

## 微奈米材料在水利工程之應用

林得志

水利技師兼黎明工程顧問股份有限公司董事長

## 一、前言

十幾年前台灣科技界興起一股奈米熱，報章雜誌經常可看到奈米的相關報導，奈米研討會盛行，知名大學紛紛成立奈米研究中心，高科技廠商也進入奈米材料的研發，筆者身歷其境，買了幾本奈米書籍來看，參加二次研討會，也兩次前往日本東京參觀第二、三屆國際奈米科技展覽會。

進入奈米領域，無非想在水利工程的專業裡注入一點強壯劑。

台灣多雨，河川陡急，地質鬆散的惡劣環境，考驗著水利工程師的能耐。當新完工的攔河堰，經歷一次大洪水就被沖刷、磨損成坑坑洞洞，鋼筋暴露，慘不忍睹時，對設計者情何以堪。

近 50 年來電子科技突飛猛進，但是水利工程最重要的材料—混凝土進步緩慢。本文將研討以微奈米材料摻入混凝土，增加混凝土的抗壓強度、耐磨度與水密性，提昇混凝土的品質，延長水利結構物的壽命。

## 二、微奈米概述

## 1. 微奈米尺度

微米( $\mu\text{m}$ )、奈米(Nano meter, 簡寫 nm) 是尺寸單位

1 公尺(m) = 100 公分(cm)

1 公分(cm) = 10 公厘(mm)

1 公尺(m) = 1,000 公厘(mm)

1 公厘(mm) = 1,000 微米( $\mu\text{m}$ )

1 微米( $\mu\text{m}$ ) = 1,000 奈米(nm)

1 公尺(m) = 1,000,000,000 奈米(nm)  
=  $1 \times 10^9$  nm

1 奈米(nm) =  $1 \times 10^{-9}$  公尺(m)

人的頭髮直徑

$0.1\text{mm} = 100 \mu\text{m} = 100,000\text{nm}$

1nm 相當於 4 個原子的直徑，是 10 個氫原子並排起來的長度。

金屬原子 0.3~0.4nm

紅血球  $7,000\text{nm} = 7 \mu\text{m}$

精蟲  $3,000\text{nm} = 3 \mu\text{m}$

愛滋病毒 110nm

PVC 保鮮膜  $15,000\text{nm} = 15 \mu\text{m}$

奈米尺度以人類的眼睛是無法看清楚，在水利、土木工程的设计圖說僅用到公分(cm)來表示尺寸，機械工程也用到公厘(mm)而已。

## 2.人類的第三度智慧空間

宏觀領域	太空
中觀領域	地球
微觀領域	奈米

## 3.改變世界的四次工業革命

### 第一次工業革命

1840 年代，英國廣泛應用蒸汽機，以機器代替手工生產，促進了紡織業與採礦業的發展，英國成為工業國家，然後法、德、俄、美跟進直至 19 世紀 80 年代。第一次工業革命的影響力席捲整個歐洲的政治、經濟、社會、文化、科學、輕重工業產生巨大變革。

### 第二次工業革命

19 世紀末期以內燃機與發電機替代了蒸氣機，藉由燃燒煤或石油，而產生穩定和大量的電力，使電力成為現代文明的主要能源。

### 第三次工業革命

進入 20 世紀中後期，人類開始使用電子計算機及資訊網路。

### 第四次工業革命

現在全球視奈米科技為下一波產業技術革命。

## 4.奈米科技(nanotechnology)的發展史

➤ 1959 年，著名物理學家、諾貝爾獎得主理查德·費曼(Richard Feynman)，在美國加州理工學院的演講，在那個以大便是美的太空時代，他的講題卻是：「在微小世界仍有許多的空間」，他說：「操縱與控制微小物體是可能的，

因為物體被縮小後，在微小世界仍有許多空間」，「如果人類能夠在原子/分子尺度上來加工材料和製造原件，將有許多令人驚異的新發現」這是關於奈米科技的最早夢想。

- 1962 年，日本久保氏(Kubo)提出超微粒子的量子限制理論，推動了向奈米尺度的探索。奈米金屬粒子的能量不連續，當金屬奈米粒子的原子數目減少，將使金屬原子間隙加大，而金屬奈米粒子的電子所具有的連續能量，將被中斷而成不連續的能量。以物理學家的角度來說，因金屬的電子能量間隙增大，使能量由連續變成不連續的能階，由於這個能量不連續的特性，奈米粒子的物理特性不同於金屬塊。
- 1980 年代初期，美國 IBM 位於瑞士蘇黎士的實驗室，賓伊和勞爾兩位科學家發明掃描穿隧式顯微鏡，可以得到物體表面原子排列的形貌，奈米技術才真正實現。
- 1984 年，德國科學家葛雷特(H.Gleiter)等人採用惰性氣體蒸發冷凝法，製出鐵、銅、鉛及二氧化鈦等金屬奈米顆粒。
- 1985 年賓尼和美國史丹福大學的奎特(C.Quate)發明原子顯微鏡，能觀察到奈米尺度的物體，甚至可看到原子。
- 1989 年，美國史丹福大學搬動原子

團寫下了史丹福大學的英文名字。

- 1990年，日本首次發現奈米碳管(nano carbon tube)，它的質量是相同體積鋼的1/6，而強度卻是鋼的10倍。
- 1992年，日本研製能進入人體血管進行手術的微型機器人，從而引發一場醫藥革命。
- 1993年，中國科學院北京真空物理實驗室自如地操控原子寫出「中國」二字，顯示中國在奈米科技領域佔有一席之地。
- 1994年，美國著手研製「麻雀」衛星，「蚊子」導彈、「蒼蠅」飛機、「螞蟻」士兵等。
- 1995年，科學家証實了奈米碳管優良的場發射性能。
- 1996年，中國實現奈米碳管大面積定向生長。
- 1997年，法國全國科學研究中心和美國IBM公司共同研製成功第一個分子級放大器，其活性部分是一個直徑只有0.7nm的碳分子，因而把電子元件微型化的係數擴大了1萬倍，奈米技術開始進入實用階段。
- 1998年，被譽為「稻草變黃金」的奈米金鋼石粉在中國研製成功。同年，美國明尼蘇達大學和普林斯頓大學成功地製備出量子磁碟。
- 1999年，韓國製成奈米碳管陰極彩色顯示器樣品。

- 1999年7月，美國加州大學與惠普公司合作研製成功100nm晶片。
- 2000年，日本製成奈米碳管場發射器樣管，美國製出量子計算機和生物計算機，美國柯達公司成功地研製了一種既具有顏料又具有染料功能的新型奈米粉體，將給彩色印像業帶來革命性的變革。
- 2003年，台積電晶片製程由130nm進入90nm。
- 2012年，台積電已進入28nm製程，DRAM廠瑞晶與力晶已進入30nm製程。

## 5. 奈米物質的特性

### (1) 表面效應

當物體本身尺寸越小，它的總表面積與質量的比值(比表面積  $m^2/g$ )就會越大，這代表原子在表面上數目越多，原子多了原子力也變強了。比表面積非常大，所以位於表面的原子非常多，物體表面的原子力很強，造成物體與外界之間的原子作用力大增，從而產生許多不同以往的表面效應的物理現象，這種物理特性可以開發前所未有的高科技技術或產品。

### (2) 小尺寸效應

#### A. 特殊的光學性質

當黃金細粉小於光波波長的尺寸時，便失去原有的光澤而呈黑色。金屬超微粒對光的反射率很

低，利用這個特性可以做為高效率的光熱光電等轉換材料，可以高效率地將太陽能轉變為熱能、電能，也可應用於紅外線敏感元件、紅外線隱形技術等。

#### B.特殊的熱性質

固態金屬的熔點很高，超細微化後熔點將顯著降低。

#### C.特殊的磁學性質

超微顆粒磁性與大塊材料顯著不同，利用磁性超微顆粒的矯頑力特性，已做成高儲存密度的磁記錄磁粉，大量應用於磁帶、磁片、磁卡以及磁性匙等。

#### D.特殊的力學性質

陶瓷材料在一般情況下呈脆性，由奈米超微顆粒壓製成的奈米陶瓷材料卻具有良好的韌性，因為奈米材料具有大的介面，介面的原子排列相當混亂，原子在外力變形

的條件下很容易遷移，因此表現出甚佳的韌性與一定的延展性，使陶瓷材料具有新奇的力學性質。氧化鈣奈米材料在室溫下可以大幅度彎曲而不斷裂。呈奈米晶粒的金屬要比傳統的粗金屬硬3至5倍。至於金屬陶瓷等複合奈米材料則可在更大的範圍內改變材料的力學性質。

### 6.奈米結構材料定義

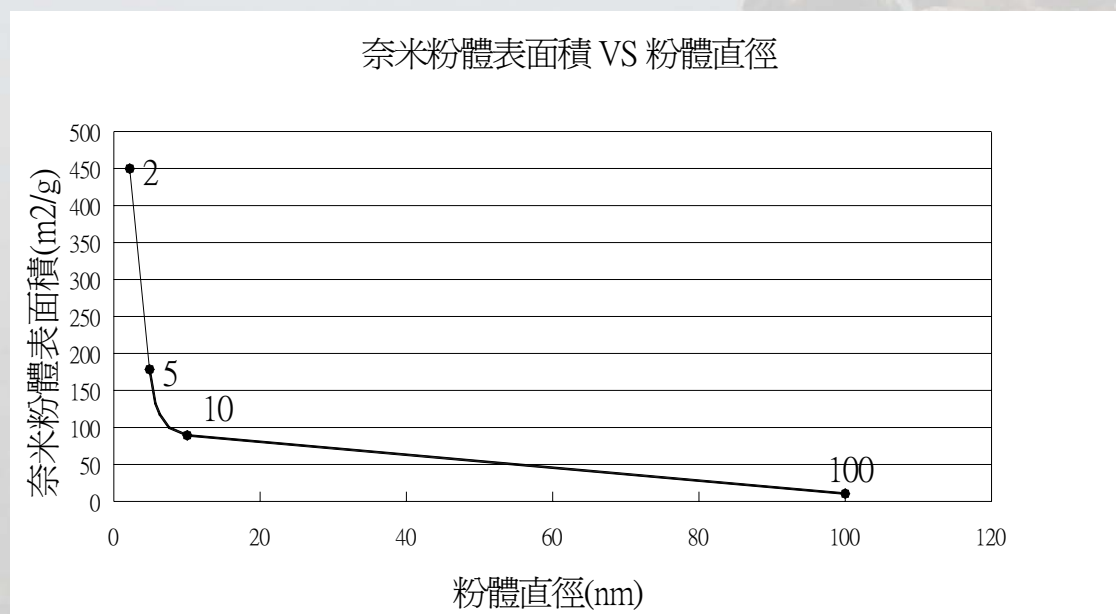
奈米技術：

凡製造、量測、模擬、精密安放和操控小於100奈米級物質者。

奈米結構材料簡稱奈米材料：

原子簇(含晶粒或相)構成至少一維尺寸介於1nm~100nm，故包括原子簇構成之奈米粒子、纖維、顆粒、膜、多層膜或奈米相材料。

### 7.粉體直徑與表面積的關係



量測奈米尺度的粉體直徑所使用的儀器非常昂貴，動輒幾仟萬元，但是量測粉

體的表面積相對容易。茲將奈米粉體表面積與粉體直徑的關係圖列如上圖，供參考。

### 三、傳統產業奈米技術應用概念

(錄自經濟部 2002 年產業技術白皮書)

奈米科技材料之神奇物理與化學特性與理想化產品之開拓潛力，帶來奈米科技研究的大量投入。對著重經濟效益之傳統產業而言，研發角度應充份了解短程內不限於奈米尺寸的定義(1nm~100nm)，而應著重於微細化的效應發揮，及有機/無機材料的融合以開拓綜效

發揮的空間，以擴大應用面及思考空間。如微粒變小，表面積同步變大，表面反應點增多，在透光、傳輸、觸媒反應性、強度等均有強化的空間，因而反應在綜效機能性功能的發揮。

- 不拘泥於“尺寸”定義，著重於微細化之效應發揮
- 有機/無機材料融合，綜效發揮

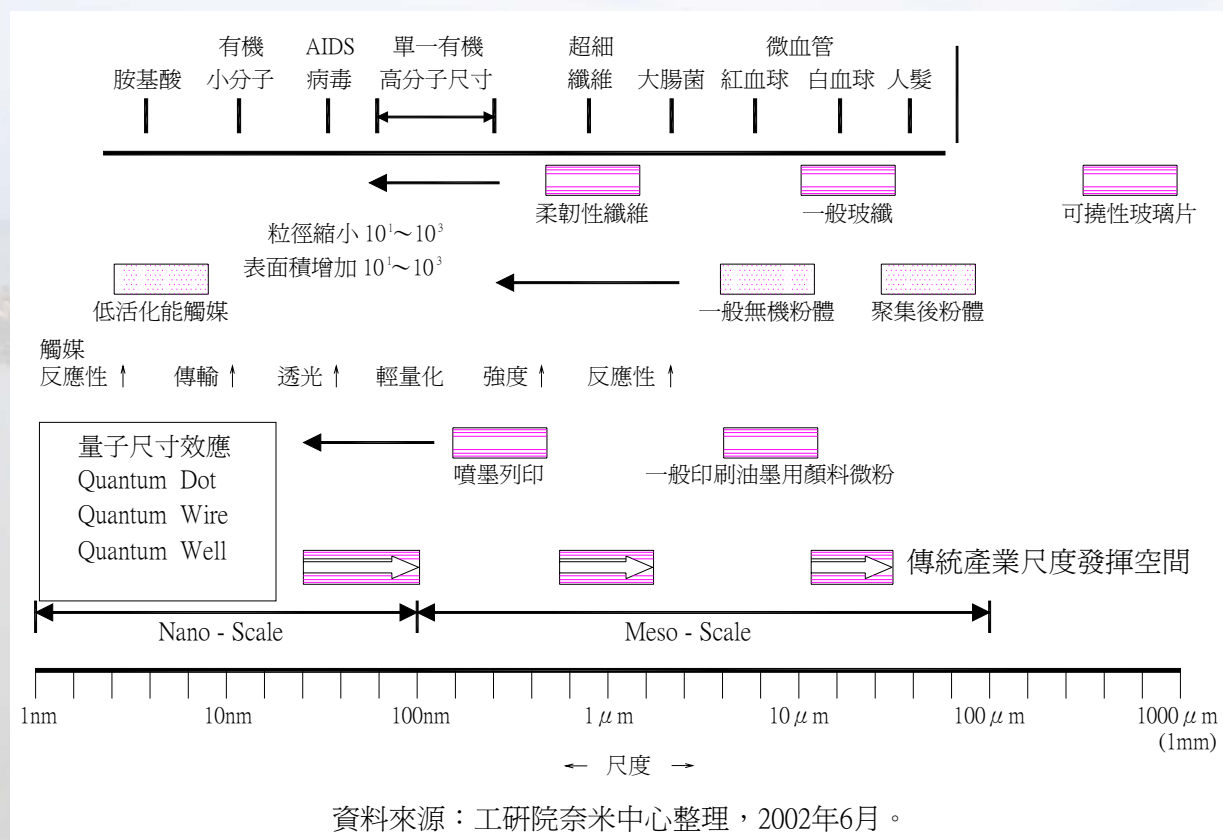
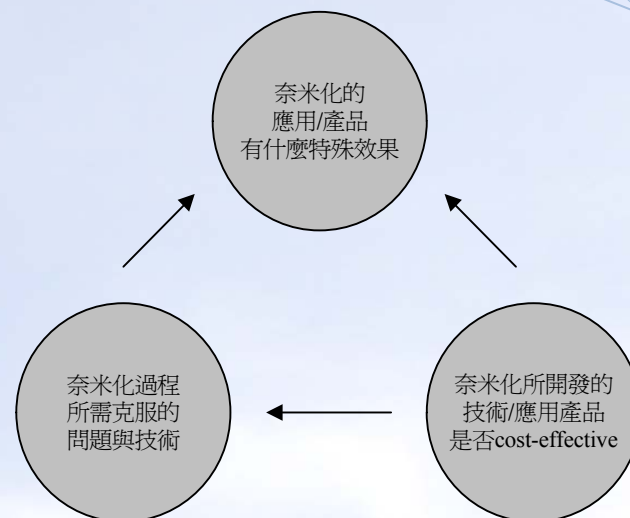


圖 1 傳統工業奈米概念發揮空間

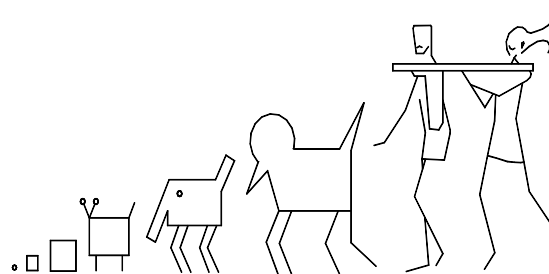
在跨入奈米技術產業應用研發之前，可透過徹底思考下面幾個問題來引導至實用化的路徑；奈米化的應用/產品有甚麼特殊效果？奈米化所開發的技術/應用產品是否符合經濟效益？奈米化過程所需克服的問題與技術為何？將這些問題思考清楚，才能估算奈米技術應用所擁有的空間及挑戰度。



在開發創意方面，可透過兩個途徑切入：

- 師法大自然，見右圖。
- 充份了解材料的基本物性，從中尋求新結構創意及應用發揮。

師法大自然，建立molecular level結構器備能力



Various animals attempting to follow a scaling law

#### 四、奈米材料的取得

奈米粒子材料的製備方法有一氣相沈積法、機械合金法、溫式化學溶液合成法等等，非水利技師所能瞭解，製備出來的粉體非常昂貴，除非用在高科技高價值產品，在土木、水利工程上是不具經濟性的。但是自然界有很多奈米現象：

蓮花效應  
鵝鴨羽毛  
碳 灰  
人骨、DNA、貝殼  
飛 灰  
活 性 碳  
矽 藻 土  
矽 灰

工程師可利用天然界的微奈米材料來增加工程材料的性能。上列的奈米材料之後四項都可做為工程材料。

##### 1. 飛灰

飛灰是燃燒煤炭，從煙囪中取得的灰炆，基本上燃燒煤炭的煙是奈米級的，但是附著在煙囪中又凝結在一起，沒有經過處理，它的細度只與水泥差不多。

飛灰早已做為混凝土的摻料，取代部分水泥，減低水化熱。

##### 2. 活性碳

活性碳的比表面積  $50\text{m}^2/\text{g}$  以上，尤其

椰子殼燒的  $100\text{m}^2/\text{g}$  以上，是奈米材料，已廣泛使用在水淨化處理上。

### 3. 矽藻土

矽藻土(硅藻土)是古代單細胞藻類的化石；乾燥後打成粉體。以三林公司的產品說明如下：

主要化學成份：

$\text{SiO}_2$  85~90%       $\text{Al}_2\text{O}_3$  5~10%

鬆密度                       $0.15\text{g}/\text{cm}^3$

實密度(震動後)       $0.22\text{g}/\text{cm}^3$

粒 徑(平均)               $3.45\mu\text{m}$

顆粒中尚有微孔結構(故單位重很輕)，孔隙已達奈米尺度。

比表面積約               $50\text{m}^2/\text{g}$

吸水(油)率              150~200%

基本特性：顆粒具有特殊的微孔結構，有很大的孔隙度和比表面積，所以有很強的吸附性。質輕、隔音、堅硬、耐磨、耐熱、耐酸等等特性，可廣泛應用於工業上之載體或填加劑，使工業產品品質更優良。

黎明工程顧問公司曾做水泥砂漿試體，摻水泥量之 0.5% 矽藻土，比未摻者 28 天抗壓強度增加約 30%。再做混凝土試體時，強度增加不顯著，可能是火山灰活性不佳所致，所以在混凝土填加物上就不再研發。

矽藻土已普遍使用在助濾劑與水處理劑。

### 4. 矽灰

來源

“矽灰”(silica fume)又叫“矽粉”(silica powder)。冶煉矽鐵合金，由電弧爐所排放的氣體收集而得矽灰。

化學成份

矽灰主要化學成份為玻璃態活性二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )，含量達 85~95%。

物理性質

(1)粒徑：矽灰是超微細粉體，80%粒徑小於  $1\mu\text{m}$ (微米)，在奈米(nm)尺度內 (200nm~1,000nm)。矽灰比表面積約  $25\text{m}^2/\text{g}$ ，水泥為  $0.35\text{m}^2/\text{g}$ ，故矽灰比水泥微細 80 多倍。

(2)顆粒形狀：由於矽灰是從蒸氣冷凝而得，故其粉體顆粒形狀具有非常完美的球狀形態。

(3)比重：2.2~2.5。

(4)單位重：原灰鬆方單位容積重 200~300 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

(5)卜特嵐性質：矽灰具有極強的卜特嵐性質，能和水泥水合作用產生的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  迅速反應生成 C-S-H 膠體，適合作為混凝土的礦物摻料。

## 五、混凝土摻料—矽灰

● 普通混凝土

= 水泥漿 + 骨材  
 / 粗骨材  
 \ 細骨材

● 現代混凝土

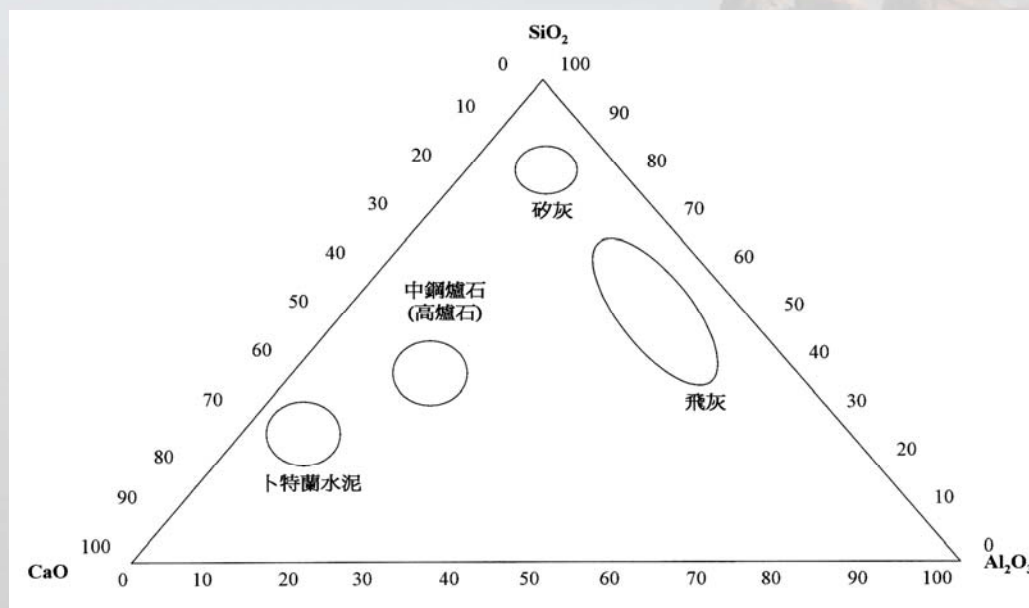
= 水泥漿 + 骨材  
 / 粗骨材  
 \ 細骨材 +  
 礦物摻料(飛灰、爐石粉、矽灰)  
 + 化學摻料(減水劑、早強劑)

水泥、飛灰、爐石粉與矽灰之化學成份與物理性質

項目	水泥 Type I	飛灰	爐石粉	矽灰	備註
SiO <sub>2</sub> (%)	20.1	47.0	33.1	95.0	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	5.4	23.0	13.9	0.1	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	2.4	20.4	0.7	0.03	
CaO (%)	62.0	1.2	42.2	0.5	
MgO (%)	2.6	1.2	6.9	1.1	
SO <sub>3</sub> (%)	3.9	0.7	0.8	0.5	
Na <sub>2</sub> O (%)	0.2	0.5	0.2	0.02	
K <sub>2</sub> O (%)	1.1	3.1	0.3	0.2	
燒失量及其他 (%)	2.3	2.9	1.9	2.45	
比重	3.15	2.53	2.8	2.2	
比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	0.35	0.30	0.35	25.00	

由上表知矽灰與其他三種材料最大的差異在二氧化矽含量特別高，二氧化矽是最堅硬耐磨的材料。另外比表面積達到 25m<sup>2</sup>/g，查表知平均粒徑在 100nm 之內，所以可稱為微奈米材料。

卜特蘭水泥與卜作嵐材料之相關成分





## 六、矽灰混凝土的特性

### 1. 抗壓强度高：

混凝土加入矽灰除產生顆粒料堆積效應和卜特嵐反應，也使水泥漿與骨材界面改善，並使孔隙結構、漿體微觀結構更加緻密而增加強度。

以矽灰摻入混凝土可製作出抗壓強度 12,000psi (840kg/cm<sup>2</sup>) 或者更高之高强度混凝土。

黎明公司以水灰比 0.24 做無摻矽灰與有摻矽灰之拌合試驗，其結果如下：

種類	水泥 (kg/m <sup>2</sup> )	矽灰 (kg/m <sup>3</sup> )	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		
			7 天	14 天	28 天
無摻矽灰	635	0	529	617	654
有摻矽灰	645	97 (水泥量之 15%)	771	847	1,027
強度增加			242	230	373
強度增加百分比			46%	37%	57%

摻水泥量之 15% 之矽灰 28 天抗壓強度為 1,027kg/cm<sup>2</sup> 比無摻矽灰者增強 57%。

### 2. 抗拉強度和抗彎強度：

矽灰混凝土的抗拉強度和抗彎強度比不摻矽灰的混凝土有很大的改善。

倍，摻矽灰 15% 之 7.1 倍，止水效果確實優異。

### 3. 抗滲性：

矽灰微奈米顆粒可填充水泥間隙，摻用矽灰降低混凝土滲透性的效果要大於強度的增加率，特別在矽灰以小量摻加入低強度混凝土時更是如此。從有關試驗資料可知，混凝土內摻水泥量之 5%~10% 矽灰，抗滲性提高 6~11 倍。

### 4. 抵抗化學侵蝕的能力：

添加矽灰可以明顯降低混凝土的滲透性及減少游離 Ca(OH)<sub>2</sub>，因而提高混凝土抗化學侵蝕性能。

### 5. 抗鹼：

矽灰混凝土的緻密性很高，減少水份在混凝土內的滲透速度，使得鹼膨脹反應所需的水份減少，且矽灰可以和混凝土中存在的 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 鹼性物質相結合，減少鹼離子濃度，故可消除或減少鹼和骨材反應。

黎明公司以原灰矽灰製作水泥砂漿試體，試驗透水性，其結果顯示未摻矽灰之滲水量為摻矽灰 10% 之 2.65

### 6. 防止鋼筋腐蝕：

混凝土的高鹼性提供給鋼筋混凝

土中的鋼筋一層鈍化膜，一旦鈍化膜破壞，鋼筋就會發生電化學腐蝕，腐蝕速度取決於混凝土的導電率和水份及氧氣進入混凝土的速度。加入矽灰雖會降低混凝土中的 pH 值，但由於卜特嵐反應及顆粒填補作用，增加混凝土緻密性、降低滲透係數，因而大大增加電阻率，所以抵抗鋼筋腐蝕的性能得到很大改善。

#### 7. 抗凍性：

輸氣混凝土的抗凍性取決於許多因素，例如飽水程度、氣泡體系、膠結材料的類型和用量、水膠比、養護條件及冷卻速度等。不管混凝土凍融在水中或在空氣中，在沒有添加輸氣劑的矽灰混凝土，其凍融耐久性均較

差。但在有輸氣劑的情況下，矽灰取代水泥量到 15% 都有良好的抗凍耐久性。

#### 8. 抗磨蝕性：

矽灰高二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )含量(90%以上)，二氧化矽是堅硬耐磨物質。加入矽灰改善混凝土的抗磨性，主要原因是由於改善了漿體自身的抗磨性、硬度，以及改善水泥漿與骨材界面粘結強度，致使骨材在受到磨損作用時難以被沖蝕。

一般添加矽灰抗磨蝕混凝土與同水泥用量不掺矽灰的混凝土相比較，抗沖磨能力可提高 1 倍左右，抗空蝕能力可提高 3 倍以上。

## 七、矽灰混凝土在水利工程之應用

### 1. 抗磨蝕矽灰混凝土：

通常應用於高速水流水工結構物，如洩洪道的消能池、輸水廊道閘門漸變段等，都採用矽灰混凝土來護面。

台灣河川流短坡陡，水流湍急，含砂量大，攔河堰進水口、固床工等等水工結構物常被磨損致鋼筋暴露，結構體嚴重受損，水利工程師傷透腦筋，找不到適當的耐磨蝕材料來護面，然而矽灰混凝土可以做為良好的護面材料。

混凝土抗壓強度與耐磨性成正

比。

抗磨蝕矽灰混凝土設計抗壓強度可採用  $840\text{kg/cm}^2$ ，以高強度及矽灰的耐磨性能來抗磨蝕。

另外可做為既有水工結構物已遭磨損的修補，由於矽灰混凝土與既有混凝土物性相同，修補後不會脫落。其案例有大甲溪台電士林攔河堰堰面的修補及濁水溪集集攔河堰排砂道磨損的修補。

### 2. 超高強度混凝土：

應用於須要高強度的結構體，可

減少樑柱斷面積，增加可利用空間；減輕結構體重量，對抗震有利。一般設計強度可達 12,000psi (840kg/cm<sup>2</sup>) 以上。其他特殊結構體如長跨距橋樑，亦可應用高強度矽灰混凝土來替代一般傳統混凝土。

### 3. 低熱矽灰混凝土

當大體積混凝土如大壩工程混凝土因水化熱溫升超過溫控要求，而無法加冰或埋水管冷卻時，可採用矽灰、飛灰共摻的辦法，以降低水泥用量和水化熱升溫，縮短工期，確保混凝土品質。

### 4. 耐久性混凝土

港灣工程或海岸工程可使用矽灰混凝土來防止海水氯離子滲透入混凝土中導致鋼筋銹蝕、混凝土剝落破壞結構物。

在廢污水環境，RC 結構物及污水混凝土管，可採用矽灰混凝土以抵抗酸鹼廢水對結構物的破壞。

### 5. 自填充混凝土(SCC)的應用

要使混凝土具有流動性，骨材不分離，使用矽灰混凝土是最佳的方法，因為矽灰顆粒微細，且是圓球形，加入混凝土內工作性很好，塌度 (slump) 25cm 骨材也不會分離。

### 6. 水密性混凝土

矽灰微細的顆粒(比水泥微細 80 倍)填於混凝土的孔隙，使混凝土的水密性倍增，可應用於水壩截水牆、地下截水連續壁、房屋地下室側牆。

另外鋼襯預力混凝土管(pccp 管)製造，鋼線施預力後噴 3cm 厚左右的混凝土，普通混凝土的水密性不足，pccp 管埋設於地下，地下水滲透入使鋼線銹蝕，受高內水壓後有爆管之慮，如採用矽灰混凝土、包裹預力鋼線，大幅增加水密性，可減低爆管的風險，增加 pccp 管的耐久性。

### 7. 噴凝土

隧道工程新奧工法開挖面掛網噴凝土及山坡等採用噴凝土護面可添加矽灰，以降低噴凝土回彈率及提高混凝土強度，又可止水，減少開挖面滲水，增加隧道開挖進度及安全性。

新奧工法之開挖面，傳統以掛鋼線網噴普通混凝土，新近以鋼纖維矽灰混凝土(矽灰填充量為水泥量之 10%) 替代，不再掛網，其優點如下：

- (1) 無需佈掛鋼絲網，大幅縮減外觀砌施工循環時間，提昇施工進度並節省工程費用。
- (2) 抗拉強度及抗彎強度提高，且止水性增強，立即噴佈可增強安全性；抗壓強度較一般噴凝土增加 30% 以上，增加結構安全。

(3)減少噴凝土反彈量，增進施工效率  
(隧道濕式鋼纖維矽灰噴凝土施工  
反彈量平均為 20%以下，較一般  
施工減少量為 50%以上)。

(4)隧道開挖面表面形狀噴佈均勻，可  
避免一般鋼絲網噴凝土襯砌因網格  
阻擋可能造成的空隙。

#### 8.灌漿及地盤改良

岩盤止水灌漿，因岩層裂隙微小，水泥顆粒太粗(比表面積 0.3~0.4 m<sup>2</sup>/g)，水泥漿無法灌入。有用超細水泥(比表面積 1.2m<sup>2</sup>/g)做為灌漿材料，但仍比不上矽灰之微細(比表面積 25m<sup>2</sup>/g)，故為達成完全止水之地盤時，可使用超細水泥添加矽灰做為灌漿材料。

軟弱地盤改良，採用擾動土體與

水泥漿混合，或高壓噴射灌入水泥漿，固結使其強度高於原地盤。地盤改良劑如以水泥、爐石粉及矽灰配合，其漿液將更具滲透性，改良後的地盤強度更高，更具有止水性。

#### 9.水中混凝土

普通混凝土水中澆置，水泥漿會被洗刷與骨材分離，品質不佳，如果使用矽灰混凝土，則黏稠性佳，泥漿與骨材不易分離，混凝土品質較佳。

#### 10.防水水泥漿及水泥砂漿塗抹

結構物壁體、外牆以水泥漿或水泥砂漿塗佈時，可摻少量矽灰，以增加水密性防止滲漏。

### 八、使用矽灰應注意事項

1.在澆置施工上，矽灰混凝土較一般混凝土不同之特性有以下幾點應予注意：

- (1)坍度(工作度)損失較快。
- (2)粘度較稠較不易泵送，合易性(工作性)較差。
- (3)沒有浮水或浮水很少，塑性收縮機率大，應加強養護，必要時得摻入膨脹劑，以減少混凝土龜裂。

2.矽灰混凝土可視工程特性及施工條件

之需要，添加飛灰、爐石粉及化學摻料，惟須先經配比設計、試驗及試拌，証實能滿足工程設計要求方可使用。

- 3.矽灰的顆粒非常細，較會吸附化學摻料，其最佳添量較一般水泥高。
- 4.為防止拌合過程中矽灰有結團，故於拌合前須先拌製成溶液，且為防止濃度分層，必須經常攪拌均勻。
- 5.矽灰混凝土拌合時間比普通混凝土延長約 0.5~1.0 倍，如出現下列情況之

一，均需重新攪拌。

(1)拌合機出口卸下的前後混凝土坍度有明顯差別。

(2)卸下的混凝土有球狀拌合物。

6.矽灰混凝土較一般混凝土粘稠，運輸時間、距離之限制(規定)較一般混凝土嚴格，可工作時間較短。拌合、輸送等機具要適時清洗。

種類	水泥 (kg/m <sup>3</sup> )	矽灰 (kg/m <sup>3</sup> )	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		
			7 天	14 天	28 天
濁水溪骨材	456	51	445	514	575
大甲溪骨材	456	51	621	702	774
強度增加			176	188	199
強度增加百分比			40%	37%	35%

配比骨材量相同，28 天抗壓強度，大甲溪比濁水溪增加 35%。

## 九、市售矽灰產品形態及適用範圍

### 1.原灰矽灰：

在矽鐵合金工廠的除塵系統中所收集矽灰、微細而蓬鬆，鬆方重 200~300kg/m<sup>3</sup>，所以運輸成本很大，但是它有最高的波特蘭活性，微奈米性能最佳，可用在填加少量就可獲得微細化效益之水密性混凝土、水泥漿、水泥砂漿、耐久性混凝土、灌漿及地盤改良等等。

### 2.緻密矽灰

矽灰原灰予以緻密化(densify)，以降低運輸成本。緻密矽灰單位重

7.矽灰混凝土早期塑性龜裂機會較多，於鋪築過程中，須儘早做濕式養護及擋風措施。

8.製作高強度耐磨混凝土時骨材品質影響很大。黎明公司以水灰比 0.28，分別以濁水溪及大甲溪骨材做為拌合試驗，其結果如下：

約 500~700kg/m<sup>3</sup>，可應用在需要填加量較大，不著重於微細化效應之抗磨蝕矽灰混凝土、高強度混凝土、低熱矽灰混凝土及 SCC 混凝土、噴凝土等等。台灣市售矽灰絕大部分都是緻密矽灰。

黎明公司以原灰矽灰與緻密矽灰摻入混凝土做拌和試驗，結果如下，顯示對抗壓強度之增加並無太大差別，但緻密矽灰比原灰矽灰成本約低 25%，故以採用緻密矽灰較方便且經濟。

矽灰摻量	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		強度增加		備註
	7天	28天	7天	28天	
0	289	383	—	—	水膠比 0.4
15% (原灰矽灰)	426	587	31%	53%	
15% (緻密矽灰)	433	563	35%	47%	

矽灰摻量	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		強度增加		備註
	7天	28天	7天	28天	
0	189	296	—	—	水膠比 0.53
10% (原灰矽灰)	268	405	42%	37%	
10% (緻密矽灰)	277	423	47%	43%	

### 3. 泥漿狀矽灰

為便於運輸和計量，以水混合為泥漿狀矽灰。由於運輸增加水的重量，也有沉澱使矽灰的用量不正

確，及較難控制混凝土的用水量等缺點，台灣尚未見泥漿狀矽灰之銷售。

## 十、矽灰對人體的影響

矽灰尤其是非緻密的原灰，在搬運與拌合過程中會灰塵飛揚，而被吸入呼吸系統中，有認為(ACI 226)矽灰粒徑微小且非結晶結構，危害健康的可能性較小。在空氣中飛揚之矽灰粒徑通常小於 5 $\mu$ m，被認為是可呼吸的，亦即可被肺細胞吸收而由

循環系統排出體外，但是吸入微粒狀物質的反應機制未完全了解，在運送或處理矽灰的工作人員，還是必須使用保護面罩及設法降低工作環境的灰塵。

## 十一、結語

### 1. 矽灰特性

超微細：粒徑達到奈米尺度，比表面積可達 25m<sup>2</sup>/g，微細效應。

圓形顆粒：玻璃珠態圓形顆粒，潤滑效應。

高 SiO<sub>2</sub>：二氧化矽含量 90%以上，堅硬耐磨。

火山灰活性高：火山灰活性 100%以上，具有波特蘭效應。

## 2. “綠” 建材

矽灰是冶煉矽鐵的飛煙所收集的灰塵，本來讓其在天空中飛揚，由於環境保護越來越嚴格，冶煉工廠裝設集塵器收集矽灰，所收集的矽灰因為蓬鬆要廢棄也很難處理，所以廢物利用做為混凝土添加劑，解決環境污染問題，所以說矽灰是“綠” 建材。

另外，混凝土添加矽灰可以大幅提高混凝土強度，也可使結構物壽命更長，則構造物斷面可縮減，減少混凝土用量，亦即減少水泥及骨材的用量，保護地球資源，如此也是“綠” 建材的意義。

## 3. 展望

目前人們使用矽灰，主要是利用其火山灰活性，大量(約水泥量的 15% 左右)添加做為高強度、抗磨損及增加工作性，對於矽灰微細特性較少去探討與利用。

材料粒徑微小化，表面積急驟變大，粒子表面原子數大幅增加。由於

表面原子數的增加，大大增強了粒子的化學活性，這是現在奈米科技微細化的主要效應之一。

矽灰的表面積可達  $25\text{m}^2/\text{g}$ ，其平均粒徑應在  $250\text{nm}\sim 500\text{nm}$  之間，已具有微細效應，目前添加為水密性混凝土(添加 10% 以下)，應用在海岸工程及高污染水域之混凝土，但是台灣並不生產矽灰，進口運費頗高，是否可添加少量就可以得到水密性的效果，則如何均勻混合入水泥中，填充水泥的空隙及矽灰的微細、大量的比表面積在水泥的水化熱中的作用如何，所形成凝固體的微觀結構如何，都是將來必須探明的課題。

目前設計 RC 混凝土，設計強度還停留在  $210\text{kg}/\text{cm}^2$ ，似應該添加矽灰將設計強度提高至  $350\text{kg}/\text{cm}^2$  以上，以因應時代要求。

希望善用矽灰，使水工結構物的混凝土技術更上一層樓。

收稿：101 年 4 月 16 日  
修改：101 年 5 月 4 日  
接受：101 年 5 月 11 日