



轉爐石應用於瀝青混凝土之循環經濟

中聯資源研發處工程師 / 陳皇甫

中聯資源研發處經理 / 許伯良

中聯資源技術室主任 / 徐登科

關鍵字：轉爐石、瀝青混凝土、節能減碳

摘要

轉爐石為一貫作業煉鋼廠轉爐煉鋼製程所產出之副產品，具有硬度高、抗壓強度高等特性，可用於取代瀝青鋪面道路中之天然砂石，不只可減少天然砂石開採造成之環境破壞，其性能更優於原本之天然砂石。轉爐石粒料外觀稜角率高，質地堅硬，磨損率低，作為瀝青鋪面之骨材更可有效提高道路耐久性及壽命，進而提高用路人安全。南星路為高雄港區重要聯外道路，高雄市養工處設計以轉爐石粒料取代天然砂石粒料產製瀝青混凝土，進行南星路道路鋪築，大幅改善道路品質及耐久性，同時節能減碳相當於4.7座大安森林公園年減碳量。高雄市養工處因該路段使用轉爐石瀝青鋪面道路成效卓越，105年榮獲公共工程委員會第十六屆金質獎殊

榮。行政院工程會於106年起鼓勵公共工程採用轉爐石瀝青混凝土鋪面，高雄市政府107年起陸續於高雄市中山及沿海路，以轉爐石鋪築密級配及新工法石膠泥瀝青混凝土鋪面，有效改善道路品質，截至112年底，高雄市已鋪築超過150條轉爐石瀝青混凝土道路，全台灣共鋪築超過450條。中鋼集團於國內推動轉爐石作為道路工程材料，除有效改善國內天然砂石資源逐漸匱乏的問題，更可創造出循環再利用的環境永續生機。

壹、轉爐石粒料

(一) 轉爐石介紹

鋼鐵為社會經濟發展中不可或缺之原料，鋼鐵工業係以生產各種鋼鐵製品為主之



行業，其規模與技術為衡量國家工業發展之重要指標。鋼鐵工業可帶動下游工業之發展，具有改善工業結構與促進國家整體經濟發展之功能，因此有「重工業之母」之稱。目前國內煉鋼方法大致有轉爐、電弧爐，常見之煉鋼爐石有轉爐石及電弧爐石，其不同之生產流程如圖1。

中鋼集團在一貫作業煉鋼過程中所產出之副產物以爐石為最大宗，中鋼及中龍公司年產轉爐石數量約160萬公噸。轉爐石為一貫作業煉鋼廠在煉製鋼液時，將鐵水、副原

料及廢鋼加入轉爐後，以純氧吹而產出鋼液及熱熔渣，其中經冷卻之熱熔渣稱為轉爐石（Basic Oxygen Furnace slag, BOF slag）。轉爐石屬煉鋼爐石之一，具有耐磨、高硬度及高抗滑之特性，且粒料特性相當適合應用於鋪面工程，為妥善將轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面，並同時解決國內砂石資源短缺之困境，經濟部標準檢驗局已於2010年12月30日公告實施CNS 15310「瀝青混凝土混合料用鋼爐渣粒料」等國家標準，明確規範道路基層、底層及熱拌瀝青混凝土使用之煉鋼爐渣。再者，美國材料試驗協會（American

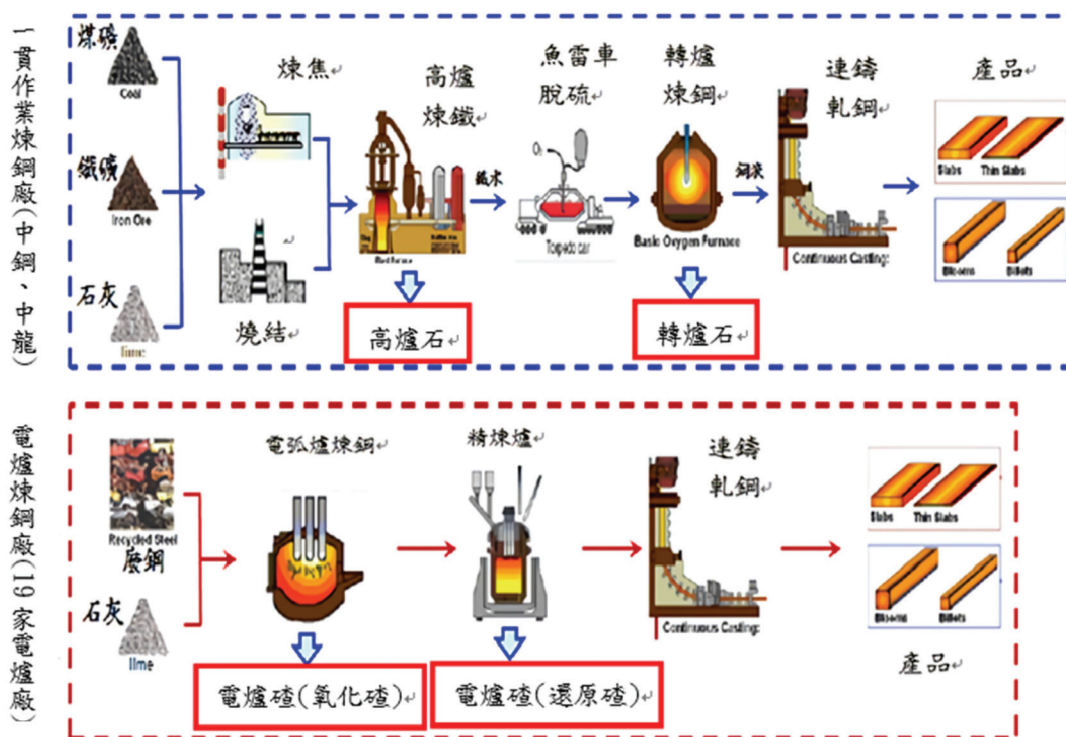


圖 1 爐渣之生產流程



Society for Testing and Materials, ASTM) 及日本工業規格 (JIS, Japanese Industrial Standards) 均已將轉爐石粒料應用於瀝青混凝土材料納入標準規範中 (ASTM D5106及 JIS A 5015)，顯見轉爐石粒料應用於鋪面工程之技術已成熟。就材料特性而言，瀝青具有防水之特性可包裹轉石而防止水分與轉爐石粒料接觸產生體積膨脹，因此轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面極具發展潛力。

電弧爐煉鋼一般可分為碳鋼製程 (例如：豐興、東和、海光公司等) 與不銹鋼製程 (例如：唐榮不銹鋼公司等)。不同於一貫作業鋼廠直接使用礦石煉鋼，電弧爐煉鋼係以回收之廢鐵、廢鋼為主要原料，經由電弧爐高溫熔煉後製成鋼材，生產過程所產生之爐石統稱為電爐石 (碴)。電弧爐熔煉過程必須經過氧化期與還原期兩個階段，因此電爐石 (碴) 又可細分為「氧化碴」與「還原碴」。此外，廢鐵、廢鋼經電弧爐高溫熔煉製程所排放的氣體及懸浮微粒經空氣污染防治設備收集後稱為「集塵灰」，電弧爐集塵灰一般含有戴奧辛及鋅、鉛等重金屬，通常被歸屬為有害事業廢棄物。

由於不同的爐石特性迥異，管理上所適用的法令規範亦有所不同。一貫作業煉鋼產出的氣冷高爐石及轉爐石為天然礦石提取鐵質後的殘餘物質，成分較為單純且性質變異小，轉爐石粒料現為中鋼公司登記在案之產品，不屬於事業廢棄物，故不適用『經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式』規定管

表 1 轉爐石之物理性質

物理性質	參考值 *
比重	3.4
單位重 (kg/m ³)	1600~1920
吸水率 (%)	2.6
洛杉磯磨損 (%)	17.6
健性試驗 (%)	1.3
加州乘載比 (CBR)	>300

理範圍，但轉爐石粒料相關產品仍須依照相關國家標準及施工綱要規範進行使用。

(二) 轉爐石性質

(1) 轉爐石物理性質

轉爐石比重約3.2~3.4，較天然砂石重，且洛杉磯磨損率及健性損失率皆優於天然砂石；轉爐石之物理性質如表1所示，轉爐石具有下列之粒料特性：

- 比重：轉爐石含氧化鐵成分，比重約為3.2~3.4。高比重材料其比重值大於3，表示材料結構緻密，具有良好粒料強度。
- 硬度：轉爐石表面堅硬、粗糙、富有稜角，莫氏硬度約為7、洛杉磯磨耗值小於20%，對於抗磨損、抗磨擦、抗侵蝕及抗風化等能力均屬優。
- 耐磨性：轉爐石有堅硬表面及較佳抗磨損能力，抗風化及抗侵蝕能力好，適合用於瀝青混凝土鋪面。
- 摩擦性：轉爐石外表粗糙凹凸富有稜角，可提高瀝青混凝土之抗磨擦能力，特別是在行車速率較高之鋪面，使用轉



表 2 轉爐石之化學成分含量

化學物質	含量 (註 1)(%)		含量 (註 2)(%)	含量 (註 3)(%)	含量 (註 4)(%)
	平均	標準差			
氧化鈣 (CaO)	40	3.4	42~52	40~52	42
二氧化矽 (SiO ₂)	9.7	1.50	10~20	10~19	15
氧化亞鐵 (FeO)	30	4.3	15~35	10~40	24
氧化錳 (MnO)	2.3	1.06	3~10	5~8	5
氧化鎂 (MgO)	7.7	4.09	1~8	5~10	8
三氧化二鋁 (Al ₂ O ₃)	4.3	1.93	0.5~3	1~3	5
五氧化二磷 (P ₂ O ₅)	2.9	0.34	1.5~4	0.5~1	0.8
硫 (S)	—	—	0.25	<0.1	0.08
氧化鉻 (Cr ₂ O ₃)	0.24	0.07	<2	—	—
CaO/SiO ₂	4	0.77	4	—	—
Free-CaO	—	—	3~13	—	—

資料來源
 註 1: 中鋼、中龍 101-108 年度統計資料
 註 2: Sustainable and Advanced Materials for Road InfraStructure (SAM-06-DE05)
 註 3: Turner Fairbank Highway Research Center. Material Description for Steel Slag.
 註 4: National Slag Association, Steel Slag- A Premier Construction Aggregate.

爐石可有助於提高鋪面之摩擦力。

- e. 健性：轉爐石的硫酸鈉健性損失率小於20%。經統計數據顯示，轉爐石相較於天然粒料具有更佳之健性，甚至達三倍之多，在瀝青混凝土中是良好的粒料替代品。
- f. 扁長率：轉爐石扁平率約有99% 超過1：3，比一般天然石低，滾壓時不易破裂。
- g. 吸水率：轉爐石因具粗糙表面且毛細孔較天然粒料多，因此粒料吸水率較高。一般建議轉爐石材料應用於瀝青混凝土時，經過烘乾後之含水量不可超過0.1%，以避免造成瀝青混凝土體積之不穩定。

- h. 親油性：轉爐石含大量鈣質成分具親油性，使瀝青膠泥不易剝脫，有利於瀝青混凝土之耐久性。

(2) 轉爐石化學性質

轉爐石主要化學成分為氧化鈣（約35~49%），其次為氧化鐵（約17~35%）、二氧化矽（約8~18%），另含有少許氧化鋁、氧化鎂…等其他化學成分。轉爐石中氧化鈣大部分與氧化矽結合成矽酸鈣化合物（calcium silicates），矽酸鈣為水泥熟料的主要成分，因此轉爐石具有類似水泥的水化膠結特性；轉爐石之化學成分含量如表2所示，各主要化學成分之特性如下：

- a. 氧化鈣（CaO）：CaO為爐石之主要



表 3 轉爐石 TCLP 溶出結果

項目	溶出值	偵測極限	項目	溶出值	偵測極限
砷 (mg/L)	ND	0.008	汞 (mg/L)	ND	0.0001
鎘 (mg/L)	ND	0.001	硼 (mg/L)	<0.020(0.015)	0.006
鉻 (mg/L)	ND	0.003	錳 (mg/L)	<0.010(0.003)	0.003
銅 (mg/L)	ND	0.002	硒 (mg/L)	ND	0.006
鎳 (mg/L)	ND	0.003	六價鉻 (mg/L)	ND	0.01
鉛 (mg/L)	ND	0.004	氟鹽 (mg/L)	0.10	0.0009
鋅 (mg/L)	ND	0.006	碳酸鹽 (mg/L)	ND	0.03

成分，CaO含量高，能生成較多矽酸鹽，形成水化反應活性(以下活性皆指水化反應的活性)較高之矽酸二鈣($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$)及硫鋁酸鈣。

- b. 二氧化矽(SiO_2)： SiO_2 主要生成低鈣矽酸鹽和高矽玻璃體，有時 SiO_2 以游離態存在，阻礙礦物水化結晶過程使其活性下降，由於轉爐石中CaO與MgO之總含量，不足以使 SiO_2 充分結合成玻璃質，所以 SiO_2 含量過多反而降低活性。
- c. 氧化鋁(Al_2O_3)： Al_2O_3 亦是決定爐渣活性之成分之一，在爐渣中易形成鋁酸鹽和鋁矽酸鹽等礦物，其含量愈多活性愈大。
- d. 氧化鎂(MgO)：在轉爐石內MgO與 SiO_2 及 Al_2O_3 結合成穩定型化合物，當MgO增加時會提高轉爐石之活性，因此轉爐石中MgO含量多寡與其活性大小有關。
- e. 硫(S)：S在爐渣中通常與CaO結合成CaS，在有MnO存在情況下易生成MnS。
- f. 氧化錳(MnO)：MnO含量在1~8%，氧化錳之存在會影響轉爐石之健度。
- g. 游離氧化鈣(f-CaO)：f-CaO若吸收大氣中之水分與二氧化碳而反應會使轉爐石體積膨脹，而當f-CaO消解完成，或經由不透水材料如瀝青包裹後，體積則呈現穩定。
- h. 其他雜質：轉爐石內可能仍含有各類物質，由於含量甚低，一般認為只會使爐石微觀結構更加開放，進而增加其活性。

(3) 轉爐石環境特性

為確保轉爐石之使用對環境生態具有相容性，中聯資源每月均進行嚴格的自主品管檢驗，以環保署公告之毒性特性溶出程序(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)進行試驗，試驗結果證實轉爐石物化性質十分穩定，重金屬溶出量均低於相關檢測標準，甚至低於偵測極限，顯示無重金屬溶出污染環境之虞，表3為轉爐石TCLP溶出結果。



貳、轉爐石循環經濟應用

(一) 循環經濟簡介

「循環經濟」基本的理念是從一個搖籃到另一個搖籃，以及將原本的廢棄物轉化為其他產品的原料，使資源得以不斷的循環再利用。相較於傳統的線性經濟(如圖2)，或俗稱拋棄型經濟，即從自然界開採原料，透過加工製成產品及使用後，直接掩埋或焚燒，循環經濟盡可能延長產品的生命週期，並在生命週期結束時透過回收、重新製作或再加工

等方式，將其再造為可利用資源，以極大化資源使用效率，這樣的過程即稱為「循環經濟」，如圖3。

(二) 先進國家轉爐石再利用概況

日本、澳洲、美國、德國等世界先進國家的爐石均進行回收與資源化應用，且再利用率皆高於80%(如圖4)，而影響各國爐石再利用率高低的原因，應與其是否建立了相關規範及標準，使爐石可順利被各單位接受及使用，而因此使其定位較趨於產品有直接相



圖 2 線性經濟

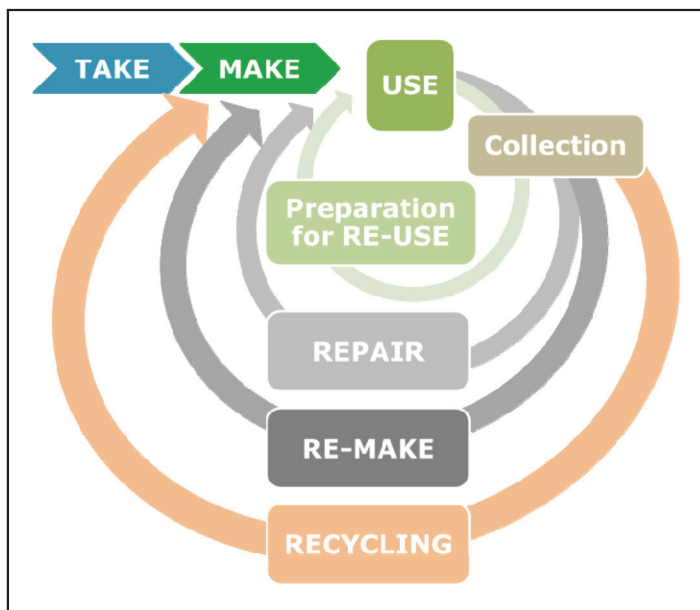


圖 3 循環經濟

關。日本轉爐石應用途徑主要以土木工程占31.6%，其次為道路占32%，並有4.5%作為水泥用；美國將約1/2轉爐石應用於道路基底層及面層材料，另近12.4%作為瀝青混凝土，日本及美國爐石應用途徑如圖5。

(三) 先進國家轉爐石再利用實例

(1) 瀝青混凝土鋪面

美國西部的科羅拉多州有一條景色秀麗、氣勢雄偉的I-70州際公路(如圖6)，這條

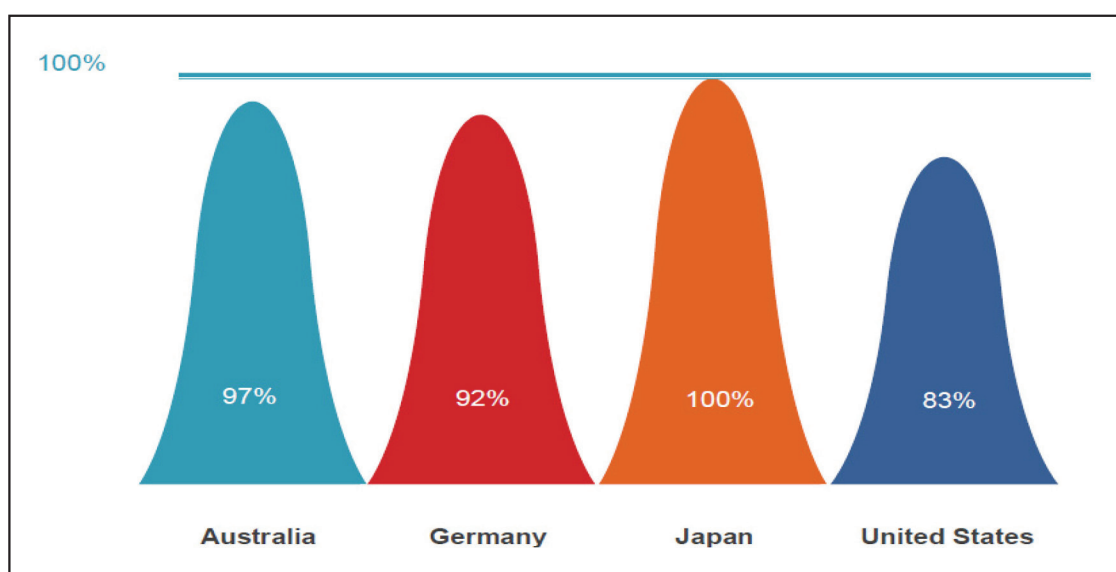


圖4 澳洲、德國、日本及美國爐石再利用率

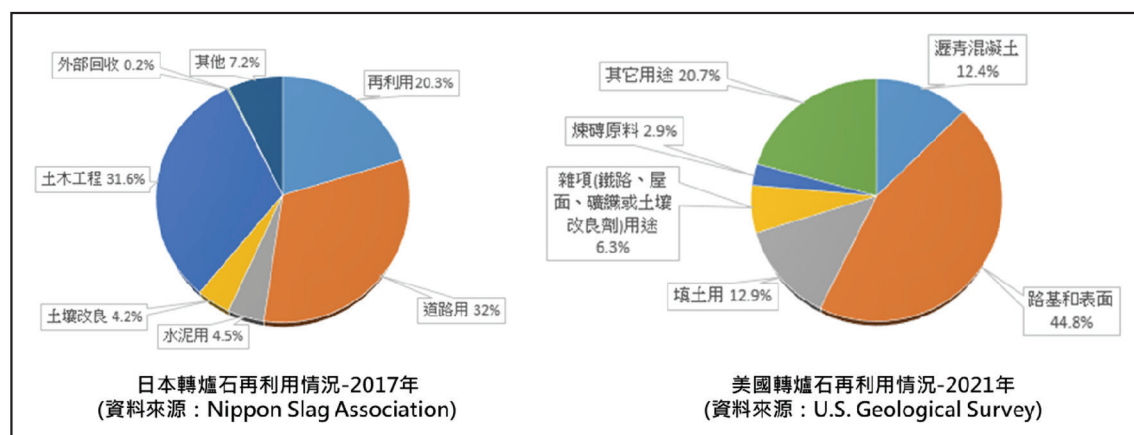


圖5 日本及美國爐石再應用途徑



州際公路橫越了科羅拉多河流經區域，除景緻亮麗以外，因為此地區一年見不到幾個月的太陽，而且有結冰凍融、高鹽害等工程需求考量，此段州際公路皆設計了不透水的密級配瀝青混凝土鋪面，由於又有抵抗高承載荷重的需求(高達 $13 \times 106 \text{EASLs}$)，當時這些瀝青混凝土的設計便考量使用轉爐石，原因是轉爐石有良好的機械性能，包含鋼性強度值高、抵抗磨損磨耗的能力高、以及粒型方正的特性可使材料更緊密，也因此增加道路路面的抗車轍變形能力，以致此路段瀝青混凝土鋪面完全沒有變形、位移、車轍的問題。

美國伊利諾州的Thornton是世界最大的露天採石廠之一，該礦區到港口唯一的行

駛道路與十字路口(Margaret and Williams Streets)因每天約五萬噸船運出口量之需，運輸卡車常需於該道路進行煞車停及轉彎迴轉等動作，造成路面嚴重破壞；為解決該問題，伊利諾州於一九九八年利用轉爐石石膠泥瀝青混凝土(SMA)進行路面改善後，該十字路口道路服務超過五年始終保持完好，使得該路段有世界上最強十字路口之稱號，證實轉爐石SMA用於高承載道路的卓越性。

(2) 填海造陸應用

日本將高爐石與煉鋼爐石應用於填海造陸建設海上機場，主要應用地點包含北九州機場(Kitakyushu Airport)、中部國際機場(Central Japan International Airport)、神戶機場(Kobe Airport)、關西國際機場

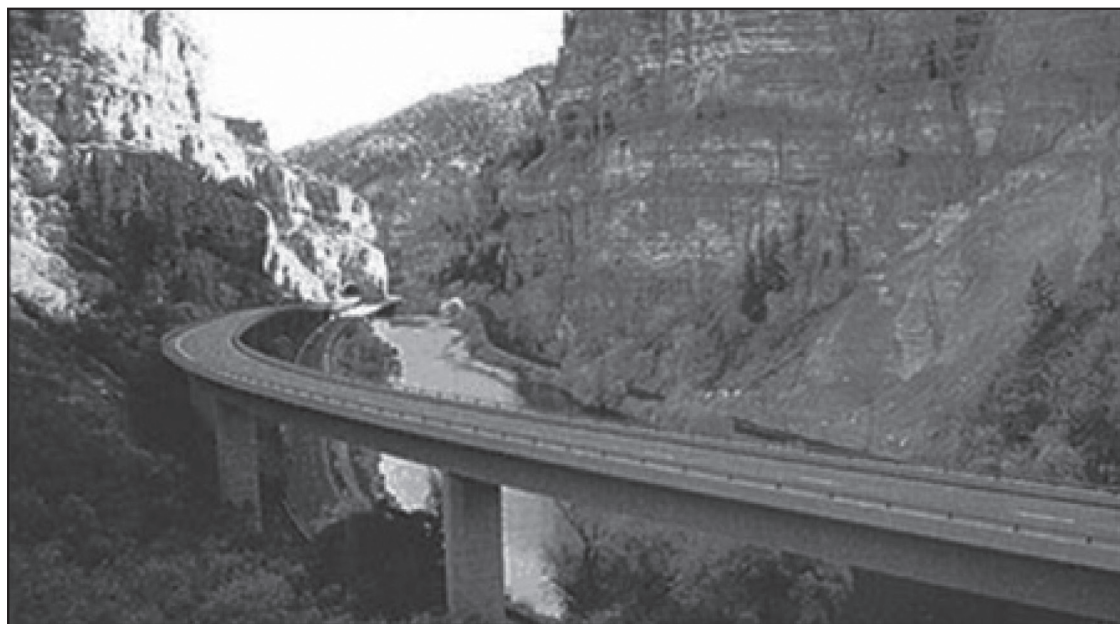


圖 6 I-70 州際公路



(Kansai International Airport)、東京國際機場 (Tokyo International Airport, Haneda Airport)等重要國際機場，如圖7，而各種爐

石用途包含地盤改良材、跑道路盤材、分區堤、臨時路面材等，從2000至2010年合計使用量超過800萬噸。



圖 7 日本應用爐石填海造陸作為機場使用地點



荷蘭在約1999年開始，超過200萬噸轉爐石已被資源化再利用，尤其在該國西南部與比利時相鄰的北海地區之Zeeland(澤蘭)省的Westerschelde和Oosterschelde間的Yangtze port (鹿特丹Rotterdam馬斯弗拉克特Maasvlakte港區)填海造陸工程，如圖8。

(3) 海洋牧場

日本近年來因海藻消失使得海洋荒漠化成為一個新的環境問題。當荒漠化問題發生時，海洋生物的生存環境同時遭到破壞，也使得沿岸漁業受到嚴重的影響。鐵質的缺乏

被發現是海洋荒漠化的重要原因，水壩等水利設施阻擋了河川流經森林區所帶來的鐵質成分，也因此減少了海洋自然的鐵質來源（如圖9）。新日鐵住金公司結合煉鋼爐石、腐植質與土壤等材料開發了一系列的鐵質供給元件，並用於促使海域中海藻重生。

製成此鐵質供給元件必須結合煉鋼爐石、土壤及腐植質，腐植質來自廢棄木材的發酵，新日鐵住金公司在北海道的增毛町（Mashike Town）進行實地試驗，將此元件以鐵箱強化後置於海床上，經過六個月後周



圖8 荷蘭 Yangtze port 填海造陸工

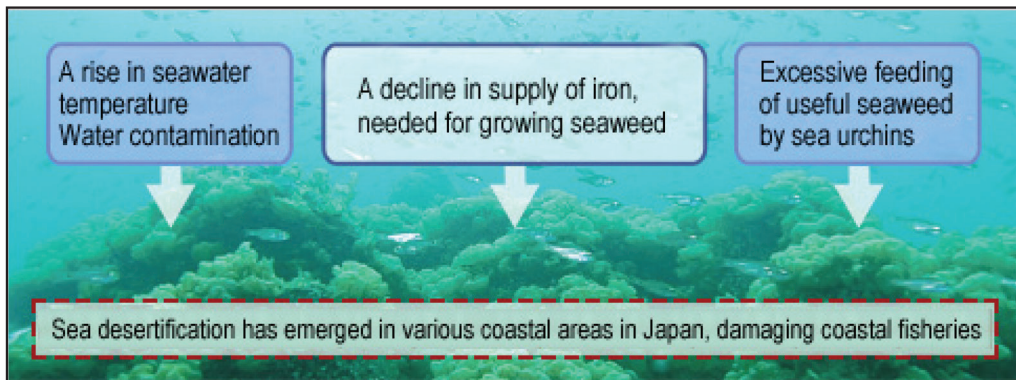


圖9 海洋荒漠化的成因

圍30公尺範圍的海藻生長情況良好，再經過2年及3年的觀察後證實這樣的正面效益是持續有效的（如圖10）。

參、國內轉爐石瀝青混凝土 (AC) 工程應用

(一) 一般原則

瀝青混凝土主要係由瀝青與粒料混拌而

成，目前國內轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面，包含密級配瀝青混凝土(Dense-Graded Asphalt Concrete, DGAC)、排水性瀝青混凝土(Porous Asphalt Concrete, PAC)、石膠泥瀝青混凝土(Stone Mastic Asphalt, SMA)，3種不同瀝青混凝土鋪面類型分別如圖11所示。

轉爐石粒料經過各種道路實際鋪築測



圖 10 煉鋼爐石應用於海域環境修復

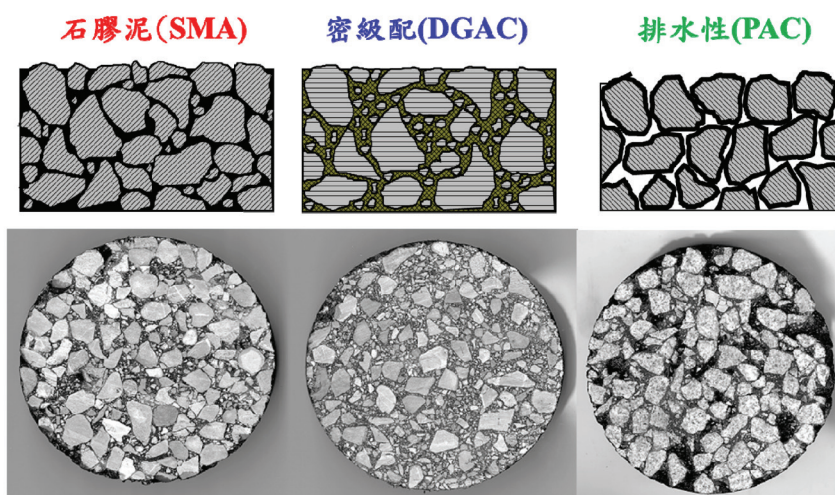


圖 11 3 種不同瀝青混凝土鋪面類型



試，結果顯示其應用於瀝青混凝土有正面效果，包括高穩定值、抗車轍能力佳、抗剝脫能力佳及抗滑性佳等，為了達到政府所推動的綠建材政策且達到永續發展的目標，將轉爐石材料添加於瀝青混凝土領域是值得推動的再利用材料。對於環境的保護，降低工業副產品生產量及回收再利用工業副產品是實現永續發展的主要手法，為了達成永續發展，這些手法一定要和政府政策、經濟及當地文化正確的結合在一起。以道路工程方面的永續發展來說，在歐美先進國家經過研究及觀察之後，認為道路工程的永續發展成功關鍵點在於工業副產品及非天然材料，而這些先進國家的政策以及其完整的永續性制度使得道路工程的永續發展得以成功實行。國內外許多研究報告指出，轉爐石添加於瀝青混凝土之領域有明顯提高瀝青混凝土自身品質的趨勢，而轉爐石添加於密級配瀝青混凝土（DGAC），以轉爐石瀝青混凝土各項試驗結果（穩定值、抗車轍、抗滑性等）則有優於一般天然粒料瀝青混凝土，轉爐石粒料

產品六分石(AC6)、三分石(AC3)、二分石(AC2)外觀如圖12。

(二) 工程性質

添加轉爐石是否會造成瀝青混凝土的工程性質改變，可藉由試驗來說明使用轉爐石於瀝青混凝土之成效。瀝青混凝土成效試驗包含車轍試驗、抗滑試驗等，綜合成果而言，使用轉爐石並不會使瀝青混凝土之成效降低，甚至於抗滑值上會有更佳的表现。

(1) 穩定值與流度值：

穩定值與流度值是決定混合料配合設計的關鍵指標參數，使用轉爐石取代部分粒料是否會造成密級配瀝青混凝土（DGAC）之配合設計中之穩定值的改變，相關研究皆依據ASTM D1559來進行穩定值試驗，應用於DGAC與RAP之結果分別如圖13、圖14所示，發現使用轉爐石取代天然粒料會提高DGAC之穩定值。

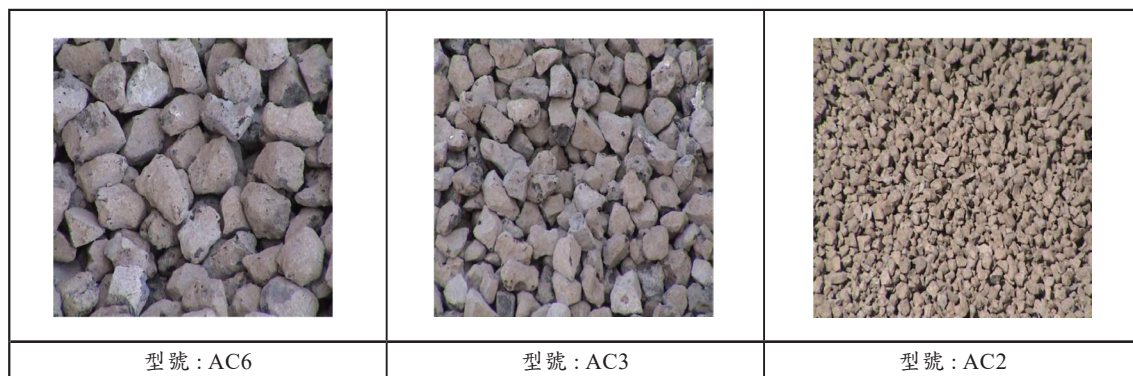


圖 12 轉爐石瀝青混凝土用粒料

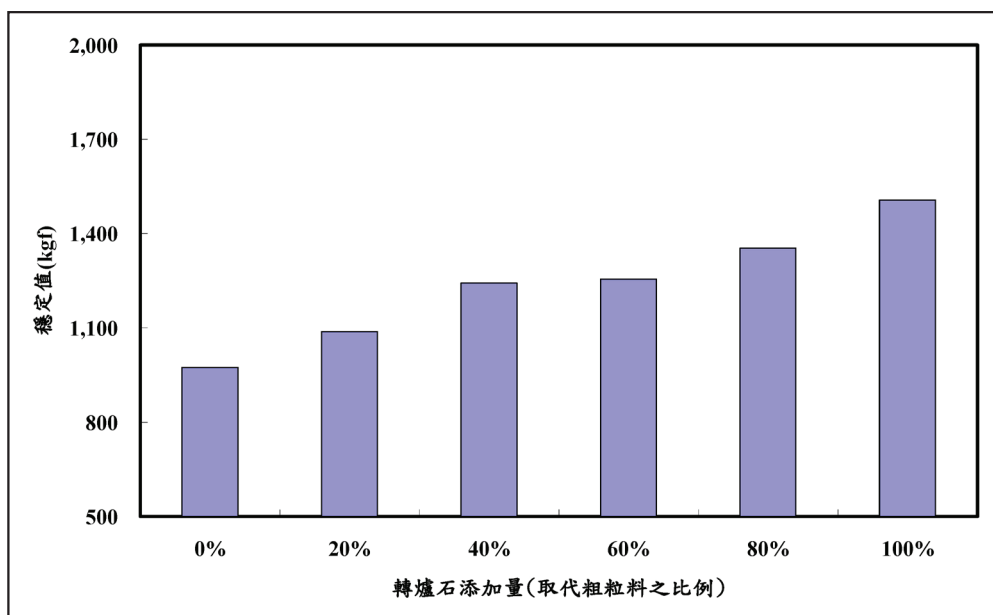


圖 13 轉爐石添加量與 DGAC 之穩度值關係圖

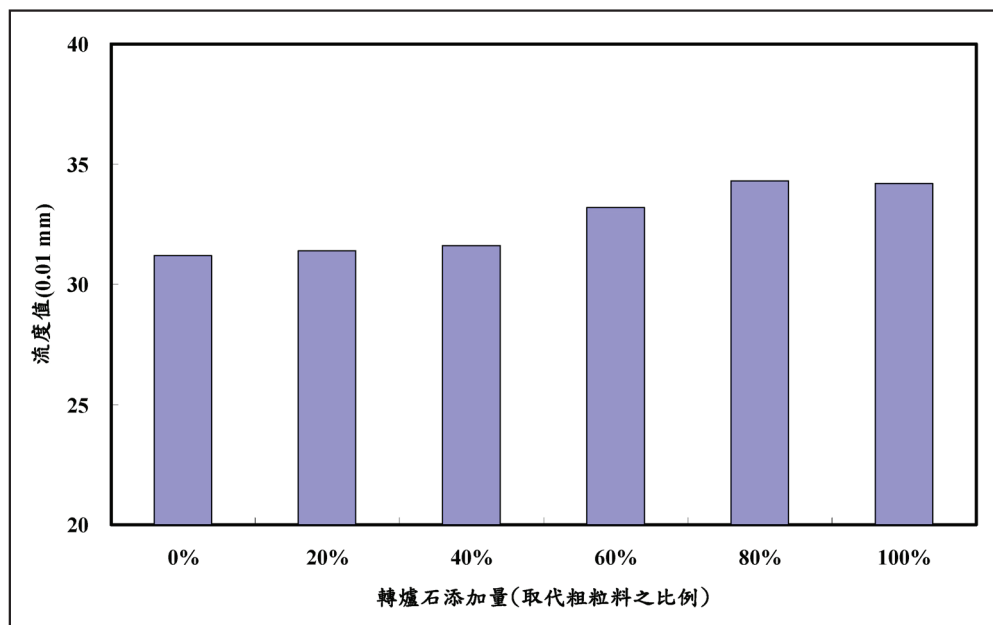


圖 14 轉爐石添加量與 DGAC 之流度值關係圖



(2) 車轍深度：

使用轉爐石取代部分粒料是否影響其排水性瀝青混凝土（PAC）、密級配瀝青混凝土（DGAC）之抗車轍行為，導致高溫路面容易產生車轍破壞之現象。車轍試驗為模擬鋪面面層材料於開放交通後，經長期車輛滾壓產生車轍破壞之情形，台灣地區鋪面最高平均溫度約為60℃，所以本試驗將溫度控制於60℃執行，並採用英國道路試驗研究方法及日本製編號TR-322M輪跡試驗進行試驗。車轍深度越高代表該材料組合越容易產生車轍，而轉爐石應用於PAC、DGAC之結果分別如圖15、圖16所示，從圖可以發現隨著轉爐石添加量增加會造成車轍深度下降，因此相較於天然粒料，添加轉爐石對於PAC整體抗車轍能力有顯著提升效果，使用轉爐石對

於台灣地區困擾已久的高溫容易產生車轍問題應可得到進一步之改善。

(3) 抗滑性：

使用轉爐石取代部分粒料是否會影響其排水性瀝青混凝土（PAC）之抗滑力，造成雨天時車輛行駛於路面容易產生打滑之現象。依據ASTM E303規範之抗滑試驗(BPN)進行評估，BPN值越高代表其抗滑能力越佳，其應用於PAC之結果分別如圖17所示，經過變異數分析結果顯示，使用轉爐石混合料明顯較使用天然粒料之BPN值高，且隨著轉爐石添加量增加會造成BPN值不同程度之上升，由此可知添加轉爐石於PAC在開放交通後有較好的抗滑能力。

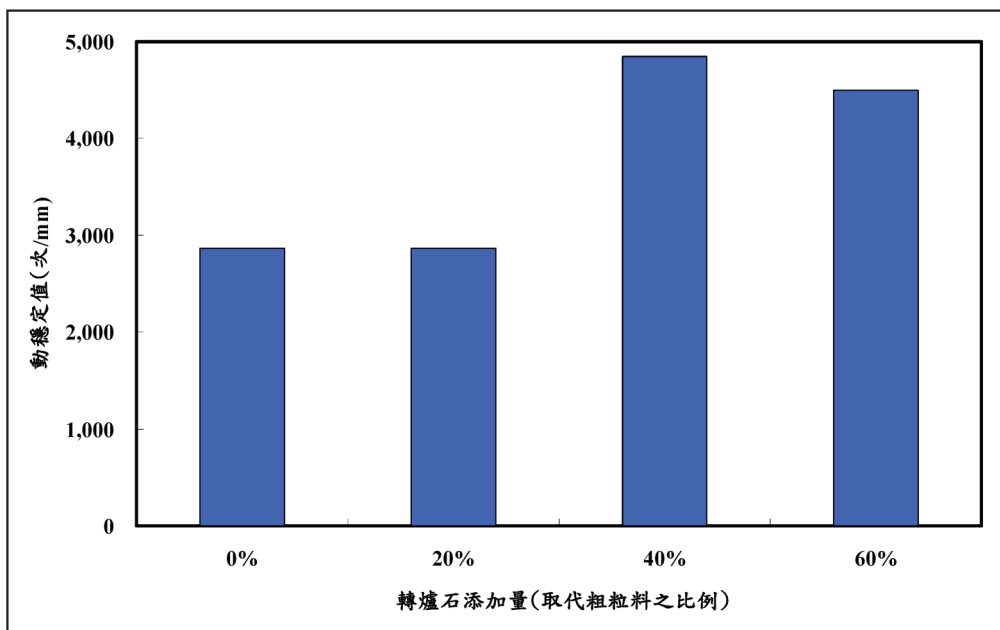


圖 15 轉爐石添加量與 PAC 車轍試驗之關係圖

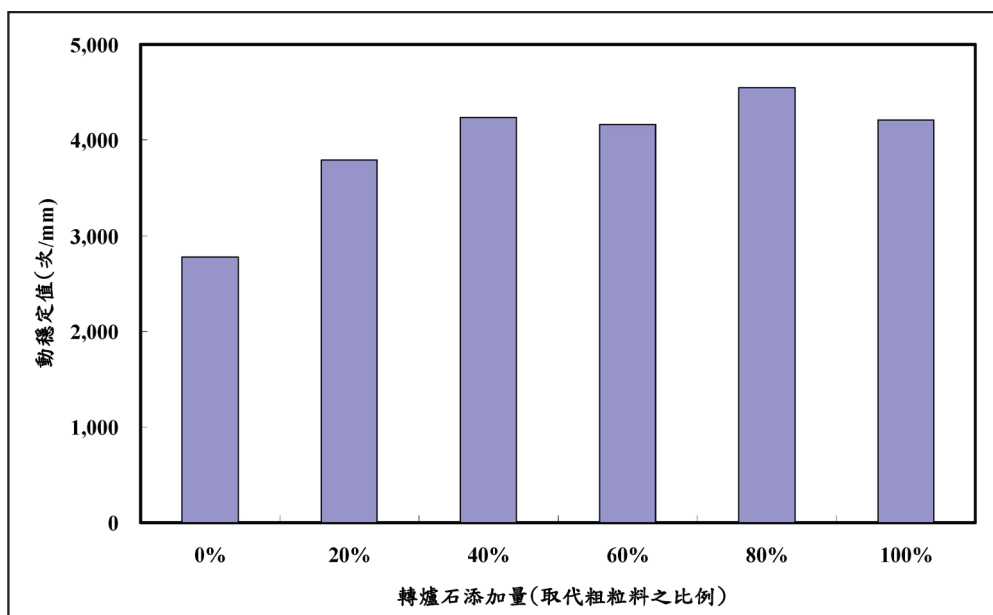


圖 16 轉爐石添加量與 DGAC 車轍試驗之關係圖

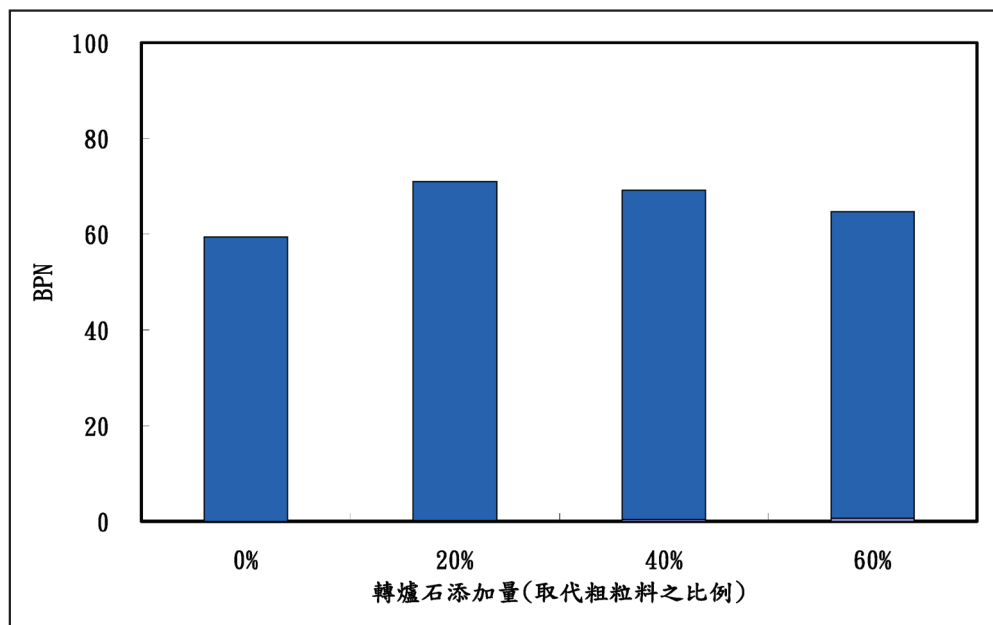


圖 17 轉爐石添加量與 PAC 抗滑試驗之關係圖



(三) 道路應用實例

台灣轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面的研究發展歷程始於民國92年，同年進行高雄市南星計畫區的道路試鋪，成效卓越；其後逐年透過國內多所大學、學術機構與工程公司之研究，包含鋪面工程學會、成功大學、中央大學、義守大學、高苑科大、逢甲大學、台灣世曦等，以及多條廠內外試鋪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混凝土鋪面具有：磨損低、穩定值高、抗滑性佳、抗車轍能力強、抗剝脫能力佳等多項優點，能夠有效提昇瀝青混凝土路面之品質與耐久性。以下分別以高雄市大業北路及台南市中華南、西路交叉口之案例，從使用層面及相關成效方面進行分析，摘要呈現部分研究道路之分析報告，並說明轉爐石於AC之道路效益。

(1) 高雄市大業北路(轉爐石密級配瀝青混凝土DGAC)：

本研究評估路段位於高雄市小港區，此道路為工業區主要聯外幹道，往返工業區的聯結車及貨櫃車交通量龐大，繁重車流容易導致道路龜裂、坑洞、車轍及嚴重破壞，經鋪設轉爐石瀝青混凝土鋪面後，道路使用情形良好(如圖18)；依檢測數據顯示，大業北路開放交通兩年之穩定值，因轉爐石硬度較高，抗磨損能力較佳，粒料不容易破碎與磨耗，故穩定值(約1345 kgf) 較天然粒料瀝青混凝土(約945 kgf)高(如圖19)；另外，大業北路經重新鋪築後整體平坦度標準差已大幅降低，開放通車兩年，轉爐石路段之平坦度標準差(2mm)遠低於天然粒料路段之平坦度標準差(3mm) (如圖20)，顯示轉爐石路面行駛狀況較良好。



圖 18 高雄市大業北路



(2) 台南市中華南、西路交叉口(轉爐石石膠泥配瀝青混凝土SMA)：

本研究評估路段位於台南市中華西路一

段與中華南路二段交叉口處，本路口由於重載車輛多，道路鋪面容易變形或破裂，經鋪設轉爐石石膠泥瀝青混凝土SMA鋪面後，

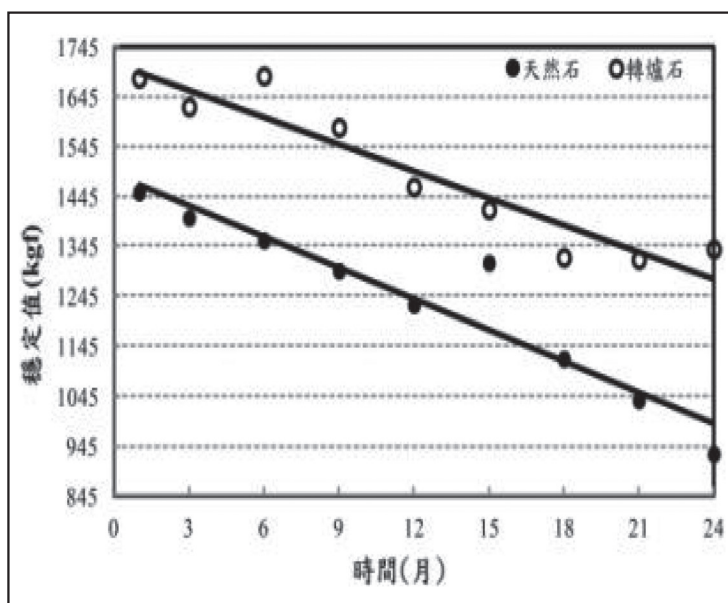


圖 19 高雄市大業北路瀝青混凝土穩定值試驗

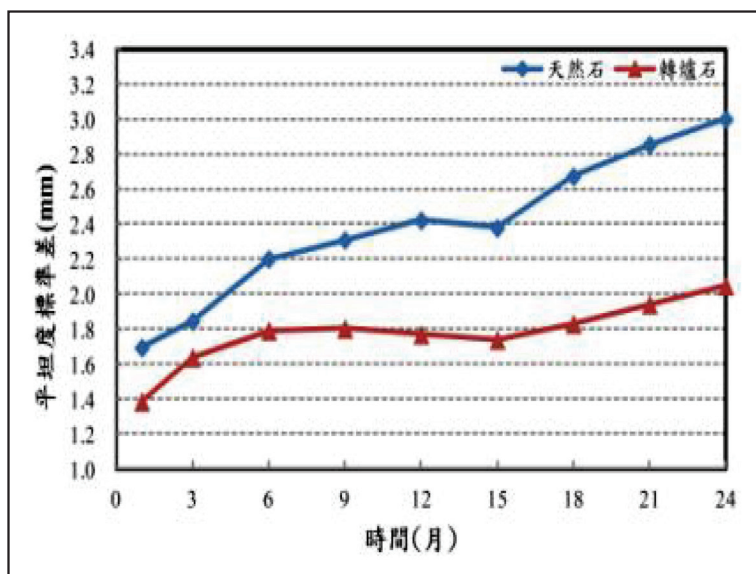


圖 20 高雄市大業北路瀝青混凝土平坦度標準差



道路使用情形良好(如圖21)；依檢測數據顯示，本道路開放交通後約17個月，轉爐石瀝青混凝土車轍深度約6~8mm，傳統瀝青混凝土約20mm，顯示轉爐石瀝青混凝土具有較

佳的抗車轍能力(如圖22)；另外，轉爐石瀝青混凝土之衝擊值(CIV)平均值在85以上(如圖23)，傳統瀝青混凝土的CIV平均值在70以下，顯示轉爐石瀝青混凝土鋪面結構良好。



圖 21 台南市中華南、西路交叉口

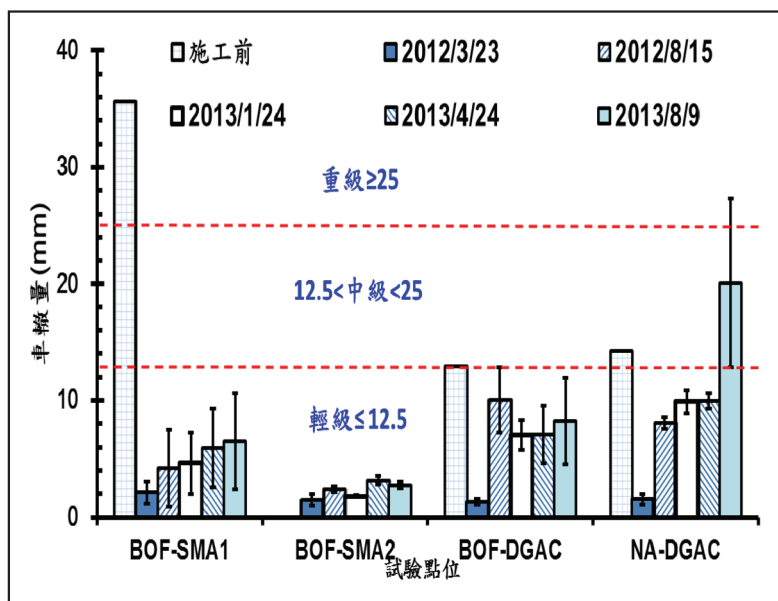


圖 22 台南市中華南、西路交叉口轉爐石瀝青混凝土車轍監測資料

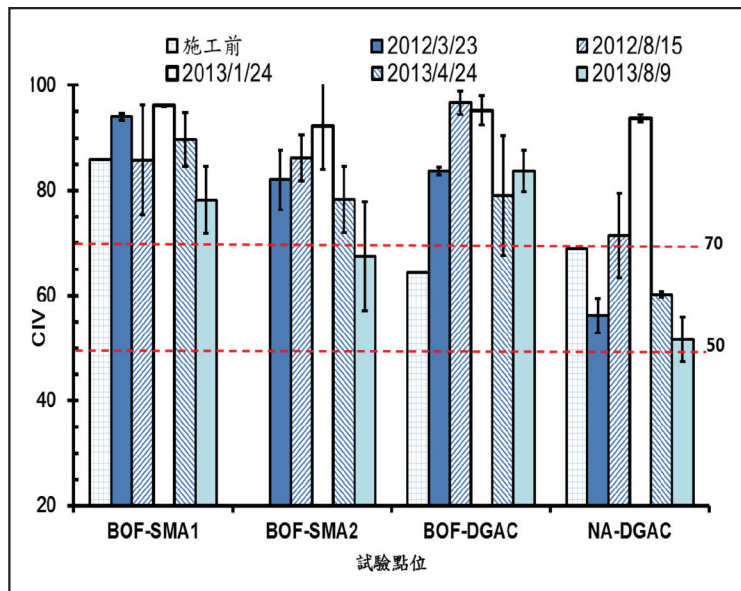


圖 23 台南市中華南、西路交叉口轉爐石瀝青混凝土 CIV 監測資料

肆、轉爐石瀝青混凝土 (AC) 之循環經濟

(一) 轉爐石瀝青混凝土道路應用歷程

中鋼集團自民國95年起推動轉爐石於道路工程之循環經濟，使用單位包含高雄市政府、台南市政府、屏東縣政府、台中市政府、公路總局、高公局、營建署、水利署、台電公司、台水公司、林園工業區、南科管理局、台塑仁武廠、中石化大社廠及中鋼集團等，轉爐石瀝青混凝土應用歷程(如圖24)及說明如下：

(1) 廠內試鋪 (民國 95~100 年)：中鋼集團於民國 95 年起，即開始於中鋼集團廠內道路鋪設轉爐石瀝青混凝土道路，並評估其成效，包含中鋼廠內動力東路及原料一東路等 11 條道路 (如圖 25)。

(2) 廠外試辦 (民國 101~102 年)：在經過多年轉爐石道路成效驗證後，於 101 年起開始向外與工務機關合作鋪築試辦工程，包含高雄市金福路 (如圖 26) 及亞太路等 6 條道路。

(3) 南部推廣 (民國 103~105 年)：南部縣市 (高雄、台南) 開始持續擴大使用，包含台南市永成路 (如圖 27) 及中華西路等 23 條道路。

(4) 循環經濟 (民國 106~112 年)：配合工程會循環經濟再生粒料政策，推廣至全省各工務機關使用，轉爐石現已普遍應用於瀝青混凝土，統計至 112 年底已完成逾 450 條轉爐石瀝青混凝土道路，目前也持續提供轉爐石瀝青混凝土粒料予各公家單位進

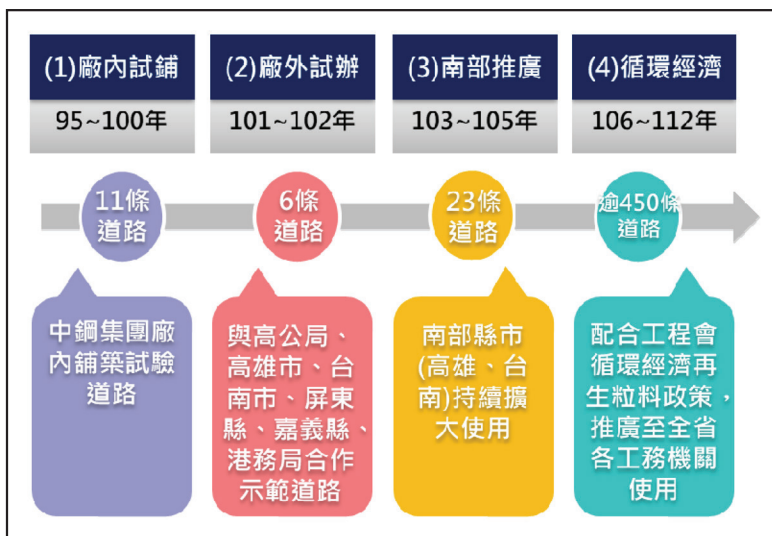


圖 24 轉爐石瀝青混凝土道路應用歷程



圖 25 中鋼廠區動力東路

行道路瀝青混凝土鋪設使用；另外，中鋼集團配合高雄市政府於 112 年 2 月舉辦轉爐石循環材料應用於道路鋪面工程座談會（如圖 28），依據政府循環經濟政策，積極推動轉爐石多元應用，創造道路建設永續發展。

（二）減碳效益及循環經濟認證

（1）高雄市南星路獲金質獎肯定

南星路為高雄港區重要聯外道路，串聯高雄港洲際貨運中心、南星自由貿易港區、遊艇產業專區，依高雄市政府規劃，未來將



圖 26 高雄市金福路



圖 27 台南市永成路



圖 28 高雄市政府攜手中鋼集團舉辦轉爐石循環材料應用於道路鋪面工程座談

銜接國道七號，因此該道路貨櫃車、卡車交通量龐大，過往以一般天然石瀝青混凝土鋪設之路面因不堪重車碾壓，產生道路凹凸不平及大量坑洞狀況。為提升鄰近居民及用路人安全，高雄市府工務局養工處設計以轉爐石粒料取代天然粒料鋪築瀝青混凝土，大幅改善道路品質及耐久性。高雄市府工務局養工處因該路段使用轉爐石瀝青鋪面道路成效卓

越，提報南星路轉爐石瀝青鋪面道路參選公共工程委員會第十六屆金質獎，榮獲優等獎(如圖29)。

從高雄市府提報南星路參加工程會金質獎資料中(如圖30)，就工程經費、鋪築後之使用年限及節能減碳這三部分而言可以清楚看出，中聯資源股份有限公司於高雄市府



星路工程中無償提供轉爐石、基底土方改良再利用，節省工程經費約423.41萬，佔總工程經費之12.85%；一般瀝青混凝土鋪面用於港區道路平均壽命約1.5~2年，南星路自101年起試鋪路段，迄今道路使用狀況仍然良好，已延壽超過5倍年限；而因應全球節能減碳之方針，本工程減少排放1,811.7公噸的二氧化碳，此量約150,975棵樹之年減碳量，相當於4.7座大安森林公園之年減碳量。

(2) 高雄市中山及沿海路獲高雄市政府肯定

高雄市中山路及沿海路為小港機場、臨海工業區及高雄港洲際貨櫃中心的主要聯外道路，重載車輛密度居全國之冠，每日上萬輛聯結車反覆輾壓，導致原本的路面不堪負荷而變形、破損，尤其在連日大雨過後，路面易產生坑洞，影響民眾的用路安全。為改善中山、沿海路之服務品質及重載道路壽命短問題，高雄市政府從107年起以轉爐石鋪築



圖 29 高雄市南星路金質獎資料

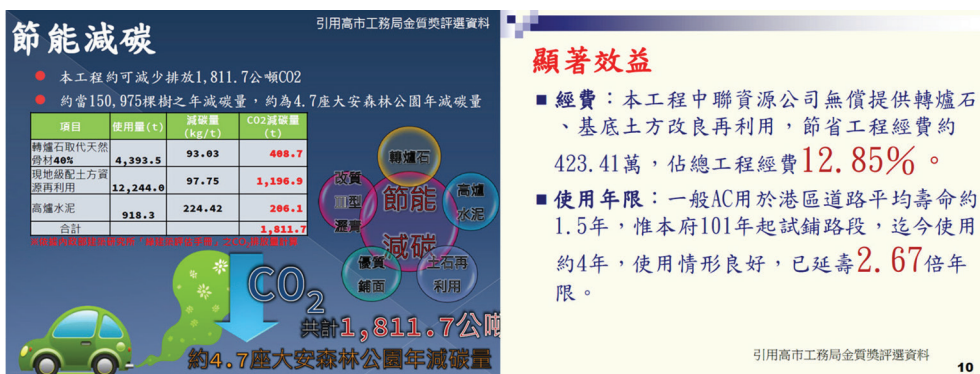


圖 30 高雄市南星路金質獎簡報資料



密級配及新工法石膠泥瀝青混凝土鋪面，有效改善道路品質，充分展現出轉爐石的優異耐久性能，截至112年底，高雄市已鋪築超過150條轉爐石瀝青混凝土道路。

依高雄市政府養工處於112年2月轉爐石循環材料應用於道路鋪面工程座談會上說明之簡報資料顯示(如圖31)，高雄市中山路及沿海路改善工程，以轉爐石取代天然粒料之效益，共節省工程經費約1億6,708萬，提高道路平均壽命約3~5倍，並減少排放11,244噸的二氧化碳，相當於29座大安森林公園之年減碳量。

(3) 轉爐石綠建材標章及BS 8001循環經濟認證
轉爐石瀝青混凝土粒料為內政部建築研

究所認證之「綠建材標章」產品(如圖32)，說明轉爐石為對環境及人體無害且符合相關規格標準的綠建材；「轉爐石應用於瀝青混凝土用途」之商業模式，於108年6月28日通過英國標準協會BS 8001循環經濟標準查核(如圖33)，並獲得最高成熟度Level Optimizing等級。

伍、結論

轉爐石為中鋼一貫作業產出的副產品，世界各國都視為可循環再利用之資源，除可取代天然砂石減少砂石之開採，亦可作為道路及土木工程使用，在歐美及日本國家，轉爐石已被廣泛使用作為瀝青混凝土粒料；中鋼集團於國內推動轉爐石作為道路工程材

改善效益

- 轉爐石取代天然粒料約**113,054噸**
- 減少碳排放量約**11,244噸** (=29座大安森林公園)
- 共可節省約**1億6,708萬元** (材料費6,098萬元 + 2次全面創鋪1億10萬元 + 6年維修費600萬元)
- 平均每部車輛行駛速度約提升**6km/hr**
- 與一般道路壽命相比提升約**3~5倍**
- **108年度路平通報案106件** (107-549件)



圖 31 高雄市政府養工處「轉爐石循環材料應用於道路鋪面工程座談會經驗分享(中山沿海路)」簡報資



圖 32 轉爐石綠建材標章



圖 33 BS 8001 循環經濟標準查核證書

料，有效改善國內天然砂石資源逐漸匱乏的問題、降低天然砂石開採環境成本，並創造出循環再利用的環境永續生機，與全球共同推動循環經濟。

轉爐石本身具有高硬度、高抗壓強度等特性，經歷多年轉爐石道路之長期成效追蹤與評估，證實轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面具有：（1）磨損低、（2）穩定值高、（3）抗滑性佳、（4）抗車轍能力強、（5）抗剝脫能力佳等多項優點，能夠有效提昇瀝青混凝土路面之品質與耐久性。以高雄市南星

路數據資料顯示，使用轉爐石鋪築瀝青混凝土可提高道路使用壽命，同時節能減碳相當於4.7座大安森林公園年減碳量；截至112年底，全台灣已鋪築超過450條轉爐石瀝青混凝土道路。

本文說明轉爐石應用於瀝青混凝土除了擁有節省工程成本、提升道路品質及環保節能減碳等優點，並能貫徹循環經濟理念，減少對自然資源之開採，故期能透過本文使工程界對轉爐石有更深的認識，響應資源循環以達成政府淨零減碳及永續發展政策。



參考文獻

1. 中華鋪面工程學會，「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊」，中華鋪面工程學會，2010。
2. 中國鋼鐵股份有限公司，轉爐石瀝青混凝土使用手冊 (109 年版)，中國鋼鐵股份有限公司，2020。
3. 林志棟，「利用轉爐石提升耐久性瀝青混凝土成效之研究」，中華鋪面工程學會，2007。
4. 黃大衛，「使用轉爐石提升耐久性瀝青混凝土成效之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2008。
5. 蔡國華，「轉 石添加量對密級配瀝青混凝土之耐久性之研究」，高苑科技大學土木工程研究所碩士論文，2009。
6. 葉志穎，「轉爐石添加量對多孔瀝青混凝土特性之研究」，葉志穎，高苑科技大學土木工程研究所碩士論文，2009。
7. 陳偉全、林平全、葉志穎、翁偉儒，「轉爐石添加量對多孔瀝青混凝土特性之研究」，礦冶季刊 54 卷第 1 期 (209 期) pp.97-pp.108，2010。
8. 袁家偉，「使用轉爐石提升耐久性瀝青混凝土成效之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2007。
9. 林登峰、陳筠昀、蔡昕融、王美雲，「探討轉爐石瀝青混凝土試驗道路成果—以高雄市大業北路為例」，2012 年轉爐石瀝青混凝土研討會，2012。
10. 陳建旭、陳偉全、廖敏志、陳海通，「天然粒料與轉爐石瀝青混凝土績效評估—以台南市為例」，2012 年轉爐石瀝青混凝土研討會，2012。