

扣件接合部位 在靜載荷下的 螺紋強度研究

“ 小牙距的螺紋外形發揮了重要作用！ ”

前言

公制螺紋的螺旋形狀（即螺牙）或表面上凸起的螺旋紋是螺紋接合不可或缺的一部分。螺紋必須確保扣件（螺柱、螺栓、螺帽）之間接合的可靠性與強度，以及受緊固之零件的結構完整性。力道會循著緊固狀態下的螺紋形狀進行傳遞，從而確保該結構中的接合部位密封性。接合部位的高靜態負載理應不會造成結構的運作問題。

“

因此，為承受負載的大型結構設計接合部位時，將材質為高強度鋼且具備合理黏塑性之螺紋形狀的強度進行合理利用，是極為重要。螺紋的外形決定扣件之金屬材料的靜態強度，這是接合部位發揮功能的關鍵標準，避免螺紋被剪切力所破壞。

”

接合部位通常是在高張力負載條件下進行檢測或評估，透過施加扭力來緊固，或初步利用液壓將螺柱頂起來。以下是最為普遍的接合部位測試方法：

- √ 直接在測試機中施加軸向力負載；
- √ 在緊固螺帽的過程中透過扭力施加負載。此時接合部位的性能會受限於具有破壞性的負載，即最小外力或應力，使螺紋產生不可逆的變形和破壞。

第一種方法最為常用，因為可簡便且準確測定接合部位強度。第二種方法主要用於擰緊工件，例如橋樑施工中預製的構件和裝置、建築業的框架梁結構等。接合部位的操作與測試經驗顯示常見的破壞類型如下：

- √ 剪切造成螺柱（螺栓）的螺紋部位沿著桿身發生斷裂，常因扣件的金屬脆性傾向或螺柱（螺栓）本體（光滑部分）具良好黏塑性而損壞；
- √ 剪切或壓碎造成螺紋外形被破壞；
- √ 剪切或壓碎造成螺紋外形功能失效；

若接合部位螺紋的牙距不夠長，且螺柱與螺帽材料的強度及延展性存在差異，則接合部位會因螺紋被剪切而失效。考量到螺帽的壁厚、螺紋部位前幾條牙的重疊及接合部位強度的衰減，剪切會發生在較大的直徑處而不是內徑。

當重疊的螺紋牙數量極小時（ H_1 和 H_{min} 分別為理論上的和最小的 height），由近似相等關係式（1）： $H_1 \sim H_{min}$ 以及螺柱與螺帽材料之機械性能決定，可能發生螺紋塑性彎曲和壓潰。此時接合部位強度明顯低於螺紋被剪切的情況。

“

本文旨在透過實驗評估公制螺紋外形對不同組裝長度之接合部位強度的影響，探究螺紋強度能否達到或超過螺柱（螺栓）本體強度。此類研究數據不僅有助於評估接合部位在高載荷下的性能，也能基於小牙距選擇最優的螺紋外形。使用大牙距（推薦用標準牙距，小牙距為非絕對必要選項）並不足以有效提升螺柱（螺栓）本體強度。

”



討論與結果分析

螺紋變形和破壞是接合部位失效的常見嚴重原因，關乎預緊力，其用來實現接合件的密封性和結構（如高壓容器）的完整性，還涉及因溫度和壓力升高而產生的操作載荷。根據 1980 年至 2005 年韓國核電廠的運行數據，有約 350 例接合部位失效案例被發現並進行分析。接合部位的退化主要是機械損傷約 90 例，其餘 240 例原因未確定。腐蝕、磨損、振動和疲勞等因素共計僅有 67 例。¹

決定螺紋強度的主要設計參數包括直徑 d 、牙距 P 、螺帽高度 H （旋緊長度 l 或 H/d 比值）。螺紋強度在“螺柱 - 螺帽”接合的工件上進行研究，該扣件是透過切割中碳低合金鋼 A193 B7（ASTM A193 / ASME SA193 標準）和珠光體類合金鋼 SA-540 B23、B24 級（ASTM A540 / A540M 標準）而製成。在此，A193 B7 鋼被選為“具脆性”的緊固用鋼材，其在 20°C 下的機械性能為：

$Rp\ 0.2 = 860-870\ \text{N/mm}^2$, $Rm = 975-985\ \text{N/mm}^2$; $A5 = 15-17\%$, $Z = 62-65\%$; $KCV = 10-40\ \text{J/cm}^2$; 衝擊試樣斷裂處纖維百分比為 $KCV\ 5-15\%$ 。

SA-540 鋼材料性能為： $Rp\ 0.2 = 910-920\ \text{N/mm}^2$, $Rm = 1015-1025\ \text{N/mm}^2$; $A5 = 15-20\%$, $Z = 62-65\%$; $KCV = 90-100\ \text{J/cm}^2$; 衝擊試樣斷裂處纖維百分比為 100%。且在負 40°C 時也維持 100% 纖維。依據斷裂處纖維百分比為 50% 的標準，且在 KCV 不低於 $59\ \text{J/cm}^2$ 條件下，SA-540 及 A193 B7 鋼的臨界脆性溫度分別為負 50°C 和正 50°C。兩者臨界脆性溫度相差 100°C，顯示緊固用鋼材在抗脆性斷裂方面存在明顯差異。為研究接合部位的螺紋外形強度，選用公稱螺紋直徑 M12，牙距分別為 1.0、1.25、1.5 及 1.75 公釐。M12 接合部位軸向拉伸測試在溫度 20°C、負載 120 kN（12 噸）、夾具移動速率 3-4 公釐 / 每分鐘（符合 ISO 6892-1 及 ASTM E8 標準）的電機機械裝置上進行。為評估螺紋外形的影響，使用了以下組裝長度 H/d 比值：0.25、0.5、0.75、1.0 及 1.5，其中 H 為螺帽高度， d 為公稱螺紋直徑。

測試結果如圖 1 及圖 2 所示。當組裝長度 $H/d < 0.75$ 時，觀察到螺柱螺紋外形因剪切而遭破壞，且破壞應力值幾乎隨組裝長度成正比增加到 $H/d = 0.75-0.80$ 。傾斜的短組裝長度區段 ($H/d < 0.75$) 受到的破壞是因螺紋剪切引起，且牙距的縮短會使接合部位受的破壞應力略微下降。此時 1.75 公釐的大牙距可在破壞應力和破壞載荷值上帶來些微優勢。當組裝長度 $H/d > 0.75$ 時，接合部位的破壞幾乎全沿著螺柱本體（光滑部分）發生。長組裝長度的水平區段破壞載荷越高，牙距越小。

“

圖 1 及圖 2 還顯示，旋入長度小的螺紋其強度在傾斜區段的破壞應力幾乎不受螺紋外形影響。而在水平區段，最大破壞載荷受內徑影響明顯，顯示小牙距螺紋外形的重要作用。

”

值得注意的是，在當今的靜態強度研究中，比例因子對高強度黏塑鋼 SA-540 製 M174x6（牙距因子）螺紋外形所受的剪切以及螺柱本體所受的破壞無顯著影響，該螺紋的旋入長度分別為 $H/d = 0.41$ 和 0.69 。用液壓機（最大負載 3,000 噸）測試的 M174x6 擁有細螺紋，直徑與牙距比為 $d/P=29$ ，對比傳統細螺紋或粗螺紋 M12x1.0 的 $d/P=12$ ，為 M174x6 的 2.4 倍以上。通常會建議負載的接合部位擰緊的長度在 $(1.0-1.2)d$ 範圍內，約為 $H/d=0.8$ 時的 1.25-1.5 倍，此時接合部位的強度受限於螺柱本體（見圖 1 及圖 2）。

考量到接合部位在壓力結構中的載荷影響及參考文獻 3 的螺紋強度研究顯示，在圖 1 和圖 2 中，對應失效示意圖的極限載荷還可由扣件抗螺紋應力集中的敏感度和強度來決定。螺紋的應力集中敏感係數可用下列關係式來呈現： $K_6 = Rm(\text{螺紋}) / Rm(\text{螺柱本體})$ ，其中 $Rm(\text{螺紋})$ 和 $Rm(\text{螺柱本體})$ 分別為考量到螺紋以及螺柱無螺紋部位之應力集中特性的極限強度。當 $K_6 > 1$ ，接合部位沿著螺柱本體開始失效，對應到螺紋外形強度的水平段；當 $K_6 < 1$ ，接合部位因為螺紋外形受到剪切而

圖 1. M12 接合部位的斷裂應力隨組裝長度而變化，螺柱與螺帽材質為 A193 B7 鋼。P 為牙距。

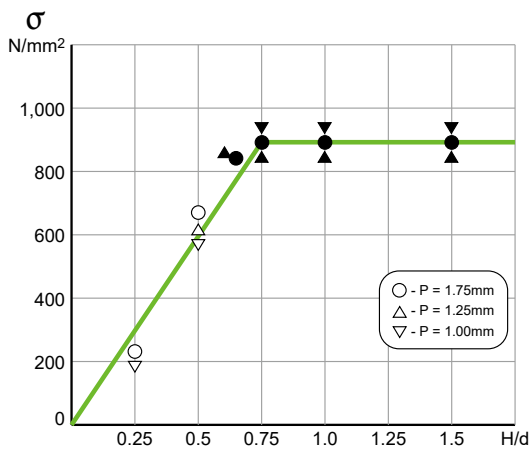
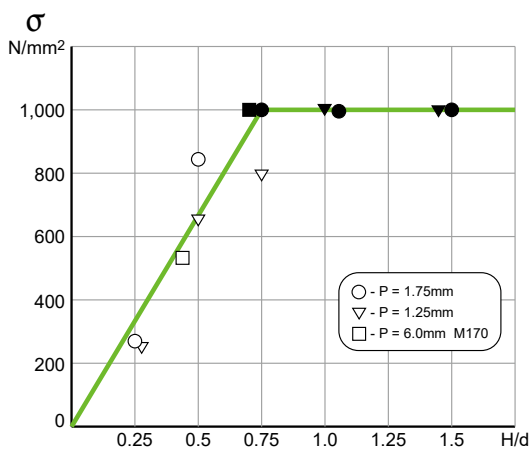


圖 2. M12 及 M174x6 連接部位的斷裂應力隨組裝長度而變化，螺柱與螺帽材質為 SA-540 鋼。



失效。圖 3 顯示的接合部位極限斷裂圖考量到緊固用鋼材抗螺紋應力集中的強度及敏感度，包括三種方案。該圖可將螺紋強度的不同變化類型系統化如下：

- ✓ 對螺紋的影響不敏感的扣件，透過增加旋入長度提升接合部位金屬強度，確保最大破壞載荷（圖 3a）
- ✓ 對螺紋敏感的扣件，即使旋入長度短，首當其衝的負載螺紋仍可能被破壞，最終因為螺紋遭切斷而使接合部位被破壞（圖 3b）；
- ✓ 對於因應力集中使強度增加的扣件，建議增加旋入長度以保證接合部位可靠性。

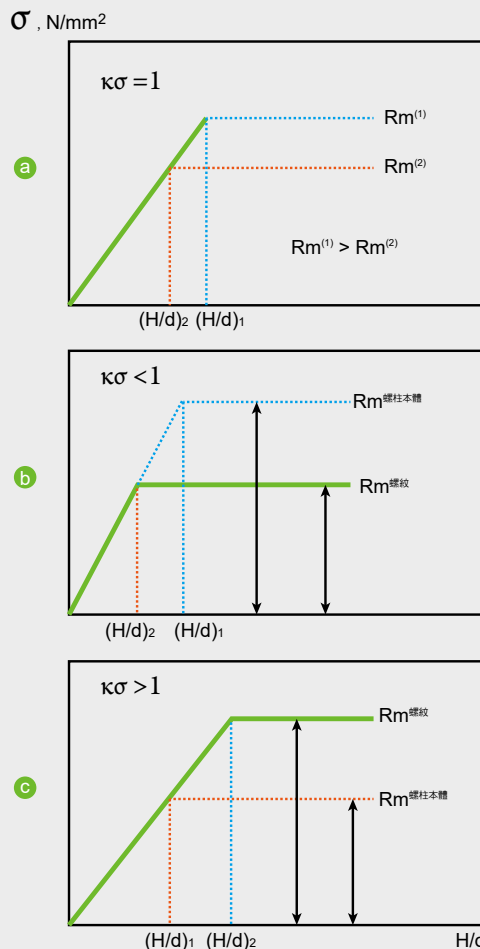
研究表明，採用黏塑性 SA-540 鋼製的 M174x6 細螺紋（ $d/P=29$ ）螺柱 - 螺帽接合件，其屈服強度 1000-1100 N/mm²，鎖緊長度 H/d 約 0.7-0.8 時，因螺紋抗剪強度提高，為螺柱本體提供了強度。同時應注意，根據標準（ISO 724、DIN 13、ANSI/ASME B1.13M），牙距分為常規型、大牙距和小牙距（四到五個小牙距相當於一個大牙距）。小牙距可視為常規或主牙距，不僅能提升螺紋外形強度，也能在旋入長度 $H/d \geq 0.75$ 時提高接合部位的承載能力。小牙距因增加螺柱（螺栓）的淨截面積，大幅降低拉伸應力水平，佔據金屬屈服強度的比例顯著。然而儘管螺柱本體保持完整，對同一公稱直徑而言，存在某一個小牙距，會使接合部位因螺紋受剪切機制破壞而強度下降。

總結

公稱直徑與牙距比 d/P 介於 6.85 至 29 範圍內的 M12 及 M174x6 螺柱螺帽接合件的螺紋強度取決於螺帽高度與公稱直徑的比值介於 0.25 至 1.5 範圍的組裝長度 H/d 。牙距作為螺紋外形的重要參數，影響強度。 H/d 小於 0.75 時，1.75 公釐的大牙距與 1.0 及 1.25 公釐的小牙距相比，在剪切過程中對 M12 螺紋的強度帶來些微優勢。同時， H/d 小於 0.75 會顯著降低螺紋強度，且其影響幾乎不受牙距大小影響。 $H/d \geq 0.75$ 時，1.0 公釐的小牙距能提供 M12 螺紋最高強度。研究證實，最高細度（ $d/P=29$ ）M174x6 螺紋的靜態強度，相較於 M12x1.0 牙距的 d/P 大了 2.4 倍，在圖 1 和圖 2 中，螺紋強度隨著組裝長度 H/d 的變化，在斜坡段和水平段所反映的破壞應力表現出相似的趨勢和相當的強度水平。細牙距（非標準常規或主牙距）確保 H/d 至少 0.75 時螺紋強度超越粗牙距和螺柱本體強度，因此該細牙距亦可視為常規或主牙距，確保鎖緊長度 ≥ 0.75 條件下，螺紋連接強度達到或超過螺柱本體強度水平。■

著作權所有：惠達雜誌 / 撰文：Vladimir Igorevich Gorynin

圖 3. 螺柱 - 螺帽接合的螺紋失效極限圖，依組裝長度劃分：a) 螺柱材料對螺紋應力集中不敏感；b) 螺柱材料對螺紋應力集中敏感；c) 螺柱材料在螺紋應力集中下硬化。



參考文獻

1. Yong-Sung Lee, Jae-Gon Lee, Yong-Chul Kang, Ki-Jong Shin. Review of Bolt Preload and Torque for Assembling Threaded Fasteners in Nuclear Power Plant. Transaction of the Korean Nuclear Society Spring Meeting. Jeju, Korea, May 10-11, 2007.
2. Wiegand H., Illgner K.-H., Striegens P. Einfluss der Gewindesteigerung auf die Haltbarkeit von Schraubenverbindungen bei zugiger Beanspruchung. Industrie Anzeiger. 1969. 91. No. 38. S. 869-874.
3. Hase R. Beanspruchung der Gewindengänge. Eingriff eine Gewind-everbildung Werkstatt und Betrag. 1980. 13. No. 4. S. 225-231.

下一個
扣件明日之星

立即登廣告，閃耀業界焦點！

