

論文 個別要素法を用いたコンクリート運搬システムの基礎理論の解明

吉國 美涼*1・加藤 佳孝*2・星野 公秀*3・魚本 健人*4

要旨：新たなコンクリート運搬工法が開発され、ダム減勢工にて実施工している。運搬方法に影響する運搬システムの形状の組み合わせは無数に存在するが、現在のところ、その最適組み合わせの選択は実機練り混ぜ試験結果によるものである。そこで本研究では、最適組み合わせを検討するために、コンクリートが運搬設備内をどのように搬送されるか等に関する基礎理論の解明を個別要素法を用いて行った。その結果、個別要素法を用いた解析により実機による実験傾向をある程度再現できることがわかった。

キーワード：個別要素法，ダムコンクリート，運搬設備

1. はじめに

通常、ダムコンクリートを施工する際、バッチャープラントで練り混ぜたコンクリートは、所定の打込み場所までクレーンやインクライン、ダンプトラック、ベルトコンベヤなどを利用して運搬される。その中でもダンプトラックを利用し、運搬経路に一般道を含む場合、一般道の交通事情によりスムーズな運搬ができなくなることが懸念される。この様な問題に対し、**図-1**に示すような新しい運搬システムが開発され、ダム減勢工にて実施工している (**写真-1**)。この装置は、斜面上において円管の内側に数枚の硬質ゴムの羽根を螺旋状に取り付けたもの（以下「搬送管」という）を回転させることにより、コンクリートや土石類を安定した状態で、連続して大量に運搬するものである。**写真-2**に羽根の取り付け状況、**写真-3**にコンクリートの搬出状況を示す。この運搬工法の特徴としては(a)ベルトコンベヤで運搬できない急勾配(20度～45度)の斜面において適用できる、(b)自然環境の改変が非常に少ない、(c)搬送管の内面が耐摩耗性のゴムを取り付けてあるため騒音もほとんど



図-1 運搬システムの概要



写真-1 運搬設備

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 工修 (正会員)

*2 東京大学講師 生産技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*3 水資源開発公団 荒川ダム総合事業所 (非会員)

*4 東京大学教授 生産技術研究所 工博 (正会員)

どない、(d) 搬送管内を運搬させるため気象条件の影響を受け難く粉塵の発生や材料の飛散も生じない、というメリットがある。この装置をダムコンクリートの運搬に使用するために実機試験によって、その性能を確認しており、安定した運搬が可能であることが明らかにされている¹⁾。

この装置の機能は、設置角度、搬送管の径、パイプ回転速度、パイプに用いる材料の素材、パイプ内に取り付ける羽根の形状や枚数、さらには、運搬するコンクリートの物性によって影響を受ける。したがってコンクリート等をこの装置を用いて適切に運搬するためには、これらの要因の影響を定量的に把握し、最適な組み合わせを設定する必要がある。しかし、これらの多数存在する要因の影響を実機により定量的に把握しようとする膨大な時間と費用がかかる。

そこで本研究では、個別要素法(Distinct Element Method)を用いて、コンクリートの運搬状況をシミュレーションすることにより、各要因が装置の運搬性能に及ぼす影響を評価することを目的とした。

2. 個別要素法の基本原理

個別要素法は非連続体をシミュレーションするための手法であり、有限要素法や境界要素法といった連続体を解析する手法とは異なり、対象物を独立した小要素の集合体として取り扱うことができるため、材料の不均一性を考慮することができる。このため、地盤の動的解析や構造物の動的破壊特性、土石流解析などに主に適用されている。コンクリートの分野では、吹付けコンクリートのシミュレーション²⁾や自己充填コンクリートの流動状況の可視化³⁾等に利用されている。個別要素法では、要素の変形は別の要素との接触点のみで生じるものとし、接触したブロック間にばねを置き、力のやりとりを表現している。各要素ごとに独立な運動方程式をたて、時間領域で漸進的に解き、個々の要素の運動を追跡していく。式(1)、(2)に質



写真-2 羽根の取り付け状況



写真-3 コンクリートの搬出状況

量 M_i 、慣性モーメント I_i のある 1 つの要素 i についての運動方程式を示す。

$$M_i \cdot u'' + C_i \cdot u + F_i = 0 \quad (1)$$

$$I_i \cdot \Phi'' + D_i \cdot \Phi' + M_i = 0 \quad (2)$$

ただし、 F_i は要素に働く合力

M_i は要素に働く合モーメント

C_i, D_i は減衰定数

U は要素の変位ベクトル

Φ は要素の回転変位

3. 解析手法

実機の搬送管の長さは約 200m 程度であるが、解析を行うに当り、搬送管の基本構造である図-2 をモデルとした。また、解析の都合上、円は正 24 角形とした。搬送管の直径は $\phi 700\text{mm}$ である。羽根の断面形状は台形とし、搬送管への投影で 120 度に相当する大きさとした。また、

羽根の取り付けは1.1mごとに螺旋状に90度づつずらして断片的に取り付けられている。搬送管の回転の向きは下向きに右回転である。なお、これは実際に現場で使用しているものを参考とした。

解析に使用した RCD コンクリートの配合を表-1に、シミュレーションに用いた各定数を表-2に示す。RCD コンクリートの場合、普通コンクリートと比較して、骨材の影響が大きいと考えられる。そこで今回、解析を行うに当たり RCD コンクリートの各定数の値は、骨材のみを搬送する場合と同様であると仮定し、波動伝播速度から算定した。また要素数は1000個とし、その大きさは粗骨材の粒度分布に従った。以下にコンクリートのパラメータを算出するための式(3)～(8)を示す。なお、算出の詳細については参考文献²⁾を参照されたい。

$$\mu_1 = G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3)$$

$$\lambda_1 = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad (4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\gamma}} \quad (5)$$

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda_1 + 2G}{\gamma}} \quad (6)$$

$$k_n = \frac{1}{4} \pi \rho V_p^2 \quad (7)$$

$$k_s = \frac{1}{4} \pi \rho V_s^2 \quad (8)$$

μ_1, λ_1 : Lamé の定数

G: 剛性率, E: ヤング係数

ν : ポアソン比

V_s : S波速度, V_p : P波速度

γ : 密度

k_n : 法線方向のばね定数

k_s : 接線方向のばね定数

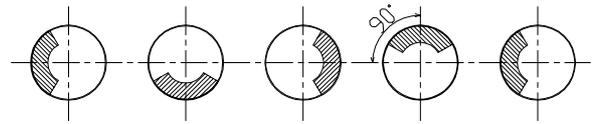


図-2 搬送管のモデル

表-1 コンクリート配合

単位量 (kg/m ³)					
W	C	S	G		
			G1	G2	G3
83	120	724	639	479	479

G1: 80~40mm G2: 40~20mm G3: 20~5mm

表-2 解析に用いた値

ばね定数 (N/m)		減衰定数 (Ns/m)		摩擦係数
垂直方向	せん断方向	垂直方向	せん断方向	
1×10^5	5×10^4	0.01	0.01	0.01

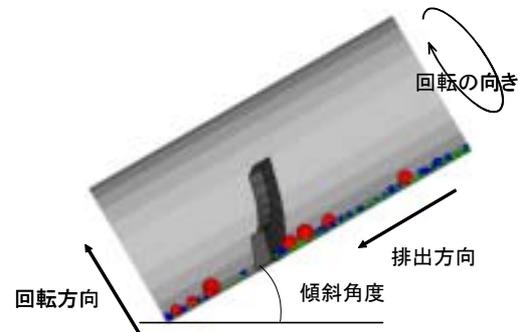


図-3 指標の定義

解析は、まず初めに搬送管の上部にホッパーを作成し、ホッパー内にコンクリートを充てんさせた。これは、実際のコンクリート中の骨材分布を再現することが困難なため、骨材粒径の異なる骨材粒子をランダムに発生させ、ホッパー内に充てんさせることで解析的に処理するために設定した。その後ホッパーと搬送管を仕切っている壁を取り除き、球に初速 0.167m/s を与え搬送管へ投入し、自由落下させることにより、搬送される様子を解析した。なお、この

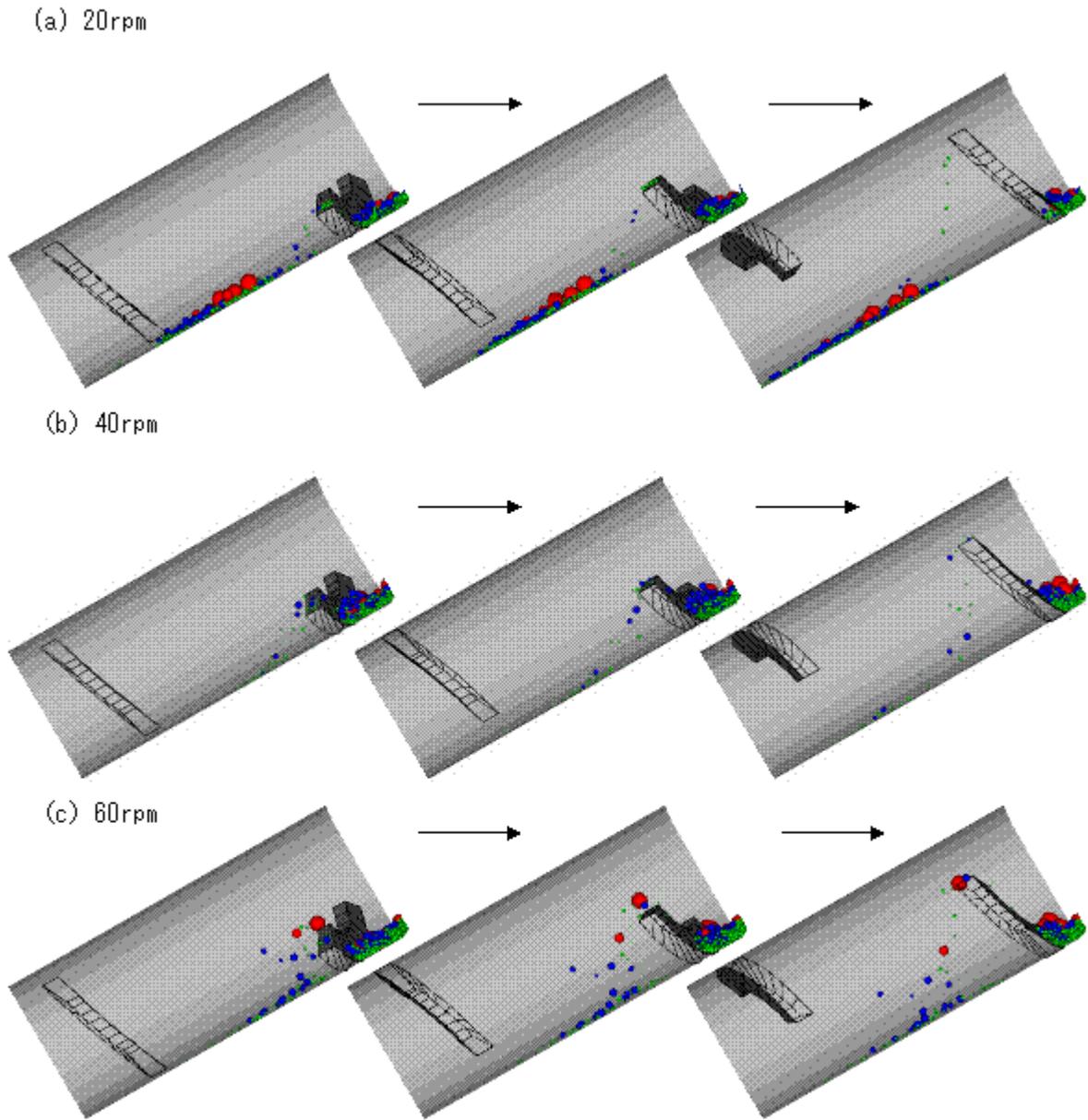


図-4 回転数の違いによる搬送状況

ときに球に与えた初速は、実際の現場において搬送管にコンクリートを投入するときを使用しているベルトコンベアーの速度をもとに決定した。

解析要因は搬送管の傾斜角度及び回転数とし、水準はそれぞれ 25 度～35 度、20rpm～60rpm とした。

4. 解析結果および考察

搬送管内の流動機構を定量的に把握する指標として、解析から得られたコンクリートの流

動速度ベクトルを図-3 に示すように排出方向、回転方向に分けて考えた。

搬送管の傾斜角度 30 度における回転数 20, 40, 60rpm の場合の搬送状況を図-4 に、羽根がない場合の搬送状況を図-5 に示す。図は左から順に時系列で並べてある。羽根がない場合、コンクリートは分散しているのに対して、羽根がある場合、どの回転数においてもコンクリートは羽根と羽根の間では分散するものの、次の羽根に到着すると再びかたまりとなり搬送されていくことがわかる。また、コンクリートは羽

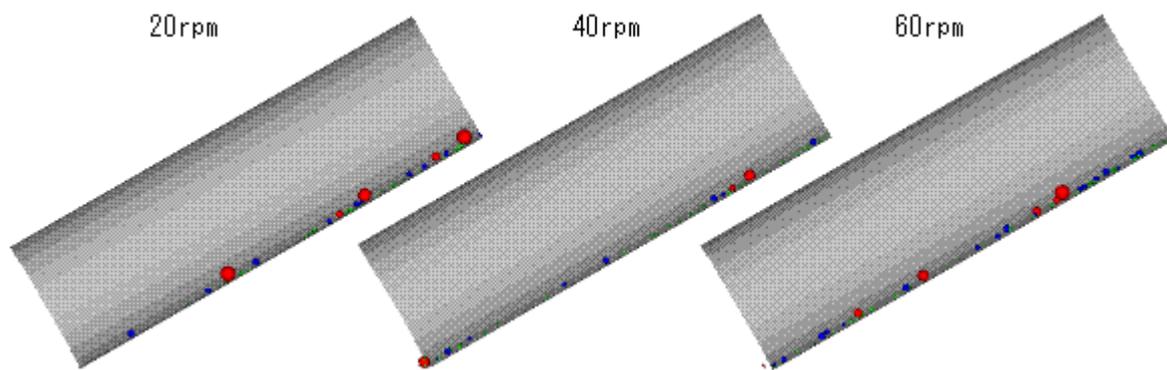


図-5 羽根がない場合の搬送状況

根と衝突した際に羽根とともに回転方向へ移動する。そしてこの移動するコンクリートの量は回転数が大きいほど多い。なお、この傾向は他の傾斜角度の場合についても同様であった。

図-6 に搬送管の傾斜角度が 30 度の場合における回転数の影響を示す。横軸は排出方向の位置を示し、コンクリートが投入される位置が 0m、排出される位置が -5.5m である。縦軸は排出方向の速度を示し、排出される方向の速度がマイナスである。

回転数が大きくなるにつれて排出方向の速度の大きさは大きくなるのがわかる。これは、回転数が大きいほどコンクリートが羽根と衝突し一緒に回転することによる速度増加が大きいからだと思われる。一方、回転数 20rpm、40rpm の場合は速度ベクトルの向きがほとんど排出方向であるにもかかわらず、回転数 60rpm の場合は排出方向と逆向きの速度ベクトルの大きさも急激に増加している。コンクリートが羽根に衝突する際、コンクリートは排出方向と逆向きの力を受けるため、速度ベクトルは排出方向と逆向きとなる。またその大きさは、反発係数が同じことを考慮すると、コンクリートが羽根に衝突する前の速度の大きさに比例する。よって回転速度が 60rpm となった場合、排出方向の速度が大きくなった分だけ逆向きの速度も大きくなったものと考えられる。

次に排出方向の位置と排出方向速度の関係を原点を通る直線で線形近似し、その傾きを運

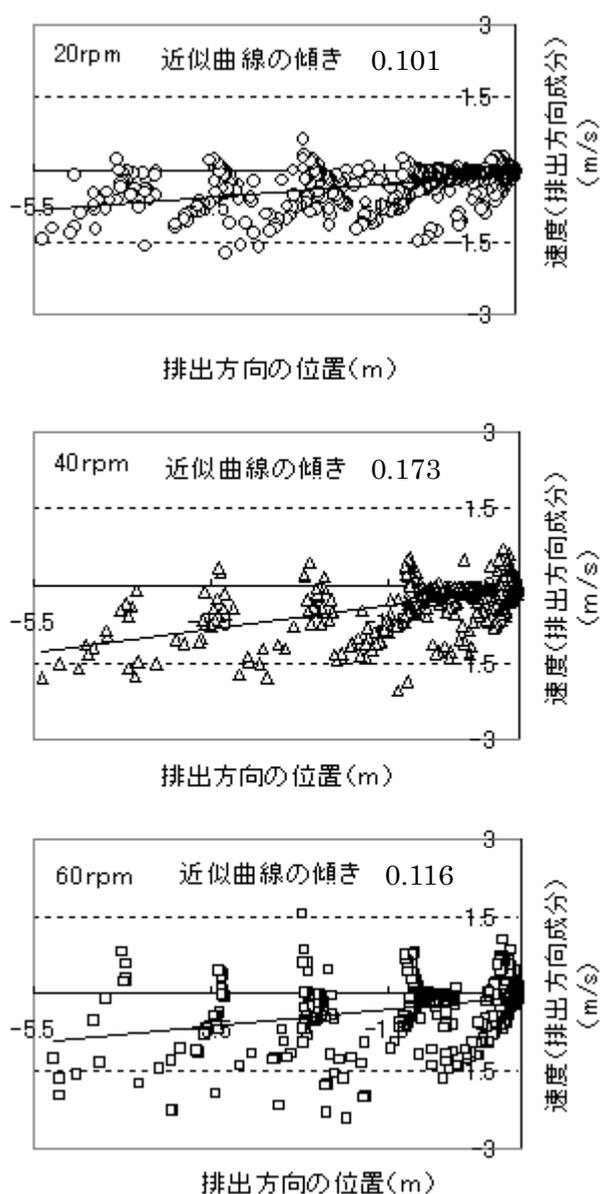


図-6 回転数の影響

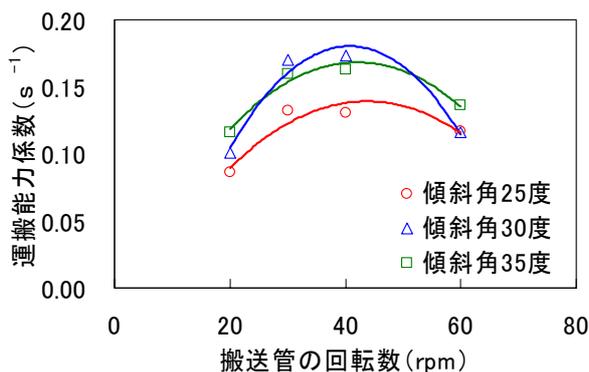


図-7 コンクリートの運搬能力（解析値）

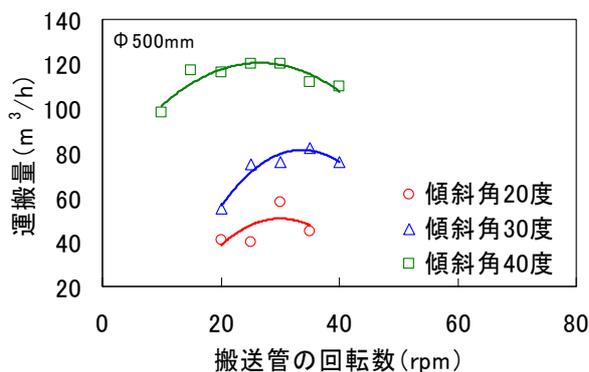


図-8 コンクリートの運搬能力（実験値）

搬能力係数と定義した。図-7にそれぞれの傾斜角度における回転数と運搬能力係数の関係を示す。また図-8は実機を用いて行ったコンクリートの回転数と運搬能力の関係である。いずれの傾斜角度においても回転数の増加に伴い運搬能力は増加し、ある値を境として運搬能力は減少している。このことから、本解析により実験結果をある程度再現できていることがわかる。傾斜角度の違いにより搬送管の回転数に対する運搬能力の増加の割合が異なるのは、傾斜角度により重力に対する羽根の傾きが異なることが一因にあると考えられる。

今回の検討では、解析値と実験値の大まかな傾向を再現することができたものの、定量的な評価はできなかった。この原因としては、DEMは非常に解析時間がかかるため、解析を行ったコンクリートの量が少ないこと、モルタルの影響を考慮していないこと、等が考えられる。

そこで今後の課題としては、(1) コンクリートの搬送管に占める装填率の影響の把握、(2)

解析に用いた諸定数の再検討、等を考えている。

5. 結論

コンクリートが搬送管内をどのように搬送されるかを解明することを目的として、個別要素法により解析的検討を行った。

本解析内において以下に示す結論を得た。

- (1) コンクリートが搬送管内を搬送される状況を個別要素法を用いて再現することができた。
- (2) コンクリートが搬送管内を流動する際、搬送管の傾斜角度、回転数によらず、コンクリートは羽根の間では分散し、羽根に到着すると再びかたまりとなり搬送されていくことが明らかとなった。
- (3) 運搬能力が最大となる回転数が存在するという実機実験の結果を解析によってある程度再現することができた。

参考文献

- 1) 大藪勝美, 松枝修治, 徳田憲治, 加藤剛四郎, 水谷淳; 新しいコンクリート運搬工法 SP-TOM を滝沢ダムへ適用するための検討, ダム技術 No. 178, pp. 9-33, 2001. 7
- 2) Phan, Quoc H.D; 3-D SIMULATION USING DISTINCT ELEMENT METHOD FOR PREDICTION OF SHOTCRETE SHOOTABILITY, PhD. Dissertation submitted to the University of Tokyo, Japan, 2002
- 3) Noor, M.A; Three-Dimensional Distinct Element Simulation of Flowable Concrete, PhD. Dissertation submitted to the University of Tokyo, Japan, 2000