

灌漿成效與灌漿量分析 — 以鯉魚潭水庫壩基為例

Analysis on the Amount and Effectiveness of Grouting – A Case Study on Li-Yu-Tan Dam Foundation Grouting

中華大學土木工程系所副教授

楊朝平

Chau-Ping Yang

摘 要

本文以重視應用技術面的研究手法，分析鯉魚潭水庫壩基隔幕灌漿施工記錄資料，以觀察灌漿成效並達估算灌漿量之目的，分析樣本為 3532 個灌漿孔段的數據。於觀察灌漿成效方面，從孔段的 *Lugeon* 值或單位長度水泥用量 *Lg* 值累積曲線遷移情形得知，經過批次灌漿處裡後壩基岩盤的 *Lugeon* 值或 *Lg* 值皆有明顯的減小，表示隔幕灌漿成效相當良好，且可達設計水密性要求。於估算灌漿量方面，本研究提出使用 *Lugeon* 值、*Lg* 值的平均值關係來估算總水泥用量之方法，發現於壩基的不同區位其 *Lugeon* 值、*Lg* 值的平均值間具高度相關性 ($R^2=0.95$)，只要樣本分佈型態具同質性則雖不屬常態分佈型者，此法亦具相當程度的估算能力，其所估算之總水泥用量為施工記錄的 72%，估算準確度高於設計的 43%。

關鍵詞：壩基，灌漿，*Lugeon* 值，灌漿量。

ABSTRACT

In this study, a practical technique is used to observe the effectiveness and estimate the amount of grouting. The construction records on Li-Yu-Tan Dam are selected as an illustrated example. From 3532 stages of grouting hole, *Lugeon value*, grouting quantity per unit length *Lg* and so on are collected. According to the transition of accumulation curves for *Lugeon value* and *Lg*, the effectiveness of curtain grouting was identified. For estimating the amount of grouting, a mean value method was proposed in this study. It is found that mean value of *Lg* increase as *Lugeon value* increase, and with a high

corelationship of $R^2=0.95$, at the four specified different areas of dam site. As long as the distributions of L_g at the four specified different areas of dam site are similar, the amount of grouting could be estimated by the proposed method with a better accuracy, even L_g is not normally distributed. The estimated amount of grouting is 72 percent of those actually used in Li-Yu-Tan Dam, which is higher than the designed amount (43% of actually used).

Keywords: Dam foundation, Grouting, *Lugeon value*, Amount of grouting.

一、前言

建壩蓄水仍是臺灣水資源開發的主軸，唯壩愈建愈淺，規劃或建設中的壩都已位置於近平原之丘陵處，良好壩基難求，故必需對自然壩基做人工處理，以達設計安全要求，於水壩工程為提昇基礎強度及降低基礎透水性的主要工法是灌漿。雖然壩基灌漿非常重要，但因岩盤隱沒於下其工程地質複雜且各具獨特性，故除需在灌漿設計階段參考他壩制定工作要領外，於施工時尚需高度依賴技術人員的經驗與技巧。

因地下壩基岩盤的獨特複雜性，致使壩基灌漿費成爲諸工程費中最難估算的一項，往往需於施工期再追加經費致遭輿論批評甚會耽延工期，所以根據已完成壩的資料，來分析灌漿成效，並探討出一估算灌漿量的方法實有其必要性。一般皆依 *Lugeon* 注入試驗法所求得之 *Lugeon* 值來瞭解岩盤深處不連續面的狀況，並據以決定其漿液濃度與灌漿壓力，(1)式爲 *Lugeon* 值($l/m/min.$)之定義。

$$Lugeon = \frac{VP_s}{T P_i L} \dots\dots\dots(1)$$

式中

- V : 注入水量(l)
- P_s : 標準灌漿壓力(10 kgf/cm^2)
- T : 注入時間($min.$)
- P_i : 施工灌漿壓力(kgf/cm^2)
- L : 孔段長度(m)

雖然 *Lugeon* 值是表現岩盤不連續面狀況的最佳物理量，唯支配灌漿量的因子多且交互影響，於

理論上甚難求出明確的 *Lugeon* 值、灌漿量關係 [11,12]。

依目前的技術欲於施工前估算出灌漿量一事尚困難，故於此方面的研究已成重要課題。有關解明此問題的手法，可說明物理機制的理論上游研究是必需的，而重視應用技術面的下游研究則是較務實且具可行性。亦即，忠實的使用現場灌漿施工資料，透過分析方法期能找出解明問題之手法，並將分析結果應用於新的類似案例上。於臺灣規劃或建設中的壩多位於西部覆瓦狀山麓丘陵，其岩性屬砂岩、頁岩、泥岩或互層者，各壩基岩盤具類似性。

基於上述背景，本文以重視應用技術面的下游研究手法，忠實分析苗栗縣三義鄉鯉魚潭水庫的砂質岩壩基隔幕灌漿施工資料，首先以累積曲線法觀察灌漿成效，接著建議估算灌漿量的方法並展示估算結果。

二、鯉魚潭水庫壩基地質

鯉魚潭水庫位置於大安溪支流之景山溪上游，爲一分區型中央心層滾壓土石壩，壩身最大高度 96 m ，壩頂寬度 10 m ，壩底寬約 500 m ，壩總體積約 $3,700,000\text{ m}^3$ 。壩區在標高 500 m 以下屬於臺灣西部山麓丘陵地，地形主要爲紅土礫石台地面亦含河岸階地面。壩區層面走向從北偏東 $28\sim 34$ 度、向南傾斜 $30\sim 34$ 度，無明顯褶皺現象，位態頗爲一致，層面間含泥質沉積物厚可達 30 cm 。

主要節理有三組，第一組節理走向北偏西 $58\sim 67$ 度、向南傾斜 $74\sim 78$ 度，延伸長度約從 $5\sim 15\text{ m}$ 間不等，部份裂面緊密但屬於開口節理部份則

可寬達 10~30 cm，夾破碎岩塊或岩屑，分佈於左壩座。第二組節理屬共軛節理，走向北偏西 71 度、向北傾斜 78~81 度，延伸長度約從 10~30m 間不等，部份裂面緊密但屬於開口節理部份則可寬達 3~30 cm，夾破碎岩塊、岩屑或泥，於左壩座甚發達。第三組節理走向北偏西 10 度至偏東 10 度、向西傾斜 60~70 度，延伸長度約從 0.5~10m 間不等，大多裂面緊密少部份有開口達 5 cm，偶有軟弱夾心，分佈於右壩座。

壩址位於桂林林層之魚藤坪砂岩上，以細粒砂岩為主，並夾有多量薄層粉砂岩及頁岩之互層，砂岩在開挖時會沿節理或層面破裂，互層者其夾層可能成為潛在滑動面。如圖 1 所示壩基岩盤為潔淨砂岩(CS)、泥質砂岩(MS)、砂頁岩互層(AL)所組成。潔淨砂岩成份為石英砂，膠結情況不佳，抗張強度 10.5 kgf/cm^2 、平均透水係數 $6.5 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 。泥質砂岩整體膠結良好，所含泥質成份多寡不一，有些含泥質條紋，抗風化，抗張強度 $11.4 \sim 20.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、平均透水係數 $3.4 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ 。砂頁岩互層為潔淨砂岩與薄層頁岩或泥質砂岩與薄頁岩之密集夾層所組成；於潔淨砂岩與薄層頁岩互層區域易滑動，尤以左壩座壩軸下游面因開挖廊道導致層面出露而發生滑動現象；薄層頁岩因大地應力致產生層面剪裂，而成泥或碎屑。

整體而言，壩基岩盤主要由厚層砂岩構成，兩岸地質構造無斷層、明顯褶皺等大變化，且層面位態一致向上游傾斜，層面走向垂直於河谷，故此地層在承受水壓力時有利於壩基的水密

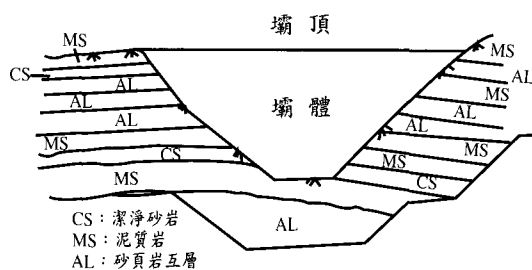


圖 1 大壩軸線地質剖面圖（臺灣省水利局，民國 82 年）

性。唯從岩石力學觀點來看，此壩基岩盤乃屬中等至脆弱級，雖較適合建造土石壩，但對於較弱的砂岩地帶及兩壩座處之解壓裂縫，仍需加以灌漿處理，以提高安全性^[1,2,3,4]。

三、隔幕灌漿

以劈距式隔幕灌漿工法處理鯉魚潭水庫之壩基岩盤，如圖 2 所示將灌漿分成四批次，按照第一批次(1st)、第二批次(2nd)、第三批次(3rd)、第四批次(4th)孔之順序施工，待某幕區的第一、二、三批次孔完成後，隨即進行初步灌漿效果檢討，以決定第四批次孔的數量和深度。等第四批次孔灌漿完成後，再做第二次灌漿效果檢討，並於岩盤節理較發達或灌漿量較大之孔附近設增加孔加強處理，最後再施行檢查孔灌漿以檢驗相當於水庫水壓下岩盤之透水性。

隔幕灌漿工法的施工項目順序為埋管、鑽孔、洗孔、試水、灌漿、透水試驗六項，其中在洗孔和透水試驗項需施行 Lugeon 注入試驗，一則依洗孔時的注入水量來決定起灌水泥灰比，再則依透水試驗時的 Lugeon 值來判釋灌漿成效，唯有關此工法的說明已超越本文範圍，讀者可參閱相關文獻^[10,15,16]。以下僅對鯉魚潭水庫壩基隔幕灌漿的工作要領概略說明之^[5]。

(1) 處理範圍

處理範圍示於圖 3，較淺處之灌漿於露天施行，較深處之灌漿則於坑內施行之，灌漿孔最大垂直深度為 50m。

(2) 灌漿孔的排列及間距

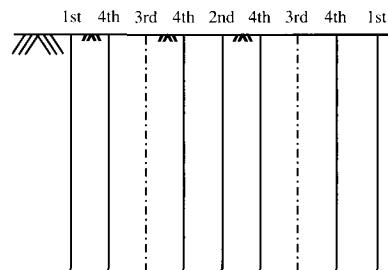


圖 2 劈距式隔幕灌漿各批次孔之配置（臺灣省水利局，民國 85 年）

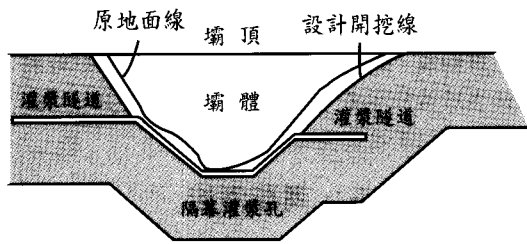


圖 3 壩基帷幕灌漿處理範圍（臺灣省水利局，民國 83、85 年）

依岩盤之良否以單排孔為主多排孔為輔，間距 1~3 m。

(3) 灌漿孔徑

使用 1.5 in 之孔徑。

(4) 灌漿深度 d

以 $d = \alpha H$ 決定之，其中 $\alpha = 0.5$ ， H 為最高水頭取 100m。

(5) 孔段長度

每一鑽孔內分數個孔段施行灌漿，若鑽孔深小於 30m 孔段長取 5 m，當鑽孔深大於 30m 時孔段長以 10m 為原則。

(6) 灌漿壓力

規定灌漿壓力一覽示於表 1。

(7) 起灌水灰比

依孔段試水量決定起始水灰比，採用

3:1~5:1，原則上細小隙縫以稀漿起灌，而較大裂隙或地表漏漿時則以濃漿起灌。

(8) 水灰比變換

水灰比變換原則參閱圖 4。

(9) 孔段灌漿完成認定

當到達下述壓力及時間內吃漿率小於 1 l/min. 時，方可認定該孔段灌漿完成：

- 灌漿壓力小於 3.5 kgf/cm^2 時連續 20min.；
- 灌漿壓力介於 $3.5 \sim 7.0 \text{ kgf/cm}^2$ 時連續 15min.；
- 灌漿壓力介於 $7.0 \sim 14.0 \text{ kgf/cm}^2$ 時連續 10min.；
- 連續灌漿 60min.，其吃漿量未達 70l 者。

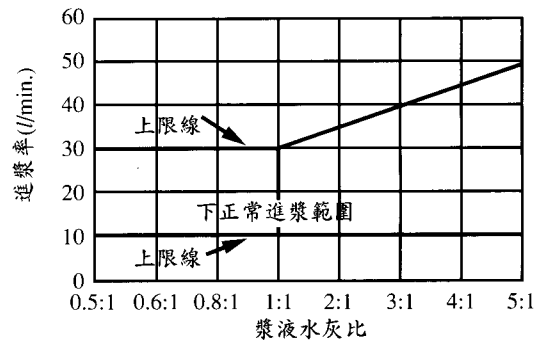


圖 4 漿液濃度變換原則（臺灣省水利局，民國 85 年）

表 1 灌漿規定壓力一覽（臺灣省水利局，民國 85 年）

地 區	孔 段	規定灌漿功力 (kgf/cm^2)							
		第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段	第 5 段	第 6 段	第 7 段	第 8 段
	深 度	5	10	15	20	25	30	40	50
露天施工	第 1 批次	2	2.5	3	3.5	4	5	6.5	8
	第 2 批次	2.5	3	3.5	4	4.5	5.5	7	8.5
	第 3 批次	3	3.5	4	4.5	5	6	7.5	9
	第 4 批次	3	3.5	4	4.5	5	6	7.5	9
	檢查孔	3	3.5	4	4.5	5	6	7.5	9
坑內施工	第 1 批次	3	3.5	4.5	5	6	7	8	9.5
	第 2 批次	3.5	4	5	5.5	6.5	7.5	8.5	10
	第 3 批次	4	4.5	5.5	6	7	8	9	10.5
	第 4 批次	4	4.5	5.5	6	7	8	9	10.5
	檢查孔	4	4.5	5.5	6	7	8	9	10.5

四、灌漿成效

所謂灌漿成效乃是觀察被處理岩盤於劈距式灌漿過程中，經批次灌漿施工後 *Lugeon* 值或灌漿量的收斂情形，可依其累積曲線觀察之。對應於各批次之 *Lugeon* 值或灌漿量累積曲線，是以灌漿孔段為對象，將其數值由小至大排序，再各別把序號除以總孔段數而求得累積百分比，並以 *Lugeon* 值或灌漿量取對數為橫軸，累積百分比為縱軸繪製而成。其中某一孔段的 *Lugeon* 值乃是在灌漿施工試水時依 *Lugeon* 注入試驗求之，即是該孔段在被灌漿處理前的 *Lugeon* 值。因為所分析之孔段長度不一有 5 m 和 10 m 者，故將某一孔段的灌漿量定義為，在此孔段灌漿被認定完成時孔段單位長度的水泥用量 L_g (kgf/m)。在此使用水泥用量而非漿液注入量來定義 L_g 的原因有三，(一)實際填滿裂縫空隙者為水泥固狀物，(二)灌漿施工經費裡的主要計價材料是水泥，(三)相關於壩工灌漿分析之文獻亦多使用水泥用量來定義灌漿量^[6,14]。

因為分析資料的灌漿孔段數甚多，且認為壩基區位也是影響灌漿量因子之一，故於本研究擬將壩基分成如圖 5 所示之左壩座上、左壩座下、河床、右壩座上、右壩座下，五個區位分別分析之。唯於河床部份，因壩積開挖時已移除鬆軟土至新鮮岩盤，其透水性皆小於 10 *Lugeon*，Houlsby(1990)^[9]建議此種低透水性岩盤自然條件已可滿足堆填壩的抗滲流安全要求，而且現場施工的灌漿孔亦少，故於本文僅以左壩座上、左

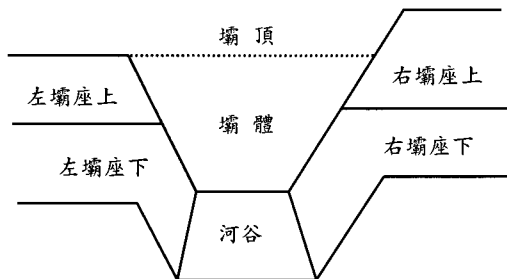


圖 5 壩基區位示意圖 (臺灣省水利局, 民國 83、85 年)

壩座下、右壩座上、右壩座下，四個區位為分析範圍。

共分析 469 個灌漿孔總計孔段數為 3532 個，各區位的孔段數於左壩座上 764 個、左壩座下 855 個、右壩座上 1300 個、右壩座下 613 個，詳表 2。於每個孔段含孔位、批次序號、孔深、孔段長度、岩性、試水 *Lugeon* 值、灌漿壓力、水灰比、水泥用量、透水試驗 *Lugeon* 值等記錄資料。此 3532 個孔段的資料乃是於民國 82 年收集自鯉魚潭水庫施工所灌漿施工檢驗表，再將其資料整理一一輸入電腦 Excel 應用程式試算表內，才得以進行分析，資料的整理與輸入作業量甚大。

表 2 分析孔段數量一覽(臺灣省水利局, 民國 83、85 年)

區位	孔序	孔數	孔深	孔段數
左壩座上	第一批次	11	591	83
	第二批次	9	543	76
	第三批次	20	1158	163
	第四批次	36	1869	262
	增加孔	11	540	76
	檢查孔	14	739	104
	小計	101	5441	764
左壩座下	第一批次	15	828	108
	第二批次	15	826	108
	第三批次	30	1655	216
	第四批次	51	2326	303
	增加孔	3	166	22
	檢查孔	14	772	101
	小計	128	6573	855
右壩座上	第一批次	16	976	133
	第二批次	15	987	134
	第三批次	30	1949	265
	第四批次	52	3029	412
	增加孔	28	1422	194
	檢查孔	20	1193	162
	小計	161	9556	1300
右壩座下	第一批次	9	480	79
	第二批次	9	472	78
	第三批次	17	906	150
	第四批次	26	879	145
	增加孔	4	221	37
	檢查孔	14	749	124
	小計	79	3707	613

圖 6~圖 9 為各區位的 *Lugeon* 值累積曲線，經過批次灌漿處理後，於四個區位的 *Lugeon* 值皆有明顯的減小。由第四批次孔的 *Lugeon* 值累積曲線知曉，於左壩座上有 90% 的孔段其透水性小於 4 *Lugeon*，於左壩座下的孔段其透水性皆小於 3 *Lugeon*，而於右壩座上則有 90% 的孔段其透水性小於 12 *Lugeon*，另在右壩座下的孔段其透水性皆小於 8 *Lugeon*，此等結果表示隔幕灌漿成效相當良好。*Lugeon* 值累積曲線形狀於壩座上、下部具差異性，即於左壩座上、右壩座上因河谷

下切解壓作用較顯著產生發達裂縫，*Lugeon* 值的值域範圍廣而呈現出較緩的曲線；於左壩座下、右壩座下則因裂縫較不發達，*Lugeon* 值較小且其值域窄而呈現出較陡的曲線。

此外，壩基岩盤經劈距式灌漿處理後其透水性的減小趨勢，可藉由圖 6~圖 9 所示之 *Lugeon* 值累積曲線的中位數 Lu_{50} 觀察之，此 Lu_{50} 被定義為對應於通過百分比 50% 的 *Lugeon* 值。圖 10 即為各區位 Lu_{50} 與批次孔序的關係，隨著批次孔序的增加 Lu_{50} 皆有減小的趨勢， Lu_{50} 於左壩

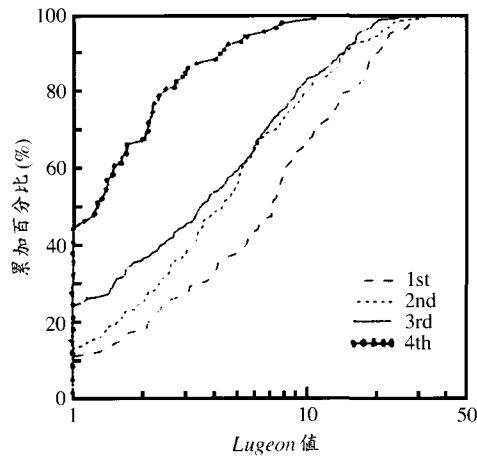


圖 6 左壩座上各批次孔 *Lugeon* 值累積曲線

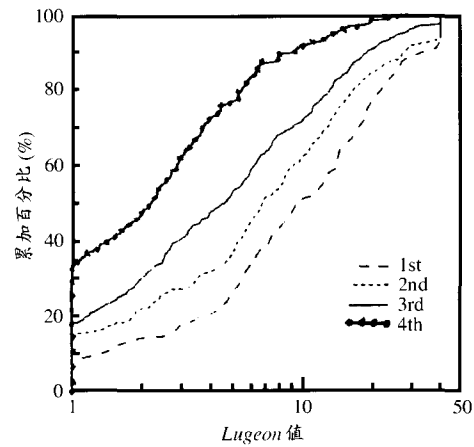


圖 8 右壩座上各批次孔 *Lugeon* 值累積曲線

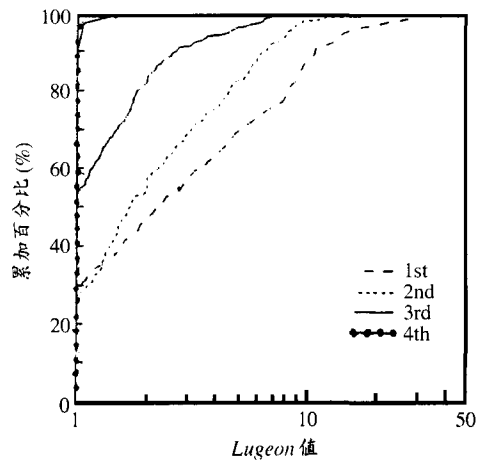


圖 7 左壩座下各批次孔 *Lugeon* 值累積曲線

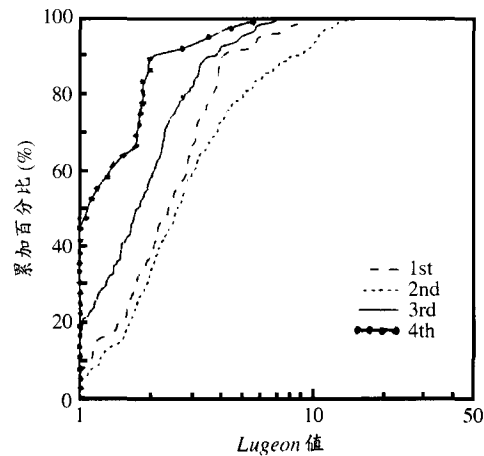


圖 9 右壩座下各批次孔 *Lugeon* 值累積曲線

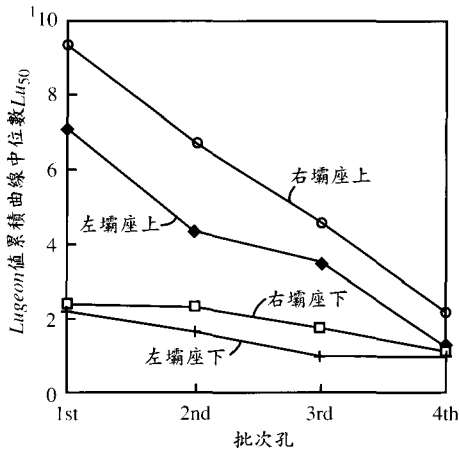


圖 10 各區位 Lugeon 值累積曲線中位數與批次孔關係

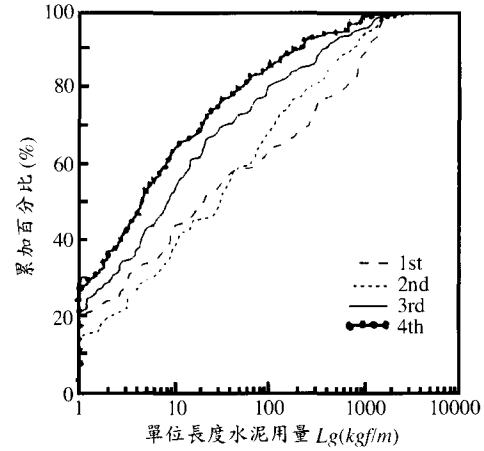


圖 11 右壩座上各批次孔單位長度水泥用量累積曲線

座上從 7.12 降至 1.26，於左壩座下從 2.23 降至 1.02，於右壩座上從 9.36 降至 2.20，於右壩座下從 2.40 降至 1.09。整體而言，因為表面逕流冲刷地表成一河谷，其解壓作用會使兩岸呈倒懸現象至產生裂縫，此作用於兩岸壩座由低往高愈明顯，亦即左壩座上、右壩座上所呈現的 Lu_{50} 皆大於左壩座下、右壩座下者。由圖 10 之曲線斜率吾人亦可知曉，對於透水性較大之壩座上方區位，每一批次孔序的灌漿處理成效都是可期待的。

另一方面，圖 11~圖 14 為各區位的單位長度水泥用量 L_g 累積曲線，其一般趨勢為隨著批次孔序的增加累積曲線向左移動，表示所需灌漿量漸減少。唯如圖 14 所示於右壩座下，其單位長度水泥用量累積曲線於第二批次孔者有移至第一批次孔者右方的現象發生，其原因可能是在第二批次灌漿孔裡有貫穿開放節理而發生漏漿情形所致，於現場也在右岸的壩座下游處發現了漏出的水泥漿液。單位長度水泥用量累積曲線的形狀於壩座上、下部亦具差異性，即累積曲線於左壩座上、右壩座上其斜率較緩而分佈範圍較廣，於左壩座下、右壩座下其斜率則較陡，此種特徵呼應著圖 6~圖 9 的 Lugeon 值累積曲線性質，暗示 Lugeon 值與灌漿量具物理性質上的對

應關係。此外，當第四批次孔處理完後，於左壩座上有 90% 的孔段其 L_g 小於 150 kgf/m ，於左壩座下有 90% 的孔段其 L_g 小於 7 kgf/m ，而於右壩座上則有 90% 的孔段其 L_g 小於 50 kgf/m ，另在右壩座下有 90% 的孔段其 L_g 小於 10 kgf/m 。明顯的，於壩座上部所需的灌漿量甚大於壩座下部者。

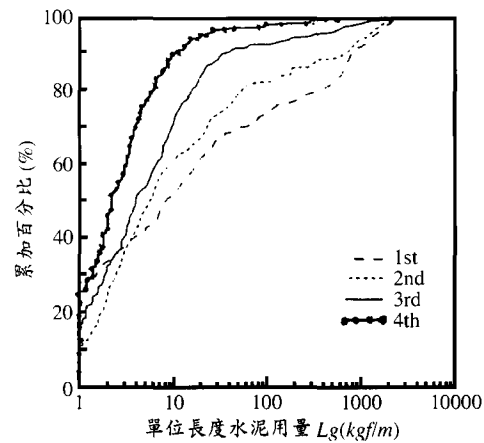


圖 12 左壩座下各批次孔單位長度水泥用量累積曲線

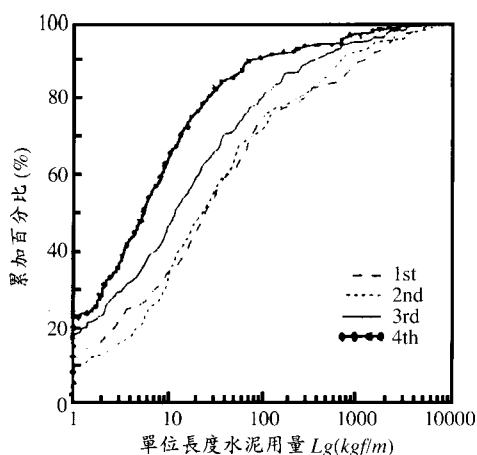


圖 13 右壩座上各批次孔單位長度水泥用量累積曲線

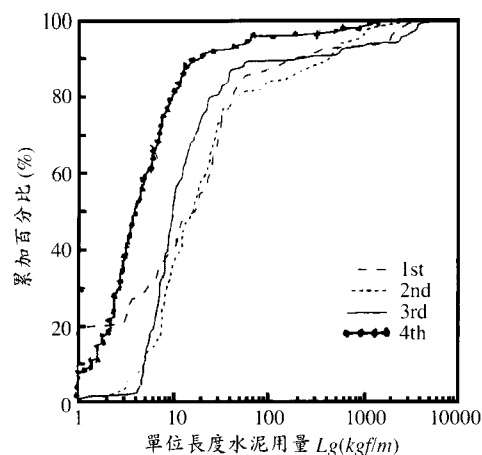


圖 15 各區位單位長度水泥用量累積曲線中位數與批次孔關係

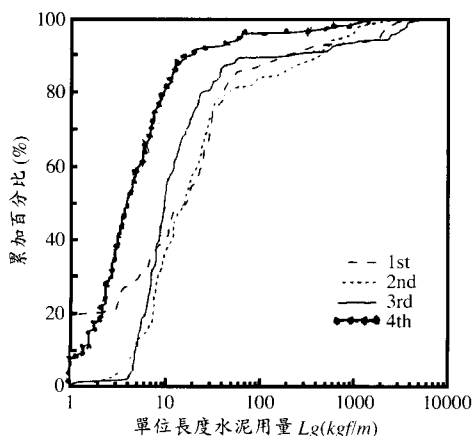


圖 14 右壩座下各批次孔單位長度水泥用量累積曲線

壩基岩盤經劈距式灌漿處理後灌漿量的減小趨勢，可藉由圖 11~圖 14 所示之單位長度水泥用量累積曲線中位數 Lg_{50} 觀察之，此 Lg_{50} 被定義為對應於通過百分比 50% 的單位長度水泥用量。圖 15 即為各區位 Lg_{50} 與批次孔序的關係，隨著批次孔序的增加 Lg_{50} 皆有減小的趨勢， Lg_{50} 於左壩座上從 19.5 kgf/m 降至 7.8 kgf/m，於左壩座下從 8.4 kgf/m 降至 3.2 kgf/m，

於右壩座上從 18.1 kgf/m 降至 4.2 kgf/m，於右壩座下從 23.3 kgf/m 降至 5.4 kgf/m。由圖 15 知曉，對應於第一批次孔與第二批次孔的 Lg_{50} 值差異不大，表示於第一批次孔所灌入的漿液未能有效填滿裂縫。而第三批次孔的 Lg_{50} 甚小於第二批次孔者，此現象或許在暗示於第二批次孔所灌入的漿液已可有效填滿大部份裂縫。當然為達特定水密性的設計安全要求，第四批次孔或增加孔、檢查孔的灌漿處理仍是必要的。

五、灌漿量影響因子

於進行估算以灌漿方法來處理壩基使達設計水密性要求時所需的灌漿量之前，需先了解影響灌漿量的因子有那些。理論上，灌漿量的影響因子有河谷形狀、工址一致性、滲水及其路徑、岩盤強度、裂縫易裂性、裂縫間距、裂縫連續性、覆蓋岩層深度、灌漿材料、灌漿壓力等甚多^[7]。因本研究重應用技術面，故僅根據於設計、施工階段所產生的資料，整理出對應於各灌漿孔的灌漿量影響因子為壩址區位、岩性、灌漿孔深度、灌漿壓力和 *Lugeon* 值五項，以下說明之。

(1) 壩址區位

因為表面逕流冲刷地表成一河谷，其解壓作用會使兩岸呈倒懸現象至產生裂縫，此作用於兩

岸壩座由低往高愈明顯，由圖 11~圖 14 之灌漿量累積曲線知曉於裂縫發達處之上部區位所需的灌漿量較多；茲將河谷形狀因子具體表示成圖 5 所示之壩址區位。

(2) 岩性

岩性蘊涵工址一致性、滲水及其路徑、岩盤強度、裂縫易裂性、裂縫間距、裂縫連續性等特性；若工址岩層位態不一致存脆弱帶需加強灌漿處理；潔淨砂岩滲水性大易被帶走基質細料，泥質砂岩整體膠結良好滲水性小，砂頁岩互層易成滲水路徑；岩盤強度影響灌漿孔自立性，於強度小者需使用特殊栓塞或縮短孔段長度；灌漿時漿液會濕潤擠壓裂縫面，易使其開裂增加灌漿量；近地表之裂縫間距若緊密，其表面易露漿、塌孔；若開口節理系統缺乏連續性，則需要更多的鑽孔方能灌滿岩盤裂隙。

(3) 灌漿孔深度

孔段位於地表下愈深者其受地盤形成過程之壓實大地應力作用愈大，則岩盤實體會較堅硬、裂縫緊密，將影響灌漿量。雖然於灌漿作業要領裡，已依灌漿深度調節了灌漿壓力，唯考慮大地應力對岩盤工程性質的影響，仍將灌漿孔深度列為灌漿量影響因子之一。灌漿壓力皆依灌漿孔所在處的大地應力而定，於壩工領域一般採用水力破裂法(Hydraulic fracturing)求此應力^[13]。

(4) 灌漿壓力

一般認為灌漿壓力是影響灌漿量的最主要人為因子，若想注入更多漿液以期填滿隙縫而提高灌漿壓力，則可能會誘發鬆弛岩盤裂縫，反而需增加施灌範圍及灌漿量。

(5) Lugeon 值

Lugeon 值為吾人唯一可求得之綜合蘊涵所有灌漿量影響因子的物理量，其值表示岩盤透水性的程度，理論上處理具高 Lugeon 值的岩盤將需較多的灌漿量。

六、灌漿量估算

當依他壩經驗來估算另一壩基所需的灌漿量時，往往會遭遇地盤特質性的問題，於鯉魚潭水庫壩基灌漿處理上所設計的單位長度水泥用

量為 50kgf/m，而根據施工記錄資料則為 115 kgf/m，致所使用的總水泥用量比設計的約多出 2 倍，由此可知灌漿量的估算至為困難。在估算灌漿量上一般會考慮觀察 Lugeon 值與單位長度水泥用量 L_g 的關係，對於較寬的裂縫 Lugeon 值大者其 L_g 也大；唯因水泥的黏滯性大於水，當裂縫發達而其開口小於 2mm 時水泥漿液將難以注入，則 Lugeon 值雖大其 L_g 卻小；另於窄裂縫若其填充物在試水時被擾動、則可能會出現 Lugeon 值小 L_g 大之關係。

雖然 Lugeon 值與單位長度水泥用量 L_g 之關係會受其他因子影響，唯本研究所取之各區位樣本孔段數夠多且具普遍性，因此將以其代表值來找出相互關係，而所觀察的代表值為中位數與平均值兩項。當找出 Lugeon 值的中位數或平均值與 L_g 者的關係式後，即可把各個孔段的 Lugeon 值代入此式而得 L_g ，並把 L_g 乘該孔段長度以求得水泥用量，最後總和 3532 個孔段的水泥用量即是此壩基灌漿的估算總水泥用量。

藉由 Lugeon 值與 L_g 的中位數關係來估算總水泥用量的方法雖是可行，但其估算準確度將取決於樣本的分佈型態，若樣本為常態分佈型則其估算準確度將較高^[8]。茲將各區位對應於不同孔序的 Lu_{50} 、 Lg_{50} 關係示於圖 16，唯因分佈型態的特質性(參閱圖 6~圖 9、圖 11~圖 14)，其 Lu_{50} 、 Lg_{50} 的值域分別小於 10、25，即 Lu_{50} 的值域不具普遍性，而若以 Lg_{50} 當作 L_g 的代表值則顯然偏小(施工記錄之 L_g 為 115 kgf/m)，故認為於

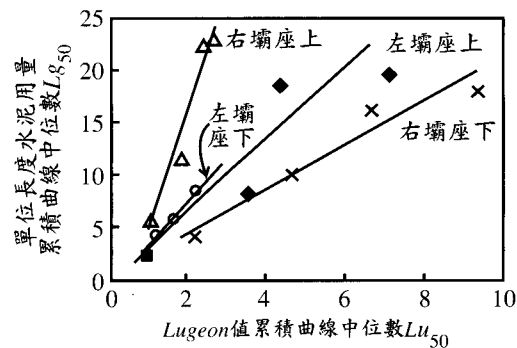


圖 16 Lugeon 值與單位長度水泥用量之中位數關係

本案例以中位數作為代表值來估算灌漿水泥用量是不適宜的。雖然如此，吾人猶可從圖 16 知曉，對應於各個區位的 Lg_{50} 會隨 Lu_{50} 的減小而變少，且其線性迴歸相關係數皆大於 0.85，故可判定以類似 Lu_{50} 、 Lg_{50} 之代表值來找出關係估算是可行的。因此，本研究將再嚐試把 *Lugeon* 值與單位長度水泥用量的平均值當作代表值，據以估算灌漿量。

圖 17 所示為各區位 *Lugeon* 值平均值與單位長度水泥用量平均值之關係，其中 *Lugeon* 值平均值為該區位各孔段 *Lugeon* 值總和除以孔段數值，而單位長度水泥用量平均值則是該區位各孔段單位長度水泥用量總和除以孔段數值。從圖 17 發現一讓人振奮的現象，即雖然於不同區位但兩者的平均值間仍具高度相關性 ($R^2=0.95$)，其原因是各區位 *Lugeon* 值、 Lg 值分析樣本的分佈特徵具如圖 18 所示之同質性，皆為單峰極偏歪斷尾型，即大部份的樣本落於小值域的區間內。於不同區位兩者的平均值間會具高度相關性的樣本條件是分佈同質性，而非分佈型態。圖 17 所示之 *Lugeon* 值平均值與單位長度水泥用量平均值關係可表成(2)式，與圖 16 之中位數值域相較，(2)式的值域較能函蓋施工數據的範圍。

$$Lg = 8.06Lugeon + 36.3 \dots\dots\dots(2)$$

接著是把各個孔段的 *Lugeon* 值代入(2)式而得 Lg ，並把 Lg 乘該孔段長度以求得水泥用量，最

後總和各孔段的水泥用量即是此壩基灌漿所需的估算總水泥用量。估算結果一覽示於表 3，本研究所估算之總水泥用量平均為施工記錄者的 72%，其準確度遠高於設計的 43%。依(2)式所估算的總水泥用量會低於施工記錄者的原因是，大部份的 *Lugeon* 值與 Lg 值分析樣本落於小值域區間內之故，若分析之 *Lugeon* 值與 Lg 值的樣本分佈愈趨於左右對稱型，則此法的估算能力將愈高。

使用 *Lugeon* 值與 Lg 值的中位數和平均值關係來估算總水泥用量的兩個方法中，中位數法較適用於分析樣本屬常態分佈型者，而平均值法對不屬常態分佈型的樣本，亦具相當程度的估算能力。

七、結論與建議

本文以重視應用技術面的研究手法，分析鯉魚潭水庫壩基隔幕灌漿施工記錄資料，以觀察灌漿成效並達估算灌漿量之目的，分析樣本為 3532 個灌漿孔段的數據，資料處理作業量甚大。

於觀察灌漿成效方面，從 *Lugeon* 值或單位長度水泥用量 Lg 的累積曲線遷移情形得知，經過批次灌漿處理後於四個區位的 *Lugeon* 值或 Lg 值皆有明顯的減小，於左壩座上、右壩座上有 90% 的孔段其透水性分別小於 4 *Lugeon*、12 *Lugeon*，於左壩座下、右壩座下的孔段其透水性皆分別小於 3 *Lugeon*、8 *Lugeon*，此等結果表示

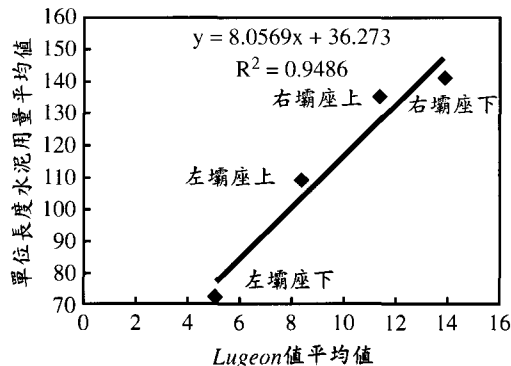


圖 17 *Lugeon* 值與單位長度水泥用量之平均值關係

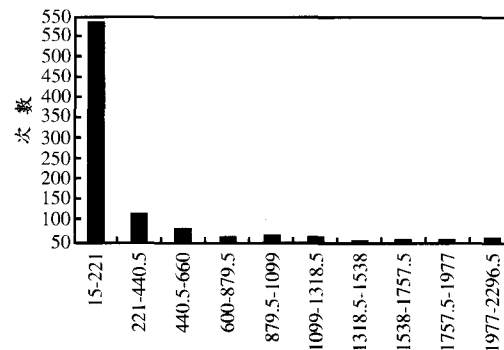


圖 18 左壩座上單位長度水泥用量分布型態

表 3 鯉魚潭水庫壩基灌漿所需總水泥用量一覽

區 位	孔段總長 (m) (1)	總水泥用量 (kgf)			(2) (3) %	(4) (3) %
		設計(1)×50kgf/m (2)	施工記錄 (3)	估 算 (4)		
左壩座上	5,441	272,050	592,251	402,731	46	68
左壩座下	6,573	328,650	457,023	338,197	72	74
右壩座上	9,555	477,750	1,341,066	952,157	36	71
右壩座下	3,707	185,350	524,446	398,579	35	76
全 區	25,276	1,263,800	2,915,786	2,091,664	43	72

隔幕灌漿成效相當良好可達設計水密性要求。位於同一區位的 *Lugeon* 值與 *Lg* 值累積曲線其形狀相呼應，暗示著 *Lugeon* 值與灌漿量具物理性質上的對應關係；於壩座上方區位者因河谷下切解壓作用較顯著使其累積曲線較緩，而於壩座下方者因裂縫較不發達其累積曲線較陡，由此可知壩基區位也是影響灌漿量的因子之一。

於估算灌漿量方面，因本研究所取之各區位樣本孔段數夠多且具普遍性，故嘗試使用 *Lugeon* 值、*Lg* 值的中位數和平均值關係來估算總水泥用量，於中位數法因要求所分析的樣本需屬常態分佈型者，故較不適用於本研究案例。而於平均值法裡，發現雖然於不同區位 *Lugeon* 值、*Lg* 值的平均值間仍具高度相關性 ($R^2=0.95$)，只要樣本分佈型態具同質性則雖不屬常態分佈型者平均值法亦具相當程度的估算能力，其所估算之總水泥用量為施工記錄者的 72%，估算準確度遠高於設計的 43%。

使用 *Lugeon* 值或 *Lg* 值的累積曲線來觀察灌漿成效甚可行。以平均值法來估算總水泥用量的適用性較優於中位數法，唯因壩基岩性不一且各具特質性，故(2)式的係數值域會因地而異，仍有待累積更多他壩的灌漿經驗以資定鑠。於設計階段如欲使用(2)式來估算壩基灌漿所需之總水泥用量，建議先確認該設計壩基的岩盤是否類似於鯉魚潭水庫者。

八、誌 謝

本研究之完成，承蒙國科會(NSC85-2211-

E-216-004)提供研究經費，臺灣省水利局(現經濟部水利處)提供資料，謹致謝忱。另本文，承蒙中華工學院土木工程系研究所楊景翔先生協助資料整理及分析，在此一併致謝。

九、參考文獻

1. 臺灣省水利局，「鯉魚潭水庫大壩第二期工程岩石開挖面地質研判與地質圖繪製總結報告」，民國 82 年。
2. 徐鐵良，「地質與工程」，中國工程師學會，民國 82 年。
3. 臺灣省水利局，「苗栗鯉魚潭水庫計畫檢討報告」，民國 83 年。
4. 臺灣省水利局，「鯉魚潭水庫工程基本設計報告」，民國 85 年。
5. 臺灣省水利局，「灌漿工法」，民國 85 年。
6. Ennto, M., "Foundation Grouting and Cut-off in Irihata Dam," The Dam Digest, No.520-2, pp.9-26, Japan Dam Foundation (1988).
7. Ewert, I. K., "Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites," Springer-Verlag Publishing Company, Berlin (1985).
8. Hirota, Y., Takebayasi, S. and Shibata, I., "Prediction of Grout Take in Dam Foundation Grouting - A Case of Granite -," Journal of Japan Society of Civil Engineering, Vol.VI-13, No.421, pp.195202 (1990).
9. Houslby, A. C., "Construction and Design of Cement Grouting," John Wiley & Sons, Inc.,

- (1990).
10. Jaroslav, I. and Verfel, D., "Rock Grouting and Diaphragm Wall Construction," Elsevier Publishing Company, New York (1989).
 11. Kutzner, C., "Consideration on Rock Permeability and Grouting Criteria," 15th International Congress on Large Dams, Lausanne, Q.58, R.17 (1985).
 12. Lombardi, G., "The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock," 15th International Congress on Large Dams, Lausanne, Q.58, R.13 (1985).
 13. Shibata, I., "The Determination of a Rational Injection Pressure Related to In-situ Stress in Dam Foundation Grouting," Journal of Japan Society of Civil Engineering, Vol.III-16, No.436, pp.121-130 (1991).
 14. Tano, S., "Foundation Grouting in Tenzan Dam," The Dam Digest, No.520-4, pp.53-83, Japan Dam Foundation (1988).
 15. Weaver, K., "Dam Foundation Grouting," Library of Congress Catalog Card No: 91-34635, ASCE (1991).
 16. Yamaguchi, Y. and Matsumoto, N., "Permeability and Lugeon Values of Dam Foundation," Journal of Japan Society of Civil Engineering, Vol.III-12, No.412, pp.51-60 (1989).

收稿日期：民國 88 年 9 月 1 日

接受日期：民國 88 年 10 月 19 日