

論文

[2063] 引張軟化モデルを用いたコンクリートのひびわれ進展挙動のBEM解析

福地伸一*1・岡崎亮男*2・大津政康*3・友田祐一*4

1. はじめに

近年、計算機を用いた数値解析が様々な分野で活発に行われている。特に、破壊力学も含めた力学を中心とした分野では、数値解析を対象とした新たな力学が提案されている。そこでの代表的な数値解法は有限要素法 (Finite Element Method, FEM) と境界要素法 (Boundary Element Method, BEM) である。このことより、JCIでは引張軟化特性を組み込んだFEMとBEMによる基本的な解析プログラムが既に出版されている[1]。FEMについては、既に詳細な実験結果と数値解析結果について検討されているので[2]、BEM解析プログラムの適用性についてこれまで検討を行ってきた[3]。本報告では、モルタルおよびコンクリートにおける検討を行い、さらに、AE法を用いて引張軟化領域と荷重-たわみ曲線の対応についても考察を行った。

2. 実験概要

2-1 使用供試体

供試体は、曲げ強度の寸法依存性を考慮し、供試体寸法の異なる10cm×10cm×40cm及び、15cm×15cm×55cmの角柱供試体を用意した。供試体中央部には、幅1mmの切り欠き(ノッチ)を設けた。これは、厚さ1mm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ものである。ノッチ深さは、10cm×10cm×40cmの供試体では2cm, 3cm, 4cmとし、15cm×15cm×55cmの供試体では3cm, 4.5cm, 6cmとした。これはノッチ深さをa、梁せいをwとしたとき、a/wが0.2, 0.3, 0.4となるように決めた。(表-1参照)。

表-1 使用供試体

供試体の種類	a(cm)	a/w
10×10×40cm	2.0	0.2
	3.0	0.3
	4.0	0.4
15×15×55cm	3.0	0.2
	4.5	0.3
	6.0	0.4

実験に用いた供試体はモルタル、普通コンクリートの2種類であり、その配合については表-2に示す。これらの供試体は、打設後24時間空气中に放置した後脱型を行い、28日間恒温室(20℃)で水中養生した後実験を行った。

表-2 材料の配合

	最大骨材寸法(mm)	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単位量(kg/m³)				AE剤(cc)	スランプ(cm)	空気量(%)
				C	W	S	G			
モルタル	/	50	/	635	317	1269	/	/	/	
普通コンクリート	15	55	41	307	169	726	1101	150	10.1	

*1 日本工営(株)中央研究所 (正会員)

*2 (株)建設技術研究所

*3 熊本大学教授 工学部土木環境工学科、工博 (正会員)

*4 熊本大学土木環境工学科

これらの材料のノッチ付き梁の曲げ試験材齢における力学的特性値を表-3に示す。ここで圧縮強度、引張強度、ヤング率は、標準円柱供試体(φ10cm×20cm)を同条件で打設し、一軸圧縮試験および割裂試験を各3本ずつ行った結果である。また、曲げ強度は標準角柱供試体(10cm×10cm×40cm)により求めた。

表-3 材料の力学特性

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
モルタル	39.45	2.49	3.40	24.09
普通コンクリート	25.43	1.93	4.50	26.63

2-2 実験方法

ノッチ付き梁の曲げ試験は、サーボ弁制御試験機を使用し図-1に示すような3等分載荷試験を実施した。ここで、変位の制御にはクリップゲージ出力のノッチ開口部の変位(CMOD)を使用した。なお、開口変位速度は試験中一定とした。また、供試体の破断に至るまでの大変形を計測するために荷重点下部と支点上部に図のように変位計を設置した。支点上部の変位の計測は、支点部による沈下や変形の影響を補正するものである。

これらの計測と同時に供試体のひびわれ進展状況を把握するため図-1に示すように、供試体中央部の上下2箇所のAE計測も行った。

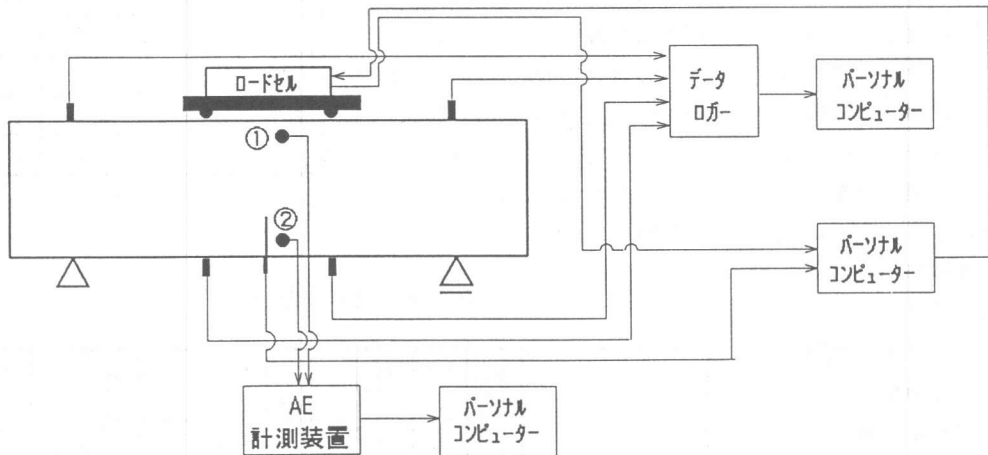


図-1 ノッチを有する供試体の曲げ試験装置

3. 引張軟化モデルによるBEM解析

FEMは、領域全てを要素として分割する必要があるのに対して、BEMは領域を囲む境界のみを要素として分割すればよいという特徴がある。解析に使用したBEMモデルを図-2に示す。これは、実験供試体の右半分の領域を対象としたものである。

BEMに組込む引張軟化モデルとしては、リニア形、バイリニア形、曲線形などが知られているが、ここでは図-3に示すような指数曲線形を用いた。このモデルは、次式により求められる。

$$\sigma = f_t \exp\left(-\frac{f_t}{G_f} w\right) \quad (f_t: \text{引張強度} \quad G_f: \text{破壊エネルギー} \quad w: \text{ひびわれ幅}) \quad (1)$$

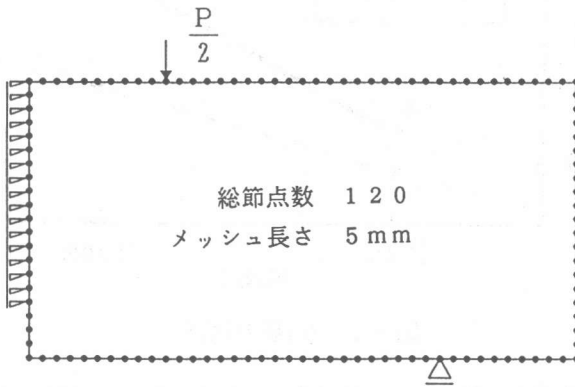


図-2 BEM解析モデル (梁高さ10cm, $a/w=0.2$)

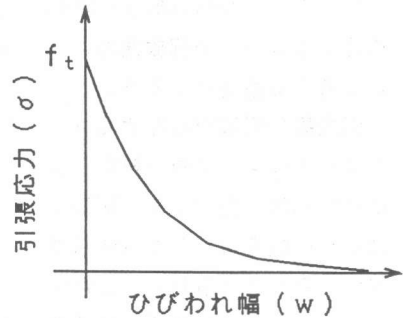


図-3 引張軟化モデル

4. 結果および考察

(1) G_f の算定

破壊エネルギー G_f の計算にはRILEM試験法[4]が提案されているが、供試体形状および試験方法が異なるため、Liの方法[4]により決定することにした。

図-4はノッチ深さの異なる3つのタイプ($a/w=0.2, 0.3, 0.4$)についての荷重-たわみ曲線(梁高さ、15cmの供試体)であるが、これは、それぞれのノッチ深さについて得られた実験結果(サンプル3本)を平均化したものである。この図は梁高さ15cmのコンクリート供試体のものであるが同様のことを他の供試体でも行

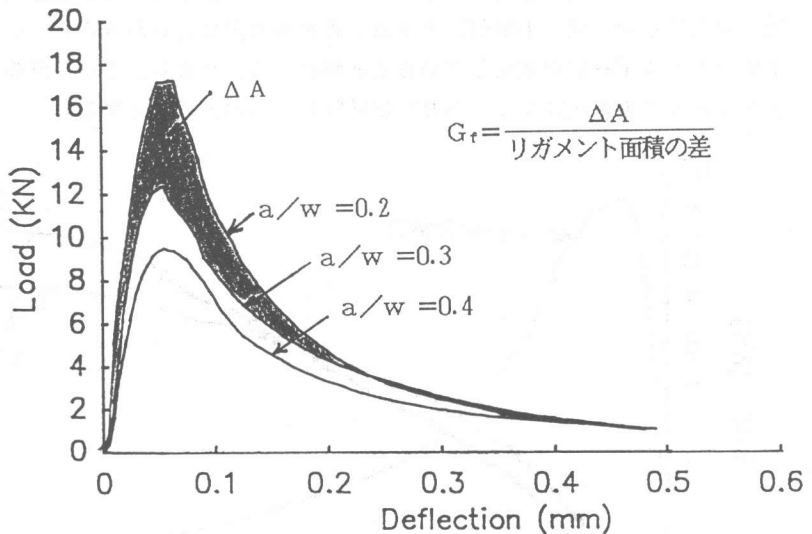


図-4 コンクリート供試体(梁高さ15cm)の荷重-たわみの平均曲線

った。そして、Liの考え方に基づいて、それぞれの曲線に囲まれた領域の面積をリガメント面積の差で除することにより、破壊エネルギーを算定した。その結果を図-5に示す。

この結果より、モルタル、コンクリートの両方において、供試体が大きくなると G_f 値が3倍近く大きくなっていることがわかる。これが寸法依存によることは明らかであるが、実験で用いた

供試体程度の寸法差では、いわゆる寸法効果（材料強度が、供試体寸法の骨材寸法に対する比に依存すること）のみが原因になるとは思われない。

むしろ、ひびわれ形成の際の消費エネルギーの解放領域について考える必要があろう。

引張軟化領域が存在するコンクリートのような複合材料ではひびわれは、面ではなく厳密にはさらに幅を持ったある体積で発生すると考えられる。したが

って、図-4のそれぞれの曲線に囲まれた領域の面積は、ある体積をもつ微小ひびわれ領域の形成の際の消費エネルギーであると考えられる。そこで、この影響が供試体寸法が大きくなるほど大きいと考えられたため、解析では G_f 値として梁高さ 10cmのもののみを用いた。

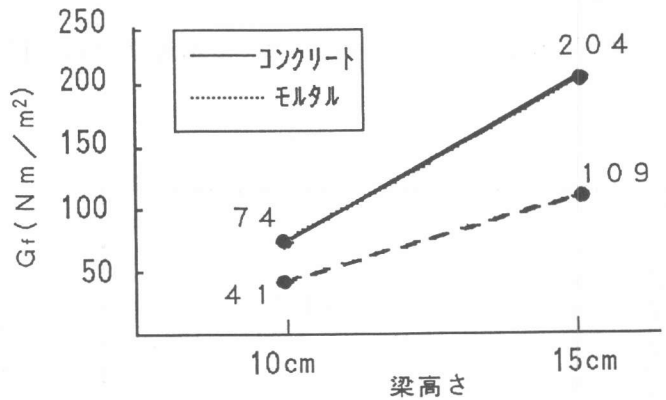


図-5 G_f 値の比較

(2) AE挙動と引張軟化領域

図-6にAE挙動と荷重-CMOD曲線を重ね合わせた図を示す。AE挙動の縦軸はエネルギーの累計である。この図はコンクリート大供試体 ($a/w=0.4$) で得られたものであるが、同様の結果が他のいくつかの供試体でも得られた。図を見ると、①曲線と②曲線（①、②はAEセンサーの取付位置を示す。図-1参照）とでは、AEの挙動に違いがみられ、CMODが0.5mm付近において累計エネルギー量が逆転していることがわかる。つまり、この2直線の交点付近において、梁高さのほぼ中央の距離までひびわれは進行したものと考えられる。

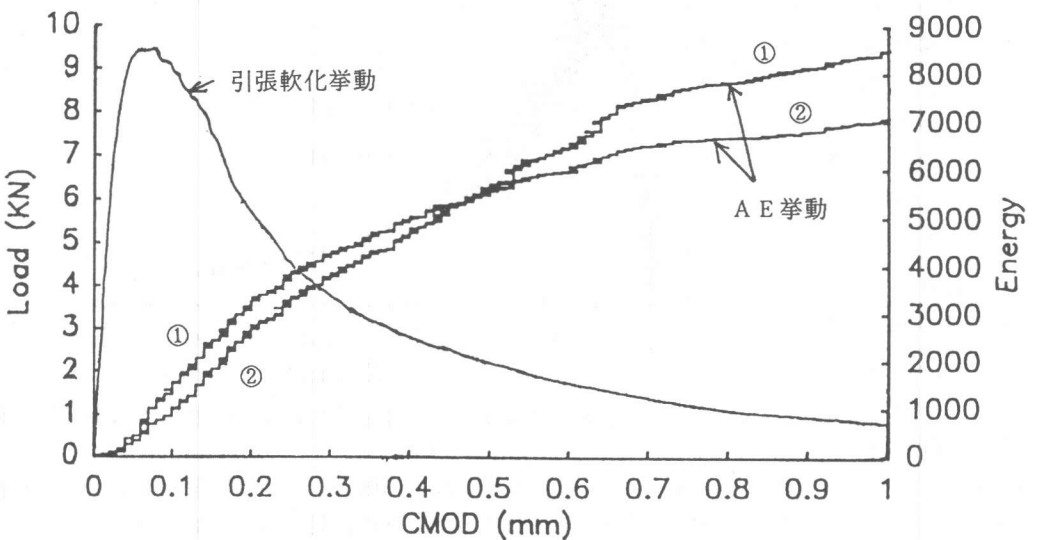


図-6 コンクリート供試体（梁高さ15cm, $a/w=0.4$ ）の引張軟化挙動とAE挙動

(3) BEM解析と荷重たわみ曲線の比較

解析は図-2に示すモデルを用いて行った。得られた解析結果を図-7～図-9に実験結果と比較して示す。図-7ではモルタルの一軸圧縮試験で得た初期勾配が少し大きかったようであるが、耐力はほぼ一致している。一方、図-8では軟化域の挙動が急激である。図-9では、 G_r 値として梁高さ10cmでの小さな値を用いたため、最大耐力が低めに求められている。このように全体的に最大荷重以降の解析値が不安定となっているが、BEM解析結果は実験結果とほぼ一致していることがわかる。これらの結果よりBEMに引張軟化モデルを導入することによりノッチを有するコンクリート梁の挙動がBEMにより解析できることが確認できた。

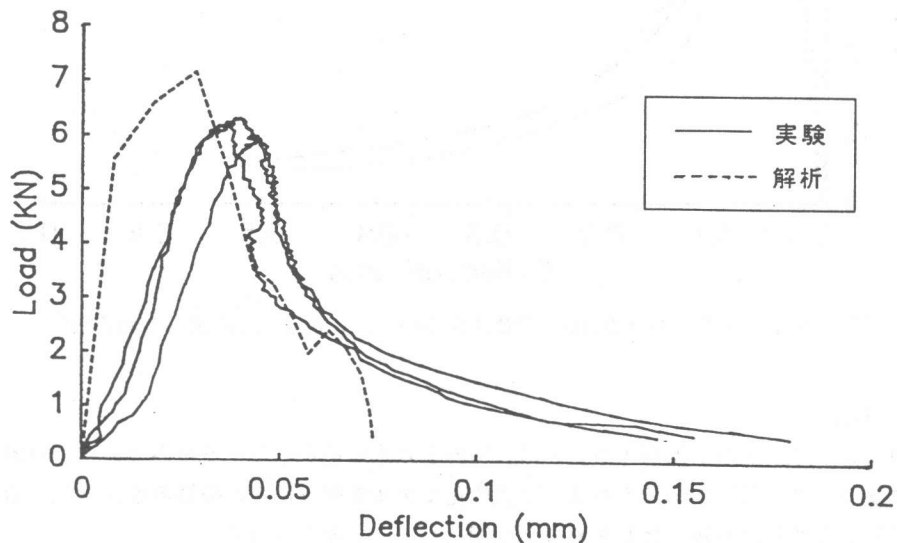


図-7 モルタル供試体 (梁高さ10cm, $a/w=0.2$) の荷重-たわみ曲線

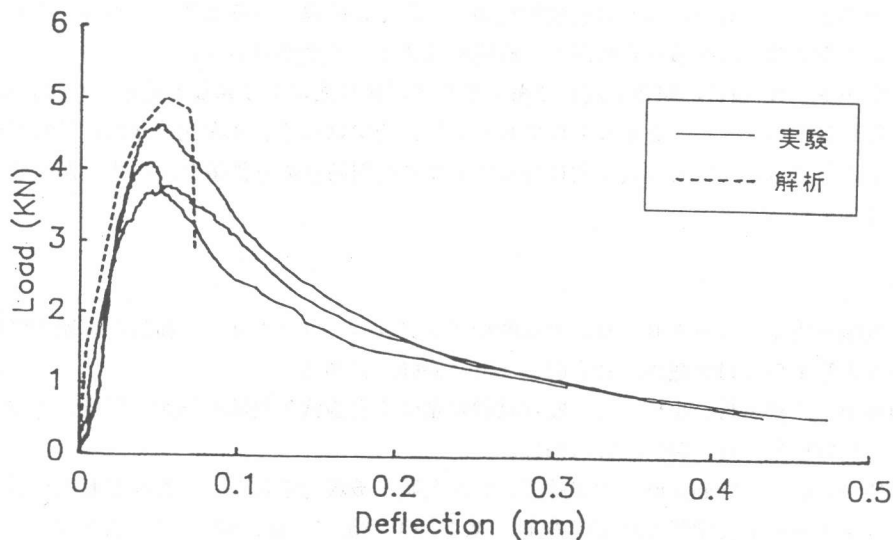


図-8 コンクリート供試体 (梁高さ10cm, $a/w=0.4$) の荷重-たわみ曲線

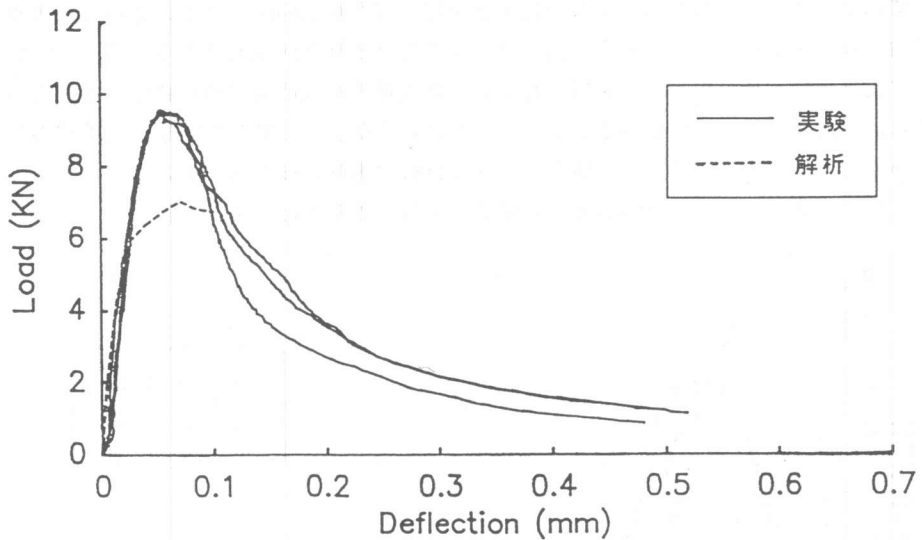


図-9 コンクリート供試体（梁高さ15cm, $a/w=0.4$ ）の荷重-たわみ曲線

5. 結論

BEMでは、ひびわれが進展することは、境界上の未知量が増加するのみであり、境界の変更は容易である。この見地から考えれば、引張軟化モデルを組み込んだ破壊の進行領域を新たな境界条件の変化とする取り扱いにはBEMに全く適したものと考えられる。

この考えに基づいて、引張軟化モデルのパラメータを実験的に求め、それらの値を用いてひびわれ進展挙動を解析し、実験値とほぼ一致する結果を得ることができた。これより、BEMモデルの破壊力学的な取扱いの適用性が確認されたと考えられる。最大荷重以降の解析値が不安定となることが問題ではあるが、これは引張軟化領域の設定に問題があると考えられる。これについては、AEの実験結果等からさらに詳しく研究を進めていく必要がある。

破壊エネルギー G_f 値は、配合は同じであっても供試体寸法により異なる値となった。このことからひびわれが、ボリュームをもつものであり2次元ではなく、3次元的な広がりをもつものであると考えられる。これを2次元的に扱うためには材料特性の寸法依存性を明らかにする必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 大津政康担当：FEMとBEMによる解析プログラム、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、JCI-C19, pp. 55-65, 1990.3
- 2) 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
- 3) 福地伸一、A. H. Chahrouh, 大津政康、竹松久明：破壊力学に基づいたひびわれ進展のBEM解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14, No. 2, pp. 909-912, 1992.6
- 4) 六郷恵哲：コンクリートの引張軟化曲線の試験法、ibid. 1), pp. 29-35.