

## 32. 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<sup>1)</sup>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<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>。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。

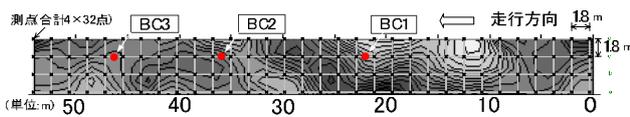


図1 水準測量の結果

#### 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（ $q_u$ ）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

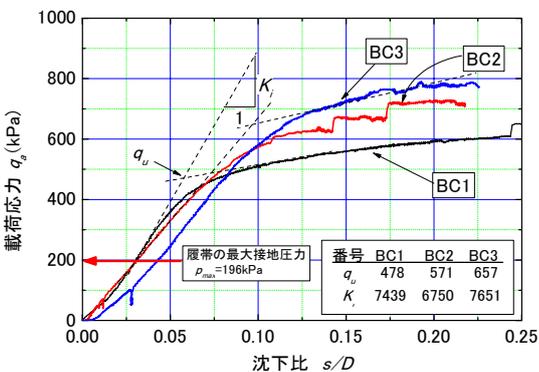


図2 載荷応力（ $q_u$ ）-沈下比（ $s/D$ ）関係

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  $q_u$  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。

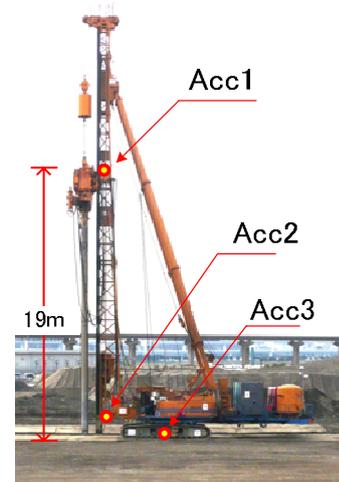


写真2 加速度計の設置位置

### 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。

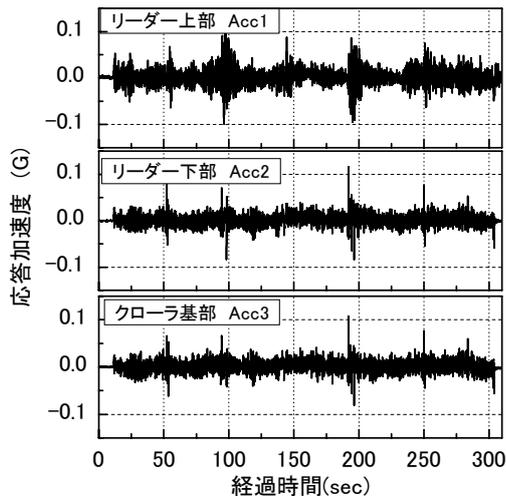


図 3 応答加速度の進行方向成分 ( $A_y$ ) と経過時間の関係

#### 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

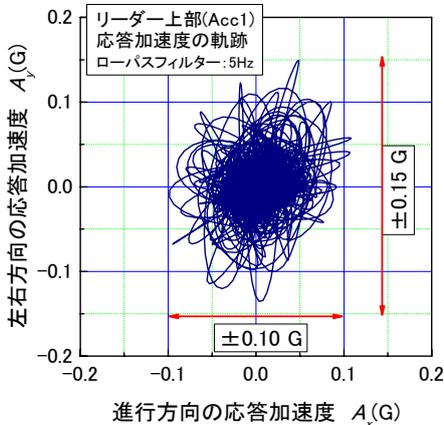


図 4 加速度の軌跡

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。

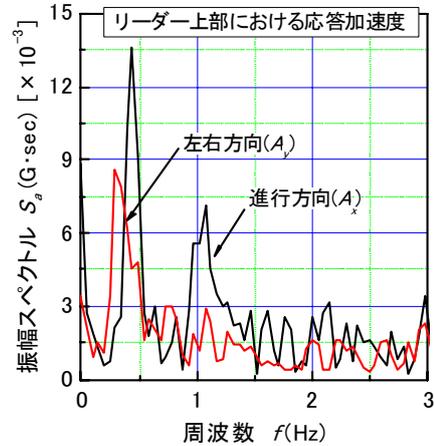


図 5 周波数特性

#### 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。

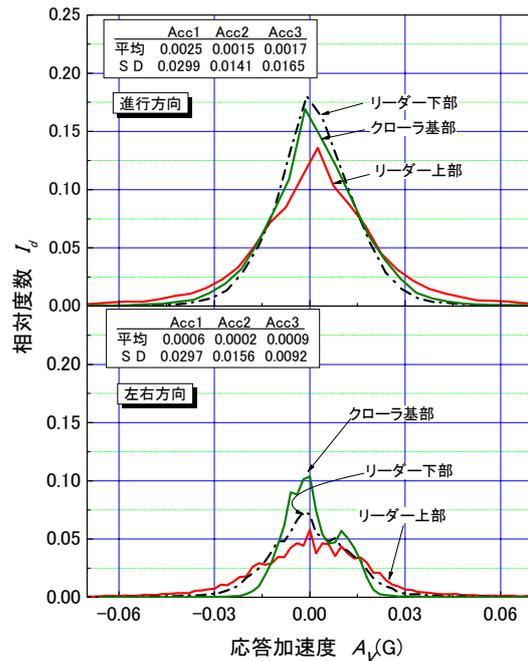


図 6 応答加速度の度数分布の比較

## 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。

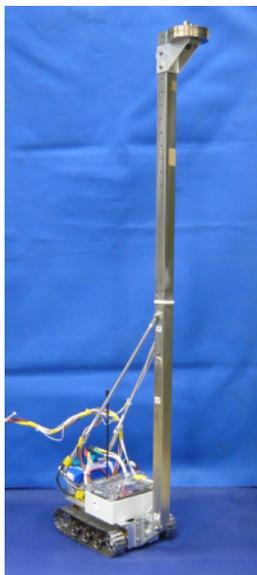


写真3 作製したくい打機械模型

## 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。

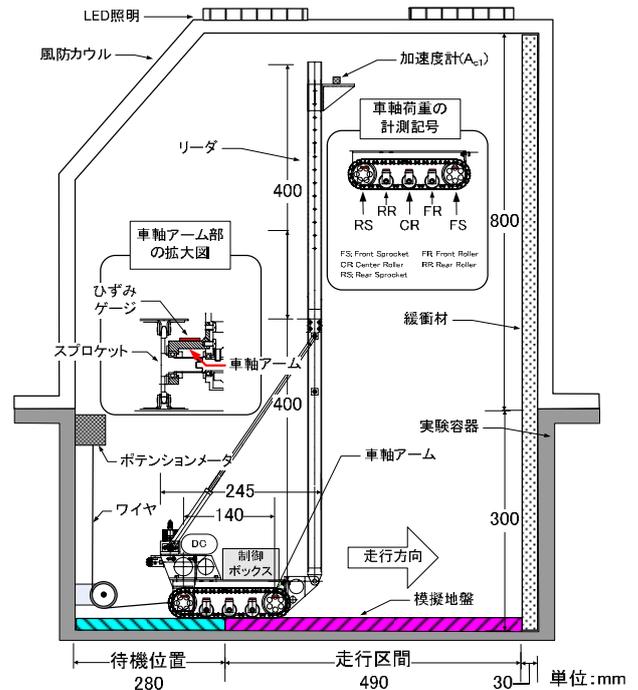
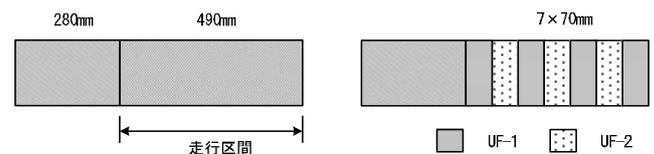


図7 遠心模型実験の概要図



(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。

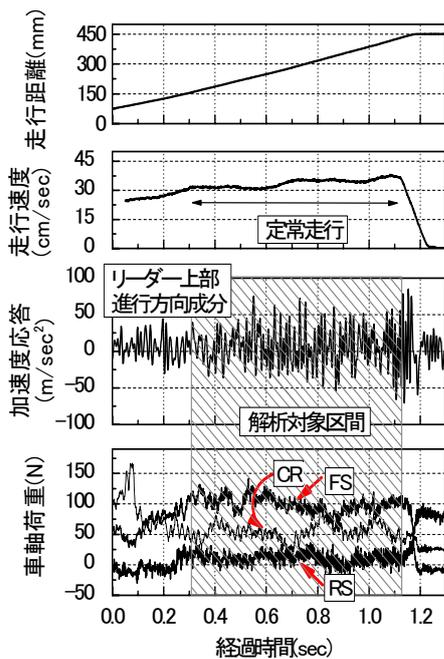


図9 実験結果 (一様地盤)

### 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

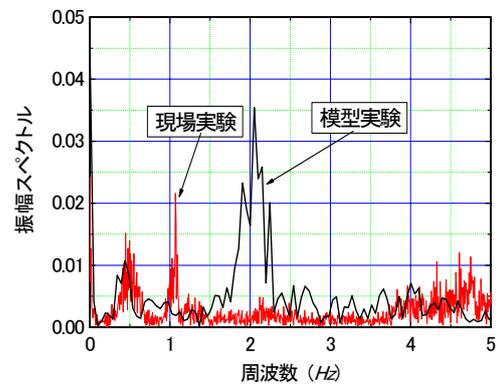


図10 周波数-振幅スペクトル関係

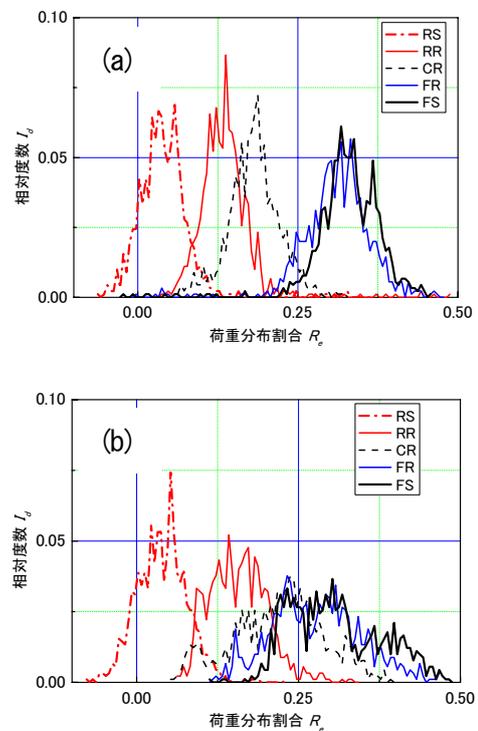


図11 相対度数と荷重分布割合の関係  
(a) 一様地盤 (b) 交互地盤

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( $R_t$ )と実験値( $R_e$ )の比較を示す。 $R_t$ はJIS基準に基づく式<sup>4)</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、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( $3\sigma$ )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  $3\sigma$  と安全率1.5の値はほぼ等しいのに対して、交互地盤の  $3\sigma$  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

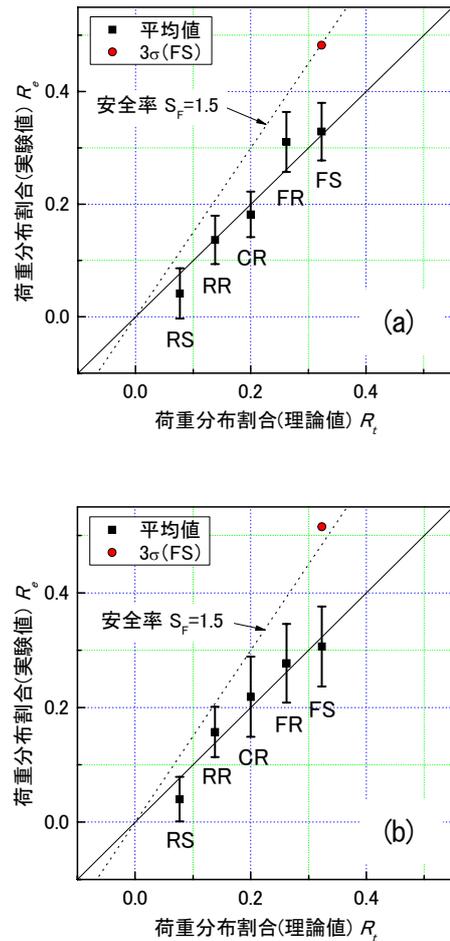


図12 荷重分布割合の理論値と実験値の比較  
(a) 一様地盤 (b) 交互地盤

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, JIS A 8509-1, p.25, 2007.