

学 位 論 文 題 名

Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar
and Concrete by RBSM

（剛体ばねモデルによるモルタル及びコンクリートのメソスケール破壊解析）

学位論文内容の要旨

コンクリートは複数の材料から構成される極めて非均質な複合材料であり、その破壊は構成材料の力学特性の違いなどに起因する局所的なひび割れに大きく影響される複雑な現象である。更にその破壊特性は荷重条件や温度・湿度等の環境条件の履歴によっても大きく変化する。

コンクリートを粗骨材とモルタルからなる複合材料として扱うメソスケールにおいてコンクリートの破壊過程を明らかにすることは、コンクリートを均質な材料として扱うマクロスケールにおけるコンクリートの挙動を明らかにすることに有用である。このスケールからの解析では、構成材料の特性を取り入れることが可能であり、ある時間における構成材料の特性が分かれば、コンクリート全体としての挙動が把握できる。つまり環境作用等によって劣化したコンクリートの性能をメソスケール解析から明らかにすることが可能となる。

メソスケールにおけるコンクリートの破壊特性に対し膨大な実験的研究がなされてきた。また近年、数値解析的な研究もなされ始めてきたが、コンクリートの破壊過程を十分に表現するに至っておらず、環境条件の影響を取り入れた数値解析的研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では、メソスケールにおけるコンクリート破壊進行過程に対して、ひび割れ進行過程を表現することに適した離散的解析手法である剛体バネモデル（RBSM）を用いて二次元及び三次元数値シミュレーションを行った。シミュレーションに用いた解析システムは、本研究において独自に開発した。

メソスケール解析に用いる RBSM は連続体を変形しない剛体の要素に分割し、この剛体要素間に垂直バネ及びせん断バネが分布すると仮定した不連続体解析手法である。メソスケールの解析においてひび割れを表現するためには、ひび割れ進行方向に人為性が加わらないために解析要素分割を細かくすること及びランダムな要素形状が必要となる。このため一要素の大きさは 2 次元解析ではおよそ 2.5mm^2 、三次元解析では 2.5mm^3 程度とした。また、ポロノイ分割法を用いることによりランダムな多角形要素形状を得た。

解析において各材料の特性は各要素間に設定された垂直及びせん断バネの性質によって表される。メソスケール解析にはマクロスケールに適用されている構成則を直接適用できない。そこでメソスケールに適用する構成則を独自に開発した。材料強度としては引張強度のみを入力値として用いており、供試体全体の圧縮破壊をメソスケールにおける引張及びせん断破壊のみによって

表現することが最大の特徴である。

二次元解析においてはまず、モルタル及びコンクリートの一軸圧縮及び引張試験を行った。いずれの場合も、載荷板の摩擦の有無の違いによるひび割れパターンの違い、破壊の局所化を含めて、破壊進行過程を合理的にシミュレーションできた。さらに圧縮強度と引張強度の関係を低強度から高強度域にかけて良く表現できた。また二軸載荷試験のシミュレーションから、解析がコンクリートの二軸応力下における破壊基準およびひび割れパターンの変化を、圧縮-引張域、引張-引張域において表現できることを示した。

以上がRBSMを用いた二次元シミュレーションの成果であるが、実際のコンクリート破壊は三次元的に複雑に配置された骨材の影響で、複雑な破壊挙動を示すため、より定量的な評価のためには三次元解析が必要である。しかし、メソスケール三次元破壊シミュレーションはひび割れ進行過程の複雑さと、膨大な計算時間が必要となる為、未だにほとんど行われていない。

モルタル及びコンクリートの圧縮及び引張試験の三次元解析により、二次元解析と同様に、載荷板の摩擦の有無の影響、応力ひずみ曲線、体積ひずみ、ポアソン比の変化、破壊の局所化などを、実験で得られるものと同様にシミュレーションできた。また、三次元解析でしか実現象を表現できない骨材周りの挙動をシミュレーションすることができた。また、モルタル及びコンクリートの圧縮強度と引張強度の関係も実験と同様に表現することができた。さらに、二軸圧縮試験では、二次元解析では表現できない面外方向に進展するひび割れによる破壊をシミュレーションできた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 上 田 多 門
副 査 教 授 佐 伯 昇
副 査 教 授 大 沼 博 志
副 査 助 教 授 後 藤 康 明

学 位 論 文 題 名

Mesoscopic Simulation of Failure of Mortar and Concrete by RBSM

(剛体ばねモデルによるモルタル及びコンクリートのメソスケール破壊解析)

コンクリートは、一般的には力学的に均質な材料として取り扱われ、強度や応力-ひずみ関係が与えられる。しかし、現実には、骨材、セメント硬化体、空隙などが混在した複合材料であり、荷重や環境作用といった種々の物理的作用、特にそれらが組み合わさった場合の損傷機構を明らかにするためには、複合材料として捉え、解析する方がよい。本論文は、コンクリートを 1mm 程度の大きさのメソスケールの要素の集合体としてモデル化することで、骨材、モルタル、および、それらの界面を表現できる数値解析を行い、複合材料としての、2 次元および 3 次元応力下のひび割れ進展性状、強度および応力-ひずみ関係を忠実に再現し、損傷機構を明らかにしたものである。

2 章では、著者自身がコーディングした 2 次元および 3 次元の剛体バネモデル (RBSM) プログラムを解説している。RBSM および要素分割のためのポロノイ分割は既存のものであるが、本研究での解析における境界条件に適合するポロノイ分割手法、3 次元の入出力結果を表現するためのポストプロセッサなど、多くの部分が著者のオリジナルである。

3 章においては、2 次元および 3 次元解析における、メソスケールの材料構成モデルを解説している。モルタル部、骨材部、それらの接合面において、弾性剛性と、引張強度およびせん断強度のみを与え、圧縮破壊はないものとし、また、それらの強度は分布をすると仮定した、著者のオリジナルのモデルとなっている。モルタルと骨材の境界部のモデルは、既往の実験結果に基づいている。通常のスケール (マクロスケール) での引張及び圧縮下の応力-ひずみ関係が得られるように、メソスケールのモデルを同定している。なお、コンクリートをその圧縮強度を与えず解析する方法は著者の独創的な点で、コンクリートの微視的な引張およびせん断すべり破壊が、マクロスケールの圧縮破壊を表現するものであることを、実験結果と定量的に整合させながら示しているのは、過去に例がない。

4 章においては、モルタルおよびコンクリート (骨材とモルタルの複合材料) の 2 次元解析結果を詳説している。ここで、コンクリート中の骨材は、形状は円形であるが、コンクリート中の容積率と粒径分布は実際のコンクリートに合わせている。具体的な成果として、1 軸応力および 2 軸応力下のひび割れパターン、応力-ひずみ関係が、実験結果を忠実に再現できることを示し

ている。特に、応力－ひずみ関係は、応力のピーク値である圧縮強度と引張強度の値自体、圧縮強度と引張強度の関係、骨材のランダムな配置の差異による強度のバラツキ、モルタルとコンクリートの強度との関係、など多くの観点で実験値を良好に再現している。また、引張破壊および圧縮破壊において生じる破壊領域の局所化、端部の拘束条件が強度やひび割れパターンに与える影響なども、再現できることが示されている。唯一実験結果を良好に再現できない例として、2軸の圧縮応力下における応力のピーク値を示し、その理由として、2次元解析ゆえに、第3方向の引張ひずみが拘束されているためであることを結論としている。損傷メカニズムとして、マクロな応力の増加とともに、メソスケールのひび割れがどのように発生・進展していくかを示している。

5章においては、モルタルおよびコンクリートの3次元解析結果を詳説している。骨材は、球形によるモデル化であるが、容積率や粒径分布は実際のコンクリートに整合させている。ここにおいても、1軸応力下および2軸応力下の引張および圧縮強度、応力－ひずみ関係、ひび割れパターンが忠実に再現されている様子が示されている。なお、2次元解析と3次元解析において、ひび割れの進展の自由度、ひび割れでの変形の自由度に差があることから、メソスケールでの材料構成モデルが異なっているが、マクロスケールでの両者の解析結果はほぼ同じである。2軸圧縮応力においては、実験結果の強度を多少過大に評価するものの、2次元解析では不可能であった現象の再現に成功している。破壊の局所化、拘束条件の影響なども、実験結果を再現している。また、応力の増加に伴うメソスケールでのひび割れの発生位置、進展を示し、損傷進展のメカニズムを解明している。

これを要するに、著者は、メソスケールの要素を導入することにより複合材料としてコンクリートを扱い、圧縮破壊を導入せずに、コンクリートの破壊現象を再現することに初めて成功するとともに、コンクリートの荷重による損傷機構を数値的に解明している。この成果は、コンクリートの材料損傷モデルの合理的な構築に大きな知見を与えるとともに、今後のコンクリート構造物の数値解析の発展に貢献するところ大なるものがある。よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。