

A Case Study on the Overturning of Drill Rigs on Construction Sites

Satoshi Tamate¹ and Tomohito Hori²

¹Senior Researcher, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan, 1-4-6 Umezono, Kiyose, Tokyo 204-0024, JAPAN; tamate@s.jniosh.go.jp

²Researcher, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan, 1-4-6 Umezono, Kiyose, Tokyo 204-0024, JAPAN; horito@s.jniosh.go.jp

ABSTRACT: Drill rigs are large pieces of construction machinery used to build pile foundations and to improve the ground stability. Crawlers comprising the lower base enable the machines to propel themselves. A tall leader given in the upper structure provides top heavy weight distribution. Sufficient bearing capacity and flatness are required in the bearing ground to keep the machinery stable without any tilts while it is propelling itself. Nevertheless, overturning often occurs at constructions. This study focuses on the phenomenon of ground instability causing machines to overturn. A drill rig weighing 372.5kN and with a leader 15.9m tall overturned on a building construction site. This machinery moved within the site to the positions required for building the diaphragm walls. This paper, firstly, summarizes operations prior to the accident. Secondly, the equilibrium condition of the machinery was calculated to clarify the stability, and the pressure acting on the ground through the crawlers was estimated. Ground properties were also investigated to assess the potential risk of failure in bearing ground. Finally, problems with the stability of drill rigs are discussed.

INTRODUCTION

Some drill rigs and similar machinery for piling and ground improvements are propelled by crawlers on both sides of the lower base carrier. Such machinery must be kept near horizontal on the bearing ground when moving if the derrick is raised. Nevertheless, accidents have often occurred due to overturning of drill rigs in Japan as well as in countries throughout the world. Ground penetration by crawlers was observed in many cases where actual overturning occurred as shown in Fig 1.

While the safety regulations for drill rigs worldwide prescribe the stability angle as the allowable tilt in the machinery, the ground is assumed to be sufficiently stiff and firm. The necessary ground conditions for setting up drill rigs are not specifically prescribed in the regulations.

This study examines the phenomenon of ground instability causing the drill rigs to overturn. A case study on an accident was carried out to investigate the problems with stability in terms of the bearing ground. This paper, firstly, summarizes the outline of

operations prior to the accident. Secondly, the equilibrium condition of the machinery was calculated to clarify the stability, and the pressure acting on the ground through the crawlers is estimated in accordance with the regulations (British Standards Institution (1996a and 1996b) and Japanese Standards Association (2007)). The bearing capacity of ground is investigated to make sure the potential risk of overturning. Finally, problems with the stability of drill rigs are discussed.



FIG.1. Overturning of a drill rig in construction site.

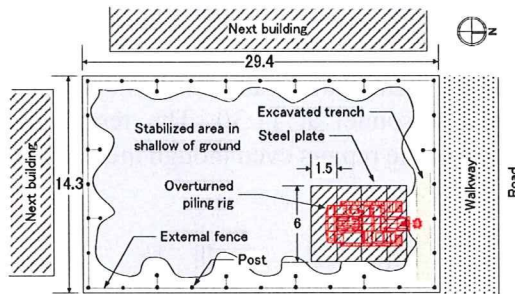


FIG. 2. Schematic view of the site.



FIG.3. Preliminary trench excavation.

SITE CONDITIONS IN THE ACCIDENT

An eight stories apartment house was being constructed at the site as shown in Fig 2. Diaphragm walls were selected as the foundation type in this construction. An external fence supported by posts was installed in the site to protect the adjacent buildings. Fig.1 shows an overturned drill rig to discuss in this paper from an incident that occurred in Japan in 2004. The drill rig comprised three augers in the leader and hit a car parked beside the site. Two workers were severely injured in this accident. Ground penetration by a crawler was clearly observed.

Soft clay was overlaid by sandy subsoil down to a depth of 0.7m. Shallow soil was stabilized by mixing with cement to increase the bearing capacity in advance. Though preliminary theoretical calculation indicated that thickness of 1.0m of stabilization was required to support heavy machinery, the actual stabilization was only performed to 0.7m due to difficulty mixing in the clay. Therefore, the bearing capacity was lower than the required value. In addition, existences of both the fence and the supporting posts disrupted the stabilization. Consequently, the bearing capacity in this around area was smaller than that of other areas. It seems that insufficient of bearing capacity was one cause of the accident.

A small trench, 0.9m in depth and 0.8m in width, was excavated by a backhoe in the north area prior to building the diaphragm wall as shown Fig 3. This trench excavation was carried out as preliminary preparation to indicate the positions of drilling columns and to prevent the overflow of mixing mud. However, the depth of the trench was deeper than 0.7m of the designed value. The deeper trench reduced the bearing capacity near the walls, and made the drill rig unstable. This was also considered to be another cause of the accident.

PROCESS PRIOR TO THE ACCIDENT

Table 1 shows the process of constructions at the site prior to the accident. Shallow soil stabilization was carried out as one of the preliminary preparations to increase the bearing capacity to ensure the machinery is kept nearly horizontal during self-propelling. The drill rig was assembled the previous day. Placing steel plates at the site was also required to support the heavy machinery.

Preliminary trench excavation started at 9:00 in the morning. Since a buried water pipe was broken at the excavation, however, the trench was submerged at 10:00. A site manager called up the water supply office to inform them of the trouble with water pipes. Running water was stopped by water supply personnel at 11:30. The remaining preparations were resumed soon after completion of the repairs even though the bearing ground softened due to the exposure to water.

Table 1. Process of the constructions prior to accident

Process	Contents of work	
Before	Shallow soil stabilization by cement	
Previous day	Assembling the drill rig in the site.	
Day of the Accident	8:00	Meeting.
	9:00	Started preliminary preparations such as excavation of small trench and placement of the steel plates.
	10:00	A buried water pipe was broken at the trench excavation.
	10:05	Started pumping the water from the submerged trench
	10:45	Water department officials arrived
	11:30	Water leakage stopped
	11:45	Water pipe was repaired. Trench excavations and placing the steel plates were resumed.
	12:15	Completion of the preparations.
	13:00	The Drill rig moved toward to the position for excavation.
	13:10	Overtured near the trench

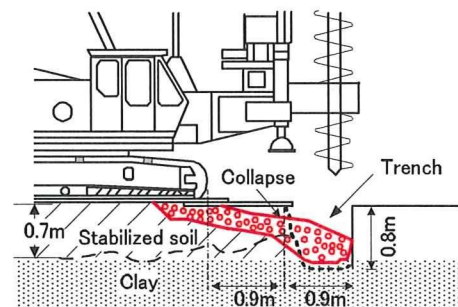


FIG.4. Soil collapse under drill rig.

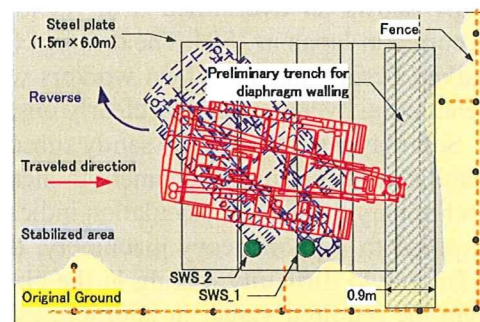


FIG.5. Location of drill rig prior to overturning.

The drill rig moved to the north east position to build the diaphragm walls as shown in Fig 4. However, the machinery was tilting slowly when it had reached a distance of 0.9m offset from the trench. An operator who observed the tilt quickly reversed the travel and turned the upper structure right as shown Fig 5. The increment of tilt in the machinery accelerated due to collapsed soil, and the machinery finally overturned as shown in Fig 1.

STABILITY OF THE DRILL RIG

Stability angle

Fig 6 shows a summary of the drill rig with a leader 15.9m in length and 372.5kN in total weight (W). Since the x axis and the y axis are defined as shown Fig 6, the origin (O) is positioned at the horizontal center of the crawler on the ground surface. Coordination of the center of gravity in horizontal axis (G_x) and vertical axis (G_y) was calculated to investigate the stability of the machinery. Table 2 summarizes the specifications of the drill rig.

Safety regulations prescribe structural requirements in terms of the stability angle as allowable tilt of drill rigs. Table 3 shows comparison of the stability angles between Europe and Japan. The European Norm (British Standard Institution (1996a) and (1996b)) prescribes the stability angles in both EN996 of "Piling equipment - safety requirements" and EN791 of "Drill rigs – safety". EN996 describes that a stability angle of 5 deg must be provided in the drill rigs as minimum requirement. 8 deg is also written for propelling on job sites. EN791 also describes the stability angles those shall not be less than 10 deg in any direction when moving and not be less than 5 deg under any other conditions. The stability angle of 10 deg also includes a margin for the effects of the inertia forces from acceleration, braking and swaying of the drill rigs. The Japanese Ministry of Health, Labor and Welfare prescribes a stability angle of 5 deg in the Ordinance on Occupational Safety and Health as a minimum value. The Society of Materials Science, Japan (2002) recommends two sets of values in connection with the stability angles that are 7 deg when drilling and 9 deg when self-propelling.

Larger values in the stability angle at self-propelling are introduced in both regulations since an increase of instability takes the effect of the inertia forces by into account. The stability angles were calculated by giving consideration to the specifications of machinery as shown in Table 4. The stability angle in forward (θ_{sf}) means a tipping angel where the center of gravity turns above the front sprockets due to tilt, and this value is derived by Eq.(1). The stability angle in lateral (θ_{sl}) is also obtained by Eq.(2). Both 18.4 degrees for θ_{sf} and 21.6 degrees for θ_{sl} are greater than 10 deg of the limitation by EN791. Hence, the drill rig overturned even though sufficient stability was provided in the machinery. Accordingly, it was ascertained that a collapse of the bearing ground was the main cause of the accident.

Pressures acting on the ground

EN791 and EN996 define five types of distributions in the pressures acting on the

ground through the crawlers as well as JIS A 8509-1 by the Japanese Standards Association(2007) . These distributions are specified by the position of a single load (e) as shown in Table 5. A value of e is the same as that of G_x introduced above. The maximum pressures acting on the ground (σ_2) are obtained by the equations given.

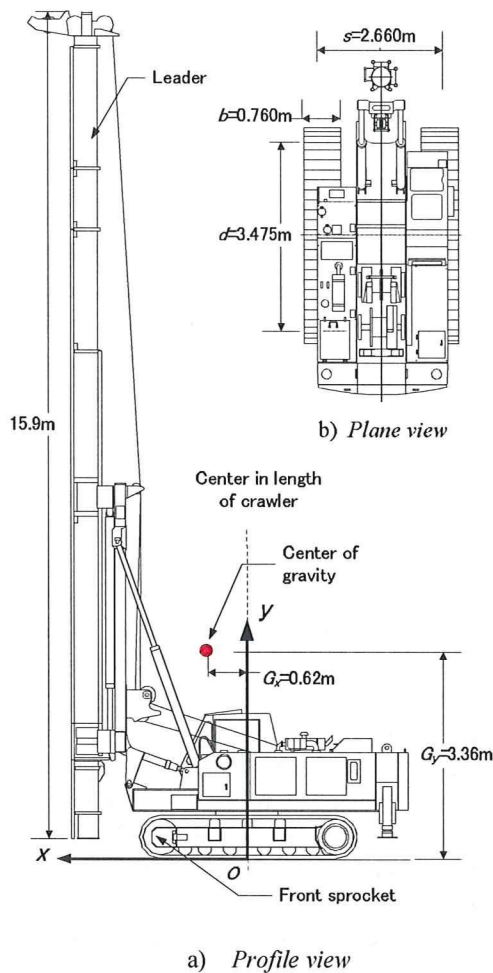


FIG. 6. Summary of the drill rig

Table 2. Specifications of drill rig

Total weight (W)	372.5kN
Horizontal distance of the centre of gravity from the centre of crawler (G_x)	0.62m
Vertical distance of the centre of gravity from ground surface (G_y)	3.36m
Length of contacting area on crawler (d)	3.475m
Width of crawler (b)	0.76m
Tread between crawlers (s)	2.660m

Table 3. Comparison of the stability angle in safety regulations

	Stability angles (deg)
EUR	Usually 5 Either 8 (EN996) or 10 (EN791) at self-propelling
JPN	5*

* 7 (at the drilling) and 9 (at self-propelling) are recommended by the Society of Material Science, Japan (2002).

Table 4. Calculation of the stability angle

	Forward	Lateral
Calculating formula	$\tan \theta_{sf} = \frac{d - 2G_x}{2G_y}$ (1)	$\tan \theta_{sl} = \frac{s}{2G_y}$ (2)
Stability angle (deg)	$\theta_{sf} = 18.4$	$\theta_{sl} = 21.6$

Table 5. Calculation of maximum ground pressure under crawlers

Load and stress diagram	Position of the single load P	Ground pressure
	$e=0$ P in the middle	$\sigma_1 = \sigma_2 = P/bd$
	$e < d/6$	$\sigma_1 = \frac{P(1-6e/d)}{bd}$ $\sigma_2 = \frac{P(1+6e/d)}{bd}$
	$e = d/6$	$\sigma_1 = 0$ $\sigma_2 = 2P/bd$
	$e > d/6$ $c = d/2 - e$	$\sigma_2 = 2P/3bc$
	$e = d/3$	$\sigma_2 = 4P/bd$

A value of e and a value of d were 0.62m and 3.475m in the drill rig, respectively. The relationship between e and $d/6$ is derived as Eq.(3). Consequently, σ_2 is calculated by Eq.(4).

$$e > \frac{d}{6} \quad (3) \quad \sigma_2 = \frac{2P}{3bc} = 146(kPa) \quad (4)$$

where the single load (P) is substituted by a value of $W/2$.

As the steel plates were sheeted on the ground surface, the actual pressure acting on the ground was smaller than the value of σ_2 .

Bearing grounds are assumed to be sufficiently stiff and firm. Safety regulations don't consider the machinery becoming unstable by tilt with an increase of differential settlement in the crawlers. However, this settlement increases the pressure acting on the ground by an increase in the overturning moment due to the machinery tilting. Accordingly, the values of the actual pressure acting on the ground become greater than the values suggested by the regulations where the machinery tilts due to settlement of crawlers.

Supported ground conditions

Swedish weight sounding tests (SWS) were carried out to investigate the distribution of stiffness at the two positions of SWS_1 and SWS_2 shown in Fig.5. The N value is well known as an index to classify the ground stiffness. N-value means the number of blows in standard penetration tests that are carried out in boreholes during site investigations. The procedure is specified in BS1377. The N value is interpreted by Eq.(5) and Eq.(6) depending on soil materials.

$$\langle \text{Sand} \rangle \quad N_i = 0.002W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad (5)$$

$$\langle \text{Clay} \rangle \quad N_i = 0.003W_{sw} + 0.050N_{sw} \quad (6)$$

where N_i is the interpreted N value, W_{sw} is the value of the loading weight, N_{sw} is the equivalent number of caracole required to penetrate 1m in depth.

Fig 7 shows the relationship between depth (D_s) and N_i . Since SWS_2 shows higher value than SWS_1, the bearing capacity of ground is lower in the northeast corner. Both curves show the existence of a stabilized layer between 0.2m and 0.9m. Soft clay was deposited below 1m so N_i decreased rapidly. A likely difference in measured N_i was the water seepage by the broke water supply line.

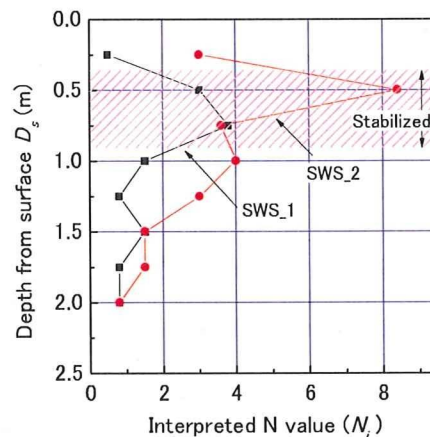


FIG.7. Relationship between the interpreted N values (N_i) and depth (D_s)

DISCUSSIONS ON PROBLEMS WITH STABILITY

Hazards in the ground

Various hazards usually exist in constructions. Since drill rigs are large pieces of machinery, their overturning causes serious damage to the surroundings of the sites as well as inside the site.

Two problems existed in the construction.

- 1) Existence of both fences and supporting posts disturbed stabilization near their boundaries. Hence, the bearing capacity was lower in this area.
- 2) Insufficient stabilization thickness reducing the bearing capacity.

In addition, another three problems made the bearing ground unstable.

- 1) Bearing capacity near the walls was reduced because the depth of the trench was deeper than the designed value.
- 2) A broken water pipe caused the excavated trench to be submerged. Water seepage made the bearing ground soft.
- 3) Soon after the completion of repairs, the remaining works were resumed without confirmation of the stability.

Safety requirements for the stability of sites

Safety regulations commonly assume that sufficient bearing capacity is provided in the ground of construction sites. Meanwhile, either pilings or ground improvements were conducted on sites where the bearing capacity is insufficient for supporting facilities. Therefore, various stabilization methods such as deep soil mixing and the installations of pile foundations are used to support the structures. Accordingly, the drill rigs must move over unstable ground on construction sites.

Tamate et al. (2005) investigated the mechanism of the overturning of the mobile cranes. Top heavy distribution in both the mobile cranes and drill rigs induce potential instability. Four outriggers support mobile cranes while hooking the load. Mobile cranes become quite unstable where the outriggers rapidly penetrate the surface due to the brittle failure in the bearing ground.

CIRIA (2003) recommends three sets of safety factors in terms of bearing capacity (F_s) as follows. F_s of 1.5 is the absolute minimum and should only be used where ground conditions have been accurately identified under the guidance of an experienced geotechnical engineers. F_s of 2.0 is adequate for most situations. F_s of 3.0 is more normally used for permanent works for foundations and will give a conservative size of foundation area. It should be used for outrigger foundations where little ground information is available, where soils are variable or where minor settlements could be critical to a precision lifting and placing operation.

Theoretical calculations were carried out by Tamate et al (2006) to learn about the relationship between the probability of safety for overturning (P_{ss}) and F_s . $P_{ss}>0.984$ at $F_s=3$ resulted whereas $P_{ss}>0.802$ at $F_s=1.5$ in particular ground that induces rapid outrigger penetration. Accordingly, it is ascertained that safety for overturning can be easily ensured by using $F_s=3$ to prevent any ground penetration by outriggers.

Drill rigs propel by themselves whereas mobile cranes stand still in the positions they perform hooking operations. The potential risk of the overturning by the differential penetrations in the crawlers due to failure in the bearing ground is unclear. In addition,

flatness of the surface and variation of the stiffness cause a swaying motion, and thus inertia forces are generated. Accordingly, drill rigs are considered to be quite unstable by the inertia forces due to sway during self-propulsion. It was confirmed that further study is needed to specify the safety requirements in terms of the bearing ground.

CONCLUSIONS

A case study on the overturning of drill rigs on construction sites was discussed to address problems with stability. The conclusions are summarized as follows:

- 1) Top heavy structure is provided in drill rigs during propelling by themselves. Sufficient bearing capacity is required to support the machinery safely. The case introduced to illustrate overturning occurred due to penetration by the crawlers because of a failure of the bearing ground. Hence, sufficient capacity must be provided to keep drill rigs stable in the bearing ground.
- 2) Safety regulations worldwide prescribe the stability angles as allowable tilt by the overturning moment. By contrast, the bearing ground is assumed to be sufficiently stiff and firm. Safety requirements on bearing ground are not prescribed in the regulations.
- 3) Calculation procedures regarding the pressures acting on the ground are specified in the regulations. Nevertheless, the values obtained are generally lower estimated because the tilts in drill rigs induced by differential settlement in crawlers are not considered.
- 4) Drill rigs propel themselves in sites while mobile cranes stand still in their positions during hooking operations. Inertia force caused by sway during propelling makes drill rigs more unstable than mobile cranes. Accordingly, the potential risk of the overturning increases for drill rigs.
- 5) Safety requirements for bearing ground are necessary to prevent the overturning of drill rigs and similar foundation machinery. Clarification of the relationship between characteristics of instability of the drill rigs and properties of the bearing ground needs to be addressed in further studies.

REFERENCES

- British Standards Institution. (1996a). "*Piling equipment - Safety requirements*", BS EN 996.
- British Standards Institution. (1996b). "*Drill rig -Safety*", BS EN 791.
- Japanese Standards Association. (2007). "*Foundation work machinery - Safety – Part 1: Requirements for piling equipment*", JIS A 8509-1.(in Japanese)
- Tamate, S., Suemasa, N. & Katada, T. (2005). "*Analyses of Instability in Mobile Cranes due to Ground Penetration by Outriggers*", American Society of Civil Engineers (ASCE), Journal of Construction Engineering and Management Vol.131 (6): pp 689-704.
- CIRIA. (2003). "*Crane Stability on Site*", Special publication 131, pp39-56.
- Tamate, S., Katada, T. & Suemasa, N. (2006). "*A study on safety requirements of bearing ground for mobile cranes*", Physical Modeling in Geomechanics – 6th ICPMG '06, pp.1297-1303.
- The Society of Materials Science, Japan. (2002). "*A guideline for design and construction of diaphragm walls*", pp.77-79.(in.Japanese)

実大走行実験によるくい打機の不安定化挙動の解析†

堀 智仁*1 玉手 聡*1

基礎工事用大型車両系建設機械（以下、「くい打機」という）は、上部旋回体と下部走行体で構成される大型の建設機械である。毎年、この種の機械の転倒災害が数件発生している。原因の多くは設置地盤の支持力不足にあるが、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と、この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。本研究では、くい打機の自走時不安定化メカニズムを明らかにすることを目的に、実機を用いた実大走行実験を実施した。実大走行実験では機体の3箇所に3成分の加速度計を設置して、直進およびカーブの2つの条件で走行挙動を計測した。その結果、走行時のくい打機の応答加速度には、長周期的な揺れが確認された。また、カーブ走行では応答加速度に増加が見られ、くい打機が不安定化した際の特徴的な傾向が計測によって明らかになった。

キーワード: くい打機, 実大実験, 自走時挙動, 施工安全

1 はじめに

くい打機は地盤の改良工事や基礎工事に用いられる大型の建設機械である。過去に発生した災害を調査すると、自走中における転倒が年間数件発生している。この転倒による被害は、現場内のみならず、その周辺にも及び、マスメディアでも大きく報道されている。

くい打機の上部旋回体には長尺なリーダー等が備わり、トップヘビーな状態で自走する。しかし、施工現場を自走するくい打機が「どのように」、そして「どの程度」不安定化するのかが未解明な問題である。

そこで本研究では、くい打機の安定度と走行地盤の支持力条件の違いが揺動と接地圧力分布に与える影響の解明を試みている。

本報告は、その第一段階として調査した国内外の安全規則に関する比較と、実大のくい打機を用いた自走実験から明らかになった揺動特性について述べる。

2 くい打機の転倒防止に関する国内外の関係規則

1) 国内の規則

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。その一つは、車両系建設機械構造規格¹⁾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において、傾けても転倒しない角度を表し、前後左右について満足しなければならない値である。表1に機械が備えるべき安定度を示す。くい打機が有するべき安定度は5度である。この値はブル・ドーザーのそれと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。

もう一つは、労働安全衛生規則第173条²⁾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。しかしながら、設置地盤の具体的な要件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³⁾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以上の確保を使用基準に定めている。

表1 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

表2 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

2) ヨーロッパの安全基準

くい打機に関するヨーロッパの基準について調査した結果、ヨーロッパの関係各国の基準が1996年に統一され、以下の2つの欧州規格が示されていた。

(1) EN-996(1996)・Piling equipment・Safety requirements

EN-996⁴⁾では、くい打機が有するべき安定度を、施工時と休止時に分けて、それぞれを3つに分類して、4つの荷重成分に対する部分安全率と機体の安定度を表3の通り示している。

(2) EN-791(1996)・Drill rigs・safety

EN-791⁵⁾には、自走時と作業時の2つの状態についてくい打機の安定度を「移動中は、前後左右に対して10度以上を有し、その他の状況は5度以上を有しなければならない。このときの安定度10度は、加速時と停止時の動的な力の作用による影響の余裕も含んでいる」と記述されている。

† 原稿受付 2008年12月19日

† 原稿受理 2009年02月17日

*1 労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ

連絡先：〒204-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6

労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ 堀 智仁*1

E-mail: horito@s.jniosh.go.jp

表 3 荷重状態と部分安全率

状態		作業荷重	旋回荷重	風荷重	動的荷重	安定度
施工時	作業中	1.1	1.1	1.1	1.1	5度
	自走中	1.1	1.1	1.1	1.1	8度
	停止時	1.1		1.1	1.1	5度
休止時	風荷重が作用	1.0		1.3		5度
	リーダーが起立状態	安定モーメント>1.1×転倒モーメント				
	リーダーが低い状態					5度

3) 日本とヨーロッパの法令規則の比較

表4にくい打機の安定度に関する日本とヨーロッパの基準の比較を示す。表に示すように、日本とヨーロッパでは走行時の安定度に違いが見られ、ヨーロッパの安定度の基準は日本よりも厳しく、詳細に記述されていることがわかった。しかしながら、くい打機の設置地盤に関する要件については、国内外の規則にその詳細が示されておらず、設置地盤の支持力要件の検討は急務であると考えられる。

表 4 安全規則の比較

	安定度			
	安全基準		推奨値	
	施工時	走行時	施工時	走行時
日本	5度	5度	7度	9度
ヨーロッパ	5度	8及び10度	不明	不明

3 実大走行実験地盤の概要

1) 実験現場

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実施した。その後、走行路に敷鉄板を敷設して、くい打機を自走させた。機体に生じる加速度応答は後述する3箇所で計測を行った。

2) 水準測量

水準測量は1.8m 間隔の格子状に測点を設定し、128地点(4×32)について計測を行った。基準点の地盤高を0mとした時の高低差を図1に示す。走行路には緩やかな起伏が見られる。高低差は最大で約10cmと小さく、

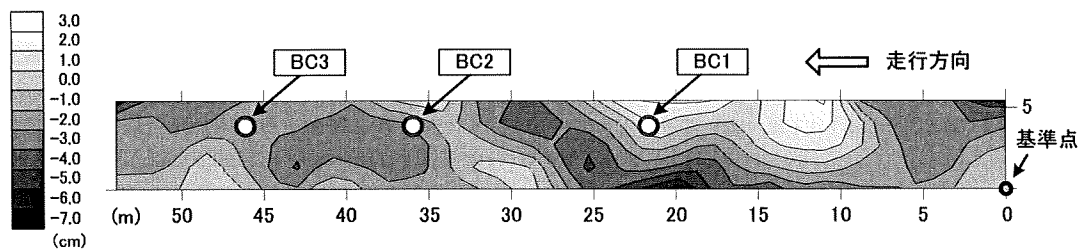


図 1 水準測量の結果

ほぼ平坦な地盤である。図中のBC1~BC3は後述する平板載荷試験の実施位置である。

3) 現場密度試験

走行路地盤密度を砂置換法⁶⁾により調査した。試験に用いた砂は豊浦砂である。表5に試験結果を示す。No.1は平板載荷試験を実施したBC1の近傍における結果であり、No.2はBC2の近傍における結果である。No.1とNo.2を比較すると、乾燥密度と含水比の値に差が見られる。図2に試験孔から採取した試料の粒度分布を示す。No.1はNo.2に比べ全体的に左上に位置しており、No.2よりも粒径が小さく、粘土分やシルト分を多く含んでいる。以上の結果から、走行路の土質は箇所によってやや異なることがわかった。

表 5 現場密度試験の結果

試料名	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 w(%)
No.1	2.685	1.531	0.922	66.0
No.2	2.675	1.670	1.389	20.2

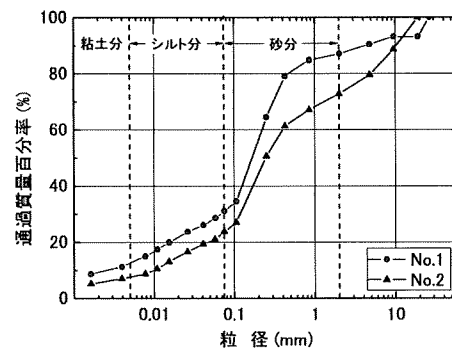


図 2 採取した試料の粒度分布

4) 平板載荷試験

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。平板載荷試験は剛な載荷板を介して原地盤に荷重を与え、荷重の大きさと載荷板の沈下量との関係から、ある深さまでの地盤の変形や強さなどの支持力特性を調べるための試験である⁷⁾。本研究では直径 30cm の円形の載荷板を用いた。写真 1 に平板載荷試験の様子を示す。試験はひずみ制御（変位速度 5mm/min）により、図 1 に示す 3 箇所で実施した。図 3 に載荷応力 (q_n) 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 が 0~0.1 の範囲では s/D 増分に対する q_n 増分が大きく、その傾き K 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、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_n 値を極限支持力 (q_u) と定義し、求めた値は 478~623kPa であった。BC1 地点の極限支持力が低い原因は、前述のとおり BC1 地点は BC2 地点に比べ含水比が高く、粘土分およびシルト分を多く含むためと考えられる。しかしながら、3 地点の q_u は本実験で使用したくい打機の最大接地圧 p_{max} (=196kPa) よりも 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。

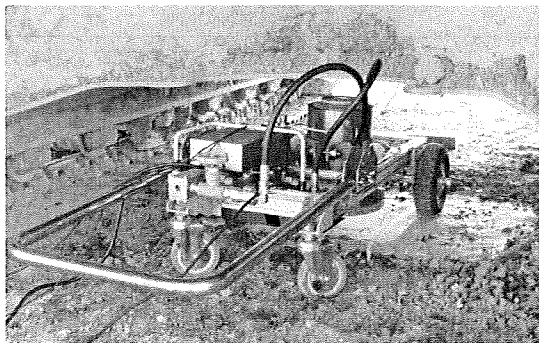


写真 1 平板載荷試験の様子

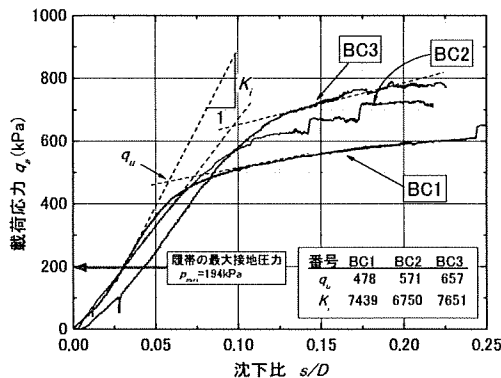


図 3 載荷応力 (q_n) - 沈下比 (s/D) 関係

4 実大走行実験

1) 走行実験の概要

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 27m、総重量 980kN、

安定度 17 度、履帯の最大接地圧 194kPa である。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)、上下方向成分 (A_z) をサンプリング周波数 100Hz で計測した。加速度計の極性は、 A_x は後方、 A_y は右、 A_z は上が正極となっている。

走行地盤には敷鉄板を進行方向に対して横向きに設置した。この敷鉄板は 1.5m×6m×25mm のものである。実験の走行速度は 1.0km/h (=28cm/sec) である。

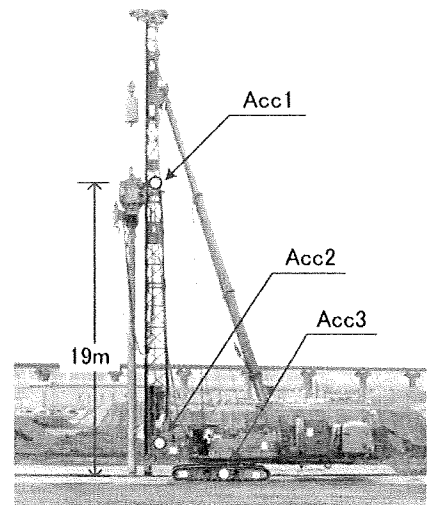


写真 2 実験に使用したくい打機

2) 周辺の振動およびエンジンの振動による影響

実験を行った現場は 24 時間体制で施工が行われており、実験現場の近傍ではサンドコンパクションパイルの施工が行われていた。サンドコンパクションパイルは振動あるいは衝撃荷重を利用して砂杭を造成する工法である。実験現場では数十 m 離れた地点で行われている施工の振動が感じられた。そのため、計測データにはサンドコンパクションパイルの施工によるノイズの影響と、エンジンの稼働によるノイズの影響が考えられる。そこで、エンジンを稼働させた状態での待機中の応答加速度を計測した。図 4 に計測した結果を示す。図中にはリーダー上部 (Acc1) とクローラ基部 (Acc3) の応答加速度を示した。なお、電気的なノイズの影響を除去するために 5Hz のローパスフィルターを施してある。Acc1 と Acc3 の応答加速度を比較すると、上下方向 (A_z)、前後方向 (A_x) および左右方向 (A_y) 全てにおいて、Acc1 の応答が大きく、緩やかに増減する傾向が見られる。これは、計測時の風速が 11m/sec と比較的強い風が吹いていたためと考えられる。 $t=16\sim 23$ sec に大きな応答が見られる。これは、サンドコンパクションの施工による影響と考えられる。いずれにせよ、待機中の加速度応答の最大振幅は $0.03m/sec^2$ であることがわかった。

図4に示したデータの周波数解析結果を図5に示す。加速度計の設置位置、計測方向によらず、ほぼ同じ周波数成分を含んでいる。その周波数は、4.7、9.4、14.1、18.9Hzであり、4.7Hzの倍数に卓越周波数が見られることから、4.7Hzが現場周辺の振動の固有周波数であると考えられる。

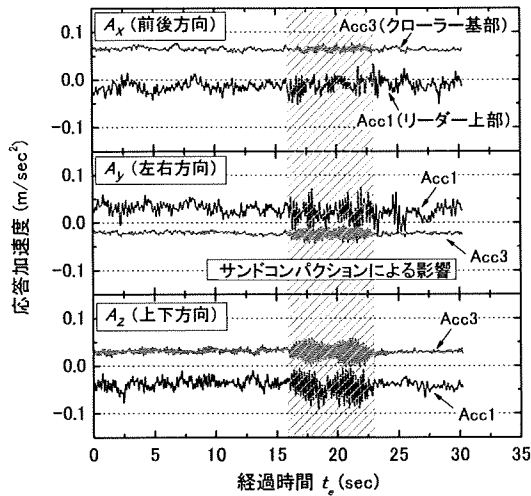


図4 応答加速度 (待機中)

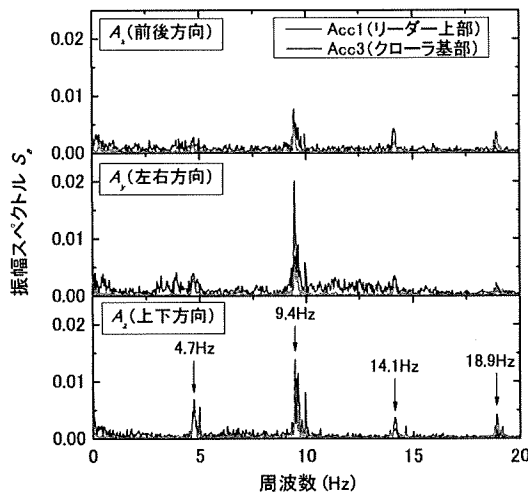


図5 周波数解析結果 (待機中)

3) 直進走行

図6にくい打機を直進させた時の応答加速度を示す。計測開始から約12秒に各Accの急増が見られる。これは機械が直進を開始したためである。待機中のノイズの最大振幅は0.03m/sec²であるのに対し、計測値はそれに比べ大きく、現場周辺の振動によるノイズの影響はないと言える。Acc1とAcc3の応答加速度を比較すると、Acc1の応答加速度はAcc3に比べ全般的に大きく、Ax(前後方向)には顕著な差は見られないが、Ay(左右方向)に明らかな増加が見られる。一方、Acc3では、AxはAcc1

とほぼ等しいが、Ayの値が小さい。すなわち、クローラ基部の前後方向の応答加速度が卓越している。

t_e=54, 100, 147, 200, 252 (sec) 付近に見られる大きな加速度応答は、走行方向の修正動作によるものである。左右の履帯に短時間の制動を与えて進行方向を微調整している。この時、機体には大きな揺れが発生し、リーダーの上部ではつり下げられた装備が動揺した。リーダーと装備は時折衝突する様子も観察された。

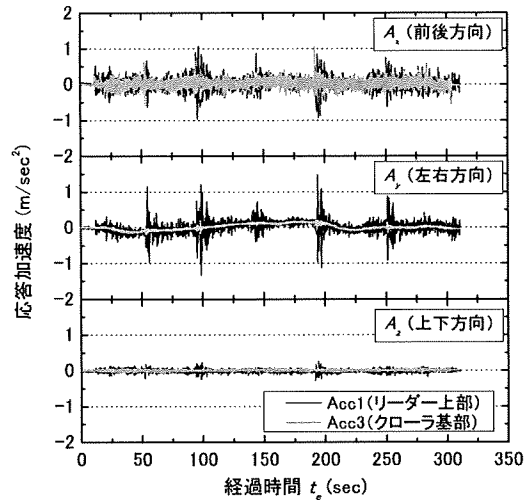


図6 応答加速度 (直進走行)

図7に応答加速度のAxとAyを平面上に表した軌跡を示す。Acc1では軌跡が縦長の楕円状に分布していることがわかる。Axの最大振幅は約1m/sec²であり、Ayでは約1.5m/sec²である。従ってAyの方がわずかに大きい。しかしながら、軌跡が集中している部分についてはほぼ円形状である。Acc2はAcc1に比べてより円形状に集中した分布が見られる。Ayの最大振幅はAcc1に比べ小さいものの、明らかに小さな範囲に集中している。Acc3では軌跡が横長の楕円状に分布している。Ayの最大振幅に比べてAxの最大振幅が大きく現れており、Acc1とは逆の分布傾向を示している。軌跡が集中する部分を比較すると、分布面積の大きさはAcc1で大きく、Acc2およびAcc3では小さい。また、Acc1ではAyの応答加速度が大きく、Acc3ではAxの応答加速度がAyに比べて相対的に大きいことが分かった。

図8は応答加速度の度数分布解析の結果である。縦軸に相対度数(I_d)を示す。AxとAyについて3箇所のI_dを比較すると、応答加速度はゼロを中心にほぼ対称に分布しており、I_dのピーク値は箇所によって異なっている。Acc1の最大I_dはAcc2とAcc3のそれに比べて小さく、3箇所の中で最も変動が大きいことが分かる。この変動の大きさは図中に示した標準偏差(SD)の値の比較からも明らかである。AyについてはAcc2およびAcc3の最大I_dの値が大きく、加速度の変動が小さいことがわかる。

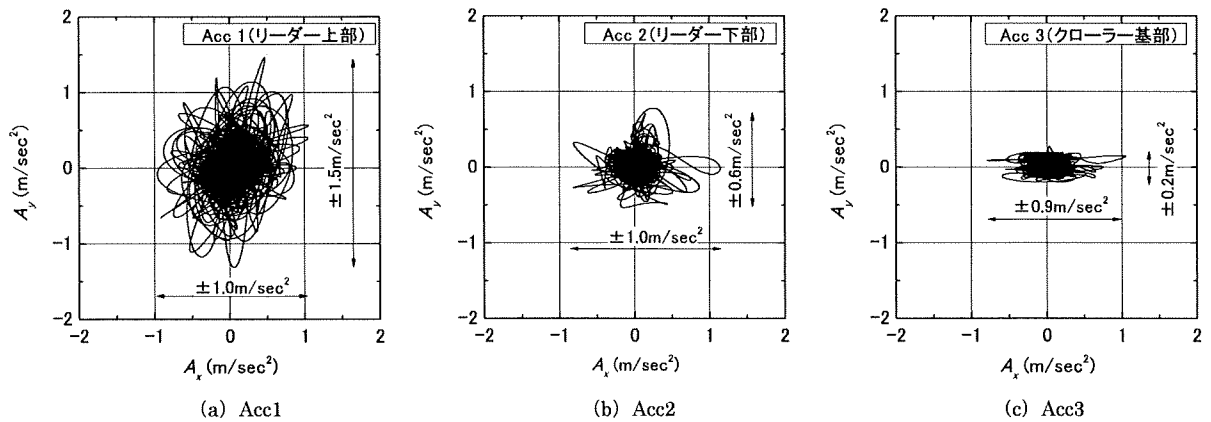


図7 応答加速度の軌跡 (直進走行)

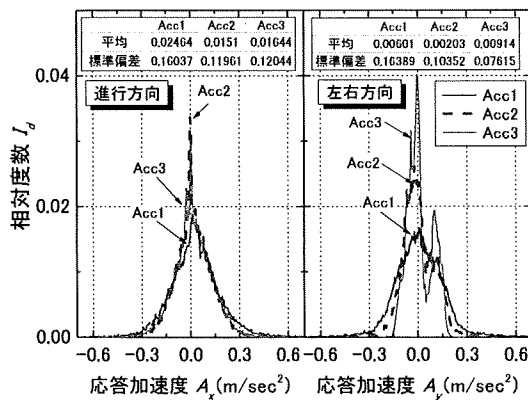


図8 度数分布解析 (直進走行)

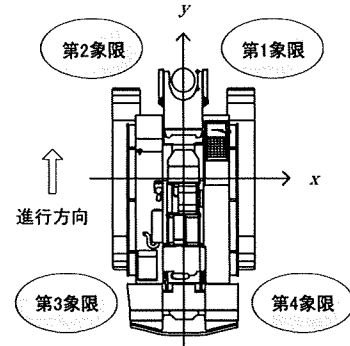


図10 象限の説明図

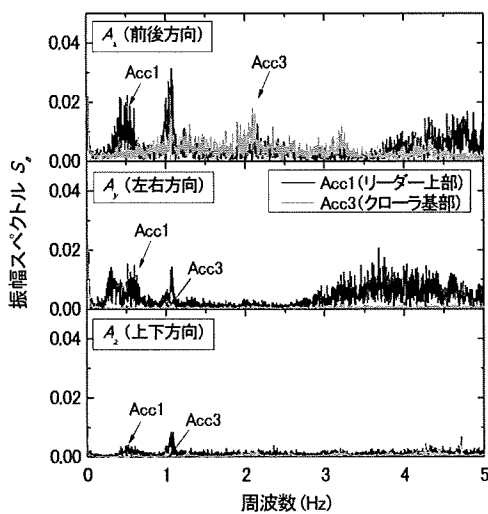


図9 周波数解析 (直進走行)

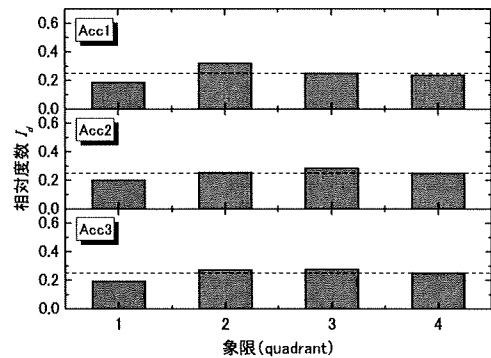


図11 度数分布解析結果 (直進走行)

図9は周波数と振幅スペクトル(S_d)の関係を示す。Acc1では A_x と A_y の応答に増幅が見られる。 A_x については0.5Hz付近に、 A_y については0.3と0.6Hz付近に卓越周波数が見られる。これは自走時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に見ら

れるもう一つのピークは、つり下げられた装備の振動や風による影響と考えられる。以上の結果から、安定度17度、水平堅固条件では、自走時に0.5Hz程度の揺れが生じ、安定度および地盤反力係数の減少により、卓越周波数はそれよりも低くなるのが定性的に推定される。

図7に示した応答加速度の軌跡の直交座標を極座標に変換した後、角度に関して級数間隔90度で度数分布解析を行い、各象限の分布を調べた。本研究では、図10に示すように前方右側を第1象限と定義した。図11および表6に度数分布解析の結果を示す。図中の破線は、

各象限に均等に分布した場合の値、すなわち 0.25 を示している。各象限の相対度数を比較すると、概ね 0.25 付近に分布している。また、前後方向の揺れの軸対称性を調べるため、第 1 象限と第 2 象限の相対度数の和を算出すると、Acc1 は 0.508, Acc2 は 0.461, Acc3 は 0.469 であり、前後方向にほぼ軸対称な揺れが生じている。

表 6 各象限の相対度数

	第 1 象限	第 2 象限	第 3 象限	第 4 象限
Acc1	0.186	0.322	0.253	0.239
Acc2	0.204	0.257	0.286	0.254
Acc3	0.196	0.273	0.279	0.253

4) カーブ走行

機械を前進させながら左にカーブさせた際の挙動計測を行った。図 12 はカーブ走行時における履帯の軌跡を示す。曲率半径 r_n を求めるために、式(1)と(2)を満足する r_n を算出した。

$$r_n(1 - \cos \theta_n) = a_n \tag{1}$$

$$r_n \sin \theta_n = d_n \tag{2}$$

ここで、 a_n は、敷鉄板端部からの距離であり、 d_n は、走行開始地点からの距離である。曲率半径を計算した結果、平均曲率半径は 28m であった。

カーブ走行は左側の履帯に細かな制動を繰り返し与え

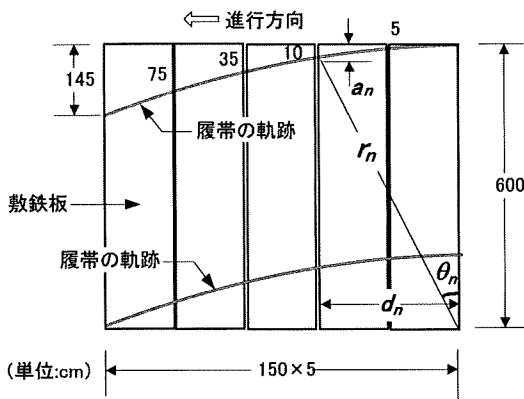


図 12 カーブ走行時における履帯の軌跡

ることによって行われた。機械には明らかな動揺が発生し、特にリーダーにつり下げられたパイロマシンの顕著な動揺が見られた。

図 13 は各箇所の応答加速度を時系列的に示す。ノイズの影響を取り除くために 5Hz のローパスフィルターを施してある。先の図 6 に示した直進時における応答加速度を比較すると、明らかな増加が見られる。Acc1 および Acc3 の A_x と A_y を比較すると、Acc1 の応答が Acc3 に比べて大きく現れており、明らかな増幅傾向が見られる。特に Acc1 では A_x と A_y の応答が顕著に現れており、両成分の最大値はほぼ同レベルである。

図 14 は応答加速度の A_x と A_y を平面上に表した軌跡を示す。Acc1 は直進条件と同じく楕円状に分布しているのに対して、Acc2 および Acc3 は、 A_y に比べ A_x の応答が大きく、負に大きな応答を示している。これは履帯に細かな制動を与えて進路を修正する際に生じる特徴的な応答と見られる。

図 15 は A_x と A_y の度数分布解析の結果を示す。3 箇所における A_x の I_d 分布を見ると、Acc2 と Acc3 の平均値

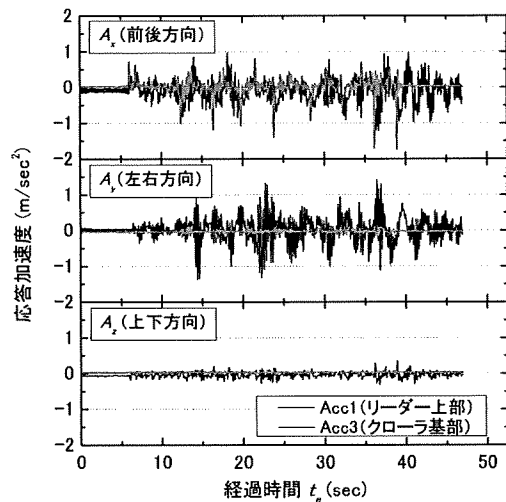


図 13 応答加速度 (カーブ走行)

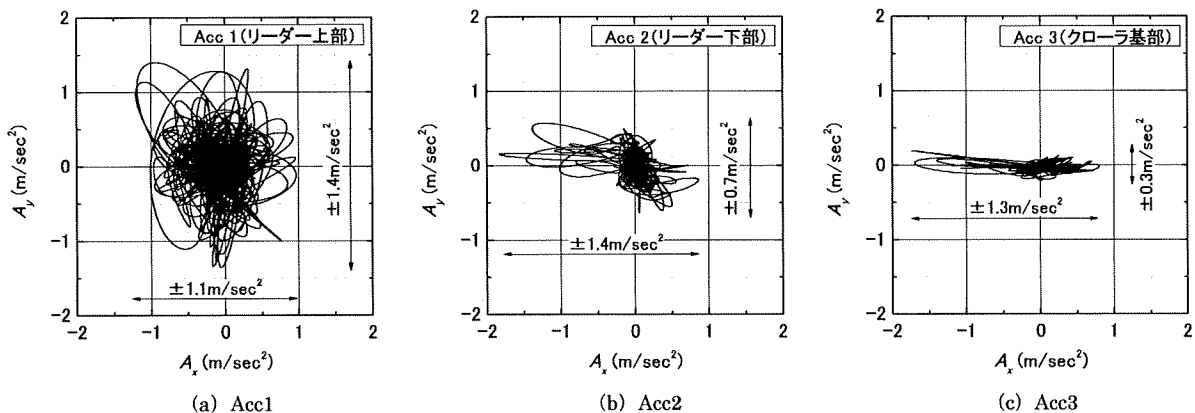


図 14 応答加速度の軌跡 (カーブ走行)

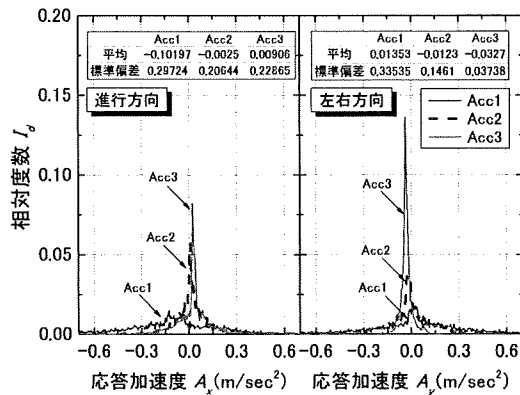


図15 度数分布解析結果 (カーブ走行)

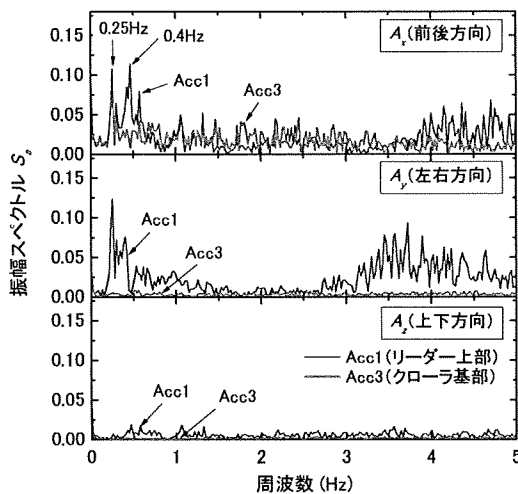


図16 周波数解析結果 (カーブ走行)

はほぼゼロである。それに対して、Acc1は -0.1m/sec^2 であり、平均値が原点から前方にシフトしており、転倒モーメントが作用している。

一方、 I_d の最大値はAcc3が最も大きくAcc1が小さい。標準偏差(SD)はAcc1とAcc3で大きく、それぞれ 0.297m/sec^2 と 0.229m/sec^2 である。直進条件のSDは、 0.160m/sec^2 と 0.120m/sec^2 であるため、カーブ走行での揺れは増加していることがわかる。 A_y においても I_d はゼロを中心としてほぼ対称に分布しており、その最大値はAcc3が最も大きくAcc1が最も小さい。SDはAcc1が他の2つに比べて大きく 0.335m/sec^2 である。

図16は振幅スペクトル S_a の周波数分布を示す。Acc1の A_x と A_y では 0.25Hz と 0.4Hz にピークが見られる。図13にも、4秒間隔で波形が大きくなっており、 0.25Hz は制動による周期であると考えられる。Acc3の A_x は 0.25Hz 付近にピークを示すものの、 A_y では加速度応答が小さく S_a に明確なピークは見られない。

カーブ走行では $0.25\sim 0.4\text{Hz}$ の長周期成分が確認され、直進走行に比べて不安定化することが明らかになった。

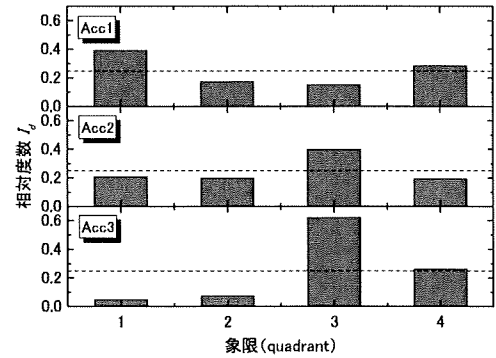


図17 度数分布解析結果

表7 各象限の相対度数

	第1象限	第2象限	第3象限	第4象限
Acc1	0.391	0.174	0.149	0.286
Acc2	0.209	0.198	0.399	0.195
Acc3	0.047	0.073	0.620	0.260

また、 0.4Hz はくい打機の安定度と地盤の特性によるものと考えられる。

図17および表7は応答加速度の軌跡の直交座標を極座標に変換した後、度数分布解析した結果である。直進条件の結果と異なり、分布が均等ではないことがわかる。これは、細かな制動を繰り返し与えられることによって機体の揺れに偏りが生じたことを示している。また、第1象限と第2象限の和を求めると、Acc1は 0.565 、Acc2は 0.407 、Acc3は 0.12 であり、非常に偏った値を示しており、Acc1では前方の相対度数が大きく、制動に伴う慣性力の影響が顕著に現れている。以上の結果から、加速度計の設置位置の違いにより大小関係が異なっているため、機体は不安定化していたと考えられる。

今後は、小型のくい打機模型を作製し、遠心場走行実験を行う予定である。遠心場走行実験では実大走行実験の挙動と比較を行うとともに、履帯に作用する圧力変動の計測を行う。最終的には、くい打機の転倒防止に必要な地盤の支持力要件についての検討を行う。

5 まとめ

本研究では、くい打機の転倒防止に関する法令規則を調べ、現行の基準の問題点を把握するとともに、くい打機の走行時に生じた応答加速度の計測を行い、以下の知見を得た。

- 1) くい打機の転倒防止に関する法令規則を調査した。その結果、国内外の規則ではくい打機が有すべき安定度について述べられているものの、安定設置に必要な地盤の支持力要件については記述が見られない。しかし、転倒災害の防止にはその検討が必要である。

- 2) 実大走行実験を行う前に走行路面の水準測量および地盤の支持力調査を行った。走行路の最大高低差は約 10cm と非常に小さく、ほぼ平坦地盤であった。地盤の支持力については本実験で使用したくい打機の最大接地圧の 2.5~3 倍程度の強度を有していた。そのため、走行路面は理想的な水平堅固地盤であることがわかった。
- 3) 直進とカーブの 2 つの条件で機体の 3 箇所の加速度応答を計測した。走行時の応答加速度はリーダー上部で揺れが増幅することがわかり、左右方向成分については前後方向に比べて増幅傾向がより明らかに見られた。
- 4) カーブ走行では片側の履帯に断続的に制動を与え、それによって機体に大きな揺れが生じていた。直進走行とカーブ走行の応答加速度を比較すると顕著な差が見られ、周波数解析の結果から、カーブ走行時に長周期成分が卓越することがわかった。
- 5) 直進走行の結果から、安定度 17 度、水平堅固条件で、自走時に 0.5Hz 程度の揺れが生じることがわかった。機体の安定度および地盤反力係数の減少により、卓越周波数はそれよりも低くなることが定性的に推定される。

謝 辞

実験を行うにあたり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ならびに羽田空港国際線エプロン JV の上地章夫統括所長には多大なるご支援とご

協力をいただきました。武蔵工業大学の片田敏行教授と末政直晃教授には本研究にご助言をいただくとともに、伊藤達彦氏（元武蔵工業大学学部生）には、実験に協力していただきました。心より感謝申し上げます。

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

文 献

- 1) 労働調査会. 労働安全衛生法. 労働調査会出版局編. 安衛法便覧 II 平成 19 年度版. 東京; 2007: 512.
- 2) 労働調査会. 労働安全衛生法. 労働調査会出版局編. 安衛法便覧 I 平成 19 年度版. 東京; 2007: 967.
- 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. 日本材料学会編. 京都; 2002: 78.
- 4) BSI. EN-996 Piling equipment: Safety requirements. British Standards Institution. BRITISH STANDARD. London; 1996.
- 5) BSI. EN-791 Drill rigs-Safety. British Standards Institution. BRITISH STANDARD. London; 1996.
- 6) 地盤工学会. 砂置換による土の密度試験. 地盤工学会編. 地盤調査の方法と解説. 東京; 2004: 563-570.
- 7) 地盤工学会. 平板載荷試験. 地盤工学会編. 地盤工学用語辞典. 東京; 2006: 284-285.

Experimental Analysis of Unstable Pile Driver Behavior when Self-propelling†

by

Tomohito HORI*¹, Sathoshi TAMATE*¹

A pile driver is a large construction machine used for ground improvement and foundation work. In recent years, there have been some reports of accidents in which the machine overturned. An investigation revealed that overturning accidents often occur while the machine is relocating to another pile. In this study, to clarify the mechanism which makes the pile driver unstable when it is self-propelled, real-scale experiments were performed. The behavior of the pile driver was measured by putting three-axis accelerometers in three places: the upper part and lower part of the leader, and the crawler base. The experiments were conducted under two conditions, straight and curved, on flat, firm ground. As a result, it was discovered that the pile driver was subject to long periodic shaking during self-propelling. The degree of shaking in response to acceleration on the curved course was large, and it was clarified that turning makes the machine unstable.

Key Words: pile driver, real-scale experiment, running behavior, construction safety

*1 Construction Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health

くい打機模型の自走挙動による応答加速度と接地圧力の計測

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

1 はじめに

近年、基礎工事中用大型建設機械（以下、くい打機という）の転倒災害がたびたび発生しており、その防止は極めて重要な課題となっている。くい打機の転倒防止に関する基準は国内外で定められている^{1),2),3),4)}し、これらの基準では、地盤が備えるべき条件について記述されておらず、安定設置に必要な地盤の支持力要件や、平坦さに関する条件が未解明である。

昨年度はくい打機の転倒メカニズムを明らかにするために、1/25 スケールのくい打機模型を製作し遠心場走行実験を行った^{5),6)}。模型地盤は、発泡ウレタンフォームを用いて一方で水平堅固な地盤を模擬した。その結果、機体の揺れに伴う接地圧力の変動を確認した。

今年は、走行地盤をより現実的に再現するために、関東ローンを締固めて模型地盤を作製した。

本報告では、関東ローン地盤におけるくい打機模型の遠心場走行実験について、その実験方法と得られた結果を述べる。

2 試験方法および試験条件

2.1 くい打機の小型模型

写真1は、くい打機の実験用模型^{7),8),9)}を示す。この模型は実機を1/25スケールで再現したものであり、遠隔操作による遠心場走行が可能となっている。

モーター、減速機、バッテリー等の部品は重心位置が実機と等しくなるように配置されている。表1に実機と模型における主要諸元の比較を示す。

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いる。これらのアーム部分にはひずみゲージが貼られており、履帯面に働く接地圧分布の測定が可能となっている。また、リーダーには加速度計を設置しており、機体に生ずる揺れを測定できる。模型に設置した加速度計の名称は図1に示すようにAcc,1~Acc,5と定義した。車軸の名称は前輪からFS(Front Sprocket), FR(Front Roller), CR(Center Roller), RR(Rear Roller), RS(Rear Sprocket)である。

表1 実機と模型における主要諸元の比較

	くい打機						
	実物			1/25 模型			
質量と重心距離 [*]	質量 (ton)	水平 x(m)	鉛直 y(m)	質量 (g)	水平 x(cm)	鉛直 y(cm)	
下部走行体	7.3	2.58	1.43	1024	6.5	2.7	
上部構造体	機体・リーダー	34.3	-1.61	12.42	1077	10.3	9.7
	アースオーガ類	13.7	-2.45	15.98	952	-3.8	58.3
合計	55.3	Gx=0.88	Gy=6.08	3053	Gx=35	Gy=22.5	
接地圧力(kPa)	101		133 (25g 場)				
走行速度(km/h)	1.08 (=30cm/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。

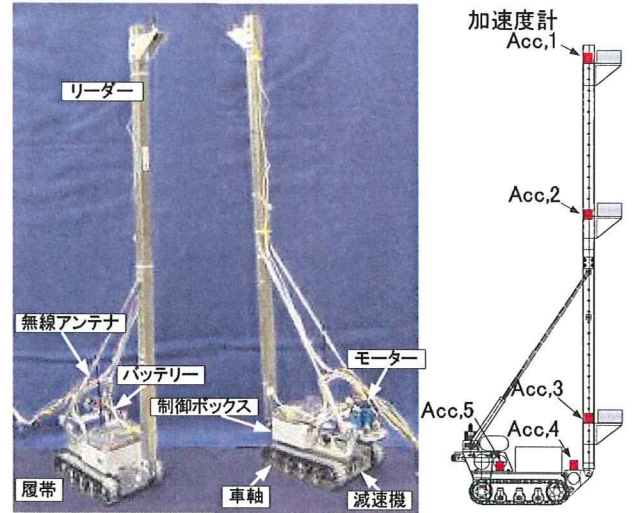


写真1 くい打機模型

図1 加速度計位置

2.2 実験装置および実験概要

図2に実験の概要を示す。実験に用いた容器は幅250mm、長さ800mm、高さ300mmである。遠心装置の回転に伴う風の影響を排除するために風防カウルで全体が覆われている。走行時の移動距離は、ワイヤ式変位計で測定した。関東ローンを用いて作製した模型地盤を、実地盤として模擬し遠心場走行実験を行った。

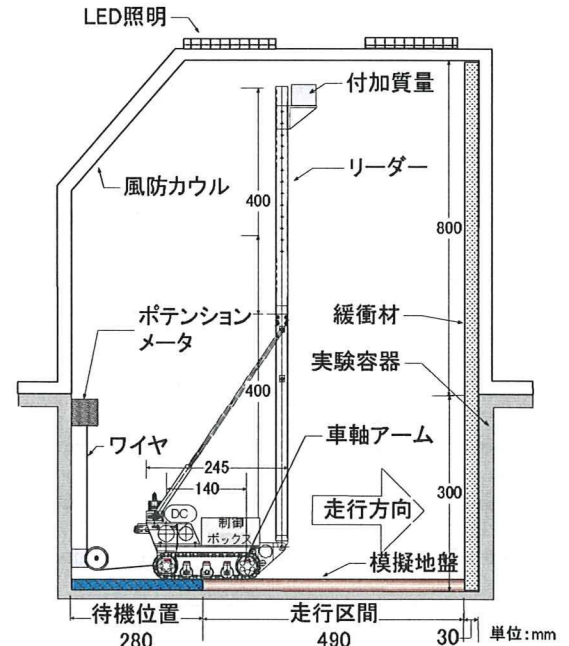


図2 遠心模型実験の概要図

写真2は実験に使用した遠心模型実験装置（NIIS Mark-II Centrifuge）を示す。本装置の、回転半径は2.30m、最大加速度は100gである。

キーワード：くい打機 遠心模型実験 転倒災害 支持力 関東ローン

連絡先：武蔵工業大学 都市基盤工学科 地盤環境工学研究室 TEL03-5707-2202

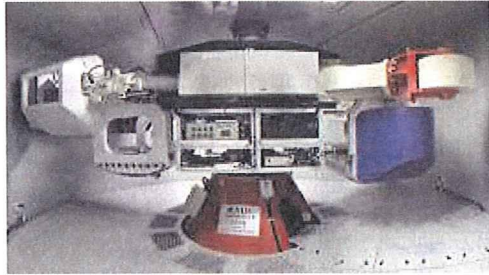


写真2 遠心模型実験装置 (NIIS Mark-II Centrifuge)

表2 実験条件

安定度 (deg)	重力 (G)	付加質量 (g)	付加位置	最大接地圧力 q_{max} (kPa)
10	5	440	上	31.7
5	5	600	上	42.9

表2に実験条件を示す。付加質量の重量を変えることによって安定度を5度、10度の2つの条件に設定した。付加質量位置は図1に示すようにリーダーの上部である。

2.3 模型地盤の作製

模型地盤は実験容器内の縦 490mm×横 250mm の走行路部分に作製した。土試料には最適含水比に予め調整した関東ロームを用いた。実験容器の壁面にはシリコングリスを塗布して摩擦を低減した。模型地盤の作製では、上層と下層の2層に分けて静的に締固めた。

1) 下層の作製

関東ロームをシャベルで静かに容器内に投入し、スクレーパーで表面高さを一定にした。その後、走行路部分と面積が等しい載荷盤を上部に設置し、載荷圧力が 147kPa となるように荷重を与え、1 時間締固めた。この時に投入された関東ロームの質量は締固め後の層圧が 2.5cm となるように予め調整した。

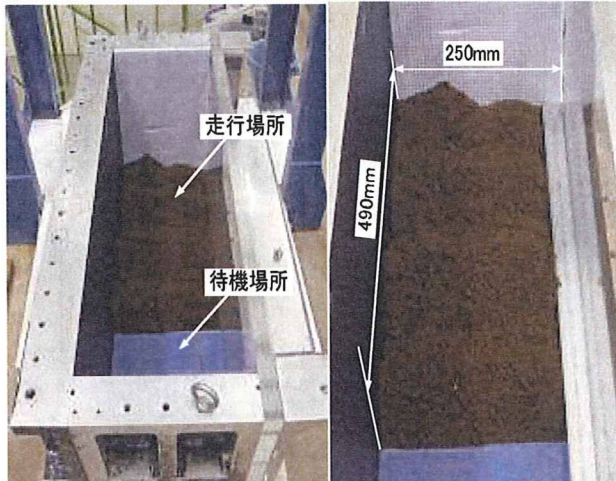


写真3 模型地盤の表面作製状況

2) 上層の作製

締固めた下層の表面を軽く乱して上層との連続性を高めた。下層と同様にして関東ロームをシャベルで静かに容器内に投入した。但し、上層の作製ではその後にスクレーパーによる高さの調整は行っていない。これは、締固め後の表面に意図的に表面(写真3)を再現するためである。

そのために 25cm×4cm の載荷面を有する載荷板を用いて、進行方向に分割して締固めを繰り返した。

写真4は作製した模型地盤を示す。地盤に表面が形成されていることがわかる。また、白い点は、走行実験終了後にハンドベーン試験を行うポイントを示したものである。



写真4 模型地盤

3) 模型地盤の表面形状

地盤作製後、模型地盤の表面の形状を明らかとするために、レーザー変位計を用いて計測を行った。その結果を図3に示す。

変位(s)が 0mm から 63mm は一様な発泡ウレタンフォーム上であり表面高さ(h)はほぼ 0mm である。を計測したものである。関東ローム地盤は 63mm 以降である。

変位(s)が 63mm～130mm の間では、表面が 7mm 程度下降している。そして $s=130\sim290$ mm では約 14mm 上昇している。その後、 $s=290\sim500$ mm では再度緩やかに下降し、その値は 10mm 程度である。計測は 535mm まで行った。

また、60mm の間隔で Center, Left, Right の 3 カ所について計測を行った。

その結果、Right の値が全体的に小さい。従って、くい打機は進行方向に対して右側が左側に比べて約 2mm 低い。しかし、その値は小さいことから、走行路はほぼ奥行き方向に対して水平とみなされる。

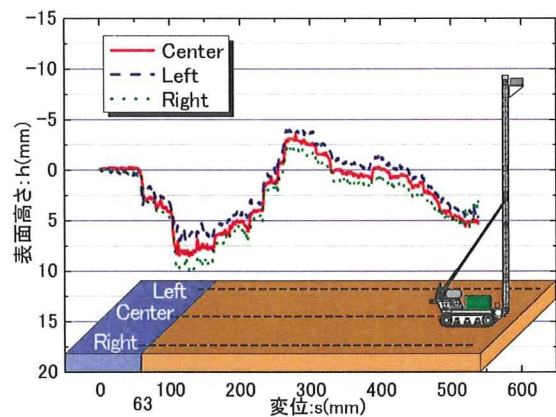


図3 模型地盤の表面計測

4) 地盤の表面と応答加速度の関係

図4は模型地盤の表面形状と、小型模型のリーダー上部における応答の比較を示す。応答加速度(r_a)の値は進行方向成分を正とした。

2 つのグラフは形状が酷似していることから、応答加速度と地表形状は関係性が見られる。

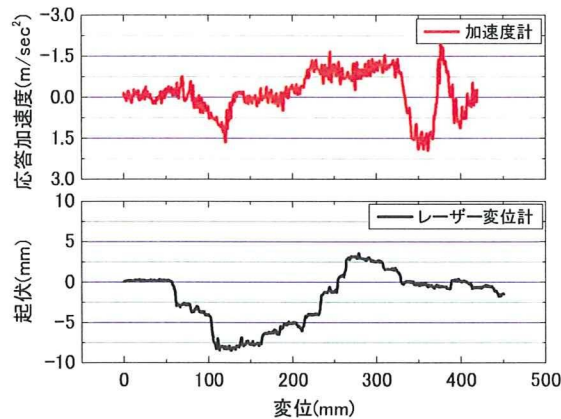


図4 応答加速度と表面の関係

3 実験結果の比較と考察

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、その後、定速走行させた。この加速に要する距離は150 mm程度である。この時、履帯は全面が走行地盤上に位置する。従って本研究では、走行距離(s)が150 mm以降のデータを解析対象とした。

3.1 応答加速度と時間の関係

(1) 進行方向成分

搭載する質量を変えて異なる安定度を再現し、自走挙動を比較した。この質量を本報告では付加質量と呼ぶ。付加質量は600gと440gの2種類であり、高さ85cmのリーダー上部に搭載して固定した。これによる安定度はそれぞれ、5度と10度とする。

履帯を支点とした回転運動に対する慣性モーメント¹⁰⁾は5度の場合が10度の場合と比べて大きく定性的に長周期化する。

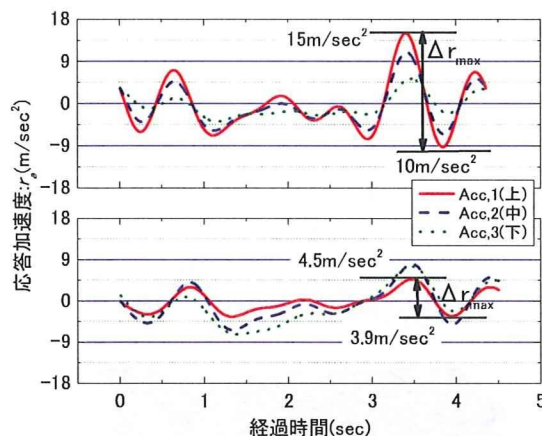


図5 応答加速度と経過時間の関係(進行方向)

図5に、リーダーの上部、中間部、下部における応答加速度(r_a)の経時変化を示す。

リーダー上部(Acc,1)における応答を比較すると、 r_a の振幅は安定度が10度の時に大きい。これは前述に示すように、安定度5度は慣性モーメントが安定度10度に比べ大きいことから、長周期的に機体が揺れ、反対に慣性モーメントが小さい安定度10度の場合では、短周期的に機体が揺れたことが考えられる。

加速度計の位置における応答波形を比較すると、安定度10度はリーダー上部(Acc,1)、中間部(Acc,2)、下部(Acc,3)の順で振幅が大きい。しかし安定度5度はAcc,3、Acc,2、Acc,1と揺れており違いが見られた。これは、重心位置の違いによる揺れの周期の違いが原因であると考えられ、重心位置の違いによって、揺れ方に違いが現れることが明らかとなった。

(2) 左右方向成分

図6に、左右方向成分の r_a を示す。リーダー上部の応答加速度(Acc,1)はマイナス側が幾分、両実験結果に共通して大きく現れている。その値の偏りは、奥行き方向の傾斜に一致しており、わずかな影響が見られる。

Acc,1における揺れの方向成分を図5と図6により比較する。 r_a の最大値と最小値の差を最大揺動と定義(Δr_{max})すると、進行方向の Δr_{max} は安定度の違いによる差が見られる。一方、左右方向の揺れはくい打機に特有の現象として現れるようであり、安定度の違いによる差が見られない。

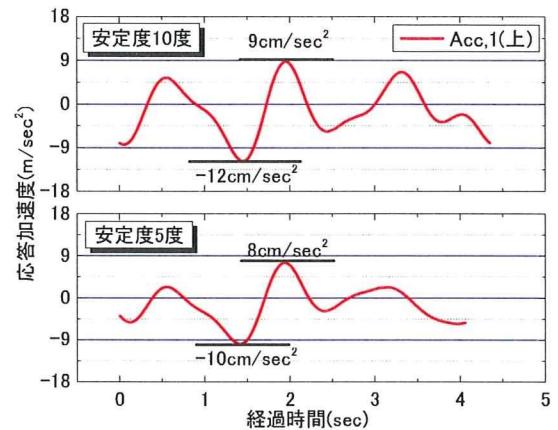


図6 応答加速度と経過時間の関係(左右方向)

3.2 揺れの周波数特性

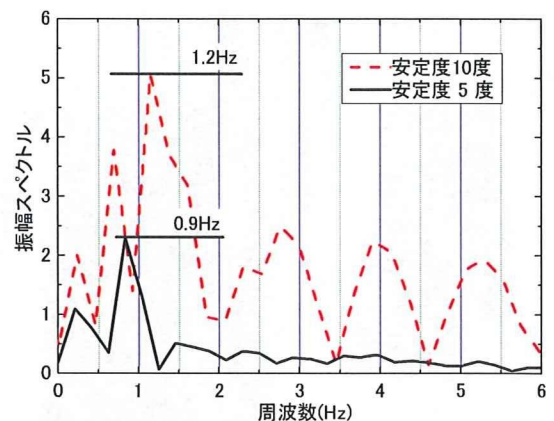


図7 周波数と振動スペクトル関係

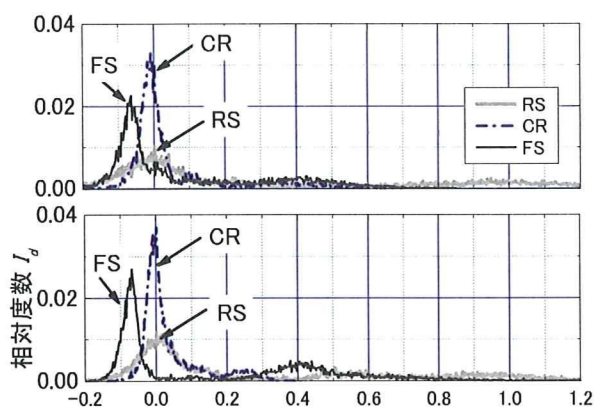
図7に応答加速度を周波数解析して求めた振幅スペクトルの分布を示す。

両安定度においてスペクトルのピークが1Hz付近に発生しているが、その値には若干の差が現れている。すなわち、安定度5度では0.9Hz、安定度10度では1.2Hzに卓越周波数があり、安定度の低下に伴う長周期化が見られる。これは先に述べた慣性モーメントの差による影響と定性的に一致する。

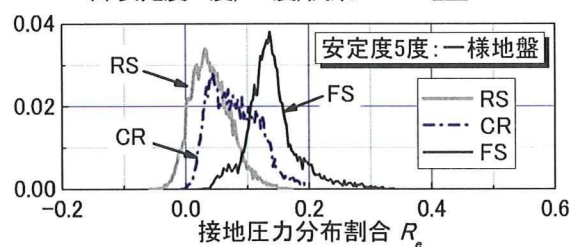
3.3 履帯接地圧力の分布

図8(a)に関東ローム地盤における安定度5度と10度の接地圧力分布割合(R_e)と相対度数(I_d)の関係を示す。ここで、接地圧力分布割合(R_e)とは、各車軸に作用する荷重から接地圧力をそれぞれ算出し、その値を全接地圧力の合計で除した値のことである。接地圧力分布割合を算出後、度数分布解析を行った。

くい打機は、前方にリーダーが搭載されていることにより進行方向にむかって転倒モーメントが働く建設機械である。そのため、履帯にかかる静的接地圧力は最前部の車軸(FS)が理論上最大となる。



(a) 安定度5度, 10度, 関東ローム地盤



(b) 安定度5度, 一様地盤

図8 接地圧分布割合の度数分布解析

ところが、各車軸の R_e のピークは0付近に見られるが、 R_e は広い範囲に分布している。FS(前軸)とRS(後軸)の R_e は最大約1を示した。これは、機体が瞬間的に前軸、又は後軸による一点支持状態になったことを示している。この原因は、模型地盤の表面に存在した起伏が過大であったためと考えられる。 R_e のピークが0付近に分布したと考えられる。また、安定度5度、10度では顕著な差は見られない。

図8(b)に発泡ウレタンフォームを用いて水平堅固地盤を作製して行った結果を示す。安定度は5度である。

関東ローム地盤の結果と比較すると、最大相対度数と分布形状に違いが見られる。最大相対度数(I_d)はFSが大きくRSが小さい。くい打機は前方に長尺なリーダーを搭載しているため重心位置が履帯の中心より前方にある。そのため、FSの I_d が大きくなっている。 R_e は正規分布的に分布している。弾性的な地盤支持状態であるため、機体に生じる揺れが小さいためであると考えられる。

また、応答加速度の最大振幅を比較すると、一様地盤では 1m/sec^2 であるのに対して関東ローム地盤では 15m/sec^2 であ

る。このことから関東ローム地盤では、大きな揺れが生じていたことが分かる。

4 まとめ

くい打機の自走挙動を明らかにすることを目的に、関東ロームを用いて作製した模型地盤で遠心場走行実験を行った。

- 1) レーザー変位計により計測される地盤の表面形状と、加速度計により計測される応答加速度には関係性が確認された。また、左右方向についての地盤の傾斜は、計測値に影響がわずかに現われることも明らかとなった。
- 2) 安定度5度と10度について進行方向の応答加速度は顕著な大小関係が存在したが、左右方向の応答加速度は微小な大小関係しか存在しなかった。
- 3) 応答加速度を周波数解析した結果、卓越周波数が、安定度5度では0.9Hz、安定度10度では1.2Hzと若干の差が見られた。これは慣性モーメントの差による影響と考えられる。
- 4) 履帯に作用する接地圧を計測した結果、水平かつ堅固を模擬した発泡ウレタンフォーム地盤ではFSの接地圧力分布が最大であった。しかし、凹凸がある関東ローム地盤において、FSの接地圧力分布は最小となり、凹凸のある関東ローム地盤特有の影響であると言える。

5 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「基礎工事前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。

6 参考文献

- 1) 労働調査会：安衛法便覧 I，労働安全衛生規則車両系建設機械構造規格，pp.966-967，2007。
- 2) 労働調査会：安衛法便覧 II，車両系建設機械構造規格，pp.512-516，2007。
- 3) British Standards Institution：BS EN 996，Piling equipment - Safety requirements，1996。
- 4) British Standards Institution：BS EN 791，Drill rigs - Safety，1996。
- 5) 玉手 聡：基礎工事前大型建設機械の転倒防止に関する研究，厚生労働省科学研究費補助金労働安全衛生総合研究事業平成19年度総括分担報告書，2008
- 6) 伊藤達彦，玉手 聡，堀 智仁，末政直晃，片田敏行：杭打ち機械の小型模型を用いた自走実験の計画，第4回地盤工学会関東支部発表講演集，pp.375-376，2007。
- 7) 堀 智仁，玉手 聡，伊藤達彦，末政直晃：杭打ち機械模型の作製と遠心場走行実験，第43回地盤工学会研究発表会概要集，pp.43-44，2008
- 8) 玉手 聡，堀 智仁：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，第63回年次学術講演会講演概要集，pp.243-244，2008
- 9) 前田周吾，玉手 聡，堀 智仁，末政直晃，片田敏行：自走式くい打機の遠心実験用模型に関する一考察，第5回地盤工学会関東支部発表会発表講演集，pp.145-148，2008
- 10) 堀 智仁，玉手 聡，前田周吾：自走式くい打機模型における付加質量位置の違いが走行挙動に与える影響，第5回地盤工学会関東支部発表会発表講演集，pp.141-144，2008