

災害調査報告書

建設工事現場で発生した
クライミングクレーンの落下災害

(要約版)

労働安全衛生総合研究所

要旨

本災害は、建設現場で使用していたクライミングクレーンの解体工事を行っていた際に、クレーンの逆クライミング（降下）作業時にクライミングマストを固定するための油圧ピンが抜けたために、クレーン本体が落下し、搭乗していた解体作業員2名が死傷した災害である。このピン抜けの原因を調査するため、油圧ピンによる傷の顕微鏡観察を行うとともに、ピン伸縮時における最大押力や引き込み力などの測定と油圧作動機構の解析を行った。これらの解析結果から、クレーン操作者は通常の手順で操作していたものの、ピンの挿入位置のずれに気付かず操作を継続したため、本クレーンの油圧機構の構造に起因したピン動作が生じて、ピンが引き抜かれたと推察された。本災害の再発防止のため、油圧回路の改善と誤操作防止方策を提言した。

1. 災害発生状況

建設現場で、図1に示す油圧駆動のクライミングクレーンの解体工事を5名の作業員により開始したところ、クレーンの逆クライミング作業中にクライミングマスト（旋回体及びジブを含む）が落下した。

この作業では、クライミング装置（図2）が取り付けられたクライミングマストをタワーマスト表面に沿って降下させる必要がある。この作業では、クレーン操作者が油圧装置を操作してタワーマストのボス穴に落下防止用の油圧ピンを交互に抜き差ししながら、クライミングシリンダを上下に伸縮させてボス間隔毎に降下させるという手動操作を行うものであった（図3参照）。

災害発生時、クレーン操作者はクライミングマスト下部の踊り場で油圧ピンとクライミングシリンダの操作を行っており、もう一人の作業員はクレーン操作者とは反対側の下部踊り場で作業中であった。この作業中に、何らかの理由によって2本の油圧ピンが共にタワーマストの最上部マストのボス穴（ピン挿入穴）から抜けたために、クライミングマストがタワーマストに沿って最下端まで約20m落下し、下部踊り場で作業中の上記2名の作業員も一緒に落下してクライミングマストと踊り場の間に挟まれた。

2. 当該クライミングクレーンの実機調査

2.1 災害発生直後の観察結果

- ・ 2本の油圧ピンは、上部ピンが完全に収納されて、下部ピンはクライミングマストのピンガイド端から約20mm突出した状態となっていた（写真1(a)）。
- ・ 4本連結されたタワーマストの最上部の上から2番目のボス上部外側及び4番目のボス下部内側に塗装ペンキが削れた新しい傷が確認できた（写真1(b)）。
- ・ クライミングマスト撤去後、油圧ポンプを起動させたところ、昇降用シリンダ及び2本のピン用シリンダは全て正常に動作することを確認した。
- ・ 上部ピンの動作は操作位置から目視可能であったが、下部ピンの動作は昇降用シリンダ伸張時では目視できなかった。

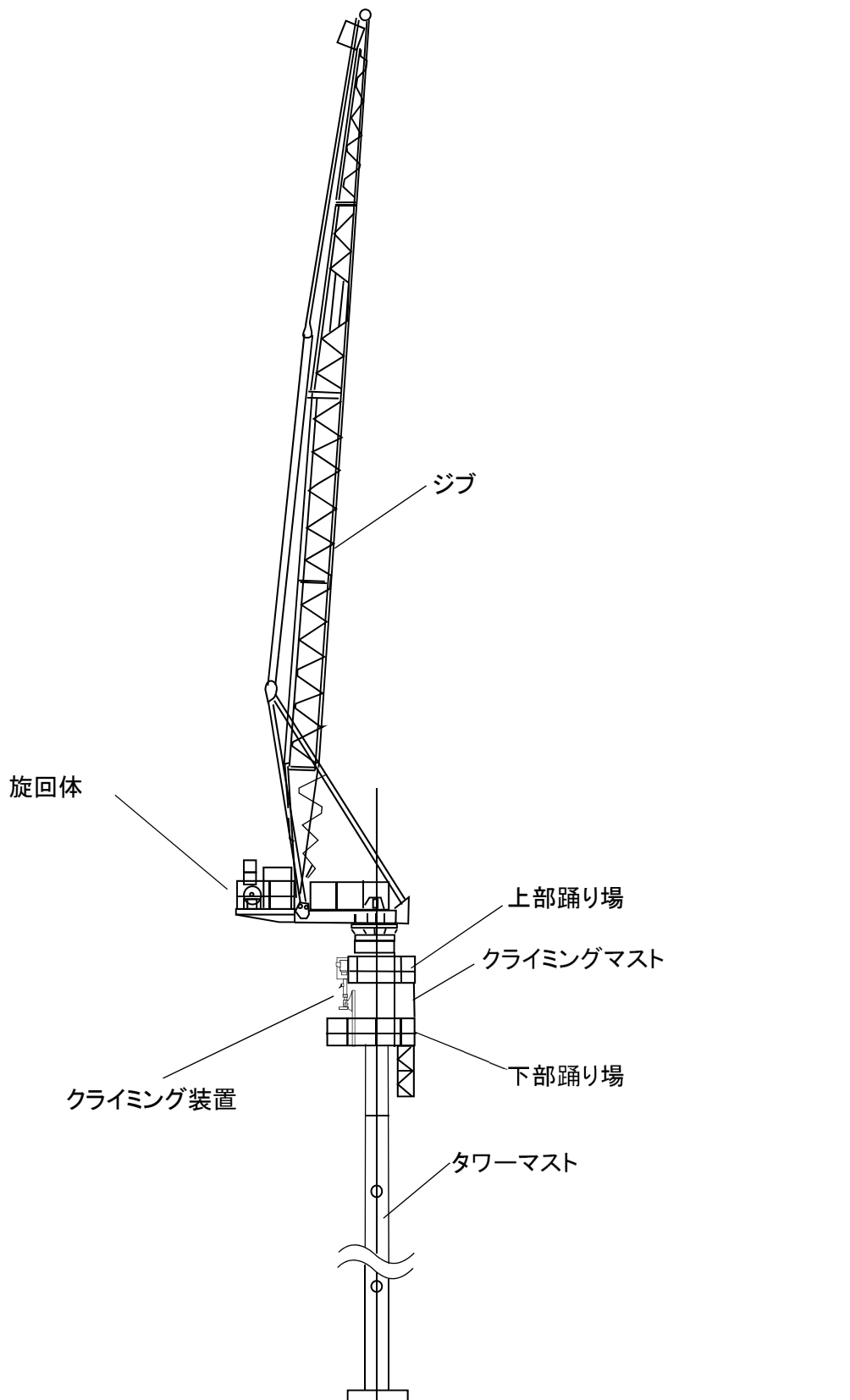


図1 クライミングクレーンの外観図

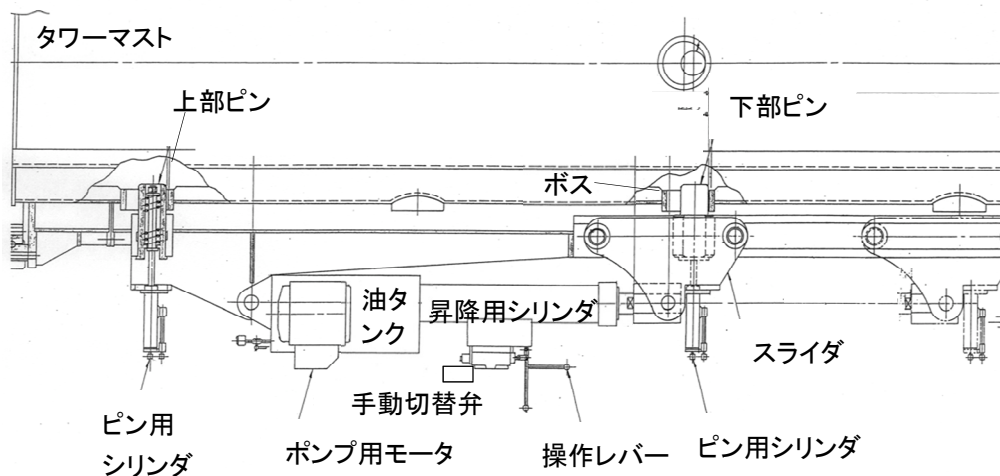
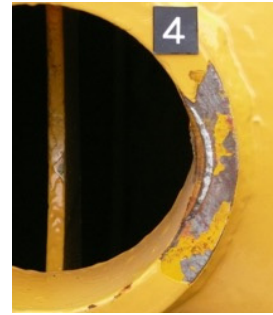


図2 クライミング装置の構成

2.2 撤去・解体後の観察結果

- ・ クライミング方式は油圧式セルフクライミングであり、固定時は別途ストップピンを手動挿入する方式であった。
- ・ 昇降用及びピン用シリンダは共に複動片ロッド油圧シリンダであり、上下ピン用シリンダのロッド端にはコイルバネが内蔵されたスリーブ上のピンが連結される。この機構では、ピン伸張時はロッドを直接押し出すが、ピン引き込み時は先にロッドが引き込まれてコイルバネを圧縮し、このバネの復元力によりピンを引き込む仕組みであった(図4参照)。
- ・ 上部ピン用シリンダはクライミングマスト部に固定されるが、下部ピン用シリンダは昇降用シリンダのスライダ部に取り付けられるため、ピン高さが可変となる。
- ・ 上下ピン下端部の間隔は2,959mm、最上部のタワーマスト(全長5,880mm)の最上部ボス下端部と上から4番目のボス下端部間の間隔は2,939mmであり、ピン間隔が20mm長かった。
- ・ 最上部タワーマストの上から2番目のボス上部端の傷はV字にえぐれており、上から4番目のボス下部内側端の傷は下向きに押しつぶされて外側へ盛り上がった変形が確認されたが、他のボスには新しい傷は確認できなかった。



(a) 下部ピン状況 (20mm 突出) (b) 新しい傷 (最上部タワーマストの上から 2,4 番目のボス)

写真 1 当該クライミングクレーンの状況 (災害発生直後及び撤去後の外観観察)

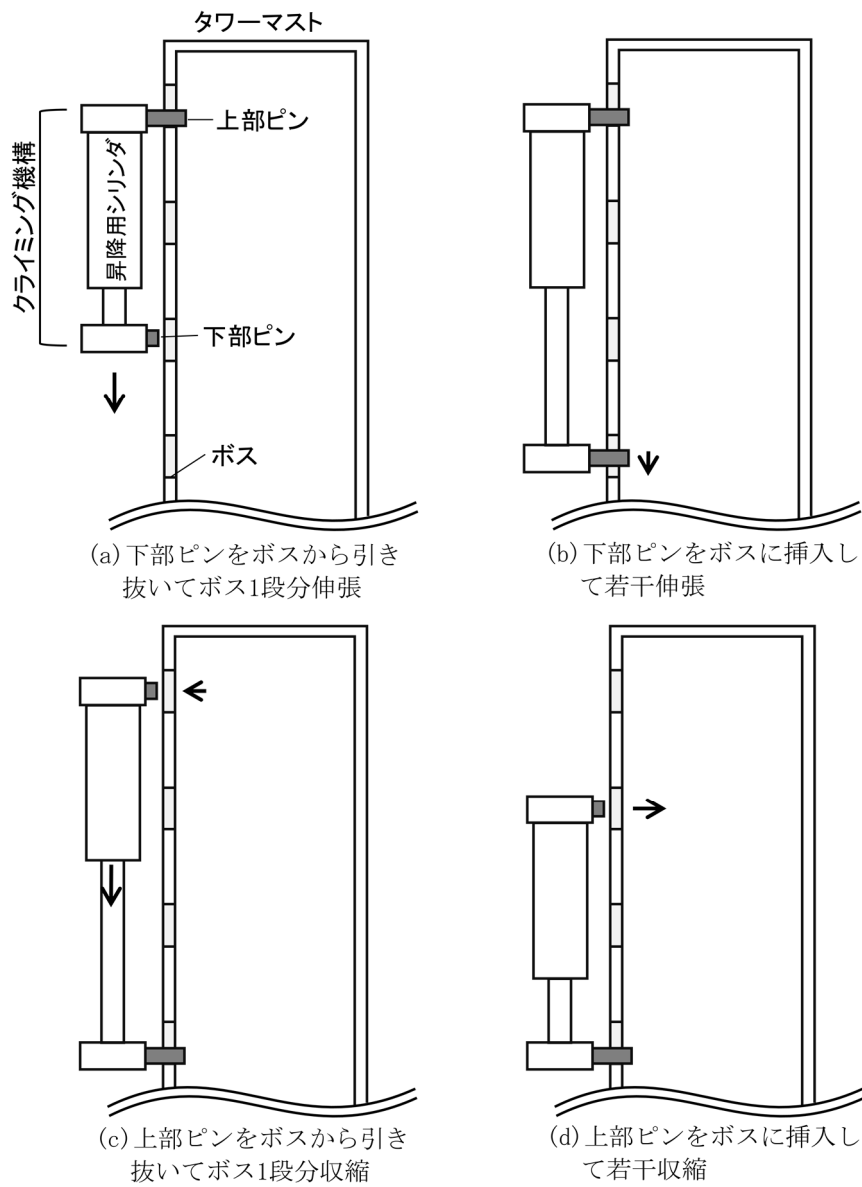
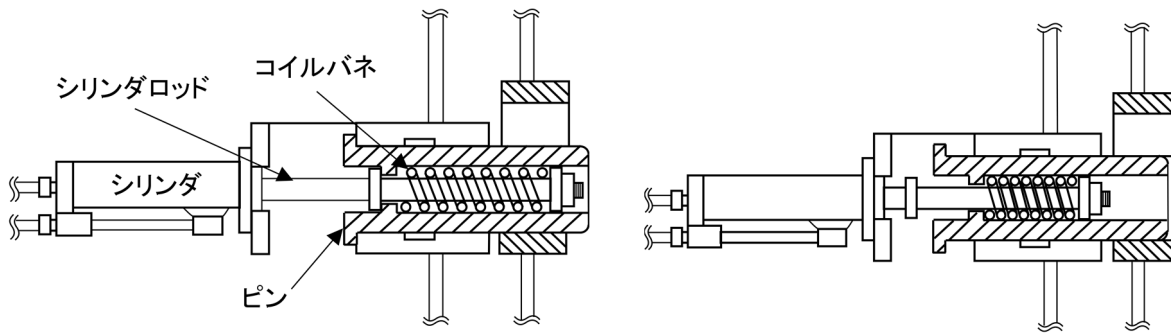


図 3 クライミング機構の逆クライミング動作



(a)伸張時（内蔵バネは非圧縮状態）

(b)引き込み時（内蔵バネの復元による
ピン引き込み途中状態）

図4 ピン用シリンダの構造

2.3 逆クライミング操作手順の検証

逆クライミング操作手順は以下の通りであった。

- ① クレーンジブを起こす（風速 5m/s 以下の条件下）。
- ② クライミングマストのタワーキャッチ（上下に各 2 カ所）を緩める。
- ③ 昇降シリンダを若干伸張して、クライミングマストを持ち上げる。クライミングマストと旋回体、ジブ等の全重量（以下、全重量という）を上から 3 番目の下部ピンで受ける。
- ④ ストッパーピンの荷重が抜けるので手で引き抜く。
- ⑤ 上部ピンを最上部のボスに挿入する。
- ⑥ 昇降用シリンダを若干縮めて、全重量を上部ピンで受ける（図 3(a)参照）。（3 番目のボスから下部ピンが自動で抜ける。）
- ⑦ 昇降用シリンダを伸張して、下部ピンを上から 4 番目のボスに挿入する（図 3(b)参照）。
- ⑧ 昇降シリンダを若干伸張して、全重量を下部ピンで受ける（図 3(c)参照）。（最上部のボスから上部ピンが自動で抜ける。）
- ⑨ 昇降用シリンダを縮めて、上部ピンを上から 2 番目のボスに挿入する（図 3(d)参照）。
- ⑩ ⑥より繰り返す。（ピンを挿入するボスは 1 段毎に下がる。）

正常動作時は、上部ピンと下部ピンは片方が伸張動作する場合、他方は引き込み動作を行い、全重量は上部ピンと下部ピンで必ず交互に支えることにより、いわゆる尺取虫動作を行いながら降下させる仕組みである。全重量を受けるのは 1 本のピンのみとなるため、各手順が確実に実行されなければならない。

当該クライミングクレーンの昇降用シリンダと上下ピンの動作は、2 本のレバーにより油圧切換弁を手動で操作することにより行われ、何れの操作用レバーも中立復帰の 3 位置操作が可能であり、昇降用は上昇・下降・停止（保持）、ピン挿入用は上部ピン挿入・下部ピン挿入・停止（保持）の操作が可能である（写真 2 参照）。したがって、操作者はピン引き込み操作を意識することなく、逆クライミング作業を実行できる。

2 本の操作用レバーは同一仕様で並べて設置されていたが、レバー操作位置が異なるとともにレバー



写真 2 操作用レバーと操作方向表示
(左側：ピン挿入用，右側：昇降用)

の操作方向ラベルが貼付されていた (写真 2 参照)。したがって、昇降用とピン挿入用のレバーを混同する可能性は低いですが、2 本の操作レバーは両手で同時に操作可能であるため、ピンが挿入途中であっても昇降動作ができるおそれがある (このことは、図 5 の油圧回路からも明らかである)。この場合、一方のピンが完全挿入する前であっても他方のピンの引き込み力が発生し始めるため、昇降動作により他方のピンにかかっていた全重量が開放されると、最悪ピンが引き込まれるおそれがあることが分かった。

以上の調査結果から、逆クライミングの正常動作は、操作者が適切な操作を行い、ピンが目的のボスに完全に挿入されるといふ前提条件が必要であることが判明した。このため、当該クライミングクレーンの取扱説明書でも災害防止対策として、ピンが完全に挿入されているかの確認を求めているが、操作者自身がピンの挿入を確認する場合、上

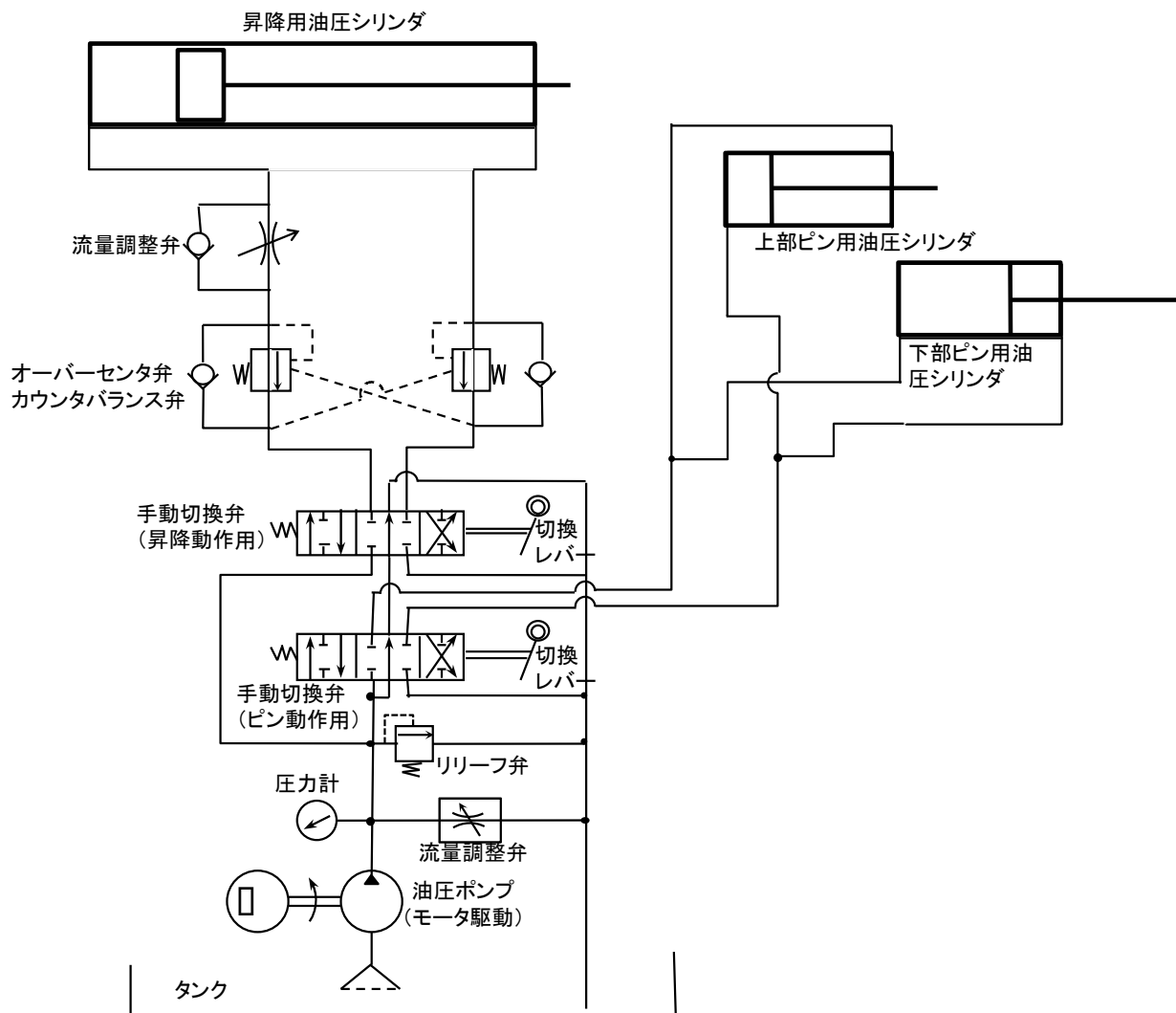


図 5 クライミング装置の油圧回路

部ピンの動作状況は目視可能であったが、下部ピンの動作状況は昇降用シリンダが伸張しているときには現実には目視が困難であった。なお、操作者以外にタワーマスト内部を目視することは実施されておらず、ピン動作を確認する他の手段（計器等）も装備されていなかった。

2.4 油圧回路の問題点の検証

昇降用シリンダと2本のピン用シリンダは、共通油圧源により独立した操作系で駆動される。ただし、2本のピン用シリンダは図5に示した油圧回路により1本の操作用レバーにより駆動される。また、同図より、昇降用シリンダの油圧回路と操作系はピン用シリンダと同様であることが分かる。

ピン用シリンダの油圧回路の大きな特徴は、ピンの挿入と引き抜きを同時に一つの操作で行えるように、一方のピン用シリンダのピストンヘッド側ポートと他方のシリンダのピストンロッド側ポートを直結して切換弁に配管している点である。しかし、両者が直結しているために、仮に一方のシリンダがストローク途中で停止した場合であっても、切換弁が操作されている限りは他方のシリンダへ油を供給して動作してしまう。したがって、コイルバネを用いるピン引き込みの仕組みがシリンダに付加されていると、一方のピンの伸張動作が不完全であっても、操作用レバーを操作する間、他方のピンはバネの圧縮が続くため、このピンの引き込み動作は起こり得ることが分かった。

また、片方のピンの中途停止はピンが目的のボスに抵抗なく挿入できない場合だけでなく、シリンダのピストンの固着やゴミなどの引っ掛かりによっても起こる可能性があり、前節で述べたピンの動作状況確認は必須であると言える。

2.5 油圧ピンとタワーマストのボスと傷の照合

最上部タワーマストの上から2番目のボス上部端のV字傷は、傷の形状からジブ等の他の鋭角部位が衝突した可能性が高いと推察され、ピンにより生じた傷ではないと判断された。

一方、最上部タワーマストの上から4番目のボス下部内側端の変形傷は、ボスにピンが接触したことで生じたと思われる塑性変形の痕が観察されたため、ボスの変形部に対してラジアル方向に組織観察を行い、結晶粒の流動した方向を基に変形の原因を調査した。写真3は、光学顕微鏡による変形部の組織観察写真である。同写真(b)、(c)に示すように、変形部の結晶粒は明らかに塑性変形をしており、写真では左から右下方向に流動していることが分かる。これは、ピンがボスの内側下部縁から滑るように下方

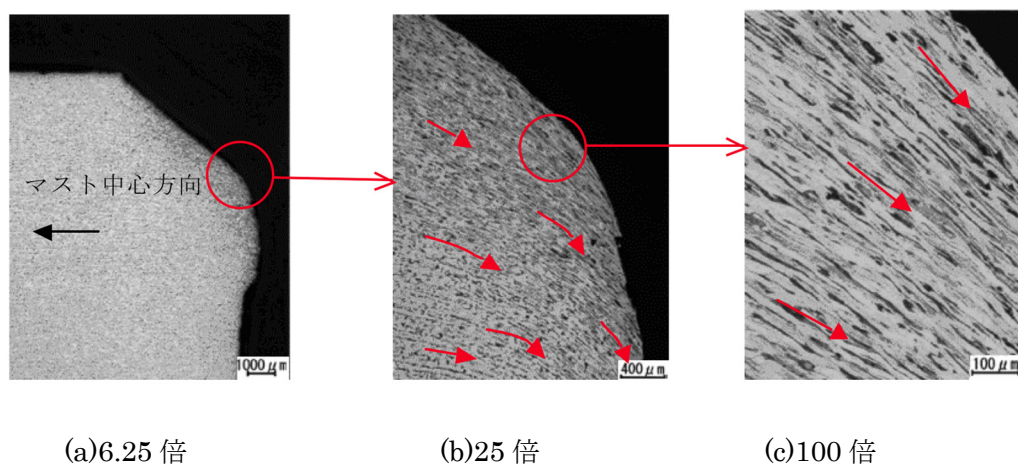


写真3 ボスの組織観察結果（写真2のボス変形部）

へ移動した結果生じたと考えられる。

次に、レーザー顕微鏡を用いてピン先端とボスの変形部の形状測定を行った結果を推定過程とともに図6に示す。ピンには変形が確認できなかったが、ボス端面からマストの中心方向に向かって約4.5mmの変形が確認できた。この変形によって盛り上がったはみ出し量は、ボス端面から約1mmであった。図面によればピンのガイド端面とボス端面の隙間は15mmであったため、前出の下部ピン突出長20mmから、ピンはボスの端面から5mmだけ挿入されていたことになる。この位置関係は、ピンの先端形状を考慮すると、ボスの変形している長さとはピンとボスが接触する長さはほぼ一致すると言える。

以上の結果から、最上段タワーマストの上から4番目のボス内側下部に生じている新しい傷(変形部)は、図6に示すように、下部ピンがこのボス内側下部に引っ掛かった状態から下方へ滑り落ちた際に生成されたと推定される。

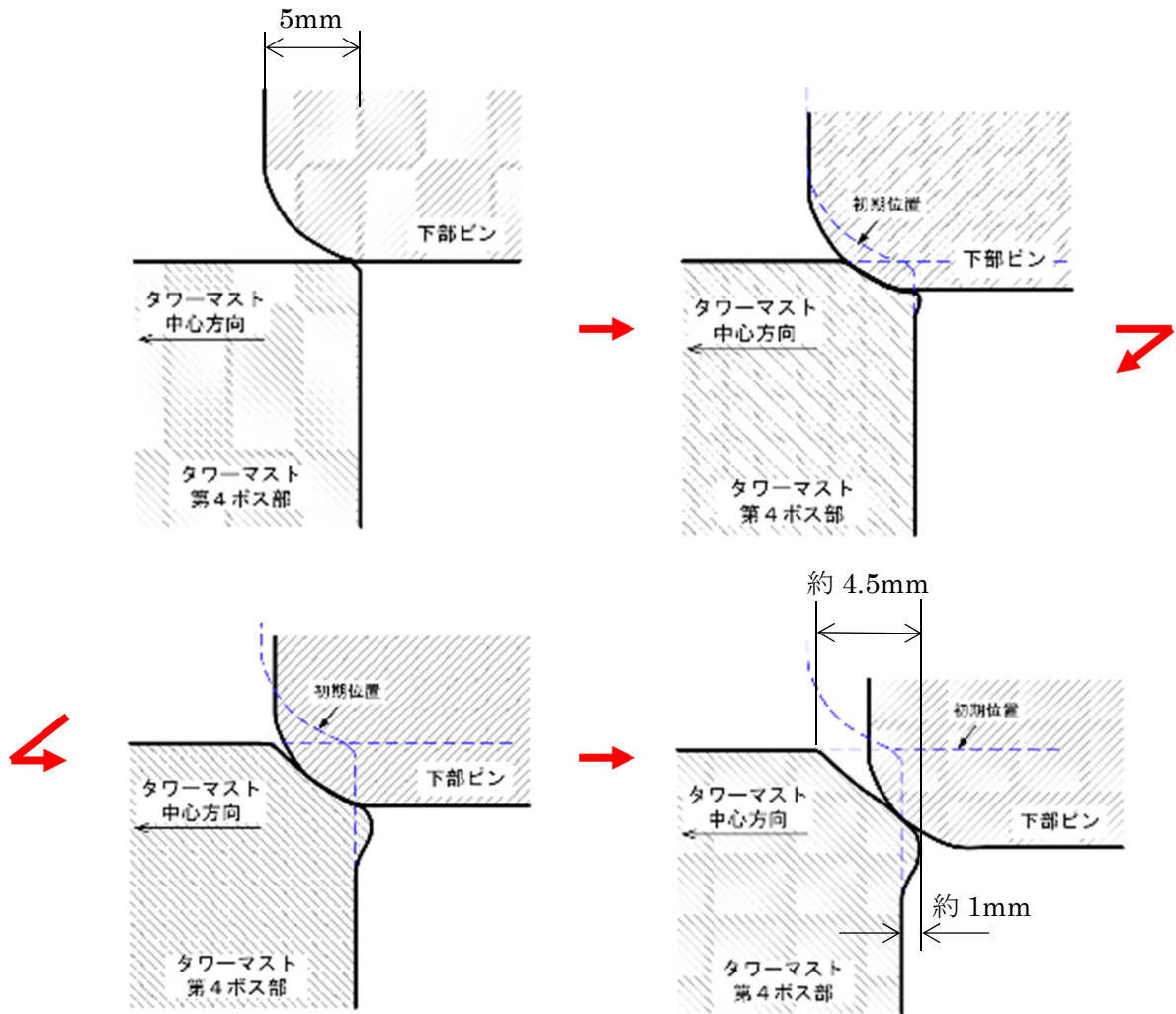


図6 下部ピンがボスに引っ掛かり変形させる推定過程

3. 災害原因の推定

3.1 下部ピン抜けに至る可能性

前章の調査結果から、下部ピンはボス縁部に引っ掛かるという不完全な挿入状態から滑り落ちており、

この引っ掛かり状態で下部ピンがクライミングマストとクレーン本体の全重量を受けたため、支えきれずに引っ掛かりが外れたと推察される。この状況は、逆クライミング時に昇降用シリンダをさらに伸張させて下部ピンでクライミングマストとクレーン本体（旋回体、ジブ等を含む）の全重量を支えた後、上部ピンにかかっていた荷重が抜けてボスから引き抜かれたことで生じる。この状態に至る可能性としては、次の3通りの過程が考えられる。

- (a) 下部ピンがボス穴の断面に垂直に当たったために、クライミングマストが傾き、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。
- (b) 下部ピンがボス縁部に角度を付けて当たったために、クライミングマストが持ち上がり、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。
- (c) 下部ピンがボス縁部に引っ掛った状態のまま昇降シリンダを伸張させたために、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。

各々の想定過程の詳細を表1に示す。

表1 下部ピン抜けに至る想定過程

No	想定過程	想定過程の詳細
(a)	下部ピンがボス穴の断面に垂直に当たったために、クライミングマストが傾き、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。	<ul style="list-style-type: none"> ① 操作者が昇降操作を行い、下部ピンを下げた。 ② 下部ピンの中心がボス穴の中心から外れたために、下部ピンがボス穴の断面を垂直に押し込む状態となった。 ③ ②によってクライミングマストが傾いた。 ④ 上部ピンに作用していたクライミングマストとクレーン本体（旋回体、ジブ等）の全重量が減少し、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。 ⑤ 下部ピンがクライミングマストとクレーン本体の総重量を受け、この重量を支えきれずに下部ピンの引っ掛かりが外れてクライミングマストが滑り落ちた。
(b)	下部ピンがボス縁部に角度を付けて当たったために、クライミングマストが持ち上がり、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。	<ul style="list-style-type: none"> ① 操作者が昇降操作を行い、下部ピンを下げた。 ② 下部ピンの位置がボス穴の位置からずれたために、下部ピンがボス縁部に角度を付けて引っ掛かり、ボス縁部を押し上げる状態となった。 ③ ②によってクライミングマストが傾いた。 ④ 上部ピンに作用していたクライミングマストとクレーン本体の全重量が減少し、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。 ⑤ (a)の⑤に同じ。
(c)	下部ピンがボス縁部に引っ掛った状態のまま昇降シリンダを伸張させたために、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。	<ul style="list-style-type: none"> ① 操作者が下部ピンを第4番目のボスに挿入させる際に、昇降用シリンダを伸張させたところ、下部ピンの位置がボス穴の位置からずれた。 ② 操作者はこのずれに気付かずに下部ピンの挿入操作を行ったため、下部ピン縁部がボス縁部に引っ掛かった（半掛かり状態）。さらに、気付かないまま下部ピンの挿入操作を続けたため、上部ピンを駆動するシリンダに油が供給され続けた。 ③ 油圧回路構成により、一方のシリンダがストロークの途中で停止した場合でも、切換弁が操作されている限りは他方のシリンダへ油を供給し続ける。この構造に起因して上部ピンの引き込み力が発生した。 ④ 昇降シリンダをさらに伸張させたところ、上部ピンがボス穴から自動的に引き抜かれた。 ⑤ (a)の⑤に同じ。

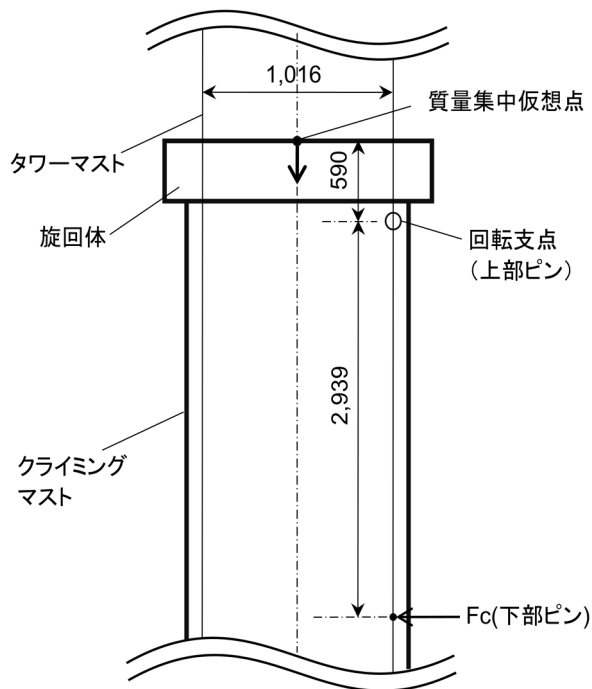


図7 クライミングマスト傾斜のためのモーメント（下部ピン最伸張時）

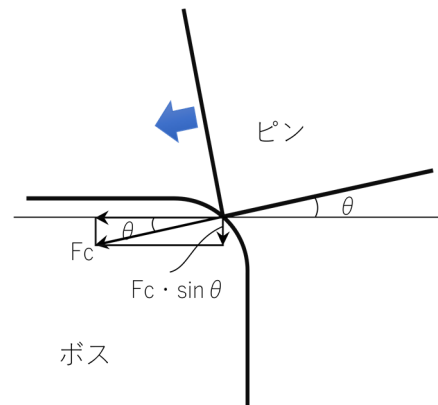


図8 ピン傾斜押圧時のポストにかかる応力

3.2 想定過程(a)の検証

上部ピンとポストとの接触点を回転支点として、下部ピンが昇降用シリンダのストローク端の位置でクライミングマストを回転させるモーメントが働くとすると、最大モーメント長 l はポスト3穴分間隔(2,939mm)となるので、支点における回転軸のモーメント M_p [kNm]は次式で得られる。

$$M_p = F_c \cdot l = 18 \times 2.939 \approx 52.9 \quad (1)$$

ただし、 F_c は定常油圧力約14MPaとシリンダ内径φ40mmから算出されるピン押力の理論値であり、実際のピン機構を取り出して構成したピン押力測定装置により測定した最大押力値は17.6kNであった。次に、計算を簡単にするために、図7に示すようにクライミングマストと旋回台、ジブ等の全質量(14.087×9.8=138kN)は旋回体台座(回転支点上方590mm)のマスト中心軸上に集中すると仮定する(最悪条件)。この質量が回転支点軸上におけるモーメント M_g [kNm]を生成し、これは次式により算出できる。

$$M_g = 14.087 \times 9.8 \times 1.016/2 \approx 70.1 \quad (2)$$

したがって、 $M_p < M_g$ となり、ピン押力のみでクライミングマスト自体を傾けることはできず、(a)の想定過程は起こりえないと判断された。なお、実際には、マスト中心から片持ち状態で設置される旋回体の長さやジブの荷重支点が中心軸から離れているため、 M_g は式(2)の値より大きくなり、より傾きにくい状況であったと推定される。

3.3 想定過程(b)の検証

ボスにかかる鉛直応力の反力がクライミングマストを持ち上げる力となるため、ピンがボスに当たる角度が垂直から傾斜する（ピンがボス内側縁部に当たる場合、水平方向からピン先端が下向きの）場合、この傾斜角度 θ により反力が増加する（図 8 参照）。しかし、クライミングマストがタワーマストに対してラジアル方向にオフセット可能な最大値が 184.2mm（各タワー半径より算出）であり、クライミングマスト長 3625mm であることから、同マストは構造上最大 2.9 度（ $=\arcsin(184.2/3625)$ ）までしか傾斜できない。この最大傾斜時の応力測定値 800N（ピン押力測定装置により実測）及び理論値 910N（ $=F_c \cdot \sin \theta$ ）の何れの場合であっても、クライミングマストと旋回体、ジブ等の全重量(138kN)に対して十分小さいことは明らかである。この結果から、(b)の想定過程も起こりえないと判断された。

3.4 想定過程(c)の検証

表 1 における(c)の③の状態は、上部ピンがボスに挿入されてクライミングマストとクレーン本体の全重量を支えているため、この状態から上部ピンの引き込み力が発生するメカニズムを検証する。

図 4 で示したように、ピン引き込み時には、シリンダロッドの延長ロッド端のフランジがコイルバネ端を押してバネを圧縮する。このとき、シリンダロッドの推力（引き込み力）はバネにのみ伝達されるため、ピンが外部から拘束されているとシリンダロッドのみ引き込んでピンは動作しない。この拘束が解けると、コイルバネの復元力によりピンが引き込み動作を開始する。ピンの外部拘束とは、ピンがボスに完全挿入されてピンとボス内側面が接して、クライミングマストと旋回台、ジブ等の全重量がピンにかかっている状態である。しかし、ピンとボスの接触状態がなくなると、ピンは無負荷状態となるために、シリンダ推力より小さなバネの復元力であってもピンを引き込むことが可能となる。すなわち、ピンに垂直荷重がかかった状態でピン用シリンダを操作することにより、バネを先に圧縮させておけば、荷重が無くなるとシリンダ操作無しに自動的にピンが引き込まれる仕組みであった。

ピンが引き込まれる初動条件は、(バネの最大復元力) > (ピンにかかる静摩擦力) という関係が成り立つことが必要である。そこで、取り出した実際の上部ピン機構部でピン引き込み力を測定したところ、最大約 480N を記録した（シリンダの引き込み方向推力は約 12kN から算出される理論値は 600N 程度）。次に、ピン押力測定装置を用いて伸張したピン側面にボス（切り出した円弧状部分）内側面を接触させて静動摩擦力の測定を行った結果、ボスにかかる垂直荷重が概ね 1,000N 以下であれば初動引き込み動作が確認できた。すなわち、この垂直荷重値以下で、なおかつ 480N 以下となる場合は、クライミングマスト自体が傾くか上方へ持ち上がることによって、ピンがボス接触面から離れる過程でのみ発生すると考えられる。

結局、3.2 及び 3.3 節で棄却した想定過程を除くと、(c)の③の状態に至るためには、シリンダロッドが引き込まれてコイルバネを圧縮して上部ピンの引き込み力が発生した状態（ただし、上部ピンはボスに挿入されて全重量を支えている）から、④の通りに昇降用シリンダをさらに伸張させたために上部ピンにかかる上記全重量が解放され、コイルバネの圧縮力によりボス穴から自動的に引き抜かれたと推察される。このことは、2.2 節で述べたようにタワーマストの最上部ボスと上から 4 番目のボス間の距離に対して、上部ピンと下部ピン間距離が 20mm 長かったことも根拠となり、この現象が発生した可能性を否定できないと考える。

以上の検証結果より、クレーン操作者は想定過程(c)の操作を行ったが、ピン動作状態の目視確認が困難であったため、ピンの異常動作状態に気付かずに操作を続けた結果、本災害が発生したものと推察される。

4. 災害防止対策

4.1 油圧回路の改善策の提案

当該クライミングクレーンでは、前述したように、危険なピン引き込み操作を行うことなく逆クライミング作業ができるように油圧回路を構成していた。ただし、ピンの完全挿入の確認が不可欠であったため、

- I. ピンが完全に挿入されているのを自動的に確認する工学的手段を設けるとともに、
- II. I の確認結果が正常でない限り次の動作を許可しないインタロック機能を油圧回路に組み込む、ことを検討した。

I に関しては、図 5 における上部及び下部ピン用油圧シリンダにストローク端検知センサ（またはスイッチ）を付加して、ピストンロッドが所定の位置に到達したことを電気信号により通報できる構成が考えられる。当該クライミングクレーンの場合は、ピンがシリンダと連結していないが、ピン完全挿入時にシリンダは必ずストローク端まで伸張するという関係が成立するので、ピン用シリンダピストンかロッドのストローク端（2本のシリンダに各1箇所）にこれらの装置を設置すればよい（ピンのみを検知するとシリンダの動作状態を必ずしも反映しない）。

II に関しては、上記センサ類の2つの出力信号の何れかがあればピンの完全挿入の確認信号となるので、この信号がなければ次の操作（すなわち昇降用シリンダの操作）ができないように、昇降用シリンダの弁操作を禁止すればよい。そのため、昇降動作用切換弁の手前に流路遮断を目的とした電磁切換弁（バネ復帰式4ポート2位置電磁弁）を設けて、センサ出力信号の論理和出力によって流路を開く構成が考えられる。これは、センサ出力と電磁切換弁の駆動用ソレノイドコイルからなるインタロック回路であり、既存の油圧回路の利点（ピン用シリンダのポート共有配管）とコイルバネによるピンの自動引き込み機能の仕組みを活かしつつ、極力少ない改造で済む。これにより、ピンの不完全挿入状態が解消されない限り昇降動作が行えないことが確認できた。なお、ストローク端検知センサの故障（検知できない危険側故障）まで考慮するならば、センサの冗長化または定期的なセンサ正常性の確認を行うことが望ましい。

4.2 誤操作防止方策とその役割

操作者による手動操作が残る以上、誤操作を極力防止する方策として次の方策も考えられる。

- ▶ 適切な昇降位置（ピン中心と挿入ボスの中心の重なる位置）をスライダにマーキング：ピンの不完全挿入の防止（ただし、ボス間隔が均一の場合）
- ▶ ピン用シリンダのストロークゲージとストローク端の表示：ピンの完全挿入状態の確認
- ▶ ピン用シリンダロッドの全ストロークが見えるような開口部（窓）の設置：ピンの完全挿入状態の確認
- ▶ ピンの完全挿入の他者による目視確認（二人作業）：ピンの完全挿入状態の目視確認
- ▶ 2本の操作レバーの分離設置あるいは形状や操作方向の差異付け：操作レバーの誤操作、同時操作の防止
- ▶ 操作手順の遵守徹底、確認行為の明文化：操作者の安全意識向上、運用の責任体制強化

以上の対策は、何れも人の注意力に依存するため、前述したクライミングクレーン側によるインタロックで安全を確保しつつ、誤操作を回避して作業効率を高めるという方策を目指すべきである。