

基於有限元素法的機械結構螺栓接合模擬方法研究

黃冠榮

國家中山科學研究院

摘要

各機械結構間之接合經常透過螺栓進行鎖合設計，而螺栓與各結構之接合界面間往往存在複雜的非線性特性，為了有效模擬螺栓連接特性與預測各結構件界面受力情況，三維實體螺栓有限元模型是較為理想的分析模式。然而，在實際工程應用上，三維實體螺栓模型受限於複雜幾何，使模擬上產生困難。本文將針對以帶頭螺栓連接之機械結構，建立對應的三維實體模型，在工作環境負荷下，考慮螺栓預力與各結構件間接觸條件，分別應用實體螺栓與耦合螺栓有限元素模式，藉由ABAQUS有限元素分析軟體，分析不同螺栓分析模式下結構變形狀況與螺孔周圍應力分佈，並比較其差異性。

關鍵字：有限元素法、螺栓接合、帶頭螺栓

ABSTRACT

Bolt connections are frequently utilized in assemblies of structural components. An interface between bolts and related components leads to complicated nonlinear mechanical behaviors. In order to obtain the characteristics and contact conditions of bolted components, the more accurate bolt connection interfacial condition can be simulated by a three-dimensional bolt finite element model. However, it is difficult to use such model because the bolt is usually confined to an intricate geometry in industrial application. In this work, a three-dimensional mechanical structure with tap bolts subjected to specific working conditions will be investigated. Both solid bolt and coupled bolt finite element models using ABAQUS are considered. Bolt pre-tension and contact effect between components are also taken into account simultaneously. Finally, the variations in structural deformation and stress distributions around bolt hole for different bolt models are discussed.

Keywords: finite element method, bolt connection, tap bolt

一、前言

在飛彈結構研發過程中，分析工作主要包括(1)初步分析，內容包含負荷與模態分析等；(2)主要組件細部分析，對象包含鼻錐罩、導控段、彈頭段、翼翅、燃燒室與發動機外殼段、致動器段與噴嘴段等各功能段；(3)次組件及小零件分析，內容包含螺釘強度分析、螺孔周圍強度分析、膠合面強度分析、銲接強度分析、補強結構強度分析、以及其他非主結構強度及勁度分析等。其中，飛彈結構各組件在連接時往往以螺釘鎖合、銲接或膠接等型態設計之。對於螺釘鎖合設計，可藉由簡易工程分析法或有限元素法來檢驗螺釘與螺孔周圍的強度，在透過有限元素模擬螺釘接合結構組件時，為了精準預測螺釘連接結構的力學特性，三維實體螺釘模型為理想的分析模式。對於工程上所處理的複雜結構，三維螺釘模型反而增添有限元計算上負擔，因此，相關研究文獻[1-3]皆針對螺釘結構進行簡化，預期能降低分析時軟硬體與計算時間上的成本，本文將藉由 ABAQUS 有限元素分析軟體，建立四種螺釘分析模式，討論彼此在分析模擬上之差異性。

二、模型建立

本文所分析的幾何由上部結構，下部結構、以及連接上下結構的帶頭螺釘(tap bolt)所組成，分析過程僅取整體結構的 1/2 來建立模型，整體結構主要承受壓力與彎矩負荷作用，而本文所採用的螺釘結構有限元素模型，可區分成四種，其差異在於模型網格數以及螺釘預力施加方式的不同，以下將簡單介紹各種螺釘分析模式：

第一種螺釘分析模式(Bolt Type 1，圖 1)，根據實際帶帽螺釘幾何建立完整有限元素模型，所對應之網格元素共有 4544 個，於螺釘與機械結構接觸位置設定適當的接觸(contact)與約束(tie)條件[4]，在模擬螺釘預力施加過程上，共分為 4 個步驟(step)：(1)定義螺釘某截面作為施加預拉力(Bolt Load)的位置，一開始先在該截面上給予微小預拉力，且為了滿足收斂要求，過程中會在結構上設定臨時的固定邊界條件，讓各結構接觸先建立起來；(2)維持預拉力大小，去除臨時的固定邊界條件；(3)增加預拉力至預期值；(4)固定由預拉力所產生的螺釘位移，即將預拉力對應之位移束制施加在結構上。

第二種螺釘分析模式(Bolt Type 2，圖 2)，保留螺釘上半部結構的有限元素模型，部分螺釘結構則以連接元素(connector)取代[5]，共計 449 個網格元素，一般而言，連接元素常運用於模擬機械結構系統的運動狀況與其結構間相互作用，來計算各組件連結位置的位移、速度、力、與力矩特性等，在使用上則是透過兩節點的連結來形成單一元素，進而構成各組件的連接關係。由於連接器中的 translator 提供了兩點之間僅能沿著局部軸向方向產生相對平移，不允許發生相對旋轉的特性，因此，第二種螺釘分析模式將利用該連接器來模擬部分螺釘結構。上半部螺釘結構仍需設定適當的接觸條件，而在模擬螺釘預力施加過程上，則分為 2 個步驟(step)：(1)直接在連結元素上施加預期的預拉力(connector force)；(2)固定由預拉力

在連結元素上所產生的位移，亦即將預拉力所形成位移(connector displacement)來約束結構。

第三種螺釘分析模式(Bolt Type 3，圖 3)，螺釘結構完全採用 translator 模擬，共計 1 個網格元素，而原本螺釘上半部結構與組件的接觸條件改以耦合條件(kinematic coupling)取代，在模擬螺釘預力施加則與第二種螺釘分析模式相同，共分為 2 個步驟(step)。

第四種螺釘分析模式(Bolt Type 4，圖 4)，螺釘結構則採用梁元素(beam)模擬之，共計 1 個網格元素，在螺釘與機械結構的接觸行為均藉由梁元素兩端結點以耦合條件(coupling)建立，然而該模式在分析過程受限於梁元素特性，未能考慮螺釘預力效應。

三、分析結果

3.1 不同工作負荷下之螺釘模型比較

本小節主要針對 4 種螺釘分析模式進行比較，其比較方式是分別以三種螺釘分析模式(Bolt Type 2~4)所得分析結果(機械結構變形量與應力值)除以三維實體螺釘分析模式(Bolt Type 1)所對應之分析結果，因此共有三種比較數據(Case 1: Bolt Type 1 和 2; Case 2: Bolt Type 1 和 3; Case 3: Bolt Type 1 和 4)，若該比值越靠近 1，表示其螺釘分析模式越能等效三維實體螺釘分析模式。

圖 5 與圖 6 分別顯示在考慮螺釘預力以及各組件間接觸條件下，且針對不同工作負荷，不同螺釘分析模式所對應結構變形與螺孔周圍應力之趨勢比較，其結果指出，針對結構變形部分，三種等效螺釘分析模式(Bolt Type 2~4)與三維實體螺釘分析模式(Bolt Type 1)計算結果差異不大，均能有效地模擬出結構的變形量，其中以 Bolt Type 2 的計算結果最吻合三維實體螺釘分析模式；針對螺孔周圍應力部分，Bolt Type 2 分析結果仍然與三維實體螺釘分析模式最接近，然而，Bolt Type 3 與 4 所對應之分析結果與三維實體螺釘分析模式則呈現出較大差異，究其原因在於螺釘上半部結構與組件間的接觸行為會直接反應在螺孔周圍應力上，因此欲直接透過簡易的耦合條件可能無法等效螺釘與組件的結構剛度。此外，Bolt Type 4 未能考慮螺釘預力效應亦是產生誤差的原因所在。

綜整上述結果，在不同工作負荷狀況下，藉由第二種螺釘分析模式(Bolt Type 2)所得結果較貼近三維實體螺釘分析模式，圖 7~圖 12 分別為第一與第二螺釘分析模式的結構變形量與螺孔周圍應力分佈比較圖，其中左圖為 Bolt Type 1，右圖為 Bolt Type 2，由變形與應力圖可以觀察到兩者分佈狀況相當一致。

3.2 不同螺釘預拉力之螺釘模型比較

根據上一小節的分析結果，螺釘與組件間的接觸狀況反映出螺孔周圍應力大小，而螺釘與組件間的接觸狀況取決於螺釘預力以及工作負荷，因此，本小節將原本所施加螺釘預力降低 10 倍，再來比較三種等效螺釘分析模式與三維實體螺釘分析模式在計算螺孔周圍應力時之差異性。分析結果指出，當螺釘預力降低時，利用三種等效螺釘分析模式計算得到的螺

孔周圍應力值已能接近三維實體螺栓分析模式的計算結果。但隨著外力負荷的增加，Bolt Type 3 與 4 的分析模式又開始與三維實體螺栓分析模式產生誤差，其原因在於由於螺栓預力偏低，當外力負荷過大時，螺栓開始鬆動，而螺栓與組件間出現較大變形量，Bolt Type 1~2 分析模式能在螺栓與組件的交界面上允許其產生相對運動(分離)，反觀 Bolt Type 3~4 分析模式在螺栓與組件交界面上是以耦合約束條件設定，兩者無法分離，進而導致結構局部剛性過大，使得應力值大幅大升。因此，在低螺栓預力的狀況下，Bolt Type 2 分析模式所得結果仍較貼近三維實體螺栓分析模式。

四、結論

本文主要工作是進行三種等效螺栓分析模式與三維實體螺栓分析模式在有限元模擬上的差異性比較，相關結論如下：

• 在分析設定上：

- (1) 三種等效螺栓分析模式均能降低螺栓網格數量；
- (2) 三種等效螺栓分析模式均能減少計算步驟(step)。

• 在分析結果上：

- (1) 結構變形量：三種螺栓分析模式所對應之分析結果貼近三維實體螺栓分析模式，即均能有效地模擬結構變形量；
- (2) 螺孔周圍應力：不同等效螺栓分析模式存在較大差異，其中以部分螺栓結構用連接元素(translator)取代的 Bolt Type 2 分析模式，其計算所得到螺孔周圍應力值與其分佈狀況最貼近三維實體螺栓分析模式，即較符合實際工程狀況式，此外，當螺栓預力較低，且外力負荷不會造成螺栓與組件間產生過多相對運動的狀況下，不考慮螺栓與組件接觸行為的螺栓分析模式(如 Bolt Type 3 和 4)方能夠等效三維實體螺栓分析模式。

五、參考文獻

- [1] J. Kim, J.C. Yoon, and B.S. Kang, "Finite element analysis and modeling of structure with bolted joints," Applied Mathematical Modeling, 31, 2007, 895-911.
- [2] Tomohiro NARUSE, Takeshi KAWASAKI, and Toshio HATTORI, "Simple Modeling and Strength Evaluation Methods for Bolt Joints Using Shell Element and Beam Elements (II) 2nd Report, Strength Evaluation Method," Journal of computational Science and Technology, Vol. 3, No.1 2009, 34-45.
- [3] R. Grzejda, "Modeling bolted joints using a simplified bolt model," Journal of Mechanical and Transport Engineering, Vol. 69, No.1, 2017, 29-37.
- [4] ANALYSIS USER'S GUIDE, "VOLUME V: PRESCRIBED CONDITIONS, CONSTRAINTS & INTERACTIONS," ABAQUS 6.14, ABAQUS Inc., 2014.
- [5] ABAQUS/CAE USER'S GUIDE, "Section 24 Connectors," ABAQUS 6.14, ABAQUS Inc., 2014.

六、圖片

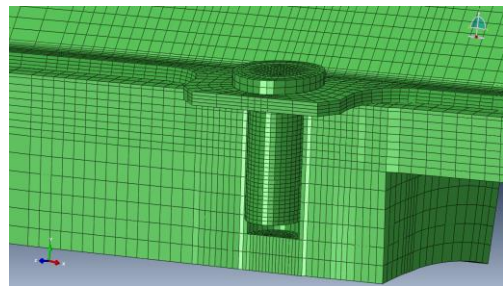


圖 1

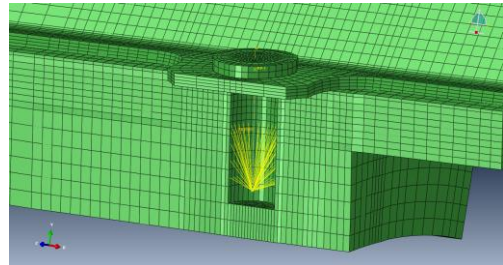


圖 2

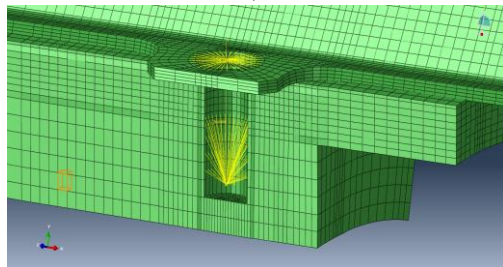


圖 3

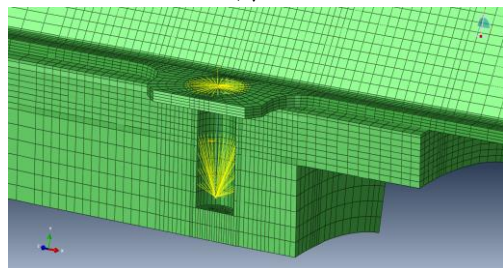


圖 4

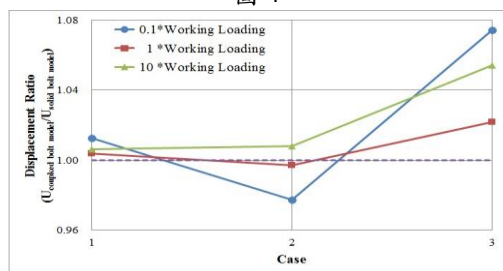


圖 5

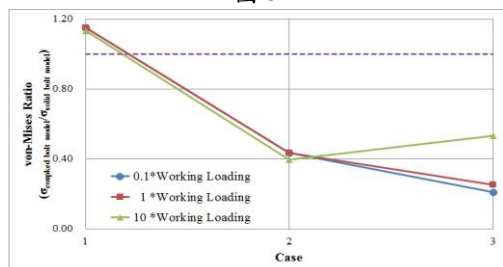


圖 6

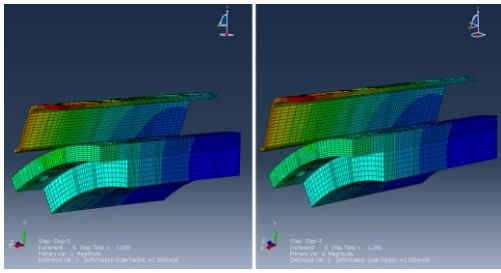


圖 7

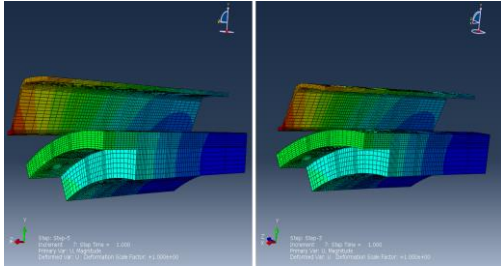


圖 8

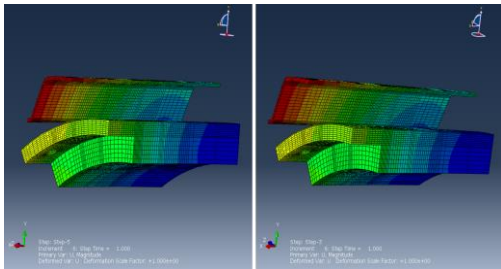


圖 9

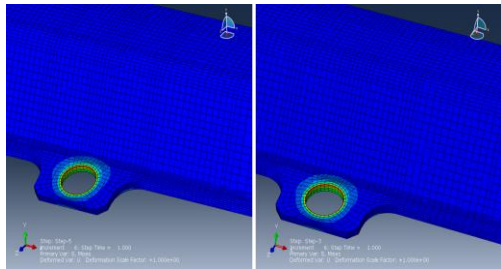


圖 10

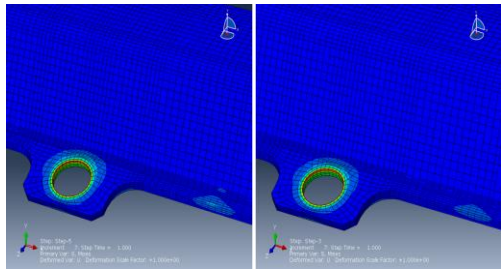


圖 11

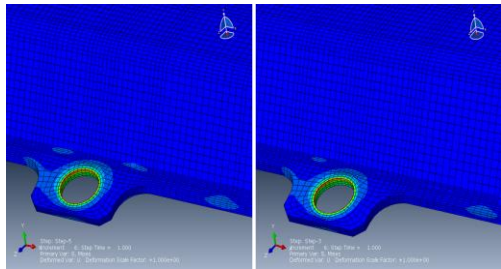


圖 12

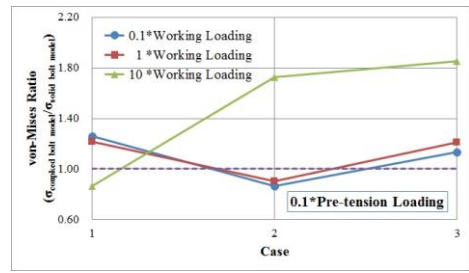


圖 13