

高強度熱浸鍍鋅鋼筋混凝土工程性質之研究

王和源¹、蔡秉誠²

¹ 國立高雄科技大學土木工程學系 特聘教授

² 國立高雄科技大學土木工程學系 碩士

摘要

本研究係選用混凝土預拌廠常使用之高強度混凝土配合設計強度 ($f_c' = 560 \text{ kgf/cm}^2$)，及使用不同鍍鋅含量之高強度鋼筋 (SD 490W 及 SD 550W)；並於現地固定鋼筋及澆置高強度混凝土，於不同混凝土養護齡期 (7、28 及 91 天)，探討高強度混凝土新拌性質、硬固、耐久性質等工程性質及握裹強度。

結果顯示，養護齡期 28 天之混凝土抗壓強度皆可達到 63.4MPa 以上，劈裂強度為 5.28 ~ 5.62MPa，反彈錘 R 值為 44，參考對應混凝土抗壓強度約為 R 值 13.6 倍，顯示強度皆隨著齡期的增加而增強，且抗壓及劈裂強度間具有良好關係；超音波波速成長狀況為 4,660 ~ 4,706 m/s，顯示各取代量皆能達到較佳的緻密性，且與抗壓強度有相似的成長趨勢；量測之表面電阻為 23.3 ~ 24.3 kΩ-cm，皆高於 20 kΩ-cm，顯示該混凝土配比有著很好的緻密性及耐久性；透過快速氯離子電滲試驗量測試體電滲值為 2,177 ~ 2,475 庫倫，顯示混凝土有較低的氯離子滲透性。28 天鍍鋅鋼筋拉拔試驗方面，其握裹強度皆達到 20MPa，顯示隨著混凝土強度的提升鋼筋的握裹力也會隨之增長，且有鍍鋅之鋼筋之握裹強度相較於無鍍鋅鋼筋有些微的提升。

關鍵字：高強度混凝土、高強度熱浸鍍鋅鋼筋、工程性質、握裹強度。

ABSTRACT

In this study, the design strength of high-strength concrete ($f_c' = 560$ kgf/cm²) that is commonly used in concrete pre-mixing plants is selected, and the high-strength steel bars (SD 490W and SD 550W) currently routinely produced by steel bar manufacturers are used; the content of galvanized steel is fixed on site and high-strength concrete is poured. In different curing ages (7, 28 and 91 days), the high-strength concrete is modified and hardened by making cylindrical specimens. And the experiment of durability quality understands the engineering properties of high-strength concrete.

The results show that the compressive strength of concrete with a curing age of 28 days can reach more than 63.4MPa, the splitting strength is 5.28~5.62MPa, the rebound hammer R value is 44, and the reference corresponding concrete compressive strength is about 13.6 times the R value. The strength increases with the increase of age, and there is a good relationship between compressive strength and splitting strength; the ultrasonic wave velocity growth status is 4,660 ~ 4,706 m/s, which shows that each amount of substitution can achieve better compactness, and It has a similar growth trend with compressive strength; the measured surface resistance is 23.3~24.3 kΩ-cm, which are all higher than 20 kΩ-cm, indicating that the concrete ratio has good compactness; through rapid chloride ion electroosmotic test The electroosmotic quality of the test body is between 2,177 and 2,475 coulombs, which shows that the concrete has low chloride ion permeability. And the holding strength of galvanized steel bars is slightly improved compared to non-galvanized steel bars.

Keywords: High-strength concrete, High-strength hot-dip galvanized rebar, engineering properties, compressive strength.

一、前言

近年來許多都市的房屋不符合現行之耐震度、管線老舊或消防法規等，為了符合現代安全標準達到延長建築物使用年限、更安全及適用目前生活機能，需將老舊建築物進行整建，而鋼材腐蝕的防護及減緩是鋼材使用上必要的元素，適切的鋼材選擇可以節省日後修繕的花費，而鍍鋅鋼材的正面效益良多。

台灣位於為熱帶 / 亞熱帶，因高濕、高溫與高鹽分的存在，造成金屬在大氣中容易腐蝕劣化。由於金屬材料的大氣腐蝕機制主要是受大氣中所含水分、氧氣和腐蝕物質（如雨中的雜質、灰塵、金屬表面沉積物等）聯合作用而產生的破壞【1】。

鋼鐵材料為今日人類生活中不可或缺的重要資源，然而因其本身特性使然，使得“銹蝕”常伴隨著我們，並無時無刻地損耗著鋼鐵資源，又因台灣受海洋性季風的惡劣環境下，“銹蝕”問題較其他國家來的更為嚴重【2】。

近年來隨著經濟發展，高層建築需要高強度鋼筋及高強度混凝土也隨之增加，如需考量耐久性而增加鍍鋅時，鍍鋅含量是否會影響品質值得進一步探討。

隨著建築科技的飛速發展，高層建築結構不斷出現，對建築材料提出了越來越高的要求，其中最為重要的一項便是混凝土強度。由於在結構荷重不斷加大的同時，結構尺寸因受到眾多因素的影響而不能加大，因而要求混凝土具有較高的強度【3-7】。本研究針對高強度鍍鋅鋼筋混凝土之工程性質及握裹強度作初步之探討，研究結果可作為業界應用高強度鍍鋅鋼筋混凝土之參考依據。

二、試驗計畫

2.1 試驗材料

本研究採用之水泥為亞洲水泥股份有限公司所生產，並符合 CNS 61 及 ASTM C150 規格之波特蘭 I 型水泥。爐石粉為中聯爐石資源處理公司所生產的水淬爐石粉，其性質符合 ASTM C989 之要求規範。水泥及水淬爐石粉之性質如表 1 所示。強塑劑為欣得實業公司所生產 PC 302 型，並符合 CNS 12283 及 ASTM C494 所規定之 G 型藥劑；拌合水為自來水廠所供應，符合 CNS 13961 之規定。選用東和鋼鐵試驗鋼筋號數：#8 與 #10 的一般鋼筋及鍍鋅鋼筋 (SD490 W & SD550W)。

表 1、水泥及水淬爐石粉之物化性質

Materials	Cement	BFS
Fineness(cm ² /g)	3450	4000
SiO ₂	19.6	33.5
Al ₂ O ₃	4.4	14.7
Fe ₂ O ₃	3.1	0.4
CaO	62.5	41.2
MgO	4.9	6.4
SO ₃	2.2	0.6
K ₂ O	-	0.3
Na ₂ O	-	0.2
TiO ₂	0.5	0.5
P ₂ O ₅	0.11	0.01
f-CaO	0.7	-
C ₃ S	56	-
C ₂ S	14	-
C ₃ A	7	-
C ₄ AF	9	-
L.O.I	2.5	0.58

表 2、不同養護齡期高強度混凝土之抗壓強度

Age day	Compressive Strength(MPa)	Compressive Strength average value(MPa)
7-1	45.62	45.53
7-2	46.23	
7-3	44.73	
14-1	55.3	55.20
14-2	55.0	
14-3	55.4	
28-1	58.6	58.28
28-2	57.5	
28-3	58.7	
56-1	58.5	59.18
56-2	58.8	
56-3	60.3	
91-1	67.5	68.33
91-2	69.1	
91-3	68.3	

2.2 試驗配比及項目

本研究係選用以設計強度 560kgf/cm² 高強度混凝土及使用之高強度鋼筋 (SD 490W 及 SD 550W)，再於現地釘製模板並固定鋼筋及澆置混凝土。於高強度混凝土不同養護齡期 (7 天、14 天、28 天、56 天及 91 天)，進行混凝土相關性質試驗；且於高強度混凝土養護齡期 (7 天、28 天及 91 天)，進行高強度鍍鋅鋼筋混凝土之拉拔試驗。

2.3 試驗方法及項目

(1) 抗壓強度，依據 ASTM C39 規範，於各齡期探討混凝土抗壓強度變化。

- (2) 劈裂強度，依據 ASTM C496 之規定，製作試體尺寸為 10cm ϕ x 20 cm 之圓柱試體，於各齡期進行劈裂抗張強度。
- (3) 超音波波速，依據 ASTM C597 規範，進行不同齡期之超音波波速，量測試體內部之波速，探討試體緻密性。
- (4) 四極式電阻，依據 ASTM C876 規範，藉由儀器量測出之電阻值，可表示為試體表面之緻密性之間接指標，電阻值越高表示試體表面孔隙越少，較能抵抗氯離子侵蝕，有較佳的耐久性。
- (5) 氯離子電滲試驗，依據 ASTM C1202 規範進行試驗，運用電流通過混凝土的電荷量多寡來判斷氯離子對混凝土的滲透性，量測齡期為 28 天及 91 天，探討試體緻密性。
- (6) 反彈錘試驗，參考 ASTM C805 之規定於不同齡期，進行反彈錘 R 值量測，求得混凝土表面的硬度，推測其抗壓強度。
- (7) 握裹強度試驗，參考 ASTM E488 規範，製作三塊大型混凝土試體並埋置鋼筋，於各齡期進行鋼筋握裹拉拔試驗，量測握裹強度。

三、結果與討論

3.1 抗壓強度

本研究以 560 kgf/cm² 設計強度混凝土，製作 ϕ 12cm \times 24cm 混凝土試體，於 7 天、28 天、56 天及 91 天養護齡期進行抗壓強度試驗，抗壓強度為強度時間變化使用之重要工程特性。

圖 1 及表 1 所示，混凝土設計強度 560kgf/cm² 時，其抗壓強度隨著齡期增加而有提高的趨勢；7 天齡期之抗壓強度在 49.86~51.68MPa，28 天齡期抗壓強度 58.8~62.1MPa；56 天齡期抗壓強度在 64.8~66.4MPa；91 天齡期抗壓強度在 67.5~69.1MPa，7 天及 28 天抗壓強度較為平緩。早齡期時的水化產物 C-S-H 膠體愈少，部分卜作嵐材料無法進行卜作嵐反應，將使早齡期強度越低。而其中取代水泥之卜作嵐材料中的爐石粉

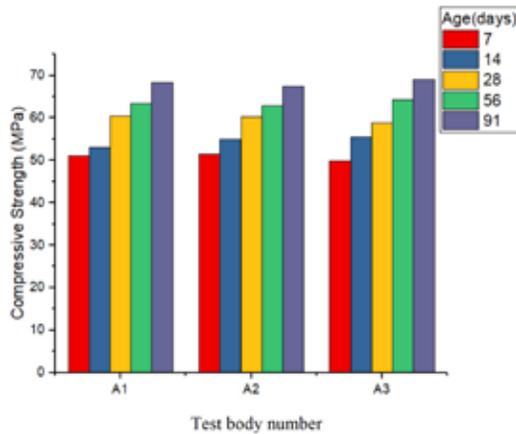


圖 1、不同養護齡期之高強度混凝土抗壓強度

對晚期強度有很大助益，隨著齡期增加卜作嵐反應將會不斷反覆進行，直到水化物氫氧化鈣 (CH) 完全被消耗為止，有助於長期強度之發展。

因早齡期混凝土中未起反應的卜作嵐材料顆粒介面越多，導致試體越不密實；而使抗壓強度降低，且水膠比的提升也會使試體孔隙增加造成抗壓強度降低，而於晚齡期隨著卜作嵐材料之卜作嵐反應持續作用，使抗壓強度提升。

3.2 劈裂強度

圖 2 所示，混凝土設計強度 560kgf/cm^2 時，其抗壓強度隨著齡期增加而有提高的趨勢，7 天齡期之抗壓強度在 $34 \sim 38\text{ MPa}$ ，28 天齡期抗壓強度 $42.3 \sim 44.3\text{ MPa}$ ；顯示 7 天至 28 天劈裂強度成長幅度 $14.3 \sim 19.8\%$ ，56 天齡期抗壓強度在 $47.7 \sim 50.3\text{ MPa}$ ；顯示 28 天至 56 天劈裂強度成長幅度 $11.3 \sim 12.1\%$ ，91 天齡期抗壓強度在 $52.3 \sim 53.1\text{ MPa}$ ，顯示 56 天至 91 天劈裂強度成長幅度 $5.3 \sim 8.7\%$ 。在混凝土配比設計中因添加了爐石粉導致早期強度較低晚期強度相對較高；而在齡期 7 天至 28 天漲幅較為明顯，在齡期 28 天至 91 天漲幅較為趨緩。

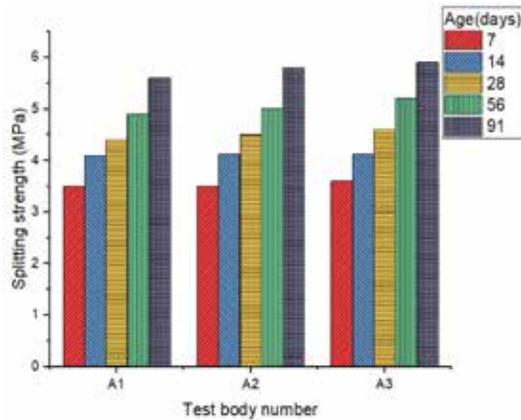


圖 2、不同養護齡期之高強度混凝土劈裂強度

3.3 超音波波速

超音波波速試驗一般用於檢測混凝土品質之優劣，屬非破壞性試驗，主要是為在不破壞試體之條件下進行超音波波速量測，波速之快慢可顯示混凝土內部緻密性與均質性程度，但其容易受到齡期、水膠比變化、水泥、拌合用水量及骨材種類與特性等特性影響而波速有所變化，具有操作簡便、過程迅速及可在現地直接量測等優點，對於混凝土強度之變化也有類似的趨勢，故常用於比較強度變化及品質評估。

圖 3 所示，一般養護下於 7 天齡期時超音波波速介於 4,486~4,615

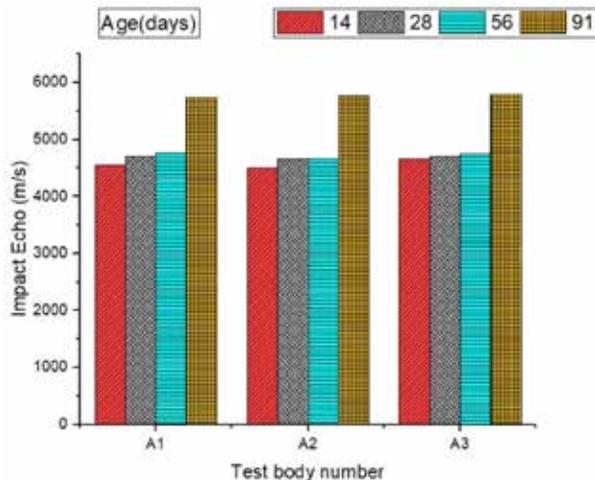


圖 3、不同養護齡期之高強度混凝土超音波波速

m/s 之間；在 14 天齡期時，其超音波波速介於 4,507~4,706m/s 間；在 28 天齡期時，其超音波波速介於 4,660~4,706 m/s 間；當 56 天齡期時超音波波速在 4,660~4,760 m/s 間；而達 91 天晚期齡期時，超音波波速介在 5,743~5,790m/s 間，顯示出混凝土於晚期時有較高的緻密性。超音波波速的傳遞快慢取決於試體結構的緻密性，當超音波波速提高，表示試體結構較為緻密。因早期卜作嵐材料的反應較為緩慢，早期波速成長較緩慢，但隨卜作嵐反應作用，試體孔隙被填充使試體有較佳緻密性，晚期波速成長幅度較明顯。

3.4 表面電阻

評估混凝土耐久性是以四極式電阻量測儀對表面電阻率進行檢測，意味著混凝土之緻密程度與耐久性有相對的關係，電阻越大表示其緻密性越佳。圖 4 所示，7 天早齡期時表面電阻值介於 9.7~10.4kΩ-cm 之間，顯示在水泥水化作用未完全反應，試體內部還充滿孔隙，導致早齡期各配比之電阻值均偏低。在 28 天齡期時，其表面電阻值介於 14.0 ~ 16.5kΩ-cm 間，電阻成長幅度約為 31.3%。

當 56 天齡期時表面電阻值在 23.3~24.3 kΩ-cm，期間電阻成長幅度約為 40.2%；91 天期齡期時，表面電阻值介在 33.3~35.0 kΩ-cm 間，電

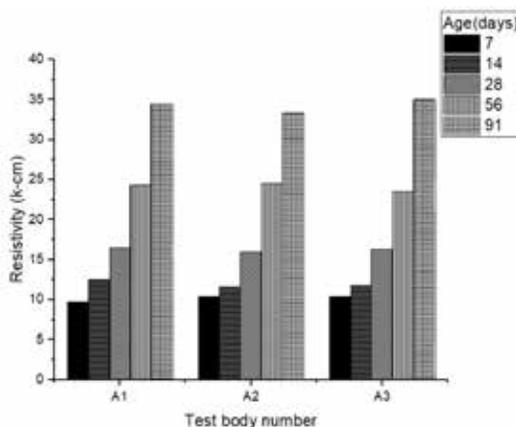


圖 4、不同養護齡期之高強度混凝土表面電阻

阻成長幅度約為 30.3%。顯示當齡期 56 天至 91 天時卜作嵐反應逐漸趨緩，波速成長幅度降低，且晚齡期時因水化作用時間較長，反應較完全，其試體結構的緻密性已趨於穩定所以成長幅度較不明顯。

由以上結果，電阻高低取決於試體結構的緻密性，當電阻提高，表示試體結構較為緻密。因爐石粉的取代，早期電阻成長較緩慢，但隨卜作嵐反應作用，試體孔隙被填充使試體有較佳緻密性，晚期電阻成長幅度較趨緩。電阻與超音波波速有相同之趨勢，能使試體有良好的緻密性與低滲透性，具有較佳之耐久性。

3.5 氯離子電滲

本試驗方法主要以混凝土導電性質的方式利用外加的 60V 直流電壓使得氯離子快速進入混凝土材料中，藉由量測得到的電流值計算 6 小時內總通過電量，用以評估混凝土抗氯離子滲透的能力。所有設計混凝土配比於試體到達養護齡期後依 ASTM C1202 標準進行試體前處理過程與 RCPT 過程。試驗結果顯示，於 56 天進行試驗時通過電荷為 2,155 ~ 2,475 庫倫，對應表 3 顯示混凝土有著中等的低滲透性【8】。

表 3、ASTM 電量與氯離子滲透性之關係【8】

Charge (coulombs)	Permeability of Cl-
>4000	High
2000~4000	Moderate
1000~2000	Low
100~1000	Very Low
<100	Negligible

3.6 反彈錘試驗

在測試物體的表面利用機械性敲擊產生暫態應力波動並導入物體

內，該應力波動包含有壓力波 (P-Wave)、剪力波 (S-Wave) 及表面波 (R-Wave)，其中壓力波及剪力波在物體內部依球狀的波形方式向前傳動，而表面波則沿著物體表面遠離敲擊點的方式向外擴散出去。當壓力波及剪力波遇到物體內部的瑕疵 (如裂縫及孔隙) 或物體的邊界時，將會被反射回去，這些反射波回到了敲擊面時，則產生表面的位移，此等位移反應可利用訊號接收器監測到。

圖 5 所示，7 天早期齡期時反彈錘反彈數 R 介於 35.0~36.4 之間；在 28 天齡期時，其反彈錘反彈數 R 介於 44.3~44.8 間；當 56 天齡期時反彈錘反彈數 R 介於 46.3~49.7 間；91 天期齡期時，反彈錘反彈數 R 介於 50.7~52.3 間，結果顯示出 R 值為混凝土抗壓強度的 70%。圖 6 所示，

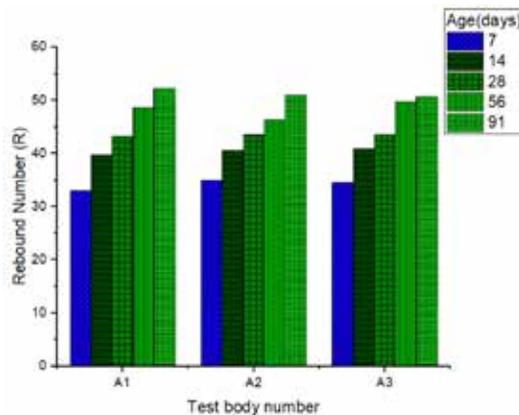


圖 5、不同養護齡期之高強度混凝土反彈錘試驗結果

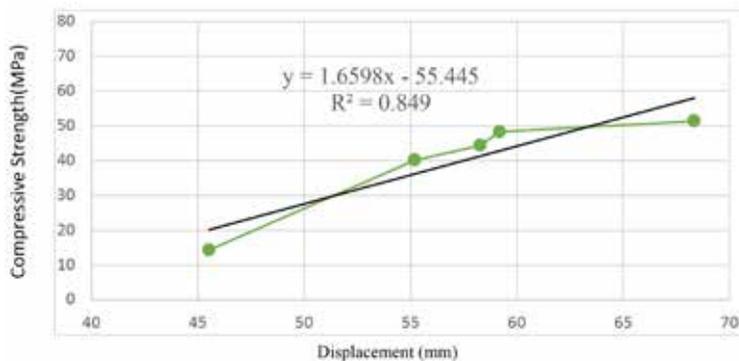


圖 6、反彈錘 R 值和抗壓強度之關係

通過將混凝土抗壓強度與反彈錘 R 值繪製回歸曲線有著高度的相關性，表示混凝土強度與 R 值是有著正相關的關係。

3.7 鋼筋握裹強度

本研究使用 2 種方式執行現地鋼筋拉拔之試驗，其一為符合 ASTM E488 拉拔試驗，另一為模擬 ASTM E488 拉拔試驗。然依試驗法 ASTM E488 規定，兩方法最主要之差異點為，執行拉拔時施加反力之承載點其跨距須為鋼筋埋置深度之 2 倍以上及測試時需架設測微表藉以了解施力時鋼筋與混凝土之相對位移量。故目前工程常是使用模擬 ASTM E488 試驗法來執行現地鋼筋拉拔試驗，其主要是因測試現地之空間侷限，無法滿足試驗法之要求（反力跨距須為鋼筋埋置深度之 2 倍以上）；測試較為快速、便利；另為符合 ASTM E488 拉拔試驗因機台因素，目前能量只能執至 #8 號鋼筋。

圖 7 及表 4 所示，無鍍鋅 #8 號鋼筋於 28 天齡期握裹強度為 19.1 及 19.3 MPa，有鍍鋅鋼筋（薄）#8 號鋼筋 28 天齡期握裹強度為 19.8 及 20.3 MPa，有鍍鋅鋼筋（厚）#8 號鋼筋，28 天齡期握裹強度 20.4 及 21.0 MPa。圖 7 及表 5 所示，無鍍鋅 #8 號鋼筋於 91 天齡期握裹強度為 20.8 及 21.1 MPa；有鍍鋅鋼筋（薄）#8 號鋼筋 91 天齡期握裹強度為

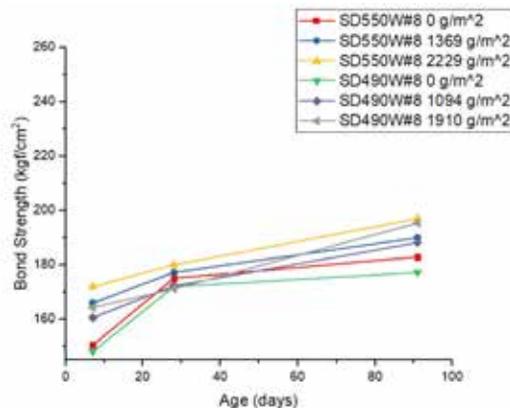


圖 7、不同養護齡期之高強度鍍鋅鋼筋混凝土之握裹強度

表 4、養護齡期 28 天符合 ASTM E488 鋼筋握裹拉拔強度

Steel grade	Steel type	Galvanized amount(g/m ²)	Bond Strength (kgf)	Bond Strength (MPa)	Bond Strength Average value(MPa)
SD490W	#8	0	24488	19.3	19.2
SD490W	#8	0	22852	19.1	
SD490W	#8	1369	22852	19.8	20.1
SD490W	#8	1369	24488	20.3	
SD490W	#8	1910	24488	20.4	20.7
SD490W	#8	1910	23670	21.0	

表 5、養護齡期 91 天模擬 ASTM E488 鋼筋握裹拉拔強度

Steel grade	Steel type	Galvanized amount(g/m ²)	Bond Strength (kgf)	Bond Strength (MPa)	Bond Strength Average value(MPa)
SD490W	#8	0	28579	21.1	20.9
SD490W	#8	0	28579	20.8	
SD490W	#8	1369	28988	22.3	21.9
SD490W	#8	1369	28988	21.6	
SD490W	#8	1910	29233	22.1	22.1
SD490W	#8	1910	29397	22.1	

21.6 及 21.9MPa，有鍍鋅鋼筋(厚)#8 號鋼筋，91 天齡期握裹強度 22.1 及 22.1 MPa；研究顯示雖然無鍍鋅鋼筋與鍍鋅量不同之鋼筋之握裹強度差異不大，但仍可觀察到有鍍鋅之鋼筋之握裹強度相較於無鍍鋅鋼筋有些微的提升。

四、結論

1. 於硬固性質中，抗壓強度皆隨齡期增加而增加，並且皆有達到設計強

度要求，於晚齡期時抗壓強度有顯著的提升。

2. 超音波波速皆隨著齡期的增加而增加，其波速均高於 4,500 m/s 顯示出有著良好的緻密性；表面電阻隨著齡期的增加也有明顯的提升，表現出於晚齡期時具有良好的抗侵蝕能力。
3. 超音波波速因添加卜作嵐材料能提供試體較佳緻密性，於晚齡期時因卜作嵐材料提供卜作嵐反應，因此波速有較佳之發展。
4. 鋼筋握裹強度中，握裹強度隨著齡期增長而增加，但鋼筋鍍鋅量並未對試驗結果造成較大的差異，因此判斷鋼筋鍍鋅量與握裹強度並沒有一個良好的關聯性；透過回歸曲線顯示鋼筋握裹強度與混凝土強度有著顯著的關聯性。
5. 高強度熱浸鍍鋅鋼筋混凝土，無鍍鋅鋼筋與鍍鋅量不同之鋼筋的握裹強度差異不大，但仍可觀察到有鍍鋅之鋼筋的握裹強度相較於無鍍鋅鋼筋有些微的提升。

五、參考文獻

1. 能源再生綠色產品促銷推廣暨成果發表會，經濟部工業局，2018。
2. 杜宗嶽，「永續性再生資源骨材混凝土之研究」，博士論文，國立台灣科技大學營建工程研究所，台北，2005。
3. 梁弘逸，「熱浸鍍鋅鋼材鐵鋁阻障層形成機構之研究」，碩士論文，國立中山大學材料與光電科學研究所，2010。
4. 林清俊，「鋼筋表層防蝕處理對鋼筋混凝土握裹行為影響之研究」，碩士論文，國立海洋大學河海工程研究所，2001。
5. 蔡明達，「熱浸鍍鋅鋼結構在花卉博覽會之應用」，帷幕牆會刊，第 45-53 頁，2011。
6. 黃兆龍，卜作嵐混凝土使用手冊，財團法人中興工程顧問社，台北，2007。
7. 高強混凝土配制的研究，黑龍江水利科技，2003，33(2)：84-85。
8. C.L. Hwang, High Performance Concrete Theory and Practice. James Publisher. Taipei. 2020.