

應用氧化矽為耐磨材料之研究

王偉哲 聯合大學土木與防災工 程學系教授	莊慶福 聯合大學土木與防災工 程學系助理教授	李增欽 聯合大學土木與防災工 程學系教授
王承德 聯合大學土木與防災工 程學系教授	劉興懋 聯合大學土木與防災工 程學系碩士生	彭勝暘 聯合大學土木與防災工 程學系碩士生

摘要

電弧爐氧化矽係電弧爐煉鋼氧化過程中所產生的副產物，一般應用於回填及路基材料，經濟價值較低。本研究為提升氧化矽之經濟效益，將其應用為抗磨損材料，首先進行七種細骨材(標準砂、氧化矽、耐磨砂、棕剛玉、天然砂、耐磨砂 2 號及耐磨砂 3 號)之基本物理性質包括吸水率、比重、篩分析及粒料健性試驗。其次，由七種細骨材篩分析試驗的結果，依 CNS 1010 規範中各項材料配比拌製水泥砂漿，測試砂漿流度及製作抗壓試體，將標準砂當成標準組，比較不同細骨材粒徑與不同種類細骨材在相同級配粒徑下，工作度與抗壓強度的變化。另外，利用 XRD 以及 SEM 分析材料之主要成分及微觀結構。最後依照 CNS 14792 混凝土抗磨性試驗法製成水泥平板，比較 28 天齡期之抗磨損能力，探討七種不同細骨材所製作平版，在不同種類細骨材及不同級配下之磨損率，分析氧化矽與一般傳統抗磨損材料(如耐磨砂和棕剛玉)耐磨損能力的差異，藉此明瞭氧化矽應用於耐磨材料之可行性與適用性。

關鍵字：氧化矽、耐磨性試驗法、健性試驗、砂漿抗壓強度

A study on using the Electric Arc Furnace Oxidizing Slag as a Abrasion Resistance Material

Abstract

Electric arc furnace (EAF) oxidizing slag is a byproduct generated by the EAF steelmaking process. The processed oxidizing slag is typically used as backfill or roadbed material, providing low economic value. To enhance the economic benefits of oxidizing slag, this study adopted oxidizing slag as an abrasion-resistant material. This study first tested the basic physical properties of seven fine aggregate, which involved water absorption, specific gravity, sieve analysis, Mohs hardness, and aggregate soundness testing. Second, based on the sieve analysis of seven fine aggregate types and various material ratios as specified by Chinese National Standards (CNS) 1010, this study fabricated cement-mortar compressive blocks and abrasion-resistant plate specimens, tested mortar fluidity, and used standard sand as the control group to compare variations in the workability and compressive strength of varying fine aggregates of identical and diverse grades. In addition, this study employed X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) to analyze the main components and microstructure of the material. Finally, based on the CNS 14792, a method for testing the abrasion resistance of concrete was adopted. This study fabricated cement plates and compared the 28-day abrasion resistance to investigate the abrasion rates of cement plates composed of various fine aggregates of different grades, and to analyze the difference in abrasion resistance between oxidizing slag and traditional abrasion-resistant material (such as emery and corundum). The feasibility and applicability of oxidizing slag used as abrasion-resistant material was evaluated.

Keyword: oxidizing slag, abrasion resistance test, soundness test, compressive strength of mortar

一、前言

電弧爐氧化渣係電弧爐煉鋼生產過程中氧化階段的副產物，當廢鋼熔融後，即加入氧化劑，使熔鋼內之雜質氧化與加入之熔劑（如石灰）結合成複雜化合物即為爐渣，而與熔鋼分離冷卻後，經磁選、破碎、篩分等加工處理，即可將之資源化再利用，一般應用於回填及路基材料[1]，Yeong-Nain Sheen 等學者[2]曾將氧化渣，以不同細度取代混凝土粘結材料。Carlo Pellegrino 等學者[3]則對爐渣取代粗骨材級配取代率進行研究，結果顯示高取代率並不會影響混凝土的力學特性，可以取代部分天然骨材。陳立[4]則對氧化渣物化性分析，其中，浸水膨脹試驗顯示爐渣會產生少量之膨脹(約 0.1%)，故需經安定化處理後方可應用於混凝土中。林凱悅[5]將鐵礦渣再利用於鋪面工程之研究，成效與天然骨材相若，且具有天然骨材所沒有之成效特性，如：可縮短應用於 CLSM 時之凝結時間、應用於瀝青混凝土之抗剝脫與卵石當量...等。黃千紋[6]利用煉鋼電弧爐熔爐熔融垃圾焚化飛灰評估其環保及經濟效益，融熔後產生之爐渣，屬一般廢棄物，可回收再利用。Gao Yun-ming 等學者[7]應用動力學模型描述 FeO 的電化學氧化還原過程。Ryo Nishimoto 等學者[8]使用 HNO₃, HF 和 NH₂OH 來做爐渣表面處理。Danielle Bonenfant 等學者[9]研究鋼渣氧化物的二氧化碳吸附過程之分子分析。Pascal Suera 等學者[10]提出利用實驗方法加速鋼渣老化之環境和技術性能進行研究，10 年的舊瀝青路面的電弧爐鋼渣在路基底層的類型，從新鮮渣到老化的過程。Samir I. Abu-Eishah 等學者[11]研究使用電弧爐鋼渣作為在混凝土中粗骨材的效果。Huiting Shen 等學者[12]應用各種方法研究不銹鋼渣的物理化學及礦物學性質。Marco Pasetto 與 Nicola Baldo [13]驗證電弧爐鋼渣取代天然骨材使用在瀝青混凝土柔性路面的可能性。Mahmoud Ameri 等人[14]驗證電弧爐渣替代天然石灰石，溫拌鋼渣瀝青混凝土。楊志祥[15]曾以不同取代量的氧化渣製成透水性鋪面地磚，磨耗量較低，與氧化渣本身之磨損率有關。

本研究為提升氧化渣之經濟效益，將其應用為抗磨損材料，首先與其他六種材料進行細骨材之基本物理性質試驗，依 CNS 1010 規範中各項材料配比拌製水泥砂漿，比較不同細骨材粒徑與不同種類細骨材在相同級配粒徑下，工作度與抗壓強度的變化。最後製成砂漿耐磨平板，比較七種不同細骨材與不同級配下之抗磨損能力。分析氧化渣與一般傳統抗磨損材料(如耐磨砂和棕剛玉)耐磨損能力的差異，藉此明瞭氧化渣應用於耐磨材料之可行性與適用性，期許未來電弧爐煉鋼所產生的氧化渣可資源化再利用，對行政院推動之「永續發展行動計畫」有所呼應。

二、試驗材料與方法

2.1 試驗材料

- (1)水泥:台灣水泥公司所出產波特蘭 I 型水泥。
- (2)標準砂:合於 ASTM C778 之渥太華標準砂。
- (3)氧化矽:取自苗栗縣某資源回收廠，色黑多飛灰。
- (4)耐磨砂:購買自苗栗縣某建材行，其色澤亮黑，斷面似玻璃晶值。
- (5)天然砂:以機械式方法碎裂後的河砂，多不規則稜角。
- (6)棕剛玉:合於 CNS13297 耐磨性試驗法用的噴砂，色黑。
- (7)耐磨砂 2 號:簡稱 MK2，購買自苗栗某耐磨地坪工程公司，色黑。
- (8)耐磨砂 3 號:簡稱 MK3 購買自苗栗某耐磨地坪工程公司，色灰。

2.2 試驗儀器與方法

2.2.1 XRD 分析

X 光繞射分析(x-ray diffraction analysis,XRD)係以日本製之 X 光粉末繞射儀(Rigaku,D/Max-2200,Japan)分析試樣之晶相物種型態，其以 CuK α 1 放射 X 光，並以 2 θ 掃描 10°~80°之範圍:掃描速率以每秒 0.05°之計數進行。X 射線粉末繞射分析儀主要依據 Bragg-s Law，將 X 光束以 θ 角撞擊物質內部，因結晶物質之原子排列具一周期性之排列，不同物種之晶格特性相異，由內部 K 層電子所反射回之 2 θ 角度形成該物種之特定波長，依此可判定其物種之型態。

2.2.2 掃描式電子顯微鏡與能量頻譜分析(SEM/EDS)

掃描式電子顯微鏡(scanning electron microscope;SEM)，簡稱掃描電鏡(SEM)。是一種利用高速電子束打擊樣品表面，並將所產生的各種訊號予以收集，利用收集所得的訊號進行成像或是定性與定量分析。並以附加裝置之 EDS(Energy Dispersive X-ray Spectrometry,INCA-sight)進行試樣之微觀觀測與化學成分之分析。

2.2.3 比重吸水率試驗與篩分析

依 CNS 487 細粒料比重及吸水率試驗法，來檢驗七種細骨材的物理性質，並依 CNS 486 粗細粒料篩析法，進行篩分析試驗。

2.2.4 流度試驗

依 CNS1010 水硬性水泥壩料抗壓強度檢驗法的流動性之測定步驟進行流度試驗，藉以瞭解各項材料取代標準砂後對流度值之影響。

2.2.5 莫氏硬度試驗

莫式硬度是最早的硬度表示法。是德國礦物學家，莫氏(Mohs)以天然礦石的硬度做為劃分依據：滑石的硬度為 1、石膏為 2、方解石為 3、氟石為 4、磷灰石

為 5、長石為 6、石英為 7、黃玉為 8、剛玉為 9、金剛石為 10。其中以金剛石硬度最高，可以在其他礦石上刻劃出刮痕而本身不受傷。目的是在測試材料受到壓痕器的集中力壓刺時，抵抗被壓凹的能力，抵抗壓凹的能力越強，則材料的硬度愈高。

2.2.6 抗壓強度試驗

依 ASTM C109 之規定，將水泥和七種細骨材(標準砂、氧化矽、耐磨砂、天然砂、棕剛玉、MK2 和 MK3)，重量比為 1:2.75，選用水灰比 $W/B=0.485$ ，拌合水泥砂漿並灌製 $5 \times 5 \times 5\text{-cm}^3$ 方塊試體，以進行抗壓強度試驗之比對。試體在維持 $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 飽和石灰水中養護水槽中養護至 7、28 天齡期時，分別取出一組三顆試體進行抗壓強度試驗，並以三顆試體抗壓強度之平均值，為該齡期之抗壓強度進行比對分析。

2.2.7 健度試驗

依 CNS 1167 使用硫酸鈉或硫酸鎂之粒料健度試驗法，本實驗試樣是以通過 9.5mm CNS386 之篩的七種細骨材停留在 #8、#16、#30、#50 號篩各 100g 來做試驗，以硫酸鈉溶液浸泡 16-18hr 後取出，在 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 烘箱烘乾到恆重，如此為一個循環，每次試驗採用 5 個循環，來瞭解各種材料損耗百分比。

2.2.8 耐磨性質試驗

依 CNS 13297 混凝土製品耐磨性試驗法(噴砂法)來試驗七種細骨材製成的 $16 \times 14 \times 4\text{-cm}^3$ 的方塊平版，以噴砂機施以 1 分鐘噴砂後，用比重已知的黏土填補耐磨試驗後產生的孔洞，最後由填補孔洞之黏土重量除以黏土比重，即可知孔洞體積，比較不同細骨材與不同粒徑的抗磨損性質。

三、試驗結果與討論

3.1 XRD 分析

將七種細骨材進行 XRD 分析，七種材料主要成分如圖 1(a)至(g)所示，標準砂與天然砂主要成分為 Si 和少量 Al，氧化矽與棕剛玉成分較為複雜，而耐磨砂之結晶不明顯，似乎顯示其為玻璃質材料，MK2 及 MK3 成分多為複雜化合物。

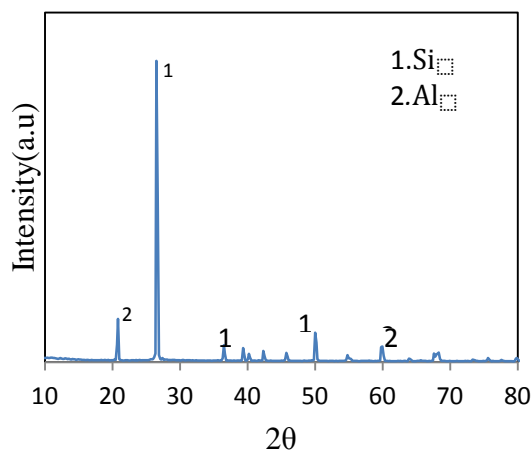


圖 1(a) 標準砂 XRD 分析圖譜

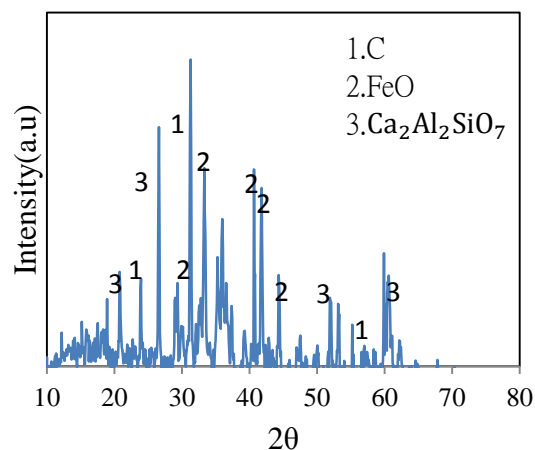


圖 1(b) 氧化矽 XRD 分析圖譜

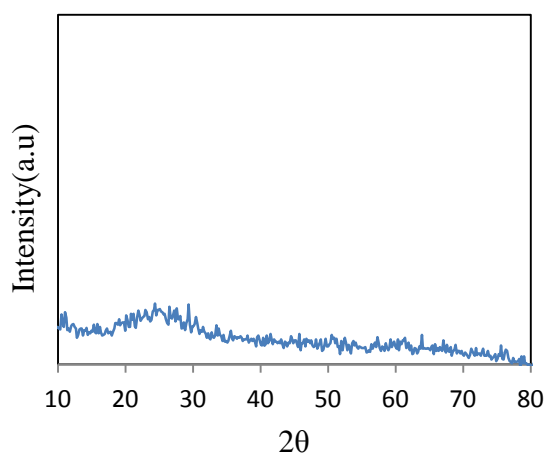


圖 1(c) 耐磨砂 XRD 分析圖譜

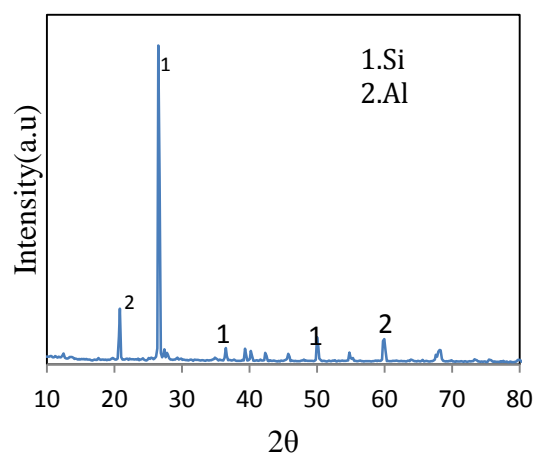


圖 1(d) 天然砂 XRD 分析圖譜

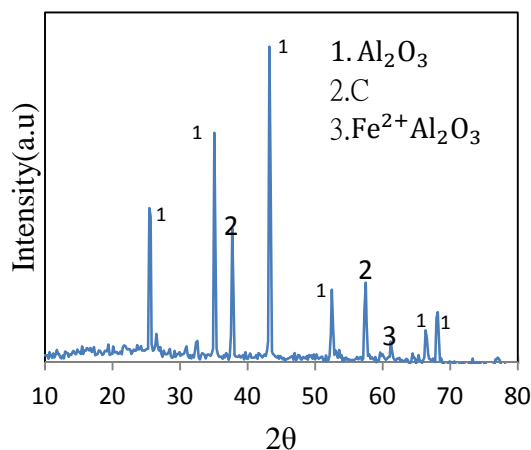


圖 1(e) 棕剛玉 XRD 分析圖譜

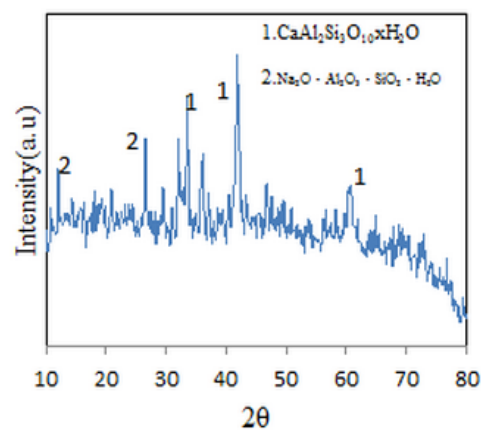


圖 1(f) MK2 XRD 分析圖譜

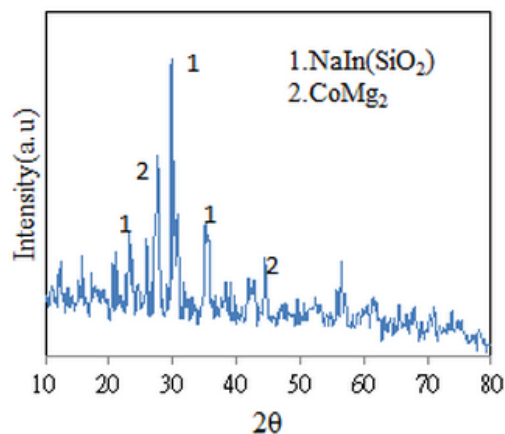


圖 1(g) MK3 XRD 分析圖譜

3.2 SEM/EDS 分析

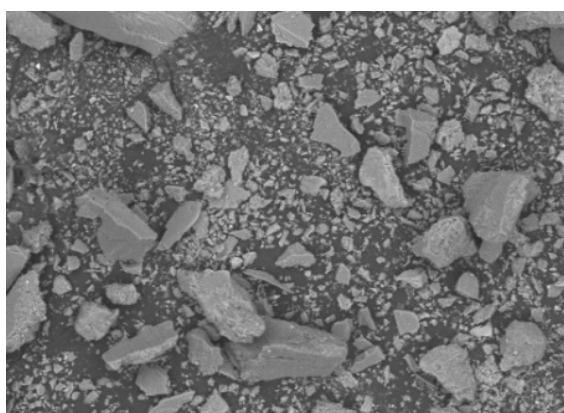
藉由 SEM 之觀察七種骨材之外觀、放大 500 及 1000 倍之影像，分別如圖 2 至圖 8 所示。標準砂與天然砂顆粒較細小，氧化矽、耐磨砂及棕剛玉則有大小粒徑夾雜。氧化矽、耐磨砂與棕剛玉色澤較黑，天然砂顏色較淺黃，標準砂為白色 MK2 顆粒偏細，色灰偏黑，MK3 顆粒偏細，色灰。另外，各細骨材之 EDS 成分結果如表一所示。



圖 2(a):標準砂外觀

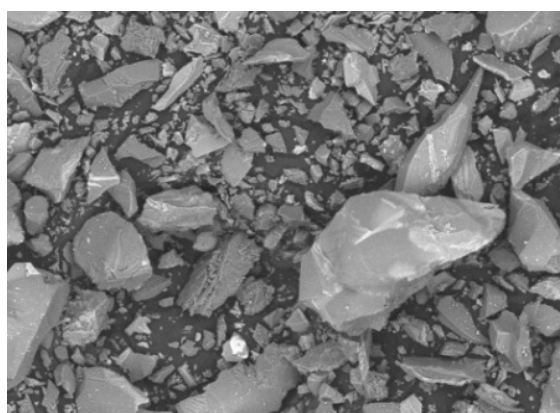


圖 3(a):氧化矽外觀



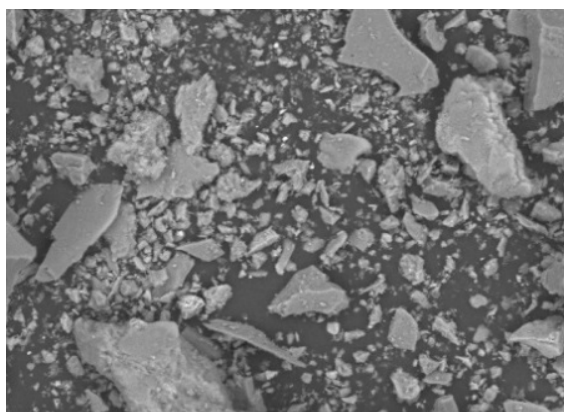
聯大-標準砂x500

圖 2(b)標準砂放大 500 倍之影像



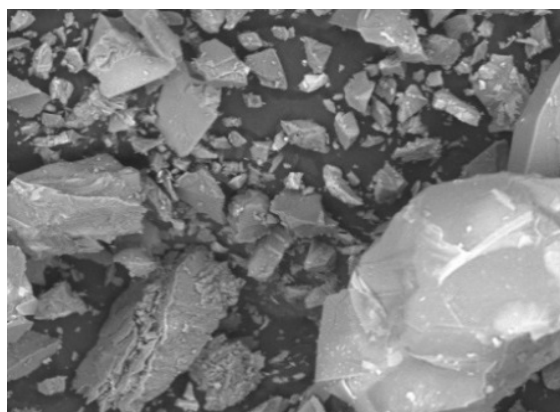
聯大-氧化矽x500

圖 3(b)氧化矽放大 500 倍之影像



聯大-標準砂x1000

圖 2(c)標準砂放大 1000 倍之影像



聯大-氧化矽x1000

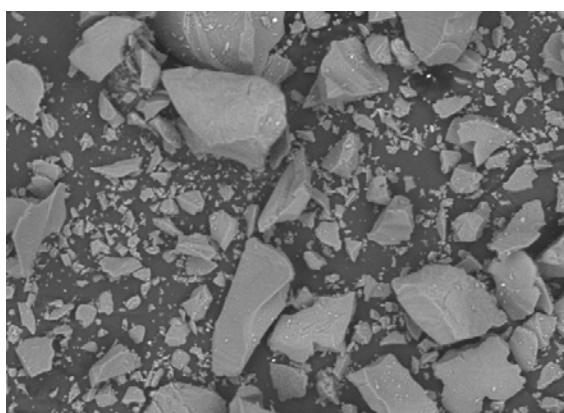
圖 3(c)氧化矽放大 1000 倍之影像



圖 4(a):耐磨砂外觀



圖 5(a):天然砂外觀



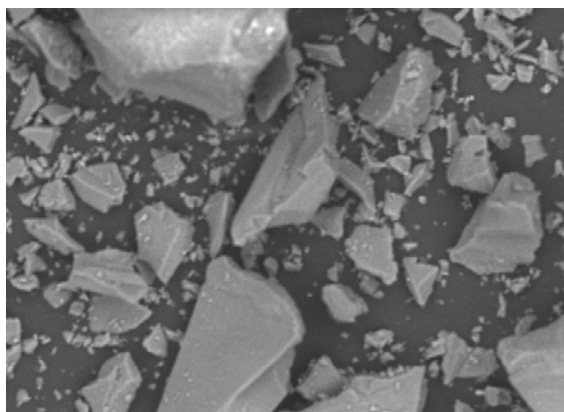
聯大-金剛砂x500

圖 4(b)耐磨砂放大 500 倍之影像



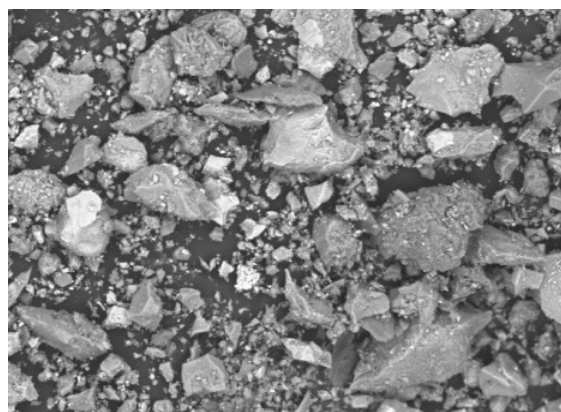
聯大-天然砂x500

圖 5(b)天然砂放大 500 倍之影像



聯大-金剛砂x1000

圖 4(c)耐磨砂放大 1000 倍之影像



聯大-天然砂x1000

圖 5(c)天然砂放大 1000 倍之影像



圖 6(a):棕剛玉外觀



圖 7(a)MK2 外觀

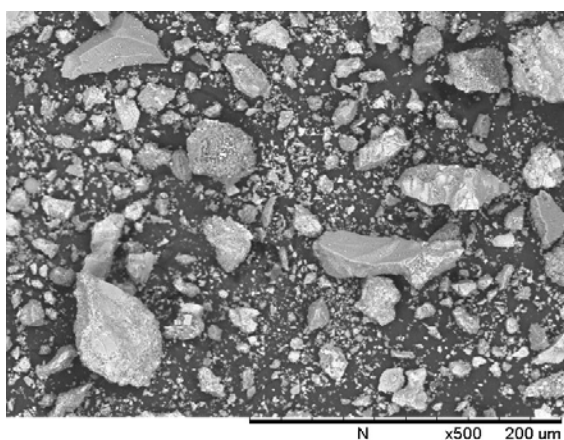


圖 6(c)棕剛玉放大 500 倍之影像

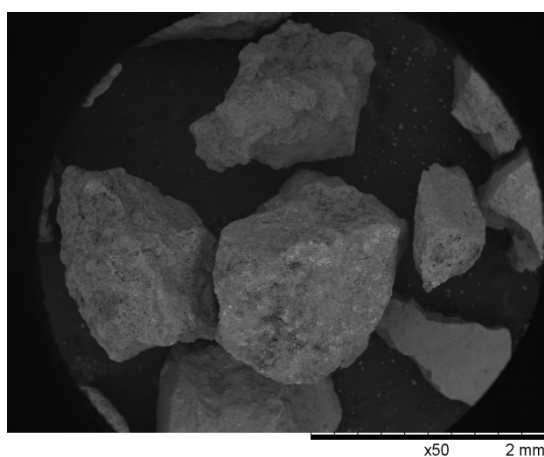


圖 7(b)MK2 放大 500 倍之外觀

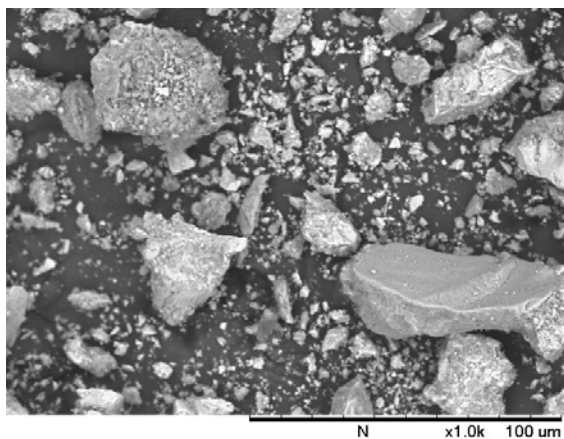


圖 6(c)棕剛玉放大 1000 倍之影像

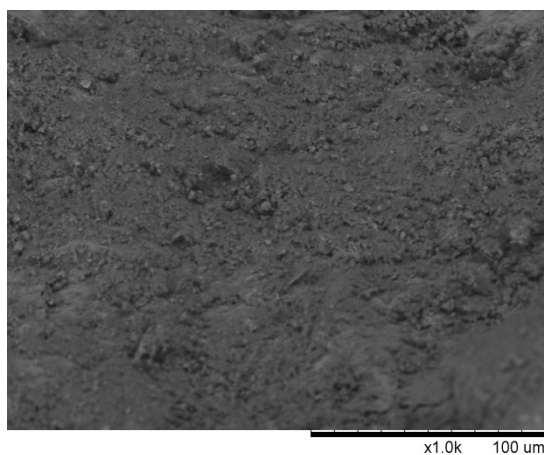


圖 7(c)MK2 放大 1000 倍之外觀



圖 8(a) MK3 外觀

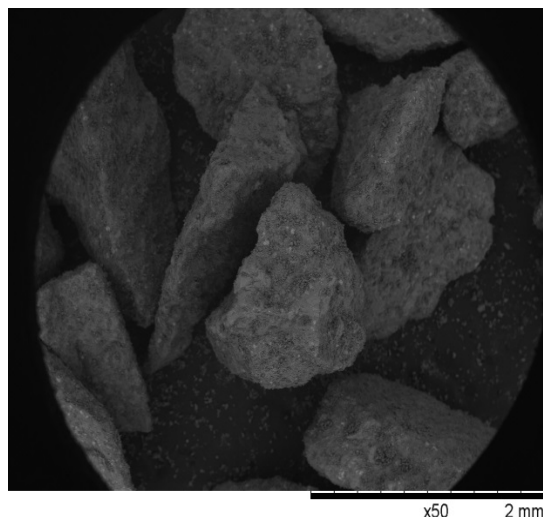


圖 8(b) MK3 放大 500 倍之外觀

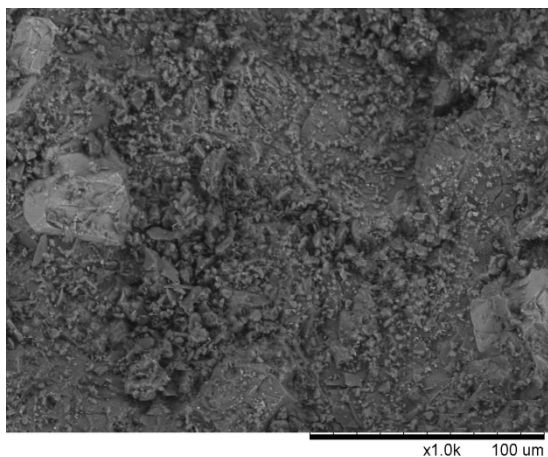


圖 8(c) MK3 放大 1000 倍之外觀

表 1-(a) 標準砂 EDS 分析之元素表

元素	C	O	Si	AL	Ca	F
Atomic%	51.85	32.11	8.15	7.73	0.07	0.09

表 1-(b) 氧化矽 EDS 分析之元素表

元素	C	O	Al	Ca	Fe	Si	Ge	Mn	Cr
Atomic%	61.63	24.81	7.21	2.58	1.04	2.02	0.40	0.22	0.09

表 1-(c) 耐磨砂 EDS 分析之元素表

元素	O	C	Al	Si	Br	Fe	Ca	K	Au	Ge	Ti	Mg
Atomic%	35.85	41.96	11.04	6.8	1.8	0.85	0.64	0.55	0.07	0.13	0.15	0.15

表 1-(d) 天然砂 EDS 分析之元素表

元素	C	O	Si	Al	Fe	K	Ge	Ca
----	---	---	----	----	----	---	----	----

Atomic%	49.66	35.83	7.70	5.99	0.30	0.28	0.10	0.15
---------	-------	-------	------	------	------	------	------	------

表 1-(e) 棕剛玉 EDS 分析之元素表

元素	O	Al	C	Si	Fe	Ti	Ca	K
Atomic%	43.30	20.58	29.29	4.71	1.20	0.48	0.24	0.19

表 1-(f) MK2 EDS 元素分析結果

元素	Al	Si	Ca	Fe	Ge	Mg	Au	Mn
Atomic(%)	50.41	8.73	21.94	13.16	0.32	3.75	0.37	1.33

表 1-(g) MK3 EDS 元素分析結果

元素	Al	Si	Ca	Fe	K	Mg	Au	Ti	Na
Atomic(%)	48.91	25.52	6.02	5.61	1.76	7.54	0.37	0.9	3.36

3.3 比重吸水率試驗與篩分析

七種骨材之比重，吸水率試驗與篩分析之結果如表 2，氧化矽與棕剛玉比重大，硬度也高。另外，天然砂與標準砂比重接近，而耐磨砂之細度大，MK2 與 MK3 均集中在#16、#30。篩分析之結果如表 3 所示。

表 2 比重吸水率試驗

	標準砂	氧化矽	耐磨砂	天然砂	棕剛玉	MK2	MK3
比重	2.65	3.52	2.54	2.6	3.6	3.83	2.87
吸水率(%)	0.3	2.9	0.75	1.2	1.5	1.09	1.65
F.M.	2.67	3.97	4.85	2.68	2.37	MK2	MK3

表 3 七種細骨材篩分析之停留百分比

篩號	停留百分比(%)						
	標準砂	氧化矽	耐磨砂	天然砂	棕剛玉	MK2	MK3
#4	0.00	0.09	0.00	0.17	0.00	0.00	0.00
#8	0.00	12.26	0.01	13.79	0.00	0.00	0.00
#16	0.00	31.89	87.48	23.18	2.91	55.48	39.91
#30	0.00	23.62	10.74	17.94	46.63	38.95	57.99
#50	68.43	15.76	1.10	16.95	39.44	5.04	1.23
#100	30.76	8.90	0.25	16.01	6.76	0.30	0.06
#200	0.48	4.15	0.10	8.11	2.57	0.05	0.09
底盤	0.00	3.18	0.08	3.65	1.61	0.08	0.71
總合	99.67	99.87	99.77	99.80	99.93	99.90	99.99
F.M.	1.67	2.97	3.84	2.68	2.37	3.49	3.36

3.4 流度試驗

本試驗依 ASTM 規範取 W/B=0.485 拌合純水泥砂漿(標準砂)與其他六種材料(耐磨砂、氧化矽、棕剛玉、天然砂、MK2、MK3)以及不同級配(氧化矽與天然砂使用標準砂、耐磨砂、棕剛玉、MK2 與 MK3 之級配)，其試驗材料配比用量及流度試驗結果，如表 4 所示；表 3 中，為 7 個平板試體大小(16×14×4-cm³)及 12 個方塊試體(5×5×5-cm³)材料配比用量及流度試驗之值。

表 4 試驗材料配比用量及流度試驗結果

平板 試體	材料名稱	標準砂	氧化矽	耐磨砂	天然砂	棕剛玉	MK2	MK3
	直徑平均值(mm)	174.6	222.6	150.9	154.0	167.4	164.6	144.6
	流度(%)	74.6	122.6	50.9	54.0	67.4	64.6	44.6
方塊 試體	直徑平均值(mm)	169.4	222.9	125.6	152.7	160.3	175.7	136.6
	流度(%)	69.4	122.9	25.6	52.7	60.3	75.7	36.6

由表 3 可知標準砂、耐磨砂和棕剛玉之級配僅集中在二至三個篩號，為比較粒徑級配對抗壓強度及耐磨能力之影響，本文將氧化矽及天然砂篩分析成標準砂、耐磨砂和棕剛玉的級配如表 5 及表 6 所示，再次拌合抗壓方塊及耐磨平板試體。其材料用量與流度值如表 7 所示。

表 5 氧化矽篩分成棕剛玉、耐磨砂及標準砂之級配

棕剛玉	平板 試體	方塊 試體	耐磨砂	平板 試體	方塊 試體	標準砂	平板 試體	方塊 試體
原重(g)	1817.5	3635.1	原重	1817.5	3635.1	原重	1817.5	3635.1
#4	0.0	0.0	#4	0.0	0.0	#4	0.0	0.0
#8	0.0	0.0	#8	0.2	0.5	#8	0.0	0.0
#16	53.0	105.9	#16	1593.8	3187.5	#16	0.0	0.0
#30	848.2	1696.3	#30	195.6	391.3	#30	0.0	0.0
#50	717.4	1434.8	#50	20.0	40.0	#50	1247.9	2495.7
#100	122.9	245.8	#100	4.6	9.2	#100	560.9	1121.9
#200	46.8	93.6	#200	1.8	3.6	#200	8.7	17.5
底盤	29.3	58.7	底盤	1.5	2.9	底盤	0.0	0.0

表 6 天然砂篩分成棕剛玉、耐磨砂及標準砂之級配

棕剛玉	平版 試體	方塊 試體	耐磨砂	平版 試體	方塊 試體	標準砂	平版 試體	方塊 試體
原重(g)	1375.0	2062.5	原重	1375.0	2062.5	原重	1375.0	2062.5
#4	0.0	0.0	#4	0.0	0.0	#4	0.0	0.0
#8	0.0	0.0	#8	0.2	0.3	#8	0.0	0.0
#16	40.1	60.1	#16	1205.7	1808.6	#16	0.0	0.0
#30	641.6	962.5	#30	148.0	222.0	#30	0.0	0.0
#50	542.7	814.1	#50	15.1	22.7	#50	944.0	1416.0
#100	93.0	139.5	#100	3.5	5.2	#100	424.4	636.5
#200	35.4	53.1	#200	1.4	2.1	#200	6.6	9.9
底盤	22.2	33.3	底盤	1.1	1.7	底盤	0.0	0.0

表 7 以氧化矽、天然砂模擬其他三種材料級配(標準砂、耐磨砂、棕剛玉)方塊抗壓及耐磨試體材料配比用量

平板 試體	材料名稱	標準 砂	氧化矽 (棕剛玉級配)	氧化矽 (耐磨砂級配)	氧化矽 (標準砂級配)	天然砂 (棕剛玉級配)	天然砂 (耐磨砂級配)	天然砂 (標準砂級配)
	水灰比	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485
	水泥(g)	500	500	500	500	500	500	500
	細粒料(g)	1375	1817.5	1817.5	1817.5	1375	1375	1375
	用水量(g)	246.6	296.3	296.3	296.3	259	259	259
方塊 試體	水灰比	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485	0.485
	水泥(g)	750	750	750	750	750	750	750
	細粒料(g)	2062.5	2726.3	2726.3	2726.3	2062.5	2062.5	2062.5
	用水量(g)	369.9	444.5	444.5	444.5	388.5	388.5	388.5
	直徑平均值(mm)	172.31	167.91	174.49	121.96	坍塌	140.78	坍塌
	流度(%)	72.31	67.91	74.49	21.96	_____	40.78	_____

3.5 莫氏硬度試驗

由莫氏硬度計各級硬度代表岩石與本文所用七種細骨材間之擦痕得知其硬度由大至小分別為如表 8 所示。

表 8 硬度試驗結果

莫氏硬度						
耐磨砂	標準砂	氧化矽	天然砂	棕剛玉	MK2	MK3
3<硬度<4	5<硬度<6	5<硬度<6	6<硬度<7	8<硬度<9	8<硬度<9	8<硬度<9

3.6 抗壓強度試驗

以七種材料(標準砂、氧化矽、耐磨砂、棕剛玉、天然砂、MK2 和 MK3)拌合水泥砂漿，選用水灰比 $W/B=0.485$ ，灌鑄成水泥砂漿抗壓試體，養護齡期為 7、28、56 天，進行抗壓強度試驗。其抗壓強度如圖 9 與表 9 所示。其中以天然砂和氧化矽強度最高，標準砂和棕剛玉抗壓強度其次，最低的是耐磨砂。探討抗壓強度高低的原因是，天然砂與氧化矽級配較佳，其他三種骨材之級配僅集中少數幾個篩號，加上耐磨砂材質偏屬玻璃質，表面較為光滑，磨擦力較低，因此抗壓強度最低，而硬度介於 8~9 的 MK2、MK3 等材料，抗壓強度卻低於氧化矽與天然砂，代表著高硬度骨材在低強度砂漿是不會影響抗壓強度。

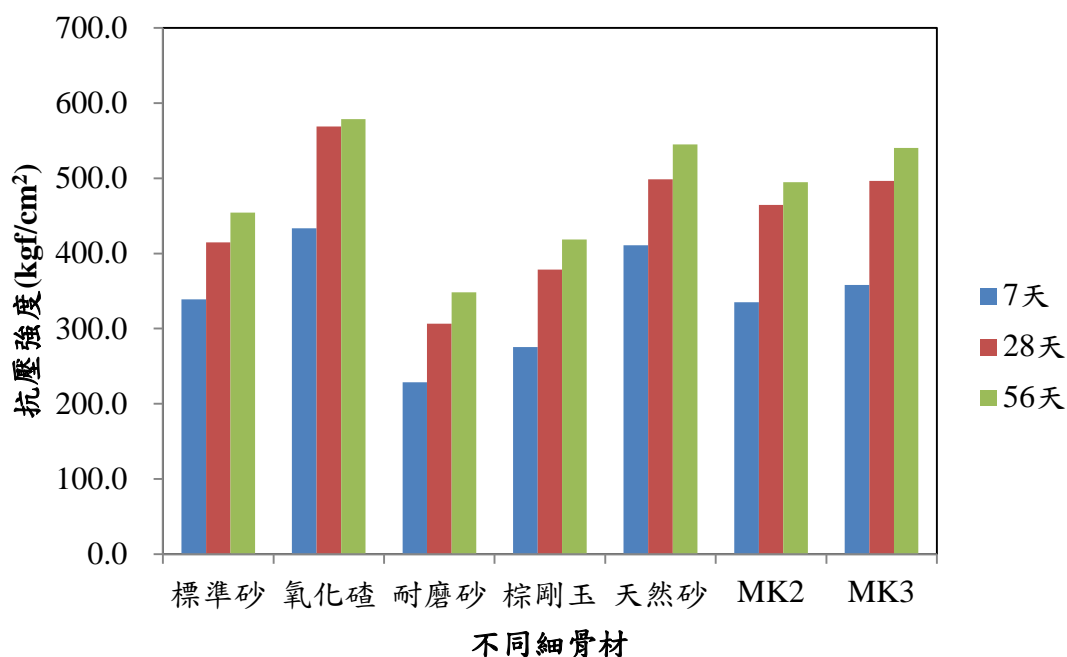


圖 9 不同細骨材 7、28 及 56 天之抗壓強度

表 9 不同細骨材之抗壓強度(kgf/cm²)

類別	抗壓強度(kgf/cm ²)		
	7 天	28 天	56 天
標準砂	338.9	414.7	454.1
氧化矽	433.6	569.1	578.8
耐磨砂	228.7	306.5	348.1
棕剛玉	275.7	378.7	418.4
天然砂	410.8	498.8	545.0
MK2	335.1	464.5	494.9
MK3	358.0	496.6	540.4

由表 9 及圖 9 可以觀察到級配愈均勻抗壓強度愈高，由於天然砂與氧化矽之級配是七種材料中較均勻，因此抗壓強度最高。其次是棕剛玉，標準砂與耐磨砂，此三種材料其級配較集中，因此抗壓強度較低。另外，以氧化矽及天然砂模擬其他三種材料級配所得抗壓結果如表 10 及圖 10 所示。當粒徑因素消失後所得抗壓強度差異不大。

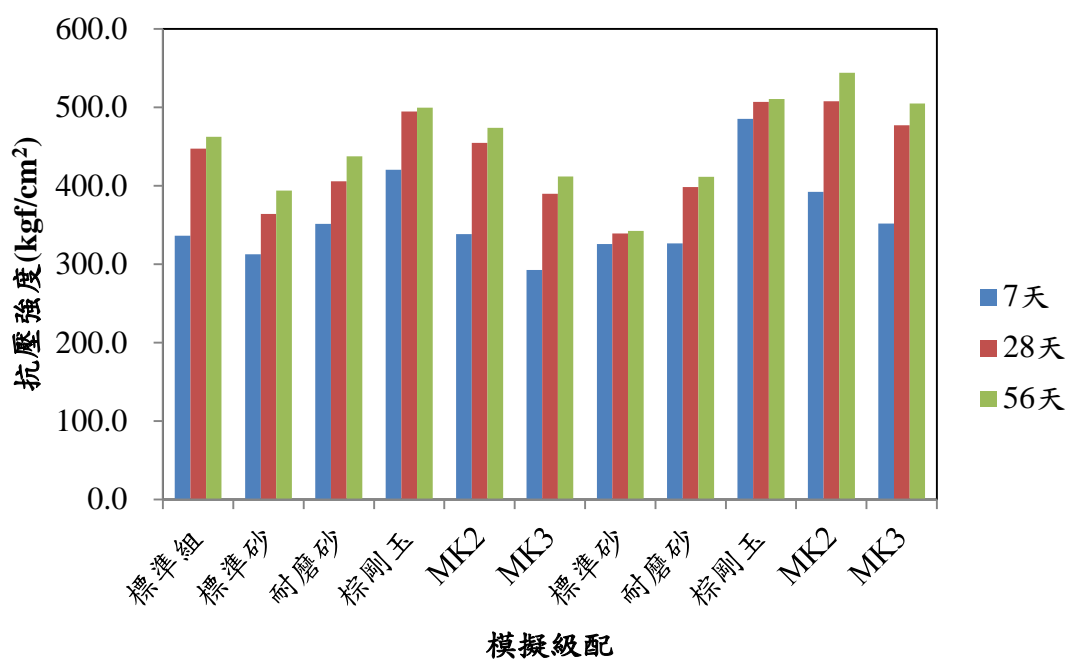


圖 10 以氧化矽、天然砂模擬其他五種材料級配(標準砂、耐磨砂、棕剛玉、MK2、MK3)

表 10 氧化矽及天然砂模擬其他三種材料級配(標準砂、耐磨砂、棕剛玉、MK2、MK3)之抗壓強度(kgf/cm²)

抗壓強度 (kg/cm ²)	氧化矽模擬級配						天然砂模擬級配				
	標準組	標準砂	耐磨砂	棕剛玉	MK2	MK3	標準砂	耐磨砂	棕剛玉	MK2	MK3
7 天	336.5	312.7	351.3	420.4	338.3	292.6	325.9	326.7	485.3	392.4	351.8
28 天	447.3	364.1	405.5	494.5	454.7	389.7	339.2	398.5	507.0	507.9	477.2
56 天	462.3	394.1	437.4	499.5	474.1	411.8	342.6	411.6	510.6	544.1	505.1

3.7 健度試驗

健度試驗的結果如表 11 所示可以發現經 5 次循環後，氧化矽和棕剛玉最能抵抗硫酸鹽侵蝕，天然砂與標準砂其次，耐磨砂抵抗硫酸鹽侵蝕能力最弱。

表 11 標準砂、天然砂、耐磨砂健度試驗結果

材料	標準砂	天然砂				耐磨砂
篩號	#50	#8	#16	#30	#50	#16
原骨材重(g)	100.0007	99.5185	99.2893	99.4643	84.7906	100.0068
5 次循環後骨材重(g)	96.0890	98.8889	98.7374	98.6792	84.1578	99.8686
損失率(%)	3.91	0.63	0.56	0.79	0.75	0.14

表 11 氧化矽、棕剛玉健度試驗結果

材料	氧化矽				棕剛玉	
篩號	#8	#16	#30	#50	#30	#50
原骨材重(g)	100.0059	100.0008	100.0057	100.0079	100.0080	100.0078
5 次循環後骨材重(g)	99.8416	99.7736	99.6896	99.6843	99.9650	99.5212
損失率(%)	0.16	0.23	0.32	0.32	0.04	0.49

表 21 MK2 及 MK3 健度試驗結果

材料	MK2		MK3	
篩號	#16	#30	#16	#30
原骨材重(g)	100.0253	100.0239	100.0978	100.0582
5 次循環後骨材重(g)	99.9120	99.8247	99.0196	98.4800
損失率(%)	0.11	0.20	1.08	1.58

3.8 耐磨性質試驗

首先以七種細骨材製作成耐磨平板，比較不同細骨材耐磨性質。耐磨平板以噴砂機噴砂，每一點噴沖 1 分鐘後，使用比重 1.63 之黏土填補孔洞。每一平板試體噴沖八點，取其孔洞體積平均值為其耐磨能力。而耐磨試驗前後之外觀及填補孔洞後之外觀如圖 11、圖 12 所示。其中圖 11 為標準砂，圖 12 為氧化矽。所得孔洞體積如表 12 所示。由表中可以看出 MK2、MK3、天然砂、棕剛玉及氧化矽較耐磨，而市售之耐磨砂與標準砂較不耐磨損。其原因應是耐磨砂及標準砂顆粒及配分佈較為不均勻，集中在兩個篩號，而且耐磨砂硬度較弱及標準砂骨材顆粒較小之原因。考量顆粒級配影響耐磨性質很明顯，如圖 13 所示。因此本研究將氧化矽及天然砂篩分析後依標準砂、耐磨砂及棕剛玉級配，再製成抗壓方塊及耐磨平板試體，養護 28 天後進行抗壓及耐磨試驗，其結果如表 13 及圖 14 所示。由其結果可以觀察到標準砂原始級配仍是最不耐磨，和標準砂相同的級配下，氧化矽

比天然砂耐磨，而且會因級配愈均勻或顆粒愈粗愈耐磨。即氧化矽和天然砂級配如市售耐磨砂情況下最耐磨，級配如標準砂最不耐磨。



圖 11(a)標準砂耐磨平板

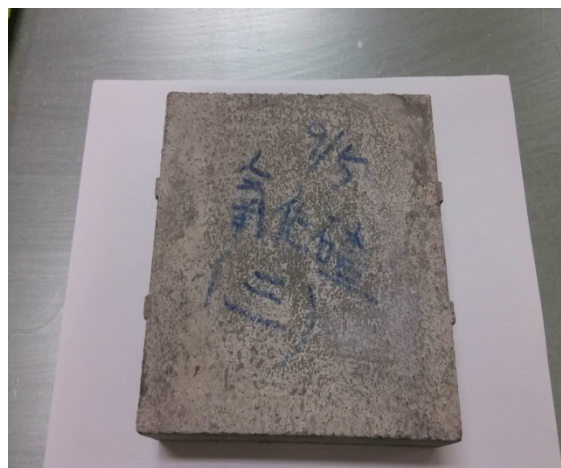


圖 12(a)氧化矽耐磨平板

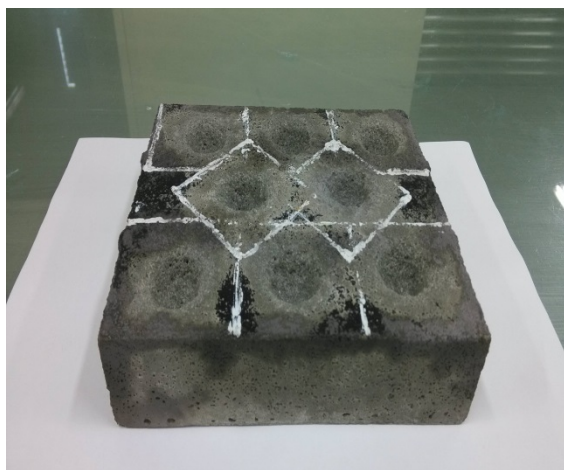


圖 11(b)標準砂噴砂後外觀

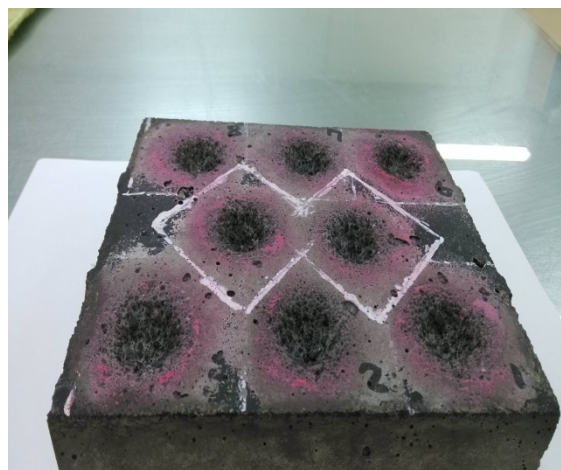


圖 12(b)氧化矽噴砂後外觀

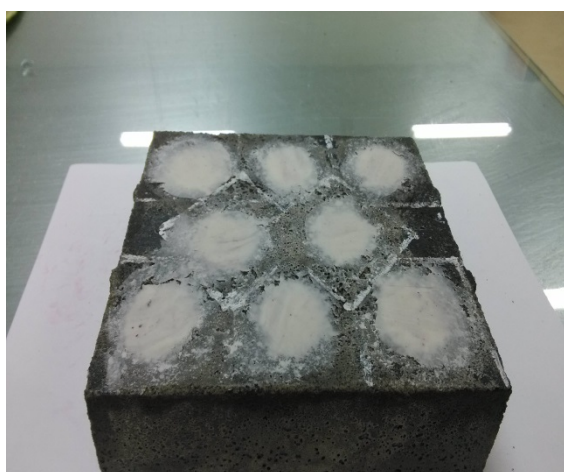


圖 11(c)標準砂填補黏土後外觀

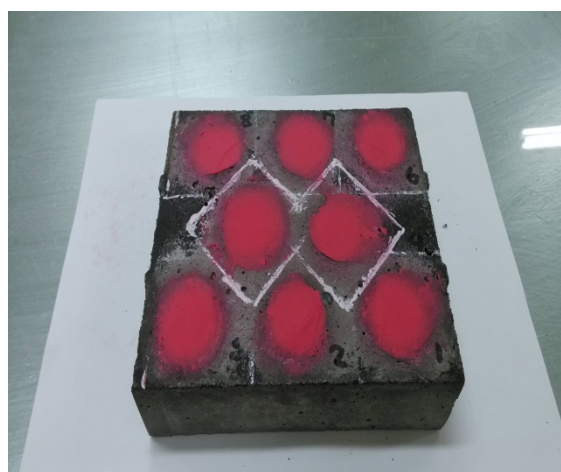


圖 12(c)氧化矽填補黏土後外觀

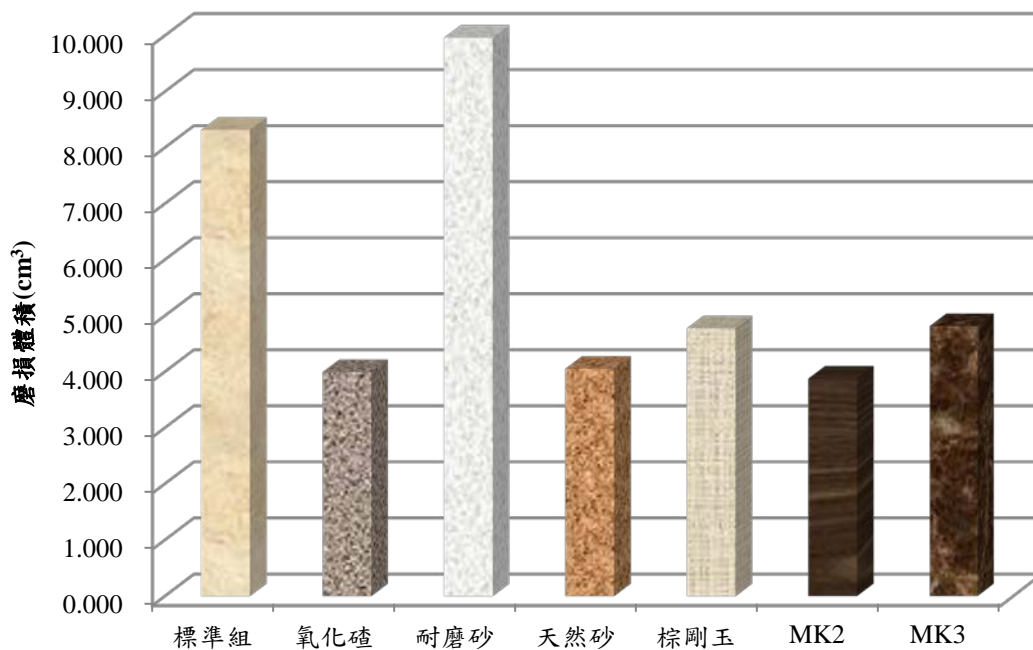


圖 13 不同種類細骨材之耐磨性質比較

表 12 不同種類細骨材耐磨試驗結果

類別	標準組	氧化矽	耐磨砂	天然砂	棕剛玉	MK2	MK3
磨損體積 (cm ³)	8.314	3.992	9.960	4.054	4.774	3.877	4.815

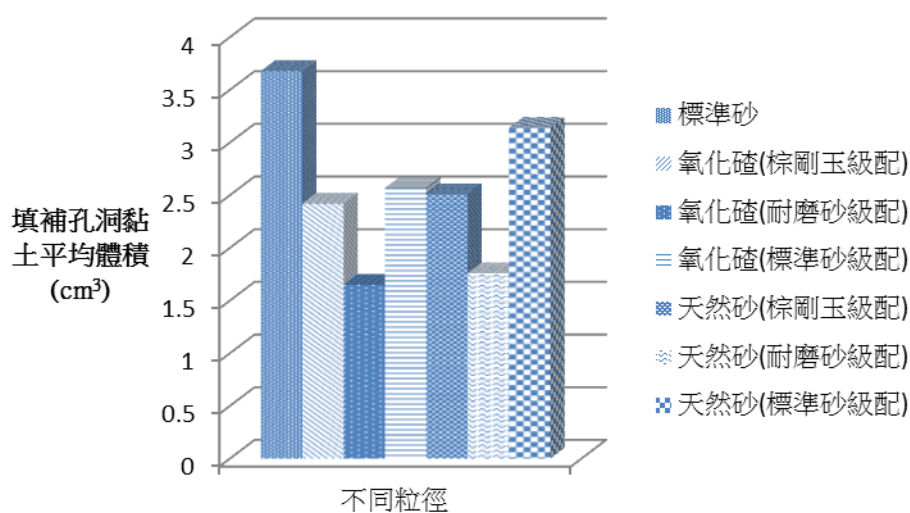


圖 14 不同粒徑細骨材之耐磨性質比較

表 13 不同粒徑細骨材耐磨試驗結果

	標準砂	氧化矽 (棕剛玉級配)	氧化矽 (耐磨砂級配)	氧化矽 (標準砂級配)	天然砂 (棕剛玉級配)	天然砂 (耐磨砂級配)	天然砂 (標準砂級配)
填土重量(g)	6.00	3.94	2.68	4.19	4.09	2.86	5.12
換算孔洞體積(cm ³)	3.68	2.42	1.65	2.57	2.51	1.76	3.14

圖 15 為本研究七種骨材之耐磨性質整體比較，第一排為不同骨材原始級配下之耐磨能力，第二排為氧化矽篩分成標準砂、耐磨砂和棕剛玉級配下之耐磨試驗結果，第三排為天然砂篩分成標準砂、耐磨砂和棕剛玉級配下之耐磨試驗結果。

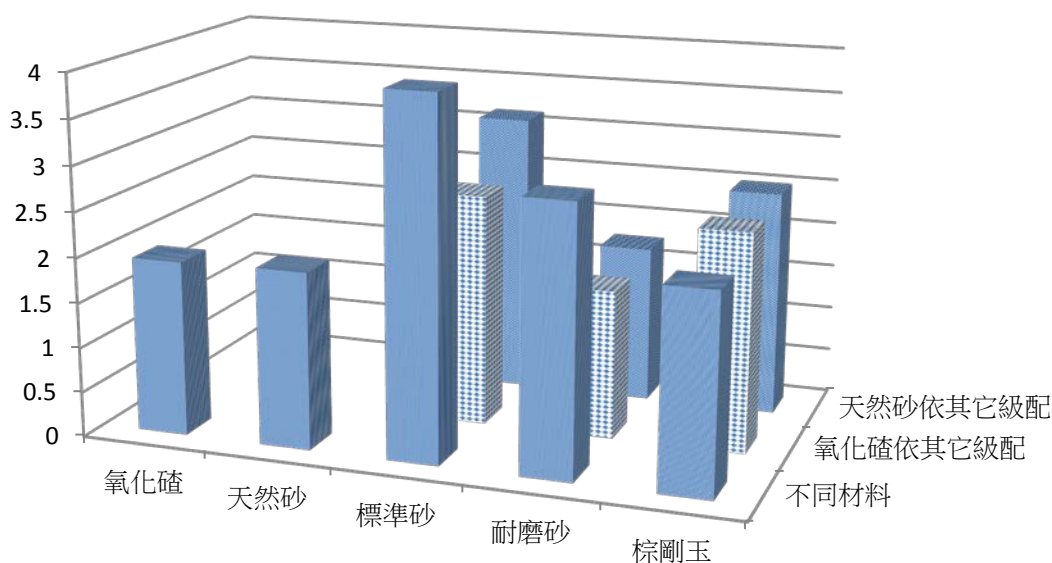


圖 15 不同細骨材與粒徑之耐磨性質比較

四、結論

依本研究之七種細骨材製作水泥砂漿方塊試體及耐磨平板試體所得之研究結果，可得以下 4 點結論。

1. 顆粒級配愈均勻，抗壓及耐磨能力愈佳；反之級配若集中少數二、三個篩號下，硬度愈高則愈不容易磨損。
2. 當級配效應被控制時，則耐磨損能力與材料之硬度成正比，例如棕剛玉級配下，耐磨能力會從棕剛玉最高，氧化矽其次，天然砂最不耐磨。耐磨砂及標準砂級配也有相同現象。
3. 級配與硬度皆相似的狀態下，顆粒愈細愈容易遭受磨損，例如氧化矽和天然砂之耐磨砂和標準砂級配下，耐磨砂級配較耐磨損。

4.健性試驗結果和硬度成正比關係，市售耐磨材料材質硬度差異很大。

參考文獻

1. 經濟部，事業廢棄物再利用種類及管理方式，經濟部工業局，台北市，第25頁(2013)
2. Yeong-Nain Sheen, Her-Yung Wang, Te-Ho Sun, "A study of engineering properties of cement mortar with stainless steel oxidizing slag and reducing slag resource materials", *Construction and Building Materials.*, vol.40,pp.239-145 (2013)
3. Carlo Pellegrino, Paolo Cavagnis, Flora Faleschini, Katya Brunelli, "Properties of concretes with Black/Oxidizing Electric Arc Furnace slag aggregate", *Cement & Concrete Composites.*, vol.37,pp.232-240(2013)
4. 陳立，「電弧爐氧化渣為混凝土骨材之可行性研究」，博士論文，國立中央大學土木工程研究所(2003)。
5. 林凱悅，鐵礦渣再利用於鋪面工程之研究，碩士論文，國立中央大學土木工程研究所(2011)。
6. 黃千紋，利用煉鋼電弧爐融熔處理垃圾焚化飛灰之效益評估，碩士論文，國立中山大學環境工程研究所(2005)。
7. Gao Yun-ming, Chou Kuo-chih, Guo Xing-min, Wang Wei, "Electroreduction Kinetics for Molten Oxide Slags", *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL.*, vol.14(1),pp.16-20(2007)
8. Ryo Nishimoto, Shigeki Fukuchi, Guangxia Qi, Masami Fukushima, Tsutomu Sato, "Effects of surface Fe(III) oxides in a steel slag on the formation of humic-like dark-colored polymers by the polycondensation of humic precursors", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects.*, vol.418,pp.117-123(2013)
9. Danielle Bonenfant, Lynda Kharoune, Sébastien Sauve, Robert Hausler, Patrick Niquette, Murielle Mimeault, Mourad Kharoune, "Molecular analysis of carbon dioxide adsorption processes on steel slag oxides", *international journal of greenhouse gas control.*, vol.3, pp.20-28(2009)
10. Pascal Suera, Jan-Erik Lindqvist, Maria Arm, Paul Frogner-Kockum, "Reproducing ten years of road ageing — Accelerated carbonation and leaching of EAF steel slag", *Science of the Total Environment.*, vol.407,pp.5110-5118(2009)
11. Samir I. Abu-Eishah, Amr S. El-Dieb, Mostafa S. Bedir, "Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region", *Construction and Building Materials.*, vol. 34, pp.249-256(2012)
12. Huiting Shen, E. Forsberg, Ulf Nordström, "Physicochemical and mineralogical

- properties of stainless steel slags oriented to metal recovery”, Conservation and Recycling., vol.40, pp.245–271(2004)
13. Marco Pasetto, Nicola Baldo, ”Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc urnace slag”, Construction and Building Materials., vol.25, pp.3458–3468(2011)
 14. Mahmoud Ameri, Saeid Hesami, Hadi Goli , ”Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag”, Construction and Building Materials., vol.49, pp.611–617(2013)
 15. 楊志祥, 「電弧爐氧化渣資源化於透水性混凝土磚之可行性研究」, 碩士論文, 朝陽科技大學環境工程與管理學系(2006)