

不銹鋼氧化渣取代混凝土粗骨材之應用研究

沈永年*、林仁益、孫德和

Application of Stainless Steel Oxidizing Slag on the Replacement of Concrete Coarse Aggregate

Y. N. Sheen*, R. Y. Lin, T. H. Sun

摘要

目前國內尚未建立不銹鋼爐渣之明確使用規範，本文係探討以不銹鋼氧化渣取代混凝土粗骨材之可行性。研究結果顯示，不銹鋼氧化渣性質符合混凝土用粗骨材之品質要求，金屬溶出值在規範標準內。以不銹鋼氧化渣完全取代粗骨材之混凝土其 28 天抗壓強度為取代量 0% 之 1.14 倍。在電阻值、超音波速率上，不銹鋼氧化渣混凝土比一般骨材混凝土高。顯示以不銹鋼氧化渣取代混凝土粗骨材之混凝土較為緻密，可提高混凝土之抗壓強度。經由能量分散式光譜儀 (EDS) 分析骨材界面元素，結果顯示不銹鋼氧化渣混凝土會消耗 Na、K 鹼性元素，對鋼筋防蝕具有正面效益。由研究證明不銹鋼爐渣可應用於混凝土工程，當作取代混凝土粗骨材來使用，以達到資源化應用目的。

關鍵詞：不銹鋼氧化渣；粗骨材；耐久性；能量分散式光譜儀。

ABSTRACT

The objective of this research is aimed at establishing the stainless steel oxidizing slag to replace the coarse aggregate of concrete. The result shows that the properties of stainless steel oxidizing slag are conform to coarse aggregate and there are no the heavy metal dissolve problem. The concrete compressive strength of the stainless steel oxidizing slag to substitute 100% is 1.14 times of 0% for the coarse aggregate at 28 days age. The electric resistance and velocity of ultrasonic is better than the specimen of normal aggregate, namely the stainless steel oxidizing slag concrete is more compact and durable. By the Energy Dispersive Spectrometer (EDS) to analyze the section of mortar and coarse aggregate, the alkalinity element sodium (Na) and potassium (K) in the stainless steel oxidizing slag concrete are dissolved, that is helpful for reinforce bar to against erode in concrete. Results show that the stainless steel slag may apply to the coarse aggregate material of concrete to achieve resources recycle application .

Keywords: Stainless steel oxidizing slag; Coarse aggregate; Durability; EDS.

國立高雄應用科技大學土木工程研究所

Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Applied Sciences

* 連絡作者 (sheen@cc.kuas.edu.tw)

1. 前言

我國鋼鐵工業快速成長，煉鋼過程中伴隨之副產品爐渣也逐年增加，一般煉鋼爐渣在混凝土粒料之資源化應用，包括混凝土用高爐爐渣粗粒料 (CNS 11824)、混凝土用高爐爐渣細粒料 (CNS 11890) 等中國國家標準認可其適用性。而不銹鋼爐渣為不銹鋼廠以廢鐵冶煉不銹鋼之副產物，國內不銹鋼爐渣年產量約 30 至 50 萬噸，一般係以廢棄物來處理，目前並無明確的資源回收再利用的規範與方法。其中不銹鋼還原渣及氧化渣之應用研究已有初步成果^[1-3]。而在國內砂石日益短缺，部份仰賴進口砂石的同時，本研究即探求如何使用不銹鋼爐渣取代混凝土粗粒料，找出最佳之取代比例，以供相關業界參考使用。以期透過業界的使用去化，一方面減少不銹鋼煉鋼廢棄物，提升不銹鋼爐渣的經濟價值，再者改善國內之砂石材料因河川禁採所面臨的短缺現象。

2. 研究計畫

本研究以經破碎、篩分及磁選的三分和六分粒徑的不銹鋼氧化渣取代混凝土一般粗骨材 0%、25%、50%、75%、100% 來探討不銹鋼爐渣混凝土之性質。本試驗之材料乃以放置於自然環境六個月以上之不銹鋼氧化渣。首先檢測不銹鋼爐渣三分及六分料之粗骨材基本性質，再輔以相關試驗印證其混凝土工程性質。混凝土圓柱試體之配比，係依據 CNS 規範之混凝土配比設計方法，求得各項材料的用量，配比資料如表 1 所示。

2.1 骨材性質試驗

粗骨材級配試驗依 CNS 486 規範求取不銹鋼氧化渣之粒徑分佈與細度模數 (FM)，以作為混凝土強度設計的依據，並依規範檢核不銹鋼氧化渣是否合於混凝土粗骨材之級配要求。粗骨材比重試驗依 CNS 488 之規定求取不銹鋼氧化渣之比重，以作為混凝土強度設計時計算不銹鋼氧化渣的用量。至於粗骨材空隙率試驗則依 CNS 1163 規定求取不

銹鋼氧化渣之空隙率，與天然骨材之空隙率比較，以驗證不銹鋼氧化渣之適用性。

2.2 耐久性試驗

粗骨材磨損試驗採用符合 CNS 490 及 ASTM C131 規範規定之洛杉磯試驗機測定不銹鋼氧化渣之磨損率，以判定其堅硬程度。粗骨材健性試驗則依 CNS 1167 規定檢核不銹鋼氧化渣之健性，以了解不銹鋼氧化渣用於混凝土粗骨材之耐久性。

2.3 硬固性質試驗

依據不銹鋼氧化渣基本性質測試結果，以不銹鋼氧化渣取代 0%、25%、50%、75% 與 100% 粗骨材，再依 CNS 規範設計混凝土配比。混凝土抗壓強度試驗依 CNS 1230 及 1232 之規定進行混凝土試體抗壓強度試驗，以探討不銹鋼氧化渣取代粗骨材之混凝土抗壓強度，是否合於 CNS 規範之設計要求。混凝土超音波試驗：混凝土的波速與其組成材料之彈性性質及密度相關，不同種類的骨材，由於其波速有所差異，將會影響到混凝土整體之波速表現^[4]。本試驗依據 ASTM C597 之相關規定對混凝土試體進行超音波量測，以探討混凝土試體在不銹鋼氧化渣不同取代量及不同齡期下，超音波波速的變化之差異，以分析不銹鋼氧化渣對混凝土之影響，藉此瞭解不銹鋼氧化渣混凝土的緻密程度。

混凝土導電性能與其微結構及孔隙內部電解質溶液之成份與濃度有關，影響電阻值最大的因素是混凝土微觀結構的緻密程度^[4,5]。又混凝土電阻係數是混凝土內部孔隙水份多寡與連通性的一個指標，亦與混凝土的品質相關的。電阻係數為水泥含量、水灰比、養護條件及添加物等因素所控制，現亦為評估混凝土中之鋼筋腐蝕程度的參考指稱。本試驗依據 AASHTO T277 之相關規定對混凝土試體於不同齡期進行混凝土電阻值量測，以分析不銹鋼氧化渣混凝土對鋼筋防腐蝕效能之良窳。

2.4 微觀分析試驗

以 SEM 分析混凝土在不銹鋼氧化渣不同取代

量及不同齡期下之組成狀態，並以 EDS 來分析其組成成份，以瞭解由不銹鋼氧化矽取代混凝土骨材後其組成成份是否與一般骨材有所不同。

2.5 金屬溶出試驗

以金屬溶出測試方法分別檢驗不銹鋼氧化矽及還原矽之金屬溶出值，是否合於環保要求，以確認不銹鋼矽在應用於混凝土材料時會不會對環境造成污染，是否能進行資源化之應用。

3. 結果與分析

3.1 基本性質分析

將經破碎、磁選及篩分之不銹鋼氧化矽三分及六分粒徑依取樣方式取料，再以標準篩進行篩分析，試驗結果如表 2 所示。顯示不銹鋼氧化矽之三分及六分粒徑以 1:1 比例混合，能符合混凝土粗骨材之級配要求。再以 1:1 比例之混合料進行比重試驗，試驗結果如表 3 所示，得不銹鋼氧化矽之比重為 2.9，比一般骨材比重 2.6~2.7 略高，故以不銹鋼氧化矽取代一般粗骨材，混凝土單位重會提高，此為決定其取代量時須注意考量的因素。由於不銹鋼氧化矽之外觀為多稜角型，故在堆積時會產生較大的孔隙空間，如表 3 中不銹鋼氧化矽之空隙率比一般粗骨材大。從上述不銹鋼氧化矽粗骨材的基本性質試驗結果，顯示不論是骨材級配、比重值及空隙率皆與一般骨材相近，且符合相關規範規定。即不銹鋼氧化矽可應用於混凝土材料中，取代粗骨材來使用。

3.2 耐久性分析

以洛杉機試驗機測定不銹鋼氧化矽及一般骨材之磨損率，如表 3 所示。顯示不銹鋼氧化矽之磨損率比一般骨材略高，但尚在 CNS 1240 粗骨材磨損率應小於 50% 之要求規定內。又不銹鋼氧化矽浸泡在飽和硫酸鎂溶液中五次循環之損耗結果，如表 3 所示。其損耗量為 3.06%，比 CNS 1240 規範中粗骨材要求的碎石、礫石損耗量 18% 及空氣冷

卻爐矽損耗量 12% 低，顯示不銹鋼氧化矽之硫酸鹽腐蝕損耗量符合規範要求。上述試驗結果顯示，不銹鋼氧化矽其堅硬程度及硫酸鹽腐蝕損耗量皆符合 CNS 粗骨材規範要求，可作為混凝土之骨材使用。即不銹鋼氧化矽使用於混凝土粗骨材時，具有耐磨損及抵抗風化的能力。

3.3 硬固性質分析

由不銹鋼氧化矽分別取代混凝土粗骨材 0%、25%、50%、75%、100% 之 10cm×20cm 圓柱體，依 CNS 1232 規範進行 7 天、28 天、56 天、90 天、120 天、180 天與 240 天齡期之抗壓強度試驗，結果如圖 1 所示。由圖中顯示，於各齡期混凝土之抗壓強度會隨著不銹鋼氧化矽之取代骨材量的增加而增加（取代量 25% 在 180 天齡期抗壓強度比 0% 較低除外），並且以不銹鋼氧化矽完全取代粗骨材（取代量 100%）之抗壓強度為最佳。就抗壓強度而言，一般粗骨材混凝土（取代量 0%）於 28 天齡期之抗壓強度為 356 kg/cm²，不銹鋼氧化矽完全取代粗骨材混凝土（取代量 100%）於 28 天齡期之抗壓強度為 407 kg/cm²，強度比值為取代量 0% 時之 1.14 倍。由試驗結果顯示，就不銹鋼氧化矽來取代粗骨材之強度效益而言，具有正面的效果，並且以不銹鋼氧化矽完全取代粗骨材的效益為最佳。

造成不銹鋼氧化矽混凝土抗壓強度高於一般粗骨材混凝土的原因，乃在於不銹鋼氧化矽表面的多稜角及多孔性。由於其粗糙表面造成與水泥砂漿接著面積增加，而提高粗骨材與水泥砂漿的鍵結能力，此種機械性質，可以提高不銹鋼氧化矽混凝土的抗壓強度，此與文獻^[6,7]中研究結果相同。

由於混凝土是由粗骨材、細骨材及水泥砂漿所組成的複合材料，內部產生很多的界面或缺陷，此界面或缺陷可藉由非破壞檢驗的超音波，以量測脈波在介質的傳遞速度來評估^[8]。一般而言，粗骨材的波傳速度大於細骨材，細骨材的波傳速度大於水泥砂漿，所以混凝土中粗骨材含量越多，其超音波速越快^[9]。由此可知，混凝土之單位重越大者，其

超音波速也越快。

圖2 為不銹鋼氧化矽混凝土於不同齡期之超音波波速，顯示於各齡期混凝土之超音波波速會隨著不銹鋼氧化矽之取代骨材量的增加而提高。即不銹鋼氧化矽取代粗骨材混凝土之 10 cm × 20 cm 圓柱體超音波波速，皆比一般粗骨材混凝土（取代量為 0%）為高，並以不銹鋼氧化矽取代一般粗骨材 100% 時其超音波波速為最快；其原因為不銹鋼氧化矽比重較大，故不銹鋼氧化矽混凝土單位重較大，導致其超音波波速較快。又不銹鋼氧化矽粗骨材因表面多棱角及多孔性，與水泥砂漿之結合較為緊密，其緻密程度比一般粗骨材混凝土高，導致超音波波速亦較快。

混凝土導電性能與其微結構及孔隙內部電解質溶液之成份與濃度有關，而影響電阻係數最大的因素是混凝土微觀結構的緻密程度^[10, 11]。圖3 為不銹鋼氧化矽混凝土於不同齡期之電阻值，顯示隨著齡期增加與不銹鋼氧化矽取代粗骨材比率增加，混凝土電阻係數皆有提高的趨勢。即以不銹鋼氧化矽取代粗骨材，對混凝土電阻係數的改善有正面效益。由上述之混凝土硬固性質試驗結果顯示，以不銹鋼氧化矽取代粗骨材之混凝土，會隨著取代粗骨材量增加而使硬固性質愈佳，並且以取代量 100% 時為最佳。

3.4 微觀組織分析

圖4 為齡期 28 天之混凝土中砂漿與骨材之界面過渡區微觀組織分析圖，顯示於不銹鋼氧化矽取代粗骨材量為 0% 及 100% 時，在界面處皆有微裂縫產生，並且水化生成物大都以 3D 網狀水化生成物為主，由微觀組織發現其間的差異不大。再經由骨材與砂漿界面的元素分析，可瞭解其水化生成物之變化。表4 為不銹鋼氧化矽混凝土於 28 天、90 天與 120 天齡期，及取代粗骨材量為 0% 與 100% 之混凝土中砂漿與骨材間界面之能量分散光譜資料 (EDS)。由元素分析表中顯示，於不同齡期之漿體與骨材界面之元素，由於不銹鋼氧化矽取代一般粗骨材，導致鹼性元素 Na 與 K 消失減少，此現象係

漿體與骨材之界面過渡區，因不銹鋼氧化矽之成份中含有矽、鈣、鋁的氧化物溶出，這些氧化物具有卜作嵐材料特性，會與鹼性元素 Na、K 結合產生體積穩定的膠體，進而消耗混凝土中 Na 與 K 之鹼性物質含量。上述微觀組織分析顯示，以不銹鋼氧化矽取代粗骨材，在漿體與骨材之界面過渡區，會產生卜作嵐材料反應而消耗 Na、K 鹼性物質，使得混凝土材料避免產生鹼骨材反應及白華現象，這對混凝土之耐久性有正面的助益。

3.5 金屬溶出試驗

表5 為不銹鋼氧化矽之金屬溶出試驗結果，顯示其金屬溶出值合乎規範標準，故可應用於混凝土材料中來使用。綜合上述各項試驗結果，顯示不銹鋼氧化矽在基本性質與耐久性上皆符合 CNS 規範要求標準，且金屬溶出值合於規範標準。在混凝土硬固性質上除了單位重較重外，其餘各項性質皆優於一般粗骨材混凝土。在取代比例中，以不銹鋼氧化矽取代粗骨材 100% 時具有最佳的工程性質。

4. 結論

本研究藉由相關試驗探討不銹鋼氧化矽混凝土之各項工程性質，獲得以下幾點結論：

1. 不銹鋼氧化矽之級配、空隙率、磨損率及健性，皆符合 CNS 粗骨材規範要求。但不銹鋼氧化矽比重略高於一般粗骨材，導致不銹鋼氧化矽混凝土單位重較大，可應用於結構物基礎工程上，以增加結構物抵抗上浮力之穩定性。
2. 不銹鋼氧化矽取代混凝土粗骨材之混凝土硬固性質分析結果顯示，混凝土抗壓強度以取代 100% 時為最佳，且 28 天強度比值為取代量 0% 時之 1.14 倍；混凝土超音波波速試驗以取代 100% 時之混凝土波速最快；混凝土電阻值於取代 100% 時為最大。顯示以不銹鋼氧化矽完全取代混凝土粗骨材，可以增加混凝土抗壓強度及緻密性，比一般骨材具有較佳之工程性質。
3. 由金屬溶出測試結果顯示不銹鋼氧化矽金屬溶出值皆在法規要求標準之內，證明其對環境不會造

成影響，可以應用於混凝土工程材料。

4. 由混凝土中砂漿及骨材之界面過渡區的能量光譜定性分析資料結果顯示，不銹鋼氧化渣具有卜作嵐材料特性會消耗 Na、K 鹼性物質，會使混凝土材料降低鹼骨材反應及白華現象的體積膨脹，對混凝土之耐久性有正面的助益。

誌謝

感謝高雄應用科技大學專題研究計劃 (KUAS 93-CI-001) 提供研究費用，及華新麗華股份有限公司提供本研究之不銹鋼爐渣材料。

參考文獻

1. 沈永年、王和源、蕭富昌、關聖立、孫德和、黃敬文、張真良，“不銹鋼爐渣取代水泥用量之性質研究”，中華民國防蝕工程學會九十二年會員大會暨論文發表會，墾丁，2003年，C12，第89頁至98頁。
2. 沈永年、林仁益、關聖立、孫德和、盧俊文、鍾文豪，“不銹鋼氧化渣取代混凝土粗骨材之性質研究”，第四屆海峽兩岸材料腐蝕與防護研討會論文集，台灣-南投，2004年，第249頁至260頁。
3. 孫德和(沈永年指導)，“不銹鋼爐渣在混凝土材料之應用研究”，國立高雄應用科技大學土木工程與防災科技研究所碩士論文，2004。
4. S. C. Pal, A. Mukherjee, and S. R. Pathak, "Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol 33 (2003) pp.1481~1486.
5. C. A. Yoda and T. Yokomuro, "Pore Structure, Strength and Carbonation of Cement Pastes Containing Ground Granulated Blast-Furnace Slag", Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. *Proceedings Sixth International Conference*, Bangkok, Thailand, Vol. 2, 1998, pp.875~900.
6. 吳泓昱，“電弧爐氧化渣特性及取代混凝土粗骨材之成效研究”，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2001。
7. 鄭清元，“電弧爐煉鋼爐渣特性及取代混凝土粗骨材之研究”，國立中央大學土木工程研究所，碩士論文，2000。
8. 沈永年、黃兆龍，“連續超音波速解析高性能混凝土之強度特性”，*中華民國建築學會建築學報*，第23期，1997年，第67~74頁。
9. 賴朝鵬、顏聰、林宜清，“混凝土材料組成與波傳速度關係之研究”，*中國土木水利工程學刊*，第十五卷，第二期，2003年，第395~403頁。
10. 湛淵源、黃兆龍，“混凝土電阻性質與氯離子電滲行為之探討”，*中國土木水利工程學刊*，第十三卷，第二期，2001年，第293~302頁。
11. 沈永年、王和源、林仁益、郭文田，in：“混凝土技術 (ISBN 957-21-4045-X)”，全華科技圖書股份有限公司，(台灣，台北，2002)，P.342。

收到日期：2004年7月31日

修訂日期：2005年2月24日

接受日期：2005年3月1日

表1 含不銹鋼爐渣粗骨材混凝土配比 (kg/m³)。

Table 1 Mixture proportions of NSHPC (kg/m³).

材料	氧化渣取代粗骨材量(%)					
	0	25	50	75	100	
水泥	386	386	386	386	386	
水量	193	193	193	193	193	
粗骨材	一般骨材	1051	788	525	263	0
	不銹鋼渣	0	278	556	835	1113
細骨材	718	736	754	770	785	
單位重	2348	2382	2414	2446	2477	

表2 不銹鋼氧化渣粗骨材級配試驗。

Table 2 Sieve analysis of stainless steel oxidizing slag.

篩號	通過百分率(%)				CNS 規範 (Dmax=1 in)
	Sample 1	Sample 2	Sample 3	平均	
1 in	100	100	100	100	95~100
3/4 in	81	76	79	79	
1/2 in	43	42	42	42	25~60
3/8 in	12	11	9	11	
No.4	0	0	0	0	0~10
底盤	0	0	0	0	0~5
FM 值	7.07	7.13	7.12	7.11	5.5~7.5

表3 不銹鋼氧化渣基本性質試驗。

Table 3 Basic properties of stainless steel oxidizing slag.

性質	比重	空隙率(%)	磨損率(%)	健性損耗量(%)
試驗值	2.9	41	32.44	3.06
CNS 1240 規範要求	—	—	< 50	爐渣 < 12, 碎石 < 18

表4 不銹鋼氧化渣混凝土漿體與骨材界面 EDS 分析。
Table 4 EDS analysis of interface between stainless steel oxidizing slag and paste.

Element	Weight (%)					
	28 days		90 days		120 days	
	0%	100%	0%	100%	0%	100%
C	9.95	-	11.55	-	5.31	-
O	50.88	33.61	55.3	37.37	42.04	47.56
Na	0.4	-	-	-	-	-
Mg	-	-	1.36	-	1.31	-
Al	1.11	-	1.49	-	4.9	2.84
Si	7.33	8.5	7.75	5.78	5.14	8.39
K	0.94	-	0.63	-	0.7	-
Ca	28.8	55.93	20.55	53.38	30.8	39.56
Mn	-	-	-	3.47	-	-
Ti	-	-	-	-	0.44	-
Fe	0.6	1.96	1.35	-	9.35	1.56
Totals	100	100	100	100	100	100

表5 不銹鋼爐渣金屬溶出檢測值。
Table 5 Result of leaching test.

金屬溶出量(mg/L)	氧化渣	還原渣	規範標準(mg/L)
Cu	ND	ND	—
Cr	0.56	0.12	5.0
Cd	< 0.01	< 0.01	1.0
Pb	0.11	< 0.1	5.0
Zn	—	—	—
As	< 0.0005	0.0018	5.0
Hg	0.0007	0.0006	0.2
Cr ⁺⁶	—	—	2.5

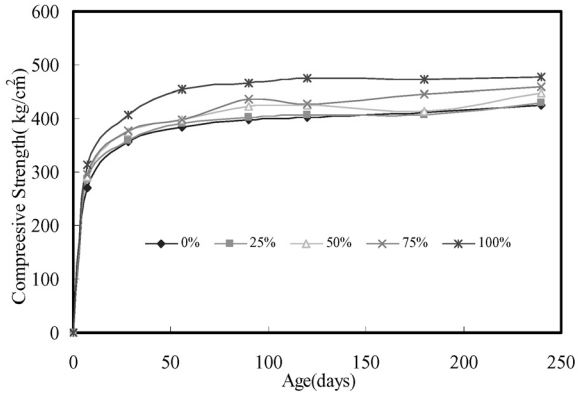


圖1 不銹鋼氧化矽混凝土抗壓強度試驗。
Figure 1 Compressive strength of stainless steel oxidizing slag concrete.

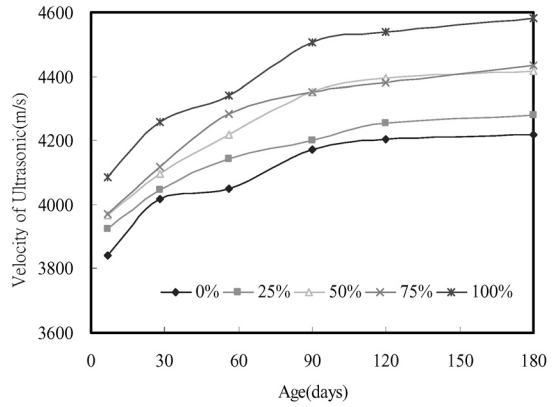


圖2 不銹鋼氧化矽混凝土超音波波速。
Figure 2 Ultrasonic velocity of stainless steel oxidizing slag concrete.

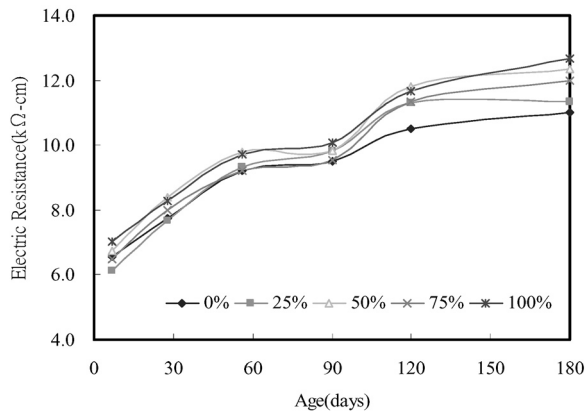


圖3 不銹鋼氧化矽混凝土電阻值。
Figure 3 Electric resistance of stainless steel oxidizing slag concrete.

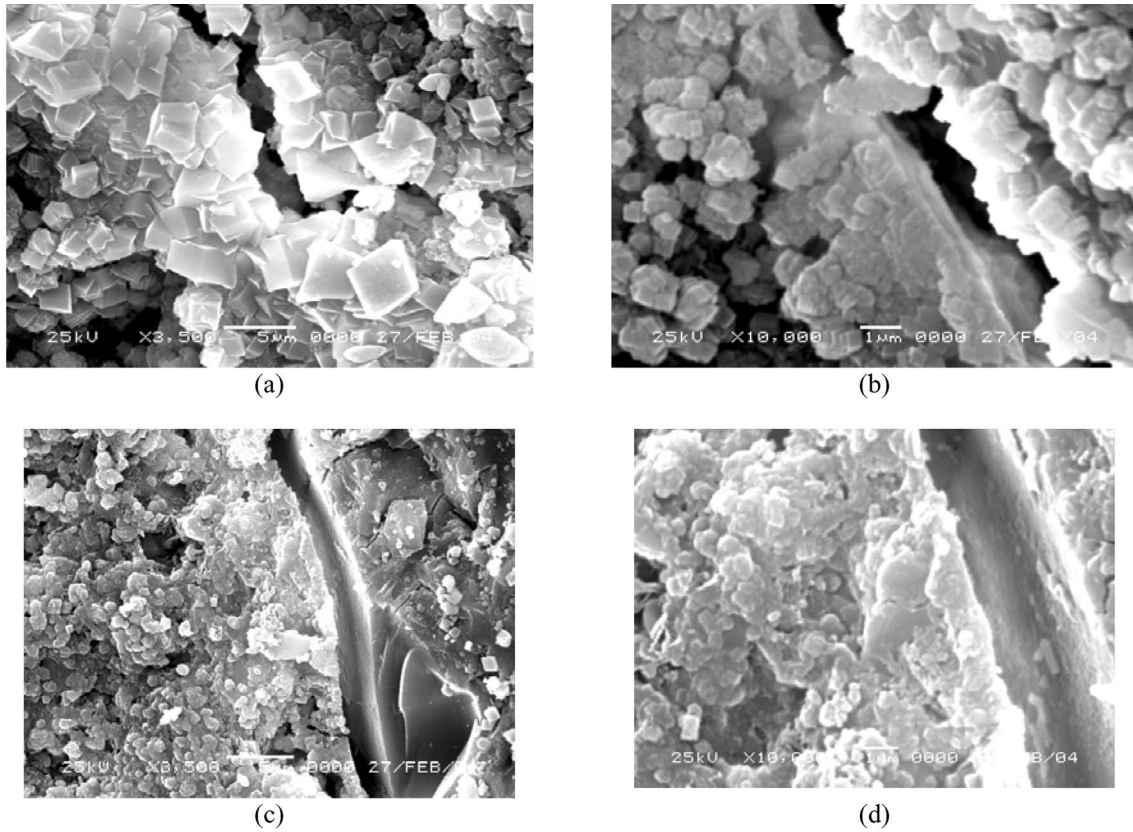


圖4 不銹鋼氧化渣混凝土砂漿與骨材界面過渡區 SEM 微觀組織圖，(a)、(b) 一般骨材界面過渡區 (0%，28天)，(b)、(d) 不銹鋼氧化渣界面過渡區 (100%，28天)。

Figure 4 SEM picture of interface between stainless steel oxidizing slag and mortar, (a) and (b) commercial aggregate (0%, 28 day), (c) and (d) stainless steel oxidizing slag (100%, 28 day).

