



鋼箱梁參數化三維建模

— 以三鶯大橋改建工程為例

The Parametric 3D Modeling Apply to Steel Box Bridge — Take Sanying Bridge Reconstruction For Example

曾榮川／台灣世曦工程顧問股份有限公司 第一結構部協理

陳政雄／台灣世曦工程顧問股份有限公司 第一結構部正工程師

李育謙／台灣世曦工程顧問股份有限公司 第一結構部工程師

吳淑珍／台灣世曦工程顧問股份有限公司 第一結構部副理

由於工業 4.0 浪潮已將傳統營造產業推向轉型的臨界點，在守舊與維新的交鋒需要有領航員找出最佳的航道。目前為止 BIM 被視為營造業進入這波工業革命的風向球，誰能掌握風起就能掌舵。迄今建築 BIM 逐漸成熟，惟橋梁工程難移植建築經驗，研析 BIM 在橋梁工程應用上與建築物的差異及所面臨困境，並具體提出 BIM 在橋梁工程應用上應有之作法，本文同時介紹以工程師設計語彙與邏輯導向之參數化 BIM 快速建模前處理程式，冀望打破以往工程師對於橋梁 BIM 建模的困囿，並以實際案例成果加以驗證其正確性與效率。結果顯示，以工程師設計語彙參數化作為資料輸入方式，並經由程式進行繁複計算及存成後續 BIM 模型使用之格式，確實發揮快速 BIM 建模的目標，大幅降低 BIM 建模成本及縮短短期程，發揮 BIM 在橋梁工程的應用與效益。對於 BIM 在橋梁工程之應用推展及效益的發揮將有很大的助益，提供業界同仁參考。

前言

近年來物聯網發展迅速，當德國提出工業 4.0 概念與政策後，引發全球智慧製造新浪潮。物聯網首重數據交換能力，此對於土木工程造成重大衝擊。傳統 2D 圖紙展現設計成果，不易於資訊傳遞。因此營造業轉向提高設計維度，以 3D 數位模型裡加入運動數據。同時擬定數據交換格式，確保數據交換可行性，以朝向智慧設計、製造、營建、維管之全生命週期領域邁進。此概念最早發展於建築，因此稱之為 BIM (Building Information Model)，演進示意如圖 1。BIM 以終為始的

設計概念，在設計階段採放樣精度建構模型，兼顧後續資訊傳遞的延續性。目前漸漸出現支援橋梁工程的商用軟體，惟建模缺乏多箱梁及導線不平行等常見橋型，在鋼箱梁設計尚未達商用水準。有鑑於此，自行開發建程式乃簡單可行的方案，解決等待商用軟體發展成熟前履約能力不足的困境。考慮第三方開發與資訊交換的前提，選用的建模軟件除需考量承載幾何、材質等…基本訊息外，還需有 API (Application Program Interface) 擴充能力，配合外掛程式達成參數化自動建模目的。

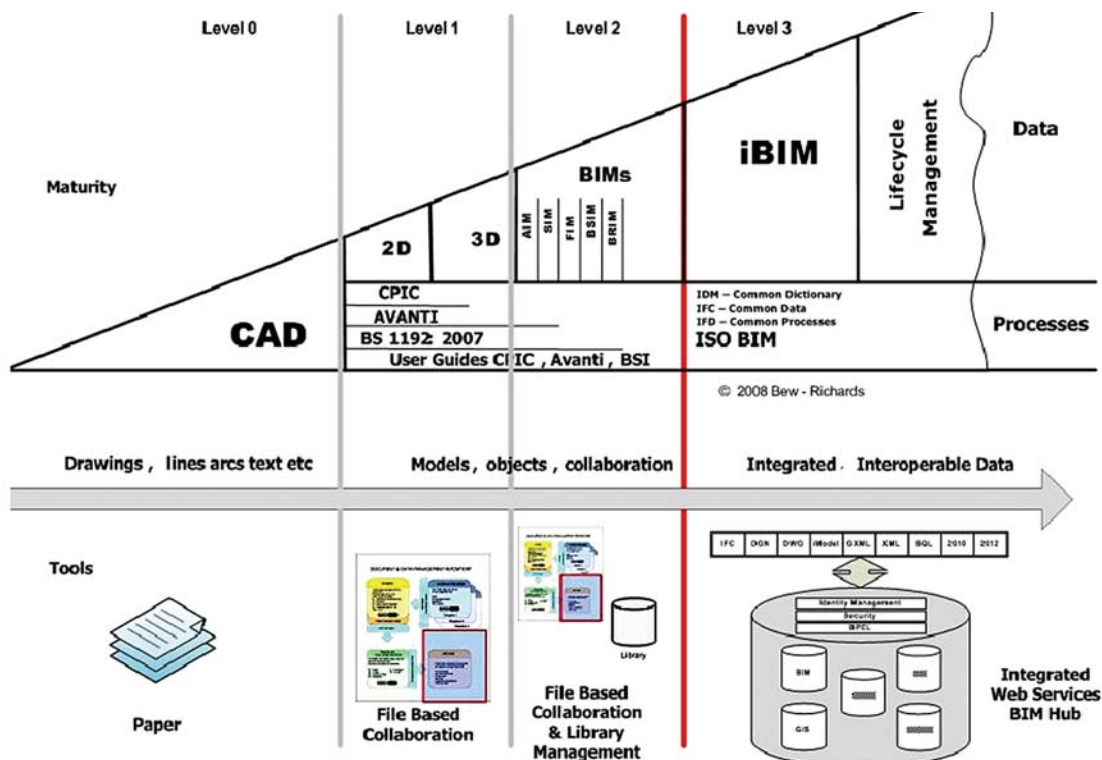


圖 1 BIM 發展階段示意圖 [1]

橋梁 BIM 發展迷思

BIM 在建築與橋梁的差異在於數據模型交換類別 (詳表 1)。建築梁柱構件幾何複雜度低, BIM 可採 Frame-Frame 數據交換模式, 在元素中附加設計資料並稱之為 BIM。橋梁工程構件幾何複雜度高, 必需以 Curve-Frame 數據交換才能保留設計參數。然而目前橋梁 BIM 軟件主要以施工放樣模型為主, 以大地座標放

樣建置鋼板後便失去連結設計參數的重要資訊, 這就是為何許多橋梁工程師不願接受以建築觀點所發展之 BIM 的主要原因。像 Solid、Shell 幾何之通用 BIM 模型僅適用於 3D 列印、機械設備、航太工業、動畫工業等領域, 橋梁只應用在特殊構件局部應力集中檢查、橋梁外觀規劃模型等, 因此橋梁工程師誤以通用 BIM 來設計橋梁會讓自己陷入圈套中。

表 1 BIM 模型與分析模型數據交換類別

用途	BIM 元件	圖例	分析模型	圖例	說明
建築 BIM	Frame		Frame		構件用 2 點座標定位, 建築 BIM 模型可以 Frame-Frame 互轉分析模型。
橋梁 BrIM	Curve		Frame		橋梁採用道路工程 Curve 元件, 外掛程式 API 加入自定義設計資料, 能自動轉換至 Frame 分析模型。
無	Shell		Frame		沒必要開發 AI 人工智慧, 通用 Shell 模型無法轉換 Frame 分析模型。
通用 BIM	Shell		Shell		若採通用 BIM 模型設計鋼箱梁, 只能用 Shell-Shell 交換至分析模型。

Shell 運算需求高

圖 2 為鋼箱梁常見尺寸，Frame 構件展為 Shell 構件後變成 304 片 Shells，版元素的自由度為梁元素的 2 倍（詳圖 3），活載重影響線所需儲存的空間增加 608 倍，勁度矩陣大小增加為 369,664 倍，一般電腦難以負荷。

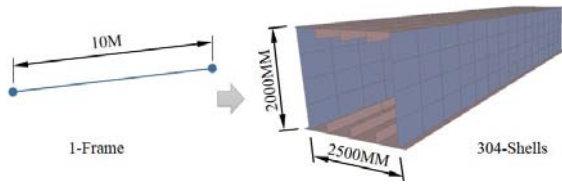


圖 2 Frame 展開 Shells

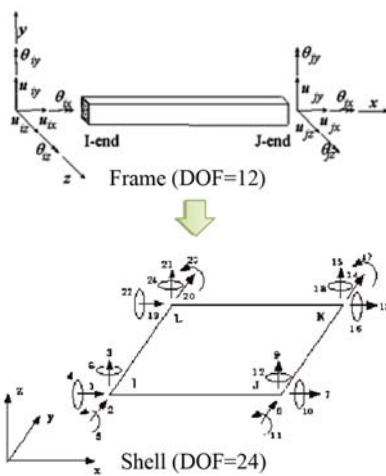


圖 3 構件自由度

Shell 應力檢核風險

我國鋼構規範之檢核對象為斷面內力，所有安全係數均隱含各式載重下鋼構材韌性容量，檢核對象為 Frame 模型斷面應力。若採用 Shell 模型分析，需依斷面應力積分取平均值檢核，在 Mesh 後的 Shell 元素不易自動化計算斷面積分，若人工檢核容易發生人為盲點。

Shell Mesh 健康度檢查

常見 Mesh（網格）Node（節點）不重合問題如圖 4，此為 Auto Mesh 後最常見錯誤；其次為元素形狀盡量避免形成狹長形或銳角形造成數值不穩定。因此在選用 BIM 軟體時，應注意其自動轉換 Shell-Shell 成熟度。

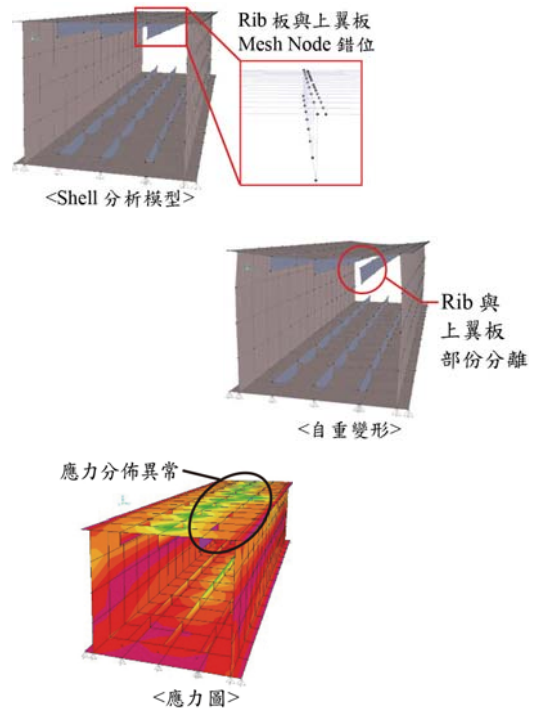


圖 4 Shell Mesh 風險 — Nodes 不協調

BIM 橋梁發展結論

橋梁採通用 BIM，由於 Shell-Shell 對電腦處理效能、儲存容量與規範檢核皆不易克服，因此我們必需找另一套可行方案，例如採用 Civil 3D 這類擁有道路工程 Curve Base 導線功能的軟體，配合自行開發的外掛程式（API），依設計橋型建立專用設計參數，如圖 5。

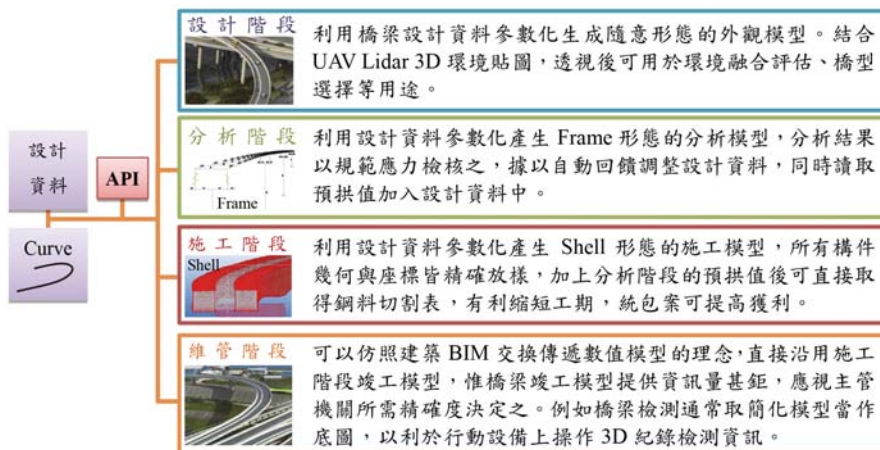


圖 5 鋼箱梁橋 BrIM 數據階層圖

從橋梁設計資料向下發展出各階段所需之模型，各階段依 3D 模型檢討成果後調整原始橋梁設計參數。因此各階段 BIM 模型若無連結橋梁設計資料的話，一旦模型形態不相同便無間接交換之可能。由於以上做法明顯與建築 BIM 有本質上的差異，FHWA 於 2015 年發起 Bridge Information Modeling (BrIM) Using Open Parametric Objects[2]，希望能引導並標準化橋梁參數模型。目前 BrIM 的 IFC Bridge Design to Construction Information Exchange 仍在發展初期，期待將來會有標準數據交換規範應用於橋梁 BIM 軟件，也希望自行開發

的成果能引起更多先進加入 BrIM 發展的行列。

三鶯大橋改建工程簡介

本案例三鶯大橋跨越大漢溪，於新北市三峽區與鶯歌區之間，如圖 6。既有橋梁為 PCI 預力梁，跨徑 20 m ~ 40 m 全部橋梁總長度達 600 m，雙向橋寬各 8.5 m。

三鶯大橋改建工程規劃四階段，本工程為第一階段擴建原橋兩側匝道，圖 7 為兩側匝道平、斷面圖及匝道 1 立面圖，全長 574.6 ~ 595.4 m。匝道 1、2 採鋼箱梁橋，橋寬 7.5 m。



圖 6 三鶯大橋原橋空拍與立面圖、斷面圖

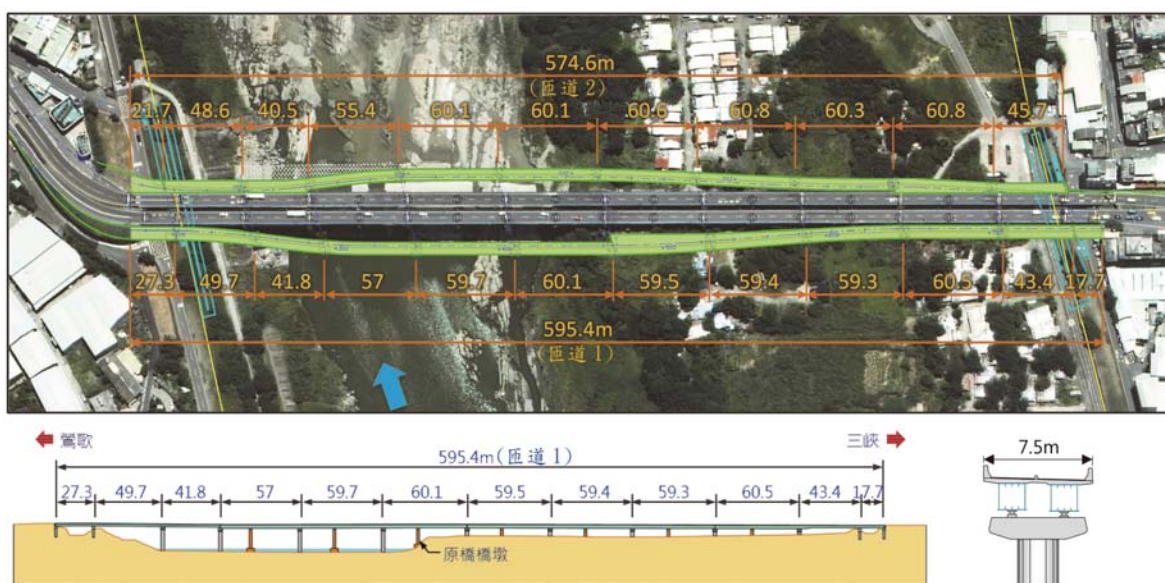


圖 7 三鶯大橋改建第一階段—擴建匝道平面圖、立面圖、斷面圖

橋梁 BrIM 自動參數化建模

BrIM 各階段數值模型需維持與橋梁設計資料的關聯性，底下將以細部設計階段，針對鋼箱梁說明參數化建模的流程。首先以工程師視角的語彙來瞭解所需資料，道路工程與橋梁基本資料概述如下，示意如圖 8 與圖 9 所示。

- 平面控制線：平面位置放樣的依據，具有路工導線方向角、曲率半徑、里程等基本訊息。
- 高程控制線（縱坡）：高程放樣的原始依據，對應於平面控制線的里程。
- 超高（橫坡）：轉彎安全所需的坡度或洩水坡度。
- 鋼梁平面位置：鋼梁與平面控制線及高程控制線之關係，即鋼梁平面配置。
- 斷面幾何：構材位置及構材間之幾何關係。

了解這些橋梁基本參數的運作，依路工導線定義就能精確放樣完整橋梁構件至大地座標。開發者只需熟悉其中運作規則就能撰寫 API 外掛程式，直接由橋梁設計參數計算橋梁構件座標，並將之拋擲至合適的 BIM 軟體。橋梁工程師便可方便地依既有的格式與邏輯輸入設計參數，將大幅提升 BIM 建模效率與正確性。接著以新北市三鶯大橋改建工程鋼箱型梁為例，其資料輸入操作流程及成果摘述如後。

表 2 為擷取部分道路工程設計參數資料，其可由 Civil 3D 直接引用，若僅有 2D 圖資，則需手動輸入控制點相關數據到設計資料庫，無論何種方式都能建立基本道路工程 Curve 設計資料。

表 3 為擷取部分鋼箱梁設計參數資料以示意 BrIM 橋梁設計資料交換格式。其中每一鋼梁為具名獨立物件，需定義其梁深變化曲線、起迄里程、梁中心曲線、上下翼板寬厚度、腹板厚度、加勁材等相關參數。橋面板部份也類似鋼箱梁，需具名化物件，除基本厚度參數外，還需要定義兩側路緣控制線及底下鋼箱梁物件名稱，以利完整描述斷面。

圖 10 是筆者自行開發的鋼箱梁參數化建模型式執行畫面，採用 C# 語言程式撰寫特色是難度低、效率高、物件導向模組化，可在短期間內快速開發大量複雜的程式，最重要的是有免費開發套件 Visual Studio Express 系列。本程式考慮輸出受體的多樣性，目前僅包含 AutoCAD 與 Tekla 輸出，將來可以視需求加入 Revit、Sketch Up … 等等。為了讓剛接觸的工程師能快速上手，GUI 加入執行階段訊息，可以快速除錯；並能指定輸出構件例如翼板、腹板、橫梁、加勁材等等 … 縮短試誤時間。經實測結果發現，採用 Tekla 當作輸出受體有許多好處，最明顯的是繪製時間只有 AutoCAD 的 10% 不到，

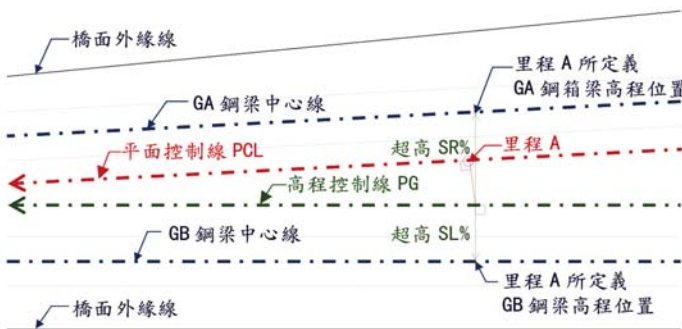


圖 8 平面控制線、高程控制線、超高、鋼梁中心線等關係示意圖

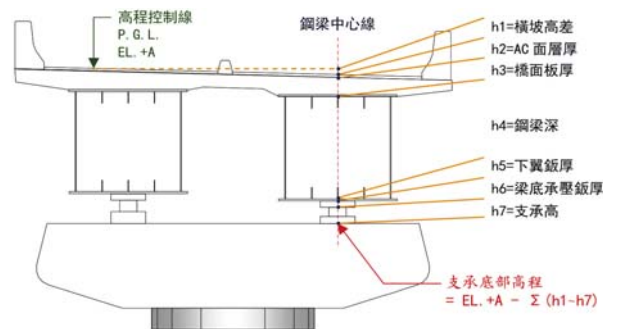


圖 9 鋼箱型梁位置及斷面幾何關係示意圖

表 2 道路工程控制點資料

PCL (平面控制線) 資料							橫坡 (超高) 資料			縱坡 (高程控制線) 資料		
STA	N	E	Type	AZ度	A(+)	R(+)	STA	RS	LS	STA	EL	Slop
0+000.000	2760060.152	285633.348	TT	177.2		OC	STA. 0+000.000	-2%	-2%	STA. 0+030.000	44.312	2.000%
0+010.308	2760049.857	285633.857	TS	177.2	82.61		STA. 0+010.308	-2%	-2%	STA. 0+070.000	45.532	4.100%
0+045.308	2760014.876	285634.540	SC	182.3		195	STA. 0+045.308	-3%	-3%	STA. 0+170.000	49.632	4.100%
0+086.685	2759974.018	285628.514	CS	194.5	-82.61		STA. 0+086.685	-3%	-3%	STA. 0+230.000	50.859	-0.010%

表 3 鋼箱梁橋設計資料

鋼箱梁設計 (鋼梁位置及斷面幾何) 資料													橋面板設計 (斷面幾何) 資料															
名稱	梁曲線	橫板控制線	梁深曲線	起始里程	結束里程	梁與 PCL 偏距	腹板長	腹板厚	上翼板內淨寬	上翼板 Ext.	上翼板板厚	上翼板 Rib 根	上翼板 Rib 厚	上翼板 Rib 寬	名稱	左側胸牆偏距	右側胸牆偏距	胸牆型式	AC 厚度	最小厚度	橫板長度	分割長度	起始里程	結束里程	鋼箱梁由左到右			
Name	PCL	PG	BG	STA0	STA1	Offset	WebL	TW	TT	TExt	TTL	TRibN	TRibT	TRibB	Name	PCLL	OffsetL	PCLR	OffsetR	Type	AC	TT	PG	SecLen	STA0	STA1	Girder	
GA23	距離2	距離2	距離2	307	487	3600	180000	13	1800	120	180000	13	2	13	S11	距離2	-200	距離2	550	TypeA	5	25	距離2	100	307	487	GC23,GA23	
GA23									1800	120																		

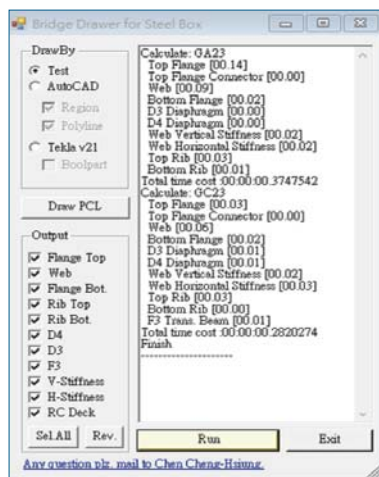


圖 10 鋼箱梁參數化建模程式



圖 11 三鶯大橋 BIM 成果

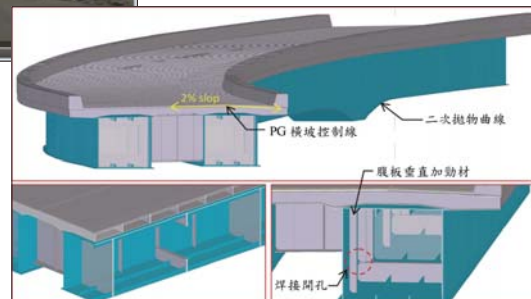


圖 12 鋼箱梁參數化建模剖析圖

鋼板可以快速設定開孔，且可以分別依實際設計結果配置不同材質如 SUS303、GR.36、GR.50 等，最重要的是其可以依板厚或材料性質來做相關數量統計。

本案三鶯大橋改建 BIM 成果如圖 11 所示，圖 12 為匝道 2 第 5 單元，平面路線包含弧線、克羅梭與直線，橋墩處梁深為二次曲線漸變。在參數化建模下，直線或曲線的困難度都一樣，設計者僅需輸入設計參數，不需花大量時間在放樣繪製鋼箱梁 BIM 模型。從圖 12 看的出鋼箱梁完成度高，隔板與加勁材於焊接處皆有精確開槽。圖 12 橋面板仍清楚看見 PG 控制線的橫坡折角，模型任一點皆可拿來施工放樣，甚至加預拱後可用於鋼材切割。

目前尚無成熟的橋梁 BrIM 程式，吾人已發展如下：

1. 直接引用類似 Civil 3D 道路工程曲線。
2. 依據指定規範與分析結果，智慧連動隨從構件。
例如：腹板垂直加勁材、翼板縱向 Rib、隔板、人孔等等。
3. 採通用施工 BIM 模型展開局部加勁材 Shell 分析模型，用於局部應力檢核。
4. 自動展開 2D 圖面，以符合業主驗收需求。

未來發展目標如下：

1. 在 3D 環境中輸入設計參數，並且快速預覽鋼箱梁樣貌。
2. 依據設計參數與路工資料自動產生 Frame 分析模型，並能依分析結果檢核應力後自動回饋調整設計資料，達成設計直覺化目標。
3. 其他橋梁類型。

結語

國內產官學研界也相當重視並積極推動 BIM 發展，公共工程主管機關並擇定各類別公共建設的示範案將資訊模型擴及公共工程。惟橋梁 BrIM 發展比較晚，方向也不一樣，建築的 BIM 經驗需從本質改變為橋梁 BrIM。身為橋梁工程師必需了解橋梁主導的 BrIM 所帶來的衝擊效應，別因誤會而排斥 BIM，錯失參與土木界難得的工業革命。

本文以新北市三鶯大橋改建為例，說明標準鋼箱梁橋 BrIM 參數化建模不但可行還有諸多利基，如高程檢核、施工排程 3D 模擬、景觀融合模擬、發包前鋼材切割評估等。當越來越多的橋梁工程先進們願意加入 BrIM 領航的行列，以實務經驗導向協助標準橋梁設計交換數據模型的發展，將來橋梁智慧化設計便指日可待。BrIM 成熟後，顧問公司自然會採用 3D 智慧橋梁設計，以精簡人力成本、提升設計效率，並獲取可視化及精確化的設計附加效益。

參考文獻

1. Richards, 2008, BIM maturity level.
2. Bartholomew et al., 2015, Bridge Information Modeling (BrIM) Using Open Parametric Objects.
3. 公路橋梁設計規範，交通部，98。
4. 公路路線設計規範，交通部，100。
5. ActiveX Developer's Guide (ActiveX/VBA), help.autodesk.com, 2016.
6. Tekla Open API Reference Manual, Trimble Solutions Corporation, 2017.
7. C# Programming Guide, Visual Studio, 2015.
8. BIM 帶來的變革與政府的前瞻作為，許俊逸、徐景文、林傑、李文欽，103。