

簡述土壤壓實度快速控制法 於土石壩填築之應用

蔡宗翰／經濟部水利署水利規劃試驗所工程師

土壤填方之壓實度與含水量為控制土壩之強度與水密性的重要因素，也是施工之品管指標。施工過程若含水量或壓實度控制不當，往往造成塌陷、掏空或破壞，對大壩穩定影響甚鉅，甚至蓄水後易造成滲漏，因此檢測的方法及過程相當重要。近年來，除傳統的 Proctor 夯實試驗外，尚有利用介電度量測（ADR、FDR 及 TDR）等之技術，惟受限於材料性質、施工便利性及推廣性等因素，因此，國內大壩施工經驗實務上，以目前國內近期完成的工程案例（寶山第二水庫及湖山水庫），皆使用的檢驗標準方法為土壤壓實度快速控制法，因此簡述該方法供實務參考應用。

理論基礎

一般將不同含水量與乾密度作圖（如圖 1），在最佳含水量處會有一最大乾密度存在，然而將夯實曲線改以濕密度與含水量表示，則在最佳含水量位置並不會有一最大值產生。因此，若定義一正規化之含水量 z 為

$$z = \frac{\omega - \omega_f}{1 + \omega_f} \quad (1)$$

其中， ω_f 為選定之任一含水量，則濕密度與 z 之關係圖如圖 2，在最佳含水量 z_m ($z_m = \frac{\omega_o - \omega_f}{1 + \omega_f}$ ， ω_o 為最佳含水量) 處仍非最大值，但若將濕密度皆除上其 x 座標值取得轉換後之濕密度曲線 (converted wet density)

$$\rho_{t,conv} = \frac{\rho_t}{1+z} = \frac{\rho_d(1+\omega)}{1+z} = \rho_d(1+\omega_f) \quad (2)$$

其中， $\rho_{t,conv}$ 為轉換後之濕密度， ρ_t 為土壤濕密度， ρ_d 為土壤乾密度。則此轉換後之濕密度相當於乾密度放

大 $(1 + \omega_f)$ 倍之結果，具有與乾密度之夯實曲線相同之特性（在最佳含水量，相對於 z_m ）下有最大值。由此，若將 ω_f 選定為現地土壤之含水量，則現地土壤之夯實度 D 為

$$D = \frac{\rho_d}{\rho_{d,max}} = \frac{\rho_d(1+\omega_f)}{\rho_{d,max}(1+\omega_f)} = \frac{\rho_{t,conv}}{\rho_{t,conv,max}} \quad (3)$$

其中， $\rho_{d,max}$ 為最大乾密度， $\rho_{t,conv,max}$ 為最大轉換濕密度。此即為快速控制法中對於夯實度控制之理論基礎。

試驗方法及流程

適用範圍

適用於通過 #4 號篩且 #200 號篩以下之細粒料含量超過 15% 以上之粘性土壤，在不須明瞭土壤含水量與乾土單位重下，快速測得夯實度之方法。

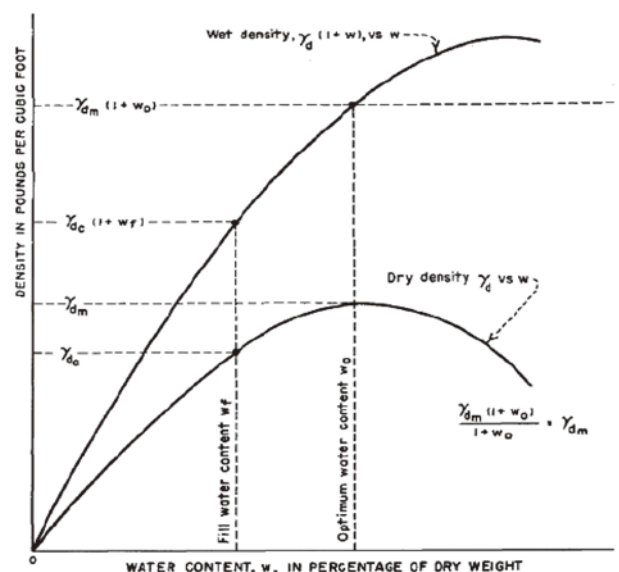


圖 1 密度與含水量之夯實曲線圖

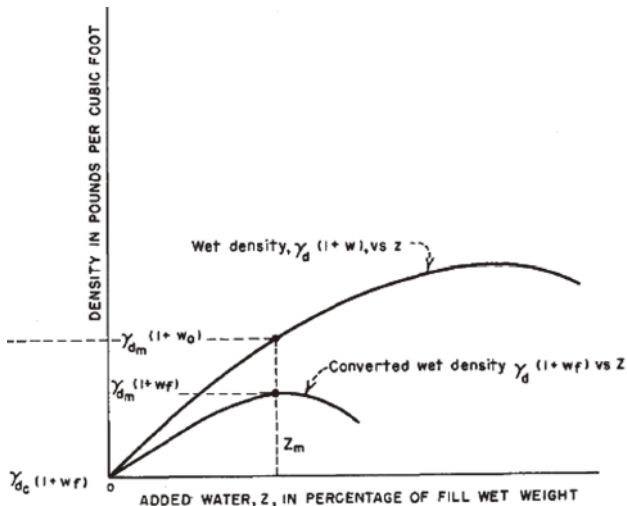


圖 2 密度與正規化含水量之夯實曲線圖

試驗方法

測試程序分為三個部份，求取工地密度、夯實試樣以獲得夯實曲線及計算最大乾密度、D 值及 $\omega_0 - \omega_f$ 。

- (1) 以砂錐法方式求取 #4 號篩以下之工地濕密度（若試驗包含粗粒料則需進行修正）。
- (2) 砂錐法完成後於該孔附近取回通過 4.75 mm 試驗篩至少 14 kg，以土壤夯實標準測試程序之 A 法（USBR 5500）進行第一個試樣夯打，求得試樣之濕密度，其記為 $\rho_{wet\ first}$ 。
- (3) 準備第二個試樣進行夯實試驗，將 3.5 kg 試樣放置在攪拌容器內，量測 70 g 的水，這個量使試樣增加 2% 之含水量，快速的攪拌試樣避免水分散失。
- (4) 進行夯實試驗並計算其濕密度， $\rho_{wet_c} = \frac{\rho_{wet}}{1 + \frac{z}{100}}$ 。
- (5) 準備第三個試樣，而第三個試樣須加水或減水，則須依據第一個與第二個試樣濕密度而定。若第二個試樣濕密度大於或等於第一個，則使用加水方式進行第三個試樣夯實；反之，則使用減水方式進行第三個試樣夯實。
- (6) 加水方式跟第二個試樣相同方式進行，假如第三個試樣之濕密度少於或等於第二個試樣濕密度，則可進行下一個步驟。反之，則繼續加水（2%）進行夯實，直至所得之濕密度小於或等於第二個試樣之濕密度。
- (7) 減水方式則將 3.5 kg 之試樣，在不減少試樣前提

下，以吹風機或熱能使試樣之水分散失 70 g 後進行夯實試驗。若第三個試樣所得之濕密度小於或等於第一個試樣濕密度，則夯實完成，可進行下一步驟。反之，依據上述方法減少試樣水分後進行夯實試驗，直至所得之濕密度小於或等於第一個試樣之濕密度。

- (8) 標示三個試樣之濕密度為 A、B、C，濕密度最高者標示為 B，少於 B 之含水量 2% 者標示為 A，多於 B 之含水量 2% 者標示為 C，如圖 1。
- (9) 定義 x_A 、 x_B 、 x_C (%) 為 A、B、C 點之加水量（例 -2、0、+2）， y_A 、 y_B 、 y_C 為 A、B、C 點之濕密度。
- (10) 計算得 $x_1 = x_B - x_A$ 及 $x_2 = x_C - x_A$ （若增量為 2%，則 $x_1 = 2$ 、 $x_2 = 4$ ）。
- (11) 計算得 $y_1 = y_B - y_A$ 及 $y_2 = y_C - y_A$ 。

$$(12) \text{ 計算 } x_m = \frac{1}{2} \left[x_1 + \frac{(x_2 - x_1) \left(\frac{y_1}{x_1} \right)}{\left(\frac{y_1}{x_1} \right) - \left(\frac{y_2}{x_2} \right)} \right]$$

$$(13) \text{ 計算 } z_m = x_A + x_m \text{ 及 } y_m = \frac{-(x_m^2 y_1)}{x_1(x_1 - 2x_m)}$$

$$(14) \text{ 計算現地含水量之最大濕密度 } \rho_m = y_A + y_m \text{ 及 } \omega_0 - \omega_f = (z_m + MA)$$

$$(15) \text{ 計算 } D_{value} = \frac{\rho_{wet_f}}{\rho_m} \times 100$$

$$(16) \text{ 次日砂錐法試驗之含水量求得，則可計算最大乾密度 } \rho_d = \frac{\rho_{wet}}{1 + (\omega_f / 100)} \text{ 及最佳含水量 } \omega_0 = \omega_f + [(1 + \omega_f / 100) \times (z_m)]$$
，詳細之流程圖詳圖 5。

快速控制法之優點

土壤壓實度快速控制法提供了迅速可求得含水量差值及密度值，對於趕工之輾壓工程，無需等待隔日含水量值，根據土料在三種不同含水量情況下之室內夯實試驗，當日就可算出壓實度 D 值及含水量差值 $\omega_0 - \omega_f$ ，可提供現場品管即時控管。試驗時間短，自申驗至數據完成，僅需 1 個半小時估計出現地之密度而在隔日獲得確認，不會耽誤升層的現場進度，因此廣為使用。

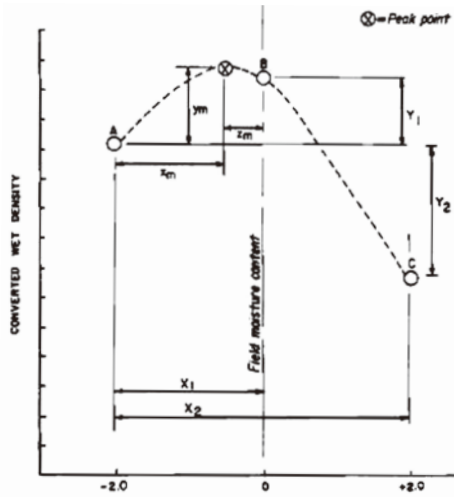


圖3 快速控制法夯實曲線圖

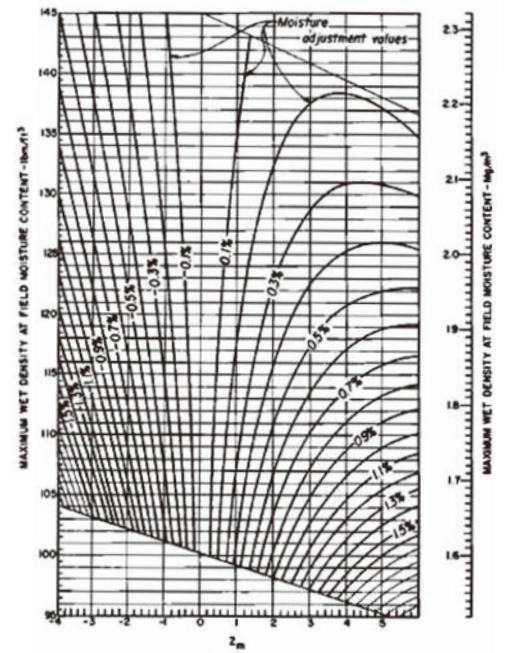


圖4 含水量調整圖 (MA圖)

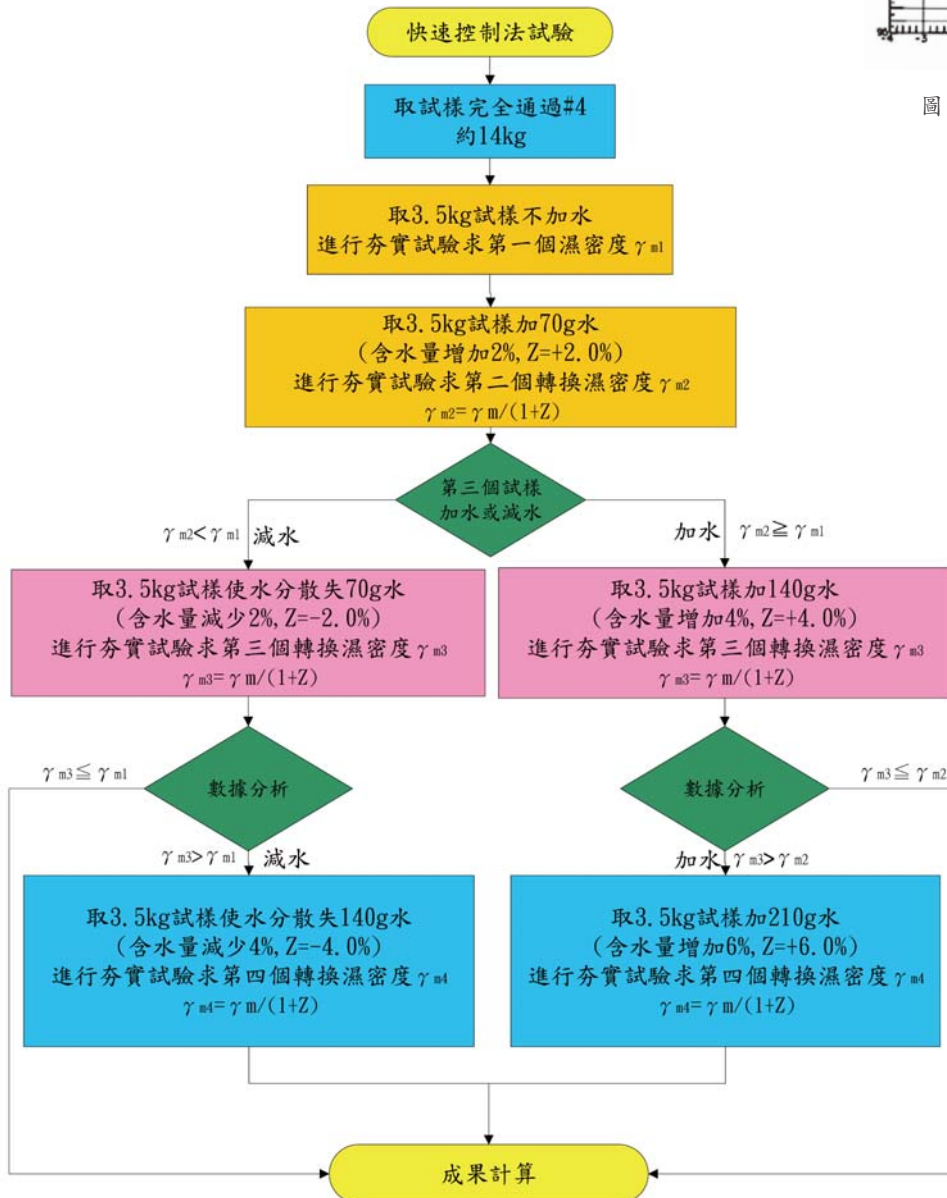


圖5 快速控制法流程图

參考文獻

1. 研究報告1，國立交通大學防災與水環境研究中心，「輾壓土壤之含水量與壓實度品質技術研究總報告」，經濟部水利署水利規劃試驗所研究報告，台中（2010）。
2. 標準測試程序1，經濟部水利署水利規劃試驗所湖山水庫工地實驗室，「土壤壓實度快速控制法標準測試程序」，經濟部水利署水利規劃試驗所，台中（2011）。
3. 試驗規範1，USBR 7240，「Performing Rapid Method of Construction Control」，美國墾務局（1998）。