

轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊及注意事項

沈得縣¹ 李承劬²

¹ 國立台灣科技大學營建工程系 教授

² 國立台灣科技大學營建工程系 博士班研究生

摘要

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，因此夙有「重工業之母」之稱呼。中鋼公司在一貫作業煉鋼過程中產出之副產物以爐石為最大宗，其中轉爐石年產量約為 120 萬公噸。轉爐石具耐磨、高硬度及高抗滑之特性，其粒料特性適合應用於鋪面工程。但未經安定化處理之轉爐石因含有游離石灰遇水後易產生體積膨脹，使其在資源再利用上受到質疑。依國內外轉爐石再利用之經驗顯示；轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面工程之技術已相當成熟，且瀝青具有防水之特性若包裹轉爐石則可防止水分與其接觸而抑制體積膨脹，並使含轉爐石之瀝青混凝土鋪面性質穩定，因此轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面極具潛力。

鑑於國內鋼鐵工業對達成「零固廢」之需求殷切，但目前卻仍未針對轉爐石應用於鋪面工程編訂相關之使用手冊。中國鋼鐵股份有限公司及中聯資源股份有限公司為宣導轉爐石之正確使用觀念，以確保轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面之績效，並避免因材料不當使用而造成工程失敗，因此委由社團法人中華鋪面工程學會召集國內瀝青混凝土相關之專家學者，研擬「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊」(以下簡稱使用手冊)。本使用手冊除可作為工程主辦機關、設計單位、施工單位及瀝青拌和廠等相關產業之參考遵循外，亦可提供轉爐石資源化應用於瀝青混凝土鋪面之相關技術，而確保鋪面工程之品質。

關鍵詞：轉爐石、轉爐石瀝青混凝土、轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊

一、前言

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。中國鋼鐵股份有限公司(簡稱中鋼公司)年平均鋼鐵生產量約為 1000 萬噸，而由煉鋼過程所產出之副產物量亦相當可觀。中鋼公司在一貫作業煉鋼過程中所產出之副產物以爐石為最大宗，依據行政院環保署 2008 年全國事業廢棄物申報統計資料顯示；水淬高爐石之產量約 276 萬公噸，轉爐石之產量約 120 萬公噸。高爐石為煉鋼廠在煉製生鐵(pig iron)過程中為降低生產溫度因添加石灰石作為助熔劑以使氧化鐵還原，而於高溫下所形成之氧化物爐渣。若以水淬方式冷卻者稱為水淬高爐石，若在大氣中冷卻者稱為氣冷高爐石，其中水淬高爐石因具潛在水硬性膠結能力，若經研磨成細粉添加於混凝土中則可產生卜作嵐反應(pozzolanic reaction)使混凝土結構更緻密，而增加混凝土晚期強度及耐久性。經濟部工業局已於

2004 年公告「水淬高爐石（渣）」為再生資源，目前國內每年至少需 400 萬噸爐石粉作為水泥摻料，因此水淬高爐石已全數資源回收再利用[1]。

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，以純氧吹煉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）。轉爐石係屬於煉鋼爐石（steel slag）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，但未經安定化之轉爐石含有大量游離石灰（f-CaO），遇水後易產生體積膨脹，使得資源再利用上受到質疑，最終多以土木工程填方、填海造陸及圍堤背填等方式處理。為妥善地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，我國經濟部標準檢驗局於 2001 年 12 月及 2010 年 12 月分別公佈 CNS 14602「道路用鋼爐渣」及 CNS 15310「瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料」等國家標準，以規範道路基層、底層及熱拌瀝青混凝土所使用之煉鋼爐渣。依據世界各國之研究結果及實務經驗顯示；轉爐石經適當安定化處理後可取代天然砂石而應用於鋪面工程作為填方材料、基底層級配料及瀝青混凝土面層材料等 [2]。再者，美國材料試驗協會（ASTM）及日本工業規格（JIS）已將煉鋼爐石應用於瀝青鋪面材料並納入標準規範中（ASTM D5106 及 JIS A 5015），顯見轉爐石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爐石而防止水分與轉爐石接觸產生體積膨脹，因此轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面極具發展潛力。

二、轉爐石之定義及材料性質

1. 轉爐石之定義

「轉爐石」（亦稱為轉爐渣），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，以純氧吹煉而產出鋼液及熱熔渣，其中經冷卻之熱熔渣稱為轉爐石。

2. 轉爐石之生產

中鋼公司在一貫作業煉鋼過程中冶煉 1 噸生鐵會自高爐排出約 310 公斤之冷卻固體物，稱為高爐石（Blast Furnace slag, BF slag）；而自轉爐用鐵水吹煉 1 噸鋼時，大約產生 100-118 公斤之冷卻固體物，稱為轉爐石（Blast Oxygen Furnace slag, BOF slag），其生產流程如圖 1 所示 [3]。由於煉鋼溶渣倒出時無法完全與鋼液分離乾淨，故轉爐石中常含有鐵成份；另為去除鋼液中之雜質常加入大量之石灰，因此在鋼吹煉完成後產出之轉爐石中亦含有游離石灰（f-CaO）。針對中鋼公司於煉鋼過程產出之轉爐石等成分，由於高爐產生之銑鐵中含有高量碳以及有害於鋼鐵材料之成分，如矽、磷及硫使銑鐵堅硬易脆，因此必須將銑鐵在轉爐中精鍊，並添加石灰與其他助熔劑，以去除有害成分，俟冷卻後形成轉爐石 [4]。

轉爐石是由多種礦物所組成，並隨化學成份之變化而有所不同。由於轉爐石含氧化鐵較高，因此比重較大，約為 3.2~3.6。轉爐石因含有未反應石灰，與水分接觸後產生水化反應形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 而使體積產生膨脹，導致其在再利用之應用上受到限制。但轉爐石外表粗糙凹凸富有稜角，且具有低磨損率、低健性、高承載比、高硬度及高內摩擦角等優點，充分顯示部分轉爐石是具有高度結構穩定性，可作為鋪面基底層級配料

及面層材料使用。

以往轉爐石之處理過程係將 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，最後再輔以破碎及篩分等動作，而形成粒徑為 2”以下之轉爐石級配料，此法與日本大致相同，日本之轉爐渣亦是待其冷卻後，利用破碎與篩分方式，取得適合之轉爐石材料 [5]。為提升轉爐石之處理效率與利用價值，中鋼公司特別委託社團法人中華鋪面工程學會研擬轉爐石之資源再生等相關策略 [4]。近年來中鋼公司改採「淺盤造塊餘熱自解法」作為轉爐石之處理方法，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粉碎成立方體狀，而得到低扁平率與 100% 破碎面之轉爐石，且轉爐石資源化加工過程不再破碎，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。淺盤造塊水坑崩解處理法之作業流程如圖 2 所示 [6]。

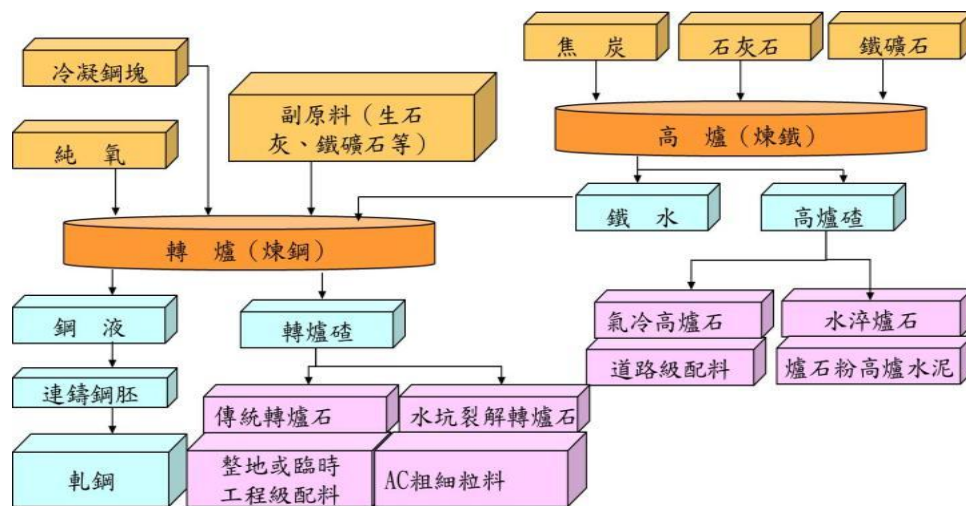


圖 1 煉鋼爐石之生產流程

3. 轉爐石之一般性質

轉爐煉鋼是以鐵水吹氧冶煉，由於製程條件之不同，所生產之轉爐石具有不同之物化性質，茲詳述如下：

(1) 轉爐石化學性質

轉爐石之化學成分主要有 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 MgO 等，其三相圖如圖 3 所示，與水泥生料所用之石灰石、黏土及鐵粉之主要成分相似。轉爐石之化學成分含量如表 1 所示，各主要化學成分之特性如下：

- 氧化鈣 (CaO)： CaO 為爐渣之主要成份， CaO 含量高能生成較多矽酸鹽類，形成活性較高之矽酸鈣 (C_2S) 及硫鋁酸鈣。
- 二氧化矽 (SiO_2)： SiO_2 主要生成低鈣矽酸鹽及高矽玻璃體，有時 SiO_2 以游離狀態存在，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，因此 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份之一，在爐渣中易形成鋁酸鹽及鋁矽酸鹽等礦物，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 ，與水作用生成 Ca(OH)_2 ，在有 MnO 存在情況下易生成 MnS ，與水作用會發生體積膨脹現象。
- 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 吸收大氣中之水分與二氧化碳 (CO_2) 而發生風化作用，使轉爐石體積膨脹。

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。

表 1 轉爐石之化學成分含量

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_2O_3)	0.5~3	1~3	5	0.5~7
五氧化二磷 (P_2O_5)	1.5~4	0.5~1	0.8	1~3
硫 (S)	0.25	< 0.1	0.08	—
氧化鉻 (Cr_2O_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。

(2) 轉爐石物理性質

轉爐石係多種礦物組成之固熔體，隨化學成份之變化而有所不同，其性質與化學成份有著密切之關係，轉爐石之物理性質如表 2 所示。轉爐石具有下列之粒料特性：

- a. 耐磨性 (durability): 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佳，非常適合用於瀝青混凝土鋪面。
- b. 摩擦性 (friction properties): 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 (wear resistance)，特別是在行車速率較高之鋪面，使用轉爐石可有助於提

高鋪面之摩擦力。

- c. 儲熱能力 (heat retention)：轉爐石儲熱之功能較天然粒料佳，可延長瀝青混凝土施工時間。
- d. 比重 (specific gravity)：轉爐石含鐵成分高，比重介於 3.2~3.6 之間，轉爐石瀝青混凝土單位重大於傳統瀝青混凝土約 15%~25%，但會依配合設計而異。

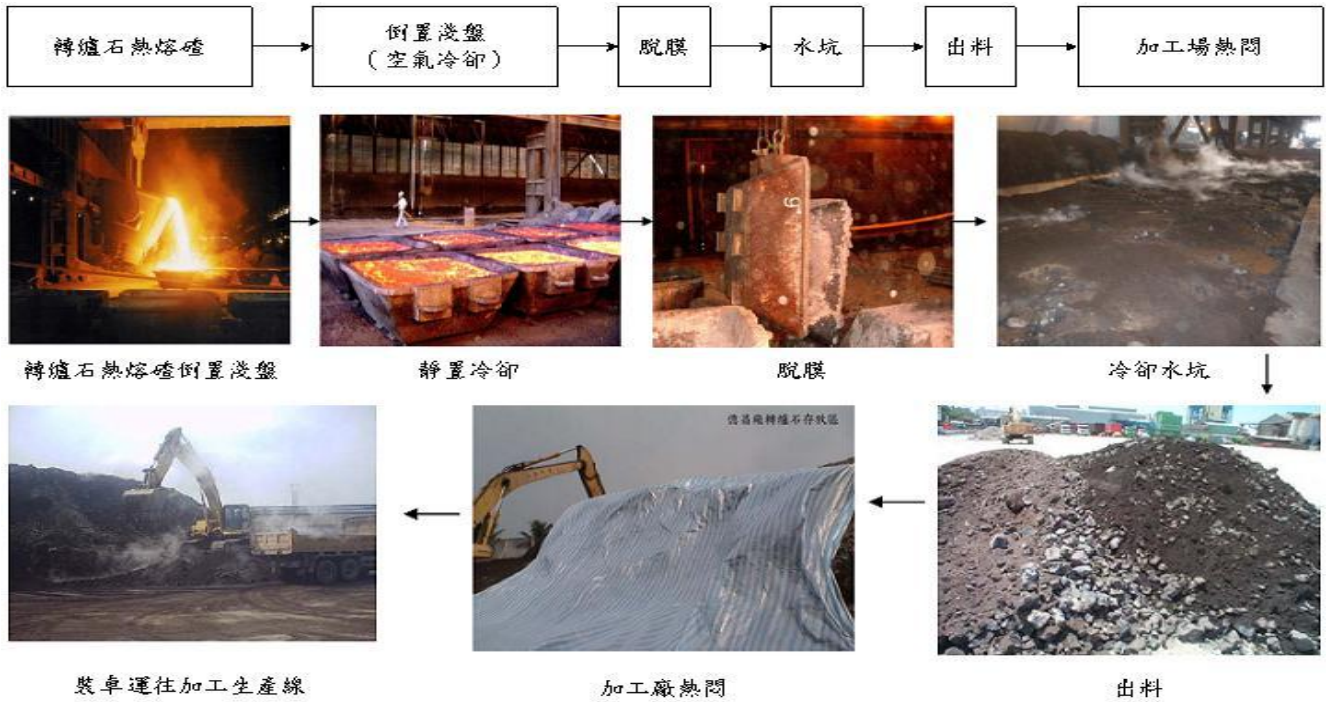


圖 2 淺盤造塊餘熱自解法之作業流程

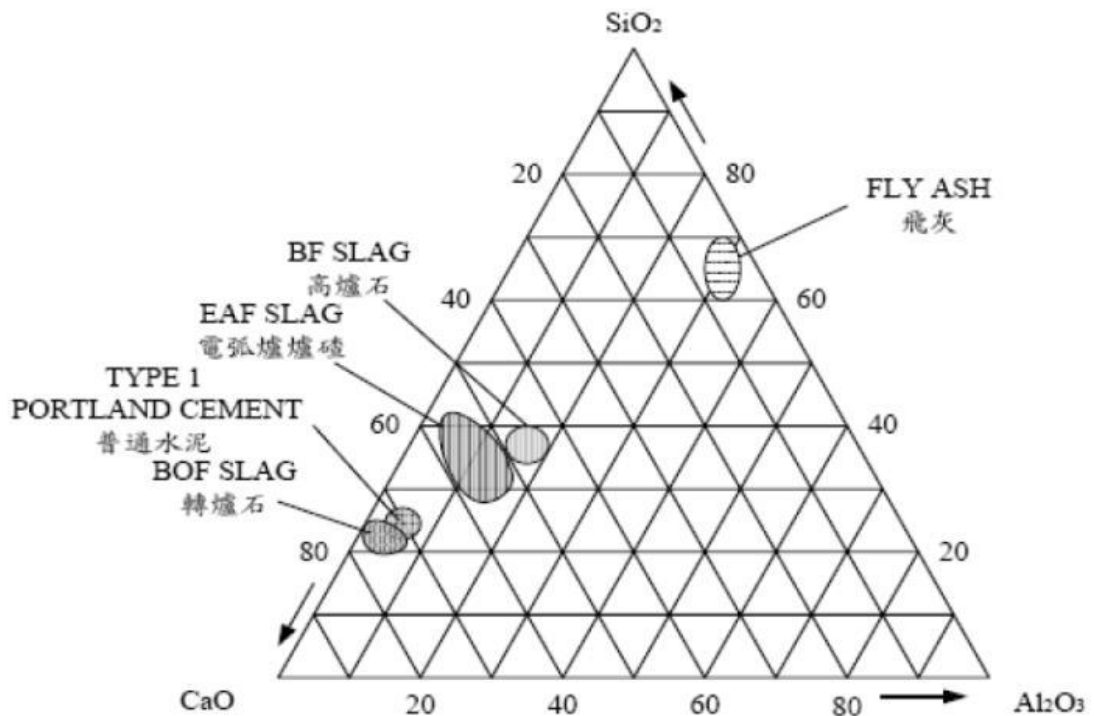


圖 3 轉爐石 CaO-Al₂O₃-SiO₂ 三相圖

- e. 吸油率 (asphalt absorption)：轉爐石吸油能力較天然粒料高，會增加瀝青混凝土之含油量。
- f. 吸水率 (water absorption)：轉爐石因具粗糙表面且毛細孔較天然粒料多，因此粒料吸水率較大。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。
- g. 親油性 (hydrophobic)：轉爐石含大量鈣質成分具親油性，有利於瀝青混凝土之耐久性。
- h. 膨脹性：轉爐石吸水後 f-CaO 會水化為氫氧化鈣 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)，體積將會膨脹 100-300%，MgO 會水化為氫氧化鎂 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$)，體積膨脹約 77%。因此含有 f-CaO 及 MgO 之轉爐石處於不穩定狀態，唯有當 f-CaO、MgO 消解完成或含量很少時，亦或是不透水材料如瀝青包裹才會穩定。

表 2 轉爐石之物理性質

物理性質	參考值*
比重	3.2~3.6
單位重 (kg/m^3)	1600~1920
吸水率 (%)	≤ 3
洛杉磯磨損率 (%)	≤ 25
健性試驗 (%)	< 12
加州承載比 (CBR)	> 300

*資料來源：中聯資源股份有限公司提供

4. 轉爐石膨脹性

(1) 影響因素

影響轉爐石之膨脹因素可歸納為養治溫度、養治方法、養治時間、游離氧化鈣之活性及轉爐石粒徑大小等，茲詳述如下 [7]：

- a. 養治溫度：轉爐石之浸水膨脹率，根據 JIS A5015 解說中證實其養治水溫愈高膨脹率愈大，尤其是養治溫度在 60°C 以上就認定有促進膨脹之效果。
- b. 養治方法：根據 JIS A5015 解說養治方法可分為；(a)間歇養治：試體浸置於 $80\pm 3^\circ\text{C}$ 熱水中持續養治六個小時，並在裝置內冷卻，次日再反覆此操作，總共 10 次循環；(b)連續養治：將試體持續養治於 $80\pm 3^\circ\text{C}$ 熱水中，養治 4 日。研究結果顯示；在養治初期係以連續養治之膨脹率較大，但就長期之膨脹率而言，兩種養治方法之差異不大。
- c. 游離氧化鈣 (f-CaO)：f-CaO 活性愈高轉爐石之膨脹性愈大，且新鮮轉爐石比安定後轉爐石活性大。鹽基度 (CaO/SiO_2) 愈高，活性愈大。
- d. 轉爐石粒徑大小：粒徑較小之轉爐石比表面積大，與水接觸之面積增加，而增加其化學反應之進行，因此膨脹量較大；反觀尺寸較大之轉爐石，因反應接觸面積減少，膨脹量反而較小。

(2) 相關規定

轉爐石具有遇水緩慢膨脹之特性，將導致鋪面工程失敗，由於各國對於膨脹性爐石品質要求相當嚴格，如：德國（DIN EN1744-1）規定正式道路級配料之膨脹率需低於 3.5%；日本（JIS A5015）規定煉鋼爐石用於正式道路級配料之膨脹率低於 1.5%；美國（FHWA）規定爐石細粒料膨脹率需低於 1%；台灣（CNS 14602）規定煉鋼爐石用於正式道路級配料之膨脹率低於 1.5% 及用於熱拌瀝青混凝土之膨脹率低於 2.0%。

5. 轉爐石處理及安定化

轉爐石於出渣冷卻時，若未經任何處理程序，由於轉爐石中存在之游離氧化鈣（f-CaO）及氧化鎂（MgO）會引起膨脹現象而造成體積不穩定，為使轉爐石達到工程所需之粒料性質要求，因此資源化再利用前必須提高其穩定性，其安定化處理技術包括自然風化法、水淬法、氣淬法、快速處理法、淺盤潑法、餘熱自解法、滾筒法及改質法等 8 種方法，在本使用手冊中均有詳細說明。

6. 轉爐石之試驗標準與規範

目前轉爐石應用於瀝青混凝土及鋪面面層與基底層級配粒料所依循之規範如表 3 所示。其中包含美國材料試驗協會（ASTM）、日本國家標準（JIS/JSA）及中華民國國家標準（CNS）等。

三、轉爐石瀝青混凝土之定義及材料特性

1. 轉爐石瀝青混凝土之定義

「轉爐石瀝青混凝土」係指以轉爐石全部或部分取代天然粒料，再按配合設計所定之配合比例與瀝青膠泥充分拌和均勻後，分一層或數層鋪築於已整理完成之底層、基層、路基或經整修後之原有面層上，滾壓至所規定之壓實度而成者。使用手冊規定使用於瀝青混凝土之轉爐石，其材料品質須符合 CNS 14602「道路用鋼爐渣」或 CNS 15310「瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料」等規範要求。轉爐石之材料品質影響瀝青混凝土鋪面績效甚巨，因此轉爐石在摻配於各種類瀝青混凝土前，應先確認轉爐石之物理性質及化學性質是否符合我國規範要求。

2. 轉爐石應用於瀝青混凝土之材料特性

轉爐石應用於瀝青混凝土具有下列之材料特性：

- (1). 穩定值（Stability）：以轉爐石拌製之瀝青混凝土可提升瀝青混凝土之穩定值。
- (2). 抗剝脫能力：轉爐石含有 CaO 可以有效增加瀝青混凝土抵抗剝脫能力。
- (3). 抗車轍能力：轉爐石瀝青混凝土動穩定值較高，因此具有良好之抗車轍能力。

四、轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊內容摘要及適用範圍

1. 使用手冊研擬之分工架構

雖然國內已累積許多轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面之成功案例，惟工程界仍普遍對轉爐石應用方面不甚瞭解，以致未能確實掌握設計與品管之要點。本使用手冊編訂之主

要目的在於提供鋪面工程界有關轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面之正確觀念與方法，進而確保轉爐石瀝青混凝土鋪面之工程品質。本使用手冊內容係彙整國內外轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面有關之文獻、規範、研究報告、技術指針及鋪設實例等資料，並針對轉爐石材料性質、轉爐石瀝青混凝土工程性質、轉爐石瀝青混凝土應用實例及效益、轉爐石瀝青混凝土配合設計、轉爐石瀝青混凝土之產製、運輸、施工及品質管理、瀝青混凝土鋪面工程使用轉爐石應注意事項等層面逐一探討。其中轉爐石材料性質探討由台灣科技大學營建工程系沈得縣教授執行，轉爐石瀝青混凝土工程性質探討由逢甲大學運輸科技與管理學系陳世晃教授執行，轉爐石瀝青混凝土應用實例及效益探討由高苑科技大學土木工程系陳偉全教授執行，轉爐石瀝青混凝土配合設計探討由台灣世曦工程顧問公司陳裕新協理執行，轉爐石瀝青混凝土產製、運輸、施工及品質管理探討由中央大學土木工程系林志棟教授執行，鋪面工程使用轉爐石應注意事項探討由樹德科技大學運籌管理系黃隆昇教授執行，使用手冊研擬之分工架構如圖 4 所示。

2. 使用手冊之內容摘要

(1) 轉爐石材料性質

粒料約佔瀝青混凝土重量之 85~94%，因此瀝青混凝土之鋪面績效深受粒料性質所影響。轉爐石之粒料品質應符合 CNS 14602「道路用鋼爐渣」及 CNS 15310「瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料」等規範之要求，以作為管制轉爐石物理性質與浸水膨脹率之依據。在煉鋼過程中產出之轉爐石會依不同冷卻及儲存方式而使得其化學性質及物理性質產生變化，本使用手冊除針對中鋼轉爐石之產出流程、化學性質、物理性質及力學性質等項目進行研析外，並參酌國內外對煉鋼爐石膨脹性之要求及其體積穩定處理法，擬定粒料安定化處理及品質管理措施，以確保粒料品質符合規範要求。

(2) 轉爐石瀝青混凝土工程性質

轉爐石可依照不同粒徑而分成特定之料堆放置，並依照級配要求拌製成瀝青混凝土。轉爐石經過適當之安定化處理，在瀝青拌和廠經過加熱與受到瀝青膠泥之包覆後，可降低爐渣膨脹之特性。轉爐石瀝青混凝土普遍具有良好之工程性質，除具備高摩擦力、高儲熱性及高穩定值外，亦兼具抵抗剝脫及車轍之能力。基本上轉爐石瀝青混凝土之工程性質須符合各主管機關訂定之規範。本使用手冊特別以專章針對轉爐石瀝青混凝土之工程性質進行說明，使工程界能確切瞭解轉爐石瀝青混凝土之特性。

(3) 轉爐石瀝青混凝土之應用實例及效益

隨著環保及資源再生之意識高漲，煉鋼爐石資源化再利用已是各國鋼鐵工業必須共同推動之重要工作，亦為國內產官學研各界共同努力之目標。若將轉爐石應用於瀝青混凝土因可利用瀝青包裹粒料而阻絕轉爐石接觸水分，而發揮穩定體積變化之功效，並且開啟轉爐石資源再利用以取代天然粒料之新契機。中鋼公司於一貫作業煉鋼生產過程中產出之轉爐石，擁有材料性質優良與產量穩定等兩項因素，而有利於鋪面工程之應用，其中以再用於瀝青混凝土最具競爭力。本使用手冊除彙整國內外轉爐石應用於瀝青混凝土之實例外，並歸納出轉爐石瀝青混凝土應用範圍及效益，供工程界參考引用。

表 3 國內外轉爐石應用於鋪面之規範編號及名稱

項目	規範名稱
瀝青 混凝土	ASTM D5106—Standard specification for steel slag aggregates for bituminous paving mixtures
	ASTM D3515—Standard specification for hot-mixed, hot-laid bituminous paving mixtures
	JIS A5015—Iron and steel slag for road construction
	CNS 14602—道路用鋼爐渣
	CNS 15306—瀝青混凝土鋪面混合料受水分影響試驗法
	CNS 15307—熱拌、熱鋪瀝青鋪面混合料
	CNS 15310—瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料
鋪面面層 與基底層 級配粒料	ASTM D1241—Standard specification for materials for soil-aggregate subbase, base, and surface courses
	ASTM D692—Standard specification for coarse aggregate for bituminous paving mixtures
	ASTM D1073—Standard specification for fine aggregate for bituminous paving mixtures
	ASTM D5106—Standard specification for steel slag aggregates for bituminous paving mixtures
	ASTM D4792—Standard test method for potential expansion of aggregates from hydration reactions
	ASTM D2940—Standard specification for graded aggregate material for bases or subbases for highways or airports
	JIS A5015—Iron and steel slag for road construction
	CNS 14602—道路用鋼爐渣
	CNS 15305—級配粒料基層、底層及面層用材料
	CNS 15308—瀝青鋪面混合料用粗粒料
	CNS 15309—瀝青鋪面混合料用細粒料
	CNS 15310—瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料
	CNS 15311—粒料受水合作用之潛在膨脹試驗法
CNS 15358—公路或機場底層、基層用碎石級配粒料	

*資料來源：中聯資源股份有限公司提供

(4) 轉爐石瀝青混凝土配合設計

台灣地區經年多雨，水份易貯積在鋪面表面而侵害瀝青混凝土，造成其黏著性及凝聚性損失而發生剝脫現象，進而引起瀝青混凝土鋪面結構破壞。為提高瀝青混凝土抗剝脫能力，通常會在瀝青混凝土中加入防剝劑或石灰而減少剝脫問題發生，但轉爐石成分中 SiO_2 之比例較天然粒料少，反而 CaO 佔相當高之比例，由於 CaO 為親油性，使得粒料能與瀝青膠泥更加緊密結合，可提高瀝青混凝土抗剝脫能力，因此轉爐石應用於瀝青

混凝土鋪面中可同時扮演粒料及防剝劑之角色。然而轉爐石因含大量之金屬氧化物如 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 等物質，使轉爐石比重較天然粒料高，而瀝青混凝土配合設計中，比重差異會帶來瀝青混凝土體積性質之差別，如瀝青混凝土單位重、粒料間空隙率 (Voids in Mineral Aggregate, VMA) 及瀝青填充空隙率 (voids filled with asphalt, VFA) 等性質。現行轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面之模式均將轉爐石視為天然粒料之替代品，但由於轉爐石與天然粒料兩者比重差異極大，故在瀝青混凝土配合設計方面須以體積法進行修正，方可獲得正確之瀝青混凝土體積。此外，轉爐石具多孔性及親油性會導致瀝青混凝土之最佳瀝青含量偏高。本使用手冊除蒐集國內外轉爐石瀝青混凝土配合設計方法之相關資料，檢討現行配合設計方法之正確性與合理性外，並據以研訂轉爐石瀝青混凝土配合設計方法，以提供國內轉爐石瀝青混凝土鋪面配合設計之參考。

(5) 轉爐石瀝青混凝土之產製、運輸、施工及品質管理

若粒料品質控制得宜，並依據正確方法進行瀝青混合料配合設計，則轉爐石瀝青混凝土之性質會與傳統瀝青混凝土相同，施工方法與使用成效亦一致。本使用手冊除彙整國內外轉爐石瀝青混凝土鋪面之施工規範，針對適用範圍、運送要點、施工要點（含準備工作與施工方法）及檢驗要點等進行通盤檢討外，並據以擬定轉爐石瀝青混凝土標準施工作業程序，以確保轉爐石瀝青混凝土鋪面之工程品質。在轉爐石瀝青混凝土之品質管理與檢驗應注意事項方面，使用手冊係依據 CNS 14602「道路用鋼爐渣」、CNS 15310「瀝青鋪面混合料用鋼爐渣粒料」、行政院公共工程委員會訂頒之「公共工程品質管理制度」與「公共工程施工品質管理作業要點」等之要求研擬品質規範。由於轉爐石瀝青混凝土之品質常受工程各作業階段影響，應以全面品質管理(TQM)方式導入品質控制，本使用手冊係針對轉爐石瀝青混凝土各作業階段應特別強調者提出相關管制措施，以確保轉爐石瀝青混凝土鋪面之品質。

(6) 瀝青混凝土鋪面工程使用轉爐石應注意事項

採用轉爐石瀝青混凝土執行鋪面工程設計時，在工程圖說上須適當標示施工應注意及配合事項。轉爐石瀝青混凝土之使用在工程設計時須能具備周詳之考慮，並在設計上做適當之配合，故工程設計者在轉爐石瀝青混凝土適切應用上亦扮演相當重要之角色。為使轉爐石瀝青混凝土之推廣能達到預期之目標，並且使工程師對轉爐石各項特性有充分瞭解，本使用手冊除針對工程設計上應注意事項進行探討外，並依據各種文獻及研究結果研擬相關應注意事項，以提供工程設計者實務上之參考。

3. 使用手冊之適用範圍

本使用手冊可使工程界洞悉轉爐石資源化再利用於鋪面工程之相關技術，本使用手冊中所規範或建議之轉爐石瀝青混凝土工程技術適用於密級配瀝青混凝土、再生瀝青混凝土及多孔隙（排水）瀝青混凝土。鑑於我國瀝青混凝土鋪面規範並未納入轉爐石相關之規定，本使用手冊乃蒐集與彙整國內外轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面之相關文獻、規範、研究報告、技術指針及鋪設實例等資料，據以增訂相關之準則，以提供工程界參考及依循。轉爐石應用於瀝青混凝土時，除可參照使用手冊中所規定之事項外，其中瀝青混凝土配合設計法可參照美國瀝青學會 (AIMS-2)「瀝青混凝土及其他熱拌類之配合設

計方法」、公共工程施工綱要規範第 02797 章「排水性改質瀝青混凝土鋪面」附錄一之「排水性瀝青混凝土混合料配合設計」及美國瀝青學會 (AI MS-20)「熱拌再生瀝青混凝土」。瀝青混凝土之相關施工規定及要求應依據行政院公共工程委員會訂頒之「公共工程施工綱要規範」第 02741 章「瀝青混凝土之一般要求」之相關規定辦理。

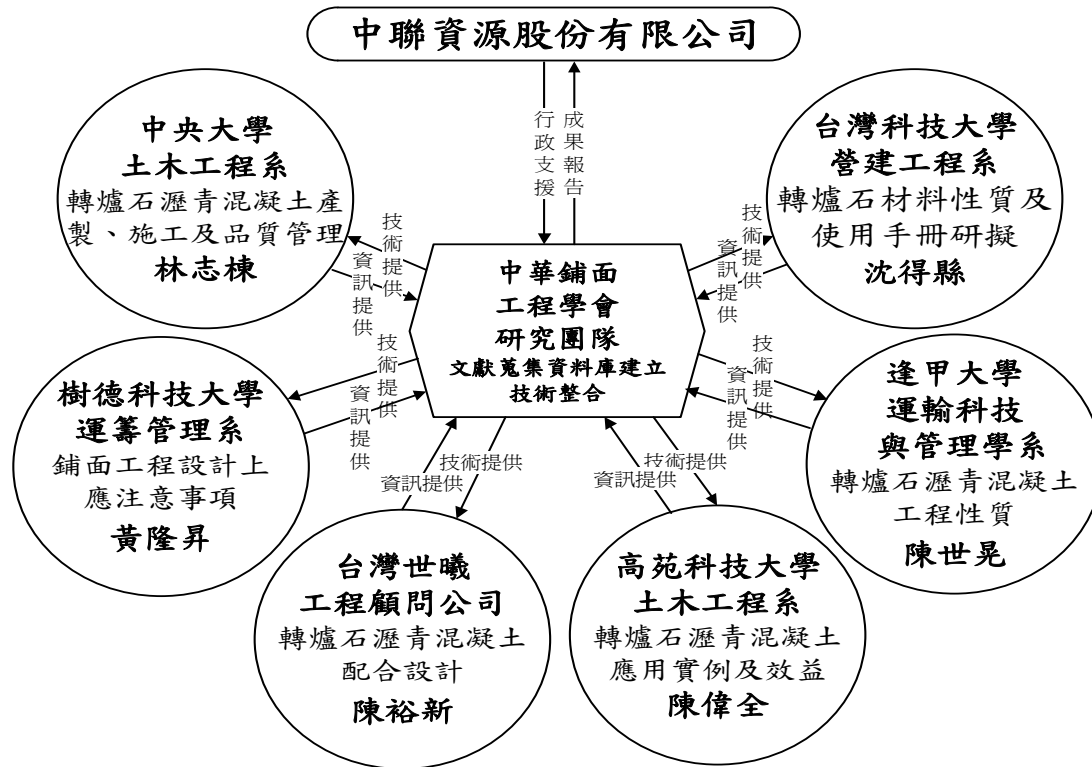


圖 4 使用手冊研擬之分工架構

五. 轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面應注意事項

1. 轉爐石較佳添加量之選定

目前國內轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊(即本手冊),係依據國內外文獻、國內試驗室模擬成效試驗及實際現場鋪設成果研訂,就粒料級配而言,計有密級配、排水性級配及再生級配等。茲就上述三種粒料級配添加轉爐石,擬定最佳添加量之原則供參考。

(1) 再生瀝青混凝土添加轉爐石比例

- a. 再生瀝青混凝土添加轉爐石,粗粒料添加越多,工程性質越佳,以取代總粒料重量 60%為最佳 [8],惟依據行政院公共工程委員會發佈「國內各工程單位使用熱拌再生瀝青混凝土之作業要點」,現行規定再生瀝青混合料不得超過整體瀝青混合料 40%,在轉爐石施行規範未公佈前,以轉爐石取代瀝青混合料時,暫時歸類為再生粒料,總共再生粒料添加比例亦需符合規定。
- b. 轉爐石與再生回收料合併取代比例不得超過總粒料比例 40%,建議較佳比例為添加 20%刨除料及 20%轉爐石。

(2) 排水瀝青混凝土添加轉爐石比例

排水瀝青混合料添加轉爐石，粗粒料添加越多，工程性質越佳，以取代總粒料重量 60% 為最佳，依據前項說明，建議在不熟悉轉爐石材料性質前，轉爐石取代比例以不超過總粒料比例 40% 為原則，以符合現行規定。

(3) 密級配瀝青混凝土添加轉爐石比例

密級配瀝青混合料添加轉爐石，粗粒料添加越多，工程性質越佳，取代總粒料比例在 55%~60% 時其各項成效最佳 [9]，惟依現行規定，轉爐石取代比例建議不超過總粒料比例 40% 為原則。

2. 轉爐石瀝青混凝土之鋪面設計

轉爐石與天然粒料混合時，轉爐石與天然粒料均做相同處理方式及採用相同試驗標準。但其材料基本特性不同，在設計方法選定前需注意下列作法。

- (1) 鋪面工程司在道路規劃設計階段，應明確規範鋪面材料級配、粒徑尺寸及轉爐石使用量。
- (2) 轉爐石粒料添加數量及費用，需於工程契約或預算書內註明運送方式及運輸費用。
- (3) 依據行政院公共工程委員會發佈之「國內各工程單位使用熱拌再生瀝青混凝土之作業要點」，規定再生粒料不得超過整體瀝青混合料 40%，以轉爐石取代天然粒料時，亦歸類為再生粒料，總共再生粒料設計比例亦需符合規定。
- (4) 轉爐石瀝青混合料鋪設時，如同一般天然粒料，瀝青混合料需衡量交通量來決定轉爐石添加量，以避免因瀝青含量過高而造成鋪面冒油現象 [10, 11]。
- (5) 工程設計時，需於工程施工設計圖註明轉爐石粒料取代比例，轉爐石粒料由於粒型較方正，鋪築時密度可能比傳統瀝青混凝土高，轉爐石添加比例大於 20% 時，必須考慮鬆實方作修正。

3. 轉爐石瀝青混凝土之配合設計

(1) 一般原則

- a. 瀝青混凝土之配合設計過程係以重量比為基準，但是轉爐石之比重較大，需要以體積法作為配合設計標準。
- b. 瀝青混合料粒料添加轉爐石粒料，添加比例小於 40% 時，最佳瀝青含量與傳統瀝青混合料類似，添加比例大於 40% 時，建議最佳瀝青含量降低 0.2%-0.3%，但須考量 V.M.A 及 V.F.A 等性質，避免因瀝青含量降低，減少附著於粒料表面之瀝青薄膜，建議可選擇較高黏度之瀝青膠泥。
- c. 轉爐石瀝青混凝土鋪面工程設計時須依據公共工程施工綱要規範第 02742 章瀝青混凝土鋪面修訂版規定，依據道路交通量、粒料最大標稱粒徑及轉爐石粒料性質等因素，進行轉爐石瀝青混凝土配合設計。
- d. 承包商應於施工前，根據所規定之材料種類作配合設計，並經各項試驗選定工地拌合公式 (Job Mix Formula) 後，送請工程司核可，以決定瀝青材料及粒料之用量。
- e. 轉爐石瀝青混凝土之滯留強度指數應依 [ASTM D1075 D4867] [ASSHTO T283] 進行試驗且試驗結果應達到 75% 以上。

(2) 排水性瀝青混凝土

- a. 在排水性瀝青混凝土中添加之纖維類材料，主要包括木質纖維與礦物纖維等。選用任一種纖維類材料之使用量需依照垂流試驗決定。高黏度改質瀝青經試驗不產生垂流現象者，可不添加纖維穩定劑。
- b. 轉爐石由於具多孔性，添加於排水性瀝青混凝土可能導致計算之最佳瀝青含量偏高，為避免鋪築後產生冒油現象，轉爐石添加於排水級配瀝青混合料，仍須添加纖維，以防止拌合過程發生瀝青垂流現象。
- c. 排水瀝青混合料添加轉爐石，同一般天然粒料，需使用較高黏度之瀝青黏結料，以有效包裹轉爐石及天然粒料，而提供較佳之抗車轍及抗疲勞性能。

(3) 再生瀝青混凝土

再生瀝青混凝土由於來源品質較難控制，如同天然粒料添加轉爐石之再生瀝青混凝土最佳含油量不宜過高，以免產生冒油現象。

(4) 密級配瀝青混凝土

- a. 依現行密級配配合設計機制所得之最佳瀝青含量，轉爐石添加比例超過 40% 時，可降低約 0.3% 瀝青用量。
- b. 轉爐石取代粗粒料比例達粒料總量之 40% 者，VMA 之規定最小值可降低 1%。
- c. 轉爐石使用於密級配瀝青混凝土可使用較高黏度之瀝青黏結材，以增加瀝青混合料各項成效。

4. 轉爐石瀝青混凝土之品質管制

(1) 拌和階段

- a. 轉爐石瀝青混凝土拌合生產前，應查驗拌合設備是否足以應付生產所需，依據試驗室配合設計之拌合公式，以拌合廠設備進行廠拌。工程單位須委託專業人員駐廠與現地檢驗材料、設備之定期檢驗及施工過程督導，確保轉爐石瀝青混凝土之施工品質。
- b. 轉爐石瀝青混凝土拌合生產過程，包括拌合順序、乾溼拌合時間、拌合溫度等與傳統瀝青混凝土相同。轉爐石本身具親油特性，拌合過程中容易完成瀝青包裹，但由於顏色外觀可能誤判已拌合均勻而縮短拌合時間。為了拌合均勻性考量，拌合時間仍應符合第 02741 章瀝青混凝土之一般要求中 3.3.1 節，乾拌及濕拌時間規定。
- c. 轉爐石瀝青混凝土比重大，每單位重量之體積量 (m^3) 相對較小，拌合生產數量計量方式通常以重量單位配置粒料比例，故計量時需注意相對體積問題，並換算符合之生產數量及計價。
- d. 轉爐石瀝青混凝土生產出料過磅單仍須以重量單位表示，以利工程單位作為驗收計價依據。

(2) 輸送、鋪築及滾壓階段

- a. 輸送：(a) 轉爐石瀝青混凝土與一般瀝青混凝土之輸送方式無異，惟排水瀝青混

凝土需注意控制運輸及待料時間，避免產生垂流而造成材料析離現象。(b).轉爐石本身具保溫性質可酌增工作時間。

- b. 鋪築及滾壓：轉爐石本身粒料形狀趨於方正，比較容易達到壓實度規定，不需要過度壓實，經鋪面工程司許可，可依試鋪結果降低滾壓次數，避免造成過度壓實而降低瀝青混凝土空隙率。

(3) 使用階段

轉爐石本身特性具持熱效應，散熱時間較一般瀝青混凝土久，但施工滾壓完成開放時間，仍應確實依公共工程施工綱要規範第 02742 章瀝青混凝土鋪面修訂版 3.4.1 節規定，最後滾壓完成後之鋪面溫度冷卻規定，除契約另有規定外，鋪面溫度自然冷卻至 50℃前，應禁止任何車輛行駛。

(4) 檢驗與品質管制

- a. 轉爐石粒料進料時需查核出廠證明、產品檢驗報告，若有疑慮時，應洽出廠公司。
- b. 轉爐石粒料料源應維持穩定，否則需增加產品檢驗頻率。
- c. 各進料斗倉之進料口處應明確標示轉爐石粒料種類，並嚴格管制不得任意與其他材料混雜，或將轉爐石粒料誤用至其他用途。

五、結論與建議

1. 本使用手冊說明鋪面工程中轉爐石瀝青混凝土之材料、設備、施工及檢驗等相關規定，可提供鋪面工程主辦機關、設計單位、施工單位、營造業及瀝青混凝土拌和廠等相關產業之依循或參考。
2. 本使用手冊僅針對轉爐石瀝青混凝土與一般瀝青混凝土不同之特性加以規定，在使用轉爐石瀝青混凝土時，除可參照本使用手冊之規定外，其產製、施工及品質管制方式，應依照行政院公共工程委員會訂頒之「公共工程施工綱要規範」，或依其他經認可之施工規範辦理。
3. 為確保轉爐石瀝青混凝土鋪面之施工品質，工程主辦機關應落實公共工程三級品管制度。轉爐石瀝青混凝土鋪面之品質管制，可參照行政院公共工程委員會訂頒之「公共工程施工品質管理作業要點」辦理。
4. 各工程主辦機關決定使用轉爐石瀝青混凝土鋪面時，應依據鋪面工程特性及需求，決定所需使用轉爐石瀝青混凝土之品質要求。除應提供詳細資料載明於工程圖說中外，並應充分瞭解使用手冊之有關規定。
5. 本使用手冊僅就眾多之轉爐石瀝青混凝土應用實例中選定少許典型案例作參考，依目前之技術將其設計及施工方法加以說明，但預期未來將有新工法或新技術陸續被開發出來，故在不違反本使用手冊之基本精神及在徵得業主同意之下，或設計者若提供配合設計報告書（內容應敘明轉爐石摻配方式、相關材料料源、配合設計及試拌結果等資料），而經工程監造單位核可者亦可採用。

六、參考文獻

1. 「公共工程高爐石混凝土使用手冊」，行政院公共工程委員會，2001。
2. 黃大衛，「轉爐石取代傳統粒料對瀝青混凝土 VMA 性質影響之研究」，國立中央大學土木工程系碩士論文，2007。
3. 「轉爐石推廣手冊」，中國鋼鐵股份有限公司，2000。
4. 林志棟，「轉爐石於鋪面工程之應用－長期成效評估（期末報告）」，社團法人中華鋪面工程學會，2006。
5. 「平成 17 年度製鋼礦渣生成量及再利用量統計」，日本鐵鋼礦渣協會，<http://www.slg.jp>。
6. 李春雄，「中鋼轉爐石回脹抑制方法之研究」，國立成功大學土木工程系碩士論文，2002。
7. 王金鐘、李德河，「轉爐石作為道路基底層及工程土方材料再生利用之力學特性研究」，中國土木水利工程學刊，第十七卷 第二期，第 1-12 頁，2005。
8. 黃隆昇、林登峰、林平全、張躍騰，「轉爐石替代再生瀝青混凝土粗粒料品質之探討」，鋪面工程，Vol.6, No.2, pp.59-68，2008。
9. 台灣世曦工程顧問股份有限公司，「轉爐石應用於密級配與排水性瀝青混凝土性質之綜合研究」，中聯資源股份有限公司委託研究計畫，2009。
10. 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。
11. 黃大衛，「轉爐石取代傳統粒料對瀝青混凝土 VMA 性質影響之研究」，國立中央大學土木工程研究所碩士論文，2008。
12. 社團法人中華鋪面工程學會，「轉爐石應用於瀝青混凝土鋪面使用手冊」，中聯資源股份有限公司委託研究計畫，2010。