

5.3.1 安定度の影響

図 5-3-2 は、一様地盤での付加質量を搭載した結果を示したものである。図に示したデータは、履帯全体が走行区間に入っている走行開始後 150mm 以降のデータである。走行速度は一定速度で推移しており、その速度は約 30cm/sec である。図に示した加速度は進行方向のものである。一様地盤では Top, Bottom, Body の加速度はほぼ等しい。それに対して、図 5-3-3 に示した付加質量のない場合は、Bottom と Body に比べ、リーダートップの加速度が大きい。このことから、安定度が高いにもかかわらず、大きく揺れることが明らかになった。また、車軸の重量をみると、FS が一番大きく、RS が一番小さい。これは前方向に転倒モーメントが働いたためである。

図 5-3-4 および図 5-3-5 は交互地盤の結果を示したものである。加速度を比較すると、一様地盤と同様の傾向が確認できる。一方、車軸荷重を比較すると、どちらの結果も一様地盤に比べ、データの増減が大きいことがわかる。

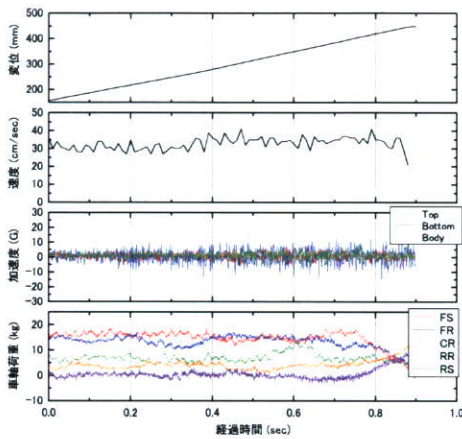


図 5-3-2 一様地盤・付加質量あり

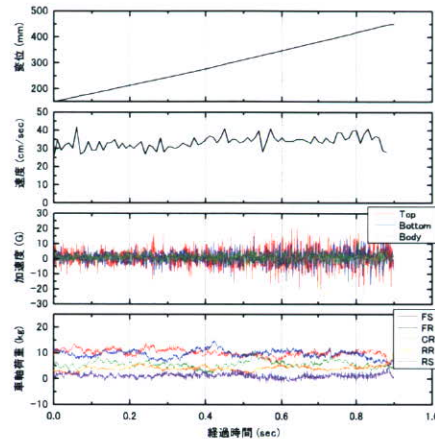


図 5-3-3 一様地盤・付加質量なし

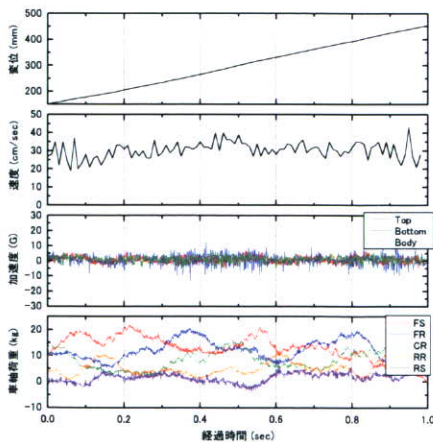


図 5-3-4 交互地盤・付加質量あり

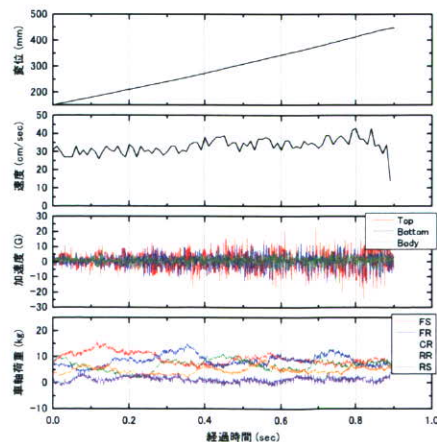


図 5-3-5 交互地盤・付加質量なし

### 5.3.2 加速度の周波数解析

図 5-3-6 から図 5-3-9 は、実大スケールに換算した後にフーリエ変換した結果を示す。一様地盤の結果を比較すると、図 5-3-6 に示す付加質量がある場合、3箇所所で測定した加速度の周期に有意な差はない。それに対して、図 5-3-7 に示す付加質量がない場合は、リーダーTopの加速度が大きく、特に0.5Hz付近に卓越周期が認められる。一方、交互地盤の結果では、図 5-3-8 の付加質量がある場合では、0.25Hz付近に卓越周期がみられる。図 5-3-9 に示す付加質量がない場合では、0~2Hzで卓越周波数が数多く存在しており、機体の動揺の影響が現れている。

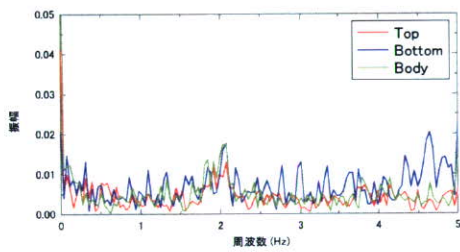


図 5-3-6 一様地盤・付加質量あり

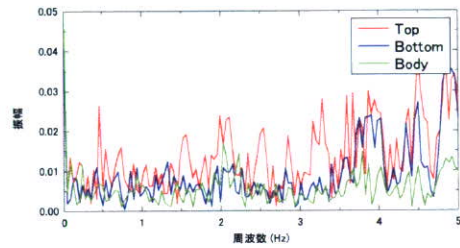


図 5-3-7 一様地盤・付加質量なし

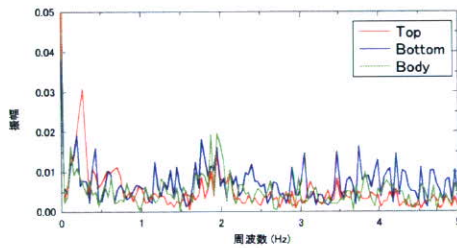


図 5-3-8 交互地盤・付加質量あり

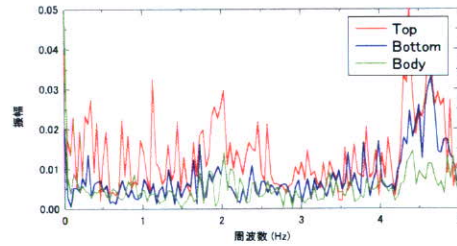


図 5-3-9 交互地盤・付加質量なし

5.3.2 測定値の度数分布解析

(1) 加速度

図 5-3-10 から図 5-3-13 は相対度数  $I_d$  と応答加速度の関係を示したものである。付加質量の有無による差がみられ、付加質量がある場合は  $\pm 0.2G$  の範囲に分布しているのに対して、付加質量がない場合は  $\pm 0.4G$  の範囲に分布している。

地盤条件の違いが相対度数に与える影響として、ピーク値で比較すると、付加質量の有無にかかわらず交互地盤のピーク値はやや低い。これは、模型の動揺の影響によるものと考えられる。しかしながら、加速度の度数分布解析の結果には、地盤条件の違いによる顕著な差はないことが明らかになった。

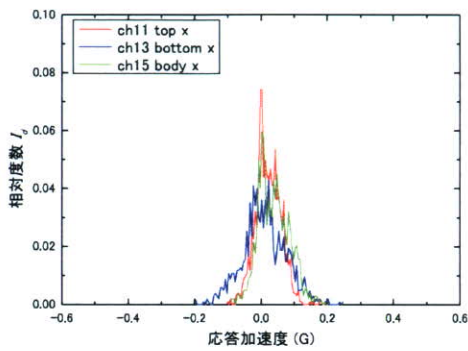


図 5-3-10 一様地盤・付加質量あり

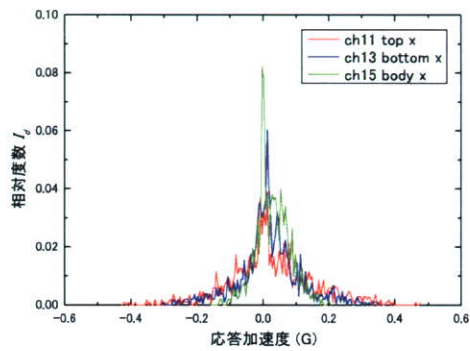


図 5-3-11 一様地盤・付加質量なし

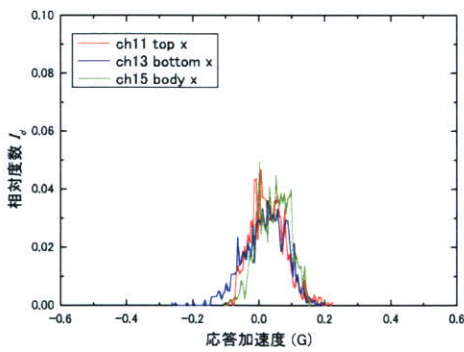


図 5-3-12 交互地盤・付加質量あり

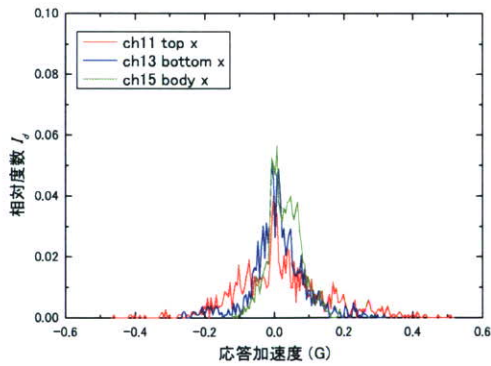


図 5-3-13 交互地盤・付加質量なし

(2) 車軸荷重

図 5-3-14 から図 5-3-17 は荷重分布割合  $R$  を算出し、それぞれを度数分布解析した図である。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。それに対して、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。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。

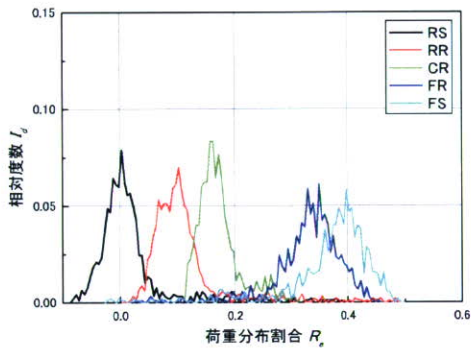


図 5-3-14 一様地盤・付加質量あり

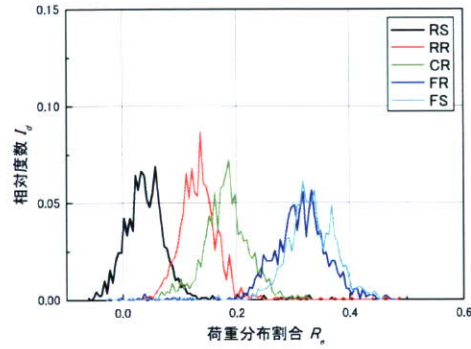


図 5-3-15 一様地盤・付加質量なし

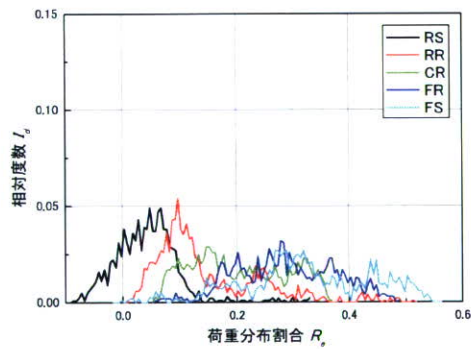


図 5-3-16 交互地盤・付加質量あり

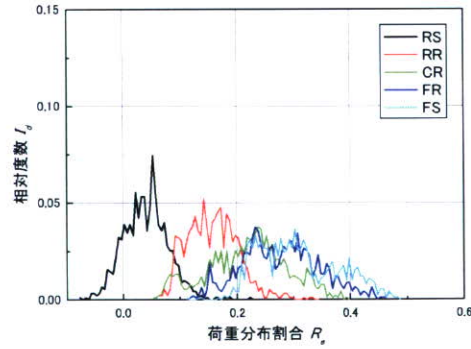


図 5-3-17 交互地盤・付加質量なし



5.3.3 理論値との比較

日本工業規格(JIS)に定められている杭打ち機械の履帯に作用する接地圧分布<sup>4)</sup>は図5-3-18になる。それぞれの $\sigma_1$ と $\sigma_2$ は式(5-3-6)～式(5-3-8)で求めることができる。図5-3-18の①～⑤は、FS～RSに相当するものであり、この面積比が荷重分布割合の理論値になる。

図5-3-19から図5-3-22は車軸荷重の理論値( $R_l$ )と実験値( $R_e$ )の比較を示す。 $R_e$ には平均値と標準偏差を示した。地盤条件および付加質量の有無にかかわらず $R_e$ の平均値は $R_l$ にほぼ一致している。しかしながら、エラーバーの大きさ比較すると、一様地盤と交互地盤では大きく異なり、交互地盤のエラーバーは全体的に大きく、走行中に機体が不安定化していることがわかる。

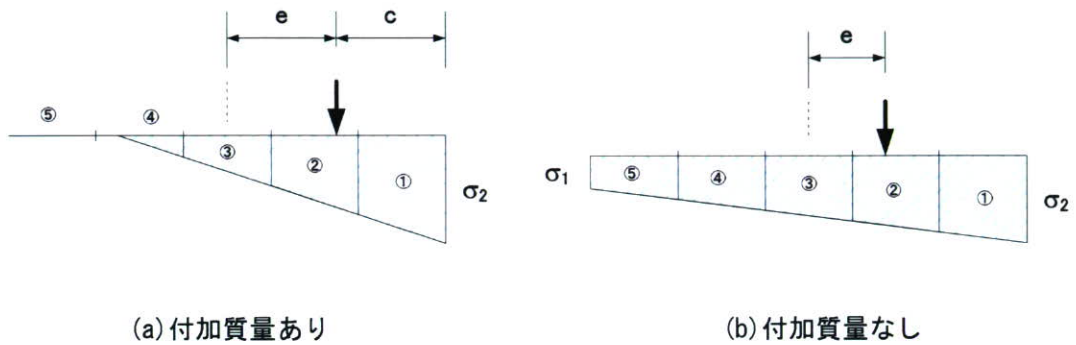


図5-3-18 接地圧分布

付加質量あり

$$\sigma_2 = \frac{2P}{3cb} \quad (5-3-6)$$

付加質量なし

$$\sigma_1 = \frac{P}{bd} \left( 1 - \frac{6e}{d} \right) \quad (5-3-7)$$

$$\sigma_2 = \frac{P}{bd} \left( 1 + \frac{6e}{d} \right) \quad (5-3-8)$$

ここで、 $P$ は機体重量。 $b$ は履帯の幅。 $d$ は履帯の長さ。 $e$ は履帯中心からの荷重の偏心量である。

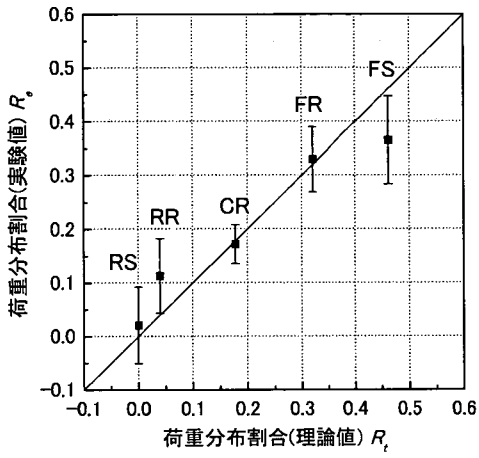


図 5-3-19 一様地盤・付加質量あり

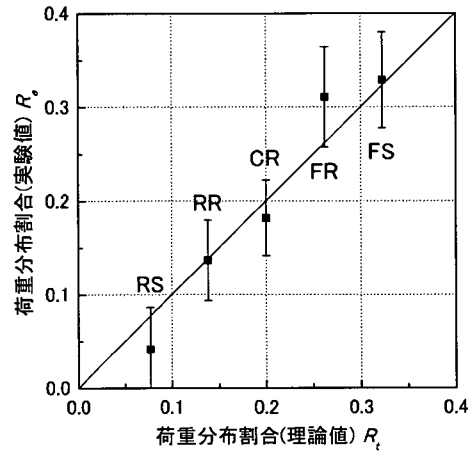


図 5-3-20 一様地盤・付加質量なし

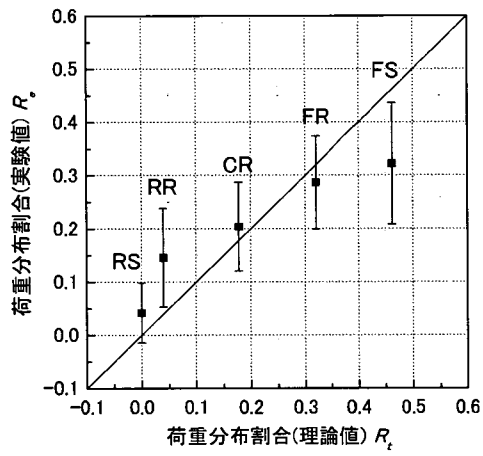


図 5-3-21 交互地盤・付加質量あり

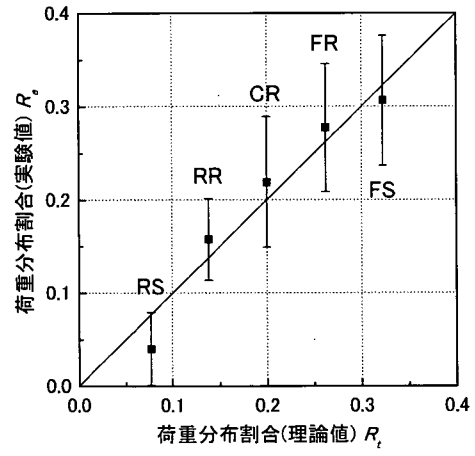


図 5-3-22 交互地盤・付加質量なし

5.3.4 実大走行実験と模型実験の動揺の比較

図5-3-23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。

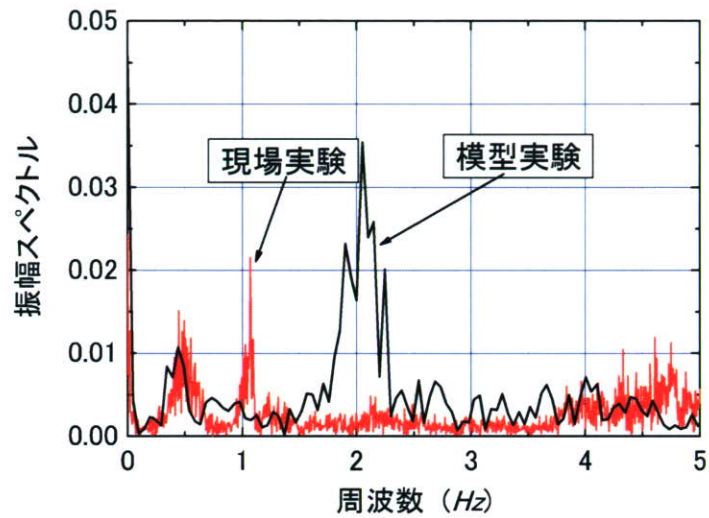


図5-3-23 現場実験と模型実験の動揺の比較

## 5.4 まとめ

杭打ち機械模型の遠心場走行実験を行うために、模型地盤に採用した2種類のウレタンフォームに対して支持力試験を行った。遠心場走行実験は一様地盤と交互地盤の条件で行った。本節では杭打ち機械模型を用いた遠心場走行実験により明らかになった事項について述べる。

### 5.4.1 ウレタンフォームの支持力試験

遠心場走行実験では、強度の異なる2種類のウレタンフォームを用いた。それぞれに対して支持力試験を行った。ウレタンフォームの極限支持力  $q_u$  と模型の接地圧  $p_{max}$  を比較すると、硬いFP15では  $q_u \cong p_{max}$  であり、軟らかいFP30は  $q_u \cong 0.4p_{max}$  であった。

### 5.4.2 遠心場走行実験

#### (1) 走行路の条件について

走行実験の地盤条件は、FP15を配置し、強度が均一な地盤を模擬した「一様地盤」と、FP15とFP30を履帯長さの1/2毎に交互に配置し、不均一な地盤を模擬した「交互地盤」で行った。また、機械の安定度は9度と19度の2種類で行った。

#### (2) 応答加速度

リーダーの上部と下部、本体の3箇所に加速度計を設置して、走行実験時の加速度応答を調べた。付加質量の有無と2種類の地盤条件で試験を実施した結果、周波数解析では実験条件の違いによる明確な差は確認できなかった。また、計測した加速度の度数分布解析の結果においても、顕著な差は見られなかった。

#### (3) 車軸荷重

車軸荷重から荷重分布割合を求めて度数分布解析を行った結果、一様地盤と交互地盤で明確な差が認められた。そのため、車軸荷重を測定することで、模型の動揺を評価できると考えられる。

#### (4) 実大走行実験と遠心場走行実験の比較

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を比較すると、共通して0.5Hz付近にピークが見られた。このことから、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と考えられる。



## 5.5 参考文献

- 1) (社)地盤工学会：地盤調査法，pp.345-368. 1995.
- 2) 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，NIIS-RR-2005，pp.57-74，2006.
- 3) 越昭三：数理統計概論，pp.1-14，1983.
- 4) (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.

## 第6章 まとめ

### 6.1 概説

本研究は基礎工事中大型建設機械の転倒防止を目的に、安定設置に必要な支持地盤の要件を検討するものであり、平成19年度より3カ年計画で開始した。本研究の主な構成は、1)災害調査、2)自走時における杭打ち機械の挙動解析、3)履帯基礎の支持力解析であり、本年度(平成19年度)は1)と2)について実施した。本章では、本報告書のまとめとして、各章で得られた知見を要約する。

### 6.2 第1章の要約

第1章は序論であり、本研究の背景、目的ならびに構成が述べられている。主な内容は、次の通りである。

- 1) 労働安全衛生規則では施工現場における杭打ち機械の設置に際して沈下防止の措置が義務づけられている。しかし、そのため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、その判断は事業者に委ねられている。
- 2) 車両系建設機械構造規格では杭打ち機械の安定度(限界傾斜角)を定めている。しかし、設置地盤は水平堅固が仮定されており、沈下により生ずる機体傾斜が厳密には考慮されていない。
- 3) 都市開発における地盤改良工事や大型建築における基礎工事は不可欠である。その結果、杭打ち機械の使用は近年増加しており、転倒防止措置の検討は急務な問題である。
- 4) 本研究で着目する機体と地盤の不安定要因を示し、その解明に必要な研究事項を示した。杭打ち機械に関する地盤工学的な問題点と本研究の構成が述べられている。

### 6.3 第2章の要約

第2章では、過去の災害事例に基づく調査結果と転倒原因の考察が述べられている。発生時の作業状況及び施工地盤の支持力条件に基づく災害原因の解明を目的に災害事例を分析した。主な内容は次の通りである。

- 1) 施工現場は深さ1m以深がN値3以下の軟弱な粘土層が分布しており、地盤工学的な問題を有していた。これに加えて、地表から深さ0.75mまでの浅層をセメント安定処理したがこの深さは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。この境界付近で機械は転倒しており施工上の問題も明らかになった。

- 2) 施工中に発生した水道管破損のトラブルによって溝部が湛水し、溝壁部を軟弱化させた可能性が明らかになった。さらにこの溝壁部に対する機械の寄りつきが計画よりも近く、沈下を生じやすい状況が明らかになり、作業方法の問題も明らかになった。
- 3) 転倒は施工現場に存在した潜在的なリスクに加えて施工中のトラブルによるリスクの増加と作業上のミスが重なったことによって発生したことが述べられている。

#### 6.4 第3章の要約

第3章では、東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業エリアにおいて実施した杭打ち機械の実大実験について述べられている。その主な内容は以下の通りである。

- 1) 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。
- 2) 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。
- 3) 応答加速度の発生頻度には正規的な分布が確認された。直進時における加速度の進行方向成分( $A_x$ )と左右方向( $A_y$ )の分布は原点に対してほぼ対称である。 $A_x$ と $A_y$ の標準偏差(SD)はリーダー上部のAcc1が最も大きく、その値は約0.03Gであることがわかった。
- 4) 定常的な直進走行時の動揺には速度増加に伴う加速度の増加が見られるものの、顕著な差は見られなかった。しかしながら、進路方向の修正時に与えられる履帯の制動は機体に大きな動揺を発生させることが明らかになった。
- 5) カーブ走行に伴って機体に生じる動揺は履帯与える頻繁な制動に伴うものである。直進走行時とカーブ走行時におけるそれぞれの加速度の最大値は約0.1Gで同レベルであるが、頻度分布には大きな差が発生した。カーブ走行における $A_x$ と $A_y$ のSDは直進時のそれに比べて約1.7倍に増加することが明らかになった。

#### 6.5 第4章の要約

第4章では、杭打ち機械模型を作製し、模型の動的な応答特性を調べた。主な内容は以下の通りである。

- 1) 杭打ち機模型を1/25スケールで作製した。模型を設計する際には、重心の位置が実機と等しくなるよう、モーターや減速機を配置した。重心の位置と安定度は付加質量の位置を変えることで、自由に変えることが可能である。
- 2) 杭打ち機模型の車軸アーム部は片持ち梁構造をしており、アーム部分にひずみゲージを貼り付けて、車軸に作用する荷重を測定できるようにした。荷重と応答ひずみの関係を調べた結果、30kgの荷重を与えても直線関係が確認できたため、25g場の遠心場でも車軸荷重の計測が可能であると考えられる。
- 3) 作製した模型の動的振動特性を調べるために、模型のリーダーの上部(Top)と下部

と Body の加速度はほぼ等しいのに対して、Top の加速度はそれらに比べ大きな値であった。このことから、模型は実機と動揺の振動特性を持っていることが明らかになった。また、加振方向が振動特性に与える影響を調べた。その結果、相対角度  $0^\circ$  に比べ、相対角度  $90^\circ$  の応答加速度が大きく、構造的に振動特性の異方性が認められた。

## 6.6 第5章の要約

第5章では、作製した杭打ち機械模型を用いて遠心場走行実験を行った。主な内容は以下の通りである。

- 1) 遠心場走行実験では、設置地盤を強度の異なる2種類のウレタンフォームにより模擬した。走行実験に先立って両ウレタンフォームに対する支持力試験を行った。ウレタンフォーム地盤の極限支持力  $q_u$  と模型の接地圧  $p_{max}$  を比較すると、硬い FP15 では  $q_u \doteq p_{max}$  であり、軟らかい FP30 は  $q_u \doteq 0.4p_{max}$  であった。
- 2) 走行実験の地盤条件は、FP15 を配置し、強度が均一な地盤を模擬した「一様地盤」と、FP15 と FP30 を履帯長さの  $1/2$  毎に交互に配置し、不均一な地盤を模擬した「交互地盤」で行った。また、機械の安定度は9度と19度の2種類で行った。
- 3) 走行時の応答加速度を度数分布解析した結果、一様地盤と交互地盤では大きな差はない。それに対して、車軸荷重から荷重分布割合を求めて度数分布解析を行った結果、一様地盤と交互地盤で明確な差が認められた。そのため、車軸荷重を測定することで、模型の動揺を評価できる可能性がある。
- 4) 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を比較すると、共通して  $0.5\text{Hz}$  付近にピークが見られた。このことから、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と考えられる。

## 6.7 健康危険情報

健康に危険を及ぼすような情報はなし。

## 6.8 研究成果による特許権等の知的財産権の出願・登録状況

特になし。

## 第7章 謝 辞

本報告は厚生労働科学研究費補助金(労働安全衛生推進事業)により実施した研究課題「基礎工用大型建設機械の転倒防止に関する研究」について、平成19年度に得られた成果をまとめたものである。本研究の実施するにあたって、多くの方々より頂いたご指導とご協力に対して深く感謝を申し上げます。

とりわけ、東京国際空港国際線地区エプロン等整備等事業大成・鹿島・五洋・東亜・鹿島道路・大成ロテック異工種建設工事共同企業体(羽田空港国際線エプロンJV)の上地章夫統括所長、早瀬宏文課長、土方 遍A工区長及び天野喜勝課長代理には、現場実大実験の計画、調整および実施の全般において大変お世話になりました。頂きました多大なるご協力で心より感謝申し上げます。

同じく、(株)不動テトラの大林淳部長、谷口利久課長、及び鈴木末男工区長には杭打ち機械の諸元や特性についてご指導を頂くとともに、現場では機械オペレータと誘導者に対する指揮監督で大変お世話になりました。ご協力で深く感謝致しております。

また、国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所の竹田康雄室長及び加藤浩司係長には大型プロジェクトの実施で大変ご多忙な中で本実験にご理解を下さり、ご支援を頂きました。ご協力で心よりお礼申し上げます。また浦本康二氏は当研究所にて卒業研究を行ったOBとしての視点から様々な助言を下さいました。心よりお礼申し上げます。

さらに、東京労働局の成毛 節安全課長には、杭打ち機械が使用されている管内の事業場をご紹介頂きました。おかげさまで、杭打ち機械の使用状況や作業方法について貴重な情報を得ることができました。また羽田空港国際線エプロンJVのご厚意による現場実験も行うことができました。ご協力で心より感謝申し上げます。

さらに、厚生労働省労働基準局安全衛生部建設業安全対策室の芳司俊郎室長補佐には労働安全衛生規則と車両系建設機械構造規格に関する議論を通じて、研究を進める上で有益なご助言を頂きました。また同室の丹羽啓達前技術審査官ならびに大阪労働局の井上貴志前安全課長には転倒災害について事例を紹介して頂きました。ご協力で感謝致します。

さらに、武蔵工業大学工学部長の片田敏行教授には本研究の方針に関してご助言を頂きました。深く感謝致しております。また、本研究を卒業研究として取り組まれ、成果の発展に多大なご協力を下さいました武蔵工業大学学生の伊藤達彦君(平成19年度卒研生)に深くお礼を申し上げます。

さらに、中央労働災害防止協会の小玉 剛企画広報部長はじめ井上 仁企画広報部次長、木下克巳企画課長、森永 悠様、相羽洋子様には労働安全衛生総合研究推進事業における若手研究者の育成活用事業を実施するにあたり、その管理と諸手続においてご協力を頂きました。深くお礼申し上げます。

本研究は今後2年間の実施が計画されており、杭打ち機械の転倒事故防止に貢献できるよう研究に取り組んで参る所存であります。引き続きご指導、ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

2008(平成20)年3月



## 第8章 研究成果の刊行に関する一覧表

本年(平成19年)度に発表した研究成果を表8-1に示す。

表8-1 平成19年度に発表した研究成果

発表者氏名	論文タイトル	発表誌	巻号	ページ	出版年
玉手 聡, 堀 智仁, 伊藤和也, 末政直晃他	杭打ち機械の自走時における動揺計測実験	地盤工学研究発表会	第43回	CD-ROM	2008
堀 智仁, 玉手聡, 末政直晃, 伊藤達彦	杭打ち機械模型の作製と遠心場走行実験	地盤工学研究発表会	第43回	CD-ROM	2008
伊藤達彦, 末政直晃, 片田敏行, 堀 智仁, 玉手 聡	杭打ち機械の小型模型を用いた自走実験の計画	地盤工学会関東支部研究発表会(Geo-Kanto 2007)発表講演集	第4回	pp.375-376.	2007
堀 智仁, 玉手 聡, 伊藤達彦	支持力試験における載荷応力と分散計測	地盤工学会関東支部研究発表会(Geo-Kanto 2007)発表講演集	第4回	pp.360-362.	2007

【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 末政直見, 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。

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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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。

表1 機種と安定度の関係

機種	杭打ち機	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

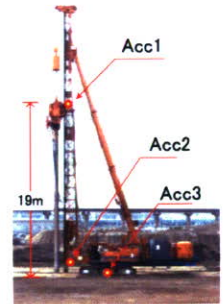


写真2 加速度計の設置位置

## 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。

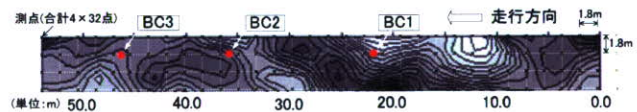


図1 水準測量の結果

(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, 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( $K_1$ )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.Itoh(ditto), N.Suemasa (Musashi Institute of Technology), T.Katada(ditto), T.Itoh(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)



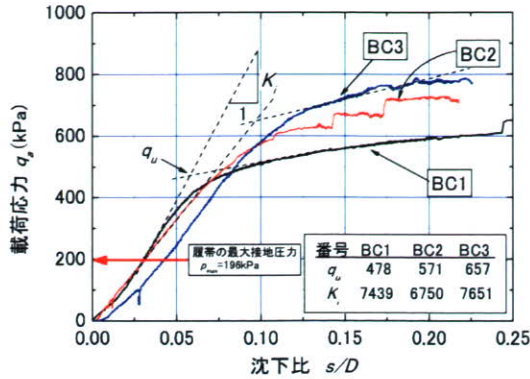


図2 載荷応力 ( $q_u$ )-沈下比 ( $s/D$ ) 関係

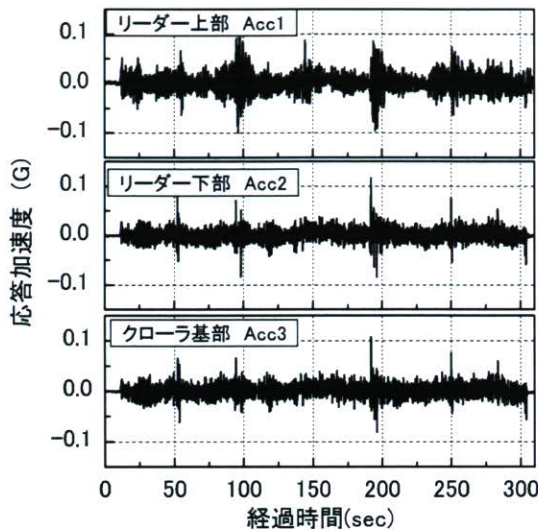


図3 応答加速度の進行方向成分 ( $A_x$ ) と経過時間の関係

(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は履帯支持枠の中央に設置した加速度計である。応答加速度は各個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。

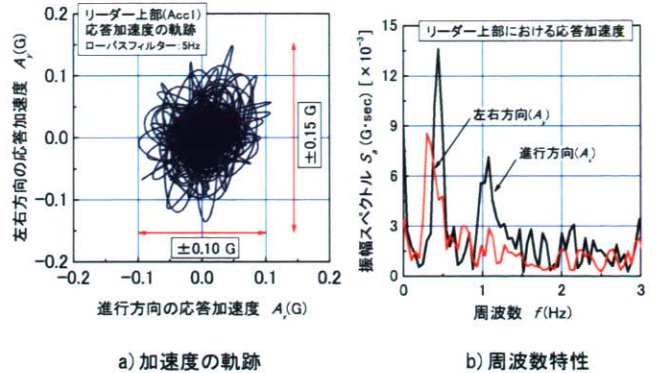


図4 リーダー上部における応答加速度の方向成分比較

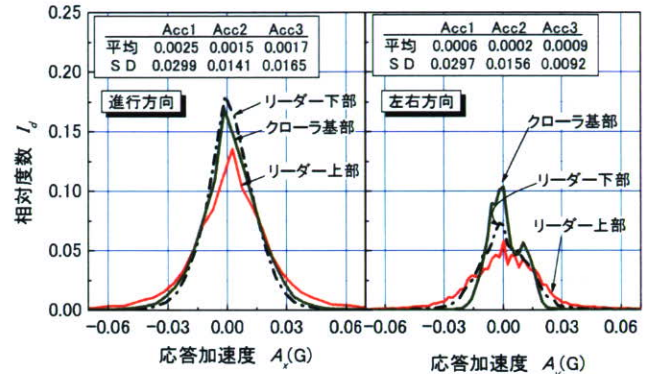


図5 応答加速度の頻度分布の比較

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 $I_d$ 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(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、もう一つは柔らかい 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<sup>1)</sup>と遠心場走行実験においてリー

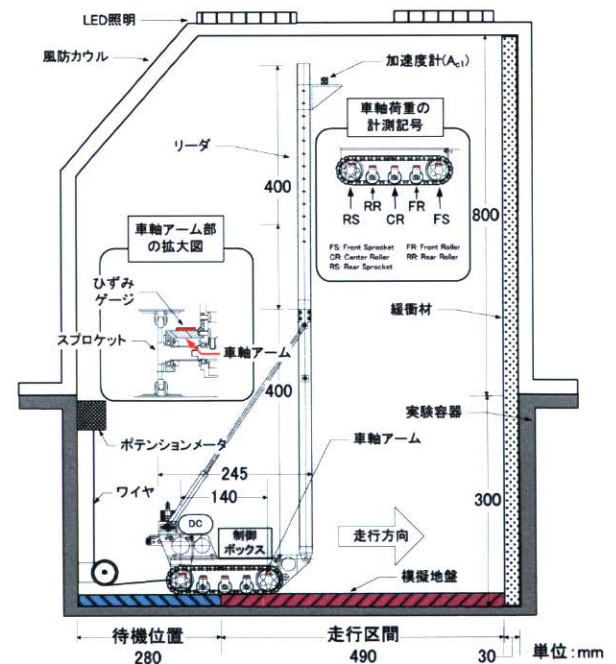


図 1 遠心模型実験の概要図

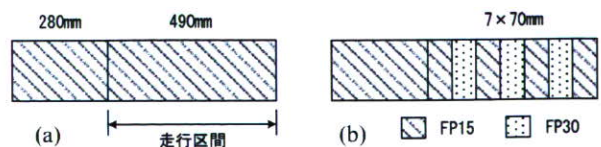


図 2 地盤の種類 (a)一様地盤 (b)凹凸地盤



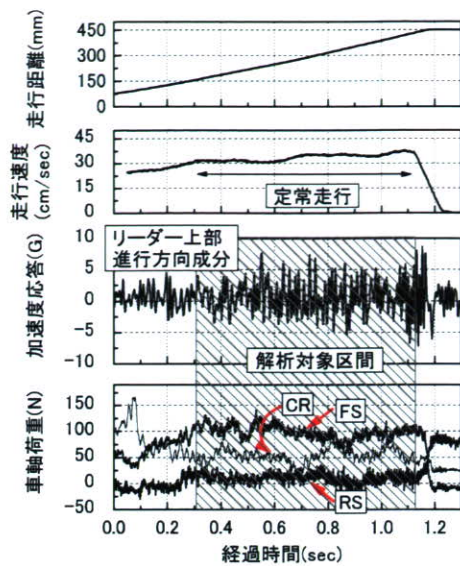


図3 実験結果（一様地盤）

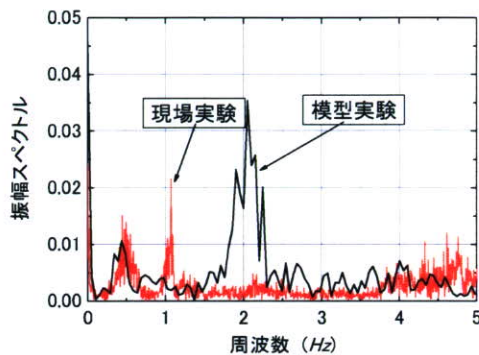


図4 周波数-振動スペクトル関係

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、 $q_w/p_{max}$  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

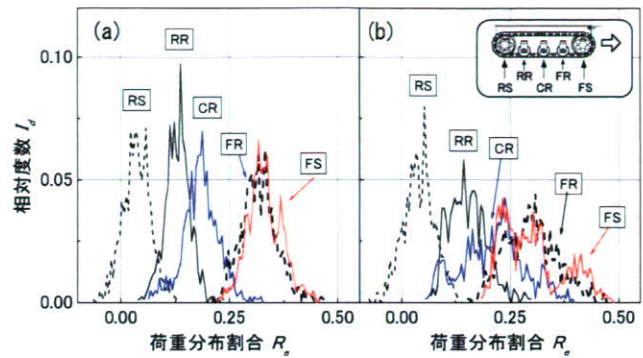


図5 相対度数と荷重分布割合の関係  
(a)一様地盤 (b)凹凸地盤

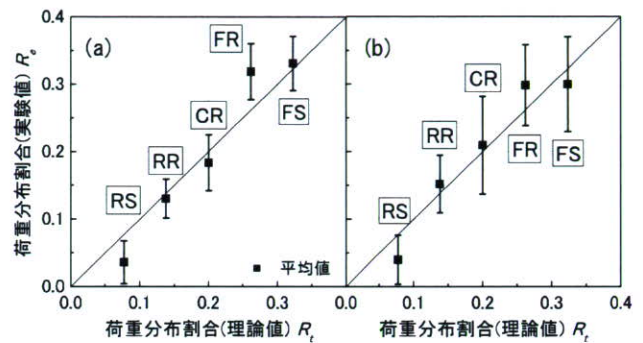


図6 荷重分布割合の理論値と実験値の比較  
(a)一様地盤 (b)凹凸地盤

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<sup>2)</sup>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。



# 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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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

## 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)