, 14には、それぞれ図-2の2直線モデルと曲線モデルを入力した有限要素法による解析結果に対して修正 J 積分法を適用した結果を示す。いずれのモデルの場合でも修正 J 積分法で推定された軟化曲線の形状は、入力した曲線によく一致しており、図-10, 11に示した新 J 積分法に比べより精度が高いことがわかる。しかし、修正 J 積分法の場合でも引張強度は推定できていない。引張強度を推定できないのは、引張強度が推

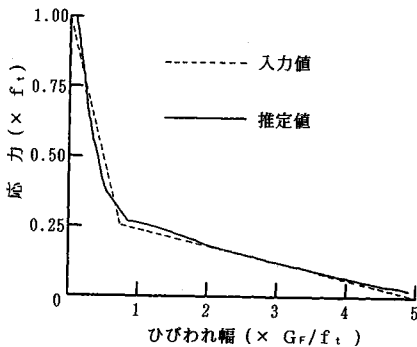


図-13 修正 J 積分法による推定 (2直線モデル)

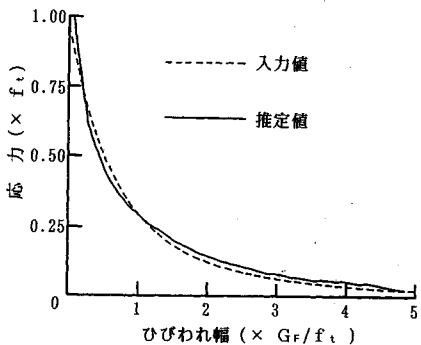


図-14 修正 J 積分法による推定 (曲線モデル)

定される载荷のごく初期の段階においても、ひびわれ長さをリガメント長さに等しいとしていること、およびひびわれ部以外の領域で蓄えられる弾性ひずみエネルギーの影響を無視してしまうことが主な原因と考えられる。また、式(10)には $E(w)$ の1階微分と2階微分が含まれているため、数値微分をする際に滑らかな微分値が得られるようにしないと推定される曲線が乱れることになる。特に、引張強度点付近では $E(w)$ の絶対値が小さく、解析誤差(実験では計測誤差)の影響を受けやすく曲線が乱れる傾向が強い。したがって、修正 J 積分法で引張軟化曲線を推定する場合でも、引張強度点については別途、引張強度試験を行い修正する必要があると考えられる。具体的な修正方法については、次章で述べる。

なお、ひびわれ長さの仮定と弾性ひずみエネルギーを無視するという大きな仮定を設けても、曲線の概形の推定ができるのは以下の理由によるものと考えられる。すなわち、初期の段階においてひびわれ長さを実際のひびわれより長く評価することは、実際のひびわれが消費するエネルギー $e(\omega)$ を過小評価することになり、一方、弾性ひずみエネルギーを無視することは $e(\omega)$ を過大評価することになり、この両者がある程度相殺するためと考えられる。図-15は有限要素解析(普通コンクリートを想定した図-3の $f_t = 35 \text{ kgf/cm}^2$ のもの)において得られた切欠き先端の開口変位を横軸にとり、そのときのリガメント長さに対するひびわれ長さ (a/a_0) とひびわれ部で消費されたエネルギーに対する全加力エネルギー (E_T/E_F) を示したものである。ここで、 a/a_0 はひびわれ長さを a_0 と仮定することによる $e(\omega)$ の過小評価分を表わし、 E_T/E_F は弾性ひずみエネルギーを無視することによる過大評価分を表わしており、それらの積 ($a/a_0 \cdot E_T/E_F$) は最終的に評価される $e(\omega)$ の真の値に対する割合を表わしていると考えられる。同図に示すとおり ($a/a_0 \cdot E_T/E_F$) は、ひびわれ幅の小さい初期の段階でわずかに差があるものの、最大耐力点付近以降はほ

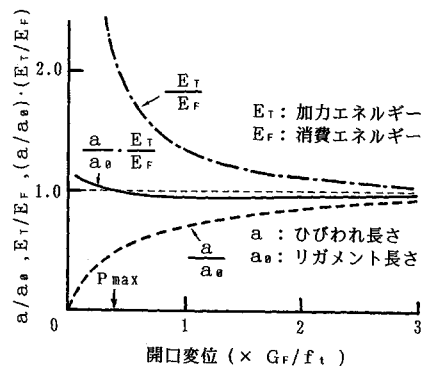


図-15 $e(\omega)$ に対するひびわれ長さ弾性ひずみエネルギーの影響

ば1.0になっており、2つの仮定による誤差がちょうど相殺されていることがわかる。

4. 各種コンクリートの引張軟化特性の計測

(1) 実験概要

高強度コンクリート、軽量コンクリートおよび荷材材令の異なる普通強度コンクリートについて、修正 J 積分法による引張軟化曲線の推定を行った。また、試験は破壊エネルギーを求めるための RILEM の試験法²⁾に準じて行い、 G_F の計測も同時に行った。高強度コンクリートは水セメント比を 27% として、高性能減水剤を用いて作成した。軽量コンクリートは細骨材、粗骨材（造粒型）ともに軽量骨材を使用し、単位容積重量は 1.63 t/m³ である。普通強度コンクリートについては、材令の異なる 3 日、7 日、28 日で試験を行った。

試験装置を図-16 に示す。試験機には容量 200 t の耐圧試験機を用いた。この試験機はサーボコントローラ等の変位制御装置の付いていない通常のアムスラー型耐圧試験機である。両支点下にはローラーを配置して水平方向の拘束をできる限り取り除くようにした。荷重点変位は供試体底面の切欠きをはさんだ 2 点で高感度変位計（感度 1/1 000 mm）を用いて計測しその平均値とした。切欠き先端の開口変位は高感度変位計（感度 1/2 000 mm）を供試体側面に直接取り付け計測した。なお、開口変位を計測する際、検長は 3.0 cm とし、検長内に含まれる弾性変形分はひびわれ幅に比較して十分小さいので無視することとした。供試体寸法は、10×10×84 cm（荷重スパン 80 cm）、切欠き深さ 5.0 cm である。高強度ならびに軽量コンクリートについては、打設後 2 週間の湿布養生を行い、その後約 8 週間気中養生を行った。普通強度コンクリートについては湿布養生とした。各供試体とも試験前日にコンクリートカッターによって切欠きを加工した。切欠きの幅は、切欠き先端を含め全長にわたって約 5 mm である。供試体の数は 1 条件につき 5 ないし 6 本とした。荷重速度は 30 秒から 60 秒程度で最大荷重に達するようにした。最大耐力点以降、破壊が急激に進展するような場合には、除荷、荷重を繰り返す、不安定破壊が生じないように制御した。

(2) 実験結果と考察

試験結果の一覧を表-1 に示す。各コンクリートの荷

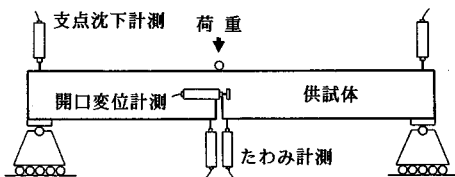


図-16 3点曲げ試験

表-1 コンクリートの力学特性

コンクリート	強度 (kgf/cm ²)			G_F (kgf/cm)
	圧縮	引張	曲げ	
高強度	848	53.0	75.7	0.178
軽量	344	22.3	30.1	0.053
普通 3 日	195	17.6	38.2	0.134
普通 7 日	292	26.7	46.6	0.144
普通 28 日	407	34.3	50.5	0.160

*曲げ強度は荷重試験後の供試体片(10×10×42cm)を使用した。引張強度は割裂引張強度である。

重-変位曲線を図-17~図-21 に示す。なお、荷重-変位曲線は特に最大耐力点以降ばらつきが大きいので、全供試体の曲線群を包絡する範囲を影を付けて示した。高強度コンクリートでは、普通強度コンクリートに比べ、圧縮強度や引張強度の増加ほどには破壊エネルギーは増加していない。また、軽量コンクリートでは破壊エネルギーが普通強度コンクリートの 1/3 程度になった。普通強度コンクリートについて、材令に伴う強度の変化をみると、圧縮強度と引張強度の増加に比べ、曲げ強度はそ

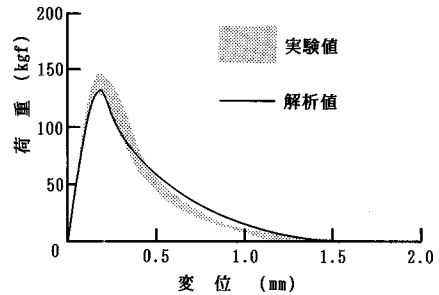


図-17 高強度コンクリートの荷重-変位曲線

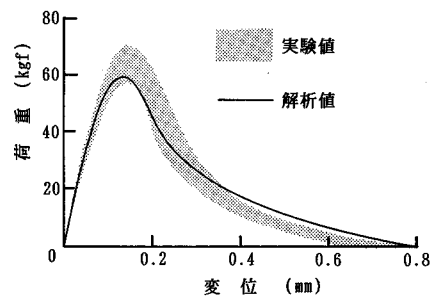


図-18 軽量コンクリートの荷重-変位曲線

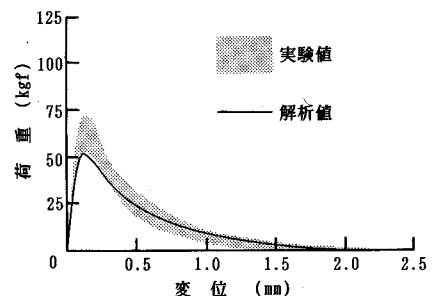


図-19 材令 3 日の荷重-変位曲線

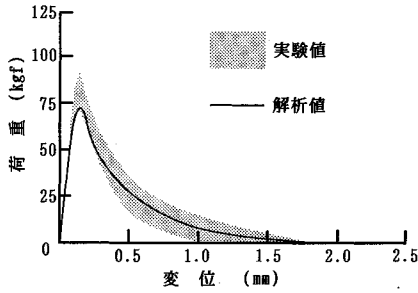


図-20 材令7日の荷重-変位曲線

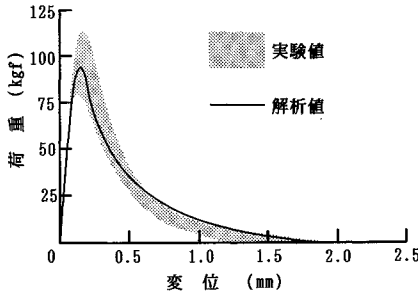


図-21 材令28日の荷重-変位曲線

れほど増加していない。これは、材令が経過しても破壊エネルギーはそれほど増加せず、また、後述するように引張軟化曲線の形状もほとんど変化しないためと考えられる。

図-22には、普通コンクリートの材令28日のものについて修正J積分法によって推定された引張軟化曲線を示す。同図に示すとおり、実際に推定された引張軟化曲線は引張強度点が別途行われた割裂引張強度試験の結果とは異なっており、しかも曲線の頂点は応力軸上からはずれている。そこで、本研究では、軟化曲線の引張強度点を割裂引張強度に置換するとともに、割裂引張強度点から推定された曲線に対して接線を引くことによって、引張強度点付近の補正をすることとした。なお、このような補正を行う理由の1つは、引張軟化曲線を組み込んで部材の解析を行う場合、曲線形状のわずかな違いよりも、引張強度点(軟化開始点)をいくりにするかが解析結果に大きな影響を与えるためである。

図-23～図-27には各コンクリートの平均の荷重-変位-開口変位関係を用いて修正J積分法によって推定された引張軟化曲線を実線で示す。さらに図-22に示したのと同様の方法で引張強度点を補正したものを点線で示す。

図-28には各コンクリートの引張軟化曲線を無次元化したものを示す。いずれの軟化曲線もほぼ同じ形状をしていることがわかる。また、同図には曲線モデルおよび2直線モデルを併記してあり、いずれのコンクリート

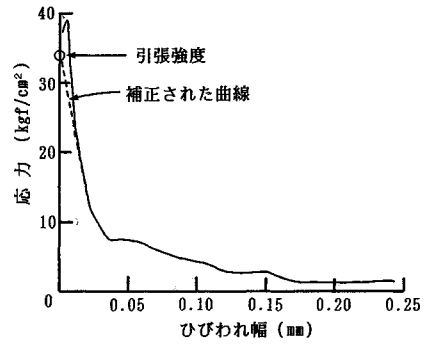


図-22 引張軟化曲線の補正

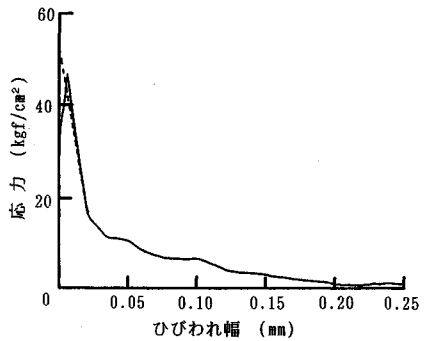


図-23 高強度コンクリートの引張軟化曲線

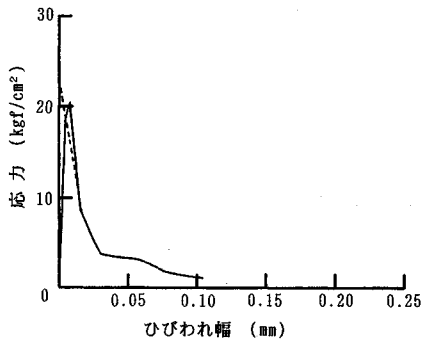


図-24 軽量コンクリートの引張軟化曲線

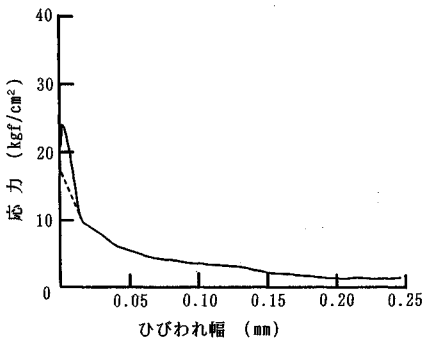


図-25 材令3日の引張軟化曲線

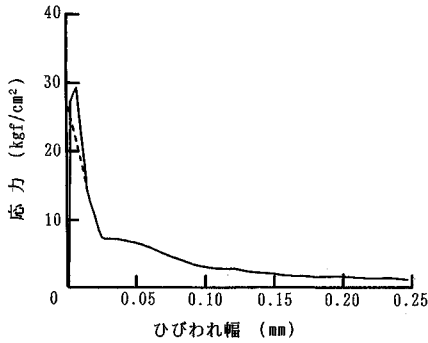


図-26 材令7日の引張軟化曲線

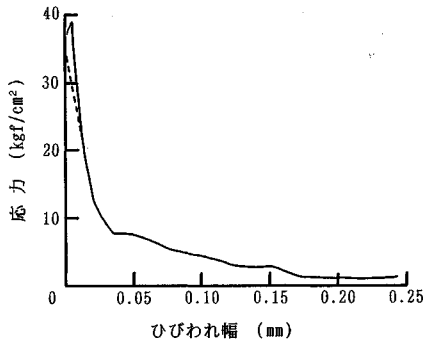


図-27 材令28日の引張軟化曲線

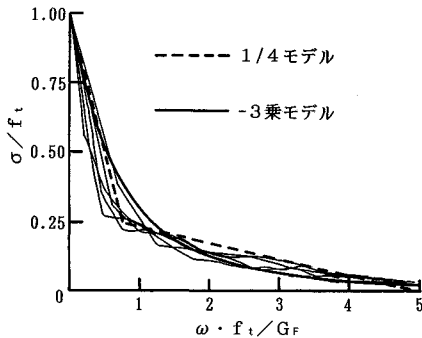


図-28 無次元化した引張軟化曲線

の場合もほぼこれらのモデルに一致していることがわかる。

前掲の図-17～図-21には修正J積分法によって推定された引張軟化曲線を用いて解析した荷重-変位曲線を実線で示した。解析では、推定された引張軟化曲線を4～7本の折れ線でモデル化したものを用いた。また、引張軟化曲線下の面積をRILEMの方法によって求められた破壊エネルギーに一致させるために限界ひびわれ幅(応力が0になるひびわれ幅)を調整した。さらに、実験では弾性係数を計測していなかったため、解析においては荷重-変位曲線の初期勾配が一致するように弾性係数を定めた。解析の結果、推定された引張軟化曲線を

用いることにより、いずれのコンクリートにおいても比較的よく実験結果を追跡できている。したがって、修正J積分法によって推定された軟化曲線は、いずれもほぼ正しいものであり、本方法によって曲げ試験からコンクリートの引張軟化曲線を精度よく推定できることが明らかとなった。

5. 結 論

本研究では、まず、ひびわれを伴う引張域のコンクリートの破壊挙動に対して、強度特性ばかりでなく、引張軟化特性が影響していることを示し、引張軟化特性を計測することの重要性を示した。つづいて、曲げ試験から引張軟化曲線を推定する方法としてすでに提案されているJ積分法ならびに新J積分法について理論的に考察し、それらの方法の問題点を指摘するとともに、新J積分法を改良して修正J積分法を提案した。修正J積分法の特徴は以下のとおりである。

- (1) J積分法は1本の引張軟化曲線を推定するために2体の供試体の試験結果を必要としたが、修正J積分法では1体のみの試験結果から引張軟化曲線を推定することができる。
- (2) 修正J積分法の試験は、切欠きはりの3点曲げ試験において荷重、荷重点変位および切欠き先端の開口変位のみを計測すればよい。

(3) 修正J積分法の試験は、破壊エネルギーを求めるためのRILEMの試験法と組み合わせることができ、引張軟化曲線と破壊エネルギーを同時に求めることが可能である。

(4) 修正J積分法は、ポテンシャルエネルギーの2階微分を含んだ式によって引張軟化曲線を推定するもので、その推定精度は新J積分法より高い。

さらに、修正J積分法を高強度コンクリート、軽量コンクリートならびに普通強度コンクリートに対して実際に適用してみた。その結果、以下のような知見を得た。

- (1) 修正J積分法によって推定された引張軟化曲線を用いて供試体の荷重-変位曲線を解析したところ、実験値と解析値がほぼ一致した。したがって、修正J積分法によってコンクリートの引張軟化曲線を精度よく推定できると考える。

(2) 本実験では3日、7日、28日と材令の経過に伴う曲げ強度の増加は圧縮強度や引張強度の増加に比べて小さくなっている。これは、曲げ強度に大きな影響を及ぼす破壊エネルギーが材令を経てもそれほど増加せず、引張軟化曲線の形状もほとんど変化しないためである。

(3) 高強度コンクリート、軽量コンクリートおよび材令の異なる普通強度コンクリートの引張軟化曲線は、いずれも、1/4モデルあるいは-3乗モデルにほぼ一致

している。

最後に、本研究では限られた寸法の供試体の実験結果と解析結果しか扱っておらず、いわゆる寸法効果については検討していない。したがって、引張軟化曲線自体に寸法効果が存在するかどうか、存在するのであるならばその程度はいくらくらいであるのか、さらにはそのメカニズムが何であるのかといった問題については今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) コンクリートの破壊力学研究委員会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム，第1部・委員会報告，日本コンクリート工学協会，JCI-C 19，1990年3月。
- 2) RILEM Draft Recommendation (50-FMC)：Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beams. *Materials and Structures*, Vol. 18, No. 93, pp. 285~290, 1983.
- 3) Petersson, P.E.：Crack Growth and Development of Fracture Zone in Plain Concrete and Similar Materials, Report TVBM-1001, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1981.
- 4) Wittmann, F.H., Rokugo, K., Bruhwiler, E., Mihashi, H. and Simonin, P.：Fracture Energy and Strain Softening of Concrete as Determined by means of Compact Tension Specimens, *Materials and Structures*, Vol. 21, No. 121, pp. 21~32, 1988.
- 5) Hu, X. Z. and Wittmann, F. H.：Fracture Process Zone and K_{Ic} -curve of Hardened Cement Paste and Mortar, *Fracture of Concrete and Rock*, Elsevier Applied Science, pp. 307~316, 1989.
- 6) Li, V. C. and Ward, R. J.：A Novel Testing Technique for Post-peak Tensile Behavior of Cementitious Materials, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Balkema, pp. 183~195, 1989.
- 7) 六郷恵哲・岩佐正徳・瀬古繁喜・小柳 治：J 積分法を用いたコンクリートの引張軟化曲線の定量化，セメント・コンクリート論文集，No. 43，pp. 304~309，1989。
- 8) Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. and Koyanagi, W.：Testing Methods to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy of Concrete, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Balkema, pp. 153~163, 1989.
- 9) Hillerborg, A.：Stability Problems in Fracture Mechanics Testing, *Fracture of Concrete and Rock*, Elsevier Applied Science, pp. 369~378, 1989.
- 10) 内田裕市・鈴木泰生・六郷恵哲・小柳 治：曲げ試験によるコンクリートの引張軟化曲線の計測，コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム，第2部・論文集，日本コンクリート工学協会，JCI-C 19，pp. 5~12，1990年3月。

(1990. 8. 20・受付)