

BIM在施工階段結構安全性分析之應用

陳志文¹ 蔡雪華² 賴建名³

摘要

在建築施工過程中，為了避免結構不穩定造成倒塌產生意外，所以針對各施工階段之結構安全進行分析。當進行分析時，結構分析人員常遭遇到以下問題：(1)結構分析人員會先閱讀施工計劃書了解整個施工進度，但因施工規劃書難以有效完整表達整個施工過程，使其解讀困難，沒有發現潛在的結構危險。(2)結構分析人員需要根據施工圖重新建置各階段結構分析模型，建置過程時間冗長和容易出現錯誤進而影響分析結果。

BIM(Building Information Modeling)為目前發展趨勢，它貫穿整個生命週期，使資訊具有一致性，避免資訊傳遞遺失；BIM模型內含豐富資訊，如幾何空間資訊、專案資訊、材料性質或施工順序等資訊。所以擷取BIM模型相關資訊可以進行數量計算、進度模擬、結構分析等；運用BIM優點解決上述在施工中結構安全性分析過程所遭遇的問題。本文提供一套從施工進度模擬，到各階段結構分析模型之輸出，期能縮短資訊剖析時間和增加資訊傳遞正確性，從而減低結構安全性分析之錯誤，供業界參考。

關鍵詞: Building Information Modeling(BIM)、結構安全性分析、施工階段

The Application of BIM to Structural Safety Analysis During Construction

Chen Chih-Wen¹ Choi Suet-Wa² Lai Chien-Ming³

Abstract

In order to avoid structural failures during construction, engineers conduct structural safety analyses for each construction stage. Even so, they still frequently meet problems such as: (1) Structural analysis-related engineers read the construction scheduling plan ahead of time. However, the plan is not effective enough to express the whole construction process due to the use of paper documents, therefore the engineers tend to miss potential structural risks. (2) In structural analysis, the engineers need to rebuild analytical models from 2D shop drawings. This not only takes a lot of time but also tends to introduce mistakes that affect the analysis results.

Building Information Modeling (BIM) has become a recent trend. It deals with a building's complete life cycle, making it easier to maintain information consistency and avoid information loss. Additionally, there is plentiful information available in BIM models, such as location and geometric attributes, object properties, construction scheduling, and structural analysis information, etc. Therefore, the information related to BIM models can be retrieved to implement quantity calculations, construction scheduling simulations, and structural analyses. In this paper, the authors describe how, in order to solve the problems mentioned above, BIM was applied to the scope from construction scheduling simulation to structural safety analyses in each construction stage, so that information analysis time could be reduced and information could be transferred more accurately, thereby effectively increasing safety during construction.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), structural safety analysis, construction stage

¹ 中興工程顧問公司BIM中心主任

² 中興工程顧問公司BIM中心工程師

³ 中興工程顧問公司萬大線DQ122設計標計畫副理

cwchen@mail.sinotech.com.tw

swchoi@mail.sinotech.com.tw

lcm@mail.sinotech.com.tw

一、前言

在建築物施工過程中，營造廠根據整個施工時程、施工方法、機具和材料進出等規劃整個施工進度順序，使其易於管理和控制整個工地的運作，並將規劃好之施工進度交給結構工程師檢核其安全性。基於安全原則，如果工程師發現結構不安全，則施工進度計劃需修改或使用其他方式去解決，如加臨時支撐等。但是，因為施工進度計劃書內容和每一項目的資訊都具有關連性，所以閱讀較為困難。往往工程師需要花很多時間去剖析所有內容，才能把整個施工過程在腦海內推演一次，從而評定其安全性。這個過程很容易使工程師產生誤解及難以發現潛在問題，以致發生施工意外，其所帶來的後果，不僅是結構物倒塌的嚴重損失，最重要的是會危及到施工人員的生命。所以施工進度安全性檢核是施工過程中很重要的一個環節，工程師若能有效理解施工進度規劃，才能作出正確的判斷，減少意外發生。另外，若工程師發現施工進度計劃會引起結構安全的問題而需進行結構分析時，會根據施工圖說把梁柱的空間位置、斷面尺寸大小和材質強度在結構分析軟體中建置模型並進行分析。但施工圖說包含各種資訊，要從圖面找到需要的資訊所花費的時間很長且容易找到錯誤的資訊，進而影響分析模型的建置及分析結果。

自從1970年代末期美國喬治亞理工學院的C.M.Eastman教授提出BIM之概念至今，學界及軟體業者均致力於發展出為設計與施工可數位化的模擬建築物，並盡可能讓模型中的所有物件性質與屬性成為工程計畫之紀錄資訊。BIM (Building Information Modeling)貫穿整個建築生命週期，使資訊具有一致性，避免資訊傳遞遺失。目前根據BIM概念設計的軟體(以下稱BIM軟體)很多，也越趨成熟，這些軟體除了能建置三維模型外，且能給予物件屬性，如尺寸、材質、進度資訊和分析時之邊界條件。並透過擷取屬性資料從而建立各面向的平立面圖、構件圖、數量計算或計劃進度排程等。另外BIM軟體可透過資訊交換的方式與其他專業分析軟體結合，增加其效益。市場上較為普遍採用的軟體有Revit Architecture、Graphisoft ArchiCAD、Bentley PlantSpace及Tekla Structures、NavisWorks…等等。此類商業軟體各有其優缺點，功能及執行效率差異甚大，價格高低相去甚遠。

若工程師能採用BIM之優點解決上述在施工中結構安全分析過程所遭遇的問題，透過BIM軟體與結構分析軟體的資料結合，快速進行資料交換，減少剖析時間和增加資訊傳遞的正確性，則使結構分析資料更能符合實際施工情況。

二、研究方法

本方法運用BIM之技術跨越整個建築生命週期，從初步設計、細部設計至施工和營運階段都由BIM作為資訊傳遞的橋梁。圖1為執行架構示意圖。圖中主要分成BIM軟體和專業軟體二部份，BIM軟體的特點是含有各類資訊(幾何空間和桿件屬性等)及整合資訊的功能(2D圖面輸出和數量計算等)。至於其他專業，如結構應力分析，則可透過資訊交換的方式與專業分析軟體聯結，讓資訊作更有效的應用，發揮更大的效益。

本研究應用在施工階段之結構安全性分析，從圖1了解到BIM軟體所需要的資訊分為三類，第一類為施工進度資訊，如工項和時間；第二類為結構分析資訊，分別為邊界條件、載

重及載重組合；第三類是施工進度和結構分析共同擁有的資訊，稱為基本資訊，如幾何形狀和空間位置。以功能面而言，BIM軟體負責處理施工進度模擬，並結合專案進度和結構分析二種專業軟體，來處理進度規劃和結構檢核。業界常用專案進度軟體為Microsoft Project(MS Project)、Primavera P6等，結構分析軟體則為SAP2000、Etabs等。最後整個運作模式為(1)施工廠商在專案進度軟體進行施工規劃，輸出相關格式給BIM軟體。(2)在BIM軟體進行進度模擬。(3)結合施工進度資訊、基本資訊和結構分析資訊輸出到結構分析軟體進行結構檢核。

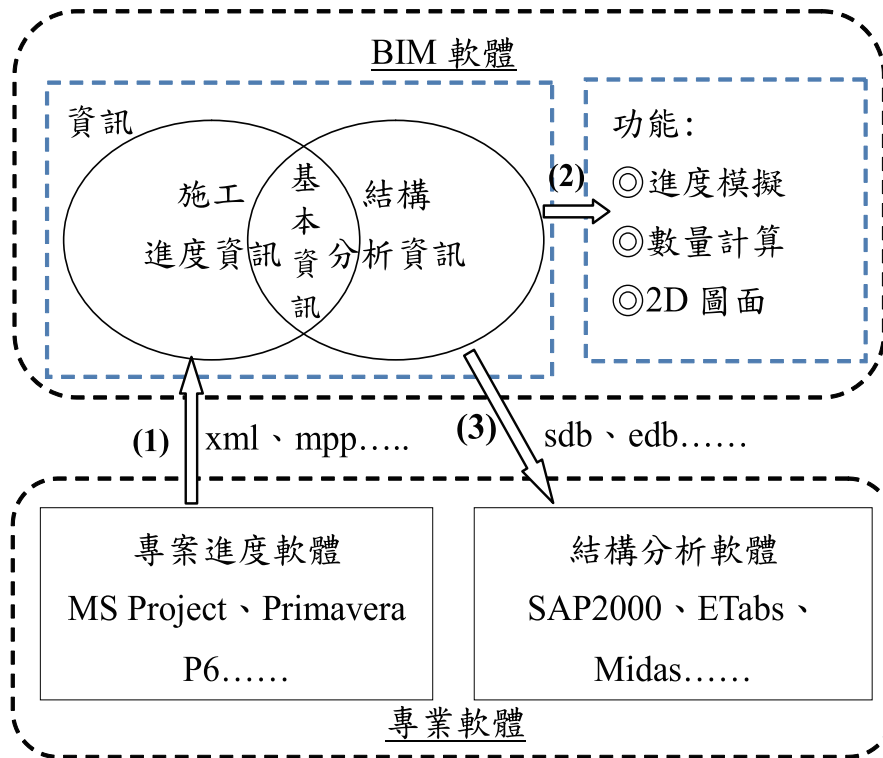


圖1 執行架構

三、實例操作

本案例以中興社研究大樓新建工程之鋼結構工程吊裝施工計劃為例。中興社研究大樓為地下三層、地上七層樓的建築物。主要作為中興社辦公室與實驗室使用，建築物地面上總高度30.55m，地下開挖深度12.75m，一樓基面高出地面80cm，其中地下三層分別高4.4m、3.8m 和3.2m，一樓至七層樓高各為4.0m、屋突樓高1.75m。研究大樓所使用之結構材料，一樓以上為鋼骨構架、其中柱採用箱型柱、梁及垂直斜支撐採用H 型鋼，地下結構部份柱、梁、牆及版均採用鋼筋混凝土，上部結構之鋼骨柱在地下一層轉換為RC 柱。

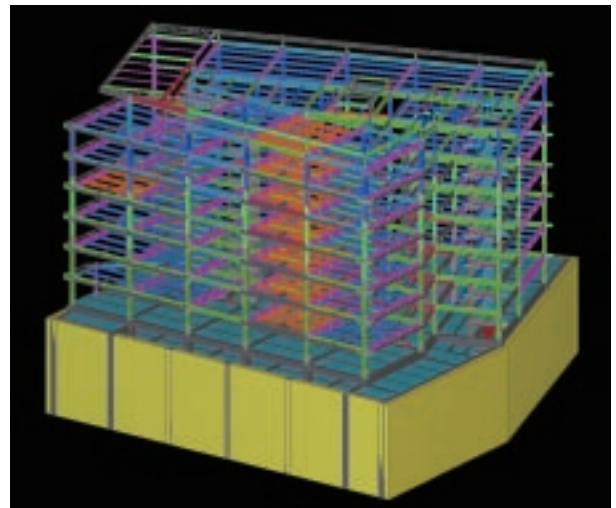


圖2 中興社研究大樓BIM施工模型

中興社研究大樓從設計到施工均使用BIM之技術作設計，施工廠商再從BIM模型產出施工圖和數量。BIM模型的建置使用Tekla Structure軟體(下文簡稱Tekla)。從鋼結構製造及吊裝廠商取得吊裝進度Microsoft Project檔案和鋼結構工程吊裝計劃書作參考。再分別以條列方式說明實際操作。

(一) 專案進度軟體與BIM軟體資料交換

鋼構廠商使用Microsoft Project軟體來規劃鋼構吊裝計劃，Tekla支援XML格式，所以把Microsoft Project檔案另存為XML格式，再匯入到Tekla的工作管理員。如圖3示意圖；左邊為Microsoft Project吊裝計劃進度示意圖，右邊為匯入後Tekla工作管理員示意圖。從圖中可看到工項、時間和工項之間的從屬關係而成功匯入。另外，如果進度需要進行修改，方式有二種，可以直接在Tekla修改；另一種為Microsoft Project輸出新XML，在Tekla使用同步匯入方式去更新原有進度。

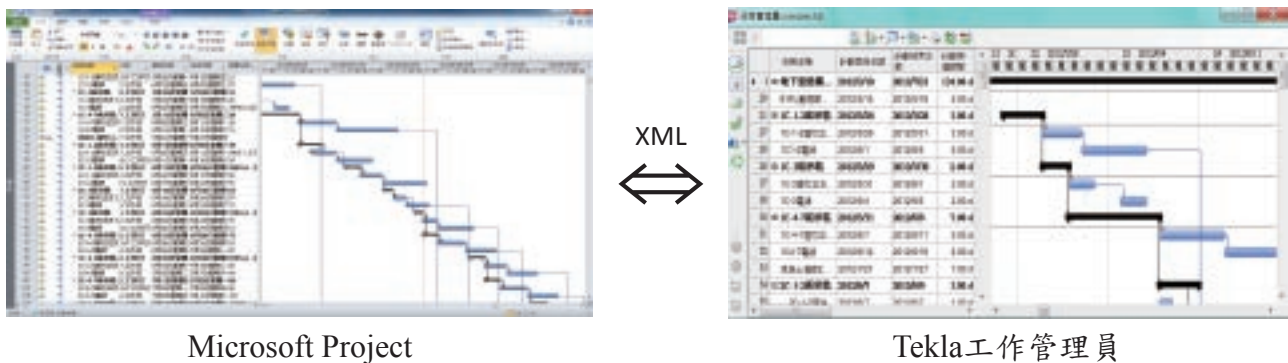


圖3 專案進度軟體與BIM軟體資料交換示意圖

(二) 施工進度模擬

1. 吊裝計劃進度與桿件連結

在鋼結構BIM施工模型中，桿件選擇主要分為二種方式，零件選擇或構件選擇。零件是指單一物件；而構件則是由多個零件所組合，構件用於表達鋼骨在工廠加工後生產的結果，如加工後的鋼柱含加勁板和接合板。因為本案例著重於結構穩定性分析，所以只需選擇柱和梁零件，不須考慮其他細節，如螺栓、加勁板等。選擇柱梁後加入到對應的進度表中。如圖4。

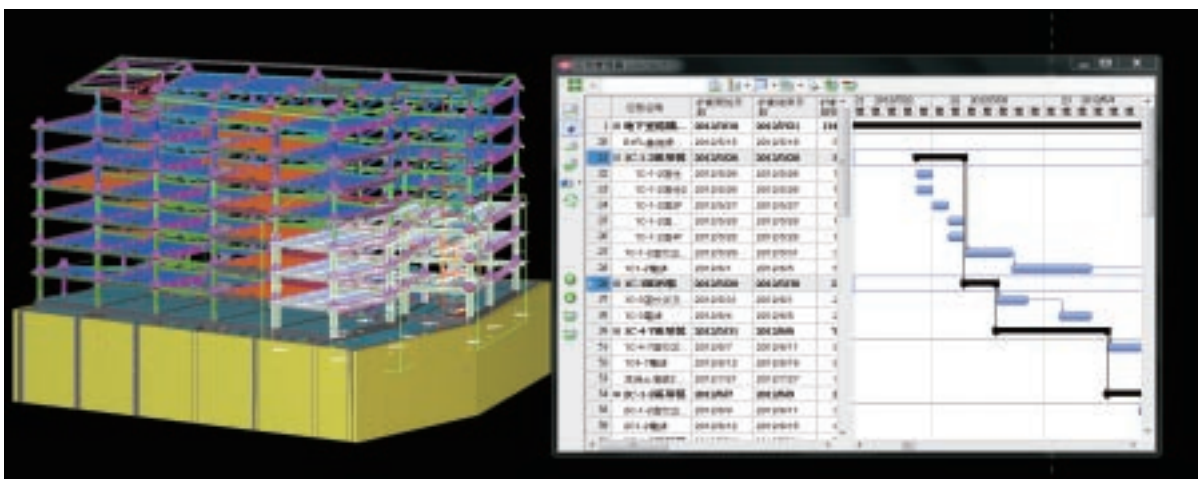

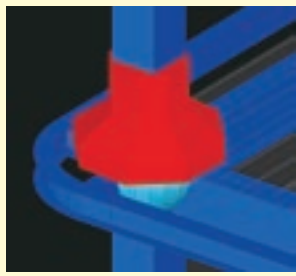


圖4 吊裝計劃進度與桿件連結

2. 施工模擬的設定

首先，設定施工模擬顏色，顏色主要分成三類，分別表示桿件在未施工、施工中和完工三種情況。未施工用白色透明的顏色，表示桿件尚未出現；施工中選擇對比度高的色彩，較易使閱讀者分辨；完工者用較暗的顏色，用以與施工中的桿件做明顯對比。另外，本文施工模擬著重在檢核施工過程中結構的穩定性狀態，所以在邊界條件的定義，螺栓鎖固和焊接皆與邊界條件有關，分別以球體和倒漏斗型表示螺栓鎖固和焊接，詳如表1。

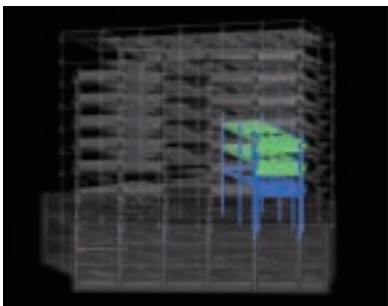
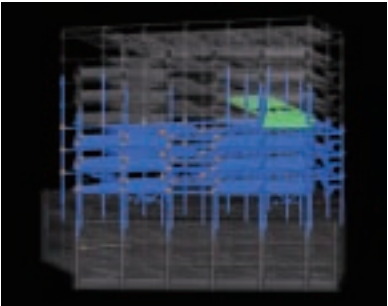
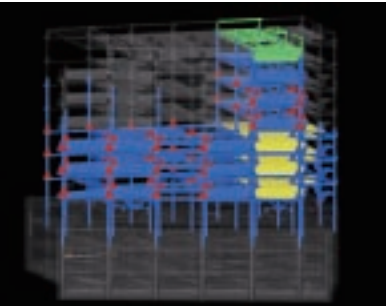
表1 施工模擬設定

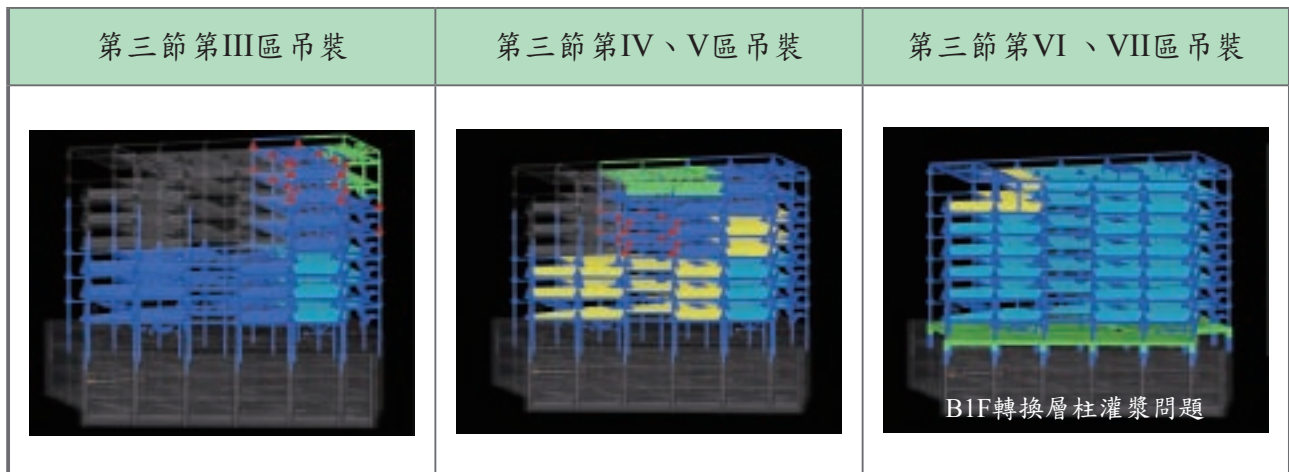
顏色設定		邊界條件	
施工階段	顏色	螺栓鎖固	焊接
未施工	白色90%透明		
施工中	亮綠或亮黃		
完工	暗藍		

3. 鋼結構吊裝施工模擬與結構穩定性之討論

本案鋼構吊裝分成三節，第一節為1F到3F，第二節為4F-5F，第三節為6F-RF，另每一節分為七區(I-VII)。表2從左到右、從上到下按施工模擬結果順序，提供給施工廠商作為參考。從模擬中發現1樓板和B1F柱灌漿時間均在鋼結構吊裝後施作，B1F柱為鋼骨與RC轉換層，所以B1F柱灌漿時間點將決定柱底模擬時之邊界條件，如果還沒有灌漿就進行吊裝，底部邊界條件將從固接(Fixed)轉變為鉸支撐(Hinge)結構，錨栓是否足以承受拉力和剪力將成為議題。廠商就可針對此問題提出其解決方法和規劃新的專案進度，並針對錨栓固定問題做進一步研究。

表2 鋼結構吊裝施工模擬

第一節第I、II區吊裝	第一節第IV-VII區	第三節第I、II區吊裝
		



(三) BIM軟體與結構分析軟體資料交換

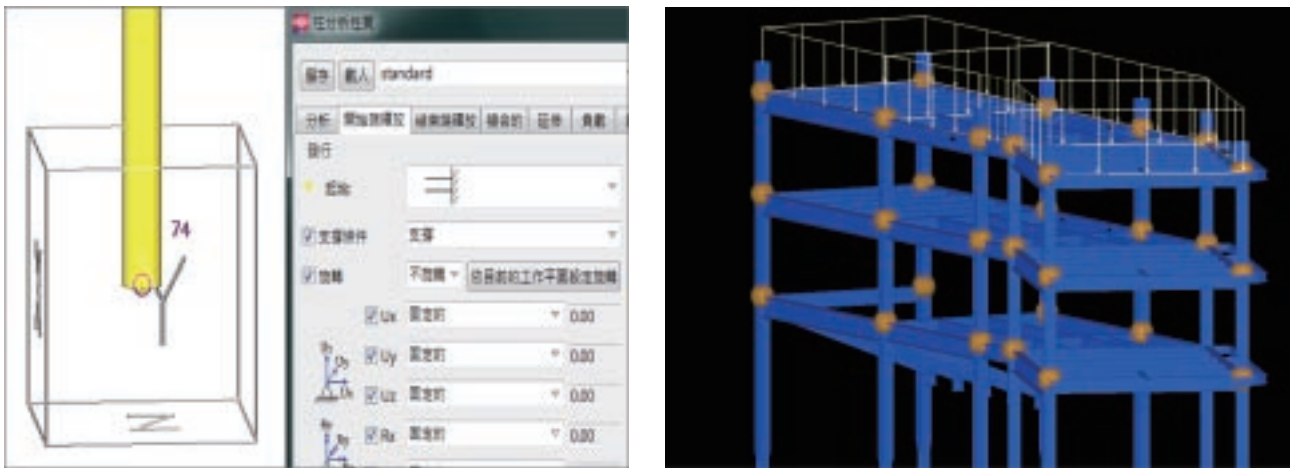
針對鋼結構柱底為鉸支撐（Hinge）條件進行各吊裝階段結構分析。

1. 結構分析條件在Tekla軟體中設定

首先設定邊界條件，柱為鉸支撐，大梁與柱為固接，小梁為鉸接。Tekla預設柱底支撐為剛接，零件間之連接為固接。若修改邊界條件，使用者可以在零件“分析性質”視窗用點選或自訂方式進行修改。如圖5(左)為柱底支撐邊界條件之修改。另外，Tekla根據零件材質和體積自動計算零件自重，同時透過“載重功能”設定loadcase和載重類型，如均佈載重和集中載重等，本案例使用此功能設定0.1T/m均佈活載重，詳如圖5(右)。而地震力、溫度效應等結構分析屬性則在結構分析軟體中設定，其中風力忽略不計。最後在Tekla設定載重組合如表3，載重組合的設定可以選擇自己設定或由規範自動產生。

表3 鋼結構載重組合(LRFD)

1.4D	D：靜載重 L：活載重 EQX：X方向地震力 EQY：Y方向地震力 註：結構全非正交，所以考慮另一方向地震力有30%貢獻。
1.2D + 1.6L	
1.2D + 0.5L ± EQx ± 0.3EQy	
1.2D + 0.5L ± 0.3EQx ± EQy	
0.9D ± EQx ± 0.3EQy	
0.9D ± 0.3EQx ± EQy	



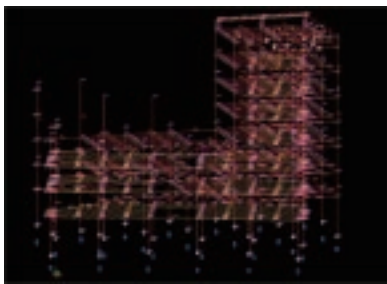
柱底為鉸接

活載重設定

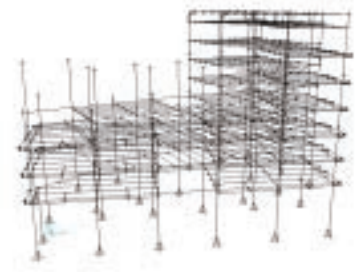
圖5 結構分析設定

2. 吊裝各階段結構分析模型輸出

結構分析參數設定後，結合3.2節的施工進度模型，利用Tekla的篩選功能把相關資訊輸出至結構分析軟體，本案選擇使用結構分析軟體為SAP2000，如圖6。在SAP2000中檢查各桿件的位置、斷面尺寸、載重等。表4為各吊裝階段轉出SAP2000結構分析模型之結果，順序從左到右、從上到下。



+ 載重
載重組合
邊界條件



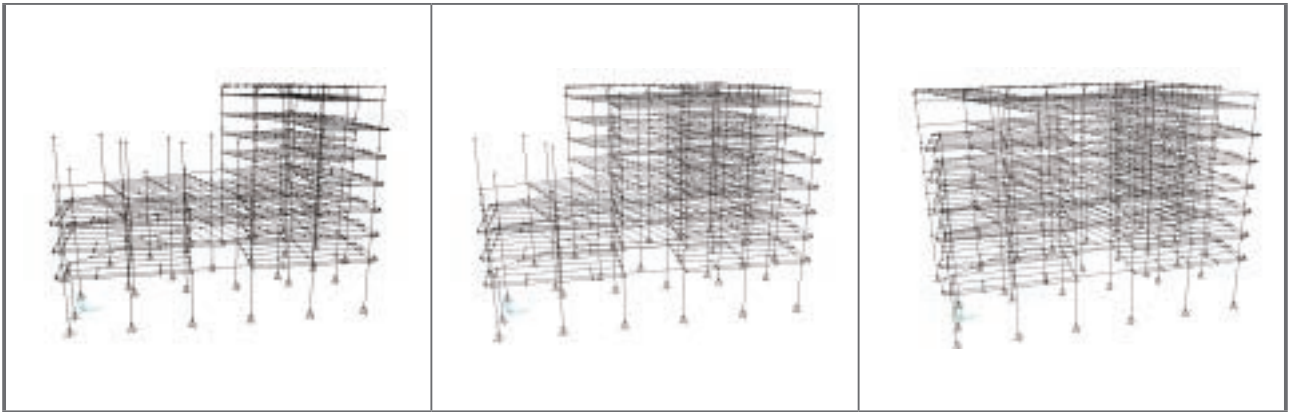
Tekla分析模型和結構分析參數

SAP2000分析模型

圖6 BIM模型與結構分析模型轉換

表4 吊裝各階段SAP2000結構分析模型

--	--	--



(四) 結構分析檢核

各階段吊裝分析模型轉換後，進行結構分析檢核，本案針對第一節第I、II區吊裝模型進行以下結構檢核探討。首先計算地震力，採用中小型地震力分析。工址為台北三區，用途係數 $I=1.0$ ，設計水平譜加速度係數 $S_{DS}=0.6$ ，工址設計水平加速度週期 $T_0^D=1.05$ ，X方向和Y方向自然振動週期0.73和0.63，從公式(1)得到X方向和Y方向均為0.1714W。

$$V^* = \frac{IF_u}{3.5\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W \quad (1)$$

式中 V^* 為避免中度地震降伏之設計地震力； I 為用途係數； F_u 為結構系統地震力折減係數； α_y 為起始降伏地震力放大倍數； S_{aD} 為工址設計水平加速度反應譜； W 為建物靜重。

1. 彎矩及軸力作用之應力檢核

根據公式(2)，由SAP2000得到柱桿件最大應力比為0.11和梁桿件最大應力比0.265，均少於1。

$$\frac{P_u}{\phi P_n} + \left[\frac{M_{ux}}{\phi_b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi_b M_{ny}} \right] \leq 1.0 \quad (2)$$

式中 P_u 為所需之軸拉力或軸壓力強度； P_n 為標稱抗拉強度或抗壓強度； M_u 為所需之撓曲強度； M_n 為標稱撓曲強度； x 為強軸， y 為弱軸； ϕ 為軸力載重之強度折減係數； ϕ_b 為撓曲載重下之強度折減係數。

2. 層間相對側向位移 <0.005

由SAP 2000程式結構分析可求得中小型地震力作用下各樓層最大之側向位移及最大層間變位角為0.001631。另外從公式(1)和公式(3)比較 $V'=0.8337V^*$ ，所以X方向和Y方向最大變位角為 $0.001631 \times 0.8337=0.00136$ ，均少於0.005。

$$V' = \frac{IF_u}{4.2\alpha_y} \left(\frac{S_{aD}}{F_u} \right)_m W \quad (3)$$

式中 V' 為層間相對側向位移水平地震力。

3. 柱底錨栓檢核

從SAP2000得到柱底最大剪力和拉力分別為3.7 ton和12 ton。從表5錨栓承受剪力時由混凝土剪破強度控制16.3ton>柱底承受剪力3.7ton，所以剪力不會破壞。另外，錨柱承受拉力時由混凝土拉破強度控制28ton>柱底承受拉力12ton，所以拉力不會破壞。考慮剪力與拉力互制，公式(4)， $3.7/16.3+12/28=0.66$ ，少於1.2，符合要求。

$$\frac{N_{ua}}{\phi N_n} + \frac{V_{ua}}{\phi V_n} \leq 1.2 \tag{4}$$

式中 N_{ua} 為單根錨栓或錨栓群之設計拉力； N_n 為拉力計算強度； V_{ua} 為單根錨栓或錨栓群之設計剪力； V_n 為剪力計算強度。 ϕ 為強度折減因數。

表5 錨栓剪力計算強度和拉力計算強度

錨栓剪力計算強度			錨栓拉力計算強度		
錨栓鋼材剪力強度(a)	混凝土剪破強度(b)	撬破強度(c)	錨栓鋼材剪力強度(d)	混凝土拉破(e)	混凝土拔出(f)
50.7 ton	16.3 ton	56 ton	97 ton	28 ton	50.4 ton

註：表中各項公式詳如下列，公式參照“混凝土工程設計規範與解說(土木401-96)”附篇D

$$(a) \phi V_{sa} = \phi n 0.6 A_{se} f_{uta}$$

$$(b) \phi V_{cbg} = \phi \frac{A_{vc}}{A_{vco}} \psi_{ec,v} \psi_{ed,v} \psi_{c,v} V_b$$

$$(c) \phi V_{cp} = \phi k_{cp} N_{cb}$$

$$(d) \phi N_{sa} = \phi n A_{se} f_{uta}$$

$$(e) \phi N_{cbg} = \phi \frac{A_{nc}}{A_{nco}} \psi_{ec,n} \psi_{ed,n} \psi_{c,n} \psi_{cp,n} N_b$$

$$(f) \phi N_p = \phi \psi_{c,p} A_{brg} 8 f'_c$$

四、結論

經過實例操作，利用既有BIM施工模型和進度資訊整合，導入施工進度可減低資料剖析誤差，能更有效發現潛在結構施工中之危險；另外，在施工進度模擬的各階段，透過BIM施工模型與結構分析軟體以數位格式交換方式結合，讓資訊能更有效被應用，增加資訊傳遞速度，提升結構分析與實際結構體的一致性，使分析結果更符合實際情況。

BIM的效益需要有豐富設計經驗的專業工程師配合才能發揮，在它整個的執行過程仍然無法跳脫各專業的設計本質。以本案而言，仍舊有經驗的結構工程師，從施工進度模擬中去判斷潛在的結構危險。另外，BIM是一種新技術的導入，需要新的工作方式與新的流程去

配合，甚而新的組織結構與新的發包制度才能發揮BIM工具的整體效益及目標。現階段在國外和國內業者、學者和政府各單位已積極發展和推動BIM技術。而要能成功導入至各事業體的最有效的方式，是先找一個有BIM執行經驗的顧問團隊作整體流程的規劃，再輔以教育訓練，才能在最短的時間內達到成功的技術轉移。

參考文獻

1. 陳志文，(民99)，「BIM趨勢及在結構設計之應用」，中華民國第十屆結構工程研討會
2. 中國土木工程學會，(民96)，混凝土工程設計規範與解說(土木401-96)，科技圖書
3. 中國土木工程學會，(民96)，混凝土工程設計規範之應用(土木404-96)，科技圖書
4. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors (Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, Kathleen Liston).
5. Tekla Structures on line Help.
6. IFC/ifcXML Specifications - developed by the International Alliance for Interoperability (IAI) .