

# 矽灰(矽粉)在混凝土之應用

黎明工程顧問股份有限公司

水利技師兼董事長 林得志

品管部經理 林如政

西元 2005 年 6 月

# 矽灰(矽粉)在混凝土之應用

黎明工程顧問股份有限公司 水利技師兼董事長 林得志  
品管部經理 林如政

混凝土是營建工程的主要建材，人類使用混凝土已達一世紀以上，最早是以水泥(膠結材)與骨材(填充材)加水混合固化成混凝土，後來逐漸發展與改良，加入礦物摻料、化學摻料及纖維摻料等等的改質混凝土。近 30 年來，人類在電子資訊及其他科技的發展突飛猛進，與其相比，混凝土技術的進步似乎緩慢了點。

混凝土發展的遠景，以製造更高強度、更耐磨的混凝土及更具有水密性、抵抗酸鹼的混凝土，以及在施工工作性更佳的混凝土。

最近兩三年奈米科技蓬勃發展，是否可以微奈米的礦物粉末做為混凝土摻料，使混凝土得到微細效應，從而改善混凝土的品質。

混凝土礦物摻料主要有飛灰，爐石粉與矽灰三種。爐石粉是礦渣研磨而成，其細度與水泥差不多，不算是微奈米材料。飛灰是燒煤的灰，它的比表面積也僅約  $0.5\text{m}^2/\text{g}$ ，也不算微奈米材料，矽灰是冶煉矽鐵的煙所收集的灰塵，比表面積達到  $25\text{m}^2/\text{g}$ ，粒徑 85% 是微米以下，達到奈米尺度，雖然不是奈米科技所界定的 100nm (奈米) 以下尺度，但是正如經濟部 2002 年產業技術白皮書 P.441，奈米技術「研發角度應充分了解短程內不受限於奈米尺寸定義 (1nm~100nm)，而應著重於微細化的效應發揮。如微粒變小，表面積同步變大，表面反應點增多，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」。

矽灰，這種高二氧化矽( $\text{SiO}_2$  含量 95% 以上)微細粉末，做為混凝土摻料已有 30 年以上歷史，主要是廢棄物之利用，以代替一部份水泥，較少去探討它的微細效應所能發揮的效果。

台灣沒有生產矽鐵合金，所以沒有矽灰產品，矽灰都仰賴國外進口，價錢比水泥貴好幾倍，很少使用為混凝土摻料，但是如果跳脫替代水泥的思維，以少量填加就能使混凝土改性或者製造以水泥無法達成的超高強度混凝土，矽灰配合石化材料(如強塑劑)，將使混凝土技術再提升。

本文將簡要介紹矽灰在混凝土之應用。

## 一、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。

## 二、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%。

## 三、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  $0.3\text{m}^2/\text{g}$ ，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  $200\sim 300\text{kg}/\text{m}^3$ 。

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。

## 四、混凝土礦物摻料—矽灰

矽灰與飛灰、爐石粉同為混凝土礦物摻料，可取代部份水泥或提高混凝土特性。三種摻料中由於矽灰的二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )的含量最高，顆粒最微細，所以是最優異的摻料。

## 五、新拌矽灰混凝土的性能

1.黏性大：矽灰會增加混凝土的粘著性(粘聚性)，在混凝土的運輸和施工過程中不易離析分裂，與岩石、老混凝土、磚等材料黏結性好，用於噴凝土工程回彈量小。含矽灰量達 20-30%時，黏稠性好，可用於水中工程施工。

2.泌水性小：由於矽灰比表面積非常高，在新鮮混凝土中的許多自由水都被矽灰粒子所約束，大大減少泌水量，矽灰混凝土在澆灌振實後，表面不泌水，不易產生沈縮裂縫，混凝土表面較為光滑。

- 3.析離：摻入矽灰可改善混凝土的析離性能，當坍度較大，或搗實時間比較長的時候，矽灰混凝土也不易析離。
  - 4.空氣含量：由於矽灰比表面積較高，在添加相同量輸氣劑條件下，會減少混凝土含氣量。
  - 5.塑性收縮：塑性收縮開裂是由於混凝土表面拉應力超過了混凝土早期的抗拉強度，這種拉應力是由混凝土表面的水份移動所引起的（表面水份蒸發速率大於泌水量），矽灰混凝土顯著減少泌水量就增加了塑性收縮開裂的機會，特別在蒸發速度比較高的情況下（例如：高風速、低濕度和高溫情況下）。
- 塑性收縮開裂通常出現於表面修飾後（收水）至混凝土開始凝固前，亦即大都發生在混凝土接近初凝的時候。
- 6.凝結時間：矽灰混凝土的凝結時間與等強度不摻矽灰的混凝土相比較經常是略為延遲特別在矽灰含量較高的情況下。所以矽灰混凝土較有時間可做表面修飾。
  - 7.水化熱與混凝土溫度：用矽灰取代部份水泥可以減少水化熱，降低混凝土升溫，其熱峰值出現時間雖略早於不摻矽灰，但總放熱量都低於不摻矽灰，7天總放熱量在取代量為10%及30%時分別降低19%及29%。

在達到相同強度情況下，每立方混凝土摻入7%矽灰可節省18%水泥用量，並使混凝土溫度降低4.3°C（降低12%）大大有利防止大體積混凝土內部升溫過大引起的開裂問題。

## 六、硬化後混凝土的特性

- 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抗壓強度12,000psi (840kg/cm<sup>2</sup>)以上之高強度混凝土。

- 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。
- 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 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，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 $\text{K}_2\text{O}$ 和 $\text{Na}_2\text{O}$ 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。
- 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%左右)，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摻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，矽灰混凝土是最好的護面材料。

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。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。

水工結構物之外，工廠重機械行駛之地床板，也可採用抗磨蝕矽灰混凝土來鋪設。

### 2. 超高強度混凝土：

應用於高樓大廈RC或SRC結構，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。

### 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，縮短工程，確保混凝土品質。

### 4. 耐久性混凝土

港灣工程或海岸工程為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，可使用矽灰混凝土。

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。用於隧道開挖及山坡噴凝土，台灣已普通使用中。

## 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  $0.3\sim 0.4\text{m}^2/\text{g}$ )，水泥漿無法灌入。有用超細水泥(比表面積  $1.2\text{m}^2/\text{g}$ )做為灌漿材料，但仍比不上矽灰之微細(比表面積  $25\text{m}^2/\text{g}$ )，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，可摻小量矽灰，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。
- 7.矽灰混凝土早期塑性龜裂機會較多，於鋪築過程中，須盡早做濕式養護及擋風措施。

## 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  $200\sim 300\text{kg/m}^3$ ，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。據查台灣僅有一家有進口原灰矽灰。

## 2. 緻密矽灰

矽灰原灰予以緻密化(densify)，以降低運輸成本。緻密矽灰單位重約  $500\sim 700\text{kg/m}^3$ ，可使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。

## 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  $5\mu\text{m}$ ，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系統的灰塵。

# 十一、效益評估

## 1. 矽灰品質

台灣目前使用矽灰摻料，大都用於噴凝土、耐磨混凝土及高強度混凝土，一般矽灰品質要求如下：

二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )  $\geq 85\%$

火山灰活性指數  $\geq 90\%$

#325 濕篩篩餘  $\leq 10\%$

燒失量  $\leq 6\%$

台灣市售緻密矽灰，大概都可符合上述品質指標，惟筆者認為因應使用目的不同，上述品質指標宜酌予修正。

二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )是堅硬與耐磨的材料，耐磨混凝土添加矽灰，矽灰之二氧化矽含量宜達 90% 以上。

原灰矽灰添加為水密性混凝土時，必須強調矽灰之微細化效應，故#325 濕篩餘小於 10% 宜改為比表面積大於  $20\text{m}^2/\text{g}$ ，80% 以上的粒徑應在奈米(nm)尺度內。

## 2. 矽灰包裝與價格

台灣市售緻密矽灰包裝有太空包，每包  $1\text{m}^3$  重約 600kg~700kg，另有紙袋或 PE、PP 袋裝之小包裝，每袋重 25kg。

緻密矽灰單價約 18 元/kg。

矽灰原灰以 PE 及 PP 袋裝，每袋重 18kg 左右，單價約 25 元/kg。

## 3. 效益評估

### (1) 噴凝土

每  $\text{m}^3$  噴凝土摻矽灰約 30kg (約水泥量之 5~10%)，但可少用水泥約 50kg。

未摻矽灰回彈損失約 20%

摻矽灰回彈損失約 10%

即可節省 10% 的噴凝土，噴凝土每  $\text{m}^3$  價格約 5,000 元。

矽灰噴凝土可節省經費：

$$(50\text{kg} \times 2.5 \text{ 元/kg}) + (5,000 \times 0.1) - (30\text{kg} \times 18 \text{ 元/kg}) = 85 \text{ 元/m}^3$$

噴凝土摻矽灰除可節省水泥及減少回彈量，可量化估計效益外，矽灰噴凝土比普通噴凝土抗壓強度可提高 20%~30%，又有止水作用，增加隧道開挖的安全。

### (2) 水密性、耐酸鹼混凝土

海岸工程，尤其潮間帶之 RC 工程，保護層混凝土水密性不佳，工程完工三、五年後，海水滲入鋼筋銹蝕膨脹致混凝土一塊塊剝落，暴露出鋼筋銹蝕景象，整體結構物也將喪失功能。

只要在混凝土中摻入 5~10% 原灰矽灰，即可改善上述現象，延長構造物壽命。

中國 2001-05-01 實施之「海港工程混凝土結構防腐蝕技術規範」已有規定添加矽灰防腐蝕。

以  $210\text{kg}/\text{cm}^2$  混凝土水泥量  $350\text{kg}$ ，添加  $20\text{kg}$  原灰矽灰為例，增加經費僅為  $25\text{元} \times 20\text{kg} = 500\text{元}$ ，非常值得。

### (3) 高強度混凝土

一般混凝土要得到高強度，必須降低水灰比，亦即提高水泥用量，但也因此增加水化熱，溫度提高混凝土容易龜裂，品質變差。

相同的水灰比，以矽灰替代一部分水泥，譬如  $210\text{kg}/\text{cm}^2$  混凝土，用  $W/C=0.53$ ，水泥用量約  $350\text{kg}/\text{m}^3$ ，採用水泥量約 20% 矽灰 ( $70\text{kg}$ ) 替代水泥，採用緻密矽灰增加費用  $70\text{kg} \times (18-2.5) = 1,085\text{元}$ ，但是根據文獻資料，摻用矽灰抗壓強度一般可提高 30%~50%，亦就抗壓強度可達到  $280\text{kg}/\text{cm}^2$  以上，而混凝土的耐久性亦得以提高，且為泵送澆置時有良好的工作性，泥漿與骨材不分離，也有需要添加矽灰。至於製造  $1,000\text{kg}/\text{cm}^2$ ，超高強度混凝土就必須摻用矽灰配合強塑劑，才能得到高強度混凝土。

### (4) 耐磨混凝土

水工結構物一般未摻矽灰之耐磨混凝土採用  $280\text{kg}/\text{cm}^2$  設計強度，每  $\text{m}^3$  單價約  $2,500\text{元}$ 。

摻矽灰及強塑劑，設計強度  $560\text{kg}/\text{cm}^2$ ，每  $\text{m}^3$  單價  $5,000\text{元}$ 。

矽灰耐磨混凝土的機制，除高強度及高耐磨外，高二氧化矽成份是堅硬與耐磨的材料，使整體混凝土提高耐磨性。

摻矽灰的耐磨混凝土比不摻者價格高一倍，但是水工結構物磨損如果三年就得修補一次，如果使用矽灰耐磨混凝土時可延長至六年以上才修補一次，效益上應可行。

## 十二、結語

### 1. 矽灰特性

超微細：粒徑達到奈米尺度，比表面積可達  $25\text{m}^2/\text{g}$ ，微細效應。

圓形顆粒：玻璃珠態圓形顆粒，潤滑效應。

高  $\text{SiO}_2$ ：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，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 25% 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。

材料粒徑減少表面積急驟變大，粒子表面原子數迅速增加。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，所形成凝固定體的微觀結構如何，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為 280 甚至  $350\text{kg}/\text{cm}^2$ ，以因應時代要求。

希望善用矽灰，使混凝土技術更上一層樓。

## 附錄一 奈米尺度及直徑與比表面積之關係

1 公尺 (m) = 100 公分 (cm)

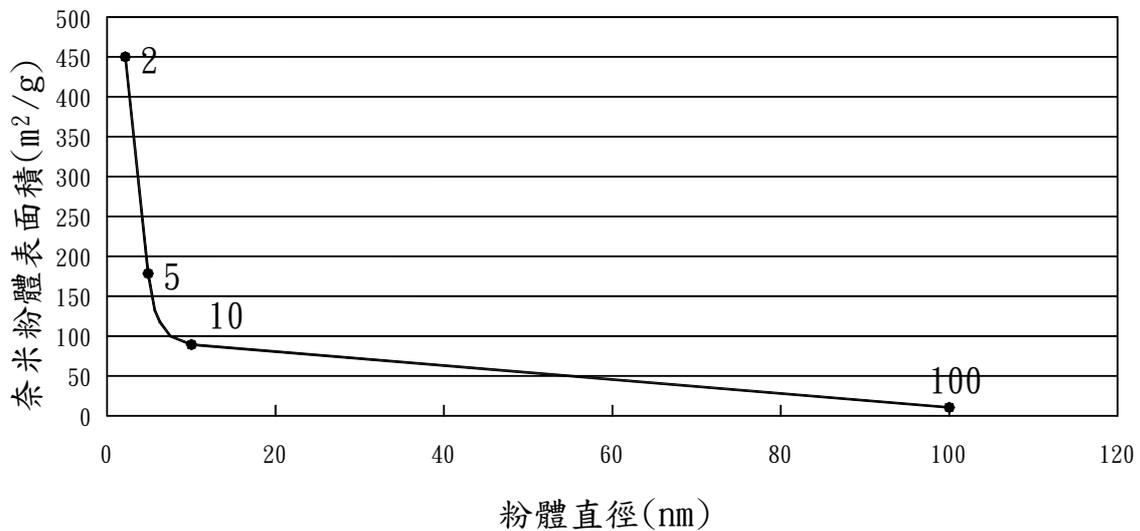
1 公分 (cm) = 10 公厘 (mm)

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

奈米粉體表面積 VS 粉體直徑



## 附錄二 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	<b>95.0</b>	
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	
C <sub>a</sub> O (%)	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	<b>25.00</b>	

## 附錄三 三林貿易公司 矽灰規格

### 1.原灰矽灰：

化學成份	$\text{SiO}_2$	97.2 %
	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.32 %
	$\text{K}_2\text{O}$	0.29 %
	$\text{CaO}$	0.05 %
	$\text{MgO}$	0.10 %
	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.03 %
	$\text{Na}_2\text{O}$	0.09 %
	燒失量	2.12 %
比表面積		25.69 $\text{m}^2/\text{g}$
粒徑中值		320nm
1 $\mu\text{m}$ 以上		18%
100nm~1,000nm		82%

以上為工業技術研究院工業材料研究所試驗結果。

### 2.緻密矽灰

$\text{SiO}_2$	97.34 %
比重	2.18
細度(停留於 No.325 篩之量)	7.63%
燒失量	2.7%

以上為 SGS 材料及工程實驗室試驗結果。

三林貿易公司 地址：台中市南屯區大墩 17 街 137 號 13F  
TEL：04-35035738  
FAX：04-23208025  
手機：0953-672010

# 附錄四 矽灰摻用試驗文獻及使用案例

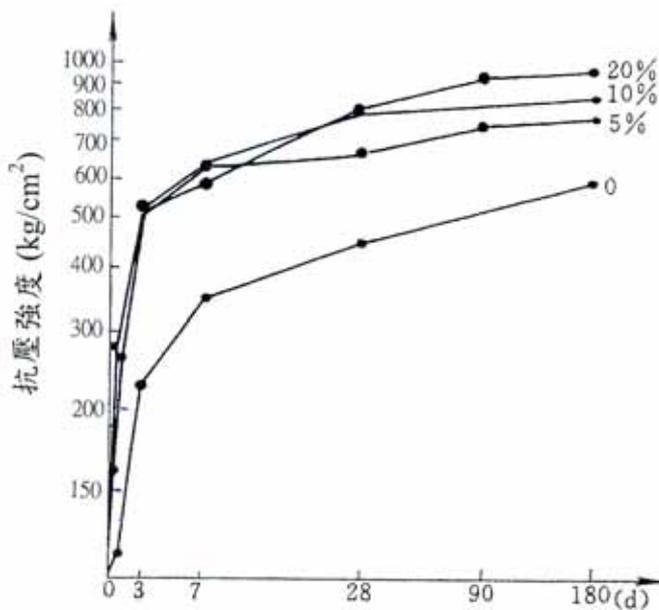
## 一、抗壓強度

### 1. 中國南科院研究不同水泥用量與矽灰摻量

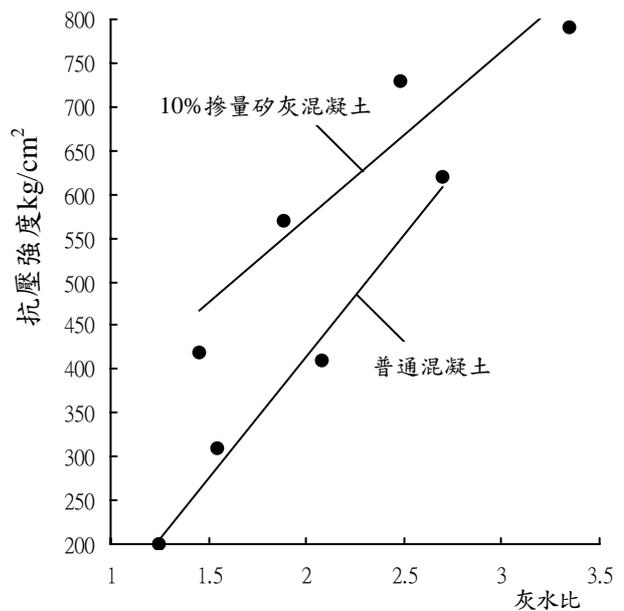
混凝土抗壓強度增長情形：

不同水泥用量下矽灰增強效果

水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )	矽灰摻量 (%)	水灰比	7 天抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	28 天抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	備註
249	0	0.81	108	207	保持相同坍度
241	10	0.64	258	417	
303	0	0.64	161	312	
293	10	0.49	363	572	
400	0	0.49	251	402	
393	10	0.34	571	730	
548	0	0.36	422	611	
541	10	0.25	732	786	



不同矽灰摻量抗壓強度與齡期關係



灰水比強度關係曲線

## 矽灰不同取代量及飛灰不同摻量對混凝土強度影響

混凝土設計 強 度	水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )	矽灰摻量 (%)	飛灰摻量 (%)	抗 壓 強 度 (kg/cm <sup>2</sup> )		節省水泥 (%)
				7d	28d	
C600	553.6	0	0	584	660	0
	470.5	5	0	625	707	15
	442.9	5	0	635	666	20
	387.5	5	0	580	675	30
	317.7	5	30	532	656	42.6
	263.5	5	40	559	700	52.4
	363.1	5	20	601	699	33.4
C400	393	0	0	—	427	0
	187	5	25	—	230	—
	211	5	25	—	336	—
	232	5	25	—	359	—
	251	5	25	—	446	36
	258	5	25	—	456	34

### 2.黎明工程顧問公司

(1)水泥漿摻用少量矽灰試驗結果如下表：

**水泥漿摻矽灰抗壓強度試驗成果表**

矽灰摻量	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			備 註
	7d	14d	28d	
0	592	823	921	註：1.採用台灣水泥（品牌） 2.由表知摻用少量矽灰 水泥漿抗壓強度，摻用 2.5% 與不摻 7d 增約 68 % 14d 增約 38 % 28d 增約 23 %
0.25%	779	836	933	
0.50%	775	802	993	
0.75%	615	853	918	
1.00%	748	918	1,026	
1.25%	850	1,128	942	
1.50%	843	1,030	1,095	
1.75%	938	1,091	1,251	
2.00%	992	1,131	1,142	
2.25%	989	1,169	1,091	
2.50%	993	1,136	1,146	

(2)水泥砂漿摻用少量矽灰試驗結果如下表：

水泥砂漿摻矽灰抗壓強度試驗成果表

矽灰摻量	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			備註
	7d	14d	28d	
0	326	398	456	註：1.水灰比 0.5 水泥／砂=1／2.75 2.由表知摻用少量矽灰 水泥漿抗壓強度，摻用 2.5% 與不摻 7d 增約 36 % 14d 增約 23 % 28d 增約 23 %
0.25%	398	513	524	
0.50%	377	498	503	
0.75%	391	425	439	
1.00%	360	444	462	
1.25%	289	425	465	
1.50%	394	496	527	
1.75%	404	442	527	
2.00%	350	534	522	
2.25%	367	496	520	
2.50%	442	490	561	

## 二、耐久性(水密性、防鋼筋腐蝕性)

### 1. 中國南科院對摻矽灰提高海事工程 RC 的耐久性試驗

#### 混凝土耐久性試驗結果

水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )		w/c=0.55					w/c=0.45					
		316	316	316	316	316	379	379	379	283	284	
矽灰摻量kg/m <sup>3</sup>		—	12.50	18.75	25.00	31.25	—	12.50	18.75	12.50	18.75	
混凝土 密實性	3hr 吸水率%	3.85	3.30	2.68	2.78	2.50	4.26	2.82	2.85	3.53	3.89	
	浸泡 6%NaCl 溶液 7day 增重%	4.88	3.62	3.51	3.02	2.38	5.08	4.03	3.20	4.21	5.01	
	1,200kg/cm <sup>2</sup> 壓力 滲水高度(mm)	33.2	12.2	10.7	7.0	4.9	18.6	10.3	8.6	19.7	19.9	
	相對滲透係數 (×10 <sup>-8</sup> cm/hr)	57.4	7.75	5.96	2.55	1.25	18.0	5.53	3.85	20.20	20.6	
抗 碳 化 能 力	碳化 深度 (mm)	3d	8.4	5.7	5.5	6.0	0	6.1	0	0	5.8	5.9
		10d	12.8	8.9	8.5	7.0	0.5	7.8	3.3	1.6	8.3	10.8
		28d	17.8	11.8	11.6	11.0	3.7	11.3	4.4	2.6	11.0	14.2
抗 氯 離 子 滲 透 能 力	3.5% 氯化 鈉溶液浸 烘15循環 後各區間 混凝土cl <sup>-</sup> (%)	0~1cm	1.088	0.911	0.830	0.728	0.740	0.921	0.687	0.663	0.81	0.760
		1~3cm	0.694	0.674	0.492	0.397	0.212	0.710	0.316	0.216	0.576	0.704
		3~5cm	0.814	0.237	0.037	0.033	0.033	0.667	0.029	0.037	0.089	0.159
	電化學快 速測定	通過電 荷量(c)	8,367	2,930	—	—	580	12,160	1,440	—	2,410	—
		溶液中cl <sup>-</sup> 損失量	0.808	0.459	—	—	0.145	0.953	0.289	—	0.400	—
電 阻 率	電阻值(Ω)	221	525	864	1,391	2,414	264	945	1,773	750	960	
	電阻率 (kΩ · cm)	4.17	9.90	16.29	26.22	45.50	4.98	17.81	32.67	14.14	18.10	

### 各配方混凝土鋼筋銹蝕浸烘循環試驗結果

循環次數	編號	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
	砂灰摻量	—	12.50	18.75	25.00	31.25	—	12.5	18.75	12.50	18.75
	水泥用量(kg/m <sup>3</sup> )	316	316	316	316	316	397	397	397	283	284
3	銹蝕根數 檢查根數	0/2	—	—	—	—	0/1	—	—	0/1	—
5	銹蝕根數 檢查根數	0/2	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1	0/1
10	銹蝕根數 檢查根數	1/1	0/1	0/1	0/1	0/1	1/3	0/1	0/1	0/1	0/1
	鋼筋周圍砂漿Cl <sup>-</sup> (%)	0.3385	0.0478	0.0290	0.0107	0.0136	0.1780	0.0150	0.0302	0.1390	0.1050
	鋼筋銹蝕面積(mm <sup>2</sup> )	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	鋼筋銹蝕失重(%)	0.013	0	0	0	0	0.001	0	0	0	0
15	銹蝕根數 檢查根數	4/4	0/3	0/3	1/4	0/3	3/3	0/3	0/3	3/3	1/3
	鋼筋周圍砂漿Cl <sup>-</sup> (%)	0.7858	0.1959	0.1046	0.0940	0.0555	0.4247	0.0497	0.0597	0.3808	0.2702
	鋼筋銹蝕面積(mm <sup>2</sup> )	1053	0	0	3	0	153	0	0	28	3
	鋼筋銹蝕失重(%)	2.28	0	0	0.01	0	0.14	0	0	0.03	0.007
	鋼筋最大坑深(mm)	1.83	0	0	0	0	0.35	0	0	0.29	0.09
22	銹蝕根數 檢查根數	2/2	3/3	2/3	0/2	1/3	3/3	0/3	2/3	3/3	3/3
	鋼筋周圍砂漿Cl <sup>-</sup> (%)	1.0121	0.5068	0.2917	0.1051	0.1069	0.9543	0.1091	0.1356	0.7916	0.9638
	鋼筋銹蝕面積(mm <sup>2</sup> )	1806	620	191	0	11	1311	0	36	1443	995
	鋼筋銹蝕失重(%)	6.85	0.88	1.05	0	0.43	2.81	0	0.03	1.39	1.91
	鋼筋最大坑深(mm)	1.47	0.45	0.28	0	0	0.91	0	0	0.60	0.94

中國南科院還將摻與不摻砂灰的鋼筋混凝土試體與混凝土試體，分別在連雲港及赤灣港浪濺區進行長期暴露試驗，經4年和6年暴露，經查結果示如下表。

### 摻砂灰暴露試驗結果

站名	組別	暴露時間	水泥用量(kg/m <sup>3</sup> )	水灰比	砂灰摻量(%)	鋼筋周圍Cl <sup>-</sup> (%)	距表面不同深度氯離子(Cl <sup>-</sup> )含量(%)			
							0~1cm	1~3cm	3~5cm	
赤灣港	CH-1	6年	345	0.45	0	0.149	0.391	0.253	0.232	
	CH-2		312	0.53	5.0	0.075	0.186	0.121	0.056	
	CH-3		272	0.58	5.5	0.087	0.211	0.158	0.086	
							0~0.5cm	0.5~2.5cm	2.5~3.5cm	3.5~5.5cm
連雲港	L-1	3年 5個月	315	0.52	0	0.309	0.490	0.308	0.271	0.163
	L-2		317	0.48	6.0	0.058	0.402	0.234	0.116	0.050
	L-3		312	0.46	12.0	0.002	0.380	0.103	0.039	0.004
	L-4		254	0.61	6.5	0.043	0.476	0.248	0.223	0.140

## 不同矽灰摻量鋼筋開始腐蝕年限

地 區	矽灰摻量 (%)	水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )	不同保護層厚度時鋼筋開始銹蝕年限(年)		
			$\chi = 3\text{cm}$	$\chi = 5\text{cm}$	$\chi = 6.5\text{cm}$
赤灣港	0	345	4.5	12.4	20.9
	5.0	312	24.4	67.8	114.5
	5.5	272	12.3	34.3	57.9
連雲港	0	315	1.6	4.5	7.6
	6.0	317	7.7	21.3	35.9
	12.0	312	15.8	44.1	74.5
	6.5	254	2.3	6.5	11.0

### 案例

#### 1. 連雲港木材碼頭

海港浪濺區鋼筋混凝土結構由於  $\text{Cl}^-$  的滲入，大多使用不到 10 年就會出現順筋裂縫，為提高碼頭上部鋼筋混凝土結構的耐久使用壽命，連雲港建港指揮部決定，在木材碼頭試用南科院研究開發的矽灰耐久混凝土。

木材碼頭是鋼筋混凝土高樁樑板式結構，位於連雲港突堤西側，全長 450m，寬 38.5m，共建兩個 3.5 萬噸級泊位。

在木材碼頭施工中，選兩個排架上部結構構件採用矽灰混凝土，其中一部分為水泥用量與普通混凝土相同，摻入矽灰；另一部分在摻矽灰後節省水泥用量 50~80kg/m<sup>3</sup>。預鑄預力門機樑 4 根，前邊樑 2 根，後邊樑 2 根，場鑄碼頭橫樑 2 根，共計 275m<sup>3</sup> 混凝土，主要配合比和性能見下表。

#### 現場應用配方及性能

構件名稱	設計強度等級	配合比	外加劑 (%)	水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )	抗壓強度(kg/cm <sup>2</sup> )		相對滲透系數 (×10 <sup>-7</sup> cm/h)	凝結時間	
					7d	28d		初凝	終凝
預力門機樑	C40	1 : 1.86 : 3.56 : 0.46	UNF-5 0.5	348	322	457	-	-	-
		1 : 1.91 : 3.55 : 0.43	SF 12.5	348	398	578	-	-	-
		1 : 2.85 : 4.46 : 0.58	SF 13.75	268	269	417	-	-	-
碼頭面板	C30	1 : 2.26 : 3.81 : 0.52	UNF-5 0.5	315	294	430	4.86	5h	7h 9min
		1 : 2.25 : 3.83 : 0.48	SF 12.5	317	323	450	1.34	3h 54min	4h 40min

		1 : 3.10 : 4.66 : 0.61	SF 13.75	254	257	427	2.25	4h 24min	6h 21min
後邊樑	C30	1 : 2.11 : 3.89 : 0.50	UNF-5 0.5	320	254	456	—	—	—
		1 : 2.25 : 3.83 : 0.48	SF 12.5	319	434	534	—	—	—
		1 : 3.10 : 4.66 : 0.61	SF 13.75	254	312	414	—	—	—
前邊樑	C30	1 : 2.27 : 3.77 : 0.54	UNF-5 0.5	315	216	346	—	—	—
		1 : 2.26 : 3.86 : 0.48	SF 12.5	315	330	531	—	—	—
		1 : 2.88 : 4.50 : 0.59	SF 13.75	265	245	433	—	—	—
下橫樑	C30	1 : 2.13 : 3.56 : 0.50	UNF-5 0.5	327	—	336	—	—	—
		1 : 2.15 : 3.60 : 0.49	SF 12.5	327	—	458	—	—	—
		1 : 2.70 : 4.22 : 0.58	SF 13.75	277	—	394	—	—	—
下橫樑	C30	1 : 2.13 : 3.56 : 0.50	UNF-5 0.5	327	—	300	—	—	—
		1 : 2.15 : 3.60 : 0.49	SF 12.5	327	—	320	—	—	—
		1 : 2.70 : 4.22 : 0.60	SF 13.75	277	—	321	—	—	—

現場取樣結果，矽灰混凝土與普通混凝土相比，水泥用量相同時，7d強度提高 24%~70%，28d提高 7%~53%，節省水泥用量 50~80kg/m<sup>3</sup>，兩組矽灰混凝土的抗滲能力分別是普通混凝土的 3.6 倍及 2.2 倍。

### 三、抗磨蝕性能

矽灰抗磨蝕混凝土強度和磨蝕性能

水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )	矽灰摻量 (%)	骨料產地 及級配	28d抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	抗沖磨能力 相對倍數	抗空蝕能力 相對倍數	試 驗 研究單位
430	0	南京 一級配	440	1.00	1.0	南科院
433	10		780	2.30	5.6	
424	30		730	3.50	6.8	
419	0	二灘 二級配	410	1.00	1.0	南科院
433	10		750	3.50	4.6	
424	20		820	3.40	4.0	
500	0	二灘 二級配	720	1.00	1.0	武漢水院
425	15		988	1.26	1.6	
440	0	二灘 二級配	609	1.00	—	成勘院 研究所
436	15		765	1.64	—	
450	0	北京	—	1.00	—	水電 科學院
450	5*		—	1.25	—	
450	5*		—	1.54	—	
276.7	0	岩灘 三級配	460	1.00	1.0	南科院
276.7	10		700	3.50	5.1	
536	0	映秀灣 一級配	659	1.00	1.0	南科院
538	10		719	1.70	17.6	
537	10**		748	1.70	12.2	
430	0	龍羊峽 一級配	508	1.00	1.0	南科院
430	10		817	2.19	8.8	
260	0	五強溪 二級配	217	1.00	1.0	南科院
259*	10		497	2.10	11.4	
403	0	東風 二級配	399	1.00	1.0	南科院
401	10		404	3.00	4.7	
314	10+FA		828	2.00	5.6	
511	0	三峽 二級配	517	1.00	1.0	南科院
511	10		937	1.86	4.3	
380	0	漫灣 二級配	358	1.00	1.0	南科院
389	10		719	1.74	4.5	
400	0	小浪底 一級配	640	1.00	1.0	南科院
400*	矽灰漿劑		950	1.90	11.7	
217	0	水口 二級配	225	1.00	1.0	南科院
255*	矽灰漿劑		577	2.10	5.4	
317	0	賓夕法尼 亞州石灰岩	390	1.00	—	美國陸軍水道試驗站 (空蝕試驗流速26m/s)
269	18		500	1.40	—	
351	43		960	3.20	—	
317	0	維吉尼亞州 輝綠岩	390	1.00	—	美國陸軍水道試驗站 (空蝕試驗流速26m/s)
269	18		590	1.40	—	
351	43		950	2.70	—	
356	0	洛杉磯	520	1.00	—	美國陸軍水道試驗站 (空蝕試驗流速26m/s)
356	15		760	2.40	—	
404	0	—	560	—	1.0	美國陸軍水道試驗站 (空蝕試驗流速26m/s)
415	20		1080	—	14.5	

## 矽灰摻量對抗磨蝕性能影響

骨 材	水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )	矽灰摻量 (%)	28d抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	相 對 抗沖磨能力	相 對 抗空蝕能力
南 京 一級配	430	0	440	1.00	1.00
	424	5	656	1.02	2.60
	433	10	780	2.30	5.60
	426	20	800	4.70	19.50
	424	30	734	3.50	6.80
二 灘 二級配	419	0	412	1.00	1.00
	433	10	749	3.47	4.60
	428	15	738	2.94	2.90
	424	20	816	3.36	2.00

### 案例

#### 1. 中國映秀灣水電站攔河閘底板

岷江上游幹流上的映秀灣攔河閘，經歷 20 年運行後，在含沙量大、推移質多的水流作用下，閘底板耐磨層(40cm厚漿砌花崗岩條石)及閘後護坦(300kg/cm<sup>2</sup>混凝土)均已遭受普遍磨損。#3 閘底板的損壞最為嚴重，最大沖刷坑深達 50cm 以上，部分受力鋼筋暴露，甚至磨斷。南科院經過調查研究，推薦矽灰和矽灰鋼纖維兩種混凝土配方，於 1988 年 3 月對#3 閘後護坦進行修補，施工後未發現裂縫。現場取樣結果與普通高強 500kg/cm<sup>2</sup>混凝土相比，矽灰混凝土與矽灰鋼纖維混凝土在節省水泥 17%~22% 的情況下，抗壓強度分別提高 44% 和 40%，相對抗沖磨強度提高 76% 和 66%，相對抗氣蝕強度分別提高 16 和 11 倍。

#3 閘下游護坦補強經受幾年度汛洩洪考驗後，發現矽灰高強混凝土和鋼纖維混凝土修補層整體上沒有破壞，但有輕微磨損。兩種混凝土還未出現明顯差別。

#### 2. 中國大伙房水庫消能池

大伙房水庫輸水洞口與消能池相接，由於消能池混凝土原設計強度較低(140~170kg/cm<sup>2</sup>)，1983 年檢查時發現破壞嚴重。1983 年 10 月採用水下環氧砂漿和環氧混凝土進行修補。但 1984、1985、1986 年汛後檢查發現，有部分 1/3 及大部分沖毀。1987 年採用南科院研製的矽灰砂漿和矽灰混凝土對消能池破壞部位進行現場修補，施工溫度 1~17℃。

1988年汛後抽水檢查，發現修補部位的矽灰混凝土及矽灰砂漿無剝蝕脫落現象，且表面完好無損，說明矽灰抗磨蝕混凝土或砂漿作為水工抗磨蝕護面材料具有十分明顯的效益。

### 3. 美國水壩

美國三個工程所用抗磨蝕矽灰混凝土配合比

工程名稱	水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨料用 量(kg/m <sup>3</sup> )	細骨料用 量(kg/m <sup>3</sup> )	矽灰漿劑 (kg/m <sup>3</sup> )	水 (kg/m <sup>3</sup> )	高效減水 劑 (mL)	水膠 比	施 工 時 間
Kinzua 壩	386	971	874	456	50		0.28	1983年
Blanco 隧道	403	1178	533	136	83	294.5	0.31	1986年
Palisades 壩	403	1133	614	119	100	300	0.35	1986年

### 4. 中國葛洲壩二江洩水閘底板

葛洲壩二江洩水閘是世界上最大的水閘之一，閘底板高程與天然河床相近。洩洪時，挾帶大量礫卵石、泥沙過閘，給部分閘室護坦帶來較為嚴重的沖磨破壞。1981年大江截流二江洩水閘投入運行後，每年都進行檢查和檢修。曾採用錨系鋼筋混凝土、乾硬性預縮砂漿、水下環氧砂漿、不飽和聚酯樹脂砂漿、丙烯酸環氧砂漿、氯偏改性砂漿等多種材料進行修補。經幾年運行比較後，在後幾次歲修中常採用氯偏及水下環氧砂漿。但經2年運行後，多次發現環氧砂漿大面積剝落和沖失，氯偏砂漿也有剝落現象。1987年1月，進行矽灰砂漿及矽灰混凝土的現場修補試驗，使用南科院提供的材料在27孔閘底板3個部位和23孔閘室出口處進行了修補，現場取樣試驗結果見表。矽灰砂漿抗沖磨性能比氯偏砂漿提高了10%~40%，其中鋼纖維矽灰砂漿沖磨性能已接近環氧砂漿。

葛洲壩現場取樣試驗結果

修補材料品種	骨 料	沖磨失重 (%)	28d強度 (kg/cm <sup>2</sup> )			施 工 部 位
			抗 壓	抗 折	抗 拉	
氯偏砂漿	鑄石砂	1.28	655	115	49	—
環氧砂漿	硬線砂、石英粉 細石	0.67	1,105	372	111	27孔閘牆
矽灰細石混凝土	鑄石砂	0.89	714	164	77	27孔底板
速凝矽灰砂漿	鑄石砂	0.89	765	143	68	23孔出口處
矽灰砂漿	鐵礦砂	1.15	1,170	186	91	27孔底板
鋼纖維矽灰砂漿	硬線砂	0.77	848	134	75	27孔底板

葛洲壩 1987 年 1 月修補後，在 1987~1988 年經受兩個汛期洩洪 75 億 $m^3$ ，13 次洪峰考驗，於 1989 年 1 月在 27 孔下閘檢查，發現三個修補面均完好無損，表面平整，粘結良好，無脫落現象，磨損量比周圍老環氧砂漿略小。從經濟觀點看，氣偏砂漿在當時須增加 200 元/ $m^2$ (人民幣)材料費，而矽灰砂漿僅增加 40~60 元/ $m^2$ (人民幣)，且施工方便，無毒無味，是一種性能優異、合理的水工修補新材料，葛洲壩電廠已將其作為近年修補材料，在工程中大面积應用。

### 5. 中國龍羊峽水電站中孔

地處青海高原的龍羊峽水電站是黃河上游的大型水電樞紐工程，壩高庫容大，最大流速高達 41m/s。1986~1987 年底孔深孔施工時，採用了乾硬性砂漿和環氧砂漿抹面。經一年運行，乾硬性砂漿已有部分開裂和脫落，環氧砂漿又存在著成本高、毒性大、施工不方便等問題。1988 年 6 月在龍羊峽中孔三段 Co105~Co120 底板進行了矽灰混凝土現場試驗性施工，施工面積共 120 $m^2$ ，矽灰耐磨層厚度為 10~15cm。底板坡度曲線為 $x_2=400y$ 。澆築順序由上而下每隔 1.5m 為一澆築塊。施工後 2~10d，先後出現了一些長短不等的表面乾縮及混凝土澆築分塊細裂縫。

現場施工取樣試驗結果

混凝土種類		矽灰 混凝土	矽灰鋼纖 維混凝土	普通高強 混凝土	備註
設計號		#800	#800	#500	普通高強度混凝土由水電十局試驗室提供，配合比為 0.3 : 1 : 0.77 : 2.26，水泥用量為 580kg/ $m^3$ (數據為南科院室內#500 混凝土試驗結果)
實測坍落度(cm)		13	11	9~13	
28d抗壓強度(kg/cm <sup>2</sup> )		821	797	569	
28d劈拉強度(kg/cm <sup>2</sup> )		47	44	42	
28d粘結強度(kg/cm <sup>2</sup> )		13	13	—	
抗(鋼球) 沖磨	失重率(%)	1.23	1.39	2.30*	
	相對沖磨強度	173	166	100	
抗氣蝕	失重率(%)	0.01	0.02	0.25*	
	相對氣蝕強度	1783	1223	100	

裂縫產生的原因主要是施工布置及施工順序不當，早期保水保濕養護不當和分段過大。分析認為，只要分塊合理，施工正確和精心養護，裂縫是可以避免的。龍羊峽現場材料試驗結果見下表。1986~1987 年，底孔深孔施工時，乾硬性砂漿材料費為 20 元/ $m^2$ (人民幣)，

環氧砂漿為 150 元/m<sup>2</sup>(人民幣)。而 1988 年中孔施工的矽灰混凝土為 18 元/m<sup>2</sup>(人民幣), 僅為環氧砂漿的 12%, 甚至比乾硬性砂漿還便宜(乾硬性砂漿為提高粘結強度, 基底塗刷環氧基液需 7.5 元/m<sup>2</sup>(人民幣)), 但其抗沖磨強度比乾硬性砂漿高 1~3 倍, 抗空蝕強度高 2~8 倍。

### 龍羊峽現場材料試驗結果

種 類		普通混凝土	矽灰混凝土	乾硬性砂漿	矽灰砂漿
水泥用量(kg/m <sup>3</sup> )		430	430	714	714
抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	7d	405	721	458	716
	28d	508	817	658	883
	90d	519	838	762	978
劈裂抗拉強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	7d	32	56	90	124
	28d	34	59	111	160
	90d	—	—	115	178
抗沖磨強度[h/(kg·m <sup>2</sup> )]		12.5	27.1	5.8	88.8
抗空蝕強度[h/(kg·m <sup>2</sup> )]		10.7	94.8	5.4	34.1
抗凍性循環次數		<50	>500	190	>300

### 6. 中國水口、五強溪水電站船閘工程

水口水電站位於閩江幹流上, 三級船閘最大工作水頭分別為 42m、32m、26m, 船閘開啟時最大流速達 50m/s。鑑於國內外水工建築物在高速水流作用下, 空蝕磨損屢見不鮮, 為確保電站安全, 設計(華東水電勘測設計研究院)決定, 除在輸水廊道閘門後採取突擴洞室消能這一結構措施外, 在高速水流區採用矽灰混凝土護面。五強溪水電工程船閘與水口工程類似, 經中南水電勘測設計研究院設計, 亦在突擴段採用高強抗磨蝕矽灰混凝土。

南科院受上述兩個工程建設單位委託, 根據前幾年推廣應用矽灰混凝土施工中出現由於乾縮容易產生施工裂縫的問題, 對配方進行改進, 設計出摻用膨脹劑補償一部分收縮的新型高強抗磨蝕矽灰混凝土, 兩個工程所用配方如下。

### 工程使用抗磨蝕混凝土主要材料用量

工程名稱	主要材料用量(kg/m <sup>3</sup> )					90d 抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
	水泥	飛灰	膨脹劑 UEA	矽灰	水	
水口	255	45.0	38.3	34.0	102	708
五強溪	259	33.6	30.5	33.6	122	—

水口及五強溪船閘矽灰混凝土已於 1992~1993 年施工，水口、五強溪兩船閘由於採用膨脹劑補償收縮，使矽灰抗磨蝕高強混凝土的乾縮率略低於普通對比混凝土，再加上精心施工，所以兩個船閘在施工中均未出現開裂。水口船閘共澆築矽灰混凝土近 4000m<sup>3</sup>。其前期現場取樣抗壓強度如下。

水口工程高強抗磨蝕矽灰混凝土現場取樣結果

施工日期 抗壓強度(kg/cm <sup>2</sup> )	1992年 4月29日	1992年 5月27日	1992年 6月4日	1992年 7月3日	1992年 9月13日	1992年 9月23日	1992年 10月5日	199年 1月
7d	919	596	745*	683	—	—		—
28d	714	698	821	819	764	843	744	772
90d	862	791	85.4	875	856	879	767	840

平均抗拉強度 101kg/cm<sup>2</sup>，平均抗壓強度 863kg/cm<sup>2</sup>，偏差係數為 0.014，抗沖磨性能提高了 1 倍。

#### 7.黎明工程顧問公司

設計集集攔河堰排砂道堰面磨損採用之矽灰耐磨混凝土配比及設計強度如下：

排砂道堰面修復材料配比表

配比 修補材料	水 膠 比	砂 率	水 泥	飛 灰	矽 灰	水	砂	石	強 塑 劑	一 般 鋼 纖 維	超 細 鋼 纖 維	聚 丙 烯 纖 維	碳 纖 維	修 補 位 置
矽灰 混凝土	0.26	0.36	375	107	54	139	610	1088	10.71	-	-	-	-	排砂道 1
矽灰 碳纖維 混凝土	0.28	0.38	400	0	171	160	580	1030	17.29	-	-	-	18	排砂道 3
甲種矽灰 複合纖維 混凝土	0.26	0.40	413	0	177	153	628	943	11.5	-	78	0.6	-	排砂道 2
乙種矽灰 複合纖維 混凝土	0.26	0.40	413	0	177	153	623	935	11.8	117	-	0.6	-	排砂道 4

註：1.以上水膠比及砂率單位為%，其他單位均為 kg。  
2.以上所列係原設計配比。

修復材料抗壓強度要求

期齡(天)	14	28	56
抗壓強度(kg/cm <sup>2</sup> )	560	840	910

#### 四、矽灰噴凝土

中國漁子溪二級水電站引水隧道噴凝土試驗結果。

##### 1. 抗壓強度

矽灰噴凝土抗壓強度試驗結果

水灰比	砂率 (%)	膠結材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )		減水劑 摻量 (%)	坍度 (cm)	抗壓強度(kg/cm <sup>2</sup> )			
		水泥	矽灰			7d		28d	
						強度值	強度比	強度值	強度比
0.55	55	325	0	0.60	2.7	210	1.00	278	1.00
0.55	55	293	32	0.60	1.7	226	1.08	395	1.42
0.55	45	300	0	0.60	1.8	206	1.00	281	1.00
0.55	45	270	30	0.60	2.0	277	1.35	445	1.58

由表看出，用 10% 矽灰取代水泥後，混凝土的抗壓強度仍有較大幅度的提高，28d 齡期增加率達 42%~58% 之多。其強度絕對值為 400kg/cm<sup>2</sup> 左右，遠遠超過設計強度的要求。

##### 2. 回彈量及水泥耗量

矽灰噴凝土施工回彈量及水泥耗量

噴射工法	膠結材料用量 (kg/m <sup>3</sup> )		混凝土配合比 膠結材： (砂：砂：水)	實測指標		膠結材料 實際用量 (kg/m <sup>3</sup> )
	水泥	矽灰		28d 抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	平均回彈率 (%)	
乾噴法	464	0	1:1.90:1.90:0.45	201	24.1	611
濕噴法	285	29	1:3.52:2.38:0.55	265	10.9	352

由於在噴凝土中摻加了矽灰，使噴射混凝土的回彈率顯著降低，還不及摻矽灰的乾噴法的一半。此外，矽灰噴凝土設計配比中的水泥用量也顯著降低，加之回彈量的減少，從而大大減少了噴凝土的實際水泥耗量，與乾噴法比較，噴凝土可節省水泥 200kg/m<sup>3</sup> 以上，降低投資 15% 左右。

## 五、巨積低熱矽灰混凝土的性能

### 低熱矽灰混凝土的性能

工程名稱	混凝土類別	單方水泥用量 (kg/m <sup>3</sup> )	飛灰摻量 (%)	矽灰摻量 (%)	抗壓強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	抗沖磨強度 [h/(kg·m <sup>2</sup> )]	絕熱溫升 (°C)
范厝水電站	普通混凝土	244	00	0	271	0.85	39.5
	低熱混凝土	150	25	7	338	1.77	23.1
李家峽水電站	普通混凝土	200	0	0	261	—	36.4
	低熱混凝土	165	0	7	264	—	32.1
東風水電站	普通混凝土	210	30	0	267	—	42.8
	低熱混凝土	165	40	5	349	—	38.7

### 案例

#### 1. 中國李家峽等工程

中國水電四局曾於 90 年代初對矽灰、飛灰雙摻混凝土在李家峽主體工程中使用進行研究與實踐，現場實測摻與不摻混凝土的絕熱溫升、混凝土收縮變形，其結果顯示，對水工大體積常用標準混凝土，摻用矽灰可使工程實體水化熱溫升降低 27% 左右，比向混凝土中摻加 40kg/m<sup>3</sup> 的冰的效果還要顯著，並且，他們在現場三維尺寸較大的混凝土澆築塊中（最長 24.16m）埋固定螺栓，然後用 GY-85 型收縮儀進行觀測，觀測部位均在表面，結果發現：前 2d 以乾縮為主，並達到最大，接著，由於混凝土升溫期出現膨脹趨勢，其收縮總值越來越小，15d 以後，應變已很小，最大量測收縮應變值儀為室內 1/3 左右。

1990~1993 年李家峽工程應用矽灰混凝土，其現場施工是成功的，共計使用矽灰 1000 噸以上，由於工地緊靠矽灰貨源地，共計節約材料費 500 萬元(人民幣)左右，收到良好的技術經濟效果。

#### 2. 挪威福瑞瓦斯壩

福瑞瓦斯水電站位於挪威西南部，大壩由高 95m、長 180m 拱壩和相鄰高 35m、長 1100m 的重力壩組成。混凝土方量 25 萬 m<sup>3</sup>，為改善混

凝土性能，減少開裂，經研究採用摻 7% 矽灰、23% 飛灰取代水泥以降低水化熱溫升，其配合比及性能見下表。

福瑞瓦斯壩大體積矽灰混凝土性能

部位	總膠凝材料 (kg/m <sup>3</sup> )	矽灰 (%)	飛灰 (%)	骨料大粒徑 (mm)	含氣量 (%)	抗壓強度(kg/cm <sup>2</sup> )		
						7d	28d	90d
內部	160	7	23	120	1.5	160	300	400
外部	215	7	23	60	4.0	240	360	460

該壩施工發現，表面混凝土很少泌水和離析，混凝土鋪築厚度 0.5m，連續澆築至高 3m，養護 3d，即可在上支立模板繼續澆築，加快了施工進度和模板周轉，10d 後，混凝土內部最高溫升為 20°C，減少了混凝土裂縫。