

熱浸鍍鋅鋼筋對爐石混凝土握裹強度影響之研究

王和源¹、何芳元²、林冠婷³

1、3分別為國立高雄應用科技大學土木系教授及碩士

2.易宏熱鍍鋅工廠股份有限公司協理

摘要

環境保護與永續發展意識抬頭，如何處理廢棄物以符合資源再利用極為重要。本研究以設計強度 280kgf/cm^2 ，水膠比0.5，以爐石取代量水泥0%、10%、20%及30%，製作 $10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 之混凝土圓柱試體，齡期為7天、14天、28天、91天及120天，經過室溫養護進行新拌性質、工程性質，握裹強度及防蝕性能分析試驗。

研究顯示隨著爐石取代量增加，坍度略增加為160 mm可改善工作性。爐石取代量逐漸增加時，單位體積重會逐漸降低至 2393kg/m^3 ，凝結時間也會因取代量的增加而提高至1.04倍。抗壓強度因爐石取代量隨著齡期的增加而增加，28天齡期爐石取代量 20%之抗壓強度 380kgf/cm^2 ；120天齡期，爐石取代量提高至30%之抗壓強度為 445kgf/cm^2 ，較7天控制組高1.57倍。爐石粉因卜作嵐反應有助於提高握裹強度，鍍鋅鋼筋最大握裹強度斜率成長較普通鋼筋高，故鍍鋅鋼筋有較高的握裹強度。研究顯示熱浸鍍鋅鋼筋使用在爐石混凝土可提高握裹強度。同時可提高廢棄物再生利用的價值，達到對於環境保護之最大效益。

Properties of Bonding Strength Using in Slag Concrete with Hot-Dip Galvanized Reinforcing Steel

Her-Yung Wang¹, Fang-Yuan Ho², Kuan-Ting Lin³

¹ Professor, Department of Civil Engineering and Disaster Mitigation technology, National Kaohsiung University.

² Assistant Vice President, I Hong Hot-Galvanization Industrial Co.,Ltd

³ Master Programs, Department of Civil Engineering and Disaster Mitigation Technology, National Kaohsiung University.

Abstract

To reach the goal of environmental protection and sustainability, the reuse of solid wastes as resource material becomes important. This research focuses on design strength 280kgf/cm², water cement ratio 0.5, furnace slag different amount of recycled materials, 0%,10%, 20%, and 30%, serving as the test variables, making PHI 10cm×20cm of concrete cylindrical specimen, for 7 days, 14 days, 28 days, 56 days, 91 days and 120 days. After curing at room temperature testing and engineering properties of the fresh character, steel bond strength test.

The result of the research shows that replaced with furnace slag increases and highest slump can reach more than 160 mm with good workability. With furnace slag amount gradually increases and Unit Weight of Volume will gradually reduce about 2393 kg/m³ and the setting time will increases to 1.04 times and compressive strength from furnace slag different amount increases with the age.

In 28 days and 120 days test, compressive strength and supersonic wave velocity are higher than the control group, 7 days. Pozzolanic reaction helps to improve the bond strength, galvanized steel slope and maximum bond strength growth. Related databases will be established in the future to future research, enhance the value of waste recycling to achieve maximum economic benefit to environmental protection.

Keywords: Slag Concrete, galvanized steel, engineering properties, bond strength.

一、前言

由於土木建築業的迅速發展，使水泥用量也日益增加，而製成水泥會造成大量的二氧化碳的產生，使溫室效應更加嚴重，所以須找出可與水泥性質相近的再生材料，以減少對環境的衝擊並且達到再生利用之目的，而鋼筋混凝土結構設計中，梁柱桿件或樓板之拉應力及部份壓應力係假設由鋼筋來承擔，而混凝土除了承壓應力之外，還需藉接觸面，將拉應力傳遞至鋼筋，然而一旦鋼筋產生了鏽蝕導致握裹力降低，進而將對結構安全產生影響，為防範鋼筋的腐蝕，鋼筋表面鍍鋅即有效的防蝕方法之一。由於現階段混凝土皆有添加卜作嵐材料，對於鍍鋅鋼筋勢必產生不同程度的影響。在添加各種摻料是否會影響鋼筋與混凝土的工程性質或行為不得而知，因此本研究是針對現代混凝土常添加的摻料，如爐石取代部分水泥後對鍍鋅鋼筋之影響進一步探討。

二、文獻回顧

鋼筋之握裹設計係指其伸展長度或搭接長度之決定，其中伸展長度是讓鋼筋之拉力有效地傳遞至周圍混凝土。而搭接長度則使鋼筋之拉力傳遞至周圍混凝土再傳遞給相鄰之鋼筋，而鋼筋與混凝土則必須藉著握裹力來承擔應力。而影響握裹強度的發展包括有化學粘附力(Chemical adhesion)、摩擦力(Friction)以及作用在鋼筋表面竹節突緣之支承力。在竹節鋼筋中，握裹力主要是源自鋼筋表面竹節斜面上之支承力，而竹節斜面對鋼筋主軸有一傾斜角度，因而造成支承力可分解為兩個方向。其一在鋼筋直徑方向，稱為徑向分力，而為劈裂鋼筋之鋼筋周圍混凝土的主要力量。其二在鋼筋之主軸方向稱為軸向分力，而其大小則為握裹應力值【1,2】。

2.1 熱浸鍍鋅原理

熱浸鍍鋅(Hot dip galvanizing)最基本的製程，就是將鋼材直接浸入熔融的鋅浴中，使表面鍍覆一層鋅層以達鋼材防蝕功效，其防蝕原理分為隔絕保護與陰極防蝕。隔絕保護是藉由鋼材表面的鍍鋅層將鋼板與腐蝕環境隔離，此外鍍鋅薄膜氧化後生成的氧化鋅及氫氧化鋅為一緻密的保護薄膜，可做為第二種阻擋層以保護底材，並使銹蝕難以繼續侵入破壞鋼材。經過合金化處理的鍍鋅鋼板，表面可獲得一層較厚、緻密又不易溶解於水的暗灰色非活性氧化膜，能阻止氧化進一步發生。而陰極防蝕作用是使用相對於鋼材活性較高較易氧化的金屬，例如鋁、鎂、鋅，利用兩者間電位差產生防蝕電流，以達防蝕效果。鋅的電極電位比鐵的電極電位低(鋅為-0.762V；鐵為-0.440V)，當鍍鋅層不完整或是有破裂時，周圍的鋅會形成陽離子來保護此處鋼材，並抑制鋼材的腐蝕，稱為犧牲陽極的作用，相對地鋼材就能得到陰極防蝕的保護，相較於使用塗裝的防蝕方法更有效果。若塗層處有裂縫產生，銹蝕會迅速入侵至鋼材，引起鋼材膨脹及塗層剝落，同時會加速該處的腐蝕情況【3~6】。

2.2 爐石粉

爐石為一貫作業煉鋼廠在煉鋼過程中所產出的副產物，其主要成分為

SiO₂與CaO。爐渣由高爐排出冷卻所得之固體物，稱為爐石，依冷卻方式的不同，可分為水淬爐石與氣冷爐石二種。水淬爐石由於利用噴水使其快速冷卻，產生大量不完全結晶之玻璃質，微結構較為凌亂，活性較高，高量玻璃質而具有潛在的膠結能力【7】。而高爐石粉顆粒細微，添加於混凝土中可減少孔隙，增加混凝土緻密性，進而增加混凝土品質及耐久性【8】。爐石之水化作用較水泥為慢，藉由水泥在水化期間，所釋放出的氫氧離子，使爐石的玻璃質結構破裂及溶解，消耗氫氧化鈣，生成水化產物C-S-H膠體，可增加混凝土的緻密性，逐漸強化混凝土的硬固性質【9】。

公共工程委員會推動營建資源再生利用於公路工程中，其資源化相當豐碩如火力發建廠所產出飛灰約170萬公噸、煉鋼廠所產出之爐石約400萬公噸，產出量回收再生利用，藉此可節省工程成本外，亦可解決砂石料源短缺之問題，且研究顯示添加適當水淬爐石粉或飛灰等工業廢棄物取代水泥或砂，在工程品質或經濟效益都較單獨添加水泥優良【10，11】。

2.3 鋼筋表面防蝕處理對混凝土耐久性影響

鋼筋混凝土為複合材料，而混凝土亦是複合材料，倘若骨材或拌合水含有氯化物，或因設計不當採用較拙劣的耐久性設計規範；或因施工不確實造成混凝土產生多孔及龜裂現象，而結構物又位於高酸雨區、鹽害區或地下土壤含氯化物過量地區，混凝土易遭受氯、鎂、硫酸根等有害物入侵，使鋼筋的鈍態保護膜破壞，鋼筋就開始銹蝕，腐蝕達到相當程度，其腐蝕生成物會膨脹數倍造成混凝土崩裂，危害到結構安全。因此在鋼筋表面施行防銹處理如塗覆環氧樹脂或熱浸鍍鋅來防止鋼筋腐蝕，在重大工程中已普遍採用，如澎湖新跨海大橋採用塗覆環氧樹脂鋼筋；台北國際花卉博覽會夢想館、生活館及未來館，金門跨海大橋皆採用熱浸鍍鋅鋼筋等【12，13】。此種措施阻隔有害物接觸鋼筋破壞鈍態保護膜，以防止鋼筋產生腐蝕導致結構體之破壞。

2.4 鋼筋混凝土握裹力之破壞模式

鋼筋混凝土界面的破壞在前人研究中常以模擬梁柱各部位接頭及彎曲鋼

筋在梁柱外接頭中之錨定特性並建立理論模式，來預測各種載重行為下鋼筋之握裹滑移情形。一般理論模式的建立係利用：(1)鋼筋應力與應變關係、(2)鋼筋局部握裹應力與滑移關係、(3)彎勾起點之應力與滑移關係、(4)沿著鋼筋方向應力與滑移之連續性等四種模式【14，15】，其中由於鋼筋表面有竹節，鋼筋應力會在通過竹節後完全消失，當載重繼續增加鋼筋對於鋼筋混凝土握裹力於受力作用後產生摩擦阻力及鍵結能力，導致受力端混凝土產生圓錐形的開裂破壞【14，16】。

三、研究計畫

3-1 試驗材料

水泥採用台灣品牌水泥公司所生產之卜特蘭第 I 型水泥，品質符合 CNS 61 規範要求，水泥購進以塑膠帶密封，確保不受潮。天然砂石採用高雄高屏溪，篩分析之粒徑分佈曲線符合 ASTM C33 規範，比重、吸水率等基本性質試驗，如表 1 所示。爐石則使用符合 CNS12549 中聯爐石資源處理公司生產之水淬爐石。鋼筋使用一般鋼筋及鍍鋅鋼筋，皆為 SD420W#6 鋼筋進行試驗，並將鋼筋作熱浸鍍鋅處理。

3-2 試驗配比

鋼筋混凝土握裹力試體之混凝土材料配比如表 2 所示。本研究以 ACI 混凝土配比設計法計算設計強度 280kgf/cm^2 ，固定水膠比 0.5，以爐石粉再生材料取代水泥 0%、10%、20%、30%，經過室溫養護進行新拌性質試驗、工程性質試驗及鋼筋混凝土握裹試驗，探討對鍍鋅鋼筋之影響。製作 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 之混凝土圓柱試體，於養護齡期 7 天、14 天、28 天、56 天、91 天以及 120 天，進行新拌性質及工程性質試驗，並在製作試體時一併埋設鍍鋅鋼筋及一般鋼筋於混凝土試體內，比較握裹強度。

3-3 試體製作

1 試體尺寸，混凝土直徑 10cm，高度 20cm，將長度 40cm 之 #6 竹節鋼筋置於試

體中央。

2 材料主要為 $f_c=280\text{kgf/cm}^2$ 之預拌混凝土，40cm長之#6竹節鋼筋，10.5公分長之萬能角鐵，固定竹節鋼筋之鐵線。

3 握裹試體製作流程：

- (1)將鋼筋預埋入混凝土深度15公分處畫線註記，以兩塊萬能角鐵固定於註記處。
- (2)將混凝土分三次搗實製作，每層以圓鋼棒搗實25次，最後將預埋設之竹節鋼筋至於混凝土模型中央，並將混凝土抹平，即完成試體製作。
- (3)試體完成一天後拆除模型，同時放置於一般水及海水養護槽中養護28天。

四、結果與分析

4.1 氯離子含量檢測

依據規範(CNS13465)規定新拌混凝土之氯離子含量檢測皆要小於 0.3kg/m^3 ，如表3所示當爐石粉取代水泥時，氯離子含量範圍在 $0.035\sim 0.049\text{kg/m}^3$ 間，氯離子含量皆符合規範規定。

4.2 坍度

圖1及表4所示，新拌爐石混凝土之控制組坍度為14cm，爐石粉取代水泥10%時，坍度由14cm增加至15cm，爐石粉取代水泥20%時，坍度增加至16cm，當爐石粉取代水泥30%時，坍度為16cm，其因爐石表面較水泥不吸附水分，使游離水增加，若在相同拌和下水，坍度略為增加，所以使用爐石粉取代水泥可改善混凝土的黏結性與可塑性而提升工作性。

4.3 單位體積重

圖1及表4所示，新拌爐石混凝土之控制組單位重為 2403kg/m^3 ，爐石粉取代水泥10%時，單位重略降低為 2401kg/m^3 ，爐石粉取代水泥20%時，單位重為 2397kg/m^3 ，當爐石粉取代水泥30%時，下降至 2393kg/m^3 ，顯示單位重隨

著爐石粉取代量增加而降低；原因為爐石粉之比重較水泥來的小，因此取代量提升時，混凝土的單位重會逐漸降低。

4.4 凝結時間

圖 2 及表 4 所示，控制組初凝時間為201min，終凝時間為314min，由爐石取代水泥10%時，初凝時間為195min，終凝時間為322min，爐石取代量為20%時，初凝時間214min，終凝時間為332min，初凝及終凝時間較控制組分別增加1.06倍及1.1倍，當爐石取代量提高至30%，初凝及終凝時間分別增加至212min、329min，時間分別較控制組增加1.05倍，結果顯示隨著爐石取代量的增加，初凝及終凝時間會略為增加。

4.5 抗壓強度

圖3及圖4所示，混凝土設計強度 280kgf/cm^2 時，其抗壓強度隨著齡期增加而有提高的趨勢，爐石混凝土控制組齡期為7、14、28、56、91及120天時，一般養護抗壓強度分別為286、346、377、401、421及 425kgf/cm^2 ，控制組於人工海水養護抗壓強度分別為263、323、353、378、398及 403kgf/cm^2 。爐石粉取代水泥10%時，一般養護抗壓強度介於 $247\sim 446\text{ kgf/cm}^2$ 之間，人工海水養護抗壓強度介於 $261\sim 417\text{ kgf/cm}^2$ ，一般養護抗壓強度較人工海水高1.1倍。爐石粉取代水泥20%時，一般養護抗壓強度介於 $229\sim 448\text{ kgf/cm}^2$ 之間，人工海水養護抗壓強度介於 $259\sim 439\text{ kgf/cm}^2$ ，一般養護抗壓強度較人工海水高1.1倍。當爐石粉取代水泥30%時，一般養護抗壓強度介於 $283\sim 445\text{ kgf/cm}^2$ 之間，人工海水養護抗壓強度介於 $245\sim 441\text{ kgf/cm}^2$ ，一般養護抗壓強度較人工海水高1.2倍，由此可知，爐石取代量增加其抗壓強度也會提高，其因爐石對混凝土強度發展與水膠比及取代比例有很大的關係，若爐石取代量越高，早期強度發展越緩慢，。

4.6 握裹強度

圖5為典型的握裹破壞模式；而爐石粉末取代之控制組之普通鋼筋混凝土及鍍鋅鋼筋混凝土於位移量3mm時，握裹強度分別為3250psi及4010psi，鍍

鋅鋼筋混凝土握裹強度較普通鋼筋高1.23倍。圖6~圖9所示，當爐石取代量增加至30%時，普通鋼筋混凝土及鍍鋅鋼筋混凝土於位移量3mm時，握裹強度分別為2772psi及3953psi，鍍鋅鋼筋混凝土崩壞強度較普通鋼筋高1.42倍。結果顯示，隨著爐石取代量的增加，混凝土與鋼筋間的黏結力也會隨取代量的增加而提高，而在相同位移量下鍍鋅鋼筋最大握裹強度斜率相較於普通鋼筋高，顯示鍍鋅鋼筋握裹強度較佳；至於握裹力與滑移量關係圖之荷重會有上下變化的情況則為外圍混凝土崩壞所造成。

五、結論

1. 新拌混凝土由爐石取代水泥，會使坍度隨著取代量的增加而提高，進而達到良好工作性。
2. 單位體積重隨著爐石取代量的增加而降低，凝結時間也會因取代量的增加而提高至1.1倍。
3. 爐石混凝土抗壓強度會隨著爐石取代量不同及齡期的增加而增加，其控制組抗壓強度在7天時一般養護高於人工海水養護1.09倍。當爐石取代量提高至30%時齡期120天，抗壓強度一般養護高於人工海水養護1倍，一般養護之抗壓強度較人工海水佳。
4. 混凝土添爐石粉因卜作嵐反應有助於提高握裹強度。鍍鋅鋼筋最大握裹強度斜率成長相較於普通鋼筋高，顯示鍍鋅鋼筋握裹強度較佳。

致謝

感謝中華民國熱浸鍍鋅協會提供經費，易宏熱鍍工業股份有限公司協助鋼筋鍍鋅，使得本研究得以順利完成。

參考文獻

1. 黃士庭，「鋼筋於自充填混凝土樑中之握裹行為」，碩士論文，國立中興大學土木工程學系，2003。
2. A.R. Marder, The metallurgy of zinc-coated steel, Progress in Material Science, Vol. 45, 2000, PP. 191-271.

3. Pistofidis, N., Vourlias, G., Konidaris, S., Pavlidou, E., Stergiou, A. and Stergiou is, G., “Microstructure of zinc hot-dip galvanized coatings used for corrosion protection,” *Materials Letters* 60, PP.786-789, 2006.
4. Yu, J.S.,Zhang, J.X., Wu, J.S.,Liu, J.L. and Chen, J.G., “ The overview of the coating performance of galvanized sheet applied in automobile,” *PTCA (Part: A Phys. Test.)*,41,PP.325-328,2005.
5. Jordan, C.E., Goggins, K.M., Benscoter, A.O.and Marder, A.R., “Metallographic preparation technique for hot-dip galvanized and galvannealed coating on steel,” *Materials Characterization*, 31, PP.107-114, 1993.
6. 梁弘逸，「熱浸鍍鋅鋼材鐵鋁阻障層形成機構研究」，碩士論文，國立中山大學材料與光電科學學系研究所，2010。
7. A.Bilodeau and V.M Malhotra. Concrete Incorporating High Volumes of ASTM Class F Fly Ashes: Mechanical Properties and Resistance to Deicing Salt Scaling and to Chloride-Ion Penetration.Fly Ash,Silica Fume,and Natural Pozzolans in Concrete.V.M. Malhotra, Ed.Proceedings, Fourth International Conference. ACI SP-132.PP. 319-349.
8. T.R.Naik, Singh, S.Shiw,and Hossain,MMohammad,Abrasion Resistance of High-Strength Concrete Made with Class C Fly Ash, *ACI Materials Journal*,Vol.92,No.6,PP.649-659,1995.
9. T.R.Naik, S.Singh, B.W.Ramme, Effect of Source of Fly Ash on Abrasion Resistance of Concrete, Vol.33, PP.1877-1881, 2003.
10. ACI 233R-03 Slag Cement in Concrete and Mortar.
11. 吳崇豪，「爐石混凝土之抗衝擊磨耗性質研究」，碩士論文，國立中興大學土木工程學系，2004。
12. 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。
13. 蔡明達，「熱浸鍍鋅鋼結構在花卉博覽會之應用」，帷幕牆會刊，45~53頁，2011。
14. 宋明山、王和源、王耀南，「鍍鋅鋼筋對結構物巨微觀影響之研究」，熱浸鍍鋅雜誌，1~17頁，2003。
15. 王和源、黃兆龍，「鋼筋混凝土材料握裹界面的為觀特性」，結構工程，第五卷，第一期，中華民國結構工程學會，第45~53頁，1990。
16. Gyetoft,K.K.Cedrewal ,L.Elfrenand ,Nilsson ,Bond Failure in Reinforced Concrete Under Monatomic and Cyclic Loading ; A Fracture Mechanics Approach.SP75-13, PP269-288, 1982.

表1. 粗細骨材基本性質

性質	最大直徑	比重	單位體積重 (kg/m ³)	水吸收率 (%)
粗骨材	9.5	2.67	1578.4	2.67
細骨材	—	2.63	—	1.02

表2. 爐石混凝土配比單位重

單位: kg/m³

試樣	水泥	水	爐石	細骨材	粗骨材
S0	400	215	-	733	960
S10	360	215	40	733	960
S20	320	215	80	733	960
S30	280	215	120	733	960
W/B=0.5					

表3. 爐石混凝土氯離子含量檢測

試樣	氯離子濃度 (kg/m ³)
S0	0.049
S10	0.039
S20	0.043
S30	0.035

表4. 爐石混凝土之坍度試驗

N.O.	坍度 (mm)	坍度流動距離 (mm)	單位體積重 (kg/m ³)	凝結時間 (mins)
S0	140	205	2403	314
S10	150	210	2401	322
S20	160	200	2397	332
S30	160	205	2393	329

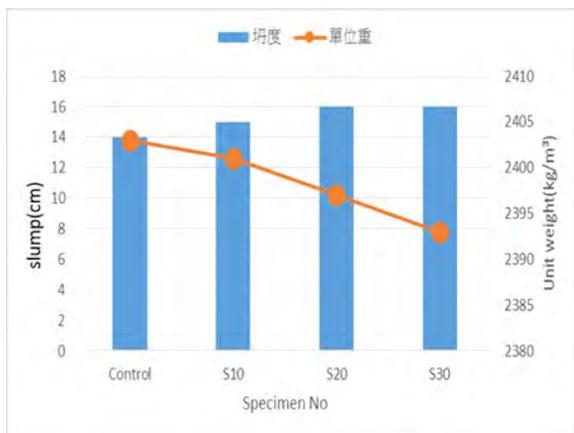


圖1. 爐石混凝土之坍度及單位重

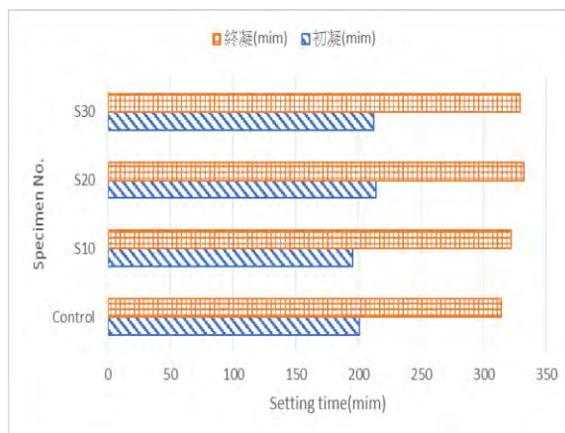


圖2. 爐石混凝土之凝結時間

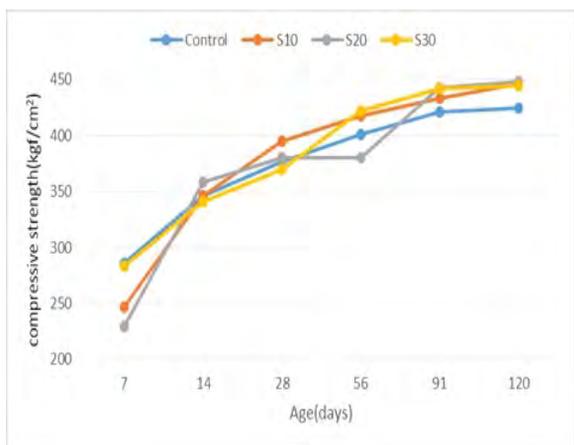


圖3. 一般養護之爐石混凝土抗壓強度

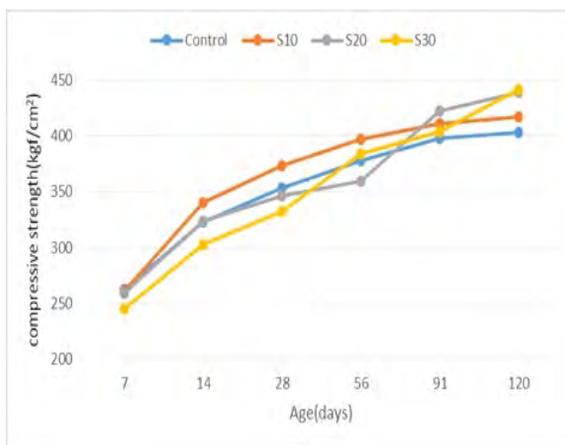


圖4. 人工海水養護之爐石混凝土抗壓強度



圖5. 典型鋼筋爐石混凝土握裹破壞模式

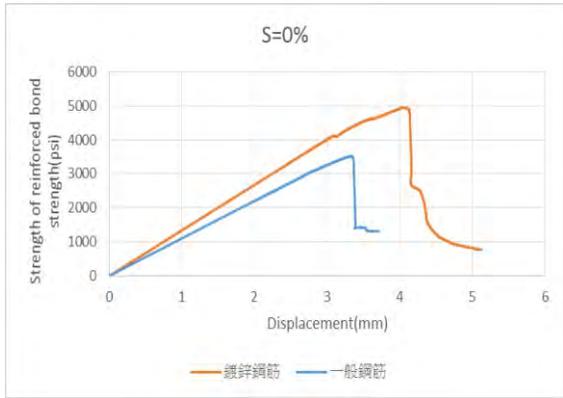


圖6. 鋼筋混凝土養護齡期28天 (S=0%)握裹—滑移量關係圖

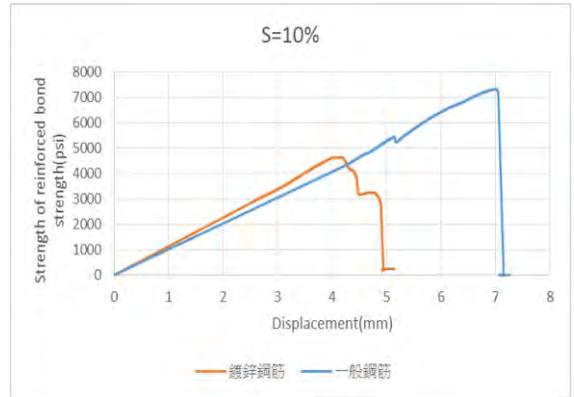


圖7. 鋼筋爐石混凝土(S=10%)養護齡期 28天握裹—滑移量關係圖

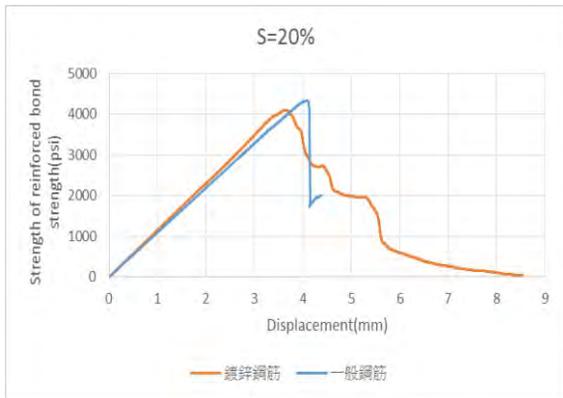


圖8. 鋼筋爐石混凝土(S=20%)養護齡期 28天握裹—滑移量關係圖

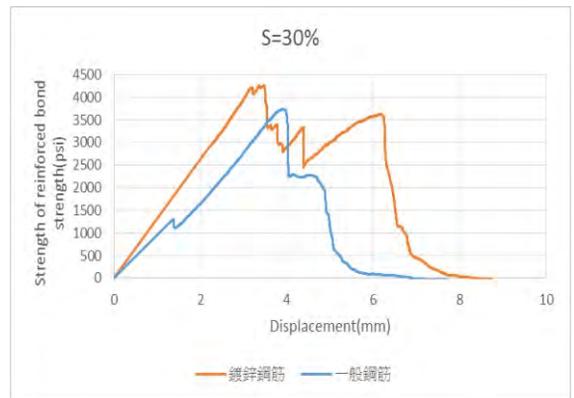


圖9. 鋼筋爐石混凝土(S=30%)養護齡期 28天握裹—滑移量關係圖