

地工技術

翡翠大壩基礎層縫處理

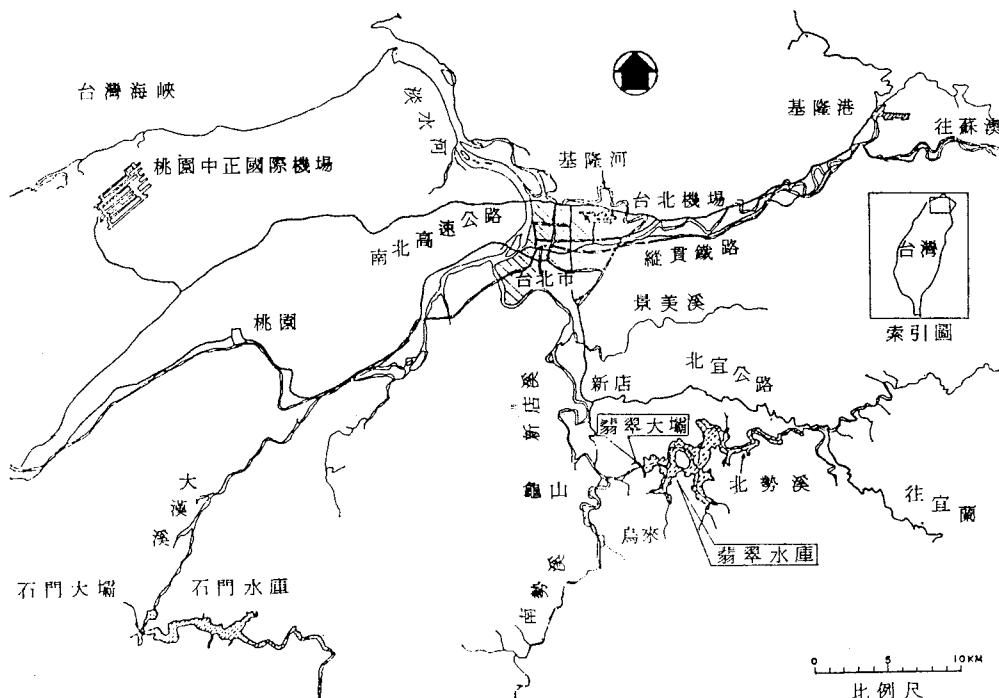
傅重煥* 李慶龍**

一、前 言

翡翠水庫係為供應大臺北區自來水長期性之水源而興建，總蓄水容量為四億六百萬立方公尺。為充分利用水源，另附設容量七萬瓩之發電廠一座。翡翠大壩屬三心雙向彎曲厚混凝土拱壩，壩高122.5公尺，壩頂長510公尺。其他重要構造物包括上游擋水壩、副壩電廠輸水路、落水池、靜水池、排洪隧道、導水隧道以及8.5公里長的骨材運輸道路等。壩址位於新店溪主要支流之北勢溪下游，距南勢

溪合流點約2.6公里，如圖一所示。

因翡翠水庫壩址臨近臺北都會地區（距臺北市約30公里），大壩的安全性遂成為大眾所矚目的焦點。又因混凝土拱壩於承受外力後，將其大部分荷重藉拱作用傳至兩側拱座基礎，因此兩岸岩盤之強度及構造對拱壩基礎安全至為重要。翡翠大壩壩基地質雖然堪稱良好，但構造上因岩層內夾有層縫且部分節理含泥，影響壩基之抗剪力、變形及水密性，因此基礎除以傳統的灌漿及基礎排水處理外



圖一 翡翠水庫地理位置圖

* 臺灣電力公司翡翠工程處基礎課長
** 臺灣電力公司翡翠工程處主管地質

對層縫處理採用全世界最新的超高壓水鑽及水刀沖洗法，並以不收縮漿填實之方法處理，以確保壩基之安全。此種利用水鑽及水刀來作層縫處理之方法在國內外壩工界尚屬首創，故特此撰文介紹於後。

二、壩址一般地質

翡翠壩址為一呈V字型順向河谷，河床標高約55尺，寬約70~90公尺，河道坡度甚為平緩，河床岩石裸露，河水清澈，兩岸山勢高聳，標高達600公尺以上。

出露於壩址地區之岩層為漸新世(Oligocene)之粗窟層與大桶山層，兩地層以右岸RV砂岩為界(如圖二、三)，前者由深灰色粉砂岩夾厚層淺灰色砂岩組成，分佈於左岸、河床及右岸低處；後者為粉砂岩夾薄層砂岩或互層所組成，分佈於右岸標高80公尺以上。大體上岩層分佈比例為粉砂岩多於砂岩，但後者因其具有較高之抗風化力，而在河床、山溝處裸露並構成順向坡之主要坡面。因此對壩址區域之邊坡穩定性具有相當重要之影響(如圖二、三)。砂岩、粉砂岩之物理及岩石力學性質如表一所示。

壩址岩層之一般走向為N68°~70°E，略平行於河谷，向西北傾斜40°，亦即岩層自左岸向右岸傾斜，故左壩座為順向坡(Dip-Slope，如圖三所示)。坡面大部分由抗風化力較強的砂岩面所形成，坡面平直而廣佈，最高延展達標高210公尺。右岸岩層走向傾斜大致與左岸相同，因向山體傾斜，

故右壩座為逆向坡(Scarp-Slope)，坡面亦呈約40°。由於岩盤風化程度不一及節理關係，造成山窪及山脊起伏變化之特殊地形。

整個壩址位於火燒樟背斜之北翼，背斜軸部通過左壩頂南方約120公尺處(圖二)，此構造非但在其軸部造成彎曲及破裂，並且在兩翼岩層內形成層縫(Bedding Seam)。層縫在近軸部之左岸較發達且數量多，構成此地區之重要地質弱面；右岸之層縫則不如左岸來得顯著。

三、壩址地質構造特性

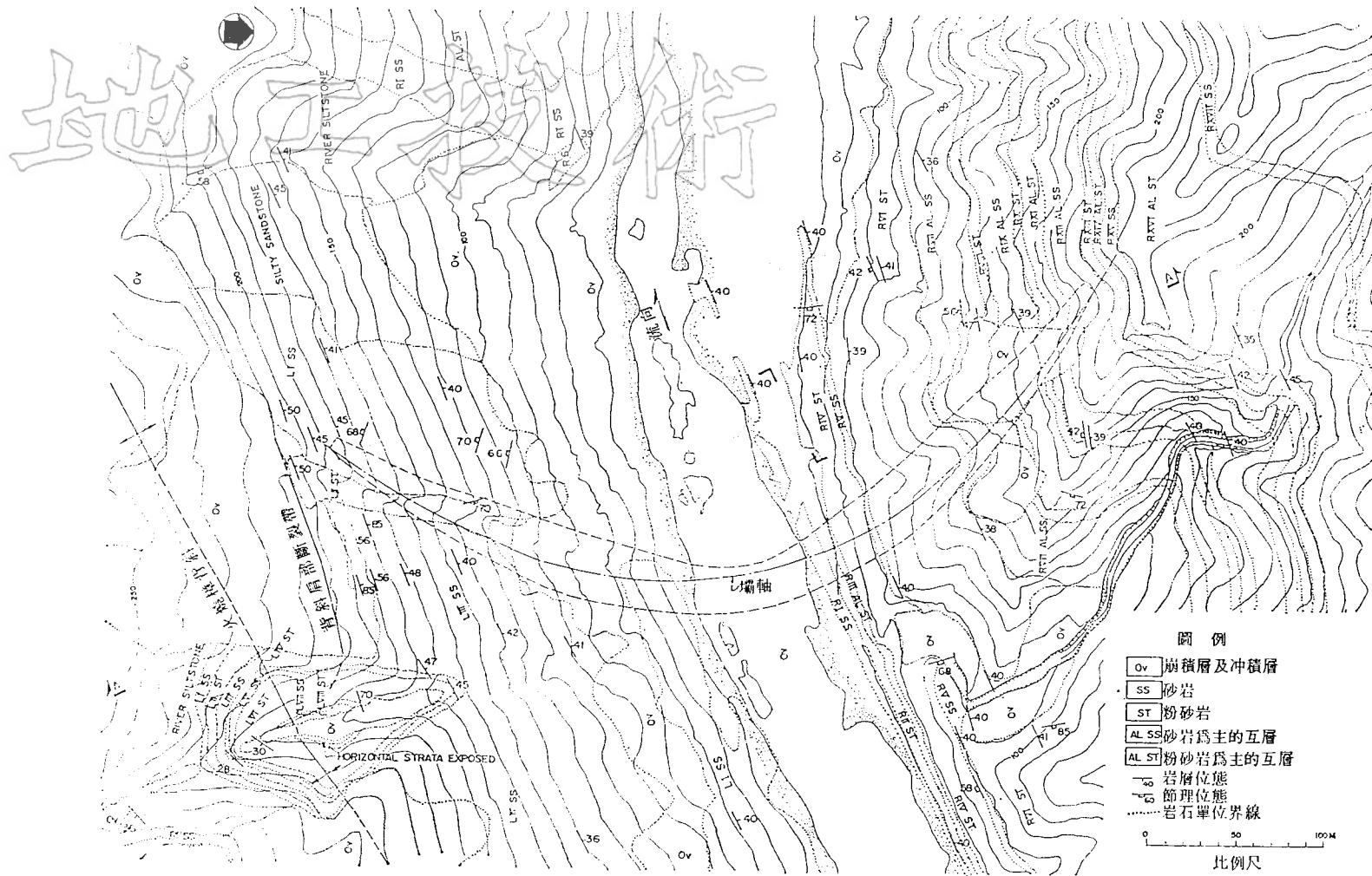
翡翠壩址之地質構造除上述火燒樟背斜外，未發現有斷層通過，但仍有節理、層縫及剪裂帶等地質弱面存在，其中以層縫為攸關翡翠大壩基礎安定之重要弱面，故將在第四節詳細介紹討論。

3.1 褶皺

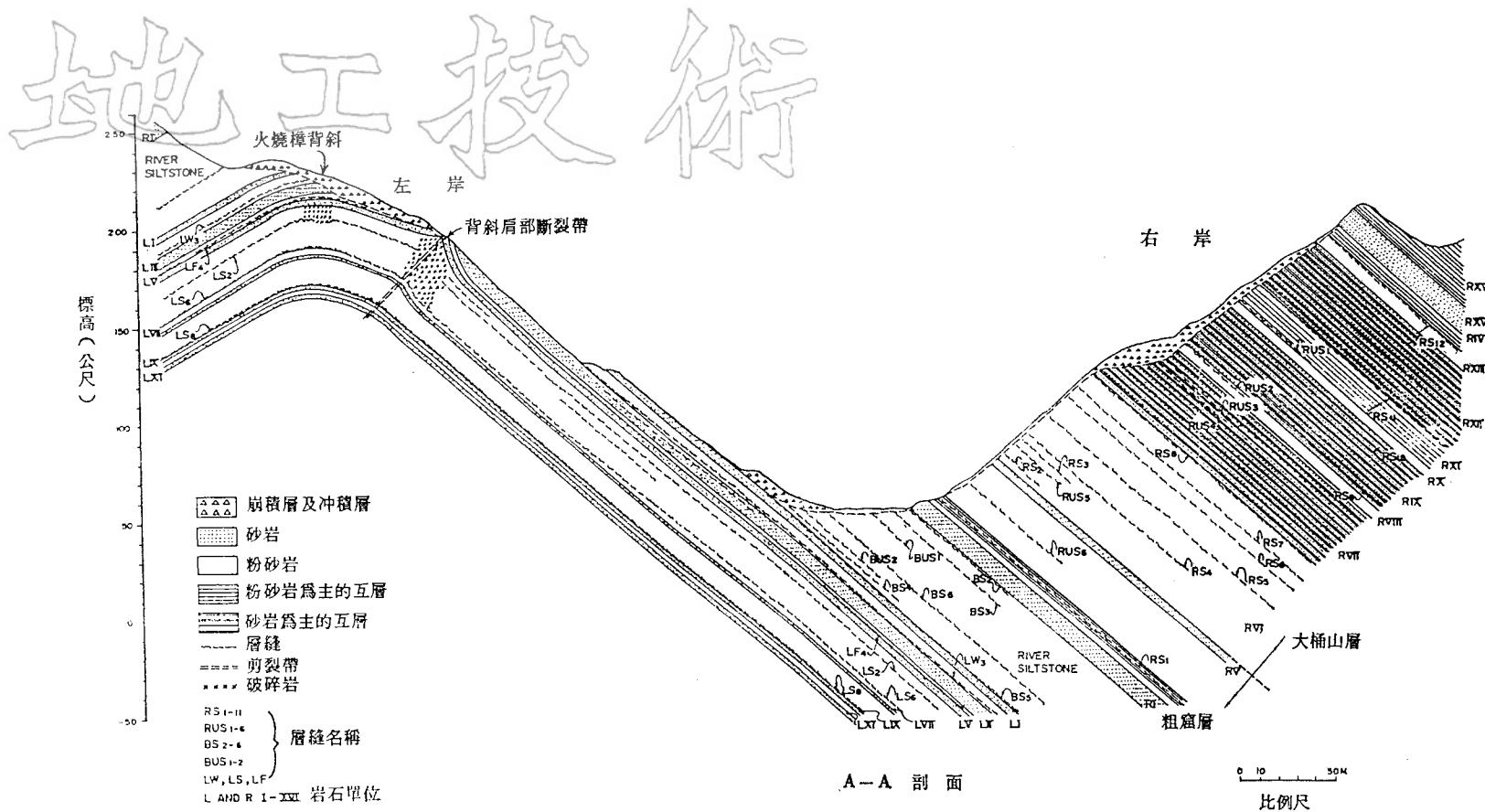
影響本壩址地質構造的褶皺僅有一火燒樟背斜，該背斜為北勢溪流域主要褶皺——插天山背斜的分支。火燒樟背斜軸通過左壩頂南方約120公尺處，亦即壩址位其北翼而呈單斜構造。構成大壩左壩座為順向坡面，右壩座為逆向坡面。背斜西北翼傾斜約40°，東南翼傾斜約26°，為一近乎對稱的背斜構造。背斜軸呈東北—西南向，故愈上游愈趨近北勢溪河道。軸部受擠壓變形頗為劇烈，致近軸部岩石破碎。此外或沿層面剪裂造成發達之層縫，或沿與層面斜交之弱面剪裂形成局部剪裂帶。其中最顯著者為背斜肩部斷裂帶(Anticlinal Shoulder Break)

表一 岩石物理、力學性質

性 質	砂	岩	粉 砂	岩
比 重	2.57~2.67		2.64~2.72	
吸 水 率 (%)	0.33		2.25	
孔 隙 率 (%)	1.5		5.5	
硬 度 (莫氏硬度計量)	3~4		2~3	
單軸抗壓強度 (kg/cm ²)	900~1648		492~917	
靜彈性模數 (kg/cm ²)	175000~411000		92000~271000	
動彈性模數 (kg/cm ²)	462000~661000		442000~557000	
抗張強度 (kg/cm ²)	72~145		24~112	
包 生 比	0.15~0.28		0.20~0.41	
凝 聚 力 (kg/cm ²)	168~200		58~88	
內 摩 擦 角 (度)	46~62		54~64	



圖二 翡翠場址平面地質圖



圖三 翡翠壩址地質剖面圖

圖二 (左)。山工挖

3.2 節理

壩址節理主要計有A、B及C三組，其位態、連續性如表二所列。在右壩座除C組節理於標高80至130公尺間較發達外，A及B組節理均不發達。一般而言，C組節理在地表淺處呈開裂、風化，稍入深處則緊密而趨尖滅，局部C組節理含泥者需予以處理。左壩座三組節理發達情形則隨岩性而異。大體而言，A組於上層砂岩、粉砂岩，B組於上層及中層砂岩中較發達，而C組則在低標高較發達。節理面多呈平面狀，但面上粗糙而稍具不規則之起伏。同一組節理似有雁形排列之趨勢，與層面垂直者，大都止於層縫，且多屬緊閉型。少數C組節理因解壓、風化，呈礦染、或含泥、或含細岩片。所有節理之連續性均甚低。

表二 翡翠壩址基礎之地質弱面

位置	項目 地質弱面	位 態	連 續 性 (%)
左 壩 座	節理	A N 6°E / 56°E	25
		B N 70°W / 56°S	25
		C N 67°E / 46°S	50
	層面	N 66°E / 40°N	75
		N 66°E / 40°N	100
	層 縫		
右 壩 座	節理	A N 8°E / 59°E	25
		B 不顯著	—
		C N 74°E / 55°S	50
	層面	N 66°E / 39°N	50
		N 66°E / 39°N	100
	層 縫		

* 節理連續性是根據 Leopold Muller's 方法計測估算。

3.3 剪裂帶

剪裂帶通常含灰色泥及破碎岩塊，寬度由5公分至數公尺不等，為與背斜褶皺同時造成的局部性小構造。剪裂帶一般走向為西北，向西南傾斜70度至90度。除河床僅出現一條外，右壩座及左壩座各有數條出現。其中最顯著者為左岸之背斜肩部斷裂帶，出露於標高190至210公尺高處（圖二、三所示），走向為N55°E，向東南傾斜45度，含約50至100公分灰色泥及碎岩塊，為與基礎穩定有關的主要剪裂帶。

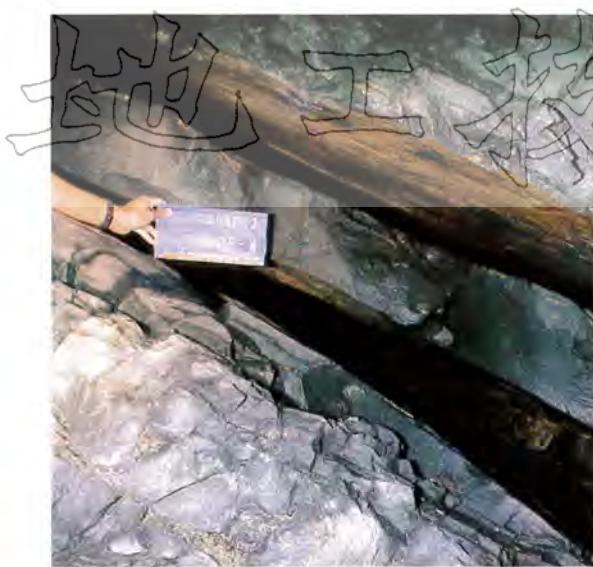
四、層縫之地質特性

層縫為順沿層面形成之弱帶，通常出現於粉砂岩內或粉砂岩與砂岩交界面之間，由純灰色黏土或砂岩、粉砂岩碎片及黏土夾雜而成，一般膠結相當緊密、堅實。為別於緊密之層面節理及其他不連續面，特稱為層縫。層縫形成原因之一為背斜褶皺時沿層界或較弱層產生剪力破壞，以致岩層間發生不同程度錯動、移距（Differential Slippage），使弱層剪裂、破碎、磨碎而成者，屬構造剪裂成因（Tectonic Shear Origin）；二為因背斜褶皺作用停止、壓力解除及河谷受侵蝕後荷重減除而解壓，導致層面節理開裂，再經風化及充填而成，此類或稱之為解壓縫（Lift Seam）。層縫之種類依其形態之變化，可分三種：第一種為呈平面或波浪起伏狀之單一層縫（Single Seam），大部分層縫屬之。其厚度有的均勻，有的寬窄不一，唯層縫上、下盤通常均為完整岩石。第二種為分支層縫（Branch Seam），係由某些單一層縫分岔而成。這些分支或延伸一小段即告尖滅、或繼續延伸相當距離、或再與原層縫合而為一。第三種為合成層縫（Combined Seam），係由二條或以上薄層縫組成之層縫帶，含黏土、破碎岩塊及風化岩石，此類層縫數量較少。翡翠大壩基礎內露出之層縫為數衆多，遍佈整個壩址（圖三），但一般以出現在壩座內者數量較多且發達（參見照片一、二）。

下面即以壩址左壩座、河床及右壩座三區，分別介紹各區出露之層縫分佈情形及特性。



照片一 大壩鍵槽面 El. 130 m 附近露出之 LF4 層
縫為黃灰色黏土夾些許碎岩片

照片二 LAT-2 內 LF₄ 層縫風化並夾大塊岩片

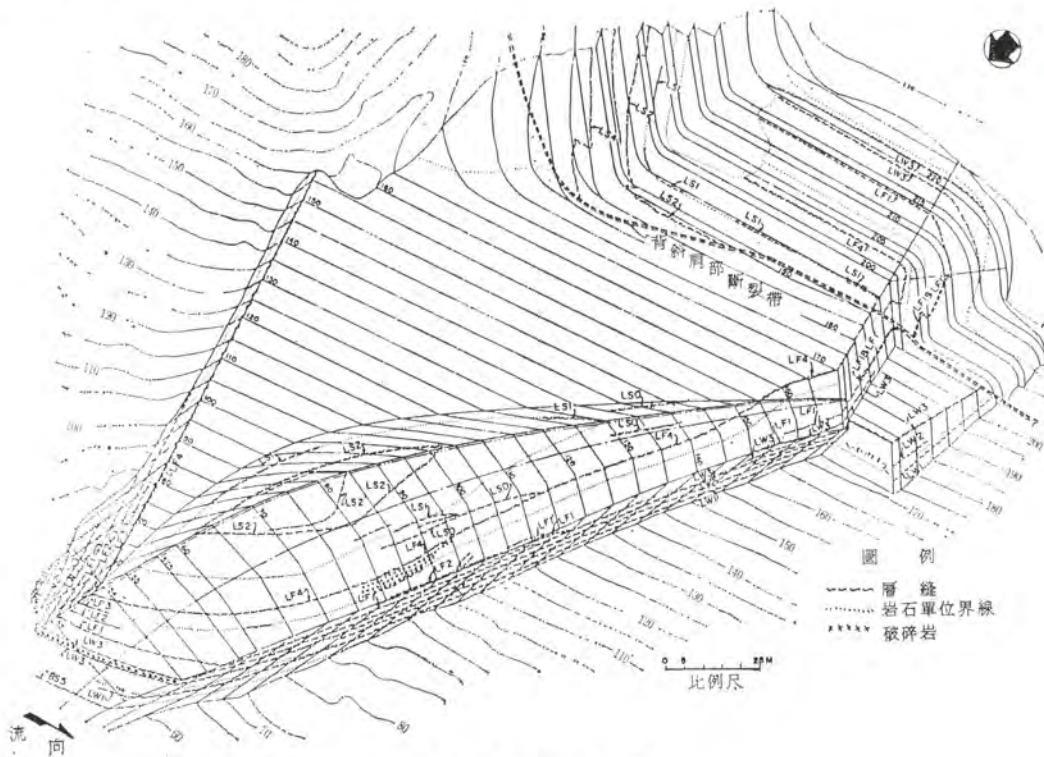
4.1 左壩座區

左壩座基礎內共發現25條層縫(圖四所示)，其名稱、組成物質、厚度及露出之連續性，詳如表三所示。其中 LF₄、LS₂、LS₃、LS₄、LS₇、LS₈、LS₉

等為構造剪裂所成，餘則為解壓縫。左壩座層縫性質、厚度及組成均較右壩座者複雜，不但分支層縫發達，厚度變化大，且夾風化岩塊及泥如 LF₁～LF₄ 層縫。有些層縫延展斷續，且不一定順沿同一層面，並夾薄層灰色泥，如 LS₃～LS₄ 層縫。左壩座最重要之層縫為 LS₂，因其厚度寬大、組成均勻，而連續性為 100%，即遍及整個左壩座基礎內，對壩基穩定最具影響，故稱為「主層縫」。壩基層縫處理廊道之主坑道即多沿本層縫挖掘，以便探查及處理(參見照片一、二)。

4.2 河床基礎區

河床基礎區亦有 12 條層縫出現(圖五所示)，各層縫之性質如表四所列。一般言之，除 BS₆ 及 LW₃ 層縫帶 (Seamy Strata) 外，多由灰色黏土形成之薄層縫，故河床壩基經開挖後呈現厚實塊狀之堅硬良質岩盤。BS₆ 層縫係由 BS₆ 及 BS₆' 層縫合成約 3 公尺寬之破碎帶，在壩基下游側又與剪裂帶 SZ₂ 交會，使岩盤局部擾亂而破碎。LW₃ 層縫帶分佈於河床左側邊緣，係由 LW₃、LW₃' 以及 LF₁ 至 LF₄ 等數條層縫在河床基礎構成寬約十餘公尺破碎帶。岩石高度風化、破碎並夾泥。除本層

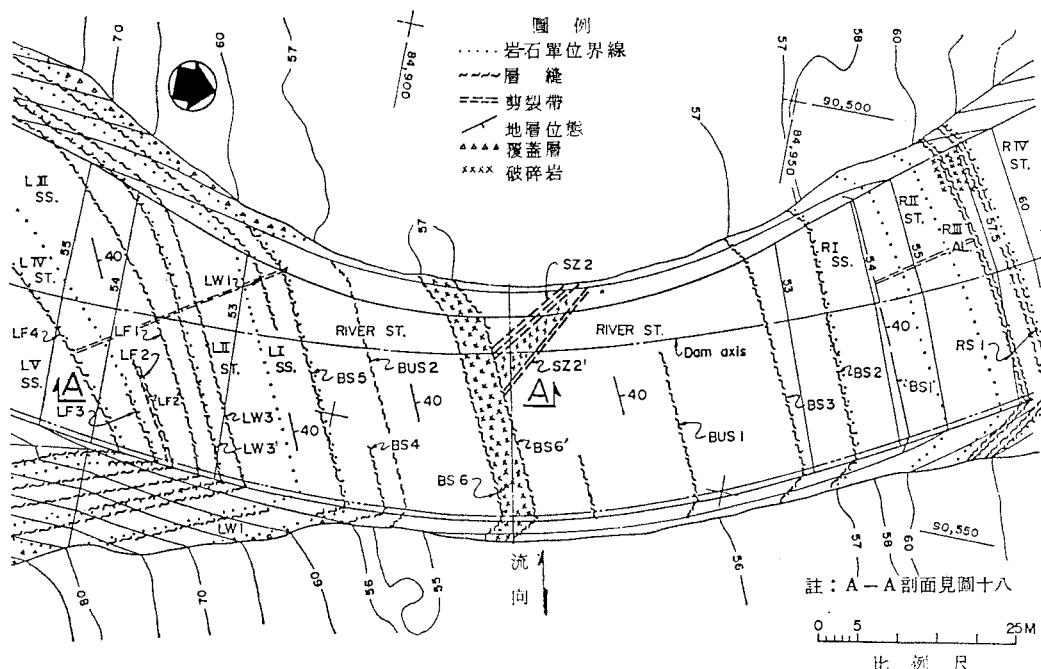


圖四 左壩座層縫分佈圖

表三 左壩座層縫

層縫名號	厚 (cm)	組 成	連 續 性 (%)	層縫名稱	厚 (cm)	組 成	連 續 性 (%)
LF ₀	0.1~10	黃褐色泥及破碎岩塊	11	LS _{1'}	0.1~10	破碎岩塊夾黃褐色泥	20
LF ₁	0.1~30	"	81	LS ₂	0.1~50	"	100
LF _{1'}	0.1~25	"	33	LS _{4'}	0.1~40	"	43
LF _{1''}	0.1~20	"	6	LS _{3'}	0.1~17	黃褐色泥	19
LF ₂	0.1~40	"	47	LS ₃	0.1~8	"	19
LF _{2'}	0.1~20	"	19	LS ₄	0.1~30	"	38
LF ₃	0.1~100	"	33	LS ₅	0.1~20	黃灰色泥	67
LF _{3'}	0.1~7	"	11	LS ₆	0.1~0.5	"	13
LF _{4'}	0.1~20	"	14	LS _{6'}	0.1~4	灰色泥	50
LF ₄	0.1~100	"	100	LS ₇	0.1~8	"	100
LS ₀	0.1~50	黃褐色泥	42	LS _{7'}	0.5~2	"	—
LS ₂	0.1~10	"	23	LS ₈	0.1~3	"	—
					2~15	"	100

* 連續性是指層縫在同一基礎廊道內或上、下廊道間露出之百分比。



圖五 河床基礎層縫分佈圖

表四 河床基礎層縫

層縫名稱	厚 (cm)	組 成	連續性* (%)
BS ₁	—	層面節理局部含薄層泥	100
BS ₂	0.1~2	灰色黏土及破碎岩片	100
BS ₃	0.1~1	"	100
BUS ₁	0.1~1	"	60
Local	0.1~1	"	50
BS ₆	100~300	"	100
BUS ₂	0.5~1	黃灰色黏土及破碎岩片	100
BS ₄	0.1~1	灰 色 黏 土	40
BS ₅	2~4	黃灰色黏土及破碎岩片	100
LW ₁	0.1~1	"	20
LW ₃	10~20	"	100
LW _{3'}	10~30	"	100

* 連續性指層縫於鍵槽內露出長度百分比。

縫帶為解壓層縫外，餘均為構造剪裂層縫。

4.3 右壩座區

右壩座出露之層縫亦達18條之多（圖六所示），各層縫之性質詳如表五所列。所有層縫之成因均

屬構造剪裂型。

本區內之層縫除 RS₁ 及 RS₁₁ 較特殊外，餘均為灰色黏土所組成之單一薄層縫。層縫上、下盤均為完整岩石。RS₁ 層縫為由4條含灰色黏土的層縫及破碎岩塊所造成3~5公尺寬的層縫破碎帶。RS₁₁ 層縫亦含1.4~1.6公尺寬的破碎岩塊及灰色黏土。

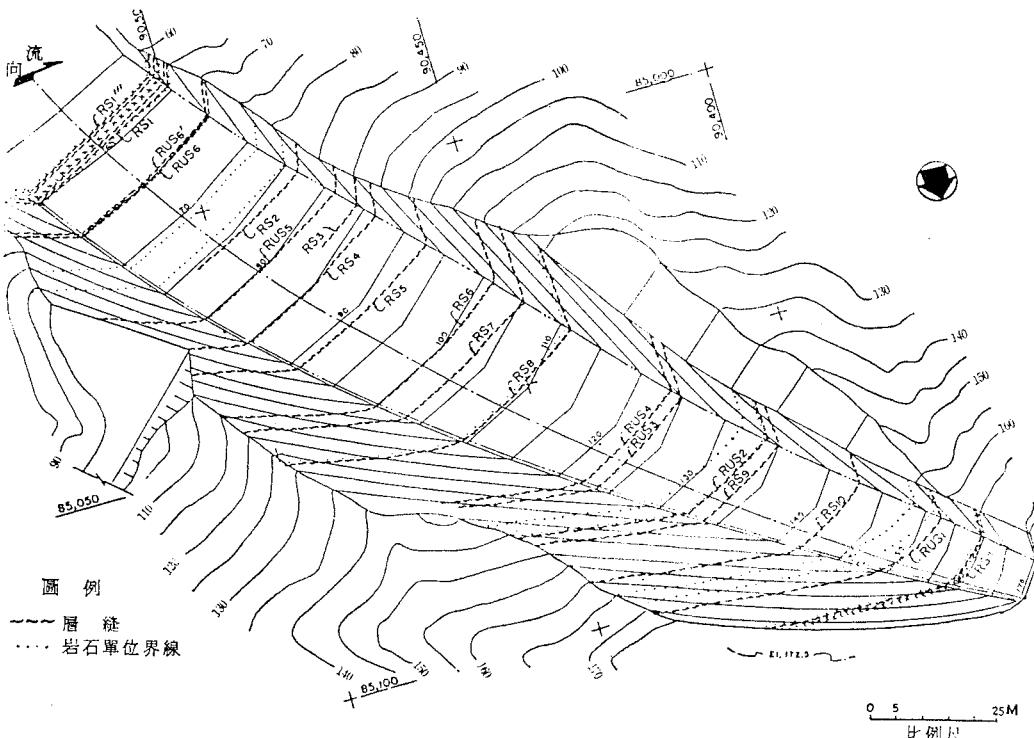
五、地質弱面之力學性質

為了解壩址岩盤及地質弱面之各種力學性質，以供壩體應力、基礎安定分析及基礎處理範圍之研判，故實施一系列現地及室內岩石力學試驗，試驗項目包括岩石及處理前弱面之凝聚力、內摩擦角，以及岩石之彈性模數、變形模數及單軸抗壓強度，其結果如表六所示。

六、層縫處理設計準則

6.1 層縫處理之基本設計考慮

由於混凝土拱壩承受外力時，將大部分荷重藉拱作用傳至兩側壩座基礎，故興建拱壩首重壩座基



圖六 右壩座層縫分佈圖

礎。翡翠壩址岩質緻密而堅硬，為良好之拱壩基礎，惟左壩座為順向坡及兩岸層內夾有含泥層縫，為本壩址最大缺點。

翡翠大壩在設計時，以立體岩楔法分析壩基安定性。由於壩基岩盤內具有不同位態之弱面，此等

弱面之抗剪力遠比岩盤本身為小，故壩基承受荷重所生之可能破壞必依最不利之弱面滑動，而岩楔即由此等弱面及坡面構成。在翡翠壩址由弱面所組成之可能滑動岩楔因左右壩座位置不同而有不同之組合與意義，須逐一分析，以尋覓最不利之岩楔。其

表五 右壩座層縫

層縫名稱	厚 (cm)	組 成	連續性*** (%)	層縫名稱	厚 (cm)	組 成	連續性*** (%)
RS ₁	300~500	破碎岩塊夾灰色黏土	100	RS ₁₀	1~20	灰 色 黏 土	100
RS ₂	0.1~2	灰 色 黏 土	80	RS ₁₁	140~160	風化破碎岩塊夾黏土	100
RS ₃	0.1~5	"	50	RUS ₁ **	0.1~2	灰 色 黏 土	100
RS ₄	0.5~3	"	100	RUS ₂ **	0.2~1	"	100
RS ₅ *	0.5~3	"	100	RUS ₃ **	1~2	"	100
RS ₆	1~5	"	100	RUS ₄ **	1~2	"	100
RS ₇ *	0.5~5	"	100	RUS ₅ **	0.2~2	"	100
RS ₈ *	0.1~10	"	100	RUS ₆ **	3~12	"	100
RS ₉ *	0.5~3	"	100	RUS ₆ **	0.1~0.5	"	100

* 局部寬達 20~30 cm 由破碎岩塊及黏土組成。

** RUS 係大壩基礎開挖後出露於大壩鍵槽面者。

*** 連續性指層縫於廊道內或鍵槽內之露出長度百分比。

表六 翡翠壩址岩石及地質弱面之力學性質

地質弱面名稱			凝聚力 (kg/cm ²)	內摩擦角 (度)	彈性模數 (kg/cm ²)	變形模數 (kg/cm ²)	單軸抗壓強度 (kg/cm ²)
層 座	左 壩 座	LF ₄	5.6	26	7200	312	
		LF ₂	0.6	18.3		188	
		LF ₄	1.5	28.8		593	
		LF ₆	0.7	27.5		2500	
		LF ₈	1.0	—			
縫 座	右 壩 座	RS ₅	4	17.5			
		RS ₉	1.5	25			
		RS ₁₀	0.7	25			
		RS ₁₁	1.0	25			
節 理	左 壩 座	A	1.3	30			
		C	0.8	26			
		層面	1.7	30.7			
	右 壩 座	A	0.7	19			
	B	1.6	27.5				
	C	1.8	26.3				
	層面	3.5	18.5				
砂 岩		184	51	309000	89000	1084	
粉 砂 岩		67	59	208000	11200	614	

安全係數應等於或大於設計之安全值，否則須予加強處理以補救之。

下面係依據上述壩基安定分析法之考慮，而檢討壩基各區有那些可能之岩楔：

6.1.1 左壩座

由於左壩座為順向坡，故基礎穩定問題較右壩座重要。依各弱面位態之關係，左壩座之岩楔由A組節理及層縫所構成之可能性最大，尤以連續性為100%之 LF_4 、 LS_2 、 LS_6 層縫必須加以考慮。但來許多岩塊之 LF_4 層縫在壩基鍵槽（Keyway）近下游側露出（圖四），承受大壩推力不及三分之一，故不會形成關鍵性之可能滑動岩楔；而 LS_6 層縫位於壩基底下深處，難於形成有害之岩楔；唯主

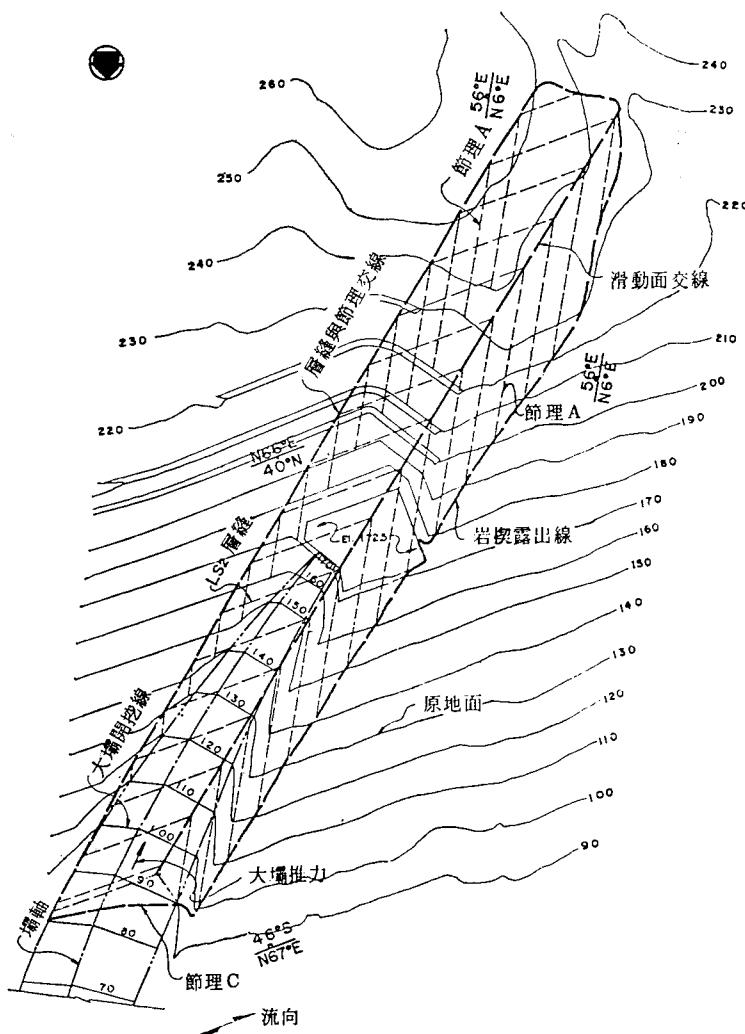
層縫 LS_2 則不然，不但發育良好且幾乎遍佈壩基，與A組節理構成如圖七、八所示之顯著岩楔。前述所形成之岩楔滑動方向（即圖上之滑動面交線）均指向上游及山體深處，而不露出於下游地表，故對基礎尚不構成破壞性岩楔。

6.1.2 右壩座

右壩座是逆向坡，故形成可能滑動岩楔之弱面為傾向河側之C組節理及層縫，C組節理尤以含泥者最為重要。右壩座之可能岩楔如圖九所示。值得注意的是可能形成之岩楔在下游河谷露出。

6.1.3 河床基礎：

形成河床基礎可能滑動岩楔之弱面為層縫及C組節理，而河床除層縫外節理不發達，但因大壩下



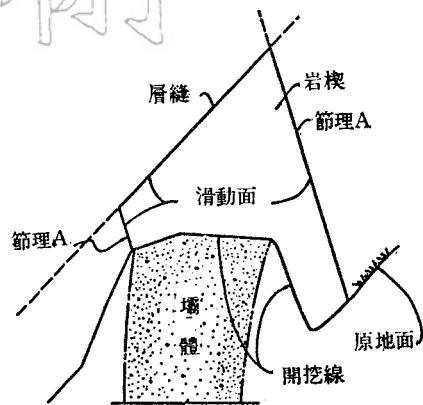
圖七 左壩座岩楔分佈圖

游落水池之挖深致可能形成岩楔，故予以考慮。

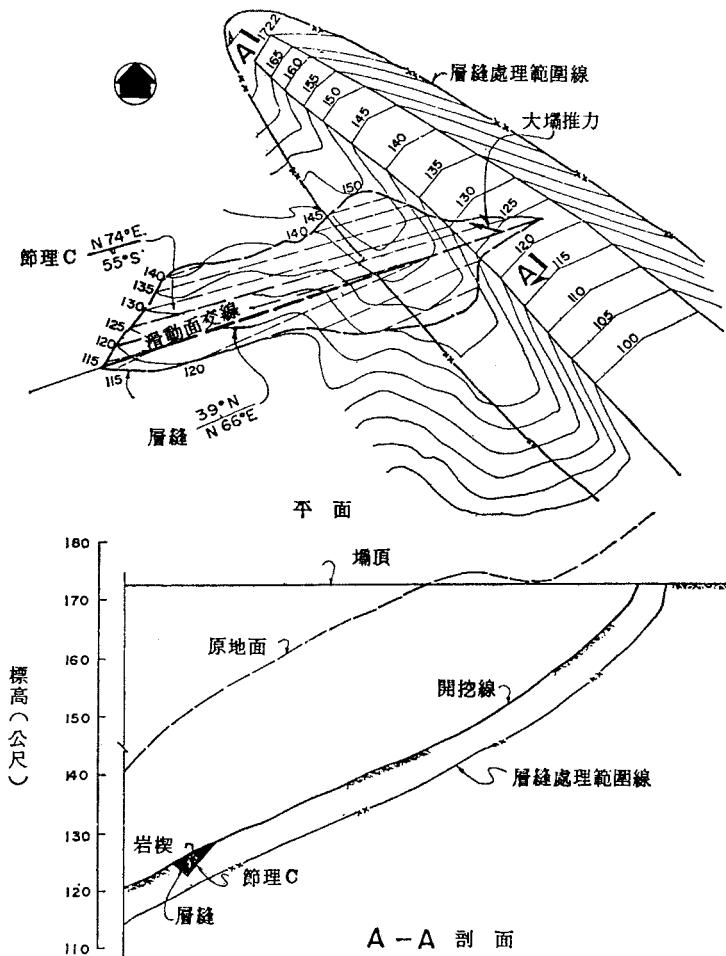
6.2 層縫處理之目的

從上述之岩楔分析結果可知，翡翠壩址基礎弱面之處理對象，首推層縫，其次為部分含泥節理。其方法為將弱面所含之破碎岩片及泥土等沖洗乾淨，而以混凝土或不收縮漿回填，以改善其抗剪強度，並使上、下盤岩石連成一體，此種處理方法統稱為層縫處理。但設計時依據固塊法 (Rigid Block Method)、部分法 (Partition Method) 及最大剪力強度法 (Maximum Shear Strength Method) 等分析結果，所有可能滑動岩楔 不論在正常荷重情況或是極端荷重情況下，其抗剪滑動安全係數 (Shearing Friction Factor of Safety) 及抗滑安全係數 (Sliding Friction Factor of Safety) 均大於所需之最小值 (參看表七)，因此層縫即使不

加以處理，拱壩亦有足夠之安全度。但地質弱面之存在，對壩基不僅影響其安定性，亦影響其變形模數及水密性，故緊接壩基之層縫仍需加以處理。其



圖八 左壩座岩楔詳圖



圖九 右壩座岩楔分佈圖

地工技術

表七 壞基岩楔穩定分析一覽表

岩 楔 位 置	弱 面	岩 楔 標 高 (公尺)	抗剪滑動安全係數								抗滑安全係數							
			N.L.C.* 異常荷重情況				極端荷重情況				N.L.C.* 異常荷重情況				極端荷重情況			
			UL1		UNL1		UNL2		EXT1		UL1		UNL1		UNL2		EXT1	
			OBE↓	OBE↑	DBE↓	DBE↑	MCE↓	MCE↑	Full Uplift	OBE↓	OBE↑	DBE↓	DBE↑	MCE↓	MCE↑	Full Uplift	EXT2	
左 壩 座	LS ₂ 層縫及 A 組節理	70	46.1	7.4	7.3	6.2	5.9	4.4	4.1	46.0	19.7	3.7	3.3	3.3	2.8	2.5	2.0	18.4
		90	61.4	7.7	7.7	6.5	6.3	4.3	4.3	60.1	24.2	3.7	3.3	3.3	2.8	2.3	2.0	22.8
		110	35.3	8.9	9.1	7.7	7.7	5.4	5.4	34.9	9.2	2.9	2.7	2.6	2.3	2.1	1.7	8.7
		130	20.5	9.1	9.7	8.2	8.5	6.1	6.4	20.4	3.3	1.9	1.8	1.8	1.6	1.5	1.3	3.1
右 壩 座	RS ₉ 層縫及 C 組節理	130	20.8	11.9	13.1	10.7	12.2	8.6	9.6	19.9	2.4	1.5	1.5	1.4	1.3	1.2	1.02	1.3
	RS ₁₀ 層縫及 C 組節理	134.5	20.2	12.6	12.6	10.3	12.3	8.3	9.1	19.5	2.6	1.7	1.7	1.5	1.4	1.3	1.1	1.7
	RS ₁₁ 層縫及 C 組節理	159	27.4	15.4	16.6	13.8	15.0	11.1	12.2	27.1	3.2	2.0	1.9	1.8	1.7	1.5	1.3	2.8
所需之最小安全係數			4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	1.33	1.33	1.33	1.5	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1

* N. L. C. 係指正常荷重情況

主要目的為減少岩盤受力後變形，並使局部岩楔穩定而不致引發連續破壞及減少壩基滲水，以確保大壩基礎之安全。

6.3 層縫處理範圍

層縫處理目的已如前述，而層縫延伸範圍甚廣，故其處理範圍應符合經濟且安全的原則。故壩基受力區 (Loaded Zone) 內的層縫處理範圍係依據下列四項原則而擬定：

(1) 在外力荷重下，壩基需有足够的剪力強度以抗拒因大壩推力所產生之局部剪應力，即不容許有剪推力 (Shear Detrusion) 發生。

(2) 處理後的每一層縫之剪力變形不能超過容許值 (剪力變形經試驗設定為 1.25 mm)。

(3) 處理後的層縫在每一點的變形均須均勻，且壩基整體須呈現適當均一之變形型態。

(4) 壩基每一點須達到可接受之有效變形模數 (Effective Deformation Modulus)，以及達到可接受局部變化之變形模數。

由於左壩座為順向坡，層縫多且組成複雜，而右壩座層縫挿入山體，層縫數量雖多，但較單純，故符合上列四項原則的層縫處理深度均不相同。決定處理之深度分別為：左壩座自壩頂最少為 12 公尺 (圖十、十一所示)，至壩底 (標高為 50 公尺) 最少為 20 公尺；右壩座為壩高的十分之一，但不得少於 5 公尺深；而河床部分因高程與左、右壩座不同，承受大壩推力較小，但仍須強化基礎岩盤，減少滲水，處理深度為 12 公尺。對於 C 組節理，依其位態及含泥者，視需要亦作某種程度之處理。

為了檢討上述層縫處理範圍是否達到安全，在壩基各高程選擇地質弱面及大壩推力具代表性的剖面 (如圖十二所示為標高 70 公尺之例)，作局部穩定分析，即經由二向度有限元素法 (Two-dimensional Finite Element Method) 及非線性反覆作業 (Non-linear Iterative Scheme) 中分析處理層縫。其結果顯示：每一剖面所劃定的處理範圍內，其安全係數均超過所需值。故處理後應具有足夠剪力強度及有效改善壩基有效變形模數。

基礎滲漏亦為攸關壩基安全重要因素之一。由於層縫具滲透性，如何有效防堵層縫之漏水性亦屬層縫處理工作之一種。壩基在層縫處理範圍內者可

經妥善的層縫處理而達有效之止水效果，再深的部分則藉隔幕灌漿 (Curtain Grouting) 處理。經灌漿試驗結果顯示，隔幕灌漿後岩盤透水應可降至 1 路琴 (Lugeon) 以下，但仍有某些層縫處透水度達 4 路琴，故為安全起見，緊臨灌漿幕 (Grout Curtain) 下游沿層縫施作 1.5 公尺寬加強處理。其處理深度分別為：左壩座與隔幕灌漿深度相同，為壩高的百分之六十，但不少於 30 公尺；右壩座為壩高的百分之四十，但不少於 20 公尺；河床部分則為 50 公尺深 (如圖十一)。

七、層縫處理施工

由於大壩基礎由左岸之順向坡、右岸逆向坡，以及居其間之河床形成，而三者間層縫之分佈、組成、厚度亦各不同，為了便於現場實際施工及滿足基礎穩定需求，將壩基分為左壩座、河床部分及右壩座三個層縫處理區，三區之施工佈置、處理方法及工作準則均不相同，茲分述如下：

7.1 施工佈置

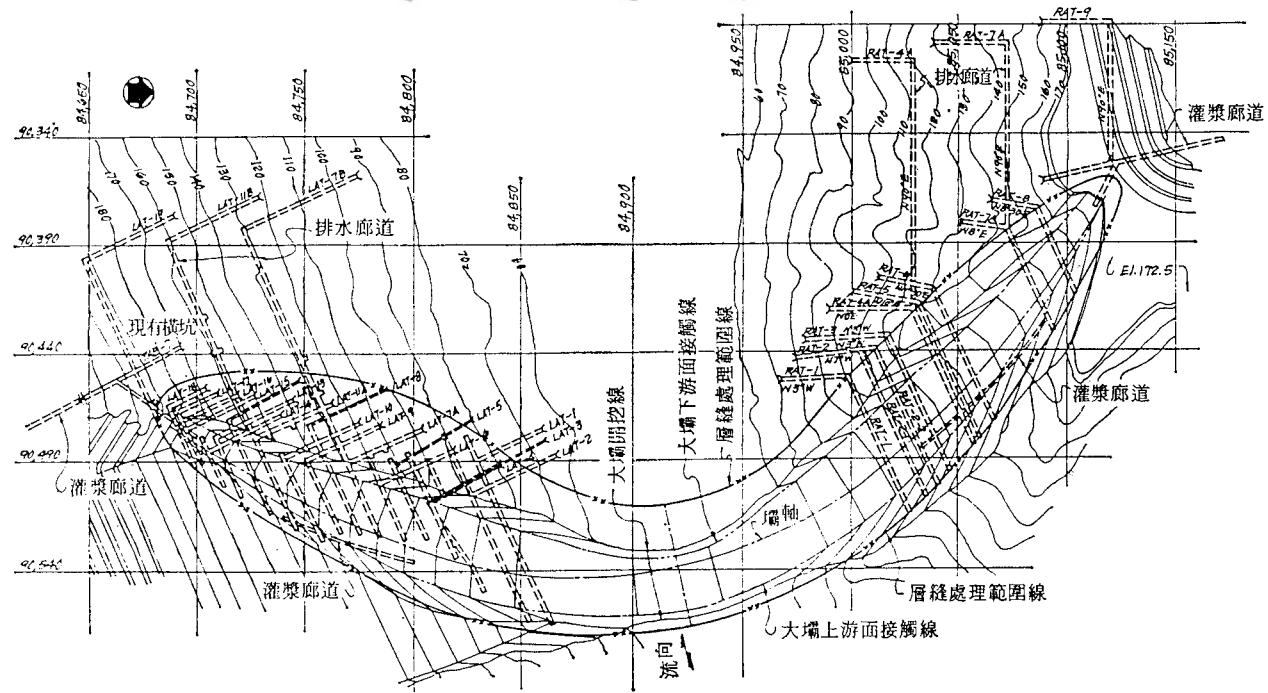
7.1.1 左壩座

自壩頂 (標高 172.5 公尺) 至壩底 (標高 50 公尺) 每隔約 7 公尺高程從地表挖一與岩層走向垂直之「主通達廊道」 (Main Access Tunnel，如圖十、十三所示) 至遇主層縫 LS_2 後，改沿 LS_2 層縫分別向上、下游挖至層縫處理範圍界線為止。再由「 LS_2 層縫通達廊道」挖垂直於層縫之水平支坑作為工作坑道 (Working Adit)。坑道間距約 9 公尺，長度則分別向河側及山側延伸至層縫處理範圍界線為止。廊道之如此佈置旨在能發現層縫處理範圍內，每一層縫或局部含泥節理，並便於有效處理。左壩座共開挖 18 條層縫處理廊道，如圖十所示，各以“LAT”稱之，廊道總長約達三千餘公尺。

7.1.2 右壩座

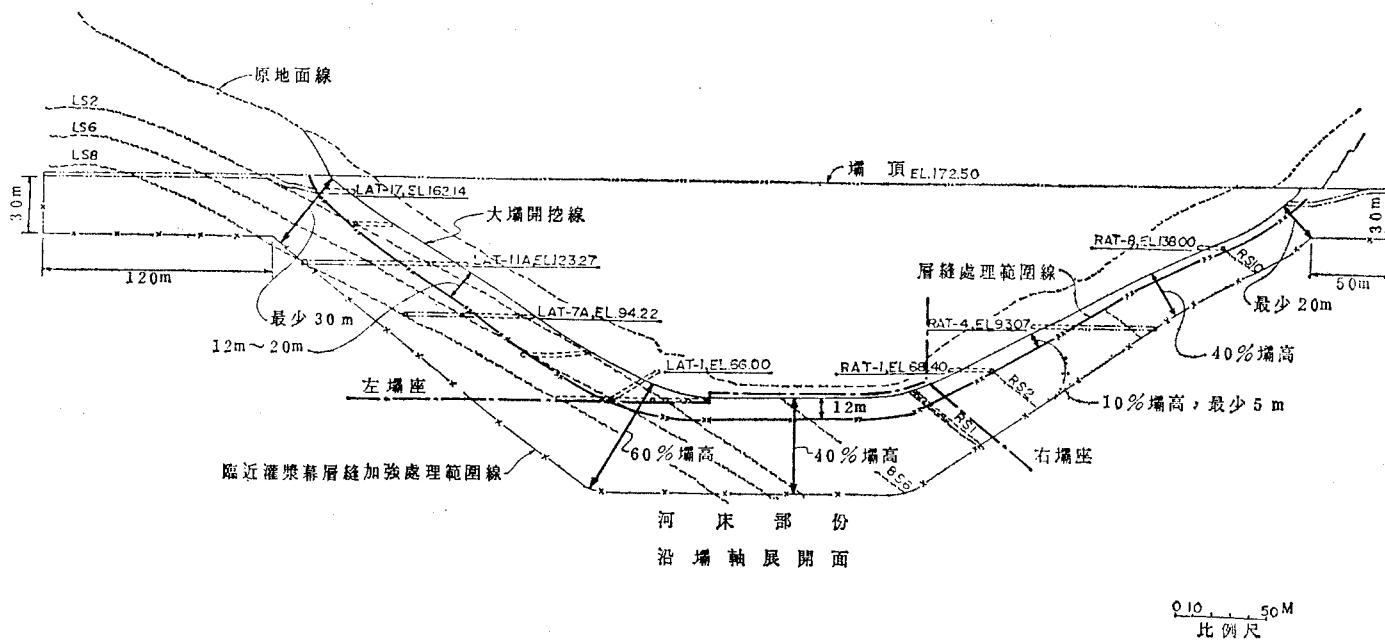
自大壩下游坡面向每一層縫挖一水平主通達廊道 (圖十、十四所示)，廊道高程定於每一層縫處理範圍內的最低點，遇需處理層縫即轉折沿層縫向上游挖掘至處理範圍之上游界線為止，再由該「沿層縫通達廊道」每隔 9 公尺向大鍵槽面開挖各間距 9 公尺之工作斜坑 (Inclined Working Shaft)，此工作斜坑完全順層縫面開挖，圖十四為右壩座層縫處理廊道佈置圖。共開挖九條層縫處理廊道，如圖十所示，各以“RAT”稱之，總長約一千餘

地工技術

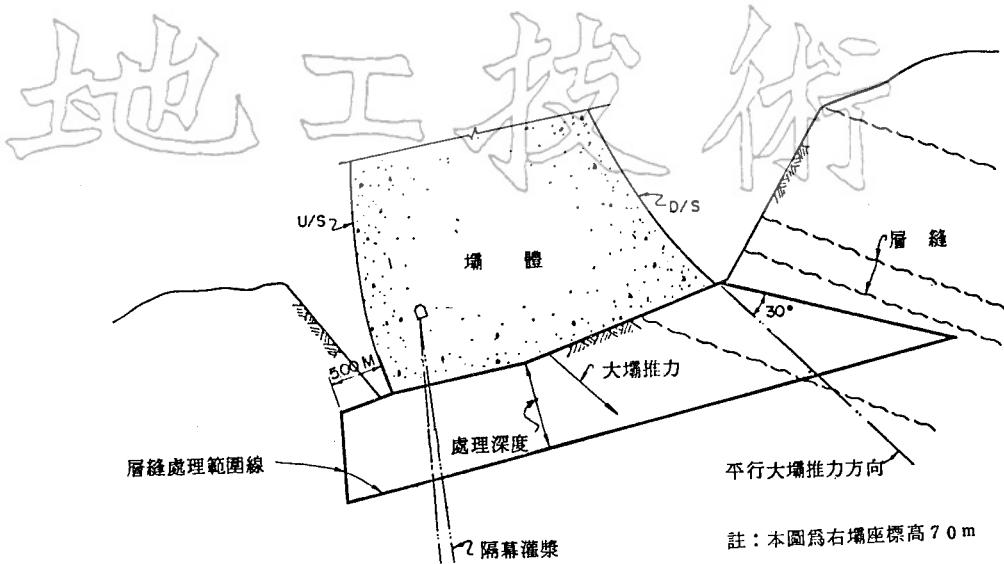


圖十 翡翠大壩層縫處理廊道佈道圖

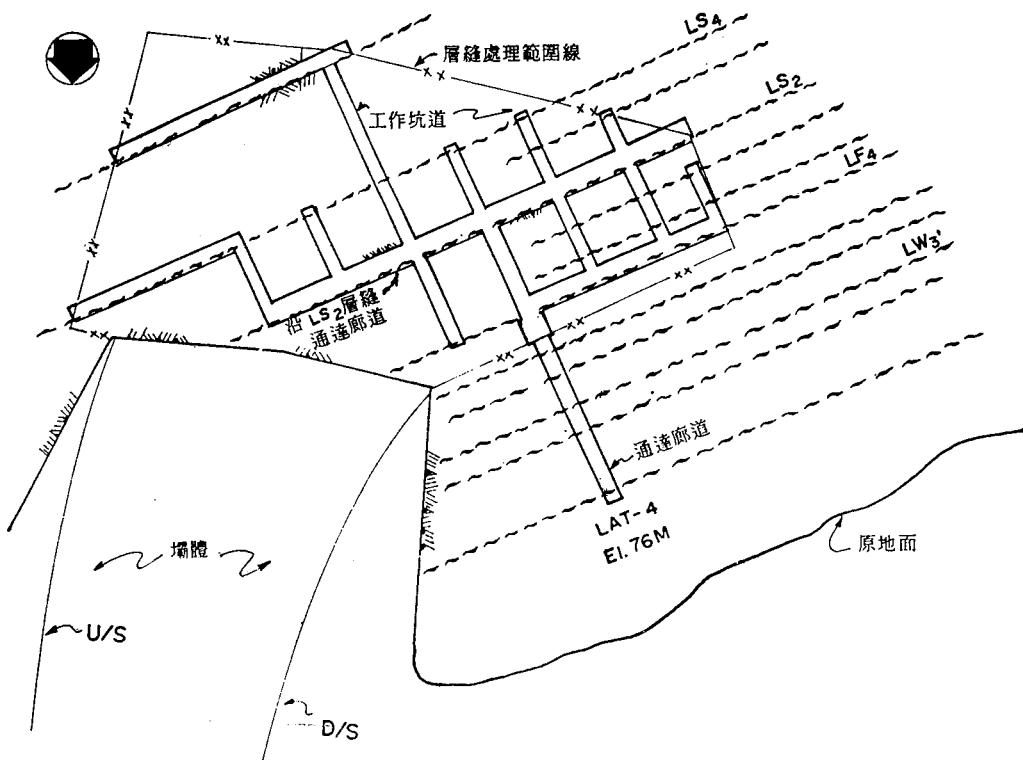
地工技術



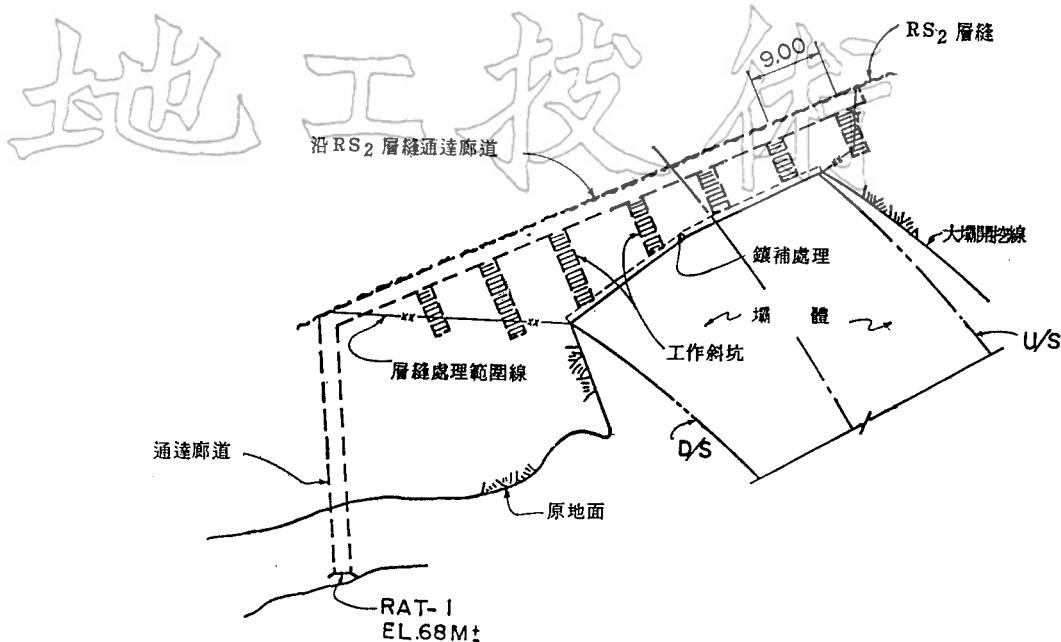
圖十一 翡翠大壩層縫處理範圍圖



圖十二 層縫處理範圍標準剖面圖



圖十三 左壩座層縫處理廊道



圖十四 右壩座層縫處理廊道圖

公尺。

7.1.3 河床部分

河床部分因低於河道高程，故除利用左壩座最底廊道 (LAT-1) 處理河床左側之層縫外，未另開挖坑道；河床右側部分之層縫則待大壩基礎開挖露出後，直接由河床鍵槽面處理之。

7.2 層縫處理方法

翡翠壩基層縫處理方法包括層縫沖洗、坑內層縫挖掘 (Mining Method) 及鑲補開挖 (Dental Excavation) 等，茲分別介紹如下：

7.2.1 層縫沖洗方法

層縫沖洗為處理工作中最重要步驟之一。但通常層縫膠結緊密，一般低壓水柱均不足以使之破碎及冲散，如德基大壩壩座內層縫曾試以約 50 kg/cm^2 高壓水柱沖洗，但未成功。故為獲取最可行而有效的沖洗方法，曾在壩址地質探查坑內選擇幾條厚度、組成不一的代表性層縫，試以各種不同之方法，進行現地沖洗試驗，包括：(1)高壓水柱沖洗法、(2)鑽孔中高壓水、氣旋轉噴射沖洗法、(3)鑽孔中高壓水、氣交替沖洗法、(4)鑽孔中加入雙氧水之高壓水、氣交替沖洗法及(5)水鑽 (Waterdrill) 及水刀 (Waterknife) 沖洗法，如此經過一連串試驗結果發現(1)、(2)及(5)等三種方法最為可行。因此依使

用機具設備及處理層縫之位置、厚度條件等分為 A、B、C 等三種沖洗法。以下為各種方法之特性及使用之機具設備。

7.2.1.1 A 方法沖洗——即高壓水柱沖洗法 (High Pressure Water Jet Washing)，適用於厚度大於 1 公分之層縫。

a. 沖洗機具設備及規範包括：

高壓水泵：由福祿公司研製之 JM-40ED 型超高压水泵，產生水壓 2400 kg/cm^2 以上；或日本 YAMADA 公司製 TB-75BH1 型，YAMATO 公司製 JG-60 型或 THP-60 型高壓水泵，產生水壓 200 kg/cm^2 以上。

沖洗桿：高壓無縫鋼管製，管徑有 1 吋、 $\frac{3}{4}$ 吋及 $\frac{5}{8}$ 吋等。

噴嘴：連接於沖洗桿末端，高強度鋼材製，有單孔前向、雙孔側向及三孔多向等三種噴嘴，孔徑有 $1 \text{ mm } \phi$, $2 \text{ mm } \phi$ 及 $3 \text{ mm } \phi$ 等三種。

另有壓力錶、鐵橇及清碴工具等附件。

b. 沖洗程序，依以下步驟進行。

在已開挖之層縫處理廊道內 (圖十、十三) 視層縫厚度，以適當的沖洗桿及噴嘴使用 200 kg/cm^2 或 2400 kg/cm^2 之水壓，並配以能充分達到沖洗效果之水量，直接以人工或機械方式沖洗之，部分層縫夾岩塊 (如 LF₄ 層縫) 須用鐵橇清除或鑲補

助孔後再沖洗之原則上沖洗是在廊道側壁、頂拱沿層縫露出處由下往上及由淺入深沖洗，如此徹底將層縫中之泥層岩屑全部清除，並使沖洗後層縫上、下側均露出堅實之岩盤面，岩面上亦無污泥及岩屑，以手或布觸拭無污泥沾上，方可視為沖洗完成。此法多用於左壩座基礎層縫（參見照片三、四）。



照片三 層縫處理廊道內 A 方法直式噴嘴沖洗情形



照片四 自大壩鍵槽面以 A 方法沖洗 LF₄ 層縫情形

7.2.1.2 B方法沖洗——即鑽孔中以高壓水、氣旋轉噴射沖洗法 (High Pressure Water Jet with Air Revolving in Drill Hole Washing)，主要應用於處理河床以下之層縫，但廊道內無法以A方法沖洗之層縫亦偶而採用之。

a. 沖洗機具設備及規範包括：

鑽機及鑽頭：採用鑽深能力達200公尺的KH-2L型油壓旋轉式鑽機且配備自動升降器（每次可提升2.5或5公分）及提升時間控制裝置，鑽機之最慢轉速為5至10 R. P. M. 鑽頭為前導型 (Pilot

Type) BX 鑽頭俾能順沿層縫鑽進至所需深度。

高壓水泵：與A方法產生200公斤/平方公分的高壓水泵同型，唯200公斤/平方公分工作壓力時，泵之出水量須大於100公升/分鐘，以獲最佳沖洗效果。

壓縮空氣：採用TA-100及GA-14071型空壓機（最大能力為在20公斤/平方公分壓力下，能產生304公升壓縮空氣），使在每一工作面之壓縮空氣量及工作壓力分別不得少於4.5立方公尺/分鐘及6公斤/平方公分。

沖洗桿：為高強度無縫鋼管製成的雙層管，內管管徑為1.6公分，送水用；外管管徑為4公分，輸送壓縮空氣用。

沖洗頭：接於沖洗桿之末端，有側向單孔及雙孔噴嘴且為圓錐形雙圈式，內圈輸水，外圈輸送壓縮空氣，均為合金或高強度鋼材製成。噴孔直徑為1mm ϕ 、2mm ϕ 、3mm ϕ 等適宜之尺寸。

另有壓力錶及配管等附件。

b. 沖洗程序：

在利用本方法施工前，先將需處理層縫之露出部分用A方法洗除或直接挖除約30公分至1公尺深，並徹底洗淨後，每隔0.5公尺預埋沖洗及灌漿管，具回填混凝土或不收縮砂漿 (Nonshrinkage Mortar) 作成適當之沖洗及灌漿保護蓋 (Grouting Cap, 圖十五所示)，俟保護蓋獲致足夠強度後，再由預埋管用前導型鑽頭沿層縫鑽孔至欲處理的深度（圖十五），鑽孔完成後，以雙層管沖洗桿接上側向噴嘴之沖洗頭以自動升降器控制，自孔底以每分鐘上升2.5至5公分之速度往復旋轉噴射沖洗，至廻水乾淨為止。沖洗時的水壓、水量及壓縮空氣壓力、輸氣量均按前述規定為之，河床層縫處理及臨近灌漿幕加強處理的層縫均用此種沖洗方法。

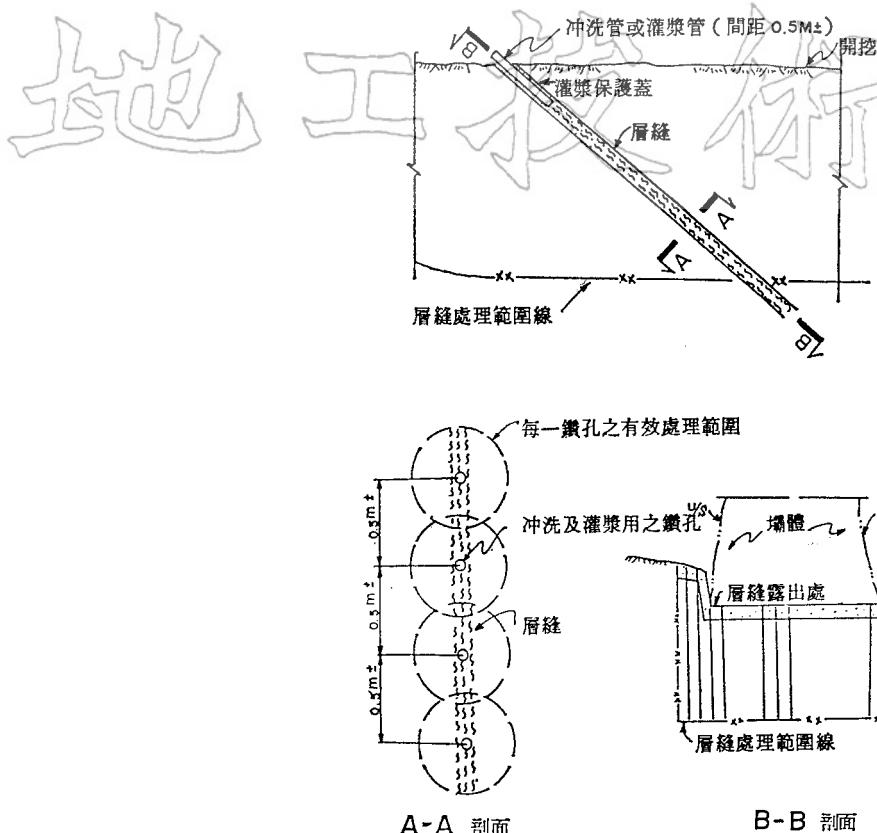
7.2.1.3 C方法沖洗——即超高壓水柱沖洗法或謂水鑽水刀法 (Waterdrill and Waterknife Method)，適用於厚度不大於1公分的層縫。

a. 沖洗機具設備及規範：

本方法之沖洗機具僅使用A方法中之2400 kg/cm²超高壓水一種。噴嘴為雙孔前向噴射，謂之水鑽，孔徑為0.015英吋；或為雙孔側向噴射以為切槽用，謂之水刀，孔徑為0.018英吋；或為三孔噴射沖洗頭。連接桿為 $\frac{3}{16}$ 英吋孔徑的不銹鋼管。

b. 沖洗程序

本方法主要處理右壩產鍵槽面及左壩座層縫處



圖十五 層縫處理 B 方法示意圖

理廊道內等於或小於 1 公分之層縫及含泥 C 組節理。其方法為沿層縫或節理露出處每隔 15 或 20 公分，用水壓為 2400 公升／平方公分的水鑽順層縫面或節理面平行鑽 $\frac{1}{8}$ 英吋口徑鑽孔至欲處理深度後（圖十六），換以雙孔側向噴嘴水刀自孔底處理深度後（圖十六），換以雙孔側向噴嘴水刀自孔底緩慢提昇切槽並往復沖洗，直至相鄰鑽孔內之廻水乾淨為止（參見照片九、十）。

7.2.2 坑內層縫挖掘法

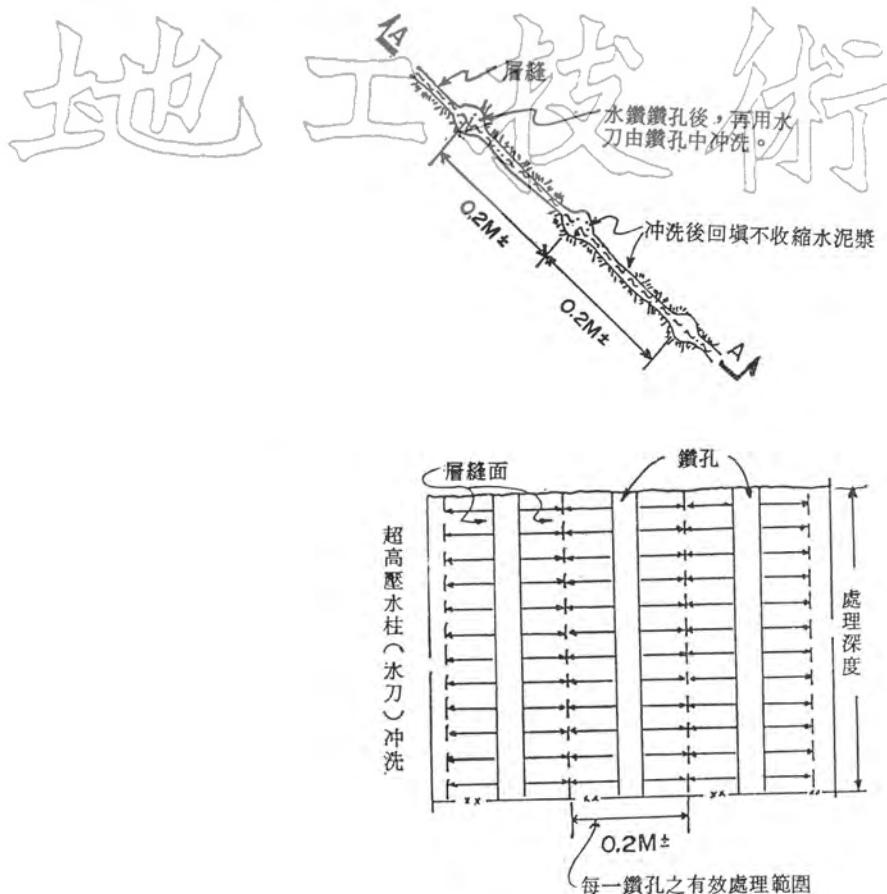
有些相鄰層縫如 LF_3 及 LF_4 ，因接近地表，形成高度風化破碎帶，尤其在標高 66~81 公尺附近造成寬度達 2 公尺，如採用上述 A、B、C 方法沖洗不但費時耗功，且根本無法有效處理，故改以人工直接挖除法處理寬 2 公尺，水平間距 6 公尺之格子狀坑道；如圖十七所示之 LAT-3 至 LAT-5 廊道間的 LF_4 層縫，即不使用炸藥而以手提鑽機、氣動碎岩機將層縫風化破碎帶中之碎泥、風化岩、碎岩及軟弱岩盤挖除，至上、下盤均為堅良岩石，及上、下層縫處理廊道相通為止。

7.2.3 鑲補開挖

大壩鍵槽面所露出之層縫、剪裂帶等地質弱帶，原則上以鑲補開挖方式將弱帶挖除（如圖十八）。開挖深度視弱帶寬度及高程而定。鑲補開挖與一般岩石爆炸開挖不同，係以手工具或以不擾及動破壞周圍良岩之機械設備為之。但亦可採用排鑽（Line Drilling）及輕度開炸法（Light Blasting），但排鑽孔及爆炸孔之直徑間距、深度及每孔藥量均需嚴加控制，俾不擾動周遭岩盤。鑲補開挖完成後以混凝土回填之，此種處理方式謂之鑲補處理（Dental Treatment）。右壩座、河床基礎上出露之全部層縫及左壩座鍵槽面出露之 LS_2 之 LF_4 層縫即以此法處理之。

7.2.4 層縫回填

所有經沖洗完成之層縫空隙需儘速以適當材料如水泥漿或砂漿回填之，以免周圍岩盤鬆動或上盤岩石懸空過久而崩塌。為防止回填之水泥漿或砂漿凝固後收縮，導致凝漿與岩盤間產生空隙，減弱岩盤之整體強度，而無法達到層縫處理之目的，故漿液



圖十六 層縫處理 C 方法示意圖



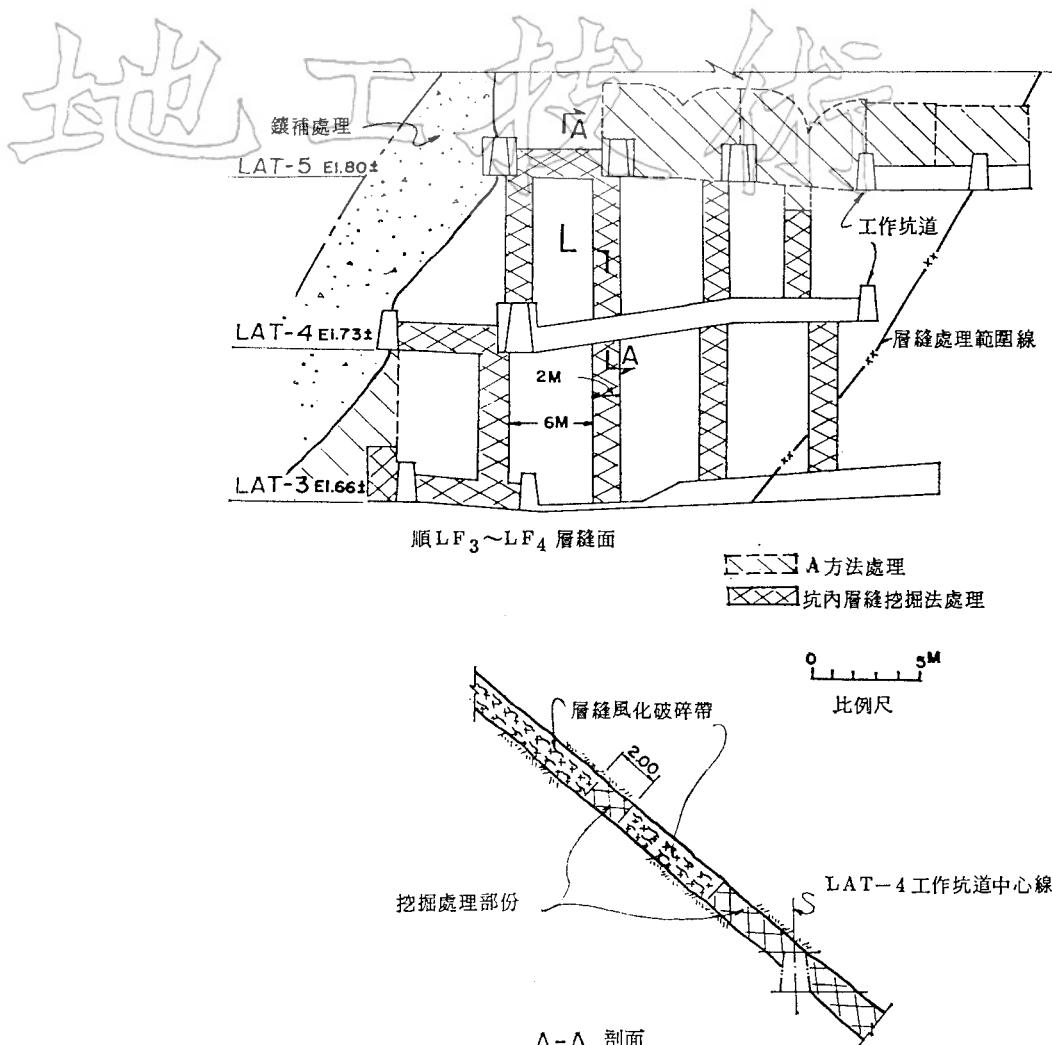
照片五 廐道內以 C 方法水刀切槽沖洗情形

中必須加入適當的不收縮附加劑 (Non-Shrinkage Admixture)。因此不收縮附加劑，亦經多次審慎

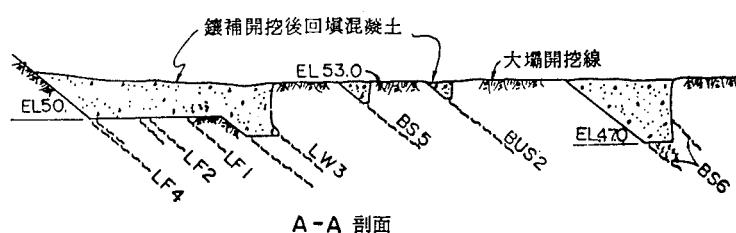
試驗後，選定為美製之 PLA-05；再以此附加劑之不同用量試驗多種漿液配比，最後獲得就體積變化、工作性及強度均符合規範要求之最經濟配比即：水泥漿為水：水泥：PLA-05=0.5:1:0.2，砂漿為水：水泥：飛灰：砂：PLA-05=0.63:1:0.2:1.3:0.232 二種。經沖洗完成後之層縫大部分即由此種不收縮水泥漿或砂漿 (Non-Shrinkage Cement Grout or Mortar) 填實之。

以 A 方法沖洗的層縫厚度大於 20 公分及坑內層縫挖掘法清理後之層縫，由於縫隙尺度及體積甚大，為符合經濟及強度要求，均以混凝土回填之。

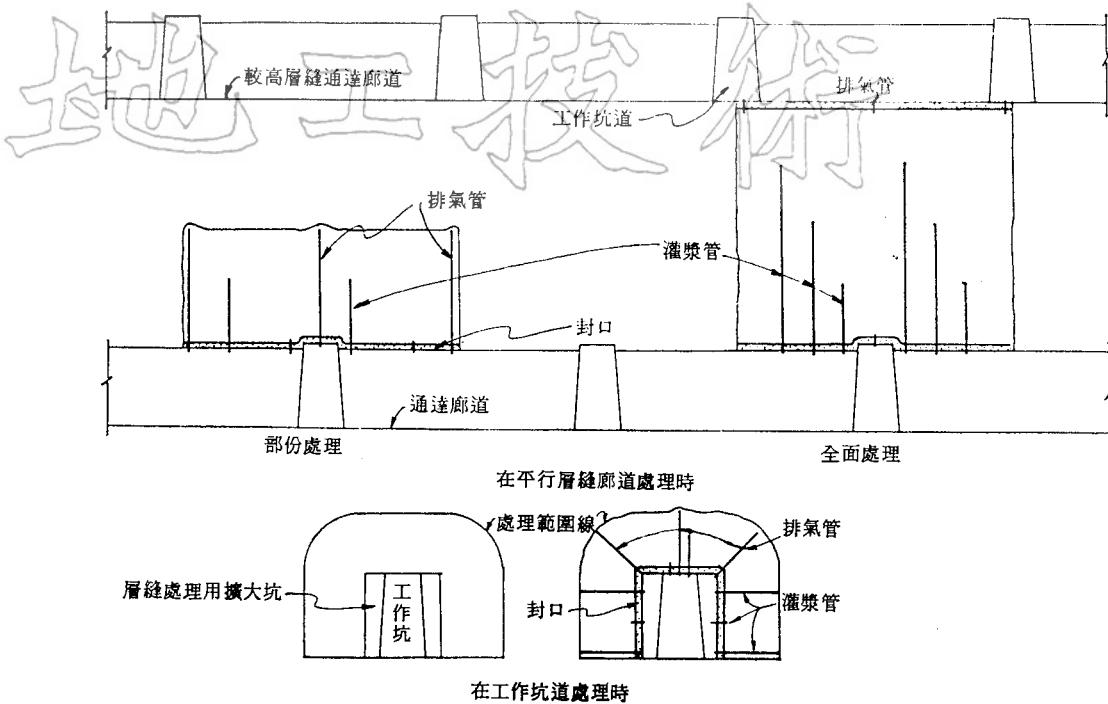
A 方法沖洗的層縫厚度在 20 公分以內及 C 方法沖洗的層縫均按上述配比之不收縮水泥漿或砂漿回填之。其程序為在層縫沖洗後開口處，以砂漿、混凝土或漿砌岩塊等適當材料封口，並預埋排氣管及灌漿管 (圖十九所示)，俟封口達一定強度後，以壓力灌漿方式將不收縮漿液填滿縫隙至排氣管排



圖十七 坑內層掘挖掘法佈置圖



圖十八 縫補處理示意圖



圖十九 層縫沖洗完成之回填灌漿管件埋設圖

漿為止。並在固定壓力下，維持至少 15 分鐘不吃漿時，方得認定灌漿完成。俟回填漿液達一定強度後始可繼續沖洗相鄰分塊。

經 B 方法沖洗完成之層縫，先施行沖洗桿灌漿，再行壓力灌漿。其程序為將沖洗桿伸至處理之孔底，使漿液經沖洗桿自孔底流出，而後逐漸提升沖洗桿直至漿液至孔口溢出時，隨即封閉孔口作壓力灌漿，維持在一定壓力下經十五分鐘之吃漿量不超過一公升時，方視為灌漿完成。

7.3 層縫處理工作準則

由於大壩基礎各部分所含之地質弱面之分佈、性質、厚度各不相同。壩基安全設計規範對左壩座、河床部分及右壩座三個層縫處理區的要求，即處理範圍、深度及強度亦不同，因此為了使這龐大而複雜之處理工作系統化，乃依各地區之特性訂定如下所述之工作準則，以便有所遵循。

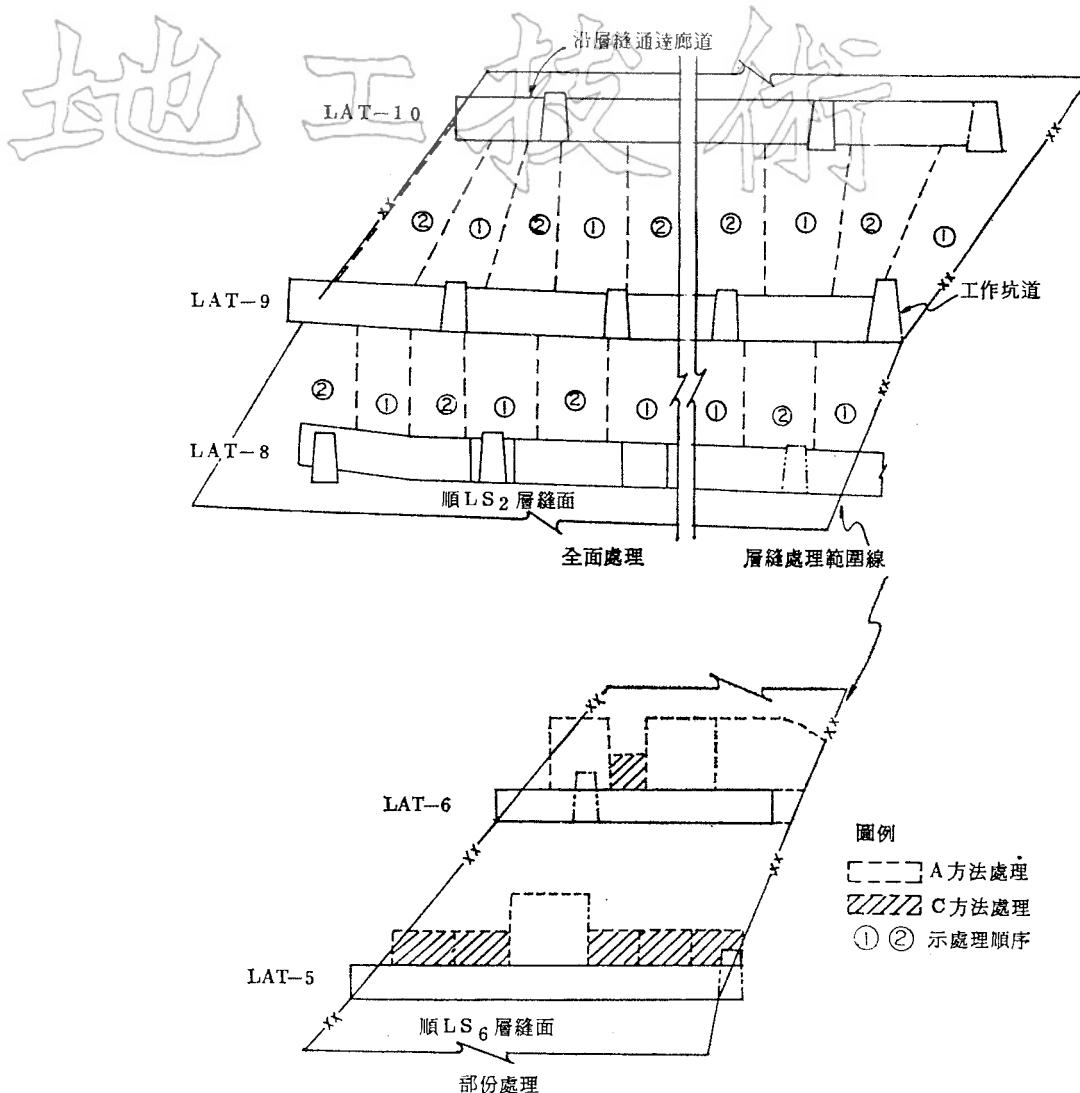
7.3.1 左壩座層縫處理工作準則

左壩座弱面之處理目的旨在制止變位及改善有效變形模數，同時改善層縫之滲透性，處理範圍頗為廣大，且方法複雜，其工作準則詳表八所示。表中處理範圍欄內第一項所謂「完全處理」，意指如 LS₃ 層縫利用通達廊道將其全面處理。另外亦有如

表八 左壩座層縫處理工作準則

層縫情況		處理範圍 (處理深度係順層縫面計)	處理方法
厚度 (cm)	連續		
>3	>50	完全處理	A方法
1~3	>50	沿層縫廊道時向上處理 4 公尺深；在工作坑道時抑拱以上作放射狀處理 4 公尺深	A方法
<1	>50	沿層縫廊道時向上處理 2 公尺深；在工作坑道時抑拱以上作放射狀處理 2 公尺深	C方法
>1	<50	"	A方法
其 他		不需處理	
風化破碎帶		坑內層縫挖掘法	

LF₄ 層縫沿通達廊道全線向上作部分處理，兩者在沖洗時，分為防止岩盤之坍塌損及壩基之安定，當依工作量分成許多分塊，再施以間跳方式進行沖洗（圖二十及二十一），相鄰兩塊不得同時沖洗處理。其餘則在工作坑道作放射狀沖洗處理（圖二十一）。又表六僅說明在廊道內之處理準則，坑道外的 LS₂ 及 LF₄ 層縫露出於壩鍵槽部分，須沿層縫做鑿



圖二十 沿層縫通達廊道處理佈置圖

補處理，直至與廊道內處理完成部分相連接為止。

7.3.2 河床層縫處理工作準則

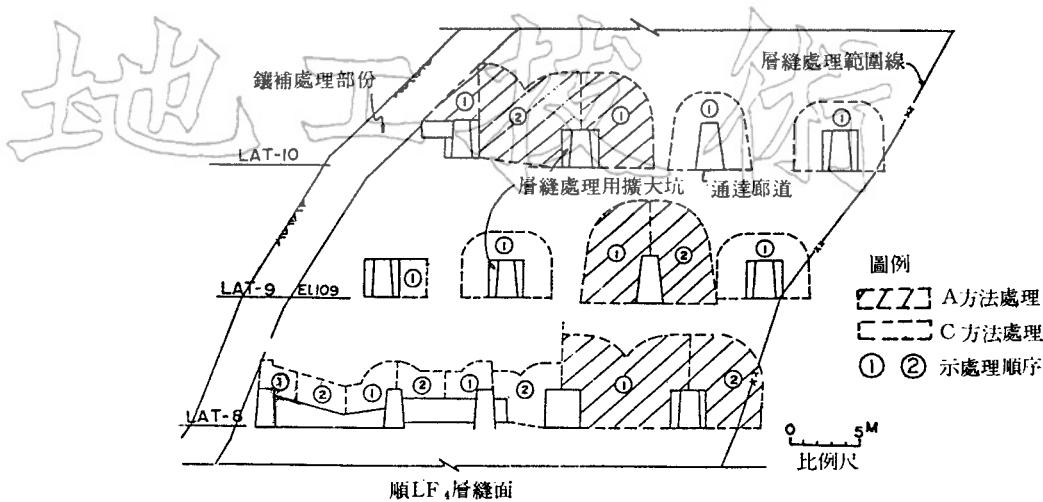
基於河床層縫處理主要目的為減少層縫滲透及增強抗剪力，故處理範圍內的層縫均未作全面處理，僅如表九所示，按層縫重要性作部份處理。河床左側部分層縫如 LF₃ 及 LF₄ 則利用左壩座最低層縫處理廊道 (LAT-1)，在仰拱以 B 方法作排列式或扇形向下處理 (圖二十二)。河床右側之層縫因厚度薄且於大壩鍵槽面露出，故按各層縫厚度施作深 1~6 公尺不等之鑽補處理。

7.3.3 右壩座層縫處理工作準則

右壩座基礎經層縫處理廊道及大壩鍵槽開挖後

所露出的地質情況比原預期為佳，而與層縫形成可能滑動岩楔 (圖九) 的 C 組節理不僅不發達，且呈波浪面，而在地表下 15~20 公尺就顯著減少甚至消失。因之，原預期之不利大岩楔不再出現。故右壩座層縫處理亦較簡單，其工作準則主要是在沿層縫通達廊道及工作斜坑，以坑內層縫挖掘法沿層縫分別向下及兩側壁擴挖，擴挖深度視層縫厚度及高程不同而定 (如表十及圖二十三所示)。

沿層縫擴挖完成後，在層縫處理廊道混凝土堵塞時一起填實。至於在廊道內或大壩鍵槽面露出的含泥節理亦按表十一所列的處理工作準則，作適當沖洗以及不收縮漿回填。



圖二十一 層縫放射狀處理佈置圖

表九 河床層縫處理工作準則

地質弱面 名稱	厚度 (cm)	連續性 (%)	處理範圍 (處理深度 係順層縫面計)	處 理 方 法
層 縫	>3	>50	處理至需要的深度	B 方法
	1~3	>50	向下處理 6 公尺深	B 方法
	<1	>50	向下處理 3 公尺深	B 或 C 方法
	>1	<50	向下處理 3 公尺深	B 或 C 方法
	<1	<50	向下處理 2 公尺深	C 方法
鍵含 泥 槽 節 面理	>3	>50	向下處理 4 公尺深	B 或 C 方法
	1~3	>50	向下處理 3 公尺深	B 或 C 方法
	<1	>50	向下處理 2 公尺深	C 方法
	>1	<50	向下處理 2 公尺深	C 方法

7.3.4 臨近灌漿幕之層縫加強處理

所有位於壩基內隔幕灌漿下游側之層縫均以 B 方法作 1.5 公尺寬之加強處理，以達有效止水效果。處理深度按「第六節層縫處理範圍」一節來實施。處理方式係緊臨隔幕灌漿下游面順層縫施鑽互相平行，間距 50 公分的 3 孔（圖二十二所示），以 B 方法沖洗完成後，再以不收縮水泥漿回填，如果處理深度超過 30 公尺，為防止坍孔及有效處理，採分段式處理。

7.3.5 層縫處理廊道回填

所有層縫處理廊道於層縫處理完成後，均以強度 2-210 混凝土回填，由於這些通達廊道及工作坑道佈置如格子狀，故廊道空間經填滿混凝土後，在壩基形成格子狀混凝土剪力樺（Shear Key），

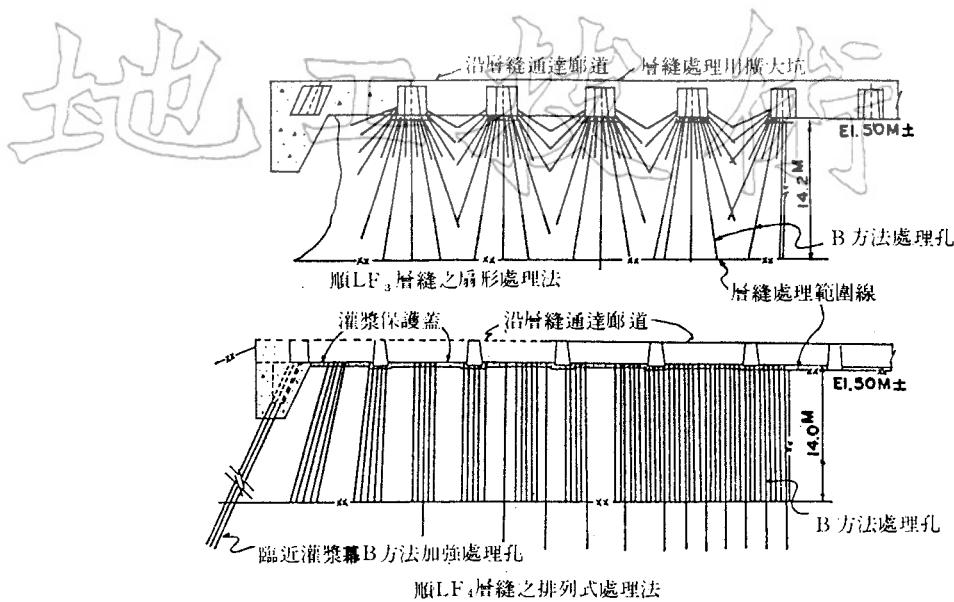
表十 右壩座層縫處理工作準則

層 縫 名 稱	高 程 (m)	鍛槽面鑽補 處理深度 (m)	工作斜坑兩側沿 層 縫 擴 挖 (m)	通達廊道仰拱沿 層 縫 擴 挖 (m)
RS ₁₁	160	3.5	—	—
RS ₁₀	142	0.6	—	—
RS ₉	134	2.0	0.6	—
RS ₈	110	1.5	—	—
RS ₇	103	1.5	—	—
RS ₆	100	2.0	0.5	0.5
RS ₅	91	2.0	0.5	1.0
RS ₄	85	2.0	0.5	1.0
RS ₃	83	2.0	0.5	1.0
RS ₂	76	2.0	0.5	—
RS ₁	60	3.0	—	—
RUS ₁	150	在鍛槽面以 C 方法沿層縫向下沖洗 3 公尺深，並以不收縮水泥漿回填。		
RUS ₂	132			
RUS ₃	124			
RUS ₄	123			
RUS ₅	80	鑽補處理 1 公尺深後，接着以 C 方法處理 3 公尺深		
RUS ₆	64	2	—	—

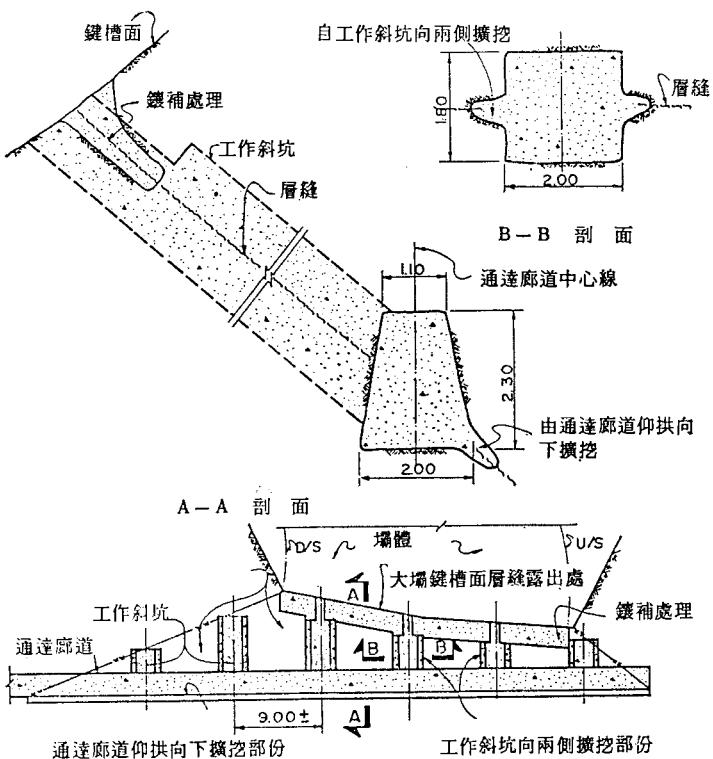
而與周圍岩盤結合形成更強之基礎，使壩基層縫處理效果更臻完善，確保大壩安全。

八、層縫處理效果評估

層縫處理自 71 年 2 月在壩基層縫處理廊道開挖完成後著手進行，至 72 年底已完成之處理數量



圖二十二 B 方法處理河床以下層縫剖面圖



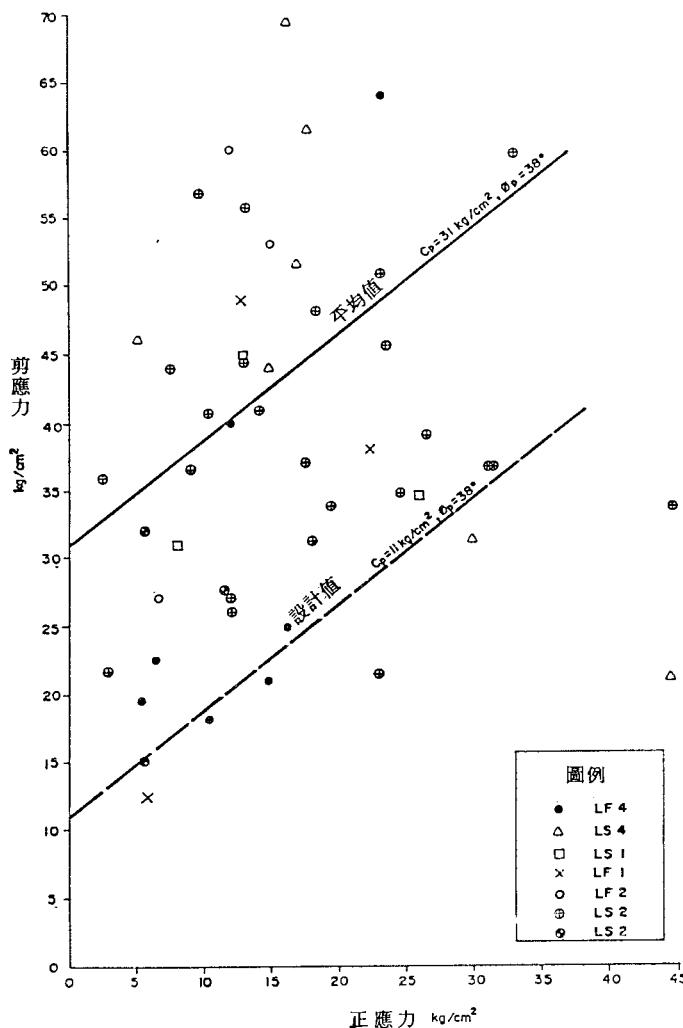
圖二十三 右壩座層縫處理示意圖

表十一 右壩座含泥節理處理工作準則

含泥節理情況		處理深度(m 係順含泥節理面計)	沖洗方法
厚度(cm)	連續性(%)		
>3	>50	4	A
1~3	>50	3	A
<1	>50	3	C
>1	<50	3	A

, A 方法約 7200 平方公尺, B 方法約 10,200 公尺, C 方法約 4,000 平方公尺, 共完成總工程量之百分之八十一, 預定 73 年底前全部完成本項層縫處理工作。為了了解及檢討已處理層縫之成效, 是否合乎設計要求及提供設計單位作評估, 施工中隨

時進行現地直剪試驗, 透水試驗及室內岩石力學試驗, 如直剪試驗、三軸試驗、抗張試驗、變形性試加以驗證驗、彈性試驗等。此種取樣試驗鑑定及評估工作, 將繼續配合層縫處理工作同時完成。至目前為止, 所採取岩心經檢視後, 不但泥土及岩屑均洗淨, 且水泥漿與周圍岩盤亦膠結良好。另外力學試驗結果如表十二及圖二十四, 亦顯示層縫處理後現地及室內所得剪力強度(與表四比較), 均超過安全設計所要求者。即凝聚力(c)為 11 kg/cm^2 及內摩擦角(ϕ) 38 度。另外以 B 方法處理後的水密性經透水試驗結果顯示(如表十三), 處理後之透水度均低於規定所需之路琴以下。基盤達到充分的水密性, 可有效控制滲漏及管湧(參見照片六)。



圖二十四 層縫處理後之剪力強度

表十二 處理後層縫剪力強度(至七十二年底之平均值)

層 縫 名 稱	現 地 試 驗 室	LS ₂	LF ₄ , LS ₄ , LS ₁	RUS ₃ , RUS ₄	設 計 值
		室 內 試 驗	室 內 試 驗	室 內 試 驗	
凝聚力(kg/cm ²)	18.6	27.3	31	18	11
內摩擦角(度)	38	38	38	45	38

表十三 B方法處理後層縫之透水度

層 縫 名 稱	LS ₈	LF ₂	LW ₃	BS ₆	RS ₆	設 計 值
試驗深度(m)	2~7	10.7~15	13~18	15.7~21	5~10	—
路琴值	0	0.4	0.6	0	0.47	2



照片六 經 A, B, C 方法處理後鑽取之層縫岩心顯示處理結果良好

九、結語

向來國內土木工程上所用之地工技術，大都由國外引進，很少自行研究開發，但翡翠大壩層縫處理，從構想、規劃、設計、試驗以至施工，完全由國人自辦，除獲得中外工程界一致讚許外，並證明本處理方法效果十分可靠，並極適合於大壩基礎弱面之處理，其效果可大幅改善壩基之強度及水密性，確保了大壩安全。

十、誌謝

本文撰寫承蒙臺電翡翠工程處宋處長輝勳先生之指導及中興工程顧問社提供資料，特別是該社副總經理程禹先生百忙中為本文斧正，使本文得以順利完成，特此一併致謝

參考文獻

- 中興工程顧問社 (1978) 「臺北區自來水第四期建設計劃—水源工程定案研究報告」，1月。
- 程禹 (1982) 「翡翠水庫工程規劃的幾個重點」，中興工程顧問社。
- 傅重煥 (1982) 「壩址地質與基礎處理」，榮工處工程技術講習會講義(一)—工程地質。
- Sinotech Engineering Consultants, Inc. (1980). *Design Consideration for Foundation Treatment*, February.
- Sinotech Engineering Consultants, Inc. (1980). *Study on Wedge Stability Analysis of Foundation of Feitsui Dam*, February.
- Sinotech Engineering Consultants, Inc. (1980). *Experiments of Bedding Seam Treatment for Feitsui Dam*, February.
- Sinotech Engineering Consultants, Inc. (1980). *Determination of the Extent of Seam Treatment*, September.