# ドラグ・ショベルの斜面降下時の限界傾斜角に関する検討

(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 正会員 〇堀 智仁(独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 正会員 玉手 聡

#### 1. 目的

ドラグ・ショベルが斜面上を走行中に転倒し,運転者や機械の周辺で作業していた労働者が死亡する災害が 後を絶たない.筆者らはこれまで斜面を降下する際の転倒現象を解明するため,模型を作製し,遠心模型実験 により斜面降下時および残土等の乗り越え時の機体の不安定化について検討を行ってきた<sup>1),2)</sup>.本稿では,斜 面降下時における限界傾斜角の算出方法について検討し,実験結果との比較を行った.

## 2. 実験の概要

図1にドラグ・ショベル模型および実験の概要を示す.本研究で使用した遠心模型実験用模型は1/10 スケールで作製したものである.模型の安定度(限界傾斜角)は、前方49.4度、後方56.3度である.詳細については既報を参照されたい<sup>2)</sup>.本実験では、遠心模型実験装置 NIIS Mark II centrifuge(最大遠心加速度100G,有効半径2.3m)を使用し、遠心重力10G場において、模型を斜面の天端より走行させて、斜面を降下する実験を行った.模型斜面は関東ロームを締め固めて作製し、斜面勾配βは20,25,30度の3種類とした.走行速度

*V*については 0.03m/s および 0.09m/s の 2 種類である.実験中の機体の揺動を高速度カメラで記録し、その動画を解析して機体傾斜角 $\theta$ や角速度 $\omega$ 等を求めた. $\theta$ の極性は図 1 に示したとおりである.

#### 3. 実験結果の一例

図2に機体傾斜角 $\theta$ と角速度 $\omega$ の関係を示す. 図に示したデ ータは、実大スケールに換算した値である. 同一Vの比較で は斜面勾配 $\beta$ の増加に伴い角速度 $\omega$ が大きくなっている. ま た、 $\beta$ =20度および $\beta$ =25度では、転倒することなく斜面を降下 することができたが、 $\beta$ =30度では模型は転倒した.

#### 4. 限界傾斜角β<sub>c</sub>の概算式

前田らは<sup>3)</sup>,二次元の構造モデルを対象とした動的 転倒角の理論解析法を示している.この解析法では,構 造物の片側下端に自由落下を発生させた際に,転倒し ない落下高さの最大値を求める理論計算式が示されて いる.

模型を1質点剛体モデルとした場合の転倒時の重心 の移動を図3に示す.ドラグ・ショベルのような履帯 を走行装置とする機械は,機械の重心が法肩を通過し た際に機体が前方に回転し始める.この時に発生する 回転運動エネルギーは位置エネルギーの変化量*Δh*<sub>1</sub>に 相当する.その後,履帯の前方を支点(転倒支点)とし て回転し,機体の重心位置が転倒支点より前方に移動 した際に転倒する.すなわち,転倒するために必要な重 
 A
 A'

 B
 B'

 Fラグ・ショベル模型
 人

 A
 A'

図1 実験の概要



図2 機体傾斜角のと角速度のの関係

キーワード ドラグ・ショベル,斜面降下,転倒災害,労働災害

連絡先 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6 (独)労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ

心移動高さは $\Delta h_2$ となる.

斜面降下時における重心の移動量Δ*h*<sub>1</sub> は式(1)で表される.

 $\Delta h_1 = h - h \cdot \cos\beta \qquad (1)$ 

ここで,*h*は履帯底面からの重心高さで ある.

転倒に必要な重心移動高さ*Δh*<sub>2</sub>は式(2) で表される.

 $\Delta h_2 = r - h \cdot \cos\beta - a \cdot \sin\beta \qquad (2)$ 

ここで,αは履帯前面から重心までの水平距離である. エネルギー保存則により,位置エネルギーと回転エネルギ ーの関係式はそれぞれ式(3)および式(4)で表される.

 $m \cdot g \cdot \Delta h_1 = \frac{1}{2} \cdot h^2 \cdot \omega^2 \qquad (3) \qquad \qquad m \cdot g \cdot \Delta h_2 = \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot \omega^2 \qquad (4)$ 

ここで, *m* は模型の質量, *g* は重力加速度, *ω*は角速度である. 式(3)および式(4)より式(5)が得られる.また,式(1),式(2)および式(5)から式(6)の関係式が得られる.

 $\Delta h_2 = \left(\frac{r^2}{h^2}\right) \cdot \Delta h_1 \qquad (5) \qquad r - h \cdot \cos\beta - a \cdot \sin\beta = \frac{r^2}{h^2} (h - h \cdot \cos\beta) \qquad (6)$ 

式(6)を整理して式(7)を得る.

$$\left\{ \left(\frac{r^2}{h} - h\right)^2 + a^2 \right\} \sin^2\beta + 2a\left(\frac{r^2}{h} - r\right) \sin\beta + \left(\frac{r^2}{h} - r\right)^2 - \left(\frac{r^2}{h} - h\right)^2 = 0$$
(7)

式(8)に示す解の公式より、傾斜角βが得られる.ここで、A、B、Cは次式で表される.

$$\sin\beta = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{A} \quad (8) \qquad A = \left(\frac{r^2}{h} - h\right)^2 + a^2 \quad (9) \qquad B = a \times \left(\frac{r^2}{h} - r\right) \quad (10) \qquad C = \left(\frac{r^2}{h} - r\right)^2 - \left(\frac{r^2}{h} - h\right)^2 \quad (11)$$

最終的に,式(8)で得られる傾斜角βが限界傾斜角β。となる.

## 5. 考察

模型の限界傾斜角 $\beta_c$ を算出するために必要なパラメータおよび算出結果を表 1 に示す.理論解析法から求めた限界傾斜角 $\beta$ が 22.02 度であるのに対して、模型実験では斜面勾配 $\beta$ =20 度および 25 度で模型は転倒せずに斜面を降下することができたため、理論解析結果と実験結果には差がみられた.この原因として、模型が法 肩部を通過する際に模型の重量により法肩部がつぶれたため、見かけの重心の移動量 $\Delta h_1$ が小さくなり、発生する回転エネルギーが小さくなったことが考えられる.しかしながら、図 2 の $\beta$ =25 の結果をみると、機体傾斜角 $\theta$ が、斜面勾配 $\beta$  (25 度)よりも大きくなっている.すなわち、模型の後輪が浮いた状態であり、転倒の可能性があったがわかる.

実際には模型の重心が法肩部を通過すると共に機体が傾斜し始め,その間も前進するためΔh<sub>1</sub>は理論値より も大きくなり,その結果としてβ<sub>c</sub>はより小さい値となるはずである.つまり危険側の評価となる.しかしなが ら,地山(土)の変形と緩衝効果が安全側に作用して結果的に理論値と実験値はほぼ一致したものと考えられ る.

### 参考文献

 1) 堀智仁,玉手聡:ドラグ・ショベルの斜面降下走行の遠心模型実験,土木学会第 69 回年次技術講演会, pp. 1077-1078, 2014.
 2) 堀智仁,玉手聡:ドラグ・ショベルの斜面等走行時の不安定性に関する基礎的検討, 土木学会平成 28 年度全国大会,第 71 回年次学術講演会講演概要集, pp. 103-104, 2016.
 3) 前田豊,井上威 恭:動的転倒に対する検討,安全工学, Vol. 12, No3, pp. 198~202, 1973.



図3 転倒時の重心の移動

表1 限界傾斜角β。の算出			
パラメータ			限界傾斜角 $\beta_c$
a (mm)	<i>h</i> (mm)	<i>r</i> (mm)	(度)
70	60	92.2	22.02