

愛知県正員鈴木哲次
金沢大学工学部 正員吉田博
金沢大学工学部 正員榎谷浩

1. まえがき

落石に対する道路交通安全の確保は、社会的に重要であるにもかかわらず、落石防護構造物に対して、いまだ定まった設計規準がない。これは、防護構造物に及ぼす落石による衝撃力の大きさが解明されていないためである。本研究は落石防護構造物の一種である落石覆（ロックシェッド）のサンドクッション上に落石が落下した場合の衝撃力を解析的に求めるための一手法の提案である。

2. 動的空洞押抜け理論

動的空洞押抜け理論は、無限弾塑性体内において空洞が生ずるために必要な力を求める理論である。図-1に示す球型空洞が膨張する場合、その空洞内部に作用する圧力 P はHopkins等により導かれている¹⁾。今、サンドクッション材を弾塑性体とし、次のように仮定する。

(1) サンドクッション材はMohr-Coulombの破壊規準に従う弾完全塑性体の砂である。

(2) この砂は非圧縮性とする。

以上の仮定を用いると、空洞の内圧 P は砂の慣性効果を考慮して次式で与えられる。

$$P = \frac{3(1+\mu)}{3-\mu} p_0 (1 - e^{-\beta})^{-\frac{4\mu}{3(1+\mu)}} + \rho \left(\frac{3}{2} \dot{a}^2 + a \ddot{a} \right) \quad (1)$$

ここで

$$\mu = \sin \phi \quad \beta = \frac{3\mu p_0}{(3-\mu)E}$$

ϕ : 砂の内部摩擦角

p_0 : 弾塑性境界 b の位置での平均応力

E : 砂のヤング係数

ρ : 砂の密度

a : 球空洞の内径

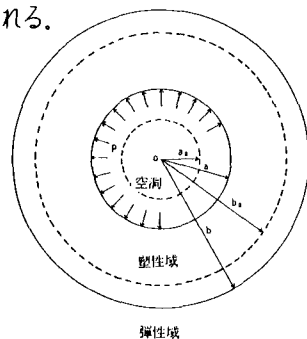


図-1 球空洞の押抜け

である。式(1)の右辺第一項は、 $\dot{a} = \ddot{a} = 0$ の場合の静的押抜けに必要な内圧を表わし、右辺第二項は砂の慣性効果を表わしている。

3. 落石貫入モデル

落石の剛性が、サンドクッション材の剛性よりはるかに大きければ、落石がサンドクッションに衝突貫入する際に生じる穴は、落石の形状によって決まる。ここで落石を図-2で示すような底面に円錐のついた円筒型の重錘におきかえる。そして重錘がサンドクッション中に貫入する際、剛体球が重錘先端に生じ膨張していると仮定する。貫入のパターンは、(i)重錘の先端部が完全にサンドクッション中に貫入していない状態、(ii)先端が完全にサンドクッション中に貫入している状態の2つに分けた。そして、それぞれの貫入パターンについて剛体球の表面に作用する圧力 P は、式(1)より求めることができる。式(1)中の球空洞の内径 a 、膨張速度 $\dot{a}$ および膨張加速度 $\ddot{a}$

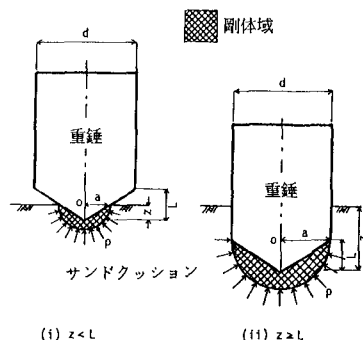


図-2 貫入パターン

は、重錘の形状、貫入量 z 、貫入速度 $\dot{z}$ および貫入加速度 $\ddot{z}$ によって表わされ、剛体球表面に作用する圧力 P は表-1で示すように、重錘の運動と関係づけられる。

4.数値解析とその結果

重錘の鉛直方向の運動方程式は、式(1)の内圧の式を用いて次式のように表わすことができる。

$$(M+dm)\ddot{z} = -G_1 - G_2\dot{z}^2 \quad (2)$$

ここで、 M は重錘の質量であり、 G_1 、 G_2 および dm は表2に示す係数である。

式(2)を初期条件 $t=0$ において $\dot{z}=\sqrt{2gH}$ 、 $z=\ddot{z}=0$ で衝撃加速度 $\ddot{z}$ について解くと重錘の受ける衝撃力が求まる。

解析例として図-3に示す形状をもつ重錘をサンドクッション上へ自由落下させた時の衝撃加速度の時間的変化を示す。図-4は、図-3中の1.0tの重錘について、計算値と金沢大学落石実験場で行なった実験結果を比較したものである。ここで計算に用いた土のヤング係数 E は、抗支持力を求めるために山口が使った N 値との関係式、 $E=210N^{0.72}$ を用い²⁾、他の材料定数は実験時に求めた定数を用いた。

図-4には落下高さ $H=5m$ および $H=20m$ から落下させた場合の衝撃加速度の時間的変化が比較して示されている。実験においては衝撃加速度の波形が2つのピークをもつのに対し、解析では1つのピークをもつ波形となっている。これは実験においてサンドクッションが、コンクリートスラブ上に敷設された有限な層であるため、その影響によると考えられる。また最大の衝撃加速度を比較した場合、落下高さが高くなるにつれ、計算値が実験値を上まわる傾向が見られた。これは計算において重錘がサンドクッションに衝突する速度を空気抵抗を無視した自由落下速度としたことが原因の一つと思われる。

4.考察

動的空洞押抜け理論を用いて落石の衝撃力を解析的に求めてみた。サンドクッション材を非圧縮性の弾塑性体と仮定するなど多くの仮定の上に行っているが、衝撃加速度の波形については傾向をよくとらえているものと思われる。今後、土の動的材料定数の解明を含め、より実際の落石による衝撃現象に近い解析方法に改良することが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Hopkins, H.G.; "Dynamic Expansion of Spherical Cavity in Metals", Progress in Solid Mechanics, Vol. 1, Chap. 3, 1964, pp. 135-156
- 2) 山口伯樹; 弾塑性解析によるクイ先端支持力式とその適用性, 土と基礎, 23-7, 1975, pp. 7-11

表-1 式(1)の諸元

	(i) $z < L$	(ii) $z \geq L$
a	$(d/2L)z$	$d/2L$
$\dot{a}$	$(d/2L)\dot{z}$	$\dot{z}$
$\ddot{a}$	$(d/2L)\ddot{z}$	$\ddot{z}$
p	$p_a + p(1.5z^2 + z\dot{z})(d/2L)^2$	$p_a + p(1.5L^2 + 0.5d\dot{z})$

$$p_a = \frac{3(1+\mu)}{3-\mu} p_e(1-e^{-\beta z})^\lambda$$

$$\beta = \frac{3\mu p_e}{(3-\mu)E}, \quad \lambda = \frac{4\mu}{3(1+\mu)}$$

表-2 運動方程式の係数

	$z < L$	$z \geq L$
G_1	$2\pi a^2(p_a)$	$2\pi p_a$
G_2	$1.5\rho(d/2L)^2\pi a^2$	$1.5\rho\pi a^2$
dm	$\rho(d/2L)^2\pi a$	$0.5d\rho\pi a^2$

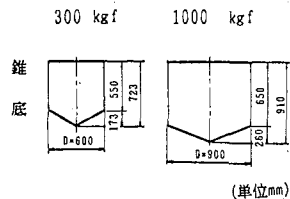


図-3 重錘の形状

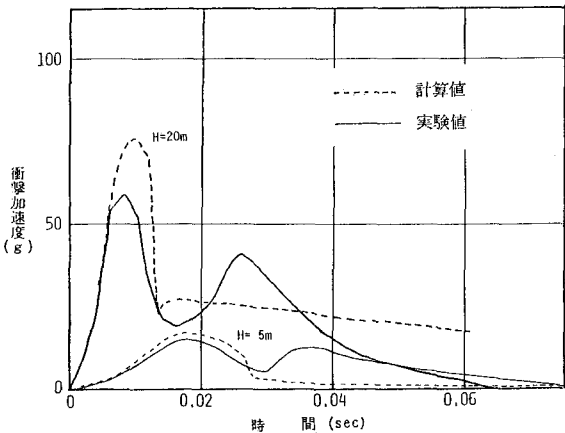


図-4 衝撃加速度の波形(錐底1.0t)