

# 卵石及乾砌石牆之物理性質－頭前溪產卵石

## The Physical Properties of Cobble and Dry Stone Masonry Wall – Tou-Qian River's Cobble –

中華大學土木工程學系  
教授

楊朝平\*

Chau-Ping Yang

### 摘 要

台灣地區多天然卵石，而「就地取材」乃是生態工法之大原則。雖然人類使用卵石已有數千年歷史，但因缺少科學化的研究，致尚欠缺相關於卵石品質要求及砌石構造物安全性分析上的基本資料，而有待更進一步研究。為此，本研究以新竹縣頭前溪產之卵石(15 cm<粒徑<74 cm)為樣本，依其粒徑分成數組，量測卵石及乾砌石牆之物理性質，並以幾何及統計方法觀察之。

研究發現(1)卵石隨著最大徑  $d_1$  之增大，愈呈細長狀，但扁平狀漸不顯著；(2) (平均值±標準差)值域於  $(d_1/d_2)$  數據為 1.15~1.81、於  $(d_2/d_3)$  數據為 1.09~2.19， $d_2$  及  $d_3$  分別為卵石之中間徑及最小徑；(3)所推導卵石面積及體積計算公式之相關性甚高；(4) 卵石之平均量測單位重為  $25.04 \text{ kN/m}^3$ ，平均浸水單位重為  $15.23 \text{ kN/m}^3$ ；(5)乾砌石牆之平均量測單位重為  $14.15 \text{ kN/m}^3$ ，理論單位重為  $13.12 \text{ kN/m}^3$ ，理論浸水單位重為  $7.98 \text{ kN/m}^3$  及(6)乾砌石牆之平均量測孔隙率為 0.378、理論孔隙率為 0.476。

**關鍵詞：**生態工法，卵石，乾砌石牆，物理性質。

### ABSTRACT

Taiwan is abundant in natural cobble and one of the principal of the ecological construction method is "full utilization of field materials." Although, human beings have built masonry structures for thousands years, the scientific study on properties of masonry structures is still scarce. It is necessary to do more research in order to meet the needs of material specification and the safety analysis on masonry structure. Therefore, this study uses the cobbles gathered from Tou-Qian River, Hsinchu County as samples. The sizes of these cobbles range from 15 cm to 75 cm. Depending on their

\*通訊作者，中華大學土木系教授，30012 新竹市香山區東香里五福路 2 段 707 號，yep@chu.edu.tw

sizes all samples are divided into several groups for measuring the physical properties of the cobble and dry stone masonry wall. Then, those properties are observed by geometrical and statistical methods.

The results from this study show that the cobbles become slender and un-platy with increasing the maximum dimension  $d_1$ . The statistical domains of (mean value  $\pm$  standard deviation) of  $(d_1/d_2)$  and  $(d_2/d_3)$  for cobbles are range from 1.15 to 1.81 and from 1.09 to 2.19 respectively. The symbol of  $d_2$  and  $d_3$  are defined as intermediate and minimum cobble dimension respectively. The equations derived by author for estimating the area and volume of cobble are accurate. The mean measured unit weight and mean submerged unit weight of cobbles are  $25.04 \text{ kN/m}^3$  and  $15.23 \text{ kN/m}^3$  respectively. The mean measured unit weight, theoretical unit weight and theoretical submerged unit weight of dry stone masonry wall are  $14.15 \text{ kN/m}^3$ ,  $13.12 \text{ kN/m}^3$  and  $7.98 \text{ kN/m}^3$  respectively. The mean measured porosity and theoretical porosity of dry stone masonry wall are 0.378 and 0.476 respectively.

**Keywords:** Ecological construction method, Cobble, Dry stone masonry wall, Physical properties.

## 一、前言

生態型河溪整治工法係以順河性、因地制宜及就地取材為原則，因為臺灣河溪多石材，而使其成為生態工法的重要材料；砌石牆則為最常見之構造物。石材構造物之歷史等長於人類生存史，雖然古人之石材技術令人歎為觀止，但自進入二十世紀隨著人類大量使用混凝土後，石材技術已漸失傳。另一方面，進入科學時代凡事需量化及分析，但因石材構造物已被混凝土取代，故其相關科學化研究亦不多，而有待研究者將石材之老材料、老工法賦予力學新生命。砌石構造物之穩定性分析為「力」，石材及其構造物之品質要求為「物理性質」，吾人亦須依其「物理性質」計算「力」。為此，本研究量測石材之粒徑、面積、體積、單位重及乾砌石牆之單位重、孔隙率，並觀察之；係以臺灣砌石構造物中最常用之卵石為試驗材料。

## 二、文獻回顧

### 2.1 石材之性質

臺灣多土石流，使河溪中、下游淤積大量卵礫石土；石材之母岩主要為火成岩、變質岩及沉

積岩。火成岩之礦物成分均勻，無層狀構造；變質岩之礦物成分視原岩之種類而差異大(如「板岩」之原岩為「頁岩」)，抗風化力弱；沉積岩係卵石、礫石、砂、粉土及黏土等經輸送、沉積及壓密而形成，其性質依礦物排列及固結程度而異(徐鐵良，2005)。

國內外對於石材尺寸之定義不一，且依學門領域而異。如於臺灣之防洪工程領域，水利局(1968)定義礫石為粒徑小於 10 cm 者、卵石為粒徑 15 cm~70 cm 者，更大者為大石。於國外之生態工程領域，則以粒徑小於 2 cm 者為砂及粉粘土、粒徑介於 2 cm~6.4 cm 者為礫石、粒徑介於 6.4 cm~25.6 cm 者為卵石、更大者為岩石(Kemp et al., 2000)。

於實務上，依據水利局之「防洪工程設計手冊」，石材用於砌石構造物時，考慮五圍砌、六圍砌、七圍砌等之易砌性及其扁平形狀限制(似橢圓者佳)，建議 $(d_1/d_2) = 1.2\sim 1.8$ 及 $(d_2/d_3) < 2.0$ ；參見圖 1，茲定義 $d_1$ 、 $d_2$ 及 $d_3$ 分別為卵石之最大徑、中間徑及最小徑(水利局，1968；Hirschfeld, 1973)。另外，根據水土保持技術規範第二百八十七條(砌石工程)規定，所使用塊(卵)石之最大徑範圍以不超過設計粒徑之 50%為宜。

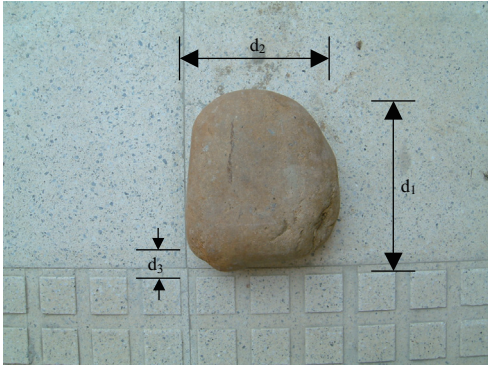


圖 1 定義卵石三種粒徑之示意圖(Hirschfeld, 1973)

石材取自河床質，而河床質之尺寸特性亦於理論及設計上扮演重要的角色，如日本建設省所建議之河道特性區段分類方法，係以河床質代表粒徑為參數之一(國土開發技術研究センター，1999)。河道平均流速之估算值合理與否，端繫於 Manning 粗糙係數  $n$  值之取決；美國墾務局係以壤土、砂、圓石、卵石及岩盤等粒徑特性區隔，建議設計  $n$  值及容許流速(易任，1976)。臺灣多數護岸、堤防之毀損乃肇因於河道彎曲部之沖刷，河床質代表粒徑也被視為估算最大沖刷深之重要影響參數(經濟部水利處，1997)。而於河床質之臨界掃流應力估算上，係以河床質之土砂單位重、平均粒徑及粒徑分布均勻係數為參數(高瀨信忠，1983)。

## 2.2 乾砌石牆之穩定性

乾砌石牆之穩定性分析著重於整體的滑動、傾倒、沉陷及內部石材間的點接觸應力、摩擦力、相對位移等；因為其組成材料之石材為獨立塊體或粒狀物，使石牆具多孔隙，致其力學行為及分析理論異於金屬、混凝土及土壤等連續體者，相關之文獻與研究並不多見。

於乾砌石牆之整體穩定性分析方面，其方法乃多依循混凝土擋土牆者，惟需多考慮牆內部石材間之滑動或變位。楊勝崎、黃宏斌(2004)以六圍乾砌石牆為案例，根據石材-地面摩擦力、石材摩擦力與側向土壓力間之平衡關係，嘗試推導出抗滑動、抗傾倒之安全係數計算公式。趙紹鋇、

王程廣(2004)以顆粒力學理論，推導乾砌石牆傾斜角度與石材摩擦角、石材自重、側向土壓力間之平衡關係式，據以計算石材抗滑動、抗滾動之安全係數；發現石材摩擦角大於  $20^\circ$  時為滾動控制，而石材摩擦角約為  $30^\circ\sim 45^\circ$ ，故滾動破壞較滑動破壞容易發生，因而認為設計上以採用滾動破壞控制為宜。另一方面，因為慣用的極限平衡分析法無法考量乾砌石牆之特有性質，如大塑性應變、石-土界面摩擦及背土回填過程等，Zhang *et al.*, (2004)以板岩砌石牆為分析對象，考慮石牆特有性質，使用有限元素法，分析其整體變形特性及抗傾倒之極限高度。Villemus *et al.*, (2007)使用破壞平衡理論，考慮石材間之滑動破壞機率，提出板岩砌石牆之穩定分析模式，並於現地構築高  $4\text{ m}$  之石牆，觀察其高度與水平變位、傾斜等之關係，據以驗證分析模式之合理性；此分析模式之特徵在於從內部石材間之滑動機制，計算出石牆外部之變形。

於乾砌石牆之內部石材間的穩定性分析方面，係將石材顆粒化，考慮顆粒的點接觸力、摩擦力與顆粒自重，依循靜力學平衡理論，先計算出顆粒間的相對位移量，續轉化成石牆之外部變形量；適宜此問題之電腦分析方法為分離元素法 (Discrete Element Method, DEM) (楊麗文，2000)。Harkness *et al.*, (2000)建制含石牆及背土之 DEM 模式，分析具四種不同傾斜度石牆外移至主動狀態之背土位移場、土壓分布及土壓合力作用點等，並提出此案例之主動土壓係數值域。Powrie *et al.*, (2002)以 DEM 分析乾砌石牆隨著背土升高時之變形、破壞(石材分離)情形，發現牆頂部發生破壞時之外移量小於  $0.01\text{ H}$  (H: 牆高)；若為較軟基礎土層時，破壞會發生於近牆底部。在同一背土高度及堅硬基礎土層條件下，Claxton *et al.*, (2005)以 DEM 分析乾砌石牆性質之影響因子，發現雖然牆單位重、石材形狀及接觸點勁度等對其破壞模式及穩定安全係數值影響輕微，但會左右牆在破壞前之變形性質。

## 三、物理性質之量測目的

本研究係以科學方法量化石材及其構造物



圖 2 試驗用卵石

之物理性質為動機，而下述為此等物理性質於學理及實務之應用性。

1. 石材粒徑之應用性：河道特性區段分類、平均流速估算、最大沖刷深估算、河床質臨界掃流應力估算及材料品質管制等。
2. 石材面積之應用性：作用於水中石材之流水力(推力、揚力、掃流應力)估算、石材間摩擦力估算及構造物穩定分析等。
3. 石材體積及單位重之應用性：抵抗流水力之石材尺寸設計及構造物穩定分析之石材自重估算等。
3. 構造物單位重之應用性：構造物之穩定及變形分析等。
4. 構造物孔隙率之應用性：生態工法多孔隙之量化參數及構造物之穩定及變形分析等。

## 四、取樣及量測方法

### 4.1 取樣

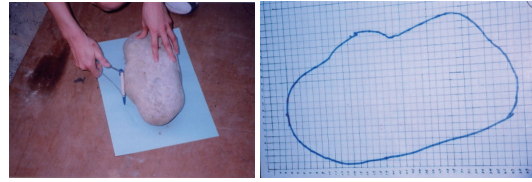
見圖 2，試驗用之卵石樣本為取自新竹縣頭前溪產者，其源自上新-更新世地層苗栗群之頭料山層，此岩層多由青灰色砂岩、粉砂岩和頁岩所組成，其比重大於 2.6、吸水率小於 3%、抗壓強度為  $35,000 \text{ kN/m}^2 \sim 85,000 \text{ kN/m}^2$  [徐鐵良，1993]；卵石樣本之粒徑為  $15 \text{ cm} \sim 75 \text{ cm}$ 。

### 4.2 量測方法

#### 4.2.1 卵石粒徑之量測方法

其方法如下所述：

1. 將試驗用卵石，依其  $d_1$  徑大小分組，並編號。



(a) 投影面 $A_3$ 之描繪

(b) 投影面 $A_3$ 之面積計算

圖 3 卵石三向投影面積之量測例

2. 各組之卵石樣本數，於  $15 \text{ cm} < d_1 < 24 \text{ cm}$  組 116 顆、 $25 \text{ cm} < d_1 < 34 \text{ cm}$  組 111 顆、 $35 \text{ cm} < d_1 < 44 \text{ cm}$  組 42 顆、 $45 \text{ cm} < d_1 < 54 \text{ cm}$  組 22 顆、 $55 \text{ cm} < d_1 < 64 \text{ cm}$  組 21 顆、 $65 \text{ cm} < d_1 < 74 \text{ cm}$  組 6 顆，共六組。

3. 以捲尺量測各卵石之  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 。

#### 4.2.2 卵石面積之量測方法

茲量測卵石於三向之投影面積，定義垂直於  $d_1$  徑、 $d_2$  徑及  $d_3$  徑之面積分別為  $A_1$ 、 $A_2$  及  $A_3$ ；其量測方法如下述：

1. 隨機取卵石樣本，依其  $d_1$  徑大小分成  $18 \text{ cm} < d_1 < 24 \text{ cm}$ 、 $27 \text{ cm} < d_1 < 34 \text{ cm}$ 、 $36 \text{ cm} < d_1 < 44 \text{ cm}$  三組，並編號。

2. 各組之卵石樣本數 20 顆。

3. 如圖 3(a)所示般，以筆描繪出卵石於三向之投影面。

4. 如圖 3(b)所示般，將描繪之投影面置於畫有方格(面積  $1 \text{ cm}^2$ )透明紙下方，計算其投影面積。

#### 4.2.3 卵石體積及單位重之量測方法

其方法如下所述：

1. 隨機取 46 顆卵石樣本、其粒徑為  $15 \text{ cm} < d_1 < 38 \text{ cm}$  者，予以編號。

2. 準備水桶、磅秤及塑膠袋等。

3. 將水桶放於塑膠袋內，並將水桶裝滿水，但不得讓水漏至塑膠袋內。

4. 將卵石輕放入桶內，所溢出之水則以塑膠袋收集之。

5. 當水桶已停止溢水時，即可慢慢將水桶移出塑膠袋。

6. 將溢出之水與塑膠袋一起秤重，即可得到卵石之體積  $V_c$  (水  $1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ gf}$ )。

7. 量測完各卵石之體積後，續以電子秤測其重量。

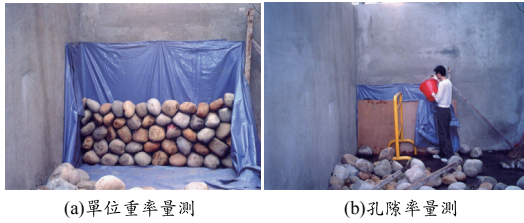


圖 4 乾砌石牆之單位重及孔隙率量測情形

8. 將卵石重量除其體積而得單位重 $\gamma_{cob}$ 。

#### 4.2.4 乾砌石牆單位重及孔隙率之量測方法

其量測步驟如下述：

1. 將卵石分成  $15\text{ cm} < d_1 < 24\text{ cm}$ 、 $25\text{ cm} < d_1 < 34\text{ cm}$ 、 $35\text{ cm} < d_1 < 44\text{ cm}$  三組。
2. 見圖 4(a)，利用牆角固定兩邊，舖上帆布(不得有破洞)，砌成石牆(約長  $2\text{ m}$ 、高  $1\text{ m}$ )。
3. 採六圍砌技術砌牆，每顆卵石應與週圍六顆緊密接觸不得懸空，每組中較大之卵石應置於底層，以維持穩固。
4. 砌完後，量測石牆之長(L)、寬(B)、高(H)。
5. 拆下各卵石一一秤重，合計其總重  $W$ 。
6. 計算石牆之量測單位重 $\gamma_{wall} = W/(L \times H \times B)$ 。
7. 接續，以水桶注水入石牆至淹滿卵石面，並秤重、紀錄全注水量  $V_v$ ，此  $V_v$  即為石牆之孔隙體積(見圖 3(b))。
8. 計算石牆之量測孔隙率 $n_{wall} = V_v/(L \times H \times B)$ 。

## 五、結果與討論

### 5.1 卵石粒徑

圖 5、圖 6 分別為卵石樣本之 $(d_1/d_2)$ 值及 $(d_2/d_3)$ 值分布型態例子(粒徑為  $15\text{ cm}$ ~ $75\text{ cm}$  者)；表 1 列出六種卵石組 $(d_1/d_2)$ 值及 $(d_2/d_3)$ 值之平均值  $mean$ 、標準差 $\alpha$ 及  $mean \pm \alpha$  值域。於 $(d_1/d_2)$ 值方面，由表 1 知曉，其  $mean$  值介於  $1.35$ ~ $1.66$  間，隨著  $d_1$  之增大而增大，即卵石愈大其愈呈細長狀。其 $\alpha$ 值介於  $0.15$ ~ $0.28$  間，與  $d_1$  間無明顯比例關係；惟於  $65\text{ cm} < d_1 < 74\text{ cm}$  卵石組之 $\alpha$ 值最小。其  $mean \pm \alpha$  值域介於  $1.15$ ~ $1.81$  間，有隨著  $d_1$  增大而增大之趨勢；發現本研究所觀察 $(d_1/d_2)$ 之  $mean \pm \alpha$  值域與「防洪工程設計手冊」所建議石材形狀管制值之 $(d_1/d_2) = 1.2$ ~ $1.8$  甚吻合。

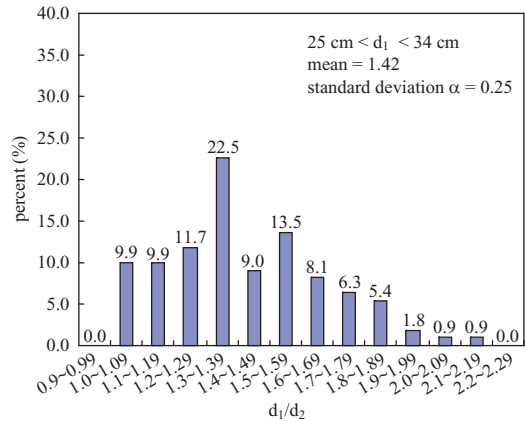


圖 5  $25\text{ cm} < d_1 < 34\text{ cm}$  卵石組之 $(d_1/d_2)$ 值分佈

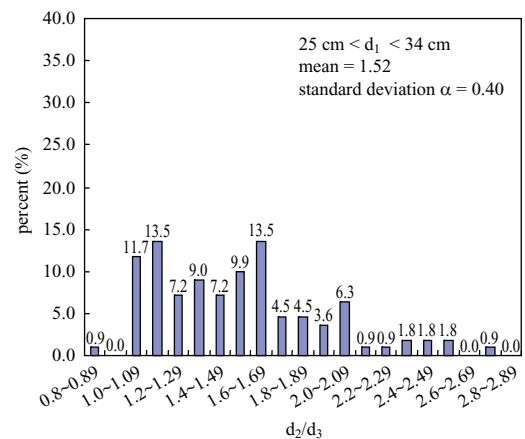


圖 6  $25\text{ cm} < d_1 < 34\text{ cm}$  卵石組之 $(d_2/d_3)$ 值分佈

於 $(d_2/d_3)$ 值方面，由表 1 知曉，其  $mean$  值介於  $1.32$ ~ $1.67$  間，隨著  $d_1$  之增大而變小，表示卵石愈大其扁平狀漸不顯著。其 $\alpha$ 值介於  $0.23$ ~ $0.52$  間，與  $d_1$  間無明顯比例關係。其  $mean \pm \alpha$  值域介於  $1.09$ ~ $2.19$  間，有隨著  $d_1$  增大而變小之趨勢；「防洪工程設計手冊」所建議之 $(d_2/d_3) < 2.0$  乃是接近此  $mean \pm \alpha$  值域之上界者，表示此項管制值較寬鬆。

### 5.2 卵石面積

因為卵石不具固定形狀，故需先以塊體近似卵石形狀，估算其於三向之面積後，再將此等面積修正為卵石投影面積，方比較準確。卵石塊體



表 1 卵石( $d_1/d_2$ )值及( $d_2/d_3$ )值之統計特性

卵石組	$(d_1/d_2)$ 值			$(d_2/d_3)$ 值		
	mean	$\alpha$	mean $\pm \alpha$ 值域	mean	$\alpha$	mean $\pm \alpha$ 值域
15 cm < $d_1$ < 24 cm	1.35	0.20	1.15~1.55	1.67	0.52	1.15~2.19
25 cm < $d_1$ < 34 cm	1.42	0.25	1.17~1.67	1.52	0.40	1.12~1.92
35 cm < $d_1$ < 44 cm	1.49	0.24	1.25~1.73	1.54	0.40	1.14~1.94
45 cm < $d_1$ < 54 cm	1.44	0.27	1.17~1.71	1.42	0.23	1.19~1.65
55 cm < $d_1$ < 64 cm	1.50	0.28	1.22~1.78	1.48	0.33	1.15~1.81
65 cm < $d_1$ < 74 cm	1.66	0.15	1.51~1.81	1.32	0.23	1.09~1.55

「防洪工程設計手冊」建議設計值： $(d_1/d_2) = 1.2\sim 1.8$ 、 $(d_2/d_3) < 2.0$

表 2 卵石量測投影面積與塊體面積間之修正迴歸公式

卵石組	$A_1$ 與 $(d_2 \times d_3)$ 值關係	$A_2$ 與 $(d_1 \times d_3)$ 值關係	$A_3$ 與 $(d_1 \times d_2)$ 值關係
18 cm < $d_1$ < 24 cm	$A_1 = 0.81(d_2 \times d_3) - 7.2$	$A_2 = 0.82(d_1 \times d_3) - 14.0$	$A_3 = 0.99(d_1 \times d_2) - 63.8$
27 cm < $d_1$ < 34 cm	$A_1 = 0.82(d_2 \times d_3) - 16.8$	$A_2 = 0.83(d_1 \times d_3) - 13.5$	$A_3 = 0.94(d_1 \times d_2) - 83.6$
36 cm < $d_1$ < 44 cm	$A_1 = 0.68(d_2 \times d_3) + 64.2$	$A_2 = (d_1 \times d_3) - 146.4$	$A_3 = 0.63(d_1 \times d_2) + 168.9$

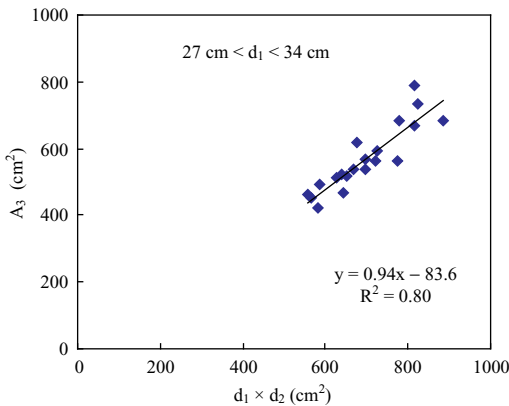


圖 7 27 cm <  $d_1$  < 34 cm 卵石組之  $A_3$  與  $(d_1 \times d_2)$  值關係

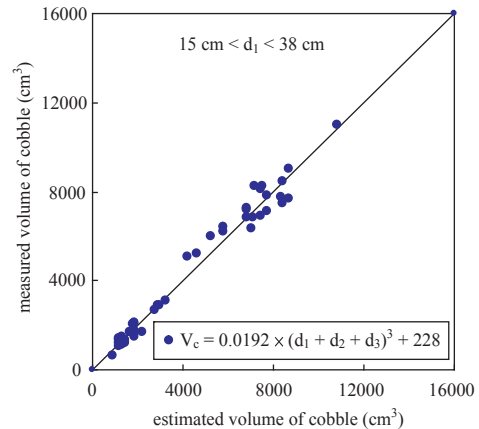


圖 8 式(3)之估算體積與實測體積間關係

化之  $d_1$  面、 $d_2$  面及  $d_3$  面之面積分別為  $d_2 \times d_3$ 、 $d_1 \times d_3$  及  $d_1 \times d_2$ ，圖 7 為迴歸觀察卵石量測投影面積( $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ )與塊體化面積關係的例子。為方便查用，茲將此等修正迴歸關係公式整理於表 2，此等公式即為本研究所建議之卵石面積計算公式。

### 5.3 卵石之體積與單位重

於計算卵石之體積上，需先以塊體或圓體近似卵石形狀，計算其幾何體積再修正之，方比較

準確；可考慮  $V = f(d_1, d_2, d_3)$  之幾何關係式，經試算比對，發現依式(1)所得之估算體積  $V$  比較接近量測體積  $V_c$ ，而式(2)為其迴歸公式。續將式(1)帶入式(2)，即得式(3)，圖 8 為由式(3)所計算之估算體積與實測體積間之關係，其相關係數  $R^2 = 0.96$  甚高，式(3)即為本研究所建議  $d_1$  值 15 cm~38 cm 區間之卵石體積計算公式。

$$V = \frac{4\pi}{3} \left( \frac{d_1 + d_2 + d_3}{6} \right)^3 \dots\dots\dots (1)$$

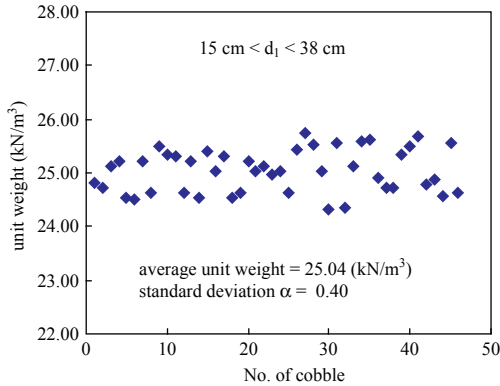


圖 9 卵石之單位重之值域

$$V_c = 0.99 \cdot V + 228 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$V_c = 0.0192 \cdot (d_1 + d_2 + d_3)^3 + 228 \quad \dots\dots\dots(3)$$

於卵石之單位重 $\gamma_{cob}$ 方面，見圖 9， $\gamma_{cob}$ 之值域為  $24.34 \text{ kN/m}^3 \sim 25.75 \text{ kN/m}^3$ 、平均值  $mean = 25.04 \text{ kN/m}^3$ 、標準差 $\alpha = 0.40$ ；其涵蓋樣本數於  $[mean \pm \alpha]$  為 59%，於  $[mean \pm 2\alpha]$  為 100%。

#### 5.4 乾砌石牆之單位重

為了驗證此試驗方法之適宜性及量測單位重之合理性，本研究採用圖 10 所示之球體牆，計算其理論之單位重 $\gamma_{th}$ 及浸水單位重 $\gamma'_{th}$ ；即將每顆卵石視為球體，以六圍砌方式整齊排置成牆，依式(4)計算之；於計算上取卵石單位重 $\gamma_{cob}$ 為  $25.04 \text{ kN/m}^3$ 、卵石浸水單位重 $\gamma'_{cob}$ 為  $15.23 \text{ kN/m}^3 (=25.04-9.81) \text{ kN/m}^3$ 。

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{\gamma_c}{V_{wall}} \left[ \frac{4\pi \cdot (D/2)^3 \cdot N}{3} \right] = \frac{\gamma_c}{L \cdot H \cdot D} \left( \frac{\pi \cdot D^3 \cdot N}{6} \right) \\ &= \frac{\gamma_c}{10D \cdot 5D \cdot D} \left( \frac{\pi \cdot D^3 \cdot 50}{6} \right) = 0.524\gamma_c \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$V_{wall}$ ：球體牆體積； $N$ ：球體牆之球體數

$\gamma = \gamma_{th}$  時，取 $\gamma_c = \gamma_{cob}$ ； $\gamma = \gamma'_{th}$  時，取 $\gamma_c = \gamma'_{cob}$

所量測之乾砌石牆單位重 $\gamma_{wall}$ 於  $15 \text{ cm} < d_1 < 24 \text{ cm}$  卵石組  $14.91 \text{ kN/m}^3$ 、於  $25 \text{ cm} < d_1 < 34 \text{ cm}$  卵石組  $14.13 \text{ kN/m}^3$ 、於  $35 \text{ cm} < d_1 < 44 \text{ cm}$  卵石

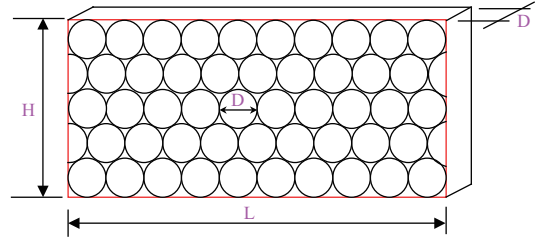


圖 10 球體牆示意

組  $13.42 \text{ kN/m}^3$ ，其平均值為  $14.15 \text{ kN/m}^3$ ；隨卵石 $d_1$ 徑之增大 $\gamma_{wall}$ 減小，表示孔隙比較多。所計算乾砌石牆之理論單位重 $\gamma_{th}$ 為  $13.12 \text{ kN/m}^3$ 、理論浸水單位重 $\gamma'_{th}$ 為  $7.98 \text{ kN/m}^3$ ，兩者皆為定值，不因球體尺寸而改變。得以觀察出 $\gamma_{th}$ 小於 $\gamma_{wall}$ 平均值之  $14.15 \text{ kN/m}^3$ ，惟當卵石 $d_1$ 徑增大時 $\gamma_{th}$ 值漸接近 $\gamma_{wall}$ 值，表示本試驗方法合理且可行。

#### 5.5 乾砌石牆孔隙率

所量測之乾砌石牆孔隙率 $n_{wall}$ 於  $15 \text{ cm} < d_1 < 24 \text{ cm}$  卵石組 0.371、於  $25 \text{ cm} < d_1 < 34 \text{ cm}$  卵石組 0.380、於  $35 \text{ cm} < d_1 < 44 \text{ cm}$  卵石組 0.383，其平均值為 0.378；隨卵石 $d_1$ 徑之增大 $n_{wall}$ 變大，表示孔隙比較多。另一方面，參閱圖 9，並依式(5)計算乾砌石牆之理論孔隙率 $n_{th}$ ，其為定值之 0.476，亦不因球體尺寸而改變。

$$\begin{aligned} n_{th} &= \frac{L \cdot H \cdot D - \left( \frac{4\pi \cdot (D/2)^3}{3} \right) \cdot N}{L \cdot H \cdot D} \quad \dots\dots\dots(5) \\ &= 1 - \frac{\pi \cdot D^2 \cdot N}{6L \cdot H} = 1 - \frac{\pi \cdot D^2 \cdot 50}{6 \cdot 10D \cdot 5D} = 0.476 \end{aligned}$$

## 六、結 論

生態工法為實現環境永續經營之施工技術，於臺灣石材為大量被使用之自然材料，為了將石材之老工法、老材料賦予力學新生命，本研究以頭前溪產之卵石為試驗材料，依其 $d_1$ 大小將其分成數組，量測卵石及乾砌石牆之物理性質；於本節茲對所得結果歸納之。

1. 隨著 $d_1$ 之增大，卵石愈呈細長狀，但扁平狀漸不顯著。

2. 所量測、觀察( $d_1/d_2$ )之  $mean \pm \alpha$  值域與「防洪工程設計手冊」所建議之( $d_1/d_2$ ) = 1.2~1.8 甚吻合；而( $d_2/d_3$ )之  $mean \pm \alpha$  值域介於 1.09~2.19 間，手冊所建議之( $d_2/d_3$ ) < 2.0 乃是接近此值域之上界者。
3. 使用量測值修正理論值方法，迴歸分析卵石面積之計算公式(見表 2)及體積之計算公式(見式 (3))，其相關性甚高。
4. 卵石量測單位重之值域為 24.34  $kN/m^3$ ~25.75  $kN/m^3$ 、平均值為 25.04  $kN/m^3$ ；卵石浸水單位重為 15.23  $kN/m^3$ 。
5. 乾砌石牆之量測單位重 $\gamma_{wall}$ 之平均值為 14.15  $kN/m^3$ ，而其理論單位重 $\gamma_{th}$ 為 13.12  $kN/m^3$ ；惟當卵石  $d_1$  徑增大時 $\gamma_{th}$ 值漸接近 $\gamma_{wall}$ 值，表示本試驗方法合理且可行；此外，乾砌石牆之理論浸水單位重為 7.98  $kN/m^3$ 。
6. 乾砌石牆之平均量測孔隙率為 0.378，而其理論孔隙率為 0.476。

本研究之試樣為新竹縣頭前溪產之卵石，故上述之研究結果可能具地域性，而不盡然可適用於他處。然而，本研究方法，仍可適用於他處之石材及構造物之物理性質調查上。

## 謝 誌

感謝經濟部水利署第二河川局資助試驗材料及中華大學土木系碩士班研究生陳國棠、王伯偉及吳嘉財等人協助施行試驗作業。

## 參考文獻

1. 水利局，1968，防洪工程設計手冊，臺灣省水利局叢書之七十三號。
2. 易任，1976，渠道水力學，東華書局，台北。
3. 徐鐵良，2005，地質與工程，科技圖書股份有限公司，台北。
4. 經濟部水利處，1997，實用河川工程學，科技圖書股份有限公司，台北。
5. 趙紹錚、王程廣，2004，疊石工法力學行為初步研究，農業工程研討會論文集，第 1037-1049 頁，桃園。
6. 楊麗文，2000，以顆粒材料力學探討卵礫石

層強度性質之研究，博士論文，土木工程研究所，中興大學。

7. 楊勝崎、黃宏斌，2004，砌石擋土牆之安定分析，農業工程研討會論文集，第 941-953 頁，桃園。
8. Claxton, M., Hart, R.A., McComble, F. and Walker, P.J., 2005, Rigid block distinct-element modeling of dry-stone retaining walls in plane strain, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 3, pp. 381-389.
9. Harkness, R.M., Powrie, W., Zhang, X., Brady, K.C. and O'reilly, 2000, Numerical modeling of full-scale tests on dry stone masonry retaining walls, Geotechnique, Vol. 50, No. 2, pp. 165-179.
10. Hirschfeld, R.C., 1973, Embankment-dam engineering, JOHN WILEY & SONS publisher company, New York.
11. Kemp, J. L., Harper, D. M. and Crosa, G. A., 2000, The Habitat-scale Ecohydraulics of Rivers, Journal of Ecological Engineering, No. 16, pp. 17-29.
12. Powrie, W., Harkness, R.M., Zhang, X. and Bush, D.I., 2002, Deformation and failure modes of drystone retaining walls, Geotechnique, Vol. 52, No. 6, pp. 435-446.
13. Villemus, B., Morel, J.C. and Boutin, C., 2007, Experimental assessment of dry stone retaining wall stability on a rigid foundation, Engineering Structures, No. 29, pp. 2124-2132.
14. Zhang, X., Koutsabeloulis, N.C., Hope, S. and Pearce, A., 2004, A finite element analysis for the stability of dry stone masonry retaining walls, Geotechnique, Vol. 54, No. 1, pp. 57-60.
15. 高瀨信忠，1983，河川水文學，森北出版社，東京(日文)。
16. 國土開發技術研究センター，1999，護岸の力學設計法，山海堂，東京(日文)。

收稿日期：民國 100 年 1 月 19 日

修正日期：民國 100 年 2 月 18 日

接受日期：民國 100 年 3 月 8 日