

The background of the cover is a high-magnification micrograph of fly ash concrete. It shows a complex network of needle-like crystals, likely ettringite, interlocking to form a dense structure. There are also smaller, more rounded particles and some darker, less crystalline regions interspersed throughout the lighter-colored crystalline matrix.

飛灰混凝土

林平全 編著

科技圖書股份有限公司

飛灰混凝土

林平全 編著



科技圖書股份有限公司

版權所有



翻印必究

行政院新聞局登記證 局版台業字第 1123 號

飛灰混凝土

編著者：林平全

發行人：趙國華

發行者：科技圖書股份有限公司

台北市重慶南路一段 49 號四樓之 1

電話：3118308 · 3118794

郵政劃撥帳號 0015697-3

七十八年十月初版

特價新台幣 170 元

序

近年來由於臺灣地區經濟快速成長，政府各項重要建設及民間營造業正蓬勃發展中，估計每年平均需要 1,100 萬噸以上水泥，而河川砂料將於民國 80 年取竭殆盡，屆時必須由國外大量進口水泥、砂等混凝土材料，才能使各項建設持續進行，也因而將耗費可觀之外匯。

世界各先進國家早已在 1940 年代開始大量使用飛灰於混凝土中，其工程效用與經濟效益已獲得相當肯定。反觀國內；雖然有學術機構不斷研究添加飛灰於混凝土之技術，使飛灰除了可取代部份水泥外亦可大量取代砂料，但實際上的應用卻一直停留在三十年前巨積混凝土的使用範圍內，很少應用於一般土木、營建工程上，使用層面至目前尚未能有效推廣。材平全君為本公司極為優秀之土木工程師，歷經國內外各大型工地之磨練，對品管及試驗之知識與經驗豐富，以不屈不撓精神花費三年時間，收集中外有關資料及多年實地工作經驗及心得，並為因應實際需要，編寫飛灰混凝土一書，內容豐富、舉例印證、敘述詳盡，是一本良好參考手冊，特為介紹。相信對欲使用飛灰混凝土者會有更明確之指引，使飛灰混凝土之應用更具信心，並將迅速擴大飛灰混凝土使用層面，而對國家社會有莫大利益。

中華民國七十八年十月一日

郭芳儀

於中華工程公司興達施工所

2006/12/1

自序

舉凡土木、水利、建築等結構物，不論在地上、地下或海中其主體結構必須採用混凝土才能完成，混凝土組成以卜特蘭水泥成本最高。然而添加適量工業廢棄物如高爐石、飛灰等混合水泥，無論在工程品質或經濟效益都比卜特蘭水泥優良，更能彌補卜特蘭水泥之缺點，增加混凝土耐久性，延長結構物使用年限。尤其海島型區域，四面環海，海邊結構物均易被海水或海風之硫酸塩侵蝕而龜裂破損。採用飛灰混凝土比卜特蘭水泥或高爐石水泥混凝土更具有抗硫酸塩作用與降低水化熱之能力，如能選擇適當添加飛灰方法，不但能增加混凝土工作度更能提高早期強度。

本書介紹飛灰混凝土之新觀念以實地工作經驗配合理論與實驗編寫而成，對混凝土添加飛灰如何選擇最適當配比設計方法與最佳添加量做最詳細說明，更能符合各區域地理環境、氣候因素、結構設計條件等要求，並繪製圖、表與計算實例，期能幫助讀者易於學習瞭解，相信工程界同仁不論是業主、設計者、或施工者都能很快對飛灰混凝土有共識觀念。然以時間短促，付梓蒼促，疏忽誤漏在所難免，尚希專家學者多賜指正。俾於再版時改進，無任銘感。

本書承蒙中華工程公司高雄辦事處兼興達施工所主任郭主任芳俊先生的鼓勵、指導及賜予鴻序，使本書增色不少，專此誌謝！

本書亦蒙劉慶一先生親自詳為校正，得以順利出版，敬致謝忱。

本書在收集資料期間，承蒙中華工程公司興達施工所工作同仁幫忙，使能更具信心完成此書，謹此致謝。同時謝謝內人 美賢在本書編選期間的鼓勵與抄寫部份協助。

林平全 識於高雄 77年9月

目 錄

序

自 序

第一章 緒 言

1-1	寫作本書目的	1
1-2	本書內容	2
1-3	文獻回顧	2
1-4	飛灰混凝土未來發展	3

第二章 飛灰簡介

2-1	飛灰來源與分類	5
2-2	飛灰的成份及其性質	8
2-3	飛灰品質標準規範要求	11
2-4	Class F 級飛灰品質判斷方法及其用途說明	19
2-5	台灣電力公司火力發電廠飛灰介紹	22
2-6	飛灰的利用途徑	22

第三章 飛灰混凝土之原理

3-1	飛灰混凝土之定義與生產方式	27
3-2	飛灰在混凝土中扮演之角色	28
3-3	飛灰混凝土水化作用及波索蘭反應過程	28

第四章 飛灰混凝土之特性

4-1	概 述	36
4-2	簡介卜特蘭水泥各成份之性質及各類型水泥之特性	36

2 飛灰混凝土

- 4-3 混凝土附加劑簡介..... 39
- 4-4 飛灰對新拌混凝土性質之影響..... 44
- 4-5 飛灰對硬化混凝土性質之影響..... 53

第五章 飛灰混凝土配合設計

- 5-1 飛灰混凝土設計準則 (Class F 級飛灰) 71
- 5-2 飛灰混凝土配比設計實例 (Class F 級飛灰) 115

第六章 選擇最適當配合設計方法及飛灰最佳添加量

- 6-1 五種配合設計方法試拌結果及其應用..... 130
- 6-2 配合設計方法之選擇..... 153
- 6-3 飛灰最佳添加量之決定..... 168
- 6-4 超量添加飛灰對混凝土品質之影響..... 178

第七章 提高飛灰混凝土早期強度方法

- 7-1 影響飛灰混凝土強度成長速度之因素..... 182
- 7-2 提高飛灰混凝土早期強度方法..... 196

第八章 飛灰混凝土之應用

- 8-1 巨積混凝土 (Mass Concrete) 結構物之應用..... 201
- 8-2 大塊版混凝土剛性路面之應用..... 204
- 8-3 受硫酸鹽侵蝕結構物之應用..... 208
- 8-4 一般水利、土木、建築等結構物之應用..... 209
- 8-5 高強度混凝土結構物之應用..... 211

第九章 施工應注意事項

- 9-1 材料進貨管理..... 212
- 9-2 混凝土拌合與輸送..... 215

9-3	澆置與養護·····	219
9-4	新鮮混凝土工作度急速變化之原因及改善辦法·····	223
9-5	工地常見早期混凝土龜裂之原因及防止方法·····	228
9-6	工地常見硬化混凝土龜裂之原因及防止方法·····	232
9-7	工地常見混凝土強度偶爾不及格之原因及改善方法··	234

第十章 飛灰及飛灰混凝土品質管制

10-1	飛灰品質管制·····	239
10-2	預拌廠混凝土添加飛灰之品質管制·····	249

第十一章 臺灣地區使用飛灰混凝土之評估

11-1	高溫多雨，提供飛灰混凝土最佳養護條件·····	259
11-2	臺灣四面環海，飛灰混凝土取代Type “Ⅱ” 水泥混凝土，增加耐久性，延長結構物使用年限·····	259
11-3	飛灰產量多免費供應，能減少天然資源被開發，保護自然生態，並減少水泥輸入·····	262
11-4	飛灰無可避免之缺點，將被爐石水泥取代·····	263
11-5	例舉飛灰混凝土工程效用與經濟效益施工實例分析··	263
11-6	結 論·····	269

附 錄 爐石水泥混凝土與飛灰混凝土比較

參考文獻

第一章 緒 言

1-1 寫作本書目的

國內對一般巨積混凝土採用飛灰混凝土之設計已有三十年經驗，可惜這三十年來飛灰混凝土一直停留在水壩巨積混凝土上，鮮少應用於一般土木、營建工程。更因為市面缺少飛灰混凝土書籍之介紹，致使國人對於飛灰混凝土的認識淺薄，誤認添加飛灰後，會使混凝土早期強度降低，祇能適用於巨積混凝土降低水化熱而已。卻不知道飛灰混凝土目前在工程上應用之廣泛及經濟效益之大。

民國 75 年中油公司在高雄縣永安鄉海埔新生地建造液化天然氣貯槽，其主體結構混凝土採用現場添加飛灰之飛灰混凝土，該項混凝土除了考慮降低巨積混凝土水化熱外，還要確保其抗硫酸鹽，抗凍融性，及長期耐候性。甚至具有特殊效果之龐大膨脹混凝土也採用混凝土添加飛灰，更能發揮其工程效用及經濟效益。近兩年來，民間也有部份預拌混凝土廠未經業主同意擅自添加飛灰於混凝土，其添加飛灰之品質，飛灰含量及配比設計是否能符合該項工程之設計要求，在品質方面因為缺少管制，也就引起不少爭議，遭遇很大麻煩。

為提高國人對於飛灰混凝土更深一層的認識，筆者參閱學術機構之專題研究，國外有關資料及本人對飛灰混凝土實地工作經驗，利用目前台電火力電廠之飛灰及當地粗細粒料，水泥，不斷的試拌、研究，確立合理的配比設計方法及施工要領，以符合各項工程設計需要，提供給一般預拌混凝土業界利用飛灰之正確指引。盼能擴大飛灰混凝土使用層面，使飛灰混凝土能在台灣佔一席之地。

1-2 本書內容

本書實驗與理論並重，著重實際施工經驗，共分十二章，主要內容包括以下各項：

1. 簡介飛灰之化學成份、物理性質及目前台電火力發電廠供應之飛灰品質。
2. 介紹飛灰混凝土之原理及其特性。
3. 飛灰混凝土配比設計之程序與實例。
4. 飛灰混凝土五種配比設計方法及其試拌結果之統計分析。
5. 如何選擇最佳配比設計方法及飛灰最佳添加量。
6. 影響飛灰混凝土強度成長速度之因素及提高飛灰混凝土早期強度方法。
7. 飛灰混凝土之應用及其工程效用與經濟效益實例分析。
8. 飛灰品質對於混凝土品質之影響及如何選擇飛灰與其品管工作。
9. 飛灰混凝土之品質管制及其他施工應注意事項。
10. 台灣地區使用飛灰混凝土之評估。
11. 高爐石水泥混凝土與飛灰水泥混凝土之比較。

1-3 文獻回顧

飛灰最初係指火山爆發時噴出大量的飛塵，經收集而得。古羅馬時代，人民便知道利用火山灰做建材，這類古代建築物迄今仍然有存在者。現代「飛灰」一詞普遍指燃煤電廠所產生的飛灰（Coal fly ash）。因此飛灰是屬於人工波索蘭（Pozzolan）材料的一種。波索蘭材料是一種石英質及鋁酸鹽的混合物，其本身不具有或僅具很微小之膠結力，但在常溫有水存在時能與水泥水化作用所產生的氫氧化鈣緩慢作用，而生成化學性質穩定且具有膠結力的矽酸鈣水化物等複合物，將改變混凝土結構組織及提高混凝土強度與耐久性。

1-3-1 飛灰使用於混凝土工程之沿革

使用燃煤飛灰 (Fly ash) 於混凝土中的概念可遠溯自 1914 ~ 1930 年時期遂有效應用於水壩巨積混凝土工程 (mass concrete)，而大宗實用化卻是在第二次世界大戰 (1945 年) 以後。在 1948 年，美國 Hungry Horse 大壩 (混凝土拱壩，高 172 m.) 大量使用飛灰為水泥混合料，這對日後歐美各國應用飛灰為水泥混合物是一大推動力。日本則於 1950 年代著手於研究飛灰，並加以利用，立即推廣至水壩混凝土，於 1955 年完成須田真壩 (壩高 75 m.，體積 21 萬 m^3 之重力壩)。1955 年美國建立了飛灰之標準規範 (ASTM - C 350 及 ASTM-C402)，1963 至 1965 年，法國、英國及蘇俄均相繼著手於飛灰使用混凝土之研究工作。在 1973 年石油危機以後，各國以煤為主要來源，飛灰產量激增，除推廣使用外，亦採廢棄方式處理剩餘飛灰，飛灰研究工作更加熱絡起來。

1-3-2 台灣地區應用飛灰於混凝土工程之狀況

台灣地區將飛灰用於混凝土工程首推民國 45 年台電公司之霧社壩工程 (壩高 114 m，體積 33 萬 m^3 之重力壩)，當時水泥為一種非常昂貴之建材，以大量飛灰代替水泥省下不少費用，而且增加混凝土晚期強度，減少浮水及透水性，降低水化熱，增加耐候性及抗化學性，減少熱脹冷縮之變形及龜裂等優點獲得肯定。此後各大工程諸如：谷關水力發電工程，青山水力發電工程，德基大壩，明湖抽蓄水庫，翡翠水庫工程及現在興建中之液化天然氣貯槽工程，明潭抽蓄水庫等都添加飛灰於混凝土中，其配合設計方法大都採用飛灰等重量取代部份水泥。近兩年來，有不少民間預拌廠擅自添加飛灰於混凝土，獲取相當利益，可惜在工程合約上因事前未經業主同意，事後引起爭議，非常麻煩。期望將來飛灰混凝土能夠獲得多方面的認知與共識，早日上軌道。

1-4 飛灰混凝土未來發展

4 飛灰混凝土

國內使用飛灰混凝土雖然目前未能普及一般工程，但因為天然資源的缺乏，可採砂石及製造水泥原料的地方愈來愈少。而且學術機構不斷研究添加飛灰於混凝土之技術，使飛灰取代水泥或細砂的技術已漸成熟，將來飛灰混凝土在台灣勢必能佔一重要地位。估計國內目前每年使用約1100萬噸以上水泥，若其中有10%被飛灰所取代，則將可用掉台電燃煤火力電廠全部飛灰。100萬噸飛灰之廢物再生利用，對國家社會將有莫大利益。

高強度混凝土簡稱H. S. C，28天抗壓強度超過8000 psi，隨著建築物的高大也逐漸被使用。飛灰利用於高強度混凝土再加上強塑劑（superplaster），有如虎添翼，能增加工作度，減少用水量，降低水灰比，增加抗壓強度，甚至水灰比低於0.3之情況下，同樣可使用pump來壓送混凝土。在美國Chicago，Water——Tower Place和River Plaza使用Class F飛灰，飛灰取代水泥量約10%，強度在28天可達9000 psi以上，坍度：11.5公分。在台灣筆者曾經利用里港粗細粒料，台電興達發電廠Class F飛灰，台普化工強塑劑TWA-H，做高強度混凝土試拌，水灰比0.31，坍度16.5公分，工作度非常良好，適於Concretepump泵送。配比方法採用飛灰取代細砂，取代量為水泥體積30%，抗壓強度3天可達到5600 psi，7天為6700 psi，28天為8900 psi。目前飛灰來源不匱乏，且由台電免費供應，如能使用於混凝土取代水泥或細砂，將可降低高強度混凝土成本，今日營建工程已朝向更高，更大的建物發展，H. S. C.將是未來工程界的寵兒，吾人深信未來飛灰在H. S. C.之運用將能帶動我國營建工業朝向更高更遠的境界邁進。同時因飛灰水泥混凝土具有波索蘭反應，能提高抗硫酸鹽之侵蝕作用，對海水之侵蝕有很好抵抗力，其在海中之壽命較普通卜特蘭水泥混凝土長很多。因此將可大量使用飛灰混凝土於海洋結構物，如防波堤，突堤，消波塊，碎波塊，海底沉箱，海底隧道，海上機場，海上電廠，碼頭，天然氣貯槽…等。台灣四周環海，海岸線長且建造物又多，若能以飛灰取代部份水泥，除了能提高工程效用外，更可獲得龐大經濟效益。

第二章 飛灰簡介

2-1 飛灰來源與分類

波索蘭材料 (Pozzolans) 是一種矽質 (石英質) 或矽質與鋁酸塩 (礬土質) 之混合物。其本身不具或僅具很微小之膠結力，但於潮濕及常溫狀態下，將與氫氧化鈣發生反應產生具有膠結力之矽酸鈣水化物，此種性質稱矽灰性質，化學反應稱矽灰反應或波索蘭反應 (Pozzolanic reaction)。

現代「飛灰」一詞，普通指燃煤電廠所生產的飛灰 (Coal fly ash) 而言，是屬於人工波索蘭材料的一種，具有矽灰性質。該飛灰含有極細之玻璃質圓球形，大部份在 20 μm 以下，由電子顯微鏡可觀察飛灰粒子有以下幾種特性，如圖 2-1 所示。

- (1) 大部份飛灰粒子像玻璃圓球體。
- (2) 有些玻璃圓球體聚集在一起，也有些分散，大顆粒附近聚集著小顆粒成串似狀。
- (3) 顆粒間亦有些未經燃燒而帶有孔隙之煤屑。
- (4) 有極少數量大顆粒之表面裂開，內部含有無數之小圓球顆粒飛灰。

全世界每年燃煤電廠所產生之飛灰八千萬噸以上，佔飛灰總量 90 % 以上。大型火力電廠燃燒煤碳方法是先將煤碳經研磨機磨細至 80 % 以上通過 #200 篩之細粉，然後噴入鍋爐燃燒，爐膛內最高溫度達 1600°C，質重而不燃燒的顆粒掉下爐底灰斗，加以粉碎後以海水或淡水沖出，這種從爐底下取出的灰渣稱為底灰 (bottom ash)，隨著燃燒氣上升的輕質不燃物經過通熱器，再熱器，篩破器，迅速降溫至 35°C 左右，然後經過靜電集塵器收集，這種收集而得之物質稱為飛灰 (

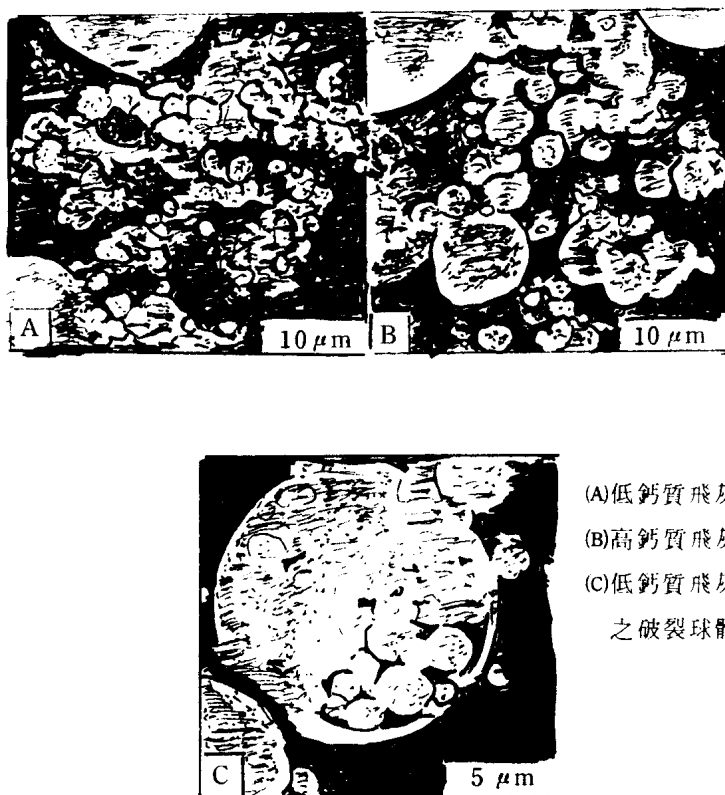


圖 2-1 飛灰的電子顯微鏡照相示意圖

fly ash)。煤灰中飛灰約佔 4/5，底灰佔 1/5，飛灰收集過程如圖 2-2 所示。

飛灰由於燃煤種類不同，所生產之飛灰等級亦不同；若為無煙煤 (anthracite) 或煙煤 (bituminous) 將可獲得含鈣質較低之 F 級飛灰，具有波索蘭性質。若燃燒褐煤 (lignite) 或次煙煤 (sub-bituminous) 則可獲得含鈣質較高之 C 級飛灰，除具有波索蘭性質外亦具有若干膠結性。目前台電燃煤火力電廠使用的煤源有澳洲煤，美國煤，南非煤，加拿大煤，及少量省產煤與阿拉斯加煤，所生產的飛灰除了阿拉斯加煤是 Class C 級飛灰外，其餘全部是屬於 Class F 級

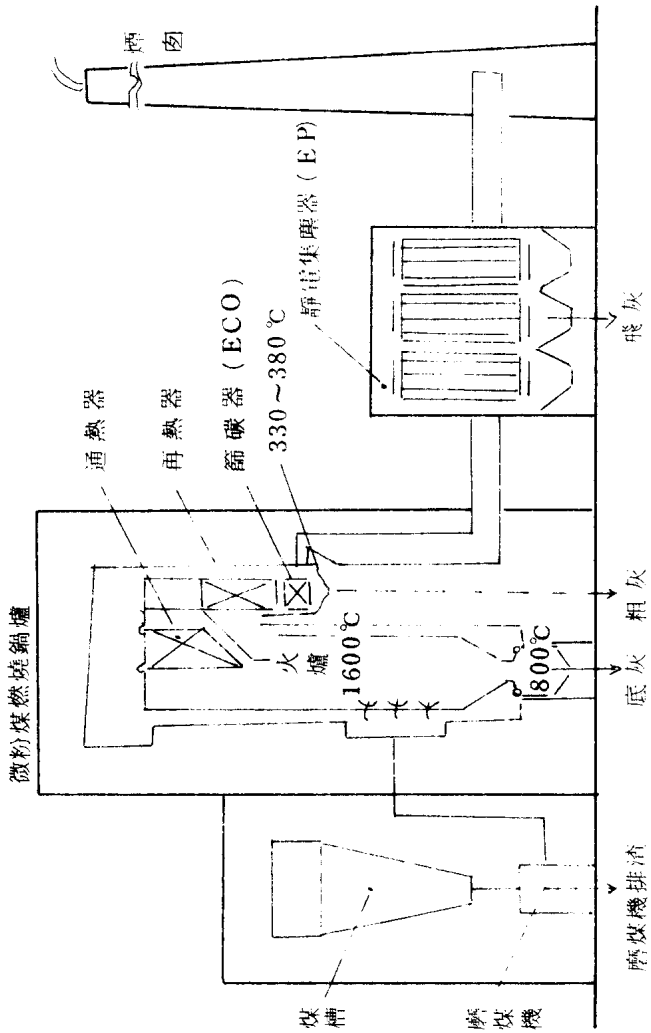


圖 2-2 電廠微粉煤燃燒過程

8 飛灰混凝土

飛灰（民國 76 年 9 月開始，大林火力電廠 # 2 號機曾經專燒阿拉斯加煤，生產 Class C 級飛灰）。

2-2 飛灰的成份及其性質

飛灰的化學成份取決於煤礦品質，主要成份約有 85 % 以上是 Si，Al，Fe，Ca，Mg，K 及 Na 等之氧化物。但各煤源飛灰化學成份組成之百分比差異甚大，甚至有超過一倍以上。一般之化學成份歸納如表 2-1 所示。表 2-2 為世界各國煤灰之主要化學分析。表 2-3 為台電火力電廠燃燒各國煤所生產之 Class F 級飛灰主要成份。本省煤之飛灰為中性或弱酸性，PH 約 5.2 ~ 7.4。從外國進口煤之飛灰呈鹼性，PH 約 10.5 ~ 12.6。而本省煤與外國煤之混合煤所生產飛灰多呈鹼性較多，PH 約 6.5 ~ 12.3。

飛灰所含其他重金屬元素性質安定，在淡水及海水中之溶解性極微小，化學性安定，可不必考慮有機性的污染問題。飛灰比重約 2.0 ~ 2.2 之間，其顆粒之粒徑非常細小，粒徑分佈由 0.4 μm 至 100 μm ，比表面積由氣透儀（Blaine）量測約在 2000 至 5000 cm^2/g 左右，與水泥顆粒大小很相近，如圖 2-3 所示。

表 2-1 飛灰的化學成份範圍

主要成份	代號	範圍值	主要成份	代號	範圍值
SiO ₂	S	20 ~ 60	MgO	M	0.3 ~ 4
Al ₂ O ₃	A	10 ~ 35	TiO ₂	T	0.5 ~ 2.6
Fe ₂ O ₃	F	5 ~ 35	KNaO		1 ~ 4
CaO	C	1 ~ 20	SO ₃	$\bar{S}$	0.1 ~ 1.2
* 水泥化學簡寫符號：S = SiO ₂ ，A = Al ₂ O ₃ ，F = Fe ₂ O ₃ C = CaO，M = MgO， $\bar{S}$ = SO ₃ ，H = H ₂ O LOI = Loss of Ignition					

表 2-2 世界各國煤灰化學分析結果

國名 試料號	化			學				成			份 (%)		SiO ₂ Al ₂ O ₃	比 重	比表面積 (cm ² /g)
	Li ₂ O	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	計					
日本 12	平均值	0.73	57.96	25.86	4.31	3.98	1.58	0.31	1.49	2.15	98.40	3.83	2.14	3.090	
	最大值	1.23	63.27	28.35	5.90	6.74	2.09	0.81	2.36	3.15	99.27	4.31	2.23	4.150	
	最小值	0.06	53.41	22.88	2.82	1.04	1.00	0.02	0.88	1.73	97.48	3.47	1.96	1.220	
美國 14	平均值	7.83	44.11	20.81	17.49	4.75	1.12	1.19	0.73	1.97	99.73	3.71	2.40	3.673	
	最大值	18.0	51.9	28.3	31.3	12.00	1.4	2.8	2.10	2.98	100.55	5.76	2.69	4.795	
	最小值	1.0	32.7	14.6	8.5	11.1	0.7	0.3	0.22	1.28	97.94	2.93	2.14	2.430	
英國 14	平均值	3.86	46.16	26.99	10.44	3.06	1.96	1.59	0.90	3.26	98.22	2.92	2.10	5.180	
	最大值	11.70	50.70	34.10	13.50	7.70	2.90	6.80	1.90	4.20	102.90	3.19	2.33	8.100	
	最小值	0.60	41.40	23.90	6.40	1.70	1.40	0.60	0.20	1.80	96.10	2.52	1.90	2.592	
法國 17	平均值	3.72	48.45	25.89	8.07	5.96	2.36	1.01	0.64	3.94	100.3	3.38	—	—	
	最大值	15.15	54.05	33.40	15.30	38.75	4.45	7.00	0.85	6.00	—	7.38	—	—	
	最小值	0.30	29.90	10.80	5.80	1.48	1.10	0.10	0.15	0.70	—	2.58	—	—	
西德 9	平均值	9.65	41.13	24.39	13.93	5.06	1.85	0.77	—	—	96.78	2.88	—	—	
	最大值	20.10	49.54	29.35	20.88	11.81	4.26	2.10	—	—	98.35	3.57	—	—	
	最小值	1.48	34.10	21.06	8.37	2.18	0.75	0.12	—	—	94.33	2.59	—	—	
蘇聯 15	平均值	—	55.08	25.97	7.83	5.08	1.81	1.63	—	—	97.40	3.70	—	—	
	最大值	—	62.08	37.15	12.01	10.62	2.90	3.78	—	—	—	5.09	—	—	
	最小值	—	47.90	20.71	3.08	1.10	0.28	0.20	—	—	—	2.20	—	—	