

III-372 ランマの落下時挙動による締固めた地盤の剛性評価に関する基礎研究

京都大学大学院 学生員 田中 宏征
 京都大学名誉教授 正 員 畠 昭治郎
 京都大学工学部 正 員 建山 和由

1. はじめに ランマなどの重錘を地盤上に落下させたときの重錘の振動挙動が地盤条件の影響を受けることに着目し、逆にこの重錘の振動挙動から地盤の力学特性を評価し得ることは既に報告されている^{1), 2)}。本研究ではこの手法に関連し、ランマの重量、落下高さ、地盤剛性とランマの落下時の振動挙動との関係を数値計算により検討を行い、この結果を利用してランマ挙動から地盤剛性を評価する手法について考察を行った。

2. 数値計算 いま、図-1に示すような半無限弾性地盤上に質量 m (kg)、半径 r (m)のランマが h (m)の高さから落下する場合を考える。ランマは地盤との衝突後、地盤から反力を受け落下速度は時間とともに減少していく。このときランマが地盤から受ける反力は、ランマ直下の土が圧縮されることにより生じる反力 F_p (N)とランマの周辺の地盤が変形することにより生じる反力 F_s (N)の和と考えられる。ここではこれら2種類の反力を非常に短い時間ステップ Δt (sec)毎の変化として数値計算によりシミュレートする。ただしここでは、ランマを剛体と考え、また地中の土粒子はランマの衝撃を受け鉛直方向にのみ運動するものとする。

(1) Step 1 ($t=0 \rightarrow \Delta t$)

・ランマ直下の反力 F_p の算定 ランマが地盤に衝突するとランマの衝撃は波頭となって地中に伝播する。このときの伝播速度 C_p は(1)式で表わされる。よって時間間隔 Δt の間に波頭は $x(1)=C_p \cdot \Delta t$ なる深さまで到達する（地表面を原点として鉛直下向きに x 軸をとる。 $x=0 \rightarrow x(1)$ を要素1とする）。このとき Δt の間はランマは初速度 $v(1)=\sqrt{2gh}$ で運動し続けるとすると、ランマは $v(1) \cdot \Delta t$ なる深さまで地中に貫入する。このとき要素1に生じるひずみ ε は(2)式で表わされる。よって要素1には(3)式で表わされる応力 σ が発生し、これが(4)式で表わされる地盤反力 $F_p(1)$ となってランマに作用する。

$$C_p = \sqrt{E'/\rho} \dots (1) \quad \varepsilon = \frac{v(1) \cdot \Delta t}{C_p \cdot \Delta t} = \frac{v(1)}{C_p} \dots (2) \quad \sigma = E' \cdot \varepsilon \dots (3)$$

$$E' = \frac{(1-\nu)E}{(1-2\nu)(1+\nu)} \quad F_p(1) = \sigma \cdot \pi r^2 \dots (4)$$

・ランマ周辺の反力 F_s の算定 ランマ周辺の地盤はランマの貫入に引かずられ図-2に示すような変形を生じる。この変形は(5)式で表わされる伝播速度 C_s で側方に広がっていく。このとき図-2の側方の領域には(6)式で表わされるせん断ひずみが生じ、これに応じて(7)式で表わされるせん断応力 τ が発生する。この応力は要素1の周面に作用して地盤からの反力 $F_s(1)$ ((8)式)となる。Step 1における地盤反力 $F(1)$ は $F_p(1)$ と $F_s(1)$ との和で表わされ、この反力を受けてランマには(9)式で表わされる加速度が生じ、速度は(10)式の $v(2)$ に減少する。

$$C_s = \sqrt{G/\rho} \dots (5) \quad \gamma = \frac{v(1) \cdot \Delta t}{C_s \cdot \Delta t} = \frac{v(1)}{C_s} \dots (6) \quad \tau = G \cdot \gamma \dots (7)$$

$$G = E/2(1+\nu) \quad F_s(1) = \tau \cdot 2\pi r C_p \cdot \Delta t \dots (8)$$

$$a(1) = g - (F_p + F_s)/m \dots (9) \quad v(2) = v(1) + a(1) \cdot \Delta t \dots (10)$$

(2) Step 2 ($t = \Delta t \rightarrow 2 \cdot \Delta t$)

Step 2では減少した速度 $v(2)$ でランマが貫入することになる。この場合の波頭の変化を図-3に示す。ランマ直下からの反力 $F_p(2)$ は(2)~(4)式において $v(1)$ を $v(2)$ に置き換えることにより得られる。

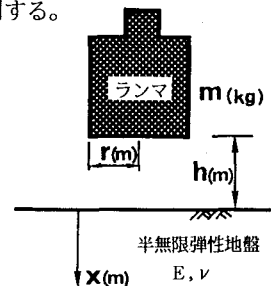


図-1 地盤へのランマの落下

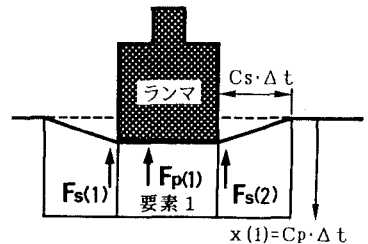


図-2 ランマの落下による波の伝播と地表面の変位のモデル化 Step 1

ランマ周辺の反力については、図-3に示すようにランマ周辺に新しい変位が生じ、Step1で生じた波頭は伝播速度Csでその外側に広がっている。このときStep1で生じたせん断波の振幅は伝播距離に逆比例して減少する³⁾と仮定すると、外側の領域の作用により生じる反力Fs'(1)は結果的に(11)式で表わすことができる。内側のStep2で生じた反力Fs(2)は(6)~(8)式においてv(1)をv(2)に置き換えることにより求めることができる。Step2の反力F(2)はこれらの反力Fp(2), Fs'(1), Fs(2)を足し合わせた値となる。ランマはこの反力を受けてStep1と同様に落下速度を減じ、次のStepの載荷を行う。以下、同じ過程の繰返しであるが、側方へのせん断波の伝播の効果はStep2のように順次足し合わせる。以上のプロセスに従いランマの挙動と地盤剛性との関係ならびにこれに及ぼすランマ質量、落下高さの影響を数値計算により検討した。なお、ここでの地盤剛性としては、平板載荷試験を想定し直径a=10cmの円盤で載荷試験を行ったときの単位面積あたりの載荷重P(N)と変位δ(m)との比で表わされる地盤剛性K(N/m³)を用い、(12)式によりランマのシミュレーションに対応する地盤剛性Kの値を求めた。

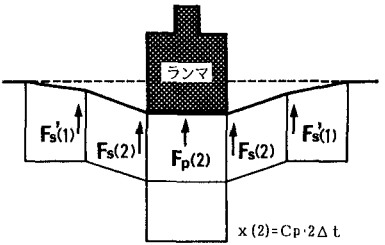


図-3 ランマの落下による波の伝播と地表面の変位のモデル化 Step 2

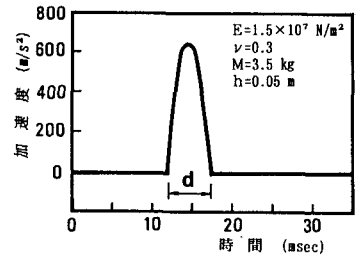


図-4 ランマの加速度波形(計算結果)

$$Fs(1)' = G \cdot \frac{v(1)}{Cs} \cdot 2\pi r \cdot Cp \cdot \Delta t \quad (11) \quad K = \frac{P}{\delta} \cdot \frac{4}{\pi a^2} = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \cdot \frac{4}{\pi a} \quad (12)$$

3. 計算結果

計算に用いたパラメータは以下に示すようである。

$$m=1.5, 2.5, 3.5, 5.0 \text{ kg} \quad h=5, 10, 15, 20 \text{ cm} \quad r=2.5 \text{ cm} \\ E=1.2, 1.5, 2.0, 2.8, 4.7, 8.6 \times 10^7 \text{ N/m}^2 \quad \nu=0.3 \quad \rho=1.6 \text{ g/cm}^3$$

図-4は計算により得られたランマの落下時の加速度波形である。この波形の特性を定量的に表すため、ここでは波形の継続時間d(sec)を用い、これとランマの落下条件、地盤剛性との関係について検討した。

図-5は計算により得られた波の継続時間dと地盤剛性との関係をランマ重量をパラメータとして描いたものである。落下高さの影響については、波の継続時間に対しては影響を与えないという結果が得られたのでここでは、重量のみをパラメータとしている。図中の直線群はプロット点をランマ重量別に近似したものである。重量によらずほぼ同じ傾きを持つ直線群となった。この図を用いて地盤剛性を推定しようとする、ランマ重量によりK値推定のための直線が異なることになる。そこでランマ重量の影響を除去するためdを(13)式で表されるB(m)で除して図-5を描き直すと図-6のようになる。この図では、4種のランマ質量に関するデータが一本の直線で表わされている。

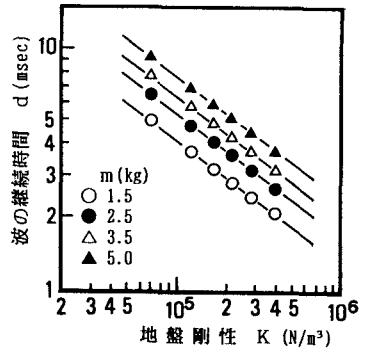


図-5 波の継続時間と地盤剛性との関係

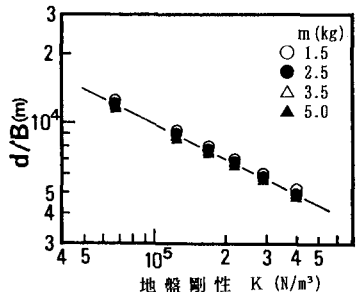


図-6 d/B(m)と地盤剛性との関係

この関係を式で表わすと(14)式になる。この式を用いると質量が既知のランマを地盤上に落とし、その振動加速度を測定することにより簡単に地盤剛性Kを判定することができる。なお検証実験の結果については別報⁵⁾を参照されたい。

$$B(m) = 10^{b(m)} \quad (13) \\ b(m) = 0.57 \cdot \log m + 2.5$$

$$\frac{d}{B(m)} = \frac{1.1}{\sqrt{K}} \quad (14)$$

参考文献 1) 島昭治郎他：締固めた土のバネ係数・粘性減衰係数の測定、テラメカニクス第4号、1984 2) 境他：土の締固め管理のための非破壊試験法(その2)、第22回土質工学研究発表会、1987 3) 振動工学ハンドブック、p.365、義賢堂、4) 木村孟：土の応力伝播、p.9-39、鹿島出版会、5) 田中宏征他：重錘落下による地盤剛性の評価に関する研究、土木学会関西支部講演会、1990