

防衛大学校 土木工学科 ○伊藤一雄, 香月智, 石川信隆
砂防・地すべり技術センター 阿部宗平, 共生機構(株) 中村徹

1. 緒言

セル型砂防ダムは、鋼壁板の中に現地土砂を中詰めした砂防ダムである。著者らは、この砂防ダムの土石流中の巨礫衝突に対する抵抗メカニズムを解明するための基礎研究として、砂中詰材の局部衝撃実験を行った。その結果、中詰材抵抗力には締め固めの程度が大きな影響を及ぼすことが明らかになった¹⁾。本研究は、締め固めの効果を表すために、応力伝達の有効範囲を考慮した個別要素法を提案し、中詰材に水平衝突荷重が作用する際の応答の解析を試みたものである。

2. 実験の概要と実験結果

解析対象とする実験の供試体は、図-1に示すような幅20cm、高さ1.0m、長さ1.0mの容器に、気乾状態のケイ砂(比重2.664、粒径範囲(0.5~1.0mm))を単位体積重量が1.33gf/cm³になる緩詰めと1.53gf/cm³になる密詰めの2つの充填方法で作成した。供試体の一方の側壁は固定しているが、他方の壁は20cm×20cm×20cmの立方体の箱を5個積み重ねて作成し、載荷点以外の箱は固定して、載荷点の箱を上下にコロを挟んで、水平に移動できるようにし、100kgfの重錘を衝突速度1m/s、2m/sおよび4m/sで下から2段目の治具に衝突させる実験を行った。

3. 個別要素法による解析

3.1 解析モデル

要素間に働く力と変形を図-2に示すような接線・法線方向の弾性ばねとダッシュポットおよびスライダ²⁾によって表す。

ここで、要素の接触状態を従来の個別要素法に応力伝達の有効範囲の概念を導入して、図-3(a)に示すように、次の3種類とする。

完全接触状態 : $D \leq R_i + R_j$ (1)

不完全接触状態 : $R_i + R_j \leq D \leq R_i + R_j + R_e (= D_e)$ (2)

完全離反状態 : $D > R_i + R_j + R_e (= D_e)$ (3)

ただし、 D :要素間距離 R_i, R_j : i, j 要素の半径 R_e :応力伝達の有効範囲

D_e :要素間の有効範囲

ここで、さらに3つの状態に応じて、要素間に働く力 Q を図-3(b)に示す伝達率 r を用いて次式によって与える。

$Q = rQ_{per}$ (4)

ここで、 Q_{per} :完全接触とした場合の要素間力(図-2参照)、 r :伝達率であり、次式によって与えた

$r = 1.0$ ($D \leq R_i + R_j$) (5)

$r = (D_e - D) / R_e$ ($R_i + R_j \leq D \leq D_e$) (6)

$r = 0.0$ ($D > D_e$) (7)

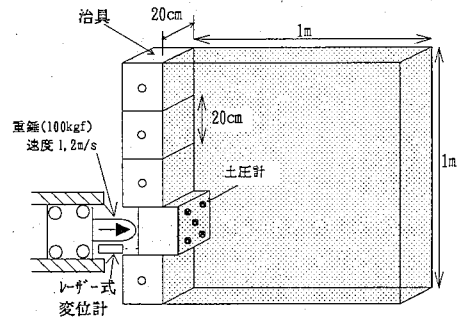


図-1 衝撃実験装置

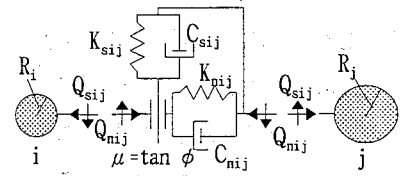
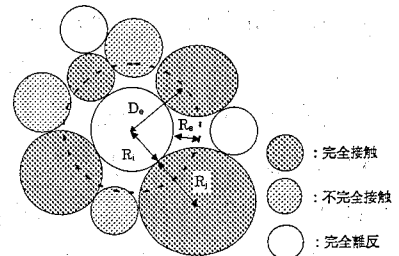
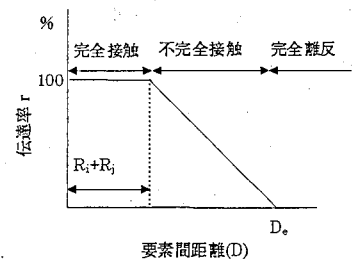


図-2 砂要素のモデル化



(a) 接触状態



(b) 応力伝達率

図-3 有効範囲と伝達率

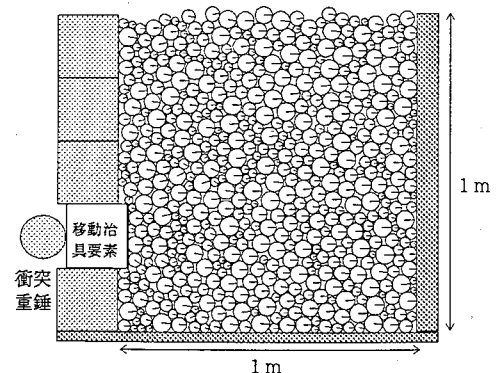


図-4 解析モデル

この要素モデルを図-4のように実験に用いた大きさを持つ矩形枠内部に直径2~6cmの円要素をランダムに配列した。基本入力定数を表-1に示す。ただし、要素*i*と要素*j*の法線方向ばね係数 k_{nij} は、要素の大きさが異なるので、次式により求めた

$$k_{nij} = \frac{\bar{E} \times \bar{D} \times L}{R_{ij}} \quad (8)$$

ここで、 \bar{E} :単位面積当たりの弾性係数、 \bar{D} :代表要素径(= $\min(D_i, D_j)$)、 L :奥行き長さ(20cm)、 R_{ij} :要素間距離

また、重錘の衝突による移動治具の動的つり合いを図-5のようにモデル化することにより、これを1つの個別要素として運動方程式を解いた。この際の抵抗圧*P*の算定は次式を用いた

$$P = \sum_{i=1}^{n_c} Q_{ni} / A \quad (9)$$

P :中詰材の抵抗圧(kgf/cm²)、 Q_{ni} :治具に接触している要素が治具に加える力、 n_c :治具に接触している中詰め要素の数、 A :治具の側面積

3.2 解析結果

図-6(a),(b)に緩詰めの中詰材による土圧~変位関係を実験結果と比較して示す。衝突直後の小さな変位における荷重の大きさが、実験に比べて解析の方は立ち上がりが遅く、その最大値も若干小さくなるが、それに続く応答は、衝突速度1.0m/s、2.0m/sいずれの場合も良くシミュレートできていることがわかる。

図-7(a),(b)に密詰めの場合のそれぞれ衝突速度2m/s、4m/sの解析結果を示す。両者とも第一波の立ち上がりとその大きさは良く合っているが、実験では変位5~10mm以降抵抗力の波状の振動が消失しているのに対し、解析では引き続き波状の振動が現れている。これは、実験では早期に中詰め内部に生じた波動が消失するのに対し、解析では消失せずに残っているためである。しかし、その平均的な抵抗力は実験値とほぼ一致しており、緩詰めに比して、約3倍になった実験結果をわずか3cmの応力伝達有効範囲を導入することによって、良くシミュレートできることがわかる。

4. 結言

本研究の成果を要約すると

(1)従来の個別要素法における完全接触と完全離反の接触状態に加えて、不完全な接触状態を導入し、その応力伝達関数を低減させることにより砂の締め固め効果を考慮する個別要素法の改良モデルを提案した。応力伝達の有効範囲を考慮した個別要素法により砂の締め固めによる衝撃抵抗力の増加を良くシミュレートできた

4. 結言

本研究の成果を要約すると

(1)従来の個別要素法における完全接触と完全離反の接触状態に加えて、不完全な接触状態を導入し、その応力伝達関数を低減させることにより砂の締め固め効果を考慮する個別要素法の改良モデルを提案した。応力伝達の有効範囲を考慮した個別要素法により砂の締め固めによる衝撃抵抗力の増加を良くシミュレートできた

(2)提案手法を用いて緩詰めおよび密詰め中詰材の局部衝撃応答挙動を良くシミュレートすることができた

参考文献:1)伊藤一雄、香月智、石川信隆、阿部宗平、中村徹:セル型砂防ダム中詰材の局部衝撃実験 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集 pp.295~300,1996年5月。

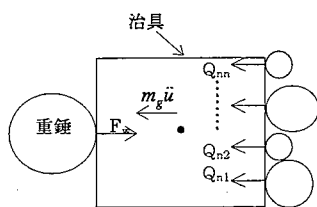


図-5 移動治具の力のつり合い

表-1 入力定数

単位面積法線方向ばね係数 \bar{E}	20kgf/cm ²	
接線方向低減率 s	0.25	
要素間すべり摩擦角 ϕ	30°	
接線方向ばね係数 k_s	$s \cdot k_n$	
法線方向減衰係数 C_n	$2h\sqrt{m \cdot k_n}$	
接線方向減衰係数 C_s	$\sqrt{s} C_n$	
要素間減衰定数 h	1.0	
重錘と治具間の弾性ばね係数 k_w	4.8×10^5 kgf/cm	
重錘と治具間減衰定数 h_w	0.01	
有効範囲 D_e	緩詰め	$D_e = R_i + R_j$
	密詰め	$D_e = R_i + R_j + 3.0$ cm
重錘重量	100kgf	
治具重量	7.5kgf	
Δt	1×10^{-5} sec	

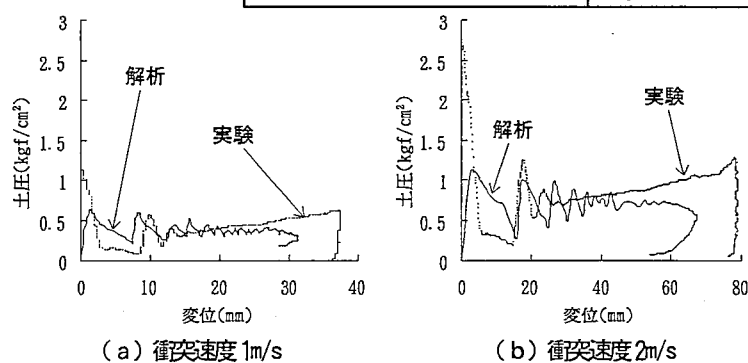


図-6 緩詰め解析結果

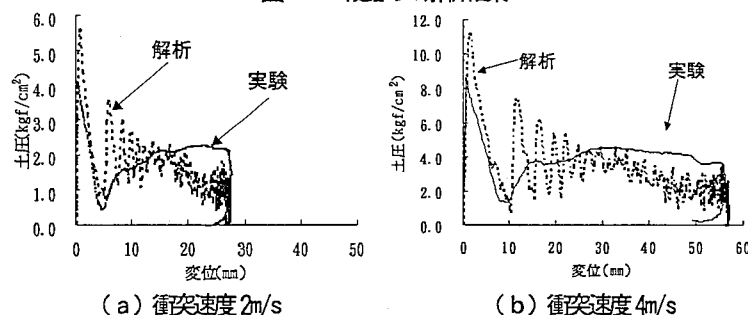


図-7 密詰め解析結果