

轉爐石產製與工程應用

許伯良¹ 林平全² 徐登科³

¹ 中聯資源公司 工程師

² 中聯資源公司 主任

³ 中聯資源公司 經理

摘要

人口的劇增、全球工業化的快速發展，導致地球資源、能源的快速消耗以及環境的破壞，人類目前已嚴重面臨資源匱乏、環境污染、溫室氣體排放過量、廢棄物過多等問題。永續發展係當今 21 世紀國際環保主流，資源循環零廢棄更是環保先進國家共同追求的目標；節能減碳、資源循環、防污減廢是你我責無旁貸所須共同面對的課題。本研究是彙整中華鋪面工程學會、中央大學、義守大學、高苑科技大學、台灣世曦工程顧問公司及中聯資源公司等單位之研究成果與比較，提供給各界參考。轉爐石應用在瀝青路面上的研究與發展歷程始於 2003 年，同年進行高雄市南星填海造地計劃區的道路試鋪，成效卓越，後續國內多所大學與研究機構進行多條試驗道路之長期成效追蹤與評估，並歷經多年颱風豪雨之考驗，證實轉爐石應用於瀝青路面具有多項優異性能，使路面不易側擠變形與產生坑洞，可有效提昇柏油路面品質與延長使用壽命。本文亦探討國外應用轉爐石之經驗與台灣本土應用作法做比較，以及天然粒料與轉爐石基本性質之差異，同時列舉多條試鋪道路之實績與成果。

關鍵詞：轉爐石、鋼爐渣、瀝青混凝土、填海造地

一、前言

鋼爐渣(石)為煉鋼過程所產出之副產品。國內煉鋼製程包含一貫作業煉鋼及電弧爐煉鋼，所產生之爐石皆通稱為鋼爐渣(石)；前者所產生之鋼爐渣(石)稱為轉爐石，後者所產生之鋼爐渣(石)包含電弧爐氧化渣與電弧爐還原渣。

一貫作業煉鋼為一路由鐵礦石煉成鐵再煉至鋼之製程，係指以鐵礦石、石灰石和焦炭等天然原物料於高爐中煉製鐵水，再直接以此鐵水加入鐵礦石、石灰石和冷凝鋼塊於轉爐中煉鋼；過程中於高爐每冶煉 1 噸鐵水會產出約 310 公斤之高溫熔渣，冷凝為固體後稱為高爐石 (Blast Furnace slag, BF slag)，而於轉爐每吹煉 1 噸鋼時，大約產生 100-118 公斤之高溫熔渣，冷凝為固體後稱為轉爐石 (Basic Oxygen Furnace slag, BOF slag)，其生產流程如圖 1 所示〔1〕。

轉爐石具有高耐磨、高硬度及高抗滑之特性，此粒料特性相當適合應用於鋪面工程，但未經安定化之轉爐石含有游離石灰 (f-CaO)，遇水後易產生體積膨脹，故工程上多以土木工程填方、填海造陸及圍堤背填等方式應用。轉爐石化學成分中之 SiO₂ 的比例較傳統天然碎石少，反而 CaO 佔相當高之比例，由於 CaO 為親油性，使得粒料能與瀝青更加緊密結合，據研究顯示，瀝青混凝土中添加石灰能提高抗剝脫能力，因此石灰亦常被作為抗剝劑使用，轉爐石具高含量 CaO 經試驗證實能提高瀝青混凝土之浸水殘餘強度，顯示其在抵抗水分侵蝕效果有良好成效〔2〕。因此，利用轉爐石本身之高含量 CaO，使得粒料能與瀝青更加緊密結合，以及利用瀝青包裹轉爐石，使轉爐石與水隔離而不致水化產生體積膨脹，將轉爐石應用於瀝青混凝土，會是絕佳之工程材料組合。

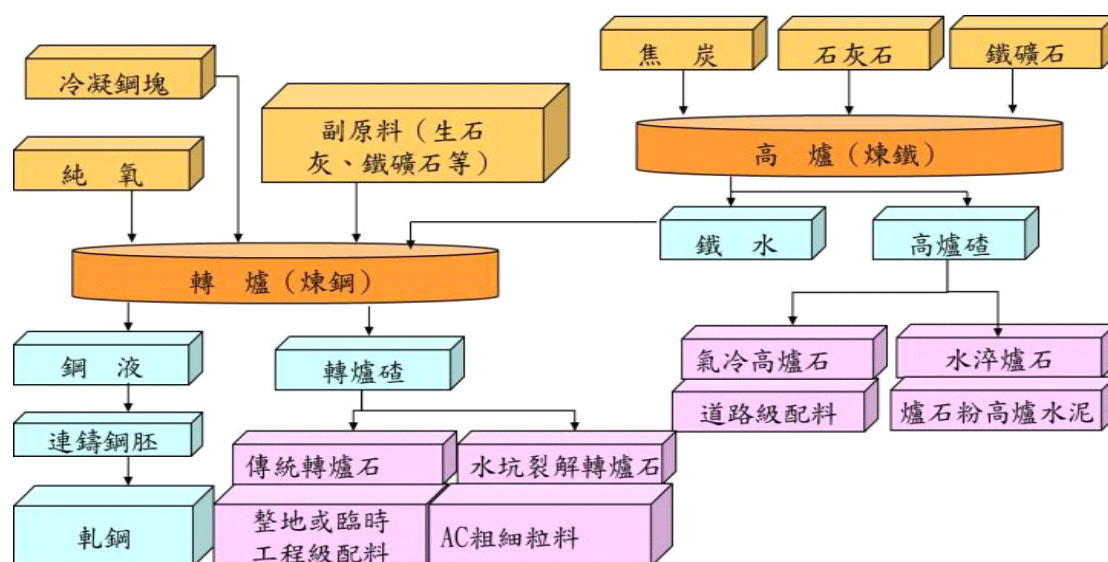


圖1 轉爐石產出流程

二、轉爐石與天然粒料之基本性質

轉爐石比重較大，天然粒料及轉爐石比重分別為2.6及3.1；吸水率亦為轉爐石較大，轉爐石吸水率比天然粒料高約1%。

轉爐石因製程特殊，粒形方正，且幾乎沒有扁平率問題存在，故抗磨損率較高、扁平率甚低、破裂面較高，在拌合過程容易形成粒料間互鎖作用，提高瀝青混凝土之結構強度。天然粒料及轉爐石物理性質比較，如表1。

表1 轉爐石與天然粒料物理性質比較〔3〕

試驗類別		轉爐石	天然粒料
比重		3.31	2.61
吸水率(%)		2.60	1.69
洛杉磯磨損試驗(%)		11.35	27.19
破裂面	三分料	三面以下(%)	2.74
		三面(含)以上(%)	97.23
扁平率	三分料	1:3 以下(%)	99.17
		1:3(含)以上(%)	0.89

轉爐石因 CaO/SiO_2 比率偏高，易析出游離氧化鈣 (free-CaO)，游離氧化鈣會吸收大氣中之水分與二氧化碳 (CO_2) 而發生風化作用，發生此風化作用的同時會伴隨體積膨脹。轉爐石成分也因為具高含量 CaO，具有親油性質，故吸油率較高，容易與瀝青膠泥結合，增加包覆能力，並降低水分侵入之機會。轉爐石之化學成分如表 2 所示。

三、國內外轉爐石之應用

國外對於轉爐石之應用相當多元，但仍以道路基、底層、面層、瀝青混凝土及填地使用為主要用途。以日本為例，如圖2，主要應用包含道路用達15.2%、地盤改良用達11.5%、土木用高達51.1%(日文土木用一詞所指為扣除圖內之道路用、地盤改良用及埋立等之其它土木用途)，以上用途總合已達近78%，其它尚有包含鋼廠再回收使用達13.6%，其它少量應用如肥料用、水泥用、混凝土用、加工原料用等皆不到10%，掩埋處理(圖文之埋立用)比率約1.2%。

再以美國鋼爐渣應用為例，如表3，主要包含道路基、底層、面層用達約51%、瀝青混凝土用平均約達13%、填地使用達13~16%，前述用途總合將近80%，其它少量應用如水泥生料用約6.7~8.2%、鋼廠再回收使用0.8~2.3%。

再以歐洲鋼爐渣應用為例，如圖3，主要包含道路工程使用達45%、鋼廠再回收使用14%、廠內堆置17%、最終掩埋處置11%，其它少量應用如肥料用、水泥生料用...等皆不到10%。圖4及圖5分別為德國將鋼爐渣應用於密級配瀝青混凝土及開放級配磨擦層瀝青混凝土之照片，兩者皆有不錯之驗證成效，不但可以提昇抗變形能力亦可增加地面與輪胎之磨擦力。

表2 轉爐石化學成分

化學物質	含量 ¹ (%)	含量 ² (%)	含量 ³ (%)	含量 ⁴ (%)
氧化鈣 (CaO)	42~52	40~52	42	35~49
二氧化矽 (SiO ₂)	10~20	10~19	15	8~18
氧化亞鐵 (FeO)	15~35	10~40	24	17~35
氧化錳 (MnO)	3~10	5~8	5	1~5
氧化鎂 (MgO)	1~8	5~10	8	1~10
三氧化二鋁 (Al ₂ O ₃)	0.5~3	1~3	5	0.5~7
五氧化二磷 (P ₂ O ₅)	1.5~4	0.5~1	0.8	1~3
硫 (S)	0.25	< 0.1	0.08	—
氧化鉻 (Cr ₂ O ₃)	< 2	—	—	0~0.5
CaO/ SiO ₂	4	—	—	—
Free-CaO	3~13	—	—	—

資料來源：

¹ Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure (SAM-06-DE05) .

² Turner Fairbank Highway Research Center, Material Description for Steel Slag.

³ National Slag Association, Steel Slag-A Premier Construction Aggregate.

⁴ 中鋼、中龍 98、99 年度統計資料。

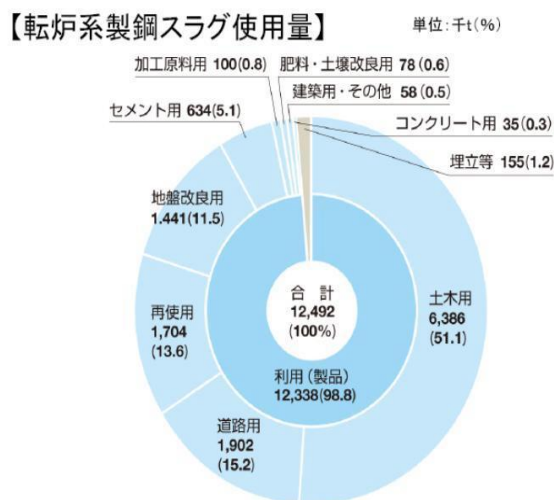


圖2 日本2007~2008年轉爐石利用狀況 [4]

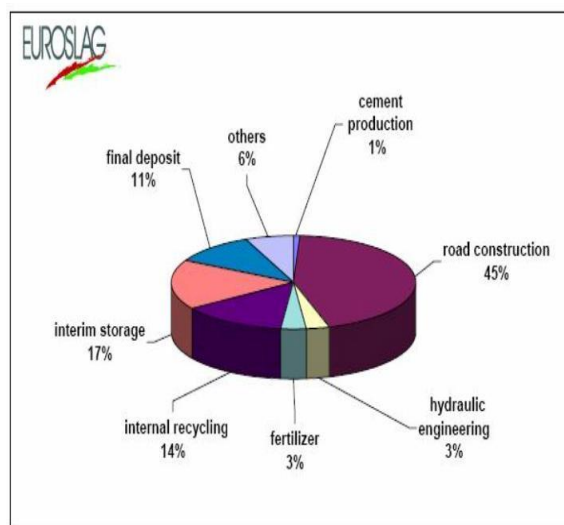


圖3 歐洲國家煉鋼爐石利用狀況(2004~2006)

(資料來源：日本鋼鐵爐石協會)

表3 美國2006、2007年鋼爐石利用狀況

(資料來源：USGS(U.S. Geological Survey))

SALES OF FERROUS SLAGS IN THE UNITED STATES, BY USE¹
(Percentage of total tons sold)

Use	2006		Steel slag	2007		Steel slag
	Blast furnace slag ² Air-cooled	Granulated		Blast furnace slag ² Air-cooled	Granulated	
Ready-mixed concrete	15.7	--	--	15.2	--	--
Concrete products	4.0	--	--	4.2	--	--
Asphaltic concrete	13.3	--	12.1	11.8	--	14.4
Road bases and surfaces	41.3	--	51.0	41.4	6.3	51.5
Fill	13.5 ^f	--	16.6 ^f	13.0	--	13.3
Cementitious material	--	94.1	--	--	86.1	--
Clinker raw material	2.6 ^f	--	8.2 ^f	4.9	5.0	6.7
Miscellaneous	7.6	0.6	0.8	6.7	0.7	2.3
Other or unspecified	2.0	5.3	11.3	2.7	2.2	12.0

^fRevised. – Zero.

¹A number of respondents provide breakouts that represent only the dominant use(s) of their slag; accordingly, the minor use categories are likely underreported. The data also incorporate some estimates and thus should be viewed as good to no more than two significant digits.

²Excludes expanded or pelletized slag; this material is generally sold as a lightweight aggregate.

³Reported as used for railroad ballast, roofing, mineral wool, or soil conditioner.



圖4 德國鋼爐渣應用於瀝青混凝土以提昇抗變形能力及增加磨擦力〔4〕



圖5 德國鋼爐渣應用於開放級配磨擦層〔4〕

國內鋼鐵公司僅中鋼公司與中龍公司之製程屬一貫作業煉鋼製程，關於國內轉爐石之應用，以中鋼為例，如表4，應用於海事工程如南星填海造陸計劃達59%，應用於工程填方如便道、整地與停車場等達11%，應用於道路工程AC骨材者達6%，前述用途總合達76%。

四、轉爐石瀝青混凝土粒料之產製

目前中鋼轉爐石在高溫熔渣狀態冷卻至固態之處理過程分兩種：一種係將 1200°C 之

熱熔渣直接倒渣於渣廠地上，先經過空氣初步之冷卻後進行推渣，並以兩度噴水冷卻；另一種為透過倒入渣盤造塊並進行冷卻，作業流程如圖 6 所示，此方法亦稱「淺盤造塊餘熱自解法」，目的乃為提升轉爐石之處理效率與利用價值，其處理流程係將剛出渣之轉爐熱熔渣置於渣盤冷卻後，再將轉爐渣推入水坑中，可使熱渣於水坑中自然崩解粒化成立方體狀，而得到低扁平率與 100% 破碎面之轉爐石，且轉爐石瀝青混凝土粒料加工過程不再破碎，僅重覆篩選與磁選工作，取粒徑 50mm 以下之粒料進行篩分，形成粒徑為 3/4”、3/8”及 1/4”之轉爐石粗粒料，篩選過程不加水沖洗故無水污染問題，細粒料篩在密閉空間篩選，亦無空氣污染之問題。轉爐石瀝青混凝土粒料加工廠全貌圖及產製後之轉爐石粗粒料成品照片分別如圖 7、圖 8 所示。

表4 中鋼2009.01~2009.10年轉爐石利用狀況(中鋼統計)

內容及說明		使用數量 (ton)	使用比例 (%)	備註
海事工程	圍堤背填材料	-		
	填海造陸	548,453	59	
	小計	548,453	59	
道路工程	AC 骨材	54,825	6	
	道路級配材料			
	小計	54,825	6	
混凝土工程	混凝土骨材	-		
	水泥製品材料	-		
	小計	-		
工程填方		102,006	11	含整地及停車場
其他	煉鋼製程回收	71,904	8	含殘鋼
	金屬回收業	138,004	15	
	試驗材料	18,628	2	
	小計	228,536	24	
總計		933,820	100	

五、轉爐石應用於瀝青混凝土之成果

中鋼公司生產之轉爐石應用於瀝青混凝土最早研究與發展始於 2003 年，同年進行高雄市南星填海造地計劃區的道路試鋪，成效卓越，後續國內多所大學與研究機構以中鋼轉爐石進行其瀝青混凝土性質研究或道路鋪設之長期成效追蹤與評估，包含中華鋪面工程學會、中央大學、義守大學、高苑科技大學、台灣世曦工程顧問公司等；各單位轉爐石道路試鋪資料彙整，如表 5 所列，本研究觀察發現，這些試鋪道路歷經多年颱風豪雨之考驗，證實轉爐石應用於瀝青路面具有多項優異性能，使路面不易側擠變形與產生坑洞，可有效提昇柏油路面品質與延長使用壽命。

比較特別的幾條道路，因鋪設所在地所處之外在環境與使用環境較特殊或具指標性意義，包含超重車輛之使用、路面經常維持濕潤狀態，有些甚且由外觀上可輕易判別出與由傳統天然粒料所製之瀝青混凝土之不同與優劣程度。

圖 10 所示為應用轉爐石粗粒料於瀝青混凝土鋪設於高雄市澄清路，於 98 年 4 月 11 日

鋪設，以三種粗粒料配比鋪設，分別為再生瀝青粒料 20% 鋪設長度約 50m、再生瀝青粒料 20% + 轉爐石粗粒料 20% 鋪設長度約 100m 以及轉爐石粗粒料 40% 鋪設長度約 100m。此路段位於縣市合併前高雄縣政府旁，北起光復路二段南至澄清路 33 巷之間，澄清路為高雄市通往澄清湖之主要幹道，平時交通流量頗大。此路段歷經 98 年 8 月 8 日八八水災，道路未因積水而毀損，經觀察使用兩年後此路段仍保持相當完好。

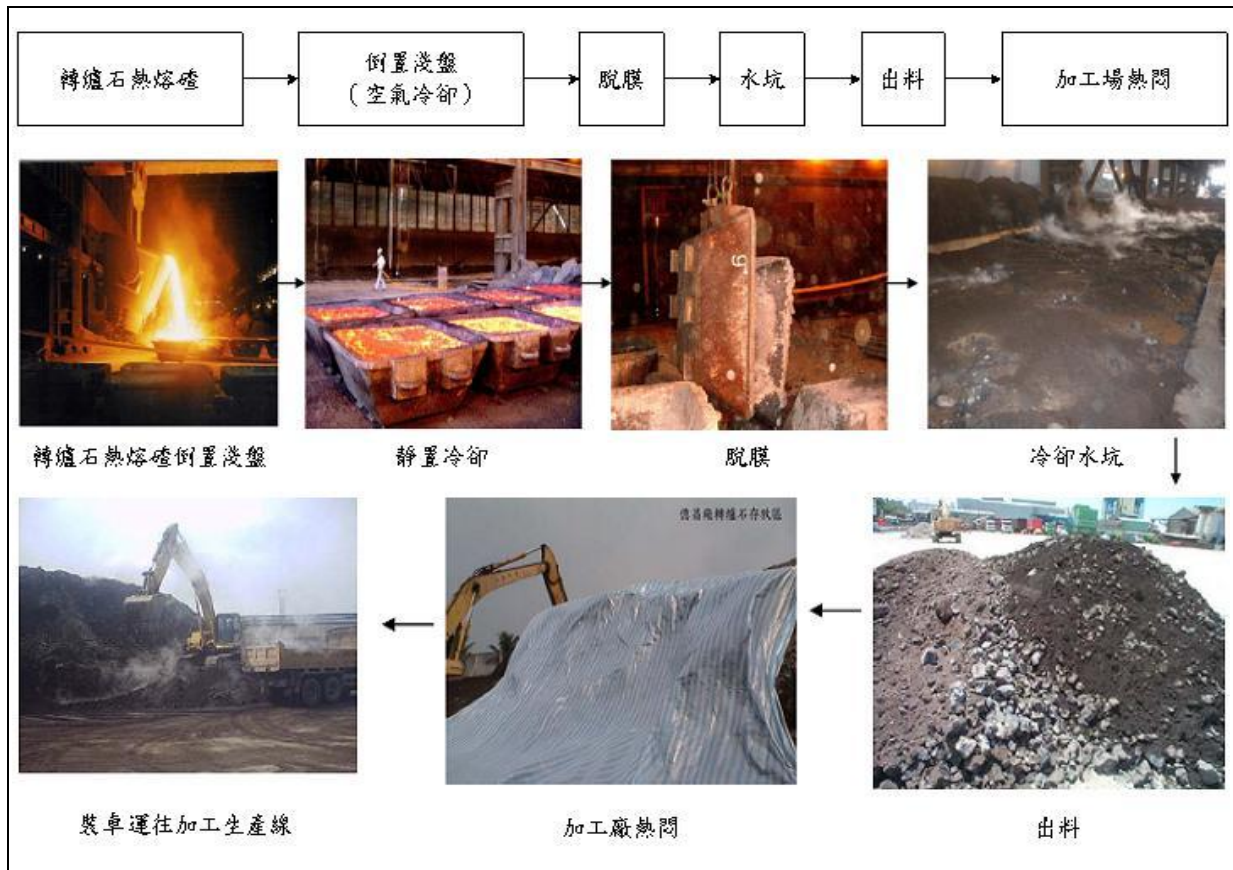


圖6 淺盤造塊餘熱自解法生產作業流程



圖7 轉爐石瀝青混凝土粒料加工廠



圖8 轉爐石瀝青混凝土粒料六分石產品

圖 11 所示為應用轉爐石粗粒料於瀝青混凝土鋪設於高雄市原料一東路，於 98 年 3 月 12 日鋪設，鋪設配比为以轉爐石全取代天然粗粒料，鋪設長度約 260m。此路段因位於鐵礦砂原料儲區旁，為防止粉塵逸散，除道路周邊裝有固定每兩小時噴灑一次之噴水

設施外，尚有每天 2~3 車次之強力噴水車。此路段自鋪設後，經觀察使用兩年後此路段亦保持相當完好。

圖 12 所示為應用轉爐石粗粒料於瀝青混凝土鋪設於高雄市動力東路，於 96 年 6 月鋪設，鋪設配比為以轉爐石全取代天然粗粒料，鋪設長度約 320m。此路段長直、平穩，兩側排水良好，車流量大，尤其重車行駛最為頻繁，圖上所示之搭載爐渣桶重車含車重約 100ton。此路段在如此反覆重載使用之下，歷經將近四年之使用，道路保持完好且未因重載使用而側擠變形。

圖 13 所示為應用轉爐石粗粒料於瀝青混凝土鋪設於高雄市中聯廠區進廠道路，於 96 年 8 月 5 日鋪設，以四種瀝青混凝土種類鋪設，即 (A1) 轉爐石全取代天然粗粒料，鋪設 12cm 厚之 AC-20 密級配及鋪設 5cm 排水瀝青混凝土；(A2) 轉爐石全取代天然粗粒料，鋪設 12cm 厚之 AC-20 密級配；(B1) 以 100% 天然粒料，鋪設 12cm 密級配及鋪設 5cm 排水瀝青混凝土；(B2) 以 100% 天然粒料，鋪設 12 cm 厚之 AC-20 密級配。特別值得一提的是圖上所示位置為左右側分別為全天然粒料之排水瀝青混凝土及全轉爐石粗粒料之排水瀝青混凝土，在新鋪後檢測時透水率為全天然粒料之排水瀝青混凝土大於全轉爐石粗粒料之排水瀝青混凝土，但經兩年後某日雨後所拍攝之照片如圖 4.4 所示，兩種配比於輪跡處明顯可見全轉爐石粗粒料之排水瀝青混凝土透水率優於全天然粒料之排水瀝青混凝土。



圖 10 轉爐石瀝青應用於高雄市澄清路
(98.04.11 試鋪，100.03.07 拍攝)



圖 11 轉爐石瀝青應用於原料一東路
(98.03.12 試鋪，100.03.09 拍攝)



圖 12 轉爐石瀝青混凝土應用於動力東路
(96.06 試鋪，100.03.07 拍攝)

圖 14 所示為應用轉爐石粗粒料於高雄市南星計畫區環外道路 350 公尺之瀝青混凝土路面，於 92 年 4 月鋪設，鋪設配比为以轉爐石 100% 取代天然粗粒料及取代天然細粒料達總粒料量之 10%。南星計畫區為一填海造陸區，主要填築材料來自建築廢棄土以及部份以轉爐石或高爐石作為填築替代料源，區內皆以一般載運土方之重車使用為主。如圖上所示，北側即為此處所指之試鋪路段，南側之以傳統天然粒料所製之瀝青混凝土雖非試驗路段且比北側試鋪路段更晚鋪設，但明顯可見摻有轉爐石之瀝青混凝土歷經 8 年的使用，未有側擠與龜裂破壞，且剝脫之情況並不嚴重。



圖 13 轉爐石瀝青應用於中聯進廠道路 (96.08.05 試鋪，98.09.01 拍攝)



圖 14 轉爐石瀝青應用於南星計畫道路-1 (92.04 試鋪，100.03.07 拍攝)

表 5 中鋼轉爐石 AC 試鋪道路一覽表

項次	鋪設地點	數量(MT)		鋪設日期	鋪設廠商	
		AC	粗骨材			
1	中聯茂大廠區道路	1000	500	95.11	光隆瀝青	
2	中鋼動力東路	1400	800	96.06.27	光隆瀝青	
3	中聯A廠廠區道路(1)	1250	700	96.07.27	建中瀝青	
廠區道路	中鋼廠區 共4條	煉焦二東路	650	390	98.03.12	光隆瀝青
		原料一東路	600	360	98.03.12	光隆瀝青
		原料二北路	600	70	98.04.26	建中瀝青
		高爐一西路	2400	1540	99.11.28	光隆(密級配) 建中(磨擦層)
460	420					
5	中聯台中研磨廠場區道路	900	500	98.01.20	禾鑫瀝青	
6	中龍廠區道路	800	320	98.08.24	禾鑫瀝青	
7	中鋼第三冷軋場	2500	510	99.02	百正瀝青	
公共工程	1	南星計畫道路-1	1500	820	92.04	光隆
使用示範	2	高雄市澄清路	360	80	98.04.12	瑞隆
道路	3	南星計畫道路-2	760	480	100.02.28	光隆

綜合上述各大學與研究機構之研究及長期成效追蹤與評估，將轉爐石應用於瀝青混凝土之特性彙整如下：

1. 轉爐石親油性較佳，瀝青膠泥不易剝脫

2. 添加轉爐石後的瀝青混凝土滯留強度指數比天然石高，較具抗剝脫能力
3. 轉爐石粒料洛杉磯磨損率較低
4. 轉爐石粒料破裂面多，稜角率高，優於天然粒料
5. 轉爐石粒料扁平率比一般天然石低，滾壓時不易破裂降級
6. 添加轉爐石後的瀝青混凝土穩定值、動彈性模數較高
7. 添加轉爐石後的瀝青混凝土抗車轍變形能力較佳
8. 使用轉爐石之瀝青混凝土最佳含油量比天然骨材者低，可節省用油成本
9. 轉爐石瀝青混凝土可提升路面抗滑能力
10. 轉爐石瀝青混凝土比重大，取代量高時鋪設成本較高
11. 轉爐石較天然骨材堅硬耐磨耗，對 AC 拌合廠設備磨損較大
12. 轉爐石全取代粗粒料的瀝青混凝土，VMA 偏低約 1%，但不影響性能展現 (40% 以下取代對 VMA 則無明顯影響)。

六、結論

瞭解轉爐石粒料與天然粒料之基本性質差異及應用後之性能，除有助於資源永續再利用外，更有助於社會大眾與工程界正確使用鋼爐渣，讓我們共同為資源有限的地球盡一份心力。就上述各節內容重點摘錄結論如下：

1. 先進國家如美、日對於轉爐石之應用皆以道路基、底層、面層、瀝青混凝土及填地使用為主要用途，使用比率達近 80%；歐洲則於道路工程之使用亦將近 50%。包含其它應用，歐、美、日對轉爐石整體資源再利用比率皆高於 70%。
2. 轉爐石相較於天然粒料，有更多優異性質適用於瀝青混凝土，包含扁平率低不易破裂降級、洛杉磯磨損率低、粒形方正可增強粒料間互鎖作用、親油性佳可提高抗剝脫能力。
3. 轉爐石瀝青混凝土有多項性能優於傳統天然粒料瀝青混凝土，包含穩定值提昇、動彈性模數變高、滯留強度指數變高、抗車轍變形能力較佳、提升路面抗滑能力。
4. 轉爐石應用於瀝青混凝土已進行過多條道路試鋪，成效卓越；且歷經多年颱風豪雨之考驗，證實轉爐石應用於瀝青路面具有多項優異性能，使路面不易側擠變形與產生坑洞，可有效提昇柏油路面品質與延長使用壽命。

七、參考文獻

1. 「轉爐石推廣手冊」，中國鋼鐵股份有限公司，高雄，2000。
2. 劉守益，「多孔性瀝青混凝土成效之評估」國立中央大學土木工程研究所碩士論文，1996。
3. 黃隆昇、林登峰、林平全、許伯良，「評估煉鋼爐石應用於瀝青混凝土之性質及現場鋪設成效」，中國工程師高雄會刊，第18卷，第2期，第47頁到55頁，2010。
4. Dr.-Ing. Heribert Motz, "Production and Use of Blastfurnace and Steel Slags in Europe", IISI 18th/20th Meeting, June 2007。
5. Nippon Slag Association (<http://www.slg.jp/e/statistics-e.htm>)
6. USGS (http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/)