

# 美國五角大廈採光牆

## 延長使用50年的修復、翻新、保護計劃

美國五角大廈係世界上最大的辦公大廈，其在第二次世界大戰期間只花16個月即建造完成，如今正進行全面翻新、修復與現代化的整修計劃。五角大廈翻新管理局所設定的計劃目標為延長其使用年限至少達50年，即期待此次修復可維持至少50年，且需耗費10年完成每一結構，包括牆面、地面、屋頂、窗戶、機電系統等，皆進行全面的翻修與更新。此文章提及五角大廈中佔最大的單一部份—混凝土。除一項結構外，五角大廈中的所有結構皆為鋼筋混凝土；不幸地，其卻已遭嚴重損壞，此文章即說明如何在損壞的混凝土中重新注入長達50年的新生命。



圖 1：搭鷹架以利直接在牆面上施工

美國五角大廈中非由鋼筋混凝土所建造的結構僅為最外面的圍牆，每個人所能見到建築物的外觀即是石灰牆。此文章主要談論其餘1,000,000平方英尺，目前正進行完整修復、翻新與保護計劃的採光牆。

美國五角大廈係由五個獨立的楔形建物所組成，每個楔形建物約90英尺，而每個楔形建物間的距離約30英尺，此空間即是所謂的採光井，每個楔形物的圍牆則稱為採光牆，而現場澆置的鋼筋混凝土採光牆，皆為承重牆與剪力牆。



圖 2：一般採光牆損壞後所顯現的剝落現象與暴露的鏽蝕強化鋼筋

採光牆中強化鋼筋的鏽蝕以及鏽蝕鋼筋產生膨脹所造成混凝土的剝落損壞係最大的問題。當鋼筋鏽蝕時，其體積將膨脹4~10倍，而對周圍混凝土產生極大的張力，造成混凝土龜裂損壞。五角大廈的計劃係進行250,000平方英尺以上如圖2所示剝落混凝土的修復與翻新，同時設計採用最新的保護工法，以抵抗後續50年內遭受損壞。



圖 3：以千斤鎚敲除腐蝕的強化鋼筋

進行計劃前所完成的混凝土測試顯示，採光牆的混凝土強度約3,500psi。然而，強化鋼筋的混凝土保護層常少於1/2英吋，而混凝土碳化的深度已達3½英吋以上。一般保護強化鋼筋的高鹼性混凝土因其pH值由13以上降至11以下，造成碳化現象，而喪失鋼筋的防蝕保護功效，因此造成約20~30%的牆面剝落損壞。由腐蝕速率測試顯示，每處牆面皆處於活性腐蝕狀態。

因此，最大的問題就是如何修復因腐蝕而損壞的混凝土結構，以及如何保護其餘牆面抵抗後續50年遭受損壞。

記錄混凝土修復計劃的結構工程師，遵照國際混凝土修復協會所訂定的混凝土修復指南，嚴格地執行此工程的修復計劃。所有已損壞與剝落的混凝土，甚至深達3~4英吋，皆以15磅的千斤鎚將其敲除，使鏽蝕的強化鋼筋

完全外露。如鋼筋四周皆鏽蝕，則需將鋼筋底部切除，使能在鋼筋表面進行噴砂，而將鏽蝕完全清除乾淨。馬里蘭州 Timonium 的 U.S. Concrete Products公司為修復用混凝土的製造商，為符合由距離30英尺處(從窗戶越過採光井



圖 4：千斤鎚完成敲除腐蝕強化鋼筋的近照，箭頭所指為底部十字交叉處，垂直鋼筋已嚴重損壞。

所見的距離)觀看牆面色彩與紋理需相稱的規範要求，而共同研發出一種顏色相稱、收縮低且可泵送的修復性混凝土。此要求說易行難，有些修復區域深度達4英吋，有些小於1英吋，更

有些小到不符組裝模板的經濟效益。對於用手小量修補的修復區，即研發出適合以鋤刀施工的配方；對於其餘區域的修復，U.S. Concrete Products研發出一種可於現場拌製且具塑性的改良型聚合物袋裝材料。此材料易於泵送入模版中進行修復，且收縮龜裂極小。此配方未添加粗骨材，但其修復深度仍可達4英吋，且幾乎無龜裂，只需簡單地以外力振動即可達到良好的固結效能，且在3天內即可達

到至少2,000psi的強度，而利於提早拆模。



圖 5：在適當位置建造與原模板飾面相稱之新模板工程



圖 6：完成防蝕的牆面，但未完成矽烷與矽酸鉀塗料的塗佈。

修復混凝土的分包商 Concrete Protection and Restoration, Inc., 公司開發出一種模板工程工法(圖5)，其易於澆置修復用的混凝土，且能與原建模板飾紋相稱。歷經數次的試驗失敗，他們迅速地瞭解最佳的修復方法即是使用與1944年原承包商所使用相同的2x12模板建造工法，因而成功地作出完全相稱的飾面。

考量到五角大廈員工的作息，吵雜的混凝土敲除工程則於晚間進行，而混凝土的澆置與其他非吵雜性的工程則在白天進行，使工作能依計劃持續進行，但真正的挑戰卻是如何保護1,000,000平方英尺的外牆面長達50年之久，使其不因強化鋼筋的鏽蝕而遭受損壞。

鋼筋保護必須克服兩項困難點：鋼筋的保護層太薄且混凝土碳化深度過深；雨水易

吸收入多孔隙的混凝土中。由於鋼筋的混凝土保護層只有或少於1/2英吋，一旦下



圖 7：完成的展示牆面。

雨，鋼筋即經常潮濕。一般pH值大於13的鹼性優質混凝土，即使鋼筋受潮，鋼筋四周所形成的惰性氧化層具有防蝕保護的作用；但混凝土碳化後將使混凝土的pH值降至11以下，而破壞此保護性氧化層，致使鋼筋暴露在腐蝕的威脅下，因此，保護方法需同時兼具抗水份的滲透與彌補鹼度的耗損。

鹼度的耗損可藉由最新科技的滲透移動腐蝕阻鏽劑彌補達成。目前有許多的防蝕技術，包括降低腐蝕速率、降低腐蝕臨界值以及降低氯化物與二氧化碳的吸收率。五角大廈防蝕工程所選定的胺基阻鏽劑係因其可保護碳化混凝土中的鋼筋，而可有效降低腐蝕速率。胺基滲透移動阻鏽劑以三種方式產生作用：毛細管作用、氣化擴散作用與離子吸附作用。在毛細管作用中，混凝土如海綿般吸收水性阻鏽劑。一旦吸收入混凝土中，氣化的胺基

分子即擴散遍佈整個混凝土基質。此擴散係根據菲克第二定律(Fick's 2nd Law)，即分子會由高濃度區域擴散至低濃度區域直到兩者達到平衡為止。最後，當胺基分子接近埋置的鋼筋時，即產生物理吸附，而緊密地吸附於鋼筋的表面上。

美國明尼蘇達州聖保羅市 Cortec Corporation所製造含胺基羧酸鹽的 MCI 2020 V/O，因具有滲透入垂直面達鋼筋混凝土深度的特性以及其他強化功能，而被選為此工程的阻鏽劑。MCI分子中所含的羧酸鹽具疏水性，當其吸附於鋼筋上，其可將水排開，而增強胺基對金屬的吸附力。腐蝕速率測試儀已證實其可有效減緩鋼筋的腐蝕速度，使腐蝕性由活性狀態降低至幾乎完全停頓狀態。鑽心樣本的化學萃取物測試也顯示其滲透的深度已遠超過鋼筋的表層。

然而，降低腐蝕速率僅達到一半的阻鏽功效，阻止水份的吸收才可使腐蝕完全停止。如何阻止水份吸收入牆面長達50年之久呢？下一步的保護是提供減少水份吸收入牆面的工法。在MCI阻鏽劑噴塗後，於外牆面再噴塗100%固體的矽烷，將可降低水份的吸收並撥除水份。但

矽烷只具撥水功效，當暴露於紫外線下即易遭破壞。為進一步保護牆面，需使用一種更具耐久性的表層塗料，不但可維持50年壽命且可防止矽烷損壞。為達到此要求，則選定矽酸鉀以強化表面，並同時保護撥水層與防蝕層。矽酸鉀係100多年前由德國Keim公司所研發與製造，當年其說明書中曾提及此產品而100年後的今天仍舊使用。矽酸鉀本身在混凝土表面上可形成一層堅韌與防水的無機表面，而具抵抗水份吸收的特性。經矽酸鉀與矽烷的雙重保護，水份可

完全由混凝土的表面排除。此外，矽酸鉀易於均勻拌合色料，進一步改善符合規範中越過採光井觀看顏色的要求規定。

以四種不同產品一層接一層的施作於舊有建物上，其彼此的相容性是最重要的課題。在此工法設計期間，阻鏽劑、矽烷與矽酸鉀的製造商皆完成其相容性的測試，並提供聯合相容說明書，以對工法的材料功效提出20年的保證。

維持長達50年修繕工程目標的設計已完成。經修繕的混凝土已恢復其完整的結構與原採光牆的外觀，且此設計工法可在未來50年中保護五角大廈的混凝土不遭受腐蝕損壞。



圖 8：以腐蝕速率偵測器偵測遭腐蝕損壞處的鄰牆，其未修繕下的腐蝕活動情況。

(譯自：Structure Magazine January 2007)