

博物館陳列室內的文物防震研究

／張世賢 余敦平 楊源泉 楊永光 賴永貳

研究緣起

台灣位在歐亞大陸板塊和菲律賓海板塊互相擠壓衝突的地方，經常發生大大小小的地震。根據過去九十年的資料顯示，台灣每年平均發生一千八百次以上的地震，多數無感，有感覺者每年平均約兩百次，會造成災害的地震則平均每年可能發生一次。

台灣的地震帶可分為三支：西部、東部及琉台。其中西部地震帶自台北南方經台中、嘉義而至台南，寬約八十公里，地震次數較少，但因震源淺（約十餘公里），地殼變動激烈，範圍廣大，災情較重。以最近一百年的大地震為例，一九〇六年嘉義烈震

造成長十三公里的梅仔坑斷層，水平最大變位達二百四十公分，垂直最大變位達一百八十公分，有顯著的地裂及噴泥現象。一九三五年新竹苗栗烈震，造成長十餘公里的屯仔腳斷層及二十餘公里的獅潭斷層，水平最大變位達一百五十公分，垂直最大變位則達三公尺，山崩地裂，並有陷沒及噴泥現象。一九四二年嘉義又發生烈震，山崩範圍擴大，草嶺走山二千五百公尺，十分罕見（註一）。其後一九四六年台南烈震以至一九九九年集集烈震的多次災難，都造成顯著的地貌變化以及數百或數千人的慘重傷亡，極為恐怖。

台灣既受到兩方板塊的不停擠壓，斷層又遍佈各地，可以說全島都籠罩在會不定時遭受大小地震襲擊的陰影，在島上的兩、三百家博物館當然就難免於藏品遭受震壞的威脅。因此，在大地平靜的時候做好藏品的防震措施，當天搖地動時讓損害降到最低限度，實乃這兩、三百家博物館的當務之急。

一九九五年一月十七日凌晨，日本關西大阪神戶一帶發生強烈地震，使神戶市立博物館展示的藏品損壞了百分之十五·八。在該館所做的檢討報告裡，坦承「因日本關西地區很少地震，完全沒有想過展示藏品的防震問題」（註二）。這是值得所有博物館員加以警惕的案例，誰都無法保證博物館的重要藏品永遠可以免於地震的災害，做好防震措施便是博物館員無可推卸的重要職責。

國立故宮博物院雖然已為藏品做了不少防震措施，但如果集集九二一規模的烈震發生在台北，在實際測試之前誰也無法保證那些措施還能發揮防震功效。為早日釐清真相，以便未雨綢繆，我們特別針對陳列室中易遭

震壞的古器物作防震的研究，尤其是精美而怕碰撞的陶瓷藏品。這項實驗研究的結果，將可以提供國內博物館參考，加強易碎藏品的防震措施。至於主要由紙張、顏料、畫布、框裱材料等組成的繪畫類文物，也是博物館陳列室防震工作的主要對象，應該一併研究改進。

壹、需要防震措施的博物館藏品

博物館的藏品不是在庫房儲存就是在展示廳陳列。在庫房儲存的藏品不必顧慮觀瞻的問題，要怎樣包裝紮網綁來防範地震都無所謂，但在展示廳陳列的藏品就要儘量減少外在的附加物，以免有礙觀瞻。以精美的中國瓷器為例，若用細線將他們上下左右綑綁，展示的效果就要打折，但它們又是最怕地震襲擊的藏品，很容易震倒破碎，因此需要特別講究防震措施。

陶器不若瓷器堅硬，怕震則無二致，因器表沒有釉層保護，且質地比較鬆軟的胎體不宜以蘸粘之法固定，其防震之法與瓷器有別。此外，石器、玉器、銅器、漆器、國畫立軸等

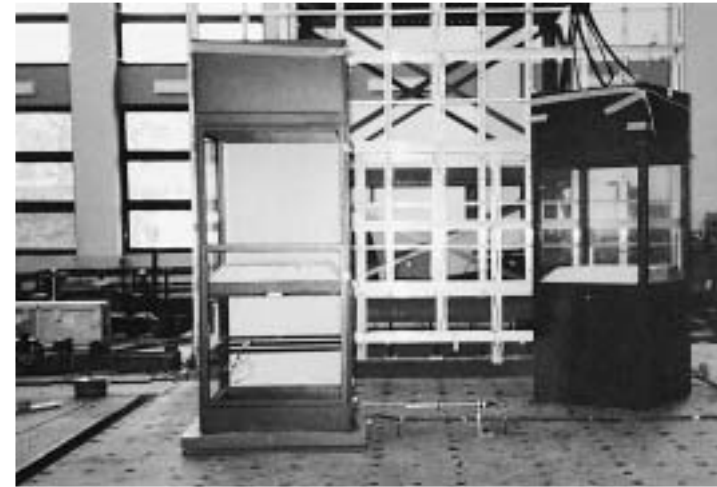
表一：陳列櫃內放置 5.98 公斤重之瓷瓶，在無任何防護措施下遭受強震後的反應

地震震	人工地震台		陳列櫃		振動結果		
	加速度 公分/秒 ²	震度	速度 公厘/秒	加速度 公分/秒 ²	速度 公厘/秒	陳列櫃	瓷瓶
故宮自由場 250	280	五級	35.65	390	27.28	擺動	擺動
故宮自由場 400	470	七級	55.60	690	56.30	擺動、位移	傾倒



圖二 在陳列櫃底部放置五百公斤鉛塊，以降低該櫃重心。

此處未能進行的實驗，是測試陳列櫃固定在人工振動台上時，未固定的瓷瓶受震後的反應。在這種情況下，瓷瓶遭受的衝擊更大，很可能在五級地震時就傾倒。因陳列櫃無法固定於振動台上，故未能確定其反應狀況。



圖一 用吊車將兩個故宮獨立陳列櫃搬到國家地震工程研究中心的大型人工振動台做模擬實驗

類藏品，無不懼怕強震而必須做好防護措施。由於重心高的中、大型瓷器問題最多，應該針對這類陳列中的器物在各種情況下受震後的反應加以測試，以確定必須採取的防護措施的底線。

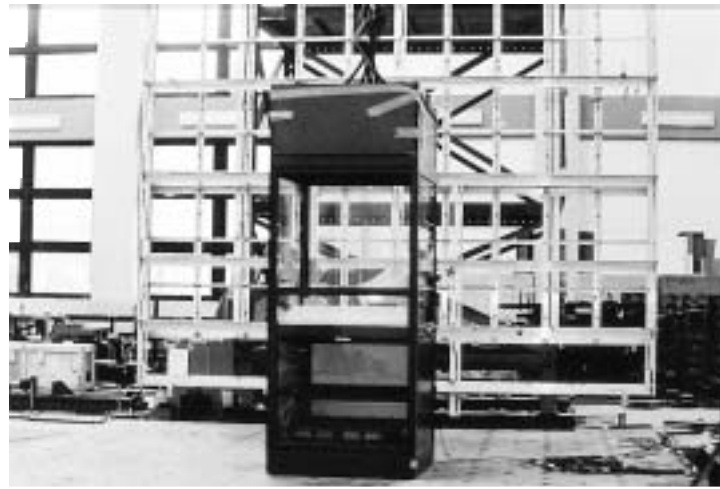
貳、重心高且未加任何防護的瓷瓶受震後的反應

為測試傳統及新式器材在防止瓷器受震傾倒上所能發揮的功效，故宮特別與國家地震工程研究中心進行合作，搬兩個陳列櫃到中心的大型人工振動台上做模擬實驗（圖一）。該櫃為一公尺見方，高二·六八公尺，重四二八公斤，將底徑一六公分、高三九公分、重五·九八公斤的中型梅瓶依故宮的陳列方式置於櫃內底座上，但未加任何防護措施。人工地震震譜採用集集九二一震波傳至故宮以後的反應波譜（名為「故宮自由場」）。若以加速度二五〇公分/秒的四級地震測試時，櫃體與瓷瓶皆未受顯著影響；若以加速度二八〇公分/秒的五級地震作測試，陳列櫃及瓷瓶均有擺動（rocking）及位移的反應，這時瓷瓶還是沒有傾倒。

用加速度提高為四七〇公分/秒的七級烈震進行測試時，則陳列櫃被震得劇烈擺動，位移頗大，櫃內瓷瓶亦傾倒滾動。可見這類瓷瓶若未加任何防護，是難以抵擋五級以上地震的侵襲的，這項實驗的結果如表一所示。

參、降低陳列櫃重心的效用

物體重心越高，受到振動時越容易傾倒。前述陳列櫃在五級地震時即產生擺動位移，七級地震時反應更烈。試將十個總重五〇〇公斤的鉛塊



圖三 在櫃底放置鉛塊的情況下，更強的地震來襲時才使櫃內瓷瓶傾倒，顯示鉛塊確有降低櫃體重心而令其更為平穩的作用。

置於櫃內底部(圖二)，則在加速度四七〇公分/秒的七級烈震時，會使櫃體與無任何防護措施的瓷瓶擺動，但幾乎沒有位移，瓷瓶未倒；若加速度提高為七一〇公分/秒的更強烈地震時，才造成櫃體的劇烈擺動而使瓷瓶



圖四 將置於櫃內底座上的梅瓶用釣魚線對稱網綁，可以有效防止烈震的侵襲。

倒下(圖三)。可見降低重心確可發揮若干防震的功能(這項實驗的結果見表二)。但建物樓版的承重力有其限度，利用重物降低櫃體重心並非十分理想的方法。

肆、簡便有效的瓷器防震措施

一般用來釣魚的絲線，細小而強韌，適於固定瓷器以防震。將上述梅瓶分別以台製二十磅釣魚線及日製九號釣魚線網綁固定後，直接用加速度超過一千公分/秒的七級烈震測試(圖四)，結果陳列櫃劇烈擺動，大幅位移，瓷瓶則原地稍微轉動，並未傾倒(表三)。可見這種價格便宜、拆卸簡易的材料，能夠有效防止瓷器遭受地震破壞。

釣魚線雖然透明而不甚顯眼，但究竟是附加之物，在精美的瓷器上網綁，多少有礙觀瞻。若能不綁絲線而得保護瓷器免於震害，則又更為理想。

在瓷瓶器底圈足用總重三·八七公克的美製微晶蠟(Microcrystalline wax)蘸粘三點，以加速度達一二三〇

表二：陳列櫃底部放置 500 公斤鉛塊後的反應

地震震	人工地震台		陳列櫃		振動結果		
	加速度 公分/秒 ²	震度	速度 公厘/秒	加速度 公分/秒 ²	速度 公厘/秒	陳列櫃	瓷瓶
故宮自由場 400	470	七級	56.30	600	46.50	擺動	擺動
故宮自由場 600	710	七級	80.33	660	50.97	擺動、位移	傾倒

表三：陳列櫃內的梅瓶分別用 20 磅及 9 號日本釣魚線網綁後的反應

地震震	釣魚線	人工地震台		陳列櫃		振動結果	
		加速度 公分/秒 ²	速度 公厘/秒	加速度 公分/秒 ²	速度 公厘/秒	陳列櫃	瓷瓶
故宮自由場 1000	20 磅	1800	139.1	1480	56.80	大幅位移	只位移 1 公分
故宮自由場 1000	9 號	1700	63.7	980	47.45	大幅位移	未移動

公分 $\frac{1}{2}$ 秒的七級烈震測試，結果瓷瓶不支倒下。再用三倍重（一二·四公克）的微晶蠟蘸粘五點（圖五），則可承受加速度為九五〇公分 $\frac{1}{2}$ 秒的七級烈震考驗而未倒。在完全相同的條件下，依次減少微晶蠟的數量直到〇·



圖五 在重量為5.98公斤的中型梅瓶底部圈足，用微晶蠟蘸粘五點，亦可使瓷瓶抵擋七級烈震的侵襲而不傾倒。微晶蠟用量即使減少到0.47公克，也具有相同的功能。

表四：瓷瓶器底使用微晶蠟固定以防止震倒之實驗結果（地震震譜為故宮自由場1000）

試體	蠟名稱	蠟重	圈足底部蘸粘點數	人工地震台		陳列櫃內測得之數據		振動結果	
				加速度 公分/秒 ²	速度 公厘/秒	加速度 公分/秒 ²	速度 公厘/秒	陳列櫃	瓷瓶
5.98公斤瓷瓶	微晶蠟	3.87公克	3	1330	113.60	1160	50.15	劇烈擺動	傾倒
5.98公斤瓷瓶	微晶蠟	12.4公克	5	950	95.12	990	49.50	劇烈擺動	未倒
5.98公斤瓷瓶	微晶蠟	7.64公克	5	1000	97.96	1160	52.70	劇烈擺動	未倒
5.98公斤瓷瓶	微晶蠟	4.80公克	5	1000	98.30	650	49.30	劇烈擺動	未倒
5.98公斤瓷瓶	微晶蠟	2.57公克	5	997	98.20	789	53.80	劇烈擺動	未倒
5.98公斤瓷瓶	微晶蠟	1.63公克	5	998	98.14	880	50.00	劇烈擺動	未倒
5.98公斤瓷瓶	Museum wax	1.62公克	5	1010	99.76	820	51.15	劇烈擺動	未倒
5.98公斤瓷瓶	Museum wax	0.83公克	5	1000	99.56	820	51.90	劇烈擺動	未倒
5.98公斤瓷瓶	微晶蠟	0.47公克	5	997	99.50	600	51.70	劇烈擺動	未倒
8.7公斤天球瓶	微晶蠟	0.50公克	5	966	58.38	1690	60.32	劇烈擺動	輕微擺動

四七公克，亦可承受加速度一千公分 $\frac{1}{2}$ 秒左右的七級烈震考驗而不倒。另一種品質類似上述微晶蠟的美製細蠟 Museum wax，也具有相同功能。

如果試體換上重達八·七公斤而重心較低的天球瓶，結果亦只造成輕微擺動而未傾倒，足見此蠟防震功能甚佳（表四）。

伍、防止陶器遭受震害的方法

陶器無釉，胎質遠比瓷器鬆軟，若用微晶蠟蘸粘器底圈足，可能因粘性太強而遭受損壞，最好用釣魚線紮緊的方式來防止震害。上節已說明在振動台上的陳列櫃內，高三九公分、重五·九八公斤的瓷瓶分別用台製二十磅及日製九號釣魚線網綁，並固定於展示台上，用七級以上的烈震加以測試，結果瓷瓶只小幅位移一公分，沒有傾倒，但陳列櫃在振動台上則有相當大的位移。在這麼強烈的搖撼下，重達五·九八公斤的瓷瓶都安然無恙，可見釣魚線是非常有效的防震器材。

瓷器可以用釣魚線防止震害，造型和質地類似瓷器的陶器，當然也可以用釣魚線來保護，只不過因為陶器表面無釉，釣魚線和器面接觸的部分必須用小塑膠管套住，否則強震帶來的壓力會讓釣魚線擦傷器面。此外，用釣魚線網綁陶器時，必須抓住一些要領，就是儘量對稱施作，使每個方向每個部位皆均勻受力，一旦震動搖晃時即不致出現較弱的缺口而傾斜或位移；尤其要注意不可施予太大的壓力，究竟低溫燒成的陶器不比瓷器堅硬，承受壓迫的能力有其限度。只要做到上述兩點，用釣魚線長期網綁陶器應不致造成損傷。

陸、國畫立軸及油畫的防震方法

國畫立軸必須懸掛在牆面，下方的木軸有一定的重量，如果沒有用托鉤托住，平日下垂的張力就會使整件畫幅產生永久變形的現象，地震來襲時木軸因受外力衝擊而產生更大的張力，會造成難以預料的破壞，若張力

超過某個限度，畫面顏料可能掉落，畫幅也很可能破損甚至斷裂。因此，除了要固定國畫立軸的上端外，下方頗重的木軸更須留意托好。

民國九十年春間成功大學建築研究所姚昭智教授獲得國科會獎助，在



圖六 懸掛牆上的國畫立軸，若其下軸沒有托住，強震來襲時木軸會猛烈拍打牆面。

國家地震工程研究中心主持「懸吊式輕鋼架天花板及系統家具耐震實驗」專題研究，在大型人工振動台上模擬設置辦公室建築和裝潢進行實驗，承蒙姚教授將多餘的空間提供故宮從事文物防震研究，故宮防震研究小組便利用難得豎立在振動台上的牆壁，懸掛國畫立軸和油畫進行防震測試。

測試的結果有幾點值得注意：

1. 如果國畫立軸的下軸沒有托住，在強烈的地震來襲時，木軸會猛烈拍打牆面（圖六）。
2. 若將下軸托住但未用線綁好，在強烈地震來襲時，木軸會在弧形托鉤上來回滾動，促使整張畫幅上下呈波浪狀擺動，震度越強，波浪越大。木軸在托鉤上來回滾動，和隔震台的輪軸來回滾動的消能作用一樣，可以大大減少畫幅所受的衝力，但畫幅受到牽引而造成的上下波動，難免會對紙質和顏料造成某種程度的影響，不過和上述沒有托住的情況相比，衝力是大為減緩的（圖七）。

3. 將下軸托住同時用線綁好，即使強震來襲，畫面只呈現小幅振盪，此時震波產生的能量有多少傳遞到畫



圖七 下軸用托鉤托住的國畫立軸，強震來襲時會在托鉤上來回滾動。

時會沿牆左右搖擺或前後碰撞牆面，視震動方向而定。震度強過某一級數時，懸吊的畫框可能因承受不了重力而下墜（圖八），或碰撞牆面太猛而破損。若以微晶蠟將畫框固定在牆上，則畫框與牆面同步振動，即可避免下



圖八 懸吊的油畫畫框可能因強震侵襲而下墜

面，雖亦有待檢測評估，但顯然比沒有托住的情況要安全許多。不過，此時從木軸傳到畫面的震動頻率變高了，對畫上材料的破壞較大，故仍以不綁木軸而讓它在托鉤上滑動較佳。

4. 懸吊的油畫畫框，在地震來襲

墜或破損的情況發生，除非建築倒蹋（圖九）。微晶蠟的用量，與畫框的尺寸、重量成正比。

柒、何時該用隔震台？

所謂隔震台（isolator），就是利用輪軸或彈簧等物吸收地震產生的動

能，使傳導到輪軸或彈簧上方平台的推力得以大幅度減少的裝置。若地表震度為七級，置於隔震台上的物體則可能只受到四級以下震度的推力，而不致傾倒破碎。近年來日、美等國皆積極研發這類裝置，應用在博物館的有櫃底型和櫃內型兩種。



圖九 用微晶蠟將油畫畫框固定在牆上，亦可有效保護畫框免於震害



圖一〇 故宮研究人員在國家地震工程研究中心用吊車將陳列櫃安置在隔震台上



圖一一 左邊陳列櫃被安置在櫃底型隔震台上，未加防護的瓷瓶直立在櫃內中間的底座；櫃內型隔震台則安置在右邊陳列櫃中間的底座上，台上的瓷瓶亦未加任何防護。



圖一二 圖一一右櫃中間的近照

在國家地震工程研究中心的人工振動台上，故宮的文物防震小組利用吊車將一個陳列櫃吊到櫃底型隔震台上（圖一〇、一一），輕便小巧的櫃內型隔震台則置於另一個陳列櫃的展示檯上（圖一二），兩種隔震台都是日本

某廠牌的产品。瓷瓶比照第參節的方式，分別放置在第一櫃的展示檯及第二櫃的櫃內型隔震台上，未作任何防護措施，另在瓷瓶頸部裝一加速規以記錄受震時的加速度。

表五記錄這個實驗中的瓷瓶在不同震譜和加速度衝擊下的反應情況。瓷瓶頸部的加速度若遠小於人工振動台上測到的加速度，表示隔震台發揮了減震作用。實驗結果顯示，櫃內型隔震台在加速度二五〇公分/秒以上（五級以上的地震）比較能夠發揮功效，櫃底型隔震台則在加速度四〇〇公分/秒以上（七級以上）的烈震發生時展現了顯著的消能減震的功效。這兩個立於隔震台上而未加其他防護措施的瓷瓶在上述實驗中皆未傾倒，說明隔震台確可防止地震損壞文物，但它也有一些必須顧慮的缺點：

- (1) 價格十分昂貴；
- (2) 它在消能減震時需要二〇~四〇公分的位移空間，造成陳列空間的浪費；
- (3) 櫃底型隔震台至少重達三〇〇公斤，二樓以上的陳列室如佈滿隔震台，會產生樓版能否負荷的問題；
- (4) 隔震台的機械構造必須定期維護，發生四級以上地震後必須調整歸零。

因此，雖然隔震台具有顯著的防震功能，非不得已實無需採用，例如在器形較大而重心又高的情況下，傳統器材無法有效防震時，才考慮加裝笨重昂貴的隔震台。

捌、櫃內型隔震台宜斟酌使用

櫃內型隔震台雖然比較輕巧，但使用起來還是有料想不到的缺點。它們的尺寸至少在四〇公分見方左右，每一台又大多只容納一件器物，在狹小的陳列櫃內佔據了許多寶貴的空間，若非其他的措施對某些器物無法有效防震，實在不必在櫃內使用隔震台。

萬一幾件器物同時都無法用其他措施滿足防震的需求，則可考慮串聯之法，以避免陳列空間的嚴重浪費。試在人工振動台上放置四台櫃內型隔震台，間隔五〇公分排成一列，其以上三公尺長、四十五公分寬的不銹鋼夾套串聯，則此三公尺長的空間皆可用來放置器物，就像沒有加裝隔震台一樣。此時以五件底徑與高度之比例為一：二，一：三，一：四的陶瓷試體放置在三公尺長的空間上，試以不同的地震震譜和加速度使其振動，從四級震度開始直到七級以上的烈震，結果五件沒有任何防護措施的陶

表五：同一廠牌及結構之櫃底型與櫃內型隔震台在不同震譜與加速度(公分/秒²)下受震之功能比較

地震震	不同方向之加速度等級		瓷瓶頸部量測的加速度	
	EW	SN	單獨陳列櫃+櫃底型隔震台	單獨陳列櫃+櫃內型隔震台
921 故宮自由場	80 (74.8)	80 (71.7)	129.5	132.4
921 故宮頂層	80 (81.4)	80 (78.3)	67.8	115.5
921 台北市政府自由場	80 (70.6)	80 (70.6)	107.8	93.5
921 故宮自由場	250 (241.8)	250 (244.1)	199.2	180.5
921 故宮頂層	250 (235.4)	250 (278.3)	371.5	175.8
921 台北市政府自由場	250 (262.4)	250 (251.0)	103.2	134.3
921 故宮頂層	400 (405.3)	400 (394.7)	131.0	309.7
921 台北市政府自由場	400 (439.2)	400 (424.6)	274.4	192.6
921 台北市政府自由場	350 (387.3)	350 (344.0)	126.5	169.8
921 故宮自由場	600 (649.4)		99.8	
921 故宮自由場	800 (733.6)		126.3	
921 故宮自由場	900 (899.1)		118.0	
921 故宮自由場	1000 (949.0)		214.8	

註：本院目前在陳列室使用的鐵製陳列櫃二個（尺寸為 100×100×268 公分）在其櫃底及櫃內分別裝置同一廠牌及機械結構的隔震台，陳列櫃內有複製的同式梅瓶各一個，梅瓶頸部分別裝置加速規一個，在人工地震台上試以不同的震譜和加速度進行實驗；本表中設定的加速度值 EW 為東西方向、SN 為南北方向，小括號內的數值為實驗時人工地震台實際操作值，最後二欄分別為複製文物頸部量測的加速度數據。在所有的實驗中，梅瓶並未傾倒，只隨著隔震台作同步位移。



圖一三 在振動台上間隔50公分放置四台櫃內型隔震台，隔震台上再放置數塊互相扣合的長條形不銹鋼銅板，可以發揮更好的功能。

瓷試體皆未傾倒或位移（圖一三）。這項實驗證明，將櫃內型隔震台串聯使用，可以發揮防震功能之餘，還可節省空間。不過，必須如此串聯使用的機會，可能微乎其微。

玖、博物館陳列室的基本防

震措施——結論

故宮科技室在國家地震工程研究中心所做的諸多實驗，顯示一般質地堅硬又容易破損的博物館藏品（尤其是瓷器），可以用黏性特佳的微晶蠟（Microcrystalline wax）或另一種品質類似的蠟 Museum wax 蘸粘於器底加以固定，效果良好而無妨礙觀瞻之虞（註三）。在各種形狀的瓷器中，梅瓶是重心比較高的一種，在底徑一六公分、高三九公分而重達六公斤的梅瓶器底圈足上的五個點，蘸上總量只有〇・四七公克的微晶蠟就能抵擋七級烈震的侵襲。如果試體換上重達八・七公斤而重心較低的天球瓶，在完全相同的實驗條件下也只造成輕微擺動而沒有傾倒。利用同量甚至更少的微晶蠟來固定比這種梅瓶小而重心又比較低的各種瓷器，必定可以滿足防震的需求。

既然瓷器之類的文物用這種簡易的方法就可以防止震害，隔震台再好也不必使用。體積特大、重心特高或在其他特殊情況下，才需要動用昂貴笨重而安裝起來又十分麻煩的隔震台。

器面無釉的陶器不能用微晶蠟固定的方式來防震，用局部套在塑膠細管中的釣魚線網綁比較安全可行。當然，要注意網綁施作的一些要領，以確保陶器不受損傷。

國畫立軸上端固定於牆面後，下端木軸應以弧形托鉤托住，地震來襲時讓木軸來回滾動即可消除大部分震波帶來的能量。

至於懸掛在牆上展示的油畫，畫框也可以用微晶蠟固定在牆面，如此即可避免遭受劇烈振動的破壞。

誌謝

國立成功大學建築系姚昭智教授在國家地震工程研究中心進行專題研究時，將大型人工振動台上搭建的實驗鋼架結構多餘的空間讓故宮防震研究小組使用，本小組乃得以和姚教授同步進行許多必要的實

驗，省去申請和排班實驗的手續，實驗期間也獲得姚教授的多方指導，是要特別在此表示感謝的。國家地震工程研究中心提供了國內首屈一指的實驗設備以及諸多人力、物力上的支援，讓本項研究得以順利完成，也要一併在此誌謝。

註釋

- 一、《地震百問》，交通部中央氣象局編，民國八十一年，頁一七。
- 二、森田稔，〈痛定思痛——阪神、淡路大地震與文化財〉，《文化財復甦——藝術與科學的接點》，日本文化財保存修復學會編，一九九五年，頁二〇～二九。
- 三、這類材料的國內代理商為捷登有限公司，02-25936883。

