

京都大学工学部 学生員 ○大野正博
京都大学工学研究科 正会員 原田英治
京都大学工学研究科 正会員 後藤仁志
京都大学工学研究科 フェロー 酒井哲郎

1.はじめに 被覆ブロックの安定性は、Hudson 公式に代表されるように、単一ブロックに作用する駆動力(揚力)と抵抗力(重力)の均衡に基づいて論じられるのが一般的である。しかし、被覆層では、単一ブロックが移動を始めても被覆層はブロック群としての抵抗を示すので、直ちに破壊されるわけではない。そこで、本研究では、ブロック間の衝突を陽に取り扱える個別要素法型の粒状体モデルを用いて、ブロック群が破壊される過程を再現し、単一ブロックの幾何的形状の違いによる噛み合せ効果が被覆ブロック群の安定性に与える影響を検討する。

2.シミュレーションモデルの概要 複数要素間の相対位置関係を固定する剛体連結モジュールを組み込んで拡張した個別要素法型の粒状体モデルによって、砕石上に敷かれたブロックの運動を、振動流の作用下で追跡する。接触状態にある要素間にはバネ・ダッシュポット等を配置して相互作用を評価し、剛体を構成する個々の要素には、剛体の重心周りの角運動量が保存されるように相対回転角を算定し、要素間の相対位置が変化しないように座標修正を施すことにより、剛体挙動させる。底面付近の流速場は、鉛直 2 次元非定常流れの Reynolds 方程式を $k-\varepsilon$ 乱流モデルで完結させたものを用い、壁面境界条件は、砕石径を粗度とした粗面を想定した壁法則で与えた。また、計算機の演算能力の制約から、ブロック間相互作用の追跡に焦点をあてて、流体・要素間に関して混合相流的な扱いは行っていない。

3.計算条件 被覆ブロックには、噛み合せ効果の違いによるブロック群の安定性を論じるため、矩形ブロックとドロス・合掌ブロックを採用し、ドロス・合掌ブロックでは鉛直 2 次元で表現する必要から十字型、H 型で表現した。何れのブロックも要素径 $d=2.0\text{cm}$ であり、ブロックは要素を剛体連結して形成するのでブロック形状が異なると使用する要素数も異なる。そこで、個々のブロックの重量が同一になるように、矩形・十字・H 型各ブロックの構成要素の比重をそれぞれ $\sigma/\rho=2.65, 4.24, 3.03$ (σ : ブロック要素の密度, ρ : 水の密度)とした。また、計算領域の左右は周期境界としている。初期配列時には施工精度のばらつきを考え、砕石配列に不規則な凹凸を与え、ブロック間にも若干の間隙を残して配列している。また、振動流の条件(T : 周期, $U_{\max}$: 境界層外縁の最大流速)を表-1 に、粒状体モデルで使用したモデル定数(k_n : 法線方向バネ定数, k_s : 水平方向バネ定数, η_n : 法線方向粘性定数, η_s : 接線方向粘性定数)を表-2 に示す。

4.シミュレーション結果 図-1 に振動流下における矩形ブロックの変形過程のスナップショットを示す。packing が終了する $t=0.2\text{s}$ から振動流を作用し始めると一斉にブロックの水平運動が生じる。その後、ブロック間の衝突が繰り返していくうちに、ブロック間に空隙が現れる。ブロックの間隔の広がる箇所では、両側に接する被覆ブロックに拘束されにくく、被覆ブロックの運動が活発になり、 $t=1.1\text{s}$ に見られるように回転を伴った運動が示された。一方下段のブロックは、上段のブロックにより上下方向の動きに制約があるため、回転運動はわずかであり主に水平運動で構成されている。また、底面砕石要素の凹凸や、上段ブロックの拘束に起因して下段ではブロックの停滞が生じる。ブロックの停滞が大きな空隙を誘発し、 $t=3.8-10.0\text{s}$ で示すようにその空隙の部分に上段のブロックの滑落が見られる。以上のシミュレーション結果より、被覆ブロックの破壊を防ぎ、被覆ブロックの機能を発揮するためには、被覆ブロックの運動をできるだけ抑制する必要があると判断される。

次に、被覆ブロック間の噛み合わせ効果を検討するために、ドロス・合掌ブロックを想定した被覆ブロックを配置してシミュレーションを実行し、その様子のスナップショットを図-2に示す。ドロス・合掌ブロックの場合矩形ブロックより強固に噛み合わさっており上下方向の運動は強く抑制され、回転運動はほとんど生じておらず、主に水平運動に支配されている。それ故に、空隙は水平方向に伝播しやすい。 $t=10.0s$ の $x=0.0-0.1m$ に見られるように一部に空隙の集積が生じるが、その他の部分ではかなり安定していると言える。以上のシミュレーション結果と図-1の噛み合わせ効果が小さい場合と比較することで、被覆ブロックの変形破壊を防ぎ、被覆ブロックの上下方向、水平方向の動きを抑制するにはブロック間の噛み合わせによる抵抗力が有効であると言える。さらに、シミュレーションから得られた結果を定量的に検討するために、被覆ブロックについて packing が終了する $t=0.2s$ を基準とした重心の鉛直方向成分 (y_{gc}) の時系列を図-3に示す。これより、明らかに矩形ブロックの振幅がドロス・合掌ブロックと比較し大きく変動していることがわかる。このことから、図-2で示したスナップショットから考察された被覆ブロックの上下方向の動きを抑制するには、ブロック間の噛み合わせによる抵抗力が有効であることが、再確認された。

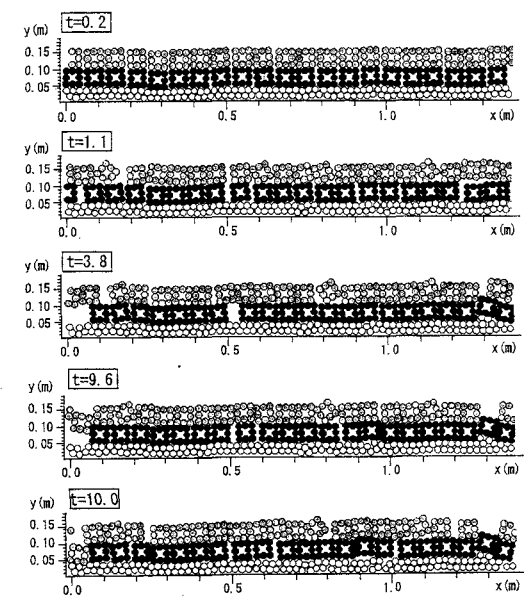


図-1 矩形ブロックのスナップショット

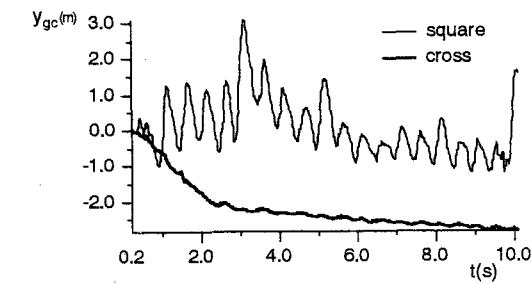


図-3 ブロック群重心の時系列

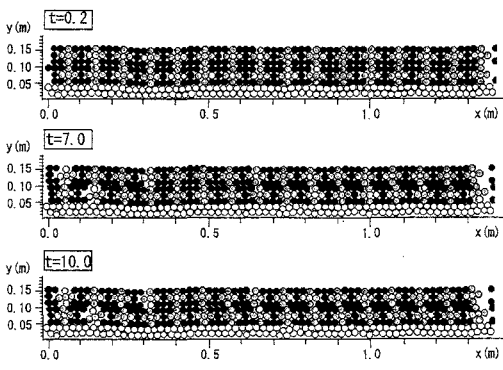


図-2 ドロス・合掌ブロックのスナップショット

表-1 計算条件

case	shape	T(s)	$U_{max}(cm/s)$	bottom surface shape
1	square	1.0	140.0	irregular
2	cross			

表-2 モデル定数

k_n	26.04×10^3	N/m
k_s	10.02×10^3	N/m
η_n	0.76×10^3	Ns/m
η_s	0.47×10^3	Ns/m