

【参考】 研究成果の刊行物・別刷り

【参考】 研究成果の刊行物・別刷り

杭打ち機械の小型模型を用いた自走実験の計画

杭打ち機械, 施工の安全, 模型実験

武蔵工業大学工学部 ○ 伊藤達彦, 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, 正会員 玉手 聡

1 はじめに

自走式杭打ち機械とは, 下部走行体と上部旋回体より構成される車両建設機械である。この機械は地盤改良工事や基礎工事に用いられるものであり, 主に軟弱地盤の対策工事に用いられる。従って, 杭打ち機械は潜在的に不安定な地盤での作業を余儀なくされる。過去に発生した災害事例を調査すると自走中における転倒が見られる。杭打ち機械はアースオーガをリーダーの上部に位置させトップヘビーな状態で自走するため設置地盤の不陸やクローラーに生じた沈下により不安定化する。そこで本研究では自走中の杭打ち機械に与える支持地盤の不安定要因を明らかにすることを目的に遠心場走行実験を計画した。本報告では, この実験の計画と試作中の小型模型について概要を報告する。

2 安全規則と施工の現状

労働安全衛生規則¹⁾では自走式杭打ち機械の転倒防止を述べており, 敷鉄板等の使用による沈下防止の措置が義務付けられている。また, 車両系建設機械構造規格²⁾は機械が備えるべき安定度を表1の通り定めており, 杭打ち機械は5度傾けても転倒しない安定度を有するものでなければならない。この値はブル・ドーザーのそれに比べて小さく設定されており, 構造的な不安定性が考慮されている。一方, 支持地盤については水平かつ堅固であることが前提とされている。しかし, その具体的な内容については示されていない。そのため, 安定設置の判断は事業者委ねられているのが現状である。表2は事業者が独自に定めた基準の一例である。作業時と走行時の安定度について異なる値で設定するとともに, 構造規格の基準値に比べ1.4~1.8倍の値が用いられている。また, 地表の勾配については, 1/100以内での平坦性と支持力の安全率を1.5以上の確保を使用基準に定めている。

3 災害事例

写真1は杭打ち機械の転倒災害の例を示したものである。この写真を見ると, アースオーガがリーダー上部に位置しており, 非常に不安定な状態で現場内を自走していた様子が伺える。このような自走式杭打ち機が転倒する事故では, 機械と地盤の両方に要因があると考えられる。杭打ち機械はトップヘビーな構造を有する機体であるため, 走行時に発生する機体の動揺によってキャタピラー面上に不均一な接地圧力分布が生じる。また, 進路変更時には, 左右のキャタピラーの回転数に差を与えて旋回するため, 地盤に水平荷重が働く。このような複合荷重が地盤支持力を減少させていると考えられる。

このように, 杭打ち機械の転倒災害の背景には施工時

における不安定要因が存在しているものと考えられる。

表1 代表的な建設機械の安定度

機械の種類	杭打ち機械	ブル・ドーザー
安定度	5度	35度

表2 事業者が独自に定めた使用基準の例

安定度	作業時: 7度以上
	走行時: 9度以上
地盤勾配	1/100(約0.57度)以内に整地し平坦性を保つ
支持力条件	安全率: 1.5



写真1 自走式杭打ち機械の転倒災害

4 杭打ち機械の模型を用いた実験計画

(1) 小型模型の作製: 杭打ち機械の小型模型は, 25gの遠心場で試験を行うことを想定し, 実機の1/25のスケールで設計した。その際, モーターや減速機およびバッテリーの配置は実機の重心位置とほぼ等しくなるように配置した。実機と模型の重心位置を表3に示す。この表を基に, 小型模型を図1のように設計した。小型模型は2つのモーターを搭載して左右の履帯を独立して駆動させる。そのため, 直進と旋回が可能である。走行は無線により制御されるラジコンである。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である。これらのアーム部分にはひずみゲージが貼り付けられ, 履帯面に働く接地圧分布を計測することができる。

(2) 予備実験: 写真2は小型模型の外観と予備実験の様子を示す。1g場における走行模型の自重は34.7Nである。しかし, 25gの遠心場ではこの自重が25倍に増加する。これによって, 遠心場模型の履帯面に働く接地圧力は実機と等しく再現することができる。従って, 小型模型は約867Nの自重を支持し, 自走できる性能を備える必要

“A study of the running tests using by the model mobile pile driver”, T. Itoh(Musashi Institute of Technology), N. Suemasa(ditto), T. Katada(ditto), S. Tamate(National Institute of Occupational Safety and Health) and T. Hori(ditto)

表3 実機と模型における主要諸元の比較

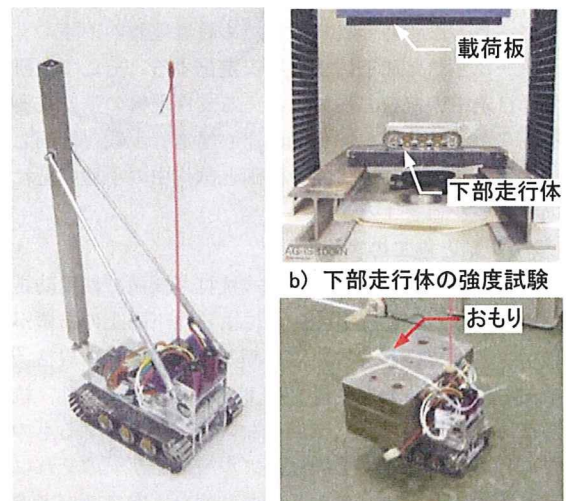
	杭打ち機械				
	実物		1/25 模型		
重心距離 ¹⁾	水平 x(m)	鉛直 y(m)	水平 x(mm)	鉛直 y(mm)	
下部走行体	-0.83	1.43	-3.33	57.36	
上部 旋回体	機体・リーダー	3.35	12.42	134.30	496.80
	アースオーガ類	4.20	15.98	168.00	639.50
合計重量	539kN		34.7N (25g 場では 867N)		
接地圧力(kPa)	100				
走行速度(km/h)	1.6 (=45cm/sec)				

1) 重心距離のうち水平(x)は下部走行体中心からの距離であり、鉛直(y)は設置面からの距離である

がある。現在製作段階にある小型模型の強度と走行性能を確認するために予備実験を行った。強度試験では模型を支持する前後の車軸ならびにその間に備わる補助輪の耐力確認を目的に写真3に示す载荷試験を行った。本試験には万能载荷装置を用い、0.1mm/minの一定速度で载荷板を変位させた。現在、700Nまでの载荷試験を実施し、その耐力を確認した。

走行実験では模型におもりを積載して走行させ、その直進性と速度を調査した。積載重量を段階的に増加させ走行性能を確認した結果、最大 320N 積載条件で約 107cm/sec の速度を確認した。この速度は目標値以上であるが、走行時の直進性に問題が見られた。その原因は左右に配置した2つのモータの出力回転に差が生じやすいことにあった。現在、回転速度をコントロールするためのフィードバック回路を追加している。また、実験の再現性を確保する観点から運転操作は容易な手法に改善する必要性も明らかになった。その理由は操作スキルの

違いにより生じる走行条件の差を小さくするためである。



a) 遠心実験用小型模型の外觀 c) 1g場での走行実験の様子

写真3 杭打ち機械の小型模型と予備実験の様子

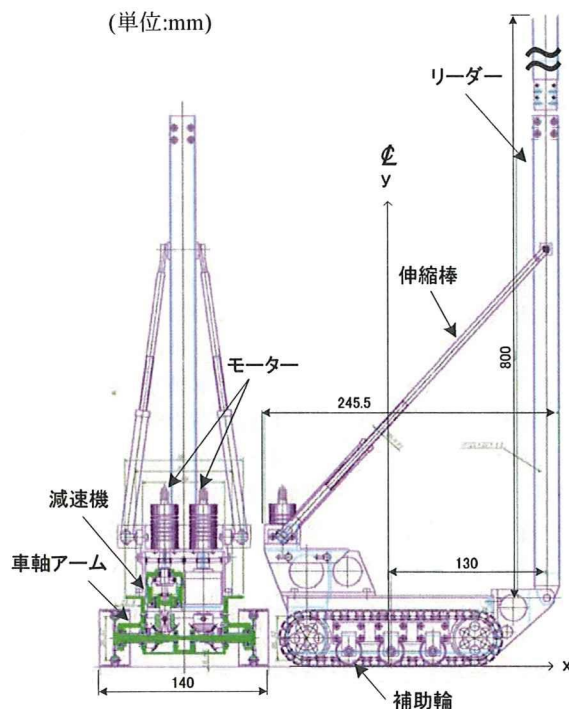


図1 杭打ち機械の小型模型(1/25スケール)

5. まとめ

本模型はまもなく完成する見込みであり、近々遠心場における予備的な性能確認を行う予定である。その後の実験では地盤支持力や地表面の凹凸状態ならびに機械の重心位置の違いが自走時における機体の動揺に与える影響を調査する予定である。計測ではリーダー部と下部走行体に加速度計を設置して動揺を計測するとともに、車軸と補助輪の取付アームにおける荷重を計測して履帯面に働く接地圧力分布を調査する予定である。これらの結果に基づいて自走式杭打ち機械の不安定メカニズムを明らかにし、安定設置に必要な支持地盤条件を検討したいと考えている。

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「基礎工事中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) 安衛法便覧Ⅰ平成19年度版：労働調査会出版局，労働調査会，pp.967. 2) 安衛法便覧Ⅱ平成19年度版：労働調査会出版局，労働調査会，pp.512.

支持力試験における載荷応力と分散計測

支持力試験 応力分布 応力分散

(独) 労働安全衛生総合研究所 国際会員 ○堀 智仁
(独) 労働安全衛生総合研究所 正会員 玉手 聡
武蔵工業大学 伊藤 達彦

1.はじめに

移動式クレーンや杭打ち機の設置時の安定性を検討する際には、クローラ接地圧を算出し、地盤の支持力と比較する。しかしながら、クローラ接地圧を算出する式は、地盤を剛体と仮定して求めるため、実際の接地圧と異なる可能性がある。また、安定計算をする際、荷重の分散角に比較的大きな値を使用する場合がある。内部摩擦角の大きな砂質土では荷重の分散効果は期待できるが、関東ロームのような火山灰質粘性土では分散の効果は小さいと考えられる。そこで本報告では、それらを検証するために、関東ロームを用いて支持力実験を行い、載荷応力と土圧の分布を測定することを試みた。

2.試料および試験方法

本実験に使用した試料は、研究所内から採取した関東ローム($\rho_s=2.759\text{g/cm}^3$, $w_{opt}=102.0\%$)である。

実験に用いた土槽の寸法は幅 500mm, 奥行き 200mm 高さ 400mm である。載荷応力の測定は、図-1 に示す載荷盤 (100mm×200mm) にロードセル (20mm×20mm) を 5 つ設置して載荷応力の分布を測定した。土圧分布の測定については図-2 に示すように土圧計を 5cm 間隔で設置している。

模型地盤は最適含水比付近に調整した関東ロームを所定の層厚 (1 層 5cm) になるよう試料を投入し、締め固め圧力 $\sigma=150\text{kPa}$ で 1 時間静的に締め固めた。なお、3 層目の試料投入後、同じ圧力で約 12 時間養生している。土槽作製後、NSF-clay を用いて 20mm のメッシュを作製し、その交点にリベットを設置した。図-3 は載荷前の土槽の様子である。

支持力試験の載荷はひずみ制御で行い、載荷速度は 2mm/min とした。

3.試験結果と考察

(1)載荷応力と土圧分布の関係

図-4 は載荷応力と変位の関係を示したものである。荷重の増大に伴い変位も増大し、その傾きは緩くなるものの荷重に明確なピークが現れていない、このことから、局所的に破壊が生じる典型的な進行性破壊であることがわかる¹⁾。図中の①~④については、それぞれ①弾性域、②弾性限界、③沈下量が直線的に増加する点の始点、④終点である。各地点の応力と土圧の分布を図-6 に示した。図中のラインは載荷ロードに設置したロードセルの値を載荷盤の面積で除した平均応力である。図-6(a)および(b)

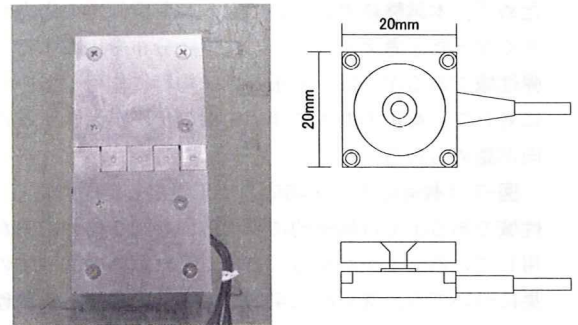


図-1 載荷盤とロードセル

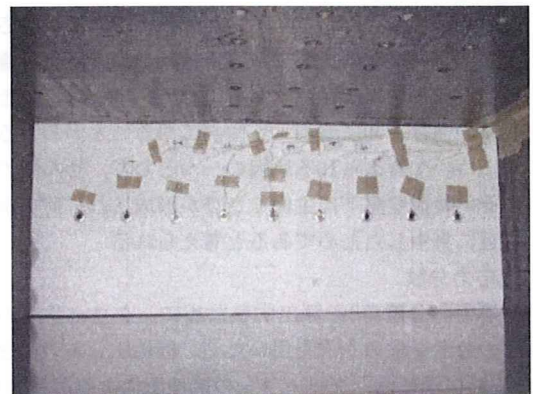


図-2 土槽底面に設置した土圧計

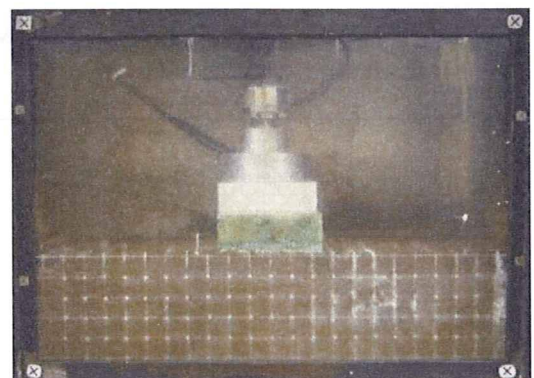


図-3 試験の様子

Measuring the earth pressure distributions between a loading plate and the lower base of container by bearing capacity tests.

Hori tomohito, Tamate satoshi (National Institute of Occupational Safety and Health)

Ito tasuhiko (Musashi Institute of Technology)

で示した①と②の結果では、平均応力に比べ荷重応力はやや低い値を示しているが、図-6(c)および(d)で示した③と④の結果では、荷重応力と平均応力はほぼ等しいことから、側面の摩擦の影響は小さいと考えられる。荷重応力の分布形状を見ると、全ての結果で中央の値が低く、両端の応力が大きくなっていることがわかる。これは、剛性基礎の接地圧分布は、粘性のない試料では中央に荷重が集中し、粘性土の場合には、周辺に反力が集中するため²⁾、本試験結果においても、荷重盤両端の応力が大きくなったと考えられる。一方、土圧分布を比較すると、弾性域である①では、土圧がほぼ均等に作用しているのに対して、荷重の増大に伴い中央の土圧が大きくなる傾向が認められる。

図-7は荷重応力を平均応力で正規化した図である。弾性域である①では局所的に平均応力の約2倍の応力が作用していることがわかる。また、それ以外の②~④の結果についても、部分的に平均応力よりも2割~4割程度高くなっている。剛な基礎の中心に荷重が作用する場合、一般的に、接地圧はほぼ等分布であると仮定して算出しているが、本試験結果から、同様なケースの場合1.2~1.4の安全率を考慮する必要があると考えられる。

図-8は土槽底部に設置した土圧計の値を平均応力で除したものである。図より、土槽端部の土圧は荷重の増加に拘わらずほぼ一定である。一方、中央付近の土圧は荷重の進行と共に増加する傾向にあることがわかる。これについて考えられる原因の一つとして、せん断の進行に伴い荷重盤直下に主働くさびが形成され、荷重が中央付近に集中したためであると考えられる。

(2) 応力分散

応力の分散角 θ を算出するために、クローラーの接地圧の分散を求める式を用いた³⁾。接地圧分布の概念図を図-9に示した。クローラーの接地圧による荷重強度 S_z は、式(1)で求めることができる。

$$S_z = \frac{B \times L \times P}{(B + 2 \cdot h \cdot \tan \theta) \cdot (L + 2 \cdot h \cdot \tan \theta)} \quad (1)$$

ここで、 B はクローラー幅、 L はクローラーの長さの1/2、 P は最大接地圧、 h は地盤の厚さである。

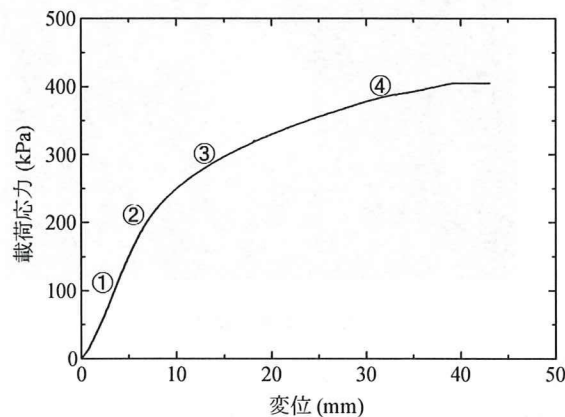


図-4 応力-変位関係

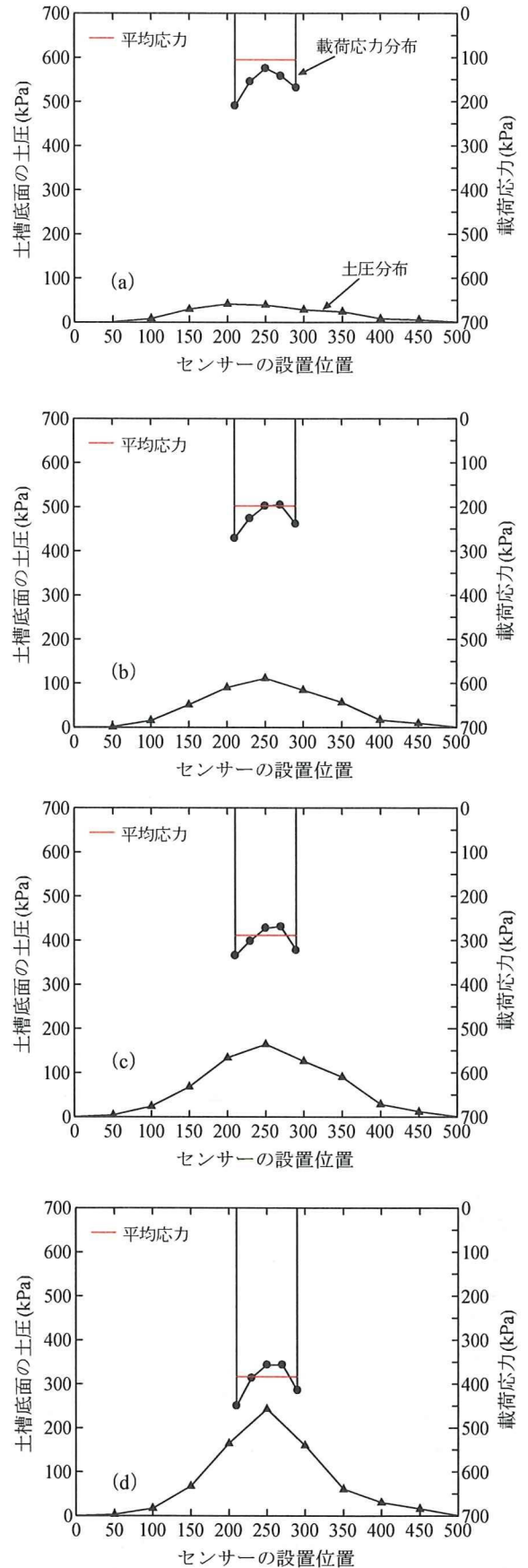


図-6 荷重応力と土圧分布の関係 (a)① (b)② (c)③ (d)④

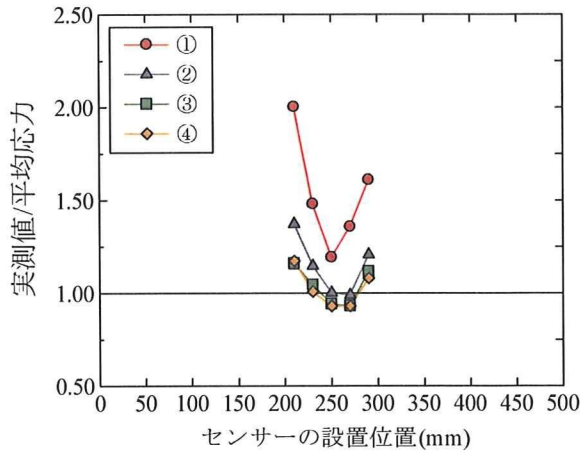


図-7 正規化した载荷応力

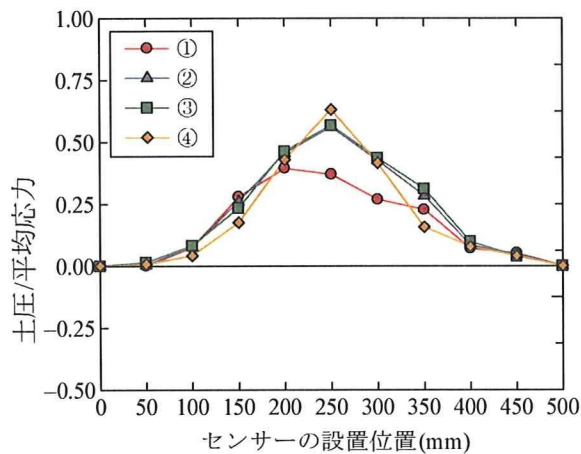


図-8 正規化した土圧分布

本研究では、奥行き方向の荷重分散がないため、土槽底面に作用する応力は式(2)で表すことができる。

$$\frac{B \times Q}{(B + 2 \cdot h \cdot \tan \theta)} = p \quad (2)$$

ここで、 Q は载荷応力の平均応力、 p は土槽底面に作用する土圧である。

上式から、分散角 θ を式(3)で算出することができる。

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{B - (p/Q) \cdot B}{2 \cdot D_f \cdot (p/Q)} \right) \quad (3)$$

図-10 は、载荷応力を降伏応力で正規化した値と分散角の関係を示したものである。分散角については中央のセンサーの土圧を用いて算出しており、分散角の上限値は実験の仕様上 50° である。図より、荷重の増加に伴い分散角 θ は低下し、降伏応力付近で分散角 θ はほぼ最小値になっている。このことから、分散角は荷重の大きさによって異なり、最小値は 13° であることが明らかになった。

建設機械設置時の安定性を検討する上で、応力分布と

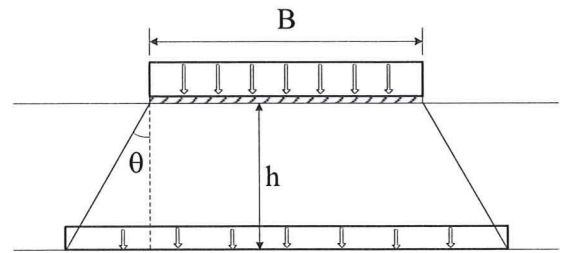


図-9 クローラー接地圧分布の概念図

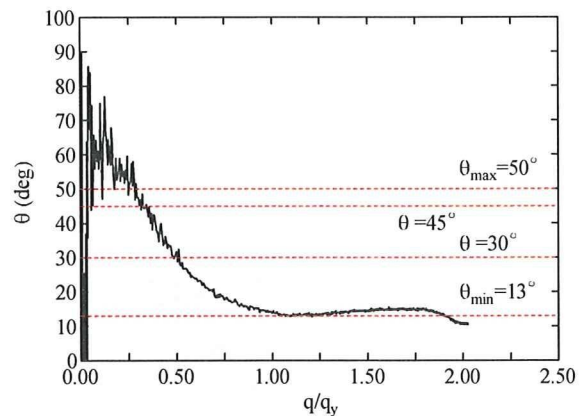


図-10 正規化した土圧分布

荷重の分散は非常に重要である。今後は、さらなるデータの蓄積を行うと共に、豊浦砂のような粘着力のない試料で試験を行うほか、敷鉄板を敷いた際の応力分散効果を調べる予定である。

4.まとめ

- 1) 载荷応力は平均応力よりも局所的に 2~4 割程度大きいことがわかった。
- 2) 関東ロームのような粘着力をもつ試料では、荷重の分散効果は小さく、降伏応力付近の分散角は 13° であった。

参考文献

- 1) 支持力入門：支持力入門編集委員会，(社) 土質工学会，pp.26.
- 2) 土質力学(第 6 版)：河上房義，森北出版，p.81.
- 3) 改訂 移動式クレーン・基礎工用機械の転倒防止指針：指針改訂委員会ワーキンググループ，(株) 建設安全センター，p35.

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。

杭打ち機械の自走時における動揺計測実験

建設機械 現場計測 自走挙動

(独)労働安全衛生総合研究所 ○玉手 聡, 堀 智仁, 伊藤和也

武蔵工業大学工学部 末政直晃, 片田敏行, 伊藤達彦

羽田空港国際線エプロンJV 上地章夫, 早瀬宏文, 土方 遍, 天野喜勝

関東地方整備局東京空港整備事務所 竹田康雄, 加藤浩司, 浦本康二

1. はじめに

杭打ち機械は地盤改良工事や基礎工事に用いられる大型の車両系建設機械であり、主に軟弱地盤の対策工事に用いられる。従って、この機械は潜在的に不安定な地盤上に設置され、作業に用いられる。一方でこの機械による転倒災害も多く報告されている。写真1は現場内を走行中に発生した転倒災害の様子を示す。杭打ち機械はアースオーガをリーダーの上部に位置させており、トップヘビーな状態で自走していたことがわかる。

杭打ち機械の転倒を防止するためには安定した支持地盤に設置する必要がある。本研究では安定走行に必要な地盤条件の検討を目的に、その第1段階として実大走行実験による杭打ち機械の挙動解析を行った。本報告では実大走行実験の概要と得られた結果を述べる。



写真1 自走式杭打ち機械の転倒災害

2. 安全関係規則

労働安全衛生規則¹⁾では自走式杭打ち機械の転倒防止を述べており、敷鉄板等の使用等による沈下防止の措置が義務付けられている。しかしながら、安定設置に必要な支持力条件については詳細が述べられておらず、安定設置の判断は事業者に委ねられているのが現状である。また車両系建設機械構造規格²⁾は機械が備えるべき安定度を表1の通り定めており、杭打ち機械は限界傾斜角が5度以上を有しなければならない。この値はブルドーザのそれに比べて小さく設定されており、構造的に不安定なことが示されている。但し、設置地盤は水平堅固が前提とされており、沈下により生じる機体傾斜は想定されていない。

表2は事業者が独自に定めた基準の一例である。作業時と走行時の安定度について異なる値を設定するとともに、構造規格の基準値に比べ1.4~1.8倍の値が用いられている。また地表の勾配については、1/100以内の平坦性と支持力安全率1.5以上が使用基準に用いられている。

機種	杭打ち機	ブルドーザ
安定度	5度	35度

安定度	作業時7度 走行時9度
地盤の勾配	傾斜1/100以下 整地し平坦化
支持力照査	安全率1.5

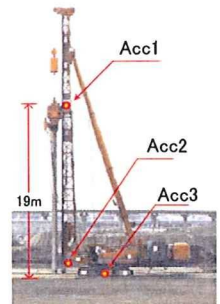


写真2 加速度計の設置位置

3. 実大走行実験

(1)実験現場：実大走行実験は東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業が行われているエリアの南西部にて実施した。本実験では走行路の地盤条件と機体に生じる挙動の関係を明らかにするために、水準測量と平板載荷試験をはじめに実施した。次いで走行路に敷鉄板を敷設し、その後に杭打ち機械を自走させた。機体に生じた加速度応答を後述する3個所で計測した。

(2)水準測量：水準測量では1.8m間隔の格子状に測点を設定し128地点を計測した。図1は走行路の高低差を示したものであり緩やかな起伏が見られる。走行路の高低差は最大値が約10cmと非常に小さく、ほぼ平坦な地盤であった。

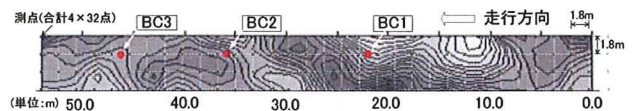


図1 水準測量の結果

(3)地盤の支持力：走行路の地盤支持力を調べるために平板載荷試験を行った。試験はひずみ制御(変位速度5mm/min)により、図1に示す3個所で実施した。図2は載荷応力(q_a)と、沈下量(s)を載荷盤の直径 D で除した沈下比(s/D)との関係を示す。3つの曲線に共通して s/D が0~0.1の範囲では s/D 増分に対する q_a 増分が大きくなり、その傾きには一致が見られる。また、曲線は $s/D=0.1$ 付近で屈曲点を示した後、ほぼ単調に増加し明確なピークを示さない。ここで屈曲点前後の2つの接線の交点における q_a 値を極限支持力(q_u)と定義し、求めた値は478~623kPaであった。本実験で使用した杭打ち機械の最大接地圧 p_{max} は194kPaであり、 $q_u > 2.4p_{max}$ であった。なお曲線の載荷初期における最大接線勾配(K_f)は6750~7651kPaであった。

“Measurement of accelerations on the moving pile driver in construction site”, S.Tamate(National Institute of Occupational Safety and Health), T.Hori(ditto), K.Ittoh(ditto), N.Suemasa (Musashi Institute of Technology), T.Katada(ditto), T.Ittoh(ditto), A.Ueji(Haneda Airport Apron JV), H.Hayase(ditto), A.Hijikata(ditto), Y.Amano(ditto), Y.Takeda(Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism), K.Kato(ditto) and K.Uramoto(ditto)

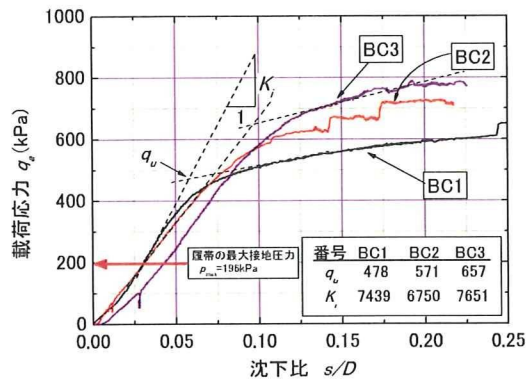


図2 載荷応力 (q_s) - 沈下比 (s/D) 関係

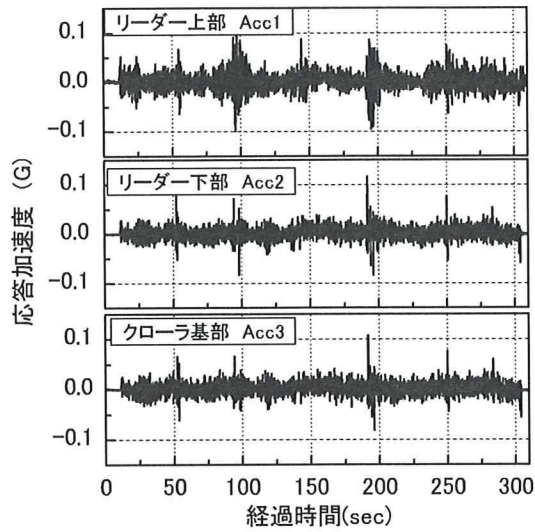


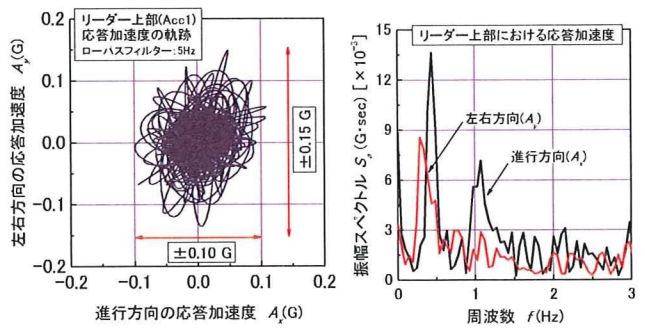
図3 応答加速度の進行方向成分 (A_x) と経過時間の関係

(4) 動揺の計測：実験に使用した杭打ち機械は写真2に示すサンドコンパクション用のものであり、全高27m、総重量980kN、安定度17(deg)、最大接地圧194(kPa)であった。機体の3箇所に加速度計を設置した。Acc1はリーダー上部、Acc2はリーダー下部、Acc3は履帯支持棒の中央に設置した加速度計である。応答加速度は各箇所において進行方向成分 (A_x) とこれと直交する左右方向成分 (A_y) をサンプリング周波数100Hzで計測した。走行速度は1.0km/h (=28cm/sec) であり、計測開始から約15秒後に前進させた。

4. 応答加速度の解析

(1) 高さ方向の増幅：3箇所計測した A_x と経過時間の関係を図3に示す。なお、計測値には5Hzのローパスフィルターが施されている。3地点における応答を比較すると、Acc1がAcc2とAcc3に比べて幾分か大きく、機体の動揺は上方で増幅している。Acc1の最大値は約0.1Gである。

(2) 動揺方向と周波数：図4はリーダー上部における応答加速度について A_x と A_y の比較を示す。a)に示す平面上に投影した加速度の軌跡は原点に対してほぼ対称であり、その形状は楕円である。加速度の最大振幅は A_x が0.1G、 A_y は0.15Gである。進行方向に比べて左右方向に幾分か大きな応答が見られた。



a) 加速度の軌跡

b) 周波数特性

図4 リーダー上部における応答加速度の方向成分比較

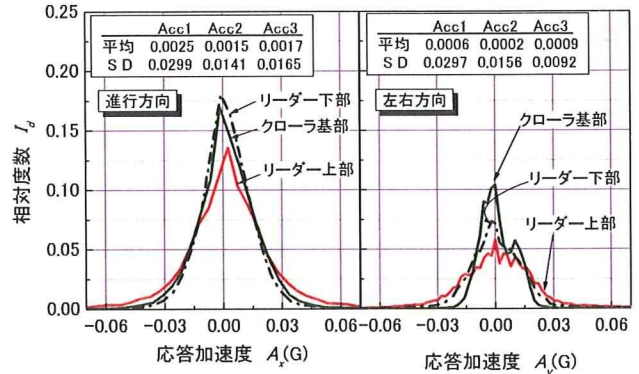


図5 応答加速度の頻度分布の比較

b)に示す周波数分布を見ると、 A_x と A_y にはそれぞれ0.4Hzと0.3Hzにピークが見られる。これは本実験における杭打ち機械の動揺特性を示すものと考えられる。なお、1.1Hzに見られるもう一つの A_x のピークは、つり下げられた装備の振動や風による影響と見られる。

(3) 加速度の頻度分布：3箇所計測された2つの応答加速度成分 A_x と A_y について、頻度分布を調査した。図5は相対度数 I_r と応答加速度の関係を示す。 I_r は各応答加速度の発生数を全計測データ数(31101個)によって除した値である。各 A_x と A_y の分布は原点に対してほぼ対称である。標準偏差(SD)は進行方向と左右方向に共通してリーダー上部のAcc1が最も大きく、その値は約0.03Gである。

5. まとめ

機体の安定度が17度、地盤は平坦で接地圧力に比べて十分に高い支持力を有する条件において、自走時における機体の動揺を計測した。その結果、応答加速度はリーダー上部で増幅することが明らかになった。平面上に投影した加速度の軌跡はほぼ楕円状に分布し、0.3から0.4Hz付近に振幅スペクトルのピークが見られた。今後は遠心模型実験において設置地盤と自走挙動の関係を調査し、安定設置に必要な支持地盤の条件を明らかにしたいと考えている。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)の交付を受け実施したものである。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献：1) 安衛法便覧Ⅰ平成19年度版：労働調査会出版局、労働調査会、p967。2) 安衛法便覧Ⅱ平成19年度版：労働調査会出版局、労働調査会、p512。3) 越 昭三：数理統計概論、学術図書出版社、p2、1983。

杭打ち機械模型の作製と遠心場走行実験

遠心力模型実験 自走挙動 杭打ち

(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 国際会員 末政直晃, 非会員 伊藤達彦

1. はじめに

杭打ち機械は主に軟弱地盤の対策工事に用いられる車両系建設機械である。杭打ち機械の転倒災害は数多く報告されており、走行中の転倒を防止するために必要な条件を明らかにする必要がある。そこで、本研究では、杭打ち機械模型を作製し、遠心場走行実験を行った。

2. 実験の概要

(1) 小型模型の作製

杭打ち機械の小型模型は 25G の遠心場で走行実験を行うことを想定し、実機の 1/25 のスケールで設計した。その際、モーターや減速機、およびバッテリーの位置は実機の重心位置と等しくなるように配置した。実機と模型の重心位置を表 1 に示す。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り、履帯面に働く接地圧分布を計測した。さらに、リーダー上部に加速度計を設置して、走行中の機体の揺れを測定した。

表 1 実機と模型における主要諸元の比較

		杭打ち機械			
		実物		1/25 模型	
重心距離*		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 旋回 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 場では 747N)	
接地圧力(kPa)		101		133	
走行速度(km/h)		1.6 (=45cm/sec)			

*重心距離のうち水平(x)は前輪設置面からの距離であり、鉛直(y)は設置面からの距離である。

(2) 地盤のモデル化

走行実験では強度の異なる 2 種類の発泡ポリウレタンフォームを用いて模型地盤を作製した。一つは硬い FP15 であり、もう一つは軟らかい FP30 である。2 種類の発泡ポリウレタンフォームに対して支持力試験を行った結果、FP15 では極限支持力(q_u)と模型の接地圧(p_{max}) は等しく、FP30 では $q_u=0.4p_{max}$ であった。

(3) 実験方法および実験条件

実験に使用した遠心模型実験装置は(独)労働安全衛生総合研究所が保有する NIIS Mark-II Centrifuge である。実験の概要を図 1 に示した。実験で用いた土槽は幅

250mm、長さ 800mm、高さ 300mm である。実験時の風の影響を除くために風防カウルで全体を覆っている。走行時の速度は、ワイヤー式変位計を用いて測定した。模型地盤は図 2 に示すように、強度の異なる地盤を模擬した条件と、履帯の長さの 1/2 の凹凸を模擬した条件の 2 種類の模擬地盤で実験を行った。

3. 実験結果

一様地盤での走行実験の結果を図 3 に示す。待機位置から加速させた模型は経過時間(t_m)が約 0.3 秒の時に走行距離が 150mm となる。この時に履帯全体が走行区間上に位置するとともに所定の速度に達している。その後、模型は定常走行に移り、 $t_m=1.1$ sec の時に容器端へ達している。計測した応答加速度には走行中の機体の揺れによる振動が現れている。また、車軸荷重は FS が最大を示し、RS はほぼゼロで推移している。本研究では、走行速度が一定である $t_m=0.3\sim 1.1$ sec を解析対象区間とした。

図 4 は実大走行実験¹⁾と遠心場走行実験においてリー

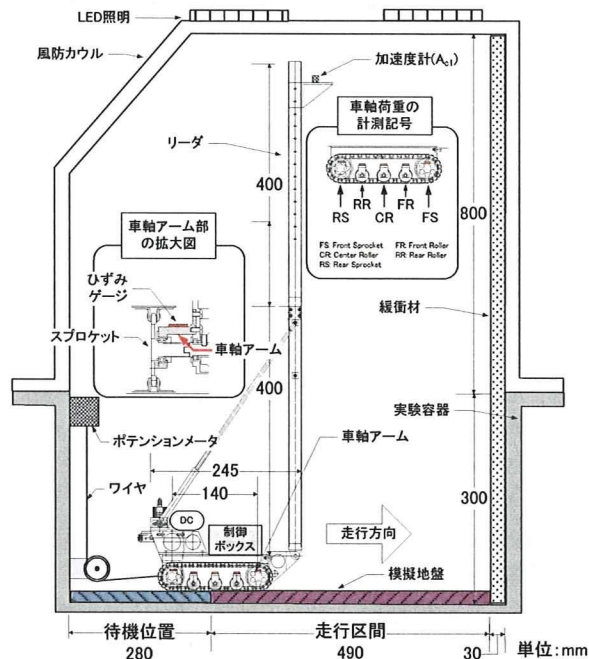


図 1 遠心模型実験の概要図

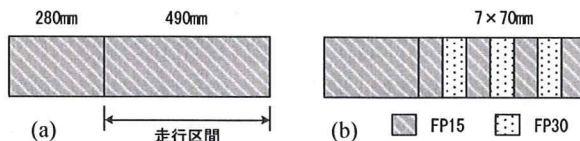


図 2 地盤の種類 (a)一様地盤 (b)凹凸地盤

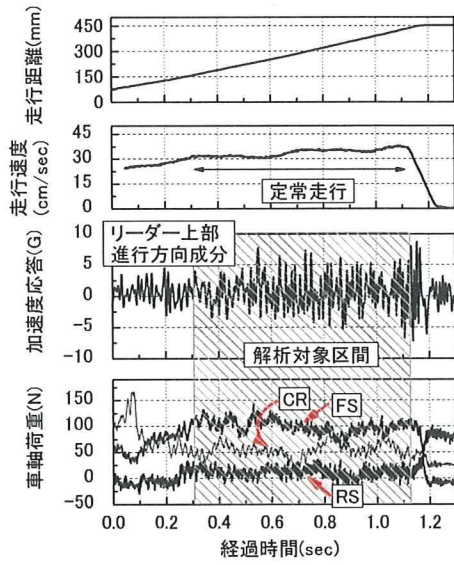


図3 実験結果（一様地盤）

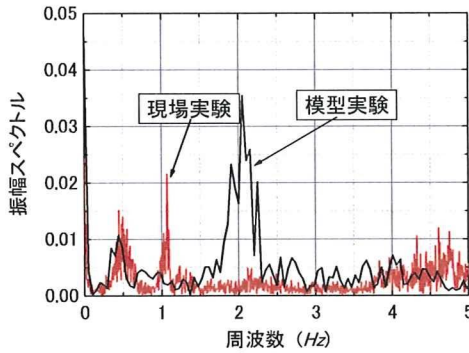


図4 周波数-振動スペクトル関係

ダー上部で計測した加速度応答の比較を示す。遠心場実験のデータは動的相似則に基づいて実大スケールの値に換算した。実大実験と遠心実験に共通して0.5Hz付近にピークが見られることから、遠心模型実験で杭打ち機械固有の挙動が再現されている。実大実験に見られる1Hzのピークは実機の吊り荷や風による影響と考えられる。一方、遠心実験に見られる2Hz付近のピークは履帯の構造的な凹凸による影響で生じたものである。

図5は地盤条件の違いが車軸の荷重分布に与える影響を示したものである。ここで、各車輪に作用する荷重を車体の重量で除した値を荷重分布割合 R と定義した。縦軸は相対度数 I_d 、横軸は荷重分布割合の実験値 R_e である。一様地盤では、 q_u/p_{max} は約1であるため履帯直下に生じる沈下は小さい。そのため、各車軸の最大相対度数 I_d には大きな違いが見られず、類似した分布形状を示している。ピーク I_d に対応する R_e の値をみると前軸のFSが最大であり、後軸のRSは最小となっている。これは前方向に対して転倒モーメントが働いていたためである。それに対して、凹凸地盤の各車軸を比較すると I_d の分布形状には違いが見られ、RSでは I_d が鋭いピークを示しその分布はほぼ山形である。一方、FSでは最大 I_d がRS

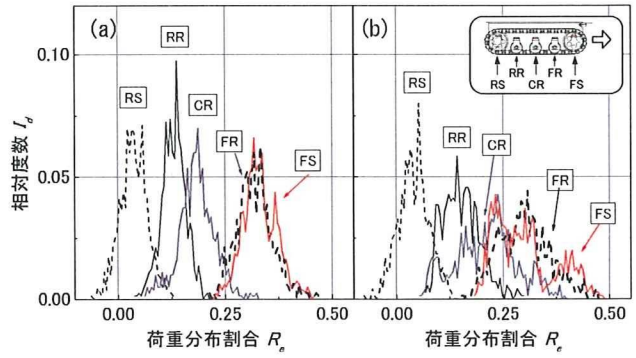


図5 相対度数と荷重分布割合の関係
(a)一様地盤 (b)凹凸地盤

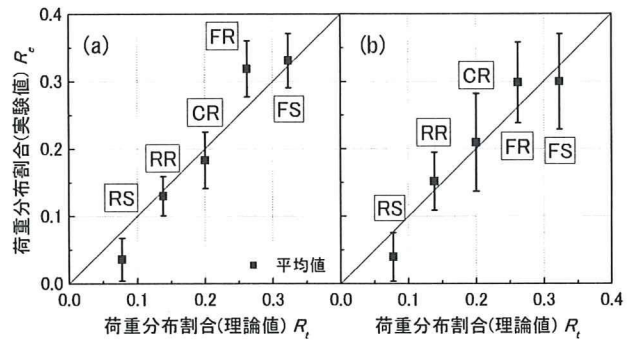


図6 荷重分布割合の理論値と実験値の比較
(a)一様地盤 (b)凹凸地盤

のそれに比べて小さく、 R_e は広い範囲に分布している。 I_d には大きく2つのピークが見られる。従って、FSには周期的に変化する地盤上を走行したことによる影響が現れている。

図6は車軸荷重の理論値 R_t と実験値 R_e の比較を示す。 R_t はJIS基準に基づく式²⁾で得られた値から算出したものである。 R_e には平均値と標準偏差を示した。地盤条件の違いにかかわらず R_e の平均値は R_t にほぼ一致している。しかしながら、履帯に最大荷重を与えるFSの値に着目すると、一様地盤では変動係数(=標準偏差/平均値)が0.121であるのに対して、凹凸地盤では0.235に増加している。従って、支持力が不均一な地盤ではFSの変動が大きくなることが明らかになった。

4. まとめ

(1) 1/25の杭打ち機械模型を作製し、遠心場走行実験を行った結果、自走時における杭打ち機の特徴的な揺れを再現することができた。

(2) 履帯車軸に生じる変動荷重は支持地盤の硬軟に影響を受けることが明らかになった。また、車軸荷重を測定することで、機体の安定性を評価できると考えられる。

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)玉手ら：杭打ち機械の自走時における動揺計測実験，第43回地盤工学研究発表会，2008。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。

くい打機の走行挙動と履帯圧力分布に関する実験的解析

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

くい打機械は地盤改良工事や基礎工事に用いられる大型の車両系建設機械であり、主に軟弱地盤の対策工事に用いられる。従って、この機械は潜在的に不安定な地盤上に設置され、作業に用いられる。一方でこの機械による転倒災害も多く報告されている。写真1は現場内を走行中に発生した転倒災害の様子を示す。くい打機械はアースオーガーをリーダーの上部に位置させており、トップヘビーな状態で自走していたことがわかる。

くい打機械の転倒を防止するためには、地盤が有すべき支持力要件について検討する必要がある。しかし、くい打機械の設置時の安定性に関する研究は非常に少なく、機械の設置要件の検討は急務であると考えられる。本研究では、実大走行実験によるくい打機械の挙動解析と、くい打機械模型を作製し遠心場走行実験を行った。遠心場走行実験では、走行時挙動に伴う接地圧力変化について計測を行った。本報告では実大走行実験の概要と模型実験で得られた結果を述べる。



写真1 自走式くい打機械の転倒災害

2. 転倒防止に関する法令規則

労働安全衛生規則¹⁾では自走式くい打機械の転倒防止を述べており、敷鉄板等の使用等による沈下防止措置が義務付けられている。しかしながら、安定設置に必要な地盤の支持力条件については詳細が述べられておらず、安定設置の判断は事業者者に委ねられているのが現状である。また、車両系建設機械構造規格²⁾では機械が備えるべき安定度を表1の通り定めており、くい打機械は限界傾斜角が5度以上を有しなければならない。この値はブルドーザのそれに比べて小さく設定されており、構造的に不安定なことが示されている。ただし、設置地盤は水平堅固が前提とされており、沈下により生じる機体傾斜は想定されていない。

表2は事業者が独自に定めた基準の一例である³⁾。作業時と走行時の安定度について異なる値を設定するとともに、構造規格の基準値に比べ1.4~1.8倍の値が用いられている。また地表の勾配については、1/100以内の平坦性と支持力安全率1.5以上が使用基準に用いられている。

表1 機種と安定度の関係

機種	くい打機	ブルドーザ
安定度	5度	35度

表2 事業者の定めた基準の例

安定度	作業時 7度
	走行時 9度
地盤の勾配	傾斜 1/100 以下 整地し平坦化
支持力照査	安全率 1.5

3. 実大走行実験

3.1 実験現場

実大走行実験は、東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業が行われているエリアの南西部にて実施した。本実験では走行路の地盤条件と機体に生じる挙動の関係を明らかにするために、水準測量と平板載荷試験をはじめに実施した。次いで走行路に敷鉄板を敷設し、その後にくい打機械を自走させた。機体に生じた加速度応答を後述する3箇所で計測した。

3.2 水準測量

水準測量では1.8m間隔の格子状に測点を設定し128地点を計測した。図1は走行路の高低差を示したものであり緩やかな起伏が見られる。走行路の高低差は最大値が約10cmと非常に小さく、ほぼ平坦な地盤であった。

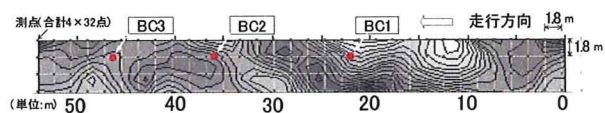


図1 水準測量の結果

3.3 地盤の支持力

走行路の地盤支持力を調べるために平板載荷試験を行った。試験はひずみ制御(変位速度5mm/min)により、図1に示す3箇所(BC1~BC3)で実施した。図2は載荷応力(q_a)と、沈下量(s)を載荷板の直径(D)で除した沈下比(s/D)との関係を示す。3つの曲線に共通して $s/D=0.1$ 付近で屈曲点を示した後、ほぼ単調

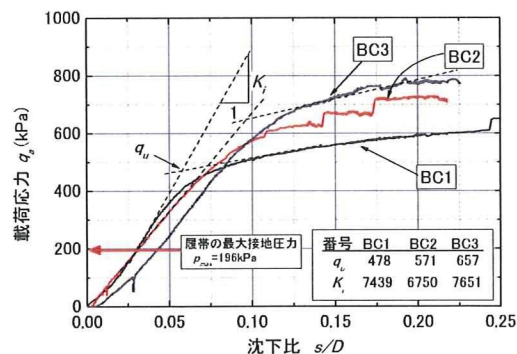


図2 載荷応力(q_a) - 沈下比(s/D) 関係

に増加し明確なピークを示さない。ここで、屈曲点前後の2つの接線の交点における q_a 値を極限支持力(q_u)と定義し、求めた値は478~623kPaであった。本実験で使用したくい打機械の最大接地圧 p_{max} は194kPaであり、 $q_u > 2.4p_{max}$ であった。このことから、走行路は機械の接地圧力に比べて十分に高い支持力を有することがわかった。

3.4 動揺の計測

実験に使用したくい打機械は写真2に示すサンドコンパクション用のものであり、全高27m、総重量980kN、安定度17(deg)、最大接地圧194kPaである。走行中の挙動を計測するために、機体の3箇所に加速度計を設置した。Acc1はリーダー上部、Acc2はリーダー下部、Acc3は履帯支持枠の中央に設置した加速度計である。応答加速度は各箇所において進行方向成分(A_x)と、これと直交する左右方向成分(A_y)をサンプリング周波数100Hzで計測した。走行速度は1km/h(=28cm/sec)であり、計測開始から約15秒後に前進させた。

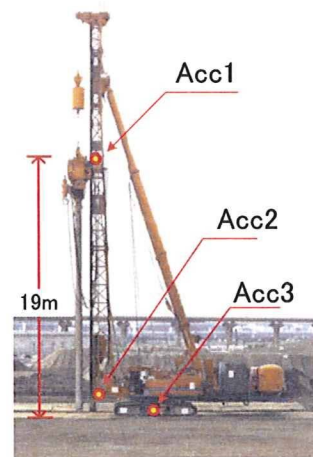


写真2 加速度計の設置位置

4. 応答加速度の解析

4.1 高さ方向の増幅

3箇所で計測した A_x と経過時間の関係を図3に示す。なお、計測値には5Hzのローパスフィルターが施されている。3地点における応答を比較すると、Acc1がAcc2とAcc3に比べて幾分大きく、機体の動揺は上方で増幅している。Acc1の最大値は約0.1Gである。

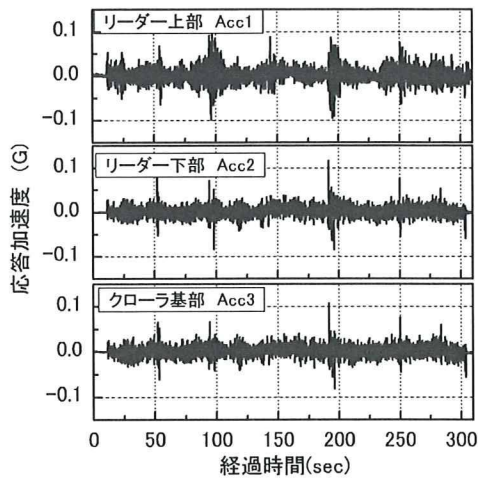


図 3 応答加速度の進行方向成分 (A_y) と経過時間の関係

4.2 動揺方向と周波数特性

リーダー上部における応答加速度について A_x と A_y の比較を図 4 および図 5 に示す。

図 4 に平面上に投影した加速度の軌跡を示す。加速度の軌跡は原点に対してほぼ対称であり、その形状は楕円である。また、加速度の最大振幅は A_x が 0.1G、 A_y は 0.15G であった。走行方向に比べて左右方向に幾分大きな応答が見られた。

図 5 は A_x と A_y の周波数特性の比較を示す。周波数分布を見ると、 A_x と A_y にはそれぞれ 0.4Hz と 0.3Hz にピークが見られる。これは本実験におけるくい打機の動揺特性を示すものと考えられる。なお、1.1Hz にみ

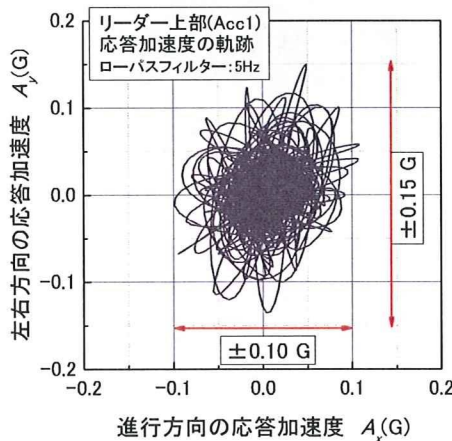


図 4 加速度の軌跡

られるもう一つの A_x のピークは、つり下げられた装備の振動や風による影響と見られるが、詳細を明らかにするには至っていない。

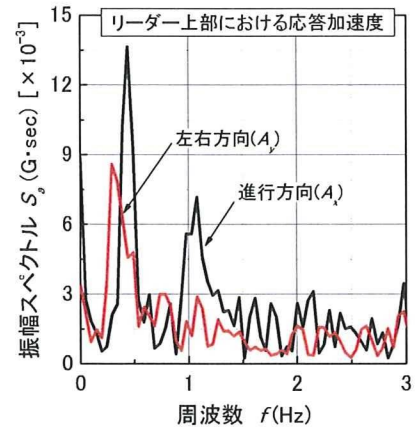


図 5 周波数特性

4.3 加速度の度数分布解析

3 箇所で計測された 2 つの応答加速度成分 A_x と A_y について、度数分布解析を行った。図 6 は相対度数 (I_d) と応答加速度の関係を示す。 I_d は各応答加速度の発生数を全計測データ数で除した値である。各 A_x と A_y の分布は原点に対してほぼ対称である。標準偏差 (SD) は進行方向と左右方向に共通してリーダー上部の Acc1 が最も大きく、その値は約 0.03G である。

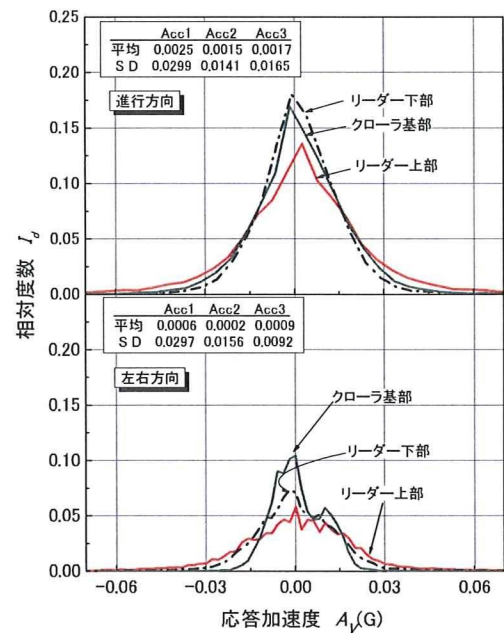


図 6 応答加速度の度数分布の比較

5. くい打機模型の作製

くい打機械の小型模型は25gの遠心場で走行実験を行うことを想定し、実機の1/25スケールで設計した。その際、モーターや減速機、およびバッテリーの位置は実機の重心位置と相対的に等しくなるよう配置した。模型の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り、履帯面に働く接地圧分布を測定することが可能となっている。また、リーダー上部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可能である。写真3に作製したくい打機械模型を示す。



写真3 作製したくい打機械模型

6. 遠心場走行実験

6.1 地盤のモデル化

走行実験では強度の異なる2種類の発砲ポリウレタンフォーム（Urethane Foam）を用いて模型地盤を作製した。一つは硬いUF-1であり、もう一つは柔らかいUF-2である。2種類のウレタンフォームに対して支持力実験を行った結果、UF-1では極限支持力(q_u)と模型の接地圧(p_{max})は等しく、UF-2の極限支持力は模型の接地圧よりも低く、 $q_u=0.4P_{max}$ であった。

6.2 実験方法および実験条件

実験に使用した遠心模型実験は(独)労働安全衛生総合研究所が保有するNIIS MARK-II Centrifugeである。

実験の概要を図7に示した。実験時の風の影響を除くために全体を風防カウルで覆っている。模型地盤は図8に示すように、強度の異なる地盤を模擬した条件と、履帯の長さの1/2の凹凸を模擬した条件の2種類の模擬地盤で実験を行った。模型の安定度は実大走行実験の条件とほぼ等しい、安定度19度である。

走行実験は25gまで遠心加速度を増加させた後、模型を走行させた。その際の走行速度は、30cm/secとした。走行速度の測定はワイヤー式変位計を図に示すように設置して行った。なお、本研究では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。

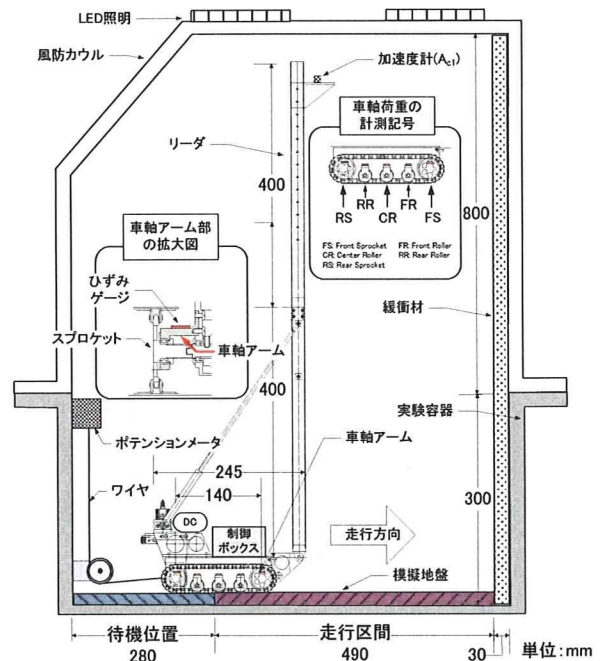
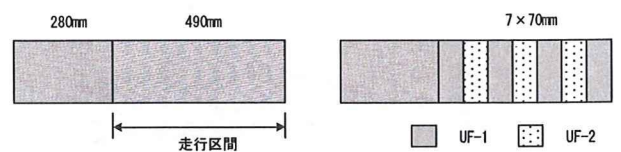


図7 遠心模型実験の概要図



(a)一様地盤

(b)交互地盤

図8 走行路の条件

7. 遠心場走行実験の結果

7.1 解析対象区間

一様地盤での走行実験の結果を図9に示す。待機位置から加速させた模型は経過時間 (t_m) が約0.3秒の時に走行距離が150mmとなる。この時に履帯全体が走行区間上に位置するとともに所定の速度に達している。その後、模型は定常走行に移り、 $t_m=1.1\text{sec}$ の時に容器端へ達している。計測した応答加速度には走行中の機体の揺れによる振動が現れている。また、車軸荷重はFSが最大を示し、RSはほぼゼロで推移している。本研究では、走行速度が一定である $t_m=0.3\sim 1.1\text{sec}$ を解析対象区間とした。

7.2 実大走行実験と模型実験の比較

図10は実大走行実験と遠心場走行実験においてリーダー上部で計測した加速度応答の比較を示す。遠心実験のデータは動的相似則に基づいて実大スケールに換算した値である。実大実験と遠心実験に共通して0.5Hz付近にピークが見られることから、くい打機械固有の挙動が再現されている。実大実験に見られる1Hzのピークは先述したとおり、実機のつり荷や風による影響と考えられる。一方、遠心実験に見られる2Hz付近の卓越周波数は履帯の凹凸による構造的な影響で生じたものである。

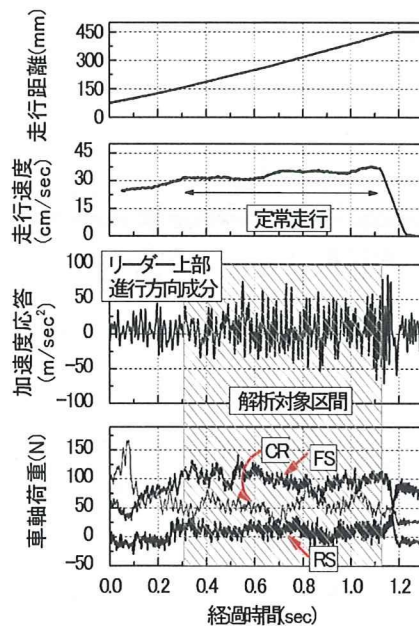


図9 実験結果 (一様地盤)

7.3 車軸荷重の頻度分布

図11は地盤条件の違いが車軸の荷重分布に与える影響を調べるために、車軸荷重を度数分布解析した結果である。ここで、各車輪に作用する荷重を車体の重量で除した値を荷重分布割合 R と定義した。縦軸は相対度数 (I_d)、横軸は荷重分布割合の実験値 (R_e) である。一様地盤では、 q_i/p_{max} は約1であるため履帯直下に生じる沈下は小さい。そのため、各車軸の最大相対度数 I_d には大きな違いが見られず、類似した分布形状を示している。ピーク I_d に対応する R_e の値をみると前

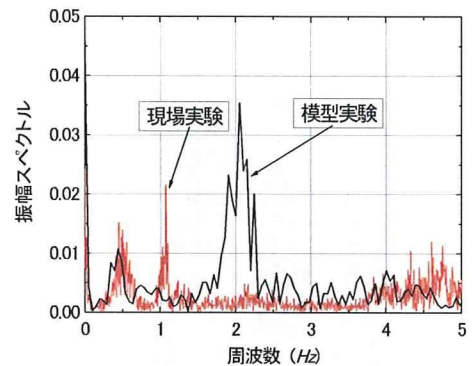


図10 周波数-振幅スペクトル関係

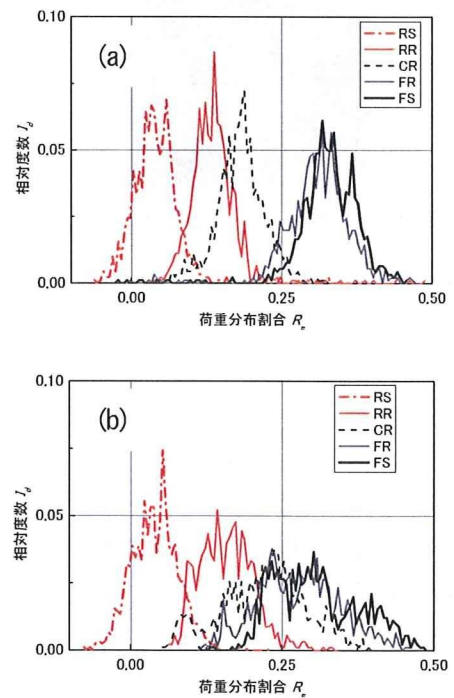


図11 相対度数と荷重分布割合の関係
(a)一様地盤 (b)交互地盤

軸のFSが最大であり、後軸のRSは最小となっている。一方、交互地盤の各車軸を比較すると I_d の分布形状には違いが見られ、RS では I_d が鋭いピークを示しその分布はほぼ山形である。一方、FS では最大 I_d がRS のそれに比べて小さく、 R_e は広い範囲に分布している。 I_d には大きく2つのピークが見られるため、FS には周期的に変化する地盤上を走行したことによる影響が現れている。

7.4 理論値と実験値の比較

図12は車軸荷重の理論値(R_l)と実験値(R_e)の比較を示す。 R_l はJIS基準に基づく式⁴⁾で得られた値から算出したものである。 R_e には平均値と標準偏差を示した。地盤条件の違いにかかわらず R_e の平均値は R_l にほぼ一致している。しかしながら、履帯に最大荷重を与えるFSの値に着目すると、一様地盤では変動係数(=標準偏差/平均値)が0.121であるのに対して、交互地盤では0.235に増加している。従って、支持力が不均一な地盤ではFSの変動が大きくなることが明らかになった。

図中には、FSの標準偏差の3倍の値(3σ)と直接基礎の短期的な安全率1.5の値を破線で示している。それぞれを比較すると、一様地盤では 3σ と安全率1.5の値はほぼ等しいのに対して、交互地盤の 3σ は安全率1.5よりも大きい。このことから、くい打機械の安定設置に必要な設計荷重の安全率は少なくとも1.7~2程度必要であると考えられる。

8. 結論

(1) 実大走行実験では、機体の安定度が17度、地盤は平坦で接地圧力に比べて十分に高い支持力を有する条件において、自走時における機体の動揺を計測した。その結果、応答加速度はリーダー上部で増幅することが明らかになった。平面上に投影した加速度の軌跡はほぼ楕円状に分布し、0.3から0.4Hz付近に振幅スペクトルのピークが見られた。

(2) 1/25のくい打機械模型を作製し、遠心場走行実験を行った結果、自走時におけるくい打機の特徴的な挙動を再現することができた。また、履帯車軸に生じる変動荷重は支持地盤の硬軟に影響を受けることが明らかになり、全ての車軸荷重は正規分布的に変動する

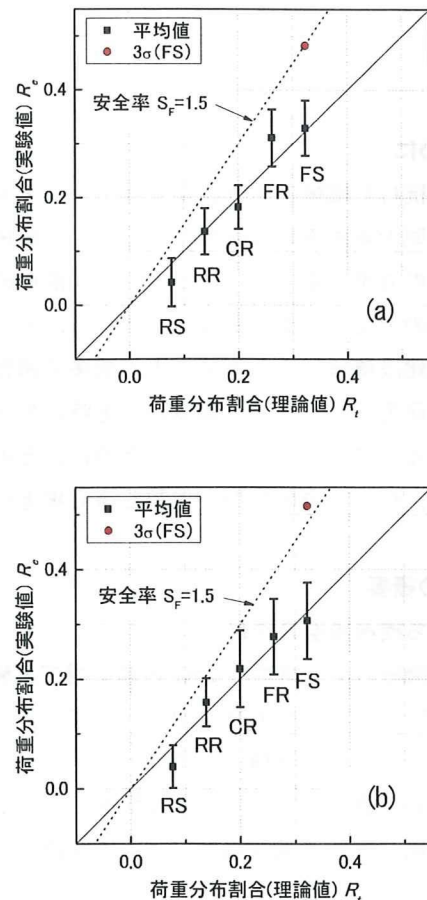


図12 荷重分布割合の理論値と実験値の比較
(a)一様地盤 (b)交互地盤

ことがわかった。ことから、確率的検討に基づいた支持力安全率の導入が必要であると考えられる。

謝辞：実大走行を行うにあたり、羽田国際線エプロンJV 上地章夫氏に多大なるご協力をいただきました。末筆ながら、感謝の意を表します。なお、本研究は平成19年度厚生労働科学研究費補助金の交付を受け実施したものである。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 労働調査会：安衛法便覧 I 平成 19 年度版, p.967.
- 2) 労働調査会：安衛法便覧 II 平成 19 年度版, p.512.
- 3) 日本材料学会：ソイルミキシングウォール設計施工指針, p.78, 2002.
- 4) 日本規格協会：基礎工事機械—安全—第1部:くい打機の要求事項, JISA 8509-1, p.25, 2007.

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

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

自走式杭打ち機械は地盤改良工事や基礎工事に用いられる大型の車両系建設機械である。この機械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、近年この建設機械による転倒災害が数多く報告されている。本研究では、杭打ち機械の自走時に生ずる不安定化のメカニズムを明らかにするために、その第一段階として、杭打ち機械模型を作製し遠心場走行実験を行った。

2. 実験の概要

(1) 杭打ち機械模型の作製

杭打ち機械の小型模型は 25G の遠心場で実験を行うことを想定し、実機の 1/25 のスケールで設計した。その際、モーターや減速機、およびバッテリーの位置は実機の重心位置と等しくなるよう配置した。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いる。これらのアーム部分にひずみゲージを貼り、履帯面に作用する接地圧分布を測定する。また、リーダー上部(Top)と下部(Bottom)、車体本体(Body)に加速度計を設置して、走行中の機体に生じる動揺を計測する。

(2) 地盤のモデル化

走行実験では強度の異なる 2 種類の発泡ポリウレタンフォームを用いて模型地盤を作製した。一つは硬い FP15 であり、もう一つは軟らかい FP30 である。2 種類の発泡ポリウレタンフォームに対して支持力試験を行った結果、極限支持力(q_u)と模型の接地圧(p_{max})を比較すると、FP15 は $q_u \approx p_{max}$ であり、FP30 では $q_u = 0.4p_{max}$ であった。

(3) 実験方法および実験条件

実験に使用した遠心模型実験装置は(独)労働安全衛生総合研究所が保有する NIIS Mark-II Centrifuge である¹⁾。実験の概要を図 1 に示した。実験で用いた土槽は幅 250mm、長さ 800mm、高さ 300mm である。実験

時の風の影響を除くために風防カウルで全体を覆っている。走行時の速度は、ワイヤー式変位計を用いて測定した。模型地盤は図 2 に示す 3 種類である。一つは FP15 を配置し、強度が均一な地盤を模擬した一様地盤である。残る二つは、履帯と等しい長さの FP15 と FP30 を交互に配置し、不均一な地盤を模擬した交互地盤である。走行速度は相似則に従い 30cm/sec とした。

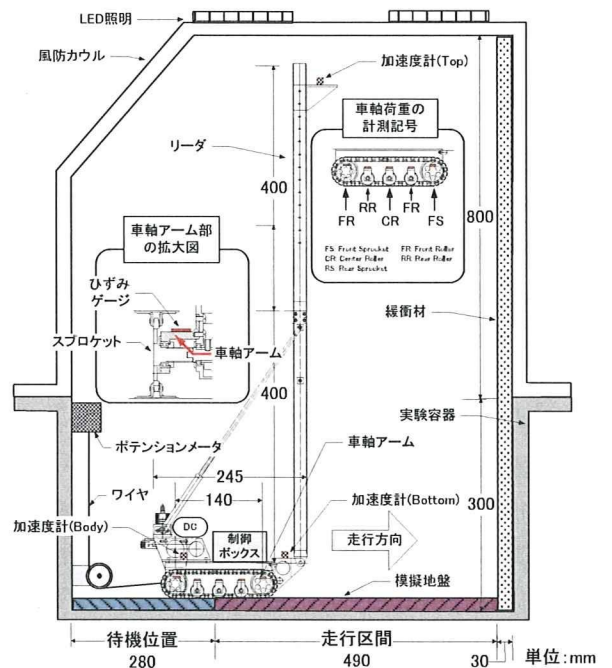


図 1 遠心場走行実験の概要

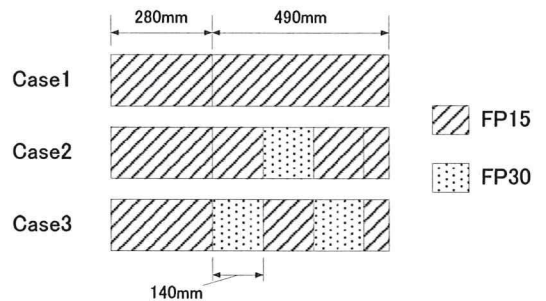


図 2 走行路の条件

3. 実験結果

図 3 は Case1 の応答加速度と車軸荷重を示したもので

キーワード 自走式杭打ち機械, 不安定化, 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

ある。加速度の結果を比較すると、Bottom と Body に比べ、Top の加速度が大きいので、リーダー部分の影響により機体の揺れが増幅していることがわかる。一方、車軸荷重の結果では、FS が一番大きく、RR が一番小さい。このことから、走行時に前方方向に転倒モーメントが作用していることがわかる。

図 4 は Case1~3 の Top の加速度を実物スケールに換算した後、フーリエ変換した結果である。地盤条件の違いによる卓越周波数の顕著な差は見られない。

図 5 は度数分布解析の結果である²⁾。度数分布解析の結果においても地盤条件の違いによる有意な差は見られず、図中に示した標準偏差 σ_d についても同様のことが言える。

図 6 に車軸荷重を度数分布解析した結果を示す。ここで、各車軸に作用する荷重を車体の重量で除した値を荷重分布割合 R と定義した。Case1 では、 q_d/p_{max} は約 1 であるため履帯直下に生じる沈下は小さい。そのため、各車軸の最大相対度数 I_d には大きな違いが見られず、類似した分布形状を示している。一方、Case2, Case3 の結果では、不均一な地盤の影響を受けて I_d が小さくなるとともに、データが広く分布している。このことから、車軸荷重を計測することにより、模型の走行時の不安定性を評価できると考えられる。

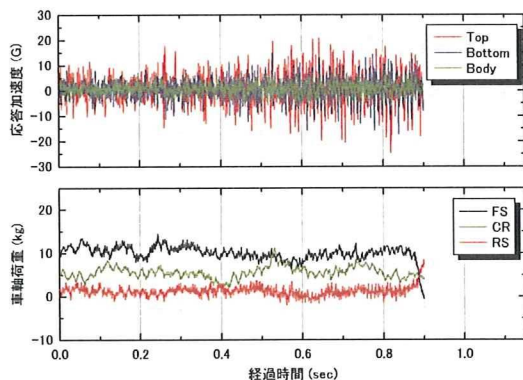


図 3 加速度と車軸荷重

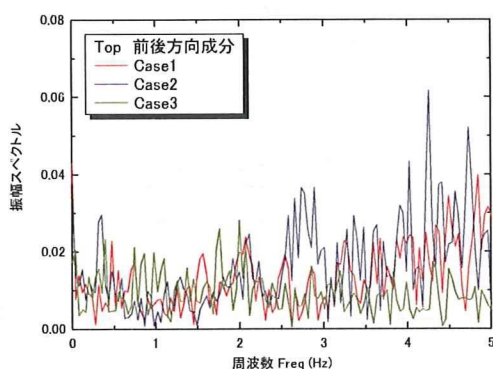


図 4 加速度の周波数解析

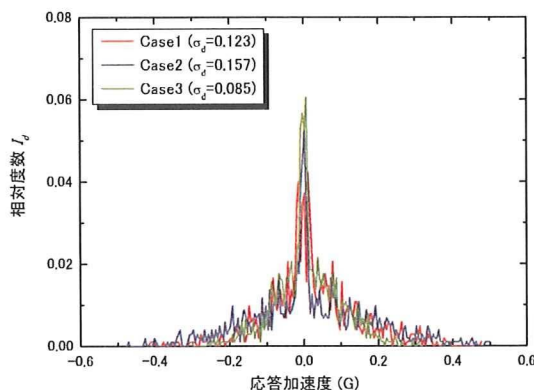


図 5 加速度の度数分布解析

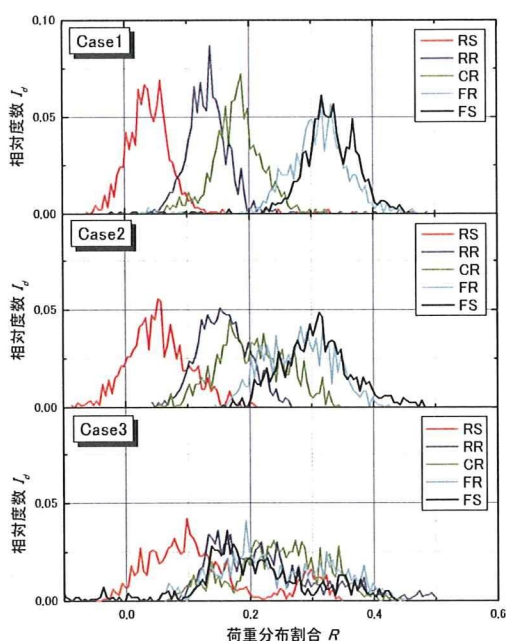


図 6 荷重分布割合の度数分布解析

4. まとめ

杭打ち機械模型を作製し、遠心場走行実験を行った。その結果、応答加速度には、地盤条件の違いによる有意な差は確認できなかった。それに対して、車軸荷重は不均一な地盤ほどデータのばらつきが大きいので、走行時の不安定性を評価できると考えられる。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。

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) 伊藤ら：新遠心模型実験装置(NIIS-Mark II Centrifuge)の開発, NIIS-RR-2005(2006), pp.57-74, 2006. 2) 越昭三：数理統計概論, pp.1-14, 1983.

杭打ち機械における転倒事例の一考察

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

1. はじめに

基礎工事用大型車両系建設機械（以下、杭打ち機械と呼ぶ）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あるが、背景には杭打ち機械がトップヘビーな構造を有しながら自走することと、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。

本報告では過去に発生した転倒事例について概説し、次いで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. 災害の概要

写真1は建築工事現場で発生した転倒事例¹⁾を示す。この杭打ち機械は3軸のアースオーガを備えた地中連続壁（ソイルミキシングウォール、以下SMWと呼ぶ）を施工するためのものであった。履帯の車軸付近に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。

災害当日はSMWの施工に先立って、打設予定位置の溝掘削作業が行われた。しかし、誤って既設の水道管を破損し、溝が湛水した。その復旧には約2時間を要した。復旧後、直ちに地表に敷鉄板を敷設し、掘削溝近傍の施工位置に杭打ち機械を移動させた。この時、溝の深さは施工標準よりも0.2m大きくまた、機械と溝の離隔は基準より0.1m小さかった。その後、敷鉄板に沈下が生じ、機体はゆっくりと傾斜した。



写真1 転倒災害の様子

傾斜の発生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。なお、この現場地盤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り、仮囲い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、地盤の支持力は不均一に分布していた。図1は機械を移動させた箇所と設置地盤に生じた崩壊の概略を示す。

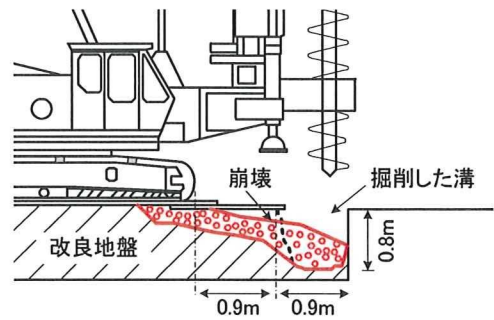


図1 機械の設置地盤に生じた崩壊概要

3. 杭打ち機械の安定条件

(1) 機械の安定度

厚生労働省令車両系建設機械構造規格²⁾の第3条では、杭打ち機械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ことを述べている。

表1に杭打ち機械の諸元を示し、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2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

表1 杭打ち機械の諸元

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 (L)	3.475m
左右の履帯の中心間隔 (S)	2.660m

表2 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	$\theta_f = 18.4$ 度 > 5度	$\theta_{ss} = 11.9$ 度 > 5度

キーワード 杭打ち機械, 転倒事故, 設置地盤, 災害事例

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

11.9 度であった。従って、本杭打ち機械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。

(2) 履帯に作用する接地圧

履帯面に働く接地圧力は支持地盤が剛体であることを仮定して求められる³⁾。この接地圧力の分布は重心位置と上部構造体の旋回角度(θ)によって変化する⁴⁾。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。本事例における接地圧力の理論分布は図 2 のような三角形である。この分布における最大接地圧力(P_{max} , 図 2 の P_{RF})は、 $\theta=0$ 度の時に 146.2kPa, $\theta=45$ 度の時に 165.2kPa である。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。

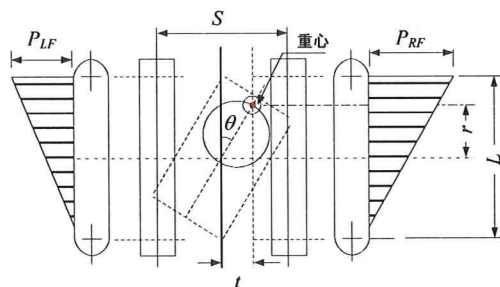


図 2 履帯に作用する接地圧 ($r>L/6$ の場合)

4. 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⁵⁾、 $q_d < P_{max}$ 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 程度までが処理された。処理深さが計画よりも浅くなった原因はバックホウで掘削した粘土がブロック化するために、セメントと均一な混合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(A 地点,B 地点)と、そこから約 8m 離れた地点(C 地点)と 10m 離れた地点(D 地点)の計 4 地点である。

図 3 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⁶⁾。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 A 地点および B 地点の q_u は、C 地点およ

び D 地点のそれに比べ小さく、機械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。

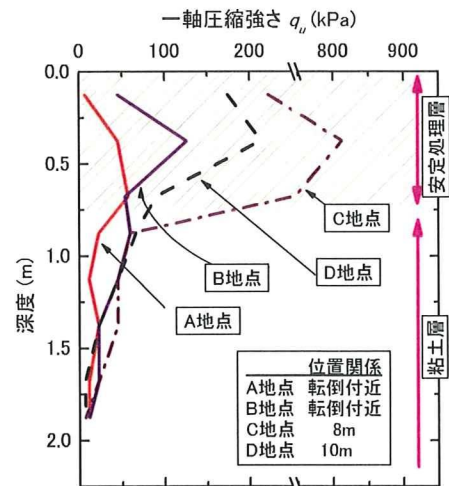


図 3 スウェーデン式サウンディング試験の結果より算出した一軸圧縮強さ (q_u) 分布

5. まとめ

杭打ち機械の転倒事例を調査した。機体の緒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。

杭打ち機械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検討項目と考えられ、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)玉手 聡：基礎工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. 2)労働調査会：安衛法便覧 II 平成 19 年度版，pp.512-516, 2008. 3) (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. 4) (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. 5) (社)地盤工学会：地盤工学数式入門，pp.183-204, 2001. 6) (社)地盤工学会：地盤調査法，pp.213-220, 1999.