

CS-33 圧縮荷重下におけるコンクリートの骨材-クラックモデル

東亜建設工業(株) 正会員 阿部 友洋
 埼玉県庁 日比野恭彦
 埼玉大学 正会員 奥井 義昭

1. はじめに

コンクリートにおける引張破壊のメカニズムは、破壊力学的手法によりある程度明らかにされ、ひずみ軟化曲線を用いた解析手法により引張クラックを含む構造物の挙動も解析が可能となりつつある。しかし、圧縮破壊場合、多数の微視クラックが同時に発生し、荷重の増加に伴い局所化し最終的な破面を形成すると言った破壊過程をたどり、引張破壊に比べ現象はより複雑であり、いまだ不明の点が多い。

本研究ではこのようなコンクリートの圧縮荷重下での挙動をマイクロメカニクスに基づく手法で明らかにする事を最終目標とし、その第一段階として微視的な破壊モデルの提案する。また、このモデルの荷重下での挙動が比較的単純なモデルのクラック進展問題で表されることを示し、その妥当性を実験により確認した結果を報告する。

2. 骨材-クラックモデル

圧縮荷重下におけるコンクリートの非弾性変形は微視的には (a) 骨材とモルタル間の界面における剥離、(b) 摩擦すべり、とそれによって生じる (c) 引張クラックの成長に起因するものと考えられる。この3つの微視的メカニズムを表すものとして図-1に示すモデルを考えた。同図において x_1 , x_2 は各々最大および最小主応力方向を表し(引張応力を正)、骨材は正方形の介在物BCB'C'でモデル化されている。圧縮荷重の増加に伴い、モルタルと骨材の界面では付着切れと摩擦すべりが生じるものとし、例えばBC上では次の境界条件が成り立つものとする。

$$\tau_{xy}^+ = \tau_{xy}^- = -\tau_c + \mu \sigma_{yy} \quad (1)$$

ここで、 τ_{xy} , σ_{yy} は各々界面に作用するせん断応力、垂直応力であり、 τ_c は骨材とモルタルの付着強度、 μ は摩擦係数を表す。さらに、図-1のモデルでは、この界面上でのすべり変形によって引張クラックAB, A'B'が生じることを表している。この引張クラックの進展条件は、クラック先端におけるモードIの応力拡大係数 K_I が破壊靱性値 K_{Ic} に達した際にクラックが進展するものとする。

したがって、提案するモデルの荷重に対する挙動を求めるのは図-1の問題を境界条件(1)の基で解き、応力拡大係数を求める必要がある。しかし、この境界値問題の解を解析的に求めることは困難であるため、図-1の問題の代わりに図-2に示す単純化された問題で応力拡大係数を評価する事とした。この問題は界面でのすべりの影響を表すため、直線のクラックAA'(長さ $2c$)の中心に集中力 F が作用する問題で、集中力の大きさは次式で与えられる。

$$F = 2a(-\tau_{xy} - \tau_c + \mu \sigma_{yy}) = a(-F_0 + \lambda_1 \sigma_{11} - \lambda_2 \sigma_{22}) \quad (2)$$

ここで、 a は正方形の骨材の一辺の長さ、

$$F_0 = 2c \cos \theta \tau_c,$$

$$\lambda_1 = \cos \theta \{ \sin 2\theta + \mu(1 - \cos 2\theta) \}, \lambda_2 = \cos \theta \{ \sin 2\theta - \mu(1 + \cos 2\theta) \}$$

$2c$ はクラック長である。この問題のモードIの応力拡大係数は、

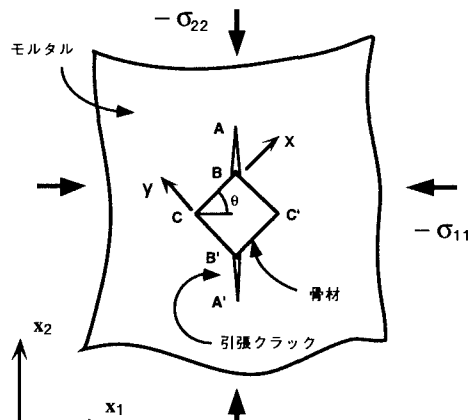


図-1 骨材-クラックモデル

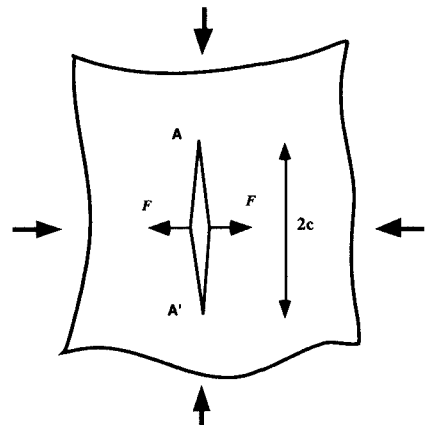


図-2 単純化されたモデル

$$K_I = \sqrt{\pi c} \sigma_{11} + \frac{F}{\sqrt{\pi c}}$$

となる。これを K_c と等置すれば、クラックの進展則が求められる。

3. 画像解析を用いたクラック進展実験

単純化したモデルから導かれたクラック進展則の妥当性を検証する目的で、図-1の骨材-クラックモデルを模擬したクラック進展実験を行った。図-3に示すようなモルタル中に粗骨材と見立てた直方体の鋼材を入れた供試体を作成し、供試体に一軸圧縮力を载荷し、荷重とクラック長の関係を調べた。

クラック長の計測は、供試体表面に現れたクラックの様子をCCDカメラで撮影することにより行い、1秒間隔で約200枚の画像をコンピューターに直接取り込んだ。図-4に示すように、この画像にキャリブレーションとノイズ除去などのためのフィルタリングを行った後、クラックの原点座標とクラックの先端座標を記録させて、クラック長を数値化した。なお、今回の装置の解像度は1ピクセル当たり0.078から0.125 mmである。

4. 応力-クラック長関係の比較

提案するクラック進展条件より求めた応力-クラック長関係と実験結果の比較を図-5に示す。縦軸は x_2 方向の応力 σ_{22} を基準応力 $\sigma_0 = K_c / \sqrt{\pi c}$ で除して無次元化した軸応力を示す。図中、実線と破線の曲線は理論値を示し、付着強度 $\tau_c = 30 \text{ kgf/cm}^2$ 、破壊靱性値 $K_c = 2.0 \text{ N/mm}^{3/2}$ のときの結果であり、摩擦係数は0.2と0.3の2ケースで計算したものである。

5. まとめ

実験値との比較から、単純化されたモデルによってクラックの進展がほぼ表現できることが示された。

しかし、今回用いた測定方法では、クラックの先端付近で、クラックのグレイバリューと、モルタルのグレイバリューの範囲が重なり、クラック先端の判別が困難となる場合があること、及び装置の解像度以下の開口幅のクラックを検出できないなどの問題がある。

今後の課題としては、上記の問題点の克服と骨材-クラックモデルを用いて応力-ひずみ関係の検討、骨材を複数個に拡張したモデルでの解析等が挙げられる。

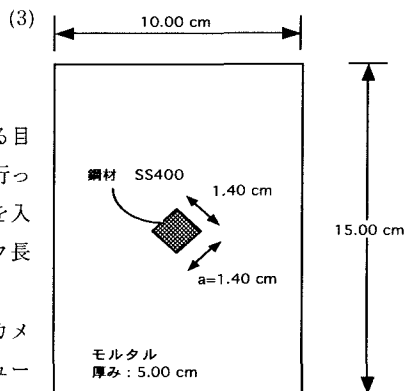


図-3 供試体概要図

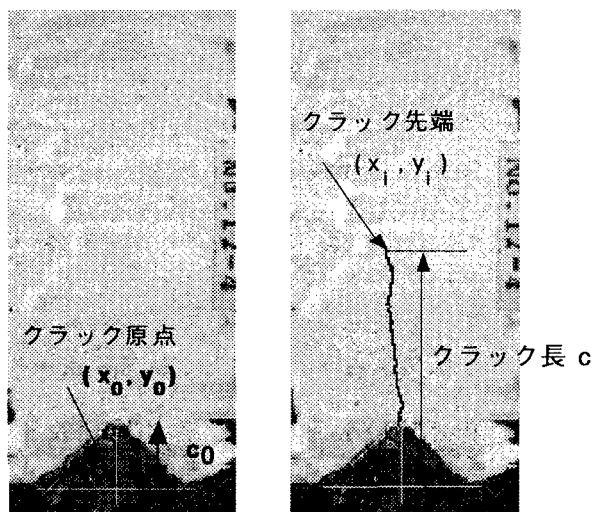


図-4 クラック進展前と進展後の画像データの例

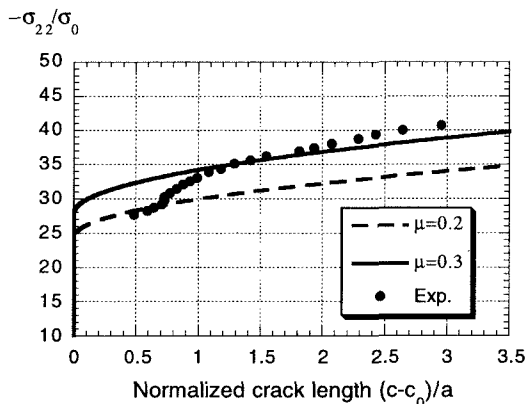


図-5 荷重とクラック長の関係