

# 論文 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

牧 剛史\*1・魚本 健人\*2

要旨：吹付けコンクリート施工時のリバウンドの発生要因や壁面に付着する理論的メカニズムについては未だ解明されておらず、経験則に基づく定性的評価のみであるのが現状である。本研究では、2次元個別要素法を用いて、吹付け時のリバウンド率の影響要因について解析的検討を行った。その結果、各パラメータの変化が付着・リバウンド性状に与える影響について把握することができ、吹付けメカニズムの定量評価への個別要素法の適用可能性を示すことができた。

キーワード：間隙層、付着力、粘着力、吹付け圧力、リバウンド率、空隙構造

## 1. はじめに

吹付けコンクリート工法[1][2]は近年、トンネルのライニング材として重要な位置を占めている。急結材の進歩や高強度化に伴い、従来のように普通コンクリートを用いずにシングルライニングで済ませるケースが増大している。しかし、吹付けコンクリート施工時にはリバウンドが発生し、吹付け前後で品質が変化するため、施工後の品質を予測することは困難であり、現時点ではリバウンドの発生量等を試験施工によって把握している。リバウンド性状についてはこれまで様々な測定結果が報告されており、その影響因子として材料の粘性や骨材粒度、水セメント比、急結材添加率、壁面までの距離や壁面角度、吹付け圧力等が挙げられている[1]。これらのことは経験的にも知られていることであるが、物理法則に基づいた理論的な研究は未だに行われておらず、吹付け時のメカニズムについては未解明であるのが現状である。メカニズムが解明されることによって、将来的には使用材料と施工条件により吹付け後の品質が予測可能となり、より高品質な吹付けコンクリートの施工が可能となると考えられる。

一方、従来は土砂によって形成される地盤等の粒状体構造の動的破壊解析[3]やコンクリート構造の動的破壊解析[4]に適用されてきた個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) は、最近ではフレッシュコンクリートの流動解析[5][6]にも適用され始めている。コンクリートは本来、セメントペーストと骨材から成る複合材料であり、個別要素法のような非連続体解析手法を適用することは妥当であると考えられる。

本研究では、2次元個別要素法を用いて、材料特性値や吐出圧力等の外部条件が付着・リバウンド性状に与える影響について解析的な検討を行い、吹付け材料が壁面に付着するメカニズムおよびリバウンド率の差異に影響する要因について考察を試みた。

## 2. リバウンド性状と解析的アプローチ

### 2.1 リバウンド性状

吹付けコンクリートのリバウンド発生量に影響を及ぼす多くの要因の中から、代表的な因子に

\*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)

表-1 リバウンド率の影響因子

影響因子	変化	リバウンド率の変化
単位セメント量	多 → 少	増加
細骨材粒度	細 → 粗	
細骨材率	大 → 小	
地面とノズルの角度	0° → 90°	
壁面までの距離	近 → 遠	

ついでその傾向を表-1に示す。また、筆者らは鉛直壁面にモルタルを吹付ける簡易な吹付け実験を行い、リバウンド率およびリバウンドした材料に含まれる細骨材の粒径別含有率を測定した。W/C ごとのリバウンド率を図-1(a)に、細骨材の粒径別含有率を図-1(b)に示す。この図より、セメント量の増加に伴い、ペースト部分が比較的固く変形性の低い配合ではリバウンド率が高くなっている。また、そのリバウンドに含まれる細骨材は粒径の大きいものが相対的に多く、リバウンド率が低くなるほどその傾向が強くなっている。このことは実際に壁面に付着した細骨材は細かいものの比率が高くなっていることを意味している。

## 2. 2 解析的アプローチのコンセプト

前節で述べた傾向を考慮して、本研究ではこれらの項目の変化を想定したパラメトリックスタディを行っている。本研究は吹付けコンクリートの理論的研究の第1段階として位置づけられるものであり、その目標を「『材料中のある粒子は付着して壁面に留まり、また他のある粒子は付着せずに跳ね返り、やがて壁面にコンクリートが構成されていく』という不確定要素の強い現象を、個別要素法を用いて観察する」ことに置いている。そのため、解析上の細かい条件については厳密に実際の条件と一致させているわけではなく、計算上適当な数値を用いて評価を行うものである。

## 3. 2次元個別要素法による解析的検討

### 3. 1 個別要素法の原理およびモデル

個別要素法の基本原理は、個々の要素毎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前進的に解くことによって各要素の動的挙動を追跡するというものである。要素に作用する力は要素の接触点を通じて伝達され、作用反作用の法則に従うと仮定する。この接触力の評価方法によって、様々な現象を解析対象とすることが出来る。ある要素*i*の運動方程式は式(1)のように表現される。

$$\begin{aligned}
 m_i \cdot \ddot{u} + C_i \cdot \dot{u} + F_i &= 0 \\
 I_i \cdot \ddot{\phi} + D_i \cdot \dot{\phi} + M_i &= 0
 \end{aligned}
 \quad \dots (1)$$

ここに、

$F_i$  : 作用合力、 $M_i$  : 作用合モーメント、  
 $u$  : 要素の変位ベクトル、 $\phi$  : 要素の回転変位、  
 $C_i, D_i$  : 減衰定数、

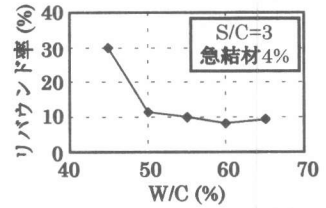


図-1(a) リバウンド率

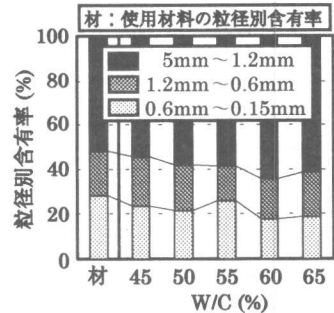


図-1(b) リバウンド中に含まれる細骨材の粒径別含有率

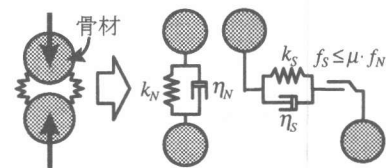


図-2 骨材同士の接触モデル

組み入れた解析モデルについて、本研究ではコンクリートを骨材とペーストの二相材料と見なしてモデルを構成している。骨材粒子は球形要素と仮定し、図-2 のように接触点にバネ、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骨材同士の接触力を評価する。骨材間に存在するペースト層は、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現し、その効果は図-3 に示すように法線方向は付着力と抵抗力、接線方向は粘着力によって評価している。これらの力はペースト層の重なり部分の断面積  $A_{CON}$  に比例すると仮定し、その比例係数を付着係数  $Q_{STK}$ 、抵抗係数  $Q_{RES}$ 、粘着係数  $Q_{COH}$  と定義している。

また、吹付けコンクリートの施工においては、早期強度を発現させるために急結材が使用されるが、急結材の効果は図-4 および式(2)に示すような時間依存型の増加率  $\alpha(t)$  を各係数に乘じることによって表現している。本来、間隙層の各パラメータはその全てが時間とともに一樣に増加するとは考えにくいが、今回は簡単のため、全てが一樣に増加するという仮定の元に解析を行った。

$$\alpha(t) = Q_a - (Q_a - 1) \cdot \exp\left[-Q_b \cdot (t - t_0)^2\right] \quad \dots(2)$$

ここに、 $\alpha(t)$ ：間隙層パラメータの時間依存増加率  
 $t_0$ ：パラメータの増加開始時間  
 $Q_a, Q_b$ ：増加速度係数

W/C 等の材料条件や吹付け圧力などの施工条件と、間隙層の各パラメータや解析条件との間には、図-5 に示すような関係があると想定している。これらのパラメータを様々に変化させることによって、各要因が解析結果に与える影響について考察を行った。

### 3. 2 解析条件

解析モデルを図-6 に示す。解析Aは単一粒径の要素群を用いた解析で、主にパラメータ解析を意図して行った。また、解析Bは複数の粒径を持つ要素群を用いた解析で、分布粒径が与える影響について考察する事を意図して行ったものである。なお、本研究は個別要素法を適用する初めての試みであり、計算時間を短縮して多くのケースを解析する意図から、大きめの粒径を用いて解析している。

解析A、Bを通じて、図-6 中の網掛け部分において、

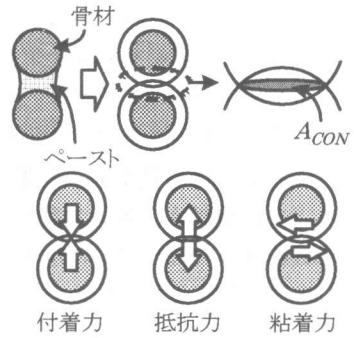


図-3 ペースト層のモデル

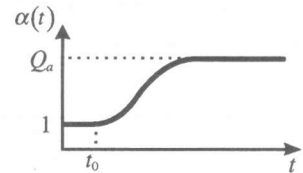


図-4 ペースト層パラメータの増加率関数概念図

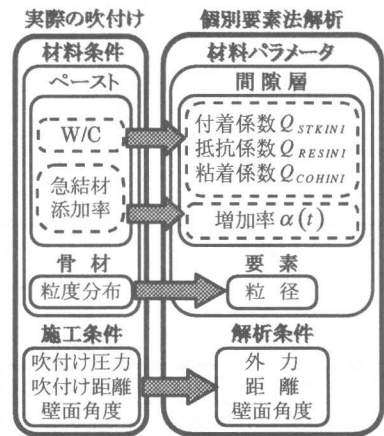


図-5 実際の吹付け条件と解析上のパラメータとの関係

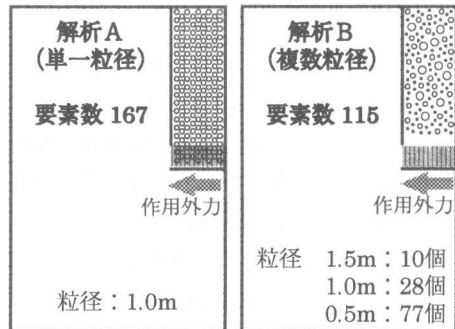


図-6 解析モデル

空気圧を想定した外力（応力）を左向きに作用させている。また、実際の吹付け施工におけるノズル直前での急結材添加を想定して、図の右上の領域から吐出された瞬間より、間隙層の各パラメータの増加を開始させた。外枠左側内縁の鉛直面を吹付け面と想定し、外力作用部から粒子を吐出させて壁面へ衝突させる解析を行った。

### 3.3 解析結果および考察

#### (1) 解析A [単一粒径]

解析結果の一例を図-7に示す。作用外力を受けて壁面に向かって吐出された要素群が、鉛直壁面に衝突・付着してコンクリートが構成されていく様子が観察できる。ここで用いた各パラメータを表-2に示す。パラメータについては文献[4]および[7]を参考にして決定した。以下、左側面に付着せず、底面に落下した要素および上面や右面に付着している要素をリバウンドとし、リバウンド重量の全要素重量に対する割合をリバウンド率と定義する。間隙層の各パラメータや作用外力を様々に変化させて解析を行い、リバウンド率に及ぼす影響について考察した。

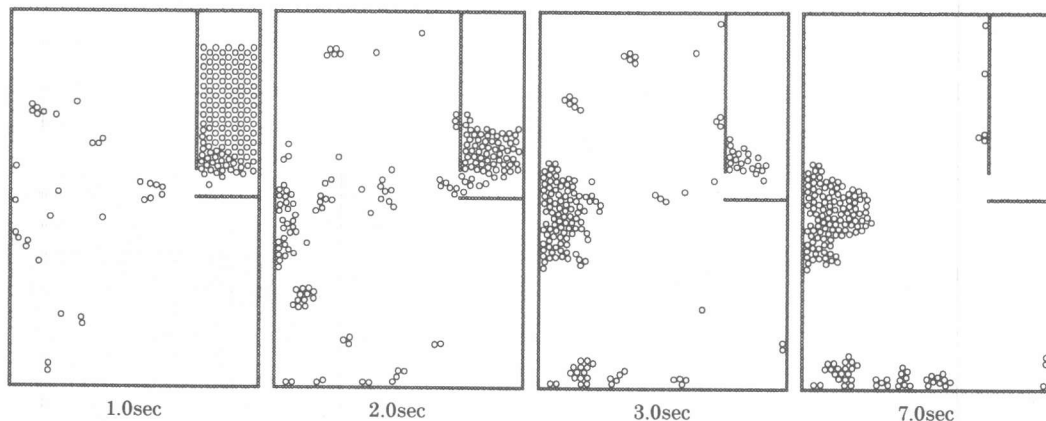


図-7 解析結果の一例（解析A）

表-2 解析に用いたパラメータ（解析A）

初期付着係数	Qstk	2.0E+06	N/m <sup>2</sup>	増加速度係数	Qa	10.0	
初期抵抗係数	Qres	7.0E+03	N/m <sup>2</sup>		Qb	1.0	
初期粘着係数	Qcoh	5.0E+04	N/m <sup>2</sup>	初期接線方向バネ定数	Qcks	5.0E+06	N/m
作用外力	SF	1.4E+06	N/m <sup>2</sup>	初期接線方向減衰係数	Qcys	3.0E+05	N/m

まず、図-8(a)より作用外力が一定であれば初期付着係数が大きいほどリバウンド率は低下し、また、作用外力が大きくなるほどリバウンド率は増加する傾向が見られる。過度の外力が作用すると初期付着係数が大きくてもリバウンド率は低下せず、その効果は低減される。

次に図-8(b)より、初期粘着係数が大きいほどリバウンド率は低下することが分かる。また、初期付着係数が小さい場合や、作用外力が大き

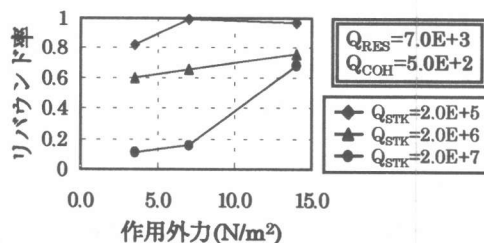


図-8(a) リバウンド率の変化(1)

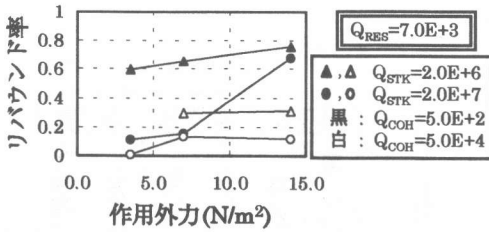


図-8 (b) リバウンド率の変化(2)

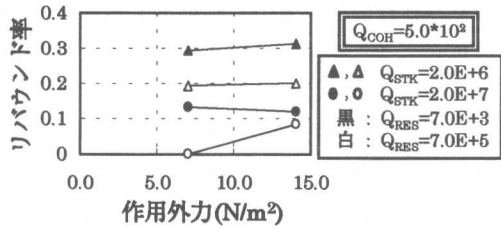


図-8 (c) リバウンド率の変化(3)

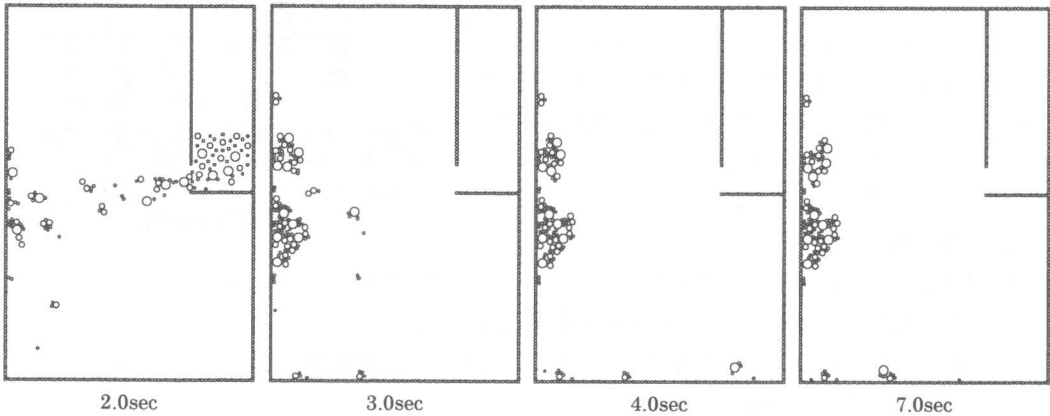


図-9 解析結果の一例 (解析B)

い場合ほど、粘着力の効果が顕著に見られる。

図-8(c)より、初期抵抗係数が大きいほどリバウンド率は低下する。本研究で用いたモデルにおいては、間隙層の抵抗が小さい場合、飛来要素の運動エネルギーを間隙層で減衰しきれず、要素同士の衝突が発生するが、図-8(c)の結果は、リバウンドの発生が骨材同士の衝突に起因することを示唆している。しかし、抵抗力とペーストの固さが相関すると考えた場合、初期抵抗係数の上昇は実際にはW/Cを低下(セメント量を増加)させたこととなり、その点では2.1で述べた傾向と一致しない。これについては、さらに多種類の数値を代入して解析を行うことや、他のパラメータとの相性を考慮する等、さらなる検討を行う必要があると思われる。

## (2) 解析B [複数粒径]

解析例を図-9に示す。使用パラメータは作用外力を  $7.0 \times 10^5 \text{ N/m}^2$  とし、その他は表-2に示す値を用いている。粒状体の挙動として、単一粒径よりも分布粒径の方が単位容積あたりの空隙量は低くなる傾向にあるが、この解析結果では解析Aよりも空隙が顕著に生成される結果となった。吹付けコンクリートにおいては高い空気圧で吹き付けることによる締め固め効果が期待されており、作用外力を変化させたときの付着部分の空隙構造の相違を観察した。付着部分の拡大図を図-10に示す。この図より、作用外力が高い場合に空隙が減少しているのが認められる。次にリバウンド要素について

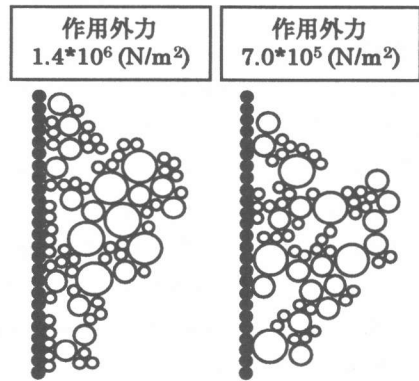


図-10 付着部分の拡大図

その粒径別含有率を算定した結果を図-11に示す。多少のばらつきは見られるが、このばらつきは解析に用いた要素数が少ないこと、および要素群の粒度分布に起因するものと考えられる。この結果より、リバウンド中に含まれる各粒径別含有率は、ある作用外力において極大または極小値を取っている。変化項目は異なるが、図-1(a)および(b)の傾向と比較すると、作用外力の低い範囲では、リバウンド率の低下に伴い大粒径の粒子が相対的に多くリバウンドする点で一致する。今回は作用外力の変化を非常に大きく取ったため、細かい傾向については今後さらなる解析が必要であると考えられる。

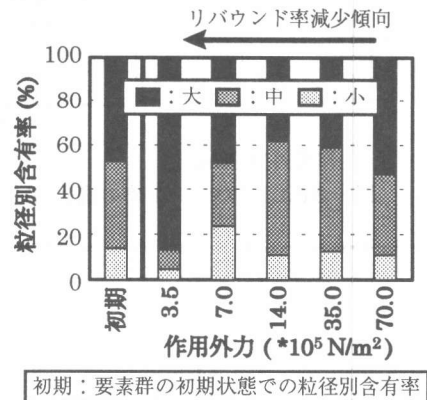


図-11 リバウンド中の要素の粒径別含有率

#### 4. まとめ

本研究では、2次元個別要素法を用い、吹付けコンクリートの付着・リバウンド発生メカニズムについて解析的な検討を行った。得られた結果を以下に記す。

- [1] 付着係数・抵抗係数・粘着係数等、間隙層のパラメータを増加させることによって、リバウンド率は低減される。
- [2] 作用外力が大きいくほど、壁面に付着する粒子群が構成する空隙量は減少する傾向にあることが視覚的に示された。
- [3] リバウンド中に含まれる粒子の粒径別含有率は、ある作用外力の時に極大値または極小値を取るが、さらに検討の必要がある。

今後は各パラメータと現実の条件との関連性、各パラメータ間の関連性についても検討を加え、さらに多様な条件下で解析を行う必要がある。

**謝辞** 本研究で個別要素法解析プログラムを使用するに当たり、東京大学生産技術研究所の目黒公郎助教授にソースプログラムを提供していただき、また、様々な御指導・御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 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] 中村敏夫他：トンネルの吹付けコンクリート、コンクリート工学、Vol.31, No.3, 1993.3
- [3] 岩下和義：粒状体シミュレーションによる地盤の動的破壊解析、東京大学地震研究所彙報、Vol.63, 1988
- [4] 目黒公郎：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析、東京大学地震研究所彙報、Vol.63, 1988
- [5] 鍋田、町田、岩下、佐々木：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, 1994
- [6] Chu, H., Machida, A.: Numerical Simulation of Fluidity Behavior of Fresh Concrete by 2D Distinct Element Method、フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集、1996.4
- [7] 牧、魚本：吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究(1)―ペースト-骨材間の付着挙動に関する数値的考察一、生産研究、第49巻2号、pp.111-114、1997.2