第 一 章 總則與內容說明

1.1 總則

1.緣起

「飛灰」為燃煤火力發電廠之副產物，為一可善加利用之材料，早期飛灰未被妥善利用，多做棄置，往往造成環境污染問題。由於飛灰屬一種卜作嵐材料，可作為混凝土之礦物摻料，除可避免資源的浪費，亦可節省可觀的處置成本。為兼顧飛灰資源之有效利用與使用飛灰之混凝土品質，行政院公共工程委員會委由國內與混凝土相關之產官學界依據「公共工程使用飛灰混凝土作業要點」研擬本「公共工程飛灰混凝土使用手冊」(以下簡稱「本手冊」)，並經公共工程委員會所成立之「公共工程飛灰混凝土使用手冊審查小組」審訂，作為工程主辦機關、設計及施工單位、營造業及預拌混凝土業等相關產業參考遵循，以提供飛灰混凝土之正確使用方法，確保公共工程品質。

2.目的

以飛灰作為混凝土的礦物摻料，有降低混凝土水化熱、提高混凝土長期抗壓強度與耐久性、節省混凝土成本等優點，同時可避免飛灰棄置所可能造成的環境污染問題。故為使資源有效利用，飛灰應被推廣應用至公共工程混凝土。不過，使用過程若缺乏正確的方法，則反將影響混凝土與工程之品質。本手冊編撰的目的，即在於提供工程界飛灰混凝土之正確使用方法，以確保公共工程品質。

3.定義

(1)飛灰

本手冊所稱之「飛灰」定義為煤粉經鍋爐燃燒，由氣體排放，以集塵設備收集而得之粉末。其品質須符合 CNS 3036 [卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煅燒卜作嵐攙和物]或 CNS 11271[卜特蘭飛灰水泥用飛灰]之規定。飛灰之成分與品質受燃煤料源或電廠燃燒程序之影響甚鉅，故使用飛灰時，應先確認飛灰之品質。

(2)飛灰混凝土

本手冊所稱之「飛灰混凝土」定義為使用前項所述飛灰作為礦物摻料的普通混凝土，飛灰摻用方式可分為取代部分水泥、取代部分細粒料或同時取代水泥與細粒料等三種。

4.適用範圍

本手冊所規範或建議事項適用於一般用途之公共工程飛灰混凝土。特殊用途之混凝土，如高強度混凝土(抗壓強度超過 420 kgf/cm^2)、高性能混凝土或其他特殊混凝土，雖亦可能摻用飛灰，但並不全然適用本手冊之相關內容。

除本手冊列述事項外，均請參照最新版之內政部營建署「建築技術規則」或中國土木水利工程學會「混凝土工程施工規範」之規定。

1.2 內容說明

本手冊之內容包含使用飛灰混凝土之各主要階段應注意事項及所需資訊，分述如下。

1.材料

飛灰之分類、化學成分、物理性質、相關規範、出廠管制、進料管制、運輸與貯藏等相關說明如第二章所述。產製飛灰之電廠與預拌混凝土廠宜參考該章相關規定將飛灰納入品管作業中，以確保飛灰與混凝土品質。

飛灰混凝土之適用範圍與特性說明如第三章所述。摻用飛灰之混凝土不論在新拌性質與硬固性質，與普通混凝土有所異同，對混凝土工程性質之影響利弊互見，工程單位在選擇材料時，應對飛灰混凝土有足夠之認識，以發揮飛灰混凝土之最大效益，並避免伴隨之負面效應。

2. 配比設計

飛灰混凝土之配比設計詳如第四章所述。在選擇使用飛灰混凝土時，應先確認飛灰是作為膠結料或細粒料之用，正確地設計混凝土配比，並經適當之試拌，合理評估其工程性質。

3. 施工

有關飛灰混凝土拌合與產製應注意事項詳如本手冊第五章所述。一般混凝土預拌廠除應依 CNS 3090 [預拌混凝土]相關規定作業外，應特別注重飛灰混凝土之拌合均勻性與品質穩定性。

飛灰混凝土之澆置施工應注意事項如本手冊第六章所述。由於飛灰混凝土的水化過程與普通混凝土稍有不同，故施工單位在進行澆置、養護與拆模等作業時，應依工程特性與施工環境進行必要之調整。

4. 品質管理

飛灰混凝土之品質管理與檢驗應注意事項如本手冊第七章所述。該章係依照 CNS 3036 及行政院公共工程委員會訂頒之「公共工程品質管理制度」與「公共工程施工品質管理作業要點」之要求撰寫。

參考文獻

1.1 台灣電力公司，1987，”煤灰利用推廣手冊”，台北。

1.2 林平全，1995，”飛灰混凝土”，科技圖書公司，台北。

（詹穎雯、柴希文撰稿）

第二章　飛　灰

2.1　簡介與定義

台灣目前混凝土所用飛灰主要來自台電公司之火力發電廠，其所使用之燃料分為煤炭、石油及天然氣等;煤炭燃燒後所剩下的灰燼就是「煤灰」。由於火力發電廠燃燒的煤炭都先經磨成粉狀微粒，亦稱為微粉煤燃燒方式，燃燒後約有 80% 的灰燼會隨著燃氣上升，當煙氣依照煙道流到靜電集塵器時，煙氣中全部的灰燼幾乎都被吸附下來，此部份的煤灰稱為「飛灰」，而另外一部份的煤灰粒徑較粗，重量較大，直接掉到鍋爐底部則稱為「底灰」。飛灰從集塵器底部灰斗，再以壓縮空氣輸送到灰倉，以供應外界提運利用，

飛灰係卜作嵐（pozzolan）材料之一種，其品質因粉煤品質及鍋爐運轉狀況而變化；一般顆粒細，含碳量低，球形顆粒多，玻璃質含量多，即為優良品質之飛灰。表 2.1 為台電公司歷年來的飛灰產量及利用情形，表 2.2 為利用途徑比例，表 2.3 為台電公司各電廠在八十七年的飛灰產量及利用統計。

飛灰應用於混凝土中替代部分水泥，主要原因為飛灰具有卜作嵐反應活性，可與水泥水化產生之 $Ca(OH)_2$ 發生化學反應，再形成水化矽酸鈣、水化矽鋁酸鈣或水化鋁酸鈣等膠體，影響混凝土有關性質；若飛灰適當正確的使用於混凝土中且養護良好，則可改善工作性、減少泌水與乾縮、降低水化熱、增進抗硫酸鹽能力與減低鹼-粒料反應等。

目前台灣之水泥 CaO 含量一般在 62% 以上，SiO_2 含量一般在 20% 以上。台灣之飛灰 CaO 含量約 10% 以下，SiO_2 含量一般約 50% 以上。表 2.4 與表 2.5 顯示目前台電公司各電廠之飛灰化學成份與變化範圍。

2.2　使用沿革

近代將飛灰摻入混凝土之施工例，首推美國墾務局在 1940 年興建之 Hungry Horse Dam（壩高 159m，體積 222 萬 m^3 之重力壩）；在日本為 1955 年完成之須田貝壩（壩高 75 m，體積 21 萬 m^3 之重力壩）；在台灣則為 1955~1959 年興建之霧社壩（壩高 114m，體積 33 萬 m^3 之重力壩）。

在台灣自從霧社水力發電工程使用飛灰之後，各大工程諸如谷關水力發電工程、青山水力發電工程、德基大壩工程、明湖抽蓄工程、翡翠水庫工程及明潭抽蓄工程、台電核二廠工程、台中火力發電廠工程等都摻用飛灰於混凝土中。大壩混凝土飛灰摻用量，一般為水泥重量之 25% ，即取代水泥 25% 之意；例如本來需使用水泥 100 kg者，改用水泥 75

kg加飛灰 25 kg。石油危機後，由於數量龐大的電廠飛灰處理困難，大部份國家開始重視飛灰的多元化利用；表 2.6 為台電公司所屬大壩、核電廠、火力發電廠等工程之混凝土摻用飛灰情況。近年來新發展的高強度混凝土及高性能混凝土大多需添加飛灰等卜作嵐材料。表 2.7 顯示正確利用品質優良之飛灰在營建工程及營建材料的優點。

2.3 飛灰品質

1. 分類

當煤粉燃燒達 1000℃~1200℃以上時，其中所含的粘土等礦物呈熔融狀態，經急速冷卻而成非結晶質或玻璃質之細顆粒飛灰，始具有卜作嵐活性；冷卻速度愈快，玻璃質含量愈高，活性愈佳，對混凝土性質的增進效果愈顯著。飛灰分為 C 類及 F 類兩種，凡使用褐煤或次煙煤燃燒收集者所得為 C 類，除具有卜作嵐活性之外，也具有若干膠結性，CaO 含量可能高於 10% ；而使用無煙煤或煙煤燃燒取得為 F 類，其僅具卜作嵐活性。目前台灣電力公司火力電廠生產之飛灰多屬 F 類。正確使用優良品質之飛灰可改善混凝土之工程性質；而卜作嵐活性指數則可用來評估混凝土強度發展情況。

2. 化學成分

一般規範之規定凡為最小值者，表示其成份愈高則顯現其品質愈佳；反之，凡為最大值者，代表該成份愈低，品質愈佳。

(1)SiO2、Al2O3、Fe2O3

規範對 F 類飛灰之 SiO2+Al2O3+Fe2O3 總百分率，要求其最小值為 70%，係因此三項化學成份具有影響混凝土品質之特性，如玻璃質 SiO2 可與 CH(氫氧化鈣)發生反應，而形成 C-S-H 膠體，其反應如下：

$$Ca(OH)_2 + SiO_2\ (glass) + H_2O \rightarrow CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$$

同樣 Al_2O_3 亦有類似地反應，而形成 C-A-H 膠體，其反應如下：

$$Ca(OH)_2 + Al_2O_3 + H_2O \rightarrow CaO \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O$$

(2)MgO、SO3 與有效鹼

目前 CNS 3036 限制 MgO 最大值為 5%；唯目前新版的 ASTM C618 已取消這項規定；限制三氧化硫最大值為 5%，係為避免因其影響混凝土之強度與體積穩定性。至於有效鹼限制為 1.5%，乃為控制或避免鹼-粒料註 1 反應，造成混凝土膨脹。

(3)燒失量

飛灰中含有燃燒未完全之碳粒，燒失量愈高顯示飛灰中的含碳量亦愈高;其混凝土需水量也較高,對化學摻料的使用效果可能有不利影響。

3. 物理性質

了解飛灰化學成份之規定係提供火力電廠，對於煤成分、研磨、燃燒、收集等過程有所控制，及作為有關設備之維護或更新的參考資料，俾在生產飛灰時能控制其品質；而物理性質之有關限制，乃在確保混凝土使用飛灰時達到增進品質之目的。

(1)細度

依 CNS 3036 規定飛灰細度溼篩洗法，以 No.325 篩之停留百分率，最大值為 34%；停留率愈大，顯示飛灰愈粗，含碳量愈大。顆粒愈小，則飛灰的比表面積愈大，卜作嵐活性指數愈高。

(2)卜作嵐活性指數

係指依據 CNS 3036 規定經養護 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之反應能力愈佳，更能增進混凝土品質。

(3)高壓蒸鍋膨脹率

CNS 3036 規定飛灰混凝土在高壓蒸鍋中之膨脹率最大值為 0.8%，以防混凝土之不正常膨脹或收縮。

1. 規範

CNS 3036 係參照美國 ASTM C618 之規範而編定，表 2.8 顯示 CNS 3036 對飛灰化學成分之規定，表 2.9 則為對飛灰物理性質之規定。

2.4 品質要求

2. 運輸與貯藏

以前飛灰有用小袋裝也有常以散裝卡車裝；袋裝飛灰主要使用於灌漿工程，遍遠地方的小工地也使用方便。袋裝飛灰的包裝袋上，應標示生產工廠及生產日期。目前幾乎所有飛灰都是採用散裝卡車裝運，快速而裝卸方便；飛灰散裝卡車上的飛灰排出管與立庫的接合器以前採用與水泥所用者不同，以防誤壓飛灰入水泥立庫。現在水泥立庫、飛灰立庫常使用 10cm 直徑的接合器，但水泥立庫的接合器加鎖，以防誤將飛灰壓入水泥立庫。飛灰原則上應使用專用密閉的飛灰立庫貯存，也應定期清倉檢查，以防飛灰因受潮而結塊或變質。又飛灰之外觀與水泥相當類似，須分開儲存並標示清楚以防止誤用。

註 1:粒料又稱骨材，英文為 Aggregate

表 2.1　台電公司歷年飛灰產量及利用情形

年	飛灰產量(噸)	飛灰利用量(噸)	飛灰利用率%
69	290,622	2,527	0.9
70	231,842	962	0.4
71	213,635	17,642	8.3
72	528,609	57,283	10.8
73	613,567	58,806	9.6
74	651,418	51,143	7.9
75	914,306	138,668	15.2
76	1,022,714	266,813	26.1
77	1,037,814	290,134	28.0
78	1,088,869	447,050	41.1
79	1,005,043	586,028	58.3
80	1,073,374	703,834	65.6
81	1,223,952	758,761	62.0
82	1,311,046	970,900	74.1
83	1,206,006	882,157	73.1
84	1,218,550	969,726	79.6
85	1,411,000	934,959	66.3
86	1,338,221	1,110,843	83.0
87	1,723,023	1,530,219	88.8

資料來源：台灣電力公司

表 2.2　台電公司飛灰利用途徑比例　　單位：%

年別 / 用途別	74	75	76	77	78	79	80	81
鋪路、跑道	18.9	25.0	1.9	1.1	0.5	1.1	0.1	0.6
預拌混凝土	60.7	46.0	83.5	82.5	82.8	90.2	92.4	91.2
水泥製品	17.3	27.0	14.0	14.0	11.0	4.2	3.6	5.2
其它	3.1	1.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.5
台電公司自用（建廠、水庫）	-	0.7	0.4	0.4	5.5	4.3	3.6	2.5

資料來源：台電煤灰小組

表 2.3　台電公司各燃煤電廠民國八十七年飛灰產量及利用統計表

廠別	項目	1月份	2月份	3月份	4月份	5月份	6月份	7月份	8月份	9月份	10月份	11月份	12月份	合計
深	燃煤量(噸)	66,119	72,645	58,114	84,497	77,409	87,694	100,940	104,651	95,610	89,542	51,418	67,529	956,168
	煤灰產量(噸)	9,306	6,768	6,709	9,845	9,653	9,700	8,018	13,081	11,951	11,193	6,427	8,441	111,092
	飛灰產量(噸)	8,556	6,015	6,367	8,905	9,353	9,184	7,216	11,773	10,756	10,074	5,784	7,597	101,580
澳	飛灰用量(噸)	8,556	4,913	6,367	8,905	9,353	9,184	4,300	10,080	8,800	4,350	5,784	7,200	87,792
	飛灰利用率(%)	100.0	81.7	100.0	100.0	100.0	100.0	59.6	85.6	81.8	43.2	100.0	94.8	86.4
林	燃煤量(噸)	51,210	59,020	73,319	116,431	93,209	110,505	119,209	117,934	102,990	116,781	89,529	137,582	1,187,719
	煤灰產量(噸)	7,066	7,586	9,636	16,800	9,936	12,524	17,743	18,295	15,267	17,970	15,491	21,403	169,717
口	飛灰產量(噸)	5,653	6,069	7,709	13,440	7,949	10,019	14,195	14,636	12,213	14,376	12,393	17,123	135,775
	飛灰用量(噸)	4,160	5,600	68,255	9,590	4,900	3,777	6,685	1,336	636	5,170	6,244	8,930	63,853
	飛灰利用率(%)	73.6	92.3	88.5	71.4	61.6	37.7	47.1	9.1	5.2	36.0	50.4	52.2	47.0
台	燃煤量(噸)	790,606	811,191	953,473	974,679	1,155,997	984,452	1,148,851	1,167,425	1,142,116	1,040,115	1,004,000	1,024,835	12,197,740
	煤灰產量(噸)	63,248	73,156	100,406	106,474	123,797	104,243	117,159	126,026	114,101	98,413	93,549	94,433	1,215,005
	飛灰產量(噸)	50,599	58,526	80,325	85,180	99,038	83,394	93,727	100,822	91,281	78,730	74,840	75,545	972,007
中	飛灰用量(噸)	50,599	58,526	80,325	85,180	99,038	83,394	93,727	100,822	91,281	78,730	74,840	75,545	972,007
	飛灰利用率(%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
興	燃煤量(噸)	310,519	279,503	367,146	467,205	525,601	449,536	491,675	498,161	489,932	495,416	402,507	411,718	5,188,919
	煤灰產量(噸)	34,716	28,621	33,025	46,977	60,208	48,775	41,301	51,709	45,809	51,474	43,793	44,589	530,997
達	飛灰產量(噸)	27,773	22,897	26,420	37,582	48,166	39,020	33,041	41,367	36,647	41,179	35,034	35,671	424,797
	飛灰用量(噸)	24,068	13,970	21,120	25,520	24,475	20,394	25,725	32,851	26,267	28,089	41,191	34,034	317,704
	飛灰利用率(%)	86.7	61.0	79.9	67.9	50.8	52.3	77.9	79.4	71.7	68.2	117.6	95.4	74.8
大	燃煤量(噸)	128,893	125,216	102,220	68,052	93,191	127,890	146,008	130,884	144,097	144,869	14,717	138,391	1,364,428
	煤灰產量(噸)	11,632	11468	10,845	2,994	7,168	10,367	6,703	4,759	8,470	9,798	9,936	12,310	106,450
林	飛灰產量(噸)	10,070	9,891	9,639	2,394	6,114	9,286	5,801	3,876	6,880	8,231	7,716	8,966	88,864
	飛灰用量(噸)	10,070	9,890	9,639	2,394	6,114	9,286	5,801	3,876	6,880	8,231	7,716	8,966	88,863
	飛灰利用率(%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
共	燃煤量(千噸)	1,347	1,348	1,554	1,711	1,945	1,760	2,007	2,019	1,975	1,887	1,562	1,780	20,895
	煤灰產量(噸)	125,968	127,599	160,621	183,090	210,762	185,609	190,924	213,870	195,598	188,848	169,196	181,176	2,133,261
計	飛灰產量(噸)	102,651	103,398	130,460	147,501	170,620	150,903	153,980	172,474	157,777	152,590	135,767	144,902	1,723,023
	飛灰用量(噸)	97,453	92,899	124,276	131,589	143,880	126,035	136,238	148,965	133,864	124,570	135,775	134,675	1,530,219
	飛灰利用率(%)	94.9	89.8	95.3	89.2	84.3	83.5	88.5	86.4	84.8	81.6	100.0	92.9	88.8

表 2.4 台電各電廠飛灰之化學成分　　單位：%

電廠名稱	電廠機組	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SiO_2	SO_3	燒失量	取樣日期
大林	#1 機飛灰	19.2	2.51	6.43	1.61	2.19	0.7	42.2	0.75	14.4	87/10/27
大林	#2 機飛灰	21.4	2.52	6.18	1.85	2.29	0.75	47.6	0.49	6.3	87/10/27
大林		18.7	5.3	5.8	1.4	2.3	1.2	48.8	1.5	6.7	87/11/24
大林	#1 機飛灰	17.4	6.2	5.1	1.1	2.3	0.96	52.2	0.95	9.1	87/11/19
大林		16.64	6.18	5.44	0.72	2.17	1.01	57.39	0.81	15.35	87/12/28
大林	#2 機飛灰	21.35	2.6	5.44	1.33	2.24	0.55	50.19	0.21	4.92	87/12/28
台中	#1 機飛灰	23.8	3.63	5.2	1.49	1.97	0.67	46.2	0.42	2.13	87/11/06
台中	#2 機飛灰	23.9	3.2	4.43	4.19	1.67	0.66	46.8	0.62	3.54	87/11/06
台中	#4 機飛灰	24.3	3.94	3.65	1.41	1.33	0.2	42.8	0.45	4.04	87/11/06
台中	#5 機飛灰	24.2	0.94	5.47	2.48	0.74	0.16	48.6	0.15	2.48	87/11/06
台中	#6 機飛灰	25.7	4.07	3.15	1.07	1.48	0.34	41.8	0.46	6.68	87/11/06
台中	#7 機飛灰	25	4.36	3.35	1.03	1.57	0.34	41.8	0.2	4.93	87/11/06
台中	#8 機飛灰	25.8	5.27	4.35	1.02	1.97	0.3	44.1	0.5	4.62	87/11/06
台中	#1 機飛灰	23.75	4.64	6.75	1.58	2.32	1.1	40.17	0.45	1.95	87/12/08
台中	#2 機飛灰	22.68	7.24	6.25	1.15	2.11	0.69	40.76	0.6	5.94	87/12/08
台中	#3 機飛灰	24.91	9.75	10.51	1.04	3.14	1.28	40.24	0.68	3.74	87/12/08
台中	#4 機飛灰	25.41	6.75	3.92	0.79	1.86	0.59	45.8	0.43	5.91	87/12/08
台中	#5 機飛灰	19.54	9.23	14.17	1.03	2.31	0.42	43.98	0.55	0.92	87/12/08
台中	#7 機飛灰	24.99	4.72	5.59	0.94	1.74	0.53	40.62	0.5	5.32	87/12/08
台中	#8 機飛灰	25.03	3.88	6.3	0.69	1.46	0.51	42.32	0.58	5.61	87/12/08
台中	#1 機飛灰	29.96	8.14	5.56	0.94	2.36	0.63	42.89	0.54	2.54	88/01/05
台中	#2 機飛灰	28.79	7.36	4.98	0.88	2.13	0.58	43.2	0.56	5.31	88/01/05
台中	#3 機飛灰	28.72	8.88	6.11	0.87	2.42	0.61	43.45	0.48	2.7	88/01/05
台中	#5 機飛灰	15.56	27.84	17.33	0.78	4.99	1.01	24.22	1.14	0.16	88/01/05
台中	#6 機飛灰	26.68	6.81	6.04	1.14	2.24	0.85	41.2	0.54	9.24	88/01/05
台中	#7 機飛灰	26.26	10.66	7.18	0.76	2.64	0.61	39.07	0.64	6.38	88/01/05
台中	#8 機飛灰	27.89	9.99	7.92	0.9	3.02	0.87	37.34	1.4	3.78	88/01/05
林口	#1 機飛灰	24.6	2.33	4.91	1.74	1.01	0.05	50.7	0.19	5.68	87/10
林口	#2 機飛灰	23.3	2.46	4.52	1.65	0.91	0.11	45.9	0.28	5.31	87/10
林口	#1 機飛灰	21.1	1.2	5	2.8	0.81	0.33	45.2	0.3	5.6	87/11
林口	#2 機飛灰	22.7	1.5	5.3	2.5	0.79	0.19	48.1	0.09	2.9	87/11
林口	林一機 87	24.43	2.09	5.21	1.47	1.08	0.09	53.55	0.15	5.98	87/12
林口	林二機 87	23.79	2.04	4.94	0.86	0.88	0.01	55.31	0.21	3.64	87/12
深澳	#1 機飛灰	19.02	2.21	4.01	0.99	1.11	0.47	44.93	0.29	5.98	87/12/03
深澳	#2 機飛灰	18.86	2.19	3.81	1.09	1.06	0.37	43.51	0.34	3.64	87/12/03
深澳	#1 機飛灰	20.3	2.97	3.94	0.76	1.07	0.18	46.8	0.49	12.3	87/11/03
深澳	#2 機飛灰	19.4	3.13	3.96	0.56	1.02	0.16	44.9	0.4	15.2	87/11/03
深澳	#1 機飛灰	20.84	4.68	4.61	0.75	1.27	0.3	51.49	0.34	5.43	88/01
深澳	#2 機飛灰	19.63	3.58	4.01	1.58	1.21	0.66	49.48	0.45	13.83	88/01
深澳	#3 機飛灰	18.65	3.61	4.16	1.56	1.15	0.68	48.51	0.35	13.4	88/01
興達	#4 機飛灰	16.9	6.49	4.38	0.48	1.6	0.16	43.3	0.98	8.27	87/11/05
興達	#2 機飛灰	17.1	6.41	4.91	0.37	1.45	0.05	45.1	0.8	8.94	87/11/05
興達	#3 機飛灰	17	6.47	5.01	0.77	1.87	0.3	43.1	0.54	8.85	87/11/05
興達	#4 機飛灰	17.2	6.36	4.89	0.73	1.86	0.31	44.2	0.78	7.29	87/11/05
興達	#2 機飛灰	16.8	3.4	4	0.06	1.3	0.29	49	0.88	14.2	87/12/03
興達	#3 機飛灰	16.8	2.8	3.3	0.14	1.2	0.24	49.4	0.28	11.6	87/12/03
興達	#4 機飛灰	18.1	3.3	4.1	0.17	1.3	0.24	52.2	0.3	4.4	87/12/03
興達	#2 機飛灰	17.94	4.21	6.01	1.24	1.67	0.56	46.08	0.33	11.98	88/01/07
興達	#3 機飛灰	18.61	3.77	6.2	1.07	1.6	0.53	55.34	0.05	2.04	88/01/07
興達	#4 機飛灰	21.29	4.54	5.86	1.1	1.52	0.49	46.57	0.21	7.2	88/01/07

表 2.5　台電各電廠飛灰化學成分變化範圍　　單位：%

電廠名稱	Al_2O_3		CaO		Fe_2O_3		K_2O		MgO		Na_2O		SiO_2		SO_3		燒失量		日期範圍	
	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值
大林發電廠	16.64	21.4	2.51	6.2	5.1	6.43	0.72	1.85	2.17	2.3	0.55	1.2	42.2	57.39	0.21	1.5	4.92	15.35	87/10	87/12
台中發電廠	15.56	29.96	0.94	27.84	3.15	17.33	0.69	2.48	0.74	4.99	0.16	1.28	24.22	48.6	0.15	1.4	0.16	9.24	87/11	88/01
林口電廠	21.1	24.6	1.2	2.46	4.52	5.3	0.86	2.8	0.79	1.08	0.01	0.33	45.2	55.31	0.09	0.3	2.9	5.98	87/10	87/12
深澳發電廠	18.65	20.84	2.19	4.68	3.81	4.61	0.56	1.58	1.02	1.27	0.16	0.68	43.51	51.49	0.29	0.49	3.64	15.2	87/11	88/01
興達發電廠	16.8	21.29	2.8	6.49	3.3	6.2	0.06	1.24	1.2	1.87	0.05	0.56	43.1	55.34	0.05	0.98	2.04	14.2	87/11	88/01

表 2.6　台電公司所屬大埧、核電廠、火力發電廠等工程之混凝土摻用飛灰情況

工程名稱	座落地點	完工時間	埧高(工程物高度)	體積 (m^3)	水泥		飛灰用量 (kg/m^3)	膠結材料用量 (kg/m^3)	用水量 (kg/m^3)	水膠比 (W/C+P)	粗骨材用量(kg/m^3)	細骨材用量 (kg/m^3)	最大粗骨材粒徑(cm)	化學摻料		混凝土	混凝土抗壓強度(kgf/cm^2)		含氣量 (%)	備註
					種類	用量 (kg/m^3)								種類	用量(%)	坍度(cm)	28 天	90 天		
霧社壩	霧社	1961	111m	328,814	TypeI	152	47.5	199.5	110.2	0.55	1551	472	15	AEA	0.11	5.0			4.0	
達見大壩	大甲溪	1974	180m	470,951	TypeII	151	51	202	105	0.52	1580	588	15	AEA W.R. AEA W.R.R	0.1818 0.5050 0.1717 0.5050	5.0		389	2.5	fc'=320 kgf/cm^2 (90 天)
核能二廠	台北縣萬里鄉國聖村	1981	反應器間146呎	644,481	TypeII	298.3	99	397.3	179	0.45	1192.4	617	3.78	Pozzolith	0.32	17.5			3.0	fc'=320～350 kgf/cm^2
翡翠大壩	北勢溪	1987	172.5m	703,675	TypeII	184	79	263	121	0.46	1455	513	10	AEA W.R.R.	0.33 0.66	5.0		367	3.5	fc'=350 kgf/cm^2 (90 天)
明湖抽蓄	水里溪	1985	57.5m	615,000	TypeII	108	36	144	92	0.64	1615	553	15	W.R.R. AEA	0.36 0.144	5.0		269	3.0	fc'=210 kgf/cm^2 (90 天)
明潭抽蓄	水里溪	1995	61.5m	747,258	TypeII	114	38	156	98	0.63	1561	578	15	AEA W.R.R.	0.114 0.532	5.0		232	3.0	fc'=210 kgf/cm^2 (90 天)
台中火力廠房基礎	台中港	1992	廠房	807,411	TypeI	353.6	62.4	416	190	0.457	979	747	2.5	--	--	12	433		1.5	fc'=350 kgf/cm^2 (28 天)

表 2.7　正確利用品質優良之飛灰在營建工程與營建材料的優點

區　分	分　類	用 途 及 說 明	優　點
營建工程	水壩	巨積混凝土	替代水泥、減少水化熱，提高晚期強度
	隧道	隧道混凝土	有利於混凝土之輸送及施工
	港灣	港灣混凝土	增進抗海水及抗硫酸鹽能力
	下水道	混凝土管、預鑄環片等	防止硫酸鹽侵蝕、增進化學抵抗性能
	剛性路面	路面混凝土	施工容易、膨脹收縮小、抗彎強度高
	柔性路面	瀝青混凝土填充料	取代石灰、爐石粉等材料
	梁柱結構物	結構混凝土	增加工作度、易於施工
	灌漿工程	填漿材料	提高工作度、改變收縮性、減少裂縫
營建材料	水泥製造業	水泥原料(生料) 水泥混合料(熟料)	代替粘土、大量使用、降低水泥成本、減少生產水泥時 CO_2 排放、減少石灰岩的開採
	預拌混凝土業	飛灰混凝土	取代部份水泥或細骨材摻用於混凝土中、降低混凝土成本
	骨材業	人工骨材	代替碎石或砂等材料、質輕
	建築材料	牆磚、磁磚、地磚、屋頂隔熱磚、空心磚、室內耐火性複合材料、工業用隔熱磚	質輕、強度高、耐火、隔熱、隔音、降低成本

表 2.8 CNS 3036 對飛灰化學成分之規定

區分	礦物性攙和物類別 / 試驗項目	F 類	C 類
標準規定	二氧化矽、氧化鋁與氧化鐵之總量 % （最小值）	70.0	50.0
	三氧化硫，% （最大值）	5.0	5.0
	含水量，% （最大值）	3.0	3.0
	燒失量，% （最大值）	12.0(1)	6.0
任選規定	氧化鎂，% （最大值）(2)	5.0	5.0
	有效鹼(3)，%（最大值）	1.50	1.50

註：(1)ASTM C 618-94A 已改為 6 %。

(2)ASTM C 618-94A 已刪除本規定。

(3)有效鹼係以 $Na_2O+0.658K_2O$ 計算

表 2.9　CNS 3036 對飛灰物理性質之規定

區分	試驗項目 ＼ 礦物性攙和物類別	F 類	C 類
標準規定	細度：試驗篩 0.044 CNS 386 篩餘量（濕篩法），% （最大值）	34	34
	卜作嵐活性指數：與卜特蘭水泥攙和，經 28 天之強度比，%（最小值）	75	75
	與石灰攙和 7 天之強度， kgf/cm^2（最小值）	56	56
	需水量之控制百分率，% （最大值）	105	105
	健度：高壓蒸煮膨脹或收縮率，% （最大值）	0.8	0.8
	均質性之規定： 每個試樣比重及細度值與其 10 個試樣（如前試樣總數不足 10 個時，則採全部試樣）之試驗平均值之差異： 比重，% （最大值） 細度，試驗篩 0.044 CNS 386 篩餘量，%（最大值）	 5 5	 5 5
任選規定	複因數：燒失量與試驗篩 0.044 CNS 386 篩*餘量之相乘積， %（最大值）	255	-
	水泥砂漿柱體乾縮增加率，28 天，% （最大值）	0.03	0.03
	均質性之規定：如為輸氣混凝土，產生空氣含量達水泥砂漿體積之 18% 時所需輸氣劑量與前十次試驗（不足十次時，則與前所有試驗）結果平均值之百分率差異，% （最大值）	20	20
	與水泥所含鹼成份之反應性： 水泥砂漿柱體膨脹性降低率，14 天，% （最小值） 水泥砂漿柱體膨脹率，14 天，% （最大值）	 - 0.020	 - 0.020

註：CNS 386 已將試驗篩 0.044 改為 45 μm，惟 CNS 3036 尚未配合修正。

參考文獻

2.1 陳朝和，1987，”飛灰混凝土使用手冊”，台電公司煤灰處理與利用小組。

2.2 陳朝和，1992，”飛灰混凝土配比設計與實例”，pp.99～119，台灣電力公司 81 年度煤灰於土木工程應用研討會，台電公司環保處。

2.3 陳朝和，1996，”飛灰混凝土產製與品管”，pp.1～17，正確使用飛灰以提昇混凝土品質研討會，台電公司台灣營建研究中心。

2.4 葉茂財，1994，”飛灰混凝土施工與品管”，pp.91～106，飛灰及爐石混凝土應用研討會，國立中央大學。

2.5 CNS 3036，”卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煆燒卜作嵐攙和物”。

2.6 CNS 11271，”卜特蘭飛灰水泥用飛灰”。

2.7 ASTM C311，” Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete”

2.8 ASTM C618，” Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”

2.9 ASTM C441，” Standard Test Methods for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction”

（陳朝和、蘇南撰稿）

第三章 飛灰混凝土適用範圍及性質

3.1 適用範圍

飛灰在混凝土中的應用一般有兩種方式：(1) 在混凝土預拌廠或工地用品質合乎 CNS 3036〔卜特蘭混凝土用飛灰〕替代部份水泥或細粒料以拌和混凝土；(2) 在水泥廠用品質合乎 CNS 11271〔卜特蘭飛灰水泥用飛灰〕加於水泥熟料或水泥中成卜特蘭飛灰水泥。雖然國外已有飛灰水泥上市，但國內目前多在混凝土拌和時直接摻用飛灰以取代水泥或砂，故本章敘述重點是第(1)種方式。但若使用第(2)種方式之飛灰水泥時，該產品中之飛灰量應與預拌廠中的飛灰摻用量合併計算。

一般而言若飛灰品質穩定，且摻用量、配比設計、產製及施工等條件恰當，則摻用飛灰可改善混凝土性質，節省水泥用量、降低成本;達成節約能源與資源之目的。由於飛灰品質對混凝土性質影響甚大，在使用前須先經試驗評估其物理及化學性質，作為決定使用策略之參考。品質合格之飛灰混凝土可運用於下列公共工程：①土木與水利工程–大壩、道路、隧道、港灣與下水道等工程；②建築工程–現場澆置之建築構造物的柱、樑、版、基礎及筏基等工程項目。就材料而言，品質合格之飛灰也可使用於：①預拌混凝土–各種規格（用途與強度等）的普通或特殊要求之預拌混凝土。②預鑄混凝土–預鑄混凝土產品、一般水泥製品等。除上述用途外，飛灰混凝土亦可應用表 2.7 之營建工程或營建材料，惟須事先須經主辦機關許可，且最好有書面文件作為品質管制之依據。

3.2 新拌混凝土性質

1.凝結時間

若在混凝土中添加飛灰以減少水泥用量，則會因飛灰的水化是在水泥水化後才發生，故摻飛灰會延長混凝土的凝結時間及減緩強度成長速率；而須注意此種凝結時間延長及強度成長慢，對混凝土澆置施工與拆模時間的不利影響；但一般而言，飛灰混凝土之緩凝對正常施工之影響不大。

2.工作性

在配比設計中若用飛灰取代相等重量水泥，由於飛灰比重只約為水泥的三分之二，所以拌合時混凝土中的實際膠結漿量會增加；加上飛灰為表面光滑之球形，會在混凝土材料間有滾球潤滑作用，故摻用飛灰可

改善混凝土的粘聚性與可塑性。

在保持同樣坍度下，飛灰品質會影響其混凝土的用水量；即飛灰的燒失量與細度常有變異，故須注意飛灰混凝土的適宜拌和水量。

通常飛灰對貧配比混凝土工作性的改善效果比富配比混凝土明顯；對不同配比的混凝土而言，存有飛灰摻量的最佳值，超過則混凝土工作性反而下降。

雖然使用品質優良的飛灰可改善混凝土的坍度，但若飛灰品質差，也會導致坍度減小，尤其在熱天施工時摻加飛灰對混凝土坍度損失的改善效果更是明顯。品質優良之飛灰在混凝土中可補償水泥用量的不足或細粒料中細粉之不足，堵塞新拌混凝土的泌水通道而降低泌水率，不易發生粒料析離。

若飛灰品質不良或攪拌能量不足，則飛灰混凝土有結球或不均勻現象；但若改善飛灰品質及有充份的攪拌時間，則飛灰混凝土的均勻性可獲提高，並增加混凝土的粘滯性。

由於飛灰為中空圓球，顆粒比水泥細小，故保水性佳；在混凝土中添加適量飛灰可改善稠度，減低混凝土與泵送管壁間的摩擦力，而改善泵送性。

當摻用品質優良之飛灰在混凝土中，會使其表面修飾性與抹光效果獲得改善。但若飛灰品質不良，則會導致混凝土保水性差，面層有浮灰、浮碳粒、浮漿等現象發生，導致混凝土品質不良。

3.水和熱與混凝土溫度

在混凝土中以飛灰替代部份水泥，使混凝土中的水泥用量減少，降低水化熱，減少巨積混凝土的內外溫度差與因其產生之裂縫，有利於巨積混凝土之施工。

4.燒失量與化學摻料使用成效

若飛灰之燒失量過高，飛灰中所含碳粒可能會吸收化學摻料分子而降低使用化學摻料之預期效果，所以飛灰與化學摻料共同使用於混凝土時，應先經試拌以驗証其使用成效。

3.3 硬固混凝土性質

1.早期強度

飛灰會與水泥水化產物中的氫氧化鈣在有足夠水份供應的環境中發生卜作嵐反應，但須注意飛灰混凝土的養護溫度不宜過低(200C)，以使卜作嵐反應有效發揮，故養護條件會顯著影響飛灰混凝土的強度成

長。在正常溫度下， 28 天齡期時卜作嵐反應尚在初期階段，故飛灰混凝土的早期強度一般低於普通混凝土。

2.長期強度

飛灰的卜作嵐反應隨齡期之延長不斷進行，產生水化矽酸鈣或鋁酸鈣等膠體填充骨材顆粒周圍的空隙、水膜層間隙等混凝土中之孔隙，使混凝土結構緻密化與發展強度；到更長齡期(91 天)時，飛灰混凝土強度通常可達到或超過同齡期普通混凝土。

3.彈性模數

飛灰混凝土之彈性模數與抗壓強度的關係，基本上與普通混凝土並無顯著差別；故相關規範中之以抗壓強度推算彈性模數的公式，仍可適用。

4. 體積穩定性

大多數飛灰混凝土的乾縮量與潛變量與普通混凝土稍有差異，使用時應先評估並加注意。

5. 耐久性

(1) 水密性

混凝土中的飛灰會與水泥的氫氧化鈣起反應生成膠體堵塞孔隙與水路，增加水密性，降低滲透性。飛灰混凝土的抗滲性隨水膠比[註1]的增大而降低。在早齡期(約 28 天以前)飛灰混凝土的水密性常較普通混凝土差，且隨飛灰摻量的增加而降低水密性；中齡期(約 60 天)時，飛灰混凝土的水密性可能已接近普通混凝土;晚齡期(約 91 天或 120 天以後)時飛灰混凝土的水密性繼續提高而可能超過普通混凝土。由於飛灰的卜作嵐效應對混凝土中之毛細孔有細化與堵塞作用，能抑制氯化物對混凝土中之鋼筋的侵蝕。

(2) 抗硫酸鹽

飛灰的卜作嵐反應可消耗氫氧化鈣與降低混凝土中的鹼度，抑制

註 1：水膠比為混凝土中拌和水對水泥及卜作嵐膠結料總量之重量比，可用 W/C+P 表示

氫氧化鈣與硫酸根離子生成鈣　石，防止混凝土體積膨脹發生龜裂。摻飛灰也相對減少水泥中之鋁酸三鈣含量，減少其與硫酸鹽反應生成硫鋁酸鹽之機率。故在混凝土中添加飛灰，可提高抗硫酸鹽侵蝕之性能。

6. 鹼-粒料反應

混凝土中添加適量飛灰可與水泥中之鹼性物質發生反應而減少發生鹼-粒料反應之機率。

3.4 使用注意事項

1. 飛灰之外觀與水泥相當類似，須分開儲存並標示清楚以防止誤用。
2. 由於飛灰顆粒表面含有微量石膏會吸附空氣中或其他水份，故儲存過久會產生凝
   集或固結；經少許加壓後也會固結。
3. 飛灰混凝土可視工程特性及施工條件之需要，添加水淬高爐爐碴(俗稱爐石粉)及化學摻料，惟須先經配比設計、試驗及試拌，證實能滿足工程設計要求方可使用。
4. 飛灰得摻加於高爐水泥中拌成混凝土，但須經試驗與試拌決定其摻用率。
5. 用於須早期拆模或提前荷載的飛灰混凝土，宜摻用強塑劑、減水劑、早強劑等化學摻料；或降低水膠比、降低飛灰摻用比例，或提高養護溫度等。惟因飛灰中碳粒會吸附化學摻料，故當飛灰之燒失量增加時，應增用化學摻料。
6. (a)飛灰在混凝土的摻用率，將因飛灰品質、水泥種類、材料配比及養護條件而異，應由混凝土試拌穫得之工作性、強度、耐久性試驗結果，及工程要求等因素決定摻用率；可參考表 4.2。
7. 飛灰混凝土的規定強度等級(f'_c)不得低於普通混凝土的規定強度等級。
8. 用於公共工程的飛灰混凝土的規定強度齡期一般定為 28 天，但由於飛灰混凝土中的卜作嵐反應在 28 天齡期時仍未充分成熟，故上述齡期可依工程需要於合約或規範中另定之，例如 56 天或 91 天。
9. 飛灰混凝土的氯離子含量應符合現行 CNS 3090〔預拌混凝土〕之規定。
10. 飛灰混凝土的規定強度、配比目標強度，與普通混凝土一樣依相關規範計算。
11. 飛灰混凝土的彈性模數與乾縮、潛變、耐久等性質指標可採用相同強度等級之普通混凝土的性質指標。

參考文獻

3.1 ACI 226.3R, “Use of Fly Ash in Concrete”.

3.2 王福元、吳正嚴，”粉煤灰利用手冊，”中國電力出版社，北京。

3.3 V.M. Malhotra and A.A Ramezanianpour,1994,”Fly Ash in Concrete, ”CANMET, Natural Resources Canada, Ottawa.

3.4 V.M Malhotra and P.Kumar Mehta,1996,”Pozzolanic and Cementitious Materials,” Gordon and Breach Publishers.

（高健章、蘇南撰稿）

第四章　配比設計

4・1 發展與分類

飛灰混凝土的配比設計目標為使飛灰混凝土具有工作性、安全性、經濟性及耐久性等;即滿足下列條件:

1.使飛灰混凝土具有適當工作性，避免泌水及析離。

2.抗壓強度滿足結構設計之要求。

3.耐久性滿足構造物暴露情況之要求。

飛灰混凝土的配比需以代表施工材料的樣品，經過試拌選定配比，並在施工期間配合材料性質之變化作適當修正。飛灰混凝土品管人員應有選擇材料、試拌混凝土及修正誤差的經驗，才能對試拌結果有正確的判斷。

目前國內的飛灰混凝土配比設計大多參照普通混凝土配比設計方法，即以飛灰取代等重量的水泥，係把飛灰視為與水泥一樣為混凝土中的膠結材料而進行配比設計；用此種方法配比飛灰混凝土，可節省水泥用量，降低水化熱及改善工作性，但在 28 天齡期前飛灰混凝土的力學強度一般較普通混凝土低，且有些混凝土性質也受飛灰品質之良窳而有所影響。

飛灰應用於混凝土中因取代材料之不同，通常有下列三種配比策略：

1.飛灰取代部份水泥

此法係以飛灰取代等重量或等體積的水泥，但一般多採用前者。以飛灰取代等重量水泥之混凝土,其在 28 天齡期前之強度通常比普通混凝土低,但約到 90 天齡期就可能趕上或超過。此種配比法可降低混凝土水化熱，改善工作性，常為巨積混凝土所採用。惟須注意其早期強度之降低對結構物的影響，採用此種配比法，可降低混凝土中的水泥成本。

2.飛灰取代部份細粒料(砂)

此法的特點是不減少混凝土中的水泥用量，而以飛灰取代部份的砂，改善砂的級配，以飛灰填塞砂粒間隙；故用此法可改善混凝土稠度與工作性、減少泌水與析離現象。由於飛灰也具有膠凝潛力，故以此法配得之混凝土，其強度一般會較普通混凝土高。

3.飛灰同時取代水泥與細粒料

以此法配製之飛灰混凝土，雖其水泥用量比普通混凝土少，但因其膠結料用量比普通混凝土的水泥用量多，故飛灰混凝土的早期強度會相近於普通混凝土，晚期強度則高於普通混凝土，並且工作性與耐久性也易獲得改善。由於飛灰的價格比水泥低甚多，故用此法配比設計，能降低混凝土成本。

4.2 配比設計原則

1.在滿足工作度的要求下，為保障飛灰混凝土的強度與耐久性，拌和水量儘量減少。

2.根據結構構件斷面尺寸、鋼筋淨間距、版厚及混凝土澆置設備等情況，選擇飛灰混凝土粗粒料標稱最大粒徑。

3.因飛灰顆粒比砂及水泥細小，使用時宜注意混凝土中飛灰與砂的級配與粗細。

4.飛灰燒失量對混凝土的拌合水及化學摻料等之用量影響甚大，故在配比設計前宜先了解飛灰品質。

5.由於台灣屬海洋型氣候，故配比設計時應兼顧耐久性，例如控制水膠(灰)比、最低抗壓強度、水泥種類或化學摻料等。

6.由於台灣夏季氣候炎熱，故在混凝土中同時摻用飛灰與減水緩凝劑，可減少飛灰上浮或泌水缺點；滿足夏季施工對緩凝的需求，並減少水化熱及提高混凝土耐久性。

4.3 配比設計方法

飛灰混凝土之配比設計步驟基本上與普通混凝土一樣，國內普遍使用之 ACI 211.1 普通混凝土配比設計法中已包括飛灰混凝土之配比設計，高強度之飛灰混凝土配比設計可依 ACI 211.4R 辦理。本手冊考慮一般性公共工程用途之飛灰混凝土，在作其配比設計前通常會先作普通混凝土之配比設計以作為比較基準，故先介紹應用 ACI 211.1 之普通混凝土配比設計法。進行配比設計前，應先確定其需求條件，一般如下：

1.混凝土之目標強度(f'_{cr})。
2.混凝土要求坍度。

3. 粗粒料之標稱最大粒徑。
4. 耐久性限制(水灰比限制或水泥用量限制)。
5. 其他：如含氣量等。

配比設計之背景資料：

1. 粗細粒料之篩分析資料。
2. 粗粒料之單位重量。
3. 粗細粒料之虛比重及吸水率。
4. 擬用粒料之經驗需水量。
5. 擬用混凝土材料之強度-水灰比經驗關係。
6. 水泥及飛灰之比重。

ACI 211.1 建議普通(基準)混凝土配比設計步驟如下：

1. 依拌和、輸送、澆置及搗實之需要，選擇混凝土目標坍度。
2. 按構造物尺度及配筋狀況選擇粗粒料之標稱最大粒徑。
3. 依坍度、粗粒料之標稱最大粒徑、輸氣與否、構造物暴露狀況，估計拌和水量(W_O)及含氣量(V_{cao})。
4. 由 f'_{cr} 及經驗資料，估計水灰比。
5. 計算水泥用量(C_o)。
6. 估計粗粒料用量(V_{cao})。
7. 估計細粒料用量(V_{fao})。
8. 以粒料含水量調整各材料用量及拌合水量。
9. 計算每盤材料用量。
10. 試拌。
11. 繪製強度與水灰比(W/C)之關係曲線。
12. 決定設計水灰比及材料配比。

以下依飛灰在混凝土中使用目的之不同，建議三種最常用配比設計法：

(一) 飛灰取代部份水泥之配比設計法(體積法)

1. 依配比目標強度及耐久性要求選定水膠比(W/C+F)[註1]。
2. 依工程特性、要求混凝土性質、施工條件及工程使用環境選擇飛灰取代部份水泥比率，則膠結材料用量可以式 1 及式 2 求得

$$F = \alpha\, C_o \qquad \text{(式 1)}$$

$$C = (1-\alpha) C_o \qquad \text{(式 2)}$$

註 1：水膠比係指拌合水與膠結料之重量比。

式中 F：每m^3飛灰混凝土中飛灰用量（kg/m^3）

C：每m^3飛灰混凝土中水泥用量（kg/m^3）

C_o：每m^3普通(基準)混凝土中水泥用量（kg/m^3）

α：飛灰取代水泥比率(%，重量比)

3.拌合水量(W)可以式 3 求得

$$W \cong W_o \qquad \text{（式 3）}$$

以式 3 算得之飛灰混凝土拌合水量得視飛灰品質或測得之坍度等性質而稍作調整。

4.粒料總體積可以式 4 計算

$$V_{ag} = 1 - \left[\frac{C}{1000 r_c} + \frac{F}{1000 r_f} + \frac{W}{1000 r_w} + V_a \right] \qquad \text{（式 4）}$$

式中 V_{ag}：粒料體積(m^3)

r_c：水泥密度(g/cm^3)

r_f：飛灰密度(g/cm^3)

r_w：水的密度(g/cm^3)

V_a：空氣含量(m^3)

5.若選定砂率(S_a，即細粒料佔全部粒料的體積比率)則

$$W_{fa} = S_a \, x \, V_{ag} \; x \; r_{fa} \, x 1000 \qquad \text{（式 5）}$$

$$W_{ca} = (1 - S_a) \, x \, V_{ag} \; x \, r_{ca} \; x 1000 \qquad \text{（式 6）}$$

式中 W_{fa}：細粒料用量(kg/m^3)

W_{ca}：粗粒料用量(kg/m^3)

r_{fa}：細粒料密度(g/cm^3)

r_{ca} :粗粒料密度(g/cm^3)

6.其它配比設計步驟與普通(基準)混凝土者相同。

7.試拌並量測混凝土的坍度、強度、空氣含量及單位體積重等性質，與作為比較基準之普通混凝土者或工程要求者有何異同：再修正配比，直到飛灰混凝土之實測性質符合工程要求為止。

計算例一：依 ACI 法算出之基準混凝土的配比用量為

水　泥 C_o = 395 kg/m^3	水泥比重= 3.15
拌合水 W_o = 212 kg/m^3	混凝土空氣含量=2.5%
粗粒料 W_{cao} = 972 kg/m^3	粗粒料比重=2.63
細粒粒 W_{fao} = 685 kg/m^3	細粒料比重= 2.56

欲以比重為 2.15 之飛灰取代水泥 α = 20%，請計算飛灰混凝土配比?

解：　飛灰用量 F = 0.2 x 395 = 79 kg/m^3

水泥用量 C = (1-0.2) x 395 = 316 kg/m^3

拌合水量 W = W_o = 212 kg/m^3

粒料總體積 $V_{ag} = 1 - \left[\frac{316}{3150} + \frac{79}{2150} + \frac{212}{1000} + 0.025\right] = 0.6259\, m^3/m^3$

選定砂率　$S_a = 41.3\%$

細粒料用量 $W_{fa} = 0.413\, X\ 0.6259\, X\ 2.56\, X\ 1000 = 662\, kg/m^3$

粗粒料用量 $W_{ca} = (1 - 0.413)\, X\ 0.6259\, X\ 2.63\, X\ 1000 = 966\, kg/m^3$

由於飛灰比重較水泥小，故以飛灰混凝土的計算單位體積重 2235 kg/m^3 較基準混凝土的 2264 kg/m^3 小。

(二)飛灰取代部份細粒料之配比設計法(體積法)

1.根據普通(基準)混凝土的配比設計法計算每 m^3 混凝土中的水泥用量（C_o）、拌合水量(W_o)、粗粒料用量(W_{ca})及細粒料用量(W_{fa})。

2.使飛灰混凝土中的水泥用量(C)與普通(基準)混凝土的水泥用量(C_o)

相等。

3. 計算水泥體積(V_c)

$$V_c = \frac{C_o}{1000 r_c} \qquad (式\ 7)$$

4. 飛灰取代細粒料之量為水泥體積的β(%)，據以計算飛灰體積(V_f)及用量(F)

$$V_f = \beta\ x\ V_c \qquad (式\ 8)$$

$$F = r_f\ x\ V_f\ x\ 1000 \qquad (式\ 9)$$

5. 因飛灰取代部份細粒料，將使其細度模數降低，故需調整砂率(s/a)

6. 修正用水量(W)

$$W \cong W_o \qquad (式\ 10)$$

故上式可算出飛灰混凝土拌合水量W，但得視飛灰燒失量及測得之坍度等性質而稍作調整。

7. 計算粒料總體積(V_{ag})

$$V_{ag} = 1 - \left[\frac{C}{1000 r_c} + \frac{F}{1000 r_f} + \frac{W}{1000 r_w} + V_a \right] \qquad (式\ 11)$$

8. 計算粗細粒料用量(W_{fa}、W_{ca})

$$W_{fa} = r_{fa}\ x \left[V_{ag}\ x\ S_a - V_f \right] x\ 1000 \qquad (式\ 12)$$

$$W_{ca} = r_{ca}\ x\ V_{ag} \left[1 - S_a \right] x\ 1000 \qquad (式\ 13)$$

9. 依粒料含水狀態調整各材料用量

10. 試拌，並比較實際測得之飛灰混凝土性質是否符合工程要求，再修正配比。

計算例二：依 ACI 法算出之基準混凝土的配比用量為

水　泥	$C_o = 395$ kg/㎥	水泥比重= 3.15
拌合水	$W_o = 212$ kg/㎥	混凝土空氣含量=2.5%
粗粒料	$W_{cao} = 972$ kg/㎥	粗粒料比重=2.63
細粒粒	$W_{fao} = 685$ kg/㎥	細粒料比重= 2.56

欲以飛灰取代細粒料之量為水泥體積的β=2%，請計算飛灰混凝土配比?

解：　水泥用量 $C = C_o = 395 \, kg/m^3$

水泥體積 $V_c = \dfrac{395}{3150} = 0.1254 \, m^3$

飛灰體積 $V_f = 0.2 \; X \; 0.1254 = 0.02508 \, m^3$

飛灰用量 $F = 2.15 \; X \; 0.02508 \; X \; 1000 = 54 kg/m^3$

選定砂率 $S_a = 41.3\%$

拌合水量 $W = 212 \, kg/m^3$

粒料總體積 $V_{ag} = 1 - \left[\dfrac{395}{3150} + \dfrac{54}{2150} + \dfrac{212}{1000} + 0.025 \right] = 0.6125 \, m^3/m^3$

細粒料用量 $W_{fa} = 0.413 \; X \; 0.6125 \; X \; 2.56 \; X \; 1000 = 648 \, kg/m^3$

粗粒料用量 $W_{ca} = (1 - 0.413) \; X \; 0.6125 \; X \; 2.63 \; X \; 1000 = 946 \, kg/m^3$

由於飛灰比重較細粒料小，故以飛灰取代部份砂時，其計算單位重 2255 kg/㎥，比基準混凝土的計算單位重 2264 kg/㎥小。

(三)、飛灰同時取代部份水泥與細粒料之配比設計法(體積法)

1. 根據普通(基準)混凝土的配比設計法計算每 ㎥ 混凝土中的水泥用量

（C_o），拌合水量（W_o），粗粒料用量（W_{cao}）及細粒料用量（W_{fao}）。

2. 選定飛灰取代水泥部份為基準混凝土中的水泥體積之α(%)，飛灰取代砂部份則為普通(基準)混凝土中之水泥體積的β(%)，
3. 計算水泥用量（C）

基準混凝土中之水泥體積　$V=\frac{C_o}{1000r_c}$　（式 14 ）

飛灰混凝土中之水泥用量　$C=r_c\ x V_c\ x\left(1-\alpha\right)x1000$　（式 15）

4. 飛灰用量（F）

取代水泥部份　$F_c=r_f\ x V_c\ x\ \alpha\ \ x1000$　（式 16）

取代砂部份　$F_s=r_f\ x V_c\ x\ \beta\ x1000$　（式 17）

全部飛灰用量　$F=F_c+F_s$　（式 18）

5. 選定水膠比：使用飛灰混凝土的水膠比與基準混凝土的水灰比相等；但若防止飛灰混凝土早期強度不致過低，亦可使飛灰混凝土的水膠比較基準混凝土的水灰比稍低。
6. 決定用水量（W）

$$W\cong\frac{W_o}{C_o}\ x\left(C+F_c\ \right)$$　（式 19）

算出之拌合水量 W 得視飛灰燒失量及測得之坍度等混凝土新拌性質而稍作調整。

7. 計算粒料總體積（V_{ag}）

$$V=1-\left[\frac{C}{1000r_c}+\frac{F}{1000r_f}+\frac{W}{1000r_w}+V_a\right]$$　（式 20）

8.選定砂率 S_a

9.細、粗粒料用量

細粒料體積　$V_{fa} = V_{ag}\ x\ S_a - F_s / 1000 r_f$　（式 21）

粗粒料體積　$V_{ca} = V_{ag}\ x\left[1 - S_a\right]$　（式 22）

細粒料重量　$W_{fa} = r_{fa}\ x V_{fa}\ x 1000$　（式 23）

粗粒料重量　$W_{ca} = r_{ca}\ x V_{ca}\ x 1000$　（式 24）

10.依粒料含水狀態修正配比

11.試拌並修正配比使符合工程要求

12.列出各項材料用量

計算例三：依 ACI 法算出之基準混凝土的配比用量為

水　泥	$C_o = 395$ kg/m^3	水泥比重= 3.15
拌合水	$W_o = 212$ kg/m^3	混凝土空氣含量=2.5%
粗粒料	$W_{cao} = 972$ kg/m^3	粗粒料比重=2.63
細粒粒	$W_{fao} = 685$ kg/m^3	細粒料比重= 2.56

欲以飛灰取代水泥 α=15%，飛灰取代細骨材 β=15%(以水泥體積計)，請計算其配比?

解：　基準混凝土中之水泥體積

$$V_c = \frac{395}{3150} = 0.1254\, m^3$$

飛灰混凝土中之水泥用量

$$C = 3.15\ X\ 0.1254\ X\ \left(1 - 0.15\right)\ X\ 1000 = 336\, kg/m^3$$

取代水泥之飛灰重

$$F_c = 2.15\ X\ 0.1254\ X\ 0.15\ X\ 1000 = 40\ {kg}/{m^3}$$

取代砂之飛灰重

$$F_s = 2.15\ X\ 0.1254\ X\ 0.15\ X\ 1000 = 40\ {kg}/{m^3}$$

全部飛灰用量

$$F\ = 40 + 40\ = 80\ {kg}/{m^3}$$

拌合水量

$$W \cong W_o\ = 212\ {kg}/{m^3}$$

粒料總體積

$$V_{ag} = 1 - \left[\frac{336}{3150} + \frac{40}{2150} + \frac{212}{1000} + 0.025 \right] = 0.6378\ {m^3}/{m^3}$$

選定砂率 $S_a = 41.3\%$

細粒料重量

$$W_{fa} = 2.56\ X \left[\ 0.6378\ X\ 0.413 - \frac{40}{2150}\ \right] X\ 1000 = 627\ {kg}/{m^3}$$

粗粒料用量

$$W_{ca}\ = 2.63\ X 0.6378\ X\ \left(1 - 0.413\right)\ X\ 1000 = 985\ {kg}/{m^3}$$

由飛灰同時取代水泥與砂之飛灰混凝土，其單位重為 2240 kg/㎥，比基準混凝土之 2264 kg/㎥稍小。

(四)比較：飛灰在混凝土中使用策略之不同對配比之影響如表 4.1 所示。

表 4.1　摻用飛灰對混凝土配比之影響　　單位：kg/m^3

飛灰使用策略	水泥	飛灰	水	粗粒料	細粒料
沒有摻用	395	0	212	972	685
取代水泥	316	79	212	966	662
取代細粒料	395	54	212	946	648
取代水泥與細粒料	336	80	212	985	627

4.4 飛灰之參考用添加量及配比

飛灰之添加量應依添加目的、構造物類型、飛灰品質、化學摻料及是否添加其他卜作嵐材料等條件而異，須依試拌結果決定。並可參考表 4.2 作適當調整。數個國內飛灰混凝土之材料配比如表 4.3 所示。目前有些混凝土常同時添加飛灰與爐石粉，該二者之合量對混凝土性質的影響須特別注意。ACI 318 對混凝土暴露解冰鹽時之飛灰摻加量規定如表 4.4 所示。

4.5 注意事項

1. 飛灰混凝土之材料及配比須依試拌結果確認是否符合工程要求。
2. 配比作業須審慎評估，了解不同飛灰含量對混凝土性質之影響；例如以試驗數據繪出不同取代量與強度及齡期之關係曲線，據以選定最佳取代量。
3. 預拌廠或工地在飛灰混凝土試拌與產製期間，應依據本手冊第七章之相關規定，建立統計品管資訊，以保混凝土品質穩定性。

表 4.2 混凝土中飛灰取代水泥量之參考值

種類	允許飛灰取代水泥之上限(以重量計)
1. 混凝土(不屬(2)～(7)項者)	20%
2. 預力混凝土	10%
3. 版混凝土	15%
4. 海邊及地下工程混凝土	25%
5. 巨積混凝土	25%
6. 水密性混凝土	20%
7. 舖面混凝土	20%

註：當飛灰混凝土同時用於不同工程部位時，以飛灰取代水泥量小者為準。

4.3 飛灰混凝土之材料配比與強度

規定代號	規定抗壓強度 (kgf/cm²)	規定坍度 (cm)	最大粗骨材粒徑 ϕ_{max} (mm)	材料配比(kg/m³)								水膠比	28天試體實測抗壓強度 (kgf/cm²)
				水泥	25mm ϕ_{max} 粗粒料	13mm ϕ_{max} 粒料	砂 (F.M=2.8~3.1)	砂 (F.M=2.5~2.7)	水	減水劑	飛灰		
1	140	15	25	200	475	560	445	430	175	1.69	26	0.78	164
2	210	15	25	275	490	520	420	420	177	2.26	27	0.59	237
3	210	18	25	270	450	550	500	335	180	2.33	41	0.58	244
4	245	15	25	309	495	515	415	390	178	2.52	28	0.53	266
5	245	18	25	302	450	550	390	405	183	2.59	43	0.54	285
6	280	15	25	342	480	520	405	380	179	2.78	29	0.49	301
7	280	18	25	332	450	550	375	390	184	2.83	45	0.49	310
8	350	18	25	383	449	550	357	350	185	3.23	47	0.43	385
9	350	14	25	330	515	514	334	335	186	2.0	100	0.432	364
10	420	25	10	387	-	800	930	-	169	12.19	97	0.36	480
11	420	25	10	372	-	758	948	-	163	13.5	93	0.37	500

註：飛灰燒失量為 10.3%，比重為 2.25。水泥為卜作嵐第 I 型。粒料產自蘭陽溪。第 1～9 號配比的減水劑為 Type A，屬木質素系列的化學摻料。第 10 及 11 號配比的減水劑為 Type G 之強塑劑。

表 4.4 混凝土暴露解冰鹽下對卜作嵐材料之限量

名　　稱	佔膠結料之最大百分率
飛灰或其他卜作嵐材料	25
飛灰或卜作嵐材料和爐石粉混用，其中飛灰亦須低於 25%總膠結料	50
飛灰或卜作嵐材料和矽灰總和	35

參考文獻

4.1 ACI,1995,Building Code Requirements for structural Concrete(ACI 318-95) and Commentary(ACI 318 R-95),Detroit(1995).

4.2 黃兆龍，王和源，1998，「公共工程混凝土使用飛灰要點」，行政院公共工程委員會專案研究計畫，台北。

4.3 王福元、吳正嚴，1997，"粉煤灰利用手冊"，中國電力出版社，北京。

4.4 甄永嚴，1992，"粉煤灰在水工混凝土中的應用"，水利電力出版社，北京。

4.5 林平全，1995，"飛灰混凝土"，科技圖書公司，台北。

4.6 American Coal Ash Association,1995,"Fly Ash Facts for Highway Engineers",Federal Highway Administration.

4.7 ACI,1995,"Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash",Reported by ACI Committee 211.

4.8 ACI,1995,"Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Hearyweight, and Mass Concrete(ACI 211.1-91),"Reported by ACI Committee 211.

（蘇南、王和源、陳式毅撰稿）

第五章　拌和與產製

5.1 材料

飛灰混凝土所用的材料有水泥、飛灰、細粒料、粗粒料、水及化學摻料等，各項材料品質均須符合國家標準(CNS)規範之要求。其材料與規範總號對應如下：

CNS 61［卜特蘭水泥］

CNS 3036［卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或煅燒卜作嵐攙和物］

CNS 1240［混凝土粒料］

CNS 13961［混凝土拌和用水］

CNS 12283［混凝土用化學摻料］

上述各種材料進廠品質除依 CNS 規範標準驗收外，對飛灰驗收應有來源或品質合格證明，否則應訂定“簡易迅速而有效之測試方法”，檢驗其品質為允收標準範圍內，否則應予拒收。

飛灰允收簡易測試方法：在此舉一方法以資參考，即當飛灰散裝車進廠時，卸料前須自散裝車料槽頂蓋打開取樣後分樣 10~20g，放置於乾淨平盤上再以清水濕潤均勻後將平盤左右傾斜 5~10°，使均勻濕潤之飛灰漿能緩緩自由向下流散，即可明顯分辨觀察出飛灰中燃燒未完全之碳顆粒分布情況與多寡、灰之顏色或有無油質含量而判定是否可允收使用。

各種材料須分離儲存，明顯標示材料名稱，不可混淆或材料相混，並有防雨、防曬、防污染之設備，以保持材料之新鮮度。水泥、飛灰之儲存槽（桶）須密閉、防潮，並有集塵設備以防止進料時粉塵飛揚，儲存輸料銜口須明顯標示水泥或飛灰之料名，且水泥輸料銜口可予上鎖與飛灰有別並嚴格管理，以免誤送。粗細粒料儲存須能充分排水。

各種材料由儲倉（槽）流入計量器時，必須是有效地暢通，儲倉出口須設置控制開關，俾使計量時可準確關閉。

5.2 計量

稱取拌和飛灰混凝土之各種材料計量磅稱需經度量衡局檢定合格，磅稱刻度應為磅秤總量之 1/1000（即 0.1%）。磅稱作靜荷重試驗時其準確度誤差值至多為其最大容量之 0.4%，其靈敏度須高於標稱容量之 0.1%。計量磅稱需定期或不定期檢驗（全自動或半自動計量設備至少 6

個月校驗乙次)，並隨時注意維修保養，若有零件更換時應即行校正以確保其準確度，並要保存校正紀錄。各種材料計量時之容許誤差值（許可差）須能符合 CNS 3090 [預拌混凝土]之規定，但飛灰或其他卜作嵐材料若計量值小於磅稱容量 30%以下時，其許可差上限為（+4%)、下限為（-0%)。

計量設備應與拌和設備結構分離，以避免震動誤差而影響計量準確性。各種材料之計量容器需能卸料徹底，不得有附著物或殘留。飛灰與水泥可採用分開計量設備為佳，不同類型之化學摻料須分別置於不同量筒俾以計量。拌和廠須備有足夠之標準砝碼，供檢驗磅稱之準確性。各種材料每盤計量後應有電腦自動紀錄與列印計量明細。

5.3 拌和

飛灰混凝土應採用固定式拌和機(Stationary mixer,即 CNS 3090 所稱之中央拌和式)拌和。拌和機須裝訂一金屬板標明拌和鼓或葉片之轉速及最大拌和量。為求拌和完全須裝置拌和「計時」與拌和完成之「警示鈴」,並完成所指定的拌和時間才能卸料。拌和機每盤之拌和量不得超過該機原製造商所保證之拌和量。拌和時不可有漏漿、漏水現象發生，機體內壁或攪拌葉片（爪）須保持清潔，不得有硬結混凝土塊產生。拌和時材料須按指定順序投入拌和機充分拌和,若前盤(Batch)混凝土未完全排出時，次盤材料不可投入，其拌和時間須能符合 CNS 3090 規範中拌和均勻性之要求，又為使飛灰混凝土拌和時能達到更完整之均質性，其拌和時間可依強度、膠結量或坍度之不同而有所差異。拌和時為求得粒料表面含水量能正確調整,須有依粒料實際含水量調整每盤重量之裝置。

5.4 拌和均勻性要求（拌和機性能試驗要求）

拌和機（攪拌機）拌和飛灰混凝土時必須足以保持完全混合及均質性，使於卸料時能符合 CNS 3090 規範中有關均勻性之要求如表 5.1 所示。均勻性試驗乃是混凝土於指定時間內拌和後對卸料約於 15%及 85%兩部位取樣作坍度試驗，並依表 5.1 之試驗項目檢驗其均勻度，且此兩試樣抽樣間隔不得大於 15 分鐘。

5.5 輸送

1. 飛灰混凝土在拌和廠以固定式拌和機辦妥後，並以預拌車依設計之攪拌速率運轉運送至工地（購方指定之位置）時，輸送時間不得超過 90 分 鐘;須保持飛灰混凝土均勻品質，使不致發生材料分離或嚴重之坍度損失。
2. 預拌車或泵浦之輸送速率不得大於現場澆置速率，應以不使飛灰混凝土澆置中斷為佳，且各批澆置間隔不宜過長以免產生冷縫。
3. 預拌車自拌和廠裝料時，轉筒（鼓）內之游離水務必徹底卸乾淨。且運送途中禁止任意加水於轉筒內以免影響品質，車到達工地卸料完成後清洗卸料槽之廢水須卸至購方（工地監工）所指定之區位。
4. 預拌車須作定期保養以保持最佳輸送能力，其裝料漏斗及卸料滑槽表面須保持光滑乾淨，轉筒（鼓）內之攪拌葉與鼓內壁不得有明顯之硬結混凝土堆積現象，須隨時清潔乾淨，攪拌葉片之磨損率不得超過原設計的 10%，否則應予更新，以免造成飛灰混凝土品質不良或卸料殘留。
5. 運送途中轉筒正常運轉速率應保持 2 ~ 6 rpm。
6. 預拌車運送飛灰混凝土至購方工地時，隨車應提出送貨簽收單（證明單），其內容至少應包括以下各項目：
   (1)拌和廠廠名；(2) 送貨單之序號；(3) 日期；(4) 車輛號碼；(5) 購方名稱或姓名；(6) 工程名稱及地點；(7) 飛灰混凝土載運數量(m^3)；(8) 購方要求之強度、坍度、最大骨材粒徑或配比資料；(9) 裝車或拌和完成之時間；(10) 購方代表或監工簽名。

表 5.1　混凝土均勻性試驗報告

工程名稱	○ ○ 新建工程	標別	○ ○	試驗日期	88.02.02
拌合廠	○ ○ 拌合廠	粗粒料比重	2.64	水灰比 W/C	0.45
拌合廠容量	2.5M^3	拌合時間	1 分鐘	坍　　度	17cm
配比編號	A-280-25-17GI	最大粒徑	25mm	附加劑種類	HI CON TYPE G

試驗項目	單位	卸料部分試驗值		前後二部位試驗值差異	規範容許最大差異
		前段(15%)	後段(85%)		
試料+容器重(W_1)	Kg	19.96	19.98	---	---
容器量(W_2)	Kg	3.660	3.660	---	---
試料重(W_3)	Kg	16.300	16.320	---	---
容器體積(V_T)	M^3	0.007077	0.007077	---	---
1.混凝土坍度	cm	19.0	20.0	1.0	10cm 以下為 25cm 10~15cm 為 38cm 15cm 以上為 43cm
2.混凝土含氣量(A)	%	1.9	1.8	0.1	1.0%
不含空氣體積 $V_R=V-(A \times V_T/100)$	M^3	0.006942	0.006950	---	---
3.每 M^3 質量(不含氣), W_3/V_R	Kg/M^3	2348.0	2348.2	0.2	16 Kg/M^3
停留#4 篩質量(面乾內飽和)(W_4)	Kg	7.180	7.060	---	---
4.粗粒料質量百分率(W_4/W_3)x1	%	44.0	43.3	0.7	6.0%
5.不含氣水泥砂漿單位質量 $(W_3-W_4)/[V_R-(W_4/(Gx1000))]$	Kg/M^3	2160	2166	0.14	1.6% (對所有試樣平均值為基準之百分率)
6.混凝土試體抗壓強度(7 天期)	kgf/cm^2	198	187	2.8	7.5% (對所有試樣平均值為基準之百分率)

備註	本試驗係依照 CNS 3090 A2040 規範施行 本標準規定，若符合上表所列六項試驗中五項要求者，應視為均勻混凝土

監造單位:　　承包商：

參考文獻

5.1 中央標準局，1994， CNS 3090［預拌混凝土］，台北。

5.2 國道工程局，1987，交通部台灣區國道高速公路局施工標準規範—施工技術規範第 9 章。

5.3 台灣電力公司，1992，混凝土施工規範(土施-01)。

（連世昌、盧榮林撰稿）

第六章　施 工

6.1 一般規定 飛灰混凝土與普通混凝土之差異僅在於有無飛灰之存在，飛灰混凝土之性質有一些影響，但飛灰混凝土仍具有普通混凝土大部份之基本性質，故使用飛灰混凝土時，基本上應遵照內政部營建署頒布「混凝土工程施工規範」之規定，再加本章之特別規定。

混凝土施工作業包括澆置、搗實與養護，必須與產製及輸送連貫配合進行，飛灰混凝土亦然。飛灰混凝土之產製與輸送已於第五章規定。本章僅對混凝土之澆置、搗實與養護做有關之規定。

在澆置施工上，飛灰混凝土較一般混凝土不同之特性有：

6.1 一般規定 飛灰混凝土與普通混凝土之差異僅在於有無飛灰之存在，飛灰混凝土之性質有一些影響，但飛灰混凝土仍具有普通混凝土大部份之基本性質，故使用飛灰混凝土時，基本上應遵照內政部營建署頒布「混凝土工程施工規範」之規定，再加本章之特別規定。

混凝土施工作業包括澆置、搗實與養護，必須與產製及輸送連貫配合進行，飛灰混凝土亦然。飛灰混凝土之產製與輸送已於第五章規定。本章僅對混凝土之澆置、搗實與養護做有關之規定。

在澆置施工上，飛灰混凝土較一般混凝土不同之特性有：

飛灰混凝土與普通混凝土之差異僅在於有無飛灰之存在，飛灰混凝土之性質有一些影響，但飛灰混凝土仍具有普通混凝土大部份之基本性質，故使用飛灰混凝土時，基本上應遵照內政部營建署頒布「混凝土工程施工規範」之規定，再加本章之特別規定。

混凝土施工作業包括澆置、搗實與養護，必須與產製及輸送連貫配合進行，飛灰混凝土亦然。飛灰混凝土之產製與輸送已於第五章規定。本章僅對混凝土之澆置、搗實與養護做有關之規定。

在澆置施工上，飛灰混凝土較一般混凝土不同之特性有：

1. 在某些特殊情況下，坍度(工作度)之損失較快，可能之情況如下：
   (1)某些種強塑劑被飛灰含碳顆粒表面吸附，降低減水效用。
   (2)添加輸氣劑之飛灰混凝土，部份輸氣劑被飛灰含碳顆粒表面吸附，降低含氣量，減少漿體之流動性。
   (3)使用時水泥溫度太高，或水泥品質不良，如有假凝現象或異常凝結現象者。
2. 澆置過程中較容易發生浮漿及浮水現象。
3. 飛灰品質不良或配比與產製不當，硬固過程中容易發生龜裂現象。
4. 強度成長較慢，早期強度較低，應加強養護。
5. 養護情況對飛灰混凝土品質之影響甚大，除應加強養護外，並應加

長養護時間。

6. 強度成長速度較慢，應適當延長拆模時間。若欲提早拆模，須採取適當再撐，確保施工安全。

本章僅對飛灰混凝土在施工上應特別注意之事項加以說明。

6.2 飛灰混凝土工作度之管制

由於某些情況下，飛灰混凝土之坍度損失快速，為使混凝土能妥善澆置施工，應採取下列措施：

1. 依據季節氣溫與輸送路程之距離，確實估計混凝土輸送之坍度損失，由混凝土配比調整增加產製之坍度，避免混凝土送至工地不適施工，而胡亂加水或須做再拌合之麻煩。
2. 要求縮短輸送作業時間，儘速送達工地。一般混凝土施工規範中多有限制混凝土自開始拌合至澆置完成時間之限制，通常為不超過 90 分鐘。飛灰混凝土應依據實際情況適當縮短。
3. 施工前應做好澆置計畫，避免各項作業無法配合使澆置作業中斷，延誤飛灰混凝土之澆置時間。
4. 工地應確實做好準備工作如模板、鋼筋及埋設物之查驗，避免飛灰混凝土送達工地無法及時澆置。

6.3 澆置過程中發生材料分離之管制

飛灰混凝土之材料分離除一般混凝土之粒料析離與浮水外，尚有飛灰上浮分佈不均之現象，均應注意以正確之方式減少其發生。可採取之措施如下：

1. 飛灰混凝土在可適當施工之情況下，工地應建議拌合廠調整減少拌合水，或採用適當之減水劑或其他類似摻料，以減少拌合水量。
2. 混凝土卸下前，先使預拌車快轉，將混凝土充分攪拌均勻再行卸下。
3. 澆置搬運輸送過程採取適當措施，減少材料分離。
4. 搗實振動應採用能量稍低之振動器；且搗實應注意均勻、適當與充分，但切忌過度搗實振動。
5. 當發生材料分離時，應設法以有效之措施使材料分佈均勻。
6. 當預期或發現混凝土可能發生過多之浮水時，例如牆或柱等垂直構材，澆置其構材上方可採水膠(灰)比較低之混凝土以補救之。

6.4 混凝土澆置中對惡劣天候環境之保護

1. 室外混凝土之澆置應避免在下大雨、下雪及刮大風等惡劣天候下進

行，不得已須澆置混凝土時，應採取適當之防護措施。

2. 冰凍之地面上不得澆置混凝土。

3. 不得使雨水損害混凝土表面或增加混凝土中之水量。

4. 混凝土澆置中及其後 24 小時內，若周圍環境之氣溫可能有低於 5℃之情況時，飛灰混凝土澆置時之溫度不得低於 15℃；但構材斷面尺寸小於 30cm 時，混凝土溫度不得低於 20℃。

5. 飛灰混凝土澆置時之周圍環境溫度不得高於 38℃；否則應採取經監造者認可之措施。

6 鋼筋及鋼模之溫度高於 49℃時,其在混凝土澆置前應先以水冷卻之。

7 防護所需之器材及設備應事先備妥。

6.5 澆置初期之龜裂防制

1. 混凝土養護末期須避免溫度驟變

表面驟冷而內部溫度仍高，會使混凝土表面發生裂紋，尤其以巨積構造物如橋墩、橋台、水壩等為甚，因此須在養護末期徐徐冷卻。如為加熱保溫時，則應先停止加熱，使混凝土溫度降至與周圍氣溫相若時再行撤去覆蓋物。

2. 溫度變化率

澆置中或剛澆置完成之混凝土附近之氣溫變化應儘量保持緩和，且每小時內之變化不得超過 3℃，24 小時內變化不得超過 28℃。

6.6 飛灰混凝土之加強養治

由於養治對品質之影響，飛灰混凝土比普通混凝土較大，故飛灰混凝土之養治應加強與加長養治之時間。飛灰混凝土之養治可參照「混凝土工程施工規範」第十二章之規定，並應加長養治時間，建議如下：

1. 早強飛灰混凝土至少須持續養護 5 日。

2. 一般飛灰混凝土至少須持續養治如表 6.1 規定之時間，惟若作圓柱試　體放在構造物附近以同樣之方法養護，當平均抗壓強度達 f'c 之 70%時，可以停止保濕措施。

3. 若起初採用者為該規範第 12.2.1(1) 節至第 12.2.1(4)節之任一種方法養護經 3 日以後可改用第 12.2.1 節所示之其他種方法繼續養護，但在養護方法之轉換過程中不得使混凝土表面乾燥。

4. 以飛灰、爐石等卜作嵐摻料取代水泥之混凝土，受濕度之影響很大，其養護時間應依取代重量百分率而定。

表 6.1　飛灰混凝土最少養護時間之規定

取代水泥量（%）	要求最少養治時間（天）
10	8
11 - 15	9
16 - 20	10

6.7 飛灰混凝土養治期間應加強保護

由於飛灰混凝土之強度成長速率較慢，早期強度較低，養治期間應加強保護如下：

1.惡劣天候之保護

(1)冷天

室外日平均氣溫低於 5℃時，在必要養護期間內，混凝土之溫度應維持在 15 ℃至 25℃之間。

如混凝土需予加熱遮蓋、隔熱或掩護時，所需設施須在澆置前預作安排。

保溫設施應能保持適當之所需溫度，並防熱量集中損傷混凝土。

除非能防止混凝土暴露於含二氧化碳之排氣中否則在最初 24 小時以內不得採用燃燒式加熱器。

(2)熱天

如混凝土需予擋風、遮陰、噴霧、洒水或覆以淺色潮濕覆蓋物時，所需設施須在澆置前預作安排。

上述措施應在不妨礙混凝土硬化與修飾工作情況下儘速進行。

(3)溫度變化率

詳如第 6.5 節。

2.機械性損傷之防護

施工過程中可能使構件混凝土所受應力超過當時強度之情況有二：一為混凝土未達足夠強度即予拆除模板支撐，二為施工載重負荷增加之速率過鉅。混凝土之防護措施如下：

(1)養護期間混凝土須防止載重應力、重大撞擊或過度振動等之損傷。

(2)修飾好之表面應加防護以免受施工作業、搬運作業、與養護作業

及雨水之損傷。

(3)構件所受載重不得使其混凝土承受超過當時強度之應力。

6.8 飛灰混凝土之拆模時間

6.8 飛灰混凝土之拆模時間

由於飛灰混凝土強度成長速度較慢應適當延長拆模時間。飛灰混凝土之拆模除按「混凝土工程施工規範」第四章有關之規定謹慎從事外，在此特別強調其基本原則如下：

1. 拆除模板及支撐時，混凝土應經按規定充分養護，且具足夠強度。
2. 拆模應按計畫謹慎從事，模板及支撐之拆除，須不致造成因混凝土強度(齡期)不足使結構受損，及因拆模作業使混凝土表面受損。
3. 拆模應注意其順序、方式及所用之器具，以避免任何部位之混凝土受力過大發生裂紋與表面遭受損傷。
4. 當未能依據混凝土之拆模要求強度決定拆模時間時(參照混凝土工程施工規範第4.7.5節之規定)，飛灰用量不超過水泥重量20%(含)者，其拆模時間可按表6.2實施；飛灰用量超過水　　第六章　施工泥重量20%者，應依試驗結果評估混凝土各齡期強度，決定適當拆模時間。
5. 拆模時間應權衡構造物之性質、當時氣候、混凝土試驗結果及構材上方施工載重等情形予以適當調整。混凝土強度之成長速率與溫度成正相關，天冷季節拆模時間應酌增。
6. 因以飛灰取代水泥使混凝土強度之成長速率減緩，故應根據其使用情形及本規定所述情況加以適當延長。
7. 拆模後之混凝土仍須按規定充份養治。

6.9 拆模時之飛灰混凝土強度

模板及支撐如係根據混凝土達規定拆模強度而拆除時，凡符合下列任一情況者，其混凝土可認為已達拆模強度：

1. 代表該批混凝土之圓柱試體在工地以與結構體同樣方法養護後，經試驗已達規定拆模或拆除支撐之強度者。
2. 該混凝土應按第6.6及6.7節之規定養護，而其養護時間已達同批試體在試驗室養護至規定拆模強度所需之齡期。結構體混凝土之養護總期間，可為不連續養護時間之累積總和，但該期間內結構體混凝土所接觸之空氣溫度應高於15℃，且該混凝土須保持潮濕或有適當防止水分蒸發與損失之措施。

表6.2 最少拆模時間參考值(飛灰取代水泥量在20%以下)

構　造　物　性　質	建議最少拆模時間(天)

	普通混凝土	飛灰混凝土
版		
5m×5m 以下	10	15
大於 5m×5m	14	22
梁		
淨跨 6m 以下	10	20
淨跨 大於 6m	14	28
柱及牆(非結構牆)之側模	1	2
短跨度拱及廊道頂模	7	10
巨積混凝土側模	1	2
隧道襯砌(鋼模)	1	1
明　渠	3	5

6.10 再撐

所謂「再撐」係指將混凝土模板及支撐拆下後，又將支撐物回撐之施工技術。通常有兩種情況運用：其一為使模板加速再用，於混凝土較低強度時即予拆模而予再撐，其原則為拆除模板及再撐過程不得使構材混凝土承受超過其當時所具之強度。以加速施工進度；另一為因施工進度快速或施工載重很大，為分散施工載重。

由於飛灰混凝土之強度成長速率較慢，如須比依據拆模要求混凝土強度決定拆模時間較早拆模時，可使用「再撐」之技術。但拆模與再撐之時間及施行程序須事先計劃，並謹慎施行。其施行可按混凝土工程施工規範第 4.8 節之規定。

參考文獻

6.1 沈進發等 18 人，1995，”混凝土工程施工規範”， pp.8-1～9-8，內政部營建署編訂，台北市。

6.2 林平全，1997，”飛灰混凝土施工”，pp.81～91，如何使用飛灰以提昇混凝土品質，台北市，台灣營建研究院。

6.3 沈進發，1996，”混凝土品質控制”，pp.232～241，台北市

6.4 台灣電力公司，1987，”煤灰利用推廣手冊”，台北。

（沈進發、林嘉永撰稿）

第七章 品質管理與檢驗

7.1 品質管理

公共工程通常具有個案重複性低、影響因素多、工期長、不合格品處理困難等特性，故需事先詳訂品質計畫，使用飛灰混凝土之公共工程亦應比照辦理。品質計畫可依照行政院公共工程委員會訂頒「公共工程品質管理制度」及「公共工程施工品質管理作業要點」辦理。若能建立 ISO 9000 系列之品質保證制度，則可更為完善。

飛灰混凝土之品質受工程各作業階段影響，應以全面品質管理(TQM)方式導入品質，以下各節分述飛灰混凝土各作業階段應特別強調之相關管制措施，以確保其品質。

1 飛灰出廠管制

(1)加強煤源進料管制，力求穩定。

(2)加強燃煤機組運轉管制，使燃燒完全降低飛灰燒失量及確保品質均勻性。

(3)依 CNS 10896 要求，每 400 公噸至少抽樣一次，並按規定檢驗，且繪製管制圖及定期統計分析檢討。

(4)對飛灰作分級，確保出廠飛灰作適當使用。

(5)飛灰出廠時提供品質檢驗報告。

(6)飛灰品質符合 CNS 3036 之要求方得提供作為公共工程飛灰混凝土之材料。

2 工程設計階段管制

(1)工程設計：

確定飛灰混凝土適用於構造物全部或某一部位。

確定飛灰混凝土之規格，如規定抗壓強度(fc')、強度合格判定基準及其它特殊要求，如耐久性、顏色均勻性等。

確定檢驗飛灰混凝土試體強度之齡期：一般以 28 日為基準、必要時可視工程需要指定為 56 或 91 日等。

(2)編訂施工規範(或施工說明書)：

載明依照行政院公共工程委員會頒布「公共工程使用飛灰混凝土作業要點」及「公共工程飛灰混凝土使用手冊」之規定辦理。

規定飛灰品質應符合 CNS 3036 要求：CNS 係非強制性標準，引用時必須列入合約才能發生效力。CNS 3036 之化學成分及物理性質

要求均分標準規定及任選規定兩種，若無特別指定，僅標準規定有效；若有特殊需要應另指定任選規定之項目(若無需要則不必多作要求)。CNS 3036 之規定係基本要求，若工程有需要可酌情更改，如輸氣混凝土所用飛灰之燒失量限制可參照 ASTM C618 指定為 6%以下。

加強養護溫度及時間之要求。

規定拆除模板及支撐之時機限制(如工地養護混凝土試體之最低強度或齡期等)。

規定施加外力(如載重、施預力等)之時機限制(如工地養護混凝土試體之最低強度或齡期等)。

規定進料檢驗、施工查驗及完工驗收之特殊規定。

構造物或施工條件特殊，或要求強度較高時，可視需要規定承包商須辦理施工模擬試驗。

(3)編訂工程預算書：

編訂飛灰混凝土工料或單價分析表，材料項目應包括合格飛灰。

若需辦理施工模擬試驗時，應列入計價項目或規定由承包商自負經費。

3 材料管制

(1)料源調查

承包商應預作飛灰料源調查，包括飛灰品質及產量。同一工程最好採用同一燃煤機所產飛灰，飛灰需求量大時應有備用料源。

(2)配比設計

以工程預定用料作試拌，求得最佳配比。

採用化學摻料(特別是輸氣劑)時，特別注意飛灰燒失量影響。

模擬施工條件繪製強度成長曲線，供施工控制參考。

(3)進料管制

查驗飛灰出廠檢驗報告(應符合規範要求)。

目視查驗及抽樣檢驗(依 CNS 10896 規定辦理，快速試驗法參見 7.3 節)。

確認飛灰送入正確料倉：水泥及飛灰料倉應有明顯標識，並上鎖管制，以防誤送。

飛灰混凝土有顏色均勻性要求時，應加強飛灰之顏色均勻性查驗。

(4)倉儲管制

定期查驗飛灰存量。

長期(六個月)未使用之飛灰應複驗其品質。

4 計量及拌和管制

(1)使用飛灰之混凝土拌和廠應依 CNS 3090 之規定作業，拌和時間以均勻性測試結果決定之。

(2)確認飛灰混凝土之正確配比，慎防誤用。

(3)必要時，試驗室所得配比應經拌和廠試拌，以確認其工作度、均勻性及強度。

(4)每日檢驗粒料含水量，修正材料計量，最好能設置粒料含水量自動偵測器。

(5)目視查驗拌和效果(可用閉路電視監視)，若有異常應即補正。

(6)定期檢驗坍度及強度等。

(7)送貨單中應載明材料配比，隨車送交工地監工簽收。

5 施工管制

(1)工程合約有所要求或實務需要時，應辦理施工模擬試驗，供審核以下項目：

工作性(含泵送性、搗實性及浮水程度等)。

外觀(緻密性、均勻性、顏色等)。

尺度。

強度。

(2)拆模時機之管制：用滑動模版或跨徑較大之梁版時，應特別加強管制滑模或拆模時機，可配合強度成長曲線以齡期管制，必要時應辦工地養護混凝土試體強度試驗，決定拆模時機。

(3)養護溫度及時間管制:養護溫度及時間為飛灰混凝土強度成長之重要因素，必要時應辦工地養護混凝土試體強度試驗，檢驗養護效果。

(4)施加外力時機(如載重、施預力等)之管制：可配合強度成長曲線以齡期管制，必要時應辦工地養護混凝土試體強度試驗。

(5)定期統計分析。

6 驗收管制

(1)查驗飛灰混凝土試驗報告及工程施工紀錄。

(2)檢視飛灰混凝土構造物外觀。

(3)必要時，辦理鑽心等試驗以抽驗品質。

7 維護管制

工程完工交付使用後，由於材料或施工之隱藏性瑕疵、自然環境、意外災害、或使用不當等因素，可使構造物發生變質、變形、龜

裂等品質降低情形，故使用期間須持續辦理維護管制，以確保構造物品質。引進新材料之初期，更需加強維護管制，一方面可補救因經驗不足所殘留之缺點，另一方面可搜集資料供後續工程參考。

(1)擬定飛灰混凝土構造物定期檢查計畫。
(2)定期檢查構造物外觀，注意有無龜裂、剝落等現象及其程度。
(3)回饋施工及檢查成果，供後續工程參考。

7.2 品質檢驗

飛灰混凝土可用普通混凝土相同方法作品質檢驗，檢驗頻率依各工程規範之規定。其所用飛灰之品質檢驗應依照 CNS 10896 之規定辦理，CNS 10896 係參考 ASTM C311 制定，但兩者之修訂進度並不一致，現行之 CNS 10896(民國 73 公布)與 ASTM C311-94b 有所差異。本節主要依 CNS 10896 編訂，惟 ASTM C311-94b 有顯著不同處則加適當提示或並列。本節內容係供基本瞭解參考，實際檢驗作業過程應依原規範之規定。

1 採樣法

(1)每 400 公噸飛灰至少採樣一件個別試樣。
(2)以連續數等份之個別試樣可組成一混合試樣。
(3)若個別試樣係供檢驗每一規定項目時，取樣量至少為 4kg；如僅供組成混合試樣之用時，取樣量至少為 2kg。
(4)每一代表 400 公噸以下之試樣應辦以下試驗項目：
細度。
含水量。
比重。
燒失量。
健度。
卜作嵐活性指數試驗(與石灰攙和 7 天)(註：ASTM C311 無此項要求，本項試驗意義不大，建議免辦)。
(5)第 4 項以外之其他規定試驗項目應以足可代表每批 2000 公噸飛灰之混合試樣施行之，此混合試樣以各代表 400 公噸之連續五等量之個別試樣混合製配而成。

2 化學成分分析法概要

(1)含水量試驗

將取得之飛灰樣品(CNS 未定數量，可採約 10g)置入稱量瓶中，稱取試樣之質量(B，g)。
將試樣連稱量瓶置於 105~110℃之烘箱中烘乾至恆量。

稱得烘乾試樣之質量(C，g)。

計算烘乾前後質量差($A=B-C$，g)。

計算含水量(w，計算至 0.1%)。

$$w(\%)=\frac{A}{B}\times 100$$

CNS 3036 標準規定：F 類及 C 類飛灰之含水量均應在 3.0%以下(ASTM C618 規定相同)。

(2)燒失量試驗

取 1g 經 105~110℃烘乾之飛灰樣品置入瓷坩鍋中，稱取試樣之質量(B，g)。

將試樣連瓷坩鍋置於 750±50℃之高溫爐中灼燒至少 15min.，以後每次再灼燒至少 5min.，到質量不變為止。

取出試樣連瓷坩鍋置於乾燥箱內降至室溫。

稱取灼燒後試樣之質量(C，g)。

計算灼燒前後質量差(A=B-C，g)

計算燒失量(LOI，計算至 0.1%)

$$LOI(\%)=\frac{A}{B}\times 100$$

CNS 3036 標準規定：F 類飛灰之燒失量應在 12.0%以下，C 類應在 6.0%以下(ASTM C618 規定兩類均應為 6.0%以下)。

(3)化學成分含量分析

二氧化矽、氧化鋁、氧化鐵、氧化鈣、氧化鎂、三氧化硫、及有效鹼含量分析，CNS 10896規定以CNS 1078[7.6]作定量分析，需由化學分析專家辦理，其分析步驟本手冊從略。

CNS 3036標準規定：F類飛灰之二氧化矽、氧化鋁及氧化鐵之總量應在70.0%以上，三氧化硫含量應在5.0%以下，C類飛灰之相應值分別為50.0%及5.0%(ASTM C618規定相同)。

CNS 3036任選規定：F及C類飛灰之氧化鎂含量均應在5.0%以下(ASTM C618無此規定)，有效鹼含量(以Na2O計)應在1.50%以下(ASTM C618規定為1.5%以下)。

3 物理性質試驗法概要

(1) 比重試驗

CNS 10896規定以CNS 487測定飛灰比重，ASTM C311則規定以ASTM C188 (CNS 11272)測定飛灰密度，因飛灰性質較近似水泥，且CNS 10896規定不夠完備，建議採用ASTM C311規定方法。

以無水煤油注入經以 20℃校正之李氏比重瓶(Le Chatelier flask)(圖 7.1)至 0~1mL 刻度間,放入 20℃恆溫水槽中至溫度恆定，記錄煤油液面刻度(A，mL)。

稱取約 50g 飛灰，小心放入比重瓶，勿使飛灰附著於管頸，使煤油液面達上方之刻度間為止，記錄所放入飛灰質量(W，g)。

以瓶塞塞住比重瓶，以傾斜滾動或水平旋轉排除氣泡，再放入 20℃恆溫水槽中至溫度恆定，記錄煤油液面刻度(B，mL)。

計算飛灰密度(d，g/cm^3)：

$$d = \frac{W}{B - A}$$

CNS 487 規定用一般比重瓶或李氏比重瓶，以水作為置換液，試驗溫度為 23℃，其中規定應測試樣之面乾內飽和狀態，用於測飛灰顯有困難，CNS 487 包括數種比重之計算法，應採何種比重在 CNS 10896 中也未指定。

CNS 3036 標準規定：F 及 C 類飛灰每個試樣比重與前十個試樣之平均值差異均應在 5%以下(ASTM C618 規定相同)。

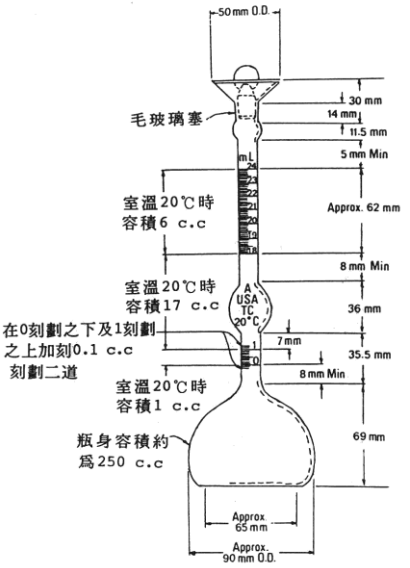


圖 7.1 李氏比重瓶

(2) 細度試驗

CNS 10896 規定以 CNS 9747 測定飛灰細度，ASTM C311 則規定以 ASTM C430 測定之，後者較直接且簡易。

ASTM C430 之基本程序

稱取 1g 飛灰置入直徑 51mm 之 0.045mm(No.325)試驗篩。

用直徑 17mm 及具 17 孔等規定構造之噴水龍頭，以 10 psi 壓力水沖洗飛灰 1 min.。

將試驗篩及殘留飛灰置入烘箱烘乾，取出冷卻。

刷出殘留飛灰，以分析天秤稱取其質量(w，g)。

計算飛灰之細度(F)：

$$F = w \times (100 + C)$$

式中，C=試驗篩之修正係數(可為正或負值，詳見 ASTM C430)。

CNS 9747 之基本程序

取 1g 試樣進行 0.045mm 試驗篩分析(ASTM C115 規定以 ASTM C430 測試)。

將適量之試樣與 10~15mL 煤油及分散劑共置於試管內，以攪拌器拌勻，然後倒入華格納濁度計(Wagner Turbidimeter)內之透明玻璃沉降槽，加煤油達 335mL，再予以拌勻。

以濁度計之規定強度光線照射沉降槽,在對側於各規定時機(由另一計時煤油滴管決定)以光電管及微電流計測定透過沉降槽之光線強度(微電流值)。

以規定公式估計算試樣之比表面積及粒度分布。

CNS 3036 標準規定：F 及 C 類飛灰之細度均應在 34%以下，並且每個試樣之細度與前十個試樣之平均值差異均應在 5%以下(ASTM C618 規定相同)。

(3)水泥砂漿柱體乾縮增加率試驗

以 CNS 1236[7.7]按規定配比分別製作成 25x25x 約 280mm 之控制組(不含飛灰)與試驗組(含飛灰)之水泥砂漿試體，每組試體各三個。

試體於養護室濕養 7 日，量測長度(L_0)。

再將試體移入溫度 23±1.1℃相對濕度 50±2%之儲存櫃保存 28 日，量測長度(L_1)。

分別計算兩組試體乾縮率(S_t、S_c)：

$$S(\%) = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100$$

計算飛灰試體乾縮增加率(S_i)：

$$S_i(\%) = S_t - S_c$$

式中，S_t=試驗組試體平均乾縮率(%)。

S_c=控制組試體平均乾縮率(%)。

CNS 3036 任選規定：F 及 C 類飛灰之水泥砂漿柱體乾縮增加率均應在 0.03%以下(ASTM C618 規定相同)。

(4)健度試驗

依 CNS 1258[7.8]規定步驟，以水泥：飛灰=100：25(重量比)之配比製成 25x25x285mm 水泥漿試體，連模置入濕櫃養治至少 20hr，脫模後試體繼續置入濕櫃養治至試驗時。

模製後 24hr±30min 由濕櫃取出試體，量測試體長度(L_0)。

將試體置入高壓蒸煮鍋，按規定程序加熱至壓力達 20.8kgf/cm^2(約 216℃)蒸煮 3hr。

減壓後取出試體，置入 90℃以上熱水中，加冷水降溫至 23℃維持 15min。

取出試體並拭乾表面，再量測試體長度(L_1)。

計算試體熱壓膨脹率(ε，%)：

$$\varepsilon(\%) = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100$$

CNS 3036 標準規定：F 及 C 類飛灰之高壓蒸煮膨脹率或收縮率應在 0.8%以下(ASTM C618 規定相同)。

(5)水泥砂漿之空氣含量試驗

依 CNS 10896 第 20.1.1 節規定配比，調成試驗試樣。

以二份試驗試樣分別加入不同量之中性 Vinsol 樹脂溶液(輸氣劑)，按 CNS 787 分別作業及依 CNS 10896 第 20.2 節規定計算其空

氣含量，再以內差法求空氣含量為 18%時之所需中性 Vinsol 樹脂溶液用量，以對水泥之重量百分比表示。

CNS 3036 任選規定：如為輸氣混凝土，F 及 C 類飛灰每個試樣之輸氣劑量與前十個試樣之平均值差異均應在 20%以下(ASTM C618 規定相同)，本項規定用於管制飛灰之均質性。

(6)與卜特蘭水泥攙和時之卜作嵐活性指數試驗

CNS 10896 與 ASTM C311 試驗程序部份不同，包括(1)拌和水量控制方法、(2)試驗試樣之飛灰取代水泥之比例、及(3)後期養治溫度，ASTM C311 溫度控制單一且過程較為方便。

ASTM C311 試驗程序

以水泥 500g、標準砂 1375g 及水 242mL 拌和，依 ASTM C109 之規定製成六個立方體為控制試樣。

以水泥 400g、飛灰 100g，標準砂 1375g 及適當水(控制使流度值為控制試樣之±5)拌和，亦依 ASTM C109 之規定製成立方體為試驗試樣。

註：ASTM C618 規定卜作嵐活性指數試驗可任選 7 日或 28 日之一項，故僅要測一種齡期強度時，兩種試樣各製三個試體即可。

將兩組試樣連模置於 23±1.7℃濕櫃養治 20~24hr，脫模後置入飽和石灰水中，依 ASTM C109 規定養治至規定齡期(7 日或 28 日)。

依 ASTM C109 規定測各試樣之抗壓強度。

計算卜作嵐活性指數(AI，%)：

$$AI(\%) = \frac{A}{B} \times 100$$

式中，A=試驗試樣之平均抗壓強度(kgf/cm^2)

B=控制試樣之平均抗壓強度(kgf/cm^2)

CNS 10896 試驗程序

以水泥、標準砂及適當之水量(X，mL)拌和，使其流度值達 100~115%，依 CNS 1010 之規定製成三個 50mm 立方體控制試樣。

將控制試樣配比之 35%水泥以相同體積之飛灰替代及適當之水量(Y，mL) 拌和，使其流度值達 100~115%，亦依 CNS 1010 製成三個 50mm 立方體試驗試樣。

將兩組試樣連模置於 23±1.7℃濕櫃養治 20~24hr，脫模後移入氣密容器，貯存於 38±1.7℃下 27 日。

取出試樣放冷至 23±1.7℃，依 CNS 1010 規定測各試樣之抗壓強度。
計算卜作嵐活性指數(*AI*，%)

$$AI(\%) = \frac{A}{B} \times 100 \quad \text{.....(式 9)}$$

式中，*A*=試驗試樣之平均抗壓強度(kgf/cm^2)
B=控制試樣之平均抗壓強度(kgf/cm^2)

CNS 3036 標準規定：F 及 C 類飛灰與水泥攙和之 28 日卜作嵐活性指數均應在 75%以上(ASTM C618 規定相同)。

(7)需水量試驗

本項試驗係以進行第 6 項試驗之拌和水量計算得之。

ASTM C311 試驗程序

以下式計算需水量控制百分率(*w*，%)

$$w(\%) = \frac{Y}{242} \times 100 \quad \text{.....(式 10)}$$

式中，*Y*=為使試驗試樣流度達控制試樣流度之±5 所需之拌和水量(mL)

CNS 10896 試驗程序

分別記錄第 6 項與卜特蘭水泥攙和時之卜作嵐活性指數試驗時，兩種試樣所需之拌和水量(*X*，*Y*)。
計算需水量控制百分率(*w*，%)

$$w(\%) = \frac{Y}{X} \times 100 \quad \text{.....(式 11)}$$

式中，*Y*=為使試驗試樣流度達 100~115%所需之拌和水量(mL)
X=為使控制試樣流度達 100~115%所需之拌和水量(mL)

CNS 3036 標準規定：F 及 C 類飛灰需水量控制百分率均應在 105%以下(ASTM C618 規定相同)。

(8)與石灰攪和時之卜作嵐活性指數試驗

按 CNS 10896 規定，將 1 份試藥級石灰(氫氧化鈣)、9 份標準砂及相當於 2 份石灰體積之飛灰及適當之用水量拌和，使流度值達 110±5%，模製成三個直徑 51mm 高度 102mm 之圓柱試樣，連模密封之。

將密封圓柱試樣在 23±1.7℃儲存 24±2hr，再於 55±1.7℃儲存 6 日。連模取出試樣，放冷至 23±1.7℃，小心拆模，蓋平試體，在濕潤狀況下測各試樣之抗壓強度(kgf/cm^2)，並計算其平均值。

CNS 3036 標準規定：F 及 C 類飛灰與石灰攪和時之卜作嵐活性指數均應在 56 kgf/cm^2 以上(ASTM C618 無此項要求，改為與卜特蘭水泥攪和時之 7 日卜作嵐活性指數，且 7 日或 28 日之任一項合格即可，本項試驗意義不大，建議免辦)。

(9)與水泥所含鹼分之反應性試驗

本項試驗在 CNS 10896 中僅簡單規定以 CNS 1236 測定(1)水泥砂漿試體膨脹性降低率及(2)水泥砂漿試體膨脹率，內容不完整，建議以 ASTM C311 規定辦理試驗。

ASTM C311 及 ASTM C618 係規定測飛灰試驗試樣對低鹼水泥控制試樣之膨脹值之百分率，程序如下：

以鹼含量低於 0.6%之水泥，依 ASTM C441 規定製成三個 25x25x285mm 之水泥砂漿柱體，作為控制試樣。

以鹼含量高於控制試樣之水泥、飛灰及矽酸硼(borosilicate)玻璃砂，依 ASTM C441 規定製成三個 25x25x285mm 之水泥砂漿柱體，作為試驗試樣。

兩組試樣均依 ASTM C441 規定濕養，並於齡期 1 及 14 日分別量測其長度，並計算膨脹率及其各組平均值(%)。

計算膨脹率比(ε_r，%)：

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_c} \times 100 \quad \text{.....(式 12)}$$

式中，ε_t=試驗試樣之平均膨脹率(%)。

ε_c=控制試樣之平均膨脹率(%)。

CNS 3036 任選規定：F 及 C 類飛灰水泥砂漿柱體之膨脹率均應在 0.020%以下(ASTM C618 規定測飛灰試驗試樣對低鹼水泥控制試樣之膨脹率比，F 及 C 類飛灰均應在 100%以下)。

7.3 快速試驗法

第 7.2 節介紹之各種標準試驗法，係供正式研判之依據，但其過程繁瑣，作業時間長，常不能滿足飛灰製造廠或飛灰使用者之品管迫切要求，因此廠商需要一些快速試驗法。本節介紹 ACI 226.3R 提供之十二種快速試驗法，可適當選取其中一種或數種結果作為飛灰品質之指標(其中有部份係以不同方法測同一特性，不必全作)，此結果可定期與標準試驗法之結果比對以資查核。各快速試驗法之詳細內容請查閱 ACI 226.3R 所引用之參考文獻。快速試驗法之試驗結果係供品管用途，若對飛灰品質有疑義，應以正式檢驗法為準。

(1) 燒失量試驗

燒失量之標準試驗法須先將樣品烘乾至恆重，若已知其含水量甚低，其快速試驗法為免除此烘乾作業，將坩鍋面加大，高溫爐預先加熱，使用冷卻器加速降溫，可在一小時內完成試驗，惟其燒失量值係包括含水量。

(2) 含碳量分析

飛灰之含碳量與燒失量有高度相關，可用快速 Leco 燃燒爐法測得總含碳量，據以推估燒失量。

(3) 殘留 0.045㎜ 篩材料處理

飛灰標準濕篩後之殘留材料需烘乾二小時以上，快速法可用電爐或較高溫度之烘箱縮短時間。

(4) 噴氣篩析(Air-jet sieving)

採用高壓空氣篩析設備取代濕篩，其留篩材料可直接秤重。

(5) 透細度

採用 ASTM C204[氣透法測水泥細度]可在十分鐘內測得飛灰之比表面積，此結果可用於偵測同一來源飛灰之細度變化，特別是顆粒分布中之較細部分。

(6) 顏色

將飛灰樣品與參考樣品並排置於一白色表面上，在日光或特定光源下比對，必要時可在飛灰樣品上覆蓋上一塊平面透明玻璃再作比對。飛灰顏色改變可視為飛灰性質有所變化，其亦可導致改變混凝土顏色，此在講究外觀之混凝土上很重要。混凝土業者可在每次飛灰到貨時取一小瓶樣品，依序存放數個月，將新到樣品與前數次者比對，可即時獲知變化之大概狀況。

(7) 密度

觀察飛灰浮於水面之數量變化，可快速研判其密度改變之大概狀況。

(8) 泡沫指數試驗(foam-index test)

將50mL水、4g飛灰、16g水泥及不同量之輸氣劑置入16oz(473mL)廣口瓶，加以強力震晃使產生泡沫，以試誤法找出泡沫正好覆蓋滿液面時所需之輸氣劑量，此輸氣劑量與採用同一料源飛灰及水泥之混凝土所需之輸氣劑量有高度相關。

(9) 有機材料

以重鉻酸鈉及硫酸測飛灰中之易氧化有機物或碳含量，其含量高者混凝土需要較高之化學摻料用量及含氣量損失亦較大。

(10) CaO含量

將飛灰與適當之化學溶液起作用，予以加熱蒸發，以自動化儀器可在15min內測得CaO含量。

(11) 碳化氫

將飛灰與自來水拌和，注意觀察水面是否有黑色薄膜。飛灰之碳化氫(hydrocarbons)來自燃煤機之起動油(start-up oil)。

(12) 阿摩尼亞

將 20~50g 飛灰加入含水泥或其它鹼性材料之自來水中，將瓶子蓋住並加以拌和，打開蓋子聞聞看有無阿摩尼亞之氣味。飛灰之阿摩尼亞來自沉澱添加劑(precipitator additive)。

參考文獻

7.1 行政院公共工程委員會，82，”公共工程品質管理制度”

7.2 行政院公共工程委員會，87，”公共工程施工品質管理作業要點”

7.3 CNS 487，”細粒料比重及吸水性之試驗法”

7.4 CNS 787，”水硬性水泥墁料之空氣含量檢驗法”

7.5 CNS 1010，”水硬性水泥墁料抗壓強度檢驗法”

7.6 CNS 1078，”卜特蘭水泥化學成分分析”

7.7 CNS 1236，”水泥砂漿及混凝土的體積變化檢驗法”

7.8 CNS 1258，”卜特蘭水泥熱壓膨脹之檢驗法”

7.9 CNS 3036，”卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然或蝦燒卜作嵐攙和物”

7.10 CNS 3090，”預拌混凝土”

7.11 CNS 9208，”混凝土用輸氣附加劑檢驗法”

7.12 CNS 9747，” 卜特蘭水泥細度檢驗法(濁度計法)”

7.13 CNS 10896，” 卜特蘭水泥混凝土用飛灰及天然卜作嵐攙和物檢驗法”

7.14 CNS 11272，” 水硬性水泥密度試驗法”

7.15 ASTM C188，” Standard Test Methods for Density of Hydraulic Cement”

7.16 ASTM C430，” Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-μm(No.325)Sieve)”

7.17 ASTM C441，” Standard Test Methods for Effectiveness of Mineral Admixtures or Ground Blast-Furnace Slag in Preventing Excessive Expansion of Concrete Due to the Alkali-Silica Reaction”

7.18 ASTM C311，” Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete”

7.19 ASTM C618，” Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete”

7.20 ACI 226.3R，” Use of Fly Ash in Concrete”

（陳式毅撰稿）