

招待論文 コンクリートの引張軟化特性と試験法

TENSION SOFTENING OF CONCRETE AND TESTING METHODS

六郷恵哲* 内田裕市** 小柳 洽***

By Keitetsu ROKUGO, Yuichi UCHIDA and Wataru KOYANAGI

The tension softening behavior of concrete is now the main subject in the field of Fracture Mechanics of Concrete. Following the description of the fracture process zone formed in front of a real crack, the tension softening parameters such as the fracture energy and the tension softening curve are explained. Models of the tension softening for numerical applications are presented. Testing methods to determine the fracture energy and the tension softening curves from three point bending tests on notched beams are discussed.

1. まえがき

「コンクリート工学」とは「ひびわれ工学」と言っても過言でないほど、コンクリートに関する技術の多くは、外力その他の各種原因によるひびわれの発生・伝播の予測、評価、防止、検出、補修などに関連している。近年、コンクリートの高性能化が計られるとともに、コンクリートがエネルギー関連施設などに高度化利用されるようになったことに伴い、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、より本質的な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。

引張応力下のコンクリートの破壊エネルギー(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。ここでは、こうした最近のコンクリートの破壊力学の中心課題である引張軟化特性とその試験法について述べる。

* 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

** 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)

*** 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

2. コンクリートの引張軟化

2.1 破壊進行領域

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ている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。モアレ法、ホログラフィ法、レーザースペックル法などの光学的計測法により、破壊進行領域に関する研究が盛んに行われている。図-1は、曲げを受けるコンクリートはりの切欠き先端部分に生じた微細なひびわれをX線造影撮影法によって検出した大塚ら[1]の結果を示したものである。コンクリート内部のひびわれは、単一のなめらかなひびわれではなく、累積した微細ひびわれであることがこの図からわかる。供試体の破断後に観察される巨視的なひびわれ面は、微細なひびわれの一部が成長したものである。

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。この破壊進行領域の長さは、コンクリートの種別や荷重条件にもよるが、数cmから数十cmとなる。したがって、ひびわれ先端に形成される非線形領域が部材寸法に比べて十分に小さいことを前提とした線形破壊力学は、一般のコンクリート構造物に対してはそのままでは適用できない。しかし、大型ダムのように、最小部材寸法が20～30m以上の大きなコンクリート構造物の場合には、ひびわれの進展による破壊を想定した場合の耐荷力の検討に線形破壊力学が有効になると言われている[2]。

なお、ひびわれの進展による線形材料の脆性破壊の予測と防止を目的とした線形破壊力学が、コンクリートではそれほど役立たないもう一つの理由は、通常、コンクリートは引張域を補強する鋼材と組み合わされ、主として圧縮材として用いられており、通常の設計法にはコンクリートの引張特性がほとんど取り入れられていないことである。

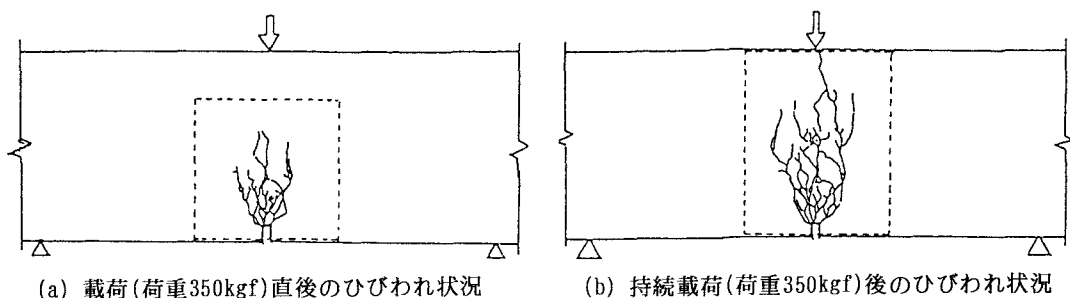


図-1 X線造影撮影法で検出した切欠き先端部分のひびわれ[1] (供試体の幅×高さ×スパン: 7×10×60 cm, 切欠き深さ: 10 mm, 3点曲げ時の最大荷重: 約410 kg)

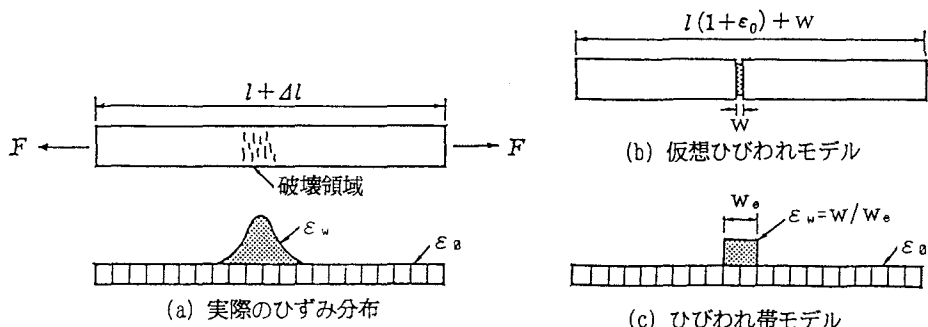
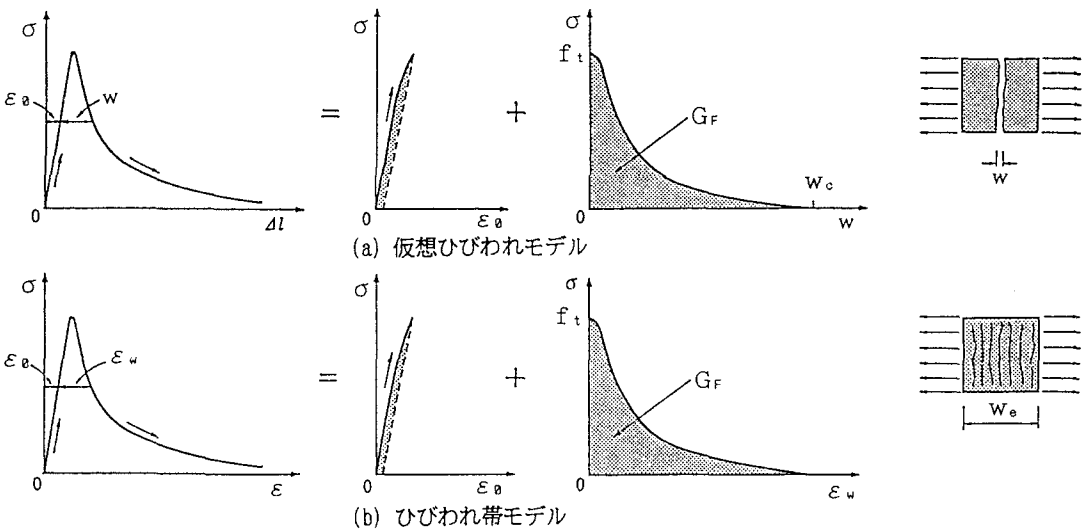


図-2 引張破壊時のひずみ分布とモデル

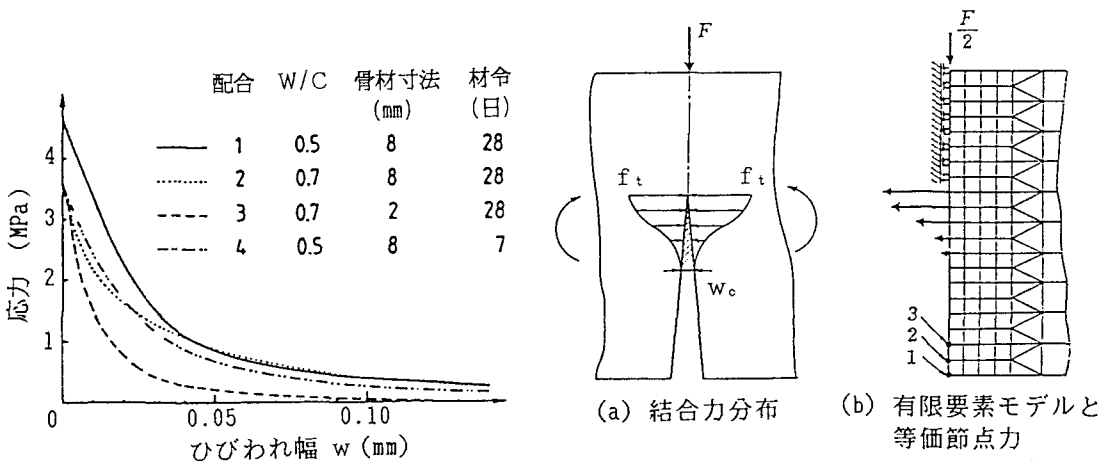
2.2 引張軟化のモデル

コンクリート供試体の純引張試験を行うと、図一2に示すように、最大引張荷重以降、微細ひびわれが局所的に集中しついに供試体は破断する。供試体全体の引張変形は、非破壊領域の変形と破壊領域の非回復性の変形との和で表される。Hillerborg[3]はこの非回復性の変形を1本の仮想ひびわれ幅 w の広がりで表した「仮想ひびわれモデル」を提案した。同様に、Bazantら[4]はこの変形をある領域に均等に分布させた「ひびわれ帯モデル」を提案した。図一3に示すように、引張軟化曲線下の面積は単位投影面積当りのひびわれの進展に消費される破壊エネルギー G_F に対応し、これらのモデルは破壊力学の基本概念と結びつく。

破壊エネルギー G_F を切欠きはりの3点曲げ試験から求める試験法がRILEM（国際材料構造試験研究機関連合）により提案されている[5]。この試験法については、3.1節で述べる。一方、引張軟化曲線をコンクリートの純引張試験から直接求めることは一般に容易ではないが、図一4の例はPetersson[6]が計測したもので



図一3 引張軟化のモデル



図一4 引張軟化曲線の計測例 [6]

図一5 破壊進行領域の結合力と有限要素モデル上の等価節点力

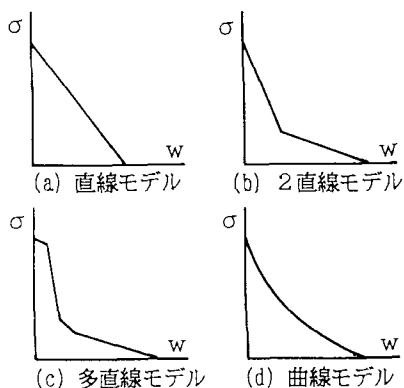


図-6 数値解析用の引張軟化曲線の例

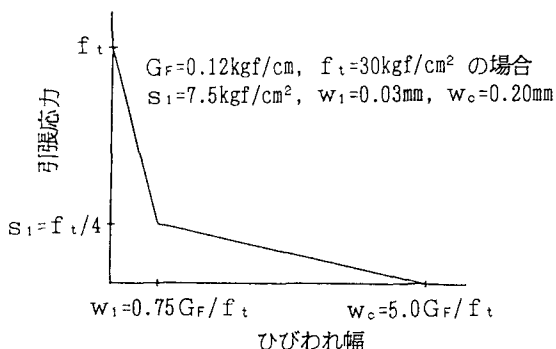


図-7 引張軟化曲線の2直線モデルの例 [8]

ある。

仮想ひびわれモデルをFEM解析に取り入れて コンクリートのひびわれ進展に伴う非線形挙動を解析するには、図-5に示すように、ひびわれ線上の離散点に等価節点力として引張軟化曲線から定まる結合力を作用させる。ひびわれ帯モデルを用いる場合には、ひびわれ線上の要素が非線形化した時に要素の大きさを考慮して引張軟化曲線に基づき 要素の剛性と応力とを低下させる方法が 一般に用いられる。これらのモデルをFEM や BEM へ組み込んだ具体的なプログラム例と比較検討結果が、JCI（日本コンクリート工学協会）の委員会報告[7]の中で紹介されている。

コンクリートの引張軟化曲線の数値解析用モデルとしては、図-6に示すように直線、2直線、多直線、曲線等、種々のものが用いられている。ひびわれ幅が小さい領域の引張伝達力が耐力に重要な役割を果たすため、コンクリート部材の最大荷重についてののみ検討する場合には、一般に直線モデルで十分である。最大荷重以降の破壊過程も含めて荷重-変位曲線等により検討する場合には、実際の引張軟化曲線の形状に近い多直線モデルが望ましいが、2直線モデルや関数で表示した曲線によっても実際の荷重-変位曲線等をよく表すことができる。

コンクリートの破壊エネルギー G_F と引張強度 f_t が与えられた場合の引張軟化曲線の2直線モデルとしては、図-7に示すように 折れ点の応力を引張強度 f_t の1/4とするモデル[8]や1/3とするモデル[6]が提案されている。例えば、圧縮強度が300 kgf/cm²、弾性係数 E が 3×10^5 kgf/cm²程度の普通コンクリートの場合には破壊エネルギー G_F は0.12 kgf/cm、引張強度 f_t は30 kgf/cm²程度であるが、この場合、折れ点の応力 s_1 を f_t の1/4とするモデル（図-7）では、折れ点のひびわれ幅 w_1 は 0.03 mm、応力の伝達が無くなる 完全ひびわれ幅 w_c は 0.20 mmとなる。直線モデルとしては、直線下の面積を G_F に一致させるモデルの他に、図-7の2直線の最初の直線のみを用いたモデルも耐力の検討には有効である。

2.3 破壊の脆性度を表す指標

コンクリートの破壊の脆性度や部材としての破壊の脆性度を表す指標として、破壊エネルギー G_F と、引張強度 f_t 、弾性係数 E とを組み合わせた特性長さ l_{ch} (characteristic length) や、部材寸法 L と特性長さ l_{ch} との比で表される脆性数 B (brittleness number) がしばしば用いられる。

$$l_{ch} = E \cdot G_F / f_t^2 \quad (1)$$

$$B = L / l_{ch} = L \cdot f_t^2 / (E \cdot G_F) \quad (2)$$

特性長さは、脆性な破壊を生じる材料ほど小さくなり、通常のコンクリートでは20～40cm程度である[6]。特性長さ l_{ch} は、弾性域の引張応力ひずみ曲線と破壊領域の引張軟化曲線をいずれも直線と仮定した場合の

表一 1 各種コンクリートの破壊エネルギーと特性長さの例

コンクリートの種類	圧縮 強度 f_c	曲げ 強度 f_b	引張 強度 f_t	弾性 係数 $E(\times 10^5)$ kgf/cm^2	破壊エ ネルギー G_F kgf/cm	特性 長さ l_{ch} cm
鋼繊維補強コンクリート (2%)	480	85.9	40.3	3.0	8.46	1600
鋼繊維補強コンクリート (1%)	484	65.9	38.0	2.5	4.47	770
普通コンクリート	373	59.0	33.7	2.5	0.165	36
モルタル	554	52.9	35.1	2.9	0.0831	20
ポリマーセメントモルタル(10%)	578	57.6	42.5	2.1	0.106	12
ポリマーセメントモルタル(15%)	605	83.4	51.2	1.9	0.129	9

注) ・特性長さ(cm): $l_{ch} = E \cdot G_F / f_t^2$

- ・ポリマーセメントモルタル: SBRラテックスを10%または15%混入した。
- ・鋼繊維補強コンクリート: 鋼繊維(0.6×30mm)を1%または2%混入した。
- ・鋼繊維補強コンクリートの引張強度は純引張試験から求め、その他のコンクリートの引張強度は割裂試験から求めた。

両曲線の勾配の比の1/2である[9]。また特性長さ l_{ch} を、破壊エネルギー G_F と最大荷重点までに単位体積に蓄えられたひずみエネルギー($f_t^2 / 2E$)との比の1/2と解釈することもできる。例えば、純引張試験において引張供試体の長さ L が材料の特性長さ l_{ch} の2倍の場合(脆性数 $B=2$)には、供試体の破壊に必要な全エネルギーが最大荷重時にすでに供試体にひずみエネルギーとして蓄えられていることになり、最大荷重点以降は外力によるエネルギーの供給が無くても供試体は破断する。供試体長さが特性長さに比べ長いほど、供試体に蓄えられるひずみエネルギーが相対的に大きくなるため、供試体の破壊は脆性的となり載荷試験時の最大荷重以降の制御は一般に難しくなる。

引張に対するコンクリートの性能を改善する方法として、繊維やポリマーを混入する方法が用いられている。表一1には鋼繊維補強コンクリートやポリマーセメントモルタルを含む各種コンクリートの破壊エネルギーと特性長さの測定例[10]を示す。鋼繊維の混入によって、破壊エネルギーと特性長さは著しく増加している。ポリマーの混入によって、引張強度も破壊エネルギーもともに増加するが弾性係数が減少する結果、特性長さは減少している。

2.4 軟化特性の利用

破壊エネルギーや引張軟化曲線を数値解析や理論にどの様に組み込み役立てるのかについては、精力的に研究が進められており、コンクリートの破壊力学に関する国際会議が毎年数回開かれている。先述のJCIの委員会報告[7]やRILEMのコンクリートの破壊力学の応用に関する委員会(FMA-90)の報告[11]の中でコンクリートの破壊力学の利用例が紹介されている。

引張軟化曲線を組み込んだ数値解析は、次に例を示すように、コンクリート部分の破壊現象の検討に適している。

- (1) コンクリート部材の破壊の脆性度の説明
- (2) コンクリートの曲げ・せん断・ねじりの各強度の寸法依存性の説明
- (3) コンクリートと鋼材との組合わされた場合の破壊であるアンカーボルトの引き抜き強度や鉄筋の付着機構の予測

こうした荷重作用による破壊だけでなく、熱応力や乾燥収縮応力の作用、アルカリ骨材反応による骨材の膨張や鉄筋腐食による鉄筋の膨張等に起因するコンクリートのひびわれや破壊の検討にも引張軟化曲線を組み込んだ数値解析は有効である。数値解析の対象としては、荷重-変位関係、ひびわれパターン、等がある。

鉄筋コンクリートはりの最小鉄筋比の計算式[12]やコンクリートのせん断耐力の算定式[9]に破壊エネルギーを組み入れる提案も行われている。

3. 引張軟化特性の試験法

3.1 破壊エネルギーを求めるためのRILEMの試験法

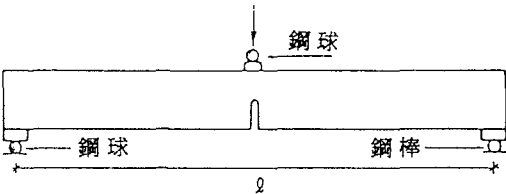
RILEMの試験法[5]は、図－8に示すように切欠きはりの3点曲げ試験を行い、図－9に示すような得られた荷重－変位曲線下の面積 W_0 から、供試体自重等の補正を行い、次式によって破壊エネルギー G_F を求める方法である。

$$G_F = (W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0) / A_{110} \quad [N/m \quad (J/m^2)] \tag{3}$$

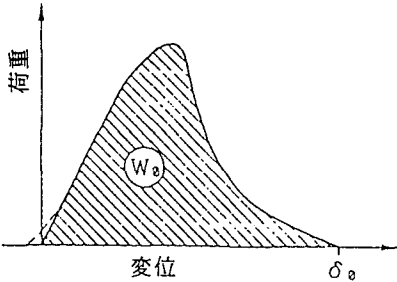
ここに W_0 : 図－9に示す荷重－変位曲線下の面積 (N/m)
 m : $m_1 + 2m_2$ (kg)
 m_1 : 支点間のはりの重さであり、はりの重さに l/L (載荷スパンと供試体長さとの比) を乗じて計算する

表－2 RILEMの3点曲げ試験に用いる供試体の寸法

骨材寸法 D_{max} (mm)	高さd (mm)	幅b (mm)	長さL (mm)	スパン l (mm)
1 - 16	100±5	100±5	840±10	800±5
16.1 - 32	200±5	100±5	1190±10	1130±5
32.1 - 48	300±5	150±5	1450±10	1385±5
48.1 - 64	400±5	200±5	1640±10	1600±5



図－8 RILEMの3点曲げ載荷試験



図－9 荷重－変位曲線下の面積 W_0 と δ_0

表－3 RILEMの試験法の自重の補正項の検討

シリーズ名	スパン (cm)	引張軟化 曲線の モデル	切欠き 長さ (cm)	破壊エネルギー		誤差 (%)
				入力値 (kgf/cm)	計算値 (kgf/cm)	
S-10	80.0	1/4	5.0	0.144	0.146	1
S-20	113.0	〃	10.0	〃	0.147	2
S-30	138.5	〃	15.0	〃	0.150	4
S-40	160.0	〃	20.0	〃	0.149	3
M-04	80.0	1/4	5.0	〃	0.146	1
M-03	〃	1/3	〃	〃	0.149	3
M-10	〃	1/10	〃	〃	0.144	0
G-Sm	〃	1/4	〃	〃	0.146	1
G-La	〃	〃	〃	0.216	0.220	2

注) ・誤差は、破壊エネルギーの入力値に対する計算値の誤差。
・はり幅は、S-30は15cm、S-40は20cm、残りはすべて10cm、
はり高さは切欠き長さの2倍(表－2に示す供試体寸法)。

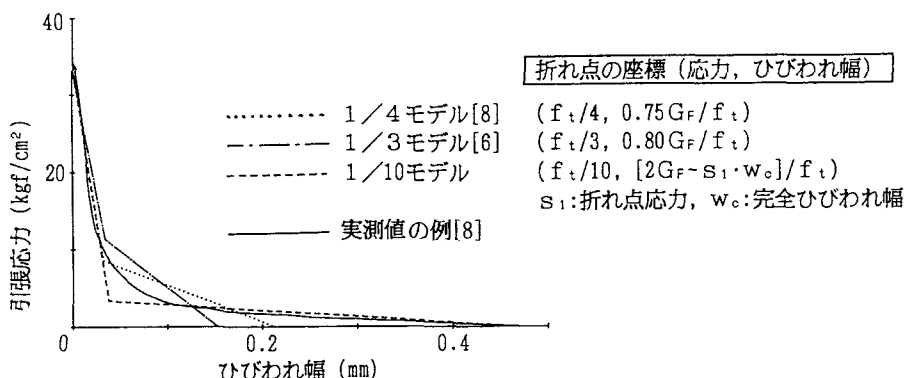


図-10 3種類の2直線モデル

m_2 : 試験機に取り付けられておらず、破断まで供試体に乗っている载荷用の鋼球等の治具の重さ

g : 重力加速度 9.81 m/s^2

δ_0 : はりの破断時の変位 (m)

A_{11g} : はりの破断部分の面積であり、はり軸に垂直な平面に投影した破壊域の面積 (m^2)

骨材の寸法に応じて表-2に示す寸法の供試体を用いる。RILEMの試験法では、通常の载荷試験機を用いて最大荷重点以降の荷重-変位曲線を安定して容易に計測できるとともに、切欠き部分以外の領域に生じる応力が小さくなるよう十分に配慮して供試体の寸法や形状が選ばれている。したがって、RILEMの試験法の条件と一部異なる条件で試験を行う場合には、十分な注意が必要である。

自重の補正項の妥当性について数値解析によって検討した結果を次に示す。表-3に示すように、はり供試体の寸法(表-2による)、数値解析に用いる2直線モデルの形状(図-10)と破壊エネルギー(入力値)を変化させた各条件について、破断に至るまでの荷重-変位曲線のシミュレーションを行い、この荷重-変位曲線をもとに式(3)より破壊エネルギー(計算値)を求め、入力値に対する誤差と共に表-3に示す。破壊エネルギーの入力値に対する計算値の誤差は4%以内であり、RILEMの補正項が妥当であることが表-3からわかる。また、供試体自重が荷重-変位曲線に影響を及ぼさないようバネで切欠き付はり供試体を吊り水平方向に载荷した試験から求めた破壊エネルギーはRILEMの試験法により求めた値とほぼ一致し、補正項が妥当であることが示されている[8]。

3.2 引張軟化曲線を求めるためのLi等のJ積分法

引張軟化曲線は純引張試験から求められるべきものであるが、一般にコンクリートの引張試験は容易ではない。Li等[13]によって提案されている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方法は、実験が比較的容易でありRILEMの試験法と組み合わせることが可能であるため、有力な方法と考えられる。

図-11に示すように、コンクリートの配合・供試体の寸法などは全く同一で、切欠きの長さのみをわずか(5~10(mm)程度)に変化させた2種類のコンクリートはり供試体の曲げ試験をRILEMの試験方法に準じて行い、荷重(P)と载荷点変位(δ)および切欠き先端の開口変位(w)を計測する。図-11(a)に示す切欠き長さが異なる2種類の供試体の荷重-変位曲線間の面積 $A(\delta)$ (面積Aは変位 δ の関数)を、投影破壊断面面積の差($b \cdot a$)で除して、変位 δ の関数として次式によって表されるJ積分値 $J(\delta)$ が得られる。

$$J(\delta) = A(\delta) / (b \cdot a) \quad (4)$$

ここで、aは切欠き長さの差、bは供試体の幅である。図-11(a)において、変位の微小増分量 $\Delta \delta$ に対応

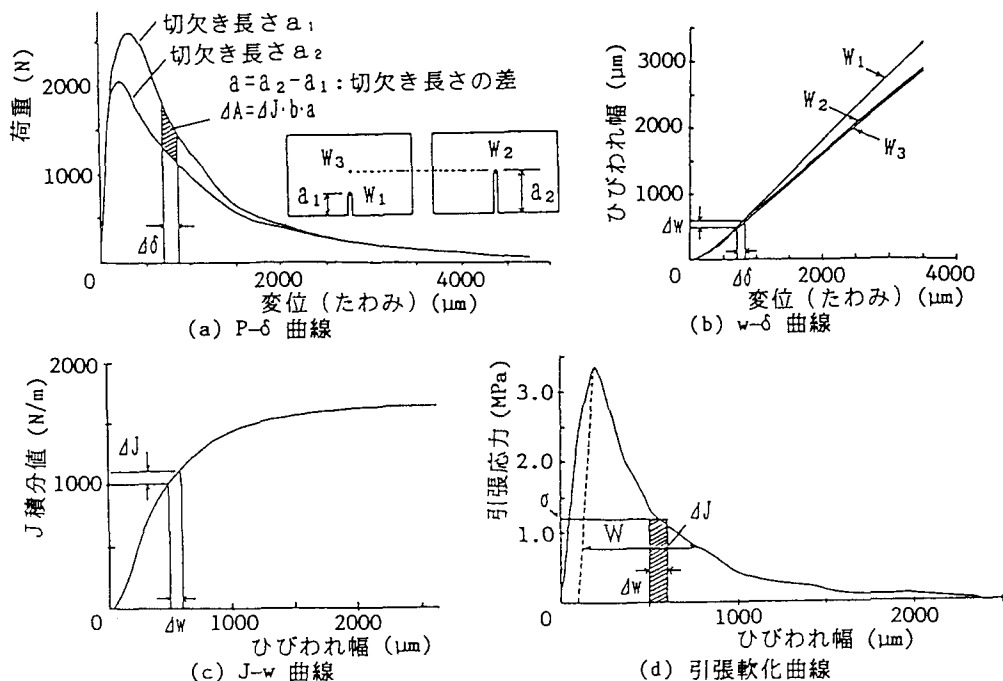


図-11 Li等の方法による引張軟化曲線の推定

する荷重－変位曲線下の面積の差の増分 ΔA はその間のJ積分値の増分 ΔJ を用いて、 $\Delta A = \Delta J \cdot b \cdot a$ で表される。図-11(b)に示す2種類の供試体の、切欠き先端での開口変位を計測した開口変位－変位曲線(図中の w_1 と w_2)の平均値を求め $w(\delta)$ とする。この場合、 w_1 と w_2 の平均値を用いるよりも、 w_1 と w_3 の平均値を用いる方がよい結果を与えるとLi等[13]は述べている。変位の微小増分 $\Delta \delta$ に対応する開口変位の増分を Δw とする。開口変位の増加に対するJ積分値の累積、すなわちJ積分値 $J(\delta)$ と開口変位 $w(\delta)$ との関係は図-11(c)のようになる。そして、図-11(c)のJ積分値－開口変位曲線の接線勾配、すなわち開口変位の増分に対するJ積分値の増分が引張応力となり、図-11(d)のような引張軟化曲線が得られる。引張応力 $\sigma(w)$ は次式で表される。

$$\sigma(w) = dJ(w) / dw \quad (5)$$

また、2種類の荷重－変位曲線(図-11(a))がほぼ一致(重なる)するときの変位を δ 。とすると、そのときのJ積分値の臨界値(臨界J積分値)が破壊エネルギー G_F となる。これはすなわち図-11(d)に示す引張軟化曲線下の面積に相当する。

Li等の方法では、2種類の切欠き深さをもつ供試体の荷重－変位曲線の下面積の差を利用しているため、実験結果のばらつきを拡大して取り入れてしまう欠点がある[14, 15]。従って実際にLi等の方法を用いる場合には、荷重－変位曲線下の面積の差 A が $G_F \cdot b \cdot a$ とほぼ等しいはりの組合せに対してのみ引張軟化曲線を推定するといった工夫が必要である。

3.3 引張軟化曲線を求めるための新J積分法

Li等の方法が、切欠きの長さの異なる2種類の供試体の荷重－変位曲線から引張軟化曲線を推定するのに対し、新J積分法は、1種類の切欠き長さの供試体の荷重－変位曲線と開口変位－変位曲線から引張軟化曲

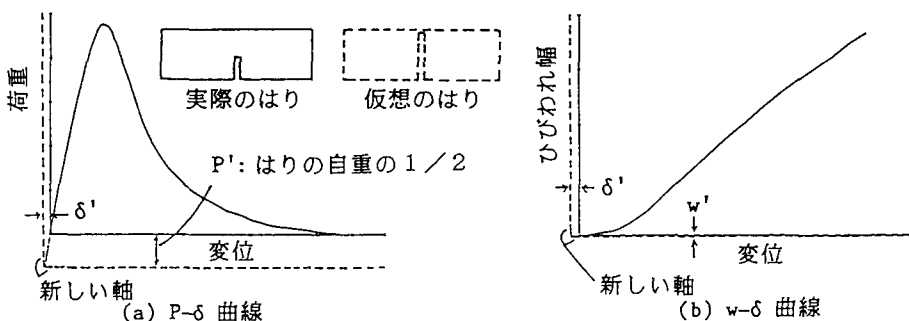


図-12 新J積分法

線を推定する方法である[14,15]。

Li等の方法において、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、供試体上端まで切欠きを入れた仮定の供試体を考える。図-12(a)に示すように 供試体自重が荷重として加わらない仮定の供試体の曲げ試験における荷重-変位曲線は、グラフの変位軸（破線）に等しくなる。また、図-12(b)に示すように 開口変位-変位曲線も同様にグラフの変位軸（破線）に等しくなる。従って、図-12に示すように、計測した荷重-変位曲線に供試体自重を考慮して補正した荷重-変位曲線と仮定の供試体の荷重-変位曲線（変位軸）、さらに、開口変位を計測した値の1/2 とした（計測した曲線と仮定の供試体の曲線、すなわち変位軸との平均）開口変位-変位曲線とを用い、Li等の方法のように引張軟化曲線の概略を推定することができる。なお、供試体自重による付加的な荷重の増加分は、中央集中載荷の場合スパン間の供試体自重の1/2 である。この新J積分法を用いれば、2種類の荷重-変位曲線の面積の「差」を用いるLi等の方法のように実験誤差を大きく拾うこともなく、引張軟化曲線の概略を知ることができる。通常の曲げ試験では供試体が破断した後の荷重-変位曲線が求まらないので、この新J積分法によっては引張軟化曲線を途中までしか推定できない。破壊エネルギー G_F の値が大きいコンクリート（例えば鋼繊維補強コンクリート）の場合には、新J積分法によって求めた引張軟化曲線は直接引張試験から求めた引張軟化曲線とよく一致する[15]。しかし、数値解析の結果によれば、 G_F の値が小さい場合には、新J積分法により求めた引張軟化曲線は真の引張軟化曲線からずれる。この誤差の原因としては、新J積分法では、曲げ破壊の初期における圧縮域を無視しており、また荷重-変位曲線下の面積の中に含まれる弾性ひずみエネルギーを考慮していないことがあげられる。

4. あとがき

最近のコンクリートの破壊力学の中心課題となっている引張軟化特性とその試験法とについて述べた。力が伝達されない完全なひびわれの先端に破壊進行領域と呼ばれる非線形な大きな破壊領域が存在することがコンクリートの引張破壊の特徴であり、この領域内における引張軟化現象（ひびわれの拡大に伴い引張伝達応力が減少する現象）を組み込んだ数値解析や理論により、ひびわれの進展によるコンクリートの破壊現象に関する検討が行われていることを示した。破壊エネルギーを求めるための RILEMの切欠きはりの3点曲げ試験法の概要を紹介するとともに、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結果を報告した。

軟化特性を扱った現在のコンクリートの破壊力学は、引張域におけるひびわれの進展問題を対象とするだけでなく、圧縮域のコンクリートの構成則や鉄筋コンクリートの構成則を用いた広い意味でのコンクリートの破壊に関する力学と結びついて今後発展していくものと考えられる。

参考文献

- [1] 庄司芳之, 大塚浩司, 森橋夫: コンクリートのひびわれ先端近傍の微視的破壊挙動に関する実験的研究, 土木学会第44回年講概要集第5部, pp.526-527, 1989.
- [2] Bruhwiler, E. and Roelfstra, P.: Tensile softening properties and structural response of a concrete member, *Fracture of Concrete and Rock*, Elsevier Applied Science, pp.682-692, 1989.
- [3] Hillerborg, A.: A model for fracture analysis, Report TVBM-3005, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1978.
- [4] Bazant, Z. P. and Oh, B. H.: Crack band theory for fracture of concrete, *Materials and Structures*, Vol.16, No.93, pp.155-177, 1983.
- [5] 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.106, pp.285-290, 1985.
- [6] Petersson, P. E.: Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials, Report TVBM-1001, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1981.
- [7] 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造の破壊力学に関する研究委員会報告, 1990 (3月発行予定).
- [8] Rokugo, K., Iwasa, M., Suzuki, T. and Koyanagi, W.: Testing methods to determine tensile strain softening curve and fracture energy of concrete, *Proc. of Int. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy*, Sendai, pp.128-138, 1988.
- [9] Gustafsson, P. J. and Hillerborg, A.: Sensitivity in shear strength of longitudinally reinforced concrete beams to fracture energy of concrete, *ACI Structural Journal*, Vol.85, No.3, pp.286-294, May-June, 1989.
- [10] 六郷恵哲, 岩佐正徳, 鈴木泰生, 小柳 治: 各種コンクリートの破壊力学パラメタ, コンクリート工学年次論文報告集, 第11巻, 第1号, pp.247-252, 1989.
- [11] Elfgren, L. ed.: *Fracture Mechanics of Concrete Structures from Theory and Applications*, RILEM Report, Chapman and Hall, p.407, 1989.
- [12] Bosco, C., Carpinteri, A. and Debernardi, P. G.: Size effect on the minimum steel percentage for reinforced concrete beams, *Fracture of Concrete and Rock*, Elsevier Applied Science, pp.672-681, 1989.
- [13] Li, V. C. and Ward, R. J. : A novel testing technique for post-peak tensile behavior of cementitious materials, *Proc. of Int. Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy*, Sendai, pp.128-138, 1988.
- [14] 六郷恵哲, 岩佐正徳, 瀬古繁喜, 小柳治: J積分法を用いた曲げ試験によるコンクリートの引張軟化曲線の定量化, 第43回セメント技術大会講演集, pp.398-403, 1989.
- [15] Rokugo, K., Iwasa, M., Seko, S. and Koyanagi, W.: Tension softening diagrams of steel fiber reinforced concrete, *Fracture of Concrete and Rock*, Elsevier Applied Science, pp.513-522, 1989.

(1989年10月2日受付)