

コンクリートのメソスケール圧縮破壊シミュレーション

九州大学 学生員 劉 玉撃

九州大学 正 員 彦坂 熙

Univ. of California 正 員 John Bolander Jr. 九州大学 学生員 榎山公洋

1. 序論

コンクリートは、ランダムに配置された骨材をセメントペーストで化学的に結合した非均質な多相材料である。この種の材料では、骨材粒子レベルのメソスコピックな組成や構造を解明して最適化することにより、優れた特性を発揮させることができ、それが高性能新素材の開発にもつながるものと期待される。

本研究では、骨材粒子の粒度分布およびランダムな配置を考慮した粒子分散形複合材料のメソスケール破壊特性のシミュレーション手法¹⁾により、コンクリート供試体の圧縮破壊シミュレーションを行い、応力-ひずみ曲線および内部破壊過程のメソスケール特性を考察した。

2. ボロノイ図に基づく離散化

まず、粗骨材を含むコンクリートに対して、ランダム粒子の生成と配置を行う。3次元空間における供試体の形状と寸法を指定したのち、骨材粒子をコンピュータで一個ずつ配置する。骨材粒子を完全な球で表し、球の中心座標 (x, y, z) を一様乱数により与える。仮定した骨材の粒度分布に従って骨材量の粒径別目標値を定め、粒径の大きな骨材から始めて、その骨材量が目標値に達すると、順次粒径の小さな骨材を配置する。

生成した骨材分布の3次元モデルを任意の平面でスライスして、得られた2次元モデルの骨材は球のスライス面(円)に外接する正多角形で表し、モルタルマトリックスはボロノイ多角形に分割する(図-1 参照)。

3. 剛体-バネモデルによる解析手法

ランダムに配置された骨材粒子要素およびモルタルマトリックス要素を剛体と仮定し、要素の境界辺に分布する垂直バネとせん断バネからなるバネ系を設ける。各要素の重心点に2次元剛体変位の3自由度を配する。表面力に関する評価点としての積分点を要素境界辺上の中点にとっている。

コンクリートを骨材粒子(a)、モルタルマトリックス(m)およびそれらの界面(i)からなると考えて取り扱う。骨材およびモルタルの材料特性については、それぞれ骨材とモルタルの材料試験により決めることが可能である。骨材-モルタル界面の材料特性については、弾性定数 E_i, ν_i は隣接する骨材とマトリックスの2つの要素の重心から要素境界辺に下した垂線(h_a, h_m)を重みとする平均値

$$E_i = (E_a h_a + E_m h_m) / (h_a + h_m) \quad (1)$$

$$\nu_i = (\nu_a h_a + \nu_m h_m) / (h_a + h_m) \quad (2)$$

を用いるが、界面の圧縮強度 f_{ci} は弱い方のモルタルの f_{cm} を採用する。骨材とペーストの付着強度はペースト強度の約65%になる結果が報告されている²⁾。そこで、界面の引張強度 f_{ti} はモルタルの引張強度の65%に仮定する。

破損が逐次発生するように変位制御により载荷する。破損判定は引張および圧縮破壊を考慮し、せん断バネの剛度低減および応力解放は同一境界辺上の垂直バネと同様に行う。破損強度に達したバネの剛度を段階的に低減することにより、コンクリートの3次元非均質性を考慮する¹⁾。

4. 圧縮破壊の解析結果および考察

上述の離散化の方法による要素メッシュを図-1に示す。供試体を $10 \times 10 \times 20 \text{ cm}$ の角柱、粗骨材の最大寸法を 15 mm とする。材料の弾性定数と強度を表-1のように設定する。

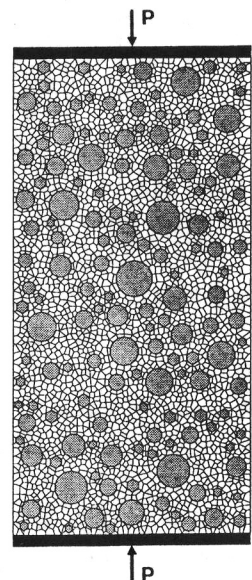


図-1 解析モデル

供試体の端面と載荷板との間のせん断バネ定数 k_s を0として、両者の間に摩擦が働かないようにした。解析結果として、応力-ひずみ関係を図-2に示し、この曲線のA~Cに対応する点の破壊の進行状態を図-3に示す。

応力-ひずみ曲線は最大応力 f_c の約30%から非線形状態に入っている。この時、界面クラックが骨材の載荷方向に近い両側面に発生し始める。荷重が増大するに従い、すべての骨材の両側面にクラックが段々と生じる。この段階でのひびわれの伝播は安定しており、変形は緩やかに増大する。しかし、応力が f_c の約80%に達すると、変形は不安定になる。この時、供試体の全体領域のモルタルの中にもクラックがばらばらに生じているが(A図)、このモルタルクラックは最大応力に至るまではほとんど進展しない。最大応力直前に骨材の上下端界面に局部圧壊が発生し(B図)、同時に横ひずみが増大する。局所的破壊の発生領域から主ひびわれが発生・伸展し(C図)、応力-ひずみ曲線の軟化域を形成する。上述の破壊現象は高速度写真による観察結果³⁾とよく合致する。

表-1 バネの材料特性

バネの構成	骨材	モルタル	界面
E (GPa)	$E_s=60.0$	$E_m=20.0$	式(1)
ν	$\nu_s=0.25$	$\nu_m=0.18$	式(2)
f_t (MPa)	$f_{ts}=6.0$	$f_{tm}=3.0$	$f_{ti}=1.95$
f_c (MPa)	$f_{cs}=90.$	$f_{cm}=30.0$	$f_{ci}=30.0$

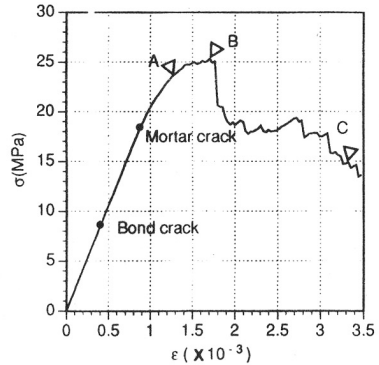


図-2 $\sigma - \varepsilon$ 曲線

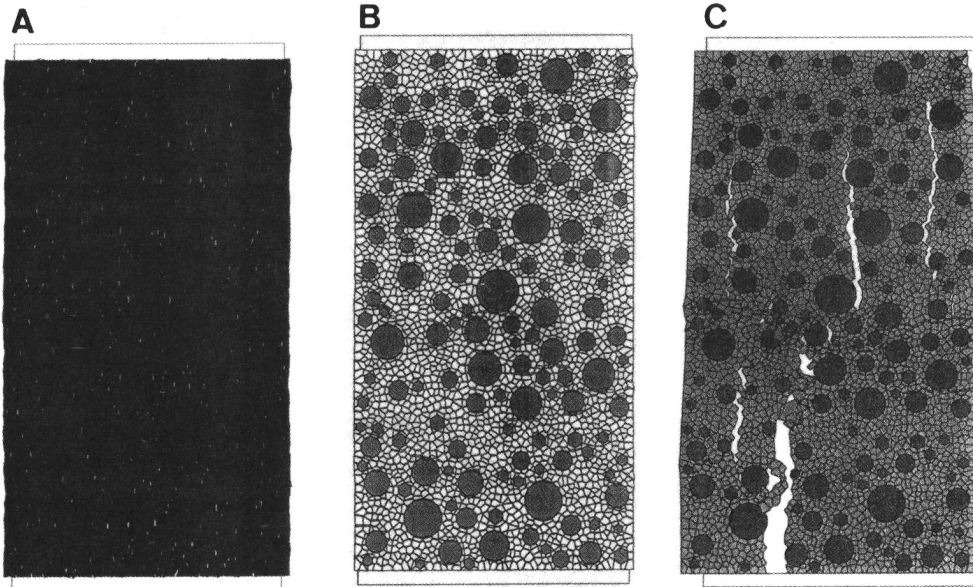


図-3 破壊進展状態

5. 結語

ボロノイ図に基づくコンクリート供試体の離散化および準微視的数値解析手法により、サイズ $10 \times 10 \times 20$ cmのコンクリート角柱供試体の圧縮破壊のシミュレーションを行った。本解析による応力-ひずみ曲線の特徴、内部破壊過程および主ひびわれの発生・成長は既往の実験結果とよく対応している。

参考文献

- 1) 劉 玉堅他：セメント系複合材料の準微視的破壊過程の数値シミュレーション，九州大学工学集報，Vol.68，No.1，1995.
- 2) 水上国男他：骨材とペーストの付着強度について，セメント技術年報，XXIX，1975.
- 3) 吉本 彰他：コンクリートにおける連続クラックの形成，セメント技術年報，XXIX，1975.