

中性化對混凝土的力學性質與抗蝕影響之研究

Effect of the Carbonation on the Mechanical Properties and Corrosion-resistance of Concrete

計畫編號：NSC 88-2211-E-019-002

執行期限：87年8月1日至88年7月31日

主持人：張建智 國立台灣海洋大學河海工程學系

一、中文摘要

本研究主要探討影響混凝土中性化後各項力學性質的改變及其對鋼筋抗蝕的影響。研究中以中性化後的混凝土試體進行各項力學性質、化學性質、電化學性質與微觀分析試驗。研究結果顯示，中性化後混凝土的抗壓強度、劈裂強度、鋼筋握裹強度皆提高。但當中性化深度到達鋼筋表面時，腐蝕電位明顯下降且腐蝕速率提高。微觀分析顯示中性化後混凝土孔隙結構較緻密且化學成份發生變化。利用 X 光繞射法分析可以獲取較精確的中性化的深度(酚酞僅能判別 $\text{pH} < 9.2$ 之混凝土)。

關鍵詞：中性化、碳化、耐久性、力學行為、腐蝕

Abstract

This study is to investigate the carbonation and its effect on concrete properties. Accelerated testing methods were applied to evaluate the carbonation factors. Mechanical tests, chemical tests, electrochemical tests, and SEM test were conducted.

Test results show that concrete carbonation may improve the compressive strength, splitting tensile strength and rebar bond strength. However, whenever the carbonation depth reaches the vicinity of rebar the half-cell potential significantly drops and the corrosion rate increases. A dense pore structure in the carbonated area was observed through SEM analysis and CaCO_3 compound was detected to verify the carbonation depth using X-ray diffraction analysis.

Keywords: carbonation, durability, corrosion, mechanical properties

二、緣由與目的

混凝土是目前應用在營建工程中最廣泛、使用量最大的材料。隨著研發技術不斷的提升，現今已可設計出各種不同性能的混凝土以滿足各類建築物的需要。然而，受到外界環境影響、施工不良及結構設計不當等因素，混凝土往往發生各種劣化現象。嚴重者，可能進一步加速鋼筋腐蝕，影響結構物的安全，減少使用壽命。

混凝土中鋼筋腐蝕除了因為氯離子侵蝕外，混凝土造成鋼中性化使得鋼筋表面鈍態保護膜的破壞亦是筋腐蝕的重要前提。因此，混凝土抗中性化能力不僅為鋼筋保護性能的指標，同樣也是影響鋼筋混凝土耐久性的重要因素。並且當混凝土孔隙結構因中性化而造成改變時，是否影響其力學行為亦有必要加以探討。

本研究係探討混凝土中性化後力學性質的改變及其對鋼筋抗蝕的影響。由於影響混凝土中性化的因素非常複雜，因此有必要建立本土化的研究成果，以推導適合臺灣地區的環境、材料的理論模式。

三、試驗計畫

試驗材料及試體製作

本實驗是採用波特蘭第一型水泥；粗、細骨材皆開採自立霧溪；實驗試體採用水灰比 0.4、0.5 及 0.6 (配比詳見表 1)，並製成 $\phi 10 \times 20$ cm 之混凝土圓柱試體和拉拔試體。

加速腐蝕試驗採用#4竹節鋼筋。其埋深長度為15公分，並在與空氣接觸的介面處上下5公分以防水材料塗封。待試體加壓加速中性化齡期結束後，將上端之防水塗料去除並焊上電線，完成整個電路配置。試驗時將試體浸置在3.5%氯化鈉溶液7天量測第一個開路電位值後再連接電路外加0.5mA/cm²的直流電流。每隔24小時後切斷電源，分別以開路電位法、直流極化法、交流阻抗法來量測鋼筋的開路電位與腐蝕速率。

實驗方法

為加速中性化，本研究中所有的試體皆在飽和石灰水中養護28天期滿後置入105°C烘箱使其達到爐乾狀態。試體自烘箱拿出後，再依實驗計劃中的各項試驗配置試體數目並加以上下或四周塗封再分別放入加速中性化箱(一般加速碳化法)、加壓筒(加壓加速碳化法)及恆溫恆濕養治箱(控制組)。

本研究中的加速中性化箱係參考Papadakis[1]於1991年所使用的加速中性化裝置而製作的。試驗時係以濃度50%的二氧化碳進行加速試驗並參考中央氣象局歷年觀測資料而設定環境參數為溫度23°C、相對濕度70%。除此之外，為了解混凝土完全中性化後的力學性質改變，本研究亦參考Loo[2]研發的加壓裝置製作加壓筒，期能在純二氧化碳、15大氣壓及加壓14天的環境下達到試體完全碳化的目的。在達到加速齡期後，分別進行抗壓強度、彈性模數、劈裂強度、鋼筋握裹強度、鋼筋腐蝕速率、中性化深度量測、X光繞射化合物分析等試驗。

四、結果與討論

4-1 中性化對混凝土力學性質之影響

中性化後混凝土的抗壓強度試驗結果如表2所示。以水灰比0.6的混凝土試體為例，在同樣的加速時間下，不論塗封形式其抗壓強度皆高於控制組，尤其以上下塗封的試體更加明顯。此外在相同的塗封

形式下，抗壓強度亦隨著加速時間的增加而略增。表3是劈裂試驗的結果，其趨勢亦類似於抗壓強度試驗的結果。

彈性模數試驗的結果如表4所示。在此可發現其中性化前後各組試體彈性模數變化皆不多。根據ACI規範之彈性模數預測公式，彈性模數是與抗壓強度的平方根成正比。雖然中性化後抗壓強度稍有提昇，但相對於彈性模數而言，此影響將更不明顯。其可能原因是在這有限時間內，並無法發生太多的中性化深度改變，以致整體彈性模數變化不大。

為了在有限時間內更清楚地瞭解中性化前後各項性質的改變，本研究另採用了加壓加速中性化法，其意義即是希望藉由提高壓力的方式，促使二氧化碳增加擴散速率，以達到完全中性化的目的。試驗結果如表5，其中以水灰比0.6的上下塗封試體最具代表意義，亦即其已達到完全中性化。在此可發現中性化後混凝土抗壓強度、劈裂強度與彈性模數皆明顯提高，其中以抗壓強度的影響較顯著。

另一方面，為探討中性化對握裹強度之影響，本研究亦使用加壓加速中性化法將混凝土試體完全碳化至鋼筋表面，然後參考ASTM C234握裹試驗方法進行試驗，所測得拉拔荷重與位移之關係如圖1所示。試驗結果顯示混凝土完全中性化後，鋼筋與混凝土間握裹強度明顯提高。

綜合以上結果，中性化產物碳酸鈣填充孔隙之效應可能是造成抗壓強度、劈裂強度及彈性模數提高的主因。此外其亦可能造成界面黏結力及界面摩擦力增加促使握裹強度的提高。

4-2 中性化對混凝土抗蝕之影響

本研究利用加壓加速中性化法使混凝土完全中性化後進行腐蝕試驗以瞭解鋼筋鈍態膜破壞後之腐蝕行為。試驗結果如圖2~圖5所示。

由圖2及圖3可以發現通電之前，水灰比0.5與0.6的加壓組試體其開路電位皆較控制組低。利用酚酞指示劑可分別量得其中性化深度。水灰比0.6的試體其中

性化深度已達到鋼筋表面，故其鈍態膜消失造成鋼筋腐蝕機率上升。然而水灰比 0.5 的試體其中性化深度僅約 2.0 公分卻仍造成開路電位的下降，這是因為實際發生中性化反應的深度不僅只有 2.0 公分。本研究中另外以 X 光繞射法來決定距試體表面特定深度下是否存在碳酸鈣以決定中性化實際反應深度。試驗結果如圖 6 所示。

圖 6 的虛線代表碳酸鈣晶體主要的尖峰值。由強度對 2θ 圖中可知，其尖峰值與虛線不符，亦即碳酸鈣不存在。但是距表面 3.0 公分之試片卻有碳酸鈣存在，表示此深度下中性化反應已經進行，而該試片利用酚酞所測得的中性化深度卻僅 1.6 公分。換言之，實際發生中性化反應的深度應大於酚酞所量測的深度。這可說明為何水灰比 0.5 之加壓組試體通電前之開路電位較控制組低，亦即鈍態膜可能因中性化反應而部份消失。

圖 4 與圖 5 顯示，不論水灰比 0.5 或是水灰比 0.6 的試體，其加壓組的腐蝕速率均比控制組快，這是因為鈍態膜消失的結果。此外，由圖 7 可以發現，水灰比 0.6 加壓組試體的腐蝕速率長期而言在同一加壓時間下卻沒有水灰比 0.5 的加壓組快，而且相對於其它各組而言，其破壞時間延後。合理的解釋應是完全中性化後，整體的孔隙率下降，結構變得較緻密，所以腐蝕生成物無法逸出，故其破壞時間延後。除此之外，二次鈍態膜的形成亦可能是加速晚期開路電位緩慢上升的原因之一。

4-3 結論

1. 試驗數據顯示中性化後的混凝土其抗壓強度、劈裂強度、彈性模數與鋼筋握裹強度等皆提高。
2. 水灰比越高之試體，受中性化的影響較大，提升抗壓強度比例較為明顯。
3. 以 X 光繞射法評估試體中的碳酸鈣存在與否可以較利用酚酞指示劑量測碳化反應更為準確。
4. 當混凝土中性化深度到達鋼筋表面時會破壞鋼筋表面鈍態膜，造成其開路電位明顯下降、腐蝕機率增加。

5. 以 X 光繞射法評估試體中的碳酸鈣存在與否可以較利用酚酞指示劑量測碳化反應更為精準。
6. 同樣的加速時間下，加壓組試體(完全中性化)由於鈍態保護膜被破壞，因此腐蝕速率明顯較控制組快。但中性化造成混凝土孔隙較緻密使得強度提高之效應卻大於鈍態保護膜被破壞而造成鋼筋腐蝕生成物所產生的膨脹效應。故加壓組(完全中性化)開裂時間延後。

五、參考文獻

- [1] V.G. Papadakis, C.G. Vayenas and M.N. Fardis, Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation, ACI Materials Journal, 1991, July-Aug, pp. 363-373
- [2] Y.H. Loo, M.S. Chin, C.T. Tam, K.C.G. Ong, A Carbonation Prediction Model for Accelerated Carbonation Testing of the Concrete, Magazine of Concrete Research, 1994, 46(168), pp. 191-200
- [3] CPC18 Measurement for Hardened Concrete Carbonation Depth, RILEM TC14-CPC, 1988
- [4] A.M. Neville, Properties of Concrete, 4th Edition, Addison Wesley Longman, London, 1997

表 1 試體配比

編號	04	05	06
水 (kg/m ³)	203	205	193
水泥 (kg/m ³)	561	444	311
細骨材 (kg/m ³)	645	760	889
粗骨材 (kg/m ³)	971	971	971
水灰比	0.4	0.5	0.6
設計坍度：15 公分			

表 2 混凝土試體抗壓強度表(MPa)

水灰比	0.4			0.5			0.6		
	控制組	四周	上下	控制組	四周	上下	控制組	四周	上下
7	53.67	55.71	60.08	37.78	40.56	46.93	26.05	27.69	32.09
14	54.39	55.98	63.01	40.29	41.19	58.77	25.37	27.84	32.91
21	54.48	55.26	62.45	40.58	42.30	53.59	26.64	27.20	38.88
28	58.01	58.58	65.69	42.22	44.35	56.70	27.87	28.49	39.49

表 3 混凝土試體之劈裂強度(MPa)

水灰比	0.4		0.5		0.6	
	控制組	上下	控制組	上下	控制組	上下
7	5.22	5.28	4.35	4.54	3.35	3.98
14	5.27	5.29	4.42	5.15	3.37	3.99
21	4.79	5.44	4.63	5.24	3.46	4.17
28	4.84	5.35	4.23	4.66	3.57	4.61

表 4 混凝土試體之彈性模數

表 4 混凝土試體之彈性模數

塗封形式	控制組			四周塗封			上下塗封		
	水灰比	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5
加速時間 (days)	彈性模數 (GPa)								
7	26.97	24.19	23.41	27.72	27.05	24.91	28.50	26.15	22.12
14	27.31	25.11	23.47	27.41	27.18	25.02	28.90	26.53	22.53
21	27.64	25.93	23.81	27.63	27.23	25.15	29.03	28.01	23.36
28	30.24	25.96	23.97	29.32	27.45	25.54	29.89	29.59	24.67

表 5 混凝土試體抗壓強度、劈裂強度、彈性模數表(加壓環境)

塗封形式	0.4			0.5			0.6		
	控制組	四周	上下	控制組	四周	上下	控制組	四周	上下
抗壓強度 (MPa)	36.01	57.32	70.05	42.22	47.03	65.33	27.87	43.23	46.70
劈裂強度 (MPa)	4.84	4.83	5.28	4.23	4.49	4.95	3.57	4.61	4.80
彈性模數 (GPa)	30.24	30.93	34.24	25.96	31.46	33.99	23.97	25.91	27.78
中性化深度 (cm)	-	0.90	1.2	-	1.3	1.8	-	2.85	5(完全)

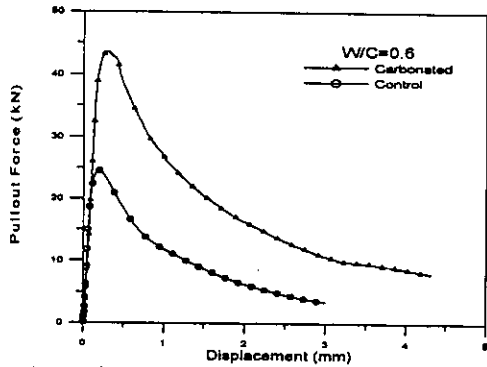


圖 1 中性化前後拉拔荷重-位移關係圖

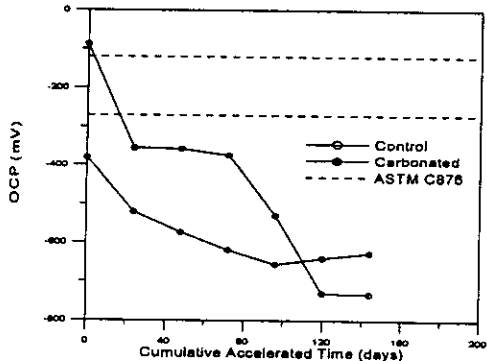


圖 2 開路電位與累積加速時間關係圖(W/C=0.5)

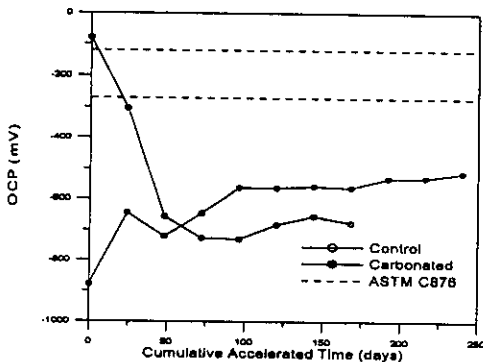


圖 3 開路電位與累積加速時間關係圖(W/C=0.6)

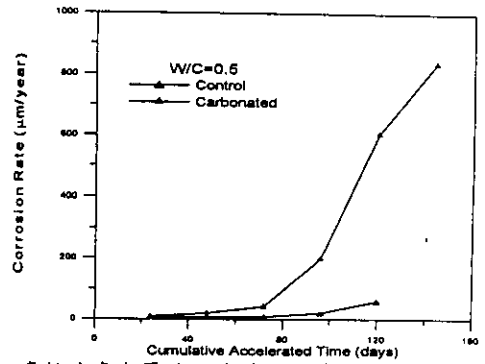


圖 4 腐蝕速率與累積加速時間關係圖(W/C=0.5,AC法)

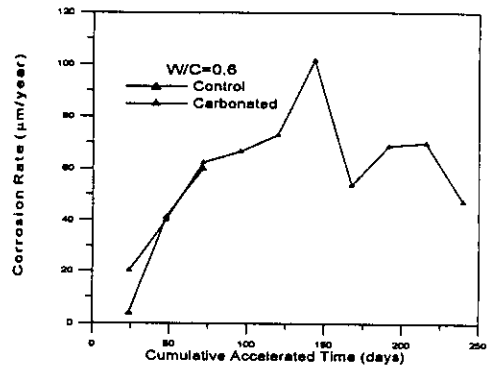


圖 5 腐蝕速率與累積加速時間關係圖(W/C=0.6,AC法)

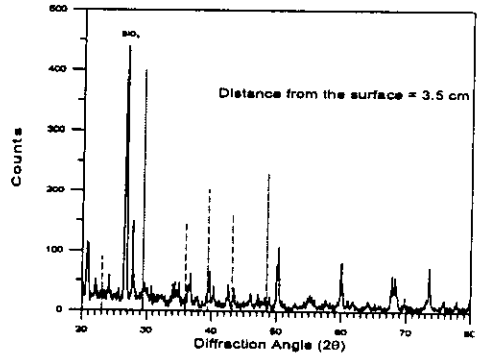


圖 6 X光繞射分析(W/C=0.6,距表面3.5公分)