

# 隔震工法在古蹟保存上之應用研究

內政部建築研究所委託研究報告

PG9303-0068

093-301070000G1025

## 隔震工法在古蹟保存上之應用研究

受委託者：財團法人中華建築中心

研究主持人：黃德琳

研究員：曾一平

研究助理：呂顏龍、吳志強

內政部建築研究所研究報告

中華民國九十三年十二月

ARCHITECTURE AND BUILDING RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF THE INTERIOR  
RESEARCH PROJECT REPORT

A Study of Retrofit of Historic Buildings by  
Using Base Isolation System

BY

TE-LIN-HUANG

YI-PING-TSENG

YEN-LUNG-LU

TZU-CHIANG-WU

December, 2004

隔震工法在古蹟保存上之應用研究

內政部建築研究所

九十三年

隔震工法在古蹟保存上之應用研究

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 27362389

地址：台北市敦化南路二段 333 號 13 樓

網址：<http://abri.gov.tw>

出版年月：九十三年十二月

版（刷）次：初版

工本費：**200** 元

GPN：

ISBN：

# 目 錄

目 錄.....	i
表目錄.....	iii
圖目錄.....	v
第一章 緒論.....	1
第一節 研究動機與目的.....	1
第二節 研究內容.....	2
第三節 研究方法與步驟.....	3
第二章 古蹟及歷史建築物之材料性質及結構系統.....	7
第一節 前言.....	7
第二節 古蹟之定義.....	7
第三節 建築材料及其力學特性.....	8
第四節 結構系統.....	29
第三章 古蹟及歷史建物補強工法.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第一節 前言.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第二節 結構性損壞.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第三節 補強工法分類及其流程.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第四節 耐震補強工法.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第五節 被動制震阻尼器補強工法.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第六節 隔震補強工法.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第四章 古蹟隔震補強案例及適用性.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第一節 前言.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第二節 隔震補強案例.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第三節 古蹟隔震補強適用性.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第五章 古蹟隔震補強設計.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第一節 前言.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第二節 隔震建物設計原則與分析方法.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第三節 設計用載重組合.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第四節 地表面加速度計算.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第五節 地震紀錄.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第六節 隔震層構造計算.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第七節 隔震結構設計檢討.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第八節 隔震器設計可行性評估.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第六章 古蹟隔震設計範例.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第一節 前言.....	錯誤! 尚未定義書籤。

第二節	建築物概要.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第三節	隔震裝置及配置.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第四節	荷重計算.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第五節	隔震結構模擬.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第六節	性能目標.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第七節	隔震結構分析成果.....	錯誤! 尚未定義書籤。
<b>第七章</b>	<b>結論與建議 .....</b>	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
第一節	結論.....	錯誤! 尚未定義書籤。
第二節	建議.....	錯誤! 尚未定義書籤。
	<b>參考文獻.....</b>	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>

# 表目錄

表 2-3.1 台灣常用磚砌體重量 .....	10
表 2-3.2 中國大陸常用磚砌體重量 .....	11
表 2-3.3 中國國家標準建築普通磚規範 .....	11
表 2-3.4 日治時期台灣各地區建築用普通磚塊性質 .....	11
表 2-3.5 磚砌體的抗壓強度標準值 .....	12
表 2-3.6 抗拉強度設計值、彎曲強度設計值和抗剪強度標準值 .....	12
表 2-3.7 粘土磚、空心磚砌體彈性模數 .....	13
表 2-3.8 日本有關磚牆的短期強度文獻 .....	15
表 2-3.9 中國大陸常用石砌體的重量 .....	18
表 2-3.10 毛料石砌體的抗壓強度標準值 .....	19
表 2-3.11 毛石砌體的抗壓強度標準值 .....	20
表 2-3.12 毛石砌體的抗拉、彎曲及抗剪強度標準值 .....	21
表 2-3.13 砌體彈性模數 .....	21
表 2-3.14 土質材的重量 .....	21
表 2-3.15 美國各地區土塊構材力學性質 .....	22
表 2-3.16 編竹夾泥牆水平剪力強度 .....	25
表 2-3.17 木材的重量 .....	27
表 2-3.18 木材的強度設計值和彈性模數 .....	28
表 2-3.19 木材強度設計值和彈性模數的調整係數 .....	28
表 2-4.1 結構系統敘述、韌性容量 R 及高度限制 .....	29
表 2-4.2 古蹟及歷史建築混合構造 .....	31
表 2-4.3 古蹟及歷史建築純木構造 .....	31
表 2-4.4 古蹟及歷史建築結構系統分類 .....	31
表 3-2.1 磚構造震災損壞 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 3-2.2 斗子磚構造震災損壞 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 3-2.3 土塊牆震災損壞 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 3-2.4 木構造震災損壞 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 3-2.5 石構造震災損壞 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 3-3.1 補強工法分類 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 3-5.1 被動消能阻尼器力學機構及元件的組成 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 3-5.2 分析結果整理 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 4-2.1 美國隔震補強建築物一覽表 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 4-2.2 設計耐震安全目標 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 4-2.3 材料之容許應力強度 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
表 4-2.4 選用輸入的地震波 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>



表 4-2.5 耐震安全性能目標 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 4-2.6 隔震構材概要 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 4-2.7 隔震結構分析結果整理(一).....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 4-2.7 隔震結構分析結果整理(二).....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 4-2.8 作業過程中監測安全值 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 4-2.9 日本隔震補強建物一覽表 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 4-2.10 紐西蘭隔震補強建築物一覽表 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 5-2.1 隔震裝置主要的力學性能 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 5-2.2 耐震安全性能目標 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 5-2.3 積層橡膠之性能 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 5-7.1 性能目標的要求 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 5-7.2 我國耐震規範三種不同層級之性能水準 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
表 5-7.3 我國隔震規範性能目標 .....	錯誤! 尚未定義書籤。

# 圖目錄

圖 1-3.1 研究步驟 .....	3
圖 1-3.2 隔震建築物之規劃設計流程 .....	5
圖 2-3.1 兩側柱附磚牆、單側柱附磚牆及獨立磚牆的示意圖 .....	14
圖 2-3.2 兩側柱附 RC 牆、單側柱附 RC 牆及獨立 RC 牆的示意圖 .....	15
圖 2-3.3 土塊牆的製作方法 .....	23
圖 2-3.4 實驗試體圖 .....	25
圖 2-3.5 兩組對照組載重位移圖 .....	26
圖 3-3.1 補強流程圖 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.1 增大柱断面 (鋼線網或閉鎖型箍筋) .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.2 增厚 RC 剪力牆 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.3 增設剪力牆 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.4 鋼斜撐型式 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.5 鋼斜撐施工中照片 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.6 鋼斜撐施工完成照片 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.7 鋼骨耐震壁 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.8 增設翼牆 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.9 土塊牆的補強工法 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.10 鋼纜及螺桿補強工法 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.11 柱圍封碳纖維 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.12 碳纖維成形板 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.13 柱圍封鋼板 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.14 帶板補強 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-4.15 鋼絲網補強 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.1 被動制震原理 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.2 構造形式的種類 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.3 制震阻尼器 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.4 位移型阻尼器 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.5 摩擦型阻尼器 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.6 油壓阻尼器 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.7 粘性阻尼器 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.8 黏彈性體阻尼器 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.9 龍興寺裝設制震裝置建物外觀 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.10 制震裝置平立面配置圖 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.11 彈塑性模型、立體分析模型及前三個振動模態 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.12 梁柱接頭處裝設被動制震阻尼器 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 3-5.13 安裝的位置 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>

圖 3-6.1 加速度反應譜示意圖 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.2 隔震工法示意圖 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.3 隔震用可撓性接頭之變形 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.4 隔震層的停車場使用例 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.5 上下動線 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.6 建築物之地震扭轉反應 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.7 積層橡膠之種類 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.8 天然橡膠遲滯圈特性 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.9 鉛心積層橡膠遲滯圈特性 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.10 高阻尼積層橡膠遲滯圈特性 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.11 滑動支承之遲滯圈特性 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 3-6.12 隔震用阻尼器之種類及遲滯特性 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-2.1 建築全景 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-2.2 施工概述 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-2.3 構造概要及隔震平面圖 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-2.4 建築全景 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-2.5 結構物模擬成 4 質點系 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-2.6 施工區域和隔震器平面配置圖及工事圖 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-2.7 隔震施工中變形監測計量測位置及紀錄 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-3.1 車輛出入口動線 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 4-3.2 隔震層周邊處理 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-2.1 隔震結構設計流程圖 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-2.2 不同剛性隔震建築反應結果 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-2.3 積層橡膠變形性能 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-4.1 表層地盤之增幅率及地表加速度反應譜 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-5.1 原記錄與地震波模擬圖形 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.1 隔震結構靜力分析流程 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.2 隔震結構反應譜分析流程 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.3 隔震建築物之設計方法流程 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.4 隔震層降伏剪力係數 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.5 隔震層最大剪力係數 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.6 結構計算流程 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.7 地震相關檢驗流程 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.8 淺層土層的增幅放大效應 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.9 層剪力與層間位移係曲線 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.10 日本隔震建築物動力歷時分析流程 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.11 模擬結構與土壤的互制行為 .....	錯誤! 尚未定義書籤。
圖 5-6.12 彈簧元素模式及修正 Penzien 模型 .....	錯誤! 尚未定義書籤。

圖 5-7.1 各種荷重下之面壓及容許變形 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>
圖 5-7.2 隔震層切線週期 .....	<b>錯誤! 尚未定義書籤。</b>

## 摘要

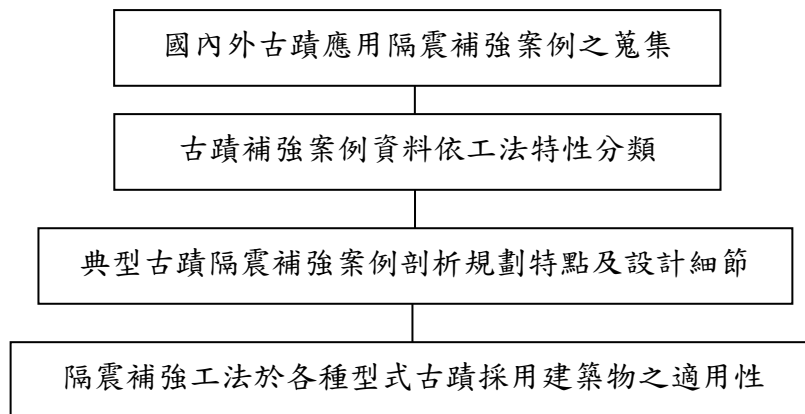
關鍵詞：古蹟建築、隔震系統、制震器、補強

### 一、研究緣起

1999年9月21日凌晨1時47分，台灣中部地區發生芮氏七點三級的強烈地震，造成地震災區古蹟及歷史建築空前浩劫，因而引起政府及社會普遍重視。當古蹟建築構造強度不足以抗震時，現存的材料強化或採其它的抗震方法則是必要的，為了達成古蹟及歷史建築的原貌保存及提昇其抗震能力，加裝隔震裝置是所有補強工法中最有效的方法之一。

### 二、研究方法及過程

本研究針對國內外古蹟進行隔震補強的案例進行蒐集，研究各案件古蹟補強規劃之特點與補強工法選定之考量因素，將古蹟型式與補強工法的適用性加以歸納，再說明古蹟補強工法之設計細節加以剖析說明。研究步驟如下圖：



### 三、重要發現

古蹟建物通常其結構體抗震能力皆不足，甚至遭受到中小度地震時，建物開始產生嚴重的損毀，即使建物不倒，其原貌亦難以保存，基於此，採用隔震補強工法可以說是最好的方法之一。以下為本研究案之結論及重要發現：

- (一)在採用古蹟隔震補強時，必須注意採用補強工法的可行性與適用性，並不是所有的古蹟建築都可以採用相同類型的隔震裝置，還必須要考慮各種不同隔震裝置的力學特性以及其適用於特定案例的可行性，例如古蹟建物重量太輕，若隔震系統全部採用鉛心橡膠支承墊，則建物之振動週期無法有效延長，則古蹟建物之隔震效果可能會不如預期，故採用 FPS 及 HDRB 隔震系統。
- (二)從國外的古蹟隔震案例，以及本文古蹟隔震系統示範例可知，古蹟及歷史建物採用隔震補強工法，無論是從歷史價值、經濟角度等方面觀之，應有其適用性及可行性。
- (三)隔震層周邊空間有限時，可以加裝被動消能制震阻尼器，以降低隔震層之反應變位。然也必須注意的是，過小的反應變位，有可能使得隔震週期無法延長，造成隔震效果不彰。
- (四)古蹟建物因為有其文化價值、歷史情感外，更重要的是，其是人類文化遺產的蒼蒼之處，故其保存的價值不言可喻。為了不破壞其原始風貌，儘可能從外觀上不改變它，然若採用隔震工法，亦無法完全達成古蹟建物耐震需求能力，則上部結構亦有採取補強的必要。

#### 四、主要建議事項

古蹟建物在決定採用隔震補強工法時，於設計上，可能會有耐震性能目標應如何決定?古蹟建物應如何正確模擬?另古蹟建物基礎強度不足、配置不佳時，如何配置隔震裝置?如何提昇下部結構之耐震能力等，皆是實務上在設計古蹟隔震建物時，會面臨的重要課題。

##### (一)立即可行之建議

主辦機關：行政院文化建設委員會

協辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署

採用古蹟隔震補強工法時，對於建物之耐震能力應該要提昇多少才算合理?關於此一部分，除了規範要求的最低限耐震能力外，建議應由主辦單位的需求、實務設計者的經驗及參考國外案例等方法，決定古蹟及歷史建物的耐震性能目標。

## (二)立即可行之建議

主辦機關：行政院文化建設委員會

協辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署

在做古蹟隔震補強工法之前，建議先調查基礎的型式及其材料力學特性，因為隔震系統下方基礎構造的耐震能力一定要高於上部結構，若下部基礎有強度不足、配置不佳等情形，則古蹟建物之底部基礎應有重新施作或補強的必要。

## (三)長期性建議

主辦機關：行政院文化建設委員會

協辦機關：行政院公共工程委員會、內政部營建署

古蹟建築不同於一般以 RC、SRC、SC 等構造建物，一方面是組成材料力學特性比較難以正確掌握，另一方面是構造的組成及其接合的方式複雜，因此該如何正確模擬？目前國內外專家學者正積極研究中，為充分依實模擬構造及構材的力學行為，必須要對各種不同構造型式接合的古蹟建物及構材做實驗，並提出可供古蹟結構設計者使用的公式及模擬方法。

# 第一章 緒論

## 第一節 研究動機與目的

1999年9月21日凌晨1時47分，台灣中部地區發生芮氏七點三級的強烈地震，造成地震災區古蹟及歷史建築空前浩劫，因而引起政府及社會普遍重視。因國內對於古蹟及歷史建築保存工作尚在起步階段，如何藉由這次慘痛但卻寶貴的經驗，以避免爾後再遭受類此天然或人為災害，並使古蹟及歷史建築得以保存、達成永續經營發展，乃是我們應予深切省思。

一般而言，世界上先進國家對於古蹟與歷史建築保護及維護干預（intervention）之層級共有七種，其分別是：衰敗的防治（prevent deterioration）或稱間接維護（indirect conservation）、原貌保存（preservation）、強化（consolidation）或稱直接維護（direction conservation）、復原（restoration）、複製（reproduction）、重建（reconstruction）與再利用（reuse）。可見得為維護人類文化價值的遺跡所必須付出的努力與專業性，豈是採用某種技術或手段即可達成。然而，經由1999年9月21日對台灣古蹟及歷史建物造成的嚴重災害，讓我們深深體認到，即使我們周延的做到了衰敗的防治、原貌保存、復原、複製等工作，而沒有做到抗震的工作，前述的努力都是白費的。對於古蹟及歷史建築，就結構設計者而言，可以努力的目標即是應用結構的手段盡最大的可能保存建築物的原貌。重要的是，如何在不大規模改變建物的原貌的條件下，又可以做到防震的工作呢？

當古蹟與歷史建築構材強度不足以抗震時，現存的材料強化或採其它的抗震方法則是必要的，但在採取抗震手段時，結構系統的原樣也必須受到尊重，而其主要特徵原貌應盡可能獲得保存。因此，古蹟與歷史建築結構的補強，必須將建築物整體結構耐震性能一併考慮外，其特徵原始風貌也應該獲得尊重。如果由結構本體來抵抗地震力，倘結構物本體的體質先天不良，則其抗震能力必定較差。在台灣的古蹟及歷史建築往往即是先天體質不良的建築，若用建築物本體去抵抗大地震，一則建築物的原貌難以保存，二則其耐震能力差，很容易於大地震發生時而倒塌。



為了達成古蹟及歷史建築的原貌保存及提昇其抗震能力，加裝隔震裝置是所有補強工法中最有效的方法之一。古蹟隔震，即是在建築物基礎安裝隔震裝置，當大地震發生時，可以使得大部份的地震能量由隔震系統隔絕及吸收，則建築物本身即可承受較小地震力，以確保建築原貌的保存。

隔震工法在古蹟及歷史建築保存的應用，首先必須瞭解台灣古蹟及歷史建築的結構系統，其次針對該結構系統進行規劃、分析設計，進一步決定其細部設計與施工可行性。因此，本研究案的目的可分為三方面，一方面是如何有效應用隔震補強工法降低建築承受之地震力，使得建物於大地震後盡可能保存其原貌；另一方面則是提供予隔震結構設計者有關古蹟及歷史建築結構系統分類、隔震規劃分析設計方法、以及設計細節；最後則是隔震補強工法於古蹟及歷史建築的適用性評估。

## 第二節 研究內容

首先根據國內相關文獻瞭解我國古蹟及歷史建築常用的建築材料，針對這些建築材料整理這些材料的力學特性，其目的是提供給設計者在做古蹟隔震結構分析時的參考樣本。此外，對一位結構設計者而言，古蹟及歷史建築結構系統的歸納亦很重要，本文於第二章對古蹟結構系統作分類與歸納，並做具體建議。第三章則是先瞭解古蹟建築遭受到震災損害的原因及位置，因為惟有先瞭解其原因才能對症下藥，再決定採用的修復補強工法，既然談到補強工法，自然要對各種補強工法有一定的認知，所以本文將國內外最常見的補強工法做有系統的分類，然後謹淺談國內常用的補強工法，並根據實務界在古蹟及歷史建築補強工法應用的情形略為說明，對於被動制震消能元件及隔震補強工法則會較耐震補強工法做更詳盡的介紹。第四章則是搜集國內外有關古蹟及歷史建築在隔震補強的實蹟，針對所搜集的資料瞭解古蹟隔震實務應用的情形，並深入探討案例中採用古蹟隔震工法的目的及原因，本章最後根據這些所收集到資料，瞭解其來龍去脈後，再探討古蹟建築採用隔震系統的適用性。第五章的重點主要是放在設計方面，探討古蹟補強所要求之設計性能與一般隔震結構設計的考慮有何不同，再做古蹟隔震規劃設計說明之前，會先對相關技術準則及隔震材料的選用做初步的淺談。第六章則是舉一實務的古蹟建築設計案

例，從古蹟建築的用途、結構系統說明、材料特性、規劃到設計等，做一系列的說明及分析設計。第七章則是針對採用隔震系統對於古蹟及歷史建築的保存做總結，並提出具體的建議。

### 第三節 研究方法與步驟

本研究針對國內外古蹟進行隔震補強的案例進行蒐集，研究各案件古蹟補強規劃之特點與補強工法選定之考量因素，將古蹟型式與補強工法的適用性加以歸納，再說明古蹟補強工法之設計細節加以剖析說明。研究步驟如下圖：

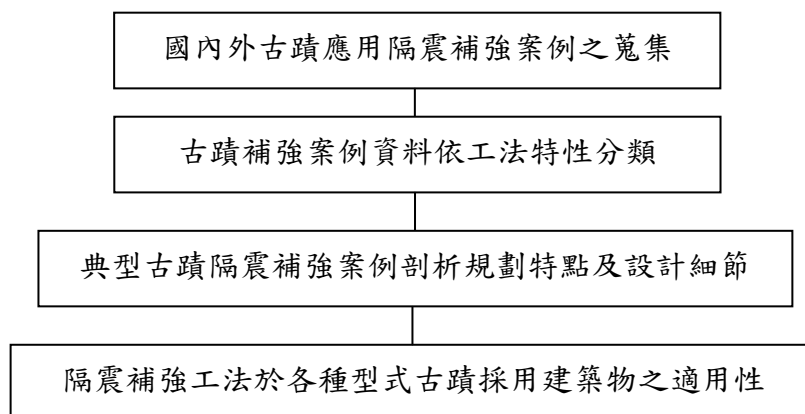


圖 1-3.1 研究步驟

#### 一、國內外古蹟應用隔震補強案例之蒐集

本研究案首先蒐集美國、日本等國家有關古蹟建物隔震補強工法的應用案例，因為這些國家採用隔震補強工法有較多實蹟可循。針對蒐集的資料做整理、歸納、分析與研判，將這些應用隔震工法於古蹟建物的國家，找出其適用之原則、效果等，並進一步探討其適用於我國古蹟建物之可行性。此外，本研究案將詳細探討一古蹟建物隔震補強的規劃設計例，最後針對古蹟建物採用隔震補強的適用性提出具體建議。

#### 二、古蹟補強案例資料依工法特性分類

##### (一)耐震補強工法

建築物受到地震力時，利用結構構材與補強構材的彈塑性特性，

在安全地支撐建築物自重下，吸收消耗地震能量。在大地震時，古蹟建物不得產生嚴重損壞，以避免造成嚴重的人命及古物財產損失。

### (二)被動制震阻尼器補強工法

於古蹟建物裝設一種消能裝置，當地震發生時，消能元件吸收消耗地震能量，有效控制建築物振動反應，減低地震對建物及其附屬物的破壞。

### (三)隔震補強工法

於古蹟建物下部設置隔震層，一方面裝設具有大變形能力支承裝置，延長建物振動週期，使得建物承受的地震力降低，另一方面將集中於隔震層之地震能，利用隔震用阻尼器，吸收消耗地震能量。大地震時，隔震建築物搖動緩慢，樓板加速度小，古蹟建物的附著之古物，亦可以做到不移動或不翻倒，因此可以有效的維持建物之機能，這也是隔震裝置設置於古蹟建物最大的特色。

## 三、古蹟隔震補強案例規劃特點及設計細節

隔震建築物之規劃設計流程如下：

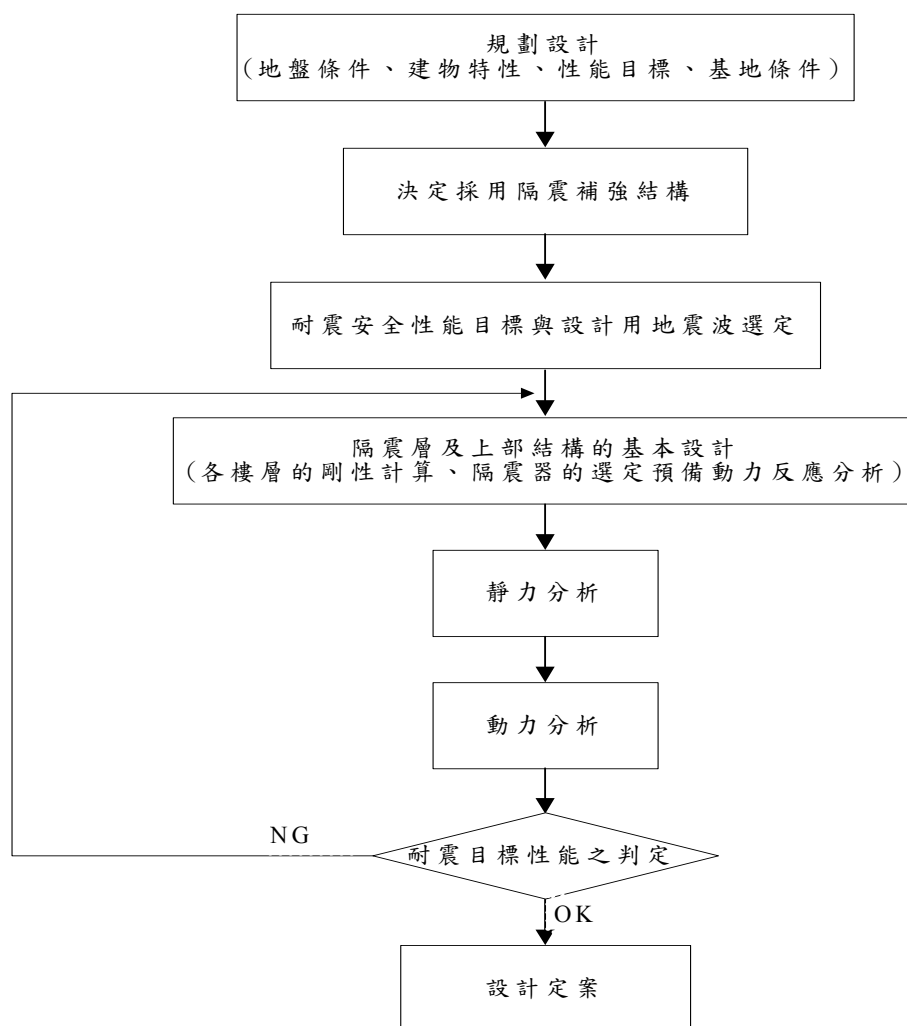


圖 1-3.2 隔震建築物之規劃設計流程

#### 四、隔震補強工法於各種型式古蹟採用建築物之適用性

古蹟建築為文化資產中重要的部分之一，其藝術、教育、歷史價值是無法估計的，故古蹟建築之保護及維護要求往往高於一般建築很多，耐震性能甚至要求超越其他一般建築的耐震標準，俾使古蹟建築在大地震發生時仍能維持內部物件之完整。耐震補強工法可維持古蹟建物強度，但在不影響古蹟外觀原貌的前提下，耐震補強工法會受到很多的限制。若容許局部修改古蹟建物外觀，制震補強工法可以有效降低建築物遭受地震力破壞。

誠如前述，世界各國的學者與設計者皆在思考，如何在不改變古老建築物本身和裝飾的原貌條件下，提高古蹟建物之耐震能力，並減少地震力對建物及古物造成之破壞。易言之，在地震發生後，古蹟建

物與古物仍能完整地保存下來。隨著人類科技的進步，目前已經有較可行的解決之道來確保古蹟及文物的安全。在「修舊如舊」的考量下，國外已有許多採用隔震補強之保護措施，減少傳遞至上部傳統構造的地震力，以降低建築物遭受地震力破壞。

人類歷史遺留的痕跡刻劃在古蹟上，因此完整維持古蹟並且保存其原始風貌是很重要的事。古蹟修復補強的方向是「修舊如舊」，而不是「修舊如新」，然而修舊不僅是外觀具有歷史風貌，甚至其骨骼(建物構材)亦盡可能不做大幅度的改變。因此隔震補強工法應用於古蹟建物不但可以減少古蹟外貌的改變，也可以減少古蹟本身原始的構材的改變，其適用性不言可喻。

## 第二章 古蹟及歷史建築物之材料性質及 結構系統

### 第一節 前言

在進行補強結構設計之前，除了須瞭解建築物座落的地點、外在環境影響因素外，其中最重要的即是必須對建築的構造材料特性及結構系統有所瞭解。在台灣的古蹟建築多為混合構造，其次為純木構造。所謂混合構造是指建築的結構體不只有一種主要構造材料組成的，而是由兩種以上的建材組成的，其組合的方式不同，結構系統也就隨之不同。另外，一般古蹟及歷史建築的構造材料包括磚、石、灰、木、土、竹等，材料性質對結構設計者是很重要的，惟有徹底瞭解建築物的材料性質才能正確計算建築物受震行為，並進一步合理預測建物可能破壞位置及需採取之修復補強方法。本章主要是整理台灣古蹟及歷史建築常見的建築材料，並針對各種建材整理分析時需要之材料力學性質。最後依據我國建築物耐震規範，將古蹟及歷史建築的結構做系統分類，以及建議結構分析時採用之韌性容量。

### 第二節 古蹟之定義

依據文法資產保存法第3條第1項第2款的定義「依本法指定、公告之古建築物、傳統聚落、古市街，考古遺址及其他歷史文化遺蹟。」同法第6款另定義所謂之歷史建築「指未被指定為古蹟，但具有歷史、文化價值之古建築物、傳統聚落、古市街及其他歷史文化遺蹟。」顯然我國對於古蹟及歷史建物的定義有所區別，倘僅從建築的角度言之，古建物與歷史建物在意涵與實質上不能混為一談。

為免混淆本研究案所謂古蹟之真正意涵，於此特以定義本研究案所謂的古蹟，乃是指「古建築物及歷史建物」，亦即不侷限於文化資產保存法所定義的建築物，因為我們認為無論是歷史建築物或古建築物，只要它具有歷史文化價值，且具有保存之必要性，對一位建築結構研究者或技術者而言，皆要儘最大的努力達成此目標。

### 第三節 建築材料及其力學特性

#### 一、建築材料

台灣地區現存的古蹟及歷史建築物中，常見之建築材料，大致可歸納如下：

##### (一)磚、瓦

磚的色彩有紅、灰兩種，閩南系建築多用紅磚瓦，有些客家及閩東系建築則有使用灰磚瓦。傳統磚瓦皆手工製作，色澤均勻且質地細密。磚是很好的建築材料，其擁有硬度大、重量輕、耐火、防水、隔冷熱、隔音性及耐久性佳等優點，故台灣古蹟及歷史建物中，有相當大的比例會以磚為建築材料。正式的字院都以磚牆為主。牆下段先砌牆腳，可用卵石。磚牆的砌法採用一橫二豎，通稱為「盒盒斗砌」的為多。傳統建築砌法工整，牆面不刷水泥白灰，即美觀大方，最足以顯示豪門臣室的風格。磚、瓦的來源，早期仍從大陸運來，以紅磚、紅瓦為主，因為土質及柴燒的關係，產生「窯變」，(係稱煤煙斑)，所以在牆面造成多彩的圖樣，非常美觀。台灣產製的磚瓦大概在嘉慶年後陸續使用。日治時期磚的規格改變，又引進黑色的「日本瓦」。日式建築大量採用。光復後台灣自產的「水泥瓦」就是仿日本瓦製成的，色澤、質地粗糙，但是給當年急於改建房舍的農村提供便宜快速的建材。此外，匠師採斗子砌，將磚砌成如中空的箱子，中間填以土塊、卵石、碎磚稱為「斗子牆」。不填者稱為「空斗牆」。

##### (二)石

使用於牆體、地坪及重要雕刻。早期以大陸來的泉州白石及青斗石最受歡迎，不過價位高，除大廟及達官貴人的宅第，一般民宅很少使用。台灣本地的石材則有安山岩、砂岩、硤咕石及鵝卵石等，都是就地取用的材料。本島石質鬆脆，不能耐久，不適做立柱或雕鑿。所以早年的廟宇或大戶人家的院落「壁飾」的石材，以福建的青斗石、金門花崗岩、泉州石為主。因為這些石材是台灣貿易船隻回程的「壓艙石」，為數不多，如今保留下來的真是建築物中的極品珍寶。大陸石材取之不易，後來只好以台灣北部觀音山石、花東的大理石代替。

##### (三)灰

是接合劑，可將砌在一起的磚、石或瓦固定，也可當作外表的粉刷材。傳統使用的灰有蠣殼灰、螺殼灰、硃咕灰等，分別使用蠣殼、螺殼、硃咕等天然物磨成粉狀後再加熱製作而成。

#### (四)土

最容易取得，可使用於地面及牆體。土質本身若黏性夠強可直接使用，否則得加入黑糖、石灰、糯米及稻殼、草根等，增加附著力。可製成土塊磚或用於版築法。承載屋頂重量的牆壁之中，土塊壁是常用的承重牆之一，農民以泥加水攪勻後，再摻入剁成短節的稻草或穀殼，然後壓入釘製好的木框，陰乾後即成。土塊壁大都是簡陋的牛稠、貯物室，若是宅院使用，必須外刷灰泥、白粉，免受雨水淋刷崩落。

#### (五)竹

常用的種類有赤竹、麻竹或長枝仔。編竹夾泥牆的作法，乃先以竹架或木架分隔牆面枋柱，再用竹蔑條織壁體，最後以稻草或麻繩絲攪拌的泥抹於壁體內，外層則刷以白灰即成。竹編夾泥牆為中國南方及日本盛行的做法，由於日治時代的影響，在台灣盛產竹子的中部地區出現不少以編竹夾泥牆為牆體的建築，尤其以日式宿舍居多。

#### (六)木

台灣古蹟及歷史建築物中，木構造建築就佔了六成以上。多用在屋架及門窗，早期以大陸進口的福州杉為主，台灣本地則有茄苳、樟木、肖楠等，品質優良的檜木則遲至日治時期才大量的開採。清代房屋的建材，以木料為主，磚、石、瓦、白灰為輔。在木料中以來自大陸的「福州杉」是最好的樑材或柱材。但是「福州杉」來之不易，所以除了官署、名門宅院外，一般百姓大都就地取材，使用「土產」可防蛀的樟木、楠木、烏心石、山杉。到了清末日治時期，實施「撫番政策」後，台灣原產的高山檜木，才得以適時採伐供應日漸興盛的房屋營建。在中國傳統建築中，工匠最擅於把雕琢彩繪藝術、木作比例表現在木料中，其典雅變化，迄今無法取代。



## 二、材料特性

### (一)磚及灰縫構材

台灣地區的古蹟或歷史建築物中，磚構造所佔的比例相當高，這些磚造歷史建築物無論從美學或歷史發展的角度來看，都屬於相當珍貴的文化資產，而必須妥善加以維護與保存，但過去對於磚造歷史建築物的維護工作，並不十分重視，尤其是耐震安全方面的問題，更鮮少為修復保存設計者所注意，而常導致修復結果不甚理想。

在純磚造之古蹟或歷史建物中，大多屬磚疊砌式構造，其牆基與牆身等結構構材係以砂漿或灰等黏結材料將一塊塊的磚疊砌而成，由於牆體內部並無植筋，對於水平地震力缺乏耐震抵抗力，但對於垂直方向則有很好之垂直承載力，牆身或基礎一旦產生裂縫或其他破壞時，便會影響到整棟建築物的耐震能力。為了瞭解磚構造物的耐震能力，首先必須瞭解磚構造的材料特性，基於此，特將磚構造之材料特性整理如下：

#### 1.磚砌體重量

(1)現在台灣常用的磚牆包括紅磚牆、混凝土空心磚牆、某屑空心磚牆、空心紅磚牆及白石磚牆等，其重量整理如表 2-3.1：

表 2-3.1 台灣常用磚砌體重量

牆壁名稱	厚度(cm)	重量(kg/m <sup>2</sup> )
紅磚牆	1B	440
混凝土空心磚牆	20	250
	15	190
	10	130
某屑空心磚牆	15	165
	20	135
	10	100
空心紅磚牆	—	195
白石磚牆一磚厚	—	440

(2)中國大陸常用磚砌體的重量整理如表 2-3.2：

表 2-3.2 中國大陸常用磚砌體重量

名稱	重量(tf/m <sup>3</sup> )
漿砌普通磚	1.8
漿砌缸磚	2.1
漿砌耐火磚	2.2
漿砌礦渣磚	2.1
漿砌焦渣磚	1.25~1.4

## 2.磚材的力學特性

台灣地區在日治時期磚塊材料性質，在不同地區、不同等級、及不同建築物上有不同之抗壓強度與含水率，但整體而言，日治時代台灣的磚塊抗壓強度皆比目前中國國家標準一級磚要求之抗壓強度大。中國國家標準建築普通磚規範及日治時期台灣各地區建築用普通磚塊性質如表 2-3.3 及表 2-3.4。

### (1)中國國家標準建築普通磚規範

表 2-3.3 中國國家標準建築普通磚規範

等級	24 小時浸水吸水率(%)	抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	磚塊尺寸					
			長度(cm)		寬度(cm)		厚度(cm)	
			最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
一級	<15	>150	22.66	23.35	10.84	11.17	5.91	6.09
二級	<19	>100	22.54	23.46	10.78	11.22	5.88	6.12
三級	<23	>70	22.31	23.69	10.67	11.33	5.82	6.18

### (2)日治時期台灣各地區建築用普通磚塊性質

表 2-3.4 日治時期台灣各地區建築用普通磚塊性質

等級	重量(g)	吸水率(%)	抗壓強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	磚塊尺寸					
				長度(cm)		寬度(cm)		厚度(cm)	
				最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
並燒	2549~2694	13.5~16.1	282~476	22.7	23.2	10.9	11.2	5.6	5.8
上燒	2559~2687	7.3~10.4	473~718	22.0	22.6	10.5	10.8	5.4	5.6

## 3.磚造構材力學特性

### (1)中國大陸建築結構規範

因為中國大陸採用之設計方法乃依可靠度分析為基礎之極限設計法，此法以機率模式，將材料強度之變異性與載重之變異性當作決定強度折減係數與載重係數的依據，使結構物整體之安全性，較能達到一致之水準。此種方法可以下式說明：

$$\phi R \geq \gamma_0 S$$

其中， $\phi R$  為結構構件抗力的設計值；

$\gamma_0$  為結構重要性係數；

$S$  為載重效應組合設計值

中國大陸建築結構規範對於構材強度的設計規定分為設計值及標準值兩種。其中強度設計值是指  $\phi R$ ，而強度的標準值則為  $R$ ，故台灣的結構設計者，倘引用中國大陸砌體強度規定時，須先瞭的其規範規定的內容及精神，方不致誤解其強度規定值。

(A) 磚砌體的抗壓強度標準值(單位：kg/cm<sup>2</sup>)

燒製普通磚、非燒結硅酸鹽磚和承重粘土空心磚砌體的抗壓強度標準值，如表 2-3.5：

表 2-3.5 磚砌體的抗壓強度標準值

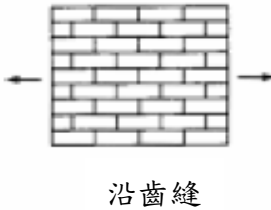
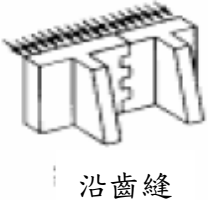
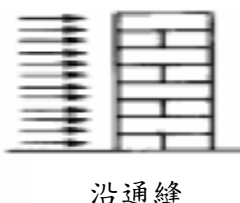
磚強度等級	砂漿強度等級							砂漿強度 0
	M15	M10	M7.5	M5	M2.5	M1	M0.4	
MU30	62.5	51.8	46.5	41.1	35.8	32.6	23.8	18.3
MU25	57	47.3	42.4	37.6	32.7	29.8	21.7	16.7
MU20	51	42.3	37.9	33.6	29.2	26.6	19.4	14.9
MU15	44.2	36.6	32.9	29.1	25.3	23.1	16.8	12.9
MU10	36.1	29.9	26.8	23.8	20.7	18.8	13.7	10.6
MU7.5	—	25.9	23.2	20.6	17.9	16.3	11.9	9.1

其中，舉例說明 MU30 及 M15 的意義，分別表示磚牆強度為 300kg/cm<sup>2</sup> 及灰縫砂漿強度為 150kg/cm<sup>2</sup>，其餘依此類推。

(B) 粘土磚、空心磚沿砌體灰縫截面破壞時的軸心抗拉強度設計值、彎曲強度設計值和抗剪強度標準值如表 2-3.6 (單位：kg/cm<sup>2</sup>)

表 2-3.6 抗拉強度設計值、彎曲強度設計值和抗剪強度標準值

強度類別	破壞特徵	砂漿強度等級
------	------	--------

			M10	M7.5	M5	M2.5	M1	M0.4
軸心抗拉		沿齒縫	3	2.6	2.1	1.5	1	0.6
彎曲抗拉		沿齒縫	5.3	4.6	3.8	2.7	1.7	1.1
		沿通縫	2.7	2.3	1.9	1.3	0.8	0.5
抗剪	—		2.7	2.3	1.9	1.3	0.8	0.5

(C) 砌體彈性模數(單位：kg/cm<sup>2</sup>)

粘土磚、空心磚砌體彈性模數如表 2-3.7：

表 2-3.7 粘土磚、空心磚砌體彈性模數

砌體種類	砂漿強度等級					
	M10	M7.5	M5	M2.5	M1	M0.4
粘土磚、空心磚	1500f	1500f	1500f	1300f	1100f	700f
註：f 為磚砌體之抗壓強度						

(2) 我國相關文獻及規定

(A) 相關文獻磚牆抗剪強度

依據許茂雄教授的實驗，兩側柱附磚牆的極限剪力強度  $\tau_{bw}$  平均為 7~8kgf/cm<sup>2</sup>；磚牆局部有開口，則其單側柱付壁的極限剪力強度  $\tau_{bw}$

平均為  $4\text{kgf/cm}^2$ ；若只有獨立的磚牆而沒有任何的柱附著，則其抗剪強度可視為  $0\text{kgf/cm}^2$ 。以簡圖說明兩側柱附磚牆、單側柱附磚牆及獨立磚牆的示意圖說明如下：

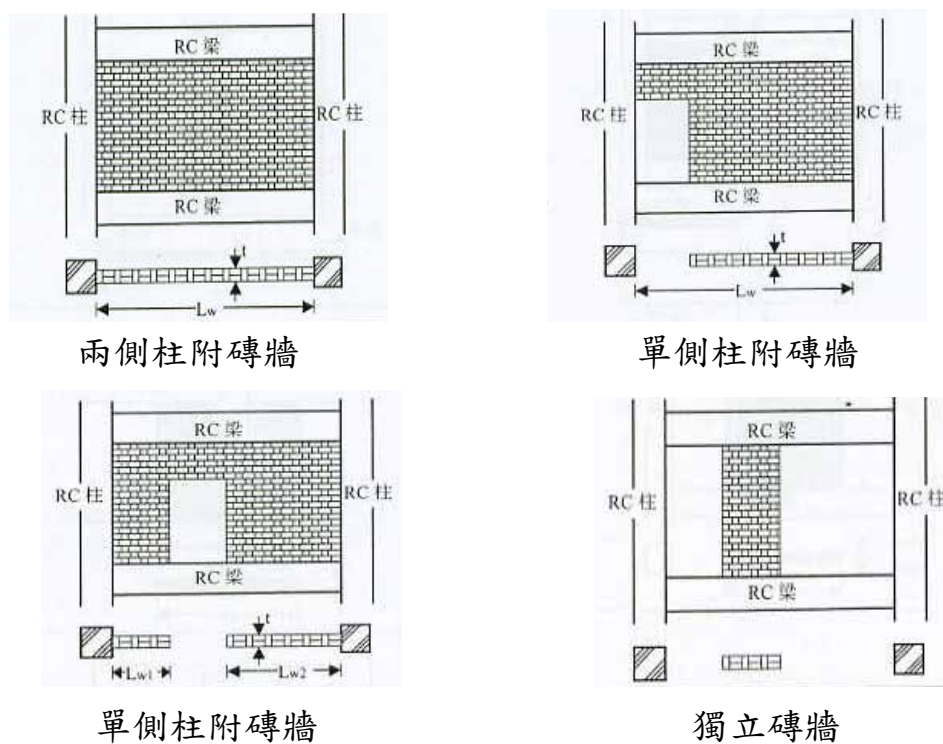


圖 2-3.1 兩側柱附磚牆、單側柱附磚牆及獨立磚牆的示意圖

### (B)我國規範的規定

依據 2002 年 08 月內政部建築技術審議委員會「建築物耐震規範及解說之修定研究」第 2.17 節規定「計算含非結構牆極限層剪力強度時，可分別計算構架及非結構牆的強度，然後直接相加而得該層之極限層剪力強度。由於柱、RC 剪力牆、非結構 RC 牆與磚牆破壞時單位面積對應能承擔的剪力不同，因此以 RC 剪力牆的面積為基準，RC 柱、非結構 RC 牆與磚牆之有效面積要分別乘以 0.5、0.4 與 0.25」，換言之，兩側柱附磚牆的極限剪力強度應可採取 RC 牆極限剪力強度的 0.25 倍，倘依據「1999 年台灣 集集地震 第二編 鉄筋コンクリト造學校」兩側柱附 RC 牆極限抗剪強度為  $30\text{kgf/cm}^2$ ，故兩側柱附磚牆的極限剪力強度應為  $0.25 \times 30 = 7.5\text{kgf/cm}^2$ ，此依據規範之推估值，可以做為結構分析時模擬磚牆強度之參考值，惟在使用規範建議的方式推估磚牆的極限剪力強度時，需注意到日本規範論及兩側柱附 RC 牆如圖 2-3.2 所示，其涵蓋面積包括柱內局部面積，而兩側柱付磚牆如圖 2-3.1 所示，其計算面積只有磚牆本體面積，故建議兩側柱付

磚牆的極限強度  $7.5 \text{ kgf/cm}^2$  於結構分析時，還需要再折減。

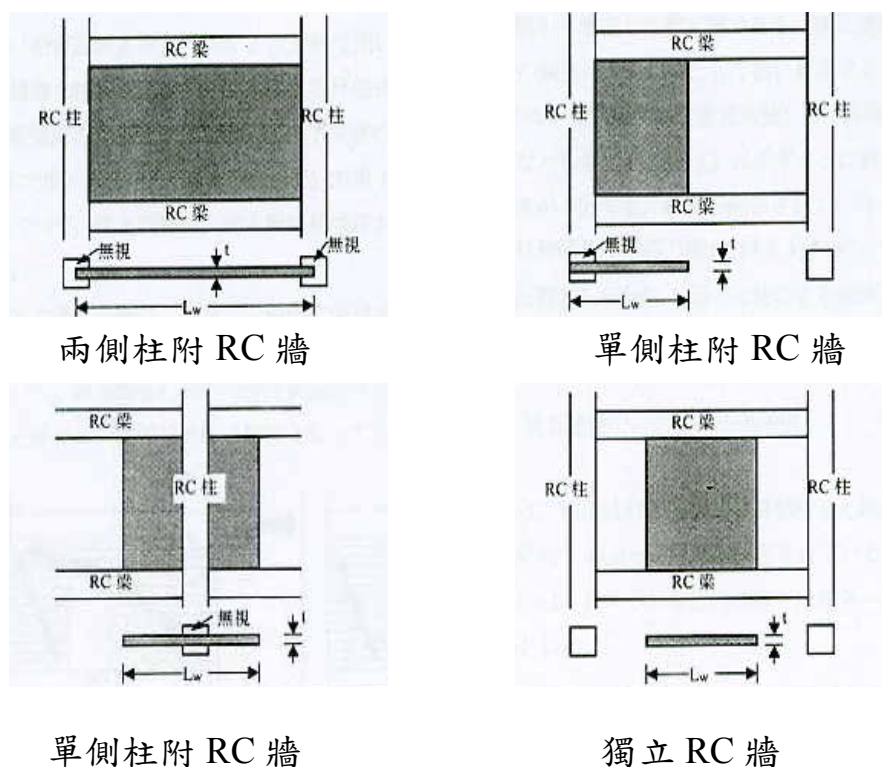


圖 2-3.2 兩側柱附 RC 牆、單側柱附 RC 牆及獨立 RC 牆的示意圖

(3)日本相關文獻資料

日本提及磚牆的短期強度是指地震力發生時結構分析採用之材料強度，有關磚牆的力學特性整理如下：

表 2-3.8 日本有關磚牆的短期強度文獻

參考文獻分類	短期抗壓強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	短期抗拉強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	短期剪力強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )
文獻 1	58.5	1.3	2.5
文獻 2	27.8	1.4	3.0

(二)灰縫

灰縫材料之性質會影響灰縫與磚塊交接界面之力學強度，根據日治時期相關文獻規定與研究發現，發現日治時期磚造歷史建築物磚牆中的灰縫，其砂漿之水泥與砂之配比，以容積比來表示時都大於  $1/3$ ，而日治以前的磚造歷史建築物牆體，根據外表之觀察，其灰縫材料則包含了許多種之配比與成份，常見的有白灰、糯米、蚶殼、石灰等。

灰縫材料性質，係指磚塊與灰縫交接界面之抗剪、抗彎、抗拉等

力學方面之強度，各國學者之研究詳如後段之說明。

## 1. 磚塊與灰縫界面抗拉強度

### (1) 日本學者左野利器之研究結果

磚牆灰縫界面拉張強度指的是磚塊與灰縫交接界面受到單純的拉力時，單位面積所能承載的最大力量，此拉力主要是受灰漿的強度所左右，而灰漿的強度則與水灰比及水泥、砂等配比有關，在一定範圍內，當水泥愈多或水份愈少，則拉張強度越大，其關係可以以下面的式子表示：

$$f_a = 12 - 2s \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

其中，

$$f_a = \text{灰縫界面抗拉強度 (kg/cm}^2\text{)}$$

$$s = \text{砂對水泥的容積比 (s 於 1~4 間)}$$

### (2) 大陸相關研究結果

磚牆灰縫界面抗拉強度，

$$f_a = k\sqrt{f'_m}$$

其中，

$$k = 0.141$$

$$f'_m = \text{砂漿之抗壓強度 (kg/cm}^2\text{)}$$

## 2. 磚塊與灰縫界面抗剪強度

### (1) 日本學者左野利器之研究結果

磚牆與灰縫界面抗剪強度主要是隨灰漿的配比而改變，其關係式如下：

$$\tau = 45 - 7.5s$$

其中，

$$\tau = \text{接合的剪斷強度 (kg/cm}^2\text{)}$$

$s$  = 砂對水泥的容積比( $s$  於 1~4 間)

從式關係中，其研究結果發現磚塊與灰縫界面剪力強度與垂直壓應力無關，其剪力強度只與灰縫漿材料黏結強度。

## (2) 國外相關研究結果

國外目前對於灰縫界面剪力強度之研究，則較傾向灰縫界面剪力強度與砂漿、磚塊材料黏結強度有關，並隨著灰縫界面所受之垂直壓應力及摩擦係數而增加，其關係式如下所示。

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma$$

其中，

$\tau$  = 灰縫界面抗剪強度

$\tau_0$  = 灰縫界面黏結強度，其值因材料而異

$\mu$  = 界面極限摩擦係數

$\sigma$  = 界面垂直壓應力

## (3) 大陸相關研究結果

大陸最具代表性的研究磚塊與灰縫界面剪力強度公式如下所示。

$$\tau = \frac{\tau_0}{1.2} \sqrt{1 + 0.45 \frac{\sigma}{\tau_0}}$$

其中，

$\tau$  = 灰縫界面抗剪強度

$\tau_0$  = 灰縫界面黏結強度，其值因材料而異

$\mu$  = 界面極限摩擦係數

$\sigma$  = 界面垂直壓應力

## (4) 灰縫厚度對抗剪強度之影響

根據許茂雄教授的研究，以新砌立方體磚墩試驗結果迴歸，推導如下式。

$$\tau = (-2.84 + 0.013f'_m - 1.3t + 1.05w - 0.039w^2) +$$



$$(0.56 + 0.00023f'_m + 0.014t + 0.029w - 0.0013w^2)\sigma$$

$f'_m$  = 灰漿抗壓強度

$t$  = 磚墩縫厚度

$w$  = 磚牆含水率

### 3. 磚塊與灰縫界面抗彎強度

磚牆灰縫界面拉彎強度依力量作用方向分為豎縫與橫縫二個方向，根據大陸砌體結構設計規範規定如下。

$$f_b = k_1 \sqrt{f'_m}$$

$$f_b = k_2 \sqrt{f'_m}$$

其中，

$$k_1 = 0.250$$

$$k_2 = 0.125$$

$f'_m$  = 砂漿抗壓強度

## (三) 石構材

### 1. 石材的重量

中國大陸常用石砌體的重量整理如表 2-3.9：

表 2-3.9 中國大陸常用石砌體的重量

名稱	重量(tf/m <sup>3</sup> )	備註
漿砌細方石	2.64	花崗岩
漿砌細方石	2.56	石灰石
漿砌細方石	2.24	砂岩
漿砌毛方石	2.48	花崗岩

漿砌毛方石	2.4	石灰石
漿砌毛方石	2.08	砂岩
干砌方石	2.08	花崗岩
干砌方石	2.0	石灰石
干砌方石	1.76	砂岩

## 2. 石材的分類

石材按其加工的外形規則程度，可分為料石和毛石。其分別說明如下：

### (1) 料石

(A) 細料石：通過細加工，外形規則，疊砌面凹入深度不應大於 10mm，截面的寬度、高度不應小於 200mm，且不應小於長度的 1/4。

(B) 半細料石：規格尺寸同上，但疊砌面凹入深度不應大於 15mm。

(C) 粗料石：規格尺寸同上，但疊砌面凹入深度不應大於 20mm。

(D) 毛料石：外形大致方正，一般不加工或稍加修整，高度不應小於 200mm，疊砌面凹入深度不應大於 25mm。

### (2) 毛石

形狀不規則，中部厚度不應小於 200mm。

## 3. 石造構材的強度標準值

### (1) 毛料石砌體的抗壓強度標準值(單位：kg/cm<sup>2</sup>)

表 2-3.10 毛料石砌體的抗壓強度標準值

強度等級	砂漿強度等級				砂漿強度
	M7.5	M5	M2.5	M1	
MU100	86.7	76.8	66.8	60.9	34.1
MU80	77.6	68.7	59.8	54.4	30.5
MU60	67.2	59.5	51.8	47.1	26.4
MU50	61.3	54.3	47.2	43	24.1
MU40	54.9	48.6	42.3	38.5	21.6

MU30	47.5	42	36.6	33.3	18.7
MU20	38.8	34.3	29.9	27.2	15.3
MU15	33.6	29.7	25.9	23.6	13.2
MU10	27.4	24.3	21.1	19.2	10.8

(2)毛石砌體的抗壓強度標準值(單位：kg/cm<sup>2</sup>)

表 2-3.11 毛石砌體的抗壓強度標準值

強度等級	砂漿強度等級					砂漿強度
	M7.5	M5	M2.5	M1	M0.4	
MU100	20.3	18	15.6	9.1	6.8	5.3
MU80	18.2	16.1	14	8.2	6.1	4.8
MU60	15.7	13.9	12.1	7.1	5.3	4.1
MU50	14.4	12.7	11.1	6.4	4.8	3.8
MU40	12.8	11.4	9.9	5.8	4.3	3.4
MU30	11.1	9.8	8.6	5	3.7	2.9
MU20	9.1	8	7	4.1	3	2.4
MU15	7.9	7	6.1	3.5	2.6	2.1
MU10	6.4	5.7	4.9	2.9	2.1	1.7

(3)毛石砌體的抗拉、彎曲及抗剪強度標準值(單位：kg/cm<sup>2</sup>)

毛石砌體沿砌體灰縫截面破壞時的軸心抗拉強度設計值、彎曲強度設計值和抗剪強度標準值。

表 2-3.12 毛石砌體的抗拉、彎曲及抗剪強度標準值

強度類別	破壞特徵	砂漿強度等級					
		M10	M7.5	M5	M2.5	M1	M0.4
軸心抗拉	沿齒縫	1.4	1.2	1	0.7	0.4	0.3
彎曲抗拉	沿齒縫	2	1.8	1.4	1	0.6	0.4
抗剪	—	3.4	2.9	2.4	1.7	1.1	0.7

(4)砌體彈性模數(單位：kg/cm<sup>2</sup>)

表 2-3.13 砌體彈性模數

砌體種類	砂漿強度等級					
	M10	M7.5	M5	M2.5	M1	M0.4
粗、毛料石、毛石	73000	56500	40000	22500	12500	8500
細料石、半細料石	220000	170000	120000	67500	37500	25500

(四)土質構材

1.土質材的重量

表 2-3.14 土質材的重量

名稱	重量(tf/m <sup>3</sup> )	備註
土坯磚砌體	1.6	
三合土	1.7	灰：砂：土=1:1:9~1:1:4

2.土塙構造力學性能

有關古蹟及歷史建物之耐震安全，在九二一地震後獲得相當之重視。土塙建物が在台灣普遍可見，土塙牆的製作方法如圖 2-3.3。在震災中亦受損嚴重，根據國立成功大學建築研究所研究生周柏琳之論文「台灣傳統建築土塙構造力學性能初探」之研究，大致有如下之結論：

(1)台灣土塙牆體細長比約在 7-10，就耐震特性評價而言，在中大型規模的地震會不穩定。因為土塙與灰縫材料的均質性，面內的剪力破壞常會有裂縫直接穿過磚身的行為，而非如磚造牆體的階梯狀裂縫；在面外力作用下，常造成土塙牆體交接處的脫離而致傾倒，連帶易使屋頂塌落。

(2)從各地蒐集之土塙試體，排除非正常使用及新作乾燥中的土塙，含

水率約在 1% ~3.1% 之間，經由簡單的抗壓試驗得知強度分布在  $4\text{kg}/\text{cm}^2$ - $20.5\text{kg}/\text{cm}^2$ ，試體進行顆粒分析後，含砂量在 8% ~46% 之間，沉泥+黏土含量在 54% ~92% 之間，與英美國家相較，本地試體含砂量偏低，細小顆粒含量偏高。

(3)土塊牆體灰縫抗剪能力則經由足尺土塊所砌的八道  $70\text{ cm}\times 70\text{ cm}$  試體，進行對角張力試驗，由試驗結果得知：

(A)傳統利用竹篾水平補強法抗剪能力未必提高。

(B)適當的利用韌性構材如鋼纜與牆體結合，可提高砌體的極限強度，牆體不易崩塌。

(C)傳統牆體灰縫抗剪強度約  $0.022\text{ kg}/\text{cm}^2$ ，透過簡易而符合可逆性的策略，亦可提升至  $0.058\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

(D)試體主要破壞模式與調查所見有別，僅有少數裂縫穿過土塊本身，大部分亦呈階梯狀開裂。

美國新墨西哥州已有土塊建築物營建法規，意謂土塊製造已工業化，故土塊品質或土塊強度可加以控制。以下為其美國各地區土塊構材力學性質：

表 2-3.15 美國各地區土塊構材力學性質

美國土塊場位置	土塊尺寸 (in*in*in)	抗壓強度 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	抗壓強度 (psi)	劈裂強度 (psi)	土塊類型
<b>小規模土塊場</b>					
Las Vegas	10*4*14	23.17	329.0	25.0	傳統
Aztec	10*4*14	35.21	500.0	89.0	傳統
Ledoux	10*3.5*14	75.42	1071.0	46.0	加壓土塊
Columbus	5.5*4*11.5	54.15	769.0	69.0	傳統
<b>中規模土塊場</b>					
Taos	7.5*4*15.5	18.38	261.0	20.0	傳統
Santafe Fe	10*3.5*14	50.28	714.0	36.0	傳統
Las Palomas, Mexico	8*3.5*16	30.00	426.0	51.0	傳統
<b>大規模土塊場</b>					
Alameda	10*4*14	34.44	489.0	66.0	傳統
Alameda	10*4*14	35.14	499.0	89.0	加強(stablized)
Madera, California	7.5*4*16	43.03	611.0	155.0	加強(tablized)



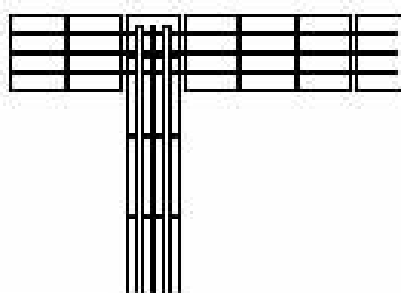
攪拌土壤，摻稻草



照 土塊置入模具



將土塊表面抹平，再行脫模



牆竹篾放置方式平面示意圖



脫模



照片 2-5 竹北間禮堂，土塊牆牆基、牆體及

圖 2-3.3 土塊牆的製作方法

## (五)編竹夾泥構材

日式古蹟及歷史建築中，其竹編夾泥牆體受地震力下，常發生木框架脫榫情形，導致牆體因脫榫而產生破壞，甚而倒塌。但是，我國相關研究編竹夾泥構材的文獻甚少，於此引用國立台灣大學森林學研究所李蕙吟之論文「方榫接合與鐵件對日式軸組式歷史建築承重牆側向力改善之探」，有關木框架竹編夾泥牆之研究部份，為免誤引用其對於竹編夾泥牆之研究，任意應用於實務結構設計上，特摘其論文部分說明之，然設計者可參酌引用。

### 1.實驗試體說明

編竹夾泥牆分為木框架部分及竹編夾泥部分，其材料與尺寸為：

(1)竹編牆體結構：木試驗結構牆之間柱及側柱採用杉木，結構包括側柱兩支、間柱兩支、上樑一支、地檻木材一支以及間梁一支(如圖 2-3.4 所示)。其結構尺寸如下：

(A)側柱：橫斷面積 12 X 12cm，長度 176cm 之正塤材，長度方面有 6 公分嵌入上樑及地檻木材。

(B)間柱：橫斷面積 6 X 12cm，長度 176cm 之平割材，長度方面有 6 公分嵌入上樑及地檻木材。

(C)上樑及地檻木材：棋斷面積 12 X 12cm，長度 309cm。

(D)間樑：橫斷面積 1.7 X 12cm，長度 265cm，長度方面有 4 公分嵌入側柱。

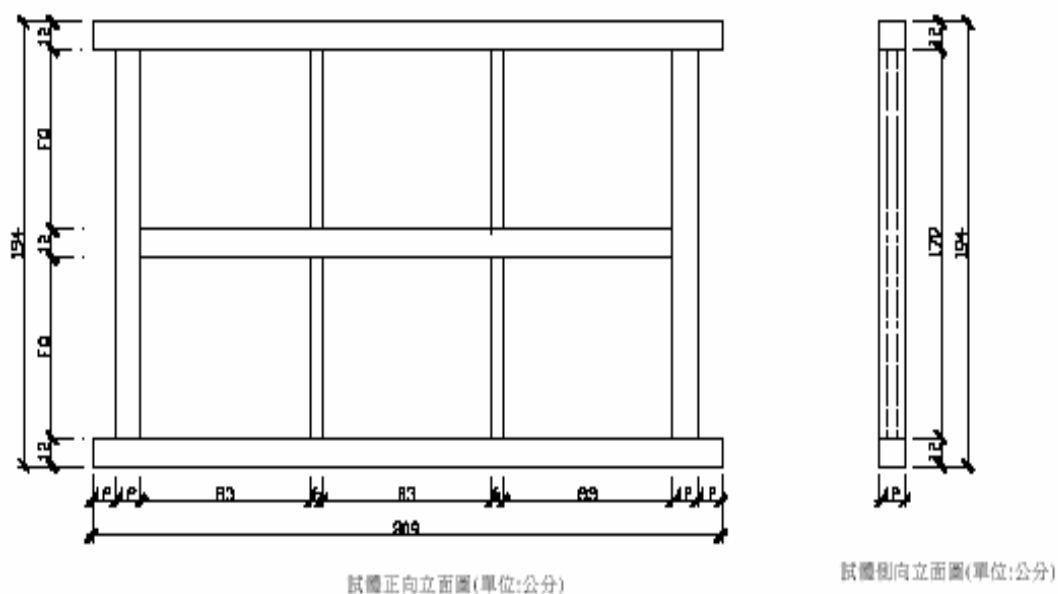


圖 2-3.4 實驗試體圖

(2)竹編部分：試驗牆面中心層編主體採用 3~5 年生之孟宗竹，產地為嘉義縣梅山鄉，竹桿定長後剖成竹片作為竹筋之用，並削平竹節，包括縱向編織竹筋尺寸為 78 X 2.4 X 0.5 cm，橫向編織竹筋尺寸為 78 X 2.4 X 0.5 cm 二種規格。

(3)其他材料：青灰泥 80 公升(採取地為屏東地區)、稻桿 500g(氣乾重)、白灰 10kg(市售之關仔嶺特級白灰)、市售麻絨 100g。

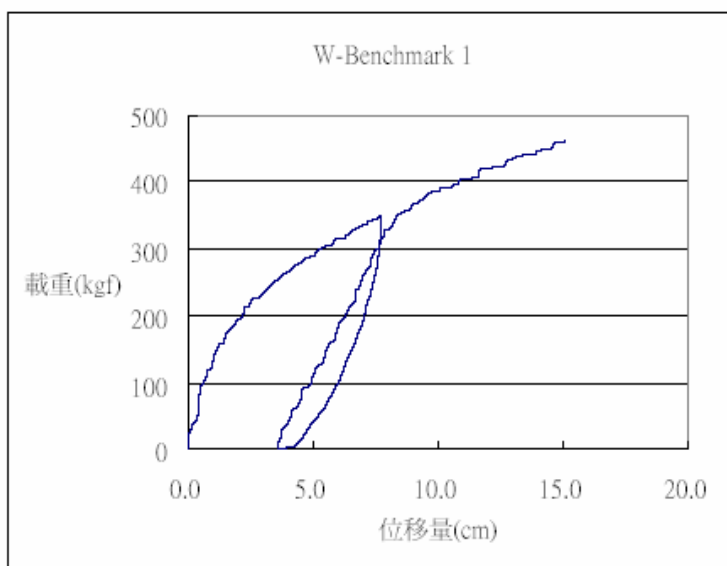
## 2.極限水平剪力強度

由兩組對照組載重位移圖中，計算最大水平剪斷強度，整理如下表：

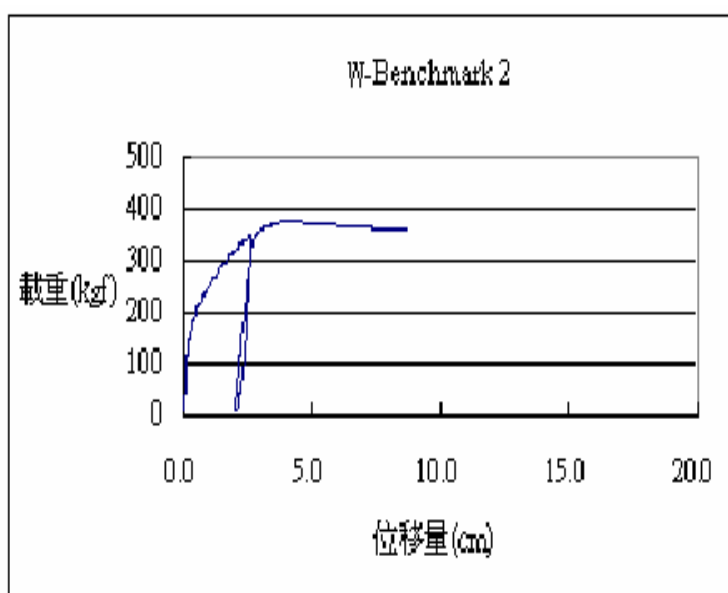
表 2-3.16 編竹夾泥牆水平剪力強度

編號	極限載重(kgf)	極限水平剪力強度(kgf/cm <sup>2</sup> )
試體 1	404	0.12
試體 2	376	0.11





試體 1



試體 2

圖 2-3.5 兩組對照組載重位移圖

## (六)木構材

### 1.木材的重量

表 2-3.17 木材的重量

名稱	重量(tf/m <sup>3</sup> )	名稱	重量(tf/m <sup>3</sup> )
杉木	0.4	楊木三夾板	0.0019
冷杉、雲杉、紅松、華山松、樟子松、鐵杉、似赤楊、紅椿、楊木、楓楊	0.4~0.5	椴木三夾板	0.0022
馬尾松、雲南松、油松、赤松、廣東松、凱木、楓香、柳木、榛木、秦嶺葉松、新疆落葉松	0.5~0.6	水曲柳三夾板	0.0028
東北落葉松、陸均松、榆木、樺木、水曲柳、苦楝、木荷、臭椿	0.6~0.7	楊木五夾板	0.003
錐木、石栎、槐木、烏墨	0.7~0.8	椴木五夾板	0.0034
楮木、柞木、桉樹、木麻黃	0.7~0.8	水曲柳五夾板	0.004
普通木板條、橡櫟木料	0.5	—	—
鋸末	0.2~0.25	—	—
木絲板	0.4~0.5	—	—
軟木板	0.25	—	—
刨花板	0.6	—	—

### 2.木材的主要特性

- (1)槐木：乾燥困難、耐腐性強、易受蟲蛀。
- (2)烏墨：乾燥較慢、耐腐性強。
- (3)木麻黃：木材硬而重、乾燥易、易受蟲蛀、不耐腐。
- (4)隆緣桉、檸檬桉和雲南藍桉：乾燥困難、易翹裂。雲南藍桉能耐腐，而隆緣桉和檸檬桉不耐腐。
- (5)檫木：乾燥較易、乾燥後不易變色、耐腐性強。
- (6)榆木：乾燥困難、易翹裂、收縮頗大、耐腐性中等、易受蟲蛀。
- (7)臭椿：乾燥易、不耐腐、易呈藍變色、木材輕。

(8)凱木：乾燥易、不耐腐。

(9)楊木：乾燥易、不耐腐、易受蟲蛀。

(10)似赤楊：木材輕、質軟、收縮小、強度低、易乾燥、不耐腐。

### 3.木材的強度設計值和彈性模數

(1)大陸常用樹種木材強度設計值和彈性模數(單位：kg/cm<sup>2</sup>)

表 2-3.18 木材的強度設計值和彈性模數

適用樹種	抗彎	順紋 抗壓及 承壓	順紋 抗拉	順紋 抗剪	90 度橫紋承壓			彈性 模數
					全表面	局部表面 及齒面	拉力螺栓 墊板下面	
柏木	170	160	100	17	23	35	46	100000
東北落葉松		150	95	16				
鐵杉、油杉	150	130	90	16	21	31	42	100000
魚鱗雲杉、西南雲杉		120	90	15				
油松、新疆落葉松、雲南松、馬尾松	130	120	85	15	19	29	38	100000
紅皮雲杉、紅松、樟子松		100	80	14				90000
西北雲杉、新疆雲杉	110	100	75	14	18	27	36	90000
杉木、冷杉		100	70	12				
楊木	200	180	120	28	42	63	84	120000
水曲柳	170	160	110	24	38	57	76	110000
錐栗(栲木)、樺木	150	140	100	20	31	47	62	100000

(2)木材強度設計值和彈性模數的調整係數

表 2-3.19 木材強度設計值和彈性模數的調整係數

使用條件	調整係數	
	強度設計值	彈性模數
露天結構	0.9	0.85
在生產性高溫影響下，木材表面溫度 40 至 50℃	0.8	0.8
木構造物	0.9	1.0

施工載重	1.3	1.0
------	-----	-----

#### 第四節 結構系統

依據「建築物耐震設計規範及解說」將建築結構系統區分為四類，分別為承重牆系統、構架系統、抗彎矩構架系統及二元系統等四種系統。結構系統敘述、韌性容量 R 及高度限制的規定如下表：

表 2-4.1 結構系統敘述、韌性容量 R 及高度限制

基本結構系統	抵抗地震力結構系統敘述	R	高度限制(m)
承重牆系統	具剪力嵌版之輕構架牆		
	(1)三樓以下三夾版嵌版牆	3.2	20
	(2)其他輕構架嵌版牆	2.4	20
	剪力牆		
	(1)鋼筋混凝土造	3.3	50
	(2)磚石造	2.0	20
	僅具受拉斜撐之輕量鋼架承重牆	1.6	20
	斜撐承受垂直載重之斜撐構架		
構架系統	(1)鋼造	3.0	50
	(2)木造	1.6	20
	鋼造偏心斜撐構架(EBF)	4.2	75
	具剪力嵌版牆之輕構架		
	(1)三樓以下三夾版嵌版牆	3.6	20
	(2)其他輕構架嵌版牆	2.8	20
	剪力牆		
	(1)鋼造	4.0	50
(2)鋼筋混凝土造	3.6	50	
(3)磚造	3.2	50	
鋼造特殊同心斜撐構架(SCBF)	3.6	50	
合成構造具偏心斜撐構架	4.2	75	
合成構造具特殊同心斜撐構架(SCBF)	3.6	50	
抗彎矩構架系統	韌性抗彎矩構架(SMRF)		
	(1)鋼造	4.8	不限
	(2)混凝土造	4.8	不限
	(3)合成構造	4.8	不限
	(4)具非結構牆	4.8	不限

	部份韌性抗彎矩構架(IMRF)		
	(1)鋼造	3.2	50
	(2)鋼筋混凝土造	3.2	50
	鋼造韌性桁架	4.0	50
二元系統	剪力牆		
	(1)鋼筋混凝土造，具 SMRF	4.8	不限
	(2)鋼筋混凝土造，具非結構牆 SMRF	4.0	不限
	(3)鋼造，具 SMRF	4.8	不限
	(4)鋼造，具非結構牆 SMRF	4.0	不限
	(5)磚石造，但具 SMRF	3.2	50
	斜撐系統		
	(1)鋼造偏心斜撐，具 SMRF	4.8	不限
	(2)鋼造特殊同心斜撐，具 SMRF	4.8	不限
	(3)鋼造偏心斜撐，具非結構牆 SMRF	4.0	不限
(4)鋼造特殊同心斜撐，具非結構牆 SMRF	4.0	不限	

在台灣古蹟及歷史建物中，結構型態大多為混合構造，其次即是木構造。對結構設計者而言，結構系統韌性容量的大小會影響結構分析時採用地震力的大小，一般而言，韌性好的結構物，設計地震力可以比較小，而韌性差的結構物，結構本體於大地震發生時吸收能量的效果較差，故於結構分析時，採用之設計地震力會比較大。然而，對於古蹟及歷史建物而言，結構設計者應該要採用多大的韌性容量才算合理呢？本文大致將古蹟及歷史建物做適當的分類，可供結構設計者做參考。

## 一、構造分類

結構系統構造分類，至少可以分成兩類，分別為混合構造及純木構造，在台灣之古蹟及歷史建物之中，則是以混合構造居多，純木構造次之。然混合構造又可將其區分為屋架、砌體及基礎三部份的組成，其中屋架部份包括西式、日式、及居多之閩南式屋架，而砌體則以石牆、磚牆、土墼牆及斗子牆為多，這些牆體之中，又以磚牆居多，至於基礎方面，則是以石、磚、混凝土或夯實為最多的構造型式。此外，由於鋼筋混凝土造及鋼構造技術的發展成熟，亦有混合式構造採用 RC 造或鋼構造組成之建物。另有關純木構造在屋架部份則採用西式、日式、及居多之閩南式屋架，房間的隔間則多採用木隔間，其木隔間一般的用途僅為隔間用，很少有木隔間尚具有承重或耐震的功

用，至於基礎方面，則同混合構造以石、磚、混凝土或夯實為主。針對以上的說明綜合整理如表：

(一)混合構造

表 2-4.2 古蹟及歷史建築混合構造

分類	構材
屋架	西式、日式、穿斗式、抬梁式、疊斗式
砌體	石牆、磚牆、土墼牆、斗子牆、編竹夾泥牆
基礎	石、磚、混凝土、夯土

(二)純木構造

表 2-4.3 古蹟及歷史建築純木構造

分類	構材
屋架	西式、日式、穿斗式、抬梁式、疊斗式
木隔間	—
基礎	石、磚、混凝土、夯土

二、結構系統分類

本文將古蹟及歷史建築物的結構系統歸納成承重牆及構架系統兩種，因為對於古蹟及歷史建物而言，於設計之初，鮮少會考慮到建築物韌性之耐震性能，大多建物只考慮到垂直載重及應用構造強度抵抗地震力，所以對於具有承受垂直載重及以結構本體韌性抵抗地震力的觀念應該不是很完備。依據古蹟及歷史建物採用的構造材料推測，其採用的材料並非具有良好的韌性，除此之外，建物梁柱的接合大部份為榫接、楔接、或連續穿材等方式，換言之，其接合方式的耐震性能亦不佳，基於以上的陳述，因此本文將古蹟及歷史建物之結構系統只歸納為承重牆系統及構架系統。至於構造分類、系統說明及建議結構分析時之韌性容量則說明如下：

表 2-4.4 古蹟及歷史建築結構系統分類

結構系統分類	構造分類	系統說明	建議韌性容量
承重牆系統	混合構造	以砌體承受全部或大部份垂直載重，並以剪力牆或斜撐構架抵抗地震力	小於 2
	純木構造	以木斜撐承受全部或大部份垂直載重，並以剪力牆或木斜撐構架抵抗地震力	小於 1.5

構架系統	混合構造	具有承受垂直載重完整之立體屋架，以剪力牆或斜撐構架抵抗地震力	小於 2
	純木構造	具有承受垂直載重完整之立體木屋架，以剪力牆或斜撐構架抵抗地震力	