

吹付けコンクリートの特性に関する基礎的研究 (2)

個別要素法を用いた吹付け時のリバウンド推定の試み

Properties of Shotcrete (2)

Estimation of Rebound of Shotcrete by Distinct Element Method

牧 剛史*・魚本健人*

Takeshi MAKI and Taketo UOMOTO

1. はじめに

吹付けコンクリートはトンネルのライニング材として重要な地位を占めており、特に近年ではその高強度化や急結材の進歩により、ライニングを吹付けコンクリートのみの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は一般に品質のばらつきが大きく、未だにその品質に対して十分信頼されていないのが現状である。特に施工時に発生するリバウンドは、吹付けコンクリートの品質管理を困難にする大きな要因となっている。骨材を主成分とするリバウンドの発生については、材料条件、施工条件共に影響を及ぼすと考えられ、この点については多くの実験結果や施工結果が報告されているが、理論的なアプローチを試みた研究は皆無と言える。

吹付け施工時の定量的評価の「導入」として、筆者らは骨材粒子がペースト面に衝突する挙動について数値的な考察を試みている^{1),2)}が、これは粒子単体の挙動を追跡したものであり、骨材同士の衝突の効果が示されていない。そこで、本報告では次なるステップとして、多数の粒子が吐出された場合の付着・リバウンド性状を定量的に把握することを目標としている。その手法として、従来では地盤やコンクリート構造の動的破壊解析^{3),4)}に適用されてきた2次元個別要素法の適用を試みた⁵⁾。

2. 解析手法

2.1 個別要素法の原理

個別要素法は、個々の要素毎に運動方程式をたて、これを差分近似して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ものである。質量 m_i 、慣性モーメント I_i のある要素 i の運動方程式は以下の式で表される。

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

ここに、

F_i : 作用合力, M_i : 作用合モーメント,
 u : 変位ベクトル, ϕ : 回転変位,
 C_i, D_i : 減衰定数

各要素間の接触点での伝達力や重力などの体積力は、右辺の作用合力およびモーメントに含まれ、変位ベクトルと回転変位は、上式を時刻歴で数値積分することにより求められる。

2.2 要素のモデル

本研究においては、図1に示すような要素モデルを適用した。すなわちコンクリートを骨材とペーストの二相系材料と考え、各個別要素を骨材と見なし、各要素の周囲に一定の層厚を持った間隙層を配置することによってペーストの効果を表現している。図2に示すように、要素同士の接触力については要素バネによって、また、ペースト部分の伝達力については間隙バネによって評価している。法線・接線方向の間隙バネに作用する引張力の上限値をそれぞれ付着力・粘着力とし、これらは図3に示すように定義している。これらのバネは、各要素の相対位置によって発生・消滅を繰り返す、その簡単なフローは図4のようになっている。

3. パラメータと解析条件

3.1 各パラメータと材料条件

間隙層はペースト部分を模擬したものであることから、間隙層パラメータはペーストの性質によって決定されるべきである。つまり、間隙層厚、法線方向・接線方向のバネ係数・減衰係数初期値、付着・粘着係数初期値は、ペースト

*東京大学生産技術研究所 第5部

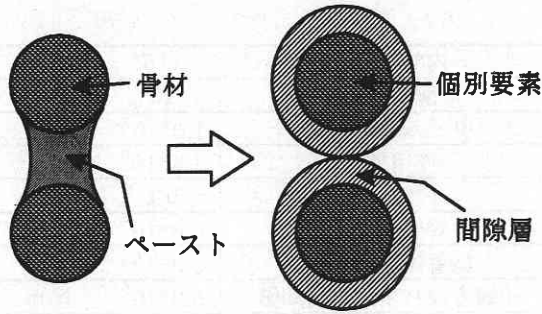


図1 要素モデル

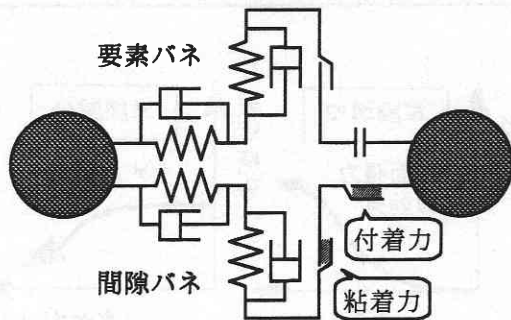
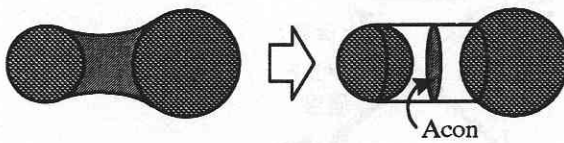


図2 要素バネと間隙バネ



付着力 = 付着係数 × Acon
粘着力 = 粘着係数 × Acon

図3 付着力と粘着力

トの水セメント比と単位セメント量によって決定される。また、吹付けコンクリート施工時に使用される急結材の効果として、全ての間隙層パラメータを時間に依存して増加させており、その増加率は急結材添加率に依存すると考えられる。

また要素バネのパラメータは、骨材の比重、ヤング率、ポワソン比より波動伝播速度を算定して決定する手法[3]を用いており、本研究においては文献[3]に記載されている砂岩の特性値を適用した(表1)。

要素径については本来、細骨材および粗骨材を合わせた骨材粒径分布によって決定すべきであるが、ここでは簡単のためと計算時間の短縮のために0.5m, 1.0m, 1.5mの3種類の粒径を持つ要素を分散配置した初期状態のもとで解析を行った。用いた要素の個数と重量比を表2に示す。

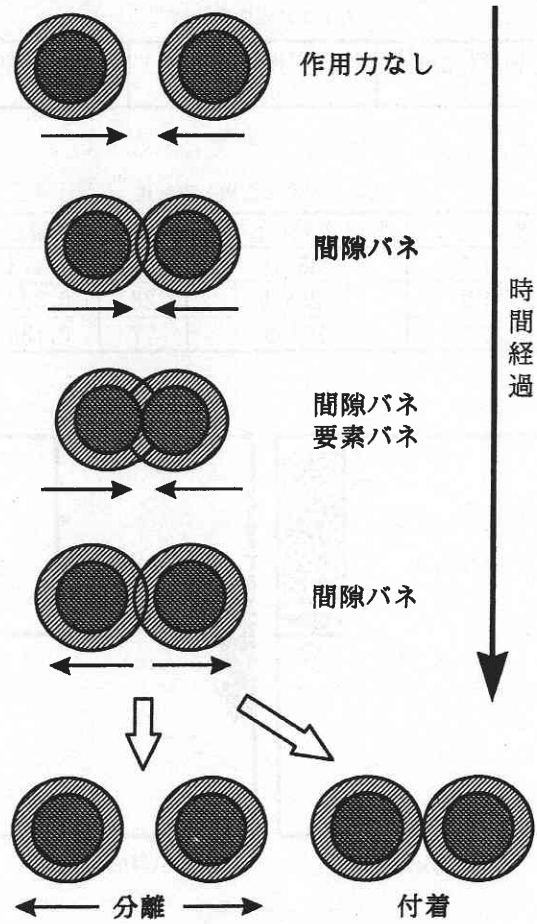


図4 バネの発生・消滅フロー

3.2 解析条件および測定項目

解析の初期状態と最終状態を図5(a)(b)に示す。図5(a)において、右上の空間①に要素群を溜めておき、空気圧を想定した外力を②の部分に左向きに作用させることによって、③の吐出口から④の鉛直壁面へ向かって吐出される。

測定項目については、図5(b)において、左壁面に付着しなかった要素の総重量を算出し、それを全要素の重量で除した値を「リバウンド率」と定義した。本研究においては、パラメータの変化がリバウンド率とリバウンド中に含まれる要素の粒径別重量比に与える影響について考察を行っている。

4. 解析結果及び考察

4.1 変化させたパラメータ

解析に使用したパラメータを表3に示す。本研究においては、水セメント比の変化がリバウンド性状に与える影響

研究速報

表1 砂岩の特性値

密度(kg/m ³)	ヤング率(kg/msec ²)	ポワソン比
2480	1.57*10 ¹⁰	0.14

表2 要素の個数と重量比

要素径(m)	要素重量(kg/個)	個数	重量比
1.5	4382.5	10	0.473
1.0	1298.5	28	0.392
0.5	162.3	77	0.135

表3 解析に用いたパラメータ (基準)

内部要素数	115	個
解析時間	10	sec
タイムステップ	1.0*10 ⁻⁵	sec
作用外力	1.4*10 ⁶	N/m ²
間隙層厚	0.1	m
付着係数初期値	5.0*10 ⁵	N/m ²
粘着係数初期値	5.0*10 ⁴	N/m ²
法線方向バネ係数初期値	5.0*10 ⁵	N/m
法線方向減衰係数初期値	8.0*10 ⁴	Nsec/m
接線方向バネ係数初期値	5.0*10 ⁴	N/m
接線方向減衰係数初期値	3.0*10 ⁴	Nsec/m

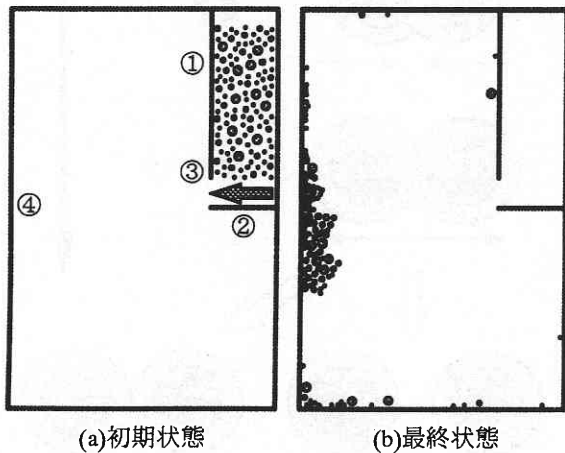


図5 解析条件

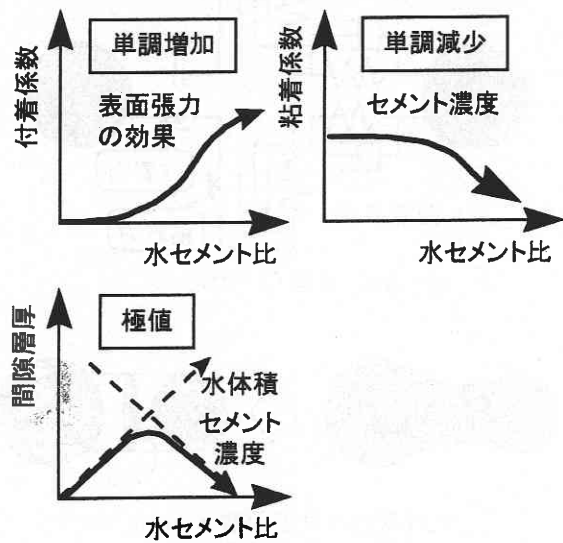


図6 各パラメータと水セメント比の関係

について考察するために、間隙層の付着係数と粘着係数、および間隙層厚を様々に変化させ、その他のパラメータについては一定としている。間隙層パラメータは各々が独立に変化するのではなく、水セメント比や単位セメント量の変化に伴って、相互に連性し合って変化するものと考えられる。水セメント比と各々の値との関係の概念図を図6に示す。付着係数は水量が少ないときは低く、水量が多くなると水の表面張力に近づいていくと考えられ、粘着係数は逆に水量の増加に伴って低下すると考えられる。間隙層厚については、水セメント比が低い範囲では水量の増加と共に厚くなり、水セメント比が高くなるとセメント濃度の増加と共に再び低下する傾向を示すと考えられる。

4.2 付着係数、粘着係数および間隙層厚の変化によるリバウンド率の影響

表3に示したパラメータを基準として、付着係数、粘着係数、間隙層厚をそれぞれ独立に変化させた時のリバウンド率の変化を図7に示す。これらの結果より、付着係数と間隙層厚がリバウンド率に与える影響が大きいことが分かる。そこで、間隙層厚と付着係数を同時に変化させてリバ

ウンド率への影響を解析した結果を図8に示す。結果より、間隙層厚が増加するに伴って付着係数とリバウンド率との関係を示す曲線は下方向へシフトするという結果が得られた。

4.3 水セメント比とリバウンド率との関係に関する考察

前節にて得られた結果(図8)から、水セメント比とリバウンド率との概念的な関係について考察した結果を図9に示す。図において、付着係数-リバウンド曲線は、間隙層厚の増加に伴って下方向へシフトする。また、図6に示したように、水セメント比の増加に伴って付着係数は単調増加する傾向を、また、間隙層厚は極大値を取る傾向を示すと考えられることから、水セメント比の増加(①→②→③)と共にリバウンド率は図に示すように変化すると考えられる。図10に筆者らが先に行った吹付けモルタルによる実験結果を示すが、水セメント比の低下と共にリバウンド

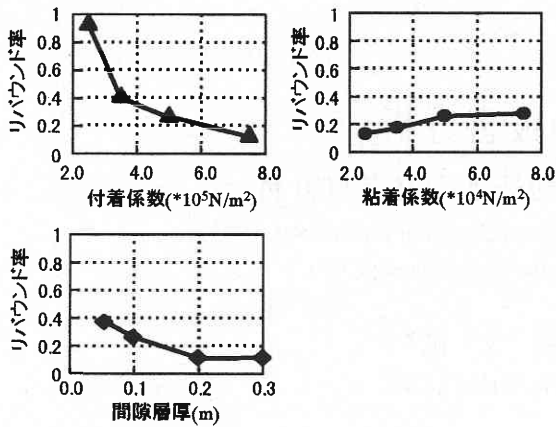


図7 各係数とリバウンド率との関係

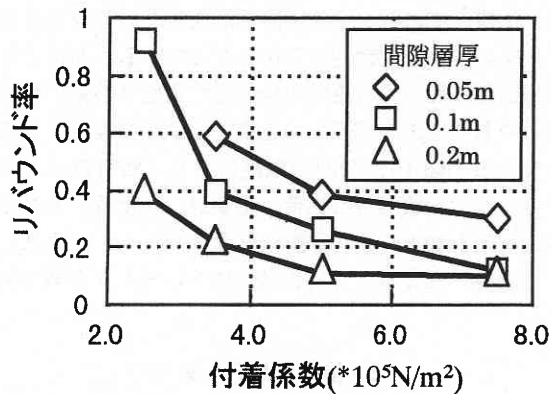


図8 付着係数および間隙層厚とリバウンド率との関係

率が大きく低下して頭打ちとなる傾向を概念的にはあるが示すことが出来ている。

5. ま と め

今回の考察より得られた結果をまとめると、以下の通りである。

- (1) 2次元個別要素法は吹付けコンクリートのリバウンドを推定する事が出来る可能性を示した。
- (2) リバウンド特性に大きく影響する因子として間隙層厚と付着係数を抽出することが出来、これら水をセメント比と関係づけることによって、リバウンド特性を概念的に示すことが出来た。
- (3) 今回は水セメント比の影響についてのみ考察を行ったが、今後は各パラメータ間の相互関係をより詳細に検討すること、また、より実際に近い解析条件で検討する必要があると考えられる。

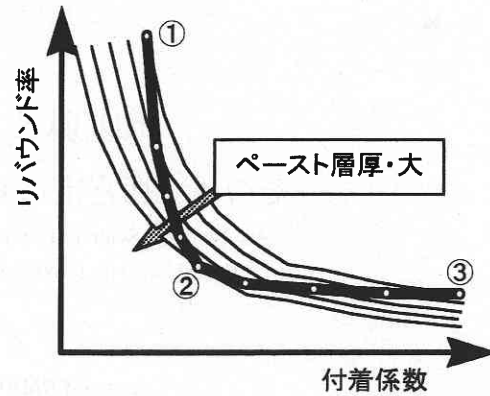


図9 水セメント比とリバウンド率の関係 (概念図)

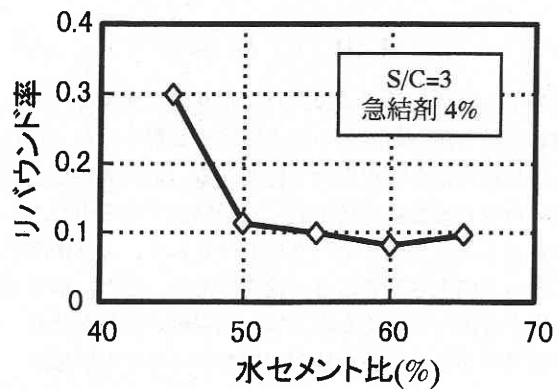


図10 リバウンド率の変化 (実験結果)

謝辞

本研究は東京大学生産技術研究所第5部魚本研究室にて行った修士論文の一部であり、また、本研究にて用いた解析プログラムは、東京大学生産技術研究所目黒公郎助教授の御厚意により提供して頂いたものであります。ここに記して感謝の意を表します。(1997年3月31日受理)

参 考 文 献

- 1) 牧, 魚本: 吹付けコンクリートの施工シミュレーションに関する基礎的研究, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.480-481, 1996.9
- 2) 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
- 3) 岩下: 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: 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) 牧, 魚本: 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第19巻, 投稿中