

有限元軟體耦合運算-以實驗控制軟體架構耦合 Abaqus 與 Opensees

Collaborative computation of FE software – Coupling Abaqus with Opensees through the Experimental Software Framework

楊麒¹、胡宣德²

國立成功大學土木工程系碩士¹

國立成功大學土木工程系教授²

摘要

由於電腦科技及計算機硬體的日趨進步，高速的運算能力使得電腦模擬結構物行為的能力大幅躍昇，在大型結構系統的模擬當中，軟體的耦合運算，將使得不同軟體的運算優勢發揮得更佳全面，更能應付現今日趨複雜的複合式問題。本研究使用 Open-source Framework for Experimental Setup and Control (Openfresco)內實驗控制的流程，透過有限元素軟體 Abaqus 的子程序以及開源有限元素軟體 Opensees，以使用者定義元素嵌入由 UC Berkely 開發的轉接元素，耦合兩個有限元素軟體 Abaqus-Opensees，完成單一的模擬分析，相耦合的兩個有限元分析軟體可同時且連續的進行分析，在每一個時間步中將指定節點的資料，在主從式架構模型下 (Client/Server Model)透過 TCP/IP 的傳輸方式於不同電腦及軟體間互相傳遞，以完成完整迭代，相較於傳統需要在每個時間步不斷關閉並重啟動程式的耦合方式方便且有效率。在本研究中，Openfresco 將作為一接口軟體，連接商用有限元素軟體 Abaqus 及開源的有限元分析軟體 Opensees 來分析結構物的受力行為，結果顯示，透過耦合模擬所得之結果，與在單一軟體中的計算相吻合，確認了耦合運算的適用性及高度準確性。

關鍵字：耦合運算、轉接元素、Openfresco, Abauqs-Opensees

Abstract

With the development of computer science and the hardware, the feasibility and accuracy of simulations increase with the computational ability. In the simulation of complex structural systems, collaborative simulation makes the more-complicated problems feasible and comprehensive. In this study, Open-source Framework for Experimental Setup and Control (Openfresco) was used, with the subroutine in Abaqus and the adapter element developed in UC-Berkley, collaborative computation between open-source FEM software Opensees and Abaqus was testified and succeed. Two couple software can run a simulation continuously in real-time with the exchange of data in every time step through the TCP/IP connection to complete every iteration. Comparing to the old-style couple simulation with the continuously restart process, the method in this study is more effective and convenient. In this study, Abaqus and Opensees was couple through the mid-ware Openfresco to study the behavior of structures under earthquake considering soil-pile interaction. The results shown the feasibility and accuracy of the collaborative computation using adapter element.

Keywords: Collaborative computation, adapter element, Openfresco, Abauqs-Opensees

一、緒論

有限元素法已被廣泛運用在各類工程問題的分析，而大部分有限元素軟體皆有其較適用之專業領域，但有可能因此於其他領域之分析能力較弱，而在土木工程之範疇當中，往往需要考慮到複合式的問題，例如大地邊坡與結構物互制問題，或是風機結構考慮了風力的流體耦合問題，因此透過耦合不同有限元素軟體的方式，能夠將不同軟體的分析能力及優勢最大化，提供更多可能性並優化分析結果

本研究採用由 UC Berkley 所開發的 Open-source Framework for Experimental Setup and Control, Openfresco (Takahashi and Fenves [6]) 做為接口軟體來連接有限元素軟體 Abaqus 及 Opensees，Openfresco 最初開發目的是用來連接有限元素模型以及實驗控制、資料擷取等實驗設備做複合式子結構試驗的物件導向接口軟體，具備高度的擴充性及使用自由性，利用接口軟體以及使用者定義轉接元素 adapter element 定義特定子結構自由度，並透過資料傳輸，進行結合有限元素軟體及實驗儀器的複合式子結構試驗。Openfresco 的計算架構容許一個結構系統的部分子結構分部於不同的有限元軟體或實體試驗，並透過可靠連線的 TCP/IP 或非連線導向的 UDP 等通訊協定的方式傳輸資料

Schellenberg et.al [7]-[9] 以實驗控制軟體架構 Openfresco 進行諸多複合式子結構試驗，並經過不斷的優化和修正軟體，驗證了此方式的可靠性和高度的軟體擴充性。Wang et al. [12] 和 Kwon et al. [5] 以重啟動程式的方式完成耦合運算分析，透過終止從程式，寫檔案給主程式讀取完成分析步後，再由從程式重啟動讀取當前步驟相關資訊後，方可進行下一步計算分析。在整體的分析過程當中，由於需要不斷重啟動程式，因此較為不便且耗時。Gu 和 Ozcelik [3] 以程式語言 Tcl 使用 Client-Server 技術將 Opensees 與 Simulink 連結做 FEA 的耦合運算，並同時探討樁土互制行為及結構物頻率響應以驗證其在土木領域中的應用。Schellenberg et al. [9] 使用轉接元素，將 Openfresco 做為接口軟口並以模擬實驗控制的方式連接兩個 Opensees 軟體，此種耦合計算方式則不需要透過重啟動程式來完成，並在研究中為聯合運算模擬的使用提出範例說明，模擬單一簡支梁受地震力的行為分析，

耦合分析中主從軟體資料傳輸過程如 Fig. 1 所示，Schellenberg, Huang & Mahin [10] 以 Ls-Dyna 中的使用者定義介面嵌入了轉接元素，並提出了數個轉接元素的使用案例，完成了 Ls-Dyna 與 Opensees 的耦合有限元分析於地震工程中的應用。

二、研究方法

2.1 分析架構

在耦合有限元分析之前，需先定義兩個有限元素軟體之主從 (Master-Slave) 關係，主程式求解整體結構之行為，從程式則負責部分子結構之求解，並透過接口程式回傳系統行為給主程式求解整體行為。主程式在求解過程中，先定義研究目標的特定自由度，並傳送研究目標的節點位移給接口程式後定義為介面自由度，在傳遞給從程式，做為從程式中所定義的研究目標節點位移後求解反力，再回傳至接口程式及主程式，做整合運算並進行下一步的迭代。

由於 Opensees 並不支援無限元素法的模擬，大部分使用 Opensees 做樁土互制行為的模擬都以土壤彈簧法作為主要分析工具，因此為了讓不同軟體能夠透過耦合計算的方式更全面的分析問題，本研究以 Abaqus 模擬土體及樁的受力行為，而上部結構則於 Opensees 當中模擬。由於結構體所在的環境及土壤性質將影響樁土互制以及結構物的反力行為，為了簡化模型，研究中土壤以中等緊密砂模擬。

2.2 轉接元素理論

在 Opensees 中，轉接元素已嵌入軟體中，因此無須針對使用者元素進行額外編程，而在其他商用軟體中，則需透過使用者介面，將轉接元素編譯，轉接元素的運作原理如下所示

在線性結構中，具備 n_d 個自由度的系統，其結構方程式可表示為

$$Kd = F \quad (1)$$

於有限元素法中，系統的勁度矩陣為所有元素勁度矩陣的組合，以及所有合力總和可寫成式(2)及式(3)

$$K = \sum_{el=1}^{n_{el}} k_{el} = \sum_{el=1}^{n_{el}} \beta^{eT} k_{el} \beta^e \quad (2)$$

$$F = \sum_{el=1}^{n_{el}} [f_{el,ext} - f_{el,int}] \quad (3)$$

其中符號 A 為一組合運算子，可被理解為使用布林陣

列 β^c 來轉換每個元素的局部下標到對應的系統下標並組合，而 $f_{el,ext}$ 為元素外力向量， $f_{el,int}$ 為內力向量。

$$k_{el} = \int_{\Omega_{el}} B^T D B d\Omega \quad (4)$$

$$f_{el,int} = \int_{\Omega_{el}} B^T \sigma_0 d\Omega \quad (5)$$

元素勁度 k_{el} 以及內力 $f_{el,int}$ 可透過式(4)、(5)求得，其

中 D 為彈性矩陣， B 為應變-位移矩陣， σ_0 為初始應力。假設 K 為一對稱正定矩陣，則可透勢能衡定原理 (potential stationary) 求解位移向量 d ，如式(6)，式中前項為應變能，後項即為外力做功。

$$\Pi(d) = \frac{1}{2} d^T K d - d^T F \quad (6)$$

為了使從程式中的子結構能與主程式耦合，需另外描述於介面自由度上的位移，因此系統需要額外的束制，這額外的線性束制可表示為式(7)。

$$g(d) = Qd - \bar{d}_g \quad (7)$$

當 $g(d)=0$ 時則滿足了該束制條件，原本所使用的勢能函數則加入罰函數 $g^T \kappa g/2$ 加入了束制條件後的勢能可表示為式(8)。

$$\Pi_k(d) = \Pi(d) + \frac{1}{2} g^T \kappa g \quad (8)$$

其中 κ 為一正定罰矩陣，為一由 κ_i 所組成的對角矩陣，用來描述轉接元素於特定自由度的罰勁度 (penalty stiffness)，當 κ_i 為 0，則此束制條件被忽略，

當 κ_i 值越大，則 d 值改變且更趨滿足束制條件。為了求出加入了束制條件的勢能穩定點，因此計算最小勢能所對應的解 d_k ，如式(9)所示。

$$\frac{\partial \Pi_k}{\partial d} = 0 = Kd_k - F + Q^T \kappa g(d_k) = Kd_k - F + Q^T \kappa (Qd_k - \bar{d}_g) \quad (9)$$

或表示為

$$[K + Q^T \kappa Q] d_k = F + Q^T \kappa \bar{d}_g \quad (10)$$

另外，原始的結構方程式，可透過定義轉接元素的方式連接所有在集合 N_{adpt} 當中與特定自由度有關的節點，而不須施加束制條件，其中集合 N_{adpt} 的大小

為 n_{adpt} ，將其勁度矩陣定義為 $[k_{el}]_{adpt} = \kappa$ ，轉接元素內力為 $[f_{el,int}]_{adpt} = -\kappa \bar{d}_g$ ，因此轉接元素與其他原始元素 n_{el} 形成一新的系統，其全域勁度矩陣及合力可表示為式(11)及式(12)。

$$\tilde{K} = \sum_{el=1}^{n_{el}+1} k_{el} = K + Q^T \kappa Q \quad (11)$$

$$\tilde{F} = \sum_{el=1}^{n_{el}+1} f_{el,ext} - f_{el,int} = F + Q^T \kappa \bar{d}_g \quad (12)$$

由於式(12)亦可寫成 $\tilde{K} \times d_k = \tilde{F}$ ，且在新的系統所對應的解為 d_k ，因此，結果顯示轉接元素法可以等效於罰函數法。而在非線性結構中，平衡方程式則改寫為式(13)。

$$0 = \tilde{R} = \tilde{F} - \tilde{F}_r(d_k) = F + Q^T \kappa \bar{d}_g - F_r(d_k) - Q^T \kappa Q d_k \quad (13)$$

其中 $\tilde{F}_r(d_k)$ 和 $F_r(d_k)$ 為所有元素包含一般元素及轉接元素的反力向量和一般元素的反力向量。殘餘力向量的總和 \tilde{R} 即為所有元素的殘餘力向量 r_{el} 加總，如式(14)

$$K = \sum_{el=1}^{n_{el}} k_{el} = \sum_{el=1}^{n_{el}} \beta^{eT} k_{el} \beta^e \quad (14)$$

其中 $r_{el} = f_{el,ext} - f_{el,int}$ ，而對於轉接元素來說，其內力向量 $[f_{el,int}]_{adpt}$ 可定義為式(15)，而 $[d_{el,\kappa}]_{adpt}$ 為轉接元素的位移分量。

$$[f_{el,int}]_{adpt} = \kappa (Qd_k - \bar{d}_g) = \kappa ([d_{el,\kappa}]_{adpt} - \bar{d}_g) \quad (15)$$

在使用轉接元素時，不應有外力作用於轉接元素的節點上，因此滿足式(16)

$$\tilde{R} = - \sum_{el=1}^{n_{el}} f_{el,int} - [f_{el,int}]_{adpt} = 0 \quad (16)$$

$$\sum_{el=1}^{n_{el}} f_{el,int} = -[f_{el,int}]_{adpt} \quad (17)$$

所有一般元素的反力總和可表示為式(17)，若將若干個一般元素視為超級元素 (superelement)，則元素反力即可透過式(17)求得。因此使用轉接元素法耦合兩個有限元素軟體可理解為透過已知的節點位移求得未知的節點力。

耦合模擬中，資料傳輸流程如 Fig. 2 所示，分析步從主程式 (Master) 開始，計算超級元素的位移，並透過通訊協定傳送到接口軟體 Openfresco 再到從程式 (Slave) 中的子結構，接著轉接元素將接收到的元素位移紀錄為 \bar{d}_g ，並和從程式求得的子結構位移結合，然

2016 SIMULIA Regional User Meeting

後使用式(15)求得轉接元素內力並傳入子結構，再以式(16)求得子結構中一般元素的內力並透過通訊協定及 Openfresco 回傳至主程式中，超級元素即將其視為元素力並施加至主結構上。

三、耦合模擬施作方式

3.1 資料傳輸 Tcp/Ip 通訊協定

在本研究中，使用 Socket 連接作為資料傳輸的途徑，在主從式架構模型下(Client/Server Model)以 TCP/IP 的方式傳輸，可於主程式或從程式任一端開啟伺服器 Server 後，等待另一程式以客戶端 Client 身分連接，在本研究中，是由 Abaqus 開啟伺服器並由 Opensess 作為客戶端連接，伺服器端開啟 socket 後需先設定初始值，呼叫 bind 函式以指定本身的 IP 位置以及連接埠號碼，並呼叫 listen() 函式使 Socket 進入等待連線的狀態，並以三向交握(three way handshake)的機制來建立連線，三個步驟分別為：(1)伺服器端等待由客戶端傳來的連線要求，而客戶端開啟 socket 後則傳送 connect() 函式來提出連線要求，(2)伺服器端若接收到回應，則回覆客戶端接到要求，(3)客戶端接到回覆後向伺服器端表示收到回應，並完成伺服器端與客戶端的連線，當 socket 完成連線後，即可透過 recv() 與 send() 函式來完成 TCP/IP 封包資料的交換。適用於子結構混合試驗及耦合計算的 socket 程式碼可在 Openfresco 的開源資料庫中取得。

3.2 Abaqus 中使用者定義元素

在本研究中，將透過前人所撰寫得 Abaqus 的子程序來描述使用者定義元素(user-defined element)，使用 Visual Studio 和 Intel Fortran Compiler 讓所編譯的 Fortran 與 C 語言程式碼能夠被 Abaqus 所使用，

在使用者自訂元素的子程序當中，有數個變數需要被定義，使用隱式積分時須先定義殘餘向量 RHS，RHS 為該自訂元素對整體系統於運動方程式等號右邊的貢獻，如式(18)，陣列的大小為 NRHS

$$M\ddot{u}(x) + C\dot{u}(x) + ku(x) - f_{ext} = RHS \quad (18)$$

以及該自訂元素對 Jacobian 矩陣的貢獻 AMATRX，才能進行分析。SVARS 為狀態變數，內函參數會在每個時間步開始時傳入自定義元素，並在時間步結束回傳更新值。

陣列 PROPS 及 JPROPS 分別為一浮點及整數陣列，包含了 NPROPS 以及 NJPROP 個參數，讓使用者使用

在 UEL PROPERTIES 中所定義的參數，在本研究中，JPROPS 包含了使用者所定義的連接埠號碼，PROPS 包含了桿件或元素的勁度矩陣

Iflags 為一陣列代表當前的運算步驟，可透過不斷輸出當前 Iflags 來協助瞭解目前子程序的求解過程，Iflags 的值會依照使用者所定義的求解方式及參數而有所不同，在分析的一開始，Abaqus/Standard 會先求取結構的質量矩陣，再依照使用者定義的靜態、動態分析，固定時間步或自動時間步等條件，而對應產生不同的 Iflags 值並進行運算

主程式和從程式所使用的積分方法必須相容，且兩程式的時間步大小必須一致，在耦合模擬中，重置殘餘向量矩陣 RHS 及自訂元素對 Jacobian 切線勁度矩陣的貢獻 AMATRX，接著程式根據使用者是否使用固定時間步長或是容許值，使用靜態 static analysis 或動態分析 dynamic analysis，依照分析模式不同，其分析步驟及所需設定的參數各不相同，在靜態分析中，程式會定義殘餘向量矩陣和切線勁度矩陣，並發送接收及傳輸資訊的指令，以更新反力及位移資料，

3.3 OpenFresco 施做細節

完成耦合運算所需要的檔案，包括兩個以 C 語言寫成的 socket 檔案，以及一個嵌入 abaqus 當中的以 fortran 語言寫的使用者自訂元素子程序，皆以開源的方式可自由地從 Openfresco 的資料庫下載，再依照使用者希望以主程式或從程式作為伺服器或客戶端，使用隱式或顯式求解方式以及 IP 位置和連接埠等等使用偏好作些許調整後，融合為一個 obj 檔，即可為 Abaqus 的子程序所使用。

在使用 Openfresco 作為接口軟件時，有幾個必須被定義的參數，包含 Expelement、Expsite、Expcontrol 及 Expsetup，Expelement 主要用來描述試體類型及行為，類型分別為桁架、梁、柱、斜撐、彈簧等實驗的試體種類，Expelement 最主要的功能即是賦予實驗元素質量、阻尼、勁度矩陣及特定變形下的殘餘力分量，並負責將有限元素模型中全域及局部座標系統的轉換。Expsite 則是定義實驗或模擬架設的場域，資料傳輸及貯存的方式，其提供了幾種通信協定的方式，包含 TCP/IP、UDP、NHCP，及安全性較高的 TLS 和 SSL。Expcontrol 主要用來定義與實驗控制方式或資料擷取系統的介面，設定溝通對象為 dSpace、LabView、

xPCtarget 等。Expsetup 則定義受測元件的變形方式及位移模式，如 Expelement 的自由度與制動器自由度間的轉換，以及線性或非線性變形的設定。自由度於不同指令間的轉換及資料流的傳輸可由 Fig. 3 所示

在資料流的傳輸，可透過輸出資料流在不同模塊當中的力、位移等分量，來協助監控並記錄分析流程，在 Fig. 3 亦描述了訊號進入或離開模塊的命名方式，以本研究為例，當資料從主程式傳入從程式時，傳入該物件的訊號為 Trial，傳出該物件的為 Ctrl；當資料由從程式傳回主程式時，傳入該物件的訊號稱為 Daq，傳出物件的訊號則為 Out，並可針對輸出或傳入資料承上各種因子，如 trialDispFact、outDispFact 等，作為自由度及資料的轉換。

$$f = K_t \times x \quad (19)$$

當 Openfresco 接收到由主程式傳送在全域座標系統中的目標位移 \tilde{u} 時，將透過座標轉換為 \tilde{x} ，再傳至從程式以式(19)求得施加於子結構的力量大小。在線性系統當中，結構物的反力 r ，透過計算結構物勁度矩陣及其位移的乘積求得，亦即 $r(u)=Ku$ 。而在非線性系統中，常見的為透過牛頓法，用已知力及切線勁度矩陣求得位移，其中切線勁度矩陣 K_t 為反力函數 $r(u)$ 的 Jacobian，在耦合的程式當中，透過計算切線勁度矩陣 K_t 及位移 x 求得反力，如式(19)

四、數值分析模型

本研究探討耦合模擬的可行性及準確性，因此建置兩個模型比較採用耦合計算法前後的差異，一個模型是將上部結構以開源有限元素軟體 Opensees 模擬，而下部結構及土體則在商用有限於素軟體 Abaqus 中模擬，並透過耦合計算的方式在考量樁土互制行為的狀況下完成結構物的受力分析；另外一個模型則是全由 Abaqus 模擬，即上部結構、下部結構、土體等都在 Abaqus 中計算，作為耦合模擬的對照組。詳細的模型描述，將分為 Opensees 中的上部結構、Abaqus 中的下部結構、土體模型做描述。由於上、下部結構的模擬軟體不同，因此模型僅以示意圖表示如 Fig. 4、Fig. 5 所示，對照組則為 Abaqus 模型如 Fig. 6。

4.1 Opensees(模擬軟體 1) – 模擬上部結構

由於 Opensees 尚未具有視覺化圖形介面，因此在模擬時在 Opensees 中載入以程式語言 tcl 所寫的指

令檔建模並讀取指令，其模擬結果輸出為節點及元素資料，而無視覺化後處理功能。

本研究以單根柱子的模型，模擬其受側推力及地震力的反應，在本研究當中，單柱是以 I 型梁 W27X114 型梁模擬，樑高 6 公尺，並在 3 公尺即 6 公尺高處施加兩個 120 kg 的集中載重，鋼材楊氏係數 $2.1E+11$ ，普松比為 0.3，樑元素則以 nonlinearBeamColumn 元素模擬，其他材料性質如 Table. 1 所示

4.2 Abaqus(模擬軟體 2) – 模擬下部結構及土體

使用 Abaqus 模擬下部結構(樁)及土體(含有限元素及無線元素土體)。為簡化模型，樁是以限彈性之鋼材模擬，其楊氏係數為 $2.1E11$ ，普松比為 0.3。土壤部分因考慮塑性模型，且其楊氏係數及其他土壤參數與所選擇之土壤材料性質有關，

本研究採以均質之中等緊密砂作為分析依據，藉由參考文獻 Das (2003)所建議之土壤分類，定義本研究所需之參數，所選土壤材料之楊氏係數為 30100KPa，摩擦角為 31.5 度，膨脹角 27.6 度，其他詳細參數選用如 Table. 2 所示。

在包含土體的模型中考量地震力影響時，為考量動態力施加所產生的能量，會因人工邊界效應之影響而反射能量進入土體內部，且若單純以有限元素土體進行分析時，要避免能量反彈需使用較大的土體半徑進行分析，導致元素過多的問題，因此本研究將採以混合有限及無限元素模型作為模擬半無限域土體的分析方法，以 CIN3D8 元素來模擬外部土體，內部土體以 C3D8 模擬。另外，使用無限元素做動力分析時，無限元素不提供勁度，且材料假設為線彈性。

4.2.1 Mohr-Coulomb 塑性準則

在本研究中，外部的無限元素土壤假設為線彈性，內部有限元素土壤則為塑性-彈性，因此莫爾庫倫塑性破壞模型被使用來描述材料的降伏行為。莫爾庫倫破壞準則已被廣泛運用在大地工程的計算當中，其假設材料破壞是由最大剪應力控制，破壞包絡線之控制程式可表示為式(20)、式(21)

$$F = R_{mc}q - p \tan \varphi - c = 0 \quad (20)$$

$$R_{mc}(\Theta) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi} \sin\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \cos\left(\Theta + \frac{\pi}{3}\right) \tan \varphi \quad (21)$$

其中 φ 為材料之摩擦角， Θ 為極偏角， p 為等值

壓應力， q 為 Mises 等值應力。而由於 Mohr-Coulomb 塑性模型在降伏面上存在著尖角，在某些情況下尖角處會出現塑性流動方向步唯一之現象，而導致計算繁瑣和收斂緩慢的問題，因此 Abaqus 採用 Menetrey 和 Willam (1995) 提出連續光滑的橢圓函數作為塑性勢能面，方程式如式(22)、(23)

$$G = \sqrt{(\varepsilon c_0 \tan\psi)^2 + (R_{mw}q)^2} - p \tan\psi \tag{22}$$

$$R_{mw} = \frac{4(1-e^2)\cos^2\Theta + (2e-1)^2}{2(1-e^2)\cos\Theta + (2e-1)\sqrt{4(1-e^2)(\cos\Theta)^2 + 5e^2 - 4e}} R_{mc}\left(\frac{\pi}{3}, \varphi\right) \tag{23}$$

4.2.2 接觸及邊界條件

在本研究中，將土體底端的橫向及縱向位移束制，即 $u=v=w=0$ ，另外由於無限元素土體用來模擬遠場條件，可視為一個邊界條件因此無須再另設。一般來說，法線及切線方向的接觸皆發生於接觸面上，在椿土摩擦行為中使用 Abaqus 中的硬接觸模擬，當兩個接觸面接觸時，壓力及摩擦力被傳遞到兩個表面，其摩擦係數為 $\mu = \tan\left(\frac{2}{3}\varphi'\right)$ ，其中 φ' 是土壤材料的摩擦角。

4.3 Openfresco(接口軟體)

為使 Opensees 能與 Abaqus 溝通，需要在接口軟體中定義 Expelement、Expstie、Expcontrol 及 Expsetup，由於這套軟體原先是用來做實驗控制的架構，因此其中諸多使用上的定義方式是以實驗為出發點，Expcontrol 用來定義與實驗控制方式或資料擷取系統的介面，用以設定溝通對象的種類，因此本研究設定其為

| expControl | \$tag | ipAddr | \$ipPort |
|--------------|-------|-----------------|----------|
| SimFEAdapter | 1 | "192.168.0.106" | 8090 |

其中 SimFEAdapte 即為使用轉接元素(adapter element)的指令，而 192.168.0.106 為由 Abaqus 開啟的伺服器位置，在此為虛擬 IP，由於為了方便起見兩個模擬程式在同一台電腦上運行，然而其耦合運算的能力在兩台不同電腦上方能有較大的發揮，若使用不同電腦作耦合分析，其 IP 位置須為實體 IP，以 8090 埠口作為客戶端與伺服器端傳輸資料的连接埠。Expelement 用來決定實驗元素種類，並賦予勁度矩陣節點自由度等參數，亦負責有限元素模型中全域及局

部座標系統的轉換。

| expElement \$tag | -node | -dofNdi | -site\$siteTag | -initStif Kij |
|------------------|-------|---------|----------------|-------------------------|
| generic | 1 | -node 1 | -dof 1 | -site 1 -initStif 30100 |

其中 generic 為使用者定義的元素種類，可依照使用者需求定義元素節點、自由度及初始勁度，在此定義轉接元素為連接樁及上方樑元素的一點，並傳輸地震作用方向自由度資料，其初始勁度則為土壤的楊氏係數。Expsetup 用來定義受測元件的變形方式及位移模式，及資料流傳遞的因子

| Expsetup | \$tag-control | -dir | -sizeTrialOut\$sizeTrial | \$sizeOut |
|----------|---------------|------------|--------------------------|-------------------|
| No | 1 | -control 1 | -dir 1 | -sizeTrialOut 1 1 |

ransformation

在 expSetup 中使用 NoTransformation 設定，可同時定義受測元件的六個方向自由度與原始的元素自由度間關係。Expstie 則是定義實驗或模擬架設的場域，資料傳輸及貯存的方式

| expSite | \$tag | \$setupTag |
|-----------|-------|------------|
| LocalSite | 1 | 1 |

在此設定 expSite 使用 LocalSite 的连接方式，若是在不同電腦上進行耦合模擬，則使用 ShadowSite 指令，並輸入 IP 位置及连接埠號碼。

五、模擬結果

為比較耦合模擬與一般模擬的計算差異，本研究比較結構物受地震力的反應，比較模型分別為耦合了 Abaqus 和 Opensees 的耦合模型，及在 Abaqus 完成全部模擬的一般模型，為單一 I 型柱透過樁打入砂質土壤中，並受 sin 波、El Centro 地震力作用的反應結果。

5.1 模型受力結果

為比較耦合模擬準確性，分別對模型施加加速度 sin 波及 El Centro 地震波作用，其加速度之正弦波大小為 $\sin(\pi t/2)$ ，時間長為 32 秒模型受力後其柱頂位移如 Fig. 7 所示，耦合模型及 Abaqus 的一般模型結果皆顯示柱頂位移約等於 0.003m，兩者之模擬結果十分貼近。

El Centro 地震為 1940 年發生於美國加州的地震，其地震的頻率內涵極為均勻且豐富，因此其資料常常為研究所用，其地震歷時約為 32 秒。結果顯示，在 EL Centro 的地震分析中，耦合模擬以及 Abaqus 模擬的結果極為相近，兩者的最大位移量均接近 0.02m，且其歷時反映趨勢皆相同，惟在部分區段反應為耦合

2016 SIMULIA Regional User Meeting

模擬稍微大於 Abaqus 模擬結果，推測其誤差來自於在耦合模擬中，I 型樑是以 Opensees 模擬，而在完整模擬中是以 Abaqus 模擬，其模型在不同軟體中的設定稍有差異，而導致了其結果的不同，整體而言，其耦合模擬的計算結果與一般模擬相當貼近，因此驗證了透過轉接元素完成耦合模擬的適用性及可靠性。

然而，由於耦合模擬是透過網路傳遞節點資料，且單一軟體必須等待另一軟體完成任一步時間的計算，並接收其資料才能進行該軟體的模擬計算，因此完成耦合計算所需花費時間是一般模擬的數倍，且為了維持模擬的效率其在硬體及網路的需求較一般模擬大。

六、結論

本研究以 Openfresco 作為一接口軟體，連接 Abaqus 及 Opensees 分析結構物的受力行為，結果顯示，透過耦合模擬所得之結果，與在單一軟體中的計算相吻合，確認了耦合運算的適用性及高度準確性，並得出以下結論：

1. 耦合模擬在技術層面上因其所具備之準確性可被使用來解決複雜性問題，轉接元素在耦合模擬中的適用性也在本研究中被證實
2. 目前在 Abaqus 的子程序撰寫中，轉接元素僅被用在隱式分析，顯示分析的部分尚待開發
3. 該技術在實用上仍有些許限制，例如兩個模擬程式必須以相同且固定的時間步長進行計算，在更複雜的非線性系統中，將因此設定，而使得模型有收斂上的困難，亦或必須顧慮計算中最小時間步長而使得整體的模擬速度大幅減慢，且其在網路流量及設備硬體上的要求又比一般模擬來的高。

目前的耦合模擬技術相較於傳統須不斷重啟動程式的方式已有跳躍式成長，擺脫以往繁瑣且不變的過程，儘管耦合模擬在現階段的發展仍受部分限制，但其所具備的潛力不容小覷，在日趨複雜的複雜性問題下，耦合技術的發展將使得有限元素的研究或軟體的開發有新的一章。

六、參考文獻

- [1] Akin, J. E. (2014). *Finite Elements for Analysis and Design: Computational Mathematics and Applications Series*. Academic Press.
- [2] Cook, R. D. (2007). *Concepts and applications of finite element analysis*. John Wiley & Sons.
- [3] Gu, Q., & Ozcelik, O. (2011). Integrating OpenSees with other software-with application to coupling problems in civil engineering. *Structural Engineering and Mechanics*, 40(1), 85-103.
- [4] Huang, Y., Schellenberg, A., Mahin, S. A., & Fenves, G. L. (2008). Coupling FE Software through Adapter Elements: A Novel Use of User-Defined Elements. In *Proceedings, 10th International LS-DYNA Users Conference, Dearborn, MI, United States*.
- [5] Kwon, O.-S., Nakata, N., Park, K.-S., Elnashai, A., and Spencer, B. (2007). User Manual and Examples for UI-SIMCOR and NEES-SAM. University of Illinois, Urbana-Champaign, IL, United States.
- [6] Takahashi, Y., & Fenves, G. L. (2006). Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(3), 267-291.
- [7] Schellenberg, A. H., Mahin S. A., Fenves G. L. (2009). Advanced Implementation of Hybrid Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center
- [8] Schellenberg, A., Mahin, S., & Fenves, G. (2007). A software framework for hybrid simulation of large structural systems. *Structural Engineering Research Frontiers*, 1-16.
- [9] Schellenberg, A., Kim, H. K., Takahashi, Y., Fenves, G. L., & Mahin, S. A. (2009). OpenFresco Framework for Hybrid Simulation: Simulation Finite Element Adapter Experimental Control Example.
- [10] Schellenberg, A., Huang, Y., & Mahin, S. A. (2008). Structural FE-software coupling through the experimental software framework, OpenFresco. In *Proceedings, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*.
- [11] Systèmes, D. (2007). Abaqus analysis user's manual. *Simulia Corp. Providence, RI, USA*.

[12] Wang, T., Nakashima, M., & Pan, P. (2006). On-line hybrid test combining with general-purpose finite element software. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(12), 1471-1488.

Table. 1 Opensees 中的材料參數

| Parameters in Opensees | | |
|--|--|------------------------|
| cross-sectional area (m ²) | | 0.02161286 |
| moment of Inertia Iz (m ⁴) | | 0.001702387 |
| moment of Inertia Iy (m ⁴) | | 6.61808E-05 |
| Steel Young's Modulus (Pa) | | 2.1E11 |
| number of Gauss integration points | | 5 |
| Pile | | |
| Young's Modulus E | | 2×10^8 kPa |
| Unit Weight γ | | 8 tf/m ³ |
| Poisson's Ratio ν | | 0.3 |
| Soil | | |
| Young's Modulus E | | 30100 kPa |
| Unit Weight γ | | 1.75 tf/m ³ |
| Poisson's Ratio ν | | 0.32 |
| Mohr Coulomb Plastic Coefficients | | |
| Friction Angle ϕ' | | 31.5 |
| Dilation Angle ψ | | 27.6 |
| Cohesion c | | 0 |
| Abs Plastic Strain | | 0 |

Table. 2 Abaqus 材料參數表

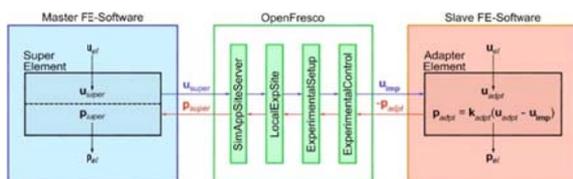


Fig. 1 耦合分析中主從軟體資料流傳輸過程

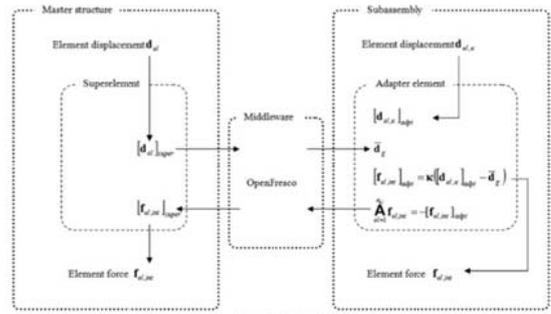


Figure 2: implementation of coupled simulation using adapter elements

Fig. 2、主從程式於耦合模擬中的資料傳輸流程

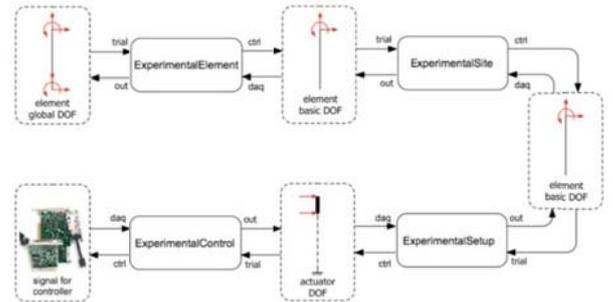


Fig. 3 自由度及資料流於不同模塊或物件中的轉換及傳輸

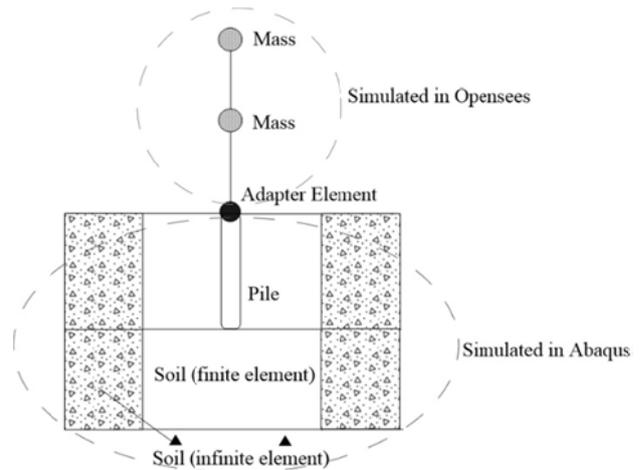


Fig. 4 耦合模擬模型示意圖

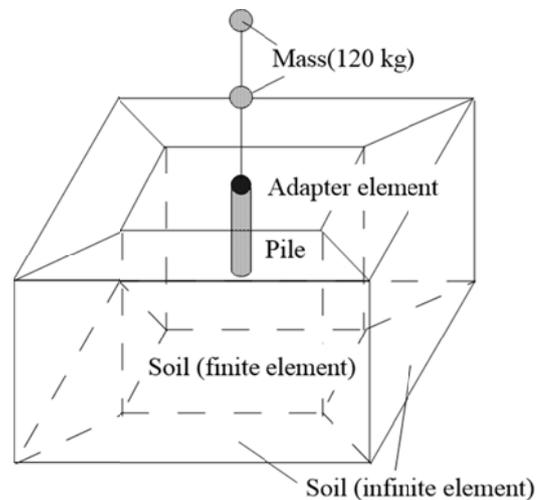


Fig. 5 耦合模擬模型 3D 示意圖

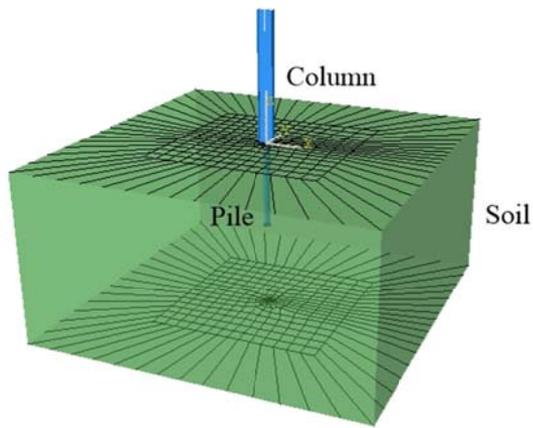


Fig. 6 Abaqus 一般模擬模型圖

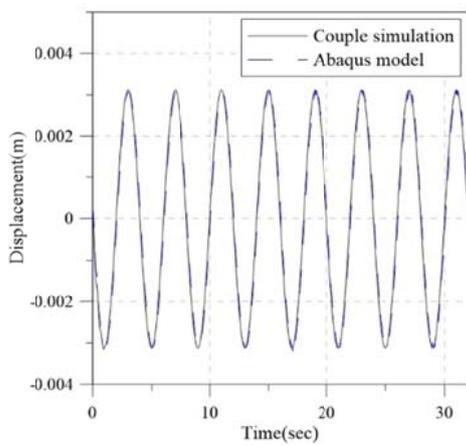


Fig. 7、耦合及一般模型受正弦波加速度歷時比較圖

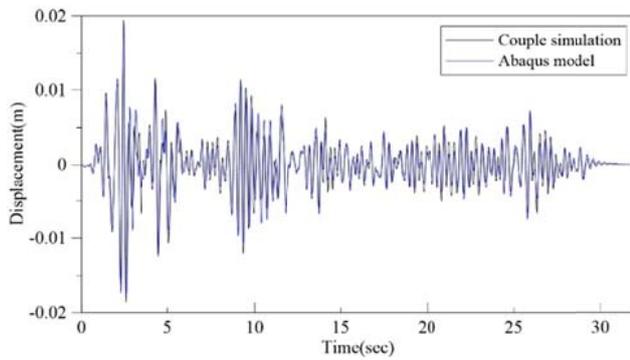


Fig. 8 耦合及一般模型受 El Centro 地震歷時比較圖