



建築物 組合式環型耐震補強 構造介紹

宋裕祺／國立臺北科技大學土木工程系 特聘教授

洪曉慧／國家地震工程研究中心 研究員

許家銓／國家地震工程研究中心 助理研究員

周光武／國家地震工程研究中心 副研究員

蘇進國／國立臺北科技大學離岸風電工程研究中心 計畫經理、研究員

許家瑋／國立臺北科技大學土木工程系土木與防災碩士班 碩士

本文介紹一種適用於鋼筋混凝土(RC)構架的創新耐震補強構造，即組合式環型耐震補強構造。這種構造由環型鋼框架和硫化橡膠組合而成，具有多重功能，包括承載能力、耐震性、使用功能、快速施工和自復位能力。相較於國內一般對於RC構架的耐震補強方法，例如擴柱或增加剪力牆等，組合式環型耐震補強構造由於可避免影響原有建物的通風、採光和通行，所以對於具開放空間需求的構造提供了另一種補強工法選擇。此外，本工法組容易，構件間僅用螺栓結合，不僅施工快速，也無須破壞原始結構。

前言

台灣位於地震帶，地震頻繁發生。近年來的幾次地震，包括2016年的美濃地震、2018年的花蓮地震、2022年的台東地震，以及今年的0304花蓮地震，都導致許多建築物受損。這些事件讓大家開始正視台灣老舊建築物的耐震問題，並體認到耐震補強的重要性。回顧近年來因地震而倒塌的建築大樓，大多數都是標準的「軟腳蝦」建築。只要屬於弱層的柱子倒塌，整個建築就會垮下來。因此，結構補強的重點是針對弱層的構架進行補強。國內外的補強案例顯示，RC構架的補強方式可區分為局部構件補強、變更結構系統及複合式補強。局部構件補強係以混凝土、鋼板或其他複合材料包覆結構局部構件進行補強；變更結構系統方式則是於結構中增加剪力牆、翼牆、鋼斜撐或阻尼器等消能裝置進行補強；而複合式補強工法則是同時採用局部構件補強和變更結構系統的方法，以同時發揮兩者的優點。這些補強方法皆已被證實能有效抵抗地震，但這些方法所使用之斜撐、構架或其他補強構件在增加結構勁度的同時，也限制了原有結構的使用空間，降低了環境的使用性。而自復位

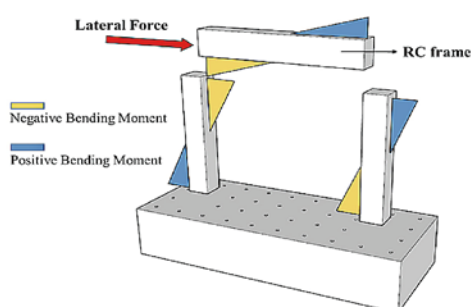
構架或其他類似的方法需要在原有結構上添加額外的補強構架，這種方式僅適用於既有建築物外部新增構架，具體適用性需視地上所有權和鄰屋間距而定。此外，大多數現有的補強結構不僅需要佔用柱與柱之間的空間，還需要使用螺栓或其他破壞性方法進行錨碇或接合，故常須於補強過程中先傷害既有之梁、柱或基礎結構。

鑑於此，本文作者等人^[1,2]以保留構架內局部活動空間及快速施工為目標，研發了一種適用於RC構架式結構的組合式環型耐震補強構造工法。這種混凝土構架補強工法兼具承載能力、耐震性、使用功能、快速施工和自復位等多重功能。本文將從本補強構造的設計概念出發，簡要介紹其設計理念和施工流程^[1,2]。接著透過簡述過去的試驗，說明其補強效益^[1]，最後概述這種工法的分析和設計方法^[3]。

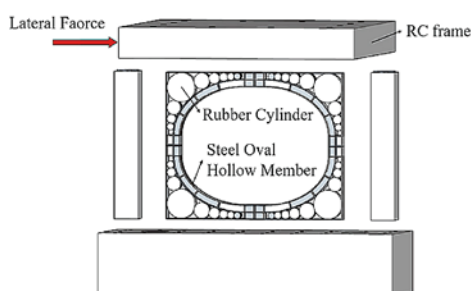
環型補強構造之設計發想

地震對一鋼筋混凝土(RC)構架的作用主要體現在上部結構上的慣性力。一個RC門型構架在頂梁處受到靜態橫向力作用時，其彎矩分布如圖1(a)所示，正負最大彎

矩出現在頂梁和兩個柱子的端部。一般而言，中空門型構架在受到地震力作用時，如果梁柱端部產生的最大彎矩超出原有結構的設計容量，就極有可能在梁柱端部產生局部損傷。因此，環型補強構造的初步研發構想即是根據門型構架在側向地震力作用下的彎矩分佈進行局部加固設計，另為了保留中央使用空間的通透性，初步設計使用 H 型鋼製成中央環形空間。在環形空間與門型構架之間的角隅處，則使用拱形鋼板填充，形成一個變斷面的抗彎矩構架。這種構架不僅可以協助抵抗側向變形，還可以提供垂直方向的承載能力。中央的拱形鋼框也可提供部分恢復力，以降低門型構架的損壞。然而，當這種構架遭受強烈地震作用時，拱形鋼板可能會率先產生挫屈變形破壞。為增加門型構架的強度和韌性，並提供結構震後自復位能力，最後使用硫化橡膠製成圓筒狀的橡膠緩衝材，取代拱形鋼板，填充在環形空間與門型構架之間的角隅處。橡膠的可壓縮性使填充的橡膠圓柱能夠吸收部分地震能量。受擠壓的橡膠圓柱在外力排除後的回彈特性也可提供部分恢復力，快速恢復原有結構的幾何形狀。此外，由於鋼構件和 RC 構架都具有剛性，在受到衝擊力時容易遭遇脆性破壞。因此，置放在這兩個剛性構件之間的柔軟中介橡膠不僅有助於減少混凝土表面與鋼板之間的碰撞，還可以防止鋼板的局部挫屈或混凝土表面的破碎。圖 1(b) 呈現了組合式環型耐震補強構造的最終設計示意圖。這項設計保持了構架內部大部分空間的通暢，不占據柱子之間的中央空間，方便日常使用，並保持了柱子之間的視覺透明度。



(a) RC 構架受水平側向力彎矩分佈示意圖



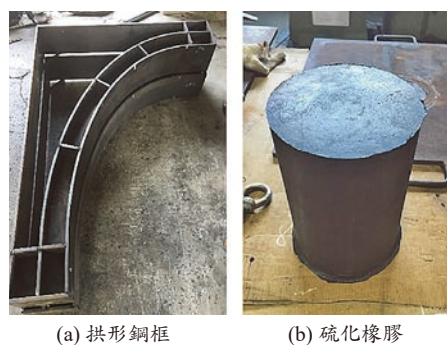
(b) 組合式環型耐震補強構造設計示意圖

圖 1 環型補強構造之設計理念

為了方便施工，環型補強構架被分成四個拱形鋼框（如圖 2(a) 所示）和數個不同大小的硫化橡膠（如圖 2(b) 所示）。每個拱形鋼框都可以在工廠中製造並在現場組裝。這種方法有助於補強構件的運輸，使補強工作更具效率，減少對環境的影響，並提高施工品質。環型耐震補強構件的補強施工流程簡單。首先，依循一般混凝土修復流程對 RC 構架進行修復，以提供環型補強構架外圍門架安裝所需的平整界面。然後使用螺栓將四個鋼框連接在一起。裝配完成的補強構架即可安裝在 RC 構架的兩個柱心之間（如圖 2(c) 所示），再次確保螺栓緊固後，再於補強構架和 RC 構架之間填充無收縮水泥砂漿，即完成補強施工。由於這種補強構架是在工廠中預先製造的，且補強構件與門型構架之間僅使用無收縮水泥砂漿粘接，無需設置剪力釘或錨栓，因此現場安裝速度快，可以有效縮短施工工期並降低環境干擾。因此，這種耐震補強構造不僅具有實用的空間使用性，還具有良好的施工性能。

環型補強構造之補強效益

經過國家地震工程研究中心的試驗，環型耐震補強構架的補強效益已得到證實^[1]。為驗證這種結構的補強效果，研究團隊建造了一個 1/4 比例的 RC 構架，並進行了耐震試驗。試驗過程包括對空構架試體進行一系列地表加速度逐步增大的振動台試驗，直到構架出現嚴重損傷。隨後，對已受損的空構架進行現地環型補強構造補強，確



(a) 拱形鋼框

(b) 硫化橡膠



(c) 補強完工相片

圖 2 環型補強構造構件與完工相片



認施工性。再對補強後的試體進行與空構架相同系列的振動台試驗，並與空構架試體的試驗結果進行比較。試驗採用之地震歷時為 1999 年 921 集集地震於測站 TCU102 所記錄到的近斷層地震紀錄，時間歷程的振幅依次按照 1/3.25、1.0、1.2、1.4、1.6 和 1.8 的比例進行放大，再進行試驗。試驗結果顯示，未經補強的試體在 1.6 倍近斷層地震作用下，振動週期增加了 193%；而補強後的試體即使遭受到 1.8 倍近斷層地震作用，振動週期僅增加了 10.2%，這結果顯示採用此工法進行補強可以有效降低結構在近斷層地震作用下的破壞程度。在變形方面，補強後試體的塑鉸區最大轉角小於未補強試體的轉角。以地震放大倍率 1.6 為例，補強構架可將最大轉角減少約 88%，這再次驗證了本補強工法可以降低地震造成的破壞。此外，補強後試體之初始勁度及最大基底剪力皆明顯高於補強前試體，補強後試體遲滯迴圈之消能面積也較未補強試體大，顯示補強構件能確實提升整體結構之耐震能力。

環型補強構造之補強設計流程

由於組合式環型補強構造所採用的構件並非一般結構中常見的梁柱構件或斜撐，而是由環形鋼框和硫化橡膠組成，因此其結構行為較為複雜，難以使用一般結構分析軟體進行模擬。為深入瞭解本補強工法在地震下的實際受力行為與補強效益，本補強工法在研發階段除進行前述的性能試驗以驗證其補強成效外，還使用了有限元素分析軟體 ANSYS 進行精細的三維有限元素模擬分析^[2]。透過模擬結果與試驗結果的比對，確認了有限元素分析模擬方法的正確性，並進一步了解了補強構件在受水平地震作用下局部區域的應力分布。在推廣階段，考慮到一般工程實務中通常使用軟體如 ETABS、SAP2000 和 MIDAS 等進行整體結構設計和補強成效分析，研發團隊提出了一套以雙向斜撐模擬環型補強構造的簡化模擬方法，使工程師能夠使用一般結構分析軟體來進行環形補強構架的設計^[3]。

根據初步分析與比較，構架內的環型補強構造可在可接受的誤差範圍內以簡化的雙向斜撐模擬。在尚未建立環型補強構造斷面參數與等值斜撐斷面參數之完整雙向對應關係前，為協助工程師進行結構補強設計與分析，建議之補強設計流程暫分為兩階段。第一階段使用有限元素分析軟體 ABAQUS，針對較複雜的局部補強構件進行如圖 3(a) 所示的三維有限元素分析，並透過側推分析結果換算補強構架的等值斜撐斷面參數，如圖 3(b) 所示。第二階段則使用工程界常用的 ETABS 軟體進行整體分析。在第二階段的分析模型中，環型補強構架以第一階段所得的等

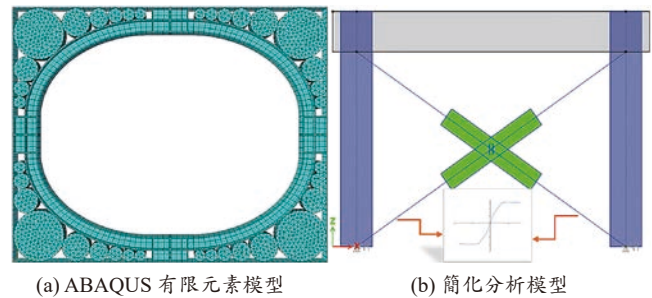


圖 3 環型補強構件之分析模型

值斜撐模擬，而鋼筋混凝土構架則以梁柱結構模擬。這個分析模型使工程師能夠依據目前工程界常用的評估補強分析流程進行環型補強工法的耐震評估與設計。雖然第一階段的有限元素分析較為耗時，但目前研究團隊正在開發自動化建模和分析程式，以自動求得等值斜撐的各項參數。研究團隊的目標是透過大量分析建立等值斜撐斷面性質與環型補強構造設計斷面之對應關係，使補強設計流程進一步簡化。未來，工程師將僅需針對圖 3(b) 所示的簡化模型進行補強設計，根據實際補強需求求得所需的等值斜撐斷面參數，再透過斜撐斷面參數反推環型補強構件的斷面參數，完成環型耐震補強構造的補強設計。

結論

組合式環型耐震補強構造是構架補強的一個新概念，為 RC 構架補強提供了一種新的選擇。透過試體試驗和試驗分析，已確認了這種補強方法的效益和施工可行性，並提出了相應的分析與設計方法，本工法也已取得日本、美國和臺灣的發明專利。這種補強工法的特點在於可以大幅降低使用空間的阻礙，同時不影響補強區域的採光和通風等使用功能。此外，補強構件是在工廠預鑄的，且與既有 RC 結構之間無需設置剪力釘或錨栓，現場安裝快速，有效減少施工工期並降低環境干擾。此工法特別適用於醫療院所、大賣場、辦公大樓和集合住宅等空間使用功能嚴峻的建築物補強工程。對於具有弱層的現有建築物，這種補強方法也可望具有相當的成效。

參考文獻

1. Sung YC, Hung HH, Chou KW, Su CK, Hsu CW, Hsu CC (2021), "Shaking table testing of a reinforced concrete frame retrofitted with a steel oval member equipped with rubber cylinders", Engineering structure, 237(15), June 2021, 112202. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112202>
2. 許家瑋 (2020), 「採用內嵌橢圓鋼架與硫化橡膠補強之鋼筋混凝土構架受近斷層地震作用之結構反應試驗與分析研究」，碩士論文，國立台北科技大學土木與防災研究所，台北，2020。
3. 許家銓、許家瑋、洪曉慧、周光武、蘇進國、宋裕祺 (2023), 「組合式橢圓鋼框補強構件之分析方法研究」，結構工程，38(4), 5-23.