

Biomechanical Analysis and Design Optimization of Prostheses for All-on-4 Treatments

黃煜峰 Yu-Feng Huang, 陳永崇 Yung-Chung Chen, 林啟倫 Chi-Lun Lin

國立成功大學機械系(所) Dept. of Mechanical Engineering, National Cheng-Kung University

摘要

All-on-4 concept 為目前使用人工植體進行全口重建較新的方法，能以較少的植體及手術次數與較低的費用，來達成製作全口固定式贖復物(fixed dental prosthesis)以重建咬合功能。為避免人工植體在接受咬合力後，齒槽骨或贖復物材料遭到破壞，植體的擺放位置及角度勢必要有通盤的分析。本計畫目的在於，導入生物力學模擬與研究，輔以自動化建模分析，找出最佳的植體擺放位置及角度，並應用於臨床。

欲找出植體最佳的位置配置，首先分別把四根植體所擺放的位置與角度參數化，藉由 python 程式的編寫配合 Abaqus Standard 力學分析，將建模和分析步驟自動化完成，並求得結構在受到咬合力後齒槽骨的應力分佈。以此自動化流程，經過最佳化演算法的計算，決定出一個最適合的植體擺放位置。

未來希望能將此力學模擬的分析的流程應用於臨床的治療流程，配合最佳化方法，於術前規劃時找出最適合病患的植體擺放位置，讓臨床醫師採用 All-on-4 concept 來進行全口重建有一科學性依據。

關鍵字：牙科植體、All-on-4、全口重建、有限元素法

ABSTRACT

The concept of all-on-4 treatment is a new option of the full-arch rehabilitation for edentulous patients. The procedure is less painful and more affordable as it uses only four dental implants and requires less procedure time to complete a fixed dental prosthesis and recover patient's occlusal function. In order to prevent the fracture of the alveolar bone and prosthesis material under the occlusal load, the position and orientation for placing the implants require a comprehensive mechanical analysis. This project proposes an integrated numerical approach combined with finite element analysis (FEA) and statistical analysis to investigate the optimal configuration of the dental implants for the all-on-4 treatment and provide clinical suggestions.

First, we identify the design parameters that define the position and the orientation of the dental implant's placement. Then, automatic modeling and finite elements analysis is constructed by applying python programming and Abaqus Standard to get the stress distribution. Applying optimal method with the framework, it is possible to decide the configuration that perform the best mechanical result.

The findings of this research can help improve the current procedure. With the advance of the computing power, the approach we proposed can become an evaluation process to provide important knowledge for the surgical planning.

Keywords: dental implant, All-on-4, concept, full-arch rehabilitation, finite element method

一、緒論

臨床上常使用的牙科贖復物，大致可分為活動式贖復物與固定式贖復物，若骨質狀況許可，通常會使用人工植體合併製作固定式贖復物來進行全口重建。而針對單顎全口無牙患者，通常需植入六根或更多的人工

植體，並在其上設計固定式贖復物。對於全口無牙患者來說，此方法所需的療程過長與高金錢花費是其主要缺點。因此，近年來，一個全新的人工植體治療概念—All-on-4 被提出且應用於單顎或雙顎全口無牙患者的治療。

All-on-4 concept 其主要設計為，將植

體數量減少到四根且同時植入，分別為近心端的兩根垂直植體，和兩根遠心端的斜向植體。斜向植體的設計，原本是為了解開重要解剖構造，同時此方法也可縮短贖復物在遠心端的懸臂(Cantilever)，也因此可使用較少的植體來支撐整個贖復物與承受咬合力。

然而，在 All-on-4 此種全口重建方法，會在遠心端傾斜植體周圍會產生較大的應力[3]。因此，勢必需要加入力學分析來計算最佳的植體擺放角度與位置，以避免接受咬合力後，周圍骨質因過度受力造成骨吸收。本研究將以有限元素法為力學分析方法，計算贖復物受力後齒槽骨的應力分佈，並以最小化最大應力為優化目標，找出參數化後的最佳植體擺放位置。希望能在導入力學計算後，讓 All-on-4 在力學行為上變得更加可以預測[4]且穩定。

二、文獻回顧

針對全口無牙患者，Paulo Malo 提出的 All-on-4 concept，使用四根植體支撐贖復物，這四根植體包括了兩根近心端植體與兩根遠心端植體[8]。其中，近心端的植體較短且垂直於咬合面植入，遠心端的植體較長且向前傾斜，其角度範圍在 30°到 45°間。此方法可避免因解剖構造干擾而造成無法植入植體的情況，而傾斜後也可以縮短贖復物懸臂的長度。因為可省去補骨的過程，此方法亦可使用於立即負載型的植體上[5]，使患者可以於術後立即裝戴假牙而不會有美觀上的困擾。

在生物力學上對於 All-on-4 的相關研究，Guilherme Carvalho Silva 等人[1]運用了簡化後的下顎骨模型配合有限元素方法，比較 All-on-4 與 All-on-6 的應力分佈情形。其結果顯示，兩者的應力分佈模式相當接近，並指出此兩種方法皆可藉由減少懸臂長度來降低最大應力值。

而 Joke Duyck 等人的研究[6]，比較三到六根不同植體數量的全口重建方法。在受試者的贖復物受到咬合力後，量測植體之受力大小。使用愈少的植體支撐贖復物，遠心端植體受到的力愈大。Cláudia Lopes Brilhante Bhering 等人藉由有限元素法比較出[7]，All-on-4 在受力後有較大的最大壓應力，且應力皆未超過骨質最大應力上限。

在 Giovanni Fazi 等人的研究[8]，更進

一步利用有限元素法比較植體的傾斜角度與與長度，對於影響最大應力是否有任何匹配關係。比較了數個臨床上常用的植體長度與角度，且做出了結論，最適合的角度與長度能有效降低最大應力。

All-on-4 concept 在療程時間的大幅縮減，使其技術在臨床上具有可行價值。而由上述研究顯示藉由調整植體的擺放位置、角度...等，能有效的減少結構的最大應力[9]，因此若該結構有更好的生物力學分析與研究，便有機會使該項技術擁有更高的可行性。

三、材料與方法

3.1 有限元素模型

在本研究中，採用幾何與簡化後的下顎骨如圖 1，其皮質骨與疏鬆骨的楊氏模數分別為 13.7GPa 和 1.37GPa。植體與支台齒幾何外型如圖 2，所使用的材料為鈦金屬，楊氏模數為 110GPa，上述所有材料蒲松比皆為 0.3。

邊界條件之設定為完全拘束下顎骨兩端處所有自由度之位移。在植體與骨質之接觸介面上，假設已經過完整的骨整合(osseointegration)過程，因此將兩者的接觸設定為無摩擦，而贖復物與植體頂端的基台(abutment)也設定為完全結合。

模型中的負載，為作用在贖復物支架上垂直向下的平均附載，其大小為 150N，目的為模擬咬合過程所受到的外力。

欲針對擺放角度及位置進行參數最佳化。因此，將欲擺放植體的位置設置參考點，其擺放方式可參考圖 3。此外，不同角度的植體擺放方式，以植體底端對齊垂直於咬何面的基準線，懸臂量長度定義為之台齒與支架接觸與與支架末端的距離，如圖 4。

3.2 自動化建模分析

將幾何簡化後的下顎骨與配合該下顎骨的贖復物之 3D 數位模型匯入有限元素分析軟體(ABAQUS 6.14)，配合程式語言 Python 撰寫腳本，達到自動產生所需的植體幾何設計模型，配置到對應的顎骨位置，接著對顎骨進行除料(布林運算)並完成接觸設定。

本次研究主要改變模型中遠心端的兩個植體角度，觀察其最大應力變化的趨勢，

遠心端植體角度從 10°到 45°，每間隔 5°進行一次有限元素分析，並觀察植體周圍下顎骨的最大 von Mises 應力值。

四、結果與討論

比較了不同遠心端植體角度對骨質最大應力的影響，得到的結果如圖 5，可發現，遠心端植體周圍的應力值較近心端植體周圍的應力值大，其角度與應力值的變化趨勢也較明顯，由此可知，不同遠心端植體角度，主要影響的區域為遠心端植體周圍，因此，此區域為我們主要關注的區域。

觀察遠心端植體，最小的應力值出現在最大的植體角度，其應力值為 31.3148MPa。可知，All-on-4 中傾斜植體的設計，除了能避免破壞到下顎骨中重要的解剖構造，如：神經束，也能因此降低結構在受到咬合力後，下顎骨承受的最大應力。除此之外，可由懸臂長度(懸臂長度為植體與支架連接觸到支架末端之距離，如圖 4)與最大應力值的關係圖 6 得知，愈小的懸臂長度，應力值也愈小，因此懸臂長度可改變整個力學結構的傳力機制。臨床上，All-on-4 concept 在現有植體傾斜角度(18°、30°、45°)中，經過本研究的模擬趨勢線顯示，45°對於骨質產生的應力值最低，若是在不考慮其他生物性影響的情況下，45°植體可為優先考慮使用的遠心端植體。

由植體角度 45°的下顎骨的應力分佈圖 7、圖 8 可知，最大應力會出現在遠心端植體周圍，且皮質骨的最大應力會比疏鬆骨大(皮質骨最大應力：26.37MPa、疏鬆骨最大應力：12.21MPa)。此結果顯示，在皮質骨表面為高應力集中區，因此為較易發生骨吸收的區域，與臨床結果相符。因此，在臨床上採用 All-on-4 concept 時，以力學觀點來看，患者皮質骨的情況需要被優先考慮。

五、結論與未來展望

本研究藉由不同的遠心端植體角度，觀察骨質在最大 von Mises 應力的變化，得到以下三點結論：(1)骨質最大應力會出現在遠心端植體周圍，因此為我們優先關注的地方；(2)此結構懸臂長度會直接影響骨質應力的分佈與最大值。愈短的懸臂長度，在下顎骨的應力極值也愈小；(3)遠心端植體傾斜角度 45°對骨質周圍產生的應力最小。

未來希望使用此自動化建模分析程式

架構，應用在真實下顎骨幾何形狀的模型上，並考慮更多的植體設計參數，藉此針對臨床上特殊全口缺牙情形，進行術前規劃，讓手術在導入力學原理後，使得 All-on-4 concept 的力學行為更加可預測。

五、參考文獻

- [1] Silva, G.C., et al., *Stress Patterns on Implants in Prostheses Supported by Four or Six Implants: A Three-Dimensional Finite Element Analysis*. International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, 2010. **25**(2): p. 239-246.
- [2] Bonnet, A.S., M. Postaire, and P. Lipinski, *Biomechanical study of mandible bone supporting a four-implant retained bridge Finite element analysis of the influence of bone anisotropy and foodstuff position*. Medical Engineering & Physics, 2009. **31**(7): p. 806-815
- [3] Kim, K.S., et al., *Biomechanical Comparison of Axial and Tilted Implants for Mandibular Full-Arch Fixed Prostheses*. International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, 2011. **26**(5): p. 976-984.
- [4] 4 Maio, P., M. de Araujo Nobre, and A. Lopes, *The use of computer-guided flapless implant surgery and four implants placed in immediate function to support a fixed denture: Preliminary results after a mean follow-up period of thirteen months*. Journal of Prosthetic Dentistry, 2007. **97**(6): p. S26-S34
- [5] Malo, P., et al., *A pilot study of complete edentulous rehabilitation with immediate function using a new implant design: Case series*. Clinical Implant Dentistry and Related Research, 2006. **8**(4): p. 223-232.
- [6] Duyck, J., et al., *Magnitude and distribution of occlusal forces on oral implants supporting fixed prostheses: an in vivo study*. Clinical Oral Implants Research, 2000. **11**(5): p. 463-475
- [7] Bhering, C.L.B., et al., *Comparison between all-on-four and all-on-six treatment concepts and framework material on stress distribution in atrophic maxilla: A prototyping guided 3D-FEA study*. Materials Science & Engineering C-Materials for Biological Applications, 2016. **69**: p. 715-725.
- [8] Fazi, G., et al., *Three-Dimensional Finite Element Analysis of Different Implant Configurations for a Mandibular Fixed Prosthesis*. International Journal of Oral & Maxillofacial Implants, 2011. **26**(4): p. 752-759.
- [9] Re, J.P., et al., *Optimal placement of the two anterior implants for the mandibular All-on-4 concept*. Journal of Prosthetic Dentistry, 2015. **114**(1): p. 17-21.

六、圖片



圖 1：下顎骨簡化模型，分為外層的皮質骨與內層的疏鬆骨

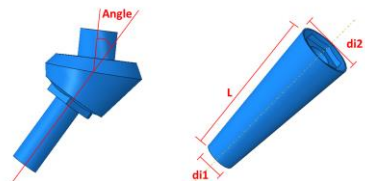


圖 2：植體與支台齒幾何外型，本研究使用的尺寸為 L：10 mm、di1：2 mm、di2：3.7 mm、angle：10°~45°

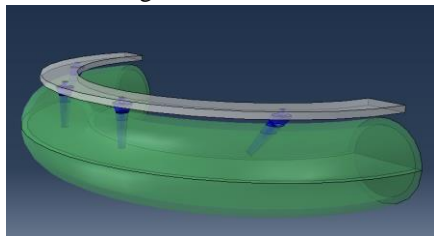


圖 3：植體支架與下顎骨的配置圖

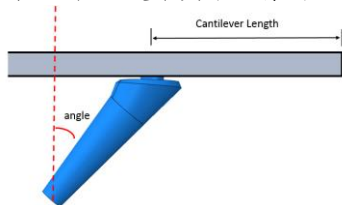


圖 4：植體傾斜角度與位置定義示意圖

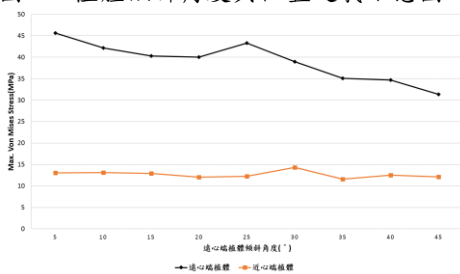


圖 5：植體周圍應力值與遠心端植體角度關係圖

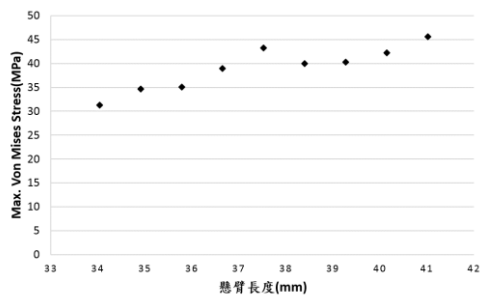


圖 6：植體周圍應力值與懸臂長度關係圖



圖 7：皮質骨質應力分佈圖

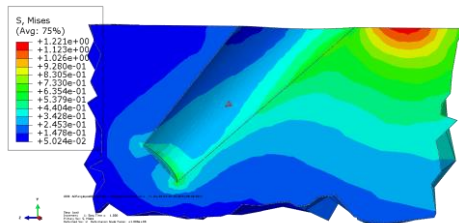


圖 8 疏鬆骨骨質應力分佈圖