

V-441

圧縮応力下におけるコンクリートの混合モード破壊の解析

大阪府立大学 正会員 石黒 寛

1. まえがき

コンクリート構造物におけるクラックの解析的な評価方法としては、引張応力度に基づく応力解析の手法と破壊力学パラメータを用いる破壊力学の手法がある。破壊力学の手法は、金属などの均質材料を対象として発展してきたものであり、近年、コンクリート材料および構造物においても本手法の適用が試みられている。また、破壊力学の手法のうち線形破壊力学モデルは、コンクリートダムにおけるクラックの安全性評価にも応用されており、応力解析の手法に比べて新しい解析手法として注目されている。本研究では、線形破壊力学モデルの適用性を検証するため、圧縮応力下におけるモルタル供試体の混合モード破壊を解析対象として、クラック進展荷重およびクラック進展経路の予測結果と試験結果とを比較した。

2. モルタル供試体の破壊試験

供試体の概要を図-1に示す。供試体には初期欠陥を想定して中央に厚さ0.5mmのステンレス板を挿入した。ステンレス板の長さLは4.5cmと7.5cmの2ケースとし、その傾斜角度 β については30°、45°および60°の3ケースを設定した。モルタルの配合は、セメント：砂：水=1:3:0.69とした。

破壊試験は単調一軸圧縮荷重とし、この際、図中に示すようにステンレス板の先端とそれより2cm上の位置、および供試体側面中心にそれぞれひずみゲージを貼付し、供試体表面のひずみを測定した。クラック進展荷重は、ひずみの増加が著しくなる時の荷重として決定し、クラック進展経路については試験終了後目視により観察した。

3. 応力拡大係数の数値解析

クラックの二次元応力拡大係数の解析方法としては、特異要素と変位法を組合せた方法¹⁾を適用した。特にここでは、ステンレス板とモルタルの接触面(クラックと呼ぶ)における摩擦抵抗作用を考慮するため、次のように弾性解析を2回繰り返す方法²⁾を用いて解析した。すなわち、1回目の解析では、与えられた荷重条件に対してクラックのせん断剛性を零として解析し、この結果よりクラック面に作用する垂直応力 σ_n を決定する。2回目の解析では、クラック面における摩擦抵抗力(= $\mu\sigma_n$)に等価な節点荷重を計算し、この荷重をクラック面に載荷させて解析を行う。ただし、 μ はクラック面の摩擦係数である。クラックの応力拡大係数は、1回目と2回目の結果を重ね合わせて求める。

4. クラック進展解析

線形破壊力学を適用したクラック進展解析においては、混合モード荷重下の破壊基準式として次式を採用した。本式に、弾性解析より決定した K_I および K_{II} を代入して K_{Ic} を計算し、この値とモルタルの破壊靱性値 K_c を比較することにより、クラックの安定性を評価する。

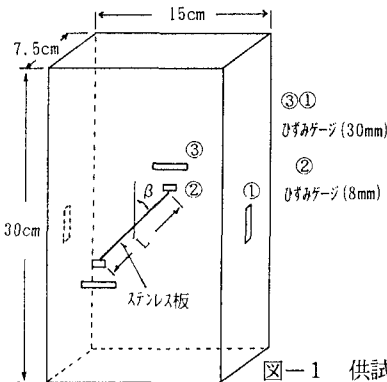


図-1 供試体

表-1 クラック進展荷重と応力拡大係数

L	β	クラック進展荷重 (tf)		最大荷重 (tf)	応力拡大係数の計算値 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}^{-3/2}$)	
		クラック発生時	2cm 進展時		K_{I1}	K_{Ic}
4.5cm	30°	8.5	18.7	21.8	83.0	95.9
	45°	8.6	17.1	19.8	82.2	94.9
	60°	13.3	22.3	24.6	80.0	92.4
7.5cm	30°	5.5	11.8	20.6	65.5	75.7
	45°	7.3	11.6	17.1	80.4	92.9
	60°	14.0	20.5	25.0	78.0	90.1
ステンレス 板なし		-	-	26.6	-	-

* K_{I1} 、 K_{Ic} は、クラック発生時の荷重より計算、ただし、 $\mu = 0.26$

$$\cos(\theta/2) [K_I \cdot \cos^2(\theta/2) - 3/2 \cdot K_{II} \cdot \sin(\theta)] = K_{Ic} \quad \dots \dots (1)$$

$$K_I \sin(\theta) + K_{II} (3\cos(\theta) - 1) = 0 \quad \dots \dots (2)$$

ただし、 θ はクラックの始発角度、 K_I および K_{II} は、それぞれ、モードIおよびモードIIの応力拡大係数である。クラックの始発角度 θ は、(2)式により求める。クラック進展解析の手順³⁾を以下に示す。

- ステップ1 : 与えられた荷重レベルに対して、クラックの応力拡大係数 K_I および K_{II} を決定する。
- ステップ2 : 決定した K_I および K_{II} を混合モード荷重下の破壊基準式に代入し、クラック進展方向の予測とクラックの安定性の評価を行う。もしクラックが不安定であればステップ3へ進む。もしクラックが安定であればステップ4へ進む。
- ステップ3 : 予測したクラック進展方向に長さ Δa だけクラックを進展させ、メッシュの再分割を行う。クラックが安定するか、あるいは破壊が起こるまでステップ1からステップ3の過程を繰り返す。
- ステップ4 : 破壊基準式に基づき、クラックが不安定性を示す荷重レベルまで荷重を増大させる。この時の荷重レベルをクラック進展開始の荷重とする。ステップ3へ進む。

5. 実験および解析結果

実験より得られた各供試体のクラック進展荷重と最大荷重、およびクラック進展荷重時の弾性解析結果から決定した応力拡大係数(K_{II})と(1)式より求めた K_{Ic} を表-1に示す。さらに、 $\beta = 45^\circ$ 、 $L = 4.5$ cmの供試体を対象として、クラック進展長さ $\Delta a = 0.75$ cmとしてクラック進展解析を行った。クラック進展荷重および進展経路の解析結果は、図-2に示すとおりである。クラックは始発角度約 70° で開始し、載荷方向に向かって3cm進展した時に破壊した。実験でも同様な挙動が見られた(図-3参照)。図-4は、クラック進展に伴うメッシュの再分割の状況を示している。本解析では、このメッシュ再分割に手間が掛かった。

6. あとがき

モルタルのクラック解析に線形破壊力学モデルを適用した結果においては、クラックの進展経路および進展荷重、破壊などの予測に関して、その適用性は良好であるといえる。本方法をダムなどの大規模な構造物に発生したクラックの安全性評価に適用できればと考えている。終わりに、本研究を進めるに当たり御協力を頂いた専攻生、渡辺等君(大阪府土木部)に感謝の意を表します。

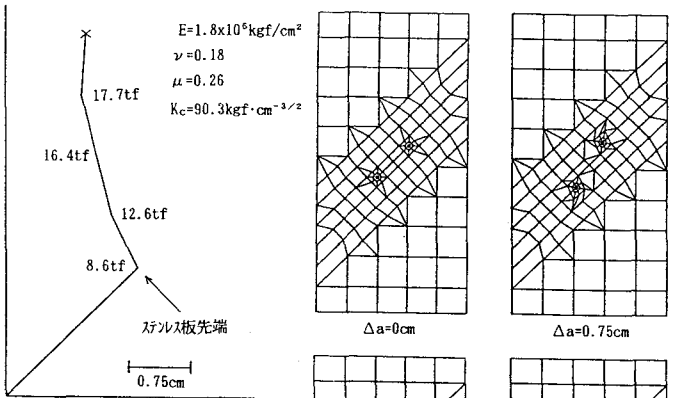


図-2 クラック進展解析結果 (L=4.5cm, $\beta = 45^\circ$)

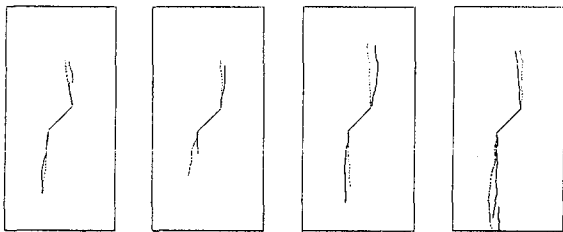


図-3 クラック進展性状 (L=4.5cm, $\beta = 45^\circ$)

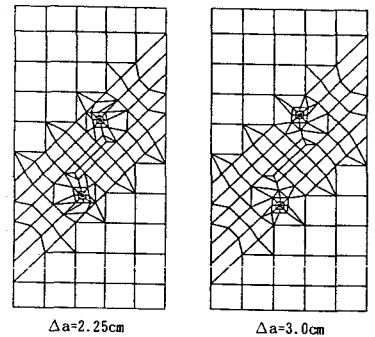


図-4 メッシュの再分割状況

<参考文献> 1) 石黒寛;有限要素法による二次元応力拡大係数の解析、コンクリート工学年次論文報告集, pp. 67~72, 1991 2) M. A. Tasdemir et al: Crack propagation in concrete under compression, Journal of Eng. Mechanics, ASCE, Vol 116, No. 5, 1990 3) G. C. Sih and A. Ditommaso: Fracture mechanics of concrete, Martinus Nijhoff Publishers, pp. 183~192, 1985