

# コンクリートの引張軟化曲線決定 に関する実験的研究

二羽淳一郎<sup>1</sup>・Taweechai SUMRANWANICH<sup>2</sup>・松尾豊史<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

<sup>2</sup>工修 アジア工科大学大学院 (P.O. Box 4, Klongluang, Pathumthani 12120, Thailand)

<sup>3</sup>正会員 工修 電力中央研究所 我孫子研究所 構造部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

コンクリートの引張軟化曲線を実験的に決定するための新しい手法を提案した。すなわち、修正J積分法に含まれている問題点を解決するために、切欠きはりの繰返し載荷実験に基づき、弾性エネルギー解放分を定量的に評価できるようにした。また、切欠きはりのリガメント部における仮想ひび割れ幅分布の計測結果に基づき、仮想ひび割れの進展状況を定量的に評価可能とした。これらを組み込んだ新しい軟化曲線の推定手法を、材齢および種類の異なる各種のコンクリートに適用し、その引張軟化曲線を推定した。各種の推定手法により得られた引張軟化曲線の相互比較から、本手法の妥当性を検証した。

**Key Words :** tension softening curve, fracture mechanics, J-integral based method, fictitious crack, elastic energy

## 1. 序論

コンクリートの引張軟化特性は、破壊エネルギーとともに、コンクリートの破壊力学特性を規定する重要なパラメータである。破壊エネルギーに加えて、この引張軟化特性が明らかになって初めて、コンクリート構造の破壊現象の数値解析が可能となる。さらに、コンクリートの引張軟化特性は、各種のコンクリートの破壊特性の評価、特に靱性評価に関して重要な情報をもたらすこともできる。このように非常に重要なコンクリートの引張軟化特性であるが、現在までのところ、これを定めるための標準的な試験方法が確立されていない。破壊エネルギーについては、切欠きはりの三点曲げ試験によるRILEMの方法が標準的なものとして扱われているが、引張軟化曲線については、標準的な試験方法が確立されていないのである。

引張軟化曲線を定めるために、現在までに多用されている手法は二つに大別される。すなわち、(1)逆解析による数値解析的な決定手法と、(2)エネルギーバランスに基づくJ積分系の決定手法である。

前者は、例えば、切欠きはりの三点曲げ試験による荷重-変位関係を実測しておき、一方それと同時に仮想ひび割れモデル解析を行い、この解析結果が得られた実測結果と一致するように、逐次引張軟化曲線を与えていくという方法である<sup>1),2)</sup>。これは、実験結果と一致するように区分的に引張軟化曲線を与えていくという方法であり、その決定の手順さえ決めてやることができれば、非常に汎用性が高く、スマートで強力な手法である。ただし、試験方法の標準化のためには、共通的な解析プログラムの整備が不可欠である。このための試みも実際になされており<sup>3)</sup>、今後の進展が期待される。

しかしながら、逆解析手法は、コンクリートのひび割れ進展に関する現象面での理解に、全く無関係に適用していくことができる。このことは逆解析手法の長所であると同時に、ひび割れ進展に関する何等の現象的な知見ももたらさないことにもつながっており、実現象解明への貢献度に欠けるきらいがある。

一方、LiらのJ積分法<sup>4)</sup>を端緒として、エネルギーバランスに基づく一連の手法が提案されている。す

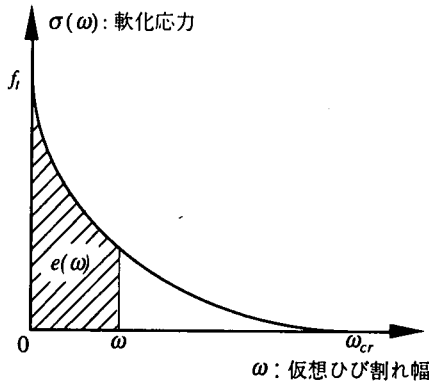


図-1 コンクリートの引張軟化曲線の一例

なわち、新J積分法<sup>5)</sup>、修正J積分法<sup>6)</sup>である。これらは、エネルギーの評価方法、測定データの精度、使用する仮定の妥当性等に関する問題点を含んでいることが指摘されている。しかしながら、逆解析手法とは異なって、破壊現象に対する理解度が向上すれば、それに伴って引張軟化曲線の推定精度も向上していく性質のものである。

本研究では、エネルギー消費時における弾性エネルギーの解放と、リガメント部における仮想ひび割れの進展状況の2点に着目し、これらを適切に評価していくことにより、精度の良い、引張軟化曲線の決定方法を提案しようとするものである。

## 2. 既往の引張軟化曲線決定手法

### (1) エネルギーバランスに基づく引張軟化曲線決定の概要

図-1に、引張軟化曲線の一例を示す。ここで $\sigma$ は軟化応力、 $\omega$ は仮想ひび割れ幅である。ここで、仮想ひび割れ幅ということを強調しているのは、これが実際のひび割れ幅ではなくて、マイクロクラック生成に伴う変形の積分値として得られることを明示するためである。

この仮想ひび割れ幅が $\omega$ となるまでに消費される、単位面積の仮想ひび割れ当たりのエネルギーを $e(\omega)$ とすると、

$$e(\omega) = \int_0^{\omega} \sigma(\omega) d\omega \quad (1)$$

となる。軟化応力が完全に0となる仮想ひび割れ幅を $\omega_{cr}$ とすると、定義より、

$$e(\omega_{cr}) = \int_0^{\omega_{cr}} \sigma(\omega) d\omega = G_F \quad (2)$$

となる。ここで $G_F$ はコンクリートの破壊エネルギー

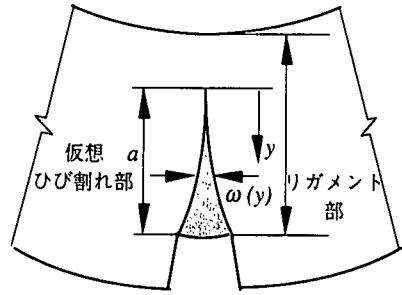


図-2 はりにおける仮想ひび割れ幅分布

である。式(1)より、消費されるエネルギー $e(\omega)$ が得られれば、軟化応力が次のように求められる。

$$\sigma(\omega) = \frac{d}{d\omega} e(\omega) \quad (3)$$

さて、図-2に示すように、幅 $b$ のはりのリガメント部で、仮想ひび割れの長さが $a$ となるまでに消費されるエネルギー $E$ は、

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

ただし、 $\omega(y)$ は $y$ における仮想ひび割れ幅である。式(4)の消費エネルギー $E$ が、外部からの仕事として与えられることにより、仮想ひび割れが進展していく。

このとき、 $E$ 、 $a$ 、 $\omega(y)$ を実験的に定めることができれば、 $e(\omega)$ が決定でき、続いて式(3)より、 $\sigma(\omega)$ も決定できる。これが、エネルギーバランスに基づく、引張軟化曲線の決定手法の概要である。

### (2) LiらのJ積分法

LiらのJ積分法<sup>4)</sup>は、初期リガメント長さのみをわずかに変化させた全く同一な二つの供試体を用意して、それぞれの荷重-変位曲線を求め、その曲線の差が、ひび割れ高さの差に起因するものと仮定して、仮想ひび割れ幅 $\omega$ と消費エネルギー $e(\omega)$ の関係を求めるものである。

すなわち、図-3に示す、初期リガメント長さのみをわずかに変化させた全く同一な二つの供試体の曲げ試験を行い、図-4の結果を得たとしたとき、図-4における曲線の差が全て、リガメント長さの差 $a$ に起因するとして、式(5)のように $e(\omega)$ を求めるのである。

$$e(\omega) = E(\omega) / (b \cdot a) \quad (5)$$

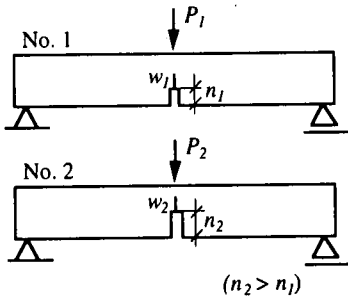


図-3 リガメント長さの異なる2供試体

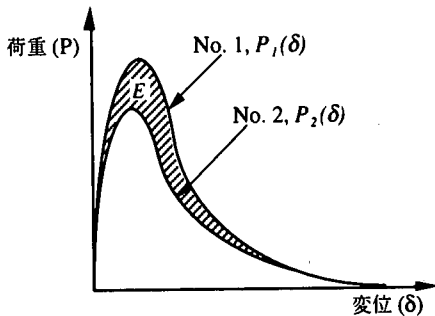


図-4 2供試体の荷重-変位関係

ただし、

$$a = n_2 - n_1$$

$$\omega = \omega(\delta) = \frac{w_1(\delta) + w_2(\delta)}{2}$$

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

ここで、 $n_1$ 、 $n_2$ はそれぞれのはりの切欠き深さで、 $n_1 < n_2$ である。 $\omega$ は変位が $\delta$ のときの仮想ひび割れ幅であるが、これは、両方のはりで実測される開口変位 $w_1$ 、 $w_2$ の平均と仮定している。またリガメント長さの差 $a$ 内での仮想ひび割れの分布 $\omega(y)$ は、一様であると仮定している。以上の仮定から式(5)の関係が得られる。

Liらの提案するJ積分法では、何ら特殊な試験装置を要しない。すなわち、RILEM準拠の切欠きはりの曲げ試験を行い、荷重-変位関係、荷重-開口変位関係を実測するだけでよい。このようにJ積分法は、論理的ではあるが、全く同一とはいえず、二つの供試体を用いていることから実験値のばらつきに対して敏感な方法となっている。この点がJ積分法の欠点として指摘されている。

### (3) 六郷らの新J積分法

LiのJ積分法では、二つの供試体を全く同一なものと仮定して用いている点に問題があった。そこでこの点を解決するため、六郷ら<sup>5)</sup>はLiのJ積分法を簡

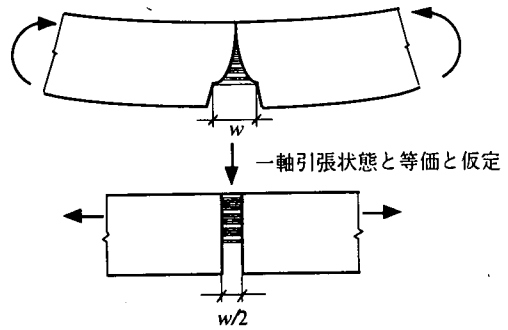


図-5 新J積分法における一軸引張の仮定

単化した新J積分法を提案した。すなわち、切欠きはりの上縁まで達している（すなわちリガメント部の無い）仮想の供試体を考えることにより、J積分法の二つの供試体の内、切欠き高さの高い供試体を置き換えることにしたのである。そして実際には、リガメント長さ $a_0$ の供試体1体のみを用いて、荷重-変位関係、荷重-開口変位関係を計測する。

このようにすれば、J積分法におけるリガメント長さの差 $a$ は、現実の供試体におけるリガメント長さ $a_0$ そのものとなる。また、仮想の供試体における開口変位は0であるので、仮想ひび割れ幅 $\omega$ は、現実の供試体における開口変位 $w$ の半分となる（ $\omega = w/2$ ）。なお、新J積分法では、J積分法に準じて、 $a = a_0$ 内で仮想ひび割れ幅の分布が一様であると仮定するのであるが、これは図-5に示すように、曲げを受けるリガメント部の挙動を、あたかも一軸引張を受ける場合の挙動と等価であると仮定することに等しい。

荷重-変位曲線下の面積から、外的に与えられるエネルギーが求められる。実際には、これに加えて供試体の自重の影響も考慮する。このエネルギーがリガメント部で消費されると考えることにより、次の関係が得られる。

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

ただし、 $A_{lig} = b a_0$  = リガメント面積

また、開口変位が $w$ となるまでに与えられるエネルギーは、

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

ただし、 $\delta_w$ は開口変位が $w$ となる時の変位である。式(6)と式(7)より、以下のように $e(\omega)$ が求められる。

$$e(\omega) = \frac{1}{A_{lig}} \int_0^{\delta_w} P(\delta) d\delta \quad (8)$$

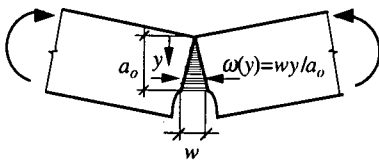


図-6 修正J積分法における仮想ひび割れ幅分布

このように新J積分法は、実用的で、簡便な方法である。いくつかの仮定のため、計算上の精度には劣ると考えられるが、実験データのバラツキに対してさほど鋭敏ではない点はJ積分法よりも優れている。この新J積分法は、引張軟化曲線を概略的に評価する際や、各種のコンクリートの引張軟化特性を相互に比較したりする際に、有力な手法であるといえる。

ただし、仮想ひび割れが、載荷とともに直ちにリガメント部全域にわたって進展していくという仮定、弾性領域に蓄えられた後、解放されるエネルギーを無視している点、仮想ひび割れ幅 $\omega$ が $a_0$ 内で一様に分布し、しかも実測される開口変位 $w$ の1/2であるとする仮定などが、実際の現象とはかけ離れていると考えられ、今後の改良の余地を残している。

#### (4) 内田らの修正J積分法

新J積分法に変わるものとして、内田らは修正J積分法を新たに提案した<sup>6)</sup>。新J積分法における問題点として、内田らは以下の3点をあげている。

(a)仮想ひび割れ幅 $\omega$ が開口変位 $w$ の1/2で、しかも仮想ひび割れ幅がリガメント部で一様に分布しているという仮定。

(b)供試体に与えられたエネルギーが全て仮想ひび割れ部で消費されるという仮定。

(c)仮想ひび割れが、載荷後直ちに、リガメント部全域にわたって進展していくという仮定。

修正J積分法は、この内の(a)の仮定についてのみ修正を行うものである。すなわち、修正J積分法では、仮想ひび割れは一様分布ではなく、図-6に示すように、切欠き上部の圧縮縁を回転の中心とするように分布すると仮定する。

したがって、仮想ひび割れ幅は、

$$\omega(y) = wy / a_0 \quad (9)$$

となる。したがって、仮想ひび割れ部で消費されるエネルギーは、

$$\begin{aligned} E &= b \int_0^a e(\omega(y)) dy = b \int_0^w e(\omega) \frac{a_0}{w} d\omega \\ &= \frac{A_{lig}}{w} \int_0^w e(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)を $w$ で微分すると、

$$e(w) = \frac{1}{A_{lig}} \left[ E(w) + w \frac{dE(w)}{dw} \right] \quad (11)$$

さらに $w$ で微分すると、

$$\sigma(w) = \frac{de(w)}{dw} = \frac{1}{A_{lig}} \left[ 2 \frac{dE(w)}{dw} + w \frac{d^2E(w)}{dw^2} \right] \quad (12)$$

ただし、 $E(w)$ は式(7)と同様にして求められる。式(12)の $w$ を $\omega$ で置き換えれば、これが引張軟化曲線となる。実際には、自重の影響も考慮する。

以上のように、修正J積分法における仮想ひび割れ幅の分布の仮定は、新J積分法における一様分布の仮定よりも現実的であり、この結果、修正J積分法は、新J積分法よりも正確に、引張軟化曲線を予測することができると考えられる。

### 3. 既往の推定手法における問題点

#### (1) 概要

修正J積分法は、新J積分法に含まれていた問題点の内、仮想ひび割れ幅の分布に関する仮定を改善したものである。しかしながら、修正J積分法の場合でも、外的に与えられたエネルギーが全て仮想ひび割れ部で消費されるという仮定と、仮想ひび割れが、載荷後直ちにリガメント部全域に進展するという仮定は、そのままとなっていた。この点をさらに改善し、現実に近いものとしていけば、さらに精度の良い引張軟化曲線の予測が可能となると思われる。そこで本研究では、これら2点に関してさらに検討を進めることとした。

#### (2) 弾性エネルギーの解放

新J積分法や修正J積分法では、外部から与えられるエネルギーを式(7)のように与えているが、これはいわばエネルギーのポテンシャルである。新J積分法や修正J積分法では、簡単のため、このエネルギーが全て、仮想ひび割れ部で消費されると仮定している。しかしながら、このエネルギーの一部は、仮想ひび割れ部以外にも蓄えられており、そしてこれらのエネルギーは、図-7に示すように除荷時には弾性エネルギーとして解放されるはずである。したがって、仮想ひび割れ部で消費されるエネルギーを正しく評価するためには、この弾性エネルギーの解放分を控除しておく必要がある。

そのためには、荷重-変位関係の軟化域における除荷・再載荷パスを明らかにしなければならない。本研究では、実験結果に基づいて、軟化域における除荷・再載荷パスを明らかにし、これに基づいて弾

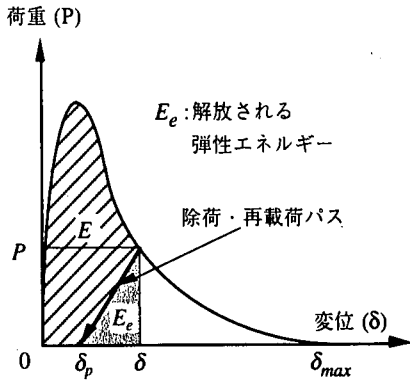


図-7 荷重—変位関係図における弾性エネルギーの解放

性エネルギーの解放分を定量的に評価していくことにした。なお本研究では、除荷・再載荷パス上の繰返し載荷では、エネルギーは消費されないと仮定している。

図-7で濃くハッチした部分は、弾性エネルギーの解放分 $E_e$ であって、仮想ひび割れ部で消費されるエネルギーではない。したがって、この除荷・再載荷パスが決定できれば、消費されるエネルギー $E$ が求められる。例えば、除荷・再載荷パスが直線的に決定できるとすれば、 $E$ は式(13)のように評価できる。

$$E(w) = \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta - \frac{1}{2} P(\delta) (\delta - \delta_p) \quad (13)$$

ただし、 $\delta_p$ は完全に除荷された状態での塑性変形量である。なお、供試体の自重の影響を考慮するため、 $P(\delta)$ には供試体重量の1/2を加えておく。

### (3) 仮想ひび割れの進展の評価

仮想ひび割れが、載荷直後から、直ちにリガメント部全域にわたって進展していくということはあくまでも仮定にすぎない。実際には、変形の増加とともに徐々に進展していくはずである。

本研究では、図-8に示すように、リガメント長さを $a_0$ 、仮想ひび割れ長さを $a$ 、仮想ひび割れ幅を $\omega(y)$ としたとき、以下の関係が成立すると仮定した。

$$\begin{aligned} \omega(y) &= \frac{y}{a} w \\ y &= \frac{a}{w} \omega(y) \\ dy &= \frac{a}{w} d\omega \end{aligned} \quad (14)$$

この部分で消費されるエネルギー $E$ は、以下のよう

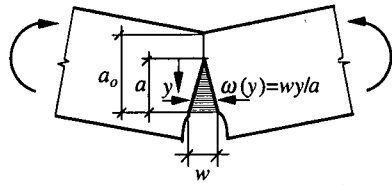


図-8 リガメント部における仮想ひび割れの進展

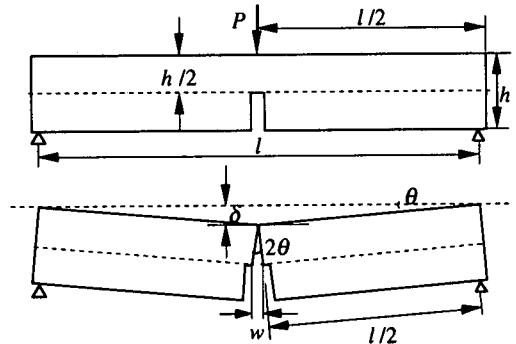


図-9 切欠きはりの剛体的変形状態

$$E = b \int_0^w e(\omega) \frac{a}{w} d\omega = \frac{ba}{w} \int_0^w e(\omega) d\omega \quad (15)$$

式(13)と(15)より、

$$\begin{aligned} \frac{ba}{w} \int_0^w e(\omega) d\omega &= \int_0^{\delta} P(\delta) d\delta - \frac{1}{2} P(\delta) (\delta - \delta_p) = E(w) \\ \int_0^w e(\omega) d\omega &= \frac{w}{ba} E(w) \\ e(w) &= \frac{1}{ba} \left[ E(w) + w \frac{dE(w)}{dw} \right] \\ \sigma(w) = \frac{de(w)}{dw} &= \frac{1}{ba} \left[ 2 \frac{dE(w)}{dw} + w \frac{d^2E(w)}{dw^2} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

### (4) 仮想ひび割れの進展に関する考察

仮想ひび割れが載荷開始から直ちにリガメント全域に進展するかどうかを検討するため、以下のような考察を行った。図-9に示すような高さの半分の切欠きを有するはりの変形を考える。仮想ひび割れ部での変形が卓越すると考え、その他の部分は剛体的に変形していくと仮定すると、仮想ひび割れがリガメント部全域に進展した状態では、供試体の変位 $\delta$ 、開口変位 $w$ 、スパン $l$ 、および高さ $h$ の間にはタワミ角を $\theta$ として、以下の関係が成立しなければならない。

$$\delta = l\theta/2 \quad (17)$$

$$w = (h/2) 2\theta = h\theta \quad (18)$$

式(17)と(18)より、

$$\frac{\delta}{w} = \frac{l}{2h} \quad (19)$$

表-1 使用したコンクリートの配合

コンクリートの種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
			W	C	F.A.	S.F.	S	G	混和剤 (%)	空気量 (%)
自己充填	24	58	159	530	133	—	896	664	2.2	2.0
高強度	22	42	116	488	—	37	768	1084	2.4	1.0
普通強度	60	45	190	316	—	—	819	1024	—	1.0

\*: W/Bは水と結合材（セメント+フライアッシュ、あるいはセメント+シリカフェーム）の重量比

\*\*: 混和剤の使用量は結合材量に対する重量比率

RILEM推奨の切欠きはりの曲げ試験では、 $l=80\text{ cm}$ 、 $h=10\text{ cm}$ であるので、 $\delta/w=4.0$ となる。したがって、測定された $\delta$ と $w$ の関係が線形で、その比が4.0であれば、仮想ひび割れが、載荷開始直後からリガメント部全域に進展しているという仮定は妥当なものとなる。逆にそうでない場合は、より適切な仮想ひび割れの進展に関する仮定が必要となってくる。

#### 4. 実験方法

##### (1) 実験の目的

弾性エネルギーの解放と、仮想ひび割れの進展についての情報を得るために、RILEMの推奨法に準拠した切欠きはりの曲げ試験を行うこととした。ただし、軟化域での除荷・再載荷パスを定めるために、通常の試験法とは異なり、荷重の軟化域で繰返し載荷を行った。また、リガメント部に5個の $\pi$ 型変位計を配置して、そこでのひずみを測定し、仮想ひび割れの進展状況を明らかにすることとした。

##### (2) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント（比重3.15）である。一部、フライアッシュ（比重2.27、ASTMのC種相当品）とシリカフェーム（比重2.20）も使用した。細骨材は川砂（比重2.60、 $FM=2.85$ 、吸水率 $=1.17\%$ ）、粗骨材は石灰岩碎石（比重2.66、吸水率 $=0.72\%$ ）である。粗骨材の最大寸法は16mmである。使用した混和剤は、ナフタレン系の高性能AE減水剤である。

これらの材料を用いて表-1に示す3種類のコンクリートを製造した。

自己充填コンクリートのスランプフローは平均で61cm、高強度コンクリートと普通強度コンクリートのスランプは、平均でそれぞれ15cmと7.5cmであった。

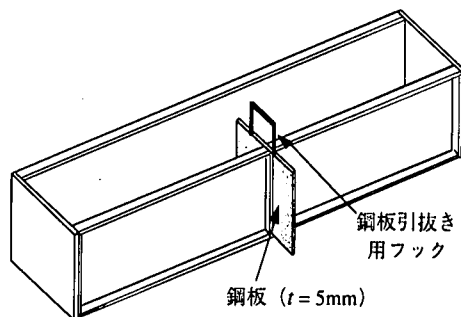
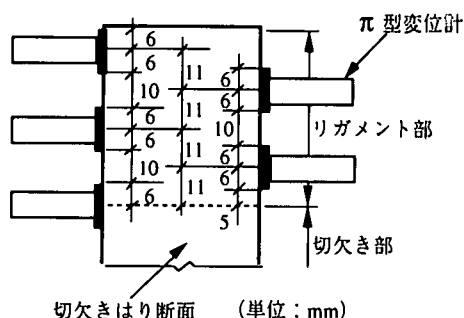


図-10 切欠きはり作成用鋼製型枠

図-11  $\pi$ 型変位計の設置状況

##### (3) 供試体

本研究に用いた切欠きはり供試体は断面が $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ で長さが84cmである。材齢1, 3, 7, 28日で各3体の試験をすることとしたため、コンクリート1種類当たり、計12体の切欠きはり供試体を作成した。図-10に示すように、コンクリート打設前に、切欠き作成用の厚さ5mmの鋼板を供試体中に差し込んでおき、硬化前にこれを引き抜くことにより、切欠きを作成した。

切欠きの高さは5cmである。コンクリート打設後は、乾燥を防ぐため湿潤状態に保ち、材齢1日で試験のものを除き、脱枠後は直ちに水中養生とした。切欠きはり供試体に加えて、強度管理用の円柱供試体（ $\phi 10 \times 20\text{ cm}$ ）を作成した。円柱供試体は、1材齢当たり、圧縮試験用に3本、割裂試験用に3本、作成することとしたので、コンクリート1種類当たり、合計24本となった。

試験時には、切欠きはり供試体の表面をサンドペーパーで平滑にした後、接着剤でベースを貼り付け、これに $\pi$ 型変位計（標点間距離100mm、横幅12mm）を取り付けた（図-11）。できるだけ多くの測定データを得て、仮想ひび割れの進展の状況を明らかにする目的で、 $\pi$ 型変位計は5cmの高さのリガメント部

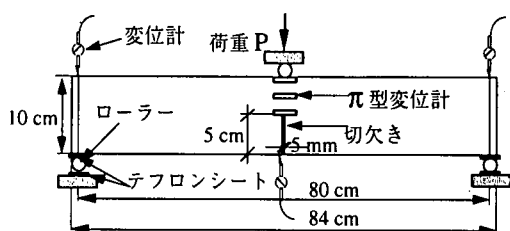


図-12 切欠きはり試験体の荷重・計測状況

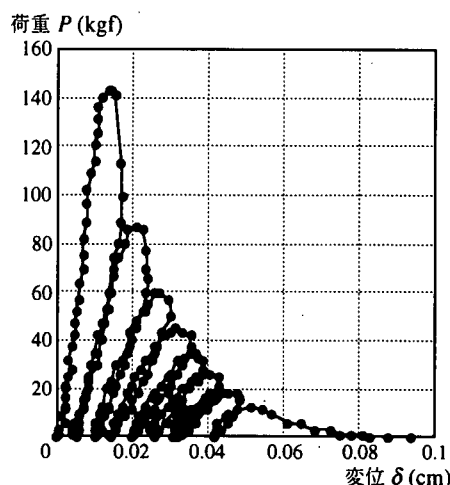


図-13 繰返し載荷時の荷重-変位関係の測定例  
(自己充填コンクリート，材齢28日)

に合計5個設置した（片側3個，反対側2個）．このπ型変位計の配置間隔は図-11に示すように11mmピッチである．

#### (4) 荷重および計測方法

図-12に切欠きはり試験体の荷重・計測状況を示す．支点での横方向の拘束をできるだけ除去するため，ローラーの上下にテフロンシートを配置し，さらにテフロンシートの表面にはシリコングリースを塗布した．荷重の載荷には，変位制御型の試験機を用いた．載荷中，支点上，ならびにスパン中央での変位を測定した．また，5個のπ型変位計を用いてリガメント部での水平方向変位を測定した．

弾性エネルギーの解放分を明らかにするためには，荷重の軟化領域での除荷・再載荷が必要となる．このため，軟化領域で，繰返し載荷を行った．その一例を図-13に示す．これは，材齢28日の自己充填コンクリートの場合である．

なお，載荷開始から載荷終了までの時間は単調載荷の場合で1～2分程度，繰返し載荷の場合で10分程度であった．

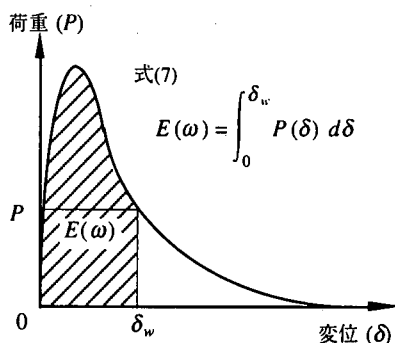


図-14 式(7)におけるエネルギーの意味

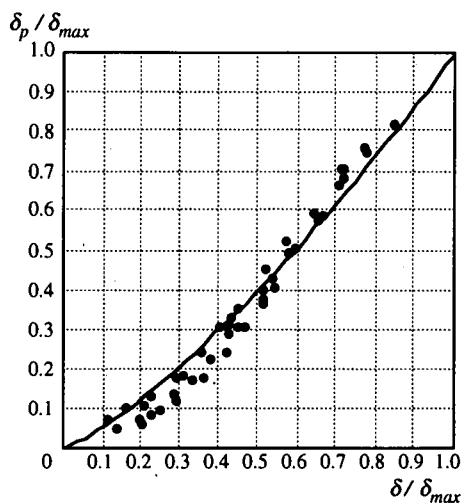


図-15  $\delta_p/\delta_{max}-\delta/\delta_{max}$  の関係

### 5. 新しい引張軟化曲線決定法

#### (1) 弾性エネルギーの控除

図-14に示すように，式(7)で与えられる荷重-変位曲線下の面積は，いわばエネルギーのポテンシャルであって，その多くは，仮想ひび割れ部で消費されるものの，一部は除荷によって解放される弾性エネルギーである．したがって，エネルギーのバランスを考える際の消費エネルギーは，式(7)ではなく，式(13)のようであってならない．

式(13)における $\delta_p$ の値を定めるために，表-1に示した3種類のコンクリートを用いて，荷重の軟化領域での除荷・再載荷実験を行った．

荷重-変位曲線における最大変位（＝終局変位）を $\delta_{max}$ ，除荷開始点変位を $\delta$ ，完全に除荷された状態での塑性変位を $\delta_p$ とする．このとき，すべての実験データに対して， $\delta$ および $\delta_p$ を $\delta_{max}$ で正規化し， $\delta_p/\delta_{max}-\delta/\delta_{max}$ の関係をプロットしたのが図-15である．

ここに示すデータは，コンクリートの種類，材齢，

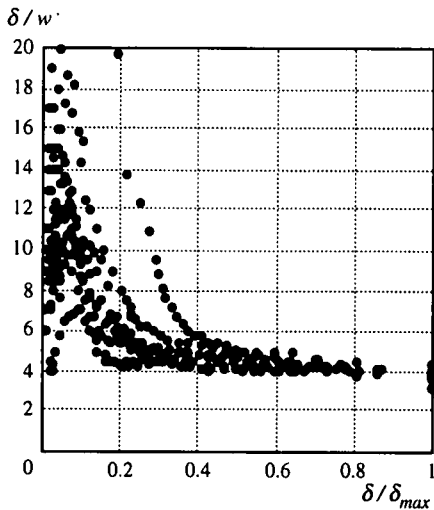


図-16  $\delta/w - \delta/\delta_{max}$  の関係

強度、破壊エネルギーの相違や大小に無関係に、得られた全てのデータを同じ方法で処理したものである。図-15を見ると多少のばらつきは観察されるものの、 $\delta_p/\delta_{max} - \delta/\delta_{max}$  関係は概ね同様な傾向を示すことが認められる。

図-15において、 $\delta_p/\delta_{max} - \delta/\delta_{max}$  関係を定式化できれば、弾性エネルギーの解放分を定量的に評価できる。ここでは、単に  $\delta_p/\delta_{max}$  を  $\delta/\delta_{max}$  のべき乗で表すこととし、最小二乗法でその指数を定めることにした。それが図-15中の実線である。この関係は、式(20)で表される。

$$\frac{\delta_p}{\delta_{max}} = \left( \frac{\delta}{\delta_{max}} \right)^{1.38} \quad (20)$$

式(20)は、実験データを指数関数で簡易に表したものであり、必ずしも実験データに対する近似度は高くない。別の関数形を用いれば、さらに近似度を上げていくことは可能であろうが、ここでの目的はあくまでも  $\delta_p/\delta_{max} - \delta/\delta_{max}$  関係の定式化であり、そのための第一近似としては、式(20)で十分であると判断した。 $\delta_p$  を式(20)のように定め、式(13)にしたがって弾性エネルギーの解放分を評価することにした。

## (2) 切欠きはり供試体の変位と開口変位の関係

载荷の初期段階から、仮想ひび割れがリガメント部全域に進展していくという仮定の妥当性を検証するために、表-1に示された3種類のコンクリートに対して、実測された切欠きはりのたわみと開口変位の比  $\delta/w$  を  $\delta/\delta_{max}$  に対してプロットした(図-16)。

3. (4) での考察によれば、 $\delta/w = 4.0$  であれば、仮想

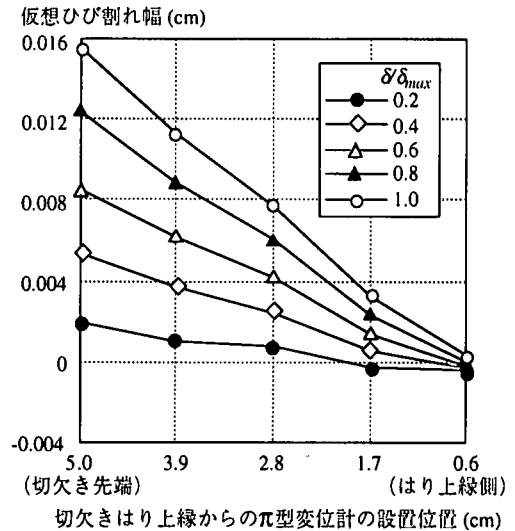


図-17 仮想ひび割れの進展状況

(自己充填コンクリート、材齢28日)

ひび割れが载荷初期からリガメント部全域に進展していくという仮定は妥当なものとなる。

図-16に示されるように、 $\delta/\delta_{max}$  の増加とともに、 $\delta/w$  は次第に4.0に漸近していくのであるが、 $\delta/\delta_{max}$  の小さい、载荷の初期段階では、かなりのばらつきを示すものの、ほとんどの場合、 $\delta/w > 4.0$  であって、たわみに比較して、開口変位が小さいことが認められる。したがって、仮想ひび割れが载荷直後から直ちにリガメント部全域に進展するという仮定に基づいて、切欠きはりの変形を剛体変形に近似することは、タワミの小さい载荷の初期段階において、とりわけ妥当なものであるとは言えず、これが引張軟化曲線の推定精度を下げる要因となっていると判断されるのである。

## (3) 仮想ひび割れの進展状況

リガメント部に配置した5個の  $\pi$  型変位計から得られる出力値を仮想ひび割れ幅と考え、この分布をプロットしたのが図-17である。これは材齢28日での自己充填コンクリートの例である。使用した  $\pi$  型変位計の標点間距離は100mmであり、厳密に言えば、測定される変形には、マイクロクラック部における微小変形の積分値である仮想ひび割れ幅に加えて、この部分での弾性変形を含むのであるが、この部分に発生する弾性応力は最大でもコンクリートの引張強度程度であり、したがってそれによる変形量もおおよそ0.001cm程度以下と推定されるので、これは仮想ひび割れ幅と比較して無視できると考え、測定データはすべて仮想ひび割れ幅に相当するものと仮定することとした。

なお、図-17に示されるようにほぼ線形の仮想ひ



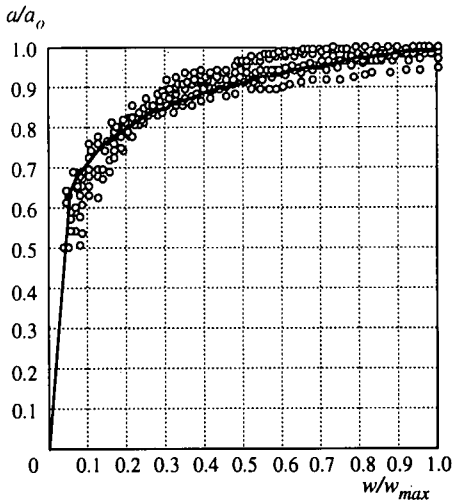


図-18 仮想ひび割れの進展と相対開口変位関係

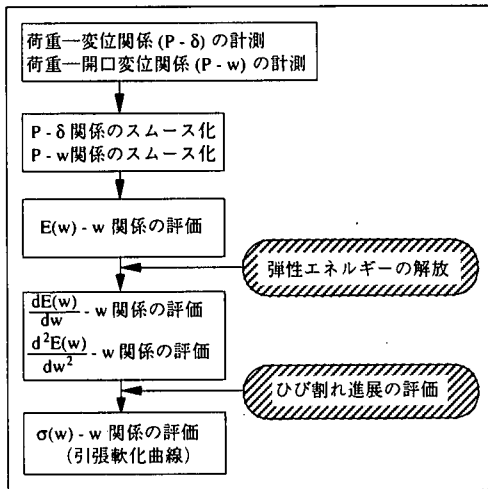


図-19 提案する引張軟化曲線の決定方法

び割れ幅分布が得られていることから、切欠きはりの左右側面における計測差はほとんどないものと考えられる。

図-17に示される通り、荷重初期の $\delta/\delta_{max}=0.2$ や $0.4$ の段階では、はり上縁に明確な圧縮領域が認められ、仮想ひび割れがこの部分に到達していないことが確認できる。しかしながら、たわみの増加とともに次第に圧縮域は減少し、 $\delta/\delta_{max}=0.8$ になると測定される変形は全て引張となって、仮想ひび割れがリガメント部上部にまで進展した状態となっていることがわかる。

図-17に示す仮想ひび割れ幅の分布状況図において、仮想ひび割れ幅が0となる位置を、仮想ひび割れの先端位置と考え、その進展状況を定式化してい

くことにした。これは厳密に言えば、かなりラフな仮定であるとも考えられるが、ここでの目的はあくまでもひび割れ進展状況の評価である。

この仮想ひび割れの先端位置を、例えば相対たわみ $\delta/\delta_{max}$ あるいは相対的な開口変位 $w/w_{max}$ の関数で表すことができれば、ひび割れ進展に関する定量的な取扱いが可能となる。

図-18は、図-17に示すような仮想ひび割れの先端位置（仮想ひび割れ幅=0の位置） $a$ をリガメント長さ $a_0$ で除した相対的な仮想ひび割れ進展位置 $a/a_0$ を、 $w/w_{max}$ に対してプロットしたものである。

図-18に示されるように荷重の初期で開口変位が小さい間は、仮想ひび割れの先端位置はリガメント長さの50~80%程度に留まっている。これに対して、荷重の進行とともに次第に仮想ひび割れの先端位置はより上縁に進展していき、 $w/w_{max}$ が50%程度になると $a/a_0$ はほぼ90%以上となっている。

図-18中の実線は、プロットされた実験データに対する近似式である。ここでは、 $a/a_0-w/w_{max}$ の関係を単純に対数関数で表すことにし、実験データに基づいて、最小二乗法により式の係数を定めた。式(21)はこのようにして得られたものであり、式(20)同様、他の関数形を用いれば、実験データに対する近似度を上げていくことは可能であろうが、ここでの目的である、 $a/a_0-w/w_{max}$ 関係の定式化と仮想ひび割れ進展評価にはこれで十分であると判断した。

$$0.05 \leq w/w_{max} \leq 1.0 \text{ のとき } \frac{a}{a_0} = 1.0 + 0.125 \ln \left( \frac{w}{w_{max}} \right) \quad (21)$$

なお、 $w/w_{max}$ が0.05を下回るときは、原点を通るように $w/w_{max}=0.05$ での値を直線的に外挿しておくことにした。

$$0 \leq w/w_{max} < 0.05 \text{ のとき } \frac{a}{a_0} = 12.51 \frac{w}{w_{max}} \quad (22)$$

本研究では、以上により、仮想ひび割れの進展を評価していくことにした。

#### (4) 引張軟化曲線の決定方法

今回提案する新しい引張軟化曲線の決定方法を図-19に示す。図中のハッチした部分が、修正J積分法と本手法の違いである。式(20)を基にして弾性エネルギーの解放を考慮し、また式(21)、(22)により、リガメント部における仮想ひび割れの進展を評価した。

この2点が今回提案する引張軟化曲線の決定方法における新しい点である。

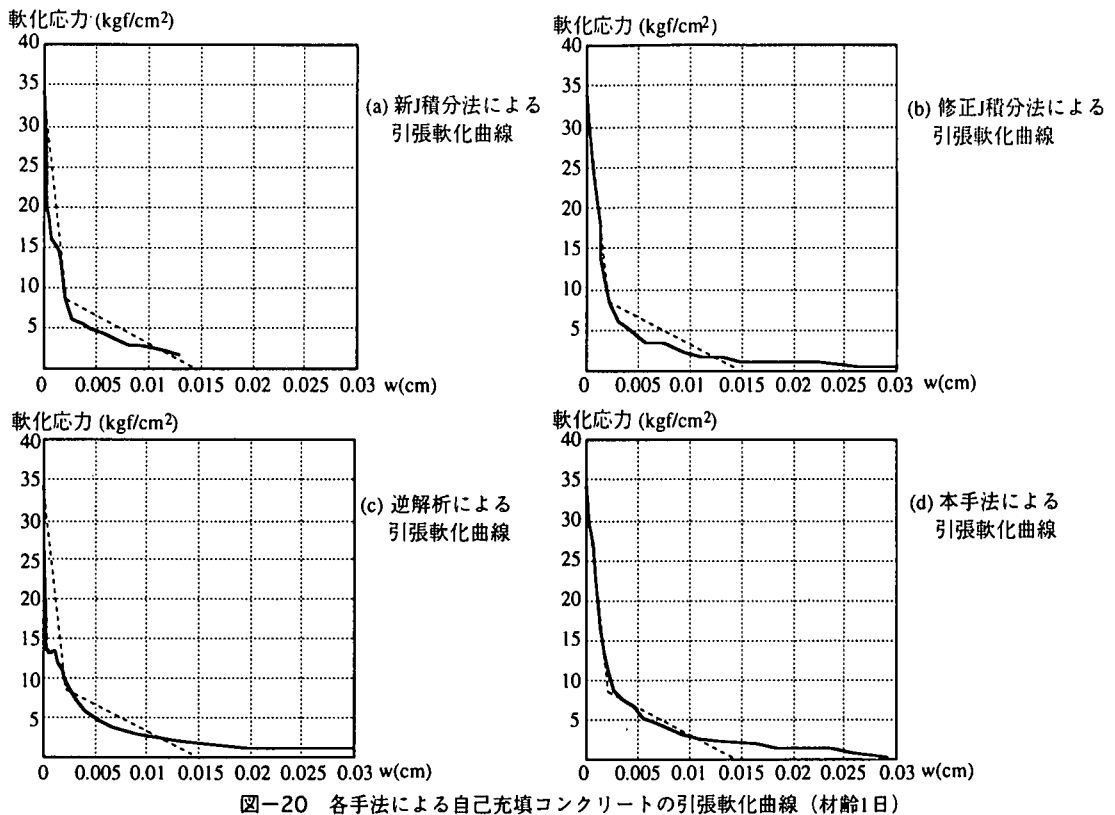


表-2 コンクリートの材料特性

材 齢	1日			3日			7日			28日		
コンクリートの種類	$f_c'$	$f_t$	$G_F$	$f_c'$	$f_t$	$G_F$	$f_c'$	$f_t$	$G_F$	$f_c'$	$f_t$	$G_F$
自己充填	353	34	0.100	478	45	0.136	538	49	0.146	721	58	0.155
高強度	597	52	0.114	744	57	0.142	840	58	0.149	966	59	0.157
普通強度	134	16	0.092	255	28	0.093	291	33	0.101	365	38	0.108

\*  $f_c'$ : kgf/cm<sup>2</sup>,  $f_t$ : kgf/cm<sup>2</sup>,  $G_F$ : kgf/cm

## 6. 引張軟化曲線の比較

### (1) コンクリートの材料特性

今回作成した3種類のコンクリートの圧縮強度、引張強度および破壊エネルギーは表-2に示す通りである。

### (2) 各種の推定手法と引張軟化曲線

今回提案した手法の妥当性を検証するため、各種の推定手法から得られる、コンクリートの引張軟化曲線を比較することとした。対象とした推定手法は、

今回提案する手法の他、新J積分法、修正J積分法、および逆解析である。各手法の特徴、得失等について、得られた結果を基に検討する。

なお、いずれの手法においても、推定される軟化開始応力の値は、割裂試験から得られるコンクリートの引張強度と完全には一致しない。したがって、引張軟化曲線における軟化開始応力は、コンクリートの引張強度で置き換えることとした。

図-20～22に自己充填コンクリート、高強度コンクリート、および普通強度コンクリートの引張軟化曲線を示す。各図中には、新J積分法、修正J積分法、逆解析、および本手法により推定された引張軟化曲線が示されている。また、引張軟化曲線中の破線は六郷らの1/4モデル<sup>7)</sup>を示している。なお、逆解析にあたっては、土木学会の寸法効果小委員会が公表している解析プログラム<sup>8)</sup>を使用した。

図-20～22より、以下のことが観察される。

(1) 新J積分法により推定される引張軟化曲線のテール部分は、他の手法による推定に比較して短く、早い段階で終わっている。これは、新J積分法では、切欠きはりのリガメント部を一樣な引張力を受ける場合と等価であるとし、仮想ひび割れ幅を開口変位の1/2と仮定していることによるものと考えられる。

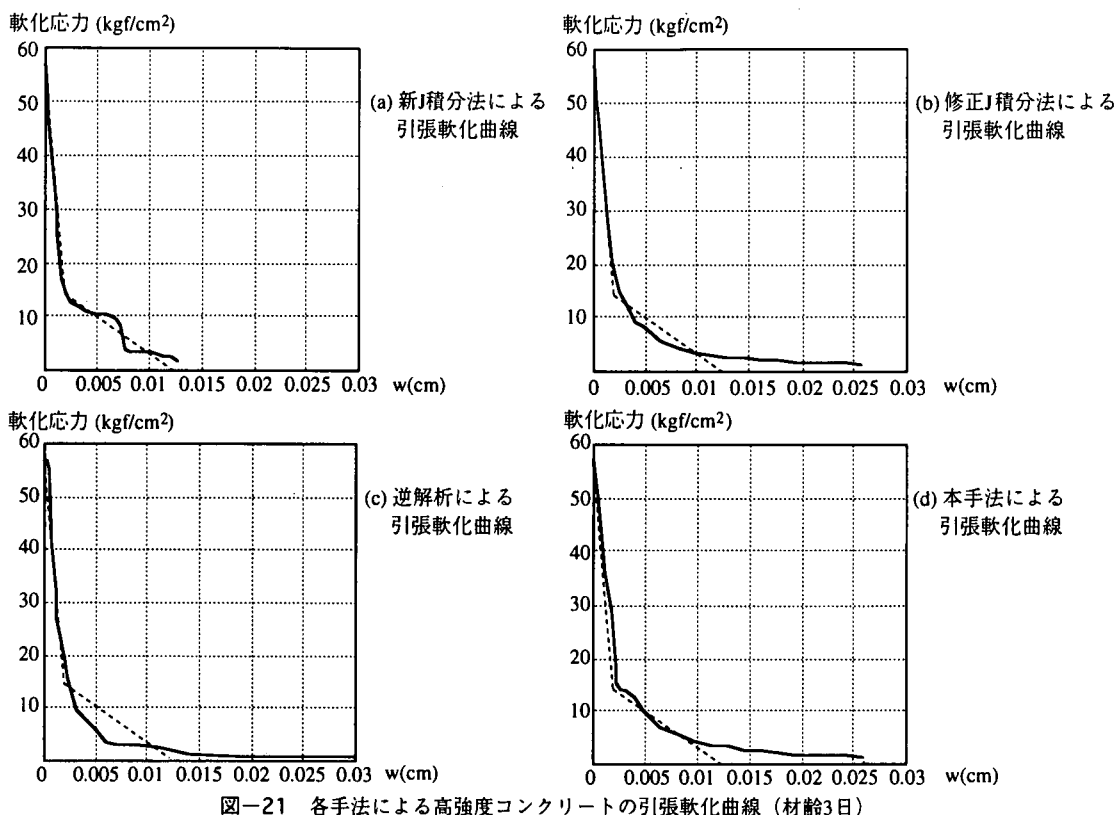


図-21 各手法による高強度コンクリートの引張軟化曲線（材齢3日）

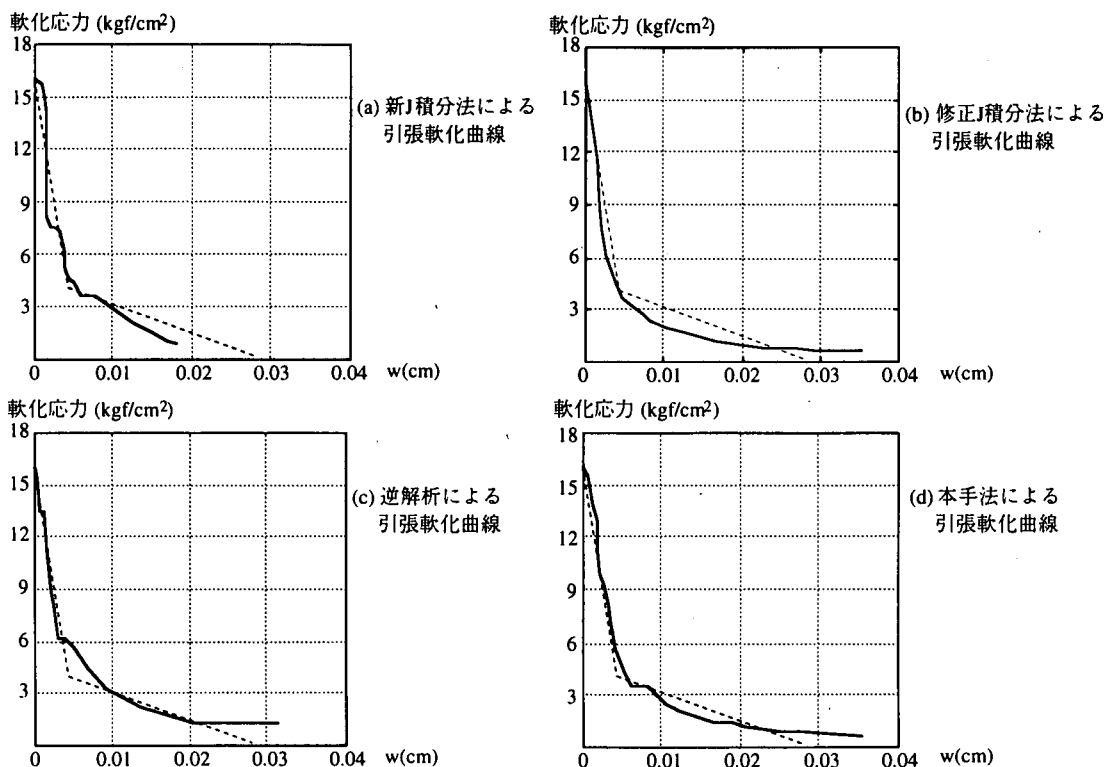


図-22 各手法による普通強度コンクリートの引張軟化曲線（材齢1日）

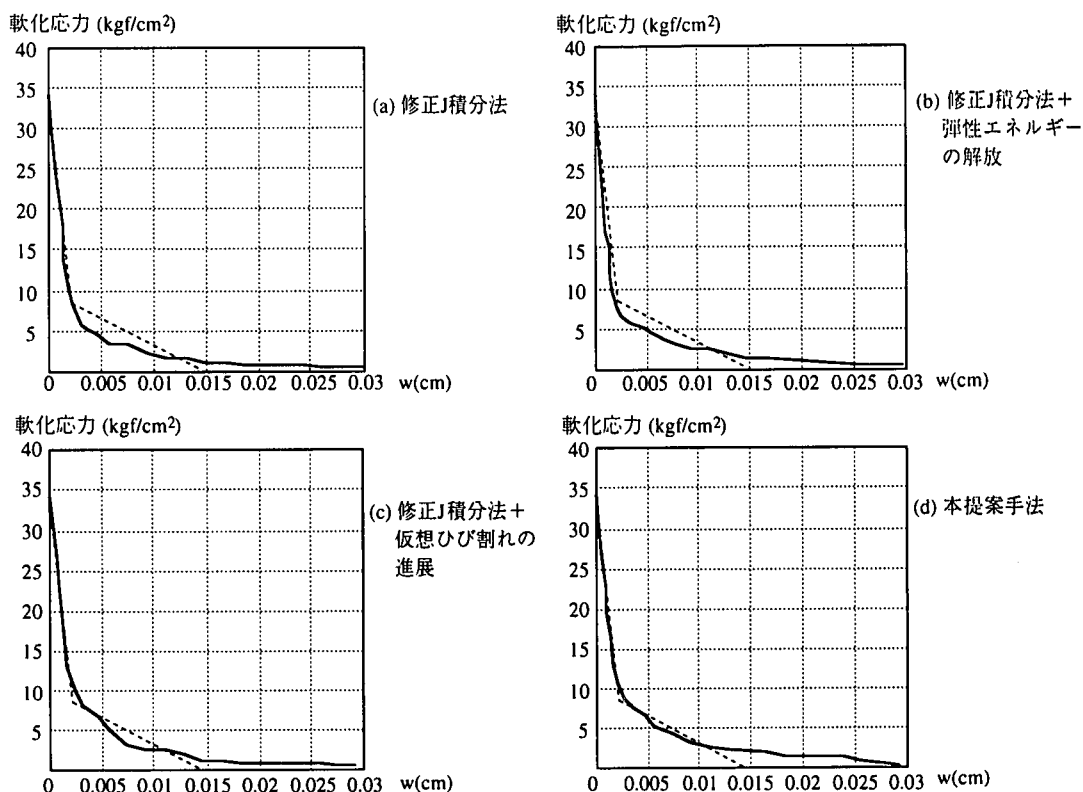


図-23 本提案手法における主たる影響要因（自己充填コンクリート，材齢1日）

(2)六郷らの提案している1/4モデルは、簡便なモデルではあるが実験データとの整合性が高いことが知られているので、ここでは引張軟化曲線の一つの典型例と考えることにした。

新J積分法により得られる引張軟化曲線は、いずれのコンクリートにおいても、おおよそ1/4モデルに類似しているが、得られた結果には振動しているものもある。したがって、新J積分法から得られる結果は、引張軟化曲線を概略的に推定する場合などに留めておくべきものと思われる。

(3)修正J積分法は、新J積分法に比較すると、いずれのコンクリートに対しても、得られる引張軟化曲線の形が格段に滑らかなものとなっている。また、仮想ひび割れ幅の増加に伴い応力が漸減していく長いテール部分も推定できている。したがって、引張軟化曲線の推定法としては、ある程度満足のゆくものと考えられる。

ただし、詳細に検討すると、例えば引張軟化曲線の緩やかな勾配の部分（1/4モデルの第2勾配部分に相当）において、1/4モデルと多少の相違があり、この点、改善の余地を残していると考えられる。

(4)逆解析には、前述の通り、土木学会の寸法効果小委員会が公表している解析プログラムを使用した。また、その際の許容誤差は0.01を目安とした。

逆解析から得られた結果は、予想外に1/4モデルとの差が大きい結果となった。

逆解析において、引張軟化曲線の勾配が急な部分（1/4モデルの第1勾配部分に相当）を決定する際には、実際には仮想ひび割れがあまり進展していない段階でこれを定めなければならない。したがって、引張軟化曲線の前半部分では実験的な誤差、あるいは計算上の許容誤差の影響を受けやすいと思われる。1/4モデルと逆解析から得られる引張軟化曲線との相違には、このことが影響しているのではないと思われる。

(5)修正J積分法を新たに二つの点で改善した本提案手法から得られる引張軟化曲線は、修正J積分法から得られるものに比較すると、幾分滑らかさに欠けるものの、その反面、緩やかな勾配部分における1/4モデルとの相違は相当に改善されている。また、引張軟化曲線の長いテール部分も推定できている。

本提案手法によれば、コンクリートの種類に拘わらず、1/4モデルに近い引張軟化曲線を程良く推定していくことが可能であると言える。

### (3) 本提案手法における主たる影響要因

本手法では、修正J積分法を、(1)弾性エネルギー解放分の控除、(2)仮想ひび割れ進展の評価、の2

点で改善したが、ここでは、この両者の内、いずれの影響がより支配的であるかについて、具体的に検討することにした。図-23は、自己充填コンクリートの引張軟化曲線を対象に、(a)修正J積分法、(b)修正J積分法+弾性エネルギーの解放、(c)修正J積分法+仮想ひび割れの進展、(d)本提案手法、の4通りの手法による引張軟化曲線の推定結果を示したものである。

(b)の弾性エネルギーの解放を考慮に加えたものは、(a)の修正J積分法の場合に比較して1/4モデルに近づいており、この操作が引張軟化曲線の推定精度向上に資することが認められる。

(c)の仮想ひび割れの進展を考慮に加えたものも、(a)の修正J積分法の場合に比較すると、1/4モデルとの適合性は良い。さらに、軟化直後の勾配が急な部分、およびその後の緩やかな勾配の部分の両方において、(b)の弾性エネルギーの解放を考慮に加えたものよりも、1/4モデルとの適合性に優れていることが認められる。

以上の結果は、仮想ひび割れの進展を適切に評価することの方が、弾性エネルギーの解放を考慮することよりも、より重要であることを示唆するものである。

さらに、この両者を考慮した本提案手法は、図-23(d)に示すように、修正J積分法に比べて、1/4モデルとの相違が小さく、また推定される長いテール部も、現実のコンクリートの軟化挙動と定性的に一致している。

しかしながら、図-23(b)と(c)の結果から判断するならば、本手法における二つの改善点の内、仮想ひび割れの進展に関する評価の方が、より重要であると推測されるのである。

## 7. 結論

コンクリートの引張軟化曲線をエネルギーバランスに基づくJ積分系の手法により、実験的に求める手法について検討した。そして、既往の修正J積分法を、弾性エネルギーの解放と、リガメント部における仮想ひび割れの進展を評価することによって改善した。

弾性エネルギーの解放分を考慮するため、荷重の軟化域で除荷・再載荷を繰返し、残留変形を終局変位と除荷開始点変位で定量的に評価した。

また、リガメント部に取り付けた $\pi$ 型変位計の計測データに基づいて、仮想ひび割れの進展状況を評

価した。本研究により得られた結論は以下の通りである。

- (1)修正J積分法を2点で改善した本手法から得られる引張軟化曲線は、修正J積分法から得られるものよりもやや滑らかさに欠けるきらいがあるが、コンクリートの引張軟化曲線の一つの典型と考えられる1/4モデルに対する適合性に関しては、修正J積分法よりも優れている。
- (2)逆解析から得られる引張軟化曲線は、予想外に1/4モデルとの相違が目立ったが、逆解析では実際に仮想ひび割れがあまり進展していない段階で、引張軟化曲線の前半部の勾配が急な部分を定めねばならず、したがって、実験的な誤差等の影響を受けやすいものと思われる。
- (3)本手法で採用した二つの改善点の内、弾性エネルギーの解放に比較して、仮想ひび割れ進展の評価の方が、引張軟化曲線の推定にあたっては、より重要であると認められた。

## 参考文献

- 1) 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, No. 453, pp. 15-25, 1993.11.
- 2) 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, V-30, pp. 119-129, 1996.2.
- 3) 橘高義典, 栗原哲彦, 三橋博三, 中村成春: セメント系複合材料の引張軟化曲線の標準試験方法についての一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, No. 2, pp. 27-32, 1997.6.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No. 426, V-14, pp. 203-212, 1991.2.
- 7) Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. and Koyanagi, W.: Testing Method to Determine Tensile Strain Softening Curve and Fracture Energy of Concrete, *Fracture Toughness and Fracture Energy*, Balkema, pp.153-163, 1989.
- 8) 土木学会コンクリート委員会寸法効果小委員会: コンクリートの寸法効果と引張軟化曲線, コンクリート技術シリーズ, No.18, 92pp., 1997.

(1997.12.8受付)

## EXPERIMENTAL STUDY TO DETERMINE THE TENSION SOFTENING CURVE OF CONCRETE

Junichiro NIWA, Taweechai SUMRANWANICH and Toyofumi MATSUO

The new method to determine the tension softening curve of concrete has been proposed in this study. To solve the problems included in the modified J-integral based method, the release of an elastic energy has been considered quantitatively based on the unloading and reloading experiment of notched beams subjected to a concentrated load. In addition, based on the measurement for the distribution of fictitious crack width of a notched beam, the propagation of the fictitious crack has been evaluated quantitatively. The new method in which these new findings are incorporated has been applied to estimate the tension softening curve of various concretes and the validity of this method has been confirmed experimentally.