

吹付けコンクリートのリバウンド評価に 対する2次元個別要素法の適用

牧 剛史¹・魚本 健人²

¹正会員 工修 埼玉大学助手 工学部建設工学科 (〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保 255)

²正会員 工博 東京大学教授 国際・産学共同研究センター (〒106-8558 東京都港区六本木7-22-1)

高品質な吹付けコンクリート施工のために品質評価および管理手法を整備することは、将来的な需要の増大に向けて急務であると考えられる。本研究は吹付けコンクリートの品質に大きな影響を及ぼすリバウンドの理論的評価法として2次元個別要素法解析による手法を提案している。種々の材料条件・施工条件を変化させたパラメトリック解析を行った結果、既往の実験結果や施工実績における傾向をよく表現しており、本手法の適用性が確認された。

Key Words : shotcrete, rebound ratio, material and constructional condition, 2-D DEM, two phase material, surface layer thickness, normal and tangential adhesion

1. はじめに

吹付けコンクリート工法は型枠なしで広い面積に比較的厚さの薄いコンクリートを施工する方法として、トンネルの一次覆工や掘削法面の保護・補強、コンクリート構造物の補修・補強等に広く用いられている。特にトンネルにおいては、掘削後直ちに地山に密着するように施工することが出来、また掘削断面形状に左右されないことから、ライニング材として重要な位置を占めている。近年では、施工機器の高性能化や急結剤の進化も相まって、従来のように一般の打設コンクリートによる二次覆工を行わず、吹付けコンクリートのみによるシングルライニングで済ませるケースが増大している。今後、都市部における用地取得が困難となるのに伴い、大深度・大断面トンネルの施工が増大し、それと共に安価な吹付けコンクリートの需要も飛躍的に増大する可能性があるものと考えられる。

吹付けコンクリートが今後、シングルライニングによる永久覆工としての地位を確立するためには、施工から耐久性までが定量的に評価されることが不可欠である。しかし、現時点では施工後の品質・性状を把握することが困難であり、未だにその品質に対して十分な信頼が得られていない。施工後の品質が不安定・不明確である原因として、材料のばらつきのみならず施工の良否による影響が極度に大きく、施工法によって全く性能の異なったコンクリートが得られることがあげられる。特に、吹

付け施工時に発生するリバウンドは、吹付け前後の品質の変動以外にも経済性、作業環境の悪化などの多くの問題を含んでいる。通常、リバウンドと称されるものには、壁面との衝突時に発生するいわゆる「跳ね返り」と、付着後に壁面に留まりきれずに落下する「剥落・ダレ」の両者が含まれる。これらのリバウンドの発生に影響を及ぼす要因として、材料面では配合条件や骨材粒度、施工面では吹付け圧や壁面までの距離など、多くの項目が挙げられている¹⁾²⁾が、それらは豊富な施工実績や実験的事実に基づいた経験則に過ぎず、各種要因とリバウンド発生との相関に対して理論的なアプローチは全く行われていない。

上記のように、今後、吹付けコンクリートが材料として重要な位置を占めるためには、施工後の品質を定量的に把握するための手法の開発が急務であると考えられる。本研究は、供用後の耐久性まで見据えた定量評価手法の確立を目指す研究の先駆けとして行ったものであり、今後の吹付けコンクリート研究におけるフレームとなる解析手法を確立することを目指している³⁾。本論文は、品質管理上最も重要となる施工時のリバウンド発生現象に焦点を絞り、各種要因とリバウンド率との関係について、2次元個別要素法を用いて解析的考察⁴⁾を行い、本手法の適用性を考察するものである。

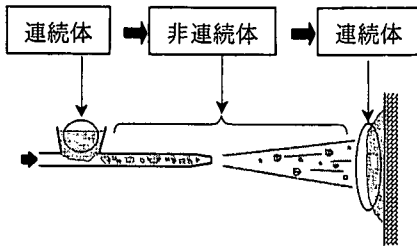


図-1 吹付けコンクリートの挙動

2. 個別要素法の適用

(1) 吹付けコンクリートのシミュレーション

前節で述べたように、吹付け時に発生するリバウンドは吹付け前後の品質変動を伴うのであるが、これはリバウンドの主成分が骨材であることに起因する。このため、壁面に付着したコンクリートは相対的にセメント分を多く含むものとなり、品質変動ばかりでなく経済的にも不利となる。吹付け施工では、準備したフレッシュコンクリートを高圧で壁面に吐出するため、ノズルから壁面に到達するまでの間は非連続体であると考えられる。つまり吹付けコンクリートは、図-1に示すように連続体から非連続体を経て、再度連続体となると見なすことが出来る。この挙動をシミュレートするためには有限要素法のような連続体解析手法では困難であり、連続体・非連続体両者の挙動を追跡可能な手法が適当と考えられる。

(2) 個別要素法の適用

本研究ではこのような手法として個別要素法に注目した。個別要素法はこれまで、地盤やコンクリート構造の破壊解析に対する適用性が示されている⁹⁾。また、最近ではフレッシュコンクリートの流動解析^{10) 11)}にも適用され、鉄筋間通過時の材料分離挙動を追跡することも可能であるとされている。しかし、これらの解析はいずれも連続体(地盤、コンクリート構造、フレッシュコンクリート)が非連続体(土粒子、コンクリート破片、分離した骨材)へと変化する挙動を対象としたものであり、非連続体が連続体へと集結する解析は現時点では行われていない。つまり本研究はこの点で新しい試みと言える。

個別要素法の利点としては、幾何学的な条件を比較的簡単に考慮できる、材料の性質やばらつきを自動的に考慮できる、等が挙げられる。また、対象材料を厳密にモデル化(例えばセメント粒子レベルからのモデル化)すれば、非常に実現現象に近いシミュレーションが可能であると言える。しかし、材料をミクロに近づけるほど、材料特性の把握がより困難となること、モデル化した粒子の粒径分布が広がること(セメント粒子~細骨材~粗骨

材料条件	施工条件
材料特性 ・骨材物性値 ・骨材粒度分布 配合条件 ・水セメント比 ・単位セメント量 ・急結剤添加率 ・細骨材率	ノズルワーク ・吹付け量 ・吹付け圧力 ・ノズル-壁面間距離 ・ノズル角度 ・圧送条件 吹付け面の特性 ・壁面物性値 ・壁面形状と粗度 ・壁面角度 ・含水状態

図-2 リバウンドの影響因子

材)等の問題も顕在化し、適切なレベルでのモデル化が重要である。

以上の点から、本研究では解析対象を非連続体から連続体へ変化する挙動に限定して着目し、コンクリートを骨材とマトリックス(セメントペースト)の二相材料としてモデル化することとした。詳細なモデルについては次章にて述べる。

3. 解析理論

(1) 吹付け施工時のリバウンドの影響因子

前節まで述べたように、吹付け施工時に発生するリバウンドによって、吹付けコンクリートの品質は大きく変動する。リバウンド発生に影響を及ぼす因子として、多くの項目が経験的に挙げられているが、これらがどのようなメカニズムでリバウンドを左右するのかについては明らかになっていない。これまで経験的に挙げられている影響因子を図-2に示す。図に示すように、各項目は材料条件と施工条件の二つに分けることができ、さらに材料条件は使用材料特性と配合条件の二つに、施工条件についてはノズルワークに関する条件と吹付け面の特性の二つに細分される。解析によってリバウンド挙動をシミュレートするためには、これらの影響要因を考慮できるようなモデルを採用することが必要である。

(2) 個別要素法の解析理論とモデル

まず個別要素法の解析理論について述べる。系に存在する、ある個別要素*i*に関する運動方程式は、以下の式(1)に示すように並進(2方向)と回転(1方向)の合計3自由度の運動方程式によって表される。プログラム内において個々の要素毎に式(1)のような運動方程式をたて、これらの連立方程式を時間領域で差分近似することにより前進的に解く。こうして時間ステップごとの全要素の

加速度・速度・変位を逐次算定することが可能となる。

$$\begin{aligned}
 m_i \cdot \ddot{u}_{xi} + C_i \cdot \dot{u}_{xi} + F_{xi} &= 0 \\
 m_i \cdot \ddot{u}_{zi} + C_i \cdot \dot{u}_{zi} + F_{zi} &= 0 \\
 I_i \cdot \ddot{\phi}_i + D_i \cdot \dot{\phi}_i + M_i &= 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここに、

u_{xi}, u_{zi} : 変位, ϕ_i : 回転変位
 m_i : 質量, I_i : 慣性モーメント
 C_i, D_i : 系の粘性減衰係数
 F_{xi}, F_{zi} : 作用合力, M_i : 作用合モーメント

式(1)における粘性減衰項は、後に述べる要素間のダッシュポットとは異なり、系全体としての粘性減衰を表すものである。計算を安定させる場合、もしくは系が存在する場(水など)における粘性減衰を加味する場合に用いるものであるが、今回の解析では系が空気中に存在し粘性減衰が限りなく小さいと考えられること、および計算が比較的安定していたこと等の理由から、系全体の粘性減衰は並進・回転とも0として計算を行った。

以上を踏まえた上で、今回の解析に用いたモデルを図-3に示す。2.(2)で言及したように、コンクリートを骨材+ペースト(マトリックス)の二相系材料と仮定し、骨材を個別要素、ペーストを骨材要素の周囲に配置した間隙層によってモデル化している。任意の2要素間の伝達力は、文献(8, 9)に準じ、要素同士の接触力を要素バネ(+ダッシュポット)によって、間隙層の伝達力を間隙バネ(+ダッシュポット)によって評価することで算定している。実際の系においては、注目する一つの要素が複数の他の要素と接触することによって接触力を受けており、各接触力の方向は接触する2要素の相対位置関係に依存しているため、接触力は接触する2要素間の局所座標系において計算される。プログラム上は任意の要素に着目し、接触する全ての要素との間に発生している伝達力を図-3のモデルにより算出した後、この伝達力を全体座標系に変換した上で各成分毎に合計した合力および合モーメントを式(1)に代入して運動方程式を解くことになる。

要素バネは圧縮力のみを受け持ち、引張力は受け持つことが出来ないとし、要素中心間距離が双方の半径の和よりも小さい時のみ発生して接触力を伝達する。要素が変位して中心間距離が半径の和よりも大きくなった時点で要素バネは消滅し、接触力は伝達されない。これに対して間隙バネは法線方向・接線方向共にある程度の引張力を受け持つことが出来ると仮定している。要素中心間距離が双方の半径と間隙層厚の和よりも小さい場合、間隙バネが発生して圧縮力を伝達する。要素が変位して中

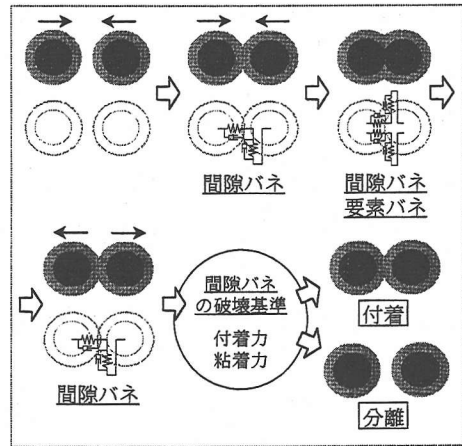
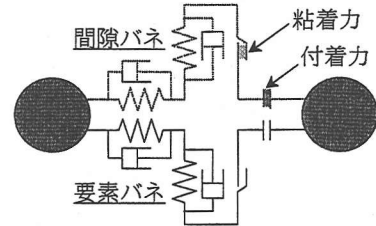
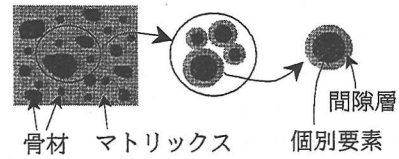


図-3 解析に用いたモデル

心間距離が半径と間隙層厚の和よりも大きくなった場合、間隙バネは引張力を伝達し(付着)、さらに変位が進みこの引張力が任意の破壊基準値に達した時点でバネは消滅する(分離)。間隙バネが消滅した時点でこの2要素間には力が全く作用しなくなり、2要素が分離することになる。この間隙バネの破壊基準として、法線方向には付着力、接線方向には粘着力による基準を設けているが、個々のパラメータおよびそれらと実際の材料条件の関係については次節で述べる。

(3) 各因子と解析パラメータの関係

a) 施工条件

図-2に挙げた施工条件のうち、吹付け量は全要素体積によって、吐出圧力については要素群に作用させる外力によって考慮することができる。ノズル-壁面間距離およびノズル角度については、個別要素法の特性上、幾何学的に加味することが可能である。また、圧送条件に関しては、材料貯留部および圧送パイプまで解析範囲を広げることによって考慮することができるが、今回は考慮しないものとする。吹付け面の特性については、壁面

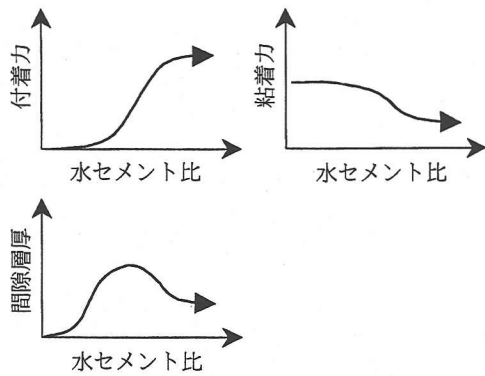


図-4 水セメント比と間隙バネパラメータの関係

物性値や含水状態は解析時に使用する壁要素の物性値に反映させることが出来、壁面形状と粗度・壁面角度についてはやはり幾何学的に考慮可能である。

なお、今回はこれらの施工条件のうち、吹付け圧力およびノズル壁面間距離に関して解析・考察を行っており、その他については一定条件とした。

b) 材料条件

図-2に挙げた材料条件のうち、材料特性に関する条件として、使用骨材の物性値と骨材粒度分布を挙げているが、骨材物性値に関しては要素バネパラメータによって評価することとし、これらは使用骨材のヤング率とポアソン比、および密度から弾性理論によって決定した。なお、要素バネパラメータの決定方法については文献 8), 9)に準じている。

また、骨材粒度分布と細骨材率については要素径分布や粒径別の要素数によって考慮可能であるが、本研究では簡単のため、全解析を通じて要素径は3種類とし、要素数は一部のケースを除いて一定としている。また、要素径の最大値は、実施工時に主に用いられる骨材最大径15mmの100倍スケールとし、最大径1.5mと設定した。これは、個別要素法の特長上、要素径が小さくなるほど解析の時間ステップを細かく設定しなければならず、ある時間(今回は10秒間)のシミュレーションを行うのに要する計算時間が飛躍的に増大してしまうためである。しかしこれに伴って解析パラメータの値が全て変化してしまうため、最終的に定量的な解析を行うためには実スケールで行う必要がある。

次に配合条件であるが、これらの条件は基本的にペースト特性を支配する条件であり、解析上は間隙バネパラメータに反映される。ペーストの初期特性(急結剤添加前の特性)は単位セメント量と水セメント比によって決定されると考えられるため、解析上は間隙層厚および間隙バネの破壊基準である付着力と粘着力で反映されている。急結剤添加率は、吐出後のペースト結合特性を代表

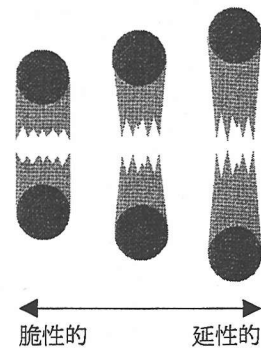


図-5 付着特性の概念図¹⁴⁾

すると考えられるため、解析では間隙バネパラメータを時間依存で増加させ、急結剤の効果を増加率として取り込むことにした。

今回の解析では上に挙げた材料条件のうち、粒度分布の変化と水セメント比の変化について考察を行い、他の条件は一定とした。

c) 間隙バネパラメータに関する仮定

前二節で述べたパラメータのうち、水セメント比と間隙バネパラメータの関係は明確でない。そこでこの点に関して図-4に示すような仮定を設定した。以下、個々のパラメータの定義および変化性状について述べる。

付着力は図-5¹⁴⁾に示すように、ペースト部の延性(引張変形性)を反映し、この場合ペースト中のセメント濃度が高い場合はセメント粒子の凝集により脆性的な破断性状を示す。一方、セメント濃度が低い場合は水の表面張力の効果により延性的となると考えられ、この時は鉛直方向間隙バネ定数が小さくなると考えられるが、ここではバネ定数を水セメント比によらず一定とし、付着力は水セメント比の増加に伴い単調増加傾向を示すものとして、結果的に間隙層での変形性が大きくなるように設定した。

粘着力はペースト部の降伏値を反映すると考えられ、水セメント比の増加と共に、セメント濃度が低下して粒子接触が減少することから単調減少傾向を示すとした。なお、ペーストをビンガム体と見なした場合、水セメント比の変化により降伏値のみならず塑性粘度も変動するため、その影響として接線方向間隙バネ定数や減衰定数も変化させるべきであるが、今回の解析では塑性粘度の影響は考慮せず、バネ定数・減衰定数は一定としている。

間隙層厚についてはペースト中の水量の増加と共に増加傾向、ある点を境に今度はセメント濃度の低下と共に減少傾向を示すとした。間隙層厚については、骨材表面積とペースト体積の関係や余剰ペースト膜厚理論から算定可能と考えられるが、要素粒度分布や要素数との兼ね合いから、具体的な設定方法についてはさらに検討の余

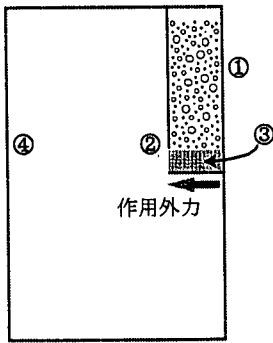


図-6 解析条件

地があると考える。

以上のように水セメント比の変化に伴って、付着力、粘着力、間隙層厚という3つのパラメータが同時に異なった変化をするという概念的な仮定を設定した。しかし、実際に水セメント比の値に応じて3つのパラメータを設定する方法については現時点で全く不明であるため、今回は出来る限り多くのケースを解析することにより、現実的な結果が得られるようなパラメータの範囲を大まかに設定し、各々を独立に変化させるパラメトリックスタディを行った。今後はセメントペーストの付着試験や粘度試験等の材料試験を用いてこれらの値を定量的に算定する手法を確立する必要があると考える。

4. 個別要素法解析

(1) 解析条件と解析例

本研究で適用した解析条件を図-6に示す。右上の長方形の空間①に要素群を貯留しておき、②の吐出口から要素を吐出させる。網掛けの部分③に吹付け圧力を想定した外力を左方向へ水平に作用させ、これによって要素は鉛直壁面④へ向かって吐出される。実際の吹付け施工では吐出ノズルの直前において圧縮空気によって急結剤が添加されるが、本解析では吐出口②を通過した瞬間を間隙バネパラメータの増加開始時刻とし、以降はパラメータに時間依存増加率を乗じることにしている。以上のように、壁面④を吹付け面と想定して吹付け施工のシミュレーションを行い、各パラメータを変化させるパラメトリックスタディを行った。以後、壁面④に付着せずに跳ね返り、底面に落下した要素を本解析における「リバウンド」とし、総要素重量に対するリバウンド要素重量の割合を「リバウンド率」と定義する。

解析に用いた要素群の構成を表-1に、また解析例と用いた各パラメータをそれぞれ図-7および表-2に示す。なお、表-2に示したパラメータは、文献(9), (10), (11)

表-1 要素群の構成

比重	2.48	要素数	115
要素径/最大径	個数	重量比	
大	1.0	10	0.473
中	0.67	28	0.392
小	0.33	77	0.135

表-2 解析例で用いたパラメータ

要素数	115	個	
ヤング率	1.57×10^4	MPa	
ポアソン比	0.14		
吹付け圧力	1.4	MPa	
時間刻み	1.0×10^{-5}	sec	
解析時間	10.0	sec	
付着力 (応力)	5.0×10^{-1}	MPa	
粘着力 (応力)	5.0×10^{-2}	MPa	
法線方向バネ定数	5.0×10^5	N/m	
法線方向減衰係数	8.0×10^4	N·sec/m	
接線方向バネ定数	5.0×10^4	N/m	
接線方向減衰係数	3.0×10^4	N·sec/m	

で用いられている値を参考として、3.(3)c)で述べたように現実的なリバウンド率が得られるように行った予備解析の結果を基に決定した。図-7より、時間経過に伴い、圧力を受けて吐出された要素群が鉛直壁面に衝突・付着して、要素塊が形成されていく様子が観察できる。始めに比較的小さい要素が付着し、その上から大きな要素が付着していく。なお、解析時間は10秒間とし、リバウンド率は10秒経過後の値を算定した。

次に、同一条件下における解析結果の再現性について述べておく。第一に要素数について、今回は要素数を100~150個程度で解析を行っているが、やはり要素数は多ければ多いほど、結果として得られるリバウンド率の値にばらつきが少なくなると考えられる。第二に初期の要素配置について、要素群に同等の粒径分布を様々な粒径を持つ要素の空間的配置が異なれば、やはり解析結果は異なってくることが考えられる。前述の通り、本解析ではまず始めに比較的小さい要素が壁面に付着し、その上から大粒径の要素が付着するため、序盤に吐出される要素の粒径が小さい場合は、結果としてリバウンド率が低くなることが予想される。第三にやはり初期の要素配置について、2.(1)において、個別要素法によって連続体→非連続体→連続体という変化を解析することが可能であると述べたが、本解析では一貫して非連続な状

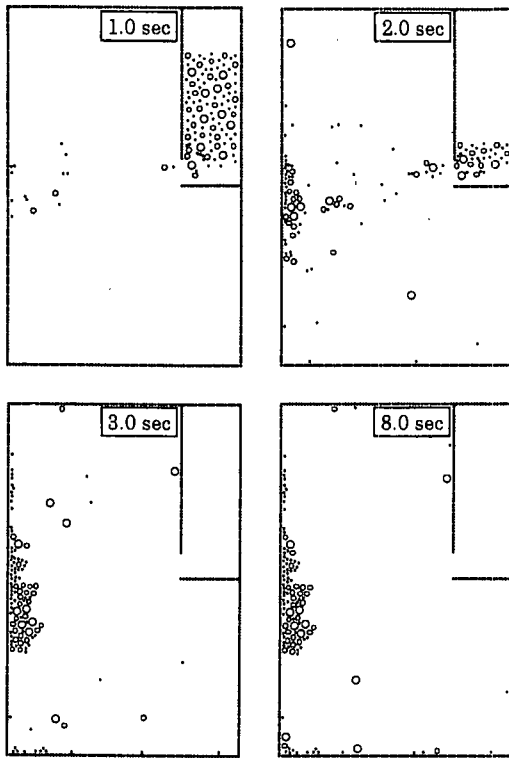


図-7 解析例

態で解析を開始している。したがって連続な状態から開始したものは結果が多少異なることが予想される。文献8), 9), 10), 11) にもあるように、本来個別要素法の初期状態は落下法に代表されるようなパッキングを行うことによって作り出すべきであり、今後はこの点についても改良する必要がある。以上の点から、同一の材料・施工条件下において、なるべく大きな要素数でパッキングした数種類の初期状態の元で解析を行うことが、再現性の点からも望ましいと考えられる。

(2) 施工条件の影響

a) 吹付け圧力の影響

吹付け圧力の影響を見るために、要素吐出部(図-6の③部分)に作用させる圧力を1.0MPa~3.0MPaの間で変化させて解析を行った。結果を図-8に示す。壁面までの距離が一定であるので、基本的に圧力が大きくなるとリバウンド率も増加する傾向が図よりうかがえる。ここで、図中A点ではリバウンド率が突然大きくなっているが、これは低吹付け圧力のために付着性がよく、壁面での付着厚さが大きくなることによって剥落が生じたためである。同図に圧力と付着厚さの関係も併せて示す。付着厚さは用いた要素の最大径で正規化して表している。圧力が小さくなると共に付着厚さが大きくなり、ある程

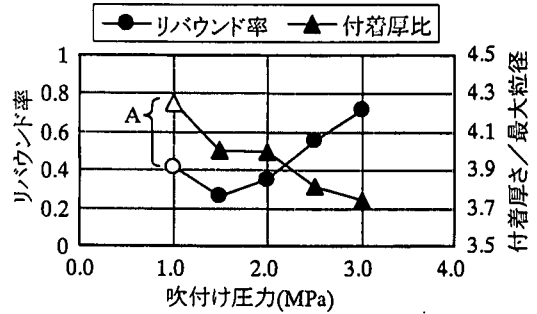


図-8 吹付け圧力とリバウンド率・付着厚比の関係

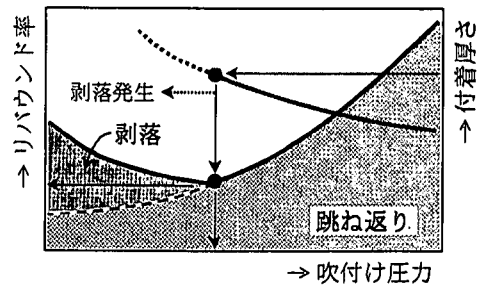


図-9 模式図

度の厚さになると剥落が生じているのが分かる。これを模式的に表したのが図-9である。この図は、材料特性が一定の場合、圧力の低下と共に跳ね返り量は減少し、その分付着厚さは増加するが、ある付着厚さに達すると剥落が発生し、トータルとしてリバウンド率が上昇することを示している。以上の考察から、用いる材料の特性に応じて、跳ね返り量が少なく、なおかつ剥落を生じない程度の適切な付着厚さが存在し、本解析によりそれを定量的に把握することが可能であると考えられる。

b) ノズル-壁面間距離の影響

ノズル(吐出口)から壁面までの距離を変化させた結果を図-10に示す。吹付け距離/最大粒径=20.0, 26.6, 33.3の3ケース行い、圧力および付着力を2種類ずつ変化させている。文献1)によると、実施工においてはある吹付け距離でリバウンド率が極小値を取るとの記述が見られる¹⁾が、今回の解析では極小値を取るといったような傾向は見られなかった。文献1)ではノズル角度と吹付け距離について、角度は壁面に対して直角が望ましく、距離については吐出量や空気量(圧力)に基づいて実際に試験施工を行うことにより最適値を設定するのが良いとしている。図-7の解析例を見て分かるように、今回の解析では吐出口から吐出された要素群はある程度の広がりを持って壁面へ向かって飛んでいくため、距離が遠くなるほど要素が壁面に衝突する範囲が広くなり、また衝突角度は壁面に対して直角ではなくなってくる。この点が、期待した解析結果を得られなかった理由であると

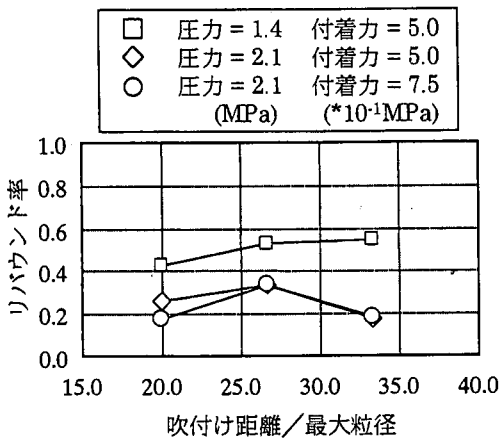


図-10 ノズル-壁面間距離とリバウンド率の関係

考えられ、解析におけるノズル（吐出口）形状を改良する必要がある。また、吹付け圧力や要素数に対する距離の変化範囲の妥当性等、他にも様々な影響要因が考えられることから、吹付け距離に関しては今後さらに検討を進めていく必要がある。

(3) 材料条件の影響

a) 粒度分布の影響

骨材の粒度分布の影響を調べるため、初期状態の要素構成比を変化させて同様の解析を行った。前述の通り、本解析では要素径を3種類に限定しているが、この3粒径の累積重量比から、下の式(2)により見かけの粗粒率(Q.F.M.)を算定し、粒度分布を代表する指標として用いている。

$$Q.F.M. = \sum_{i=1}^3 w_i \quad (2)$$

ここに、 w_i : D_i 以上の粒径を持つ要素の重量比 ($D_i > D_{i+1}$)

以上の式より求めた見かけの粗粒率(Q.F.M.=1.0~2.56の間で変化させている)とリバウンド率との関係を示したものが図-11である。見かけの粗粒率の増大と共にリバウンド率が上昇し、また、大粒径の粒子を含むほどリバウンド率は高くなるのが分かる。初期状態での見かけの粗粒率と壁面に付着した要素およびリバウンド要素の見かけの粗粒率との関係を図-12に示す。初期状態での見かけの粗粒率が大きいほど、付着要素の粗粒率の低下も大きくなる傾向がうかがえる。以上の結果から、リバウンド率が高い場合は付着要素の粗粒率が大きく低下すると考えられる。既往の実験結果(7)においても同様の結果が得られており、本解析での結果は実際の傾向と合致していると言える。また、このような解析を行うこ

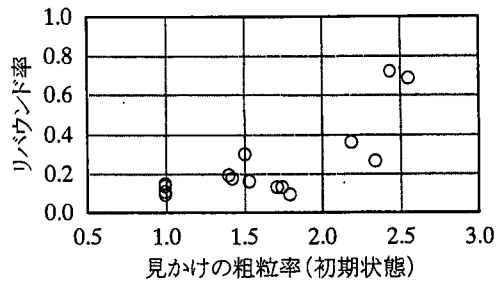


図-11 見かけの粗粒率とリバウンド率の関係

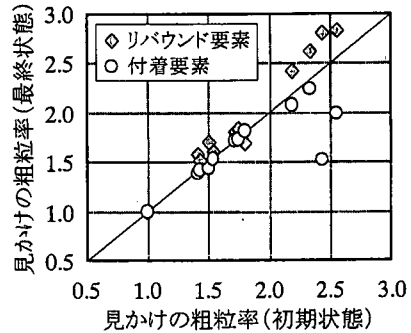


図-12 吹付け前後における見かけの粗粒率の変化

とにより、実際に施工された吹付けコンクリートに含まれる骨材の粒度分布を推定することも可能であり、将来的には吹付けコンクリートの強度や空隙推定等の品質評価にも適用可能であることが示唆される。

b) 水セメント比の影響

3.(3)c)で述べたように、水セメント比の変化を付着力・粘着力・間隙層厚の3つのパラメータに代表させ、これらを様々に変化させることによって水セメント比がリバウンド特性に与える影響について考察を行った。なお、文献2)によると、付着したコンクリートが軟らかい方がリバウンド率は低く、つまり水セメント比が高い方がリバウンドは少ないと報告されている。ここでは事前に行った予備解析の結果を基に、付着力:0.25~0.75MPa、粘着力:0.025~0.075MPa、間隙層厚/最大粒径:0.033~0.133の間で変化させている。

付着力と粘着力を同時に変化させたときのリバウンド率の変化を図-13に示す。この図より、付着力の変化が及ぼす影響が非常に大きいことが分かる。また、多少のばらつきは見られるものの、粘着力の変化が「跳ね返り」としてのリバウンド率に与える影響は小さいと考えられる。

図-14に粘着力が高い場合と低い場合の解析結果を示す。粘着力が低い場合は高い場合に比較して、付着状態が縦に広がっているのがうかがえる。これは、壁面に衝突後、要素が壁面をつたって下方へ流下した結果で

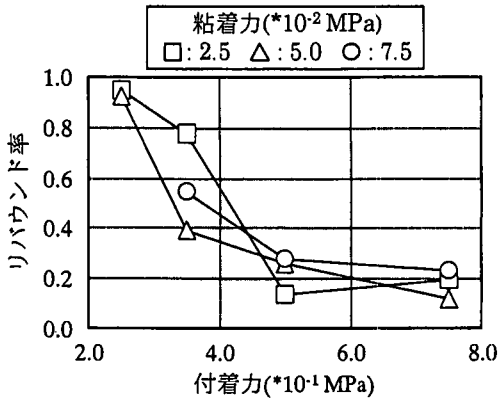


図-13 付着力・粘着力とリバウンド率の関係

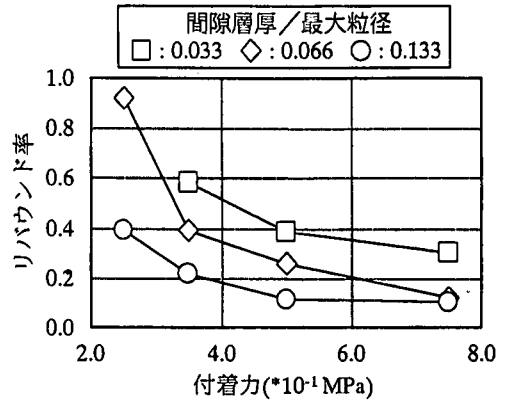


図-15 付着力・間隙層厚とリバウンド率の関係

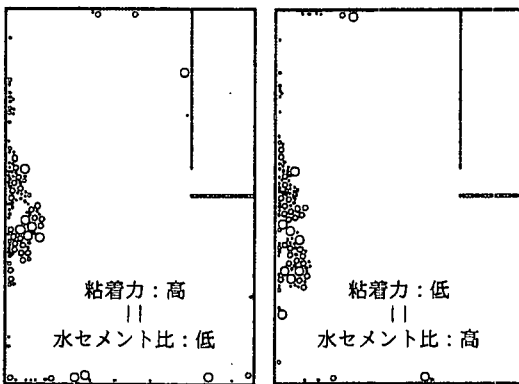


図-14 粘着力の高低による吹付け性状の差異

あり、粘着力が極度に低い場合はいわゆる「ダレ」が生じることでリバウンド率が増加する可能性があることを示唆している。またこのことは、水セメント比が高い場合に「ダレ」が発生しやすいという実際の傾向と合致している。

次に、付着力と間隙層厚を同時に変化させた場合のリバウンド率の変化を図-15に示す。付着力の増加に伴いリバウンド率は低下するが、間隙層厚の増加と共にその曲線が下方へシフトして行く傾向が見られる。

以上の結果より、付着力と間隙層厚の2つがリバウンド率の支配パラメータであると考え、これらの結果をもとに、水セメント比とリバウンド率との関係について概念的な考察を行った。図-16の図中における数本の細かい曲線は、図-15で示した付着力と間隙層厚を変化させた結果を模式的に表したものであり、間隙層厚が大きくなるほど、付着力変化に伴うリバウンド率の変化曲線は下がる(図中の太い矢印方向)。ここで、3.(3)c)で述べた仮定(図-4)に従ってリバウンド率の変化を考える。すなわち、水セメント比が低い範囲では、付着力

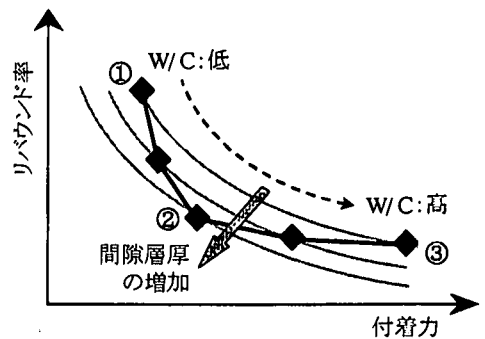


図-16 リバウンド率変化の概念図

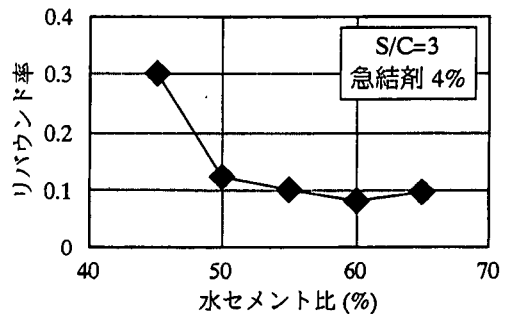


図-17 水セメント比とリバウンド率の関係

の増加と共にリバウンド率は低下するが、併せて間隙層厚も増加するため、結果的にリバウンド率は急激に低下する(図中①~②)。水セメント比が高くなると、付着力はやはり増加するのに対し、間隙層厚は減少傾向に転じることにより、リバウンド率の低下は緩やかになり(図中②~③)やがて頭打ちとなる。つまり水セメント比が低い値から高い値へと変化した場合、リバウンド率は図-16中、①→②→③へと推移していくことが分かる。図-4において間隙層厚が極大点をとる水セメント比の

値によって、リバウンド率が頭打ち傾向を示すかどうかには差異が出るものの、図-17の筆者らが行ったモルタル吹付け実験の結果⁷⁾(吹付け距離30cm, 吹付け圧力0.5~0.7MPa, 吹付け量20%, ダレ・剥落なし)における傾向をよく表現していると考えられる。

なお、図-15における解析では、前述したダレや剥落は発生していないが、粘着力や吹付け圧力の値によっては生じる可能性もある。いずれにしても間隙バネパラメータを適切に設定することによって、実際の現象をシミュレートしうると考えられる。

5. まとめ

本研究は吹付けコンクリートの品質変動を定量評価するという点に大目標を置き、その手法として2次元個別要素法の適用可能性を検討したものである。現段階では未だ開発途中であり、定性的評価にとどまっているものの、今後十分に拡張可能な解析フレームが得られたと考えられる。

1) 吹付け施工時のリバウンド性状に影響を及ぼす因子として、材料条件では水セメント比および骨材粒径分布、施工条件として吹付け圧力およびノズル壁面間距離を取り上げ、これら因子の変動とリバウンドとの関係について考察した結果、概ね従来の経験的・実験的評価と一致した傾向が確認された。

2) 特に水セメント比の影響については、間隙バネパラメータと関連づけることによって、概念的ではあるがリバウンド率の評価が可能であることを確認した。

3) ノズル壁面間距離の影響については要素配置の初期状態やノズル形状等の影響が大きいと考えられ、今後の進展が必要である。

本手法を今後、吹付けコンクリートのリバウンドおよび品質変動の定量評価へ適用するための課題を以下に列挙し、本研究の結びとする。

① 2.(1)において、個別要素法によって連続体→非連続体→連続体という変化を解析することが可能であると述べたが、4.(1)で述べたように、本研究では初期状態を非連続体としている。初期状態も解析結果に大きく影響すると考えられることから、今後はこの点についても考察を行う必要があると思われる。

② 解析における各パラメータについて、これらは本来、実際に使用される材料特性から決定されるべきであり、材料条件、特に間隙バネパラメータと実際のフレッシュペースト性状および急結剤等の混和剤による効果との関係について定量的に評価する必要がある。

③ 施工条件に関しては、本解析法の性質上、実際の条件に一致させることは可能であると考えられ、今後は材

料条件も併せて実際の条件を取り込んで解析を進めて行く必要がある。

④ 今回はリバウンド率のみの検討であったが、吹付けコンクリートの品質を把握するためには、付着したコンクリートの空隙率や強度等の物性値に関しても検討する必要がある。本解析法はこの問題について評価可能な拡張性を有しているものと考えられる。

謝辞：本研究は著者が東京大学大学院修士課程在籍時に、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内容をまとめたものであります。実験を行うにあたり、元芝浦工業大学卒論生の野口綾子氏(開発コンサルタント)に御協力頂きました。また、本研究で用いた個別要素法プログラムは東京大学生産技術研究所目黒公郎助教より御提供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。

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) 中原 康, 田沢雄二郎, 萩尾正雄: 吹付けコンクリート工法の研究, 鹿島建設技術研究所年報, 第17号, 1968.
- 3) 中原 康, 田沢雄二郎: 吹付け工法, コンクリート工学, Vol.23, No.7, 1985.7.
- 4) 牧 剛史, 魚本健人: 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, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集V, 1996.9.
- 5) 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, 1997.7.
- 6) 牧 剛史, 魚本健人: 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 -, 生産研究, 第49巻, 7号, 1997.7.
- 7) Maki, T. and Uomoto, T.: Fundamental Study on Mechanism of Shotcrete - Application of 2D-DEM for Estimation of Rebound -, The Sixth East Asia Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 1998.1.
- 8) 岩下和義: 個別要素法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.
- 9) 目黒公郎: 個別要素法によるコンクリート構造物の破壊解析, 東京大学地震研究所彙報, Vol.63, 1988.
- 10) 鍋田克己, 町田篤彦, 岩下和義, 佐々木尊廣: 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.
- 11) Chu, H. and 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.

APPLICATION OF 2-D DISTINCT ELEMENT METHOD FOR EVALUATING REBOUND OF SHOTCRETE

Takeshi MAKI and Taketo UOMOTO

Due to rebound from the wall when shooting, the quality of shotcrete varies between before and after shooting. So accurate quantitative evaluation method of quality evaluation is strongly needed above all for the more demand of high quality shotcrete in the near future. From the past many experimental researches or constructional showings on shotcreting, it is empirically said that rebound is caused by various material and constructional factors, but little is clarified about its mechanism as things are. In this paper, the first theoretical approach is attempted; namely, 2-Dimensional Distinct Element Method (2D-DEM) is applied to estimate the amount of rebound. Some parametric studies are employed and the relationship between every parameters and rebound ratio is considered. As a result, application of this new method is verified against the result of our past experiment or general mentions about shotcrete rebound.