

I-DEAS 中的接觸分析(Contact Analysis)與功能介紹(下)

謝坤昌 陳焜燦 江林穎

摘要

本文將接續上期的論題，繼續討論 I-DEAS 中所提供的接觸分析功能中的相關性質：包括間隙元素的使用、組立 (Assembly) 元件的有限元素分析模型建立步驟，並介紹 I-DEAS 系統如何快速的將有限元素接觸分析模型，轉換輸出至世界知名的泛用型有限元素分析程式-ABAQUS，來進行接觸碰撞計算；而本文最後並討論 I-DEAS 系統中之接觸演算法的參數設定方式與其關係。

間隙元素的使用

在上期的接觸分析與功能介紹中，曾談到 I-DEAS 的接觸分析功能，支援實體元素及殼元素，但不支援樑、桿或軸對稱等等的一維元素；但卻可以加入節點至節點的一維間隙(Gap)元素，而在接觸問題中使用。樑元素可說是在結構力學中為最常用的元件之一，以往在使用樑元素進行一般的結構分析時，樑與樑之間的力量傳遞完全取決在元素節點與節點間的連接，如果樑與樑之間沒有相互的接觸影響，此種模型假設是足以模擬許多實際狀況的，但是如果樑與樑之間除了接頭或端點有連接外，樑身與樑身之間可能會因為負荷的作用而有接觸，此時力量的傳遞即需考慮樑與樑之間的接觸，方能正確的模擬實際狀況，這種情形即可利用 I-DEAS 中的間隙元素來連接於兩樑元素，模擬實際空隙的接觸狀況。

圖 1. 所示的為固定於左端的兩上下相同截面與材料性質的懸臂樑分析模型，長度為 100mm，兩上下懸臂樑中間空隙為 5mm，當上懸臂樑右端的自由端遭受 8mm 的向下位移拘束時，以此狀態進行分析計算；則上懸臂樑每一節點的縱向位移，可如圖 2. 所示，因下懸臂樑在此分析模型中，並未遭受力或其他拘束的作用，所以每一節點的縱向位移皆為零(在圖 2. 中並未表示下懸臂樑位移狀況，因為 I-DEAS 系統在分析結果為零的狀況下是不會畫出其結果的)。

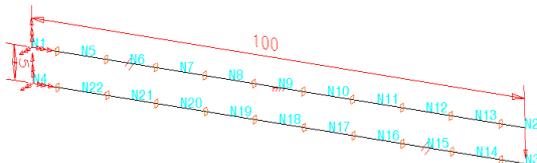


圖 1. 中間空隙為 5mm 雙樑有限元素模型-不含間隙(gap)元素

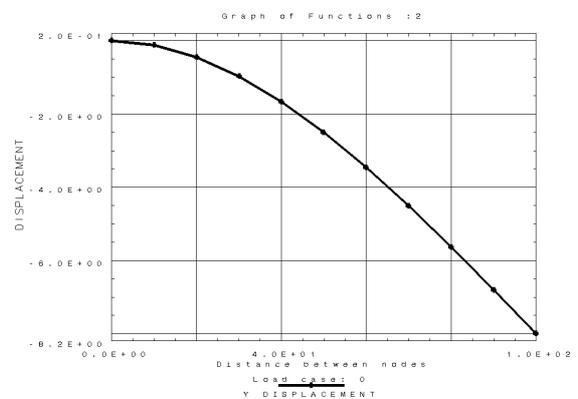


圖 2. 上樑的變形位移

如以此實際狀況而言，上懸臂樑右端向下變形 5mm 時，上下懸臂樑即會有接觸的狀況發生，進而下懸臂樑的結構亦會對上懸臂樑有交互影響，因而此種樑元素所遭遇的接觸問題，可以以圖 1. 所示的分析模型為基礎，再增加合適的間隙元素，如圖 3. 所示；並重新計算；其上下懸臂樑的縱向位移結果，可如圖 4. 所示，除上懸臂樑的位移變形曲線與圖 2. 相同外，下懸臂樑亦受上懸臂樑的接觸擠壓，而在右端有 3mm 的縱向位移。

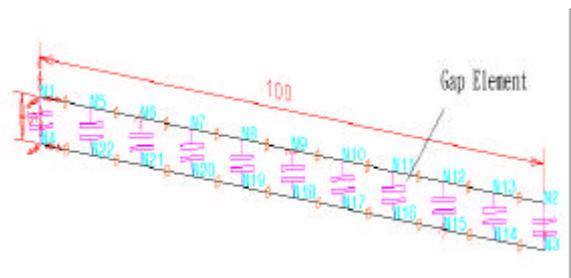


圖 3. 中間空隙為 5mm 雙樑有限元素模型-含間隙元素

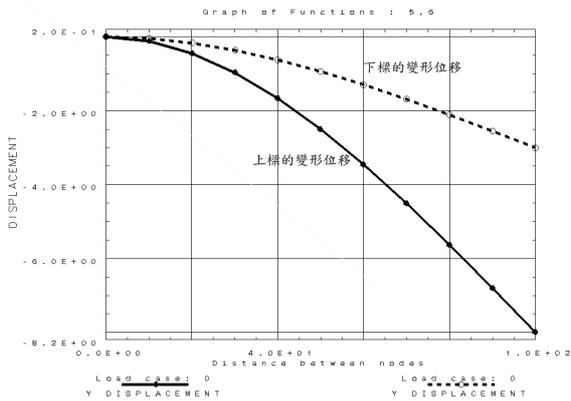


圖 4. 上下標的變形位移

I-DEAS 系統所提供的間隙元素，除了可使用在一維的樑元素外，尚可應用在許多的元素與分析模型上，如三維的實體元素與二維的殼元素等等，其使用場合可說比接觸元素來得廣泛些，其分析領域不僅支援線性靜態分析，亦支援非線性靜態分析；並可設定兩接觸元素之間的摩擦係數(無法在非線性分析中使用)，但間隙元素其輸出結果卻僅有位移與限制力量(Constraint forces)兩項。

使用者可在 Meshing 工作模組中，按下 Ctrl-M，使圖形視窗的左邊出現完整的指令選單(Menu)，接續選擇 Element>Create...，即會出現元素構建類型設定及對話框，如圖 5.所示，再分別點選 Element 元素選項中的 Other 及 Element Family 選項中的 Gap，按下 Ok 鍵後，即可在圖形螢幕中連接節點，開始構建間隙元素。(在 I-DEAS 系統中命令的下達，除可使用螢幕右側的指令圖像外，尚可使用 Ctrl-M 來控制左端指令選單的開關，兩種指令下達的方式，其功能幾乎是相同的，但指令選單所包含的指令數量卻比圖像視窗來的完整，使用者在圖像視窗如找不到所欲執行的指令圖像時，建議可使用指令選單來尋找所欲執行指令)

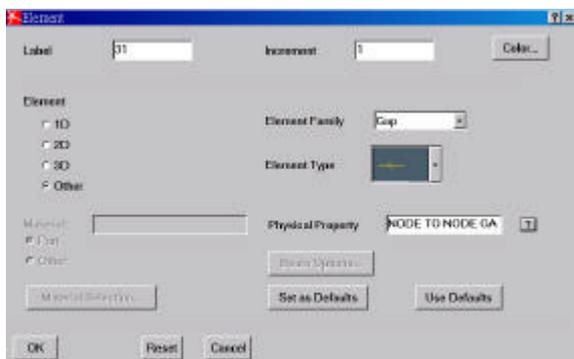


圖 5. 元素構建類型及設定對話框

另外在使用間隙元素時，尚須注意其物理性質的設定，使用者可在指令選單中，選擇 Physical Properties>Manage，會出現元素物理性質管理表對話框，如圖 6.所示，此時需再選擇 NODE TO NODE GAP1 及修改功能圖像後，就會出現如圖 7.所示的間隙元素物理性質設定對話框。在圖 7.中使用者可在 Coefficient of Friction 空格中設定摩擦係數之外，此處最需要注意的地方，為單軸旗標(Uniaxial Flag)的設定，其功能是提供使用者對於間隙元素分開的距離與方向進行給定，在進入該對話框時，此處的預設選項是 Use separation as specified 及對應上方的 Separation 為 0 mm，而 Contact Direction 選項則無需使用，此種設定的意義是預設目前的間隙元素其分開間隙距離皆為 0 mm，如果以上述兩懸臂樑的範例而言，此處 Separation 的值應改為 8 mm，方能符合分析模型的實際條件。



圖 6. 元素物理性質管理表對話框

如果使用者在此設定中，勾選 Compute separation 此選項時，則該間隙元素的分開間隙距離，I-DEAS 系統會根據兩節點的實際距離自動設定，而 Separation 的設定也會自動失效，但可設定接觸方向(Contact Direction)，是一個相當方便的功能；如果未選擇以上兩個選項，而選擇 Off 時，則使用者必須針對接觸元素的分開間隙距離與接觸方向進行設定。

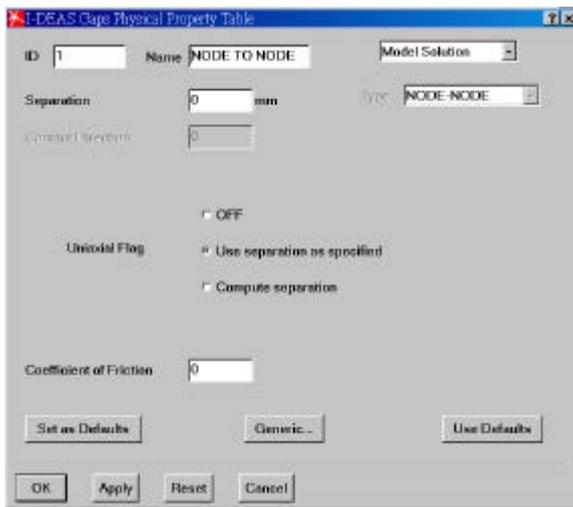


圖 7. 間隙元素物理性質設定對話框

I-DEAS 組立元件的有限元素模型建立

在 I-DEAS 系統中的一般三維有限元素分析模型形態，可分成單元件及組立元件兩種，單元件模式大都為針對單一機械元件，或者較為簡單的分析模型或分析需求而建立；而組立元件模式則因為分析模型，需同時考慮兩個以上的元件模型的交互或影響作用而建立的分析模式，因在 I-DEAS 系統中有組立(Assembly)工作模組的應用，所以可讓使用者不僅在 I-DEAS 系統中輕易的將兩個以上的元件進行管理、組立等的設定外，亦將此功能提供在有限元素模型的建立上；雖然在分析模型的建立步驟上，如不使用組立工作模組，亦可以用單一元件模式來建構較為複雜的分析模型，但如此不僅會增加幾何模型或分析模型建立的困難度，且對於往後的幾何模型或分析模型的修改更新，亦會造成困擾。

如以齒輪的接觸分析為例，假設有兩個不同大小的齒輪，在建立三維實體模型時，一般皆為獨立建構或以單一元件分別命名管理，但在進行機構模擬或干涉分析時，則必須將兩個齒輪元件同時建構在同一分析模型，考慮其交互影響，其模擬狀況會更接近真實狀況，而齒輪的應力分析亦有相同考量，此時即需藉助組立工作模組的來管理組立元件，再進而建構有限元素分析模型。

假設考慮一重量為 30g，外徑為 60mm，厚度為 3mm、密度為 $9.86 \times 10^{-7} \text{ kg/mm}^3$ 的空心橡皮球，自距離圓心高度 90mm 處落下與一剛性平板接觸(重力加速度為 9810 mm/s^2)，欲了解與剛性平板接觸後，橡皮球的底端變形與作用力大小，於是可在 Master Modeler 工作模組下，分別建立兩個物件橡皮球(Rubber Ball)與剛性平板

(Rigid Plate)三維實體模型，如圖 8.所示，並分別命名為 rubber ball 及 rigid plate (註：剛性板尺寸為 $30 \times 30 \text{ mm}$ ，在此不詳述模型建立流程，請使用者自行參考 I-DEAS 使用手冊或相關書籍)。

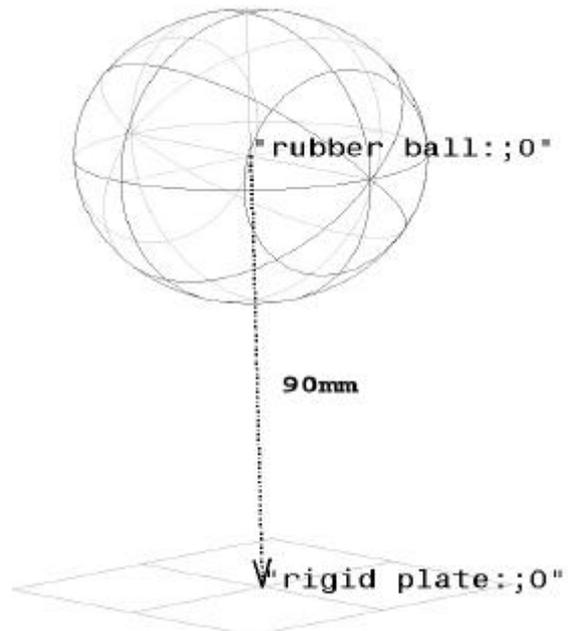


圖 8. 橡皮球與剛性板模型

繼續將工作模組轉換至 Master Assembly 來建構組立元件，點選圖形視窗的左邊的指令選單中的指令 Assemble > Hierarchy ...，此時會出現一對話框視窗如圖 9.所示：

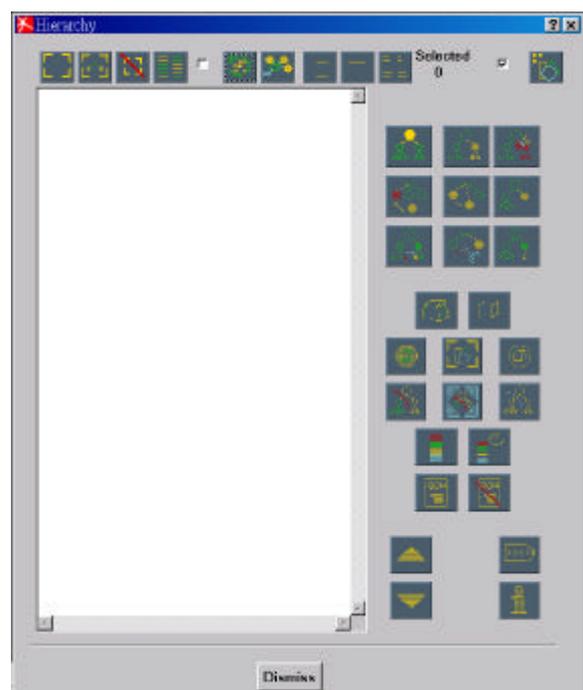


圖 9. 組立元件結構對話框

接續點選圖 9.中的圖像 (構建增加組立元件起源)

後，在隨後產生的名稱(Name)對話框中，使用者可以自由命名此組立元件的名稱，在此給定名稱為 Drop Analysis，確定按下 ok 鍵後，該組立元件名稱會立即更新出現在圖 9.的左側上，使用者選取 Drop Analysis 再點

選圖 9.中的圖像 (增加元件於此組立元件中)，再於圖形視窗中選取 rubber ball 及 rigid ball 並確定後，圖 9.組立元件結構對話框會將選取的兩個物件名稱顯示出來，如圖 10.所示。

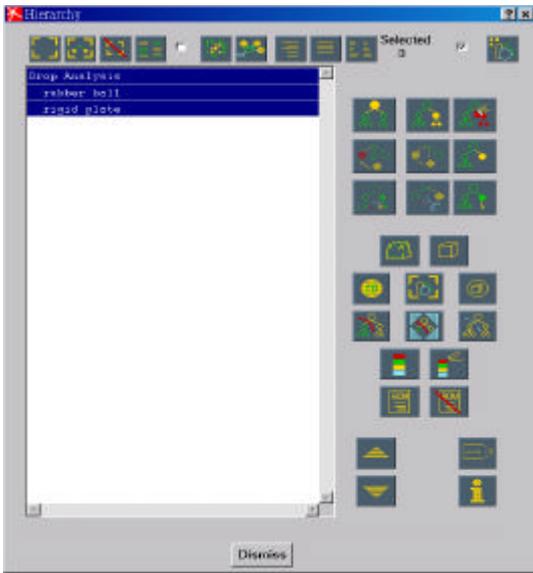


圖 10. 組立元件結構對話框(已有組立元件及其元件)

確定產生組立元件設定無誤後，按下 Dismiss 鍵，再將工作模組轉換至 Boundary Conditions 模組，進行有限元素模型建立設定，點選圖形視窗的左邊的指令選單中的指令 Create > FE from Geometry 後，將立即出現圖 11.所示有限元素模型構建對話框。

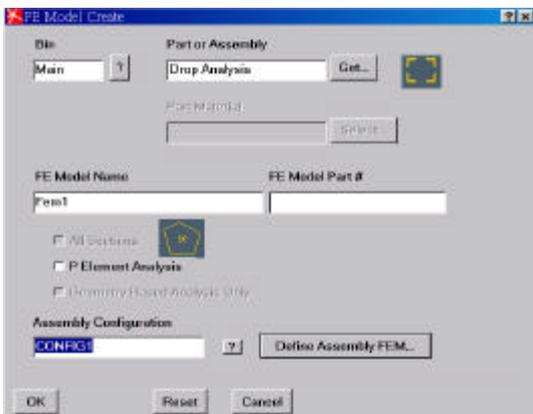


圖 11. 有限元素模型構建對話框

此時使用者可以再點選該對話框中的 Get.. 鍵，來構建是以何種形式為基礎的有限元素模型，在按下 Get.. 鍵後，立即會出現如圖 12.所示的來源元件選擇對話框，此時使用者即可選取 Drop Analysis 此組合元件為有限元素模型之構建基礎，但如在其他場合，如只欲對單一元件進行分析模型的建立，則此時亦可選擇其他選項，換言之，在此來源元件選擇對話框中，I-DEAS 系統不僅提供使用者在 Master Modeler 工作模組所構建及輸入單一元件，尚包括在 Master Assembly 所定義的組立元件，因此使用者可以在已建立好的實體模型檔案中，根據分析模擬需求，自由選取及定義分析模型。在選定分析模型是以 Drop Analysis 組立元件為分析模型基礎後，按下 OK 鍵，即回到圖 11.所示有限元素模型構建對話框，此時使用者可以命名分析模型的名稱與組立元件細部的設定，因此處其他選項較不常使用，所以不擬在此介紹，使用者如有興趣，可自行參考 I-DEAS 使用手冊。

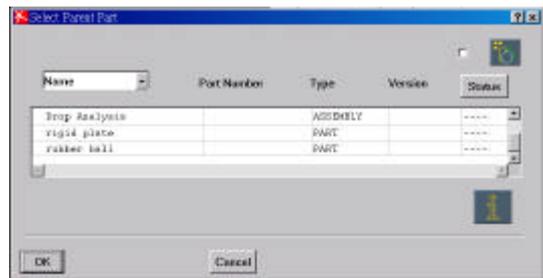


圖 12. 來源元件選擇對話框

在設定分析模型無誤後，接續即可開始設定邊界條件、負荷條件、材料性質、元素性質、接觸條件與邊界條件集合設定(此處操作流程與原理，可參考上期電腦輔助設計雜誌)，最後即可得到如圖 13.所示的橡皮球掉落接觸分析之有限元素分析模型。

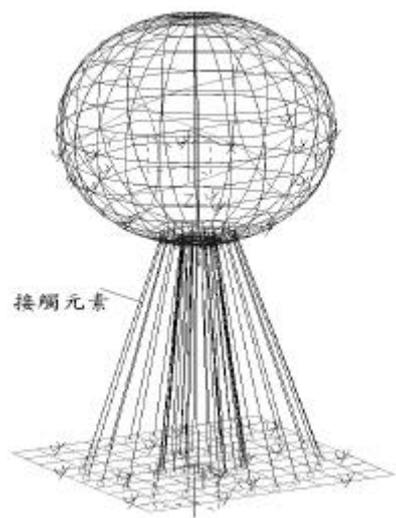


圖 13. 橡皮球與剛性板之掉落接觸有限分析模型

I-DEAS 接觸分析的擴充之一-ABAQUS

在上期的文章曾論及 I-DEAS 的接觸分析功能雖然方便。但仍有些限制，此時可利用其他的泛用型有限元素程式，來擴充其分析領域或驗證分析結果的正確性。此處擬以世界知名的商用有限元素程式 ABAQUS 來說明，I-DEAS 系統與該程式之間的接觸碰撞分析模型檔案轉換與其操作流程。

如使用者已在 I-DEAS 系統中做好接觸分析的邊界條件、起始條件、接觸條件、元素網格分割等設定工作，使用者在主功能表中選擇 File(檔案)->Export..(輸出)後，螢幕會出現 Export Selections(輸出選項對話框)，接續即可選擇 Abaqus，按下 OK 鍵，螢幕會出現 ABAQUS File Exporter(檔案輸出器)對話框如圖 14.所示。在 ABAQUS 檔案輸出器上的上方有兩個選項，分別為 ABAQUS Standard 與 ABAQUS Explicit，使用者需要依分析問題的類型與可用的 ABAQUS 模組進行此選項的選擇。就以本文所述範例-橡皮球與剛性板的掉落分析而言，須選擇 Explicit 模組，雖然兩者皆可處理結構與接觸的問題，但是在高速動態、複雜接觸、複雜扭曲等此類的問題，在 ABAQUS 中使用 Explicit 模組會比 Standard 模組合適的多。

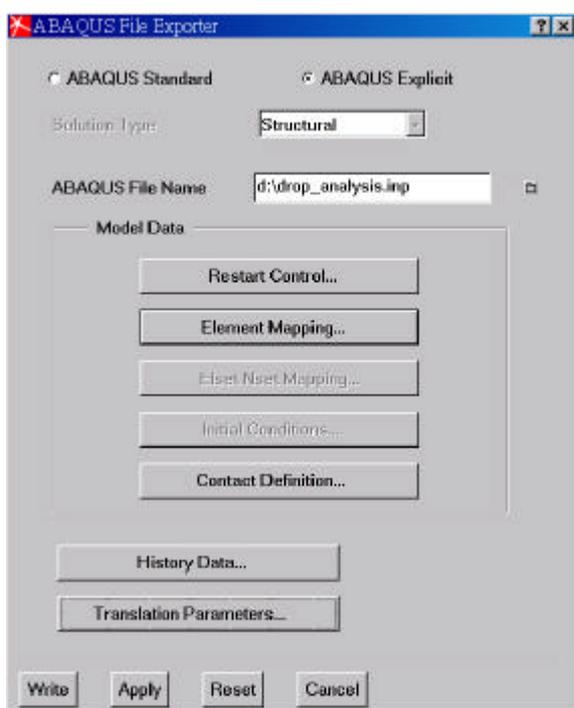


圖 14 ABAQUS 檔案輸出器

選定了 ABAQUS 的分析模組後，在 ABAQUS 檔案輸出器對話框中，接續按下 Element Mapping..(元素對映)此按鈕後，即會出現如圖 15.所示的 Element Mapping Form(元素對映表)對話框，此對話框的主要功能，是讓使用者在 I-DEAS 系統中已經給定完成的元素模型型態，對應至 ABAQUS 的相同類型的元素，例如在本文所用的範例-橡皮球的有限元素網格模型中，其元素形態包括有四邊形的四節點線性薄殼元素與三邊形的三節點線性薄殼元素，在 I-DEAS 系統中，所提供的薄殼元素種類除此之外，尚有四邊形的八節點與三邊形的六節點二次薄殼元素，這在一般的工程模型中，已可有效的計算處理大部分的問題，但如在 I-DEAS 系統中，當有限元素模型建構完成後，欲將此有限元素模型轉至 ABAQUS 或其他有限元素軟體時，就會發現其所對應的元素種類比 I-DEAS 來得多，例如在四邊形四節點線性元素，在對應至 ABAQUS Explicit 模組時，即會有 S4R、S4RS 及 S4RSW 等三種四邊形四節點線性薄殼元須選擇指定，如圖 15.所示，此時使用者就需要對此元素種類的差異有所了解(例如 S4RSW 此元素在 ABAQUS 的編號意義分別代表為 S:殼(shell)、4:節點數目、R:簡化積分(reduced integration)、S:小應變公式(small-strain formulation)以及 W:在小應變公式中考慮扭曲(warping))，因此使用者就必須選擇合適的對應元素，此點使用者在初接觸 I-DEAS 的檔案輸出時，可能在操作上是會感覺有些許的不便，但以另外一個觀點而言，I-DEAS 透過此種有限元素模型檔案的輸出，不僅在分析問題的類型上，會有相當程度的擴充，且元素的選擇性也更多了。

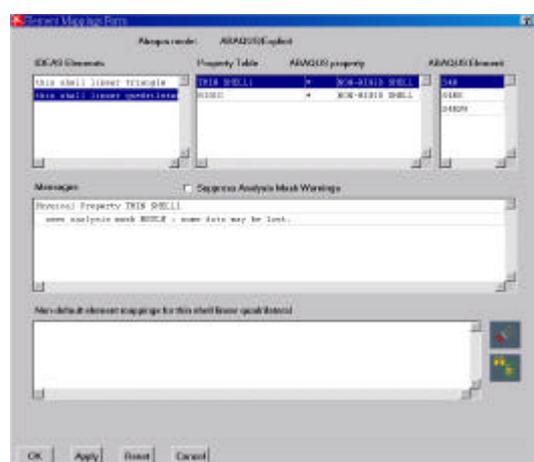


圖 15. 元素對應表格對話框

在分析模型的元素對應輸出設定完畢後，接

續即可回到 ABAQUS 檔案輸出器對話框中,按下 Contact Definition..(接觸定義)鍵後,即可進入如圖 16.所示的接觸管理對話框,再按續按下 Create(構建)鍵後,就會出現 ABAQUS Contact Definition 對話框,I-DEAS 在此對話框中提供兩種接觸對偶的設定方式,一為使用在 I-DEAS 系統已設定的接觸對偶,來直接轉換成 ABAQUS 接觸分析設定,如圖 16.所示,而另外一種則是利用 I-DEAS 的有限元素模型元素群組(Element Groups)來進行 ABAQUS 接觸分析設定,如使用者在進入有限元素模型檔案轉換之前,已經將接觸對偶設定完畢且預覽過後,那麼在此 ABAQUS 接觸定義中,使用前者來定義接觸對偶是相當方便的,使用者只要直接點選圖 16.中所示的接觸對偶名稱,按下 Apply 或 Ok 鍵即可完成 ABAQUS 接觸分析設定;至於使用元素群組來定義接觸分析設定的操作步驟,煩請使用者自行參考 I-DEAS 使用者手冊中的 Using I-DEAS with External Solvers-Solving with ABAQUS. 。

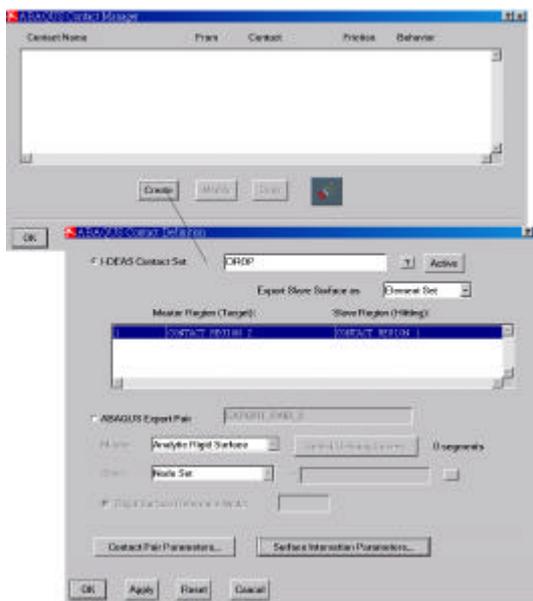


圖 16. ABAQUS 接觸設定對話框

當使用者對接觸對偶定義設定完畢後,回到如圖 14.所示的 ABAQUS 檔案輸出器對話框後,按續可按下對話框的 History Data..(歷程資料)鍵,進入到如圖 17.所示的 ABAQUS 歷程定義對話框,此時使用者可在 Time Period(期間),填入所欲分析歷程時間長短,在此不須要填得太大,因為在掉落或高速碰撞分析中,其所須花費的時間不僅比一般來得多,且依本文所述範例,約計算至 0.05 秒,就可以觀察到橡皮球與剛性平板碰撞時的諸多現象。而此時使用者尚須在歷程對話框中,按下 Output

Control..(輸出控制)鍵,進入到如圖 18.所示的輸出控制選項視窗,來勾選所欲得到計算結果種類與輸出結果的時間間距,此處在 Enter Number Interval 填入 100,即代表計算 0.05 秒的過程中,每隔 0.0005 秒,ABAQUS 即會將計算結果輸出儲存一次。

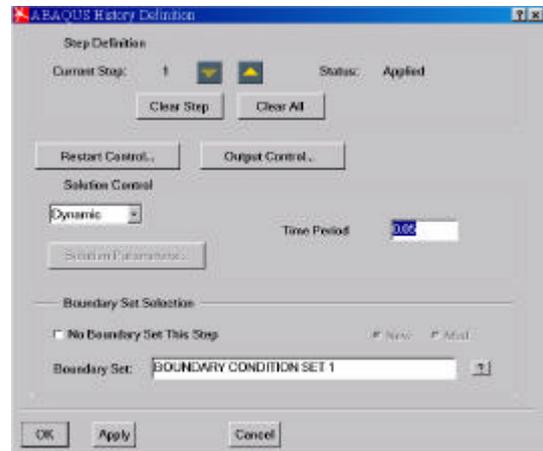


圖 17. ABAQUS 歷程定義對話框

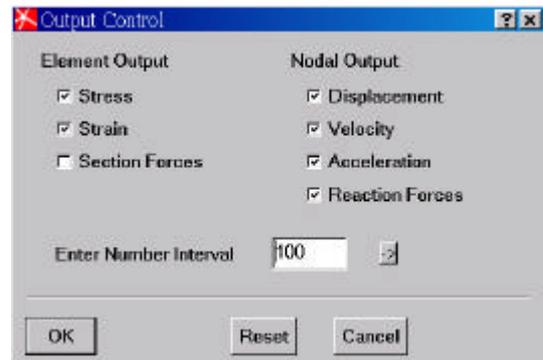


圖 18. 輸出控制選項視窗

當已將輸出檔案名稱、路徑、對應元素、接觸對偶條件、歷程定義都已經設定完畢後,回到圖 15.所示的 ABAQUS 檔案輸出器對話框中,按下 Write 鍵,I-DEAS 立即會將該有限元素分析模型輸出至指定的路徑上,並在訊息視窗上,告知輸出狀況。此時使用者即可將此檔案送至 ABAQUS 執行,待執行完畢後,可利用 ABAQUS 所提供的 Viewer 處理器來觀看計算結果,或者再利用 I-DEAS 來觀看計算結果。如選擇後者,使用者可在 I-DEAS 系統的主功能表上,選擇 Files..->Import..,進入輸入選擇視窗,選擇輸入資料類型為-Abaqus 後,按下 OK 鍵,進入如圖 19.所示的 ABAQUS Dataloader Steup Form(資料載入器設定表),使用者在此僅須給定 ABAQUS 所計算的結果檔案路徑與名稱外,再給定一個

I-DEAS 所專用 Universal 檔案名稱，以供 I-DEAS 系統儲存 ABAQUS 的分析結果檔，按下 RUN 鍵後，系統會自動經過幾個視窗的轉換，就可將 ABAQUS 的分析結果檔轉入至 I-DEAS 系統中。



圖 19. ABAQUS Dataloader Step Form 視窗

當 ABAQUS 分析結果檔專入 I-DEAS 系統後，使用者可以將工作模組轉換至 Post Processing(後處理)模組，來進行結果的審視，如使用者須確定 ABAQUS 計算結果是

否有無成功進入 I-DEAS 系統，則可按下圖像  (Selects which results to Display) 後，螢幕會出現如圖 20. 所示的結果選擇視窗，在此視窗中可以確定 ABAQUS 所計算的結果是否正確的進入至 I-DEAS 系統外，尚可將結果以單一或多重的方式選擇後顯示於螢幕上。

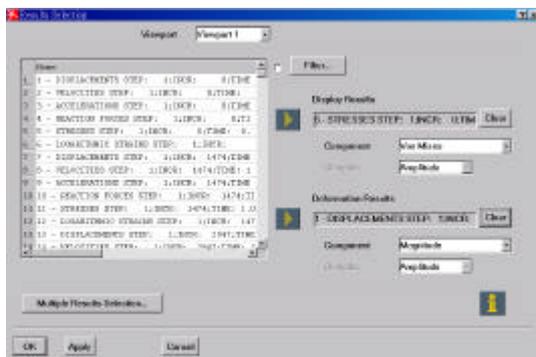


圖 20. 結果選擇視窗

I-DEAS 接觸分析中的參數設定

如使用者在 I-DEAS 系統中，如不是輸出其他的檔案格式供 ABAQUS 或其它有限元素軟體來進行接觸分析計算，而是在 I-DEAS 直接進行接觸分析，則在所有的分析模型與條件都已設定完畢的條件後，使用者可在工作模組 Model Solution 中進行接觸演算法的參數設定，在按下

圖像  (Solution Set..) 後，隨即會出現如圖 21. 所示的解答集合管理(Manage Solution Sets)對話框，當按下其中 Create..(構建)鍵後，接續會出現解答集合(Solution Set)對話框，再按下 Options..(選擇)鍵，即會出現解答選項(Solution Options)對話框，此時再按下 Contact Control..(接觸控制)鍵，會進入如圖 22. 所示的接觸控制(Contact Control)對話框，在此對話框中，使用者可以設定接觸分析演算法中的參數或者使用預設值，以下即針對接觸分析的參數設定與影響進行說明：

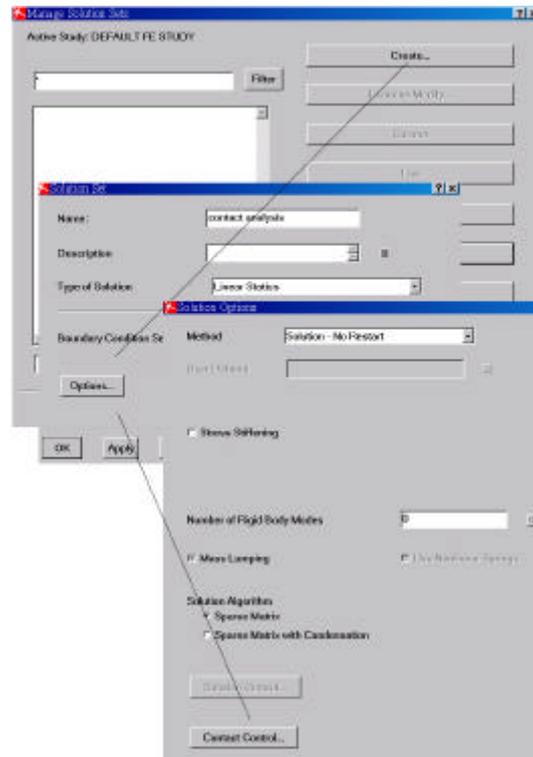


圖 21. 解答集合管理對話框

Penalty Factors(罰因子)：在圖 22. 所示的對話框中可以看到罰因子可分成法線罰因子與切線罰因子兩種，而在接觸演算法中，罰因子是用來控制接觸與滑動勁度，而直接影響其收斂的快慢。

- Normal(法線)罰因子：控制接觸曲面在開始接觸時其法線方向的穿透勁度，通常這個值太大時是不容易得到收斂的結果。而當此值大小約在 1000 至

10,000 中間，是可適用於大部份的接觸問題的。而當此值的範圍在 10 至 100 之間時，可適用在同一曲面的非對應網格(unmatched meshes)；換言之，較小數值的罰因子設定可在位移不協調的網格上，平滑且合理的來進行接觸計算，而在計算過程中，如對於接觸應力是非常在意的，當在移動及目標表面上的網格為對應(match)時，則可以得到相當好的數值結果，此外太大的罰因子值(超過 1E9)是不建議的，如此會造成數值計算的問題，即使是相當平且有規格的網格曲面，也需要避免，但罰因子數值過小(小於 1)其計算收斂速度會相當慢，在此也不建議給定

- Tangential(切線)：控制有摩擦力量時的計算收斂速度，通常這個值為小於法線罰因子的 10 至 100 倍。

Contact force convergence tolerance(接觸力量收斂容許)設定：接觸收斂容許是比較兩接觸物體中所變化的尤拉範數(Euclidean Norm)，當給定收斂容許小於接觸力量收斂因子時，則在此接觸計算中是收斂的。

Minimum Contact set Percentage(最小接觸設定百分比)：此選項是針對接觸元素作用時的最小百分比而設定的，如果設定值為零的話，則只有那些接觸元素會在接觸計算中有作用，如果設定值是 100 的話，則全部的元素都會考慮在接觸計算作用中。

Maximum Iterations(最大疊代次數)：在接觸計算疊代中可分成內迴圈與外迴圈，使用者可控制這兩個迴圈的疊代次數。

- Force Loop(力量迴圈)：可給定內迴圈的最大疊代次數，此迴圈的作用條件是指兩接觸體之間的沒有穿透時的力量。
- Contact Status loop(接觸狀態迴圈)：可給定外迴圈的最大疊代次數，此迴圈決定在接觸區域或接觸元素中那些是有作用的。

而以上的迴圈接觸狀態選項控制是只有在線性靜態中是有所作用的，如果在非線性分析中，迴圈的控制是取決於平衡疊代的次數。

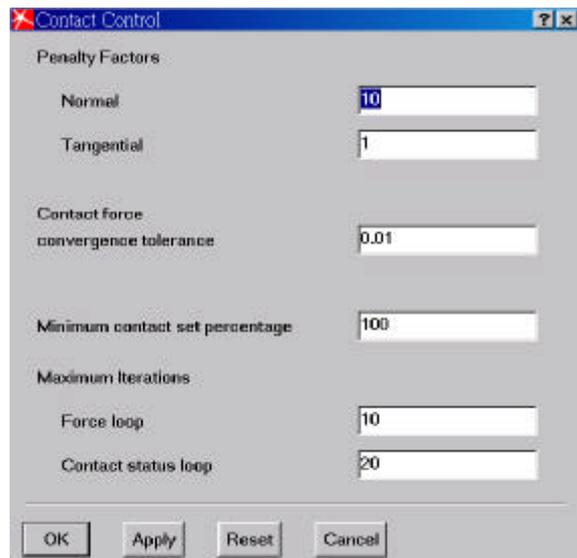


圖 22. 接觸控制對話框

結論

本文延續上期的 I-DEAS 接觸分析課題，除了對間隙元素進行介紹外，更嘗試的將多元件的有限元素分析模型建立步驟介紹給使用者，以凸顯 I-DEAS 系統在工程分析模擬中的實用性與廣泛性，然而 I-DEAS 系統尚可透過分析模型檔的轉換，將執行檔傳至其他的有限元素分析程式上執行，並可將分析結果回饋至 I-DEAS 系統中審視，大大的提高了 I-DEAS 系統在有限元素上擴充性，而在有限元素模型檔案的輸出入轉換中，I-DEAS 在輔助系統中提供了相當完整的使用手冊，使用者可以自行參考，以增加對 ABAQUS 檔案輸出入器或其他檔案輸出入器的了解；另外需提醒使用者，接觸分析計算無論是在 I-DEAS 或者其他的有限元素軟體上執行，都會花費比線性靜態分析更多的時間，因此如在 I-DEAS 系統上進行接觸分析時，使用者可先從較粗的元素網格並配合接觸演算法的參數設定開始進行計算，如此方才可驗證分析模型建立的正確性，而無需等待系統花費相當多的計算時間後，方才得知該分析模型並不收斂，而從新再建或修改分析模型。

註：

陳焜燦 中興大學應用數學系副教授

e-mail : ktchen@dragon.nchu.edu.tw

謝坤昌 中興大學應用數學研究所博士班研究生

e-mail : d8553003@mail.nchu.edu.tw

江林穎 啟德電子公司開發處工程師

e-mail : jhon@charder.com.tw