

論文 コンクリート引張軟化曲線の実験的決定手法

二羽 淳一郎*1・Taweecchai Sumranwanich*2・松尾 豊史*3

要旨：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。これは修正J積分法に基づくものであるが、外部エネルギーを評価する際に弾性エネルギーの解放分を控除し、さらに仮想ひび割れの進展状況に関する現実的な評価を行い、この2点により、修正J積分法を改善したものである。本手法により得られた引張軟化曲線を、1/4モデルと比較して示し、その有効性を明らかにした。

キーワード：引張軟化曲線、破壊力学、仮想ひび割れ、修正J積分法、1/4モデル

1. はじめに

コンクリートの引張軟化曲線を定めるために多用されている手法は、(1)逆解析による数値解析的な手法と、(2)エネルギーバランスに基づくJ積分系の手法に大別されるが、現在までのところコンクリートの引張軟化曲線を定める標準的な試験方法は確立されていない。

この内、後者は、LiらのJ積分法¹⁾を端緒として発展してきたものであり、新J積分法²⁾や修正J積分法³⁾に集約されている。これら一連の手法は、エネルギーの評価方法、測定データの精度、仮定の妥当性等に関して問題点を含んでいるものの、コンクリートのひび割れ進展現象に対する理解が深まれば、それと同時に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、外部エネルギーを評価する際の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することにより、精度の良い、引張軟化曲線の決定方法を提案するものである。

2. 修正J積分法の問題点

修正J積分法³⁾は、新J積分法²⁾に含まれていた問題点の内、仮想ひび割れ幅の一様分布の仮定を改めたものである。

しかしながら、外部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、載荷直後からリガメント部全域に進展するという仮定はそのままとっていた。

これらの点を改善し、現実に近いものとしていけば、精度良く引張軟化曲線を予測できるものと思われる。本研究では、これら2点について、修正J積分法を改善するものである。

3. 弾性エネルギーの解放

3.1 概要

修正J積分法では、外部エネルギーを式(1)の右辺のように与えているが、これはいわばポテンシャルエネルギーである(図-1)。

$$E(\omega) = \int_0^{\delta_w} P(\delta) d\delta \quad (1)$$

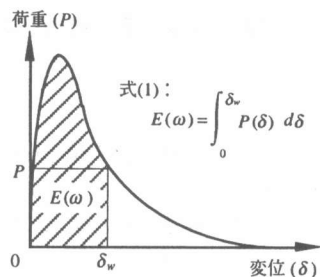


図-1 式(1)におけるエネルギー

*1 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 工博(正会員)

*2 前・アジア工科大学大学院 工修

*3 電力中央研究所 構造部建設材料グループ 工修(正会員)

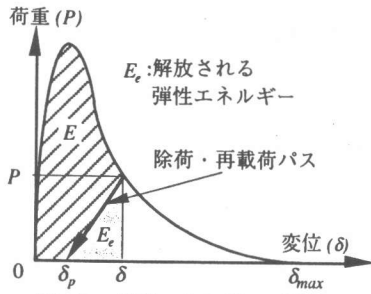


図-2 弾性エネルギーの解放

ただし、 w は仮想ひび割れ幅、 $E(w)$ は仮想ひび割れ幅が w となるまでに消費されるエネルギー、 δ_w は開口変位が w となるときの変位である。ここでは、開口変位 w と仮想ひび割れ幅 w が対応している。

しかしながら、外部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、それらは、図-2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。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、ポテンシャルエネルギーからこの弾性エネルギーの解放分を控除する必要がある。

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。そこで本研究では、実験結果に基づいて、軟化域における除荷・再載荷パスを定め、これにより弾性エネルギーの解放分を定量的に評価することにした。

3.2 切欠きはりの除荷・再載荷実験

除荷・再載荷パスが直線に近似できるとすれば、式(1)は式(2)のように書き換えることができる。

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

ただし、 δ_p は完全に除荷された状態での残留変位である。

式(2)の δ_p を定式化するために、表-1に示した3種類のコンクリートを用いて、単純支持された切欠きはり（幅10cm×高さ10cm×長さ84cm、スパン80cm、切欠き深さ5cm）の3点曲げ試験を行

表-1 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 ³)						
			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、セメント+シリカフューム）の重量比

**： 混和剤の使用量は結合材量に対する重量比率

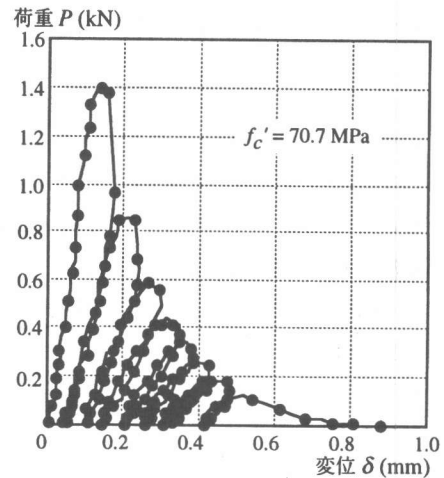


図-3 荷重-変位関係の測定例（自己充填コンクリート、材齢28日）

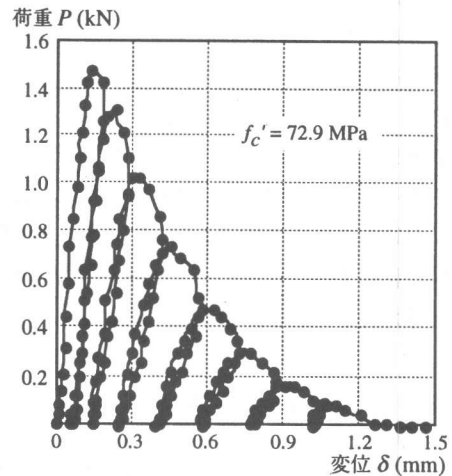


図-4 荷重-変位関係の測定例（高強度コンクリート、材齢3日）

い、荷重の軟化域での除荷・再載荷を繰り返した。図-3～5は、それぞれ自己充填コンクリート、高強度コンクリート、普通強度コンクリート

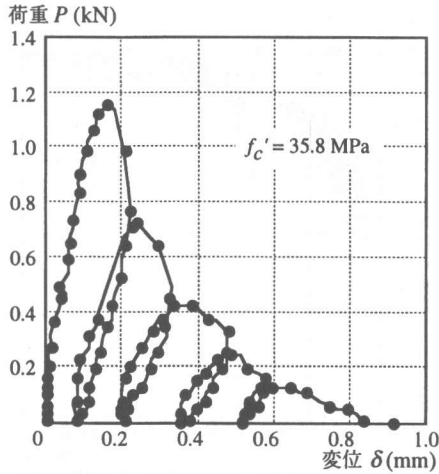


図-5 荷重-変位関係の測定例
(普通強度コンクリート，材齢28日)

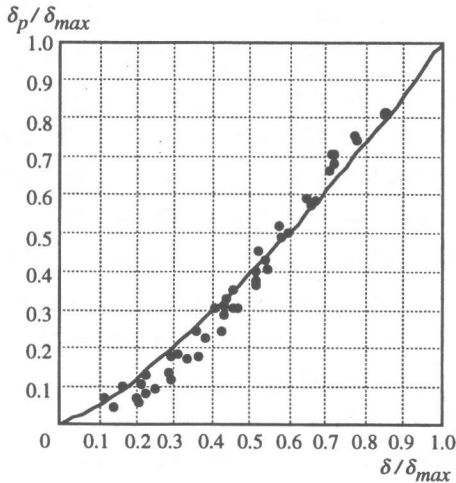


図-6 $\delta_p / \delta_{max} - \delta / \delta_{max}$ の関係

の荷重-変位関係の測定例である。

荷重-変位曲線における最大変位（荷重0に対応する終局変位）を δ_{max} ，除荷開始点変位を δ ，完全に除荷された状態での残留変位を δ_p とする。このとき，すべての実験データに対して， δ および δ_p を δ_{max} で無次元化し， $\delta_p / \delta_{max} - \delta / \delta_{max}$ 関係をプロットしたのが図-6である。

また，図-6の実験結果に対して， δ_p / δ_{max} を δ / δ_{max} のべき乗で表すこととし，最小二乗法で指数を定めたのが，図-6中の実線である。この関係は，式(3)で表される。

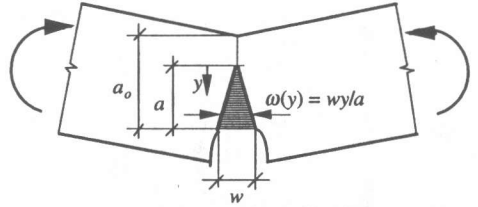


図-7 仮想ひび割れの進展状況

$$\frac{\delta_p}{\delta_{max}} = \left(\frac{\delta}{\delta_{max}} \right)^{1.38} \quad (3)$$

本研究では δ_p をこのように定め，式(2)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。

4. 仮想ひび割れの進展評価

4.1 仮想ひび割れ幅の測定

修正J積分法では，仮想ひび割れが載荷直後からリガメント部全域にわたって進展していくと仮定している。ただし実際には，切欠きはりの曲げ変形の増加にともなって，仮想ひび割れも徐々に進展していくはずである。つまり，図-7に示すように変形の途中では仮想ひび割れはリガメント部全域には達していない。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 $\omega(y)$ とする。開口ひび割れ幅を w とすると式(4)の関係が成立する。

$$\omega(y) = w y/a$$

$$y = a \omega(y)/w$$

$$dy = (a/w) d\omega \quad (4)$$

このとき，この部分で消費されるエネルギー E は以下のように求められる。

$$E = b \int_0^w e(\omega) \frac{a}{w} d\omega = \frac{b a}{w} \int_0^w e(\omega) d\omega \quad (5)$$

さらに変形して，

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

$$e(w) = \frac{1}{b a} [E(w) + w E'(w)]$$

$$\sigma(w) = \frac{d e(w)}{dw} = \frac{1}{b a} [2E'(w) + w E''(w)] \quad (6)$$

となって，軟化曲線が得られるが，これが仮想ひ

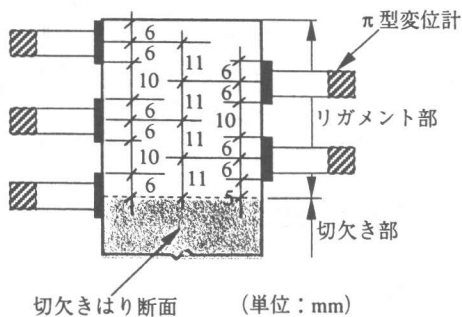


図-8 π型変位計の取り付け状況

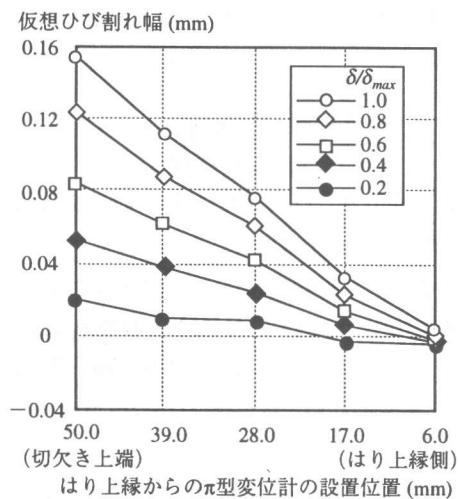


図-9 仮想ひび割れ幅の分布状況
(自己充填コンクリート、材齢28日)

び割れ長さ a に依存している点が、修正J積分法との違いである。

切欠きはりの曲げ試験における仮想ひび割れの進展状況を明らかにするために、リガメント部で、はり軸方向のひずみ分布を測定することにした。具体的には、図-8に示すように、はりのリガメント部の両側面に片側3個、反対側2個の合計5個のπ型変位計（標点間距離100mm、幅12mm）を取り付け、これにより、はり軸方向のひずみ分布を測定した。π型変位計のはり高さ方向の配置間隔は11mmである。

図-9はこのようにして得られた、リガメント部における仮想ひび割れ幅の分布状況の例である。なおこれは自己充填コンクリートの材齢28日における測定結果である。

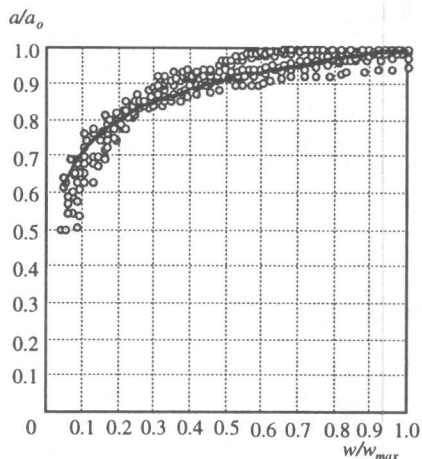


図-10 仮想ひび割れ長さとの相対開口変位の関係

π型変位計から得られるひずみの値には、厳密には標点間でのコンクリートの弾性変形分が含まれている。したがって、測定値は仮想ひび割れ幅そのものではない。しかしながら、この部分に生じる引張応力は最大でもコンクリートの引張強度程度である。コンクリートのヤング係数、引張強度、ならびに標点間距離から弾性変形分を推定すれば、高々0.01mm程度と予測されるが、これは図-9に示される仮想ひび割れ幅に比較すればわずかである。したがって、本研究ではπ型変位計から得られる測定値は全て仮想ひび割れ幅であると見なすことにした。

図-9に示されるように、切欠きはりの曲げ変形が小さい $\delta/\delta_{max}=0.2$ や 0.4 の段階では、はりの上縁部に圧縮領域が認められる。これは仮想ひび割れが、リガメント部全域にわたっては進展していないことを示すものである。ただし、この圧縮領域の大きさは、切欠きはりの曲げ変形の増加とともに次第に減少し、例えば $\delta/\delta_{max}=0.8$ の段階では全て引張となっている。このことは仮想ひび割れがリガメント部全域に進展したことを意味している。このような仮想ひび割れの進展状況を正しく評価し、引張軟化曲線を推定していく。

4.2 仮想ひび割れ進展状況の評価

図-10は、仮想ひび割れ長さ（切欠き上端から図-9における仮想ひび割れ幅=0の位置までの

表-2 コンクリートの材料特性

材齢	1日			3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
自己充填	34.6	3.33	0.10	46.8	4.41	0.13	70.7	5.68	0.15
高強度	58.5	5.10	0.11	72.9	5.59	0.14	94.7	5.78	0.15
普通強度	13.1	1.57	0.09	25.0	2.74	0.09	35.8	3.72	0.11

* f'_c : MPa, f_t : MPa, G_F : N/mm

長さ) 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長さ a/a_0 を相対的な開口変位 w/w_{max} に対してプロットしたものである。ここに w_{max} は δ_{max} に対応する終局時の開口変位である。使用したデータは3種類の全てのコンクリートに対する測定値である。

図-10に示されるように、 $w/w_{max}=0.2$ 程度までの荷重の初期段階では仮想ひび割れ長さは、リガメント長さの80%程度以下である。しかしながら、荷重が進むにつれて次第に仮想ひび割れ長さも増加していき、 $w/w_{max}=0.5$ 程度になると、 a/a_0 も0.9を上回るようになってくる。図-10中の実線は実験データに対する近似式であり、式(7)で表される。

$$\frac{a}{a_0} = 1.0 + 0.125 \ln \left(\frac{w}{w_{max}} \right) \quad (7)$$

ただし、 $0.05 \leq w/w_{max} \leq 1.0$ 。

本研究では式(7)により、仮想ひび割れの進展を評価することにした。

5. 引張軟化曲線の比較

5.1 コンクリートの材料特性

表-2に今回の実験に使用した3種類のコンクリートの材料特性を示す。

5.2 コンクリートの引張軟化曲線

今回提案した引張軟化曲線の推定方法の妥当性を検証するため、修正J積分法から得られる引張軟化曲線と提案した手法から得られる引張軟化曲線を比較した。

なお、いずれの手法においても、推定される軟

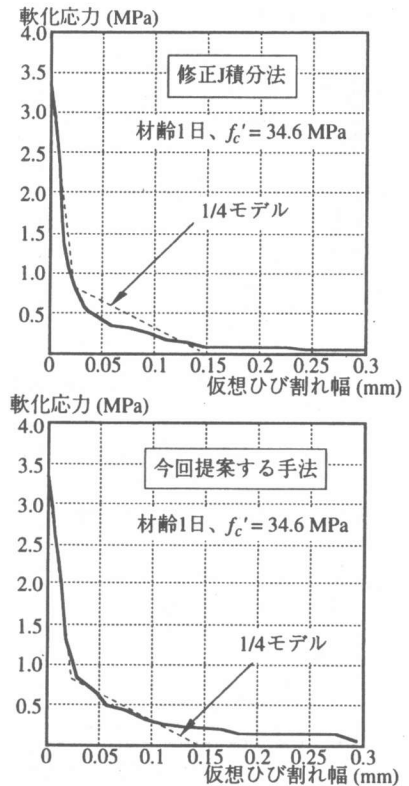


図-11 自己充填コンクリートの引張軟化曲線

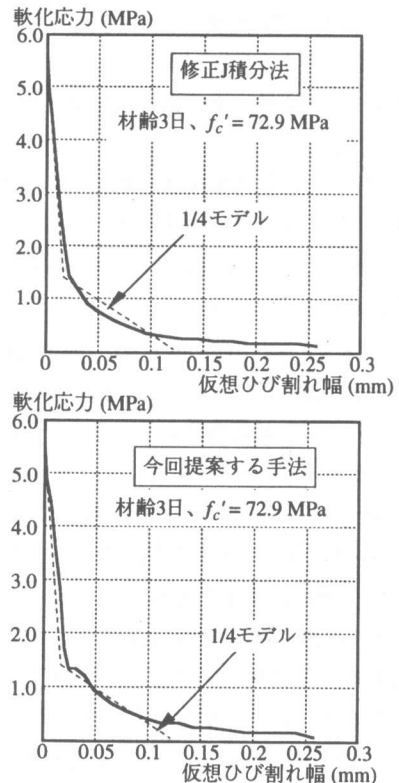


図-12 高強度コンクリートの引張軟化曲線

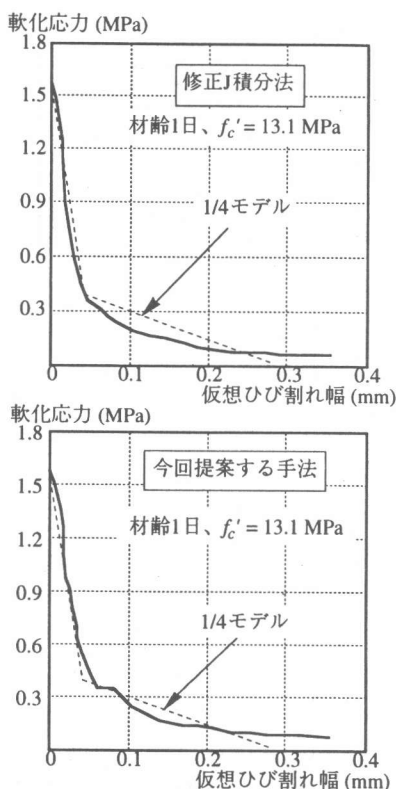


図-13 普通強度コンクリートの引張軟化曲線

化開始応力は、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ので、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にした。

図-11～13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、修正J積分法と今回提案する手法により推定された引張軟化曲線に加え、1/4モデル⁴⁾も示している。1/4モデルは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と考えることにした。

図-11～13より、以下の状況が観察できる。

修正J積分法は、いずれのコンクリートに対しても、滑らかな引張軟化曲線を与えている。また、仮想ひび割れ幅の増加に伴い応力が漸減していく軟化曲線の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。しかしながら、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では、1/4モデルとの相違が大きく、改善の余地を残している。

一方、修正J積分法を2つの点で改善した今回の提案手法による引張軟化曲線は、やや滑らかさに欠けるものの、緩やかな勾配部分における1/4モデルとの相違は、修正J積分法に比較して改善されている。また、軟化曲線の長いテール部分も推定できている。

今回提案する手法によれば、典型的な軟化曲線と考えることのできる1/4モデルに近い引張軟化曲線を、コンクリートの種類に拘わらず与えることができたが、このことは提案した手法の有効性を示すものと思われる。

6. まとめ

今回提案したコンクリートの引張軟化曲線の実験的な決定手法は、修正J積分法に含まれる問題点の内、弾性エネルギーの解放分を控除し、さらに仮想ひび割れの進展に関する仮定をより現実的なものに改めたものである。

以上の2点を改善した本手法により得られたコンクリートの引張軟化曲線は、今回使用したコンクリートの種類に拘わらず、妥当なものとなっており、本手法の有効性が確認された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.