

論文 粗骨材の粒度が吹付けコンクリートの吹付け性状に及ぼす影響

塚原絵万^{*1}・魚本健人^{*2}

要旨：吹付けコンクリート施工時におけるリバウンド発生要因や付着性状の理論的メカニズムについては未だ明らかにはされておらず、その性状把握は経験に頼るところが多いのが現状である。近年、個別要素法を用いた吹付けメカニズムの定量評価が種々検討されているが、本研究においては、2次元個別要素法を用い、コンクリート吹付け時に材料特性が付着およびリバウンド率に与える影響およびその要因について検討を行った。その結果、天端方向への吹付け時の付着、リバウンド性状、またその影響因子を把握することができた。

キーワード：吹付けコンクリート、2次元個別要素法、リバウンド率、粗粒率、空隙率

1. はじめに

吹付けコンクリートは近年、トンネルの支保部材として非常に重要な役割を担っている。地山と一体化した薄肉構造体の形成、施工が容易であることなど、他の支保部材には無い特徴を有している。しかし、施工時のリバウンドの発生、吹付け前後での品質変化により施工後の品質予測が困難であること、また粉塵の発生など、欠点があることも事実である。リバウンド発生量等は、現在、試験施工により把握しているが、その性状には様々な影響因子があるとされており、モルタルの粘性、骨材粒度、水セメント比、急結剤添加率、壁面までの距離や壁面角度、吹付け圧力、ノズルの角度等が挙げられている¹⁾。吹付けコンクリートの性状把握や品質管理は、現時点では経験に頼る部分が多く、その耐久性を考えるうえでも、物理的法則に基づいたメカニズムの解明が必要とされている。

個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) は非連続体をシミュレーションするための一手法であり、その性格上、粒状材料集合体の動的挙動を扱うのに適しているとさ

れている。そのため、セメントペーストと骨材から成る複合材料であるコンクリートに適用することは妥当であると考えられ²⁾、近年では吹付けコンクリートの吹付けメカニズムの定量評価においても数々の検討がなされている³⁾⁴⁾⁵⁾。

本研究においては、2次元個別要素法を用いて、天端方向へのコンクリート吹付け時に材料特性値が付着およびリバウンド性状に与える影響、またその要因について解析的検討を行った。また、吹付けコンクリートが壁面に付着するメカニズムについて考察を試みた。

2. 2次元個別要素法の解析モデル

本研究では、コンクリートを粗骨材とモルタルの2相材料と見なして解析モデルを構成している。粗骨材粒子は粒径要素と仮定し、骨材間に存在するモルタル層は、各要素の周囲に一定の厚さを持った間隙層を想定することで表した。また、単純化のために、細骨材とセメントペースト間の相互作用は考慮しないこととした。

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 東京大学教授 東京大学生産技術研究所 工博 (正会員)

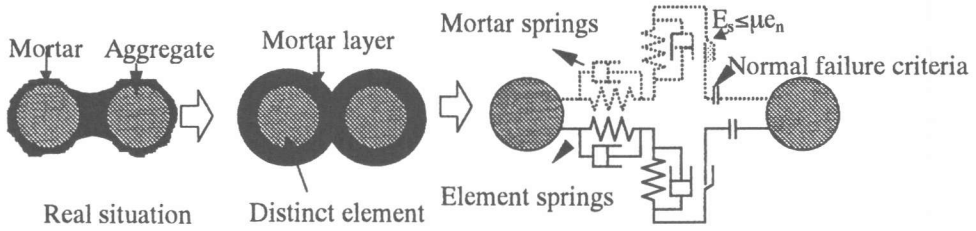


Fig.1 DEM modeling of shooting material (concrete)

解析要素は、粗粒率により粒径・数が決定されるよう設定しており、本研究では3ケースの粗粒率について解析した。要素は、吹付け開始以前はホッパー部分にて全てパッキングされた状態であるとする。

個別要素法は、各要素ごとに独立した運動方程式をたて、これを差分近似して時間領域で漸進的に解くことによって、個々の要素の動的挙動を追跡していくものである。以前の時刻の要素の位置より各接触点に作用する相互作用力を求め、加速度、角加速度を数値積分することによって、要素の変位を求める。

要素に作用する力は個々の要素との接触点でのみ生じるものとし、接触点を通じて粒子間の力が伝達されるものとする。また、これは作用反作用の法則に従うものとする。解析モデルを Fig.1 に示す。粗骨材粒子の接触点にバネ、粘性ダッシュポット、およびスライダーを想定することによって、その接触力を評価する。ある要素の運動方程式は Eq.(1) のように表される。

$$\begin{aligned}
 F &= \sum f_e + \sum f_m + f_g = m\ddot{u} \\
 M &= \sum M_e + \sum M_m = I\ddot{\phi} \quad \dots(1)
 \end{aligned}$$

ここに、

- F : 作用合力
- f_e : 要素に作用する力
- f_m : モルタル層に作用する力
- f_g : 重力
- m : 要素の質量
- M_e : 要素に作用するモーメント
- M_m : モルタル層に作用するモーメント
- I : 慣性モーメント
- u : 要素の変位ベクトル
- ϕ : 要素の回転変位

モルタル層のバネの破壊基準を Fig.2 に示す。バネの破壊基準を考える際には、法線方向に働く粘着力と接線方向に働く付着力、および抵抗力が考えられるが、既往の解析的アプローチ⁴⁾により、リバウンド量は接線方向に働く力よりも、法線方向に働く力に影響を受けることが明らかにされている。また、付着性状についても同様とされているため、本研究においては接線方向に働く粘着力は考慮しないものとする。

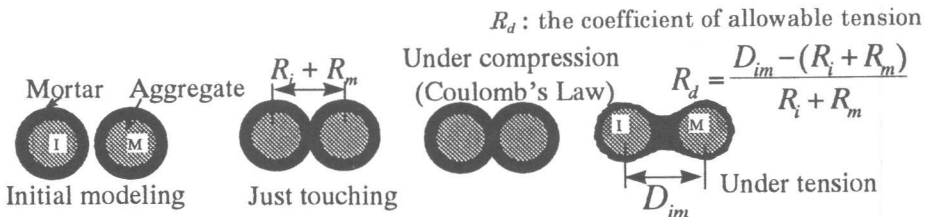


Fig.2 Criteria for failure of mortar spring in tension

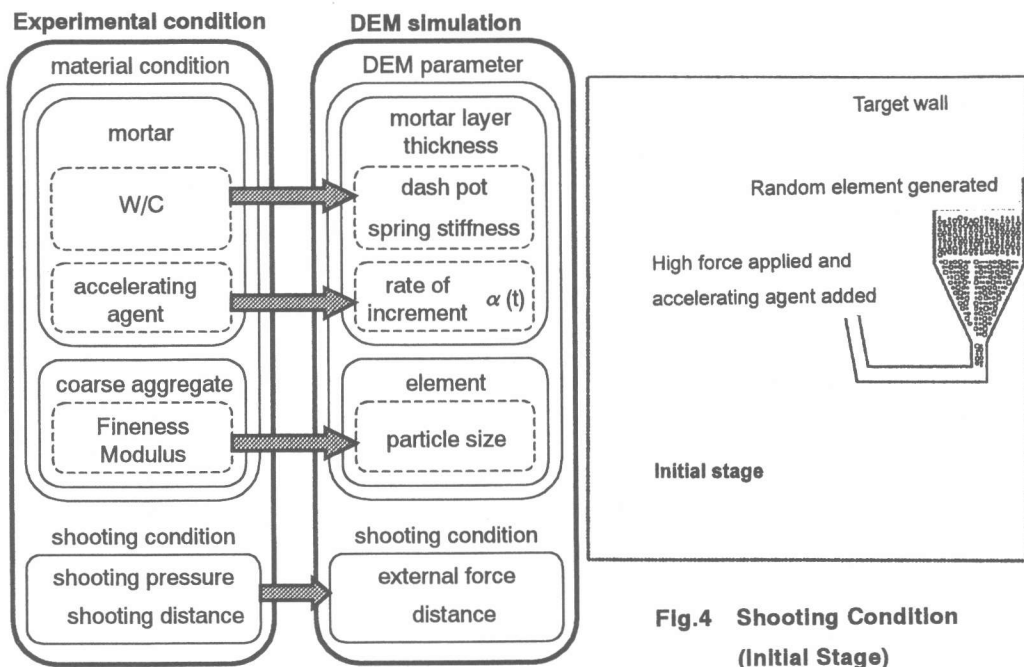


Fig.3 Relationship between experimental condition and DEM simulation

バネの引張許容百分率(R_d)は、要素間の力の伝達を行うパラメータとして考慮している。これは、相互の要素間のモルタル層のバネが破壊に至るまで、つまり接触した要素が完全に離れるまでの要素間の距離を表している。本研究においては、モルタル層の変形の範囲は要素の半径に支配されると仮定する。要素の集合体が対象とする壁に当たるときは、先行した集合体から順に破壊基準が訪れるとものとした。

また、吹付けコンクリートの施工においては早期強度の発現のために急結材が使用されているが、本研究においては、急結材の効果を時間依存型の増加率 $\alpha(t)$ を考慮することによって表現した。実際には考えられにくいですが、単純化のために、モルタル層の付着力および抵抗力が時間と共に一様に増加すると仮定し、解析を行った。間隙層パラメータの時間依存増加率は Eq.(2) のように与えられる。

$$\alpha(t) = Q_a - (Q_a - 1) \cdot \exp[-Q_b \cdot (t)^2] \quad \dots(2)$$

ここに、

$\alpha(t)$: 間隙層パラメータの時間依存率

t : パラメータ増加開始からの時間

Q_a, Q_b : 増加速度係数

実際の吹付けにおける材料条件や施工条件と、解析に用いたパラメータおよび解析条件との間には、Fig.3 に示すような関係があると想定し、解析を行った。

3. シミュレーションケース

本研究では粗粒率を設定することによって、解析要素の径・数を決定している。シミュレーションケースを Table 1 に示す。尚、その他のモルタル層の特性値、吹付け壁面、吹付け状態等の他の条件については、何れのケースにおいても一定として解析を行った。

本研究における解析条件の初期状態の一例を Fig.4 に示す。シミュレーションは吹付け開始から 5 秒間の設定で行っており、吹付け圧は 0.44MPa としている。

Table 1 Coarse Aggregate Content

Analyzed Case	Case-1	Case-2	Case-3
FM	6.55	7.70	8.40

4. 解析結果および考察

各ケースにおける最終結果を Fig.5~7 に示す。これより、要素の付着性状は要素の径、つまりは粗粒率に影響を受けることが明らかに分かる。粗粒率が小さい Case-1 では、他と比較して、要素の集合が広範囲にまた一定の厚さを持って付着しており、品質もよい吹付け状態であると考えられる。その他 Case-2, Case-3 については、要素はノズルの延長上に偏って付着しており、また要素間に比較的大きな空隙が存在する事も確認することができる。

ここで、上部壁面に付着せず底面に落下した要素、および他の壁面に付着している要素をリバウンドとし、総要素重量に対するリバウンド重量の割合をリバウンド率と定義する。リバウンド量はリバウンドした要素の体積を求め、コンクリートの密度を $2.6 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ と設定して求めた。

また、空隙量は付着した要素から代表的な部分 ($l/d=1, 100\text{mm} \times 100\text{mm}$) を抜き出した後、その領域内に存在する要素の体積を測定し、空隙以外の領域を求め、全領域(抜き出した領域、 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$)よりその領域を差し引いた分の全領域に対する割合を空隙率と設定した。尚、領域内に存在する要素はコア領域内に完全に含まれているものだけではなく、コア領域端部に存在する扇形状のもの

も含んでおり、モルタル層硬化後の要素の形状変化も考慮している。

本解析において得られたリバウンド率、空隙率およびリバウンドした要素の粗粒率を Table 2 に、また粗粒率とリバウンド率および空隙率との関係を Fig.8 および Fig.9 に示す。

Fig.8 より、リバウンド率は粗粒率が小さいケースほど、小さくなる事が確認できる。リバウンドした要素の粗粒率、またシミュレーション最終結果を見ると、特に Case-3 においては大きい径を持つ要素ほど、付着が困難であることが分かる。シミュレーションの経時変化を見ると、初期段階においては要素のリバウンド量は多いが、次第に小さい径を持つ要素から付着していった。これは、間隙層の付着によるクッションの作用が働き、次第に付着しやすい状態が作られていくためと考えられる。また、次段階では要素径の小さいものほど付着しやすいものと考えられる。これより、他の解析条件が一定の時、付着性状は要素径、つまりは粗粒率に影響を受けるといえる。これは、横方向壁面への吹付けシミュレーションと同様の傾向であった⁴⁾。

粗粒率はリバウンド率だけでなく、空隙率にも大きく影響することは Fig.9 より明らかである。空隙の存在は、コンクリート密度を減少させ、強度だけでなく、結果としてその耐久性にも影響を及ぼすこととなる。Case-2 および Case-3 では、シミュレーション最終結果を見ると、付着した要素の集合体が Case-1 と比較して、密実状態でないことは明らかであり、両者とも吹付け初期段階、つ

Table 2 Rebounds and Void Ratios versus FM

Analyzed Case	Case-1	Case-2	Case-3
Initial FM	6.55	7.70	8.40
Rebound / wt (%)	28.45	49.60	71.50
FM of Rebound	6.62	7.82	8.61
Void Ratio(%)	25.69	35.07	39.19

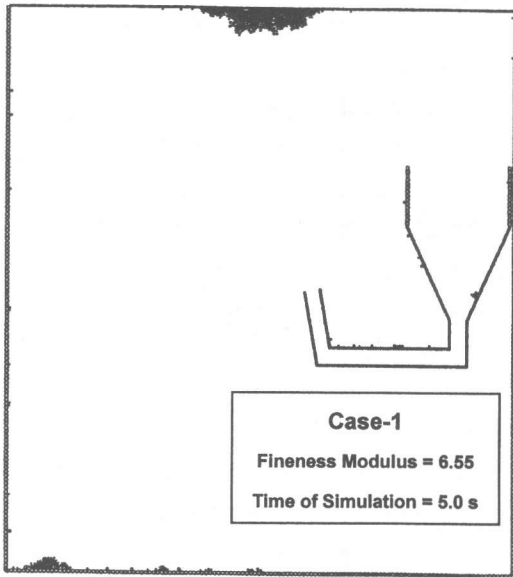


Fig.5 Shooting Simulation (Case-1)

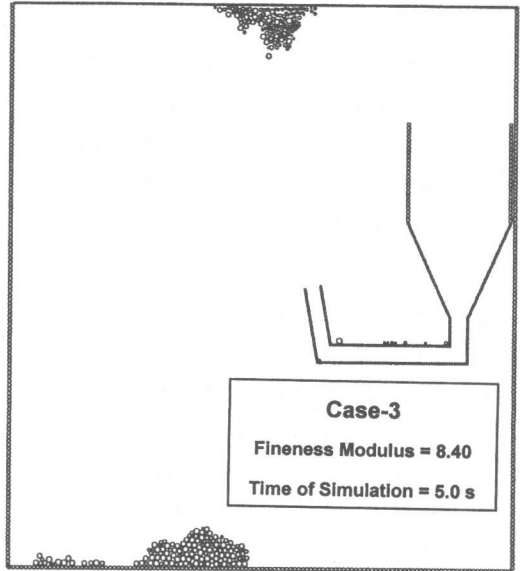


Fig.7 Shooting Simulation (Case-3)

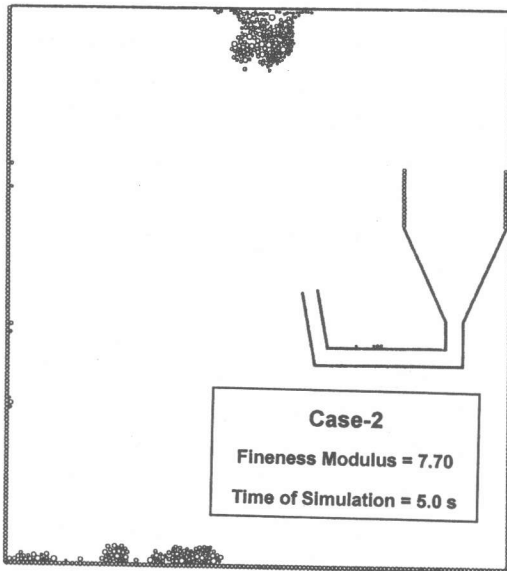


Fig.6 Shooting Simulation (Case-2)

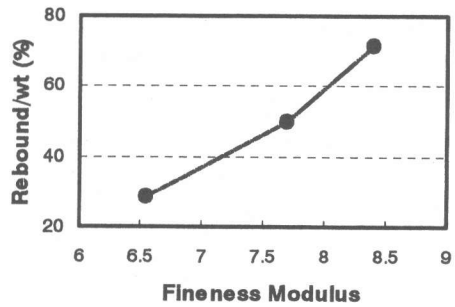


Fig.8 Rebound/wt versus FM

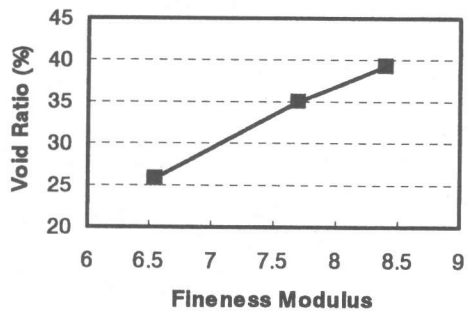


Fig.9 Void Ratio versus FM

まり壁面との接点においての要素は特に密ではないことが分かる。また、両者ともに集合体の状態は不均一ながら、Case-1 よりも厚みのある不安定な構造をとっている。実際のコンクリート吹付けにおいてこの様な状態をとると、結果としてはぶら下がった、構造上不安定な状態になる、あるいは剥落する恐れがあり、その要因については、主に以下の項目が考えられる。

- a) 水セメント比が高い
- b) 吹付け圧力が低い
- c) 吹付け対象とする壁面の湿潤状態
- d) 急結材の効果が小さい
- e) 粗骨材寸法が大きい（粗粒率が大きい）
- f) 同じ箇所に集中的に吹付けを行う

Case-2 および Case-3 の要因としては、本解析には間隙層のパラメータおよび外力等の解析条件は一定としているので、e), f) が考えられる。e) については言うまでもないが、f) はシミュレーションの経時変化および最終結果の付着要素集合体の幅、またリバウンドした要素の集合体とノズルとの位置関係より、粗粒率の小さいものほど、要素はノズルの延長上だけではなく分散して飛来することが分かる。よって、要素の付着およびリバウンドには粗粒率が大きな影響を及ぼしているということが分かる。

また、リバウンドした要素の粗粒率は、何れのケースにおいても吹付け以前の粗粒率より大きくなっており、これは実際に施工を行った場合と似通った傾向を示していると思われる。

5. まとめ

本研究においては、2次元個別要素法を用いて、天端方向へのコンクリート吹付け時の付着・バウンド発生とその影響因子について解析的に検討を行った。得られた結果を以下に述べる。

- (1)粗粒率が小さいものほどリバウンド率

および空隙率は低減する。

- (2)他の条件が一定の時、吹付けコンクリートの付着性状は粗粒率に多大な影響をうける。
- (3)本研究の範囲内で、解析により吹付けコンクリートの性状が把握できる可能性が示された。

今後は間隙層パラメータや解析条件を変化させるなど多様な条件で解析を行い、実施工とシミュレーションの整合について、さらに検討を行いたい。

謝辞

本研究費の一部は日本鉄道建設公団からの受託研究費であることを付記する。

また、本研究を行うにあたりご協力を頂いた U.C. PURI 氏に感謝の意を表す。

参考文献

- 1)日本トンネル技術協会：トンネルの吹付けコンクリート、1996.2
- 2)鍋田克己ほか：個別要素法を用いたフレッシュコンクリートの流動シミュレーション、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.1, pp.479-484, 1994
- 3)牧剛史・魚本健人：2次元個別要素法を用いた吹付けコンクリートの吹付けメカニズムに関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.19, No.1, pp.1441-1446, 1997
- 4)PURI, U.C. ・ Uomoto, T : Numerical Simulation of Shotcrete Rebound and Its Inspection By 2D-DEM Considering Real Distinct Element Particle Grading, EASEC-6, pp.1911-1916, Jan. 1998
- 5)PURI, U.C. ・ Uomoto, T : Numerical Simulation of Shotcrete - A Revolution in shotcrete research-, Material and Structural Journal, 投稿中, 1998