

不同固定位置之半正弦波產生器於衝擊試驗之探討

王栢村¹、陳郁伶²、李昆達³

¹國立屏東科技大學機械工程學系 教授

²國立屏東科技大學機械工程學系 研究生

³金頓科技股份有限公司 研發處處長

Tel: (08)7703202 ext. 7017, Email: wangbt@mail.npust.edu.tw

摘要

衝擊試驗中最廣泛之測試規範為半正弦波，一般將衝擊平台（簡稱平台）升於某高度以自由落體方式撞擊衝擊座或稱半正弦波產生器，使得平台可形成半正弦波之加速度的波形。半正弦波產生器可獨立放置於基座，由平台落下撞擊，也有新形式之設計，將半正弦波產生器安置於平台下方，在落下衝擊時，產生規範要求之半正弦波響應。本文以有限元素分析軟體，針對兩種半正弦波產生器不同固定位置之衝擊試驗進行對應之模擬分析。首先以三維立方體元素建構平台與半正弦波產生器有限元素模型，設定衝擊分析選項為面對面之自動接觸形式，並模擬受重力作用之自由落體，以求頂面之加速度波形，以及平台與衝擊座應力等，以比較兩種衝擊座固定方式之差異，並引用 Goodman 圖探討衝擊平台之疲勞強度，以作為爾後平台之設計變更參考依據。本文建立了衝擊試驗對應之碰撞模擬方法，藉以了解兩種衝擊座固定方式之差異，未來可再進一步探討如衝擊座尺寸選用及平台含待測物之影響。

關鍵字：衝擊試驗，衝擊平台，半正弦波產生器，衝擊模擬，有限元素分析，疲勞強度

1. 前言

由於現今社會的科技高速發展，技術不斷的創新，各種產品的結構組成日趨精細複雜，一個系統需要無數個零件所組成，但是系統依使用者之環境不同使得系統不能完全在系統設計時期的環境設定條件下運作。在不同的環境下造成零件的損毀，可能會導致系統的功能發揮不完全，或是造成整個系統的功能癱瘓而造成無法預測的結果。所以無論任何產品都需要可以經得起各種的環境的試驗，像是振動、衝擊、落下、溫濕度、冷熱衝擊、鹽霧等試驗，並要確認產品在正式生產使用後可以經安全、可靠的讓客戶使用，因此必須在產品研發階段將可靠度設計在其中，以確保產品的品質。假使能利用電腦軟體模擬分析產品受振動、衝擊與掉落之響應，可使設計者於開發初期預估產品品質性能與發掘及改善問題，如此可減少實驗次數及縮短開發時間與成本，增加產品之競爭

力。

林[1]隨著產品不斷的推陳出新，而使用者對產品品質的要求也逐漸升高，因此在產品的量產前，廠商會對產品執行環境應力測試以確保產品在運送和使用中的可靠度，環境應力試驗主要分成環境振動試驗、衝擊試驗、落下試驗三大部分。許和廖[2]指出執行環境測試的目的是為了要瞭解產品對於環境外在所激發出的影響，並在設計的階段進行改善，其中會遭受到的環境因子有振動、衝擊和落下效應等。楊[3]說明以生產製造商的觀點來探討電機產品執行可靠度測試內容，其中有振動測試(vibration test)、衝擊測試(shock test)、落下測試(drop test)，執行可靠度之目的在於考驗電機產品品質，確保電機產品可以在嚴苛的使用環境下之運作能力。

在衝擊及落下試驗方面，主要以衝擊與落下試驗機對結構進行測試，也運用市面上有限元素之動態分析軟體模擬衝擊情況，並與實際實驗比較兩者之差異。由有限元素分析軟體搭配實驗動態分析模擬分析環境應力試驗之應用，能在產品的設計與品質提升的過程中，大大減少研發過程所需的時間與成本，並能提早預知產品的品質，也因此隨著硬體設備的提升與軟體的輔助，使得利用電腦輔助分析成為目前分析方法的主流。

林[4]說明對於電子連接器與線纜組的環境試驗中包括了衝擊測試，其目的是要瞭解連接器的脆性及其結構強度。JEDEC[5]衝擊試驗規範內說明半導體零組件應受過衝擊測試，並在衝擊試驗後執行外觀及功能檢視以確保半導體零件之品質。楊等人[6]使用 JEDEC 衝擊測試規範對 PCB 板進行衝擊測試發現在封裝體的地方最容易產生失效，原因為中心位置為彎曲變形發生最劇烈的位置。美國軍方規範 MIL-STD-883E[7]中指出執行衝擊試驗的設備需要有提供 500~3000g 的半正弦波波形，其衝擊時間 0.1~1ms 間，且允許誤差需在規範中的 20% 以內，且需承受正負軸向，每軸向 5 次之衝擊。

美國軍方 MIL-STD-810F [8] 514.6 節衝擊規範說明，衝擊試驗之目的在於提供產品在結構和功能使用上的信心度，且產品可以承受在運送、使用、搬運環境下受到非重複性的衝擊，並說明衝擊會對產品產生

電路板故障、機械變形、材料加速疲勞等現象，以及提供衝擊試驗需依據使用之環境狀態選擇衝擊測試之程序。

對於執行衝擊試驗之衝擊試驗機之相關的研究，王等人[9]對衝擊試驗機之衝擊平台使用有限元素分析和實驗模態分析進行模型驗證，求得一可以代表實際結構的等效分析模型。王等人[10]對夾持邊界下的衝擊試驗平台進行有限元素分析並運用三種不同的邊界模擬方式模擬平台邊界結構的效應，並和實驗模態分析的方法作比較，以及配合操作模態分析所得之平台動態特性的結果來更新有效分析模型。王等人[11]對衝擊試驗中產生衝擊波波形的半弦波產生器進行材料的測定，藉由拉伸試驗的結果進行運算求得半弦波產生器之材料參數，所得之材料參數後續可輸入有限元素分析軟體中，進行模擬衝擊分析，以求得較佳之衝擊分析結果。王等人[12]以理論分析來求得平台受衝擊時頂面所產生時域加速度峰值響應，利用現有平台分析模型導入有限元素分析進行簡諧分析求得頻率響應函數，同時也與實際衝擊實驗結果進行比較，目的在於發展虛擬測試方法，爾後可應用於評估衝擊平台之平坦度性能指標所用。王等人[13]使用已發展出的撓性理論，對半弦波產生器的幾何尺寸和落下的高度進行預測，且加入平坦度的評估的模式得到半弦波產生器數量、位置效應之平台平坦度結果。王等人[14]發展出單自由度理論分析之半弦波產生器設計解析流程，並和衝擊模擬由有限元素分析進行相互驗證，方法為將已知之半弦波產生器材料參數，帶入單自由度理論分析，則可預測衝擊落下高度，和半弦波產生器長度，並將所得之預測衝擊落下高度，和半弦波產生器長度帶入有限元素分析軟體中，最後將理論分析和有限元素分析所得之衝擊加速度峰值和衝擊時間交互比較，發現理論解析有其參考價值。王等人[15]使用有限元素分析軟體對進行衝擊模擬分析，模擬衝擊試驗機經衝擊落下測試，撞擊鉛錐，所得之鋸齒波波型進行探討，內容為改變鉛錐之幾何尺寸，配合不同之衝擊高度，進行模擬，並由衝擊結果波型與規範要求之波形進行比較。以驗證使用有限元素分析具有其可行性。王等人[16]由單自由度剛性平台理論，結合有限元素分析之方法，發展出撓性平台理論，改善單自由度平台理論無法預測半弦波產生器數量和擺放位置之缺點，並和衝擊模擬有限元素分析比較驗證，確立其可行性。

圖 1 為實際在進行衝擊測試時的待測物擺放示意圖，在進行衝擊測試時是將待測物擺放於衝擊平台頂面正中央，執行衝擊測試，以瞭解待測物之性能。半弦波產生器之擺置位置除了固定於擊平台底面外，也會將半弦波產生器固定於基座上，因此本文將探討，不同半弦波產生器之擺放位置，對衝擊試驗之結構應力和加速度峰值之影響。

2. 衝擊試驗之衝擊平台有限元素分析

本文是運用有限元素分析軟體 LS-DYNA 對含半

弦波產生器衝擊平台，和不含半弦波產生器衝擊平台之衝擊平台進行衝擊模擬試驗分析。圖 2(a)與 2(b)分別為將半弦波產生器分別固定於衝擊平台與基座之示意圖。表 1 為半弦波產生器固定於衝擊試驗平台底面之螺絲幾何參數。由於將半弦波產生器放置不同之位置故需建構 2 種不同之有限元素分析模型，有限元素分析模型建構如下：

- (1) 元素選用：衝擊試驗平台、半弦波產生器以及底板使用三維線性立方體元素 SOLID164，將半弦波產生器鎖附於平台底面之螺絲選用三維線性樑元素 BEAM161。
- (2) 元素分割：衝擊試驗平台、半弦波產生器以及底板均為 mapped mesh 漁網分割，分割元素數目分別為衝擊試驗平台 8996 個元素，每個半弦波產生器有 192 個元素，底板為 13500 個元素。將半弦波產生器鎖附於平台底面之螺絲每個 1 個元素。圖 3 為半弦波產生器分別固定於平台與基座之有限元素模型。
- (3) 位移限制：
 - 圖 2(a)為含半弦波產生器之衝擊平台：含半弦波產生器衝擊平台是以全自由邊界(free-free)模擬，被撞擊之底板則設定其底面為固定端($U_Y=0$)。平台底面與半弦波產生器頂面，以及半弦波產生器底面與底板頂面所有節點設定為接觸面，並使用自動面對面接觸形式 (automatic surface-to-surface contact)。
 - 圖 2(b)則是將半弦波產生器固定於基座：衝擊平台是以全自由邊界(free-free)模擬，被撞擊之半弦波產生器則設定其底面為固定端($U_Y=0$)。而平台底面與半弦波產生器頂面所有節點設定為接觸面，並使用自動面對面接觸形式。
- (4) 負荷條件：
 - 含半弦波產生器衝擊平台：給予含半弦波產生器之衝擊平台所有節點重力加速度 $g=9.807\text{m/s}^2$ 與初始速度 v 。
 - 固定於基座：給予衝擊平台所有節點重力加速度 $g=9.807\text{m/s}^2$ 與初始速度 v 。
 - 但以上二者如直接代入單自由度剛性平台理論所求得之衝擊落下高度 H ，則 $v=0$ 。但是衝擊落下距離對求解時間有相當大的影響，故為了節省縮短軟體求解時間，將衝擊落下距離設定為 $h=0.001\text{m}$ ，且將其落下高度利用位能與動能關係式轉換成初始速度，並依不同落下高度情況施與含半弦波產生器之衝擊平台以及衝擊平台不同初始速度，其衝擊落下高度 H 與初始速度 v 轉換關係如下所示：

$$mg(H-h) = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

$$v = \sqrt{2g(H-h)} \quad (2)$$

3. 結果與討論

本節針對不同半弦波產生器固定位置進行模擬衝擊試驗分析之結果。模擬使用 4 個直徑 $D=0.09\text{m}$ ，長度 $L=0.1\text{m}$ 半弦波產生器固定於平台底面，衝擊落下高度 $H=0.09\text{m}$ ，於衝擊試驗後，對圖 4 之有興趣部份之所得加速度峰值與結構強度影響進行探討。

3.1 不同半弦波產生器放置位置對衝擊平台結構之影響

本節探討不同半弦波產生器放置位置，分別固定於衝擊平台底部，和基座上，模擬衝擊有限元素分析，其半弦波產生器使用 4 個其直徑 $D=0.09\text{m}$ ，長度 $L=0.1\text{m}$ ，衝擊落下高度 $H=0.09\text{m}$ 。綜合探討如下：

1. 由圖 5(a)和圖 6(a)可知加速度峰值，在衝擊試驗平台有興趣之觀察點，運用模擬分析，皆有呈現半弦波波之形狀。
2. 圖 5(b)和 6(b)可知最大主應力，除在半弦波產生器的位置因為衝擊時的壓縮為負值外，其餘有興趣之位置均為正值。
3. 由表 2 可知有無含半弦波產生器之衝擊平台，其加速度峰值產生最大值之位置均為，平台底面和半弦波產生器接處，其因為不含半弦波產生器之衝擊平台，於衝擊試驗時會直接撞擊於半弦波產生器上，故平台底面和半弦波產生器接觸面為最大加速度峰值之位置。
4. 由表 3 結合表 4 探討，可以發現含半弦波產生器衝擊平台之最大主應力大於不含半弦波產生器衝擊平台，其因可能為，在衝擊試驗時，含半弦波產生器之衝擊平台撞擊物為鋼製底板，其撞擊後之反作用力會大於衝擊試驗平台撞擊半弦波產生器。
5. 由表 3 可知，衝擊平台和含半弦波產生器衝擊平台最大主應力均位於平台底面中心點處。
6. 表 2 結合表 3 綜合探討觀察麥西斯(von Mises)應力圖推測衝擊試驗平台含半弦波產生器，於衝擊試驗時結構較容易產生破壞，其區域可能為半弦波產生器故於衝擊平台底面之位置，其值約為 1.898MPa 。
7. 由表 4 可知不含半弦波產生器衝擊平台之麥西斯(von Mises)應力大於含半弦波產生器衝擊平台，其值為 2.725MPa ，原因推斷衝擊試驗時為衝擊試驗平台撞擊半弦波產生器之關係。

3.2 不同半弦波產生器放置位置對衝擊平台結構疲勞之影響

本節運用 Goodman 圖，針對衝擊試驗平台之疲勞強度進行探討，Goodman 圖之定義如圖 4-12，其中鋁鎂合金極限強度(S_m)值為 160MPa ，疲勞強度(S_e)為 70MPa 。

將表 4 所得之最大主應力 σ_1 假設為最大應力 σ_{\max} ，而最小應力 $\sigma_{\min} = 0$ ，則可得知應力振幅(σ_a)及平均應力(σ_m)：

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (3)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (4)$$

若需求得材料之容許平均應力(S_m)與容許應力振幅(S_a)，則需代入下式：

$$S_m = \frac{S_e}{\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_m} + \frac{S_e}{S_m}\right)} \quad (5)$$

$$S_a = \frac{S_e \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_m}\right)}{\left(\frac{\sigma_s}{\sigma_m} + \frac{\sigma_e}{S_m}\right)} \quad (6)$$

對應之安全係數分別為平均應力安全係數(n_m)與應力振幅安全係數(n_a)公式分別如下：

$$n_m = \frac{S_m}{\sigma_m} \quad (7)$$

$$n_a = \frac{S_a}{\sigma_a} \quad (8)$$

表 4 為半弦波產生器有無固定於衝擊平台上，所得之應力振幅(σ_a)、平均應力(σ_m)、容許平均應力(S_m)、容許應力振幅(S_a)以及其安全係數分別為 n_m 與 n_a 。將應力振幅(σ_a)、平均應力(σ_m)代入 Goodman 疲勞分析圖，可知半弦波產生器有無固定於平台底部，對衝擊平台結構之影響無太大差異，無論半弦波產生器有無固定於平台底部，衝擊平台疲勞強度仍在安全區的範圍內，其安全係數為 $115.338 \sim 115.529$ 間。

4. 結論

本文運用有限元素分析軟體，模擬半正弦波產生器不同固定位置之有限元素分析，分別建立含半正弦波產生器之平台與將半正弦產生器固定於基座兩種有限元素模型，並以進行衝擊模擬分析，探討半弦波產生器及各組件之加速度及應力影響。整體而言，衝擊平台於衝擊時，所承受之應力，就結構疲勞強度分析，安全係數高，應無疲勞破壞之虞，未來可針對衝擊平台之平坦度，亦即平台之性能特性與疲勞強度進行綜合之交互影響探討，將有助於平台輕量化之結構設計。後續可對含半正弦波之衝擊試驗平台實際進行衝擊試驗，運用儀器設備量測對衝擊試驗結構感興趣之部份進行實際量測，再和有限元素分析進行比較，以得知有限元素分析和實際量測結果之差異。

5. 致謝

本文感謝金頓科技股份有限公司產學交流合作，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

6. 參考文獻

- [1] 林壯昶，1998，「環境條件與環境試驗之國際標準」，*工業財產權與標準*，第 95~100 頁。
- [2] 許凱超、廖建義，2002，「產品研發之環境輪廓及效應分析」，*品質管制月刊*，第 32 卷，第 8 期，第 70~74 頁。
- [3] 楊長江，2001，「以使用者的品質觀點談振動測試」，*電子檢測與品管季刊*，第四十五期，第 58~59 頁。
- [4] 林明儀，2002，「電子連接器與線纜組測試分析概要」，*電子檢測與品管*，第 49 期，第 39~41 頁。
- [5] JEDEC Solid State Technology Association, JESD22-B110: Subassembly Mechanical Shock.
- [6] 楊秉豐，賴逸少，葉昶麟，蔡靜宜，2005，「無鉛晶片封裝之掉落衝擊測試表現」，*第二十一屆機械工程學會*，高雄，第 5813~5819 頁。
- [7] MIL-STD-833E, 1996, *Test Method Standard Microcircuits*, US Department of Defense.
- [8] MIL-STD-810F, 2000, *Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests*, US Department of Defense.
- [9] 王栢村，陳克強，李昆達，2005，「衝擊試驗機滑動平台之模型驗證」，*中國機械工程學會第二十二屆全國學術研討會論文集*，中壢，論文編號：C3-003。
- [10] 王栢村，陳克強，李昆達，2006，「夾持邊界下衝擊試驗機滑動平台之模型驗證」，*2006 年北京科技大學—屏東科技大學學術研討會論文集*，北京，論文編號：M-E004。
- [11] 王栢村，李沛緯，李昆達，2008，「半正弦波產生器之機械材料性質測定」，*2008 精密機械與製造科技研討會*，屏東，論文編號：E-07。
- [12] 王栢村，陳克強，李昆達，2006，「滑動平台之衝擊分析與實驗驗證」，*中國機械工程學會第二十三屆全國學術研討會論文集*，台南，論文編號：C3-029。
- [13] 王栢村，李沛緯，李昆達，2008，「應用平坦度評估對簡易衝擊平台與半正弦波產生器之設計與研究」，*中華民國振動與噪音工程學會第十六屆學術研討會*，台北，論文編號：C-4。
- [14] 王栢村，黃宗淇，李昆達，2007，「衝擊試驗機半正弦波產生器設計之預測與驗證」，*第十屆全國機構與機器設計學術研討會*，台中，論文編號：F02。
- [15] 王栢村，胡惠文，黃宗淇，李昆達，2006，「衝擊試驗後緣鋸齒波之撞擊模擬分析」，*中華民國*

第三十屆全國力學會議，彰化，論文編號：H2-2。

- [16] 王栢村，黃宗淇，李昆達，2007，「應用撓性簡化衝擊平台模型於半正弦波產生器之設計分析」，*中國機械工程學會第二十四屆全國學術研討會論文集*，桃園，論文編號：B11-0021。

Discussions on Different Locations of Half-sine Wave Programmers for shock Testing

Bor-Tsuen Wang¹, Yu-Lin Chen²,
David Lee³

^{1,2} Department of Mechanical Engineering National
Pingtung University of Science and Technology

³ Director, King-Design Company

Tel: (08)7703202 ext. 7017

Email: wangbt@mail.npust.edu.tw

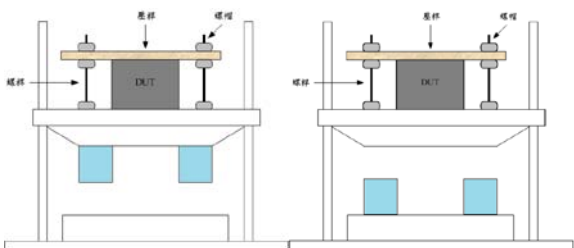
Abstract

The half-sine wave is the most frequently used in shock tests. The shock table is generally set to a height and fallen freely to impact the shock pad or called the half-sine wave programmer. The proper acceleration half-sine wave can then be obtained on the top surface of shock table. The programmer can be installed at the base, and the shock table will impact the programmer in free-fall. The new type of design is that the programmer is attached at the bottom of shock table and fallen together with the shock table to generate the shock wave. This work adopts the finite element analysis (FEA) software to simulate the shock impact for the two types of half-sine wave programmers. First, the three dimensional solid elements are used to construct the FE model for the table and programmer. The automatic surface-to-surface contact is selected to simulate the free-fall impact in contact. The acceleration on the top surface of shock table as well as the impact stresses in the table and programmer can be determined and compared for the two types of shock tests. The Goodman diagram is also used to discuss the fatigue strength of the table that is useful for future design consideration. This work establishes the shock impact simulation method for shock tests and studies the difference between the two types of test methods. The simulation can be extended for other analysis, such as the selection of programmer's geometry and the effect of device under test (DUT) during shock testing.
Keywords: shock test, shock table, half-sine wave programmer, impact simulation, finite element analysis, fatigue strength.

附錄：圖表彙整

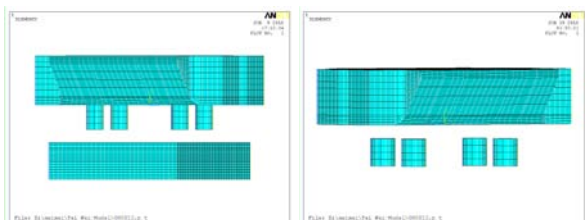


圖 1 衝擊測試時待測物擺放位置示意圖



(a) 固定於平台 (b) 固定於基座

圖 2 不同半弦波產生器固定位置示意圖



(a) 固定於平台 (b) 固定於基座

圖 3 不同半弦波產生器固定位置之有限元素模型

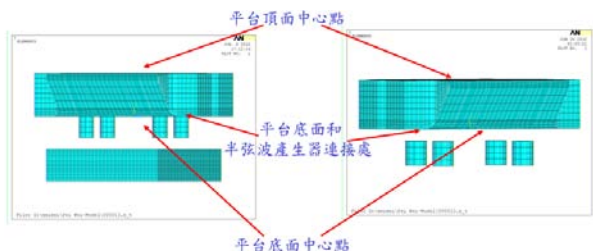
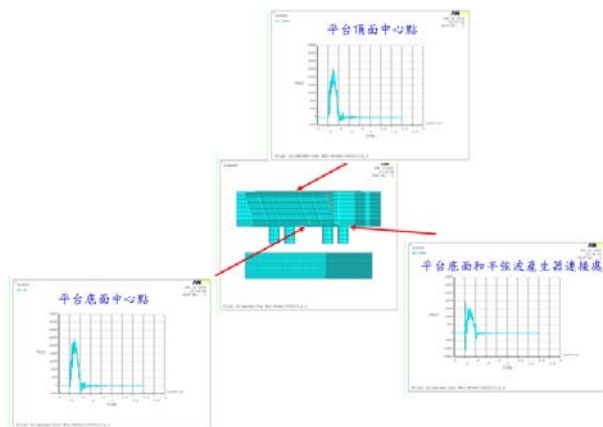
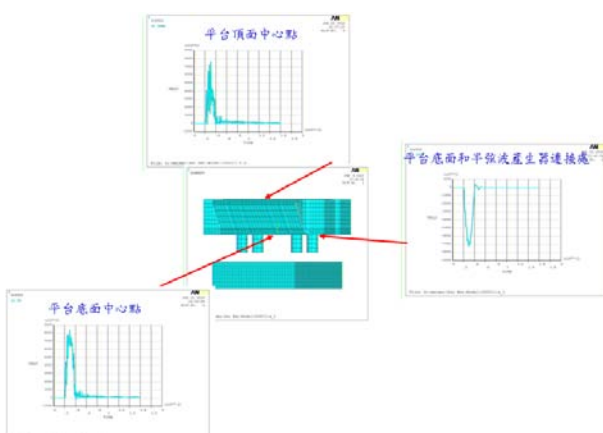


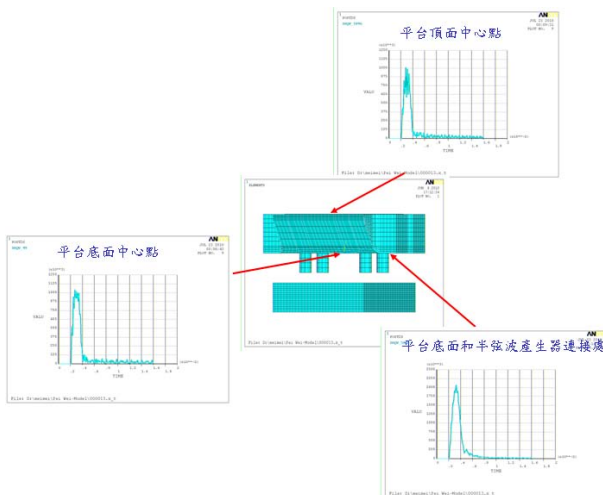
圖 4 不同半弦波產生器固定位置感興趣之位置圖



(a) 加速度峰值

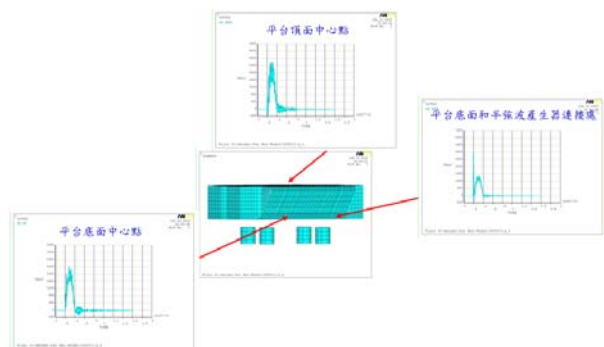


(b) 最大主應力 σ_1

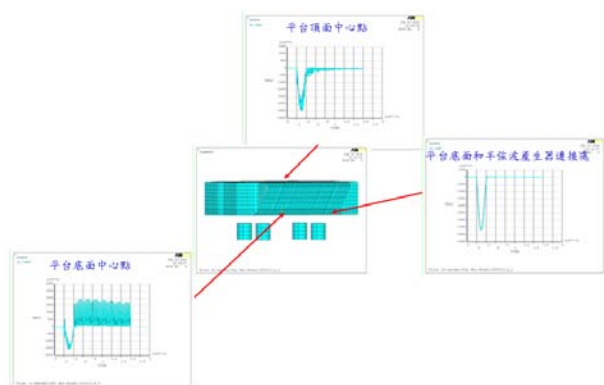


(c) 麥西斯應力

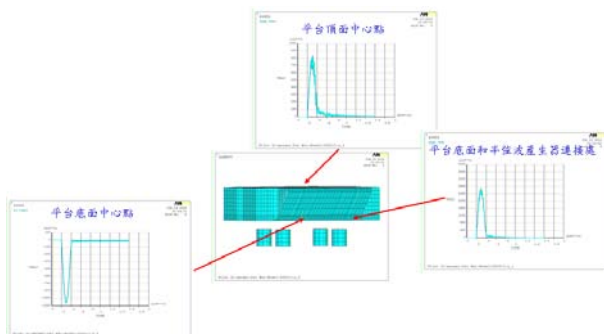
圖 5 半弦波產生器固定於衝擊平台底面所得之加速度峰值、最大主應力 σ_1 、麥西斯應力時域響應圖



(a) 加速度峰值



(b) 最大主應力 σ_1



(c) 麥西斯應力

圖 6 半弦波產生器固定於基座所得之加速度峰值、最大主應力 σ_1 、麥西斯應力時域響應圖

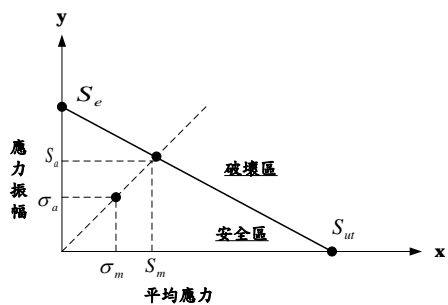


圖7 Goodman疲勞分析圖

表 1 衝擊試驗平台各組件之幾何與材料參數

(a) 衝擊平台

項目	幾何與材料參數
平台面長	0.6(m)
平台面寬	0.6(m)
總寬	0.88(m)
總高	0.2(m)
鋁鎂合金楊氏係數	38.5(GPa)
密度 ρ	1900(kg/m ³)
浦松比 ν	0.35

(b) 半弦波產生器幾何參數與材料性質[21]

項目	幾何與材料參數
楊氏係數	43(GPa)
半弦波產生器直徑	0.1(m)
浦松比 ν	0.375
抗拉強度	46(MPa)
降伏強度	39.5(MPa)
密度 ρ	1379(kg/m ³)

(c) M10 螺絲幾何參數與材料性質

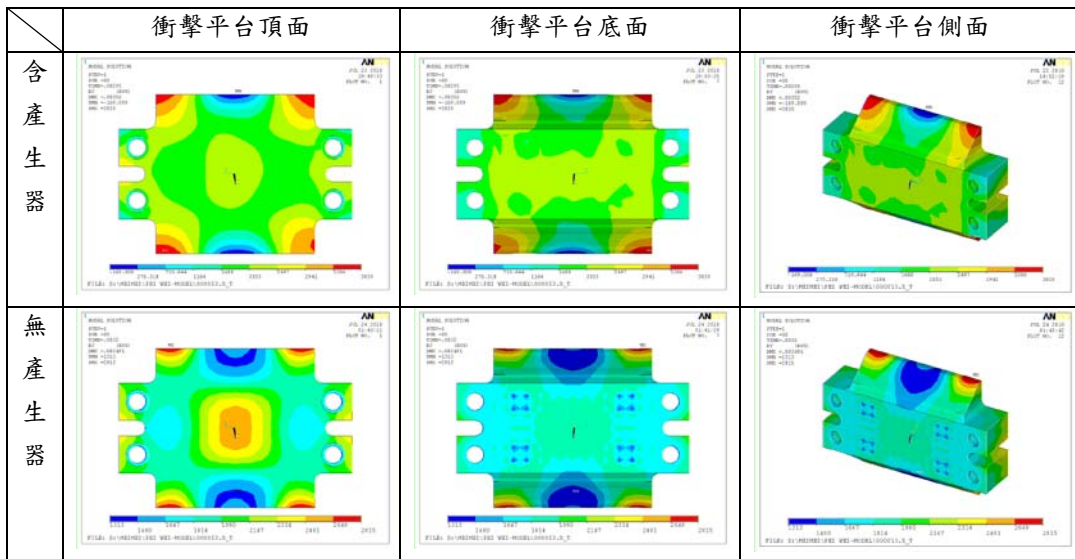
項目	幾何與材料參數
螺絲長	0.03(m)
外徑	0.01(m)
楊氏係數	209(GPa)
密度 ρ	7850(kg/m ³)
浦松比 ν	0.35

(d) 底板幾何參數與材料性質

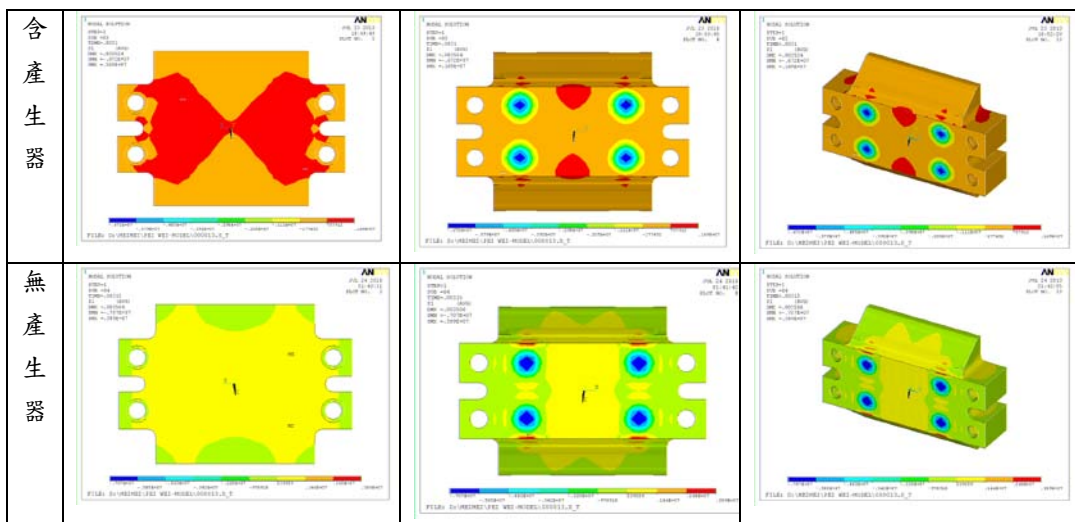
項目	幾何與材料參數
底板面長	0.6(m)
底板面寬	0.6(m)
底板總高	0.15(m)
底板楊氏係數	209(GPa)
密度 ρ	7850(kg/m ³)
浦松比 ν	0.35

表 2 不同半弦波產生器放置位置之加速度峰值、最大主應力 σ_1 、麥西斯應力比較

(a) 加速度



(b) 最大主應力 σ_1



(c) 麥西斯應力

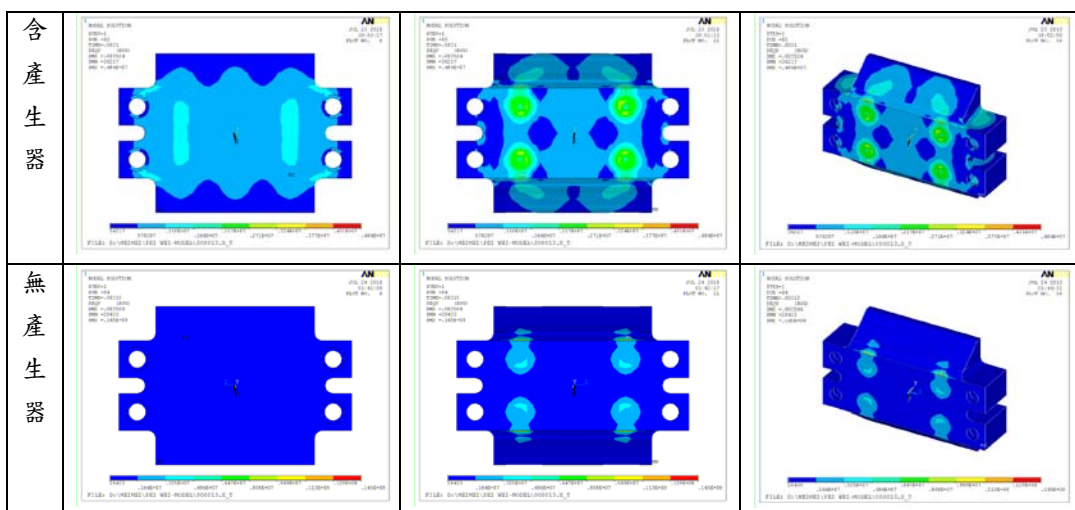


表 3 不同半弦波產生器放置位置加速度峰值、 σ_1 、麥西斯應力比較

項目	位置	平台底面中心 點	平台頂面中心 點	平台底面和半 弦波產生器連 接處
	平台			
加速度(g)	衝擊平台	247.69	264.74	487.86
	含半弦波產生器衝 擊平台	243.17	252.08	315.84
最大主應力 σ_1 (MPa)	衝擊平台	0.8434	0.626	0.1226
	含半弦波產生器衝 擊平台	0.8444	0.771	0.3675
Von Mises Steess (MPa)	衝擊平台	0.8920	0.840	2.725
	含半弦波產生器衝 擊平台	0.8613	1.049	1.898

表 4 有無含半弦波產生器所得之結果表

		σ_1 (MPa)	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	S_m (MPa)	S_a (MPa)	n_m	n_a
1	含半弦波產生 器	0.844	0.422	0.422	48.696	48.696	115.338	115.338
2	不含半弦波產 生器	0.843	0.422	0.422	48.696	48.696	115.529	115.529

備註：極限強度(S_u)160MPa，疲勞強度(S_e)為 70MPa