

淺談如何提升建築鋼結構抗震性能

文・圖／蔡克銓

地震波分為體波與表面波兩種，體波又分為P波與S波。P波振動模式是縱波（壓縮波），在地層中傳遞速度較快；S波振動模式是橫波（剪力波），速度約較慢。一般來說S波振幅較P波大，且其水平向振動，會使建築結構產生側向變形，破壞性較強，常是造成地震災害的主因。高層建築採鋼結構可縮短工期，亦可減輕整體重量，因此在國內中高層建築的應用比例亦有漸增的趨勢。惟鋼梁柱框架建築結構系統的側向勁度往往較小，改善方法包括增大梁柱尺寸、或降低柱與柱之間矩；但這些方案會增加建築營建成本，或降低建築的使用機能。本文介紹結構工程師嘗試減輕營建成本，且同時提升結構耐震性能時常採用的結構系統與新型減振元件。因篇幅所限，本文主要介紹鋼建築結構系統。

建築結構耐震設計基本原則

在營建成本與震害風險二者取平衡的考量下，現今各國建築結構的耐震設計規範之修訂皆採性能設計法，亦即在不同大小的地震作用下，結構物應有不同的性能表現水準。一般將設計目標訂在「小震（service level earthquake, SLE）時不損壞、中震（design basis earthquake, DBE）後可修、大震（maximum considered earthquake, MCE）作用下不可倒」。小震、中震及大震的定義為地震在結構預期壽命50年間之超越機率分別是50%、10%與2%。以花東地區為例，SLE的震度約為4級，DBE約落在6弱與6強的分界點，MCE則落在6強。震度分級方式可詳交通部中央氣象署（https://www.cwa.gov.tw/Data/service/hottopic/20191213_SC_NewInt.pdf）。我國建築結構耐震設計規範規定在設計靜載重（不隨時間改變而變化的荷重）、活載重（會隨時間變化而改變大小與位置的荷重）與SLE共同作用下，結構需保持彈性；意即在SLE之後，結構應恢復

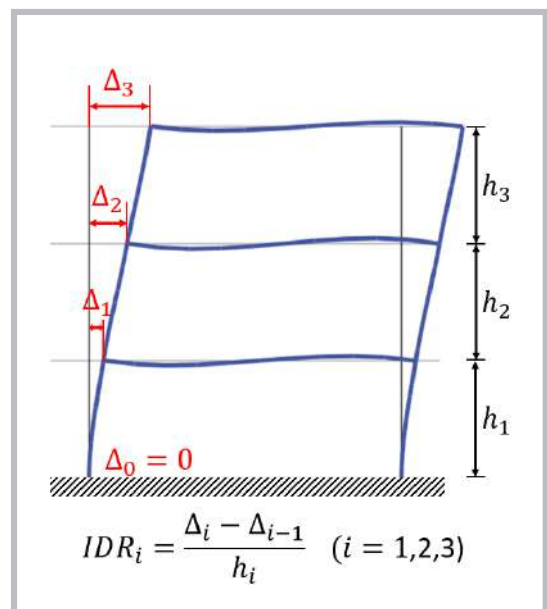


圖1：建築結構側向層間變形比例示意

至SLE之前的位置。此外，為避免不具結構功能的隔間牆發生損壞，或使得門窗失去使用功能，不論是鋼結構或是鋼筋混凝土（reinforced concrete, RC）結構，規定在SLE小震作用時樓層與樓層之間的側向位移差（如圖1所示之 Δi ）與該樓層高度的比值（interstory drift ratio, IDR_i ），不得超過1/200；然而，RC牆或磚牆在IDR達1/300時，就會顯出裂痕。

建築結構受震所產生的側向變形反應是動態隨機的忽大忽小，高層建築受震時各層的尖峰IDR不但不會在同一時間發生，而且各層的尖峰IDR值也常是有大有小很難均勻。在DBE中震作用下某些層的IDR極可能超過1/100，在MCE大震作用下最大的IDR甚至可能接近1/50或1/40。在DBE或MCE震動過程中結構極可能由彈性變形範圍進入非彈性變形範圍，這意味著結構體在地震停止之後可能無法回復至震前的位置，而出現很難消除的殘餘側向變形；嚴重時將影響建築使用功能，就算未倒塌恐也難逃必須拆除之命運。

地震作用時控制結構側向變形的重要性

可想而知，建築結構因受震導致側向變形過大，常是造成地震災害的主因。當建築結構在立面分佈不規則時，例如常見多層的住宅建築，底層採挑高門廳作為開放的公共使用空間，而二樓以上是典型有很多RC隔戶與隔間牆的住宅配置，此種結構受震時側向變形往往集中發生在較軟或較弱的底層，造成底層的嚴重損壞或崩塌，甚至造成生命與財產重大損失。因此結構工程師所追求之目標，是如何利用有限的營造成本，讓建築結構受震下之IDR儘量小，且在各層之間儘量均勻。

梁柱抗彎構架與斜撐構架

建築垂直方向的靜載重與活載重，常藉由樓板傳至小梁、大梁及柱，並傳入基礎。垂直方向的風力或地震力的傳遞路徑也相同。為抵抗在水平方向所受的風力或地震力，最常見的方式就是將柱與相連的大梁採「抗彎」方式接合，以形成「抗彎構架」（moment resisting frame, MRF）。在MRF中，因柱與大梁以較為堅固的抗彎方式接合，使得梁柱

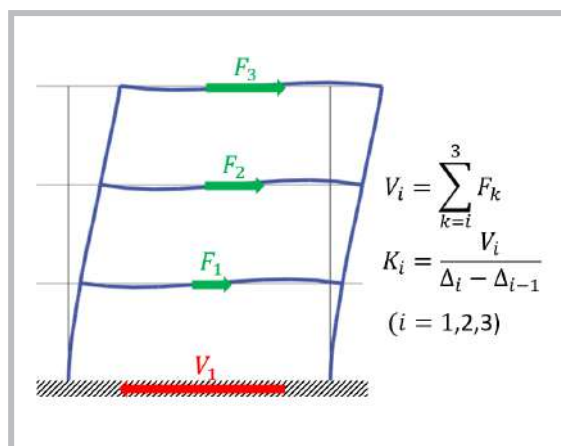


圖2：建築結構側向剛度計算示意

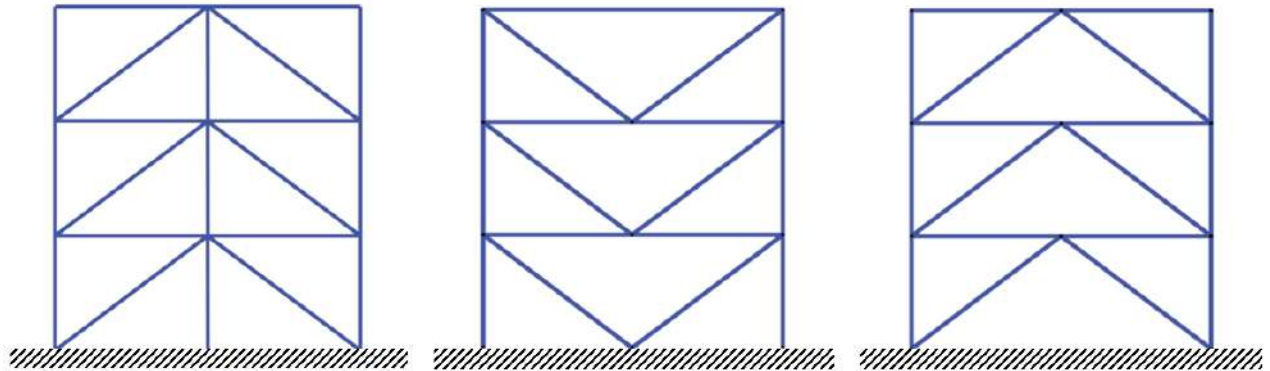


圖3：同心斜撐構架示意

接頭除了能傳遞垂直方向的外力，也能將大梁端部發生的彎矩傳給柱，使得建築結構在受到水平側力時，大梁與柱構件因變形所產生的反力，可共同抵抗水平外力。當梁柱構件的反力或構架變形超過標準時，就須靠增加梁柱斷面強度或尺度來解決。如圖2所示， V_i 為第 i 層樓的柱子所需承受的水平力， K_i 為構架第 i 層的側向勁度，其意義為在欲產生一單位側向變形時所須施加的水平力，所以單位可為 kN/cm 。側向勁度愈大，結構在受水平外力時所發生的變形就愈小。MRF的柱與柱距增大時，雖能提升建築使用機能，但側向勁度與強度（結構能抵抗的最大水平外力）會大幅降低。

當不影響建築機能的情況時，例如在電梯服務核之柱梁構架內某些位置配置斜撐，如圖3所示，在地震過程中，斜撐以受拉與受壓的方式協助抵抗外力，是提升整體建築側向勁度最有效率的方法。斜撐中心線的走向對準梁與柱中心線交點，或是梁與另一斜撐中心線之交點，以此方式所組成之構架稱為同心斜撐構架（concentrically braced frame, CBF）。在服務核附近的CBF與該建築其他位置上的MRF共同抵抗對應方向的側向水平外力就成了CBF+ MRF 的二元系統（dual system），整體系統設計在SLE小震下須保持彈性，因側向勁度較大，較易滿足IDR不得超過1/200的規定；但在震度提高至DBE或MCE時，若側向IDR超過1/200，在不



圖4：實尺寸同心斜撐構架抗震實驗受壓斜撐面外挫屈情形

到1/100之前，CBF內受壓的斜撐就會發生構架面外的整體挫屈（如圖4所示），導致CBF顯著喪失抗側力的勁度與強度，若斜撐發生劇烈的反覆拉降伏、壓挫屈凹折情形時，斜撐甚至會在凹折處受拉斷裂。因此當超高層建築採CBF+MRF的二元系統來有效率地抵抗風力與地震力時，設計風力常會大於SLE地震力許多，結構工程師常關心在震度達DBE甚至MCE時，巨大的斜撐構件能否保持彈性。

挫屈束制支撐與耐震間柱的減震原理

為避免斜撐受壓時發生整體挫屈，導致側向勁度與強度驟降，結構工程師發展出挫屈束制支撐（buckling-restrained brace, BRB）。其原理為在會受拉壓以至於原本會受壓時挫屈的鋼支撐周圍，加上側向抗彎束制。該側向抗彎束制因設計成不受拉壓外力，故能以抗彎勁度與強度有效束制鋼支撐受壓時發生的側向挫屈反應。BRB的構造常為將鋼支撐先鋪設2mm左右厚的脫層材料（例如黏性橡膠），然後以具有足夠抗彎勁度之鋼管套住，再往鋼管內灌入混凝土作為填充材料（如圖5所示）。脫層材料可以降低鋼支撐與填充用混凝土間的摩擦力，使鋼支撐在受拉壓外力時自由延伸或壓縮；鋼管與混凝土因不受鋼支撐軸向拉或壓力作用，不會發生挫屈行為，更可束制鋼支撐的側向變形，避免整體挫屈發生。這樣的設計使 BRB 不論受拉或受壓皆不易破壞，可持續提供所需之勁度與強度。此外，地震發生時，BRB可藉由反覆軸向延伸與壓縮持續產生塑性變形，以此大量吸收與消散地震輸入於結構之能量，顯著提升建築的抗震性能，因此，BRB已成為現代高性能耐震元件的代表之一。在二元系統中，以BRB取代傳統斜撐（如圖6所示之紅色構件），可提升結構於DBE甚至MCE地震下的結構整體穩定性與抗震能力。

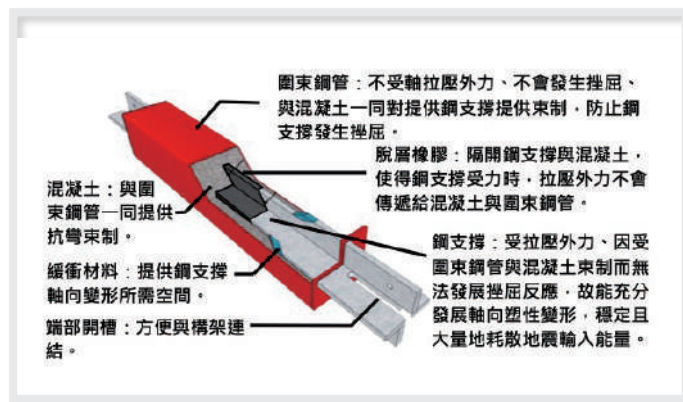


圖5：鋼挫屈束制支撐構造示意圖

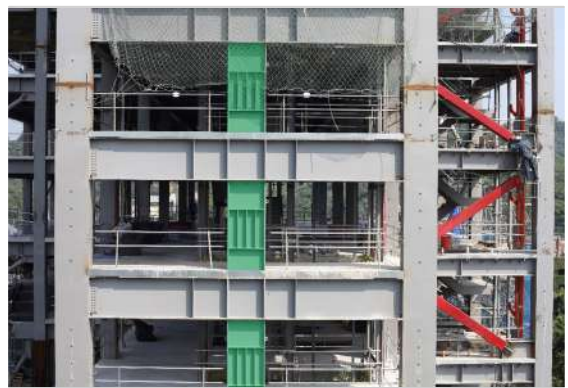


圖6：同時配置挫屈束制支撐（紅色）與剪力降伏型耐震間柱（綠色）之鋼建築結構

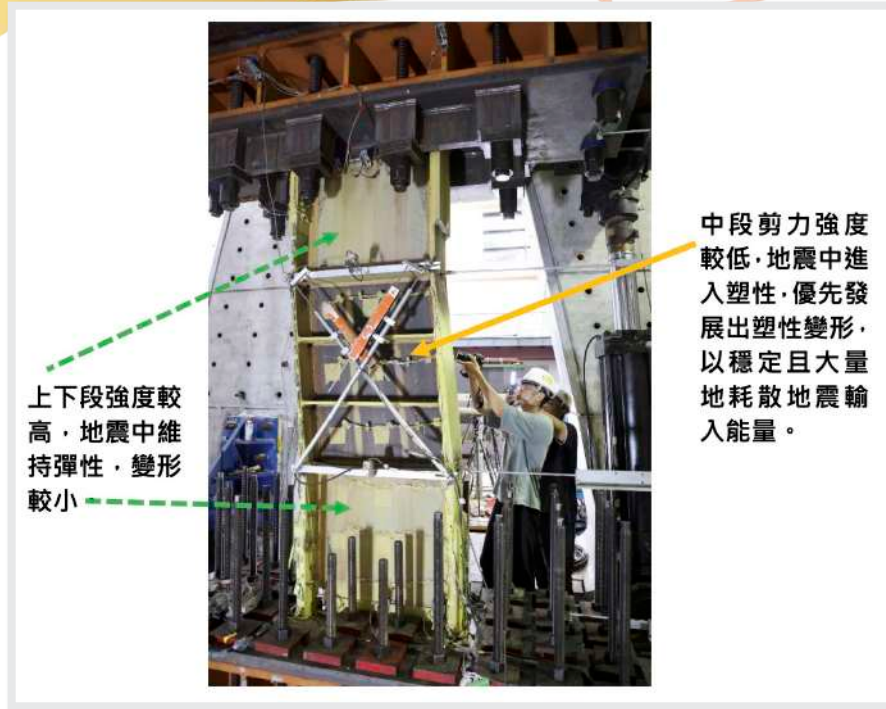


圖7：實尺寸剪力降伏型耐震間柱抗震實驗時中央核心段塑性變形情況。

是利用其在地震中產生水平方向（剪力）變形的方式，提升構架的側向勁度與強度。在SLE發生時，SSC可有效抑制樓層間位移差，避免結構側向變形過大；而在DBE與MCE發生時，若經妥善設計，例如將H型鋼組合成中間段的剪力強度較上下兩段為弱，如此一來SSC的中間段將優先發展出塑性剪力變形（如圖7所示），能吸收與消散地震能量，進一步保護SSC上下段及主構架梁柱不致提前損壞，提升結構整體穩定性與耐震能力。相較傳統斜撐，SSC佔用空間小，配置彈性高，對樓層使用機能影響低，特別適用於需保有開放格局的樓層。在不改變整體建築配置的前提下，SSC提供一種兼顧減震效能與空間實用性的強化方案，已成為鋼結構中常見的耐震設計選項之一。

結語

臺灣處於兩板塊的交界，地震發生頻繁，國人無法避免地震的發生，因此建立地震防災意識人人有責。另外，在全球暖化的危機下，營建工業如何追求節能減碳的創新技術是刻不容緩的要務。雖然鋼結構能回收後再製重新利用，然而，研究人員與工程師在研發耐震性能更佳，營建成本及碳足跡更低的結構材料、系統及工法的路途上，仍然面臨著嚴峻

然而，由於建築空間使用需求日趨多元，部分樓層不適宜配置斜撐，或因使用機能限制無法縮短柱距，此時可如圖6中以綠色構件所示，於MRF中配置耐震間柱（seismic stub column, SSC）。SSC

之作用不在於分擔承受垂直載重，而

的挑戰。本文淺談習見的鋼建築結構系統，詳細的結構力學原理可參考下列有關論文。（本專題策畫／工學院闕蓓德副院長）

參考文獻：

- [1] Tsai, KC, Wu, AC, Wei, CY, Lin, PC, Chuang, MC, Yu, YJ. (2014). Welded end-slot connection and debonding layers for buckling-restrained braces. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 43(12):1785-1807.
- [2] Chuang, MC, Tsai, KC, Lin, PC, Wu, AC. (2015). Critical Limit States in Seismic Buckling-Restrained Brace and Connection Designs. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 44(10):1559-1579.
- [3] Lin, PC, Tsai, KC, Chang, CA, Hsiao, YY, Wu, AC. (2016). Seismic design and testing of buckling-restrained braces with a thin profile. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 45(3):339-358.
- [4] Wu, AC, Tsai, KC, Yang, HH, Huang, JL, Li, CH, Wang, KJ, Khoo, HH. (2017). Hybrid experimental performance of a full-scale two-story buckling restrained braced RC frame. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 46(8):1223-1244.
- [5] Tsai, KC, Hsu, CH, Li, CH, Chin, PY. (2018). Experimental and analytical investigations of steel panel dampers for seismic applications in steel moment frames. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 47(6):1416-1439.
- [6] Chen WD, Tsai KC. (2024). Experimental and analytical investigation of WT-shapes stiffened steel panel dampers. *Earthquake Eng. and Structural Dynamics*, 53(1):23-42.



筆者（右1）與學生在鋼構廠視察試體製造

蔡克銓 小檔案

蔡克銓博士現為臺灣大學土木工程學系講座教授，1977年在本校土木工程系畢業後，分別於1980、1988年在美國史丹佛大學及柏克萊加州大學土木工程碩士班與博士班畢業。研究興趣主要為地震工程、建築鋼結構耐震實驗、分析與設計；曾任國家地震工程研究中心主任，現為該中心顧問，教育部國家講座主持人及美國工程院國際院士。