

應用研究

腐蝕鋼筋之拉力行為

歐昱辰／國立台灣科技大學營建工程系副教授

郭陳風／國立台灣科技大學營建工程系研究助理

劉澄洲／國立台灣科技大學營建工程系碩士班學生

許多鋼筋混凝土結構，或由於使用氯離子含量過高之粒料、且／或受長期海風之吹拂、且／或因混凝土中性化之故，因而面臨鋼筋腐蝕之問題，威脅結構之安全。本文蒐集文獻中之腐蝕鋼筋拉力試驗資料，探討自然與加速腐蝕鋼筋之拉力行為。研究結果發現腐蝕鋼筋之拉力強度與腐蝕最小斷面有關，其與腐蝕重量損失率之間呈現顯著之線性關係；腐蝕鋼筋之變形能力則與最小斷面以及斷面積沿鋼筋長度方向之分布有關，其與腐蝕重量損失率之關係有較顯著之離散性。自然與加速腐蝕鋼筋之拉力性質比對結果顯示，通電加速腐蝕包覆於混凝土內之鋼筋，可得與自然腐蝕近似之強度折減係數；在極限應變方面，多數加速腐蝕所得之折減係數皆高於自然腐蝕所得之值；在彈性模數方面，作者所採用的通電加速腐蝕可得較自然腐蝕為高的折減結果，其他研究之加速腐蝕則得較低之彈性模數折減。根據所蒐集之自然腐蝕鋼筋拉力試驗數據，本文最後建議模擬自然腐蝕鋼筋拉力性質之方法。

鋼筋過早腐蝕·影響構造物安全

台灣許多鋼筋混凝土結構在一般 50 年使用期限內，即面臨鋼筋腐蝕之威脅。鋼筋過早產生腐蝕，其原因一般可歸咎於建造時使用了受氯離子污染之粒料，以及／或因長期受海風之吹襲，導致混凝土氯離子含量過高，以及／或由於保護層混凝土中性化，減弱對鋼筋防蝕之作用所導致。鋼筋腐蝕可導致斷面積減少，並可在局部區域產生孔蝕，降低鋼筋韌性與承載力；鋼筋腐蝕後體積會膨脹，破壞握裹，造成保護層混凝土剝落，降低混凝土之承載力；箍筋的腐蝕除造

成抗剪強度下降外，亦會削弱對混凝土之圍束能力，降低核心混凝土之強度與韌性。

圖 1 顯示幾個鋼筋腐蝕之確認與疑似案例，圖 1(a) 與 1(b) 為新北市一棟大型集合住宅，住宅多處有保護層混凝土剝落，露出腐蝕鋼筋之現象，圖 1(a) 顯示該住宅一鋼筋混凝土柱，表面可見順柱方向之裂縫，最大裂縫寬度為 3.5 mm，移除保護層後，發現主筋與箍筋皆已腐蝕，腐蝕重量損失率分別達 36% 與 17%；圖 1(b) 顯示該住宅一鋼筋混凝土梁，表面可見順梁方向裂縫，最大裂縫寬度為 6 mm，保護層混凝土移除後，發現主筋與箍筋皆已腐蝕，此處主筋腐蝕重量損失率為 29%，箍筋因樣本長度不足，無法取得可信賴之重量損失數據。圖 1(c) 為新北市金山區台 2 舊線 40 號橋，此橋於大梁、橋柱等多處有保護層剝落，露出腐蝕鋼筋之現象。圖 1(d) 為台二線之王公橋，橋柱表面有許多沿主筋方向、疑似鋼筋腐蝕之裂縫。

前述結構只是目前台灣眾多鋼筋腐蝕結構之縮影，此類結構之結構性能與耐震能力已非設計當初所預期，因此有必要進行結構安全之評估，惟該評估需能適當考慮鋼筋腐蝕之效應。本文針對評估中一重要參數：腐蝕鋼筋之拉力性質進行探討，最終建議腐蝕鋼筋拉力性質之模擬方法。

腐蝕鋼筋拉力行為特徵

腐蝕對鋼筋斷面積之折減一般並非沿著鋼筋長度方向均勻分布，此不均勻分布造成鋼筋受力時，斷面應力與應變沿鋼筋方向產生不均勻之分布。由於最小斷面往往決定整根鋼筋之拉力強度，因此若依據整根鋼筋平均



圖 1 (a) 建築柱鋼筋腐蝕裂縫；(b) 建築梁鋼筋腐蝕裂縫；(c) 40 號橋大梁與柱鋼筋腐蝕；(d) 王公橋橋柱表面沿主筋裂縫

重量損失率所推得之平均剩餘斷面積，來計算腐蝕鋼筋之剩餘強度，往往會高估其真實強度，得不保守之評估結果。此外，前述計算也無法反應應變沿鋼筋長度方向不均勻分布，對整根鋼筋極限變形能力之影響。

舉例而言，圖 2 顯示兩根自然腐蝕鋼筋於拉力試驗前、後之照片 [1]，此兩根鋼筋乃截取自受鹽害之鋼筋混凝土集合住宅，其未腐蝕之尺寸為 D16(#5)。試體 N-14 受腐蝕之重量損失率為 37.8% (圖 2a 與 2b)，試體 N-15 受腐蝕之重量損失率為 38.5% (圖 2c 與 2d)，兩根鋼筋有相似之重量損失率，但腐蝕型態卻不相同 (圖 2a 比對圖 2c)。拉力試驗結果顯示，兩根鋼筋拉斷之位置皆為最小斷面處 (圖 2b 比對圖 2d)。圖 3 顯示此兩根鋼筋拉力與平均應變之關係，平均應變為黏貼於鋼筋上下之兩光學位置感測器 (圖 2 之圓點) 所測得之鋼筋變形，再除以兩感測器距離而得。此兩鋼

筋之拉力與平均應變之關係顯示，隨著腐蝕程度之增加，鋼筋之拉力強度呈現下降之趨勢，惟在此案例中，腐蝕較嚴重的鋼筋 (N-15) 卻有較大的變形能力，此現象將於下段文字中作進一步解釋。表 1 為拉力試驗結果之數據，包含降伏與極限拉力，以及極限應變，表中並進一步將兩根鋼筋之強度與應變除以未腐蝕狀態之值，以呈現與未腐蝕性質之比對。

由表中數據可觀察到兩根鋼筋平均重量損失率為 38%，然而其平均降伏強度下降 43%，平均極限強度下降 40%，分別高於平均重量損失 13% 與 5%，此顯示主控鋼筋強度之最小斷面，其斷面積小於平均重量損失所推得之平均剩餘斷面積。在極限應變方面，兩根鋼筋平均下降 29%，極限應變下降之原因，為斷面之腐蝕折減沿鋼筋長度方向並非均勻分布，導致當最小斷面達極限應變而斷裂時，其他較大斷面之應變仍小

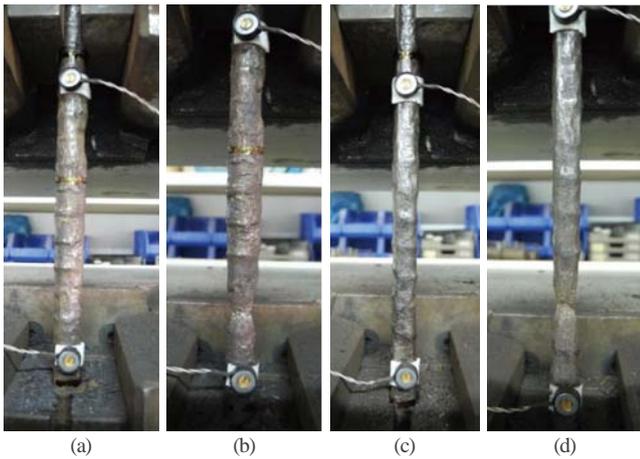


圖 2 鋼筋試體 N-14：(a) 測試前照片；(b) 測試後照片；鋼筋試體 N-15；(c) 測試前照片；(d) 測試後照片

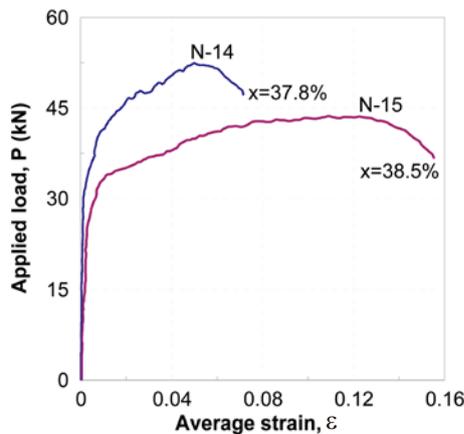


圖 3 拉力與平均應變關係

於極限應變，使得整根鋼筋平均應變低於最小斷面之極限應變。兩根鋼筋之極限應變差異頗大，且腐蝕較嚴重的試體卻有較大的極限應變，仔細觀察鋼筋之腐蝕型態後可發現，腐蝕較嚴重試體（N-15）之腐蝕分布較為均勻，因此有較大之極限應變，此現象說明腐蝕斷面折減分布有顯著之變異性。

表 1 拉力試驗結果數據例

試體	未腐蝕尺寸	x (%)	P _{ysc} (kN)	P _{usc} (kN)	ε _{usc}	P _{ysc}	P _{usc}	ε _{usc}
						P _{ys0}	P _{us0}	ε _{us0}
N-14	D16	37.8	30.2	52.4	0.050	0.60	0.66	0.45
N-15	(#5)	38.5	27.6	43.8	0.109	0.55	0.55	0.98

未腐蝕鋼筋性質：P_{ys0} = 50.1 kN；P_{us0} = 80 kN；and ε_{us0} = 0.11 [1]

腐蝕鋼筋拉力行為模擬

腐蝕鋼筋拉力行為之模擬一般有兩種方式，一種透過折減斷面積模擬腐蝕效應 [2-4]，另一種透過改變鋼筋應力應變曲線模擬腐蝕效應 [5-6]。前者模擬方

式尚須折減強度與極限應變，以考慮不均勻腐蝕之影響；後者之模擬方式假設腐蝕鋼筋之斷面積同未腐蝕鋼筋，此種模擬方式較前者簡單，易為工程師所用，因此本文採用後者方式模擬腐蝕鋼筋之拉力行為。在後者方式的模擬中，腐蝕鋼筋之拉力應力應變性質與腐蝕重量損失率之關係，可用以下線性關係表示：式 (1)、(2)、(3) 與 (4) 分別代表重量損失率與正規化腐蝕鋼筋降伏強度、彈性模數、極限應力與極限應變之關係（與未腐蝕性質正規化），β_{fy}、β_E、β_{fu} 與 β_{εu} 分別為相對應之折減係數。

$$\frac{f_{ysc}}{f_{ys0}} = 1 - \beta_{fy} \cdot x(\%) \quad (1)$$

$$\frac{E_{sc}}{E_{s0}} = 1 - \beta_E \cdot x(\%) \quad (2)$$

$$\frac{f_{usc}}{f_{us0}} = 1 - \beta_{fu} \cdot x(\%) \quad (3)$$

$$\frac{\epsilon_{usc}}{\epsilon_{us0}} = 1 - \beta_{\epsilon u} \cdot x(\%) \quad (4)$$

圖 4 顯示作者所蒐集共 18 根，受自然鹽害腐蝕鋼筋之拉力試驗結果 1，試驗結果根據未腐蝕尺寸之不同，區分為三類：D13 (#4)；D16 (#5)；D19 (#6)，分別進行回歸分析，以求得式 (1) 至 (4) 中之折減係數。圖中可觀察到，相較於與變形相關之拉力性質（彈性模數與極限應變），與強度相關之拉力性質（降伏與極限強度）與重量損失率有較好的線性關係，此因強度性質由鋼筋最小斷面控制，而變形特性除與最小斷面有關外，尚與斷面積沿鋼筋長度方向上的分布有關，如前節所述，後者變異性顯著大於前者。回歸分析結果之數據列於表 2，表 2 同時列出文獻中自然腐蝕鋼筋之拉力性質折減係數，由於自然腐蝕鋼筋之取得不易，因此相關文獻並不多見。表中可見降伏強度、彈性模數與極限強度之折減係數，各研究之間之差異不大，極限應變則有較大差異。

表 3 列出文獻中所蒐集之加速腐蝕鋼筋拉力性質折減係數，此類試體由於取得較為容易，因此相關文獻較自然腐蝕多許多。與自然腐蝕之折減係數比較顯示，加速腐蝕之降伏與極限強度折減係數範圍涵蓋自然腐蝕之係數範圍，自然腐蝕係數範圍約落於加速腐蝕係數範圍之中間。更進一步的比較顯示，通電加速腐蝕包覆於混凝土內的鋼筋，所得之腐蝕鋼筋降伏

與極限強度折減係數與自然腐蝕鋼筋類似。多數文獻沒有提供彈性模數之折減係數，在有限的資料點數目內，作者過去所採行的通電加速腐蝕法 [1] 所得之彈性模數折減略大於自然腐蝕所得之值，因此可得較為保守之預測結果，其他研究所得之彈性模數折減係數則

較為不保守。對於極限應變而言，加速腐蝕所得之折減係數一般大於自然腐蝕，顯見加速腐蝕較自然腐蝕更易造成斷面積沿長度方向分布之不均勻性，使極限應變隨腐蝕之增加而折減得更快，此說明了加速腐蝕一般可保守用於預測自然腐蝕鋼筋之極限應變。

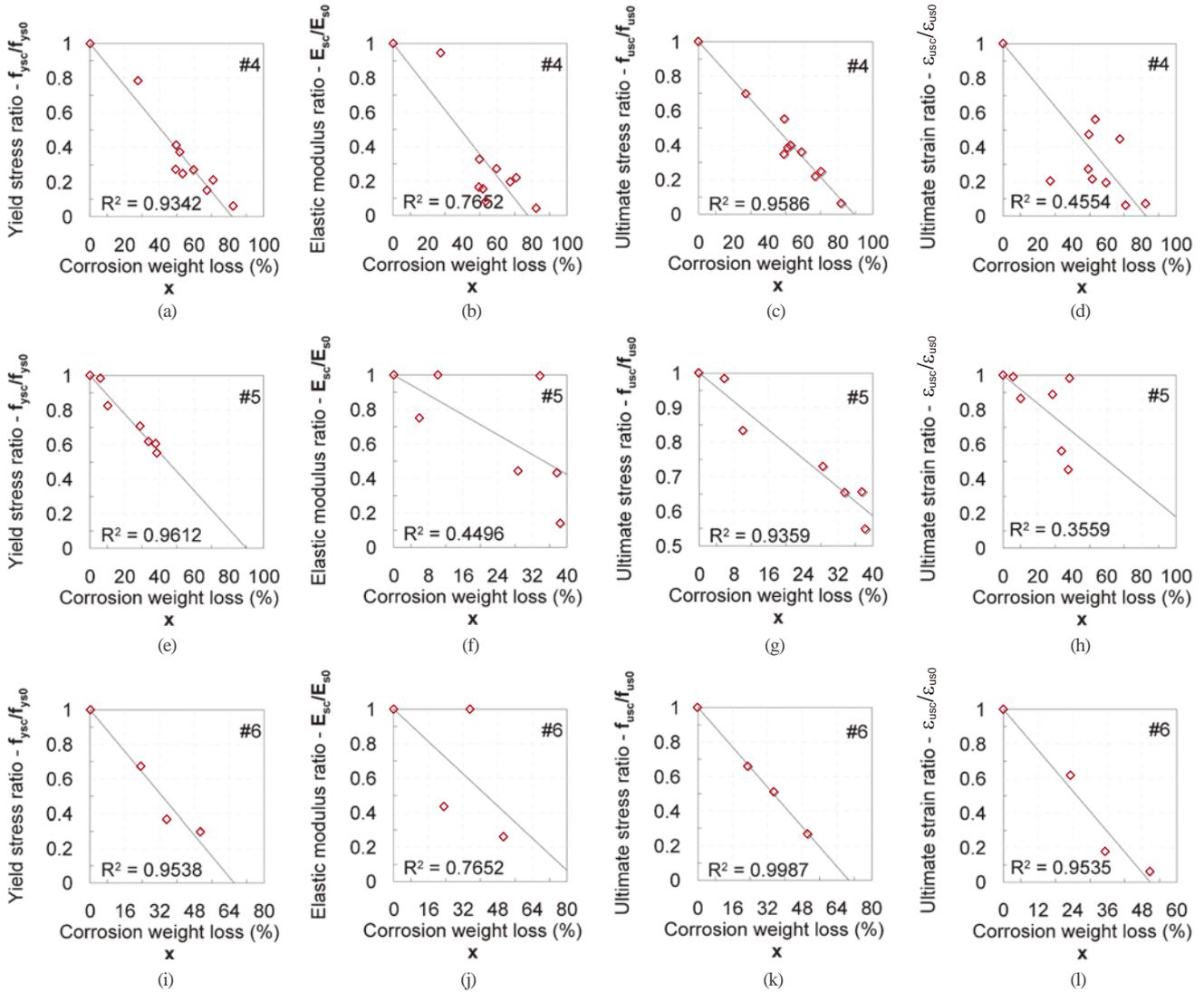


圖 4 受鹽害自然腐蝕鋼筋正規化拉力性質回歸分析：D13 (#4)：(a) f_{ysc}/f_{ys0} ；(b) E_{sc}/E_{s0} ；(c) f_{usc}/f_{us0} ；(d) $\epsilon_{usc}/\epsilon_{us0}$ ；D16 (#5)：(e) f_{ysc}/f_{ys0} ；(f) E_{sc}/E_{s0} ；(g) f_{usc}/f_{us0} ；(h) $\epsilon_{usc}/\epsilon_{us0}$ ；D16 (#6)：(i) f_{ysc}/f_{ys0} ；(j) E_{sc}/E_{s0} ；(k) f_{usc}/f_{us0} ；(l) $\epsilon_{usc}/\epsilon_{us0}$

表 2 自然腐蝕鋼筋拉力性質折減係數

	鋼筋尺寸	x (%)	腐蝕原因	β_{fy}	β_E	β_{fu}	β_{ϵ_u}
郭陳風 [1]	D13 (#4)	27.4 ~ 82.4	鹽害	0.0122	0.0129	0.0112	0.0121
	D16 (#5)	5.9 ~ 38.5	鹽害	0.0111	0.0144	0.0103	0.0082
	D19 (#6)	23.2 ~ 50.7	鹽害	0.0151	0.0129	0.0144	0.0197
Zhang et al. [7]	D6 (#2)	15.6 ~ 31.2	中性化	0.014	未提供	0.0138	未提供
Kashiwabara et al. [8]	D16 (#5)	0 ~ 21	鹽害	0.0119	未提供	未提供	未提供
Palsson and Mirza [9]	D16 (#5)	0 ~ 80	鹽害	未提供	未提供	未提供	0.0166

表 3 加速腐蝕鋼筋拉力性質折減係數

	鋼筋尺寸	x (%)	加速腐蝕方法	腐蝕電流密度	β_{fy}	β_E	β_{fu}	β_{ϵ_u}
				(mA/cm ²)				
郭陳風 [1]	D13 (#4)	0 ~ 31.4	通電、包覆混凝土	0.6	0.0123	0.0179	0.0107	0.0265
	D29 (#9)	0 ~ 19.9			0.0162	0.0185	0.0146	0.0371
Cairns et al. [6]	D16 (#5)	0 ~ 3	通電、包覆混凝土	0.01 ~ 5	0.012	未提供	0.011	0.03
Lee and Cho [10]	D10; D13 (#3; #4)	0 ~ 35	通電、包覆混凝土	未提供	0.0124	0.0075	0.0107	0.0195
			乾濕循環、包覆混凝土	-	0.0198	0.0115	0.0157	0.0259
Du [11]	D8; D16; D32 (#3; #5; #10)	0 ~ 25	通電、裸鋼筋	0.5 ~ 2	0.014	未提供	0.014	0.029
		0 ~ 18	通電、包覆混凝土	1	0.015	未提供	0.015	0.039
Andrade et al. [12]	N/S	0 ~ 11	通電、裸鋼筋	1	0.015	未提供	0.013	0.017
Clark & Saifullah [13]	N/S	0 ~ 18	通電、包覆混凝土	0.5	0.012	未提供	0.014	未提供
					0.013		0.017	
Lee et al. [14]	D10 (#3)	0 ~ 25	通電、包覆混凝土	13	0.012	未提供	未提供	未提供
Apostolopoulos [16]	D10 (#3)	0 ~ 46	鹽霧、裸鋼筋	-	0.017	未提供	0.0158	0.0206
Apostolopoulos [17]	D13 (#4)	0 ~ 10.4	鹽霧、裸鋼筋	-	0.0087	未提供	0.0068	0.0292
Apostolopoulos & Papadopoulos [18]	D10 (#3)	0 ~ 8.5	鹽霧、裸鋼筋	-	0.0139	未提供	0.0124	0.0592

圖 5 將本文所蒐集之所有自然腐蝕鋼筋拉力試驗結果，置於一起進行回歸分析，所得之拉力性質折減係數列於表 4。在降伏與極限強度方面，所有資料點呈現良好之線性關係（圖 5a 與 5c），回歸所得之降伏與極限強度折減係數分別為 0.0123 與 0.0115，意即若重量損失率為 10%，降伏與極限強度將分別下降 12.3% 與 11.5%。在彈性模數與極限應變方面，所蒐集之資料

點呈現較顯著之離散性，所得之折減係數分別為 0.013 與 0.0125，意即若重量損失率為 10%，彈性模數與極限應變將分別下降 13% 與 12.5%。

表 4 建議之自然腐蝕鋼筋拉力性質折減係數

β_{fy}	β_E	β_{fu}	β_{ϵ_u}
0.0123	0.0130	0.0115	0.0125

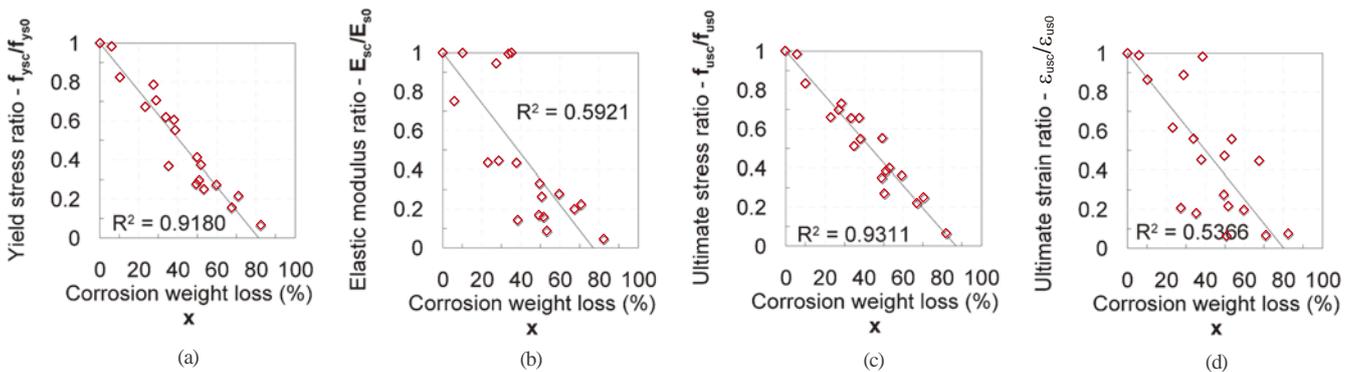


圖 5 所蒐集之自然腐蝕鋼筋正規化拉力性質回歸分析：(a) f_{ysc}/f_{ys0} ；(b) E_{sc}/E_{s0} ；(c) f_{usc}/f_{us0} ；(d) $\epsilon_{usc}/\epsilon_{us0}$

腐蝕鋼筋拉力強度與最少斷面有關

本文蒐集自然腐蝕鋼筋與加速腐蝕鋼筋之拉力試驗之結果，研究其拉力行為。研究結果發現腐蝕鋼筋之拉力強度與最小斷面有關，其與腐蝕重量損失率呈現明顯之線性關係；腐蝕鋼筋之變形能力則不只與最小斷面有關，且與斷面積沿鋼筋長度方向之分布有關，其與腐蝕重量損失率之關係呈現較為顯著之離散性。自然腐蝕鋼筋與加速腐蝕鋼筋之拉力性質比對結果顯示，通電加速腐蝕包覆於混凝土內之鋼筋，可得與自然腐蝕近似之強度折減；在極限應變方面，多數加速腐蝕所得之折減皆高於自然腐蝕；在彈性模數方面，作者所採用的通電加速腐蝕可得較自然腐蝕為高的折減結果，其他研究之加速腐蝕則得較低之彈性模數折減。根據所蒐集之自然腐蝕鋼筋拉力試驗數據，本文最後建議模擬自然腐蝕鋼筋拉力性質之折減係數。

符號表

E_{s0} = 未腐蝕鋼筋彈性模數
 E_{sc} = 腐蝕鋼筋彈性模數

P_{us0} = 未腐蝕鋼筋極限拉力

P_{usc} = 腐蝕鋼筋極限拉力

P_{ys0} = 未腐蝕鋼筋降伏拉力

P_{ysc} = 腐蝕鋼筋降伏拉力

f_{us0} = 未腐蝕鋼筋極限應力

f_{usc} = 腐蝕鋼筋極限應力

f_{ys0} = 未腐蝕鋼筋降伏應力

f_{ysc} = 腐蝕鋼筋降伏應力

$x(\%)$ = 腐蝕重量損失率 (%)；

例如， $x = 10$ 表 10% 重量損失率

β_E = 彈性模數折減係數

β_{fu} = 極限應力折減係數

β_{fy} = 降伏應力折減係數

$\beta_{\epsilon u}$ = 極限應變折減係數

ϵ_{us0} = 未腐蝕鋼筋極限應變

ϵ_{usc} = 腐蝕鋼筋極限應變



參考文獻

1. 郭陳風,「自然腐蝕與加速腐蝕鋼筋之拉力行為」,國立台灣科技大學營建工程系碩士論文,指導教授:歐昱辰,民國一百零三年一月。
2. Stewart, M. G., “Mechanical Behaviour of Pitting Corrosion of Flexural and Shear Reinforcement and Its Effect on Structural Reliability of Corroding RC Beams,” *Structural Safety*, V. 31, 2009, pp. 19-30.
3. Du, Y., Clark, L. A., and Chan, A. H. C., “Residual Capacity of Corroded Reinforcing Bars,” *Magazine of Concrete Research*, V. 57, No. 3, 2005, pp. 135-147.
4. Kallias, M. I., and Rafiq, M. I., “Performance Assessment of Corroding RC Beams Using Response Surface Methodology,” *Engineering Structures*, V. 49, 2013, pp. 671-685.
5. Ou, Y.-C., Tsai, L.-L., and Chen, H.-H., “Cyclic Performance of Large-Scale Corroded Reinforced Concrete Beams,” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, V. 41, No. 4, April 2012, pp. 593-604.
6. Cairns, J., Plizzari, G. A., Du, Y., Law, D. W., and Franzoni, C., “Mechanical Properties of Corrosion-Damaged Reinforcement,” *ACI Materials Journal*, V. 102, No. 4, July-August 2005, pp. 256-264.
7. Zhang, W.; Song, X.; Gu, X.; and Li, S., “Tensile and Fatigue Behavior of Corroded Rebars,” *Construction & Building Materials*, V. 34, 2012, pp. 409-417.
8. Kashiwabara, S., Tanimura, Y., Izuminami, R., and Kimura, M., “A Study on Evaluation Method of the Tensile Yield Strength of Corroded Reinforcing Bar Cut Out from Structure,” *Proc. Of the 55th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, V. 357, 2000, pp. 716-717. (in Japanese)
9. Palsson, R., and Mirza, M. S., “Mechanical Response of Corroded Steel Reinforcement of Abandoned Concrete Bridge,” *ACI Structural Journal*, V. 99, No. 2, Mar.-Apr. 2002, pp. 157-162.
10. Lee, H. S., and Cho, Y. S., “Evaluation of the Mechanical Properties of Steel Reinforcement Embedded in Concrete Specimen as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion,” *International Journal of Fracture*, V. 157, 2009, pp. 81-88.
11. Du, Y., “Effect of Reinforcement Corrosion on Structural Concrete Ductility,” PhD thesis, University of Birmingham, UK, Mar. 2001, 320 pp.
12. Andrade, C., Alonso, C., Garcia, D., and Rodriguez, J., “Remaining Lifetime of Reinforced Concrete Structures: Effect of Corrosion in the Mechanical Properties of the Steel,” *Life Prediction of Corrodible Structures*, NACE, Cambridge, UK, Sept. 1991, pp. 12/1-12/11.
13. Clark, L. A., and Saifullah, M., “Effect of Corrosion Rate on the Bond Strength of Corroded Reinforcement,” *Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete*, R. N. Swamy, ed., Sheffield Academic Press, Sheffield, 1994, pp. 591-602.
14. Lee, H. S., Tomosawa, F., and Noguchi, T., “Effect of Rebar Corrosion on the Structural Performance of Singly Reinforced Beams,” *Durability of Building Materials and Components*, V. 7., C. Sjoström, ed., E&FN Spon, London, 1996, pp. 571-580.
15. Lee, H. S., Tomosawa, F., and Noguchi, T., “Effect of Rebar Corrosion on the Structural Performance of Singly Reinforced Beams,” *Durability of Building Materials and Components*, V. 7., C. Sjoström, ed., E&FN Spon, London, 1996, pp. 571-580.
16. Apostolopoulos, C. A., Papadopoulos, M. P., and Pantelakis, S. G., “Tensile Behavior of Corroded Reinforcing Steel Bars BSt 500s,” *Construction & Building Materials*, V. 20, 2006, pp. 782-789.
17. Apostolopoulos, C. A., “Mechanical Behavior of Corroded Reinforcing Steel Bars S500s Tempcore under Low Cycle Fatigue,” *Construction & Building Materials*, V. 21, 2007, pp. 1447-1456.
18. Apostolopoulos, C. A., and Papadopoulos, M. P., “Tensile and Low Cycle Fatigue Behavior of Corroded Reinforcing Steel Bars S400,” *Construction & Building Materials*, V. 21, 2007, pp. 855-864.