

# 台灣劣化混凝土橋梁 鋼筋腐蝕危害地圖之建立與應用

宋裕祺／國立台北科技大學土木工程系教授暨國家地震工程研究中心組長

邱建國／國立台灣科技大學營建工程系副教授

曾惠斌／國立台灣大學土木工程系教授

林曜滄／台灣世曦工程顧問股份有限公司第一結構部協理

許家銓／國家地震工程研究中心 助理研究員

陳尚德／國立台北科技大學土木與防災研究所碩士

穆大邦／國立台北科技大學土木與防災研究所碩士生

## 摘要

中性化與鹽害均會造成鋼筋混凝土橋梁之鋼筋腐蝕，隨著劣化持續加據，鋼筋有效斷面積亦隨之減少、鋼筋與混凝土之間握裹力逐漸變差，導致結構物承載能力衰退和使用機能不足，進而影響橋梁耐久性。

本文蒐集國內鋼筋混凝土橋梁之檢測報告及台灣大氣腐蝕劣化因子調查資料，利用非線性回歸方法分析，建立以地理網格為基準之台灣鋼筋混凝土橋梁劣化評估模式，預測中性化深度、鹽害深度與鋼筋銹蝕速率等時變特性，並利用 Google Fusion Table 將影響鋼筋混凝土橋梁的劣化參數及鋼筋斷面積損失率，製成鋼筋腐蝕危害地圖，得以展現鋼筋腐蝕潛勢區域之分布，可供為橋梁耐久性評估與設計之用。

## 前言

本文旨在探討混凝土劣化模式對鋼筋混凝土橋梁之衰退特性，以混凝土中性化及鹽害為研究主軸。以台灣地區為研究項目，蒐集影響橋梁劣化之相關參數，建立以網格為基準之橋梁劣化模式，並將劣化橋梁衰退資訊以危害地圖做視覺化之呈現。混凝土中性化預測模式加入二氧化碳因子作為修正；鹽害模式則

蒐集台灣現有之飛來鹽實測值，藉由非線性差值進行修正。

依據不同劣化模式導致之鋼筋腐蝕資訊建立鋼筋腐蝕危害地圖。根據地圖，可輕易瞭解災害趨勢之發展，針對嚴重地帶進行較詳細的探討。

## 危害地圖網格化及環境參數之分析與調查

本文建立依網格為基礎之鋼筋混凝土橋梁鋼筋腐蝕劣化模式，將台灣進行國土網格化，其網格大小為 1 Km × 1 Km，隨著地理位置不同，其劣化嚴重性則有所不同。為瞭解各地區環境參數對鋼筋腐蝕模式之影響，蒐集了包括年平均溫度、年平均濕度及台灣飛來鹽量分布等環境資訊，計算台灣各地之鋼筋混凝土橋梁鋼筋腐蝕情形，並且透過 Google 所提供之 Google Fusion Table 服務建立所對應之劣化環境參數危害圖。

在年平均溫度方面，本研究採用邱清安與林博雄所建議之各月平均氣溫之迴歸式（如表 1 所示），將計算所求得之各月平均氣溫加總後取平均值即可得年平均溫度值（年平均溫度之計算如式 1 及圖 1 所示）。

表 1 各月平均氣溫 (T1 ~ T12) 之迴歸式

月平均氣溫	迴歸式	月平均氣溫	迴歸式
T1	57.398 - 0.00461E + 0.00001038X - 0.0000163Y	T7	28.622 - 0.00568E
T2	64.407 - 0.00444E + 0.000008993X - 0.0000186Y	T8	28.288 - 0.00565E
T3	66.225 - 0.00436E + 0.00000571X - 0.0000181Y	T9	32.747 - 0.00535E - 0.00000767X - 0.0000015Y
T4	56.226 - 0.00472E - 0.0000044X - 0.0000122Y	T10	44.389 - 0.00498E - 0.00000567X - 0.00000694Y
T5	46.342 - 0.00511E - 0.00000863X - 0.00000705Y	T11	49.22 - 0.00476E - 0.0000015X - 0.0000103Y
T6	34.397 - 0.00541E - 0.0000047X - 0.00000215Y	T12	52.256 - 0.00469E + 0.000005803X - 0.0000133Y

註：E 為海拔高度。X 與 Y 為 TM 二度分帶座標。

$$Temp = Average \left( \sum_{i=1}^{12} T_i \right) \quad (1)$$



圖 1 網格化年平均溫度

而年平均濕度值 (RH) 係依據中央氣象局所公佈之測站年平均濕度值 (如表 2 所示), 按測站與橋梁之地理座標進行內插而得。全台灣年平均濕度之分佈如圖 2 所示。

表 2 各測站統計之相對濕度值 (單位: %) (節錄)

地名	平均	統計期間
大武	75.6	1971-2000
臺東	75.6	1971-2000
恆春	76.7	1971-2000
臺中	77.1	1971-2000
臺北	77.7	1971-2000
高雄	77.7	1971-2000
梧棲	77.9	1977-2000
新竹	78.3	1992-2000
臺南	78.4	1971-2000
花蓮	78.8	1971-2000

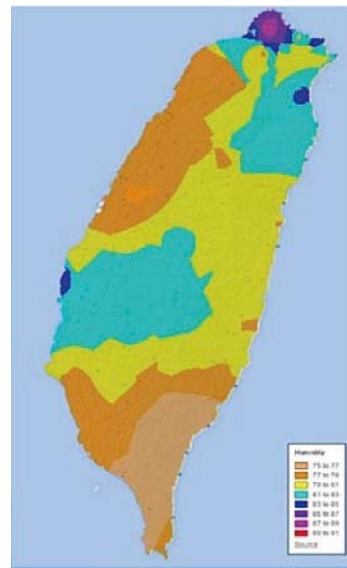


圖 2 網格化年平均濕度

本研究由 2013 年台灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報 (2013) 中擷取各試驗點所量測之飛來鹽量 (mg/dm<sup>2</sup>/day), 按試驗點與橋梁之地理座標進行內差而得。台灣飛來鹽量之分布如圖 3 所示。

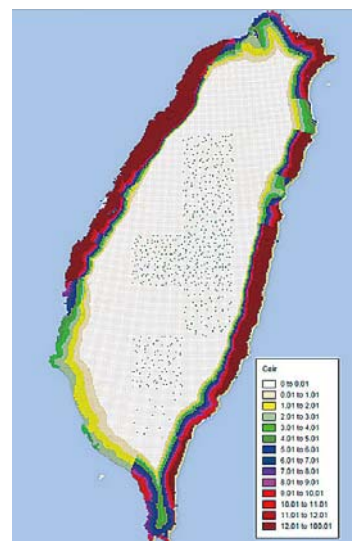


圖 3 網格化飛來鹽之分布圖

## 橋梁鹽害分析模式之建立

混凝土之鹽害深度與混凝土表面氯離子濃度及氯離子擴散係數有關，本研究以 Weyers (1998) 建議之公式計算混凝土鹽害深度：

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right] \quad (2)$$

式中， $C(x, t)$  為時間  $t$  時與混凝土表面距離  $x$  處之氯離子濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $C_i$  為混凝土中氯離子起始濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $C_s$  為混凝土表面氯離子濃度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $D_c$  為氯離子擴散係數，本研究參考日本土木學會 (2008) 建議之一般混凝土氯離子擴散係數 (如式 3 所示)； $\operatorname{erf}$  為誤差函數。

$$\log D_c = -6.77(w/c)^2 + 10.1(w/c) - 3.14 \quad (3)$$

式中， $D_c$  為氯離子擴散係數， $w/c$  為水灰比。

本研究根據蕭輔沛等人 (2012) 建立適用於台灣地區之本土化公式，由飛來鹽預測公式 (如表 3 所示) 計算橋梁附近之氯鹽量，再計算混凝土表面附著氯鹽量 (如式 4 所示)。

$$C_s = 13.137 \times C_{air}^{0.6394} \quad (4)$$

式中， $C_s$  為混凝土表面附著氯鹽量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )， $C_{air}$  為飛來鹽量。

本文亦參考由交通部運研所出版 2013 年台灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報 (2013) 中所測得 60 筆試驗點之氯鹽沉積速率 ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ )，並依據所在位置進行內插求值及進行飛來鹽修正。

鹽害混凝土中鋼筋銹蝕之過程依照不同時期，將

有不同的腐蝕速度，蕭輔沛等人 (2012) 將鋼筋銹蝕分為潛伏期、進展期、加速期前期及加速期後期等四大階段 (如圖 4 所示)。

橋梁構件建設完成後至鋼筋開始腐蝕這段期間定義為潛伏期；依照日本 JCI (2004) 及 AIJ (2004) 之定義，當氯離子由混凝土表面擴散至鋼筋表面並超過臨界腐蝕氯離子濃度 (本文在此假設為  $0.6 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) 時，鋼筋開始腐蝕，混凝土構件將進入進展期。此時之腐蝕速率依照邱建國 (2012) 之研究成果，可由式 (9) 表示。

當混凝土表面開始產生裂縫至混凝土保護層剝落之期間則定義為加速期前期，依照蕭輔沛等人之建議，此時鋼筋銹蝕速率與進展期相同。而當鋼筋之重量減少率超過混凝土開裂臨界腐蝕重量減少率時，則視為混凝土保護層剝落，此時進入加速期後期，本研究定義混凝土開裂臨界腐蝕重量減少率  $V_{cr} = 3.28\%$ 。本時期外層鋼筋已無混凝土保護，鋼筋銹蝕速率將近似於裸鋼之銹蝕速率，加速期後期鋼筋腐蝕速率如式 (6) 所示 (蕭輔沛、邱建國、涂豐鈞，2012)。

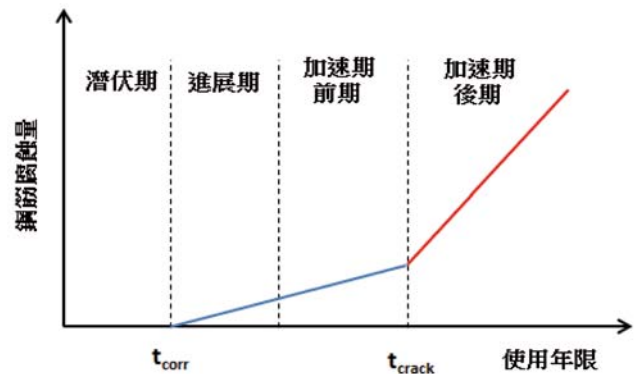


圖 4 鹽害混凝土中鋼筋之銹蝕速率示意圖 (蕭輔沛、邱建國、涂豐鈞，2012)

表 3 飛來鹽預測公式 (蕭輔沛、邱建國、涂豐鈞，2012)

測站	飛來鹽預測公式	測站	飛來鹽預測公式
桃園	$C_{air} = 0.4606 \times u^{-3.9654} \times d^{-1.9076}$	高雄	$C_{air} = 0.0539 \times u^{-2.916} \times d^{-1.0454}$
蘇澳	$C_{air} = 0.0526 \times u^{-4.0179} \times d^{-1.2749}$	核三廠	$C_{air} = 0.1111 \times u^{-2.3821} \times d^{-1.1637}$
台中	$C_{air} = 0.1588 \times u^{-5.5253} \times d^{-0.9235}$	花蓮	$C_{air} = 0.0992 \times u^{-2.5298} \times d^{-1.3061}$
台塑六輕	$C_{air} = 0.3089 \times u^{-3.8131} \times d^{-1.3932}$		

$$V_{corr}(t) = \left(\frac{1}{c}\right)^{0.5} \times (0.578 \times Cl(t) + 0.023(w/c) - 1.52) \quad (5)$$

式中， $V_{corr}(t)$  為平均鋼筋年重量減少率 (%/year)； $Cl$  為鋼筋表面氯鹽量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )； $c$  為鋼筋保護層厚度 (mm)； $w/c$  為水灰比。

$$\begin{aligned} V_{crack}(\text{北部}) &= e^{-0.0809T} \times (RH - 0.45)^{0.2288} \times d^{-0.0374} \\ V_{crack}(\text{中部}) &= e^{-0.0513T} \times (RH - 0.45)^{0.938} \times d^{-0.0522} \\ V_{crack}(\text{南部}) &= e^{-0.0169T} \times (RH - 0.45)^{1.765} \times d^{-0.0601} \\ V_{crack}(\text{東部}) &= e^{-0.0934T} \times (RH - 0.45)^{0.28} \times d^{-0.0875} \end{aligned} \quad (6)$$

### 橋梁中性化分析模式之建立

根據王傳輝 (2004)、蘇進國 (2005) 及陳尚德 (2015) 之研究成果，混凝土中性化深度可表示為中性化速度係數  $K$  與時間  $t$  (year) 之關係如下式：

$$D_c = K\sqrt{t} \quad (7)$$

經由非線性迴歸，建立本土化以網格為基準之中性化速度係數預測模型，如下式：

$$\begin{aligned} &K(f'_c, Temp, RH, \alpha, \beta) \\ &= \left( 0.4316 \times \frac{280}{f'_c} + 2.8 \times \frac{Temp}{50} - 12.195 \times RH(1 - RH) \right. \\ &\quad \left. + 0.184 \times \frac{\alpha}{4} + 2.855 \times \frac{\beta}{3} + 2.763 \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中， $f'_c$  為混凝土抗壓強度 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )； $Temp$  為年平均溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )； $RH$  為年平均濕度 (%)； $\alpha$  為石化工業區距離之等級； $\beta$  為人口密度之等級。

混凝土中性化過程可區分為潛伏期、進展期、加速期及劣化期等四大階段 (如圖 5 所示)。根據蘇進國 (2005) 先前之研究成果，進展期之鋼筋銹蝕速率預測模式如下：

$$R_{corr}^{prop}(t) = 1.022 \times 10^{-3} \exp^{0.04 \times Temp} \left(\frac{RH - 45}{100}\right)^{\frac{2}{3}} c^{-1.36} t^{1.83} \quad (9)$$

其中， $t$  為橋梁之使用年期 (year)、 $RH$  為年平均濕度 (%)、 $c$  為保護層厚度 (mm)、 $Temp$  為年平均溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )。加速期之銹蝕速率，參照牛荻濤 (2003) 結合電化學原理與實際工程銹蝕速度分析結果，加速期之鋼筋銹蝕速率  $R_{corr}^{acee}(t)$  可取為進展期者之 2.5 倍，即  $R_{corr}^{acee}(t) = 2.5R_{corr}^{prop}(t)$ ；劣化期之速率則假設為與加速期相同， $R_{corr}^{dete}(t) = R_{corr}^{acee}(t)$ 。依據 2.3.1 節所得進展期之鋼筋銹蝕速率  $R_{corr}^{prop}(t)$  與加速期之鋼筋銹蝕速率  $R_{corr}^{acee}(t)$ ，可分別求得進展期與加速期之鋼筋銹蝕深度，如下所示：

$$\delta_{prop}(t) = R_{corr}^{prop}(t) \times (t - t_i) \quad (10)$$

$$\delta_{acee}(t) = \delta_{prop}(t_{cr}) + R_{corr}^{acee}(t) \times (t - t_{cr}) \quad (11)$$

進展期與加速期之分界點，定義為混凝土因鋼筋銹蝕引致體積膨脹造成混凝土保護層發生開裂之時間  $t_{cr}$ 。根據工研院材料銹蝕電流密度評估表以及按 Faraday 定律計算之鋼筋瞬時銹蝕速度，可估算出混凝土保護層開裂時之鋼筋銹蝕速率約為  $R_{corr}^{crack} = 5.805 \times 10^{-3} (\text{mm}/\text{year})$ 。因此，將  $R_{corr}^{prop}(t)$  與  $R_{corr}^{crack}$  聯立求解即可獲致  $t_{cr}$ 。

而根據一般大氣環境鋼筋開始銹蝕的條件，可以得到鋼筋開始銹蝕時間為

$$t_i = \left(\frac{c - D_0}{K_{measured}}\right)^2 \quad (12)$$

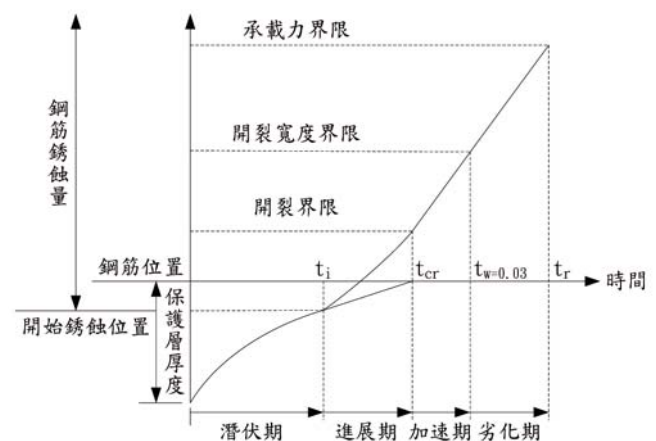


圖 5 混凝土中性化過程示意圖

式中， $D_0$  為中性化殘量 (mm)，可表示如下：

$$D_0 = 5.9063(-RH^2 + 1.5RH - 0.45)(c - 5)(\ln f'_c - 2.3) \quad (13)$$

式中， $RH$  為環境年平均濕度 (%)、 $c$  為混凝土保護層厚度 (mm)、當  $c > 50$  mm 時，取  $c = 50$  mm； $f'_c$  為混凝土抗壓強度 (MPa)。

## 劣化橋梁之強度衰減特性之分析

### 鹽害橋梁強度衰減特性

鋼筋銹蝕不僅造成鋼筋斷面積損失，還會直接影響結構物的力學性能。以混凝土鹽害導致鋼筋發生均勻銹蝕而言，鋼筋失重率與鋼筋的斷面積損失率近乎等同，而且鋼筋極限拉應力的降低量與鋼筋的斷面積損失率大約呈現正比關係。因此，本文採用牛荻濤 (2003) 之建議公式如下：

$$\eta(t) = \left[ 1 - \frac{A_{s, \text{left}}(t)}{A_{s, \text{total}}} \right] \times 100\% \quad (14)$$

$$f_{y, \text{corr}}(t) = [1 - 1.077\eta(t)]f_y, \quad t \geq t_i \quad (15)$$

式中， $f_{y, \text{corr}}(t)$  為銹蝕鋼筋之降伏強度 (MPa 或 kgf/cm<sup>2</sup>)， $f_y$  為鋼筋之初始降伏強度 (MPa 或 kgf/cm<sup>2</sup>)， $\eta(t)$  為銹蝕鋼筋之斷面積損失率 (%)； $A_{s, \text{total}}(t)$  與  $A_{s, \text{left}}(t)$  分別為鋼筋銹蝕前、後之斷面積 (mm<sup>2</sup>)， $t_i$  為鋼筋開始銹蝕之時間 (year)。

### 中性化橋梁強度衰減特性

混凝土中性化後，混凝土有呈現更為緻密的現象，因此有些學者認為混凝土抗壓強度會有增加的趨勢，然有些學者則認為中性化會使混凝土材質變差，抗壓強度恐因而降減。本研究參考王傳輝 (2004) 之研究成果，假設中性化混凝土之抗壓強度與未中性化前相同，不考量其增減效應。而中性化混凝土之有效斷面計算方式如下：

$$\begin{cases} B_e(t) = B - 2 \times D_c(t) & , \quad t \geq t_{cr} \text{ and } D_c(t) \geq c \\ H_e(t) = H - 2 \times D_c(t) & , \quad t \geq t_{cr} \text{ and } D_c(t) \geq c \end{cases} \quad (16)$$

式中， $B_e(t)$  為混凝土斷面有效寬度 (mm)， $H_e(t)$  為混凝土斷面有效深度 (mm)， $B$  與  $H$  分別為混凝土未劣化前之斷面寬度 (mm) 與深度 (mm)， $D_c(t)$  為中性化深度 (mm)， $C$  為混凝土保護層厚度 (mm)。中性化混凝土有效斷面之示意圖如圖 6 所示。

中性化導致之鋼筋銹蝕則採用與鹽害橋梁相同之計算方式。

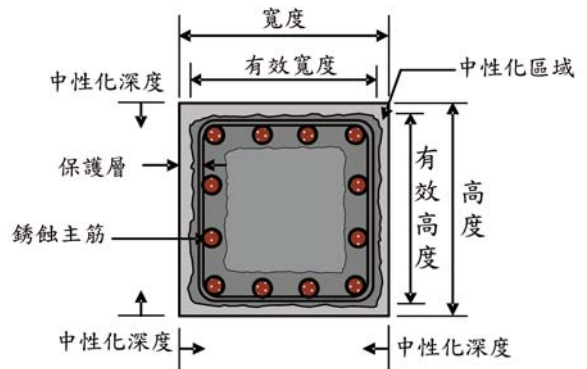


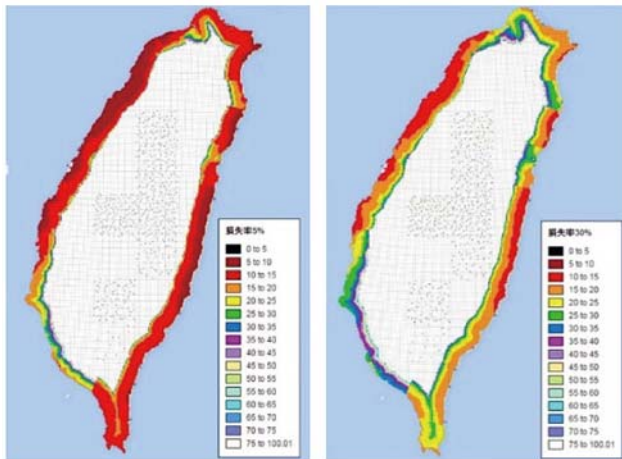
圖 6 中性化混凝土有效斷面

## 台灣混凝土橋梁鋼筋腐蝕危害地圖之建立與應用

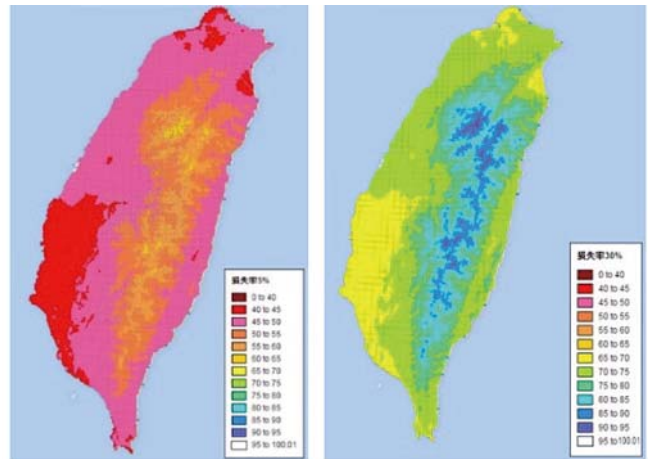
為瞭解台灣各地環境對混凝土橋梁劣化之影響，本研究以前述之劣化橋梁分析模式及網格化台灣地區劣化環境資料為基準，建立台灣地區鋼筋混凝土橋梁鋼筋腐蝕危害度地圖。

由前述之劣化鋼筋混凝土橋梁強度衰減特性可知，橋梁強度之衰減主要係起因於鋼筋混凝土有效斷面積減少。排除化學摻料之影響因素，本研究將針對台灣地區各網格進行一般鋼筋混凝土橋梁鋼筋有效斷面積損失率之分析，求得每一網格達到鋼筋斷面積腐蝕之目標值所需之時間，每一網格之分析結果如圖 7 及圖 8 所示。

鹽害導致之鋼筋腐蝕受到距離遠近而有明顯地影響，透過圖 3 可知新竹及花東一帶飛來鹽量較高，故此可知沿海一帶之鋼筋腐蝕較為嚴重 (如圖 7 所示)。中性化作用則以二氧化碳濃度較高者為嚴重區域，根據本文建立之中性化模式，考量工業區及人口密集區兩者因素，可得知雲林及高雄有石油工業而有較嚴重之中性化現象，北部則以人口密集等因素加速中性化反應 (如圖 8 所示)。



(A)  $\eta = 5\%$  (B)  $\eta = 30\%$   
圖 7 鹽害危害度地圖 (Cover = 5 cm)



(A)  $\eta = 5\%$  (B)  $\eta = 30\%$   
圖 8 中性化危害度地圖 (Cover = 5 cm)

將鋼筋腐蝕危害圖中特定網格之橋梁劣化資訊（鋼筋斷面積損失率、使用年期及保護層厚度）製成橋梁鋼筋腐蝕危害資訊表。透過查圖查表方式，可用於為評估一座使用未知年的橋梁，利用橋梁所在地及當地環境特性，保守預估橋梁現況之鋼筋斷面積損失情形，且根據原使用壽命之設計值以評估該橋再繼續使用多久後即判定為補強維修之時間點。

在設計方面，倘若在某地有橋梁工程興建之必要，依據工程師設計考量之鋼筋斷面積損失率最大容許值及使用年限之設計值，透過查圖瞭解該處之中性化反應及鹽害效應下，找出適合當地之保護層最小厚度容許值。

本研究以一個位於新竹沿海地帶之網格為例，依據當地環境參數建立起不同保護層厚度下，使用年期與鋼筋斷面積損失率之關係圖，並將數據整理繪製成三維圖，如圖 9 所示。由圖 9 中資訊歸納不同使用年期對應不同鋼筋斷面積損失率的條件下，搜尋符合條件之保護層厚度最小容許值，彙整如表 4 所示。透過圖 9 觀察出該地區受到鹽害作用之嚴重性，當曲面切線斜率從 0 開始增加的時間點為鋼筋開始腐蝕時間，而該地區考量不同保護層厚度發生鋼筋開始腐蝕之時間甚早，最早於 5 年以內，最晚至 15 年，可說明此地飽受海鹽侵蝕，若在此地興建工程時，可根據設計者需求考量保護層厚度，假定考量使用設計年為 15 年時，鋼筋斷面積損失率達到 30% 為目標值，則由圖 12 可得知，不考慮特殊防蝕工程條件下，保護層厚度

為 40 mm，並不符合設計者設計需求；而保護層厚度為 100 mm，雖可達到設計目標需求，但設計值過於保守，故 70 mm 為這三者中最佳之選擇。另外，設計者為了更詳細探討保護層厚度之設計值，可依循表 4 中內容，考慮橫軸使用年期為 15 年且縱軸鋼筋斷面積損失率為 30%，得到 70 mm 的數值，意義為當結構體在 15 年的鋼筋損失率達到 30% 之保護層厚度最小容許值。表格中有無內容之空格之說明，當混凝土抗壓強度為 350 kgf/cm<sup>2</sup> 時，搜尋不到保護層（當保護層厚度為 30 mm ~ 100 mm）在使用 30 年之久而鋼筋斷面積損失率為 0%，此時使用者可能需要尋求品質更好的混凝土或是將水灰比之設計值降低。

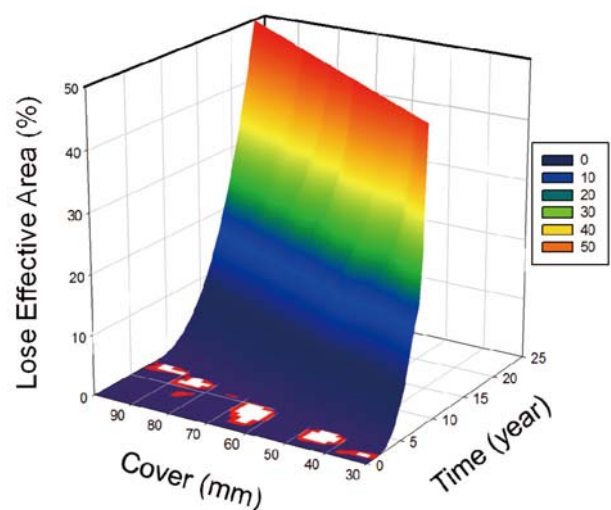


圖 9 不同保護層厚度、使用年期與鋼筋斷面積損失率之關係圖 (沿海地區)

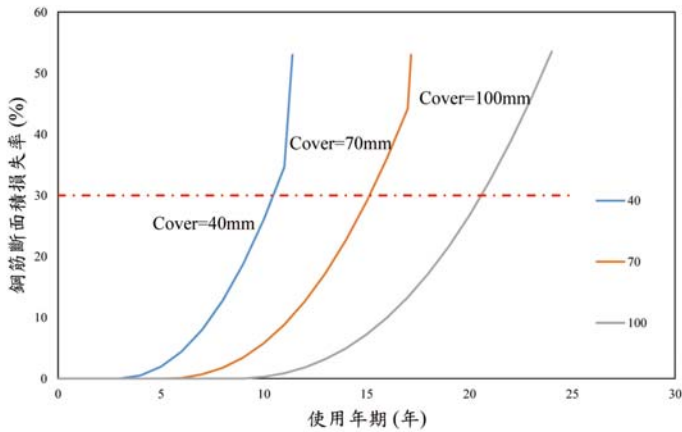


圖 10 不同保護層厚度、使用年期與鋼筋斷面積損失率之關係圖（沿海地區）

表 4 使用年期與鋼筋損失率得該區保護層厚度最小容許設計值（單位：mm，考慮區域：沿海地區）

使用目標 年期 (yr) 保護層厚度 最小容許值 (mm) 鋼筋斷面積 容許損失率 (%)	0	5	10	15	20	25
0	30	40	80			
10		30	60	80		
20		30	50	70	100	
30		30	40	60	90	
40		30	40	60	80	100
50		30	30	60	70	100

### 結論

為瞭解台灣劣化混凝土橋梁鋼筋腐蝕趨勢，本文基於中性化機理、鹽害機理及部分學者建立之經驗預測公式建置以網格為基準之橋梁劣化模式，並透過鋼筋腐蝕程度時變性的簡易評估，將劣化橋梁之強度衰減特性以危害地圖進行視覺化之呈現，所獲的結論如下：

1. 以網格為基準之中性化深度預估模式進行預測不同區域之中性化深度；其中，考慮二氧化碳之相關因子，著重於石化工業區及人口密集區為中性化效應帶來的影響。另外，配合網格為基準之橋梁鹽害預測模型，並修正各地飛來鹽量之預測更能使預測結果符合現況。

2. 依據不同劣化模式，計算鋼筋斷面積損失率，以鋼筋腐蝕為危害地圖之資訊，將鋼筋斷面積損失之結果以視覺化呈現，能直覺地瞭解危害之災損範圍及發展趨勢。
3. 透過不同劣化模式的危害地圖可明確瞭解特定地區的危害災損程度較高。為了明確考慮該處之危害損失資訊，將危害地圖進行單一網格詳細的劣化資訊評估，以便探討設計需求或是評估預測橋梁劣化之發展。

### 參考文獻

1. 邱清安、林博雄，「由測站資料推估台灣之氣溫與降水之空間分布」，大氣科學，第 32 卷，第 4 期，2004，第 329-350 頁。
2. 中央氣象局，「臺灣年平均濕度」，地面氣象觀測網站，2010，[http://www.cwb.gov.tw/V7/eservice/docs/overview/observation/metro/sfc\\_obs.htm# 濕度](http://www.cwb.gov.tw/V7/eservice/docs/overview/observation/metro/sfc_obs.htm#濕度)。
3. 邱永芳、羅建明、陳桂清、柯正龍、謝明志，「2013 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報」，交通部運輸研究所，104 年 6 月。
4. 日本土木學會 (JSCE)，コンクリート構造物の信頼性設計法に關する研究小委員會 (336 委員會) 成果報告書，第三篇耐久性信頼評價，2008。
5. 蕭輔沛、邱建國、涂豐鈞，「考慮劣化與震損影響之 RC 校舍耐震能力評估研究」，國家地震工程研究中心，2012 年 12 月。
6. 莊育泰，「劣化 RC 牆生命週期耐震能力研究」，碩士學位論文，邱建國教授指導，國立臺灣科技大學，臺北，臺灣，2012。
7. 王傳輝，「台灣地區鋼筋混凝土橋中性化效應之耐久性評估」，碩士學位論文，宋裕祺教授指導，國立台北科技大學，臺北，臺灣，2005 年 1 月。
8. 蘇進國，「模糊遺傳算法在橋梁耐震性能設計之應用與耐震維修補強生命週期成本最小化之研究」，博士學位論文，宋裕祺教授指導，國立台北科技大學，臺北，臺灣，2008 年 6 月。
9. 陳尚德，「鋼筋混凝土橋梁鋼筋腐蝕危害地圖建立與應用」，碩士學位論文，宋裕祺教授指導，國立台北科技大學，臺北，臺灣，2015 年 7 月。
10. 牛荻濤，「混凝土結構耐久性與壽命預測」，科學出版社，2003。
11. Sung, Y.C., Su, C.K., "Time-dependent Seismic Fragility Curves on Optimal Retrofitting of Neutralized Reinforced Concrete Bridges", Structure and Infrastructure Engineering, Vol.7, No.10, October 2011, p.p. 797-805.
12. Sung, Y. C., Su, C. K., "Seismic Evaluation of Existing Bridges: Theory And Application", International Training Program for Seismic Design of Structures, National Center For Research on Earthquake Engineering, October 26, 2005, Taipei, Taiwan.
13. 陳威成，「由生命週期成本分析探討鋼筋混凝土消防廳舍耐震設計及補強基準」，博士論文，蔡益超教授指導，國立台灣大學土木工程系，台北，2012。
14. 邱永芳、羅建明、陳桂清、柯正龍、謝明志，「2013 年臺灣大氣腐蝕劣化因子調查資料年報」，交通部運輸研究所，台北，2013。

