

200938003A

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 21 年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 玉手 聡

平成 22 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 21 年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 玉手 聡

平成 22 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 機械の安定に関する条件	22
2.3 転倒メカニズムの推定	31
2.4 まとめ	46
2.5 参考文献	52
第 3 章 くい打機のモデル化と実験装置の開発	53
3.1 くい打機械模型の製作	53
3.2 くい打機模型の改良	62
3.3 その他の実験装置	74
3.4 模型地盤の条件と調査	95
3.5 実験条件	110
3.6 参考文献	122
第 4 章 遠心場走行実験	123
4.1 収録データの基本的な解析方法	123
4.2 履帯に作用する理論接地圧	131
4.3 均質平坦地盤 ( $F_s=1.5$ ) の実験結果	134
4.4 均質平坦地盤 ( $F_s=0.8$ ) の実験結果	150
4.5 現場実大走行の再現実験	166
4.6 平坦不均質な関東ローム地盤での実験結果 (その 1)	170
4.7 平坦不均質な関東ローム地盤での実験結果 (その 2)	177
4.8 平坦均質な関東ローム地盤での実験結果	184
4.9 関東ロームの起伏地盤での実験結果 (その 1)	190

4.10	関東ロームの起伏地盤での実験結果（その2）	197
4.11	関東ロームの起伏地盤での実験結果（その3）	211
4.12	関東ロームの起伏地盤での実験結果（その4）	225
4.13	関東ロームの起伏地盤での実験結果（その5）	238
4.14	関東ロームの起伏地盤での実験結果（その6）	253
4.15	まとめ	276
4.16	参考文献	277
<b>第5章</b>	<b>履帯基礎の支持力と敷鉄板の養生性能</b>	<b>279</b>
5.1	概説	279
5.2	履帯基礎の支持力に与える重心の影響	280
5.3	敷鉄板による移動荷重の分散効果	288
5.4	重ね敷き方法の分類と養生方法	315
5.5	まとめ	326
5.6	参考文献	328
<b>第6章</b>	<b>不安定要因とその影響</b>	<b>329</b>
6.1	機械側条件による影響	329
6.2	地盤側条件による影響	344
6.3	支持地盤の破壊に対する危険性の解析	349
6.4	転倒に対する危険性の解析	356
6.5	まとめ	367
6.6	参考文献	369
<b>第7章</b>	<b>まとめ</b>	<b>371</b>
7.1	概説	371
7.2	第1章の要約	371
7.3	第2章の要約	371
7.4	第3章の要約	372
7.5	第4章の要約	372
7.6	第5章の要約	373
7.7	第6章の要約	373
7.8	健康危険情報	375

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	375
第8章 謝辞	377
第9章 研究成果の刊行に関する一覧	379
【参考】研究成果の刊行物・別刷り	381

## 第1章 はじめに

### 1.1 研究要旨

本研究の目的は基礎工事用大型車両系建設機械の転倒災害を防止することである。ここで基礎工事用大型機械とは、労働安全衛生法施行令第10条第2項に規定される建設機械であり、別表第7第3項に記載された基礎工事用機械のうち大型のものを意味する。すなわち、くい打機、くい抜機、アース・ドリル、リバース・サーキュレーション・ドリル、せん孔機、アース・オーガ、ペーパー・ドレーン・マシーン等である。これらの機械はベアスマシンが類似しており、その安定特性はほぼ同等と見なされる。本研究では、特に必要がない限りこれらの機械をまとめてくい打機と呼ぶものとする。

くい打機の転倒原因は設置地盤の支持力不足にあるが、その背景にはトップヘビーな構造を有する機械が自走することと、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た。

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)

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、判断は事業者任せ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、次のメカニズムを調査した。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載荷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した。

本年度(平成21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、不安定要因を分析した。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、載荷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

平成21年に発生したアース・ドリルの転倒災害について、その発生状況を整理した。機体の緒元や作業状態ならびに地盤条件等の危険要因について工学的な分析を行い、明らかになった事項を述べる。

#### (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したものであり、30gの遠心力に耐えうるボディと自走可能な動力が備わる。リーダー部に搭載するウェ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成分の加速度計によって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明らかにするための荷重計が備わる。

一昨年度(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。昨年度(平成20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、動力部に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。今年度(平成21年度)は車軸荷重の計測精度を向上させるとともに、摩耗や損傷が生じた部分の改善を行った。模型地盤を段階的に高度化させて、より正確に施工現場を再現した。潜在する不安定要因と転倒に与える影響の関係の解明に取り組んだ。

### (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、機械側条件と地盤側条件の両面から不安定要因を検討した。機械側条件では安定度と重心高さ、及び走行速度に着目した。地盤側条件では均質平坦地盤、不均質平坦地盤、不均質起伏地盤へと段階的に高度化させ、支持力安全率と変動係数の違い、及び起伏(傾斜角)が機体の揺動に与える影響を調査した。

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。

さらに、高速度カメラで撮影した自走時の様子から、機体傾斜角の変動を解析した。地表の傾斜を考慮した正味の安定度と生じた傾斜角の関係から転倒危険性を検討した。

### (4) 履帯基礎の支持力と敷鉄板の養生性能に関する実験的解明

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。また、地盤養生に用いられる敷鉄板について、接地圧力の分散効果を実験的に調査した。くい打機は現場内を移動して施工する。従って、敷鉄板に対しては移動荷重となる。分散効果は載荷位置により異なると共に、重複の与え方によっても変わることを明らかにした。

以上のように、本報告では今年度実施した災害調査とくい打機の自走挙動に関する研究結果について、以下にその詳細を述べる。



## 第2章 災害調査

### 2.1 災害の概要

#### 2.1.1 工事概要

ビル建築工事に関連した杭基礎の施工中に、写真 2-1-1 に示すようなアース・ドリルの転倒災害が発生した。建築中のビルは地上 19 階、地下 2 階を有するものであり、施工中の基礎杭は場所打ち杭形式であった。この基礎杭は全部で 16 本の施工が計画されていたが、転倒は 3 本目と 4 本目の施工中に発生した。転倒は、深さ約 15m まで掘削した 4 本目の削孔に表層ケーシングを挿入する作業において発生した。

この表層ケーシングは 3 本目の杭の削孔に挿入されて、使用中であった。そのため次の 4 本目に使用するためには、これを削孔から「引き抜き」、そして「移動」させ、次に「挿入」する、という作業が必要であった。

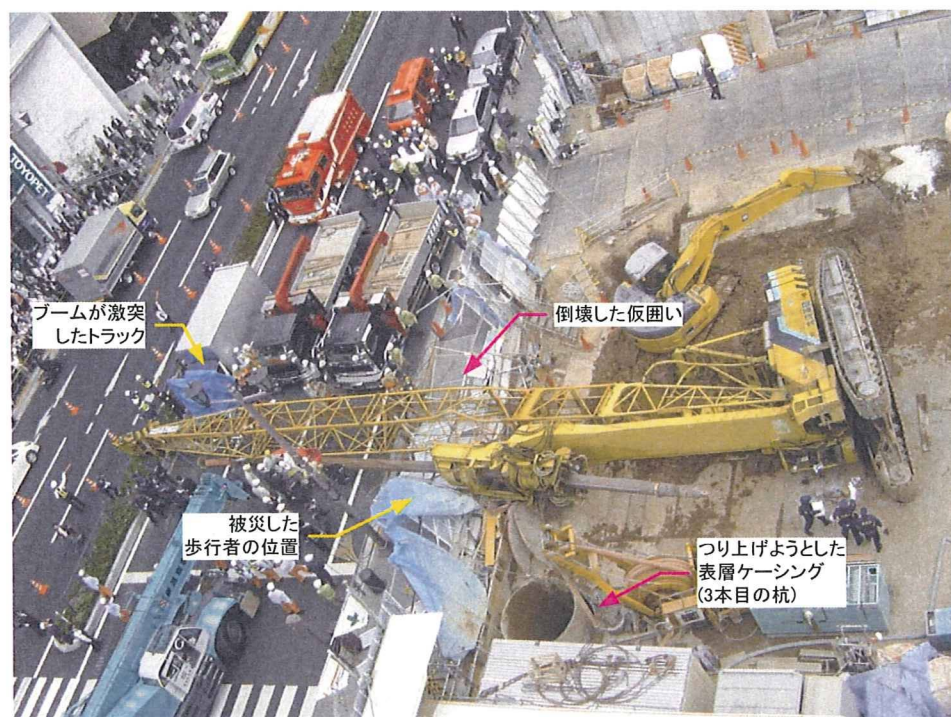


写真 2-1-1 災害現場を上空から見た様子

### 2.1.2 災害の発生状況

当時、削孔途中にあったアース・ドリルは 4 本目の杭に近接した位置で作業を行っており、3 本目の杭に設置されていた表層ケーシングからは遠い位置にあった。この表層ケーシングを引き抜きそして、つり上げようとしたところ、「転倒させようとする力(転倒モーメント)」が「安定させようとする力(安定モーメント)」を上回り、アース・ドリルは転倒した。なお、この表層ケーシングの引き抜き作業に関する条件の詳細は第 2.2 節に後述する。

転倒したアース・ドリルのブームは隣接する国道を完全にふさいだ(写真 2-1-2 参照)。当時、中央分離帯寄りの車線を走行していたトラックがブームの直撃を受け、運転席部分が押しつぶされた。乗車していた 3 人が車内に閉じ込められたが、消防隊員によってまもなく救助された。

また当時、現場と国道の間の歩道を歩いていた 60 代の一般女性が、このブームが衝突したことによって倒壊した仮囲い(フラットパネル)の直撃を受け、意識不明の重傷を負った。この状況を目撃した人の情報によれば、血痕はパネル上端部の敷地内側面に付着が多く見られたとのことであった。おそらく囲いの上端部が女性を直撃したために、飛び散った血液がパネルの内側にも付着したと想像される。なお、この女性は事故発生から 10 日後に死亡した。その他、歩行中の 30 代の一般男性が軽傷を負った。

アース・ドリルを運転していたオペレータは転倒直前に運転席から飛び降りようとしたが間に合わず、アース・ドリルが先に転倒した。その衝撃によって運転席から転落し背部を打撲する軽傷を負った。



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

### 2.1.3 杭の施工法と分類

図 2-1-1 は基礎杭の施工法による分類を示す。基礎杭工法は打込み杭工法、埋込み杭工法、場所打ちコンクリート杭工法に大別される。打込み杭工法には打撃工法と振動工法があるが振動と騒音を発するため、近年都市部の施工には用いられない。埋込み杭工法におけるプレボーリング工法はアースオーガなどで地盤をせん孔した後に、その中に杭を沈設する工法である。先端部分での支持力発現のため、ハンマーなどで打ち込むものと、セメントミルクにより根固めするものがある。

アース・ドリル工法は表層部では表層ケーシング(スタンドパイプとも言う)を用い、それより下部は安定液により孔壁の崩壊を防止しながら、ケリーバに取り付けたドリリングバケットを回転させて地盤を掘削する。バケット内に収納された土砂は地上に排出される。孔径は 0.7m から 2.0m が一般的であるが 3.0m の実績もあり、杭長は 50m 以下とされる。拡底杭工法は通常の場所打ちコンクリート工法で掘削した後、拡底用の掘削ビットで底部を拡大する方法であり、アース・ドリル方式とリバースサーキュレーション方式がある。本工事ではアース・ドリル方式による拡底杭工法が用いられていた。

図 2-1-2 は基礎杭の材質による分類を示す。基礎杭は木杭、コンクリート杭、鋼杭、合成杭に大別される。木杭は地下水位以下の使用では健全な状態を維持できるが、水位が変動する場所では急速に腐食が進行するため、近年はほとんど用いられていない。

埋込み杭工法については、各社が細部の異なる工法を開発しており、国土交通大臣の認定を取得した工法は 27 を超える。既製コンクリート杭は構造の違いにより 5 ついに分類される。RC 杭は曲げ耐力が小さく水平抵抗があまり期待できない。PHC 杭は A,B,C 種が一般的であり、D,E,F 種は軸力が比較的小さく大きな曲げ耐力を必要とする擁壁の基礎に使用される。

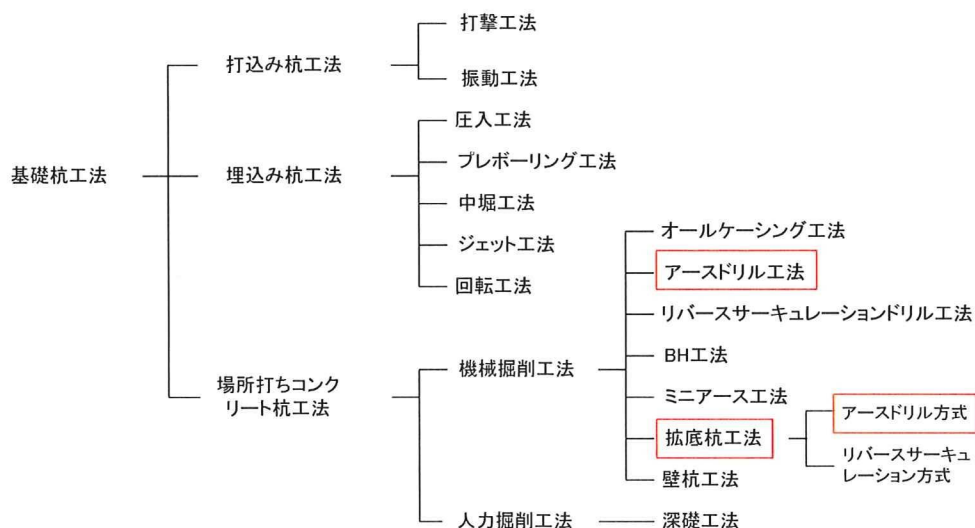


図 2-1-1 杭の施工法による分類

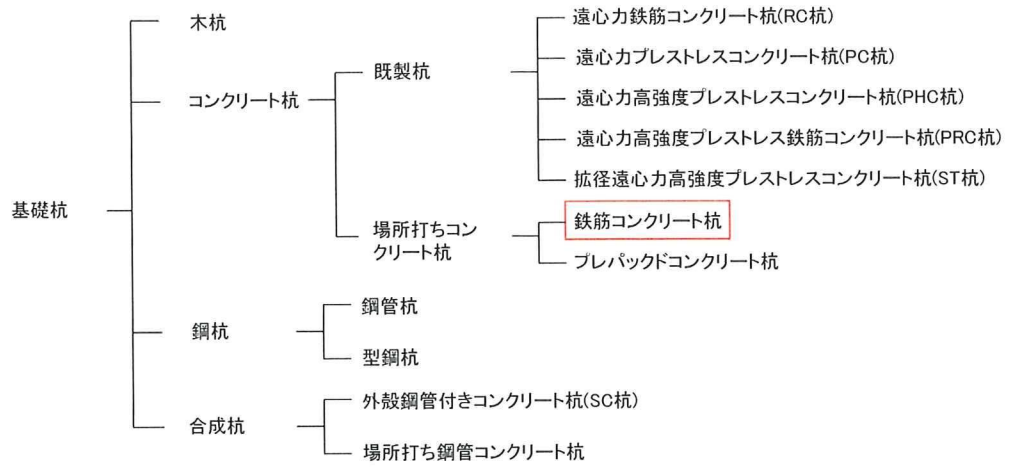


図 2-1-2 杭の材質による分類

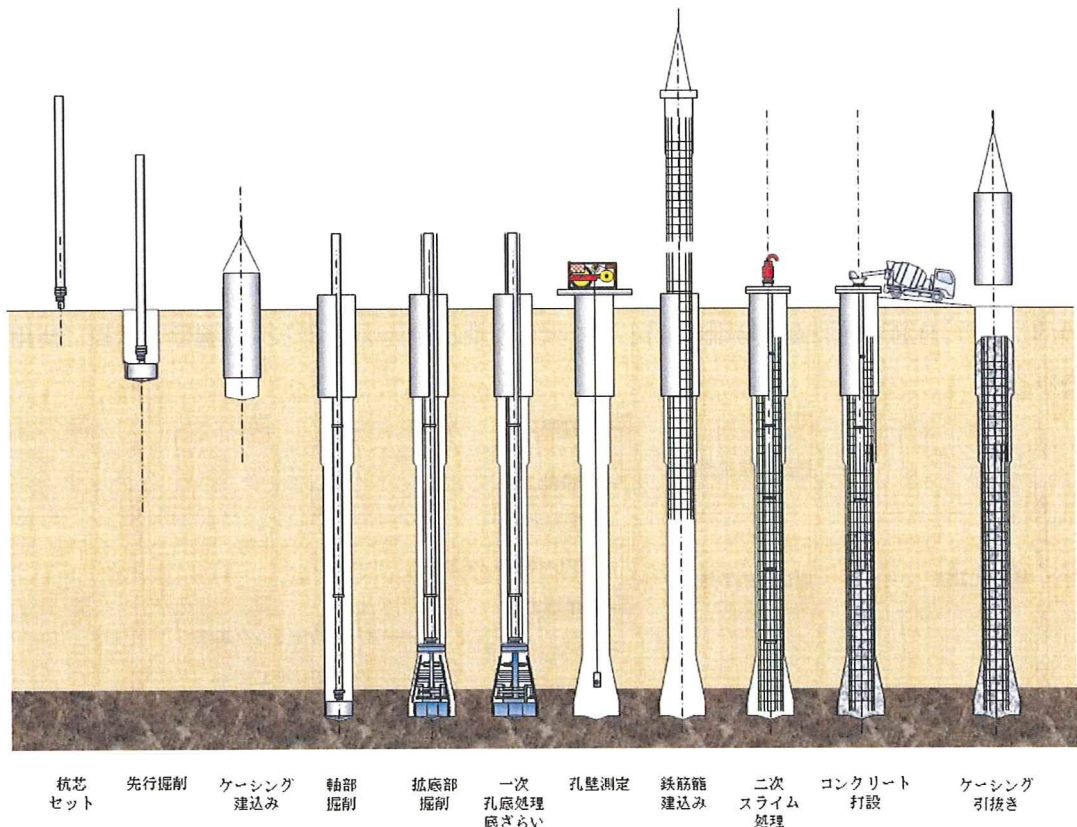


図 2-1-3 アース・ドリル式拡底杭の施工の概念図 (ジャパンパイル株式会社 HP より抜粋)

第2章 災害調査



ここで、図中にある「ケーシング」は文中の「スタンドパイプ」とも同意である

図 2-1-4 施工フローチャート

鉄筋コンクリート杭にはオールケーシング杭，アース・ドリル杭，リバースサーキュレーション杭，BH 杭，深礎杭および地中連続壁工法によって築造された壁杭がある。プレバックドコンクリート杭は現在あまり使用されていない。

図 2-1-3 はアース・ドリル方式による拡底杭工法の施工のプロセスを示す。はじめに削

孔位置を確認した後に先行掘削が行われ、表層ケーシングが建て込まれる。次いで、安定液で孔壁を支持しながら所定の深さまで掘削する。続いて、底部を拡底し底浚えを行った後に鉄筋かごが挿入される。最後に、トレミー管を挿入すると共にスライム処理が行われ、コンクリートが打設される。打設を完了すると表層ケーシングが引き抜かれる。

図 2-1-4 はそのフローチャートを示す。施工は、準備工、軸部掘削工、拡底部掘削工、コンクリート工、養生工の 5 つのプロセスに大別できる。表層ケーシングの引抜き作業は、場所打ち杭施工の最後の工程であった。

2.1.4 災害発生までの経過と作業条件

(1) 発生前日までの作業

場所打ち杭の築造は杭番号⑨(1本目)より開始された。その後、杭番号⑦(2本目)の施工が行われた。前項で述べた通り場所打ち杭の施工では、孔壁の崩壊を防止するための表層ケーシングが建込まれる。表層ケーシングは長さが約7mを有するため、通常は6m掘削した後に挿入される。しかし、当該現場では15m掘削した後に挿入されていた。

この表層ケーシングは表層から浅い範囲の崩壊防止に用いられるものであり、その大きさは直径2.4m、長さ7mであり、質量は10.46t(玉掛けワイヤーを含めると10.52t)であった。続いて、杭番号①(3本目)の掘削が行われた。図2-1-5はこの時の推定作業位置を示す。①の杭芯とアース・ドリルの旋回中心までの距離は5.8mである。この値はアース・ドリル側の条件で決定される。アース・ドリルが①と⑦の対角線上に位置していたと仮定すると、⑦の杭芯と旋回中心の間の距離は9.19mとなる。この距離は補助吊り作業時における作業半径であり、アース・ドリルの安定性を左右する重要な値である。この作業半径と補助吊り時の限界(転倒)荷重については詳細を後述する。なお、先に述べた⑦(2本目)の施工時における離隔についても、⑨(1本目)のそれと同様であったと考えられる。

杭番号①(3本目)における施工では⑦の施工と同様に、約15mまで掘削した後に表層ケーシングが建込まれた。この表層ケーシングは⑦に使用中のものを、引き抜いて移動させ建込まれた。その後、①の施工は災害の前日に完了した。なお、コンクリート打設終了後には、翌日の表層ケーシングの引き抜きが可能であるかを確認するために、一度僅かに引き抜かれている。この時のアース・ドリルの位置は図2-1-5のままであったと思われる。

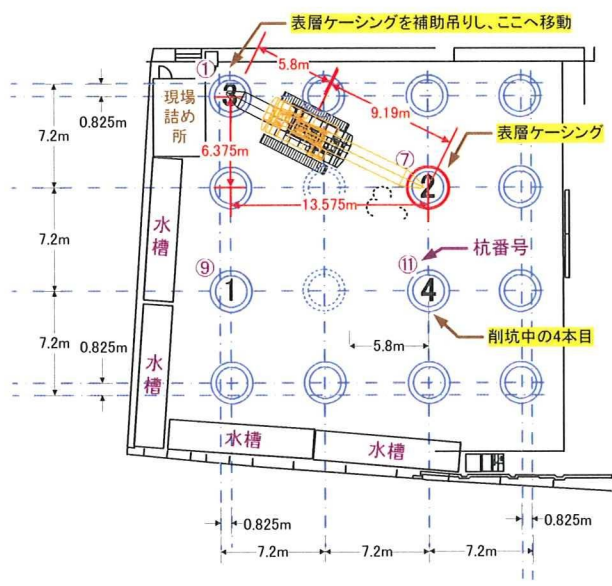


図2-1-5 前日の掘削と補助吊りにおけるアース・ドリルの推定作業条件

### 2.1.5 当日の作業と経過

当日は午前9時頃より杭番号⑪の場所(4本目の杭)の削孔を開始した。図2-1-6のようにアース・ドリルを⑪の西側に位置させた。旋回中心から杭芯までの距離は先にも述べたとおり5.8mである。

掘削はケリーバにドリリングバケットが装着されて行われる。掘削によって土砂がバケットに充填される。バケットが土砂で一杯になると掘削を中断し、つり上げて排出させる。

⑪の施工では北側に土砂が堆積しており、上部構造体を左旋回させて土砂を排出していたものと見られる。この脇にはバックホウが待機しており、土砂を脱水させた後にセメント混合して固化処理する。

処理土の一部は杭番号①の埋め戻しに使用され、その他は産業廃棄物としてトラックに搭載して処分場に運搬される。

深さ約15mまでの掘削が終了後、杭番号⑪に表層ケーシングを挿入するための作業に移った。使用予定の表層ケーシングは当時、杭番号①(3本目)に挿入して使用中であった。そのため、この表層ケーシングを引き抜き、⑪番の削孔に移動させる必要があった。

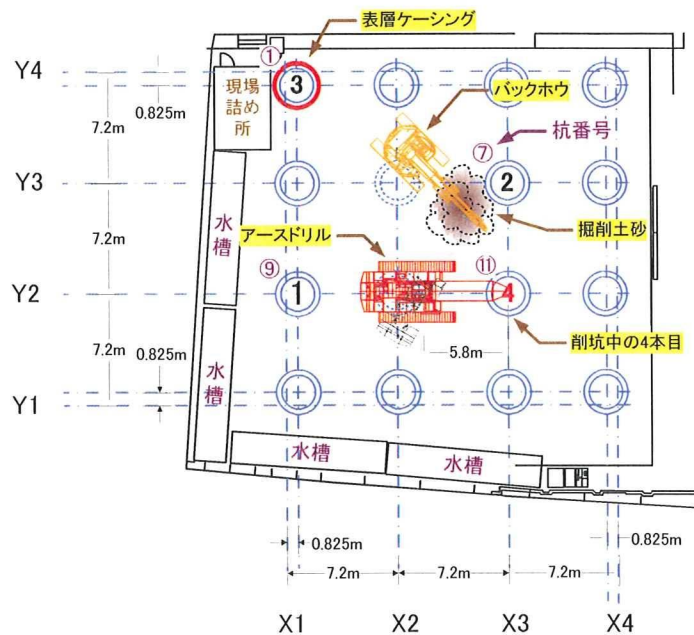


図2-1-6 杭番号⑪(4本目)の杭に関する掘削作業の配置

引き抜きを行うに当たり、まずアース・ドリルに取り付けられているドリリングバケットが外された。写真2-1-3は転倒時の状況を改めて示す。4本目の削孔の右側にドリリングバケットが置かれている。これはアース・ドリルから取り外されたものである。補助吊り作業ではドリリングバケット等の掘削装置を取り外さなくてはならない。

図2-1-7は⑪を削孔したアース・ドリルを移動させることなしに、上部構造体のブーム



のみを①の方向に向けて表層ケーシングを引き抜こうとした推定状況を示し、これを1回目の推定作業条件と呼ぶ。⑩と⑨を結ぶ直線上にアース・ドリルは位置していたと見られ、①に対する補助吊りの作業半径の計算値は約15.64mとなる。

表2-1-1は実測結果を示す。1回目における作業半径の実測値は15.5mであり、先に述べた計算値にほぼ一致する。この1回目の引き抜きではアース・ドリルのウインチを巻き上げた際に、機体後部にあたる東南角部の履帯が浮き上がった。そのためこの位置では引き抜きが困難と判断し、作業を一時中断した。次に機体を①側に近づく方向、すなわち西側に移動させ、2回目の引き抜きが再開された。

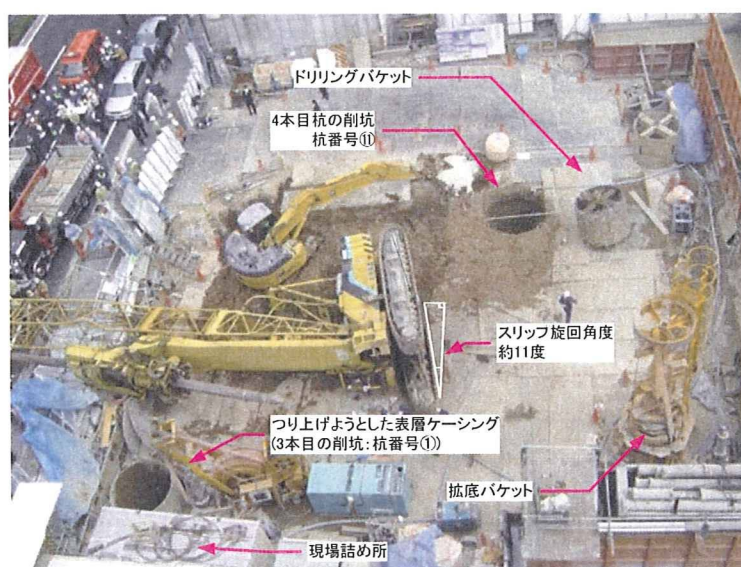


写真 2-1-3 転倒時の状況

表 2-1-1 表層ケーシング引き抜き作業時におけるアース・ドリルの推定状態

状況	作業半径 <sup>1)</sup> (m)	ジブ角度(起伏角) <sup>2)</sup>	ジブの旋回角度 <sup>3)</sup>
引き抜き1回目(断念中止)	15.5	59度31分	28度53分
引き抜き2回目(転倒直前)	14.4	62度06分	19度32分

1)調査による実測値

2)実測値に基づいた計算値

3)下部走行体の真横からの角度

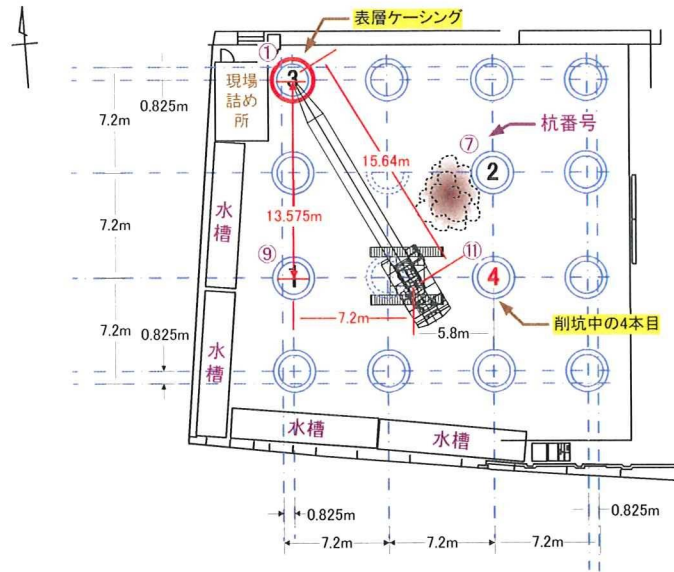


図 2-1-7 杭番号①の表層ケーシングに対する 1 回目の推定引き抜き条件

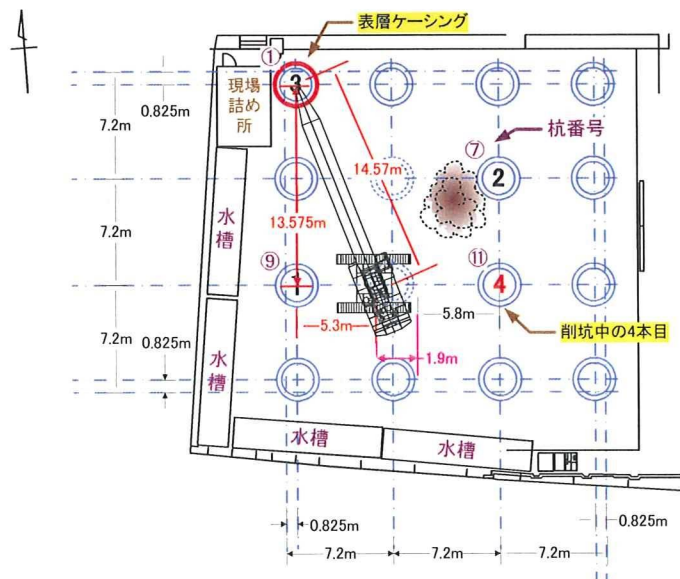


図 2-1-8 杭番号①の表層ケーシングに対する 2 回目の推定引き抜き条件

業界関係者の話によれば、杭を施工中のアース・ドリルは掘削精度を確保する観点からその途中に機体を移動させることは好まない。その理由は、一旦移動させると機体と同じ位置に再設置することが容易でなく、ドリルの軸と杭芯の位置の間に誤差を生じやすくなるためである。この誤差は杭の鉛直性を低下させるため、機体の移動は通常あまり行われない。

しかしながら、2 回目の引き抜きではやむを得ず機体を西側に約 1.9m 移動させ、杭番号

⑨側に近づけている。この移動は西側へのほぼ直進的なものであったと見られる。すなわち、機体をカーブ走行させて①に正対するように近づける配置はこの時選択されていない。その背景には引き抜き後に先の掘削位置⑩に戻るのが容易となるように考えたのではないかと想像される。

図 2-1-8 はこの 2 回目の推定引き抜き条件を示す。アース・ドリルは先の状態と同様に⑨と⑩を結ぶ直線上に位置したと仮定すると、①の表層ケーシングと旋回中心の間の作業半径の計算値は 14.57m となる。この実測値は 14.4m であり、計算値にほぼ一致する。

2 回目の引き抜きでは、はじめに表層ケーシングが約 2m つり上げられ、その後、表層ケーシングの半径程度、すなわち 1m 程度の右旋回が行われた。この旋回を行った理由は、表層ケーシングが西側にあった現場詰め所に衝突することを避けるためであった。右旋回の作用によって表層ケーシングは幾分斜めに引き抜かれた。この時、敷鉄板と表層ケーシングの間で接触が目撃されている。その直後に再びアース・ドリルの東南側の履帯が浮き上がった。危険を感じたオペレータは巻き戻して表層ケーシングを降ろそうとしたが間に合わず、アース・ドリルは転倒に至った。

### 2.1.6 作業半径と補助吊りの荷重

本工事で用いられたアース・ドリルの側面図を図 2-1-8 に示す。アース・ドリル掘削作業時のブーム角度は  $81.1^\circ$  であり、その際の作業半径は  $5.8\text{m}$  である。

補助吊りではケリーバとフロントフレームをブームに引き寄せた状態にし、補巻きを用いて行われる。補助吊り時の定格総荷重の最大値はワイヤーロープの掛け数によって異なり、1本掛けの場合は  $6.5\text{t}$ 、2本掛けの場合は  $13\text{t}$  である。

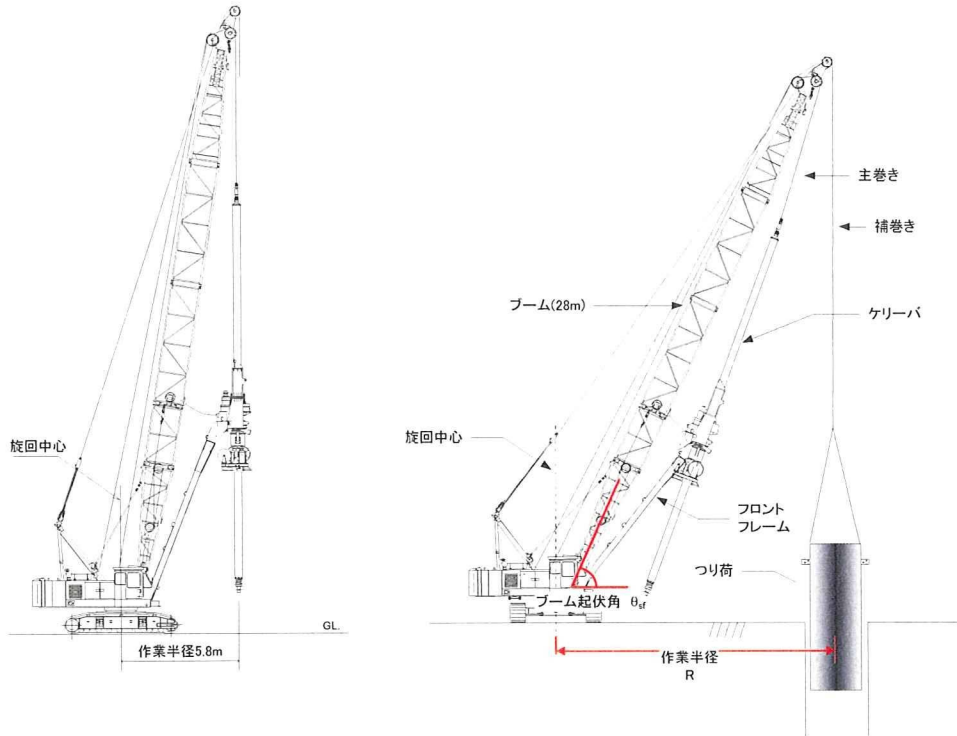


図 2-1-8 当該現場で使用されていたアース・ドリル

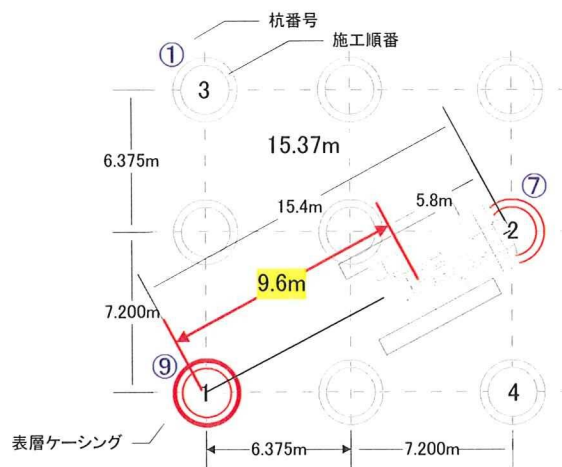


図 2-1-9 1本目(杭番号⑨)から表層ケーシングを引き抜いた時の作業位置