

論文の内容の要旨

論文題目 3-D SIMULATION USING DISTINCT ELEMENT METHOD FOR PREDICTION OF SHOTCRETE SHOOTABILITY

(3次元個別要素法による吹付けコンクリートの施工性に関するシミュレーション)

氏名 ファン ウォック ハウ ユイ

吹付けコンクリートはモルタルやコンクリートを空気圧で高速度で表面に吹付ける工法で、数10年にわたり施工実績がある。吹付けコンクリートは、様々な構造物、例えば、トンネル、スロープ、プール等の用いられている。吹付けコンクリートは特殊なコンクリートを使用しているのではなく、その施工方法に特徴がある。

吹付けコンクリートには、乾式と湿式2つの方法があるが、近年では90%が湿式で行われており、本研究でも湿式方法を扱っている。

吹付けコンクリートの要求性能は、通常のコンクリートのように硬化後の強度だけではなく、その施工性も重要であり、その経済性、施工期間が長年問題視されている。吹付けコンクリートの施工性はリバウンド率と吹付け厚が重要である。

最終目標はリバウンド率を最小にし、吹付け厚を最大になるような最適な吹付け条件と配合の組合せをみつけることである。色々な吹付け条件、配合で吹付け実験を行うことで、最適な組合せを導くことはできるが、巨額な費用と時間、手間がかかる。

コンピューターの発達により、吹付けシミュレーションで、吹付け実験を模擬的に検証することでコストを削減でき、吹付けコンクリートの施工計画の支援が可能となった。

実際に、様々な手法でフレッシュコンクリートの数値解析が研究者達によって行われてきた。その手法は、Viscoplastic Finite Element Method (VFEM), Viscoplastic Suspension Element Method (VSEM), Viscoplastic Divided Space Element Method (VDEM) 等である。

しかしながら、これらの手法は吹付け時の粒子性状を表現できず、吹付けコンクリートのシミュレーションに適するものではなかった。吹付けコンクリートは粒子同士の付着と塊の落下等が特徴であり、Distinct Element Method (DEM) が最も適した手法である。

DEMによるフレッシュコンクリートのシミュレーションが何人かの研究者達に行われており、各々のモデルが提案されている。

1つ目は、Single Phase Modelと呼ばれるモデルで、フレッシュコンクリートの砂利の周囲をモルタルが覆っている状態を仮定し、付着性状に関してはモルタルの性状が用いられている。

2つ目は、Two-Phase Model と呼ばれるモデルである。このモデルは、砂利の周囲が強度の小さいモルタル層で覆われており、粒子間の付着性状は、モルタル層の特性で支配されている。このモデルは、以前の研究者達(牧剛史氏, U.Puri 氏)が吹付けコンクリートのシミュレーションに用いたが、砂利とモルタルが一体化しているため、砂利とモルタルのリバウンド率が同じ値になる。実際には、砂利の方が付着率が低いため、必ずしも実現象を模擬しているものではなかった。

本研究では、Two-Phase Model を用いた M. A. Noor 氏によるモルタルと砂利を別々に考慮した自己充填コンクリートのシミュレーション方法を参考とした。注目すべき点は、砂利とモルタル間の付着要素を導入し、発展させたことである。この点は、以前の研究では考慮されていなかった。

DEM の短所の 1 つとして、計算量が非常に多くなることが挙げられる。本研究では、多くの改良を加えることで計算手法を改善し、計算時間の短縮が可能となった。これにより、コンクリート量が多い場合でも、吹付けコンクリートのリバウンド率を精度よく評価できるようになった。

本研究では配合からニューラルネットワークを用いてモルタルのレオロジー性状を予測している。ニューラルネットワークは、レオロジー性状から DEM の各種パラメータを決定するプロセスにおいても使用している。

セメントの水和による材料性状の時系列変化、吹付けによる水分のロス、吹付け圧力によって粒子の付着時に空気が押出される現象が、レオロジー性状を調整することにより考慮されている。

始めに、急結剤の影響を実験結果から、定量的に評価し、DEM のパラメータを決定した。

このモデルは、2 つの相(モルタル, 砂利)が別々に考慮されており、特に吹付け初期の砂利のリバウンド率が高い現象を再現している。これにより、実際に付着したコンクリート粒子の分布が容易に推定可能となった。

シミュレーション結果から、コンクリートのスランプは吹付け厚とは直接関係はなく、モルタルの引張強度に依存することが確認された。吹付けコンクリートの施工性を評価するには、モルタルのレオロジー性状の基礎研究が重要である。

シミュレーションを行うことで、吹付けコンクリートは、壁に水平よりも若干下方に吹いた方がリバウンド率が低いことが確認された。

最終的には、吹付け角度、吹付け速度、コンクリートのレオロジー性状等の吹付けコンクリート施工に有用な情報を提供することができた。

更に吹付けコンクリートの速度、急結剤の影響、鋼繊維の混入等の影響を定量的に評価することが今後必要であるが、DEM はフレッシュコンクリートと吹付けコンクリートのシミュレーションのツールとしての活用が大いに期待できる。