

台灣地區淨水污泥餅特性及資源化之發展趨勢

*康世芳，**劉明仁，***林志麟

*教授，**副教授，***碩士班研究生

*, ***淡江大學水資源與環境工程學系，**淡江大學土木工程學系

摘要

本研究目的為：(1) 考察日本淨水污泥餅再利用技術，(2) 調查台北自來水事業處(北水處)淨水場污泥餅化學、物理與力學特性，(3) 訪查臺灣地區淨水污泥餅再利用現況，以綜合檢討台灣地區淨水污泥餅資源化方向性。研究結果顯示日本於 1996 年污泥餅再利用率達 35%，且再利用於土木建築材料(骨材、水泥)與農業(園藝、客土)各約佔 50%。北水處淨水場污泥餅化學特性，重金屬含量低，屬一般事業廢棄物；污泥餅物理、力學特性，顯示為粒徑細小之粉粒與黏土類物質，具高塑性、高吸水率與低滲透性，於統一土壤分類法屬塑性粉土(MH)之無機土壤。此外，北水處污泥餅之 CBR (California bedding ratio) 值為 18%，取代 30-50% 管線工程回填級配料(天然砂與水泥)之 CBR 值可達 30% 以上，初步判斷符合自來水管線工程回填用土材料規範。推動污泥餅再利用需考慮技術、法規與經營策略等三方面，再利用可分為農業與土木建築材料，宜配合市政單位公園管理處、衛生工程處、養護工程處、環境保護局與教育局等局處共同推動。

前言

台灣地區自來水普及率已達 85% 以上，自來水處理過程產生之污泥餅須符合環保署「廢棄物清理法」之規定予以

適當地處理處置，或亦可依「經濟部事業廢棄物再利用管理辦法」申請再利用，以配合環保署「資源回收法案」政策。推估台北自來水事業處(簡稱北水處)與台灣省自來水公司(簡稱省水公司)每月產生污泥餅(含水率 30-50%)達 6,000 m³ 以上，委託清運至垃圾掩埋廠處置，清運處置費用為 1500-3000 元/m³。為降低污泥餅清運處置費及因應今後掩埋場不易獲得，故自來水事業單位須研擬污泥餅資源化對策。此外，台灣地區於 2000 年才開始淨水污泥餅資源化之研究[1][2]，相對地日本於 1980 年代已開始探討，且日本厚生勞動省(原厚生省水道環境部水道整備課)於 2000 年 3 月發行「淨水污泥減量及再利用手冊」[3]-[5]。本報告乃北水處於 2001 年 6-12 月期間委託筆者執行「淨水污泥餅再利用技術調查及應用於臺北自來水事業處淨水場可行性之評估」之研究成果[6]，報告內容分為：(1) 日本淨水污泥餅再利用技術之現況與考察、(2) 台灣地區淨水污泥餅特性與再利用現況、及(3) 台灣地區淨水污泥餅再利用之發展趨勢。

日本淨水污泥餅再利用技術與現況

日本淨水污泥餅再利用政策

日本自 1980 年即開始推動污泥餅資源化，依日本水道技術研究中心於

1998年研究報告[3][4]，指出日本全國淨水污泥餅再利用率約為35%，再利用可分為農業或土木建築，農業再利用為客土與園藝用土，土木建築則再利用為回填材料、道路骨材、路面材料與水泥原料。2000年3月厚生勞動省公告「淨水污泥減量及再利用手冊」，呼籲自來水事業單位推動淨水污泥減量及再利用[5]。筆者於2001年9月赴日本橫濱市及大阪市水道局考察淨水污泥餅再利用現況及技術，主要可分為四個領域，即(1)水泥原料、(2)園藝用土、(3)管線工程回填用土、及(4)混凝劑回收再利用，分述如下。

再利用於水泥原料

一般製造1噸波特蘭水泥所須各項原料之比率，石灰石、粘土、砂土、石膏及鐵分分別為1080、220、60、30及35Kg，可知石灰石為水泥主要成分。污泥餅可作為粘土替代品，替代率為粘土量20%，換言之，製造1噸水泥可再利用污泥餅約40Kg ($220\text{ Kg} * 0.20 = 44\text{ Kg}$)，且污泥加壓脫水時添加石灰及高分子脫水助劑與否，皆不影響污泥餅再利用。大阪市水道局污泥餅再利用於水泥原料居多(約20,000噸/年)，支付住友大阪水泥公司之污泥餅清運與處置費用為每噸8,000-8,500日幣，若運至掩埋場(鳳凰計畫海上掩埋場)則每噸7,100-9,700日幣[7]。

再利用於農業園藝用土

淨水污泥餅成分含微量錳、銅及砷等重金屬不妨礙植物生長，若能添加不足的肥料養分，則可作為植物之栽培用土。大阪市、橫濱市、東京都及千葉縣等水道局將污泥餅經乾燥床或無加藥(不添加石灰及polymer)脫水污泥餅經破碎、造粒及紫外線照射或乾燥(抑制雜草生長)，添加必要的適當量肥料，可作為園藝用土賣給民眾或園藝廠商。園藝用

土之商品名於大阪市、東京都及千葉縣分別為「River Green」、「東京土太郎」、及「千葉土太郎」[8][9]。

再利用於管線工程回填

一般輸配水管線工程施工時，管溝埋填襯土須以天然砂土作為回填土，污泥餅經破碎至適當粒徑及添加適當的混合物(如固化劑與安定劑等)，使污泥餅達到一定強度，則可作為管線工程回填用土。日本道路工程管理單位對回填用土之要求條件如下:(1)材料強度之修正CBR值為30%以上；(2)在濕潤狀態下亦可長期維持安定的品質；(3)對環境無不良影響。橫濱市水道局已於淨水場內設置污泥餅處理設施生產再生土，供管線工程回填；大阪市與東京都亦開始推動再利用於管線工程回填用土。

混凝劑回收再利用

淨水流程混凝、沉澱及過濾處理後衍生化學污泥，一般淨水場使用硫酸鋁或多元氯化鋁(PAC)為混凝劑，含鋁鹽化學污泥餅發生量多寡依原水濁度、混凝劑及脫水方式而異。混凝操作pH控制於中性，鋁鹽形成氫氧化鋁($\text{Al}(\text{OH})_3$)沉澱物，沉澱污泥主要成分為水分、氫氧化鋁及濁度(粘土)，鋁鹽污泥經硫酸酸化處理後，氫氧化鋁於酸性pH會溶解，除可回收鋁鹽混凝劑外，亦可減少污泥固體物重量。橫濱市水道局淨水場於污泥濃縮槽添加硫酸，回收混凝劑再利用於淨水程序，每年節省約30%混凝劑藥品費。

台灣地區淨水污泥餅特性及再利用技術現況

污泥餅化學特性

台灣地區淨水污泥大都採用壓濾式

(filter-press) 脫水方式，依操作條件污泥餅含水率可達 60% 以下，污泥餅化學成份影響再利用方式。筆者於平時及颱風時期採樣分析北水處直潭淨水場污泥餅，其基本特性 pH 值約為 6.55，含水率之 30-50% (平均 40%)，灼燒減量則為 9.6%，可知污泥餅中有機物含量低。污泥餅化學組成如表 1 所示，主要化學成份為 SiO₂ 及 Al₂O₃，分別佔 52.3% 及 24.2%，其餘組成則為 Fe₂O₃、MgO、CaO 等。因此，可知污泥餅性質與天然粘土或粉土成份相似，主要為矽酸鹽化合物及石英，Al₂O₃ 成分乃由於添加鋁鹽混凝劑。颱風高濁度污泥餅之 SiO₂ 之比例 59.93% 較平時污泥餅 (中、低濁度) 之 52.37% 高，此乃因颱風暴雨時河川所攜帶的泥沙量較多，造成污泥餅中矽酸鹽化合物的成份較高 [6]。

污泥餅中所含 Zn、Cu、Pb、Cr、Cd、Hg 等重金屬含量如表 2 所示，其中 Zn 含量 0.135mg/g，其次為 Cu、Pb、Cr，而 Cd 與 Hg 則低於偵測極限。相同的，颱風高濁度污泥餅中重金屬之比例除 Pb 含量較多外，為 0.345mg/g，其餘與一般污泥餅相似，但其含量亦相當低。污泥餅再利用時須檢驗毒性物質溶出 (TCLP) 溶出值，如表 3 所示溶出液中可測出 Zn、Cu、Pb、Cd 之含量，其中仍以 Zn 之溶出濃度 0.2mg/L 為最高，其次為 Pb 元素 0.12mg/L；颱風高濁度污泥餅以 Pb 含量最高為 0.43mg/L。由污泥餅之 TCLP 溶出值可知皆符合法規限值，故淨水污泥餅可列為一般事業廢棄物。

污泥餅物理特性

淨水污泥餅物理特性試驗可檢討污泥餅之材料與工程相關性質之差異，作為污泥餅再利用方向之參考，物理特性如表 4 所示。顯示污泥餅之顆粒粒徑相當細小，具輕微可塑性，且為高吸水率與滲透性低之材料，含砂當量值較低，

不符合路面工程之要求，於統一土壤分類法屬塑性粉土 (MH) 之無機土壤。

再利用技術現況

台灣地區淨水污泥餅資源化技術之研究於 2000 年開始，大學研究群探討再利用於燒結或熔融 (混合淨水污泥、工業污泥與生物污泥) 處理以再利用於製磚、輕質骨材之土木建築 [1][2]。此外，淨水場污泥餅目前委託清運及處置費用依運送距離而定為 1500-3000 元/噸，如表 5 所示民間廠商將污泥餅再利用於水泥砂漿、水泥、燒製紅磚或輕質骨材，但目前仍於試驗階段，正申請相關單位核准再利用中。為降低污泥餅清運處置費及因應今後掩埋場場地不易獲得，民間園藝公司與中興大學土壤環境研究中心共同合作，研究再利用於園藝用土；2002 年初北水處與省水公司分別已開始檢討推動再利用於製磚與園藝用土。但國內於管線工程回填用土及混凝劑回收再利用之探討仍然欠缺。

由日本橫濱市小雀淨水場自行設置污泥餅處理廠，污泥餅經破碎、混合及養生程序，生產改良土，再利用為自來水管線工程之回填砂。近年台灣地區砂石資源枯竭，參考日本發展技術經驗，污泥餅進行改良可應用於管線回填材料。圖 1 所示則為北水處自來水管線工程回填砂之設計斷面範例，圖中回填砂用於管溝回填至水管頂上方一定深度後，再回填 CLSM 底層材料，鋪設瀝青混凝土面層，再生土可取代迴填砂。

筆者採樣分析北水處淨水污泥餅之 CBR (California bedding ratio) 值僅有 18%，係為軟弱之土壤，故需改良其強度才能符合「台灣省自來水公司自來水管埋設工程施工說明書」中對回填砂級配粒料之 CBR 值需在 20% 以上規定。表 6 所示淨水污泥餅與天然砂之 CBR 值分別為 18% 與 46%，添加水泥 8-16% (以重

量計)且僅使用 20%天然砂,則可改善再生土(污泥餅、天然砂與水泥混合)之 CBR 值至 36-44%,符合 CBR 值 20% 以上規定[6]。換言之,減少 80%天然砂之開採,緩和對天然環境開發及破壞(開採天然砂)。綜合初步試驗,淨水污泥餅改良處理後可再利用作管線回填砂,具技術可行性。

淨水污泥餅再利用之發展趨勢

依前述淨水污泥餅化學特性調查,顯示淨水污泥餅為一般事業廢棄物且重金屬含量低。日本東京都淨水污泥餅約 50% 再利用於園藝,橫濱市亦再利用管線回填工程用土,由日本經驗得知淨水污泥餅主要再利用於土木建材或農業園藝時,對土壤環境無不良影響,故日本厚生勞動省及各縣市皆推動淨水污泥餅再利用。筆者對推動淨水污泥餅再用於農業園藝與土木建材之發展趨勢建議優先順序歸納如表 7 所示[6]。由於農業園藝方面無環境污染之虞,污泥餅再利用短中程發展方向優先考慮,台灣地區淨水污泥餅再用於農業園藝及對環境影響之資訊相當欠缺且不了解,惟再利用之檢討必須邀請農業園藝之專家學者參與研討。再利用管線工程回填材料(回填砂)方面,日本已有成熟技術經驗,同時又屬於公共工程之應用,污泥餅添加天然砂及水泥可改善力學特性且再用作管線工程回填砂。

推動淨水場污泥餅再利用乃長期工作,且須考慮環保法規、工程規範及政府各單位配合。綜合上述討論結果,污泥餅資源化,自來水單位可結合政府單位如公園管理單位(園藝、客土)、衛生工程單位(下水道管線回填用土)、道路養護或管線工程單位(回填用土)與環保單位(環保法令)等相關單位互相配合,共同推動淨水污泥餅資源化。參考本研究結果,省水公司與民間公司合作,於今年已通過申請審查,將淨水污

泥餅再利用於農業園藝;北水處亦正徵求合作公司申請污泥餅再利用。此外,東京都與大阪市採污泥酸化處理以回收再利用凝劑,乃從污泥產源減少污泥排出量[10],亦值得國內檢討。

誌謝

本文部份內容參考台北自來水事業處委託「淨水污泥餅再利用技術調查及應用於台北自來水事業處淨水場可行性評估」研究計畫,承蒙研究經費資助,特此致謝。

參考文獻

- 1.孫國鼎(2001)“水庫淤泥及淨水污泥再利用製磚之研究”,交通大學環境工程研究所碩士學位論文。
- 2.謝寅雲(2001)“淨水污泥/工業廢水污泥之燒結資源化研究”,台灣大學環境工程研究所碩士學位論文。
- 3.日本財團法人水道技術研究中心(1998)“淨水污泥の再生利用等に関する調査報告書(平成 7-9 年)”。
- 4.日本財團法人水道技術研究中心センター(1999)“淨水污泥の再生利用等に関する調査報告書”。
- 5.日本厚生勞動省(2000)“淨水污泥の減量化及び再生利用に関する手引き”。
- 6.康世芳(2001),「淨水污泥餅再利用技術調查及應用於台北自來水事業處淨水場可行性評估」,台北自來水事業處委託研究計畫期末報告書。

- 7.林秀樹(2001)“上水汚泥の有効利用”，環境技術，Vol.30, No.4, pp.25-29。
- 8.高谷幸秀、岩間清内、松田博章、武井讓二(1997)“千葉縣工業用水道の浄水發生土と資源化製品の開發”，工業用水，第 449 號，第 14-29 頁。
- 9.村田博、岩間清内、武井讓二、小堀英和、佐藤裕隆、菊本定美(1997)“浄水場發生土の園藝培養土としての開發”，工業用水，第 472 號，第 14-24 頁。
- (4) 10.關根勇二(2001)“再生 PAC の生産と排水處理の改善—システム提案—”，水道協會誌，第 70 卷，第 9 號，第 23-33 頁。

1. 經濟部早災緊急應變小組，「臺灣地區乾旱應變總結報告」，2002
2. 臺北自來水事業處，「臺北地區因應九十一年乾旱時期緊急應變措施」、「臺北地區因應九十一年乾旱時期輪流分區供水整體計畫」等，2002
3. 鄭錦澤，「從北投自來水輸水幹管搶修供水調度探討危機處理與管理」，中華民國自來水協會第十八屆自來水研究發表會論文集，2001

表 1 污泥餅之化學組成

| 項目 | 單位 | 平時污泥餅 | 颱風污泥餅 |
|--------------------------------|----|-------|-------|
| SiO ₂ | % | 52.37 | 59.93 |
| Al ₂ O ₃ | % | 24.23 | 19.32 |
| Fe ₂ O ₃ | % | 6.49 | 6.75 |
| MgO | % | 1.83 | 2.12 |
| CaO | % | 0.37 | 0.52 |

表 2 污泥餅之重金屬含量

| 項目 | 平時污泥餅 | 颱風污泥餅 |
|----|-------|-------|
| Zn | 0.135 | 0.138 |
| Cu | 0.03 | 0.04 |
| Pb | 0.029 | 0.345 |
| Cr | 0.01 | ND |
| Cd | ND | ND |
| Hg | ND | ND |

註：單位:mg/g-dry sludge

表 3 污泥餅之 TCLP 溶出值

| 項目 | 平時污泥餅 | 颱風污泥餅 | 法規限值 |
|----|-------|-------|------|
| Zn | 0.20 | 0.12 | 25.0 |
| Cu | ND | 0.08 | 15.0 |
| Pb | 0.12 | 0.43 | 5.0 |
| Cr | ND | ND | 5.0 |
| Cd | ND | ND | 1.0 |
| Hg | ND | ND | 0.2 |

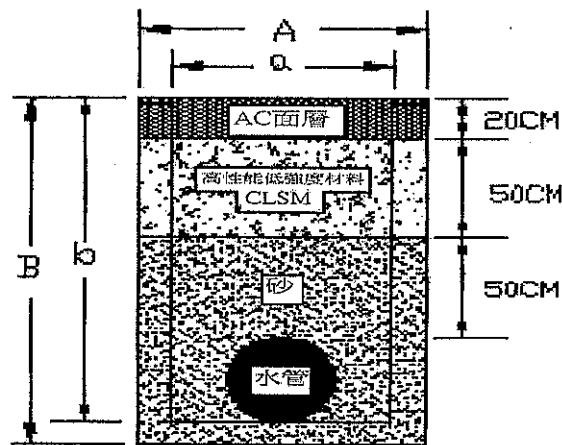
註：單位:mg/L

表 4 淨水污泥餅物理特性

| 試驗項目 | 試驗結果 | |
|-------|---|---|
| | 平時時期 | 颱風時期 |
| 粒徑分析 | 95%污泥餅顆粒粒徑小於 0.1 mm | |
| 阿太堡限度 | 液性限度 (LL) = 58.32% 塑性限度 (PL) = 52.20% 塑性指數 (PI) = 6.12% | 液性限度 (LL) = 55.81% 塑性限度 (PL) = 50.22% 塑性指數 (PI) = 5.59% |
| 滲透係數 | 滲透性為 1.11×10^{-4} cm/sec | 滲透性為 1.221×10^{-4} cm/sec |
| 比重 | 污泥餅比重在 2.00~2.11 之間， 平均值為 2.06 | 平均值為 2.08 |
| 吸水率 | 烘乾狀態之淨水污泥吸水率介 於 72.95~75.49% 之間，平均 73.87% | 平均值 77.07% |
| 含砂當量 | 氣乾狀態之污泥餅，所得之含砂 當量試驗平均值為 17% | 平均值 22% |
| 土壤分類 | ASTM 統一土壤分類屬於 MH (塑性粉土) | ASTM 統一土壤分類屬於 MH (塑性粉土) |

表 5 淨水污泥餅資源化建材廠商訪查資料

| | | | | | | |
|---------|-----------------------|------------------|---------------|-----------------|----------------|--------------|
| 廠商代號 | A | B | C | D | E | F |
| 建材業別 | 乾燥處理 | 乾燥處理 | 紅磚 | 輕質骨材 | 水泥 | 紅磚 |
| 污泥來源 | 工業污泥 淨水污泥 | 工業污泥 淨水污泥 | 工業污泥 淨水污泥 | 水庫淤泥 淨水污泥 | 工業污泥 紙廠污泥 | 淨水污泥 |
| 再利用* | 水泥砂漿 | 紅磚 | 紅磚 | 輕質骨材 | 水泥 | 紅磚 |
| 資源化生產流程 | 經高溫乾燥後，添加水泥製造水泥砂漿（壩料） | 經高溫乾燥後，運送至磚廠燒製紅磚 | 污泥與黏土混合後，燒製紅磚 | 污泥經造粒、高溫燒結成輕質骨材 | 污泥與水泥原料混合，燒製水泥 | 污泥與黏土混合，燒製紅磚 |



挖掘瀝青路面管溝回填斷面圖

圖 1 管線工程回填砂之設計斷面範例

表 6 淨水污泥餅再利用作回填砂之 CBR 試驗

| 試驗編號 | 配合比例（重量比） | CBR 值（%） |
|------|------------|----------|
| | 污泥餅：天然砂：水泥 | |
| 1 | 100：0：0 | 18 |
| 2 | 0：100：0 | 46 |
| 3 | 100：20：8 | 36 |
| 4 | 100：20：16 | 44 |

註：試體為浸水養護，養護時間為 7 天

表 7 淨水污泥餅於農業與建材方面資源化發展優先順序建議

| 資源化 | 應用性質 | 關鍵因素 | 優先順序 |
|---------|----------|---------|------|
| 農業園藝* | 園藝、綠化 | 污泥處理處置費 | 短、中程 |
| 管溝回填砂** | 管線回填公共工程 | 污泥需先強化 | 短、中程 |
| 紅磚 | 一般建材 | 污泥處理處置費 | 中、長程 |
| 水泥 | 一般建材 | 污泥處理處置費 | 中、長程 |
| 輕質骨材 | 一般建材 | 污泥處理處置費 | 中、長程 |

註：*農業園藝再利用於日本為成熟技術且商品化。

**若淨水場自行設廠生產，則污泥清運處理成本低。