

敷鉄板の載荷位置と地盤支持力に関する模型実験

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

1. はじめに

くい打機の転倒災害を調査すると、履帯が敷鉄板端部に位置した際に転倒した事例や、敷鉄板の敷設が不十分であったことが原因で転倒に至った事例が見られた。

労働安全衛生規則第173条¹⁾では、くい打機の転倒を防止するため、沈下防止措置として敷板、敷角等の使用を義務付けている。しかし、敷鉄板の敷設方法等、その詳細については述べられていない。

そこで本研究では、履帯模型基礎を作製し、偏心荷重と支持力の関係を明らかにするとともに、敷鉄板模型を作製し、載荷位置と支持力の関係を調べた。

2. 実験の概要

(1) 履帯模型基礎および敷鉄板模型の作製

履帯模型基礎はステンレスで作製し、模型の寸法は22mm×173mm×23mmである。

敷鉄板模型は鉄を用いて作製した。模型の寸法は90mm×180mm×1.6mmである。

(2) 地盤のモデル化

本研究では、実験データの再現性を向上させるため、均質な材料である発泡ポリウレタンフォーム（密度 $\rho=28\text{kg/m}^3$ ）を用いて模型地盤を作製した。模型地盤の寸法は、360mm×360mm×50mmである。

(3) 実験方法および実験条件

実験に使用した試験装置は、島津製作所製の精密万能試験装置 Autograph である。試験はひずみ制御（載荷

速度0.5mm/min）で行い、変位と荷重を計測した。試験の概要を写真1に示す。履帯模型基礎を用いた実験では、10mm間隔で偏心荷重を与えた。

敷鉄板模型を用いた試験は図1に示す8箇所で載荷実験を行った。

3. 実験結果

(1) 荷重の偏心と支持力試験の関係

図2に荷重と沈下量の関係を示す。図中には偏心量 $e=0,20,40,60,80\text{mm}$ の結果を示した。偏心量の増加とともに支持力が著しく低下していることがわかる。

Meyerhofは幅 B の帯基礎に対して、偏心量 e の位置に鉛直荷重が作用した場合、載荷荷重は実質的に幅 $B'=B-2e$ の部分で支持されると述べている²⁾。図3に概念図を示す。問題を単純化するために、極限鉛直圧 σ_y^* は一樣であると仮定すると、鉛直荷重 P^* の推定値は式

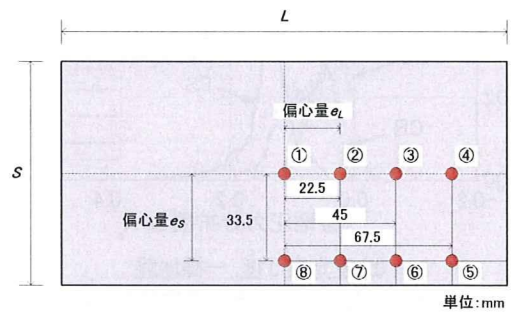


図1 敷鉄板模型の載荷位置

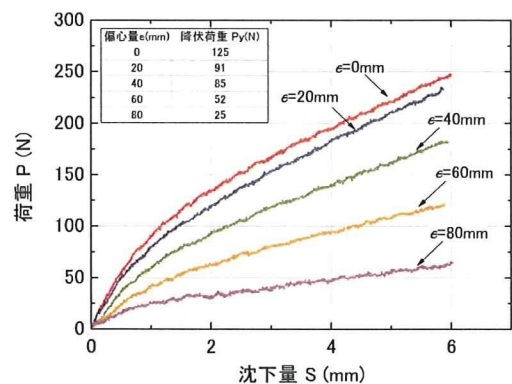


図2 荷重と沈下量の関係

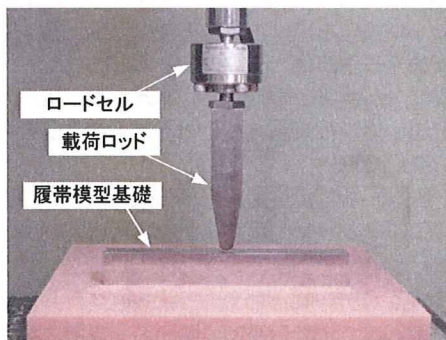


写真1 試験の様子

キーワード 敷鉄板、支持力、敷設効果

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

(1)で表される。

$$P^* = \sigma_f^* (B - 2e) = (\sigma_f^* \cdot B) (1 - 2e/B) = P_{e=0} (1 - 2e/B) \quad (1)$$

ここで、 $P_{e=0}$ は荷重の偏心が無い場合の極限鉛直荷重である。最大偏心量 e_{max} は $B/2$ であるため、式(2)が得られる。

$$P^*/P_{e=0} = 1 - e/e_{max} \quad (2)$$

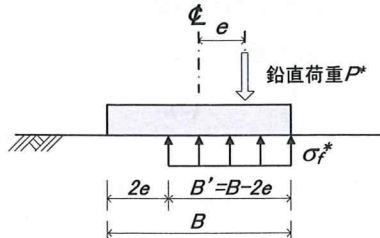


図3 偏心鉛直荷重を受ける帯基礎の有効幅 B'

図4に $P^*/P_{e=0}$ と e/e_{max} の関係を示す。Meyerhofの提案式の値と実験値を比較すると、実験値はやや大きいですが、両者はほぼ一致している。

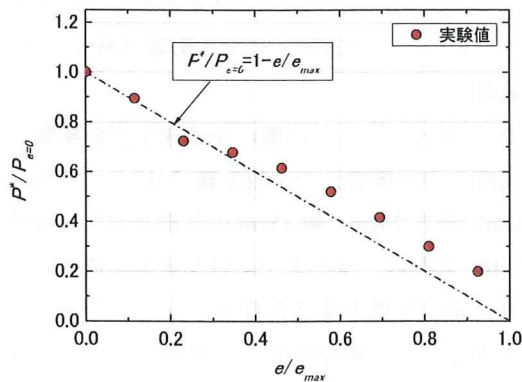


図4 $P^*/P_{e=0}$ と e/e_{max} の関係

(2) 敷鉄板模型の載荷実験

図5は敷鉄板模型の試験結果を示したものである。この場合の最大偏心量 e_{max} および偏心量 e は、式(3)および式(4)から算出した。

$$e_{max} = \sqrt{(S/2)^2 + (L/2)^2} \quad (3)$$

$$e = \sqrt{(e_s/2)^2 + (e_L/2)^2} \quad (4)$$

偏心量の増加とともに支持力は著しく低下し、敷鉄板の端部(⑤地点)に載荷した場合の支持力は、中央載荷の1/10である。そのため、くい打機の安定設置の検討を行う際には、偏心量の増加に伴う地盤支持力の減少を考慮する必要がある。

実験値とMeyerhofの提案式から得た値を比較すると、

僅かに実験値が小さく、ばらつきがみられる。しかし、両者に大きな差はないことから、非常に簡易な式から支持力の概算値を算出することが可能と考えられる。

次に、敷鉄板の敷設効果を調べる予備的な実験を行った。試験の概要を図6に示す。敷鉄板模型の1/2をラップさせて、④および⑤地点で載荷実験を行った。 $P^*/P_{e=0}$ を比較すると、一枚敷きでは0.1と0.25であるのに対して、二枚敷きでは0.55と0.81にそれぞれ増加している。このことから、敷鉄板の敷設方法を工夫することで荷重が分散し、支持力が著しく増加することが明らかになった。

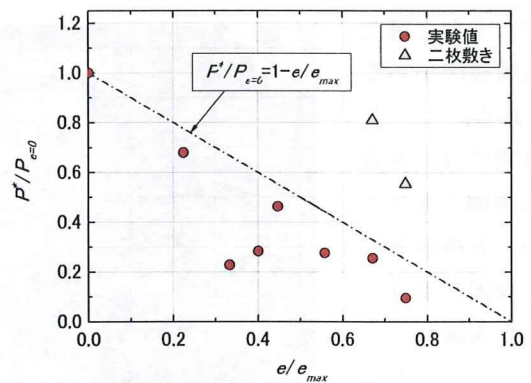


図5 敷鉄板模型の実験結果

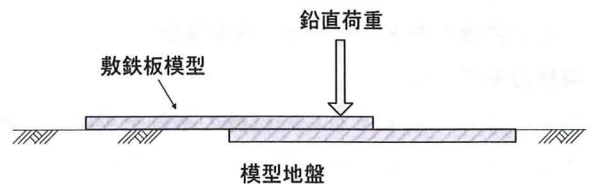


図6 敷鉄板模型の敷設方法

4. まとめ

履帯模型基礎と敷鉄板模型を作製し、偏心荷重と支持力の関係について調べた。その結果、偏心量の増加とともに地盤の支持力が著しく低下することが確認された。

敷鉄板の敷設方法を工夫することで荷重が分散し、支持力が増加することが明らかになった。

謝辞: 本研究は厚生労働科学研究費補助金において得られた成果であり、関係各位に対し、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) Meyerhof, G. G.: The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads, *Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.440-445, 1953.

くい打機の自走挙動に関する実験的解析（その1）

— 遠心模型実験のモデル化と実験条件 —

独立行政法人労働安全衛生総合研究所 正会員 ○玉手 聡, 堀 智仁
 東京都大学大学院 学生会員 前田周吾, 正会員 末政直晃

1. はじめに

基礎工事用大型車両系建設機械（以下、くい打機と呼ぶ）の転倒災害が度々発生している（写真1参照）。その転倒原因の多くは設置地盤の支持力不足にあるが、背景にはくい打機がトップヘビーな構造を有しながら現場内を自走することと、設置される施工現場が軟弱地盤であるなど潜在的な危険要因があると思われる。

本研究では、地盤側と機体側に存在するくい打ち機固有の不安定要因に着目し遠心模型実験による調査を行った。本報告では本実験の概要について述べる。



写真1 転倒災害の様子

2. くい打機のモデル化と遠心模型実験

1) 実験のモデル化

自走に伴って揺動するくい打機の挙動を実験的に再現するために、回転運動に関する相似則を検討した。以下では添え字 p が実機を示し、 m は模型を示す。

相似比率が n 倍の時、慣性質量を I 、傾斜角を θ 、ダンピング係数を c 、時間を T 、接地面積を A 、腕の長さ l 、地盤の弾性係数 k 、ひずみを ε 、重力加速度を g とする。慣性モーメントの比 r_i は式(1)により表され、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)、さらに地盤反力によるモーメントの比 r_e は式(3)、そして転倒モーメント r_m の比は式(4)で表される^{1), 2)}。

$$r_i = \frac{I_m \ddot{\theta}_m}{I_p \ddot{\theta}_p} = \frac{1}{n} \times \left(\frac{T_p}{T_m} \right)^2 \quad (1), \quad r_c = \frac{c_m l_m A_m \dot{\theta}_m}{c_p l_p A_p \dot{\theta}_p} = \frac{1}{n^3} \times \frac{c_m}{c_p} \times \frac{T_p}{T_m} \quad (2)$$

$$r_e = \frac{k_m \varepsilon_m l_m A_m \theta_m}{k_p \varepsilon_p l_p A_p \theta_p} = \frac{1}{n^3} \quad (3), \quad r_m = \frac{m_m l_m g_m}{m_p l_p g_p} = \frac{1}{n^3} \times \frac{g_m}{g_p} \quad (4)$$

ここで、式(1), (2), (3), (4)に示すモーメントの比が全て等しくなる条件は式(5)の関係であり、その成立条件は式(6), (7), (8)の通りとなる。

$$r_i = r_c = r_e = r_m = \frac{1}{n^3} \quad (5), \quad \frac{T_m}{T_p} = \frac{1}{n} \quad (6)$$

$$\frac{c_m}{c_p} = n \quad (7), \quad \frac{g_m}{g_p} = n \quad (8), \quad \frac{v_m}{v_p} = 1 \quad (9)$$

模型に n 倍の重力と地盤に 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。従って、速度(v)は模型と実物で等しく与える必要がある。なお、本実験では土の粘性を n 倍とする人工的な調整は施していない。しかし、くい打機から模型地盤に働く接地圧力を降伏支持力以下のレベルで与えるようにすることで、ダンピング力が運動に与える影響は減少させた。

2) 実験装置

約 1/25 スケールのくい打機の小型模型³⁾を写真2に示し、実機との主要諸元の比較を表1に示す。模型は高さ 80cm、長さ 25cm、幅 15cm の外形を有し、機体重量は 27.4N である。リーダーに付加質量を搭載することにより、重心位置を変えた任意な安定度を再現することが出来る。この模型の走行は無線により遠隔操作する。遠心場で 30cm/sec 以上の速度を発生可能な動力が備わっており、実機と同レベルの速度を再現可能である。また、筐体には 30g 場における自重に耐えうる強度が与えられている。

機体に搭載するモーター、減速機、バッテリー等は重心が実機と等しくなるように配置している。

表1 実機と模型における主要諸元の比較

	実機			1/25 模型		
	重量 (kN)	水平距離 (m)	鉛直距離 (m)	重量 (N)	水平距離 (mm)	鉛直距離 (mm)
重心						
機体	470.5	1.4	4.6	27.4	52	154
施工装備	71.5	-2.5	15.9	3.2	102	840
全体	542.0	0.88	6.08	30.5	36	225
平均接地圧力	101kPa			90kPa (25g 場)		
安定度	8			10 (任意に設定可能)		
走行速度	1.1km/h (=30cm/sec)					

キーワード くい打機, 転倒事故, 自走シミュレーション, 遠心模型実験

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

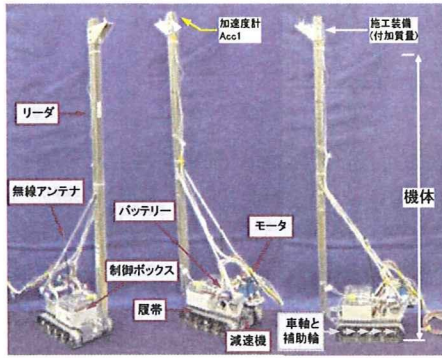


写真2 くい打機模型の加速度計位置

前後の車軸とその間に備わる補助輪は筐体からアームで支持された片持ち梁構造をしている。これらのアーム部分にはひずみゲージが貼りつけられており、載荷荷重を計測できる。リーダーには加速度計を設置し、走行中の揺動を測定する。

3) 模型地盤の支持力と分布

実験容器内に幅 250mm 長さ 490mm の模型地盤を作製し、くい打機模型を走行させた。模型地盤は最適含水比の関東ロームを模型地盤と同じ面積を有する載荷板を介して 150kPa の圧力で静的に締め固めて作成した。

図1は模型地盤における載荷圧力(q)-沈下比(s/D)関係を示す。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。 s は 1mm/min の定速で与えた。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、直線的な関係がみられる。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つの接線の交点を極限支持力(q_u) と定義すると、 q_u は約 270kPa である。

図2は模型地盤における平面的な強度の分布特性を調べるために行ったミニベーン試験の結果を示す。本試験は 5cm 間隔の格子状に 45 カ所で行われ、得られた抵抗値から換算してせん断強度(τ)を求めた。 τ の値は 56kPa から 144kPa の間に分布し、109.2kPa が平均値であり 120kPa が最大頻度である。変動係数は 0.2 である。

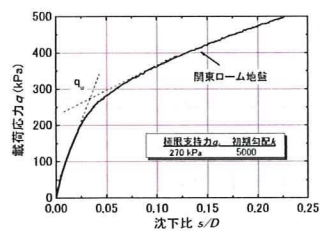


図1 関東ローム模型地盤の載荷応力(q)と沈下比(s/D)の関係

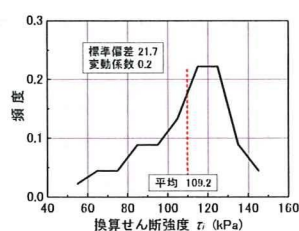


図2 ベーン試験による換算せん断強度の変動分布

4) 機体の設定安定度と自走実験の方法

くい打機模型に異なる安定条件を与えて自走させ、走行挙動を比較した。実験条件を表2に示す。安定度(a)とは車両系建設機械構造規格で定められた機械の安定基準である。安定可能な傾斜角を意味するものであり、この値が増加すると機体の安定性は高くなる。くい打機では a が 5 度以上と定められている。今回の実験で a が 5 度と 10 度を比較するとともに、同一安定度において異なる重心距離、すなわち、高重心と低重心の場合の比較を行った。

履帯における接地圧力の最大値は q_u の 1/2 程度以下となるように、走行は 5g の遠心力場で実施した。

表3 実験名称と機体の安定条件

実験名称	安定度, a (deg)	前輪からの重心距離, l (cm)
Cs1	10	13.4
Cs2	10	23.9
Cs3	5	32.4

3. 遠心場走行における計測と機体揺動

遠心実験における計測結果の一例を図3に示す。模型の移動距離をポテンションメータにより計測すると共に、機体の揺動を加速度計で計測した。また、詳細は別報⁴⁾に譲るが車軸と補助輪における載荷荷重から履帯における接地圧力の分布を解析すると共に、高速カメラによる運動解析を行った。図4は機体揺動の周波数分布を比較して示す。卓越周波数は 1.2Hz と 2Hz 付近に現れ、安定度に比べて重心位置の違いによる影響が見られる。くい打機の安定性に与える機体側と地盤側の要因について今後詳細を検討する予定である。

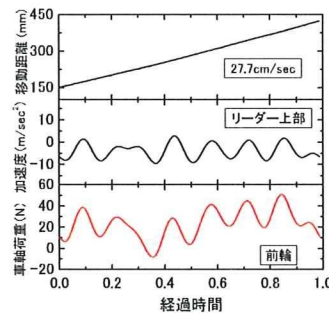


図3 自走実験時の計測例

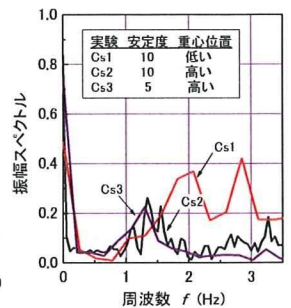


図4 揺動の周波数解析

謝辞：本研究は厚生労働科学研究費補助金において得られた成果であり、関係各位に対し、謝意を表します。
参考文献：1)香川崇章：度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，第275号，pp.69～77，1976。2)玉手 聡：移動式クレーンの安定接地に必要な地盤の支持力要件，産業安全研究所安全資料，NIIS-SD-NO.22，2006。3)堀智仁，玉手聡：自走式杭打ち機械模型の作製と遠心場走行シミュレーション，土木学会第63回年次学術講演会講演集CDROM，pp.151-156，2008。4)前田周吾，末政直晃，玉手聡，堀智仁：くい打ち機の自走挙動に関する実験的検討，土木学会第64回年次学術講演会講演集CDROM，投稿中，2009。

くい打機の自走挙動に関する実験的解析 (その2)

— 揺動の画像解析と接地圧力変動 —

東京都市大学大学院 学生会員○前田周吾 正会員 末政直晃
(独)労働安全衛生総合研究所 正会員 玉手 聡 正会員 堀 智仁

1 はじめに

くい打機は主に軟弱地盤の対策工事に用いられるため、潜在的に不安定な地盤の上での作業を余儀なくされる。そのため、近年この種の建設機械による転倒災害が発生している。本研究では、くい打機の安定設置に必要な支持地盤条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。本報告では、自走中に生じる揺動と履帯接地圧変動の計測結果について述べる。

2 実験の概要

実験条件を表1に示す。機体の安定度¹⁾は5度および10度である。同一安定度条件で重心位置の違いが走行挙動に与える影響を調べるため、図1に示すように、付加質量の位置を変えて実験を行った。その他の詳細については別報を参照されたい²⁾。

遠心場走行実験は遠心加速度 5g を与えた後、走行速度 35cm/sec で走行させた。

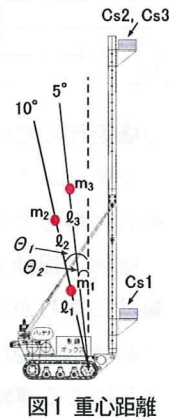


図1 重心距離

表1 実験条件

	安定度 (θ 度)	全重量 m (kg)	重心距離 l (cm)	遠心加 速度(g)	地盤材料
Cs1	10	3.36	13.4	5	関東ローム
Cs2	10	3.24	23.9		
Cs3	5	3.79	32.4		

3 自走に伴う接地圧力変動の解析

遠心場走行実験³⁾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試験地盤上に移動する。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。

図2はCs2により得られた接地圧力の理論値 R_t と実験値 R_e の比較を示す。 R_t はJIS規格⁴⁾に基づいて計算した各車軸に作用する荷重の割合である。 R_e は合計荷重に対する各作用荷重の割合を示し、平均値をマークで、標準偏差(σ)をエラーバーで示した。なお、本研究では各車軸の名称を前輪からFS(Front Sprocket), FR(Front Roller), CR(Center Roller), RR(Rear Roller), RS(Rear Sprocket)と定義した。

R_t に着目すると、RRとRSはともに0である。これは、本実験の安定度条件では、機体が前側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、RRとRSの R_e には荷重の発生が見られ、 $R_e > R_t$ である。一方、FRとCRは $R_e < R_t$ 、FSは $R_e > R_t$ である。

σ の分布を見ると、 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0.301と大きく、各車軸におけるバラツキの違いが確認された。

表2は、Cs1, Cs2, Cs3の履帯接地圧力におけるFSの平均値と標準偏差(σ)、慣性モーメントを示す。 σ に着目すると、Cs1 < Cs3 < Cs2という関係が見られる。しかしながら、理論的な慣性モーメントの大小関係はCs1 < Cs2 < Cs3であり、その関係性には違いが見られた。

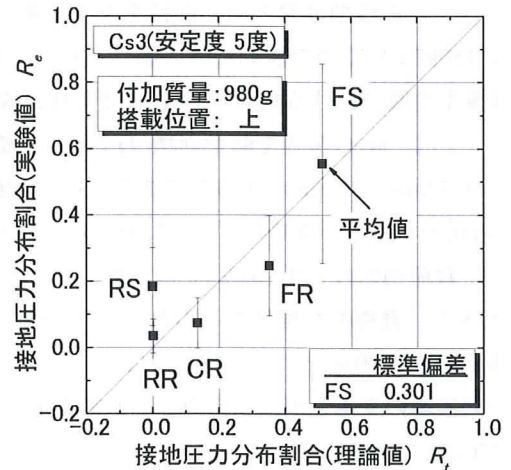


図2 接地圧力の理論値 R_t と実験値 R_e の比較

表2 FSの平均値、標準偏差、慣性モーメント

	平均値	標準偏差 (σ)	慣性モーメント ($g \cdot cm^2$)
Cs1	0.516	0.195	171
Cs2	0.459	0.399	3177
Cs3	0.555	0.301	7076

4 高速度カメラによる挙動解析

1) 高速度カメラの概要

走行中のくい打機模型の挙動を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。

キーワード：くい打機 遠心模型実験 転倒災害 支持力 関東ローム

連絡先：〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 東京都市大学 地盤環境工学研究室 TEL 03-5707-2202

実験は500コマ/秒で撮影した。1pixelは約0.8mmである。写真1に測点の概要を示す。マーカーは全部で10点(P0～P9)である。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。

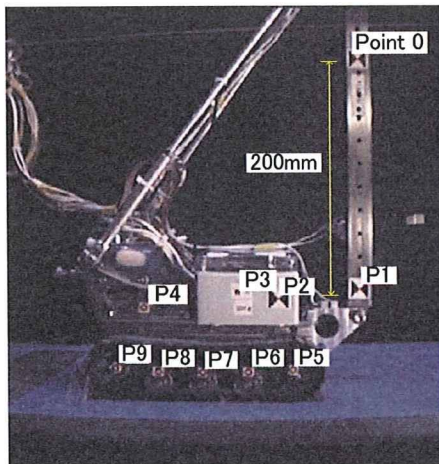


写真1 高速度カメラ測定位置

2) 解析結果

図3に傾斜角と経過時間の関係を示す。安定度と重心位置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、同じような揺動が生じたと考えられる。

表3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(ΔH)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、安定度と重心位置の違いで差が見られる。Cs1とCs2を比較すると、Cs1は短周期的に揺れているのに対して、Cs2は長周期的な揺れが生じている。この原因として、前述した慣性モーメントの違いが考えられる。すなわち、慣性モーメントの小さいCs1は回転しやすく、短周期的な揺動が生じたと考えられる。一方、Cs2とCs3を比較すると、安定度10度に比べ、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。

今後はさらなるデータの蓄積を行うとともに、様々な条件で試験を行い、走行時の安定性について検討する予定である。

表3 傾斜角の解析結果

	平均値 (deg)	標準偏差 (σ)	最大値 (deg)	最小値 (deg)	最大傾斜角差 (ΔH)	周波数 (Hz)
Cs1	0.316	0.243	0.79	-0.04	0.83	3.80
Cs2	0.230	0.263	0.59	-0.51	1.10	1.29
Cs3	0.184	0.254	0.68	-0.27	0.95	1.12

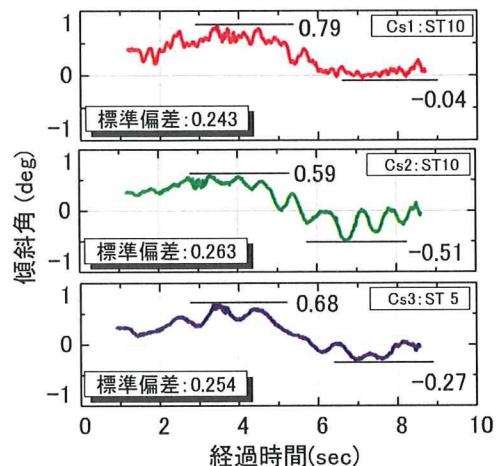


図3 傾斜角と経過時間の関係

5 まとめ

遠心場走行実験を行い、履帯の接地圧力と、高速度カメラを用いた模型の自走挙動に関する測定を行った。

- (1)自走時の履帯接地圧力変動の解析を行った。模型はRR、RSでも走行しており理論値との違いが見られた。また、最も大きな荷重が作用するFSの平均値と標準偏差を比較した結果、Cs2とCs3の平均値と標準偏差は相反関係にあり、不安定条件では、FSの平均値(荷重)が大きくなり、標準偏差が小さくなる傾向があることがわかった。
- (2)高速度カメラで撮影した動画を解析した結果、Cs1は、Cs2およびCs3に比べ、短周期的な揺れが生じていた。一方、Cs2とCs3を比較すると、安定度の低下に伴い揺れが長周期化していることが確認された。

謝辞

本研究は平成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、関係各位に対し、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 労働調査会：安衛法便覧 II，車両系建設機械構造規格，pp.512-516，2007。
- 2) 玉手 聡，堀 智仁，前田 周吾：くい打機の自走時揺動に関する遠心模型実験，第64回年次学術講演会講演概要集投稿中，2009
- 3) 玉手 聡：基礎工事用大型建設機械の転倒防止に関する研究，厚生労働省科学研究費補助金労働安全衛生総合研究事業平成19年度総括分担報告書，2008。
- 4) 基礎工事機械-安全，第一部：くい打機の要求事項，JIS A 8509-1，pp.25，2007。

自走するくい打機の揺動と接地圧力に関する遠心模型実験

—その1：実験手法と揺動解析—

くい打機 遠心模型実験 転倒災害

武蔵工業大学 学生会員○前田周吾, 国際会員 末政直晃, 正会員 片田敏行
(独)労働安全衛生総合研究所 国際会員 堀 智仁, 国際会員 玉手 聡

1. はじめに

基礎工事中大型建設機械（以下、くい打機という）の転倒災害が年間数件発生しており、その発生防止は重要な課題となっている。本研究の目的は、くい打機の転倒を防止するために必要な支持地盤の条件を明らかにすることである。転倒災害の多くは、設置地盤の支持力不足に原因がある。くい打機はアースオーガをリーダーの上部に位置させて自走するため、トップヘビーな構造となる。これに加えて、機械が設置される施工現場が潜在的に軟弱な地盤であることの2つの要因があると思われる。

本報告では、はじめに遠心場走行実験を行うにあたって作製したくい打機模型を概説し、次いで、遠心場走行実験の概要および実験から得られた応答加速度より明らかとなった揺動特性について述べる。

2. 遠心場模型実験の概要

2.1 くい打機の小型模型

くい打機の小型模型¹⁾を写真1に示す。実機を1/25スケールで再現した遠心場で遠隔走行可能な実験装置である。モーター、減速機、バッテリー等の部品は重心位置が実機と等しくなるように配置されている。また、前後の車軸とその間に備わる補助輪は、アームで支持された片持ち梁構造をしており、これらのアーム部分にひずみゲージを貼ることによって、履帯面に働く接地圧分布の測定が可能となっている。また、リーダーに加速度計を設置して、走行中の機体の揺れを測定することができる。

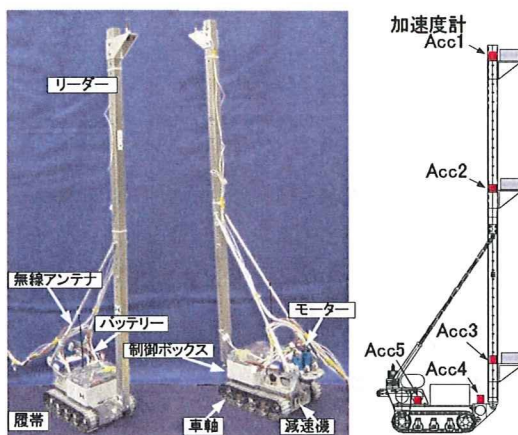


写真1 くい打機模型 図1 加速度計位置

図1は模型に設置した加速度計を示し、Acc1~Acc5と定義した。車軸の名称は前輪からFS(Front Sprocket), FR(Front Roller), CR(Center Roller), RR(Rear Roller), RS(Rear Sprocket)と定義する。

2.2 実験装置および実験概要

図2に実験方法の概要を示す。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風の影響を排除するために風防カウルを設置し、模型を覆っている。走行時の移動距離は、ワイヤー式変位計で測定する。

表1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ことを目的とした。試験地盤は、硬質ウレタンフォームによる模擬地盤と関東ロームを静的に締固めた模型地盤の2種類である。平坦性を有する地盤において、地盤支持力の有無が自走挙動に与える影響を比較した。

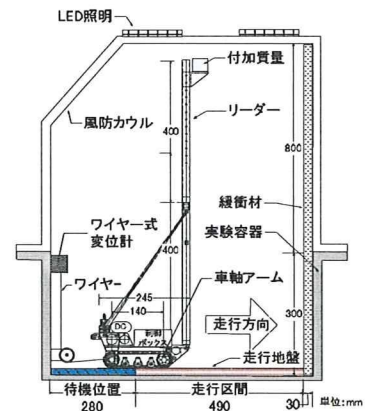


図2 遠心模型実験の概要図

表1 実験条件

実験	安定度	遠心加速度 (g)	地盤材料
Cs1	10度	5	関東ローム
Cs2		5	ウレタン
Cs3		25	関東ローム
Cs4		25	ウレタン
Cs5	5度	5	関東ローム
Cs6		5	ウレタン

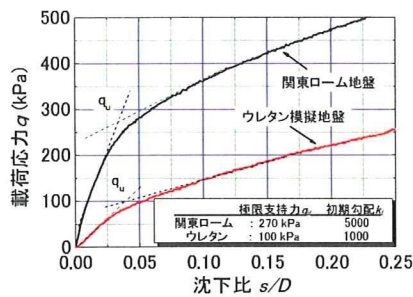


図3 支持力試験結果

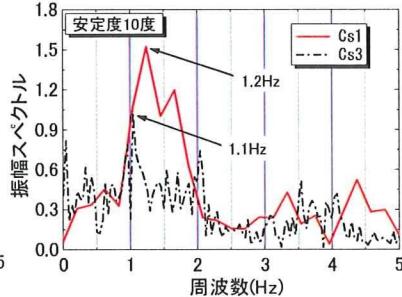


図5 周波数と振動スペクトル関係

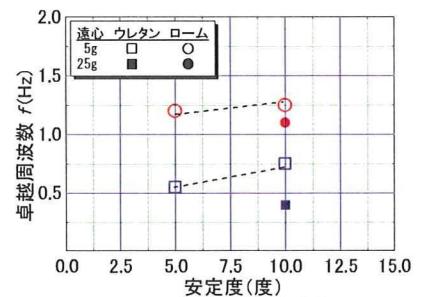


図6 卓越周波数分布図

2.3 模型地盤の作製

硬質ウレタン地盤は、富士ゴム産業製の硬質ウレタンフォーム(以下、ウレタンと言う)を用いて作製した。このウレタンは密度(ρ)が 61kg/m^3 であり均質な材料である。試験地盤には、 $250\text{mm}\times 245\text{mm}\times 50\text{mm}$ のウレタンを2つ配置した。

関東ローム地盤は最適含水比に予め調整した試料を静的に締固めて作製した。試料はシャベルで投入した後に、高さを均し、载荷盤を介して 150kPa で静的に締固めた。

2.4 支持力試験

2種類の試験地盤の载荷圧力(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。ここで、 q は荷重を载荷面積(A)で除した値であり、 A は $30\text{mm}\times 30\text{mm}$ 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。 s は 1mm/min の定速で与えた。

図3に q と s/D の関係を示す。载荷初期の $s/D < 0.02$ 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みられる。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、実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。

3. 実験結果

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試験地盤上に移動する。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。

3.1 応答加速度と時間の関係

図4に、Cs1とCs3におけるリーダー上部(Acc1)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。値を比較してみると、両実験はともに最大 r_a が 4m/sec^2 程度である。また、最小 r_a は Cs1 遠心加速度 5g において -3m/sec^2 程度、Cs3 では -2m/sec^2 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 Cs3 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は傾斜したためと考えられる。このことは、図中に示す r_a の分布図からもわかる。Cs1 の平均値は $-0.06 (\text{m/sec}^2)$ であるが、Cs3 の平均値は $1.00 (\text{m/sec}^2)$ 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、揺動したことが分かる。

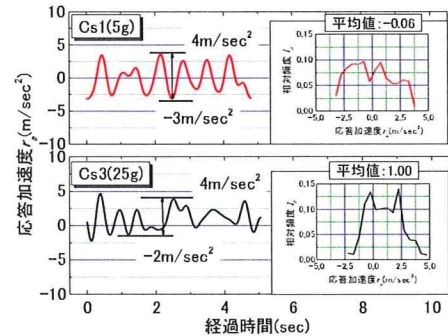


図4 応答加速度と経過時間の関係(実大換算)

3.2 揺動の周波数特性

図5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 0Hz 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。

3.3 卓越周波数分布

図6は実験における卓越周波数分布図を示す。遠心加速度 5g ではウレタンとロームにおいて、 f の値が安定度の増加に伴って増加しているが、その値は小さい。

f の値はむしろ模型地盤の種類によって、明確な差が現れ、ロームではウレタンに比べて f が大きい。この原因は支持力試験における q - s/D 曲線においてロームの初期勾配 k_i がウレタンのそれに比べて大きいためと考えられる。

遠心加速度(n)の違いが f に与える影響を、安定度と模型地盤が等しい条件において比較すると、 $n=25$ における f の値は、 $n=5$ のそれに比べて、幾分か小さくなっている。

4. まとめ

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、自走に伴う機体の揺動は $0.5\sim 1.2\text{Hz}$ 付近に卓越が見られた。地盤の支持力は機体の安定度よりも卓越周波数に与える影響が大きいことが分かった。

謝辞：本研究は厚生労働科学研究費補助金において得られた成果であり、関係各位に対し、謝意を表します。

参考文献

1) 堀 智仁, 玉手 聡, 末改直晃, 伊藤達彦: 杭打ち機械模型の作製と遠心場走行実験, 第43回地盤工学研究発表会講演集, pp.43-44, 2008.

自走するくい打機の揺動と接地圧力に関する遠心模型実験

－その2：履帯に作用する接地圧力変動－

くい打機 遠心模型実験 転倒災害

(独) 労働安全衛生総合研究所 国際会員○堀 智仁, 国際会員 玉手 聡
武蔵工業大学工学部 学生会員 前田周吾, 国際会員 末政直晃

1. はじめに

前報(その1)では, くい打機模型の説明と遠心場走行実験の概要および応答加速度に関する結果の考察について述べた. 本報では, 計測した履帯接地圧変動と地盤のせん断強さのばらつきから, 信頼性工学的手法に基づいた支持力安全率の検討を行った.

2. 実験の概要

(1) 実験条件

実験条件を表1に示す. 実験の詳細については別報を参照されたい.

表1 実験条件

実験	安定度	遠心加速度 (g)	地盤材料
Cs1	10 度	5	関東ローム
Cs2		5	ウレタン
Cs3		25	関東ローム
Cs4		25	ウレタン
Cs5	5 度	5	関東ローム
Cs6		5	ウレタン

(2) 地盤のばらつき評価

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. 調査は5cm 間隔の格子状に測点を設定し, 合計45箇所(5×9)で計測した. 用いた装置は, 幅10mm×長さ20mmのベーンブレードが備わり, 表層部に手動で貫入した後に, 最大トルクを記録した. 写真1にハンドベーンの概要を示す.

トルク値(T_r)からせん断強さを算出した試験結果を図1に示す. 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め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小さい.

3. 実験結果

(1) 履帯の履帯の接地圧力

図2に, Cs3, Cs4により得られた接地圧力の理論値 R_l と実験値 R_e の比較を示す. R_l はJIS規格²⁾に基づいて計算した各車軸に作用する接地圧の割合である. R_e は合

計荷重に対する各作用荷重の割合を示し, 平均値をマークで, 標準偏差(σ)をエラーバーで示した. なお, 本研究では, 各車軸を前輪からFS(Front Sprocket), FR(Front Roller), CR(Center Roller), RR(Rear Roller), RS(Rear Sprocket)と定義した.

R_e に着目すると, RRとRSは共に0である. これは, 両実験の安定度条件では, 機体が前側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_l 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, $R_e > R_l$ である. 一方, FRとFSでは $R_e < R_l$ 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Cs3(ローム)では0.07であるが, Cs4(ウレタン)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.

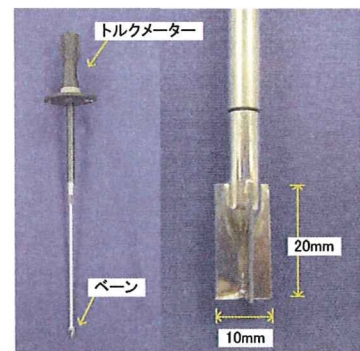


写真1 ハンドベーン

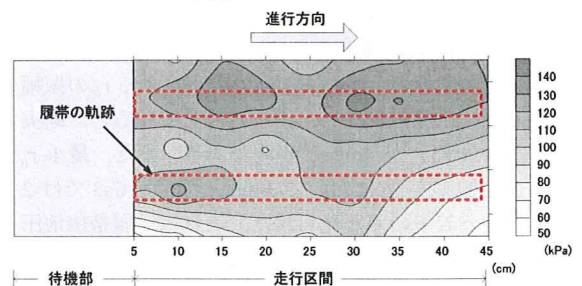


図1 走行路のせん断強度の分布

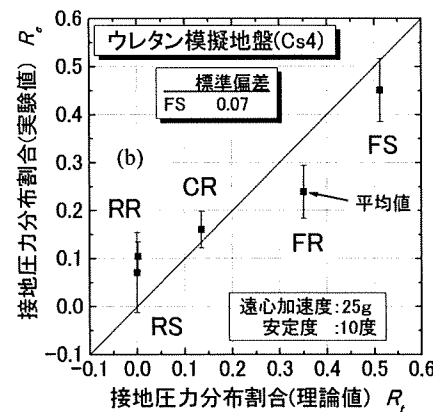
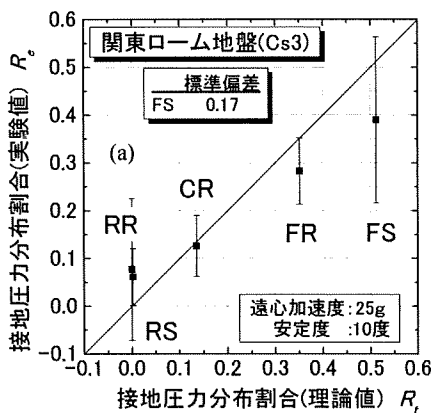


図2 接地圧分布割合の実験値と理論値の比較
(a)Cs3(ローム) (b)Cs4(ウレタン)

(2) 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、模擬地盤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。

$$G_f(q_u, q_a) = q_u - q_a \quad (1)$$

$$\begin{cases} G_f(q_u, q_a) > 0 & \text{安全} \\ G_f(q_u, q_a) < 0 & \text{危険} \end{cases}$$

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 と 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。

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

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

ここで、 μ_G と σ_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 Φ 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4

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。

Cs3とCs4の事例にもと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3に示す。

C_{vg} と C_{vp} の値がともに大きいCs3の曲線は、両値がともに小さいCs4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、その値には0.162と0.003であり大きな差が生じることが分かった。

表4 接地圧力の支持力安全率と変動係数

	支持力安全率 q_u/μ_a	変動係数	
		支持力 C_{vg}	接地圧力 C_{vp}
Cs3	2.2	0.16	0.45
Cs4	0.9	0.08	0.14

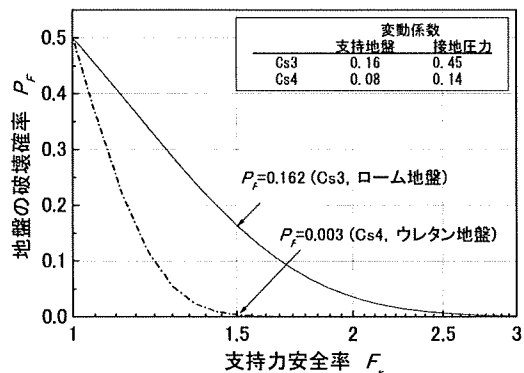


図3 地盤の破壊確率と支持力安全率の関係

4. まとめ

(1) 履帯の接地圧力は、自走に伴って変動することがわかった。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。

(2) 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：本研究は厚生労働科学研究費補助金において得られた成果であり、関係各位に対し謝意を表します。

参考文献

- 1)前田ら：自走するくい打機の揺動と接地圧力に関する遠心模型実験—その1：実験手法と揺動解析—，第44回地盤工学研究発表会，2009。
- 2)基礎工事機械-安全-，第一部：くい打機の要求事項，JIS A 8509-1，pp.25，2007。

くい打機の転倒に与える施工現場の支持力要因

(独)労働安全衛生総合研究所 ○玉手 聡
同 上 堀 智仁

1. はじめに

基礎工事用の大型建設機械の転倒災害が度々発生している。その転倒原因の多くは設置地盤の支持力不足に見られるが、その背景にはくい打機がトップヘビーな構造を有しながら自走すること、設置される施工現場が軟弱地盤であるなど潜在的な危険要因が存在する。

本報告では、はじめに国内外の安全基準を概説し、次に過去に発生した転倒事例について、機体と地盤条件を整理する。そして、事故の発生原因と今後解明が必要とされる問題点を考察する。

2. 国内外の安全基準

労働安全衛生規則¹⁾では、基礎工事用機械(以下、くい打機と呼ぶ)の倒壊防止について述べており、軟弱な地盤における沈下防止措置を義務付けている。また、車両系建設機械構造規格(厚生労働省告示²⁾)では、建設機械が備えなければならない安定度を機種毎に定めている。

安定度は限界傾斜角の下限値を意味し、機械が最も不利となる方向に対して満足しなければならない値である。ブル・ドーザー等ではその値を35度と高く設定する一方で、くい打機は5度となっている。すなわち、くい打機はブル・ドーザー等に比べて安定度が低く不安定な機械といえる。なお、安定度の値は水平かつ堅固な面に対する設置が前提とされている。

日本材料学会が発行するソイルミキシングウォール設計施工指針³⁾では、独自に安定度の推奨値を示している。その値は、作業時が7°以上とし、走行時は9°以上としている。この値は日本建設機械化協会ならびに、関係業界が発行するマニュアルで標準的に示されている。

欧州規格では、くい打機について2つの安全基準を示している。一つは、EN-996- Piling equipment - Safety requirements⁴⁾である。この基準では、くい打機の状態を施工時と休止時の2つに大別し、さらに両状況をそれぞれ3つに分類して、2つの指標を示している。詳細は文献⁴⁾に譲るが、この指標には作用荷重の安全率と機体の安

定度が示されている。6つの荷重状態に対する安定度(Stability angle)は自走以外の場合を5度、自走する場合は8度としている。

もう一つの基準は EN-791(1996) -Drill rigs- Safety⁵⁾である。この基準においても同様に条件を2つの作業状態、すなわち自走時と施工時に大別して次のように解説している。「移動中は、前後左右方向に対して10度以上を有し、その他の状況では5度以上を有しなければならない。安定度10度は、加速時と停止時の動的な力の作用による影響が考慮された値である」。

表1は国内外の基準を比較して示す。くい打機が備えるべき安定度は日本とヨーロッパに共通して示されている。しかし、その値には差がある。施工時の安定度は日本とヨーロッパで値が共通して5度であるが、自走時については、日本では特に示していない。一方、ヨーロッパでは機種によって8度または10度であるが、いずれも、施工時に比べて大きく設定されている。

表1 くい打機の安定に関する基準の国際比較

	安定度		設置地盤	
	施工時	走行時	支持力	傾斜
安衛則と構造規格	5	5	堅固	水平
団体等の推奨値	7	9	$F_s=1.5$	1/100
EN996(Piling eq.)	5	8	—	—
EN791(Drill rig.)	5	10	—	—



写真1 転倒災害の様子

2. 災害事例

写真 1 は建築工事現場で発生した転倒事例を示し、図 1 は現場平面の概略を示す。14.3m×29.4mの敷地に 8 階建てのビル建築が計画され、その基礎には地中連続壁（ソイルミキシングウォール、以下 SMW と呼ぶ）が選択された。その施工には 3 軸のアースオーガを備えるくい打機が用いられた。

敷地の外周部には防護フェンスが支柱によって支持されていた。現場地盤の表層部はセメント安定処理による養生が行われていた。しかし、転倒したくい打機の履帯には大きな沈下が見られ、設置地盤は不安定な状態であったことがわかる。この災害では現場の作業員 2 名が重傷を負った。

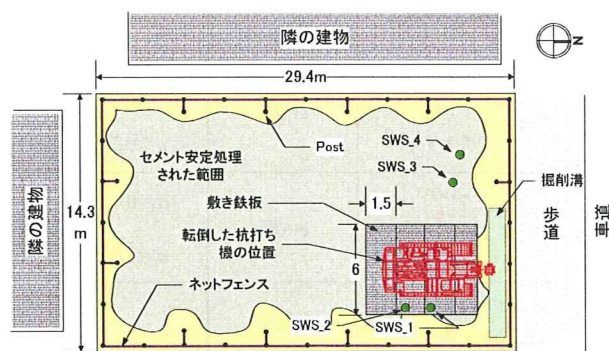


図 1 発生現場の平面的状況

3. 災害発生までの経過

本転倒災害の発生までの過程は表 2 の通りであった。現場地盤では地耐力を確保するために表層部のセメント安定処理による地盤の養生が行われた。前日までにくい打機の搬入と組立が終了していた。

災害当日は SMW の打設に先立って、敷き鉄板の敷設と写真 2 に示すような打設予定位置の溝掘削作業が行われた。この溝は幅 1m、深さ 0.8m であり、長さは 7m であった。この掘削は探索堀とも呼ばれ、オーガによる地中掘削とその後を実施するセメントと土の混合（これを削孔混練りと言う）をスムーズに行うためのものであった。しかし、当日の 10:00 頃、掘削を行っていたバックホウが誤って埋設されていた水道管を破損し、溝が湛水した。その復旧には約 2 時間を要した。なお、その後の調査から実際の溝の深さは施工標準よりも 0.2m ほど大きかったことがわかった。

水道管の修理が終了した後に作業は再開され、敷き鉄板の敷設を完了させた。13:00 頃、くい打機を自走させて図 2 に示す敷地内の北東部へ移動させた。施工位置の溝脇に到着したところ、溝の法肩部が図 3 のように崩壊した。この時、履帯と溝の離隔は少なくとも施工標準より 0.1m 小さい状況であったと見られる。

表 2 転倒災害発生までの過程

経過	時刻	作業内容
以前		セメント安定処理による地盤養生の実施
前日		くい打機の搬入と組立作業
当日	8:00	朝礼
	9:00	溝掘と敷鉄板の敷設等の準備的作業を開始
	10:00	水道管を破損し、掘削溝が湛水
	10:05	水中ポンプにて排水の実施
	10:45	水道局担当者の到着
	11:30	止水の完了
	11:45	水道管の復旧、溝掘作業及び敷鉄板の敷設作業を再開
	12:15	準備的作業の終了
	13:00	くい打機の施工位置への移動開始
	13:10	溝近傍でくい打機が転倒



写真 2 SMW の施工に先立って行われる溝掘削

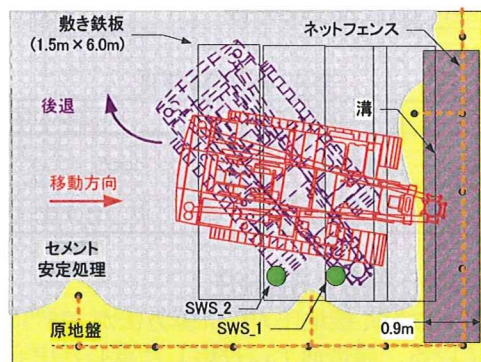


図 2 転倒時におけるくい打機の位置

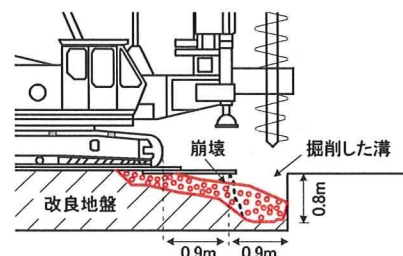


図 3 機械の設置地盤に生じた崩壊概要

この崩壊に伴って敷鉄板には沈下が生じ、機体がゆっくりと傾斜した。傾斜を察知した運転士は

溝近傍から機体を後退させるとともに、上部を右旋回させて転倒モーメントを減少させた。しかし、機体の傾斜増加は収まらず、転倒に至ったものである。

先にも述べた通りこの地盤では浅層部分にあらかじめ安定処理が施されていた。しかし、機械を移動させた箇所は当該現場の敷地境界付近であった。敷地の外周部にはネットフェンスが設けられていた。このフェンスが安定処理の障害となったために、部分的に地盤の支持力は低い箇所が存在していた。

4. くい打機の安定条件

4.1 機械の安定度

先に述べたとおり、くい打機は前後および左右方向に対して5度以上の安定度(θ_s)を有しなければならない。表3は本件のくい打機の諸元を示し、これに基づいて計算した機体の前方と側方の安定度を表4に示す。機体前方に対する安定度は18.4度であり、側方の安定度は11.9度であった。従って、本くい打機の安定度は規則で定める値よりも大きく、安定な条件であった。

表3 くい打機の諸元

水平方向の重心位置 (G_x)	0.62m
鉛直方向の重心位置 (G_y)	3.36m
履帯の接地面の長さ (d)	3.475m
左右の履帯の中心間隔 (S)	2.660m

表4 機体の安定度

	前方安定度	側方安定度
関係式	$\tan \theta_f = \frac{L - 2G_x}{2G_y}$	$\tan \theta_{ss} = \frac{S - 2G_x}{2G_y}$
安定度	$\theta_f = 18.4 \text{ 度} > 5 \text{ 度}$	$\theta_{ss} = 11.9 \text{ 度} > 5 \text{ 度}$

4.2 履帯に作用する接地圧

履帯面に働く接地圧力の計算方法がJIS⁶⁾に定められている。履帯面上に投影した重心と中心間の距離(e)の違いにより、接地圧力の分布は表5に示すような5つに分類されている。なお、支持地盤は水平かつ堅固であることが仮定されている。

この接地圧力の分布は図4に示すとおり上部構造体の旋回角度(θ)によっても変化するため、その計算では別途考慮が必要である⁷⁾。傾斜を開始した当初は上部構造体が前方を向いていたが、転倒直前には右前方約45度に旋回させていた。

本事例では履帯の長手方向に対する作用位置(e)が $\theta=0$ の時に $e > d/6$ となり、圧力分布は三角形となる。一方、 $\theta=45$ の時は $e < d/6$ であり、分布は台形となる。接地圧力の理論分布は図4のような三角形である。以上の検討に基づいて推定した最大接地圧力の値を表6に示す。

本事例の場合では $\theta=45$ 度の場合が $\theta=0$ の場合よりも大きく、履帯接地圧力の最大値は146(kPa)から165(kPa)程度であったと推定された。なお、沈下によって生じる機体傾斜は転倒モーメントを増加させるため、最大接地圧力はさらに大きく生じる場合がある。

表5 重心と履帯接地圧力の関係(JIS A 8509-1:2007)

履帯の接地圧力分布	単一荷重 P (重心)の作用位置	接地圧力 (最小: σ_1 , 最大: σ_2)
	$e=0$ 中央に P	$\sigma_1 = \sigma_2 = P/bd$
	$e < d/6$	$\sigma_1 = \frac{P(1-6e/d)}{bd}$ $\sigma_2 = \frac{P(1+6e/d)}{bd}$
	$e = d/6$	$\sigma_1 = 0$ $\sigma_2 = 2P/bd$
	$e > d/6$ $c = d/2 - e$	$\sigma_2 = 2P/3bc$
	$e = d/3$	$\sigma_2 = 4P/bd$

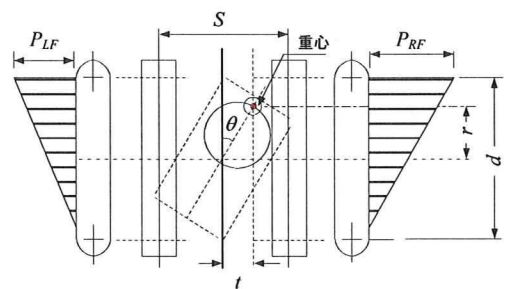


図4 履帯に作用する接地圧 ($e > d/6$ の場合)

表6 転倒時における履帯の最大接地圧力の推定値

旋回角, θ (deg)	0	45
最大接地圧力, σ_2 (kPa)	146	165

5. 現場地耐力の推定

施工現場は深さ約0.7m以深の土質が粘土であり、 q_u の値が30kPa前後の軟弱地盤であった。この粘土地盤に対する履帯の支持力(q_d)は110kPa程度と推定され、 $q_d < P_{max}$ の不安定条件であった。地表から深さ約0.7mの範囲には砂質土が存在した。セメ

ント安定処理は当初、深さ1mまでを計画したが、実際には0.7m程度までしか処理されていなかった。処理深さが計画よりも浅くなった原因は粘土とセメントを均一に混合することが困難なためであった。

安定処理された地盤箇所をスウェーデン式サウンディング試験により調査した。試験は転倒位置の近傍2地点(SWS_1とSWS_2の地点)と、そこから約8m離れた地点(SWS_3の地点)と10m離れた地点(SWS_4の地点)の計4地点である。

図5はこの試験結果に基づいて計算した一軸圧縮強さ(q_u)の分布を示す。安定処理が施された浅層部すなわち、地表から深さ0.75mの q_u は0.7m以深のそれに比べて大きな増加が見られる。しかしながら、浅層部の q_u には調査地点の違いによって大きな差が見られる。

転倒付近のSWS_1およびSWS_2による q_u は、SWS_3およびSWS_4のそれに比べ小さく、重機を支持できない強さであった。これはセメント安定処理の深さが予定よりも浅くまた、敷地境界部は囲いフェンスが障害となって不十分な処理状態であったためである。転倒はこの境界付近で発生しており、安定処理における施工上の問題も明らかになった。

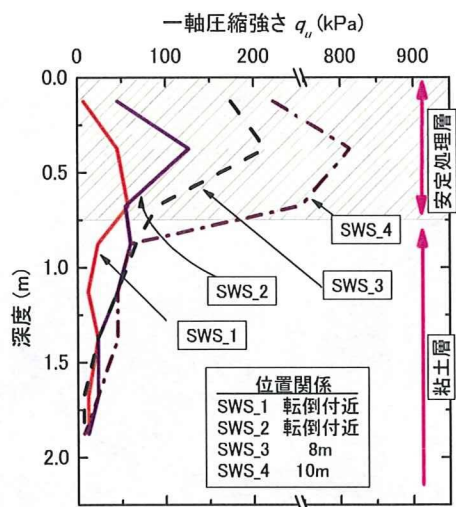


図5 スウェーデン式サウンディング試験の結果より算出した一軸圧縮強さ(q_u)分布

6. 転倒原因と再発防止対策の考察

くい打機は大型の建設機械であるため、その転倒は建設現場内のみならず周辺社会にも多大な影響を及ぼす。本事例の転倒原因は次の通り要約できる。

- 1) 敷地境界付近の地盤養生が設置されたフェンスが障害となって不十分な施工となり、部分的に支持力は低い状態にあった。
- 2) セメント安定処理による表層地盤の改良深さが計画よりも小さかった。

- 3) 準備掘削された溝が所定よりも深く、また機械と溝の離隔も少なかった。
- 4) 水道管の破壊により溝が湛水し、地盤を軟化させた。
- 5) 水道管の修復後直ちに、地盤の安定性を確認せずに作業を再開した。

施工上のミスを中心に防ぐことは容易でない。しかし、準備が不十分なことにより生じた災害については、その防止は可能と考えられ、危険は低減されるべきものである。特に施工現場の支持力については養生の確実な実施により、沈下を防止できる。なお、地盤養生における安全要件とその設定レベルについては明らかでなく、事業者に委ねられているのが現状であり、検討が必要である。

7. まとめ

くい打機の転倒事例を調査した。機体の諸元や作業方法ならびに地盤養生等の条件を分析し、発生原因を考察した。その結果、現場地盤は軟弱であり潜在的な危険性を有していたことがわかった。加えて施工中の水道管破損による溝の湛水トラブルも発生し、地盤を劣化させた可能性も明らかになった。さらに作業上のミスも重なり、転倒災害に至ったことがわかった。

くい打機による施工においては様々な危険要因が存在し、災害はいくつかの要因が重なって発生するものと見られる。この中で大型機械を支持する施工地盤のリスク評価は最も重要な課題と考えられ、安定設置に必要な地盤支持力や傾斜などの必要条件について今後検討したいと考えている。

謝辞：本研究は厚生労働科学研究費補助金による研究(課題番号 H19-労働-一般-005)で得られた成果⁸⁾である。関係各位に対し謝意を表します。

参考文献

- 1) 労働調査会：安衛法便覧I 平成19年度版, p.967, 2008.
- 2) 労働調査会：安衛法便覧II 平成19年度版, p.513, 2008.
- 3) (社)日本材料学会：ソイルミキシングウォール(SMW)設計施工指針(改訂版), SMW掘削機械転倒防止のための重点管理基準, p.78, 2002.
- 4) British Standards Institution : BS EN 996, Piling equipment · Safety requirements, 1996.
- 5) British Standards Institution: BS EN 791, Drill rigs – Safety, 1996.
- 6) (社)日本規格協会：JIS A 8509-1:2007「基礎工事機械—安全—第一部：杭打ち機の要求事項」, pp.20-33, 2007.
- 7) (社)日本建設機械化協会：移動式クレーン・杭打ち機棟の支持地盤養生マニュアル, pp.9-22, 2000.
- 8) 玉手 聡：基礎工事用大型建設機械の転倒防止に関する研究, 厚生労働科学研究費補助金(労働安全衛生総合研究事業)平成19年度総括分担報告書, pp.3-31, 2008.

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 ○ 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。

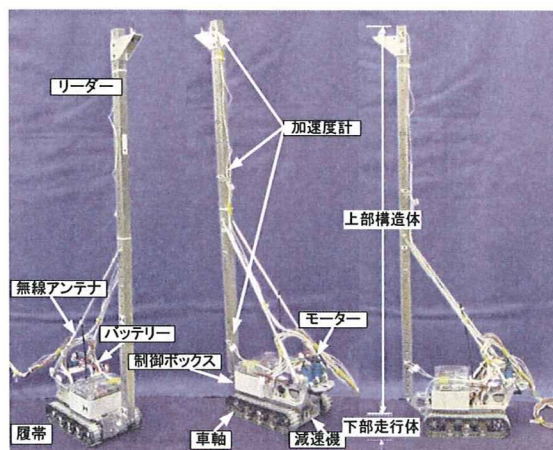


写真-1 作製したくい打機模型

表-1 実機と模型の諸元の比較

	くい打機械				
	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	
上部構造体	機体・リーダー	3.35	12.42	213.0	198.8
	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)		
接地圧力 (kPa)	101		133		
走行速度 (km/h)	1.6 (=45cm/sec)				

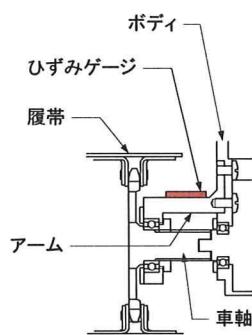


図-1 車軸部の断面図

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ゲージを貼り付け、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。

表-2 関東ロームの物理特性

試料名	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	塑性指数 I_p	最適含水比 w_{opt} (%)
関東ローム	2.759	60.6	102.0

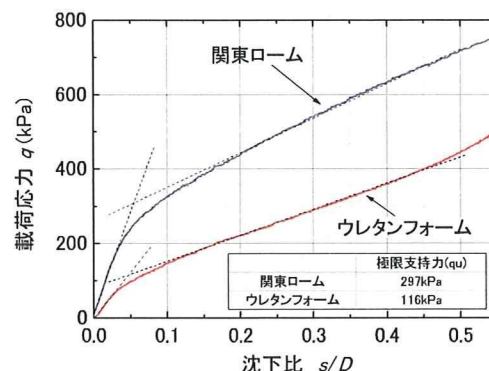


図-2 支持力試験結果

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スタビライザー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

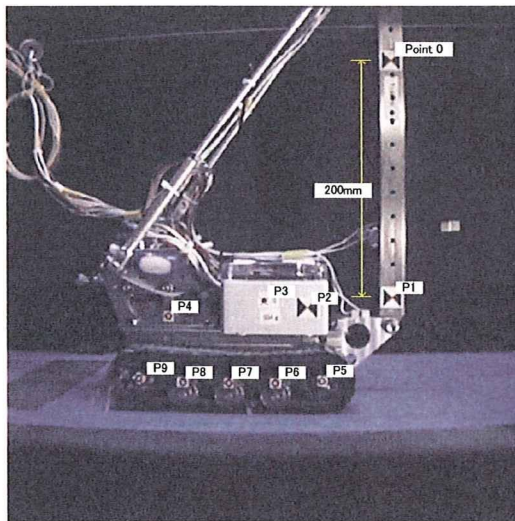


写真-2 高速度カメラの測点

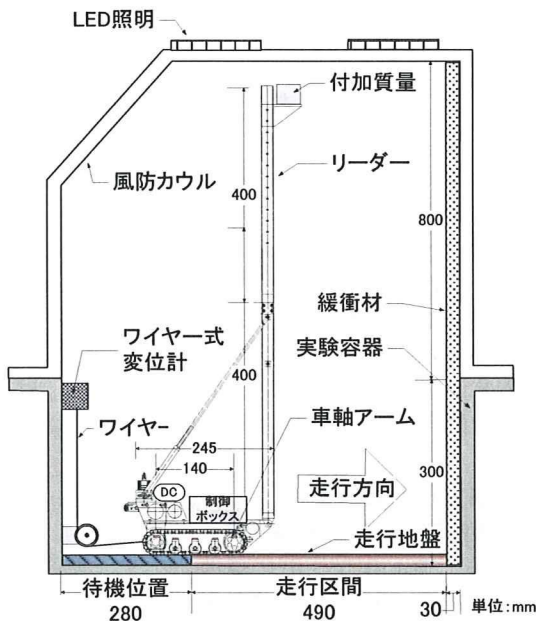


図-3 遠心模型実験の概要図

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。

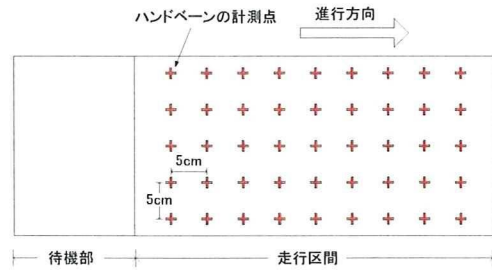


図-4 ハンドベーン計測箇所

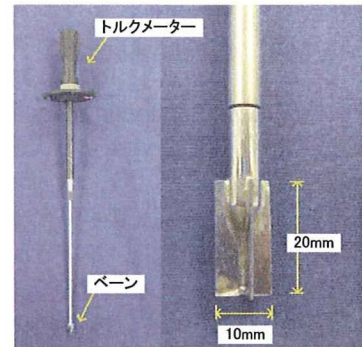


写真-3 ハンドベーンの概要

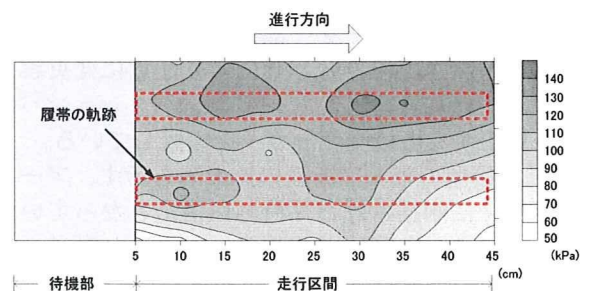


図-5 ハンドベーン試験結果

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、

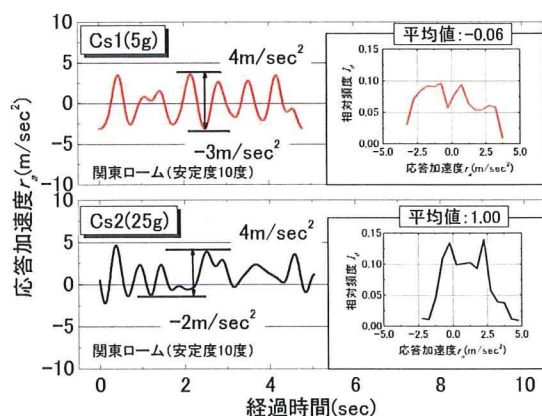


図-6 応答加速度と経過時間の関係(実大換算)

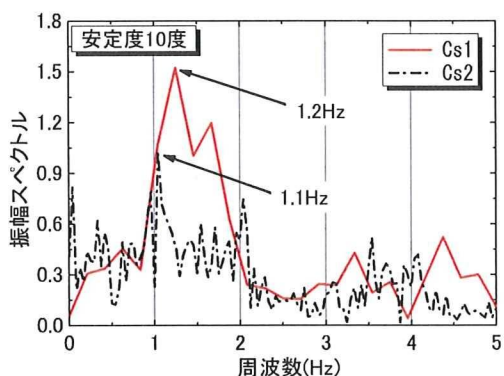


図-7 周波数と振幅スペクトル

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

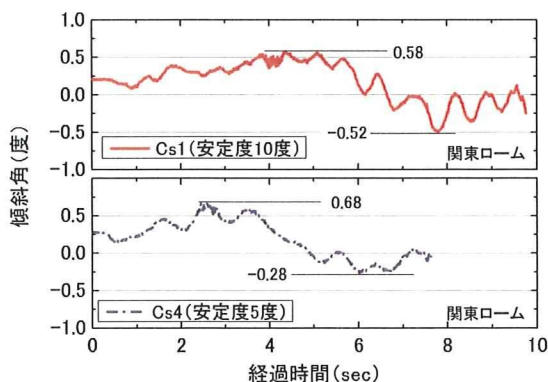


図-8 経過時間と傾斜角の関係

と両実験結果はともに最大 r_a が 4m/sec^2 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/sec^2 程度、Cs3 では -2m/sec^2 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/sec^2 であるが、Cs3 の平均値は 1.00m/sec^2 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 $0 \sim 0.1\text{Hz}$ 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 ($\Delta\theta$) 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

	平均値 (度)	標準偏差 (σ)	最大傾斜角差 ($\Delta\theta$)	周波数 (Hz)
Cs1	0.173	0.258	1.10	1.13
Cs4	0.184	0.254	0.96	0.91

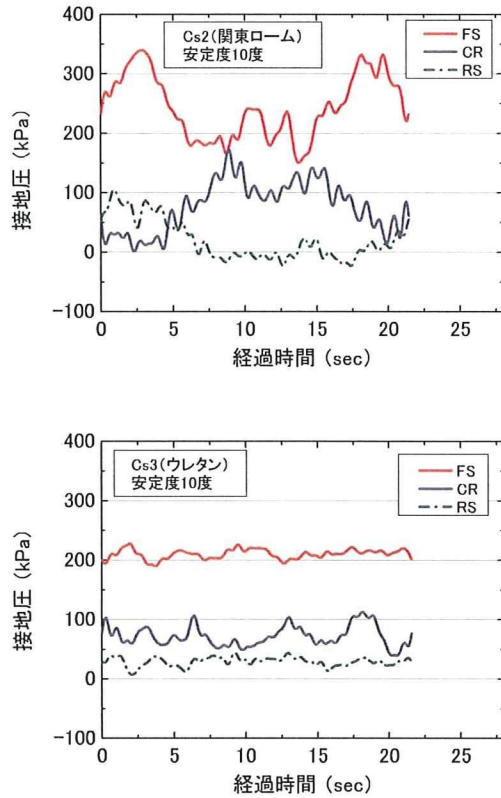


図-9 接地圧の時刻歴

(a) Cs2(フォーム) (b) Cs3(ウレタン)

図-9 に接地圧力と経過時間の関係を示す。関東フォームとウレタンの結果を比較すると、関東フォームの接地圧変動が大きい。これは、関東フォ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 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

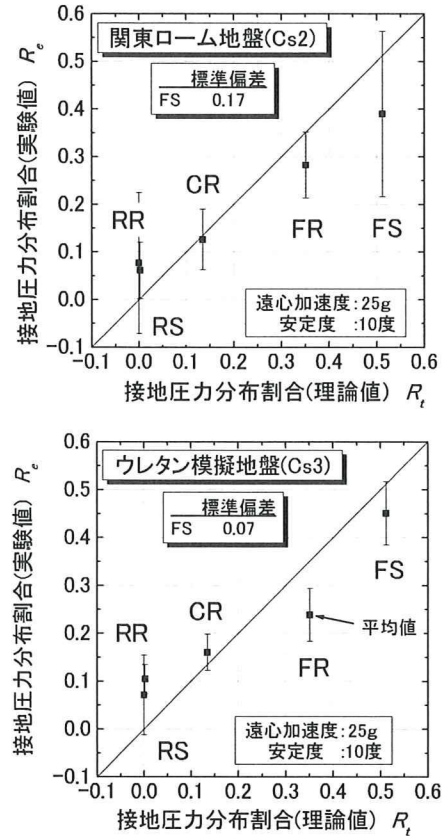


図-10 接地圧分布割合の実験値と理論値の比較
(a) Cs3(フォーム) (b) Cs4(ウレタン)

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、フォーム地盤では 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、フォーム地盤では 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、不確か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 q_u/μ_a	変動係数	
		支持力 C_{vg}	接地圧力 C_{vp}
Cs2	2.2	0.16	0.45
Cs3	0.9	0.08	0.14

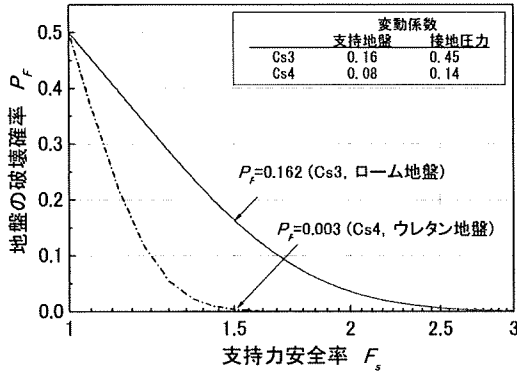


図-10 地盤の破壊確率と支持力安全率の関係

$$G_f(q_u, q_a) = q_u - q_a$$

$$\begin{cases} G_f(q_u, q_a) > 0 & \text{安全} \\ G_f(q_u, q_a) < 0 & \text{危険} \end{cases} \quad (1)$$

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 と 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。

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

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

ここで、 μ_G と σ_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、 Φ 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、ル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} と 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「基礎工事中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，JIS A 8509-1，pp.25, 2007