

第壹篇 高強度混凝土設計及施工準則草案

第一章 引言

1 - 1 歷史背景

高強度混凝土雖已發展多年，但仍常被視為相對的新材料，隨著發展的歷程，高強度混凝土跟著有不同的定義。在一九五〇年代，抗壓強度 350 kg/cm^2 ($5,000 \text{ psi}$) 之混凝土即被視為高強度；目前，普遍被認定的標準高強度混凝土其強度至少超過 420 kg/cm^2 (6000psi)。由應用發展史觀之，抗壓強度在 420 至 525 kg/cm^2 ($6,000$ 至 $7,500 \text{ psi}$) 之混凝土已被商業應用了；在一九七〇年代初期， 630 kg/cm^2 ($9,000 \text{ psi}$) 之混凝土已正式上市。最近，抗壓強度超過 1120 kg/cm^2 ($16,000 \text{ psi}$) 之混凝土已被採用於現場建造之建築物及預力構件中。

長久以來，抗壓強度在 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 以上之混凝土僅限於少數地區方可購得，但最近幾年來，高強度混凝土之應用大量增加，而高強度混凝土之使用亦蔚然成為國際之新趨勢。這種蓬勃景象導因於近年來新材料技術的高度發展及高強度混凝土的甚高需求。芝加哥之水塔宮 (Water Tower Palace) 為世界上最高的混凝土建築物，但若非藉助高強度混凝土則難以建造完成；而長跨徑、預力橋樑上部結構，如華盛頓州跨越哥倫比亞河的巴肯 (Pasco Kenneick) 橋，若非使用高強度混凝土，亦甚難順利建造成功。在國內高強度混凝土的應用早在 1972 年代南北高速公路的大直橋曾使用在預力鋼梁，然使用在建築物上則相當有限。

近年來我國經濟建設突飛猛進，公共建設以及民間投入到高層建築之數量龐大，技術層面的水準要求越來越高，有關高強度混凝土之需要在營建工作上日益迫切，高強度混凝土設計及施工準則之適時提出對業界當有所助益。

1 - 2 目標及定義

水泥及混凝土工業對高強度混凝土抱著極大的興趣【見附錄問卷調查資料】，美國混凝土協會在一九七九年組織了 ACI 363 委員會，委員會的職責乃在研究並報告有關高強度混凝土的最新發展情況，中國土木水利工程學會於 1989 年亦成

立「高強度混凝土專案小組」專案處理相關資料。本設計及施工準則草案乃委員會依據美國 ACI 363 高強度混凝土之報告及國內之相關研究資料彙整成較正式之報告文件。

高強度混凝土的定義隨時代在改變，應視其作業需求重新訂定混凝土強度的範圍。基本上定義為：「高強度混凝土為強度等於或大於 420 kg/cm^2 ($6,300 \text{ psi}$) 以上的混凝土；而以其他外加材料或特殊技術製造的混凝土不在考慮之內」。以上定義中「外加材料」一語係指例如注膠聚合物混凝土、環氧樹脂混凝土或人工常重骨材及重骨材。

雖然 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 是較低極限，但這並不意謂在此極限之材料性質或生產技術會有急遽的改變。事實上， 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 以上混凝土所產生的改變過程是逐漸由較低強度混凝土持續到高強度混凝土的。然而許多用來預測混凝土性質或用來設計結構構件的方程式都是根據測試之抗壓強度在 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 以下混凝土所建立的，因此任何有關較高強度混凝土的數據資訊都應經過評估後，才能確定是否適用於高強度混凝土；同時，資料的引用及公式延伸應用亦要格外謹慎，必要時，可先進行試驗工作以建立資料，便於解決材料或應用上之困擾。

另外，必須瞭解高強度混凝土的定義會因地域而有所差異，例如在某些地區， 630 kg/cm^2 ($9,000 \text{ psi}$) 抗壓強度的混凝土早已經商業性生產及製造了，因此所謂高強度混凝土的定義可能指 840 kg/cm^2 至 1050 kg/cm^2 ($12,000 \text{ psi}$ 至 $15,000 \text{ psi}$) 抗壓強度的混凝土而言。然而在某些地區，商業用混凝土強度僅 350 kg/cm^2 ($5,000 \text{ psi}$)，因此， 630 kg/cm^2 ($9,000 \text{ psi}$) 混凝土才被視為高強度。在某一相當大範圍的混凝土強度之內，材料選擇、材料配比、配料、拌合、輸送、澆置及控制程序大致相同。但是，本報告所論及的材料性質與結構設計大體都是針對最高抗壓強度而言，因此儘可能針對上述材料及設計特質來撰寫本設計及施工準則草案。

第二章 材料的選擇

2-1 引言

生產能符合建築技術規則第三三五條所要求工作性與強度發展的高強度混凝土，材料的選擇需求較一般強度混凝土更形重要，高品質的材料是必要條件，而規範要嚴謹執行更是重要。高強度混凝土的生產需根據試拌結果所選擇出較大範圍品質佳的材料所製造。本章主旨在闡述材料選擇應具備的專業知識，並做為第三章材料配比的基準。

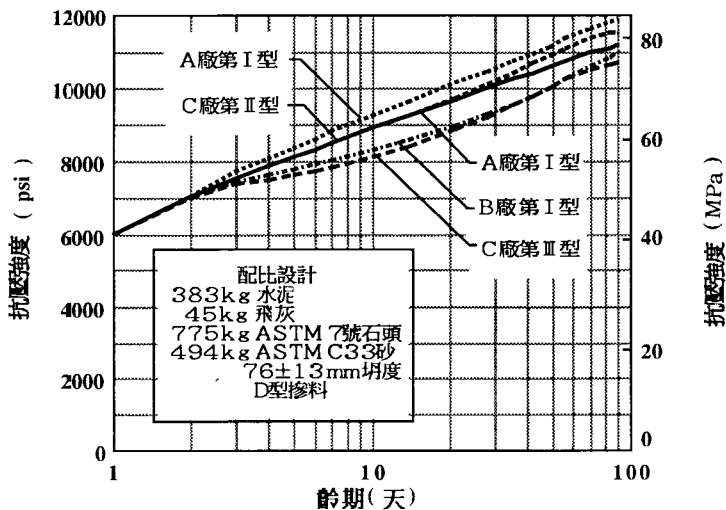


圖 2-1 水泥對混凝土抗壓強度的影響【2.2】

2 - 2 水泥

卜特蘭水泥的選擇對高強度混凝土而言尤其重要【 2.1,2.2 】，除非特別需要顧及早期強度，譬如預力混凝土之類的早期強度，否則並無需使用卜特蘭第三型高早強水泥。甚且，就所選擇之水泥類型而言，雖然都符合 CNS 61 R2001 規定，但由於水泥組成成份和細度不同，不同水泥廠所製造的混凝土其強度發展特性亦有所不同。

因此早在計劃前 6 至 12 個月，應該要求可能參與工程之供應商提供倉儲檢測證明資料。這項工作的進行不僅可以事先指出 CNS 1010 R3032 水泥砂漿立方體測試所顯現的強度特性，更重要的是能適時有效提供水泥均勻性的資訊。水泥供應商有義務提供依 CNS 規範所檢測的水泥均勻性之報告。假若其中矽酸三鈣含量變異數達 4%；或燒失量變異超過 0.5%；且或細度差異超過 $375\text{cm}^2/\text{g}$ (Blaine) 時，則將無法確保均勻一致之高強度【 2.1 】。硫酸鹽 (SO_3) 含量應維持在最佳狀態，其變異數應限制在 $\pm 0.20\%$ 範圍內。

雖然水泥砂漿立方體測試方法可以提供潛在強度的指標，惟測試時仍應先進行試拌工作。這些試拌配比應採用施工工程可使用之材料，使之符合預期之稠度，其強度分別應在 7, 28, 56 及 91 天齡期加以測定。高強度混凝土所含水泥量較高，因此水泥特性對拌合水量的影響更為顯著。

使用高水泥含量將使混凝土內部之溫度升高，例如：芝加哥 Water Tower Place 使用含 $502\text{ kg}/\text{m}^3$ 水泥量的混凝土柱 (1.2m 正方)，結果在水化期間，溫度由 24°C 昇至 66°C ，這些昇高的熱量在六天內就消散掉，並未造成不良影響【 2.2 】。雖然如此，若溫度升高預期會產生其他問題時，則可用第二型 (較低水化熱) 水泥，不過先決條件則必須符合強度的要求。

另外需要考慮的是水泥-摻料系統的最佳配比，例如：減水劑對需要拌合水量的效益端視水泥特性而定，強度發展由水泥特性及水泥含量來決定。

2 - 3 化學摻料

2 - 3 - 1 一般原則

摻料被廣泛使用在高強度混凝土上，這些材料包括：輸氣劑、化學及礦物類摻料在內。輸氣劑一般都是表面活性劑，可在空氣-孔隙系統內增加其耐久性。化學摻料

通常採用碳化木質素、羥磺酸、碳化化物、三聚氰胺及濃縮物和各種配方之有機及無機速凝劑。摻料類型、廠牌與加劑量速率的選擇應考慮與其他使用在工程上之材料配合；摻料或選用摻料可明顯增加抗壓、控制硬固速率、加速強度增加率、改善工作性與耐久性。在選購摻料時，應參考俱工程成效之摻料。

2-3-2 輸氣摻料 (CNS 3091)

使用輸氣摻料可增加混凝土抵抗凍融的耐久性。當抗壓強度增加及水灰比減低時，空氣-孔隙參數及輸氣百分比可依建築技術規則第三五〇條之規定，採用較低且可接受之範圍。空氣的輸入會降低強度，特別是對高強度混凝土更形嚴重，因此，除了增加耐久性的考慮，不宜採用輸氣摻料。

2-3-3 緩凝劑 (CNS 12283)

高強度混凝土配比設計大都採用高水泥含量，這與一般商業化混凝土不同。緩凝劑通常有益於控制早期水化現象，千萬不可加水重拌混凝土否則會明顯降低強度。再者，結構設計常常需要大量加強鋼筋及複雜的模板，更連帶地造成混凝土澆置的困難度，而緩凝劑可以有效控制硬化速率，避免冷縫產生，使澆置期間更具彈性。曾有某工程成功的運用緩凝劑，其初期設計之摻料中許可加入緩凝劑，以提供在預期溫度條件下俱有需要的硬固速率。

由於緩凝劑常常促使強度增加，其增加量與加入劑量成正比，因此，如預期明顯使用不同添加率時則應設計不同添加劑量，但是由於溫度的關係會產生使減低強度變異數的補償功效，亦即當溫度增高時，晚期強度將下降。若能增加緩凝劑之量以控制硬化速率，則將能緩和溫度上昇所帶來強度減低之影響；相反地，溫度下降時，劑量要跟著減少。

當提供初次緩凝作用，二十四小時後的強度可藉常態劑量而增加，但若持續緩凝或較冷溫度，則可能會嚴重影響初期（24 小時）強度變化。

2-3-4 正常凝結減水劑 (CNS 12283)

ASTM C 494 之 A 型傳統正常凝結減水摻料可以增加強度而不影響硬化速率。選購這些摻料時應根據其對強度變化的影響，劑量超過常態劑量時，一般都有增加強度的效能，但凝結時間可能會延長。如果摻料使用的目的在於緩凝，則有時會產生有助

於強度的效益。

2-3-5 高性能減水劑【2.4,2.5】(CNS 12283)

高度減低用水量提供高強度的性能，特別在初期（24 小時內）階段更為明顯。摻料的類型與加劑速率應能夠配合水泥性質，這是相當重要的。由於加入摻料後不久會產生坍度損失現象，故應該在工地加入高性能減水劑（HRWR）。

高強度混凝土採用高性能減水劑之目的為：在固定坍度下增加強度或純為增加坍度。摻料的添加應該是能均勻分佈到整體混凝土內，而適當拌合對均勻性質相當重要。因此，現場監督加入摻料對使用 HRWR 而言是相當慎重且重要的。另外，有關使用強塑劑的討論可參考強塑劑在混凝土上應用之論文【2.6】。

2-3-6 速凝劑 (CNS 12283)

除了特別需要提早拆模外，高強度混凝土甚少使用速凝劑。高強度混凝土之配料可以產生足夠強度以便早期拆除牆柱的垂直外模。用來增加硬化速率的速凝劑對整個極限強度發展來說是無效果的，這點必須注意的。

2-3-7 摻料混合體

高性能減水劑與正常凝結減水劑或緩凝劑的混合使用，是一種花費最少而可獲得最佳成效的組合方式。有了最佳組合，強度的增加及凝固時間的控制和工作性的提高能有更佳的效果。在某些情形下，正常凝結減水劑或緩凝減水劑加上速凝劑互相配合，有時亦能產生特殊效果，但不論如何應先行試拌。

當採用摻料混合體時應該各別分開添加，且添加方法應經過廠商同意。如果使用輸氣摻料應該與減水劑分開添加。

2-4 細粒化礦物摻料

“細粒化礦物摻料”主要包括包括飛灰在內為製造高強度混凝土廣泛採用之摻料。雖然高爐水泥已在歐洲被採用了好幾年，但被用來生產高強度混凝土的資料卻相當缺乏。

2-4-1 類型

高強度混凝土採用的飛灰材料共分成兩大類。F 級飛灰一般來自於燃燒無煙煤或煙煤，具有波索蘭特性，但僅僅稍許或無膠結性特質。C 級飛灰則來自於燃燒褐

煤或次煙煤，不但其有波索蘭特質，更含有某些自生的膠結性特質。一般而言， F 級飛灰產於台灣電力公司【 2.7 】、美國東部及加拿大，而 C 級飛灰則產於美國西部及加拿大。

細磨矽石或矽石水泥僅見於美國與加拿大少數地區。 CNS 12549 載有有關細磨高矽石的規範，而且 CNS 3036 亦載有卜特蘭高矽石水泥的相關規範【 2.8 】。適用於混凝土的高矽石一般都是非金屬類產品，在高矽中與鐵呈熔融狀。熔融高矽石若經過適當的淬火及製程處理過，則在混凝土內俱水硬性特徵，可代替一部分卜特蘭水泥。高矽石可與水泥一同磨細，或做為摻料單獨加入配料中使用，並以拌合設備加以拌合。高矽石的化學成份主要為鋁矽酸鈣化合物及氧化鐵【 2.9 】，研究結果顯示細磨高矽石是一種值得使用於高強度混凝土中之材料。

矽灰或任何含有矽灰物質的摻料亦曾用於製造高強度混凝土【 2.10,2.11,2.12 】，不但可適用於結構物上也可用在地板表面，及在需要高抗壓強度和低滲透性情形時，當做一種修補材料來使用。

2-4-2 規範

有關飛灰的規範，涵蓋在 CNS 3036 及 11271 內，而取樣、測試方法則見於 CNS 3036 。任何礦物摻料其物理或化學性質的變化雖然在容許範圍內，但均可能引起高強度混凝土性質的變化，若要降低這類變化，可對現場材料加以測試或增加取樣頻率。建築技術規則第三四四條載有混凝土使用摻料的指示，最重要的，在實際運用於工程前，必須對礦物類摻料的接受性及一致性加以測試，並且仔細檢驗其強度產生特性及與摻料內其他材料的相容性。

2-4-3 評估與選擇

如同其他高強度混凝土材料一樣，礦物摻料應先行在實驗室內試拌加以評估，以決定最佳性質。實際施工時採用的材料樣本應包括在評估範圍內，先應確定這些礦物摻料測試樣本係來自主要供應商，且為具代表性者。一般而言，可使用數次試拌，其變數為不同水泥因素與摻料用劑量下所得到的結果，並將此等結果繪成曲線。根據曲線便可決定如何組合水泥與摻料才能達成某項預期結果。

當使用飛灰前必須認定符合 CNS 3036 規範，雖然此規範容許較高的燒失量，而

理想情況下【 2.13 】，緩凝損失最好不超過 3%。其它要求有：高細度、生產均勻性、高波索爾反應活性及與其他材料的相容性。

2-5 骨材

2-5-1 一般原則

高強度混凝土所採用的粗骨材、細骨材必須符合 CNS 1240 A56 規範，而下列要求有助於高強度混凝土的製造。

2-5-2 級配

2-5-2-1 細骨材

高強度混凝土所採用的細骨材其最佳級配端視其對用水量的影響而定，與物理堆積較無關。根據報告顯示，細度模數 2.5 以下的砂會使混凝土稠度增加，以致太黏而很難壓實。細度模數約 3.0 的砂具最好的工作性及抗壓強度。

典型高強度混凝土含有大量細粒膠結性材料，因此骨材的級配也就相對沒有傳統混凝土那般重要了。但若能增加細度模數，仍是有益的。其他減低用水量的方法【 2.14 】包括：減低通過 50 號篩及 100 號篩的量，但仍要符合 CNS 1240 A56 的規範，其中應不含雲母或黏土雜質。另外砂的級配對早期強度並無顯著影響【 2.15 】，但在後期齡期和極限強度時，跳越級配砂混合料所表現的強度比一般標準混合料所表現的強度要低。

2-5-2-2 粗骨材

在高水泥量和低水灰比情形下如欲產生最佳的抗壓強度，則其最大骨材粒徑應維持最小，即 12.7mm(1/2 吋) 或 9.5mm(3/8 吋) 左右【 2.13,2.15,2.20 】，當然最大骨材粒徑 19.0mm(3/4 吋) 至 25.4mm(1 吋) 內亦有成功案例可尋，其原因係骨材個別表面積增加，而增加強度。Alexander 【 2.21 】發覺 76mm(3 吋) 骨材顆粒所澆生之握裹強度只有 12.7mm(1/2 吋) 骨材顆粒的十分之一。同時指出除非非常好或非常差的骨材，一般骨材的握裹強度約為 7 天齡期水泥漿強度的 50% 至 60%。較小粒徑骨材能產生較高強度的另一原因，係由於水泥漿的彈性模數與骨材種類之模數有所不同，而可能造成骨材顆粒邊界應力集中的現象，但會因採用小骨材而減低。

2 - 5 - 3 顆粒形狀

許多研究均證明壓碎石子比圓形卵石更能產生較高強度，原因可能是有稜角的顆粒所產生的握裹強度較大之故。但過度的稜角可能造成用水量增加且降低工作性，故應避免之。理想的骨材必須是淨潔、稜角方體；百分之百壓碎，含少量扁平且細長條狀顆粒【 2.14 】。

2 - 5 - 4 礦物學

握裹強度在高強度混凝土製造過程中俱舉足輕重之角色，因此骨材的礦物學特質應該能增加化學鍵結為宜。某些人工材料，譬如卜特蘭與高鋁水泥熟料及精選的高爐石曾被運用於營建工程內【 2.15, 2.22 】，但是熟料的長期穩定性仍無法確定。Harris 指出 Moorehead 曾測得至少有 1970 kg/cm^2 (28,000 psi) 的砂-石灰鍵結強度，或許含砂灰質礦物將含有相當潛在鍵結強度，惟這方面值得進一步研究及證實。

2 - 5 - 5 吸水性

養護工作在高強度混凝土製造過程中相當重要。為了生產含高固體含量的水泥漿，混凝土內必須含有絕對最低水量的配比。但混凝土澆置及水泥漿結構形成後，水量就不再受限制，尤其在初期水化階段更是如此【 2.15, 2.24 】。在這個時期，大量水份與水泥相結合，在化學反應完成後，水份的損失約占全部體積的 1/4。這種現象造成小真空吸氣效應，可將水份短距離內拉入仍俱相對可滲透的混凝土內。此時，加入結構內的水均會增加極限水化量及水泥漿每單位量的固體百分比，相對混凝土的強度亦跟著增加。如果骨材能吸收適當量的水份，則其作用如同小型養護水池，能分佈水份至混凝土內，因此提供額外的養護水，這對低水灰比水泥漿甚為有益。

2 - 5 - 6 骨材本質強度

一般都認為高強度混凝土亦要採用高強度骨材，這種論調在某些方面是對的，然而許多研究發覺【 2.25, 2.26 】，使用某些骨材在到達某種強度時，超過此點即使再加入水泥量仍無法增加混凝土的抗壓強度：這種現象並非導因於混凝土的抗壓強度已經完全發展，而是已經達到水泥-骨材混合料間的潛在鍵結極限了。

2 - 6 水

高強度混凝土對水質的要求（依 CNS 1010 R73 決定）已不像傳統混凝土那般嚴苛。通常，混凝土所需的水都要求是自來水品質。雖然這項限制太保守，但在以往由於混凝土的製造地點靠近市區自來水廠，因此倒沒有造成太大的問題，但是實際上仍有可能會採用低品質水的情形。在這些情況下，應該以此種水加以製造混凝土來測試，並與蒸餾水所造成之混凝土加以比較，或者可以製造 CNS 1010 (ASTM C 109) 水泥砂漿立方體。不管那種情形，都必須對 7 天與 28 天齡期的試體進行抗壓測試。如果採用有問題水質所製造試體之抗壓強度，則至少應為由蒸餾水製造試體的 90%【 2.27 】。有關詳細資料及特殊性質規範之資料，參見參考書目 2.28, 2.29 及 2.30。

2 - 7 引用文獻

- 2.1. Hester, Weston, "High Strength Air-Entrained Concrete", Concrete Construction, V.22, No.2, Feb.1977, pp.77-82.
- 2.2. "High Strength Concrete in Chicago High-Rise Buildings", Task Force Report No.5, Chicago Committee on High-Rise Buildings, Feb.1977, 63 pp.
- 2.3. Freedman, Sydney, "High-Strength Concrete", Modern Concrete, V.34, No.6, Oct.1970, pp.29-36, No.7, Nov.1970, pp.28-32, No.8, Dec.1970, pp.21-24, No.9, Jan.1971, pp.15-22, and No.10, Feb.1971, pp.16-23. Also, Publication No. IS176T, Portland Cement Association.
- 2.4. "Superplasticizing Admixtures in Concrete", Publication No.45.030, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1976, 32 pp.
- 2.5. Eriksen, Kirsten, and Nepper-Christensen, Palle, "Experiences in the Use of Superplasticizers in Some Special Fly Ash Concretes", Developments in the Use of Superplasticizers, SP-68, American Concrete Institute, Detroit, 1981, pp.1-20.
- 2.6. Developments in the Use of Superplasticizers, SP-68, American Concrete Institute, Detroit, 1981, 572 pp.

- 2.7.黃兆龍, 林建宏, 高強度飛灰混凝土性質及結構行為研究 (I), NSC 77-0410 E011 06, 行政院國家科學委員會專題研究成果報告, 國立台灣工業技術學院營建系, 1989, pp.196.
- 2.8. 中國國家標準
- 2.9.Kleinlogel, Adolf, Influences on Concrete, Frederick Ungar Publishing Co., New York, 1950, pp.211.
- 2.10.Wolsiefer, John, "Ultra High-Strength Field Placeable Concrete with Silica Fume Admixture", Concrete International: Design & Construction, V. 6, No. 4, Apr. 1984, pp. 25-31.
- 2.11.Malhotra, V. M., and Carrette, G. G., "Silica Fume", Concrete Construction, V. 27, No. 5, May 1982, pp. 443-446.
- 2.12.Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Other Mineral By-Products in Concrete, SP-79, American Concrete Institute, Detroit, 1983, 1196 pp.
- 2.13.Blick, Ronald L., "Some Factors Influencing High-Strength Concrete", Modern Concrete, V. 36, No. 12, Apr. 1973, pp. 38-41.
- 2.14."High Strength Concrete", Manual of Concrete Materials-Aggregates, National Crushed Stone Association, Washington, D. C., Jan. 1975, 16 pp.
- 2.15.Perenchio, W. F., "An Evaluation of Some of the Factors Involved in Producing Very High-Strength Concrete", Research and Development Bulletin No. RD014, Portland Cement Association, Skokie, 1973, 7 pp.
- 2.16."Methods of Achieving High Strength Concrete", ACI Journal, Proceedings V. 64, No. 1, Jan. 1967, pp. 45-48.
- 2.17.Fowler, Earl W., and Lewis, D. W., "Flexure and Compression Tests of High Strength, Air-Entraining Slag Concrete", ACI Journal, Proceedings V. 60, No. 1, Jan. 1963, pp. 113-128.
- 2.18.Harris, A. J., "High-Strength Concrete: Manufacture and Properties",

- The Structural Engineer (London), V. 47, No. 11, Nov. 1969, pp. 441-446.
- 2.19. Walker, Stanton, and Bloem, Delmar L., "Effects of Aggregate Size on Properties of Concrete", ACI Journal, Proceedings V. 57, No. 3, Sept. 1960, pp. 283-298.
- 2.20. Cordon, William A., and Gillespie, H. Aldridge, "Variables in Concrete Aggregates and Portland Cement Paste Which Influence the Strength of Concrete", ACI Journal, Proceedings V. 60, No. 8, Aug. 1963, pp. 1029-1052.
- 2.21. Alexander, K. M., "Factors Controlling the Strength and Shrinkage of Concrete", Constructional Review (North Sydney), V. 33, No. 11, Nov. 1960, pp. 19-28.
- 2.22. "Tentative Interim Report on High Strength Concrete", ACI Journal, Proceedings V. 64, No. 9, Sept. 1967, pp. 556-557.
- 2.23. Harris, A. J., "Ultra High Strength Concrete", Journal, Prestressed Concrete Institute, V. 12, No. 1, Feb. 1967, pp. 53-59.
- 2.24. Klieger, Paul, "Early High Strength Concrete for Prestressing", Proceedings, World Conference on Prestressed Concrete, San Francisco, 1957, pp. A5-1-A5-14.
- 2.25. Burgess, A. James; Ryell, John; and Bunting, John, "High Strength Concrete for the Willows Bridge", ACI Journal, Proceeding V. 67, No. 8, Aug. 1970, pp. 611-619.
- 2.26. Gaynor, Richard D., "High Strength Air-Entrained Concrete", Joint Research Laboratory Publication No. 17, National Sand and Gravel Association/National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Mar. 1968, 19 pp.
- 2.27. "Requirements for Water for Use in Mixing or Curing Concrete", (CRD-C

- 400-63), Handbook for Concrete and Cement, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, 2 pp.
- 2.28. Concrete Manual, 8th Edition, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, 1975, 627 pp.
- 2.29. McCoy, W. J., "Mixing and Curing Water for Concrete", Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP-169A, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1966, pp. 515-521.
- 2.30. Steinour, Harold H., "Concrete Mix Water-How Impure Can It Be?" Journal, PCA Research and Development Laboratories, V. 2, No. 3, Sept. 1968, pp. 32-50. Also, Research Department Bulletin No. 119, Portland Cement Association.

第三章 混凝土配比

3-1 引言

高強度混凝土的配比受許多因素影響，例如：強度要求、測試齡期、材料特性及應用類別等。此外，經濟因素、結構要求、製造可行性、養護環境及季節都會影響配比的選擇。關於混凝土配比的資料，可參見美國混凝土學會 ACI 211.1 及 ACI SP 46 【3.1】，而在 ACI SP-46 內可參考的論文為「高強度混凝土的配比與控制」，高強度混凝土的配比較一般強度混凝土的配比更加嚴謹，一般都會採用經特殊選擇的波索蘭材料與化學摻料；水灰比則維持在較低比例，而且要透過許多試拌程序來建立檔案，俾研究人員決定最佳拌合配比。

3-2 規定強度

3-2-1 建築技術規則鋼筋混凝土篇

建築技術規則明白規定混凝土強度要求：通常，混凝土的配比可使抗壓強度試驗值的平均值超過其規定強度 f_c ，其數值足以使試驗值低於規定值之相對頻率較低，因此必須依據工程統計學的觀念來設計需求強度。任何量測資料都可算出一個平均值，任一單獨試驗值與平均值的差異可用標準偏差來計算，而混凝土試驗值標準偏差的計算有助於預測未來試驗結果的變異性。

影響試驗結果變異性的因素很多，包括：材料、工廠、承包商、監造單位及環境因素等。選擇配比及決定可接受的標準偏差時，必須同時考慮所有影響強度變異及強度量測的因素，且用來作為拌合混凝土的材料及配比，不應較所預期規劃的有更嚴格的控制。一般來說，高強度混凝土比一般強度混凝土還難測試【3.3,3.4,3.5】，因若測試不順利，會造成量測值太低或變異性較高之現象。若試驗結果的變異很高，則平均強度的要求也應較高。若變異性比原先預計的還高，則試驗值低於指定強度的頻率會特別的高。因此，在選擇標準偏差值時，混凝土生產者應該提出最適當的試驗記錄以佐證之【3.6】。若拌合配比已為最佳組合時，則在生產高強度混凝土時很難再得到更高的平均強度。

建築技術規則也注意到某些試驗結果可能低於預定強度，解決之道是將試驗值低

於預定強度的速率加以限制。一般而言，混凝土若符合下列條件，即視為可接受：

- ① 每連續三組強度試驗結果之平均值等於或大於規定強度 f_c 。
- ② 任一組強度試驗（二個圓柱試體平均值）不可低於 f_c 值 35 kg/cm^2 。

但是有一些設計者會訂出一個超過規則所要求之強度，例如不自動要求除去低於要求強度 35 kg/cm^2 (500 psi) 之混凝土，但要求重新調整配比及改進不足之處，這是因為建築技術規則設計篇所應用的混凝土強度範圍是 210 kg/cm^2 (3,000 psi) 至 350 kg/cm^2 (5,000 psi) 之故。高強度混凝土比低強度混凝土更易隨時間增長而增加強度【 3.7 】，對七天至九十天齡期的高強度混凝土而言，其抗壓強度增加之百分比會等於或小於較低強度之混凝土，但實際上所增加之強度值卻高得多。

例如：七天齡期平均強度為 175 kg/cm^2 (2,500 psi) 的試體在九十天齡期時平均強度達 294 kg/cm^2 (4200 psi)，其所增加之強度約為七天強度之 60%，即 119 kg/cm^2 (1,700 psi)；而齡期七天平均強度為 511 kg/cm^2 (7,300 psi) 的試體在九十天齡期可能達 700 kg/cm^2 (10,000 psi)，其增加幅度只 37% 而已，但所增加的強度值 189 kg/cm^2 (2,700 psi) 卻整整比較低強度者多 70 kg/cm^2 (1,000 psi)。

建築技術規則准許拌合配比的設計依據工地經驗或實驗室試拌結果而定，若生產者決定依實驗室試拌結果來選擇高強度混凝土之拌合配比，則仍必須對工地澆置的混凝土作進一步測試。

3-2-2 評估作業

測試資料齊全後，可參考美國混凝土學會 ACI 214 的「混凝土抗壓測試結果評估方法」再度進行評估工作，根據測試結果所需進行之分析工作可參見 4-8-1 及 4-8-2 節，分析工作有助於得到正確的拌合配比。

3-2-3 其他強度規定

在某些情形下，除抗壓強度外，其他因素也可能會影響拌合配比，例如撓曲與拉力強度等。

3-3 測試齡期

拌合配比之選擇會受測試齡期的影響，測試齡期則依施工需求而有所不同，一般

而言，測試齡期是指達到接受條件的時間，一般為二十八天，當然試驗工作在接受測試的齡期之前或之後進行，應視實際需要來決定。

3 - 3 - 1 早期階段

預力混凝土之運作在 12 至 24 小時內也許需要高強度才行，而在某些特殊情形下，如：機器基礎、路面或採用滑動模板的早期使用要求條件下，必須採用早期能獲高強度的混凝土。後拉法混凝土通常在第三天施加預力，因此需要較高強度。一般而言，晚期強度高的混凝土通常也會有高的早期強度，但是對不同的測試齡期所採用的材料與配比會有所不同，例如：Type III 水泥不加飛灰曾用於高早期強度之設計；而 Type I 或 Type II 水泥及混合飛灰水泥則用於需晚期強度之設計。由於養護溫度及水泥早期特性的影響，早期強度較易產生變異，因此，對於較高的規定強度或較晚的測試齡期，預期的配比應事先加以評估。

3 - 3 - 2 二十八天齡期

一般測試混凝土抗壓強度的齡期是二十八天，而根據 CNS 1132 規定所製作之 152 ϕ \times 305mm (6 ϕ \times 12in) 圓柱體和結構物之行為有良好之關係，尤其對較低強度且不要求早期強度或早期評估之混凝土而言，關係更好。但高強度混凝土在晚期強度會顯著增加，因此，當施工方面之要求能夠容許混凝土有更多的時間去發展強度時，高強度混凝土應在晚期再進行評估。配比及重要的膠結物成份則依測試齡期之需要而調整。

3 - 3 - 3 晚期階段

高強度混凝土通常係在五十六天至九十天晚期階段測試，高強度混凝土常被應用於高層建築物之柱。利用長期性強度增加之性能以便達到施工材料的有效運用是有益的，而且由於高層建築物的載重在晚期階段方才發生，因此這種作法也是正確的。

對晚期階段之接受條件有所規定的工程，發展早期階段試驗或加速試驗以預測晚期強度對混凝土供應商是有利的【3.8】，ACI SP-56 加速強度測試，頗有參考價值【3.9】；當然，與材料和配比有關且能連繫兩者強度的檔案資料都要加以收集。雖然，這些試驗不一定對晚期強度有正確評估，但是可以儘早發現有較低強度之趨勢，而晚期之接受條件常令有問題的混凝土存在著很長的一段時間。

有的圓柱體會被保留下來在規定的測試齡期後試驗，若混凝土有未達到規定抗壓強度 f_c 之情形，則利用晚期階段或保留的圓柱體進行試驗，有時亦可證明此類被懷疑有問題之混凝土是可接受的。

3 - 3 - 4 養護有關的測試齡期

在決定拌合配比時，養護方法要與測試齡期一併加以考慮，特別是要求較高的早期強度時更是如此，混凝土藉由成熟度而增加強度，而成熟度卻依養護溫度及時間而定。

3 - 4 水灰比

3 - 4 - 1 高強度混凝土水灰比的特性

水灰比與抗壓強度之關係在低強度混凝土已得到確認，此關係可應用於高強度混凝土，較高水泥含量與較低水量可產生較高強度，若加入較多水泥於拌合物內，水量之需求也會跟著增加，而增加的水泥量超過某種程度後，抗壓強度即不再增加。混凝土中若採用波索蘭材料，則水重與水泥加上波索蘭材料後重量之比值將用來取代傳統的水灰比。一般可採用符合 CNS 3036 規範且燒失量少於 3.0% 的飛灰，及符合 CNS 61054 第 A,D,F,G 型化學摻料【 3.10 】。

混凝土的坍度與水灰比和混凝土中全部水量都有密切關係，以往在預鑄施工方面雖曾製造過坍度為 0 至 5cm(2in) 的混凝土，但在搗實時須特別注意。不含高性能減水劑的混凝土規定坍度在 6 至 11cm(2 1/2 至 4 1/4in) 之間，工地澆置、不含強塑劑的混凝土坍度約在 12cm(4 3/4in) 【 3.10 】，使用高性能減水劑會造成較低水灰比及較大坍度【 3.11 】。

高強度混凝土的水灰比一般在 0.27 至 0.50 之間，液體摻料含量，特別是高性能減水劑，有時亦包括在水灰比計算之內。

3 - 4 - 2 抗壓強度的估計

在某一水灰比之下所產生的混凝土抗壓強度會依採用的水泥、骨材及摻料之不同而有所不同。某一水灰比下，抗壓強度變化的主要原因包括：水泥產生強度的能力、飛灰或其他波索蘭材料產生波索蘭反應的可能性；不同類型及廠牌的卜特蘭水泥所產生的抗壓強度也不同，如圖 3-1 所示【 3.2, 3.12 】。

與水泥抗壓強度範圍有關的規範及文獻資料可參見 CNS 3090 和 Peters 【3.13】之論著。飛灰的波索蘭反應指標可達 CNS 3036 所定義之卜特蘭水泥控制的 75% 至 110% ，某些含有砂灰的波索蘭材料，其波索蘭反應指標曾超過 200% 【3.14】。個別的波索蘭材料其水量需求有所不同，通常隨細度增大而增加，而飛灰混凝土所需水量比卜特蘭水泥混凝土來得低，這點有助於降低拌合物的水灰比。

因使用骨材之不同，實驗室拌合之混凝土，在一定水灰比下，也會有不同的抗壓強度【3.15】。此外，雖材料來源相同，但實驗室拌合結果與實際生產結果也會不同，圖 3-2 是表示在一定水灰比下，強度的變化情形。採用實際工程所使用的材料來進行試拌是有必要的。一般而言，實驗室試拌所產生的強度會比實際生產的强度高，如圖 3-3 所示【3.2】。

3-5 水泥含量

高強度混凝土混合物內的水泥含量最好是由試拌的結果來決定。一般言之，高強度混凝土之試驗計畫中，水泥含量約在 392 至 557 kg/m³ (660 至 940 lb/yd³) 之間【3.2,3.16】。在評估最佳水泥含量時，通常水量視混合物之需水量而定，以使得試拌時都能達到相同之稠度。

3-5-1 強度

不管採用任何材料之混凝土，都有一產生最佳強度的水泥含量，有時，超過這個最佳含量時，即使再增加水泥亦無法增加強度。對某一水泥含量而言，其強度會隨混合物之需水量及該水泥之特性而變，如圖 3-1 所示。在考慮水泥含量時，CNS 3090 的「評估水泥強度一致性的標準方法」可供參考【3.13】。在加水泥於高強度混合物時，必須評估水泥砂漿至 90 天齡期的抗壓強度。

混凝土混合物的強度會依膠體空間比而變化，所謂膠體空間比的定義是：「水化水泥漿體積與水化水泥體積加毛細管體積總和的比值」【3.17】。這在採用輸氣摻料的情形下更為正確，輸氣混凝土中使用較高的水泥含量所產生的強度並不會比非輸氣混凝土的强度高。大約每增加百分之一的空氣量可能會降低百分之五至七的混凝土強度，如圖 3-4 所示。

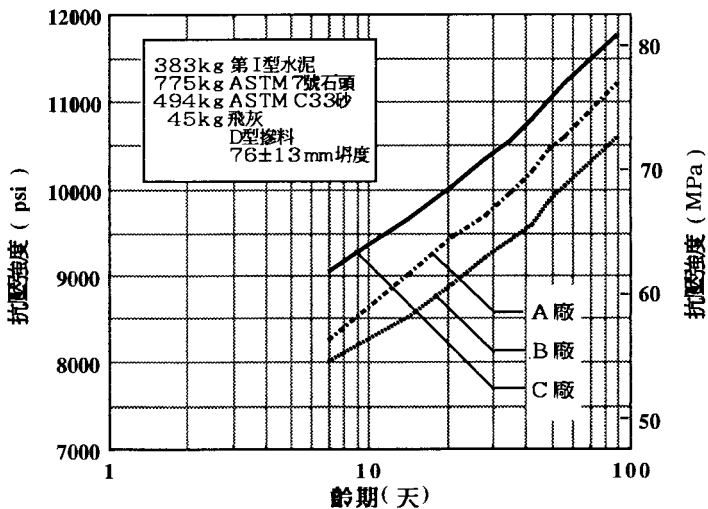


圖 3-1 不同品牌水泥對混凝土抗壓強度的影響【3.2.3.12】

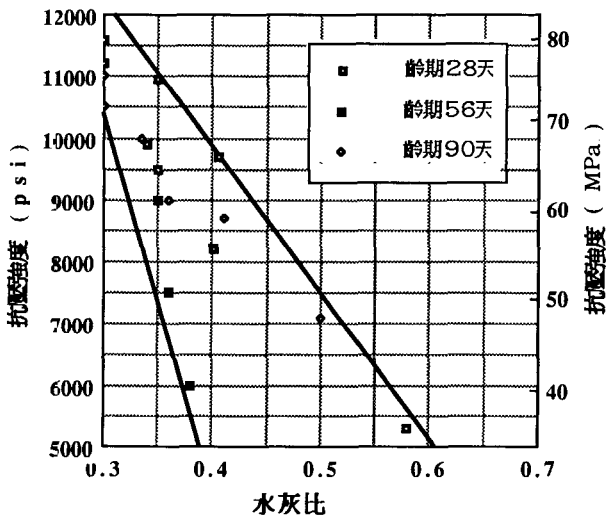


圖 3-2 混凝土抗壓強度與水灰比關係圖【3.2,3.10,3.15,3.16】

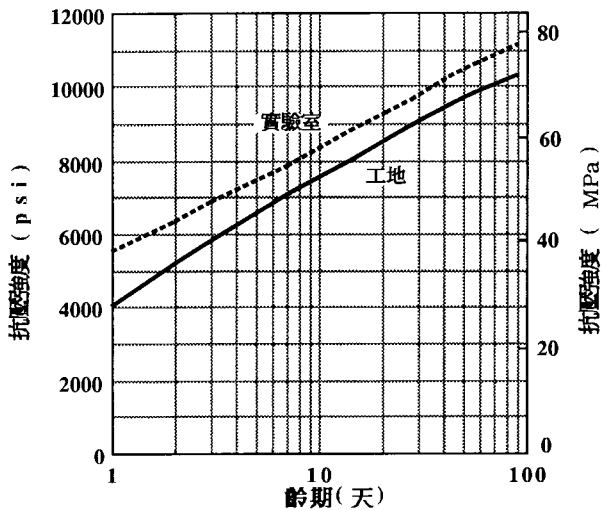


圖 3-3 9000psi (62MPa) 混凝土強度於實驗室與工地澆置之強度比較【3.2】

3-5-2 最佳化

決定水泥含量有一原則可循，即先決定產生最佳強度的材料組合型態。理論上，在不同的稠度時對各種可能採用的水泥、飛灰、液體摻料及骨材加以評估，可得到最佳水泥含量及最佳材料組合的資料，然通常受限於時間、經費的因素，測試無法完全周到，所以對使用水泥的廠牌及波索蘭材料的等級、來源作評估時則一定要特別小心，例如在 1977 年以前，芝加哥地區的高強度混凝土營建工程皆採用 F 級飛灰，而同時期在休斯頓地區則採用 C 級飛灰【3.2.3.10】，芝加哥一直到 1977 年後才改採用 C 級飛灰材料；台灣地區則仍使用 F 級飛灰【3.18】。

不同強度時使用不同的最大骨材粒徑，其水泥的強度效用也會有不同，在高強度且使用較小的最大骨材粒徑時可獲得較佳水泥效用，如圖 3-5 所示，例如：若最大的骨材粒徑小於 9.5 mm (3/8 in) 時，則 490 kg/cm² (7,000 psi) 之拌合物能得到最高的水泥效用。

3-5-3 限制因素

有幾項限制高強度混合物所需最大水泥含量的因素，分述於後。若所加水泥量超過最佳水泥量上限時，混凝土強度可能會降低；有些摻料如減水劑，因會阻止水泥分子的凝聚力，而使得最大水泥含量也會隨著改變。如果拌合物內加入太多水泥會造成黏度增加，工作性亦隨之降低，水泥、波索蘭和砂之拌合配比必須考慮水灰比對拌合物澆置性的影響，如加入輸氧劑後水泥對混合物工作性之可能受到影響。

混凝土的最高溫度要求會限制水泥使用類別和用量【3.2.3.18】，若能採用冰、緩凝劑或波索蘭材料可能有助改善此項限制。水泥量高的混合物，其需求水量亦高，因此，決定最佳養護水量以達充分水化可採用下列方式：減少水泥量、骨材的適當選擇及配比更加審慎進行，換言之，即其他因素儘量最佳化。

坍度損失會促成需水量的增加及延長混凝土凝固時間，而坍度損失幅度及凝固期也因水泥類型、廠牌、水泥量而不同，在一定範圍內，較低水泥含量若能產生足夠強度時，亦可加強混合物的澆置性。

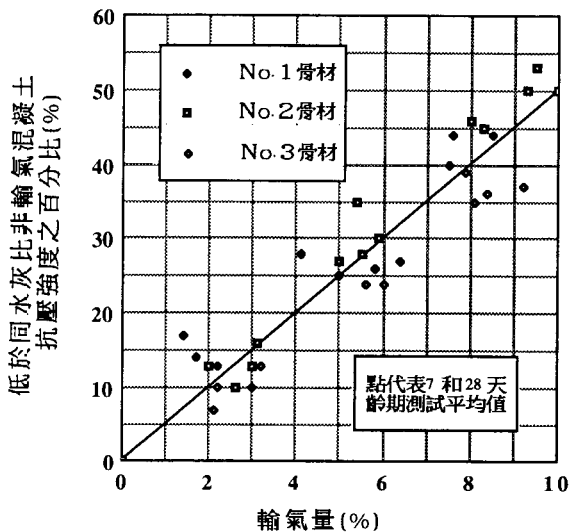


圖 3-4 輸氣量與強度折減之關係【3.26】

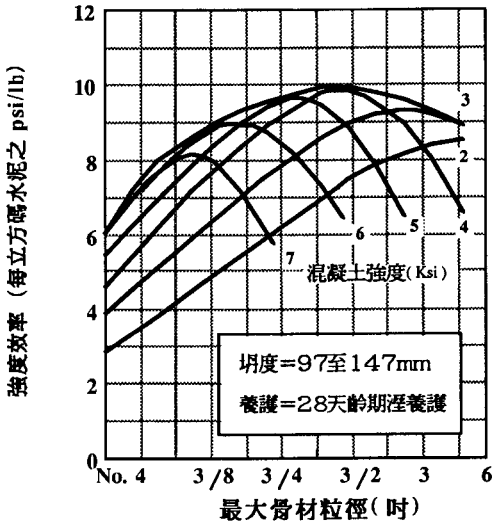


圖 3-5 骨材最大粒徑對混凝土強度之影響【3.2】

3-6 骨材配比

骨材在混凝土混合物內佔最大的比例，因此如何調配骨材非常重要，通常，可用常態重量骨材來製造高強度混凝土；高強度結構輕質混凝土曾被成功使用【 3.20, 3.21 】；採用重骨材的高強度及高密度混凝土有其可能性【 3.22 】。

3-6-1 細骨材

混合物配比時，一般認為細骨材或砂對配比選擇的影響比粗骨材大，主要是同樣重量的細骨材，其表面積比粗骨材大，而由於骨材表面皆要塗抹或吸附水泥漿，因此粗、細骨材的對比對水泥漿需求量有直接影響。再者，砂之形狀可呈圓球狀、微稜角或極稜角，雖然砂的需求總量不變，但這些特質亦都可能對水泥漿需求量造成影響。

細骨材的級配對新拌及硬固混凝土之性質都有影響，例如：若砂大部分都是通過 50 及 100 號篩，則新拌混凝土之工作性將會增加，但所增加的表面積便需要更多的水泥漿來塗抹潤滑，如此一來，混合物造價將提高，若是用加水方法來增加水泥漿體積，則會造成強度降低的不良後果。

若增加粗骨材，降低細骨材含量，則可降低水泥漿需求量，且較經濟。用這種配比方法可使含有一定膠結材料的混合物得到較高強度。但是，若砂配比太低，工作性將成問題。若能採用機械振動機，則低砂含量所帶來的影響便可降低，另外，採用機動粉刷設備亦有助克服鏟平問題。有時為了砂的級配及增加其強度以生產更高強度混凝土，似可以混合不同種類的砂。

3-6-2 粗骨材

配合砂的粗骨材最佳量及最佳粒徑視砂之性質而定，尤其是砂的細度模數更是影響關鍵所在，這可從表 3-1 看出來。每一立方米的混凝土，其需水量隨砂的孔隙大小而改變，即砂內孔隙每增加 1%，需水量即增加 3.8 公升（1 加侖）【 3.23 】，另有報告指出若砂中孔隙很小，則表 3-1 所示粗骨材配比可增加 4% 左右【 3.24 】。如果砂粒極為尖突，則粗骨材需求量可減少 4%，儘管此種作法將會改變一定坍度的需求水量，以上粗骨材與砂之含量調整可達到相當的工作性，不管混凝土內需水量改變多少，為使水泥達到一定稠度，且使水灰比維持不變，必須調整水泥含量與膠結材料。

表 3-1 單位體積混凝土之粗骨材體積

最大骨材粒徑 (吋)	對不同細度模數砂，每單位體積 積混凝土之乾拌粗骨材體積			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.60
1	0.71	0.69	0.67	0.65
3/2	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.80	0.78	0.76
6	0.87	0.85	0.83	0.81

表 3.1取自 A C I 211.1 乾拌骨材體積乃遵循 A S T M C 29 骨材單位重
規範而定，此體積值乃依實際經驗所得，適用於一般鋼筋混凝土建築。
鋪面工程所需混凝土工作性較低，可提高表中之量百分之十左右。工作
性需求較高的混凝土，請參見 5.3, 6.1 部份。

另外一種粗骨材配比方法是將 CNS 1240 規範內的骨材配比量改變，參考文獻 3.25 及 3.26 對這點有詳盡描述，這個方法可視為一種避免顆粒干擾現象的方法，即增加粗骨材量而減少砂含量，如此一來，水泥漿需求量亦跟著降低，黏度增加，強度也更為提高。

3-6-3 骨材配比

表 3-1 所列的粗骨材數量可作為初期配比工作之參考；砂的特質（如細度模數與突曲程度等）因會改變粗骨材的需求量，故要審慎評估。一般而言，針對需求的工作性採用最小砂量時，可使水泥漿產生最佳強度。機拌可助降低砂之配比量。粗骨材粒徑愈小愈好，而壓碎的骨材更可對水泥漿造成最大握裹強度。

3-7 摻料配比

幾乎所有高強度混凝土都含有摻料，這些摻料的數量與組合方式都對塑性狀態及硬化後之高強度混凝土有所影響，因此，對於這些摻料的影響要審慎評估（見 2-3 與 2-4 節）。混合物配比的適度調配要隨摻料含量或組合方式之改變進行，而因材料性質的變異性，測試工作變得更加重要。

3-7-1 波索蘭材料

波索蘭材料常用來替代水泥，在高強度混凝土使用上，波索蘭材料可替代 10% 至 40% 重的卜特蘭水泥。某些情形下，膠結材料絕對體積增加的原因是由於加入波索蘭材料之故，此時通常需要減少砂的絕對體積。

若採用飛灰，則混合物之需求水量會略為減少，水體積的減少則以增加砂之方式補償。其他波索蘭材料則有不同情況發生，例如砂灰會大量增加需水量，因此需要使用緩凝劑或強塑劑以因應之，含有砂灰的材料尚須包括均勻拌合良好的化學摻料【3.14】。

3-7-2 化學摻料

3-7-2-1 傳統減水劑及緩凝劑

用於高強度混凝土的摻料含量視其種類及用途而定，一般而言，稍過量加入這些摻料可使減水量由 5% ~ 8% 增至 10%，此時，便需增加砂量以彌補總體積的損失。

3-7-2-2 強塑劑或高性能減水劑

混凝土加高性能減水劑時其配比之調整與加傳統減水劑者相似，由於採用這類高性能減水劑會大量減低用水量，減低幅度約在 12% 至 25% 之間，因此有必要加入大量砂以彌補降低水量所造成之體積損失，然而某些設計師使用高性能減水劑並不另調整配比，目的在增加混凝土的工作性。有時基於經濟因素考慮及減低水化熱，可降低水泥或膠結材料含量。但是，通常在高強度混凝土中，高性能減水劑的主要作用在降低水灰比及增加坍度，其效果奇佳，同時因為使用大量液態強塑劑之故，在計算水灰比時此類摻料亦常包含在內。

3-7-2-3 輸氣劑

輸氣劑因會引起抗壓強度的降低，因此很少應用在高強度混凝土內，通常可利用降低砂含量以降低水灰比和調節產量，而在高強度混凝土，特別是在低坍度混合物及應用大量飛灰時，輸氣劑的使用劑量都比較大。

3-7-2-4 組合方式

大部分高強度混凝土均含有礦物類與化學類摻料，這兩類摻料也可能會有不同化學摻料的組合。高性能減水劑若與傳統減水劑或緩凝劑配合，效果更好，這是因為可降低坍度損失之故，而採用卜特蘭與波索蘭材料的高強度混凝土也有可能含有傳統減水劑及高性能減水劑。

3-8 工作性

工作性的定義是指：「已拌合新拌混凝土的特性，是決定拌合、澆置、搗實、施工容易度及均勻性的關鍵因素」。

3-8-1 坍度

CNS 1176 規範列有卜特蘭水泥混凝土坍度的測試方法，可量測混凝土的稠度，這個測試方法卻不適用於特低或特高坍度的混凝土。對於極黏硬的混合物可採用 Vebe 試驗儀來計量高強度混凝土的工作性。

高強度混凝土本身搗實必須很高，且完全與鋼筋接觸，不留任何孔隙。坍度必須滿足這個需求，提供工作性佳、易於震動、移動性高的混合物，以穿過鋼筋間之小間隙。一般而言，102 mm (4 in) 的坍度，其工作度即符合需要。但是，在配比設計前應先考慮模板的形狀與鋼筋的間距。坍度低於 76 mm (3 in) 時則需藉助特殊搗實

設備與步驟，方能使任務順利達成。

若澆置不當，則結構之整體性將大打折扣。高強度混凝土比低強度混凝土的坍度損失速率快，若坍度是現場控制的標準，則在拌合後必先加以測試，而混凝土必需在其失去工作性之前澆置。

3 - 8 - 2 澆置性

骨材最大粒徑小於 12 mm (0.5 in)，較高水灰比的高強度混凝土一般澆置性都不錯，但必須先將砂對粗骨材比例最佳化。本地材料特性對配比的影響很大，而水泥細度及其粒徑大小分佈會影響混合物特性，加入某些摻料有助於改善混合物的澆置性。在拌合配比確立之前，必先對臨摹形式的澆置性加以評估，由於澆置程序，振動技術及日程計畫對成品與混合物澆置性有極大影響，故在評估工作進行之前須先確立無誤。

3 - 8 - 3 流動性與黏滯性

因應流動性所需要的坍度可經設計而成；但必須先對骨材及配比進行評估，以達到最佳坍度。骨材的顆粒扁長，粗、細骨材的級配不良都可能影響流動性，造成需水量增加及強度降低。

高強度混凝土含高細粒料混合物已俱適度黏性，某些不良的水泥、水泥／波索蘭或水泥／摻料組合方式會造成不正當黏度而破壞流動性，在不影響工作性情形下混合物內膠結材料含量為強度發展要求的最低含量，並配合粗骨材最高含量，則強度發展條件即已俱全。若原本設計的混合物發生特性改變現象且黏度增加時，應檢查配比、水泥假凝及是否有不當輸氣現象，高強度混合物的特性若有改變，可能是品質控制不良的警訊。

3 - 9 試 拌

高強度混凝土的發展過程中，常需要大量試拌資料【 3.2,3.10 】，除了實驗室試拌外，工地試拌也常用來預測實際生產狀況，所有測試取樣必須由產量中提供，且須具代表性。為了避免意外測試誤差，有些研究人員將測試混合物故意弄亂固定之程序，以得到正確的評估。

3 - 9 - 1 實驗室試拌研究

實驗室試拌目的有數項，而試拌方式應依照 CNS 1230 「實驗室混凝土試體製造與養護方法」。但是，在工地會碰到的問題如：凝結時間、處理方式及環境皆應加以考慮。

材料的選擇可藉助比較測試，除了主要試驗材料維持不變外，必須考慮其他可能變異，測試時不同組合方式中總有某些最佳之狀況，在測試最佳材料的最佳含量時，研究人員應隨時記錄最佳材料組合與配比關係。

一旦混合物組成方式確立，接下來可進行混合物特性定量測試，不同齡期的強度特性亦應加以記錄，如此一來，水量、坍度損失、泌水量、析離及凝固時間方可加以評估，混合物的單位重量要確立，往後則成為品質控制的利器。同時對於結構因素，如：乾縮與彈性模數也可確立，雖然工作性與澆置性較難確立，但仍要提供主觀評估。

3-9-2 工地製造試拌

一旦實驗室試拌結果確立，接著可繼續進行工地測試，常常實驗室試拌結果的強度比一般生產情形下的強度要來得高，如圖 3-3 所示【3.2】。實際工地所需水量及混凝土體積與實驗室的情形有明顯差異，周遭溫度與氣候都會影響混凝土的行為，採用實際工地的設施及人員來作試拌生產，則生產可行性與品控程序才能正確被評估。

3-10 引用文獻

- 3.1. Proportioning Concrete Mixes, SP-46, American Concrete Institute, Detroit, 1974, 240 pp.
- 3.2. Blick, Ronald L., Petersen, Charles F., and Winter, Michael E., "Proportioning and Controlling High Strength Concrete," Proportioning Concrete Mixes, SP-46, American Concrete Institute, Detroit, 1974, P. 149.
- 3.3. Kennedy, T. B., "Making and Curing Concrete Specimens," Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials, STP-169A, American Society for Testing and Materials, Philadelphia,

1966, pp. 98-101.

- 3.4. Price, Walter H., "Factors Influencing Concrete Strength," ACI Journal, Proceedings V. 47, No. 6, Feb. 1951, pp. 417-432.
- 3.5. Hester, Weston T., "Testing High Strength Concretes: A Critical Review of the State of the Art," Concrete International: Design & Construction, V. 2, No. 12, Dec. 1980, pp. 27-38.
- 3.6. Gaynor, Richard D., "Mix Design Submission Under ACI 318 and ACI 301-(or Which Test Record Should I Use?)," NRMCA Technical Information Letter No. 372, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, May 8, 1980, 7 pp.
- 3.7. Schmidt, William, and Hoffman, Edward J., "9000 psi Concrete-Why? Why Not?," Civil Engineering-ASCE, V. 45, No. 5, May 1975, pp. 52-55.
- 3.8. Gaynor, Richard D., "An Outline on High Strength Concrete," Publication No. 152, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, May 1975, pp. 3, 4, and 10.
- 3.9. Accelerated Strength Testing, SP-56, American Concrete Institute, Detroit, 1978, 328 pp.
- 3.10. Cook, James E., "A Ready-Mixed Concrete Company's Experience with Class C Fly Ash," Publication No. 163, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Apr. 1981, 11 pp.
- 3.11. Hester, Weston, T., and Leming, M., "Use of Superplasticizing Admixtures in Precast, Prestressed Concrete Operations."
- 3.12. "High Strength Concrete." National Crushed Stone Association, Washington, D. C., Jan. 1975, 16 pp.
- 3.13. Peters, Donald J., "Evaluation of Cement Variability-The First Step," Publication No. 161, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Apr. 1980, 9 pp.

- 3.14. Wolsiefer, John, "Ultra High-Strength Field Placeable Concrete with Silica Fume Admixture," *Concrete International: Design & Construction*, V. 6, No. 4, Apr. 1984, pp. 25-31
- 3.15. Perenchio, William F., and Klieger, Paul, "Some Physical Properties of High Strength Concrete," *Research and Development Bulletin No. RD056.01T*, Portland Cement Association, Skokie, 1978, 7 pp.
- 3.16. Freedman, Sydney, "High-Strength Concrete," *Modern Concrete*, V. 34, No. 6, Oct. 1970, pp. 29-36, No. 7, Nov. 1970, pp. 28-32, No. 8, Dec. 1970, pp. 21-24, No. 9, Jan. 1971, pp. 15-22, and No. 10, Feb. 1971, pp. 16-23. Also, Publication No. IS176T, Portland Cement Association.
- 3.17. Neville, A. M., *Properties of Concrete*, 3rd Edition, Pitman Publishing Limited, London, 1981, 779 pp.
- 3.18. Hwang, C. L., C. Y. Lin, S. S. Hong, "Strategies of Using Fly-Ash and Their Effects on the Properties of Cement Mortars," *Journal of Chinese Institute of Engineers*, Vol. 9, No. 2, 1986, pp. 289-299.
- 3.19. Bickley, John A., and Payne, John C., "High Strength Cast-in-Place Concrete in Major Structures in Ontario," Paper Presented at the ACI Annual Convention, Milwaukee, Mar. 1979.
- 3.20. Shideler, J. J., "Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use," *ACI Journal*, Proceedings V. 54, No. 4, Oct. 1957, pp. 299-328.
- 3.21. Holm, T. A., "Physical Properties of High Strength Lightweight Aggregate Concretes," *Proceedings, 2nd International Congress on Lightweight Concrete (London, Apr. 1980)*, Ci80, Construction Press, Lancaster, 1980, pp. 187-204.
- 3.22. Mather, Katharine, "High Strength, High Density Concrete," *ACI Journal*, Proceedings V. 62, No. 8, Aug. 1965, pp. 951-962. Also, Technical Report No. 6-635, U. S. Army Engineer Waterways Experiment

Station.

- 3.23. Bloem, Delmar L., and Gaynor, Richard D., "Effects of Aggregate Properties on Strength of Concrete," ACI Journal, Proceedings V.60, No.10, Oct. 1963, pp. 1429-1456.
- 3.24. Tobin, Robert E., "Flow Cone Sand Tests," ACI Journal, Proceedings V. 75, No. 1, Jan. 1978, pp. 1-12.
- 3.25. Ehrenburg, D. O., "An Analytical Approach to Gap-Graded Concrete," Cement, Concrete, and Aggregates, V. 2, No. 1, Summer 1980, pp. 39-42.
- 3.26. Tuthill, Lewis H., "Better Grading of Concrete Aggregates," Concrete International: Design & Construction, V. 2, No. 12, Dec. 1980, pp. 49-51.
- 3.27. Gaynor, Richard D., "High Strength Air-Entrained Concrete," Joint Research Laboratory Publication No. 17, National Sand and Gravel Association National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Mar. 1968, 19 pp.

第四章 配料、拌合、輸送、澆置、養護及控制程序

4-1 引言

高強度混凝土的配料、拌合、輸送、澆置及控制程序與傳統混凝土基本原則相同，惟應注意下列修正及強調之處。例如：所有混凝土應用上盡量要求單位含水量降低、而且適合澆置及品質一致性等都是值得鼓勵的作法，在高強度混凝土應用上，這些作法為重點所在。由於製造高強度混凝土必須採用大量水泥，將產生大量水化熱，此點有必要參考“熱天氣製造混凝土”之施工技術，另外，高強度混凝土的製造廠家，對混凝土試體及產品品質必須確實保證。

4-2 配料

4-2-1 材料控制、處理及儲存

高強度混凝土材料的控制、處理與儲存和傳統混凝土相差不大，但是拌合過程中骨材的儲存、濕度的一致性及其取樣則須特別注意。若水泥在暖天氣裡保存的最高溫度 77 °C (170 °F)，而炎熱天氣下 66 °C (150 °F) 就非常不妥。為節省搬運時間，拌合設備應置於工地或靠近工地之處，在拌合之前所有材料的儲存溫度應儘量維持在較低溫狀態。材料運送時間要儘可能縮短、工作程序與澆置步驟要特別謹慎詳細規劃、避免卡車等候卸貨時間。

4-2-2 量測與測重

製造高強度混凝土所用的材料可在人工、半自動或自動拌合廠拌合，但是基於速度及正確性的考慮，要求以自動化設備來計量水泥及波索蘭材料重量；而在測定水量則宜採用自動化重量拌合機或量測設備；為穩定高強度混凝土正確的水灰比，細骨材的濕度要嚴格加以控制；在溫暖的氣候及高水泥含量的情形下，則需將水和水泥加以冷卻，使用冰冷拌合水可促使混凝土澆置溫度降低，若能採用冰塊，效果比冰水更佳，但是比較不方便的是拌合廠必須具備製冰或刨冰設備。

4-2-3 材料的裝載

試拌過程對靜態拌合機及車載式拌合機是否生產充分拌合均勻的混凝土是有重要

載式兩種拌合器使用，亦可在工地用車載式拌合機加以拌合。但是，不是所有車載式拌合機都能拌合高強度混凝土，尤其高強度混凝土坍度極低狀況時更不適宜。嚴密的製程控制對高強度預拌混凝土作業是非常重要的，此可避免因延遲澆置所造成的卡車在工地等候的現象，此刻可利用緩凝劑來延長時間，以便混凝土在澆置成型後能加以震動使之緻密；留一些拌合水等卡車到達工地時再加上去，然後以平均拌合速度翻攪三十次，使水能均勻攪和；若坍度損失及工作度問題仍無法解決，可在工地添加高性能減水劑拌合混合料工作。使用高性能減水劑時，一定要在到達工地後方才使用，這是因為其效期很短暫之故，現場高性能減水劑的拌合通常要以卡車拌合混合料或使用工地拌合機器（安裝在鼓輪上的電動泵浦）加以拌合。

4 - 4 輸送

4 - 4 - 1 一般原則

高強度混凝土的輸送方法及設備甚多，諸如車載式拌合機、無動力卡車車體（有無翻攪器均可）、輸送管或輸送帶。每種運送方法都有其優缺點，端視使用情形、摻料成份、澆置地點遠近、運送能量、時間及氣候而定。

4 - 4 - 2 車載式拌合混凝土

車載式拌合是指將配好的混凝土材料由拌合廠轉移至卡車拌合機上拌合的方式。許多生產者都會以設定速度將所有材料放進車載式拌合機內，鼓輪不轉動，直到卡車抵達或靠近工地時才開始加以拌合；另一拌合步驟是在生產者處，於卡車拌合器內將所有材料拌合好後，再運送至工地，途中鼓輪無需翻轉；第三個辦法是所謂乾拌。乾拌步驟是將乾燥材料以卡車鼓輪運至工地，拌合水則以另一銜接於卡車後的水槽裝運，再加水拌和，直到完全拌均勻為止。乾拌方法後來發展成一種適用於長程運送或解決澆置延誤的方法，若想維持長期工作性，則以此方法最為理想。值得注意的是，骨材內的含水量，為拌合水之一部份，可能會有輕微的水泥水化現象。

4 - 4 - 3 含／不含翻攪器的固定卡車車體

以上方式運送通常要在卡車後部加掛一個無蓋車體，這種平滑、流線造型的金屬車體在車體傾斜時由後面裝卸混凝土，銜掛於車體的震動器供裝卸之用。同時還需備有拌合混凝土用的裝備，以免在加水後因缺乏攪拌器而有無法充分拌合的困擾。

4 - 4 - 4 泵送

高強度混凝土有時亦可以泵浦來輸送，泵浦可用來處理低坍度混合料及提高輸送能量。由於高強度混凝土一般皆有高水泥含量及較小最大骨材粒徑，因而有助於泵浦方式壓送混凝土。利用泵浦運送高強度混凝土的原則，為在工地泵浦應置於靠近澆置區域，泵浦管線則應儘量避免彎曲，泵浦應固定好，同時可用其他管線或可撓曲的管子或軟管，直接澆置於大面積模板上。泵浦操作人員與混凝土澆置人員之間應有良好連繫及溝通，在泵送過程不可中斷泵浦動作，因為一旦中途停止，混凝土稍一硬固摩擦力增大即難再推動混凝土。

4 - 4 - 5 輸送帶

利用輸送帶運送混凝土相當普遍，輸送帶一定要固定，確保輸送過程平順、不震動；傾斜角度要加以控制，以減少粗骨材與水泥砂漿析離的傾向。輸送帶運送的混凝土一般坍度在 25 至 100 mm(1 至 4 in) 間，因此高強度混凝土之搬運僅適用於短程如 60 至 90 m(200 至 300ft) 之距離，距離太遠或運送時間太久，則坍度損失會增大而降低工作性。輸送帶可加蓋以防雨淋、風吹、日晒或不適當溫度（太熱或太冷），如此可避免坍度或混凝土溫度產生明顯變化。任何運送高強度混凝土的方法，皆應有合宜的規劃、日程計畫、監控等過程，這種工作相當重要。

4 - 5 澆置步驟

4 - 5 - 1 準備工作

在澆置高強度混凝土工作開始前，必須衡量各種可能的不正常情況，並謀求對策，不能等到了要澆置前才臨時準備。由於工作性隨時間會逐漸降低，因此有必要做好各種準備措施，以便能以最快速率進行運送、澆置、凝結以至整飾。首先，混凝土運送至工地之時間表必須確定，以便一抵達工地即可迅速澆置，尤其第一批混合料之運送更要注意。澆置混凝土的設備必須有充分能量，且有效率運作，不致造成任何延誤，包括遠距離澆置在內；震動裝置要足夠，搗實混凝土之人力也要充足，以便在難度較高之工作區亦能快速搗實混凝土，所有設備都必須在最佳之狀態，若有任何故障或延誤都可能對工程品質造成重大影響。由於坍度損失快速，震動器的應變能力要加大，且必須有備用震動器，一般至少每三輛就有一台備用。因震動器一旦發生故障而又

缺乏備用震動器，特別在炎熱氣候裡，則高強度混凝土的澆置工作必會受到嚴重延誤。

4-5-2 設備

澆置設備之基本要求在於確保混凝土能有預定的高品質，此應包含水灰比、坍度、空氣含量、均勻性等因素，選擇各種設備必須依其處理混凝土的能力及效率，能在澆置時有最有利的配比，好使混凝土以震動方式均勻拌合，並加以搗實。澆置結束時應留存一些混凝土做為整平之用，如需要整修的話，可用小推車、斜槽、桶子、漏斗，或其他工具來搬運，底部卸放的吊桶效果最佳，惟邊緣傾斜度要很陡以防發生堵塞現象。高強度混凝土不可置於吊桶內太久，因為會造成黏性太強，卸料不易。

4-5-3 搗實

搗實高強度混凝土最好的方法是利用適當的內部震動，混凝土澆置時加以震動的優點已經得到肯定。高強度混凝土有時黏性極高【4.1, 4.7】，搗實工作應從拌合配比著手計劃，粗砂的工作性最佳【4.7】，完全壓實亦很重要，混凝土裡每增加1%空氣【4.8】，則強度損失可高達5%，因此，充分震動方能確保高強度混凝土應有的品質。

4-5-4 特殊情況的處理

不同結構桿件若同時採用不同強度的混凝土時，則需要考慮特殊之澆置方法，但為了避免澆置柱時發生混淆或錯誤，所有柱及剪力牆均應採用相同強度的混凝土加以澆置，另外為了達成模板經濟效益，高層建築最好不要變化柱斷面尺寸大小【4.9】。在某些使用不同混凝土的區域如建築結構中柱與板之鄰接部位，柱周圍的混凝土必先澆置然後再澆置樓板。依此步驟，若兩種不同強度混凝土間若有冷縫發生，在柱界面仍可產生剪力強度【4.10】。

4-6 養護

4-6-1 養護的重要性

「養護」是指在水泥水化期間，維持混凝土中充足濕度及有利溫度，以便混凝土的預期特質能充分發揮而言。養護工作對混凝土品質非常重要，在製造高強度混凝土時更是如此，必須在澆置前就作好周詳的養護工作計畫，混凝土的潛在強度與耐久性

方能充分發展。同時，高強度混凝土必須在早期階段以水養護，因為部分水化可使毛細管現象中斷，而再恢復養護時，水不能再滲入混凝土內部，因此阻止了內部進一步的水化作用【 4.11 】。

4 - 6 - 2 養護類型

高強度混凝土以水養護最為理想，因為水灰比低之緣故【 4.11 】。水灰比低於 0.4 時，若不供給水份時，水化程度會明顯降低，水養護可使水泥水化更有效率。以水來養護低水灰比之混凝土，其優點比養護較高水灰比混凝土還要多【 4.12 】，因為水灰比 0.29 的混凝土，其以濕飽和骨材製成且以貯水槽養護的試體，在第二十八天齡期的強度比其他用乾骨材製成，濕麻布養護的試體強度大 $60-70 \text{ kg/cm}^2$ (850 ~ 1000 psi) 左右。同時，雖然早期強度可藉提高摻料及養護溫度增加，但後期強度則會減少，惟若不持續加溫則後期強度的減少甚為有限【 4.13 】，而以濕氣養護二十八天後再暴露於空氣中則有助於九十天的強度【 4.1, 4.14 】。

4 - 6 - 3 養護方法

最徹底但也最少用的水養護方法係將混凝土成品完全浸泡於水中。所謂儲水或浸泡是指在工程結構邊緣用不滲透之泥土或其他材料圍堵成水池，而將混凝土泡入。若浸泡方法行不通，可採用噴霧方式噴灑水氣；若不顧慮水的流動，可採用效果不錯的草地灑水裝置；若混凝土表層有乾燥現象，則不可中斷灑水。噴水龍頭特別適用於垂直表面的混凝土；粗麻布、棉墊、毯子及其他吸收材料覆蓋物可保持表面濕度，垂直或平行混凝土均可適用；液體養護膜劑可維持原混凝土的水分，但無法增加更多濕氣。

4 - 7 品質保證

4 - 7 - 1 材料

高強度混凝土配比後，供應商或生產者應該有計劃以保證運送所希望品質的產品至工地。水泥的變化對強度的影響大於其他因素，因此要定期取樣、測試，以確保物理性質符合要求，評估材料均勻一致性可採用 CNS 1237 「單一來源評估水泥強度均勻一致性的方法」；同時，骨材與摻料也要有均勻一致性，且來源固定。

4 - 7 - 2 製程控制【 4.7 】

供應商與承包商之間應密切合作與有效控制製程，對品質有重大影響。通常供應商對高強度混凝土享有完全控制權，直至澆置成型為止，供應商同時也負責控制坍度、時間、拌合及摻料的調整等，而承包商則負責處理、澆置及搗實混凝土。由於水泥水化現象、溫度上升、坍度損失及骨材碾碎現象均隨拌合時間的加長而增加，因此有必要儘量減少拌合與輸送的時差；卡車的派送必須配合澆置的速率，避免延誤。如果拌合與澆置之時間延誤太久，以至拌合水需求量增加或坍度明顯損失，則預拌車上之拌合工作可延至澆置前拌合完成即可。

4 - 7 - 3 通訊設施

供應商與澆置地點之監控小組間直接連繫管道非常重要。必備設施包括：指示及標示器材，依工程複雜程度及採用摻料而定。計畫工程師通常應建議承包商採用何種設施較為合宜，且在澆置之前準備有關此類設施的使用說明或計畫書，以供參考。

4 - 7 - 4 實驗室【 4.7 】

一個設備完善的實驗室應隨時待命，以便測試運往工地的混凝土。這個實驗室可藉水泥與混凝土研究實驗室加以檢核，且符合 CNS 3222 規範。通常澆置混凝土每 76 m^3 (100 yd^3) 至少需要一組圓柱試體 (2 個以上)，每一個齡期，即七天、二十八天、五十六天與九十天，均各需要至少 2 個圓柱試體。

4 - 7 - 5 偶發事故處理原則

由於高強度混凝土場鑄困難，因此需準備替代作業方案。備用設備特別是震動器，更不可少，若澆置速率緩慢，拌合量可減少。卡車拌合混凝土若在交通尖峰時期運送，極可能造成嚴重問題。水泥與水接觸時間 (拌合與運送期間) 儘可能縮短，尤其在暖氣候時更是必要，通常會要求水泥自置入拌合鼓起 1-1/2 小時內須出料完畢 (參見 CNS 3090)，若天氣酷熱或有嚴重坍度損失時，則時間減為 45 分鐘。由於高強度混凝土可能用到高性能減水劑 (強塑劑)，因此在特別高的工地溫度情況下最實際的拌合方法是把材料直接運往工地，無需加水，待抵達工地後，再加入水及高性能減水劑再進行拌合。

4 - 8 品控程序

4 - 8 - 1 準則

選擇品控程序第一考慮因素是抗壓強度測試結果的分佈應該呈常態分佈曲線。平均值接近極限值時，會出現扭曲分佈現象【 4.15 】，尤其極高強度混凝土如 1050 kg/cm² (15,000 psi) 以上更常發生這種現象，但是，有些資料【 4.19,4.20 】則顯示強度在 420 kg/cm² 至 700 kg/cm² (6,000 psi 至 10,000 psi) 之間，則呈常態分佈。品控與設計階段另一重點是高強度混凝土測試的齡期，根據抗壓測試顯示，高強度混凝土在二十八天齡期之後強度仍會明顯增加，因此，建議【 4.7,4.10,4.17 】應修正某些抗壓規範，如將二十八天齡期延至五十六天或九十天。延長齡期可以用五十六天齡期的 490 kg/cm² (7000 psi) 混凝土取代二十八天 420 kg/cm² (6000 psi) 混凝土，而無需改變摻料。高強度混凝土一般用在高層建築上，因此，延長抗壓測試時間是合理的，因為結構較低部分需要至少一年以上時間才會承受服務載重。

4 - 8 - 2 評估方法

為了使品質符合設計強度要求，混凝土的平均強度應超過設計強度 f_c ，超過量則以變異係數或標準偏差來表示，視測試結果變異程度而定或視允許強度低的比例大小而定。根據資料顯示【 4.11,4.16,4.17 】，高強度度混凝土標準偏差在 35 kg/cm² 至 49 kg/cm² (500 至 700 psi) 之間【 4.11,4.16,4.17 】，因此，變異係數會隨混凝土平均強度增加而減低，這種結果可能是由於生產者對品質控制變得更嚴格所致，因此，品控方法與 4-7 節所列因素息息相關。若生產者看重品質保證施行程序，則標準偏差方法可為一項合理的品控程序。例如：若某一工程要求 700 kg/cm² (10,000 psi) 之 f_c ，且標準偏差值為 45 kg/cm² (645 psi)，則只需 770 kg/cm² (11,000 psi) 的配比設計需求強度 f_{cr} ，即

$$\begin{aligned} f_{cr} &= f_c + 1.34S \\ &= 700 + 1.34 \times 45 \\ &= 760 \text{ kg/cm}^2 (10,864 \text{ psi}) \dots\dots\dots \text{式 (4-1a)} \end{aligned}$$

或

$$\begin{aligned} f_{cr} &= f_c + 2.33S - 35 \\ &= 700 + 2.33 \times 45 - 35 \end{aligned}$$

$$= 770 \text{ kg/cm}^2 (11,000 \text{ psi}) \dots\dots\dots \text{式 (4-1b)}$$

其中S為標準偏差

當然，嚴格的工地檢驗，以控制圖表或其他方法分析記錄也都是必要程序。混凝土強度的早期階段控制工作如加速養護及抗壓試驗亦常採用（如 CNS 及 ASTM C 684 所示），特別是在晚期強度為測試結果（五十六至九十天）才是決定是否接受的關鍵狀況下，更需採用上述方法，以提早瞭解強度性質。

4 - 9 強度量測

4 - 9 - 1 各種可能狀況

高強度混凝土的著眼點仍舊是在抗壓強度上，因此抗壓強度的量測為主要試驗項目，中國國家標準（CNS）的規範和測試方法，除某些因高強度混凝土特殊性質外，可適用高強度混凝土，只有藉一定步驟對試體加以測試，方能得知混凝土的潛在強度與變異性，然後，配比的控制與評估的第一步便是標準控制試驗程序。有時，有必要在建築工地養護混凝土試體，這是因為最具代表性之故，對工地養護的試體加以測試是有助於決定拆模工作時間，特別是在冰冷氣候下，或決定強度發展速率，以上試體不可用來當作品質控制測試，其他非標準情形下製作的試體，其強度與行為則應另行說明及分析，依一般規定每一次測試中每一個齡期至少需要測試兩個圓柱試體。

4 - 9 - 2 試體大小與形狀

一般標準試體直徑是 15 cm (6 in) 與高 30 cm (12 in)，此要求已行之多年，且符合實際考慮。因為這一尺寸是一個人可以處理的極限，且可以適用於最大骨材粒徑 5 cm (2 in) 以下的混凝土，設計師即採用 15 ϕ \times 30 cm (6 ϕ \times 12 in) 試體做為量測強度的標準。最近，10 \times 20 cm (4 \times 8 in) 圓柱則被使用來量測抗壓強度【 4.18, 4.19 】，但是，10 \times 20 cm (4 \times 8 in) 圓柱試體比起標準 15 ϕ \times 30 cm (6 \times 12 in) 圓柱試體的強度較高，其變異程度亦來得較大【 4.20, 4.21 】。不管試體大小，由於壓力會經由載重承壓板與試體界面傳遞，試體末端應力會有複雜或三軸的分佈現象，且可能明顯改變試體破壞模式並影響評估結果，應注意之。

4 - 9 - 3 試驗機器

會影響抗壓量測值的機器特性包括：校正精度、軸向及側向剛度、穩定性、機器零件的校正、承壓板類型及承壓板球型承座行為。測量圓柱抗壓試體時，所有測試儀器均需符合 CNS 1232 規範要求。整體測試儀器之設計，包括軸向、側向剛度、儀器穩定性，都會影響試體行為及其最大載重能力；而承壓板類型及球承座的行為則會影響測得抗壓強度大小【 4.20 】。

最小側向剛度建議應在 1.8×10^4 kg/m (10×10^4 lb/in) 左右【 4.22 】；而軸向剛度則應在 1.8×10^6 kg/m (10×10^6 lb/in) 左右，柔性的儀器會產生劈裂爆炸性破壞，對最大應力值則不甚重要；另外，若儀器軸向剛硬，但側向相當俱柔彈性，亦會對抗壓量測產生不良影響。使用大小合宜及適當設計的承壓板有助於測得較大強度及減低變異性【 4.23 】。上層承壓板要有一個承座，且要能轉動，在初期載重下與試體完全接觸，在接近極限載重時，能固定不轉動。一座在載重下壓盤可轉動的測試儀器，在測試強度愈高之混凝土時，測試結果誤差愈大，強度降低幅度在 700 kg/cm^2 ($10,000 \text{ psi}$)，混凝土立方體可達 16%。

承壓板直徑大小及球型承座承受口大小相當重要【 4.20 】，理想情形下，承壓板及承座直徑應該與試體的受壓表面接近，若球型承座表面大於試體受壓面將造成側向擴張受限制之現象，同時擴張速度低於與試體擴張速度，如此一來，在試體末端會產生束制應力。而球型承座表面與承座的直徑比試體直徑小時，則試體可能有一部分未受載重，承壓板會在承受口附近產生彎曲，如此一來，應力分配將會不均勻。

4-9-4 試體模種類

試體模材料及特殊製模方法對抗壓量測影響相當大，剛性組合的模，容易壓密；而俱可防水之模可以減少砂漿洩漏及混凝土脫水現象。使用鋼鑄試體模的試體強度比高品質低模者增加 13%，而不管使用何種材料，對抗壓強度量測變異性沒有明顯的影響，鋼鑄試體模比錫鑄試體模的強度大 6%，但變異數也較大【 4.7 】；而鋼鑄試模比塑膠試模對於錫鑄試體的強度大 16%。

4-9-5 試體準備

多年來，混凝土專家一致認為抗壓測試前應該先對混凝土試體末端加以蓋平或磨平，事實上，不規則性、塵埃及油脂等不利因素所造成的影響已有完整評估記錄【

4.20】。在高強度混凝土應用內，若使用蓋平程序，其蓋平材料之強度要加以評估。各種蓋平材料如石膏漿、硫磺砂漿、高鋁水泥和其他蓋平材料均有其優缺點【4.24, 4.25】，如果蓋平材料的抗壓強度或彈性模數比試體小，則經由蓋平產生的荷重則無法平均地傳遞。

硫磺砂漿是應用最為廣泛的蓋平材料，市場上可購買到的硫磺砂漿為由硫磺與惰性材料組成，這種組合的蓋平材料不但經濟、好用且在短期內就能產生高強度，但是，這些材料卻易受成分及使用過程影響。蓋平厚度在 1.5 至 3 mm (1/18 至 1/8 in) 之間最適用於高強度混凝土【4.26】，但比 3 mm (1/8 in) 薄的蓋平卻不易製作，而且較薄蓋平容易在試體蓋平介面產生空隙，在荷重下試體覆膜易破裂【

4.20, 4.26】，因此，厚度在 6 mm (1/4 in) 的蓋平最為理想。低強度厚蓋平在荷重下會產生側向潛變的問題，如此一來，試體末端的拉壓應力會增加且試體抗壓強度明顯減少。採用高強度蓋平材料【4.27, 4.28】，如：硫磺砂漿，適用於強度 700 kg/cm² (10,000 psi) 以下之混凝土，若蓋平厚度維持在 6 mm (1/4 in) 時，硫磺砂漿強度約在 490 至 560 kg/cm² (7,000 至 8,000 psi) 之間，超過 700 kg/cm² (10,000 psi) 強度混凝土，則兩端表面應為成型或磨平之。

4 - 10 引用文獻

- 4.1.Saucier, K. L., Tynes, W. O., and Smith, E. F., "High-Compressive-Strength Concrete-Report 3, Summary Report," Miscellaneous Paper No. 6-520, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Sept. 1965, 87 pp.
- 4.2.Saucier, K. L., "Evaluation of Spiral-Blade Concrete Mixer, Shelbyville Reservoir Project, Shelbyville, Illinois," Miscellaneous Paper No. 6-975, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mar. 1968, 17 pp.
- 4.3.Concrete Manual, 8th Edition, U. S. Bureau of Reclamation, Denver, 1975, 627 pp.
- 4.4.Saucier, K. L., "Evaluation of a 16-cu-ft Laboratory Concrete Mixer,

- " Miscellaneous Paper No. 6-892, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Jan. 1965.
- 4.5. Bloem, Delmar L., "High-Energy Mixing, " Technical Information Letter No. 169, National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Aug. 1961, pp. 3-8.
- 4.6. Saucier, Kenneth L., "Use of Belt Conveyors to Transport Mass Concrete, " Technical Report No. C-74-4, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, 1974, 42 pp.
- 4.7. Blick, Ronald L., "Some Factors Influencing High-Strength Concrete," Modern Concrete, V. 36, No. 12, Apr. 1973, pp. 38-41.
- 4.8. Davies, R. D., "Some Experiments on the Compaction of Concrete by Vibration," Magazine of Concrete Research (London), V. 3, No. 8, Dec. 1951, pp. 71-78.
- 4.9. Schmidt, William, and Hoffman, Edward J., "9000-psi Concrete- Why? - Why- Not? ," Civil Engineering-ASCE, V. 45, No. 5, May 1975, pp. 52-55.
- 4.10. "High-Strength Concrete in Chicago High-Rise Buildings," Task Force Report No. 5, Chicago committee on High-Rise Buildings, 1977, 63 pp.
- 4.11. Neville, A. M. Properties of Concrete, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, 1973, 686 pp.
- 4.12. Klieger, Paul, "Early High Strength Concrete for Prestressing." Proceedings, World Conference on Prestressed Concrete, San Francisco, 1957, pp. A5-1-A5-14.
- 4.13. Pfeiffer, D. W., and Landgren, J. R., "Energy Efficient Accelerated Curing of Concrete-A Laboratory Study for Plant-Produced Prestressed Concrete," Technical Report No. 1, Prestressed Concrete Institute, Chicago, Dec. 1981.

- 4.14. Price, Walter H., "Factors Influencing Concrete Strength," ACI Journal, Proceedings V. 47, No. 6, Feb. 1951, pp. 417-432.
- 4.15. Mather, Bryant, "Stronger Concrete," Highway Research Record No. 210, Highway Research Board, 1967, pp. 1-28.
- 4.16. Day, K. W., "Quality Control of 55 MPa concrete for Collins Place Project, Melbourne, Australia," Concrete International: Design & Construction, V. 3, No. 3, Mar. 1981, pp. 17-24.
- 4.17. Cook, James E., "Research and Application of High-Strength Concrete Using Class C Fly Ash," Concrete International: Design & Construction, V. 4, No. 7, July 1982, pp. 72-80.
- 4.18. Forstie, Douglas A., and Schnormeier, P. E., "Four-by-Eight Test Cylinders Are Big Enough," Concrete Construction, V. 24, No. 11, Nov. 1979, pp. 751-753.
- 4.19. Wolsiefer, John, private communication with ACI Committee 363, 1982.
- 4.20. Hester, Weston T., "Field Testing High-Strength Concretes: A Critical Review of the State-of-the-Art," Concrete International: Design & Construction, V. 2, No. 12, Dec. 1980, pp. 27-38.
- 4.21. Carrasquillo, Ramon L.; Nilson Arthur H.; and Slate, Floyd O., "Properties of High-Strength Concrete Subject to Short-Term Loads," ACI Journal, Proceedings V. 78, No. 3, May-June 1981, pp. 171-178.
- 4.22. Sigvaldason, O. T., "The Influence of Testing Machine Characteristics Upon the Cube and Cylinder Strength of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V. 18, No. 57, Dec. 1966, pp. 197-206.
- 4.23. Cole, D. G., "Some Mechanical Aspects of Compression Testing Machines," Magazine of Concrete Research (London), V. 19, No. 61, Dec. 1967, pp. 247-251.
- 4.24. Troxell, G. E., "The Effect of Capping Methods and End Conditions

- Before Capping Upon the Compressive Strength of Concrete Test Cylinders," Proceedings, ASTM, V. 41, 1941, pp. 1038-1052.
- 4.25. Werner, George, "The Effect of Type of Capping Material on the Compressive Strength of Concrete Cylinders," Proceedings, ASTM, V. 58, 1985, pp. 1166-1186.
- 4.26. Kennedy, Thomas B., "A Limited Investigation of Capping Materials For Concrete Test Specimens," ACI Journal, Proceedings V. 41, No. 2, Nov. 1944, pp. 117-128.
- 4.27. Gayncr, R. D., "Studies of Capping Procedures for Concrete Cylinders; Effects of Type of Material and Cap Thickness (Series J-128)," Joint Technical Information Letter No. 227/216, National Sand and Gravel Association/National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Nov. 27, 1964, 8 pp.
- 4.28. Saucier, K. L., "Effect of Method of Preparation of Ends Concrete Cylinders for Testing," Miscellaneous Paper No. C-72-12 U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Apr. 1972, 51 pp.
- 4.29. 黃兆龍, 「高強度混凝土之施工及品質管制」, 高強度混凝土研討會論文集, 1990。

第五章 高強度混凝土的特性

5-1 引言

混凝土特性如：應力-應變關係、彈性模數、拉力強度、剪力強度及握裹強度常以 $152 \phi \times 305 \text{ mm}$ ($6 \phi \times 12 \text{ in}$) 圓柱試體之單軸向抗壓強度來表示。一般而言，所有以往常見混凝土特性的描述都是依據抗壓強度低於 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 混凝土之試驗資料而定，在本章中將重新檢視高強度混凝土之相關特性，同時也討論現行設計之計算式在高強度混凝土之適用性及相關學者最近所提出的預測公式。

5-2 單軸向抗壓應力-應變行為

抗壓強度在 840 kg/cm^2 ($12,000 \text{ psi}$) 內的混凝土，其單軸應力-應變曲線可以用圖 5-1 來表示，拋物線上昇部分在高強度混凝土較陡直，而尖峰應力所對應之應變，對高強度混凝土而言稍大【5.1 ~ 5.7】，過了尖峰應力之後，拋物線之下降趨勢隨混凝土強度之提高而更形急速，要想獲得高強度混凝土應力-應變曲線下降部分之確實數據是比較困難的工作【5.3, 5.5, 5.9】。

參考文獻 5.3, 5.7 及 5.8 說明如何描繪較平穩的曲線下降部分。在加壓測試過程中，將混凝土圓柱試體與一鋼管平行放置，此管壁之厚度應足以使加壓過程中，鋼管能持續承受遞增之荷重，這個方法可適用於大部份之傳統抗壓試驗機【5.5】；另一個方法是採用閉路式電子、油壓控制系統之抗壓試驗機。後者可使試體在加載過程中，維持一定之應變速率，而不致發生突然破壞之情形。

在一定軸向應變情況下，高強度混凝土的內部細微碎裂現象比低強度混凝土輕微【5.10】，因此，高強度混凝土所產生的側向應變相對減小（如圖 5-2 所示）【5.11, 5.12】。在非彈性範圍內，較低側向擴張現象可能表示高強度混凝土在三軸向應力的受力行為不同。例如：螺旋箍筋的效應對高強度混凝土與對普通強度混凝土之影響有所不同【5.13】，高強度混凝土受到螺旋箍筋之圍束效應也較小【5.13】。

5-3 彈性模數

根據抗壓強度在 700 kg/cm^2 ($10,000 \text{ psi}$) 至 770 kg/cm^2 ($11,000 \text{ psi}$) 之

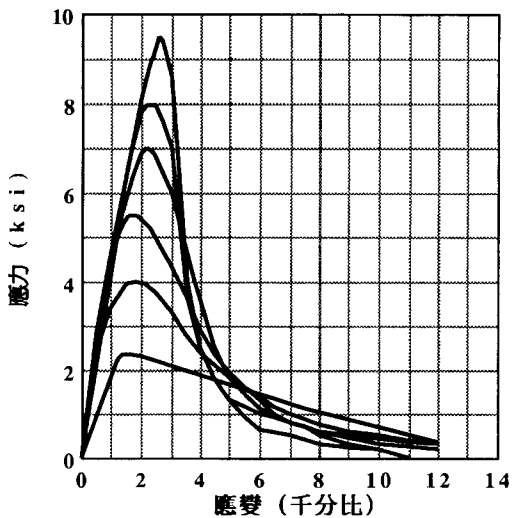


圖 5-1 混凝土抗壓應力應變曲線【5.1】

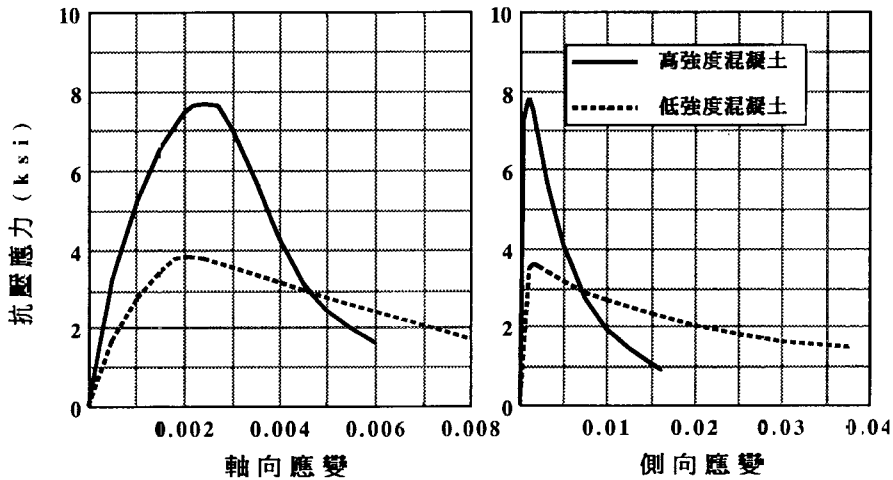


圖 5-2 常重混凝土軸向應力與軸向應變及側向應變之關係【5.11】

混凝土測試其彈性模數，若以單軸抗壓試驗之應力應變曲線在 25% 尖峰應力之切線值為準，可測得 E_c 值為 $2.94 \times 10^5 \sim 3.64 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ($4.2 \times 10^6 \sim 5.2 \times 10^6 \text{ psi}$) 【 5.14 】，而以不同方法計算，可得高強度混凝土之彈性模數值約為 $3.15 \times 10^5 \sim 4.55 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ($4.5 \times 10^6 \sim 6.5 \times 10^6 \text{ psi}$)。根據建築技術規則， E_c 值計算公式分別預測高強度混凝土及較低強度混凝土之彈性模數值與試驗值比較情形，如圖 5-3 所示〔低強度混凝土之乾單位體積重以 2346 kg/m^3 (145 lb/ft^3) 計算〕。依圖中之試驗值顯示，現行建築技術規則之 E_c 值預測公式稍微高估抗壓強度 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 以上之混凝土的彈性模數值；常重混凝土之 E_c 值與其抗壓強度 f'_c 的關係（見圖 5-3）可用以下方程式表示：

$$E_c = 10,800 f'_c + 70,000 \text{ kg/cm}^2, \text{ 當 } 210 \text{ kg/cm}^2 < f'_c < 840 \text{ kg/cm}^2 \text{ 時,}$$

$$\text{【或 } E_c = 40,000 f'_c + 1.0 \times 10^6 \text{ psi 當 } 3,000 \text{ psi} < f'_c < 12,000 \text{ psi 時, } \text{】} \cdots \text{式(5-1)}$$

其他預測彈性模數之經驗計算式可參見各種文獻。預測值與實驗值之偏差主要來自於粗骨材的特性與配比之不同【 5.7, 5.22, 5.23, 5.24 】。

5-4 波松比 (Poisson's ratio)

有關高強度混凝土的波松比文獻很少，根據二十八天最高強度為 740 kg/cm^2 ($10,570 \text{ psi}$) 之輕質骨材高強度混凝土所作之試驗發現，波松比約為 0.20，此值與混凝土之強度、齡期及含水量無關【 5.2, 5.25 】。而以一般骨材製作之高強度混凝土，當抗壓強度為 $560 \sim 812 \text{ kg/cm}^2$ ($8000 \sim 11600 \text{ psi}$) 時，波松比為 0.20 ~ 0.28 【 5.26 】。以動態方法測得之波松比較靜態方法測得之值稍高；此外，以動態方法測試抗壓強度在 $175 \sim 805 \text{ kg/cm}^2$ ($2,500 \sim 11,500 \text{ psi}$) 之混凝土，不論混凝土抗壓強度高低、粗骨材配比及試驗時之齡期為何，波松比約為 0.23 ~ 0.32 【 5.27, 5.28 】。依據飛灰混凝土的分析，強度在 $300 \sim 1000 \text{ kg/cm}^2$ 範圍內，顯示波松比隨強度增加而趨大之趨勢【 5.7 】；惟目前可根據資料，在彈性範圍內，視高強度混凝土與普通強度混凝土之波松比相差不多。

5-5 破裂模數

多位專家研究報告指出輕質與常重高強度混凝土的破裂模數約在 $2 f'_c \text{ kg/cm}^2$

至 $3.2 \sqrt{f_c} \text{ kg/cm}^2$ 【 $7.5 \sqrt{f_c} \sim 12 \sqrt{f_c} \text{ psi}$ 】之間【 $5.25, 5.29 \sim 5.31$ 】。若以破裂模數 f_r 表示混凝土之抗拉強度時，可以下式預測常重混凝土之抗拉強度【 5.2 】；試驗值與預測值比較如圖 5-4 所示：

$$f_r = 3.2 \sqrt{f_c} \text{ kg/cm}^2, \quad \text{當 } 210 \text{ kg/cm}^2 < f_c < 840 \text{ kg/cm}^2 \text{ 時,}$$

$$[f_r = 11.7 \sqrt{f_c} \text{ psi}, \quad \text{當 } 3,000 \text{ psi} < f_c < 12,000 \text{ psi 時}] \dots\dots\dots \text{式 (5-2)}$$

5-6 劈裂強度

間接抗拉強度（圓柱劈裂強度）與抗壓強度達 847 kg/cm^2 （ $12,105 \text{ psi}$ ），齡期二十八天的混凝土抗壓強度關係之研究【 5.30 】，在低強度時，間接抗拉強度可高至抗壓強度的 10%，但在較高強度時，則降低至 5%；而碎石骨材（Crushed rock aggregate）混凝土的劈裂強度則比普通卵石骨材（Gravel-aggregate）混凝土的劈裂强度高 8%，除此之外，齡期二十八天的劈裂強度約是撓曲強度的百分之七十五。劈裂強度與圖 5-5 所示一般範圍內相差不大。雖然抗壓強度增加，實測之劈裂強度仍落在預測值之上限範圍內【 5.7 】，建議高強度混凝土之劈裂強度保守的可沿用常重混凝土的劈裂強度之計算式【 5.2 】：

$$f_t = 2 \sqrt{f_c} \text{ kg/cm}^2, \quad \text{當 } 210 \text{ kg/cm}^2 < f_c < 840 \text{ kg/cm}^2 \text{ 時} \dots\dots\dots \text{式 (5-3)}$$

$$[f_t = 7.4 \sqrt{f_c} \text{ psi}, \quad \text{當 } 3,000 \text{ psi} < f_c < 12,000 \text{ psi 時}]$$

5-7 疲勞強度

高強度混凝土的疲勞強度文獻較少，依現有資料顯示高強度混凝土在軸向抗壓下之疲勞強度，以抗壓強度達 781 kg/cm^2 （ $11,155 \text{ psi}$ ）之 10 cm （ 4 in ）立方體，試驗之最小應力在 87.5 kg/cm^2 （ $1,250 \text{ psi}$ ）左右經一百萬次之重覆加載後，試體之抗壓強度為靜態載重能力之 66% ~ 71%【 5.32 】，此百分比隨混凝土強度之增高及粗骨材粒徑增加而減低，但此種差異並不大，就已知資料判斷，高強度混凝土的疲勞強度與較低強度混凝土之疲勞強度相似。

5-8 單位重

高強度混凝土單位重之實測值比以相同材料製造較低混凝土強度之單位重稍高【 5.7 】。

5-9 熱傳導性質

高強度混凝土的熱傳導性質與較低強度混凝土大致相同【 5.23, 5.29 】，已有之

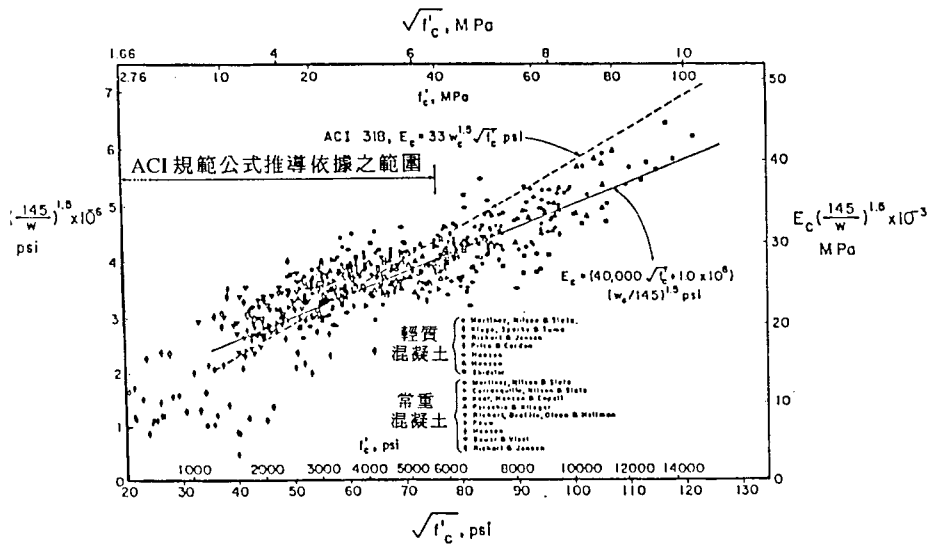


圖 5 3 混凝土彈性模數與抗壓強度之關係【5.21】

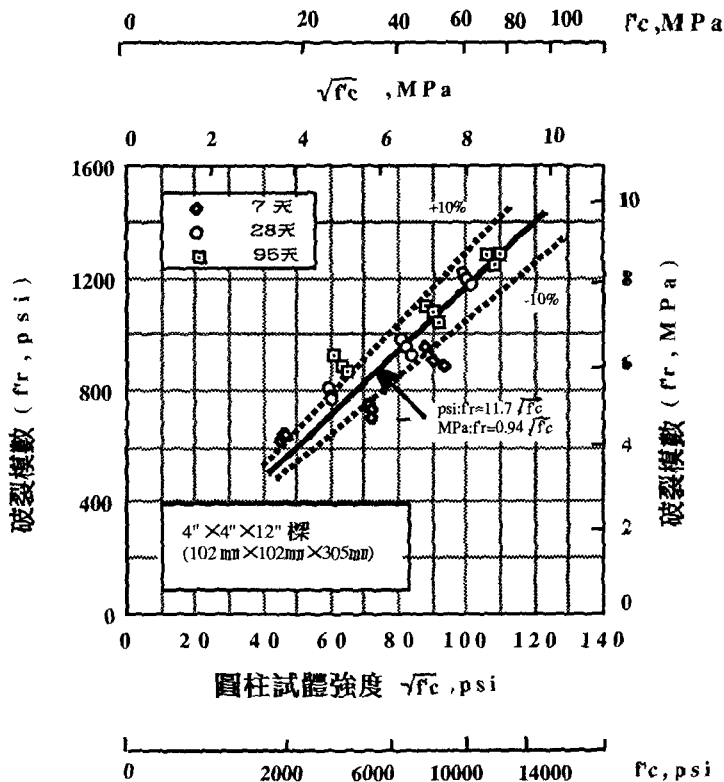


圖 5-4 根據破裂模數推算之抗拉強度【5.2】

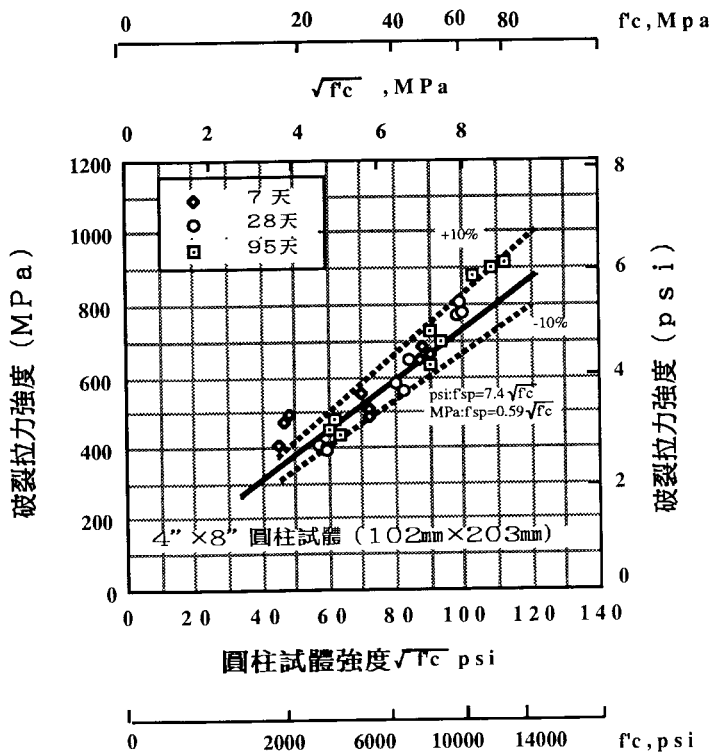


圖 5-5 根據圓柱試體劈裂試驗之抗拉強度【5.2】

試驗資料包括：比熱、熱擴散、熱傳導特性與熱膨脹係數。

5-1.0 水化熱

水化引起的溫度上升幅度視水泥含量、水灰比、試體大小、周圍氣溫、環境等因素而定。依據圖 5-6，可判斷高強度混凝土水化熱每 0.75 m^3 混凝土中，每 45.4 kg (100 lb) 之水泥水化熱為 $6.1 \sim 8.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ($11 \sim 15 \text{ }^\circ\text{F}$) 【 5.16 】。圖 5-7 是芝加哥一棟建築物的水化熱測量結果：結構物混凝土中含水泥量 562 kg / m^3 (846 lb/ft^3)，其水化熱放出量約為 $56 \text{ }^\circ\text{C}$ ($100 \text{ }^\circ\text{F}$) 【 5.17 】。

5-1.1 強度成長速率

高強度混凝土在早期成長強度之速率比較低強度混凝土來得快，但在後期，這種差異就沒那麼明顯了【 5.1, 5.2, 5.7, 5.15, 5.17, 5.33, 5.34, 5.35 】（如圖 5-8 所示）。高強度混凝土之七天對二十八天齡期之強度比為 $0.8 \sim 0.9$ ，對低強度混凝土而言，此項比例則為 0.7 至 0.75 【 5.7, 5.29 】。低強度混凝土之七天對九十五天強度比為 0.6 ；中強度混凝土則為 0.65 ；而高強度混凝土則為 0.73 【 5.2, 5.19 】。高強度混凝土早期強度獲得速率較高之原因可能有二：一是因水化熱較高，二是高強度混凝土內因低水灰比造成水化顆粒間距離縮短之故。

5-1.2 耐凍融性質

有關高強度混凝土需要多少空氣含量以產生適度耐久性之爭論很多，例如：經由實驗室中快速凍融試驗判斷，為免高強度混凝土在潮濕環境下結凍，則儘管輸氣會導致強度損失，仍要進行輸氣【 5.23 】。相反地，有些研究指出，不管輸氣與否，高強度混凝土均具有相當理想的耐凍性質【 5.27 】。此情形歸因於可結凍水含量之大量降低及抗拉強度增加之故。

5-1.3 乾縮

有關高強度混凝土的乾縮行為資料很少，曾有報告【 5.29, 5.36 】指出初期高乾縮速率的可能性，但是，經過一百八十天的乾縮期行為，由白雲石或石灰石裂成的高及低強度混凝土的乾縮大小大致相同【 5.29, 5.36 】。若將養護齡期由二十八天縮短成七天，則乾縮要縮為增加【 5.28, 5.36 】。水灰比的改變對乾縮並無明顯影響，但通常與混凝土含水量的百分比有一定關係【 5.17 】。一些實驗室研究及現場

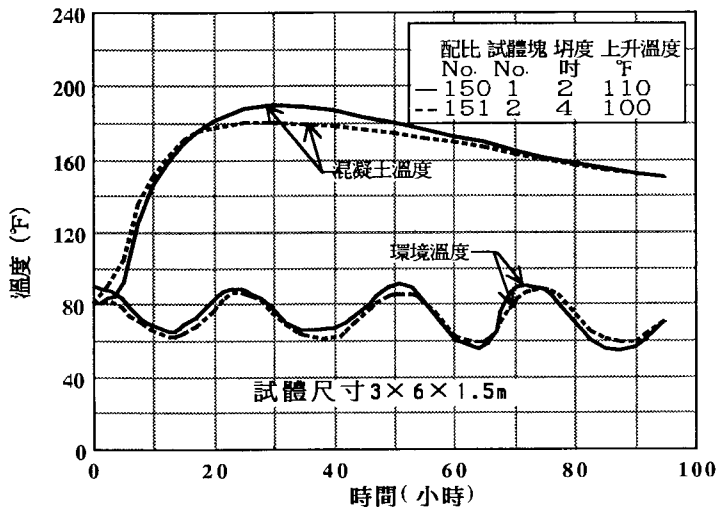


圖 5-6 高強度混凝土工地澆置試體溫度歷程圖【5.23】

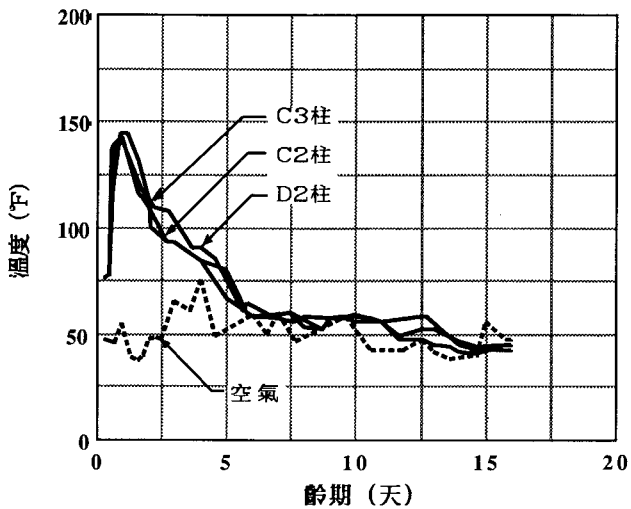


圖 5-7 由Water-Tower Place混凝土所測溫度歷程【5.18】

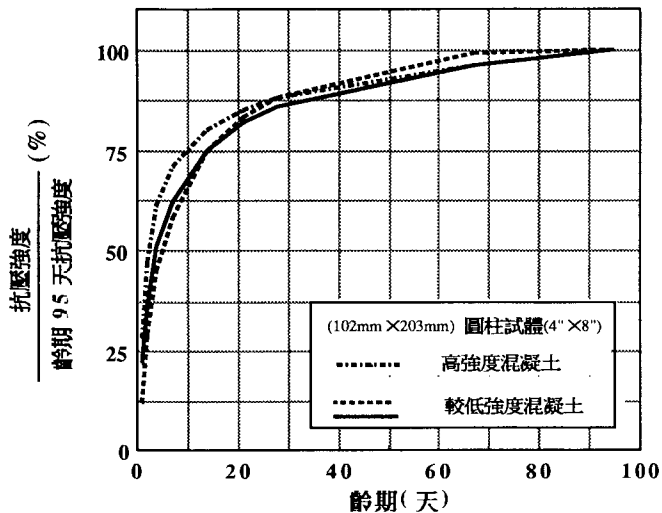


圖 5.8 濕治石灰岩骨材混凝土強度發展【5.2】

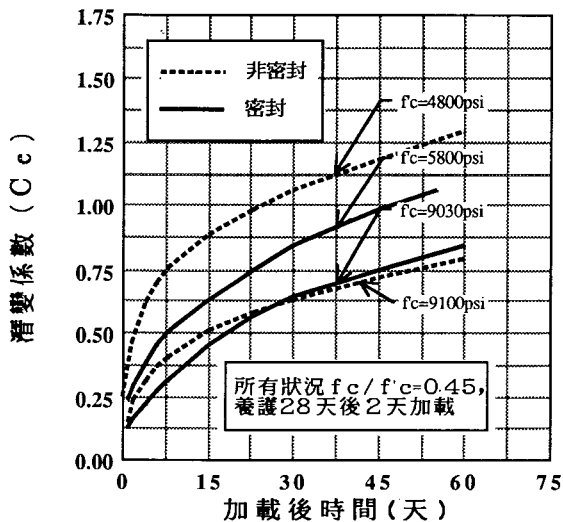


圖 5-9 密封及非密封混凝土試體潛變係數與時間關係圖【5.37】

研究指出高強度混凝土的乾縮情形與較低強度混凝土的乾縮情形大致相同【 5.18, 5.24, 5.31, 5.37 】，含高性能減水劑的高強度混凝土，其乾縮比低強度混凝土小。若與純水泥高強度混凝土比較，少量砂灰取代水泥（10% 以下）可減少乾縮量【 5.33 】，惟高量取代則不論何種波索蘭材料均有加大乾縮量之現象【 5.38 】，因此乾縮量與混凝土配比有密切關連。

5 - 1 4 潛變

混凝土在極限強度 30% 之長期載重下，若以短期性應變比表示，則密封高強度混凝土的總應變與較低強度混凝土相同；在乾燥環境下，這個比值比低強度混凝土低約 25%【 5.29 】；而密封、乾燥高強度混凝土的總長期應變則比低強度混凝土高 15% 及 65%，在乾燥與密封兩種情形下，高強度混凝土的潛變沒有多大差異，含高性能減水劑之高強度混凝土潛變被證明可以大為降低【 5.38 】，同齡期載重的高強度混凝土比較低強度混凝土之最大比潛變值小【 5.18, 5.22, 5.37 】，圖 5-9 是一個很好的例子【 5.31 】，但是，高強度混凝土被使用來承受較高應力，因此，任何強度混凝土的總潛變值大同小異，用高強度混凝土鑄造之混凝土柱，潛變造成的問題很少，此與低強度混凝土之潛變行為相似，載重齡期愈長，潛變愈少，而水灰比若增加，則比潛變會增加【 5.37, 5.38 】。同時，潛變大小與應力也有線性關係【 5.23, 5.25, 5.33 】，這種應力對應變比之線性關係適用範圍比低強度混凝土為高。少量以砂灰取代水泥量（10% 以下）可減少高強度混凝土在潮濕或相對濕度 50% 乾燥環境下之潛變。大量添加矽石粉取代水泥量（50%），則顯示其潛變量稍高於純水泥製高強度混凝土【 5.34 】。

5 - 1 5 引用文獻

- 5.1. Wischers, Gerd, "Applications and Effects of Compressive Loads on Concrete," *Betontechnische Berichte* 1978, Beton-Verlag GmbH, Dusseldorf, 1979, pp. 31-56. (in German)
- 5.2. Carrasquillo, Ramon L.; Nilson, Arthur H.; and Slate, Floyd O., "Properties of High Strength Concrete Subjected to Short Term Loads," *ACI Journal*, Proceedings V. 78, No. 3, May-June 1981, pp. 171-178.

- and Discussion, Proceedings V. 79, No. 2, Mar. -Apr. 1982, pp. 162-163.
- 5.3. Wang, P. T.; Shah, S. P.; and Naaman, A. E., "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression," ACI Journal, Proceedings V. 75, No. 10, Nov. 1978, pp. 603-611.
- 5.4. Kaar, P. H.; Hanson, N. W.; and Capell, H. T., "Stress Strain Characteristics of High-Strength Concrete," Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, SP-55, American Concrete Institute, Detroit, 1978, pp. 161-185. Also, Research and Development Bulletin No. 851.01D, Portland Cement Association.
- 5.5. Shah, S. P.; Gokoz, U.; and Ansari, F., "An Experimental Technique for Obtaining Complete Stress-Strain Curves for High Strength Concrete," Cement, Concrete and Aggregates, V. 3, No. 1, Summer 1981, pp. 21-27.
- 5.6. Shah, S. P., "High Strength Concrete-A Workshop Summary," concrete International: Design & Construction, V. 3, No. 5, May 1981, pp. 94-98.
- 5.7. 黃兆龍, 林建宏, "高強度飛灰混凝土性質及結構行為研究 (I)", NSC 77-0410-E011-06, 行政院國家科學委員會研究成果, 1989.
- 5.8. Shah, S. P.; Naaman, A. E.; and Moreno, J., "Effect of Confinement on the Ductility of Lightweight Concrete," International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete (Harlow, Essex), V. 5, No. 1, Feb. 1983, pp. 15-25.
- 5.9. Holm, T. A., "Physical Properties of High Strength Lightweight Aggregate Concrete," Proceedings, 2nd International Congress on Lightweight Concrete (London, Apr. 1980), C180, Construction Press,

- Lancaster, 1980, pp. 187-204.
- 5.10. Carrasquillo, Ramon L.; Slate, Floyd O.; and Nilson, Arthur H., "Microcracking and Behavior of High Strength Concrete Subject to Short Term Loading," ACI Journal, Proceedings V. 78, No. 3, May-June 1981, pp. 179-186.
- 5.11. Ahmad, Schuaib, and Shah, Surendra P., "Complete Triaxial Stress-Strain Curves for Concrete," Proceedings, ASCE, V. 108, ST4, Apr. 1982, pp. 728-742.
- 5.12. 方一匡, 宋昌國, 「高強度混凝土在軸壓下之強度及韌性研究」, 國科會專題研究報告, 1989.
- 5.13. Ahmad, S. H., and Shah, S. P., "Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement," ACI Journal, Proceedings V. 79, No. 6, Nov. -Dec. 1982, pp. 484-490.
- 5.14. Thoman, William H., and Raeder, Warren, "Ultimate Strength and Modulus of Elasticity of High Strength Portland Cement Concrete," ACI Journal, Proceedings V. 30, No. 3, Jan. -Feb. 1934, pp. 231-238.
- 5.15. Smith, E. F.; Tynes, W. O.; and Saucier, K. L., "High Compressive Strength Concrete, Development of Concrete Mix," Technical Documentary Report No. RTD TDR 63 3114, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Feb. 1964, 44 pp.
- 5.16. Nedderman, Howard, "Flexural Stress Distribution in Very High Strength Concrete," MSc thesis, University of Texas at Arlington, Dec. 1973, 182 pp.
- 5.17. Freeman, Sydney, "High-Strength Concrete," Modern Concrete, V. 34, No. 3, Oct. 1970, pp. 29-36; No. 7, Nov. 1970, pp. 28-32; No. 8, Dec. 1970, pp. 21-24; No. 9, Jan. 1971, pp. 15-22; and No. 10, Feb. 1971, pp. 16-23. Also, Publication No. IS176T, Portland Cement Association.

- 5.18. "High Strength Concrete in Chicago High-Rise Buildings." Task Force Report No. 5, Chicago Committee on High-Rise Buildings, Feb. 1977, 63 pp.
- 5.19. Tvechene, D. C.; Parrott, L. J.; and Pomeroy, C. D., "The Estimation of the Elastic Modulus of Concrete for the Design of Structures," Current Paper No. CP23/78, Building Research Establishment, Garston, Watford, 1978, 11 pp.
- 5.20. Ahmac, S. H., "Properties of Confined Concrete Subjected to Static and Dynamic Loading," PhD thesis, University of Illinois at Chicago Circle, Mar. 1981.
- 5.21. Martinez, S.; Nilson, A. H.; and Slate, F. O., "Spirally Reinforced High-Strength Concrete Columns," Research Report No. 82-10, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Aug. 1982.
- 5.22. Russell, H. G., and Corley, W. G., "Time-Dependent Behavior of Columns in Water Tower Place," Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, SP-55, American Concrete Institute, Detroit, 1978, pp. 347-373. Also, Research and Development Bulletin No. RD052.01B, Portland Cement Association.
- 5.23. Saucier, K. L.; Tynes, W. O.; and Smith, E. F., "High Compressive-Strength Concrete-Report 3, Summary Report," Miscellaneous Paper No. 6-520, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Sept. 1965, 87 pp.
- 5.24. Pfeifer, Donald W.; Magura, Donald D.; Russell, Henry G.; and Corley, W.G., "Time Dependent Deformations in a 70 Story Structure," Designing for Effects of Creep, Shrinkage, Temperature in Concrete Structures, ACI SP-37, American Concrete Institute, Detroit, 1971, pp.

159-185.

- 5.25. Shiceler, J. J., "Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use," ACI Journal, Proceedings V. 54, No. 4, Oct. 1957, pp. 299-328.
- 5.26. Perenchio, William F., and Klieger, Paul. "Some Physical Properties of High Strength Concrete," Research and Development bulletin No. RD056.01T. Portland Cement Association, Skokie, 1978. 7 pp.
- 5.27. Kaplan, M. F., "Ultrasonic Pulse Velocity, Dynamic Modulus of Elasticity, Poisson's Ratio and the Strength of Concrete Made with Thirteen Different Coarse Aggregates." RILEM Bulletin (Paris). New Series No. 1, Mar. 1959. pp. 58-73.
- 5.28. 方一匡, 黃漢屏, 「場拌高強度混凝土之配製及其力學特性之探討」, 土木水利季刊, 第十六卷, 第四期, 1990。
- 5.29. Parrot, L. J., "The Properties of High-Strength Concrete." Technical Report No. 42. 417, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1965, 12 pp.
- 5.30. Dewar, J. D., "The Indirect Tensile Strength of Concretes of High Compressive Strength." Technical Report No. 42. 377. cement and Concrete Association, Wexham Springs, Mar. 1964, 12 pp.
- 5.31. Kaplan, M. F., "Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of the Coarse Aggregates." ACI Journal, Proceedings V. 55, No. 11, May 1959. pp. 1193-1208.
- 5.32. Bennett, E. W., and Muir, S. E. St. J., "Some Fatigue Tests of High-Strength Concrete in Axial Compression." Magazine of Concrete Research (London). V. 19, No. 59, June 1967, pp. 113-117.
- 5.33. 陳振川, 林焜鋒, 詹穎雯, 「含砂灰高強度混凝土之潛變與乾縮」, 台灣大學土木工程學研究所報告, 1990。
- 5.34. 陳振川, 周東陽, 詹穎雯, 「含 50% 爐石粉高強度混凝土之力學行為」, 台

灣大學土木工程學研究所報告，1990。

- 5.35. 陳振川，唐開明等，「不同強度混凝土之破裂特性」，中國土木水利工程學刊，第二卷，第一期，1990，第73-81頁。
- 5.36. Swamy, R. N., and Anand, K. L., "Shrinkage and Creep of High Strength Concrete." Civil Engineering and Public Works Review (London), V. 68, No. 807, Oct. 1973, pp. 859-865, 867-868.
- 5.37. Ngab, A. S.; Slate, F. O., and Nilson, A. H., "Behavior of High Strength Concrete under Sustained Compressive Stress." Research Report No.80-2, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Feb.1980.201 pp. Also, PhD dissertation, Cornell University, 1980. and "Shrinkage and Creep of High Strength Concrete," ACI Journal, Proceedings V. 78, No. 4, July-Aug. 1981, pp. 255-231.
- 5.38. 黃兆龍，沈得驥，「普通水泥添加波索蘭材料水化機理之研究(III)」，國科會專題研究報告，1990。
- 5.39. Nagataki, S., and Yonekura, A., "Studies of the Volume Changes of High Strength Concretes with Superplasticizer." Journal. Japan Prestressed Concrete Engineering Association (Tokyo), V. 20, 1978, pp. 23-33.

第六章 結構設計所須考慮的要素

6-1 引言

高強度混凝土與低強度混凝土有不同的一些特性和工程特質，例如：由於短期與持續的負荷及環境因素所造成的內在變化就有不同。直接與這些內在差異有關係的是在機械特性方面的不同，而這些不同正是設計工程師們在預測結構行為和安全性時必須知道的，這些差異隨著強度的增加愈顯重要，例如：對於無鋼筋高強度混凝土的測試中顯示：此種材料的特質是線彈性可以上達將近最大應力之水準，其後應力應變曲線比低強度混凝土下降較速【 6.1 ~ 6.8 】

許多研究成果有助了解高強度混凝土的行為，雖有實質資料，但最終的建議仍需等待近期和未來的研究結果來決定。

本章重點在構材和結構的設計上，所做臨時性的建議是以近期試驗資訊為基礎。一些尚無資料可尋的項目如：握裹力、錨定、和續接長度，若以低強度混凝土的特性做為設計的基礎，則似乎比較保守；其他項目如剪力、斜張力、和扭力在設計上採用較低材料之強度來設計則並不一定安全，因為與較高強度材料在破壞特性上有所差異之故。

6-2 軸心載重之柱

實際上，柱很少是真正只受到軸心載重，由於載重的偏心或是剛構體作用係有關聯，彎矩通常會附加於軸心載重上。

6-2-1 鋼筋和混凝土的強度貢獻

本節重點在於極限強度，在計算一個軸心載重構材的強度時，現行的設計是以直接附加的法則來總結混凝土和鋼筋的強度：關於這點的辯證理由從圖 6-1 可以看出，圖中不但顯示三組混凝土抗壓強度的典型應力-應變曲線，並附加一降伏強度 4,200 kg/cm² (60,000 psi) 鋼筋的曲線，為了方便，最後的曲線畫在不同的垂直比例尺度上，通常假設鋼筋和混凝土的應變在任何載重程度下都是相同的

對較低強度混凝土而言，當混凝土達明顯的非線性範圍時（約 0.001 應變），鋼筋仍然在彈性範圍內，也因此開始承擔大部分的載重。當應變接近 0.002 時，混

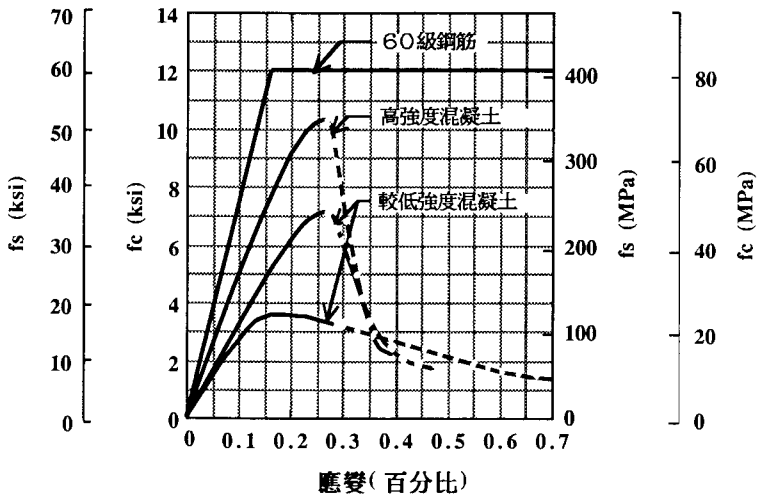


圖 6-1 混凝土與鋼筋應力應變曲線

凝土曲線的斜度幾乎是零，並且可視為在少許或根本沒有應力的增加下，呈塑性變形，鋼筋在此種應變值（0.002）達到其降伏點，此時混凝土是在最大應力處，而鋼筋是在 f_y ，因此柱的強度可估算為：

$$P = 0.85f_c A_c + f_y A_s \dots\dots\dots \text{式(6-1)}$$

式中 f_c = 混凝土的圓柱試體抗壓強度，

f_y = 鋼筋的降伏強度，

A_c = 混凝土斷面積，和

A_s = 鋼筋的斷面積。

係數 0.85 是用來說明柱上之混凝土強度和等值配比混凝土之標準抗壓試體之比較差異。

若鋼筋可於混凝土達到最高強度前降伏，則上述分析方法也同樣適用於高強度混凝土柱，但鋼筋會保持恆定應力，直到混凝土完全受力。因此，對強度之預估仍然可依式（6-1）來算，試驗資料也支持對高強度混凝土使用 0.85 係數的作法【 6.9 】。

6-2-2 圍束鋼筋之影響

柱中的側向箍筋（尤其是連續的螺旋鋼筋）對柱行為有兩項作用：（1）藉著把核心局限住以對抗在載重之下的側向膨脹，由此大大地增加了螺旋箍筋中核心混凝土的強度；（2）增加混凝土的軸向應變能力，促使柱具較緩和與韌性的破壞，換言之，就是一種韌性較佳的柱【 6.9, 6.10 】。

在 1977 年和後來的 ACI 318 修訂版中，螺旋箍筋基本設計是螺旋箍筋的加勁效果至少必須相等於當箍筋外緣的混凝土外殼因載重而剝落時所損失的柱強度。螺旋箍筋最小體積比值，依建築技術規則公式是

$$\rho_s = 0.45 \left(\frac{A_g}{A_c} - 1 \right) \frac{f_c}{f_y} \dots\dots\dots \text{式(6-2)}$$

式中 ρ_s = 螺旋筋體積與混凝土核心體積的比值；

A_g = 混凝土斷面的總面積；

- A_c = 混凝土核心的面積；
- f_c = 混凝土的圓柱試體抗壓強度；和
- f_y = 螺箍筋降伏強度。

螺箍筋提供增加之抗壓強度是由試驗導出之強度增加關係：

$$\bar{f}_c - f_c'' = 4.0f_y \dots\dots\dots \text{式 (6-3a)}$$

式中 \bar{f}_c = 螺箍筋加勁混凝土柱的抗壓強度；

f_c'' = 非圍束混凝土柱的抗壓強度；和

f_y = 螺箍筋產生的混凝土圍束應力。

這種關係可證明與公式 (6-2) 之直接關係。由螺箍筋 f_y 產生的混凝土圍束應力是基於螺箍筋已經降伏的基礎來計算。用熟知的張力環公式：

$$2A_s f_y = f_c' d_c s$$

或是

$$f_c' = \frac{2A_s f_y}{d_c s} \dots\dots\dots \text{式 (6-3b)}$$

式中 A_s = 螺箍筋的面積，

d_c = 混凝土核心的直徑，和

s = 螺箍筋間距。

其他項與已經定義過的相同。

螺箍筋的強度效益對高強度混凝土柱體及輕質混凝土柱體都較小【 6.10 】；在最大載重下，高強度混凝土柱和輕質混凝土柱體，螺箍筋的應力常十分明顯地較發展公式 (6-2) 所假設的降伏強度為小。此與試驗研究結果相符合【 6.9 】，一種“有效的”圍束鋼筋應力 $f_y' (1-s/d_c)$ 用以核估結果，其中混凝土之圍束應力，由箍筋的實際應力來計算，通常少於 f_y 值。因 $(1-s/d_c)$ 項反映出箍筋間距增加而致箍筋效果減小的關係，公式 (6-3) 之修正式為：

$$\bar{f}_c - f_c'' = 4.0f_y' (1-s/d_c) \dots\dots\dots \text{式 (6-3c)}$$

圖 6-2 顯示試驗柱體使用不同強度之混凝土結果【 6.9 】，相當明顯地，公式

(6-3b) 所預測的強度，圍束應力至少達 210 kg/cm^2 ($3,000 \text{ psi}$)，對所有強度的常重混凝土是有效的。根據公式 (6-3a) 所做的一個類似曲線顯示出，對較高圍束應力之預估較不保守，但也可證明螺箍筋的典型圍束應力很少超過 70 kg/cm^2 ($1,000 \text{ psi}$)，在這個範圍內，公式 (6-3a) 能提供良好的結果：從強度的觀點來看，目前建築技術規則對最小量螺箍筋量公式亦適用於高強度混凝土柱子，其安全性如同用於低強度混凝土柱【 6.9,6.11 】。

圖 6-2 顯示出螺箍筋在輕質混凝土柱體中具較少圍束效果。輕質混凝土內之箍筋在大負荷之下，有壓碎混凝土之傾向，因而去除圍束壓力，對於輕質螺旋鋼筋之加勁，Martinez 建議公式 (6-3a) 應被修正成：

$$f_c - f_c'' = 1.8f_s \dots\dots\dots \text{式(6-4a)}$$

並且公式 (6-3c) 改寫為：

$$\bar{f}_c - f_c'' = 1.8f_s(1 - s/d_c) \dots\dots\dots \text{式(6-4b)}$$

這種修正在行為上有相當的不同，意味著建築技術規則中之方程式 (6-2) 必須重新檢查，而審查結果顯示輕質混凝土柱需要比同等的常重混凝土柱多 2.5 倍的螺旋鋼筋，如此才能滿足在表層剝落後的強度需求，然而這種需求在目前的建築技術規則版本中並沒有反映出來，如此多量的螺箍筋是否需要，尚需進一步的探究。

螺旋鋼筋對於改進高強度混凝土柱的延展性，換言之，增加極限應變並且展平在最大應力後的應力應變曲線的負斜率之作用是否有效，則尚無定論。圍束螺旋鋼筋在展平應力－應變曲線的負斜率上，對於高強度混凝土柱的效益與低強度混凝土柱之效果大致一樣【 6.10 】，然而，有些研究結果卻顯示相當的不同【 6.9 】，圖 6-3 可示為不同強度的常重混凝土柱不同的螺旋鋼筋所造成不同的試驗應力－應變曲線。三組曲線分別代表三種混凝土強度，各組又包含三種不同量的側面加勁材的曲線，在各組曲線中用一條短的水平線標示的為相對於那組特殊圍束柱的非圍束柱之平均強度：

圖 6-3 中，高強度混凝土柱 NC167 【具有 54 kg/cm^2 (767 psi) 的有效圍束應力】的曲線與低強度混凝土柱 NC163 【具有 56 kg/cm^2 (800 psi) 的有效圍束應力】的曲線相比較，可見圍束應力所產生不同的行為是很明顯的：高強度混凝土

在最大應力下的應變不但比低強度混凝土小得多，而且在剛超過最高值時應力就會減退，甚至對柱圍束應力高達 175 kg/cm^2 (2500 psi) 的 NC169 (實際柱子可能不易獲得)，也被證明為正確。

根據已知證據可獲下列結論：正常密度之高強度混凝土柱加上螺旋鋼筋可以產生目前公式預估由螺旋鋼筋所造成的強度增加率，但是這些高強度柱體在超過最高應力後的性質與低強度柱相比就顯得不足；而且輕質混凝土柱加上螺旋狀鋼筋的設計應該加以特別考慮。

另外與一般的螺旋鋼筋柱有關的重要發現是：依建築技術規則設計的螺旋鋼筋之圍束應力程度對所有的柱而言都相當低的。假設保護層要求相同，對較大直徑的柱體而言，圍束應力就變得特別低，這與公式 (6-2) 有直接關係。對較大的柱而言， A_c 和 A_s 的比例就變得較小，因此所需的螺旋鋼筋比值較小，而有效的圍束應力相對地變小。有關建築技術規則設計的螺旋鋼筋所產生的圍束應力，對低與高強度混凝土、其核心直徑 38 mm 和 127 mm (1.5 和 5.0 英寸) 的柱的圍束應力可參見表 6-1。

試驗顯示對低強度混凝土而言，即使在圍束應力從 16.7 減到 5.8 kg/cm^2 (即由 238 減到 83 psi)，技術規則所得的情況將會產出具有極大應變之柱體，而且不會明顯地損失抗力。對高強度混凝土而言，把圍束應力從 58 減至 18.5 kg/cm^2 (825 至 263 psi) 會產出不具尖峰強度後之應變能力。甚至，較高的圍束應力 58 kg/cm^2 (825 psi) 會產生具有不良性質的柱，在最高應力後抗力馬上大幅降低【 6.9 】。目前僅有些關於高強度混凝土柱利用側面繫材而非利用螺旋鋼筋的試驗資料可以參考，對這類建材仍有許多工作尚待努力【 6.12, 6.13 】。

6-2-3 反覆載重

單向載重時，即使接近極限載重，高強度混凝土也相對地不受內部微細裂紋的威脅【 6.14 】，根據報告【 6.2 】，高強度混凝土因為沒有如同低強度混凝土伴隨裂紋成長而增加的展延性，所以比低強度混凝土易碎【 6.2 】；有些試驗性的研究指出疲勞強度基本上與抗壓強度沒有關聯【 6.14 】；最近研究指出：由於反覆載重造成的混凝土碎裂大概可由直接與短期單向的應力-應變曲線有關的包絡曲線預估出

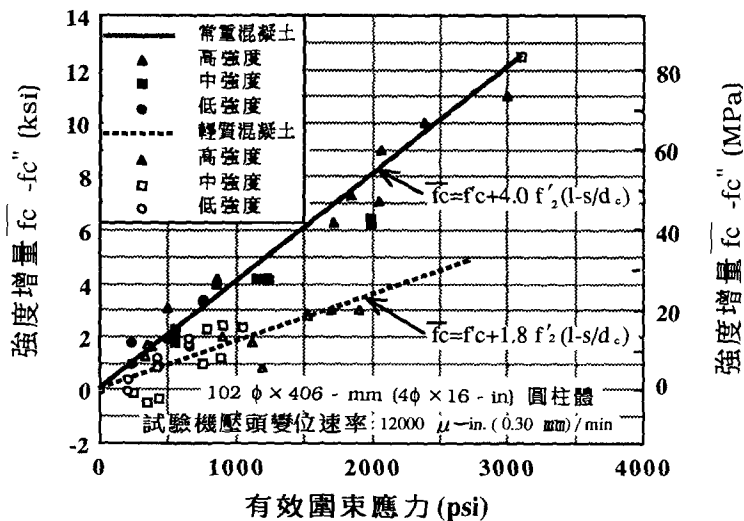


圖 6-2 螺旋筋對柱體加勁產生之強度增量

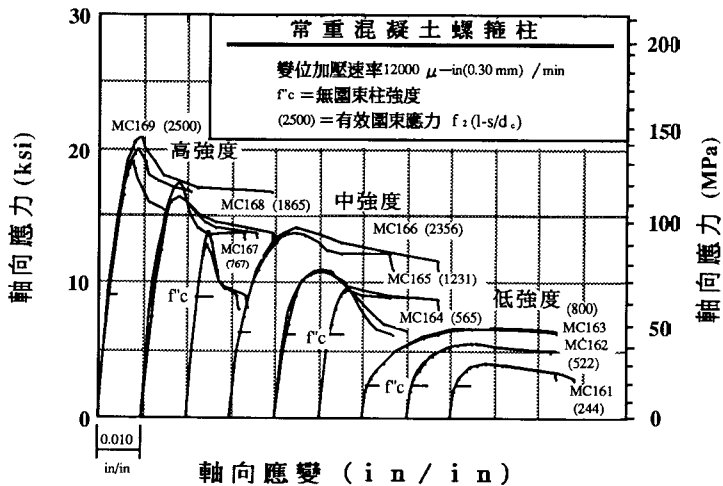


圖 6-3 $4\phi \times 16$ 英寸螺箍筋加勁常重混凝土柱之應力應變曲線

表 6-1 ACI 318規定螺箍筋設計產生之圍束應力

dc mm(in)	A _s /A _c	ρ_s^*	f' _c (1-s/dc) MPa(psi)	s mm(in)
f' _c = 21MPa(3000psi) (# 3螺箍筋)				
38(1.5)	1.44	0.0099	1.64(238)	75(2.96)
127(5.0)	1.12	0.0028	0.57(83)	81(3.17)
f' _c = 69MPa(10,000psi) (# 5螺箍筋)				
38(1.5)	1.44	0.0330	5.69(825)	64(2.50)
127(5.0)	1.12	0.0093	1.81(263)	68(2.67)

*螺箍筋與混凝土核心體積比

來【 6.15 】。對高強度混凝土而言，各個載重運用造成較少的增量減損率，無論如何，混凝土碎裂的週期並不一定因為尖峰後期包絡曲線較大的負面斜率就會造成週期數目增加。

雖然大部份研究工作已完成，然而在設計方法推出之前，不論有沒有圍束鋼筋，或受制於不同的重覆載重限制，目前仍有必要對高強度混凝土各方面性質做進一步探討研究【 6.14, 6.16, 6.17 】。

6-2-4 持續載重

大部分的施工作業，混凝土都受持續載重的影響，這些時間性應變應力因素，對於建築行為有深遠的影響。這些應變直接與長期變形、預力量的損失和龜裂有關。柱強度可能因為持續高密度載重而減弱，同時混凝土結構強度可能因為混凝土潛變而調整局部荷重增加之應力。潛變可用潛變係數來分析：

$$C_c = \frac{\text{潛變量}}{\text{原始彈性應變}} \dots\dots\dots \text{式 (6-5)}$$

或者也可用比潛變係數（單位潛變係數）來描述：

$$\delta_c = \text{每個單位應力之潛變應變} \dots\dots\dots \text{式 (6-6)}$$

這兩者可藉由彈性模數加以關連：

$$C_c = E_c \delta_c \dots\dots\dots \text{式 (6-7)}$$

一般皆同意高強度混凝土的潛變明顯地比低強度混凝土的潛變為小【 6.7, 6.18, 6.21 】。最近【針對約 700 kg/cm² (10,000 psi) 強度的混凝土】資料顯示：高強度混凝土比低強度混凝土只有百分之二十的比潛變 (specific creep)，而且潛變係數也只有低強度混凝土的百分之三十【 6.21 】。

由此可知：對於軸心載重的高強度混凝土柱而言，在設定的應力標準下，潛變的縮短將會比低強度混凝土柱少，而這個事實在高聳的混凝土建築物可能甚具意義【 6.22 】。此外，高強度混凝土柱的混凝土和鋼筋的載重分配不因時間增加而改變，應力的彈性分配可能較容易維持。對於預力構材而言，由於潛變縮短而造成的應力損失，在某一特定混凝土應力標準下將會小得多。但是，如果容許較大的持續載重應力

下，以上的優勢就要大打折扣了。

6-3 梁與版

第五章以及 5-2 節所描述的材料特性可能會影響高強度混凝土梁的行為【6.23, 6.26】。在有些狀況，可以看出大幅進展，但在有些例子中也有不理想結果產生。許多方面，高強度鋼筋混凝土梁的行為或許可採用較低強度混凝土梁相同的原則，但仍有些問題待解決。

6-3-1 抗壓應力分佈

梁中的抗壓應力分佈直接與單軸壓力應力應變曲線的形狀有關。因此，對於高強度混凝土而言；如圖 6-1 所示，它會呈現不同形狀，尤其是在載重接近極點時，可以預期撓曲所致壓應力分佈不同。

目前建築技術規則中，梁斷面的選擇，通常依據分解為承載因數化荷重之假定，其所產生之瞬時坍塌狀況來判定。圖 6-4(a) 顯示出由低強度混凝土製成的梁，其抗壓應力分佈形成一拋物線形狀，如知道了內力 T 和 C 以及相互間的力臂就可以計算標稱彎矩阻抗。在達到破壞荷重瞬間，如果知道了 (1) 抗壓合力 C 的大小，以及 (2) 其在梁斷面力作用位置，則可瞭解抗壓應力分佈的確切形狀，惟實際上即使在一固定的混凝土強度範圍內，也是不定的。可以被視為不相關。對任一應力分佈狀況，可經由三個變數特性來決定上述之值，【見圖 6-4(a)】：

β_1 = 梁的平均抗壓應力與最大抗壓應力的比值，

β_2 = 深度與抗壓合力的位置深度與中性軸比值，和

β_3 = 梁的最大應力與相對應軸載重圓柱試體最大應力的比值。

針對一般設計，較方便的方法是利用圖 6-4(b) 所示的等值矩形抗壓應力分佈，且具有如前面所示的抗壓合力大小和力作用位置，ACI 318 和 ACI 318R 允許使用上述等值分佈方法。混凝土抗壓力假設相當於 $0.85 f_c$ 的均佈值，僅需一個變數 β_1 ，就足以用來同時定義力的大小和力作用位置。

對高強度混凝土而言，應力應變曲線比較接近直線而非拋物線，因此，定義應力塊參數變數值可能有所不同。試驗研究證實兩者之差異性，而且也已經提議取代矩形應力塊的建議（如圖 6-4(c) 所示）【6.26】，但對梁與及偏心柱強度值的計算之

差別，亦取決於鋼筋比及其他因素。

根據等值矩形應力塊，ACI 318 解說中建議，偏低配筋梁之標稱彎矩 (Under-reinforced beam) 強度可以下式計算：

$$M_n = A_s f_y d (1 - 0.59 \rho \frac{f_y}{f_c}) \dots\dots\dots \text{式 (6-8)}$$

式中，

- M_n = 斷面標稱彎矩強度 (in-lb)，
- A_s = 拉力鋼筋之斷面積 (in²)，
- f_y = 鋼筋之降伏強度 (psi)，
- d = 壓側外圍緣至拉力鋼筋中心之距離 (in)，
- ρ = 拉力鋼筋比
- f_c = 混凝土抗壓強度 (psi)。

根據在許多研究中心研究 $k_2 / k_1 k_3$ 與混凝土抗壓強度之關係，可得 $k_2 / k_1 k_3$ 值相當於 0.59，請參閱圖 6-5 【 6.6, 6.22, 6.26 】。個別 k 值的詳細研究結果指出個別參數的明顯差異取決於混凝土強度，從圖 6-5 亦可清楚看出這些差異是相互補償的，而且這個組合的係數也可以由恆常值 0.59 表示，此論點可由圖 6-6 的結果加以證實。圖 6-6 係比較 (1) 矩形應力分佈，(2) 三角形應力分佈，和 (3) 對應於應變之應力分佈三種關係以及含不同鋼筋比和利用 770 kg/cm² (11,000 psi) 抗壓強度混凝土梁的預測撓曲強度值與試驗資料之比較。最好之預測值係使用真正的應力應變曲線，但是使用矩形或三角形分佈也可以得到可被接受的試驗值和理論值的下限值【 6.28 】。

根據以上及類似研究顯示，對偏低配筋梁而言，目前 ACI 318 規範幾乎可以不必修改就可應用，至少對強度高達 840 kg/cm² (12,000 psi) 的混凝土強度而言是如此。至於 ACI 318 規範中不允許之偏高配筋梁 (Over-reinforced beam)，或是承受組合軸向壓力和彎矩的構件，可能產生重大的差異【 6.25 】。

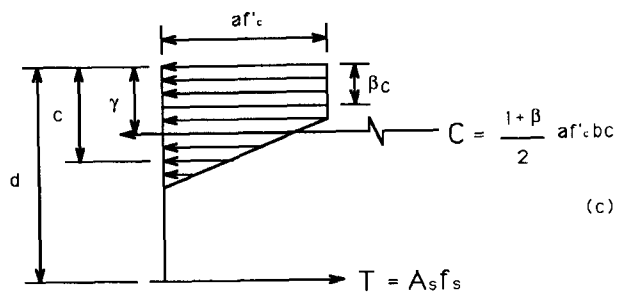
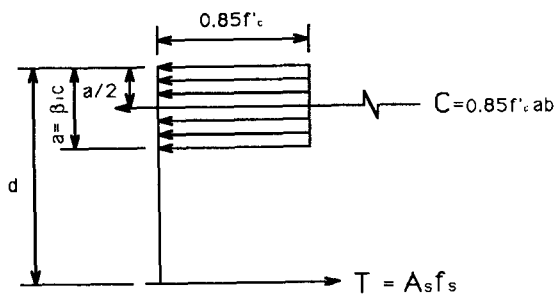
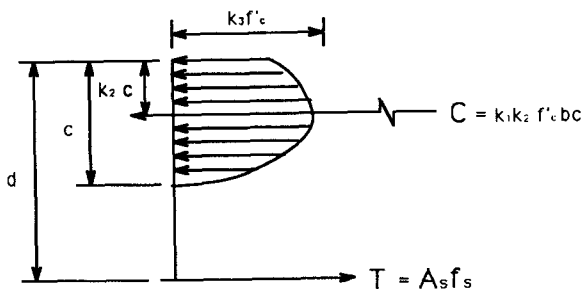


圖 6-4 混凝土矩形斷面梁應力分佈

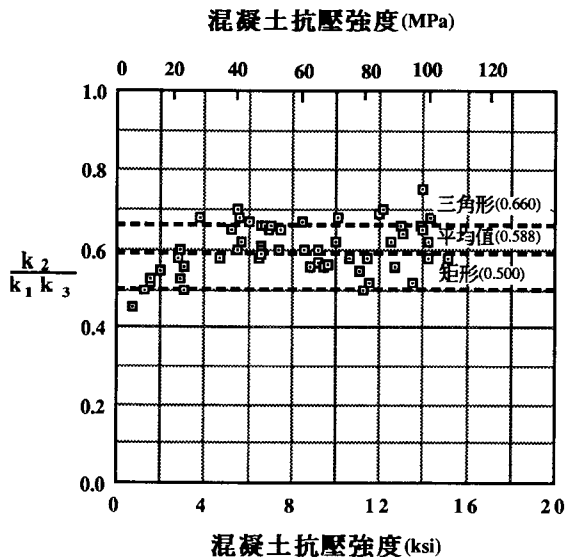


圖 6-5 應力塊參數 $k_2/k_1 k_3$ 對混凝土抗壓強度的關係

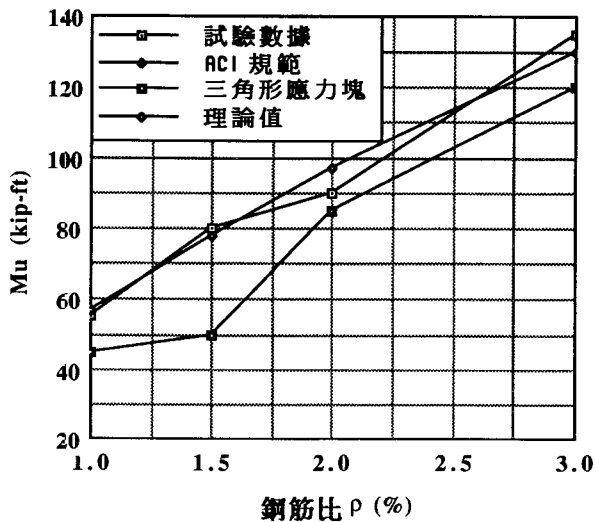


圖 6-6 計算梁撓曲強度 M_u 值之比較

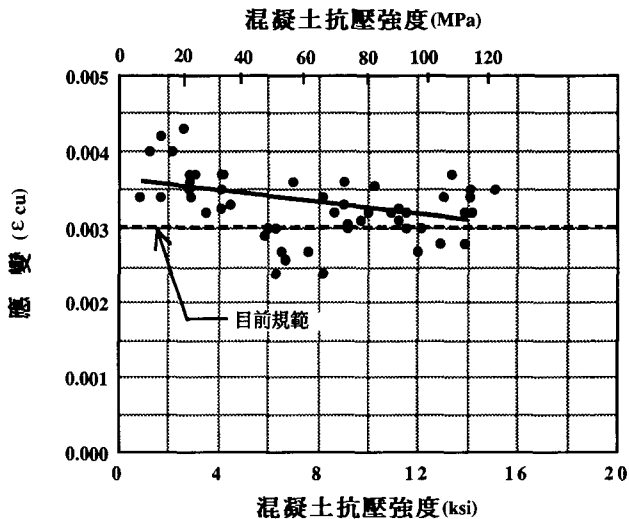


圖 6-7 混凝土極限撓曲應變與抗壓強度關係

6-3-2 極限抗壓應變

高強度混凝土到達最大應力時，其相對應之抗壓應變略比低強度混凝土高，而軸向抗壓試驗或梁試驗狀況，高強度混凝土的極限應變比低強度混凝土低【6.9, 6.26】，上述結果被歸諸於測試裝備所釋放的能量所致。圖 6-7 顯示出單筋混凝土梁或是不加側向圍束鋼筋的偏心載重柱在最大壓力面上破壞時的混凝土應變變化【6.5】。建築技術規則中指出在極限混凝土抗壓應變 0.003，這個恆值不但可合理描述低強度混凝土的試驗結果，亦同時也適用於高強度混凝土的情況，雖然對高強度混凝土而言，並不像低強度混凝土一樣保守。

6-3-3 圍束鋼筋和壓力鋼筋的影響

考慮到高強度混凝土在抗壓中有限的應變能力之特性，必須評估高強度混凝土梁的韌性，撓曲變位韌性比， μ 可定義為

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \dots\dots\dots \text{式(6-9)}$$

式中 Δ_u = 破壞荷載下梁之撓度；和

Δ_y = 拉力鋼筋降伏時，載重所造成之梁撓度。

有關較高強度混凝土梁的試驗，可參見表6-2（系列A）和表6-3（系列B）【6.26】。A 系列梁為單筋梁，不加抗壓鋼筋也不加圍束鋼筋【6.26】。這系列包括由 260 到 650 kg/cm²（3,700 到 9,265 psi）混凝土強度製成的梁。對高強度混凝土梁而言，拉力鋼筋比由 0.29 ρ_b 變化到 1.11 ρ_b ， ρ_b 表示平衡鋼筋比。與 A1 梁相比之下，過量鋼筋補強（指超過平衡設計）的結果顯示：高強度混凝土有極低的延展性指數，而中強度混凝土梁亦有較低的指數。

表 3-3 概述的第二系列就是根據這些結果進行的，這些梁包括不同含量的抗壓鋼筋，由百分之五十到一百的拉力鋼筋面積，以及封閉間隔 7.6, 15.2 和 30.5 公分（3,6 到 12 英吋）的側面圍束鋼筋。所有的梁都是高強度混凝土製成，而且可與第一系列的梁柱 A4（沒有圍束鋼筋，也沒有壓力鋼筋）作比較。

與梁 A4 比較，從梁 B1 到 B2 之結果，可得到以下結論：圍束鋼筋在 30.5 公

表 6-2 A系列梁之韌性比【6.26】

標	f _c		ρ / ρ_b	韌性比 $u = \Delta_u / \Delta_y$
	psi	(MPa)		
A1	3700	(26)	0.51	3.54
A2	6500	(45)	0.52	2.84
A3	8535	(59)	0.29	2.53
A4	8535	(59)	0.64	1.75
A5	9264	(64)	0.87	1.14
A6(a)	8755	(60)	1.11	1.07
ρ_b 平衡鋼筋比， ρ 鋼筋比				

表 6-3 B系列梁之韌性比【6.26】

樑	f _c		ρ / ρ_b	A's/A _s	2號箍筋間距		韌性比 $\Delta u / \Delta y$
	psi	(MPa)			in	(mm)	
B1	8534	(59)	0.57	1/2	12	(305)	2.36
B2	8605	(59)	0.55	1	12	(305)	2.64
B3	8578	(59)	0.57	1/2	6	(152)	4.88
B4	8478	(58)	0.59	1	6	(152)	8.32
B5	8516	(59)	0.56	1/2	3	(76)	5.61
B6	8466	(58)	0.58	1	3	(76)	6.14

分 (12 英吋) 間距會增加展延性指數, 惟增加有限。當團束鋼筋間隔降為 15.2 公分 (6 英吋) (如在梁 B3 和 B4) 時, 延性指數即顯著地增加, 但是當間隔續減為 7.6 公分 (3 英吋) 時, 指數就不再有上揚的趨勢了。梁 B3 和 B4 的比較, 顯示出加上更多壓力鋼筋所產生有利的結果, 雖然這種趨勢在對梁 B5 和 B6 的比較上並沒有明顯地顯示:

6 - 3 - 4 最低拉力鋼筋比

建築技術規則中梁的拉力鋼筋比之限制為平衡鋼筋比的百分之七十五, 若有破壞荷重情形, 也是漸進產生。最低拉力鋼筋比是為避免混凝土梁在混凝土開裂而其應力轉移至梁鋼筋時, 因梁拉力鋼筋量不足而導致梁產生突然之崩落。

目前建築技術規則對於較低強度混凝土的最低鋼筋比要求:

$$\rho_{min} = \frac{14}{f_y} \quad (f_y \text{ 以 } \text{kg/cm}^2 \text{ 為單位}) \dots\dots\dots \text{式 (6-10)}$$

$$\rho_{min} = \frac{200}{f_y} \quad (f_y \text{ 以 } \text{psi} \text{ 為單位})$$

此表示法是根據龜裂斷面的彎矩抵抗能力 (鋼筋應力約為 $2 f_y / 3$) 至少應該與導致構件龜裂值一樣, 而計算是基於破裂模數。這是因高強度混凝土估算破裂強度比低強度混凝土大【 6.2, 6.9 】, 因此, 混凝土的強度應該被包括在式 (6-10) 中、若把破裂模數計為 $0.62 \sqrt{f_c}$ ($7.5 \sqrt{f_c}$), 可以下列方程式表之對 210 到 840 kg/cm^2 (3,000 到 12,000 psi) 之混凝土強度【 6.29 】、

$$\rho_{min} = \frac{2.7 \sqrt{f_c}}{f_y} \geq 1.38 / f_y \quad (200 / f_y) \dots\dots\dots \text{式 (6-11)}$$

6 - 3 - 5 剪力與斜拉力

目前實際應用例中, 剪力的設計是基於因數化荷重狀況而定, 剪力總阻抗是由兩部分構成: V_s (由箍筋供給) 和 V_c (名義上由混凝土貢獻)。概括而論, 這個名

義上由混凝土所貢獻的部份：一個假設斜角裂縫之端仍未龜裂混凝土的貢獻、由沿斜角裂縫表面的骨材牽制所產生的阻抗、以及由主鋼筋所產生的剪力樞阻抗。

高強度混凝土在單軸向抗壓載重所產生突然破碎現象，可產生一層平滑近乎平面的破壞表面【 6.1, 6.3, 6.31, 6.32 】，此現象與較低強度混凝土特有的粗糙表面剛好相反。在剪力強度控制的梁中狀況是雙軸應力的結合，由載重點到支點方向的斜向壓力以及垂直方向的斜拉力。高強度混凝土梁中的斜拉力裂縫可以預期會產生平滑的表面，多半在骨材牽制上有所不足。骨材牽制會隨著混凝土強度之增加而減少，因此，剪力強度不足也可能產生，而這種結果並不能由目前設計方程式證明。研究資料指出【 6.33 】：估計中的混凝土對 V_c 之貢獻是足夠的，然而，在未發表的資料中指出目前的設計方法對高強度混凝土並不保守，目前，並沒有關於防止危險的斜拉裂縫之形成而造成脆性破壞的鋼筋量資料。高強度混凝土深梁與托架在單軸或多軸外力作用下剪力強度之探討參見文獻【 6.36 ~ 6.41 】。

6 - 3 - 6 握裹、錨定與發展長度

目前，建築技術規則對於發展強度以及拉力鋼筋錨定的設計方法是根據試驗值而定，通常使用抗壓強度小於 280 kg/cm^2 ($4,000 \text{ psi}$) 的混凝土做測試，雖然最近已有相關之高強度混凝土可尋，但是仍然沒有足夠的資料可被允許進行修正工作。

6 - 3 - 7 裂縫

在第五章中已經提過，對於強度在 210 到 840 kg/cm^2 ($3,000$ 到 $12,000 \text{ psi}$) 範圍內的常重混凝土，破裂模數是 $3.2 \sqrt{f_c} \text{ kg/cm}^2$ ($11.7 \sqrt{f_c} \text{ psi}$)，而這個模數正是用於預測撓曲龜裂荷重的混凝土抗拉強度的適當準則。因此看來建築技術規則所估計的 $7.5 \sqrt{f_c}$ (f_c 以 psi 為單位) 值似乎太低。然而對於養護狀況，如：乾燥空氣後接著七天的潮濕養護， $7.5 \sqrt{f_c}$ 這個值對相應強度範圍可能是非常接近了，因此，可以不做更改。把破裂模數假定為比撓曲構件的正確值低並非保守與否，而是會對龜裂載重產生不正確預估，因為這樣會造成彈性和潛變的不正確結果。舉例而言：直接的抗拉強度很少被量測過，但是卻對研究預力混凝土構件的腹剪力裂縫有助益。高強度混凝土的破裂模數和劈裂抗拉強度都比等值的較低強度混凝土高得多，至少，根據較低強度混凝土經驗所得的撓曲剪力和扭轉剪力強度的公式可用在高強度混凝土計

算，其他相關方面注意事項則在 6-3-5 節的部分討論。

6-3-8 彈性撓度

在預估鋼筋混凝土梁的彈性撓度時主要的不確定性在於 (1) 彈性模數 E_c ，(2) 破裂模數 f_r ；以及 (3) 有效慣力矩這取決於梁龜裂的程度。

對彈性模數，除非確切的模數值已知，否則可用下列等式：

$$E_c = 3320 \sqrt{f_c} + 6900 \text{ MPa}$$

$$E_c = 40,000 \sqrt{f_c} + 1.0 \times 10^6 \text{ psi} \quad \text{式(6-12)}$$

對混凝土密度不是 2320 kg/m^3 (145 lb/ft^3) 而言，式 (6-12) 應加以修訂【SI 單位為 $(w_c / 2320)^{1.5}$ 】 ($w_c / 145$)^{1.5}【6.2, 6.9, 6.33】。6-3-7節的部分討論過破裂模數，對變位預測，可以用 $3.2 \sqrt{f_c} \text{ kg/cm}^2$ ($7.5 \sqrt{f_c} \text{ psi}$) 計算梁的撓曲抗裂彎矩、建築技術規則有效慣性矩：

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \quad \text{式(6-13)}$$

式中

M_{cr} = 開裂彎矩；

M_a = 計算撓度時構材最大彎矩；

I_g = 斷面之總慣性矩；和

I_{cr} = 混凝土開裂斷面之慣性矩。

提供梁變位計算的公式，但對於高強度混凝土，式(6-13)之適用性仍待驗證。

6-3-9 時間相依變位

潛變和收縮而造成與時間有關的梁變位，目前係運用乘方數計算的彈性變位。對高強度混凝土構件，此種過程大致仍可適用，但是試驗資料顯示：由於高強度混凝土有較低潛變係數，這個乘方數可能會小很多。根據建築技術規則附加的長期變位是由使用下列的乘數所獲得：

$$\frac{1}{1 + 50 \rho'} \quad \text{式 (6-14)}$$

式中 ρ' = 非預力之壓力鋼筋比；和

ξ = 時間相依乘數。

這個時間相關的係數可見於圖6-8中。

進展中的研究指出長期乘方數和其因時間所生的變化，而可歸納在圖 6-9 【 6.35 】。圖中顯示不同強度混凝土梁的長期變位乘方數範圍達到一年的加載重齡期，其試驗結果趨勢如下：

- (1) 對強度 250 kg/cm^2 (3,600 psi) 的混凝土梁，一年的乘數 ρ' / ρ ，分別為 0.85, 0.60, 0.50 (相對於 ρ' / ρ 值為 0, 0.5, 1.0)，比建築技術規則對較低強度混凝土一年的值 1.40, 1.10 和 0.80 小。
- (2) 對高強度混凝土梁，變位乘方數更是比建築技術規則的值為低。未加壓力鋼筋的高強度梁，一年值 0.55 只有建築技術規則值的百分之四十，也只有較低強度混凝土試驗值的百分之六十五。
- (3) 壓力鋼筋的影響可能對高強度混凝土梁影響較小，不似其對低強度混凝土梁那麼重要。較低強度的混凝土梁，使用相當於拉力鋼筋面積的壓力鋼筋可以減少一年變位百分之四十一，高強度混凝土，加用壓力鋼筋的梁顯示大約只有百分之三十五的減少率，這一點是可意料的，因為壓力鋼筋的使用主要是減少載重之下抗壓區域混凝土之潛變；而具較低潛變係數的高強度混凝土就比較不需壓力鋼筋的幫忙了。

上述研究中，變位的量測仍持續進行中，較長時間的試驗結果以及抗壓強度 f_c 為 845 kg/cm^2 (12,000 psi) 之梁變位的資料都是可得的。要預估長期變位，公式中混凝土的強度應該是個變數。由於較低潛變係數的原因，混凝土強度不但直接影響長期的梁變位，而且也影響到壓力鋼筋的有效性。

6-3-10 反覆載重

參考 6-2-3 部分，高強度混凝土在承受加載時，相對地，較不容易在內部產生

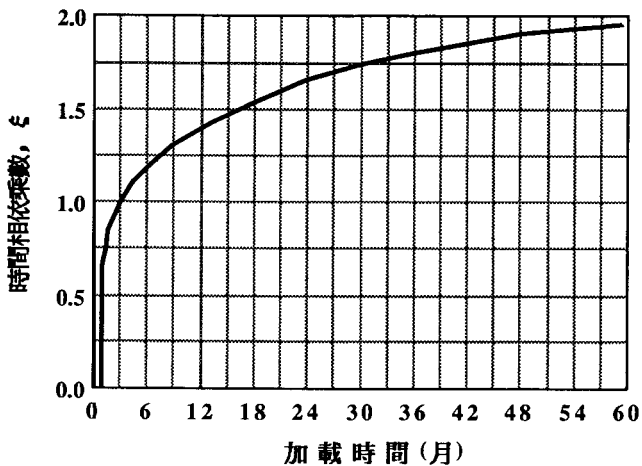


圖 6-8 ACI 318規範解說梁長期變位變化之乘數

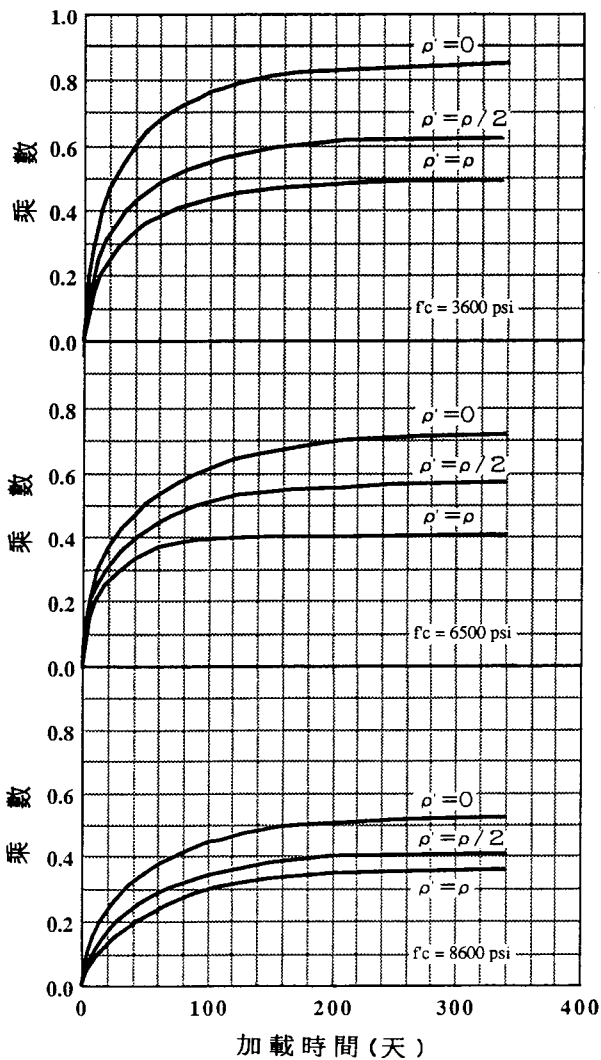


圖 6-9 不同強度混凝土梁長期撓度乘數

微小裂縫，所以高強度混凝土對於在較低應力範圍（如橋梁）的反覆載重較有抵抗力。若在抗震設計中，延展性是個重要的考慮因素，就要利用緊密圈束鋼筋和壓力鋼筋。低強度混凝土這方面的主題早已被徹底研究，目前對於高強度混凝土梁在承受反覆載重的資料仍是寥寥無幾【 6.14, 6.16, 6.17 】。

6 - 3 - 1 1 預力混凝土梁

前面軸向載重構件和鋼筋混凝土梁，文中討論過高強度混凝土之特性會同樣影響預力混凝土梁的行為，特別是非常低潛變係數的影響。在相同的混凝土應力程度下，高強度梁的時間相關變位也會比較少。另一方面，在許多案例中，由於預力梁柱所產生的向上彎曲潛變被持續載重所產生向下潛變變位所抵消，所以低混凝土潛變可能對預力梁變位影響並不大，這會導致僅有非常小量的淨變位和承受的持續載重有關。對一定強度的混凝土應力，可以預期由於潛變而生的預力損失對高強度混凝土預力應力梁而言較小，然而較高的持續載重會減少此種好處。

6 - 4 偏心柱

6 - 4 - 1 抗壓應力分配

6-3-1 討論梁柱部分已經指出：高強度混凝土梁之壓應力分配形狀趨向不同於低強度混凝土梁之形狀，如圖 6-1 顯示之抗壓應力－應變曲線的不同形狀，對於加勁不足的混凝土梁其強度由加勁的降伏強度控制，用於計算撓曲強度的抗壓應力的正確形狀並不太重要，只要抗壓合力的橫桿臂接近真正的值就可以了。傳統的矩形應力分佈圖以及目前規則中決定撓曲強度的公式，一般而言是令人滿意的。根據規則過份加勁的梁並不被允許，因此可結論目前依規則規定設計出來的，不論是用低或高強度的混凝土，將具有良好之結果。

在彎矩和軸向載重組合加載的案例中（也就是偏心柱），構材撓曲抗壓失敗是不可避免的。對於較低偏心率的構材，失敗會源自混凝土到達它的極限應變，然而在柱較遠邊的鋼筋在破壞載重時可能遠不及其抗拉降伏點或者可能停留在抗壓中。在此情況下，混凝土抗壓應力分佈圖形較正確的描述就很重要了。

6 - 4 - 2 短柱強度交互作用圖

偏心柱極限分析研究對目前規則所根據之等量矩形應力塊所做的預測，以及不等

邊四方的混凝土應力分配之比較，顯示不等邊四方形的一般形狀會有改變，從低強度混凝土之近矩形到極高強度之近似三角形（在 6-3-1 部分已討論過）。圖 6-10 顯示出強度交互作用圖，比較一個由強度 840 kg/cm^2 ($12,000 \text{ psi}$) 混凝土所造成的 14×14 英寸，柱軸向載重為 P_n 和彎矩為 M_n 。鋼筋是由降伏強度 $f_y = 420 \text{ kg/cm}^2$ ($60,000 \text{ psi}$) 的四角落之鋼筋所提供，在組合軸向載重和彎矩之強度計算中，首先使用傳統的矩形應力分佈（實線），然後使用比例變化的不等邊四方形（虛線）。

對較大偏心狀況，由彎矩支配並且由抗拉鋼筋降伏產生破壞，則兩條曲線幾乎無可區分。對於中等到小的偏心，與技術規則之結果比較，更能精確核算，軸力與彎矩且均得較大值。在此特案中柱之最糟偏差值在百分之五程度，惟此值尚不足以辨明較確實的計算值。

建築技術規則方法是配合混凝土壓應變值在 0.003 之假定，6-3-2 中已經顯示此種估計對高強度混凝土比低強度混凝土不保守。在有效側向箍筋之存在下如由常重混凝土柱中的連續螺旋鋼筋所提供有效應變極限值比此值大，而且應變一致性分析可以根據 0.003 應變，目前仍沒有明顯的證據可辨明極限應變假設值可以超過此值。

6-4-3 細長比效應

細長比效應對鋼筋混凝土柱強度所採的彎矩放大法，一般來說適用於高強度混凝土，可能的例外是在計算有效撓曲剛度的公式。技術規則給了兩個撓曲剛度之替代公式，兩者均包括以近似法估算混凝土潛變之效應，對高強度混凝土而言，這些公式的真實性至少是可疑的，因為高強度混凝土的潛變係數顯然較低，惟目前尚無試驗資料可得。此外，計算式中也應加入公式 (6-12) 式所給的 E 。估計值。

6-5 結語

6-5-1 回顧

本章對高強度混凝土之特性提出一些摘要性說明，作為鋼筋混凝土構材與結構行為與設計之指標：

對於軸心載重柱而言，直接疊加混凝土和鋼筋強度之分配量，通常與低強度混凝土

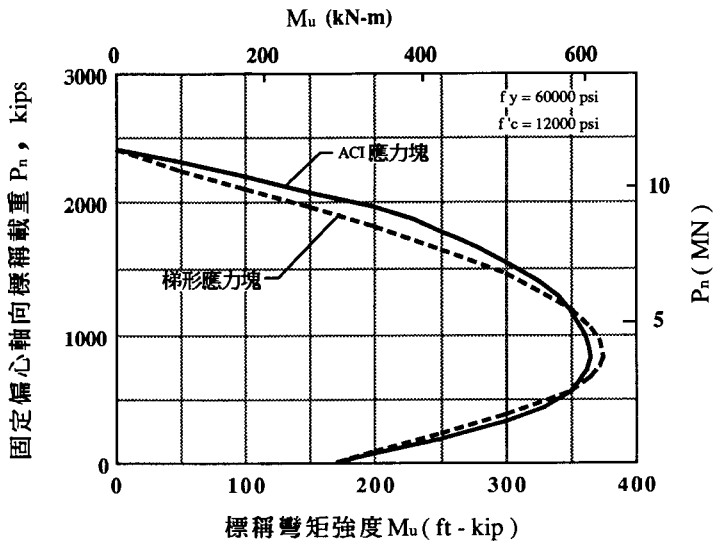


圖 6-10 高強度混凝土柱交互作用比較圖

土構材一樣正確，側向鋼筋在改善延展性和韌性上扮演特別重要的角色。特別要注意在極限應力之後承載力的驟然降低以及與低強度混凝土柱相較下，側面鋼筋在增加延展性的效果會明顯減小，此需要進一步的研究。由於彈性模數較高，而潛變係數較低，在載重之下，高強度混凝土柱會展示出比低強度混凝土柱較小的短縮。

對梁柱，使用傳統的等值矩形應力分佈圖，似乎產生對要求較低鋼筋量之技術規則方法有令人滿意的結果。高強度混凝土的抗壓應變限度應該比低強度混凝土者為小，但是仍可將其設定為 0.003。圍束鋼筋和抗壓鋼筋在設計混凝土梁柱時都要使用，因為其延展性對耐震抗力具有重要性。技術規則建議最小抗拉鋼筋比值要做更改，以反映混凝土強度的影響以及彈性模數對撓曲計算影響；高強度混凝土梁柱為了要反映出較低的潛變係數和較低的抗壓鋼筋效果，在計算長期梁變形時也應有重大的改變。

對於偏心柱強度的計算，可能被壓應力塊狀分佈形狀所影響，尤其是破壞時其中心軸接近柱邊之偏心率較小之柱。以有限的計算結果比較矩形應力塊和非等邊四方形應力塊，顯示只有微小的差異。在決定細長比效果時，要特別考慮到高強度混凝土具較低的潛變係數，因為它會影響計算中使用的有效撓曲剛度，並且也要考慮其對彈性模數的增值。

6 - 5 - 2 研究需要

第六章的內容應該可根據未來研究結果再修訂。資料不足的範圍包括：剪力、斜張力、扭力、握裹力、錨定、續接長度、以及反覆載重的效果，為了填補這些空隙、在許多中心，研究計畫目前都在進行中。如此，擴大研究的範圍，就可以根據完整的材料特性資料和構材行為特性，安全地、有信心地利用高強度混凝土的許多優點。

6 - 6 引用文獻

6.1. Carasquillo, Ramon L., Nilson, Arthur H., and Slate, Floyd O., "Microcracking and Engineering Properties of High-Strength Concrete," Research Report No. 80-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Feb. 1980, 254 pp.

6.2. Carasquillo, Ramon L., Nilson, Arthur H., and Slate, Floyd O.,

- "Properties of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loads," ACI Journal, Proceedings V. 78, No. 3, May-June 1981, pp. 171-178.
- 6.3. Carrasquillo, Ramon L., Slate, Floyd O., and Nilson, Arthur H., "Microcracking and Behavior of High Strength Concrete Subject to Short-Term Loading," ACI Journal, Proceedings V. 78, No. 3, May-June 1981, pp. 179-186.
- 6.4. "High Strength Concrete in Chicago High-Rise Buildings," Task Force Report No. 5, Chicago Committee on High-Rise Buildings, 1977, 63 pp.
- 6.5. Kaar, P. H., Hanson, N. W., and Capell, H. T., "Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete," Douglas McHenry International Symposium on Concrete and Concrete Structures, SP-55, American Concrete Institute, Detroit, 1978, pp. 161-185. Also, Research and Development Bulletin No. RD051.01D, Portland Cement Association.
- 6.6. Perenchio, William F., and Klieger, Paul, "Some Physical Properties of High Strength Concrete," Research and Development Bulletin No. RD056.01T, Portland Cement Association, Skokie, 1978, 7 pp.
- 6.7. Shah, S. P., Editor, Proceedings, National Science Foundation Workshop on High Strength Concrete, University of Illinois at Chicago Circle, Dec. 1979, 226 pp.
- 6.8. Wang, P. T., Shah, S. P., and Naaman, A. E., "Stress-Strain Curves of Normal and Lightweight Concrete in Compression," ACI Journal, Proceedings V. 75, No. 11, Nov. 1978, pp. 603-611.
- 6.9. Martinez, S., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Spirally Reinforced High-Strength Concrete Columns," Research Report No. 82-10, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Aug. 1982.

- 6.10. Ahmad, S. H., and Shah, S. P., "Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement," ACI Journal, Proceedings V. 79, No. 6, Nov. Dec. 1982, pp. 484-490.
- 6.11. Iyengar, K. T. Sundara Raja, Desayi, Prakash, and Reddy, K. Nagi, "Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Binders," Magazine of Concrete Research (London), V. 22, No. 72, Sept. 1970, pp. 173-184.
- 6.12. Vallenias, J., Bertero, V. V., and Popov, E. P., "Concrete Confined by Rectangular Hoops and Subjected to Axial Loads," Report No. UCB/EERC-77/13, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1977.
- 6.13. 方一匡, 宋昌國, 「高強度混凝土在軸壓作用下之強度及韌性研究」, 中國土木工程學刊, 第一卷, 第三期, 1989。
- 6.14. Bennett, E. W., and Muir, S. E. St. J., "Some Fatigue Tests on High Strength Concrete in Uniaxial Compression," Magazine of Concrete Research (London), V. 19, No. 59, June 1967, pp. 113-117.
- 6.15. Ahmad, S. H., "Properties of Confined Concrete Subject to Static and Dynamic Loading," PhD thesis, University of Illinois at Chicago Circle, Mar. 1981.
- 6.16. Bertero, V. V., Bresler, B., and Liao, H., "Stiffness Degradation of Reinforced Concrete Members Subject to Cyclic Flexural Moments," Report No. EERC-69/12, University of California, Berkeley, Dec. 1969.
- 6.17. Bresler, B., and Bertero, V. V., "Influence of High Strain Rate and Cyclic Loading Behavior of Unconfined and Confined Concrete in Compression," Proceedings, 2nd Canadian Conference on Earthquake Engineering, Department of Civil Engineering, McMaster University,

- Hamilton, June 1975, pp. 15-1-15-38.
- 6.18. Ngab, A. S., Slate, F. O., and Nilson, A. H., "Behavior of High-Strength Concrete under Sustained Compressive Stress," Research Report No. 80-2, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Feb. 1980, 201 pp.
- 6.19. Ngab, Ali S., Nilson, Arthur H.; and Slate, Floyd O., "Shrinkage and Creep of High Strength Concrete," ACI Journal, Proceedings V. 78, No. 4, July-Aug. 1981, pp. 255-261.
- 6.20. Ngab, Ali S., Slate, Floyd O., and Nilson, Arthur H., "Microcracking and Time-Dependent Strains in High-Strength Concrete," ACI Journal, Proceedings V. 78, No. 4, July-Aug. 1981, pp. 262-268.
- 6.21. Smadi, M. M., Slate, F. O., and Nilson, A. H., "Time-Dependent Behavior of High-Strength Concrete under High Sustained Compressive Stresses," Research Report No. 82-16, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Nov. 1982.
- 6.22. Russell, H. G., and Corley, W. G., "Time-Dependent Behavior of Columns in Water Tower Place," Douglas Mc Henry International Symposium on Concrete Structures, sp-55, American Concrete Institute, Detroit, 1978, pp. 347-373. Also, Research, and Development Bulletin No. RD052.01B, Portland Cement Association.
- 6.23. Leslie, Keith E., Rajagopalan, K. S., and Everard, Noel J., "Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams," ACI Journal, Proceedings V. 73, No. 9, Sept. 1976, pp. 517-521.
- 6.24. Nedderman, H., "Flexural Stress Distribution in Very-High Strength Concrete," MSc thesis, University of Texas at Arlington, Dec. 1973, 182 pp.
- 6.25. Zia, Paul, "Structural Design with High Strength Concrete," Report

- No. PZIA-77-01, Civil Engineering Department, North Carolina State University, Raleigh, Mar. 1977, 65 pp.
- 6.26. Pastor, J. A., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Behavior of High Strength Concrete Beams," Research Report No. 84-3, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, Feb. 1984.
- 6.27. Wang, Pao-Tsan, Shah, Surendra P., and Naaman, Antoine E., "High Strength Concrete in Ultimate Strength Design," Proceedings, ASCE, V. 104, ST11, Nov. 1978, pp. 1761-1773.
- 6.28. 黃兆龍, 林建宏, 「高強度飛灰混凝土性質及結構行為研究」, NSC 77-0410-E011-06, 國科會專題研究報告, 1989。
- 6.29. Discussion of "Flexural Behavior of High-Strength Concrete Beams" by Keith E. Leslie, K. S. Rajagopalan, and Noel J. Everard, ACI Journal, Proceedings V. 74, No. 3, Mar. 1977, pp. 140-145.
- 6.30. Zia, Paul, Private Correspondence Pertaining to Minimum Steel Ratios Nov. 1981.
- 6.31. 方一匡, 彭盛昌, 「高強度混凝土樑在低剪力鋼筋量下之行為研究」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 1989。
- 6.32. 方一匡, 洪木通, 「高強度混凝土短樑在低剪力鋼筋量下之行為研究」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 1990。
- 6.33. Mphonde, A. G., and Frantz, G. C., "Shear Tests of High and Low Strength Concrete Beams without Stirrups," ACI Journal, Proceedings V. 81, No. 4, July-Aug. 1984.
- 6.34. Pauw, Adrian, "Static Modulus of Elasticity of Concrete as Affected by Density," ACI Journal, Proceedings V. 57, No. 6, Dec. 1960, pp. 679-688.
- 6.35. Luekkeman, C.; Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Short Term and Long Term Deflections of High Strength Reinforced Concrete Beams,"

Research Report, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca (in preparation).

- 6.36. Lin, I. J. and Chen, Y. I., "Shear Transfer Across a Crack in Reinforced High-Strength Concrete", Proceedings of the Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Chiang Mai, January 1989, pp. 505-510.
- 6.37. 林英俊, 林總仁, 「高強度混凝土深梁之剪力強度」, 國立台灣工業技術學院工程技術研究所碩士論文, 1989。
- 6.38. 林英俊, 何國彰, 「高強度鋼筋混凝土托架之研究」, 國立台灣工業技術學院工程技術研究所碩士論文, 1990。
- 6.39. 林英俊, 劉張欽彥, 「軸向力作用時鋼筋混凝土深梁之剪力強度」, 國立台灣工業技術學院工程技術研究所碩士論文, 1990。
- 6.40. 林英俊, 吳枝萬, 「反覆載重作用下鋼筋混凝土之剪力摩擦強度」, 國立台灣工業技術學院工程技術研究所碩士論文, 1986。
- 6.41. 林英俊, 李宜純, 「彎矩作用於剪力面時鋼筋混凝土之剪力傳遞」, 國立台灣工業技術學院工程技術研究所碩士論文, 1989。

第七章 經濟考慮

7-1 引言

前幾章顯示高強度混凝土是一種藝術狀態的材料，如同大部分的藝術狀態材料一樣，高強度混凝土需要較高的價格，在一些例子中，採用高強度混凝土所獲之成果值得付出比較高的費用，但並非對各工程皆是。在討論特定工程應用時，宜先探討使用高強度混凝土的成本效益，俾作經濟考量。

許多工程應用上，高強度混凝土的效益不只在於補償原料和品管所增加的費用，基本上，高強度混凝土可以比低強度混凝土花較少的費用來承擔同一抗壓載重【7.1】。芝加哥的結構工程師 W. Schmit 和 E. S. Hoffman 編繪可顯示成本的圖表，並指出：當支持 445 噸 (100,000 lb) 載重時，若採用強度 420 kg/cm^2 (6,000 psi) 的混凝土每樓層須費 4.21 美元，若採用 630 kg/cm^2 (9,000 psi) 的混凝土（這種混凝土在芝加哥地區並不難獲得），則費用可降到 3.65 美元【7.2】。

這些統計圖表雖反映出 1975 年的成本，但其比率至今應仍相似，作這些統計分析就單價而言，高強度混凝土雖然高於較低強度混凝土，但是這些單價的差距在設定的構件尺寸及位置上卻被明顯的抵消。高強度混凝土這種經費補償的功能在柱構件的使用中特別明顯。

因為建築機能及空間之需求，柱子尺寸因數非常重要，在較高層建築物中柱子尺寸受到限制，因此常採用高強度混凝土來解決，以代替採用較多鋼筋的作法，尤其是要求韌性較高的地震區更為明顯有效。

1976 年，建築記錄曾記述：「設以 420 kg/cm^2 (6,000 psi) 混凝土所澆置的 $12 \times 12 \text{ cm}$ (30×30 英吋) 柱在某特定載重下需要配 4% 鋼筋比，若採用強度 630 kg/cm^2 (9,000 psi) 的混凝土以相同尺寸柱子卻只需法規規定之最小量 1% 鋼筋比的鋼筋【7.3】；」。

7-2 成本研究

依據美國材料服務公司 (The Material Service Corporation) 進行一項成本與單價分析研究【7.4】，顯示在短的箍柱中使用高強度混凝土取代鋼筋可達成的成

本效益。這份 1983 年的研究是依承擔設計載重 (1.4D+1.7L) 為 445 噸 (1000 kips) 的柱子作對象，並依下列單價 (現場供應) 來評估：

鋼筋	760 美元/公噸
490 kg/cm ² (7,000 psi) 混凝土	105 美元/m ³
630 kg/cm ² (9,000 psi) 混凝土	111 美元/m ³
770 kg/cm ² (11,000 psi) 混凝土	136 美元/m ³
980 kg/cm ² (14,000 psi) 混凝土	169 美元/m ³
模板	366 美元/m ³

如圖 7-1 所示：採用高強度混凝土配合最少的鋼筋比是最經濟的方案。

製造 40×40in 方柱，
每英尺每 1000kip 於
設計載重 (1.4D +
1.7L) 下之費用，
美金(元) \$

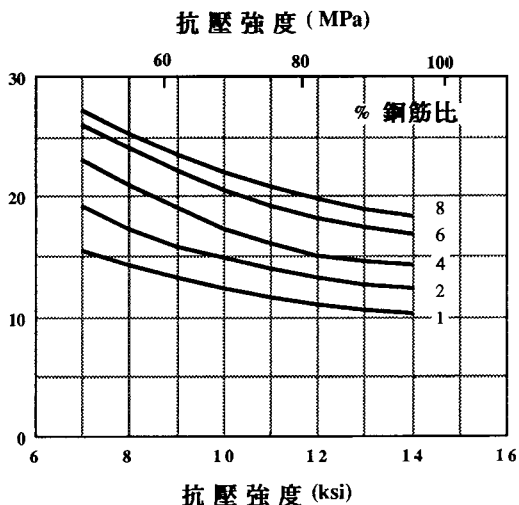


圖 7-1 柱成本圖

7-3 實例說明

以下兩個實例有助於瞭解這種作業上的節省轉成真正的金錢節約，茲說明如下：

7-3-1 實例一

1968 年美國賓州第一座採用 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 的混凝土高層辦公大樓進行設計時，為要達成柱間跨距的要求〔大約將近 9 公尺 (30 呎) 的跨徑〕，且為避免在較低層使用過大的柱子，所以在最低三層的柱子擬採用鋼骨。然而，工程師作成本比較研究，採用強度 560 kg/cm^2 ($8,000 \text{ psi}$) 混凝土作替代設計後指出：

7-3-1-1 若低層柱仍維持原來不能接受的尺寸，但改用 560 kg/cm^2 ($8,000 \text{ psi}$) 混凝土，則鋼筋可減少 60%，如此可以使每支柱子減少 24 處的搭接，且在勞力及時間上均節省不少。

7-3-1-2 若低層柱仍維持其鋼筋用量，則柱尺寸可以從 $915 \times 1170 \text{ mm}$ ($36 \times 46 \text{ 英吋}$) 減小到 $760 \times 760 \text{ mm}$ ($30 \times 30 \text{ 英吋}$)，此柱尺寸已可使建築師和業主接受，並可以免除鋼骨構造之採購業務。

大致上估計顯示，若在較低層柱使用 560 kg/cm^2 ($8,000 \text{ psi}$) 的混凝土，混凝土強度往上遞減，到頂樓採用 210 kg/cm^2 ($3,000 \text{ psi}$) 的混凝土，如此可以使柱尺寸符合建築師、業主及承租戶的要求，則可節省 1968 年面額將近 530,000 美元的費用。

7-3-2 實例二

高強度混凝土的經濟效益，在 1979 年建造紐約市第一座使用 560 kg/cm^2 (8000 psi) 混凝土的大樓 Palace Hotel 時更顯明。剛開始的構想是在低層（設計做為舞廳和餐廳之用）採用鋼骨構造且以鋼筋混凝土建造飯店的上部房間部。然而，工程師們採用 560 kg/cm^2 (8000 psi) 的混凝土把整個設計轉換成鋼筋混凝土構造（除了最低四層應舞廳和餐廳需要採較大的跨徑兩支鋼柱不變之外）：若使用 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 的混凝土，其設計會使柱子尺寸變成很大而不經濟。有關高強度混凝土的價值與品質保證計畫等呈報給紐約市營建部後，終獲准高強度混凝土之使用：

僅於建築物的柱採用具有抗壓強度 560 和 490 kg/cm² (8,000 和 7,000 psi) 的混凝土；抗壓強度 245 kg/cm² (3,500 psi) 的輕質混凝土用於梁及樓版；而強度 350 到 420 kg/cm² (5,000 到 6,000 psi) 的混凝土則用於牆壁。在飯店最低的五層，柱大小可減少約百分之二十五，因採高強度混凝土而減少約 10% 鋼筋用量。另外，11 號鋼筋仍然維持，以避免機械接合的需要，這樣可減少相當多梁及版紮筋的時間，再者，較上層柱尺寸的變化可以減少並減少鋼筋用量。

對業主、建造者和工程師而言，能夠在不犧牲強度的情況下減少昂貴的鋼筋用量，是相當有意義的，在高樓柱中採用高強度混凝土就有如此的經濟效益。它使得高層建築物的較底層柱能維持在可接受的尺寸，也可增加建造的樓層數【7.1】。

這正是一個新材料能因應市場經濟要求的成功案例。芝加哥委員會【7.5】研究指出：「若採用一般低強度混凝土建造高樓，預期的樓層數目必然會受限於大尺寸柱子，黃金地段的不動產必須發展成最大的租賃樓層空間，且公寓或是大廈單元之機能配置必須要有彈性，卻受限於柱子尺寸。高強度混凝土可以使柱子尺寸減到最小，所以滿足了這種情況」。

7-4 其他研究

在加拿大 Ontario 的 Richmond-Adelaide Center，因採用高強度混凝土而使這座建築增加將近百分之三十的地下停車空間【7.6】。在建築營建很難獲利之時，這種既可以減低營建成本又可以實質上在建築物內增加收入空間的新材料，確是在決定建造時非常重要的考慮因素。

7-5 材料的選擇

在加拿大 Ontario 的皇家銀行廣場計畫為 1976 年開始建造的 43 層樓建築物。係第一棟使用飛灰的高強度混凝土大樓之一，所有不同強度混凝土均拌合當地的飛灰。使用結果，節省了原本契約 100,000 美元的花費，而且也製造出品質相當好的新拌與硬固混凝土【7.6】。

7-6 品質管制

材料的選擇會影響成本，然而另外一個限於使用高強度混凝土的因素，就是在使用高強度混凝土時由於需不斷試驗、品管和檢驗所需的費用。混凝土的品質和均勻性

是非常重要的，並且必須採取附加的步驟以確保混凝土的品質和均勻性。

在皇家銀行廣場計劃，一些預防措施是必要的。混凝土的供應商必須有品管人員控制卡車的調度和卸料時混凝土的均勻性。對於這個中央控制計劃，供應商同意在卡車卸料地點時不再加水以及在運送過程更要略做修正。對於拌合廠要做規律性檢驗以便檢視拌合的過程並且取得測試的樣品。再者，還要雇用專業的技工來進行現場取樣和試驗，這是品質管制的基本特徵。

在後來的計劃中，Richmond-Adelaide Center 第二期（加拿大 Ontario 1977 ~ 1979 年為同批工程師所設計），混凝土供應商不但在現場維持全天候的檢視以確保輸送的材料符合需要，而且業主雇用的工程師也維持全天候的檢視並且定期檢查拌合廠。這種嚴格的品質管制是規範所規定的要求。

對皇宮飯店而言，紐約市營建部明文規定至少兩個混凝土的供應商具製造 560 kg/cm^2 (8,000 psi) 的能力，並由測試實驗室來驗證，且需要一個全天候專業工程師不斷地檢視工作的進展，而這個工程師在營建期間不必擔任其他工作【 7.7 】。對於熱天的混凝土施工，工程師們要求拌合不超過 10°C (50°F) 的限制，並且在陽光直接照射之下，預拌車的拌合桶外要用水噴灑。另外，所有預拌車的載重限制 7.6 m^3 (10 yd^3)，雖然這些預拌車的載重量有 12.2 m^3 (16 yd^3)。這種職業性的檢視增加了費用，但是對於混凝土供應商和混凝土小包商在這方面品質管制的持續教育最終仍會製造出各種強度品質較好的混凝土，並且也會製造出較好而且經濟的材料。

7 - 7 運用範圍

一般而言，當高強度混凝土用於高層建築物柱子時，它的經濟效益最能突顯。在這方面的運用，工程師們可以充分利用高強度混凝土所增加的抗壓強度，減少鋼筋用量，減少柱子大小以增加可用的底層空間，或者可以在不損壞較低層的情況下允許樓層數的增加。這些利益可以彌補因高強度所須增加的品質管制費用和前面討論過可能較高的原料費用，同時高強度混凝土的運用也已經擴展到其他方面：例如主要的樓版、梁和大跨距的橋梁等，這些工程上的運用仍須經過經濟性考驗。

高強度混凝土用於樓版，最主要的優點在於減少靜載重【 7.8 】，然而 Schmidt

和 Hoffman 指出：明顯的經濟效益僅藉由減少勁度所必需的厚度來達成，但所需的額外鋼筋量可能會抵消所節省的混凝土費用。高強度混凝土若用在矩形梁，T形梁和單向版上，會減少其寬度或厚度，並提供較大的跨距，但是在梁及樓版中較便宜的輕質混凝土也相當適合。目前，在一般的狀況下對於高強度混凝土使用於樓版及梁，尚未有顯著的經濟效益可言。

長跨距橋梁是另一個高強度混凝土工程應用，且具有明顯經濟效益的領域。高強度混凝土可提供每單位重量和單位體積較大的抗壓強度，使得橋墩重量減輕、尺寸縮小，如此增大淨跨距離。另外，當雙位及穩定性控制橋梁設計時，高強度混凝土俱可增加勁度是有益的；在預力混凝土中，高強度混凝土增加其拉力強度，對於服務載重設計有其助益【7.9】。

在建造跨俄亥俄河的斜張橋的發包會中，一個混凝土車道案因比鋼構造案減少百分之二十九的經費而得標（相差大約一仟萬美元）。在西維琴尼亞州 Huntington 與俄亥俄 Proctorville 之間的雙線立體交叉路口包括了美國第一個主要不對稱斜撐梁橋。其最大跨距達 900 呎，前三標均採用混凝土造，其標價從二千三百五十萬美元到二千九百七十萬美元，均低於最低之鋼構造標價（三千三百三十萬美元）很多。設計者 Arvid Grant Associates 特別指定用 560 kg/cm^2 (8,000 psi) 高強度混凝土設計成僅 1.5 公尺 (5 呎) 深之箱形梁作為該橋之主梁【7.8】。

7-8 結語

高強度混凝土的經濟效益甚為明顯，隨著高強度混凝土使用日漸普遍後，其效益更彰顯。事實上，這些先驅採用高強度混凝土的工程已經明顯地證實且展示其經濟效益。目前，工程師可以採用高強度混凝土而達到經費和空間的有效運用；未來，這些因素可能會決定工程案建造的取捨。

7-9 引用文獻

- 7.1. "High Strength Concrete-Costs More in the Truck, Costs Less in the Structure," PCA Concrete Technology Today, No. 4, Dec. 1980, p.3.
- 7.2. Schmidt, William, and Hoffman, Edward S., "9,000-psi Concrete-Why? , Why Not? ," Civil Engineering-ASCE, V. 45, No. 5, May 1975, pp.

52-55.

- 7.3. "High-Strength Concrete Allows Bigger Loads on Smaller Columns," Architectural Record, V. 159, No. 7, June 1976, pp. 133-135.
- 7.4. Private correspondence from J. Moreno of Material Service Corp. to Irwin G. Cantor, May 12, 1983.
- 7.5. "High-Strength Concrete in Chicago High-Rise Buildings," Task Force Report No. 5, Chicago Committee on High-Rise Buildings, Feb. 1977, 63 pp.
- 7.6. Bickley, John A., and Payne, John C., "High Strength Cast-in-Place Concrete in Major Structures in Ontario," paper presented at the ACI Annual Convention, Milwaukee, Mar. 1979.
- 7.7. Private correspondence from J. T. Walsh, Department of Buildings, New York, to Irwin G. Cantor, Aug. 11, 1977.
- 7.8. "Concrete Beats Steel by 29%," Engineering News-Record, V. 206, May 14, 1981, P. 16.
- 7.9. Carpenter, James E., "Applications of High Strength Concrete for Highway Bridges," Public Roads, V. 44, No. 2, Sept. 1980, pp. 76-83.

第八章 應用

8-1 引言

本章描述高強度混凝土的一些特殊運用。方向，包括建築物、橋梁、和特殊建築物方面的運用，這些運用並非涵蓋所有高強度混凝土的運用範圍，此處也將討論高強度混凝土的一些潛在的運用場合。

8-2 建築物

高強度混凝土在建築物中最大的運用方向是高層建築物的柱子。芝加哥地區高強度混凝土的歷史已經在芝加哥高層建築委員會的 5 號報導中描述過，從 1972 年起，芝加哥已經有超過 20 座的大廈用設計抗壓強度 630 kg/cm^2 (9,000 psi) 的柱子來建造【 8.1 】。Bickley 和 Payne【 8.2 】也報導在加拿大多倫多兩座大廈使用高強度混凝土之發展。在紐約【 8.3 】、休士頓【 8.4, 8.5 】、明尼亞波利【 8.6 】、以及澳大利亞的墨爾本【 8.7 】也都有其他的運用實例，表 8-1 概述由這些及其他來源所得到的資料。

8-3 橋梁

已有許多運用高強度混凝土於預鑄預力橋梁的例子，然而已發表有關構造物的資料仍然有限。

Carpenter 描述過在四種不同實心斷面梁使用高強度混凝土的效果【 8.8 】。對於整體 T 型複合斷面版而言，間距密集梁的跨距會隨混凝土強度增大而增加。對於間距較大的梁而言，當混凝土強度增加到 560 kg/cm^2 (8,000 psi) 時，跨距能力就隨之增加。抗壓強度超過 560 kg/cm^2 (8,000 psi) 時，因為無法供足夠的預力，所以跨距能力就不再增加，其他相關部分也得到類似的結果。

對於後拉式的箱型梁橋梁，Carpenter 報告指出高強度混凝土可以用來增加跨距。對於較高強度混凝土，最大可得的預力也是一樣會限制最大的跨距。對於節段式箱型梁橋梁，他表示：「在構件厚度由應力決定的地方，高強度混凝土具有實用的。然而，在厚度由其他因素控制時，高強度混凝土可能並無助益」。表 8-2 列出了一些已經使用高強度混凝土的橋梁。美國最有名的運用實例可能是橫跨西維吉尼亞州的 Huntington 到俄亥俄州的 Proctorville 的大橋，係由抗壓強度 560 kg/cm^2

表 8.1 使用高強度混凝土之建築物

建築物	地點	年份*	總層數	最大混凝土設計強度 (psi)
Pacific Park Plaza	加州	1983	30	6500
S.E. Financial Center	邁阿密	1982	53	7000
Petrocanada Building	Calgary	1982	34	7250
Lake Point Tower	芝加哥	1965	70	7500
1130 S. Michigan Ave	芝加哥	1981	75	7500
Texas Commerce Tower	休士頓	1978	53	8000
Helmesley Palace Hotel	紐約	1981	68	8000
Trump Tower	紐約	1981	52	8000
City Center Project	Minneapolis	1980	44	8000
Collins Place	Melbourne	1980	31	8000
Larimer Place Condominiums	丹佛市	1975	27	8500
499 Park Avenue	紐約	1975	43	8800
Royal Bank Plaza	多倫多	1978	33	8800
Richmond Adelaide Center	多倫多	1972	50	9000
Midcontinental Plaza	芝加哥	1973	55	9000
Frontier Towers	芝加哥	1975	79	9000
Water Tower Place	芝加哥	1976	56	9000 +
River Plaza	芝加哥	1982	40	9000 #
Chicago Mercantile Exchange	芝加哥			

* 高強度混凝土澆鑄年份
 + 含兩個 11000 psi 強度的柱
 # 含兩個 14000 psi 強度的柱
 換算法: 1000 psi = 6.895 MPa

表 8-2 使用高強度混凝土之橋樑

橋 樑	地 點	年 份	最 大 跨 徑 (ft)	最 大 混 凝 土 設 計 強 度 (psi)
Willows Bridge	多倫多市	1967	158	6000
Houston Ship Canal	德州	1981	750	6000
San Diego to Coronado	加州	1969	140	6000 L*
Linn Cove Viaduct	北卡州	1979	180	6000
Passco -Kennewick Intercity	華盛頓州	1978	981	6000
Coweman River Bridges	華盛頓州	146	146	7000
Huntington to Proctorville	西維吉亞州	1984	900	8000
Nitta Highway Bridge	俄亥俄州	1968	98	8500
Kaminoshima Highway Bridge	日本	1970	282	8500
Fukamitsu Highway Bridge	日本	1974	85	10000
Ootanabe Railway Bridge	日本	1973	79	11400
Akkagawa Railway Bridge	日本	1976	150	11400

* 輕質混凝土

換算法:1000 psi = 6.895 MPa

(8,000 psi) 之混凝土建成【 8.9 】，這座橋包括一個由主跨徑 274 公尺（900 呎）做成的不對稱斜張梁之上層結構。

日本也已有報告指出在鐵路大橋使用抗壓強度高達 770 kg/cm^2 (11,000 psi) 的混凝土【 8.10, 8.11 】，Nagasaki 報告說【 8.11 】：在日本地區強度 800 kg/cm^2 (11,400 psi) 的混凝土很容易在工地取得使用，表 8-2 列出日本採用高強度混凝土的橋梁。

8-4 特殊應用

在 1948 年，明尼蘇答 Fork Peck 水壩的電廠使用指定抗壓強度 630 kg/cm^2 (9,000 psi) 的混凝土來做預鑄鑊板。高強度混凝土被指定提供構造相當緻密的混凝土以抗拒嚴重的暴露環境，報告中並指出混凝土的真正抗壓強度較 630 kg/cm^2 (9,000 psi) 高出相當多。

1970 年 Skrastins 【 8.16 】已經使用強度 700 kg/cm^2 (10,000 psi) 混凝土，及以高速旋轉方式所製造的預力混凝土桿，高強度混凝土被選擇用來減小混凝土桿的尺寸。

Copen 【 8.17 】已經指出，薄拱壩使用 700 kg/cm^2 (10,000 psi) 的混凝土，通常經由減小混凝土的體積而造成較大的經濟效益。高強度混凝土會有減少拱壩變位，並且可以改進建造接合處的強度，也可以使模版提早移去。Copen 指出高強度混凝土的缺點包括：應力集中現象（特別是水壩的基礎）；增加混凝土龜裂數目的傾向；增加溫度控制問題；以及牽涉到水壩穿孔及壩頂鐵道通路工程問題的複雜性。

Bobrowski 【 8.18 】曾描述高強度混凝土在兩個正面觀眾席屋頂的運用實例【 8.18 】。具有密度 1.89 Mg/m^3 (118 lb/ft³) 以及在 28 天最小方塊強度 525 kg/cm^2 (7,500 psi) 的輕質混凝土被使用在英國 Doncaster 運動場的屋頂梁的建造。在愛爾蘭 Leopards 城的運動場屋頂梁則有 28 天的方塊抗壓強度 505 到 620 kg/cm^2 (7,200 到 8,850 psi) 和平均 1.84 Mg/m^3 (115 lb/ft³) 的密度。Anderson 【 8.19 】指出在美國西北部用高強度混凝土做海域結構的基樁。二十八天抗壓強度範圍從 550 到 690 kg/cm^2 (7,900 到 9,900 psi)；具有抗壓強度高達 660 kg/cm^2 (9,400 psi) 的高強度混凝土也在美國西北部被用來建造船閘

結構的頂板。

Wolsiefer 【 8.20 】 指出高強度、低滲透性、高化學物阻抗混凝土在工業製造上之運用，特別的運用包括：幾座標準單元化的銀行保險門俱 230 mm (9 英寸) 的坍塌，其四十五天齡期混凝土抗壓強度為 840 kg/cm^2 (12,000 psi)。

8 - 5 潛在運用場合

高強度混凝土大部分運用是利用這種材料的高強度特性，然而，高強度混凝土亦具有其它可以被有利地用在混凝土建築的特質，Le Messurier 【 8.21 】 建議使用高強度混凝土來滿足高彈性模數的需求。相同的，高強度混凝土也可以用在樓版上使得模版工程可以早些拆除，而且也可以避免再支撐，即利用到高強度混凝土較高的彈性模數和較低的潛變之特性【 8.22 】。Anderson 【 8.19 】 建議在考慮減少預力損失時應該也考慮高強度混凝土的低潛變特性，因為大部分的預力損失可歸因於潛變和乾縮，所以高強度混凝土構材的預力損失應該會比低強度混凝土構材為小。

Rabbat 和 Russell 【 8.23 】 指出當混凝土抗壓強度從 350 到 490 kg/cm^2 (5,000 增加到 7,000 psi) 時，實心梁的最大跨距能力也可隨之增加百分之十五。最後 Manning 建議【 8.24 】，高強度混凝土和高品質混凝土之間的關係可以使高強度混凝土不是以它的強度吸引人，而是由於長期耐久的服務表現。

8 - 6 引用文獻

- 8.1. "High-Strength Concrete in Chicago High-Rise Buildings," Task Force Report No. 5, Chicago Committee on High-Rise Buildings, Feb. 1977, 63 pp.
- 8.2. Bickley, John A., and Payne, John C., "High-Strength Cast-in-Place Concrete in Major Structures in Ontario," paper presented at the ACI Annual Convention, Milwaukee, Mar. 1979.
- 8.3. "New York City Gets Its First High-Strength Concrete Tower." Engineering NewsRecord, V. 202, Nov. 2, 1978, P. 22.
- 8.4. Pickard, Scott S., "Ruptured Composite Tube Design for Houston's Texas Commerce Tower," Concrete International: Design & Construction,

- V. 3, No. 7, July 1981, pp. 13-19.
- 8.5. Cook, James E., "Research and Application of High-Strength Concrete Using Class C Fly Ash, " Concrete International: Design & Construction, V. 4, No. 7, July 1982, pp. 72-80.
- 8.6. Venema, T. P., and Regnier, H. J., "Placement, Batching, and Tests of High Strength Concrete for Minneapolis City Center Project," submitted to ACI for publication.
- 8.7. Day, K. W., "Quality Control of 55 MPa Concrete for Collins Place Project, Melbourne, Australia, " Concrete International: Design & Construction, V. 3, No. 3, Mar. 1981, pp. 17-24.
- 8.8. Carpenter, James E., "Applications of High Strength Concrete for Highway Bridges, " Public Roads, V. 44, No. 2, Sept. 1980, pp. 76-83.
- 8.9. "Concrete Beats Steel by 29%," Engineering News Record, V. 206, May 14, 1981, P. 16.
- 8.10. "Stronger Concrete," Engineering News Record, V. 189, June 8, 1982, P. 12.
- 8.11. Nagataki, Shigeyoshi, "On the Use of Superplasticisers," Seminar on Special Concretes, 8th FIP Congress (London, 1978). Federation Internationale de la Precontrainte, Wexham Springs, 1978, 15 pp.
- 8.12. "Concrete Box Girder Span Establishes U. S. Record," Engineering News-Record, V. 208, No. 1, Jan. 7, 1982, pp. 22-25.
- 8.13. Pfeifer, Donald W., "Development of the Concrete Technology for a Precast Prestressed Concrete Segmental Bridge," Journal, Prestressed Concrete Institute, V. 27, No. 5, Sept. -Oct. 1982, pp. 78-99.
- 8.14. Hurlbut, Roger, "146-ft Long Precast Prestressed Bridge Girders in Washington State, : Journal, Prestressed Concrete Institute, V. 24, No. 1, Jan-Feb. 1979, pp. 88-92.

- 8.15. "Unusual Strengths Attained in Precast Slabs Used for Facing Power House Walls," Concrete, V. 57, No. 5, May 10, 1949, pp. 9-10.
- 8.16. Skrastins, Janis I., "Toward High-Strength Concrete, " Modern Concrete, V. 34, No. 1, May 1970, pp. 44-48.
- 8.17. Copen, Merlin D., "Problems Attending Use of Higher Strength Concrete in Thin Arch Dams," ACI Journal, Proceedings V. 72, No. 4, Apr. 1975, pp. 138-140.
- 8.18. Bobrowski, J., and Bardham-Roy, B. K., "Structural Assessment of Lightweight Aggregate Concrete," Concrete (London), V. 5, No. 7, July 1971, pp. 229-234.
- 8.19. Anderson, Arthur R., "Research Answers Needed for Greater Utilization of High Strength Concrete, " Journal, Prestressed Concrete Institute, V. 25, No. 4, July-Aug. 1960, pp. 162-164.
- 8.20. Wolsiefer, John, "Ultra High-Strength Field Placeable Concrete with Silica Fume Admixtures, " Concrete International: Design & Construction, V. 6, No. 4, Apr. 1984, pp. 25-31.
- 8.21. Fischer, R. E., "Round Table-Concrete in Architecture: A Current Assessment," Architectural Record, Nov. 1982.
- 8.22. Nilson, A. H., "Structural Design Considerations for High Strength Concrete, " Proceedings, National Science Foundation Workshop on High Strength Concrete, University of Illinois at Chicago Circle, Dec. 1979.
- 8.23. Rabbat, Basile G., and Russell, Henry G., "Optimized Sections for Precast, Prestressed Bridge Girders, " Journal, Prestressed Concrete Institute, V. 27, No. 4, July-Aug. 1982, pp. 88-104.
- 8.24. Young, F. J., and Russell, H. G., "Session V-Summary of Floor Discussion, " Proceedings, National Science Foundation Workshop on

High Strength Concrete, University of Illinois at Chicago Circle,
Dec. 1979.

第九章 結 論

本報告目的係回顧強度超過 420 kg/cm^2 ($6,000 \text{ psi}$) 混凝土的文獻資料，但不包括使用特殊材料或技術做成的混凝土。在本章中將總結前面幾章的重點。

高強度混凝土所用的材料都要小心選擇，要利用所有可能的技術來確保同一標準的均勻性。在選擇材料時必須考慮的項目包括：水泥特性、骨材尺寸、骨材強度、顆粒形狀和紋理、以及各種控制凝結之摻料、減水劑、砂灰、和波索蘭材料。試拌工作是必需的，這樣才可確保混凝土強度及組合材料之協合性。

高強度混凝土的配比通常視特定齡期所達成要求抗壓強度而定，為配合適當的運用，指定齡期不一定為二十八天。選擇混凝土配比時的考慮要素包括：材料的取得、工作性、以及溫度上昇的影響。在混凝土配比中，必須對所有組成材料做最佳化的要求，使達成最大的強度。高強度混凝土配比通常使用高水泥含量、低水灰比，常重骨材、以及化學和波索蘭材料。要求的強度、指定的齡期、材料特性以及運用類型都會嚴重影響配比設計。據研究指出，高強度混凝土配比設計的過程比較低強度混凝土配比設計更具有關鍵性，以往均要求實驗室試拌以便產生有關配比設計的必要資料。在許多實例中，緊跟著實驗室試拌即應在工地製造試驗拌合。

高強度混凝土的拌合、運送、澆置和控制程序，並不一定與較低強度混凝土所用的程序不同，然而，必須特別注意以期確保高強度的一致性。特別要注意的是縮短混凝土拌合和最終澆置於模板間的時間。延遲澆置會影響終期強度並造成澆置之困難，另外要注意高強度混凝土圓柱試體的測試，任何過程之缺失會造成比混凝土可真正達成的強度為低。值得特別注意的項目包括：抗壓強度量測、控制試體的製造、養護和蓋平、測試機器的特性、用來製造試體的模具類型以及測試的齡期。在許多例子中，即使指定五十六或九十天抗壓強度，然而在早期，也必須做一些強度試驗。

有些研究資料指出高強度混凝土的彈性模數，比以根據較低強度混凝土資料所預估的為低，但參考較低強度混凝土，波松比的值顯示在預期的範圍內。高強度混凝土的破裂模數比預期值為高，然而拉力劈裂強度值顯示與較低強度混凝土一致。單位重、比熱、擴散係數、熱傳導率、以及熱膨脹係數大致仍落在較低強度混凝土的一般

範圍。高強度混凝土，與較低強度混凝土相比，在早期顯示較高之強度增加速率，但是在後期差異就不顯著。有關高強度混凝土的潛變和收縮的資料指出，收縮量與較低強度混凝土的收縮量差不多，然而高強度混凝土的比潛變係數比低強度混凝土少。

在結構設計的範圍，高強度混凝土的軸向載重柱可用較低強度混凝土設計方式來設計，另外，由於高強度混凝土較高的彈性模數和較低的潛變係數，高強度混凝土柱顯示出比低強度塊柱之縮短較少。以梁來說，使用傳統等值矩形應力塊對鋼筋量不足的混凝土構件則有令人滿意的結果， 0.003 的抗壓應變限制似乎是可令人接受的。專家建議應修改目前規範之最小拉力鋼筋比、破裂模數、和彈性模數值。在計算長期梁變位的問題，修正現有規範也是迫切需要的。

使用高強度混凝土於高層建築的柱子，其經濟效益可由許多城市的運用實例清楚證明。在不犧牲強度的情況下，能夠減低柱中鋼筋用量，並且同時保持柱在一定接受尺寸，對高層建築物的業主自然有經濟利益。因此，具有抗壓強度超過 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ ($6,000\text{ psi}$) 的混凝土已經被用於北美各城市高層建築物的柱構件上。研究也指出在長跨距混凝土橋梁使用高強度混凝土的好處，然而，這種運用仍需要一段時間證明。另有一些運用，其中需要高抗壓強度混凝土來滿足特定區域要求的需要。這些包括：水壩、預力混凝土樑、觀眾席屋頂、海洋構造物基礎，以及工業製造的運用。

雖然高強度混凝土通常被視為頗新的建材，但是它目前在北美地區漸漸被接受，如同高強度混凝土使用的許多實例所顯示。同時，建材生產者也正回應建材的要求，並且也在學習生產技巧。隨著新式建材的發展，支持這種發展的研究資料也愈益增多，無論如何，在剪力強度、扭力、握裹力和發展長度以及反覆載重的作用等領域，仍須有更多資料補充，有些研究計畫正在進行以因應這些需要。然而，仍須要更進一步的工作以便能充分利用高強度混凝土的優點並且肯定其功能。這份報告儘量記錄對高強度混凝土現有的知識，俾能確定未來發展的方向。

第貳篇 高強度混凝土之應用評估

第一章 引言

高強度混凝土材料為未來建築材料之主流，為了使其能確實在國內生根，有必要系統化的評估及探討國內及國外部份研究成果及經驗，本篇即針對國內的現況來分析及選擇高強度混凝土組成材料的特徵及品質之要求，同時瞭解生產技術及製程品管的方法，並評估高強度混凝土使用之可行性，經由分析可獲得一些相關需要探討高強度混凝土結構性質及力學行為之項目，作為後續研究之參考，評估重點如圖 1-1 所示。

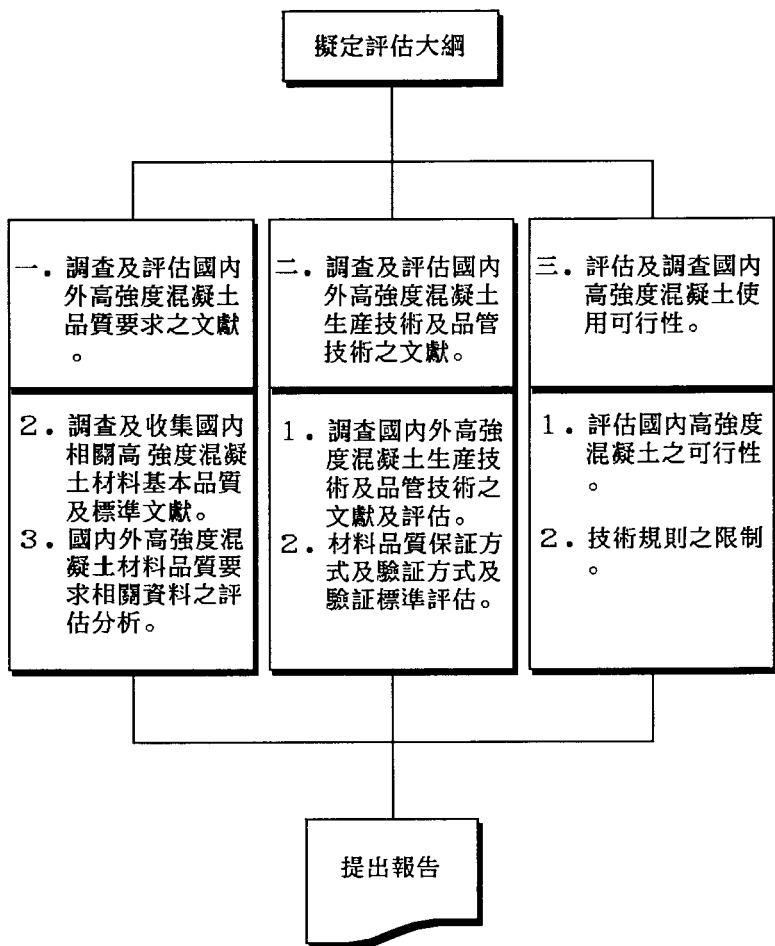


圖 1-1 高強度混凝土之應用評估

1 - 1 高強度混凝土之特性

高強度混凝土可被定義為「特定強度等於或大於 420 kg/cm^2 之混凝土」，此種定義並不包括使用外來材料或特殊技術生產者，亦即並不涵蓋注膠，環氧樹脂混凝土，或高溫高壓處理之預鑄混凝土在內【 1 】。由此定義可看出高強度混凝土除了強度需求外，可工作性為另外一項重要性質，影響傳統混凝土品質的因素當然對高強度混凝土品質亦會有莫大之影響，甚至更為重要，因為高強度混凝土使用可能低於 0.38 以下的水灰比，其工作條件較傳統混凝土不利；而使用較大量的水泥，可能會產生溫度裂縫的風險，表 1-1 所示為傳統混凝土與高強度混凝土基本上的差異性【 2 】，所以高強度混凝土由材料之選擇、配比設計、澆置、搗實及養護等，至品質管制，每一階段都必須詳細而且經嚴格的檢驗。換言之，必須有完善之品質保證制度以確保品質變異量在可接受的範圍內。

1 - 2 國內高強度混凝土之需求性

高強度混凝土基本上材料的組成如同一般強度混凝土材料，係由水泥、水、骨材及摻料等四種主要材料組合而成，但是高強度混凝土特別強調低水灰比（w/c）及摻料科學技術的應用，故與一般觀念的混凝土不同，因為水灰比太低則會面臨嚴重工作性的問題而造成強度的不足，除非有超強的振動作用及離心式作業才能達到品質優良的條件，但這些都是無法在現場鑄造的，幸而 80 年代因有「強塑劑」或稱為「高性能減水劑」的新化學摻料產生，才使得低水灰比無法工作的配比變成高流動化之高強度混凝土，這點亦對國內高強度混凝土提供有益之途徑，然而國內一般大氣溫度較高，高水泥量水化熱高會影響到強塑劑的效益，必須特別慎重才能確保合宜的工作性。

高強度混凝土對高層建築、大跨徑橋樑、耐震結構物、高耐久性結構有其必需性，對國內有限且昂貴的都市土地而言，為了達到「住者有其屋」、「人人有殼」的目的，高樓建築勢在必行，若用鋼骨結構來建造，除了需要高度精密的技術外，防火需求及價格高昂將使一般中低收入者無法購屋而造成嚴重社會問題，因此使用鋼筋混凝土結構物將是最佳的抉擇，然而若利用一般強度混凝土，則由於國內預拌混凝土技術水準低落無法確保應有的品質外，低層結構之樑及柱將因軸向載重及橫力作用而變得粗

表 1-1 傳統混凝土與高強度混凝土之比較【2】

性 質	傳 統 混 凝 土	高 強 度 混 凝 土
強度 kg/cm ² (psi)	210~420 (3000~6000)	≥420
使用地點	一般建築物	高層建築物之底層柱，剪力牆，結構體
材料選擇 1. 水泥	細度2800 Blaine， 28天強度280kg/cm ² (4000psi)	C ₃ S含量較高，細度3500-4000 Blaine，品質均勻者7天強度要求 294kg/cm ² (4200psi)
2. 骨材	要求洗淨即可，砂之FM 2.3~3.0即可，以2.6 較佳，粗骨材最大粒徑 1"或1.5"以求經濟性	3/8"~3/4"最大粒徑骨材有較佳 之結果骨材表面不可有雜質、粘 土，必須澈底洗淨粗骨材用量可 較高。砂採用粗砂(FM-3.0)
3. 摻料	無特別限制	必須使用減水劑，減水緩凝劑或 強塑劑(高性能減水劑)
4. 波索屬材料	除了ACI 318耐久性考 慮外，一般並不限定使 用	飛灰、矽灰、高爐燃料，稻殼灰 取代部份水泥及砂使用量5-20% 的水泥重。
配比設計	坍度依構造物而定，水 灰比0.4~0.7視耐久性 及強度而定，水泥用量 320kg/m ³ 以上	坍度4吋以上，水泥用量390-560 kg/m ³ ，水灰比0.3-0.4範圍
拌合、澆置、 搗實及養護	稠度良好；不可過量振 動，以防止析離，失去 輸氣量；一般養護作業	稠度甚硬和粘；注意必須迅速搗 實，並且要充分振動，寧可超振 動；養護作業特別重要。
品質管制	一般性品質控制	預拌廠及現場均必須有範圍較廣 的品質控制計劃，包括材料的儲 存至施工階段均須嚴密控制，確 保強度最小的變異量

重，自然影響到空間的利用，因此採用較傳統混凝土高出 2 倍以上的高強度混凝土其樑柱截面可以減小，而增加有效空間利用效益。因為長跨度之樑若採用一般強度混凝土則斷面將非常大而笨重，增加撓度且影響其潛變量，故採用高強度混凝土將可以減少潛變量、減少撓度、避免樑過於粗重而易吊裝。一般強度鋼筋混凝土在地震力作用下容易產生混凝土壓碎的現象，為提高鋼筋混凝土的韌性，提高混凝土強度相等的等於降低鋼筋使用量而提昇了鋼筋混凝土的整體韌性【 3 】。ACI 318-89 規範規定耐久性結構物一般採用 0.45 以下之水灰比，未來由於低水灰比可工作混凝土新技術的開發，可能規範會要求更低的水灰比以因應當作低透水性，高耐久性混凝土的需求了，這對惡劣海域環境下之本省而言更俱吸引力。尤其近年來我國經濟快速成長，公共工程及一般工程方興未艾，然而建築物結構施工品質之低落為各方所詬病，為了使國內混凝土品質及施工技術的提昇，更有必要透過需要品質保證制度的高強度混凝土來達成了。

1 - 3 國內高強度混凝土之問題點

雖然高強度混凝土有其需求性，然而在國內的發展受到設計及施工準則欠缺、品質保證制度尚未建立、生產技術尚未充分開發及發展、結構行為未充分理解的限制，使得高強度混凝土的應用還需靠研究、發展及推廣的連續工作，方能達到實際可應用的階段。

(一) 迫切需要建立高強度混凝土設計及施工準則

想要將高強度混凝土新材料應用到結構設計上，首先必須能有合理的法規供設計者參考與應用。雖然國外高強度混凝土設計及施工準則尚未建立，但一些基本研究在國內已陸續進行，基本上高強度混凝土的設計觀念及理論相同於一般強度混凝土，一些 ACI 318 建築規範的經驗公式經過適當修正即能應用到結構設計上，目前在第壹篇中先將設計及施工準則製定出供參考外，需要建築主管單位與學術、研究單位及有關學會合作儘速製訂規範。

(二) 企需建立高強度混凝土品質保證制度

高強度混凝土雖然基本組成材料如同一般強度混凝土，然而由於強度甚高，其強度支配因子除了水泥漿強度及骨材強度外，界面的強度常是失敗的主因

而混凝土自配料以後其拌合、輸送、澆置、養護及維護等階段均會對高強度混凝土造成相當的影響，因此不論業主、設計者、施工者、材料供應商及使用者均要有品質保證觀念，而自材料以至施工均需嚴格的品質管制，才能確保實際結構體上之混凝土強度及變異性在合理且可接受的範圍。國內傳統混凝土施工技術及觀念均非常低劣，在高強度混凝土施工技術應用之前，應推廣及建立統計為依據之品質保證制度及觀念。

(三) 開發高強度混凝土施工技術

高強度混凝土使用低水灰比，故在合理工作性下需要較大量的水泥，以致有高水化熱的問題，這種混凝土通常需要有高頻率之振動器或添加較大之強塑劑，而且更重要的是必須控制混凝土溫度，以避免施工不良及溫度裂縫的產生。由於傳統混凝土預拌廠都欠缺良好的控溫設備及正確的配比觀念，故需要建立合理的施工技術，才能使高強度混凝土的變異性減低，換言之，均勻性能被確保，而目前國內混凝土工程施工技術上的缺失可歸納如下弊端【 4 】：

1. 混凝土採現場拌合時，材料計量誤差頗大。
2. 部份預拌廠之電腦設備未充份利用。
3. 技術工人沒有適時使用漏斗、瀉槽等澆置工具，造成骨材析離現象極為嚴重。
4. 為利於澆置作業，現場加水現象時常發生，導致混凝土骨材析離、水泥漿流失或嚴重泌水現象。
5. 技術工人並未正確使用振動機，而常利用振動機移動混凝土，或振動鋼筋等情形發生。
6. 施工縫未受技術人員重視。
7. 炎熱天或雨天中澆置混凝土，沒有適當防護設備，結果造成混凝土龜裂及積水現象。
8. 蜂窩現象的發生，幾乎大小工程都有。

(四) 企需探討高強度混凝土的結構行為

高強度混凝土的工程力學性質與一般強度混凝土有些差異，使用在結構物上其行為多少會有些改變，這方面有待國內學術界進行研究，俾有大規模之實驗印證資料。

1-4 國內高強度混凝土研究發展現狀及趨勢

高強度混凝土施工技術能確實執行前，大量之基本研究是必須的，依據國科會 78 年 2 月份陳舜田博士主持之「大學院校土木類系、所研究概況」之結果【 5 】及國科會、台灣電力公司和內政部建築研究所之資料顯示國內和大學研究發展之趨勢可依研究人力、研究重點及未來研究方向來說明。

(一) 高強度混凝土研究人力資源

高強度混凝土的基本人力，依國科會報告及有關資料顯示【 5 】成功大學、交通大學、中興大學及技術學院曾經從事相關高強度混凝土研究之人力共計 8 人，其中二人以高強度材料行為為主，而其餘研究方向則以工程力學及行為為主，這些人力資源已足夠進行國內高強度混凝土研究所需。

(二) 高強度混凝土過去研究之重點

高強度混凝土的研究，過去十年間係以高強度混凝土剪力傳遞【 6 】，高強度混凝土材料及力學性質【 3,7,8,9 】，箍筋對高強度混凝土韌性之影響【 10 】，高強度飛灰混凝土性質及結構行為【 3 】為研究重點，惟各校之研究缺乏整合性及大規模之探討，容易造成各校研究範圍過度重疊及浪費的問題。

(三) 國內高強度混凝土研究發展之趨勢

未來國內高強度混凝土之研究係以支援營建、土木、建築業界為基準，而且為了避免人力及研究子題重複而造成浪費，基本上力學及數學模式分析由國科會支撥經費，而高強度混凝土應用研究應由政府建管單位及其它有關研究發展單位來贊助。

依照數年來國內高強度混凝土研究發展的趨勢及國科會、內政部建築研究所及台灣電力公司之資料推估以下五大研究方向：

- ① 高強度混凝土設計及施工規範製訂。
- ② 高強度混凝土材料品質要求及分析。

③高強度混凝土生產技術及品質技術之研究。

④高強度混凝土結構力學及行為研究。

⑤高強度混凝土知識及技術推廣。

高強度混凝土為未來國內高層結構物及長跨徑結構物的重要施工材料，亦是未來營建工程主流，為確保混凝土強度安全性及耐久性，應更積極從事高強度混凝土研究開發之工作，並應領先國外製訂高強度混凝土設計及施工規範，以為設計及施工之依據，且積極建立良好品質保證觀念以改善我國混凝土工程材料技術層面及觀念，使 MIT Concrete 成為優良混凝土代號。

1-5 參考文獻

1. ACI Committee 363, "The State-of-the-art Report on High Strength Concrete", ACI Journal, Proceedings, 1984, pp. 364-411.
2. 黃兆龍, 「高強度混凝土施工及品質管制」, 高強度混凝土研討會論文集, 1988, 頁91~116.
3. 黃兆龍、林建宏, 「高強度飛灰混凝土材料性質與撓曲行為之研究」, 國科會, NSC 77-0410-E011-06, 1989。
4. 黃兆龍、胡秀昌, 「現行營建體制下混凝土品質問題研究—台灣北部地區預拌混凝土品質分析探討」, 私立中原大學建築研究所碩士論文, 1977。
5. 陳舜田、楊德良、譚建國、李建中、張家祝、顏聰、林憲意, 「土木水利工程研究規劃報告」, 國家科學委員會, NSC 77-0410-E011-03, 1989。
6. 林英傑、李宜純, 「彎矩作用與剪力面時鋼筋混凝土之剪力傳遞」, 國立台灣工業技術學院營建系碩士論文, 1989。
7. 方一匡、黃漢屏, 「以傳統拌合方式製造高強度混凝土及其力學與微觀特性研究」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 1988。
8. 方一匡、梁正儀, 「高強度水泥砂漿受硫酸鹽侵蝕問題之探討」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 1990。
9. 方一匡、王瑞麟, 「添加矽灰之高強度混凝土強度與微觀性質之研究」, 國立成功大學土木工程研究所碩士論文, 1990。
10. 顏聰、湯兆緯, 「箍筋對高強度混凝土 RC 梁延展性之影響」, 國立中興大學土木工程研究所碩士論文, 1988。

第二章 材料品質要求評估

2-1 前言

混凝土強度主要由水泥漿、骨材及泥漿／骨材界面鍵結強度所支配【 1 】。影響水泥漿強度的主要因素為水灰比及齡期，見圖 2-1 【 2 】，但水灰比過低則可能會因夯實不佳而形成蜂窩，造成強度的不足現象，見圖 2-2 所示，必須採用加強振動機能量的方式，或添加強塑劑或減水劑等表面活性劑的策略來促使水灰比低稠度大的混凝土變成可工作的狀況；骨材的強度一般均可超過 420 kg/cm^2 ，故通常只重視骨材的表面狀況，尤其是微紋理及微糙度 (Micro-roughness)；水泥漿／骨材的界面通常是混凝土最弱的一環，若不加以注意則可能影響到混凝土的強度，一般降低水灰比可增加界面的互制力外，通常以波索蘭材料取代部份砂及水泥，或以其它界面活性劑藉由離子交換的方式，而轉化界面大量的氫氧化鈣形成與水泥膠結水化物類似之物質，形成界面強化的效應【 4 】。瞭解支配強度的基因及改變的策略後，高強度混凝土的製造即可不用採購特殊的材料，若加上經濟性的考慮，當然地域性的材料變成最佳的選擇標地了。

2-2 水泥

卜特蘭水泥的選擇並不僅止於早期 28 天的強度而已，最好能考慮到極限強度，譬如 90 天強度，對高強度混凝土而言，至少水泥砂漿方塊之 7 天強度要有 294 kg/cm^2 (4200 psi) 以上才行，故採用較細的水泥可獲佳之效果，見圖 2-3 所示【 2 】。但過細也會有不良影響，一般在 $3500 \sim 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine 左右，水泥中最好含較高量的 C_3S ，以促使強度增加，惟一般建議只要較細的第一種水泥即可達到強度要求。水泥用量由於低水灰比而可能超過 590 kg/m^3 ，致面臨增加成本，水化熱和乾縮的問題，故宜以其它之方法改善【 5 】。國內之水泥經測試結果，顯示如圖 2-4 【 6 】，基本性能可以製造一般高強度混凝土，至於超高強度混凝土則必須加以改良方可。在國內一般工程採用第 I 型水泥細度 $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 以上，依據實驗顯示強度超出 420 kg/cm^2 ，此點更說明國內材料製造技術絕對沒有問題的。

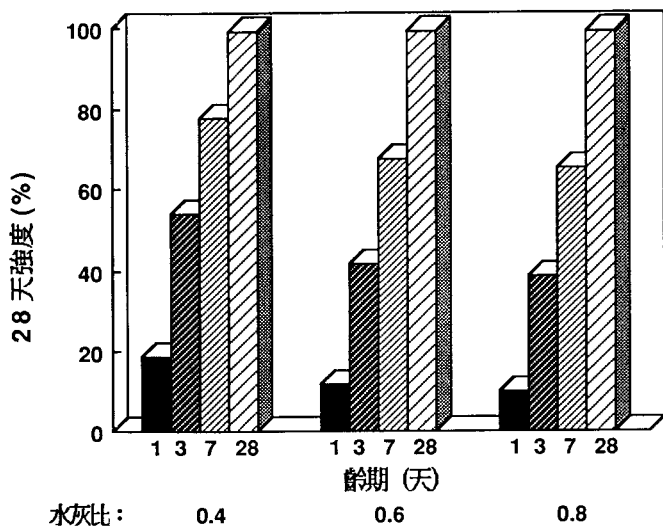


圖 2-1 混凝土強度的發展隨水灰比及齡期而變 (第一種水泥) 【2】

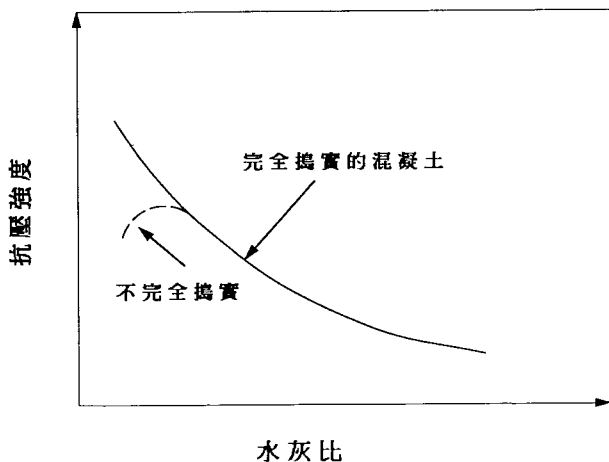


圖 2-2 水灰比與抗壓強度之關係示意圖，圖中虛線顯示搗實不佳造成強度的折減現象【2】

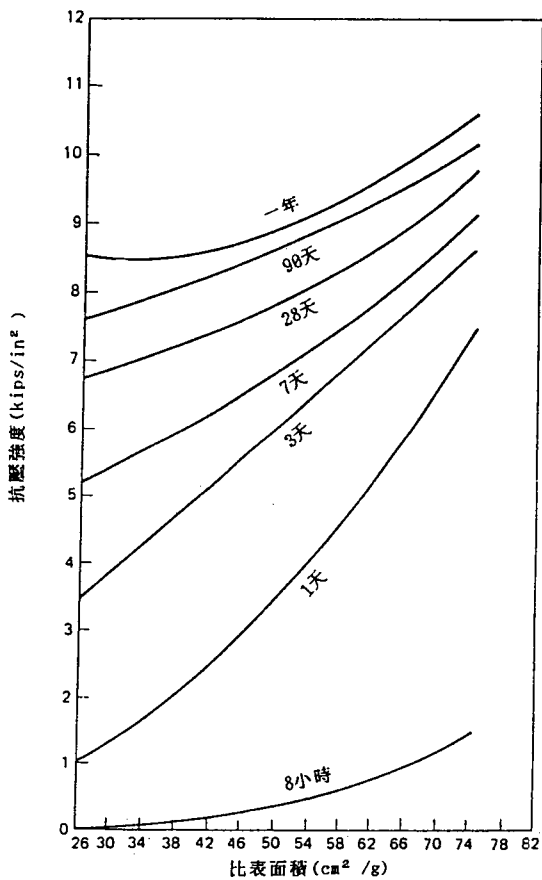


圖 2-3 水泥細度對強度之影響 ($w/c=0.4$) 【2】

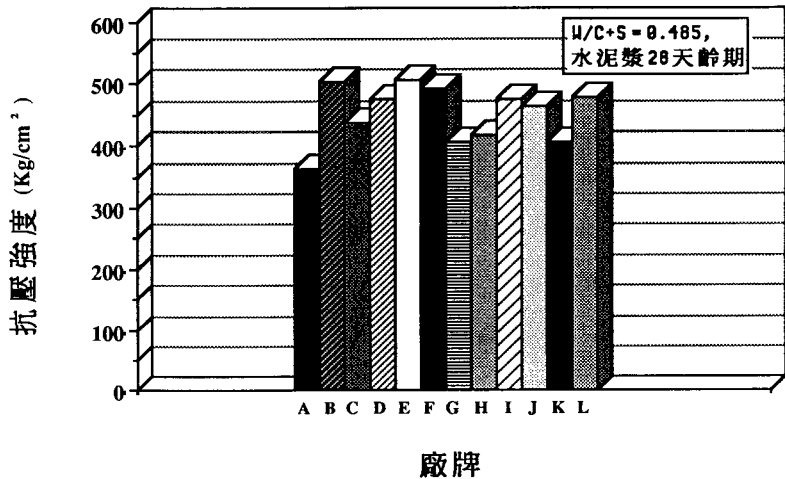


圖 2-4 國內主要廠牌水泥強度發展圖【6】

2-3 骨材

骨材的尺寸、形狀、表面紋理、礦物性質和淨潔度均應注意。傳統混凝土粗骨材之最大粒徑愈大則經濟性愈佳，然而高強度混凝土並非純以經濟性為著眼點，為了補償骨材／水泥漿物界面的限制，必須採用較小粒徑以獲得較大互制表面積來增加混凝土整體的強度，一般最佳骨材最大粒徑的求得係透過試拌配比，然後經分析強度效率包絡線，見圖 2-5【7】，可找到最大效率之骨材粒徑，經驗指出似乎 3/8 吋～3/4 吋為有效之範圍。圖 2-6 則說明富配比中最大骨材粒徑的影響以 90 天較為顯著，高強度混凝土因其使用時機較慢，建議採取 56 天或 90 天的強度為設計依據。粗糙、角形和機碎之粗骨材有較佳的強度表現，此點說明界面互制的影響，當然高強度混凝土使用的骨材務必要清洗乾淨，不能有損及強度之灰塵和粘土覆蓋表面。粗骨材的使用量因相對較大量的膠結料（水泥加波索蘭材料）使用在高強度混凝土中，必

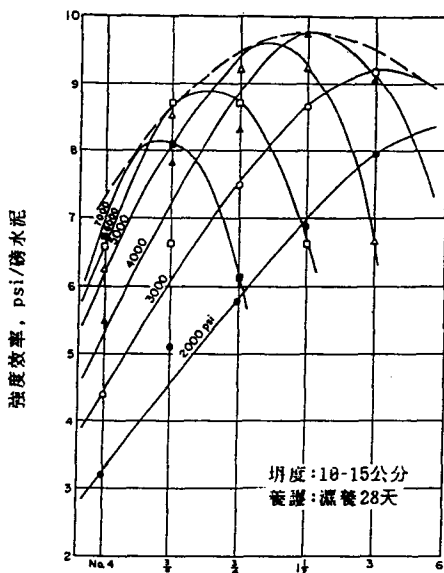


圖 2-5 強度效率包絡曲線與最大骨材粒徑之關係【7】

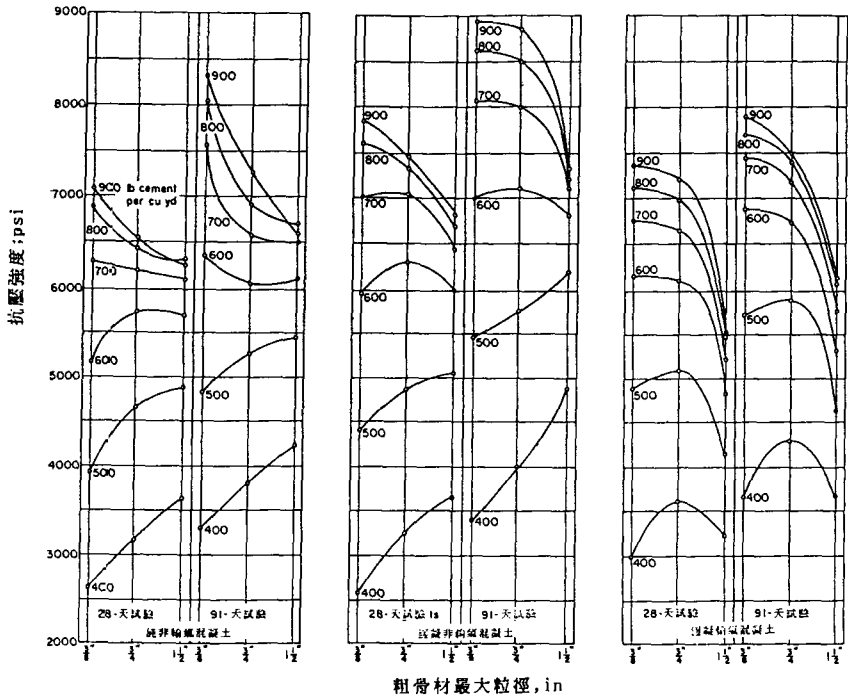


圖 2-6 最大骨材粒徑對不同混凝土抗壓強度之影響【7】

須及容許較傳統混凝土有更高量的粗骨材，但仍然以不影響要求工作性為限度。

高強度混凝土使用大量的膠結性材料，見表 1-1，故骨材間的漿量是充裕的，細骨材的顆粒限制較小，細度模數（FM）為 3 的粗砂由於有較小的表面積，不會與顆粒小而量大的膠結料爭逐水份，可獲得較佳的工作性與表面粉刷性質，此點有別於傳統混凝土要求 FM=2.3 ~ 3.1 的範圍，不然會因採用細砂而造成粘性大而低強度的配比【 7 】。在本省一般細砂所用之河川砂，往往因近河口而呈較細的現象，宜利用碎石砂來修正之，而台灣中北部粗骨材，基本性質應可製造高強度混凝土【 8 】。

2-3-1 台灣主要河川骨材岩性

台灣大小河流共 151 條，可供採砂石者 61 條，以高屏溪、濁水溪、大肚溪、大甲溪等流域面積較廣，砂石蘊藏量及開採量較大【 8 】。北及中部河川粗骨材來源以大漢、淡水、頭前、後龍、大安、大甲、大肚、濁水等河川為主；南部集中在北港溪、八掌溪、曾文溪、高屏溪；東部則以花蓮溪、卑南溪為主，圖 2-7【 8 】所示為台灣主要河川分佈狀況。河川骨材之岩性與上游岩性有其共同性，惟河川骨材係受自然淘選及沖刷作用，故性質上稍有不同。

2-3-2 台灣主要河川粗骨材分佈與一般性質

一般河川骨材之性質與陸上砂石資源性質，若源頭相關則性質不致相差太大，然而河川砂石係經過自然變遷作用，受遷徙距離的影響，相應形狀及粒徑會轉變為圓滑及較小，鬆弛風化或脆弱顆粒會在移動過程中被粉碎或溶解，故一般河川砂石加工層面較陸上砂石低，惟靠近溪口細粉料較多，對高強度混凝土而言不宜。

臺灣西部河川流域之構成地層為第三世紀的泡質沉積物，受到相當程度壓緊和變質作用，而成為西部較新地層中碎屑物質之主要來源。大部份沉積物是深灰及灰黑色劈理良好的硬頁岩、板岩、千枚岩及變硬泥岩等；其中夾有砂岩層與質地堅緻之硬砂岩，以近似圓形砂石者居多【 8,9 】。河川流域，粒徑由上游向下游呈遞減趨勢，河床砂石呈層狀變化【 10 】。野外調查顯示臺灣主要河川骨材岩性與其集水區露頭岩盤一致【 11,12 】，大漢、頭前溪以石英岩和混濁砂岩礫為主；中部之大安、大甲、大肚及濁水溪，以石英岩礫為主；南部地區之高屏溪以石英岩、板岩礫為主；東

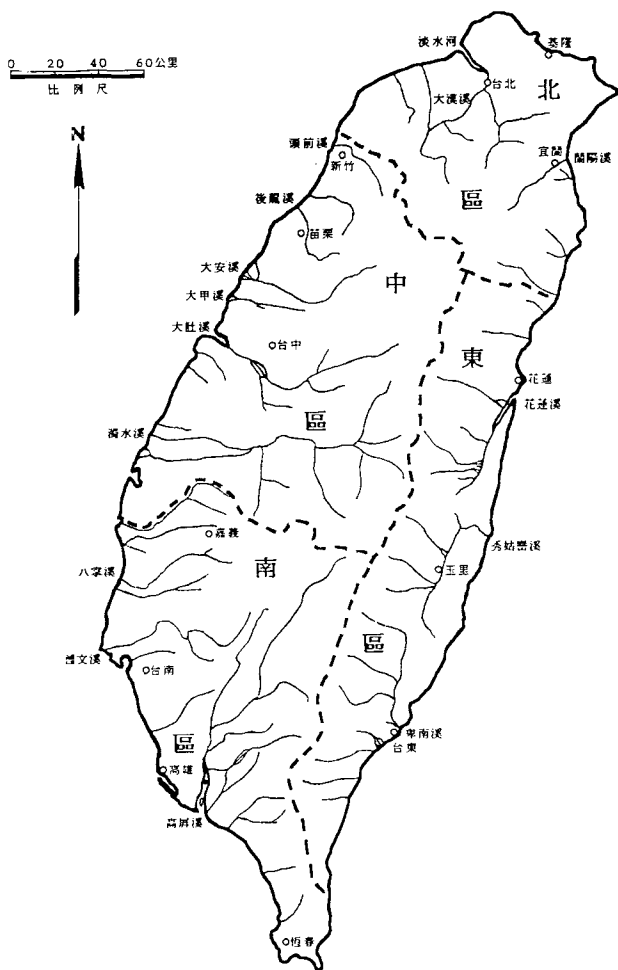


圖 2-7 台灣主要河川分佈圖【8】

部地區之蘭陽溪、木瓜溪、花蓮溪、秀姑巒溪、卑南大溪等則以片岩、板岩、頁岩、大理石、蛇紋岩、及變質石灰岩礫等為主，質地較脆弱狹長粒料較多，較不適用於澆置高強度混凝土【 10 ~ 13 】。表 2-1 顯示，臺灣主要河川之粗細骨材品質一般均合乎要求，唯粒形有所差異，且北部地區河川砂石可採量接近枯竭，中部地區可採量較豐，南部地區可採量有限，東部可採量最豐。北部地區砂石有賴外購，或開採陸上砂石資源以解決骨材之大量短缺現象，中部及南部地區局部可開採陸上砂石以縮短骨材運輸距離，東部地區河川堆積甚速，砂石不虞匱乏【 5 】。

2 - 3 - 3 粗骨材的巨觀工程性質

本節所指之巨觀工程性質即傳統工程師所重視之性質，包括岩石強度、硬度、比重、吸水量、級配、形狀紋理、單位重、孔隙率、健度及有害物質等。

(一) 岩石單軸抗壓特性

粗骨材岩石樣品之強度，一般採用無側限壓力、有側限壓力、剪力、及拉力試驗等，而以無側限抗壓強度試驗最常用。岩心抗壓強度性質主要受含水狀態、加壓速率、試體形狀、礦物組成、顆粒大小、試體端面平整等因素所支配。含水狀態會影響岩心孔隙與裂縫水壓，故會影響強度；例如易碎砂岩，含飽和水時，會喪失約 15% 的強度【 11 】。加壓速度（國際岩石力學學會）ISRM 建議在 0.5 ~ 1.0MPa/S 範圍，速率愈快，強度可能較高。表 2-2 顯示本省陸上砂石資源岩心性質符合高強度混凝土的生產及製造。

(二) 粗骨材強度

單獨粗骨材顆粒強度可藉岩心抗壓強度或骨材壓碎值來推估；也可藉助點荷重試驗值來表示，然修正因數較大【 8 】。當混凝土承受外力時，粗骨材顆粒邊緣處會產生應力集中現象，故極佳（Excellent）骨材之抗壓強度應達 2100 kg / cm^2 (30,000 psi)；達 840 kg / cm^2 (12,000 psi) 者方可視為優良（Good）；一般規定母岩之抗壓強度大於 500 kg / cm^2 屬於硬石； $500 \sim 100 \text{ kg / cm}^2$ 為準硬石；小於 100 kg / cm^2 為軟石。砂岩質粗骨材之抗壓強度約 1330 kg / cm^2 ，唯視其生成年代與地域因素等條件而異。粗骨材彈性模數值會影響混凝土之潛變、乾縮及骨材—水泥漿體鍵結處之裂縫發

表 2-1 臺灣主要河川砂石資源及品質狀況【5,6】

溪流名稱	發源地	流域區域	出海地點	全長 (km)	流域面積 (km ²)	砂石儲藏量, (砂石可採量*) (萬公噸)	主要產區 (屬公噸)	粗骨材品質	砂石分佈狀況
大漢溪及淡水河	桃園縣 桃園山 品田山	桃園縣 一區 北港溪、大漢溪及新店溪於匯入淡水河口	淡水 八里	1,448	2,725	49,317 [12,833]	臺北地區 桃園縣	粗骨材以 0.532 水成之凝結土抗壓強度達 318 kg/cm ² , 但細骨材品質較劣, 且可否繼續採探應再進一步覓劃探討。	匯流到南興橋為砂質河床, 需砂量頗豐; 南興橋向河床, 基本上為砂礫層河床。基本上, 向中上游河床, 粒徑越趨越粗與三鶯橋向河床粒徑 D ₅₀ 平均值約為 11.6 cm 在石門水庫下游 D ₅₀ 為 12.2 cm。
頭前溪	新竹縣 香山	竹東一至竹南 竹一 竹北	南寮	63	566	19,789 [6,514]	新竹縣市	以 0.532 水成凝結土抗壓強度之凝結土抗壓強度, 但粗骨材品質較劣, 可進一步覓劃探討。	本流域較以腐蝕土上游之砂石可採量較多, 約佔全流域之 88%。河口至高潭公路橋為礫石河床 D ₅₀ 約 3.4 cm, 中上游河床 D ₅₀ 約 4.8~6.4 cm。
後龍溪	苗栗縣 鹿場山	汶水—後龍—苗栗—頭前—大甲—泰安	墨子	58	537	4,798 [2,316]	苗栗縣市	全流域砂石產配不一, 但粗細骨材比運已達 2.6, 水灰比 0.532 之凝結土抗壓強度約 289 kg/cm ² 。	砂石可採量較多, 約佔全流域之 36%; 流域下游為砂礫層河床, D ₅₀ 約為 5.8 cm; 中游 D ₅₀ 約為 3.4 cm, 上游 D ₅₀ 約為 17~21 cm。
高屏溪	屏東縣 中央山脈之玉山	南高屏溪 高屏山 高屏山 高屏山 高屏山 高屏山 高屏山	林園	171	3,257	53,988 [37,536]	高雄縣市 屏東縣	粗骨材品質實遠優良, 其基本之細骨材品質更優良。	自河口至集集國橋附近為砂質河床, 需砂量頗豐; 集集國橋至高屏大橋為礫質河床, 其至河口占約 79%, 自高屏大橋至高屏大橋為砂礫層河床。D ₅₀ 平均約 4.32 cm, 其中砂約佔 57%。
花蓮溪	花蓮縣 中央山脈 鳳城山	光復鄉—沿中央山脈—沿鳳城山—鳳城山—鳳城山—鳳城山—鳳城山—鳳城山	花蓮市	57	1,587	53,699 [19,971]	花蓮縣 日本、琉球	粗骨材之品質及細骨材之比重, 均略優於日本、琉球。	自河口至光復國橋間為砂質河床, D ₅₀ 平均約為 7.37 cm, 其中中上游河床, 粒徑越趨越粗, 且為砂礫層河床, 其至河口占約 79%, 自高屏大橋至高屏大橋為砂礫層河床。D ₅₀ 平均約 4.32 cm, 其中砂約佔 57%。
卑南溪	台東縣 中央山脈 卑南山	北港—沿卑南山—卑南山—卑南山—卑南山—卑南山—卑南山	臺東市	188	1,683	25,936 [7,672]	臺東縣	粗骨材之品質及細骨材之比重, 均略優於日本、琉球。	自河口至卑南國橋間為砂質河床, D ₅₀ 平均約為 7.37 cm, 其中中上游河床, 粒徑越趨越粗, 且為砂礫層河床, 其至河口占約 79%, 自高屏大橋至高屏大橋為砂礫層河床。D ₅₀ 平均約 4.32 cm, 其中砂約佔 57%。

* 係依據臺灣省水利局之民國 71 年 (南部地區) 及 73 年 (中部暨東部地區) 之河川砂石資源調查統計資料
 ** D₅₀ 表示通過百分比為五十一之粒徑

表 2.1 臺灣主要河川砂石來源及品質狀況【5,6】(續)

蘭陽溪	南湖大山 山西北麓	臺山脈與 南湖大山山 脈之間至波 牛罵進入平 原-蘭陽大橋	太平	73	978	36,517 [16,103]	宜蘭縣	中上游材質尚佳，均 具開採價值。	河口至溪洲間，屬砂質河床，以 上佔90%。壯二村至溪洲村間， 為本溪河床質粗細粒料呈北段， 粗粒料約佔85%，上游河段粒徑 分佈和下游段約略相當。
大安溪	大霧尖 山西麓	流入卓蘭 入平原	大安	96	758	12,977 [9,514]	臺中縣 苗栗縣	比重、渣形礫磨損率 皆符合龍潭土用粗骨 材標準。	砂石可採量豐富，自河口到雙崎 為砂質河床，8以上塊石約佔 26%，粗骨材佔83%。全流域 D ₅₀ 均為7.8cm
大甲溪	中央山 脈之大 甲山及南 大湖山	梨山-佳水 關-石岡 豐原	清水	140	1,236	11,074 [5,348]	臺中縣	比重、渣形礫磨損率 皆滿足龍潭土粗骨材 標準，曾供應臺中港 工程	河口到白冷間為砂質河床， 8以上塊石約30%，粗骨材佔 90%，全流域河床粒徑D ₅₀ 平均約 9.4cm
大肚溪	合歡山	臺中縣市 -南投縣 -彰化縣	龍井	117	2,026	34,698 [14,534]	臺中縣市 彰化縣 南投縣	比重、渣形礫磨損率 皆合於標準。	流域下游靠近河口段為砂質河床 ，細骨材佔95%，藍雲礫磨損率到 龍潭者品質頗高為砂質河床，粗骨 材約佔75%。全流域河床質粒徑 D ₅₀ 平均為41.07cm
濁水溪	合歡山 南麓	仁愛 -集集 -林內 -西螺 -二水 -竹堇	大城 麥寮	186	3,115	56,950 [22,271]	彰化縣 南投縣 雲林縣	粗細骨材皆達到龍潭 土材料之標準。	砂石儲藏量佔中部37.51%，為 中部砂石之重要來源。河口到西 螺大埔河段間為砂質河床，河床 質粒徑D ₅₀ 約為0.2-0.6mm，砂質 含量約為57-100%。西螺大埔至 各竹大埔為砂質河床，D ₅₀ 約 2.6-6.0mm，砂質含量佔 57-18%；自名竹大埔至龍潭橋 段，河床質粒徑D ₅₀ 約為 59.92-129.54mm，砂質含量約 為18-16%。
八掌溪	東面 起湖山 谷	包尾溝溪、 臺南二縣之 十四鄉鎮	布袋 縣	81	475	11,269 [4,917]	嘉義縣	粗骨材比重及渣形礫 磨損率皆遠優過；但 細骨材之含泥量較高 ，品質欠佳。	自河口至忠義橋河段間為砂質 河床，其中忠義橋至出港橋河段 間#100號以下約95%，含泥量 太高。全河段D ₅₀ 平均為0.16mm
曾文溪	阿里山 脈之西 南麓	臺南縣山上 鄉-或勢臺- 麻豆鎮-西 港鄉-七股 鄉-臺南市	四草 鄉	139	1,177	7,511 [5,025]	高雄縣市 屏東縣	粗骨材比重，磨損率 皆合於標準，但細骨 材比重2.43，略小於 標準2.55，細度係數 1.91，含泥量太高， 未達建材品質標準。	自河口至縱貫鐵路橋河後間為砂 質河床，河床質粒徑D ₅₀ 平均 約0.85mm，自縱貫橋至善文二 橋河段間為砂質河床，D ₅₀ 平均 約為50.0mm。

表 2-2 壽滿陸上砂石資源岩心性質【14】

南部地區	抗壓強度 (Kg/cm ²)	16-207
	彈性模數 (105Kg/cm ²)	0145-706
	波松比	0.051-0.687
東部地區	抗壓強度 (Kg/cm ²)	496-1848

展；但岩心彈性模數與強度間並無明顯之相關關係，一般岩石之彈性模數約 $1.3 \sim 5.4 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 。

(三) 超音波傳波速度

岩石及粗骨材傳波速度之影響參數為岩石種類、紋理、密度、孔隙率、異向性、應力、含水量及溫度等，一般而言，越為緊密或堅實之岩石傳波速度愈高，砂岩之傳波波速約 3000 ~ 6000 m/sec。就組織而言，波速與造岩礦物之顆粒大小有關，細晶粒較粗晶粒者波速快；數種造岩礦物之縱波波速 (m/s) 如表 2-3 所示【14】。通常密度愈大，波速愈快；換言之，就成份及紋理相同之岩石而言，波速隨孔隙率增加，呈遞減現象。就其層次之岩石而言，平行於層次之波速大於垂直於層次者。又壓應力使得孔隙率減少及裂縫閉合，且增加晶粒間之接觸，故波速增加。含水量增加，波速亦增加；但若溫度昇高，晶粒間接觸較疏鬆且會產生內部裂縫，所以縱波速度降低。

表 2-3 一般礦物傳波速度(m/sec)【14】

礦物名稱	傳波速度
橄欖石	8400
白雲石	7500
輝石	7200
角閃石	7200
方解石	6600
斜長石	6250
石英	6050
正長石	5800
白雲母	5800

岩石傳波速度受密度與彈性性質所支配，而強度性質又往往與彈性、勁度有關，所以可藉傳波速度推測岩石及粗骨材品質，若以動態性質來評估應注意岩石動態彈性模數與靜態彈性模數之比值，實際上依岩石種類而異，一般約 1.07 ~ 1.35。

(四) 堅硬性—磨損抵抗

耐磨性為骨材受磨耗及揉搓時抵抗破損的能力，破損現象通常多發生於骨材製造堆積及拌合混凝土時【15】：一般普通混凝土之水泥漿，其水灰比高，則抵抗磨損之能力較低，故混凝土主要靠骨材之耐磨性。粗骨材之岩質以石英、砂岩及質地緻密之火山岩，磨損抵抗能力較大【16】。通常粗骨材之磨損抵抗用洛杉磯試驗法（ASTM C131）加以測定，而以磨損率表示，其值愈低表強度愈高，一般混凝土用粗骨材最大磨損重量比不得大於 50%；但若大於

50% ，而混凝土配比抗壓強度合於要求時，則此粗骨材仍可使用，但是高強度混凝土用骨材宜採低磨損率者。日本土木學會規定磨損率不得大於 40% ，臺灣各地區及北中部主要河川粗骨材磨損率，如表 2-4 及圖 2-8 所示，均小於 50% 。

表 2-4 臺灣省各地區暨北中部主要河川粗骨材磨損率表【13】

臺灣省公路局	地區	500轉磨損率(%)
	北區	18.2~26.2
	中區	21.8~25.0
	南區	22.6~25.6
臺灣省水利局	東區	27.6~29.3
	河川	500轉磨損率(%)
	大漢	-----
	頭前	-----
	後龍	-----
	大安	19.84
	大甲	22.12
	大肚	16.78
高速公路局	濁水	18.26
	河川	500轉磨損率(%)
	大漢	19.2
	頭前	19.4~24.7
	後龍	-----
	大安	8.81
	大甲	1.0~11.3
	大肚	9.3~12.2
濁水	15.0~23.8	

中區

南區

東區

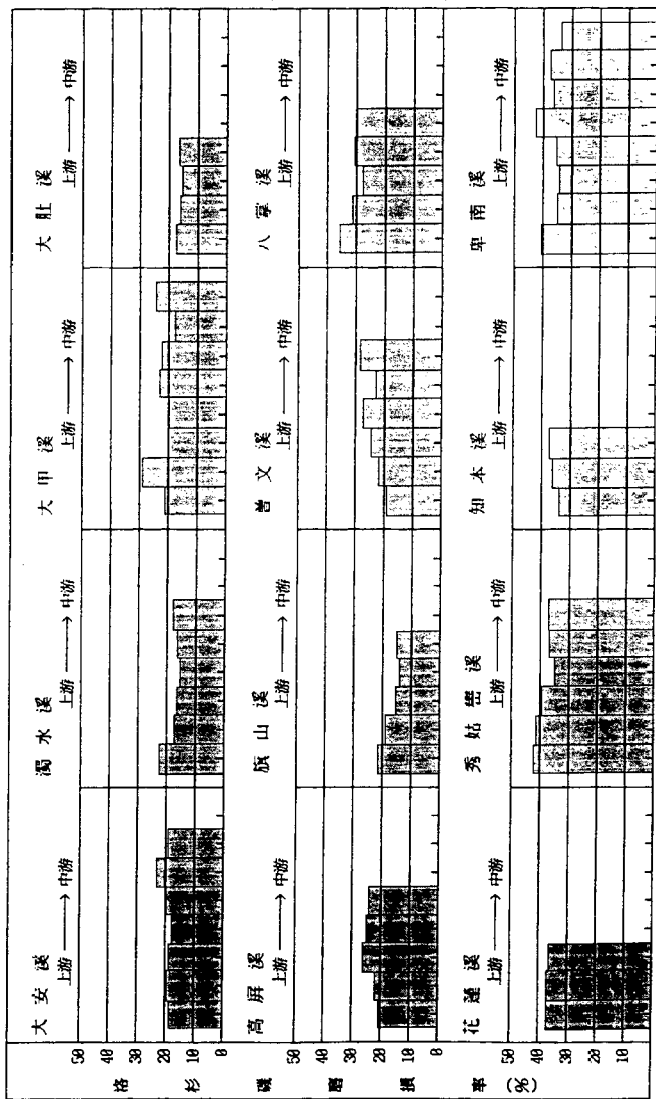


圖 2-8 臺灣省各地區主要河川粗骨材磨損率分佈圖【8】

(五) 表面水量及吸水量

吸水率 (Adsorption Capacity) 隨骨材風化狀態、裂隙多寡、孔隙多少及骨材種類、成分等而異；通常沈積岩孔隙大其吸水率亦較大；含水量 (Moisture Content) 則隨風速、溫度、濕度狀況而異；而同一堆骨材，上層與下層就有明顯差異。一般可藉助吸水率間接量測孔隙率以推測粗骨材之緻密性與耐久性。一般規定混凝土用粗骨材之吸水率應小於 3%，顯示材質堅緻，孔隙率小。根據資料顯示本島河川粗骨材吸水率均小於 3%【8】，見圖 2-9 所示。

(六) 比重與密度

骨材之面乾飽和比重，粗骨材約 2.55 ~ 2.70，細骨材為 2.50 ~ 2.65，以大於 2.55 者較佳，比重大者，吸水率較小，成份緻密，耐久性好。臺灣省地區主要河川粗骨材比重資料，簡示如表 2-5，圖 2-10 顯示北中部主要河川流域及臺省各地粗骨材之比重分佈情形。

(七) 級配、形狀和紋理

篩分析為評估經濟用漿量的工具，經由篩分析可獲得大骨材尺寸、顆粒分佈曲線（級配）及細度模數等資料。骨材級配若偏離 ASTM C33 曲線並非骨材不能使用，而係指工作度與經濟性將受損。

粗骨材形狀 (Shape) 和表面紋理 (Texture) 對新拌混凝土之工作度及早期強度影響較大，但對硬固混凝土晚期強度之影響則不明顯，為克服混凝土拌合時骨材間之卡鎖作用 (Interlock)，需足夠的水泥漿體來提供潤滑作用【2,5】，但過多的水泥漿不利於體積穩定性，因此考慮其他因素來改善工作性。

理想中易工作的骨材形狀最好是接近圓形且俱光滑紋理，如此可減少拌合時之阻力及所需漿體，然此會對混凝土早期強度有不利影響，大部份天然砂及礫石雖接近此形狀。人工碎石粗骨材則俱多角狀及粗糙紋理，骨材間移動阻力大，且需較多水泥漿體潤滑骨材表面，所以經濟上會受影響，但對早期混凝土強度可能較有利。考慮硬固混凝土剪力狀況時，粗糙多角形骨材較圓形或光滑

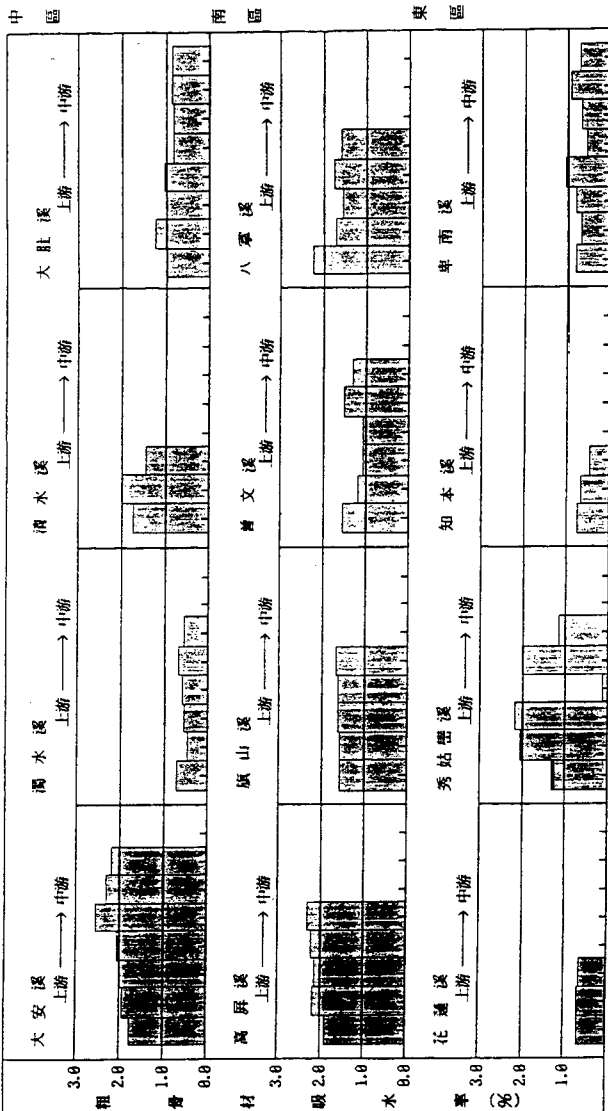


圖 2-9 臺灣省各地區主要河川粗骨材吸水率分佈圖【8】

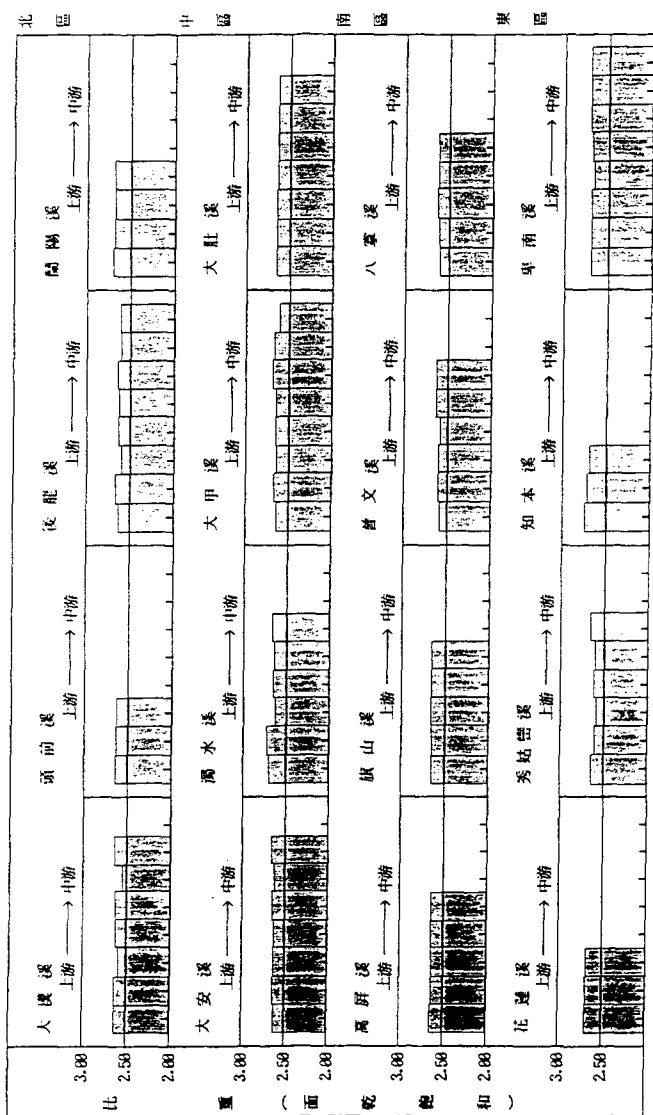


圖 2-10 輝南水志圖甘輝河川粗身材比重分佈圖【8】

表 2-5 臺灣地區河川粗骨材比重資料【8】

臺灣省公路局	地區	比重
	北部	2.53~2.64
	中部	2.60~2.67
	南部	2.51~2.67
臺灣省公路局	東部	2.53~2.71
	河川	比重
	大漢	2.62
	頭前	2.62
	後龍	2.64
	大安	2.63
	大甲	2.64
	大肚	2.63
濁水	2.67	
高速公路局	河川	比重
	大漢	2.59
	頭前	2.57~2.65
	後龍	2.58
	大安	2.63
	大甲	2.64
	大肚	2.62
濁水	2.67	

骨材佳；然對於拉力狀態下與水泥漿體間的結合情形，具微粗糙度的巨觀平滑骨材即可。

(八) 單位重及空隙率

單位重 (Unit Weight) 為骨材單位體積之重量，此體積包括骨材實體積、骨材顆粒空隙及骨材與骨材間之空隙；單位重因骨材之級配、比重、粒形、紋理、含水量等而異。一般河川粗骨材之單位重約在 1550 ~ 1850 kg / m³ 範圍。一般河川粗骨材空隙率約為 35 ~ 40%，但粗細骨材具有適當之粒度及良好之混合比例時，其空隙率約為 25% 以下，日本土木學會規定依粒形判斷之實體積比 (實積率) 應在 55% 以上，即空隙率不得大於 45%【17】。一般而言，空隙率愈低，意味著粗骨材中之圓狀顆粒愈多【8】。

(九) 粗骨材健康度及有害物質

健度差之粗骨材吸水性較大，易破碎【 8 】；當水份飽和時產生膨脹，暴露自然界中容易風化碎裂，使用於混凝土中則會降低其強度或導致破裂與分解，一般而言，頁岩、易碎之砂岩、雲母質或黏土質頁岩、粗顆粒結晶岩及火山岩等，均屬健度差者：一般規定經硫酸鈉或硫酸鎂溶液五次往復試驗之容許最大損失值應為 12% ~ 18% 範圍：

(十) 鹼骨材反應

鹼-碳酸鹽類之反應性骨材僅以極少部份存在於東部某些地區的骨材之中會發生鹼-碳酸鹽類反應作用的骨材，如大理石、石灰岩等，在工業及商業利用目的下，甚少用於混凝土上，圖 2-11 所示為本省北、中、南及東部地區，骨材之潛在鹼性反應，可發現南部地區之骨材大致上良好，僅少部份具鹼骨材反應潛能，中部地區稍差，而東部地區及澎湖則有許多具鹼-骨材反應之骨材，北部地區所採取之樣品大致良好，但根據中央地質調查所之報告【 8,18 】，北部地區具安山岩地質，此與東部地區相似，故於選取骨材時宜應注意。而由岩相分析結果顯示，台灣地區易發生鹼-骨材反應之岩石種類分佈澎湖海嶼，本省東部及北部山區乃安山岩類、石英岩類、砂岩類等，此類岩石若其內含之矽活性稍高，則很容易成為具鹼-骨材反應之岩石骨材【 8 】，採用時應注意。

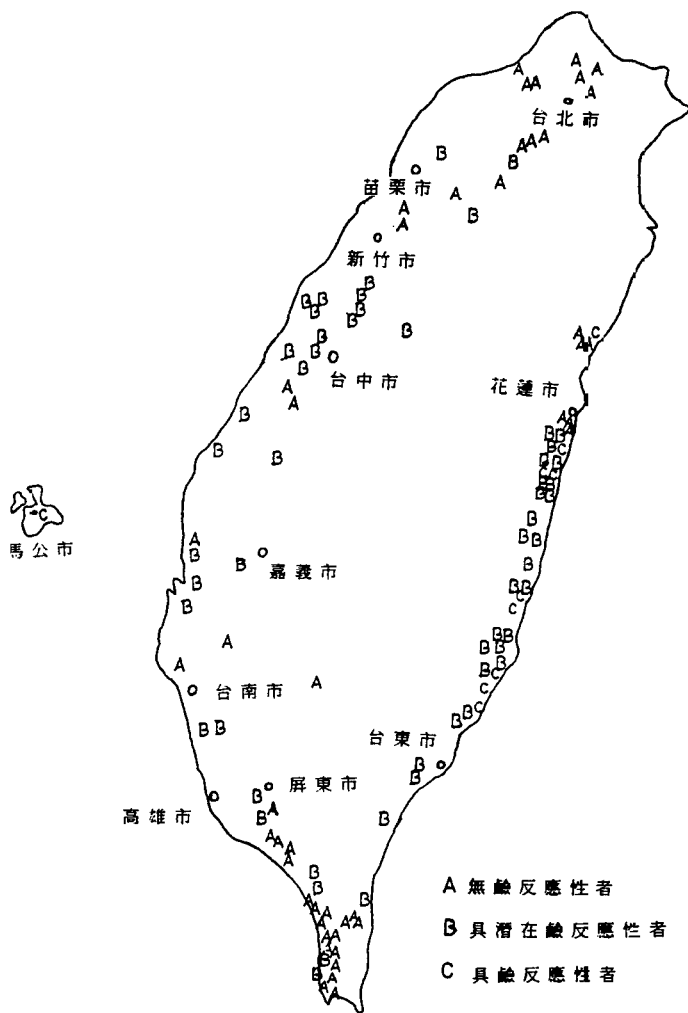


圖 2-11 台灣北、中、南及東部地區鹼-骨材反應潛能圖【8】

2-4 化學摻料

摻料本質上並不會或僅少量影響混凝土極限強度，然而因為減水而使水灰比或孔隙降低，則可獲其大之強度效益【19】，稍微減低水灰比則可獲取相當大的強度效益，然而降低用水量將嚴重影響新拌混凝土工作性，甚至無法拌合、澆置及搗實，故必須使用減水劑類型的表面活性劑。過去數十年來由於高性能減水劑—「強塑劑」的推出，使得低水灰比而仍具高工作性的高強度混凝土之理想得以獲得，甚至 0.3 以下水灰比的超高強度混凝土亦可獲得（強度超過 700 kg/cm^2 ）。使用摻料前品質之認定、強度之效益和水泥及波索蘭材料間之相容性、減水量、凝結時間、工作性、劑量及摻加時機等性質均應以試拌方式加以測試。

本省近年來強塑劑摻料的應用風氣漸盛【20】，品質管制觀念亦在成長中，但因為國內氣溫較高，強塑劑的效益在短期間即消逝，宜配合一般減水劑，或緩凝型減水劑混合使用，將可獲良好之效能另外使用時亦應控制混凝土溫度不超過 27°C 為準，使強塑劑能確保應有之功能。

2-5 波索蘭材料

波索蘭材料包括稻殼灰（Rice Husk Ash），矽灰（Silica Fume），高爐熟料（BF Slag）及飛灰（Fly Ash）等，其添加有幾個目的：①減少因使用高水泥用量所產生的高水化熱、高乾縮量及成本的增加②利用波索蘭反應使得骨材／水泥漿界面泌水所造成的氫氧化鈣堆積層受到交換作用而形成俱膠結性之物質，進而改善界面強度【8,22】及水密性性質。波索蘭材料的使用量通常在 5 ~ 20% 的水泥重量，過低效果不佳，過高則可能影響工作性，而且其波索蘭性質不能充分發揮，因此每一種波索蘭材料皆應可找到最佳水泥加上波索蘭材料的用量，圖 2-12 所列為波索蘭材料之反應速率供使用者參考【6】。

波索蘭材料原來是工業廢料，經過資源化研究發展後，轉化成有用的資材。本省盛產飛灰、爐石及稻殼灰等波索蘭材料，經分析均可達到高強度混凝土的要求，其強度甚至高達 840 kg/cm^2 【21】，更重要的是價格便宜同時其使用對國內環保及再生利用材料有其重要之意義，故應是本省初期高強度發展的重要材料。

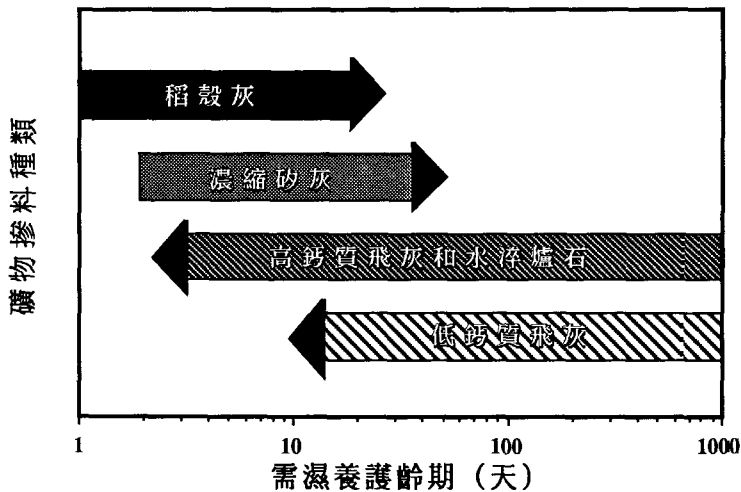


圖 2-12 各類型波索蘭材料之反應速率【6】

2-6 水

水質對混凝土的影響並沒有想像中嚴重，拌合混凝土之水須為潔淨且不含各種油脂、酸、鹼、鹽類、有機物或其它有害於混凝土或鋼筋之物質如表 2-6，最簡單的原則是「凡是可喝的水皆可當拌合水」。不幸的是由於自然環境受到工業及人為的污染，常含有各種不同程度的雜質，有的可溶、有的不溶、有的含有有機物，雖然可能亦可以喝，但用來做拌合水則可能有害混凝土的品質，造成影響凝結時間、乾縮、耐久性問題、風化、析晶及鋼筋腐蝕等不良的結果。因此須視結構物的重要性來選定拌合水的品質。有關水質的檢驗，ASTM C94 有規定，也可參考英國 (BS 1880) 或 CNS R3032，原則上要求拌合水之品質對凝結時間及抗壓強度不可有過度的影響，其一般要求凝結時間 (ASTM C191) 早 1 小時至遲 1.5 小時，而 7 天強度 (ASTM C109) 至少為控制試驗的 90% 之限度。

表 2.6 拌合水中不潔物質之容許值【5】

化 學 名 稱	最大濃度 (ppm)	試驗方法
氯化物 (Cl)	(a) 預力混凝土或混凝土橋墩 500 (b) 潮濕環境下之鋼筋混凝土， 1000 含有鉛製埋設物，不同種類 之金屬一起埋設，留置鍍鋅 金屬模板於結構體內時	CNS 5858
硫酸鹽 (SO ₄)	3000	CNS 5862
鹼性物質 (Na ₂ O + 0.658 K ₂ O)	600	
總固物量 (total solids)	50000	CNS 1237
濁度	2000	

2-7 參考文獻

1. 黃兆龍，高等混凝土技術，國立臺灣工業技術學院營建系教案，1985。
2. Mindess, S. and J. F. Young, Concrete, Prentice Hall, NJ, 1981.
3. 黃兆龍，硬固混凝土行為學，國立臺灣工業技術學院營建系研究所材料組教學講義，1985。
4. 黃兆龍，沈得勝，「普通水泥添加波峯蘭材料水化機理之研究」，國科會專題研究報告，1987。
5. 黃兆龍，混凝土材料品質保證—檢驗的制度，廣氏書局，1988。
6. 林草英，黃兆龍，黎網雄，「摻加 5% 水浮爐石粉對水泥砂漿力學性質的影響研究」，技合建字第 0263 號，1986。
7. ACI Committee 363, "The State of the Art Report on High Strength Concrete", ACI Journal, Proceedings, 1984, pp. 364-411.

8. 黃兆龍, 蘇南, 「台灣北中部主要河川粗骨材微觀結構巨觀性質及其抗壓品質研究」, 技術學院營建材料論文序列 010, 1989。
9. 候翠等, 「臺灣地區高速公路路面養護管理系統第一期期末報告」, 臺灣營建研究中心, 1986。
10. 臺灣省水利局, 「臺灣地區河川砂石資源調查報告書」, 水利局, 1984。
11. 徐鐵良, 地質與工程, 中國工程師學會, 1984。
12. 林朝筭等, 臺灣地質, 茂昌圖書公司, 1978。
13. 臺灣省水利局, 「臺灣北部地區河川砂石資源調查報告書」, 「臺灣中部暨東部地區河川砂石資源調查報告書」, 「臺灣南部地區河川砂石資源調查報告書」, 水利局, 1982, 1983, 1984。
14. 黃兆龍、蘇南, 「台灣主要河川骨材資源, 岩性及巨觀工程性質之探討」, 中國土木水利季刊, 第十六卷, 第二期, 1989, 頁 61 ~ 76。
15. ACI, Aggregates for Concrete, ACI Education Bulletin No. EL-78, 1987.
16. PCA, Design and Control of Concrete Mixtures, Portland Cement Association, 12th Edition, 1979.
17. 白木良一, 「中國・四國的骨材品質現況」, 日本Cement and Concrete 期刊, No. 415, 1981, pp. 78-64.
18. 張徽正等, 「台灣陸上砂石資源調查與研究報告」, 中央地質調查所, 1982。
19. 黃兆龍, 「高強度混凝土施工及品質管制」, 高強度混凝土概論, 高強度混凝土研討會論文集, 財團法人台灣營建研究中心, 1988。
20. 黃兆龍, 「混凝土減水緩凝劑管理採購策略之研究」, 中國土木水利季刊, 第十四卷, 第二期, 1987, 頁 73-102。
21. 黃兆龍, 林建宏, 「高強度飛灰混凝土性質及結構行為研究(1)」, 國科會研究成果報告, NSC 77-0410-E011-06, 1989。

第三章 生產及品質技術評估

3-1 前言

高強度混凝土基本上即為低水灰比，又依 ACI 363 之定義可依傳統方式施工【1】，因此在考慮經濟性、工作性、安全性及耐久性的大前題，低水灰比與高工作性的矛盾要求下必須透過甚多材料技術來組合，利用品質保證的手段，應用計劃管制 (Plan-Do-Check-Action) 的工作循環，由人力素質、工程經驗、材料選擇、配比設計、計劃、拌合、澆置、搗實和養護施工等，每一階段均須確實做好嚴格的檢驗及品管【2】；以確認新拌高強度混凝土的品質變異性在可接受的範圍內，滿足高強度鋼筋混凝土的結構設計行為。

3-2 人力素質與工程經驗

施工人員之認知，為達成高強度混凝土成功運用的先決條件。依問卷調查顯示【3】，國內施工或工地管理人員之學歷水準，以大專之 74% 佔絕大部份，而高中僅佔 8%。就年齡而言，30-39 歲佔 56%，40-49 歲佔 30%，且具工程經驗 10-20 年者佔受訪人員的 37%，5-10 年者亦佔 27%。由此可見，國內的混凝土工程人員水準及經驗頗佳，足以擔負發展高強度混凝土的尖兵。若建築主管機關訂有明確的材料、施工及品管準則，以國內工程人員之專業素養及才智，將高強度混凝土應用於土木營建工程，應是可行的。

對於高強度混凝土之生產技術，問卷調查顯示，有 76% 受訪者認為與普通強度混凝土 (Ordinary Strength Concrete, OSC) 相同，且亦有 81% 受訪者認為高強度混凝土之品管制度應與一般強度者相同，說明了很多受訪者雖有興趣，但忽略材料（尤其是粗骨材）須先篩選，搗實養護須嚴格控制才能符合要求；由抽樣頻率及數量等品管要求須相對提高，品質的穩定及均勻性皆應比一般混凝土重要等。

雖然有大部份受訪者認為很有必要或必要在國內推廣高強度混凝土，將來國內必然或很可能使用高強度混凝土，說明了若研究成熟，技術轉移成功，將有廣大的使用者與愛好者。但調查結果亦顯示，有 45% 受訪者認為國內品管工作做得不好或很差，僅有 6% 認為很好，可見工程界應用的成敗有賴品管制度的提昇與製程經驗的累積。

：值得樂觀的是，有 59% 受訪者認為將來國內之 HSC 可達成品管要求，顯示若政府在法令、規章上若能對品管作更周延規定，切實對營造廠商加強管理，要求技師確實負起監造責任、實施混凝土專業技工證照制度，則以國內之從業人員素質，有能力做好高強度混凝土品管工作【 4 】。

受訪時有 67% 單位願意提供經費以協助推動高強度混凝土，且有 55% 受訪者認為應施以高強度混凝土之在職訓練或舉辦研討會來推廣高強度混凝土，說明了不少業者之求知慾，若能持續舉辦研究成果或使用實例發表會，對高強度混凝土認知的普遍化，及技術轉移將莫大貢獻。

3 - 3 材料選擇

1. 水泥：

通常若無特殊需要，採 Type I 水泥即可【 1 】。台灣之水泥成份尚稱穩定，惟因氣候潮濕，製作時須注意水泥進庫後之貯藏方式與時間，俾使用時無結塊現象，否則將因混凝土中之水泥量分佈不均勻而使高強度混凝土結構物產生材料弱區 (Weak Zone)。一般而言，用於高強度混凝土水泥，需滿足下列要求【 1 】：

- (1) C_3S 含量較高，且其含量變化不超過 4%。
- (2) 細度大於 $3500 \sim 4000 \text{ cm}^2 / \text{g}$ (Blaine)。
- (3) 燒失量小於 0.5 %。
- (4) SO_3 之變化量小於 0.2 %。
- (5) 7 天強度要求大於 294 kg/cm^2 。

依水化機理觀之， C_3S 含量愈高，強度獲得率，發展愈快；細度愈大，則早期（或 28 天）之相對強度有較高之趨勢。由於某些圓柱試體 3 天強度即可達 630 kg/cm^2 【 5,6 】，故工程上若需提早拆模，使用第一型水泥即可達成高早期及高晚期強度之要求，惟仍需注意水泥品質之穩定，不受潮、不結塊，及拌合時先乾拌以使水泥顆粒均勻分散地包裹粗細骨材。

2. 骨材：

品質優良之骨材為製造高強度混凝土的先決要件；細骨材由於與水泥拌合成水泥漿體，構成混凝土中之基體組織，而基體之強度主要由水灰比所支配，而粗骨材

乃混凝土中之填充料，為承力的主要骨幹，優良品質骨材之來源，為目前台灣欲發展高強度混凝土所必先面臨之實際問題。同一配比及生產技術，因採用不同粗骨材而致有大量之改變【 7 】，顯示粗骨材的重要性。

台灣地區北中部河川骨材以大安、大甲、大漢溪較佳，此乃因其 SiO_2 含量稍多所致【 7 】；花東地區目前骨材蘊藏量為本省最豐富，但因其多為大理石、片麻岩等變質岩【 8 】，變異性大，是否適用仍待研究。

骨材（包括粗、細）水洗與否對高強度混凝土未如想像中來得大，此可能與河川骨材係經水流長距離淘選、搬運、表面不潔物本就較少。至若碎石過程中沾附在粗骨材面之石粉，其質地與骨材一致，並由於充分預先拌合及高水泥含量，故不致對粗骨材／砂漿界面區（Transition Zone）之水化作用造成太大影響。惟若碎石廠在碎石過程中忽略洗砂、洗石過程，則對此種品質之骨材就須重視水洗問題，以能獲致期望之混凝土強度。

由於高強度混凝土之高水泥用量，故一般學者建議採用較粗之砂（即 FM 稍大）【 1 】，又粗骨材／砂漿界面之高握裹強度要求，故粗骨材最大粒徑被認為以不超過 $3/4"-1"$ 為適宜【 1,9 】，而工作度的達成可藉由強塑劑與運用細料比例等不同方式來達成。

骨料粒形係採碎石級配料但未刻意去除扁平顆粒及紋理不佳者；蓋碎石較卵石有較佳之粗骨材／水泥砂漿界面卡鎖作用（Inter-Locking）。

3. 水

混凝土規範中有關水質的規定甚少：ASTM 沒設定，BS314 提醒注意，其基本原則為「可飲用則可當作拌合水」【 10 】。

若考慮高水泥用量所導致之較高水化熱會引起溫度龜裂，則拌合水宜採用冰水或飲水機之涼水（溫度約 10°C ）以獲致較良好之初期水化及成核而導致較緻密之水泥漿體基體組織，而有益於混凝土極限強度。

4. 化學摻料－強塑劑

高強度混凝土通常採用 F 或 G 型強塑劑（Superplasticizer，簡稱 S.P.）【 1,9 】；添加強塑劑之目的，乃係藉由界面活性劑之包圍水泥顆粒表面使帶有

同性電荷進而產生互相排斥作用而使工作度增加，使低水灰比之混凝土仍可工作【 11 】，但若劑量添加過量，則易使試體在震動時發生浮水現象，導致強度減低，故最適用量的強塑劑為使能夠充份搗實的最低量，而其最高量則需以不致發生浮水現象為上限。若混凝土係以震動台搗實，能量施加較易【 8 】，故 W/C 在 0.20（含）以上之試體，大部份可加強塑劑而仍能獲致高強度，惟因使用較大量之水泥不利於體積穩定性，應注意之。若水灰比愈低或添加飛灰時，因為飛灰顆粒較細且易吸水，故添加飛灰及水灰比更低時就添加強塑劑，其用量約 0.5 - 2.0%。悉視現場拌合時之新拌混凝土稠度而定，蓋若驟然加太多，則易生浮水；太少則顆粒過於乾澀而無法藉震動之物理作用使其顆粒呈半固/液態而進行搗實。

影響強塑劑用量的因素頗多，且有些為交互影響，故建議最佳劑量以試拌為主，輔以廠商說明書及拌合時之目視、經驗判斷為宜【 10 】。

5. 波索蘭材料

(1) 飛灰

使用飛灰於混凝土係基於①改善混凝土性質②減少環境污染；和③有效利用資源的上述三項考慮。飛灰係一種石英質與鋁酸鹽的混合物，其本身不具或僅具很小之膠結力，在常溫有水氣的情況下，能與水泥分解時產生之氫氧化鈣緩慢作用而成化學性質穩定且具有膠結力的矽酸鈣水化物等複合物，亦即一般所謂的波索蘭（Pozzolans）反應【 12 】。此反應一般約在拌合後 60 天（或更多，依飛灰化學成份而異）才會開始反應，故當添加飛灰之混凝土在齡期約 60 天以前宜將飛灰當成填充物，而大於此齡期飛灰則視為膠結料。故若以飛灰取代水泥則早期強度將降低，拆模時間需延緩；但若用以取代細骨材，則不會對強度，拆模時間有所影響，甚至可提高早期強度【 12 】。飛灰顆粒粒徑非常細小，其粒徑分佈由 0.4 μm -100 μm ，比表面積由滲氣法（Blaine）量測大約在 2000-5000 cm^2 / g 左右，與水泥顆粒相近或稍細【 1 】，故添加飛灰可改善混凝土的泌水現象及減小孔隙結構，改善耐久性。拌合時，飛灰易結成球（塊）狀或粘附於拌合筒，此種現象當飛灰取代量愈高就愈明顯，故在拌合過程中應不時搗碎之，以獲致較均勻之拌合料。又飛灰久置於空氣中，

易吸收潮氣而結塊，拌合時應將此球塊搗碎或棄置以使品質均勻。

(2) 爐石

添加爐石至高強度混凝土中，由於爐石為半膠結性材料，本身即俱有膠結及波索蘭二種特性，根據國外文獻顯示，以爐石取代 20-50% 之水泥量，在水灰比為 0.25-0.03 的水灰比之配合設計時，其 28 天抗壓強度可達 875 ~ 1205 kg / cm² 較飛灰佳【 13 】，國內目前正進行中。

3 - 4 配比設計

基於強度－水灰比理論、骨材級配理論及材料體積法，由經驗法及半分析法所發展出之配比設計方法有 ACI 法及美國墾務局法、DIN（西德）、BS（英國）及 JIS（日本）等所定之配比方法。其中 ACI 法及美國墾務局法廣為國內工程界採用，惟上述方法均僅適用於普通強度混凝土。國內曾以最小孔隙比【 14 】或表面積理論【 15 】等之半分析法配合試驗來發展高強度混凝土配比設計法，惟大部份學術或工程機關仍傾向於參考前人配比再加上當地材料、施工條件而修正之經驗法來作 HSC 配比。一般而言，國內所常採用高強度混凝土配比範圍為：水灰比約 0.23 ~ 0.35，水泥用量約 500-850 kg / m³，砂／石比約 40 ~ 50% 左右，強塑劑之廠牌、類型及劑量則依研究者喜好依試拌而定。表 3-1【 6,14 ~ 20 】顯示近年來國內各學術單位所發展之出典型高強度混凝土之配比。惟須注意者，若只有適當之配比，而拌合、搗實澆置養護等施工條件未能確實估好，則將無法達到預期之強度。

一般高強度混凝土配比通常為高水泥量及低水灰比，但對達到相同目標強度的不同配比，仍然以較低水泥量之經濟配比如為宜【 6 】。骨材對水泥量比亦為影響混凝土強度因子之一，而細骨材量的多寡則會影響工作度之佳與否，其含量多，表面積大，工作度雖較佳但水泥用量增加，較不經濟，且有較大體積穩定性的問題。

3 - 5 拌合

高強度混凝土與一般混凝土之拌合料目的相同，都是使拌合呈連續均質的新拌或硬固混凝土，俾能儘量滿足混凝土結構物的設計要求及力學假設，故品質穩定與材料均勻為拌合首要目的。一般建議拌合機可採（1）移動式拌合鼓（2）垂直軸式拌合鼓（3）螺旋葉片式拌合鼓等三種【 1 】。由於高強度混凝土高水泥量及拌合水較少，

表 3-1 國內某些大專院校近年來所發展出之典型高強度混凝土配比

單位 材料	工業技術學院		成功大學		中興大學	交通大學	高雄工專
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(1)	(1)
W/S*	0.305	0.38-0.54	0.28	0.24	0.32	0.23-0.35	0.26
水泥 (Kg/m ³)	585	343-468	500	570	578	425-510	475
飛灰 (Kg/m ³)	131	0-142	—	30(砂灰)	—	75-340	59
水 (Kg/m ³)	178	159-199	140	144	185	115-300	142
最大粗骨材粒徑 (in)	1/2	1/2	3/4	3/8	3/8	1/2	3/8
粗骨材用量 (Kg/m ³)	984	1065-1086	966	1069	720	625-890	1098
粗骨材來源	大安溪	大安溪	老港溪	里港溪	—	大安溪	高厝溪
細骨材用量 (Kg/m ³)	524	568-1086	853	627	880	625-890	641
S.P. 用量百分比 (相對於水泥重量)	1.6	0-1	0-4	0.7-1.0	1.5%	0.5-2	1.9
28天抗壓強度 (psi)	9000-13000	7160-9830	9800	11000-13000	8350-9290	8000-13000	8300

* S 為總膠結材料之量，包含水泥及波索蘭材料

並且缺乏較大粒徑之粗骨材級配，拌合較難均勻，故建議採用水平雙軸式拌合鼓，並拌合時間的延長，進料的順序，及新拌高強度混凝土外觀形態的目測就愈形重要。

一般高強度混凝土拌合 90-120 秒鐘即可達最佳效果，或先以試拌來測定之。若先加 10% 之水注入拌合鼓內再隨固態材料均勻加入鼓中時添加 80% 之水，最後再加入剩餘的 10% 之水，則可得較好之拌合效果【 21 】。強塑劑可採溶於水中加入或單獨加入，加入時機採先加或後加均可，悉視試拌效果及參考廠商使用說明書而定。惟若留待部份劑量於工地添加將有助於坍度的回復。拌合鼓較速須合於要求，拌合能量須足夠。拌合時間過長則易導致水份蒸發而降低工作度。混凝土可於中央預拌廠拌合、卡車途拌，或兩者之組合。也有將水泥、砂、石等乾料於預拌廠加入乾拌載至工地，再於現場加水及強塑劑而拌合，須注意效率差的卡車並不適用於拌製此種混凝土。工地應有完善的澆置計劃及時程、人員之管理，以避免卡車等待或澆置中斷。保留部份的拌合水或強塑劑於工地現場加入，再啟動拌合鼓轉 30 轉將有利於坍度的回復。拌合是否均勻則可於每批新拌 HSC 之 2-3 個位置取樣試驗或輔以目視評估之【 1 】。

3 - 6 輸送

高強度混凝土可由拌合卡車、裝載卡車、泵送管路及輸送帶、吊斗等來輸送，每種方式各有利弊，悉視工地配置、天候條件、輸送距離、時間等條件而選擇一適合施工條件之運送方式，約可分為【 1 】：

1. 卡車拌合及輸送：

- (1) 途拌式：於中央預拌廠裝配後拌合鼓僅以最小速率運轉或停轉，而待拌合車輸送至工地之中途時再開始拌合。
- (2) 中央拌合式：將新拌混凝土在預拌廠之拌合鼓或在卡車拌合鼓中於配料廠中拌合完成，再載至工地。
- (3) 工地拌合式：將乾料置於卡車拌合鼓而卻將拌合水置於卡車之另一水槽中，至抵達至工地後開始加水拌合。一般而言，高強度混凝土大多採此種拌合方式，以減少水份蒸發，坍度損失，澆置延誤等不利因素。

2 裝載式卡車：此種卡車類同一般之砂石車，有舉起料斗之千斤頂，但無拌合葉片。

僅能作一般之運送用。

3. 泵送機：基於高水泥含量及最大粗骨材粒徑較小，故很適用於以泵送機來輸送。亦即高壓力之泵送機很適用來輸送此種低坍度，但粘度大之高強度混凝土拌合物，惟操作時需符合品質規定。
4. 輸送帶：坍度為 2.5 ~ 10 cm 之高強度混凝土亦較適合以輸送帶運輸，距離則以 60 - 90m 為宜，太長則易造成工作度損失。使用輸送帶運送時，對澆置計劃、場地、配置、輸送時間等均須有妥善規劃。

3 - 7 澆置

1. 澆置準備由於高強度混凝土之坍度小及損失快，故其輸送、澆置、搗實粉刷等工作須迅速進行，澆置機具須有充分適切之能量才不會延誤速度、人力的妥善分配亦是重要的。若發生施工中斷或澆置延誤，將嚴重影響品質。振動機器須確保可運轉及有預備之振動器，俾以保證在機具發生故障或天候太熱時仍可確保澆置速度。
2. 設備：澆置設備的需求隨混凝土、水灰比、坍度、含氣量及均勻性而不同。機具的選擇原則為能適切迅速地載送混凝土到澆置地點而予搗實。因而，吊桶、澆槽、推車、漏斗等搬運機須備全，尤其是底卸不下來的問題必須防止。

3 - 8 搗實

高強度混凝土由於用水量少，可塑性及工作度不佳，故其搗實方法值得探討。依照連體材料之破裂理論觀之，若能使混凝土之孔隙減小，則必能大幅提高力學強度。基本上施工與傳統普通強度混凝土基本上無太大差異，但因高強度混凝土漿量較多，稠度大，粘度大，因此必須有較好的搗實技術，才能充分壓密混凝土，以發揮材料強度。目前國內常用於高強度混凝土的搗實方法有：

1. 振動棒：

可分為內模振動棒及外模振動器，振動時間及插入位置悉視構成或試體之尺寸、厚度而定，而水灰比及強塑劑之添加量為決定性因素。一般而言須使振動能量均勻且插入位置適當，而操作至使混凝土中之氣泡大概皆排出或稍呈泌水為止，稍微超振動是允許的，但太過份則易引致粒料分離而降低強度。澆置後須迅速搗實，否則添加坍度損失甚快，影響後續工作。

2 震動台（桌）：

以震動台搗實之混凝土，其孔隙較振動棒者為小且均勻，骨材及砂漿分佈亦較均勻，抗壓及抗劈裂強度較大；可能係因以振動棒搗實圓柱試體，易使棒抽出時在該處形成孔隙，導致弱區之產生，且以振動棒搗實者其能量之傳遞不若震動台均勻【 3 】。惟須注意，若震動過度將造成粒料析離與上層材料水灰比稍高使混凝土的均質性更差及強度減低的問題，故震動應至上層混凝土表面稍有泌水即停止或加料。至於試體及構件之施工，基本搗實技術尚待研究，以傳統規則之分三層搗 25 下或分兩層用振動棒執行之，其能量是否足夠均有待商榷。

3 - 9 養護

由於高強度混凝土之低水灰比及保證水化作用之持續進行，提供足夠的養護水是必須的。養護溫度、濕度與強度發展有密切關切，較高的養護溫度早期強度發展較快，而晚期強度則不一定。高強度混凝土之養護以水養護為主【 1 】。其中以儲水法或浸水法為最佳，噴水法或撒水法次之。且高強度混凝土須於終凝硬固後僅早養護，且早期的養護愈重要，若養護水供應不足將使原先的拌合水被蒸發出而嚴重影響水泥水化造成甚大之強度折減。尤須注意應儘量避免乾濕交替式養護，而造成較多之乾縮龜裂【 1 】。最好能採取適當的防護措施（如遮風、覆蓋布等）以減小塑性收縮，有好的養護，才有高品質的混凝土。

3 - 1 0 品質保證

高強度混凝土生產前，則供應廠商須擬定適切的品質保證計劃，在配比、施工各階段執行之，以確保混凝土之品質。由於高水泥因子及在低水灰比範圍內之微量變化會嚴重影響混凝土之品質，故高強度混凝土之品保計劃較一般混凝土愈形重要【 21 】。

1. 材料：須確保材料的來源固定及品質變異在可控制的範圍內。
2. 操作控制：預拌混凝土供應商與施工者間之有效協調與控制程序關係到施工操作的優劣。供應商須負責使高強度混凝土妥善地到達至模板，故材料抵工地時間、拌合、配比的調整和坍度控制為其權責。但使材料到達後迅速地澆置、搗實、養護等則為施工者權責。施工過程中必須掌握時間而不應有延遲現象，或其他可能有害品質

之施工程序。

3. 聯絡設備：材料供應商與澆置地點監工人員間之聯絡工具相當重要。若施工計劃大且複雜，則可能需採適當的信號及標誌。通常專案計劃工程師須建議施工者在澆置高強度混凝土前充分了解及評估施工計劃書，才可開始澆置與施工。
4. 試驗室：現場混凝土的檢驗須由勝任的試驗室來執行，這類試驗室通常須具公信力，符合建築法規、施工計劃書之要求。每澆置 76 m³ 高強度混凝土至少須製作齡期分別為 7, 28, 56 及 90 天之圓柱試體各一組（至少二個）。
5. 補救計劃：品保系統對施工過程中可能產生的困難或意外事故，應事先擬妥補救計劃。例如準備多餘的振動機以防止故障，澆置延時調整拌合量，卡車延時等之處置措施等。

3 - 1 1 品質控制

1. 準則：品質控制過程的首要在於決定抗壓強度是否依循常態曲線分佈。許多試驗結果顯示高強度混凝土的分佈多呈非對稱之偏峰分佈（Skew Distribution）。再者高強度混凝土通常使用於高層建築的較下層部份，而其承載全載重的時機通常在一年以後或以上，故就設計層面而言品管標的應為 56 或 90 天之試體抗壓強度而非傳統典型之 28 天強度【 1 】。
2. 評估方法：高強度混凝土的強度評估方式與一般混凝土相同，基本上須滿足 99% 超過設計強度之 f_c 的要求。而需求平均強度 f_m 應超出 f_c 的多少，則依品管成效及試體統計之變異係數而定。一般變異隨約 35 ~ 49 kg / cm²，而試體強度提高時其變異係數應較低，故高強度混凝土生產者對於此種較小之安全餘裕應特別警惕，而確實作好品管過程。一般有品管資料的狀況下可採下列公式較大者設計之【 1 】。

$$f_m = f_c + 1.34 S \text{ 或 } \dots\dots\dots \text{ 公式 (3-1)}$$

$$f_m = f_c + 2.33 S - 35 \text{ (kg/cm}^2 \text{) } \dots\dots\dots \text{ 公式 (3-2)}$$

式中 f_m ：配比設計之需求平均強度；

f_c ：結構設計強度；和

S：標準偏差值

惟若工地無資料可尋，則高強度混凝土之配比設計強度應為

$$f_{cr} = f_c + 98 (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots \text{公式 (3-3)}$$

此外，工地各種施工過程之檢核表格及（又 - R）管制圖的研判將使管制作業事半功倍。國內傳統上，甚少應用又 - R 管制圖來管理混凝土品質，此點有必要加強教育以達成之。

3 - 1 2 參考文獻

1. ACI 363 R-84, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete", ACI, Detroit, 1984.
2. 黃兆龍，混凝土品質保證—檢驗與制度，詹氏書局，1988。
3. 交大土木所，「高強度混凝土設計及施工準則初步研究問卷調查表」，國立交通大學土木工程研究所材料組，1990。
4. 彭耀南、趙文成，「製造高強度混凝土可行性評估」，交通大學土木所，1990。
5. 趙文成，「飛灰用於高溫高壓養護之預力混凝土電桿」，交通大學土木所，1990。
6. 魏坦雄，「飛灰高強度混凝土，高溫高壓養護及其基本力學性質之研究」，交大土木所碩士論文，1990。
7. 黃兆龍、蘇南，「台灣北中部主要河川粗骨材微觀結構，巨觀性質及其混凝土抗壓品質之研究」，國立台灣工業技術學院碩士論文，1987。
8. 張徽正等，「台灣陸上砂石資源調查報告書」，經濟部中央地質調查所，1982。
9. Russel, H. G., "High Strength Concrete", ACI SP-87, Dertroit, 1985.
10. Mindess, S. and J. F., Young, Concrete, Prentice-Hall, N. J., 1981.
11. Mehta, P. K., Concrete: Structure, Properties. and Materials, Prentice-Hall, N. J., 1983.
12. 林草英、黃兆龍、洪賢信，飛灰取代部份混凝土細骨材可行性研究，國立台灣工業技術學院營建系，1988。

13. Djellouli, H., P.C. Aitcin, and O. Chaalal, "The Use of Ground Granulated Slag in High-Performance Concrete", Proceedings of the Second International Symposium on Utilization of High-Strength Concrete, University of California, Berkeley, May 20-23, 1990.
14. 黃兆龍、林建宏、凌峰生, 「高強度飛灰混凝土性質及結構行為研究」, 國科會研究報告 NSC 77-0410-E011-06, 1989。
15. 顏聰, 詹文宗, 「以表面積理論探討高強度混凝土之配合設計法」, 國立中興大學土木工程研究所碩士論文, 1988。
16. 林英俊, 葉文德, 「高強度飛灰混凝土之剪力摩擦強度」, 國立台灣工業技術學院碩士論文, 1990。
17. 顏聰, 湯兆緯, 「箍筋對高強度 R.C. 樑延性之影響」, 國立中興大學土木工程研究論文, 1988。
18. 方一匡、黃漢屏, 「以傳統拌合方式製造高強度混凝土及其力學性質與微觀結構之研究」, 國立成功大學碩士論文, 1988。
19. 方一匡、洪木通, 「高強度混凝土短樑在低剪力鋼筋量下之行為研究」, 國立成功大學碩士論文, 1990。
20. 王和源、林仁益、黃兆龍, 「高強度混凝土微觀結構之研究」, 第二屆軍事工程研討會論文集, 第 53 ~ 73 頁, 1990。
21. 黃兆龍, 「高強度混凝土施工及品質管制」, 高強度混凝土研討會論文集, 台灣營建研究中心, 1988。

第四章 國內使用可行性評估

4 - 1 前言

為明瞭國內使用高強度混凝土之工程現況及其發展潛力，藉之研擬研究架構及推廣方向以提升工程品質，確保建設成果，特以評估其可行性，乃製作相關問卷，寄發一千六百餘份，分別對工程研究、工程設計師、材料供應、施工、工程管理等單位發出問卷。希望透過實務性調查，瞭解當前工程界對高強度混凝土的意見，以作為規則研擬、材料改進、工程品質保證、工程應用等學術研究之參考。由於技術性的內涵未臻成熟等外在及內在因素，在題數、題型及問卷內容上雖未達完美，規劃、設計亦未作問卷之測試。然經由問卷調查初步瞭解目前國內使用高強度混凝土之現況及發展潛力。

4 - 2 調查內容及對象

問卷的發出對象係根據結構工程學會，建築師學會，營建管理學會之名冊，涵蓋了學術研究、工程設計、工程管理、材料供應、施工等單位，希望透過各有關從業人員之調查以收到集思廣益之效。問卷調查表主要內容如下：

1. 國人對高強度混凝土之瞭解程度。
2. 高強度混凝土在國內工程建設中使用狀況。
3. 高強度混凝土與設計相關規則之適用情形。
4. 國內對高強度混凝土施工品質控制之能力。
5. 高強度混凝土對工程品質之影響。
6. 採用高強度混凝土之工程項目。
7. 高強度混凝土之推廣方式。

4 - 3 問卷製作及回收

1. 製作

經由文獻的收集及專家學者開會討論的結果，共製作問卷內容十五題，寄發一千六百餘份問卷；限於時間，問卷發出前並未做任何的測試工作。

2. 回收

一千六百四十四份問卷，陸續回收了四百二十份，有效回收率為 25.5 %，回收之問卷經過濾、歸納，視為有效問卷者（係指回答完整而外觀未任意作答者）計四百一十份，分別為：

- (1) 結構工程學會（發出四百八十份，有效回收一百八十二份回收率38%）
- (2) 營建管理學會（發出四百十四份，有效回收九十九份回收率24%）
- (3) 建築師學會（發出七百五十份，有效回收一百二十九份回收率17%）

4 - 4 問卷調查之結果

此次問卷調查在發出問卷時，是根據結構工程學會、建築師學會及營建管理學會之名冊分三類寄出，但在最終統計時，乃是三者合在一起統計，分別依各重點在下列的統計圖表中，註明每一類的統計百分比，茲將問卷調查統計結果分列如下：

基本資料

(1) 年齡

1.20~29歲, 2.30~39歲, 3.40~49歲, 4.50歲以上, 5.其他

	1	2	3	4	5
結構	22.5%	38.5%	26.9%	9.9%	2.2%
營建	1.0%	45.5%	39.4%	11.1%	3.0%
建築	2.3%	32.6%	40.3%	21.7%	3.1%
總計	11.0%	38.3%	34.1%	13.9%	2.7%

依統計顯示以30到49歲間青壯年之回函佔最主要部份, 為目前工程界主要領導與工作者, 故本次問卷相當可予重視。統計圖如圖4.1.1。

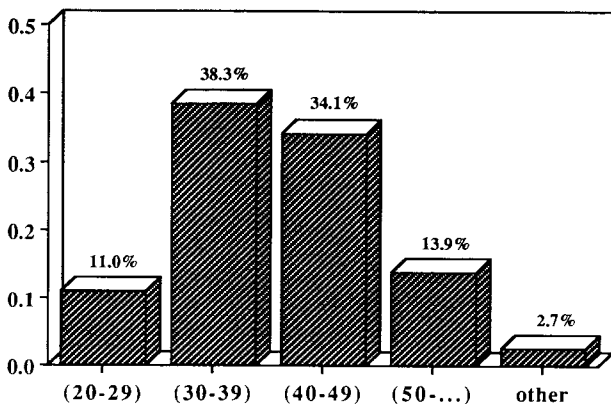


圖 4.1.1 基本資料—年齡

1.20~29歲, 2.30~39歲, 3.40~49歲, 4.50歲以上, 5.其他

(2) 學歷

1.高工、高中，2.大專，3.碩士，4.博士，5.其他

	1	2	3	4	5
結構	0.0%	36.3%	48.9%	11.0%	3.8%
營建	7.1%	78.8%	10.1%	0.0%	4.0%
建築	2.3%	60.5%	25.6%	8.5%	3.1%
總計	2.4%	54.1%	32.2%	7.6%	3.7%

依上表統計顯示受訪者之學歷絕大部份是大專以上程度，故本次問卷相當可予重視。統計圖如圖4.1.2。

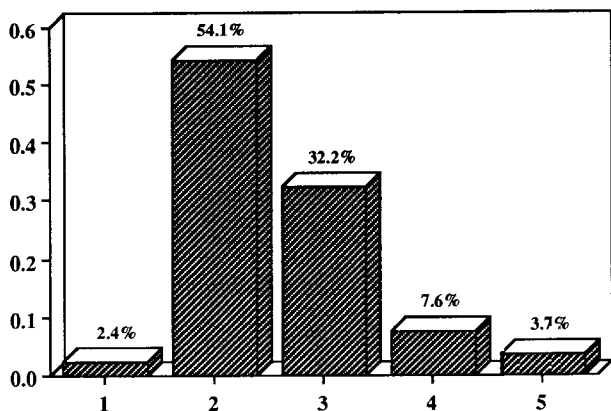


圖 4.1.2 基本資料－學歷

1.高工、高中 2.大專 3.碩士 4.博士 5.其他

(3) 職業類別

1.材料供應, 2.施工, 3.工程設計, 4.工程管理, 5.工程研究, 6.其他

	1	2	3	4	5	6
結構	0.0%	5.5%	54.4%	6.0%	14.3%	19.7%
營建	0.0%	35.4%	9.1%	47.5%	3.0%	5.0%
建築	11.6%	54.3%	16.3%	6.2%	5.4%	6.2%
總計	3.7%	28.0%	31.5%	16.1%	8.8%	12.0%

依上表統計顯示以設計與施工之受訪者最多。在職業類別中, 尚有教學、工程實驗、學生、程式設計、技術諮詢、建築師、建設公司負責人、公務人員等。統計圖如圖4.1.3。

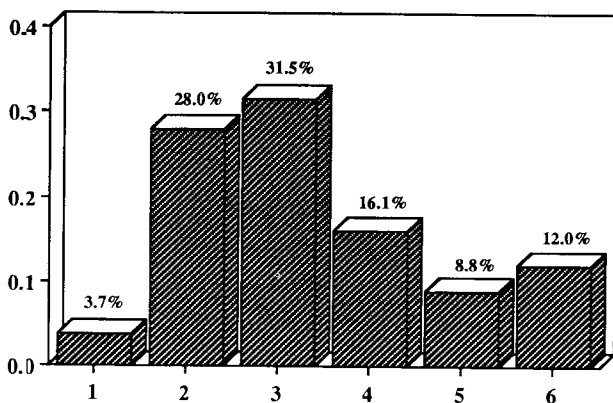


圖 4.1.3 基本資料－職業類別

1.材料供應 2.施工 3.工程設計 4.工程管理 5.工程研究 6.其他

(4) 工程經驗

1. 0~5年, 2. 5~10年, 3. 10~20年, 4. 20~50年, 5. 其他

	1	2	3	4	5
結構	30.8%	16.5%	33.0%	14.3%	5.5%
營建	4.0%	21.2%	51.5%	21.2%	2.0%
建築	7.0%	18.6%	40.3%	31.8%	2.3%
總計	16.8%	18.3%	39.8%	21.5%	3.7%

回函的問卷中乃大多數出自工程經驗10年以上者, 故問卷結果相當可靠。
統計圖如圖4.1.4。

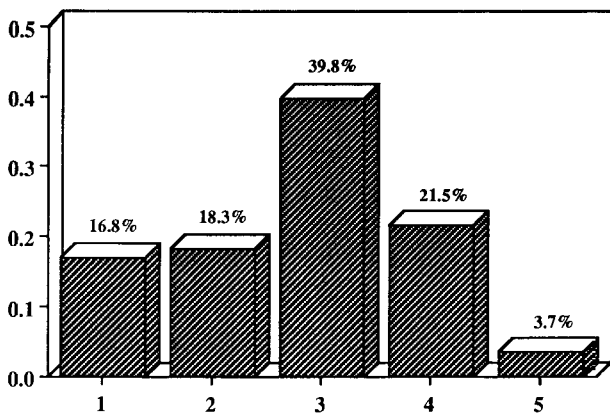


圖 4.1.4 基本資料—工程經驗

1. 0~5年 2. 5~10年 3. 10~20年 4. 20~50年 5. 其他

曾使用過的混凝土之最高抗壓強度(f_c) : kg/cm^2 (psi)

(1)210(3000), (2)280(4000), (3)350(5000), (4)420(6000), (5)其他

	1	2	3	4	5
結構	7.1%	27.1%	28.0%	20.9%	16.4%
營建	3.0%	41.4%	30.3%	19.2%	6.1%
建築	11.6%	51.9%	27.1%	6.2%	3.1%
總計	7.6%	38.5%	28.3%	15.9%	9.8%

依上表顯示國內採用280 kg/cm^2 (4000psi)以上之混凝土還相當少，表示高強度混凝土有其相當大的發展空間。有些受訪者曾使用過高達14000psi之混凝土，認為在PC樁方面應視廠商規格而定，惟本處所謂高強度混凝土並不包括預鑄廠特殊鑄造之混凝土。統計圖如圖4.2。

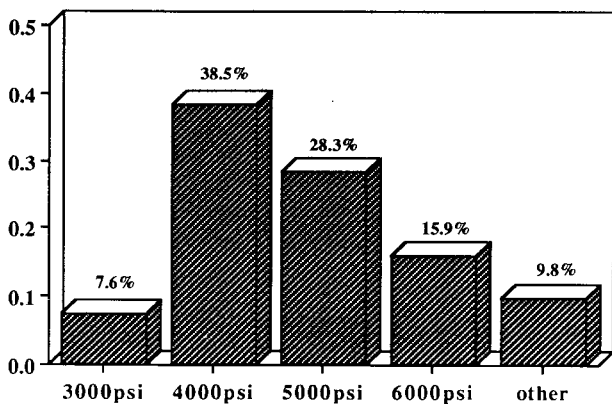


圖 4.2 使用過的混凝土之最高抗壓強度(f_c) kg/cm^2 (psi)

(1)210(3000) (2)280(4000) (3)350(5000) (4)420(6000) (5)其他

受訪者判斷目前國內工程條件下可以採用之混凝土最高抗壓強度：

kg/cm² (psi)

(1)210(3000), (2)280(4000), (3)350(5000), (4)420(6000), (5)其他

	1	2	3	4	5
結構	2.2%	16.5%	37.4%	32.4%	11.5%
營建	2.0%	7.1%	41.4%	37.4%	12.1%
建築	1.6%	21.7%	45.0%	24.8%	7.0%
總計	2.0%	15.9%	40.7%	31.2%	10.2%

依上表顯示國內工程環境下對420kg/cm² (6000psi)之混凝土尚具信心。有些受訪者認為可採用之混凝土最高抗壓強度為800 kg/cm²，亦有人認為應視：

1.現場工程師 2.業主 3.品管之要求而定。統計圖如圖4.3。

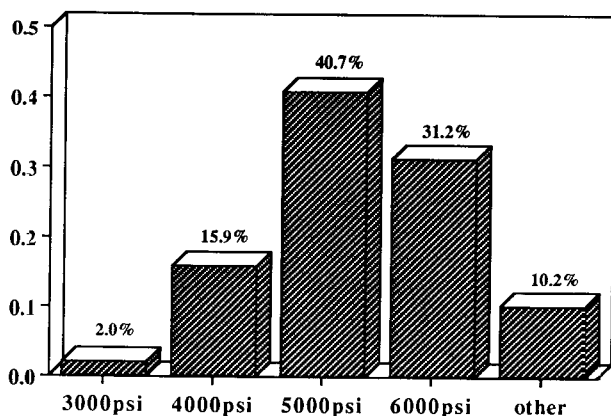


圖 4.3 目前國內工程環境下可以採用之混凝土最高抗壓強度 kg/cm² (psi)

(1)210(3000) (2)280(4000) (3)350(5000) (4)420(6000) (5)其他

1、受訪者認為混凝土之抗壓強度多少kg/cm² (psi) 以上才算高強度混凝土而須要另設規範規定之：

(1)420(6000), (2)490(7000), (3)560(8000), (4)630(9000), (5)其他

	1	2	3	4	5
結構	73.1%	13.7%	8.8%	1.6%	2.7%
營建	74.7%	10.1%	7.1%	4.0%	4.0%
建築	69.0%	10.1%	6.2%	3.9%	10.9%
總計	72.2%	11.7%	7.6%	2.9%	5.6%

依上表顯示，絕大多數均認可以420kg/cm² (6000psi) 以上之混凝土為高強度混凝土。有些受訪者認為預拌廠出品者應為350 kg/cm²，非預拌廠出品者應為280 kg/cm²，亦有受訪者認為應800 kg/cm²才是。統計圖如圖4.4。

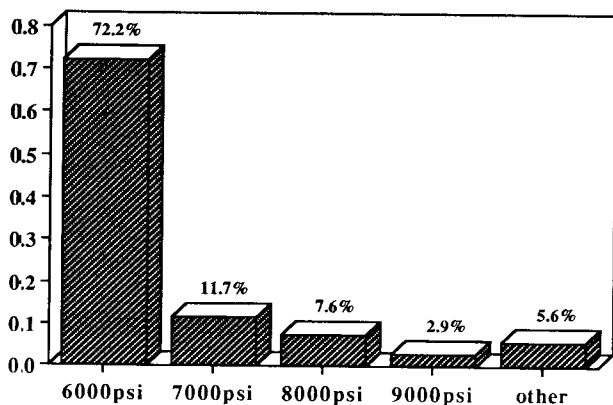


圖 4.4 多少混凝土之抗壓強度 kg/cm² (psi) 以上才算高強度混凝土而須要另設規範(1)420(6000) (2)490(7000) (3)560(8000) (4)630(9000) (5)其他

五、依據美國 ACI 363 技術委員會規定，抗壓強度 420 kg/cm^2 (6000psi) 以上之混凝土為高強度混凝土，受訪者認為現場澆注高強度混凝土，國內曾用之處：(可複選)

(1) 橋梁, (2) 基樁, (3) 高樓結構體, (4) 穀倉, (5) 港灣工程, (6) 其他

	1	2	3	4	5	6
結構	49.5%	31.3%	30.8%	4.4%	16.5%	12.6%
營建	57.6%	36.4%	32.3%	7.1%	27.3%	16.2%
建築	64.3%	22.5%	29.5%	12.4%	31.0%	9.3%
總計	56.1%	29.8%	30.7%	7.6%	23.7%	14.9%

依統計國內曾使用於橋梁、高樓結構體、基樁、港灣工程等，綜合其他意見，有一半的人答不知道，剩餘的人中大部份多為隧道，次為電桿及機場跑道，其他尚有壩體、水電工程、核能廠、牆板、拱形支柱、醫院X光室、貯槽、及涵洞。統計圖如圖4.5。

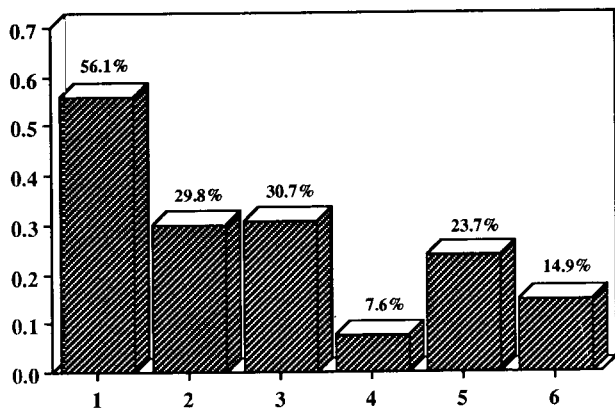


圖 4.5 受訪者認為現場澆注高強度混凝土 ($f_c = 420 \text{ kg/cm}^2$) 國內曾用於
 (1) 橋梁 (2) 基樁 (3) 高樓結構體 (4) 穀倉 (5) 港灣工程 (6) 其他

受訪者認為工程採用高強度混凝土最主要之原因為：（可複選）

- (1)增加使用空間，(2)增大跨距，(3)節省經費，(4)減輕呆重，
(5)增加耐久性，(6)縮短工期，(7)其他

	1	2	3	4	5	6	7
結構	55.5%	68.1%	23.6%	66.5%	29.1%	17.0%	2.7%
營建	44.4%	61.6%	13.1%	43.4%	38.4%	36.4%	3.0%
建築	50.4%	73.6%	14.0%	60.5%	34.1%	24.0%	3.9%
總計	29.0%	68.3%	18.0%	59.0%	32.9%	23.9%	3.2%

採用高強度混凝土之主要原因依次為：增大跨距、減輕呆重、增加耐久性、增加使用空間、縮短工期、節省經費。有些受訪者認為尚可：防止放射線之穿透、耐衝擊、增加抗壓構材強度及增加樓高。統計圖如圖4.6。

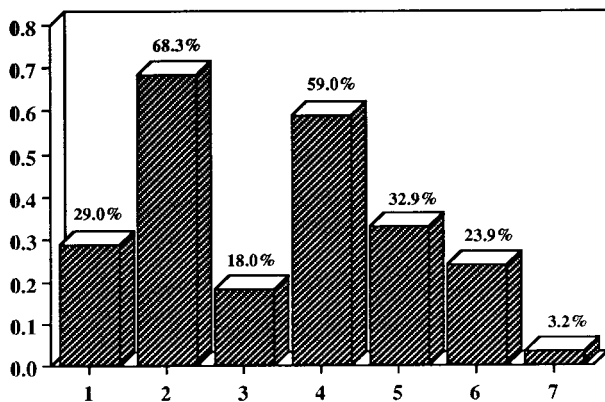


圖 4.6 工程採用高強度混凝土最主要之原因

- (1)增加使用空間 (2)增大跨距 (3)節省經費 (4)減輕呆重 (5)增加耐久性
(6)縮短工期 (7)其他

七、受訪者認為高強度混凝土施工之品質對工程品質之影響程度為：

(1)影響很大，(2)有影響，(3)略有影響，(4)無影響，(5)不知道

	1	2	3	4	5
結構	65.4%	25.8%	4.9%	0.5%	3.3%
營建	60.6%	34.3%	0.0%	2.0%	3.0%
建築	65.1%	28.7%	3.9%	0.0%	2.4%
總計	64.1%	28.8%	3.4%	0.7%	2.9%

依統計大多數人認為高強度混凝土施工之品質對工程品質之影響很大，統計圖如圖4.7。

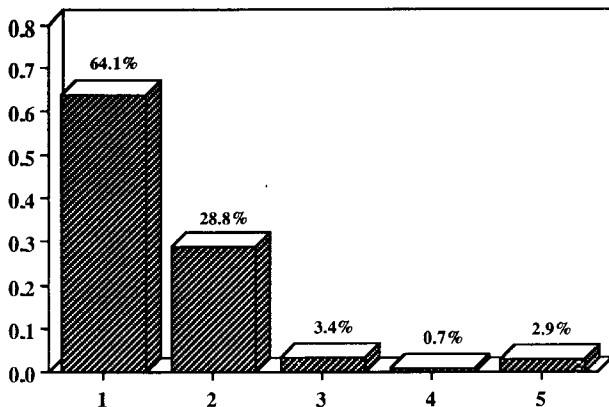


圖 4.7 高強度混凝土施工之品質對工程品質之影響程度

(1)影響很大 (2)有影響 (3)略有影響 (4)無影響 (5)不知

受訪者認為目前國內頒行之設計規範可適用於高強度混凝土設計之程度為
 (1)完備，(2)尚可，(3)不足，(4)不知道

	1	2	3	4
結構	0.5%	9.9%	75.8%	13.7%
營建	0.0%	8.1%	71.7%	20.2%
建築	0.8%	8.5%	69.0%	21.7%
總計	0.5%	9.0%	72.7%	17.8%

依統計大多數受訪意見，顯示國內之現行相關設計規範不足，即表示相關設計規範應速予研訂，以利設計之依據。統計圖如圖4.8。

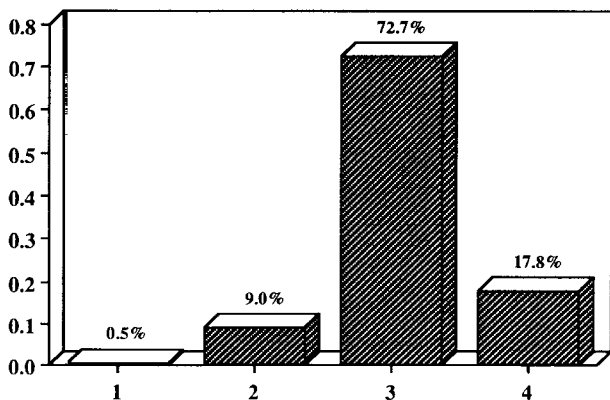


圖 4.8 目前國內頒行之設計規範可適用於高強度混凝土設計之程度
 (1)完備 (2)尚可 (3)不足 (4)不知道

九、受訪者認為目前國內頒行之施工規範可適用於高強度混凝土施工之程度：

(1)完備，(2)尚可，(3)不足，(4)不知道

	1	2	3	4
結構	0.0%	9.3%	76.4%	14.3%
營建	2.0%	8.1%	73.7%	16.2%
建築	0.8%	7.8%	69.8%	21.7%
總計	0.7%	8.5%	73.7%	17.1%

依大多數受訪意見，國內之現行相關施工規範顯示其不足，即應速予研訂以利施工之依據。統計圖如圖4.9。

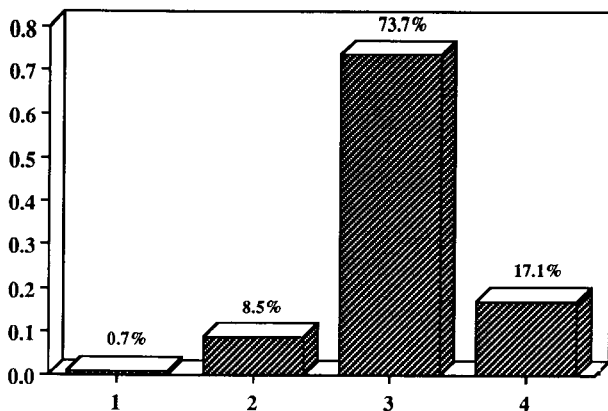


圖 4.9 目前國內頒行之施工規範可適用於高強度混凝土施工之程度

(1)完備 (2)尚可 (3)不足 (4)不知道

卜、受訪者認為若在國內工程中採用高強度混凝土，其施工品質之可靠程度：

(1)很可靠，(2)可靠，(3)尚可靠，(4)不可靠，(5)不知道

	1	2	3	4	5
結構	0.5%	5.5%	26.4%	50.5%	17.0%
營建	1.0%	11.1%	33.3%	45.5%	9.1%
建築	1.6%	7.0%	25.6%	53.5%	12.5%
總計	1.0%	7.3%	27.8%	50.2%	13.7%

過半數人尚覺得採用高強度混凝土之工程施工品質未具信心，應改進施工品控、統計圖如圖4.10。

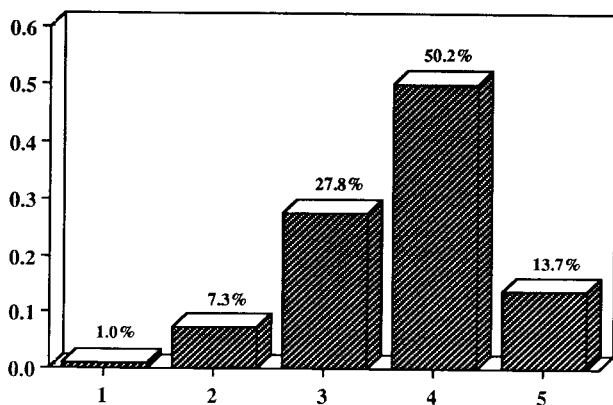


圖 4.10 若在國內工程中採用高強度混凝土，其施工品質之可靠程度
(1)很可靠 (2)可靠 (3)尚可靠 (4)不可靠 (5)不知道

十一、受訪者認為國內對高強度混凝土施工有能力之單位為：（可複選）

(1)丙級營造廠，(2)乙級營造廠，(3)甲級營造廠，(4)特甲級營造廠，(5)其他

	1	2	3	4	5
結構	0.5%	6.6%	50.0%	39.6%	30.2%
營建	2.0%	7.1%	48.5%	35.4%	37.4%
建築	0.8%	0.8%	39.5%	40.3%	38.8%
總計	1.0%	4.9%	46.3%	38.8%	34.6%

統計結果顯示應具甲級營造廠以上者較具信心。其中尚有些受訪者認為與等級無關，應找有信譽、品管好的廠商，如公營機構及專業廠商 其他條件：1.設備完善，2.負責人之良好心態，3.良好之檢驗制度，4.施工者之夠水準5.管理完善及人員完備之公司 8.專業PC樁PC電桿製造廠 9.施工品質良好之單位。）統計圖如圖4.11：

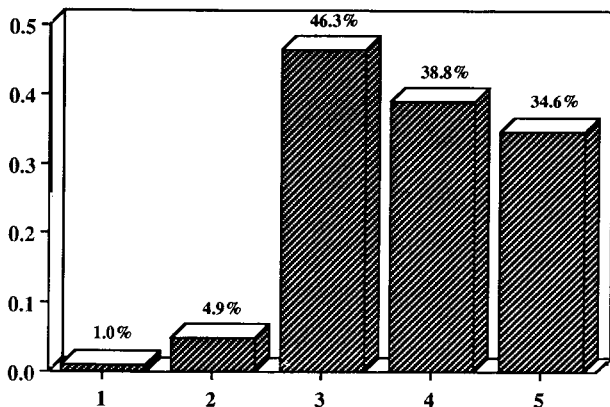


圖 4.11 國內對高強度混凝土施工有能力之單位

(1)丙級營造廠 (2)乙級營造廠 (3)甲級營造廠 (4)特甲級營造廠 (5)其他

十二、受訪者認為將來高強度混凝土在國內推廣應用之必要性為：

(1)很有必要，(2)必要，(3)尚必要，(4)無必要，(5)不知道

	1	2	3	4	5
結構	35.7%	48.9%	12.1%	1.1%	2.2%
營建	33.3%	52.5%	7.1%	1.0%	6.1%
建築	29.5%	49.6%	12.4%	4.7%	4.3%
總計	33.2%	50.0%	11.0%	2.2%	3.7%

大多數人（94.2%）認為高強度混凝土在國內推廣有其必要性：

統計圖如圖4.12。

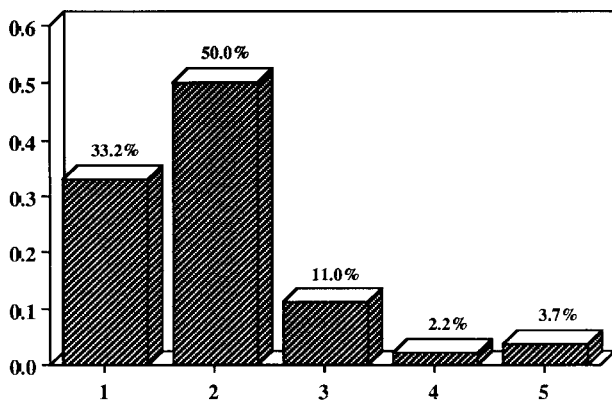


圖 4.12 將來高強度混凝土在國內推廣應用之必要性

(1)很有必要 (2)必要 (3)尚必要 (4)無必要 (5)不知道

十三、受訪者現有對高強度混凝土知識之獲取方式為：（可複選）

(1)學校上課，(2)參加研討會或講習班，(3)購書自修，(4)到圖書館找參考資料，(5)由廠商提供資料，(6)其他

	1	2	3	4	5	6
結構	24.7%	53.3%	26.4%	34.6%	35.7%	12.6%
營建	6.0%	66.7%	32.3%	15.2%	38.4%	10.1%
建築	8.5%	43.4%	31.8%	19.4%	37.2%	14.0%
總計	15.1%	53.4%	29.5%	25.1%	36.8%	12.4%

大多數人認為研討會、講習班、廠商提供資料、及圖書館資料很受重視；其他意見有：參考外國工程實例、與同事切磋、工程顧問公司、實際參與、報章雜誌、研究報告及出國觀摩。統計圖如圖4.13。

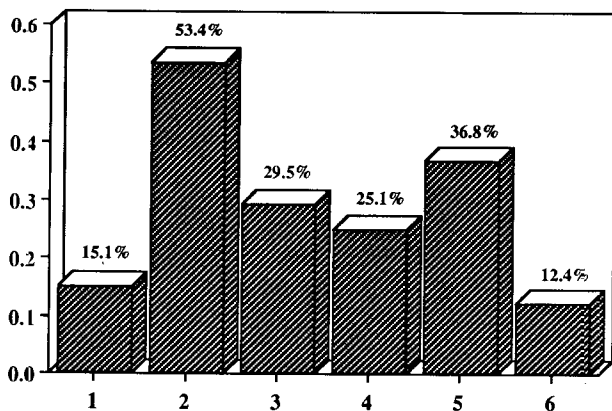


圖 4.13 現有對高強度混凝土知識之獲取方式

(1)學校上課 (2)參加研討會或講習班 (3)購書自修
(4)到圖書館找參考資料 (5)由廠商提供資料 (6)其他

十四、若要在國內推廣高強度混凝土之應用，受訪者建議有關單位從事的活動：
 (可複選) (1)研討會或講習班，(2)在職訓練，(3)資格檢定，(4)研究發展，
 (5)參觀見習 (6)其他

	1	2	3	4	5	6
結構	81.9%	51.1%	29.7%	57.1%	33.5%	2.7%
營建	76.8%	39.4%	26.3%	41.4%	46.5%	4.0%
建築	72.1%	52.7%	27.1%	35.7%	45.7%	1.6%
總計	77.6%	48.8%	28.0%	46.6%	40.5%	2.7%

依統計要推廣高強度混凝土之應用應從事的活動，應包括研討會、講習班、
 在職訓練、研究發展、參觀見習及資格檢定等。尚有受訪者建議：考試增
 列構造材料一科及舉辦專業書籍展。統計圖如圖4.14。

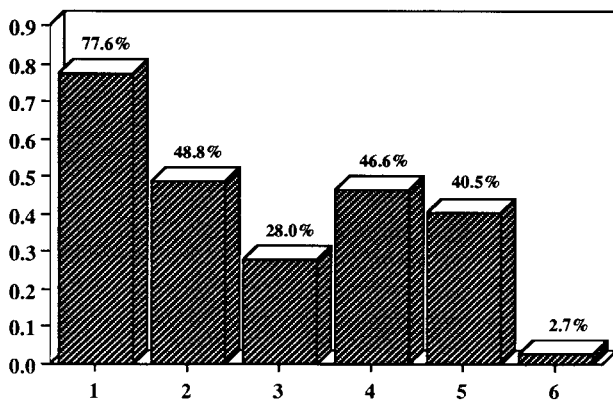


圖 4.14 在國內推廣高強度混凝土應從事的活動

(1)研討會或講習班 (2)在職訓練 (3)資格檢定 (4)研究發展
 (5)參觀見習 (6)其他

十五、其他意見

0 表示無意見，1 表示稍有意見，2 表示意見稍多，3 表示意見頗多，4 表示意見很多，5 表示意見非常多者。

	0	1	2	3	4	5
結構	83.5%	6.0%	4.4%	4.4%	1.6%	0.0%
營建	67.7%	12.1%	7.1%	10.1%	1.0%	2.0%
建築	70.5%	8.5%	9.3%	7.0%	4.7%	0.0%
總計	75.6%	8.3%	6.6%	6.6%	2.4%	0.5%

依統計雖四分之三的受訪者不表示意見，但尚有四分之一（約一百人）的受訪人相當熱心而提出許多寶貴意見。統計圖如圖 4.15。

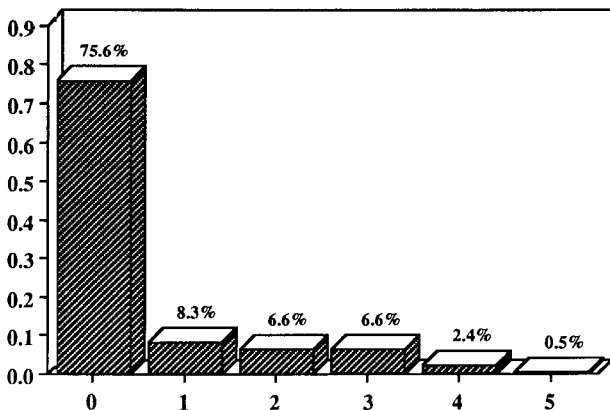


圖 4.15 其他意見

0 表示無意見 1 表示稍有意見 2 表示意見稍多 3 表示意見頗多
4 表示意見很多 5 表示意見非常多者。

茲將所有有效回收問卷的意見整理如下：

1. 經過研討後，頒訂高強度混凝土設計及施工規範，並嚴格實行；
2. 預拌廠之品質難以保證，在運送過程中，運輸車之老舊及加水以利施工之手段，亦令混凝土品質無法達到有效之強度；
3. 對於骨材強度，粗細骨材配比，水灰比，水泥用量及產生的水化熱對混凝土的影響，應做比較研究；
4. 施工及監工人員之品質觀念低落是一大問題。
5. 專業人才之訓練須加強。
6. 配合發展需要，找合格拌合廠，同步從事研究，而後推廣，尤其是對施工廠商之推展。
7. 推廣高強度混凝土，應注意目前國內施工及拌合廠品質能力之低落，及業主等之心態，貿然引進高強度混凝土是危險的。

4 - 5 建築技術規則之限制探討

現行『建築技術規則』中與高強度混凝土設計及施工有關之條文中，經初步研判，須重行審慎檢討其適切性者均在該規則『建築構造編』中，茲將其條文及主要項目列舉於次：

第一章 基本規則

第八及九條，施工品質

第二章 基礎構造

第一〇八條，施工品質

第六章 混凝土構造

第二節 品質要求

第三三八及三三九條，水泥，粒料

第三四四條，摻合劑

第三四七條，混凝土配比

第三四八條，試驗記錄記比法

第三四九條，試驗配比法

第三五〇條，水灰比

第三五二條，鑽心體試驗

第三五九條，拆模

第三節 設計細則

第三七六條，彈性模數

第三四七條，負彎矩調整

第三四八條，單向撓度， f_r ， f_c

第三九八及三九九條，拉力及壓力握持長與 f_c 之關係

第四節 耐震設計之特別規定

第四〇八條，耐震要求，與 f_c 之關係

第四〇九及四一〇條，撓曲材及受撓柱，混凝土壓力應變， P_b ， V_c

四一二條，剪力牆， P_b ， f_r

第五節 強度設計

四一六～四一九條，設計假定及原則，撓曲強度，混凝土壓力應變，
混凝土壓應力分佈， f_c ， β_1 ， E_c

四二二條，鋼筋限制，鋼筋比

四二八條，腹筋，扭力強度， f_c

四三一～四三九條，容許剪應力強度等， V_c ， V_{tc}

第六節 工作應力設計

四四〇條，設計假定，彈性模數比 n

四四一～四四五條，混凝土容許應力

四六八條，無筋混凝土

四七八條，橫剪力

四八二條，容許應力，壓應力，拉應力

四八四條，撓曲強度

四九五條，薄殼配筋，混凝土拉應力

以上不適切之條文內容，尚須詳加實驗研究修訂後，始能在國內安全地順利推動高強度混凝土之廣泛應用。這些可能不適切之規則條文，限制高強度混凝土在國內之推廣應用，亟須另案詳加研究這些條文內容，且進行相關之試驗研究，以求取切合高強度混凝土特性之規則條文和規範，以確保高強度混凝土工程之品質及其建設成果，而提升我國之工程水準。

第五章 結論與建議

本篇評估工作，針對材料品質，生產及品管技術，國內使用可行性等方面透過文獻回顧及問卷調查分析可獲下列之結論及建議。

一、結論

- (一) 材料品質的要求在本質上本省的材料足以滿足，惟必須依目前的水準再加強特別篩選之。水泥、骨材、摻料、波索蘭、水等材料之來源必須穩定，且採用前必須經過詳細試驗評估，除了符合現有建築技術規則外，必須統計分析將品質的分佈及變異範圍明白示出，以便建立品質保證系統，確保高強度混凝土的品質穩定性及均勻性。
- (二) 高強度混凝土如同一般混凝土，自材料選擇、配比、拌合、輸送、澆置、施工、養護等過程均會影響其強度，且祇要其中一個過程稍有疏忽，將嚴重影響其品質，故高強度混凝土的品管程序與品保系統的建立愈形重要，惟有嚴格的製成品管，妥善的施工程序，及合理的品管理念，才能使工地所澆置之混凝土品質滿足結構設計之要求。
- (三) 國內超過 $420 \text{ kg} / \text{cm}^2$ 以上高強度混凝土應用有其潛力及潛在市場，若能儘速修訂部份建築技術規則之條文，便利設計者依循，配合良好品質保證的營造者，材料供應者，使用者作業下，此等混凝土可達到增大跨距、減輕呆重、增加耐久性、增加使用空間、縮短工期或節省經費等目的。

二、建議

- (一) 各學術研究單位、主管單位、工業界應合作加強推廣混凝土品質保證教育及訓練，並進行相關之研究，俾能提供資料，並培育高強度混凝土相關之設計、施工、材料及材料供應人才。
- (二) 速研擬建築技術規則內有關高強度混凝土設計及施工規則，以利設計及施工者之遵循根據。
- (三) 對台灣生產水泥細度、早期強度狀況，環境影響因素，水灰比，水泥用量，水化熱，摻料性能，水的品質、骨材強度，粗細骨材比，對高強度混凝土的

影響，應做比較研究；並應繼續進行高強度混凝土之結構力學試驗，以彌補現行建築技術規則之不足。

- 四) 配合高強度混凝土發展需要，評估拌合廠，確立機械系統、人力素質、品管技術，同步從事研究；並且加強推廣使施工廠商之品管水準提高。並且因應發展新施工技術，使國內相關混凝土工程品質同步提昇，俾能達到投資者、設計者、材料供應者、施工者、使用者與建築主管單位觀念一致的建築品質，如此方能確保建物之安全、經濟、耐久之目標。

附錄一 高強度混凝土設計及施工 準則初步研究

- 附錄 1-1-1 綜合問卷
- 附錄 1-1-2 綜合問卷分析
- 附錄 1-2-1 材料品質問卷調查表
- 附錄 1-2-2 材料品質問卷分析
- 附錄 1-3 生及品管技術問卷調查表
- 附錄 1-4 國內高強度混凝土使用可行性
評估問差調查表

附錄 1 - 1 - 1 高強度混凝土設計及施工 準則初步研究

● 綜合問卷

附錄 1 - 1 - 1
高強度混凝土設計及施工準則初步研究
綜合問卷

鈞鑒：

近年來，我國經濟快速成長，營建業蓬勃發展，建築物日漸增加，混凝土是一項重要的施工材料；鑑於高強度混凝土為未來營建工程使用之主流，而確保構造物的安全及提昇混凝土施工品質，似應從確保混凝土強度及全面品質控制著手，因此中國土木水利工程學會接受內政部建築研究所籌備處之委託積極進行高強度混凝土設計施工準則、品質檢驗標準及可行性評估之研究。

請您就 ACI 363 委員會之高強度混凝土綜合報告譯稿中（如附件），依 1. 材料品質要求 2. 生產技術及品管技術 3. 國內使用高強度混凝土之可行性，選擇您專長之項目以評估之，並將評估意見於 79 年 5 月 10 日前寄回聯絡處，謝謝您的合作。（若篇幅不夠，請另紙繕寫）

1. 材料品質要求

2. 生產技術及品管技術

3. 國內使用高強度混凝土之可行性

4. 其他

中國土木水利工程學會
混凝土工程委員會主任委員
葉 基 棟 敬上

聯絡處：台北市10772基隆路四段43號
國立台灣工業技術學院營建系
營建材料研究室 黃兆龍 教授
(02) 7353950

附錄 1 - 1 - 2 高強度混凝土設計及施工 準則初步研究

- 綜合問卷分析

附錄 1 - 1 - 2 綜合問卷分析

目前國內高強度混凝土之材料品質，生產技術及可行性分析。其外審專家意見如下：

(一) 材料品質要求部份

- 陳朝和先生 (台灣電力公司)

台灣已有多種廠牌水泥符合高強度混凝土使用，粗細骨材以石榴板及林內最佳，而清水溪、大甲溪及大安溪之骨材都可符合要求，其他地區次之；高性能減水劑品牌多，品質差異很大，必須比較試驗後選用；台電飛灰符合要求。

- 吳振芳先生 (台灣預拌混凝土公會)

粗骨材：來源沒什麼困難。

細骨材：來源取得較困難。高強度混凝土細度模數(F.M.)如定在3,則必須進行適當調配，更增加來源之困難。

- 邱世良先生 (台灣水泥公司)

1. 水泥

- (1) 依ACI 363之要求，水泥供應商應提供水泥均勻性報告：

其中 C_3S 含量之變異不得大於4%，燒失量之變異不得大於0.5%，細度(Blaine)之變異不得大於 $375 \text{ cm}^2 / \text{g}$ ， SO_3 含量應維持在最適量範圍，其變異量限制在 $\pm 0.20\%$ 以內，否則維持均勻之高強度將有問題。

目前本公司(台泥)採電腦控制配料之生料系統，配合穩定之製程，磨成水泥均可符合上項規定。

- (2) 水泥之溫度規定熱天不得高於66℃：

若水泥供應商為應客戶要求，於水泥磨內裝有水泥冷卻器(Cement Coller)者，應可達到此一要求。(台泥提供任選規定之低溫水泥、水泥溫度可低於50℃)

2. 骨材

- (1) 粗骨材：符合ASTM C33之粗骨材目前國內尚無問題。

- (2) 細骨材：欲取得細度模數(F.M.)約3.0之天然良質細骨材，由於多數河川禁止採掘更為不易，可能須以配料方式配成。

3. 化學摻料

目前國內化學摻料供應商多以國外進口之粉劑在國內加水拌成液態摻料，只要濃度控制得當，取得符合 ASTM C494 Type A, B, C, D, F及G之化學摻料並無困難。

• 吳鳳儀先生（公路局材試所）

(1) 水泥：第一種、第二種，若工程需要亦可用第三種卜特蘭水泥，其品質須符合 CNS 61之規定。為確保混凝土強度之一致性，每項工程所使用水泥品質要具均勻性，最好每一工程採用同一品牌之水泥。

(2) 細骨材：在工地附近能採用之天然砂為主，其品質應符合 CNS 1240之規定。台灣地區河川污染情形嚴重，砂有否污染應多加檢查。又台灣河川湍急頻有洪水發生，砂之級配變化大應加注意。

(3) 粗骨材：以立方體之碎石為原則，其品質能符合 CNS 1240之規定，顆粒之最大尺寸，宜採 25mm~9.5mm(1吋~3/8吋)。

(4) 化學摻料：採用高性能減水劑，其品質符合 ASTM C494之F型或G型。

(5) 礦物摻料：一般以飛灰為主，其品質應符合 CNS 3036之C類或F類。本省台電所產的飛灰係屬F類，石灰(CaO)含量較低，以F類飛灰混合之混凝土，其初期之強度較純混凝土為低，故設計及施工均須注意。

• 許茂雄教授（成功大學）

從結構設計觀點而言，高強度混凝土除重視 $f'c$ 強度外，應同時重視到達 $f'c$ 時之應變不能太小。國內普通混凝土之極限應變，達不到 0.002，高強度混凝土之極限應變若更低，勢必影響 RC 結構之韌性。

(二) 生產技術及品質技術

• 陳朝和先生（台灣電力公司）

現有預拌場，擇優秀廠商稍加訓練，都可生產高強度混凝土。但輸送及澆置必須專人監視，避免加水，因為本省施工人員加水習性太普遍，極難糾正。品質技術程度無問題，但執行有問題，因為大部分工程都由工人自由澆置，監工人員未善盡職責。

• 吳振芳先生（台灣預拌混凝土公會）

生產技術：大致生產技術一般只在於拌和機械優劣而已，其餘較沒有什麼大問題。

品管技術：大部份預拌廠之施工及品管未能完全了解，故須加強宣導及訓練。

• 吳鳳儀先生（公路局材試所）

高強度混凝土通常使用高水泥含量，低水灰比，另加添加劑及飛灰，故其配比，材料品質、施工及養護等稍有差異，即會影響其品質。生產高強度混凝土時，其拌和、運輸、澆置、養護及品管等步驟必須特別注意方足以確保高強度之一致性。高強度混凝土之水灰比很低，用水量較少，故拌和時骨材溫度、控制及運輸中水份損失之預防要特別小心。台灣屬亞熱帶氣候一般對溫度應予預防控制。

• 許茂雄教授（成功大學）

水泥或混凝土填充劑或填充料之品質及配比應嚴格規定。目前市面上已發現飛灰添加不當的現象，嚴重影響混凝土品質。

（三）國內使用高強度混凝土之可行性

• 陳朝和先生（台灣電力公司）

國內在各方面都已達使用高強度混凝土的水準，惟過去可能因習性過份保守，不敢大膽設計，對施工品質缺乏信心。應由公家機關，率先使用高強度混凝土蓋一間高層大樓，做為示範宣導。

• 吳振芳先生（台灣預拌混凝土公會）

在國內使用高強度在8,000psi以上可能會有困難，一般廠商有關高強度的資訊比較缺乏，真正本身建立資料者少之又少，大都是收集國外之資料，但不知是否可行，一般廠商都說沒什麼問題。當拌和困難時，問題便隨之而來。

• 吳鳳儀先生（公路局材試所）

對公路橋梁而言，本省除了小部份橋梁外，均以預力混凝土單筋梁為主，其設計 $f'c$ 亦限於 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ 設計、施工多年、設計型態、施工方法變化多樣。同一條件下採用高強度混凝土可減少斷面及增大跨徑，減少建造費，同時可縮短工期，並可造成美麗外觀。高強度混凝土為求得其強度

之一致性，品質要嚴。在本省環境下，強度提昇過大，在設計、施工及品質管上，一時可能無法適應。在公路預力混凝土橋梁而言，先自 $f'c$ 在 $420 \sim 450 \text{ kg/cm}^2$ 範圍適應一段時期後，再行增加。

• 黃民仁先生（鐵路局）

若營建法規適當修正配合，以有效控制材料及施工品質，高強度混凝土之使用應屬必要並且可行。

• 許茂雄教授（成功大學）

從超高層建築結構設計的觀點是有必要使用 700 kg/cm^2 左右的高強度混凝土，以減少柱梁剖面尺寸及結構體自重。惟目前市面上之品質良莠不齊，若不嚴加管制後果堪虞。

（四）其他意見

• 陳朝和先生（台灣電力公司）

一般人認為高強度混凝土延展性較差，台灣地震多，不敢冒然使用。應由政府出資委託學術界、多多舉辦高強度混凝土研討會，邀請設計公司，建築師，混凝土預拌廠，工程機關人員參加。

• 吳振芳先生

國內高強度之問題應加強輔導，並建立應有之資料。

• 顏聰教授（中興大學）

針對第六章「營建設計所須考慮的因素」內容，提出意見：

1. 譯稿甚為通順可讀，大致上已能表達原文涵意，然因部份用辭遣字過多口語化，反而欠缺專業化論述之精簡優點。
2. 部份專有名詞之譯述不甚理想。除第六章內本人已加以修正外，其他各章宜由專家學者詳閱訂正，俾臻完善。

• 周文宗先生（啟欣化學）

針對第二章部份提出意見

2-1 引言

生產能符合規範所要求之工作性與強度發展的高強度混凝土，其材料的選擇較一般（中、低）強度混凝土更形重要，高品質的材料及嚴謹的施工規範的執行，更是高強度混凝土，不可或缺的條件。（第 3 頁）

第一行倒數第五字可否改為符合強度設計的要求 (第 4 頁)

2-3-1 第二行輸氣劑

輸氣劑一般都是表面活性劑，利用其產生之均勻氣泡，形成特有的空氣／孔隙系統以增加混凝土之耐久性 (第4頁)

2-3-1 第三、四、五行

碳水化合物，三聚氰胺、甲荳縮合物或高分子化合物等各種配方之廠牌與加劑量的選擇速率，可刪除之材料配合適當的選用摻料可明顯的提昇混凝土物理性質 (第 4 頁)

2-3-2 第三行可改為然而過量的輸入空氣 (第 4 頁)

2-3-3 第一行高水泥 (含量) 而緩凝劑水化現象 (第 4 頁)

2-3-3 倒數第四行由於緩凝劑可使混凝土後期強度增加，在其安全劑量內，其加入劑量與混凝土強度之增加百分比成正比 (第 4 頁)

2-3-5 第三行減水劑 (HRWR) 改高性能減水劑

加劑改為加劑量故在工地應該加入高性能減水劑 (WR) 或較新型之高性能減水緩凝劑 (HRWR & RD) 以有效抑制坍度急劇的損失 (第 5 頁)

2-3-5 倒數第一行討論將在 ACI SP-68, SP-119 作進一步討論 (第 5 頁)

2-3-7 高 (度) 改為性能

第四行特殊效果，但絕對要注意摻料對混凝土及摻料對參料彼此間之化學相似性及相容性才可保障混凝土之品質，才不致發生突變。(第 5 頁)

· 許茂雄教授 (成功大學)

請建立混凝土預拌廠等級制度。例如甲級廠可生產 $800\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下材料；乙級廠可生產 $600\text{kg}/\text{cm}^2$ 丙級可生產 $400\text{kg}/\text{cm}^2$ 並實施抽查與評鑑與控訴制度。

附錄 1 - 2 - 1 高強度混凝土設計及施工 準則初步研究

● 材料品質問卷調查表

附錄 1 - 2 - 1
高強度混凝土設計及施工準則初步研究
材料品質問卷調查表

* 各位先生/女士：您好

* 為瞭解國內使用高強度混凝土之工程環境及其發展潛力，藉以研擬研究架構及推廣方向，並有助於提升工程品質確保建設成果，特舉辦此次問卷調查。本調查資料純為學術研究之參考，懇請協助支持並就下列各題勾選出適當的答案，並請於5月20日前寄回，以便統計。非常感謝您的合作及提供寶貴的意見！

敬請在合適的方格“”中打勾或在_____處簡答下列各題：

1. 請問您的

- 1-1 年齡 (1) 20 ~ 29 歲 (2) 30 ~ 39 歲 (3) 40 ~ 49 歲
 (4) 50 歲以上
- 1-2 學歷 (1) 高工/高中 (2) 大專 (3) 碩士 (4) 博士
- 1-3 職業類別 (1) 材料供應 (2) 施工 (3) 工程設計 (4) 工程管理
 (E) 工程研究 (6) 其他_____
- 1-4 工程經驗 (1) 5 年以下 (2) 5 ~ 9 年 (3) 10 ~ 19 年
 (4) 20 年以上

2. 請問您曾使用過混凝土之抗壓強度 ($f'c$) 最高為多少 kg / cm^2 (psi) ?

- (1) 210(3000) (2) 280(4000) (3) 350(5000) (4) 420(6000)
 (5) 其他_____

3. 依您判斷目前國內的工程環境可採用之混凝土抗壓強度最高為多少 kg / cm^2 (psi) ?

- (1) 210(3000) (2) 280(4000) (3) 350(5000) (4) 420(6000)
 (5) 其他_____

4. 依據美國 ACI 308 技術委員會規定，抗壓強度 $420 \text{ kg} / \text{cm}^2$ (6000psi) 以上之混凝土為高強度混凝土，據您所知國內欲達此強度之各項材料要求為何？(可複選)

- 4-1 水泥符合 CNS 61 之 (1) 第 I 型 (2) 第 II 型 (3) 第 III 型
 (4) 第 IV 型 (5) 第 V 型 (6) 其他_____
- 4-2 水泥細度 (氣透儀法) 最小值 (1) 2800 cm^2 / g (2) 3300 cm^2 / g
 (3) 3200 cm^2 / g (4) 3400 cm^2 / g (5) 其他_____
- 4-3 水泥 (第 I 型) 之使用量 (1) 300 kg / m^3 以下 (2) 300 ~ 399 kg / m^3
 (3) 400 ~ 499 kg / m^3 (4) 500 ~ 600 kg / m^3 (5) 其他_____
- 4-4 細骨材細度模數 (F.M) (1) 2.3 ~ 2.49 (2) 2.5 ~ 2.69 (3) 2.7 ~ 2.99 (4) 3.0 以上
 (5) 其他_____
- 4-5 粗骨材之最大粒徑 (1) 3/8 英吋 (2) 3/4 英吋 (3) 1 英吋
 (4) 1 1/2 英吋 (5) 其他_____
- 4-6 骨材之平均抗壓強度 (1) 700 kg / cm^2 以下 (2) 700 ~ 799 kg / cm^2
 (3) 800 ~ 899 kg / cm^2 (4) 900 ~ 999 kg / cm^2 (5) 1000 kg / cm^2
以上

4-7 使用之化學摻料 (1) 速凝劑 (2) 緩凝劑 (3) 減水劑
 (4) 減水緩凝劑 (5) 強塑劑 (6) 其他 _____

4-8 添加強塑劑 (SP) 與水泥重量百分比 (1) 0.5% 以下 (2) 0.5% ~ 0.79%
 (3) 0.8% ~ 0.99% (4) 1% ~ 1.49% (5) 1.5% 以上

4-9 使用之礦物摻料 (1) 飛灰 (2) 高爐石 (3) 稻殼灰 (4) 矽灰
 (5) 其他 _____

4-10 使用礦物摻料之百分比 (1) 5% 以下 (2) 5% ~ 9% (3) 10% ~ 19%
 (4) 20% ~ 40% (5) 其他 _____

4-11 水灰比 (1) 0.3 以下 (2) 0.3 ~ 0.39 (3) 0.4 ~ 0.49
 (4) 0.5 ~ 0.6 (5) 其他 _____

5. 請問您，以目前國內生產之那項材料可用以製造高強度混凝土？(可複選)

(1) 水泥 (2) 細骨材 (3) 粗骨材 (4) 化學摻料 (5) 礦物摻料
 (6) 其他 _____

6. 請問您，影響高強度混凝土強度之最大因素為何？

(1) 水泥 (2) 水 (3) 細骨材 (4) 粗骨材 (5) 摻料
 (6) 其他 _____

7. 其他意見：

謝謝您的支持與合作

國立台灣工業技術學院營建系
高強度混凝土研究小組 敬上

台北市10772基隆路四段四十三號
營建系營建材料研究室

黃兆龍 教授 收

附錄 1-2-2 高強度混凝土設計及施工 準則初步研究

●材料品質問卷分析

附錄 1 - 2 - 2 材料品質問卷分析

一、概說

近年來，國內經濟快速成長，營建業蓬勃發展，而土地價格昂貴，促使高層建築物日漸增加，這些建物除了採用鋼骨材料外，混凝土是另一項重要的施工材料；鑑於高強度混凝土為未來營建工程混凝土材料使用之主流，而且為了確保構造物的安全及提高混凝土施工品質，似應積極從確保混凝土強度及全面品質控制著手。中國土木水利工程學會接受內政部建築研究所籌備處之委託，積極進行高強度混凝土設計施工準則、品質檢驗標準及可行性評估之研究。為瞭解國內使用高強度混凝土之工程環境及其發展潛力，藉以研擬研究架構及推廣方向，企望有助於提升混凝土工程品質確保建設成果，特設計高強度混凝土設計及施工準則初步研究問卷調查，期望能透過實務性的問卷調查結果，初步瞭解當前營建工程界對於「高強度混凝土設計及施工準則」之研究，以作為本階段研究作業上的依據。

二、調查內容及對象

為了廣泛吸收各單位的意見，問卷寄發對象包括營造施工人員、工程設計人員、工程管理人員、工程研究人員及材料供應商等等，希望透過各有關從業人員之調查以收集思廣益之效，問卷調查表如附錄一所示，主要調查之內容歸納如下：

- ①個人資料分析，包括年齡、學歷、職業類別、從事營建業年資，以了解目前從事營建業階層；
- ②國內曾使用過混凝土之最高抗壓強度，及判斷國內工程環境可採用之混凝土最高抗壓強度；
- ③高強度混凝土各項材料品質要求；
- ④目前國內高強度混凝土生產技術及品質管制技術之要求；
- ⑤目前國內領行之設計及施工規範對於高強度混凝土之適用性；和
- ⑥未來高強度混凝土之應用推廣及使用可行性

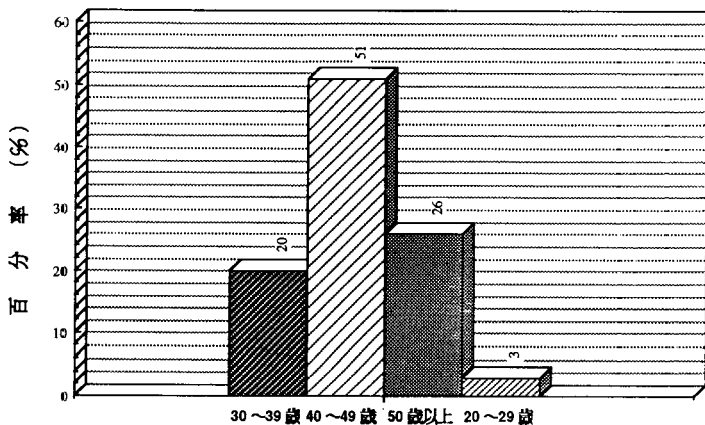
三、問卷統計與分析

一、材料品質

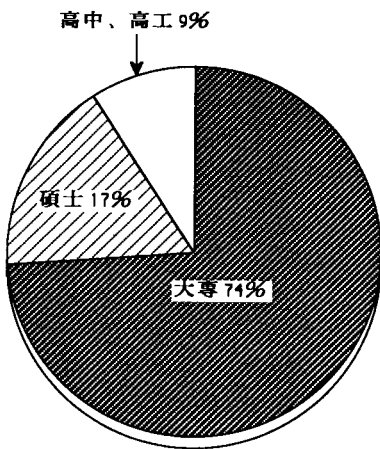
本問卷調查共寄發 1000 份，總計回收 200 份，回收率 20%，分析結果如下：

1. 請問您的

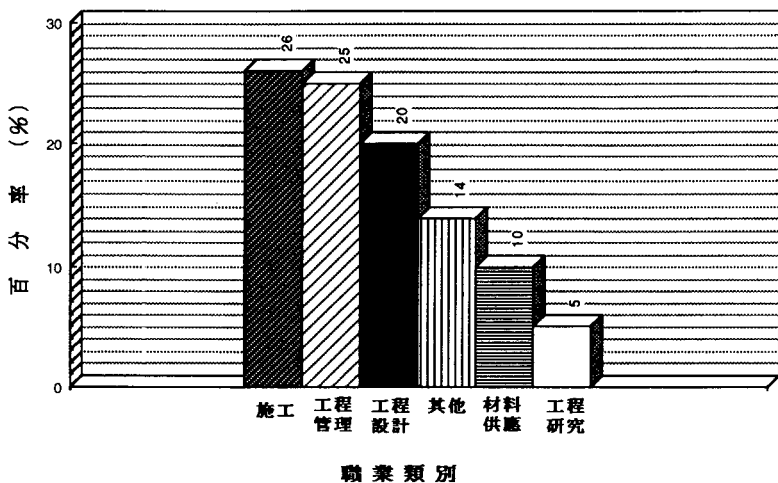
1-1 年齡 □(1)20~29歲 □(2)30~39歲 □(3)40~49歲 □(4)50歲以上



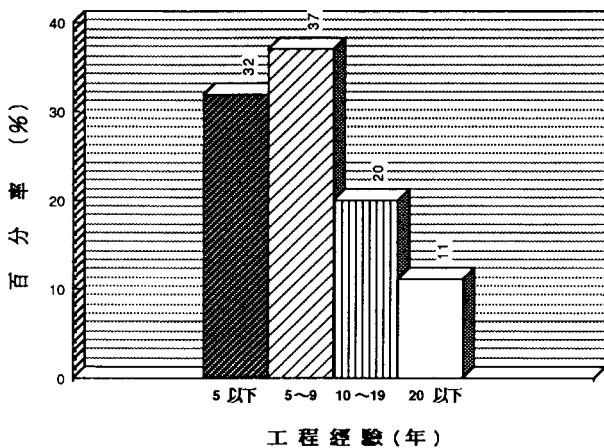
1-2 學歷 □(1)高工/高中 □(2)大專 □(3)碩士 □(4)博士



1-3 職業類別 □(1)材料供應□(2)施工□(3)工程設計□(4)工程管理
 □(5)工程研究□(6)其他 _____



1-4 工程經驗 □(1)5年以下□(2)5~9年□(3)10~19年□(4)20年以上



①問卷回收結果，年齡 20 ~ 29 歲佔 20%，30 ~ 39 歲佔 51%，40 ~ 49 歲佔 26%，而工程經驗以 10 ~ 20 年之 37% 及 5 年以下之 32% 居首位，5 ~ 10 年之 20% 居次；可見在實務經驗有 10 年以上之營建從業人員，較能感受到台灣發展高強度混凝土之潛力及需要。

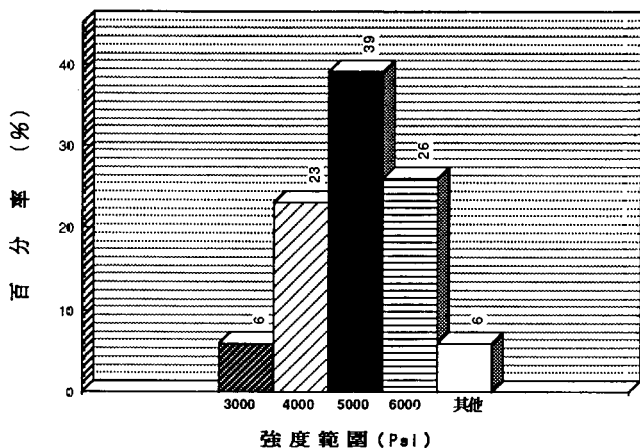
②就學歷而言，回收對象大專學生以 74% 佔絕大部份，而高中、高工僅佔 9%，結果顯示高強度混凝土的接受性以專上程度為主，因其本身已受相當程度之訓練，故若政府機關訂有嚴格的施工及品管準則，配比、材料來源適當，以國內工程人員之專業水準而言，則高強度混凝土之應用於土木營建工程，當可獲致相當之效益。

③就職業類別而言，本問卷回收對象以施工單位及工程管理單位各佔 23% 及 25% 居首，而工程設計單位之 20% 居其次，研究單位居 5%，顯示國內工程界對使用高強度混凝土之意願、興趣極高，尤其目前高強度混凝土方面多由學術單位進行研究，若工程機關（如省公路局、顧問公司、高速公路局等）能更大量地參與高強度混凝土之研究，其推廣效果及高強度混凝土之實用性將較目前更具宏效。

2. 請問您曾使用過混凝土之抗壓強度 ($f'c$) 最高為多少 kg/cm^2 (psi) ?

(1) 210(3000) (2) 280(4000) (3) 350(5000) (4) 420(6000)

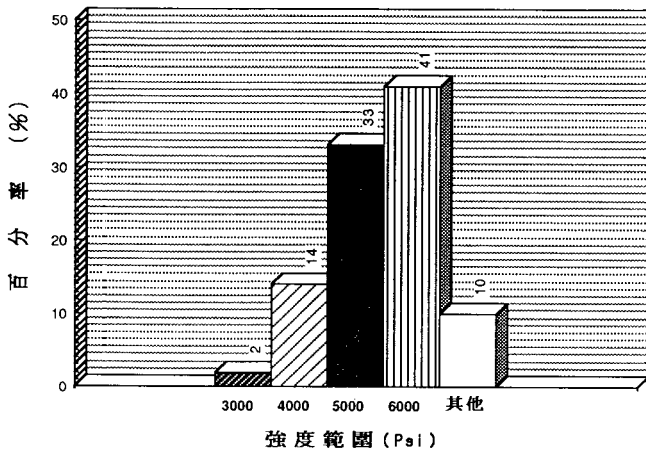
(5) 其他 _____



對使用過之混凝土強度而言，以 $350\text{kg}/\text{cm}^2$ (5000psi) 之39%情形最多，420 kg/cm^2 (6000psi)的26%次之，而280 kg/cm^2 (4000psi)亦佔23%，且多家預鑄廠曾有製作560 kg/cm^2 (8000psi)~700 kg/cm^2 (10000psi)之經驗，可見若能獲得適當、穩定性高之材料，台灣目前工地施工之混凝土強度提升至420 kg/cm^2 (6000psi)~560 kg/cm^2 (8000psi)層次並非太難的。

3. 依您判斷目前國內的工程環境可採用之混凝土抗壓強度最高為多少 kg/cm^2 (psi)？

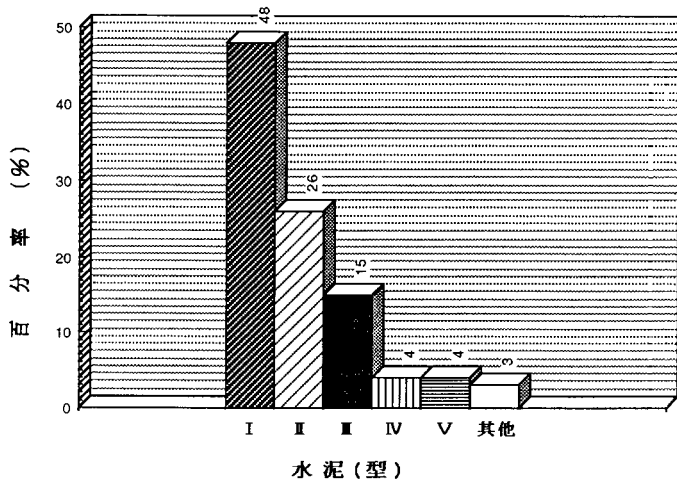
- (1) 210(3000) □ (2) 280(4000) □ (3) 350(5000) □ (4) 420(6000)
 □ (5) 其他.....



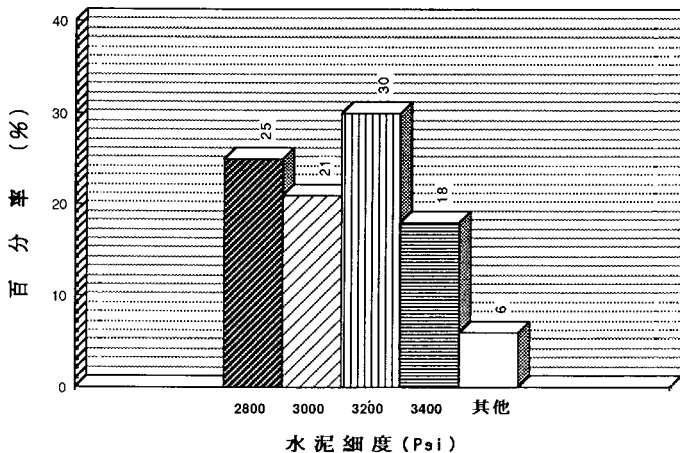
對判斷目前國內工程環境可採用之混凝土抗壓強度，以420 kg/cm^2 (6000psi) 之42%最多，350 kg/cm^2 (5000psi)之33%居次，可見國內之營造工程業者，認為國內工程環境可採用之混凝土強度甚高，且多家預鑄廠亦已製作過強度560 kg/cm^2 (8000psi)之預鑄構件經驗，可見國內目前之工程環境及材料品質，對於發展高強度混凝土有相當之潛力。

4. 依據美國ACI 363技術委員會規定，抗壓強度 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ (6000psi)以上之混凝土為高強度混凝土，據您所知國內欲達此強度之各項材料要求為何？(可複選)

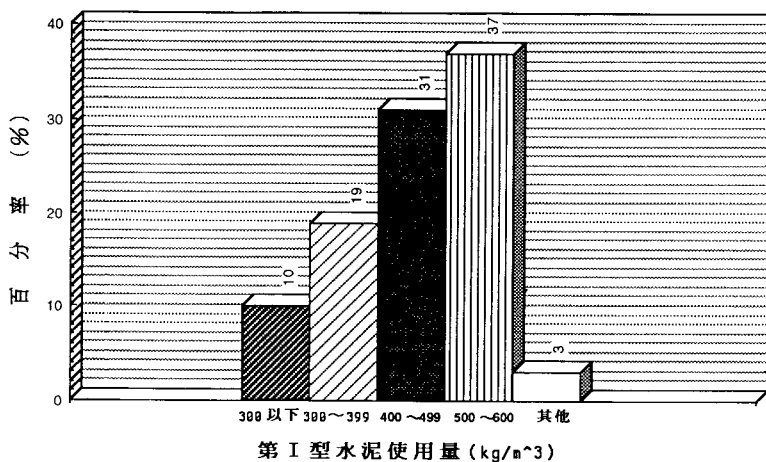
- 4-1 水泥符合CNS 61之 (1)第I型 (2)第II型 (3)第III型
 (4)第IV型 (5)第V型 (6)其他_____



- 4-2 水泥細度(氣透儀法) 最小值 (1) $2800\text{cm}^2/\text{g}$ (2) $3000\text{cm}^2/\text{g}$
 (3) $3200\text{cm}^2/\text{g}$ (4) $3400\text{cm}^2/\text{g}$ (5)其他_____



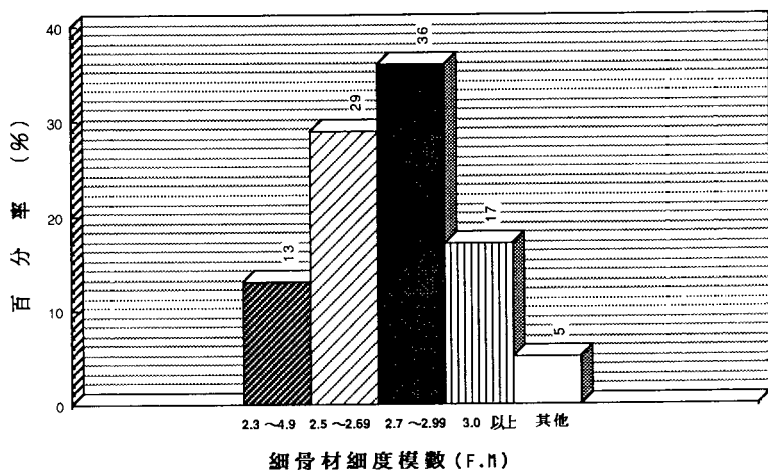
4.3 水泥（第Ⅰ型）之使用量 二 (1) 500kg/m³ 以下 二 (2) 300~399kg/m³
 二 (3) 400~499kg/m³ 二 (4) 500~600kg/m³ 二 (5) 其他



國內對高強度混凝土，材料方面要求，認為水泥符合 CNS 61 之型別，以第 I 型之 43% 佔第一位，第 II 型之 26% 居次；水泥細度最小值之要求，以 5000cm²/g 佔 30% 及 2800cm²/g 佔 25%，3000cm²/g 佔 21%，基本上水泥細度符合 CNS 61 之要求即可製造高強度混凝土（即大於 2800 cm²/g）。而對於水泥（第 I 型）之使用量要求，以 500~600kg/cm³ 之 37% 及 400~499 kg/cm³ 之 31% 居首位，當然低水灰比下水泥（第 I 型）之使用量亦會較高，保持估計水泥用量在 500kg/cm³ 範圍。

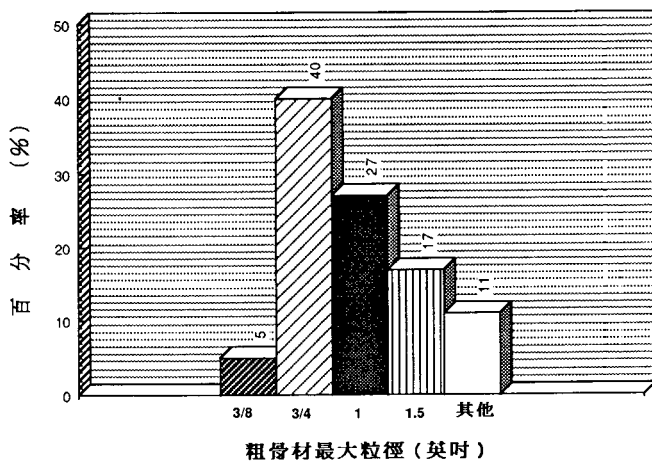
4-4 細骨材細度模數(FM) □(1)2.3~2.49 □(2)2.5~2.69

□(3)2.7~2.99 □(4)3.0以上 □(5)其他

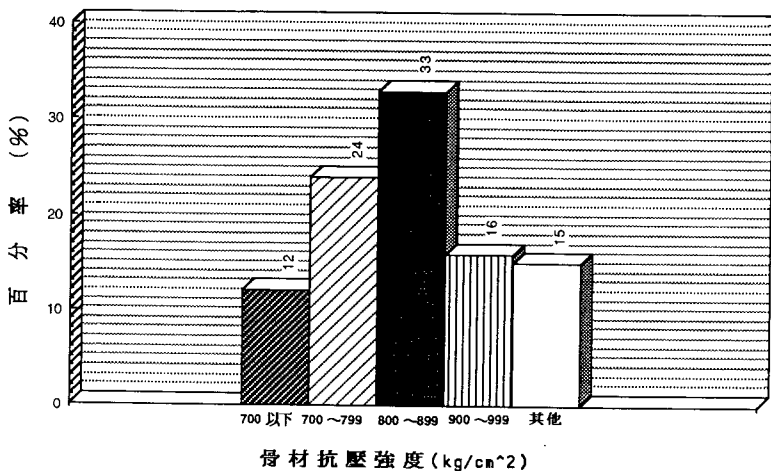


4-5 粗骨材之最大粒徑 □(1)3/8英吋 □(2)3/4英吋 □(3)1英吋

□(4)1 1/2英吋 □(5)其他



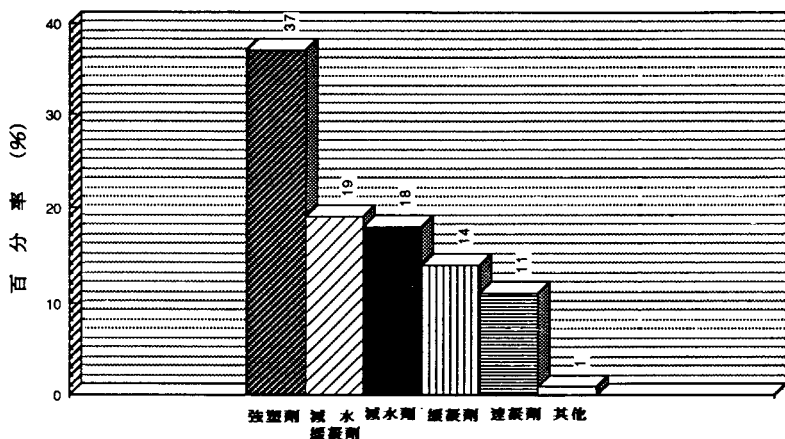
- 4.6 骨材之平均抗壓強度
- (1) 700kg/cm² 以下
 - ▨ (2) 700~799kg/cm²
 - ▧ (3) 800~899kg/cm²
 - ▩ (4) 900~999kg/cm²
 - (5) 1000kg/cm² 以上



對於骨材方面的要求如下：

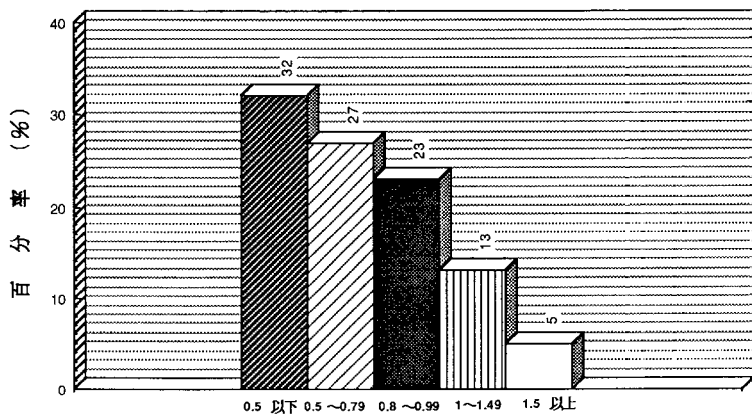
- 對於細骨材細度模數(FM)之要求以2.7~2.99之36%及2.3~2.49之29%居首位；高強度混凝土其細骨材細度模數因為含有高量水泥及波索蘭摻料，並且因含水量較低，使用較細骨材，將影響工作性，因此一般要求較高。
- 而對粗骨材最大粒徑的要求，以3/4英吋之40%居首位，1英吋之27%其次，亦可看出國人認為欲達到高強度混凝土其粗骨材最大粒徑要求需較大，這也是必須加以修正的，因為粒徑愈大，則界面愈小，鍵結力將受到影響。
- 對於骨材之平均抗壓強度要求，以800~899kg/cm²之33%佔第一位，700~799kg/cm²之24%居其次，可看出欲達到高強度混凝土其骨材之平均抗壓強度亦較高。

4-7 使用之化學摻料 二(1)速凝劑 二(2)緩凝劑 二(3)減水劑
 二(4)減水緩凝劑 二(5)強塑劑 二(6)其他



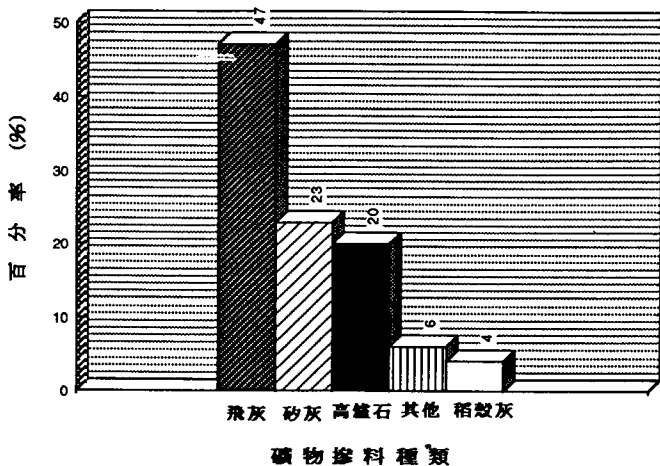
化學摻料種類

4-8 添加強塑劑(SP)與水泥重量百分比 二(1)0.5%以下 二(2)0.5%~0.79%
 二(3)0.8%~0.99% 二(4)1%~1.49% 二(5)1.5%以上

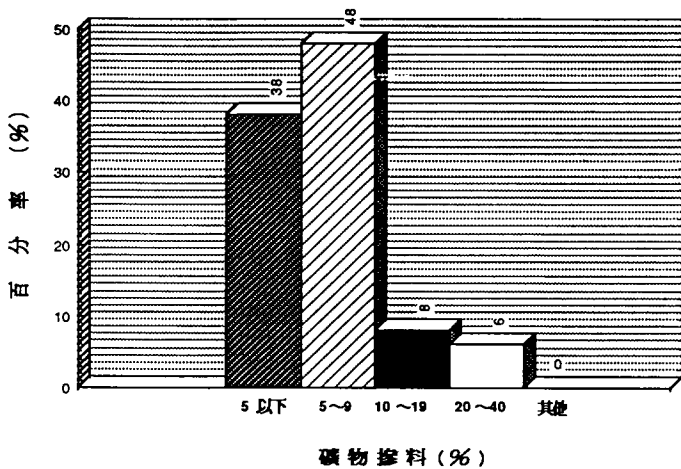


強塑劑與水泥重量比 (%)

4-9 使用之礦物摻料 (1)飛灰 (2)高爐石 (3)稻殼灰 (4)矽灰
 (5)其他



4-10 使用礦物摻料之百分比 (1)5%以下 (2)5%~9% (3)10%~19%
 (4)20%~40% (5)其他

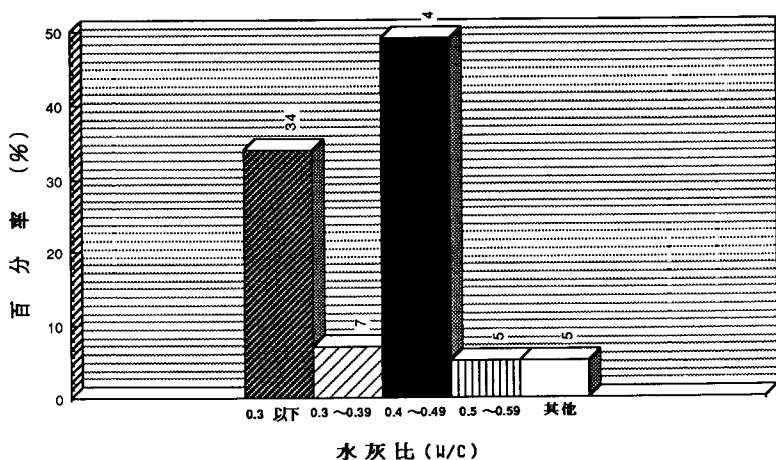


材料要求方面，對於摻料之要求如下：

- 對於添加之化學摻料以強塑劑之37%佔第一位，減水緩凝劑之19%及減水劑18%居次，可看出受調人認為對於提高混凝土強度最常使用的摻料是強塑劑，其次是減水緩凝劑及減水劑。
- 對於添加強塑劑(SP)與水泥重量百分比0.5%以下之32%居首位，重量百分比0.5%~0.79%之27%及重量百分比0.8%~0.99%之23%居次，可看出國內添加強塑劑(SP)與水泥重量百分比以0.5%最多，事實上強塑劑用量在超高強度上可以超過1%以上，視減水程度及工作性而定。
- 對於添加礦物摻料以提高混凝土強度方面，添加飛灰之47%佔第一位，添加矽灰之23%及高爐石之20%居次，可看出國內使用飛灰礦物摻料以達到高強度混凝土的趨勢及觀點。
- 對於添加礦物摻料之百分比以5%~9%之48%居首位，百分比5%以下之33%居次，可看出一般添加礦物摻料，以增加混凝土強度之添加量以5%~9%最多，然以國外之資料顯示添加量可以更高。

4-11 水灰比 □ (1) 0.3以下 □ (2) 0.3~0.39 □ (3) 0.4~0.49

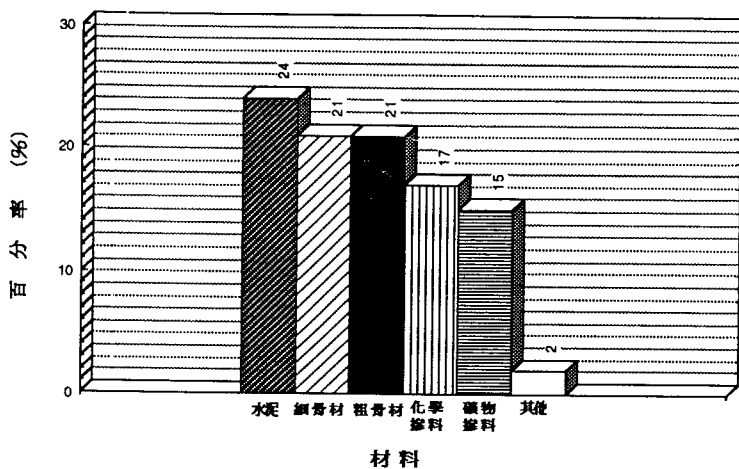
□ (4) 0.5~0.59 □ (5) 0.60以上 _____



對於水灰比之要求，以水灰比0.5~0.59之53%居首位，水灰比0.4~0.49之24%居次。欲達到高強度混凝土，實際上其水灰比視所需強度而變，基本上低於0.5以下。

5. 請問您，以目前國內生產之那項材料可用以製造高強度混凝土？（可複選）

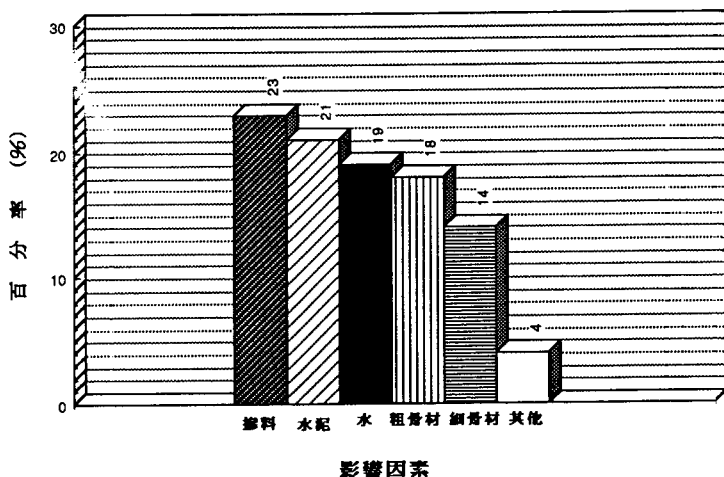
- (1) 水泥 (2) 細骨材 (3) 粗骨材 (4) 化學摻料 (5) 礦物摻料
 (5) 其他 _____



對於目前國內生產之材料可用以製造高強度混凝土上，以水泥之24%，粗骨材之21%及化學摻料之21%居首位，因為本問題為複選，故可看出受調查人員認為國內之材料均可製造出高強度之混凝土。

6. 請問您，影響高強度混凝土強度之最大因素為何？

- (1) 水泥 (2) 水 (3) 細骨材 (4) 粗骨材 (5) 摻料
 (6) 其他_____



對於影響高強度混凝土強度之最大因素，以摻料之23%最高，水泥之21%及粗骨材之19%其次，可看出受調人員認為摻料之添加為影響目前國內高強度混凝土之最大因素，因為添加摻料會改善混凝土工作度，減少搗實上困擾，使水灰比降低，而提高強度。

附錄 1 - 3 高強度混凝土設計及施工準則 初步研究

- 生產及品管技術問卷調查表

附錄 1 - 3

高強度混凝土設計及施工準則初步研究

生產及品管技術問卷調查表

各位先生／女士：您好

為瞭解國內使用高強度混凝土之工程環境及其發展潛力，藉之研擬研究架構及推廣方向以提升工程品質確保建設成果，特舉辦此次問卷調查。本調查資料純粹作為學術研究之參考不移地用懇請 閣下惠賜助於下列問題中選出您認為最恰當的答案，非常感謝您的合作及寶貴意見敬請在合適的答案前之方格“”中打勾或在_____處簡答下列各題：

1. 請問您的

1-1. 年齡 (1) 20-29 (2) 30-39 (3) 40-49 (4) 50以上

1-2. 學歷 (1) 高工、高中 (2) 大專 (3) 碩士 (4) 博士

1-3. 職業類別 (1) 材料供應 (2) 施工 (3) 工程設計 (4) 工程管理
 (5) 工程研究 (6) 其他_____

1-4. 工程經驗 (1) 0-5年 (2) 5-10年 (3) 10-20年 (4) 20-50年

2. 請問您曾使用生產過的混凝土之抗壓強度 (f_c') 最高為多少 kg/cm^2 (psi) ?

(1) 210(3000) (2) 280(4000) (3) 350(5000) (4) 420(6000)

(5) 其他_____

3. 您認為在目前國內一般對品質管制的制度如何？

(1) 很好 (2) 還好 (3) 普通 (4) 不好 (5) 很差

4. 您認為在貴單位對品質管制的制度是：

(1) 很好 (2) 還好 (3) 普通 (4) 不好 (5) 很差

5. 依您判斷在目前國內的工程環境下可以用之混凝土抗壓強度最高為多少 kg/cm^2 (psi) ?

(1) 210(3000) (2) 280(4000) (3) 350(5000) (4) 420(6000)

(5) 其他_____

6. 就您認為高強度混凝土之生產技術與一般混凝土是否有所不同？

(1) 是 (2) 否

7. 就您認為高強度混凝土之品質管制要求與一般混凝土是否有所不同？

(1) 是 (2) 否

8. 您認為國內生產高強度混凝土是否可達成品質管制上的要求：

(1) 絕對可以 (2) 應該可以 (3) 可能有問題 (4) 不可能 (5) 不知道

9. 利用泵送方式輸送混凝土，依您的工地經驗，最合適之坍度為：
 (1) 12cm (2) 15cm (3) 18cm (4) 20cm (5) 其他 _____
10. 您是否生產（或設計）過添加強塑劑（S-P）之混凝土
 (1) 不曾使用過 (2) 很少 (3) 常用
11. 您認為未來使用高強度混凝土的可能性：
 (1) 必然 (2) 很可能 (3) 可能 (4) 不一定 (5) 不會
12. 請問您將來高強度混凝土在國內推廣應用之必要性為：
 (1) 很有必要 (2) 必要 (3) 尚必要 (4) 無必要 (5) 不知道
13. 請問您現有對高強度混凝土知識之獲取方式為：（可複選）
 (1) 學校上課 (2) 參加研討會或講習班 (3) 購書自修 (4) 到圖書館找參考資料
 (5) 由廠商提供資料 (6) 其他 _____
14. 若要在國內推廣高強度混凝土之應用，您建議有關單位從事何種活動：（可複選）
 (1) 研討會或講習班 (2) 在職訓練 (3) 資格檢定 (4) 研究發展
 (5) 參觀見習 (6) 其他 _____
15. 貴公司是否有意參與國內研究使用高強度混凝土之推動工作，並願出部份經費協助學術單位推展此項工作：
 (1) 願意 (2) 不願意 (3) 原因 _____
16. 其它意見：

謝謝您！！

交通大學土木工程研究所材料組 敬上

新竹市大學路1001號

交通大學土大系

彭麗南 教授 收

附錄1-4 高強度混凝土設計及施工準則 初步研究

- 國內高強度混凝土使用可行性評估
問卷調查表

附錄 1 - 4

高強度混凝土設計及施工準則初步研究

國內高強度混凝土使用可行性評估問卷調查表

各位先/女士：您好

為瞭解國內使用高強度混凝土之工程環境及發展潛力，藉之研擬研究架構及推廣方向以提工程品質確保建設成果，特舉辦此次問卷調查。本調查資料純粹作為學術研究之參考不移他用，懇請 閣下惠賜協助於下列問題中選出您認為最恰當的答案，非常感謝您的合作及寶貴意見！敬請在合適的答案前之方格中打勾或在_____處簡答下列各題：

1. 請問您的

- 1-1 年齡 (1) 20~29 (2) 30~39 (3) 40~49 (4) 50以上
- 1-2 學歷 (1) 高工高中 (2) 大專 (3) 碩士 (4) 博士
- 1-3 職業類別 (1) 材料供應 (2) 施工 (3) 工程設計 (4) 工程管理
 (5) 工程研究 (6) 其他

2. 請問您曾使用過的混凝土之抗壓強度 (f_c') 最高為多少 kg/cm^2 (psi)?

- (1) 210(3000) (2) 280(4000) (3) 350(5000) (4) 420(6000)
 (5) 其他

3. 依您判斷在目前國內的工程環境下可以採用之混凝土抗壓強度最高為多少 kg/cm^2 (psi)?

- (1) 210(3000) (2) 280(4000) (3) 350(5000) (4) 420(6000)
 (5) 其他

4. 您認為混凝土之抗壓強度多少 kg/cm^2 (psi) 以上才算高強度混凝土而須要另設規範規定之?

- (1) 420(6000) (2) 490(7000) (3) 560(8000) (4) 630(9000) (5) 其他

5. 依據美國 ACE 363 技術委員會規定，抗壓強度 $420\text{kg}/\text{cm}^2$ (6000 psi) 以上之混凝土為高強度混凝土，據您所知，現場澆注高強度混凝土，國內曾用於：(可複選)

- (1) 橋梁 (2) 基樁 (3) 高樓結構體 (4) 穀倉 (5) 港灣工程 (6) 其他

6. 就您所知工程採用高強度混凝土最主要之原因為：(可複選)

- (1) 增加使用空間 (2) 增大跨距 (3) 節省經費 (4) 減輕笨重
 (5) 增加耐久性 (6) 縮短工期 (7) 其他

7. 請問您高強度混凝土施工之品質對工程品質之影響程度為：

- (1) 影響很大 (2) 有影響 (3) 略有影響 (4) 無影響 (5) 不知道

8. 請問您目前國內頒行之設計規範可適用於高強度混凝土設計之程度為：

- (1) 完備 (2) 尚可 (3) 不足 (4) 不知道

內政部建築研究所籌備處專題研究計畫成果報告
計畫名稱：高強度混凝土設計及施工準則初步研究

高強度混凝土設計及施工準則 初步研究

計畫編號：A09-22

執行期間：78年11月至79年8月

主持人：葉基棟博士

顧問：楊裕球先生

共同主持人：彭耀南教授 陳清泉教授 黃兆龍教授

研究委員：高健章教授 林英俊教授 陳振川教授

林建宏教授 趙文成教授 方一匡教授

助理人員：王和源先生 林仁益先生 廖啓忠先生

蘇南先生 阮淑鵬小姐 陳燕青小姐

吳淑芬小姐 黃足滿小姐 林綾音小姐

魏衍先生

委託單位：內政部建築研究所籌備處

執行單位：中國土木水利工程學會

中華民國七十九年十二月

序

中國土木水利工程學會歷年來即集合產、官、學、研各界人士，配合國家經濟建設政策殫精竭慮奉獻心力。近年來我國經濟建設發展迅速，科技水準之要求日益提昇，尤其目前政府正大力積極推動六年經濟建設計畫，對吾儕土木及水利工程人員無疑是一種新的挑戰，如何利用「新觀念、新材料、新技術、新工法」來創造「生產力」是當前首要的課題。

本學會混凝土工程委員會，為因應國內工程界在高強度混凝土技術方面之迫切需求，毅然接受內政部建築研究所籌備處之委託，協同國內學術界參與高強度混凝土之研究，實令人鼓舞。為使高強度混凝土能在國內確實生根，本研究以系統化的評估及探討國內外的研究成果及經驗，經一年的努力完成本研究報告，內容詳實，相信對國內工程界當有所助益，尚祈學者專家先進不吝賜教。

中國土木水利工程學會理事長

程 禹 謹序

中華民國八十年五月

誌 謝

近年來由於混凝土工程技術之進步，使高強度混凝土在營建工程上之應用及需求日增，高強度混凝土應用於高層建築，可減少建築物本身之重量，除大幅降低基礎費用外，並減少構材之尺寸而增加建築物可使用之空間及增進美觀。高強度混凝土之推廣應用有其實用上之需要，尤其面對目前國內對高層結構的需求愈趨普遍之際，有必要擬定高強度混凝土設計及施工準則草案，以做為未來設計施工的準繩。

在「中國土木水利工程學會」現任 程理事長禹及前任 齊理事長寶錚的鼓勵及付託，以及 楊裕球顧問之指導，由混凝土工程委員會負責彙集國內研究菁英，接受內政部建築研究所籌備處的委託，進行「高強度混凝土設計及施工準則初步研究」，本研究承蒙國內學者專家之指導及參與研討，方能順利完成本研究報告，期望對國內營建工程界有所貢獻，並藉此提昇混凝土品質，使其成為高科技產物之一，更盼望產、官、學、研各界共襄盛舉，參與推廣及研究工作，共同促進改良未來混凝土工程品質。

值此國家推動六年經建之際，願將此研究報告貢獻給經建業界，期能對國家經濟建設推向高品質、高價位及高科技的目標而略盡綿薄心力，共同建設更美好，更進步的未來。

最後由衷感謝所有參與研究、討論此項研究案之顧問、研究人員及助理們的辛勞與奉獻。本研究報告之完成，就參與工作同仁而言，雖已全力以赴，疏漏在所難免，尚祈學者專家不吝指正。

中國土木水利工程學會
混凝土工程委員會主任委員

葉 基 棟 謹誌

高強度混凝土設計及施工準則 初步研究

葉基棟^{博士}

陳清泉^{教授} • 彭耀南^{教授} • 黃兆龍^{教授}

中國土木水利工程學會

摘 要

高強度混凝土材料為未來營建材料之主流，為了使其能確實在國內生根，有必要系統化評估及探討國內外相關研究成果及經驗。本研究首先是參考ACI 363資料，評估及分析國內外有關高強度混凝土設計及施工之文獻，接著針對國內的現況來選擇及分析高強度混凝土組成材料的特性及品質之要求，同時瞭解生產技術及製成品管的方法，經由分析以獲得一些相關有待探討高強度混凝土結構行為及力學性質之研究子題。本計畫重點在探討及瞭解高強度混凝土設計及施工之相關資料如材料性質、配比、配料、拌合、輸送、澆置、養護等控制程序。至於高強度混凝土結構行為之瞭解則有賴進一步深入研究。

Preliminary Study on the Design and Construction Guidelines of High Strength Concrete

ABSTRACT

High-strength concrete (HSC) will be the mainstream of construction materials in the future. For practical applications, it is requested at present to evaluate and study both academic and empirical knowledge of **HSC** base on the research result did by domestic and foreign research institutes. In this research project, building code and specifications concerning **HSC** from foreign document will be assessed at first. Next, **HSC** material properties and its quality requirements will be studied under local base and the related criteria will be set up or selected. Finally, concrete technology/process and quality control procedure will be analyzed. During the research, some topics about structural characteristics and mechanical behavior of **HSC** also will be reorganized. In this study, the design and building codes concerning **HSC** process control methods such as material proportion, batching, mixing, transportation, placing, and curing will be reviewed. As for the understanding of other structural properties and behaviors, further study will be required.

Key Words: *high-strength concrete, building code, quality control, concrete technology/process.*

目 錄

摘要

目錄

第壹篇 高強度混凝土設計及施工準則草案

第一章 引言

1 - 1 歷史背景	1
1 - 2 目標及定義	1

第二章 材料的選擇

2 - 1 引言	3
2 - 2 水泥	4
2 - 3 化學摻料	4
2 - 4 細粒化礦物摻料	6
2 - 5 骨材	8
2 - 6 水	9
2 - 7 參考文獻	10

第三章 混凝土拌合配比

3 - 1 引言	14
3 - 2 規定強度	14
3 - 3 測試齡期	15
3 - 4 水灰比	17
3 - 5 水泥含量	18
3 - 6 骨材配比	25
3 - 7 摻料配比	27
3 - 8 工作性	28
3 - 9 試拌	29

3 - 1 0	參考文獻	38
第四章	配料、拌合、輸送、澆置、養護及控制程序	
4 - 1	引言	34
4 - 2	配料	34
4 - 3	拌合	35
4 - 4	輸送	36
4 - 5	澆置步驟	37
4 - 6	養護	38
4 - 7	品質保證	39
4 - 8	品控程序	40
4 - 9	強度量測	42
4 - 1 0	參考文獻	44
第五章	高強度混凝土的特性	
5 - 1	引言	48
5 - 2	單軸向抗壓應力－應變行為	48
5 - 3	彈性模數	48
5 - 4	波松比	51
5 - 5	破裂模數	51
5 - 6	劈裂強度	52
5 - 7	疲勞強度	52
5 - 8	單位重	52
5 - 9	熱導性質	52
5 - 1 0	水化熱	56
5 - 1 1	強度獲得速率	56
5 - 1 2	耐凍融性質	56
5 - 1 3	乾縮	56
5 - 1 4	潛變	61

5 - 1 5	參考文獻	61
第六章 營建設計所須考慮的要素		
6 - 1	引言	67
6 - 2	軸心載重之柱	67
6 - 3	梁與版	77
6 - 4	偏心柱	92
6 - 5	結語	93
6 - 6	參考文獻	95
第七章 經濟考慮		
7 - 1	引言	101
7 - 2	成本研究	101
7 - 3	實例說明	103
7 - 4	其他研究	104
7 - 5	材料選擇	104
7 - 6	品質管制	104
7 - 7	運用範圍	105
7 - 8	結語	106
7 - 9	參考文獻	106
第八章 應用		
8 - 1	引言	108
8 - 2	建築物	108
8 - 3	橋樑	108
8 - 4	特殊應用	111
8 - 5	有潛在力的運用場合	112
8 - 6	參考文獻	112
第九章 結論		

第貳篇 高強度混凝土之應用評估

第一章 引言

1 - 1	高強度混凝土之特性	120
1 - 2	國內高強度混凝土之需求性	120
1 - 3	國內高強度混凝土之問題點	122
1 - 4	國內高強度混凝土研究獲展現狀及趨勢	124
1 - 5	參考文獻	125

第二章 材料品質要求評估

2 - 1	前言	126
2 - 2	水泥 (Cement)	126
2 - 3	骨材	130
2 - 4	化學摻料	147
2 - 5	波索蘭材料	147
2 - 6	水	148
2 - 7	參考文獻	149

第三章 生產及品質技術評估

3 - 1	前言	151
3 - 2	人力素質與工程經驗	151
3 - 3	材料選擇	152
3 - 4	配比設計	155
3 - 5	拌合	155
3 - 6	輸送	157
3 - 7	澆置	158
3 - 8	搗實	158
3 - 9	養護	159
3 - 10	品質保證	159
3 - 11	品質控制	160

3 - 1 2	參考文獻	161
第四章	國內使用可行性評估	
4 - 1	前言	163
4 - 2	調查內容及對象	163
4 - 3	問卷製作及回收	163
4 - 4	問卷調查之結果	164
4 - 5	建築技術規則之限制探討	183
第五章	結論與建議	
	附錄一	
	附錄二	

第壹篇 高強度混凝土設計及施工準則草案

圖 目 錄

圖 2-1 水泥對混凝土抗壓強度的影響	3
圖 3-1 不同品牌水泥對混凝土抗壓強度的影響	19
圖 3-2 不同配比之混凝土強度與水灰比關係圖	20
圖 3-3 9000 psi (62Mpa) 混凝土強度於實驗室與工地澆置之強度比較	21
圖 3-4 因輸氣而降低強度	23
圖 3-5 骨材最大粒徑對混凝土強度之影響	24
圖 5-1 混凝土抗壓應力應變曲線	49
圖 5-2 常重混凝土軸向應力與軸向應變及側向應變之關係	50
圖 5-3 混凝土彈性模數與抗壓強度之關係	53
圖 5-4 根據破裂模數推算之抗拉強度	54
圖 5-5 根據圓柱試體劈裂試驗之抗拉強度	55
圖 5-6 高強度混凝土工地澆置試體溫度歷程圖	57
圖 5-7 由Water-Tower Place混凝土所測溫度歷程	58
圖 5-8 濕滄石灰岩骨材混凝土強度發展	59
圖 5-9 密封及非密封混凝土試體潛變係數與時間關係圖	60
圖 6-1 混凝土與鋼筋應力應變曲線	68
圖 6-2 螺箍筋對柱體加勁產生之強度增量	73
圖 6-3 4 ϕ \times 16吋螺箍筋加勁常重混凝土柱之應力應變曲線	74
圖 6-4 混凝土矩形斷面梁應力分佈	79
圖 6-5 應力塊參數 R_2 / R_1 R_3 對混凝土抗壓強度的關係	80
圖 6-6 計算梁撓曲強度 M_u 值之比較	81
圖 6-7 混凝土極限撓曲應變與抗壓強度關係	82
圖 6-8 ACI 318規範解說梁長期變位變化之乘數	90
圖 6-9 不同強度混凝土梁長期撓曲乘數	91

圖 6-10 標稱彎矩強度 M_u (ft-kip).....	94
圖 7-1 柱成本圖.....	102

表 目 錄

表 3-1 單位體積混凝土之粗骨材體積	26
表 6-1 ACI 318規定螺箍筋設計產生之圍束應力	75
表 6-2 A系列梁之韌性比	84
表 6-3 B系列梁之韌性比	85
表 8-1 使用高強度混凝土之建築物	109
表 8-2 使用高強度混凝土之橋梁	110

第貳篇 高強度混凝土之應用評估

圖 目 錄

圖 1-1 高強度混凝土之應用評估	119
圖 2-1 混凝土強度的發展隨水灰比及齡期而變(第一種水泥)	127
圖 2-2 水灰比與抗壓強度之關係示意圖, 圖中虛線顯示摻質不佳造成強度的折減現象	127
圖 2-3 水泥細度對強度之影響($W/C=0.4$)	128
圖 2-4 國內主要廠牌水泥強度發展圖	129
圖 2-5 強度效率包括曲線與最大骨材粒徑之關係	130
圖 2-6 最大骨材粒徑對不同混凝土抗壓強度之影響	131
圖 2-7 台灣主要河川分佈圖	133
圖 2-8 台灣省各地區主要河川粗骨材磨損率分佈圖	140
圖 2-9 台灣省各地區主要河川粗骨材吸水率分佈圖	142
圖 2-10 台灣省各地區主要河川粗骨材比重分佈圖	143
圖 2-11 台灣北、中、南及東部地區鹼-骨材反潛能圖	146
圖 2-12 各類型波索蘭材料之反應速率	148

表 目 錄

表 1-1 傳統混凝土與高強度混凝土之比較.....	121
表 2-1 台灣主要河川砂石資源及品質狀況.....	135
表 2-2 台灣陸上砂石資源岩心性質.....	137
表 2-3 一般礦物傳波速度(m/sec)	138
表 2-4 台灣省各地區暨北中部主要河川粗骨材磨損率表.....	139
表 2-5 台灣地區河川粗骨材比重資料.....	144
表 2-6 拌合水中不潔物質之容許值.....	149
表 3-1 國內某些大專院校近年來所發展出之典型高強度混凝土配比.....	155