

# 半尺度七層樓 RC 結構受扭轉不規則之 3D 有限元素非線性分析研究

陳宥銜<sup>1</sup> 蕭輔沛<sup>2</sup> 胡宣德<sup>3\*</sup>

**關鍵詞：**半尺度七層樓 RC 結構、有限元素分析、混凝土塑性損傷模型、非線性扭轉、扭轉不規則、ABAQUS。

## 摘 要

有鑑於近年來 921 集集地震和 2016 年美濃地震造成的地震危害，台灣的鋼筋混凝土結構易受到偏心和扭轉不規則的破壞。因此，專家和學者們致力於扭轉不規則結構的抗倒塌分析和模擬，並使用大型振動台試驗針對一系列具有不同扭轉不規則來源的半尺度七層樓鋼筋混凝土結構進行測試，期望可以對鋼筋混凝土結構的非線性扭轉反應進行研究。

本研究旨在透過 NCREE 所進行的振動台試驗，研究既有鋼筋混凝土建築物在近斷層地震作用下的非線性扭轉行為，並強調軟弱底層系統的特性。搭配使用有限元素分析軟體“ABAQUS”進行動力分析，並詳細討論如何建立合適的分析模型來有效地模擬其結構勁度、混凝土的塑性行為、破壞模式和線性扭轉反應。最終，將通過模擬分析獲得的動態行為和相關數據與 NCREE 量測到的實驗數據進行比較，討論非線性扭轉分析技術的準確性，並提出結論和未來的建議。

## NONLINEAR FINITE ELEMENT 3D ANALYSIS OF HALF-SCALE SEVEN-STORY RC STRUCTURES WITH TORSIONAL IRREGULARITY

Yo-Shien Chen

Department of Civil Engineering  
National Cheng Kung University  
Tainan, Taiwan 70101, R.O.C.

Fu-Pei Hsiao

National Center for Research on Earthquake Engineering  
Taipei, Taiwan 10668, R.O.C.  
and Department of Civil Engineering  
National Cheng Kung University  
Tainan, Taiwan 70101, R.O.C.

Hsuan-Teh Hu

Department of Civil Engineering  
National Cheng Kung University  
Tainan, Taiwan 70101, R.O.C.

Department of Civil and Disaster Prevention Engineering  
National United University  
Miaoli, Taiwan 36063, R.O.C.

**Key Words :** half-scale seven-story RC structure, finite element analysis, concrete damage plastic model, nonlinear torsion, torsional irregularity, ABAQUS.

## ABSTRACT

In view of the recent earthquake damage caused by the 921 Chi-Chi Earthquake and the 2016 Meinong Earthquake, reinforced concrete structures in Taiwan are vulnerable to eccentric and irregular torsional damage. Therefore, experts and scholars are devoted to the analysis and simulation of the collapse resistance of the structures with torsional irregularity, and a series of half-scale

<sup>1</sup> 國立成功大學土木工程研究所碩士

<sup>2</sup> 國家地震工程研究中心組長；國立成功大學土木工程學系合聘副教授

<sup>3</sup> \*通訊作者，國立成功大學土木工程系特聘教授；國立聯合大學土木及防災工程學系教授兼副校長

seven-story reinforced concrete structures with different sources of irregularities were tested on the shaking-table at the National Earthquake Engineering Research Center (NCEE) Tainan laboratory. It is expected that the nonlinear torsional response of the reinforced concrete structures can be experimentally studied.

This study aims to investigate the nonlinear torsional behavior of existing reinforced concrete buildings under seismic motion through the shaking-table tests performed by NCEE and emphasizes the characteristics of the weak first-story system. The finite element software “ABAQUS” is used for dynamic analysis. Detailed discusses on how to establish an appropriate analysis model to effectively simulate its stiffness, plastic behavior of concrete, failure mode and nonlinear torsional response are given. Then the numerical simulations of the dynamic behavior of the structure are compared with the experimental data provided by NCEE to discuss the accuracy of the analysis for nonlinear torsion. Finally, conclusions and suggestions for future research are given.

## 一、前言

回顧過去的地震事件，許多 RC 建築物因局部構件的破壞而引致整體結構倒塌。在這些事件中，震後調查發現局部構件破壞主要是由結構系統中的扭轉不規則引起的。這種不規則是由於結構構件在垂直和水平面上的不對稱排列而產生的。這些事件顯示出，儘管設計規範和手冊都有討論結構物對扭轉的需求，但在定義與地震反應有關的非線性扭轉行為時仍存在著諸多不確定性，例如，現有的鋼筋混凝土結構由於結構上的弱點，易使整體結構受到扭轉危害，包括垂直的不規則如軟弱底層系統；水平不規則如柱構件在平面中的不對稱排列、使用無筋磚造填充牆 (URM)、結構構件不同的破壞程度以及不對稱的韌性柱配置。而在這些系統中發現，較少有研究與非線性扭轉反應的影響有關。這項研究的目的是填補這一空缺，並提供一種在有限元素分析中評估扭轉反應的方法。

## 二、文獻回顧

### 2.1 混凝土塑性損傷模型 (CDP Model)

Abaqus 混凝土損傷塑性材料模型 [1] 最初由 Lubliner 提出 [2]，後來由 Lee & Fenves 修改 [3]，根據混凝土在循環載重下因裂縫的開裂和閉合所造成的損傷行為，以及相關混凝土塑性行為所發展出的材料模型，在單軸循環載重的行為如圖 1。

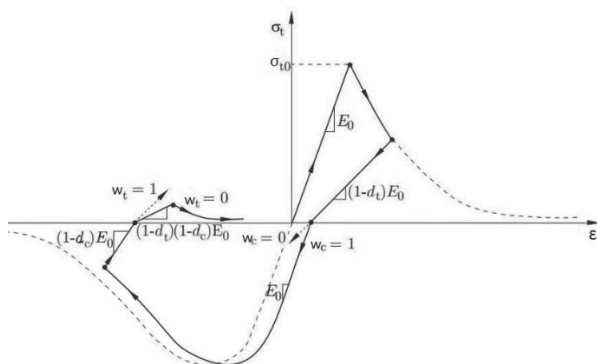


圖 1 CDP 單軸循環載重行為 [1]

CDP 模型將混凝土視為連續體，主要由兩種破壞機制控制，分別為壓縮破碎和拉伸破裂，並且拉力與壓力下具有異向性，而在產生開裂之後即會影響材料剛度，故以壓力損傷參數  $d_c$  及拉力損傷參數  $d_t$  來模擬混凝土塑性應變引起的勁度退化。在循環加載時，若混凝土產生受拉伸裂縫則由拉力轉為壓力，由於壓力引起的裂縫閉合可能產生勁度恢復效應，CDP 模型便定義壓縮恢復係數  $w_c$ ，一般預設為 1 代表勁度完整恢復，同樣的以拉伸恢復係數  $w_t$  表示壓力轉為拉力的剛度變化，一般預設為 0，代表勁度無恢復效應。

### 2.2 非線性扭轉效應

透過基本定義了解，如果結構物勁心與質心並非存在同一點位，且偏心距超過建築物與地震垂直方向尺度百分之十者，將視為平面不規則結構。針對平面不規則性而言，一棟建築物或許具有對稱且不含凹角與側翼之平面幾何形狀，但仍可能因其質量分布或豎向側力抵抗構材之不對稱性，而被歸類為平面不規則結構。除此之外，即使在靜態質心與剛心重合的情況，建築物也可能在地震時產生扭轉效應。舉例，不對稱的裂紋及降伏均會導致建物產生扭轉效應。當然，靜態質心與剛心的偏心將更放大此扭轉效應。

## 三、三向動態地震歷時分析 (NCEE\_BAC)

### 3.1 實驗介紹

實驗於 2018 年 11 月在國家地震工程研究中心台南實驗室進行。本章的實驗試體為 4 層樓鋼筋混凝土結構，在三個方向（兩個水平和一個垂直）上皆有輸入地震力，並且在試體中一側為大柱 (CB)、而另一側為小柱 (CA)，組成平面柱構件排列不對稱的結構，因此當在輸入 Y 向地震力時，結構將會發生偏心扭轉。如同實驗預期，最終試驗結果顯示出明顯的扭轉反應，並且由於扭轉效應引起的嚴重損壞而導致整體結構倒塌。

實驗總共經歷了 5 次的地震輸入。輸入的地震歷時資料是取自於 2016 年美濃地震期間在台南市白河國小站 (CHY015) 和台南市日碑國小站 (CHY063) 獲得的測站值。地震加速度和輸入順序記錄在表 1 中，首先輸入彈性階段的試驗編號 1 和 2，接著輸入非彈性階段的試驗編號 3 和 4，

表 1 地震力測試順序

Test number	Recording station	Scale	Gal	Stage
1	CHY015	70%	180	Elastic
2	CHY063	50%	200	Elastic
3	CHY063	100%	400	Inelastic
4	CHY063	150%	600	Inelastic
5	CHY063	200%	800	Collapse

最終試驗編號 5 是輸入 2 倍的 CHY063 地震力，並代表倒塌階段。此外，在每次地震輸入之間皆有進行白噪音測試 (white noisetest)，目的為量測結構當時對應的自然振動週期、阻尼比和其他數據等，而這些量測數據可以使研究者了解試體在子震前後的損傷程度，並作為系統識別的基礎。

本實驗輸入了三方向的地震力，即 N-S 方向 (X)、E-W 方向 (Y) 和 U-D 方向 (Z)，如圖 3 所示，其中 E-W 方向為主要地震力。

本實驗透過 Mocap (Motion Capture) 可以獲得各樓層相對應標記點的絕對位移。其原理為通過將其標記黏貼在實驗試體表面上，可以量測出標記的絕對位移，且後處理後，還可以得到相對位移。本實驗的標記位置如圖 4 所示，分別標記前側和後側的構架，目的為觀察兩側構架的非同步現象來描述結構的扭轉現象。

從圖 5 的相對位移歷時圖來看，試體在 50% 地震 (彈性階段) 下幾乎沒有產生殘留變形，結構保持彈性，但是在 100% 和 150% 地震 (非彈性階段) 下，實驗數據顯示試體開始傾斜。最終，在 200% 地震 (倒塌階段) 中，實驗數據顯示試體已產生永久性位移，並且倒塌。

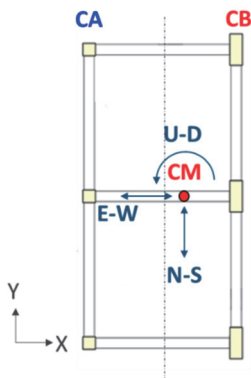


圖 3 三向地震力輸入

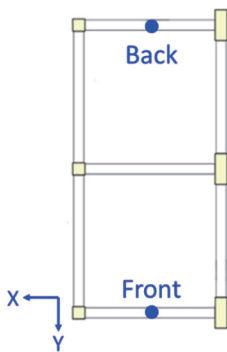


圖 4 Mocap 佈設圖

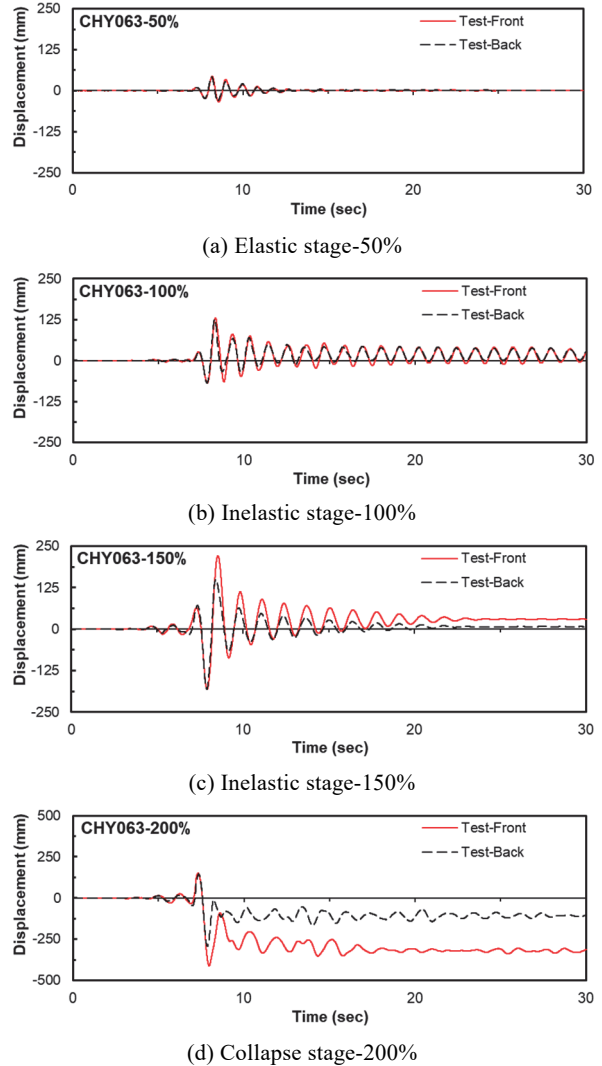


圖 5 第一層樓前後側構架的 X 向相對位移比較

### 3.2 數值模型

在振動台實驗中，五次的地震測試是連續被輸入的，也就是說，結構的損壞、構件的軟化、非彈性變形等將延續到下一個地震測試，並改變下一個實驗的初始條件；然而，考量到分析效率，數值模型各別分析每個地震測試，為分段分析，因此每個地震測試相對應的數值模型都是一個全新的模型，這將導致實驗和數值分析的初始條件有所不同。

因此為了減少不同初始條件引起的誤差，本研究使用系統識別方法找出每個地震測試下結構的系統識別週期，目的為了解結構勁度的軟化程度。本研究的系統識別方法使用結構動力學中最基本的方法來計算自然振動週期 [5]。試體識別的振動週期結果顯示於表 2。

對於數值模型，首先進行模態分析以獲得結構的基本頻率和模態，接著確定基本振動週期。在線性擾動步驟中使用 Lanczos 方法 [6] 求解特徵值方程，獲得了前 100 個模態及其對應的頻率，並找出 X 向上具有最高的質量參與因子的振動週期。最後，將數值模型的週期與四個地震測試的週期進行匹配。表 3 列出了原始條件下的混凝土彈性模數

表 2 系統識別週期

CHY063	200 Gal	400 Gal	600 Gal	800 Gal
Period (s)	0.697	0.843	1.088	1.202

表 3 彈性模數折減

	Elastic Modulus, E (MPa)	Natural Frequency, f (Hz)	Natural Period, T <sub>n</sub> (s)
	Concrete	Mode 1	Mode 1
Original	17,600	2.27	0.44
40% Reduced	10000	1.42	0.704

和週期以及在 50% 地震時折減後的混凝土彈性模數和週期。其他 100%、150% 和 200% 地震也是透過相同的方法折減勁度，以達到分析模型振動週期與實驗試體週期一致的目標。表 4 顯示了每個地震的實驗目標週期與分析模型的週期設定。

表 4 系統識別週期與模型週期設定

CHY063	50%	100%	150%	200%
ID period (s)	0.697	0.843	1.088	1.202
Model period	0.704	0.847	1.091	1.203

### 3.3 數值結果與實驗數據比較

為了有效地評估結構受扭轉影響的程度，本研究使用平面扭轉角 [7] 來量化每個地震中的非線性扭轉程度。平面扭轉角定義為相對於基座/振動台的旋轉角，如公式(1) [7] 所示。前側構架相對於基座的位移 ( $\delta_F$ ) 減去後側構架相對於基座的位移 ( $\delta_B$ ) 並除以兩側構架間 Y 向的距離 ( $L$ )。圖 6 說明了公式中每個參數的意思。

$$\theta = \frac{\delta_F - \delta_B}{L} \quad (1)$$

其中，

- $\theta$ ：平面扭轉角 (單位：rad)。
- $\delta_F$ ：前側構架相對於基座的位移。
- $\delta_B$ ：後側構架相對於基座的位移。
- $L$ ：兩側構架在 Y 向的距離。

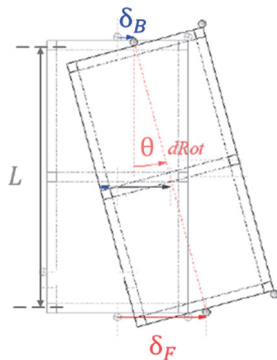


圖 6 平面扭轉角示意圖 [7]

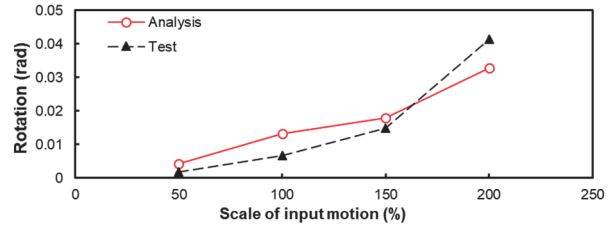


圖 7 四個地震輸入的平面扭轉角峰值

圖 7 顯示了實驗和分析的平面扭轉角峰值。紅的實線表示分析結果、黑的虛線表示實驗數據。可以發現，與實驗相比，分析模型在彈性和非彈性階段表現出較大的扭轉程度 (50%、100% 和 150%)。但在倒塌階段 (200%)，分析模型的扭轉程度要比實驗小。

總結，分析結果的趨勢相似於實驗，當地震力越大 (從彈性階段到非彈性階段)，結構產生的扭轉反應程度也越明顯。因此認為此分析方法對於研究受非線性扭轉影響的結構是可行的。

## 四、扭轉不規則的動態地震歷時分析 (NCREE\_BPC)

### 4.1 實驗介紹

實驗於 2019 年 5 月在國家地震工程研究中心台南實驗室進行。本實驗有兩組七層樓試體，稱為 Specimen 1 和 Specimen 2。此次實驗的目的是評估結構受不同來源的不規則性引起的非彈性扭轉反應，這些不規則性包括勁度/強度偏心、損傷不規則性和韌性不規則性。

參考表 5，在 Specimen 1 中，為了產生剛度/強度偏心，在西側第一層構架中使用無筋磚造填充牆 (URM)，在此試體上進行的測實驗被稱為“Series-1A”，期望地震將會在東側構架 (無 URM 側) 上產生較多的損壞。緊接著 Series-1A 之後，將磚牆拆除，使結構具有損傷不規則性，以進行下一個系列的測試，稱為“Series-1B”。

參考表 6，在 Specimen 2 中，為了產生非韌性柱配對不規則性，對西側構架的柱構件採用「韌性」配筋設計。而東側和中間構架的柱構件則是採用「非韌性」配筋設計。而

表 5 Series-1 的兩個不規則扭轉來源 [7]

Test name	Series-1A	Series-1B
Source of torsion	Stiffness eccentricity	Damage irregularity
Illustration for irregular systems		
CR: center of rigidity CV: center of strength CM: center of mass		
Irregularity produced by	URM infill in one frame	Damage from Series-1A

表 6 Series-2 的不規則扭轉來源 [8]

Test name Source of torsion	Series-2 Non-ductile irregularity	
Illustration for irregular systems  CR: center of rigidity CV: center of strength CM: center of mass	Slight shaking	Strong shaking
Irregularity produced by	Asynchronous strength degradation	

這種不對稱的韌性配置在受到強震時，將會產生不同步的強度衰退機制，導致扭轉。在 Specimen 2 上進行的系列實驗被稱為“Series 2”。

本實驗選擇了 1999 年集集地震在 CHY101 站記錄的地震歷時資料。如圖 8 所示，該實驗僅輸入 X 向的地震力。地震加速度和輸入順序記錄在表 7 中。首先進行 Series-1A 實驗，包括編號 1 ~ 4，然後進行 Series-1B，包括編號 5 ~ 8，通過等效放大每個輸入的地震強度，觀察建築物在不同強度下的破壞行為。此外，在每個輸入地震之間一樣有進行白噪音測試 (white noise test)。

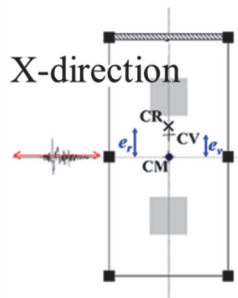


圖 8 地震力輸入方向 [9]

表 7 地震力測試順序 [9]

Series 1	Test name	Scale	Gal	Irregularity
1	1A-10%	10%	88.3	Stiffness
2	1A-20%	20%	177	
3	1A-60%	60%	530	
4	1A-60%-2	60%	530	
5	1B-10%	10%	88.3	Damage
6	1B-20%	20%	177	
7	1B-40%	40%	353	
8	1B-60%	60%	530	
Series 2	Test name	Scale	Gal	Irregularity
1	2-10%	10%	88.3	Ductile
2	2-20%	20%	177	
3	2-40%	40%	353	
4	2-60%	60%	530	

圖 9 顯示了 Series-1 下底層構架的裂紋發展。從圖中可以看出，在 1A-10% 和 1A-20% 期間並無發現明顯的裂縫，且在磚牆上也無觀察到裂縫。接著，以 60% 的地震強度對試體進行兩次的輸入，分別為 1A-60% 和 1A-60%-2，造成了結構構件產生了較明顯的損壞。兩次地震都顯示出類似的破壞模式，在東側構架底層柱的頂部和底部都可以看到明顯的破壞，包括混凝土剝落剝離和樑柱接頭處的一些撓曲裂縫。另外，在磚牆上觀察到一些對角線裂縫，但未觀察到混凝土剝落或嚴重損壞 [8]。

總結 Series-1A 的損壞狀態，該試體在四次的地震輸入後沒有顯示出太嚴重的損壞，並且在磚牆上沒有觀察到嚴重的剝落或壓碎，表示該結構依然可以供後續的 Series-1B 實驗進行測試，並且西側的磚牆抵抗了所有 1A 的地震輸入。也是因為西側構架受到磚牆的保護，導致東側比西側構架受到更嚴重的損壞，且由於先前 Series-1A 實驗中損傷構件的軟化和殘留位移，造成了 Series-1B 仍然受扭轉反應的影響。

Series-1B 中，在 10% 和 20% 期間，結構的損壞狀態大致相同。在 40% 時，東側構架上發現更多的撓曲裂縫，並且變形集中在東側構架的樑柱接頭，但是沒有明顯的混凝土剝落剝離或鋼筋挫屈。最終，輸入 60% 地震，將試體推向倒塌階段，導致明顯的混凝土剝落剝離和鋼筋挫屈，導致試體倒塌 [8]。



圖 9 Series-1 底層構架的受震後照片 [8]

總結 Series-1B 的損壞狀態，儘管在拆除磚牆後結構已恢復對稱性，但兩側構架損壞程度的差異確實為 1B 創造了新的不對稱來源。

圖 10 顯示了 Series-2 下第一層構架的裂縫發展。從圖中可以發現，在前三個地震輸入 (2-10% 到 2-40%) 期間都沒有發現嚴重的裂紋，並且兩側構架的損壞狀態類似。然而，最後輸入的 2-60%，將試體推向倒塌階段，東側構架受到較嚴重破壞，可以觀察到對角破壞、縱向主筋挫屈和核心混凝土壓碎 [9]；相反地，西側構架依然保持中等的破壞程度，只有發現些許的撓曲裂縫在柱構件的末端 [9]。

對圖 11 和圖 12 的 Series-1 中的第一層構架相對位移

反應進行討論。在 1A-10% 和 1A-20% 中，相對位移峰值是小於降伏值的 [8]，結果也顯示兩次的輸入並沒有對試體產生非彈性位移，表明結構仍處於彈性階段。在 1A-60% 和 1A-60%-2 中，東側構架的最大相對位移遠遠超出了估計的降伏位移值 [8]，並且東側構架已產生殘留位移，表明該結構已進入非彈性階段。在 1B-10%、1B-20% 和 1B-40% 中，由於先前 Series-1A 的損壞和非彈性位移，東側構架 (損傷側) 的峰值相對位移大於西側構架 (無損側)，使結構產生扭轉反應。最後 1B-60% 的地震輸入將試體推向倒塌階段。地震輸入的最大脈沖在東側構架中引起了 429 mm 的相對位移，使試體無法將自身拉回到其原始位置 [8]，視為倒塌。

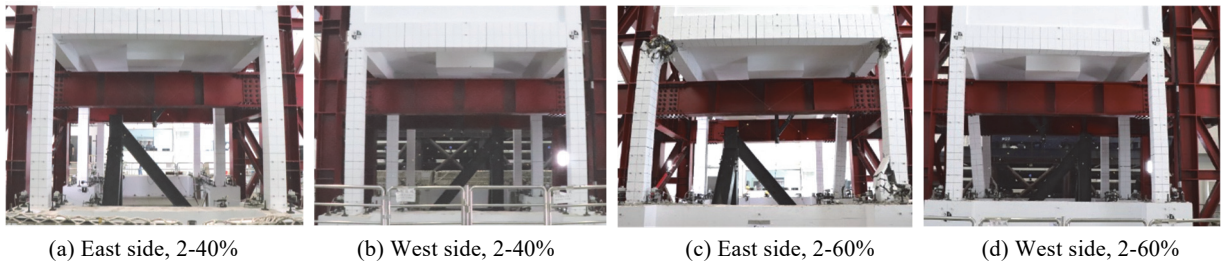


圖 10 Series-2 底層構架的受震後照片 [9]

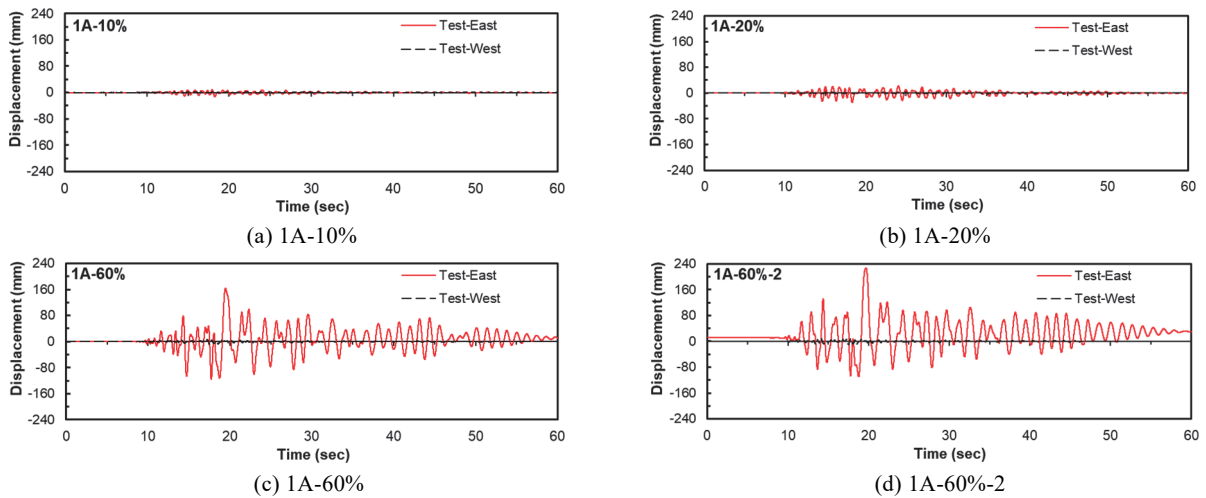


圖 11 Series-1A 的東西側第一層樓的相對位移 [8]

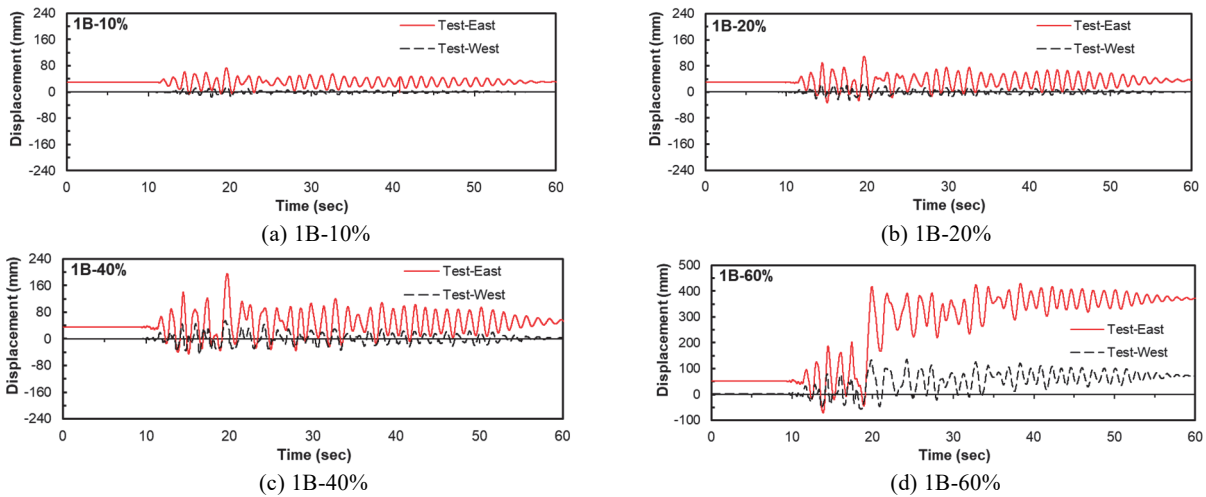


圖 12 Series-1B 的東西側第一層樓的相對位移 [8]

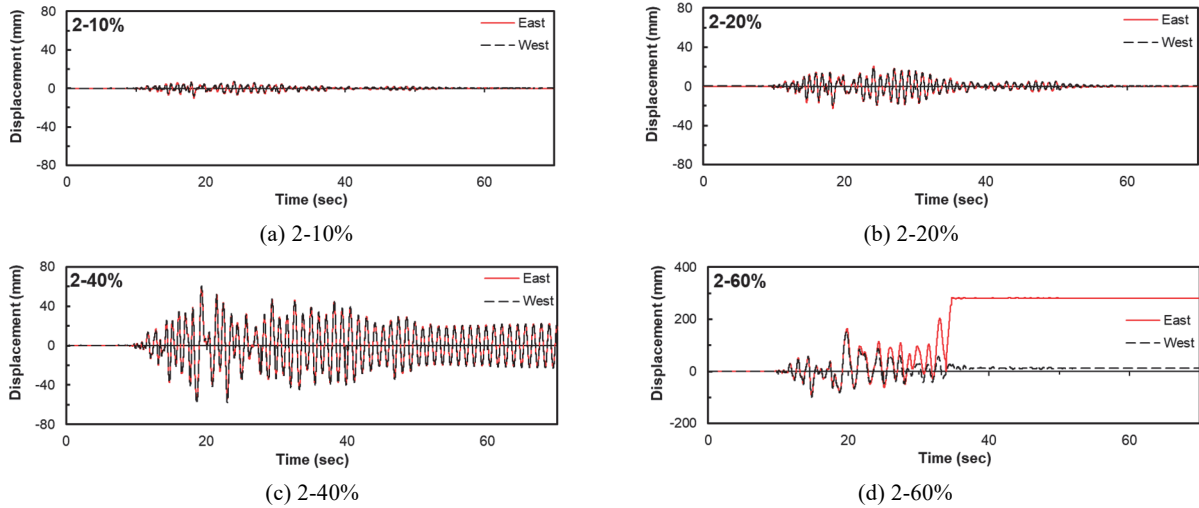


圖 13 Series-2 的東西側第一層樓的相對位移 [9]

觀察圖 13，Series-2 中第一層樓的相對位移反應，在前三個地震輸入中，從 2-10% 到 2-40%，兩側構架的反應幾乎是保持對稱的。而在最終的地震輸入 (2-60%) 中，兩側構架開始表現出不對稱的反應，這使得東西構架之間位移需求的差異逐漸增大。經過幾次扭轉之後，東構架的非韌性柱失去了軸向承載能力，使整體結構倒塌 [9]。

### 4.2 數值模型

使用與前一章相同的系統識別方法分別識別每個地震輸入前的白噪音，並找出每個地震輸入下的結構振動週期。Series 1 和 Series 2 的識別週期結果如表 8 和表 9 所示。

同樣地，使用線性擾動步驟中的 Lanczos 方法來求解特徵值方程，獲得數值模型的模態及其對應的頻率。接下來，將其週期與系統識別週期進行匹配，並透過試誤法來調整材料的勁度，使模型週期與試體週期一致。表 10 和表 11 顯示了 Series 1 和 Series 2 中的實驗目標週期與分析模型週期的設定。

表 8 Series-1 的系統識別週期

Test name	Series-1A				Series-1B			
	10%	20%	60%	60%	10%	20%	40%	60%
Scale	10%	20%	60%	60%	10%	20%	40%	60%
Period (s)	0.89	0.9	0.93	1.28	1.36	1.33	1.39	1.36

表 9 Series-2 的系統識別週期

Test name	Series-2			
Scale	10%	20%	40%	60%
Period (s)	0.93	0.9	1.0	1.12

表 10 Series-1 的系統識別週期與模型週期設定

Series-1A	10%	20%	60%	60%-2
ID period (s)	0.89	0.9	0.93	1.28
Model period	0.898	0.898	0.922	1.29
Series-1B	10%	20%	40%	60%
ID period (s)	1.36	1.33	1.39	1.36
Model period	1.352	1.352	1.364	1.364

表 11 Series-2 的系統識別週期與模型週期設定

Series-2	10%	20%	40%	60%
ID period (s)	0.93	0.9	1.0	1.12
Model period	0.9	0.9	0.97	1.08

接著定義模型材料，對於數值分析而言，是很難模擬在 Series-1B 中的殘留損傷行為，尤其是每個地震輸入的數值模型都是分段的。初始損傷和初始殘留位移難以精確模擬。然而，本章利用了 CDP 模型可以定義材料的應力-應變曲線這一優點，嘗試模擬 Series-1B 中各地震輸入的損壞情形。

因為在 NCREE 實驗中，對 Series-1A 和 Series-1B 是連續進行測試的，所以在 Series-1B 前是沒有混凝土強度測試，因此無法了解混凝土的強度衰退和損傷狀態。因此，只能通過一些合理的假設來推導 Series-1B 數值模型中混凝土的損傷程度，並從實驗數據中驗證該假設的合理性。在這項研究中，可以從兩個方面討論受扭混凝土柱的假設：

#### 1. 勁度折減：

由於混凝土損傷後勁度降低是不可避免的，因此首先降低東側柱 (損傷側) 的勁度，而西側柱 (未損傷側) 則保持原始勁度。另外，中間構架柱的勁度也同時進行折減，使用原始柱的勁度和損傷柱的勁度取平均，如圖 14 所示。至於折減參數的取用，則根據兩側的相對位移實驗數據，找到東、西構架的最大位移後，將兩側的最大位移相除以獲得差值，然後將此差值設置為兩側柱勁度的折減比例，最終的勁度折減比例設定為 3.0。

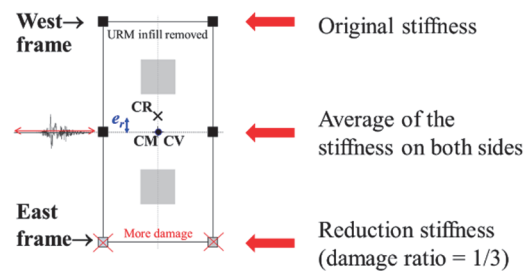


圖 14 各構架的勁度損傷折減

2. 極限強度折減：

然而分析結果發現，僅透過強度折減來表達損傷差異是不夠的。本研究增加利用極限強度折減以增強損傷差異的表現。從實驗結果得知，在 1B-10% 和 1B-20% 中的損傷是較不嚴重的，而在 1B-40% 和 1B-60% 中的損傷較嚴重。因此，在 1B-10% 和 1B-20% 的地震輸入中給予約 5 MPa 的極限強度下降，在 1B-40% 和 1B-60% 的地震輸入中給予約 10 MPa 的極限強度。損傷後的混凝土壓力-應力-應變曲線如圖 15 所示。黑色的虛線表示原始 CDP 模型、紅色的實線表示在 1A-10% 和 1A-20% 中損傷的 CDP 模型、藍色的實線表示在 1A-40% 和 1A-60% 中損傷的 CDP 模型。

在 Series-2 中，構件的單柱側推分析試驗在紐西蘭實驗室進行，但是由於疫情的關係，此試驗直到最近才開始執行，因此目前沒有任何關於試體韌性和非韌性柱的相關材料試驗曲線。作為分析者而言，只有先基於基本力學概念，對韌性和非韌性結構行為做出一些合理的假設。將來，一旦側推分析試驗結果出來，就可以對材料的行為進行更精確的模擬。

因此，西側構架（韌性側）的柱使用原始的 CDP 模型。但是，為了模擬非韌性行為，東構架和中間構架（非韌性側）的柱給予與西側柱相同的初始強度 and 極限強度，但限制了其塑性變形能力，最終生成了新的非韌性 CDP 模型，如圖 16 所示。

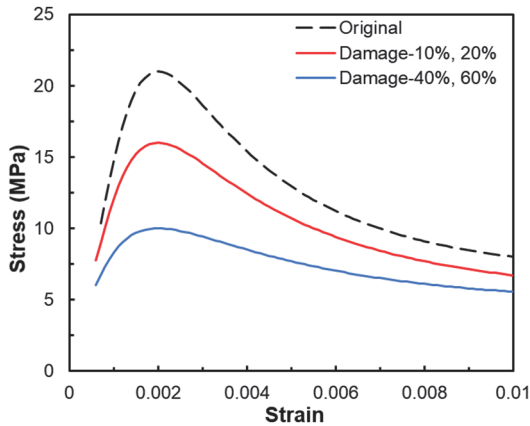


圖 15 Series-1B 損壞後的混凝土壓力-應變曲線

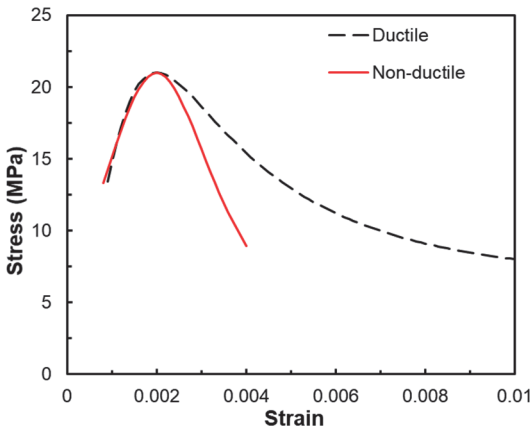


圖 16 Series-2 中的韌性與非韌性混凝土壓力-應變曲線

4.3 數值結果與實驗數據比較

如圖 17 所示，Series 1A 中，在彈性階段（10% 和 20%），分析模型的扭轉反應比實驗明顯，但進入非彈性階段，即兩個 60% 的強度，分析模型和實驗開始產生較大的誤差。值得注意的是，在振動台實驗中，輸入兩次 60% 的地震目的為探討受損結構再次受到地震災害的影響；而在分析模型中，透過強度折減法，也可以使數值模型顯示出如同實驗的結果。

如圖 18 所示，在 Series-1B 中，分析模型的扭轉反應不如實驗結果明顯，因為在數值模型中混凝土的損傷程度較難準確定義。儘管如此，分析模型的扭轉趨勢與實驗是一致的，對於較大的地震，結構受扭轉較劇烈。

如圖 19 所示，在 Series-2 中，分析就如同實驗一樣。小震時，韌性和非韌性柱表現出相同的反應，因此平面扭轉角較小。當輸入強震時，不同的韌性配筋的柱將會產生不對稱的強度衰退機制，從而使結構產生較明顯的扭轉反應。

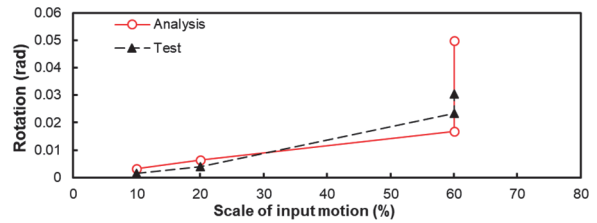


圖 17 Series-1A 的平面扭轉角峰值

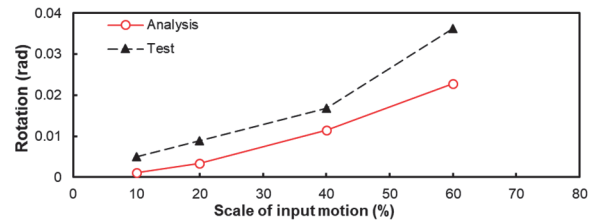


圖 18 Series-1B 的平面扭轉角峰值

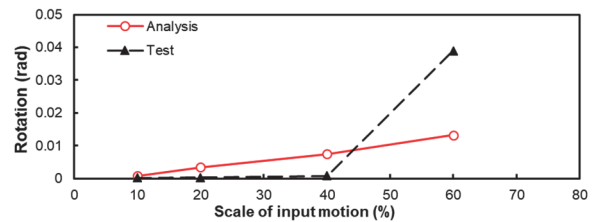


圖 19 Series-2 的平面扭轉角峰值

五、結論與建議

5.1 結論

- 1. 在 Series-1A 中，西側填充磚牆確實使其相鄰的柱構件減少破壞，造成東、西構架間的不對稱損傷狀況（東構架進入非彈性階段；而西構架仍處於彈性階段），使兩側有著不同的位移需求。



2. 在 Series-1A 中，透過勁度折減來使數值模型的振動週期與實驗試體的識別週期一致，可讓分析模型反映出如實驗預期結果，受損結構再次受到地震災害的影響；數值模型輸入兩次相同 60% 強度的地震可以產生出不同的結果，並且在第二次 60% 的地震 (1A-60%-2) 中表現出更大的位移反應。
3. 在 Series-1B / Series-2 中，透過更改東側構架 (損壞/非韌性側) 的 CDP 模型，可以模擬各種不同來源的平面不規則性，以產生如實驗預期的扭轉反應。
4. 本研究利用計算平面扭轉角的方法有效地掌握了結構在不同震度地震作用下的扭轉反應，並定點評估了非線性扭轉的程度。
5. 當進行動力分析時，利用勁度折減使數值模型與實驗試體具有相同的振動週期，從而可以有效地模擬結構在不同損傷狀態下的動態行為。此證明了可以透過分段分析模型來模擬振動台實驗的連續測試模式。回歸地震評估與耐震補強中，建築物先前的損壞歷史是難以追溯的，因此，當我們要分析此建物時，就像面對振動台測試中的單一個案一樣，我們可以使用一些測試方法 (例如微震測試) 先對測建物的振動週期，然後將其引入數值模型中進行分析和模擬。

## 5.2 建議

1. 第 5 章中 Series-1B 和 Series-2 的分析結果證明了 CDP 模型可以模擬構件不同的損傷狀態和韌性配置。期望持續改進對 CDP 模型的掌控，將能更有效地模擬現有建築物在更多不同情況下的受震行為。
2. 本研究主要探討扭轉不規則造成的損壞。將來可以實務推廣，考慮使用 L 形或 U 形實驗試體以及其他平面不規則結構進行測試，對於扭轉反應可能更為明顯。

## 參考文獻

1. Abaqus, "Abaqus analysis user's manual Vol. 3 Materials," Dassault Systèmes Simulia (2018).
2. Lubliner, J. J., Oliver, S. O., and Oñate, E., "A plastic-damage model for concrete," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, No. 3, pp. 229-326 (1989).
3. Lee, J. and Fenves, G. L., "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 8, pp. 892-900 (1998).
4. 中華民國內政部營建署 (2019), 混凝土結構設計規範。
5. Chopra, A. K., "Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering," *Pearson College Div* (2011).
6. Shambhu, P. D. and Indrajit, C., *Computation of Rayleigh Damping Coefficients for Large Systems*. Indian Institute of Technology Kharagpur, India (2003).
7. Suzuki, T., Elwood, K. J., Puranam, A. Y., Lee, H.-J., Hsiao, F.-P., and Hwang, S.-J., *Shake-Table Tests of Seven-story Reinforced Concrete Structures with Torsional Irregularities* (2020).
8. Suzuki, T., Puranam, A. Y., Elwood, K. J., Lee, H.-J., Tsai, R.-J., Hsiao, F.-P., and Hwang, S.-J., *Seismic Response of Half-scale Seven-story Reinforced Concrete structure with Torsional and Damage Irregularities* (2019).
9. Suzuki, T., Elwood, K. J., Puranam, A. Y., Lee, H.-J., Tsai, R.-J., Hsiao, F.-P., and Hwang, S.-J., *Seismic Response of Half-scale Seven-story Reinforced Concrete systems with Torsional Irregularities: Test result* (2020).

---

109 年 7 月 30 日	收稿
109 年 8 月 14 日	修改
109 年 9 月 20 日	接受

