

2014中華民國營建工程學會第十二屆營建產業 永續發展研討會

隧道修復與補強技術之探討

楊錫麒
中華大學營建管理學系
副教授

*陳東揚
台灣西卡股份有限公司
業務經理

吳紹華
中華大學營建管理學系
碩士班研究生

摘要

不管是交通運輸需求，亦或是水力資源開發，隧道工程總會是關鍵項目；目前台灣正在營運中的隧道，總長度達821公里以上。近來，許多營運中的隧道常有滲漏水或龜裂等情況產生；影響其使用的功能，甚至危及安全。為冀求延長生命週期與永續經營，多數狀況皆優先以修復與補強技術，恢復原有使用功能，並以最佳經濟效益為首要考量。面對450座以上使用超過30年年限，以及部份出現安全警訊的隧道，探討適當的隧道修復與補強技術，延長隧道生命週期及其使用年限，實為營建工程的重要課題。

關鍵詞：鋼筋混凝土結構物、隧道工程、修復、補強

Discussion of the tunnel repair and reinforcement technology

Abstract

Whether it is transportation, or the development of water resources, the tunnel project is always the key projects. Taiwan is currently operating in the tunnel, with a total length of 821 km or more. Recently, a lot of operations in the tunnels, often leaking or cracking occurs, the impact of their use features, and even endanger safety. In order to prolong the life cycle and sustainable operation, the majority of all priority to repair and reinforcement technology, restore the original function, and in the best economic paramount considerations. Faced with more than 450 tunnels used for more than 30 years, and part of the tunnel's safety warning. Discuss the appropriate tunnel repair and reinforcement technology to extend the life cycle of the tunnel and its life time is an important issue for the construction of the project.

Keywords: Reinforced concrete structures、Tunnel engineering, Repair, Reinforcement

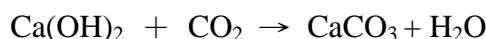
一、前言

台灣漸趨高齡化社會演進，社會社區整體不復以往充滿動力的活絡。公共工程暨交通運輸、民生系統業已不復以往需求；公共工程整體預算勢必相對地減少。然而，為確保現存社會資產，維持既有基礎建設的使用狀況，長期使用的服務水準與安全性。有效的維護管理系統需被重視，完整記錄並更積極地進行維護，延長既有基礎建設的服務年限，減少重新建造對環境造成的不必要衝擊，並達成節能的效果，俾符合永續發展之觀念。

生命週期維護管理觀念尚待提昇；由於基礎建設逐年累積，必須維護管理的公共構造物逐年增加，因此政府投注於維護的費用，將逐年提高，一旦多數公共構造物步入中、老年期，維護費用更將急劇攀高。只有技術上正確，以及經濟上可行的解決方案，才能使人人滿意。因此選擇正確的維修補強工法，必須充份掌握整體結構物發生之現象與原因，並考慮環境、結構與施工作業等條件，檢討實施的規模與範圍、施工性、經濟性與工期等，才能選擇出最佳技術與方法，賦予生命周期真正價值。

二、襯砌劣化原因

憑心而論，一般鋼筋混凝土構造物，在妥適的施工下，鋼筋包覆於混凝土結構中，擁有相當程度的保護層，並在混凝土惰性的鹼環境保護下，使鋼筋免受腐蝕。然而，台灣地屬海洋性氣候影響，鋼筋混凝土構造物，長期暴露於易侵蝕的環境。隨時間發展，空氣中的水分子、氯化物以及陽光_廢氣產生的化學腐蝕物質，悄然無息地侵入混凝土結構體內；當鋼筋表層的混凝土鹼度降低，或是有水分和氧氣存在，或是有氯離子存在之情況下，鋼筋表面的鈍態保護膜會很容易的被破壞，促使鋼筋發生氧化反應而產生腐蝕。這種不可逆的氧化反應，除非進一步制約或制止，否則勢必持續發生。鋼筋由於氧化反應，伴隨而生的物理現象是體積膨脹，在禁錮的鋼筋混凝土的結構中，隨即影響混凝土產生裂隙；此時，更加速了各種腐蝕性物質以及各種樣態影響的速率和環境。另一個主要影響是混凝土的中性化(Carbonation)；主要是混凝土中的氫氧化鈣Ca(OH)₂(可溶性，pH值12.5-13.5)，與空氣中的二氧化碳產生反應，形成弱鹼性的碳酸鈣CaCO₃，(不可溶，pH值<9)。此種因CO₂的相互作用，而使得混凝土pH值由強鹼性轉變為弱鹼性之過程，即所謂的混凝土中性化(Carbonation of Concrete)，其反應式如下所示。



此時，混凝土結構物惰性的鹼環境遭到弱化，鋼筋的保護層也直接面臨影響。這些主要而直接的影響，導致鋼筋混凝土結構物之損壞，且侵蝕其使用年限；像一張無牙的大嘴，不吃肉，只吸食靈魂，它不吐骨頭。

2.1 隧道襯砌受損因素及異狀

我們嘗試著區分不同類型的隧道襯砌受損因素，略敘述如下；外力作用：撞擊、磨損、過負載、地震...。化學作用：鹼骨材反應、化學物質、微生物...。物理現象：熱效應、冰凍、風化、沖刷...。腐蝕損害：中性化、電流腐蝕、化學腐蝕...。

伴隨上述因素，相對於隧道襯砌所呈現的異狀，分別有：襯砌裂縫、襯砌開裂、襯砌剝離、襯砌剝落、散狀剝落、鋼筋外露、裂縫滲漏水、仰拱隆起、襯砌入侵、

背後空洞、錯動、襯砌開裂掉落、襯砌鼓起、施工縫分離等。此處使用〈異狀〉分類，隱含初步直接判斷、實際損害原因必須再進一步解決之意。

2.2 隧道襯砌修復和補強之價值意義與目的

多數時候，面對鋼筋混凝土結構物修復和補強，都沒有明確的目的與價值意義；以至於，對於各種裂縫和損壞情形，修復和補強的意義，都充滿了目的取向不同的謬誤；甚至，誤以為裂縫修補了，就意以為可以延長結構物的使用年限。這的確輕忽了鋼筋混凝土結構物整體材料結構行為。延長現有建物之服務年限，通常是一般預期的目的；然而，定義鋼筋混凝土結構物的生命週期，又常令人卻步；那麼究竟延長了多久服務年限呢？退而求其次，改善與修復結構抗腐蝕能力，這在某種意義上，只有延緩損壞和恢復其原有功能之作用。另外則是，為改良功能所進行的修復與補強工程；此時常伴隨不同等級的改良，通常降低服務功能的修復和補強工程，爭議不大；原結構物原本設計功能，通常較多於次服務功能的結構物。提升服務功能的修復和補強工程，例如，人行隧道改良為公路隧道，加強現有結構強度及韌性補強，通常無法避免，最後，還是必需賦予使用年限的意義。針鋼筋混凝土結構物，修復和補強的價值意義和目的；訂定實際工程目標，就變得很有意義。我們可以選擇：1.不作任何處理。2.降低結構物的載重等級。3.避免或降低將來的傷害。4.改善、修補、或補強部分或全部的結構。5.拆除。

三、物理性修補

3.1 混凝土表面氣孔修補

造成混凝土表面氣孔的原因有很多，誠如眾所皆知的，混凝土配比不當、混凝土澆置技術不良、混凝土澆置搗實振動不良……等，情況發生有連貫，通常在結構新建的初期即可目視發見，多數情況與混凝土結構有關，此處僅泛指初步目視，並未影響結構的表面氣孔。意味著此處有影響因子產生，須即時修補，否則容易衍生鋼筋混凝土結構提早發生問題。材料選擇：(1)接著層：水、水泥、砂及防水黏著添加劑(2)修飾層：一般高效能修飾砂漿。施作依序是：混凝土表面打除→清潔→混凝土表面濕潤→接著層塗佈(將水、水泥、砂及防水黏著添加劑混合攪拌)→溼對溼結合→由於氣孔厚度較薄，一般再補上一層表面修飾性砂漿，即已足夠。修飾性砂漿之目的，是在維持混凝土表面顏色一致。主要注意事項：(1)與混凝土接著強度須大於 1.5 N/mm^2 (2)接著層必須選擇能增進防水功能的添加劑混合。

3.2 混凝土表面厚層修補

對於修補材料觀點而言，此處混凝土表面厚層修補相對於混凝土表面氣孔修補，主要差異是在於修補材料是否會有垂流現象。而對於鋼筋混凝土構造物觀點而言，主要差異是在於鋼筋是否外露(不包括裂縫與滲水)。對於垂直面修補，一般混凝土表面厚層修補，接著層塗佈必須在意防水及具鋼筋腐蝕抑制劑成分功能；修補層部份，在適當調整水灰比的情形下，多數認可約2~5公分尚足以抵擋垂流。材料選擇：(1)接著層：水、水泥、砂及防水黏著添加劑；最好摻有鋼筋腐蝕抑制劑成分(2)厚層水泥砂漿：預拌式水泥系(含砂灰成分及無收縮功能)、環氧樹脂(無溶劑成分)+石英砂=環氧樹脂修補砂漿(3)修飾層：一般高效能修飾砂漿。施

作依序是:混凝土表面打除→清潔→表面濕潤→接著層塗佈→溼對溼結合→塗抹厚層修補砂漿→修飾性砂漿。

3.3 混凝土組模灌漿修補

大面積以及相對較深厚的混凝土結構物異狀，一般人工修飾塗抹並不足以完備所有細節。此時，重組外模並進行較細膩操作的灌注動作是必需的。材料選擇:(1)接著層和厚層水泥砂漿:同前述(2)二次滲透灌注層:超微細水泥、低黏滯性環氧樹脂(3)修飾層:一般高效能修飾砂漿。施作依序: 混凝土表面打除→表面清理→預濕→塗佈接著層/防侵蝕→設置外模→無收縮水泥灌注→外模震動→通風孔覆蓋→二次滲透性低壓灌注→外模移除。注意事項:(1)通風排氣孔的設置須在意(2)二次滲透性灌漿須採低壓灌注(3)材料強度及相容性。

承上述，我們已提及環氧樹脂，聚酯樹脂，水泥砂漿粉體、水泥等各類型修補材料，彙整相關一般性質，如表1. 混凝土結構物修復材料。

表1. 混凝土結構物修復材料

材料性質	環氧樹脂	聚酯樹脂	水泥砂漿粉體	水泥
抗壓強度(N/mm ²)	55 ~ 110	55 ~ 110	10 ~ 80	20 ~ 70
撓曲強度(N/mm ²)	25 ~ 50	25 ~ 30	6 ~ 15	2 ~ 5
抗拉強度(N/mm ²)	9 ~ 20	8 ~ 17	2 ~ 8	1.5 ~ 3.5
強度所需時間	6 ~ 48hrs	2 ~ 6 hrs	1 ~ 7天	1 ~ 4週

3.4 裂縫修補

裂縫一般均伴隨有鋼筋生鏽及白華等現象，若為結構裂縫，則還會產生應力集中之影響。通常剪力裂縫>0.2mm，撓曲裂縫>0.3mm均視為結構裂縫，且不論寬度大小，均對混凝土結構物耐久性產生影響。材料選擇和前述混凝土表面氣孔修補、厚層修補相同，程度端賴裂縫深度決定。施作依序較不同的是，先在裂縫兩側切割一道V型槽溝→清潔→混凝土表面濕潤→接著層塗佈→溼對溼結合→塗抹修補砂漿→表層修飾。

3.5 裂縫注射修補

討論混凝土結構物裂縫的修復和補強，令人津津樂道、印象深刻的，當屬那一整排神神秘密、晦澀不明的注射筒。一般可見做法:先用環氧樹脂黏著材封膠進行表面封層→每隔15至30公分設置灌注底座→使用低黏滯度、無溶劑、高強度的環氧樹脂進行灌注。注射時機、有無滲水問題、施工程序、封層及注射用材料是主要需要注意的事項。壓力過高會有打開裂縫、增添裂縫之疑慮；壓力過低亦有灌注材料不及於裂縫尾端之現象。

3.6 裂縫止水修補

混凝土結構物表面，若存在潤濕可見水滴的情形，皆無法和現今化學裂縫灌注材料有效接合。水分子存在其介面處，常造成裂縫修補的失敗。有效的作法，是將滲水的主要源頭，先行制約或改變其流動方向。此現象好發於隧道和地下結構物，一般地面上混凝土結構物除管線破裂外，多數不常伴隨滲水現象；隧道和地下結構物裂縫的產生，絕大多數伴隨滲水現象，而且源源不絕。若未先行制約或改變水流方向，此處裂縫修復，不易令人滿意。多數時候是注射遇水膨脹型化

學藥劑，企圖在混凝土結構物外側，型成一層固體泡沫狀的化學物質，封阻並改變地下水流動的方向，祈使混凝土結構物表面呈現乾燥情況，以利修補。

上述裂縫注射修補和裂縫止水修補，在隧道和地下結構物中，通常伴隨而生。一個共同的事實是，我們都不知道灌注進入地下土體的實際情形。這些化學灌注材料，在實驗室和生產程序中，受到嚴謹控制，一般而言，注射距離、接著強度、耐久性、混合穩定性、膨脹性、灌注壓力、工作時間、硬化速率、硬化後體積變化率、環境影響/毒性、耐火性.....等等，這是實驗室和生產程序所能主動控制的；然而，實際面臨的裂隙寬度、環境因素、溫度變化.....等，都足以使這些化學灌注材料，難以發揮其正常功用。一般的工程師，不知其不可為而為之；聰明的工程師，面對這些不確定性問題，理性邏輯分析，並妥適運用這些化學灌注材料特性，使用階段式程序收斂風險，達成其工作目的之範疇。此端(3.1~3.6)討論的是，盡量恢復鋼筋混凝土構造物原有功能，或抑止鋼筋混凝土構造物繼續惡化的期程。

3.7 裂縫導水修補

隧道和地下結構物中，裂縫和滲水通常伴隨而生；此處所述並不為恢復鋼筋混凝土構造物原有功能，或抑止鋼筋混凝土構造物繼續惡化；而是直接改變混凝土構造物的服務等級。裂縫和滲水狀況依舊繼續存在，使用一些簡易材料，例如不鏽鋼材或橡膠，將滲水導流至邊溝，只要這些滲水不要影響一般人的使用即可。

四、防腐蝕保護

防腐蝕保護的課題，在一些非常專業的場合常被提及，然而普及的防腐蝕保護，卻並未被廣泛的使用。一些傳統的方式，如包覆與隔離以及提供額外之噴凝土保護層，都具有完美地改善結構外觀，可提供額外的隔離且具有長期保護效果的優點；這些歷史悠久之傳統工法，都有隱藏潛在的損傷無法提供保護，且易將損傷延展至難以復加地步的重大缺憾，對將來的侵蝕影響並無幫助。另外，陰極防蝕法暨鹼性還原法，亦有長期花費在維護系統、永久維護須搭配完整之修補計畫、許多結構物類型並不適用等，待解決事項。此處，嘗試以非傳統的方式，高分子材料，以及階段性步驟，逐步接近鋼筋混凝土修復與補強的標的與價值取向。

興建階段的防腐蝕保護；誠如眾所皆知，如果增加混凝土的緻密性，有助於阻隔空氣中的水分子以及腐蝕物質，入侵混凝土結構體內。添加矽灰以及降低水灰比是有效的。此時，混凝土內添加抑制鋼筋腐蝕添加劑，對於鋼筋會有更進一層的保護作用。此端討論的是，預期增加保護鋼筋混凝土構造物原有功能的期程。

修復階段的防腐蝕保護；或許屆臨服務年限，亦或許意圖延長使用年限。一些修復階段的防腐蝕保護，被普遍的進行著。滲透式防鋼筋腐蝕抑制劑，如今廣泛的被使用，並被證明能簡易、快速的達到預期功效。直接將滲透式防鋼筋腐蝕抑制劑，塗佈於鋼筋混凝土構造物的表面，滲入混凝土5到8公分，並在鋼筋表面形成電子保護膜，減緩鋼筋生銹速度或延遲鋼筋開始生銹時間。經過國際認證實驗室認證，十年後仍存在於鋼筋表面。而針對混凝土部分的保護，可使用混凝土表面保護塗料塗裝。一般區分有砂漿塗料和化學塗料，化學塗料以較佳的特性和具備裂縫橋接功能，普遍能提供較接近延長使用年限的期待。材料使用需注意：

是否具裂縫橋接功能、黏結強度、水氣擴散抵抗能力、二氧化碳擴散抵抗能力、紫外線抵抗能力……等。此端討論的是，抑止鋼筋混凝土構造物繼續惡化的期程。

五、結構補強

前端我們討論過恢復鋼筋混凝土構造物原有功能、抑止鋼筋混凝土構造物繼續惡化的期程，以及預期增加保護鋼筋混凝土構造物原有功能的期程。本章節討論的是，額外增加鋼筋混凝土構造物功能亦或改變其功能的期程。

誠如921地震過後，地震分區及震度分別有不同程度的調整。此時一些鋼筋混凝土構造物，必須根據不同震度的提升，而額外增加其承載功能→提高樑、樓版、的彎矩強度；提高柱的側向圍束力；提高剪力強度；提高勁度、塑性。碳纖維網結構補強系統，被簡單運用於一般結構物受損、變形量過大、提高抗震能力、鋼筋不足、鋼筋鏽蝕上；以加強樑的彎矩及剪力、樓版的開孔及彎矩、柱的圍束、磚牆的勁度等。超微細水泥，也被大量運用於加強地下結構物支撐承載力，以及抵抗土壤液化問題。這些額外增加亦或改變其功能的補強，一般未被賦予耐久性和使用年限的桎梏，然而，嚴格的說，設計基本功能已經改變，生命週期基本架構業已調整，負責任的工程師，應當為其補強的措施，給予生命週期的意義。

六、結論

1.不管是恢復鋼筋混凝土構造物原有功能、抑止鋼筋混凝土構造物繼續惡化的期程，以及預期增加保護鋼筋混凝土構造物原有功能的期程。我們使用了大量的不確定性形容詞，使我們面對鋼筋混凝土構造物的修復和補強，無法明確界定和量化其功效及價值。修復和補強的意義，充滿了目的取向不同的謬誤；甚至，誤以為裂縫修補了，就意以為可以延長結構物的使用年限。這輕忽了鋼筋混凝土結構物，整體材料結構行為。生命週期的定義，為當務之急的任務；也唯有明確的生命週期定義，鋼筋混凝土結構物修復和補強的意義，方能彰顯。

2.興建之後，驗收之前的鋼筋混凝土結構物的修復和補強，必須被重視。其主要意義是→確保並完備鋼筋混凝土構造物原有功能。修復和補強前、中、後的載重方式以及未來修復和補強工作的可能性，也相同重要。

3.工程師理性邏輯分析，充分掌握材料特性，妥適運用各項看似容易的修補動作。面對地下結構的高度不確定性，適理判斷，使用階段式程序收斂風險。企圖以簡單方法解決，並無法收斂發散性問題。

七、參考文獻

1. Working Group No.6 Maintenance and Repair, "Study of Methods for Repair of Tunnel Linings", Report and Documents, Final edition June 2001.
2. 陳東揚，陳俊傑，徐卓濤，「超微細水泥軟岩固結灌注評估暨執行報告」，第十二屆海峽兩岸隧道與地下工程學術與技術研討會，2013。
3. 陳東揚，「噴凝土中的速凝劑」，台灣混凝土學會，「2013年混凝土工程研討會論文集」，2013。