

(I-25) 剛体-バネモデルを用いたサンドクッション層の衝撃緩衝特性に関する一考察

防衛大学校 学生員○西原 勝 正員 園田 佳巨 正員 佐藤 紘志 正員 石川 信隆

1. 緒言

落石覆工上のサンドクッションの衝撃力緩衝効果に関する実験的研究は、過去に比較的多く行なわれているが、いままで砂の性状とサンドクッションの緩衝効果との関係を考慮した解析的研究は比較的少なく、樹谷¹⁾らの個別要素法による解析的検討がなされているのみである。そこで本研究では、剛体-バネモデルを用いた衝撃応答解析法を開発することにより、サンドクッションの衝撃緩衝効果と砂の状態（特に、落石覆工の設計で用いられるラーメの定数）との関連性について検討を試みるものである。

2. 解析手法

(1) 剛体-バネモデル²⁾

本研究では、砂が不連続体として取り扱う必要があることを考慮して、剛体-バネモデルを用いた解析を行なうこととした。すなわち、要素内変形を無視し、各要素境界辺上の表面力に関する釣り合いを考えることにより、図-1に示すような三角形剛体パネルを、曲げおよびせん断に抵抗するバネで連結し、その伸び縮みにより応力を算定する。



図-1 剛体-バネ系

(2) 砂の特性を表わすパラメータ

解析モデルに用いるバネ定数については、ヤング率 E とポアソン比 ν のみにより決定される。すなわち、曲げに抵抗するバネ定数 K_n とせん断に抵抗するバネ定数 K_s とは、次式により表わされる。

$$K_n = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \cdot \frac{1}{(h_1+h_2)} \quad (1)$$

$$K_s = \frac{E}{(1+\nu)} \cdot \frac{1}{(h_1+h_2)} \quad (2)$$

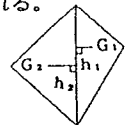


図-2 垂線の定義

ただし、 h_1+h_2 : 図-2に示すように、それぞれ三角形要素の重心 G_1 、 G_2 から要素境界辺上に下した垂線の長さの合計。ここで、 E 、 ν は、砂の締め固め度によるパラメータとし、次の式(3)、式(4)に示されるようにラーメの定数 λ の値の大小によってそれぞれ表-1中の値をとるものとした³⁾。

$$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} \quad (4)$$

表-1 砂の弾性係数とポアソン比

	λ (t/m ²)	E (t/m ²)	ν
密詰め砂	400	1000	0.25
ゆる詰め砂	200	500	0.25
特にゆる詰め砂	100	250	0.25

ただし、 λ 、 μ : ラーメの定数

よって、落石現象の場合一般に、 $\mu = \lambda$ 、 $\nu = 1/4$ 、 $E = 2.5\lambda$ とみなされる。

(3) 破壊基準

本解析モデルでは、破壊基準として、モール・クーロンの式を用いることとした。 $-C$ モール・クーロンの条件は、図-3に示すように、せん断力 τ が垂直応力 σ の1次関数となっている場合で、次式により与えられる。

$$\tau = \pm (C + \tan \phi \cdot \sigma) \quad (5)$$

図-3モール・クーロンの条件

ただし、 C : 粘着力、 ϕ : 内部摩擦角。よって、降伏条件としては、次式のように表わされる。

$$f = \tau^2 - (C + \tan \phi \cdot \sigma)^2 \quad (6)$$

(4) 衝撃応答解析手法

サンドクッションに対する衝撃応答解析は、次式に示す運動方程式についてNewmark- β 法($\beta = 1/6$)を用いて解析を行なうものとした。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (7)$$

ただし、M:質量行列、C:減衰行列、K:剛性行列、 $\ddot{u}$:加速度、 $\dot{u}$:速度、 u :変位、F:荷重、ここで、式(7)を解く計算アルゴリズムを示すと図-4のようになる。なお、減衰行列Cは、質量行列Mと剛性行列Kの線形和としたレイリー減衰($C = \alpha_0 M + \alpha_1 K$)を使用し、ここでは、 $\alpha_0 = \alpha_1 = 0.01$ を用いた。

3. 数値計算例

サンドクッション層の厚さについては、標準的な値として90cmとし、衝撃土圧の分散勾配(具体的な値として1:0.5の勾配とした)を考慮して、幅2mの領域について図-5に示すような要素分割を行ない、それに重錘重量100kg、落下高さ5mの場合の解析を試みた。ただし、重錘と砂とは弾性衝突とみなし、式(8)により载荷要素に直接初速度を与えることにより初期条件を与えた。

$$V_0 = \frac{m_1(1+e)}{m_1+m_2} \sqrt{2gh} \quad (8)$$

ただし、 V_0 :载荷要素の初速度、 m_1 :重錘質量、 m_2 :载荷要素質量、 e :重錘と砂との反発係数、 g :重力加速度、 h :落下高さ。なお砂の諸元として、 $C \approx 0$ 、 $\phi = 30^\circ$ 、 $e = 0.1$ を用いるものとし、 E 、 ν は表-1の値を採用した。

4. 計算結果及び考察

(1) ラーメの定数と衝撃応力との関係

载荷点直下のサンドクッションにおける衝撃応力と時間の関係を、ラーメの定数 $\lambda = 100, 200, 400$ の3ケースを例にとり示す。すなわち、図-6は、衝撃応力-時間曲線を示したもので、ラーメの定数 λ が大きいほど、砂は密に締め固まっているために、発生応力は当然大きくなるが、 λ が小さい場合は発生応力がさほど大きくならないことも認められた。

(2) 衝撃時の砂粒子の運動状況

図-7のようにラーメの定数 λ の大小により粒子の運動状況に大きな相違が見られる。ラーメの定数が小さい場合($\lambda = 100$)、比較的ゆる詰めであるため、落石の衝突位置近傍の砂のみが、落石の貫入により移動し、上下方向の移動が大きくなる。一方、ラーメの定数が大きい場合($\lambda = 400$)、落石の衝突の影響が広範囲にわたり、水平方向の移動が大きくなる傾向が見られる。

5. 結言

本研究の成果をまとめると次のようになる。①サンドクッション底面に伝播する最大応力は、ラーメの定数が大きい場合ほど大きくなる。②ラーメの定数の大小により応力の伝播状況が異なるため、サンドクッション底面への応力の伝播範囲も変わるものと考えられる。したがって、現設計法では、衝撃土圧の分散勾配は砂質にかかわらず一定とされているが、砂の状態によって変える方が妥当であると考えられる。

参考文献

- 1) 榎谷、吉田、園田、上林: 個別要素法の落石衝撃問題への適用について、数値解析シンポ No.1.13 1989.7
- 2) 川井、竹内: 離散化極限解析プログラミング 1990.7; コンピュータによる極限解析法シリーズ No.4 1991.7
- 3) 三上善蔵: 落石防止防護工法 1984.12

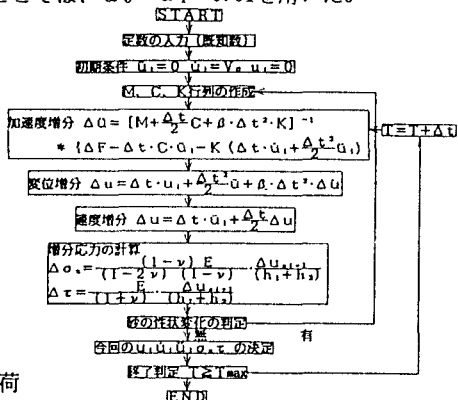


図-4 計算アルゴリズム

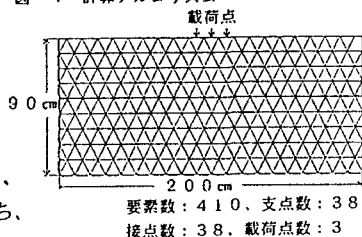


図-5 解析例

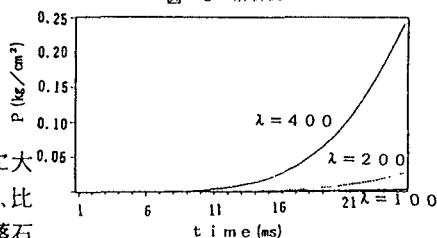


図-6 衝撃応力-時間関係

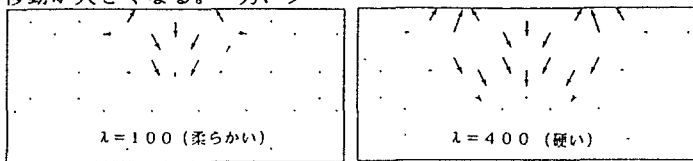


図-7 粒子の運動状況