

如何作12,000psi 飛灰混凝土的配比設計 (上)

作者/林炳炎

在我完成「飛灰・矽灰・高爐爐石用在混凝土中」一書後，即有意退出混凝土論述圈，1994年12月將近二十年集所收集有關混凝土的書籍、文獻共六大箱全部捐給在台中的啓欣公司後，退隱之心更加明確。最近去看了台灣有史以來最高強度12,000psi混凝土後，那種在經濟略有發展，而想創造最大最強的企圖心表現無遺，當然資本霸權與學術霸權互相勾結，終於演出最難看的劇目，這種將別人視同學術無知的惡劣行徑，我會在正進行研究中的《紅毛土在台灣》(紅毛土為台語，意為水泥)記上一筆。其實「飛灰・矽灰・高爐爐石用在混凝土中」其主要意義即站在資源有限、生態要保護的觀點之混凝土，有人稱為ECONOCRETE，但因這類材料所具有特性，高強度混凝土皆會使用這些材

料，以改善高強度混凝土所須面對高水泥量所帶來難以克服的困難，這些材料都能減低水化熱的早期發作所帶來熱效應。本文是為了說明高強度混凝土不需要使用非常昂貴的材料，在技術上與經濟上而能合理的達到要求。

ACI 211委員會是負責草擬與修改混凝土配比設計法的委員會，而 ACI 211.1是常重，重及巨積混凝土的配比設計標準，它所應付的是普通強度的混凝土，其強度範圍是 $140 \sim 420 \text{kgf/cm}^2$ ($2000 \sim 6000 \text{psi}$)，對高強度混凝土的配比設計要求是遠比普通混凝土來得嚴格。通常，主要考慮是使用特別選定波索蘭材料及化學附加劑，而達到低水膠比(low water-to-cementitious ratio) $\omega/c+p$ 。常須要很多試拌以產生數據以決定最佳的配比。本文即想透

過試拌提供選擇包含 $840\text{kgf}/\text{c m}^2$
($12,000\text{psi}$)之高強度混凝土之最佳配
比。

在此處所謂高強度混凝土是使用傳統材料之製造方法所生產出來，有很多人馬上會想到矽灰(silica fume)及研磨高爐爐石粉(ground granulated fast furnace slag ; GGBFS)，這二種材料是不包括在內。有關矽灰混凝土的配比設計資料仍然非常有限，其主要原因是有些是與專利有關。ACI 234是矽灰混凝土委員會，負責發展使用矽灰的資訊。GGBFS混凝土的配比設計在ACI 226-IR(現在是ACI 233委員會)討論。如果能得到額外資料，ACI會發展出包括這些材料混凝土的配比設計方法。目前，矽灰和高爐爐石(GGBFS)的供應商提供了含這些材料配比設計方法。

高強度混凝土定義為混凝土的指定抗壓強度 f'_c 是高於 420kgf/cm^2 (6000psi)，本文試圖涵蓋現場強度高達 840kgf/cm^2 ($12,000\text{psi}$)。本文是基於從承包商、混凝土供應商、工程師三方面從事於此類高強度混凝土目前所能得到實務及資料。如果想對這些資料作更深的回顧的話，請參閱「飛灰・矽灰・高爐石在混凝土中」及 ACI 363。

1、所需求求

A. 試驗齡期

配比的選擇會受到試驗齡期的影響。高強度混凝土會在通常指定齡

期28天後得到可觀的強度。為了利用這個性質，許多施工說明書修正以往典型的28天準則成為56天，91天或更晚（如Malhotra以120天為齡期）。膠結材料的配比通常必須調整以產出在所選定試驗齡期得到想要的強度。

B. 所要強度

上面二個式子基本上是由ACI 318來的，式(1)完全相同，式(2)是由 $f'c_r = f'_c + 2.33s - 500\text{psi}$ 所修正而來。目前大家所能接受的是：高強度混凝土強度低於 $0.9f'_c$ 的個別強度試驗不大於 $1/100$ ，這是式(2)之理論來由。如果施工說明書指明要符合ACI

318準則，則請恢復修正前之式子。在這裏另外要指出的是，基本上，高強度混凝土一般預拌混凝土廠是很少會有經驗，因此要計算出上面兩式子的抽樣標準偏差S，在實務上是不可能的，特別是在台灣，對普通3000psi混凝土可能都不易找到合格可用的抽樣標準偏差S，更何況高強度混凝土。

ACI 318對缺乏統計資料以計算 f'_{cr} 時，它有一規定是：當 $f'c < 3000\text{psi}$ 時， $f'_{cr} = f'c + 1000\text{psi}$ 或 $f'_{cr} = f'c + 70\text{kgf/cm}^2$ 。當 $3000 \leq f'c \leq 5000\text{psi}$ 時， $f'_{cr} = f'c + 1200\text{psi}$ 或 $f'_{cr} = f'c + 84\text{kgf/cm}^2$ 。當 $f'c > 5000\text{psi}$ 時， $f'_{cr} = f'c + 1400\text{psi}$ 或 $f'_{cr} = f'c + 98\text{kgf/cm}^2$ 。這樣簡單的要求讓我們有所遵循。但在美國，若 $f'c > 5000\text{psi}$ 之高強度混凝土，習慣上採取 $f'_{cr} = f'c + 1500\text{psi}$ 或 $f'_{cr} = f'c + 105\text{kgf/cm}^2$ ，亦可提供較保守的看法。

在ACI 211.4R提供另一種想法，當混凝土生產廠商在選擇高強度混凝土配比是基於實驗室試拌時，它建議所需平均抗壓強度 f'_{cr} 可由下式來決定：

$$f'_{cr} = \frac{(f'c + 1400)}{0.9} \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(3)的想法很明顯是從ACI 318中沒有統計資料中來的，它比ACI 318所計算者大11.11%。根據美國高強度混凝土的經驗顯示，在理想的現場情況的

試驗結果，所得強度僅為在實驗室所得者的90%。因此，假定現場生產混凝土的平均強度會等於實驗室試拌結果是不切實際的，這是由於在現場有很多因素會影響所測量強度及強度的變動性。初次在現場使用高強度混凝土拌合物往往須要對空氣含量及產量(yield)作一些調整，以符合上面所列的適當的要求。若從現場實務獲得充分資料，拌合物的配比須要依ACI 214作再評估並作對應的調整。

C.其它要求

除了抗壓強度會影響材料及拌合物配比的選擇外，尚需考慮下列這些要求：a. 彈性模數b. 抗撓及抗張強度c. 水化熱d. 潛變和乾縮e. 耐久性f. 透水性g. 凝結時間h. 澆置的方法及i. 工作度。

2、基本關係

A.材料的選擇

高強度混凝土的有效產製是由小心的選擇、控制及所有成分的配比設計才能達成。為了達到高強度混凝土，必須選擇最適配比，要考量水泥和飛灰的性質，骨材的品質，水泥漿的比例，骨材水泥漿的交互作用，附加劑的TYPE和使用劑量，以及拌合。從各種可能料源以各種變動的比例來評估水泥、飛灰、化學附加劑及骨材，才能找出最佳的材料組合。高強度混凝土的供應商必須對所有用來生

產高強度混凝土材料進行材料的均勻度和驗收試驗的品質控制計畫，才能確保所有產製的混凝土是符合要求的高強度混凝土。

a. 波特蘭水泥

適當選用水泥的type(型)和料源是生產高強度混凝土最重要的一步。ASTM C917可用來考量水泥料源。水泥的化學成分和物理性質的變動會影響混凝土的抗壓強度遠比其它單一材料的變動來得厲害。對任何已知的材料組合，會有最佳的水泥用量，而超出此水泥用量，增加水泥用量會得到強度沒有或很少增加的現象。

b. 其它膠結材料(cementitious materials)

研細的膠結材料除了波特蘭水泥外，尚包括飛灰、研磨高爐爐石粉或矽灰(microsilica)被考慮用來生產高強度混凝土，這是由於高強度混凝土須要很高的膠結材料量及低水膠比 $\omega/c+p$ 。這些材料能幫助控制早期混凝土溫度升高，以及在已知工作度這些材料會減少需水量。但是早期混凝土強度成長會因此而略降。

ASTM C618規範了用在混凝土中之F類飛灰和C類飛灰以及未煅燒天然波索蘭N類的化學成分和物理性質的要求。飛灰的性質會因不同地區及來自相同地區而來自不同煤源

而有很大變動。用在高強度混凝土的飛灰最好其燒失量不大於3%，有高細度，而料源是來自均勻度能符合ASTM C618的要求。

c. 拌合用水

用於高強度混凝土的拌合用水並沒有特別考究，只要是飲用水即可，否則須試驗看是否符合ASTM C94的要求。

d. 粗骨材

在作高強度混凝土的配比設計時，骨材因素要特別加以考慮，因為它們佔有混凝土任何成分中佔最大體積，因而對混凝土的強度和其它性質有很大的影響力。通常，高強度混凝土用常重骨材來生產。但是也有文獻報導高強度混凝土使用輕質骨材生產結構混凝土，用重質骨材(heavy wight aggregates)以生產高密度混凝土。

粗骨材會明顯的影響混凝土的強度和結構性質。為了此理由，粗骨材要選擇充分硬、沒有裂紋(fissure)或弱平面、清潔及沒有表面污染(surface coating)。粗骨材也影響骨材水泥砂漿間的黏結性質及所要拌合用水量。較小尺寸的骨材已證明會有較高強度的潛力。

對每一混凝土強度水準，有一最佳粗骨材尺寸會使每公斤水泥產生最大抗壓強度。25.4mm或19.1mm標稱最大尺寸骨材通常用在生產混

凝土強度小於 630kgf/cm^2 (9000psi)者，而 12.7mm 或 9.53mm 用來生產大於 630kgf/cm^2 (9000psi)混凝土。通常，對已知水膠比 $\omega/c+p$ ，較小尺寸骨材產生較高強度。但是，在拌合物使用化學附加劑之配比，使用 25.4mm 標稱最大尺寸骨材可能生產抗壓強度超過 700kgf/cm^2 (10,000psi)。如果使混凝土的彈性模數、潛變及乾縮的最佳化是重要的話，那麼選擇使用最大可能粗骨材是重要的考慮。

e. 細骨材

細骨材的級配和顆粒形狀在生產高強度混凝土是重要的因素。顆粒形狀和表面質地會如同粗骨材一樣對混凝土的所需要拌合用水和抗壓強度有很大的影響力。細骨材有相同的級配但孔隙含量差1%時，則所需拌合用水量差是 2.23kg/m^3 。更多資料請查閱ACI 211.1。

當粗骨材對細材料的相對體積增加，則混凝土拌合物單位體積所需的水泥漿量會減少。這是由於高強度混凝土的膠結材料量相當大，則細料的體積傾向於較大量。因此，砂的體積能保持最小需要量達到工作度和可夯實度(compactibility)。如此，在已知膠結材料量下，將可能產生較高強度混凝土。

細骨材的細度模數在2.5至3.2

之間適用於高強度混凝土。混凝土拌合物使用細骨材的細度模數小於2.5會使拌合物產生黏稠(sticky，高強度混凝土很容易遇到的一種困境)而使工作度很差且需要較高的需水量。有時可能使用從不同砂料源之混合砂來改善級配及增進它們產生較高強度的能力。如果使用軋製砂，要考慮到為了工作度而增加拌合用水。軋製砂與天然砂比較，軋製砂的顆粒形狀及增加表面積會明顯的影響拌合用水量。

f. 化學附加劑

在生產混凝土時，比較喜歡用降低拌合用水量來降低水膠比 $\omega/c+p$ 而不是用增加總膠結材料量，降低水膠比通常會產生較高強度。為了這理由，生產高強度混凝土要考慮使用化學附加劑，有關這方面請參閱拙著「飛灰・矽灰・高爐爐石用在混凝土中」第十一章，或參閱ACI 212.3R及ASTM C494。在本文使用每 100kg 的總膠結材量要用多少公斤液體附加劑的劑量來表示。如果使用粉狀附加劑，使用劑量是用乾重來表示。使用化學附加劑會改進及控制硬化及坍度損失速率，而造成增加強度成長，較佳耐久性及改進工作度。

高性能減水附加劑(HRWR)也稱為強塑劑(superplasticizer)，在混凝土拌合物含有很多水泥及其它

膠結材料時最有效。強塑劑協助分散水泥顆粒，而它能減少所需拌合用水達30%，因此增加混凝土的抗壓強度。

通常，高強度混凝土會使用傳統減水或減水緩凝附加劑及強塑劑二者。附加劑的使用劑量通常依不同的製造廠商而有不同的建議使用量。雖然僅有有限的資料，高強度混凝土也能用高劑量的常凝減水附加劑及速凝劑的合併使用而達到。附加劑的性能會受到所使用的特殊膠結材料的影響。附加劑或混合附加劑的最佳劑量要由不同劑量的附加劑在試拌時比較來決定。最佳結果通常是水泥已在拌合鼓中拌合，水泥已溼了後之拌合中加入高性能減水劑。

輸氣附加劑很少使用在建築物的高強度混凝土，特別是沒有凍融問題。如果由於環境惡劣而需要輸氣，要知道這樣會明顯的降低混凝土的抗壓強度。

B. 水對膠結材料的比率($\omega/c+p$)

許多研究者已得到結論，達到高強度混凝土的單一最重要變數是水灰比(ω/c)。但是大部份高強度混凝土拌合物含有其它膠結材料，水對膠結材料的比率 $\omega/c+p$ 必須考慮用來取代傳統 ω/c 。水膠比 $\omega/c+p$ 像水灰比 ω/c 要用重量來計算。強塑劑中所含的水量要包括在 $\omega/c+p$ 之算式中。

水灰比與抗壓強度之間的關係，在一般強度混凝土中已被廣為接受，而且也發現在較高強度混凝土這關係仍然有效。化學附加劑和其它膠結材料的使用，已證實要生產可澆置混凝土是低水灰比。高強度混凝土的水膠比 $\omega/c+p$ 一般在0.2至0.5之間。

C. 工作度

所謂工作度是新拌混凝土擁有適當拌和、澆置、搗實及粉刷而不會有骨材分離的性質，這種性質能很簡單的測量出來，在傳統混凝土是使用坍度來衡量，而高強度混凝土也接受這種試驗方法。一般而言，高強度混凝土要在最低的坍度下澆置，在現場要能適當處理及搗實。坍度5公分至10公分能提供在所有大部份使用所需的坍度。但是，鋼筋的間距和模板的細部情形在發展混凝土配比前要加以考慮，坍度太小是否會造成澆置及搗實困難。

由於粗骨材與膠結材料二者之含量高且低水膠比 $\omega/c+p$ ，高強度混凝土可能難以澆置。但是高強度混凝土在含有HRWR強塑劑下有很高坍度不會有骨材分離的問題且能夠澆置。含有HRWR強塑劑的流動混凝土坍度超過20公分(8")是能很有效在很密的鋼筋間距下填充孔隙。在輸送這樣混凝土的情況下，坍度損失會是問題，可澆置坍度能夠用再加強塑劑的方式來恢復坍度。第二次加強塑劑所造成的結果

是在所有齡期的強度試驗其強度幾乎都增加了。這種實務上的好處特別在使用強塑劑於熱天候混凝土澆置更值得重視。

D. 強度測量

試驗方法一要根據ASTM或CNS的試驗方法，除非如ACI 363R針對高強度混凝土性能而有所修正。對於已知配比材料的混凝土其可能強度，只能在標準情況下製造試體並加以壓驗才能建立其強度關係。對於每一試驗齡期及試驗情況下，最少需2只試體才能用來建立這種強度關係，建築技術規則的要求是3只。

試體尺寸——一般 15×30 公分($6 \times 12"$)圓柱試體被指定為標準試體，以用來評估高強度混凝土的強度。但是，有時 10×20 公分($4 \times 8"$)圓柱試體也被用來作為強度衡量。由混凝土生產廠商所使用試體尺寸以決定混凝土配比者要與試驗機的負載能量相符，也要與設計者所指定作為驗收用之試體尺寸相一致，否則不同尺寸試體強度代表不同意義，很難有公認的轉換關係。使用 15×30 公分($6 \times 12"$)圓柱體的強度是不能轉換成 10×20 公分($4 \times 8"$)圓柱體強度。

試體模的型式一所使用的試體模型式會明顯的影響抗壓強度的衡量。通常使用鐵模遠比使用塑膠模所得的抗壓強度有更一致的結果。對於高強度混凝土建議不要使用紙板所製的

模。使用一次的硬塑膠模曾在高強度混凝土計畫中成功的使用。但不管使用什麼材料作模，其要點是在配比設計所使用的試體模要與將來工程施工時作為驗收強度用的模的材料要一樣才可以。

試體蓋平——在試體試驗前，試體的兩端通常要蓋平，以使試驗機平鉗的力量能均勻穿透試體。硫礦砂漿是最常作為蓋平的材料，如果適當的準備，它是經濟方便的材料，能在短時間內發展出相對高的強度。

對高強度混凝土試體而言，實務上要求蓋平厚度越薄越好，其範圍 $1.6 \sim 3.2$ mm之間。在美國市場上可買到高強度硫礦蓋平材料，用以決定混凝土強度超過 700kgf/cm^2 ，且蓋平厚度維持在大約 3.2 mm。當使用硫礦蓋平材料於高強度混凝土試體，在蓋平之前應先修整試體兩端的不規則情況。試體端部不規則情況及蓋平材料與試體端部表面的氣隙會對衡量抗壓強度有負面影響。當混凝土抗壓強度超過 700kgf/cm^2 ，某些混凝土專家偏好於修正或磨平試體端部，以符合ASTM C39的容許差的要求。

試驗機器——試驗機器的特性，主要是荷重能力及剛度(stiffness)，能明顯的影響所測量強度的結果。當測量高強度混凝土圓柱體時用的試驗機器，其最小側向剛度是 1051b/in ，而縱向剛度最小為 1071b/in ，能得到

好的試驗結果及最小的強度變動。試驗機器的側向撓曲會減少所試驗試體的抗壓強度。

3、高強度混凝土的配比設計

本文企圖說明使用常重骨材不輸氣而能配比出混凝土強度在 $420\sim 840\text{kgf}/\text{cm}^2$ ($6000\sim 12000\text{psi}$)之高強度混凝土。當配比高強度混凝土的拌合物時，其基本考慮仍然是在最低成本下決定所有成分所需數量以使所生產混凝土有所要塑性性質(工作度、粉刷性等)及硬化性質(強度、耐久性等)。對所有使用材料需要適當加以配比。由於高強度混凝土的性能與個別成分的性質有高度相關，本配比方法意謂著基於實驗室調整和現場試拌而得到生產配比比例會是合理的步驟。配比的調整的指引會在後面提出來討論。本法進一步假定使用在試拌的材

料的性質及特性足夠達到所要混凝土抗壓強度。為了生產高強度混凝土之材料選擇指引請詳ACI 363R。

在開始配比高強度混凝土之前應先回顧此計畫的施工說明書。本回顧要建立指定強度、強度所要達到之齡期、其它試驗接受準則等設計準則。

對於高強度混凝土的設計方法是類似於在ACI 211.1所描述的普通強度混凝土配比設計。其方法包含一系列的步驟，在完成這一系列步驟後，所提供的配比能基於個別選擇材料和配比成分的混合性質，而符合所要強度和工作度。但是，在發展高強度混凝土拌合物，基於一系列試拌，從不同比例和膠結材料含量之嘗試中可以得到最佳配比。

…未完待續…

建築帷幕牆工程標準規範
台北市建築單行法規集成

詹 氏 \$400
詹 氏 \$700

現代營建雜誌社

電話/(02)551-8906 傳真/(02)571-9333

劃撥帳號/01510899 地址/台北市長安東路一段46號5樓

如何作12,000psi 飛灰混凝土的配比設計 (中)

作者/林炳炎

<接上期>

A. 配比設計步驟

完成下列的步驟，將會得到一組經調整的高強度混凝土實驗室試拌配比。這些配比提供往後在現場試驗拌合的基礎，從這些試驗將可能選擇到最佳配比。

步驟1—選擇坍度和所需混凝土強度

混凝土坍度的建議數值如表一。高強度混凝土含強塑劑者，雖然沒有可測量的初期坍度，但卻能成功的生產和澆置，還是建議在加入強塑劑前的初期坍度是25~50mm(1~2吋)。這樣會保證有足夠的水來供拌合及讓強塑劑能有效的運作。對高強度混凝土不含強塑劑者，建議的坍度是50~100mm(2~4吋)，可依照工作的性質而選擇。最低坍度50mm(2")的建議值是給不含強塑劑的混凝土。混凝土坍度小

於50mm是很難於搗實，這是由於粗骨材和膠結材料量很高的原故。所需要混凝土強度(f'_{cr})如何決定在前面已有說明。

表一 含與不含強塑劑之混凝土之建議坍度

含強塑劑者在加入強塑劑前之坍度*	25~50mm
不含強塑劑者之坍度	50~100mm

*透過添加強塑劑在現場調整坍度以符合施工要求。

步驟2—最大骨材尺寸的選擇

基於強度的要求，粗骨材的最大尺寸建議值詳表二。而建築技術規則或ACI 318所規定粗骨材最大尺寸不得超過最窄模板間距的1/5，樓版深度的1/3，也不得超過個別鋼筋淨間距的3/4。此處的鋼筋包括鋼筋束，預力鋼

線或鋼線導管。

表二 建議粗骨材的最大尺寸

所需混凝土強度 kgf/cm ²	粗骨材建議最大尺寸 mm
<630	19.1~25.4
>630	9.53~12.7*

*當使用強塑劑及選擇的粗骨材，混凝土的抗壓強度範圍在630~840kgf/cm²，能使用建議最大粗骨材尺寸到25.4mm者。

步驟3—選擇最佳粗骨材含量

粗骨材的最佳含量端視粗骨材的強度潛能的性質及最大尺寸而定。表三是最佳粗骨材的建議含量，是以乾搗單位重來表示粗骨材含量，表三可以看出來是最佳含量是標稱最大粒徑的函數。由於表三是由單位體積的乾搗重所算出，因此每單位體積的重量是由下式算出：

表三 單位體積混凝土之建議粗骨材體積

標稱最大粒徑mm	9.53	12.7	19.1	25.4
乾搗粗骨材所佔的 部份體積	0.65	0.68	0.72	0.75

*所使用細骨材的細度模數FM是2.5~3.2。

*此處的體積是依照ASTM C29所描述的乾搗單位重之體積。

粗骨材的烘乾重=表上數字×乾搗單位重

在配比普通強度混凝土拌合物時，粗骨材的最佳含量是最大粒徑和

細骨材的細度模數的函數。但是，高強度混凝土拌合物有高的膠結材料量，因此不是如此與細骨材的細料有關以作為潤滑及夯實用。因此表三建議所使用的砂的細度模數值在2.5至3.2之間。但若膠結量太高，砂的細度模數要越高越好以改善Sticky情形。

步驟4—估計拌合用水量及含氣量

表四 新拌混凝土估計所需拌合用水及空氣含量kg/m³

坍度 mm	粗骨材最大粒徑mm			
	9.53	12.7	19.1	25.4
25~50	183	174	168	165
50~75	189	183	174	171
75~100	195	189	180	177
偏限空氣量%	3 (2.5)	2.5 (2.0)	2 (1.5)	1.5 (1.0)

註1：本表細骨材的空隙量35%，不是者應調整。

2：空氣偏限量括弧內數字是使用強塑劑者。

單位體積混凝土所需水量以得到所要坍度是依骨材的最大粒徑、顆粒形狀及級配，水泥的數量及所使用減水附加劑的形式等而定。如果使用強塑劑，則強塑劑中的水分要計算在水膠比ω/c+p中。表四是在外加任何化學附加劑前，使用9.53~25.4mm最大粒徑骨材的高強度混凝土所需拌合用水量。也指出其相對偏限的空氣含量數值。這些拌合用水是對合理良好形

狀、清潔、角狀粗骨材，良好級配等符合ASTM C33之最大粒徑者。由於細骨材的顆粒形狀和表面形狀能明顯影響其孔隙，所以拌合用水可能會與表所給的數值有很大的差異。

表四是當使用細骨材的孔隙量35%時的拌合用水量。細骨材的孔隙含量可用下式來計算：(下式用公制單位)

$$\text{孔隙含量V\%} = 100 - \frac{\text{乾摗單位重}}{\text{體密度}} \times 100$$

當所使的細骨材的孔隙含量不等於35%時，建議拌合用水量用下式調整：

$$\begin{aligned} \text{所調整拌合用水量kg/m}^3 &= (V-35) \\ &\times 4.72 \end{aligned}$$

此式子說明孔隙含量每偏差於35%達±1%則要調整拌合用水±4.72kg/m³。

步驟5—選擇水膠比ω/c+p

在高強度混凝土拌合物中，芝加哥高樓建築委員會很早就建議使用飛灰，因此其它膠結材料如飛灰、矽灰、高爐爐石會被使用，本文只討論飛灰，至於另二項材料請詳《飛灰·矽灰·高爐爐石用在混凝土中》有特別詳細介紹。所以所謂水膠比ω/c+p是拌合用水量除以水泥和飛灰合併的重量。

在表五與表六中可以看到，為了在不同齡期28天或56天達到不同的抗壓強度，所建議的最大水膠比ω/c+p

是骨材最大粒徑的函數。使強塑劑通常增加混凝土的抗壓強度。表五是混凝土不使用強塑劑的水膠比ω/c+p，而表六是混凝土使用強塑劑的水膠比ω/c+p。

表五 不含強塑劑混凝土，建議最大水膠比ω/c+p

f' cr , kg/cm ²	現場強度				粗骨材最大粒徑mm
	9.53	12.7	19.1	25.4	
490	28天	0.42	0.41	0.40	0.39
	56天	0.46	0.45	0.44	0.43
560	28天	0.35	0.34	0.33	0.33
	56天	0.38	0.37	0.36	0.35
630	28天	0.30	0.29	0.29	0.28
	56天	0.33	0.32	0.31	0.30
700	28天	0.26	0.26	0.25	0.25
	56天	0.29	0.28	0.27	0.26

$$f' cr = f' c + 98 \text{kgf/cm}^2$$

表六 含強塑劑混凝土，建議最大水膠比ω/c+p

f' cr , kg/cm ²	現場強度				粗骨材最大粒徑mm
	9.53	12.7	19.1	25.4	
490	28天	0.50	0.48	0.45	0.43
	56天	0.55	0.52	0.48	0.46
560	28天	0.44	0.42	0.40	0.38
	56天	0.48	0.45	0.42	0.40
630	28天	0.38	0.36	0.35	0.34
	56天	0.42	0.39	0.37	0.36
700	28天	0.33	0.32	0.31	0.30
	56天	0.37	0.35	0.33	0.32
770	28天	0.30	0.29	0.27	0.27
	56天	0.33	0.31	0.29	0.29
840	28天	0.27	0.26	0.25	0.25
	56天	0.30	0.28	0.27	0.26

$$f' cr = f' c + 98 \text{kgf/cm}^2$$

註：如果比較表五與表六，可得到下列結：

1. 在一已知水膠比下，含強塑劑混凝土的現場強度比不含者大，且在較短齡期達到。
2. 使用強塑劑，在已知現場強度及齡期下，可以比不含強塑劑用較少膠結材料來達到

通常水膠比 $\omega / (c+p)$ 是受到抗壓強度的限制，但它更受到耐久性要求而進一步受到限制。舉例來說， $f' c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ ，所需要的水膠比 $\omega / (c+p)$ 大於 0.6，但有耐久性之要求時，通常依 ACI 318 的要求，水膠比要小於 0.45 甚或小於 0.40。但高強度混凝土的水膠比通常會滿足耐久性要求。何況，在典型的使用中，高強度混凝土不會去面對極嚴厲的暴露狀況。當使用這些表而計算出膠結材料量超過 590 kg/m^3 ，更實際的拌合物是使用替代膠結材料或配比設計方法。

步驟6—計算膠結材料量

每 m^3 所需膠結材料量可以用前面所選用拌合用水除以水膠比 $\omega / (c+p)$ 而得到。但是為了達到施工說明書對每 m^3 混凝土的最低水泥量之限制，因此，拌合物要用較高量的膠結材料來配比。當從表上數字算出膠結材料量超過 590 kg/m^3 ，要用替代膠結材料或配比設計方法來得到更實際的拌合物，希望讀者要好好思考這過程，本文不會對此作進一步的探討。

步驟7—配比出不含其它膠結材料的基本配比

為了配比出最佳配比，配比設計者要準備一些含不同飛灰量的試配比。通常，一個試配比要用波特蘭水泥作為唯一膠結材料。要遵循下列步驟來完成基本配比的配比設計：

(A) 水泥含量。

由於僅使用波特蘭水泥作為唯一膠結材料而無其它膠結材料，這個拌合物的水泥量是等於步驟6所算出膠結材料量。

(B) 砂含量。

在決定每 m^3 的混凝土的粗骨材、水及水泥重量以及所侶限含氣量，依照 ACI 211.1 的絕對體積法，能很快算出砂的重量。

步驟8—配比使用飛灰的對照配比

在生產高強度混凝土中使用飛灰，其結果是降低需水量、降低混凝土溫度及降低成本。但是，由於飛灰的化學性質變動，會影響混凝土的強度成長的特性。

為了要完成每一對照配比，要遵循下列步驟：

(A) 飛灰的類別。

由於飛灰的不同化學成份、減水及強度成長特性等依使用飛灰的類別和料源而變動，通常飛灰是分為 F 類及 C 類，最近有不少學者建議依 CaO 含量來分類飛灰，或者依其波特蘭反應能力來分類，但看目前的 ASTM 似乎還沒有修改規範的傾向。因此，在使用飛灰時，要考慮這些性質。目前在台灣使用的飛灰都是 CaO 含量低的 F 類飛灰， CaO 含量少有超過 10%。

(B) 飛灰的含量。

多少量的水泥將被飛灰所取代，端視所使用材料類別而定。表七是常見二類飛

灰取代波特蘭水泥之建議的取代比例。對於每一對照配比，要從這表選擇取代比例。這是典型ACI委員會保守的取代比例，其實是違背歷史實務。1910年代，在台灣的基隆港築港所使用日本唐津火山灰，其取代水泥的比例即高達30%。在1980年代末期，Malhotra在加拿大努力推展 180kg/m^3 波特蘭水泥加 220kg/m^3 F類飛灰用在生產接近 700kgf/cm^2 之高強度混凝土，其F類飛灰取代比例高達55%，這二事例皆可顯示ACI之保守，值得讀者注意，可參閱上述拙作。

表七 飛灰用來取代波特蘭水泥之建議比例

飛灰	建議取代百分比(重量)
F類	15~25
C類	20~35

(C)飛灰重量。

當飛灰取代波特蘭水泥的比例一經決定，我們即很容易算得飛灰重量，把前面步驟7所算得水泥重量（不使用其它膠結材料）乘以所選定飛灰取代水泥比例即得所用飛灰重量，而將所有膠結材料量減掉飛灰重量，剩下來的就是對照試拌配比所使用水泥用量。因此，每一配比，飛灰重量加上水泥重量要等於步驟6所算出的膠結材料量。

(D)飛灰的體積。

由於波特蘭水泥和飛灰的比重差異，因此每 m^3 混凝土的膠結材料

的體積會依飛灰含量而變動，甚至於膠結材料總量維持固定，會因比重的變動而產生膠結材料所佔體積明顯變動。因此，每一拌合物，要計算膠結材料的體積，是由水泥的體積加上飛灰的體積。

(E)砂的含量。

計算每 m^3 混凝土的膠結材料的體積，粗骨材的體積，水及侷限空氣的體積後，依照絕對體積法，就能算出每一配比砂的含量。

使用前述步驟，每 m^3 混凝土的水泥加飛灰加砂的總體積要保持不變。由於需水的改變及飛灰對混凝土性質影響，會需要進一步去調整配比，這種調整會在試拌合時決定，在後面會加以討論。

步驟9—試拌

從步驟1至8所得的每一試拌配比，一試拌要經過試拌合以決定其工作度和強度特性。要根據骨材含水情況調整修正砂、粗骨材和水的重量。每一拌合要經過澈底拌合，其量要能有均勻拌合物以製造供壓驗強度所需試體數。

步驟10—調整試拌配比

如果混凝土所要性質沒有達到，原來試拌配比要依照下述來調整以生產所要工作度。

(A)初坍度。

如果試拌的初坍度沒有在所要範圍內，拌合用水要加以調整。膠

結材料量要跟著調整才能維持所要的水膠比 $\omega/c+p$ 。而砂量要調整以使混凝土的產量能剛好是 1m^3 。

(B)強塑劑的劑量。

如果使用強塑劑，要試用不同的劑量對混凝土拌合物的工作度和強度的影響。由於高強度混凝土的本性，比製造廠商所建議更高的附加劑劑量會是能容許的不會有粒料分離。而且，由於強塑劑添加時機和混凝土的溫度都會影響附加劑的效率，在試驗室試拌所用的附加劑可能要針對現場情況加以調整。一般而言，已經發現再添加強塑劑以恢復坍度，其結果是在所有齡期混凝土強度皆增加。

(C)粗骨材含量。

當混凝土試拌配比已經調整至所要坍度，要決定此試拌在澆置或粉刷要求下是否太粗糙？如果需要減少粗骨材量，而砂的含量要跟著調整，以確保產量不變。但是，如此可能會使拌合物增加用水量，而會增加膠結材料含量來維持水膠比

$\omega/c+p$ 。除外，減少粗骨材含量會造成降低硬固混凝土的彈性模數。

(D)空氣含量。

如果測量空氣含量與設計配比所計算的有明顯的差異，強塑劑的劑量要減少或者砂的含量要調整以維持產量。

(E)水膠比 $\omega/c+p$ 。

如果依照表五或表六所建議的水膠比，沒有達到所要混凝土抗壓強度的話，要對較低水膠比試拌進行試驗。如果這樣還是無法達到增加抗壓強度，材料是否適當要進行檢討。

步驟11—選擇最佳拌合比例

當試拌配比已調整到產生所要工作度和強度性質，要在預期現場情況製作抗壓強度試體，並依照 ACI 211.1 所建議的方法進行和調整試拌和。實際的生產和品質管制，要用實際工作所用設備及人員從事生產規模的試拌才能是較佳評估。強度試驗結果要基於強度要求和成本來選擇本計畫可接受的配比。

…未完待續…

地下工程實務(八)即將出版
詳情請看P.5上

如何作12,000psi 飛灰混凝土的配比設計

(中)

作者/林炳炎

<接上期>

A. 配比設計步驟

完成下列的步驟，將會得到一組經調整的高強度混凝土實驗室試拌配比。這些配比提供往後在現場試驗拌合的基礎，從這些試驗將可能選擇到最佳配比。

步驟1—選擇坍度和所需混凝土強度

混凝土坍度的建議數值如表一。高強度混凝土含強塑劑者，雖然沒有可測量的初期坍度，但卻能成功的生產和澆置，還是建議在加入強塑劑前的初期坍度是25~50mm(1~2吋)。這樣會保證有足夠的水來供拌合及讓強塑劑能有效的運作。對高強度混凝土不含強塑劑者，建議的坍度是50~100mm(2~4吋)，可依照工作的性質而選擇。最低坍度50mm(2")的建議值是給不含強塑劑的混凝土。混凝土坍度小

於50mm是很難於搗實，這是由於粗骨材和膠結材料量很高的原故。所需要混凝土強度(f'_{cr})如何決定在前面已有說明。

表一 含與不含強塑劑之混凝土之建議坍度

含強塑劑者在加入強塑劑前之坍度*	25~50mm
不含強塑劑者之坍度	50~100mm

*透過添加強塑劑在現場調整坍度以符合施工要求。

步驟2—最大骨材尺寸的選擇

基於強度的要求，粗骨材的最大尺寸建議值詳表二。而建築技術規則或ACI 318所規定粗骨材最大尺寸不得超過最窄模板間距的1/5，樓版深度的1/3，也不得超過個別鋼筋淨間距的3/4。此處的鋼筋包括鋼筋束，預力鋼

線或鋼線導管。

表二 建議粗骨材的最大尺寸

所需混凝土強度 kgf/cm ²	粗骨材建議最大尺寸 mm
<630	19.1~25.4
>630	9.53~12.7*

*當使用強塑劑及選擇的粗骨材，混凝土的抗壓強度範圍在630~840kgf/cm²，能使用建議最大粗骨材尺寸到25.4mm者。

步驟3—選擇最佳粗骨材含量

粗骨材的最佳含量端視粗骨材的強度潛能的性質及最大尺寸而定。表三是最佳粗骨材的建議含量，是以乾搗單位重來表示粗骨材含量，表三可以看出來是最佳含量是標稱最大粒徑的函數。由於表三是由單位體積的乾搗重所算出，因此每單位體積的重量是由下式算出：

表三 單位體積混凝土之建議粗骨材體積

標稱最大粒徑mm	9.53	12.7	19.1	25.4
乾搗粗骨材所佔的 部份體積	0.65	0.68	0.72	0.75

*所使用細骨材的細度模數FM是2.5~3.2。

*此處的體積是依照ASTM C29所描述的乾搗單位重之體積。

粗骨材的烘乾重=表上數字×乾搗單位重

在配比普通強度混凝土拌合物時，粗骨材的最佳含量是最大粒徑和

細骨材的細度模數的函數。但是，高強度混凝土拌合物有高的膠結材料量，因此不是如此與細骨材的細料有關以作為潤滑及夯實用。因此表三建議所使用的砂的細度模數值在2.5至3.2之間。但若膠結量太高，砂的細度模數要越高越好以改善Sticky情形。

步驟4—估計拌合用水量及含氣量

表四 新拌混凝土估計所需拌合用水及空氣含量kg/m³

坍度 mm	粗骨材最大粒徑mm			
	9.53	12.7	19.1	25.4
25~50	183	174	168	165
50~75	189	183	174	171
75~100	195	189	180	177
偏限空氣量%	3 (2.5)	2.5 (2.0)	2 (1.5)	1.5 (1.0)

註1：本表細骨材的空隙量35%，不是者應調整。

2：空氣偏限量括弧內數字是使用強塑劑者。

單位體積混凝土所需水量以得到所要坍度是依骨材的最大粒徑、顆粒形狀及級配，水泥的數量及所使用減水附加劑的形式等而定。如果使用強塑劑，則強塑劑中的水分要計算在水膠比ω/c+p中。表四是在外加任何化學附加劑前，使用9.53~25.4mm最大粒徑骨材的高強度混凝土所需拌合用水量。也指出其相對偏限的空氣含量數值。這些拌合用水是對合理良好形

狀、清潔、角狀粗骨材，良好級配等符合ASTM C33之最大粒徑者。由於細骨材的顆粒形狀和表面形狀能明顯影響其孔隙，所以拌合用水可能會與表所給的數值有很大的差異。

表四是當使用細骨材的孔隙量35%時的拌合用水量。細骨材的孔隙含量可用下式來計算：(下式用公制單位)

$$\text{孔隙含量V\%} = 100 - \frac{\text{乾撓單位重}}{\text{體密度}} \times 100$$

當所使的細骨材的孔隙含量不等於35%時，建議拌合用水量用下式調整：

$$\begin{aligned} \text{所調整拌合用水量kg/m}^3 &= (V-35) \\ &\times 4.72 \end{aligned}$$

此式子說明孔隙含量每偏差於35%達±1%則要調整拌合用水±4.72kg/m³。

步驟5—選擇水膠比ω/c+p

在高強度混凝土拌合物中，芝加哥高樓建築委員會很早就建議使用飛灰，因此其它膠結材料如飛灰、矽灰、高爐爐石會被使用，本文只討論飛灰，至於另二項材料請詳《飛灰·矽灰·高爐爐石用在混凝土中》有特別詳細介紹。所以所謂水膠比ω/c+p是拌合用水量除以水泥和飛灰合併的重量。

在表五與表六中可以看到，為了在不同齡期28天或56天達到不同的抗壓強度，所建議的最大水膠比ω/c+p

是骨材最大粒徑的函數。使強塑劑通常增加混凝土的抗壓強度。表五是混凝土不使用強塑劑的水膠比ω/c+p，而表六是混凝土使用強塑劑的水膠比ω/c+p。

表五 不含強塑劑混凝土，建議最大水膠比ω/c+p

f' cr , kg/cm ²	現場強度				粗骨材最大粒徑mm
	9.53	12.7	19.1	25.4	
490	28天	0.42	0.41	0.40	0.39
	56天	0.46	0.45	0.44	0.43
560	28天	0.35	0.34	0.33	0.33
	56天	0.38	0.37	0.36	0.35
630	28天	0.30	0.29	0.29	0.28
	56天	0.33	0.32	0.31	0.30
700	28天	0.26	0.26	0.25	0.25
	56天	0.29	0.28	0.27	0.26

$$f' cr=f' c+98kgf/cm^2$$

表六 含強塑劑混凝土，建議最大水膠比ω/c+p

f' cr , kg/cm ²	現場強度				粗骨材最大粒徑mm
	9.53	12.7	19.1	25.4	
490	28天	0.50	0.48	0.45	0.43
	56天	0.55	0.52	0.48	0.46
560	28天	0.44	0.42	0.40	0.38
	56天	0.48	0.45	0.42	0.40
630	28天	0.38	0.36	0.35	0.34
	56天	0.42	0.39	0.37	0.36
700	28天	0.33	0.32	0.31	0.30
	56天	0.37	0.35	0.33	0.32
770	28天	0.30	0.29	0.27	0.27
	56天	0.33	0.31	0.29	0.29
840	28天	0.27	0.26	0.25	0.25
	56天	0.30	0.28	0.27	0.26

$$f' cr=f' c+98kgf/cm^2$$

註：如果比較表五與表六，可得到下列結：

1. 在一已知水膠比下，含強塑劑混凝土的現場強度比不含者大，且在較短齡期達到。
2. 使用強塑劑，在已知現場強度及齡期下，可以比不含強塑劑用較少膠結材料來達到

通常水膠比 $\omega/c+p$ 是受到抗壓強度的限制，但它更受到耐久性要求而進一步受到限制。舉例來說， $f'c=210\text{kgf/cm}^2$ ，所需要的水膠比 $\omega/c+p$ 大於 0.6，但有耐久性之要求時，通常依 ACI 318 的要求，水膠比要小於 0.45 甚或小於 0.40。但高強度混凝土的水膠比通常會滿足耐久性要求。何況，在典型的使用中，高強度混凝土不會去面對極嚴厲的暴露狀況。當使用這些表而計算出膠結材料量超過 590kg/m^3 ，更實際的拌合物是使用替代膠結材料或配比設計方法。

步驟6—計算膠結材料量

每 m^3 所需膠結材料量可以用前面所選用拌合用水除以水膠比 $\omega/c+p$ 而得到。但是為了達到施工說明書對每 m^3 混凝土的最低水泥量之限制，因此，拌合物要用較高量的膠結材料來配比。當從表上數字算出膠結材料量超過 590kg/m^3 ，要用替代膠結材料或配比設計方法來得到更實際的拌合物，希望讀者要好好思考這過程，本文不會對此作進一步的探討。

步驟7—配比出不含其它膠結材料的基本配比

為了配比出最佳配比，配比設計者要準備一些含不同飛灰量的試配比。通常，一個試配比要用波特蘭水泥作為唯一膠結材料。要遵循下列步驟來完成基本配比的配比設計：

(A) 水泥含量。

由於僅使用波特蘭水泥作為唯一膠結材料而無其它膠結材料，這個拌合物的水泥量是等於步驟 6 所算出膠結材料量。

(B) 砂含量。

在決定每 m^3 的混凝土的粗骨材、水及水泥重量以及所侷限含氣量，依照 ACI 211.1 的絕對體積法，能很快算出砂的重量。

步驟8—配比使用飛灰的對照配比

在生產高強度混凝土中使用飛灰，其結果是降低需水量、降低混凝土溫度及降低成本。但是，由於飛灰的化學性質變動，會影響混凝土的強度成長的特性。

為了要完成每一對照配比，要遵循下列步驟：

(A) 飛灰的類別。

由於飛灰的不同化學成份、減水及強度成長特性等依使用飛灰的類別和料源而變動，通常飛灰是分為 F 類及 C 類，最近有不少學者建議依 CaO 含量來分類飛灰，或者依其波特蘭反應能力來分類，但看目前的 ASTM 似乎還沒有修改規範的傾向。因此，在使用飛灰時，要考慮這些性質。目前在台灣使用的飛灰都是 CaO 含量低的 F 類飛灰， CaO 含量少有超過 10%。

(B) 飛灰的含量。

多少量的水泥將被飛灰所取代，端視所使用材料類別而定。表七是常見二類飛

灰取代波特蘭水泥之建議的取代比例。對於每一對照配比，要從這表選擇取代比例。這是典型ACI委員會保守的取代比例，其實是違背歷史實務。1910年代，在台灣的基隆港築港所使用日本唐津火山灰，其取代水泥的比例即高達30%。在1980年代末期，Malhotra在加拿大努力推展 180kg/m^3 波特蘭水泥加 220kg/m^3 F類飛灰用在生產接近 700kgf/cm^2 之高強度混凝土，其F類飛灰取代比例高達55%，這二事例皆可顯示ACI之保守，值得讀者注意，可參閱上述拙作。

表七 飛灰用來取代波特蘭水泥之建議比例

飛灰	建議取代百分比(重量)
F類	15~25
C類	20~35

(C)飛灰重量。

當飛灰取代波特蘭水泥的比例一經決定，我們即很容易算得飛灰重量，把前面步驟7所算得水泥重量（不使用其它膠結材料）乘以所選定飛灰取代水泥比例即得所用飛灰重量，而將所有膠結材料量減掉飛灰重量，剩下來的就是對照試拌配比所使用水泥用量。因此，每一配比，飛灰重量加上水泥重量要等於步驟6所算出的膠結材料量。

(D)飛灰的體積。

由於波特蘭水泥和飛灰的比重差異，因此每 m^3 混凝土的膠結材料

的體積會依飛灰含量而變動，甚至於膠結材料總量維持固定，會因比重的變動而產生膠結材料所佔體積明顯變動。因此，每一拌合物，要計算膠結材料的體積，是由水泥的體積加上飛灰的體積。

(E)砂的含量。

計算每 m^3 混凝土的膠結材料的體積，粗骨材的體積，水及侷限空氣的體積後，依照絕對體積法，就能算出每一配比砂的含量。

使用前述步驟，每 m^3 混凝土的水泥加飛灰加砂的總體積要保持不變。由於需水的改變及飛灰對混凝土性質影響，會需要進一步去調整配比，這種調整會在試拌合時決定，在後面會加以討論。

步驟9—試拌

從步驟1至8所得的每一試拌配比，一試拌要經過試拌合以決定其工作度和強度特性。要根據骨材含水情況調整修正砂、粗骨材和水的重量。每一拌合要經過澈底拌合，其量要能有均勻拌合物以製造供壓驗強度所需試體數。

步驟10—調整試拌配比

如果混凝土所要性質沒有達到，原來試拌配比要依照下述來調整以生產所要工作度。

(A)初坍度。

如果試拌的初坍度沒有在所要範圍內，拌合用水要加以調整。膠

結材料量要跟著調整才能維持所要的水膠比 $\omega/c+p$ 。而砂量要調整以使混凝土的產量能剛好是 $1m^3$ 。

(B)強塑劑的劑量。

如果使用強塑劑，要試用不同的劑量對混凝土拌合物的工作度和強度的影響。由於高強度混凝土的本性，比製造廠商所建議更高的附加劑劑量會是能容許的不會有粒料分離。而且，由於強塑劑添加時機和混凝土的溫度都會影響附加劑的效率，在試驗室試拌所用的附加劑可能要針對現場情況加以調整。一般而言，已經發現再添加強塑劑以恢復坍度，其結果是在所有齡期混凝土強度皆增加。

(C)粗骨材含量。

當混凝土試拌配比已經調整至所要坍度，要決定此試拌在澆置或粉刷要求下是否太粗糙？如果需要減少粗骨材量，而砂的含量要跟著調整，以確保產量不變。但是，如此可能會使拌合物增加用水量，而會增加膠結材料含量來維持水膠比

$\omega/c+p$ 。除外，減少粗骨材含量會造成降低硬固混凝土的彈性模數。

(D)空氣含量。

如果測量空氣含量與設計配比所計算的有明顯的差異，強塑劑的劑量要減少或者砂的含量要調整以維持產量。

(E)水膠比 $\omega/c+p$ 。

如果依照表五或表六所建議的水膠比，沒有達到所要混凝土抗壓強度的話，要對較低水膠比試拌進行試驗。如果這樣還是無法達到增加抗壓強度，材料是否適當要進行檢討。

步驟11—選擇最佳拌合比例

當試拌配比已調整到產生所要工作度和強度性質，要在預期現場情況製作抗壓強度試體，並依照 ACI 211.1 所建議的方法進行和調整試拌和。實際的生產和品質管制，要用實際工作所用設備及人員從事生產規模的試拌才能是較佳評估。強度試驗結果要基於強度要求和成本來選擇本計畫可接受的配比。

…未完待續…

地下工程實務(八)即將出版
詳情請看P.5上

如何作12,000psi 飛灰混凝土的配比設計 (下)

作者/林炳炎

<接上期>

4、計算實例

此處所揭示的例子，用以說明如何進行高強度混凝土的配比設計。實驗室試拌結果是依實際所使用材料而定。在本例中，Type I水泥的比重是3.15。

高強度混凝土要用於高層辦公大樓的最初三層樓的柱子。指定抗壓強度在齡期28天是630kgf/cm²(9000psi)。由於在柱子的鋼筋很密，能使用的最大粗骨材粒徑是19.1mm。符合ASTM C33要求的天然砂將使用，它有下列性質：細度模數FM2.9，乾比重BSGdry=2.59，基於烘乾的吸水率Abs=1.1%，乾摗單位重=1650kg/m³。而且強塑劑及緩凝劑也要用。

步驟1—選擇坍度及所需混凝土強度

由於要使用強塑劑，因此在加入強塑劑之前，混凝土將設計在坍度25~50mm。

預拌混凝土生產廠商沒有高強度混凝土的歷史資料可用，因此將依實驗室試拌來選擇配比。所需平均抗壓強度 f'_{cr} 是 $f'_{cr} = \frac{630 + 98}{0.90} = 809 \text{ kgf / cm}^2$ 即 $f'_{cr} = 810 \text{ kgf / cm}^2$ 。

步驟2—選擇骨材最大粒徑

依照表二，選用軋製石灰岩標稱最大粒徑12.7mm粗骨材，它的材料性如下：烘乾體比重BSGdry=2.76，烘乾的吸水率Abs=0.7%，乾摗單位重DRUW=1618kg/m³，粗骨材的級配必須符合ASTM C33粒徑編號N0.7的粗骨材。

步驟3—選擇最佳粗骨材含量

最佳粗骨材含量依表三佔混凝土單位體積的0.68，每 m^3 混凝土的粗骨材乾重 $W_{dry}=0.68 \times 1618=1100\text{kg}/m^3$ 。

步驟4—估計拌和用水和空氣含量

由於坍度是25~50mm，粗骨材最大粒徑是12.7mm，從表四初步估計混凝土所需拌和用水量是 $174\text{kg}/m^3$ ，使用強塑劑，同表所構限空氣量是2%。但砂的孔隙含量=100-

$$\frac{1650}{2.59 \times 1000} \times 100 = 36.2\% \text{。所要調整半合用水} = (36.2 - 35) \times 4.72 = 6\text{kg}/m^3 \text{。所以每} m^3 \text{混凝土}$$

所需拌合用水量是 $180\text{kg}/m^3$ 。這所需半合水量包括緩凝附加劑但不包括強塑劑中的水份。

步驟5—選擇水膠比 $\omega/c+p$

混凝土使用強塑劑而最大粒徑骨材尺寸是12.7mm，基於實驗室試拌在齡期28天有平均抗壓強度 $810\text{kgf}/cm^2$ ，從表六用內差法查出所需水膠比 $\omega/c+p$ 是0.31。要注意的是表六與表五是所需現場平均強度。雖然在實驗室所需強度是 $810\text{kgf}/cm^2$ ，因此在表上所要查的強度是 $0.9 \times 810 = 729\text{kg}/cm^2$ 。

步驟6—計算膠結材料量

每 m^3 混凝土所需膠結材料重量是 $180/0.31=580\text{kg}/m^3$ ，施工說明書並沒有規定最少膠結材料量，所以就用 $580\text{kg}/m^3$ 。

步驟7—配比僅用水泥的基本配比

(1)水泥量= $580\text{kg}/m^3$

(2)每 m^3 材料的體積：

$$\text{水泥} = \frac{580}{3.15 \times 1000} = 0.1841 m^3$$

$$\text{粗骨材體積} = \frac{1100}{2.76 \times 1000} = 0.3986 m^3$$

$$\text{水的體積} = \frac{180}{1000} = 0.18 m^3$$

$$\text{空氣的體積} = 1 \times 0.02 = 0.02 m^3$$

$$\text{砂的體積} = 1 - 0.1841 - 0.3986 - 0.18 - 0.02 = 0.2173 m^3$$

$$\text{砂的重量} = 0.2173 \times 2.59 \times 1000 = 563\text{kg}/m^3$$

故所得基本配比：水泥 $580\text{kg}/m^3$ 、乾砂 $563\text{kg}/m^3$ 、乾粗骨材 $1100\text{kg}/m^3$ 、水(包含 $0.188\text{kg}/100\text{kg}$ 水泥緩凝劑) $180\text{kg}/m^3$ 。

步驟8—配比使用水泥與飛灰的對照配比

所使用飛灰是符合ASTM的C類飛灰、比重2.64。表七建議取代比例是20~35%。將有4對照配比，其飛灰取代比例分別為CM#1:20%，CM#2:25%，CM#3:30%，CM#4:35%。

對照配比CM#1，每m³混凝土的飛灰重是 $0.2 \times 580 = 116\text{kg/m}^3$ 。
因此水泥重是 $580 - 116 = 464\text{kg/m}^3$ 。

CM#2配比的飛灰重 $= 0.25 \times 580 = 145\text{kg/m}^3$ ，而水泥重是 $580 - 145 = 435\text{kg/m}^3$ 。

CM#3配比的飛灰重 $= 0.30 \times 580 = 174\text{kg/m}^3$ ，而水泥重是 $580 - 174 = 406\text{kg/m}^3$ 。

CM#4配比的飛灰重 $= 0.35 \times 580 = 203\text{kg/m}^3$ ，而水泥重是 $580 - 203 = 377\text{kg/m}^3$ 。

CM#1配比材料佔1m³混凝土的體之計算如下：水泥是 $\frac{464}{3.15 \times 1000} = 0.1473\text{m}^3$ ，飛灰是

$\frac{116}{2.64 \times 1000} = 0.04394\text{m}^3$ ，總膠結材料所佔體積 $= 0.1473 + 0.04394 = 0.1912\text{m}^3$ 。其餘各對照配比之飛灰、水泥、總膠結材料佔混凝土體的計算詳表八。

表八 水泥、飛灰、總膠結材料佔1m³混凝土的體積。m³

配比	水泥	飛灰	膠結材料
CM#1	0.1473	0.0439	0.1912
CM#2	0.1382	0.0549	0.1931
CM#3	0.1289	0.0659	0.1948
CM#4	0.1197	0.0769	0.1966

CM#1配比的粗骨材、水及空氣含量等體積與基本配比一樣，即膠結材料體積 0.1912m^3 ，粗骨材體積 0.3986m^3 ，水的體積 0.18m^3 ，空氣的體積 0.02m^3 ，則砂所佔體積 $= 1 - 0.1912 - 0.3986 - 0.18 - 0.02 = 0.2102\text{m}^3$ ，所以每m³混凝土的乾砂重 $= 0.2102 \times 2.59 \times 1000 = 544\text{kg/m}^3$ 。因此4對照配比的各成分重量詳表九。在這個例子中，當使用其它膠結材料時，化學附加劑的劑量須或不須調整，這是沒有現存指示可供遵循，完全依照經驗來做調整，配比設計者要注意到可能需要調整的問題。在試拌時，要證實所有化學附加劑的劑量是正當的。

表九 4對照配比的各成分重量kg/m³

成份配比	CM#1	CM#2	CM#3	CM#4
水泥	464	435	406	377
飛灰	116	145	174	203
砂(乾)	544	540	535	530
粗骨材(乾)	1100	1100	1100	1100
水(含緩凝劑中水)	180	180	180	180

註：緩凝劑的劑量是 $0.283 \sim 0.425\text{kg}/100\text{膠結材料}$

步驟9—試拌

要對基本配比及4對照配比進行試拌工作。骨材經烘乾後發現砂的含水量是6.4%，粗骨材是0.5%。如此基本配比材料應調整：溼砂重= $563 \times (1+0.064) = 599 \text{ kg/m}^3$ ，粗骨材溼重= $1100 \times (1+0.005) = 1106 \text{ kg/m}^3$ ，而拌合用水重= $180 - 563(0.064 - 0.011) - 1100(0.005 - 0.007) = 152 \text{ kg/m}^3$ 。基本配比之調整水分結果詳表十。為了試拌的拌合鼓較小，使用 0.1 m^3 作為每一拌的材料，所以單位拌合的重量詳表十一。

表十 調整骨材中水分後，基本配比與對照
配比之各成分重量 kg/m^3

成分\配比	基本	CM#1	CM#2	CM#3	CM#4
水泥	580	464	435	406	377
飛灰	—	116	145	174	203
砂	599	579	575	569	564
粗骨材	1106	1106	1106	1106	1106
水	152	153	154	154	154

註：基本配比的水含有緩凝劑 0.188 kg/100kg 水泥
CM#1～CM#4的水含有緩凝劑 $0.283 \text{ kg/100kg} \sim 0.425 \text{ kg/100kg}$ 膠結材料

表十一 試拌用各成分重量 kg

成分\配比	基本	CM#1	CM#2	CM#3	CM#4
水泥	58	46.4	43.5	40.6	37.7
飛灰	—	11.6	14.5	17.4	20.3
砂	59.9	57.9	57.5	56.9	56.4
粗骨材	110.6	110.6	110.6	110.6	110.6
水	15.2	15.3	15.4	15.4	15.4

註：化學附加劑包含在拌合用水中。

步驟10—調整試拌配比

在加入強塑劑之前與之後，每一試拌配比要加以調整以得到所要坍度及所要工作度，在此處只針對基本配比及對照配比CM#4的調整過程加以說明，而其七對照配比只有計算結果。

(A)基本配比

雖然照表計算，要生產 $25 \sim 50 \text{ mm}$ 坍度混凝土所需水量是 15.2 kg ，但發現實際要 15.7 kg (包括緩凝劑的水分)才能生產所要的坍度，修改每一材料的乾重如下：水泥

58kg，砂(乾) $59.9 \div 1.064 = 56.3\text{kg}$ ，粗骨材重(乾) $= 110.6 \div 1.005 = 110.1\text{kg}$ ，水重 $15.7 + 2.98 - 0.22 = 18.49\text{kg}$ 。這些材料是否會是 0.1m^3 呢？水泥的體積 =

$$\frac{58}{3.15 \times 1000} = 0.0814\text{m}^3 \text{，砂的體積} = \frac{56.3}{2.59 \times 1000} = 0.0217\text{m}^3 \text{，粗骨材的體積} =$$

$$\frac{110.1}{2.76 \times 1000} = 0.0399\text{m}^3 \text{，水的體積} = \frac{18.49}{1 \times 1000} = 0.0185\text{m}^3 \text{，空氣的體積} = 0.02 \times$$

$0.1 = 0.002\text{m}^3$ ，故此拌材料的總體積 = $0.0184 + 0.0217 + 0.0399 + 0.0185 + 0.002 = 0.1005\text{m}^3$ 。調整成 1m^3 混凝土之各材料重分別為：水泥 577kg ，砂 560kg ，粗骨材 1096kg ，水 184kg 。此新配比的水膠比是 0.32 ，為了維持所要水膠比，水泥的重量要

增加至 $\frac{184}{0.31} = 594\text{kg}$ ，請讀者注意 594kg 已略為超過前面所說的 590kg 的限量，由於增加

水泥所增加的體積是 $\frac{594 - 580}{3.15 \times 1000} = 0.00444\text{m}^3$ ，水泥所增加的體積就要擠掉一些砂，被

擠掉的砂重 = $0.00444 \times 2.59 - 1000 = 12\text{kg}$ ，所以調整後配比是：水泥 594kg/m^3 ，砂 548kg/m^3 ，(乾)粗骨材 1096kg/m^3 (乾)，水 184kg/m^3 (含緩凝劑的水分)。

為了想澆置鋼筋密集的柱子，所以要用坍度最少是 $229\text{mm}(9")$ 的流動混凝土。強塑劑廠商建議用量是每 100kg 的膠結材料用 0.5kg 至 1kg 。在實驗室的溫度是 23.9°C ，發現在這種情況下，強塑劑的劑量每 100kg 膠結材料用 0.5kg 時會產生 152mm 的坍度，劑量是每 100kg 膠結材料用 0.69kg 時會產生 254mm 的坍度，而劑量是每 100kg 膠結材料用 1.0kg 時會造成新拌混凝土的粒料分離。緩凝劑的劑量也與拌合水一起加入。強塑劑劑量使用每 100kg 膠結材料用 0.69kg ，在拌和後 15 分鐘才加入。

混凝土拌合物有 254mm 的坍度就有足夠工作度供適當的澆置，因此不必對粗骨材含量加以調整。

加入強塑劑的拌合物測量其空氣含量是 1.8% 也沒有必修正配比。

要注意的是，添加強塑劑要調整膠結材料量以及計算拌和物是否正好 1m^3 。在強塑劑正常劑量每 100kg 膠結材料 0.625kg 至 0.938kg 時，沒有需要修正配比。

基本配比的 28 天抗壓強度是 823kgf/cm^2 ，滿足於實驗室試驗強度 812kgf/cm^2 。

(B) 對照配比CM#4

為了生產 $25 \sim 50\text{mm}$ 坍度混凝土，由於用飛灰取代水泥之故，用飛灰通常產生減水效果，實際所需拌和用水較少，故其材料比例如下：水泥 37.7kg ，飛灰 20.3kg ，砂 56.4kg ，粗骨材 110.6kg ，水 14.9kg 。修正這些材料乾重如下：水泥 37.7kg 飛灰

20.3kg，砂53kg，粗骨材110kg，水=14.9+2.81-0.22=17.49kg。這些材料會仍然保持

$$0.1\text{m}^3 \text{ 嗎？水泥的體積} = \frac{37.7}{3.15 \times 1000} = 0.01197\text{m}^3 \text{ 飛灰的體積} =$$

$$\frac{20.3}{2.64 \times 1000} = 0.00769\text{m}^3, \text{ 砂的體積} = \frac{53}{2.59 \times 1000} = 0.02046\text{m}^3, \text{ 粗骨材的體積} =$$

$$\frac{110}{2.76 \times 1000} = 0.03986\text{m}^3, \text{ 水的體積} = \frac{17.49}{1 \times 1000} = 0.01749\text{m}^3, \text{ 空氣體積} = 0.02 \times 0.1 =$$

0.002m^3 。故此拌材料的總體積= $0.01197+0.00769+0.02046+0.03986+0.01749+0.002=0.09947\text{m}^3$ ，尚不足 0.1m^3 ，調整為 1m^3 的材料重為水泥379kg，飛灰204kg，砂533kg，粗骨材1106kg，水176kg。此時之水膠比為0.30，但所要水膠比為0.31，所以所要的膠結材料要減少，但飛灰取代水泥的比例35%要維持，新的總膠結材料重是

$$\frac{176}{0.31} = 568\text{kg/m}^3, \text{ 因飛灰取代水泥比例為35%，飛灰重} 568 \times 0.35 = 199\text{kg/m}^3, \text{ 水泥重}$$

$$= 568 - 199 = 369\text{kg/m}^3, \text{ 膠結材料改變的體積數是} = \frac{379 - 369}{3.15 \times 1000} + \frac{204 - 199}{2.64 \times 1000} = 0.0051, \text{ 這些體積的減少，意謂著這些空間應由砂來填補，} 0.051 \times 2.59 \times 1000 = 13\text{kg/m}^3, \text{ 所以調整後的配比變成：水泥 } 369\text{kg/m}^3, \text{ 飛灰 } 199\text{kg/m}^3, \text{ 砂 } 533 + 13 = 546\text{kg/m}^3, \text{ 粗骨材 } 1106\text{kg/m}^3, \text{ 水 } 176\text{kg(包含緩凝劑中所含水分)}.$$

在實驗室的情況下，對調整後的配比加入強塑劑，發現使用每100kg膠結材料用0.563kg的強塑劑可得241mm坍度的流動混凝土。緩凝劑與拌合水一起加入拌合鼓中並當作拌合水一部份。在初拌後15分鐘再加入強塑劑。由於強塑劑得到足夠坍度，沒有必要對粗骨材量調整。其空氣含量經測量是2.1%，很接近預期值，不必調整。從實驗室試拌所鑄試體的28天平均抗壓強度是796kgf/cm²，略小於原來預期的812kgf/cm²，如果有時間應再調整試驗。

(C)試拌配比的性能摘要

在實驗室試拌配比經調整後，其性能摘要如表十二。

步驟11—選擇最佳配比

對照配比CM#4是唯一明顯的在28天齡期強度低於812kgf/cm²，除了CM#4外，其餘配比皆作現場試拌，在加入強塑劑之前與之後，拌合物皆調整至所要坍度，並作抗壓強度試體。混凝土溫度也記錄起來，其結果詳表十三。雖然在齡期28之抗壓強度皆超過現場所要

的 728kgf/cm^2 ，但對照配比CM#3的膠結材料量及混凝土溫度受到混凝土製造商所滿意，所以被選為最佳配比。如果周圍溫度及材料性質變動，需要作額外的現場調整。■

表十二 經調整後試拌配比的性能摘要

材料及性能	基本	CM#1	CM#2	CM#3	CM#4
水 泥 kg/m^3	594	464	439	398	369
飛 灰 kg/m^3	—	116	146	171	199
砂(乾) kg/m^3	548	544	543	545	546
粗骨材(乾) kg/m^3	1096	1104	1111	1104	1106
水 kg/m^3	184	180	178	177	176
坍 度 mm	25	32	25	38	50
緩凝劑 *	0.188	0.156	0.156	0.125	0.125
強塑劑 *	0.688	0.688	0.625	0.594	0.563
坍 度 mm	254	267	229	260	241
28天強度 kgf/cm^2	823	805	833	812	769

*單皆為每100kg膠結材料多少kg的附加劑。

註：本表對強塑劑所含水分並未計入拌合水中，這通常是不應該的。

表十三 各配比之抗壓強度及混凝土溫度。

配比	28天抗壓強度 kgf/cm^2	混凝土溫度 $^{\circ}\text{C}$
基本	729	34.4
CM#1	740	33.8
CM#2	737	31.7
CM#3	734	28.9

參考文獻

- 林炳炎，「飛灰用在混凝土中」，1990。
- 林炳炎，「飛灰・矽灰・高爐爐石用在混凝土中」，1993。
- G. R. Mass "Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash".

地下工程實務(八) 即將出版
詳情請看P.28上



不可失

集合住宅施工自動化個案研究

彭雲宏教授主持研究

項目	內容	定價	特惠價
第一輯	第1冊研究成果摘要報告	110元	600元
	第2冊柱、牆鋼筋組立工法改良之研究	160元	
	第3冊梁、版鋼筋組立工法改良之研究	160元	
	第4冊模板施工自動化之研究	160元	
	第5冊自動化施工自動化之研究	160元	
第二輯	第1冊研究成果摘要報告	110元	600元
	第2冊個案調查研究報告	300元	
	第3冊系統模板技術發展策略	180元	
	第4冊建築投資風分析	160元	

(請另加掛號郵資60元)

第一輯 + 第二輯合購現在只要1200元

現代營建雜誌社

電話/(02)551-8906

傳真/(02)571-9333

地址/台北市長安東路一段46號5F

劃撥帳號/01510899 戶名/現代營建雜誌社