



台灣電力公司

煤灰海事工程應用手冊

中華民國 114 年 08 月

摘要

煤灰在國內、外已廣泛應用，如預拌混凝土、水泥製品、管溝回填、路基材料、水泥生料及礦坑回填等。煤灰可細分為飛灰及底灰，台電公司飛灰應用於國內公共工程已行之有年，如台電公司所屬大壩、核電廠、火力發電廠等工程，近年來也進一步推廣至高強度混凝土及高性能混凝土。至於底灰應用於管溝回填工程，也獲得良好的成效。然而，目前為止這些材料在國內多數都是應用於陸域，僅有少部分的海事應用案例，為配合政府推動循環經濟政策，並推廣煤灰應用於海事工程，進而提升煤灰再利用率，因此編寫本手冊。

本手冊主要參酌國內經濟部產業發展署 2017 年核可之「轉爐石海事工程應用手冊」^[1]與日本煤灰能源中心(JCOAL) 出版之「港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン」^[2,3](本手冊稱為日本「煤灰混合材港灣工程使用指南」)等相關內容與架構進行編寫。本手冊中，煤灰應用於海事工程種類計有工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)與人工魚礁等五大項，內容主要包含材料、環保與工程等三面向，同時也彙整眾多國內、外應用案例，其中國內應用案例多為本公司實際執行之成果，詳實描述研究及實作的過程，並綜合實作之經驗，撰寫工程使用說明相關章節，國外案例則取自日本、英國、美國、中國、韓國...等國家，藉實際案例的說明增加使用者的信心。

手冊中建議之煤灰產品標準及規範可作為煤灰應用於海事工程之參考，希望藉由本手冊的彙整與編寫，可使工程主辦機關、設計及施工單位對於煤灰應用於海事工程更具信心，有利共同推行資源循環永續利用並確保公共工程的品質。

煤灰海事工程應用手冊

目錄

第一章 總則	1
1.1 緣起與目的	1
1.2 名詞定義	2
1.3 適用範圍	4
1.4 內容說明	4
第二章 煤灰材料性質及環境安全性.....	7
2.1 煤灰的產生	7
2.2 煤灰物化性質	8
2.2.1 飛灰化學性質	9
2.2.2 飛灰物理性質	14
2.2.3 底灰化學性質	15
2.2.4 底灰物理性質	18
2.2.5 灰塘灰物理、化學及工程性質	19
2.3 煤灰於海事工程之應用型式	26
2.3.1 日本	26
2.3.2 台灣	27
2.4 煤灰環境安全性	30
2.4.1 毒性特性溶出程序	30
2.4.2 重金屬全量分析	31
2.4.3 日本環境廳告示第 13 號試驗 ^[21]	36
2.4.4 簡化生物可及性萃取法及序列萃取法 ^[21]	37
2.4.5 再生粒料環境用途溶出程序	43
第三章 煤灰海事工程之應用實例.....	49

3.1 國內案例	49
3.1.1 工程填地	53
3.1.2 隔堤	65
3.1.3 港灣道路基底層或施工便道	78
3.1.4 無筋預鑄混凝土塊	81
3.1.5 人工魚礁	85
3.2 國外案例	89
3.2.1 工程填地	94
3.2.2 隔堤	96
3.2.3 港灣道路基底層或施工便道	100
3.2.4 無筋預鑄混凝土塊	106
3.2.5 人工魚礁	110
3.2.6 堤後補強	117
3.2.7 地盤改良	119
3.2.8 橋樑及海底隧道	122
3.2.9 碼頭岸壁	127
第四章 煤灰應用於海事工程之環境安全與產品品質標準.....	129
4.1 工程填地	130
4.1.1 煤灰環境安全品質檢測	130
4.1.2 產品標準	130
4.2 隔堤	131
4.2.1 煤灰環境安全品質檢測	131
4.2.2 產品標準	131
4.3 港灣道路基底層或施工便道	132
4.3.1 煤灰環境安全品質檢測	132
4.3.2 產品標準	132

4.4 無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)	133
4.4.1 煤灰環境安全品質檢測	133
4.4.2 產品標準	133
4.5 人工魚礁	135
4.5.1 煤灰環境安全品質檢測	135
4.5.2 產品標準	135
第五章 煤灰應用於海事工程之施工規劃	137
5.1 一般原則	137
5.2 煤灰應用於海事工程相關施工步驟與工法說明	138
5.2.1 工程填地	138
5.2.2 隔堤	146
5.2.3 港灣道路基底層或施工便道	151
5.2.4 無筋預鑄混凝土塊	154
5.2.5 人工魚礁	157
第六章 煤灰應用於海事工程之驗收機制	162
6.1 一般原則	162
6.2 現場品質驗收機制	163
6.2.1 工程填地	163
6.2.2 隔堤	164
6.2.3 港灣道路基底層或施工便道	165
6.2.4 無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)	165
6.2.5 人工魚礁	166
第七章 煤灰應用於海事工程之環境監測	167
7.1 一般原則	167
7.2 環境監測	167
第八章 煤灰應用於海事工程之注意事項	171
8.1 一般原則	171

8.2 煤灰應用於海事工程之注意事項	171
8.3 煤灰應用於海事工程之品質管制應注意事項	173
參考文獻	175
附件	180
附件 1 國外飛灰與底灰化學性質	182
附件 2 林口電廠更新擴建計畫(113 年度 Q1~Q3)	183
附件 3 台中電廠環境監測(民國 113 年 Q1~Q3)	187
附件 4 線西西三區環境監測(民國 113 年 Q1~Q3)	193
附件 5 品質管控檢核表	195
附錄	203

圖目錄

圖 2-1 煤灰產生流程(台電內部資料).....	7
圖 2-2 飛灰((A)外觀圖(B)微觀圖(2000X))(台電內部資料)	9
圖 2-3 底灰((A)外觀圖(B)微觀圖(500X))(台電內部資料)	9
圖 2-4 實驗室試驗之採樣點位分布	21
圖 2-5 煤灰混合材主要種類 ^[2]	27
圖 3-1 林口電廠排灰情形(台電內部資料).....	53
圖 3-2 礫石樁施工情形(台電內部資料).....	54
圖 3-3 圓錐灌入試驗情形(台電內部資料).....	55
圖 3-4 林口電廠室內筒式煤倉(台電內部資料)	55
圖 3-5 林口電廠二期工程填地場址	57
圖 3-6 台中電廠一期工程填地排灰情況(台電內部資料)	59
圖 3-7 擠壓砂樁施工情形 ^[24]	60
圖 3-8 標準貫入試驗 ^[24]	60
圖 3-9 擠壓回填試驗前之地質調查孔位置平面圖 ^[25]	62
圖 3-10 擠壓回填試驗前之地質調查孔之地質調查結果 ^[25]	63
圖 3-11 煤灰擠壓樁試驗區域 ^[25]	64
圖 3-12 擠壓樁各區深度與 SPT-N 關係圖 ^[25]	64
圖 3-13 擠壓回填各區深度與孔隙比關係圖 ^[25]	64
圖 3-14 築堤工程施工區域圖 ^[26]	65
圖 3-15 四種海水下澆置試驗平面示意圖 ^[29]	67
圖 3-16 現場澆置情形 ^[26, 29]	68
圖 3-17 澆置單元鑽心取樣位置平面示意圖 ^[26]	69
圖 3-18 東隔堤斷面圖 ^[26]	69
圖 3-19 全煤灰 CLSM 預鑄方塊現場試吊情形(澆置後 14 天) ^[26]	70
圖 3-20 全煤灰 CLSM 預鑄方塊澆置及吊放施工過程(1/2) ^[26]	71
圖 3-21 全煤灰 CLSM 預鑄方塊澆置及吊放施工過程(2/2) ^[26]	72
圖 3-22 東隔堤下堤體澆置 ^[26]	73

圖 3-23	東隔堤上堤體澆置 ^[26]	74
圖 3-24	線西西三區東隔堤完工圖 ^[26]	75
圖 3-25	築堤工程鑽孔取樣工作 ^[26]	76
圖 3-26	築堤工程鑽心取樣位置平面圖 ^[26]	77
圖 3-27	全煤灰水泥固化物道路斷面示意圖 ^[31]	78
圖 3-28	求取 CACSM 強度係數 A_I ^[31]	80
圖 3-29	通霄電廠道路試驗段鋪設基底層與 AC 面層 ^[31]	80
圖 3-30	實體消波塊製作 ^[9]	83
圖 3-31	實體消波塊吊放測試 ^[9]	84
圖 3-32	實體消波塊表面海洋生物附著情形 ^[9]	84
圖 3-33	實體消波塊鑽心取樣 ^[9]	84
圖 3-34	煤灰礁體 ^[32]	86
圖 3-35	魚類群聚情形 ^[32]	87
圖 3-36	煤灰空心磚之海洋生物附著情形 ^[33]	88
圖 3-37	海洋生物利用煤灰空心磚情形 ^[33]	88
圖 3-38	MILLENIUM COAST PARK 回復計畫 ^[35, 36]	95
圖 3-39	MILLENNIUM HOPE HILLS 回復計畫 ^[3]	96
圖 3-40	SHINCHI 電廠海堤斷面圖 ^[3]	97
圖 3-41	SHINCHI 電廠海堤完成圖 ^[3]	97
圖 3-42	HAKUCHOU-OHASHI 大橋橋墩臨時圍堰之施作斷面示意圖 ^[3]	98
圖 3-43	HAKUCHOU-OHASHI 大橋橋墩臨時圍堰之施作完成圖 ^[3]	99
圖 3-44	日本北海道苫小牧東港堤防建設工程施工示意圖 ^[3]	99
圖 3-45	日本北海道苫小牧東港堤防建設工程施工圖 ^[3]	100
圖 3-46	RAMSGATE 港口聯絡道路實景 ^[38]	101
圖 3-47	日本福島縣石川線臨時道路施工斷面示意圖 ^[3]	102
圖 3-48	日本福島縣石川線臨時道路施工及完成圖 ^[3]	103
圖 3-49	日本福島縣盤城市港區臨時道路煤灰混合材料現場製作情形 ^[2]	103
圖 3-50	日本福島縣盤城市港區臨時道路臨時道路之現場施工情形 ^[2]	104
圖 3-51	ASHEVILLE 區域機場道路鋪設工程 ^[39, 40]	104

圖 3-52	亞伯丁港擴建計畫的消波塊 ^[42, 43]	107
圖 3-53	日本島根縣松江市海堤海堤混凝土塊放置位置 ^[3]	109
圖 3-54	日本島根縣松江市海堤混凝土混合比例 ^[3]	109
圖 3-55	日本島根縣松江市海堤成品及取樣 ^[3]	109
圖 3-56	人工魚礁材料均勻度指數及生物多樣性指數比較 ^[48, 49]	113
圖 3-57	根據廢棄物管理法所檢驗出的有害物質 ^[34]	114
圖 3-58	海藻覆蓋率提升(6 個月) ^[34]	115
圖 3-59	海藻覆蓋率提升(12 個月) ^[34]	115
圖 3-60	6 個月與 12 個月海藻覆蓋照片 ^[34]	115
圖 3-61	日本石炭灰有效利用可能性調查之人工魚礁(1) ^[50]	116
圖 3-62	日本石炭灰有效利用可能性調查之人工魚礁(2) ^[50]	117
圖 3-63	日本 KYUSHU 與 J-POWER 電力之共同護岸設施施作示意圖 ^[3]	118
圖 3-64	日本 KYUSHU 與 J-POWER 電力之共同護岸設施施工圖 ^[3]	118
圖 3-65	日本富山新港火力發電廠填灰區鋼板樁隔離工程施工圖 ^[3]	119
圖 3-66	日本三川港及廣島港擠壓砂樁壓實樁示意圖 ^[3]	120
圖 3-67	日本瀨戶內海沿岸擠壓砂樁施工示意及現況圖 ^[2]	121
圖 3-68	澳洲海崖大橋(SEACLIFF BRIDGE)	123
圖 3-69	檳城第二大橋(PENANG SECOND BRIDGE)	124
圖 3-70	杭州灣跨海大橋(HANGZHOU BAY BRIDGE)	125
圖 3-71	中國廈門翔安海底隧道	126
圖 3-72	日本酒田港外港區碼頭建設工程位置圖	127
圖 3-73	日本酒田港外港區碼頭建設工程施作示意圖 ^[65]	128
圖 3-74	日本酒田港水質監測點位示意圖 ^[67]	128
圖 6-1	現場品質驗收機制流程圖	162
圖 7-1	台灣地區沿海海域範圍及海域分類圖 ^[61]	170

表目錄

表 1-1 本手冊重要名詞定義表	3
表 2-1 CNS 3036 化學成分要求.....	10
表 2-2 CNS 3036 物理性質要求.....	10
表 2-3 台電各電廠飛灰化學性質(1/2)	12
表 2-4 台電各電廠飛灰化學性質(2/2)	13
表 2-5 台電飛灰物理性質(台電內部資料)	15
表 2-6 台電各電廠底灰化學性質(1/2)	16
表 2-7 台電各電廠底灰化學性質(2/2)	17
表 2-8 台電底灰物理性質(台電內部資料)	18
表 2-9 物理、化學與工程性質試驗之檢測內容及檢測方法	22
表 2-10 一期灰塘海水底灰「物理化學及工程性質」檢測結果	23
表 2-11 飛灰與底灰之可再利用項目 ^[20]	28
表 2-12 煤灰應用與再利用項目對應說明表	28
表 2-13 煤灰應用於海事工程之經濟與環境效益	29
表 2-14 台電煤灰以 TCLP 溶出之重金屬檢測結果(台電內部資料)	32
表 2-15 台電煤灰之重金屬全量檢測結果(1/2)(台電內部資料).....	33
表 2-16 台電煤灰之重金屬全量檢測結果(2/2)(台電內部資料).....	34
表 2-17 國內底泥品質標準	35
表 2-18 海洋沉積物之無機重金屬相關危害門檻閾值	35
表 2-19 重金屬溶出試驗結果(JLT-13) ^[21]	36
表 2-20 序列萃取試驗分析方法 ^[21]	38
表 2-21 煤灰中砷之生物可及性及序列萃取試驗結果 ^[21]	39
表 2-22 煤灰中汞之生物可及性及序列萃取試驗結果 ^[21]	39
表 2-23 煤灰中鎘之生物可及性及序列萃取試驗結果 ^[21]	40
表 2-24 煤灰中鉻之生物可及性及序列萃取試驗結果 ^[21]	40
表 2-25 煤灰中銅之生物可及性及序列萃取試驗結果 ^[21]	41
表 2-26 煤灰中鎳之生物可及性及序列萃取試驗結果 ^[21]	41

表 2-27	煤灰中鉛之生物可及性及序列萃取試驗結果 ^[21]	42
表 2-28	煤灰中鋅之生物可及性及序列萃取試驗結果 ^[21]	42
表 2-29	煤灰與土壤背景值之比較 ^[21]	43
表 2-30	重金屬溶出試驗結果(再生粒料環境用途溶出程序)(台電內部資料)	44
表 2-31	重金屬溶出試驗結果(再生粒料環境用途溶出程序).....	44
表 2-32	重金屬溶出試驗結果(再生粒料環境用途溶出程序)(PPM).....	45
表 2-33	一期灰塘重金屬溶出試驗結果(再生粒料環境用途溶出程序)(台電內 部資料).....	47
表 3-1	國內案例內容摘要彙整表-工程填地.....	49
表 3-2	國內案例內容摘要彙整表-隔堤.....	50
表 3-3	國內案例內容摘要彙整表-港灣道路基底層或施工便道.....	51
表 3-4	國內案例內容摘要彙整表-無筋預鑄混凝土塊.....	51
表 3-5	國內案例內容摘要彙整表-人工魚礁.....	52
表 3-6	林口電廠環境監測(民國 113 年 Q3) ^[23]	56
表 3-7	林口電廠環境監測(民國 113 年) ^[23]	58
表 3-8	台中電廠環境監測(民國 113 年 Q3) ^[23]	61
表 3-9	隔堤參考配比表 ^[28]	66
表 3-10	現地試驗採用東隔堤配比及地改配比 ^[26, 30]	67
表 3-11	預鑄方塊配比表 ^[26]	70
表 3-12	東隔堤堤體配比表 ^[26]	73
表 3-13	線西隔堤之環境監測(民國 113 年 Q3) ^[65]	77
表 3-14	電廠道路試驗段鋪設基底層配比參考表 ^[31]	79
表 3-15	實體消波塊配比 ^[9]	83
表 3-16	飛灰人工魚礁配比 ^[32]	86
表 3-17	國外案例內容摘要彙整表-工程填地.....	89
表 3-18	國外案例內容摘要彙整表-隔堤.....	90
表 3-19	國外案例內容摘要彙整表-港灣道路基底層或施工便道.....	91
表 3-20	國外案例內容摘要彙整表-預鑄混凝土塊.....	91

表 3-21	國外案例內容摘要彙整表-人工魚礁.....	92
表 3-22	國外案例內容摘要彙整表-其他類.....	93
表 3-23	SHINCHI 電廠海堤煤灰混合比例 ^[3]	97
表 3-24	SGI 發展之管制標準值 ^[41]	106
表 3-25	英國 POOLE BAY 魚礁的三種配比之重量百分比(%) ^[46]	111
表 3-26	日本三川港及廣島港煤灰混合材料之性質 ^[3]	120
表 3-27	日本瀨戶內海沿岸擠壓砂樁材料性質 ^[2]	122
表 3-28	澳洲海崖大橋飛灰產品物質安全資料表.....	123
表 4-1	煤灰自主檢測(一)-重金屬溶出量(TCLP 及再生粒料環境用途溶出程序) ^[57, 58, 62, 63]	129
表 4-2	煤灰自主檢測(二)-PH 與輻射 ^[59, 60]	130
表 4-3	工程填地產品標準-破碎材.....	131
表 4-4	工程填地產品標準-控制性低強度回填材料.....	131
表 4-5	隔堤產品標準-破碎材.....	132
表 4-6	隔堤產品標準-控制性低強度回填材料.....	132
表 4-7	港灣道路基底層或施工便道產品標準-控制性低強度回填材料....	133
表 4-8	應用於無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)之底灰性質要求.....	134
表 4-9	無筋預鑄混凝土塊 ^[註 1] (消波塊或方塊)產品標準-混凝土.....	134
表 4-10	應用於無筋人工魚礁之底灰性質要求.....	136
表 4-11	無筋人工魚礁產品標準-混凝土.....	136
表 5-1	煤灰海事工程使用注意事項與建議.....	137
表 6-1	現場品質驗收機制彙整表.....	163
表 7-1	環境監測規範及項目.....	168
表 7-2	海域環境分類及海洋環境品質標準 ^[61]	169
表 7-3	台灣地區沿海海域範圍及海域分類 ^[61]	169

第一章 總則

1.1 緣起與目的

電力是現代化生活的基石，也是經濟發展的動力，而電力供應的穩定度也攸關產業發展及民眾生活，因此，台電公司掌握環境、社會與科技的發展脈動，並肩負起提供社會多元發展所需充足與穩定電力的重責大任。

台電公司的發電結構具能源多元化特色，以 2023 年為例，按照發購電量依序為燃氣、燃煤、再生能源、核能、汽電共生、燃油與抽蓄水力等七大類^[4]。燃煤發電佔該年總發電量之 34.1%^[4]，計有林口、台中、興達和大林等 4 座燃煤電廠，估計煤灰(coal ash)總年產量約 240 萬噸，其中燃煤飛灰(coal fly ash)約 200 萬噸，燃煤底灰(coal bottom ash)約 40 萬噸。煤灰資源再利用攸關電廠能否穩定發電，根據資料顯示^[5-8]，飛灰為圓球狀顆粒，可改善新拌混凝土流動性，且飛灰適量取代水泥，其卜作嵐反應所形成的低密度 C-S-H 膠體能填充混凝土內部孔隙，使孔隙細緻化，除了減少界面微裂縫機率，又可強化粒料界面之鍵結強度，有助於混凝土強度長期持續的提升。在惡劣環境下，也能抵抗水分、硫酸鹽及氯離子的入侵，避免鋼筋的腐蝕膨脹，增進混凝土的耐久性。飛灰取代水泥也能降低混凝土成本，亦可間接減少生產水泥所產生之碳排與能耗，具環境友善性。底灰雖然具有較低的粒料強度，但對環境安全性佳，由台電公司過去案例^[9]及其他國家的案例^[2, 3]顯示，底灰搭配飛灰使用能創造出許多工程應用空間，尤其在海事非主結構工程上。

台電公司長期以來定期針對煤灰重金屬溶出進行檢驗，結果顯示符合國內環保法規要求，所以煤灰為可資源再利用資材是毋庸置疑的。飛灰的卜作嵐反應可提升混凝土耐久性與抗硫酸鹽能力，可說是應用於海事結構工程的絕佳材料，減少水泥使用也能降低二氧化碳的排放。近年天然砂石逐漸枯竭，在低強度混凝土應用上，底灰可部分替代天然砂使用，在非主結構物部分，適當摻配飛灰有助於提升工程性質。由國內外相關應用案例得知，煤灰應用於海事工程，如工程填地、隔堤工程、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)與人工魚礁等，確屬可行。

依據內政部綠建材解說與評估手冊內容^[10]，綠混凝土與控制性低強度回填材料均歸類為再生綠建材範疇，而煤灰材料皆能符合綠混凝土^[11]之主要評比項目，如有害物質零排放、高能源使用效率與廢棄物循環再利用等，也滿足控制性低強度回填材料之高流動性及低強度要求，因此，煤灰應用於海事工程可說是替電廠副產物找到好的歸宿，屬於電業與營建業之跨產業循環資源化利用^[12, 13]。

為確保煤灰應用於海事工程之工程品質，特整理煤灰材料性質與環境安全性，彙整國內外應用實績，並參考「轉爐石海事工程使用手冊」(2017 年版)^[1]撰寫架構、日本石炭灰混合材料有效利用指引內容^[2, 3]，研擬本「煤灰海事工程應用手冊」(以下簡稱本手冊)，提供工程主辦機關、設計及施工單位等產業參考依循，有利共同推行資源循環永續利用並能確保公共工程品質。

1.2 名詞定義

1. 煤灰

煤炭經粉煤機磨成粉狀後，送進鍋爐燃燒以加熱爐水，使其生成為高溫及高壓的蒸汽，繼而推動汽機作功，煤灰即為粉煤於鍋爐內經高溫燃燒後之固態殘餘物，為燃煤電廠主要副產物。其中較輕的塵粒則會隨煙氣被攜帶至後爐，再被靜電集塵設備或袋式集塵器所收集，稱為燃煤飛灰，簡稱飛灰，約佔煤灰總量 80%~90%，而較重的顆粒會落至爐膛下方，此為燃煤底灰，簡稱底灰，約佔煤灰總量 10%~20%。

2. 海事工程

海事工程係指海岸或港灣之護岸、離岸堤、潛堤、突堤、海堤、防波堤、圍堤造地、隔堤、碼頭與後線設施等工程，而本手冊主要以無筋型式應用於回填或非主結構物為主，如工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、海堤或防波堤採用之無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)與人工魚礁等用途材料，相關定義詳表 1-1 所示。

表 1-1 本手冊重要名詞定義表

項次	名 詞	定 義
1	煤 灰 (coal ash)	粉煤於鍋爐內經高溫燃燒後之固態殘餘物，為燃煤電廠主要副產物（含燃煤飛灰及燃煤底灰）。
2	燃煤飛灰 (coal fly ash)	簡稱飛灰，煤灰中較輕的部分，隨著煙氣被攜帶至後爐，被靜電集塵設備或袋式集塵器所收集，約佔煤灰總量之 80%~90%。
3	燃煤底灰 (coal bottom ash)	簡稱底灰，煤灰中較重顆粒的部分，通常會落至爐膛下方，約佔煤灰總量之 10%~20%。
4	工程填地 (engineered landfill)	將原有海域或河岸填築形成新生地。
5	隔 堤 (separation embankment)	未直接受到波浪力之內堤，可作為施工過程兩區域之臨時阻隔或圍擋設施，經適當評估後，亦可作為道路使用。
6	道路基底層 (road subbase and base course)	柔性鋪面結構組成之一，基層位於路基上底層下，可提高承載能力，降低路基單位承載力，減少冰凍作用；底層位於基層與面層之間，可提高承載能力。
7	施工便道 (contrary wind)	海事工程或土建工程之臨時施工便道。
8	無筋預鑄混凝土塊 (unreinforced precast concrete block)	本手冊之無筋預鑄混凝土塊係指消波塊或方塊，是一種混凝土產品，係在工廠將混凝土澆築到模具中，在受控環境下硬化，出廠後運送到工地施工。
9	消 波 塊 (armor blocks)	又稱防護塊，是在海岸或河堤邊放置的大型水泥塊，削減海浪衝擊以保護海岸或河堤。
10	人工魚礁 (artificial reef)	是將天然或人造結構體投置於適合海域，以改善或營造海洋生物之棲息環境，而達到培育生物資源，增進漁業經營之目的。
11	破 碎 材 (crushed aggregate)	將煤灰與水泥、水及摻料依設計配比進行拌合，經適當方式養護後硬固，再破碎成不規則狀之粒料，若經設備直接成形成適當塊狀則毋須再破碎。
12	控制性低強度回填材料 (Controlled Low-Strength Material, CLSM)	係由水泥、卜作嵐或無機礦物摻料、粒料、水及化學摻料按設定比例拌和而成，產生可滿足工作性及強度需求之複合材料，亦翻成控制性低強度材料。
13	灰塘灰(pond ash)	排入灰塘回填之煤灰。

1.3 適用範圍

本手冊適用於台電公司等火力電廠所產出之煤灰、拌合其他材料所製成海事工程所需之半成品或產品，以無筋型式應用於回填或非主結構物為主，包括作為工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)與人工魚礁等項目。

1.4 內容說明

本手冊內容闡述煤灰物化特性、彙整國內外煤灰應用於海事工程相關文獻、規範、研究報告、技術指南及應用實例等資料，鋪陳出煤灰應用於海事工程之指引，各章內容摘要如下：

1. 第二章 煤灰材料性質及環境安全性

針對台電公司煤灰的產生流程、煤灰化學及物理性質、煤灰應用型式與煤灰重金屬溶出量等項目進行介紹，以彰顯煤灰之環境安全性。

2. 第三章 煤灰海事工程之應用實例

彙整國內外煤灰應用於工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)與人工魚礁等海事工程應用實例。

3. 第四章 煤灰應用於海事工程之環境安全與產品品質標準

參考國內環境部規定訂定環境安全品質標準，並參考行政院公共工程委員會訂頒的施工綱要規範、國家標準(CNS)與台電公司案例研擬產品品質標準。

4. 第五章 煤灰應用於海事工程之施工規劃

參考相關國家標準及施工綱要規範，彙整國內外煤灰海事工程之施工規範，針對不同海事工程用途，從施工說明(含施工計畫與施工方法)、材料供應計畫與材料儲備與運輸等面向進行分析，據以擬定煤灰應用於海事工程之施工作業程序，以確保工程品質。

5. 第六章 煤灰應用於海事工程之驗收機制

說明煤灰應用於海事工程驗收機制之規範準則，供工程驗收單位或第三公正單位參考。

6. 第七章 煤灰應用於海事工程之環境監測

為確保煤灰應用於海事工程時可符合國內環保法規，本章說明其環境監測之目的、範圍、項目及監測內容所引用的規範來源，以供工程界參考引用。

7. 第八章 煤灰應用於海事工程之注意事項

本章係綜合前述各章再次提列煤灰應用於海事工程時所需注意事項，提供工程設計者規劃實務上參考。

第二章 煤灰材料性質及環境安全性

2.1 煤灰的產生

煤炭為古代植物之化石，為自然界中一種天然有機物質之結晶，為燃煤電廠所使用之燃料。電廠為提高燃燒效率，於煤炭送進鍋爐高溫燃燒(均溫約 1450°C ，見圖 2-1 之左側)前曾經粉煤機磨成粉狀，燃燒後之固態殘餘物稱為煤灰，其中較重的顆粒會落至爐膛下方，此為底灰，約佔煤灰總量 10%~20%。較輕的塵粒則會隨煙氣被攜帶至靜電集塵設備 (Electrostatic Precipitator, ESP) 或袋式集塵器，靜電集塵設備係藉由施加高壓直流電形成電暈放電效果，使氣體電離釋放大量游離電子，當煙氣通過靜電集塵設備所組成之電場時，煙氣中原本不帶電的粉塵粒子會因此而被荷電(charge)，且在電場電磁力的作用下，向極性相反的極板 (Collecting Electrode, CE) 移動，當荷電粉塵到達極板後，電子會被導入大地而粉塵則被吸附在極板上，達到煙氣淨化效果，而被吸附在極板上的粉塵則透過敲擊方式震落^[14]，袋式集塵器則藉由濾袋收集塵粒，不論透過靜電集塵設備或袋式集塵器收集到的塵粒皆稱為飛灰，約佔煤灰總量 80%~90%(見圖 2-1 中央)，煤灰產生流程如圖 2-1 所示。

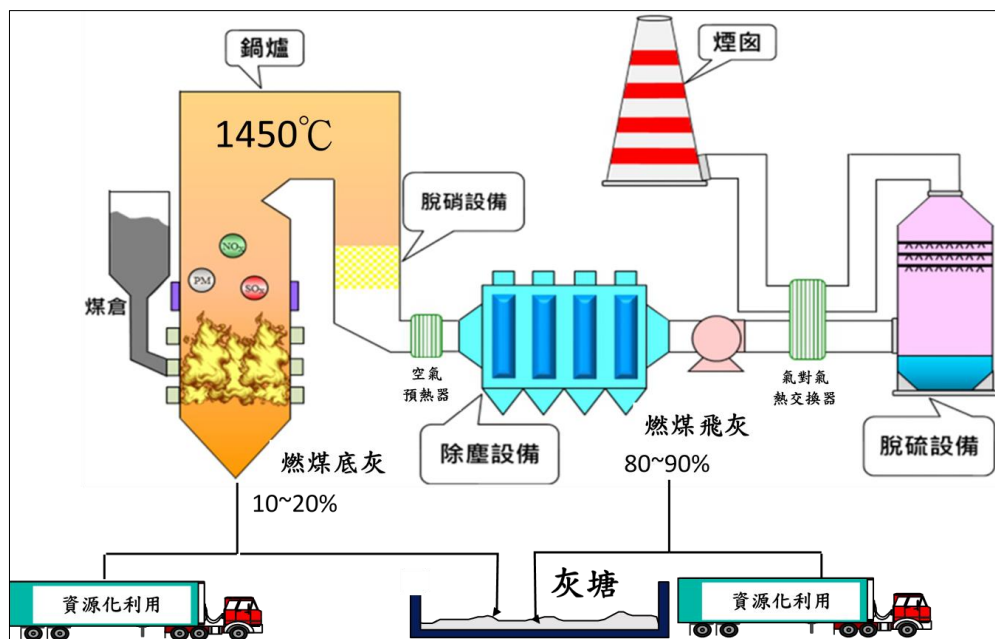


圖 2-1 煤灰產生流程(台電內部資料)

依經濟部事業廢棄物再利用管理辦法，燃煤飛灰和燃煤底灰屬公告應回收或再利用事業廢棄物(R類)，兩者皆具多種合法再利用用途。必須特別澄清的是，燃煤飛灰的性質有別於較低溫鍋爐或使用其他非煤炭燃料所收集到之飛灰，如焚化爐之集塵飛灰與反應灰等。同樣地，燃煤底灰和某些使用非煤炭燃料或較低溫鍋爐所收集到之底渣性質不同，如焚化爐之焚化底渣或煉鋼廠之爐渣(還原渣與氧化渣)等，主要差異為煤灰之化學性質變異性較小且重金屬相對安定。

2.2 煤灰物化性質

煤灰為煤炭燃燒後之固態殘餘物，在煤炭上之黏土、石英與長石礦物等經燃燒後，使其煤灰成分中含有大量 SiO_2 、 Al_2O_3 與 Fe_2O_3 等，與原生黏土有關^[6]，而台灣黏土與砂石之化學性質可參考經濟部地質調查及礦業管理中心出版之台灣非金屬經濟礦物^[15]。煤灰性質往往會隨著電廠機組、使用煤源、粉煤細度及鍋爐燃燒狀況等因素而有不同的物理和化學性質^[6]。

飛灰為灰白至灰黑的粉狀物，在掃描式電子顯微鏡下可看出其為圓球狀，如圖 2-2 所示。由於飛灰為非晶質或半晶質圓形球體，具卜作嵐反應，可取代部分水泥或填塞細粒料使用，適量添加於混凝土中，可改善工作性、減少泌水與乾縮、降低水化熱、提高晚期強度、提升耐久性、增進抗硫酸鹽能力與減低鹼-粒料反應。

底灰外觀為灰白至灰黑的粒狀物，表面粗糙呈不規則多角狀，在電子顯微鏡下可看出底灰為多孔性材料，如圖 2-3 所示。整體而言，底灰具多孔質輕特性，粒料強度低且吸水率高，主要應用於低強度混凝土或非主結構物。



圖 2-2 飛灰((a)外觀圖(b)微觀圖(2000X))(台電內部資料)

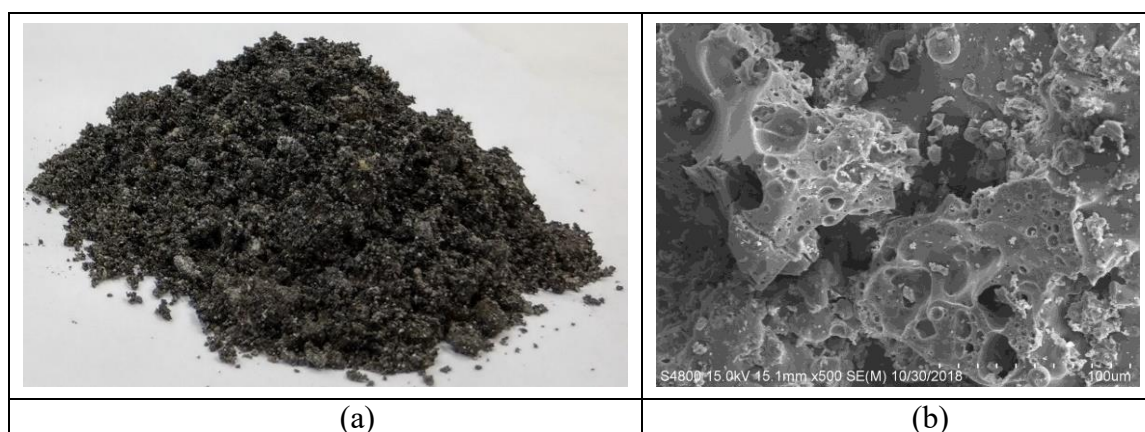


圖 2-3 底灰((a)外觀圖(b)微觀圖(500X))(台電內部資料)

2.2.1 飛灰化學性質

飛灰主要分為 C 類及 F 類兩種(如表 2-1 與表 2-2)，凡使用褐煤或次煙煤燃燒收集者多為 C 類，CaO 含量可能高於 10%，除具有卜作嵐活性之外，也具有若干膠結性；而使用無煙煤或煙煤燃燒取得飛灰為 F 類，僅具卜作嵐活性。目前台電公司火力電廠生產之飛灰多屬 F 類，而其他各國飛灰之化學成分依煤源與燃燒條件而有所不同，將文獻^[16]內容摘錄於附件 1 國外飛灰與底灰化學性質。

表 2-1 CNS 3036 化學成分要求

試驗項目	礦物性攪和物類別	F 類	C 類
二氧化矽(SiO_2)、氧化鋁(Al_2O_3)與氧化鐵(Fe_2O_3)之總和，%(最小值)		70.0	50.0
三氧化硫(SO_3)，%(最大值)		5.0	5.0
含水量，%(最大值)		3.0	3.0
燒失量，%(最大值)		6.0	6.0

表 2-2 CNS 3036 物理性質要求

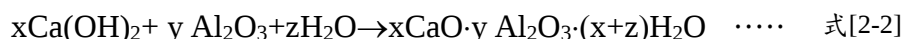
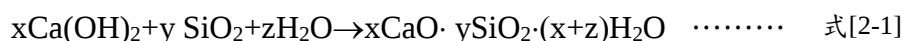
試驗項目	礦物性攪和物類別	F 類	C 類
細度：試驗篩 0.045mm，CNS 386〔試驗篩〕 篩餘量(濕篩法)，%(最大值)		34	34
強度活性指數： 與卜特蘭水泥攪和 7 天，控制百分率，%(最小值)		75	75
強度活性指數： 與卜特蘭水泥攪和 28 天，控制百分率，%(最小值)		75	75
需水量：控制百分率，%(最大值)		105	105
健度：高壓蒸煮膨脹或收縮率，%(最大值)		0.8	0.8
均質性規定： 密度，與平均值之最大變異，%(最大值)		5	5
均質性規定： 停留於試驗篩 0.045mm CNS 386 篩餘量百分比，與 平均值之最大變異		5	5

台電飛灰的化學成分如表 2-3 與表 2-4 所示，主要成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ，其次為 CaO ，以及少量的 MgO 與 SO_3 ，具有卜作嵐反應作用，各化學成分之特性敘述如下：

1. 二氧化矽(SiO_2)、氧化鋁(Al_2O_3)、氧化鐵(Fe_2O_3)

SiO_2 平均值介於 56.49%~65.72%， Al_2O_3 平均值介於 19.71%~20.60%， Fe_2O_3 平均值介於 5.47%~8.91%，台電公司燃煤電廠此三項合計百分率皆在 70%以上，符合 CNS 3036 對 F 類飛灰要求，此

三項化學成分具有影響混凝土品質之特性。飛灰是一種矽鋁酸鹽，本身不具膠結能力，但在有水分供應下，玻璃質 SiO_2 可與 Ca(OH)_2 發生卜作嵐反應，產生具備膠結力之 C-S-H 膠體。卜作嵐反應式參考相關文獻^[17]表示，如式[2-1]，使式子兩端原子數相同，同樣地， Al_2O_3 亦有類似地反應，而形成 C-A-H 晶體^[6, 18]，反應如式[2-2]所列：



根據資料顯示^[5-8]，飛灰為圓球狀顆粒，可改善新拌混凝土流動性，且飛灰適量取代水泥，其卜作嵐反應所形成的低密度 C-S-H 膠體能填充混凝土內部孔隙，使孔隙細緻化，除了減少界面微裂縫機率，又可強化粒料界面之鍵結強度，有助於混凝土強度長期持續的提升。在惡劣環境下，也能抵抗水分、硫酸鹽侵蝕，提高電阻並降低氯離子電滲量，避免鋼筋的腐蝕膨脹，增進混凝土的耐久性。飛灰取代水泥也能降低混凝土成本，亦可間接減少生產水泥所產生之碳排與能耗，具環境友善性。

2. 氧化鈣(CaO)：台電飛灰 CaO 平均值落在 2.96%~7.68% 以下，且飛灰中的 CaO 會與 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 先行作用形成固熔體，幾乎不會以游離型態(free- CaO)存在，沒有混凝土膨脹性的問題^[6]。
3. 氧化鎂(MgO)：台電飛灰 MgO 平均值介於 1.14%~3.13%。
4. 氧化鈉(Na_2O)：台電飛灰 Na_2O 平均值介於 0.59%~1.62%。
5. 氧化鉀(K_2O)：台電飛灰 K_2O 平均值介於 0.96%~1.09%。
6. 三氧化硫(SO_3)：CNS 3036 限制 SO_3 最大值為 5%，避免影響混凝土強度與體積穩定性^[6]，台電公司飛灰的 SO_3 都在 1% 以下。
7. 燒失量(L.O.I)：燒失量為飛灰中未完全燃燒的部分，基本上飛灰燒失量愈高，含碳量會愈高，造成混凝土需水量提高，會影響化學摻料的使用效果^[6]。近年來，台電飛灰的燒失量品質透過設備更新改善，都能控制在 6% 以下。

表 2-3 台電各電廠飛灰化學性質(1/2)

電 廠	SiO ₂				Al ₂ O ₃				Fe ₂ O ₃				CaO				MgO				樣 本 數
	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	
A 電廠	64.69	78.43	51.95	5.98	20.20	32.79	14.93	2.41	6.14	12.83	1.44	1.92	3.48	8.62	0.11	2.15	1.47	4.27	0.19	0.81	60
B 電廠	56.49	65.45	32.77	5.23	19.71	24.02	14.83	1.81	8.91	17.49	5.94	1.74	7.68	20.22	3.71	2.46	3.13	9.60	1.84	1.14	93
C 電廠	63.03	72.91	50.03	4.72	19.96	27.94	14.51	2.68	6.67	11.96	3.19	1.50	5.06	10.51	0.88	1.93	1.80	3.26	0.74	0.45	64
D 電廠	65.72	70.60	58.69	3.34	20.60	24.26	12.63	2.72	5.47	7.15	3.81	0.97	2.96	8.06	1.03	1.42	1.14	1.66	0.56	0.29	23

備註：1.各性質之單位為％。
2.資料來源：台電公司內部資料(108 年)。

表 2-4 台電各電廠飛灰化學性質(2/2)

電 廠	Na ₂ O				K ₂ O				SO ₃				燒失量				含水量				樣 本 數
	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	
A 電廠	0.99	2.58	0.17	0.49	1.05	1.65	0.57	0.23	0.19	0.35	0.10	0.05	1.13	1.85	0.24	0.35	0.17	0.46	0.03	0.07	60
B 電廠	1.62	3.96	0.68	0.57	1.09	1.42	0.76	0.11	0.39	0.85	0.00	0.15	2.47	5.48	0.40	1.10	0.33	0.63	0.02	0.11	93
C 電廠	1.16	2.06	0.36	0.53	0.96	1.38	0.69	0.19	0.20	0.48	0.00	0.11	3.11	5.79	0.44	1.42	0.24	0.45	0.01	0.10	64
D 電廠	0.59	0.86	0.33	0.16	0.97	1.26	0.70	0.16	0.15	0.25	0.03	0.05	1.31	1.83	0.74	0.29	0.11	0.30	0.07	0.04	23

備註：1.各性質之單位為%。
2.資料來源：台電公司內部資料(108 年)。

2.2.2 飛灰物理性質

飛灰物理性質會影響混凝土使用飛灰之品質，台電飛灰的物理性質如表 2-5 所示，說明如下：

1. 比重

飛灰由於化學成分的差異、中空腔與玻璃壁厚相對尺寸的不同^[6]，比重亦不同，台電飛灰比重介於 2.1~2.4。

2. 細度

飛灰粒徑主要介於 1~100 μm ，依 CNS 3036 規定，飛灰細度採溼篩洗法檢測，No.325 篩之停留百分率需小於 34%。停留率愈大，飛灰愈粗，含碳量通常較多，反之，飛灰顆粒愈小，飛灰的比表面積愈大，卜作嵐活性指數愈高^[6]。台電飛灰 No.325 篩之停留百分率都低於 25%，符合 CNS 3036 小於 34%之規定。

3. 卜作嵐活性指數

依據 CNS 3036 規定，經養護 7 天或 28 天之飛灰與卜特蘭水泥砂漿試體強度對控制組(純卜特蘭水泥砂漿試體)之比率稱為卜作嵐活性指數，CNS 規定其最小值為 75%，卜作嵐活性指數愈大表示飛灰與氫氧化鈣在濕氣環境下之反應能力愈佳，更能增進混凝土品質^[6]。因飛灰通過煙道過程為急速冷卻，而成非結晶質或玻璃質，一般來說，若冷卻速度愈快，玻璃質含量愈高，卜作嵐活性愈佳，對混凝土性質的增進效果愈顯著。台電飛灰之 7 天卜作嵐活性指數在 77%以上，28 天卜作嵐活性指數不低於 87%，皆能滿足 CNS 3036 最小 75%之規定。

4. 健度

依據 CNS 3036 規定，使用高壓蒸鍋進行膨脹試驗，透過高溫及高壓方式加速方鎂石及游離石灰之化學反應，此試驗可預測飛灰混凝土的耐久性，需將膨脹率控制在 0.8%以下，以防止混凝土硬固後產生不正常的膨脹^[6]。台電飛灰健度試驗小於 0.06%，均能滿足 CNS 3036 最大 0.8%之規定。

表 2-5 台電飛灰物理性質(台電內部資料)

比 重		2.1~2.4
粒 徑(μm)		1~100
細度：篩餘量(濕篩法)%		$\leq 25\%$
強度活性指數(%)	7 天	$\geq 77\%$
	28 天	$\geq 87\%$
需水量：控制百分率(%)		$\leq 104\%$
健度：高壓蒸煮膨脹或收縮率(%)		$\leq 0.06\%$

2.2.3 底灰化學性質

底灰和飛灰之化學性質與煤源有關，相同煤源基本上化學成分均相似。台電底灰的化學成分如表 2-6 與表 2-7 所示，主要成分有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 ，其次為 CaO ，以及少量的 MgO 與 SO_3 。其化學成分之特性與飛灰相近，可參考 2.2.1 飛灰化學性質。而其他各國底灰之化學成分依煤源與燃燒條件而有所不同，將文獻^[19]內容摘錄於附件 1 國外飛灰與底灰化學性質。

表 2-6 台電各電廠底灰化學性質(1/2)

電 廠	SiO ₂				Al ₂ O ₃				Fe ₂ O ₃				CaO				MgO				樣 本 數
	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	
A 電廠	64.10	78.31	50.68	5.49	19.59	24.47	14.23	2.00	8.09	16.51	2.89	1.94	4.55	10.20	0.10	2.32	1.61	4.28	0.19	0.69	57
B 電廠	60.89	70.34	52.42	5.80	18.30	23.28	14.76	2.32	10.37	20.54	6.38	3.12	6.51	12.06	3.72	2.47	2.55	4.95	1.48	0.90	23
C 電廠	67.14	75.67	53.27	7.36	18.67	26.40	13.99	3.90	7.25	9.78	3.74	1.95	4.19	11.04	0.84	3.48	1.55	2.34	0.67	0.61	11
D 電廠	67.42	75.88	60.01	3.62	19.86	24.35	16.96	1.86	7.23	10.10	2.04	1.69	2.97	7.70	0.46	1.36	1.24	1.98	0.46	0.37	23

備註：1.各性質之單位為%。
2.資料來源：台電公司內部資料(108 年)。

表 2-7 台電各電廠底灰化學性質(2/2)

電 廠	Na ₂ O				K ₂ O				SO ₃				燒失量				含水量				樣 本 數
	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	平均值	最大值	最小值	標準 偏差	
A 電廠	0.97	2.25	0.15	0.49	0.96	1.62	0.52	0.22	0.00	0.03	0.00	0.00	0.20	0.98	0.01	0.14	0.61	12.56	0.01	2.46	57
B 電廠	1.27	2.41	0.42	0.50	0.92	1.20	0.64	0.14	0.12	0.98	0.00	0.22	4.42	12.47	0.03	4.89	0.37	1.55	0.01	0.41	23
C 電廠	1.00	1.61	0.30	0.41	0.86	1.23	0.70	0.16	0.05	0.15	0.00	0.05	0.62	1.76	0.04	0.60	0.39	3.39	0.01	1.00	11
D 電廠	0.55	0.86	0.33	0.18	0.93	1.23	0.60	0.19	0.32	0.98	0.00	0.33	0.25	1.06	0.01	0.24	23.05	28.04	18.22	3.06	23
備註：1.各性質之單位為%。 2.資料來源：台電公司內部資料(108 年)。																					

2.2.4 底灰物理性質

台電底灰的物理性質如表 2-8 所示，說明如下：

1. 粒徑：底灰粒徑大致分佈在 0.1~19 mm 之間，以 No.4 篩以下為主，細度模數(FM)約 2.3~3.7，屬粗砂等級。
2. 比重：由於化學成分及孔洞多寡的差異，底灰烘乾比重介於 1.1~2.2。
3. 吸水率：底灰為多孔性材料，吸水率通常可小於 20%。
4. 含水量：採溼式出灰的底灰經暫置瀝乾數日後，底灰出廠含水量不超過 30%，實際含水量受氣候條件及瀝乾天數而異，採乾式出灰的系統，底灰可視為不含水。
5. 健度：底灰細粒料的健度試驗依 CNS 1167 進行，由浸泡飽和硫酸鈉溶液 5 次循環後之粒料重量損失來計算，台電底灰健度小於 3%，低於 CNS 1240 對混凝土用細粒料最大值 10%之標準。
6. 筒壓強度：底灰為多孔性材料，偏屬輕質粒料，本試驗依 CNS 14779 進行，台電底灰筒壓強度介於 4~10 kgf/cm²。
7. 內摩擦角：本試驗參考 CNS 11778 土壤直接剪力試驗法進行施作，台電底灰之內摩擦角 $\geq 30^\circ$ ，但凝聚力(c)則幾乎可視為 0，表示其剪力強度大都由煤灰顆粒間之互鎖作用而提供。

表 2-8 台電底灰物理性質(台電內部資料)

粒徑(mm)	主要介於 0.1~19
細度模數(FM)	2.3~3.7
烘乾比重	1.1~2.2
吸水率(%)	通常小於 20%
健度試驗(%)	$\leq 3\%$
筒壓強度(kgf/cm ²)	4~10
內摩擦角($^\circ$)	≥ 30

2.2.5 灰塘灰物理、化學及工程性質

為辦理台中發電廠一期灰塘海水底灰應用於港區填築工作，台電公司於 113 年 4 月 17 日起依「再生粒料應用於港區造地填築作業程序」規定辦理填築前三階段評估，並於 113 年 9 月 30 日已完成辦理第一階段實驗室模擬試驗，該報告採樣點位共 18 處，採樣點位規劃原則為避免與已檢測之 12 件次採樣點位重疊且於基地範圍內均勻分布，位置如圖 2-4，以圓形標示（另綜研所已檢測 12 件次採樣點位以座標形標示）。相關檢測內容包含：物理、化學與工程性質試驗、環境安全性試驗及其他試驗彙整如表 2-9，摘述相關結果如下：

1. 物理性質試驗

(1) 視比重：檢測結果為 1.95~2.4 間，與先期報告（煤灰粒料應用於港區填築實驗室試驗報告）檢測結果 2.12~2.31 間相近。

(2) 吸水率：檢測結果為 10.38~30.27% 間，與先期報告檢測結果 2.7~26.5% 間相近，由粒料成分判斷應不致產生潛在膨脹而影響隔堤安全性。

2. 化學性質試驗

(1) 組成成分分析：元素分析以鋁含量最高，檢測結果為 10.64~14.89% 間；硫含量為 0.03~0.14% 間；氯含量為 0.03~0.55% 間。氧化物分析依序為二氧化矽 SiO_2 (69.25%~75.83%)、三氧化二鋁 Al_2O_3 (15.6%~19.6%)、氧化鈣 CaO (3.82%~8.76%)，其餘為氧化鉀 K_2O 、氧化鎂 MgO 、三氧化硫 SO_3 等。

(2) 三成分分析：水分檢測結果為 12.26~35.44% 間、可燃分為 4.07~18.23% 間、灰分為 50.88~83.56% 間。

3. 工程性質試驗

(1) 篩分析—粒徑範圍：灰塘灰細度模數 (FM) 檢測結果為 0.55~2.81，與先期報告檢測結果 2.3~3.1 間相近，粒徑研判屬於細粒料 (9.5mm 篩之累計過篩百分率為 100%)，或可透過拌合（如提高用水量、藥劑量及膠結材用量）等方式，以確保達到

所需工作性及強度要求。

- (2)膨脹率：膨脹率檢測結果為-0.0086~0.15%間，滿足共通性施工綱要規範第 02722 章級配粒料基層相關參考規定（浸水膨脹比不得大於 0.5%），或符合經濟部再利用管理辦法附表三中編號八、電弧爐煉鋼爐渣（石）應用於海事工程用粒料之膨脹標準規定($\leq 0.5\%$)。
- (3)洛杉磯磨損率：洛杉磯磨損率 2 件次檢測結果為 39%及 51%。
另 2 件次因粗粒料組成過低磨損率低於試驗極限。
- (4)夯實試驗（最大乾密度）：夯實試驗（最大乾密度）檢測結果為 $0.973 \sim 1.380 \text{ kg/m}^3$ 間。
- (5)含砂當量：含砂當量檢測結果為 13~63%間。
- (6)健度：煤灰屬於細粒料，細粒料健度試驗 3 件次檢測結果為 1.8~3.8%間，另 1 件次低於試驗極限。
- (7)CBR（加州承載比）：加州承載比檢測結果為 0.9~35.9%間。

另本次針對一期灰塘海水底灰進行之環境安全性試驗，檢測成果詳 2.4.5 節內容。



- 本報告18處採樣點位(113年)
- 綜研所12處採樣點位(112年)

圖 2-4 實驗室試驗之採樣點位分布

表 2-9 物理、化學與工程性質試驗之檢測內容及檢測方法

試驗項目	檢測內容		檢測方法
物理 試驗	比重		CNS 487 細粒料密度、相對密度（比重）
	吸水率		及吸水率試驗法 CNS 488 粗粒料密度、相對密度（比重） 及吸水率試驗法
化學 試驗	化學成分	組成成分分析 （二氧化矽、氧化鈣、三氧化 二鋁、三氧化二鐵、氧化鎂、 三氧化硫、氧化鈉、氧化鉀、 氯含量、硫含量、鋁含量）	元素分析儀（EA 與 XRF）
		三成分分析（水分、灰分、 可燃分）	NIEA R205.01C 廢棄物中灰分、可燃分測 定方法
	燒失量		CNS 1078:2020 水硬性水泥化學分析法
工程性質 試驗	篩分析—粒徑範圍（cm）		CNS 486 粗細粒料篩析法
	膨脹率（%）		CNS15311 粒料受水合作用之潛在膨脹試 驗法
	洛杉磯磨損率（%）		CNS 490 粗粒料（37.5 mm 以下）洛杉磯 磨損試驗法 CNS 3408 粗粒料（粒徑 19 mm 以上）磨 損試驗法 （依判定粗/細粒料決定檢測方法）
	最大乾密度（t/m ³ ）		CNS 11777-1 土壤含水量與密度關係試 驗法（改良式夯實試驗法）
	含砂當量（%）		CNS 15346 土壤及細粒料之含砂當量試 驗法
	健度		CNS 1167 使用硫酸鈉或硫酸鎂之粒料健 度試驗法（粗粒料） CNS 1167 使用硫酸鈉或硫酸鎂之粒料健 度試驗法（細粒料） （依判定粗/細粒料決定檢測方法）
	CBR（加州承載比）		CNS 12382 夯實土樣加州載重比試驗法

表 2-10 一期灰塘海水底灰「物理化學及工程性質」檢測結果

工作項目				單位	採樣點位																	
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
物理 試驗	吸水率			%	20.7 2	10.38	12.02	11.43	13.63	13.48	11.48	15.02	18.58	16.28	21.88	30.27	16.82	18.01	28.77	16.28	14.81	10.81
	視比重			－	2.4	2.19	2.08	2.04	2.07	2.15	2.19	2.08	1.95	2.02	1.98	1.97	2.2	2.03	2.04	2.1	2.36	2.18
化學 試驗	元素 分析	硫含量		wt%, dry	0.04	0.06	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05	0.04	0.1	0.05	0.14	0.1	0.13	0.12	0.08	0.13	0.07	0.04
		氯含量			0.05	0.06	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.32	0.05	0.53	0.14	0.55	0.14	0.04	0.3	0.14	0.03
		鋁含量			13.2 5	14.88	14.43	13.9	14.53	13.63	14.18	13.75	12.37	13.79	12.47	12.05	12.04	14.89	10.64	13.5	14.74	13.91
	氧化 物分 析	氧化鎂		%	0.57	1.19	0.76	0.61	1.17	0.56	0.9	0.93	0.42	0.73	0.68	0.73	0.42	1.26	0.37	0.62	0.98	0.89
		三氧化二鋁			17.4 3	18.9	18.72	17.84	18.68	17.22	19.48	17.51	17.73	19.06	17.81	18.24	17.36	19.6	15.6	18.25	19.51	18.16
		二氧化矽			71.9	69.25	71.98	73.1	70.86	72.86	69.49	70.03	72.09	72.67	69.51	71.67	69.98	69.67	75.83	71.51	70.66	71.42
		三氧化硫			0.91	0.95	0.76	0.49	0.77	1.04	0.81	0.83	1.29	0.49	1.94	0.98	1.6	1.41	1.44	1.18	0.74	0.93
		氧化鉀			1.78	1.6	1.51	1.3	1.42	1.17	1.79	1.18	1.33	1.25	1.43	1.52	1.5	1.56	1.3	1.33	1.62	1.67
		氧化鈣			6.13	6.76	5.54	5.91	6.2	6.53	6.62	8.76	4.05	4.86	4.7	5.58	4.58	4.89	4.44	3.82	4.49	5.76
	三成 分分 析	水分		wt%,a r	16.3 6	14.02	16.95	14.99	15.89	13.41	20.91	12.26	33.68	24	30.08	30.34	30.88	35.44	22.74	34.2	25.58	14.56
		可燃分			8.02	4.79	6.41	5.26	5.86	4.07	11.27	4.18	15.44	12.11	16.78	18.12	17.42	7.56	18.23	11.21	9.07	7.56
		灰分			75.6 2	81.18	76.64	79.75	78.24	82.52	67.82	83.56	50.88	63.89	53.15	51.55	51.71	57	59.03	54.59	65.35	77.88
	燒失量				%	9.82	5.68	7.72	6.17	6.92	4.64	14.34	4.72	23.38	15.94	24.07	26.02	25.33	11.9	23.67	17.32	12.29
工程 試驗	粒徑 範圍	CNS4 86	篩分 析	%																		
			50mm (2")																			
			37.5mm (11/2")																			
			25.0mm (1")																			
			19.0mm (3/4")																			
			12.5mm (1/2")																			
			9.5mm (3/8")																			
			4.75mm (No.4)																			

表 2-10 一期灰塘海水底灰「物理化學及工程性質」檢測結果(續)

工作項目					單位	採樣點位																	
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
工程試驗	粒徑範圍	CNS486	累計過篩百分率	2.36mm (No.8)	%		76					85				98					94		
				1.18mm (No.16)			58					69				95					92		
				600µm (No.30)			44					56				92					90		
				300µm (No.50)			32					42				87					88		
				150µm (No.100)			19					24				73					83		
				75µm (No.200)			10					9				51					73		
				細度模數 (F.M)			2.81					2.3				0.55					0.56		
	膨脹率	CNS15311	夯壓試驗	最大乾密度	kg/m ³		1,260					1,084				825					1,060		
				最佳含水量	%		22.8					24.5				58					41		
			浸水 70°C 膨脹試驗 (7 天平平均值)		%		0.02					- 0.0086				0.15					-0.09		
	洛杉磯磨損率	CNS490	洛杉磯磨損值 (級配 D, 500 轉)		%		39					51				無法執行					無法執行		
	最大乾密度	CNS1777-1	夯壓試驗	最大乾密度	kg/m ³		1,380					1,230				973					1,021		
				最佳含水量	%		15.1					21.0				41.8					38.2		
	含砂當量	CNS15346	含砂當量		%		60					63				44					13		
	健度	CNS1167	粗粒料健度		%		無法執行					無法執行				無法執行					無法執行		
		CNS1167	細粒料健度	通過	停留	-						-				-					無法執行		
				9.5mm (3/8")	4.75mm (No.4)	%						0.2				0.1							
			損耗率	4.75mm (No.4)	2.36mm (No.8)							0.5				0.2							

表 2-10 一期灰塘海水底灰「物理化學及工程性質」檢測結果(續)

工作項目						單位	採樣點位																		
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
工程 試驗	健度	CNS1 167	損耗 率	2.36mm (No.8)	1.18mm (No.16)	%		1									0.7								
				1.18mm (No.16)	600μm (No.30)			0.5									0.6								0.4
				600μm (No.30)	300μm (No.50)			0.5									0.6								0.7
				300μm (No.50)	150μm (No.100)			-									-								-
				150μm (No.100)				-									-								-
				總計				3.8									2.6								1.8
	CBR (加州承 載比)	CNS1 2382	CBR 值			%		35.9					22.9				3.1					0.9			

2.3 煤灰於海事工程之應用型式

2.3.1 日本

煤灰於海事工程之應用型式除了以煤灰直接使用外，亦可將煤灰添加水泥、水和其他材料進行拌合與加工，依據日本煤灰能源中心(JCOAL) 煤灰混合材港灣工程使用指南^[2]，主要將煤灰混合材分為四大類，包含破碎材、造粒材、塑性材與灰漿材，如圖 2-5 所示。

破碎材和造粒材為低強度粒料，破碎材為先將煤灰添加水泥、水和其他材料進行拌合及養護，使強度提升後，再使用破碎設備，使得外觀有稜有角，而造粒材為先將煤灰添加水泥、水和其他材料進行拌合至近零坍度後，再使用圓盤造粒機，使粒料趨近圓形。塑性材具高塑性，介於控制性低強度回填材料與滾壓混凝土(RCC)之間，而灰漿材具有高流動性，可配合管路泵送澆置，和控制性低強度回填材料相似。

破碎材和造粒材皆為原煤灰再經相關設備及製程所得之混合加工材，過程中可能會產生更多碳排放、能耗與揚塵問題(包含運輸與製程)。而塑性材與灰漿材在使用於水面下，需注意澆置可能造成材料分離而影響工程品質。因此，煤灰的再利用應以原煤灰為優先，無法滿足工程需求時再考慮混合材的使用，並搭配合適工法來符合規範要求。

總之，設計單位必須根據不同的工程條件選用適合的煤灰應用型式，而混合材之物理、化學及工程性質在某種程度上可藉由廠商配比與製程之修正來滿足工程需求。

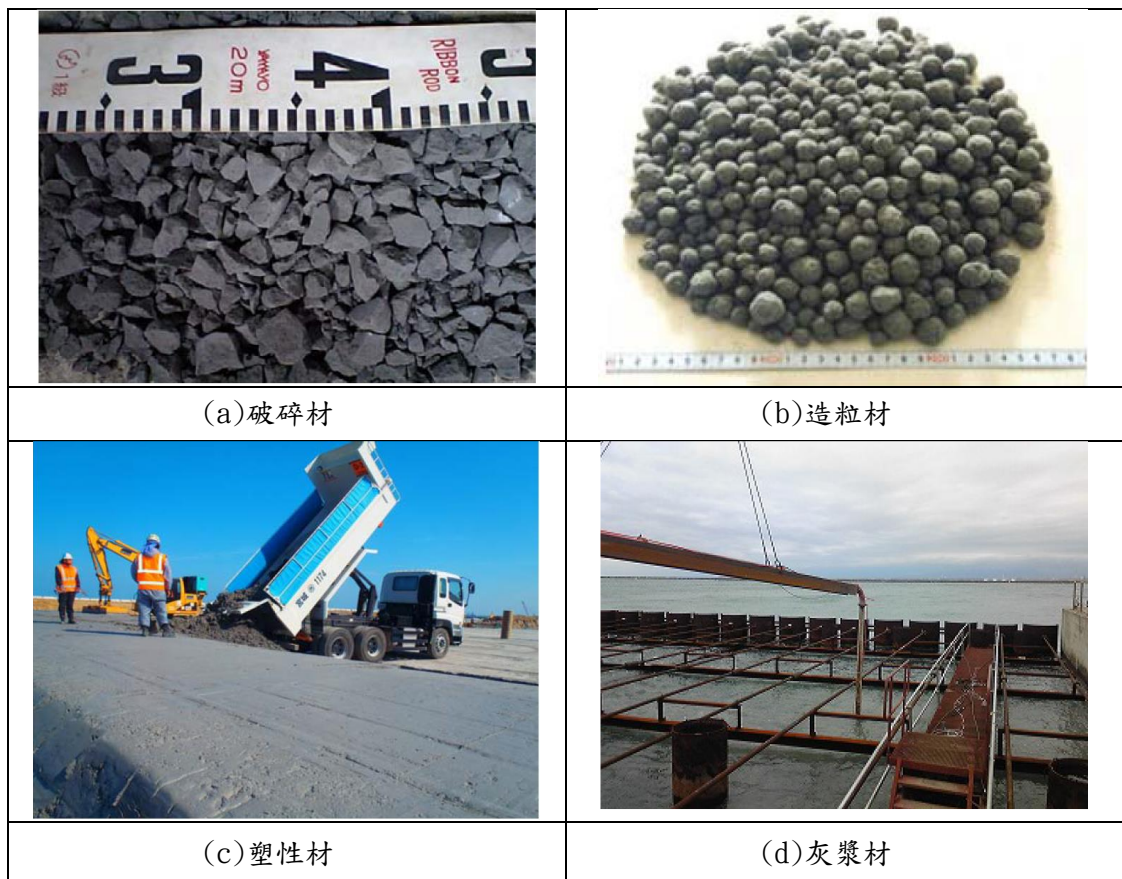


圖 2-5 煤灰混合材主要種類^[2]

2.3.2 台灣

依據經濟部事業廢棄物再利用管理辦法，飛灰與底灰之可再利用項目如表 2-11 所示，而本手冊煤灰應用與再利用項目之對應說明如表 2-12 所列。另外，將煤灰應用於海事工程之經濟與環境效益整理如表 2-13。

表 2-11 飛灰與底灰之可再利用項目^[20]

種類	再 利 用 項 目
飛灰	高爐爐石粉原料、水泥原料、水泥製品(限混凝土(地)磚、空心磚、水泥瓦、水泥板、緣石、混凝土管、人孔、溝蓋、紐澤西護欄、預鑄混凝土建築構件)原料、混凝土攪和物、陶瓷磚瓦原料、顆粒保溫材原料、鋪面工程之基層或底層級配粒料原料、混凝土粒料原料、瀝青混凝土粒料原料、控制性低強度回填材料原料或非農業用地之工程填地材料。
底灰	水泥生料、預拌混凝土原料、混凝土粒料原料、陶瓷磚瓦原料、顆粒保溫材原料、鋪面工程之基層或底層級配粒料原料、瀝青混凝土粒料原料、控制性低強度回填材料用粒料原料、控制性低強度回填材料原料或非農業用地之工程填地材料。

表 2-12 煤灰應用與再利用項目對應說明表

應用種類	應用型式	煤 灰 再 利 用 項 目	
		飛 灰	底 灰
工程填地	原煤灰	非農業用地之工程填地材料	非農業用地之工程填地材料
	破碎材	控制性低強度回填材料原料 ^(註) 、混凝土攪和物 ^(註)	控制性低強度回填材料原料 ^(註) 、預拌混凝土原料 ^(註)
	控制性低強度回填材料	控制性低強度回填材料原料	控制性低強度回填材料原料
隔 堤	破碎材	控制性低強度回填材料原料 ^(註) 、混凝土攪和物 ^(註)	控制性低強度回填材料原料 ^(註) 、預拌混凝土原料 ^(註)
	控制性低強度回填材料	控制性低強度回填材料原料	控制性低強度回填材料原料
港灣道路 基底層或 施工便道	控制性低強度回填材料	控制性低強度回填材料原料	控制性低強度回填材料原料
無筋預鑄 混凝土塊	混凝土	混凝土攪和物	預拌混凝土原料
人工魚礁	混凝土	混凝土攪和物	預拌混凝土原料

註：本手冊破碎材之製作方式為將煤灰添加少量水泥、水和其他材料進行拌合成控制性低強度回填材料或混凝土(通常為低強度)，經適當養護後使強度提升，再破碎成粒料(若經設備直接形成適當尺寸則可毋須再破碎)。其中，若拌合成控制性低強度回填材料，飛灰與底灰可視為控制性低強度回填材料原料使用，若拌合成混凝土，飛灰與底灰可分別視為混凝土攪和物與預拌混凝土原料使用。實際再利用項目仍依據經濟部事業廢棄物再利用管理辦法辦理，與日本煤灰能源中心(JCOAL) 煤灰混合材港灣工程使用指南定義之破碎材有些微差異。

表 2-13 煤灰應用於海事工程之經濟與環境效益

應用種類	經 濟 效 益	環 境 效 益
工程填地	1. 當煤灰需求降低時，具調節功能，避免因灰位過高使電廠面臨降載或停機而產生的損失。 2. 就近取用電廠煤灰做為填海造陸材料，降低購買回填材料成本。 3. 填海造陸後，經適當地盤改良，可做後續土地利用。	1. 具調節煤灰市場功能，避免因需求降低導致煤灰被惡意棄置影響環境。 2. 圍堤斷面結構設有堤後濾層設施，可達攔灰透水功能。 3. 由台電案例之環境監測結果顯示，電廠工程填地擴建及煤灰填築對環境之影響程度不明顯。
隔堤	1. 飛灰取代部分水泥使用，材料成本下降。 2. 底灰替代部分天然粒料，降低材料成本。	1. 電廠副產物之資源化利用。 2. 減少水泥與天然粒料使用，降低開採對生態環境衝擊，節能並降低碳足跡。 3. 飛灰有助於提升整體緻密性，抑制重金屬釋出。 4. 由台電案例之環境監測結果顯示，隔堤建置及煤灰填築對環境無明顯影響。
港灣道路基底層或施工便道	1. 底灰替代部分天然粒料，降低材料成本。 2. 相較傳統級配工法，具施工簡單，降低工程造價。	1. 電廠副產物之資源化利用。 2. 減少天然粒料使用，降低開採對生態環境衝擊，節能並降低碳足跡。 3. 飛灰有助於提升整體緻密性，抑制重金屬釋出。
無筋預鑄混凝土塊	1. 飛灰取代部分水泥使用，材料成本下降。 2. 底灰替代部分天然粒料，降低成本。	1. 電廠副產物之資源化利用。 2. 減少水泥與天然粒料使用，降低開採對生態環境衝擊，節能並降低碳足跡。 3. 飛灰有助於提升整體緻密性，抑制重金屬釋出。
人工魚礁	1. 飛灰取代部分水泥使用，材料成本下降。 2. 底灰替代部分天然粒料，降低成本。 3. 有效培育漁業資源。	

2.4 煤灰環境安全性

本節採用毒性特性溶出程序(Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)、重金屬全量分析、日本環境廳告示 13 號釋出潛勢試驗(Japanese Leaching Test No.13, JLT-13)、簡化生物可及性萃取法(Simplified Bioaccessibility Extraction Test, SBET)及序列萃取法(Sequential Extraction Procedure, SEP)與再生粒料環境用途溶出程序等方法對煤灰進行重金屬溶出量檢測。毒性特性溶出程序與重金屬全量分析為本公司煤灰例行檢驗項目，而日本 JLT-13 釋出潛勢試驗、簡化生物可及性萃取法及序列萃取法為本公司為了解煤灰之重金屬特性及對環境可能的影響，與台大環工所合作研究試驗的結果，有關再生粒料環境用途溶出程序方法的試驗，則因應國內環檢所於 2019 年 10 月最新公布，適用於測定再生粒料(包括焚化再生粒料、煉鋼爐渣(Steel slag)、非鐵金屬爐渣 (Non-ferrous slag) 及廢棄物熔融爐渣(Waste molten slag))中重金屬溶出量的方法(NIEA R222)，本公司綜研所特別請通過認證的檢測公司，對煤灰的重金屬溶出做更進一步的分析，相關試驗結果整理如表 2-14 至表 2-30。綜整結果可知，煤灰重金屬溶出量均低於標準，重金屬全量與重金屬生物可及性和臺灣土壤背景值相近，煤灰的重金屬也多屬於安定型態，不易溶出，顯示煤灰材料十分穩定，對環境影響相當輕微。

2.4.1 毒性特性溶出程序

本公司利用環檢所公布之 TCLP 標準檢驗方法(NIEA R201)進行試驗，用以判定飛灰與底灰是否為有害廢棄物。本手冊統計本公司 108 年飛灰與底灰重金屬溶出含量，如表 2-14 所示，對照環境部所公布「有害事業廢棄物認定標準」，其管制項目包含總銅、總鎘、總鉛、總鉻、總砷、總汞、總硒、總鋇、六價鉻等重金屬(法規值並列於表 2-14)，比較各電廠檢測 TCLP 重金屬溶出平均值與法規值，結果顯示本公司飛灰與底灰之相關檢測平均值都遠低於法規標準，非屬有害事業廢棄物。

2.4.2 重金屬全量分析

重金屬全量分析採環檢所 NIEA S321 (鎘、鉻、銅、鉛、鎳、鋅)、NIEA S310 (砷)、NIEA M318 (汞)標準方法進行，樣品經過篩後，以王水消化法進行萃取，再以感應耦合電漿發射光譜儀(Inductively Coupled Plasma, ICP)及原子吸收光譜儀(Atomic Absorption Spectrometer, AAS)分析各種重金屬含量。此分析結果可代表實際樣品重金屬總量，本手冊統計本公司 108 年各電廠例行分析的飛灰與底灰重金屬含量之最大值、最小值、平均值與標準偏差值，列於表 2-15 與表 2-16 所示，環境部所公告之「土壤污染監測標準」(指基於土壤污染預防目的，所訂定須進行土壤污染監測之污染物濃度)及「土壤污染管制標準」(指為防止土壤污染惡化，所訂定之土壤污染管制限度)，同時並列於表 2-15 與表 2-16，比較結果可直接反應對環境衝擊程度。從結果顯示台電公司飛灰及底灰的重金屬平均值均遠低於土壤污染監測標準，該標準比起國內「有害事業廢棄物認定標準」(TCLP)(NIEA R201)更為嚴格，因此可符合該標準顯示煤灰對於環境之影響應較小。另以全量分析結果比較「國內底泥品質標準」及美國 NOAA SQuiRT 快篩表之「海洋沉積物之無機重金屬相關危害門檻閾值」(詳表 2-17 及表 2-18)，底泥品質標準部分，本公司煤灰全量分析結果可符合該標準之上限值；海洋沉積物之無機重金屬相關危害門檻閾值部分，全量分析結果之平均值皆可符合 PEL(probable effect level)及 ERM(Effects Range-Median)之標準。

表 2-14 台電煤灰以 TCLP 溶出之重金屬檢測結果(台電內部資料)

電廠機組	灰樣	總銅 Cu	總鎘 Cd	總鉛 Pb	總鉻 Cr	總砷 As	總汞 Hg	總硒 Se	總鋇 Ba	六價鉻 Cr ⁶⁺	樣本數
A 電廠	飛灰	0.131	0.069	0.197	0.093	0.1050	0.0011	0.066	0.335	0.053	61
	底灰	0.042	0.072	0.166	0.045	0.0047	0.0010	0.033	0.330	0.005	60
B 電廠	飛灰	0.041	0.063	0.226	0.116	0.1084	0.0011	0.086	0.299	0.083	13
	底灰	0.040	0.061	0.172	0.043	0.0025	0.0010	0.041	0.293	0.005	14
C 電廠	飛灰	0.100	0.076	0.179	0.108	0.0591	0.0010	0.083	0.449	0.056	11
	底灰	0.079	0.079	0.191	0.043	0.0116	0.0010	0.029	0.205	0.004	10
D 電廠	飛灰	0.069	0.093	0.223	0.097	0.2114	0.0011	0.103	0.249	0.036	23
	底灰	0.035	0.072	0.176	0.052	0.0041	0.0010	0.038	0.350	0.004	23
檢測方法		NIEA R201 NIEA R306 NIEA M111	NIEA R201 NIEA R306 NIEA M111	NIEA R201 NIEA R306 NIEA M111	NIEA R201 NIEA R306 NIEA M111	NIEA R201 NIEA R318	NIEA R201 NIEA R318	NIEA R201 NIEA R306 NIEA M104	NIEA R201 NIEA R306 NIEA M104	NIEA R201 NIEA R309	
方法偵測極限(MDL)		0.032	0.035	0.054	0.043	0.0003	0.0003	0.016	0.011	0.003	
法規值		15.0	1.0	5.0	5.0	5.0	0.2	1.0	100.0	2.5	

備註：1.各重金屬溶出單位為 mg/L。
2.資料來源：台電公司內部資料(108 年)。
3.原始資料為 ND 者，以 MDL 值取代，每次的 MDL 不盡相同，為便於計算，以表列之 MDL 估算平均值。
4.分析結果以平均值表示。

表 2-15 台電煤灰之重金屬全量檢測結果(1/2) (台電內部資料)

電 廠	汞				鉛				鉻				鎘				樣 本 數
	平均值	最大值	最小值	標準偏差	平均值	最大值	最小值	標準偏差	平均值	最大值	最小值	標準偏差	平均值	最大值	最小值	標準偏差	
A 電廠飛灰	0.182	0.488	0.021	0.133	9.09	37.50	0.34	6.12	22.39	91.20	4.81	17.23	0.528	1.310	0.100	0.351	28
A 電廠底灰	0.008	0.021	0.005	0.004	1.14	10.40	0.10	2.99	12.06	66.90	0.17	14.19	0.168	0.719	0.100	0.154	27
B 電廠飛灰	0.257	0.357	0.157	0.059	9.58	14.20	6.01	1.96	30.82	46.40	22.40	5.90	0.854	1.570	0.100	0.404	12
B 電廠底灰	0.016	0.055	0.005	0.016	1.62	9.93	0.10	2.85	21.77	96.30	5.59	25.46	0.231	0.586	0.100	0.167	12
C 電廠飛灰	0.213	0.774	0.049	0.129	7.45	18.60	0.10	4.58	26.03	123.50	4.82	19.39	0.568	2.230	0.100	0.488	38
C 電廠底灰	0.008	0.017	0.005	0.004	0.47	1.81	0.10	0.57	11.40	24.60	0.10	8.24	0.167	0.587	0.100	0.159	12
D 電廠飛灰	0.231	0.774	0.049	0.167	8.15	18.60	2.37	4.44	27.01	123.50	4.82	20.58	0.839	2.230	0.163	0.540	34
D 電廠底灰	0.009	0.017	0.005	0.005	0.44	1.81	0.10	0.56	11.25	24.60	1.99	8.48	0.272	0.719	0.100	0.247	11
檢測方法	NIEA M318				NIEA S321				NIEA S321				NIEA S321				
方法偵測極限(MDL)	0.005				0.10				0.10				0.10				
土壤污染監測標準 ⁴	10(2)				1,000(300)				175				10(2.5)				
土壤污染管制標準 ⁴	20(5)				2,000(500)				250				20(5)				

備註：1.各重金屬全量單位為 mg/kg(ppm)。
2.資料來源：台電公司內部資料(108 年)。
3.原始資料為 ND 者，以 MDL 值取代，每次的 MDL 不盡相同，為便於計算，以表列之 MDL 估算平均值。
4.括弧內為食用作物農地之監測與管制標準值。

表 2-16 台電煤灰之重金屬全量檢測結果(2/2) (台電內部資料)

電 廠	砷				鎳				銅				鋅				樣 本 數
	平均值	最大值	最小值	標準偏差	平均值	最大值	最小值	標準偏差	平均值	最大值	最小值	標準偏差	平均值	最大值	最小值	標準偏差	
A 電廠飛灰	10.449	19.500	0.100	4.836	25.11	56.60	7.04	11.87	23.78	55.00	12.50	8.05	40.83	79.50	11.10	15.00	28
A 電廠底灰	1.138	11.000	0.100	2.877	13.65	34.60	2.09	9.69	10.19	29.40	2.52	7.11	15.82	53.30	1.25	14.02	27
B 電廠飛灰	15.675	23.300	11.500	3.381	32.29	45.20	23.60	7.98	26.73	34.70	23.20	3.45	59.23	83.70	43.60	13.99	12
B 電廠底灰	0.453	2.290	0.100	0.824	19.07	60.40	7.42	13.99	11.18	17.90	3.33	5.10	25.38	62.30	9.01	14.37	12
C 電廠飛灰	8.292	25.200	0.100	6.153	22.57	85.70	7.22	14.54	19.74	47.80	7.17	9.25	33.44	99.40	13.60	17.17	38
C 電廠底灰	0.700	2.830	0.100	1.092	12.49	27.40	0.10	8.09	8.83	23.00	0.10	6.61	16.50	64.90	0.16	16.75	12
D 電廠飛灰	9.855	25.200	0.332	6.872	22.44	85.70	7.22	14.28	20.68	47.80	7.17	10.10	36.94	99.40	13.60	21.31	34
D 電廠底灰	0.754	2.830	0.100	1.128	12.08	21.90	3.38	5.98	9.11	23.00	1.26	5.99	17.16	64.90	4.00	16.91	11
檢測方法	NIEA S310				NIEA S321				NIEA S321				NIEA S321				
方法偵測極限(MDL)	0.10				0.10				0.10				0.10				
土壤污染監測標準 ⁴	30				130				220(120)				1,000(260)				
土壤污染管制標準 ⁴	60				200				400(200)				2,000(600)				

備註：1.各重金屬全量單位為 mg/kg(ppm)。
2.資料來源：台電公司內部資料(108 年)。
3.原始資料為 ND 者，以 MDL 值取代，每次的 MDL 不盡相同，為便於計算，以表列之 MDL 估算平均值。
4.括弧內為食用作物農地之監測與管制標準值。

表 2-17 國內底泥品質標準

底泥品質指標項目	上限值	下限值
砷(As)	33.0	11.0
鎘(Cd)	2.49	0.65
鉻(Cr)	233.0	76.0
銅(Cu)	157.0	50.0
汞(Hg)	0.87	0.23
鎳(Ni)	80.0	24.0
鉛(Pb)	161.0	48.0
鋅(Zn)	384.0	140.0

備註：1.單位：mg/kg。

2. 參考來源：底泥品質指標之分類管理及用途限制辦法第四條。

表 2-18 海洋沉積物之無機重金屬相關危害門檻閾值

國家 單位 參數 底質 重金屬	美國國家海洋大氣管理局 (National Ocean and Atmosphere Administration, NOAA)			
	海洋沉積物(Marine Sediment)			
	TEL	ERL	PEL	ERM
砷	7.24	8.2	41.6	70.0
鎘	0.68	1.20	4.21	9.60
鉻	52.3	81.0	160	370
銅	18.7	34.0	108	270
鉛	30.24	46.7	112	218
錳	—	—	—	—
汞	0.13	0.15	0.70	0.71
銀	0.73	1.00	1.77	3.70
鎳	15.9	20.9	42.8	51.6
硒	—	—	—	—
鋅	124	150	271	410

備註：1.參考來源：<https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/SQuiRTs.pdf>。

2.單位：乾重 mg/kg。

2.4.3 日本環境廳告示第 13 號試驗^[21]

日本為評估廢棄物於掩埋處理、海底掩埋及海拋處理等環境溶出情形，訂定「環境廳告示第 13 號」Japanese leaching test No.13 (JLT-13) 試驗方法，用以評估重金屬於類中性環境中的釋出潛勢，環境部於 2014 年 12 月將 JLT-13 列為海洋環境溶出試驗檢測方法 (NIEA R220.20C)，台電公司綜研所於研究期間取電廠飛灰與底灰進行試驗，分析結果如表 2-19 所示，方法偵測極限亦列於表中，由結果可知重金屬溶出量大多低於方法偵測極限亦或是在方法偵測極限附近，相當的低。因環境部雖訂定檢測方法，卻未針對此試驗方法，進一步訂定相關標準，因此本結果僅供參考。

表 2-19 重金屬溶出試驗結果(JLT-13) ^[21]

重金屬 樣品	砷	汞	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅	硒
A 電廠飛灰	0.022	ND	ND	ND	0.004	0.105	ND	ND	ND
A 電廠底灰	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
B 電廠飛灰	ND	0.000053	0.008	0.099	0.016	0.002	ND	ND	0.046
B 電廠底灰	ND	ND	ND	ND	0.004	0.063	ND	ND	ND
C 電廠飛灰	ND	ND	0.002	0.078	0.008	ND	ND	ND	ND
C 電廠底灰	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
方法偵測極限 (MDL)	0.014	0.0000002	0.01	0.007	0.003	0.002	0.007	0.016	0.028
備註：1.單位 mg/L。 2.D 廠正值機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。									

2.4.4 簡化生物可及性萃取法及序列萃取法^[21]

簡化生物可及性萃取法為美國 EPA 於 2012 年提出，用來評估含重金屬固體於動物消化液中的重金屬溶出情形，本萃取法之萃取液，是由 0.4M 甘氨酸(glycine)與 12 N 濃鹽酸調整 pH 值至人體胃液之酸鹼值(pH 1.5) 模擬胃液，進行萃取重金屬試驗，此方法即為模擬樣品進入人體胃時均勻混合反應之情形。

序列萃取試驗被廣泛用來評估重金屬的型態及移動性，其基本原理是依化學試劑萃取強度由小而大進行逐步萃取，而各化學型態之分佈會依重金屬之化學特性與固體物特性有很大的差異，固體物中重金屬之化學型態會影響其溶解度，而溶解度也會直接影響其移動性與生物有效性。序列萃取測試方法如表 2-20 所示，共分為 4 種(F1~F4)或 5 種相態(F1~F5)，表示重金屬在該相態的穩定程度，若重金屬溶出比率集中在殘餘相態，則表示固體物重金屬較為穩定，不易溶出。試驗結果如表 2-21~表 2-28 所示，分別為砷、汞、鎘、鉻、銅、鎳、鉛及鋅之生物可及性及序列萃取試驗結果，由結果顯示，除 B 電廠飛灰及 C 電廠飛灰砷元素生物可及性比例偏高外，其他元素大都很低，生物可及性含量甚至低於方法偵測極限，致使生物可及性比例無法計算。由序列萃取試驗結果可知，大部分煤灰樣品之重金屬移動性普遍偏低，主要集中在殘餘相態，表示煤灰的重金屬大多屬穩定不易溶出狀態。另外，煤灰重金屬全量濃度範圍和生物可及性比例分析結果與台灣水源保護區自然背景土壤所測得之結果比較列於表 2-29，煤灰重金屬全量濃度與台灣水源保護區自然背景土壤比較，雖有部分元素(鉻、銅、鉛及鋅)最大值略高於背景土壤的最大值，仍屬安全範圍；而生物可及性比例與台灣自然背景土壤所測得之結果比較，砷、汞、鉻、鎳及鋅元素的生物可及性百分比略高於背景土壤，但因重金屬的全含量低，相對對人體的危害度也低，綜合以上結果，煤灰重金屬含量低與背景土壤屬同一等級，且屬穩定的重金屬，不具環境與人體危害性。

表 2-20 序列萃取試驗分析方法^[21]

SEP	砷			汞			一般重金屬 (鎳、鎘、鉻、鉛、鋅、銅、硒) – BCR 法		
	相態	萃取試劑	萃取時間	相態	萃取試劑	萃取時間	相態	萃取試劑	萃取時間
F1	非專一性吸附	0.05 M 硫酸銨 ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$)	4 hr	水可溶解態	去離子水 (DI water)	2 hr	酸可溶及交換態	0.11 M 醋酸 (CH_3COOH)	16 hr
F2	專一性吸附	0.05 M 磷酸二氫銨 ($(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$)	16 hr	可交換態	0.5 M 醋酸銨-EDTA ($\text{NH}_4\text{Ac-EDTA}$)	2 hr	可還原結合態	0.5 M 鹽酸羥銨 ($\text{NH}_4\text{OH}\cdot\text{HCl}$)	16 hr
F3	無定型鐵鋁氧化物鍵結	0.2 M 草酸銨 ($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$)	4 hr	有機結合態	0.2 M 氫氧化鈉 (NaOH)	2 hr	可氧化結合態	8.8 M 過氧化氫 (H_2O_2)	1 ~ 2 hr
					4% 醋酸 (CH_3COOH)	2 hr		1 M 醋酸銨 ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$)	16 hr
F4	結晶型鐵鋁氧化物鍵結	0.2 M 草酸銨 ($(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$)、 0.1 M 維他命 C (Vitamin C)	0.5 hr	殘餘態	微波消化	-	殘餘態	微波消化	-
F5	殘餘態	微波消化	-	-	-	-	-	-	-

表 2-21 煤灰中砷之生物可及性及序列萃取試驗結果^[21]

樣 品	砷							
	SBET			SEP				
	全量	生物可及性 含量	生物可及性 比例 ^[註]	F1	F2	F3	F4	F5
	mg/kg	mg/kg	%	%				
A 電廠飛灰	ND	6.16	N/A	4.60	0.00	26.79	3.65	64.96
A 電廠底灰	ND	ND	N/A	0.00	0.00	0.00	9.66	90.34
B 電廠飛灰	20.2	20.2	100	11.36	10.22	23.73	9.45	45.24
B 電廠底灰	ND	2.91	N/A	3.44	0.00	0.00	0.00	96.56
C 電廠飛灰	14.40	14.40	100	13.37	2.68	27.93	2.25	53.77
C 電廠底灰	ND	2.36	N/A	3.54	0.00	0.00	0.00	96.46
方法偵測極 限(MDL)	7.5	0.14	—	—	—	—	—	—
備註：1. 濃度低於方法偵測極限者以”ND”表示； N/A：not available； SEP 試驗結果中，若各相態檢測 值為 ND 者，各相態所佔比例以 0.00%表示。 2. 生物可及性比例(%)=生物可及性含量/全量。 3. D 廠於試驗期間恰逢機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。								

表 2-22 煤灰中汞之生物可及性及序列萃取試驗結果^[21]

樣 品	汞						
	SBET			SEP			
	全量	生物可及性 含量	生物可及性 比例 ^[註]	F1	F2	F3	F4
	mg/kg	mg/kg	%	%			
A 電廠飛灰	0.054	0.006	11.42	0.83	0.53	0.63	98.00
A 電廠底灰	0.010	ND	N/A	1.56	0.00	8.73	89.71
B 電廠飛灰	0.453	0.112	24.71	0.05	3.91	1.28	94.76
B 電廠底灰	0.061	ND	N/A	1.64	6.00	6.17	86.18
C 電廠飛灰	0.194	0.003	1.52	0.06	0.36	0.42	99.15
C 電廠底灰	0.016	ND	N/A	2.84	0.11	12.13	84.92
方法偵測極 限(MDL)	0.00005	0.000002	—	—	—	—	—
備註：1. 濃度低於方法偵測極限者以”ND”表示； N/A：not available； SEP 試驗結果中，若各相態檢測值為 ND 者，各相態所佔比例以 0.00%表示。 2. 生物可及性比例(%)=生物可及性含量/全量。 3. D 廠於試驗期間恰逢機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。							

表 2-23 煤灰中鎘之生物可及性及序列萃取試驗結果^[21]

樣品	鎘						
	SBET			SEP			
	全量	生物可及性 含量	生物可及性 比例 ^[註]	F1	F2	F3	F4
	mg/kg	mg/kg	%	%			
A 電廠飛灰	0.26	ND	N/A	0.00	0.00	0.00	0.00
A 電廠底灰	ND	ND	N/A	0.00	0.00	0.00	0.00
B 電廠飛灰	0.30	ND	N/A	6.40	93.60	0.00	0.00
B 電廠底灰	0.30	ND	N/A	0.00	0.00	0.00	0.00
C 電廠飛灰	0.33	ND	N/A	0.00	0.00	0.00	0.00
C 電廠底灰	ND	ND	N/A	0.00	0.00	0.00	0.00
方法偵測極 限(MDL)	0.25	1.0	—	—	—	—	—
備註：1. 濃度低於方法偵測極限者以“ND”表示；N/A：not available；SEP 試驗結果中，若各相態檢測值為 ND 者，各相態所佔比例以 0.00% 表示。 2. 生物可及性比例(%)=生物可及性含量/全量。 3. D 廠於試驗期間恰逢機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。							

表 2-24 煤灰中鉻之生物可及性及序列萃取試驗結果^[21]

樣品	鉻						
	SBET			SEP			
	全量	生物可及性 含量	生物可及性 比例 ^[註]	F1	F2	F3	F4
	mg/kg	mg/kg	%	%			
A 電廠飛灰	36.1	1.83	5.09	1.26	5.24	4.00	89.50
A 電廠底灰	54.5	ND	N/A	0.00	0.84	0.59	98.57
B 電廠飛灰	75.3	22.70	30.15	0.84	16.20	2.21	80.75
B 電廠底灰	31.2	2.12	6.81	0.53	3.81	1.23	94.43
C 電廠飛灰	62.1	12.03	19.37	5.09	14.78	5.25	74.88
C 電廠底灰	53.6	ND	N/A	0.00	1.54	0.69	97.77
方法偵測極 限(MDL)	7.5	0.7	—	—	—	—	—
備註：1. 濃度低於方法偵測極限者以“ND”表示；N/A：not available；SEP 試驗結果中，若各相態檢測值為 ND 者，各相態所佔比例以 0.00% 表示。 2. 生物可及性比例(%)=生物可及性含量/全量。 3. D 廠於試驗期間恰逢機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。							

表 2-25 煤灰中銅之生物可及性及序列萃取試驗結果^[21]

樣品	銅						
	SBET			SEP			
	全量	生物可及性 含量	生物可及性 比例 ^[註]	F1	F2	F3	F4
	mg/kg	mg/kg	%	%			
A 電廠飛灰	66.3	4.43	6.68	29.88	47.97	22.15	0.00
A 電廠底灰	47.6	1.30	2.73	35.50	35.63	28.87	0.00
B 電廠飛灰	39.3	8.78	22.35	0.00	65.30	8.96	25.73
B 電廠底灰	19.2	1.87	9.76	0.00	15.49	30.39	54.12
C 電廠飛灰	65.3	9.50	14.56	8.67	44.79	22.26	24.27
C 電廠底灰	45.4	3.54	7.80	10.79	18.55	2.24	68.43
方法偵測極 限(MDL)	7.5	0.3	—	—	—	—	—
備註：1. 濃度低於方法偵測極限者以“ND”表示；N/A：not available；SEP 試驗結果中，若各相態檢測值為 ND 者，各相態所佔比例以 0.00%表示。 2. 生物可及性比例(%)=生物可及性含量/全量。 3.D 廠於試驗期間恰逢機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。							

表 2-26 煤灰中鎳之生物可及性及序列萃取試驗結果^[21]

樣品	鎳						
	SBET			SEP			
	全量	生物可及性 含量	生物可及性 比例 ^[註]	F1	F2	F3	F4
	mg/kg	mg/kg	%	%			
A 電廠飛灰	90.5	2.86	3.16	4.47	3.01	6.40	86.11
A 電廠底灰	63.5	0.50	0.78	0.49	3.40	1.92	94.18
B 電廠飛灰	110.3	51.15	46.36	0.00	44.17	2.15	53.68
B 電廠底灰	101.4	10.37	10.22	6.94	8.48	21.39	63.18
C 電廠飛灰	112.0	11.41	10.18	6.86	10.98	8.04	74.11
C 電廠底灰	103.0	1.92	1.86	1.73	3.22	2.14	92.91
方法偵測極 限(MDL)	7.5	0.2	—	—	—	—	—
備註：1. 濃度低於方法偵測極限者以“ND”表示；N/A：not available；SEP 試驗結果中，若各相態檢測值為 ND 者，各相態所佔比例以 0.00%表示。 2. 生物可及性比例(%)=生物可及性含量/全量。 3.D 廠於試驗期間恰逢機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。							

表 2-27 煤灰中鉛之生物可及性及序列萃取試驗結果^[21]

樣品	鉛						
	SBET			SEP			
	全量	生物可及性 含量	生物可及性 比例 ^[註]	F1	F2	F3	F4
	mg/kg	mg/kg	%	%			
A 電廠飛灰	48.7	ND	N/A	0.00	2.71	5.99	91.29
A 電廠底灰	20.2	ND	N/A	0.00	0.00	0.00	100.00
B 電廠飛灰	25.1	4.58	18.23	0.00	23.03	3.02	73.95
B 電廠底灰	28.1	ND	NA	0.00	0.00	0.00	100.00
C 電廠飛灰	58.0	2.27	3.92	0.00	6.50	8.93	84.57
C 電廠底灰	18.9	ND	N/A	0.00	0.00	0.00	100.00
方法偵測極 限(MDL)	8.25	0.7	—	—	—	—	—
備註：1. 濃度低於方法偵測極限者以“ND”表示；N/A：not available；SEP 試驗結果中，若各相態檢測值為 ND 者，各相態所佔比例以 0.00%表示。 2. 生物可及性比例(%)=生物可及性含量/全量。 3.D 廠於試驗期間恰逢機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。							

表 2-28 煤灰中鋅之生物可及性及序列萃取試驗結果^[21]

樣品	鋅						
	SBET			SEP			
	全量	生物可及性 含量	生物可及性 比例 ^[註]	F1	F2	F3	F4
	mg/kg	mg/kg	%	%			
A 電廠飛灰	113.0	4.25	3.76	4.27	3.29	7.90	84.55
A 電廠底灰	109.5	ND	N/A	2.96	4.49	3.27	89.28
B 電廠飛灰	326.7	99.90	30.58	0.00	31.50	1.08	67.42
B 電廠底灰	102.0	4.61	4.52	8.49	8.71	5.60	77.21
C 電廠飛灰	206.0	41.33	20.06	9.63	18.93	10.62	60.82
C 電廠底灰	104.0	5.16	4.96	3.93	3.66	1.83	90.59
方法偵測極 限(MDL)	12.5	1.6	—	—	—	—	—
備註：1. 濃度低於方法偵測極限者以“ND”表示；N/A：not available；SEP 試驗結果中，若各相態檢測值為 ND 者，各相態所佔比例以 0.00%表示。 2. 生物可及性比例(%)=生物可及性含量/全量。 3.D 廠於試驗期間恰逢機組改建，無煤灰產出，故無檢測數據。							

表 2-29 煤灰與土壤背景值之比較^[21]

樣品類型		砷	汞	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅
水源保護區自然背景土壤 (n=20)	全量 (mg/kg)	3.59-16.6	0.04-0.40	ND-0.12	7.82-352	4.63-38.3	5.81-97.5	12.5-38.8	48.2-150
	生物可 及性比 例(%)	4.72-33.1	0.19-5.98	N/A-44.1	N/A	N/A-52.5	N/A-12.2	15.9-51.2	0.44-20.1
本計畫 煤灰 (n=24)	全量 (mg/kg)	ND-21.75	0.001-0.453	ND-0.36	31.2-149	ND-68.2	22.9-128	13.7-67.6	48.0-327
	生物可 及性比 例(%)	N/A-100	0-24.71	N/A	0-48.42	0-26.67	0.78-46.4	0-65.87	0-40.11
備註：濃度低於方法偵測極限者以“ND”表示；N/A：not available。									

2.4.5 再生粒料環境用途溶出程序

再生粒料環境用途溶出程序(NIEA R222)為環檢所於 2019 年 10 月公布之溶出方法，適用於測定再生粒料(包括焚化再生粒料、煉鋼爐渣(Steel slag)、非鐵金屬爐渣 (Non-ferrous slag) 及廢棄物熔融爐渣(Waste molten slag))中金屬之溶出量。環境部於 2020 年 5 月 18 日公告垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式，明定焚化再生粒料環境標準環境用途的一、二級標準，於水質保護區、自然生態區....等，溶出結果須符合第一級管制標準(即第一類地下水污染管制標準)，若非屬限制使用地點，須符合第二級管制標準(第二類地下水污染管制標準)。

台電公司為了解煤灰作為環境用途之安全性，故委託國內合格檢驗機構依此溶出程序對煤灰進行重金屬溶出試驗，試驗數據如表 2-30 所示。可看出飛灰與底灰之鎘、鎳、鉛、汞等檢測結果都低於方法偵測極限，而砷、鉻、銅、鋅部分數據高於方法偵測極限，不過幾乎都低於焚化再生粒料環境用途第一級管制標準，僅鉻元素溶出結果高於環境用途第一級管制標準，不過仍符合焚化再生粒料環境用途第二級管制標準，表示煤灰若比照焚化再生粒料環境標準環境用途標準，可用於非水質保護區、自然生態區等等的環境中。

表 2-30 重金屬溶出試驗結果(再生粒料環境用途溶出程序)(台電內部資料)

煤灰樣品	砷	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅	汞
飛灰 1	0.009	ND	0.190	ND	ND	ND	0.006	ND
飛灰 2	ND	ND	0.165	0.003	ND	ND	0.017	ND
飛灰 3	ND	ND	0.123	ND	ND	ND	0.022	ND
飛灰 4	0.015	ND	0.100	ND	ND	ND	0.031	ND
底灰	ND	ND	0.005	ND	ND	ND	ND	ND
檢驗方法	NIEA R222/NIEA R306/NIEA M104							NIEA R222/ NIEA R314
方法偵測極限 (MDL)	0.008	0.001	0.003	0.002	0.003	0.004	0.006	0.0001
焚化再生粒料 環境標準第一 級標準(即第一 類地下水污 染管制標準)	0.05	0.005	0.05	1	0.1	0.01	5	0.002
焚化再生粒料 環境標準第二 級標準(即第二 類地下水污 染管制標準)	0.5	0.05	0.5	10	1	0.1	50	0.02

單位：mg/L

摘錄台電公司綜合研究所「煤灰粒料應用於港區填築實驗室試驗」報告，試驗數據如表 2-31 所示，檢測結果顯示所有樣品之檢測項目都低於方法偵測極限，均符合焚化再生粒料環境用途第一管制標準，表示煤灰若比照焚化爐底渣焚化再生粒料環境用途標準，可用於非水質保護區、自然生態區等等的環境中。

表 2-31 重金屬溶出試驗結果(再生粒料環境用途溶出程序)

煤灰樣品	砷	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅	汞
S5 灰塘灰	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

煤灰樣品	砷	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅	汞
S6 灰塘灰	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
S7 灰塘灰	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
S8 灰塘灰	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
S9 灰塘灰	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
S10 灰塘灰	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
方法偵測極限 (MDL)	0.005	0.001	0.005	0.006	0.006	0.002	0.011	0.0001

單位：mg/L

另摘錄台電公司綜合研究所「煤灰環境用途適用性探討」完成報告，111 年台電公司各火力電廠煤灰依 NIEA R222.10C “再生粒料環境用途溶出程序”後的重金屬分析，試驗成果如表 2-32 所示，檢測結果顯示銅、鉛、汞、鋅、鎳等 5 個元素的溶出均低於焚化再生粒料環境用途第一管制標準，鎘、鉻、砷元素則超出焚化再生粒料環境用途第一管制標準，但低於焚化再生粒料環境用途第二管制標準。

表 2-32 重金屬溶出試驗結果(再生粒料環境用途溶出程序) (ppm)

重金屬 樣品	銅	鉛	鎘	鉻	砷	汞	鋅	鎳
A 電廠 #1 機飛灰	0.0173	0.0042	0.0053	0.0824	0.1860	ND	ND	0.0072
A 電廠 #1 機底灰	0.0052	0.0013	0.0002	ND	0.0183	ND	ND	0.0016
A 電廠 #2 機飛灰	0.0023	0.0021	0.0055	0.0691	0.2300	ND	ND	0.0075
A 電廠 #2 機底灰	0.0029	0.0010	0.0002	ND	0.0208	ND	ND	0.0016
A 電廠 #3 機飛灰	0.0014	0.0010	0.0045	0.0831	0.2100	ND	ND	0.0078
A 電廠 #3 機底灰	0.0029	0.0013	0.0002	ND	0.0145	ND	ND	0.0016

重金屬 樣品	銅	鉛	鎘	鉻	砷	汞	鋅	鎳
B 電廠 乾式底灰	0.0010	0.0031	0.0008	0.0049	0.0650	ND	ND	0.0026
B 電廠 淡水底灰	0.0014	0.0174	0.0015	ND	0.0253	ND	ND	0.0035
B 電廠 混合飛灰	<0.0010	0.0010	0.0034	0.1350	0.2760	ND	ND	0.0089
B 電廠 混合底灰	0.0016	0.0058	0.0007	ND	0.0157	ND	ND	0.0030
B 電廠 #1 機飛灰	<0.0010	0.0072	0.0055	0.2630	0.3490	ND	ND	0.0103
B 電廠 #2 機飛灰	<0.0010	0.0639	0.0125	0.1730	0.2000	<0.0010	ND	0.0078
B 電廠 #3 機飛灰	<0.0010	0.0142	0.0053	0.2640	0.3860	ND	ND	0.0100
B 電廠 #4 機飛灰	<0.0010	0.0179	0.0079	0.2060	0.3430	ND	ND	0.0111
B 電廠 #5 機飛灰	<0.0010	0.0018	0.0031	0.0930	0.1520	ND	ND	0.0059
B 電廠 #6 機飛灰	<0.0010	0.0007	0.0034	0.1680	0.1980	ND	ND	0.0066
B 電廠 #9 機飛灰	<0.0010	0.0030	0.0042	0.1180	0.2060	ND	ND	0.0084
B 電廠 #10 機飛灰	<0.0010	0.0069	0.0034	0.1300	0.2260	ND	ND	0.0076
B 電廠 乾式底灰	0.0016	0.0023	0.0008	0.0055	0.0651	ND	ND	0.0024
B 電廠 淡水底灰	0.0027	0.0172	0.0008	ND	0.0066	ND	ND	0.0012
C 電廠 #2 機飛灰	<0.00100	0.0018	0.0048	0.0354	0.1800	ND	ND	0.0042
C 電廠 #3 機飛灰	0.0010	0.0028	0.0056	0.0312	0.1570	ND	ND	0.0043
C 電廠 #3 機底灰	0.0014	0.0012	0.0002	ND	0.0401	ND	ND	0.0018
C 電廠 #1 機飛灰	0.0020	0.0039	0.0047	0.0270	0.1480	ND	ND	0.0044
C 電廠 #1 機底灰	<0.0010	0.0018	0.0008	ND	0.0378	ND	ND	0.0107
D 電廠 #1 機飛灰	<0.0010	0.0007	0.0029	0.2310	0.2010	<0.0010	ND	0.0076

重金屬 樣品	銅	鉛	鎘	鉻	砷	汞	鋅	鎳
D 電廠 #1 機底灰	<0.0010	0.0006	0.0003	ND	0.0192	ND	ND	0.0018
D 電廠 #2 機飛灰	<0.0010	0.0022	0.0029	0.2580	0.1970	<0.0010	ND	0.0083
D 電廠 #2 機底灰	0.0012	0.0009	0.0002	ND	0.0150	ND	ND	0.0018
方法偵測極 限(MDL)	0.00033	0.00003	0.00003	0.00033	0.00033	0.0003	0.017	0.00033

台電公司另針對一期灰塘海水底灰以「再生粒料環境用途溶出程序(NIEA R222)」進行重金屬分析，試驗成果如表 2-33 所示，檢測結果顯示各項目都低於方法偵測極限，均符合焚化再生粒料環境用途第一管制標準，表示煤灰若比照焚化爐底渣焚化再生粒料環境用途標準，可用於非水質保護區、自然生態區等等的環境中。

表 2-33 一期灰塘重金屬溶出試驗結果(再生粒料環境用途溶出程序)(台電內部資料)

煤灰樣品	砷	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅	汞
灰塘灰 C2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
灰塘灰 C6	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
灰塘灰 C7	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
灰塘灰 C11	ND	ND	ND	<0.03	ND	ND	ND	ND
灰塘灰 C13	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
灰塘灰 C15	ND	ND	ND	<0.03	ND	ND	ND	<0.001
灰塘灰 C16	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
灰塘灰 C18	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

煤灰樣品	砷	鎘	鉻	銅	鎳	鉛	鋅	汞
方法偵測極限 (MDL)	0.0086	0.00059	0.0025	0.03	0.0051	0.0039	0.0025	0.001
檢驗方法	NIEA R222/NIEA R306/NIEA M104							NIEA R222/ NIEA R314
焚化再生粒料 環境標準第一 級標準(即第一 類地下水污 染管制標準)	0.05	0.005	0.05	1	0.1	0.01	5	0.002
焚化再生粒料 環境標準第二 級標準(即第二 類地下水污 染管制標準)	0.5	0.05	0.5	10	1	0.1	50	0.02

此外，針對海水環境進行重金屬溶出試驗的 pH 值檢測，結果顯示萃取液的 pH 值範圍為 7.54~8.48，符合「有害事業廢棄物認定標準」中氫離子濃度指數（pH 值） $2.0 < \text{pH} < 12.5$ 的規定，同時亦符合「海域環境分類及海洋環境品質標準」之乙類海域 pH 值規範（7.5~8.5）。

第三章 煤灰海事工程之應用實例

煤灰為廣泛應用的材料，國內已有許多工程案例，包括台電公司所屬大壩及電廠之興建工程、東帝士 85 大樓、台北 101 大樓等。然而，煤灰應用仍以陸域工程為主，海事工程上的使用相對較少，因此，本章蒐集國內外應用案例，從工程背景、工程或環境效益面向來說明，提供給工程單位參考。

3.1 國內案例

將國內案例依應用分為五大種類(含工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊與人工魚礁)，並摘要案例重點彙整成表，如表 3-1～表 3-5。

表 3-1 國內案例內容摘要彙整表-工程填地

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
工程填地	台電林口電廠一期工程填地(1987~2000)	原煤灰	1.發揮調節煤灰市場功能，使電廠順利發電。 2.填築完成後，經適當地盤改良，可規劃後續利用。 3.環境監測結果顯示林口電廠工程填地擴建及煤灰填築對環境之影響程度不明顯。
	台電台中電廠一期工程填地(1996 至今)	原煤灰	1.發揮調節煤灰市場功能，使電廠順利發電。 2.填築完成後，經適當地盤改良，可規劃後續利用。 3.工程填地之圍堤斷面結構，均設有堤後濾層設施，可達攔灰透水功能。 4.環境監測結果顯示台中電廠工程填地擴建及煤灰填築對環境無明顯影響。
	台電台中電廠一期工程填地煤灰擠壓回填試驗(2016)	原煤灰	1.原軟弱工程填地以煤灰擠壓回填，SPT-N 值未有明顯提升，但孔隙率有降低趨勢。 2.使用擠壓工法可增加工程填地填築煤灰容量，減少建造工程填地所產生的碳排放。

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
	台電林口電廠二期工程填地(2005～至今)	原煤灰	1.發揮調節煤灰市場功能，使電廠順利發電。 2.填築完成後，經適當地盤改良，可規劃後續利用。 3.環境監測結果顯示林口電廠工程填地擴建及煤灰填築對環境之影響程度不明顯。

表 3-2 國內案例內容摘要彙整表-隔堤

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
隔堤	台電彰濱工業區線西隔堤工程(2012)	控制性低強度回填材料	1.本案例以全煤灰 CLSM 應用於隔堤之堤體與兩側之預鑄混凝土方塊，形成穩定之隔堤結構。 2.此工程共使用底灰約 12.6 萬噸，飛灰約 8.6 萬噸，兼具降低天然石料開採對生態環境衝擊之優點，同時可減輕煤灰處置場地取得的壓力，達到經濟、環保的雙重效益，符合資源永續利用的原則及綠工程目標，對環境品質維護具有正面效益。 3.此工程亦為國內將全煤灰 CLSM 運用於築堤工程的首例，具工程示範意義，藉由完整的施工過程記錄及成效展現，可做為未來類似工程之參考。 4.透過空氣品質與海域水質之監測，結果顯示線西隔堤建置及煤灰填築對環境無明顯影響。

表 3-3 國內案例內容摘要彙整表-港灣道路基底層或施工便道

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
港灣道路基底層或施工便道	台電通霄電廠柔性道路工程(2018)	控制性低強度回填材料	1.依據 AASHTO 柔性鋪面設計指南，以本手冊參考配比所求得之結構層強度係數(ai)約 0.22。 2.以鋪面現況、鋪面平坦度與軸重壽命(W18)進行評估，成效良好。採用全煤灰水泥固化工法應用於道路基底層可符合 AASHTO93，具施工簡單、降低工程造價、資源循環再利用與節能減碳特點，值得推廣應用。

表 3-4 國內案例內容摘要彙整表-無筋預鑄混凝土塊

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
無筋預鑄混凝土塊	台電高煤灰摻量無筋預鑄混凝土消波塊(2019)	混凝土	1.本案例前導試驗使用膠結材量約 400 kg/m^3 (水膠比小於 0.5)，飛灰佔總膠結材比率 36%，底灰替代砂粒料比率達 100%，結果顯示 28 天抗壓強度可穩定超過 240 kgf/cm^2。 2.後續製作實體消波塊，將其置放海域，進行海水沖刷作用力、乾濕循環作用與海水硫酸鹽作用等真實海域環境影響條件的測試。將置放約半年的實體消波塊吊上來做表面檢視，消波塊表面附著藤壺、管蟲與少量螺類，表面無混凝土脹裂、粒料脫落或具明顯孔洞的現象。 3.檢視硬固性質、工作性質、耐久性質，顯示高煤灰摻量無鋼筋混凝土具實際可行性。

表 3-5 國內案例內容摘要彙整表-人工魚礁

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
人工魚礁	台電飛灰魚礁(1986~1988)	混凝土	1.將製成之飛灰魚礁投放於北部萬里海域、南部興達海域，供作調查。 2.於煤灰礁區使用魚群探測器探查礁區之魚群量及分佈。結果發現礁體的周圍水域有濃厚的魚群分佈，魚群密度指數介於$1.2 \times 10^{-4} \sim 7.4 \times 10^{-3}$之間，出現於礁區的魚類組成具經濟性價值。另作礁區及非礁區的比較作業試驗，礁區的魚獲率較非礁區至少可增加 61%以上。 3.根據 2 年來的潛水調查結果及當地漁民於煤灰礁區附近之可觀魚獲量來看，煤灰礁區的確發揮了誘集魚類之效果，不僅有效培育漁業資源，也落實電廠副產物的循環再利用。
	台電煤灰空心磚魚礁(2019 至今)	水泥製品 (試驗用)	1.本案例之人工魚礁為煤灰空心磚型態，以底灰為主要素材，搭配適當水泥及飛灰混和，於 2019 年投放至東北角廢棄九孔池。 2.放置約 2 個月後，空心磚本體已開始被殼狀珊瑚藻所覆蓋並長出大型藻類，顯示底灰空心磚與海洋生物環境之相容性甚高。隔年 7 月初發現空心磚本體幾乎已全部被殼狀珊瑚藻所覆蓋，也發現海洋生物利用煤灰磚情形，顯示空心磚用於營造海洋生物棲地的潛力相當高。

3.1.1 工程填地

台電林口電廠一期工程填地(煤灰)^[22]

1. 工程背景

根據經濟部能源署統計，112 年燃煤發電占總發電量約 42%，而煤灰為燃煤電廠最大量的副產物。經統計可知，預拌混凝土為煤灰最主要的再利用途徑之一，然而煤灰市場需求隨整體經濟表現與營建業景氣循環而有所波動，因此，在高度不確定性下，為維持燃煤電廠的穩定供電，必須規劃有足夠容量的工程填地以收容無法及時再利用的煤灰。林口電廠第一期工程填地占地約 20 公頃，約可容納 125 萬 m^3 之煤灰，煤灰主要經由密閉管路，以水力方式泵送至工程填地，排灰情形如圖 3-1 所示。



圖 3-1 林口電廠排灰情形(台電內部資料)

2. 工程或環境效益

林口電廠一期工程填地於填築完成後，規劃作為室內筒式煤倉使用，因此將煤灰填築區劃分 10 個工區，以礫石樁進行地盤改良，施工過程如圖 3-2 所示，改良後之圓錐灌入試驗(Cone Penetration Test, CPT)情形如圖 3-3 所示。

改良後室內筒式煤倉完工照片如圖 3-4 所示，由上可知，林口電廠一期工程填地除了發揮調節煤灰市場功能及確保電廠順利發電外，在填築完成後，只要再經適當地盤改良，也能有效規劃再利用。

民國 113 年第 3 季林口電廠環境監測結果如表 3-6 所示^[23]，透過空氣品質、河川水質、海域生態、海域水質、陸域動物生態、陸域植物生態、工程填地地下水之監測，由監測結果顯示林口電廠工程填地擴建及煤灰填築對環境之影響不明顯。



圖 3-2 礫石樁施工情形(台電內部資料)



圖 3-3 圓錐灌入試驗情形(台電內部資料)

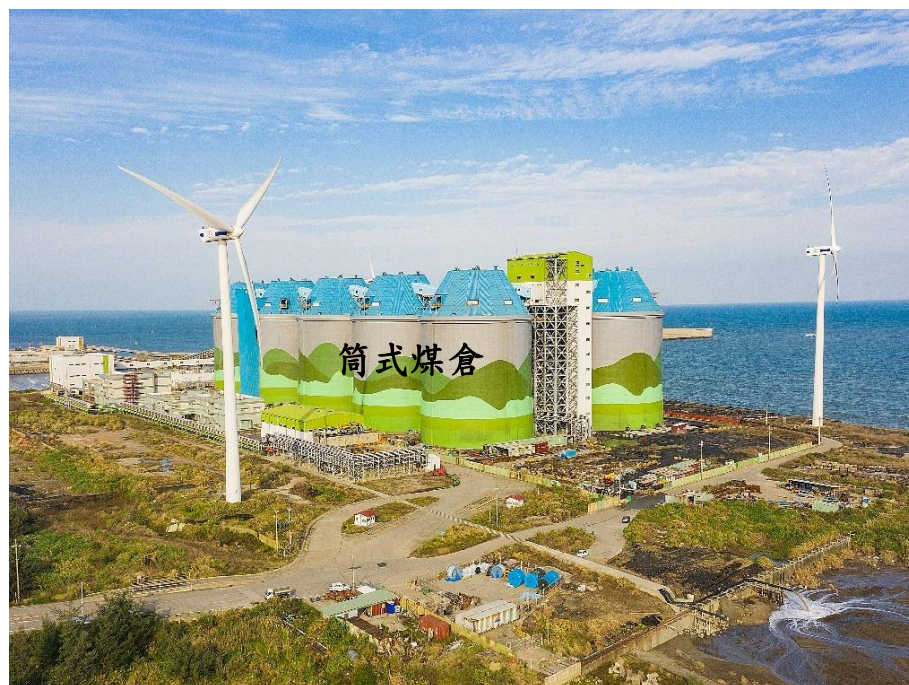


圖 3-4 林口電廠室內筒式煤倉(台電內部資料)

表 3-6 林口電廠環境監測(民國 113 年 Q3)^[23]

監測種類	監 測 項 目	頻 度	說 明
空氣品質	總懸浮微粒(TSP)、懸浮微粒(PM ₁₀)、二氧化硫(SO ₂)、二氧化氮(NO ₂)、一氧化碳(CO)、風向及風速	每季進行一次連續 24 小時監測	符合空氣品質標準
河川水質	pH、溶氧量、生化需氧量、大腸桿菌群、懸浮固體、氨氮	每季進行一次採樣調查	輕度污染，本河段水質主要係受上游背景水質影響。
海域生態	浮游植物、浮游動物、底棲生物、魚卵及仔稚魚	每季進行一次採樣調查	歷年無明顯變化
海域水質	pH、濁度、溶氧量、生化需氧量、葉綠素 a、懸浮固體、鹽度、化學需氧量、水溫、硫酸鹽	每季進行一次採樣調查	各測站之 pH、溶氧及生化需氧量測值均符合乙類海域環境分類及海洋環境品質標準
陸域動物生態	鳥類	每兩季進行一次調查，每次調查時間至少四天三夜	歷年無明顯變化
陸域植物生態	植物	每兩季進行一次調查	歷年無明顯變化
工程填地地下水	懸浮固體、化學需氧量、重金屬鋅、鎘、鉛、銅、汞等項目	每季測定一次	符合地下水污染管制標準

註：詳細資料可參考附件 2 林口電廠更新擴建計畫(113 年度 Q1~Q3)

(監測網址 <https://www.taipower.com.tw/2289/2363/2391/52641/52807/normalPost>)。

台電林口電廠二期工程填地(煤灰) [64]

1. 工程背景

林口電廠第二期工程填地位於新北市林口區海濱地區，於林口電廠第一期灰塘之東北側，約沿水深 4 公尺之等深線，向東延伸約 641 公尺至嘉寶溪出海口附近，再轉折向案延伸至岸邊(詳圖 3-5)，主要之回填材料為電廠再利用後剩餘之煤灰，灰塘占地約 21 公頃，約可容納 142 萬 m^3 之煤灰，煤灰主要經由密閉管路，以水力方式泵送至工程填地。



圖 3-5 林口電廠二期工程填地場址

民國 113 年第 3 季林口電廠環境監測結果如表 3-7 所示^[23]，透過空氣品質、河川水質、海域生態、海域水質、陸域動物生態、陸域植物生態、工程填地地下水之監測，由監測結果顯示林口電廠工程填地擴建及煤灰填築對環境之影響不明顯。

表 3-7 林口電廠環境監測(民國 113 年) [23]

監測種類	監 測 項 目	頻 度	說 明
空氣品質	總懸浮微粒(TSP)、懸浮微粒(PM ₁₀)、二氧化硫(SO ₂)、二氧化氮(NO ₂)、一氧化碳(CO)、風向及風速	每季進行一次連續 24 小時監測	符合空氣品質標準
河川水質	pH、溶氧量、生化需氧量、大腸桿菌群、懸浮固體、氨氮	每季進行一次採樣調查	輕度污染，本河段水質主要係受上游背景水質影響。
海域生態	浮游植物、浮游動物、底棲生物、魚卵及仔稚魚	每季進行一次採樣調查	歷年無明顯變化
海域水質	pH、濁度、溶氧量、生化需氧量、葉綠素 a、懸浮固體、鹽度、化學需氧量、水溫、硫酸鹽	每季進行一次採樣調查	各測站之 pH、溶氧及生化需氧量測值均符合乙類海域環境分類及海洋環境品質標準
陸域動物生態	鳥類	每兩季進行一次調查，每次調查時間至少四天三夜	歷年無明顯變化
陸域植物生態	植物	每兩季進行一次調查	歷年無明顯變化
工程填地地下水	懸浮固體、化學需氧量、重金屬鋅、鎘、鉛、銅、汞等項目	每季測定一次	符合地下水污染管制標準

台電台中電廠一期工程填地(煤灰)^[24]

1. 工程背景

煤灰為燃煤電廠的主要副產物，台中電廠煤灰年產量超過 100 萬噸。由於煤灰市場需求與營建業景氣有高度相關性，面臨如此不確定性，台中電廠必須規劃足夠容量的工程填地，以收容無法及時再利用的煤灰。因此，台中電廠向台中港務分公司承租一期工程填地用地，於 1991 年建造，歷經 4 年 4 個月，於 1996 年正式啟用，總容積約 760 萬 m^3 ，煤灰採水力出灰方式，如圖 3-6 所示。



圖 3-6 台中電廠一期工程填地排灰情況(台電內部資料)

2. 工程或環境效益^[23, 24]

台中電廠一期工程填地分區填築完成後，即配合台中港港埠用地需求，以擠壓砂樁進行地盤改良(如圖 3-7)，改良後的區域每隔 1.00 m 深度進行標準貫入試驗(SPT)(如圖 3-8)，符合交還港務公司土地使用標準。由此案例可知，台中電廠煤灰回填區經適當改良後，也能有效利用。

由於台電公司工程填地之圍堤斷面結構，均設有堤後濾層設施，

以達到攔灰透水之功能。電廠煤灰透過密閉管路，以水力排灰方式泵送至工程填地，當填築至規定高程並完成地改後，表面會有覆土層或以防塵網覆蓋，可有效抑制塵揚發生。

113 年第 3 季台中發電廠環境監測結果如表 3-8 所示，透過空氣品質、水質、海域生態、鳥類、農作物、地下水質監測，結果顯示台中電廠工程填地擴建及煤灰填築對環境無明顯影響。



圖 3-7 擠壓砂樁施工情形^[24]

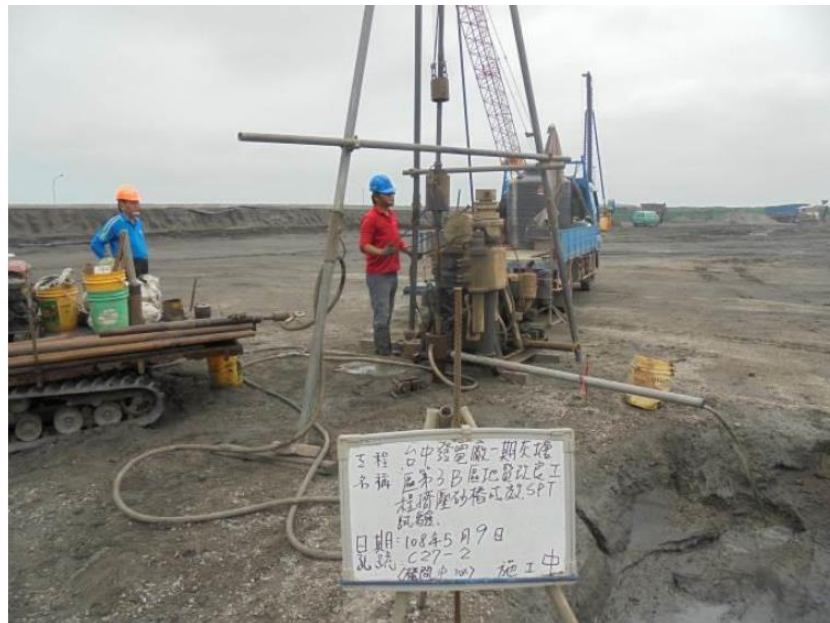


圖 3-8 標準貫入試驗^[24]

表 3-8 台中電廠環境監測(民國 113 年 Q3)^[23]

監測種類	監 測 項 目	頻 度	說 明
空氣品質	連續自動環境空氣品質監測：SO ₂ 、NO _x 、PM ₁₀ 、PM _{2.5} 、地面風速及風向	連續 24 小時監測	符合空氣品質標準
水質	水溫、pH、懸浮固體、生化需氧量、化學需氧量、溫排水之水溫	水質調查每季一次， 水溫監測每月一次	各監測項目測值均符合乙類海域海洋環境品質標準
海域水質	溫度、溶氧量、pH、殘餘氧化劑、懸浮固體、硝酸鹽、亞硝酸鹽、鋅、鉛、汞、鎘、鉻、六價鉻、砷	每季一次	各項環境參數屬一般海域之正常範圍之內，且符合相關環境標準。
海域生態	植物性浮游生物、動物性浮游生物、底棲動物	每年採樣兩次，底棲生物監測頻率每月一次	歷年無明顯變化
鳥類	鳥類	每月一次	歷年無明顯變化
農作物	植體分析、土壤分析	依作物生產季節而定，每季一次	歷年無明顯變化
地下水質	pH、溫度、濁度、懸浮固體、總溶解性固體、化學需氧量、生化需氧量、重金屬(總汞、鎘、鉛、六價鉻、砷)、氯、鈉、鎂、鈣、鉀、氟	每季測定一次	與歷季變化趨勢大致相符

註：詳細資料可參考附件 3 台中電廠環境監測(民國 113 年 Q1~Q3)

(監測網址 <https://www.taipower.com.tw/2289/2363/2391/52641/52857/normalPost>)。

台電台中電廠一期工程填地煤灰擠壓回填試驗(煤灰)^[25]

1. 工程背景

台中電廠一期工程填地為水力排灰，回填物由飛灰與底灰所組成，為了解當時的地層情況，於擠壓回填試驗前，選取 2 個鑽探點 (S-SPT-1 與 S-SPT-2) 進行初步地質調查(圖 3-9)，調查結果如圖 3-10 所示。由圖 3-10 可知，煤灰地層約由地表面至地下 14 公尺之深度，地下水位約為地表下 0.65~3.13 公尺處。因採水力排灰緣故，煤灰層之物理性質將隨著排放時期與距離有所不同。其中，0~6 米處，STP-N 值大致上高於 5，但超過 9 米後，其 SPT-N 接近 0。根據統一土壤分類，0~3 米接近無塑性粉土砂(SM)，4~14 米，為低塑性粉土(ML)，具有高含水特性，土層之孔隙率大，力學性質(剪力強度、滲透性與壓縮性)和沉泥相似。因此，為解決工程填地地質不良之特性，使用煤灰拌合其他材料進行擠壓回填現地試驗。

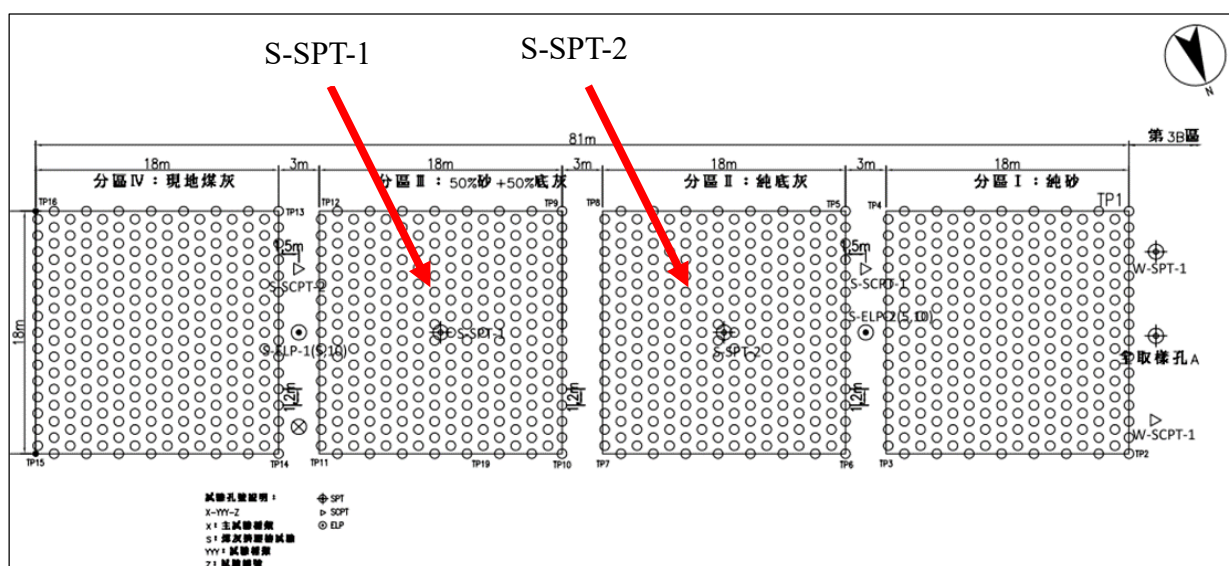


圖 3-9 擠壓回填試驗前之地質調查孔位置平面圖^[25]

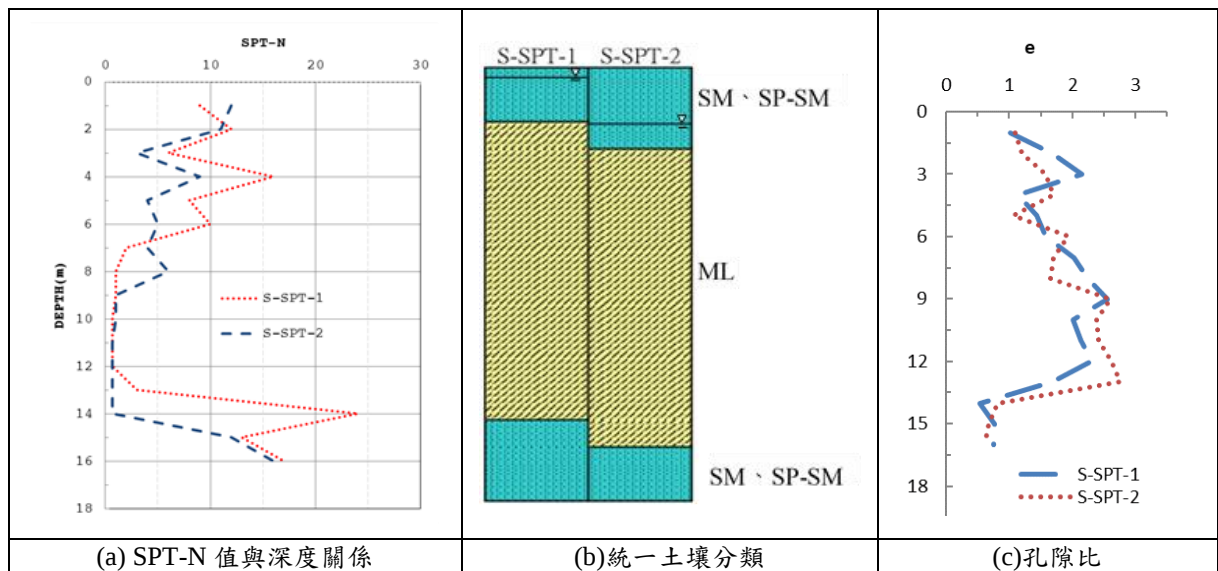


圖 3-10 擠壓回填試驗前之地質調查孔之地質調查結果^[25]

2. 工程或環境效益

本試驗之試驗區，將其區分為四區(如圖 3-11 所示)，I 區為一般砂，II 區為底灰，III 區為 50%砂+50%底灰，IV 區為現地煤灰，將上述材料擠壓進入工程填地內後，由圖 3-12 可發現，一般砂於 7~8 米處，SPT-N 有明顯提升外，其他不管是何種材料，其 SPT-N 值此段未有較明顯之提升，但超過 7~8 米處後，不管何種材料皆無法提升，但單就就軟弱層來看，孔隙率有降低之趨勢(如圖 3-13)，由此可知，雖然本試驗對於工程填地地層無明顯有效的改善，但使用擠壓工法可增加工程填地填築煤灰容量。

早期工程填地填築方式皆以水力方式直接排放，但也造成地質軟弱的情形。經由本試驗，雖無法看出煤灰對地層有明顯改良效果，但卻提供軟弱地質增填煤灰的可能性，也能減少因工程填地建造施工時，所產生的碳排放。

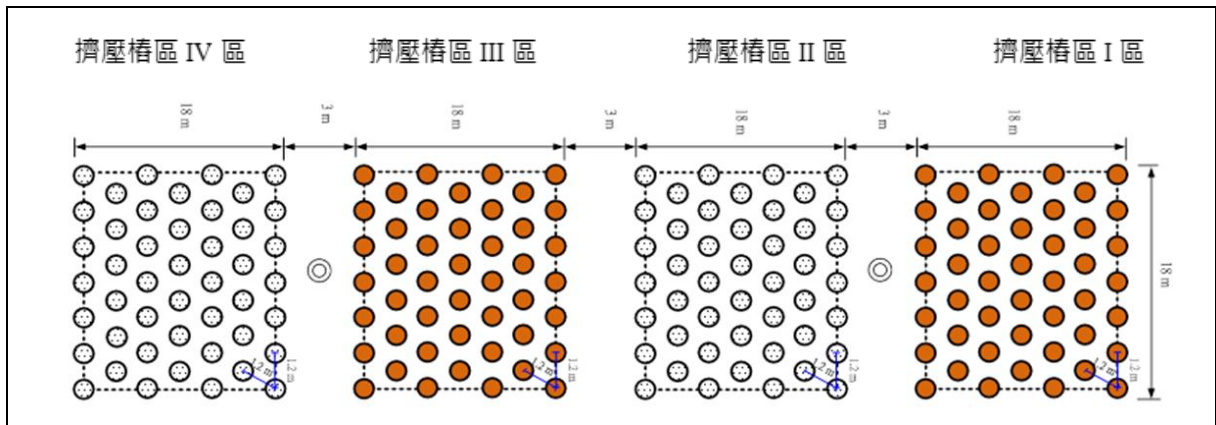


圖 3-11 煤灰擠壓樁試驗區域^[25]

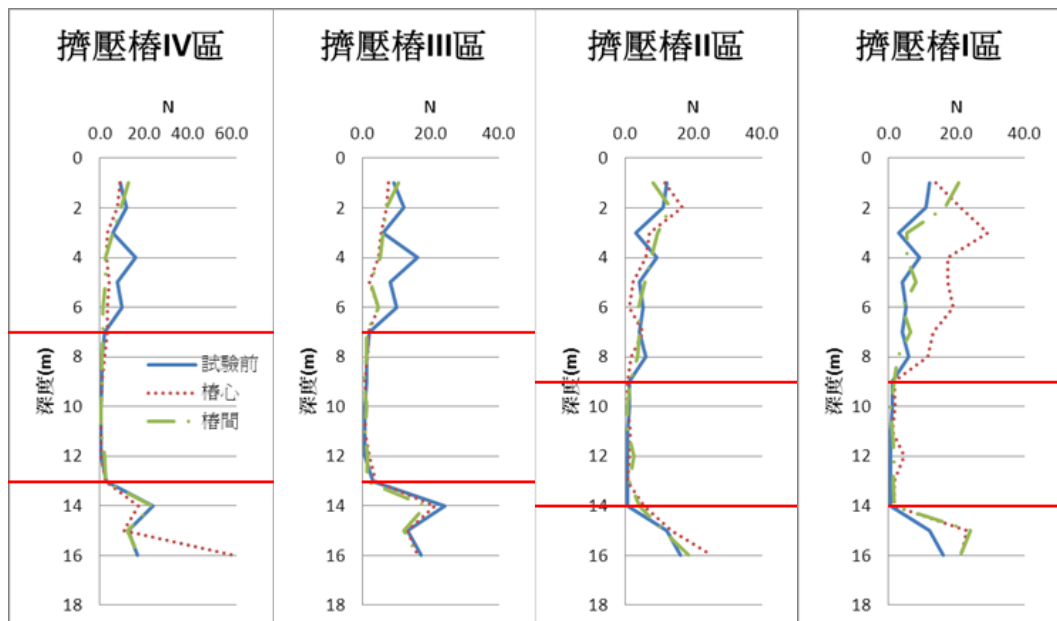


圖 3-12 擠壓樁各區深度與 SPT-N 關係圖^[25]

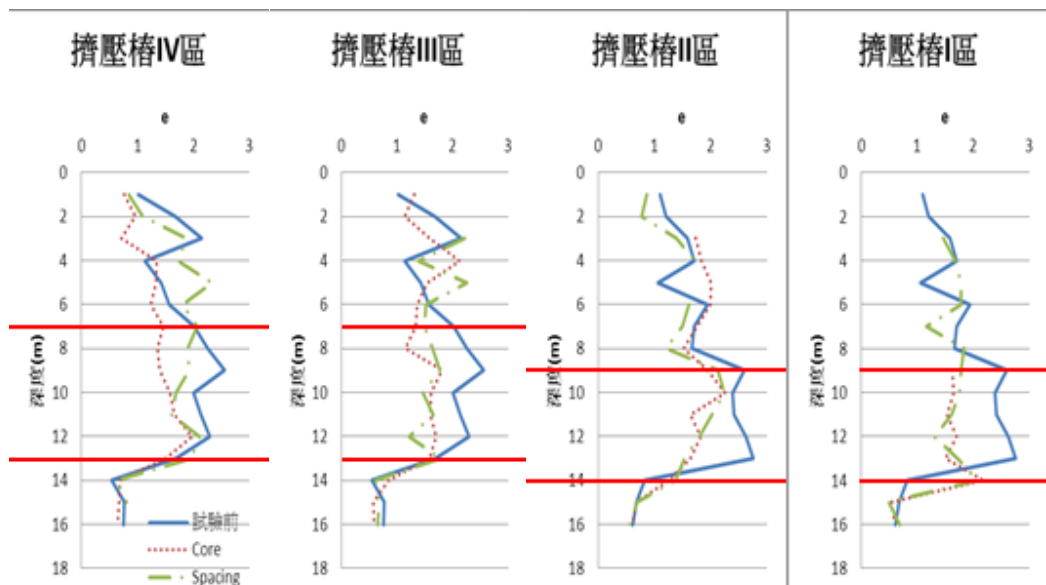


圖 3-13 擠壓回填各區深度與孔隙比關係圖^[25]

3.1.2 隔堤

台電彰濱工業區線西隔堤工程(煤灰)^[26, 27]

1. 工程背景

台電公司規劃購買彰濱工業區線西西 3 區以作為台中電廠煤灰緊急填築用地，範圍如圖 3-14 所示，於工程範圍東側築堤以圈圍一封閉水域，提供填築煤灰使用。為配合政府推動「永續公共工程－節能減碳」政策，協助電廠去化煤灰並作為內部推廣煤灰 CLSM 新用途之示範工程，故研發利用全煤灰 CLSM 構築隔堤的技術，希望就近利用電廠產出的煤灰，拌合少量之固化材料，於淺層海水下築堤，取代傳統堆砂堤之設計。

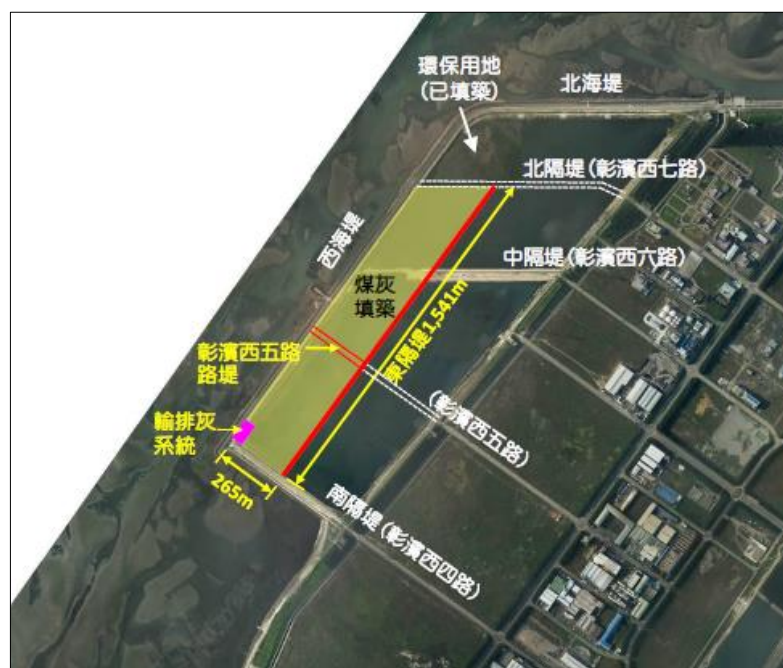


圖 3-14 築堤工程施工區域圖^[26]

為確保將來隔堤水下全煤灰 CLSM 澆置施工品質，台電公司於 2009 年至 2012 年執行數項隔堤相關研究，包括：

- (1) 全煤灰 CLSM 材料於淺層海水下的最佳構築配比試驗^[28]

針對台中電廠煤灰進行全煤灰 CLSM 配比設計試驗，確立

適於淺層海水環境的配比，試驗項目包括坍流度、管流度、泌水、凝結時間、單位重、抗壓強度、劈裂強度、硫酸鹽侵蝕、單向度壓密、海水乾濕循環與波浪作用、風砂沖刷作用、水中澆置等。

經由前置試驗，且基於經濟性與設計強度考量，本試驗選取 C8540 及 C10562 兩組配比，如表 3-9 所示，試驗結果摘要如下：

- a. 管流度都在 150mm 以上，符合 CLSM 高工作性的要求。
- b. 在 28 天抗壓強度部份，強度分別為 36.8kgf/cm² 及 37.1kgf/cm²，而使用海水拌合之強度較使用淡水拌合者高約 30%，使用輕質底灰者之強度較使用重質底灰者低。
- c. 28 天劈裂強度分別為 4.32 kgf/cm² 及 4.14 kgf/cm²，劈裂強度發展與抗壓強度有正相關。
- d. 兩組試體經過 15 次的侵蝕循環，未見有崩壞情形，顯現對硫酸鹽類侵蝕耐性佳。
- e. 經過 90 天海水乾溼循環與波浪作用，對試體表面造成的影響甚小，且海水中的氯離子加速了混凝土中水泥強度的發展，所以整體強度較一般養護下之試體高。
- f. 經過 90 天的風砂試驗，扣除水分散失與泌水造成脆弱表層之重量損失部分，重量變化僅約 0.5%，說明試體磨損甚小。
- g. 飛灰用量較多之全煤灰 CLSM 配比較為濃稠，在水中澆置時，具有較佳抗分離能力。

表 3-9 隔堤參考配比表^[28]

編號	配比量(kg/m ³)				試驗結果			
	水泥	飛灰	底灰	水	單位重(kg/m ³)	管流度(mm)	28 天抗壓強度(kgf/cm ²)	28 天劈裂強度(kgf/cm ²)
C8540	103	730	487	409	1,729	155	36.8	4.32
C10562	124	450	734	413	1,721	165	37.1	4.14

(2)全煤灰 CLSM 材料於淺層海水下澆置方式現地驗證^[29]

為延續上述(1)的試驗，係於林口電廠工程填地進行全煤灰 CLSM 於淺層海水下澆置之現地試驗，以驗證其澆置成效。現地試驗採用東隔堤配比及地改配比(如表 3-10)，進行四種海水下澆置試驗，如圖 3-15 所示，其中(A)是預拌車將東隔堤配比倒入卡車內待初凝後直接傾倒澆置，(B)是以預拌車將東隔堤配比直接澆置，(C)是東隔堤配比以特密管澆置，(D)以預拌車將地改配比直接澆置，現場澆置情形如圖 3-16 所示。

表 3-10 現地試驗採用東隔堤配比及地改配比^[26, 30]

編 號	配比量(kg/m ³)				單位重(kg/m ³)
	水泥	飛灰	底灰	水	
東隔堤配比	124	450	734	413	1,721
地改配比	70	450	734	413	1,667

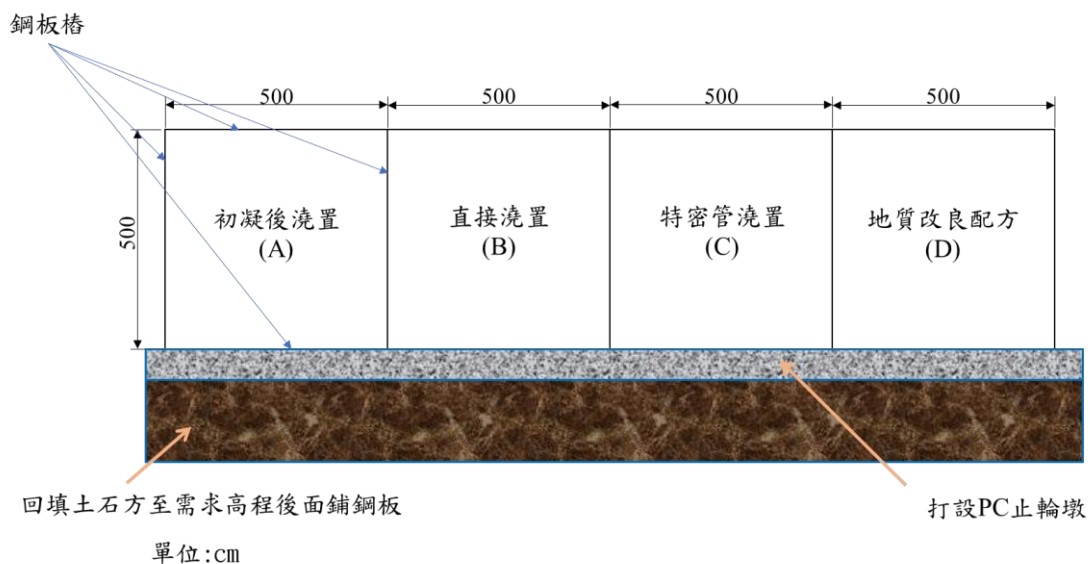


圖 3-15 四種海水下澆置試驗平面示意圖^[29]



圖 3-16 現場澆置情形^[26, 29]

為了評估各種澆置方式的實際效益，以作為未來施工規範之依據，特針對現地四種澆置方式，進行鑽心取樣以了解澆置的均勻性及其品質，鑽取位置編號如圖 3-17 所示，本現地試驗結果重點摘要如下：

- a. 東隔堤配比產製穩定性良好，優於地改配比，但拌合前須確認當天底灰含水量。
- b. 以(A)方式澆置，全煤灰 CLSM 可能有些分離現象，但透過後續的膠結反應只要給予足夠的時間還是能達到需求性能。
- c. 採(B)直接澆置與(D)地改直接澆置兩區則分別因施工方式或水泥含量偏低而使改良品質有局部不佳情況，但鑽心取樣完整之試體，強度均能符合契約對抗壓強度的要求。
- d. 由四種澆置方式的現地鑽心取樣分析，顯示(C)特密管澆置方式之品質最佳。

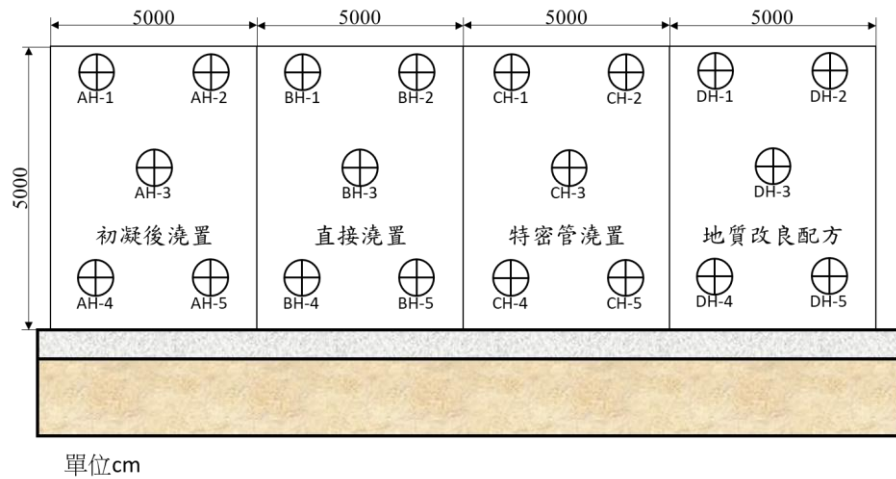


圖 3-17 澆置單元鑽心取樣位置平面示意圖[26]

2. 工程或環境效益

全煤灰 CLSM 築堤工程施工地點位於彰濱工業區線西西三區，此築堤屬於新增的東隔堤，施工區域圖如圖 3-14 所示，主要施工方式採用全煤灰 CLSM 預鑄方塊做為提供澆置時的圍擋設施。東隔堤長度約為 1,541 公尺，堤寬度約為 20 公尺，堤頂高度為了能配合未來計畫煤灰填埋至 EL.+4.70 公尺，並鋪設 30 公分厚礫石覆土層至高程 EL.+5.00 公尺，東隔堤斷面如圖 3-18 所示。

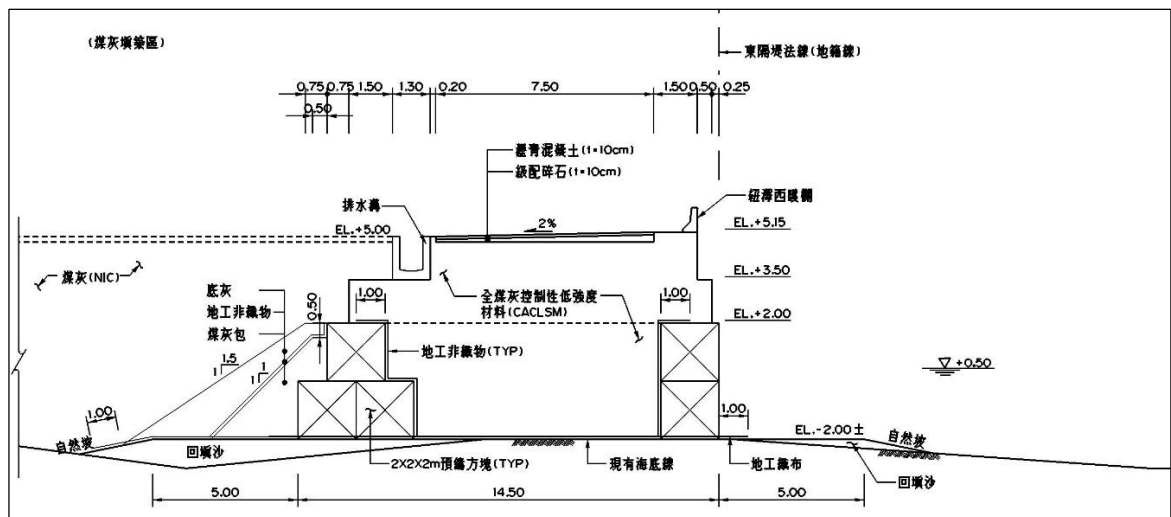


圖 3-18 東隔堤斷面圖[26]

此築堤工程規劃以全煤灰 CLSM 預鑄方塊做為堤心澆置時的圍擋設施，因此先行製作 2 塊全煤灰 CLSM 預鑄方塊，瞭解全煤灰 CLSM 可供吊放時程。全煤灰 CLSM 預鑄方塊配比如表 3-11 所示，俟方塊養護數日即進行拆模，澆置 14 天後已能順利吊掛(含吊舉及反轉)，顯示吊筋裹握強度大於吊放所產生之應力，如圖 3-19 所示。經過試吊作業後，再全面展開預鑄方塊製作與施工。本工程全煤灰 CLSM 預鑄方塊模板組立、全煤灰澆置搗實、移吊儲放、吊放施工過程如圖 3-20 與圖 3-21 所示。

表 3-11 預鑄方塊配比表^[26]

編號	配比量(kg/m ³)					試驗結果				
	水泥	飛灰	底灰	水	藥劑	單位重(kg/m ³)	管流度(mm)	抗壓強度(kgf/cm ²)		
								7 天	14 天	28 天
1	114	426	1,095	342	0	1,977	17	20.67	25.00	42.67
2	114	836	558	342	1	1,851	18	28.67	32.33	43.00



圖 3-19 全煤灰 CLSM 預鑄方塊現場試吊情形(澆置後 14 天)^[26]



(a) 鋼模組立 1



(b) 鋼模組立 2



(c) 預埋吊筋組立固定



(d) 全煤灰 CLSM 澆置



(e) 全煤灰 CLSM 震動搗實



(f) 全煤灰 CLSM 抹平鏟光

圖 3-20 全煤灰 CLSM 預鑄方塊澆置及吊放施工過程(1/2)^[26]



圖 3-21 全煤灰 CLSM 預鑄方塊澆置及吊放施工過程(2/2)^[26]

配合築堤工程堤心之澆置時程，進行全煤灰 CLSM 預鑄方塊吊放，吊車於預鑄方塊置放場將預鑄方塊吊放至載運卡車上，載運卡車由預鑄方塊置放場運至預定吊放單元之處。當卡車載運至吊放單元之處後，再由另一部吊車將預鑄方塊置放於預定的位置。吊放作業期間吊車及卡車是不間斷的運作，其中工作人員協助調整吊放位置，待預鑄方塊吊放完

成之後，即可進行堤體澆置作業。

1. 下堤體澆置

東隔堤下堤體澆置前會先做預鑄方塊的吊放及地工織布的鋪設，做為澆置時的圍擋設施，全煤灰 CLSM 堤體澆置之配比如表 3-12 所示，澆置時使用設備主要包括預拌車及灌漿車，當澆置完成後，施工人員馬上進行面抹平作業，使澆置面能夠平整，俟抹平作業完成後，即進行養護作業，如圖 3-22 所示。

表 3-12 東隔堤堤體配比表^[26]

編號	配比量(kg/m ³)					試 驗 結 果				
	水泥	飛灰	底灰	水	藥劑	單位重(kg/m ³)	管流度(mm)	抗壓強度(kgf/cm ²)		
								7 天	14 天	28 天
1	103	730	487	409	0	1,729	18	28.67	33.67	45.00
2	124	450	734	416	0	1,724	18	30.67	37.33	48.33

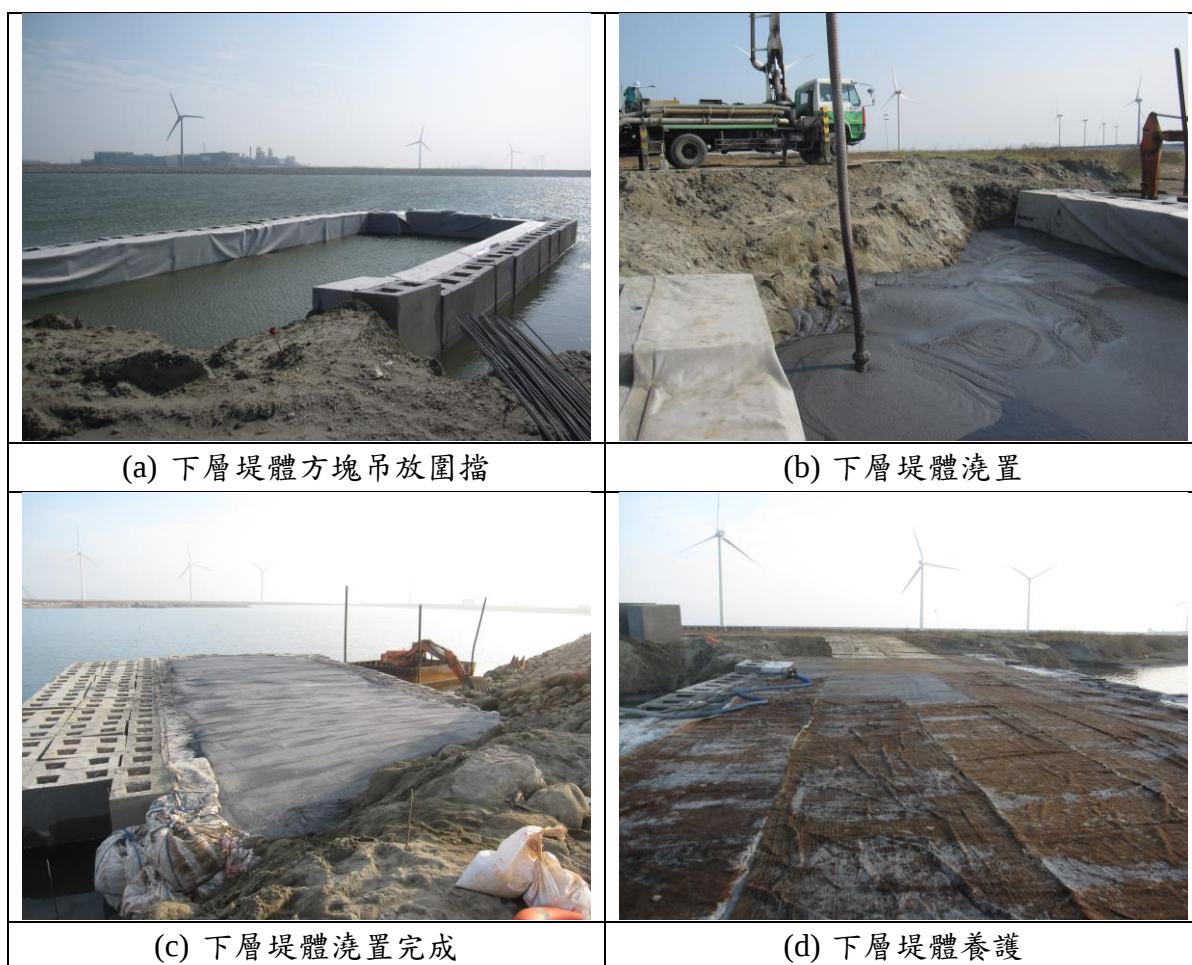


圖 3-22 東隔堤下堤體澆置^[26]

2. 上堤體澆置

上堤體澆置前施作木製模板以做為澆置時的圍擋設施，模板可重複使用，全煤灰 CLSM 澆置時使用設備包括預拌車及灌漿車。如同下堤體澆置，當全煤灰 CLSM 澆置完成後，施工人員馬上進行面抹平作業，使澆置面能夠平整，俟抹平作業完成後，即進行養護作業，如圖 3-23 所示。線西西三區東隔堤完工圖如圖 3-24 所示。



圖 3-23 東隔堤上堤體澆置^[26]

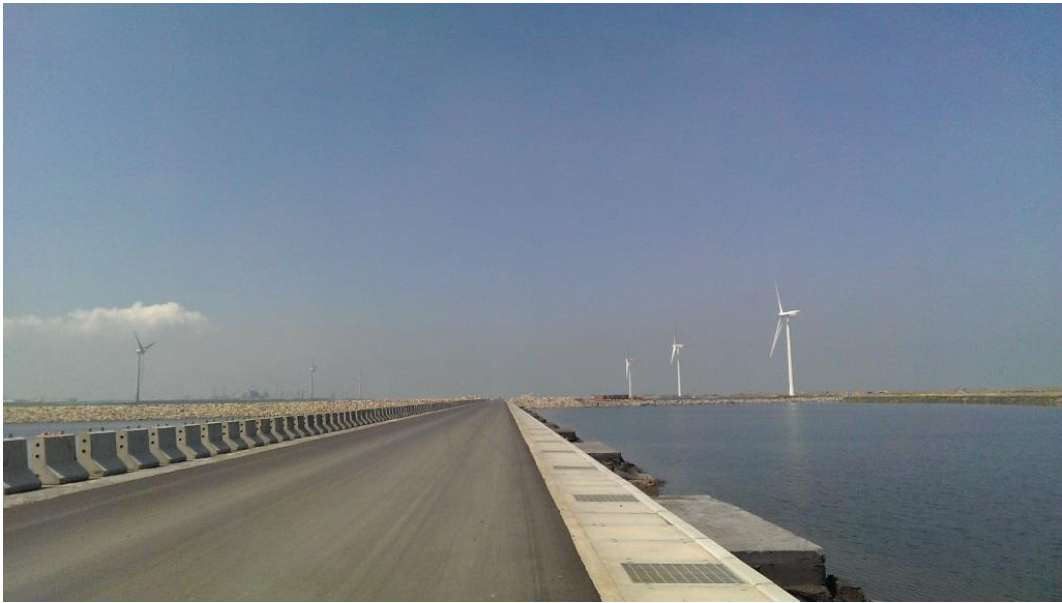


圖 3-24 線西西三區東隔堤完工圖^[26]

3. 鑽心取樣作業

依據築堤工程的全煤灰控制性低強度回填材料規範第 2.3.4 全煤灰 CLSM 水中澆置施工作業及品質標準訂定的規定(台電, 2009), 全煤灰 CLSM 水中澆置的品質控管, 以 28 天齡期鑽心試體的取樣率及抗壓強度做為施工品質管制依據, 其強度不得低於 10 kgf/cm^2 。

為驗證全煤灰 CLSM 於海水中澆置後, 並持續浸於海水中 28 天的抗壓強度, 自澆置全煤灰 CLSM 日起算計 28 天後, 由承包商會同工程單位進行現場鑽心取樣, 如圖 3-25 所示, 取樣位置概略均勻分布, 而築堤工程鑽心取樣位置平面圖, 如圖 3-26 所示。

鑽心試體抗壓強度試驗成果顯示, 抗壓強度試驗值均高於工程規範要求強度 10 kgf/cm^2 , 若以隔堤回填料來看, 此試驗值過於規範要求, 應可調整此 CLSM 的配比, 降低水泥用量, 除可降低施工成本外, 亦可降低二氧化碳排放量。

民國 113 年第 3 季線西西三區環境監測結果如表 3-13 所示, 透過空氣品質與海域水質之監測, 顯示線西隔堤建置及煤灰填築對環境無明顯影響。

本案例煤灰作為隔堤兩側之預鑄混凝土方塊，並以全煤灰 CLSM 澆置其間，形成穩定之隔堤結構，此工程共使用底灰約 12.6 萬噸，飛灰約 8.6 萬噸，除可減少外購石料及一般混凝土使用量，提升資源再利用之成效外，兼具降低天然石料開採對生態環境衝擊之優點，可有效解決台灣砂石短缺及環保問題，同時可減輕煤灰處置場地取得的壓力，達到經濟、環保的雙重效益，符合資源永續利用的原則及綠工程目標，對環境品質維護具有正面效益。

此工程亦為國內將全煤灰 CLSM 運用於築堤工程的首例，具工程示範意義，藉由完整的施工過程記錄及成效展現，可做為未來類似工程之參考，值得注意的是，此案例中水面下澆置深度為 2.5m，施工過程利用泵送車搭配軟管進行水面下澆置，避免物料分離影響工程品質。

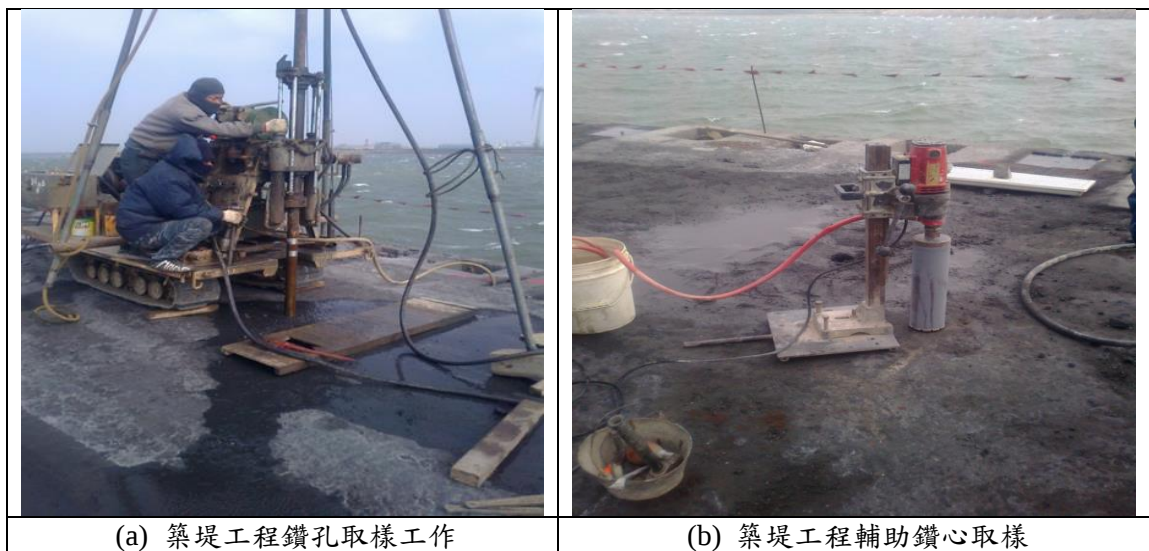


圖 3-25 築堤工程鑽孔取樣工作^[26]

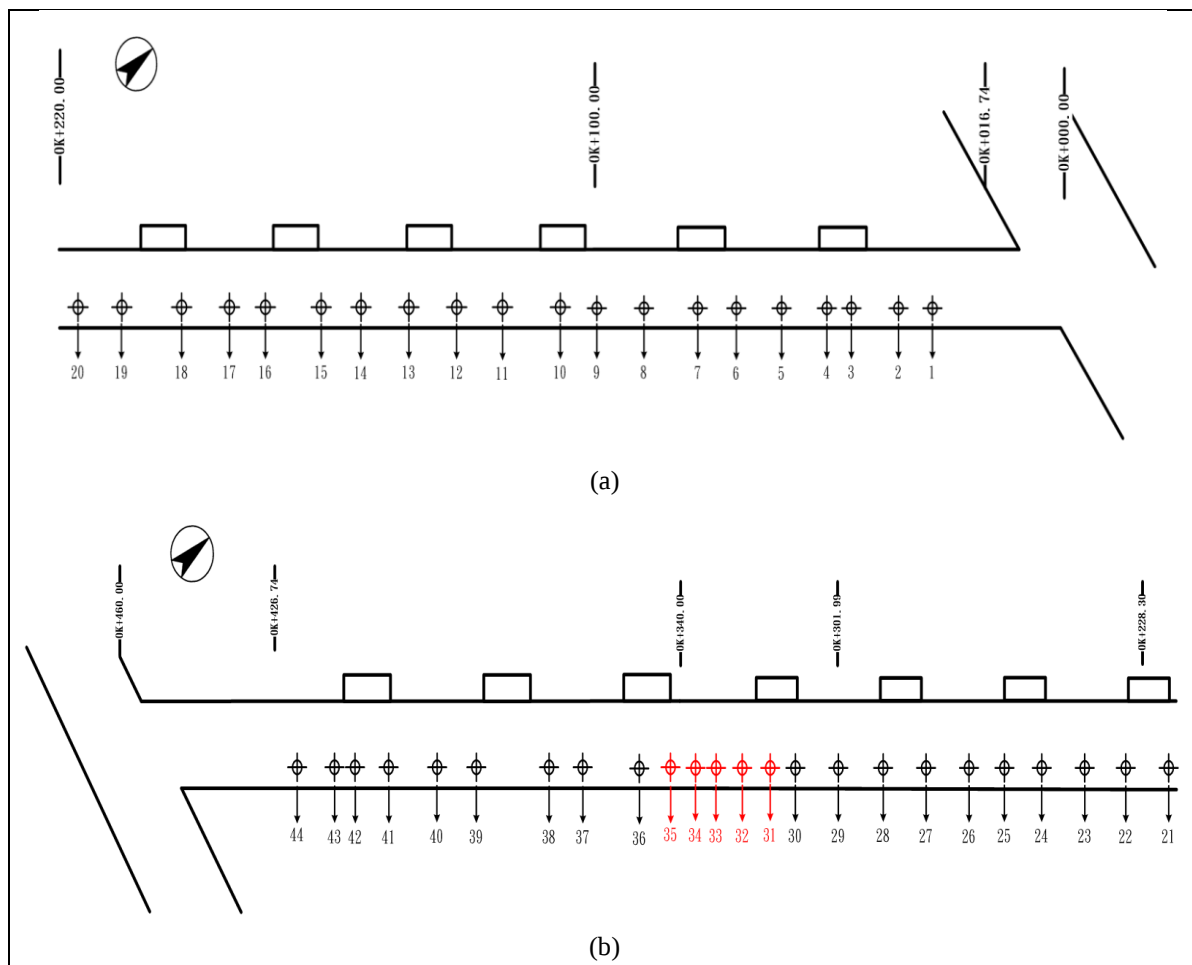


圖 3-26 築堤工程鑽心取樣位置平面圖^[26]

表 3-13 線西隔堤之環境監測(民國 113 年 Q3)^[65]

監測種類	監測項目	頻度	說明
空氣品質	風向、風速、總懸浮微粒(TSP)、PM ₁₀ 、NO ₂ 、SO ₂ 、CO、PM _{2.5} 、地面風速及風向	每季一次	符合法規標準
海域水質	水溫、透明度、溶氧量(DO)、鹽度、生化需氧量、pH、銅、硒、鋅、鉛、鎘、鉻、汞、砷	每季一次	各監測項目測值均符合乙類海域海洋環境品質標準

註：詳細資料可參考附件 4 線西西三區環境監測(民國 113 年)。
(監測網址 <https://www.moe.gov.tw/ema/BE0AD34C04AFEF4B>)。

3.1.3 港灣道路基底層或施工便道

台電通霄電廠柔性道路工程(煤灰)^[31]

1. 工程背景

台電於 2010 年首將全煤灰水泥固化物應用於大林電廠臨時煤場之環場周邊柔性道路工程，斷面示意如圖 3-27 所示，經重車頻繁輾壓後路面品質仍維持良好，遂於 2011 應用於大林更新計畫之臨時停車場鋪面工程及廠區道路工程，大林電廠臨時煤場道路與臨時停車場拆除後，可發現基底層仍完好。

為擴大本公司在道路基底層之示範案例，故配合 2018 年通霄電廠更新計畫廠區道路施工作業，選定一段約 250m 道路，將基底層採用全煤灰水泥固化物，取代碎石作為基層與底層之傳統工法，並進行相關性能評估。

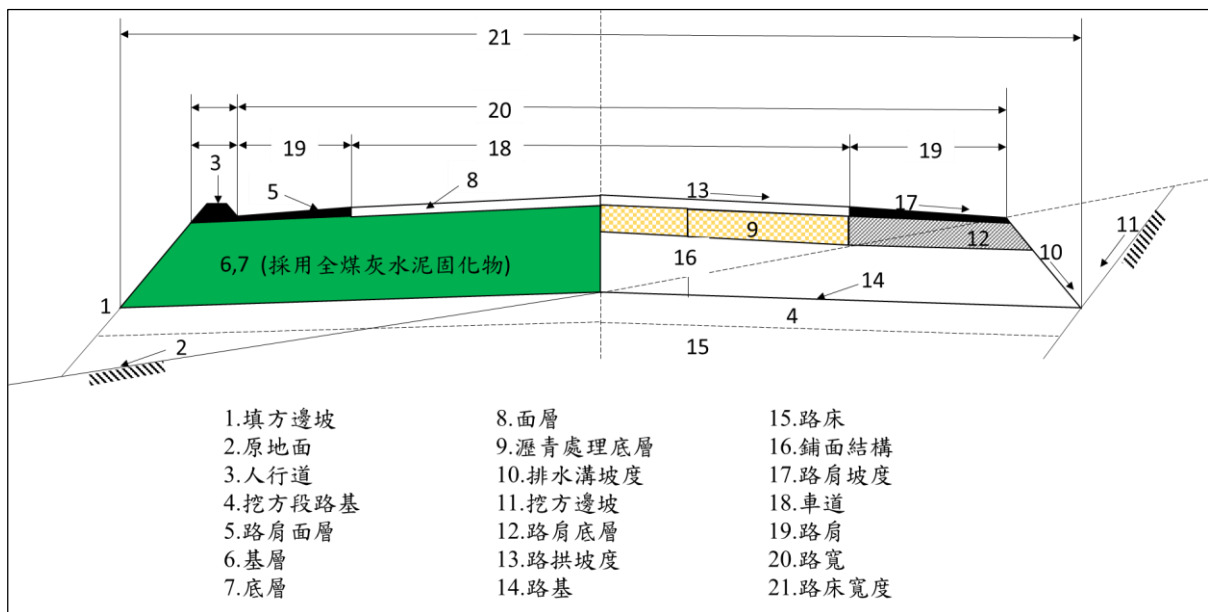


圖 3-27 全煤灰水泥固化物道路斷面示意圖^[31]

2. 功能成效

煤灰取自台中燃煤電廠生產飛灰與#1~2、#9-10 號機淡水底灰，由台電綜合施工處之混凝土檢驗室進行全煤灰水泥固化，並依契約規定強度與坍度規定進行配比設計，且由結果可知即使飛灰與底灰配比約略互換，在短齡期(28 天)內所得 2 組配比的抗壓強度約略相當，此現象為全煤灰 CLSM 有別於砂石水泥製拌 CLSM 的材料特性，其配比如表 3-14 所示。

表 3-14 電廠道路試驗段鋪設基底層配比參考表^[31]

項次	配比量 (kg/m ³)				試 驗 結 果				
	水	水泥	飛灰	底灰	單位重 (kg/m ³)	空氣含量 (%)	坍流度 (cm)	抗壓強度 (kgf/cm ²)	
								7 天	28 天
1	445	131	606	405	1,587	3.5	50	27	36
2	437	131	393	586	1,547	4.3	43	29	37

本案將依據 AASHTO1993 年版(交通部於民國 91 年 1 月頒行交通技術標準規範引用之柔性鋪面設計規範)設計指南，瞭解探究以全煤灰水泥穩定材料(Coal Ash Cement Stabilized Materials, CACSM)為柔性鋪面系統基層、底層結構的學理。為確保本示範案例能符合道路設計要求，台電公司與成功大學土木系研究團隊進行合作，研究架構如圖 3-28 所示，透過實驗室實驗與現地實驗兩部分，相互比較實驗室養置試體與現地鑽心試體之抗壓強度試驗及楊氏模數試驗結果，再經由實驗室回彈模數試驗結果與現地落重撓度試驗數據疊代反算求解得出有效回彈模數值，同時依據 AASHTO 柔性鋪面設計指南非破壞性 NDT 方法求得結構強度有效值，試圖得到 CACSM 結構層強度係數(ai)，以本手冊參考配比(表 3-14)所求得之 ai 約 0.22。

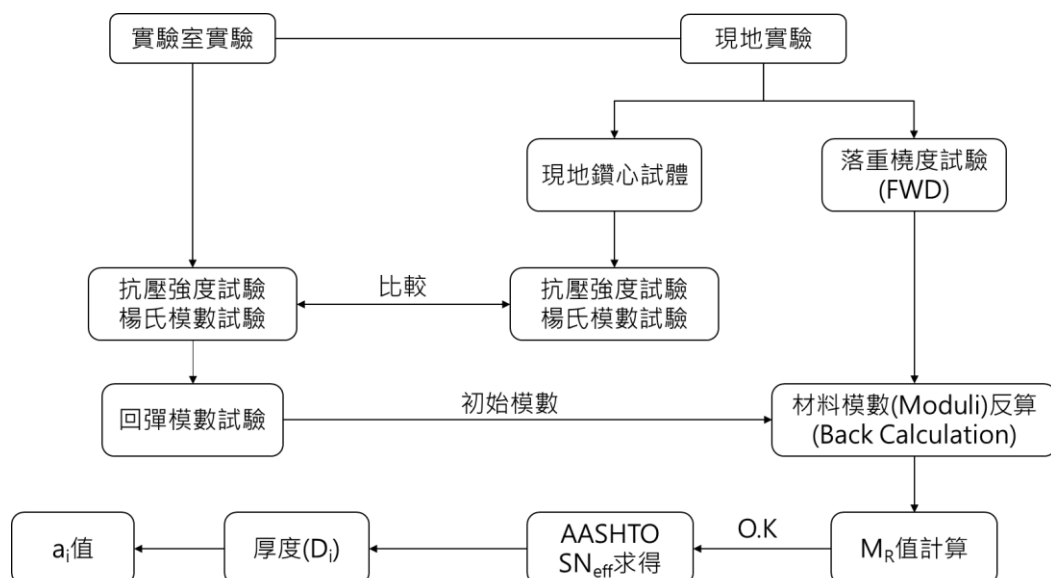


圖 3-28 求取 CACSM 強度係數 a_i [31]

通霄電廠廠區道路鋪面結構由 10 公分密集配瀝青混凝土面層，50 公分全煤灰水泥固化材料基底層及砂質路基所組成，道路基底層與 AC 面層施工完成如圖 3-29 所示。

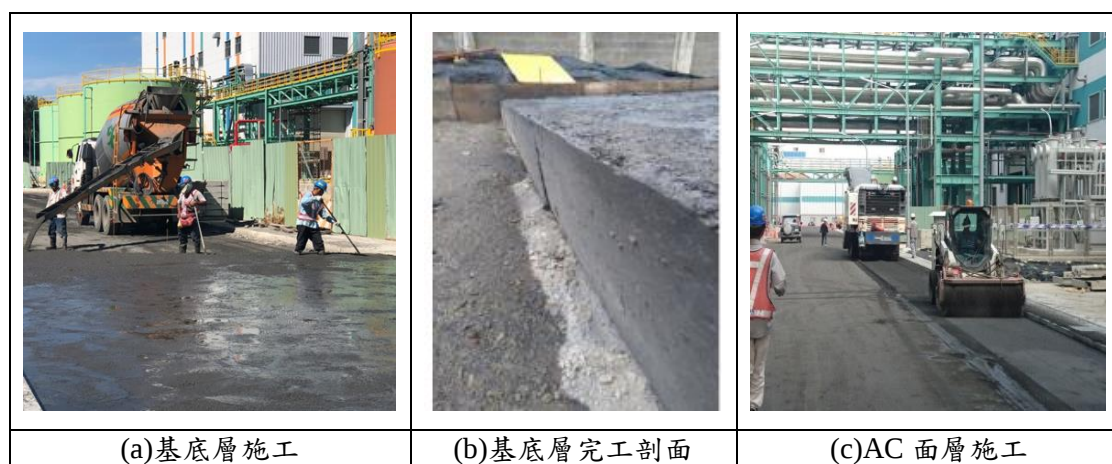


圖 3-29 通霄電廠道路試驗段鋪設基底層與 AC 面層[31]

有關通霄電廠示範道路之基底層採全煤灰水泥固化工法之成效，以鋪面現況、鋪面平坦度與軸重壽命(W_{18})進行評估，說明如下：

- (1)鋪面現況：依據 ASTM D6433 規範執行，鋪面現況指數(Pavement Condition Index,PCI)為人工調查並以計算值作為鋪面狀況評估參考，本案共進行 3 次調查，調查結果 PCI number 介於 99～

100，屬優良等級。

- (2)鋪面平坦度：使用鋪面平坦儀，量測通霄電廠試驗路段之鋪面橫向變量與縱向變量並進行 IRI 值計算，國際糙度指標 (International Roughness Index, IRI)是依據 ASTM E1926-08 建立的標準，常作為判定道路平坦度的指標，一般認為數值超過 8m/Km 就屬於行駛困難，IRI 值越低表示道路平坦度越佳，本案共進行 3 次檢測，IRI 平均值介於 3.8~4.2，差異數值不大，顯示完工後鋪面無發生明顯破壞。
- (3)鋪面軸重壽命：依據 AASHTO(1993)道路斷面結構強度設計法，透過路基土壤強度(MR)、服務指數損失量(Δ PSI)、各層的結構強度與厚度與道路設計的可靠度，可估算出道路的交通容許當量軸次(W_{18})，通霄電廠廠區道路鋪面之交通容許當量軸次 W_{18} 約為 232,023,872 ESALs，相當於載重 42 噸之聯結車 27,752,392 車次或載重 33 噸之聯結車 63,557,736 車次，為一般砂石級配鋪面之 5.18 倍以上。

由本案例可知，採用全煤灰水泥固化工法應用於道路基底層可符合 AASHTO93，並具施工簡單、容易掌握工進、有利降低整體道路工程造價、資源循環再利用與提升台電公司對環境保護與節能減碳的形象，值得推廣應用。

3.1.4 無筋預鑄混凝土塊

台電高煤灰摻量無筋預鑄混凝土消波塊(煤灰)^[9]

1. 工程背景

鑒於台電公司相關海事工程有大量無鋼筋混凝土塊體需求，如用來消波減能的消波塊或臨時阻隔的方塊等。本案例是以底灰取代砂細粒料之試驗，以達到可符合無結構鋼筋混凝土塊體之功能需求且以底灰適量添加為原則，並非以全部取代天然砂石且能超越原有混凝土性質為目標，若能成功開發，勢必對底灰的再利用有很大的助益。

2. 工程成效

本試驗使用台中電廠煤灰，在控制混凝土水膠比、水泥、飛灰、拌合水量與固定混凝土砂率條件下，以底灰替代相同體積砂細粒料比例為主要試驗參數，替代率分別為 0%、20%、40%、60%、100%，檢測與比較各種配比與底灰替換率的混凝土抗壓強度發展、工作性等性質變化，期望找出製作消波塊的較佳配比。

考量一般底灰顆粒比砂粒料多孔與質輕，會降低混凝土工作性，需提高拌合用水的需求量，對水的需求增加是造成混凝土孔隙體積增加的主因，水留下的孔隙，在泌水後將形成混凝土內的裂縫等劣勢，因此，試驗採用高量飛灰利用飛灰卜作嵐反應形成的 C-S-H 膠體填充孔隙，利用飛灰的圓顆粒與較同重量水泥多的體積來提高混凝土工作性，降低化學藥劑需求量，同時發揮飛灰抗硫酸鹽的功能。

試驗初期選定總膠結材為 300 kg/m^3 之高煤灰摻量混凝土配比，底灰以同體積替代細砂粒料之比例由 0% 逐漸增加至 100%。結果顯示，飛灰取代水泥量 27% 比取代 36% 的 28 天強度高約 30%，但底灰摻量增加，其影響減少。顯然在低膠結粉體用量條件下，飛灰摻量超過 30% 替代水泥量會降低混凝土早期強度。當底灰用量增加，底灰之多孔隙、高吸水率，及裹漿量低時易泌水之特性對強度影響甚大。初步研判底灰多孔隙性粒料的表面積大於顆粒圓潤之砂粒料，故底灰所需之裹漿量大於砂。若裹漿量不足，則將產生較多孔隙弱點，進而造成抗壓強度降低。綜上，高底灰摻量混凝土採 300 kg/m^3 之膠結料，雖有部分配比可達強度需求，但有析離、泌水性高等不良現象，應採用較高膠結材用量。

後續改採 400 kg/m^3 膠結材用量(水膠比 0.5)，結果顯示膠結材用量足夠下，底灰摻量對混凝土抗壓強度影響不大。採用飛灰替代水泥比率達 36% 之條件下，底灰替代砂粒料比率達 100%，抗壓強度可穩定超過 240 kgf/cm^2 ，此結果也顯示高飛灰取代率未必會降低混凝土早期(28 天)強度。

在完成實驗室先導試驗後，進一步製作實體消波塊，如圖 3-30 所示，每顆重量約 5 噸，配比如表 3-15 所示，配比參數為總膠結料

量 391 kg/m^3 、水膠比 0.49、飛灰佔總膠結量約 35%、底灰 100% 取代砂，將其置放海域，進行海水沖刷作用力、乾濕循環作用與海水硫酸鹽作用等真實海域環境影響條件的測試，如圖 3-31 所示。

將置放約半年的實體消波塊吊上來做表面檢視，塊體上原有的噴漆大部份沖刷流失，導流堤海水沖刷，以及導流堤水位變化令消波塊乾濕循環等作用，消波塊表面附著藤壺、管蟲與少量螺類，表面無混凝土脹裂、粒料脫落或具明顯孔洞的現象(如圖 3-32)，另外，將消波塊鑽心試體經抗壓測試的破裂面，大致上均在細粒料膠結材或膠結材與礫石的膠結面，鑽心試樣表面無膨脹裂紋現象或混凝土膨脹粒料鬆脫現象，如圖 3-33 所示。

綜上，高煤灰摻量無鋼筋混凝土的硬固性質、工作性質、耐久性質均能符合標準，明確顯示具實際可行性。



圖 3-30 實體消波塊製作^[9]

表 3-15 實體消波塊配比^[9]

配比量 (kg/m^3)						試驗結果				
水泥	飛灰	水	底灰	石	藥劑	單位重 (kg/m^3)	空氣 含量 (%)	坍度 (cm)	抗壓強度 (kgf/cm^2)	
									7 天	28 天
254	137	190	556	913	1.40	2,050	1%	13.5	198.3	284.7



圖 3-31 實體消波塊吊放測試^[9]

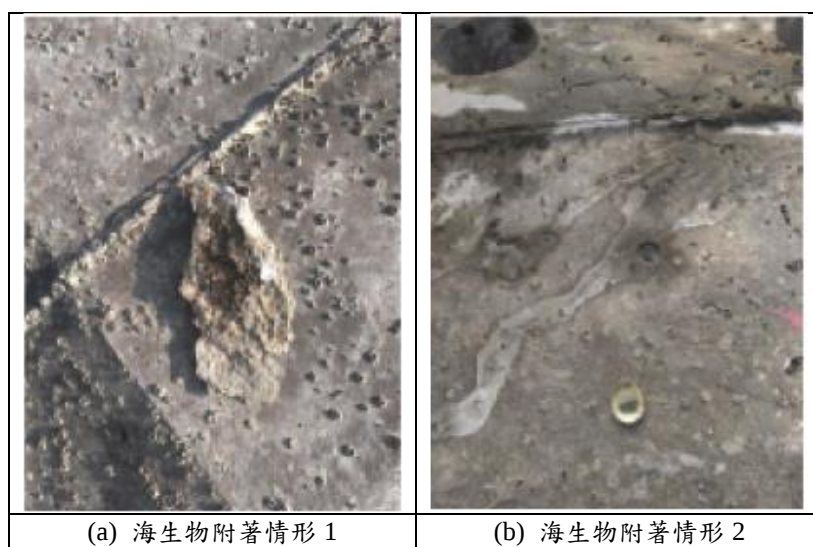


圖 3-32 實體消波塊表面海洋生物附著情形^[9]

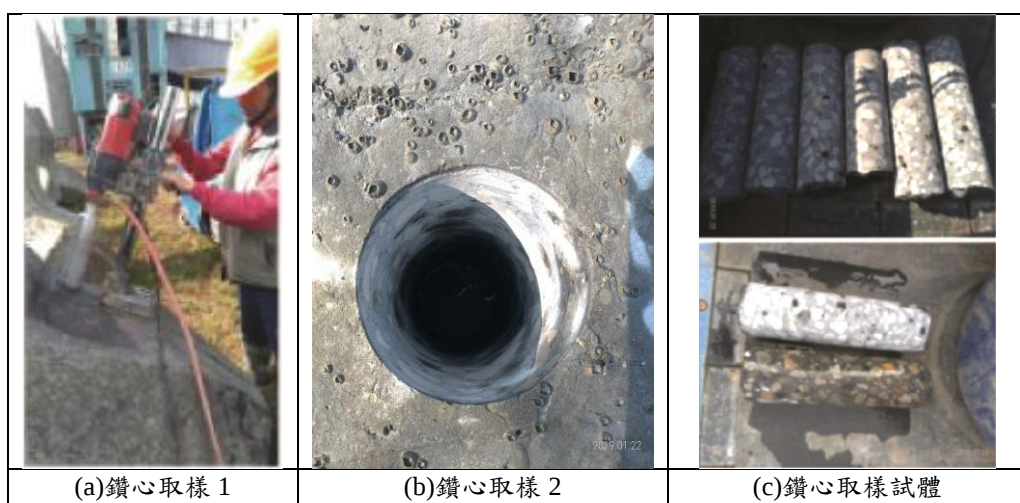


圖 3-33 實體消波塊鑽心取樣^[9]

3.1.5 人工魚礁

人工魚礁具營造海洋生物之棲息環境，並達到培育漁業資源的功能。目前以煤灰作為人工魚礁的案例有應用於台灣、英國、香港、日本、韓國、中國、義大利、美國與以色列等地。整體來說，使用飛灰作為人工魚礁的試驗皆指出，飛灰與水泥的組合穩定且能有效促進生物群聚展現棲地營造功能。

台電飛灰人工魚礁^[32]

1. 工程背景

民國 70 年代，當時的能源政策係以核能、石油與煤炭三者並重，因此面對龐大的煤灰產量必須加以研究其應用途徑。依據國外之研究報告指出，將煤灰壓鑄成方塊後，投放在沿岸地區供作魚礁是一項具有實用性的使用方式。因此台電以飛灰作為人工魚礁原料，製作多只人工魚礁，再進行拋放及後續成效評估。

2. 功能成效

1986 年 4、5 月間製作煤灰魚礁約 69 噸，配比如表 3-16 所示，礁體大小形式包括：15 個圓筒形礁體及 200 個立方礁體，如圖 3-34 所示。於 7 月初完成投放，其中 200 個立方礁體投放於北部萬里海域，其餘 15 個圓筒形礁體則放於南部興達海域，水深各為 10 m 及 15 m 處。另外在 1986 年 8 月間，在基隆市八斗子海濱製作 100 個魚礁(尺寸為 $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ m}^3$)，於 9 月底投放於萬里海域，供作調查。

在萬里海域之煤灰魚礁總共記錄到 17 科 34 種魚種，其中有 11 種魚種具有經濟價值，顯示煤灰礁所誘集的魚類以經濟性魚類為主。由潛水調查結果，煤灰礁並無明顯破損情形，顯示煤灰礁具抗海流能力且有聚魚效果，如圖 3-35 所示。

在興達海域之煤灰礁區使用 Honda HE-301 型 200 KC 的魚群探測器探查礁區之魚群量及分佈，掃描航跡垂直面的魚群分布，由探測器之魚群像紀錄，計算其厚度(水深方向)和長度(進行方向)的相乘積 $q(\text{m}^2)$ 作為各航跡的魚群量指標，並由魚群指向角內的垂直截面乘上有效航行距離，作為航行掃描體積 $v(\text{m}^3)$ ，分別計算各航跡的

q/v ，作為各航跡的魚群密度。設人工魚礁漁業效果的範圍為 V' ，則 $v/V'=p$ 為掃描機率，則 $q/p=Q(m^2)$ 將視為魚礁效果水域內的魚群總量。

結果發現礁體的周圍水域有濃厚的魚群分佈，魚群密度指數介於 $1.2 \times 10^{-4} \sim 7.4 \times 10^{-3}$ 之間，出現於礁區的魚類組成以頂蛇鰻的 50.6% 為最高，其次為花狗桿魚的 11.5%，再次為花身雞魚的 8.6%，沙鯪和尖頭鰻則均為 5.2%。另作礁區及非礁區的比較作業試驗，經檢定結果，顯示兩海域之魚獲績效有明顯的差異，在 95% 信賴區度範圍內，礁區的魚獲率較非礁區至少可增加 61% 以上。

綜而言之，根據 2 年來的潛水調查結果及當地漁民於煤灰礁區附近之可觀魚獲量來看，煤灰礁區的確發揮了誘集魚類之效果，不僅有效培育漁業資源，也落實電廠副產物的循環再利用。

表 3-16 飛灰人工魚礁配比^[32]

配比量(kg/m ³)					28 天抗壓強度(kgf/cm ²)
水泥	飛灰	砂	石	水	227
210	176	685	1,008	216	



圖 3-34 煤灰礁體^[32]



圖 3-35 魚類群聚情形^[32]

台電煤灰空心磚人工魚礁^[33]

1. 工程背景

早期的人工魚礁多以飛灰代替水泥為研究方向，文獻顯示^[34]飛灰固結物長期浸泡於海水中強度會逐漸增加，重金屬溶出量與全量皆低於規定基準值，顯示與海洋生態環境的相容性高。而本次的人工魚礁是以底灰做為主要素材，以適當水泥及飛灰做為膠結料進行混和，搭配高壓設備壓製成空心磚型態，尺寸為 $39 \times 19 \times 19 \text{ cm}^3$ ，於 2019 年投放至東北角廢棄九孔池。

2. 功能成效

本試驗與國立臺灣海洋大學團隊進行合作，煤灰空心磚於 2019 年 3 月底投放至東北角廢棄九孔池(如圖 3-36(A))，放置約 2 個月後於 5 月底進行檢視，發現空心磚本體已開始被殼狀珊瑚藻所覆蓋(如圖 3-36 (B))，並長出大型藻類，包括石蓴、囊藻等種類，吸引眼斑海兔及寄居蟹至此覓食，顯示底灰空心磚與海洋生物環境之相容性甚高，隔年 7 月初之後再次確認空心磚情況，發現空心磚本體幾乎已全部被殼狀珊瑚藻所覆蓋(如圖 3-36 (C)與(D))。另外，也發現海洋生物利用煤灰磚情形，如海水性蝦類、陽隧足、油彩蠟膜蝦與大

型藻類，分別如圖 3-37(A)~(D)，顯示空心磚用於營造海洋生物棲地的潛力相當高，後續宜持續進行驗證，以進一步確認底灰材料如何能助益於優良海洋環境條件之營造。

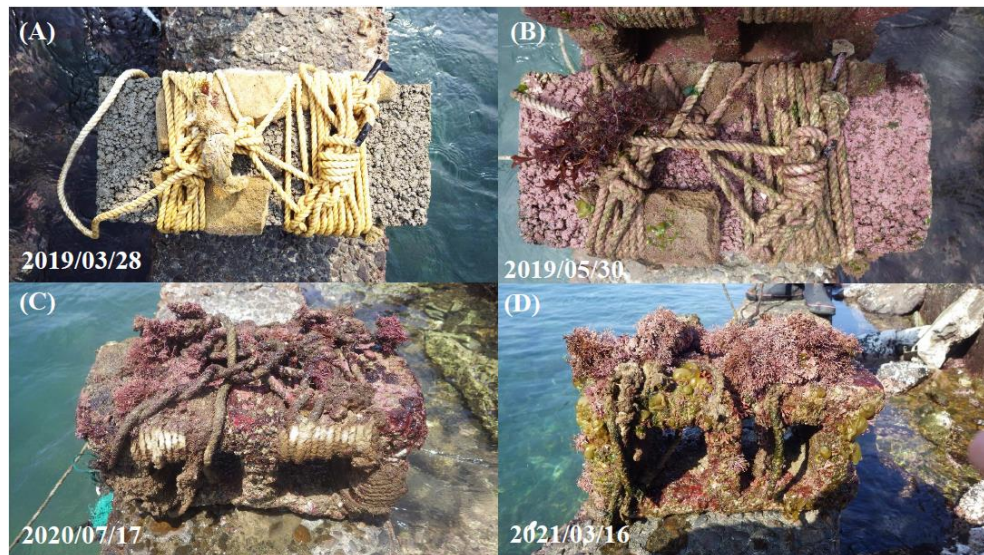


圖 3-36 煤灰空心磚之海洋生物附著情形^[33]

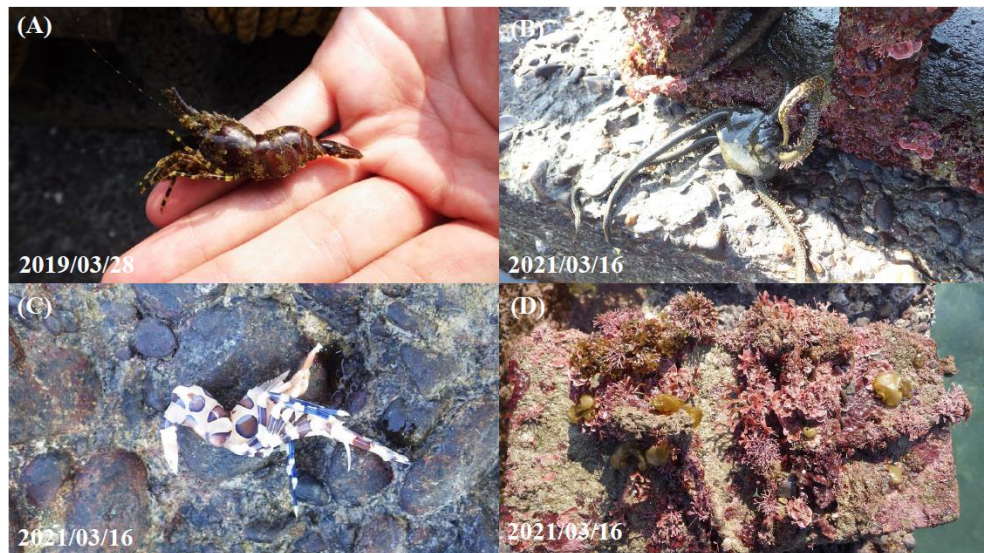


圖 3-37 海洋生物利用煤灰空心磚情形^[33]

3.2 國外案例

本節提供國外參考案例，除本手冊 5 大應用種類(含工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊與人工魚礁)外，另有其他 3 種應用種類案例說明，包含堤後補強、地盤改良以及橋樑及海底隧道。本節針對國外煤灰海事工程使用案例，從工程背景、工程或環境效益兩面向來說明，提供給工程單位參考。

將國外案例依應用種類分類(含工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊、人工魚礁與其他類)，並摘要案例重點彙整成表，如表 3-17 至表 3-22。

表 3-17 國外案例內容摘要彙整表-工程填地

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
工程填地	英國南威爾斯 Millenium Coast Park(1980-2000)	原煤灰、 灰漿材	1.飛灰與水泥摻和可降低滲透性、提高水密性，使植被重新生長。
	日本岩沼市堤後公園 重建	塑性材	1.該計畫利用煤灰及其餘廢棄物混合做為內部回填料，約有 90%之廢棄物來自岩沼市，回收再利用總重量約為 574,000 噸，可降低成本達到資源再利用之目的，並減少對自然環境之影響。 2.施工後須依預期載重進行壓密試驗，確保施工品質並符合設計要求。

表 3-18 國外案例內容摘要彙整表-隔堤

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
隔堤	英國 Falmouth 的 Pendennis 碼頭擴建之海堤(2012-2015)	混凝土	1.飛灰與水泥摻和可提高強度和耐久性。 2.該文獻對其採樣樣本進行重金屬溶出測試及生物累積量的分析，其研究結論指出煤灰在海域人工魚礁使用安全性上為穩定，但僅限定於特定生物如藻類與小型生物(依附於魚礁的小生態系 epibiota)，並無針對整體海域進行大範圍的其他監測。
	福島縣 Shinchi 電廠海堤重建	塑性材	1.本工程採用煤灰、水泥、添加劑及水所混合之複合材料，在預拌廠拌和均勻後，運送至施工地點後，透過滾壓方式進行壓實後完成潮汐海堤。 2.完工後海堤除具有抵擋潮汐外，並可有綠化環境之功效。
	日本 Hakuchou-Oohashi 大橋橋墩之臨時圍堰	灰漿材	1.使用灰漿材作為臨時圍堰中之填充材料，相較於傳統砂土填料，可有效降低側向土壓力並降低施工成本，臨時圍堰可提高施工安全性也避免影響水域環境。
	日本北海道苫小牧東港堤防建設工程	塑性材	1.本案例之隔離路堤使用煤灰塑性材，由飛灰、海水、水泥及再生土混合而成，控制適當的含水量使其具有近零坍度，降低施作時材料分離情況。

表 3-19 國外案例內容摘要彙整表-港灣道路基底層或施工便道

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
港灣道路基底層或施工便道	英國 Kent 地區 Ramsgate 港口聯絡道路(1999)	混凝土	1.可減少使用瀝青和傳統混凝土，更為環保且具能源效率，節省 80,000 英鎊的成本。
	日本福島縣石川線臨時道路	破碎材	1.採用添入飛灰、水泥、碎石及水，加工製成之破碎材，該工程使用約 4,000m ³ 之破碎材。
	日本福島縣盤城市港區臨時道路	破碎材	1.本案例使用之煤灰混和材由煤灰、水泥與水混合而成，並在電廠內壓實及固化及破碎。
	美國阿什維爾地區機場臨時跑道(2009-2015)	原煤灰	1.使用底灰，避免土地開挖(268 萬立方公尺)與其他環境干擾。
	瑞典北雪平港口(1990)	原煤灰	1.使用底灰作為結構填料，相對傳統填料更輕、更容易施工，亦無承載能力的問題。 2.此專案以底灰進行地基填充節省了數百萬克朗。

表 3-20 國外案例內容摘要彙整表-預鑄混凝土塊

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
預鑄混凝土塊	英國亞伯丁港擴建計畫(2016-2020)	混凝土	1.飛灰之摻入能強化水泥的性能。
	美國緬因州混凝土塊實驗(1987-2011)	混凝土	1.添加飛灰的混凝土塊，較不容易被侵蝕。 2.添加飛灰在混凝土中可以顯著提升抗氯化物滲透的能力。
	泰國春武里地區混凝土塊實驗(2011-2018)	混凝土	1.飛灰比例提升可有效降低氯化物的滲透係數，且降低混凝土塊中鋼筋的腐蝕程度。
	日本島根縣松江市海堤之混凝土塊	混凝土	1.混合材料包含煤灰、水泥、爐渣，使確保密度足夠，並加入海水調配使強度達到標準。

表 3-21 國外案例內容摘要彙整表-人工魚礁

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
人工魚礁	英國 Poole Bay 魚礁 (1989)	混凝土	1.生物累積的測試結果顯示與天然魚礁對照組無明顯差異，魚礁上迅速形成了豐富的植物群和指標性生物。 2.重金屬溶出的塊體測試，重金屬濃度(鎘、鉻、銅、鉛、錳、鎳、及鋅)並沒有顯著的改變。
	香港魚礁 (1993-1996)	混凝土	1.在軟泥質海床鋪設的人工魚礁較其附近的天然軟泥質海床所聚集魚類數量及品種都較多。 2.人工魚礁有利本地漁業資源及海洋生態。
	中國青島魚礁 (2015-2016)	混凝土	1.鋁酸鹽水泥及飛灰矽酸鹽水泥製成的人工魚礁生物附著效果好，最常用的複合矽酸鹽水泥人工魚礁生物附著效果相對較差。 2.飛灰製作的人工魚礁具有較高抗壓強度、無污染、造價低及結構穩固等效益。
	南韓海洋牧場 (2016)	混凝土	1.實驗組(底灰粒料替代混合物)較對照組強度提升，且海洋生物黏附性提升。
	日本人工魚礁	混凝土	1.人工魚礁以添加煤灰進行拌合固化，28 天抗壓強度平均值皆可達 20N/mm ² ，而固化物之重金屬含量與溶出試驗，皆符合日本相關規範值，可提供藻類生長，並提供生物良好棲息地。

表 3-22 國外案例內容摘要彙整表-其他類

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
堤後補強	日本 Kyushu 與 J-Power 電力之共同護岸設施	灰漿材	1.護岸所處的海岸環境嚴苛，且因長期使用導致原有混凝土劣化而不堪使用。 2.此工程使用灰漿材充填破損處，達加強護岸之防護作用。
	日本富山新港火力發電廠填灰區鋼板樁隔離工程	灰漿材	1.日本富山新港火力發電廠於 2001 年 10 月進行圍籬區施工，其施工方法為將新鋼板樁放置於舊鋼板樁前方，並在兩鋼板樁之空隙間填入灰漿材，施工數量約為 1,100m ³ 。
地盤改良	日本山口縣三川港及廣島港擠壓砂樁	破碎材	1.使用相對密度較輕且粒徑分布正確之壓碎骨材、粒狀骨材及煤灰之混合材料也能有效減少沉陷，此種混合材料可以利用壓實樁(SCP)之方式取代原有之砂土，且保留良好之滲透性。
	日本瀨戶內海沿岸擠壓砂樁 (2002-2011)	破碎材	1.日本山口縣及廣島縣瀨戶內海沿岸地區於 2002 年開始進行地盤改良，為期 9 年至 2011 年完成施工，該造粒材由煤灰、水泥、膨潤土及水混合製作而成，其物理性質如表 3-27。該混合材料用量約 280,000m ³ ，用於擠壓砂樁替代海砂之材料，可改善軟弱土層及土壤液化。
橋樑及海底隧道	澳洲海崖大橋 (2003-2005)	混凝土	1.混凝土的收縮、坍度、抗壓強度皆符合預期，且煤灰之摻入有助其降低水化熱，並顯著提升抗硫酸鹽、抗氯化物、抗鹹水的能力。
	馬來西亞檳城二橋 (2006-2014)	混凝土	1.混凝土的收縮、坍度皆符合預期，且抗壓強度、吸水率和抗氯離子滲透等性能良好，滿足施工和耐久性的要求。
	中國杭州灣跨海大橋 (2003-2007)	混凝土	1.混凝土的收縮、坍度、抗壓強度皆符合預期，飛灰之摻入有助其降低水化熱，並顯著提升抗硫酸

應用種類	案例名稱	煤灰應用型式	工程或環境效益說明
			鹽、抗氯化物的能力。
	中國廈門翔安海地隧道(2005-2010)	混凝土	1. 在常溫下與水泥產生水合作用，生成新的矽酸鈣凝膠，填充水泥內部空隙，提高混凝土抗滲性。 2. 混凝土的收縮、坍度、抗壓強度皆符合預期。 3. 飛灰之摻入有助其降低水化反應。
碼頭岸壁	日本酒田港外港區碼頭	灰漿材	1. 1998 年 7 月至 11 月，坂田港建設辦公室進行「酒田港外港區碼頭（-14m）建設」 2. 該計畫採用煤灰、水泥與水混合固化處理，作為碼頭牆的回填材料。

3.2.1 工程填地

英國南威爾斯 Millenium Coast Park(飛灰)^[35, 36]

1. 工程背景

英國威爾斯 Llanelli 地區原為工業重鎮，並有採礦廠、發電廠等設施，在工業沒落後留下受污染的土壤。1980 年代，威爾斯發展處和地方政府開始推行 Millenium Coast Park 海岸公園計畫，進行污染整治與地方轉型，於 2000 竣工。沿著 22 公里長的海岸，規劃出水塘、林地、自行車道、人行步道，由於該地有 Carmarthen Bay 發電廠留下的大量飛灰，故將飛灰用於(a)土壤回復材料—填入受污染場址或促進植被生長的肥料、(b)地景改造—回填沼澤地、作為新開挖之水塘底鋪面(c)輕質工程結構填料(d)石灰/水泥固化飛灰—混和石灰和水泥作為臨時道路和自行車道的基底層。

2. 工程或環境效益

由於飛灰的滲透係數低(約 10^{-7}m/s)，將其與石灰或卜特蘭水泥摻和，便能降低回填材的滲透性、提高水密性，使植被重新生長，達到廢棄物資源化利用。然而，2009 年 Phillips 等的文獻指出，該

處在經歷幾次強烈暴風雨事件後，海岸線退縮、表土受到侵蝕、沿海步道損壞，甚至導致飛灰裸露在沙灘地上。故此案例可作其他工程的提醒，在設計海岸周邊的回填材時，應留意海岸地形的變遷並做好周邊相關防護工程規劃。



圖 3-38 Millenium Coast Park 回復計畫^[35, 36]

日本岩沼市堤後公園重建(煤灰) ^[3]

1. 工程背景

2011 年發生東日本大地震，導致沿岸嚴重損毀，雖海堤已陸續完成，但仍有堤後高程過低或破損嚴重問題，需要大量之回填材料提高地平面。岩沼市執行 Millennium Hope Hills 計畫(圖 3-39)，該計畫主要為建造具有植物之沿海堤防，打算使用煤灰混合材(塑性材)做為回填材料，以利加速完成堤後公園重建。

2. 工程或環境效益

該計畫利用煤灰及其餘廢棄物混合做為內部回填料，約有 90% 之廢棄物來自岩沼市，回收再利用總重量約為 574,000 噸，可降低成本達到資源再利用之目的，並減少對自然環境之影響。施工後須依預期載重進行壓密試驗，以確保施工品質並符合設計要求。



圖 3-39 Millennium Hope Hills 回復計畫^[3]

3.2.2 隔堤

英國 Falmouth 的 Pendennis 碼頭擴建之海堤(飛灰)^[37]

1. 工程背景

英國 Falmouth 地區的 Pendennis 船塢碼頭在 2012 至 2015 年間進行擴建，並新建一座海堤，於 2015 年完工。為了應付海岸嚴峻的環境，需要使用低水化熱、高長期強度、耐硫酸鹽和氯酸鹽侵蝕的材料，故工程單位採用 Tarmac 公司所生產的 Eco Phoenix®水泥，其成分含 40% 以上的 F 級飛灰。

2. 工程或環境效益

Eco Phoenix®水泥符合 BS EN 197-1，摻合了飛灰的水泥，不僅能降低水化熱，減少澆灌時因內外溫度差而產生的熱裂風險，因此可提高晚期強度和耐久性。

根據 Eco Phoenix 水泥的物質安全資料表，該水泥產品對環境無害。生態毒理學測試顯示，該水泥所屬的卜特蘭水泥對大型水蚤 (*Daphnia magna*) 和月牙藻屬的 *Selenastrum coli* 之生物毒性影響極小。此外，也不存在持久性及降解性、生物蓄積性、土壤流動性與其他不良反應之問題。環保方面，由於使用再生原料，相較使用傳統卜特蘭水泥，可大幅減少排碳量。

福島縣 Shintchi 電廠海堤重建(煤灰)^[3]

1. 工程背景

2011 年發生東日本大地震，導致沿岸海堤嚴重損毀，位於福島

縣 Shinchī 電廠打算進行海堤之重建計畫。

2. 工程或環境效益

本工程採用煤灰、水泥、添加劑及水所混合之複合材料，其混合比例如表 3-23，並利用水來控制現場所需之工作性。將上述材料在預拌廠拌和均勻後，運送至施工地點後，透過滾壓方式進行壓實後完成潮汐海堤，如圖 3-40 與圖 3-41 所示。在示範工程中，先於基層鋪設碎石，厚度為 20cm，再進行煤灰混和材滾壓施工，潮汐海堤的寬度和高度分別為 14m 和 3.5m，坡度設定為 1:1.15，每層的壓實厚度為 30cm，共 10 層，最上層鋪設砂土，厚度為 30cm。完工後海堤除具有抵擋潮汐外，並可有綠化環境之功效。

表 3-23 Shinchī 電廠海堤煤灰混合比例^[3]

煤灰	水泥	添加劑	水
乾重 1000kg	100kg	20kg	依現場所需工作性調整

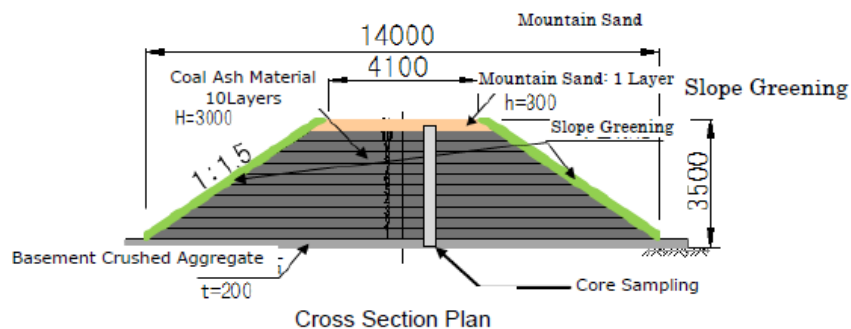


圖 3-40 Shinchī 電廠海堤斷面圖^[3]



圖 3-41 Shinchī 電廠海堤完成圖^[3]

日本 Hakuchou-Oohashi 大橋橋墩之臨時圍堰(煤灰)^[3]

1. 工程背景

日本 Hakuchou-Oohashi 大橋橋墩使用煤灰混合材料建造水中人工島作為施工基地，並利用灰漿材作為臨時圍堰之填充材料。此混合材料包含煤灰、火山灰、水泥與海水，煤灰與火山灰以 7:3 的比例混合，再加入 4-5% 水泥與海水製成灰漿材，約有 53,600m³ 的灰漿材利用特密管灌入直徑約為 1.3m 的圍堰中，本工程使用之煤灰重達 46,100 噸，並計畫於電廠範圍 100 公里內提供其它工程使用，該工程也驗證煤灰混合材料可應用於海事工程。

2. 工程或環境效益

使用灰漿材作為臨時圍堰中之填充材料，相較於傳統砂土填料，可有效降低側向土壓力並降低施工成本，且儘管於低溫下填築，強度仍然足夠無需進行改良，臨時圍堰的施作提高施工安全性也避免施工時影響水域環境之效果。

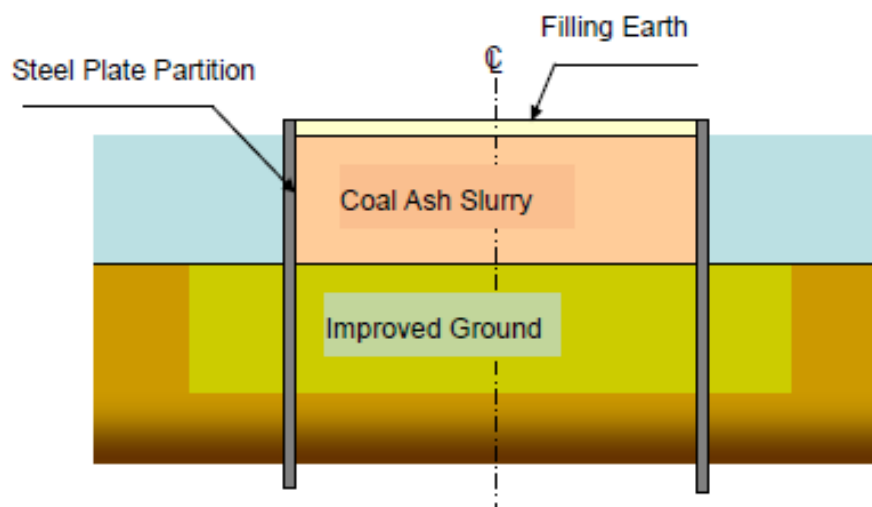


圖 3-42 Hakuchou-Oohashi 大橋橋墩臨時圍堰之施作斷面示意圖)^[3]



圖 3-43 Hakuchou-Oohashi 大橋橋墩臨時圍堰之施作完成圖^[3]

日本北海道苫小牧東港堤防建設工程(飛灰)^[3]

1. 工程背景

本案例之隔離路堤使用煤灰塑性材，由飛灰、海水、水泥及再生土混合而成，控制適當的含水量使其具有近零坍度，在施作時不易被海水沖散，該混合材由卡車運輸至施工地點，再利用挖土機協助均勻整地，壓實後完成路堤施作，施作圖面如圖 3-44 與圖 3-45 所示。

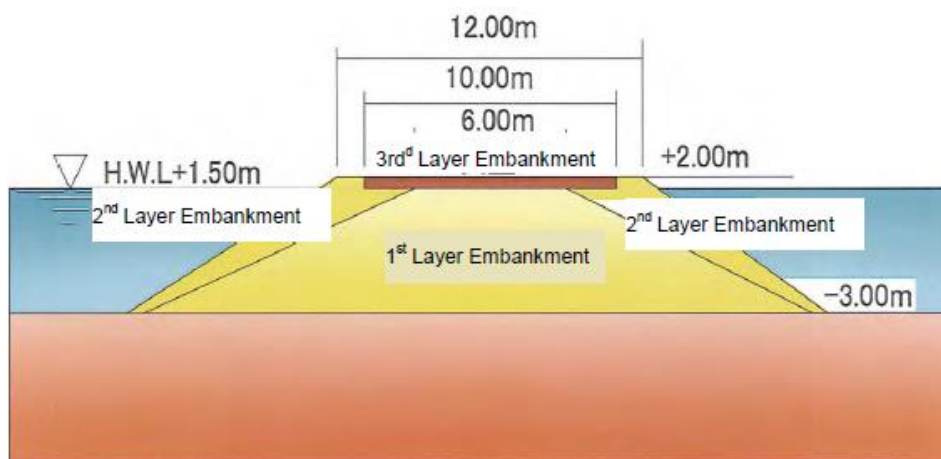


圖 3-44 日本北海道苫小牧東港堤防建設工程施工示意图^[3]



圖 3-45 日本北海道苫小牧東港堤防建設工程施工圖^[3]

3.2.3 港灣道路基底層或施工便道

英國 Kent 地區 Ramsgate 港口聯絡道路(飛灰)^[38]

1. 工程背景

興建於 1999 至 2000 年的英國 Kent 地區的 Ramsgate 港口聯絡道路(圖 3-46)，其道路基層和底層是採用添加飛灰的粒狀材料(Granular material treated with Fly Ash, GFA)，此道路路長約為 1.4 公里，其中 50% 的路段在隧道內，煤灰主要來自 Didcot 發電廠。工程開始前，實驗室評估了三種不同的 GFA 組成配比，亦即碎粒料(crushed graded aggregate)、飛灰、石灰與水的混和比。CBR 為 5%之混合料用於隧道之外部工程，CBR 為 15%之混合料用於隧道內之路基，並覆蓋 400mm 之砂土。



圖 3-46 Ramsgate 港口聯絡道路實景[38]

2. 工程或環境效益

道路於施工完成後進行承壓測試，同時，該段聯絡道路也成功歷經路面結霜的考驗。整體而言，相較傳統的道路基底層，此種方式具良好的長期耐受度，可於冬天建造，且因減少新原料的使用，降低施工成本。

由於此應用添入 GFA，使得強度增加緩慢，具有不易產生反射性開裂的優點，且與傳統的路面相比，添入 GFA 使用較少的瀝青和傳統混凝土，故更具環保效益與能源效率。

日本福島縣石川線臨時道路(飛灰)^[3]

1. 工程背景

興建於 2001 年的日本福島縣石川縣之臨時道路，其道路基層和道路底層(圖 3-47)是採用添入飛灰、水泥、碎石及水，通過配料機加以攪拌混合而成的材料，並至養護場壓實養護 28 天，固化後再透過旋轉式破碎機破碎至適當之粒徑分佈後，再輸送至施工現場，該工程使用約 4,000m³ 之煤灰混合材料(破碎材)，而施工現場及成品如圖 3-48。

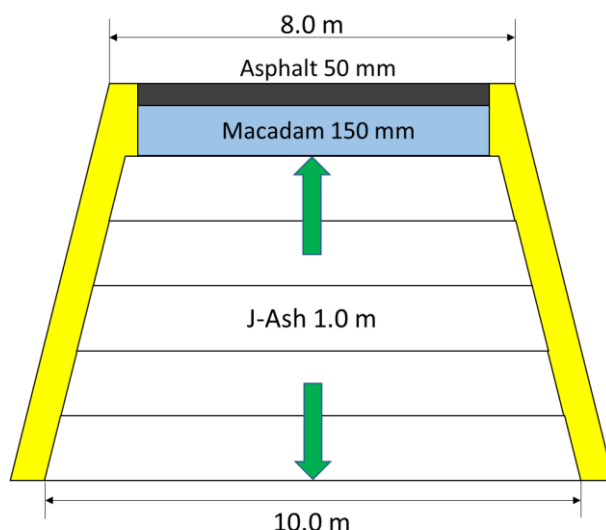


圖 3-47 日本福島縣石川線臨時道路施工斷面示意圖^[3]



圖 3-48 日本福島縣石川線臨時道路施工及完成圖^[3]

日本福島縣盤城市港區臨時道路(煤灰)^[2]

本案例使用之煤灰混和材由煤灰、水泥與水混合而成，並在電廠內壓實及固化及破碎，如圖 3-49，再運送至港口臨時道路之施工現場，運用於路面及路基，其現場施工情況如圖 3-50。



圖 3-49 日本福島縣盤城市港區臨時道路煤灰混和材料現場製作情形^[2]



圖 3-50 日本福島縣盤城市港區臨時道路臨時道路之現場施工情形^[2]

美國阿什維爾地區機場跑道(煤灰)^[39, 40]

1. 工程背景

美國阿什維爾地區機場(Asheville Regional Airport, AVL)為避免因修建跑道而造成機場關閉，決定建設臨時跑道。此機場所在地區地形變化很大，為修建跑道，須將部分區域填高 1 至 1.5 公尺。AVL 與杜克能源公司(Duke Energy)及具煤灰管理專長的長橋顧問公司(Charah Solutions)於 2009 年開始合作，使用底灰與飛灰作為填料，鋪設佔地約 34 公頃的跑道，2010 年該工程完成環境評估，並開始正式動工，至 2015 年秋天工程正式結束，並於 2016 年啟用，施工情形如圖 3-51 所示。



圖 3-51 Asheville 區域機場道路鋪設工程^[39, 40]

2. 工程或環境效益

煤灰由 Duke Energy 的工程填地取出後，放置一段時間以去除水分，後續運送到 AVL 進行道路鋪設，並使用高密度聚乙烯(HDPE)材質與地工皂土毯(GCL)的土工膜系統，並讓煤灰填充達到 98%至 100%的壓實率，以避免地基潮濕。該工程規範滿足了美國聯邦航空總署對公用事業、航空設施和基礎設施開發的要求，並為機場節省大約 1,200 萬美金。

此工程極具環境意識，事先調查相關溪流、濕地、與文化資源，並實施抗侵蝕、沉積物、污染防治活動，進行濾滲液與雨水收集，並遵循相關施工規範，使用底灰避免了大約 268 萬立方公尺的土地開挖與其他環境干擾。

瑞典北雪平港口(底灰)^[41]

1. 工程背景

瑞典北雪平(Norrköping)港口於 1990 年建設新的輪渡碼頭時，由於碼頭所在地區的地基有一層 4 至 6 公尺的疏鬆軟黏土、15 至 20 公尺深度又是冰川黏土層，必須要避免填料過重而影響地基的穩定，故無法使用傳統的結構填料，須使用較輕的填料。此次鋪設選用底灰作為填料，使地基更穩固，實務上北雪平港口總共填了 14,000 立方公尺。

2. 工程或環境效益

施工完成後，並未發現結構穩定性相關的問題，且使用底灰作為填料相對傳統填料而言更輕、且更容易施工，亦無承載能力的問題，完工後大型車輛也能夠在地面上行駛。瑞典岩土工程研究所(Swedish Geotechnical Institute, SGI)將此試驗型計畫之調查數據結果，與其它試驗計畫進行分析，並發展相關管制標準值(請見表 3-24)，提供瑞典相關計畫參考。

表 3-24 SGI 發展之管制標準值^[41]

Parameter	Unit	Guideline	Limit
pH		6.5–10	5–11
Conductivity	mS/m	100	300
Chloride	mg/L	300	1000
Sulphate	mg/L	300	1000
Aluminium	µg/L	300	2000
Arsenic	µg/L	20	100
Cadmium	µg/L	5	30
Chromium	µg/L	50	300
Copper	µg/L	100	1000
Nickel	µg/L	100	500
Lead	µg/L	50	500
Zinc	µg/L	200	1000

3.2.4 無筋預鑄混凝土塊

英國亞伯丁港擴建計畫(飛灰)^[42, 43]

1. 工程背景

位於英國蘇格蘭的亞伯丁港(Aberdeen Harbour)正在進行一項擴建計畫，預計於 2020 年夏季完工。這項預計花費 350 萬英鎊的計畫包含了防波堤、碼頭等海事工程建設的興建，其中最值得一提的是，位於港口防波堤北岸及南岸外圍的消波塊，為了能夠抵禦海浪侵蝕、強化結構，其原料使用了摻合飛灰的「Blue Circle Phoenix 水泥」(CEM II/B-V+SR, 又稱為卜特蘭飛灰水泥)，成分為約 65~79% 的水泥熟料、21~35% 的 F 級飛灰、0~5% 的額外成分。擴建計畫期間，預計生產約 9 千個消波塊，每個消波塊約 20 至 40 公噸不等(如圖 3-52)。

2. 工程或環境效益

飛灰的摻入能夠降低水與水泥作用時產生的熱，並強化水泥的性能，也因此廣為應用於打樁時所需之耐化學性、生產預鑄混凝土的相關設施、碼頭岸壁以及海岸防護工程等。這些使用了 Blue Circle Phoenix 水泥的消波塊能夠確保防波堤裡層等其他層次的結構不被

海浪侵蝕，同時抵抗各種天氣情況下的海況對防波堤結構造成的衝擊。



圖 3-52 亞伯丁港擴建計畫的消波塊^[42, 43]

美國緬因州混凝土塊實驗(飛灰)^[44]

1. 工程背景

在美國緬因州的特里特島(Treat Island)的測試基地進行了為期 24 年的實驗，這些混凝土塊大小為 $305 \times 305 \times 915 \text{ mm}^3$ ，至於中潮位置，水膠比介於 0.31-0.46，飛灰的比例介於 56%-58% 以及多種不同的密度。這些混凝土塊處在極為嚴苛的海洋環境之中，包括 100-160 次的凍融循環、世界上最高的 6.2 m 的潮汐、年均溫 5°C 的海水，以及氯化物濃度高達 19,300 ppm 的環境，測試高比例的飛灰混凝土塊面對嚴峻環境的表現。

2. 工程或環境效益

樣本都可以看到侵蝕或縮小的痕跡，有飛灰的混凝土塊和未添加飛灰的對照組相比，展現出較不嚴重的表面侵蝕，此外，研究團隊也檢視樣本中氯化物的滲透率，有添加飛灰的混凝土塊可以減少 30 mm 的氯化物滲透深度。實驗結果顯示，添加飛灰在混凝土中可以顯著的提升抗氯化物滲透的能力。

泰國春武里地區混凝土塊實驗(飛灰)^[45]

1. 工程背景

在泰國春武里地區(Chonburi Province)海岸 2018 年結束為期七年的實驗，在溫暖跟潮濕的海洋環境之下，分析五種比例(0%, 15%, 25%, 35%, 50%)飛灰的混凝土樣品作為卜特蘭水泥 I 型水泥的替代品，並運用三種不同的水膠比(0.45, 0.55, 0.65)，這些尺寸為 200 mm 的混凝土塊以及內嵌的鋼筋被放置於潮間帶上用以測試氯化物的滲透測試、鋼筋上的氯化物含量以及不同種類的混凝土保護內嵌鋼筋免於被腐蝕的能力。

2. 工程或環境效益

飛灰比例的提升會有效的降低氯化物的滲透係數並且降低混凝土塊中鋼筋的腐蝕程度，此外，在七年的實驗期間，含有 20-25% 飛灰以及 0.65 水膠比的混凝土塊，和普通的卜特蘭混凝土塊(0.45 水膠比)相比，擁有更好的抗鋼筋腐蝕能力。

日本島根縣松江市海堤之混凝土塊(煤灰)^[3]

1. 工程背景

透過混合爐碴、水泥、煤灰及海水生產密度大於 2.3g/cm^3 的混凝土材料，且配合不同的模具產生以下不同規格之混凝土塊，並分別置於海堤不同區域，其配置圖如圖 3-53 所示：

- (1) 80 噸消波塊 5150 個(約 $180,000\text{m}^3$)
- (2) 25 噸消波塊 40 個(約 400m^3)
- (3) 42 噸消波塊 1890 個(約 $34,000\text{m}^3$)
- (4) 42 噸方塊 300 個(約 $5,400\text{m}^3$)
- (5) 41~45 噸基趾保護混凝土塊 490 個(約 $8,800\text{m}^3$)

2. 工程或環境效益

混合材料包含煤灰、水泥、爐碴，使確保密度足夠，並加入海水調配使強度達到標準，其混合比例如圖 3-54。且製造地點鄰近施

工地點，有利於加速混凝土塊製造及降低運輸成本，製造方法為將混凝土材料倒入消波塊模具中，透過振動器進行壓搗實。經取樣檢測，發現爐渣分布均勻且固化品質佳，其成品及取樣芯如圖 3-55。

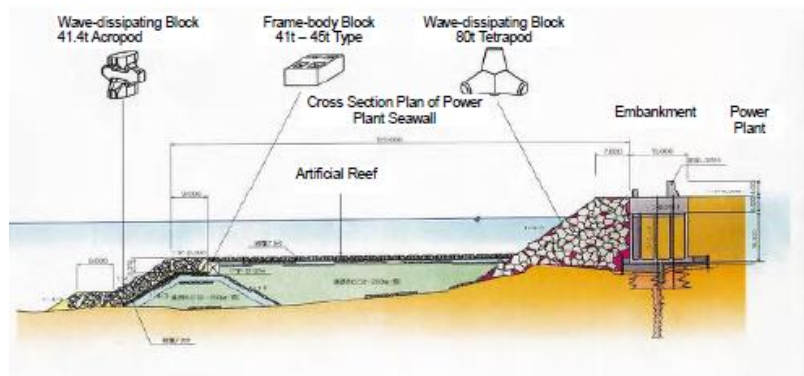


圖 3-53 日本島根縣松江市海堤海堤混凝土塊放置位置^[3]

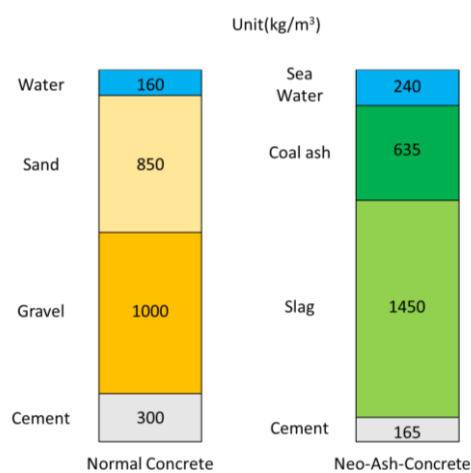


圖 3-54 日本島根縣松江市海堤混凝土混合比例^[3]



圖 3-55 日本島根縣松江市海堤成品及取樣^[3]

3.2.5 人工魚礁

英國 Poole Bay 魚礁(飛灰)^[46]

1. 工程背景

英國 Poole Bay 的試驗性人工魚礁設置於 1989 年，採用英國燃煤發電廠的廢棄物：飛灰、石膏、污泥，以三種不同的比例與水泥和礫石進行混合(表 3-25)，製作成 40 x 20 x 20cm³ 大小的混凝土塊體，再將 50 噸的塊體組合成共 8 組高達 1 公尺、直徑 4 公尺的圓錐體。

2. 工程或環境效益

為了解人工魚礁與天然魚礁對環境影響之差異，在 Poole Bay 人工魚礁竣工後兩年，當地中央電力理事會與國家能源局邀請專家進行一研究計畫，根據調查結果，魚礁上形成了豐富的植物群和表棲動物、魚類、甲殼動物，指標性生物包含紅藻、水螅、苔癬蟲、海綿動物、海鞘類、軟體動物等，並對人工魚礁塊體的重金屬溶出和生物累積兩項指標進行檢測。

重金屬溶出方面，該調查分別針對魚礁表面和核心的重金屬濃度進行取樣檢測以得知溶出率，表面係指採樣之樣本來自魚礁的表面(surface samples)，而核心則是該樣本抽取切面之魚礁的中心(sectioned cores)，檢測之重金屬包含鎘、鉻、銅、鉛、錳、鎳、及鋅。表面採樣樣本塊體溶出之測試結果顯示重金屬溶出之濃度並沒有顯著的改變；然而，從核心切面樣本的深度剖面觀察到的變化顯示，其剖面的鈣少部分流失(<5%)，且剖面的錳和鉻具增加趨勢，與其他研究相符；而其他重金屬(銅、鉛、鎳、及鋅)則是無明顯的規律可斷定是否有過量的累積。以魚礁本質而言，鈣為其重要成分，鈣的流失以及其他金屬的替代表示該魚礁的性質可能將會與原本以鈣為主的天然魚礁有所差異，然目前尚無證據證明此成分的變化會產生生物危害。生物累積方面，則比對了人工魚礁和周遭的天然魚礁對照組上的附著動植物的生物累積性，測試結果顯示與天然魚礁對照組無明顯差異。

表 3-25 英國 Poole Bay 魚礁的三種配比之重量百分比(%)^[46]

材料	組合 1	組合 2	組合 3
飛灰	40	50	40
脫硫石膏	20	10	17.5
脫硫污泥	0	0	2.5
水泥	10	10	10
礫石	30	30	30

香港魚礁(飛灰)^[47]

1. 工程背景

香港自 1996 年起推行人工魚礁計畫。在此之前，香港曾於 1993 至 1996 年間進行第一個人工魚礁試驗，試驗用的人工魚礁是由 1000 件邊長半米的立方體堆砌成一個直徑約 10 米高約 3 米的小丘。該立方體用飛灰混凝土製成，於 1993 年 12 月投放並進行了為期 3 年的監測。

2. 工程或環境效益

根據外牛尾海敷設人工魚礁的項目之環境許可簡介，其依據日本(Suzuki 1995)，台灣(Kuo et al. 1995)，美國(Roethel and Oakley 1985)，英國(Collins and Jensen 1995)，意大利(Relini et al. 1994)及香港(Leung et al. 1997)各地研究得出的結論指出，混入飛灰於混凝土內，能加強混凝土的強度和減少人工魚礁對海床的壓力，且煤灰混凝土表面會形成對鹽的障礙層，阻止水泥成分因與水接觸造成的重金屬物質的釋出，文獻結果顯示煤灰混凝土是一種可安全用作建造人工魚礁的材料。

由香港漁護署自一九九八年起進行水底監測，包括點算在人工魚礁出沒的魚類數量和品種，以評估人工魚礁對增加漁業資源及改善海洋生態的成效，監察結果顯示，在軟泥質海床鋪設的人工魚礁較其附近的天然軟泥質海床所聚集魚類，不論數量和品種都較多。

同時，也委託英屬哥倫比亞大學進行一項海域投入人工魚礁後的成本效益分析，分析結果顯示，長遠來說，鋪設人工魚礁有利本地漁業資源及海洋生物。根據上述據環境監測及成本效益分析結果，投放人工魚礁確實可以增加數量、生物量、多樣化和魚類品種，目前香港在多個海域皆有以預製混凝土構件為材質的人工魚礁。

中國青島魚礁(飛灰)^[48, 49]

1. 工程背景

青島市薛家島實驗開始於 2015 年 9 月，過去對於不同混凝土類型作為人工魚礁的研究資料較少，因此採用複合矽酸鹽水泥(P.C)、礦渣矽酸鹽水泥(P.S)、火山灰質矽酸鹽水泥(P.P)、飛灰矽酸鹽水泥(P.F)和鋁酸鹽水泥(C.A)等五種材質，製作成尺寸為 20x 20 x20 cm³ 大小的塊體，懸掛在纜繩上，沉降至海平面以下 50 cm 處，2015 年 11 月和 2016 年 3 月，分別進行 1 次取樣，進行為期 6 個月的監測。

2. 工程或環境績效

本次實驗中據投放的人工魚礁，5 種不同水泥類型的人工魚礁中飛灰矽酸鹽水泥(P.F)、鋁酸鹽水泥(C.A)兩組生物附著種類最多，鋁酸鹽水泥(C.A)、火山灰質矽酸鹽水泥(P.P)、飛灰矽酸鹽水泥(P.F)三組生物量較多，飛灰矽酸鹽水泥(P.F)、礦渣矽酸鹽水泥(P.S)、火山灰質矽酸鹽水泥(P.P)三組生物群落較為穩定，而 PC 組生物種類及生物量最少，Shannon-Wiener 多樣性指數和 Pielou 均勻度指數均最低(圖 3-56)。實驗結果可知，鋁酸鹽水泥(C.A)及飛灰矽酸鹽水泥(P.F)製成的人工魚礁生物附著效果好，最常用的複合矽酸鹽水泥(P.C)人工魚礁生物附著效果相對較差。

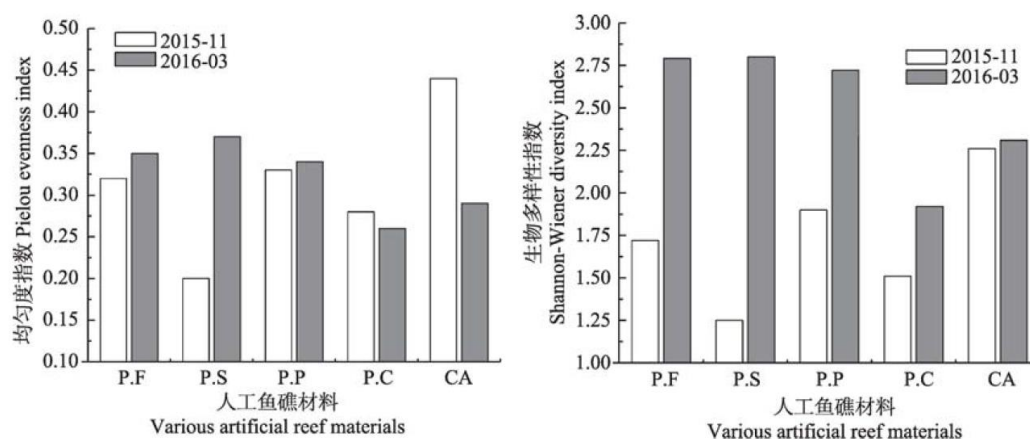


圖 3-56 人工魚礁材料均勻度指數及生物多樣性指數比較^[48, 49]

除此之外依據伊朗國家建築研究中心的報告指出，飛灰矽酸鹽水泥(P.F)生物附著效果較好，生態效益均佔優勢，此實驗製作四種含有不同濃度的飛灰人工魚礁(0%、40%、60%、80%)，並均沉降於海明面下 18.5 公尺處，於 33 個月內，每 3~4 個月分別取樣，並將各魚礁表面的相片上傳於電腦做成對樣本 t 檢定和 ANOVA 檢測的生物多樣性分析，並也將不同水泥樣本，依造伊朗國家檢測規章做壓力測試，研究結果指出在含 40%-60% 飛灰的礁體上，藻類附著效果要顯著好於純混凝土和純飛灰礁體。

另外從成本上來看，鋁酸鹽水泥(C.A)成本較普通水泥的 2-4 倍，火山灰質矽酸鹽水泥(P.P)因生物附著效果不好，較少使用，複合酸鹽水泥(P.C)較飛灰矽酸鹽水泥(P.F)及礦渣矽酸鹽水泥(P.S)高。由此可知，飛灰矽酸鹽水泥(P.F)不僅成本低，而且生物附著效果較好，經濟效益和生態效益均佔優勢。

南韓海洋牧場(底灰)^[34]

1. 工程背景

南韓於 2016 年的研究將底灰粒料 (bottom ash aggregate) 應用於海洋牧場的多孔混凝土生產中的粗粒料的替代材料，分別進行 30%、50%、100%的底灰替代率的實驗。

2. 工程或環境效益

底灰粒料中的氣泡和氣孔提升了混凝土混合物的孔隙，並降低了多孔混凝土混合物的抗壓強度。但透過混合 30% 的底灰粒料和 10% 的粒狀肥料，有助於使其維持與對照組相當的強度。

由溶出測試結果顯示，針對南韓環境部公告的十種有害物質(圖 3-57)，底灰粒料的溶出結果是可忽略的。此外，此案例並針對添加底灰粒料的混凝土混合物進行毒性測試，該毒性測試於 30 天內觀察 15 條鯉魚之生存率，均未觀察到死亡，顯示該底灰混合物無短期危害。

Table 6. Environment criteria and detection amount of harmful materials by solid waste management law.										
Sample	Test items unit : mg l ⁻¹									
	Cr ⁶⁺	As	Cd	Pb	Cu	CN	Hg	PCE	TCE	OP
Environment criteria	1.5	1.5	0.3	3	3	1	0.005	0.1	0.3	1
Bottom ash	0.061	0.033	0.004	0.092	0.090	Non-detection	Non-detection	Non-detection	Non-detection	Non-detection
Porous concrete using bottom ash	Non-detection	0.011	0.001	0.022	0.005	Non-detection	Non-detection	Non-detection	Non-detection	Non-detection

CN: cyanide; OP: organic phosphorus; PCE: perchloroethylene; TCE: trichloroethylene.

圖 3-57 根據廢棄物管理法所檢驗出的有害物質^[34]

於環境效益來說，底灰粒料替代混合物的耐海水性與對照組相當，與對照組相比，還顯示出對海洋生物粘附程度的極大改善，由圖 3-58 至圖 3-60 可見，添加底灰粒料之混凝土，相對於無添加底灰粒料之混凝土，其餘 6 個月及 12 個月之海藻覆蓋率皆有提升。

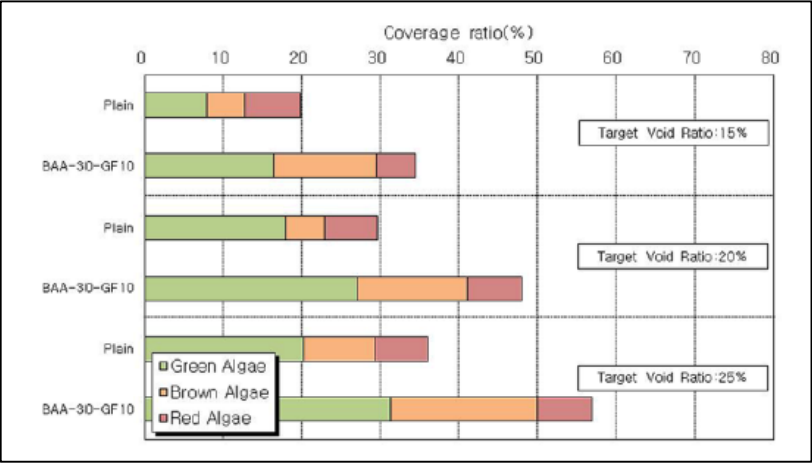


圖 3-58 海藻覆蓋率提升(6 個月) [34]

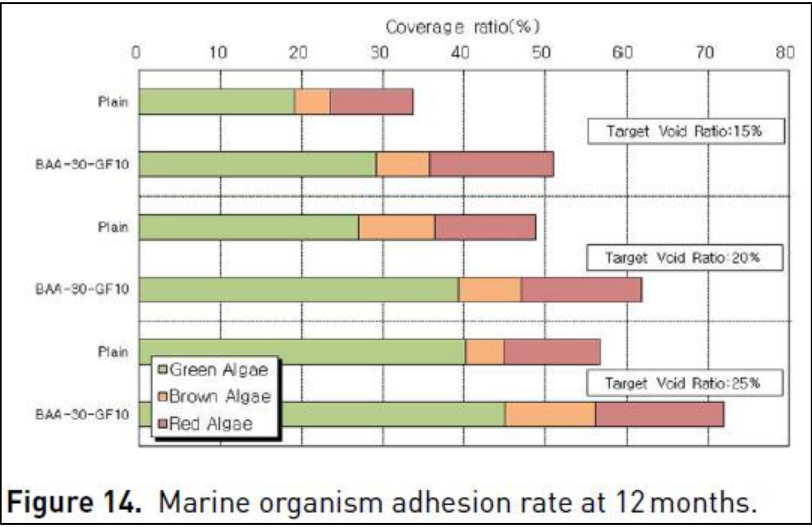


Figure 14. Marine organism adhesion rate at 12 months.

圖 3-59 海藻覆蓋率提升(12 個月) [34]

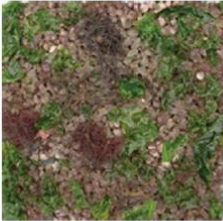
Table 7. Marine organism inhabitation according to mixing with specially treated GF.		
Immersion time	Plain	VR25-GF10
6 months		
12 months		

圖 3-60 6 個月與 12 個月海藻覆蓋照片 [34]

日本人工魚礁(煤灰) [50]

1. 工程背景

日本秋田縣內之東北電力公司及私人發電廠，每年約產 30 萬噸煤灰，預計新電廠運轉後，年產量將高達兩倍以上，因此陸續有煤灰應用研究，如本案例之人工魚礁。

2. 工程與環保效益

依據秋田縣產業勞動部資源能源產業課於平成 27 年提出之「石炭灰有效利用可能性調查」[50]報告，人工魚礁添加煤灰進行拌合固化，28 天抗壓強度平均值皆可達 20N/mm^2 ，而固化物之重金屬含量與溶出試驗，皆符合日本相關規範值，而在日本之中國電力株會社之人工魚礁計畫中，使用飛灰、水泥、水所製成之 Hi 鎖珠(Hi ビーズ・ロック)，其能夠提供安置較軟的海底地面上，可供良好的矽藻生長，另 NA 夾板魚礁(NA クリート製魚礁)，使用水泥、飛灰、爐碴與海水，拌合成 28 天抗壓強度達 21N/mm^2 之人工魚礁，與 Hi 鎖珠類似，可提供藻類生長，並提供生物良好棲息地。另外，太平洋材料有限公司，在與東京海洋大學共同研究以添加煤灰與貝殼為材料，製作成單位重為 2.6 t/m^3 之 FA 繁殖礁，用以建立海草床與保護繁殖地，在三重縣志摩郡大雄町和千葉縣立山市之試驗中，證實相關海草生長繁茂，其他煤灰人工魚礁之型式與案例可參閱文獻資料[50]。



圖 3-61 日本石炭灰有效利用可能性調查之人工魚礁(1)[50]

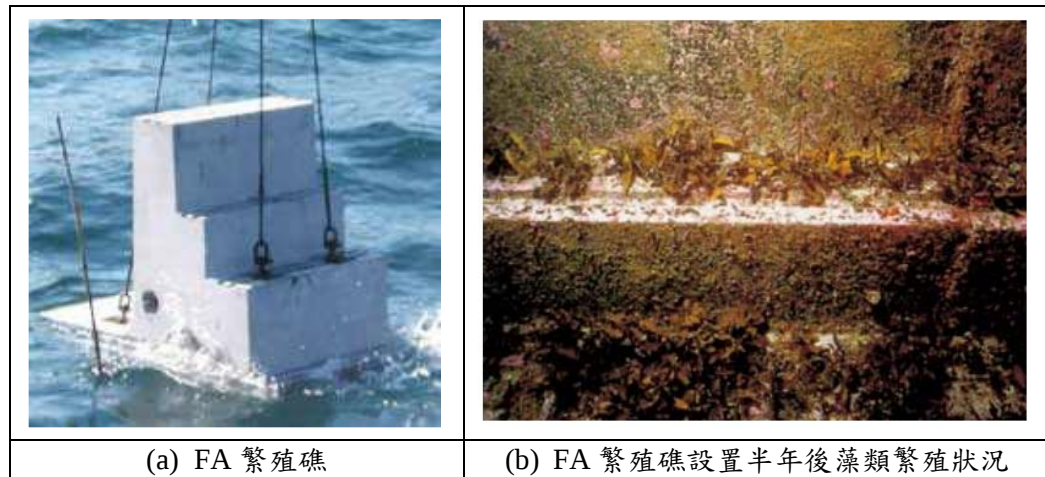


圖 3-62 日本石炭灰有效利用可能性調查之人工魚礁(2)^[50]

3.2.6 堤後補強

煤灰以破碎材型式應用於堤後背填，可減少濕軟土地之地面下沉，且此材料之單位重較小，能有效減少護岸結構物之土壤壓力及側向位移，或以控制性低強度回填材料型式進行堤後破損修護，可延長使用壽命。

日本 Kyushu 與 J-Power 電力之共同護岸設施(飛灰)^[3]

1. 工程背景

護岸所處的海岸環境嚴苛，且因長期使用導致原有混凝土劣化而不堪使用。

2. 工程或環境效益

此工程使用灰漿材充填破損處，達加強護岸之防護作用，施工材料採飛灰、水泥及海水混和，水泥約佔整體的 5%至 15%，配比於實驗室通過強度測試後再進行施作，相關施作圖如圖 3-63 及圖 3-64 所示。

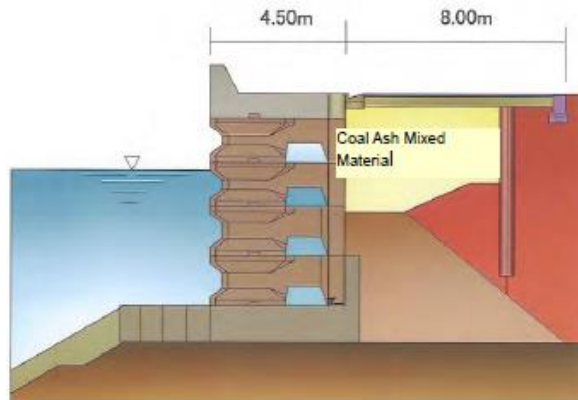


圖 3-63 日本 Kyushu 與 J-Power 電力之共同護岸設施施作示意圖^[3]

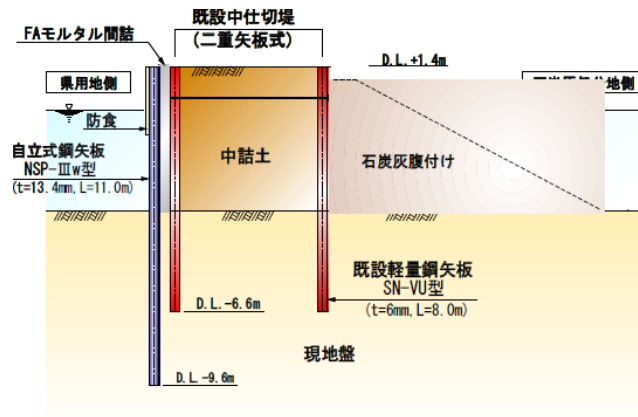


圖 3-64 日本 Kyushu 與 J-Power 電力之共同護岸設施施工圖^[3]

日本富山新港火力發電廠填灰區鋼板樁隔離工程(煤灰)^[3]

1. 工程背景、工程或環境效益

日本富山新港火力發電廠於 2001 年 10 月進行圍籬區施工，其施工方法為將新鋼板樁放置於舊鋼板樁前方，並在兩鋼板樁之空隙間填入灰漿材，施工數量約為 1,100 m³，其施工圖如圖 3-65 所示。



(a) 施工示意圖



(b) 施工圖 1



(c) 施工圖 2

圖 3-65 日本富山新港火力發電廠填灰區鋼板樁隔離工程施工圖^[3]

3.2.7 地盤改良

日本山口縣三川港及廣島港擠壓砂樁(煤灰)^[3]

1. 工程背景

由於防波堤之底層必須穩定且堅硬，足以支撐較大的荷重，若在軟弱土層上施工，則會透過地質改良工作來強化地層。

2. 工程或環境效益

透過換砂的方式來增加地層的承載力，且粒徑分布正確，相對密度較輕的壓碎粒料、粒狀粒料及煤灰之混合材料也能有效減少沉陷，此種混合材料可以利用壓實樁(SCP)之方式取代原有之砂土，且此材料需保留良好之滲透性，其示意圖如圖 3-66。

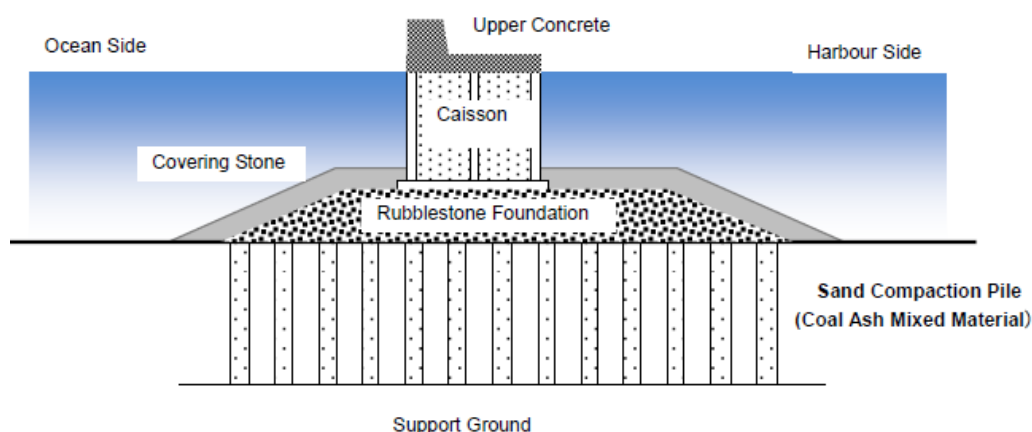


圖 3-66 日本三川港及廣島港擠壓砂樁壓實樁示意圖^[3]

此壓實樁(SCP)之材料配比為 85%煤灰、15%水泥及適量的水混合而成，並透過旋轉式造粒機將材料之粒徑介於 5-20mm 後，經四週固化至所需強度。顆粒密度約為 2.4 g/cm^3 ，與正常土壤顆粒相近，粒料之乾鬆單位重約為 947 kg/m^3 ，比一般土壤較為輕，且為觀察到材料破碎，崩解率約為-0.04%，其材料性質如表 3-26 所示，顯示此種煤灰製成之混合材料可完全取代天然之砂土。

表 3-26 日本三川港及廣島港煤灰混合材料之性質^[3]

項 目	試 驗 值
土壤顆粒密度(g/cm^3)	2.366
單位體積重量(kg/m^3)	947
自然含水量(%)	15.5
吸水率(%)	20.72
崩解率(%)	-0.04

日本瀨戶內海沿岸擠壓砂樁(煤灰)^[2]

1. 工程背景、工程或環境效益

日本瀨戶內海沿岸地區於 2002 年開始進行地盤改良，為期 9 年至 2011 年完成施工，該造粒材由煤灰、水泥、膨潤土及水混合製作

而成，其物理性質如表 3-27。該混合材料用量約 280,000 m³，用於擠壓砂樁替代海砂之材料，可改善軟弱土層及土壤液化，其施工圖如圖 3-67。

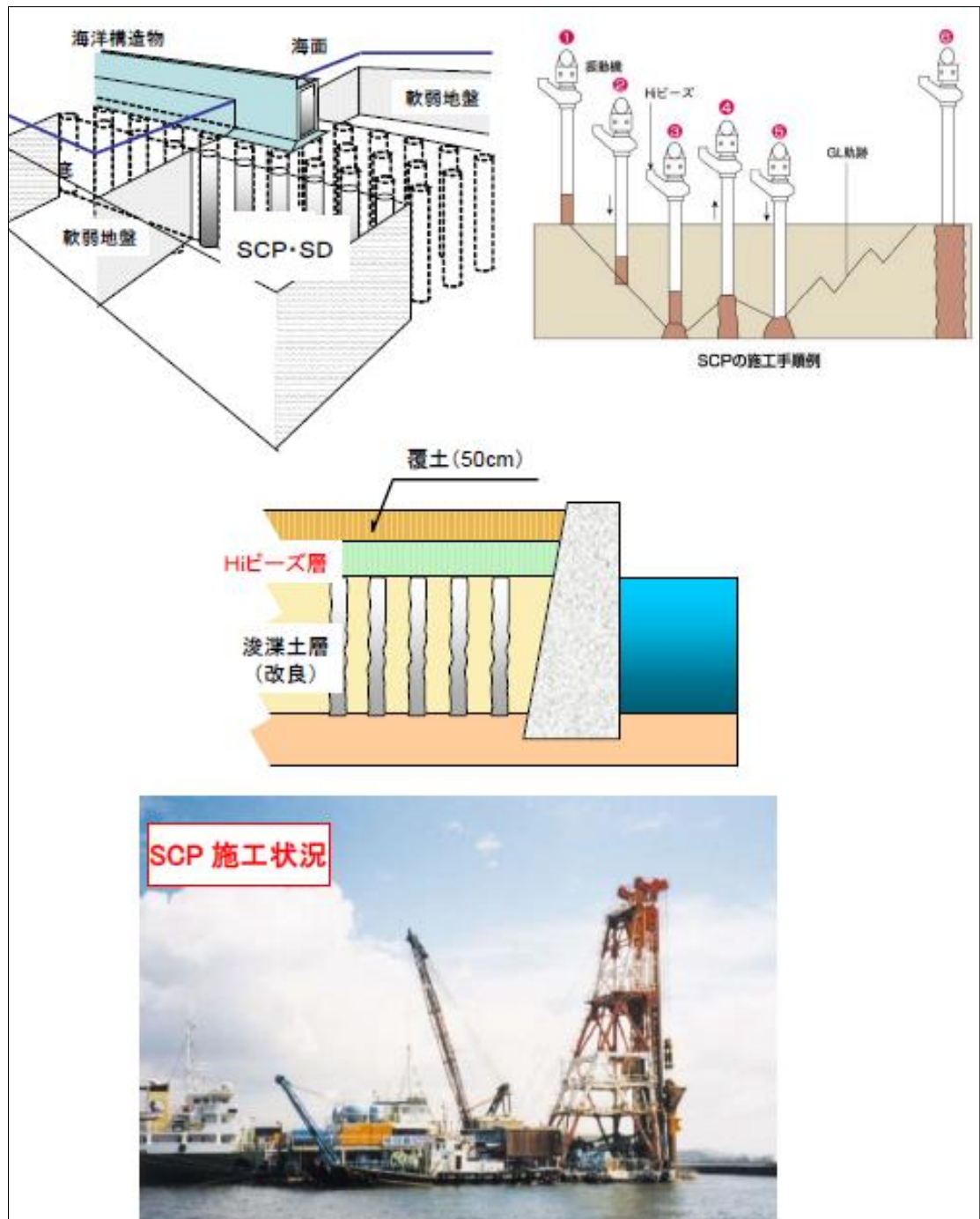


圖 3-67 日本瀨戶內海沿岸擠壓砂樁施工示意及現況圖^[2]

表 3-27 日本瀨戶內海沿岸擠壓砂樁材料性質^[2]

項 目	試 驗 值
平均粒徑(mm)	7.5
土壤顆粒密度(g/cm ³)	1.747
自然含水量(%)	11.6
吸水率(%)	16.4
滲透係數(cm/s)	1.34×10 ⁻³
內摩擦角	47.6°

3.2.8 橋樑及海底隧道

澳洲海崖大橋(Sea Cliff Bridge)(飛灰)^[51, 52]

1. 工程背景

位於澳洲新南威爾斯省的海崖大橋(Seacliff Bridge)(圖 3-68)，連結著克利夫頓(Clifton)與煤崖(Coalcliff)這兩座城市，環繞著海岸興建，2003 年開始施作、2005 年竣工，全長 665 公尺，由 Boral Concrete 公司建造。由於該大橋直接面對開放海域、受湧浪打擊，為了提高橋梁的耐用度，使橋樑的安全服役到目標年限—100 年，更重要的挑戰是能夠抵禦氯化物的侵蝕，工程團隊評估了不同的方式。起先評估使用 60%高爐石粉和 40%水泥、添加矽灰，但因其強度成長的幅度低且需要熟化、耗費時間長，最後工程團隊決定在混凝土中再添加比重至少 25%飛灰，主要用於橋的基樁與橋身。

2. 工程或環境效益

根據該計畫說明顯示，混凝土的收縮、坍度、抗壓強度皆符合預期，且煤灰之摻入有助其降低水化熱，並顯著提升抗硫酸鹽、抗氯化物、抗鹹水的能力。從該飛灰產品之物質安全資料表(表 3-28)中可見關於成分、毒性、暴露控制、穩定性及反應、對生態之影響等說明：此產品在應用於環境時並不會對環境產生負面影響，因其不可降解、不會有生物蓄積之特性，且在掩埋情況下預期有低土壤

流動性，但須於建築工程期間須注意排水或水路相關規劃的完善程度。



(圖片來源：illawarrashowcase)

圖 3-68 澳洲海崖大橋(Seacliff Bridge)

表 3-28 澳洲海崖大橋飛灰產品物質安全資料表

物質安全評估面向	評估結果
成分	飛灰及石英
毒性	此產品無已知毒性，及無相關足夠數據證明其毒性
暴露控制	此產品無生物限制量(biological limit values)
穩定性及反應	無預期產生之聚合物
對生態之影響	不可降解、無生物蓄積性、掩埋情況下的低土壤流動性

馬來西亞檳城二橋(飛灰)^[53]

1. 工程背景

位於馬來西亞檳城的檳城二橋(Sultan Abdul Halim Muadzam Shah Bridge)(圖 3-69)是馬來西亞檳城和馬來西亞大陸的第二座跨海大橋，連接檳城州東南部和威士利省的巴都加灣，為東南亞最長的跨海大橋，2006 年開始施作、2014 年竣工，全長 24 公里，其中

16.9 公里跨越大海，由中國港灣工程有限責任公司建造。為了達到橋樑 120 年的耐用年限，以及針對特定項目的耐久度需求以及必須採用本地材料的要求，採用飛灰、高爐石粉和矽灰，配置成低熱、低滲透度的高性能凝土，施工後通過實體模型測溫、溫控仿真計算制定出具體的溫控防裂措施；有效控制混凝土的內部溫度和內表溫差，避免產生裂紋，從而保證橋樑的使用壽命。

2. 工程或環境效益

根據該計畫說明顯示，混凝土的收縮、坍度皆符合預期，且抗壓強度、吸水率和抗氯離子滲透等性能良好，滿足施工和耐久性的要求。



(圖片來源：malaymail.com)

圖 3-69 檳城第二大橋(Penang Second Bridge)

中國杭州灣跨海大橋(飛灰)^[54, 55]

1. 工程背景

位於中國浙江省的杭州灣跨海大橋(Hangzhou Bay Bridge)(圖 3-70)，連結著嘉興市與寧波市這兩座城市，橫跨杭州灣海域，2003 年開始施作、2007 年竣工，全長 38 公里。該橋位處於杭州灣，是世界三大強潮海灣之一，受強風及大浪的打擊，使橋樑的安全服役到目標年限—100 年，還要克服海水氯化物腐蝕性的問題。工程

團隊選擇在混凝土摻入大量的飛灰和磨細高爐石粉，製成具有高密度的特殊混凝土，最後決定採用水泥(55%)和飛灰(45%)，因添加飛灰具有增長後期強度的能力，並能緩慢降低氯離子擴散係數，增加抗氯離子滲透的能力，另外，從施工的過程質量控制來看，原料供應及海上施作的配置也會較為簡便，主要用於橋的主墩以及橋樑的基樁。

2. 工程或環境效益

根據該計畫說明顯示，混凝土的收縮、坍度、抗壓強度皆符合預期，且飛灰之摻入有助其降低水化熱，並顯著提升抗硫酸鹽、抗氯化物的能力。



(圖片來源：<https://www.gotoningbo.com.tw>)

圖 3-70 杭州灣跨海大橋(Hangzhou Bay Bridge)

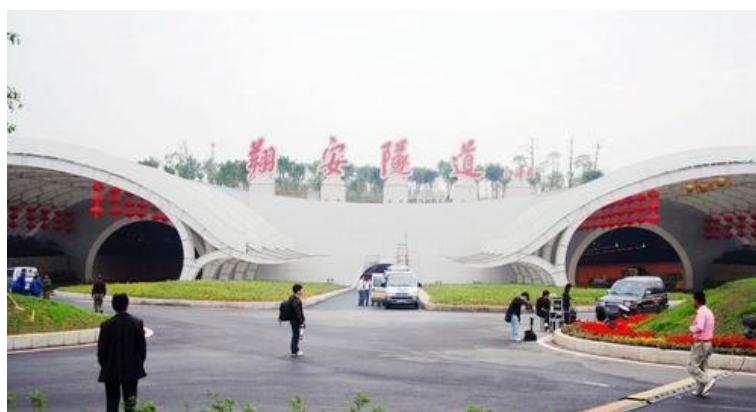
中國廈門翔安海底隧道(飛灰)[56]

1. 工程背景

位於中國福建省的翔安海底隧道(xiang an sub-sea tunnel)(圖 3-71)，連結著廈門市本島與翔安區陸地，是中國第一條由內專家設計的隧道，2005 年開始施作、2010 年竣工，由廈門路橋建設集團有限公司負責建造。翔安隧道全長 6050 公尺，其中海底部分長 4200 公尺，最深的地方在海平面下 70 公尺左右。

2. 工程或環境效益

根據該計畫說明顯示，為保證隧道的結構有超過 100 年的耐久性，灌漿作業中使用高性能混凝土施工，包含水泥、高效減水劑、矽灰、飛灰等原料，飛灰中含有大量的玻璃球形顆粒，在常溫下與水泥產生水合作用，生成新的矽酸鈣凝膠，填充水泥內部空隙，提高混凝土抗滲性。混凝土的收縮、坍度、抗壓強度皆符合預期，且飛灰之摻入有助其降低水化反應。



(圖片來源：<http://www.dahe.cn>)

圖 3-71 中國廈門翔安海底隧道

3.2.9 碼頭岸壁

日本酒田港外港區碼頭建设工程(飛灰) [65]

1. 工程背景

1943 年酒田港建設辦公室成立，陸續針對酒田港進行相關碼頭改善工程計畫，1998 年在外港區碼頭岸壁工程計畫採用酒田共同火力發電廠所產生之石炭灰(圖 3-72)，將其與水泥、水混合固化處理後，作為碼頭岸壁的回填材料，施作圖面如圖 3-73 所示。自 2016 年起，酒田市政府持續進行相關海域環境監測，防止因酒田北港區開發而產生水污染，依 2024 年《酒田市環境報告書》^[67]公共水域水質測量計畫包含酒田港口 10 個監測點位(圖 3-74)，報告成果顯示 2023 年度各海域檢測值皆符合環境標準。

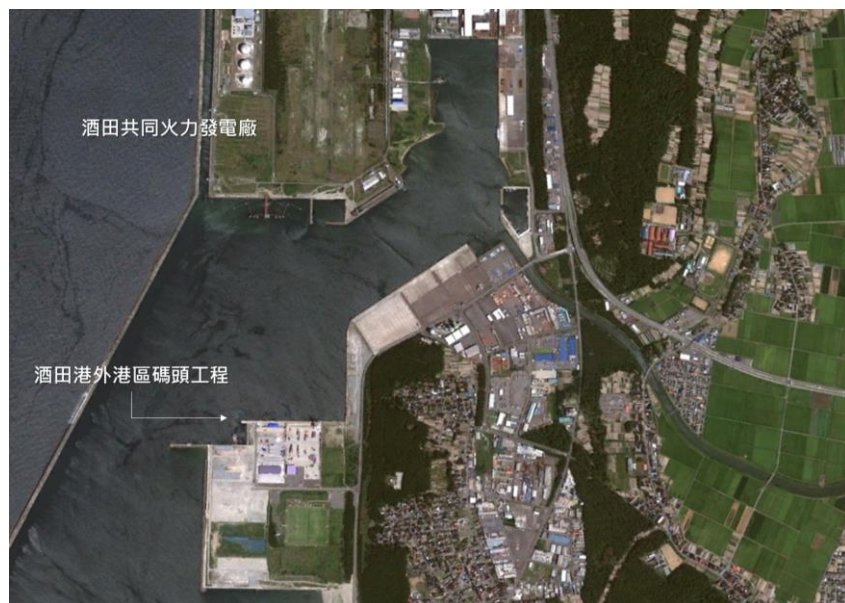


圖 3-72 日本酒田港外港區碼頭建设工程位置圖

第四章 煤灰應用於海事工程之環境安全與產品品質標準

為確保煤灰應用於海事工程之環境安全與工程品質能符合法規及規範要求，須做好各階段之品質查驗或驗收，其中供料階段之煤灰材料自主檢驗與製作階段之產品品質標準可參考第四章說明，施工階段之施工規劃及注意事項可參考第五章，現場品質驗收流程及彙整表整理至第六章，環境監測可參考第七章，其餘設計或施工注意事項可參考第八章。

本公司將定期針對產出煤灰進行自主檢測，包含重金屬溶出量(TCLP 及再生粒料環境用途溶出程序)、pH 與天然放射性核種活度濃度指數，如表 4-1 與表 4-2，為保障源頭品質管制，可配合煤灰採購方需求提供本公司煤灰相關檢測結果。另考量各類工程特性及需求，由設計者再進一步規範煤灰或相關產品之檢驗標準，以達工程安全設計之目的。本章各小節即依據國內外相關工程案例或經驗，初步制定煤灰相關產品品質標準，未來可配合更多實際應用案例予以檢討。

表 4-1 煤灰自主檢測(一)-重金屬溶出量(TCLP 及再生粒料環境用途溶出程序)[57, 58, 62,,63]

檢測項目	檢測方法	標準值 (mg/L)		檢測頻率
重金屬溶出量	毒性特性溶出程序(TCLP)(NIEA R201)	總銅 Cu	≤15.0	每半年一次
		總鎘 Cd	≤1.0	
		總鉛 Pb	≤5.0	
		總鉻 Cr	≤5.0	
		總砷 As	≤5.0	
		總汞 Hg	≤0.2	
		總硒 Se	≤1.0	
		總鋇 Ba	≤100.0	
		六價鉻 Cr ⁶⁺	≤2.5	
	再生粒料環境用途溶出程序(NIEA R222) ^[註 1]	鉛	≤0.1	每半年一次
		鎘	≤0.05	
		鉻	≤0.5	
		銅	≤10	

		砷	≤ 0.5	
		汞	≤ 0.02	
		鎳	≤ 1	
		鋅	≤ 50	

註：1.依環境部「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」規範，海事工程非屬公告事項七之限制使用地點，應適用焚化再生粒料環境標準第二類地下水污染管制標準。

表 4-2 煤灰自主檢測(二)-pH 與輻射^[59, 60]

檢測項目	檢測方法	標準值	檢測頻率
pH	氫離子濃度指數測定方法 (NIEA R208)	$< 12.5^{[註 1]}$	每半年一次
建材活度濃度指數(I)	純鍺偵檢儀(RL-E0-14)	$I \leq 1^{[註 2]}$	

註：1.比照「轉爐石海事工程使用手冊」標準。

2.採用天然放射性物質管理辦法中，對建築物主體結構之標準。

4.1 工程填地

4.1.1 煤灰環境安全品質檢測

煤灰應定期進行自主檢測，包含重金屬溶出量(TCLP 及再生粒料環境用途溶出程序)、pH 與建材活度濃度指數，如表 4-1 與表 4-2 所列。

4.1.2 產品標準

煤灰可直接用於工程填地。若採用煤灰固化後之破碎材型式做為工程填地使用，產品標準如表 4-3；若採用控制性低強度回填材料型式做為工程填地使用，產品標準如表 4-4。本節表格所列之檢測項目及規範值僅供參考，設計或工程單位可依實際需求進行調整。除本節所列之產品標準外，煤灰應用於工程填地前需注意是否符合再生粒料應用於港區造地填築作業程序。

表 4-3 工程填地產品標準-破碎材

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
比重	$\geq 1.10^{[註1]}$ 或依設計需求	CNS 487 細粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法 CNS 488 粗粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法
粒徑範圍 (cm)	$\leq 10^{[註2]}$ 或依設計需求	CNS 486 粗細粒料篩析法

註：1. 參考海水比重值，若回填區域有較明顯的海水擾動或破碎材粒徑較大時，須適度提高比重，使破碎材可克服浮力及其他外力順利沉降。本比重為參考 CNS 487 與 CNS488 之試驗結果，如有其他更適合之方法及標準，可由設計者與業者協商同意後執行。

2. 一般而言，作為工程填地之破碎材，強度較無特別要求，若為低強度粒料，破碎粒徑不宜設定太低，可參考市面上破碎機具設定粒徑規範。若經設備直接形成適當尺寸塊狀則毋須再破碎。

表 4-4 工程填地產品標準-控制性低強度回填材料

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
坍流度(cm)	$\geq 40^{[註1]}$ 或依設計需求	CNS 14842 高流動性混凝土坍流度試驗法
抗壓強度(28天)(kgf/cm ²)	$\geq 20^{[註2]}$ 或依設計需求	CNS 15865 控制性低強度材料圓柱試體之製備及試驗法

註：1. 參考 CLSM 坍流度，可依實際需求進行調整。

2. 此為 CLSM 最低強度要求，可依現場實際需求調整。

4.2 隔堤

4.2.1 煤灰環境安全品質檢測

煤灰應定期進行自主檢測，包含重金屬溶出量(TCLP 及再生粒料環境用途溶出程序)、pH 與建材活度濃度指數，如表 4-1 與表 4-2 所列。

4.2.2 產品標準

採用煤灰固化後之破碎材型式做為隔堤材料使用，產品標準如表 4-5，若以控制性低強度回填材料型式做為隔堤材料，產品標準如表 4-6 所示。本節表格所列之檢測項目及規範值僅供參考，設計或工程單位可依實際需求進行調整。

表 4-5 隔堤產品標準-破碎材

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
比重	$\geq 1.10^{[註 1]}$ 或依設計需求	CNS 487 細粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法 CNS 488 粗粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法
粒徑範圍(cm)	$\leq 10^{[註 2]}$ 或依設計需求	CNS 486 粗細粒料篩析法

註：1. 參考海水比重值，若回填區域有較明顯的海水擾動或破碎材粒徑較大時，須適度提高比重，使破碎材可克服浮力及其他外力順利沉降。本比重為參考 CNS 487 與 CNS488 之試驗結果，如有其他更適合之方法及標準，可由設計者與業者協商同意後執行。

2. 一般而言，作為隔堤應用之破碎材，強度較無特別要求(尤其是背填材)，若為低強度粒料，破碎粒徑不宜設定太低，可參考市面上破碎機具設定粒徑規範。若經設備直接成形成適當尺寸塊狀則毋須再破碎。

表 4-6 隔堤產品標準-控制性低強度回填材料

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
坍流度(cm)	$\geq 40^{[註 1]}$ 或依設計需求	CNS 14842 高流動性混凝土坍流度試驗法
單位重(t/m^3)	$\geq 1.6^{[註 2]}$ 或依設計需求	CNS 15863 控制性低強度材料密度(單位重)、拌成物體積、水泥含量及含氣量(比重計法)試驗法
落沉試驗(小時)	依設計需求 ^[註 3]	CNS 15862 測定控制性低強度材料施加荷重時機之落球試驗法
抗壓強度 (28 天) (kgf/cm^2)	$\geq 20^{[註 4]}$ 或依設計需求	CNS 15865 控制性低強度材料圓柱試體之製備及試驗法

註：1. 參考 CLSM 坍流度，可依實際需求進行調整。

2. 參考台電全煤灰 CLSM 配比單位重。

3. 可參考 CLSM 一般型常用標準，或依實際需求進行調整。

4. 參考 CLSM 最低強度要求，可依現場實際需求調整。

4.3 港灣道路基底層或施工便道

4.3.1 煤灰環境安全品質檢測

煤灰應定期進行自主檢測，包含重金屬溶出量(TCLP 及再生粒料環境用途溶出程序)、pH 與建材活度濃度指數，如表 4-1 與表 4-2 所列。

4.3.2 產品標準

煤灰用於港灣道路基底層或施工便道主要以控制性低強度回填材料型式為主，產品標準如表 4-7 所示。本節表格所列之檢測項目及規範

值僅供參考，設計或工程單位可依實際需求進行調整。

表 4-7 港灣道路基底層或施工便道產品標準-控制性低強度回填材料

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
坍流度(cm)	$\geq 40^{[註1]}$ 或依設計需求	CNS 14842 高流動性混凝土坍流度試驗法
落沉試驗(小時)	依設計需求 ^[註2]	CNS 15862 測定控制性低強度材料施加荷重時機之落球試驗法
抗壓強度 (7 天或 28 天) (kgf/cm ²)	依設計需求 ^[註3]	CNS 15865 控制性低強度材料圓柱試體之製備及試驗法

註：1. 參考 CLSM 坍流度，可依實際需求進行調整。

2. 可參考 CLSM 一般型常用標準，或依實際需求進行調整。

3. 可參考台電通霄電廠廠區示範道路實際強度(林茂容, "煤灰水泥處理柔性鋪面基底層的效能評估," 2019.)，可依承載需求適度調整。

4.4 無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)

4.4.1 煤灰環境安全品質檢測

煤灰應定期進行自主檢測，包含重金屬溶出量(TCLP 及再生粒料環境用途溶出程序)、pH 與建材活度濃度指數，如表 4-1 與表 4-2 所列。

4.4.2 產品標準

煤灰用於海事工程之無筋預鑄混凝土消波塊或方塊時，需依工程會施工綱要規範「第 03439 章港灣用預鑄混凝土塊」或參考台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊等規定辦理。底灰性質要求如表 4-8 所示，飛灰做為礦物摻料，其相關品質特性依工程會施工綱要規範(第 03050 章)及 CNS 3036 相關規定辦理。製成之產品標準如表 4-9 所示。本節表格所列之檢測項目及規範值僅供參考，若無特別選訂，煤灰混凝土單位重可能僅有 1.9 t/m³，設計或工程單位可依實際需求進行調整。本節所指之方塊為設計抗壓強度在 210 kgf/cm² 以上，若非屬該強度範圍，則毋須參考表 4-8 與表 4-9，由設計單位依設計強度另行參考控制性低強度回填材料或其他混凝土相關規範即可。

表 4-8 應用於無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)之底灰性質要求

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
粒徑範圍(mm)	$\leq 9.5^{[註 1]}$ 或依設計需求	CNS 486 粗細粒料篩析法
細度模數 ^[註]	$2.10 \sim 3.50^{[註 1][註 2]}$ 或依設計需求	CNS 486 粗細粒料篩析法
健度(硫酸鈉)(%)	$\leq 10^{[註 1]}$ 或依設計需求	CNS 1167 使用硫酸鈉或硫酸鎂之粒料健度試驗法
含水量(%)	$\leq 30^{[註 1]}$ 或依設計需求	CNS 11298 粒料含水量乾燥測定法
比 重	$\geq 1.6^{[註 1]}$ 或依設計需求	CNS 487 細粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法 CNS 488 粗粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法
氯離子(%)	$\leq 0.012^{[註 3]}$ 或依設計需求	CNS 13407 氯離子含量試驗法測試

- 註：1. 參考台電實際案例、林茂容, "高煤灰摻量無鋼筋混凝土應用於海事工程構造物完成報告," 2019.與台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊。本比重為參考 CNS 487 與 CNS488 之試驗結果, 如有其他更適合之方法及標準, 可由設計者與業者協商同意後執行。
2. 若細度模數不符規範值, 經實驗室試驗結果能達到需求工作性與強度, 並經同意後, 亦可使用。
3. 經業主同意後氯離子含量可免測試。

表 4-9 無筋預鑄混凝土塊^[註 1](消波塊或方塊)產品標準-混凝土

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
坍 度(cm)	$\geq 12.5^{[註 2]}$ 或依設計需求	CNS 1176 混凝土坍度試驗法
單位重(t/m^3)	$\geq 1.9^{[註 3][註 4]}$ 或依設計需求	CNS 11151 混凝土單位重、拌和體積及含氣量(比重)試驗法
氯離子(kg/m^3)	$\leq 0.15^{[註 5]}$ 或依設計需求	CNS 13465 新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法
抗壓強度 (28 天) (kgf/cm^2)	$\geq 210^{[註 3]}$ 或依設計需求	CNS 1232 混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法

- 註：1. 若產品有吊掛鋼筋, 建議做適當的防蝕處理。
2. 可依實際工作性需求進行調整。
3. 參考台電實際案例、林茂容, "高煤灰摻量無鋼筋混凝土應用於海事工程構造物完成報告," 2019.與台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊。
4. 若添加底灰時, 應注意該混凝土單位重量, 再據以設計所需混凝土方塊、消波塊等之尺寸或型式, 以符合設計所需之混凝土塊個體重量。
5. 經業主同意後氯離子含量可免測試。

4.5 人工魚礁

4.5.1 煤灰環境安全品質檢測

煤灰應定期進行自主檢測，包含重金屬溶出量(TCLP 及再生粒料環境用途溶出程序)、pH 與建材活度濃度指數，如表 4-1 與表 4-2 所列。

4.5.2 產品標準

本手冊將人工魚礁分為有鋼筋與無鋼筋，說明如下：

1. 有鋼筋

煤灰應用於有筋人工魚礁，以使用飛灰為原則(經業主同意使用底灰不在此限)，飛灰品質需依工程會施工綱要規範(第 03050 章)及 CNS 3036 相關規定辦理。

2. 無鋼筋

煤灰用於人工魚礁時，需依工程會施工綱要規範「第 03439 章 港灣用預鑄混凝土塊」及參考台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊等規定辦理。底灰性質要求如表 4-10 所示，飛灰做為礦物摻料，其相關品質特性依工程會施工綱要規範(第 03050 章)及 CNS 3036 相關規定辦理。製成之產品標準如表 4-11 所示。本節表格所列之檢測項目及規範值僅供參考，若無特別選訂，煤灰混凝土單位重可能僅有 1.9 t/m^3 ，設計或工程單位可依實際需求進行調整。

表 4-10 應用於無筋人工魚礁之底灰性質要求

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
粒徑範圍(mm)	$\leq 9.5^{[註1]}$ 或依設計需求	CNS 486 粗細粒料篩析法
細度模數	$2.10 \sim 3.50^{[註1][註2]}$ 或依設計需求	CNS 486 粗細粒料篩析法
健度(硫酸鈉)(%)	$\leq 10^{[註1]}$ 或依設計需求	CNS 1167 使用硫酸鈉或硫酸鎂之粒料健度試驗法
含水量(%)	$\leq 30^{[註1]}$ 或依設計需求	CNS 11298 粒料含水量乾燥測定法
比 重	$\geq 1.6^{[註1]}$ 或依設計需求	CNS 487 細粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法 CNS 488 粗粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法
氯離子(%)	$\leq 0.012^{[註3]}$ 或依設計需求	CNS 13407 氯離子含量試驗法測試

- 註：1. 參考台電實際案例、林茂容, "高煤灰摻量無鋼筋混凝土應用於海事工程構造物完成報告," 2019.與台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊。本比重為參考 CNS 487 與 CNS488 之試驗結果, 如有其他更適合之方法及標準, 可由設計者與業者協商同意後執行。
2. 若細度模數不符規範值, 經實驗室試驗結果能達到需求工作性與強度, 並經同意後, 亦可使用。
3. 經業主同意後氯離子含量可免測試。

表 4-11 無筋人工魚礁產品標準-混凝土

檢測項目	規範值	檢 測 方 法
坍度(cm)	$\geq 12.5^{[註1]}$ 或依設計需求	CNS 1176 混凝土坍度試驗法
單位重(t/m^3)	$\geq 1.9^{[註2][註3]}$ 或依設計需求	CNS 11151 混凝土單位重、拌和體積及含氣量(比重)試驗法
氯離子(kg/m^3)	$\leq 0.15^{[註4]}$ 或依設計需求	CNS 13465 新拌混凝土中水溶性氯離子含量試驗法
抗壓強度(28天)(kgf/cm^2)	$\geq 210^{[註5]}$ 或依設計需求	CNS 1232 混凝土圓柱試體抗壓強度檢驗法

- 註：1. 可依實際工作性需求進行調整。
2. 參考台電實際案例、林茂容, "高煤灰摻量無鋼筋混凝土應用於海事工程構造物完成報告," 2019.與台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊。
3. 若添加底灰時, 應注意該混凝土單位重量, 再據以設計所需混凝土方塊、消波塊等之尺寸或型式, 以符合設計所需之混凝土塊個體重量。
4. 經業主同意後氯離子含量可免測試。
5. 開發/設計單位須依預定規劃投放海域情形(含深度、海流情形等)進行相關評估後, 設計礁體強度。

第五章 煤灰應用於海事工程之施工規劃

由前述煤灰特性及相關案例說明可知，煤灰得以原煤灰、破碎材、控制性低強度回填材料及混凝土等型式，廣泛應用於工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊及人工魚礁等工程用途。本章即針對原煤灰其製成之半成品或成品等不同型式，研擬應用於相關工程之施工規劃，供使用者參考，並配合工程特性另行修訂。

5.1 一般原則

煤灰應用於工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊、及人工魚礁等工程，將以原煤灰、破碎材、控制性低強度回填材料及混凝土等不同型式作為工程材料使用，於設計階段除依循相關設計規範外，仍需注意煤灰物化性質及應用途徑，妥適規劃相關施工方法與施工步驟，並視工程內容與施工環境特性予以檢討擬訂，以達相關工程施工設置目的。另外，工程施作前應向中央或地方主管機關申請同意始可施工。

茲將有關煤灰以不同型式應用於相關海事工程一般注意事項與建議，彙整如表 5-1 所示，設計或使用單位宜再依據工程環境與應用場域特性評估採用。

表 5-1 煤灰海事工程使用注意事項與建議

煤灰應用型式	注意事項	建 議 事 項
原煤灰	較天然砂輕	一般底灰烘乾比重約 1.1~2.2，設計或使用單位可依工程需求評估使用或摻拌重質材料來提高整體比重。
破碎材	較天然石料輕	一般煤灰破碎材烘乾比重介於底灰(1.1~2.2)與天然砂石(2.6)之間，設計或使用單位可另調整材料配比以符合工程比重需求。
控制性低強度 回填材料	較一般水泥漿料輕； 水下澆置需注意析離狀況	一般控制性低強度回填材料單位重約僅 1.6~1.75(t/m ³)，設計或使用單位可另調整材料配比以符合工程比重需求。 控制性低強度回填材料利用泵送車及軟管澆置於水下 2.5m 內尚可維持澆置品質，若於更深處之澆置作業，設計或使用單位宜再評估搭配特密管等適當工法因應。
混凝土	較一般混凝土輕	一般煤灰混凝土單位重約 1.9~2.1(t/m ³)，可研究評估調整配比或摻拌重質材料來改善煤灰混凝土單位重較小之情況。 設計或使用單位應依設計規範(如消波塊、混凝土方塊需以 Hudson、Tanimoto 等計算公式)重新評估計算所需結構量體大小或尺寸規格。

註：1.比重與單位重乃參考台電公司資料。

2.CLSM 於水下 2.5m 內澆置，搭配適當工法尚可維持澆置品質係參考台電公司實際施工案例。

5.2 煤灰應用於海事工程相關施工步驟與工法說明

5.2.1 工程填地

煤灰應用於工程填地，現階段可採原煤灰、破碎材及控制性低強度回填材料等型式進行回填，設計者宜考量 4.1 節相關產品特性，須注意原煤灰、煤灰破碎材及控制性低強度回填材料比重與單位重均較天然砂石、水泥漿料輕之情況，本節亦僅針對回填作業之施工步驟與工法說明，若回填區未來有其他用途時，則應配合回填區用途需求再另行設計與規劃適當工法，以符合回填工程之目的。

採原煤灰、破碎材等型式做為工程填地時，係分別以裸料及煤灰水泥固化破碎，以替代天然石料之應用方式；採控制性低強度回填材料型式進行回填時，依據台電工程案例，利用軟管澆置深度約 2.5m 時，仍可維持漿料硬固後之成品狀況。澆置深度亦可依據工程特性、工程技術與機具之精進，使用添加抗析離劑、特密管或其他適當工法，而據以檢討放寬澆置深度，以顧及工程品質與施工需求。

有關原煤灰、破碎材及控制性低強度回填材料等工程填地之應用型式，未來亦得配合相關材料之研究、工法演進或設備精進，不排除拌合其他材料(如：包含浚港淤泥、一貫煉鋼之高爐石或轉爐石、營建土石方及抽砂等材料)再進行回填施工。相關施工規劃與工法請參酌以下說明。

1. 施工說明

承包商應在施工前向業主或監造單位提報施工計畫書，經工程司核定後施工。

(1) 施工計畫

施工計畫內容至少包含以下各點：

- ① 依施工項目建立人事組織、任務編組。
- ② 開工前置作業，工程及材料概述、施工方法、施工程序、分項施工計畫、測量工程及假設工程計畫等施工細則。
- ③ 施工圖、臨時設施工作圖之設計、繪製與結構計算等。
- ④ 依據契約工期要求，配合氣象、海象及環境等訂定工作天及

工作時數，訂定每工作天/月各別工項必須完成之工作量。

⑤施工機具設備與人力運用計畫，包含施工機具之名稱、型式、每小時工作能量、配備數量及工作進度表。

⑥施工交通維持及安全管制措施、安全衛生管理、環境保護、工區及鄰近水陸地區環境污染防治計畫。

若該工程已依環境影響評估法辦理申請時，仍須依說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等相關要求，以及當地相關法規辦理。

⑦緊急應變及防災計畫等。

(2) 施工方法

依原煤灰、破碎材及控制性低強度回填材料等三種型式說明：

① 原煤灰

一般而言，煤灰由輸灰管、卡車或灰罐車(飛灰)運送至填築區，必要時須配合現場設備進行排灰，惟仍須配合煤灰供料方式及工區特性適度調整。

A. 以易辨認且牢固之標誌標示工程填地填築區域邊界，如於陸地及淺水部分可用標竿標示，於水中部分可利用混凝土塊及浮球配合測量定位標示。

B. 煤灰可藉由傾卸卡車載運、船運或管線輸送等方式，依規劃之填築區進行填築。

C. 若採車載從岸側向水側逐步回填施工時，作為運送之通路應適合重車通行，其高度以不受潮位影響，寬度至少為3.9m，並於適當地點設置迴車道。

D. 若採輸灰管輸送時，應配合設計圖說之規定，設置輸送管線再排入回填區。

E. 若採船運方式，則宜有臨時卸料碼頭或相關臨時卸料設施之規劃(如簡易岸邊吸斗、鏟斗、抓斗設施等)，以利將煤灰回填至填區內。

F. 煤灰填築至出水面時，需視實際現場狀況進行灑水工作，並於達設計高程後，再依據設計圖說要求鋪設覆蓋層，以減少揚塵發生。

G. 若為增加回築區之煤灰填築量，可參考擠壓砂樁之施工方式，將煤灰擠壓於填區空間內，相關施工重點整理如下：

(A) 施工機具

- a. 承包商應具備足夠之砂樁機、挖土機、剷裝機、運土卡車及相關附屬設備。
- b. 所採之砂樁機其施工能量至少能打至預計深度樁長加 2 公尺之深度，施工前應提供砂樁機規格資料及具完備之施工安全控制計畫經工程司認可後始得施工。

(B) 擠壓樁之樁徑、間距、打設深度及方法，均應按設計圖說施工，不得擅自變更，如遇現場無法施作時，須經工程司同意後調整。

(C) 施工前需將擠壓區域之障礙物清除，依設計圖說規定適當整平地表高程，並調查鄰近之地下管線，排水溝、水井及構造物基礎情況等，採取適當防護。

(D) 施工步驟

- a. 採用振動擠壓式或其他經設計單位指示之工法施作。
- b. 利用振動打樁機將底部有自動靴密封之鋼管，打至規定之設計深度。
- c. 將一定量之煤灰由漏斗注入鋼管內，再將鋼管徐徐振動拔起一定高度(依設計要求)，利用振動及壓縮空氣等方法，使管內煤灰經自動靴擠出管外。
- d. 將鋼管徐緩拔起避免坍孔，每次提升高度約 4.0m 為原則，使鋼管中之煤灰經由自動靴順利流入管底孔中；再將拔起之鋼管適度往下振壓 3.0m，利用壓縮空氣與鋼管下端，擠壓管外之灰料，將擠壓樁搗實，如此往復操作直至工址整

理後之地表下方 3m 為止；當擠壓樁施作深度位於工址整理後之地表下方 3m 內時，得依提昇貫入比 4：3 之比例調整此深度內每次鋼管提昇高度。每公尺樁長之壓灰量不得少於 0.5m^3 (鬆方)，並確實按規定投灰量打設。以上作業狀況得配合現場實際施工狀況調整。

e.鋼管提昇之速度應小於 $8\text{m}/\text{min}$ ，且往上拔起與往下振壓之速度應力求均勻，以免擠壓樁有中斷、頸縮情形。

f.鋼管拔起與振動過程中，應隨時校核投入之灰量與形成之擠壓樁長度。

(E) 樁位之容許誤差

a. 樁位置須依據設計圖規定佈設，為防止累積誤差，須設置若干控制基線，以便引測附近擠壓樁位置。

b. 樁位打設前須進行放樣，放樣偏差不得超過 10 公分，另得由需求面及技術面評估研訂之。

(F)施打順序建議由外圍向中心漸進為原則，或採階段或跳排方式打設，如因其他原因，而須變更施打順序時，須先取得工程司之同意。

(G)為確保擠壓樁能得到良好效果，施工機具必須熟練之人員操作，於施工時應裝設(1)五針式自動記錄器(KW 計、BM 計、GL 計、SL 計及 MSL 計)，或(2)三針式自動記錄器(KW 計、BM 計、GL 計)，且施工前提送分項計畫書針對投入量提出可行且清晰之監視錄影記錄方式，以攝錄鏟煤灰投入漏斗之過程，以便將施工過程作成紀錄，供工程師查核。

a. 電力自動記錄器(KW 計)：為貫入鋼管與擠壓樁時，振動機所耗電力之連續記錄計，用以推測擠壓樁之壓實度。

b. 投入砂量桶記錄器(BM 計)：本計用於記錄注入管內之煤灰量，用以檢算擠壓樁實需煤灰量進而判定擠壓樁之樁徑、樁長與壓實度是否合乎規定。

- c. 管底高程記錄器(GL 計)：為施工時鋼管貫入與煤灰料被擠壓作業過程中，自動記錄管底高程變化，以得知擠壓樁之長度，並供查看擠壓樁形成經過 及其壓實度。
- d. 管內煤灰面高程記錄器(SL 計)：為鋼管提升與擠壓過程中，監測鋼管內煤灰面高程變化，配合管底高程記錄計，瞭解各深度圍範內之實際投灰量。
- e. 基準線記錄計(MSL 計)：為界定鋼管內煤灰面高程變化之基準，以檢測上述各記錄計之高程變化，並控制每次擠壓之投灰量。
- f. 振動機宜具備 KW、BM 及 GL 等三針式自動記錄器。且上述各自動記錄器均應於施工前會同工程司進行校正。各項自動記錄器如因故臨時故障，非經工程司同意不得繼續施工。
- g. 每支擠壓樁之施工紀錄至少應包含下列項目：樁號、日期、天氣、施工起迄時間、打樁機別、操作者及乙方現場監督工程師姓名、施工前後原地面高程、振動頻率及出力能量、鋼管管徑、鋼管貫入時間及拔管時間、鋼管 貫入深度、填灰量、灰料進場數量統計、壓縮空氣壓力、異常現象等。
- h. 以上各種記錄，承包商應予整理後於次日送工程師核備。
- i. 上述之自動記錄計如有下列現象，應立即停止擠壓樁打設之作業，並通知甲方，待瞭解及排除異常，經工程師同意後，才可繼續施工。

(a) 投入灰量不足或不均勻

(b) 自動記錄計故障或異常

(c) 記錄計表列結果部分異常

(H) 擠壓樁施工完成後，應依設計要求進行地面復舊。

H. 若環境影評估法之相關說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等對施工方法有相關要求時，則須依其要求

辦理。

②破碎材

由於破碎材為煤灰固化後破碎而成，型態類似礫石料，因受粒徑大小影響，一般無法以輸灰管方式施工，而以車載、船運等方式施工為主，相關作業則與煤灰作為工程填地施工方法略同。

- A. 以易辨認且牢固之標誌標示〈填築區域邊界，如於陸地及淺水部分可用標竿標示，於水中部分可利用混凝土塊及浮球配合測量定位標示。
- B. 破碎材可藉由傾卸卡車載運或船運等方式，依規劃之填築區進行填築。
- C. 以車載逐步回填施工時，作為運送之通路應適合重車通行，其高度以不受潮位影響，寬度至少為 3.9m，並於適當地點設置迴車道。
- D. 若採船運方式，則宜有臨時卸料碼頭或相關臨時卸料設施之規劃(如簡易岸邊吸斗、鏟斗、抓斗設施等)，以利回填至填區內。
- E. 填築至出水面時，需視實際現場狀況進行灑水工作，並於達設計高程後，再依據設計圖說要求鋪設覆蓋層，以減少塵揚發生。
- F. 若環境影評估法之相關說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等對施工方法有相關要求時，則須依其要求辦理。

③控制性低強度回填材料

控制性低強度回填材料主要由煤灰、水泥、水與其他摻料拌合而成，一般可在工地現場或拌合場混拌後，藉由拌合車、泵浦車、管線等進行填築，惟需注意漿料可能發生分離狀況，故宜採小分區、分層填築方式，以減低分離狀況發生。

- A.採小分區填築方式，以易辨認且牢固之標誌標示工程填地填築區域邊界，如於陸地及淺水部分可用標竿標示，於水中部分可利用混凝土塊及浮球配合測量定位標示各分區。
- B.控制性低強度回填材料回填之分區，宜配合供料能量及施工工法予以規劃，並配合設置臨時設施，減少水體擾動情況及漿料擴散，使漿料能於規劃之空間與時間內完成澆置，以利後續施工。
- C.水位以下之控制性低強度回填材料澆置時，以拌合車配合水泥輸送軟管或特密管，由下往上填注之施工方式為宜，澆置作業應自海床底部開始灌注及參考第 03310 章「結構用混凝土」之水中混凝土施工要求辦理，以減少漿料分離狀況發生為原則。除經過特殊配比設計或添加劑可降低漿料分離情況外，不宜以拌合車或受泥船直接傾卸於填築區內之方式施工。
- D.水位以下之控制性低強度回填材料澆置時，採泵浦車以水泥輸送軟管澆置於填築區時，除經進一步評估研析，水位以下之澆置深度以不超過 2.5m 為宜，惟經進一步評估研析其他適當澆置工法時，得將澆置深度予以加深，以確保施工品質與施工需求。
- E.水位以上之控制性低強度回填材料澆置時，得以拌合車直接傾卸或輔以泵浦車利用其臂架直接澆置。
- F.車輛運送之通路應適合重車通行，其高度以不受潮位影響，寬度至少為 3.9m，並於適當地點設置迴車道。
- G.控制性低強度回填材料回填至出水面後，得視設計要求，參考工程會第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」之施工縫與第 03310 章「結構用混凝土」之混凝土養護要求等相關規定辦理。
- H.若環境影評估法之相關說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等對施工方法有相關要求時，則須依其要求

辦理。

2. 材料供應計畫

承包商於開工後須提出工程填地之材料供應計畫。計畫內容應包括下列各點：

- (1)材料供應場之位置、儲存量及物化性質。
- (2)材料需求量、運輸量、儲備量及使用量。
- (3)材料供應/堆置場平面佈置圖。
- (4)退貨機制：如材料收受後，業主或監造單位進行抽驗，檢測判定不符合品質規範則進行退貨，或按工程契約相關規定辦理。

3. 材料儲備與運輸

以下主要針對陸運或海運之施工方式，若煤灰利用輸灰管填築時，則無須特別考量儲備及運輸之施工規劃。

(1)儲備

- ①依據工程填地之材料供應計畫，參照每日最大需要量及合理儲備量設置儲存場，平日應儲備相當數量，以備雨季時，可維持工程填地之材料供應，避免造成工程停工，有關材料之抽驗頻率依工程特性及設計要求辦理。
- ②若採煤灰破碎材型式，應考量製造所需之澆置、破碎與堆置等作業所需場地，其中澆置除參酌下述控制性低強度回填材料之供料考量外，相關作業則應配合工區環境特性、交通動線與每日施工能量需求，設置合宜之施工場地。
- ③若採控制性低強度回填材料型式，則需參照每日最大需要量，取得拌合場供料規劃，得於施工前約定 2 家以上之拌合場協助供料，以確保可工作日能正常供料，不致發生停工之情況。惟若採現地設置拌合場之方式供料，則需考量相關拌料之合理儲備量設置儲存場。
- ④工地儲存場採取材料分區儲放為原則，以利施工，並應注意

地表逕流水處理及防塵需求。

(2) 運送

- ①視車輛、機具等之裝載能力、路面承載力與法規，限制承載量及其行駛速度。若以船隻輸送時，則應注意其載重限制、吃水深及繫靠設施等需求。
- ②載運車輛皆設置有防塵措施與 GPS 設施管控流向。船隻宜配置 AIS(自動辨識系統)，必要時並協助業主辦理航船布告，以利航港單位管控與水域航安。
- ③載運車輛駛出工區前，須經洗車設備清洗後，方得駛離，以維持工區鄰近環境。
- ④材料供應場及工地應過磅，並以此作為料源及進料品質、數量控制使用。
- ⑤由工區外拌合場供料時，每載運車次均應提供混凝土供應商之證明文件或出貨單。

5.2.2 隔堤

依據國內案例，隔堤係位於圍堤完成水域內，為無需考量波浪作用之海事構造物，煤灰主要以破碎材及控制性低強度回填材料等 2 種型式應用於隔堤，藉由填灌於適當圍堵區域內，作為分區或聯絡道路使用。

煤灰以破碎材及控制性低強度回填材料等 2 種型式應用於隔堤，設計者宜考量 4.2 節相關產品特性，須注意煤灰破碎材及控制性低強度回填材料比重與單位重均較天然砂石或水泥漿料小，本節亦僅針對隔堤作為填區內分區或聯絡道路之施工步驟與工法說明，若隔堤有其他用途時，則應配合需求再另行設計與規劃適當工法，以符合設置隔堤之目的。

煤灰以破碎材應用於隔堤可參考工程填地之施工規劃；如採用控制性低強度回填材料施工時，需配合適當圍束(如模板、方塊、土工纖維材料、板樁等)避免漏漿外，其中，若圍束設施有漏漿之虞，應於澆置之內側規劃設置不織布，減少漿料滲漏，必要時得於圍束設施外側另設濾石層，提高阻漏效果，另依據台電工程案例，利用軟管填注之深度約 2.5m

時，仍可維持漿料澆置後之成品狀況。澆置深度亦可依據工程特性、工程技術與機具之精進，使用添加抗分離劑、特密管或其他適當工法，而據以檢討放寬澆置深度，以顧及工程品質與施工需求。相關施工規劃與工法請參酌以下說明。

1. 施工說明

承包商應在施工前向業主或監造單位提報施工計畫書，經工程司核定後施工。

(1) 施工計畫

施工計畫內容至少包含以下各點：

- ①依施工項目建立人事組織、任務編組。
- ②開工前置作業，工程及材料概述、施工方法、施工程序、分項施工計畫、測量工程及假設工程計畫等施工細則。
- ③施工圖、臨時設施工作圖之設計、繪製與結構計算等。
- ④依據契約工期要求，配合氣象、海象及環境等訂定工作天及工作時數，訂定每工作天/月各別工項必須完成之工作量。
- ⑤施工機具設備與人力運用計畫，包含施工機具之名稱、型式、每小時工作能量、配備數量及工作進度表。
- ⑥施工交通維持及安全管制措施、安全衛生管理、環境保護、工區及鄰近水陸地區環境污染防治計畫。
若該工程已依環境影響評估法辦理申請時，仍須依說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等相關要求，以及當地相關法規辦理。
- ⑦緊急應變及防災計畫等。

(2) 施工方法

依破碎材及控制性低強度回填材料等二種型式，分述如下：

① 破碎材

由於破碎材為煤灰固化後破碎而成，型態類似礫石料，

因受粒徑大小影響，一般無法以輸灰管方式施工，而以車載、船運等方式施工為主，相關作業則與煤灰作為工程填地施工方法略同。

- A. 工程範圍放樣，以易辨認且牢固之標誌標示施工區域邊界，如於陸地及淺水部分可用標竿標示，於水中部分可利用混凝土塊及浮球配合測量定位標示。
- B. 由陸側往水側端進施工時，以傾卸卡車載運並直接卸入隔堤設置區內。
- C. 以車載逐步傾卸施工時，作為運送之通路應適合重車通行，其高度以不受潮位影響，寬度至少為 3.9m，並於適當地點設置迴車道。
- D. 若採船運方式，則宜有臨時卸料碼頭或相關臨時卸料設施之規劃(如簡易岸邊吸斗、鏟斗、抓斗設施等)，以利破碎材水下拋放作業。
- E. 拋放至設計高程後，再依據設計圖說要求鋪設頂部混凝土等設施，惟因破碎材孔隙較大，為有利頂部混凝土澆置，宜鋪設一層碎石料或降低漏漿之墊層。
- F. 若環境影評估法之相關說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等對施工方法有相關要求時，則須依其要求辦理。

②控制性低強度回填材料

控制性低強度回填材料主要由煤灰、水泥或其他拌合料拌合而成，一般可於現場混拌或拌合場混拌後，藉由拌合車、泵浦車、管線等進行填築，惟需注意漿料發生分離狀況，故宜採小分區、分層填築方式，以減低分離狀況發生。

- A. 工程範圍放樣，以易辨認且牢固之標誌標示分區施工區域邊界，如於陸地及淺水部分可用標竿標示，於水中部分可利用混凝土塊及浮球配合測量定位標示各分區。

- B. 控制性低強度回填材料澆置施工分區，宜配合供料能量及施工工法予以規劃，並配合設置臨時圍束設施，減少水體擾動情況及漿料擴散，使漿料能於規劃之空間與時間內完成澆置，以利後續施工。
- C. 水位以下之控制性低強度回填材料澆置時，以拌合車配合水泥輸送軟管或特密管，由下往上填注之施工方式為宜，澆置作業應自海床底部開始灌注及參考第 03310 章「結構用混凝土」之水中混凝土施工要求辦理，以減少漿料分離狀況發生為原則。除經過特殊配比設計或添加劑可降低漿料分離情況外，不宜以拌合車或受泥船直接傾卸於填築區內之方式施工。
- D. 水位以下之控制性低強度回填材料澆置時，採泵浦車以水泥輸送軟管澆置於填築區時，除經進一步評估研析，水位以下之澆置深度以不超過 2.5m 為宜，惟經進一步評估研析其他適當澆置工法時，得將澆置深度予以加深，以確保施工品質與施工需求。
- E. 水位以上之控制性低強度回填材料澆置時，得以拌合車直接傾卸或輔以泵浦車利用其臂架直接澆置。
- F. 車輛運送之通路應適合重車通行，其高度以不受潮位影響，寬度至少為 3.9m，並於適當地點設置迴車道。
- G. 控制性低強度回填材料回填至出水面後，得視設計要求，參考工程會第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」之施工縫與第 03310 章「結構用混凝土」之混凝土養護要求等相關規定辦理。
- H. 若環境影評估法之相關說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等對施工方法有相關要求時，則須依其要求辦理。

2. 材料供應計畫

承包商於開工後須提出材料供應計畫。其計畫內容應包括下列各點：

- (1)材料供應場之位置、儲存量及物化性質。
- (2)材料需求量、運輸量、儲備量及使用量。
- (3)材料供應場平面佈置圖。
- (4)退貨機制：如材料收受後，經現場判定不符合品質規範則進行退貨，或按工程契約相關規定辦理。

3. 材料儲備與運輸

(1)儲備

- ①依據隔堤之材料供應計畫，參照每日最大需要量及合理儲備量設置儲存場，平日應儲備相當數量，以備雨季時，可維持隔堤之材料供應，避免造成工程停工，有關材料之抽驗頻率依工程特性及設計要求辦理。
- ②若採控制性低強度回填材料型式，則需參照每日最大需要量，取得拌合場供料規劃，宜於施工前約定 2 家以上之拌合場協助供料，以確保可工作日能正常供料，不致發生停工之情況。惟若採現地設置拌合場之方式供料，則需考量相關拌料之合理儲備量設置儲存場。
- ③工地儲存場採取材料分區儲放為原則，以利施工，並應注意地表逕流水處理及防塵需求。

(2)運送

- ①視車輛、機具等之裝載能力及路面之承載力，限制承載量及其行駛速度。若以船隻輸送時，則應注意其載重限制、吃水深及繫靠設施等需求。
- ②載運車輛皆設置有防塵措施與 GPS 設施管控流向。船隻宜配置 AIS(自動辨識系統)，必要時並協助業主辦理航船布告，以利航港單位管控與水域航安。
- ③載運車輛駛出工區前，須經洗車設備清洗後，方得駛離，以維持工區鄰近環境。
- ④材料供應場及工地應過磅，並以此作為料源及進料品質、數

量控制使用。

- ⑤由工區外拌合場供料時，每載運車次均應提供混凝土供應商之證明文件或出貨單。

5.2.3 港灣道路基底層或施工便道

依據國內外案例經驗，煤灰應用於道路基底層或臨時施工便道，目前採煤灰、水泥與現地土壤混拌或控制性低強度回填材料等型式為主，而國內之台電工程案例，則以控制性低強度回填材料固化作為道路基底層材料為主。

控制性低強度回填材料應用於道路基底層時，設計者宜考量 4.3 節相關產品特性，須注意控制性低強度回填材料之單位重較一般水泥漿料小，且控制性低強度回填材料固化後除具一定強度外，亦不具透水性，有別於一般採回填土或天然級配料作為道路基底層具有透水、彈性結構特性，因此在相關道路設計時宜加強路面的排水及上層柔性鋪面結構功能，如加鋪一層砂質、天然級配透水層或 AC 鋪面加厚等方式因應。相關施工規劃與工法與 5.2.2 節隔堤雷同，請參酌以下說明。

1. 施工說明

承包商應在施工前向業主或監造單位提報施工計畫書，經工程司核定後施工。

(1) 施工計畫

施工計畫內容至少包含以下各點：

- ①依施工項目建立人事組織、任務編組。
- ②開工前置作業，工程及材料概述、施工方法、施工程序、分項施工計畫、測量工程及假設工程計畫等施工細則。
- ③施工圖、臨時設施工作圖之設計、繪製與結構計算等。
- ④依據契約工期要求，配合氣象、海象及環境等訂定工作天及工作時數，訂定每工作天/月各別工項必須完成之工作量。
- ⑤施工機具設備與人力運用計畫，包含施工機具之名稱、型式、每小時工作能量、配備數量及工作進度表。

⑥施工交通維持及安全管制措施、安全衛生管理、環境保護、工區及鄰近水陸地區環境污染防治計畫。

若該工程已依環境影響評估法辦理申請時，仍須依說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等相關要求，以及當地相關法規辦理。

⑦緊急應變及防災計畫等。

(2) 施工方法

控制性低強度回填材料主要由煤灰、水泥或其他拌合料拌合而成，一般可於現場混拌或拌合場混拌後，藉由拌合車、泵浦車、管線等進行澆置施工，相關施工方式與 5.2.2 節控制性低強度回填材料應用於隔堤雷同。

①工程範圍放樣，以易辨認且牢固之標誌標示分區施工區域邊界。

②雨天時應視氣候狀況，並徵得同意後方可施工。並參考工程會第 02336 章「路基整理」之相關規定辦理，確保路基高程平整度、壓實度等符合設計要求。

③控制性低強度回填材料澆置施工分區，宜配合供料能量及施工工法予以規劃，並配合設置臨時圍束設施，使漿料能於規劃之空間與時間內完成澆置，以利後續施工。

④控制性低強度回填材料澆置時，得以拌合車直接傾卸或輔以泵浦車利用其臂架直接澆置。

⑤車輛運送之通路應適合重車通行，其高度以不受潮位影響，寬度至少為 3.9m，並於適當地點設置迴車道。

⑥控制性低強度回填材料澆置至設計高程時，可參考工程會第 03050 章「混凝土基本材料及施工一般要求」之施工縫與第 03310 章「結構用混凝土」之混凝土養護要求等相關規定辦理。

⑦若環境影評估法之相關說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等對施工方法有相關要求時，則須依其要求辦理。

2. 材料供應計畫

承包商於開工後須提出材料供應計畫。其計畫內容應包括下列各點：

- (1)材料供應場之位置、儲存量及物化性質。
- (2)材料需求量、運輸量、儲備量及使用量。
- (3)材料供應場平面佈置圖。
- (4)退貨機制：如材料收受後，經現場判定不符合品質規範則進行退貨。若控制性低強度回填材料強度經合格檢測單位檢測不符合設計要求時，則另按工程契約辦理。

3. 材料儲備與運輸

(1)儲備

- ①依據港灣道路基底層或施工便道之材料供應計畫，參照每日最大需要量，取得拌合場供料規劃，宜於施工前約定 2 家以上之拌合場協助供料，以確保可工作日能正常供料，不致發生停工之情況。惟若採現地設置拌合場之方式供料，則需考量相關拌料之合理儲備量設置儲存場，有關材料之抽驗頻率依工程特性及設計要求辦理。
- ②工地儲存場採取材料分區儲放為原則，以利施工，並應注意地表逕流水處理及防塵需求。

(2)運送

- ①視車輛、機具等之裝載能力及路面之承載力，限制承載量及其行駛速度。
- ②載運車輛皆設置有防塵措施與 GPS 設施管控流向。
- ③載運車輛駛出工區前，須經洗車設備清洗後，方得駛離，以維持工區鄰近環境。
- ④材料供應場及工地應過磅，並以此作為料源及進料品質、數量控制使用。

- ⑤由工區外拌合場供料時，每載運車次均應提供混凝土供應商之證明文件或出貨單。

5.2.4 無筋預鑄混凝土塊

預鑄混凝土塊於海事工程應用甚廣，常用各類型無筋結構之方塊及消波塊等，於煤灰混凝土應於無筋預鑄混凝土塊時，設計者宜考量 4.4 節相關產品特性，須注意煤灰混凝土單位重較一般混凝土輕，並依據交通部港灣構造物設計基準中之 Hudson、Tanimoto 等計算公式以波浪、拋放坡度、放置水深等條件，檢核消波塊或方塊所需重量，而混凝土強度則依設計需求擬定。另有關煤灰混凝土單位重，未來亦得配合相關材料之研究、工法演進或設備精進，不排除拌合其他重質材料，提高煤灰混凝土單位重。

相關製作要求，除可參考台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊(含附錄)之相關要求外，另可斟酌工程需求再參考公共工程委員會第 03310 章結構用混凝土、第 03316 章結構用輕質粒料混凝土、第 03439 章港灣用預鑄混凝土塊等施工綱要規範之相關要求辦理。茲將無筋預鑄混凝土塊成品應用之相關施工作業規劃說明如后。

1. 施工說明

承包商應在施工前向業主或監造單位提報施工計畫書，經工程司核定後施工。

(1) 施工計畫

施工計畫內容至少包含以下各點：

- ①依施工項目建立人事組織、任務編組。
- ②開工前置作業，工程及材料概述、施工方法、施工程序、分項施工計畫、測量工程及假設工程計畫等施工細則。
- ③施工圖、臨時設工作圖之設計、繪製與結構計算等。
- ④依據契約工期要求，配合氣象、海象及環境等訂定工作天及工作時數，訂定每工作天/月各別工項必須完成之工作量。

- ⑤施工機具設備與人力運用計畫，包含施工機具之名稱、型式、每小時工作能量、配備數量及工作進度表。
- ⑥施工交通維持及安全管制措施、安全衛生管理、環境保護、工區及鄰近水陸地區環境污染防治計畫。
若該工程已依環境影響評估法辦理申請時，仍須依說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等相關要求，以及當地相關法規辦理。
- ⑦緊急應變及防災計畫等。

(2) 施工方法

- ①無筋預鑄混凝土塊施工前，應先進行施工場地及儲料場地、臨時碼頭(視狀況)、潮位計、臨時導航及安全措施、環境監測、水深測量、交通維持、勞工安全衛生、環境保護措施等相關作業。

②施工場地及儲料場地

- A. 基地先進行工地清理、清除及掘除，完成後進行整地。
- B. 清除及掘除應依施工綱要規範第 02231 章「清除及掘除」之規定辦理。

③無筋預鑄混凝土塊製作及吊放

無筋預鑄混凝土塊相關製作及吊放施工，可參考台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊(含附錄)之相關規定辦理，另可配合各案工程特性，另參考工程會施工綱要規範第 03310 章「結構用混凝土」、第 03439 章「港灣用預鑄混凝土塊」，以及第 02391 章「防波堤」等相關章節規定辦理。相關吊放作業施工至少須注意以下規定：

- A. 混凝土塊排放前，應先檢查基礎地坪是否平整。
- B. 混凝土塊安放排列方式，需依設計圖說規定排放。消波塊吊放須互卡，不得有孤立之情況，其自然間隙不得填充石料，與基礎面間亦不得墊充石料。

C.方塊吊排放之間距及排列之邊緣線，需符合設計圖說精確度要求。

D.方塊疊砌而成之結構，除設計圖說另有規定外，宜設置凹凸槽榫連接，疊砌時應注意上下縱縫必須錯開，不得成為直線。

④水域施工臨時導航及安全措施

A.設置警示燈及浮燈標。

B.施工期間於施工週邊船舶航行範圍，應設置日、夜、晴、雨皆清晰可見之警示燈、浮燈標，以維持船舶航行及施工作業船舶及人員之安全。

C.設置之時間及區域應先知會當地漁會及管轄之航管單位，並經公告後設置(如航船布告等)。

D.施工船機：按航行及船舶避碰規定於船四周，加裝紅、綠 2 色燈組，以避免碰撞。

E.海上管及浮筒：每組浮筒上應加裝警示燈，尤以夜間更應告知周遭船隻安全航道。

F.臨時警示浮燈標：應於施工區之施工船舶前後與鄰側佈放浮燈標示警。

G.工區位於外海時，應考量足夠航行之航道，並置放足夠之警示浮燈標。

2. 材料供應計畫

承包商於開工後須提出材料供應計畫。其計畫內容應包括下列各點：

(1)材料供應場之位置、儲存量。

(2)材料需求量、運輸量、儲備量及使用量。

(3)材料供應場平面佈置圖。

(4)退貨機制：如材料收受後，經合格檢測單位檢測判定不符合品質規範則進行退貨，或按工程契約相關規定辦理。

3. 材料儲備與運輸

(1) 儲備

- ①依據無筋預鑄混凝土塊之材料供應計畫，參照每日最大需要量及合理儲備量設置儲存場，平日並應儲備相當之數量，以備雨季時，可維持無筋預鑄混凝土塊之供應，避免造成工程停工，有關材料之抽驗頻率依工程特性及設計要求辦理。
- ②工地儲存場採取材料分區(依不同型式、噸型等噴漆編號)儲放為原則，並應注意地表逕流水處理及防塵需求。

(2) 運送

- ①視車輛、機具等之裝載能力及路面之承載力，限制承載量及其行駛速度。若以船隻輸送時，則應注意其載重限制、吃水深及繫靠設施等需求。
- ②載運車輛皆設置有防塵措施與 GPS 設施管控流向。船隻宜配置 AIS(自動辨識系統)，必要時並協助業主辦理航船布告，以利航港單位管控與水域航安。
- ③載運車輛駛出工區前，須經洗車設備清洗後，方得駛離，以維持工區鄰近環境。
- ④材料供應場及工地應過磅，並以此作為料源及進料品質、數量控制使用。
- ⑤由工區外拌合場供料時，每載運車次均應提供混凝土供應商之證明文件或出貨單。

5.2.5 人工魚礁

煤灰應用於人工魚礁，主要以混凝土製作成不同型式或多孔構造物，可提供海域生物棲息空間之結構使用，於煤灰混凝土應於人工魚礁時，設計者宜考量 4.5 節相關產品特性，須注意煤灰混凝土單位重較一般混凝土輕之特性，檢核人工魚礁所需重量，混凝土強度則配合人工魚礁設計需求另行檢討擬訂，而人工魚礁拋放位置，則應配合漁業法及相關漁政單位之規定與要求辦理。

相關製作要求，除可參考台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊(含附錄)之相關要求外，另可斟酌工程需求再參考公共工程委員會第 03310 章結構用混凝土、第 03316 章結構用輕質粒料混凝土、第 03439 章港灣用預鑄混凝土塊等施工綱要規範之相關要求辦理。有關人工魚礁除以海上吊放為主外，其餘之施工規劃與工法與 5.2.4 節無筋預鑄混凝土塊雷同，請參酌以下說明。

1. 施工說明

(1) 施工計畫

施工計畫內容至少包含以下各點：

- ①依施工項目建立人事組織、任務編組。
- ②開工前置作業，工程及材料概述、施工方法、施工程序、分項施工計畫、測量工程及假設工程計畫等施工細則。
- ③施工圖、臨時設施工作圖之設計、繪製與結構計算等。
- ④依據契約工期要求，配合氣象、海象及環境等訂定工作天及工作時數，訂定每工作天/月各別工項必須完成之工作量。
- ⑤施工機具設備與人力運用計畫，包含施工機具之名稱、型式、每小時工作能量、配備數量及工作進度表。
- ⑥施工交通維持及安全管制措施、安全衛生管理、環境保護、工區及鄰近水陸地區環境污染防治計畫。
若該工程已依環境影響評估法辦理申請時，仍須依說明書、評估報告書或差異分析及對策檢討報告等相關要求，以及當地相關法規辦理。
- ⑦緊急應變及防災計畫等。

(2) 施工方法

- ①人工魚礁施工前，應先進行施工場地及儲料場地、臨時碼頭、潮位計、臨時導航及安全措施、環境監測、水深測量、交通維持、勞工安全衛生、環境保護措施等相關作業。
- ②施工場地及儲料場地

- A. 基地先進行工地清理、清除及掘除，完成後進行整地。
- B. 清除及掘除應依施工綱要規範第 02231 章「清除及掘除」之規定辦理。

③人工魚礁製作

人工魚礁所需之無筋預鑄混凝土塊或相關結構型式，依施工綱要規範第 03310 章「結構用混凝土」、台電公司技術規範第 03439A 章港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土-消波塊(含附錄)等施工綱要規範相關規定辦理。

④人工魚礁吊放拋投申請

人工魚礁之吊放拋投應依「投設人工魚礁或其他漁業設施許可管理辦法」申請投設許可，有關該辦法第 4 條所訂之公私場所申請投設人工魚礁或其他漁業設施，應檢具下列文件：

- A. 申請書載明機構名稱、負責人姓名、地址及電話。
 - B. 以經緯度表示之申請投設礁區或地點之位置。
 - C. 礁體或設施之型式、規格、數量、材質及結構設計圖。
 - D. 投設之機具及方式。
 - E. 預計投設之期間及次數。
 - F. 投設前底質、水質、水文、營養鹽、浮游生物及包含底棲生物在內生態環境概況。
 - G. 預估投設後對生態環境之影響說明。
 - H. 投設行為有無污染之虞及相關污染防治措施之說明。
 - I. 依本法第五十七條規定繳交審查費之證明。
 - J. 其他經中央主管機關或中央漁業主管機關指定之文件。
- ### ⑤水域臨時導航及安全措施(完工後除另有指示外，均須完全撤移)
- A. 設置警示燈及浮燈標。

- B. 施工期間於施工週邊船舶航行範圍，應設置日、夜、晴、雨皆清晰可見之警示燈、浮燈標，以維持船舶航行及施工作業船舶及人員之安全。
- C. 設置之時間及區域應先知會當地漁會及管轄之航管單位，並經公告後設置。
- D. 施工船機：按航行及船舶避碰規定於船四周，加裝紅、綠 2 色燈組，以避免碰撞。
- E. 海上管及浮筒：每組浮筒上應加裝警示燈，尤以夜間更應告知周遭船隻安全航道。
- F. 浮標：應於施工區之施工船舶前後與鄰側佈放燈組浮標示警。
- G. 海底人工魚礁置放處外側設置浮燈標。

2. 材料供應計畫

承包商於開工後須提出材料供應計畫。計畫內容包括下列各點：

- (1) 材料供應場之位置、儲存量及物化性質。
- (2) 材料需求量、運輸量、儲備量及使用量。
- (3) 材料供應場平面佈置圖。
- (4) 退貨機制：如材料收受後，經合格檢測單位檢測判定不符合品質規範則進行退貨，或按工程契約相關規定辦理。

3. 材料儲備與運輸

(1) 儲備

- ① 依據人工魚礁工程材料供應計畫，參照每日最大需要量及合理儲備量設置儲存場，平日應儲備足夠數量，以備雨季，維持人工魚礁供應，避免造成工程停工，有關材料之抽驗頻率依工程特性及設計要求辦理。
- ② 工地儲存場採取材料分區儲放為原則，並應注意地表逕流水處理及防塵需求。

(2) 運送

- ①視車輛、機具等裝載能力及路面承載力，限制承載量及其行駛速度。船隻輸送時，應注意其載重限制、吃水深及繫靠設施等需求。
- ②載運車輛皆設置有防塵措施與 GPS 設施管控流向。船隻宜配置 AIS(自動辨識系統)，必要時並協助業主辦理航船布告，以利航港單位管控與水域航安。
- ③載運車輛駛出工區前，須經洗車設備清洗後，方得駛離，以維持工區鄰近環境。
- ④材料供應場及工地應過磅，並以此作為料源及進料品質、數量控制使用。
- ⑤由工區外拌合場供料時，每載運車次均應提供混凝土供應商之證明文件或出貨單。

第六章 煤灰應用於海事工程之驗收機制

6.1 一般原則

為確保施工時所使用的材料或產品符合業者所提規範且工程品質亦能符合設計要求，需做好各階段之品質查驗或驗收，其內容包含煤灰材料檢驗、產品檢驗與工程驗收，現場品質驗收機制流程圖可參考圖 6-1。

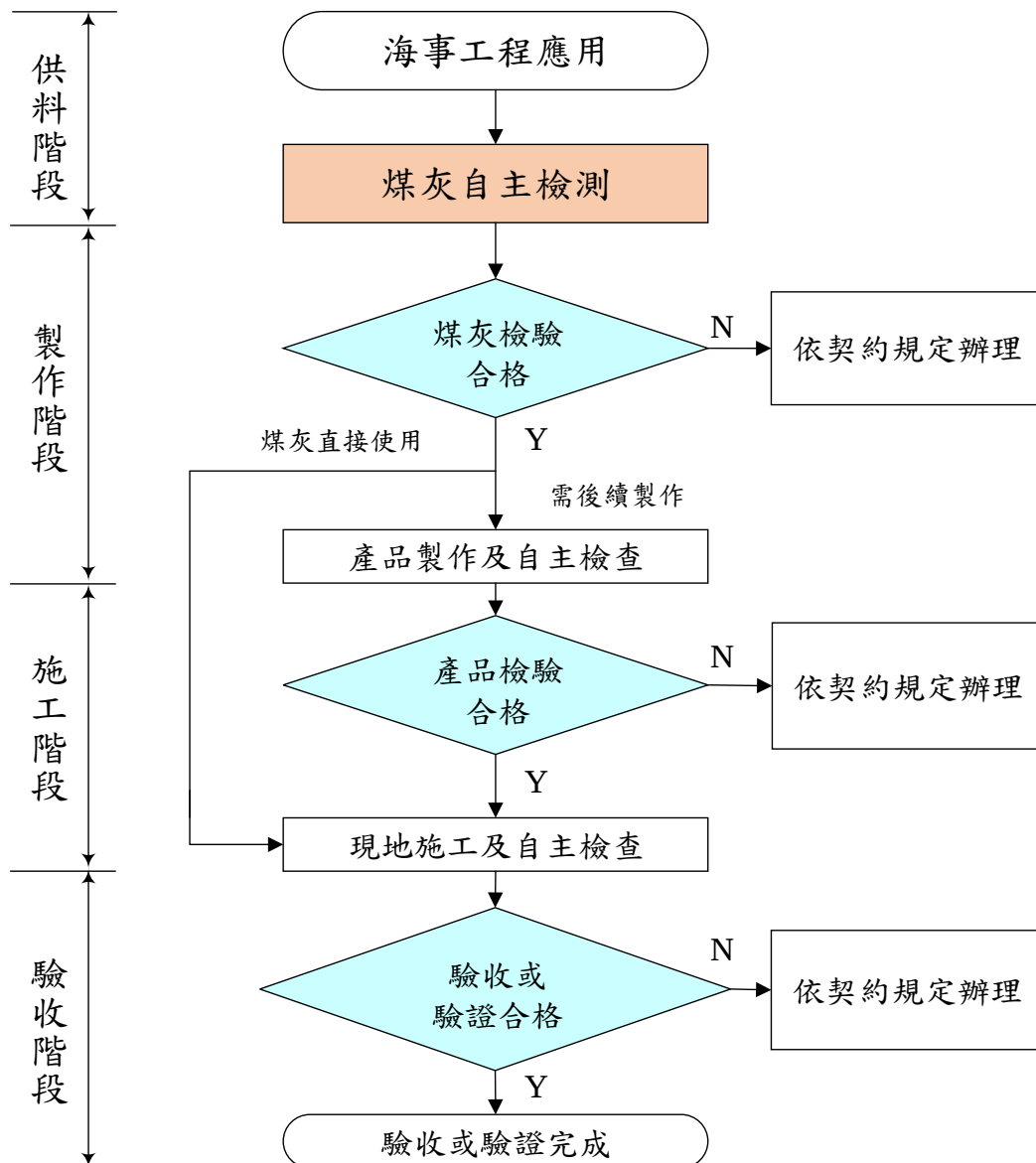


圖 6-1 現場品質驗收機制流程圖

6.2 現場品質驗收機制

本手冊之煤灰應用品質管控可參考表 6-1 現場品質驗收機制彙整表與附件 5 品質管控檢核表。

表 6-1 現場品質驗收機制彙整表

應用種類		工程填地	隔堤	港灣道路 基底層或 施工便道	無筋預鑄混凝土塊		人工 魚礁
					消波塊	方塊	
應用型式		原煤灰	破碎材	控制性低 強度回填 材料	混凝土		混凝土
		破碎材					
			控制性低 強度回填 材料				
		控制性低 強度回填 材料					
抽樣方式與頻率		依據契約規定辦理					
驗收 機制	煤灰環境 安全品質	表 4-1～表 4-2					
	產品檢驗 標準	表 4-3～ 表 4-4	表 4-5～ 表 4-6	表 4-7	表 4-8～表 4-9		表 4-10～ 表 4-11
不合格處理		材料或產品收受後，如經合格檢測單位檢測判定不符合品質規範則進行退貨或依契約規定辦理。					

6.2.1 工程填地

1. 煤灰用於工程填地之環境安全品質要求可參考表 4-1～表 4-2。
2. 煤灰用於工程填地之產品檢驗標準可參考表 4-3～表 4-4，而抽樣方式與頻率則依據契約規定辦理。

3. 回填材料運入施工用地，經檢驗合格後，方准卸車或裝船；不合格者，應原運輸設備運回。
4. 回填材料，須層次分明均勻，以達指定之位置及高程。
5. 為免偏離回填區位，必須預先設置各種適當標幟指明作業範圍，並隨時舉行測量，以免過與不及，影響整坡工作。
6. 每一層材料之填築，於未經檢查或高程測量前，不得填築上層之材料。
7. 以煤灰用於工程填地，施工方法並無明顯差異，相關管理注意事項參考「第八章煤灰應用於海事工程之注意事項」。
8. 有關回填高程等需符合設計圖之規定，檢驗與驗收規定亦可參考表 6-1。

6.2.2 隔堤

1. 煤灰用於隔堤之環境安全品質要求可參考表 4-1～表 4-2。
2. 煤灰用於隔堤之產品檢驗標準可參考表 4-5 與表 4-6，而抽樣方式與頻率則依據契約規定辦理。
3. 隔堤施作之材料運入施工用地，經檢驗合格後，方准卸車或裝船；不合格者，應原運輸設備運回。
4. 隔堤材料需依設計圖位置施作，以符合指定之位置及高程。
5. 為避免偏離堤線，必須預先設置各種適當標幟指明作業範圍，並隨時舉行測量，以免過與不及，影響工作。
6. 相關管理注意事項參考「第八章煤灰應用於海事工程之注意事項」。
7. 有關隔堤高程等需符合設計圖之規定，檢驗與驗收規定亦可參考表 6-1。

6.2.3 港灣道路基底層或施工便道

1. 煤灰用於港灣道路基底層或施工便道之環境安全品質要求可參考表 4-1～表 4-2。
2. 煤灰用於港灣道路基底層或施工便道之產品檢驗標準可參考表 4-7，而抽樣方式與頻率則依據契約規定辦理。
3. 其餘相關規定可參考 6.2.1 工程填地之第 3 點～第 8 點之規定辦理。

6.2.4 無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)

1. 煤灰用於無筋預鑄混凝土塊之環境安全品質要求可參考表 4-1～表 4-2。
2. 煤灰用於無筋預鑄混凝土塊之材料性質與產品檢驗標準可參考表 4-8～表 4-9，而抽樣方式與頻率則依據契約規定辦理。
3. 無筋預鑄混凝土塊之製作及吊放：
 - (1)原則以 5m 為一測點控制。
 - (2)安放不良或損傷嚴重之方塊，應重新排放或更換；必要時鄰近方塊一併重排或更換。
4. 本節未說明之工作項目依設計圖說及契約項目或依該施工項目之相關章節中之現場品質管理部分辦理。
5. 相關管理注意事項參考「第八章煤灰應用於海事工程之注意事項」。
6. 檢驗要點：有關拋填高程及坡度、混凝土型塊尺寸與吊放等需符合設計圖之規定，檢驗與驗收規定亦可參考表 6-1。

6.2.5 人工魚礁

1. 煤灰用於人工魚礁之環境安全品質要求可參考表 4-1～表 4-2。
2. 煤灰用於人工魚礁之材料性質與產品檢驗標準可參考表 4-10～表 4-11，而抽樣方式與頻率則依據契約規定辦理。
3. 拋放人工魚礁：
 - (1)拋放人工魚礁，以達指定之位置及高程。
 - (2)人工魚礁應依設計圖說拋放，必須預先設置各種適當標幟指明堤線等作業範圍，並隨時測量。
4. 拋放人工魚礁之製作及吊放：
 - (1)原則以 5m 為一測點控制。
 - (2)安放不良或損傷嚴重之人工魚礁時應重新排放或更換；必要時鄰近人工魚礁一併重排或更換。
5. 本節未說明之工作項目：

依設計圖說及契約項目或依該施工項目之相關章節之現場品質管理部分辦理。
6. 相關管理注意事項參考「第八章煤灰應用於海事工程之注意事項」。
7. 檢驗要點：有關拋填高程及坡度、尺寸與吊放等需符合設計圖之規定，檢驗與驗收規定亦可參考表 6-1。

第七章 煤灰應用於海事工程之環境監測

7.1 一般原則

煤灰應用於海事工程包含工程填地、隔堤、港灣道路基底層或施工便道、無筋預鑄混凝土塊與人工魚礁等。

依經濟部事業廢棄物再利用產品環境監測管理辦法規定，若再利用產品作為填海、填築土地或工程填地材料用途，且同區域單次或累積填築總量達一萬二千公噸以上者，應實施環境監測。填海、填築土地或工程填地行為已依環境影響評估法通過環境影響評估審查者，經檢具環境影響說明書、環境影響評估報告書所載與環境監測計畫有關內容報請經濟部備查後，得免依前項規定辦理。但環境影響說明書、環境影響評估報告書所載環境監測計畫未包含再利用產品使用地點之環境品質監測者，不適用之。除上述管理辦法外，開發行為若需經環境影響評估者，環境監測仍須遵照環評承諾。因此，本手冊有關環境監測項目及頻率需依照「事業廢棄物再利用產品環境監測管理辦法」及環境影響評估承諾辦理。

再利用產品使用地點之環境監測類別應視污染潛勢，本手冊的可能污染對象為海洋，因此監測項目包括氫離子濃度指數及海域環境分類及海洋環境品質標準第四條所列重金屬項目。

7.2 環境監測

1. 監測規範、項目、頻率與標準：依照「事業廢棄物再利用產品環境監測管理辦法」及環境影響評估承諾辦理。依事業廢棄物再利用產品環境監測管理辦法，監測項目包含 pH 值及 11 項重金屬，如表 7-1 所列。海域環境主要分為甲、乙、丙三類，依表 7-3 與圖 7-1 可知，台灣地區沿海海域屬甲或乙類，因此檢測值應符合海域環境分類及海洋環境品質標準(表 7-2)之甲或乙類。
2. 監測報表：前述各監測成果可供業主或第三公正單位參考使用。

表 7-1 環境監測規範及項目

應用種類		應用型式	應用區域	適用規範	監測項目 ^[註]	
工程填地		原煤灰	海域	海域環境分類及海洋環境品質標準	pH	11 項重金屬 (鎘、鉛、六價鉻、砷、總汞、硒、銅、鋅、錳、銀、鎳)
		破碎材				
		控制性低強度 回填材料				
隔堤		破碎材				
		控制性低強度 回填材料				
港灣道路基底層或施工便道		控制性低強度 回填材料				
無筋預鑄混凝土塊	消波塊	混凝土				
	方塊					
人工魚礁		混凝土				
備註		環境監測項目及頻率需依照「事業廢棄物再利用產品環境監測管理辦法」及環境影響評估承諾辦理，若隔堤、無筋預鑄混凝土塊與人工魚礁等已納入環評要求之環境監測範圍，應依規定辦理環境監測。				

表 7-2 海域環境分類及海洋環境品質標準^[61]

項目 \ 分類	單位	甲類	乙類	丙類
鎘	μg/L	≤5		
鉛	μg/L	≤10		
六價鉻	μg/L	≤50		
砷	μg/L	≤50		
總汞	μg/L	≤1		
硒	μg/L	≤10		
銅	μg/L	≤30		
鋅	μg/L	≤30		
錳	μg/L	≤50		
銀	μg/L	≤10		
鎳	μg/L	≤50		
pH 值	--	7.6-8.5	7.5-8.5	7.0-8.5

註：1. 甲類：適用於一級、二級水產用水、工業用水、游泳及環境保育。

2. 乙類：適用於二級水產用水、工業用水及環境保育。

3. 丙類：適用於環境保育。

表 7-3 台灣地區沿海海域範圍及海域分類^[61]

海 域 範 圍	水 體 分 類
鼻頭角向彭佳嶼延伸至高屏溪口向琉球嶼延伸線間海域	甲
高屏溪口向琉球嶼延伸至曾文溪口向西延伸線間海域	乙
曾文溪口向西延伸線至王功漁港向西延伸線間海域	甲
王功漁港向西延伸線至鼻頭角向彭佳嶼延伸線間海域	乙
澎湖群島海域	甲

註：在右列之一海域水體內之河川、區域排水出海口或廢水管線排放口出口半徑二公里之範圍內之水體得列為次一級之水體。

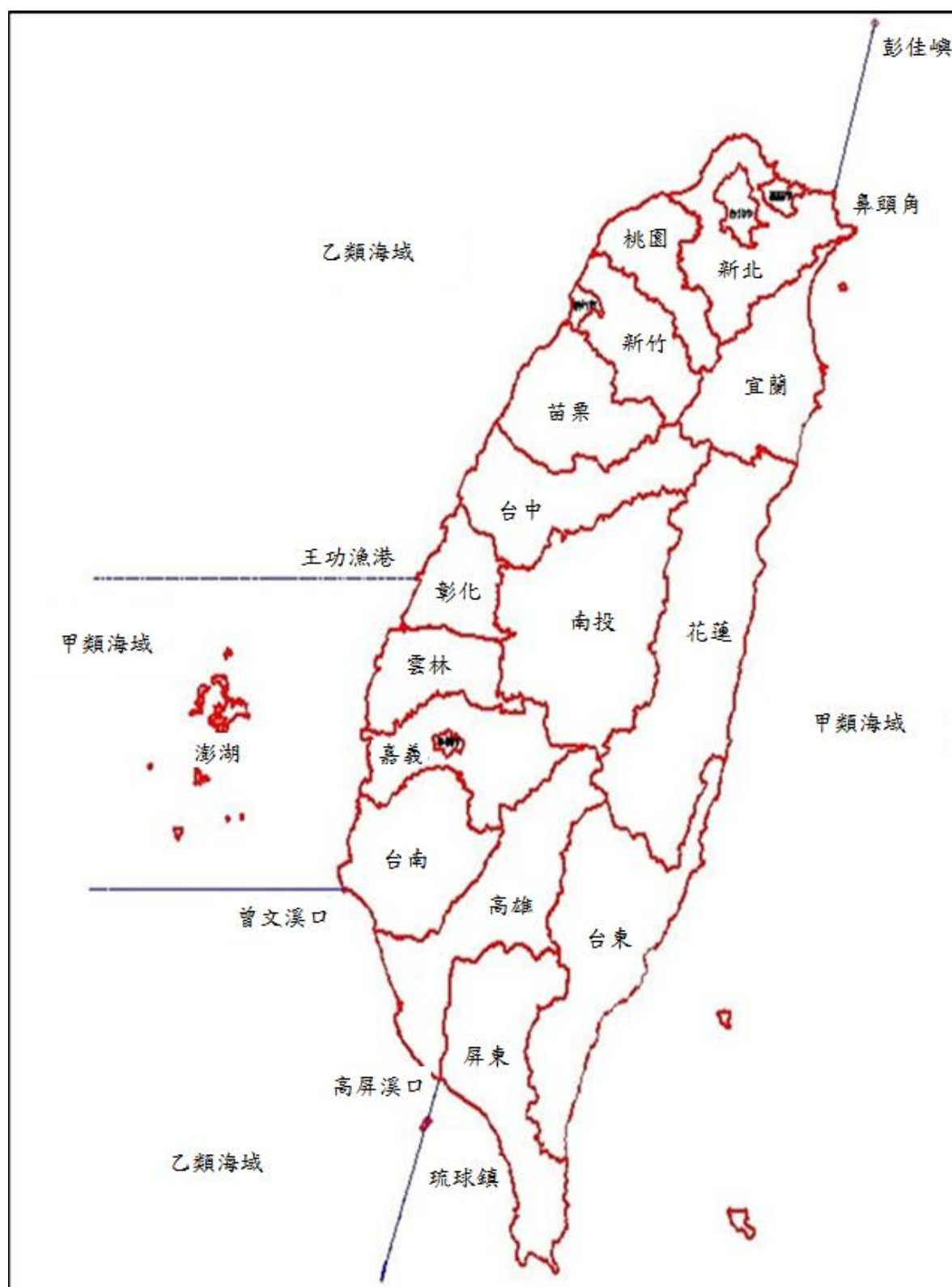


圖 7-1 台灣地區沿海海域範圍及海域分類圖^[61]

第八章 煤灰應用於海事工程之注意事項

8.1 一般原則

煤灰係指台灣電力公司燃煤發電過程所產生之副產物，基於有限的天然資源及落實公共工程資源再利用政策，本手冊於前述各章已針對煤灰基本性質、煤灰應用於海事工程之施工過程及應用範圍等內容，提出詳細之敘述。本章係綜合前述各章再次提列煤灰應用於海事工程時所需之注意事項等，作簡要說明，期望有助於業界參酌應用。

8.2 煤灰應用於海事工程之注意事項

1. pH 值：煤灰在煤炭經高溫燃燒且氧氣充足下，已轉變成安定、水溶性低的氧化物，煤灰屬鹼性物質，當應用於海事工程時，會部份接觸海水，但由於海水具備緩衝與稀釋能力，對於海域 pH 值之影響有限，惟仍可定期辦理 pH 值檢測作業。
2. 人工魚礁之吊放拋投應依「投設人工魚礁或其他漁業設施許可管理辦法」申請投設許可，有關該辦法第 4 條所訂之公私場所申請投設人工魚礁或其他漁業設施，應檢具下列文件：
 - (1)申請書載明機構名稱、負責人姓名、地址及電話。
 - (2)以經緯度表示之申請投設礁區或地點之位置。
 - (3)礁體或設施之型式、規格、數量、材質及結構設計圖。
 - (4)投設之機具及方式。
 - (5)預計投設之期間及次數。
 - (6)投設前底質、水質、水文、營養鹽、浮游生物及包含底棲生物在內生態環境概況。
 - (7)預估投設後對生態環境之影響說明。
 - (8)投設行為有無污染之虞及相關污染防治措施之說明。
 - (9)依本法第五十七條規定繳交審查費之證明。
 - (10)其他經中央主管機關或中央漁業主管機關指定之文件。

3. 依不同應用用途說明施工後之維護與改建管制方式：

(1)工程填地

由於使用煤灰、煤灰破碎材或控制性低強度回填材料等應用型式作為永久性之填海造陸材料後，上方需再鋪築覆土材料，故無施工後之維護作業。惟仍需視填築後之土地使用需求進行地盤改良作業。

(2)隔堤

由於使用煤灰破碎材或控制性低強度回填材料等應用型式作為隔堤構築材料，上方需再鋪築堤面混凝土等設施，且兩側均有回填料回填，除堤面設施將因使用而需適當維護外，該堤面設施下方則無施工後之維護作業必要性。

(3)港灣道路基底層或施工便道

針對該場址應用控制性低強度回填材料作為道路基底層及施工便道時，施工後之維護作業則應依與業主的合約規定執行。

(4)無筋預鑄混凝土塊

針對該場址應用煤灰作為消波塊或方塊，施工後之維護作業則將依與業主的合約規定執行；另因其使用場址位於海岸旁，長期受海浪侵襲後而可能發生位移或破損底，故後續仍需視拋放區安全需求，進行適度之補拋作業，以維安全。

(5)人工魚礁

針對該場址應用煤灰製作之產品作為人工魚礁，施工後之維護作業則將依與業主的工程契約規定執行，如制定定期巡檢作業，確認投放位置並記錄其完整性；另因其場址位於海底，為最終使用用途(永久性存在)，故得配合業主之規劃需求，適度補拋人工魚礁，以維持原有需求功能。

4. 煤灰應用在海事工程之移除與粒料回收規劃：

(1)若屬營建剩餘土石方部分應依「營建剩餘土石方處理方案」處理；若屬內政部公告之一般事業廢棄物再利用種類部分，則應依「營建事業廢棄物再利用種類及管理方式」辦理；其他非屬上揭部分者，應依「廢棄物清理法」規定清除處理或再利用，送往合法掩埋場、焚化廠、合法廢棄物代處理機構或再利用事業機構處理。

(2)有關經海水浸泡有殘留鹽分對回收再利用之影響，依「營建事業廢棄物再利用種類及管理方式」規定，再利用用途之產品應符合國家標準或國際標準或該產品之相關使用規定。

5. 施工綱要規範：行政院公共工程委員會於 109 年 6 月 15 日修正「公共工程施工綱要規範使用及編修應注意事項」，並將名稱修正為「公共工程共通性工項施工綱要規範使用及編修應注意事項」，其中闡明綱要規範係為公共工程共通性工項所訂定之通案原則性施工規範參考範本，故非屬共通性工項施工綱要規範，行政院公共工程委員會將不再辦理後續維護更新。本手冊內所提之施工綱要規範，如「第 03316 章 結構用輕質粒料混凝土」及「第 03439 章 港灣用預鑄混凝土塊」，非屬共通性工項施工綱要規範，僅供設計及工程主辦機關參考。

8.3 煤灰應用於海事工程之品質管制應注意事項

1. 煤灰材料、半成品與產品需依工程契約進行品質檢驗，若未符合標準，需依契約規定辦理，以維護工程品質。
2. 各儲區應明確標示煤灰材料及產品等種類，並嚴格管制不得任意與其他材料混雜，或誤用至其他用途。
3. 廠商需提出配比設計或實際拌合配比供機關審核。
4. 工程施工方式，除煤灰裸料填築作業得配合輸灰管由電廠逕行拌水回填至預定填築區外，其餘主要利用卡車將材料或製成品運抵場區後，直接傾倒入或吊放於工區預定位置，另為減少對鄰近環境之影響，並於施工期間之運輸路線、場區或工區，進行灑水作業，減少揚

塵。

5. 由於現場施工條件複雜，應考量工程特性及實際施工需求，選用合宜之施工作業方式。
6. 由於海事工程應用場域具高硫酸鹽特性，建議採用卜特蘭 II 型水泥，相較於卜特蘭 I 型水泥，II 型水泥有較佳之抗硫酸鹽侵蝕能力。

參考文獻

- [1]中國鋼鐵股份有限公司、中龍鋼鐵股份有限公司(2017),「轉爐石海事工程使用手冊」。
- [2]一般財団法人石炭エネルギーセンター(2017),「港湾工事における石炭灰混合材料の有効利用ガイドライン(改訂版)」。
- [3]J. C. E. Center(2015),「Guideline for Utilization of Coal Ash Mixed Material (Application for construction materials in earthquake reconstruction works)」。
- [4]台灣電力公司官網(2020),「歷年發購電量占比」, Retrieved 11/10/ 2020 from <https://reurl.cc/ynjNQD>。
- [5]A. K. Saha(2018), "Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete," *Sustainable environment research*, vol. 28, no. 1, pp. 25-31.
- [6]黃兆龍(2007),「卜作嵐混凝土使用手冊」, 中興工程顧問社, 臺北市。
- [7]P. K. Mehta and R. W. Burrows(2001), "Building durable structures in the 21st century," *Concrete international*, vol. 23, no. 3, pp. 57-63.
- [8]V. Malhotra(1999), "Making concrete" greener" with fly ash," *Concrete international*, vol. 21, no. 5, pp. 61-66.
- [9]林茂容、朱炳垣、張獻文、邱智勇(2019),「高煤灰摻量無鋼筋混凝土應用於海事工程構造物完成報告」。
- [10]蔡耀賢、林芳銘、陳振誠(2020),「綠建材解說與評估手冊」, 內政部建築研究所。
- [11]張大鵬、黃兆龍(2009),「綠混凝土性質與指標之研究」, 國立臺灣科技大學、內政部建築研究所。
- [12]黃育徵、陳惠琳(2021),「循環台灣」, 天下雜誌股份有限公司, 臺北市。
- [13]黃育徵(2017),「循環經濟」, 天下雜誌股份有限公司, 臺北市。
- [14]簡大舜、王銘揚、蔡進賜、謝翔帆、徐榮彬、梁達嵐(2020). "協和發電廠三年改善靜電集塵器效率達到粒狀物個位數排放專案," *台電工程月刊*, vol. 859, pp. 73-81。
- [15]魏稽生、譚立平(1999),「臺灣非金屬經濟礦物」, 經濟部中央地質調查所。
- [16]A. Bhatt, S. Priyadarshini, A. A. Mohanakrishnan, A. Abri, M. Sattler, and S. Techapaphawit(2019), "Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, p. e00263.
- [17]E. John, T. Matschei, and D. Stephan(2018), "Nucleation seeding with calcium silicate hydrate—A review," *Cement and Concrete Research*, vol. 113, pp. 74-85.
- [18]行政院公共工程委員會(1999),「公共工程飛灰混凝土使用手冊」。
- [19]K. Muthusamy, M. H. Rasid, G. A. Jokhio, A. M. A. Budiea, M. W. Hussin, and J. Mirza(2020), "Coal bottom ash as sand replacement in concrete: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 236, p. 117507.
- [20]全國法規資料庫(2021),「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」, Retrieved 1/15,2021 from <https://reurl.cc/nnjjQv>。
- [21]台電電力公司綜合研究所(2016),「煤灰特性對環境影響之研究」。
- [22]台灣電力公司綜合研究所(2019),「結合煤灰排放與填地工法研究完成報告」。
- [23]台灣電力公司官網(2024),「環境監測資訊揭露」, Retrieved 07/27, 2024 from https://www.taipower.com.tw/2289/2363/2391/52641/?Page=1&PageSize=10&q_attribute=231。
- [24]台灣電力股份有限公司綜合施工處(2019),「台中發電廠一期灰塘區第 3B 區地質改

良工程」。

- [25]台灣電力股份有限公司、喬泰營造有限公司、萬鼎工程服務股份有限公司(2016),「台中發電廠一期灰塘區第 3A 區地質改良工程研究區工作」。
- [26]台灣電力股份有限公司(2014),「全煤灰 CLSM 隔堤工程設計施工作業程序建議報告」。
- [27]台灣電力股份有限公司(2013),「煤灰 CLSM 築堤工程效益評估、CO₂ 排放量盤查與計算完成報告」。
- [28]郭麗雯、黃兆龍(2010),「全煤灰 CLSM 材料於淺層海水下之最佳構築配比與澆置方式」。
- [29]黃兆龍、郭麗雯(2011),「全煤灰 CLSM 材料於淺層海水下澆置方式現地驗證」。
- [30]郭麗雯、許讚全、黃兆龍、李隆盛(2012),「全煤灰 CLSM 材料於淺層海水下之最佳構築配比與澆置方式」。
- [31]林茂容(2019),「煤灰水泥處理柔性鋪面基底層的效能評估」。
- [32]郭淑德、許讚全、蘇義雄、陳銘盤、林溫欣、李志榮、張昆雄、邵廣昭、周耀傑(1987),「煤灰應用作人工魚礁之可行性研究」。
- [33]陳璽年、林茂容(2019),「底灰作為人工魚礁材質之可行性初探」。
- [34]B. J. Lee, G. G. Prabhu, B. C. Lee, and Y. Y. Kim(2016), "Eco-friendly porous concrete using bottom ash aggregate for marine ranch application," *Waste Management & Research*, vol. 34, no. 3, pp. 214-224.
- [35]M. Phillips, V. Powell, and R. Duck(2009), "Coastal regeneration at Llanelli, South Wales, UK: lessons not learned," *Journal of Coastal Research*, pp. 1276-1280.
- [36]U. K. Q. A. Association(2003)."Millenium Coastal Park, Llanelli, South Wales".
- [37]F.Pendennis Dock, Tarmac Retrieved 11/10/2020 from <https://www.tarmac.com/media/109713/pendennis-dock-falmouth-final.pdf>
- [38]UKQAA. "GFA for the A259 Ramsgate Harbour approach road in Kent." Retrieved 11/10,2020 from <https://reurl.cc/mqOY4j>
- [39]Robert Nordstrom(2015)."Airport Imprevement Magazine".Retrieved 03/25/2021 from <https://reurl.cc/MZQWI3> .
- [40]C. Solutions. Retrieved 03/25,2021 from <https://charah.com/resources/case-studies/fully-lined-structural-fill-at-asheville-regional-airport/>
- [41]J. Rogbeck and Å. Knutz, "Coal bottom ash as light fill material in construction," *Waste Management*, vol. 16, no. 1, pp. 125-128, 01/01/ 1996, doi: [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(96\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(96)00035-9).
- [42]Tarmac(2019), "Aberdeen Harbour expansion Project".
- [43]A. Harbour(2015), "Environmental statement non-technical summary".
- [44]E. G. Moffatt, M. D. Thomas, and A. Fahim(2017), "Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment," *Cement and Concrete Research*, vol. 102, pp. 127-135.
- [45]E. Cejuela, V. Negro, M. D. Esteban, J. S. López-Gutiérrez, and J. M. Ortega(2018), "From Julius Caesar to Sustainable Composite Materials: A Passage through Port Caisson Technology," *Sustainability*, vol. 10, no. 4, p. 1225. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/4/1225>.
- [46]K. J. Collins, A. C. Jensen, A. P. M. Lockwood, and A. W. H. Turnpenny, "Evaluation of Stabilized Coal-Fired Power Station Waste for Artificial Reef Construction," *Bulletin of*

- Marine Science*, vol. 55, no. 2-3, pp. 1251-1262, // 1994.<https://www.ingentaconnect.com/content/umrmsas/bullmar/1994/00000055/f0020002/art00079>.
- [47]漁農自然護理署(2020),「在外牛尾海敷設人工魚礁」, Retrieved 11/10/2020 from <https://reurl.cc/nnjjQv>。
- [48]李真真、公丕海、关长涛、李娇、王騰騰(2017),「不同水泥类型混凝土人工鱼礁的生物附着效果」, *渔业科学进展*, vol. 38, no. 5, pp. 57-63。
- [49]立法會環境事務委員會(2010),「人工漁礁計劃」。
- [50]秋田縣產業勞動部資源能源產業課(2015),「石炭灰有效利用可行性調查報告書」。
- [51]"Boral Cement Safety Data Sheet." Retrieved 03/25/2021 from <https://flyash.com/wp-content/uploads/2018/09/SDS-Fly-Ash-All-Types-18-0731.pdf>.
- [52]A. D. Association(2006)."SEACLIFF BRIDGE."Retrieved 04/25/2021 from <https://reurl.cc/qmRvyn>.
- [53]吴浩、盛余飞、刘宇峰、江健伟(2013),「檳城二桥大体积承台混凝土的配置技术」。
- [54]王志忠、吴健(2006),「大掺量粉煤灰在海工耐久混凝土中的应用」, vol. 9, pp. 104-106。
- [55]陈儒发、李书惠、林海(2005),「大掺量粉煤灰混凝土在海工桩基中的应用」, vol. 9, pp. 104-106。
- [56]厉顺荣、中铁隧道股份有限公司(2006),"厦门翔安海底隧道在施工中应注意的几个方面," (in 簡體中文), *隧道建设*, no. 2006 年 04, pp. 43-45. <https://www.AiritiLibrary.com/Publication/Index/sdjs200604013>.
- [57]行政院環境部(2020),「事業廢棄物毒性特性溶出程序 (NIEAR201.15C)」, Retrieved 11/10/2020 from <https://reurl.cc/E2Mlan>。
- [58]全國法規資料庫(2020),「有害事業廢棄物認定標準」, Retrieved 11/10/2020 <https://reurl.cc/8yZMzo>。
- [59]行政院環境部(2020). "廢棄物之氫離子濃度指數(pH 值)測定方法—電極法 (NIEA R208.04C)." Retrieved 11/10/2020 form <https://reurl.cc/R6lGED>。
- [60]行政院原子能委員會(2020),「天然放射性物質管理辦法」, Retrieved 11/10/2020 from <https://reurl.cc/1gaAEY>。
- [61]全國法規資料庫(2024),「海域環境分類及海洋環境品質標準」, Retrieved 07/27/2024 from <https://reurl.cc/l0jrOd>。
- [62]國家環境研究院(2023),「再生粒料環境用途溶出程序 (NIEA R222.11C)」, Retrieved 07/27/2024 from <https://www.moenv.gov.tw/nera/9DA55CE386B2F925/e7b63c9b-1552-4d46-aebe-d5874ad9c3be>。
- [63]行政院環境部(2022). 「垃圾焚化廠焚化底渣再利用管理方式」 Retrieved 2024/9/8 form <https://oaout.moenv.gov.tw/Law/LawContent.aspx?id=GL007767>。
- [64]台電公司(2000). 「林口發電廠第二期灰塘工程 海埔地開發許可申請書圖」 Retrieved 2024/9/8 ,form https://eland.nlma.gov.tw/nuld/Web_Plan/Web_PlanDetailFromLink/10369?pitid=0&plid=0&cntyid=0&cntrid=0&pdtid=0&patid1=0&sortorder=planundertaker_desc。
- [65]国土交通省 東北地方整備局 酒田港湾事務所(2020). 「石炭灰の有効活用」 Retrieved 2024/9/8 ,form

<https://www.pa.thr.mlit.go.jp/sakata/030/040/20200101053000.html>。

- [66]環境部環境管理署(2024)「彰化濱海工業區開發計畫線西西3區部分土地新增工程填地料源環境影響差異分析」施工期間環境監測報告 Retrieved 2025/1/16 ,form <https://www.moenv.gov.tw/ema/BE0AD34C04AFEF4B>
- [67]酒田市政府「酒田市環境報告書」 Retrieved 2025/3/21 ,form <https://www.city.sakata.lg.jp/jyutaku/kankyou/kankyohozen/kankyouhoukoku.files/r6houkokusyo.pdf>

附件

附件 1 國外飛灰與底灰化學性質

附件 2 林口電廠環境監測(民國 109 年)

附件 3 台中電廠環境監測(民國 109 年)

附件 4 線西西三區環境監測(民國 109 年)

附件 5 品質管控檢核表

附件 1 國外飛灰與底灰化學性質

表 1-國外飛灰化學性質

Summary of worldwide coal fly ash chemical composition ranges.

Country	% Chemical composition											
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	SO ₃	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MnO	LOI
Australia	31.1-68.6	17-33	1-27.1	0.1-5.3	0.1-2.9	0-2	0-0.6	1.2-3.7	0-1.5	0-3.9	nd	na
Bagladesh	55	24.7	7.7	6.2	1.1	0.7	1.1	na	na	0.9	0.1	na
Bulgaria	30.1-57.4	12.5-25.4	5.1-21.2	1.5-28.9	0.8-2.8	1.1-2.9	0.4-12.7	0.6-1	0.4-1.9	0.1-0.4	0-0.2	0.8-32.8
Canada	35.5-62.1	12.5-23.2	3-44.7	1.2-13.3	0.5-3.2	0.4-3.1	0.2-7.8	0.4-1	0.1-7.3	0.1-1.5	na	0.3-9.7
China	35.6-57.2	18.8-55	2.3-19.3	1.1-7	0.8-0.9	0.7-4.8	1-2.9	0.2-0.7	0.6-1.3	1.1-1.5	nd	nd
Denmark	48-65	26-33	3.3-8.3	2.2-7.8	na	na	na	na	1.1-2.8	na	na	3.1-4.9
Europe	28.5-59.7	12.5-35.6	2.6-21.2	0.5-28.9	0.4-4	0.6-3.8	0.1-12.7	0.5-2.6	0.1-1.9	0.1-1.7	0-0.2	0.8-32.8
France	47-51	26-34	6.9-8.8	2.3-3.3	na	1.5-2.2	0.1-0.6	na	2.3-6.4	na	na	0.5-4.5
Germany	20-80	1-19	1-22	2-52	0-2	0.5-11	1-15	0.1-1	0-2	na	na	0-5
Greece	21-35	10-17.9	4.5-8.4	27.3-45	0.4-1	1.5-3.8	4-8.6	na	0.2-1	na	na	3-7
India	50.2-59.7	14-32.4	2.7-16.6	0.6-9	0.2-4.7	0.1-2.3	na	0.3-2.7	0.2-1.2	na	na	0.5-7.2
Israel	45.6-58.6	24.4-34.5	3-6.7	4.9-9.9	0.1	1.6-2.5	0.6-0.8	1.2-1.9	0-0.1	0.8-1.8	na	6
Italy	41.7-54	25.9-33.4	3-8.8	2-10	0-2.6	0-2.4	na	1-2.6	0-1	0-1.5	0-0.1	1.9-9
Japan	53.9-63	18.2-26.4	4.2-5.7	2-8.1	0.6-2.7	0.9-2.4	0.3-1.4	0.8-1.2	1.1-2.1	na	na	0.5-2.1
Korea	50-55.7	24.7-28.7	3.7-7.7	2.6-6.2	1.1	0.7-1.1	0.5-1.1	na	na	0.9	0.1	4.3-4.7
Mexico	59.6	22.8	5.6	3.1	1.3	0.9	0.4	0.9	0.5	0	na	na
Netherlands	45.1-59.7	24.8-28.9	3.3-9	0.5-6.8	0.6-2.9	0.6-3.7	0.2-1.3	0.9-1.8	0.1-1.2	0.1-1.5	0-0.1	2.7-8.1
Northern China	43.7	44	3.5	0.9	0.9	0.4	0.7	1.5	0.3	na	na	10
Poland	32.2-53.3	4-32.2	4.5-8.9	1.2-29.9	0.2-3.3	1.2-5.9	na	0.6-2.2	0.2-1.5	0.1-0.9	0-0.3	0.5-28
Russia	40.5-48.6	23.2-25.9	na	6.9-13.2	1.9-2.6	2.6-4	na	0.5-0.6	1.2-1.5	0.3-0.4	0.2-0.4	na
South Africa	46.3-67	21.3-27	2.4-4.7	6.4-9.8	0.5-1	1.9-2.7	na	1.2-1.6	0-1.3	0.3-0.9	0-0.5	na
Spain	41.5-58.6	17.6-45.4	2.6-16.2	0.3-11.8	0.2-4	0.3-3.2	0.1-2.2	0.5-1.8	0-1.1	0.1-1.7	0-0.1	1.1-9.7
Spain	41.5-58.6	17.6-35.6	2.6-16	0.8-11.8	0.4-4	0.9-2.5	0.1-2.2	0.5-1.6	0.2-0.8	0.1-1.7	0-0.1	1.1-5.2
Turkey	37.9-57	20.5-24.3	4.1-10.6	0.2-27.9	0.4-3.5	1-3.2	0.6-4.8	0.6-1.5	0.1-0.6	0.2-0.3	0	0.4-2.7
United State	34.9-58.5	19.1-28.6	3.2-25.5	0.7-22.4	0.9-2.9	0.5-4.8	0.1-2.1	1-1.6	0.2-1.8	0.1-1.3	na	0.2-20.5
Minimum	20.0	1.0	1.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Maximum	80.0	55.0	44.7	52.0	4.7	11.0	15.0	3.7	7.3	3.9	0.5	32.8

Note: nd = Not detected, na = Not available.

參考來源： A. Bhatt, S. Priyadarshini, A. A. Mohanakrishnan, A. Abri, M. Sattler, and S. Techapaphawit, "Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 11, p. e00263, 2019.

表 2-國外底灰化學性質

Chemical composition of CBA.

Author (s)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	LOI	MgO	SO ₃	K ₂ O	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Others
土耳其 Kula et al. [51]	50.98	14.96	9.63	2.63	0.47	15.7	4.01	0.16	1.3	-	-	-	-
土耳其 Targan et al. [42]	42.39	21.35	6.41	17.57	-	10.17	1.52	2.34	1.11	-	-	-	-
土耳其 Canpolat [47]	44.26	21.48	6.4	17.57	0.29	-	1.29	2.17	0.77	-	-	-	-
泰國 Jaturapitakkul and Cheerarat [11]	48.12	23.47	10.55	11.65	0.07	4.02	3.45	1.76	3.45	0.07	-	-	-
土耳其 Targan et al. [43]	42.39	21.35	6.41	17.57	-	10.17	1.52	2.34	1.11	-	-	-	-
土耳其 Kurama and Kaya [12]	55.95	16.65	9.69	4.39	0.084	4.65	5.14	0.7	1.44	-	-	-	-
巴西 Martins [52]	52.02	23.23	9.11	6	0.49	2.94	2.17	0.65	1.14	-	1.23	0.71	-
土耳其 Kizgut et al. [55]	61.36	21.86	6.78	2.55	0.44	1.75	2.1	trace	3.5	-	1.03	-	0.38
泰國 Wongkeo et al. [48]	42.51	23.52	10.2	12.55	2.2	3.82	2.45	-	2.12	0.05	0.41	0.17	-
泰國 Wongkeo et al. [91]	44.56	22.48	14.93	10.54	0.77	1	2.54	0.65	1.76	0.12	0.46	0.19	-
西班牙 Arenas [44]	52.32	25.14	9.23	2.37	0.66	1.07	1.84	0.03	3.72	0.07	1.45	0.25	-
西班牙 Menendez et al. [49]	49.97	26.95	8.34	8.28	0.14	1.85	1.12	0.11	0.78	0.05	2.25	0.95	0.07
韓國 Kim [21]	45.37	25.12	5.81	0.99	0.64	13.1	1.16	-	3.87	0.06	2.84	0.18	-
土耳其 Aydin [45]	55.1	28.1	8.3	1.1	-	3.9	0.3	0.3	1.5	-	-	-	-
美國 Oruji [53]	58.7	20.1	6.2	9.5	0.1	0.8	1.6	0.4	1	-	-	-	-
西班牙 Argiz [54]	52.4	27.5	6.6	2.4	0.36	3.8	1.83	0	3.48	0	0.97	0.12	0.006
泰國 Abdulmatin et al. [46]	35.6	19.6	14.9	18.7	1.2	3.6	2.4	1.7	2.3	-	-	-	-
馬來西亞 Mangi et al. [41]	52.5	17.65	8.3	4.72	-	4.01	0.58	0.84	-	-	2.17	-	-
泰國 Rathnayake et al. [57]	34.49	17.74	14.24	21.97	-	-	1.90	1.71	-	-	-	-	1.42
泰國 Khongpermgoson et al. [56]	35.6	19.6	14.9	18.7	-	3.6	2.4	1.7	2.3	-	-	-	0.01

參考來源： N. Singh and A. Bhardwaj, "Reviewing the role of coal bottom ash as an alternative of cement," *Construction and Building Materials*, vol. 233, p. 117276, 2020.

附件 2 林口電廠更新擴建計畫(113 年度 Q1~Q3)

監測類別	監測項目	監 測 結 果 摘 要
空氣品質	總懸浮微粒(TSP) 懸浮微粒(PM ₁₀) 二氧化硫(SO ₂) 二氧化氮(NO ₂) 一氧化碳(CO) 風向及風速	本年度於下福聚落、貓尾崎聚落及中央警察大學旁聚落測站之空氣品質監測值，均符合空氣品質標準。 1. TSP 及 PM₁₀：TSP24 小時值下福聚落介於 26~36 µg/m³ 之間、貓尾崎聚落介於 19~31 µg/m³ 之間、中央警察大學旁聚落介於 16~31 µg/m³ 之間；年算術平均值下福聚落為 31.0 µg/m³、貓尾崎聚落為 26.0 µg/m³、中央警察大學旁聚落為 22.7 µg/m³；PM₁₀ 日平均值下福聚落介於 19~28 µg/m³ 之間、貓尾崎聚落介於 15~22 µg/m³ 之間、中央警察大學旁聚落介於 12~16 µg/m³ 之間；年平均值下福聚落為 22.3 µg/m³、貓尾崎聚落為 19.3 µg/m³、中央警察大學旁聚落為 14.3 µg/m³，皆符合空氣品質標準(PM₁₀：日平均值 100 µg/m³，年平均值 50 µg/m³)。 2. SO₂：SO₂ 之最大小時平均值下福聚落介於 0.002~0.003 ppm 之間、貓尾崎聚落介於 0.002~0.003 ppm 之間、中央警察大學旁聚落介於 0.002~0.003 ppm 之間；日平均值下福聚落均為 0.002、貓尾崎聚落均為 0.002、中央警察大學旁聚落均為 0.002 ppm；年平均值下福聚落為 0.002 ppm、貓尾崎聚落為 0.002 ppm、中央警察大學旁聚落為 0.002 ppm，皆符合空氣品質標準(小時平均值：0.075 ppm；年平均值：0.02 ppm)。 3. NO₂：NO₂ 之最大小時平均值下福聚落介於 0.011~0.018 ppm 之間、貓尾崎聚落介於 0.012~0.038 ppm 之間、中央警察大學旁聚落介於 0.012~0.038 ppm 之間；年平均值下福聚落為 0.014 ppm、貓尾崎聚落為 0.022 ppm、中央警察大學旁聚落為 0.028 ppm，符合空氣品質標準(小時平均值：0.25 ppm；年平均值：0.05 ppm)。 4. CO：CO 監測之最大小時平均值下福聚落介於 0.4~0.5 ppm 之間、貓尾崎聚落介於 0.3~0.7 ppm 之間、中央警察大學旁聚落介於 0.4~0.7 ppm 之間；而最大 8 小時平均值下福聚落介於 0.3~0.4 ppm 之間、貓尾崎聚落介於 0.3~0.5 ppm 之間、中央警察大學旁聚落介於 0.3~0.5 ppm 之間，皆符合空氣品質標準(小時平均值：35 ppm；8 小時平均值：9 ppm)。 5. 風速及風向：各季盛行風向下福聚落分別為 S、SSE、及 SSE，貓尾崎聚落為 SE、SSW 及 E，中央警察大學旁聚落為 ENE、ESE 及 SE；風速之最大小時平均值下福聚落介於 0.5~2.6 m/s 之間、貓尾崎聚落介於 0.2~0.4 m/s 之間、中央警察大學旁聚落介於 0.6~1.4 m/s 之間。

監測類別	監測項目	監 測 結 果 摘 要
空氣品質	總懸浮微粒(TSP) 懸浮微粒(PM ₁₀) 二氧化硫(SO ₂) 二氧化氮(NO ₂) 一氧化碳(CO) 風向及風速	本年度於林口電廠、蘆竹及大園測站之空氣品質監測值，均符合空氣品質標準。 1. PM₁₀：PM₁₀ 日平均值林口電廠介於 20.8~56.9 µg/m³ 之間、蘆竹測站介於 26.4~53 µg/m³ 之間、大園測站介於 25.6~57.3 µg/m³ 之間，皆符合空氣品質標準(PM₁₀ 日平均值：125 µg/m³)。 2. PM_{2.5}：PM_{2.5} 24 小時值林口電廠介於 3.7~17.7 µg/m³ 之間、蘆竹測站介於 6.9~20.5 µg/m³ 之間、大園測站介於 6.94~14.7 µg/m³ 之間，皆符合空氣品質標準(PM_{2.5} 日平均值：35 µg/m³)。 3. SO₂：SO₂ 之最大小時平均值林口電廠介於 0.002~0.004 ppm 之間、蘆竹測站介於 0.003~0.006 ppm 之間、大園測站介於 0.002~0.005 ppm 之間，日平均值林口電廠為 0.001、蘆竹測站介於 0.001~0.002 ppm 之間、大園測站介於 0.001~0.002 ppm 之間，皆符合空氣品質標準(小時平均值：0.25 ppm；日平均值：0.1 ppm)。 4. NO₂：NO₂ 之最大小時平均值林口電廠介於 0.012~0.028 ppm 之間、蘆竹測站介於 0.018~0.033 ppm 之間、大園測站介於 0.021~0.045 ppm 之間，符合空氣品質標準(小時平均值：0.25 ppm)。 5. 風速及風向：各季盛行風向林口電廠分別為 ESE、SE 及 SSE，蘆竹測站為 NNE、SW 及 N，大園測站為 NNW、S 及 NNW；風速之最大小時平均值林口電廠介於 0.8~2.4 m/s 之間、蘆竹測站介於 1.3~3.1 m/s 之間、大園測站介於 1.2~7.7 m/s 之間。
河川水質	pH、溶氧量、生化需氧量、大腸桿菌群、懸浮固體、氨氮	本年度河川水質之監測結果，RPI 積分介於 1.0~2.3 之間，屬未(稍)受污染~輕度污染。 1. pH：測值介於 7.6~7.8 之間，符合丁類陸域地面水體水質標準(6.0~9.0)。 2. 溶氧量：測值介於 7.4 ~10.0 mg/L 之間，符合丁類陸域地面水體水質標準(3.0 mg/L 以上)。 3. 生化需氧量：測值皆<2.0 mg/L，符合丁類陸域地面水體水質標準(8.0 mg/L)。 4. 大腸桿菌群：測值介於介於 6.0×10³~7.5×10⁴ CFU/100mL 之間。 5. 懸浮固體：測值介於 6.0~10.0 mg/L 之間，符合丁類陸域地面水體水質標準(100 mg/L)。 6. 氨氮：測值介於 0.14~1.88 mg/L 之間。

監測類別	監測項目	監 測 結 果 摘 要
海 域 生 態	浮游植物、浮游動物、底棲生物、魚卵及仔稚魚	1.浮游植物：本年度第1季共發現4門72種，第2季發現2門32屬73種，第3季發現2門34屬70種。 2.浮游動物：本年度第1季共鑑定出15種的浮游動物，第2季鑑定出18種浮游動物，而第3季鑑定出18種的浮游動物，各測站整體平均浮游動物密度分別為38,151、28,698及131,657 (inds./1000m ³)。 3.底棲生物：本年度第1季共發現3門12種31個生物個體，第2季共發現5門16種37個生物個體，第3季共發現5門14種28個生物個體。 4.魚卵及仔稚魚：本年度第1季共記錄到1種仔稚魚，第2季為記錄到，第3季共記錄1種仔稚魚。
海 域 水 質	pH、濁度、溶氧量、生化需氧量、葉綠素a、懸浮固體	本年度海域水質監測值，整體而言大致可符合乙類海域水體水質標準。 1.pH：4測站之表層pH測值介於7.9~8.22之間，中層測值介於7.89~8.2之間，底層測值介於7.9~8.19之間。各測站測值均符合乙類海域水體水質標準(7.5~8.5)。 2.濁度：4測站濁度表層測值介於1.1~9.6 NTU之間，中層測值介於1.4~8.3 NTU之間，底層測值介於1.3~9.8 NTU之間。 3.溶氧量：4測站溶氧量表層測值介於6.1~6.8 mg/L之間，中層測值介於6.1~6.8 mg/L之間，底層測值介於6.0~6.8 mg/L之間(標準值 ≥ 5.0 mg/L)。 4.生化需氧量：4測站生化需氧量表層測值介於0.6~1.8 mg/L之間，中層測值介於0.5~1.6 mg/L之間，底層測值介於0.4~1.1 mg/L之間，各測站測值均符合乙類海域水體水質標準(≤ 3.0 mg/L)。 5.葉綠素a：4測站葉綠素a表層測值介於0.329~9.05 $\mu\text{g/L}$ 之間，中層測值介於0.165~9.38 $\mu\text{g/L}$ 之間，底層測值介於0.165~9.05 $\mu\text{g/L}$ 之間。 6.懸浮固體：4測站懸浮固體表層測值介於3.4~13 mg/L之間，中層測值介於3.8~14.6 mg/L之間，底層測值介於5.4~13.1 mg/L之間。 7.鹽度：4測站鹽度表層測值介於31.2~32.6 psu之間，中層測值介於31.2~32.5 psu之間，底層測值介於31.1~32.6 psu之間。 8.化學需氧量：4測站化學需氧量表層測值介於N.D.~10.6 mg/L之間，中層測值介於N.D.~10.1，底層測值介於N.D.~10。 9.水溫：4測站水溫表層測值介於20.5~33.4°C之間，中層測值介於20.3~33.1°C之間，底層測值介於20.1~32.9°C之間。

監測類別	監測項目	監 測 結 果 摘 要
	鳥類、植物	1. 陸域植物 (1) 種屬組成 第 1 季共記錄植物 449 種，其中蕨類植物佔 10.9%，裸子植物佔 1.8%，雙子葉植物佔 69%，單子葉植物佔 18.3%。依植物生長型劃分，計喬木佔 24.9%、灌木 12.2%、木質藤本 5.8%、草質藤本 6.7% 及草本 50.3%。依植物屬性區分，計有原生種佔 63.5%；歸化種佔 28.5%，栽培種則為 8%。 第 3 季共記錄植物 451 種，其中蕨類植物佔 10.9%，裸子植物佔 1.8%，雙子葉植物佔 69.1%，單子葉植物佔 18.2%。依植物生長型劃分，計喬木佔 24.8%、灌木 12.2%、木質藤本 5.8%、草質藤本 6.7% 及草本 50.5%。依植物屬性區分，計有原生種佔 63.2%；歸化種佔 28.8%，栽培種則為 8%。 第 2 季未有紀錄。 2. 鳥類 (1) 種屬組成及數量 第 1 季共記錄鳥類物種量 1504 隻，總類數共 51 種，豐富度 3.16，歧異度 0.8；第 2 季無資料；第 3 季共記錄鳥類物種量 1526 隻，總類數共 48 種，豐富度 3.19，歧異度 0.82。
工程填地地下水	懸浮固體、化學需氧量、重金屬 鋅、鎘、鉛、銅、汞	113 年度灰塘地下水監測值，均符合地下水污染管制標準值。 1. 懸浮固體：1、2 號井測站測值分別為 <2.5 mg/L 及介於 14.6~25.1 mg/L 之間。 2. 化學需氧量：1、2 號井測站測值分別介於 N.D.~10.0 mg/L 及 N.D.~11.8 mg/L 之間。 3. 鋅：1、2 號井測站測值分別介於 0.004~0.011 mg/L 及 0.006~ <0.019mg/L 之間，皆符合管制標準值(50 mg/L)。 4. 鎘：1、2 號井測站測值分別為 N.D. mg/L 及介於 N.D.~<0.001 mg/L 之間，皆符合管制標準值(0.05 mg/L)。 5. 鉛：1、2 號井測站測值分別為 N.D. mg/L 及介於 N.D.~<0.006 mg/L 之間，皆符合管制標準值(0.1 mg/L)。 6. 銅：1、2 號井測站測值分別介於 N.D.~0.002 及 N.D. mg/L，皆符合管制標準值(10 mg/L)。 7. 汞：1、2 號井測站測值分均為 N.D. mg/L，皆符合管制標準值(0.02 mg/L)。

附件 3 台中電廠環境監測(民國 113 年 Q1~Q3)

監測類別	監測項目	113 年 監 測 結 果 摘 要
一、空氣品質	1.SO ₂	第 1 季各測站之日平均值之最大值介於 0.002~0.005ppm 之間，小時平均值之最大值介於 0.004~0.013ppm 之間；第 2 季各測站之日平均值之最大值介於 0.002~0.004ppm 之間，小時平均值之最大值介於 0.005~0.010ppm 之間；第 3 季各測站之日平均值之最大值介於 0.001~0.005ppm 之間，小時平均值之最大值介於 0.002~0.009ppm 之間，均符合標準限值 ^{註1} (SO ₂ 小時平均值：0.075 ppm)。
	2.NO ₂	第 1 季各測站之小時平均值之最大值介於 0.028~0.057ppm 之間；第 2 季各測站之小時平均值之最大值介於 0.011~0.024ppm 之間；第 3 季各測站之小時平均值之最大值介於 0.014~0.039ppm 之間，均符合標準限值 ^{註1} (NO ₂ 小時平均值：0.1 ppm)。
	3.PM ₁₀	第 1 季各測站之日平均值之最大值介於 57~104.5μg/m ³ 之間，其中伸港站及鹿港站超出標準限值；第 2 季各測站之日平均值之最大值介於 33.2~82.2μg/m ³ 之間，測站皆可符合標準限值；第 3 季各測站之日平均值之最大值介於 25~52.9μg/m ³ 之間，測站皆可符合標準限值 ^{註1} (PM ₁₀ 日平均值：100 μg/m ³)。
	4.PM _{2.5}	第 1 季各測站之日平均值之最大值介於 28.7~43.8μg/m ³ 之間，各測站均超出標準限值；第 2 季各測站之日平均值之最大值介於 12.8~37.1μg/m ³ 之間，其中草屯站超出標準限值；第 3 季各測站之日平均值之最大值介於 8.5~25μg/m ³ 之間，各測站均符合法規標準。
註：1. 參考中華民國 109 年 9 月 18 日行政院環境保護署環署空字第 1091159220 號令修正發布之空氣品質標準。		
二、水質	1.溫升監測	第 1 季各測站之排放口溫度最高值測值介於 19.96~21.09℃ 之間，符合放流水不得超過 42℃ 之標準；溫升最大值為 0.75℃，均符合距電廠溫排水排放口 500 m 表面水溫差不得超過 4℃ 之標準。 第 2 季各測站之排放口溫度最高值測值介於 25.21~28.63℃ 之間，符合放流水不得超過 42℃ 之標準；溫升最大值為 0.74℃，均符合距電廠溫排水排放口 500 m 表面水溫差不得超過 4℃ 之標準。 第 3 季各測站之排放口溫度最高值測值介於 26.67~32.5℃ 之間，符合放流水不得超過 42℃ 之標準；溫升最大值為 1.22℃，均符合距電廠溫排水排放口 500 m 表面水溫差不得超過 4℃ 之標準。

監測類別	監測項目	113 年 監 測 結 果 摘 要
	2.水質監測 a.水溫 b.pH c.懸浮固體 d.生化需氧量 e.化學需氧量	a.第 1 季各測站介於 19.7~20.2℃ 之間；第 2 季各測站介於 28.3~29℃ 之間；第 3 季各測站介於 30.6~31.7℃ 之間。 b.第 1~3 季介於 8.1~8.2 之間，均符合乙類海域海洋環境品質標準(7.5~8.5)。 c.第 1 季各測站介於 2.9~3 mg/L 之間；第 2 季各測站介於 6~14 mg/L 之間；第 3 季各測站介於 6.9~12.5 mg/L 之間。 d.第 1 季為<1.0 mg/L；第 2 季介於<1.0~2.2mg/L；第 3 季為<1.0 mg/L，均符合乙類海域海洋環境品質標準($\leq 3\text{mg/L}$)。 e. 第 1 季為 N.D.；第 2 季介於 N.D.~3.3 mg/L 之間；第 3 季介於 N.D.~3.5 mg/L 之間。
		由以上監測結果顯示，本年度進出水口及台中港港口海域各監測項目測值均符合乙類海域海洋環境品質標準，無明顯異常。
三、海域生態 (含海域水質)	1.生物因子 a.植物性浮游生物 b.動物性浮游生物 c.底棲動物	a.第 1 季共記錄 4 門 35 屬 62 種植物性浮游生物；第 2 季共記錄 4 門 35 屬 70 種植物性浮游生物；第 3 季共記錄 3 門 27 屬 55 種植物性浮游生物。 b.第 1 季共記錄 35 種物種以及仔稚魚與魚卵，平均數量為 $6.68 \times 10^5 \text{inds./1000m}^3$ ；第 2 季共記錄 30 種物種以及仔稚魚與魚卵，平均數量為 $4.87 \times 10^5 \text{inds./1000m}^3$ ；第 3 季共記錄 27 種物種以及仔稚魚與魚卵，平均數量為 $3.77 \times 10^5 \text{inds./1000m}^3$ 。 c.第 1 季於各測站之採樣共發現亞潮帶採獲脊索動物、節肢動物、軟體動物、環節動物及棘皮動物等 5 大類計 25 科 35 屬 38 種共 915 個生物個體。潮間帶採獲脊索動物、節肢動物、軟體動物及蠕蟲動物等 4 大類計 14 科 19 屬 20 種共 305 個生物個體；第 2 季亞潮帶採獲脊索動物、節肢動物、軟體動物、環節動物及棘皮動物等 5 大類計 34 科 47 屬 55 種共 1,114 個生物個體。潮間帶則採獲脊索動物、節肢動物、軟體動物及環節動物等 4 大類計 29 科 37 屬 39 種共 259 個生物個體；第 3 季亞潮帶採獲脊索動物、節肢動物、軟體動物、環節動物及棘皮動物等 5 大類計 32 科 39 屬 43 種共 462 個生物個體。潮間帶則採獲脊索動物、節肢動物、軟體動物、環節動物及棘皮動物等 5 大類計 28 科 37 屬 41 種共 338 個生物個體。
		由以上之監測結果顯示，本年度海域生態之生物因子均屬正常變化範圍。

監測類別	監測項目	113 年 監 測 結 果 摘 要
	2.環境因子 海域水質調查	第 1 季至第 3 季調查水溫介於 19.1~31.3℃ 之間；pH 測值 8~8.3；溶氧量測值介於 6.0~7.9mg/L 之間；懸浮固體測值介於 1.4~66.5mg/L 之間；亞硝酸鹽介於<0.02~0.28mg/L；硝酸鹽介於<0.22~3.93 mg/L。 重金屬：鋅：N.D.~4.36μg/L；鉛：皆 ND；鎘：皆 ND；鉻：皆<0.005μg/L；汞：均為 ND；砷：0.56~1.7μg/L；六價鉻：皆 ND。
	海域沉積物	本次大肚溪口 19 號測站總有機物及部分重金屬(鉛、鋅、鉻、銅)有較海域水質測站偏高情形，推估應持續受大肚溪口潮水變化影響所致。
四、鳥類	種類、數量、出現 頻率	本年度第 1 季於調查樣區內之調查結果發現之鳥種數共有 144 種，總隻次數共計 25,400 隻次；第 2 季於調查樣區內之調查結果發現之鳥種數共有 147 種，總隻次數共計 10,372 隻次；第 3 季於調查樣區內之調查結果發現之鳥種數共有 125 種，總隻次數共計 10,409 隻次。
五、農作物	植體分析 a.氮 b.磷 c.鉀 d.鈣 e.鎂 f.鐵 g.錳 h.鎘 i.鉻 j.銅 k.鎳	各植體之氮含量第 2 季介於 1.80~2.82%之間；第 3 季介於 0.26~1.75%之間。 各植體之磷含量第 2 季介於 0.21~0.32%之間；第 3 季介於 0.04~0.44%之間。 各植體之鉀含量第 2 季介於 1.72~2.84%之間；第 3 季介於 0.13~2.86%之間。 各植體之鈣含量第 2 季介於 2167~18705ppm 之間；第 3 季介於 623~6777ppm 之間。 各植體之鎂含量第 2 季介於 1244~6775ppm 之間；第 3 季介於 306~4949ppm 之間。 各植體之鐵含量第 2 季介於 85~1129ppm 之間；第 3 季介於 35~27537ppm 之間。 各植體之錳含量第 2 季介於 59~338ppm 之間；第 3 季介於 1.35~2872ppm 之間。 各植體之鎘含量第 2 季分佈於 0.01~0.35ppm 之間；第 3 季介於 0.02~2.02ppm 之間。 各植體之鉻含量第 2 季介於 0.30~1.35ppm 之間；第 3 季介於 0.55~6.88ppm 之間。 各植體之銅含量第 2 季介於 3.87~17.5ppm 之間；第 3 季介於 2.02~69.6ppm 之間。 各植體之鎳含量第 2 季介於 0.27~2.18ppm 之間；第 3 季介於 0.38~20.1ppm 之間。

監測類別	監測項目	113 年 監 測 結 果 摘 要
	l.鉛 m.鋅	各植體之鉛含量第 2 季介於 0.25~2.11ppm 之間；第 3 季介於 0.10~31ppm 之間。 各植體之鋅含量第 2 季介於 20~53ppm 之間；第 3 季介於 13~106ppm 之間。
	土壤分析 a.pH	a.表土之酸鹼值第 1 季介於 4.91~6.60 之間；底土則介於 6.22~8.73 之間。表土之酸鹼值第 3 季介於 4.87~6.74 之間；底土則介於 6.00~8.19 之間。
	b.導電度	b.表土之導電度第 1 季介於 1.72~9.69mmho/cm；底土則介於 0.54~1.85 mmho/cm 之間。表土之導電度第 3 季介於 0.9~2.39mmho/cm；底土則介於 0.43~1.87 mmho/cm 之間。
	c.水溶性陰離子	c.表土之氟離子第 1 季介於 2.42~7.69μg/g 之間，底土則介於 2.44~8.02μg/g 之間；表土之氟離子第 3 季介於 2.01~5.32μg/g 之間，底土則介於 2.00~10.1μg/g 之間； 表土之氯離子第 1 季介於 76~777μg/g 之間，底土則介於 18~120μg/g 之間；表土之氯離子第 3 季介於 33~120μg/g 之間，底土則介於 24~82μg/g 之間； 表土之硫離子第 1 季介於 292~1,605μg/g 之間，底土則介於 50~269μg/g 之間；表土之硫離子第 3 季介於 120~1,154μg/g 之間，底土則介於 42~499μg/g 之間。

監測類別	監測項目	113 年 監 測 結 果 摘 要
		d.表土之鐵離子第 1 季介於 851~1539$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 267~977$\mu\text{g/g}$ 之間；表土之鐵離子第 3 季介於 773~1646$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 323~1120$\mu\text{g/g}$ 之間； 表土之錳離子第 1 季介於 4~113$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 37~135$\mu\text{g/g}$ 之間；表土之錳離子第 3 季介於 1.76~109$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 13~168$\mu\text{g/g}$ 之間； 表土之鎘離子第 1 季介於 0.07~0.19$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 0.03~0.10$\mu\text{g/g}$ 之間；表土之鎘離子第 3 季介於 0.05~0.19$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 0.03~0.07$\mu\text{g/g}$ 之間； 表土之鉻離子第 1 季介於 0.35~0.95$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 0.3~0.58$\mu\text{g/g}$ 之間；表土之鉻離子第 3 季介於 0.37~1.41$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 0.34~0.90$\mu\text{g/g}$ 之間； 表土之銅離子第 1 季介於 6.56~21.8$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 2.95~5.25$\mu\text{g/g}$ 之間；表土之銅離子第 3 季介於 6.22~25.6$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 3.04~5.48$\mu\text{g/g}$ 之間； 表土之鎳離子第 1 季介於 1.67~9.8$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 1.18~3.02$\mu\text{g/g}$ 之間；表土之鎳離子第 3 季介於 1.72~12.8$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 1.71~2.35$\mu\text{g/g}$ 之間； 表土之鉛離子第 1 季介於 7.96~13.0$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 2.82~7.78$\mu\text{g/g}$ 之間；表土之鉛離子第 3 季介於 7.64~11.6$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 3.92~7.97$\mu\text{g/g}$ 之間； 表土之鋅離子第 1 季介於 11.3~28.5$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 4.14~14.9$\mu\text{g/g}$ 之間；表土之鋅離子第 3 季介於 6.31~37.2$\mu\text{g/g}$ 之間，底土則介於 3.3~12.0$\mu\text{g/g}$ 之間。
六、地下水質	第一期工程填地 附近地下水水質 (含工程填地水質) a.pH b.水溫($^{\circ}\text{C}$) c.濁度(NTU) d.氯鹽(mg/L)	第 1 季：介於 7.4~8.3 之間;第 2 季：介於 7.2~8.3 之間;第 3 季：介於 7.2~8.4 之間。 第 1 季：介於 15.9~24.2 之間;第 2 季：介於 24.1~32.0 之間;第 3 季：介於 28.0~31.6 之間。 第 1 季：介於 9.1~80.0 之間;第 2 季：介於 6.8~130 之間;第 3 季：介於 2.8~45.0 之間。 第 1 季：介於 27.6~26500 之間;第 2 季：介於 49.9~25700 之間;第 3 季：介於 34.6~11200 之間。

監測類別	監測項目	113 年 監 測 結 果 摘 要
	e. 化學需氧量 (mg/L)	第 1 季：介於 N.D.~51.0 之間;第 2 季：介於 4.9~50.6 之間;第 3 季：介於 3.2~39.1 之間。
	f. 生化需氧量 (mg/L)	第 1 季：為<1.0;第 2 季：介於<1.0~3.4 之間;第 3 季：介於<1.0~1.8 之間。
	g. 重金屬 鎘(mg/L)	第 1 季、第 2 季、第 3 季皆為 N.D.。
	六價鉻(mg/L)	第 1 季、第 2 季、第 3 季皆為 N.D.。
	砷(mg/L)	第 1 季：介於 0.0030~0.0894 之間;第 2 季：介於<0.0020~0.139 之間;第 3 季：介於<0.0020~0.246 之間。
	汞(mg/L)	第 1 季、第 2 季皆為 N.D.;第 3 季：介於 N.D.~<0.0010 之間。
	鉛(mg/L)	第 1 季：介於 N.D.~<0.008 之間;第 2 季：介於 N.D.~0.013 之間;第 3 季：介於 18.9~222 之間。
	h. 鈣(mg/L)	第 1 季：介於 50.1~533 之間;第 2 季：介於 54.0~575 之間;第 3 季：介於<0.0020~0.246 之間。
	鎂(mg/L)	第 1 季：介於 23.4~1610 之間;第 2 季：介於 29.7~1690 之間;第 3 季：介於 28.2~625 之間。
	鈉(mg/L)	第 1 季：介於 17.8~13000 之間;第 2 季：介於 19.3~14100 之間;第 3 季：介於 17.2~4950 之間。
	鉀(mg/L)	第 1 季：介於 21.3~506 之間;第 2 季：介於 24.3~560 之間;第 3 季：介於 16.2~204 之間。
	i. 懸浮固體(mg/L)	第 1 季：介於 8.5~125 之間;第 2 季：介於 4.5~231 之間;第 3 季：介於 3.9~93.5 之間。
	j. 總溶解性固體 (mg/L)	第 1 季：介於 374~55700 之間;第 2 季：介於 456~55000 之間;第 3 季：介於 395~22400 之間。
	k. 氟化物(mg/L)	第 1 季：介於 0.18~1.39 之間;第 2 季：介於 0.26~1.70 之間;第 3 季：介於 0.15~1.07 之間。

附件 4 線西西三區環境監測(民國 113 年 Q1~Q3)

表 1 監測結果概述(1/2)

空氣品質			第 1 季	第 2 季	第 3 季
最頻風向			東北風	東北風	東南風
平均風速		(m/s)	10.8	2.3	3.1
總懸浮微粒(TSP)	24 小時值	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	105	101	23
粒徑 $\leq 10\mu\text{m}$ 之懸浮微粒 (PM10)	日平均值	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	58	59	13
二氧化氮(NO_2)	小時平均值	(ppm)	0.007	0.01	0.013
二氧化硫(SO_2)	日平均值	(ppm)	0.002	N.D.	N.D.
	小時平均值	(ppm)	0.003	0.002	0.001
一氧化碳(CO)	小時平均值	(ppm)	0.4	0.3	0.1
	8 小時平均值	(ppm)	0.4	0.2	0.1

表 2 監測結果概述(2/2)

海域水質		第 1 季			第 2 季			第 3 季		
		北側	西側	南側	北側	西側	南側	北側	西側	南側
水溫	(°C)	19.1	19	19	26.6	26.6	26.6	31.4	31.2	31.4
透明度	(cm)	280	280	260	280	280	280	280	280	280
溶氧量(DO)	(mg/L)	6.3	6.3	6.4	6.3	6.4	6.4	6.3	6.4	6.4
鹽度	(psu)	32	32	32.2	31.7	31.7	31.7	31.8	31.8	31.8
生化需氧量(BOD)	(mg/L)	1.2	1.1	1.1	1	0.9	0.9	1.1	1	1
氯離子濃度指標	(pH)	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2
銅(Cu)	(µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
硒(Se)	(µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
鋅(Zn)	(µg/L)	5.5	4.5	5.6	15.8	9.2	20.3	7.3	12.5	26.8
鉛(Pb)	(µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
鎘(Cd)	(µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
鉻(Cr)	(µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
汞(Hg)	(µg/L)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
砷(As)	(µg/L)	1.2	1.1	1.6	1.1	1.2	1.1	1.4	0.6	1

附件 5 品質管控檢核表

表 1 工程填地檢核表(原煤灰)

僅供參考

編號：

工程名稱				
分項工程名稱				
檢查位置			檢查日期	年 月 日
檢查時機		☐ 檢驗停留點 ☐ 隨機抽查		
檢查結果		☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		抽查標準(定量定性)	實際抽查情形 (敘述抽查值)	抽查結果
飛灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
底灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
其他材料	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
其他事項	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
缺失複查結果： ☐ 已完成改善(檢附改善前中後照片) ☐ 未完成改善，填具「缺失改善追蹤表，編號_____」進行追蹤改善 複查日期： 年 月 日 複查人員職稱： 簽名：				
備註： 1.抽查標準及實際檢查情形應具體明確。 2.抽查結果合格者註明「○」，不合格者註明「×」，如無需檢查之項目則打「／」。 3.本表由監造工地現場人員實地檢查後覈實記載簽認。 4.[]表示可依據設計需求調整。 5.本表檢查項目及抽查標準僅供參考，設計單位可依實際需求調整。				

監造現場人員簽名：

監造主管簽名：

僅供參考

表 2 工程填地檢核表(破碎材)

編號：

工程名稱				
分項工程名稱				
檢查位置		檢查日期	年 月 日	
檢查時機		☐ 檢驗停留點 ☐ 隨機抽查		
檢查結果		☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		抽查標準(定量定性)	實際抽查情形 (敘述抽查值)	抽查結果
飛灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度 濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
底灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度 濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
其他材料	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
破碎材	比重	≥1.10[]		
	粒徑範圍	≤10[或]cm		
	其他注意事項	依據實際需求		
其他事項	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
缺失複查結果： ☐ 已完成改善(檢附改善前中後照片) ☐ 未完成改善，填具「缺失改善追蹤表，編號_____」進行追蹤改善 複查日期： 年 月 日 複查人員職稱： 簽名：				
備註： 1.抽查標準及實際檢查情形應具體明確。 2.抽查結果合格者註明「○」，不合格者註明「×」，如無需檢查之項目則打「／」。 3.本表由監造工地現場人員實地檢查後覈實記載簽認。 4.[]表示可依據設計需求調整。 5.本表檢查項目及抽查標準僅供參考，設計單位可依實際需求調整。				

監造現場人員簽名：

監造主管簽名：

僅供參考

表 3 工程填地檢核表(控制性低強度回填材料)

編號：

工程名稱				
分項工程名稱				
檢查位置		檢查日期	年 月 日	
檢查時機		☐ 檢驗停留點 ☐ 隨機抽查		
檢查結果		☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		抽查標準(定量定性)	實際抽查情形 (敘述抽查值)	抽查結果
飛灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度 濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
底灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度 濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
其他材料	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
控制性 低強度 回填材料	坍塌度	≥40 [或] cm		
	28 天抗壓強度	≥20[或] kgf/cm ²		
其他事項	依實際需求訂定	依實際需求訂定		

缺失複查結果：

☐已完成改善(檢附改善前中後照片)

☐未完成改善，填具「缺失改善追蹤表，編號_____」進行追蹤改善

複查日期： 年 月 日

複查人員職稱： 簽名：

備註：

- 1.抽查標準及實際檢查情形應具體明確。
- 2.抽查結果合格者註明「○」，不合格者註明「×」，如無需檢查之項目則打「／」。
- 3.本表由監造工地現場人員實地檢查後覈實記載簽認。
- 4.[]表示可依設計需求調整。
- 5.本表檢查項目及抽查標準僅供參考，設計單位可依實際需求調整。

監造現場人員簽名：

監造主管簽名：

僅供參考

表 4 隔堤檢核表(破碎材)

編號：

工程名稱				
分項工程名稱				
檢查位置		檢查日期	年 月 日	
檢查時機		☐ 檢驗停留點 ☐ 隨機抽查		
檢查結果		☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		抽查標準(定量定性)	實際抽查情形 (敘述抽查值)	抽查結果
飛灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度 濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
底灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度 濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
其他材料	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
破碎材	比重	≥1.10[]		
	粒徑範圍	≤10[或]cm		
	其他注意事項	依據實際需求		
其他事項	依實際需求訂定	依實際需求訂定		

缺失複查結果：

☐已完成改善(檢附改善前中後照片)

☐未完成改善，填具「缺失改善追蹤表，編號_____」進行追蹤改善

複查日期： 年 月 日

複查人員職稱： 簽名：

備註：

- 1.抽查標準及實際檢查情形應具體明確。
- 2.抽查結果合格者註明「○」，不合格者註明「×」，如無需檢查之項目則打「／」。
- 3.本表由監造工地現場人員實地檢查後覈實記載簽認。
- 4.[]表示可依設計需求調整。
- 5.本表檢查項目及抽查標準僅供參考，設計單位可依實際需求調整。

監造現場人員簽名：

監造主管簽名：

僅供參考

表 5 隔堤檢核表(控制性低強度回填材料)

編號：

工程名稱				
分項工程名稱				
檢查位置		檢查日期	年 月 日	
檢查時機		☐ 檢驗停留點 ☐ 隨機抽查		
檢查結果		☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		抽查標準(定量定性)	實際抽查情形 (敘述抽查值)	抽查結果
飛灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度 濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
底灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度 濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
其他材料	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
控制性 低強度 回填材 料	坍流度	≥ 40 [或] cm		
	單位重	≥ 1.6 [或] t/m ³		
	落沉試驗	[] 小時，依實際需求訂定		
	28 天抗壓強度	≥ 20 [或] kgf/cm ²		
其他事項	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
缺失複查結果： ☐ 已完成改善(檢附改善前中後照片) ☐ 未完成改善，填具「缺失改善追蹤表，編號_____」進行追蹤改善 複查日期： 年 月 日 複查人員職稱： 簽名：				
備註： 1.抽查標準及實際檢查情形應具體明確。 2.抽查結果合格者註明「○」，不合格者註明「×」，如無需檢查之項目則打「／」。 3.本表由監造工地現場人員實地檢查後覈實記載簽認。 4.[]表示可依據設計需求調整。 5.本表檢查項目及抽查標準僅供參考，設計單位可依實際需求調整。				

監造現場人員簽名：

監造主管簽名：

表 6 港灣道路基底層或施工便道檢核表(控制性低強度回填材料)

僅供參考

編號：

工程名稱				
分項工程名稱				
檢查位置		檢查日期	年 月 日	
檢查時機		☐ 檢驗停留點 ☐ 隨機抽查		
檢查結果		☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		抽查標準(定量定性)	實際抽查情形 (敘述抽查值)	抽查結果
飛灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
底灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	其他注意事項	依實際需求訂定		
其他材料	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
控制性低強度回填材料	坍流度	≥40 [或] cm		
	落沉試驗	[] 小時，依實際需求訂定		
	抗壓強度(7 天或 28 天)	[] kgf/cm ² ，依實際需求訂定		
其他事項	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
缺失複查結果： ☐ 已完成改善(檢附改善前中後照片) ☐ 未完成改善，填具「缺失改善追蹤表，編號_____」進行追蹤改善 複查日期： 年 月 日 複查人員職稱： 簽名：				
備註： 1.抽查標準及實際檢查情形應具體明確。 2.抽查結果合格者註明「○」，不合格者註明「×」，如無需檢查之項目則打「／」。 3.本表由監造工地現場人員實地檢查後覈實記載簽認。 4.[]表示可依設計需求調整。 5.本表檢查項目及抽查標準僅供參考，設計單位可依實際需求調整。				

監造現場人員簽名：

監造主管簽名：

表 7 無筋預鑄混凝土塊(消波塊或方塊)檢核表(混凝土)

僅供參考

編號：

工程名稱				
分項工程名稱				
檢查位置		檢查日期	年 月 日	
檢查時機		☐ 檢驗停留點 ☐ 隨機抽查		
檢查結果		☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		抽查標準(定量定性)	實際抽查情形 (敘述抽查值)	抽查結果
飛灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	※物化性質	CNS 3036		
底灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	粒徑範圍	≤9.5[或] mm		
	細度模數	FM=2.10[]~3.5[]		
	健度(硫酸鈉)	≤10[或] ppm		
	含水量	≤30[或] ppm		
	比重	≥1.6[或]		
	*氯離子	≤0.012 [或] ppm		
其他注意事項	依實際需求訂定			
其他材料	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
混凝土或產品	坍度	≥12.5 [或] cm		
	單位重	≥1.9 [或] t/m ³		
	*氯離子	≤0.15[或] kg/m ³		
	28 天抗壓強度	≥210 [或] kgf/cm ²		
其他事項	依實際需求訂定	依實際需求訂定		

缺失複查結果：
☐已完成改善(檢附改善前中後照片)
☐未完成改善，填具「缺失改善追蹤表，編號_____」進行追蹤改善
 複查日期： 年 月 日
 複查人員職稱： 簽名：

備註：
 1.抽查標準及實際檢查情形應具體明確。
 2.抽查結果合格者註明「○」，不合格者註明「×」，如無需檢查之項目則打「/」。
 3.本表由監造工地現場人員實地檢查後覈實記載簽認。
 4.[]表示可依據設計需求調整。
 5.«*»表示可經業主同意可免測試。
 6.本表檢查項目及抽查標準僅供參考，設計單位可依實際需求調整。
 7.本表之方塊為設計強度在 210 kgf/cm² 以上，若非屬該範圍，則由設計單位依設計強度另行參考控制性低強度回填材料或其他混凝土相關規範即可。

監造現場人員簽名：

監造主管簽名：

僅供參考

表 8 人工魚礁檢核表(混凝土)

編號：

工程名稱				
分項工程名稱				
檢查位置		檢查日期	年 月 日	
檢查時機		☐ 檢驗停留點 ☐ 隨機抽查		
檢查結果		☐ 檢查合格 ☒ 有缺失需改正 ☐ 無此檢查項目		
檢查項目		抽查標準(定量定性)	實際抽查情形 (敘述抽查值)	抽查結果
飛灰	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	物化性質	CNS 3036		
※底灰 (有結構鋼筋之人工魚礁需經業主同意方能添加底灰)	重金屬溶出量檢測	低於有害廢棄物標準及焚化再生粒料環境標準之第二級標準		
	pH 值與建材活度濃度指數(I)	pH<12.5[或] I≤1[或]		
	粒徑範圍	≤9.5[或] mm		
	細度模數	FM=2.10[]~3.5[]		
	健度(硫酸鈉)	≤10[或] ppm		
	含水量	≤30[或] ppm		
	比重	≥1.6[或]		
	*氯離子	≤0.012 [或] ppm		
其他注意事項	依實際需求訂定			
其他材料	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
混凝土或產品	坍度	≥12.5 [或] cm		
	單位重	≥1.9 [或] t/m ³		
	*氯離子	≤0.15[或] kg/m ³		
	28 天抗壓強度	≥210 [或] kgf/cm ²		
其他事項	依實際需求訂定	依實際需求訂定		
缺失複查結果： ☐ 已完成改善(檢附改善前中後照片) ☐ 未完成改善，填具「缺失改善追蹤表，編號_____」進行追蹤改善 複查日期： 年 月 日 複查人員職稱： 簽名：				
備註： 1.抽查標準及實際檢查情形應具體明確。 2.抽查結果合格者註明「○」，不合格者註明「×」，如無需檢查之項目則打「／」。 3.本表由監造工地現場人員實地檢查後覈實記載簽認。 4. []表示可依設計需求調整。 5. 「*」表示可經業主同意可免測試。 6. 本表檢查項目及抽查標準僅供參考，設計單位可依實際需求調整。				

監造現場人員簽名：

監造主管簽名：

附錄

公共工程委員會施工綱要規範

1. 第 02231 章 清除及掘除
2. 第 02336 章 路基整理
3. 第 03050 章 混凝土基本材料及施工一般要求
4. 第 03310 章 結構用混凝土
5. 第 03316 章 結構用輕質粒料混凝土
6. 第 03439 章 港灣用預鑄混凝土塊

台電公司施工規範

1. 第 03439A 章 港灣用高煤灰摻量預鑄混凝土塊-消波塊
2. 第 02705 章 煤灰填海造地