

## (2) 3次元個別要素法による砂礫流の衝撃力予測に関する基礎的研究

Application of Distinct Element Method to estimate impact force by debris flow

今村 建二\*, 金子 徹\*\*, 小口 菊雄\*\*\*, 辻 裕\*\*\*\*

Kenji IMAMURA, Touru KANEKO, Kikuo KOGUCHI and Yutaka TSUJI

- \* 三菱重工業(株)横浜研究所 主査(〒236 横浜市金沢区幸浦1丁目8番地1)
- \*\* 三菱重工業(株)横浜製作所 鉄構技術部水門鉄管設計課 課長(〒231 横浜市中区錦町12番地)
- \*\*\* 三菱重工業(株)横浜製作所 鉄構技術部水門鉄管設計課 (〒231 横浜市中区錦町12番地)
- \*\*\*\* 工博 大阪大学教授 工学部産業機械工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

キーワード: 排砂設備, 衝撃力, 個別要素法

(debris barrier, impact force, DEM)

## 1. 緒言

砂礫流の複雑性を考えると、目標とする物理量を把握することは実験をもってしても容易ではなく、その分野の構造設計に適用する量は実験で求めたものであっても近似性を認めない<sup>(1)</sup>。

本論文では3次元個別要素法で砂礫流をシミュレーションし衝撃力を近似的に求める手法に関する基礎的な研究結果を示した。ねらいは、近似した点を明確にして解を求め、近似性を念頭において解を見ることで、実験資料と類似の有効情報の抽出を図ったところにある。

本研究の前にも個別要素法による砂礫流のシミュレーションが公表されている<sup>(2, 3, 4)</sup>。それらの結果の中に構造設計に直接参照できる物理量を見出す事は今は難しい。そこまで踏み込む数値を出すには当時の計算機では負荷が大きすぎたと推定するが、また、照合する実験資料の公開値が当時資料にもまた今も少ないと思われる。しかし今後の実験研究の拡大、また計算機能力の向上は、実現象理解の深まり及びシミュレーション法の向上と、結果としてシミュレーションによる実験と類似の有効情報の抽出に結びつくであろうと筆者等は考え取り組んでいる。

今回の研究では空中での砂礫流をシミュレーションし、床面あるいは側壁に発生する衝撃力を求めた。衝撃力の絶対値の評価に関しては、空中落下衝撃力の実験値と本計算の値との比較から補正値を求めて適用した。

当研究の特徴は側壁や局面床を含む任意の境界条件に関して砂礫流の衝撃力の基礎的な検討ができる点にある。実現象の複雑さに鑑ると今後に残しているか第一段階として報告する。

## 2. 計算の理論

計算理論全般は他書<sup>(2, 3, 4, 5, 8, 9)</sup>に譲り、ここでは球体間に作用する粘性抵抗力に関する取りあつかい法を示す。球体の衝突によるエネルギー減衰をダッシュポットで表す。その減衰ははねかえりの係数と整合しなくてはならない。それについては田中等<sup>(6)</sup>の研究を適用し、次のように求めた。

$$d = \delta \eta \quad (1)$$

ここに  $d$ ; 減衰力

(添え字を削除して法線方向, 接線方向の共通表現としている)

$\eta$  ; 減衰係数

$$= \alpha (m \cdot k)^{0.5} \delta^{0.25} \quad (2)$$

$\alpha$  ; 図1で表されるパラメータ

$m$  ; 着目球体の質量

なお、 $\eta$ の値は法線方向値を求め、それと同値を接線方向にも適用した。

### 3. 単体球の発生させる衝撃力の検討

本研究の排砂設備における砂礫の衝撃力の検討に際し、単体球の発生させる衝撃力に関する実験値と、本研究での計算値との比較検討をした。実験は受託業務であったため、実験値等に参考文献8を参照されたい。

#### (1) 落下供試体の説明

図2に落下供試体の説明を示す。特徴は下記である。

- a) 材料は鋼であり、質量は20~67.2kgであった。
- b) 上部のフランジ部を電磁石で吊り、解磁して落下させた。
- c) 中央部の4個のストレインゲージで衝撃力を捉える。実験の前に、床面のロードセルに落下させ、ロードセルとストレインゲージとの校正値が得られた。この方式が採用されたのは、床材の損傷状況や応力伝播状態も研究されたことによる。

#### (2) 計算衝撃力波形の例

下記の条件に関して計算した衝撃力の波形を図3に示した。

球の半径 ; 0.125m

質量 ; 67.2kg

ヤング率 ;  $2.06 \times 10^{11}$  Pa

ポアソン比 ; 0.34

衝突速度 ; 0.64m/s(高さ2mからの落下速度)

減衰率パラメータ  $\alpha$  ; 0.5, 0.4

(はねかえりの係数 約0.5, 0.6相当値)

計算時間刻み ;  $2 \times 10^{-6}$  sec

図3の結果と実験結果との照合の結果は次のようであった。

f) 衝撃力の値は、計算値の最大値が約3300kNであるが、実験値の最大値は約1500kNであったことから、計算値が実験値に比し約2.2倍大きかった。

g) 衝突時間は計算値が実験値の約0.6倍に短かった。これについては、図2のストレインゲージが実際より長い衝突時間を示す結果であると考えられる。すなわち、図2のストレインゲージがとらえる衝突時間とは、下方の球状体が衝突し離反する過程で、上方の球状体がストレインゲージ貼り付け部等の途中部材を圧縮し圧縮解除するまでの時間である。その時間は単一球が衝突離反する時間より長くなると考えるのが自然であろう。

h) 計算時間刻みはここで採用した値が衝撃力を滑らかに計算する上で適切と言える。

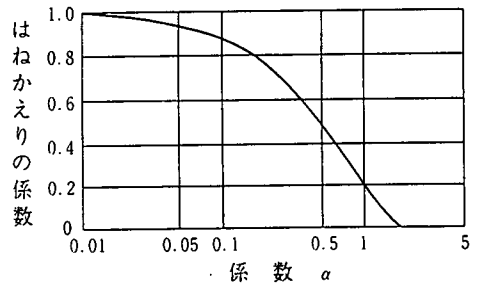


図1 減衰係数のパラメータ<sup>(8)</sup>

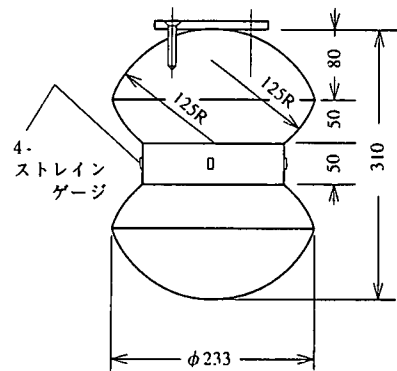


図2 落下衝撃力実験供試体 (単位はmm)

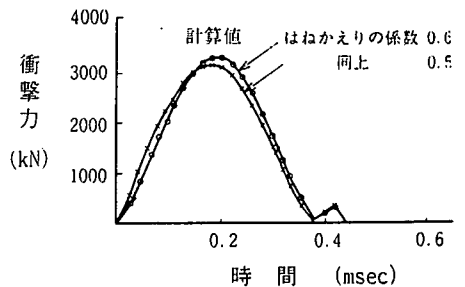


図3 落下衝撃力の計算値

(3)落下高さを変えた衝撃力の計算値の検討

上記2)の条件に関し、落下高さ 0.5, 1, 1.5m 相当値の計算を行なった。

その結果を図4に示す。同図の計算値衝撃力はほぼ実験値の2.3倍の値であった。

上述の事項の評価においては、計算値が実験値の約2.3倍であることに議論が残る。単独球の衝撃力のみに着目した研究の場合には、さらに詳細なモデル化と時間をかけた計算も必要であろう。

砂礫流の場合には無数の衝突を取り扱う。そこで本研究では第一次手法として、計算値に1/2.3の補正をすることで表現スケールへの検討に供することにした。

(4)球径の差の計算値への影響

この件に関する実験資料は無いが、次節で実設備の検討をするに先立ち、球径の違いが計算値に及ぼす影響について検討した。

計算の条件は下記である。

a)実設備に近い条件

- 球体の直径 ; 0.2m
- 石礫の密度 ; 約 2700 kg/m<sup>3</sup>
- 球体の質量 ; 約 11.3 kg
- 衝突速度 ; 16.7m/s(落下高さ14.2m 相当値)

b)比較計算条件

- 球体の直径 ; 0.5 m
- ” 質量 ; 11.3 kg (上記 a) に同じ)
- 衝突速度 ; 16.7m/s

計算の結果を図5に示す。同図の如く球体の直径を大きくモデル化すると他の条件が同じでも衝撃力は大きく計算される。これは球の直径が大きいとばね定数が大きくなるため衝突時間が短くなることによる。上記の比較計算では、球の直径を実際に近い0.2mから0.5mに変えた場合、衝撃を約20%大きく示すことが分かる。

4. 実機排砂設備相当の解析

(1)対象設備の寸法

図6に検討対象の排砂設備のモデル化寸法を示す。特徴を要約すると次のとおりである。

- a)実機の貯砂池に相当させて、矩形の貯砂域を設けている。
- b)ゲートをモデル化した移動壁を有している。ゲートの寸法は、幅3m、高さ4mである。
- c)ゲートの床面は河床から14.2m 上方にあり、河床に至る間に、円弧および傾斜部を有している。
- d)ゲートから河床に至る間は流路幅3mを保つ鉛直側壁を有している。

(2)計算条件及び近似

a)空中の重力落下衝撃力の計算

ここでは空中の重力落下衝撃力の検討をする。実際の設備では水も流出するが、その現象を精度高く検討するにはまだ多くの時間を必要とするであろう。実設備の計画においても空中落下衝撃力を基礎データとした計算が採用されるが、本研究でもそれと類似の視点で検討をし、砂礫の流れ、またその流れの中で発生する衝撃力と分布等に新資料

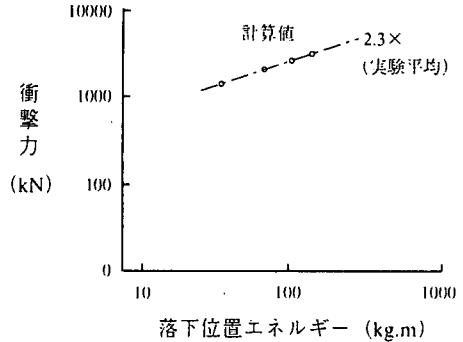


図4 各種落下高さに対する計算衝撃力

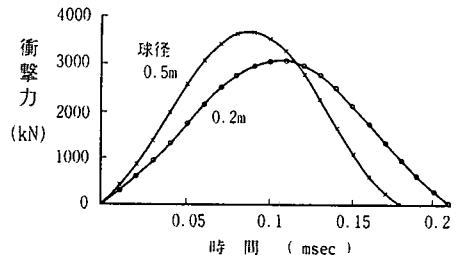


図5 球直径の差が計算衝撃力に与える影響例

の提供を図る。

b)ゲートの開き速度

全開までの時間を0.1secの瞬間的な開き現象に近似した。この近似により、短時間に多量の砂礫が流出することになるから、計算としては厳しい側の現象を取り扱っていると言える。

c)砂礫の寸法と材料特性

砂礫の直径は50cmとし、質量は直径20cmの石に同じとした。ここに石の密度は $2700\text{kg/m}^3$ とした。この近似で衝撃力は約20%大きめに評価することは前節で記述した。直径の大きい球体で計算したのは、同一体積流れを表現する上で球の数を低減できるため計算負荷を小さくできることによる。

砂礫のヤング率については、石英の値を採用して $7.31 \times 10^{10}\text{Pa}$ とした<sup>(7)</sup>。ポアソン比は鋼材等と類似と近似して0.34とした。またはねかえりの係数については0.25と想定した。これは実験結果において、落下高さが大きくなるとはねかえりの係数が小さくなる現象が見えたので、図3の条件より小さめの値を想定した事による。

d)壁はすべて鋼材とした。

(3)計算結果の整理法

計算衝撃力は時間的にも空間的にもランダムにまた多数の値を示す。そこで下記の整理をほどこした。

a)代表格子座標での表示

流れ方向座標をxとすると、そこに $x_1, x_{1+1}, x_{1+2}, \dots$ のステップ座標を設ける。そして例えば $x_i < x < x_{i+1}$ で発生した衝撃力は全て $x_{i+1}$ で発生したと見なすことにした。xに垂直なy, z座標についても同じである。これは次で述べるピークホールド衝撃力の表示の上で有効になる。

b)ピークホールド衝撃力の表示

ある代表格子座標 $(x_{i+1}, y_i)$ での衝撃力としては1個の値で充分であり最大値を知りたい。そこで計算過程での着目格子座標での衝撃力としては常に最大値のみを採用することにした。このピークホールド衝撃力がほぼ不変状態になればもはやそれ以上の計算の実行は意味が少ない。その計算時間判定にもこの表示は有効である。

(4)計算時間刻み他

計算時間刻みは図3の説明で述べた如く $2 \times 10^{-5}\text{sec}$ とした。

また計算時間は5secとした。この時間でピークホールド衝撃力がほぼ不変になった。

(5)計算結果

a)全般的パターン

図7にゲートが開いて砂礫が流出し、床の各部に衝撃力が発生する状況のパターンの例を示す。同図において、時刻tはゲート開き始めからの時間である。本計算で取扱った空中の砂礫流の挙動としては妥当な結果を示していると考え。実現象では水と一緒に流出し、河床部にもある程度水深が保たれている状態で落下するから、河床部の衝撃力はこの計算値よりかなり小さいであろう。それについては次段階で検討したいと考えている。

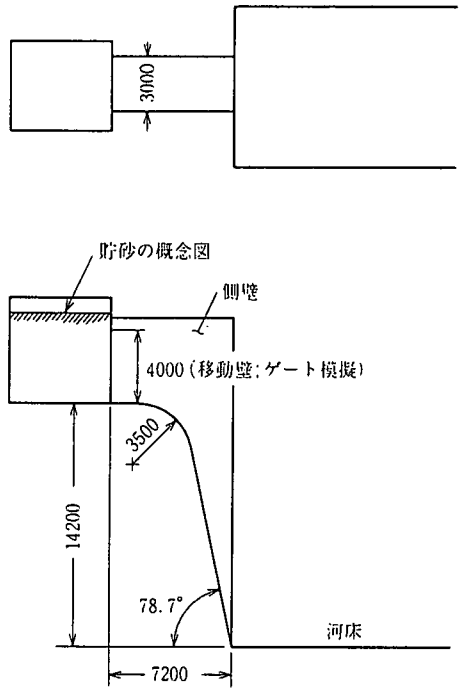


図6 実機排砂設備のモデルの寸法(単位mm)

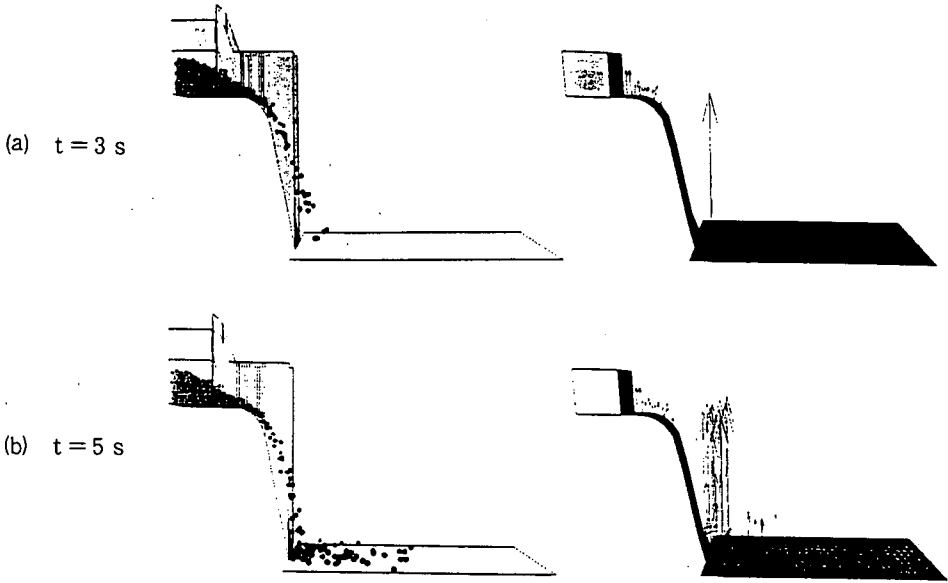


図7 流れと衝撃力のパターン計算結果の例

b) 床面の衝撃力の予測値

図8に床面の衝撃力の予測値を示す。要約すると次のことが言える。

i) 図8(a)より、ゲートの流出口から河床に至る間においては、最大衝撃力は約300kNである。また傾斜面の下方に衝撃力が見えるが、これは河床に落下した際のはねかえりで衝突したものであり、落下過程の直接衝突は計算では現れなかった。

ii) 河床での現象に関しては分布について述べる。

図8(a)より、ゲート設置高さからの直接落下衝撃力発生範囲としては河床の始端から約3mの範囲が予想される。

その下流約5mの範囲にはねかえり落下領域がある。また、図8(b), (c)より、幅方向への分布は比較的小さく、両幅で約8mの範囲に大きな荷重が発生すると考えられる。

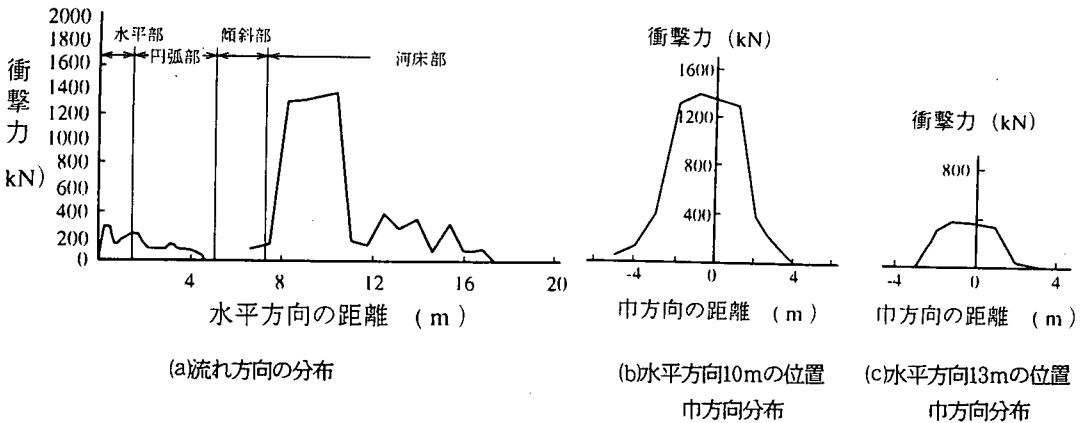


図8 床面の衝撃力の予測値

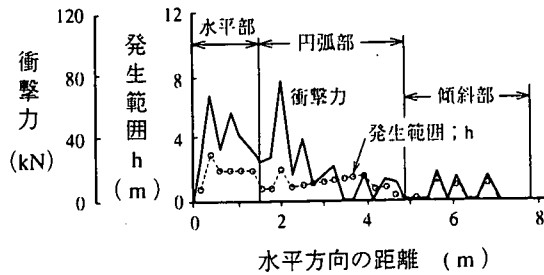
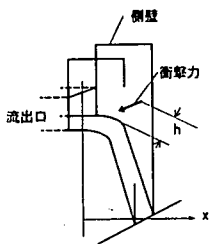


図9 側壁の衝撃力と発生域の予測値

ハ)側壁については、図9から、最大衝撃力は約80kNまたその発生範囲は、床面から約3mまでと予測される。

## 6. 結び

排砂設備を対象として、3次元個別要素法により砂礫の流れをシミュレーションし、床面あるいは側壁に発生する衝撃力を解析的に予測する手法を研究した。

衝撃力の絶対値については、単一球が自由落下して床面に発生させる衝撃力を実験値と計算値とで比較して、計算値を補正する手法を採用した。

排砂設備の実寸法に相当する条件で計算を行なった結果、ゲートの直下流床面では、最大衝撃力は約300kN、側壁では約80kNと想定された。

実現象は複雑であり、各種の検討の積み重ねが必要であるが、当手法も衝撃力とその分布等の検討にひとつの資料を提供すると思われる。

## 参考文献

1. 水山；砂防ダムに対する土石流衝撃力算定とその問題点；新砂防, Vol. 32, No.1, (112号)
2. 木山他；カンドルの離散剛要素法を用いた岩質粒状体の重力流動の解析；土木学会論文報告集, 333, 1983
3. 内田他；岩屑流・土石流解析への個別要素法の応用；構造工学における数値解析シンポジウム論文集, 第13巻(平成元年7月)
4. 下田他；個別要素法によるコンクリート製砂防ダムの衝撃破壊シミュレーション解析；土木学会論文集, No. 480/IV-21, 1993
5. Mindlin, R. D. & Deresiewicz, H.; J. Appl. Mech. Trans. ASME, 20(1953), 327
6. 田中他；水平管内粒状体プラグ流の直接数値シミュレーション；日本機械学会論文集(B編), 57巻534号(1991-2)
7. 丸善；理科年表；1993
8. 今村他；3次元個別要素法による砂礫流の衝撃予測に関する基礎的研究；ダム工学(1996年4月；投稿中)