

## 論文の内容の要旨

論文題目    **THREE-DIMENSIONAL DISCRETE ELEMENT SIMULATION OF  
FLOWABLE CONCRETE**  
(流動コンクリートの3次元個別要素シミュレーション)

氏名    ヌール・ムーナズ・アハメド

本研究は定性的と定量的の両者を考慮した粒子モデルを用いて高い流動性を持つコンクリート（以後 HPC）の数値解析的モデルの考えを述べたものである。フレッシュコンクリートは複合的なモデルでなく粒子が浮遊したとして考えることができる。浮遊状態であれば粒子と液相の定義が多く存在することになる。たとえば、液相のモルタル（水とセメントと細かな粒子）内の粗骨材、もしくは液相のペースト（水とセメントとセメント粒子程度の粒子）内の細骨材である。粒子の大きさに依存したレオロジーの調査が必要となる。

数値解析的手法は今までのものよりも新しいものが必要となる。個別要素法(以後 DEM)は土質力学の分野で粒の集合体の特性を調査するのに用いられていたものであり、土や岩石の集合体のようにコンクリート内の骨材間の相互作用を調査する事が可能であると考えられた。しかしながらコンクリートもまた様々な状態で特に高い流動性をもつコンクリートであれば流体の連続体としての性質を持つことになる。それ故に、連続体の影響を取り入れた DEM の修正版は必要不可欠であり、フレッシュコンクリートにおける修正 DEM の妥当性もまた実証する必要がある。配合の観点から容易にワーカビリティを予測するために、実験により配合から DEM パラメータを予測する必要がある。新しい数値解析的アプローチの進歩は、存在する様々な種類のコンシステンシー試験をシミュレートし、今までの方法では説明できなかったフレッシュコンクリートの流動メカニズムを説明することである。一般的に数値解析的シミュレーションの最終目的は実際のコンクリートのレベルにおいて可能な予測手法を確立することにある。もし、数値解析的シミュレーションの方法が、たとえば新材料の使い方と新しい特別な建設方法が実行された時に実際の建設現場で

十分に予測できる情報を与えられたら、大きな労働と巨額なコストを削減できる。

このモデルは粒子個々が独立的に配置されており、その粒子同士が接触した時のみ相互作用するとしている。粒子の流動モデルは流動性の仮定に基づいている。粒子は堅いものとして扱っているため、接触は非常な小さな領域で起こる。しかし、コンクリートに適用する場合には重なり合いをある程度許すことが可能である。重なり合いの大小は引力の法則によって接触力に依存し、すべての重なり合いは粒子のサイズの関係で小さくなる。結合力は粒子間の接触したところに存在する。数値解析シミュレーションで使われるすべての粒子は球形である。

実際の施工の前に自己充填コンクリートの挙動を予測するいくつかのモデルを構築することは重要なことである。本研究では、様々な場合における自己充填コンクリートの挙動をシミュレートするために、新しい方法として3次元個別要素法を使用した。本研究の目的は自己充填コンクリートの流動と変形を推測するシミュレーション手法を確立することである。流動に必要なエネルギーは内部応力により消費されることは事実である。その結果、粗骨材粒子が障害となるため、エネルギーを多く消費する粗骨材の量を減少させれば、この手の封鎖現象はなくなると考えられる。様々な状況の下におけるフレッシュコンクリートの封鎖挙動を予測するために作動力もまた発生する。まず、自己充填コンクリートの定性的なシミュレーションを完成させた。定性的なシミュレーションの完成のために、自己充填コンクリートの様々なコンシステンシーとレオロジーテストの定性的なシミュレーションを行った。ここではスランプフロー、ボックステスト、V字管テストにおいて数値解析手法によりシミュレーションを行った。いくつかのモデルを大きなスケールで行う前に、いくつかの結果をだした。つまり、適切なモデルのパラメータの選定や現実的なモデルにとって必要な非常に多い粒子の数を減少させたりする事である。この研究で現実的な骨材、モルタル、最終的にはフレッシュコンクリートの挙動を得るために必要なDEMパラメータを選出するためガイドを見いだした。

本研究においてまず、定性的に異なったパラメータの値で計算を行い、モルタルと骨材のシミュレーションを別々に行った。定性的なシミュレーションのために簡単なモデルを提案した。最終的にモルタルと骨材のシミュレーションから選ばれた値をもちいて、コンクリートとレオロジーテストのシミュレーションを成し遂げた。単一相モデルは粒からなる材料の流動シミュレーションのためには十分であるといえる。しかしながら、フレッシュコンクリートは単一相モデルでは不可能であり、多相物質としてのモデルでなければならない。DEMにおいて、相数の増加とセメントや砂のような小さな粒子サイズを考えるとシミュレーションと計算速度が非常に遅くなってしまう。今までのモデルでは同一要素内で骨材とモルタルの特性を含めた単相か二相のモデルであった。本研究においては二相モデルを採用したが、異なった方法によるものとした。ここに、骨材とモルタルは別々の要素を用いたモデルとした。モルタル要素はシミュレーション上では仮想の要素とした。フレッシュコンクリートの定性的挙動を得るために、球引き抜き試験を選定した。研究は3

つの主要な部分に分割した。数的実験より得られた最初の結果は分離した要素はフレッシュコンクリートにおいて見られる定性的挙動を再現した。それらの予備的な結果は分離した要素モデルの手法がフレッシュコンクリートの定性的挙動をシミュレートするための非常に適したツールと考えられる。

二つ目に、配合とレオロジーパラメータの関係をえるためにいくつかの実験を行った。その結果から定性的な解析を行った。この段階で開発したモデルの立証と使用したモデルの妥当性を確認した。この研究では、レオロジーを研究し、高流動性コンクリートの伝統的な試験方法との関係を研究した。一般的にレオロジーの研究は流体と固体の間に当たる性質をもつ物質で調査する。物質としてのフレッシュコンクリートはこの範囲の中のどこかにあると考えられる。

さらに様々なコンクリートのレオロジー定数を計測するために、これらのレオロジー定数のモデルについても調べ、次の2つのタイプのモデルを用いた。a) Farris 方程式の論理 b) 経験的に構築された方程式である。すべてのモデルに対して同じ入力パラメータを用いた。測定した特性から決定した骨材のパラメータを固体部の体積を  $\phi$ 、最大体積を  $\phi_m$  とした。この研究で使用するモデルは Farris モデルとした。Farris モデルは浮遊した固体相を含めた粒子が二つか多くの明確なサイズに分けられるという理論に基づいている。つまりコンクリートも一般的に粗骨材と細骨材とセメントに分けられるということから、このモデルを適用した。ビンガムモデルで材料の降伏値を予測するモデルはこれまでになかったので、本研究ではそれを可能にするようにした。

このレオロジーの研究は二つのテスト、つまり一つはモルタル、もう一つはコンクリートで行った。モルタルは以前行ったコンクリートの特性と同じモルタルを用いた。別々に練る代わりにウエットスクリーニングを用いてモルタルを得た。ウエットスクリーニングの過程では、時間は混ぜ合わせからの時間を必要とし、パイプレーションは粗骨材からモルタルを分離するために必要とした。それら二つは混ぜ合わせの時間の間にモルタルの特性に影響を与える。モルタルを準備する主な目的は、コンクリートの中と同じモルタルを保持することである。これはコンクリートがビンガム流体と仮定して、配合からレオロジーの一般的な式を作成することが目的である。HFC はビンガムモデルでないことが分かった。さらにフレッシュコンクリートやモルタルのビンガム係数は最近の研究で貢献に値する方法を用いた配合の要因から決定することができた。トライアンドエラーで得られたデータに基づくと、満足できる正確さでレオロジー値から DEM パラメータを予測することができた。

定性的なシミュレーションの後、流動性コンクリートの挙動をシミュレートするための DEM の妥当性を確かめるレオロジーと定性的な研究はフレッシュコンクリート、モルタル、骨材の球引き抜き試験によって証明された。いくつかのコンクリートの配合は実用されている高流動性コンクリートを可能な限りの範囲で実現した。骨材中の球引き抜き試験と DEM シミュレーションの計算結果との応力-変位曲線の比較を行った。二つの結果は良好

であり、このモデルの妥当性を確認した。モルタルおよびコンクリートにおける実験と修正DEMモデルの結果は同一性が満足できる率であったことからモデルの妥当性を証明できた。実験と数値解析シミュレーションによる応力—変位曲線の結果が良好であったことから予測手法は妥当であるといえた。

DEMの方法の検証とDEMのパラメータの研究によって、様々な種類の数値解析シミュレーションでさまざまなフレッシュコンクリートの特性を評価する試験を異なった粒子のテストによっておこなった。スランプフロー、T-ビーム、ボックス試験に関してこのモデルを用いてシミュレートした。同軸の円筒粘度計の円筒内の粘性勾配についてもシミュレートした。流動性コンクリートのシミュレートによりDEMの妥当性についても評価できた。最後に、L-ボックスは流動している時に観測される閉塞と分離のシミュレーションもシミュレートできた。