

以空間點雲進行鋼筋混凝土版結構之二維擬合

吳天佑, 侯琮欽, 胡宣德
國立成功大學土木工程學系

摘要

近年來由於光學感測、微機電(Microelectromechanical Systems, MEMS)與計算機技術的快速發展, 雷射掃描無論在速度、精度與取樣範圍上皆有長足的進展。具體而言, 以散漫點雲為基礎的雷射掃描儀擁有遠距離、高取樣與高精度的優勢, 適合以大量資料庫建立為基礎的幾何資訊蒐集, 因此本文嘗試探索地面雷射掃描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)於土木工程結構中常見之二維鋼筋混凝土版構件之變形量測精確度。

除監測儀器外, 本研究亦輔以有限元素法與實驗結果比較, 利用有限元素分析軟體ABAQUS, 建立鋼筋混凝土版實尺寸模型進行分析觀察。為使模型中各材料參數設定所得出的結果能夠精確反映試體實際行為, 本研究將實尺寸試驗之鋼筋混凝土版受力行為與ABAQUS有限分析模型結果進行自互校正, 以確保有限元模型之代表性, 進而模擬整體受載過程中鋼筋混凝土版之力-位移關係, 以佐證實驗所得的數據, 也使得數值分析與實驗能夠互相驗證。

關鍵字: 地面雷射掃描、有限元素分析、鋼筋混凝土版、ABAQUS

ABSTRACT

In recent years, because of the rapid development of optical sense, microelectromechanical systems and computer technology, laser scanning technology has significant progress that high speed, high precision and sampling range. In this study, focus on measuring the deformation of two dimensional of structural member by TLS and calculating the precision of TLS measurement.

In addition to use monitoring instruments, the study also uses the finite element method to analysis. Use the finite element software "ABAQUS" to establish the real size model of reinforced concrete slab. To make the results of the analysis model can accurately reflect the actual behavior of the experimental specimen. Let the experimental specimen result and analysis model result mutually regulate. To ensure the representation of the finite element model. Further, investigate the force-displacement behavior of the model under axial compression and compare with true experimental result. Experiment and analysis support each other.

Keywords: Terrestrial Laser Scanner; Finite Element Method; Reinforced Concrete slab; ABAQUS

一、研究動機與目的

在現今的土木工程中, 常因設計與施工的差異、自然環境的不確定性, 或建築物本身的老化問題, 導致近年建築物使用與維護管理不當的事件層出不窮, 進而導致許多社會問題。因此, 國內對建築物定期檢測的

重視應予以提升, 對於檢測既有建築物結構系統與使用方式是否安全, 以及推展設施維護與再用, 並積極落實關注「建築延壽」的課題, 方能符合國家永續發展的目標。由於我們無法使用數學公式或程式模擬來判斷監測物的安全性, 導致我們需要利用儀器蒐

集和程式分析的搭配來進行評估。而從古至今已發展出多項技術來解決建築物健康檢測的問題，且各個技術皆擁有一套的方式來處理建築物健康檢測的問題，但是他們皆存在各種不同的優缺點。這些技術及其應用包括最早起的古典測量或全球定位系統(Kalooop(2009)、Li(2006))，到近幾年發展出的近景攝影測量(Chen(2013)、Gao(2013)、Gou(2013))和地面雷射掃描(Park(2007)、D.Gonzalez(2008)(2008)、Hu(2010)、H.Gonzalez(2012)、Kim(2014))等。

近年來已於土木、水利、農林、交通工程以及環境復育、古蹟保存等測量上逐漸廣泛應用。實際案例如地震後的建築物修繕與加強、古蹟維護與建模、鐵道橋梁及隧道位移監測、海上油井鑽探、石化廠管線設計配置、儲存槽結構完整性、工程選址和大範圍地形地貌變化等分析等，以上皆可以透過現地雷射掃描測量方式獲得目標物的三維立體空間的點雲資訊。由各應用領域可以得知，雷射掃描於結構尺寸(> 1m)的監測任務中已能夠提供相當精細(~mm)的點雲資料擷取以供後續分析。因此本文嘗試探索地面雷射掃描(Terrestrial Laser Scanning, TLS)於土木工程結構中常見之二維鋼筋混凝土版構件之變形量測精確度。本文以鋼筋混凝土版構件為研究主題其主要原因有二：其一，點雲散佈於二維幾何構件能得到比一維更均勻的資料以供分析，並精確反映微小變形與大變形的差異；其二，鋼筋混凝土版之整體變形與平整度較難以傳統單點式檢測儀器得知，其(於地震後之)受損情況亦同，本文嘗試探索 TLS 於版構件全域變形與量化評估之可行性。

二、研究方法

本研究先利用有限元素法寫入 ABAQUS 套裝軟體內做混凝土版結構二維變形之數值分析與模擬來對實驗之成果做比較，研究重點在於地面雷射掃描對於混凝土樓版結構的受力二維變形量測之精確度，依現今台灣「混凝土結構設計規範」來自行設計三組不同厚度與不同配筋量的單向版，經由全吉土木包工業的幫助製成，並對試體保持養護五十八天後，透過成功大學土木工程學系結構材料試驗室的萬能試壓機對試體進行三點抗彎試驗，並於實驗時在

試體底部安裝線性可變差動變壓器(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)與地面雷射掃描的點雲分析結果進行比較，對於版結構而言，雖然預期載重並不大，實驗時仍於試體中央施載點配置尺寸為 30cmX30cm 之承壓塊，以避免應力集中產生局部破壞。在施加载重或位移達到預設值時便停止力量的加載，使用地面雷射掃面對試體進行掃描，以此循環直至試體承載能力達到極限為止，經掃描後所獲得的點雲數據，利用最小二乘法(Least Mean Square, LMS)回歸擬合曲面，將擬合之二維曲面撓度變形與 LVDT 所量測到的版之撓度變形，並與 ABAQUS 模擬之中點位移變化做誤差比較，以實驗數據判斷地面雷射掃描的量測精確度。

三、試體材料與尺寸

目前本國的建築物多屬於鋼筋混凝土構造，故實驗試體的材料選用鋼筋混凝土，而地面雷射掃描對試體進行散亂點雲蒐集時，會受到萬能試壓機的承壓頭遮擋，進而影響到點雲的擬合，所以為了增加試體點雲數量使擬合度上升，故選擇大尺寸試體。試體數量為三組鋼筋混凝土單向版，尺寸與鋼筋配置細節如表 3.1 所示。

實驗試體製作由全吉土木包工業協助，以達試體快速製作並提高試驗效率，避免造成施工流程的錯誤和試體品質的降低。

試體材料所使用的材料性質分別為混凝土強度為 235，坍度=15cm，粒徑=19cm；主筋斷面尺寸#4(D13)強度為 2800 的鋼筋；而溫度鋼筋斷面尺寸#3(D10)強度亦為 2800 的鋼筋。

四、材料參數

4.1 鋼筋材料

鋼筋在現今的土木結構，是一種廣泛使用不可或缺的材料，一般來說鋼筋混凝土中的鋼筋通常只受到拉或壓的行為影響，此可視為一維的問題去探討，因此不必討論多軸應力的複雜組合關係。而圖 4.1 為典型的鋼筋應力應變曲線，由圖可以簡單的判讀出彈性極限、降伏點、鋼筋強度、延展性和應變硬化等材料性質，因整段過程應力應變呈現非線性的關係。為了簡化分析，將鋼筋單

軸受拉的應力應變曲線以雙線性理想化模擬，如圖 4.2 所示。

4.2 混凝土材料

混凝土的材料性質會因不同的混凝土配比而有所改變，所以需要對混凝土做單軸抗壓試驗(Uniaxial Compression Test)，可以得到混凝土之極限載重與彈性係數之值，類似如圖 4.3 所示之應力應變關係圖，由圖 4.3 中可以判斷約最大抗壓強度百分之三十的範圍之內，混凝土保持為線彈性行為(Linear-Elastic Behavior)，在超過了彈性極限值(Elastic Limit)後，應力應變曲線曲率於 0.75~0.9 的混凝土強度間逐漸地開始發生彎曲，緊接著會有明顯的彎曲至頂點極限強度，過了頂點後，應力應變曲線會逐漸下降直到混凝土破壞，在此時應變約落在 0.002 和 0.003 之間。

經由養護 28 天後的混凝土圓柱試體進行單軸抗壓試驗後，平均出來的混凝土最大抗壓強度為 235，但是試體實驗時間與圓柱試體試驗時間相差一個月，導致混凝土強度有向上增長的可能，所以在鋼筋混凝土版實驗當天利用硬度錘做簡單的混凝土強度測試，經統計後所得到試體一和三的混凝土強度為 247，而由於試體二有蜂窩現象的產生，試體二混凝土強度不升反降，經硬度垂的測試後，試體二的混凝土強度為 219。

在分析過程中，混凝土在進入塑性階段時，吾使用 Saenz 於 1964 年所建議使用的應力應變關係式，此也是目前廣泛被應用在模擬混凝土塑性階段的應力應變曲線，示意圖如圖 4.4 所示

五、模型建立

5.1 實驗試體的簡述

本研究所製做的鋼筋混凝土版結構，因研究重點在於地面雷射掃描對於混凝土樓版結構的受力二維變形量測之精確度，吾依現今台灣「混凝土結構設計規範」來自行設計三組不同厚度與不同配筋量的單向版。因傳統殼元素是使用殼的中面去描述，很難處理雙面接觸的問題，實體殼元素利用實體元素對混凝土建模，可以較容易處理雙面接觸的問題，在求解時，實體殼元素採用殼元素公式求解，並且能有效的提升計算效率，實驗試體中的混凝土部分採用三維實體

殼元素 SC8R(3D Continuum Shell Element)，所以 ABAQUS 分析模型中混凝土材料之元素均採用三維實體殼元素 SC8R(3D Continuum Shell Element)，每個元素具有八個節點降階積分，並且具有三個平移自由度。

而混凝土中的鋼筋尺寸主要使用的是 ASTM #3 和 ASTM #4，由於混凝土中的鋼筋只受到拉或壓的行為影響，可看成一維行為，所以主筋和溫度鋼筋採用線性桁架元素 T3D2(3D Truss Elements)，每個元素有兩個節點，並有 x、y、z 的三個方向自由度，而無轉角之自由度，並在設定時將斷面積加入。

5.2 邊界條件

由於鋼筋混凝土版模型內部混凝土與鋼筋假設緊密連結，使用 ABAQUS 內的 *Embedded 指令，而分析模型採用原試體之二分之一或四分之一分析之，分別對 x 和 y 軸設定對稱，這將有效的減少模型分析的時間。並以中心點為中心畫出邊長三十公分正方形，在正方形上設個 z 方向向下之均佈壓力，邊界條件設定在混凝土試體底面左右兩邊由外往內十公分的距離來制 y 和 z 軸之位移，而 x 軸之位移和 x、y、z 之轉角均不束制，使模擬與實驗相同。

5.3 收斂性分析

影響有限元素分析結果的原因有許多，如：元素種類、邊界條件、網格大小和材料參數等因素，所以在建立模型前應對分析的問題有充足的解釋。而以網格劃分的差別去探討，網格越小，精度會越高，但分析時間卻越久，所以為了保持分析結果的精確性，透過收斂性分析，尋找出最適合的網格大小和數量。

本研究的收斂性分析使用試體一模型之材料參數和邊界條件，對混凝土元素大小共劃分五種，分別為：元素大小 3.75cm，共 7520 個元素、元素大小 3.85cm，共 7360 個元素、元素大小 4 cm，共 6840 個元素、元素大小 4.25 cm，共 5880 個元素和元素大小 4.5 cm，共 5148 個元素，分析時間約略 60~90 分鐘。分析後輸出中點的 z 方向力與位移，繪製成圖 5.1，其中可以看到網格越小，其結果與實驗越相似，可由圖 5.1 發現元素大小在 4cm 後，其力與位移曲線與實驗結果相似，因此將選用 4cm 元素大小的

模型來操作後續的分析。

六、分析結果

從各個紀錄點中所得到的 TLS 點雲數據，經由曲面擬合步驟做點雲數據的後處理，並且將其他八個加載後的曲面對未加載的曲面做 z 值的相減得到各個加載後的變形量，經整理後畫出 TLS 中點的載重與位移圖。LVDT 經由蒐集到的電壓數據轉換為變位數據後，畫出於 LVDT 中點的載重與位移圖。依據材料性質、邊界條件和元素種類建立的材料模型，對模型進行有限元素模擬分析，並繪出於 ABAQUS 中點的載重與位移圖。統合後各分析之中點的力與位移關係圖，如圖 6.1-6.3 所示

實驗結果顯示試體一的極限強度為 8535.86 kgf，而圖 6.1 是試體一 ABAQUS 的極限載重結果為 7645.02 kgf，試體一分析與實驗的相對誤差約為 10.44%。繼續觀察與 LVDT 的誤差關係，在彈性區域內與 LVDT 的絕對誤差皆保持在 1cm 以內，但是進入到塑性區域後絕對誤差卻會大量增加，相差超過 2cm 以上。

實驗結果顯示試體二的極限強度為 4039.00 kgf，而圖 6.2 是試體二於 ABAQUS 的極限載重結果為 4242.56 kgf，試體二分析與實驗的相對誤差約為 5.04%，並且 ABAQUS 模擬曲線趨勢與實驗曲線趨勢吻合。繼續觀察與 LVDT 的誤差關係，在彈性區域內與 LVDT 的絕對誤差皆保持在 0.5cm 以內，但是進入到塑性區域後絕對誤差卻會大量增加，產生最大誤差 3cm。

ABAQUS 對試體三數值模擬的誤差極大，從圖 6.3 看出模擬混凝土版極限強度為 5100.33 kgf 遠大於實驗之混凝土版的極限強度 1958.89kgf，其相對誤差為 160.36%，產生非常大的誤差，主要因模型所建立的鋼筋位置以設計的有效深度為準，而實驗試體的有效深度與設計相差過大，導致無法準確的模擬試體三的力學行為，故試體三模擬載重與位移曲線趨勢和極限強度皆不適當。

七、結論

利用 ABAQUS 有限元素軟體建立的模型分析後所得到的結果，與實驗試體結果進行誤差分析可以明顯地看到，在彈性階段的絕對誤差皆能控制在比較理想的階段，但

是進入塑性階段後絕對誤差卻會大量增加，無法滿足實驗的精度要求。

八、參考文獻

- [1] Chen, Jian Min, et al. "Photogrammetry Technology of Three Dimensional Coordinate in the Construction of Curved Surface." *Advanced Materials Research*. Vol. 694. Trans Tech Publications, 2013.
- [2] Diego González-Aguilera, Javier Gómez-Lahoz, Ángel Muñoz-Nieto and Jesús Herrero-Pascual, "Monitoring the health of an emblematic monument from terrestrial laser scanner," *Nondestructive Testing and Evaluation*, Vol. 23, p 301-315, 2008.
- [3] Diego González Aguilera, Javier Gómez-Lahoz and José Sánchez, "A New Approach for Structural Monitoring of Large Dams with a Three-Dimensional Laser Scanner," *Sensors*, 8, 5866-5883, 2008.
- [4] González- Jorge H, "Monitoring biological crusts in civil engineering structures using intensity data from terrestrial laser scanners," *Constr*; 31, 119-128, 2012.
- [5] H. S. Park & H. M. Lee, "A New Approach for Health Monitoring of Structures: Terrestrial Laser Scanning," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 22, 19-30, 2007.
- [6] Hui Hu, Tomas M. Fernandez-Steeger, Mei Dong, Hieu Trung Nguyen, Rafiq Azzam, "3D Modeling Using LiDAR Data and its Geological and Geotechnical Applications," *International Conference on Geoinformatics*, vol.18, 2010
- [7] Li, Xiaojing, et al. "The Complementary Characteristics of GPS and Accelerometer in Monitoring Structural Deformation."
- [8] Mingzhi Chen, "The Application and Comparison of Digital Ground Photogrammetry Technology for Bridge Safety Monitoring," *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 170-173, pp 2979-2986, 2012.

- [9] Min-Koo Kim , Hoon Sohn , Chih-Chen Chang , “Automated dimensional quality assessment of precast concrete panels using terrestrial laser scanning , Autom.” *Constr.* , 45 , 163–177,2014.
- [10] Kaloop, Mosbeh R., and Hui Li. "Monitoring of bridge deformation using GPS technique." *KSCE Journal of Civil Engineering* 13.6 (2009): 423-431.
- [11] ZhiYang Gou,Qiong Zheng,Changru Liu,Yajun Wu, Meng Wang, “Deformation monitoring method based on photogrammetry technology,” *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 475-476, pp 111-115,2013.

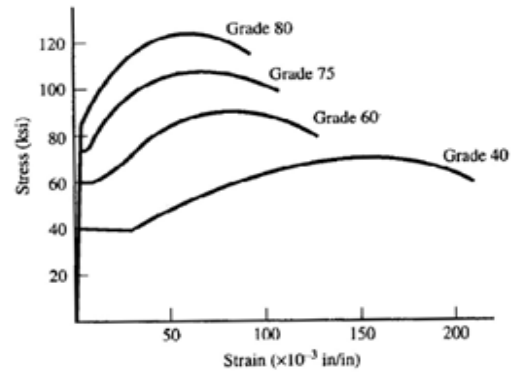


圖 4.1 典型鋼筋應力應變曲線(Meyer1996)

九、表格

表 3.1 試體尺寸

試體	版長 (cm)	版寬 (cm)	版深 (cm)	主筋間距 (cm)	溫度筋間距 (cm)
試體一	350.5	149.5	16.5	10	25
試體二	350	149.4	13.9	15	25
試體三	349.4	149.6	10.5	10	25

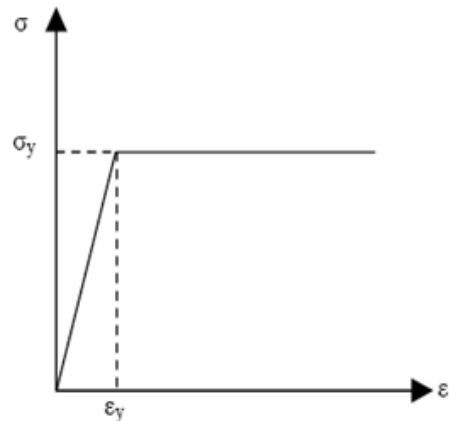


圖 4.2 理想化鋼筋應力應變曲線

表 4.1 材料參數

Steel	
Young's Modulus E	2.04E+6
Yield Strength f	2800
Poisson's Ratio v	0.3
Concrete	
Young's Modulus E	$15000 \sqrt{f'_c}$
Concrete Strength f	219 or 247
Strain	0.3
Poisson's Ratio v	0.2

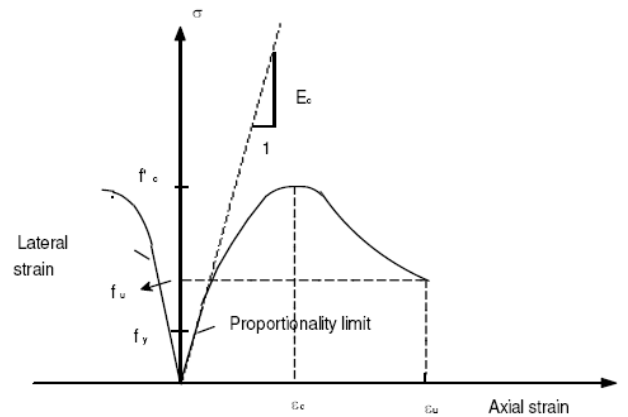


圖 4.3 混凝土受單軸壓力試驗之應力應變圖

十、圖片

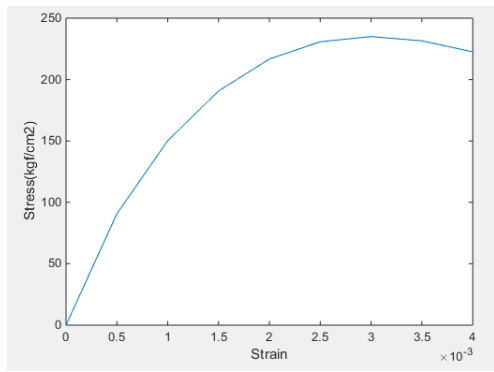


圖 4.4 Saenz 混凝土應力應變曲線模擬圖

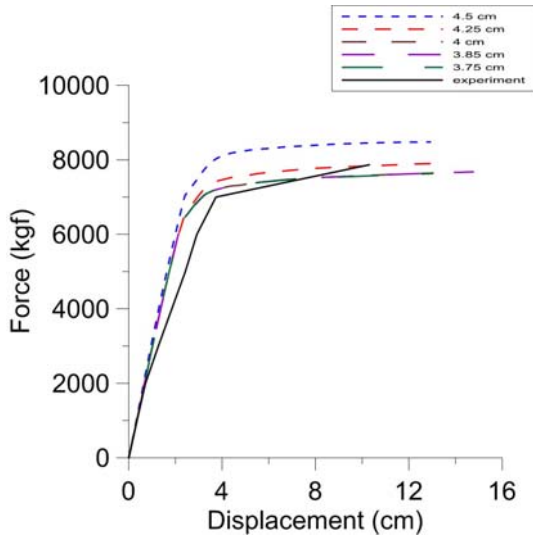


圖 5.1 不同網格大小之力與位移圖

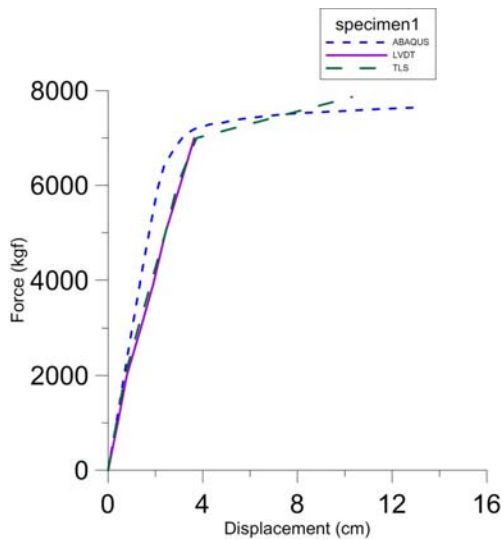


圖 6.1 試體一力與位移關係圖

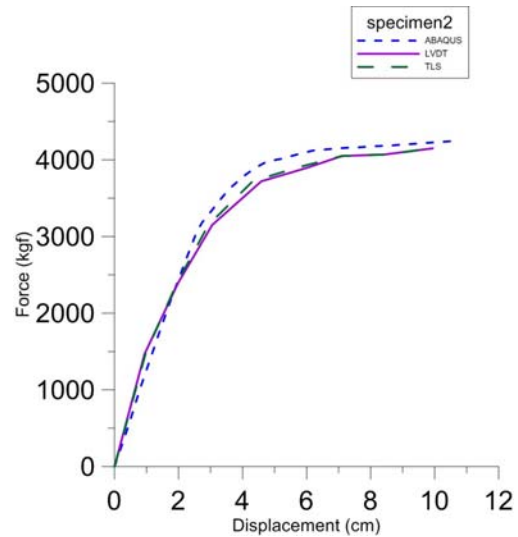


圖 6.2 試體二力與位移關係圖

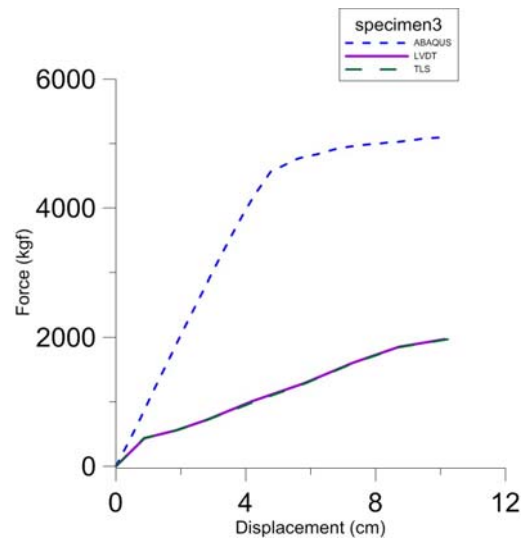


圖 6.3 試體三力與位移關係圖