

個別要素法を用いたコンクリート運搬システムの 性能評価に関する研究

Evaluation of a new concrete transportation system using DEM analysis

吉 國 美 涼*・加 藤 佳 孝**・魚 本 健 人**

Misuzu YOSHIKUNI, Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO

1. はじめに

現在、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、ベルトコンベヤ等を利用して運搬される。しかし、いずれの工法も設備規模が大きくなることや、コスト、自然環境面で問題があること等が指摘されている。そこでこのような現状を解決するために、図1に示すような新たな運搬工法が開発され、ダム工事現場において実施工されている。

この装置の性能は、搬送管の設置角度や管径、回転速度、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。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。なお、今回は、無数に存在する運搬性能に影響する要因の中から、搬送管の傾斜角度と回転数の関係

に関して考察を行った。

2. 運搬工法の概要

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1に羽根の取り付け状況、写真2にコンクリートの排出状況を示す。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

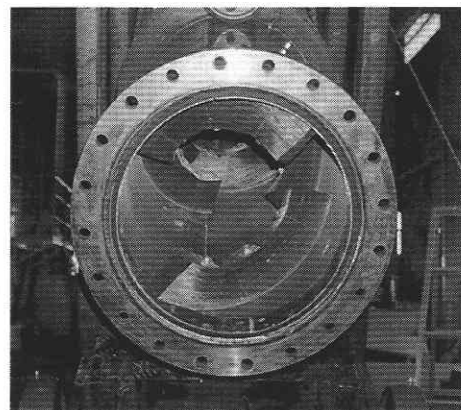


写真1 羽根の取り付け状況

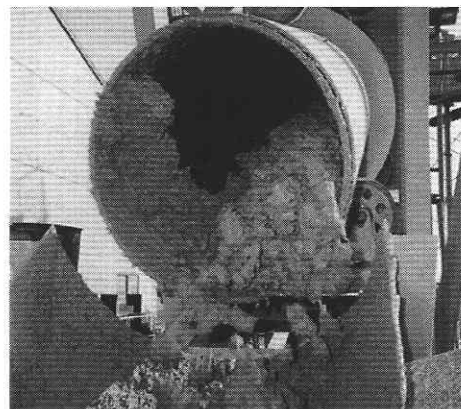


写真2 コンクリートの排出状況

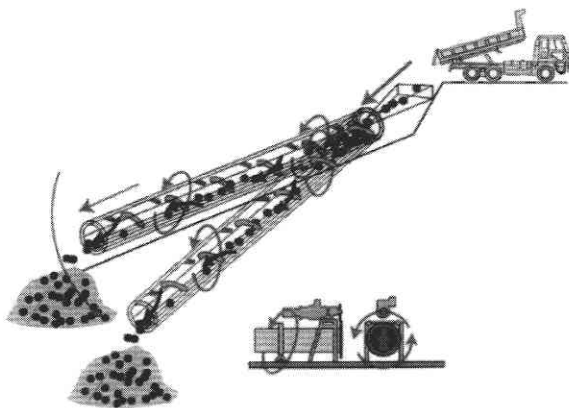


図1 運搬システムの概要

*東京大学大学院工学系研究科

**東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

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. この装置は, 実機による運搬試験によって, 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⁾.

3. 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, 対象物を独立した小要素の集合体として取り扱うため, 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. 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.

$$m_i \cdot \ddot{u} + C_i \cdot \dot{u} + F_i = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$I_i \cdot \ddot{\phi} + D_i \cdot \dot{\phi} + M_i = 0 \dots\dots\dots (2)$$

ただし, F_i : 要素に働く合力, M_i : 要素に働く合モーメント, C_i, D_i : 減衰定数, u : 要素の変位ベクトル, ϕ : 要素の回転変位

4. 解析手法

実機の搬送管の長さは約 200 m 程度であるが, 解析を行うに当たり, 搬送管の基本構造部 (搬送管の長さ: L) のみを取り出し, 解析を行った. 搬送管は, 管径 $\phi 700$ mm, $L = 5.5$ m, 羽根の枚数は 5 枚とし, 搬送管の傾斜角度を 20 度 ~ 40 度まで変化させて解析を行った. 図 2 に羽根配置図を示す. 搬送管のモデルは, 解析の都合上, 円を正 24 角形とした. 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. 搬送管の回転の向きは下向きに右回転である.

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が考えられる. 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出し, 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

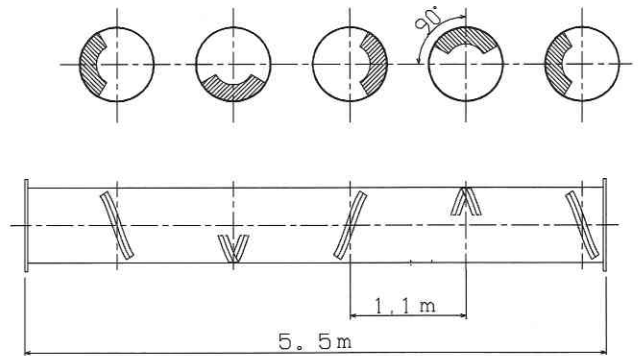


図 2 羽根配置図

表 1 RCD コンクリートの配合

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

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

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

示す. なお, 算出の詳細については参考文献³⁾ を参照されたい.

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

$$\lambda_1 = \frac{Ev}{(1+v)(1-2v)} \dots\dots\dots (4)$$

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

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

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

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

- μ_1, λ_1 : Lamé の定数
- G: 剛性率, E: ヤング係数
- v: 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

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

研究速報

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行った。その後ホッパーと搬送管を仕切っている壁を取り除き、自由落下させることにより、搬送される様子を解析した。

5. 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。

また、コンクリートを運搬する際は、排出速度がある程度大きく、一定の速度で排出され、材料の分離がないことが重要であると考えている。そこで、今回は、コンクリートの排出速度および排出時の速度のばらつきに着目して解析結果の考察を行った。

図4に搬送管の傾斜角度40度、回転数30rpmの場合を例に搬送状況を示す。図は、左から順に時系列に並べてある。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って搬送されていくことがわかる。なお、この傾向は他のケースについても同様であった。

図5にコンクリートの排出速度を示す。実験値は、コンクリートの最大運搬量からコンクリートが搬送管に占める充填率を1/3と仮定して算出し、解析値は、粒子の排出方向成分における平均速度を示している。いずれの傾斜角度においても回転数の増加に伴い排出速度は増加し、ある値

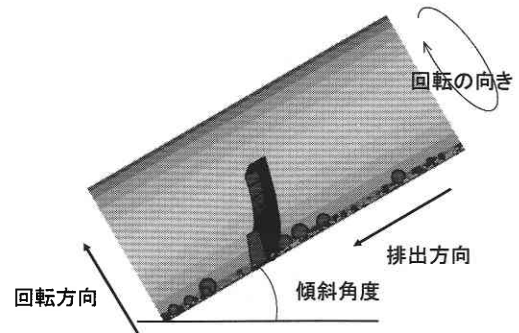


図3 指標の定義

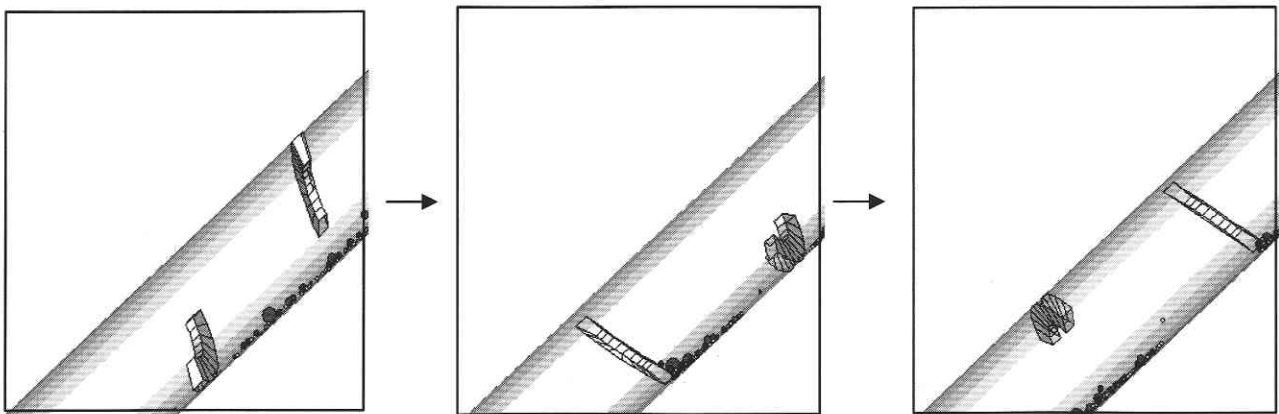


図4 搬送状況

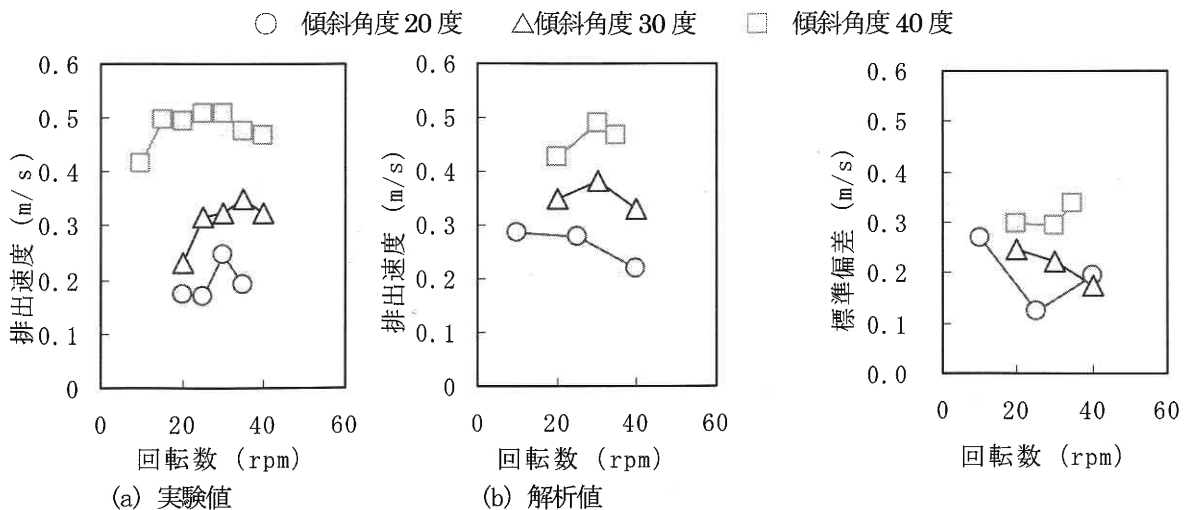


図5 コンクリートの運搬能力

図6 排出時の速度のばらつき

を境として減少している。このことより、本解析は、実験結果の傾向をある程度再現できていることがわかる。運搬能力を最大とする回転数のピーク値が存在するのは、回転数が小さいときは、重力の影響がコンクリートに作用する遠心力と比較して大きく、回転数が増加するほど、遠心力の影響の方が大きくなるためだと考えられる。一方、実験値と解析値の値が一致しない原因としては、解析を行ったコンクリートの量が実験と比較してかなり少なかったこと、モルタルの影響を考慮していないことが一因であると考えられる。つまり、モルタルの影響を考慮した場合、その影響は、搬送管の傾斜角度が小さい方が顕著であると予測でき、搬送管の傾斜角度による排出速度の違いがもっと顕著に現れるものと考えられる。図6に、コンクリートの排出時の速度のばらつきを示す。この結果、傾斜角度が大きくなるに従い速度のばらつきが大きくなっていることがわかる。一方で、傾斜角度が40度の場合、回転数による速度のばらつきに大差はなかったものの、傾斜角度20、30度の場合、回転数により速度のばらつきの程度に差が認められた。さらに、傾斜角度が20度の場合、排出速度が同程度であっても速度のばらつきの程度は大きく異なった。したがって、現場の斜面の傾斜に依存する搬送管の傾斜角度を変えることは、難しいが、搬送管の回転数は、容易に変えることができることから、回転数を決定するに当たっては、排出速度のみならず、コンクリートの材料分離についても考慮する必要がある。

6. ま と め

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搬送される際、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って搬送されていくことが明らかとなった。
- (3) 排出速度が最大となる回転数が存在するという実験結果を解析によってある程度再現することができた。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、水資源開発公団荒川ダム総合事業所の方々には、多大なるご協力を頂きました。深く感謝の意を表します。

(2004年1月10日受理)

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