

論文

[2157] 破壊力学に基づいたひびわれ進展の BEM 解析

正会員○福地伸一 (熊本大学大学院)

正会員 A. H. Chahrouh (熊本大学大学院)

正会員 大津政康 (熊本大学土木環境工学科)

竹松久明 (構造技術センター)

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、最近、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実験を行って検討した。

2. 実験および解析概要

実験に用いたのは、モルタル、プレーンコンクリートおよび鋼繊維補強 (SFR) コンクリートの 3 種類であり、その配合を表-1 に示す。SFR には長さ 30mm のせん断ファイバーを体積混入率 1% で用いた。これらの配合により、10 cm X 10 cm X 40 cm の梁供試体で中央部に 2 cm と 4 cm の幅 1 mm のノッチを有する供試体を作成し水中養生を行った。これらの材料のノッチ付き梁の曲げ試験材令

表-1 材料の配合

供試体	最大骨材寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				A E 剤 (cc)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				C	W	S	G			
モルタル	/	45	/	648	292	1296	/	/	/	
コンクリート	20	45	41	375	169	703	1066	150	6.7	5.7
SFR 1%	20	45	41	375	169	692	1050	150	3.2	3.2

における力学特性をまとめ表-2 に示す。ノッチ付き梁の曲げ試験は、サーボ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)

表-2 材料の力学特性

供試体	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング率 (kgf/cm ²)	G _r (kgf/cm)	K _{rc} (kgf/cm ^{3/2})	l _{ch} (cm)
モルタル	600.5	38.9	2.59×10 ⁵	0.087	55.94	0.33
コンクリート	461.6	41.8	3.22×10 ⁵	0.304	57.37	0.30
SFR 1%	589.7	49.7	3.53×10 ⁵	0.873	89.43	0.51

を使用した。また、荷重点たわみを計測するために載荷点と荷重点に図のように変位計を設置した。なお、一部の供試体ではひびわれ進展状況を把握するため図中のようにA E計測も行った[3]。これは、主として急激な終局破壊を予防するために実施した。

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て既報のモデル[1]のひびわれ進展領域であるリガメントのみを細分割したものである。

引張軟化モデルとして、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1/4モデルとも呼ばれる[2]バイリニアモデルを使用することにした。

3. 実験および解析結果と考察

モルタル供試体で得られた荷重-CMOD曲線の例を図-4に示す。図には2 cmおよび4 cmノッチの供試体について、それぞれ実際に実験を実施した2本の曲げ試験の結果を示している。この結果の最大荷重より線形破壊力学により求めた限界応力拡大係数 K_{Ic} の平均値が表-2に示されている。この程度の寸法の供試体では寸法効果の影響が大きいことが知られていることより、この K_{Ic}

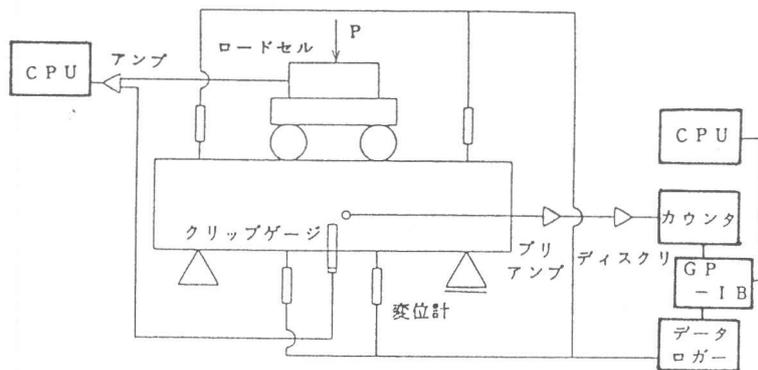


図-1 ノッチを有する供試体の曲げ試験装置

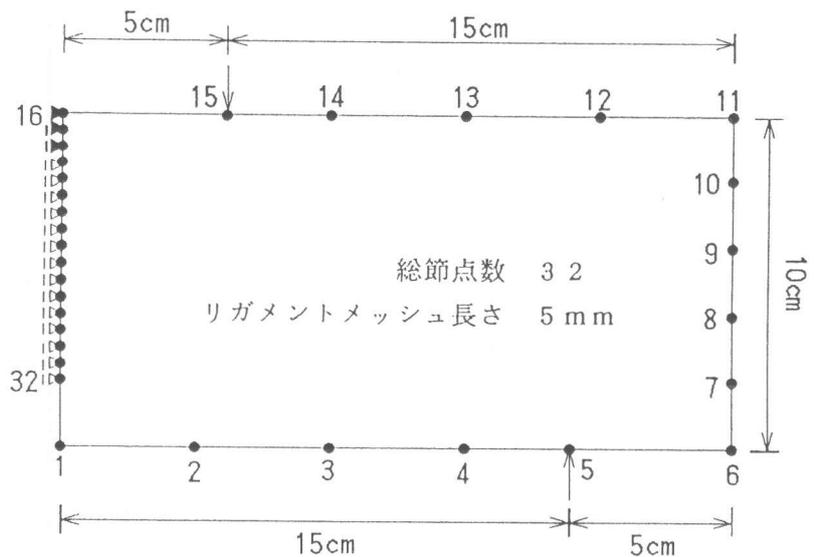


図-2 BEM解析モデル (2 cm ノッチ)

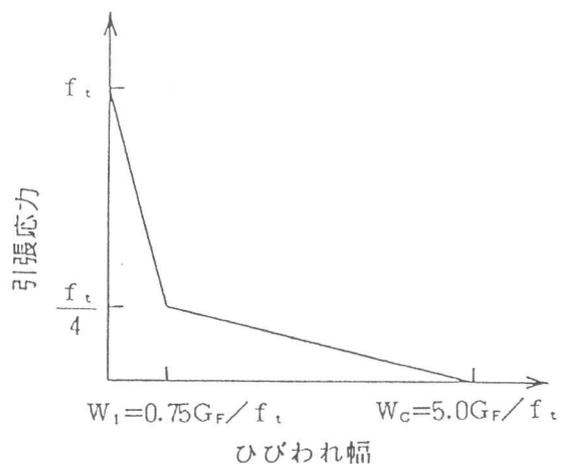


図-3 引張軟化モデル

の値は解析でのメッシュ分割の規準に適用する。

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。

次に、図-5 に示すように荷重と荷重点たわみの計測データより荷重-たわみ曲線を求め、2つの供試体での結果の平均値を5次曲線で近似することにした。その近似曲線が図には示されている。そして、Li の考え方に基づいて、この2つの近似曲線に囲まれた領域の面積をリガメント差の面積で除することにより、破壊エネルギーを算定した。その結果も表-2 中に示してある。

ひびわれ進展時のノッチ先端での応力分布を線形破壊力学に基づいて考えれば、ノッチ先端には引張強度を越

える応力集中域が出現する。その結果、破壊進行領域が形成されるが、応力拡大係数 K_I と応力 σ の間には、 $\sigma = K_I / \sqrt{2\pi r}$ の関係が成立することより、 $l_{cn} = (K_{Ic} / f_t)^2 / (2\pi)$ として限界応力拡大係数 K_{Ic} と引張強度 f_t が一致する距離として特性長さ l_{cn} を求め、表-2 に示してある。

BEM 解析では、図-3 に示す引張軟化モデルをひびわれ進展部の境界に作用させることになるが、そこでの境界メッシュ長さの取り方が解析結果に影響することが知られている [1]。数値

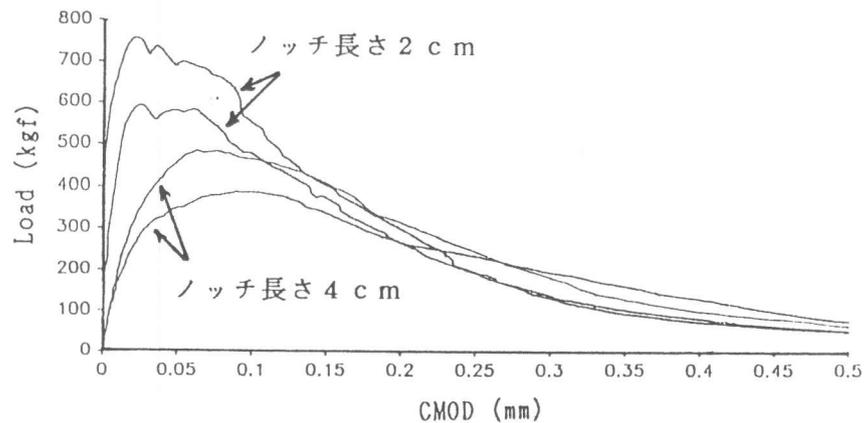


図-4 モルタル供試体での荷重-CMOD 曲線

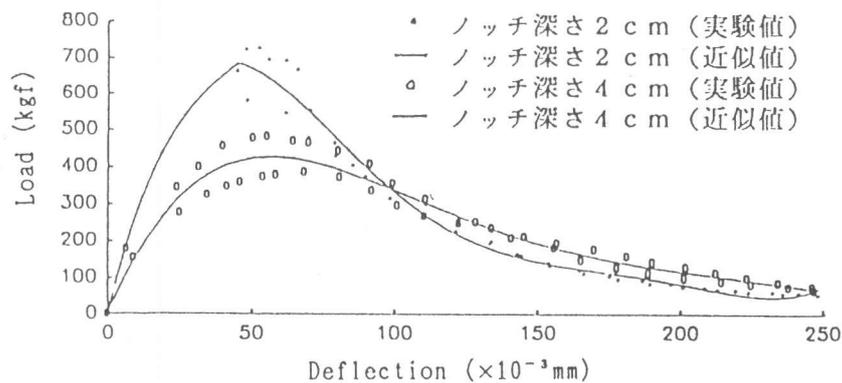


図-5 モルタル供試体の荷重-たわみの近似曲線

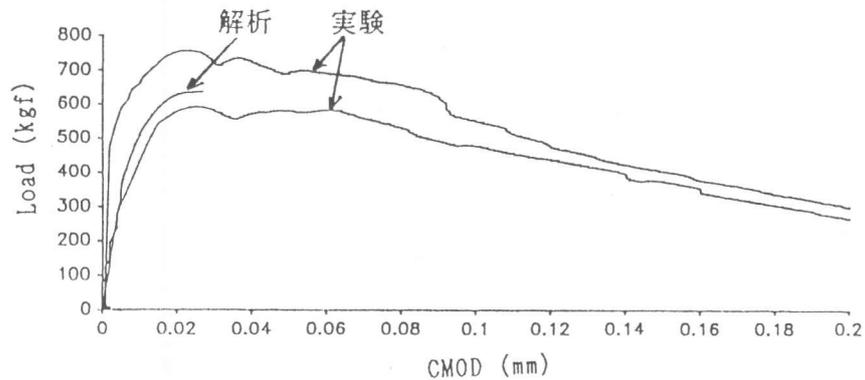


図-6 BEM 解析結果 (モルタル・ノッチ 2 cm)

解析の観点からは、細かな分割が望ましいが、あまりに細かくすれば解の不安定性を招く恐れのあることも知られている。そこで、ひびわれが進展するリガメント部の合理的なメッシュ長さとして、特性長さに相当する程度にすることにした。これは、メッシュ長さ $L \geq l_c$ ならば、ひびわれ進展により新たに設けられるノッチ先端では応力レベルは引張強度以下になると想定でき、不安定な条件は起こらないと考えたためである。ただし、実際には $L = 2.5\text{mm}$ についても検討したが、結果に差異はみられなかった。

以上の考察に基づいて、モルタルのノッチ2 cmの供試体では、メッシュ長さ L を表-2の結果を参考にして、 $L = 5\text{mm}$ として解析を行った。その結果を図-6に示す。これより、BEM解析により実験結果がかなりよくシミュレーションできていることがわかる。同じように、コンクリートおよび、SFR供試体についても検討し、同程度の結果が得られた。これは、16ビット程度のCPUを有するパーソナルコンピュータで解析したものであるが、この程度のモデルでも、引張軟化則を導入した場合のノッチを有するコンクリート梁の挙動は簡単にBEMにより解析できることがわかる。

4. 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が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、実験値とよく対応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。

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) A. H. Chahrour, 大津政康、坂本哲也：Implementation of BEM Analysis in Mode-I Fracture of Concrete Beams, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, pp. 1009-1014, 1991.6
- 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.