

淺談金屬疲勞

對高空作業設備從業人員之危害

江坤星 | 勞動部職業安全衛生署北區職業安全衛生中心檢查員



▲ 圖 1 使用高空工作車從事招牌清潔作業，吊桿支撐座螺絲斷裂導致人員隨工作台倒塌，導致作業人員顱內出血死亡

壹、前言

移動式起重機附掛搭乘設備是當今台灣生活中常見的高空作業機具，它將工作台（搭乘設備）附掛於移動式起重機吊桿上方，供作業人員於該設備內從事高處作業，作業方式與高空工作車類似，是依據勞動部所訂的起重升降機具安全規則第 19 條第 2 項所定義的高處作業設備，事實上移動式起重機依據同條第 1 項規定是不得載人，不過在台灣為了一些貨櫃裝卸、船舶維修、高煙囪施工等尚無其他安全作業替代方法，或臨時性、小規模、短時間、作業性質特殊之作業時，特別允許起重機在

採取防止墜落措施狀況下可以例外以附掛搭乘設備的方式載人作業，但由於近年來發生多起使用搭乘設備導致作業人員死亡之職業災害，其中部分災害主因來自於金屬疲勞，本文以透過辦理某招牌清洗作業發生因金屬疲勞導致之死亡職業災害調查的經過，將金屬疲勞潛藏對高空作業設備之風險及建議的預防方法提供讀者參考。

貳、金屬疲勞導致職業災害案例

108 年 12 月 28 日凌晨約 1 點左右，國內某間專門承攬招牌清潔公司之員工正要開始清潔宜蘭縣羅東某間便利商店之廣



▲ 圖 2 支撐座螺絲全數斷裂

告招牌，該次作業人員有兩人，其中一人乘坐搭乘設備抬高約離地 8 公尺後，瞬間吊桿支撐座螺絲斷裂，吊桿倒塌（圖 1），作業人員隨搭乘設備墜落地面，由於罹災者未使用安全帽，導致顱內出血死亡，而該肇災的設備是一台由移動式起重機改裝的高空工作車，鋼索及吊鉤已經移除，難以認定該改裝設備為起重機，以致案件以高空工作車認定辦理，惟其結構本質仍屬移動式起重機；而本案為何支撐座螺絲會斷裂呢（圖 2）？經分析該斷裂之螺絲斷面，可發現已經出現明顯之海灘紋（beach mark）或稱蚌殼紋（clam shell marks），此為金屬疲勞之特徵，而且斷面裂縫最深的螺絲就是吊桿正後方的螺絲，因為槓桿原理該螺絲也是承受最大拉應力的螺絲，當它因金屬疲勞裂縫導致承載力不足斷裂後，力量會加載於其他螺絲導致其他螺絲負載過重而斷裂，所以調查採證的監視器畫面可以看到吊桿倒塌前有先發生左右搖晃後才倒塌，而且只是瞬間幾秒之間，罹災者是在沒有預

警的狀態下墜落死亡，想見金屬疲勞對於此類高處作業潛藏極高風險，而本案勞動部職業安全衛生署最終認定該高空作業設備因金屬疲勞導致材料強度不足斷裂，雇主違反職業安全衛生設施規則第 115 條規定：「雇主對於車輛機械應有足夠之馬力及強度，承受其規定之荷重…」及另外未於事前依作業場所之狀況、高空工作車之種類、容量等訂定包括作業方法之作業計畫及未使員工確實使用安全帽而分別違反同規則第 128 條之 1 及第 281 條規定。

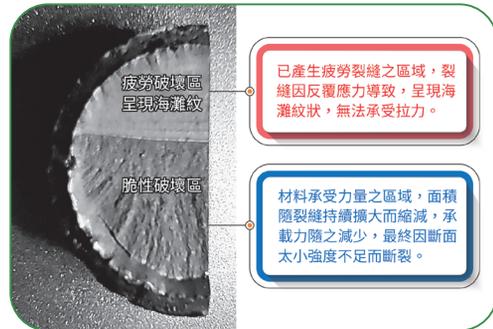
本災害發生後雇主頻頻喊冤，不服勞動部的認定，從訴願到行政訴訟已纏訟約 2 年，台北高等行政法院 110 年 12 月 30 日判決¹ 雇主敗訴，顯示司法仍認定雇主對於此類災害仍應積極預防，並負起責任，但本案仍可上訴；而爭訟的過程雇主流張，金屬疲勞不能目視檢查發現，僅僱用數人的小公司，雇主怎麼可能知道金屬疲勞的專業知識及預防方式，所以主張無過失，說的似乎有理，但我們想想，難道罹災勞工及其家屬就該接受些說法嗎，雇主不專業為何要承攬涉及專業設備的工作呢，勞工多數情況並沒有辦法選擇雇主提供的設備，都是雇主提供什麼就只能用什麼，雇主當然應該提供給勞工使用的設備是安全無虞的，本災害調查發現，發生災害事業單位在發生本次死亡職災前已經發生過 2 次同為螺絲疲勞斷裂導致吊桿倒塌之案件，並曾有人員因此受傷，已發生兩次事故之後雇主仍未有積極預防作為，最終於第 3 次發生疲勞破壞時導致員工墜落

死亡，案發後仍認此災害非屬雇主應預防之法定義務，不願負起責任，讓人無法接受，可見本災害並非意外，而是人禍。

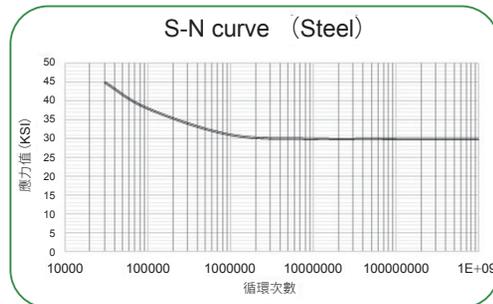
參、認識金屬疲勞對高空作業設備之影響

本案依據證人（維修廠商）的供述，肇災螺絲事前因為斷裂更換過新品，但不到一年又發生斷裂導致可怕的死亡災害，為何該清潔公司設備吊桿之撐座螺絲會如此頻繁發生斷裂呢？依據維修業者說法，認為該公司是使用不當，才會使螺絲頻繁斷裂，但事實並非使用不當，而是因為金屬疲勞導致。所謂金屬疲勞，是金屬材料持續受到反覆載重時發生之物理現象，美國材料與試驗協會（American Society for Testing and Materials, ASTM）將「疲勞」定義為：「金屬材料在承受反覆應力或應變作用下逐漸產生局部區域的永久性結構改變，且在一定循環次數後，在這些區域能導致裂紋穿透構件或使構件全部斷裂」之物理性質，而金屬疲勞會使金屬斷面因受損裂痕起始（fracture initiation）發展，該軸件需經過反覆週期性負載施加下，由上半部裂痕開始往下發展，在向下發展過程中任何破壞的斷面會形成海灘紋（beach mark）現象（圖3），當斷面變的越來越小時，最後該斷面所承受的反覆週期性荷載超過機械材料特性的降伏強度時，即造成拉伸破壞（tensile failure），會發生立即斷裂的情況²，舉例說明，某金屬材料受力達45Ksi的應力會導致破壞，若只承受35Ksi的應力則游刃有餘，但是反覆承受

35Ksi的應力循環達一定次數時，材料同樣會產生疲勞而破壞，當然承受的應力值越低可以承受反覆受力的次數越多，而受力與循環次數間之關係，可以用S-N curve圖（圖4）呈現，而本案事發事業單位主要經營內容為承攬便利商店的招牌清潔業務，作業會頻繁使用起重機吊桿附掛搭乘設備，又吊桿撐座螺絲的負荷能力會依據其吊桿伸長長度與水平角度而有不同，正常吊桿在全部伸長且呈水平狀態承受負荷能力最低，以本案車輛之荷重表顯示（圖5），此狀態時僅可承受150公斤之負荷，而清洗招牌的作業，尤其是便利商店招牌，作業高度約略為一層樓樓頂位置居多，且車輛多受限需停放路邊，距離越遠就會越伸長吊桿，也越趨近於水平狀態，此時的



▲ 圖3 檢視斷裂之螺絲發現有明顯金屬疲勞的特徵—海灘紋



▲ 圖4 鋼鐵材料S-N對數圖，顯示承受應力與循環次數間之關係



▲ 圖5 本次災害雇主提供高空作業設備之荷重表



▲ 圖6 國內常見使用移動式起重機附掛搭乘設備清洗招牌之作業情形

承載力最差（圖6），若人員加上工作臺重量為130公斤（接近承載力150公斤），由S-N curve圖就能理解，此狀態對產生金屬疲勞的影響就相當大（即循環次數相對較少的情況就會產生疲勞現象），再者，此類招牌清洗，人員於工作台上刷洗、或是移動重心產生的振動均屬於受力之循環次數，就如同徒手扯斷鐵絲一樣，彎折次數夠多就能折斷，不用考慮花多少時間彎折，本案招牌清潔公司幾乎是每天深夜作業到天亮，設備使用頻率相當高，加上刷洗招牌會產生劇烈振動增加受力之循環次數，所以撐座螺絲才會短時間頻繁發生金屬疲勞，肇致勞工傷亡。

肆、建議預防方式

由本職業災害案例可知，金屬疲勞產生的破壞是沒有預警的，突發的材料斷裂導致人員閃避不及而發生職業災害，此類災害到底應該如何預防呢？建議可以從以下三點來著手：

- 一、認識金屬疲勞對作業可能產生的危害。
- 二、避免金屬疲勞的發生。
- 三、評估發生金屬疲勞破壞時如何維護員工安全。

以本案災害為例，經營內容頻繁使用起重機附掛搭乘設備作業之事業單位，應對其作業可能發生之危害應有相當的認識並探詢預防之方式，本案事業單位事前已經發生兩次撐座螺絲金屬疲勞斷裂之事件，仍未有積極預防作為，顯示雇主危害意識不足，兩次都是撐座螺絲斷裂，倘為避免再次發生，自當研究疲勞裂縫成因及檢查螺絲裂縫情形之方式，而研擬有效預防方式，而本案雇主主張螺絲因疲勞產生裂縫並非肉眼目測可判定，無法事先預見螺絲是否發生金屬疲勞，其實不然，螺絲如有裂縫或瑕疵，均能事先以非破壞性檢測（Nondestructive-Testing，以下簡稱NDT）發現，國內均有檢驗方式及標準，如CNS 3712 金屬材料之超音波探傷試驗法、CNS 11048 磁粒檢測法通則、CNS 11047 液滲檢測法通則、CNS 11050 渦電流檢測法通則等，均能事先發現螺絲因疲勞產生之裂縫，國內也有許多檢測機構提供檢測服務，以NDT檢測設備容易發生疲勞破壞的構件，並適時更換已有疲勞現象

之材料，將有助預防金屬疲勞產生之危害，國內最常使用起重機附掛搭乘設備或高空工作車作業的台灣電力股份有限公司，為避免設備因金屬疲勞帶來之危害，特別修訂：「台灣電力公司配電工程承攬商安全衛生輔導施行細則」，規定高空工作車（昇空工程車）使用達6年起，原則上每2年週期辦理1次超音波檢測及放射線（X光、伽瑪線）照相檢測，另外基座螺絲、螺栓及焊道超音波檢測，顯示台電公司已發現並重視金屬疲勞可能對於高空作業人員可能之危害情形並加以著手預防，不過，使用的定期NDT檢查的方式仍有盲點，因為先前已經提到，與金屬疲勞有關之因素為受力之循環次數，並非歷經時間，以本案例災害斷裂的螺絲為例，更換新品螺絲後僅間隔未逾一年就發生疲勞破壞，如果用台灣電力公司定期2年實施NDT檢查方式將無法有效預防本次災害，螺絲仍會因為金屬疲勞而斷裂，所以採行定期NDT檢查之週期，仍應考量設備使用之頻率及作業產生的振動情況做合理推算，才能有效預防金屬疲勞之發生。

然而評估推算金屬疲勞發生的時程卻有其難度，所以雇主除積極避免設備發生疲勞破壞之外，仍應考量發生疲勞破壞時如何降低作業人員危害之因應對策，於作業前依作業場所之狀況、高空作業設備之種類、容量等訂定包括作業方法之作業

計畫，評估破壞時如何維護員工安全，並使勞工確實使用防墜落用之安全帽等防護具，以降低設備發生金屬疲勞破壞時對作業人員之危害程度。

◎ 伍、結論

金屬疲勞產生的危害是無預警的，而且已發生多起類似於本案之災害，不論是高空作業車或移動式起重機附掛搭乘設備，應特別注意基座（撐座）螺絲可能發生疲勞破壞之風險，依據國內民情，通常設備都是用到零件壞了才去保養廠更換新的零件，如此消極的維修方式將極可能使作業人員暴露於極高的風險之中，就像本案一樣，材料發生疲勞破壞的同時，人員也隨之罹難了，另外國內使用之移動式起重機，多數為日本進口之二手貨，使用年份很多已超過10年甚至20年，材料結構應有承受相當反覆應力之情形，會發生金屬疲勞的風險就很高，面對如此無預警又高風險的危害，積極的預防才能有效杜絕災害發生，而對於一些資源較為有限的小型事業單位，如不了解如何辦理NDT檢測及評估疲勞破壞的發生期程，定期以預防性更換撐座螺絲等易發生金屬疲勞之零件，將是經濟有效的替代方式，再者，確實要求作業人員配戴有效之防墜型安全帽，才能對於此類無預警突發的災害提供最後的防護。

參考文獻

1. 台北高等行政法院 109 年度訴字第 1042 號判決 (2021)。台北市，台灣。
2. 賴俊發 (2021)。淺談壓力容器疲勞破損預防及檢查，社團法人中華產業機械設備協會。