

# 建築與科學

## 瑞士蘇黎世聯邦理工學院的數位建築實踐

Architecture and Science

Digital Architecture in the Swiss Federal Institute of Technology Zurich

文／高鼎鈞（瑞士聯邦蘇黎世理工學院建築研究所博士候選人）

/ By Gene T. C. Kao

今日數位建築教育致力於跨領域知識與技術的全面整合，以達成永續節能、高效率建造、人工智慧或是高度自動化等目標。

Today's digital architectural education devotes in multidisciplinary knowledge and techniques for the sustainable purposes of energy saving, high efficient construction, artificial intelligence and high degree of automation.

目前的建築營造是個非常浪費且不甚環保的產業，占了全世界溫室氣體排放量約40%，區域能源消耗的40%，廢料生產的40%，整體能源消耗的40%，而且依照現在全世界人口成長的速度，人類將必須在未來的40年內每個月蓋一個紐約市才足以容納下所有人，所以我們必須積極的正視這個問題，以有效率的方法來設計建築並減少浪費。」ETH Zurich的教授Philippe Block目光如炬地解釋著。在高性能低排放的實驗建築HiLo(High Performance-Low Emissions)裡，Block教授領導研究團隊Block Research Group (BRG)所主導設計的HiLo屋頂，挑戰以精準且有效率的方法去實踐大跨距結構設計，整座薄殼雙曲面屋頂提供了平面無柱空間120平方米，最長結構跨距為12米，而屋頂厚度從結構支撐處12公分至無支撐處薄至僅僅3公分(圖1)。傳統上建造此類水泥曲面建築需要製作大量客製化模板與支撐鷹架以供水泥灌注，但HiLo屋頂的施工方法上使用了精密的鋼纜張力結構覆蓋薄膜後加上水泥噴漿，大量節省傳統建

造所造成非常高的成本與能源消耗。

近年來數位工具逐漸成熟並大量被運用在真實的建築案中，數位建築不再只是侷限於大多數人刻板印象裡誇張的造型設計或是電腦工具的極致展現，抑或是那些蓋不出來的美好憑空想像，今日數位建築教育致力於跨領域知識與技術的全面整合，以達成永續節能、高效率建造、人工智慧或是高度自動化等目標。而「建築」從古至今作為藝術與科學的跨領域學科，建築設計與科技的結合勢必為大勢所趨。

位於歐洲瑞士的蘇黎世聯邦理工學院（德文Eidgenössische Technische Hochschule Zürich，簡稱ETH Zurich）是著名物理學家愛因斯坦的母校。其歷史悠久並擁有世界上頂尖的研究資源，瑞士每年投資了超過百分之三的國內生產毛額在科學研發上，ETH作為瑞士頂尖的學術研究機構其研究經費更不在話下了，其中也

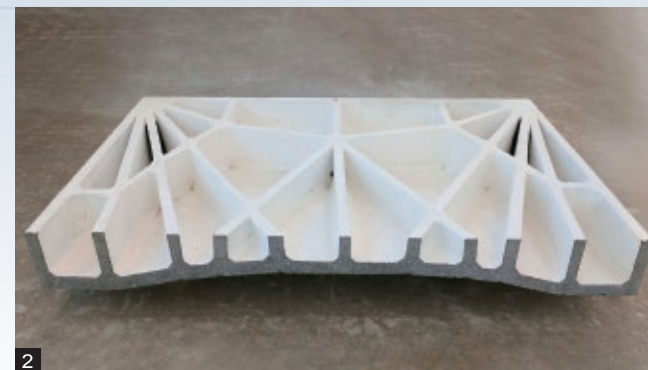


1 HiLo屋頂完工照

© Stefan Liniger



1 有效建造水泥薄膜屋頂所需的鋼纜張力結構 © Juney Lee



2 HiLo拱形樓板結構剖面原照

© BRG



2 HiLo智慧太陽能立面完工照

© Roman Keller



3 機械手臂的電焊Mesh Mould的過程照

© Dezeen magazine



3 研究員協同機械手臂組裝DFAB House木結構過程照

© NCCR Digital Fabrication / Roman Keller

投資了非常多的資源在數位的研發與教學上。ETH建築科技研究所（Institute of Technology in Architecture，簡稱ITA）蘊含著世界頂尖的數位建築技術，並有著相當多元且多面向的發展，在不同教授帶領下發展的研究實驗室分別有：建築與結構（Architecture and Structure，又稱為Block Research Group，簡稱BRG），數位科技（Digital Building Technologies，簡稱DBT），數位製造（Architecture and Digital Fabrication，又稱為GKR），數位構築（Digital Architectonics，又稱為CAAD），遺產保存與建造(Construction Heritage and Preservation)，建築營造(Architecture and Building Process)，建築系統（Architecture and Building Systems，簡稱A/S），結構設計(Structural Design)。此外瑞士為了維持國家競爭力與其在世界上頂尖的創造力，以及基礎科學與高科技研究影響力，瑞士國家競爭力研究中心（National Centre of Competence in Research，簡稱NCCR）挑選出長期對於國家未來有著重要影響力的重點研究項目進行高度培育與支持。自2014年起，其中的一項跨領域學科：數位製造（NCCR Digital Fabrication，簡稱NCCR DFAB）為重點研究計畫之一，常駐於ETH ITA並與建築學系以外多個科系都有著緊密的關係，其中不乏電腦科學、機器人、

材料科學與自動化系統等。

ETH和NCCR除了自身的學術研究之外也與業界緊密合作並成功地建造了許多令人驚豔的案例作品。前面所提及的HiLo為BRG，A/S，DBT與建材營建公司Holcim等多方長期合作下的成果，整個HiLo建築，除了超薄的屋頂結構施作，還有非常多實驗性且傑出的設計，例如A/S所主導設計的智慧太陽能立面，可折裝式的智慧系統被設計在輕巧的結構上，使其可同時被運用在新與舊建築上，除了智慧遮陽的功能，此設計還可以有效的儲存能源以備不時之需。此外，圖2中的HiLo拱形樓地板更是件突破性的設計，在設計上樓板內藏有拱形結構，而拱形上方肋骨形狀的結構更是加強了承載的極限重量，在移除結構上多餘的部分後，使大部分的水泥只有約3公分的厚度，值得一提的是此樓板在承受平常樓地板同樣的重量下竟可大量節省70%以上的材料消耗。今日大城市中的建築大多數為高層建築，超過十層樓以上的建築樓地板就占了約41%的重量，而HiLo拱形樓地板設計大量減少了高層建築自重進而輕量化整體結構重量，所以此特殊設計如果可以大量生產之後將能對於節能減碳有著重大且顯著的貢獻。

除了節能和有效率的建築結構之外，前幾年由NCCR DFAB研究員們共同完成的DFAB House展示了使用機器人建造與3D列印在未來建築的可能性。其中圖3上圖中的Mesh Mould運用機械手臂加上電腦視覺的技術使鋼筋焊接自動化，讓曲面水泥牆施工





4 DFAB House室內完工照，其右側為Mesh Mould牆完成照。

© Roman Keller



4 智慧動態水泥灌注施工過程

© Christian Breittler, DFAB ETH Zurich



5 Armadillo Vault完工照

© Iwan Baan



5 Armadillo Vault施工過程照

© Anna Maragkoudaki

更加精準且省去了水泥灌注模板。圖3下為DFAB House最上層木結構單元空間的模組化自動化施工過程，多支機械手臂的協同作業加速了施工精準度和速度。另外還值得一提的是他們的智慧動態水泥灌注技術所製作出來的柱子與3D列印樓板，特別展現出了施工技法的純粹與複雜幾何的美感(圖4)。

圖5為2016年BRG受邀在威尼斯雙年展設計展出的 Armadillo Vault，整體結構非常震撼由399塊石灰岩塊所組成，石塊與石塊之間沒有鋼筋，水泥漿或任何的結構型連接，設計完全是純粹依靠石塊堆砌所產生的壓力互相支撐（純受壓結構），跨距16米長，而最薄的石塊竟然只有5公分厚，完美的展現了傳統石構造教堂的建築結構語彙。在製造設計上，基於有限的時間，研究團隊使用幾何優化的技術使每塊石塊只有拱形內部的一面為自由曲面，反面為平面，四

周則為直紋曲面，如此一來在石塊切割製造上可以省去翻面校正的大量時間，進而加快製造速度。近年來這些製造的知識在數位技術的普及下，也慢慢的讓建築人能在設計的同時也考慮到一些實務面的限制，這是傳統建築設計過程所被容易忽略的，也因此成為一種特殊的語彙與美感。

BRG在本屆2021威尼斯雙年展與札哈·哈蒂建築事務所數位運算設計部門(Zaha Hadid Architects Computation and Design Group-ZHACODE)合作設計施工展出的步行橋設計Striatius，為世界上第一個無鋼筋預鑄水泥3D列印橋樑(圖6)。與傳統3D列印水平堆積水泥不同，他們與營造團隊合作開發出以機械手臂列印出非平面擠出的技術，而且每個橋樑的水泥單元並無任何乾式或濕式接合，整座橋樑秉持著環保3R的理念：減少浪費、可以輕易的拆裝、運送、重組與重新利用。

圖7中的方案建於墨西哥，BRG與ZHACODE在2018年所完成的另一個合作案例KnitCandela，其概念非常新穎，以布料當結構支撐建造而成，整個方案所需的50平方公尺大小布料支撐全部在ETH運用客製化的工業紡織機生產製作完成且打包成僅僅兩個行李箱的大小，運送至墨西哥的展覽館組裝，布料展開後在其預先織好的口袋中加裝上充氣的氣球，這些口袋在製造上使用不同密度的織法，所以能使用標準化的氣球在充氣的時候產生不同的厚度，最後在布料與氣球縫隙中填上由ETH材料研究所研究員所研發出的特殊快乾水泥噴漿，完成了由溫暖且柔軟的布料與冰冷且堅硬水泥所形成的美麗建築結構。

上述的這些案例倘若缺乏了精準電腦運算幾何與結構或是數位製造的技術，技術突破所成就的特殊建築空間語彙與建築耗材低碳排放等目標便完全無法實現。除了酷炫的外表之外，如何實際實現這些科學技術便是其中的關鍵，例如說如何應付與處理建築所需要的所有資訊，並非只是狹義的建築資訊模型(BIM)或是簡單地使用廣泛建築資訊模型軟體例如Revit即可達成。所以除了建築科技在實際的案例上的展現，ETH各個研究實驗室與NCCR DFAB並不吝於分享他們

的科學研究過程與技術，目前他們積極廣推由電腦程式語言Python所撰寫而成的數位運算框架COMPAS (A computational framework for collaboration and research in Architecture, Engineering, Fabrication, and Construction)著重於不同領域建築資訊之間的執行與交換，是為廣義的BIM。例如HiLo從設計，結構分析至施工就是全部運用COMPAS所實踐的，其結構分析運用著結構找形的技術(Form-Finding)並以超級電腦即時運算水泥的重量和其鋼索需添加的額外張力以達成複雜雙曲幾何所需的施工精準度，並且也有效率的進行資料傳輸至其它的結構工程軟體中進行結構分析，COMPAS並非僅侷限於單件建築軟體的使用且不被軟體所控制，而是著重在核心的數位運算與軟體間資料的方便交換。COMPAS秉持著開源、合作與站在巨人肩膀的理念上，希望建築科學研究與實務可以大量減少重複前人所犯過的錯誤。我們身處21世紀，是科學與科技蓬勃發展的年代，大家應該期許數位科技的普及，身為建築人，我們必須努力持續學習並結合目前快速發展的各種科技，為大眾建造更自動化，空間品質良好，經濟實惠與更為永續的建築。



6 Striatius完工照

© naaro



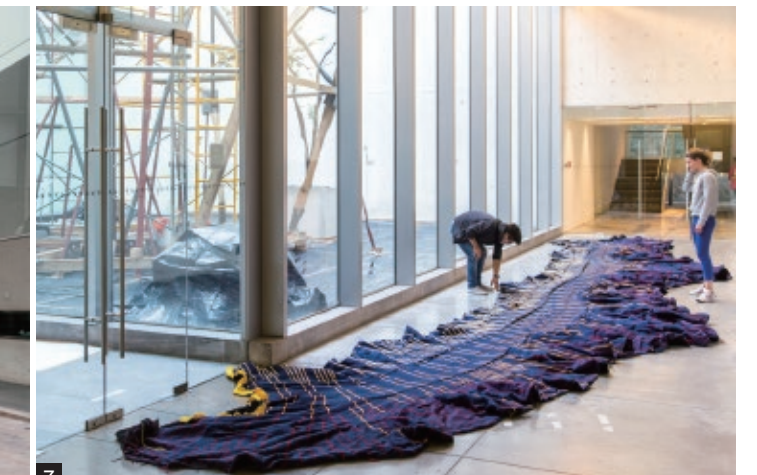
6 Striatius水泥3D列印過程

© in3d



7 KnitCandela完工照

© Juan Pablo Allegre



7 KnitCandela建造所使用的布料支撐結構

© Lex Reiter