

災害調査報告書

ビル建築工事現場で発生した
アース・ドリルの転倒災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

1. 災害の概要

ビル建築工事に関連した杭基礎の築造中に図1に示すようなアース・ドリルが転倒した。この工事では計16本の場所打ち杭が計画されていたが、事故はその3本目の削孔内(No.3)に設置されていた表層ケーシングを引き抜く作業中に発生したものであった。

アース・ドリルとは労働安全衛生法施工令 別表第7 建設機械に記載されている基礎工事用機械¹⁾の一つであり、図2のようなものである。転倒したアース・ドリルは下部走行体にクローラを有し、上部旋回体に起伏可能なブームを有する機械であった。地盤を削孔する際は、ブームとフロントフレームに支持されたケリーバの下部にドリリングバケット等を装着し、このドリリングバケットを回転させて行われる。また、補助吊りは、ドリリングバケットを一旦取り外してケリーバを手前に引き寄せた状態にし、補巻きで荷を吊り上げるものであった。

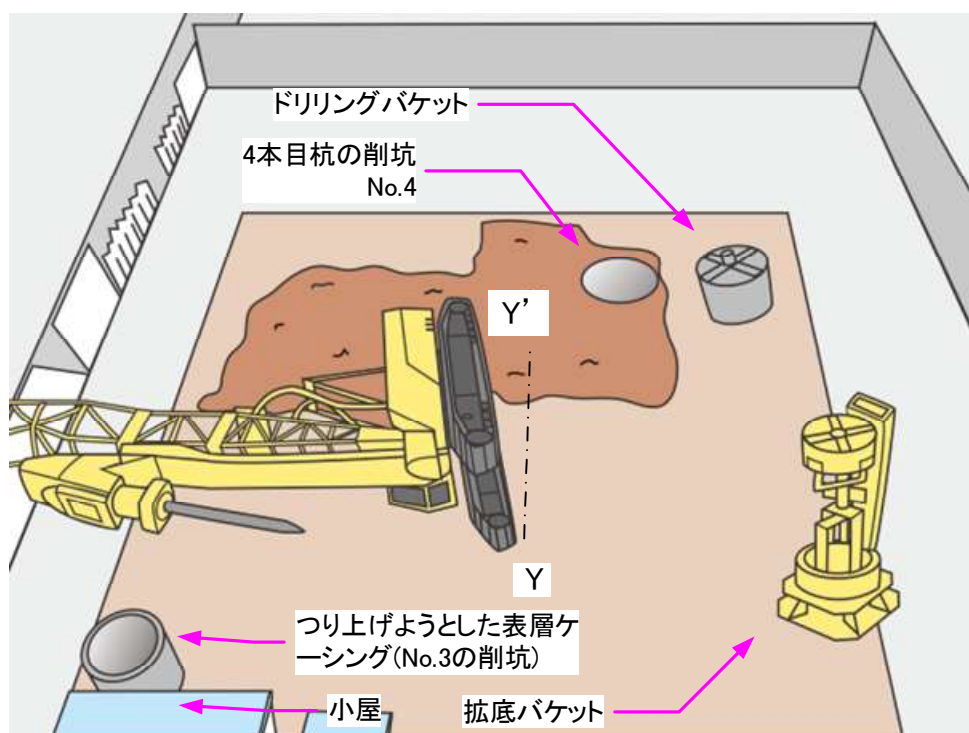


図1 アース・ドリルが転倒した現場の様子

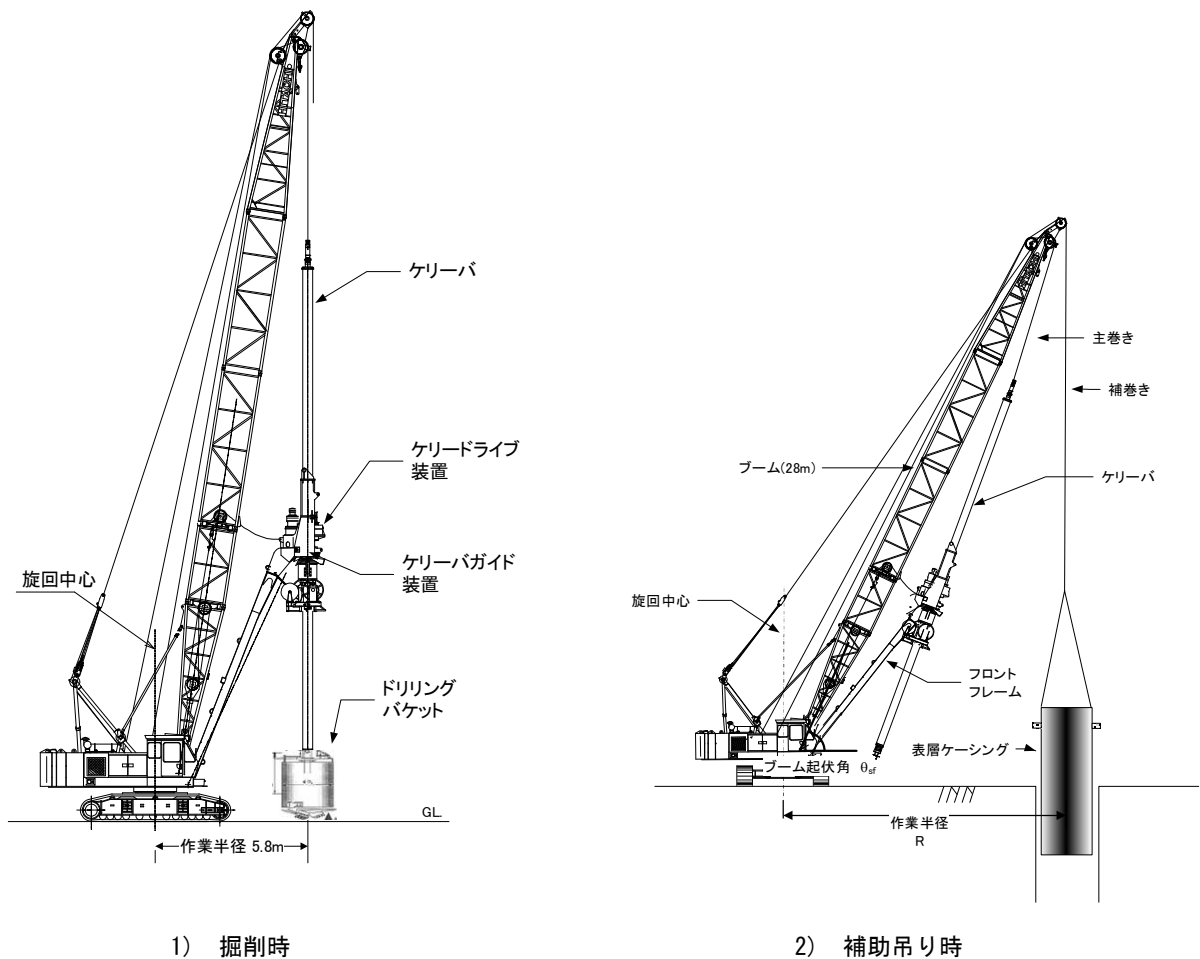


図 2 アース・ドリルによる掘削と補助吊り

2. 発生状況の調査

災害発生当日は朝から No. 4 (4 本目の杭) の削孔が開始され、アース・ドリルは図 3 のように No. 4 の西側に置かれていた。この時に、旋回中心から杭芯までの距離は 5.8m であった。削孔ではケリーバにドリリングバケットが装着され、このバケットが掘削土砂で一杯になると、一旦つり上げて脇に排土する流れで作業は行われていた。排出された土砂は脇に待機するドラグ・ショベルがセメントと混合して固化処理し、処理土の一部は削孔の埋め戻しに使用され、残りは廃棄物として処分された。

No. 4 の掘削が所定の深さ(約 15m)まで終了した後に、表層ケーシングを挿入する作業に移った。表層ケーシングとは表層から浅い範囲の崩壊防止に用いられる鉄製の円筒体であり、その大きさは直径 2.4m、長さ 7m であり、質量は吊り具を含めて 10.5 トンであった。この表層ケーシングは当時、No. 3 にて使用中であったため、これを引き抜いて No. 4 に移動させる必要があった。そのため作業では、まず、ドリリングバケットがケリーバから取り外された。この取り外されたドリリングバケットは図 1 内に示すように No. 4 の直ぐ脇に置かれていた。

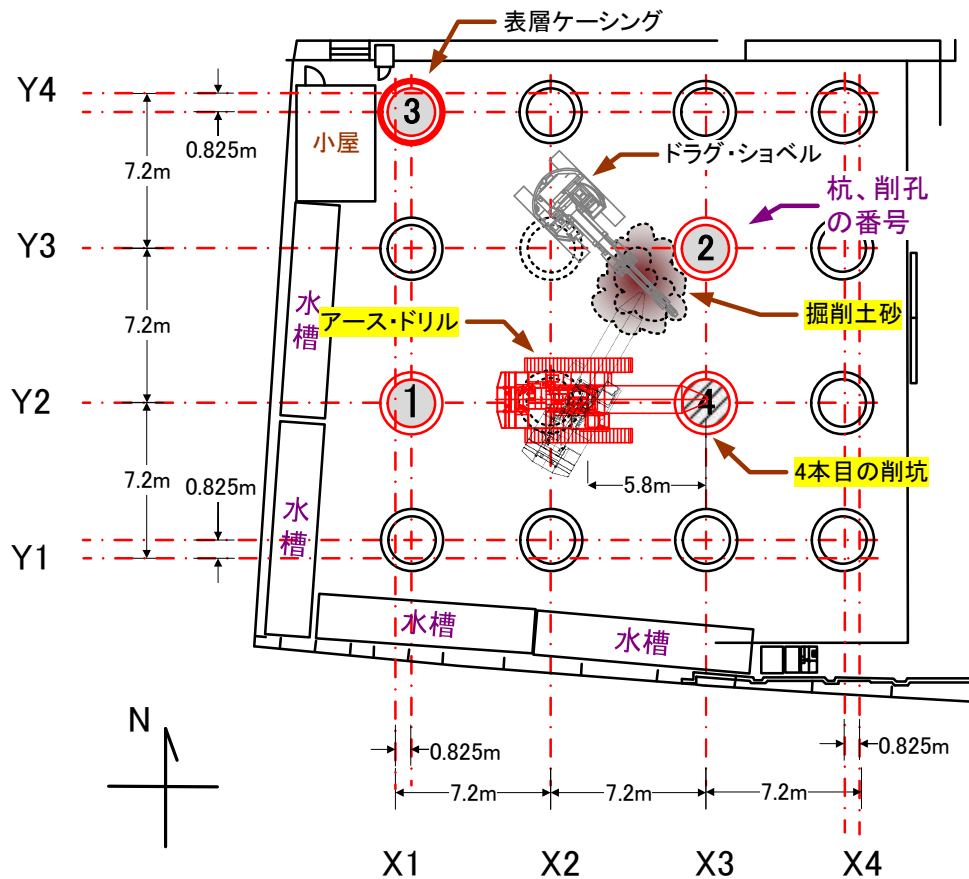


図3 No. 4の杭に関する掘削作業

図4はNo.4を削孔したアース・ドリルの位置を移動させずに、上部旋回体の旋回のみによってブームをNo.3の方向に向けて表層ケーシングを引き抜こうとした場合の状況を示す。これが1回目の補助吊りであった。この時の作業半径は15.5mであったが、この1回目の補助吊りでは、ウインチを巻き上げて表層ケーシングをつり上げようとしたところ、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の引き抜きは困難と判断し、作業は中止された。

次に、機体をNo.1側に近づく方向、すなわちY2軸上を西側に移動させ、2回目の補助吊りが行われた。その状況を図5に示す。なお、削孔中のアース・ドリルは杭の施工精度を保つために通常、途中で機体を移動させない。その理由は、一旦移動すると同じ位置に戻るのが容易でなく、ドリルの軸と杭芯の位置に誤差を生じやすいためである。この誤差は杭の鉛直性を低下させるものとなる。しかしながら、2回目の補助吊りではやむを得ず機体を西側に1.9m移動させ、No.1に近づけており、その移動はほぼ直線的なものであった。

図5は2回目の補助吊りの状況を示す。アース・ドリルはNo.1とNo.4を結んだ直線上にほぼ位置し、作業半径は14.4mに減少していた。この2回目の引き抜きでは、表層ケーシングを2mほどつり上げたところで再びアース・ドリルの東南側で履帯が浮き上がった。危険を感じたオペレータは直ぐにウインチを巻き戻して表層ケーシングを吊り降ろそうとしたが間に合わず、機体は転倒したものである。なお、前日までに行われたNo1とNo.2における同様な補助吊りでは、作業半径がそれぞれ9.6mと9.2mで行われ、その作業に問題はなかった。しかしながら、災害発生当日のNo.3では作業半径を14.4mに増加させて補助吊りしたところ転倒したものであった。

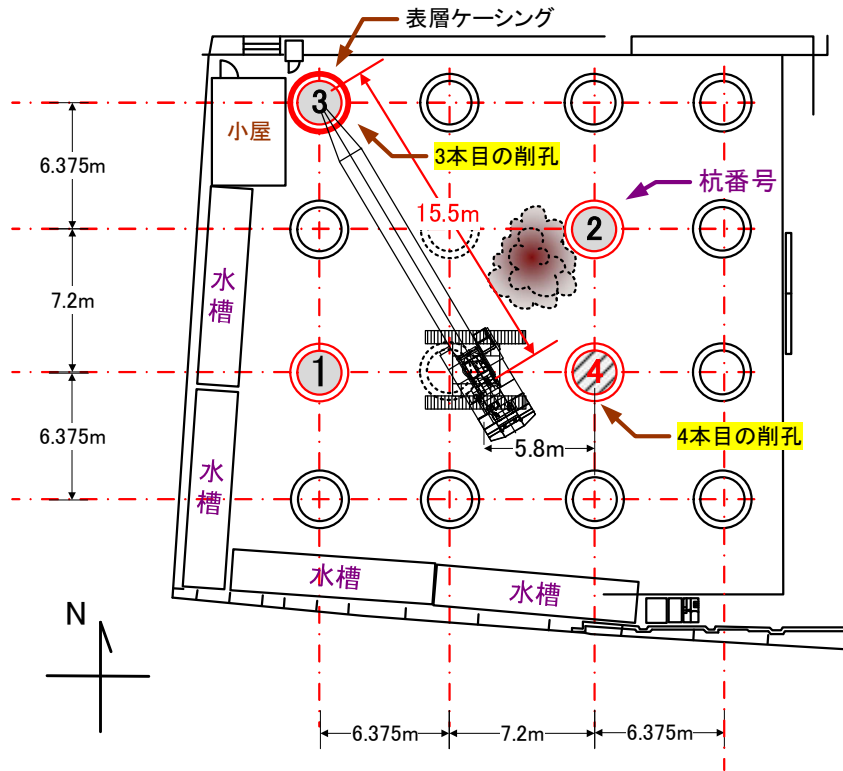


図4 No3 に対する 1 回目の補助吊りの位置

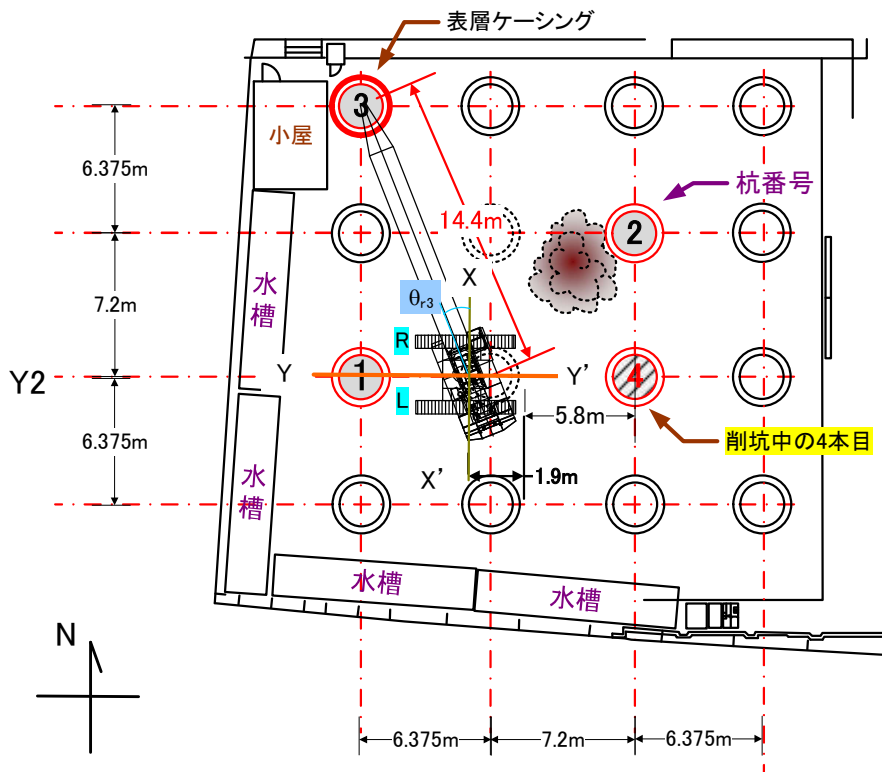


図5 No. 3 に対する 2 回目の補助吊りの位置 (転倒時)

3. 安定性の検討

3. 1 補助吊りした表層ケーシングの重さと安定限界

転倒したアース・ドリルが補助吊りできる定格総荷重はワイヤーロープの掛け数によって異なった。具体的には、1本掛けの場合は最大6.5トン、2本掛けの場合は最大13トンであり、本工事では2本掛けとなっていた。

ここで用いる用語のうち、「定格荷重」とは、移動式クレーンの構造および材料ならびにブームの傾斜角および長さに応じて（作業半径に応じて）負荷させることができる最大の荷重から、フック、グラブバケット等のつり具の質量をそれぞれ差し引いた荷重である²⁾。

したがって、「定格総荷重」とは、定格荷重にフック等のつり具の質量を加えた荷重をいう³⁾。

さらに、「つり上げ荷重」とは、アウトリガーを最大に張り出し、ブームの長さを最も短く縮小して、ブームの傾斜角を最大にしたとき（作業半径を最小にしたとき）に負荷させることができる最大の荷重をいい¹⁾、つり上げ荷重にはフック、グラブバケット等のつり具の質量が含まれている。

本工事で用いられていた表層ケーシングと吊り具を合計した質量は10.5トンであった。したがって、つり荷側の重さは定格総荷重の最大値よりも小さかった。しかしながら、先に述べたとおり定格総荷重は作業半径によって変化するものでもある。アース・ドリルの作業半径は図2のようにブームの起伏によって変化する。

図6は作業半径とつり荷の荷重の関係を示し、この図中に定格総荷重と限界の荷重の2つの曲線を示す。ここでの限界の荷重とは定格総荷重を1.27倍²⁾して便宜的に示した参考値であり、2本掛けの最大値である13トン以上の範囲は破線で示した。ただし、両曲線は下部走行体に対して上部旋回体の旋回角が90度の条件におけるものである。No.1からNo.3の一連の補助吊りは旋回角度が90度ではなく、いわゆる斜め方向であったことから、実際の各旋回角における定格総荷重と限界の荷重は表示の曲線よりも大きく、少し上側に位置していたものと考えられる。

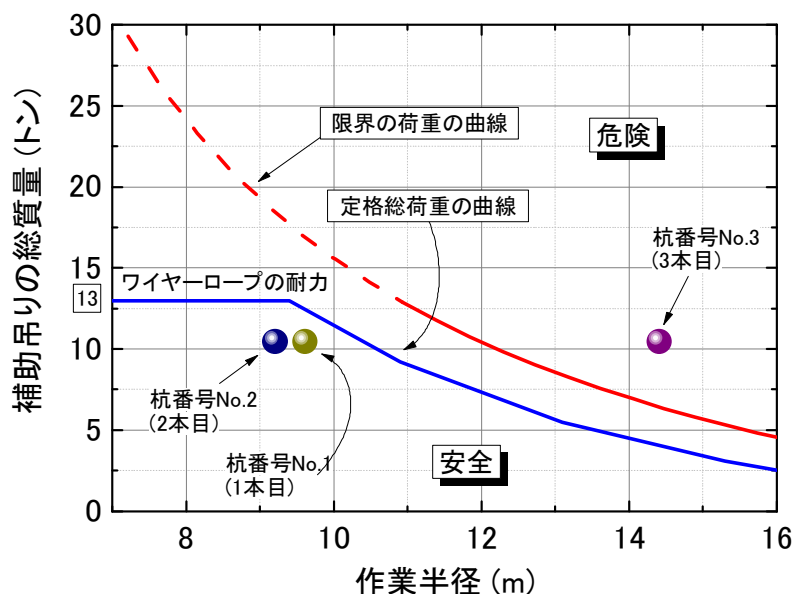


図6 作業半径に対する補助吊りの定格総荷重と限界の荷重の関係（2本掛け）

吊り具を含む表層ケーシング側のつり荷の総質量の 10.5 トンを計 3 回の補助つり時の作業半径にプロットして示す. No. 1 の作業半径は 9.6m, No. 2 は 9.2m であったことから両プロットは定格荷重曲線の下側に位置している. すなわち, つり上げ可能な重さであった. ただし, 両作業半径における定格総荷重と補助吊りの総質量の差はさほど大きくなく, No. 1 での余裕は 2 トンほどに減少していた. 一方, No. 3 のプロットは定格総荷重の曲線の上側に位置し, さらに限界の荷重よりも上側であった. 先にも述べたとおり, 両曲線は 90 度回転時を仮定したため曲線上の値は安全側に示されているものの, No. 3 のつり荷の総質量は定格総荷重の約 2 倍に達していた. さらに, 事故当時は表層ケーシングと削孔壁面との間に摩擦が生じるなど作業上の負荷も加わって過荷重となり, その値は限界の荷重を超えたものと考えられる.

3. 2 現場に作用した接地圧力と地盤の支持力

補助吊り時の履帯に生じた接地圧力を推定した. ここでは, 転倒前の作業状況から, ドリリングバケットは取り外された状態とし, フロントフレームはブームに引き寄せた状態を仮定した. また, 上部旋回体の旋回角は図 4 の X-X' 軸から反時計回りに 19.5 度であったこと, さらに, ブームの起伏角や機械の仕様も考慮して左右履帯(転倒支点側を R, 反対を L とする)の載荷荷重 F_R と F_L を計算した. その結果, F_R は 1018.2 kN, F_L は 21.6 kN と求めた. さらに F_R が作用した位置, すなわち履帯長手方向に対する偏心を考慮して履帯の最大接地圧力 q_{max} を求めた⁴⁾. その結果, q_{max} は 565 kN/m² と推定された. さらに, 工事現場の表面には敷鉄板が敷かれており, 履帯はその端部に設置されていた. 敷鉄板によるその分散効果は不明であったが現場地盤への接地圧力は少なくとも q_{max} 以下であることがわかった.

次に現場地盤を地盤調査してその支持力を求めた. 調査した箇所は図 7 に示した BCT_1 と BCT_2 の 2 箇所であり, アース・ドリルが最後に補助吊りした位置の周辺であった. 調査方法には現場地耐力試験を用い, その詳細については文献等⁵⁾に譲る. 以下この方法を BCT と呼ぶ.

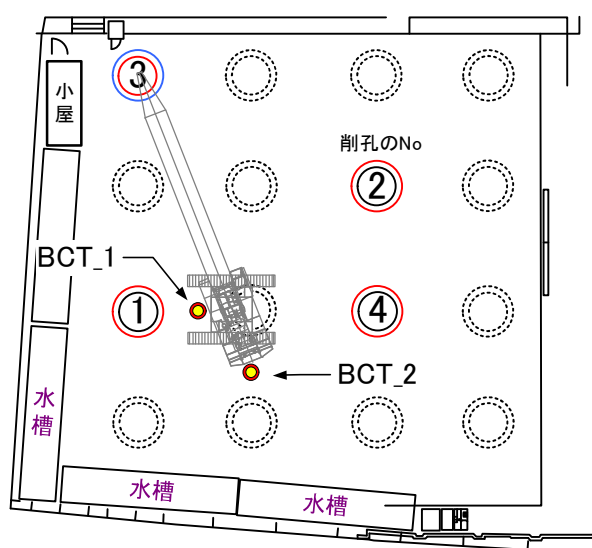


図 7 現場地耐力試験(BCT)の実施位置

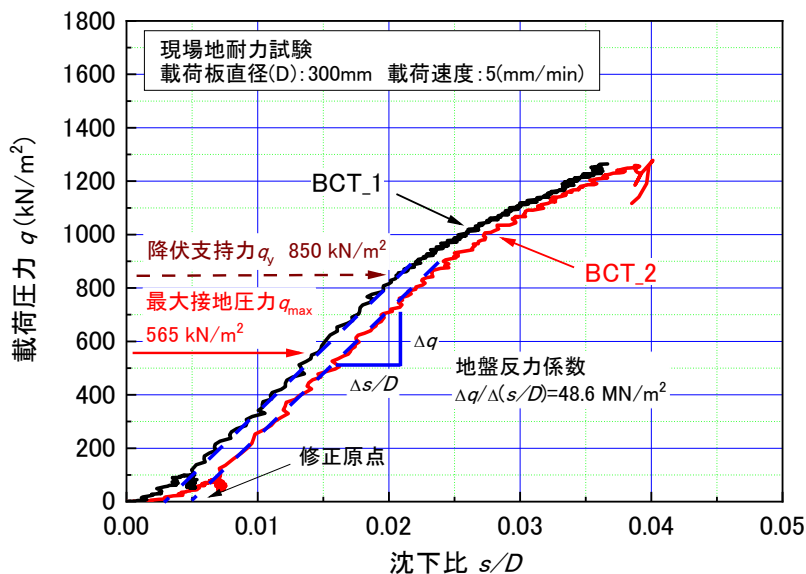


図 8 現場地耐力試験の結果

図 8 に BCT の結果を示す。BCT_1 と BCT_2 の両曲線では修正原点の沈下比が異なる点を除けば曲線の形状はほぼ一致している。載荷圧力 q が 565 kN/m^2 以下では q と s/D の関係はほぼ直線的である。ここで、この 565 kN/m^2 を降伏支持力 q_y と定義する。 $q > q_y$ では s/D 増分に対する q 増分は減少し、すなわち、 $565 < q < 1100 \text{ kN/m}^2$ において曲線は屈曲し、傾きは減少している。 $q > 1100 \text{ kN/m}^2$ では、 q は再び直線的な増加に推移している。ここで、 $q < q_y$ における直線の勾配を地盤反力係数と定義し、その値を求めると 48.6 MN/m^2 であった。先のアース・ドリルの履帯に生じた最大接地圧力 q_{\max} は 565 kN/m^2 であったがこの値は q_y よりも小さい。したがって、アース・ドリルが置かれていた場所は、 $q_{\max} < q_y$ であって、その時の沈下比 s/D は 0.015 以下と十分小さいことから、支持地盤に問題となる過大な沈下は生じていなかったことがわかった。

4 転倒機序の推定

次に、転倒後の状態に基づいて転倒機序を推定した。この推定では事故機の運転席に見られた損傷とブームの起伏角に着目した。図 9 は転倒したアース・ドリルの運転席を示す。左側の図は転倒直後の様子であるが運転席に向かって左側面に折れ曲がった変形が見られる。この変形は転倒時に左側面が何かに衝突したことを示している。しかしながら、転倒後の状況を見ると地盤との接触は見られない。従って、この衝突は転倒する過程の中で発生したものと考えられた。そこで、ミニチュア模型を用いて転倒過程を再現し、その機序を推定した。

図 10 はブームの起伏角と旋回角を事故直前の引抜き時の状態を示す。1) は転倒前の状況であり、2) は履帯を始点に傾斜した機体の様子を示す。当時の旋回角では機体が側方に傾斜すると、はじめに、運転席付近が地面に衝突することがわかる。したがって、図 9 の運転席側面に見られた変形はこの時に生じたものとわかった。

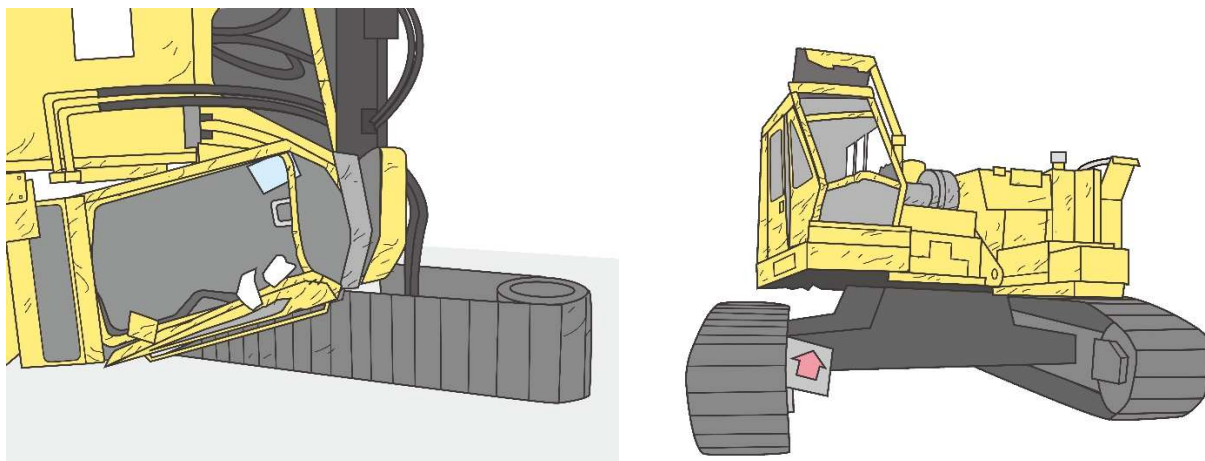
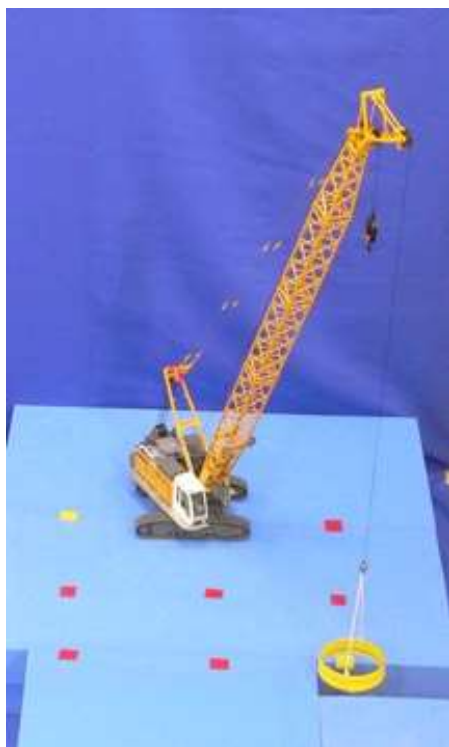
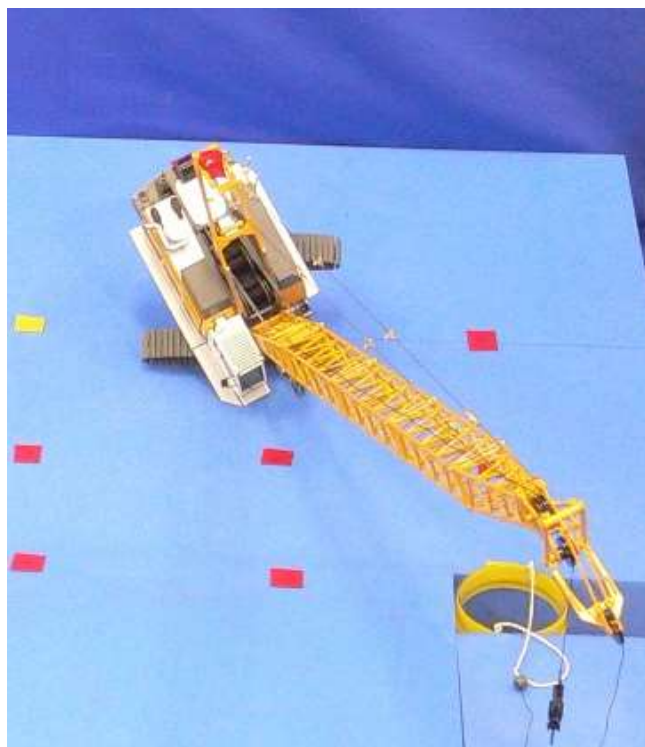


図9 損傷したアース・ドリルの運転席の様子(左：転倒直後の様子，右：検証時の様子)

図 11 はさらにこの衝突後のプロセスを示す．運転席が衝突した後に，機体がさらに傾斜すると次に 1)のようにブームが地面と衝突する．さらに，その転倒の勢いで機体がブームを押しように運動し，2)では起伏角が大きく増加する．ここで，図 12 からブームに押されて変形したバックストッパーの様子が確認され，推定した機序と矛盾しない．さらに，3)のようにブームと地面が衝突した反動とカウンターウエイトの自重によって上部構造体は反時計回りに旋回し，その向きは最終的に下部走行体とほぼ平行になったものと考えられる．



1) 転倒直前の補助吊り



2) 転倒して地面に衝突する運転席

図 10 転倒開始後に運転席が地面に衝突する様子



1) ブームが地面に衝突

2) 転倒の勢いでブームが
押されて起伏角が増加

3) 上部旋回体が回って
下部走行体と平行

図 11 転倒によってブームが地面と衝突しその反動で機体が横向きになる過程

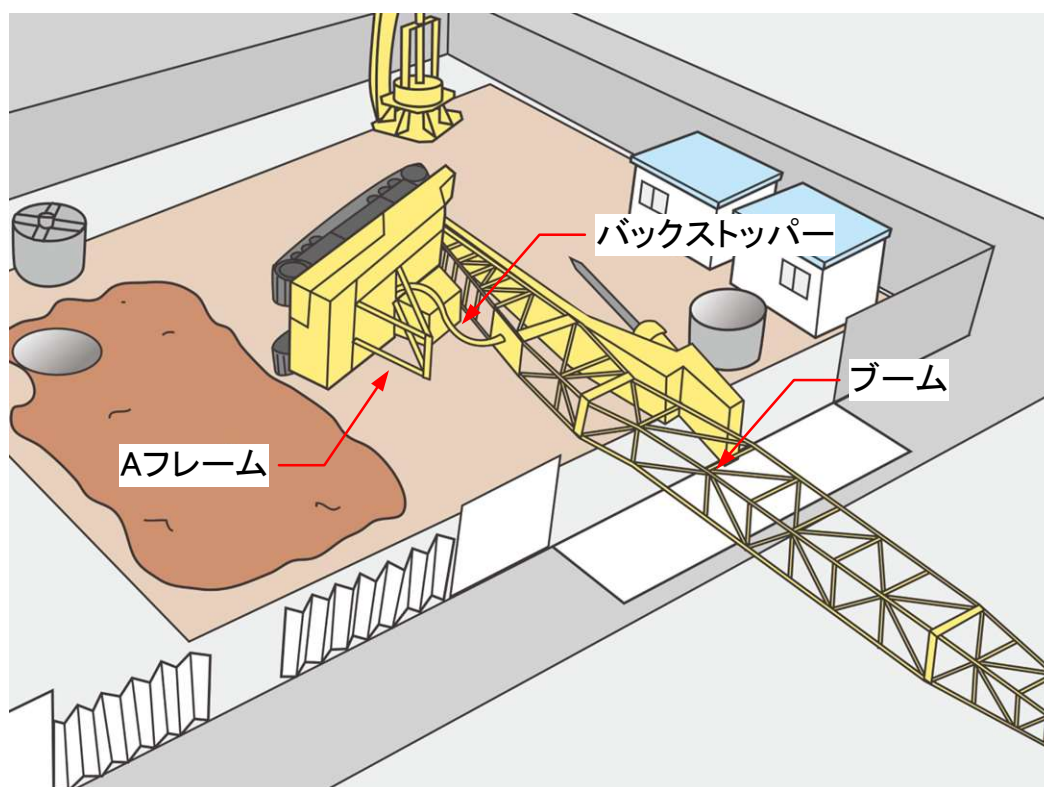
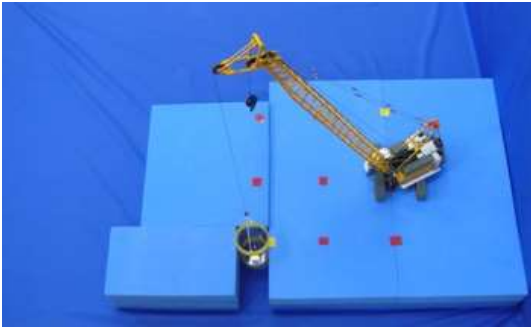
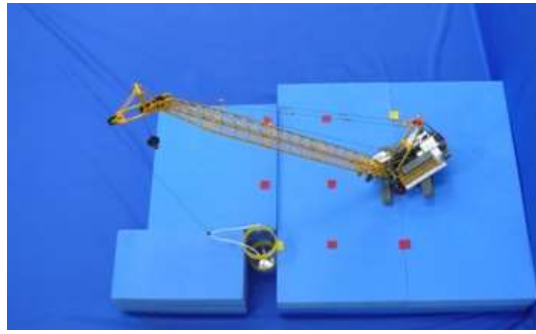


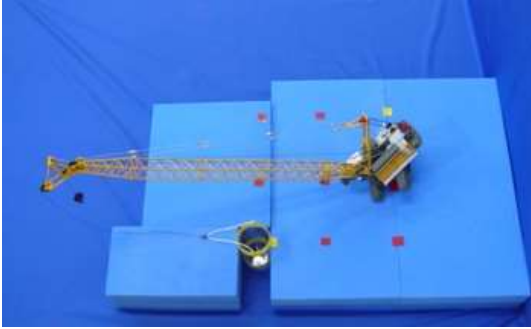
図 12 ブームの起伏角がほぼ直角となり変形したバックストッパー



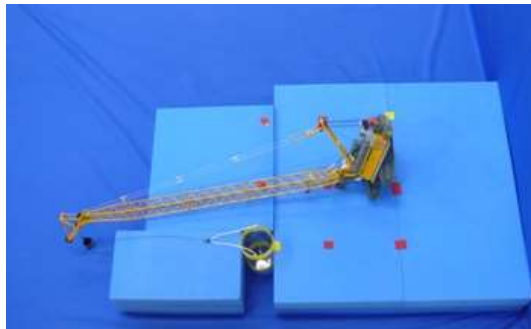
1) 表層ケーシングをつり上げた



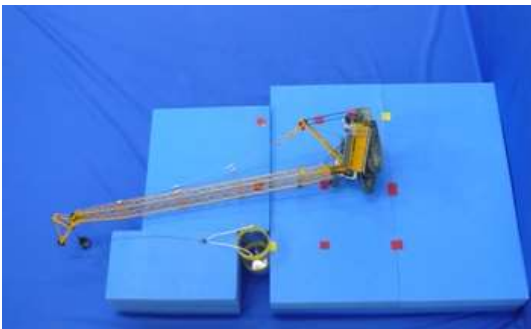
2) 傾斜を始める



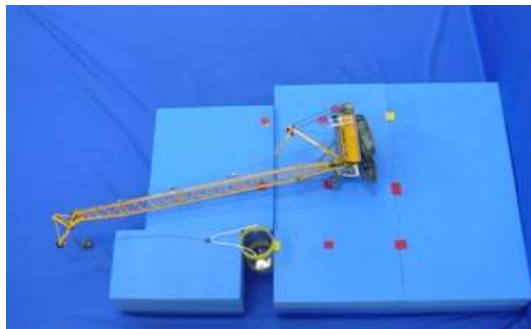
3) 運転席が地面に衝突する



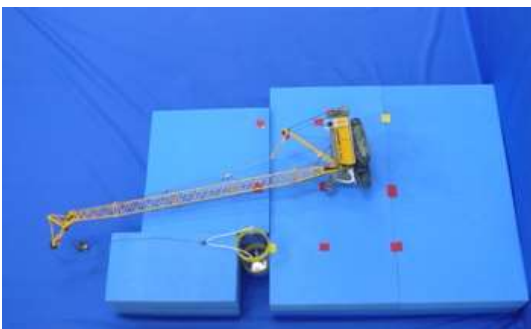
4) ブームが地面に衝突する



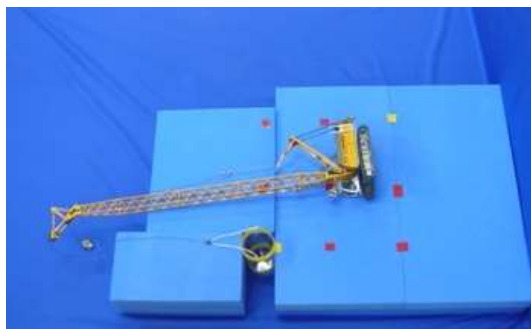
5) ブームが押されて起伏角が増加する



6) ブーム起伏角が限界まで押される



7) 反動で上部構造体が反時計回りに旋回する



8) 上部構造体と下部走行体がほぼ平行になる

図 13 前方上側から見た転倒の連続写真

図 13 は別の角度から転倒の経過を見たものである。ブームが地面に衝突して押され、起伏角は増加し、最終的に上部旋回体が下部走行体とほぼ平行となる一連のプロセスが推定されている。図 13 の 8) に示したブームの角度や上部旋回体と下部走行体の向きの様子は先の図 1 に示した事故後の様子とよく一致している。

5. 災害の発生原因

本災害の発生原因として次のようなことが考えられる。

(1) 転倒モーメントが過大となったこと

表層ケーシングとアース・ドリルの間の距離が離れていたにもかかわらず、無理な引き抜きを行ったために転倒モーメントが安定モーメントを上回り転倒した。事故当時の補助吊りは安定限界付近で引き抜くティッピング行為が行われていたが、作業半径が大きい条件であったために、引き抜き荷重は定格荷重を上回るとともに、限界(転倒)の荷重よりも大きな値となったこと。

(1) 杭の施工順序が適切で無かったこと

表層ケーシングを場内で順次転用する施工方法であったにもかかわらず、次に移動させる削孔までの作業半径を適切に考慮した作業の計画とはなっていなかったこと。

(2) 引き抜きに吊り上げ高さが必要であったこと

通常のクレーン作業では荷のつり上げ高さを地切り程度で低く抑えることで、たとえ機体が傾いても荷を接地させることで転倒は防止できる。しかしながら、削孔に挿入した表層ケーシングを引き抜くには6m以上つり上げる必要があった。そのため、危険を察知して荷を接地させようとしても吊り下ろす時間的な猶予がなく転倒を回避できなかったこと。

(3) 引き抜き荷重に不確定要素があったこと

表層ケーシングの引き抜きでは、その質量に加えて孔壁との摩擦などが加わる可能性があり、つり上げる荷の重さに不明確な要素があったこと。

6 同種災害の再発防止対策

同種災害の再発防止には以下のような対策が必要と考えられる。

(1) 補助吊りは定格荷重以内で行うこと

定格荷重は限界の荷重に対して1.27倍以上の安全率が考慮された値であるため²⁾、定格荷重を少し超える荷を吊っても限界の荷重よりも小さければ転倒しない。しかしながら、今回の事故では安定上の限界であるティッピング状態でつり上げようとしていた。定格荷重を超えたつり上げは危険であり、つり荷の重さは定格荷重以下とすることを第一に遵守されなければならない。

(2) 適切な機械を使用すること

アース・ドリルによる補助吊り作業はマニュアルに記述された使用方法であるが、この補助吊りは工事用品(表層ケーシング、鉄筋、トレミー管)を削孔へ吊り込むような作業を指すものであり、今回のような表層ケーシングの引き抜きは本機械では認められていなかった。表層ケーシングを引き抜く作業には移動式クレーンの性能を有する適切な機械を使用しなければならない。

(3) 余裕をもった機械の選択

場所打ち杭の長尺化と大口径化によって補助吊りするつり荷の質量は増加している。アース・ドリルの構造的な安全性と転倒に対する安定性を確保するためには、過負荷防止装置を装備する移動式クレーンと同等な性能を有する機械を使用すべきである。また、削孔に挿入された長尺な表層ケーシングの引き抜きでは、つり上げ高さが大きくなることや孔壁との摩擦などの基礎工

事特有の危険要因が存在する。従って、このような引き抜き作業では十分な安定を有する機械の選択が必要である。

(4) 現場地盤の適切な養生

本災害の原因ではなかったが、過去の災害事例には現場地盤の地耐力不足による転倒も多く見られる。労働安全衛生規則ではくい打機、くい抜機及びボーリングマシンに対して軟弱な地盤に据える時に脚部の沈下防止の措置を述べている⁶⁾。当研究所の安全資料では、移動式クレーンの安定設置に必要な支持地盤の安定要件として地盤の支持力安全率の値を提案している⁷⁾。特に、荷を吊った移動式クレーンはトップヘビーな状態となり、支持地盤に急激な沈下を生じると大きく不安定化する。そのため、急激な沈下の可能性がある現場地盤では支持力安全率を 3.0 以上、緩慢な沈下の条件でも 1.5 以上は確保するものとし、その沈下性状が不明確な場合は安全側に選択されるべきと考える。

参考文献等

- 1) 安衛法便覧 I 令和 4 年度版, 労働安全衛生法施行令 別表第 7 (建設機械) 及び第 10 条 (法第三十三條第一項の政令で定める機械等), 労働調査会, p. 824 及び pp. 752-753, 2023.
- 2) 安衛法便覧 I 令和 4 年度版, クレーン等安全規則第 1 条 (定義) 及び第 55 条 (製造検査), 労働調査会, p. 1767 及び p. 1823, 2023.
- 3) 伊藤廣: 移動式クレーンの知識, 鹿島出版会, pp127-130, 1994.
- 4) JIS S 8509-1: 基礎工事機械—安全—第一部, くい打ち機の要求事項, 日本規格協会, pp. 20-33, 2007.
- 5) 玉手聡, 堀智仁: 作業現場における地耐力確認の方法—移動式クレーンを含めた建設機械等の転倒防止対策—, 労働安全衛生総合研究所技術資料, JNIOSSH-TD-NO. 3, 2015.
- 6) 安衛法便覧 I 令和 4 年度版, 労働安全衛生規則第 173 条 (倒壊防止), 労働調査会, pp. 1152-1183, 2023.
- 7) 玉手聡: 移動式クレーンの安定設置に必要な地盤の支持力要件, 産業安全研究所安全資料, NIIS-SD-NO. 322, 2006.