

27. ドラグ・ショベルの斜面降下走行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

建設機械等による死亡災害は年間約80人であり、労働災害の約1割を占める。建設機械の中でも、ドラグ・ショベルに代表される掘削用機械による災害が最も多い。過去に発生した、同種機械による労働災害の分析結果より、事故の型別で比較すると「はさまれ、巻き込まれ」による災害が最も多く、次いで、「激突され」、「墜落、転落」の順となっている。「墜落、転落」災害では、斜面から機械とともに転落する災害が最も多く、機械の安定度（限界傾斜角）よりも緩い斜面を走行中に転落する事例も見受けられた。このような、機械の転倒メカニズムについては明らかになっていないのが現状である。そこで、本研究では、掘削用機械の斜面走行時における転倒災害の防止を目的に、ドラグ・ショベルの小型模型を作製して、遠心模型実験を実施している。本稿では、斜面降下実験の結果について報告する。

2. 遠心実験用小型模型の製作

ドラグ・ショベルによる転倒・転落災害の調査結果¹⁾から、バケット容量0.2m³未満の小型の機械による災害が大部分を占めていることがわかった。そこで、本研究では、小型の機種種の模型を作製することとした。

10Gの遠心場で走行実験を行うことを想定し、実機の約1/10スケールで製作した。なお、模型の重心位置が実機と等しくなるよう、バッテリーや

モータ、減速機等を配置した。

図-1に製作した模型を示し、表-1に実機と模型の諸元の比較を示す。両者を比較すると、実機の前方安定度が42.2度であるのに対して、模型の前方安定度が49.4度であった。実機に比べ、模型の安定度がやや高くなっている。すなわち、実機に比べ模型はより安定性が高い。一方、接地圧については、遠心力下での接地圧はほぼ等しくなっている。

図-2に模型の概要を示す。小型モータを2個搭載し、左右の履帯を独立して駆動させることが可能である。モータ軸にはピニオンギアが備わり、減速機に備え付けたスパーギアと接続する。モータの回転数は、モータに備わる回転センサーの情報を利用して、走行速度および模型が直線的に走行するための制御を行っている。

制御ボックスには、前述のモータ回転数を制御するための電子回路と、模型をワイヤレス操作するための命令信号を送受信する電子回路が備わる。

3. 実験の概要

本実験では労働安全衛生総合研究所が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。図-3に遠心模型実験の概要を示す。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

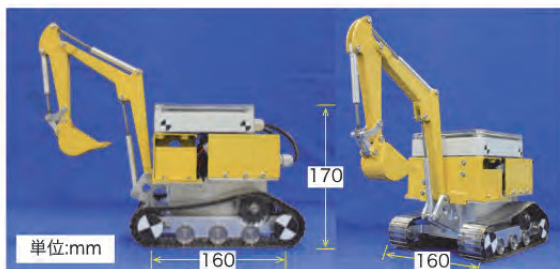


図-1 ドラグ・ショベル模型

表-1 実機と模型による主要諸元の比較

	実機		模型	
	水平 x(m)	鉛直 y(m)	水平 x(m)	鉛直 y(m)
重視距離	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。

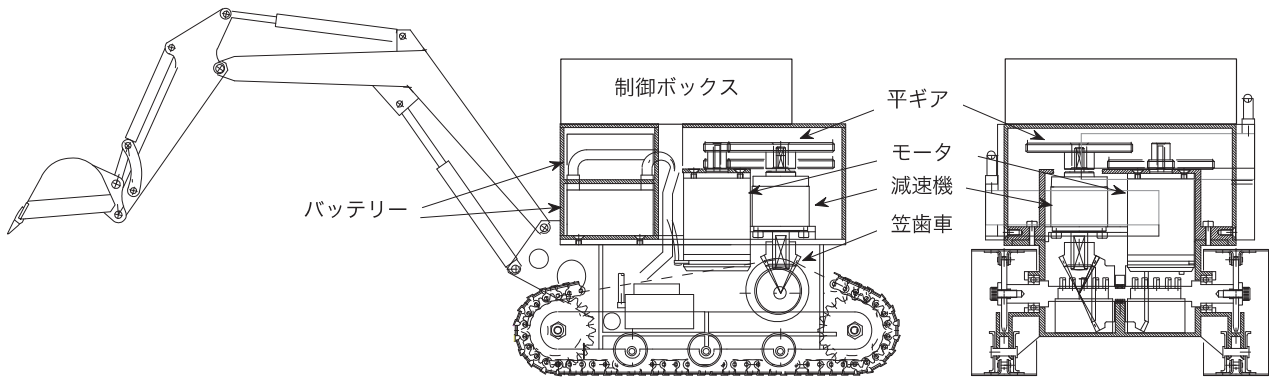


図-2 ドラグ・ショベル模型の概要

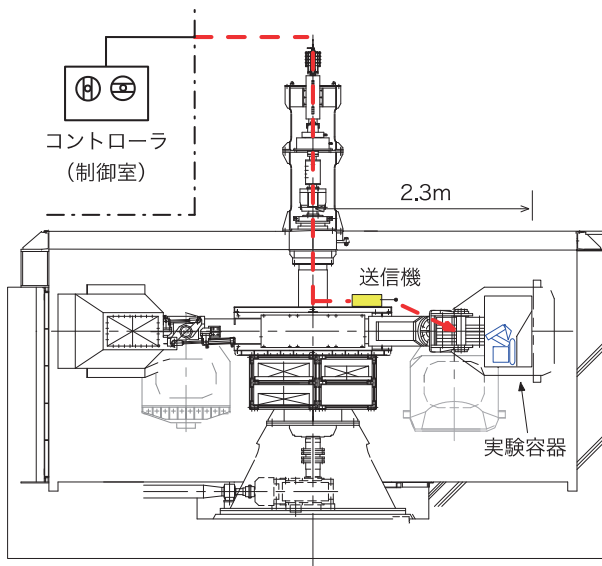


図-3 遠心模型実験装置の概要

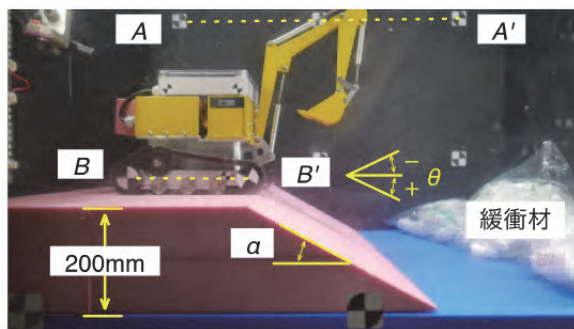


図-4 斜面降下実験の概要

ントローラと分離した構造となっている。このコントローラと送信機はスリッピングを介して接続されている。

図-4 に実験の概要を示す。斜面降下実験では、斜面の天端より模型を走行させて斜面を降下させた。斜面の傾斜は4種類 ($\alpha=15, 20, 25, 30$ 度) とし、高さは200mm (実大換算 2m) である。走行速度 V は0.03m/s (実大換算 0.108km/h) および0.09m/s (実大換算 0.324km/h) とした。さらに、進

行方向の違いによる影響を調べるため、 $\alpha=30$ 度において、後進により斜面を降下する実験も行った。

模型地盤の作製には、強度の異なる2種類の発泡ポリエチレン (Expanded Poly-Ethylene) を用いた。本研究では、強度の高い方を EPE-1(極限支持力 $P_u=100\text{kPa}$) と定義し、強度の低い方を EPE-2($P_u=33\text{kPa}$) と定義した。EPE は均質な材料であるため、実験の再現性を確保する目的で使用した。

計測については、走行挙動を高速度カメラ (nac 社製) とデジタルカメラ (Panasonic 社製) で撮影し、動画を解析して模型の揺動を求めた。解析では、実験容器の壁面に設置した2つのターゲットマーカを結ぶ測線 A-A' と、模型の車軸部分に設置した2つのマーカを結ぶ測線 B-B' とのなす角 θ を求めた。なお、高速度カメラの撮影速度は500フレーム/秒 (解像度 512×512) であり、デジタルカメラは60フレーム/秒 (解像度 1920×1080) である。

4. 実験結果

4.1 高速度カメラとデジタルカメラの比較

図-5 に高速度カメラとデジタルカメラで撮影した動画の解析結果の比較を示す。図中に示した実験条件は、EPE-1 における $\alpha=25$ 度である。また、図中のデータは実大スケールに換算した値で示している。極性については機体が前方に傾斜する方向を+ (プラス) とした。

高速度カメラとデジタルカメラの結果はほぼ一致しており、デジタルカメラによる収録 (60fps) でも解析可能であることが確認された。このことから、本研究では解析精度向上を見込めるデジタルカメラのデータを解析することとした。

4.2 実験結果の一例

図-6 に機体傾斜角 θ および角速度 ω の時刻歴を示す。天端走行中 ($t_e=0 \sim 38\text{sec}$) は機体傾斜角 θ の変動はほぼゼロである。模型が法肩を通過して

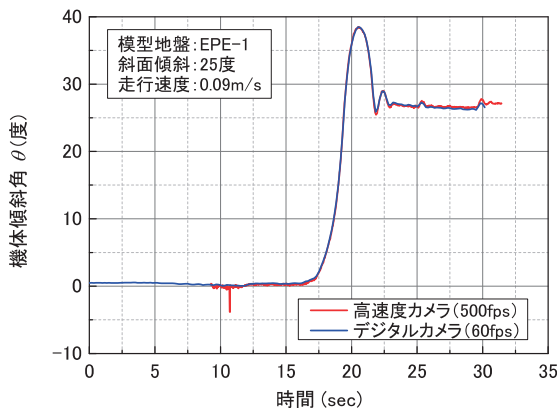


図-5 解析結果の比較

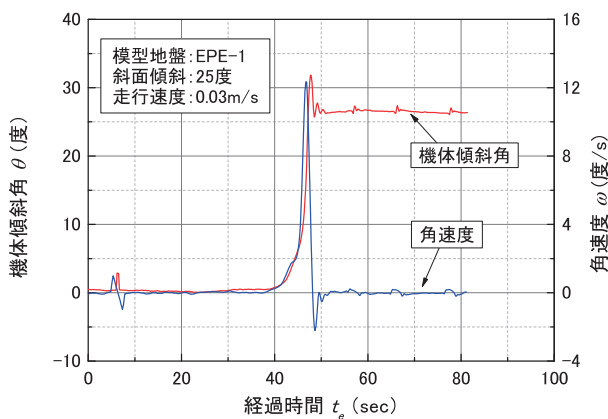


図-6 実験結果の一例

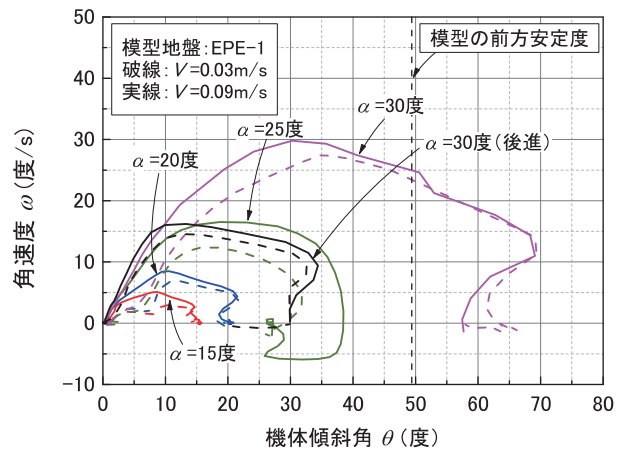
斜面上を走行した際 ($t_e=39\text{sec}$) には、 θ および ω は大きく変動している。その後、斜面上の走行 ($t_e=50\text{sec}$) では、 ω はほぼゼロとなり、 θ も変動が少ない。

4.3 機体傾斜角と角速度の関係

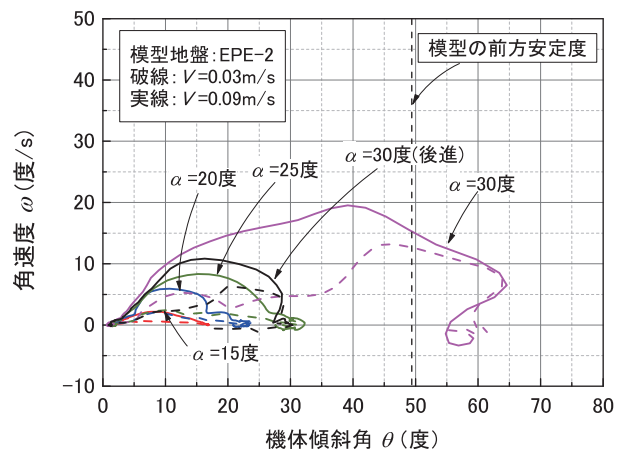
図-7 に各実験条件での機体傾斜角 θ と角速度 ω の関係を示す。図中の破線は $V=0.03\text{m/s}$ の結果であり、実線は $V=0.09\text{m/s}$ の結果をそれぞれ示している。

斜面傾斜 $\alpha=30$ 度では、前進により斜面を降下した場合、地盤条件の違いにかかわらず θ は模型の前方安定度 (49.4 度) を上回り、模型は転倒した。このことから、機械の安定度より緩い斜面においても転倒することが確認された。一方、後進により斜面を降下した場合、転倒することなく斜面を降下することが可能であった。前進で降下した場合の結果と比較すると、後進による θ および ω ともに前進のそれに比べ小さくなっている。前後方向で安定度は異なるものの、進行方向の違いにより安全性に大きな差があることが確認された。

速度の違いによる比較をすると、すべての条件において、実線で示した $V=0.09\text{m/s}$ の角速度の最



(a) EPE-1



(b) EPE-2

図-7 機体傾斜角 θ と角速度 ω の関係

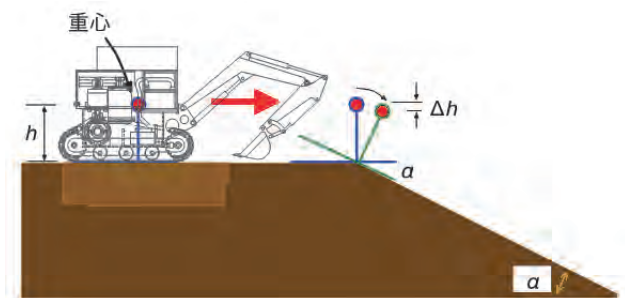


図-8 斜面降下時の重心位置の移動

大値 ω_{\max} が大きくなっている。すなわち、斜面を降下する際、速度が速いと機械がより不安定化することを意味している。

また、 ω_{\max} は、斜面傾斜 α の増加に伴って大きくなっている。ドラグ・ショベルのような履帯式の走行装置を有する機械が斜面を降下する場合、重心が法肩を通過した直後に機体が傾き始め、自由落下を伴うような急激な機体傾斜 θ が発生する。そのため、 α の増加に伴って、 ω が大きくなったと考えられる。

表-1 斜面傾斜と Δh および角速度 ω_{cal} の関係

斜面傾斜 α	Δh (cm)	角速度 ω_{cal} (度/s)
15	2.04	60.47
20	3.62	80.45
25	5.62	100.27
30	8.04	119.90

図-8に斜面降下時の重心位置の移動を示す。斜面降下時の重心の高さ方向の移動量 Δh は次式によって求めることができる。

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

ここで、 h は履帯底面から重心位置までの距離である。

傾斜により、位置エネルギー Δh が角速度 ω の運動エネルギーに保存されるためその関係式は次式のとおり表される²⁾。

$$M \cdot g \cdot \Delta h = \frac{1}{2} \cdot M \cdot h^2 \cdot \omega^2 \quad (2)$$

ここで、 M は模型の質量、 g は重力加速度、 h は回転半径である。

式(2)から、角速度 ω_{cal} は次式によって求めることができる。

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

表-1に、斜面傾斜角 α と Δh および ω_{cal} を示す。本研究では、実験で計測した最大角速度 ω_{max} と Δh から算出した角加速度 ω_{cal} の比を角速度比 R_ω と定義した。 R_ω は次式で表される。

$$R_\omega = \frac{\omega_{max}}{\omega_{cal}} \quad (4)$$

図-9に斜面傾斜 α と角速度比 R_ω の関係を示す。強度の低いEPE-2については、 $\alpha=15\sim 25$ で R_ω は1以下となっており、 ω_{max} は ω_{cal} より小さくなっている。これは、地盤の支持力($p_u=33\text{kPa}$)に比べて模型の接地圧($p=40.2\text{kPa}$)が高く、法肩部に模型が位置した際に、履帯直下に沈下が生じる。それにより実際の Δh は小さくなるため、 ω_{max} が ω_{cal} より小さくなったと考えられる。一方、強度の強いEPE-1の R_ω は1に近い値であり、 ω_{max} と ω_{cal} はよく対応している。

$\alpha=25$ 度における $V=0.09\text{m/s}$ の R_ω は約1.7と大き

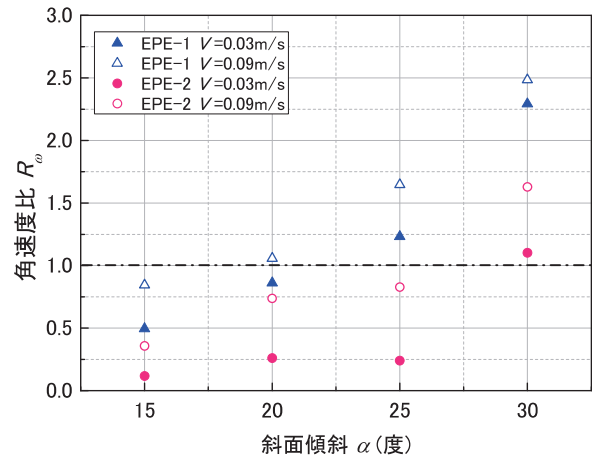


図-9 斜面傾斜と角速度比 R_ω の関係

い値を示している。図-7(a)に示した結果から、当該条件では部分的に $\alpha < \theta$ となっており、かつ、 ω の一部がマイナスとなっている。これは、履帯後部が浮き上がった後に復原力で元の状態に戻ったことを意味しており、転倒の危険性が高かったことを意味している。このことから、 R_ω が大きくなったと考えられる。なお、転倒した $\alpha=30$ 度では、すべての結果において、 R_ω は1より大きな値となっていた。

5. まとめ

ドラグ・ショベルの小型模型を作製し、遠心場において斜面を降下する実験を行った。実験により得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 機械の安定度よりも緩い斜面で、機械が転倒することが確認された。
- 2) 斜面降下時には、なるべく速度を低下させる必要がある。
- 3) 斜面を降下する場合、前進により斜面を降下するよりも、後進により斜面を降下する方が安全であることが確認された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、日立建機株式会社生田正治氏にご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 前田豊・井上威恭：動的転倒に対する検討，安全工学，Vol.12，No.3，pp.198～202，1973。