

論文

[1040] 各種コンクリートの破壊力学パラメタ

正会員 六郷恵哲 (岐阜大学工学部)

正会員 岩佐正徳 (岐阜大学大学院)

正会員○鈴木泰生 (岐阜大学大学院)

正会員 小柳 治 (岐阜大学工学部)

1. まえがき

最近、コンクリート構造物（特に無筋構造物）の解析に、コンクリートの破壊力学が適用されるようになってきた。コンクリートの破壊力学では、破壊エネルギーを引張軟化曲線下の面積と結び付け、有限要素法などによる数値解析に適した構成則を提案しているところに特徴がある。また、コンクリートの引張に対する性能を改善する方法として、鋼繊維をはじめとする繊維を混入する方法や、各種のポリマーを混入する方法がある。これらを混入することにより改善されたコンクリートの引張に対する性能を評価するためには、従来用いられてきた割裂引張強度や曲げ強度だけでは不十分であり、破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊力学パラメタが有効であると考えられる。

そこで本研究では、RILEM が提案している破壊エネルギーを求めるための3点曲げ試験[1]を行って破壊エネルギーを求め、J積分を用いた引張軟化曲線の推定法（新J積分法）[2]によって引張軟化曲線を推定し、鋼繊維補強コンクリートならびにポリマーセメントモルタルの破壊エネルギーと引張軟化曲線の形状について検討した。

2. RILEM の試験法と新J積分法の概要

2-1 RILEM の試験方法の概要[1]

この試験方法は、はり高さの半分まで切欠きを入れたはり供試体の3点曲げ試験を行い、その荷重-変位曲線下の面積から、供試体自重による仕事量の補正をして、次の式によって破壊エネルギーを求める方法である。

$$G_F = (G_0 + m g \cdot \delta_0) / A \quad (1)$$

ここに、 G_0 : 荷重-変位曲線で囲まれた面積

$m g$: スパン間のはりの重量

δ_0 : 供試体破断時の変位

A : 投影破断面積

2-2 新J積分法の概要[2]

切欠きはりの3点曲げ試験を行い、荷重-変位曲線と切欠き先端の開口変位-変位曲線を計測する。図-1(a)~(b)に示すように、荷重-変位曲線に供試体自重の半分を付加的な荷重として加え、それに伴う変位と開口変位の増加分をそれぞれ荷重-

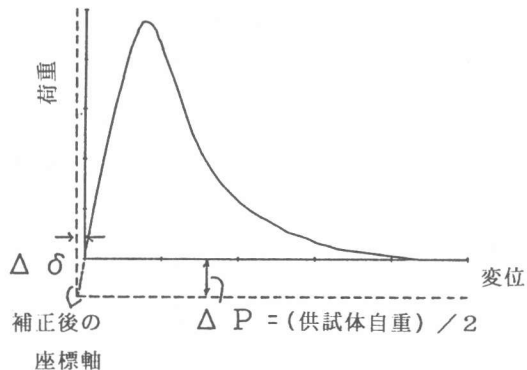


図-1 (a) 新J積分法: 荷重-変位曲線の補正

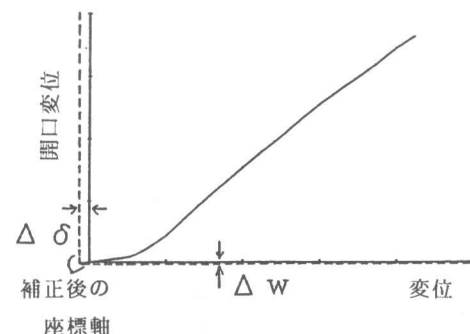


図-1 (b) 新J積分法: 開口変位-変位曲線の補正

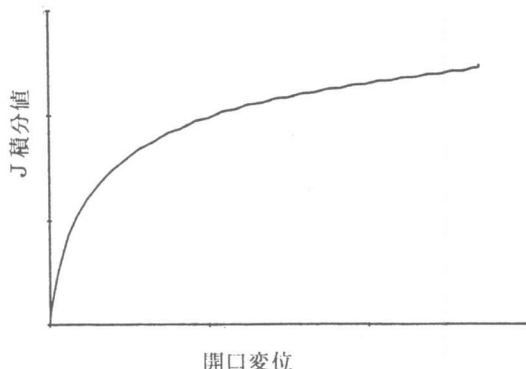
変位曲線と開口変位－変位曲線に加えて補正する。開口変位を計測値の1/2 として新たに開口変位－変位曲線を補正する。図－1 (a)に示す補正した荷重－変位曲線下の面積 $A(\delta)$ を破断面積 $(b \cdot a)$ で除して次式によってJ積分値 $J(\delta)$ を求める。

$$J(\delta) = \frac{A(\delta)}{b \cdot a} \quad (2)$$

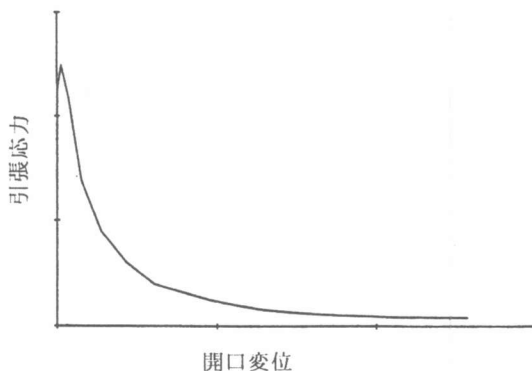
ここで、 a は破断面のはりの高さ、 b は供試体の幅である。図－1 (b)に示す補正した開口変位－変位曲線を用いて、J積分値 $J(\delta)$ と開口変位 $w(\delta)$ との関係は図－1 (c)のようになる。そして、図－1 (c)のJ積分値－開口変位曲線の接線勾配が引張応力となり、図－1 (d)のような引張軟化曲線が得られる。引張応力 $\sigma(w)$ は次式で表される。

$$\sigma(w) = \frac{dJ(w)}{dw} \quad (3)$$

なお、供試体自重の半分を付加的な荷重として加えており、引張軟化曲線は供試体が破断した変位に相当する点までしか推定できず、新J積分法によって破壊エネルギーを求めることはできない。また、図－1 (d)にみられるように、J積分法や新J積分法によって求めた引張軟化曲線のピークは、縦軸（開口変位ゼロ）からわずかにずれる傾向にある。そこで本研究においては、立ち上がりからピークまでの曲線とそれ以降の曲線との差を開口変位として、引張軟化曲線を修正する[2]。



図－1 (c) 新J積分法：J積分値－開口変位曲線



図－1 (d) 新J積分法：引張軟化曲線

表－1 (a) コンクリートの配合

種類	鋼繊維 混入率 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m³)					
				W	C	S	G	鋼繊維	減水剤 (cc)
F 4 2	2	5 4	5 0	194	360	834	834	157	1080
F 4 1	1	5 4	5 0	178	329	880	880	78.5	820
N 4	—	5 4	4 8	170	315	860	931	—	788

鋼繊維：φ0.6×30mm

表－1 (b) ポリマーセメントモルタルの配合

種類	ポリマー 混入率 (%)	目標 フロー値 (mm)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m³)			
				W	C	S	ポリマー
P 0 0	0	1 7 0	4 3	284	662	1330	—
P 1 0	1 0	1 7 0	2 4	169	704	1410	70.4
P 1 5	1 5	1 7 0	2 0	141	698	1400	105

ポリマー：SBRラテックス

3. 実験概要

切欠きはりの3点曲げ試験によって荷重-変位曲線および切欠き先端の開口変位-変位曲線を計測し、RILEMの方法によって破壊エネルギーを、また新J積分法によって引張軟化曲線を求めた。

供試体の寸法は10x10x84 (スパン80) (cm)とした。コンクリートはプレーンコンクリート、スレート鋼繊維を1%または2%混入した2種類の鋼繊維補強コンクリート、プレーンモルタル、SBRラテックスを10%または15%混入した2種類のポリマーセメントモルタルの合計6種類とした。コンクリートの示方配合を表-1(a)~(b)に示す。硬化コンクリートの諸試験値を表-2に示す。切欠き長さは供試体高さの半分とし、全て5.0(cm)とした。RILEMの提案に従い、試験時のはりの高さ方向がコンクリートの打設時の水平方向となるように型枠を作製し、切欠きは

厚さ3.3(mm)、幅5.0(cm)の鋼板を型枠に固定した後コンクリートを打設することによって作製した。

3点曲げ試験方法を図-2に示す。

支点での水平方向の拘束を除くため、鋼繊維補強コンクリート、プレーンコンクリート、プレーンモルタルについては、支点の下にグリスを塗布した鋼板を数枚重ねて置き、ポリマーセメントモルタルについては、支点の下にローラを置いて、支点が水平方向に自由に移動できるようにした。また、図-3に示すように、高感度変位計を供試体側面の切欠き先端部に取り付けて、切欠き先端の開口変位

(実際は、切欠きから左右に1.5 (cm)離れた点間 (検長3.0 (cm)) の変位) を計測した。荷重と載荷点変位および開口変位と載荷点変位は同時にXYレコーダに記録した。試験後、供試体の重量と破断面の断面積を計測した。得られた荷重-変位曲線、開口変位-変位曲線、供試体の重量、破断面の断面積を用いて、RILEMの方法によって破壊エネルギーを、新J積分法によって引張軟化曲線を求めた。

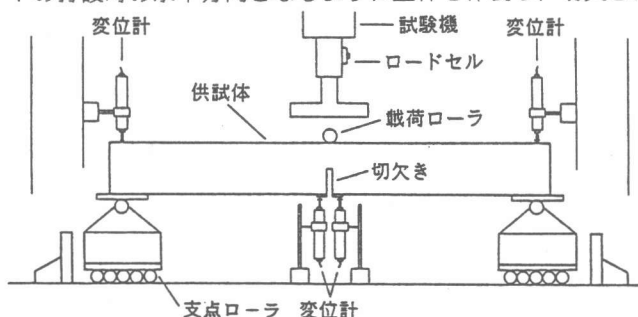


図-2 3点曲げ試験方法

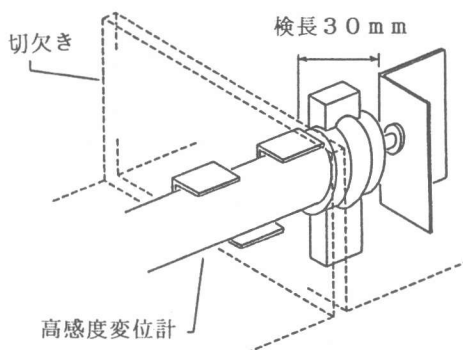


図-3 高感度変位計による開口変位の計測

表-2 材料特性

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 $E (x10^5)$	破壊エネルギー G_F	特性長さ
	(kgf/cm ²)			kgf/cm ²	kgf/cm	l_{ch} cm
F 4 2	480	85.9	40.3	3.0	8.46	160
F 4 1	484	65.9	38.0	2.5	4.47	77
N 4	373	59.0	33.7	2.5	0.165	3.6
P 0 0	554	52.9	35.1	2.9	0.0831	2.0
P 1 0	578	57.6	42.5	2.1	0.106	1.2
P 1 5	605	83.4	51.2	1.9	0.129	0.9

* 引張強度 : 割裂試験による

ただし、F42とF41は直接引張試験による

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

4. 結果と考察

試験の結果得られた荷重－変位曲線を図－4(a)～(b)に示す。RILEM の方法によって求めた各種コンクリートの破壊エネルギーを表－2に示す。また、新J積分法によって推定した各種コンクリートの引張軟化曲線を図－5(a)～(b)に示す。図－4、5の横軸の目盛りの大きさの違いからも分かるように、鋼繊維補強コンクリートの変形能は、モルタルやコンクリートよりも数十倍大きい。すなわち、鋼繊維を混入することによって破壊エネルギーはプレーンコンクリートよりも格段に大きくなり、脆性は著しく改善された。プレーンモルタルの破壊エネルギーはプレーンコンクリートのそれよりも小さくなった。ポリマーセメントモルタルの破壊エネルギーは、ポリマーの混入率が増加するほど大きくなった。

各種コンクリートの引張軟化曲線の形状は引張強度や最大開口変位の違いこそあれ、どれも似たような形状をしている。そこで、引張軟化曲線の縦軸を引張強度(f_t)で、横軸を(破壊エネルギー／引張強度)(G_F/f_t)でそれぞれ除して、無次元化した曲線を図－6に示す。無次元化した曲線は、コンクリートの種類によって多少のばらつきはあるものの、ほぼ1本の曲線で代表されと考えられる。従って、無次元化し代表とした引張軟化曲線を適当な関数で置き換えることによって、どのコンクリートについても引張強度(f_t)と破壊エネルギー(G_F)のみを計算すればある程度引張軟化曲線の形状を推定することが可能である。なおコンクリートの引張軟化曲線を2直線モデルで近似する場合に、比較的汎用性の高いモデルとして筆者らが提案している1/4モデル[3](折れ点の応力が引張強度の1/4)を図－6中に示す。この1/4モデルは、各種要因について行ったシミュレーション結果[4]にもとづいて提案されている。

引張に対するコンクリートの性能を改善した場合、破壊エネルギーのみならず引張強度も改善される場合がある。コンクリートの引張に対する性能改善の評価指標として、引張強度と破壊エネルギーの両方を取り入れた特性長さ(Characteristic Length, l_{ch}) [5]がある。特性長さは次のように定義される。

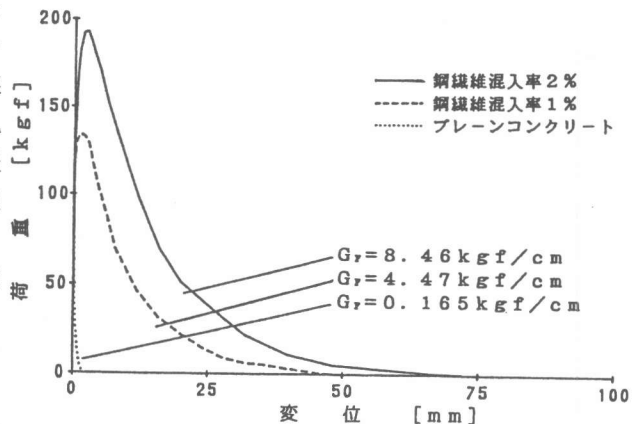
$$l_{ch} = \frac{E \cdot G_F}{f_t^2}$$

ここで、 l_{ch} : 特性長さ(cm)

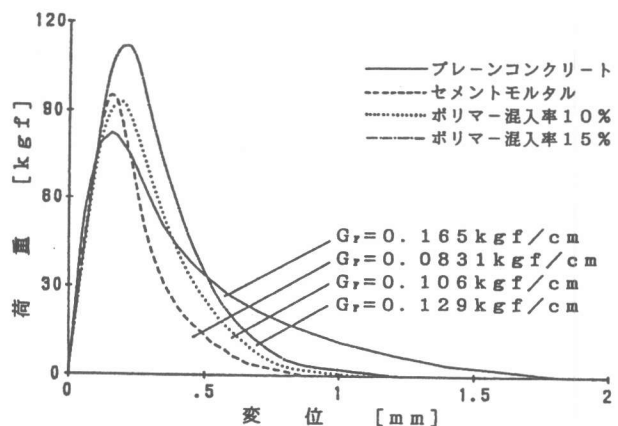
E : 弾性係数(kgf/cm²)

G_F : 破壊エネルギー(kgf/cm)

f_t : 引張強度(kgf/cm²)



図－4 (a) 鋼繊維補強コンクリートの荷重－変位曲線



図－4 (b) ポリマーコンクリートの荷重－変位曲線

特性長さは、コンクリート供試体の純引張試験を考えたときに、最大耐力点までに供試体の単位体積に蓄えられたひずみエネルギー ($f_t \cdot \varepsilon_t / 2 = f_t^2 / (2 \cdot E)$) (ε_t :最大耐力時のひずみ)と、最大耐力点以降破壊が終了するまでに、破断面の単位面積で消費される破壊エネルギー(G_F)との比に対応しているという解釈ができる。例えば、純引張試験において、引張供試体の長さが特性長さに等しい場合には、供試体の破壊に必要な全エネルギーのうちの1/2が、すでに最大耐力時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る。供試体長さが特性長さに比べ大きいほど、供試体に蓄えられる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、載荷試験時の制御も一般に難しくなる。また、供試体長さが同じ場合には、特性長さが大きい材料ほどゆっくりとした破壊をし、特性長さが小さい材料ほど脆性的な破壊を示す。本研究においては、コンクリートの引張に対する性能を、この特性長さによって適切に評価しうるかどうかが検討する。

RILEM の方法によって求めた各種コンクリートの破壊エネルギーから、特性長さを求め表-2に示す。鋼繊維補強コンクリートの場合、鋼繊維混入率が増加するほど破壊エネルギーも特性長さも大きくなり、その値はプレーンコンクリートの数10倍となった。逆にポリマーセメントモルタルではポリマーを混入することにより、破壊エネルギーは大きくなったが、特性長さは小さくなった。すなわちポリマーを混入することにより、破壊において消費されるエネルギー

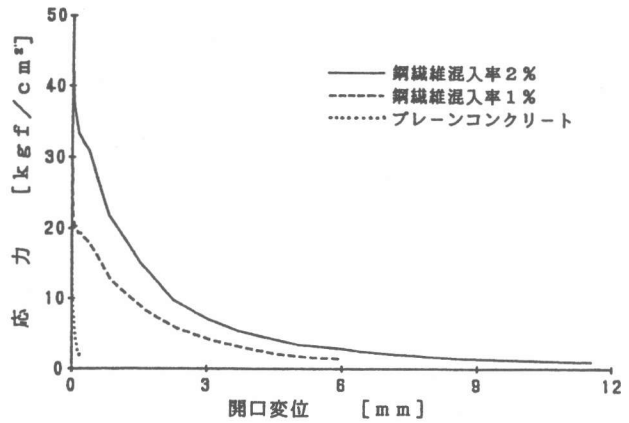


図-5 (a) 鋼繊維補強コンクリートの引張軟化曲線

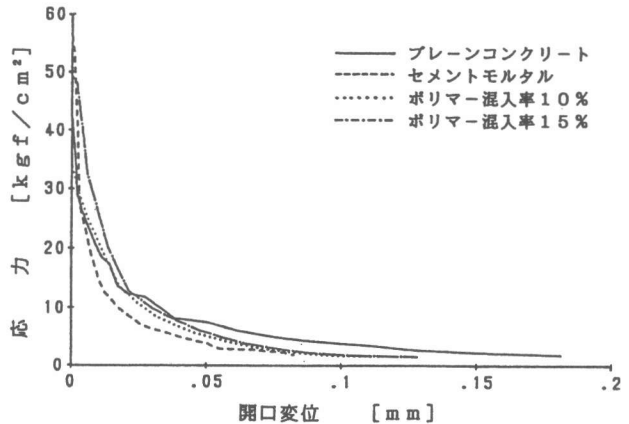


図-5 (b) ポリマーコンクリートの引張軟化曲線

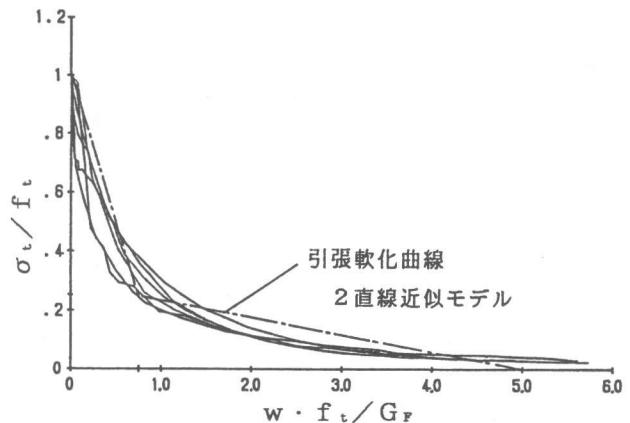


図-6 無次元化した引張軟化曲線

ギーは大きくなるが、引張強度の増加の度合も大きいため、特性長さという材料特性を用いると、ポリマーセメントモルタルの材料としての破壊はブレンコンクリートに比べ数字の上では脆性的になる。しかし、ポリマーセメントモルタルの切欠き曲げ試験において、ブレンコンクリートと破壊の様子はそれほど変わらず、荷重-変位曲線を見ても、ブレンコンクリートよりも脆性的な破壊をすると考えるのは不自然である。非弾性挙動が卓越する場合には、必ずしも特性長さが性能改善の評価指標とはならないことが考えられる。

5. まとめ

(1) 鋼繊維やポリマーを混入することにより破壊エネルギーは改善され、特に鋼繊維を混入することにより破壊エネルギーは格段に改善された。

(2) コンクリートの引張に対する性能改善の評価の指標に、特性長さを用いた場合、鋼繊維補強コンクリートの破壊エネルギーも特性長さも、ブレンコンクリートのそれよりも著しく大きくなった。

(3) ポリマーセメントモルタルの場合は、破壊エネルギーが増加するにもかかわらず、特性長さは小さくなった。しかし、このことから直ちに、ポリマーセメントモルタルが通常のモルタルと比べ脆性的な破壊を示すものとはいえず、特性長さと概念の適用にはなお検討が必要であると考える。

(4) 各種コンクリートの引張軟化曲線の形状は引張強度や最大開口変位の違いこそあれ、どれも類似した形状をしており、引張軟化曲線を無次元化して表せば、概略的には1本の曲線によって代表させることができる。

[参考文献]

[1] RILEM Draft Recommendation (50-FMC): Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Test on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, 1985, pp.285~290.

[2] 小柳治, 六郷恵哲, 岩佐正徳, 瀬古繁喜: 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, セメント技術大会年次講演会前刷, 1989.

[3] 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, Oct. 1988.

[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.

[5] Lennart Elfgren: Applications of Fracture Mechanics to Concrete Structures, Proc. International Workshop on Fracture Toughness and Fracture Energy, Sendai, 1988.