

# 33. ドラグ・ショベルの斜面降下時および残土等乗り越え時の機体の不安定化に関する基礎的検討

(独)労働安全衛生総合研究所 ○堀 智仁  
(独)労働安全衛生総合研究所 玉手 聡

## 1. はじめに

掘削用機械は、建設機械の中でも労働災害が最も多く発生しており、事故の型別の災害発生状況は、「はさまれ、巻き込まれ」、「激突され」、「墜落、転落」の順となっている。

同建設機械については、機械メーカーをはじめ関係業界の尽力により、転倒時保護構造（ROPS）を国際規格として制定し、それによって運転席の強化が図られ、機械の転倒による運転者の死亡事故を防止するためのハード面の対策がなされてきた。しかしながら、当該機械の転倒災害は依然として発生しており、斜面上を移動中に転倒する災害や、建設工事に伴い副次的に発生する建設発生土（以下、残土という。）等を乗り越える際に転倒した事例が多く見受けられる。転倒時に ROPS 等により運転者が保護され、労働災害に至らなかった事例も考慮すると相当数の転倒災害が発生していると考えられる。このような建設機械の転倒災害は、周囲で作業している作業者を巻き込む可能性があり、安全に作業するための条件を明らかにする必要がある。

筆者らはこれまで、ドラグ・ショベルの小型模型を作製して、斜面降下時の不安定性を明らかにするための実験を行ってきた。その結果、機体の安定度（限界傾斜角）よりも緩い傾斜で機械が転

倒することや、斜面を降下する際には前進で降下するよりも後進で降下する方が安定することが明らかになった<sup>1)</sup>。

残土等の乗り越え時にドラグ・ショベルが転倒する災害も多く発生しているため、本研究ではドラグ・ショベル模型を用いて、斜面降下時と残土等の乗り越え時の機械の不安定性について比較を行った。

## 2. 遠心実験用小型模型の概要

ドラグ・ショベルによる労働災害の分析結果から、バケット容量 0.2m<sup>3</sup> 未満の小型の機種で災害が多く発生していることがわかった<sup>2)</sup>。そのため、本研究では、小型の機種の模型を作製した。作製したドラグ・ショベル模型を図-1 に示し、表-1 に実機と模型の諸元の比較を示す。模型の詳細については既報を参照されたい<sup>1)</sup>。

## 3. 実験の概要

### 3.1 遠心模型実験装置

本実験では当研究所が所有する遠心模型実験装置 NIIS Mark-II Centrifuge（最大遠心加速度 100G、有効半径 2.3m）を使用した。遠心模型実験とは、遠心加速度を付与できる実験装置に幾何学的に縮小された（1/N）小型模型を取り付け、Ng の遠心

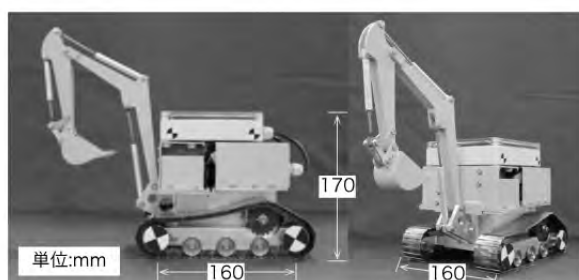


図-1 ドラグ・ショベル模型

表-1 実機と模型の主要諸元の比較

	実機		模型	
	水平 x(m)	鉛直 y(m)	水平 x(m)	鉛直 y(m)
重心距離	0.24	0.81	0.01	0.06
合計重量	46.16kN		38.56N (10G 場では 385.76N)	
平均接地圧	40.4kPa		40.2kPa(10G 場)	
安定度	前方	後方	前方	後方
	42.2 度	57.3 度	49.4 度	56.3 度

※水平方向の重心位置は旋回中心を基準にして前方を（+）で示している。

加速度が作用している場で小型模型の挙動を調べる実験のことである<sup>3)</sup>。図-2に遠心模実験の概要を示す。模型の操作は無線通信により操作する。模型を操作する送信機はコントローラと分離した構造となっており、コントローラと送信機はスリッパリングを介して接続されている。

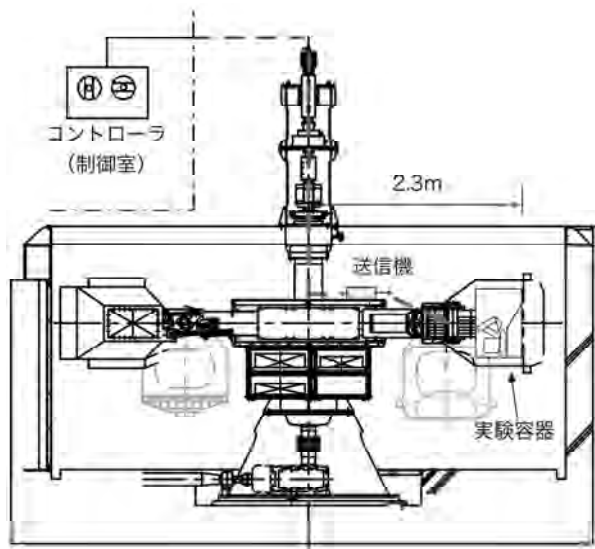


図-2 遠心模型実験の概要



図-3 実験の概要

### 3.1 実験条件

機械が斜面を降下する実験と、残土等を乗り越える実験を実施した。本研究では、それぞれを「斜面降下実験」、「乗り越え実験」と呼ぶこととする。斜面降下実験は、模型を天端（盛土の上面）より走行開始して斜面を降下させるものであり、乗り越え実験は斜面上から走行を開始して残土を模擬した山を乗り越える実験である。

図-3に実験の概要を示す。斜面降下実験における斜面の勾配 $\alpha$ は3種類（20度、25度、30度）であり、乗り越え実験における勾配は4種類（15度、20度、25度、30度）である。高さはそれぞれ200mm（実大換算2m）である。模型の走行速度 $V$ は0.03m/s（実大換算0.108km/h）とした。

計測については、走行挙動を高速カメラ（nac社製）で撮影し、動画解析により模型の揺動を求めた。解析では、壁面に設置した2つのターゲットマーカを結ぶ側線 $A-A'$ と、模型の車軸部分に設置した2つのターゲットマーカを結ぶ側線 $B-B'$ とのなす角 $\theta$ を求めた。本研究では $\theta$ を機体傾斜角と定義した。

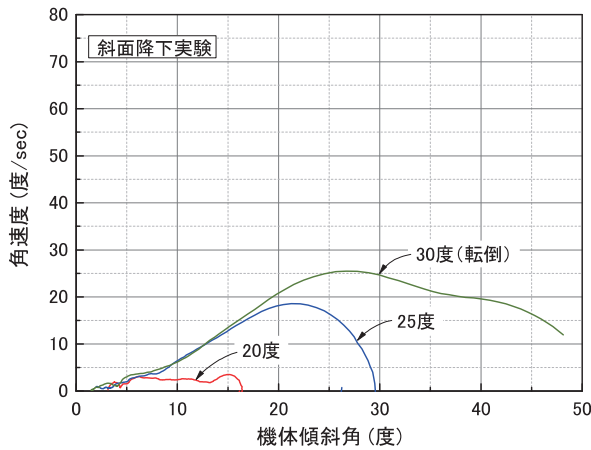
高速カメラの解像度は $512 \times 512$ であり、撮影速度は500コマ/秒である。

模型地盤は関東ロームにより作製した。締固め圧が50kPaとなるよう静的に締固めた後、所定の形状に成形した。なお、実際の盛土の表面部分は締固めを行っていない場合が多く、表面部分の強度は低いと考えられる。それに比べて、本研究で作製した模型地盤は静的に締固めた地盤であり、実地盤に比べ、強度がやや高いと考えられる。この点については、実際の盛土と条件は異なる。

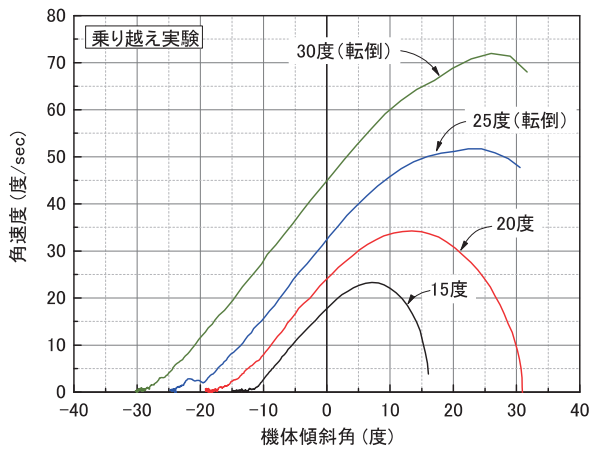
### 4. 実験結果

高速カメラで撮影した動画を解析して求めた機体傾斜角 $\theta$ と角速度 $\omega$ の関係を図-4に示す。この図は、同じ $\theta$ で $\omega$ を比較した場合 $\omega$ が大きい方が回転運動エネルギーは大きく、より不安定であることを意味している。図より、斜面傾斜の増加とともに角速度 $\omega$ は大きくなっており、機体はより不安定化している。また、斜面降下実験と乗り越え実験の結果を比較すると、乗り越え実験の $\omega$ が全体的に大きい。すなわち、残土等を乗り越える方が機体はより不安定であることがわかった。なお、本実験で走行中に模型が転倒した条件は、斜面降下実験においては $\alpha=30$ 度、乗り越え実験では、 $\alpha=25$ 度および $\alpha=30$ 度であった。

斜面降下実験と乗り越え実験の結果を比較すると、斜面降下実験の $\alpha=30$ 度と乗り越え実験の $\alpha=15$ 度では、角速度の最大値 $\omega_{max}$ はほぼ等しいにもかかわらず、斜面降下実験（ $\alpha=30$ 度）では模型が転倒し、乗り越え実験（ $\alpha=15$ 度）では模型は転倒しなかった。このように、走行中に生じる角速度（回



(a) 斜面降下実験



(b) 乗り越え実験

図-4 機体傾斜角 $\theta$ と角速度 $\omega$ の関係

転運動エネルギー) が同じでも安定性に差があることがわかった。この原因は、斜面降下後および乗り越え後の機体の安定性が異なることが考えられる。次に転倒の条件に関する検討を行う。

図-5 に斜面降下実験と乗り越え実験における模型の重心位置の移動を示す。

斜面降下実験における重心の移動量 $\Delta h$  は式(1)で表される。

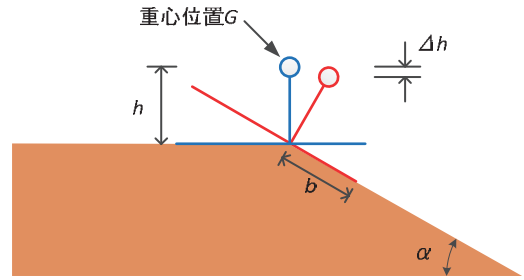
$$\Delta h = h - h \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

ここで、 $h$  は模型の重心高さである。

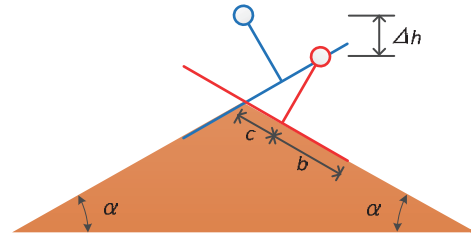
一方、乗り越え実験の際の重心位置の移動量 $\Delta h$  は式(2)で表される。

$$\Delta h = h/\cos \alpha + c \cdot \cos \alpha - h \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

エネルギー保存則に基づき、重心位置の変化量(位置エネルギーの変化量)が回転エネルギーに変換されると仮定すると、重心の移動量 $\Delta h$ と角速度 $\omega_{cal}$ の関係は式(3)で表される。



(a) 斜面降下実験



(b) 乗り越え実験

図-5 実験時の重心位置の移動量

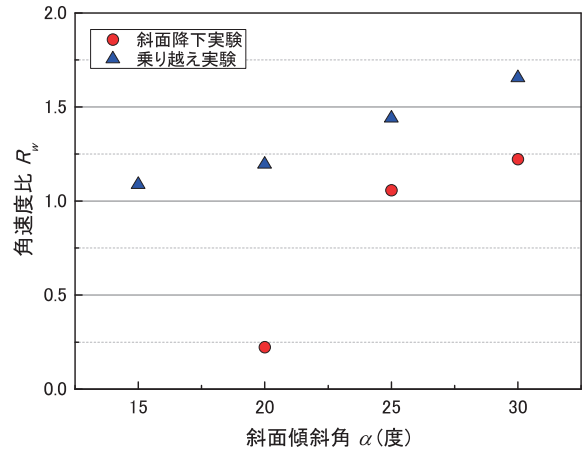


図-6 斜面傾斜と角速度比の関係

$$\omega_{cal} = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\Delta h}{h^2}} \quad (3)$$

ここで、 $g$  は重力加速度である。

図-6 に角速度比 $R_\omega$ と斜面傾斜角 $\alpha$ の関係を示す。ここで、角速度比とは、実験で得られた角速度の最大値 $\omega_{max}$ を計算で求めた角速度 $\omega_{cal}$ で除した値である。

$R_\omega$ は概ね 1 以上となっており、実験値が理論値よりもやや大きな値であった。この原因は、理論値ではある点を中心に機体が回転すると仮定して $\Delta h$ を求めているのに対して、実験では機体の回転中も模型は移動し続けているため、結果的に $\Delta h$ が多くなり、 $\omega_{max}$ が理論値よりも大きくなったことが考えられる。

次に、転倒の条件について、検討を行う。図-7 に転倒時の重心位置の移動を示す。

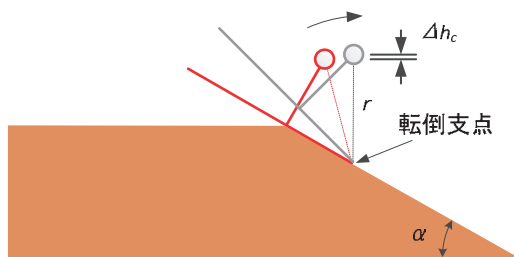


図-7 転倒時の重心の移動

表-2 転倒に必要な条件

斜面傾斜 $\alpha$ (度)	$\Delta h_c$ (mm)	限界角速度 $\omega_c$ (度/sec)
15	13.68	27.29
20	9.85	23.15
25	6.61	18.97
30	4.00	14.75

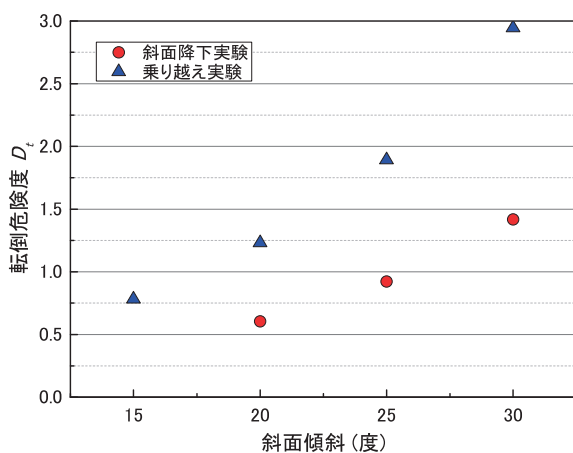


図-8 斜面傾斜と転倒危険度  $D_t$  の関係

模型の転倒する条件は、履帯の前方を回転の支点（転倒支点）として回転し、機械の重心位置が転倒支点よりも前方に移動した際に転倒する。すなわち、転倒に必要な運動エネルギーは $\Delta h_c$ となる。 $\Delta h_c$ については式(4)で表される。

$$\Delta h_c = r - (b \sin \alpha + h \cos \alpha) \quad (4)$$

表-2 に各斜面傾斜での $\Delta h_c$ と限界角速度 $\omega_c$ を示す。ここで、式(1)および式(2)の $\Delta h$ から算出した $\omega$ を、限界角速度 $\omega_c$ で除した値を転倒危険度 $D_t$ と定義した。

図-8に斜面傾斜と $D_t$ の関係を示す。斜面降下実験（○印）と乗り越え実験の結果（△印）を比較すると、斜面降下実験に比べ、乗り越え実験の転倒危険度が約2倍となっている。

履帯を走行装置とする機械は、重心位置が法肩（法面の上端）や残土の頂部を通過した際に機体が回転し始める。図-5(b)に示す通り、乗り越え実験では、重心の水平位置が残土の頂部を通過した

際に機体が回転を始めるため、斜面降下実験に比べ $\Delta h$ が大きくなり、結果的に角速度 $\omega$ が大きくなったと考えられる。また、転倒危険度 $D_t$ と模型実験の結果を比較すると、乗り越え実験における $\alpha=20$ 度の $D_t$ は1以上であるが実験の結果、模型は転倒しなかった。この実験条件については、実験と理論的検討で違いがみられたが、それ以外は理論的な検討の結果と実験結果は良く対応していることがわかった。

以上の結果から、斜面降下時に比べ、残土等を乗り越える際に機械が不安定になることや、理論的な検討と実験結果はよく対応していることが確認された。このことから、理論的な検討である程度機械の安定性を推定することが可能であると考えられる。

## 5. まとめ

ドラグ・ショベルの小型模型を用いて、斜面を降下する実験と残土等を乗り越える実験を行った。実験により得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 斜面降下実験と乗り越え実験の角速度 $\omega$ について同じ斜面傾斜角で値を比較すると、乗り越え実験の方が生じる角速度が大きく、機体がより不安定化することが明らかになった。
- 2) 模型の転倒条件から転倒危険度 $D_t$ を求め、斜面降下実験と乗り越え実験を比較した。その結果、残土等を乗り越える際の $D_t$ は斜面降下実験の約2倍であることがわかった。
- 3) 理論的な検討の結果と実験で得られた値を比較した結果、両者はよく対応していることが確認された。そのため、理論的な検討で機体の不安定性を推定することが可能であると考えられる。

## 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に関する基礎的検討，平成26年度建設施工と建設機械シンポジウム論文集・梗概集，pp.111-114，2014。
- 2) 吉川直孝・伊藤和也・堀智仁・清水尚憲・梅崎重夫・濱島京子：ドラグ・ショベルに係る死亡災害の調査分析，安全工学シンポジウム2013年講演予稿集，pp.396～399，2013。
- 3) 岡村未対・竹村次朗・上野勝利：遠心模型実験—実験技術と実務への適用—2，遠心模型の相似則，実験技術—利点と限界，土と基礎，No.52，vol.10，pp.37-44，2004。