

厚生労働科学研究費補助金
労働安全衛生総合研究事業

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)

平成 20 年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 玉手 聡

平成 21 年 4 月

厚生労働科学研究費補助金
労働安全衛生総合研究事業

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)

平成 20 年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 玉手 聡

平成 21 年 4 月

目次	ページ
第1章 はじめに	1
1.1 研究の要旨	1
1.2 研究の背景	1
1.3 研究の方法	2
第2章 災害調査	5
2.1 災害の概要	5
2.2 杭打ち機械の安定に関する条件	13
2.3 転倒現場の地盤調査	22
2.4 転倒原因と再発防止対策	32
2.5 参考文献	35
第3章 転倒防止に関する安全基準の国際比較	37
3.1 概要	37
3.2 日本における安全基準	38
3.3 海外における安全基準	46
3.4 安全基準の国際比較と要点	69
3.5 まとめ	70
3.6 参考文献	72
第4章 遠心場走行実験	73
4.1 小型くい打機械模型の作製	73
4.2 くい打機模型の改良	79
4.3 遠心場走行実験の概要	86
4.4 実験結果	93
4.5 まとめ	99
4.6 参考文献	100
第5章 挙動と不安定要因	101
5.1 同一安定度条件における重心位置が走行挙動に与える影響	101

5.2	地盤反力分布の影響	112
5.3	走行速度の影響	116
5.4	関東ローム地盤	119
5.5	地盤の破壊確率と支持力安全率の検討	132
5.6	まとめ	134
5.7	参考文献	135
第6章	履帯の支持力特性	137
6.1	載荷応力分布と分散計測	137
6.2	地盤支持力と偏心荷重の関係	148
6.3	履帯模型基礎による支持力実験	155
6.4	敷鉄板の敷設効果に関する予備実験	163
6.5	まとめ	166
6.6	参考文献	167
第7章	まとめ	169
7.1	概説	169
7.2	第1章の要約	169
7.3	第2章の要約	169
7.4	第3章の要約	170
7.5	第4章の要約	171
7.6	第5章の要約	171
7.7	第6章の要約	172
7.8	健康危険情報	172
7.9	研究成果による特許権等の知的財産権の出願・登録状況	172
第8章	謝辞	173
第9章	研究成果の刊行に関する一覧	175
【参考】	研究成果の刊行物・別刷り	177

第1章 はじめに

1.1 研究要旨

本研究の目的は基礎工事に用いられる大型車両系建設機械(以下、くい打機と呼ぶ)の転倒災害を防止することである。このような転倒災害の原因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潜在的に軟弱な地盤であることの2つの不安定要因がある。

本研究では施工現場を自走する杭打ち機械の不安定化メカニズムを明らかにし、安定設置に必要な地盤の支持力要件を検討する。

本研究は平成19年度より3年間で実施が計画され、以下の4名の研究者が携わっている。

研究代表者 玉手 聡 (独立行政法人 労働安全衛生総合研究所)

研究分担者 末政直晃 (東京都市大学, 旧武蔵工業大学)

研究分担者 伊藤和也 (独立行政法人 労働安全衛生総合研究所)

リサーチアシスタント 堀 智仁 (独立行政法人 労働安全衛生総合研究所)

1.2 研究の背景

くい打機は下部走行体と上部旋回体より構成される車両系建設機械である。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、従って、強固ではない地盤での工事に用いられる。すなわち、くい打機は潜在的に不安定な地盤での作業を余儀なくされる。

過去に発生した転倒災害を調査すると、自走中の転倒が多く見られる。転倒状況を詳細に分析すると、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現場内を自走することが明らかになった。

労働安全衛生規則(厚生労働省令)ではくい打機の転倒を防止するために、設置地盤には沈下防止対策を講じなければならないことが述べられている。安定設置の必要性が定性的に述べているものの、地盤に必要とされる支持力の基準等は明らかにされておらず、判断は事業者に委ねられているのが現状である。

車両系建設機械構造規格(厚生労働省告示)では、機体は5度傾けても転倒しない安定度を有しなければならないことが定められている。しかし、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。また、走行時の安定度については触れられておらず、設置地盤の沈下や走行時における動揺の発生については想定されていない。

都市部の開発では地盤改良が行われ、大型建設工事では基礎工事が不可欠である。そのため、くい打機の使用は近年増加しており、その転倒防止措置の検討は急務な問題となっ

ている。

以上より、同種災害の発生を防止するためには、走行時におけるくい打機の不安定性を考慮して安定度の閾値を再検討し、安定設置に必要な地盤の支持力条件を明らかにする必要がある。

1.3 研究の方法

本研究では機体と地盤の両方に存在する 2 つの不安定要因に着目し、次のメカニズムを明らかにする。一つはトップヘビーな構造を有する機械の走行時不安定メカニズムの解明である。もう一つは、キャタピラ基礎に生じる複合荷重の荷重が地盤支持力の減少に与える影響の解明である。不安定メカニズムの実験的解析に基づいて、くい打機の安定設置に必要な地盤の支持力要件を検討する。

本年度(平成 20 年度)は、初めに災害事例に基づく発生原因の調査を行った。次いで自走時におけるくい打機の挙動を解析し、不安定要因の分析を行った。さらに下部走行体の履帯模型を用いた支持力実験を行い、荷重圧力と沈下比の関係を調べた。以下に概要を述べる。

(1) 災害事例の調査

くい打機の転倒事例を調査した。本調査の目的は機体の緒元や作業状態ならびに地盤条件等の危険要因を明らかにすることであった。平成 19 年に発生した災害事例に着目し、工学的に分析した。発生当時の作業状況と施工地盤の条件を整理し、災害原因を考察した。

(2) 遠心場走行実験

くい打機を約 1/30 スケールに縮小した小型走行模型を用いて遠心場走行実験を行った。この模型は本研究において開発されたものであり、30g の遠心力に耐えうる強度と自走可能な動力が備わる。リーダー部に搭載するウエイトの質量と高さを変えることによって、任意な安定度と重心位置が再現できる。搭載した 3 方向加速度計が模型に生ずる揺動を計測する。遠心模型実験では実機と同じ接地圧力レベルが再現可能であり、履帯を支持する全ての車軸と補助輪には圧力分布を計測するための荷重計が備わる。昨年度(平成 19 年度)は予備的な実験を実施し、装置の性能確認と実験システムの整備を行った。今年度は前年度に明らかとなった履帯張力の干渉による、車軸荷重を過小評価する問題について対策を講じるとともに、動力部生じた摩耗や劣化に対する補修を行い、データ蓄積のための実験に段階を進めた。

(3) 機体の揺動と履帯接地圧力に与える安定度と支持力条件の影響

上記(2)の遠心場走行実験によるくい打機の挙動解析では、機体条件と支持力条件の両面から不安定要因を検討した。機体条件では安定度と重心高さに着目し、支持力条件では安全率と変数係数の違いによる影響を調査した。車両系建設機械構造規格では、くい打機の

安定度を5度以上と定めている。本研究ではこの値の増減が自走挙動に与える影響を調査するとともに、同一安定度で重心高さが異なる場合や履帯の接地圧力と地盤支持力の関係が与える影響についても調査を行った。

(4) 履帯における載荷圧力-沈下比関係の実験的解明

くい打機の下部走行体に備わる履帯の基礎模型を製作し、その載荷圧力と沈下比の関係を実験的に調査した。この調査では機体重心の違いを荷重の偏心により再現した。基礎模型の載荷面には7個の高精度薄型荷重計を配置して履帯の圧力分布を計測するとともに、基礎両端における沈下記録から沈下比と傾斜角の関係を整理した。均等分布を与えた場合の極限支持力を標準に、同一荷重を偏心して与え不等分布させた場合の沈下比と傾斜角について比較した。

以上に従って、本報告では今年度実施した災害調査と自走時における杭打ち機械の挙動解析結果の内容の詳細について述べる。

第2章 災害調査

2.1 災害の概要

2.1.1 工事概要

マンションの新築における杭基礎の打設工事においてくい打機が転倒した(写真 2-1-1)。くい打機とは下部走行体と上部旋回体により構成される建設機械である。下部走行体にはクローラを有し、上部旋回体にはジブ、リーダー及びオーガ等が備わるものである。このマンションは鉄筋コンクリート製の地上7階建であり、その基礎として全41本のコンクリート製の杭(以下、これを杭と呼ぶ)施工が計画されていた。転倒は37本目の打設中に発生した。



写真 2-1-1 災害現場を上空から見た様子

2.1.2 災害の発生状況

くい打機はコベルコ製のクローラクレーンを改造したものであり、長さ 21m のリーダーがジブとキャッチホークによって支持された構造を有した。転倒時における機体重量は約 57 トン(559kN)であった。

当時このくい打機は基礎杭の打設に係わる作業を行っており、転倒は杭のつり上げ時に発生した。転倒した機械の片側クローラには、写真 2-1-2 に示すような大きな沈下が発生した。なお、本災害は杭基礎工事のほぼ最終段階において発生したものであり、同機械は数日後に撤収される予定であった。

転倒した杭打ち機のリーダー部分は写真 2-1-3 に示すように隣接した道路を遮断し、その先端は道路向い側に位置した公園のブロック塀に激突した。さらに、このリーダー部分は道路に駐車中であった自動車のボンネット部を写真 2-1-4 のように押しつぶした。この自動車の運転席にて休憩中であった同工事の関係者は足が挟まれた状態となったが、その後まもなく駆けつけたレスキュー隊により救出された。幸運にも負傷の程度は軽く、膝に打撲を負った程度であった。



写真 2-1-2 片側のクローラが大きく沈下して転倒した様子



写真 2-1-3 転倒したくい打機のリーダーが道路をふさいだ様子



写真 2-1-4 リーダーで押しつぶされた自動車のボンネット部

2.1.3 災害発生までの経過

図 2-1-1 は災害発生現場の平面図を示す。当該現場は三角形に似た形状の敷地であり、ここに鉄筋コンクリート製の地上 7 階建てマンションが建設中であった。図中に示す丸印 (o) はコンクリート製の杭(以下、これを杭と呼ぶ)の施工位置であり、全体では 41 本の打設が計画されていた。転倒は 37 本目の打設中に発生した。

転倒時における機械の作業は杭のつり上げであった。図 2-1-2 に示す位置において機械はバランスを崩し、転倒した。

転倒は杭のつり上げ中に発生したが、これは次のような作業工程の一つであった。

- 1) 地盤の削孔:アースドリルで地盤を削孔する。孔内にはベントナイト混合液(以下、安定液という)を充填され、孔壁を安定させる。
- 2) 杭のつり上げ:削孔後に機械を杭の仮置き場まで移動させる。リーダー部分に内蔵するフックで杭をつり上げる。
- 3) 杭の設置:リーダ部に杭を吊した状態で機械を挿入位置まで自走させる。移動後、ワイヤーを巻き戻して杭を削孔内に挿入する。この時、削孔内から溢れた安定液が地表に湛水する。

本工事では直径 80cm、深さ 22m の規模の削孔がこの機械によって行われ、直径 60cm の杭がここに挿入された。この杭は図 2-1-2 に示すような敷地北側の道路境界付近に仮置きされており、機械のリーダー位置は杭端から数メートル離れていたと見られる。くい打機はクレーン車と異なり作業半径を変化させることができない。その理由はジブの伸縮や起伏ができないためである。従って、つり上げ時には機械を自走させて対象物に近づく必要があった。そして、横引きを伴うつり上げが行われた。

この時のつり上げの様子を図 2-1-3 に示す。オペレーターの説明によれば当時、上部旋回体は地切り直前に a) 及び b) のように右方向へ旋回させ、リーダーは杭側に近づけられた。これは、c) のような荷ぶれを減少させて、機械の動揺や荷の激突による災害を防止するためであった。

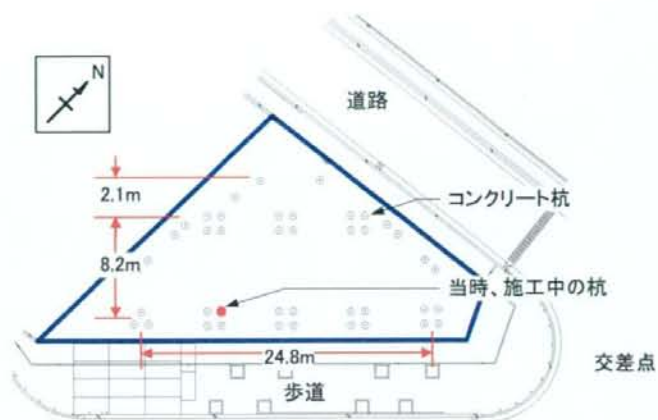


図 2-1-1 災害発生現場の平面図

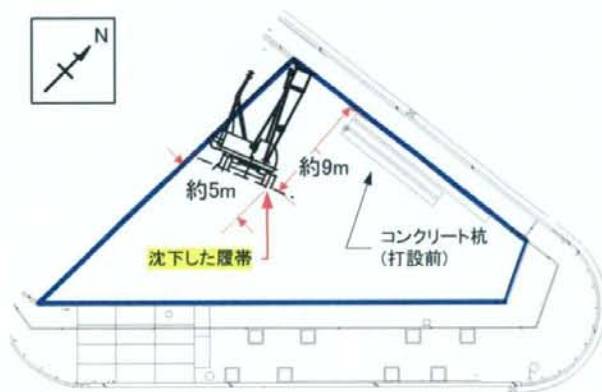


図 2-1-2 くい打機の転倒位置

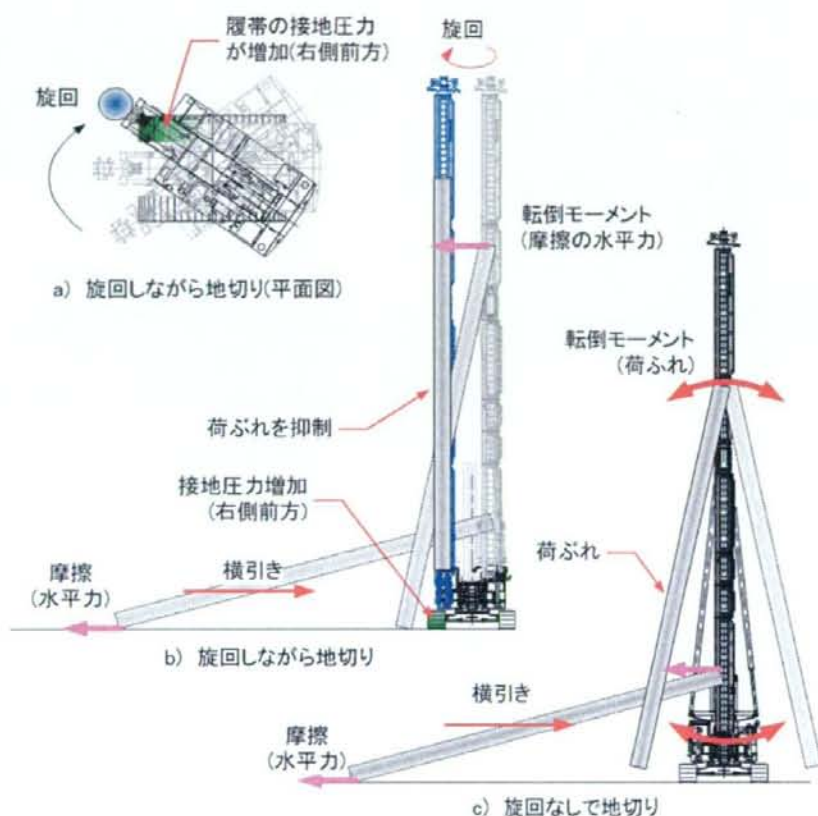


図 2-1-3 つり上げ時の旋回が接地圧力に与える影響

しかし、横引きによって生じた転倒モーメントは安定度を低下させるとともに、旋回は接地圧力の集中を生じさせたと推定される。この接地圧力に関する解析的な検討については 2.3 節に詳細を譲るが、リーダーが右方向に旋回したことにより、右側履帯前方部分に接地圧力の増加が発生した。

写真 2-1-2 から明らかなように、沈下は接地圧力が集中した部分に発生している。従って、右旋回により生じた増加した接地圧力が地耐力を超えたために履帯は沈下したと見られる。

2.1.4 施工地盤と養生方法

施工中の地盤表面には図 2-1-4 に示すような 2 種類の養生が施されていた。一つは表層に対するセメント安定処理であり、もう一つは覆工板の設置である。

セメント安定処理は敷地北側から南方向に実施され、その面積は幅4m、長さ10m程度であった。処理深さは約1mである。すなわち、対象の土量は 40m^3 であった。これに対して投入されたセメントの重量は 19.6kN (2トン)であったことから、理論配合割合は $490\text{N}/\text{m}^3$ ($50\text{kgf}/\text{m}^3$)であった。

また混合方法はバックホウを用いた原位置混合方式であった。この方法の概略は次の通りである。

- ① 粉体状のセメントを現場内に散布する。
- ② バケットで表層を攪拌し、土とセメントを混合する。
- ③ バックホウの走行により転圧し、締め固める。

一般的に、原位置混合方式はプラント混合方式に比べて混合効果にバラツキが生じやすいことが知られている。また特に、固化剤添加量が $490\text{N}/\text{m}^3$ 以下では均一な混合が難しく部分的に貧配合となり、強度にむらを生じることが知られている¹⁾。

幅1.5m×長さ3.0m×厚さ22mmの覆工板は図のような自走経路上に複数枚設置された。くい打機は南東から北西方向に移動し、図内に示す位置に停止した。この時、右側履帯は安定処理土の上になく、地耐力が低い原地盤上にあつたと見られる。

その後、前述したつり上げ作業が行われた結果、履帯の車軸付近に大きな沈下が生じた。この沈下に伴って、履帯の下面に設置された覆工板には北西方向への移動が生じた。移動後の様子を写真2-1-5に示す。この移動は、履帯が覆工板の端部に位置していたため、沈下によって盤面に生じた傾斜が水平反力を与えたためと考えられる。

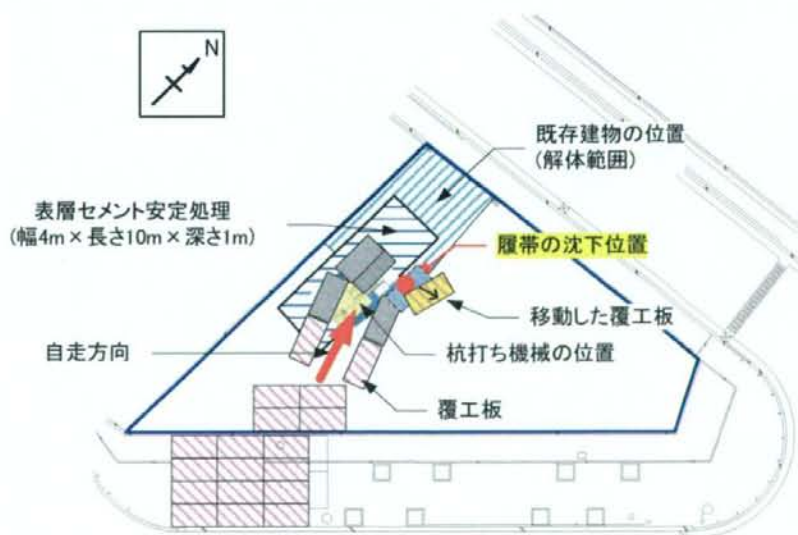


図2-1-4 地盤の養生状況と沈下位置の関係



写真 2-1-5 履帯の沈下によって移動した覆工板

2.2. くい打機の安定に関する条件

2.2.1 くい打機の緒元

転倒したくい打機はコベルククレーン社製のバイルドライバであり、その概要を図2-2-1に示す。この機械はクローラクレーン(型式7035)を本体ベースとし、これに他社製の角型リーダーを備えるものであった。発注者より情報提供のあった機械の緒元を表2-2-1に示す。

各装置の重心位置は、下部走行体の接地面における中央を原点とした値である。機体の重心座標(G_x , G_y)は、各点装置の断面一次モーメントを合計し、その値を全重量で除すことによって求めた。

図2-2-1のように重心の水平位置(G_x)は履帯の中心からリーダー側に0.99m離れた位置にあり、鉛直位置(G_y)は地表面から5.93mの高さにある。図2-2-2は下部走行体の緒元を示す。履帯の幅は0.76mであり、その地盤に対する接地面の長さ(タンブラ間距離： L)は4.31mである。従って、後述する接地圧力の載荷条件、 e/L の値は約1/6であった。

2.2.2 安定度の検討

厚生労働省令車両系建設機械構造規格の第3条では、くい打機は前後および左右方向に対して5度以上の安定度を有しなければならないことを定めている。本節では当該くい打機の安定度について検討する。

1) 前方安定度

履帯の前後方向に対する安定度について、不安定側(機体リーダー側)条件となる前方安定度(θ_{st})を計算する。 θ_{st} と機体緒元の間には式(2-1)の関係が成り立つ。

表2-2-1 くい打機(コベルククレーン7035に他社製リーダーを搭載)の諸元

装置名	重量(①) tonf(kN)	重心位置(②) m	①×②	重心高さ(③) m	①×③
7035 本体	36.44(357.11)	-1.20	-43.73	1.20	43.73
ブーム(12.19m)	1.76(17.25)	2.72	4.79	9.85	17.34
リーダー(21m)	4.50(44.10)	3.80	17.10	11.50	51.75
キャッチホーク	0.80(7.84)	2.22	1.78	1.78	1.42
オーガ(掘削用)	5.50(53.90)	4.80	26.40	19.00	104.50
オーガ(攪拌用)	4.30(42.14)	3.80	16.30	17.70	76.11
スクリー、ヘッド(17.3m)	4.10(40.18)	4.80	19.68	9.45	38.75
キャブタイヤケーブル	0.10(0.98)	2.72	0.27	9.85	0.99
杭側ロッド、キャブ	0.30(2.94)	3.80	1.14	14.45	4.34
杭(13m)	4.80(47.04)	3.80	18.24	6.70	32.16
全体	62.60(613.48)	$G_x=0.99$	62.01	$G_y=5.93$	371.09

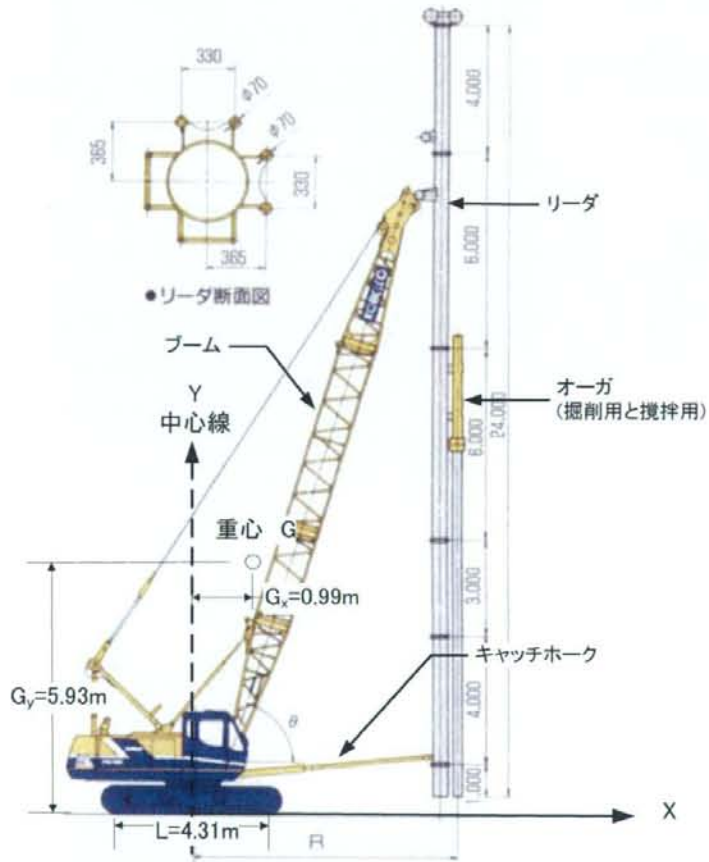


図 2-2-1 転倒しやすい打機の立面図(コベルククレーン(株)ホームページより抜粋したものに加筆)

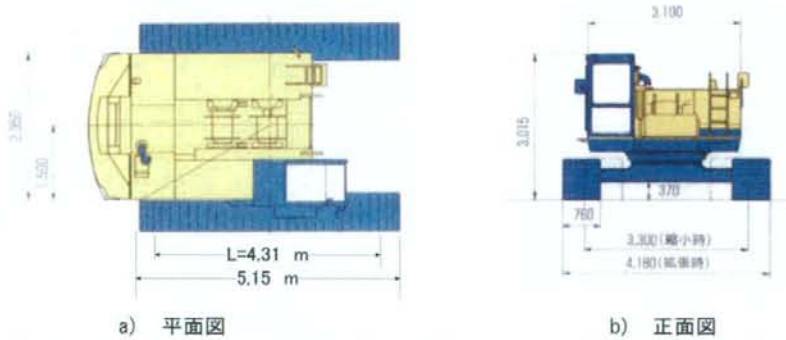


図 2-2-2 下部走行体の概要(コベルククレーン(株)ホームページより抜粋したものに加筆)

$$\tan \theta_{yf} = \frac{L - 2e}{2H} \quad (2-1)$$

ここで、 e と H の値はそれぞれ前述した重心 G_x と G_y と同じとなり、本ケースでは $e=0.99\text{m}$ 、 $H=5.93\text{m}$ 、 $L=4.31\text{m}$ である。

これらの値を代入して計算した結果、 θ_{yf} は次の通り得られる。

$$\theta_{yf} = 11.1 \text{度} > 5 \text{度}$$

この値は規格で定める値(5度)よりも大きいことから、この機械は前後方向に対して安定な条件であったことがわかった。

2) 左右方向の安定度

履帯の左右方向に対する安定度(θ_{ls})と機体緒元の間には式(2-2)の関係が成り立つ。

$$\tan \theta_{ls} = \frac{S - 2e}{2H} \quad (2-2)$$

ここで、 S は履帯の支持車輪間距離とし、拡張時の全幅4.18mより履帯幅0.76mを引いた値であり、 $S=3.42\text{m}$ である。他の値を同様に代入すると、 θ_{ls} の値は次の通り求まる。

$$\theta_{ls} = 6.9 \text{度} > 5 \text{度}$$

この値は規格で定める値(5度)よりも大きく、この機械は左右方向に対して安定な条件であったことがわかった。

以上より、本くい打機は前後方向および左右方向に対して構造規格が定める値以上の安定度を有しており、安定な状態にあったことがわかった。なお、(社)日本材料学会ではくい打機の安定度について、さらに安全側の基準例を示している²⁾。その値は作業時7度、走行時9度であり、構造規格のそれぞれ1.4倍と1.8倍である。この作業時安定度の7度と θ_{ls} を比較すると、 $\theta_{ls} < 7$ であり当時は左右方向の安定度が学会基準を幾分下回る条件であった。

2.2.3 履帯面上に働く接地圧力

履帯面に働く接地圧力は支持地盤が剛体であることを仮定して求めることが可能である。その計算方法は日本工業規格に定められる(JISA8509-1「基礎工事機械 — 安全 — 第一部：くい打ち機の要求事項」とともに³⁾、(社)日本建設機械化協会が出版するマニュアルではその特性について解説が述べられている⁴⁾。本節ではこの計算法に基づいて、転倒時における接地圧力分布を考察する。

1) 上部が横向き状態における左右履帯の反力

図 2-2-3 は 2 次元上に投影されたい打機の概念的な立面図を示す。ここで、 t は任意な偏心量の値すなわち、上部旋回体の旋回量によって変化する値である。この時、左右の履帯に働く反力 F_L と F_R はそれぞれ式(2-3)と式(2-4)で求められる。

$$F_R = \frac{M}{S} \left(\frac{S}{2} - t \right) \quad (2-3)$$

$$F_L = \frac{M}{S} \left(\frac{S}{2} + t \right) \quad (2-4)$$

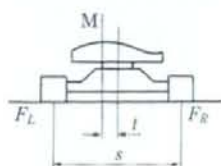


図 2-2-3 横向き状態における機械のパラメータ

さらに、上部旋回体が下部走行体に対して 90 度の向きにある時における左右の履帯面に働く反力は、機体の重量(M)と 90 度旋回による重心の偏心量(t_{90})を用いて求められる。すなわち、右側クローラの反力(F_{R90})及び左側クローラの反力(F_{L90})は式(2-5)と(2-6)の通りである。

ここで、各変数に下付けて示した数値は旋回角度を示すものとし、表記なしの場合は任意な角度を意味する。

$$\begin{aligned} F_{R90} &= \frac{M}{S} \left(\frac{S}{2} - t_{90} \right) \\ &= \frac{613.48}{3.42} \left(\frac{3.42}{2} - 0.99 \right) \\ &= 129.15(\text{kN}) \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} F_{L90} &= \frac{M}{S} \left(\frac{S}{2} + t_{90} \right) \\ &= \frac{613.48}{3.42} \left(\frac{3.42}{2} + 0.99 \right) \\ &= 484.33(\text{kN}) \end{aligned} \quad (2-6)$$

なお、 $t=0$ の時は左右の履帯に働く載荷荷重は等しくなる。その値を F_M で表すものとし、式(2-7)の通り求められる。