

図-6 応答加速度と経過時間の関係 (実大換算)

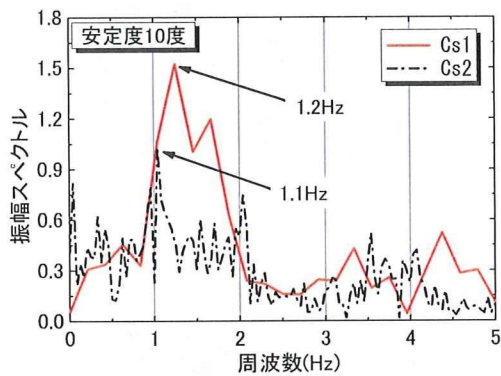


図-7 周波数と振幅スペクトル

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

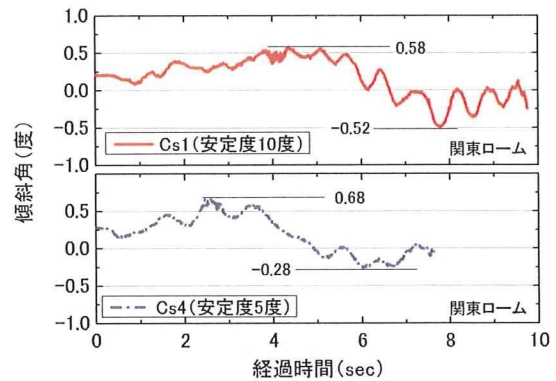


図-8 経過時間と傾斜角の関係

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 0~0.1Hz 付近に見られる振幅スペクトルの増加には、先に述べた模型の傾斜による影響が見られる。

5.3 高速度カメラによる挙動解析

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

表-4 に傾斜角の解析結果を示す。平均値と標準偏差、傾斜角の最大値と最小値の差 ($\Delta\theta$) 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

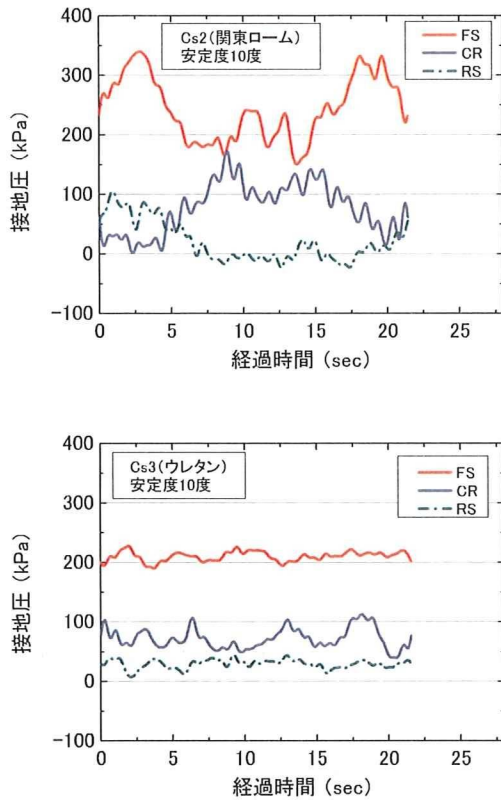


図-9 接地圧の時刻歴

(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 が定める接地圧力の関係式⁵⁾から算出した。JIS A 8509-1 には、くい打機の履帯に作用する接地圧力分布形状とその最大・最小接地圧の算出方法が定められており、機体重心の水平偏心量(e)と履帯諸元の相対的な関係に基づいて接地圧力の算出式が規定されている。

図-10 に Cs2 および Cs3 より得られた接地圧力

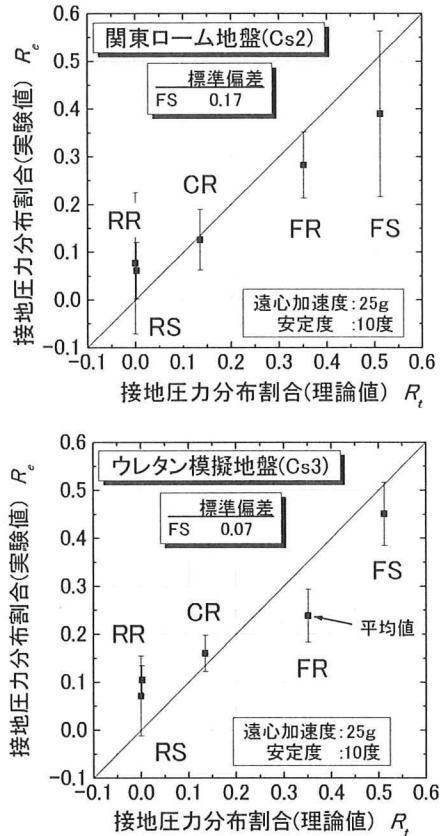


図-10 接地圧分布割合の実験値と理論値の比較
(a)Cs3(フォーム) (b)Cs4(ウレタン)

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

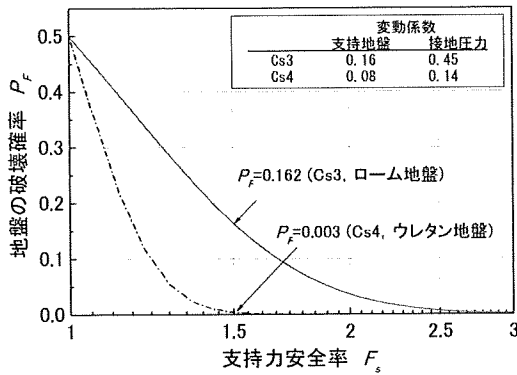


図-10 地盤の破壊確率と支持力安全率の関係

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

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

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

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

参考文献

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

技術資料

くい打機の走行挙動と履帯圧力分布の計測

＝くい打機の転倒防止に関する研究＝

(独)労働安全衛生総合研究所 堀 智仁・玉手 聡
Tomohito Hori Satoshi Tamate

1. はじめに

くい打機は地盤改良工事や杭基礎工事に用いられる大型の建設機械である。毎年この種の機械による転倒災害が数件発生している。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と、機械が設置される施工現場が軟弱であることの2つの要因がある。このような大型建設機械の転倒災害は現場内のみならず周辺にも多大な被害を与える。

くい打機の転倒災害の様子を写真1に示す。アースオーガをリーダー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。また、履帯には大きな沈下が見られる。このケースのように、転倒災害の多くは設置地盤の支持力不足による

ものである。

くい打機の転倒防止を目的とした研究はこれまでほとんど行われておらず、転倒に至るメカニズムは未解明である。そこで本研究では、くい打機の転倒防止に関する第一段階として、実大走行実験と遠心場走行実験を実施した。実大走行実験では、走行路の水準測量と支持力調査を行い、自走時の揺れを計測した。遠心場走行実験では、1/25スケールのくい打機模型を作製し、自走時に生じる揺れと、それに伴う接地圧変動の計測を行った。

本報告では、実験結果をふまえてくい打機の安定設置に関する評価法について述べる。

2. くい打機の転倒防止に関する国内の関係規則

くい打機の転倒を防止するために2つの規則等が定められている。その1つは、労働安全衛生規則第173条であり、「軟弱な地盤において施工する場合には、敷板等の使用による沈下防止のための措置を講じなければならない」と記述されている。

もう1つは、車両系建設機械構造規格第3条であり、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。ここで、安定度とは、機械が最も不利となる状態での限界傾斜角を表し、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。第1表に機種と安定度の関係を示す。くい打機が有すべき安定度は5度である。この値はブル・ドーザー



写真1 くい打機の転倒災害

第1表 機種と安定度

機種	くい打機	ブル・ドーザー
安定度	5度	35度

一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わかる。一方、設置地盤は水平かつ堅固であることが前提とされているが、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に委ねられているのが現状である。第2表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が設定され、その値は構造規格の基準に比べ1.4~1.8倍である。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安全率1.5以上の確保を使用基準に定めている。

第2表 事業者が定めた使用基準の例

安定度	作業時：7度 走行時：9度
地盤床・地盤の勾配	1/100以内に整地し平坦性を保つ
支持力条件	安全率：1.5

3. 実大走行実験

3-1 実験現場

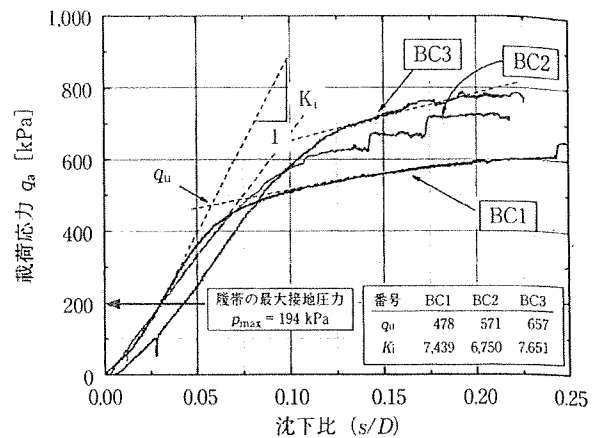
実大走行実験は東京国際空港国際線地区エプロン等整備事業が行われているエリアの南西部にて実施した。本実験では走行路の地盤条件と機体に生じる挙動の関係を明らかにするために、水準測量と平板载荷試験をはじめに実施した。次いで走行路に敷鉄板を敷設し、その後にくい打機を自走させた。機体に生じる応答加速度は後述する3ヶ所で計測を行った。

3-2 水準測量

水準測量では1.8 m間隔の格子状に測点を設定し、128地点(4×32)を計測した。第1図は基準点に対する高低差の分布を示す。走行路には緩やかな起伏が見られ、高低差は最大で約10 cmと非常に小さく、ほぼ平坦な地盤であった。

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载荷試験を行った。試験はひずみ制御(変位速度5 mm/min)により、第1図に示す3ヶ所で実施した。本研究で

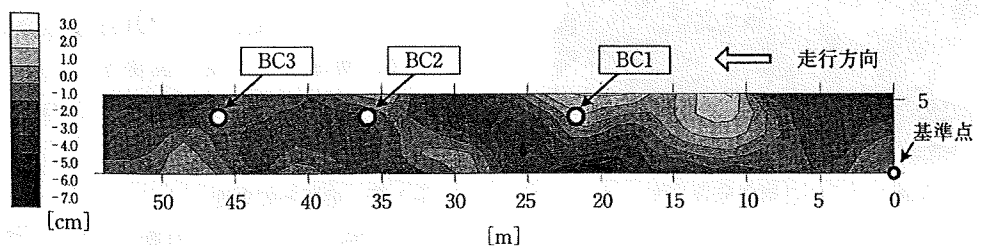


第2図 载荷応力 (qa) - 沈下比 (s/D) 関係

用いた载荷板は直径30 cmである。第2図に载荷応力 (qa) と、沈下量 (s) を载荷板の直径 (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が0~0.1の範囲ではs/D増分に対するqa増分が大きく、その傾きKiには一致が見られる。また、曲線はs/D=1.0付近で屈曲点を示した後、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qa値を極限支持力 (qu) と定義し、求めた値は478~623 kPaであった。3地点のquは本実験で使用したくい打機の最大接地圧 (pmax) に比べ2.4~3.3倍と高く、走行路地盤は十分な支持力を有していた。

3-4 動揺計測

実験に使用したくい打機は写真2に示すサンドコンパクション用のものであり、全高27 m、総重量980 kN、安定度17度、最大接地圧194 kPaである。機体の3ヶ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 (Ax) と、これと直交する左右方向成分 (Ay) をサンプリング周波数100 Hzで計測した。走行速度は1.0 km/h (= 28 cm/s) であり、計測開始から約15秒後に前進させた。



第1図 水準測量の結果

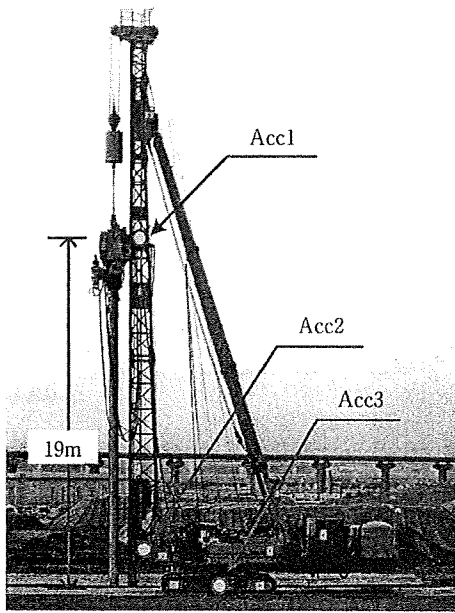
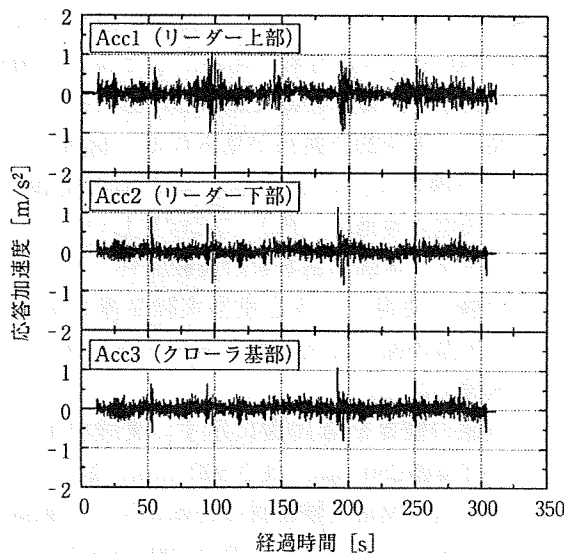


写真2 実験に仕様したくい打機

3-5 応答加速度の解析

(1) 高さ方向の増幅

3ヶ所で計測した加速度の A_x (進行方向成分) と経過時間の関係を示したものを第3図に示す。なお、計測値には5 Hzのローパスフィルターが施されている。全般的な傾向として、リーダー上部の Acc1は最も大きな応答を示しており、Acc2および Acc3はほぼ等しい。このことから、機体の揺れは上方で増幅していることが明らかになった。また、Acc1の最大振幅は約 1 m/s^2 であった。



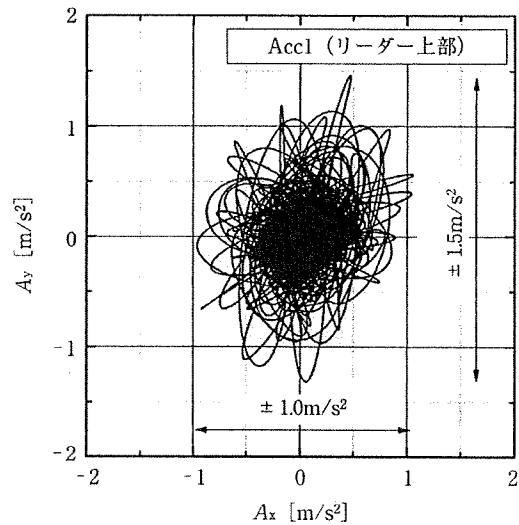
第3図 応答加速度の進行方向成分と経過時間の関係

(2) 動揺方向と周波数特性

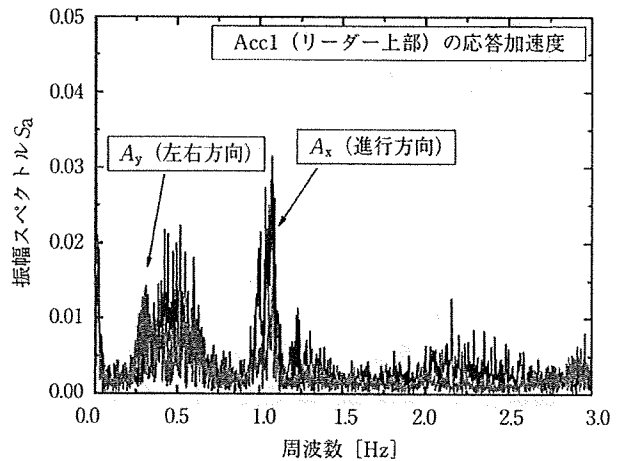
リーダー上部における応答加速度について A_x (進行方向成分) と A_y (左右方向成分) の比較を第4図および第5図に示す。

第4図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 1.0 m/s^2 、 A_y は 1.5 m/s^2 である。進行方向に比べて、左右方向に幾分大きな応答が見られた。

第5図は周波数特性の比較である。 A_x と A_y にはそれぞれ 0.5 Hz と 0.3 Hz にピークが見られ、長周期的な揺れが生じていることがわかる。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。



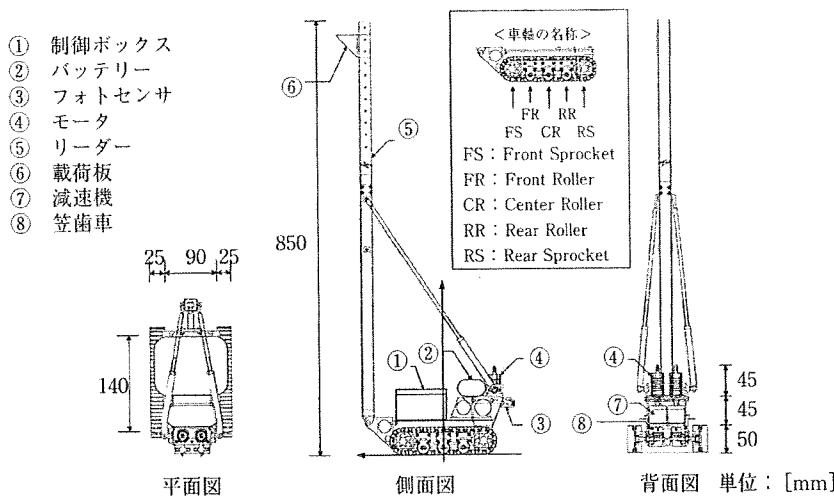
第4図 加速度の軌跡



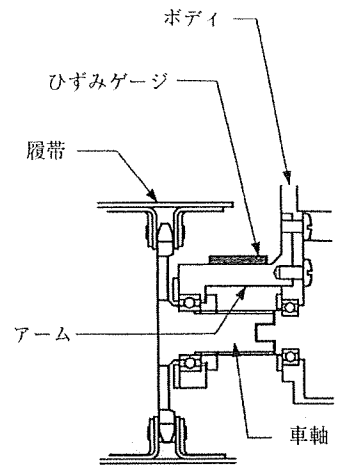
第5図 周波数特性

4. 小型くい打機模型の作製

遠心場走行実験のためのくい打機模型を作製し



第6図 くい打機模型の概要



第7図 車軸部の断面図 (前輪)

た。参考にした機種は総重量は539 kN (55 t) 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スケールであり、対応する標準の遠心加速度は25 gとした。第6図に作製したくい打機模型の概要を示す。模型の重心は実機と相対的に同じになるようモータや減速機、およびバッテリーを配置させた。

模型は最大回転数が35,000 rpmの小型モータを2個搭載し、左右の履帯が独立して駆動する。モータ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でモニタリングして、制御ボックスで演算処理を行い、フィードバック制御をしている。

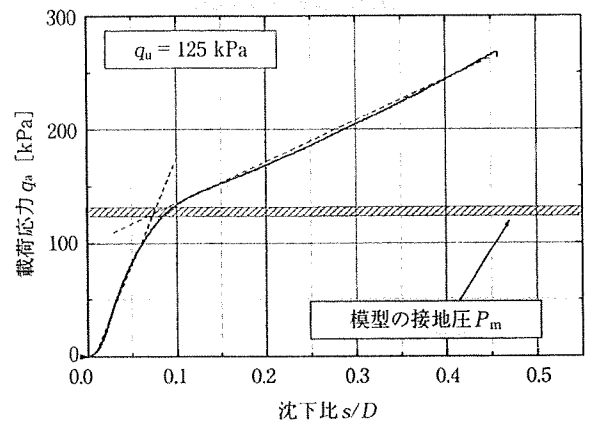
第7図に模型の車軸部断面を拡大して示す。アームはボディに剛結された片持ち梁構造となっている。全アームの上部にはひずみゲージを貼り付けて、車輪に作用する荷重を計測した。本研究では、各車輪を前輪からFS (Front Sprocket)、FR (Front Roller)、CR (Center Roller)、RR (Rear Roller)、RS (Rear Sprocket) と定義した。

模型の重量は29.9 N (3.05 kg) であり、25 g場の遠心場では模型の重量が25倍になり、模型の履帯面に作用する接地圧は実機と等しく再現することができる。

5. 遠心場走行実験

5-1 地盤のモデル化

水平かつ一様な支持力分布の地盤をウレタンフォームにより模擬し、くい打機の自走挙動に関する基



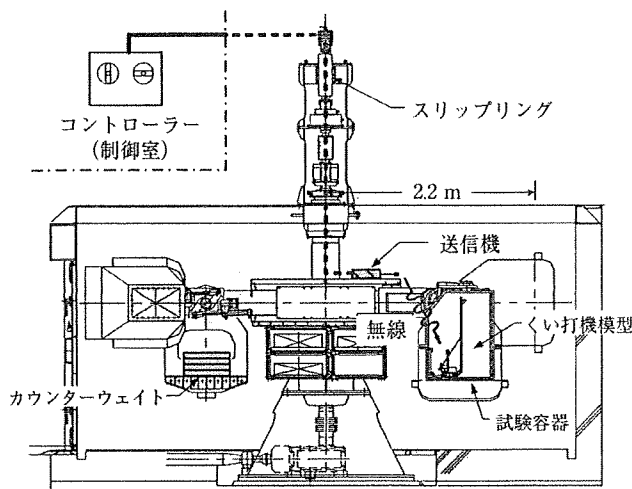
第8図 ウレタンフォームの支持力試験結果

本特性を調査した。ウレタンフォーム地盤の載荷応力 (q_a) - 沈下比 (s/D) 関係を把握するために、支持力実験を行った。載荷はひずみ制御で行い、載荷速度は1 mm/minである。実験に用いた載荷板は25 × 50 mmの長方形である。 q_a と s/D の関係を第8図に示す。載荷初期では s/D 増分に対する q_a 増分は高く、直線的な関係が見られる。屈曲点前後の2つの接線の交点における q_a 値を q_u と定義すると、 q_u は模型の接地圧 (P_m) にほぼ等しい。

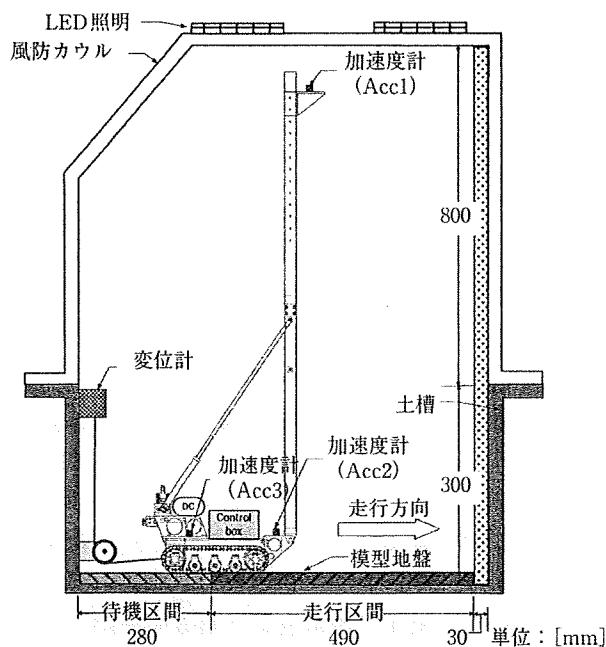
5-2 実験方法および実験条件

実験に使用した遠心模型実験装置を第9図に示す。模型の操作は制御室からスリップリングを介して無線で行う。

実験の概要を第10図に示す。実験で用いた容器の内寸は幅250 mm、長さ800 mm、高さ300 mmである。遠心模型実験装置の回転に伴う空気抵抗を模型に作用させないため、高さ800 mmのアクリル製の風防カウルで全体を覆った。模型の走行速度は図



第9図 遠心模型実験装置の概要



第10図 実験の概要

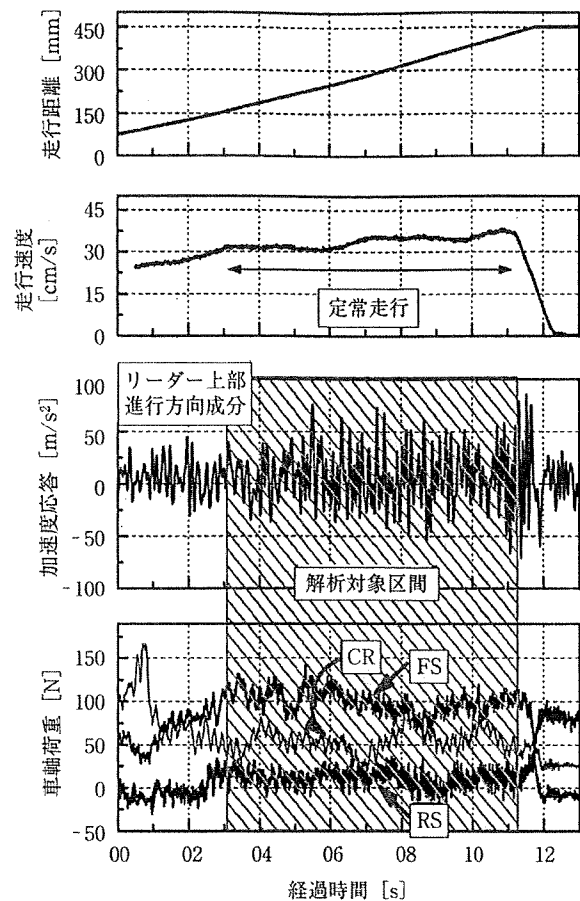
に示すようにワイヤー式の変位計を用いて計測した。

遠心場走行実験は遠心加速度 25 g まで増加させた後、模型を走行させた。その際の走行速度は、相似則に従い 30 cm/s ($\approx 1\text{ km/h}$) とした。模型の安定度は、実大走行実験とほぼ同じ安定度 19 度である。模型の挙動は3ヶ所に設置した加速度計で計測した。Acc1はリーダー上部、Acc2はリーダー下部、Acc3は機体本体に設置した加速度計である。

5-3 実験結果および考察

(1) 解析対象区間

遠心場走行実験の結果を第11図に示す。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 150 mm となる。この時に履帯全



第11図 実験結果

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、 $t_m = 1.1\text{ s}$ の時に容器の端へ達している。計測した応答加速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 (前輪) が最大値を示し、RS (後輪) はほぼゼロ付近で推移している。

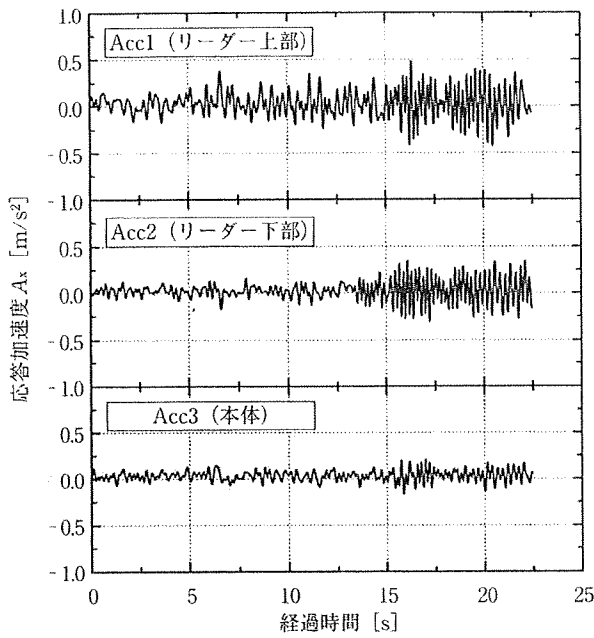
本研究では、走行速度が一定である $t_m = 0.3 \sim 1.1\text{ s}$ を解析対象区間とした。

(2) 走行挙動の計測

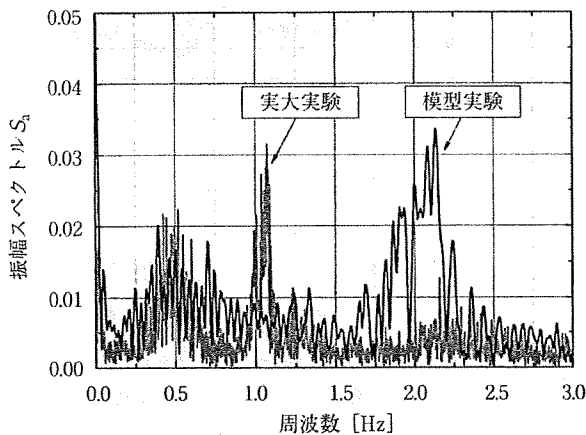
第12図に3ヶ所の進行方向成分の応答加速度を実大スケールに換算して示す。なお、ノイズの影響を取り除くため、 5 Hz のローパスフィルターを換算後に施した。それぞれの応答加速度を比較すると、Acc1はAcc2およびAcc3よりも大きく、リーダー上部の応答加速度は増幅している。この傾向は、実大走行実験の結果と同じである。

(3) 実大走行実験と遠心場走行実験の比較

第13図は、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。



第12図 計測した応答加速度

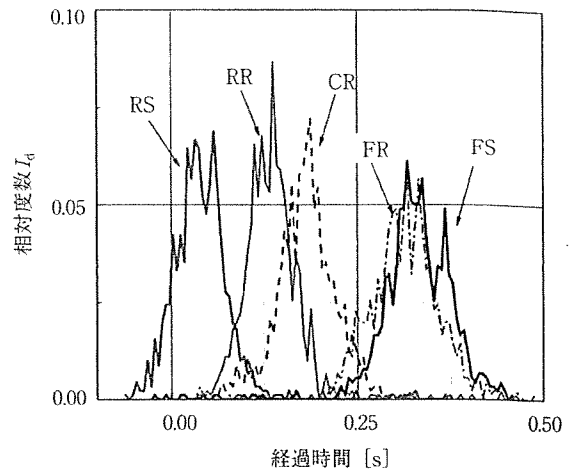


第13図 実大実験と模型実験の周波数特性の比較

両試験結果に共通して、0.5 Hz付近にピークが見られることから、遠心場走行実験でくい打機固有の挙動が再現されていると考えられる。模型実験の結果では2 Hz付近にも卓越周波数が見られるが、これは履帯の構造的な凹凸に起因するノイズである。

(4) 車軸荷重の度数分布解析

第14図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。縦軸は相対度数 (I_d)、横軸は荷重分布割合 (R_e) である。各車軸の最大相対度数 I_d には大きな差は見られず、類似した分布形状を示している。また、各車軸荷重は正規分布的に変動していることが明らかになった。

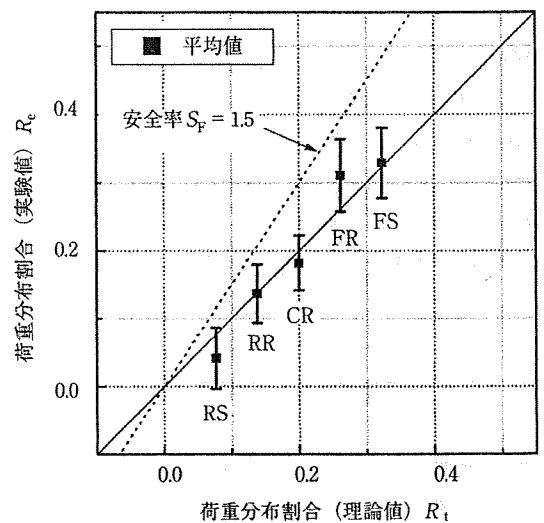


第14図 荷重分布割合の度数解析結果

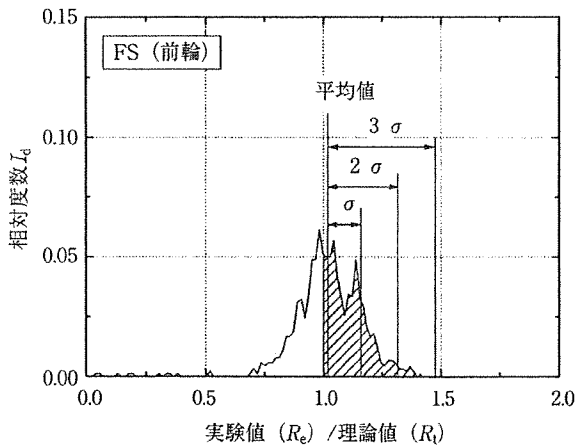
(5) 車軸荷重の理論値と実験値の比較

第15図に車軸荷重の理論値 (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。図中の破線は、直接基礎の短期的な安全率1.5を示している。各車軸の R_e の平均値と R_e を比較すると、理論値と平均値はおおむね一致している。すなわち、走行時に作用する荷重の平均値は、静止時に作用する荷重にほぼ等しい。

最大荷重が作用するFS (前輪) に注目し、荷重の変動量について調べた。第16図は R_e を R_t で除した値に対して度数分布解析した結果である。図中には平均値と標準偏差 $\sigma (= 0.155)$ も示した。斜線で示した部分は、理論値よりも大きな範囲である。走行中にかなりの頻度で理論値を上回る荷重が生じてい



第15図 荷重分布割合の実験値と理論値の比較



第16図 FSの度数分布解析

第3表 上部旋回体の配置と最大および最小接地圧 [kPa]

前方配置	最大	188
	最小	83
	平均	136
側方配置	最大	159
	最小	112
	平均	136
斜め45°配置 (リーダー側の履帯)	最大	194
	最小	111
	平均	153
斜め45°配置 (リーダーと反対側の履帯)	最大	152
	最小	87
	平均	120

ることがわかる。また、 R_e/R_t が正規分布であると仮定し、平均値と 3σ の和で評価した場合、その値は約1.4である。これは、実機の接地圧が模型と同じように変動した場合、走行中に理論値の最大1.4倍の接地圧が作用することを意味する。

(6) 揺れに伴う接地圧変動を考慮した安定性の検討

静止時の接地圧は上部旋回体の配置によって異なる。第3表に実大走行実験で使用したくい打機の上部旋回体の配置と最大・最小接地圧の関係を示す。ここで、前方配置は上部旋回体が前方を向いた状態であり、斜め45°配置は45°旋回した状態、側方配置は90°旋回した状態である。くい打機の設置時の安定性を評価する際、現行の方法では、静的な状態で作用する最も大きな値、すなわち、斜め45°配置の最大接地圧(194 kPa)を用いて検討を行っている。しかし、遠心場走行実験での推定最大値は前方配置の最大接地圧の1.4倍であり、その値は263 kPaである。そのため、走行に伴う接地圧力変動の影響を適切に考慮した安全率の使用が必要であると考えられる。

今後は、さらなるデータの蓄積を行い、走行中に

生じる接地圧力変動を定量的に評価し、適切な安全率の検討を行っていく予定である。

6. おわりに

くい打機の実大走行実験および遠心場走行実験を行い、以下の知見を得た。

- ① 実大走行実験では、機体の安定度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地盤において自走時挙動を計測した。その結果、応答加速度はリーダー上部で増幅することがわかった。また、周波数解析の結果0.3~0.5 Hz付近にピークが見られ、長周期的な揺れが生じていた。
- ② 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った。実大走行実験と同様の実験条件で実験を行った結果、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、履帯に作用する変動荷重は、正規分布的に変動することがわかった。
- ③ くい打機の安定設置を検討する際に、現行の方法では静的な状態で作用する最も大きな接地圧を用いて検討している。しかし、本実験結果から走行時の揺れに伴って、静止時の最大接地圧よりも大きな接地圧が作用することが明らかになった。そのため、走行に伴う接地圧変動の影響を適切に考慮した安全率の使用が必要であると考えられる。

<参考文献>

- (1) 指針改定委員会ワーキンググループ：“改訂 移動式クレーン・基礎工専用機械の転倒防止指針”，p.21 (1993)

【筆者紹介】

堀 智仁 (昭和53年8月4日生)
 (独)労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ
 研究員
 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6
 TEL : 042-491-4512 FAX : 042-491-7846
 E-mail : horito@s.jniosh.go.jp
 <主なる業務歴および資格> 博士(工学)

玉手 聡
 (独)労働安全衛生総合研究所 建設安全研究グループ
 上席研究員
 〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6
 TEL : 042-491-4512 FAX : 042-491-7846

基礎工事用機械の走行挙動と接地圧変動に関する実験的解析

○堀 智仁 ((独)労働安全衛生総合研究所) 玉手 聡 ((独)労働安全衛生総合研究所)

1. はじめに

基礎工事用機械（以下、くい打機という）は、主に杭基礎工事に用いられる大型の車両系建設機械である。軟弱地盤上での作業を余儀なくされるため、近年、この種の機械による転倒災害が報告されている。

くい打機を設置する際には、静止した状態で履帯に作用する最も大きな接地圧と、地盤の極限支持力に短期的な安全率 $S_f=1.5$ を乗じた値とを比較検討して、安全性を確認する。しかしながら、自走中に生じる機体の揺れに伴って接地圧力が変動し、静止時の最大接地圧よりも大きな接地圧が作用することが考えられる。

そこで、本研究では自走時の接地圧変動量を明らかにするために、実大走行実験によるくい打機の挙動解析と、くい打機模型を作製し遠心場走行実験を行った。遠心場走行実験と実大走行実験の結果を比較するとともに、走行挙動に伴う接地圧力変動を計測し解析を行った。

2. 実大走行実験

(1) 実験の概要

くい打機の自走時挙動解析を行うために、実大走行実験を行った。実験現場は東京国際空港国際線地区エプロン等事業が行われているエリアの南

西部である。

本実験では走行路の水準測量と支持力調査を行った。次いで走行路に敷鉄板を敷設し、その後にくい打機を自走させた。機体に生じた加速度応答を後述する3箇所で計測した。

(2) 水準測量

走行路の高低差を計測するために、1.8m 間隔の格子状に測点を設定し、128 地点の計測を行った。図1に水準測量の結果を示す。走行路の高低差は最大で約10cmと非常に小さく、ほぼ平坦な地盤であることがわかった。

(3) 地盤の支持力

走行路の地盤支持力調査を平板載荷試験により行った。試験はひずみ制御（変位速度5mm/min）で行い、図1に示す走行路の3箇所で実施した。

図2に載荷応力(q_a)と沈下量(s)を載荷板の直径(D)で除した沈下比(s/D)の関係を示す。屈曲点前後の接線の交点における q_a 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の最大接地圧 p_{max} は194kPaであるため、走行路はくい打機の接地圧力に比べて十分高い支持力を有することがわかった。

(4) 自走時挙動の計測

実験に使用したくい打機を写真1に示す。サンドコンパクションパイルを施工する機械であり、

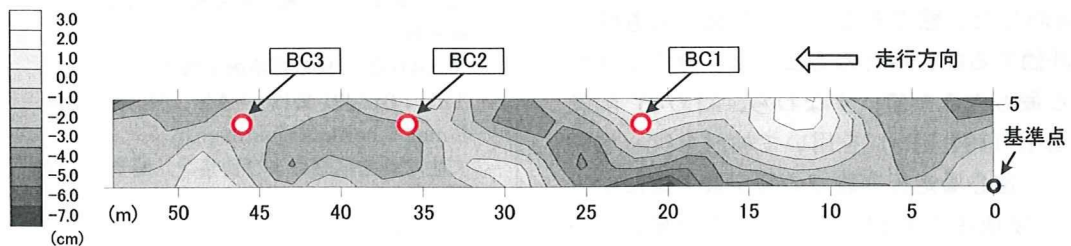


図1 水準測量の結果

全高 27m, 総重量 980kN, 安定度 17 度, 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。走行速度は約 1km/h(=28cm/sec)である。

(5) 応答加速度

3 箇所で計測した進行方向の応答加速度(A_x)と経過時間の関係を図 3 に示す。なお, 計測値には電氣的なノイズを除去するために, 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

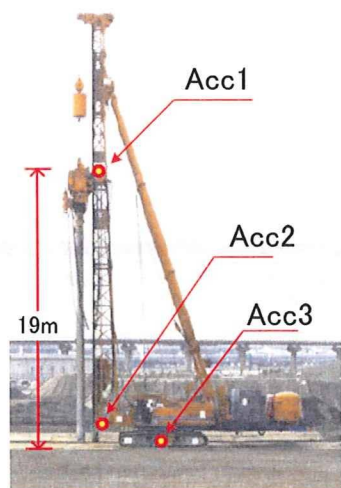


写真 1 加速度計の設置位置

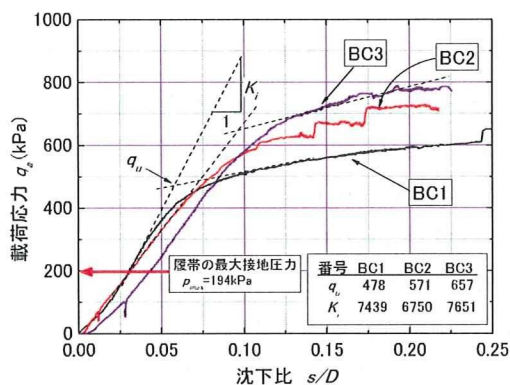


図 2 载荷応力 (q_s) - 沈下比 (s/D) 関係

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ことがわかる。また, Acc1 の最大値は約 1m/sec^2 であった。

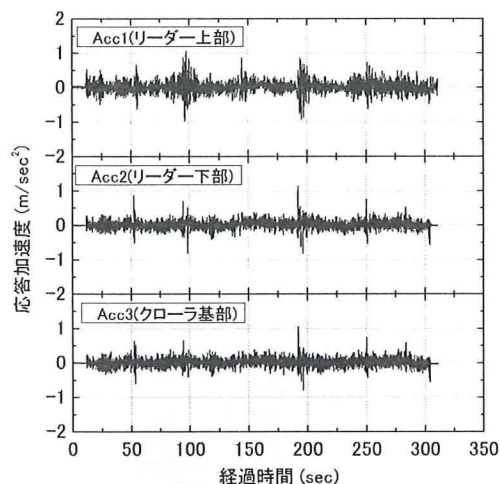


図 3 応答加速度の進行方向成分 (A_x) と経過時間の関係

(6) 周波数特性

図 4 にリーダー上部における加速度計の 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, 自走時には長周期的な揺れが生じていることが明らかになった。これは, くい打機固有の動揺特性であると考えられる。

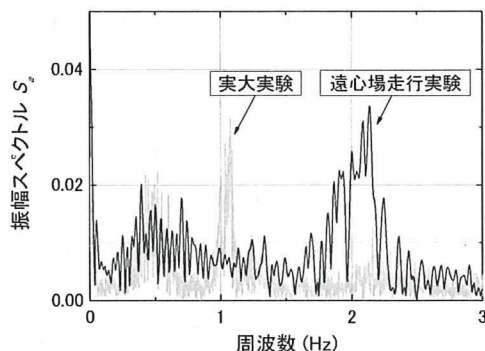


図 4 周波数特性

3. 遠心場模型実験の概要

(1) 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、模型の重心位置は、実機と相対的に等しくなるよう設計した。

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、履帯面に作用する接地圧力分布を測定することが可能となっている。模型の操作は制御室から無線で行う。写真 2 に作製した模型を示す。

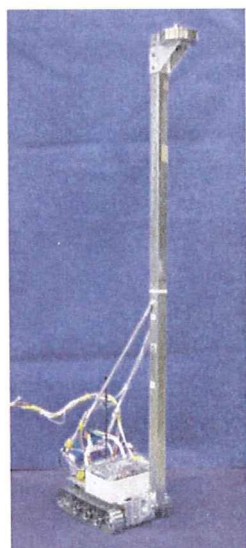


写真 2 作製したくい打機模型

(2) 地盤のモデル化

模型地盤は発泡ポリウレタンフォームを用いて作製した。ウレタンフォームに対して支持力実験を行った結果、極限支持力(q_u)と模型の接地圧(p_{max})はほぼ等しいことがわかった。

(3) 実験方法および実験条件

実験の概要を図 5 に示す。遠心実験装置の回転に伴う空気抵抗を模型に作用させないため、全体を風防カウルで覆った。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。

遠心場走行実験は遠心加速度を 25g まで増加させた後、模型を走行させた。その際の走行速度は

相似則に従い、30cm/sec(≒1km/h)とした。走行速度の計測はワイヤー式変位計を図に示すように設置して行った。自走時の機体の挙動はリーダー上部に設置した加速度計にて計測した。

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。

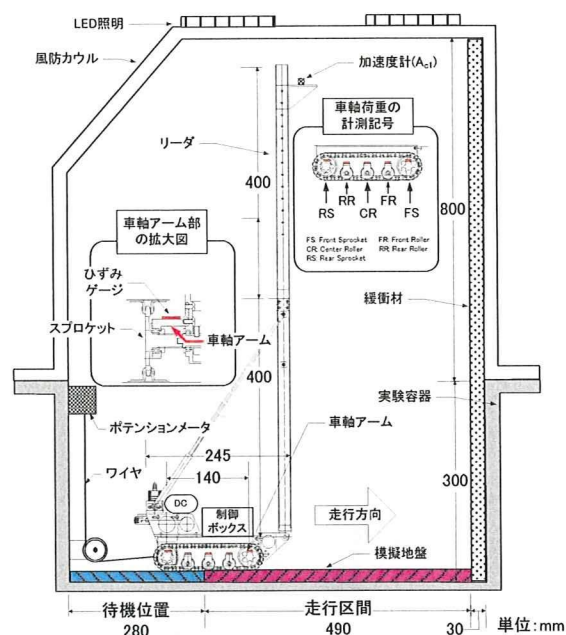


図 5 遠心模型実験の概要

4. 遠心場模型実験の結果

(1) 実大走行実験と遠心場走行実験の比較

図 6 に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周波数解析結果を示す。

模型実験のデータは、実大スケールに換算した値である。実大実験と遠心模型実験に共通して 0.5Hz 付近にピークが見られることから、くい打機固有の挙動が遠心模型実験で再現されている。模型実験の 2Hz 付近に見られるピークは履帯の凹凸による構造的な影響で生じたものである。

(2) 自走時の接地圧力変動

計測した車軸荷重に対して度数分布解析した結果を図 7 に示す。ここで、各車軸に作用する荷重

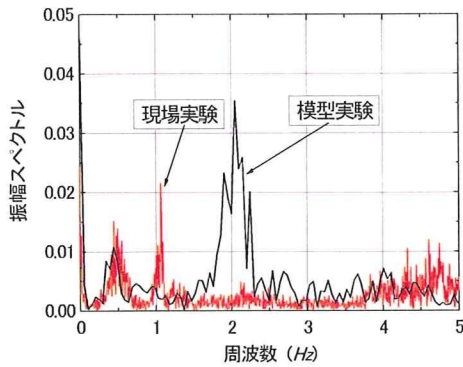


図 6 実大走行実験と模型実験の比較

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。各車軸の相対度数に大きな差は見られない。また、自走時挙動の影響により各車軸の R は正規分布的な分布を示しており、RS(後輪)に比べ FS(前輪)の分布範囲が幾分大きい。

最も大きな荷重が作用する FS(前輪)の接地圧の変動量について調べた。図 8 に FS の実験値 R_e を理論値 R_t で除した値について度数分布解析した結果を示す。理論値 R_t は、日本工業規格(JIS)が定めるくい打機の接地圧の関係式¹⁾から求めた。図中には平均値と標準偏差 σ も示した。走行時に作用する車軸荷重の平均値は静止時に作用する接地圧にほぼ等しい。

斜線で示した部分は R_t よりも大きな値である。この結果から、走行中にかなりの頻度で理論値よりも大きな車軸荷重が作用していることがわかる。ここで、FS が正規分布に従うと仮定した場合、信頼係数 99% である 3σ で評価すると、安定設置に必要な安全率は約 1.5 程度である。

以上の結果から、車軸に作用する荷重は正規分布的に変動することがわかり、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と考えられる。

5. 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

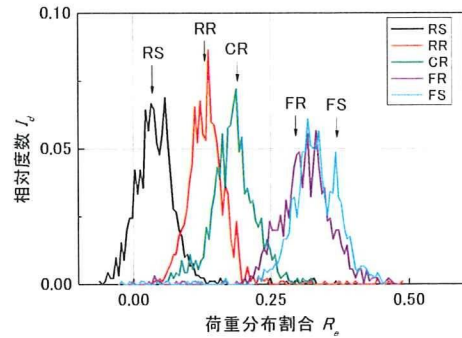


図 7 相対度数と荷重分布割合の関係

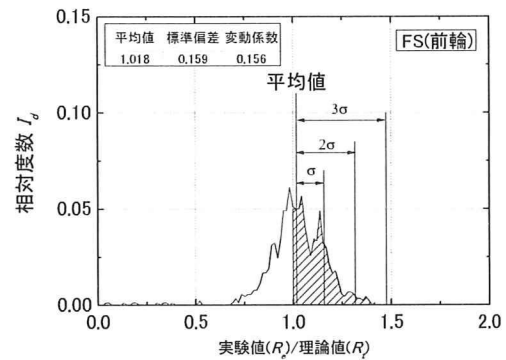


図 8 理論値 (R_t) と実験値 (R_e) の比較

を有する条件において、自走時に生じる動揺の計測を行った。応答加速度の周波数解析の結果から、自走時には約 0.5Hz の長周期的な揺れが生じることが明らかになった。

(2) 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った。その結果、模型と実機の走行挙動はほぼ等しいことがわかった。また、自走時挙動に伴う車軸荷重は、正規分布的に変動することがわかり、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が明らかになった。

謝辞：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て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) 日本規格協会：基礎工事-安全-第 1 部；くい打機の要求事項，JIS A 8509-1，p.25，2007。

くい打機の転倒と設置地盤に関する一考察

○玉手 聡 ((独)労働安全衛生総合研究所) 堀 智仁 ((独)労働安全衛生総合研究所)

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. 災害事例

写真1は建築工事現場で発生した転倒事例¹⁾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た大型の基礎工事用機械(以下、くい打機と呼ぶ)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。

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1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、後の調査から実際の溝の深さは施工標準よりも0.2mほど大きいものであったことがわかった。



写真1 転倒災害の様子

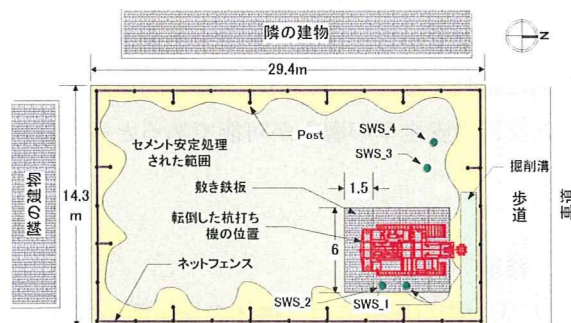


図1 発生現場の平面的状況

表 1 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

水道管の修理が終了した後に作業は再開され、敷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。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、機体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。

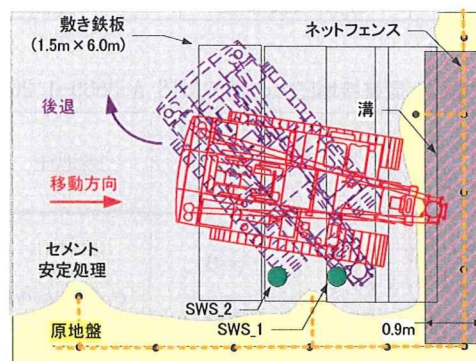


図 2 転倒時におけるくい打機的位置

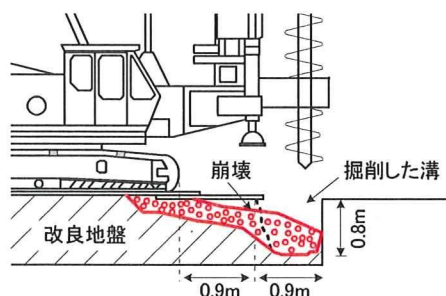


図 3 機械の設置地盤に生じた崩壊概要

4. くい打機の安定条件

(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、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)を有しなければならないことを述べている。

表 2 に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 3 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。

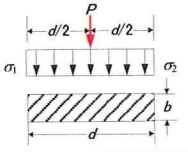
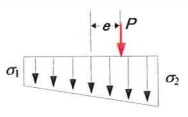
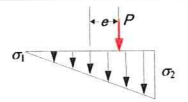
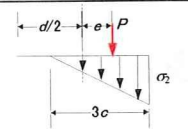
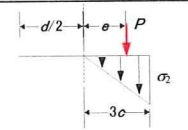
表 2 くい打機の諸元

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3 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	$\theta_f = 18.4 \text{ 度} > 5 \text{ 度}$	$\theta_{ss} = 11.9 \text{ 度} > 5 \text{ 度}$

表4 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
	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	$\sigma_2 = 4P/bd$

(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 JIS A 8509-1:2007 に定められており、表4に示すような機体重心に働く全重量(P)の作用位置(e)の関係から圧力分布が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³⁾。

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5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。

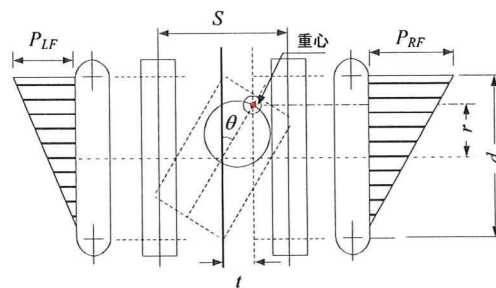


図4 履帯に作用する接地圧 ($r > L/6$ の場合)

表5 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程度までしか処理されていないかった。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 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。

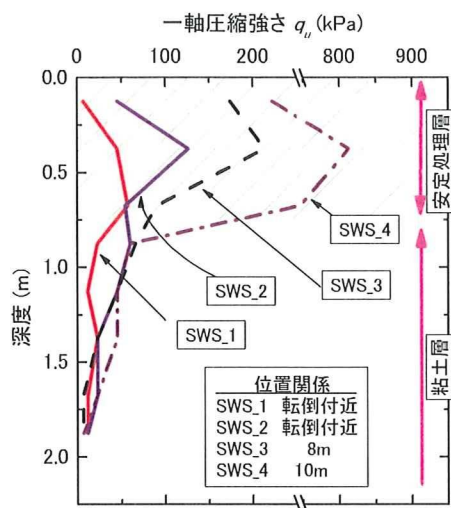


図5 スウェーデン式サウンディング試験の結果より算出した一軸圧縮強さ (q_u) 分布

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こと。
- 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こと。
- 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こと。
- 4) 水道管の破壊により溝が湛水し、地盤を軟化

させたこと。

- 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こと。

施工上のミスを完全に防ぐことは難しい。しかし準備が不十分なことによる危険は低減可能であり、特に支持地盤については養生の確実な実施により沈下を防止できる。しかし、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、事業者任せられているのが現状である。

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よる研究(課題番号 H19-労働-一般-005)で得られた成果である。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。
- 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：地盤工学教式入門，pp.183-204，2001。
- 6) (社)地盤工学会：地盤調査法，pp.213-220，1999。

