

淨水污泥再利用製磚 - 燒結條件之探討

黃志彬¹ 袁如馨² 孫國鼎³ 劉又瑞⁴ 廖錦聰⁵

摘要

台灣地小人稠，過去大量的淨水污泥採用掩埋處理並不為一適當之處置方法。淨水污泥每年所產生之體積可達 740~8900 萬立方公尺(濕基)，且品質相當穩定。本研究中，我們以淨水污泥製磚探討其燒結操作條件。由實驗結果顯示，淨水污泥在成型壓力為 220 kg/cm² 時，燒結溫度為 1100°C，燒結時間為 15 分鐘時，淨水污泥燒結體符合中國國家標準(CNS)一級磚之規範。當提高成型壓力至 440 kg/cm² 時，燒結溫度提升至 1150°C，燒結時間延長為 60 分鐘時，淨水污泥燒結體可符合一般鋪路磚之規範。為求降低製磚之經濟成本，我們嘗試將具良好黏土性質之水庫淤泥添加至淨水污泥中，以不同的混合比例探討混合污泥燒結體用於製磚之適當燒結條件。由實驗結果顯示，當水庫淤泥的混合比例為 80~90%，成型壓力為 220 kg/cm²，燒結溫度 1050°C，燒結時間為 60 分鐘時，混合污泥燒結體可符合 CNS 一級磚之規範。當水庫淤泥的混合比例為 30~60%，成型壓力為 220 kg/cm²，燒結溫度 1150°C，燒結時間為 60 分鐘時，混合污泥燒結體可符合一般鋪路磚之規範。因此，在淨水污泥中混合適當比例之水庫淤泥可有效降低製磚之經濟成本。

前言

根據台灣省自來水公司及台北市自來水事業處之統計，台灣地區 89 年度出水量達 37 億 2 仟多萬立方公尺，依 AWWA 及 ASCE (1996) 之方法估計，自來水廠所產生之淨水污泥為處理水量之 0.2~2.4%，易言之，台灣地區每年所產生之淨水污泥體積可達 740~8900 萬立方公尺(濕基)，大量的污泥產生必須要一妥善之處置，而且在最新的法規管理下，淨水場將面臨自行處理污泥之困境。

1、2：國立交通大學環境工程研究所教授

3：國立交通大學環境工程研究所碩士

4：國立交通大學環境工程研究所研究生

5：工業技術研究院環安中心正研究員

目前污泥的最終處置大多為衛生掩埋及海洋棄置，在最終處置前，污泥尚須視最終之處置而作適當的處理以達減量化、安定化和無害化之目的。不同種類的污泥，因性質有別，其處理處置之方式亦有不同，在台灣，廢棄污泥之最終處置方法大部分皆為掩埋處理，如此白白浪費了許多土地的有效利用。淨水污泥雖不是有害性廢污泥，但在地小人稠的台灣，大量的廢棄污泥採用掩埋處理並不是一適當的處置方法。利用燒結技術處理污泥並使其再利用，已有不少的學者專家進行一深度之研究，且多有良好的應用成果，但大部分研究的對象為下水污泥或工業污泥，如 Bernd & Carl (1997) 探討下水污泥製磚之研究、Liaw & Chang (1998) 探討將紙廠污泥製磚及輕骨材之研究、王鯤生等人 (1999) 探討下水污泥焚化灰渣燒結輕質骨材之研究、Espinosa & Tenorio (2000) 探討含絡之電鍍污泥取代部分水泥原料之研究等等，但對於數量龐大的淨水污泥卻少有探討。若將淨水污泥視為廢棄物質予以掩埋處理，將會造成掩埋場壽命之減短。在日本大阪市，為了解決此一問題，已著手進行淨水污泥於園藝用土的再利用。另外，水庫淤泥亦為一大量之廢棄物，台灣幾個主要水庫均有淤積之問題，淤積程度由 18% 到 68%，以台灣水庫總蓄水量 3 億餘立方公尺估計，淤泥量至少為 6 仟萬立方公尺，但因其成分比例類似磚用黏土之組成，其亦為製磚之良好原料 (Huang, 2001)，如能將其視為天然黏土加以利用，並配合淨水污泥之資源化再利用，則不但能解決廢棄物最終處置的問題，且能減少對自然資源之需求。

表 1 CNS 382.R2002 對一般建築用磚之規範及一般鋪路磚之規範

| | 吸水率 | 抗壓強度 | 比重 |
|-----|--------|---------------------------|---------|
| 一級磚 | 15% 以下 | 150 kg/cm ² 以上 | |
| 二級磚 | 19% 以下 | 100 kg/cm ² 以上 | 1.8~2.0 |
| 三級磚 | 23% 以下 | 75 kg/cm ² 以上 | |
| 鋪路磚 | 2% 以下 | 500 kg/cm ² | 2.2~2.6 |

本研究為評估以燒結處理技術將淨水污泥資源化之可行性，探討經由適當燒結操作條件之控制，將淨水污泥製成良好之燒結磚體，期望能得到與一般用磚品質相當的磚體。CNS 382.R2002 對一般建築用磚之規範及一般鋪路磚之規範如表 1。另一方面，水庫淤泥的性質近似黏土，且有機物含量少，因此我們將淨水污泥混合適當比例的水庫淤泥，探討混合污泥的燒結操作條件。期使燒結處理技術成為在處置產量龐大之淨水污泥時之可行資源化技術。

實驗材料與方法

實驗材料

(1) 淨水污泥之製備

淨水污泥取自台北直潭淨水廠經濃縮、脫水後之污泥餅，其為使用 PACI 做污泥調理劑，在取材時，因淨水廠將之置於日曬堆放廠儲存，故含水量不高。在進行燒結程序前，將淨水污泥餅予以粉碎，並以 105°C 烘乾至恆重後保存，待後續實驗使用。

(2) 水庫淤泥之製備

水庫污泥採至於石門水庫排泥池，其上游溪流為大漢溪，其流經之區域多為頁岩地質，在取材時，因水庫淤泥已在日曬堆放廠儲存已久，故含水量亦低。在進行燒結程序前，將淨水污泥餅予以粉碎，並以 105°C 烘乾至恆重後保存，待後續實驗使用。

實驗方法

實驗主軸分為三部分 (1) 探討燒結溫度及時間對燒結體物化性質的影響；成型壓力固定為 220 kg/cm²，燒結試驗溫度設定於 950~1150°C，試驗時間設定為 15~75 分鐘 (2) 探討模體成型壓力對燒結體物化性質的影響：分別以 110~550 kg/cm² 的壓力將污泥粉末加壓成矩形模體進行試驗，燒結溫度為 1000~1150°C，燒結時間固定為 60 分鐘 (3) 探討混合污泥中淨水污泥與水庫淤泥的混合比例對燒結體物性的影響：成型壓力固定為 220 kg/cm²，燒結時間固定為 60 分鐘，燒結溫度設定為 1050~1150°C 之間，水庫淤泥佔混合污泥之比例為 10%~90% 之間。其他相關之試驗操作條件分述如下：

(1) 研磨分級

試體組成粉體的大小，對燒結後之試體特性亦有不小之影響 (Tin 1994)，故為求整體研究之一致性，將污泥餅予以研磨分級，取粒徑小於 250 μm 之粉體進行後續之實驗。

(2) 加壓成型

本實驗所用之加壓成型機為 CARVER 出品之 No.3851 成型壓力機，可控制模壓成形之壓力大小，最大成形壓力為 12 Tons，成形模具為超合金鋼模，其粉體添充區為 6x 3x 2 cm 之方形區。在本實驗中探討成型壓力影響之實驗條件為 110 kg/cm²、220 kg/cm²、330 kg/cm²、440 kg/cm²、550 kg/cm²。

(3) 燒結

本研究所用之燒結爐為 Naber 之 N100H 型高溫燒結爐，最高溫度可達 1340 °C，可控制昇溫速率及恆溫時間。在燒結時升溫速率不宜過快，太快的升溫速率導致燒結體受熱不均，表面與內部之溫度相差甚大。在本研究中，以 3~5°C/min 之升溫速率將燒結爐升至既定溫度，燒結溫度範圍為 950~1150°C，燒結時間為 15~75 min。

乾燥泥餅之基本性質分析

分析項目包括三成分分析、重金屬濃度分析及化學組成鑑定。

(1) 三成分分析（水分、灰分、可燃分）

三成分分析方法參照環保署公告之 NIEA 203.00T~205.00T。

(2) 重金屬濃度分析

將泥餅及燒結後試體以研鉢進行研磨成粉體後，再進行重金屬總量分析實驗，以環保署公告之廢棄物重金屬總量檢測方法進行固體消化程序(NIEA R109.00C)，再以火焰式原子吸收光譜儀（AA）進行重金屬濃度分析。

(3) 化學組成鑑定

本實驗中先以能量分散光譜儀（EDS）對污泥中之元素種類予以鑑定，再以感應耦合電漿原子發射光譜分析儀（ICP-AES）量測乾燥污泥之學組成比例。

燒結體特性分析

本實驗對於燒結體之特性分析主要以燒失量、體積收縮率、吸水率、比重及抗壓強度為主要指標。為瞭解此燒結體是否可應用於自然環境之建築材料使用，將進行 TCLP 分析。

(1) 體積收縮率

在燒結的過程中，因試體粒子的黏結作用，使孔隙率降低，產生一緻密化的現象，因而會造成試體的收縮，一般來說，隨著燒結溫度時間的延長，體積收縮率會增大，燒結體

的緻密性會較佳 (Lu,1995)。體積收縮率為在燒結過程中試體體積在燒結前後之收縮量，試體之體積收縮率可由下列公式計算出：

$$\text{體積收縮率} = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\%$$

V_0 ：燒結前試體體積

V_1 ：燒結後試體體積

(2) 吸水率

吸水率為磚之最重要指標之一，Nagaharu (1997) 在以下水污泥灰製磚之研究中，發現全以下水污泥灰當作製磚之原料，磚體的吸水率會過高，而過高的吸水率將會導致生苔及 CaCO_3 結晶之問題。一般磚體之吸水率測試以 24 小時吸水率為主，檢測方法參照 CNS 382 & 1127

$$\text{吸水率} = [(W_1 - W_0) / W_0] \times 100\%$$

W_1 ：表面乾燥而內部飽和之試體重量

W_0 ：烘乾之試體重量

(3) 燒結體比重測定

本研究之密度測定是以經 24 小時吸水試驗後，燒結體呈現面乾內飽和狀態時，以排水體積法求得試體體積，再以乾燥試體之重量除以試體體積而得試體之密度，可以下列公式計算求得

$$\text{燒結體密度} = W_s / V_s$$

W_s ：烘乾之燒結體重

V_s ：燒結體體積

燒結體體積可以下列公式計算求得

$$V_s = 50 - (W_w / \rho_w)$$

$$W_w = W_2 - W_1$$

W_w ：水重

W_1 ：量筒重 + 烘乾之燒結體重

W_2 ：定量至 50 ml 時，量筒重 + 烘乾之燒結體重 + 水重

ρ_w ：水之密度

(4) 抗壓強度

為瞭解試體經過不同操作條件之燒結程序後試體強度變化情形，使用 ELE 出品之 EI 25-3525/02 型之壓力機進行燒結試體之抗壓強度試驗，試驗方法乃參照 CNS 382 & 1127 之標準方法，將試體置於抗壓平台予以加壓，至試體破碎時讀取最大受力值，將此值除以試體截面積而得試體的抗壓強度。

結果與討論

基本性質分析

由表 2 可知，淨水污泥 pH 約為中性，在此範圍內，污泥內的重金屬離子不易溶出，因而以往淨水污泥以掩埋方式處理，對環境應無危害。由標準毒性特性溶出程序 (TCLP) 可知，淨水污泥所有的重金屬溶出濃度皆符合法規限值。

對於一般經過調理脫水後的污泥，其污泥含水量應該在 60~70%，但從表 2 知，淨水污泥的含水量約 11%，這是因為直潭淨水廠先將污泥統置於一處，經由自然的日曬烘乾，故含水量再減少 50~60%，如此可大幅降低污泥再利用前烘乾處理所消耗之能源。由表 2 可知，水庫淤泥經由堆放日曬後，其含水量更少於 2% 以下。由可燃份分析知，淨水污泥及水庫淤泥在 800°C 可分解之成分皆不多，大部分皆為不易分解之無機成分，淨水污泥灰分達 74%，水庫淤泥更高達 90% 以上的灰分，故在進行燒結前處理前，可不先經一焚化程序，而直接以經過一 105°C 烘乾前處理的污泥原料進行後續之燒結程序，如此，亦可節省一龐大之能源消耗。

表 2 污泥之基本性質分析

| 基本性質 | 淨水污泥 | 水庫淤泥 |
|-------------------------------|--------|--------|
| pH | 6.59 | 6.72 |
| 水分 % | 11.73 | 1.42 |
| 灰份 % | 74.82 | 90.66 |
| 可燃份 % (以 800±50°C 燃燒 3 小時) | 13.45 | 7.92 |
| 熔流溫度 | 1520°C | 1450°C |

化學組成

組成成份的不同會影響試體的熔流溫度，並影響燒結最高溫度的決定，一般來說，燒結的最高溫度為熔流溫度的 0.8 倍 (程, 1990)。由表 3 可知，淨水污泥的主成份為 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 Na_2O 及 CaO ，此 7 種化合物佔總成份的 98%，試體之熔流溫度及燒結條件皆取決於這些成份的組成比例。

Nowok (1993) 定義 b/a 值為
$$\frac{\text{base}}{\text{acid}} = \frac{\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$
，若污泥之鹼性金屬成

份越高，燒結時所產生之液相黏滯度愈低，因而可降低燒結溫度。在此 8 種成分中， K_2O 及 Na_2O 的熔點溫度較低，一般可當作助熔劑，另外， Al_2O_3 為熔點極高之物質，約為 2300°C 。由表 3 可知，比較淨水污泥與磚用黏土之組成成分，淨水污泥之 Al_2O_3 的含量高於磚用黏土，故可預測淨水污泥的熔流溫度應高於磚用黏土，可能較不適合直接做為製磚之原料。但水庫淤泥 Al_2O_3 的含量與磚用黏土相近，預測水庫淤泥的熔流溫度應近似於磚用黏土，故水庫淤泥為一良好的製磚混合材料。

表 3 淨水污泥及磚用黏土之主要化學組成及熔流溫度

| | 淨水污泥 ^a (%) | 水庫淤泥 ^a (%) | 磚用黏土 ^b (%) |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| SiO_2 | 52.750 | 66.435 | 61.95 |
| Al_2O_3 | 20.150 | 15.726 | 16.95 |
| Fe_2O_3 | 6.750 | 6.135 | 9.27 |
| K_2O | 3.690 | 3.820 | 0.14 |
| MgO | 1.860 | 1.734 | — |
| Na_2O | 0.872 | 1.267 | 0.02 |
| CaO | 0.300 | 0.513 | 0.45 |

a: 本研究使用之材料

b: 參考文獻資料

燒結溫度與燒結時間的影響

燒結溫度可說是影響燒結體特性最重要之操作條件。林及段 (1991) 研究加熱溫度及加熱時間對氧化鋁顆粒擴散係數的影響，發現升高加熱溫度 100°C ($1500^\circ\text{C} \rightarrow 1600^\circ\text{C}$ ，增加比例 1/15)，氧化鋁顆粒的擴散係數增加 100 倍，但延長加熱時間 100 秒 ($1500^\circ\text{C} \rightarrow 1600^\circ\text{C}$ ，增加比例同樣 1/15)，擴散係數只增加了 3%，故可推論燒結時的溫度影響應會大於燒結時間的影響。

燒結溫度的提升，理論上可增加試體粒子的熱運動，促使粒子與粒子間的黏和作用，使頸部成長的現象較快產生。另外，燒結溫度的增加也可使燒結液相量較快速的產生，促使燒結體更加的緻密。

燒結時間對燒結體之物化特性亦有影響，燒結時間不夠長，導致試體受熱不均，粒子與粒子之黏和程度不佳，進一步的頸部成長現象不良，但若燒結時間過久，則試體區域軟化的程度加深，且浪費能源。曾有研究指出，若燒結溫度不高，則可藉延長燒結時間來達到相同之燒結效果。在相同的溫度下，燒結體的強度隨著燒結時間的延長而增高，但過長的燒結時間也會導致試體強度的降低，其原因為試體粒子與粒子間之黏結部分斷裂所造成 (Nowok, 1990)。此外，(Lu, 1995) 研究下水污泥灰表面積與燒結溫度之關係，發現隨著燒結時間的增長，燒結體的體積會隨之增加，但過長的燒結時間(2 小時以上) 會導致孔隙的崩塌，因而導致試體體積的收縮及燒結體呈現破裂之狀況產生。不管燒結時間是過短或過長，皆將導致燒結體之物性不良，致使燒結體之用途受到限制。在本研究中，成型壓力則固定於 220 kg/cm^2 ，燒結溫度設定於 $950\sim 1150^\circ\text{C}$ 之間，試驗時間設定為 $15\sim 75$ 分鐘之間，並分別探討對體積收縮率、比重、吸水率、抗壓強度之影響，其結果分述如下：

(1) 體積收縮率

在燒結過程中，我們不希望體積收縮過大，因過大的體積收縮率可能會造成燒結體的變形、破裂。圖 1 為不同燒結時間的淨水污泥燒結體體積收縮率隨燒結溫度變化之關係。由此可知，淨水污泥燒結體的體積收縮率隨燒結溫度的提升而增加，當燒結溫度在 $1000\sim 1100^\circ\text{C}$ 時，體積收縮率幾乎隨燒結溫度的提升成線性增加。在燒結溫度為 950°C ，淨水污泥的體積收縮率小於 10% ，燒結體之表面依然具有粉狀顆粒，此因粉體顆粒因受熱導致熱擴散，粉體顆粒之間的距離縮短，粒子剛產生接觸現象，但粒子黏和及頸部成長現象尚未開始，故燒結體微微收縮，燒結體內部的孔隙尚多，沒有產生一良好緻密化的作用。一般來說，隨著燒結溫度與時間的延長，體積收縮率會增大，燒結體的緻密性會較佳 (Lu, 1995)。另外，若燒結時間夠久，試體的有機物及低溫可分解的無機鹽類逸散出試體後，粒子與粒子之頸部成長現象持續進行，而使燒結體內孔隙度減小，造成體積收縮的現象 (Wang, 1998)。從燒結溫度 950°C ，淨水污泥燒結體之 SEM 照片，可看

出大部分的顆粒並無產生黏結現象，孔隙尚多。

淨水污泥在燒結溫度 1100°C 以上時，其體積收縮率為 40% 以上，甚至高達 55%，如此大的體積收縮率，將有造成試體破裂之可能性。但由實驗知，雖然其在高溫燒結時之體積收縮率過大，但其表面依然完整，沒有任何崩裂現象產生。

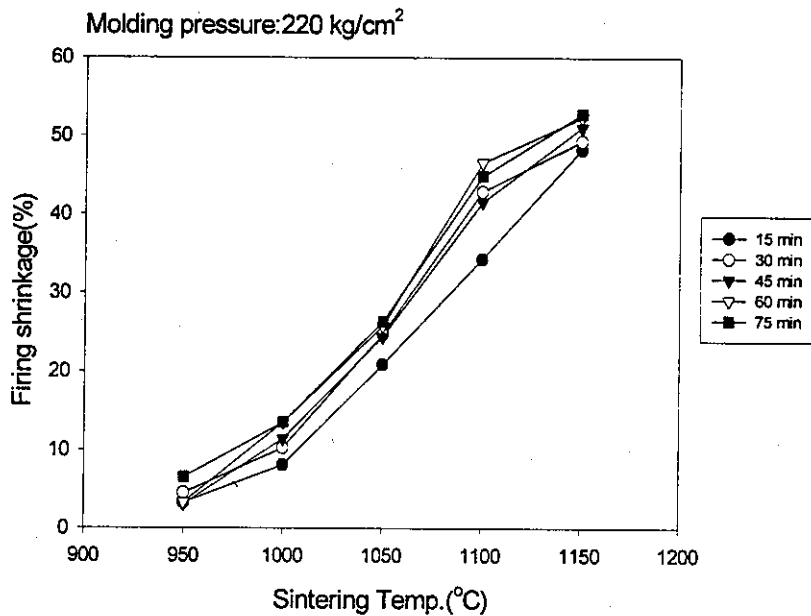


圖 1 燒結溫度對不同燒結時間之淨水污泥
燒結體體積收縮率的影響

(2) 比重

磚之種類分為普通磚、特殊磚、耐火磚及鋪路磚，隨著燒結溫度越高，其比重越高。普通磚的比重一般在 1.8~2.0，其燒結溫度在 800~1000°C。特殊磚包括輕磚及異形磚，輕磚的比重一般在 1.6 以下，以降低牆之負荷，但不用於結構牆中，內部多孔隙，可作為隔熱、隔音之用。鋪路磚的比重較普通磚重，一般在 2.2~2.6 間，其燒成溫度約在 1100~1300°C，吸水率極低，強度之要求亦遠高於普通磚（黃，1998）

圖 2 為不同燒結時間的淨水污泥燒結體比重隨燒結溫度變化之關係。由圖知，燒結體的比重隨燒結溫度的提昇與燒結時間的延長而增加，但燒結時間的影響遠小於燒結溫

度。當燒結溫度為 1050°C 以下時，淨水污泥燒結體的比重比一般磚頭之比重 1.8 為小。當燒結溫度在 1000°C 以下時，其比重甚至小於 1.5，隨著燒結溫度升至 1150°C，淨水污泥的比重升至 2.5 左右。另外，在燒結溫度超過 1050°C 時，淨水污泥燒結體的比重才較大幅度的增加，由此可知淨水污泥緻密化的速率在燒結溫度為 1100°C 時開始增快，而在此溫度時，我們可藉著將燒結時間縮短至 15 分鐘，使燒結體的比重亦小於 2.0。結果得知，淨水污泥有成為輕磚之潛力

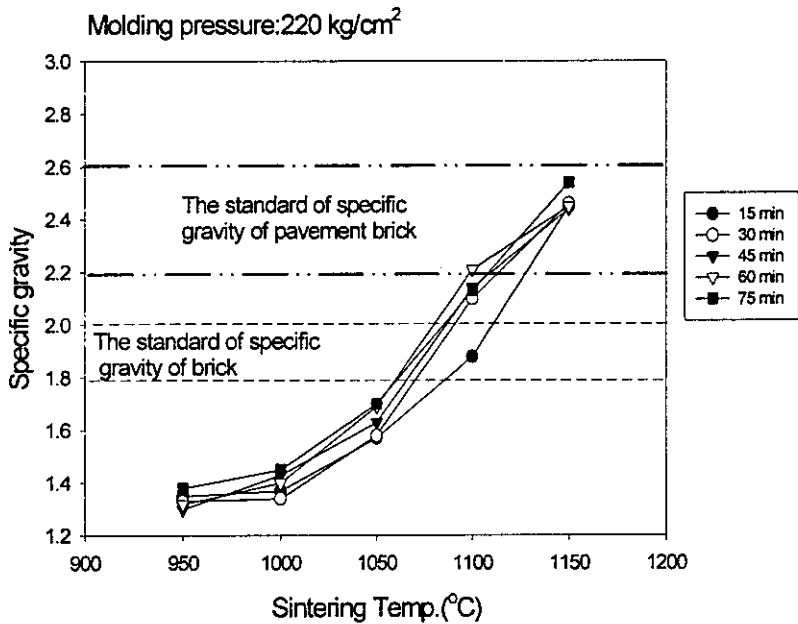


圖 2 燒結溫度對不同燒結時間之淨水污泥燒結體比重的影響

(3) 吸水率

圖 3 為不同燒結時間的淨水污泥燒結體吸水率隨燒結溫度變化之關係。吸水率隨著燒結溫度的提昇與燒結時間的延長而逐漸降低。由於，淨水污泥在燒結溫度為 1050°C 時，其吸水率尚無法符合 CNS 三級磚(吸水率上限 23%)之要求，但在燒結溫度為 1100°C 時，其吸水率才大幅降低至符合 CNS 一級磚之要求，顯見燒結溫度 1050°C 時，淨水污泥燒結體尚未有明顯之粒子黏結現象。從淨水污泥燒結體在燒結溫度為 1050°C 時之 SEM 照片，可見淨水污泥燒結體尚未有明顯之粒子黏和之現象。另外，對照圖 1 及圖 2 在燒結溫度為 1100°C 之淨水污泥燒結體之體積收縮率及比重，發現燒結溫度 1100°C 為淨

水污泥緻密化速率加快之起始點。

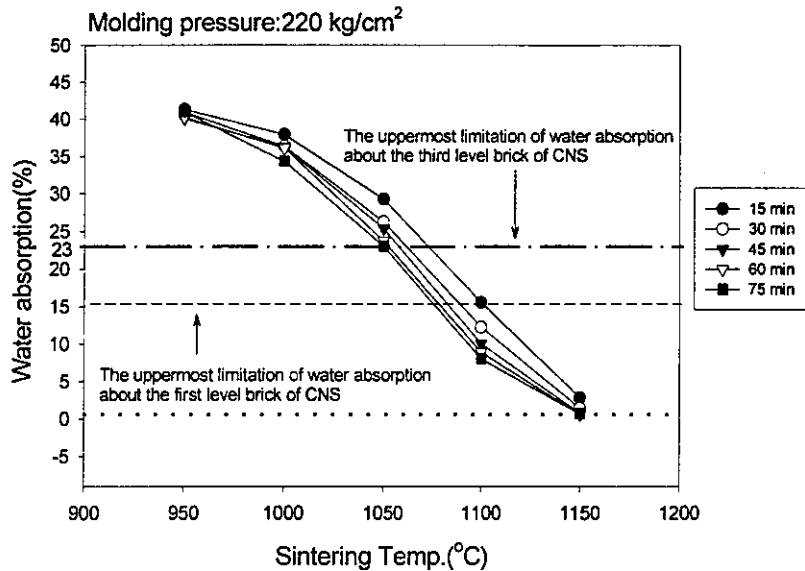


圖 3 燒結溫度對不同燒結時間之淨水污泥燒結體吸水率之影響

一般鋪路磚的吸水率規範在 2.0% 以下，由圖 4 可知，淨水污泥燒結體在燒結溫度為 1150°C 時，磚體吸水率接近零。另外由淨水污泥在燒結溫度為 1150°C 時之 SEM 照片（燒結時間為 60min），可看出燒結體的表面幾乎已無孔隙，故其燒結體幾乎不吸水。

(4) 抗壓強度

圖 4 分別為不同燒結時間的淨水污泥燒結體抗壓強度隨燒結溫度變化之關係。由圖可知，燒結體之抗壓強度隨著燒結溫度的提昇而增強，但在燒結時間在 45 分鐘以上，燒結溫度為 1150°C 時，燒結體之抗壓強度卻不增反減。經比較 1150°C 燒結體與其它燒結溫度之燒結體，發現燒結體已有彎曲之現象，導致施壓時應力分佈不平均，此應為造成燒結體抗壓強度降低之主因。

由圖 4 可知，淨水污泥燒結體在燒結溫度 1050°C 時，燒結體之抗壓強度即符合 CNS 一級磚之標準，但考量吸水率（見圖 3），其尚無法達到三級磚之標準，在燒結溫度為 1100°C，燒結時間為 15 分鐘時，淨水污泥燒結體之吸水率及抗壓強度皆符合一級磚之標準，且比重小於 2.0，也可做為一級建築用磚之用，但是，1100°C 已比一般用磚之燒結溫度高

約 100°C，故在做為建築用磚上，有能源問題之考量。

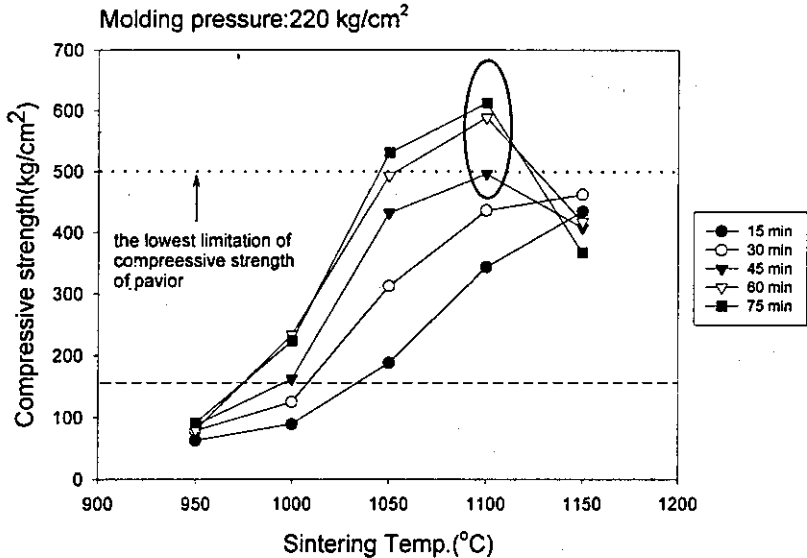


圖 4 燒結溫度對不同燒結時間之淨水污泥燒結體抗壓強度的影響

燒結時間對燒結體抗壓強度的影響較小，但適當的控制燒結時間亦可使燒結體的抗壓強度大幅增加。由圖 4 可知，在低溫燒結時 (950 及 1000°C 時)，過短的燒結時間 (15 分鐘) 根本無法有明顯的緻密化行為，此時的抗壓強度相差不多，提高 50°C 的燒結溫度並無法造成任何抗壓強度上的變化。但值得一提的是，在較高的燒結溫度時 (1050 和 1100 °C) 時，隨著燒結時間的延長，其抗壓強度即有一大幅度的提升。

較高的燒結溫度可增進燒結體的緻密化速率及程度，理論上，抗壓強度應能提升，但如上述所提，1150°C 的燒結溫度將會造成試體之軟化，因而導致抗壓強度的大幅降低，在燒結時間為 45 分鐘時，淨水污泥燒結體的抗壓強度甚至已低於 1050°C 同時間的抗壓強度了。在燒結溫度為 1150°C 時，隨著燒結時間繼續延長 (60 分鐘以上)，燒結體軟化的程度加深，不過，較短的燒結時間可避免軟化現象的產生，因而可提高燒結體之強度，在燒結溫度為 1150°C，燒結時間在 30 分鐘以下，淨水污泥燒結體之抗壓強度高於同時間的 1100°C 之燒結體，比重及吸水率皆符合一般鋪路磚之規範，但其抗壓強度尚不符合鋪路磚之規範，故淨水污泥在此燒結條件下並不能做一良好鋪路磚之材料。

成型壓力的影響

過低的成型壓力將使試體在燒結前不夠緻密，在燒結時受熱膨脹而崩解，提高成型壓力可使試體更緻密，在燒結時縮短粒子的黏和時間，提高緻密化速率。Chen and Lin (1996) 發現當成型壓力愈大時，試體之孔隙率降低，亦提升燒結時試體的緻密化速率，但施壓的時間愈長，並不會使試體更緻密。由於成型壓力的提升，效果相同於提升燒結溫度或增加燒結時間，且是屬於比較節省能源之方法，故為降低製磚過程的成本，成型壓力的影響實為一重要之考量。在本節中，成型壓力設定為 $110\sim 550\text{ kg/cm}^2$ 之間，燒結溫度設定於 $1000\sim 1150^\circ\text{C}$ 之間，燒結時間固定為 60 分鐘。並分別探討體積收縮率、比重與吸水率、抗壓強度如下：

(1) 體積收縮率

成型壓力的提升可使燒結前之試體粒子間的距離縮短，因而使試體粒子在燒結時擴散距離縮短，造成黏結現象提早發生而提高緻密化的速率。由圖5 可知，對於淨水污泥，成型壓力對體積收縮率的影響就不是這麼的明顯，即使在燒結溫度為 1150°C ，當成型壓力為 220 kg/cm^2 ，體積收縮率為 54%，但當成型壓力為 550 kg/cm^2 ，體積收縮率為 48%，也只不過少收縮 10%。淨水污泥燒結體之體積收縮率，雖然不因成型壓力的提升而有大幅度減少體積收縮的現象，但體積收縮率的降低，卻可明顯抑制試體之軟化程度，這將於後續由抗壓強度的測量證明之。

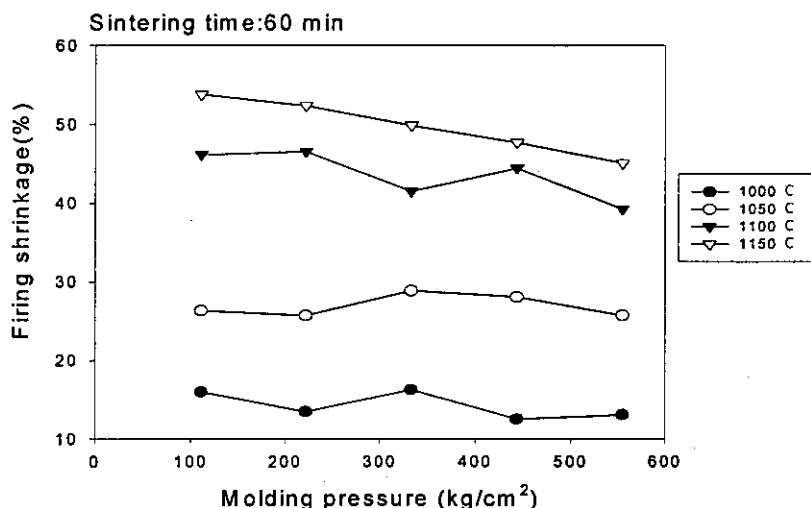


圖5 成型壓力對淨水污泥燒結體體積收縮率的影響

(2) 比重與吸水率

隨著成型壓力的增加，燒結體的比重也會隨之增加。由圖6可知，淨水污泥燒結體在燒結溫度為1100°C時，不管是任何的成型壓力，其燒結體之比重皆大於2.0。故對於一般建築用磚的用途而論，加大成型壓力，對淨水污泥燒結體來說都是一負面之影響。在此，我們將探討淨水污泥燒結體做為鋪路磚之可行性。

一般的鋪路磚，其燒結溫度約在1100~1300°C間，比重約為2.2~2.6，其對吸水率要求為小於2%，抗壓強度大於500 kg/cm² (宋 1989)。圖7為成型壓力對淨水污泥燒結體吸水率的影響。由前述可知，燒結溫度在1100°C以上時，淨水污泥燒結體之比重皆符合鋪路磚之一般規範，但對照吸水率之數據，得知淨水污泥在燒結溫度為1100°C時，成型壓力即使提升至550 kg/cm²，亦無法使吸水率低於2%，故淨水污泥必需在燒結溫度為1150°C之下方可使燒結體符合鋪路磚吸水率的要求。

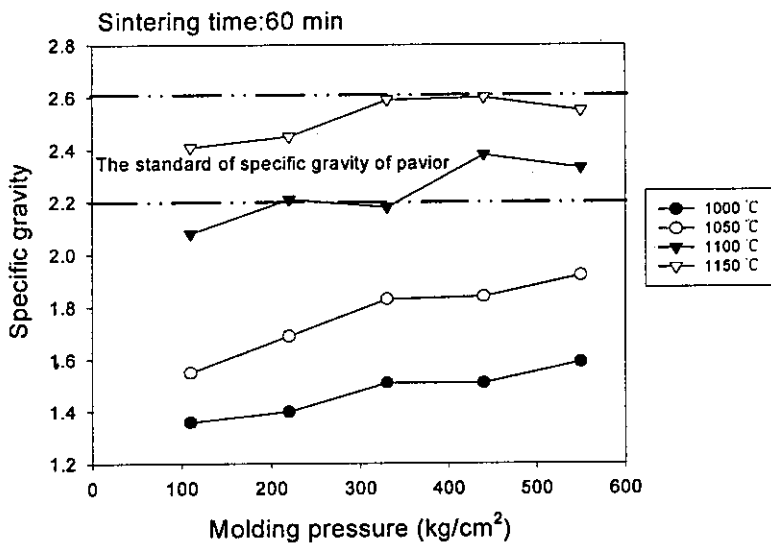


圖6 成型壓力對淨水污泥燒結體比重之影響

抗壓強度

為考量將淨水污泥燒結體作為鋪路磚之用途，抗壓強度必須大幅提昇至500 kg/cm²以上，由圖8可知，淨水污泥燒結體在燒結溫度為1100°C時，雖然成型壓力為220 kg/cm²

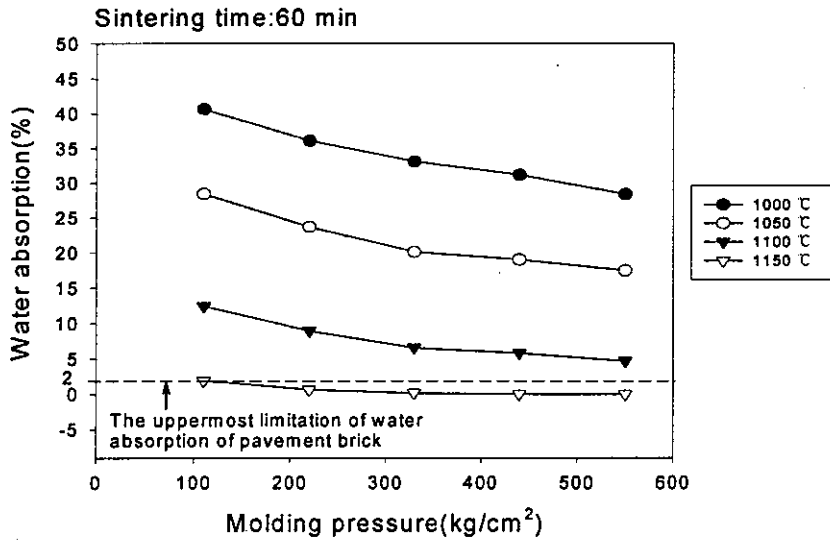


圖 7 成型壓力對淨水污泥燒結體吸水率的影响

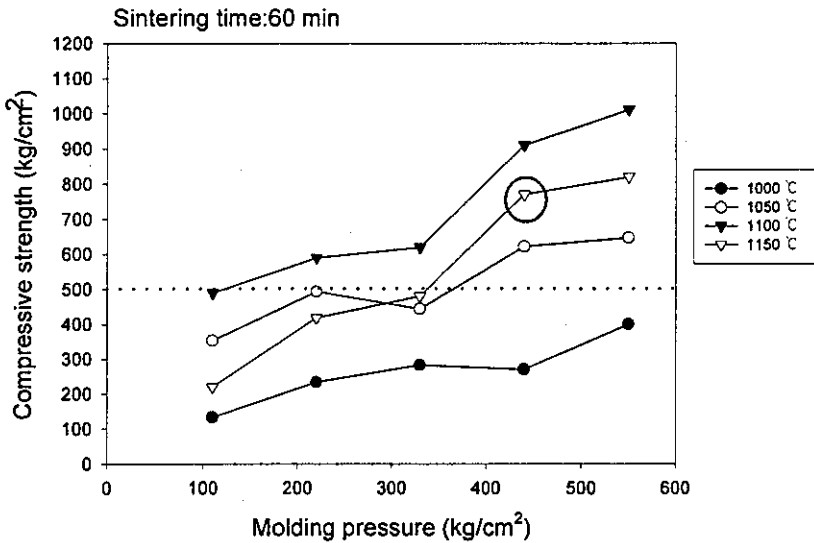


圖 8 成型壓力對淨水污泥燒結體抗壓強度的影响

時即符合鋪路磚之強度要求，但如前節所述，其吸水率並不符合鋪路磚之一般規範。故為符合吸水率之要求，只有在燒結溫度為 1150°C 時，淨水污泥才可符合要求。由圖知，燒結溫度為 1150°C 時，成型壓力提升至 440 kg/cm² 以上，淨水污泥燒結體之抗壓強度增

至 700 kg/cm^2 ，如此，淨水污泥亦可符合鋪路磚之規範。故雖然當燒結溫度為 1150°C 時，淨水污泥燒結體會因軟化彎曲而造成抗壓強度的大幅降低，但將成型壓力提升至 440 kg/cm^2 時，抗壓強度會大幅上升，亦即成型壓力的提升可降低試體軟化的程度。

混合污泥燒結體物性的變化及應用

由燒結溫度、燒結時間及成型壓力的探討可知，淨水污泥燒結體雖可在適當的燒結條件下作為一般建築磚及鋪路磚之使用，但其所適合之燒結條件範圍並不廣。Huang (2001) 發現水庫淤泥為一良好之製磚原料，且其適當之燒結條件的範圍較廣，另外，水庫淤泥亦為產量龐大之廢棄污泥。為了能擴大淨水污泥之燒結條件範圍並做一有效之利用，本研究考量將水庫淤泥以不同的比例取代淨水污泥，探討燒結溫度對此混合污泥燒結體物化性質的影響，及此混合污泥燒結體作為再利用製磚之方向。水庫淤泥添加比例佔總混合污泥 $10\sim 90\%$ 之間，成型壓力固定為 220 kg/cm^2 ，燒結時間固定為 60 分鐘，燒結溫度為 $1050\sim 1150^\circ\text{C}$ 之間。

比重及吸水率的變化

水庫淤泥燒結體之比重較淨水污泥燒結體為重，理論上，隨著混入水庫淤泥的比例增加，混合污泥燒結體之比重會越來越大。圖 9 為水庫淤泥的取代淨水污泥的比例對混合污泥燒結體比重之影響。由圖可知，在較低的燒結溫度時 (1050°C)，隨著水庫淤泥混合比例的增加，混合污泥燒結體的比重越重，但在越高的燒結溫度下，水庫淤泥混合比例的影響越小，在燒結溫度為 1150°C 時，水庫淤泥混合比例的多寡並不會對混合污泥燒結體比重有任何明顯的影響，其值皆介於 $2.4\sim 2.55$ 。另外，由圖 10 可知，隨著水庫淤泥混合比例的增加，混合污泥燒結體的吸水率會隨之下降，但如同比重一樣，在越高溫的時候，水庫淤泥的混合比例對混合污泥燒結體之吸水率影響就越小，在燒結溫度為 1150°C ，不管水庫淤泥的混合比例多寡，混合污泥燒結體之吸水率幾乎為零。當燒結溫度為 1050°C ，水庫淤泥的混合比例為 $60\sim 80\%$ 時，混合污泥燒結體之吸水率低於 19% ，且其比重介於 $1.8\sim 2.0$ ，如此已分別可符合 CNS 二級磚之相關規範，但在水庫淤泥的混入比例高達 90% ，混合污泥燒結體之比重及吸水率才能符合 CNS 一級磚之相關規範。

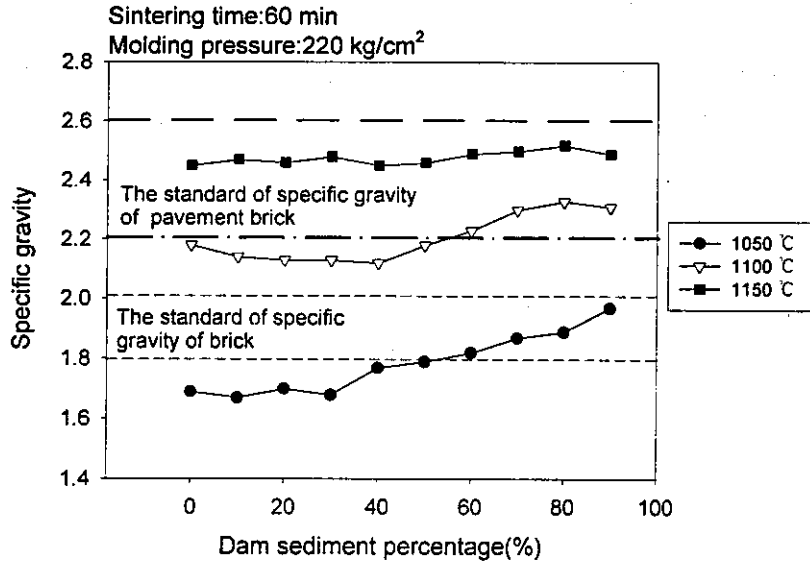


圖 9 水庫淤泥混合比例對淨水污泥燒結體比重之影響

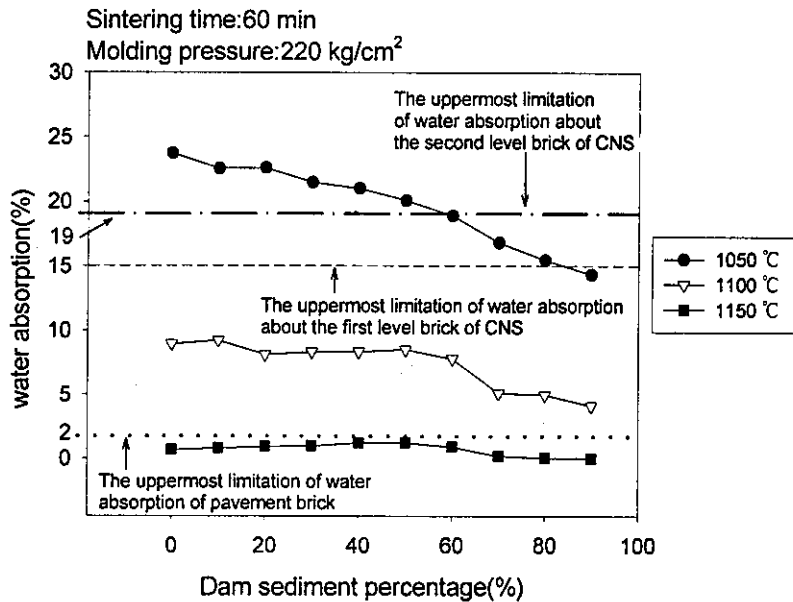


圖 10 水庫淤泥混合比例對淨水污泥燒結體吸水率之影響

抗壓強度的變化

水庫淤泥的熔流溫度低於淨水污泥，且因其具有良好之黏土性質，故理論上，在混合污泥中，水庫淤泥所佔的比例越高，混合污泥燒結體之抗壓強度也越高。從圖 11 可知，

當燒結溫度為 1100°C 時，混合污泥燒結體之抗壓強度的確隨著水庫淤泥混合比例的增加而逐漸升高。但當燒結溫度為 1050°C 時，混合污泥燒結體之抗壓強度卻隨著水庫淤泥的混合比例的增加而有一先降後升的現象，此可能因水庫淤泥燒結體之粉體黏和緻密化現象在燒結溫度為 1050°C 即產生，而淨水污泥在燒結溫度為 1100°C 才開始產生粉體黏和緻密化現象（孫 2001），故在燒結溫度為 1050°C 時，當混合污泥中水庫淤泥所佔的比例少於淨水污泥時，因水庫淤泥此時已產生粉體黏和而變成較大之粒子，致使混合污泥燒結體中之組成粉體粒徑大，甚至在混合污泥燒結體中有區域團塊（block）的現象產生，導致混合污泥燒結體之抗壓強度降低，但隨著水庫淤泥的混合比例大於 40% 時，抗壓強度即隨之上升，至水庫淤泥在混合污泥中所佔比例大於淨水污泥時（80~90%），混合污泥燒結體之抗壓強度已大於純淨水污泥燒結體，故由燒結溫度為 1050°C 的實驗中，我們知道兩種污泥混合在一起時，燒結溫度若未能使其中一種污泥產生黏和緻密化現象，則對燒結體的抗壓強度會造成負面的影響。

在燒結溫度 1050°C，不論添加水庫淤泥的比例如何改變，其混合後之污泥燒結體的抗壓強度皆符合 CNS 一級磚之抗壓強度規範，但考量吸水率後，只有在水庫淤泥的混合比例為 90% 時，混合污泥燒結體才符合 CNS 一級磚之標準，而在水庫淤泥之混合比例為 60~80%，混合污泥燒結體能符合 CNS 二級磚之標準。至於當燒結溫度為 1100°C，雖然任一水庫淤泥的混合比例，其混合污泥燒結體之抗壓強度及吸水率皆符合一般建築用磚之標準，但比重皆高於一般 1.8~2.0 的要求，如此則增加牆之重量負荷。故若考量將此混合污泥燒結體作為一般建築磚之使用，其燒結操作條件只有在燒結溫度為 1050°C，燒結時間為 60 分鐘時，水庫淤泥混入比例在 60~90% 方可用。

為能擴大淨水污泥的經濟效益，且能有效的消耗水庫淤泥，我們探討混合污泥燒結體作為鋪路磚之可行性。由燒結溫度、時間及成型壓力對燒結體物性的影響研究得知，雖然當成型壓力為 220 kg/cm²，燒結時間為 60 分鐘時，在燒結溫度為 1150°C，淨水污泥燒結體會因軟化彎曲而導致抗壓強度的大幅降低，但若將成型壓力提高至 440 kg/cm² 時，其抗壓強度會提升至符合鋪路磚的規範。在燒結溫度為 1150°C 時，隨著水庫淤泥混合比例的添加，混合污泥燒結體之抗壓強度亦隨之增加，當水庫淤泥的混合比例在 30~60% 時，混和污泥燒結體之抗壓強度已可符合鋪路磚之規範，但當水庫淤泥混合比例

達 70% 以上時，混合污泥燒結體之抗壓強度卻大幅下降，此因混合污泥中水庫淤泥已為大部分之物質，故降低混合污泥的熔流溫度，使燒結體的彎曲程度增加，導致混合污泥燒結體

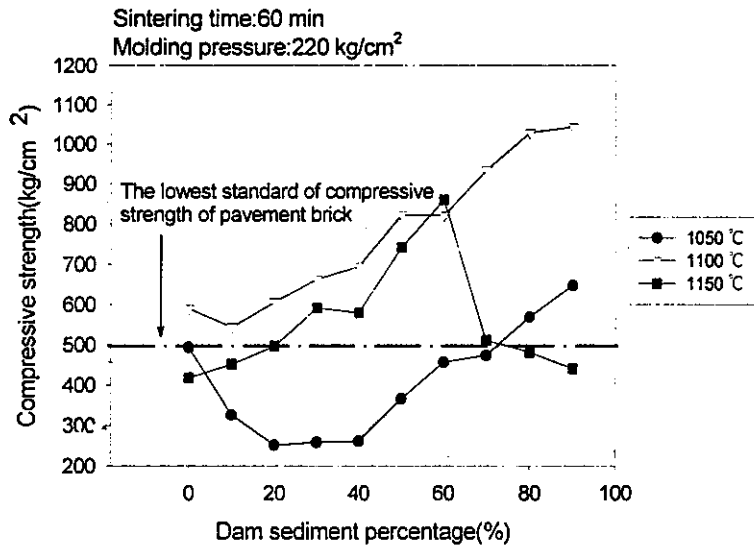


圖 11 水庫淤泥混合比例對混合污泥燒結體抗壓強度之影響

的抗壓強度大幅降低。與成型壓力影響之研究結果比較，混合污泥燒結體作為鋪路磚之使用，其水庫淤泥污泥可添加至 30~60%，不僅可大量消耗掉水庫淤泥，亦可使淨水污泥做為製磚用途擴大，且可不必提升成型壓力至 440 kg/cm²，僅需以 220 kg/cm² 的成型壓力即可，故將混合污泥作為鋪路磚之使用，可使淨水污泥做一有效之利用。

總結

1. 隨著燒結溫度的提昇，燒結體之體積收縮率變大，淨水污泥燒結體甚至可高達 50% 以上，但其表面依然完整，無任何崩裂之現象。
2. 在成型壓力為 220 kg/cm²，燒結溫度為 1100°C，燒結時間為 15 分鐘時，淨水污泥燒結體符合 CNS 一級磚之標準。而當成型壓力提升至 440 kg/cm²，燒結溫度為 1150°C，燒結時間為 60 分鐘時，淨水污泥燒結體符合鋪路磚之規範。
3. 在添加水庫淤泥之混合污泥研究中，水庫淤泥混合比例 90%，燒結溫度 1050°C，燒

結體可符合 CNS 一級磚之標準。當水庫淤泥混合比例為 60%~80%，相同的燒結溫度下，燒結體可符合 CNS 二級磚之標準。當燒結溫度為 1150°C 時，在混合污泥中增加水庫淤泥的比例至 30~60% 時，可提升燒結體之抗壓強度，使混合污泥燒結體能符合鋪路磚之規範。

4. 總而言之，本研究所建議之淨水污泥燒結溫度與時間、成型壓力之最佳操作範圍如圖 12 所示。

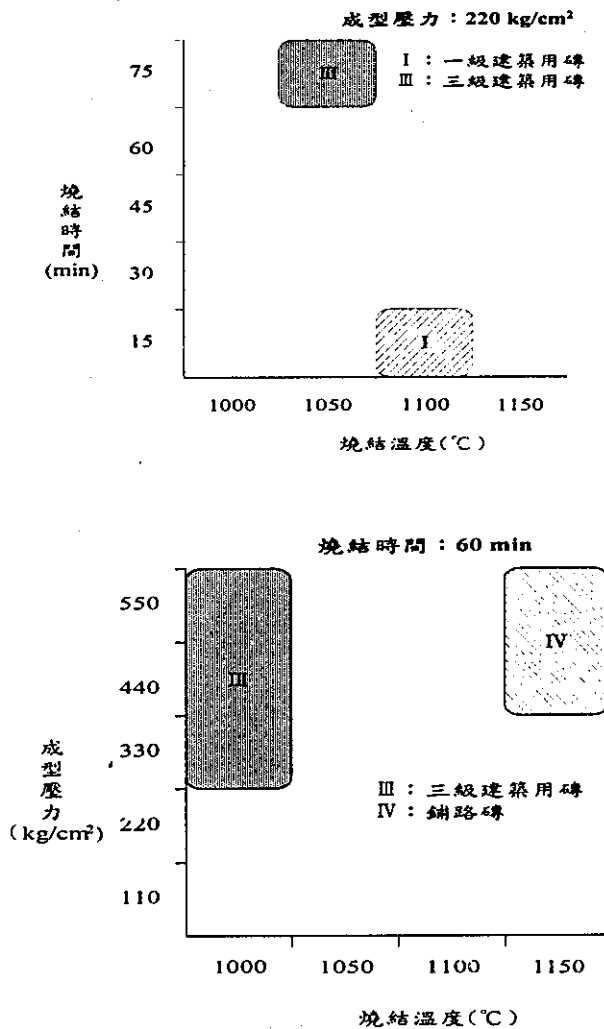


圖 12 淨水污泥燒結溫度與燒結時間、成型壓力之建議操作條件範圍

誌謝

本研究經費承國科會補助，台大環工所李公哲、林正芳教授的指導，淡江水環系康世芳教授文獻上的提供，以及工業院環安中心廖錦聰先生實務經驗的協助，特此誌謝。

參考文獻

- 程道腴，鄭武輝，「工業陶瓷」，徐氏基金會，1990。
- 林正雄、段維新等編，「粉末冶金」，中華民國粉末冶金協會，1991。
- 黃忠信，「土木工程材料」，三民書局，1998。
- 宋佩瑄、黃馨，「土木工程材料學」，大中國圖書公司，1989。
- 北川勝義，「台北自來水事業處淨水污泥餅再利用研討會」，2001。
- 王鯤生(1999)，「下水污泥焚化灰渣燒結輕質骨材之研究」，第十四屆廢棄物處理技術研討會論文集，545-552。
- Bernd W. and Carl F. S. (1997) Utilization of Sewage Age Sludge Ashes in the Brick and Tile Industry. *Water Science and Technology*, 36(11), 251-258.
- Chen H. K. and Lin C. I. (1996) Variations of Physical Properties in Pellets Containing Alumina/Carbon Powder Mixtures During Reduction and Nitridation. *J. of Material Science*, 31, 3549-3557.
- Espinosa D. C. R. and Tenorio J. A. S. (2000) Laboratory study of galvanic sludge's influence on the clinkerization process. *Resources, Conservation and Recycling*, 31(1), 71 - 82.
- Huang C. P., Pan J. R., Sun K. D. and Liaw C. T. (2001) Reuse of Water Treatment Plant Sludge and Dam Sediment in Brick-Making. *Proc. IWA'2001 Conf.*, Taiwan, 705-712.
- Liaw C. T. and Chang H. L. etc. (1998) A Novel Method to Reuse Paper Sludge and Co-generation Ashes from Paper Mill. *J. of Hazardous Materials*, 58, 93-102.
- Lu G. Q., Low J. C. F., Liu C. Y. and Lua A. C. (1995) Surface Area Development of Sewage Sludge During Pyrolysis. *Fuel*, 74(3), 344-348.
- American Society of Civil Engineers *Management of Water Treatment Plant Residuals* (1996). ASCE, USA
- Nowok J. W., Benson S. A. and Jones M. L. (1990) Sintering Behaviour and Strength Development in Various Caol Ashes. *Fuel*, 69, 1020-1028.
- Ting J. M. and Lin R. Y. (1994) Effect of Particle-Size Distribution on Sintering. *J. of Materials Science*, 29, 1867-1872.
- Nagaharu Okuno and Shiro Takahashi (1997) Full scale application of manufacturing bricks from sewage. *Wat. Sci. Tech.*, 36(11), 243-250.
- Nowok J. W., Benson S. A., etc. (1993) The effect of surface tension/viscosity ratio of melts on the sintering propensity of amorphous coal ash slags. *Fuel*, 72(7), 1055-1061.
- Wang K. S., Chiang K. Y. etc. (1998) The characteristics study on sintering of municipal solid waste incinerator ashes. *Journal of Hazardous materials*, 59, 201-210.