2012 年度 公益財団法人交流協会フェローシップ事業成果報告書

劣化建築物之維護管理與永續再生

(表面被覆材料耐久性能評估)

国立台湾科技大学 邱建國 招聘期間(2012年6月28日~8月26日)

> 2012 年 11 月 公益財団法人 交流協会

> > 1

一、前言

近年日本因建築物性能維持與管理所產生之大量資源使用、營建廢棄物增加等危害地球環境 等問題日益受到重視,建築物之長壽命化或耐久性問題也受到廣泛的關心與注意。較於 1997 年之 京都議定書內容,日本建築學會於 1997 年 12 月亦提出「如為減少 30%之 LCCO₂,建築物之壽命 必須延長為原設定值 3 倍,即為 100 年之供用目標」,由於可見,建築物之性能維持或長壽命化於 「永續發展」或「永續工程」中是不可缺少的。2008 年 9 月日本建築學會頒布「鋼筋混凝土建築 物之環境配慮施工指針(案)及解說」一書,當中以鋼筋混凝土建築物為對象,依生命週期(Lifecycle)觀點提出「省資源型」、「省能源型」、「環境負荷物質減低型」及「長壽命型」等共四類之環 境考慮方法,並於生命週期各階段(設計階段、施工階段及使用維護階段等)提及各型應滿足事項 外,各相關人員(設計師、施工監造人員等)所應具備之思維與知識。以鋼筋混凝土建築而言,為 延長其生命週期或使用年限,可提升其 "耐久性能 "以符合長壽命建築之要求。

建築物於使用過程中隨著時間增長,因水化熱,乾縮使得混凝土產生開裂再加上外在環境的影響,例如氯離子與二氧化碳,會逐漸腐蝕鋼筋,一旦鋼筋發生腐蝕,腐蝕生成物使得鋼筋體積膨脹, 膨脹後對混凝土所造成之壓力,將導致其周圍混凝土開始產生較大的裂縫,當裂縫蔓延至構件表面, 促使更多鋼筋腐蝕,腐蝕後之鋼筋因為截面積逐漸變小,導致混凝土結構物耐久性能下降。此時氯 離子會因裂縫寬度的不同與混凝土中孔隙的大小而產生擴散效應,導致混凝土保護層剝落,造成結 構性能大幅下降,影響其耐久性。因此,新建初期之表面被覆使用與使用階段之維護管理於永續工 程中成為非常重要之議題。圖1為鋼筋腐蝕,混凝土開裂相互影響之示意圖。

一般而言,建築構件之表層大多被覆粉飾材料或瓷磚等;因此,於鋼筋腐蝕機率評估時表面材 料之塩害抵抗也須考慮於擴散模擬之中。本研究參照中央氣象局之環境因素,再根據日本建築與土 木學會及 Fick 第二定理,計算鋼筋表面之氯鹽量,另外,採用蒙地卡羅模擬環境與材料性質之不 確定性因素,分析鋼筋腐蝕開始時間,圖2為蒙地卡羅之計算流程圖,至於牆體採不同被覆材料之 鋼筋程度則反應於鋼筋之重量減少率曲線,其詳細說明則如下所示。



圖 2 蒙地卡羅之流程圖

二、日本永續與耐久設計發展

日本於 2000 年開始推動「住宅品質確保制度」·而其國土交通省則適時建立相關住宅性能評估 基準與表示方法·主要包含 10 個領域(結構安全、火災安全、劣化減輕、維護管理與更新等)及 34 個項目。結構安全中共規定七個項目·除地震荷重外風力及積雪也考慮在內,以耐震等級 - 結 構崩塌防止為例,共分為三個等級如下所示:

等級1:於日本建築基準法所定之稀有地震(約數百年1次)作用下,建築物不能倒壞或崩塌。

等級 2:於日本建築基準法所定之稀有地震(約數百年 1 次)之 1.25 倍作用下,建築物不能倒壞

或崩塌。

等級 3: 於日本建築基準法所定之稀有地震(約數百年 1 次)之 1.50 倍作用下,建築物不能倒 壞

或崩塌。

劣化減輕對策中僅規定一項目,依劣化對策等級共分為:

等級 1:依日本建築基準法所規定之相關事項進行設計(使用年限約 25-30 年)。

等級 2:於設定之自然環境與維護管理條件下,符合 2世代建築標準(使用年限約 50-60 年)。 等級 3:於設定之自然環境與維護管理條件下,符合 3世代建築標準(使用年限約 75-90 年)。

除劣化對策等級 1 外,為使建築符合 2 世代或 3 世代建築標準,可依日本國土交通省建議之 基準,依 a. 水泥種類; b. 混凝土水灰比; c. 構件設計與配筋; d. 混凝土品質; e. 施工計畫; f. 其 它結構構件等項目進行設計。台灣之內政部建築研究所雖有推動「新建住宅性能評估制度」,但對 耐久或劣化相關規定或建議,則鮮少著墨; 換言之,台灣對於建築之使用年限部份並無清楚定義。

日本建築學會出版之「建築工事標準仕樣書·同解說 JASS 5 鋼筋混凝土工事」(2009)中亦有提 及一般劣化環境下(中性化為主)之混凝土耐久設計基準強度,如下表所示,並配合混凝土保護層、 混凝土內含氯鹽量容許值(0.3 kg/m³)及表面裂縫容許值(0.2 mm)等規定,以確保其耐久性能。若建 築物承受特殊劣化作用,如鹽害或凍融作用等,則除上述各項依所處環境條件另有規定外,亦可考 慮設置表面被覆材料以增進其耐久性能。

計畫供用期間等級	計畫供用期間(年)	耐久設計基準強度(N/mm ²)
短期供用等級	30	18
標準供用等級	65	24
長期供用等級	100	30
超長期供用等級	200	36

表1 日本建築學會 JASS 5 之耐久設計基準強度規定

*若為超長期供用等級時,當混凝土保護層增加 10 mm 時,耐久設計基準強度可設定為 30 N/mm²

關於非建築類之結構,日本土木學會混凝土標準示方書設計篇中關於一般環境下且其使用年 限為100年之結構物耐久設計(第2章),主要建議混凝土水灰比及保護層厚度,設計者若依其建 議值設計,可不須進行性能檢核。然而,若對於具塩害、中性化、凍害或化學侵蝕等劣化可能之結 構物,則提供耐久性簡易設計法(第3章)以符合示方書中所規定之性能檢核。以塩害為例,設計 者須依環境條件(混凝土表面氯塩量)及性能檢核基準(鋼筋腐蝕之臨界氯塩量;第8章),以決 定混凝土保護層厚度與氯離子擴散係數之組合;並於設定之保護層厚度下,依容許之裂縫寬度及氯 離子擴散係數以決定所須之混凝土水灰比。以中性化而言,設計者須依環境條件及性能檢核基準 (第8章),以決定混凝土保護層厚度及其水灰比。日本土木學會混凝土標準示方書設計篇主要規 定耐久性能檢核方法,除環境條件或作用之設定參數外,分為鋼筋腐蝕檢核及混凝土劣化檢核二大 項目。混凝土劣化之原因以凍害及化學侵蝕為主,不在本文介紹範圍。鋼筋腐蝕檢核又可分為:

1. 混凝土表面裂縫是否符合最小值規定;

2. 鋼筋表面氯離子濃度於使用期間內是否小於腐蝕發生之臨界值;

3. 中性化深度於使用期間內是否未達腐蝕發生之臨界深度。

三、考慮表面被覆材料影響之鹽害劣化分析模式

本文將鹽害造成鋼筋腐蝕之情形,分為四個階段,分別為:潛伏期(Initiation stage)、進展期 (Propagation stage)、加速期前期(Former period of acceleration stage)及加速期後期(Latter period of acceleration stage),而四個階段之曲線,稱之為鋼筋重量減少率曲線如圖3所示;首先針對潛伏期 之定義與評估方法做說明:



3.1 潛伏期(Initiation stage)

構件完工後至鋼筋開始腐蝕之階段定義為潛伏期,本研究採 Fick's 第二擴散定理進行氯離子 擴散分析,並利用數值方法求解不同表面被覆材料下之鋼筋腐蝕機率以定義其腐蝕開始時間。對鹽 害而言,本研究定義鋼筋開始腐蝕時間點為當最外層鋼筋表面之氯鹽量大於鋼筋腐蝕臨界氯鹽量, 依文獻(Noguchi, T.(2008))建議可設定為 1.0~1.2kg/m³ 且為均勻分佈;另外,混凝土擴散係數則可參 照文獻(JCI (2008))建議,依其水灰比進行估算,如式(1)所示。

$$\log D_2 = -6.77(w/c)^2 + 10.1(w/c) - 3.14 \tag{1}$$

式中,D₂:混凝土擴散係數(cm²/year)、w/c:水灰比。

然而 · Fick's 第二擴散定理會因混凝土表面被覆條件而使邊界條件(B.C.)有所不同 · 因而須採 用不同之求解方式 · 本研究共分為三類進行討論 · 如下所述:

3.1.1 Laplace 轉換法

當初期混凝土於內部任何位置之氯鹽量為 0(初始條件 C(x,0)=0) · 而混凝土表面氯鹽量均為定 值(邊界條件 C(0,t)=Co) · 於此條件下(圖 4)可將 Fick 第二定理透過 Laplace 轉換 · 而得其解析解如 式(2)所示 · 此求解方程式也最常被用於定常型氯離子擴散計算。



圖 4 I.C.為 C(x,0)=0、B.C.為 C(0,t)=Co 之示意圖

$$C(x,t) = C_0 \cdot \left\{ 1 - erf\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_2 \cdot t}}\right) \right\}$$
(2)

式中 · C(x,t): 在距離 x 時間 t 之氯鹽量(kgf/m³)、Co: 混凝土表面之氯鹽量(kgf/m³)、D₂: 混凝土 擴散係數(cm²/year)及 erf: 誤差函數。

3.1.2 格林函數解法

當混凝土存在表面被覆材料時,其混凝土表面氯鹽量會隨時間改變而非定值,因此無法使用式 (2)進行氯離子擴散模擬,因此本研究將設定二種狀態,且各含不同之初始條件(I.C.)與邊界條件 (B.C.),再以格林函數解求解 Fick's 第二定理以進行鋼筋腐蝕之預測。

第一種狀態之 I.C.為 C(x,0)=g(x), 其涵義為混凝土內部任何位置之初始氯鹽量, 而 B.C. 為 C(0,t)=0, 其涵義為混凝土表面氯鹽量含量為0且不隨時間變化(圖5); 此狀態下之格林函數解 則如式(3)。



圖 5 I.C.為 C(x,0)=g(x)、B.C.為 C(0,t)=0 之示意圖

$$C(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_2 t}} \int_0^\infty \left(\exp\left(-\frac{(x-y)^2}{4D_2 t}\right) - \exp\left(-\frac{(x+y)^2}{4D_2 t}\right) \right) g(y) dy$$
(3)

式中·t:時間(年)、 D_2 :混凝土擴散係數(cm²/year)、g(y):混凝土內部氯鹽量(kgf/m³)及 x:保護層 厚度(cm)。

 第二種狀態之 I.C.為 C(x,0)=0 · 其涵義為混凝土內部氯鹽量含量為 0 且不隨時間改變 · 而 B.C. 為 C(0,t)=h(t) · 其涵義為混凝土表面的氯鹽量為時間變數(圖 6); 此狀態之格林函數解如式(4) 。



式中·t :時間(年)、 D_2 :混凝土擴散係數(cm²/year)及 h(s):混凝土表面氯鹽量(kgf/m³)。

3.1.3 有限差分法

2.1.2 節所提之求解方法雖可考慮構件周圍環境條件之變異性,但無法反應表面被覆材料因環 境影響,如日曬、兩淋等,而造成其擴散性質改變,因此,為合理模擬其擴散係數隨時間變化之情 形,本節將採用有限差分法求解 Fick's 第二定理。

於有限差分解法中,為了解 Fick 第二定律,初始條件(I.C): C(x,0) = g(x)與邊界條件(B.C): C(0,t)

=h₁(t)、C(a,t)=h₂(t)必須決定。初始條件(I.C)為C(x,0)=g(x),其涵義為被覆材料表面任何位置之氯 鹽量。而第一種邊界條件(B.C)為C(0,t)=h₁(t),其涵義為被覆材料因環境因素劣化後,其擴散係數 改變,造成被覆材料中氯鹽量隨時間增加;第二種邊界條件(B.C)為C(a,t)=h₂(t),其涵義為被覆材料 底層之氯鹽量。其示意圖如圖7所示。此情況下之有限差分解如式(5)所示。其公式涵義為計算被 覆材料劣化後之氯鹽量。



圖 7 I.C.為 C(x,0)=g(x)、B.C.為 C(0,t)=h₁(t)、C(a,t)=h₂(t)之示意圖

$$C_{i,j+1} = \frac{B_{i,j} - C_{i-1,j+1} - C_{i+1,j+1}}{b_{i,j}}$$
(5)

式中 · $b_{i,j} = -2(1 + \frac{1}{rD_{l(i,j+1)}})$ 、 $B_{i,j} = -\frac{D_{l(i,j)}}{D_{l(i,j+1)}}(C_{i+1,j} - 2C_{i,j} + C_{i-1,j}) - \frac{2C_{i,j}}{rD_{l(i,j+1)}}$ 、 $r = \frac{k}{h^2}$ 、 k : 有

限差分法中,相鄰時間點之間距、 $h: 有限差分法中,相鄰位置點之間距、<math>D_1: 被覆材料之擴散$ 係數($cm^2/year$)

上述為氯鹽量於劣化被覆材料中擴散之說明,針對被覆材料因環境因素隨時間劣化影響其擴散 係數而導致氯鹽量增加之情形,本文將參考文獻(Noguchi, T.(2008)),如式(5)所示,考慮擴散係數之 變化如式(6)所式。

$$A = \exp(\frac{\log(\frac{D_2}{D_1})}{rt})$$
(6)

$$D_{1(h,k)} = D_1 \times A^{t \times k} \tag{7}$$

式中 \cdot D₁:被覆材料之擴散係數(cm²/year)、D₂:混凝土之擴散係數(cm²/year)及 rt:被覆材料有效 年限。

氯離子擴散分析在考慮表面被覆材料情形下,因其材料擴散係數影響混凝土表面氯鹽量之多寡,因此須考慮被覆材料性質,本文中分為(1)無被覆、(2)水泥板材被覆、(3)瓷磚被覆、(4)水泥砂漿被

覆、(5)樹脂材料被覆等,對於本文提到之被覆種類,唯有樹脂被覆需考慮劣化後造成之影響,其使 用年限本文假設為 10 年。至於其他被覆材料之種類劣化模式則參考文獻(AIJ (2004))、(Takeda, N(2003))如表 2 所示,找出對應之模厚、擴散係數及折減係數即可。

另外本文將 3.1.1 至 3.1.3 節之三種類型計算鋼筋表面氯鹽量之公式所對應之條件整理,如表 3 所示。

表 2 被覆材料特性								
被覆材料特性	水泥板材	樹脂被覆	水泥砂漿	瓷磚				
膜厚(cm)	5	0.05	1.5	_				
擴散係數 D ₁ (cm ² /year)	0.09	0.0037	1.65	_				
使用年限(year)	_	10	_	_				
折減係數	—	—	_	0.16				

表 3 鋼筋表面氯鹽量公式計算

Τ

	使	「用作	条件								
類 型	環境氯 量入侵 定值	ı 鹽 I	混凝土 內部無 氯鹽量		計算鋼筋表面氯鹽量公式						
					Laplace 轉換						
_	是		是		$C(x,t) = C_0 \cdot \left\{ 1 - erf\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_2 \cdot t}}\right) \right\}$						
	(市田45型)				不能考慮氯離子入侵隨時間變化						
_	使用畎點				不能考慮混凝土內部之氯鹽量						
					格林函數解						
_	否否否			C(x,t)	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_2 t}} \int_0^\infty \left(\exp\left(-\frac{(x-y)^2}{4D_2 t}\right) - \exp\left(-\frac{(x+y)^2}{4D_2 t}\right) \right) g(y) dy$						
—				$C(x,t) = \int_0^t \frac{x}{\sqrt{4\pi D_2(t-s)^3}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D_2(t-s)}\right) h(s) ds$							
	使用缺點			不能	不能考慮被覆材料劣化後 · 其擴散係數變化之程度 ·						
Ξ	否		否	計算混凝	有限差分法						

	土表面氯 鹽量	$C_{i,j+1} = \frac{B_{i,j} - C_{i-1,j+1} - C_{i+1,j+1}}{b_{i,j}}$
		$b_{i,j} = -2(1 + \frac{1}{rD_{1(i,j+1)}})$
		$B_{i,j} = -\frac{D_{1(i,j)}}{D_{1(i,j+1)}} (C_{i+1,j} - 2C_{i,j} + C_{i-1,j}) - \frac{2C_{i,j}}{rD_{1(i,j+1)}}$
		格林函數解
	計算鋼筋 表面氯鹽 量	$C(x,t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi D_2 t}} \int_0^\infty \left(\exp\left(-\frac{(x-y)^2}{4D_2 t}\right) - \exp\left(-\frac{(x+y)^2}{4D_2 t}\right) \right) g(y) dy$
		$C(x,t) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{4\pi D_2(t-s)^3}} \exp\left(-\frac{1}{4D_2(t-s)}\right) h(s) ds$
使用條件		被覆材料必須產生劣化之現象(如樹酯材料)

3.2 進展期(Propagation stage)

進展期為鋼筋開始腐蝕至混凝土表面裂縫產生階段。文獻(Kato and Uomoto (2005))指出,鋼 筋腐蝕程度之評估為混凝土構件表面之氯離子滲透到鋼筋表面後,當鋼筋表面氯鹽量達臨界值時, 開始計算鋼筋腐蝕後之直徑變化。本文定義鋼筋腐蝕臨界氯鹽量為 1.0~1.2 kg/m³之均勻分佈。另 外,可依文獻(JCI (2004))所提出之公式(8),將構件之水灰比 w/c (%)、鋼筋之保護層厚度 c (mm)、 鋼筋表面氯離子濃度 Cl (kg/m³)等參數代入即可得鋼筋之年腐蝕速率 V_{corr} (mg/cm²/year)。腐蝕對材 料劣化之影響通常是依據鋼筋腐蝕程度進行評估,且以重量減少率為最常使用之量化指標,如式(9) 所示。為了對應重量減少率之單位(%),將式(8) 鋼筋之腐蝕速率單位轉化為(%/year),如式(10)以 便日後計算之統一性。

$$V_{corr}(t) = \frac{78}{\sqrt{c}} \left(0.578 \times Cl(t) + 0.023(w/c) - 1.52 \right)$$
(8)

$$\Delta W_{corr} / W = \frac{4V_{corr}}{\gamma \times d_{bi}} \tag{9}$$

$$V_{corr}(t) = V_{ccr}\left[\left(\frac{1}{c}\right)^{0.5} \times \left(0.578 \times Cl(t) + 0.023(w/c) - 1.52\right)\right]$$
(10)

式中,γ:鋼筋密度 (mg/cm³;約為7850)及 d_{bi}:原始鋼筋直徑(mm)。

3.3 加速度前期 (Former period of acceleration stage)

混凝土表面裂縫產生至混凝土表面剝離或剝落發生階段,當鋼筋腐蝕所造成之混凝土表面裂 縫超越某一臨界寬度時依文獻(AIJ (1997))定義為 0.5~1.0mm,剝離或剝落現象即會發生,本研究則 依文獻(Tottori and Miyagawa (2004))建議,假設進展期與加速期前期之鋼筋腐蝕速率相同,未來若 有更為可靠之實驗或理論成果則可以取代之。

3.4 加速度後期 (Latter period of acceleration stage)

混凝土表面剝離發生之後稱為加速期後期,此階段之鋼筋已無混凝土保護,其腐蝕速度可近 似於裸鋼之腐蝕速度,本研究根據港灣研究中心試驗線測站所記錄之裸鋼腐蝕速率資料,迴歸出海 岸距離與腐蝕速率之關係,其數學式則依照文獻(牛荻濤(2003))建議之腐蝕速率公式,再利用中央 氣象局各地區溫度與濕度迴歸台灣沿岸地區裸鋼腐蝕速度之公式,如表4所示。

裸鋼腐蝕後,直徑變化的程度則與裸鋼腐蝕速度息息相關,本文定義混凝土表面開始剝離時 間為 t_{crack},因此從混凝土表面開始剝離後,每年鋼筋直徑變化量取決於上一年鋼筋直徑變化量與每 年鋼筋腐蝕速度,並將其關係反應於式(11)。另一方面,裸鋼腐蝕後每年之重量減少率的關係則建 立於混凝土開裂臨界腐蝕重量減少率和每年裸鋼直徑減少率之間,其關係反應於式(12)。

$$d_b(t_{crack}) = d_{bi}(t_{crack}) - V_{crack}(t - t_{crack})$$
(11)

$$\Delta W(t) = \int_0^{t_{corr}} V_{corr}(t) dt + \sum_{t_{crack}}^t \frac{d_{bi}^2 - d_b(t)^2}{d_{bi}^2} \times 100$$
(12)

式中·d_b:鋼筋腐蝕後之直徑(mm)、d_{bi}:原始鋼筋直徑(mm)、V_{corr}:鋼筋年腐蝕速率(%/year)及 V_{crack}:裸鋼腐蝕速率(mm/year)。

地區分類	回歸試驗線	混凝土開裂後腐蝕速率 (mm/year)						
北部	桃園、蘇澳	$V_{crack} = e^{-0.0809T} \times (RH - 0.45)^{0.2288} \times d^{-0.0374}$						
中部	台中、台塑六輕	$V_{crack} = e^{-0.0513T} \times (RH - 0.45)^{0.938} \times d^{-0.0522}$						
南部	高雄、核三廠	$V_{crack} = e^{-0.0169T} \times (RH - 0.45)^{1.765} \times d^{-0.0601}$						
東部	花蓮	$V_{crack} = e^{-0.0934T} \times (RH - 0.45)^{0.28} \times d^{-0.0875}$						

表4 裸鋼腐蝕速率回歸公式

T:平均溫度(℃),RH:平均相對濕度(%),d:離海岸線距離(km)。

四、表面被覆材料性能評估

4.1 表面被覆材料性能評估

分析時被覆材料之特性如表 2 所示,透過蒙地卡羅模擬環境氯鹽量、混凝土性質、施工品質及 鋼筋腐蝕臨界氯鹽量等之不確定性,其隨機變數之統計特性如表 5 所示,其中,當鋼筋腐蝕機率大 於 20%定義其腐蝕開始時間(ASTM C876(1991))。牆體於澆置時必須考慮其施工性,因此本研究假 設水灰比為 40%~60%。而被覆材料表面氯鹽量之計算則參考文獻(邱建國及涂豐鈞(2012))之飛來鹽 預測公式,如表 6 所示,至於飛來氯鹽量預測公式雖可獲知結構物附近環境之氯鹽沉積量,但氯鹽 量未必完全殘留於被覆材料表面,須利用被覆材料表面附著氯鹽量公式,計算出被覆材料表面附著 氯鹽量,以進行後續氯離子擴散分析,如式(13)所示;至於鋼筋腐蝕速率之修正係數、混凝土開裂 臨界腐蝕重量減少率、混凝土開裂後腐蝕速率之修正係數之平均值均參考(JCI(2008)),如表 7 所示, 分析之流程可參考圖 8(以樹脂被覆為例),其中,離海岸線距離(d),則參考文獻(AIJ (2004))之建議, 採用 0.05km、0.25km 及 1km,牆之保護層及鋼筋號數本文採用 2 公分及 6 號鋼筋。另外,本文採 用交通部運輸研究所之測站位置,分別對蘇澳、高雄及台中建立鋼筋腐蝕重量減少率之曲線,結果 如圖 9(a)至圖 9(d),其中若結構物位於蘇澳、高雄地區且離海岸線 0.25km 以上時,飛來鹽對結構物之影響不大,因此,本文不將其結果列出,至於交通部 運輸研究所其他測站位置及鹽害預測公式選用與修正之詳細說明,可參考文獻(邱建國及涂豐鈞 (2012))。

圖 8 之模擬流程圖是以樹脂被覆材料為依據,若想採用其他被覆材料,可將流程圖中被覆材 料劣化後之氯鹽量計算替換即可,其中,關於分析樹脂被覆材料之鋼筋重量減少率曲線流程圖之輸 入、輸出訊息如表 8 所示,符號之說明如表 9 所示,另外,當不同被覆材料之鋼筋重量減少率曲線 於模擬時不產生交錯時之次數,本研究定義為模擬次數,一般來說,模擬次數位於 4000~5000 次。

$$C_e = 13.137 \times C_{air}^{0.6394} \tag{13}$$

不確定性因素	機家公佑	亚均	變異係數	
个唯足口凶杀	יווין נעייי-גאוי		C.O.V	
		هر چک		
		又廣	訞	
被覆材料表面氯鹽量	對數常態	邱建國及涂	0.1	
		飛來鹽預		
保護層厚度 (cm)	對數常態	2.0)	0.2
		w/c (%)	w/c (%) D ₂	
汨海土愤动修 动 内 (…2)	半要诉你	40	0.66	0.2
ル炭上旗取除数D2 (cm ⁻ /year)	到数吊您	50	1.65	0.5
		60	3.04	
混凝土內部氯鹽量 (kg/m ³)	對數常態	0.1		0.1
鋼筋腐蝕之臨界氯鹽量 (kg/m ³)	均勻		1.0~1.2	

表 5 隨機變數之統計特性

表 6 飛來鹽預測公式

測站	飛來鹽預測公式(mdd)	風速平均值 u (m/s)
蘇澳	$C_{air} = 0.0526 \times u^{-4.0179} \times d^{-1.2749}$	2.06
臺中	$C_{air} = 0.1588 \times u^{-5.5253} \times d^{-0.9235}$	1.61
高雄	$C_{air} = 0.0593 \times u^{-2.916} \times d^{-1.0454}$	2.18

表 7 鋼筋腐蝕速率及重量減少率之特性

變數	平均值
鋼筋腐蝕速率之修正係數(V _{ccr})	1
混凝土開裂臨界腐蝕重量減少率(Vcr)	3.28
混凝土開裂後腐蝕速率之修正係數(V _{crack})	1.130

種類	輸入訊息	單位
甘士初亡	評估年限	year
基本設定	模擬次數	_
	溫度	°C
	濕度	—
環境條件	離海岸距離	km
	平均風速	m/s
	飛來鹽預測	mdd
	被覆材料表面附著氯鹽公式	kg/m ³
	被覆材料厚度	cm
波 薯 材料條件	被覆材料之擴散係數	cm ² /year
恢復初科际什	被覆材料之使用年限	year
	有限差分法之時間間距	year
	有限差分法之位置間距	cm
	混凝土保護層厚度	cm
混凝土條件	混凝土之水灰比	_
	混凝土之擴散係數	cm ² /year
	鋼筋直徑	mm
	鋼筋腐蝕之臨界氯鹽量	kg/m ³
鋼箆修件	鋼筋腐蝕速率之修正係數	_
	混凝土開裂臨界腐蝕重量減少率	%
	混凝土開裂後腐蝕速率之修正係數	_
種類	輸出訊息	單位
被覆材料	被覆材料之擴散係數變化	cm ² /year
混凝土	混凝土表面氯鹽量	kg/m ³
	鋼筋表面氯鹽量	kg/m ³
	鋼筋開始腐蝕時間	year
	混凝土開裂時間	Year
鋼筋	鋼筋腐蝕後之腐蝕速率	%/year
	混凝土開裂後之腐蝕速率	%/year
	鋼筋直徑之變化量	mm
	鋼筋重量減少率	%

表 8 流程圖之輸入、輸出訊息

符號	符號說明
D1	被覆材料之擴散係數
D_2	混凝土之擴散係數
rt	被覆材料使用年限
х	混凝土保護層厚度
Cl	氯鹽量
w/c	混凝土水灰比
g(y)	混凝土內部氯鹽量
h(s)	混凝土表面氯鹽量
$\mathbf{V}_{\mathrm{ccr}}$	鋼筋腐蝕速率之修正係數
\mathbf{V}_{cr}	混凝土開裂臨界腐蝕重量減少率
$\mathbf{V}_{\mathrm{crack}}$	混凝土開裂後腐蝕速率之修正係數
RH	濕度
d	離海岸距離
d_b	鋼筋腐蝕後之直徑
d_{bi}	原始鋼筋直徑
t _{crack}	混凝土開裂時間
$\Delta W(t)$	每年之重量減少率

表 8 流程圖之符號說明



圖 8 鋼筋重量減少率曲線模擬流程圖



圖 9(d) 台中-不同被覆材料情況下之鋼筋重量減少率曲線

4.2 鋼筋腐蝕之重量減少率曲線說明

牆體若無被覆材料,其鋼筋開始腐蝕時間為所有被覆材料中最早且鋼筋重量減少率亦為所有 被覆材料中最高者,此現象是無庸置疑的,因此,若想比較牆體於無被覆材料狀態下與採用其他被 覆材料狀態下之鋼筋開始腐蝕時間及混凝土開裂時間之差異性,可參考表 10 至表 12,其中,若鋼 筋腐蝕開始時間及混凝土開裂時間大於評估年限 100 年,本文皆以 100 年表示之,造成此現象的原 因來自於被覆材料表面之氯鹽量,因為本文假設鋼筋腐蝕之最基本條件來自於被覆材料表面氯鹽 量,被覆材料表面氯鹽量則與飛來鹽量有關,而飛來鹽量的多寡,則與離海岸距離、中央氣象局之 測站位子、風向、風速、及建築物所處環境周圍之遮蔽物有關,而上述之因子將導致隨著離海岸距 離越遠,飛來鹽量越少,造成三個地區於距海岸距離 1 公里處,其被覆材料表面氯鹽量皆小於 1(kg/m³),因此,當氯離子擴散至鋼筋表面時,此時氯鹽量之濃度皆無法對鋼筋產生腐蝕之效應。

另外,圖 9(a)至 9(d)中,每條曲線之轉折處,即為為混凝土之開裂時間(加速度後期),圖中之 y 軸(鋼筋重量減少率)之最大值僅考慮至 30%之原因是為了滿足鋼筋產生腐蝕導致其重量減少率之 上限值,以實際狀況來說,若鋼筋重量減少率高達 30%,鋼筋腐蝕之機制已經相當嚴重,若再高於 此值,其增量則微乎其微。

蘇澳地區		被覆材料	無	無被覆材料			討脂材制	라	水泥砂漿材料		
	被覆材		w/c			w/c			w/c		
離海岸 距離 (km)	料表面 氯鹽量 (kg/m3)	評估內容	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
0.05	2 2 6 9	鋼筋腐蝕開始 時間(年)	3	2	2	4	3	3	6	4	4
0.05 3.36	3.308	508 混凝土開裂 時間(年)	27	17	13	33	20	16	37	23	18
	鋼筋腐蝕開始 時間(年)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
0.25	0.938	混凝土開裂 時間(年)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	0.212	鋼筋腐蝕開始 時間(年)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	0.312	混凝土開裂 時間(年)	100	100	100	100	100	100	100	100	100

表 10 蘇澳地區,不同被覆材料情況下之鋼筋腐蝕開始時間及混凝土開裂時間之比較表

高雄地區		被覆材料	無	無被覆材料			樹脂材料			水泥砂漿材料		
	被覆材			w/c			w/c			w/c		
離海岸 距離 (km)	料表面 氯鹽量 (kg/m3)	評估內容	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	
		鋼筋腐蝕開始 時間(年)	3	2	2	4	3	3	6	4	4	
0.05	3.516	混凝土開裂 時間(年)	25	16	13	31	19	15	34	22	18	
0.25	1 100	鋼筋腐蝕開始 時間(年)	99	43	31	100	100	80	100	90	81	
0.23	1.190	混凝土開裂 時間(年)	100	100	61	100	100	100	100	100	100	
1	0.4747	鋼筋腐蝕開始 時間(年)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

表 11 高雄地區,不同被覆材料情況下之鋼筋腐蝕開始時間及混凝土開裂時間之比較表

表 12 台中地區,不同被覆材料情況下之鋼筋腐蝕開始時間及混凝土 開裂時間之比較表

								- 1713-24			•
台中地區		被覆材料	無被覆材料			樹脂材料			水泥砂漿材料		
離海岸 距離 (km)	被覆材 料表面 氯鹽量 (kg/m3)	評估內容	w/c			w/c			w/c		
			0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6
0.05	4.4164	鋼筋腐蝕開始 時間(年)	3	2	2	4	3	2	5	4	3
		混凝土開裂 時間(年)	20	13	10	24	16	12	27	18	15
0.25	1.700	鋼筋腐蝕開始 時間(年)	11	5	4	22	9	7	28	13	11
		混凝土開裂 時間(年)	90	40	26	100	52	33	100	55	37
1	0.753	鋼筋腐蝕開始 時間(年)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
1	0.753	混凝土開裂 時間(年)	100	100	100	100	100	100	100	100	100

五、結論

被覆材料性質, 攸關著氯離子擴散速度的快慢,因此牆體表面若採樹脂被覆時,因大氣條件 使其產生劣化,導致鋼筋開始腐蝕時間早於未考慮劣化者,其差異性則如表 13 至表 15 所示,因 此,勢必考量樹脂材料劣化後對鋼筋開始腐蝕時間之影響。



表 13 水灰比 40%, 樹脂劣化與未劣化之分析結果比較表



表 14 水灰比 50%, 樹脂劣化與未劣化之分析結果比較表

表 15 水灰比 40%, 樹脂劣化與未劣化之分析結果比較表



鹽害對牆體之影響,部分參數(如膜厚、擴散係數、折減係數、被覆材料劣化後擴散係數之變 化量、混凝土擴散係數計算及裸鋼之腐蝕速率),目前皆參考日本建築學會與日本土木學會之建 議,未來可針對這些參數作適當之調整,以符合更真實的模擬狀態。

誌謝

作者為 2012 年日本交流協會招聘學者,時間為 2012 年 6 月 28 日至同年 8 月 26 日,感謝日本交流協會贊助作者於日本東京大學進行本篇文章內容研究之所須經費。此外,亦感謝東京大學野口 貴文教授給於本人之研究意見與協助。

參考文獻

- Chiu, C. K., Noguchi, T. and Kanematsu, M. (2008), "Optimal Maintenance Plan for RC Members by Minimizing Life-Cycle Cost Including Deterioration Risk Due to Carbonation", Journal of Advanced Concrete Technology, 6(3), 469-480.
- Kim, H. R., Noguchi, T. and Nagai, H. (2008), "Evaluation mechanical performance of corroded reinforcement considering the surface shape", Journal of structural and construction engineering 73(624), 181-188.
- ASTM C876 (1991) Standard test method for Half –Cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete, American Society for Testing and Material.
- AIJ (2004). Recommendations for Durability Design and Construction Practice of Reinforced Concrete, Tokyo: Architectural Institute of Japan.
- AIJ (1997). Recommendations for Practice of Survey, Diagnosis and Repair for Deterioration of Reinforced Concrete Structures, Tokyo: Architectural Institute of Japan.
- Tottori, S. and Miyagawa, T. (2004), "Deterioration prediction of concrete structures concerning rebar corrosion due to carbonation", Proceedings of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 767, 35-46.
- 日本土木學會(2008)〈第三篇 耐久信賴性評價〉《コソクリート構造物の信賴性設計法に関する 研究小委員会(336委員会)成果報告書》:51-55,日本土木學會,日本。
- 牛荻濤(2003)。《混凝土結構耐久性與壽命預測》,科學出版,中國。
- 邱建國,涂豐鈞(2012)(考慮劣化與震損影響之 RC 校舍耐震能力評估研究)《國立台灣科技大學 營建工程所碩士論文》。
- 印建國,莊育泰(2012)(劣化 RC 牆生命週期耐震能力研究)《國立台灣科技大學營建工程所碩士 論文》。