

ドラグ・ショベルの斜面降下時と残土乗り越え時における不安定性の実験的解析

堀 智仁*1, 玉手 聡*1

ドラグ・ショベルに代表される掘削用機械の過去の災害事例を分析すると、斜面走行中の転倒に起因する災害が数多く発生している。とりわけ、転倒したドラグ・ショベルが走行していた斜面の角度は、その傾斜の影響で転倒が生じる可能性があると考えられる角度（安定度）を超えるような急勾配の場合だけでなく、それよりも緩い勾配の場合においても転倒災害が発生していることがわかった。そこで本研究では、残土等の斜面を乗り越える際または斜面を降下する際の転倒現象等を解明するため、ドラグ・ショベルの小型模型を製作し、遠心模型実験により検討を行った。検討の結果、ドラグ・ショベル模型の転倒現象は、模型の安定度よりも角度の緩い斜面においても観察され、災害事例で見られた転倒現象を遠心模型実験により再現することができた。またドラグ・ショベルが転倒の危険なく走行できる斜面の角度は、前進移動の場合と後進移動の場合で異なること等が明らかとなった。本研究の結論として、ドラグ・ショベルの斜面走行時の転倒現象は、エネルギー保存則に基づく概算値により、おおそ説明できることを明らかにした。

キーワード: ドラグ・ショベル, 掘削用機械, 転倒災害, 遠心模型実験

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・ショベルや油圧ショベル、バックホウ等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、機械の転倒が生じるとされる角度（以下、安定度という）よりも緩い斜面を走行中に転倒する事例も見受けられた¹⁾。

ドラグ・ショベルの転倒に関して、事故原因の調査および再現実験を行った研究例がある²⁾。しかし、その再現実験は安全意識高揚のための視覚情報を提供する目的で行われたものであり、斜面等走行時の転倒現象の解明を目的とした研究は非常に少なく、十分な知見がないのが現状である。そこで本研究は、ドラグ・ショベルの斜面等走行時の転倒災害を防止するための走行条件等を明らかにすることを最終目的としている。本論文では、ドラグ・ショベルの小型模型を製作して、模型実験により転倒災害を再現した。走行中の危険要因を明らかにするとともに、エネルギー保存則に基づく評価手法について検討した。

2 遠心実験用模型の製作

ドラグ・ショベルの転倒現象について実機を用いて再現することは安全上困難であるため、本研究では、ドラグ・ショベルの小型模型を製作して、遠心模型実験により転倒現象を再現した。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 $1/n$ の小型模型を取り付け、 n 倍の遠心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である³⁾。例えば、 $1/10$ スケールで作製した模型を用いる場合、 $10G$ の遠心加速度を付与することで、実機の挙動を再現することが可能となる。

1) 模型の概要

過去に発生したドラグ・ショベルの転倒・転落災害を調査した結果、そのほとんどがバケット容量 0.2m^3 未満の小型の機械による災害であった¹⁾。そのため、本研究では、小型の機械を研究の対象とした。

ドラグ・ショベルの小型模型は $10G$ の遠心場で実験を

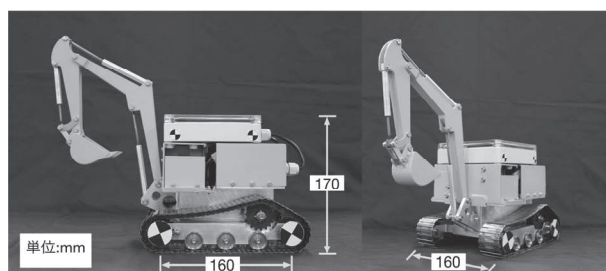


図1 ドラグ・ショベル模型

表1 ドラグ・ショベルの仕様

	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
総重量	46.16kN		38.6N (10G 場では 385.8N)	
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前輪車軸中心を基準にして後方を (+) で表示している。鉛直方向は履帯底面を原点としている。

*1 労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ 堀 智仁*1

E-mail: hori@s.jniosh.go.jp

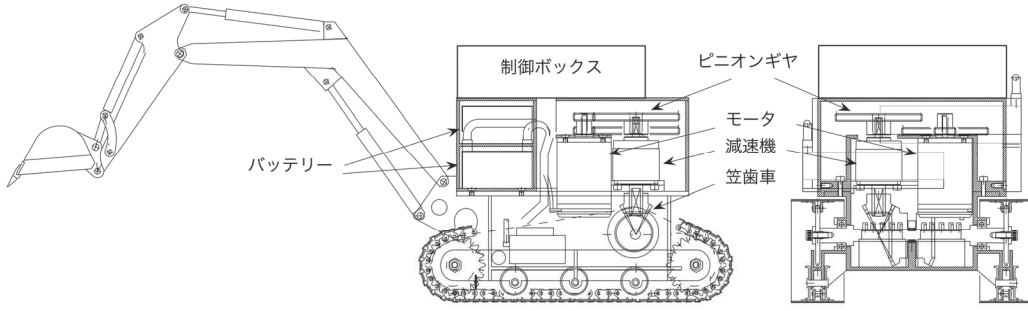


図2 ドラグ・ショベル模型の概要

行うことを想定し、約1/10スケールで設計した。モータや減速機、およびバッテリー等の位置は実機の重心と等しくなるように配置した。なお、模型の車軸や履帯の剛性やたわみ等の機械的特性については実機を完全に再現することができていないが、これらの影響は軽微であると推測される。

図1に製作した小型模型を示し、実機と模型の諸元の比較を表1に示す。両者を比較すると、実機の前安定度が42.2度であるのに対して、模型の前安定度が49.4度であった。すなわち、実機に比べ模型の方が構造的に転倒しにくいものであった。このように安定度に差はあるものの、模型実験の結果を相対的に比較することで斜面を降下する際や、残土を乗り越える際の安全性を評価できると考えられる。一方、模型の接地圧については、遠心力下では実機とほぼ等しくなっている。ここで、接地圧とは全装備質量を接地面積で除した平均圧力である。

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ヤが備わり、減速機に備え付けたスパーギヤと接続する。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制御して、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。

2) 動的相似則

ドラグ・ショベルが転倒する際には、前輪の車軸を支点として前方へ転倒するため、走行時の挙動（動的な不安定化）を遠心模型実験で再現するためには、前輪の車軸を支点とする回転運動に関する相似則を満足させる必要がある^{4),5)}。回転運動は慣性力、ダンピングモーメント力、地盤反力モーメント、転倒モーメントにより構成される。

慣性力は慣性質量 I と角加速度 $\ddot{\theta}$ の積であり、模型と実機の慣性力の比 r_i は式(1)で表される。

$$r_i = \frac{I_m \ddot{\theta}_m}{I_p \ddot{\theta}_p} = \frac{\rho_m L_m^5 (\ddot{\theta}_m / T_m^2)}{\rho_p L_p^5 (\ddot{\theta}_p / T_p^2)} = \frac{1}{n^5} \times \left(\frac{T_p}{T_m} \right)^2 \quad (1)$$

ここで、添え字の p は実機を示し、 m は模型を意味する。また、 θ は機体傾斜角、 ρ は密度、 T は時間、 n は相似比率である。

ダンピングモーメント力はダンピング係数 c と機体傾斜の角速度 $\dot{\theta}$ の積である。土の粘性によるダンピング力のモーメントの比 r_c は式(2)で表される。

$$r_c = \frac{c_m L_m A_m \dot{\theta}_m}{c_p L_p A_p \dot{\theta}_p} = \frac{1}{n^3} \times \frac{c_m}{c_p} \times \frac{T_p}{T_m} \quad (2)$$

ここで、 c はダンピング係数、 L は長さ、 A は接地面積である。

地盤反力によるモーメント比 r_e は式(3)で表される。

$$r_e = \frac{k_m \varepsilon_m L_m A_m \theta_m}{k_p \varepsilon_p L_p A_p \theta_p} = \frac{1}{n^3} \quad (3)$$

ここで、 k は弾性係数、 ε はひずみである。

転倒モーメントの比 r_m は式(4)で表される。

$$r_m = \frac{m_m L_m g_m}{m_p L_p g_p} = \frac{1}{n^4} \times \frac{g_m}{g_p} \quad (4)$$

ここで、 g は重力加速度である。なお、式(1)~(4)の根拠は文献4)および5)に記載されているため、詳細は文献を参照されたい。

式(1)~式(4)に示すモーメントの比がすべて等しくなるためには、次式の関係が成立する必要がある。

$$r_i = r_c = r_e = r_m \quad (5)$$

式(1)~式(3)に式(5)を代入すると、以下の関係式が導出される。

$$\frac{T_m}{T_p} = \frac{1}{n} \quad (6)$$

$$\frac{L_p}{L_m} = n \quad (7)$$

$$\frac{c_m}{c_p} = n \quad (8)$$

$$\frac{g_m}{g_p} = n \quad (9)$$

ここでは、模型に n 倍の重力加速度と地盤に n 倍のダンピング係数を与えると、現象は $1/n$ の時間で再現される。長さの次元についても $1/n$ となることを意味する。したがって、速度 v は式(10)の成立が必要条件となる。

$$\frac{v_m}{v_p} = 1 \quad (10)$$

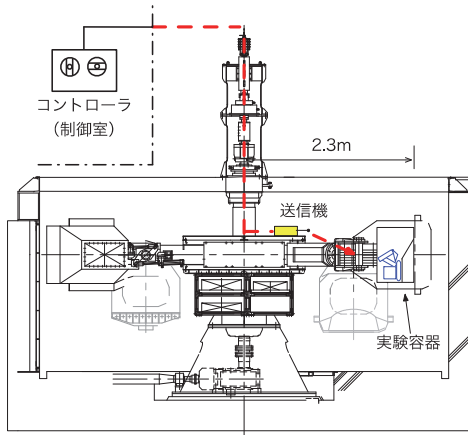


図3 遠心模型実験の概要

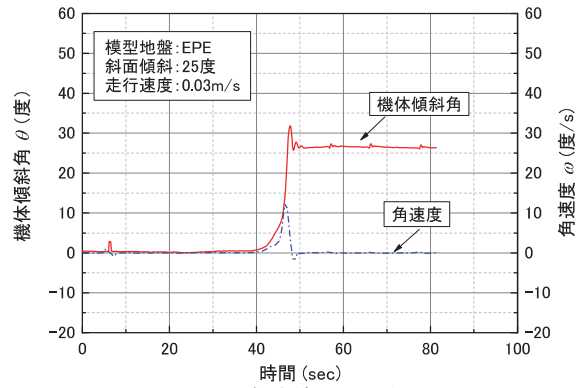


図5 実験結果の一例

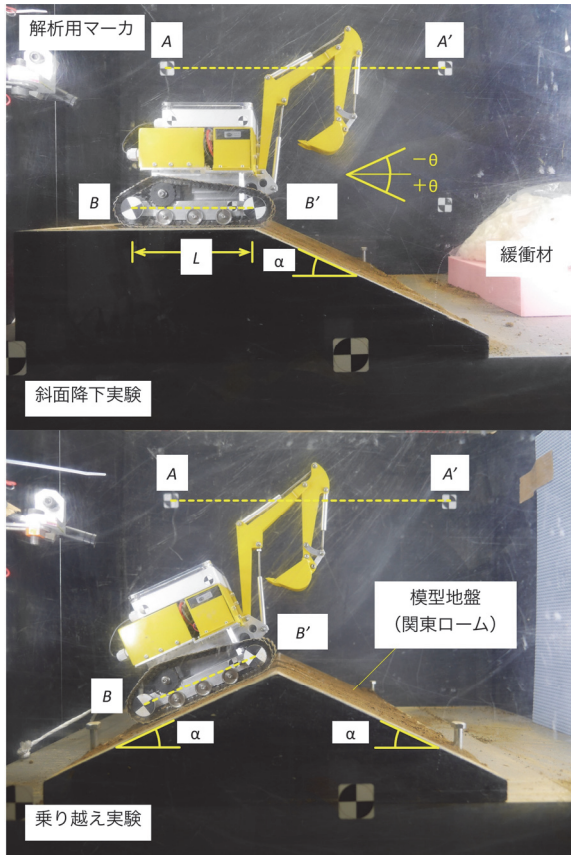


図4 実験の概要

なお、模型の接地圧を地盤の弾性限界以下とすることで、地盤のダンピングの影響が小さくなるように工夫した。それにより、ダンピングが模型の揺動に与える影響を少なくした。

3 実験の概要

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) を使用した⁶⁾。

図3に遠心実験の概要を示す。模型の操作は無線通信によって操作する。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プリングを介して接続されている。

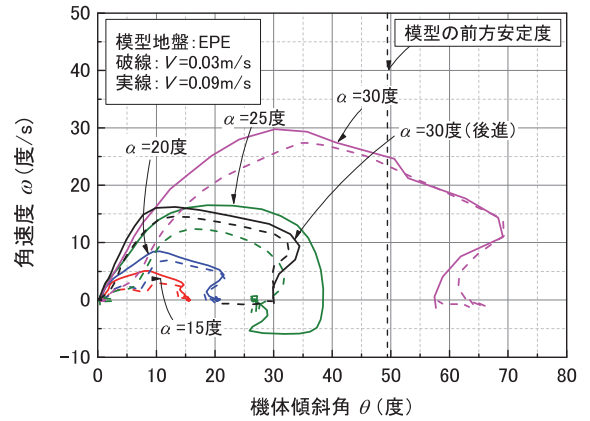


図6 機体傾斜角と角速度の関係

模型地盤については、発泡ポリエチレン(Expanded Poly-Ethylene, 以下、EPE という。)と関東ロームを用いて製作した。EPE は均質な化学材料であるため、実験の再現性を確保する目的で使用した。

関東ローム地盤は、均等に締めめ圧力が作用するよう、遠心実験装置を用いて締めめを行った。締めめ圧は 50kPa になるよう重石を配置して、遠心加速度 50G で締め固めた後、所定の形状に成形した。締めめによって製作された模型地盤の極限支持力は約 250kPa であり、ドラグ・ショベル模型の接地圧 (40.2kPa) は地盤の弾性限界以下となるため、地盤のダンピングの影響が小さいと考えられる。

斜面降下実験は、模型実験を天端 (盛土の上部) より走行開始して斜面を降下させるものである。一方、乗り越え実験は残土を模擬した盛土を乗り越える実験である。

模型の走行速度 V については、模型の最高速度が 0.15m/s であることと、機械が斜面降下時および残土乗り越え時に低速で走行することを考慮して 0.03m/s および 0.09m/s とした。これらの速度は実機と同じ速度に相当する。

計測については、走行挙動を高速度カメラで撮影し、動画解析により模型の揺動を求めた。解析では、壁面に設置した二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 $B-B'$ とのなす角を機体傾斜角 θ と定義した。 θ の極性については、図4の図中に示すとおり、機体が前方に傾斜する方向を+ (プラス) とし

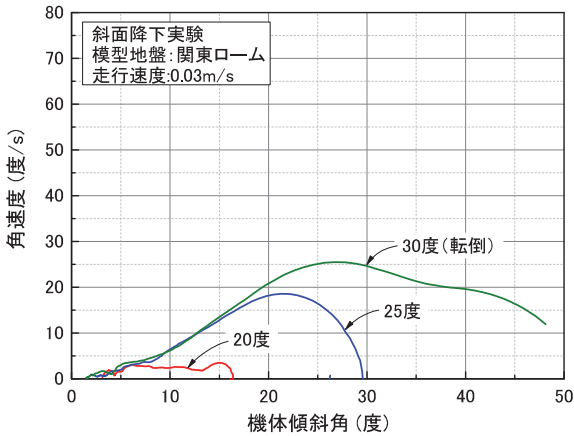
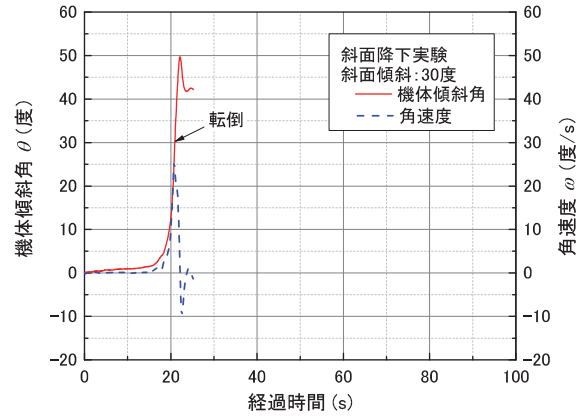


図7 斜面降下実験の結果 (関東ローム)



(a) 斜面降下実験 ($\alpha=30$ 度)

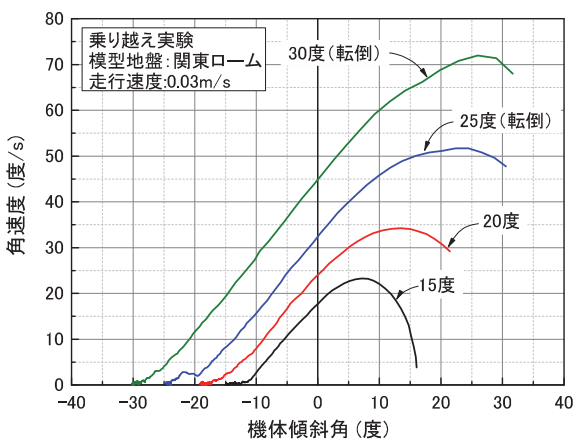
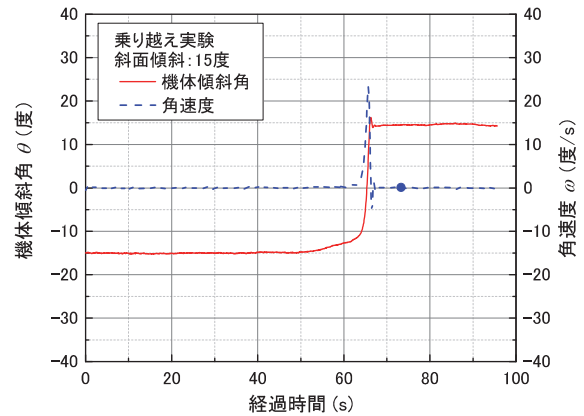


図8 乗り越え実験の結果 (関東ローム)



(b) 乗り越え実験 ($\alpha=15$ 度)

図9 機体傾斜角および角速度と経過時間の関係

た。高速度カメラの解像度は512×412ドットであり、撮影速度は500fpsである。

その他、斜面降下実験については、進行方向の違いが不安定性に与える影響を調べるために、前進で降下する条件と後進で降下する条件で実験を行った。

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、関東ロームを静的に締固めて作製した模型地盤は実地盤に比べ、強度がやや高いと考えられる。そのため、本研究では、模型地盤の幾何学的形状が走行挙動に与える影響について調査した。

4 実験結果

1) 遠心模型実験の結果

(1) 斜面降下実験

高速度カメラで撮影した動画を解析して機体傾斜角 θ およびその角速度 ω を求めた。図5に機体傾斜角 θ および角速度 ω の時刻歴を示す。図中に示した実験条件は、EPE地盤の斜面傾斜25度である。天端走行中($t=0\sim 38$ s)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斜面上を走行した際($t=39$ s)には、 θ および ω は大きく変動している。その後、斜面上の走行時($t=50$ s)では、 ω はほぼゼロとなり、 θ も変動が少ない。

図6は機体傾斜角 θ と角速度 ω の関係を示したものである。この図は、同じ θ で ω を比較した場合、 ω が大きい方が回転運動エネルギーが大きく、より不安定であることを意味している。図中の破線は $V=0.03$ m/sを示し、実線は $V=0.09$ m/sの結果を示している。斜面傾斜の増加に伴って ω も増加しており、不安定化していることが確認できる。

斜面傾斜 $\alpha=30$ 度では、前進により斜面を降下した場合、模型は転倒した。模型の前方安定度 θ_f は49.4度であり、機械の安定度より緩やかな斜面($\alpha<\theta_f$)においても転倒することが確認された。一方、同じ $\alpha=30$ 度の斜面において、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。この理由は、模型の重心が履帯の中央よりもやや前方に位置しているため、前後方向で安定性が異なることや、前進で斜面を降下する場合は履帯の前面に荷重が集中的に作用するのに対して、後進により斜面を降下する場合には、履帯に均等に荷重が作用するなどが考えられる。 θ - ω 関係を比較すると、後進での θ - ω 関係は、前進で降下した場合に比べ小さくなっている。この結果から、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定して走行することができることがわかった。

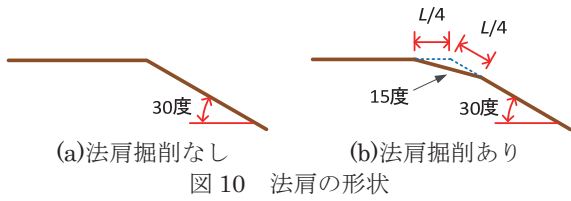


図 10 法肩の形状

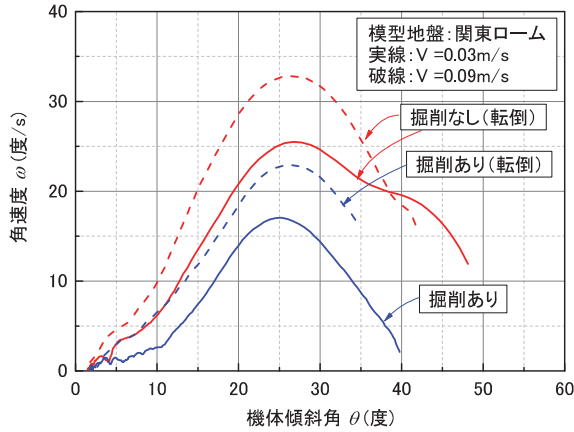


図 11 法肩形状の違いによる影響

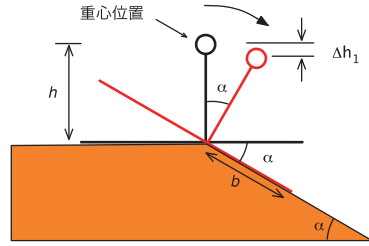
ドラグ・ショベル製造各社の仕様には、登坂能力が示されている。一般的に 35 度の傾斜を登ることが可能とされているが、本実験結果から、斜面を上ることができても、安全に下ることができない場合があることがわかった。

(2) 斜面降下実験と乗り越え実験の比較

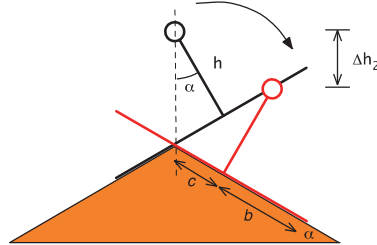
図 7 および図 8 に関東ローム地盤における斜面降下実験と乗り越え実験の結果を示す。斜面降下実験に比べ、乗り越え実験の ω は全体的に大きな値を示しており、より不安定化していることがわかる。なお、転倒した条件は、斜面降下実験では $\alpha=30$ 度、乗り越え実験では $\alpha=25$ 度および 30 度の 3 ケースであった。

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 ω_{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) では転倒しなかった。図 9 にそれぞれの機体傾斜角および角速度と経過時間の関係を示す。図 9 (a) および (b) の機体傾斜角 θ を比較すると、転倒した斜面降下実験 ($\alpha=30$ 度) の方が値の変動量が大きい。一方、角速度 ω については、両者の変動量はほぼ等しい。なお、図 5 との比較が可能となるよう、軸のスケールをそろえて図示した。

このように、発生する最大角速度 (回転運動エネルギー) が同じであっても結果に違いがみられた。この原因は、 ω_{max} が発生した時の機体傾斜角 θ と斜面傾斜 α が関係したものと考えられる。つまり、斜面傾斜 $\alpha=30$ 度上に設置された機体と、 $\alpha=15$ 度上に設置された機体では安定性が異なり、転倒するために必要なエネルギーも異なる。機械の転倒条件の検討については後述することとする。



(a) 斜面降下実験



(b) 乗り越え実験

図 12 実験時の重心位置の移動

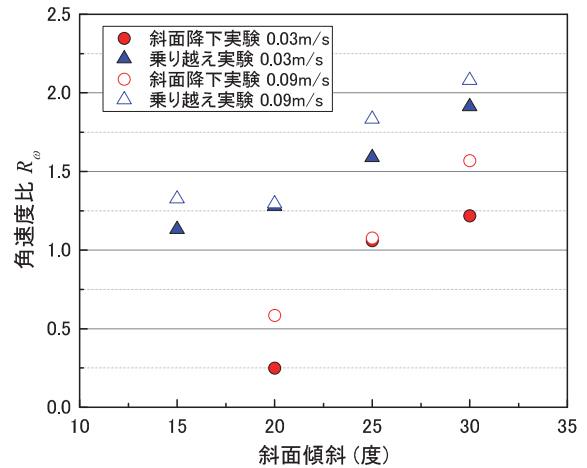


図 13 角速度比 ω_r と斜面傾斜 α の関係

以上の結果から、残土等を乗り越える際には、斜面を降下する場合に比べ、機体は不安定化し、比較的緩やかな傾斜でも転倒する危険性があることがわかった。

(3) 斜面降下時の法肩形状の影響

法肩形状の違いが、斜面降下時の走行挙動に与える影響を調べるために、図 10 に示す、 $\alpha=30$ 度の模型斜面の法肩から天端方向と法先方向の $L/4$ の点を結んだ部分を掘削した条件で走行実験を行い、法肩掘削の有無が試験結果に与える影響を検討した。ここで、 L は模型の車軸間距離である。

図 11 に実験結果を示す。法肩の掘削の有無について結果を比較すると、法肩を掘削した条件の ω は法肩を掘削していない条件よりも小さい。すなわち、より安定であった。走行速度の違いについて比較すると、速度の大きい方 (破線) が ω は大きく、機体が不安定化していることがわかる。なお、本実験の結果から、斜面を掘削した条件で、速度が遅い場合のみ模型は転倒せずに斜面を降下することが可能であった。以上の結果から、斜面を降

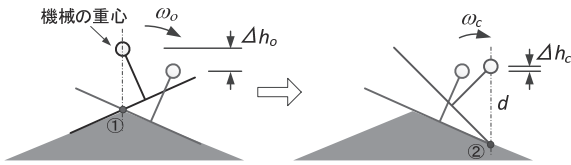


図 14 転倒時の重心の移動

表 2 限界角速度 ω_c

斜面傾斜 α (度)	Δh_c (mm)	限界角速度 ω_c (度/s)
15 度	13.68	18.51
20 度	9.85	15.70
25 度	6.61	12.87
30 度	4.00	10.01

下する際には、地表形状と走行速度が安全性を左右する重要な要因であることが確認された。

2) エネルギーの釣り合いに基づくドラグ・ショベルの転倒現象の検討

(1) 角速度の概算値

斜面降下時および乗り越え時に発生する角速度 ω の概算値について検討する。遠心模型実験における重心位置の移動を模式的に示したものを図 12 に示す。斜面降下実験における重心の移動量 Δh_1 は式(11)で表される。

$$\Delta h_1 = h - h \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

一方、乗り越え実験の際の重心の移動量 Δh_2 は式(12)で表される(補足 1 参照)。

$$\begin{aligned} \Delta h_2 &= h / \cos \alpha + c \cdot \sin \alpha - h \cdot \cos \alpha \\ &= 2 \cdot h \cdot \sin \alpha \cdot \tan \alpha \end{aligned} \quad (12)$$

機械が斜面を降下する際や、残土を乗り越える際には、盛土の法肩や残土の頂部で機械の重心が回転するように移動する。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)が回転運動エネルギーに変換されると仮定すると、斜面降下実験では式(13)の関係式が得られる。

$$m \cdot g \cdot \Delta h_1 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot h^2 \cdot \omega_1^2 \quad (13)$$

ここで、 m は模型質量、 g は重力加速度、 h は回転半径であり、このケースでは重心の高さである。式(13)から、重心の移動量 Δh_1 と角速度 ω_1 の関係式は式(14)で表される。

$$\omega_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\Delta h_1}{h^2}} \quad (14)$$

同様に、乗り越え実験での関係式は式(15)で表され、重心の移動量 Δh_2 と角速度 ω_2 の関係式は式(16)で表される(補足 2 参照)。

$$m \cdot g \cdot \Delta h_2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (h / \cos \alpha)^2 \cdot \omega_2^2 \quad (15)$$

$$\omega_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{\Delta h_2}{h^2} \cdot \cos^2 \alpha} \quad (16)$$

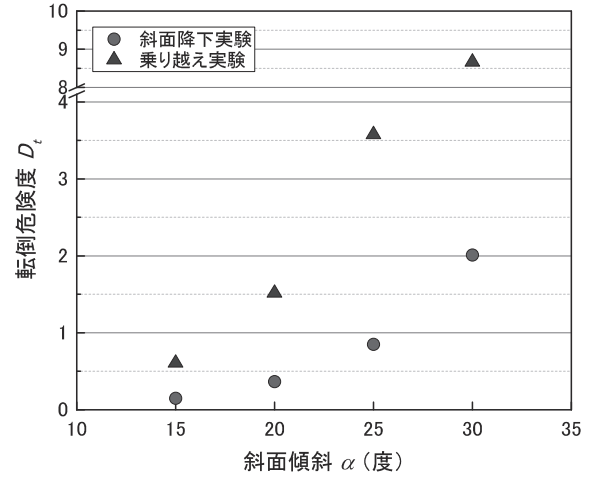


図 15 斜面傾斜と動的転倒危険度 D_t の関係

式(14)および式(16)から斜面降下時および乗り越え時に発生する角速度の概算値を求めることができる。

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 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。

$$R_\omega = \frac{\omega_{max}}{\omega_{cal}} \quad (17)$$

図 13 に斜面傾斜角 α と角速度比 R_ω の関係を示す。 R_ω は概ね 1 より大きな値であった。この原因は概算値では回転支点を中心に機体が回転すると仮定して Δh を計算しているのに対して、実際には機体の回転中も前進し続けているため、結果的に Δh が概算値よりも大きくなるためと考えられる。

(2) 転倒条件の検討

次に転倒の条件について検討を行う。図 14 に転倒時の重心移動の概念図を示す。履帯を走行装置とする機械は、機械の重心が法肩(法面の上端)や残土の頂部を通過した際に①を支点に模型が回転し始める。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_0 に相当する。その後、模型は履帯の前方②を支点(転倒支点)として回転し、機械の重心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心の移動高さは Δh_c となる。 Δh_c は次式で表される。

$$\Delta h_c = d - (b \cdot \sin \alpha + h \cdot \cos \alpha) \quad (18)$$

エネルギー保存則より位置エネルギーと回転エネルギーの関係式は、式(19)で表すことができる。

$$E_c = m \cdot g \cdot h_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot d^2 \cdot \omega_c^2 \quad (19)$$

ここで、 d は転倒時の回転半径である。

表 2 に斜面傾斜 α と Δh_c および限界角速度 ω_c を示す。斜面傾斜が大きい場合は、 Δh_c および ω_c は小さく、転倒に至るまでのエネルギーが小さいことが確認できる。

斜面降下時や乗り越え時(点①)に発生するエネルギー E_0 を転倒に必要なエネルギー E_c (点②)で除した値を

動的転倒危険度 D_t と定義した。関係式を式(20)に示す。 D_t は 1 より大きい場合に転倒することを意味する。

$$D_t = \frac{E_o}{E_c} \quad (20)$$

図 15 は先に述べた各実験の D_t を理論解析的に検証した結果を示す。斜面降下実験と乗り越え実験の両ケースを比較すると、斜面降下時に比べ、乗り越え時の D_t は 2 倍以上となっている。そのため、残土等乗り越える際には、斜面降下時に比べ機体が不安定化しやすく、傾斜の緩い条件でも転倒する可能性があることが明らかになった。

また、前述した斜面降下実験 ($\alpha=30$ 度) と乗り越え実験 ($\alpha=15$ 度) の D_t を比較すると、斜面降下時 ($\alpha=30$ 度) では 2.01 であり「転倒する」が、乗り越え時 ($\alpha=15$ 度) では 0.61 であるため「転倒しない」ことを意味する。この解析結果は実験結果と合致していた。なお、乗り越え時で $\alpha=20$ 度の D_t は 1 以上となったが、実験では転倒しなかった。その理由は、実験では頂点①を乗り越えた際に沈下が生じ(つぶれ)て実際の Δh は概算値よりも小さくなったためと考えられる。その結果、実験では E_o が小さくなり D_t は 1 以下となった(転倒しなかった)。この条件以外のケースでは理論解析と実験結果は良い一致が確認された。したがって、履帯の沈下がないものと仮定して解析的に求めた D_t による転倒危険度は安全側の結果を導くことがわかった。

本研究ではドラグ・ショベルの斜面走行時の転倒現象を解明するため、主として斜面形状が機械の安定性に与える影響について検討を行った。乗り越え実験においては、二等辺三角形の形状をした盛土について検討を行ったが、本研究結果はそれ以外の形状においても応用可能と考えられる。一方、地盤の沈下の影響等、地盤の子細な力学的特性による影響については検討していないため、今後は、地盤の力学的特性を考慮したモデルの構築が必要と考えられる。

5 まとめ

掘削用機械の斜面降下時および残土等乗り越える際の機械の不安定性を調べるために、小型の模型を作製し、

斜面の勾配等を変えた遠心場走行実験を実施した。実験により得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 斜面の勾配が機体の安定度以下でも転倒するケースが実験的に確認された。
- 2) 斜面傾斜の増加に伴って機体は不安定化するがその絶対値は機体の進行方向で大きく異なることがわかった。すなわち、前進により斜面を降下するよりも、後進で斜面を降下した方がより安定である。後進により斜面を降下するのは、前進で登坂する条件と同等の状況である。
- 3) 斜面を降下する際には、地表面形状と走行速度が安全性を左右する重要な要因であることが確認された。
- 4) 機械の転倒する条件を理論的に導出し、実験により得られた角速度 ω_{max} との比である転倒危険度 D_t を比較した。その結果、同じ傾斜で比較すると、斜面降下実験に比べ、乗り越え実験の D_t は 2 倍以上であり、転倒する危険性が高いことが明らかになった。

参考文献

- 1) 吉川直孝, 伊藤和也, 堀智仁, 清水尚憲, 濱島京子, 梅崎重夫, 豊澤康男. ドラグ・ショベルに係る死亡災害の詳細分析と再発防止対策の検討, 土木学会論文集 F6 (安全問題), vol.70, No.2, 2014; 1_1-7-1_114.
- 2) 西ヶ谷忠明. ミニショベルの転倒事故再現実験, 建設機械, vol.43, No.11, 2007; 25-31.
- 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, 2004; 37-44.
- 4) 香川崇章. 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, No.275, vol.7, 1978; 69-77.
- 5) 玉手聡, 堀智仁. 大型建設機械の不安定性と転倒防止のための安全要件, 労働安全衛生総合研究所安全資料, JNIOOSH-SD-NO.28, 2010; 88-90.
- 6) 伊藤和也, 玉手聡, 豊澤康男, 堀井宣幸. 新遠心模型実験装置 (NIIS Mark II centrifuge) の開発, 産業安全研究所研究報告, NIIS-RR-2005, 2006; 57-74.

(補足 1) 式(12)の導出

図 A に乗り越え実験における重心の移動を示す。この時の位置エネルギーの変化量 Δh_2 は、次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta h_2 &= (1) + (2) - (3) \\ &= h/\cos\alpha + c \cdot \sin\alpha - h \cdot \cos\alpha \\ &= h/\cos\alpha + h \cdot \tan\alpha \cdot \sin\alpha - h \cdot \cos\alpha \\ &= 2 \cdot h \cdot \tan\alpha \cdot \sin\alpha \end{aligned}$$

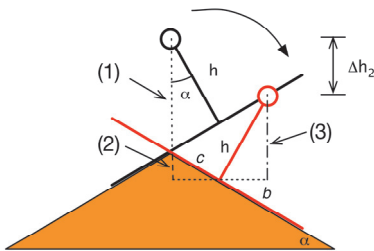


図 A 乗り越え実験における重心の移動

(補足 2) 式(18)の導出

図 B に転倒時の重心位置の移動を示す。転倒するために必要な重心位置の移動量 Δh_c は次式で表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta h_c &= d - ((1) + (2)) \\ &= d - (b \cdot \sin\alpha + h \cdot \cos\alpha) \end{aligned}$$

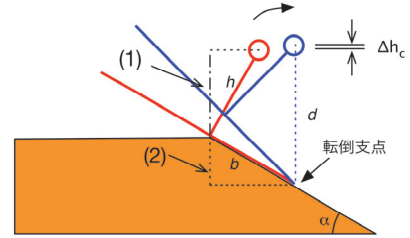


図 B 転倒時の重心位置の移動