

後堀水庫集水區泥沙產量推估

Prediction of Sediment Yield on the Watershed to Ho-Ku Reservoir

臺灣省水利局規劃總隊工程員

顏 惟 孝

W. S. Yen

臺灣省水利局規劃總隊總隊長

黃 金 山

J. S. Hwang

Abstract

The probable life of a reservoir is depending primarily upon the available capacity for sedimentation and the sediment yield itself. If a small reservoir was erected on a river with heavily sediment-laden flow, the useful life of the reservoir would be depleted rapidly in a short time.

An economical evaluation of a reservoir project is essentially based on a correct prediction of the reservoir useful life that is also corresponding to the correct estimation of sediment yield introducing into the reservoir. Consequently, the prediction of an acceptable sediment yield to a reservoir is virtually not negligible for the planning of a reservoir. This paper describes the procedure that is presently using as an approach for the planning of Ho-Ku Reservoir to estimate the sediment yield. As the results, the probable life of Ho-Ku Reservoir can be reasonably forecasted. The procedure adopted for previous prediction could be also used for the other reservoir planning in southern Taiwan.

一、緒 論

行政院 俞院長於七十三年九月廿一日立法院第七十四會期第一次會議提出施政報告指出；未來六年內，政府將積極推動十四項重大經濟建設，配合國家經濟發展之需要，提高國民生活水準及品質，使我國早日擠身已開發國家之林。其中第十項建設，水資源開發計畫有(一)鯉魚潭水庫，(二)後堀水庫，(三)四重溪水庫等，均為與發展產業及提高國民生活品質息息相關之重大經濟基本建設。而後堀水庫計畫即為水利局與自來水公司於72及73年度合作規劃完成之公共給水單目標水庫。其功能以解決北起新營南至臺南等29鄉鎮市即將面臨之缺水問題，此

外並能舒解曾文水庫水權紛爭及具有支援高雄地區部份公共用水之潛能。惟水庫建設之是否經濟端視其能否具有合理之可用壽命，而可用壽命之短長全靠水庫集水區泥沙產量之多寡而定。規劃之初，對於水庫集水區之泥沙產量應妥為研究檢討，推估合理之數值，水庫可用壽命之短長始能合理掌握，水庫建設之投資報酬評估才能依據水庫可用壽命之長短準確加以分析判斷。本文即介紹後堀水庫規劃時，對於集水區泥沙產量預估之方法與步驟，在外來諸輸砂公式猶未能適切地應用於南臺灣泥、頁岩分佈極廣的河川情況下，提供今後南臺灣有關水資源開發計畫時對於泥沙產量推估之參考。

二、後堀水庫及其集水區簡介

後堀溪為曾文溪重要支流之一，發源於嘉義，臺南、高雄三縣交界之頂平林附近，由東北往西南流，行經臺南縣南化鄉關山村關山壹號橋下游 200 公尺處之計畫壩址，在玉井附近注入曾文溪。後堀水庫除了匯集其壩以上 104 平方公里之集水區水量外，尚擬引入旗山溪豐水期剩餘水量，故兼具在槽與離槽兩種形態。建壩壩頂標高如為 185 公尺，其容量約 1.57 億立方公尺，如建土石壩或混凝土重力壩，其蓄水率分別為 29 與 246。壩址附近地質經調查與各種室內外岩石力學試驗結果，在本省而言可能為難得之優良壩址。水庫集水區面積 104 平方公里，除北方 10 平方公里（頂平林盆地）屬於嘉義縣大埔鄉茄苳村外，其餘 94 平方公里皆為臺南縣南化鄉關山村，其集水區地形參數如表一，其中並附

曾文、白河二水庫地形參數以為比較。集水區地質依露頭判斷以砂、頁岩互層為主之卓蘭層分佈最廣。集水區呈東北—西南走向之狹長方形，高度亦依東北向西南漸次降低，水系亦依此方向呈非字形。右岸各支流河床與地表露頭為細砂岩，河蝕緩慢，河性較安定。左岸各支流河床與地表則露出青灰色之泥、頁岩互層，崩坍區較多，河蝕有縱橫擴展現象，是本集水區泥砂生產主要來源。後堀溪由壩址以上之河床，岩石露頭處處可見，除了關山壹號橋與貳號橋之間有一 S 型之河曲段有大量推移載沉積外，其餘皆呈細顆粒之沉滓沉積於河之兩岸，顯示本溪之搬運力很強。同時因母岩係呈卓蘭層之泥、頁岩互層分佈，因此地表抗風化與水蝕力弱，極易產生層狀剝離之風化與水蝕現象，故沉滓以懸浮載為多，河床載比例較少。

表一 後堀、曾文、白河三水庫集水區地形參數比較表

集水區特性	符號	單位	數 量			附 記
			後堀水庫	曾文水庫	白河水庫	
集水區面積	A	KM ²	104	481	26.6	
集水區周長	P	KM	54.5	121.2	26.4	
本流長度	L ₀	KM	28	56.2	10.28	
河川總長度	L	KM	174.13	231.2	24.28	
集水區平均高度	H	M	473	963	396	
集水區平均坡度	S	—	0.393	0.544	0.425	$S=D\Sigma L/A$
集水區平均寬度	W	KM	3.71	8.56	2.48	$W=A/L_0$
河流長度與集水區平均寬之比	R	—	7.54	6.57	4.13	$R=L_0^2/A$
集水區形狀係數	F	—	0.133	0.152	0.242	$F=A/L_0^2$
集水區密集度	C	—	1.508	2.03	1.43	$C=P/2\sqrt{\pi A}$
排水密度	Dd		1.674	0.443	0.913	$Dd=L/A$
集水區圓比值	M		0.44	0.412	0.48	$M=4\pi A/P^2$

三、水文資料及含砂量觀測分析

(一) 水文記錄

後堀溪集水區年平均降雨量為 3,307 公厘，集中在 5 月至 9 月，雨量雖多但分佈極不平均。流量站設於壩址下游之玉田村（玉田流量站以上集水面積為 160.53 KM²）。壩址年平均逕流量 2.4 億立方公尺，發生頻率大於 75% 之逕流量為 1.7 億立方公尺。玉田流量站於 48 年至 69 年之流量觀測期間亦兼

取懸浮載樣本，因之吾人可利用玉田站之懸浮載實測值及其對應之流量，導出一迴歸方程式如下：

$$Q_s = 2.146 Q_w^{2.0761} \dots\dots\dots (1)$$

式中 Q_s 為輸砂量，單位 tons/day， Q_w 為流量，單位 CMS-day

(二) 輸砂量分析推估

首先根據玉田流量站之日流量記錄分析玉田站之日流量持續曲線〔1〕，再根據流量持續曲線與方程式(1)計算玉田站之懸浮載年產值為 4836.914 噸/日

表二 後堀溪玉田站年懸浮載輸砂量計算表

(1) 頻 率 組 距 %	(2) 百 分 率 間 隔 %	(3) 百 分 率 中 間 數 %	(4) 流 量 Q (CMS)	(5) 懸 浮 載 輸 砂 量 噸/日	(6) (2)×(4) (CMS)	(7) (2)×(5)
0.01- 0.05	0.04	0.03	630	1,400,000	0.252	560
0.05- 0.10	0.05	0.075	520	940,000	0.260	470
0.10- 0.15	0.05	0.125	470	760,000	0.235	380
0.15- 0.20	0.05	0.175	420	600,000	0.210	300
0.20- 0.30	0.10	0.25	370	460,000	0.370	460
0.30- 0.40	0.10	0.35	320	340,000	0.320	340
0.40- 0.60	0.20	0.5	280	240,000	0.560	480
0.60- 0.80	0.20	0.7	220	156,000	0.440	312
0.80- 1.00	0.20	0.9	190	115,000	0.380	230
1.00- 1.40	0.40	1.2	170	92,000	0.680	368
1.40- 1.80	0.40	1.6	140	61,000	0.560	244
1.80- 2.20	0.40	2.0	110	37,000	0.440	148
2.20- 3.00	0.80	2.6	89	28,000	0.712	224
3.00- 4.00	1.00	3.5	62	11,400	0.620	114
4.00- 5.00	1.00	4.5	46	6,000	0.460	60
5.00- 7.00	2.00	6.0	32	2,850	0.640	57
7.00- 9.00	2.00	8.0	24	1,600	0.480	32
9.00-11.00	2.00	10.00	19	980	0.380	19.6
11.00-13.00	2.00	12.00	14	520	0.280	10.4
13.00-16.00	3.00	14.50	13	440	0.390	13.2
16.00-20.00	4.00	18.00	8	170	0.320	6.8
20.00-24.00	4.00	22.00	5.8	86	0.232	3.44
24.00-28.00	4.00	26.00	4.8	60	0.192	2.40
28.00-36.00	8.00	32.00	2.8	19	0.224	1.52
36.00-42.00	6.00	39.00	1.6	6	0.096	0.36
42.00-50.00	8.00	46.00	0.9	1.8	0.072	0.144
50.00-60.00	10.00	55.00	0.42	0.4	0.042	0.04
60.00-70.00	10.00	65.00	0.2	0.1	0.020	0.01
70.00-80.00	10.00	75.00	0.1	0	0.010	0
80.00-85.00	5.00	82.50	0.052	0	0.0026	0
85.00-90.00	5.00	87.50	0.038	0	0.0019	0
90.00-95.00	5.00	92.50	0.026	0	0.0013	0
95.00-98.50	3.50	96.75	0.018	0	0.00063	0
98.50-99.50	1.00	99.00	0.014	0	0.00014	0
99.50-99.90	0.40	99.70	0.012	0	0.00005	0
99.90-99.98	0.08	99.94	0.011	0	0.00001	0
99.98-100.00	0.02	99.99	0.01	0	0	0
合 計					9.88363	4836.914

×365日=1,765,473 噸/年。其計算過程如上表二所示。推移載部份如以懸浮載之25%計，則玉田站年平均總輸砂量為 1,765,473噸×1.25=2,206,841噸

。壩址輸砂量係以玉田站之輸砂量依據美國墾務局公式轉移； $Q_s = K A^{-0.229}$ (2)
式中 Q_s 為輸砂量，單位為acre-ft/sq. mile/

year A為集水區面積，單位為 sq.mile。

由於美國墾務局公式為英制，因此玉田站之年輸砂量需化成單位面積年輸砂量，故玉田站之單位面積輸砂量

$$\begin{aligned} Q_s &= 2,206,841 \div 1.2 \div 160.53 \\ &= 11456.02 \text{ m}^3/\text{KM}^2/\text{year} \\ &= 24.05 \text{ acre-ft/sq.mile/year} \\ &= 0.0378 \text{ ft/year} \\ &= 11.52 \text{ mm/year} \end{aligned}$$

再由方程式(2)求後堀水庫集水區輸砂量常數K值；

$$K = Q_s / A^{-0.229} = 24.05 / (61.98)^{-0.229} = 61.88$$

得到後堀水庫輸砂量方程式為：

$$Q_s = 61.88 A^{-0.229} \dots\dots\dots(3)$$

依方程式(3)則可求得後堀水庫集水區年平均輸砂量。壩址以上集水面積 $A = 104 \text{ KM}^2 = 40.15 \text{ mile}^2$ 故其單位面積年平均輸砂量 $Q_s = 61.88 (40.15)^{-0.229} = 26.565 \text{ acre.ft/sq.mile/year}$ 年平均輸砂量為 $40.15 \text{ sq.mile} \times 26.565 \text{ acre.ft/sq.mile/year} = 1066.58 \text{ acre./year} = 1,315,610 \text{ m}^3/\text{year} = 1,315,610 \times 1.2 = 1,578,732 \text{ 噸/年}$ 。折合年平均地表刷深 $d = 1,578,732 / (1.2 / 104 \times 10^6) = 12.65 \text{ mm/year}$ 。

(二)檢討

後堀溪集水區年輸砂量依上述求得年地表刷深為 12.65mm，而玉田站之年地表刷深為 11.52mm。因集水區越往上游地表刷深應越大，因此上文依美國墾務局公式推算而得之結果尚稱合理。此外參考臺灣南部以泥、頁岩為母岩地區之現有水庫之年游砂量實測值，折合集水區地表刷深如白河水庫為 21.66mm/year，尖山埤水庫為 22.36mm/year，烏山頭水庫為 17.28 mm/year，曾文水庫為 8.92 mm/year，阿公店水庫為 15.91mm/year等相比較，亦在合理範圍內，然因此結果在計算過程中將推移載部份假設為懸浮載部份之25%，缺乏根據，故下文更進一步以其他推估方法做比較分析。

四、以間接推估方法估算後堀水庫年輸砂量

(一)地表覆蓋比例法：

參照「二仁灌區感恩水庫第二期規劃調查報告」中以白河水庫實測得之年輸砂量依各種植生覆蓋程度與地質性質估計各級地表類別之沖蝕量，然後以實際勘察感恩水庫集水區內各級地表類別（依白河水庫分類標準）之百分比，再以比例推估感恩

水庫各級土地類別單位面積之年沖蝕量，然後計算而得感恩水庫總輸砂量。後堀水庫如參照此法〔2〕推估則其值為 $2,306,985 \text{ m}^3/\text{year}$ ，（2,768,382噸/年），折合年平均地表刷深為 22.2 mm/year 。

(二)如依據中興大學何智武教授等研究國姓水庫年輸砂量提出之複因子實驗公式〔3〕；

$$Q_s = 0.875 R^{3.09} C^{-1.53} S^{3.3} A \dots\dots\dots(4)$$

其中 Q_s 為年輸砂量，噸/年。

R 為年降雨量，公尺

C 為植生覆蓋率，%。

S 為流域平均坡度，%。

A 為流域面積， KM^2 。

則後堀水庫集水區年降雨量 $3307 \text{ mm} = 3.307 \text{ M}$ ，植生覆蓋率為 92.6%，流域平均坡度為 39.3%，流域面積為 104 KM^2 ，代入公式(4)得 $Q_s = 0.875 (3.307)^{3.09} \times (92.6)^{-1.53} (39.3)^{3.3} (104) = 655,650 \text{ 噸/年} = 546,377 \text{ m}^3/\text{年}$ ，折合年平均地表刷深為 5.25 mm/year 。

(三)依曾文水庫實測值推估後堀水庫之年輸砂量

後堀水庫集水區與曾文水庫集水區為鄰，而曾文水庫自民國63年起每年均有淤積量測量，其測值在 320 萬噸/年至 1100 萬噸/年之間，其平均值折合年地表刷深 8.92mm。由表一與表三可知曾文、後堀二相鄰水庫集水區地形參數，水文條件，植生被覆，地質狀況均相近似，故以曾文水庫年輸砂量利用美國墾務局公式（方程式(2)）推估後堀水庫集水區年輸砂量如下：

表三 曾文、後堀二水庫集水區，影響泥砂產量因子對照表

影響因子	水庫別	
	曾文水庫	後堀水庫
集水面積	481.1 KM^2	104 KM^2
集水區平均坡度	54.4%	39.3%
年平均雨量	3,350mm	3,307mm
年平均逕流量	11.9億立方公尺	2.2億立方公尺
集水區平均標高	963公尺	473公尺
集水區起伏量	846公尺	113公尺
集水區崩壞面積	1.1 KM^2	2.3 KM^2
集水區覆蓋率	91.4%	92.6%
地質狀況	兩集水區相鄰、地表母岩與重要地質構造線均相似，詳見參考文獻〔page,71〔4〕〕	

曾文水庫之年地表刷深為

$$8.92\text{mm}=18.61\text{acre-ft/sq mile}$$

$$\text{集水面積 } 481.1\text{KM}^2=185.75\text{sq.mile}$$

$$\therefore K=18.61/(185.75)^{-0.229}=61.63$$

而後堀水庫集水區面積為

$$104\text{KM}^2=40.15\text{sq.mile}$$

$$\text{故 } Q_s=61.63(40.15)^{-0.229}$$

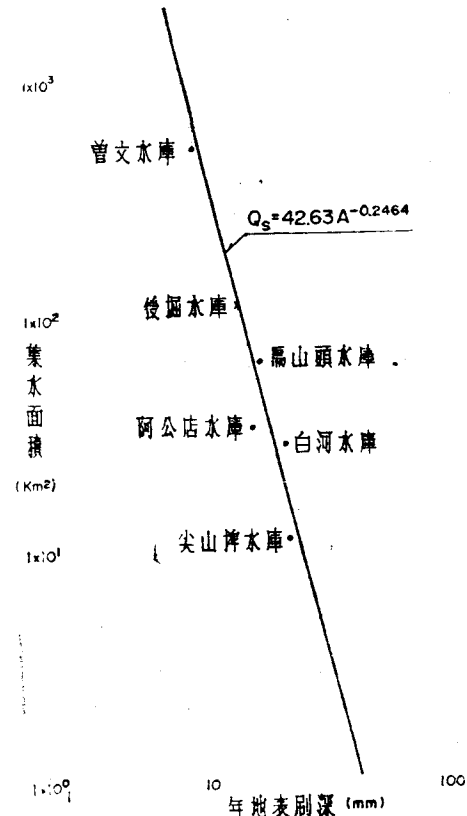
$$=26.46\text{acre-ft/sq.mile}$$

$$=12.68\text{mm/year.}$$

(四)依南部地區各水庫年淤積量實測值估算

此乃將南部各水庫年平均地表刷深之實測值與其集水面積歸納出一關係式： $Q_s=42.63A^{-0.2463}$...

... (5) 並繪成圖一。此方程式與美國墾務局公式相似，然因方程式(5)之樣本為來自本省南部現有水庫之實測資料，因之更能適切及合理地用來推估相同地區的其他水庫年輸砂量。後堀水庫依方程式(5)可求得年地表刷深值為13.57mm/year，合年淤砂量為141 萬餘立方公尺。其計算過程如下表（表四）。



圖一 南部各水庫集水面積與年地表刷深關係曲線

表四 南部地區水庫年地表刷深與集水面積關係推估、計算過程表

	y=logQs		x=log A		計 算 過 程 與 結 果
	Qs	y	A	x	
白 河 水 庫	21.66	1.3357	26.55	1.4241	Qs：各水庫年平均地表刷深mm A：各水庫集水面積 KM² 由五個已知樣本歸納得 $y = a + bx$ 其中 $a=1.62975$, $b=-0.2464$, $r=-0.9511$ 故推得 $\log Q_s = \log k + n \log A$ 因 $\log k = a \therefore K=42.63$ $\therefore Q_s = 42.63A^{-0.2464} \dots \dots (5)$ 並繪如圖一，後堀水庫集水面積為 104KM²代入(5)得 $Q_s=13.57\text{mm}$
尖 山 埤 水 庫	22.36	1.3495	10.60	1.0253	
烏 山 頭 水 庫	17.28	1.2375	60.6	1.7825	
曾 文 水 庫	8.92	0.9504	481.1	2.6822	
阿 公 店 水 庫	15.91	1.2017	31.87	1.5034	

五、檢討研判

以上所述四種間接方法所推估之輸砂量，第一種地表覆蓋比例法所得之值 22.2mm/year，可能高估，因後堀水庫集水區不論植生被覆，人文活動干擾以及地質狀況，均與相鄰之曾文、烏山頭水庫相似，而此二水庫之年地表刷深分別為 8.92mm 與 17.28 mm，故此法估得之結果顯然偏高。其次第二種方法以國姓水庫實驗公式求得之值為 5.25mm

/year，則顯然偏低，因此值比玉田站之懸浮載實測值推得之後堀壩址懸浮載數量還少許多，同時與鄰近現有水庫淤積量比較更不合理。因此臺灣中部水庫之實驗公式並不能用來估算南部水庫之淤積量，因兩者水文條件、地質狀況與崩坍類型差異甚大。此外第三、四種方法分別推得後堀水庫年地表刷深為 12.68mm/year 與 13.57mm/year，均在合理範圍內，但兩者以第四法較為客觀、合理。同時，第四法歸納而得之方程式(5)是以南部現有水庫淤積實

測值為樣本歸納而得之關係式，較美國墾務局公式更能適切地運用在南臺灣其他水庫之輸砂量之初步計算。

六、結論與建議

本省河川由於坡陡流急，降雨大且分佈極不平均，又因地質年輕，岩質脆弱，凡此皆為造成本省河川輸砂量極大，各水庫均受淤砂嚴重為害之主因。如何能合理地擬建新水庫前估算其泥沙年產量，對於工程效益評估與水庫集水區經營均顯得甚為重要。過去雖有許多外來輸砂公式引進，但因地理環境不同無法適用於本省。因此水資源規劃有關於泥沙產量估算應運用理論及經驗經實地勘察，比較研判既有實測資料與計算資料尋求一個合理範圍的估測數值，乃不失為一適當之推估方式。今後水庫規劃建設將因各標的需水量日益迫切而增多，因此水庫的開發與其集水區泥沙產量推估之正確性將更顯得重要。下文擬就後堀水庫計畫對於泥沙產量估算之方法與步驟整理敘述如下，希望拋磚引玉，預期更多迴響，使泥沙產量估計方法更為合理完備。

首先第一步工作為計算懸浮載部份，依本文第三段第二節方法推得為 $1,052,397\text{m}^3/\text{year}$ ，即為每年1,262,876噸。其次推移載部份因後堀溪河床到處地質露頭可見與一般中部地區之沖積河流不同，在平時河床幾無推移載而洪水期又無推移載之採樣記錄，故祇好採用參考文獻〔5〕(1)page,146所示曾文溪水系輸砂量統計表所示該河流之推移載為其懸浮載之 $1/8$ 計得到壩址之推移載每年為157,860噸，故壩址之總輸砂量=懸浮載+推移載+流洗載(Wash Load)，而臺灣地區河川之流洗載約懸浮載與推移載和之20%，因之壩址之總輸砂量為1,704,883噸/年，折合年地表刷深如 $13.66\text{mm}/\text{year}$ ，而與本文第四段第四節由南部現有水庫淤積實測值歸納而得之方程式(5)所求得後堀水庫年地

表刷深值 $13.57\text{mm}/\text{year}$ 相近。後堀水庫規劃所採用每年地表刷深值為 $15\text{mm}/\text{year}$ ，係根據方程式(5) $Q_s=42.63A^{-0.2463}$ 推估可能之水庫淤沙量，再考慮該方程式迴歸分析所用之資料為水庫實測淤沙量、與輸沙量(Sediment yield)之間尚有一因沙率的關係。檢討(5)式所用資料，其平均因沙率約為0.9，因此建議下式可供南部地區水庫初步規劃，集水區泥沙產量之推測式：

$$\text{水庫輸沙量 } Q_s = (42.63A^{-0.2463})/T.E.$$

式中A為集水面積，單位為平方公里，T.E.為因沙率(Trap efficiency)約為0.9。其適用地區為八掌溪以南至高屏溪以北。

七、參考文獻

- 〔一〕臺南地區水源開發規劃研究計畫專題報告之四—水文分析——水利局72年。
- 〔二〕二仁灌區感恩水庫第二期規劃調查報告——水利局69年6月。
- 〔三〕何智武等人——國姓水庫集水區泥沙產量之試驗分析研究——國立中興大學72年10月。
- 〔四〕臺南地區水源開發規劃研究計畫專題報告之七一集水區保育初步調查73年6月。
- 〔五〕陳志清——河道輸砂學導論——徐氏基金會出版。
- 〔六〕黃金山——水庫防淤規劃研究——水利局規劃總隊民國69年6月。
- 〔七〕臺南縣南化鄉鏡面水庫計畫報告——水利局第一規劃調查隊民國64年6月。
- 〔八〕金城——尖山埤水庫排砂試驗報告——臺糖46年5月。
- 〔九〕顏啓照、何智武——曾文水庫集水區輸砂量之估算——中國土木水利期刊四卷二期，民國66年。

專營土木、水利、建築等工程

好 億 興 業 有 限 公 司

地 址：大甲鎮孟春里通天路185巷11號

電 話：(046) 8 1 3 6 0 0 • 8 1 2 5 5 8