18. 遠心模型実験によるくい打機の最大接地圧と支持力安全率の検討

くい打機械の転倒防止に関する研究

独立行政法人 労働安全衛生総合研究所 〇 堀 智仁 独立行政法人 労働安全衛生総合研究所 玉手 聡

1. はじめに

くい打機は建設工事や土木工事の基礎を造成す るために用いられる大型の建設機械である。上部 旋回体と下部走行体で構成され,上部旋回体には 長尺なリーダーが備わる。そのため,重心位置が 高く,不安定な構造をしている。主に軟弱地盤の 対策工事や杭基礎工事に用いられ,潜在的に不安 定な地盤上での作業を余儀なくされる。近年,こ の種の建設機械の転倒災害が相次いで発生してい る。

くい打機の転倒防止に関する関係規則^{1),2)}を調 査すると、機械が有するべき安定度について述べ られているものの、地盤の支持力要件に関する規 定がなく、その詳細については明らかになってい ないのが現状である。

本研究では、くい打機の安定設置に必要な地盤 の支持力要件を明らかにするために、くい打機模 型を作製し、遠心場走行実験を行った。既報³⁾で は、実機を用いた実大走行実験と、1/25 スケール のくい打機模型を作製し、遠心場走行実験を行い、 実機と模型の走行挙動の類似性を確認した。また、 走行挙動に起因する接地圧変動は正規分布的に分 布し、確率的検討に基づいた支持力安全率の導入 が可能であることを明らかにした。

本稿では,関東ロームと硬質ウレタンフォーム を用いて,地盤支持力のバラツキが異なる模型地 盤を作製し,遠心場走行実験を行った。高速度カ メラを用いて行った挙動解析や,履帯接地圧およ び地盤支持力の変動係数から,信頼性設計の概念 に基づいた支持力安全率の検討を行った。

2. くい打機模型

作製したくい打機の小型模型を**写真-1**に示す。 小型模型は過去に転倒災害が発生した機種を参考 に作製した。表-1は実機と模型の諸元を比較した 表である。実機の総重量は539kN(55t)であり, 同種機械の中型クラスである。くい打機模型は 1/25 スケールで設計した。模型の重心は実機と相 対的に同じになるよう,モーターや減速機,およ びバッテリーを配置させた。模型の重量は29.9N (3kg)である。



写真-1 作製したくい打機模型

			< V	打機械				
		実機		模型 (1/25 scale)				
重心の位置		水平 x (m)	鉛直 y(m)	水平 x (mm)	鉛直 y (mm)			
下部走行体		-0.83	1.43	6.5	2.7			
上部	機体・リーダー	3.35	12.42	213.0	198.8			
構造体	アースオーガ類	4.20	15.98	-5.8	32.2			
合計重量		539kN		29.9N (25g in 747N)				
		101		133				
走行速度 (km/h)		1.6 (=45cm/sec)						

表-1 実機と模型の諸元の比較



図-1 車軸部の断面図

模型は最大回転数が 35000rpm の小型モーター を 2 個搭載し,左右の履帯が独立して駆動する。 モーターに取り付けたギアには,軸対称な位置に 切り欠き部が設けられた検知盤が備わる。検知盤 の単位時間における回転数をフォトセンサーでモ ニタリングし,制御ボックスで演算処理してフィ ードバック制御を行っている。制御ボックスでは, モーターの回転数を制御するための電子回路に加 え,走行をワイヤレスで操作するための命令信号 を送受信する電子回路も搭載している。

模型の安定度はリーダー部分に搭載する付加質 量の重さと高さの組み合わせにより任意に変更設 定できる。付加質量は、サンドコンパクションパ イルを施工する機械やオーガーを模擬している。

図-1 に模型の車軸部断面の拡大図を示す。アームはボディに剛結された片持ち梁構造となっている。全アームの上部にひずみケージを貼り付け、 車軸に作用する荷重の計測が可能となっている。

走行中の機体に生じる挙動の計測は, リーダー 上部に設置した加速度計により行った。

3. 地盤のモデル化

模型地盤は硬質ウレタンフォームと関東ローム を用いて作製した。関東ロームの物理特性を表-2 に示す。

硬質ウレタンフォーム(Urethane Foam,以下ウ レタンと記す)は水平かつ一様な支持力分布の地 盤を模擬している。それに対して,関東ローム地 盤は,地盤の支持力にバラツキがある地盤を模擬 している。

関東ローム地盤は,最適含水比を目標に含水比 調整した後,締固め後の厚さが約25mmとなるよ う所定の量の試料を投入し,締固め圧力150kPaで 1時間静的に締固めを行った。2層目の締固めは 12時間以上行い,厚さ50mmのローム地盤を作製 した。

2 種類の模型地盤の載荷圧力(q)-沈下比(s/D)関係を明らかにするために,支持力試験を行った。



図-2 支持力試験結果

ここで, *q* は荷重を載荷面積(*A*)で除した値であり, *A* は 30mm×30mm の正方形である。*s/D* は沈下量 (*s*)を辺長(*D*)で除した値である。試験はひずみ制御 で行い,載荷速度は 1mm/min とした。

図-2 に載荷応力 q と沈下比 s/D の関係を示す。 載荷初期の s/D<0.02 は, s/D 増分に対する q 増分 は大きく,直線的な関係が共通して見られる。そ の後,屈曲点が現れるが,明確なピークは示さな い。屈曲点前後の 2 つの接線交点を極限支持力(q_u) と定義すると,試験に用いたウレタンの q_u は約 100kPa,関東ローム地盤は約 270kPa であった。

4.実験装置と実験条件

4.1 実験装置および実験条件

図-3に、遠心模型実験の概要を示す。実験に用 いた容器は幅 250mm,長さ 800mm,高さ 300mm である。その上部には遠心装置の回転に伴う空気 抵抗の影響を排除するため、風防カウルを設置し、 模型全体を覆った。走行時の移動距離はワイヤー 式変位計により計測を行った。

表-3 は実験条件を示す。異なる 2 つの安定度を 与えた模型を,遠心加速度 5g と 25g において走行 させた。この比較は,接地圧力と極限支持力の関 係を変えて,弾性的支持条件と,塑性的な沈下を 伴う支持条件を再現するためである。試験地盤は 前述の通り,硬質ウレタンによる模型地盤と関東 ロームを静的に締固めた模型地盤の 2 種類であり, 平坦性を有する地盤において,地盤支持力のばら つきの有無が自走挙動に与える影響を比較した。

車両系建設機械構造規格²⁾には建設機械が有す るべき構造的な安定度を機種毎に定めている。こ こで、安定度とは、機械が最も不利となる状態で



写真-2 高速度カメラの測点



表-3 実験条件

実験名称	安定度 (度)	遠心加速度 (g)	地盤材料
Cs1	10	5	関東ローム
Cs2	10	25	関東ローム
Cs3	10	25	ウレタン
Cs4	5	5	関東ローム

の限界傾斜角を意味し,前後左右の方向に対して 満足しなければならない値である。くい打機械が 有するべき安定度は5度であるため,本研究では, 模型の安定度を5度および10度とした。



図-5 ハンドベーン試験結果

4.2 高速度カメラの概要

走行中のくい打機模型挙動の実測は困難である ため、高速度カメラで走行挙動を記録し、画像解 析を行った。実験に使用した高速度カメラは nac 社製 fx Rx-6G である。

動画は 500 コマ/秒で撮影し, 1pixel あたりの精 度は約0.8mmである。写真-2 に測点の概要を示す。 マーカーは全部で 10 点 (P0~P9)であり,本研究 では, Point0 と Point1 を結んだ測線の傾斜角を算 出した。なお,解析結果にはレンズの光学歪補正 を施した。

4.3 ハンドベーン試験

遠心場走行実験を行った関東ローム地盤に対し て、ハンドベーンを用いたせん断強度分布の調査 を行った⁴⁾。調査は 5cm 間隔の格子状に測点を設 定し、合計 45 箇所(5×9)の計測を行った。図-4 に ハンドベーンの計測箇所を示す。用いた装置は、 幅 10mm×長さ 20mm のベーンブレードが備わり、



図-6 応答加速度と経過時間の関係(実大換算)



図-7 周波数と振幅スペクトル

表層部に手動で貫入した後に,最大トルク *M_{max} を* 計測するものである。**写真-3** にハンドベーンの概 要を示す。

図-5 にハンドベーン試験の結果を示す。走行路 のせん断強さにはバラツキが見られ,部分的にせ ん断強さが大きい箇所が見られる。この原因とし て,遠心場走行実験の後にベーンせん断試験を実 施したため,履帯の通過により地盤が締固まった 事が考えられる。しかしながら,進行方向のせん 断強さのバラツキは比較的小さいことがわかった。

5. 実験結果および考察

遠心場走行実験では、くい打機模型を待機位置 から加速させ、次に定常走行させる。この加速に 要する距離は 15cm 程度である。この時履帯は全面 が待機位置から模型地盤上に移動する。従って本 研究では、走行距離が 15cm 以降のデータを解析対 象とした。

5.1 応答加速度

図-6 に, Cs1 と Cs2 におけるリーダー上部の応 答加速度(*r_a*)の経時変化を示す。

応答を比較すると、遠心加速度の大小による r_aの振幅には顕著な差は見られない。値を比較する



と両実験結果はともに最大 r_a が 4m/sec² 程度であ る。また,最小 r_a は Cs1 の遠心加速度 5g において -3m/sec² 程度, Cs3 では-2m/sec² 程度と若干の差が 見られた。これは,履帯接地圧力(q_a)が大きい Cs2 では, $q_a > q_u$ となるために,Cs1 に比べて大きな沈 下が生じ,機体が傾斜したと考えられる。このこと は,図中に示す r_a の分布図からも解る。Cs1 の平 均値は-0.06m/sec² であるが,Cs3 の平均値は 1.00 m/sec² である。従って,Cs3 では機体が約 5 度傾斜 した状態で自走し,揺動したことがわかる。

5.2 揺動の周波数特性

図-7は、Cs1とCs3におけるr_aを周波数解析し 求めた振幅スペクトルの分布である。遠心加速度 5gにおけるCs1の振幅スペクトルはピークが 1.2Hz付近に現れている。遠心加速度25gにおける Cs3の振幅スペクトルのそれは1.1Hz付近に見ら れ、その値はほぼ一致している。また、Cs3の周 波数0~0.1Hz付近に見られる振幅スペクトルの増 加には、先に述べた模型の傾斜による影響が見ら れる。

5.3 高速度カメラによる挙動解析

図-8 に傾斜角と経過時間の関係を示す。安定度 の違いにかかわらず、ほぼ同じ傾向を示している。 これは、与えた遠心加速度が小さく、履帯に生じ る接地圧が小さいため、弾性的な支持条件が支配 的となり、同じような動揺が生じたと考えられる。

表-4に傾斜角の解析結果を示す。平均値と標準 偏差,傾斜角の最大値と最小値の差(Δθ)を比較 すると,試験条件の違いにかかわらず,有意な差 は見られない。それに対して周波数成分を比較す ると,Cs1(安定度10度)に比べ,Cs4(安定度5 度)は長周期的に揺動している。このことから安 定度の低下に伴い,走行時の揺れは長周期化する ことが確認された。

5.4 履帯に作用する接地圧力変動

計測した車軸荷重を各車軸の接地面積で除して 接地圧力を求めた。



表-4 傾斜角の解析結果



(a) Cs2(ローム) (b) Cs3(ウレタン)

図-9 に接地圧力と経過時間の関係を示す。関東 ロームとウレタンの結果を比較すると、関東ロー ムの接地圧変動が大きい。これは、関東ローム地 盤は支持力のバラツキを有するのに対して、ウレ タン地盤は、支持力のバラツキが非常に小さいた め、地盤支持力の影響によるものと考えられる。

全接地圧に対する各車軸の接地圧の比を,接地 圧分布割合 R と定義し,実験値 R_eと理論値 R_tの比 較を行った。ここで,理論値 R_tの算出方法につい ては,JIS が定める接地圧力の関係式⁵⁾から算出し た。JIS A 8509-1 には、くい打機の履帯に作用する 接地圧力分布形状とその最大・最小接地圧の算出 方法が定められており、機体重心の水平偏心量(e) と履帯諸元の相対的な関係に基づいて接地圧力の 算出式が規定されている。

図-10 に Cs2 および Cs3 より得られた接地圧力



図-10 接地圧分布割合の実験値と理論値の比較 (a) Cs3 (ローム) (b) Cs4 (ウレタン)

の理論値 R_t と実験値 R_e の比較を示す。実験値の 平均値をマークで、標準偏差 σ をエラーバーで示 した。 R_e に注目すると、RR と RS はともに 0 で ある。これは、両実験の安定度条件では、機体 が前輪 3 個の車輪によって支持されることを意 味する。平均値に着目すると、両実験に共通し て R_t と R_e は、ほぼ一致している。RR と RS には、 R_e が 0.1 以下程度の小さな荷重の発生が見られ、 R_e > R_t である。一方、FR と FS では、 R_e < R_t である。

標準偏差 σ の分布を見ると、ウレタン地盤では各部の値がほぼ等しいが、ローム地盤では R_e の増加に伴う σ の増加が見られる。特に接地圧力が最大となる FS の σ に着目すると、ウレタン地盤では 0.07であるが、ローム地盤では 0.17 と大きく、地盤支持力のバラツキによる違いが確認された。

5.5 走行地盤に必要な支持力安全率の考察

遠心場走行実験より得られた履帯接地圧の変動 係数と、模型地盤の支持力の変動係数を用いて、 不確実さを考慮した支持地盤の破壊確率の検討を 行った。

 G_f を地盤破壊に関する限界状態関数と定義すると、 G_f は式(1)によって表される。

表-5 接地圧力の支持力安全率と変動係数

	支持力安全率	変動係数			
	q_u/μ_a	支持力 C _{vg}	接地圧力 Cvp		
Cs2	2.2	0.16	0.45		
Cs3	0.9	0.08	0.14		



$$G_{f}(q_{u},q_{a}) = q_{u} - q_{a}$$

$$\begin{cases} G_{f}(q_{u},q_{a}) > 0 & \text{gc} \\ G_{f}(q_{u},q_{a}) < 0 & \text{fc} \\ \end{cases}$$
(1)

ここで、 q_a は履帯に生じる接地圧力であり、 q_u は地盤の極限支持力である。

 $q_a \ge q_u$ は互いに独立であり、 G_f は正規分布に従うことを仮定すると、地盤の破壊に対する危険の 確率 (P_{FP}) は式 (2) により求められる。

$$P_{FP} = P(q_a > q_u) = P(G_f < 0)$$

= $F_G(0) = \Phi\left(\frac{0 - \mu_G}{\sigma_G}\right) = \Phi\left(-\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_G}{\sigma_G}\right)$ (2)

ここで、 $\mu_G \geq \sigma_G$ は G_f の平均値と標準偏差である。 F_G は確率分布関数であり、 \mathcal{O} は F_G によって表された標準正規分布関数である。

遠心場走行実験に基づく走行地盤の破壊確率に ついて、仮定的な検討を行った。検討に用いたパ ラメータを表-5に示す。支持力安全率は地盤の極 限支持力 q_u を FS の履帯接地圧 q_a の平均値 μ_a で除 した値である。支持力の変動係数 (C_{vg})は、ロー ム地盤ではハンドベーン試験の結果より与え、ウ レタン地盤には推定値を与えた。

Cs2 と **Cs3** の事例に基づいた支持力安全率 *F*_s と 地盤の破壊確率 *P*_fの関係を図-10 に示す。

 $C_{vg} \geq C_{vp}$ の値がともに大きい Cs2 の曲線は、両値がともに小さい Cs3 の上方に位置している。施工現場で慣用的に用いられることが多い、短期的な安全率 F_s =1.5 で P_f の値を比較すると、その値は0.162 と 0.003 であり、大きな差が生じることがわ

かった。

以上の結果から,接地圧力変動と地盤のせん断 強さのバラツキから,信頼性設計の概念に基づい た支持力安全率の検討が可能であることが明らか になった。

6. まとめ

(1) くい打機模型を作製し, 遠心場走行実験を行った。その結果, 自走に伴う機体の動揺は1.1~1.2Hz 付近に卓越が見られた。

(2) 高速度カメラで撮影した動画を解析した結果, 安定度の低下に伴い,機体の揺れが長周期化して いることが確認された。

(3) 履帯の接地圧力は自走に伴って変動すること がわかり、その変動は、支持力の安全率と地盤支 持力のバラツキに影響を受けることがわかった。

(4) 実験的に得られた支持地盤と接地圧力の変動 係数を用いて,支持力安全率(F_s)と地盤の破壊確率 (P_f)の関係を調査した。その結果,現場で慣用的に 用いられている F_s =1.5における P_f の値は0.162と 0.003と大きく異なり,両変動係数は安全率の選択 上,重要なパラメータであることがわかった。な お,本実験では現場地盤に存在する地表面の凹凸 は考慮されていないため,実際の P_f はこれよりも 大きくなる可能性がある。

謝辞:本研究成果は平成19年度厚生労働科学研究 費補助金(労働安全衛生総合研究事業)の交付を 受けた研究課題「基礎工事用大型建設機械の転倒 防止に関する研究(H19-労働一般-005)」において 得られた成果であり,関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 労働調査会:安衛法便覧I,平成19年度版, pp.967,2007
- 2) 労働調査会: 安衛法便覧II, 平成19年度版, pp.512, 2007
- 3) 堀智仁, 玉手聡: くい打機の走行挙動と履帯圧力分布に 関する実験的解析, 平成20年度建設施工と建設機械シン ポジウム論文集, pp.151~156, 2008
- 4) (社)地盤工学会:地盤調査法, pp.242~248, 1995
- 5) 日本工業規格:基礎工事機械-安全-,第一部:くい打機 の要求事項,JISA 8509-1, pp.25,2007