



混凝土塗裝介紹及塗膜缺陷分析

吳忠民／柏林股份有限公司經理

陳哲生／柏林股份有限公司總經理

於混凝土結構表面再進行油漆塗裝，在現今是非常普遍且常見的工法。混凝土塗裝後不但能改變其單調外觀，創造出更高的視覺效果，更能達到保護混凝土表面，不受外界化學物質侵蝕進而延長結構體的使用壽命，兼具美觀與防護功能。因混凝土面為一具多孔性材質，其抗張強度低，容易發生表面龜裂現象，而使得混凝土塗裝比起鋼鐵塗裝，更容易產生起泡、針孔、龜裂及剝離等塗膜缺陷。故不論是塗裝承包商、塗料製造商及任何關心混凝土塗裝品質者有必要瞭解並學習如何處理塗裝缺陷，以避免塗膜缺陷重複發生。雖然今天所有塗料製造商幾乎都有ISO 9000品質管理系統制度，及透過相關混凝土塗裝規範等文件制定，來避免混凝土防護塗裝的缺陷一再發生，但有時候相同錯誤卻還是重複出現。本文，主要針對在混凝土塗裝上較常見塗膜缺陷類型介紹及建議改善措施，避免相同錯誤重複產生。

混凝土特性及型態介紹

混凝土是由水泥、砂子與碎石的混合物。當加入一定量水分的時候，混凝土中水泥便會「水合」：形成微觀不透明的晶格結構，從而包裹和結合骨料硬化成為整體結構，產生堅硬的強度。人類使用水泥並不是近代的事，遠在古埃及和希臘時代，人們就知道用水泥來黏合石材和磚塊，建造各種建築物。只是古代所用的水泥成分主要是石灰泥，也就是生石灰（CaO）和砂子的混合物。其強度的產生，並非靠最初加入水時石灰的消化作用（ $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 \downarrow$ ）而來，而是後來由於長期接觸空氣，吸收其中的二氧化碳而產生碳酸鈣（ $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ）的緣故，這與目前普遍使用的波特蘭水泥（portland cement）：其主要成份為矽酸鹽混合物，經水合作用（ $\text{CaSiO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2 + \text{CaSiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ）而硬化並不相同。現代較常用的波特蘭水泥（portland cement），一般均認為是由一位英國里芝市（Leeds）的建築師 Joseph Aspdin 所發明（他在 1824 年申請獲得

專利）。其製造方法是以一定比例的石灰石（碳酸鈣）和黏土（矽酸鋁），混合置於窯中燒製而成。此法至今仍無重大改變。在燒製時，原料熔成塊狀，磨成細粉後即成水泥，其中所含的矽酸鈣，就是促使水泥具有「水硬性」（hydraulic character）的主因。波特蘭水泥的首次大規模應用，是在 1825 至 1834 年的泰晤士河隧道建築工程。

混凝土為無機、多孔性材料，乾燥時其孔洞體積可達 10 ~ 25%，其硬化或水合過程可持續數年，但約在 28 天可達初步物理特性。混凝土結構擁有易施作、可提供高厚度、緻密性之防水遮蔽層，達一定厚度時其結構可阻礙水通過混凝土；另一方面，它的多孔性可使水分蒸發，使其從高濕度回復至低濕度。在飽和水中，其 pH 值達 12 ~ 13，屬高鹼性材料；而一般鋼鐵在 pH 值達 11.5 時即呈現鈍化而達到防蝕作用。混凝土抗壓強度相當高，可達 2,000 ~ 8,000 psi，但相對抗張強度相當低，通常僅為抗壓強度 1/10 ~ 1/13，故易產生龜裂現象。因混凝土的抗拉強度較低，任何顯著的拉彎作用都會使其微觀晶格結構開裂和分離，從而導

致結構的破壞。而絕大多數結構構件內部都有「受拉應力作用」的需求，故未加鋼筋的混凝土極少被單獨使用於工程。一般工程常見混凝土型態包括：

1. 鋼筋混凝土（在混凝土中安置鋼筋，主要用於一般房屋建築物）。
2. 鋼骨混凝土（以鋼材替代鋼筋，增強抵抗外力的韌性，用於高樓建築物）。
3. 預力混凝土（使用預力鋼鍵，主要用於長跨橋樑，部分房屋建築也有使用）。
4. 輕質混凝土（使用較輕的人造骨材，用在隔熱、隔音，可降構材載重）。
5. 重質混凝土（用於防護核子輻射，常見於醫院及核能電廠）。
6. 預鑄混凝土（先在工廠完成灌鑄工作，再運至工地進行安裝，應用範圍很廣）。
7. 預拌混凝土（混凝土在設備完善的工廠中先拌好，再運送至工地使用，多為一般工程所使用）
8. 滾壓混凝土（用於大壩及道路施工）。
9. 噴射混凝土（用於襯工、保護、及維修工程）。

其中又以鋼筋混凝土為應用最多的一種結構形式。目前中國大陸是世界上使用鋼筋混凝土結構最多的地區。

鋼筋混凝土失效形式

因混凝土為反應性材料，易與酸性化學物質及純水反應進而分解，故混凝土在與不同化學物質與環境變化下會產生品質下降現象。常見鋼筋混凝土失效模式如下：

碳化作用

混凝土孔隙中含的水分通常是鹼性，混凝土在飽和水中其 pH 值為 12 ~ 13 屬高鹼性。根據 pourbaix 圖，鋼筋在 pH 值大於 9.5 時是惰性的，不會發生鏽蝕。但因空氣中的二氧化碳會與水泥中的鹼反應，使得混凝土碳酸化而導致孔隙水變酸，使 pH 值降低至 9.5 以下，造成混凝土中鋼筋失去惰性而產生鏽蝕、體積膨脹，進而使得混凝土產生裂縫。從構件製成之時起，二氧化碳便會碳化構件表面的混凝土，並且不斷加深。如果構件發生開裂，空氣中的二氧化碳將會更容易進入混凝土的內部。通常在結構設計的過程中，會根據建築規範確定

最小鋼筋保護層厚度，如果混凝土的碳化削弱了這一數值，便可能會導致因鋼筋鏽蝕造成的結構破壞（如圖 1）。測試構件表面的碳化程度的方法是在其表面鑽一個孔，並滴以酚酞，碳化部分便會變成粉色，通過觀察變色部分便可得知碳化層的深度（如圖 2）。

氯化腐蝕

氯化物，包括氯化鈉，會對混凝土中的鋼筋腐蝕。其主要氯離子來源為海風侵蝕、混料及除雪劑。因此，拌合混凝土時只允許使用清水且需注意砂子及骨材含氯量。同樣，在冰封路面使用鹽來為混凝土路面除冰是不適當。

硫酸鹽腐蝕

硫酸鹽會與矽酸鹽水泥反應生成具有膨脹性的副產品，例如：礬石（Ettringite）或碳硫矽鈣（Thaumasitein）從而導致混凝土的早期失效。而硫酸鹽主要來源為地下水、工業污染、汽機車廢氣及自然界中細菌分解。



圖 1 鋼筋腐蝕而造成混凝土層剝落



圖 2 混凝土層碳化部分經酚酞滴定成粉色

鹼骨料反應

鹼骨料反應或鹼矽反應，(Alkali Aggregate Reaction, 簡稱 AAR, 或 Alkali Silica Reaction, 簡稱 ASR) 是指當水泥的鹼性過強時, 骨料中的活性矽成分 (SiO₂) 與鹼發生反應生成矽酸鹽, 引起混凝土的不均勻膨脹, 導致開裂破壞。它的發生條件為、(1) 骨料中含有相關活性成分、(2) 環境中有足夠的鹼性、(3) 混凝土中有足夠的濕度 75% RH。

混凝土塗裝

為避免混凝土因不利環境接觸而產生早期失效現象, 雖然有其他具有特殊用途—如快乾性、放熱低及抗硫性的水泥, 也逐漸發展出來了, 但總結仍以油漆塗裝方式最為經濟、便利方式之一。塗裝不但能強化混凝土防水功能, 透過不同塗裝系統的選擇, 更能達到抗酸鹼、防腐蝕及美觀功能。為確保混凝土塗裝能正常發揮其功能並達到預期的保護壽命, 正確的塗裝流程及混凝土素地狀況掌握便顯得相當重要。尤其鋼筋混凝土皆為現場施工灌漿, 施工品質好壞相對影響後續塗裝的品質及難易度。本文將就混凝土塗裝流程及常見混凝土塗裝缺陷及預防方法介紹如下。

混凝土素地檢查

混凝土品質不似鋼鐵穩定, 如混凝土混合比例不當及施工品質低落, 將會造成後續塗裝容易失敗。故塗裝前須先確認混凝土品質是否符合規定, 不合格混凝土面, 未經改善前即施作塗裝, 將造成塗膜缺陷提早出現。表 1 為混凝土塗裝前須確認素地處理狀況, 待一切確認後方能進行塗裝。另外塗裝前混凝土素材平整度即已決定, 無法憑藉塗料塗裝方式改變其原有平整性。

表 1 混凝土素地檢查

項次	檢查項目
1	混凝土養生硬化期是否已足夠 (一般需 28 天以上)
2	混凝土表面含水量是否符合要求
3	結構體是否有滲漏現象
4	工區內模板、雜物是否已清除完畢
5	混凝土表面鐵線、鐵釘、鋼筋及木屑等突出物是否已完全清除並補平
6	混凝土表面釘孔、蜂窩、蟲洞是否已完全填補平整
7	混凝土突出部份腳印及泥渣是否已剷除並修補平整
8	模板接縫處高低差是否已完全修補平順
9	是否有砂石與水泥分離, 造成混凝土鬆散強度低落之現象
10	混凝土表面泥漿層是否有太厚之現象
11	混凝土表面平整度在 3 公尺範圍內是否高低差 > 3 mm

混凝土表面處理

此為影響後續混凝土塗裝品質最重要階段。混凝土表面處理可參考 NACE No.6/SSPC-SP13 Joint Surface Preparation Standard. 其表面處理方法有下列幾種：

1. 表面清潔：依 ASTM D4258 描述, 可藉由真空、噴射空氣及水清潔, 除去混凝土表面髒物、灰塵及鬆動物質。另外, 使用清潔劑和蒸汽則為除去混凝土表面的油脂。
2. 機械表面處理法：
 - (1) 噴砂法：依 ASTM D4259 描述, 可使用乾式噴砂 (Dry abrasive blasting)、溼式噴砂 (Wet abrasive blasting)、真空噴砂 (Vacuum-assisted blasting) 及離心式鋼珠噴砂 (Centrifugal shot blasting) 等除去污染物、浮漿 (laitance) 及強度較弱的混凝土層, 並使混凝土表面產生適當的粗糙度; 但使用此工法需避免過度噴砂, 造成石礫外露, 而影響後續塗膜平整性。原則上以 40 ~ 60# 砂紙粗糙度較為合適。
 - (2) 水刀：依 NACE No.5/SSPC-SP 12、ASTM D4259, 可使用高壓水或水刀 (Waterjetting) 方式來除去污染物、浮漿 (laitance) 及強度較弱的混凝土層, 並使混凝土表面產生適當粗糙度。
 - (3) 敲擊法：採用敲擊或鏟除方式可除去舊塗膜、浮漿及強度較弱的混凝土層, 但此法可能破壞混凝土表面或造成微龜裂, 需依規定程序執行。處理完畢後亦可依 ASTM D4541 執行抗拉試驗, 以確認其附著強度。
 - (4) 動力工具：如採用動力工具, 像研磨機或鋼絲刷亦可除去上述混凝土表面物質, 但效率較差, 可能過度研磨且無法產生適當粗糙度。
3. 化學表面處理法：
 - (1) 酸洗法：依 ASTM D4260 及 NACE Standard RP0892, 針對水平混凝土面, 酸洗 (Acid etching) 可除去浮漿、強度較弱的混凝土層及提供表面粗糙度。但此法須完全除取反應物質並檢測 pH 值, 確保酸液已完全中和。但需注意, 採用此法時不可使用鹽酸, 以避免腐蝕鋼筋; 此法並不適用在垂直混凝土面及有填縫劑之混凝土面。
 - (2) 燃燒法：使用火或其他熱源將混凝土表面有機物

質去除。去除範圍依所使用設備效率、火燄大小及與混凝土面距離有關。此法會降低混凝土強度或破壞混凝土，須進一步執行拉拔強度試驗。

4. 表面清潔度：

表面處理後之混凝土面須牢固並產生適當粗糙度且亦需再依 ASTM D4258 方法進行混凝土表面清潔。

塗裝前環境檢測

混凝土為多孔性材質，其含水分會影響後續塗裝品質，故塗裝前須確認其混凝土含水份是否達到塗裝前之規定。另外塗裝前可允許環境條件則依塗料製造商或供應商規定執行。一般業界混凝土塗裝前環境檢測條件如下：

1. 表面含水分：如混凝土含水率高於可塗裝之規定限制，須將混凝土乾燥至可塗裝範圍。目前混凝土含水份檢測可採用 ASTM D4263 塑膠薄膜測試法，將約 45 公分平方 0.1 mm 厚之塑膠膜，以膠帶密封於待測混凝土面，經 16 小時以後觀察塑膠膜下是否有水珠凝結，如有，則表示含水分過高，不宜塗裝。另外亦可採用水分測定計直接量測，此儀器仍藉由超音波原理進行檢測。一般混凝土可塗裝狀況下之含水率約為 5 ~ 15%；此數值會因依使用不同的塗料而異，8% 較為常見的標準。
2. 除原油漆製造商的規定外，氣溫在 10°C 以下、表面溫度在露點 3°C 以下，或環境相對濕度超出 85% 以上時，不得進行塗裝工作。
3. 風力足以使塵垢、砂土等沾於漆膜時，除非另有方法阻止此種現象發生，否則不得進行油漆工作。
4. 潮濕天候時，不得將油漆塗覆於無遮蔽之表面，亦不得塗於有水或潮濕之表面。

塗裝作業

混凝土素地及表面處理完成後，經環境檢測合格則可進行塗裝工作。一般混凝土塗裝系統可分為薄塗型含溶劑型及水性塗料（總乾膜厚約在 500 μm 以下），厚塗型，無溶劑塗料（總乾膜厚約在 5 mm 以下）及 FRP 玻璃強化纖維內襯。而塗裝材料，依系統特性約可分為底漆、中塗漆及面漆。其特性說明如下：

1. 底漆：須具備高滲透性及高附著力，可使混凝土表面強度增加、上塗塗料與混凝土相容性更好且能穩

固附著於混凝土面上，故此層一般設計膜厚較薄並不建議一次厚塗。

2. 補土：需具備高固成分、可厚批、易研磨、乾燥快、附著力優等優點。其為填補混凝土中孔洞或毛細孔，使塗膜更為平整美觀。補土與塗料相容性要好，以方便上漆。
3. 中塗漆：宜具較高顏料分（高顏料體積濃度值）、阻絕性，及體固分，使其能一次厚塗，增加塗膜厚度。在一般混凝土塗裝設計中，有時中塗漆與面漆為同一材料。
4. 面漆：樹脂含量宜高（低顏料體積濃度值），使塗膜更為緻密，抗化學藥品性更佳。塗裝作業中，須隨時注意施工環境條件變化，及每道漆上塗前底塗表面狀況及塗裝間隔。塗裝間隔過短或太長，都會影響塗膜層間附著性。

混凝土塗裝塗膜缺陷分析

混凝土塗裝不似鋼鐵面塗裝，容易受到底材狀況影響而形成塗膜缺陷。且混凝土多孔性特質及現場灌漿施工所造成之缺陷也與日後塗裝成敗息息相關。故瞭解混凝土塗裝經常產生的缺陷型態及如何避免，是確保塗裝品質非常重要一環。現將塗裝缺陷型態說明如下：

孔洞 (Holes)

在塗裝過程中所發生之塗膜缺陷。如果塗裝過程中沒改善這些在塗膜中的孔洞，將因混凝土品質降低而使塗膜失敗。一般孔洞可分為三種類型並說明如下：

1. 氣孔 (Blow Holes)：在塗膜中產生較小、形狀似火山口孔洞（圖 3）。其為混凝土中氣體或水蒸氣自然



圖 3 混凝土塗裝缺陷—氣孔

逸出所造成。當混凝土板塊溫度增加時，便會產生氣體逸出現象；通常在戶外施工此一現象會較為明顯，尤其是在陽光直接照射的情況下。要解決此一問題，可在當混凝土溫度達到最高時（一般約在午後）施作至少一道底漆或封孔漆（sealer）。在上塗第二道漆前，須檢查第一道漆並處理所有氣孔。

2. 蟲洞 (Bug Hole)：如圖 4 所示，在 SSPC-SP 13/NACE No.6 中，定義蟲洞為規則或不規則洞穴，通常它的直徑不超過 15 mm。其形成原因是混凝土澆注時，搗實不足或黏度太高，造成空氣誘導至表面而形成。在有蟲洞表面塗裝，須先將這些孔洞進行填補。填補前要先將蟲洞表面破壞，以避免產生水滴型孔洞，而使空氣無法順利逸出，造成補土因空氣阻隔而鼓起，而法填滿孔洞。有時候，其他塗膜孔洞是在橋樑狀蟲洞，用較薄混凝土修補後產生。經過一段時間，薄混凝土層產生缺陷，然後塗膜亦隨之發生缺陷。為避免上述問題發生，應確保所有蟲洞皆已處理並填入與塗裝系統相容之補土材料。



圖 4 混凝土缺陷—蟲洞

3. 針孔 (Pinhole)：這些孔洞（圖 5）微小到幾乎很難用肉眼觀察。其主要是由塗料施工性及施工方式所造成。多道塗裝系統所產生針孔，較不像單道塗裝，其針孔由底材直接通至外界，污染物及濕氣容易進入底材。通常小數量針孔並不會造成塗膜失敗，除非表面曝露於凍／融循環或腐蝕環境。針孔測定可於塗裝後藉由針孔測定器測得。但於混凝土塗裝作業中，如要進行針孔測試需採用導電型底漆。發現針孔後則需進行補修程序。



圖 5 混凝土塗裝缺陷—針孔

塗膜龜裂 (Cracks)

塗膜龜裂是塗膜邊緣鼓起 (edge lifting)、碎裂和剝離的開始點，尤其當塗膜處於熱應力、水、凍／融循環和化學物質環境。當塗裝施工後，混凝土產生龜裂則塗膜亦會隨之發生缺陷。另一方面，如果塗裝前混凝土接縫處已產生龜裂，則塗裝後亦容易發生塗膜龜裂現象。在許多案例中，龜裂現象有時候在美觀上是可以被接受的，也就是說，除非塗層有進一步破壞發生，否則是不會被視為一種缺陷。塗膜龜裂現象約可分類為 5 種狀況，分別敘述如下。

1. 反射性龜裂 (Reflective Cracks)：當塗裝完成後，因混凝土發生後續龜裂，而造成塗膜產生反射性龜裂（圖 6）。一般發生此一現象，是混凝土硬化過程中收縮造成的（通常約 44% 收縮龜裂發生在前 28 天，而 91% 則在 1 年內發生）。大部分新建結構工程，工期皆非常緊迫，總是無法在 28 天後才塗裝，也就是說塗裝時混凝土並未完全硬化，所以混凝土及塗膜龜裂風險便會增加。為避免塗膜因混凝土收縮現象發生龜裂，要求較低混凝土水灰比及設計適當的混凝土控制縫 (control joints) 可將收縮龜裂可能性降至最低。



圖 6 混凝土塗裝缺陷—反射龜裂

2. 動態龜裂 (Dynamic Cracks)：任何會移動的龜裂 (圖 7) 皆屬動態龜裂。室外環境比室內環境更容易產生移動性龜裂，此乃因裂縫的移動、擴張、收縮與環境溫度變化有關，而室內溫度變化通常較室外少。動態龜裂可以是收縮 (非結構) 龜裂或結構性龜裂。兩者之差異是收縮龜裂通常在同一平面上往兩個方向移動，而結構龜裂則是多個方向及平面移動。在動態龜裂的混凝土面上施作塗裝，將造成塗膜缺陷產生。為避免因動態龜裂所伴隨的塗膜缺陷，應在塗裝前將此些結構缺陷找出並加以修補。混凝土結構龜裂的補修無法由塗裝包商自行補修，應由土木工程師確認造成結構龜裂的原因及提出適當的修補工法，而這些動作須在塗裝執行前完成。混凝土動態龜裂處理可藉由加強網補強 (Bridge technique)、灌注樹脂接著劑或切割裂縫填入彈性填縫劑等工法加以補修。

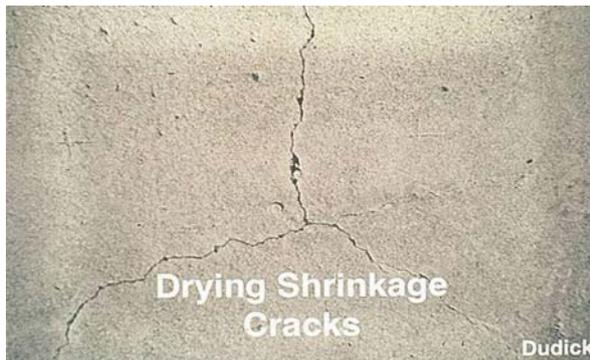


圖 7 混凝土缺陷—乾縮龜裂

3. 冷接縫龜裂 (Cold Joints Cracks)：此一因混凝土澆注時間差所產生接縫龜裂 (圖 8)，通常與收縮龜裂類似。此龜裂發生在兩次混凝土澆注所產生收縮應力之弱點處。當塗裝施作於冷接縫混凝土面時，此缺陷非常有可能在接縫處因冷接縫收縮龜裂而造成塗膜隨之龜裂，此一現象與反射性龜裂非常類似。避免冷接縫所造成塗膜龜裂其處理方式與動態龜裂同。

4. 控制縫塗膜龜裂 (Coating Cracks in Control Joints)：控制縫的目的，是在避免因收縮應力所產生的龜裂 (圖 9)，將混凝土面產生任意龜裂現象的可能性降至最低。當塗裝施作於控制縫上，控制縫的收縮膨脹活動將造成大部分塗膜龜裂。另外，施工應避免在控制縫中灌注樹脂砂漿或其它硬質材料否則將使控制縫功能失效。如何在控制縫上避免塗膜缺陷，可藉由適當的填縫劑填充控制縫。如果控制縫不能



圖 8 混凝土缺陷—冷接縫龜裂



圖 9 混凝土缺陷—控制縫龜裂

裸露，而加以塗膜覆蓋的設計是必要的話，則必須小心施工。控制縫龜裂其模式與動態龜裂類似，在 SSPC-TU2/NACE 6G197 文獻中，有其圖解說明如何處理此兩種接縫龜裂的不同工法。

失去附著力 (Disbondment)

塗膜失去附著力一般是不被允許。無論如何，塗料最基本要求是：能附著於底材上。雖然許多塗料能容許小部分塗膜失去附著強度而仍能保有原塗膜功能，但對於任何種類的塗料，塗膜產生龜裂或剝離總是不被接受。下列幾種現象是造成塗膜在混凝土面附著力降低的肇因：

1. 混凝土表面強度不佳：對大部分塗裝來說，混凝土表面之抗張強度是非常重要的，原則上混凝土面抗張強度需達 200 psi 才能符合塗裝附著強度要求。是否因混凝土抗張強度不足而造成塗膜附著力不佳的現象，很容易從剝離的塗膜底面是否仍黏著一層薄薄混凝土層而得知。而這層薄薄混凝土層有可能是未完全除去的水泥浮漿或鬆散混凝土層。為避免塗膜附著力因此現象降低，混凝土面需有適當的處理及硬化，所有浮漿必須全部去除並在塗裝前進行抗

張強度試驗（依 ASTM D4541 或 ACI 503R），另外亦可參考 SSPC-SP13/NACE 6 作為混凝土塗裝前表面處理指導，而混凝土可接受的抗張強度值應向塗料製造商諮詢。

2. 混凝土面粗糙度不足：大部分塗裝系統需要底材表面的粗糙度來提供足夠的機械錨定機制。混凝土面所需粗糙度是依塗料的種類及厚度不同而異。如果剝離塗層底面未黏著任何混凝土層且塗層底面呈現平滑狀，則代表可能是混凝土面粗糙度不足，需進一步向塗料製造商洽詢。避免此一類型失敗，可藉由規範設定、檢查及加強依塗料製造商所建議表面粗糙度來達到改善目的。在由國際混凝土修補協會（International Concrete Repair Institute）所出版技術指導規範“Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation for Sealers, Coatings and Polymer Overlays”有 9 種不同粗糙度目視標準，而 SSPC-SP13/NACE 6 同樣提供表面粗糙度指導。
3. 混凝土表面污物：依污染物種類不同，塗膜會附著於污染物（如：灰塵）上或從污染物上分離（如：油酯或矽化物）而非混凝土面。有些污染物甚至會影響到塗膜硬化而造成塗層剝落，此一狀況發生，可由塗層下帶有黏性的現象獲得證實。避免此一剝離現象產生，可藉由規範設定、檢查及依塗料製造商所建議或相關業界規範文件，確實除去表面污物。
4. 熱應力（Thermal Stress）：極端溫度（太冷或太熱）環境、溫度突然變化或冷熱循環等現象會在塗膜產生足夠熱應力而造成塗膜龜裂或剝離。一般在塗料選用上，如果未考量所處的環境熱應力影響，則塗膜缺陷便會發生。產生熱應力的典型環境例子，如曝露在極端溫度的戶外混凝土面、使用熱水或水蒸氣的混凝土面清潔方式和周圍有極端冷熱設備（如：烤箱或冰箱）的環境。為避免此一現象的塗膜失敗，可依塗料製造商建議，適用此環境的塗裝系統設計。
5. 起泡（Blisters）：塗膜起泡（圖 10），通常是因混凝土表面空氣進出或水蒸氣散發及過多水分所造成。當混凝土氣體逸出，而塗膜強度足以抵抗此一氣壓，則會立即產生氣泡（否則則會產生氣孔）。高膜厚塗層（厚度超過 2.5 mm）在施工過程中，混凝土氣體逸出，則塗層容易產生氣泡。如果起泡的大小



圖 10 混凝土塗裝缺陷—氣泡

- 是在可接受的範圍（依使用條件而定），這些起泡可能並不會影響塗膜的功能性。但一般而言，起泡仍是不被接受的。避免混凝土中氣體逸出所造成的起泡，可藉由規範設定、檢查或確認混凝土面是在冷卻的狀況下才施以塗裝，來達到預防效果。混凝土中濕氣的散發所造成的塗膜起泡，在塗裝施工後任何時間（從一個月至數年）皆可能發生。而所產生的氣泡內可能含有水分，也可能是乾的，完全依當時檢查時間點而定，甚至偶有會起泡發生後又消失狀況發生。造成起泡現象有多種理論，如滲透壓（Osmotic Pressure）、毛細現象（Capillary Action）、水蒸氣散發和化學反應。在這些理論中，塗膜下過多的水分是造成起泡主因，需要加以預防。為避免此一問題發生，塗裝施工前，如有必要可在所有混凝土面覆蓋濕氣阻絕層並檢測水蒸氣蒸發情況（依 ASTM F1869），確認混凝土面過多的水分已蒸發。當塗層封住混凝土表面，將阻礙水分蒸發而可能造成塗膜起泡。為避免因混凝土含水分過高的問題，可在塗裝前藉由覆蓋透明塑膠膜，進行含水分觀察（依 ASTM D4263）來判定是否可進行塗裝，而塗料製造商亦需提供一混凝土含水分可接受範圍值。
6. 接縫處附著力降低：對塗裝工程而言，對於如何處理塗層與控制縫界面是非常重要的階段。如果塗層邊緣沒有封住，則塗層容易被其他物質侵入而造成塗膜邊緣隆起和碎裂。為避免在接縫處的塗層被破壞，可選擇一合適材料（比原塗料更能承受在邊緣處所產生應力），封住塗層接縫處並選用一個好的填縫劑以封住控制縫，此填縫劑強度需要能緩衝接縫邊緣應力和具可撓性，如此才足以抵抗在室溫下接縫週期性移動。

7. 塗層終止端 (Termination Points) 附著強度降低：對於任何塗裝系統，混凝土接縫處及終止端，對其收邊處塗膜狀況都具有明顯影響。一般塗層終止端處，如排水溝渠設備之設備界面和混凝土樓板中間（僅一半樓板需塗裝），此一部分處理細節及訓練常被忽略，所以在塗層終止端常見塗膜缺陷，如塗膜邊緣鼓起和片狀碎裂。為避免此一問題發生，可藉由對混凝土邊緣切割成一適當角度而加以改善。在 SSPC TU2/NACE 6G197 文獻中有適當的處理程序說明。排水溝渠處，因經常性磨擦和液體侵蝕（如水和化學藥品）故常會發生塗層剝落及磨損現象。此一現象可藉由將原混凝土塗裝邊緣再加塗並封住四周來避免。工廠許多地方皆可見設備的界面，包括平底桶槽、支撐柱、幫浦、支撐托架、溝渠、管線支架和其他永久性設備會阻礙塗層在混凝土面形成一連續塗膜且因這些界面形狀複雜，所以常常缺乏適當處理，通常會造成塗膜邊緣鼓起。在一般正常設備操作條件下，塗膜失敗的風險若過高，建議利用填縫劑封住設備界面或在結構設計上儘量降低界面個數與複雜性。

層間剝離

此類型塗膜失敗非常容易觀察，因為單一層或多層塗膜仍然良好的附著在混凝土面上。失敗主要原因是塗層間的表面污染物、胺霧 (Amine Brush)；主要發生於環氧樹脂系統、底層塗膜硬化不足和底層與上層塗料相容性不佳所造成。

1. 層間污染物：通常是由灰塵、水分凝結或化學物質所造成。為避免污染物附著，可藉由堅持清潔有可能已污染塗層表面來達到目的。依塗裝系統不同，可能需要在塗前研磨下層已塗裝完成的表面來除去不純物。避免水分凝結，可藉由確認表面溫度高於露點溫度 5°F (3°C) 來達到。
2. 胺霧 (Amine Brush)：此問題通常發生在胺硬化環氧樹脂塗裝系統 (圖 11)。胺霧發生程度依塗料配方和施工環境而異 (如：相對濕度)。嚴重胺霧可由外觀看出塗膜發白或雲狀褪色現象，且其通常摸起來會有黏黏的感覺。有時候輕微胺霧發生並不易由外觀觀察到，故在塗裝下一道漆前表面須先清潔，清潔方法可藉由研磨或刮除方式執行。



圖 11 混凝土塗裝缺陷—胺霧

3. 底塗硬化不良：此一問題非常明顯，當底層材料產生層間附著失敗，通常是部分塗膜附著在上層漆表面下方和部分塗膜保留在混凝土面 (圖 12)。塗料製造商可透過底材塗膜樣品進行分析，來判定是否已適度硬化。為避免此一問題發生，可增加品質控制步驟來確認下一層塗料執行前是否已適度硬化。
4. 底塗材料不相容：此一問題發生通常是底塗材料 (如：補土) 與上塗材料由不同塗料廠商生產且相互間未進行相容性試驗。不相容的底塗材料對上層塗料可能鍵結較弱或上層塗料可能溶解底塗。通常不相容現象可從底塗層間附著失敗或是黏著的狀況產生於兩塗層間觀察出來。堅持使用同一塗料製造商所生產塗料或經塗料製造商對於上塗前驗證底塗相容性，可避免此一塗膜缺陷的發生。



圖 12 混凝土塗裝缺陷—剝離

舊塗膜重新上塗失敗

此塗膜失敗類型的主因是舊塗膜與混凝土間附著強度變弱，使得上塗塗料時產生較弱的層間附著強度和新舊塗膜相容性不佳所造成的。

1. 附著強度變弱：當上塗新塗層且在塗膜硬化過程中舊塗膜產生收縮，塗膜與混凝土附著變弱將造成層狀剝離。此現象可由已剝落的新塗膜底面中發現亦有舊塗膜附著觀察到。避免因舊有塗膜附著力不足而產生重塗後塗膜剝離缺陷，可藉由包括品質控制程序來測試舊塗膜附著強度（依 ASTM D4541 或 ACI 503R），通常其合格標準最少是 200 psi。為確保其附著性可選擇將舊塗膜除去以避免失敗。
2. 層間附著力不足：舊有塗層間附著力變弱是此塗膜缺陷主因。在舊有塗膜重新上塗在塗膜乾燥過程中會產生收縮應力，而如舊塗膜其強度不足以抵抗其收縮應力且兩塗層本身鍵結強度良好的話則層間附著失敗便會產生。
3. 新、舊塗膜不相容：舊塗膜有時會影響上塗塗料硬化或被上塗塗料溶解。在環氧樹脂舊塗膜其硬化劑在長時間下並未完全產生聚合反應，甚至可長達 10 ~ 15 年。而此未反應的硬化劑將阻礙乙烯酯塗料硬化，而苯乙烯系塗料將溶解乳膠系塗料。為避免不相容現象發生，在重新塗裝前可執行相容性試驗。

表面外觀缺陷

表面缺陷一般是外觀問題，大部分並不會影響塗料功能。一些共同表面缺陷描述如下：

1. 水漬：水潑濺在塗膜表面，塗層初期看起來是好的，然後轉為白點化。這是表面現象，通常此些白點洗不掉，甚至要用砂紙或機械研磨才能清除。此表面缺陷肇因通常是胺硬化環氧樹脂產生胺霧的類型。過多的胺與水蒸氣反應形成油膩、白化或雲狀薄膜。避免水漬產生，可藉由塗料供應商提供試驗數據或方法，進一步排除此一問題。
2. 灰塵黏著：許多塗料因具有吸附灰塵的趨勢，而此一現象可能是個缺陷，尤其是塗膜外觀及衛生上常會特別受到重視。灰塵吸附能力可請塗料製造商提供資訊，而灰塵清潔可藉由工具加以清潔。

3. 褪色（UV 黃變）：許多塗料對抗紫外線能力較弱，會使塗膜產生黃變（其他功能仍保持），如果已塗裝混凝土面是需曝曬在紫外光下，為避免褪色可向塗料製造商諮詢，請其提供抗紫外線數據或提供抗 UV 塗料。
4. 粉化（Chalking）：通常大部分環氧樹脂塗料與苯環族 PU 漆，在經一段時間後，塗膜表面會粉化而導致塗膜厚度損失。為避免此一狀況，可使用較厚的塗裝系統設計，允許一段時間後粉化所造成塗膜損失，並要求塗料製造商提供試驗數據和產品可接受的粉化度作為參考依據。
5. 沾污性（Staining）：塗膜曝曬於化學物質中而造成顏色改變，有時候這種化學曝曬是因清潔塗層的清潔劑（如硝酸系清潔劑）所造成。沾污，通常是一種外觀的問題，但有時候在沾污及清潔多次循環下可能造成塗膜損失。避免沾污，可藉由已知化學曝露環境和塗料製造商提供，可使用於塗膜的抗污化學藥品資訊。
6. 表面刮痕（Surface Scratches）：通常發生於地板塗裝。表面刮痕並不會影響塗膜功能性（除非外觀及衛生是重要的）。對於塗膜，不論其顏色為何，其刮痕皆為白色。避免刮痕，在選擇塗料前可先選擇一小區域進行測試或參考塗料製造商的說明書。針對此一問題，可使用耐磨性較佳的面漆，於有抗磨和外觀上需求之塗裝系統。

避免塗膜失敗的策略

1. 更新塗裝規範：塗裝規範是避免失敗的控制文件，而此規範應該隨時更新。當塗裝缺陷出現，瞭解其產生原因及機構是預防再發生的最好方法，而後續則須將此一經驗反應在規範上。避免塗裝失敗，應列出塗料可能發生的缺陷查核表，包括缺陷發展的有效因子、會發生缺陷的區域。如下所述：
 - (1) 塗膜缺陷：氣孔、蟲洞、針孔。
 - (2) 缺陷發展有利因子：混凝土表面強度、混凝土透氣性、過多水分、表面平整度、濕氣傳送、接縫處邊緣處理、接縫處填縫劑設計、光澤保持率、色彩保持率、抗污性、抗灰塵黏附性。

(3) 發生缺陷區域：收縮龜裂、動態龜裂、結構縫、控制縫、隔離縫、溝渠／排水界面、混凝土板中間終止端、設備界面。

2. 遵守規範：工程執行時，有時候進度壓力相當大。有時候，趕工時常會有藉口說，我們沒有時間完全依規範程序將事情完成，但一旦發現失敗時，卻又有時間做第二次。堅持依規範進度時間適當執行工作是必要的，不要輕易以進度及方便理由，同意縮短工期。

確實執行檢查：檢查是強化工具。開始時如有一位塗料製造商的技術代表及有此類工作經驗及指定塗裝系統經驗之專職檢查員，是確保工程成功要素。保持記錄也是非常重要的，正確的記錄將有助於判別失敗的型態。一般工作日誌資訊應包括下列項目：底材表面溫度、大氣溫度、露點、相對濕度、塗裝工作流程、混凝土表面強度數據、表面處理檢查記錄、表面粗糙度檢查記錄、使用塗料批號、乾

或濕膜厚、針孔測試、一般性記錄（如每日活動）、每日安全查核表。

3. 排定維護工作：已施作完成塗裝須排定其維護計畫，以確保塗膜發揮至最大使用壽命。如果沒有執行維護，塗膜小缺陷可能依操作條件不同很快的會變成失敗主因。定期修護塗膜小缺陷（如間隔6~12個月），將可確保整體塗裝系統的完整性和降低維護成本。維護頻率依所處環境而定，曝露於嚴重腐蝕環境區域需更頻繁的維護來預防主要失敗的發生。清潔工作應包括在維護程序中，清潔工作可使塗膜小缺陷被發現的機率提高並且將腐蝕性液體清除以減低對塗膜的影響進而延長塗膜使用壽命。

混凝土塗裝受底材狀況影響較鋼鐵塗裝更為複雜，塗裝過程中任一環節稍不注意都可能使塗層提早發生缺陷，降低其使用壽命。唯有清楚掌握混凝土塗裝過程中每一環節該注意事項及處理重點並確實依規定執行，才能達到預期塗裝保護壽命年限。 



社團法人
中國土木水利工程學會
CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING

敬邀您加入本學會會員



www.ciche.org.tw

學會是 ...

一個凝聚產官學土木專業知識的團體
一個國際土木組織最認同的代表團體

一個土木人務必加入的專業學術團體
一個最具歷史且正轉型蛻變中的團體

會員可享多項優惠 ...

申請學生獎學金
得到國際專業組織承認
參加國際交流活動
免費贈送一年六期會刊

本會出版品七折優待
本會學刊訂閱優惠
主辦研討會優先參加及大幅優惠