

中華民國第 64 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學(二)科
佳作

052410

"堅實"起點，"穩固"未來-不同深度基礎各種加固
之比較

學校名稱：臺中市立大甲高級中等學校

作者： 高二 謝寓臣 高二 連定宇 高二 江品臻	指導老師： 林素苹
---	------------------

關鍵詞：基礎、加固、土壤液化

摘要

探討不同基礎、不同加固法及不同地質條件，對建築物耐震能力的影響。在無進行地質模擬的情況下，淺基礎無加固的耐震能力，優於無基礎和深基礎。深基礎因基樁與底板連接處易斷裂，而存在受損風險。對比各種加固法，彈力球體加固法的效果最佳，其次則是彈簧加固法。而因一代和二代彈珠的工法差異，二代在降低加速度值的效果較好。整體而言，免震效果最突出的加固方式為彈力球體和彈簧加固法。在模擬不同的地質條件下，彈力球體加固法在各種深度基礎中表現最佳。而深基礎彈力球體加固法在降低加速度值的能力上更是優於淺基礎；在土壤液化區的測試過程中，裝置彈力球體的建築物較不易有傾斜、沉陷及損壞的現象發生，所以基礎加固是必須被重視的。

壹、研究動機

地震依其發生的原因，可分為構造性地震、火山地震、衝擊性地震（黃明豐，2002），而臺灣位於環太平洋地震帶，更處於歐亞板塊與菲律賓海板塊相互碰撞的交界點上，屬於典型板塊碰撞所產生的大陸邊緣島嶼（陳姵妤，2016），使得臺灣一直都存在著頻繁的地震活動，因此在買房前，我們會特別關注房屋耐震設計及在特殊地質條件下的抗震能力，像是在土壤液化區，房屋受到劇震時，劇烈搖晃會破壞砂質顆粒間的平衡，使孔隙水壓升高，喪失彼此間接觸能力而變成泥漿狀，失去承載房屋的能力，使其沉陷與傾倒。因此土木技師、大地技師、結構技師等專業技術人員通常會考量地質條件，搭配不同的基礎型式做基礎結構設計，讓建物更穩定。但過去文獻對基礎構造設計的探討並不多，這讓我們好奇地震力對基礎工程設計與上部結構的影響。除了上部結構安全性重要，若基礎構造不穩固，有可能會導致整棟建築物傾倒與不均勻沉陷，並危害鄰房安全。

因此我們希望藉由這次研究，來探討基礎設計中不同加固方法對建物在地震過程中的損害程度以及在特殊地質條件中的抗震效果，以期望達到減少房屋傾倒及毀損的機率。

貳、研究目的

本研究是針對不同基礎結構深度，進行各類型基礎的加固方式，在上部結構各樓層加1.5 kg的鐵塊，並進行實際地震模擬測試。同時收集數據，並進一步分析、探討這些基礎結構行為，是否能在地震力作用下，有助於改善及降低房屋毀損的機率。

研究目的如下：

- 一、探討並比較「無基礎」、「淺基礎」及「深基礎」三種不同基礎結構，受到地震力作用下之基礎結構行為與抗震能力。
- 二、採用「無加固」、「彈簧」、「彈珠」、「黏土」、「十字擴柱」與「彈力球體」等方式，對無基礎、淺基礎和深基礎進行加固，探討並比較基礎結構之間的行為及抗震能力。
- 三、採用「彈簧」、「彈珠」與「彈力球體」等加固方式，進行實際模擬在不同地質條件下，所受到地震力作用之基礎結構行為與抗震能力之比較。

參、研究設備及器材

一、器材準備、加速度感測器及軟體設定

表一、實驗前準備與製作

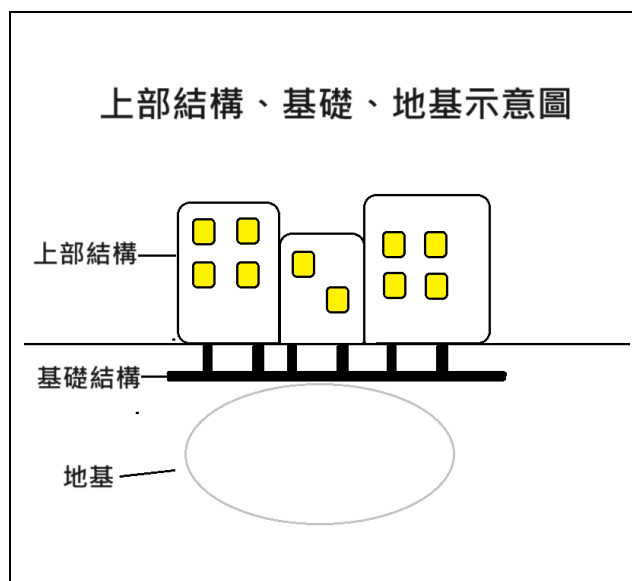
地震檢測器 (Vibrometer)	地震平台製作	Go Direct acceleration 加速度感測器的設定與調整
地震檢測器用於測量人體或周圍其他物體的振動，麥加利 (Mercalli) 強度量表，是用於測量地震強度的震動和衝擊損傷的級別，強度區分為 I~XII 級。可以按照圖一，來換算台灣震度。	先將方形鐵烏龜車放在桌上，並在鐵烏龜車下方四個中點，裝上兩組桌上足球機把手，再利利用束帶及絕緣膠固定，防止螺絲在使用過程中鬆動。	測量搖晃時 X、Y 和 Z 軸的加速度值，測試前先將儀器中的誤差值歸零，並且固定秒數 (30 秒)，資料檢測頻率為 60Hz。
 圖片來源：第二作者手機下載之軟體截圖	 圖片來源：第三作者自行拍攝	 圖片來源：第三作者自行拍攝

臺灣新地震震度分級與日本、美國的對照表		
臺灣CWB	日本JMA	美國USGS
		
2級	2級	II-III
3級	3級	II-III~IV
4級	4級~5弱	IV~VI
5弱	5弱~5強	VI~VII
5強	5強~6弱	VIII
6弱	6弱~6強	VIII~IX
6強	-	IX
7級	-	X+

圖一、各國震度分級對照表 (圖片來源：中央氣象局數位科普網)

二、建築物的介紹與製作

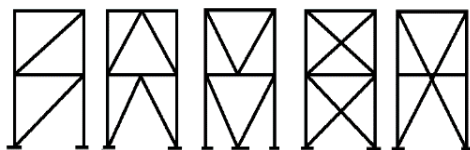
建築的結構分為上部結構、基礎構造與地基，以下將對建築物的構建系統敘述說明：



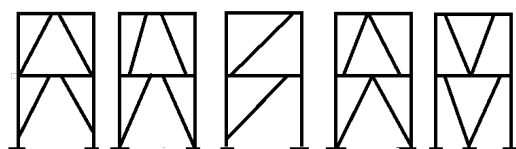
圖二、基本結構解釋圖（圖片來源：第一作者自行繪製）

- （一） 上部結構（Floor structure）：樓層結構（上部結構）（圖二）建築物基面以上結構，由梁、柱、板、牆等構建組成各樓層。其中梁與柱是建築物主要構架且極為重要。
- （二） 基礎結構（foundation structure）：建築物基面以下結構，基礎可分為淺基礎與深基礎。淺基礎類型有獨立基礎、聯合基礎、筏式基礎等；深基礎類型有樁基礎。各種基礎加固設計之目的，在於增加建築物於土壤液化區時，抵抗強震後差異性沉降及傾斜之能力。（圖二）
- （三） 地基（Foundation）：地基是位於基礎板以下的地層，其作用是承受基礎傳遞過來的建築荷重。地基的性質直接影響建築物的穩定性和安全性，應該具有足夠的承載能力，以確保建築物在不同地質條件下都能保持穩定。（圖二）
- （四） 斜撐架構系統：同心斜撐系統（Concentrically Braced Frame,CBF）傳統上使用較為廣泛的架構系統，尤其在高而窄的架構體上使用，同心斜撐系統在抵抗側力的特性上，以斜撐的軸力來傳達大部分的側力，吸收大部分的地震能量（李景亮、梁英文，1995）（圖三）。

（五）斜撐架構系統：偏心斜撐系統（Eccentrically Braced Frame ,EBF）與同心斜撐的基本分別，為斜撐中心線並不直接通過梁柱接頭中心或與其他斜撐共同交於樑中心線上，留有適當的距離，稱為偏移量連桿（link）（李景亮、梁英文，1995）（圖四）。



圖三、同心斜撐系統（圖片來源：第三作者自行繪製）



圖四、偏心斜撐系統（圖片來源：第三作者自行繪製）

表二、基礎建築物的製作、基礎長度分類（圖片來源：第二作者自行拍攝）

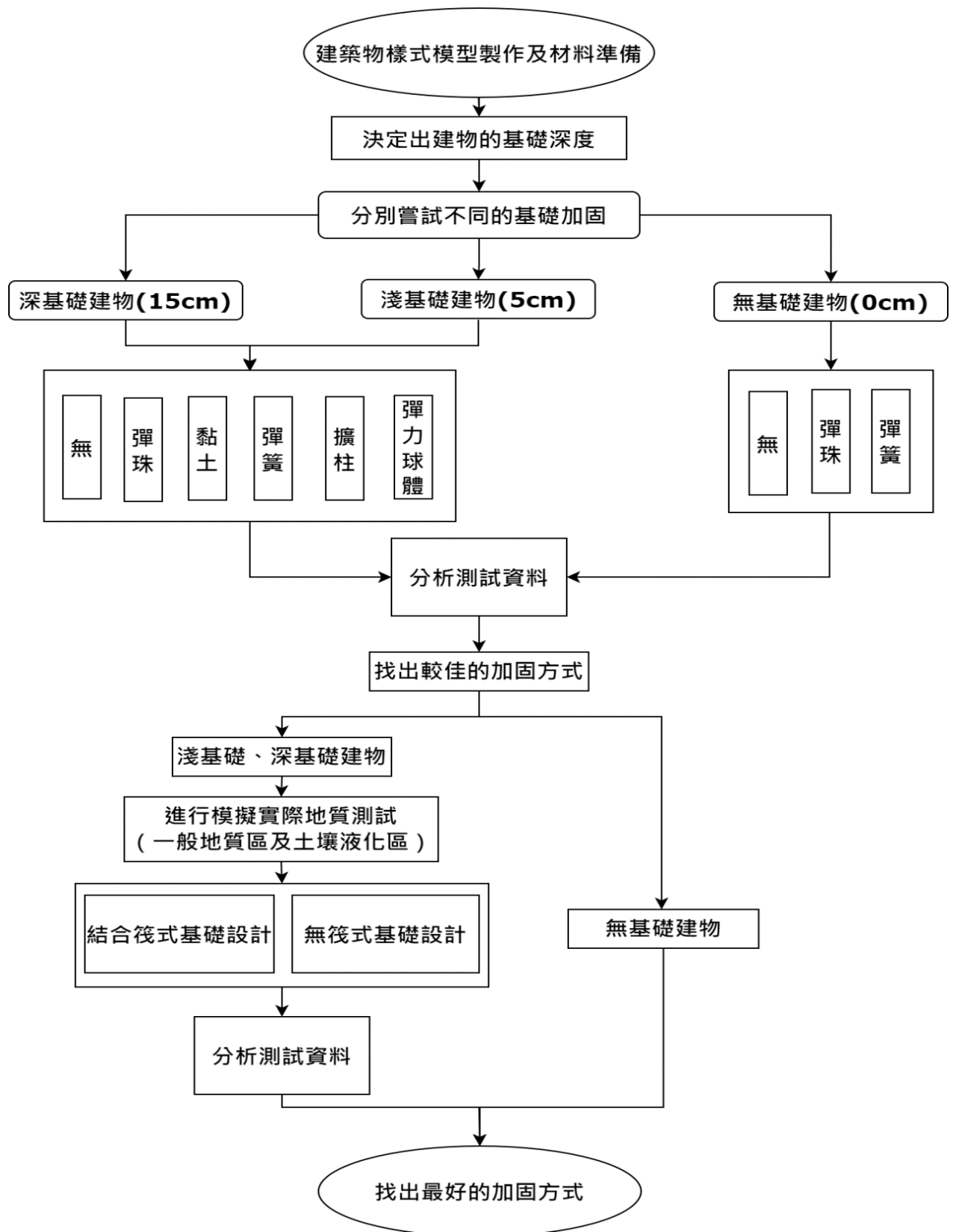
無基礎（0cm）	淺基礎（5cm）	深基礎（15cm）
		

三、工具與耗材

巴爾沙木（*Ochroma pyramidale*）、熱熔膠槍、熱熔膠條、針筒、彈珠、彈簧、瓦楞板、木質底板、紙黏土、水管、線鋸、美工刀、剪刀、箱子、砂紙、打火機、棉線、橡皮筋、包塑鐵絲線、計時器、彈力繩束帶、鐵塊、土壤和軟式棒球。

肆、研究過程或方法

一、本實驗流程



圖五、實驗流程圖（圖片來源：第一作者自行繪製）

二、本實驗使用的測量方式

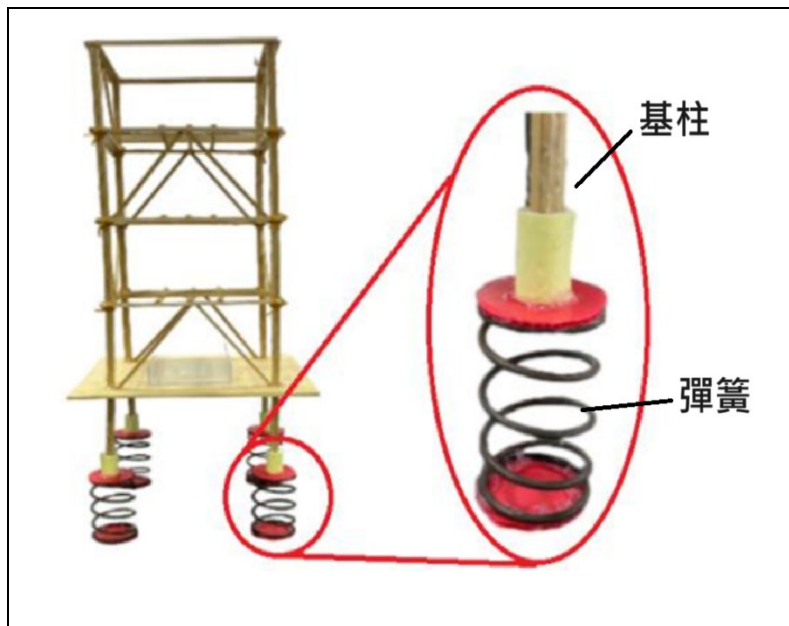
我們以三向量合成波來計算加速度大小，與中央氣象局的方式不同。利用這個加速度值並搭配手機軟體-地震檢測器（Vibrometer）的使用，來比較不同的基礎加固方法對於建築物免震、抗震及消能效果。利用三向量合成波，可以直接觀察加固方式是否能够有效降低加速度值，所以本實驗採用此種方式來進行比較。

三、研究方法

（一）基礎構造加固製作方法：

1. 彈簧加固法

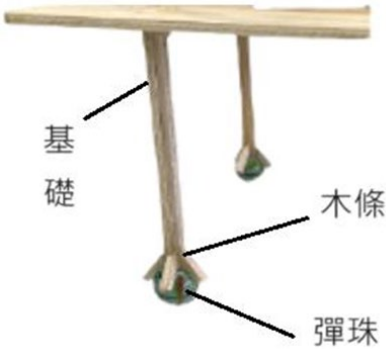
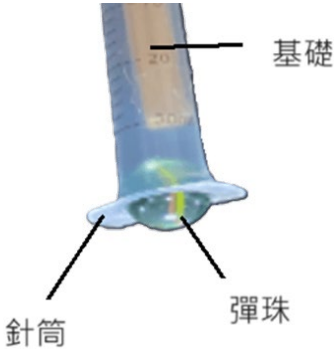
先把瓦楞板裁剪成與彈簧上下兩端圓形面積相等的大小後，再黏貼於彈簧兩面使其平整，接著將兩平整面黏在建築物的基柱下方。黏貼前先在4支基柱黏上泡棉膠，其目的是為了增加彈簧與基柱間的接觸面積，使黏著力更加牢固。（圖六）



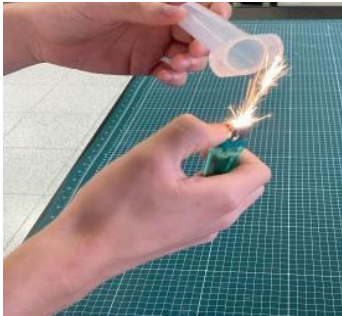
圖六、彈簧加固法（圖片來源：第一作者自行拍攝、製作）

2. 彈珠加固法（第一代、第二代）

表三、第一代、第二代彈珠加固法的比較（圖片來源：第二作者自行拍攝）

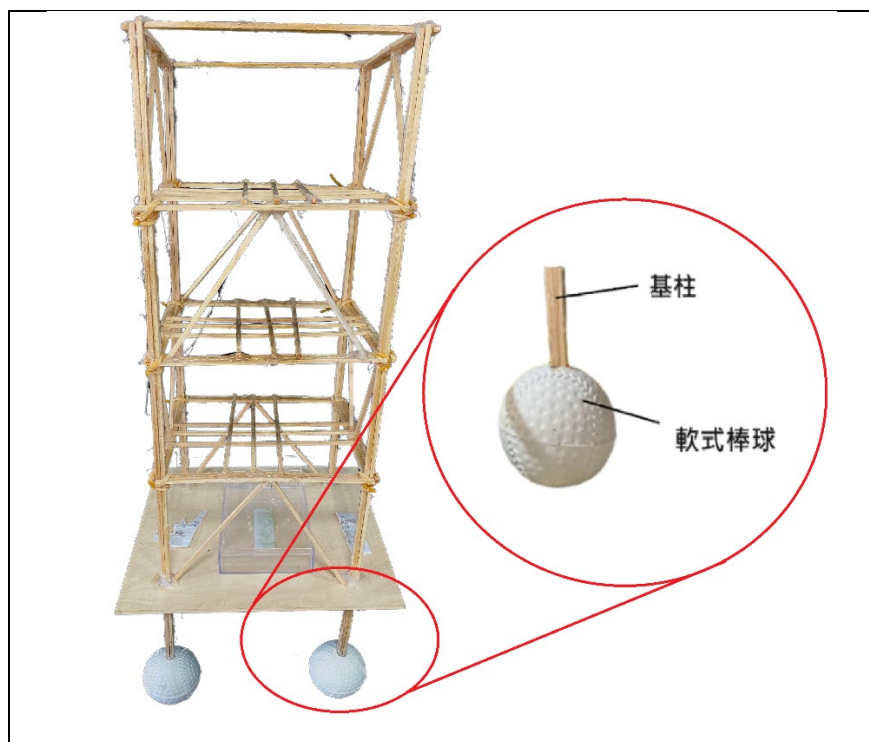
第一代	第二代
基礎設計是採用類似爪鑲法的方式將彈珠固定。	先將四支針筒裁切成相同的長度，使用打火機加熱軟化針筒底部後迅速把彈珠置入使其固定於針筒內，再將4支基礎插入針筒完成前置作業。
	

表四、二代彈珠的製作（圖片來源：第二作者自行拍攝）

1.準備製作的材料：針筒、彈珠、打火機、有洞的棉線捆桶（固定彈珠用）。 	2.使用打火機加熱針筒使其軟化。 
3.先將彈珠置放在棉線捆桶中固定，且迅速的將針筒插入棉線捆桶上。 	4.因為捆桶中露出的彈珠高度相同，所以固定在針筒管上的彈珠面積和高度也都會相同。 

3. 彈力球體加固法

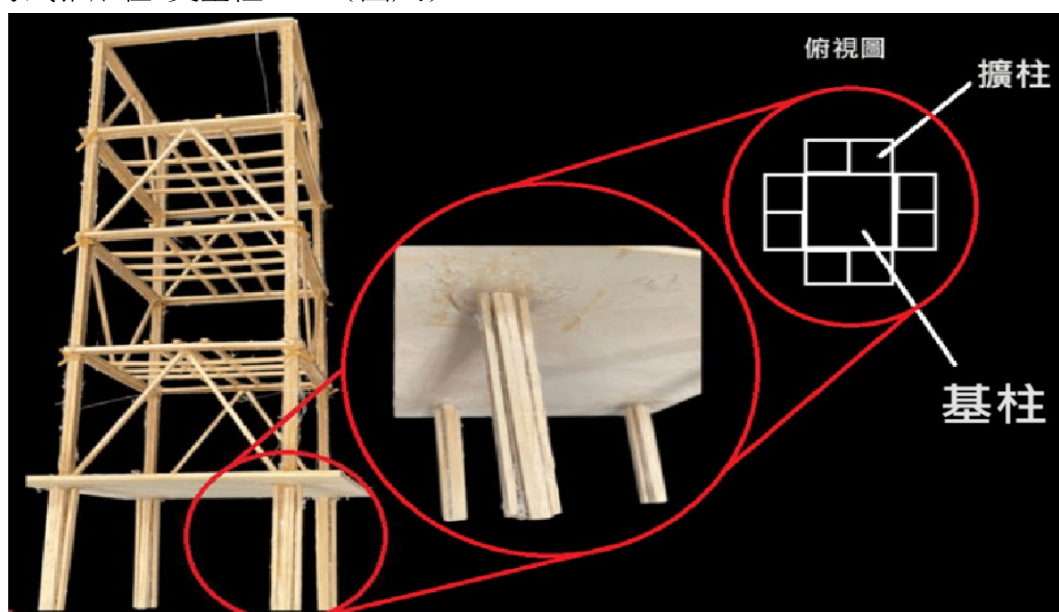
此方式是參考「彈簧」與「彈珠」加固法，並將兩者特性結合的加固法。先使用錐子及鉸槍將軟式棒球戳入相同深度的圓洞後，再將不同深度的基礎置入。（圖七）



圖七、彈力球體加固法（圖片來源：第一作者自行拍攝、製作）

4. 十字擴柱加固法（淺基礎、深基礎）

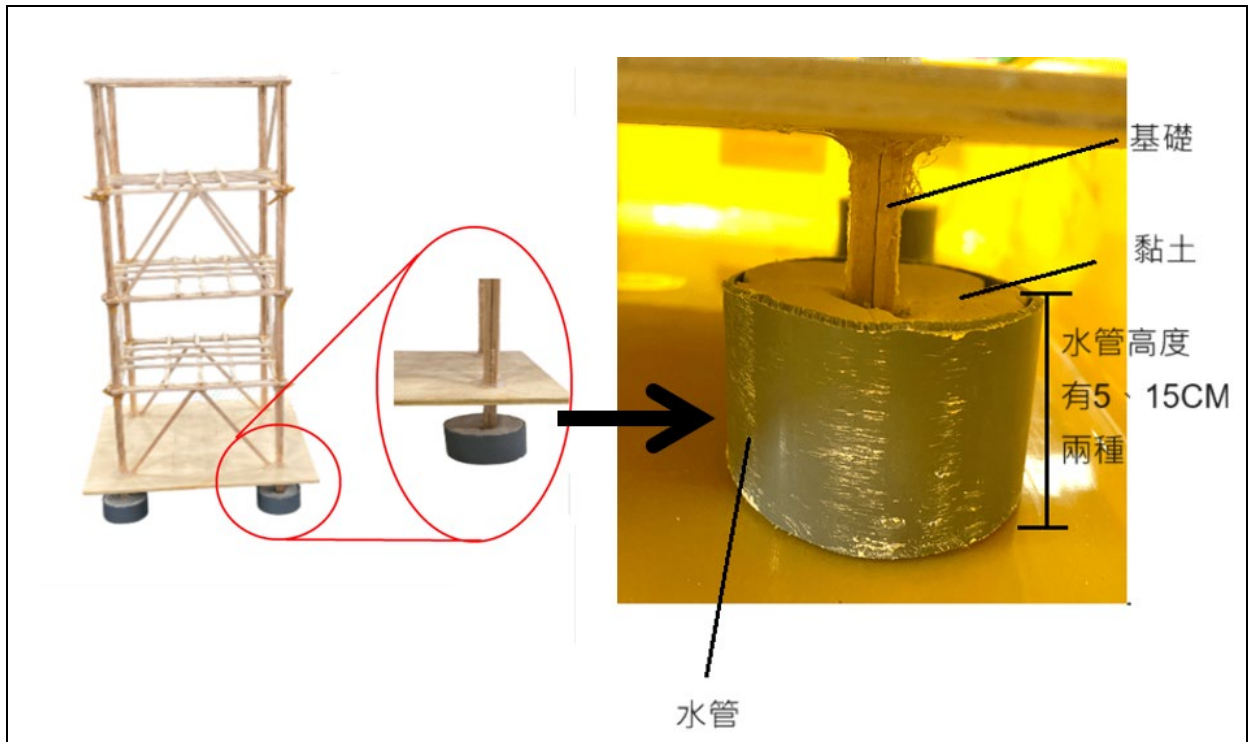
裁切32支木條，每支木條與基礎的長度相同，先將木條倆倆合併，共16組，再以對稱方式黏貼在4支基柱上。（圖八）



圖八、十字擴柱加固法（圖片來源：第二作者自行拍攝、製作）

5. 黏土加固法（淺基礎、深基礎）

先量取5、15cm的水管並裁切，再把黏土充填至水管內部，並將4支基礎柱嵌入其中使其穩固。（圖九）



圖九、黏土加固法（圖片來源：第一作者自行拍攝、製作）

6. 筏式基礎設計

先裁切邊長30*30公分的木質底板一片，接著將瓦楞板切割成30*5公分長條形狀，並用膠帶和熱熔膠包圍住底板四周，形成一個類似竹筏的構造。（圖十）

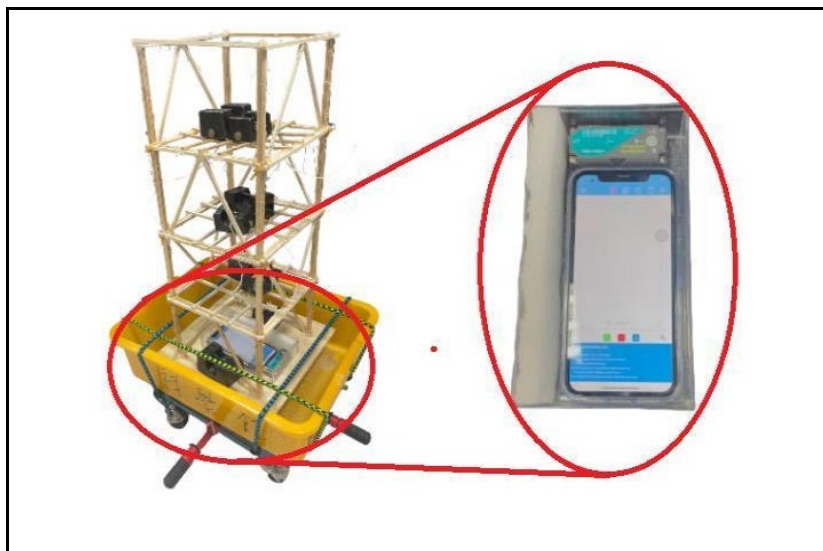


圖十、筏式基礎設計（圖片來源：第二作者自行拍攝、製作）

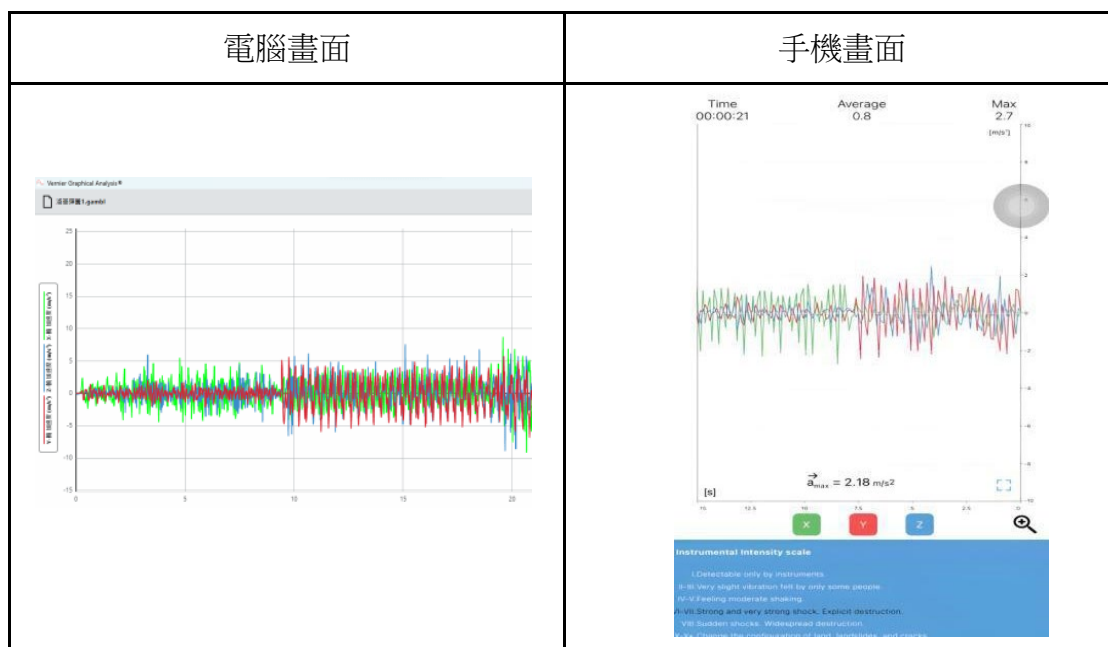
(二) 實驗測量和研究方法

1. 模擬地震震動搖晃測試：（圖十一、十二）

- (1) 先把裝有建築物的置物皿，用彈簧繩固定在震動平台上。
- (2) 分別在每層樓的樓板上安裝1.5公斤的鐵塊。
- (3) 先將手機軟體Vibromete做好設定後，與三軸加速度感測器一起放入壓克力盒中，並用泡棉膠固定在一樓樓地板上。
- (4) 測試時間設定為30秒，每0.02秒收集一個數據，配合計時器將X軸、Y軸方向搖晃時間各設定為10秒，第20秒後為兩個方向同時搖晃，總計30秒。



圖十一、模擬地震震動搖晃測試（圖片來源：第二作者自行拍攝、製作）

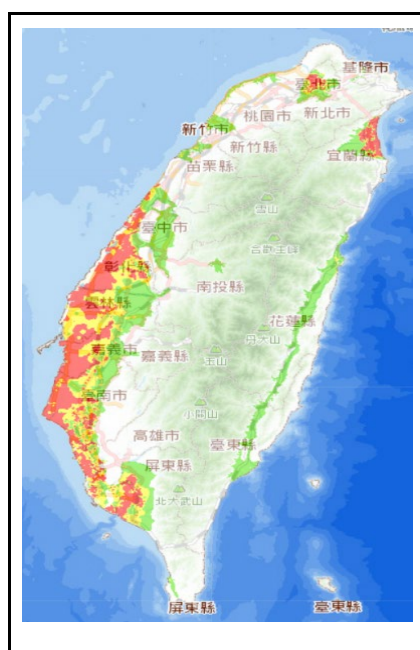


圖十二、測試過程儀器畫面（圖片來源：第一作者自行拍攝）

2. 實際地質模擬測試：

土壤液化是指土壤在地震力影響下，性質轉變為類似液體狀態使強度大幅下降，進而引發建物損壞。政府對於土壤液化潛勢調查圖資可分為三級。第1級圖資由中央政府測製，比例尺為1：25,000，提供國土規劃與可行性研究的基礎資料，但不得直接引用於工程規劃或設計。第2級和第3級分別由地方政府及開發單位開發，按照相關規範進行細部地質探查與評估。

土壤液化潛勢調查，主要是為了協助了解平原都會區遭遇土壤液化的災害範圍，作為都市防災預先規劃的參考。（經濟部地質調查及礦業管理中心）（圖十三）

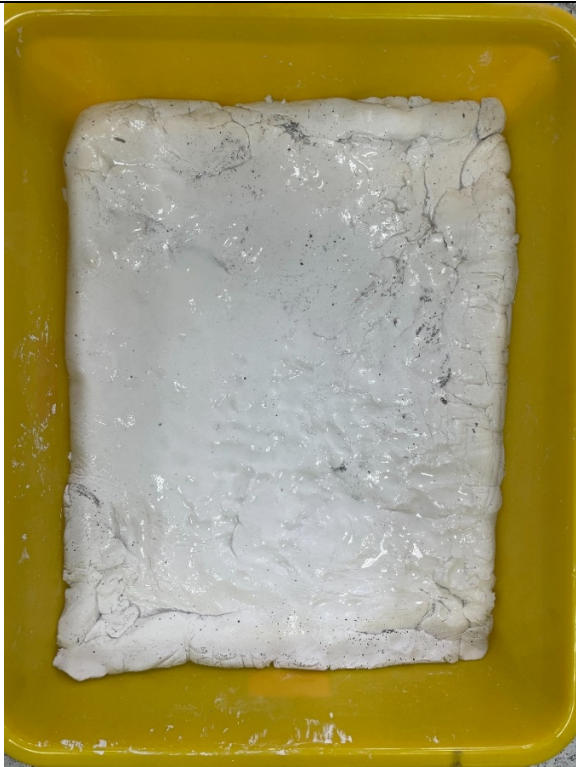


圖十三、土壤液化潛勢區

（圖片來源：經濟部地質調查及礦業管理中心土壤液化潛勢查詢系統）

先將砂和土混合成「砂質土壤」後再加入液態水，模擬土壤液化區的地質條件。由於砂土的孔隙度較大，加入水後進行搖晃測試，會使砂土顆粒排列更緊密，並與孔隙水混合後變成泥漿狀，此模擬與現實生活中「土壤液化區」的條件相同。而黏土則是模擬地質條件較好的地區，因為黏土層緊密度優於土壤，所以在加入水後進行地震力測試時，較不容易使水滲出表面，為較好的地質模擬條件。（表五）

表五、不同地質條件（圖片來源：第二作者自行拍攝）

模擬「土壤液化區」	模擬「一般地質區」
	

分別將兩個放置建築物的置物皿加入500ml的水後，再填鋪約5公分的砂土層（模擬土壤液化區）和黏土層（模擬一般地質區），水與砂土層及黏土層的比例約1：20。建置好兩種不同條件的地質環境後，再將具有彈簧、彈珠和彈力球體結合「筏式」設計的基礎，置入安裝並進行地震力測試。（表五）

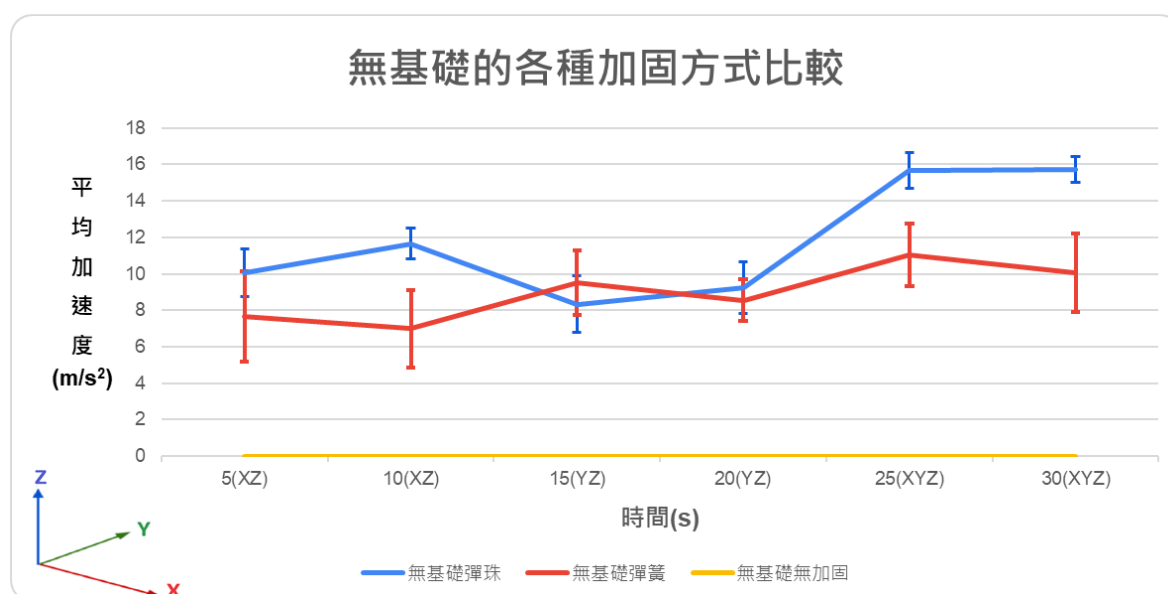
伍、研究結果

一、不同深度基礎構造的各種加固法比較

先以計時器設定 X、Y 軸以及同時搖晃的時間，其中 X 軸為前後搖動，Y 軸為左右搖動，Z 軸則是晃動過程中自然產生。每種加固方法各進行四次測試（ $n=4$ ）並取其平均值，並用 T-test（ p ）進行分析。（ $p>0.05$ 表示資料相關性大）

（一）無基礎構造的各種加固法比較

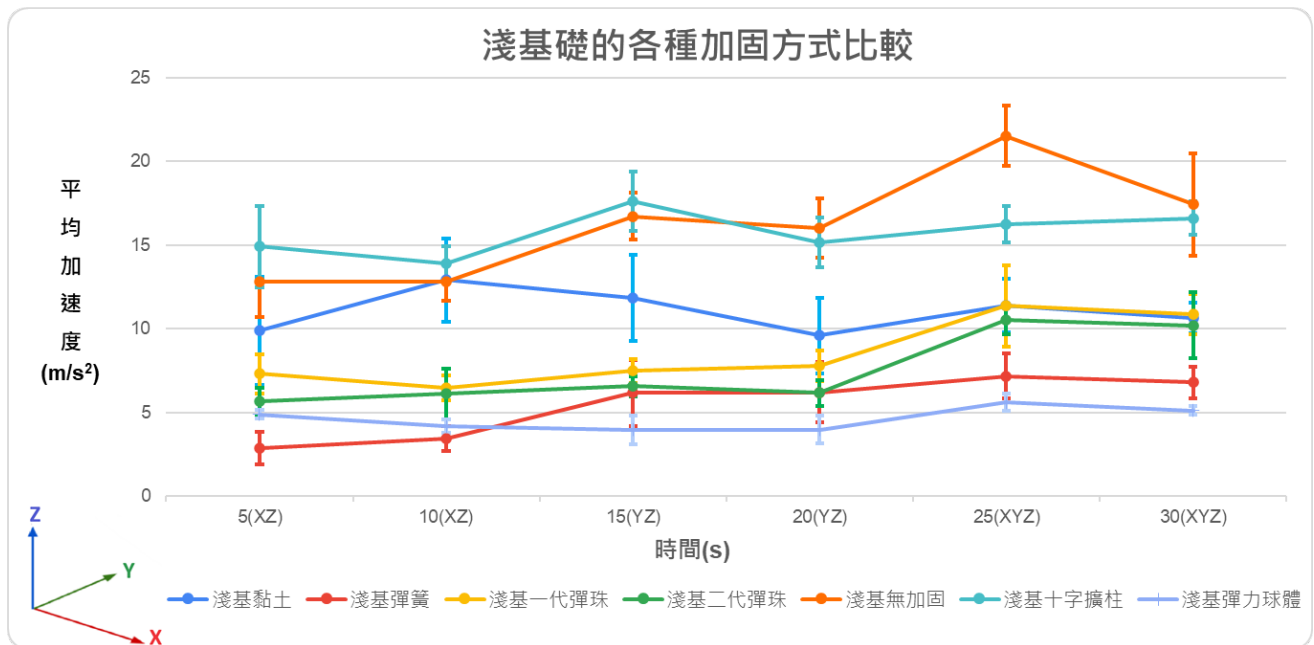
無基礎構造無加固在第一次測試時就已經損毀，所以無法進行後續二、三、四次之實驗。而從圖中得知，使用彈簧對減少加速度值的能力較好（ $p<0.05$ ），且在真實模擬地震的 X、Y、Z 軸三方向同時搖晃（20~30 秒）下的效果最為顯著。（圖十四）



圖十四、無基礎構造彈珠、彈簧、無加固的比較（ $n=4$ ）（圖片來源：第一作者自行製作）

（二）淺基礎構造各種加固法的比較

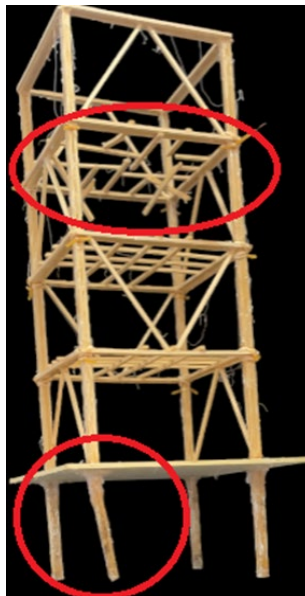
由測試結果可知「淺基礎彈力球體」是所有加固法中最為有效的一種模擬隔震的方式（圖十五），它大大地降低了加速度值，而十字加固法是較為無效的加固方式，另外，在一代彈珠加固和二代彈珠加固的比較上也能看出這兩種設計中，二代彈珠加速度值都是比一代彈珠加固法小。



圖十五、淺基礎的各種加固方式比較 (n=4) (圖片來源：第一作者自行製作)

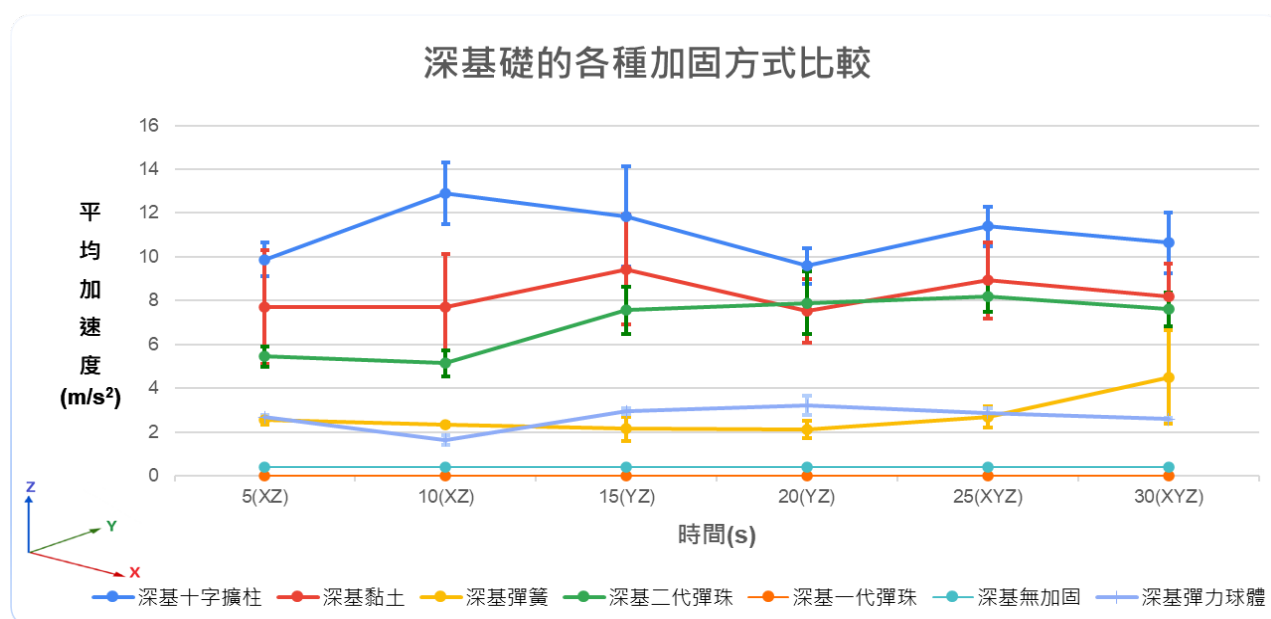
(三) 深基礎構造各種加固法的比較

深基礎「無」加固以及深基礎「一代彈珠」加固法在測試過程中損毀。深基礎無加固是由於沒有減震及制震設計，導致基柱斷裂和樓地板塌陷（圖十六）。深基礎一代彈珠則是因為爪鑲法的設計缺陷，導致於測試過程中彈珠容易脫落造成建築物傾斜，因偏心荷載和側向壓力不平衡，使結構不穩而造成建築物毀壞，所以這兩種皆無法進行後續的數據採集。



圖十六、深基礎無加固構造損壞圖 (圖片來源：第二作者自行拍攝、製作)

由測試結果可知「彈力球體加固法」設計在深基礎加固法中的表現最好，是最具免震效果的加固方式，數據上顯示其具有和「彈簧加固法」差不多的平均加速度值（ $p>0.05$ ），且在平均加速度值的起伏上也相對較小，數值呈現較平穩的狀態，與其他加固法的數據拉開了差距。（圖十七）

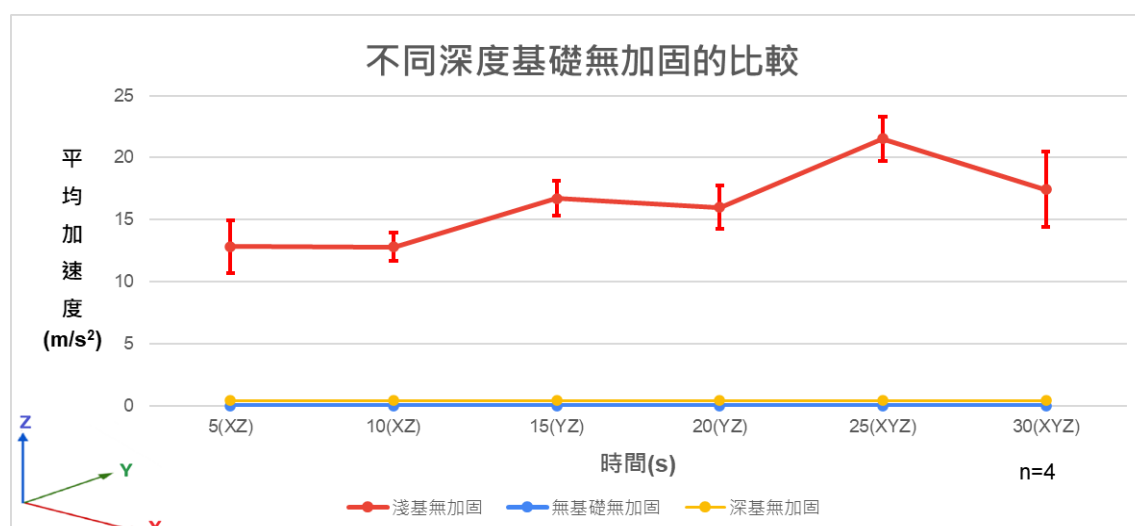


圖十七、深基礎的各種加固方式比較（ $n=4$ ）（圖片來源：第一作者自行製作）

二、相同加固方式，不同深度基礎之比較

（一）無加固

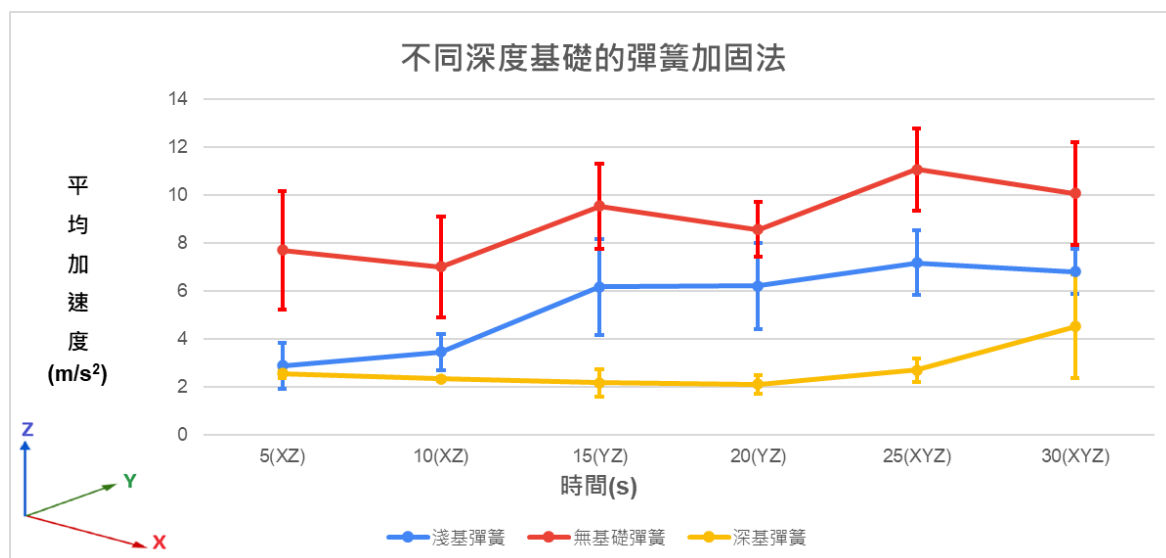
由測試結果得知，淺基礎無加固測試過程中無任何毀損，而無基礎的樓板塌陷、深基礎的基樁（pipe）斷裂，兩種不同深度構造皆有破壞。（圖十八）



圖十八、不同深度基礎的無加固（ $n=4$ ）（圖片來源：第一作者自行製作）

（二）彈簧加固法

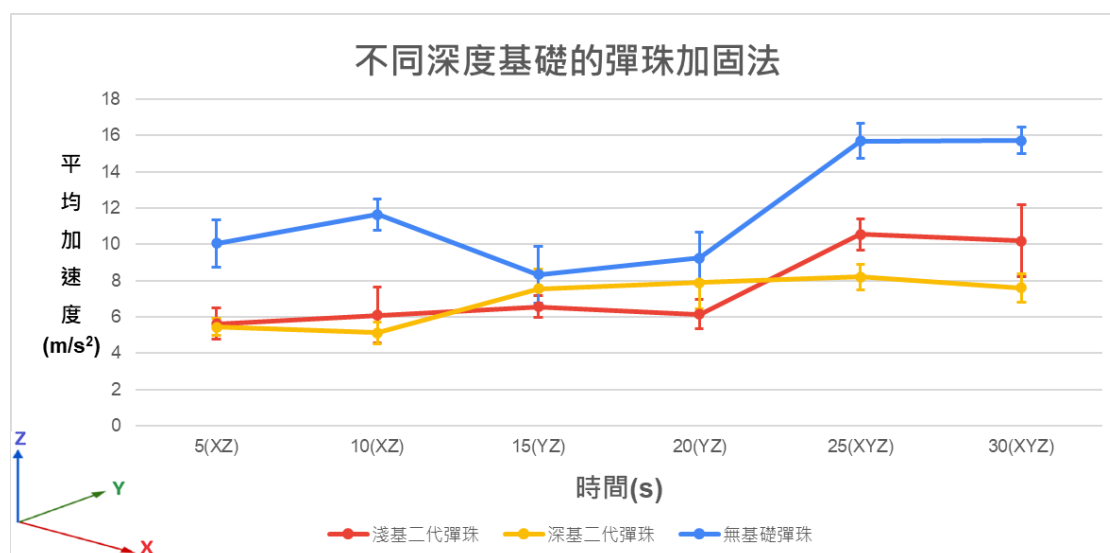
由測試結果得知，深基礎彈簧的穩定度較佳，平均加速度也降低到約 2.0 m/s^2 左右的數值，深基礎彈簧加固法雖然在X方向上的平均加速度值和淺基礎彈簧的差不多（ $p>0.05$ ），但在最後的XYZ方向上平均加速度值卻有緩緩上升的趨勢。（圖十九）



圖十九、不同深度基礎的彈簧加固法（n=4）（圖片來源：第一作者自行製作）

（三）二代彈珠加固法

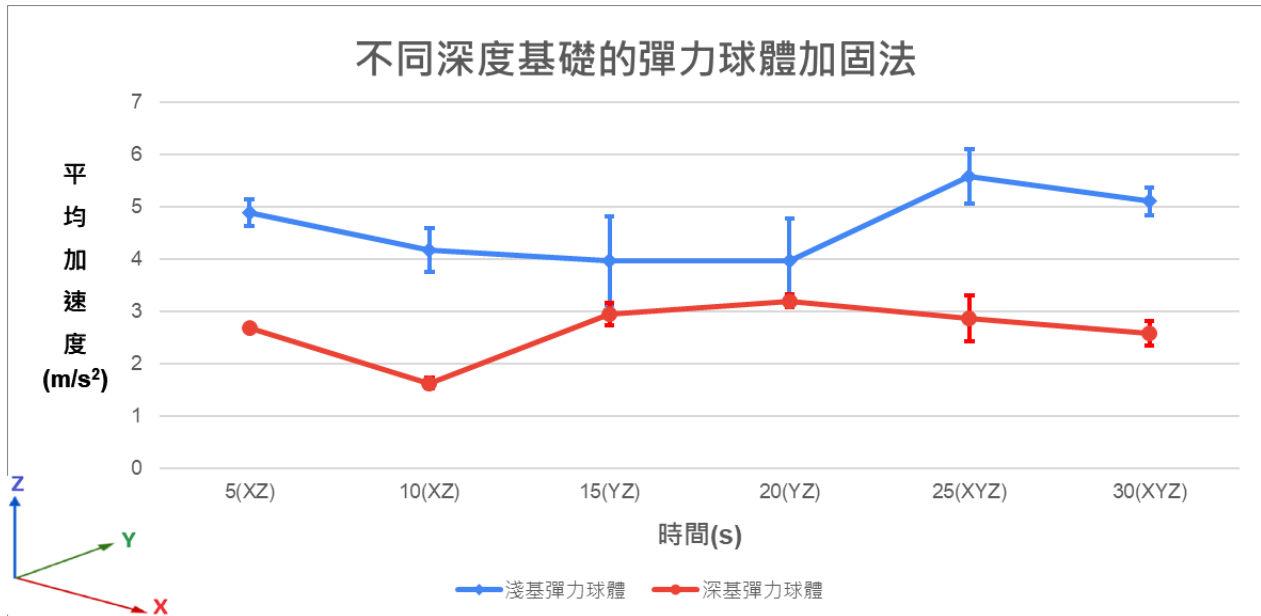
在不同深度基礎構造的彈珠加固法實驗數據中可知，三者差距不會太大，但整體上淺基礎二代彈珠加固法和深基礎二代彈珠加固法的平均加速度值還是比無基礎彈珠小（ $p<0.05$ ）。（圖二十）



圖二十、不同深度基礎的彈珠加固法（n=4）（圖片來源：第一作者自行製作）

(四) 彈力球體加固法

無基礎因為是平面底板設計而無法使用彈力球體加固法，所以未進行測試。由圖表得知，深基礎彈力球體加固法在降低加速度值中的表現最好 ($p < 0.05$)。(圖二十一)

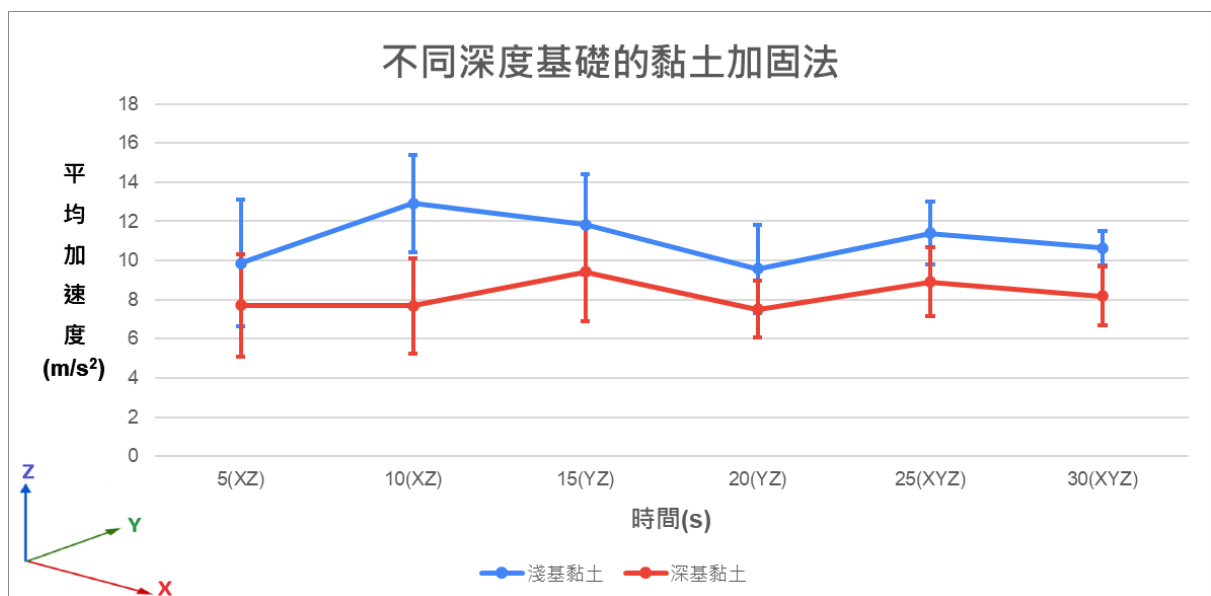


圖二十一、不同深度基礎的彈力球體加固法 (n=4) (圖片來源：第一作者自行製作)

(五) 黏土加固法

無基礎因為是平面底板設計而無法使用黏土加固法，所以未進行測試。

由不同深度基礎的黏土加固法測試結果知，深基礎黏土加固法的消能效果優於淺基礎，平均加速度值的差異也呈現顯著的差距 ($p < 0.05$)。(圖二十二)

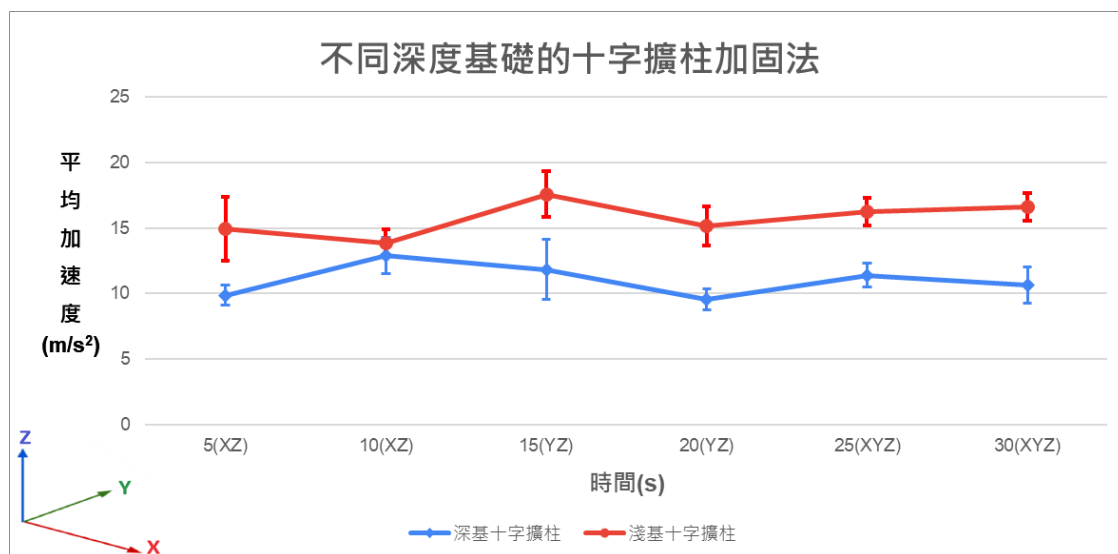


圖二十二、不同深度基礎的黏土加固法 (n=4) (圖片來源：第一作者自行製作)

（六）十字擴柱加固法

無基礎因為是平面底板設計而無法使用十字擴柱加固法，所以未進行測試。

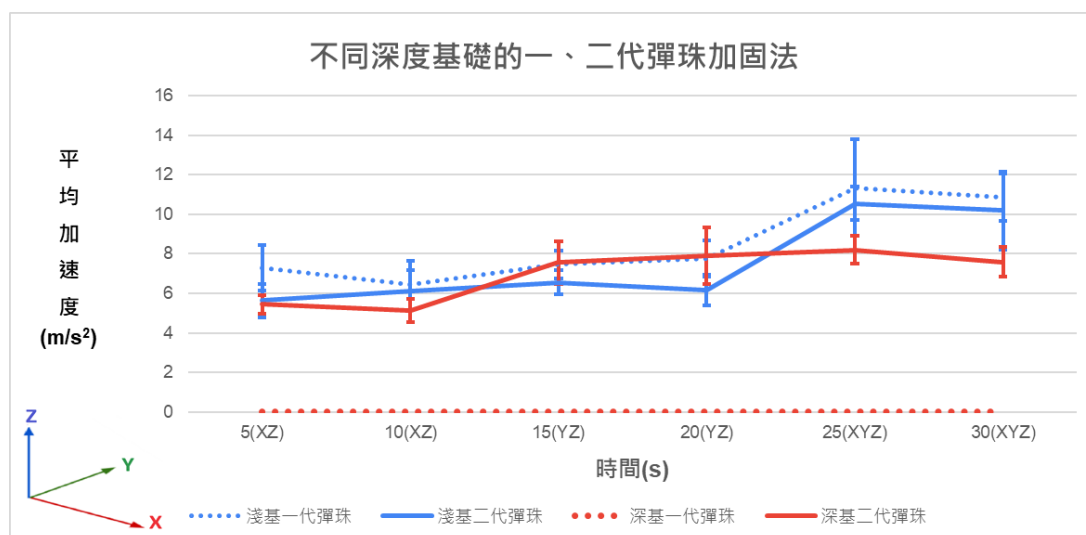
由測試結果看出，深基礎十字擴柱加固法的平均加速度較淺基礎小（ $p < 0.05$ ），而相較於淺基礎，深基礎有較優越的抗震效果。（圖二十三）



圖二十三、不同深度基礎的十字擴柱加固法（ $n=4$ ）（圖片來源：第一作者自行製作）

（七）一、二代彈珠加固法比較

深基礎第一代彈珠加固法在測試過程中因基柱的斷裂所以無法進行後續測試。根據實驗數據顯示，第二代彈珠加固法相較於第一代表現更為優越。然而，單獨觀察第二代彈珠加固法時，在同時搖動的情況下（20~30秒），深基礎的效果卻略勝於淺基礎（ $p < 0.05$ ），結果與深基礎第一代彈珠加固法在測試中斷裂的情況呈現極大的差異。（圖二十四）

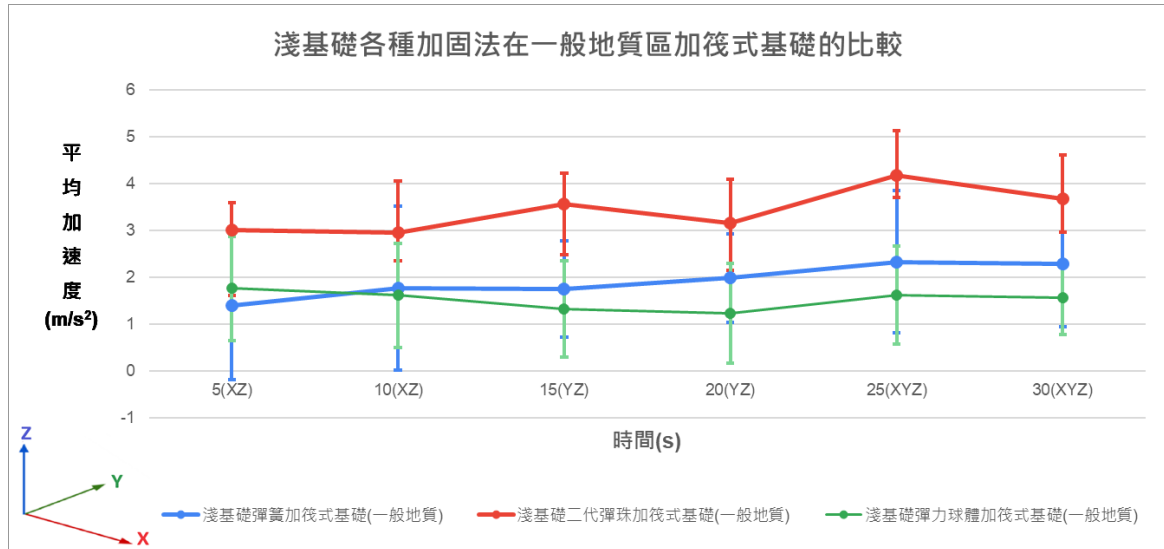


圖二十四、不同深度基礎的一、二代彈珠加固法（ $n=4$ ）（圖片來源：第一作者自行製作）

二、在「一般地質區」不同加固方式於結合筏式基礎設計之比較

(一) 淺基礎各種加固法

在前10秒淺基礎彈簧加固法的平均加速度值最低，之後隨著時間拉長，平均加速度值呈現逐漸上升的趨勢，甚至超越淺基礎彈力球體加固法。而淺基礎彈珠加固法則是所有方式中平均加速度最大者($p < 0.05$)。(圖二十五)

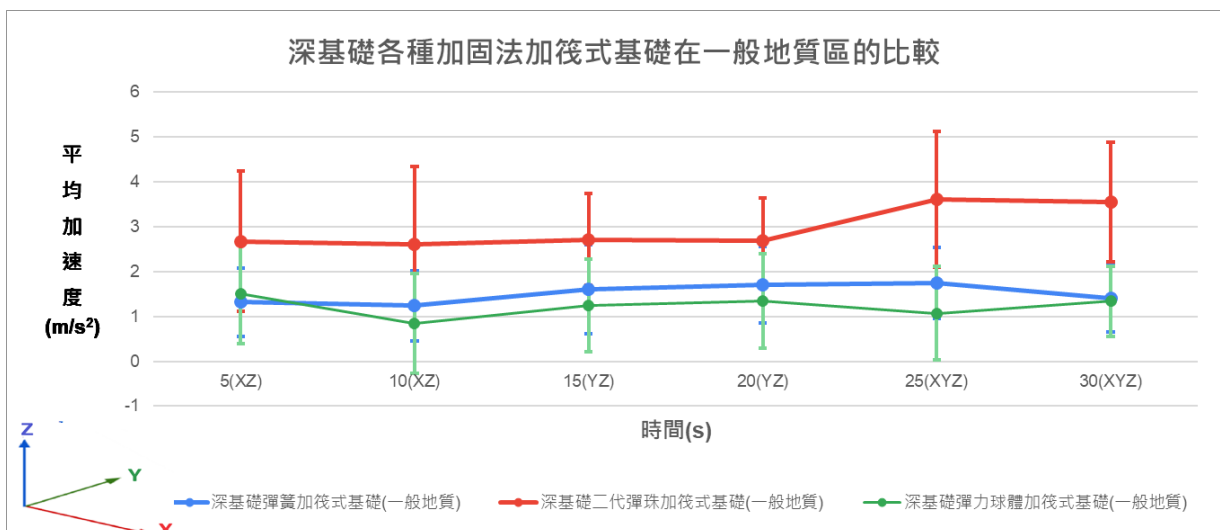


圖二十五、淺基礎各種加固法在「一般地質區」結合筏式基礎的比較 (n=4)

(圖片來源：第一作者自行製作)

(二) 深基礎各種加固法

彈力球體加固法及彈簧加固法兩者平均加速度值的表現差距不大 ($p > 0.05$)，數據平穩，起伏也不大。而二代彈珠加固法是三種方式中加速值最高者。(圖二十六)



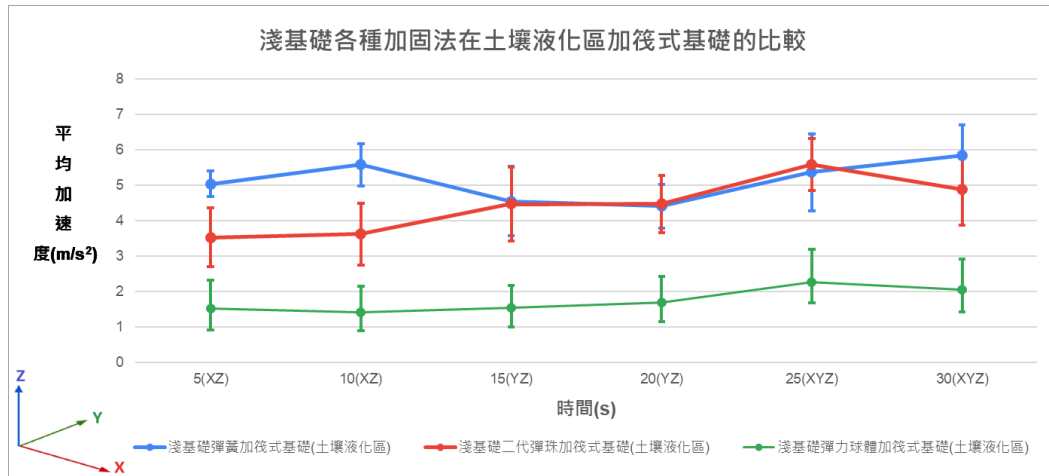
圖二十六、深基礎各種加固法在「一般地質區」結合筏式基礎的比較 (n=4)

(圖片來源：第一作者自行製作)

三、在「土壤液化區」不同加固方式於結合筏式基礎設計之比較

(一) 淺基礎各種加固法

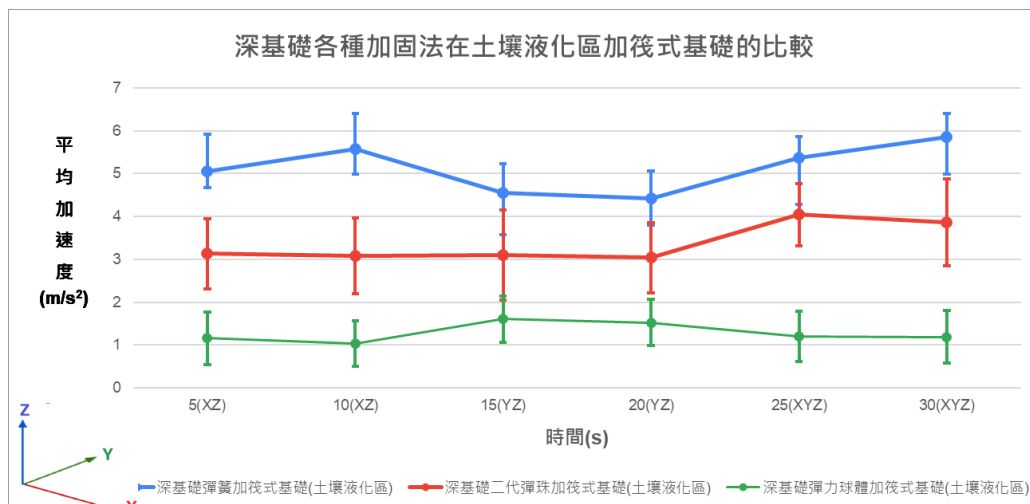
淺基礎彈簧加固法在前10秒測試時平均加速度值最大，但到了10~25秒時，彈珠加固法的平均加速度值開始呈現持續上升的現象，數值和彈簧加固法差不多($p>0.05$)，直到25~30秒時才又些微下降。而彈力球體加固法始終是最平穩，平均加速度值最小的($p<0.05$)，是三者在地質區表現最好的加固方式。(圖二十七)



圖二十七、淺基礎各種加固法在「土壤液化區」結合筏式基礎的比較 (n=4)
(圖片來源：第一作者自行製作)

(二) 深基礎各種加固法

深基礎彈珠加固法在前20秒的平均加速度值非常平穩，但在20秒後有上升的趨勢。相較於其他兩種加固法，彈力球體加固法的平均加速度值最小($p<0.05$)，數值與淺基彈簧加固法呈現明顯差異，在液化地質區中是一種最好的加固方式。(圖二十八)

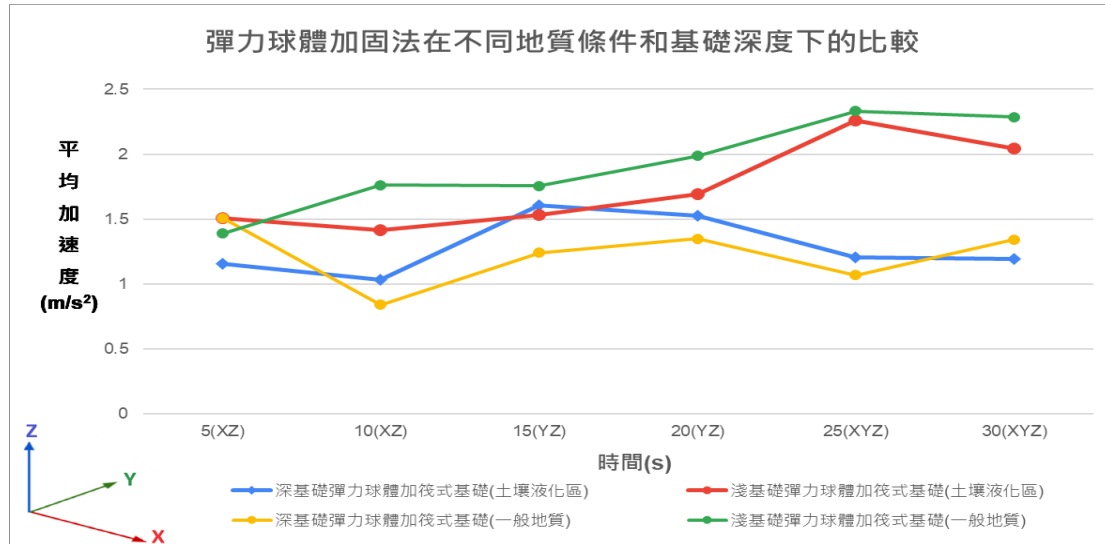


圖二十八、深基礎各種加固法在「土壤液化區」結合筏式基礎的比較 (n=4)
(圖片來源：第一作者自行製作)

四、相同加固方式於結合筏式基礎設計下在不同地質條件中的比較

(一) 彈力球體加固法在不同地質條件及不同深度基礎之比較

由圖表數據知，彈力球體加固法在所有不同地質條件及不同深度基礎中，都有非常不錯的表現，因其本身具有免震及消能的特性，以至於可以有效降低加速值，尤其是深基礎彈力球體加固在不同地質條件下，平均加速度值皆比淺基礎彈力球體要來的小（ $p < 0.05$ ）。

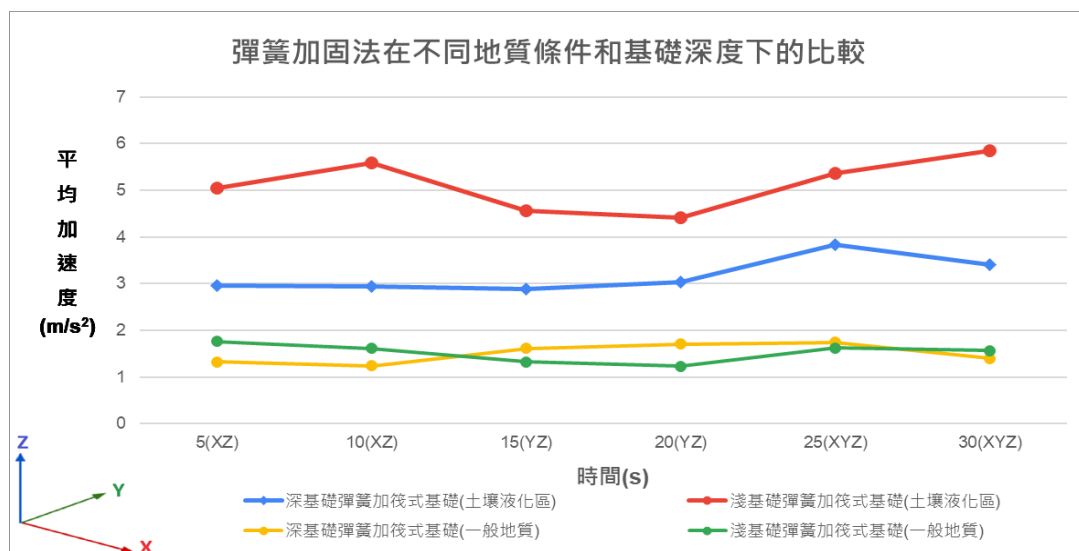


圖二十九、彈力球體加固法在不同地質條件和基礎深度下的比較（ $n=4$ ）

（圖片來源：第一作者自行製作）

(二) 彈簧加固法在不同地質條件及不同深度基礎之比較

彈簧加固法結合筏式基礎設計測試中，在一般地質區加速度值較小，淺基礎及深基礎數值相近（ $p > 0.05$ ），但兩者在土壤液化區數據卻大幅上升，由圖表呈現出的結果得知，彈簧加固法較不適合使用在土壤液化區。（圖三十）

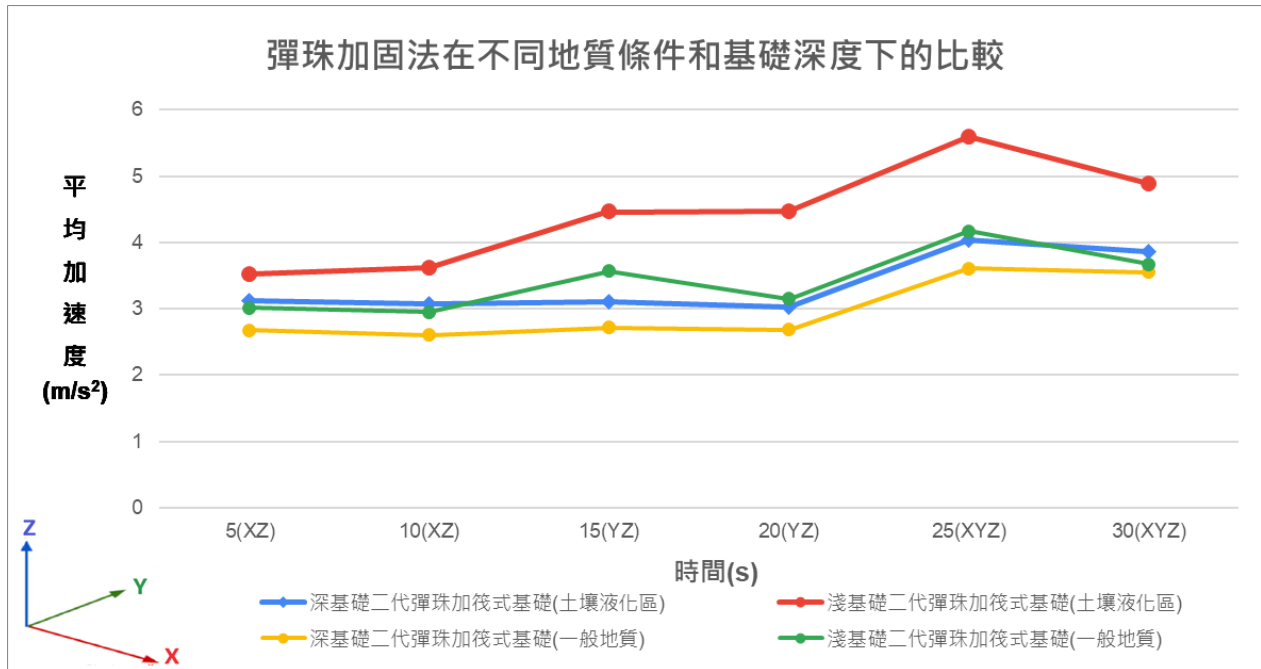


圖三十、彈簧加固法在不同地質條件和基礎深度下的比較（ $n=4$ ）

（圖片來源：第一作者自行製作）

（三）彈珠加固法在不同地質條件及不同深度基礎之比較

實驗結果中可得知，一般地質區的深基礎彈珠加固法加筏式基礎平均加速度值最低，而土壤液化區的深基礎及一般地質區的淺基礎（ $p>0.05$ ），平均加速度值差異不大。淺基礎彈珠加固法加筏式基礎在土壤液化區，呈現的平均加速度值最大。（圖三十一）



圖三十一、彈珠加固法在不同地質條件和基礎深度下的比較（n=4）

（圖片來源：第一作者自行製作）

陸、討論

一、討論基礎構造深度差異

在實驗中我們把基礎構造深度分為無基礎、淺基礎、深基礎，長度分別為完全無基礎構造（0cm）、三分之一層樓高（5cm）、一層樓高（15cm）。

在表六中可以知道只有淺基礎能夠順利完成四次的測試且無損壞，代表在本次實驗中它相對於其他深度的基礎，擁有較好的耐震能力。在實驗測試中發現，無基礎的設計容易造成建築物直接倒塌；而深基礎破壞的點，通常為基礎與底板的連接處，這是因為基柱深度較深，導致力臂較長，以至於深基礎基柱和底板的連接處（支點），較容易發生斷裂的情形。

深基礎和淺基礎最佳的加固方式皆是「彈力球體加固法」，無基礎最佳的加固方式則是「彈簧」加固法。淺基礎的任何加固方法皆無斷裂，在測試過程中深基礎的「一代彈珠加固法」和「無加固」斷裂，無基礎則是「無加固」斷裂。

表六、各種基礎構造與加固方式之綜合比較（圖片來源：第二作者自行製作）

✓：最佳的加固方式 ✕：有斷裂情形的建築物 \：無法進行此實驗

	彈力球體	彈簧	一代彈珠	二代彈珠	十字擴柱	黏土	無加固
無基礎	\	✓	\		\	\	✕
淺基礎	✓						
深基礎	✓		✕				✕

二、討論各基礎構造加固法的優劣

在實驗過程中，我們針對基礎構造的加固方式進行了多種比較，包括彈簧、第一代彈珠、第二代彈珠、彈力球體、十字擴柱加固以及黏土加固法。控制變因為淺基礎建築模型，觀測搖晃時地動加速度的變化。

從實驗結果來看，（圖十五）可以清楚得知淺基礎，在使用彈力球體加固法的情況下，能夠使地動加速度值降至最低，彈力球體設計理念是結合了彈簧、彈珠和擴柱的特點，有很好的免震及消能設計。其次是彈簧加固法，彈簧的設計原理是利用其彈性減少，甚至隔絕傳遞到上層結構的能量，能減小上部結構搖晃幅度及結構損害，因此能夠有效降低地震之加速度值。接著是第二代彈珠加固法，設計原理為使其晃動頻率與建築物的自然振動頻率相異，以減緩加速度影響，儘管相較於彈簧有些微差距，但仍呈現出不錯的效果。

第一代和第二代彈珠加固法相較之下則稍微差一點，抗震效果則是位居第三。黏土加固法的設計與第一代彈珠加固法的加速度數值較為接近。黏土加固法的設計原理是利用它的黏

著咬合能力與摩擦力，來吸收地震釋放的能量，以此降低地動加速度值，在搖晃過程中，此方法無法像第一代彈珠，在最後10秒（XYZ軸三方向）測試過程中，平均加速度值就已降低，所以效果不如彈珠顯著。

最後，進行了十字擴柱加固法的設計，是一種補強方式，其原理是增加基礎斷面積來提升原有基礎的勁度與耐震能力。此設計儘管在減少加速度值的成效上，並未像前幾個設計有明顯的差異，但抗震效果還是比無加固更為有效。

三、討論各種加固法對不同深度基礎構造的影響

從實驗結果來看，無基礎及深基礎的無加固法，在測試過程中發生斷裂狀況，因此兩者平均加速度的大小無法比較。無基礎上方樓層的樓地板塌陷，是由於無任何抗震能力，而深基礎則是因力臂因素，導致基柱容易從連接點的地方斷裂。最後，淺基礎無加固法在測試下並無造成損壞。

以下為所有方式在搖晃測試時的比較：

1. 在不同的加固方法中，彈力球體加固法對於深基礎效果較佳。（圖十七）

彈力球體 > 彈簧 > 二代彈珠 > 一代彈珠 > 黏土 > 十字擴柱

2. 在彈簧加固法中，平均加速度值最小的為深基礎，最大的為無基礎。（圖十九）

3. 在二代彈珠加固法中，平均加速度值最小的為深基礎，最大的為無基礎。深基礎<淺基礎<無基礎。（圖二十）

4. 在彈力球體加固法中，平均加速度值最小的為深基礎。（圖二十一）

5. 在彈力球體、黏土和十字擴柱加固法中，由於無基礎為平面底板設計無任何深度的基樁故無法進行比較。所以只探討淺基礎和深基礎，深基礎的平均加速度值都小於淺基礎。（圖二十一、圖二十二、圖二十三）

由此可知，無論何種加固方式，深基礎所呈現出來的平均加速度值都比較小。

四、討論第一代彈珠和第二代彈珠加固法的差異

我們參考固定鑽石的爪鑲法（Prong setting）（白石小編，2022），製作出第一代彈珠的基礎構造，但因為彈珠表面光滑，摩擦力以及附著力不足，容易導致彈珠滑落，造成建築物的基礎高度不同，分布在四支基柱上的壓力不均勻而傾斜，甚至引發建築物斷裂或受損。

二代彈珠的加固方式是使用塑膠熱塑固定（repair thermoplastic）（黃景忠，2011）法，用打火機把針筒燒熱軟化，並迅速地將彈珠壓入其中，避免脫落。考慮到壓入時高度不同會導致建築物傾斜，所以在製作時使用了中空的棉線捆桶，作為固定彈珠和控制露出相同面積的

利器。二代彈珠加固法不像一代彈珠直接將彈珠固定在基柱上，這種方式也間接地取代了基礎。由（圖二十四）可知二代彈珠加固法在後續的實驗中也有不錯的表現。

五、各種基礎加固法在「土壤液化」地質區中抗震能力之表現

在地震影響下，土壤液化區的地質無法提供足夠的支撐力，這使得基礎無法發揮其功效，致使建築物可能因此產生不均勻的沉降或傾斜。當地震力作用在建築物上時，基礎和上部結構可能會發生損壞、錯位。進行實驗前，我們參考現實生活中專業建築與營造技術，發現筏式基礎為安全且常見的基礎形式，所以我們決定結合筏式基礎設計，來提高建築物在土壤液化區抗震能力之表現。實驗中我們發現彈力球體加固法於結合筏式基礎設計下，能夠有效的減少建築物的傾斜風險，且大大地減少了地震力所產生的加速度值。其次是彈簧加固法，加速度值雖然沒有比彈力球體加固法好，但其在各方面也都有不錯的表現。效果排列第三的則是二代彈珠加固法，加速度較前兩者來的大，但有降低加速度值的效果。

六、討論未來可使用何種基礎構造加固法

經過所有測試結果可得知，我們設計的彈力球體加固法是所有加固方式中表現最好的，能有效降低地震力所造成的加速度值，此方法是參考目前日本OILES公司所設計的滑動積層橡膠支承（Sliding Support With Rubber-pad）、橡膠支承的概念，並以彈簧具彈力的特性結合擴柱及彈珠滑動的靈感，加以研究改良設計出可以包覆住基礎的「彈力球體加固法」。

彈簧加固法為第二佳的加固方式，它達到了很好的抗震效果，我們也對比了目前建築物會使用到的鉛心橡膠支承墊（Lead Rubber Bearing）（詹添全、蔡益超，2005）。鉛心橡膠支承墊為隔震支撐的一種，主要構造為多層薄層橡膠與薄層鋼板交互疊合密貼成積層橡膠支承墊。以積層橡膠提供垂直向支撐與水平向之彈性與柔度隔離振動力，鉛心的純剪降伏了變形並吸收消散振動能量（三立化學股份有限公司），這種方式在臺大土木研究大樓的基礎隔震設計中已得到驗證及應用。彈簧隔震原理與其相似，且已用在現實生活中，由此可知彈簧為可行的加固方法。

二代彈珠加固法抗震效果位居第三，可以參考（詹添全、蔡益超，2005）在「建築物隔震設計與施工」書中所提到的滑動式隔震元件，由上下兩塊承重鋼板，中間以類似半圓形的鋼球提供滑動元件，滑動摩擦界面（Sliding Friction Interface）提供隔震效果，陶朱隱園的基礎加固方式即採用了類似原理，彈珠加固原理在未來可能成為有效的加固方式。

雖然十字擴柱加固及黏土加固法並未造成深基礎的基樁斷裂，但和淺基礎無加固的平均加速度數值並沒有太大的差異。在最後10秒XYZ軸三方向的測試，此兩種加固方法比無加固本身的抗震效果還要好，但整體來說，其效果還是略遜於彈力球體、彈簧和彈珠加固法。

柒、結論

一、「無基礎」、「淺基礎」及「深基礎」的無加固，受地震力下產生的加速度值之比較

三種不同基礎都無實施任何加固，其耐震能力比較為：淺基礎 > 無基礎 = 深基礎。深基礎之基樁長度較長，以至於深基礎基柱與底板的連接處（支點）較容易發生斷裂的情形。而無基礎是由於沒有任何抗震、免震及消能的設計，導致上方樓層的樓板容易斷裂。

二、各項加固法在無實際地質進行模擬測試時對降低加速度值能力的比較

（一）在所有基礎深度、加固方式的比較中，撇除無法進行測試的模型，抗震效果優劣順序為：彈力球體 > 彈簧 > 第二代彈珠 > 第一代彈珠加固法。而十字擴柱及黏土加固法並未達到預期中的成效。

（二）經所有實驗結果顯示，無基礎導致樓層樓板損害，深基礎雖然有它的抗震效果，但基柱容易斷裂。在加固方法比較中，彈力球體加固法在深基礎表現最佳，而黏土和十字擴柱加固法在淺基礎效果較差。儘管深基礎抗震效果優越，但存在基柱斷裂的風險。因此，在選擇加固方法時，需平衡抗震效果和結構安全性。

（三）由一代彈珠加固及二代彈珠加固法的數據顯示，二代彈珠加固法抗震能力優於一代彈珠，是由於二代彈珠使用了塑膠熱塑固定法，會使彈珠固定在基柱上而不容易滑落，降低了因為彈珠掉落所造成的建築物損壞。

（四）彈力球體加固法以及彈簧加固法在免震成效上效果顯著，十字擴柱加固及黏土加固法雖能使深基礎穩定，卻在實驗數據上稍顯遜色。整體而言，彈力球體、彈簧和二代彈珠等加固法有著卓越的免震效果，及未來實際運用在建築物基礎加固的可行性。

三、採用「彈簧」、「彈珠」、「彈力球體」等三種加固模式結合筏式基礎設計進行模擬，在不同地質與基礎深度條件下，受到地震力影響之基礎結構行為與抗震能力之比較。

（一）「土壤液化區」中的淺基礎結合筏式基礎設計

在本次測試中，彈力球體加固的效果展現出最低的加速度值。在地震力作用下，彈力球體的特性具有制震的能力，能夠讓建築物的晃動程度減小，加速度值降低，彈珠和彈簧加固法的加速度值表現則相差不遠。這兩種方法都能夠有效降低傳遞至建築物的加速度值，但效果不如彈力球體加固法顯著。

（二）「土壤液化區」中的深基礎結合筏式基礎設計

經由實驗結果顯示，彈簧加固法的加速度值低於彈珠加固法，且兩者的加速度值有明顯差異，但和彈力球體加固法相比，彈簧加固法的加速度值仍高出不少。彈力球體加固法展現出優異的效果，可以有效降低加速度值。

（三）「一般地質區」中的淺基礎結合筏式基礎設計

由實驗測試結果可以得知，彈力球體和彈簧加固法的實驗數據表現接近，其加速度值都明顯低於彈珠。彈珠加固法還是能夠有效降低搖晃所造成的加速度值，但效果不如彈力球體及彈簧加固法顯著。

（四）「一般地質區」中的深基礎結合筏式基礎設計

藉由實驗結果可以得知，深基礎彈力球體和深基礎彈簧加固法的實驗數據，仍然表現的非常接近，其免震效果明顯優於深基礎彈珠加固法。

（五）「一般地質區」和「土壤液化區」加速度值的區別

實驗過程中得知，雖然在「土壤液化區」搖晃過程中所造成的加速度值可能不高，但卻伴隨著建築物傾倒的風險，相較於「一般地質區」的土壤液化潛勢較低，搖晃造成建築物傾斜的風險也相對較小。

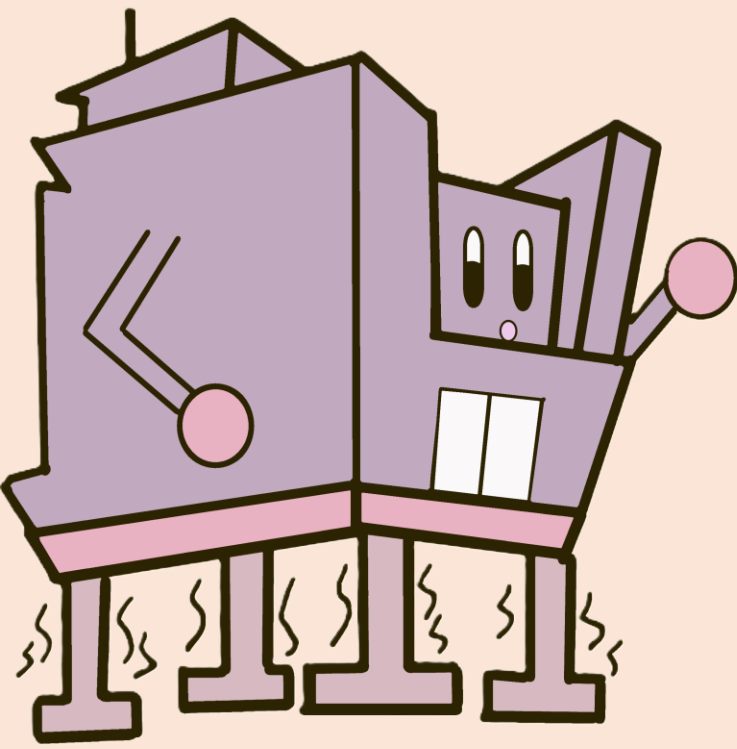
捌、參考資料

1. 中華民國112年內政部建築物基礎構造設計規範。
2. 米泓生（2023）。普通型高級中學地球科學（全）。龍騰出版，（第60、61、66、67頁）。
3. 李景亮、梁英文（1995）。結構耐震設計Earthquake resistant structural design。文笙出版，7-1章-7-12章、8-1章節-8-13章。
4. 施國欽（2010）。大地工程學（二）基礎工程篇。文笙出版，3-1章、6-1章
5. 施國欽（2011）。大地工程學（一）土壤力學篇。文笙出版。
6. 高山峯夫、田村和夫、池田芳樹（2015）。簡單搞懂耐震制震。詹氏書局。
7. 陳姵妤（2016）。台灣地震鏈的研究。國立中央大學碩士論文。
8. 黃明豐（2002）。國小高年級學童地震迷思概念之研究。國立嘉義大學碩士論文。
9. 詹添全、蔡益超（2005）。建築物免震設計與施工。財團法人中華建築中心出版，1-5、1-6、1-7、4-2。
10. OILES。SSR（滑動天然層壓橡膠隔震裝置）。
取自：https://www.oiles.co.jp/products/damping_isolation/building/ssr/。
11. 白石小編（2022）。鑽石鑲嵌工藝指南：7種常見的鑽石鑲嵌方式。
取自：<https://www.diamond-shiraishi.tw/blog/type-of-diamond-settings/>
12. 國家地震工程研究中心。921集集地震橋梁震害線上史料館。
取自：https://www.ncree.org/921_bridge_project/%E9%9A%94%E9%9C%87%E6%8A%80%E8%A1%93/%E9%9A%94%E9%9C%87%E6%8A%80%E8%A1%932.htm。
13. 黃景忠（2011）。塑膠時代的必備常識。
取自：<https://www.scimonth.com.tw/archives/2164>
14. 潘昌志（2020）。提升地震災害防治與準確度— 2020年臺灣震度分級新上路 - 科學月刊Science Monthly。取自：<https://www.scimonth.com.tw/archives/3726>。

【評語】 052410

本作品針對不同基礎型式、加固方法及地質條件下，分析比較建築物耐震能力之優劣。實驗結果發現，深基礎因基樁與底板連接處易斷裂，淺基礎無加固建築物之耐震能力，優於無基礎與深基礎者，免震效果最佳加固方式為彈力球體與彈簧加固法，彈力球體加固法優於彈簧加固法，深基礎彈力球體加固法於降低加速度值能力上優於淺基礎，另外，土壤液化區測試過程中發現，彈力球體加固之建築物較不易產生傾斜、沉陷及損壞現象。本作品所分析不同基礎加固方法與耐震成效為已知技術與知識，部分研究成果不符合現有工程技術知識，例如，淺基礎優於深基礎。宜驗證本作品各種加固基礎施作組構之適宜性，探討無加固、彈簧、彈珠、黏土、十字擴柱與彈力球體等加固方式，所對應之實務工程技術。

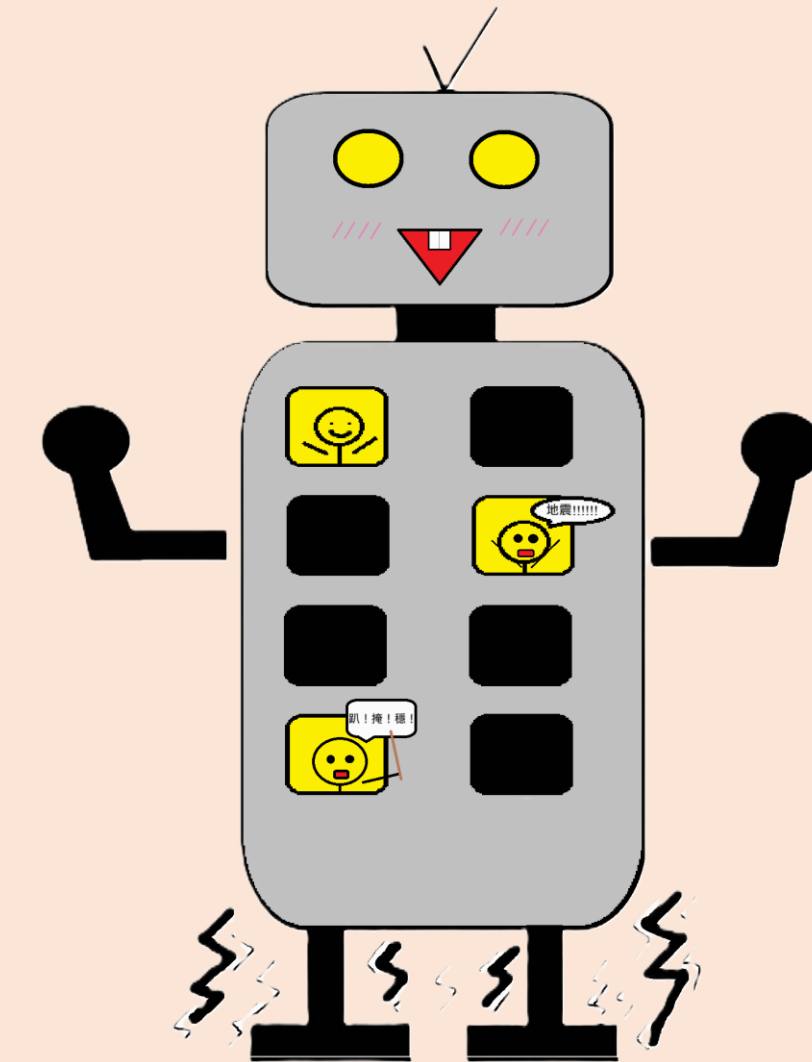
作品簡報



(第二作者自行繪製)

"堅實"起點，"穩固"未來

— 不同深度基礎各種加固之比較



(第一作者自行繪製)

研究動機

臺灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的交界點上，屬於典型板塊碰撞的大陸邊緣島嶼（陳姵妤，2016），這使得臺灣一直都存在著頻繁的地震活動，因此在買房前，我們會特別關注房屋耐震設計及在特殊地質條件下的抗震能力，像是在土壤液化區，房屋受到劇震時，劇烈搖晃會破壞砂質顆粒間的平衡，使孔隙水壓升高，喪失彼此間接觸能力而變成泥漿狀，失去承載房屋的能力，使其沉陷與傾倒。因此土木技師、大地技師、結構技師等專業技術人員通常會考量地質條件，搭配不同的基礎型式做基礎結構設計，讓建物更穩定。但過去文獻對基礎構造設計的探討並不多，這讓我們好奇地震力對基礎工程設計與上部結構的影響。除了上部結構安全性重要，若基礎構造不穩固，有可能會導致整棟建築物傾倒與不均勻沉陷，並危害鄰房安全。

因此我們希望藉由這次研究，來探討基礎設計中不同加固方法對建物在地震過程中的損害程度以及在特殊地質條件中的抗震效果，以期望達到減少房屋傾倒及毀損的機率。

研究目的

本研究是針對不同基礎結構深度，進行各類型基礎的加固方式，在上部結構各樓層加**1.5kg**的鐵塊，並進行實際地震模擬測試。同時收集數據，並進一步分析、探討這些基礎結構行為，是否能在地震力作用下，有助於改善及降低房屋毀損的機率。

研究目的如下：

- 一、探討並比較「無基礎」、「淺基礎」及「深基礎」三種不同基礎結構，受到地震力作用下之基礎結構行為與抗震能力。
- 二、採用「無加固」、「彈簧」、「彈珠」、「黏土」、「十字擴柱」與「彈力球體」等方式，對無基礎、淺基礎和深基礎進行加固，探討並比較基礎結構之間的行為及抗震能力。
- 三、採用「彈簧」、「彈珠」與「彈力球體」等加固方式，進行實際模擬在不同地質條件下，所受到地震力作用之基礎結構行為與抗震能力之比較。

研究設備及材料

表一、研究設備及材料		
自製震動平台	加速度感測器 (Go Direct acceleration)	地震檢測器 (Vibrometer)
		
(第三作者自行拍攝)	(第三作者自行拍攝)	(第二作者手機下載之軟體截圖)

研究方式

建築物樣式模型製作及材料準備

決定出建物的基礎深度

分別嘗試不同的基礎加固

深基礎建物(15cm)

淺基礎建物(5cm)

無基礎建物(0cm)

無 彈珠 黏土 彈簧 擴柱 彈力球體

無 彈珠 彈簧

分析測試資料

找出較佳的加固方式

淺基礎、深基礎建物

進行模擬實際地質測試 (一般地質區及土壤液化區)

結合筏式基礎設計 無筏式基礎設計

分析測試資料

找出最好的加固方式

表二、不同地質條件 (第二作者自行拍攝)

一般地質區



土壤液化區



表三、不同深度基礎 (第二作者自行拍攝)

無基礎 (0cm)



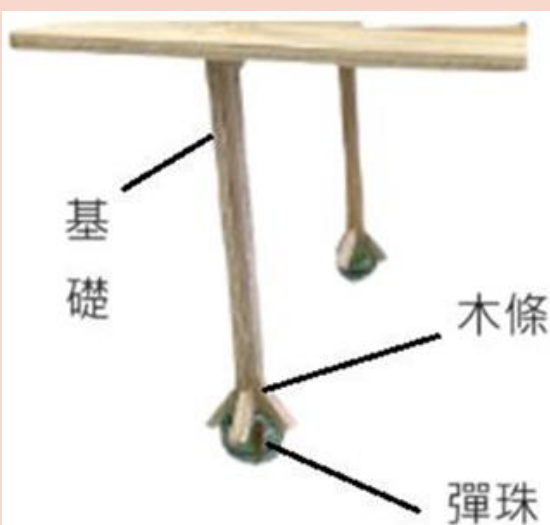
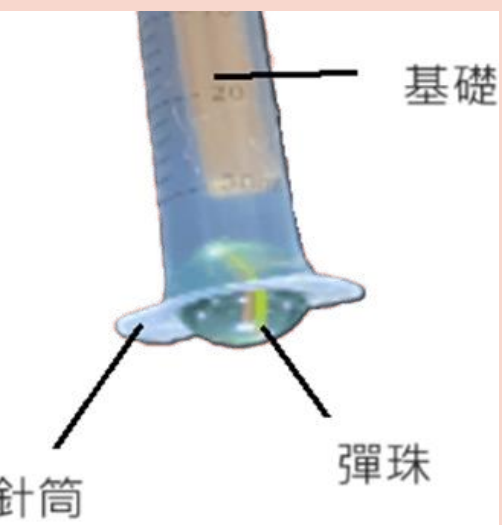
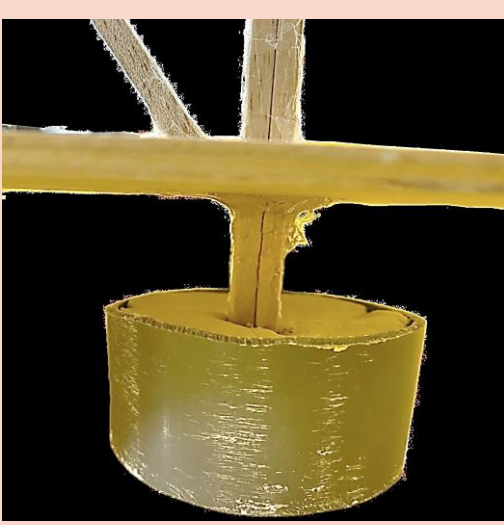
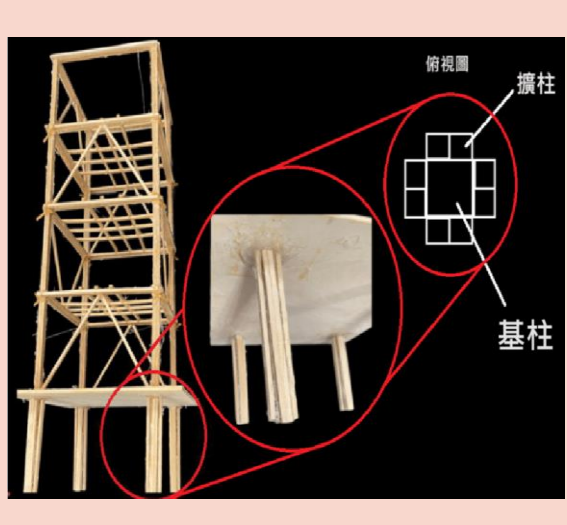
淺基礎 (5cm)



深基礎 (15cm)



圖一、實驗流程圖 (第二作者自行繪製)

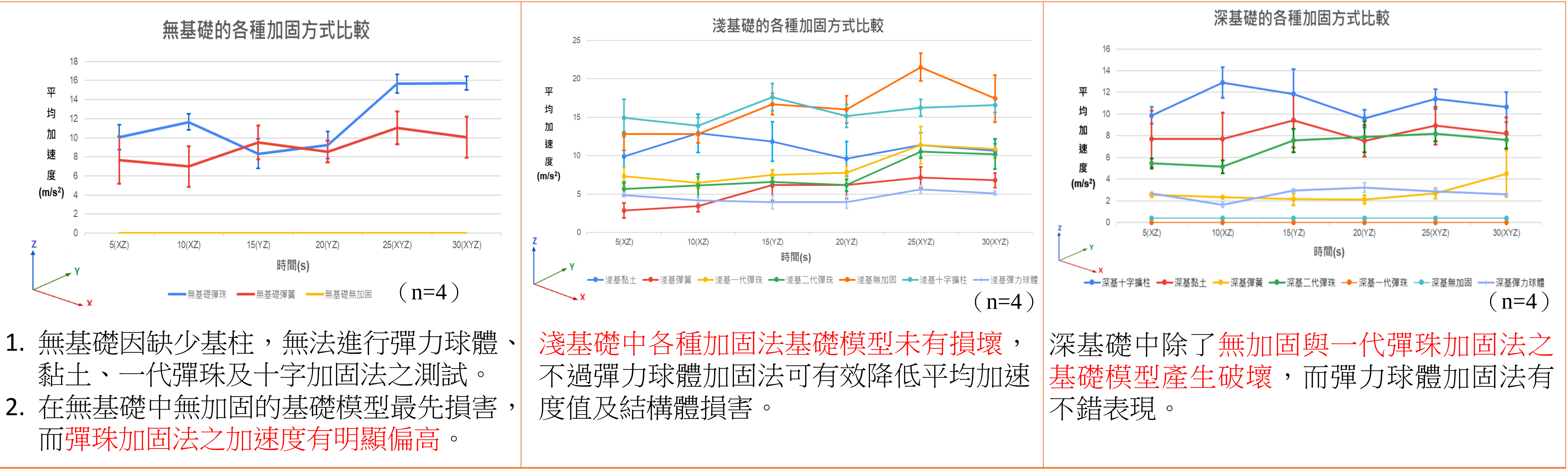
表四、各種加固法						
彈簧	第一代彈珠	第二代彈珠	彈力球體	黏土	十字擴柱	筏式基礎
(第一作者自行拍攝、製作)	(第二作者自行拍攝、製作)	(第二作者自行拍攝、製作)	(第一作者自行拍攝、製作)	(第一作者自行拍攝、製作)	(第二作者自行拍攝、製作)	(第二作者自行拍攝、製作)
						

研究結果

一、三種不同基礎各種加固方式之比較

n：實驗次數；p：T-test 測試結果

表五、三種不同基礎各種加固方式比較（第一作者自行製作）



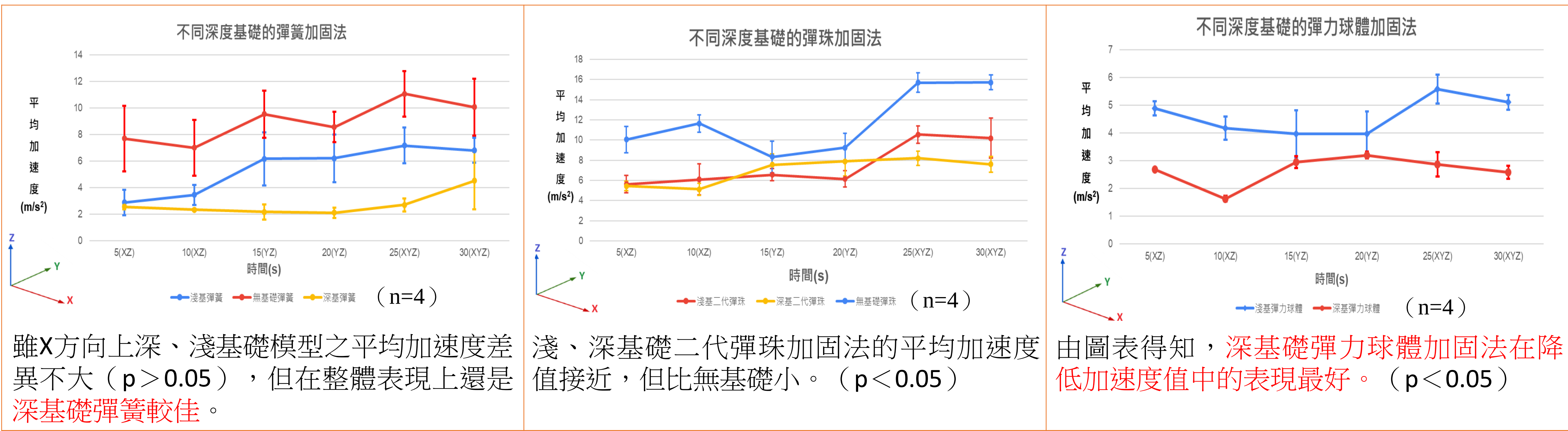
1. 無基礎因缺少基柱，無法進行彈力球體、黏土、一代彈珠及十字加固法之測試。
2. 在無基礎中無加固的基礎模型最先損害，而彈珠加固法之加速度有明顯偏高。

淺基礎中各種加固法基礎模型未有損壞，不過彈力球體加固法可有效降低平均加速度值及結構體損害。

深基礎中除了無加固與一代彈珠加固法之基礎模型產生破壞，而彈力球體加固法有不錯表現。

二、不同基礎深度「彈簧」、「二代彈珠」、「彈力球體」加固法的比較

表六、三種不同加固方式在各基礎之比較（第一作者自行製作）



雖X方向上深、淺基礎模型之平均加速度差異不大（ $p > 0.05$ ），但在整體表現上還是深基礎彈簧較佳。

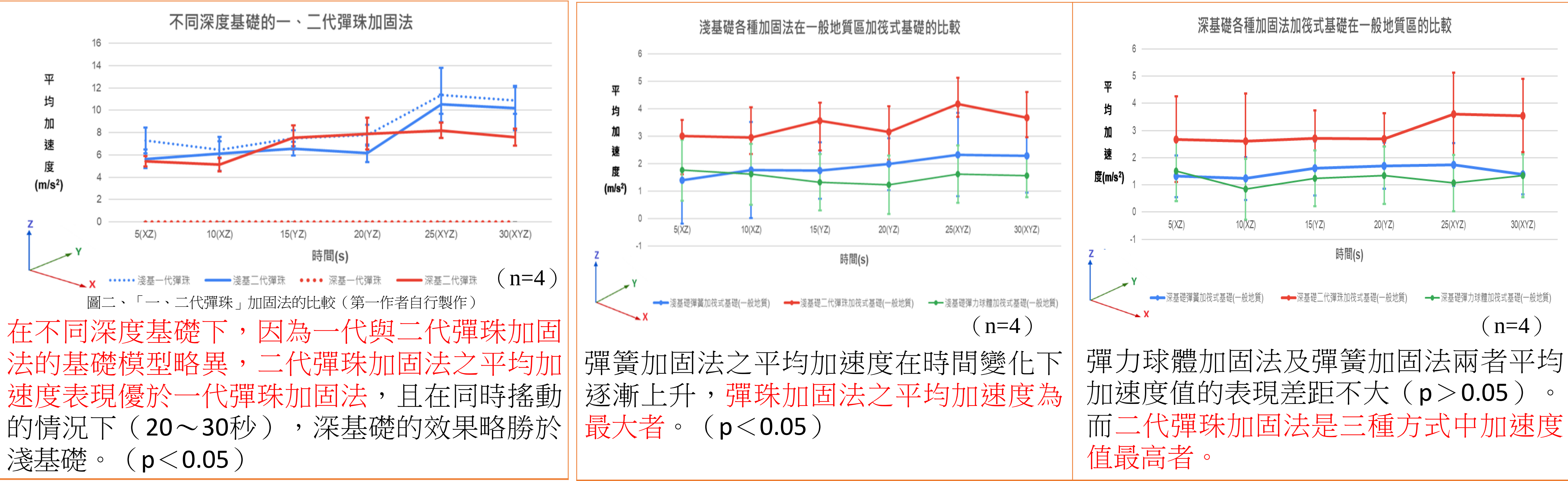
淺、深基礎二代彈珠加固法的平均加速度值接近，但比無基礎小。（ $p < 0.05$ ）

由圖表得知，深基礎彈力球體加固法在降低加速度值中的表現最好。（ $p < 0.05$ ）

三、「一、二代彈珠」加固法的比較

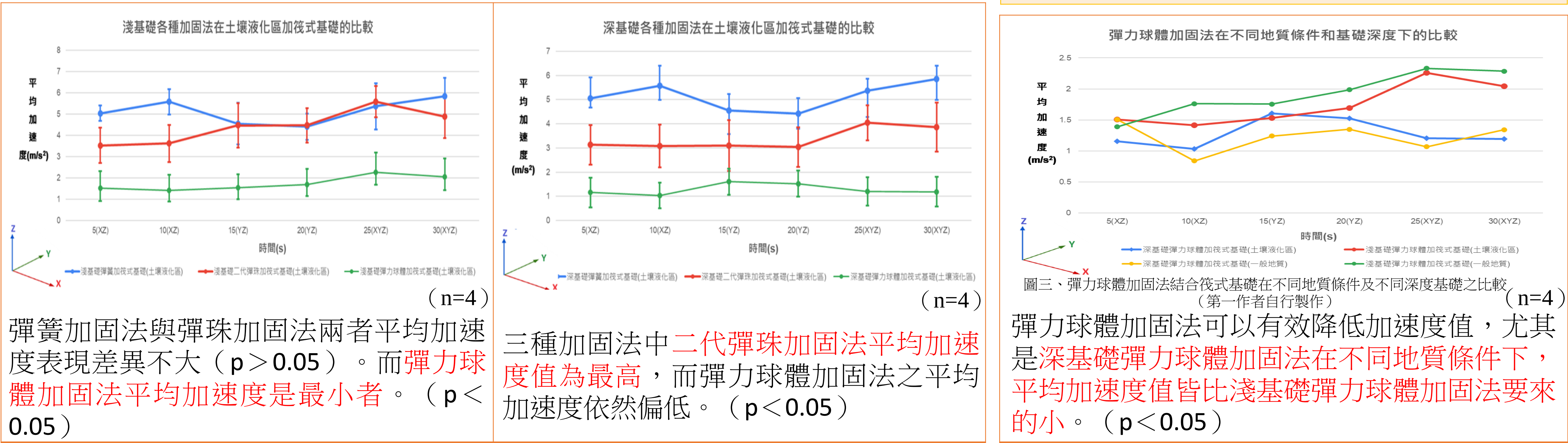
四、在「一般地質區」不同加固方式於結合筏式基礎設計之比較

表七、「一般地質區」不同加固方式於結合筏式基礎設計之比較（第一作者自行製作）



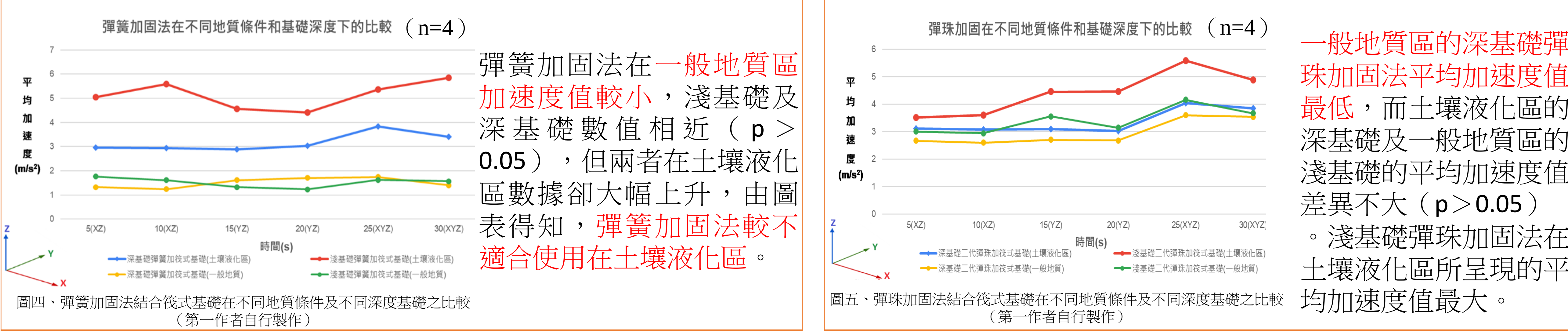
五、在「土壤液化區」不同加固方式於結合筏式基礎設計之比較

表八、「土壤液化區」不同加固方式於結合筏式基礎設計之比較（第一作者自行製作）



六、彈力球體加固法在不同地質條件及不同深度基礎之比較

七、彈簧加固法在不同地質條件及不同深度基礎之比較



討論

一.討論各基礎構造無加固的優劣

淺基礎能夠順利完成四次的測試且無損壞，本次實驗中它相對於其他深度的基礎，擁有較好的耐震能力。無基礎設計容易造成建築物直接倒塌；深基礎破壞點，通常為基礎與底板的連接處，這是因為基柱深度較深，導致力臂較長，以至於深基礎基柱和底板的連接處（支點），較容易發生斷裂的情形。

二.討論各種加固法的優劣

- 以下為所有方式在搖晃測試時的比較：
- (一) 在不同的加固方法中，彈力球體加固法效果較佳。
彈力球體>彈簧>二代彈珠>一代彈珠>黏土>十字擴柱
- (二) 彈簧加固法中，平均加速度值最小的為深基礎，最大的為無基礎。
- (三) 二代彈珠加固法中，深基礎<淺基礎<無基礎。
- (四) 彈力球體加固法中，平均加速度值最小的為深基礎。

表九、綜合比較（第二作者自行製作）

✓：為最佳的加固方式 ✕：為有斷裂情形的建築物 \：無法進行此實驗

	彈力球體	彈簧	一代彈珠	二代彈珠	十字擴柱	黏土	無加固
無基礎	\	✓	\		\	\	✕
淺基礎	✓						
深基礎	✓		✕				✕

三.討論第一代彈珠和第二代彈珠加固法的差異

第一代彈珠的基礎構造我們參考固定鑽石的爪鑲法，但因為彈珠表面光滑，摩擦力以及附著力不足，容易導致彈珠滑落，造成建築物斷裂或受損。二代彈珠的加固方式是使用塑膠熱塑固定法，用打火機把針筒燒熱軟化，並迅速地將彈珠壓入其中，避免脫落。

四.基礎加固法在不同地質區中抗震能力之表現

我們參考現實生活中專業建築與營造技術，決定結合筏式基礎設計進行測試，發現不管是在「一般地質區」或「土壤液化區」，彈力球體加固法結合筏式基礎設計能夠有效的降低建築物的傾斜風險，且大大地減少了地震力所產生的加速度值。其次是彈簧加固法，加速度值雖然沒有比彈力球體加固法好，但其在各方面也都有不錯的表現。效果排列第三的則是二代彈珠加固法，加速度值雖然較前兩者來的大，但還是有降低加速度值的效果。

五.討論未來可使用何種基礎構造加固法

由測試結果得知，我們設計的「彈力球體」加固法是所有加固方式中表現最好的，此方法參考目前日本OILES公司所設計的滑動積層橡膠支承、固定橡膠支承的概念，同時以彈簧具彈力的特性結合擴柱及彈珠滑動的靈感，加以研究改良設計出可以包覆住基礎的「彈力球體加固法」。彈簧加固法為第二佳的加固方式，它達到很好的抗震效果，可對比目前建築物會使用到的鉛心橡膠支承墊，二代彈珠加固法抗震效果則位居第三，可以參考滑動式隔震元件，陶朱隱園的基礎加固方式即採用了類似原理，彈珠加固原理在未來可能成為有效的加固方式。這些加固法即使在土壤液化區也能展現相當好的效果。而我們相信這三種加固法對於未來建築物在抗震的表現上會有一定的幫助。

六.未來展望

- (一)目前我們設計的「彈力球體」加固法在現實生活中尚未被應用，因此希望未來能找到類似特性的材料，並進一步實際應用於建築物的基礎加固中。
- (二)本次實驗僅測試了較極端的地質條件，未來我們計劃使用不同的「砂土與黏土的混和比例」和「地質材料」，探討各種加固方法在更多樣的地質條件下的表現。

結論

- 一. 三種不同基礎都無實施任何加固，其耐震能力比較為 ➡淺基礎 ➡ 無基礎 ➡深基礎。
- 二. 在「無實際地質條件」進行模擬測試，所有加固方式的比較抗震效果優劣順序為 ➡彈力球體 ➡彈簧 ➡ 第二代彈珠 ➡ 第一代彈珠加固法。而十字擴柱及黏土加固法並未達到預期中的成效。
- 三. 採用「彈簧」、「彈珠」、「彈力球體」等三種加固法結合筏式基礎，在不同地質與基礎深度的條件下，受到地震力影響的基礎結構行為與抗震能力之比較。
- (一)「土壤液化區」中的「淺基礎」結合筏式基礎設計為 ➡彈力球體 ➡彈簧 ➡ 第二代彈珠加固法。
- (二)「土壤液化區」中的「深基礎」結合筏式基礎設計為 ➡彈力球體 ➡彈簧 ➡ 第二代彈珠加固法。
- (三)「一般地質區」中的「淺、深基礎」結合筏式基礎設計為 ➡彈力球體 ➡彈簧 ➡ 第二代彈珠加固法。
- 四.地質條件的比較 ➡「土壤液化區」搖晃過程中所造成的加速度值可能不高，但卻伴隨著建築物傾倒的風險，相較於「一般地質區」的土壤液化潛勢較低，搖晃造成建築物傾斜的風險也相對較小。

參考資料

- 中華民國112年內政部建築物基礎構造設計規範。
- 米泓生（2023）。普通型高級中學地球科學（全）。龍騰出版，（第60、61、66、67頁）。
- 李景亮、梁英文（1995）。結構耐震設計Earthquake resistant structural design 。文笙出版，7-1章-7-12章、8-1章節-8-13章。
- 施國欽（2010）。大地工程學（二）基礎工程篇。文笙出版，3-1章、6-1章。
- 施國欽（2011）。大地工程學（一）土壤力學篇。文笙出版。
- 高山峯夫、田村和夫、池田芳樹（2015）。簡單搞懂耐震制震。詹氏書局。
- 陳姵妤（2016）。台灣地震鏈的研究 。國立中央大學碩士論文。
- 黃明豐（2002）。國小高年級學童地震迷思概念之研究。國立嘉義大學碩士論文。
- 詹添全、蔡益超（2005）。建築物免震設計與施工。財團法人中華建築中心出版，1-5、1-6、1-7、4-2。
- OILES。SSR（滑動天然層壓橡膠隔震裝置）
取自：https://www.oiles.co.jp/products/damping_isolation/building/ssr/。
- 白石小編（2022）。鑽石鑲嵌工藝指南：7種常見的鑽石鑲嵌方式。
取自：<https://www.diamond-shiraishi.tw/blog/type-of-diamond-settings/>
- 國家地震工程研究中心。921集集地震橋梁震害線上史料館。
取自：https://www.ncree.org/921_bridge_project/%E9%9A%94%E9%9C%87%E6%8A%80%E8%A1%93/%E9%9A%94%E9%9C%87%E6%8A%80%E8%A1%932.htm
- 黃景忠（2011）。塑膠時代的必備常識。
取自：<https://www.scimonth.com.tw/archives/2164>
- 潘昌志（2020）。提升地震災害防治與準確度— 2020年臺灣震度分級新上路 - 科學月刊Science Monthly。
取自：<https://www.scimonth.com.tw/archives/3726>。