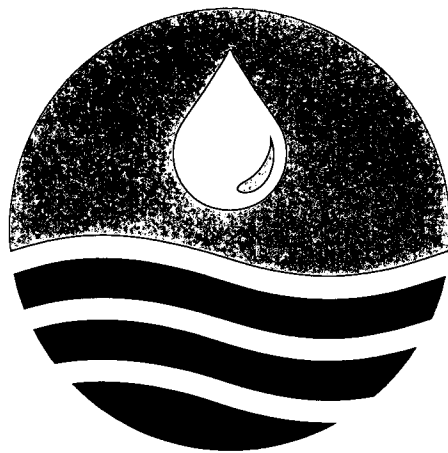




MOEAWRA0990027

設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與 評估研究(2/2)

A study on the mechanisms and evaluation of
rockbed erosion after weir installation (2/2)



經濟部水利署水利規劃試驗所

中華民國 99 年 12 月

設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與
評估研究(2/2)

A study on the mechanisms and evaluation of
rockbed erosion after weir installation (2/2)

主辦機關：經濟部水利署水利規劃試驗所
執行機關：國立交通大學防災與水環境研究中心

中華民國 99 年 12 月

目 錄

目錄.....	目-1
表目錄.....	表-1
圖目錄.....	圖-1
摘要.....	摘-1
Abstract.....	A-1
結論與建議.....	結-1
第壹章 前言.....	1-1
一、計畫緣起.....	1-1
二、計畫目標.....	1-1
三、工作項目及內容.....	1-1
四、工作範圍.....	1-3
五、工作執行流程.....	1-3
六、歷年規劃或研究成果.....	1-10
第貳章 相關研究文獻與資料補充蒐集.....	2-1
一、基本圖資.....	2-3
(一)石岡壩下游岩盤沖刷情形探討.....	2-3
二、相關研究文獻.....	2-9
(一) 補充蒐集沖刷坑深度之評估方式.....	2-10
(二) 西班牙 Ricobayo Dam 溢洪道沖刷坑案例.....	2-13
三、水文資料.....	2-17
第參章 西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性補充調查.....	3-1
一、後村堰(大漢溪).....	3-2

(一) 岩性種類	3-3
(二) 地層位態與水流流向關係	3-5
(三) 岩石強度	3-6
(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-6
(五) 沖蝕特徵探討	3-7
二、義興壩(大漢溪)	3-12
(一) 岩性種類	3-13
(二) 地層位態與水流流向關係	3-14
(三) 岩石強度	3-15
(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-15
(五) 沖蝕特徵探討	3-16
三、石岡壩(大甲溪)	3-20
(一) 岩性種類	3-21
(二) 地層位態與水流流向關係	3-25
(三) 岩石強度	3-27
(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-27
(五) 沖蝕特徵探討	3-27
四、龍泉圳攔河堰(烏溪)	3-34
(一) 岩性種類	3-35
(二) 地層位態與水流流向關係	3-35
(三) 岩石強度	3-37
(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-37
(五) 沖蝕特徵探討	3-38
五、集集攔河堰(濁水溪)	3-41
(一) 岩性種類	3-41
(二) 地層位態與水流流向關係	3-43

(三) 岩石強度	3-44
(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-44
(五) 沖蝕特徵探討	3-45
六、觸口攔河堰(八掌溪)	3-49
(一) 岩性種類	3-50
(二) 地層位態與水流流向關係	3-51
(三) 岩石強度	3-52
(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-52
(五) 沖蝕特徵探討	3-52
七、曾文東口攔河堰(曾文溪)	3-57
(一) 岩性種類	3-58
(二) 地層位態與水流流向關係	3-58
(三) 岩石強度	3-60
(四) 沖蝕特徵探討	3-60
八、甲仙攔河堰(高屏溪)	3-62
(一) 岩性種類	3-63
(二) 地層位態與水流流向關係	3-63
(三) 岩石強度	3-65
(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-65
(五) 沖蝕特徵探討	3-65
第肆章 石岡壩下游岩盤之抗沖蝕能力調查	4-1
一、石岡壩下游水力特性分析	4-1
(一) 一維水力特性分析	4-3
(二) 二維水力特性分析	4-4
二、沖蝕特性調查	4-10
三、鑽探採樣及現地試驗	4-12

(一)鑽探採樣計畫	4-12
(二)鑽探成果	4-15
(三)孔內造影成果	4-15
四、室內岩石試驗	4-22
(一)試體準備	4-23
(二)一般物性試驗	4-23
(三)消散耐久性試驗	4-24
(四)單軸抗壓試驗	4-25
(五)巴西人抗張試驗	4-29
(六)室內試驗結果綜合討論	4-30
五、抗沖蝕能力指數 K_h 與深度變化之關係	4-31
(一)參數採用原則	4-32
(二)抗沖蝕能力指數隨深度變化之探討	4-34
第五章 攔河堰下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析	5-1
一、攔河堰下游岩盤沖刷機制	5-1
(一) 後村堰	5-3
(二) 義興壩	5-7
(三) 石岡壩	5-8
(四) 龍泉圳攔河堰	5-11
(五) 集集攔河堰	5-13
(六) 觸口攔河堰	5-17
(七) 東口堰	5-21
(八) 甲仙攔河堰	5-21
二、各類型沖刷機制必要條件及抗沖蝕能力分析	5-23
三、攔河堰沖蝕機制綜合探討	5-23
第陸章 探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷深度 評估方法	6-1

一、Annandale (2006)岩盤沖刷評估方式	6-3
二、Annandale (2006)岩盤沖刷深度評估結果	6-13
(一)義興壩	6-14
(二)石岡壩	6-18
(三)集集攔河堰	6-24
三、Bollaert (2002)岩盤沖刷評估方式	6-27
四、Bollaert (2002)岩盤沖刷深度評估結果	6-28
(一)義興壩	6-28
(二)石岡壩	6-29
(三)集集攔河堰	6-31
五、岩盤沖刷深度評估方式探討	6-32
六、岩盤沖刷深度評估方法後續建議	6-33
第七章 探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷穩定策略	7-1
一、既有攔河堰沖刷穩定策略	7-1
(一)提升岩盤抗沖蝕能力	7-2
(二)降低流功	7-3
(三)避免流量過度集中	7-4
二、未來攔河堰設置選址及設計考量策略	7-5
(一)堰址之地形地質條件	7-5
(二)堰壩型式與排砂消能設施	7-6

參考文獻

附錄一 報告審查意見與辦理情形

附錄二 石岡壩鑽探柱狀圖

附錄三 石岡壩各重現期距洪水量 CCHE2D 模擬成果

附錄四 Annandale(2006)抗沖蝕能力指數評估法

附錄五 Bollaert(2002)沖刷深度評估法

附錄六 CCHE2D 模式理論

表 目 錄

表 1-1	本計畫第 1(民國 98)年度調查攔河堰基本資料表.....	1-11
表 1-2	集集攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力調查工作數量表.....	1-15
表 2-1	農林航測所圖資補充蒐集(正射影像).....	2-5
表 2-2	石岡壩航空照片補充蒐集現況.....	2-6
表 2-3	石岡壩下游岩盤沖刷演進變化.....	2-7
表 2-4	岩盤沖蝕抵抗能力(K_e)分類表(Liu, 2005).....	2-11
表 2-5	Ricobayo Dam 之 K_h 調查與沖刷門檻值計算表.....	2-16
表 2-6	石岡壩河段鄰近水文測站歷年資料統計.....	2-18
表 2-7	大甲溪各重現期距洪峰流量.....	2-18
表 2-8	石岡壩歷年發生最大流量統計表.....	2-19
表 3-1	岩層層厚定義.....	3-4
表 3-2	後村堰堰址岩層分層與描述.....	3-5
表 3-3	後村堰岩盤沖蝕特性補充調查表.....	3-11
表 3-4	義興壩壩址地質岩性與描述.....	3-14
表 3-5	義興壩岩盤沖蝕特性補充調查表.....	3-19
表 3-6	石岡壩岩層分層與描述.....	3-25
表 3-7	石岡壩下游鑽探岩心試驗成果.....	3-27
表 3-8	石岡壩岩盤抗沖蝕能力補充調查表.....	3-33
表 3-9	石岡壩抗沖蝕能力調查點統計.....	3-34
表 3-10	龍泉圳地質岩性與描述.....	3-37
表 3-11	龍泉圳岩盤沖蝕特性補充調查表.....	3-40
表 3-12	集集堰地質岩性與描述.....	3-44
表 3-13	集集攔河堰岩盤沖蝕特性補充調查表.....	3-49
表 3-14	觸口攔河堰地質分層與描述.....	3-51

表 3-15	觸口攔河堰岩盤沖蝕特性補充調查表	3-56
表 3-16	東口攔河堰地質分層與描述	3-59
表 3-17	甲仙堰堰址地質岩性與描述	3-64
表 3-18	甲仙攔河堰沖蝕特性補充調查表	3-70
表 4-1	石岡壩下游岩盤抗沖蝕能力調查工作數量表	4-1
表 4-2	大甲溪石岡壩段計畫洪水量水理因素成果表	4-4
表 4-3	石岡壩堰址重現期距洪水量	4-6
表 4-4	二維水理演算檢定成果	4-6
表 4-5	鑽孔位置與深度表	4-13
表 4-6	層面分析彙整表	4-19
表 4-7	節理面分析彙整表	4-21
表 4-8	室內試驗工作數量表	4-23
表 4-9	一般物性試驗結果表	4-24
表 4-10	石岡壩岩心消散耐久試驗結果表	4-25
表 4-11	石岡壩單軸抗壓強度結果表	4-28
表 4-12	石岡壩巴西人抗張試驗結果表	4-30
表 4-13	石岡壩岩石材料物性及力學強度建議值	4-31
表 4-14	堰前抗沖蝕能力指標與深度變化中各項參數依據表	4-32
表 4-15	堰前劇烈沖刷岩層材料強度評分 M_s	4-32
表 4-16	堰前劇烈沖刷岩層弱面組數評分 J_n	4-33
表 4-17	堰前劇烈沖刷岩層弱面剪力強度評分 J_r	4-33
表 4-18	塊體構造評分 J_s	4-34
表 4-19	堰前抗沖蝕能力 K_h 與石岡壩現場調查結果比較表	4-36
表 5-1	攔河堰下游岩盤沖刷機制表	5-3
表 5-2	攔河堰下游岩盤抗沖刷能力比較表	5-27
表 6-1	不同射流破裂長度比之平均動態壓力係數參數表	6-11

表 6-2	波動動態壓力係數之參數選用表(Bollaert, 2002).....	6-12
表 6-3	不同結構出水口之典型紊流強度 T_w	6-13
表 6-4	義興壩地形資料及水理參數來源表	6-15
表 6-5	義興壩沖刷深度評估參數及計算結果表	6-17
表 6-6	石岡壩地形資料及水理參數來源表	6-19
表 6-7	石岡壩沖刷深度評估參數及計算結果表	6-22
表 6-8	石岡壩虛擬案例沖刷深度評估參數及計算結果表.....	6-23
表 6-9	集集攔河堰地形資料及水理參數來源表	6-24
表 6-10	集集堰沖刷深度評估參數及計算結果表	6-26

圖 目 錄

圖 1-1	調查攔河堰位置圖	1-8
圖 1-2	計畫分期工作執行流程圖	1-9
圖 1-3	塊體抽離型沖刷示意圖	1-18
圖 1-4	均勻下切型沖刷示意圖	1-18
圖 1-5	槽溝下切型沖刷示意圖	1-18
圖 2-1	水躍發在逆坡之作用力示意圖	2-12
圖 2-2	Ricobayo Dam 平面佈置圖及水壩模型	2-13
圖 2-3	沿溢洪道地形剖面之節理分佈型態示意圖	2-14
圖 2-4	Ricobayo Dam 溢洪道附近地質圖	2-14
圖 2-5	Ricobayo Dam 溢洪道地形剖面沖刷範圍示意圖	2-15
圖 2-6	1935 年溢洪道沖刷岩盤沖刷門檻值與洪水能量比較圖	2-16
圖 2-7	1936 年溢洪道沖刷岩盤沖刷門檻值與洪水能量比較圖	2-17
圖 2-8	大甲溪水系與水文測站位置圖	2-20
圖 2-9	大甲溪石岡壩附近河段及斷面	2-20
圖 2-10	大甲溪各河段計畫流量	2-20
圖 2-11	石岡壩艾莉颱風實測流量水位	2-21
圖 2-12	白鹿橋站流量與懸浮載輸砂量迴歸曲線圖	2-21
圖 3-1	後村堰位置圖	3-2
圖 3-2	後村堰 98.08.03 照片	3-3
圖 3-3	後村堰現地岩性露頭照片	3-4
圖 3-4	後村堰地表地質圖	3-5
圖 3-5	後村堰岩層弱面狀況調查	3-7
圖 3-6	後村堰岩盤沖蝕特徵	3-8
圖 3-7	後村堰下游岩盤沖刷演進	3-9

圖 3-8	後村堰岩盤沖蝕特性調查點位	3-11
圖 3-9	義興壩位置圖	3-12
圖 3-10	義興壩 99.06.01 照片	3-13
圖 3-11	義興壩現地岩性露頭照片	3-14
圖 3-12	義興壩地表地質圖	3-15
圖 3-13	義興壩下游岩盤沖刷演進	3-17
圖 3-14	義興壩岩盤沖蝕特徵	3-18
圖 3-15	義興壩沖刷坑塊體抽離至下游之岩塊	3-18
圖 3-16	義興壩岩盤沖蝕特性調查點	3-19
圖 3-17	石岡壩位置圖	3-20
圖 3-18	石岡壩 99.03.22 照片	3-21
圖 3-19	石岡壩堰前地表地質圖	3-22
圖 3-20	石岡壩堰前砂岩偶夾頁岩(SS)	3-23
圖 3-21	石岡壩堰前厚層頁岩(Sh)	3-23
圖 3-22	石岡壩堰前層狀砂岩(LSS).....	3-24
圖 3-23	石岡壩堰前層狀砂岩之高傾角傾角且岩層破碎圖	3-24
圖 3-24	石岡壩堰前極厚層砂岩(MSS).....	3-25
圖 3-25	石岡壩堰前地表地質圖	3-26
圖 3-26	斷層附近的破碎岩體	3-29
圖 3-27	莫拉克颱風後石岡壩洩洪	3-29
圖 3-28	石岡壩堰前沖刷坑	3-30
圖 3-29	石岡壩下游河道呈槽溝狀	3-32
圖 3-30	石岡壩岩盤沖蝕特性調查點	3-32
圖 3-31	龍泉圳位置圖	3-34
圖 3-32	龍泉圳 99.06.28 照片	3-35
圖 3-33	龍泉圳露頭照片	3-36

圖 3-34	龍泉圳地表地質圖	3-37
圖 3-35	龍泉圳現地露頭照片	3-38
圖 3-36	龍泉圳堰址流況	3-39
圖 3-37	龍泉圳岩盤沖蝕特性調查點	3-40
圖 3-38	集集攔河堰位置圖	3-41
圖 3-39	集集攔河堰 99.05.02 照片	3-42
圖 3-40	集集堰現地岩性露頭照片	3-42
圖 3-41	集集攔河堰堰前地表地質圖	3-43
圖 3-42	莫拉克颱風後集集攔河堰洩洪	3-46
圖 3-43	集集攔河堰下游河道因岩性造成之差異侵蝕	3-47
圖 3-44	集集攔河堰堰前層狀砂岩	3-47
圖 3-45	集集攔河堰下游層狀砂岩	3-48
圖 3-46	集集堰岩盤沖蝕特性調查點	3-48
圖 3-47	觸口攔河堰位置	3-49
圖 3-48	觸口攔河堰 99.05.10 照片	3-50
圖 3-49	觸口堰現地岩性露頭照片	3-50
圖 3-50	觸口攔河堰地表地質圖	3-51
圖 3-51	觸口攔河堰莫拉克颱風後堰外左側改道下切狀況.....	3-53
圖 3-52	觸口堰堰體左岸切穿與壺穴沖蝕	3-53
圖 3-53	觸口攔河堰堰體破壞淤埋狀況	3-54
圖 3-54	觸口攔河堰岩盤沖蝕特性調查點	3-55
圖 3-55	觸口堰正射影像(莫拉克颱風前).....	3-55
圖 3-56	觸口堰正射影像 99.1.10(莫拉克颱風後).....	3-56
圖 3-57	東口攔河堰位置圖	3-57
圖 3-58	東口攔河堰 99.06.28 照片	3-57
圖 3-59	東口攔河堰下游出露之鹽水坑頁岩	3-58

圖 3-60	東口堰地表地質圖	3-59
圖 3-61	東口堰堰前沖刷坑	3-60
圖 3-62	東口堰下游右岸護岸破損情形	3-61
圖 3-63	甲仙攔河堰位置圖	3-62
圖 3-64	甲仙攔河堰 99.06.28 照片	3-62
圖 3-65	甲仙攔河堰下游出露之鹽水坑頁岩	3-63
圖 3-66	甲仙堰地表地質圖	3-64
圖 3-67	甲仙堰頁岩之解壓節理及風化現象	3-65
圖 3-68	甲仙堰靜水池下方沖刷坑現況	3-66
圖 3-69	甲仙堰靜水池與下游沖刷坑現況	3-67
圖 3-70	甲仙堰下游河道變化	3-69
圖 3-71	甲仙攔河堰抗沖蝕能力調查點	3-70
圖 4-1	攔河堰下游水力特性分析流程圖	4-2
圖 4-2	石岡壩二維水力特性模擬範圍	4-7
圖 4-3	石岡壩民國 98 年地表地形測量高程圖	4-8
圖 4-4	民國 98 年地形 Q_{20} 流速分佈	4-8
圖 4-5	98 年地形 Q_{20} 剪應力分佈	4-9
圖 4-6	98 年地形 Q_{20} 單寬流量分佈	4-9
圖 4-7	98 年地形 Q_{20} 福祿數分佈	4-10
圖 4-8	石岡壩堰前施工便道情形	4-14
圖 4-9	鑽孔地質圖剖面圖	4-16
圖 4-10	孔內聲波造影儀分析結果節錄	4-17
圖 4-11	S-1 層面統計分析立體投影圖	4-18
圖 4-12	S-1 節理面統計分析立體投影圖	4-18
圖 4-13	S-2 層面統計分析立體投影圖	4-20
圖 4-14	S-2 節理統計分析立體投影圖	4-20

圖 4-15	石岡壩鑽孔平均位態與現地位態	4-21
圖 4-16	室內試驗規劃流程圖	4-22
圖 4-17	交通大學軟岩三軸試驗系統圖	4-27
圖 4-18	石岡壩單壓試體破壞形式(a)劈裂破壞 (b)沿層面破壞.....	4-29
圖 4-19	S-1 孔抗沖蝕能力 K_h 深度變化關係	4-35
圖 4-20	S-2 孔抗沖蝕能力 K_h 與深度變化關係	4-36
圖 5-1	探討攔河堰下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析流程圖....	5-2
圖 5-2	後村堰現地沖蝕狀況照片	5-4
圖 5-3	後村堰沖蝕機制航空照片	5-5
圖 5-4	後村堰槽溝下切機制發展特徵	5-5
圖 5-5	義興壩下游節理發達岩體沖蝕狀況	5-7
圖 5-6	義興壩正射影像(97.11.29).....	5-8
圖 5-7	石岡壩堰前沖蝕狀況	5-9
圖 5-8	石岡壩槽溝狀下切機制與沖刷坑發展	5-10
圖 5-9	龍泉圳堰前沖刷坑形成發展	5-12
圖 5-10	龍泉圳攔河堰下游出露頁岩及沖蝕狀況	5-14
圖 5-11	集集攔河堰下游出露岩層及沖蝕狀況.....	5-14
圖 5-12	集集攔河堰下游岩盤地質圖	5-15
圖 5-13	集集堰河道槽溝下切與沖刷坑發展	5-16
圖 5-14	觸口攔河堰下游出露之岩層	5-18
圖 5-15	觸口堰下游沖刷與沖刷坑	5-19
圖 5-16	東口堰下游卵礫石形成護甲層	5-21
圖 5-17	甲仙堰堰前頁岩表面裂隙	5-22
圖 5-18	甲仙攔河堰下游出露之頁岩	5-22
圖 5-19	塊體抽離型沖刷示意圖	5-25
圖 5-20	均勻下切型沖刷示意圖	5-26

圖 5-21	槽溝下切型沖刷示意圖	5-26
圖 6-1	攔河堰(壩)下游岩盤沖刷深度評估方法流程圖	6-2
圖 6-2	單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖(Annandale, 1995).....	6-3
圖 6-3	評估沖蝕坑的可能沖蝕深度	6-4
圖 6-4	水流過溢洪道進入消能池之示意圖(Bollaert, 2002).....	6-7
圖 6-5	平均動態壓力係數與正規化消能池深度關係	6-8
圖 6-6	正規化消能池深度與平均動態壓力係數之函數關係圖	6-10
圖 6-7	正規化消能池深度、平均動態壓力係數在不同射流破裂長度 比之函數關係圖(Castillo, 2004).....	6-11
圖 6-8	正規化消能池深度與波動動態壓力係數之函數關係圖	6-12
圖 6-9	義興壩民國 97 年航空照片及民國 90 年地形測量.....	6-15
圖 6-10	義興壩沖刷坑剖面圖	6-16
圖 6-11	石岡壩 961029(上)、981021(下)正射影像及分析剖面	6-20
圖 6-12	石岡壩 9612(上)、9809(下)地形測量及分析剖面	6-21
圖 6-13	石岡壩沖刷坑 AA'剖面圖.....	6-22
圖 6-14	石岡壩沖刷坑 BB'剖面地形圖	6-22
圖 6-15	集集堰 960128(上)、981209(下)正射影像及分析剖面	6-25
圖 6-16	集集攔河堰沖刷坑 AA'剖面圖.....	6-26
圖 6-17	水流沖擊引致之沖蝕機制示意圖	6-27
圖 6-18	義興壩可攜走最大岩塊尺寸	6-30
圖 6-19	石岡壩可攜走最大岩塊尺寸	6-31
圖 6-20	集集堰可攜走最大岩塊尺寸	6-32
圖 7-1	部分灌漿拋石護層施作方式	7-3

摘 要

一、前言

(一)計畫緣起

攔河堰之設置因改變河川坡度，造成上游泥砂淤積，下游水流能量增加而引致局部沖刷或形成沖刷坑。傳統之沖刷議題係著眼於河床顆粒材料而未及於岩盤，國內、外對於攔河堰下游的岩盤沖刷機制及評估方法尚未有具體有效之研究成果。而岩盤之沖刷具有快速及不可逆之特點，近年如集集堰及石岡壩等皆有岩盤沖刷之情勢，增加管理單位之困擾。

(二)計畫目標

本計畫分兩個年度針對岩盤之沖刷力學機制進行研究，進而提出可行之沖刷深度評估方法以及研擬抗沖蝕穩定策略，以供規劃設計單位參考，防範相關問題於未然。

二、工作範圍、項目及內容

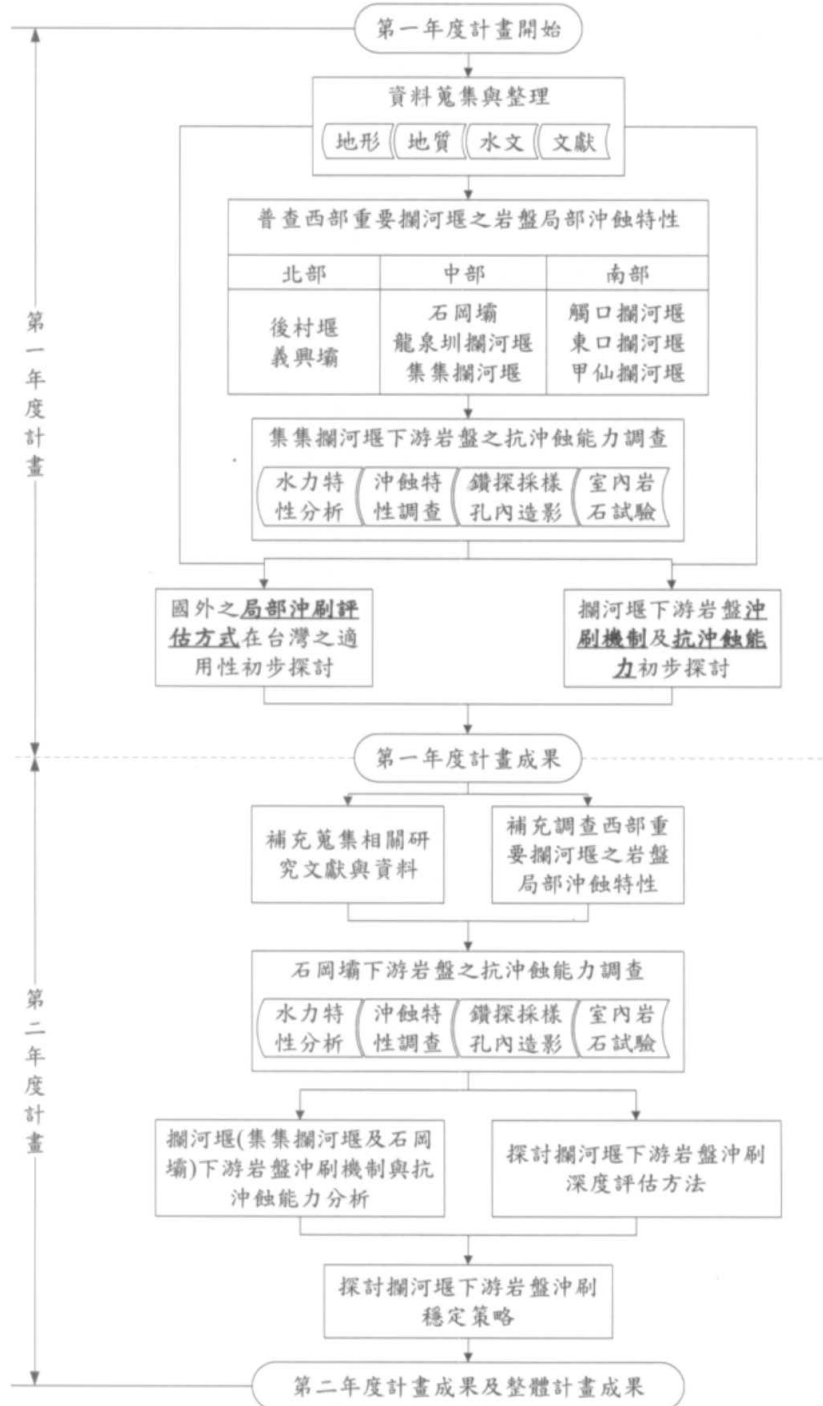
本計畫進行岩盤局部沖蝕特性調查之攔河堰包括後村堰(大漢溪)、義興壩(大漢溪)、石岡壩(大甲溪)、龍泉圳攔河堰(烏溪)、集集攔河堰(濁水溪)、觸口攔河堰(八掌溪)、東口攔河堰(曾文溪)、及甲仙攔河堰(高屏溪)等，本工作團隊對台灣西部許多攔河堰的現地勘查，選取原則包含常見的沖刷類型，區域涵蓋從北到南的西部區域主要河川。計畫工作項目及執行流程如摘圖-1所示。

(一)第 1(民國 98)年度工作重點

建立攔河堰下游岩盤沖蝕之研究基礎資料，瞭解台灣地區攔河堰下游岩盤之沖刷特性，蒐集目前攔河堰下游沖蝕行為之研究成果，進行攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力之初步探討，並評估國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性。

(二)第 2(民國 99)年度工作重點

延續第 1(民國 98)年度之工作成果深入探討相關議題，分析攔河堰下游岩盤之沖刷機制與抗沖蝕能力，探討攔河堰下游岩盤沖刷深度評估方法最適合方法，並藉以檢討與提出攔河堰下游岩盤之沖刷穩定策略。



摘圖 - 1 計畫分期工作執行流程圖

三、相關研究文獻與資料補充蒐集

本計畫廣泛蒐集後村堰等 8 座攔河堰之基本資料、區域地質資料、壩址鑽探試驗資料、歷年地形資料、水文資料、以及文獻資料等，摘表 - 1 為本計畫沖蝕特性調查之 8 座攔河堰之基本資料整理，資料中可以發現，此 8 座攔河堰中除曾文東口攔河堰尚無明顯沖刷問題外(但有沖刷坑形成)，其餘均有程度不一的岩盤沖刷問題。

本(民國 99)年度延續第 1 年度的資料蒐集成果，持續補充蒐集相關基本圖資、相關研究文獻及水文資料，其主要內容包含 8 座攔河堰基本圖資補充蒐集，供後續沖刷機制探討。並補充蒐集國外學者沖刷深度評估方式以及應用案例。

四、西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性補充調查

為探討攔河堰下游岩盤沖刷機制，本計畫於第 1 年度之調查工作乃針對西部重要攔河堰岩盤局部沖蝕特性進行普查工作，內容包括後村堰(大漢溪)、義興壩(大漢溪)、龍泉圳攔河堰(烏溪)、集集攔河堰(濁水溪)、觸口攔河堰(八掌溪)、東口攔河堰(曾文溪)、及甲仙攔河堰(高屏溪)等 8 座攔河堰之岩性種類、地層位態與水流流向關係、水流狀況與沖蝕特徵、岩石強度、節理狀況、節理風化程度、節理面粗糙程度及填充物狀況，其成果已呈現於第 1 年度成果報告中。

延續第 1 年度工作成果與調查經驗，本(民國 99)年度進行查察各攔河堰是否產生新的沖蝕特徵，並檢核第 1 年度調查之沖蝕特徵是否完整涵蓋，所以進行本沖蝕特性補充調查工作。本補充調查工作之調查項目包括：

1. 岩性種類。
2. 地層位態與水流流向關係。
3. 岩石強度：藉史密特錘量測以估計岩石強度。

4. 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物。
5. 沖刷特徵探討。

以上調查成果主要供沖刷機制歸納使用，為縮減篇幅及整合性，本工作項目調查成果將於「六、攔河堰下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析」一併說明。

五、石岡壩下游岩盤之抗沖蝕能力調查

為進行攔河堰下游之岩盤沖刷機制與沖刷坑研究，除進行 8 座攔河堰的岩盤沖蝕普查工作外，並擇定石岡壩進行抗沖蝕能力調查評估工作，工作項目包括水力特性(一維及二維)、岩石特性、沖蝕狀況、以及岩石力學參數等，工作數量整理如摘表 - 2 所示。

石岡壩室內岩石試驗之岩性包含了鄰近沖刷坑之層狀砂岩與厚層頁岩，試體為鑽探取樣之岩心。消散耐久試驗結果顯示，層狀砂岩屬於低至非常低耐久性，膠結不佳、泡水容易崩解，抗風化能力弱。頁岩消散耐久試驗結果為高耐久性。單壓試驗結果為供後續抗沖蝕能力指數 K_h 使用，故採用劈裂破壞之單壓強度，層狀砂岩單壓強度介於 1.52~1.82 MPa(應力單位：每平方公尺百萬牛頓)，後層頁岩單壓強度介於 2.79~5.22 MPa。層狀砂岩與厚層頁岩抗張強度差異不大，介於 0.14~0.21 MPa。

根據鑽探取樣及現地試驗、室內岩石試驗結果，石岡壩堰下游沖刷坑的抗沖蝕能力指數 K_h 與隨深度變化之關係主要受到近斷層效應影響，部分區域的節理較為發達，會造成該深度的 K_h 較低，其餘參數的變化皆不顯著。

摘要表 - 1 本計畫調查攔河堰基本資料表

編號	名稱	興建時間	所在河系	目前用途	壩高(m)	壩長(m)	堰壩形式	河床組成
1	後村堰 (已沖毀)	民國 72 年	大漢溪	已沖毀	3	556.3	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石及岩盤出露
2	義興壩	民國 62 年	大漢溪	攔砂壩 淤積嚴重	25.5	100	混凝土重力壩 靜水池式消能工	岩盤為主
3	石岡壩	民國 66 年	大甲溪	公共給水 農業用水	21.4	240	混凝土重力式堰 靜水池及階梯式消能工	卵礫石及岩盤出露
4	集集攔河堰	民國 90 年	濁水溪	公共給水 農業用水	15	352.5	混凝土重力式堰 靜水池及水泥護坦	卵礫石及岩盤出露
5	龍泉圳攔河堰	民國 71 年	烏溪	農業用水	3	80	混凝土重力式堰 混凝土塊護床工	卵礫石及岩盤出露
6	觸口攔河堰	民國 88 年	八掌溪	公共給水	1.5	72	自由溢流堰 增設多階靜水池	卵礫石及岩盤出露
7	東口攔河堰	民國 62 年	曾文溪	公共給水 農業用水	約 5 公尺	220.8	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石為主
8	甲仙攔河堰	民國 88 年	旗山溪	公共給水	7	120	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石及岩盤出露

(本計畫綜合資料整理)

摘表 - 2 石岡壩下游岩盤抗沖蝕能力調查工作數量表

工作項目	數量
(一)攔河堰下游水力特性分析	1 式
(二)沖蝕特性調查	1 式
(三)鑽探取樣及現地試驗	1 式
1.鑽探及取樣	50 公尺
2.孔內造影	40 公尺
(四)室內岩石試驗	1 式
1.物性試驗	12 組
2.消散耐久試驗	6 組
3.單壓試驗	6 組
4.張力試驗	6 組

六、攔河堰下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析

本工作進行之目的主要在探討攔河堰下游岩盤局部沖刷及沖刷坑形成機制，以及岩盤之抗沖蝕能力，並歸納整理本計畫攔河堰沖蝕特性補充調查的工作成果。

本計畫藉由現地地質、堰前沖蝕特徵、以及資料蒐集比對，並參考既有相關研究文獻，綜合所調查八個攔河堰下游岩盤的沖刷機制，除了未出現沖刷岩盤情況的東口堰，可知當岩性(單一)均勻且節理又不發達時，岩盤沖刷問題相對較為單純。若河床岩盤係兩種以上岩層交錯出現的岩盤(如砂頁岩互層)，則必須釐清彼此間的互制行為，了解到底何種機制掌控了沖刷的速率，並釐清主控岩盤沖刷之岩層與因素。本研究調查發現的沖刷機制歸納與簡化為 3 類沖刷模型：

(一)塊體抽離型(義興壩)

此類沖刷現象乃由塊體抽離主控的沖刷形式，其特色是岩石

強度較強，遠大於節理面強度，且節理發達。岩石強度強，代表水流作用力對岩盤本身材料的磨蝕較少，且較不易因撞擊產生新裂隙。當岩石強度遠大於節理面強度，節理又發達，則控制了破壞型態，水流沖擊力、顆粒撞擊力、渦流及壓力波動皆會令既有節理延伸及連通。當節理連通造成塊體孤立後，經由水流拖曳力及裂縫間的水壓放大效應將塊體上舉脫離，其示意如摘圖 - 2。

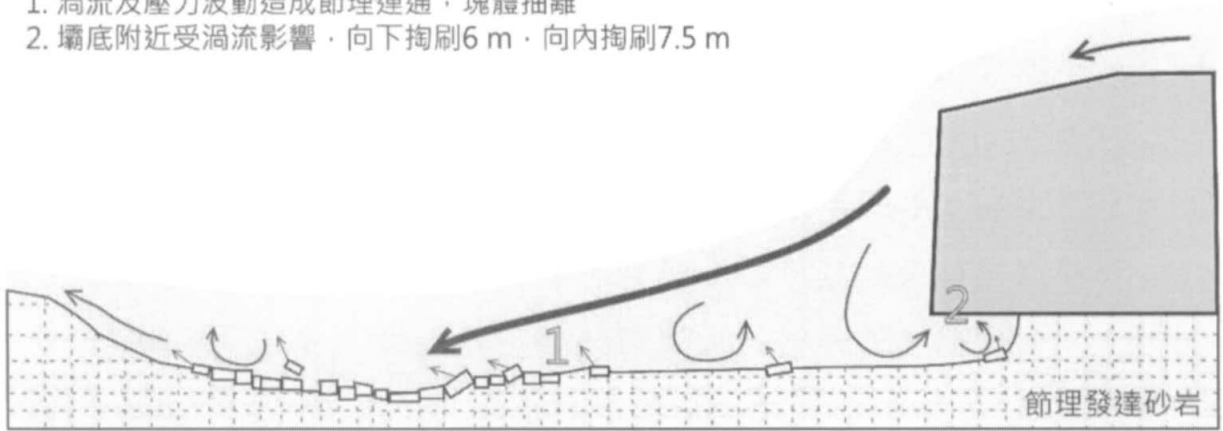
(二) 均勻下切型(龍泉圳攔河堰、觸口攔河堰、甲仙攔河堰)

均勻逐層下切的沖刷模式主要出現在厚層頁岩、砂頁岩互層中的頁岩或是強度較弱的砂岩及粉砂岩，其特色是岩石強度較弱，但節理不發達。岩石強度弱，代表水流造成之床面剪應力對岩盤表層磨蝕的影響相對較大，節理不發達的岩體無特定之破壞面，水流沖擊力及顆粒撞擊力造成裂隙均勻產生，受到渦流及壓力波動之後岩盤表面產生岩石碎屑再被水流沖離，其示意如摘圖 - 3。

(三) 槽溝下切型(後村堰、石岡壩、集集攔河堰)

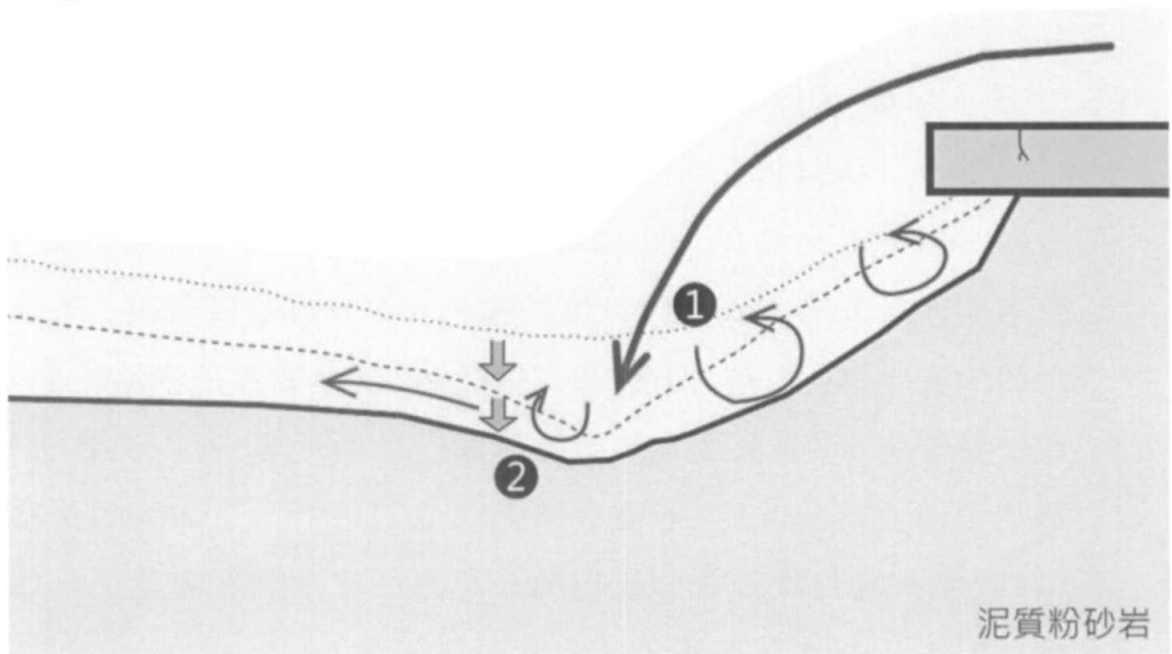
槽溝下切型主要出現在兩種以上岩層交錯出現的岩盤，通常為砂岩與頁岩交替出現的地層，岩層走向與河道平行或斜交，傾角又頗高，由於頁岩的沖蝕速率較快，當頁岩被侵蝕後，尚未侵蝕的砂岩孤立，失去了束制且凸顯範圍增加，放大了水流沖擊力、顆粒撞擊力、渦流及壓力波動對孤立砂岩的影響，造成撓曲斷裂，加速塊體脫離的潛能。若要合理簡化並掌握槽溝下切型的沖刷速率，只要掌握抗沖蝕能力較低的岩層乃主控沖刷之岩層的原則，便可掌握沖刷坑之發展，其示意如摘圖 - 4。

1. 渦流及壓力波動造成節理連通，塊體抽離
2. 壩底附近受渦流影響，向下掏刷6 m，向內掏刷7.5 m



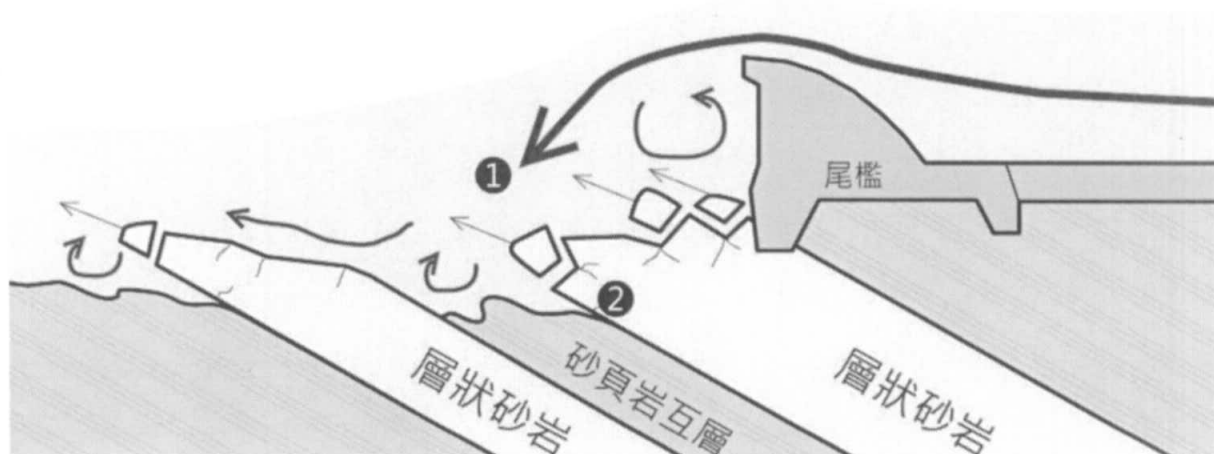
摘圖 - 2 塊體抽離型沖刷示意圖

- ① 水流直接衝擊岩盤，並向四周擴散形成渦流
- ② 渦流自頁岩表層逐層下切磨蝕，形成沖刷坑



摘圖 - 3 均勻下切型沖刷示意圖

- ① 水流作用力直接沖擊岩盤，並擴散形成渦流
- ② 砂頁岩互層沖蝕速率較快，層狀砂岩失去束制後產生裂縫形成塊狀脫落



摘圖 - 4 槽溝下切型沖刷示意圖

七、探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷深度評估方法

第 1 年度針對國外之局部沖刷評估方式之文獻探討，以 Annandale(2006)以及 Bollaert(2002)兩種方法於近年相關研究中被引用得較多，且為 ASCE 出版之工程師手冊中 Sedimentation Engineering(2008)所推薦，因此本計畫採用此 2 方法進行攔河堰下游岩盤沖刷深度評估，並探討其結果及適用性。本(民國 99)年度以第 1 年度集集堰、義興壩之初步探討成果為基礎，加入本(民國 99)年度石岡壩的案例進行綜合探討，並就現有評估方法不足之處提出改良建議供後續研究計畫參考，如下所述。

Annandale(2006)及 Bollaert(2002)的 2 種沖刷深度評估方式，在評估水流狀況為垂直射流情況下的義興壩，因為 Annandale 及 Bollaert 沖刷深度評估方法的水流作用力，皆考慮「垂直射流」的壓力波動隨沖刷深度變深(尾水位越高)而遞減，最終與岩盤抗沖蝕能力平衡之關係，故 2 種方法皆適用。

Bollaert 沖刷深度評估方法並不適用在評估水流狀況為水平

全面溢流情況下的石岡壩與集集堰，因為此法僅考慮垂直射流，假設水流方向與岩盤面垂直，水流作用力直接衝擊岩盤。Annandale 沖刷深度評估方法的水流作用力除了考慮垂直射流，亦可考慮全面溢流在副壩/尾檻與岩盤交界處之水躍流功。用於評估全面溢流情況之石岡壩與集集堰，結果顯示目前石岡壩中央排水道仍會繼續沖刷，副壩其他區域相對穩定，集集堰尾檻下游岩盤相對穩定，與現地觀察結果吻合。

綜合以上 2 種沖刷深度評估方法之適用條件與分析結果，本計畫建議下列項目可供後續研究探討：

- (一)軟岩的強度較低、膠結性較差，受到水流的動態壓力波動時，較硬岩易產生內部之裂隙，易形成小片岩屑陸續剝離。
- (二)軟岩的風化速率較硬岩快，若沖刷坑附近乾濕循環明顯，則岩盤表面的抗沖蝕能力可能會高估。
- (三)大壩溢洪道的射流在進入消能池時，是以幾近垂直角度進入，且消能池的水平流速並不大。攔河堰尾檻或靜水池出口射流在進入沖刷坑水面時，多以幾近水平的角度進入，且水流水平流速較大，因此在計算射流的平均動態壓力及波動動態壓力的折減，應與既有經驗公式有出入，此複雜流況之動態壓力計算現階段仍缺乏確認適用之理論可直接計算。
- (四)Bollaert 的沖刷深度評估方法是以理論解配合室內試驗的結果，計算壓力波動作用於節理塊體底部，能被上舉的塊體尺寸，以下幾項可供後續研究探討：
 - 1、沒有考慮到塊體本身是否會沿著材料內部損壞，與軟岩實際破壞的情況可能不盡相符。
 - 2、水平水流是否能引用垂直射流壓力波動的概念，解決現有水平水流僅考慮剪應力，造成低估沖刷深度的盲點。

(五)考慮到軟弱岩盤材料的特性，在評估沖刷深度時，建議未來能以 Annandale 沖刷深度評估方式為基礎進行延伸。後續應加強、修正材料的疲勞效應以及水平射流流功的消散，並期望可以利用流功的概念分析沖刷坑末端岩盤的穩定性。

八、探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷穩定策略

本工作藉由文獻補充蒐集、攔河堰岩盤局部沖刷機制歸納成果、攔河堰下游岩盤沖刷深度評估成果及國外最新抑止沖刷之概念，期能提出有效之攔河堰下游岩盤沖刷穩定策略。本工作除針對既有攔河堰之岩盤沖刷進行探討外，亦希望使相關問題防範於未然，亦針對未來新設之攔河堰提出預防沖刷相關建議，提出概念性的策略。本計畫分以下 2 部分進行探討：

- 1、既有攔河堰沖刷穩定策略。
- 2、未來攔河堰設置選址及設計考量策略。

(一)既有攔河堰沖刷穩定策略

針對既有攔河堰沖刷穩定之對策，現階段多以於攔河堰下方設置消能池、副壩、護坦為主，並於洪水過後檢查沖刷現象，若沖刷過於嚴重則往往繼續往下游加設消能池、副壩、護坦、透水式護床工，若輕微沖刷則進行塊石混凝土鑲補及堆置鼎塊，此種以補強為主的抗沖刷策略往往難於持久有效。本計畫試圖由以下 3 個方向探討抗沖刷策略：

1、提升岩盤抗沖蝕能力

傳統上國內既有攔河堰多設置護坦保護下游岩盤，常採表面灌漿，但往往成效不彰。德國專家 Heibaum 主張「部分灌漿拋石護層」(Partial Grouted Riprap, PGR) 新觀念，在岩盤表面鋪設拋石並點狀的灌漿，保留約 30~40%的孔隙維持拋石護層的滲透性，較高的滲透性可以快速消散水壓波動所

引起的超額孔隙水壓，避免如同傳統護坦因為水流進入與岩盤介面，形成強大的上舉力無法消散，造成整片剝離的現象，且 PGR 相較於全面灌漿具透水性、柔性，容許變位。並藉由 PGR 的概念串連拋石，讓小塊拋石組合成拋石層，或許可以解決現有放淤護層容易被水流沖走的問題。

2、降低流功

本計畫建議若為長期沖刷穩定策略考量，務本之道應盡可能採用能減少水流能量的概念。水流能量既然與單寬流量、流速(縱向坡度)成正相關，因此應分 2 個方向討論。

(1)降低單寬流量的方式可以考慮興建分洪隧道或分流暗渠，洪水時將部分流量直接繞過攔河堰堰前岩盤或由堰底通過，平時則可供取水。

(2)降低流速與坡度的方式可考慮將攔河堰全部或部分堰體改建為洪水時可全開之操作方式，讓河道暫時回到未興建攔河堰前之原始坡降，如此可減少因為堰體所提升之水頭高程引起的額外水流流功，減少洪水時的沖刷。河道坡度的一致性，也可提供穩定的流速，讓退水時河床載均勻停留在攔河堰上下游岩盤表面，減少上游淤積，增加下游護甲層，保護岩盤免受退水時的水流沖刷以及常時水流沖刷。

3、避免流量過度集中

對於既有的堰前淨水池、副壩、消能池，修復時絕對應避免束縮河道，反而應考慮擴大河道寬度，增加河道通水斷面積，以減少單寬流量。當副壩損壞，應盡可能避免將流量集中於 1 處（譬如石岡壩副壩損壞後，修復方案採興建中央排水路，而未全面修復副壩），一旦流量過於集中，因而使

其流功會遠大於下游側原本平均分攤的流功，而使沖刷坑之發展加劇。

(二)未來攔河堰設置選址及設計考量策略

攔河堰設計主要目的為抬高水位以順利取水，在設置攔河堰後卻往往改變河川原有之輸砂沖淤平衡狀態，導致下游護甲層流失速率加快，再者，水位抬升後的造成水流能量增加，促使下游沖刷作用更加活躍。

因此，未來攔河堰設置的選址及設計工作勢必需將下游可能啟動的沖刷機制及必要條件納入考量，以及能減少下游岩盤沖刷行為之堰壩形式進行策略性的探討。

1、堰址之地形地質條件

考量波動水壓下節理發達的岩體將易於出現節塊抽離機制之沖刷，岩體抵抗節塊抽離沖刷之能力與岩塊大小正相關，決定於岩體中弱面組數與節理間距。

針對台灣西部麓山帶最常出現的砂頁岩互層，抗沖蝕能力強弱差異很大，需將重點放在較易風化、侵蝕的岩層作為沖蝕深度評估之主控層。層狀岩床沖刷之發展與岩層位態有密切之關連，影響攔河堰前局部沖刷範圍與擴展趨勢，岩層位態與水流方向之夾角也是選址時必須考量的重點因素。

2、堰壩閘門型式與排砂消能設施

攔河堰下方岩盤的沖刷行為多發生於洪水期間，洪水期間攔河堰亦無取水之需求，堰壩型式可朝向洪水期間可暫時降低跌水高、能彈性調整攔抬水高度之閘門形式(如採橡皮壩或 Drum-gate 型態之堰壩閘門控制)，如此可減少洪水時期攔河堰上下游之水頭差所形成的地形陡降點，降低水流因為垂直射流而產生的流功。當攔河堰上下游坡度差異不大，洪水

退水時流速分佈均勻，河床載才有可能停留在下游岩盤表面，作為抵抗常時水流沖刷之護甲層。排洪設計原則上應採以消能為主、固床為輔(可參考 PGR 之概念)、增強排砂效率、減少堰壩上游的洄砂率等策略。

除了暫時降低跌水高之策略，另一策略為降低單寬流量，以減少作用於岩盤表面之水流流功。必要時可考慮於河道設置暗渠通過攔河堰下方河床，平時可兼做取水用途，洪水時期則關閉取水閘門，往下游分洪，減少通過攔河堰上方跌水之單寬流量，降低攔河堰前之流功，抑制局部沖刷之潛能。

若嘗試人為提高尾水位，也不妨考慮於沖刷坑尾端設置如興建副壩、梳子壩，以控制洪水時的尾水高度，小水量時水流可有效通過，大水量時梳子壩內之水位將自然湧高，提供暫時之較高尾水位，增加水墊作用之消能效應。因為部分之流量可經過梳子壩間通過，減低梳子壩上、下游間之平均位能水頭差，可降低其下游端局部沖刷之潛能，或能有雙向之優點。

Abstract

Weirs or small dam were often built across rivers to elevate river water table for providing public water supply in Taiwan. Most of the river beds in western foothills of Taiwan are composed soft sedimentary rocks. Due to low rock strength and the head difference caused by the weirs, rapid scour downstream of weirs is often observed. This type of scour may induce weir instability and accelerate river-bed incision. To mitigate the damages, the scouring mechanism and processes in front of a weir built on soft rock riverbed need to be correctly identified. It is also necessary to determine the possible extent of scour hole and to deliberate the appropriate engineering countermeasure.

The project aims at investigating the erosion/scouring problems associated with weirs built on soft rock. The scope of this project includes the following: (1) collection of relevant data for eight weirs built on soft rock; (2) study of erosion mechanism and erodibility of soft rock ahead of weirs; (3) applicability evaluation of the available approaches for estimating local scouring in front of a weir built on soft rock; and (4) study on the strategies for weir-front erosion control.

On the basis of data from field geology, site investigation, and erosion pattern recognition for eight weirs built on soft rock, three types of erosion models are identified; namely (1) plucking type, (2) uniform incision type, and (3) trenching incision type.

The approaches of Annandale et al. (1995, 2006) and Bollaert (2002) are two approaches recommended by American Society of Civil Engineers (2008) for the estimation of the depth of scour hole in rock in front of a spillway. Annandale et al. (1995, 2006) model uses a so called erodibility index K_h to quantitatively characterize the resistance of geo-materials

(including intact rock, rock mass, and soil) to erosion. The erodibility index tends to increase with depth, in general. On the other hand, the erosive power will decrease with depth due to energy dissipation. There will be a certain depth that the erosive power is no more enough to overcome the rock resistance to erosion. Hence, the scouring depth can be estimated. Model of Bollaert and Schleiss (2003) is applicable for hard jointed rocks subjected to high velocity jets; this model was intended to estimate the scour depth or the apron concrete thickness in plunge pools. Both approaches are adopted for the preliminary applicability evaluation in the cases of the Chi-Chi Weir, Shi-Gang Dam and the Yi-Sin Dam.

Based on the erodibility indexes evaluated in field, the scouring depths in Chi-Chi Weir, Shi-Gang Dam, and Yi-Sin Dam predicted by the Annandale's model were compared with what has actually occurred in field. The scouring trend in the Chi-Chi weir and Shi-Gang Dam predicted by the Annandale's model agrees more or less with real situation. The scouring hole in the Yi-Sin Dam predicted by Annandale's model and Bollaert-Schleiss model agree with the field condition.

It appears that both of the two models are partially applicable. The Bollaert-Schleiss model is applicable for jet flow on rock bed when plucking of jointed rock mass is the predominant erosion mechanism. The Annandale's model works when the stream power on rock bed can be accurately evaluated. The applicability and limitation of both methods deserve further deliberation and examination.

The strategy for weir-front erosion control was briefly studied. For existing weirs with excessive erosion problem, attention should be paid to protect the river bed, to reduce the stream power, and to avoid the

concentration of weir-front flow. For the planning of a new weir with potential erosion concern, the site conditions of geology and geomorphology should be carefully studied to examine the erodibility of rock bed and the potential progress of weir-front erosion. The layouts of weir gate and energy dissipation tactic are very important for the reduction of erosion potential.

結論與建議

一、結論

- (一)本計畫針對 8 座攔河堰下游側岩盤的局部沖刷進行深入調查研究，並蒐集豐富之攔河堰地質、地形、水文、相關研究文獻、航空照片及正射影像等，對於瞭解沖刷發展之過程有很大助益。
- (二)對於岩盤河道而言，攔河堰堰前局部沖刷型態不僅受水文條件影響，亦深受地層岩盤特性影響。本計畫採用 Annandale(2006)所提出之岩盤抗沖蝕能力指數(K_h)的評分方法，掌握了岩盤沖刷的主控因子，可以作為評估攔河堰下游岩盤沖蝕特性與沖刷潛能的指標。
- (三)本計畫透過現地地質調查、堰前沖蝕特徵調查，並參考既有相關研究文獻，詳細調查與評估所調查之 8 座攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力指數(K_h)，結果能充分反映現地調查所歸納的 3 種岩盤沖刷機制，如塊體抽離型的 K_h 節理分數相對較低、均勻下切型 K_h 材料強度分數相對較低、槽溝下切型強弱層的 K_h 差距可超過 1 個 order 以上，並釐清攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力之主控因素，如摘表 - 3 所示。
- (四)本(民國 99)年度探討沖刷深度評估方法，部分可適用於台灣軟弱岩盤，Annandale 法及 Bollaert 法用於垂直射流流況(義興壩)之沖刷坑深度，均有很好的效果，Annandale 法及 Bollaert 法用於洪水時全面溢流流況(石岡壩、集集堰)，分析結果符合實際狀況，但仍有改善空間。全面溢流所造成的水躍，與沖刷坑持續發展之間的關聯性，現階段仍無法充分掌握。

摘表 - 3 攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力之主控因素表

攔河堰	抗沖蝕能力主控因子
後村堰	槽溝下切：堰前的砂頁岩互層，其抗沖蝕能力相對低，為沖蝕之主控岩層。
義興壩	塊體抽離：岩體中之節理間距。
石岡壩	槽溝下切：厚層頁岩及砂頁岩互層中的頁岩抗沖蝕能力相對低，為沖蝕主控岩層。
龍泉圳攔河堰	均勻下切：堰址之厚層頁岩。
集集攔河堰	槽溝下切：堰址之砂頁岩互層。
觸口攔河堰	均勻下切：堰址之泥質粉砂岩以及泥岩。
甲仙攔河堰	均勻下切：堰址之泥質粉砂岩以及頁岩。

(五)針對既有攔河堰沖刷穩定策略，宜以降低流功(增加河道寬度、抬昇尾水位)為主，提升岩盤抗沖蝕能力為輔的概念抑止沖刷。過去利用護坦、放淤保護下游岩盤的方式成效不彰，可以改採「部分灌漿拋石護層」(PGR)的概念，應可有效減少沖刷速率。

(六)對於未來攔河堰設置選址及設計考量策略，則首先宜考慮地形及地質條件是否適合，例如砂頁岩互層，抗沖蝕能力強弱差異很大，需將重點放在較易風化、較易侵蝕的岩層作為沖蝕深度評估之主控層，且必須避免水流方向與岩層方向一致的沖刷情況。另外對於堰壩形式(可暫時降低跌水高、能彈性調整攔抬水高度之閘門形式)與排沙消能(消除跌水高、增加尾水深，如梳子壩等)設施必須先行布置，或是考慮分洪隧道或暗渠在洪水時直接減少單寬流量或流功的概念。

二、建議

(一)台灣之主要河川一般均僅數年進行 1 次大斷面測量，對於攔河堰之局部沖刷研究而言相當不足，建議重要之攔河堰或有岩盤沖刷潛勢之攔河堰應考量沖刷坑出現範圍及沖刷速率，增加地形測量資料。如枯水期地表地形測量、DEM、水下地形測量(聲納)等。

(二)根據本計畫沖刷深度評估過程中參數選用之心得，及針對軟岩及硬岩之間的差異性，建議未來宜針對以下項目更進一步進行探討：

- 1、軟岩的強度較低、膠結性較差，受到水流的動態壓力波動時，較硬岩易產生內部裂隙，容形成小片岩屑陸續剝離。
- 2、軟岩的風化速率較硬岩快，若沖刷坑附近乾濕循環明顯，則岩盤表面的抗沖蝕能力可能會高估。
- 3、大壩溢洪道的射流在進入消能池時，是以幾近垂直角度進入，且消能池的水平流速並不大。攔河堰尾檻/靜水池出口射流在進入沖刷坑水面時，多以幾近水平的角度進入，且水流水平流速較大，因此在計算射流的平均動態壓力及波動動態壓力的折減，應與既有經驗公式有出入，此複雜流況之動態壓力計算現階段仍缺乏確認適用之理論可直接計算。
- 4、Bollaert 的沖刷深度評估方法是以理論解配合室內試驗的結果，計算壓力波動作用於節理塊體底部，能被上舉的塊體尺寸，以下幾項可供後續研究探討：
 - (1)沒有考慮到塊體本身是否會沿著材料內部損壞，與軟岩實際破壞的情況可能不盡相符。
 - (2)水平水流是否能引用垂直射流壓力波動的概念，解決現

有水平水流僅考慮剪應力，造成低估沖刷深度的盲點。

5、考慮到軟弱岩盤材料的特性，在評估沖刷深度時，建議未來能以 Annandale(2006)沖刷深度評估方式為基礎進行延伸。後續應加強、修正材料的疲勞效應以水平射流流功的消散，並期望可以利用流功的概念分析沖刷坑末端岩盤的穩定性。

(三)本計畫已能掌握攔河堰下游岩盤之抗沖蝕能力、沖刷機制及沖刷深度評估方式，期能於後續計畫更進一步研究。

第壹章 前言

一、計畫緣起

攔河堰之設置因改變河川坡度，造成上游泥砂淤積，下游水流能量增加而引致局部沖刷或形成沖刷坑。傳統之沖刷議題係著眼於河床顆粒材料而未及於岩盤，國內、外對於攔河堰下游的岩盤沖刷機制及評估方法尚未有具體有效之研究成果。而岩盤之沖刷具有快速及不可逆之特點，近年如集集堰及石岡壩等皆有岩盤沖刷之情勢，增加管理單位之困擾。

二、計畫目標

本計畫分兩個年度針對岩盤之沖刷力學機制進行研究，進而提出可行之沖刷深度評估方法以及研擬抗沖刷穩定建議方法，以供規劃設計單位參考，防範相關問題於未然。

三、工作項目及內容

本(民國 99)年度係執行本研究計畫之第 2 年度工作，延續第 1 年度攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力調查、沖刷機制及抗沖蝕能力探討、沖刷深度評估方式探討等初步成果。本(民國 99)年度將探討影響攔河堰下游岩盤沖刷機制之必要條件、提出岩盤沖刷深度評估方法，最後對現有及未來的攔河堰下游岩盤沖刷穩定策略提出建議，各年度工作項目及內容分述如下。

(一)第 1(民國 98)年度

- 1、資料蒐集與整理。
- 2、普查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性。
- 3、攔河堰(集集攔河堰)下游岩盤之抗沖蝕能力調查。
- 4、攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力初步探討。

5、國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性初步探討。

(二)第 2(民國 99)年度：(本年度)

1、補充蒐集相關研究文獻與資料。

(1)補充蒐集國內外相關攔河堰岩盤沖刷研究文獻。

(2)補充蒐集國內各攔河堰相關之研究報告。

2、補充調查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性。

(1)調查對象包括後村堰(大漢溪)、義興壩(大漢溪)、石岡壩(大甲溪)、龍泉圳攔河堰(烏溪)、集集攔河堰(濁水溪)、觸口攔河堰(八掌溪)、東口攔河堰(曾文溪)、及甲仙攔河堰(高屏溪)。調查內容包含是否發生沖蝕、沖蝕位置、沖蝕現象、沖蝕規模、及抗沖蝕能力指數等。

(2)針對第 2 年度計畫執行期間攔河堰沖蝕現象之變化進行補充調查。

3、石岡壩下游岩盤之抗沖蝕能力調查。

調查項目包括岩性、位態、節理條件、及沖蝕狀況等，調查進行包含下列工作：

(1)攔河堰下游水力特性分析。

(2)沖蝕特性調查。

(3)鑽探取樣及現地試驗。

包含鑽探取樣 2 孔(合計長度 50 公尺)及孔內造影。

(4)室內岩石試驗。

包含岩石物性試驗及力學性質試驗。

4、攔河堰(集集攔河堰及石岡壩)下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析。

綜合第 1(民國 98)年度集集堰的調查分析成果以及第 2(民國 99)年度石岡壩之成果進行綜合歸納，探討攔河堰下游岩盤沖刷機制，分析岩盤之抗沖蝕能力。

5、探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷深度評估方法。

以第 1 年度針對國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性初步探討成果為基礎，進行試用驗證，必要時進行改良修正，最後提出建議之沖刷深度評估方法。

6、探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷穩定策略。

針對攔河堰下游之沖刷機制探討建議岩盤沖刷穩定策略。

四、工作範圍

依據本計畫工作項目及內容，將進行調查之後村堰(大漢溪)、義興壩(大漢溪)、石岡壩(大甲溪)、龍泉圳攔河堰(烏溪)、集集攔河堰(濁水溪)、觸口攔河堰(八掌溪)、東口攔河堰(曾文溪)、及甲仙攔河堰(高屏溪)等 8 座壩堰址之分佈位置如圖 1-1 所示。

五、工作執行流程

本計畫屬 2 年度計畫，第 1 年度工作已於民國 98 年底完成，本(民國 99)年度為第 2 年度。以下就 2 個年度之所有工作項目與整體計畫預期目標，說明年度計畫構想。本計畫 2 年分期執行構想如圖 1-2，並說明如下：

(一)第 1(民國 98)年度(已完成)

第 1 年度工作重點在於建立攔河堰下游岩盤沖蝕之研究基礎資料，藉由普查台灣西部攔河堰之岩盤局部沖刷特性，以及集集攔河堰下游岩盤之抗沖蝕能力調查工作，瞭解台灣地區攔河堰下游岩盤沖刷之一般特性；另外並藉由廣泛蒐集彙整國內外相關研究文獻，瞭解目前攔河堰下游沖蝕行為之研究成果。

綜合上述台灣地區攔河堰下游岩盤之沖刷特性及目前文獻研究成果，進行攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力之初步

探討，並評估國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性。

(二)第 2(民國 99)年度

第 2 年度之工作係延續第 1 年度之工作成果，深入探討相關議題，補充蒐集新的相關文獻資料，進行攔河堰下游岩盤之局部沖蝕特性補充調查，並於石岡壩進行現地鑽探採樣及岩石室內試驗以便輔助石岡壩下游岩盤之抗沖蝕能力調查。

此外，第 2 年度之工作重點為分析攔河堰下游岩盤之沖刷機制與抗沖蝕能力，探討攔河堰下游岩盤沖刷深度之評估方式，並以第 1 年度針對國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性初步探討成果為基礎，進行試用驗證，最後建議合宜之沖刷深度評估方法。藉由沖刷機制及其主控因子，探討台灣西部地區攔河堰下游軟弱岩盤之沖刷穩定策略。

(三)計畫關鍵性課題探討分析

近年來，台灣西部地區攔河堰普遍存在下游岩盤沖刷的現象，造成攔河堰下游河道下切並產生沖刷坑，若沖刷範圍持續擴大掏刷，將影響攔河堰本體及附屬構造物基礎的安全性。過去的工程觀點認為水工構造物的基礎只需深達岩盤即算穩定，但實務上眾多攔河堰(如石岡壩、集集攔河堰、竹山攔河堰等)下游岩盤都有明顯沖刷情形，即便經常整修，但颱風之後仍然造成靜水池、護坦基礎損壞淘空，除威脅攔河堰基礎、河岸、與下游河道之穩定性，更嚴重影響供水之永續經營，攔河堰下游岩盤沖刷問題非常需要重視，其岩盤沖刷之現象及成因亟需探討並深入研究。

攔河堰建造抬水後引致水流流場與河床狀況改變，上游河道的縱向坡度會因為蓄水、河床載沉積而變緩，水流流速變慢。下游河道會因為攔河堰抬昇水位，產生額外水頭差造成坡度局

部的陡降、水流流速變快、流功增加。河床狀況也會隨之改變，攔河堰上游洄砂造成土砂量供應不足，下游河床護甲層逐漸流失，護甲層一旦流失之後岩盤就開始出露直接承受水流衝擊，造成岩盤開始沖刷，影響攔河堰及附屬構造物之基礎、兩側河岸、下游河道的穩定性。因此欲瞭解設置攔河堰後對下游岩盤的影響，必須掌握水流作用力、攔河堰附近河道地形、岩盤抗沖蝕能力所扮演的角色，也需瞭解與探討岩盤沖蝕機制。

水流作用力受到流量、流速、河道地形(坡度、粗糙度)、跌水形式等因素影響，作用於岩盤表面的剪應力或是流功分佈因此不同，因此有必要藉由水理分析求得必要之水力參數，以估計水流作用力的大小。然分析所得水力參數之正確性是否可靠取決於所採之數值模式是否能合理、準確地考量攔河堰上、下游局部區間之劇烈水理變化。

岩盤抗沖蝕能力受到岩性、構造、岩層位態與水流向間關係、風化程度等因素影響，必須從現地勘查、鑽探取樣、現地試驗獲得這些必要參數，用以估計岩盤抵抗水流沖蝕之能力。然而除了定性之影響趨勢，如何合理定量考量岩盤之抗沖蝕能力，是否能適用廣泛之岩盤條件，其實仍有其疑問。

攔河堰附近河道地形的演變，受到護甲層沖淤、岩盤沖刷、攔河堰及附屬構造物(如靜水池、副壩、護坦等)建造及修復的影響，需由歷年航照判釋及地形測量資料、現地簡易測量、相關工程設計圖獲得，了解堰前沖刷坑發展之過程及沖刷量之評估。但若為攔河堰探討下游河床沖刷坑之演變，仍需掌握逐年堰前沖刷坑之調查成果，資料常往往不盡完整。

基於第 1 年度之研究初步成果，沖刷機制的探討應可從現地調查岩盤抗沖蝕特性，觀察影響岩盤沖刷的主要因素為何來

著手。不同條件可能出現不同之沖刷機制，例如無明顯節理的岩層可能以均勻下切沖刷為主，節理發達的岩層可能以塊體抽離沖刷為主，砂頁岩互層岩層可能抗沖蝕能力較低的頁岩為主控層先行沖刷，形成槽溝下切型的沖刷機制。

透過調查掌握相關的參數及可能沖刷機制，進一步工作為評估岩盤沖刷坑的深度及延展範圍，釐清水流條件及岩盤材料條件在沖刷坑發展過程中所扮演之角色及影響程度，作為探討堰壩下游沖刷穩定策略的基礎。

目前國際上針對岩盤沖刷深度的評估方法經過本計畫第 1 年度的調查，大多考慮硬岩受到水流衝擊、壓力波動造成節理開裂，岩塊因為水流上舉力而抽離為主。或者是考慮水流在不同水力條件、跌水條件下的流功，岩盤以類似岩體評分法(NGI-Q 法，挪威地工技術研究所提出的岩體分類法)得到的抗沖蝕能力兩者做比較。這些評估方法用於台灣軟弱岩盤沖刷深度之評估會面臨許多問題，軟弱岩盤的材料性質、節理面性質、解壓風化行為都有很大的差異，且探討的案例多為大壩底下溢洪道的沖刷坑，其水流條件與攔河堰靜水池下游河道也有差異。

本計畫第 1 年度調查 8 座攔河堰下游岩盤局部沖蝕特性，將其沖刷行為歸納成 3 種沖刷機制：塊體抽離型(義興壩)、均勻下切型(龍泉圳攔河堰、觸口攔河堰、甲仙攔河堰)、槽溝下切型(後村堰、石岡壩、集集攔河堰)。為探討國外局部沖刷評估方式在台灣之適用性，採用 Annandale(1995, 2006)以及 Bollaert(2002)所提出的兩種方式評估集集攔河堰與義興壩下游側沖刷坑之發展，評估結果顯示各有其適用範圍。由第 1 年度的結果已大致可以掌握攔河堰下游的沖刷機制，但對於主控沖

刷的關鍵因子所扮演的角色、相對重要性等仍非完全明確。

據此，本(民國 99)年度補充蒐集文獻及補充調查攔河堰下游岩盤局部沖蝕特性，透過現地調查沖刷現象及岩盤特性，探討攔河堰下游岩盤沖刷機制與必要條件，掌握台灣西部 8 座攔河堰常見的沖刷類型。並藉由水理演算、地形資料、鑽探取樣等方式，獲得石岡壩下游岩盤的水理條件、地形條件、岩石性質參數。包括水力特性分析，瞭解石岡壩下游於不同流量下的流速、剪應力等。經由沖蝕特性調查以獲得到下游岩盤的岩石性質，如節理間距、岩層位態，並繪製堰前地質圖、地質剖面圖以掌握沖刷坑附近的岩層特性。鑽探採樣及現地試驗可以獲得岩石物理及力學參數。並綜合第 1 年度集集堰及本(民國 99)年度石岡壩調查結果，探討這 2 座堰壩槽溝下切型沖刷機制及抗沖蝕能力分析，並進行沖刷深度之評估。

此外，本(民國 99)年度延續第 1 年度 Annandale (1995, 2006) 以及 Bollaert (2002) 所提出之沖刷深度評估方法，首先對於第 1 年度未能充分適用的部分進行檢討並比較其理論基礎與假設條件，是否與本(民國 99)年度補充調查所歸納之沖刷機制主控因子有相異之處，針對相異之處探討是否能適當的修正，用以評估台灣攔河堰下游岩盤沖刷深度。

本計畫最終將綜合攔河堰下游岩盤沖刷機制及深度評估方法之成果，探討攔河堰下游岩盤刷衝穩定之可行策略，以供相關單位處理攔河堰下游岩盤沖刷穩定問題，或規劃未來攔河堰之參考。

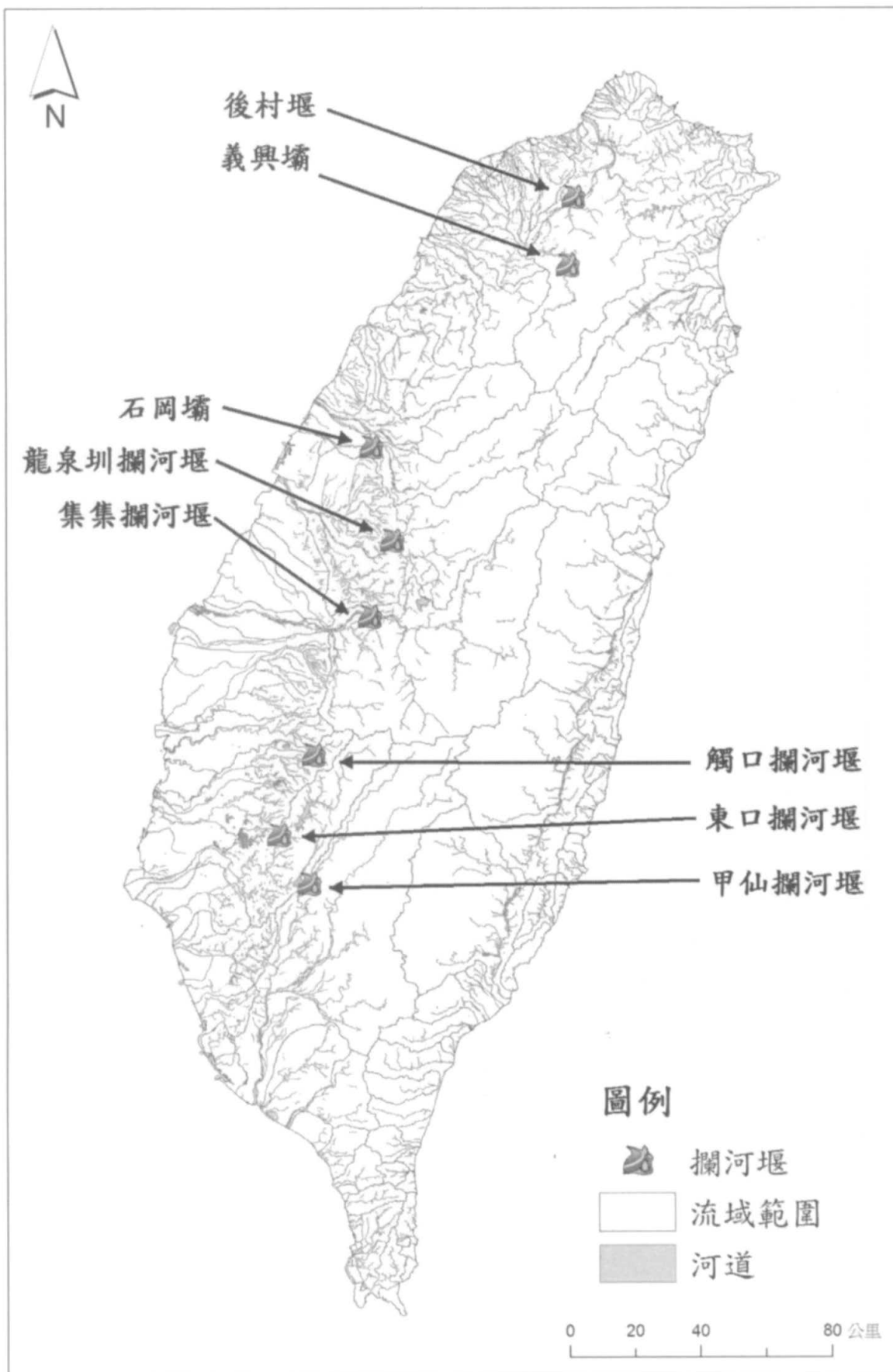


圖 1-1 調查攔河堰位置圖

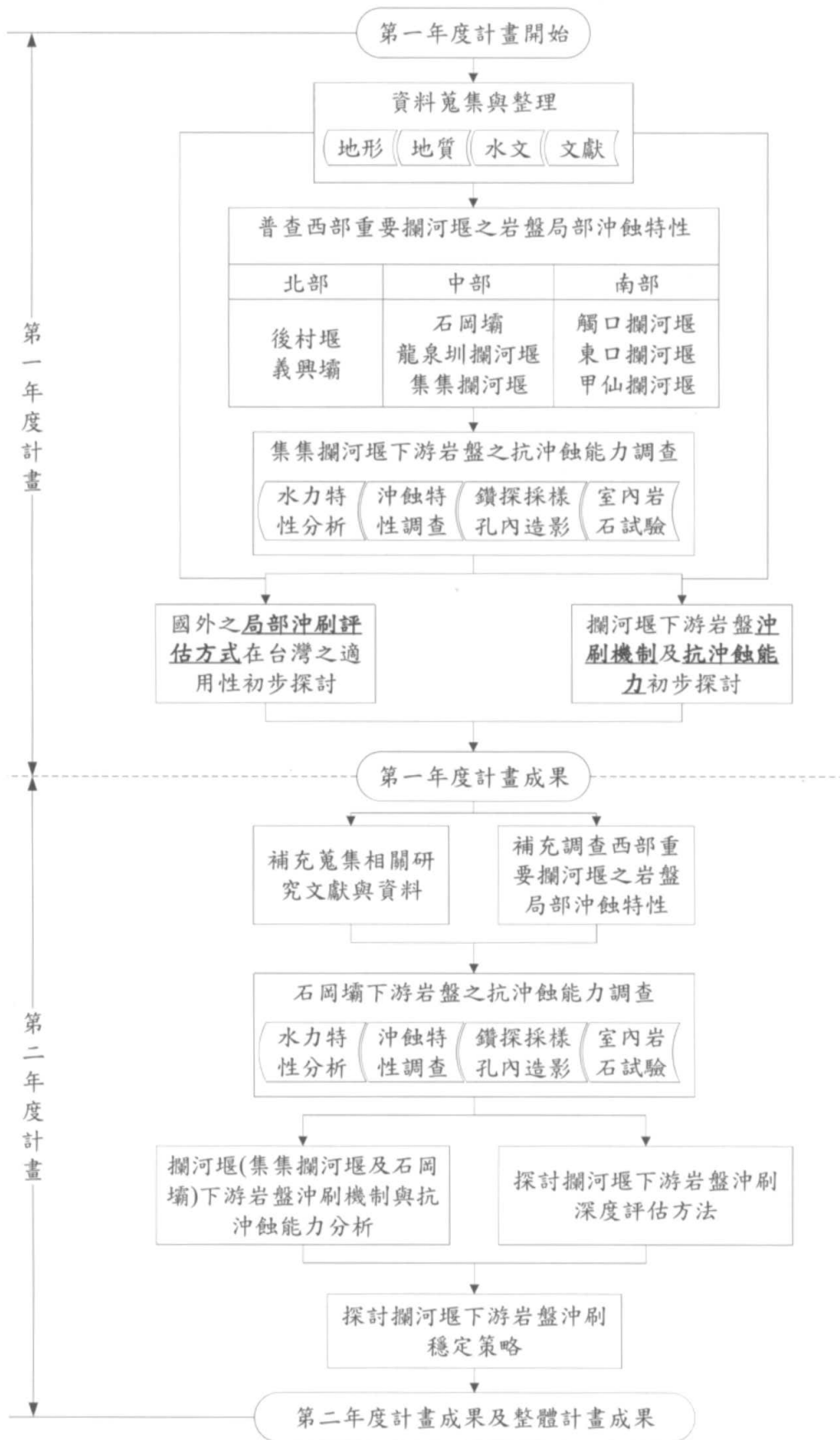


圖 1-2 計畫分期工作執行流程圖

六、歷年規劃或研究成果

(一)資料蒐集與整理

本計畫廣泛蒐集後村堰等 8 座攔河堰之基本資料、區域地質資料、壩址鑽探試驗資料、歷年地形資料、水文資料、以及文獻資料等，表 1-1 為本計畫沖蝕特性調查之 8 座攔河堰之基本資料整理。

(二)普查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性

現地沖蝕現象調查之目的在於瞭解攔河堰下游區域內裸露岩床的沖蝕狀況與特徵，紀錄不同地質條件的岩床沖蝕特性，量測反應岩石材料抗沖刷能力之必要參數，最後將調查結果歸納分類，作為後續沖蝕機制探討應用。調查對象以攔河堰前之岩盤為主，若堰前水流深急、或受到砂石覆蓋不適宜進行調查時，則以堰下游之河道相同岩性之岩盤地層作為調查對象。調查內容擬包含是否發生沖蝕、其沖蝕位置、沖蝕現象與特徵、沖蝕規模、水流條件、岩性、及地層位態等。

表 1-1 本計畫第 1(民國 98)年度調查攔河堰基本資料表

編號	名稱	興建時間	所在河系	目前用途	壩高(m)	壩長(m)	堰壩形式	河床組成
1	後村堰 (已沖毀)	民國 72 年	大漢溪	已沖毀	3	556.3	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石及岩盤出露
2	義興壩	民國 62 年	大漢溪	攔砂壩 淤積嚴重	25.5	100	混凝土重力壩 靜水池式消能工	岩盤為主
3	石岡壩	民國 66 年	大甲溪	公共給水 農業用水	21.4	240	混凝土重力式堰 靜水池及階梯式消能工	卵礫石及岩盤出露
4	集集攔河堰	民國 90 年	濁水溪	公共給水 農業用水	15	352.5	混凝土重力式堰 靜水池及水泥護坦	卵礫石及岩盤出露
5	龍泉圳攔河堰	民國 71 年	烏溪	農業用水	3	80	混凝土重力式堰 混凝土塊護床工	卵礫石及岩盤出露
6	觸口攔河堰	民國 88 年	八掌溪	公共給水	1.5	72	自由溢流堰 增設多階靜水池	卵礫石及岩盤出露
7	東口攔河堰	民國 62 年	曾文溪	公共給水 農業用水	約 5 公尺	220.8	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石為主
8	甲仙攔河堰	民國 88 年	旗山溪	公共給水	7	120	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石及岩盤出露

(本計畫綜合文獻資料整理)

1、後村堰(大漢溪)

堰址附近岩性為南莊層，以砂岩和頁岩之薄葉狀互層為主，夾有深灰色頁岩及煤層，砂岩膠結疏鬆。後村堰附近的地層位態約為 N68E/53，地層走向與水流流向大致平行。民國 93 年堰體沖毀前主要沖刷問題為下游河道沖刷下切至岩盤，砂頁岩互層間差異侵蝕。民國 93 年艾利颱風，後村攔河堰堰體遭洪水侵蝕流失 100 公尺長，並形成深 15 公尺之深水河槽。堰體沖毀後，由於地層走向與水流方向幾近水平，水流會沿著層面侵蝕，最終只剩下砂岩突出於河道上，深槽化之河道為其沖蝕特徵。現地量測表面風化程度較低的砂岩單壓強度約介於 10~20MPa，表面風化程度較低的砂頁岩互層及夾煤層單壓強度約介於 5~10 MPa。現地沖刷行為勘查顯示雖然此區各岩性的岩層單壓強度都差不多，但砂頁岩互層、頁岩的表層易受風化或解壓作用影響而形成較破碎的岩體，導致較容易受水流沖蝕而下切，為本區域沖蝕型態成槽溝狀之原因。

2、義興壩(大漢溪)

義興壩址之基層岩盤為木山層，在壩基部分主要以厚層塊狀砂岩及砂頁岩互層為主。附近地層位態約為 N16E/8N，地層走向與水流流向大致平行。義興壩前形成一巨大的沖刷坑，其沖刷特徵在岩石成塊狀脫落，不論厚層塊狀砂岩或砂頁岩互層岩塊沿著節理面及層面脫落的現象均相當明顯。義興壩附近之粉砂岩單壓強度平均約為 80 MPa。由於此區砂岩多屬於正石英砂岩，強度高抗物理風化能力強，表面磨蝕沖刷行為較不明顯，現場現象觀察大部分呈現的沖蝕機制由塊體抽離所主控。

3、石岡壩(大甲溪)

壩址附近之地層為卓蘭層，由砂岩、粉砂岩、泥岩、及頁

岩之互層組成，附近的地層位態約為 N45E/50S，地層走向與水流流向夾角約 20 度。壩前河道呈現槽溝狀，其成因研判為岩性與節理性質的不同產生差異侵蝕。各岩層的單壓強度則介於 2~12MPa 之間。本區域節理以解壓節理為主，受到車籠埔斷層之影響造成局部區域地層較為破碎，岩床容易被侵蝕，斷層引起的岩體破碎程度對岩盤侵蝕的影響相當大。

4、龍泉圳攔河堰(烏溪)

堰址附近區域地層屬猴洞坑層，岩性大部份由灰黑色塊狀頁岩組成，龍泉圳附近的地層位態約為 N2W/80N，地層傾向與水流流向相反。沖蝕特徵主要為完整厚層頁岩的沖蝕，以表面風化造成的小碎屑被水流帶走、及水流磨蝕為主。砂岩單壓強度約為 36~40 MPa，砂頁岩互層單壓強度介於 16~41.5 MPa。本區域節理並不發達。

5、集集攔河堰(濁水溪)

堰址附近區域岩層屬卓蘭層，以泥質細粒至粗粒混濁砂岩、粉砂岩，砂質頁岩及砂頁岩互層所組成。集集堰下游地層位態約為 N20W/40N。水流量小時，水流順著地層走向沿著槽溝較低處沖刷，水流量大時，採全面溢流沖刷。自攔河堰靜水池下游側約 300 公尺後，岩層位態受到初鄉斷層之影響出現劇烈變化。河道整體沖蝕狀況之主要特徵皆為沿岩層走向方向的槽溝狀差異侵蝕，岩性上以砂頁岩互層、頁岩下切幅度較大較深。砂岩單壓強度約為 30 MPa，砂頁岩薄互層之單壓強度約為 2 MPa。由於本區域有斷層通過，因此岩層有局部受大地應力影響所產生的剪力節理，以及解壓節理。

6、觸口攔河堰(八掌溪)

堰址附近區域屬於六重溪層，由泥質粉砂岩夾深灰色頁岩

或灰色砂質頁岩、泥岩組成。觸口堰附近的地層位態約為 N60E/10N，地層走向與水流流向大致平行。莫拉克颱風過後原左側混凝土牆多數已沖毀，堰體遭破壞淤埋，水流改道攔河堰外左側，基礎旁下切出一條新河道，岩層表面多為滑槽(flute)之沖蝕特徵。表面風化程度較低的粉土質泥岩單壓強度約為 10 MPa，表面風化程度較高的頁岩單壓強度約為 5 MPa。本區域並無明顯因應力環境所產生的節理，但頁岩表面多因風化而產生的解壓節理。從河床表面多圓滑滑槽(flute)以及大型塊體抽離痕跡，初步推測莫拉克颱風時此區域的水流對岩床的沖蝕作用應有兩項，(1)河床載對完整岩床的衝擊力造成岩塊碎裂，進而被水流帶走，(2)懸浮載對岩床表面的磨蝕作用，造成許多滑槽殘留。

7、曾文東口攔河堰(曾文溪)

東口堰附近地層屬中新世之鹽水坑頁岩，以巨厚、塊狀之頁岩為主，偶夾黃灰色砂岩或泥質砂岩。此區域水流流向大至與地層走向平行。東口堰前有一大型沖刷坑，由卵礫石所覆蓋組成。此區域地形高程左岸較右岸高出約 4~5 公尺，所以沖刷坑集中形成於河道右側，本區河道地形經比較民國 65 及 96 年航照無太大差異，顯示河道穩定性佳且沖刷坑亦無明顯變化。

8、甲仙攔河堰(高屏溪)

甲仙攔河堰附近地層屬中新世之鹽水坑頁岩，以深灰色頁岩為主，偶夾凸鏡狀粉砂岩或砂岩。本區岩層位態為 N45E/36S，經現地初步判釋，此區域水流流向與地層傾向相同，大約夾 10 度，屬於順向河類型。此區水流在靜水池前與河道岩床交界處有高程落差，水流的跌水效應在岩床上形成沖刷坑，為此區域岩盤主要的沖刷問題。新鮮頁岩層單壓強度約為 13~25

MPa。現地另有一薄層砂岩，單壓強度較高，為 28~42 MPa。八八水災造成甲仙攔河堰功能幾乎全毀，僅堰體受損較為輕微，莫拉克颱風後護坦全部損毀，但攔河堰下游河道於莫拉克颱風後變化並不劇烈，僅沖刷帶離覆蓋岩床上的卵石保護層，岩床本身似無明顯下切或拓寬情形。

(三)集集攔河堰下游岩盤之抗沖蝕能力調查

為進行攔河堰下游之岩盤沖刷機制與沖刷坑研究，除進行 8 座攔河堰的岩盤沖蝕普查工作外，並擇定集集堰進行抗沖蝕能力調查評估工作，工作項目包括水力特性(一維及二維)、岩石特性、沖蝕狀況、以及岩石力學參數等，工作數量整理如表 1-2 所示。

表 1-2 集集攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力調查工作數量表

工作項目	數量
(一)攔河堰下游水力特性分析	1 式
(二)沖蝕特性調查	1 式
(三)鑽探取樣及現地試驗	1 式
1.鑽探及取樣	50 公尺
2.孔內造影	40 公尺
(四)室內岩石試驗	1 式
1.物性試驗	12 組
2.消散耐久試驗	6 組
3.單壓試驗	6 組
4.張力試驗	6 組

鑽探岩心可分為 3 類：分別為層狀砂岩、頁岩偶夾砂岩，與砂頁岩互層。本計畫兩鑽孔層面位態大致上一致，代表本次鑽孔取樣並未鑽過斷層擾動帶。C01 鑽孔有 1 組節理面，C02 鑽孔共有 3 組節理面。

一般物理性質試驗結果詳見成果報告。單軸抗壓試驗包含 3 種岩性，分別為砂岩、頁岩與砂頁岩互層，試驗結果顯示，砂岩單壓強度最高(平均值 30 MPa)，其次為頁岩(平均值 10 MPa)，砂頁岩薄互層最弱(平均值 2 MPa，沿層面破壞)。切線模數與單壓強度比介於 100~300。巴西人試驗結果可看出砂岩與頁岩之張力強度差距不大，約為 1.6~1.75 MPa。砂頁岩互層則在 0.21~0.8 MPa。其他並依鑽孔資料以及岩石力學試驗結果，評估地表下方未受解壓節理影響岩層之抗沖蝕能力，折減反算出近地表之抗沖蝕能力指數，推估建議堰前之層狀砂岩近地表抗沖蝕指數採 645，砂頁岩互層採 8。地表下未受解壓節理影響之層狀砂岩採 842，砂頁岩互層採 41。

(四)攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力初步探討

本工作進行之目的主要在探討攔河堰下游岩盤局部沖刷及沖刷坑形成機制，以及岩盤之抗沖蝕能力。進行之方式採兩大工作方向同時進行的方式：(1)文獻回顧的方式歸納國外相關研究成果，包含工程會(89 年)、Bollaert and Schleiss(2003)、Spurr(1985)、Akhmedov(1988)、Whipple et al(2000)，(2)歸納整理本計畫攔河堰沖蝕特性調查以及抗沖蝕能力評估的工作成果。

本計畫藉由現地地質、堰前沖蝕特徵、以及資料蒐集比對，並參考既有相關研究文獻，綜合所調查八個攔河堰下游岩盤的沖刷機制，除了未出現沖刷岩盤情況的東口堰，可知當岩性均勻且節理又不發達時，岩盤沖刷問題相對較為單純。若河床岩盤係兩種以上岩層交錯出現的岩盤(如砂頁岩互層)，則必須釐清彼此間的互制行為，了解到底何種機制掌控了沖刷的速率，並釐清主控岩盤沖刷之岩層與因素。本研究調查發現的沖刷機

制歸納與簡化為 3 類沖刷模型：

1、塊體抽離型(義興壩)

此類沖刷現象乃由塊體抽離主控的沖刷形式，其特色是岩石強度較強，遠大於節理面強度，且節理發達。岩石強度強，代表水流作用力對岩盤本身材料的磨蝕較少，且較不易因撞擊產生新裂隙。當岩石強度遠大於節理面強度，節理又發達，則水流沖擊力、顆粒撞擊力、渦流及壓力波動皆會令既有節理延伸及連通。當節理連通造成塊體孤立後，經由水流拖曳力及裂縫間的水壓放大效應將塊體上舉脫離，其示意如圖 1-3。

2、均勻下切型(龍泉圳攔河堰、觸口攔河堰、甲仙攔河堰)

此類沖刷模式主要出現在厚層頁岩、砂頁岩互層中的頁岩或是強度較弱的砂岩及粉砂岩，其特色是岩石強度較弱，節理不發達。岩石強度弱，代表水流之床面剪應力對岩盤表層磨蝕的影響相對較大，節理不發達的岩體無特定之破壞面，水流沖擊力及顆粒撞擊力造成裂隙均勻產生，受到渦流及壓力波動之後岩盤表面產生岩石碎屑再被水流沖離，其示意如圖 1-4。

3、槽溝下切型(後村堰、石岡壩、集集攔河堰)

槽溝下切型主要出現在兩種以上岩層交錯出現的岩盤，通常為砂岩與頁岩交替出現的地層，岩層走向與河道平行或斜交，傾角又頗高，由於頁岩的沖蝕速率較快，當頁岩被侵蝕後，尚未侵蝕的砂岩孤立，失去了束制且凸顯範圍增加，放大了水流沖擊力、顆粒撞擊力、渦流及壓力波動對孤立砂岩的影響，造成撓曲斷裂，加速塊體脫離的潛能。若要合理簡化並掌握槽溝下切型的沖刷速率，只要掌握抗沖蝕能力較低的岩層乃主控沖刷之岩層的原則便可掌握沖刷坑之發展，其示意如圖 1-5。

1. 渦流及壓力波動造成節理連通，塊體抽離
2. 壩底附近受渦流影響，向下掏刷6 m，向內掏刷7.5 m

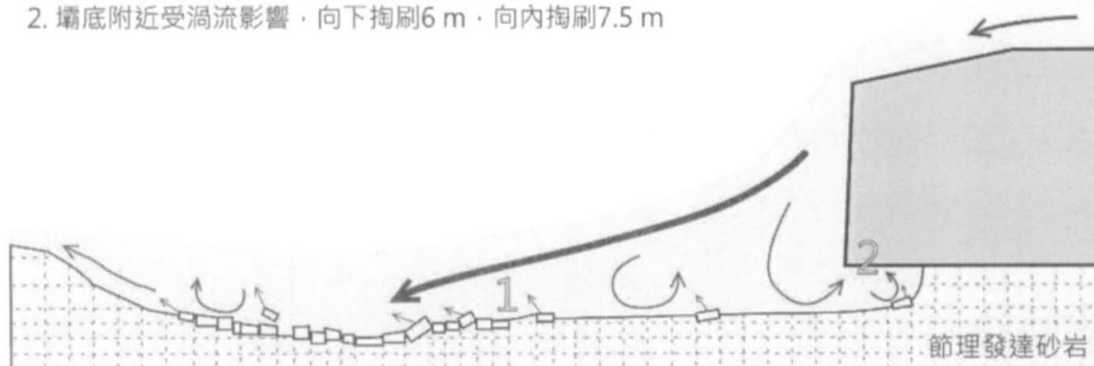


圖 1-3 塊體抽離型沖刷示意圖

- ① 水流直接衝擊岩盤，並向四周擴散形成渦流
- ② 渦流自頁岩表層逐層下切磨蝕，形成沖刷坑

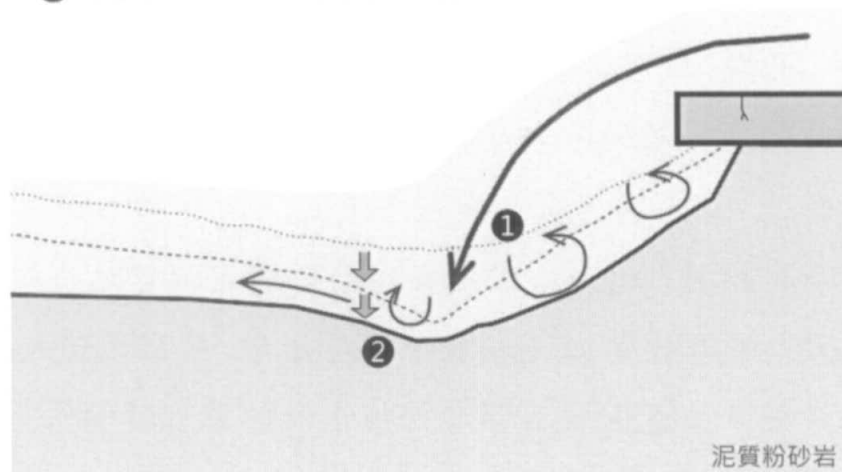


圖 1-4 均勻下切型沖刷示意圖

- ① 水流作用力直接沖擊岩盤，並擴散形成渦流
- ② 砂頁岩互層沖蝕速率較快，層狀砂岩失去束制後產生裂縫形成塊狀脫落

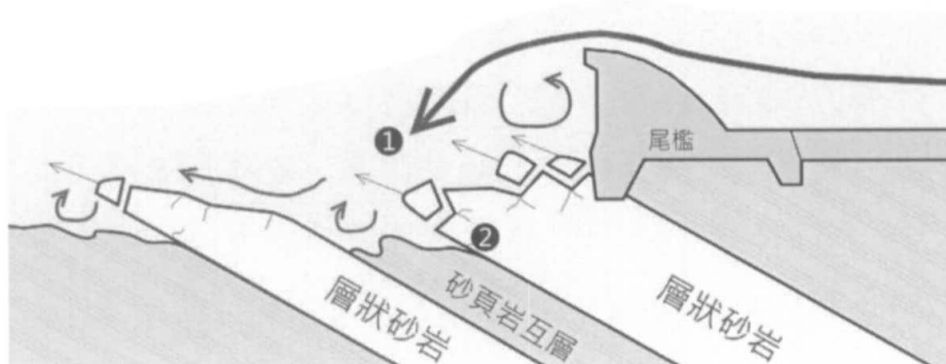


圖 1-5 槽溝下切型沖刷示意圖

(五)國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性初步探討

本工作之目的主要在蒐集國外之局部沖刷評估方式，探討這些方式用在評估台灣攔河堰下游岩盤局部沖刷之適用性。工作之順序將由國外之局部沖刷評估方式的分類評選開始，初步評選出適用性相對較高的方式後，再以本計畫之集集攔河堰進行實例探討分析，評估這些方式的適用性。

本計畫分別以 Annandale (1995, 2006)及 Bollaert (2002)岩盤沖刷評估方式針對集集堰及義興壩不同狀況下之攔河堰下方局部沖刷分析，就第 1(民國 98)年度所採用之國外局部沖刷評估方式於台灣適用性初步探討，Annandale 與 Bollaert 都各有其適用範圍，後續可就本計畫調查所得之沖刷坑發展狀況與機制探討其適用條件。Annandale 的岩體抗沖蝕指數評分法，初步用於估計集集攔河堰前的軟岩沖刷坑發展狀況，深度方面的量級趨勢大致均與沖刷資料及現地觀察吻合，本(民國 99)年度加入石岡壩的案例分析進行綜合探討。Bollaert 的評估方式考慮節理發達硬岩岩體中，水流壓力波動於裂縫間的放大效應所造成塊體上舉力，以及隨著沖刷坑下刷而逐漸增加的尾水深度所提供的消能效應，初步應用於分析義興壩的沖刷坑深度發展，尚能大致符合歷年沖刷量測資料變化的趨勢，後續仍須針對其限制條件、適用性及參數選用方式進一步檢驗與探討。

第貳章 相關研究文獻與資料補充蒐集

本計畫所調查之 8 座攔河堰之基本資料如表 2-1 所示，此 8 座攔河堰中除曾文東口攔河堰尚無明顯沖刷問題外(但有沖刷坑形成)，其餘均有程度不一的岩盤沖刷問題，詳細沖刷情形將於第參章說明。8 座攔河堰中石岡壩、集集堰屬於全斷面閘門控制式，後村堰、龍泉圳、東口堰、甲仙堰屬於局部(排砂道)控制式，而義興壩、觸口堰則屬於自由溢流堰。壩高以義興壩為最高，達到 25.5 公尺，而以觸口堰壩高為最低，僅 1.5 公尺，但觸口堰經過多次修復工程，壩高已經隨著沖刷坑的發展變為原始壩高的 3 倍左右。

本計畫已於第 1(民國 98)年度蒐集與整理 8 座攔河堰之區域地質資料、地形資料、水文資料、以及文獻資料等，目的為獲得各攔河堰附近的區域地質概況、攔河堰設計資料及下游區域初始地形與現況、颱風時期流量，另外亦歸納比較國外學者針對岩盤沖刷機制的研究及沖刷坑深度評估方式等資料，工作成果詳見第 1(民國 98)年度成果報告「第貳章 資料蒐集與整理」。

本(民國 99)年度延續第 1(民國 98)年度的資料蒐集成果，持續補充蒐集相關基本圖資、相關研究文獻及水文資料，其工作成果如下所述。

表 2-1 本計畫調查攔河堰基本資料表

編號	名稱	興建時間	所在河系	目前用途	壩高(m)	壩長(m)	堰壩形式	河床組成
1	後村堰 (已沖毀)	民國 72 年	大漢溪	已沖毀	3	556.3	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石及岩盤出露
2	義興壩	民國 62 年	大漢溪	攔砂壩 淤積嚴重	25.5	100	混凝土重力壩 靜水池式消能工	岩盤為主
3	石岡壩	民國 66 年	大甲溪	公共用水 農業用水	21.4	240	混凝土重力式堰 靜水池及階梯式消能工	卵礫石及岩盤出露
4	集集攔河堰	民國 90 年	濁水溪	公共用水 農業用水	15	352.5	混凝土重力式堰 靜水池及水泥護坦	卵礫石及岩盤出露
5	龍泉圳攔河堰	民國 71 年	烏溪	農業用水	3	80	混凝土重力式堰 混凝土塊護床工	卵礫石及岩盤出露
6	觸口攔河堰	民國 88 年	八掌溪	公共用水	1.5	72	自由溢流堰 增設多階靜水池	卵礫石及岩盤出露
7	東口攔河堰	民國 62 年	曾文溪	公共用水	約 5 公尺	220.8	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石為主
8	甲仙攔河堰	民國 88 年	旗山溪	公共用水	7	120	混凝土重力式堰 靜水池式消能工	卵礫石及岩盤出露

(本計畫綜合資料整理)

一、基本圖資

林務局農林航測所為國內地圖及航空影像圖資主要製作供應單位，本計畫已依據農林航測所網頁公告最新資料，於第 1(民國 98)年度購買 8 座攔河堰歷年重要的正射影像及航空照片，本(民國 99)年度已繼續補充購置至最新圖資。

基本圖資補充蒐集 8 座攔河堰最新的航空照片或正射影像，並與現有圖資進行比對判釋，將地形地物明顯變化之區域，提供作為後續抗沖蝕能力及沖刷機制補充調查之參考。本(民國 99)年度補充蒐集的正射影像資料如表 2-1 所示。

除此之外，本(民國 99)年度亦針對石岡壩下游岩盤沖刷機制、抗沖蝕能力分析、沖刷深度評估方法進行更深入之探討。藉由蒐集石岡壩從民國 65 年建壩之前之初始河況、建壩之後至九二一大地震前沖刷狀況，以及九二一大地震岩盤抬昇、副壩興建、93 年敏督利颱風(七二水災)、副壩水流集中工程等種種因素對下游岩盤影響之航空照片，判釋堰前沖刷坑演進過程及範圍，作為石岡壩下游岩盤沖刷機制、抗沖蝕能力分析之佐證，及後續沖刷穩定策略之建議及檢討。本(民國 99)年度補充蒐集之石岡壩航空照片如表 2-2 所示。

(一)石岡壩下游岩盤沖刷情形探討

本節探討由表 2-2 所蒐集之航空照片及正射影像，判釋自建壩初期(民國 66 年)至民國 98 年流路的變化、構造物的興建、921 地震的影響、歷年颱風的影響等對石岡壩下游岩盤沖刷所造成的變化，如表 2-3 所示。

表 2-3(b)為建壩完成後 21 年的航空照片，顯示下游河道在未受九二一地震抬昇前就已經有岩盤裸露的問題，堰前無明顯的沖刷坑形成。表 2-3(f)為九二一地震後兩年的正射

影像，此時副壩已經興建完成，堰前雖有沖刷坑，但是均勻的分佈在副壩前方，下游河道亦無明顯的主深槽出現。表 2-3(h)副壩損壞為民國 93 年敏督利颱風所造成，由正射影像可知，即使石岡壩經歷建壩以來最大洪峰流量 6,195 cms(流量單位：每秒立方公尺)，但堰前岩盤沖刷坑仍均勻發展，下游河道沒有明顯的深槽下切，說明副壩在沒有中央排水道的時候，並無局部深槽化之現象。表 2-3(i)為中央排水道施做完成後經過民國 95 年洪水事件後，下游的沖刷狀況。民國 95 年的最大洪峰流量僅為 1,227 cms，但中央排水道下方岩盤就已經明顯沖刷較副壩其他區域迅速，其原因可能為中央排水道將流量集中於 1 處，其流功會遠大於原本平均分攤於副壩的流功。表 2-3(k)說明中央排水道由於沖刷太過迅速，因此在下方新設了靜水池，此時沖刷坑因沖刷太過迅速且已經跟主深槽連接，造成沖刷坑尾端岩盤持續沖刷。表 2-3(l)為民國 98 年 10 月最新正射影像，此時沖刷坑已經與主深槽連結，形成 1 個狹長型的沖刷槽溝。根據本(民國 99)年度現地補充調查結果，由於中央排水道下游沖刷仍持續發展，民國 99 年 4 月已於中央排水道靜水池下方新設一固床工。

表 2-1 農林航測所圖資補充蒐集(正射影像)

壩(堰)名	圖號	圖名	密等	拍攝日期
後村堰	96221015	阿四坑	普通	971021
	96221015	阿四坑	普通	981019
	96221016	山佳	普通	971021
義興壩	96221085	小烏來(四)	普通	971129
石岡壩	95211081	石岡	普通	961029
	95211081	石岡	普通	971128
	95211081	石岡	普通	981021
龍泉圳	95212083	乾峰	普通	981212
集集堰	95201071	濁水吊橋	普通	981205
觸口堰	95194024	觸口	機密	990110
東口堰	94192020	曾文新村	普通	981101
甲仙堰	95193064	甲仙	普通	980808 後

表 2-2 石岡壩航空照片補充蒐集現況

照片編號	拍攝日期	備註	照片類別
65P80_144	65.12.18	建壩時流況	航空照片
66P75_403	66.11.11	石岡壩完工 1 個月	航空照片
66P75_405	66.11.11		立體對
74P98_9564	74.09.10	瞭解沖刷坑變化	航空照片
82P91_7845	82.08.16		航空照片
87P22_108	87.04.09	921 地震前	航空照片
87P22_109	87.04.09		立體對
88R64_139	88.09.22	921 地震後隔天	航空照片
88R64_140	88.09.22		立體對
91R063_130	91.09.16	補充 921 地震至 93 年 敏督利颱風期間變化	航空照片
93r030_004	93.07.10	敏督利颱風 副壩中間沖毀	航空照片
93r030_005	93.07.10		立體對
94R077_095	94.11.20		航空照片
95R037_168a	95.10.25	為瞭解副壩中間排水路 對沖刷坑之影響	航空照片
96R11_154	96.01.31		航空照片
96R11_155	96.01.31		立體對
95211081	96.10.29		正射影像
95211081	97.11.28		正射影像
95211081	98.10.21		正射影像

二、相關研究文獻

本(民國 99)年度針對國內外與研究區域或與攔河堰下方岩盤沖刷行為相關文獻、沖刷坑地形測量報告、沖刷坑附近地質圖、堰體構造物維修情形、災損情形進行補充蒐集，彙整入第參章各攔河堰補充調查資料中。國內相關文獻資料如：

- (一)經濟部水利署中區水資源局，「年度石岡壩安全檢查總報告」，民國 95，96，97 年。
- (二)經濟部水利署中區水資源局，「96 年度石岡壩庫區淤積測量測量報告」，民國 96 年。
- (三)經濟部水利署水利規劃試驗所，「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(1/4, 2/4)」，民國 97，98 年。
- (四)經濟部水利署南區水資源局，「甲仙堰第一次安全評估報告」，民國 98 年。
- (五)經濟部水利署中區水資源局，「集集攔河堰初次使用安全評估」，民國 98 年。
- (六)經濟部水利署中區水資源局，「98 年度石岡壩庫區淤積測量測量報告」，民國 98 年。

本計畫於針對國外沖蝕坑深度評估方式進行彙整與比較，評選出較可能應用於台灣的 5 種評估方式，分別為 Akhmedov(1988)、Annandale (1995, 2006)、Bollaert (2002)、P.Q Liu (2005)、Spurr(1985)等學者所提出，其中又以 Annandale(1995, 2006)、Bollaert(2002)兩位學者所提出的沖刷深度評估法較為國際上所普遍採用，本計畫於後續章節亦針對這兩位學者的沖刷深度評估方法於台灣之適用性進行探討。補充蒐集國外相關文獻的方向分為 2 個部分，(1)補充蒐集岩盤沖刷深度評估方式、攔河堰下方水流作用力評估方法、及抗沖蝕能力評估方法等最新研究成果。

(2) Annandale(1995, 2006)、Bollaert(2002)冲刷深度评估法，國外之實際應用案例。

(一) 補充蒐集冲刷坑深度之評估方式

大陸學者 Pei-Qing Liu 於 2005 年認為可將冲刷坑之發展，視為水躍發生在逆坡之行為，利用動量方程式來計算能量損失之影響。他首先引用 Beltaos and Rajaranam(1977)之成果，利用尾水高度、流體寬度及投入角度之關係，計算跌水之能量損失。再假設冲刷坑之形狀為一等斜之坡度，以簡化各作用力之相對關係，取用冲刷坑最大深度及原始岩盤面為邊界，邊界之水壓力為靜態分佈，作用力之估算及方向示意圖如圖 2-1 所示，進行力平衡計算。

$$m = 0.5 \left(1 + \frac{h_t - 5.5 D_0 \sin \beta}{8.3 h_0 \sin \theta - 5.5 h_0 \sin \theta} \right) \dots\dots\dots(2-1)$$

$$\left(\frac{h_2}{h_3} \right)^2 = 1 + \frac{2qV_1}{Bgh_2^2} - \frac{2qV_2}{Bgh_2^2} \dots\dots\dots(2-2)$$

令 $V_2 = kV_1$ ，

$$V_1 = \varphi \sqrt{2gH}$$

$$h_3 = \frac{T}{\cos \alpha} \quad h_2 = \frac{h_t}{\cos \alpha}$$

$$K_t^2 = \frac{2\sqrt{2}\varphi_1(1-k)\cos\theta}{(1-\eta_p)}$$

則式 2-1 則可改寫如式 2-3 所示：

$$D = \sqrt{h_t^2 + k_t^2 \frac{q\sqrt{H}}{g}} \dots\dots\dots(2-3)$$

式中：

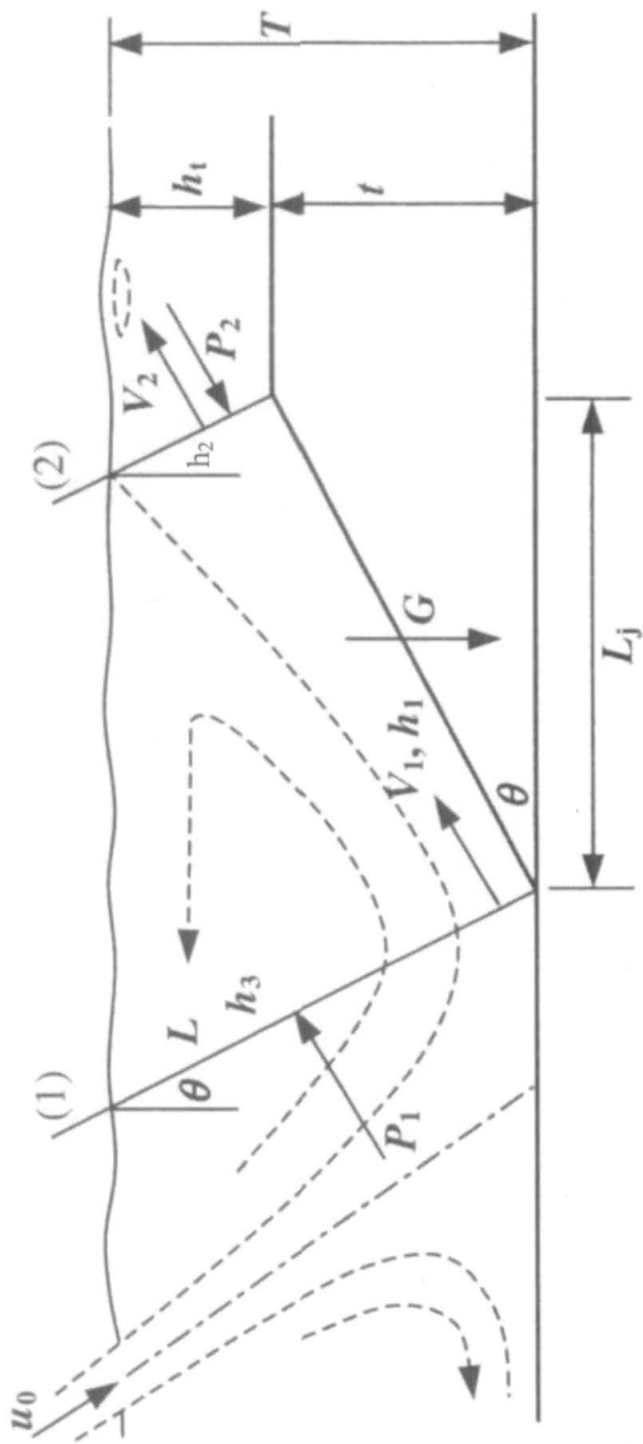
m：射流擴散形狀因子、D:沖蝕深度及尾水深度之和、 h_t ：尾水深度、 ϕ ：能量修正因子、k：流速修正因子、 ηp ：靜態水壓修正因子、q：單寬流量、 V_t ：斷面處流速、 α ：沖蝕面角度、 h_3 ：最大沖刷深度之切線長、 h_2 ：原始岩盤面水深之切線長、 D_0 ：射流初始直徑、 β 為射流入射角度、 θ 為逆坡角度。

由式 2-3 可知唯一之未定數為 K_t^2 ，由其定義可知其為在此特定形狀下之水流能量折減函數。將水流能量折減之部份視為力量由水體傳遞至岩盤之作用外力，其能量折減之比率受到流體擴散程度影響，同時隨著沖刷深度之增加而增大。沖刷深度之增加速度則受岩盤條件影響，以 K_e 代表岩盤之抵抗能力，數值愈大則代表岩體抵抗能力愈差， K_e 之值藉由三峽大壩之現地觀測資料回歸而得，其值示如表 2-4。再將所得之 K_t^2 代回式 2-3 則可據以計算不同流量及跌水高度之沖刷深度。

$$k_t^2 = k_e^2 \left(\frac{T}{D_0 \sin \beta} \right)^{-m} \dots\dots\dots(2-4)$$

表 2-4 岩盤沖蝕抵抗能力(K_e)分類表(Liu, 2005)

Catalog	Properties of bed rock	K_e	
		Range	Mean
Type I: High erosion resistance	Mega-block, non-jointed, closed fracture, non-fault	0.8-2.0	1.4
Type II: Mid erosion resistance	Big block, jointed, open fracture, less filled	2.0-3.2	2.6
Type III: Low erosion resistance	Cataclasis structure, well jointed, most open fracture, partly filled, fault	3.2-4.5	3.9
Type IV: Extra low erosion resistance	Cataclasis structure, well jointed, full open fracture, filled with clay, fault	4.5-6.4	5.6



(1) Momentum equation

$$P_1 - P_2 - G \sin \theta = \frac{\gamma q}{g} (V_2 - V_1)$$

(2) Hydrostatic pressure distribution

$$P_1 = \eta \frac{\gamma}{2} h_3^2 \cos \alpha$$

$$P_2 = \eta \frac{\gamma}{2} h_2^2 \cos \alpha$$

(3) Gravity force term

$$G = \gamma \times A$$

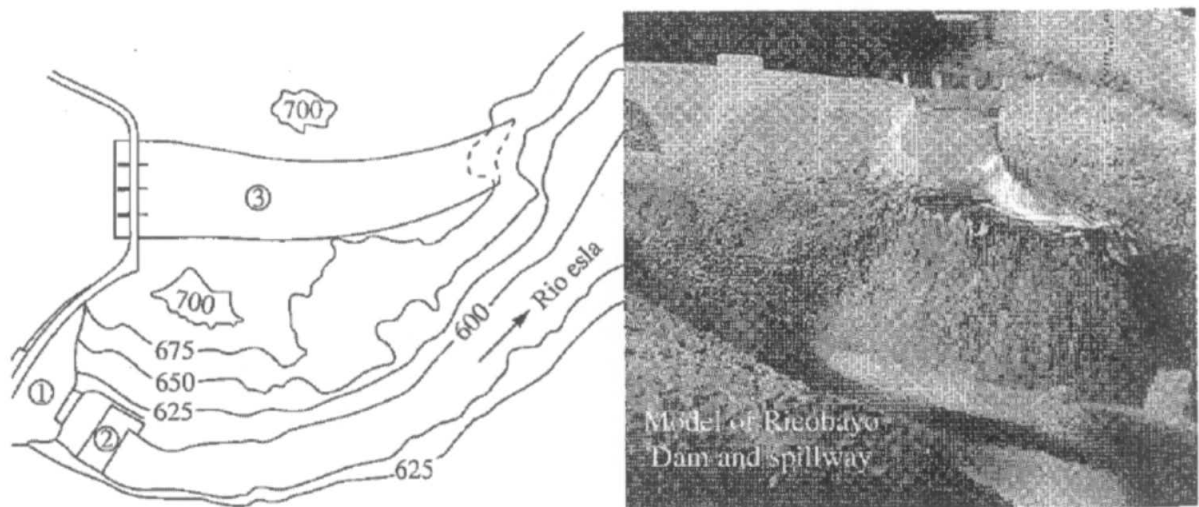
$$A = \frac{1}{2} (h_3 + h_2) \times \frac{L_j}{\cos \theta}$$

$$L = \frac{\cos^2 \theta}{\sin \theta} (h_3 - h_2)$$

圖 2-1 水躍發在逆坡之作用力示意圖(Liu, 2005)

(二) 西班牙 Ricobayo Dam 溢洪道冲刷坑案例

西班牙 Ricobayo Dam 位於 Duero River 的支流 Esla River 上，為高度 99 公尺的拱壩，包含 1 座溢洪道，完工於西元 1933 年，水壩及溢洪道平面佈置圖如圖 2-2 所示。溢洪道位於左壩座，長度 400 公尺，坡降約 0.45%，設計排洪量為 4650 cms，直接座落於無襯砌之岩盤上，溢洪道尾端為斷崖，直接將洪水排放回 Esla River。



①為拱壩，②為水力發電廠，③為溢洪道

圖 2-2 Ricobayo Dam 平面佈置圖及水壩模型(Annandale,2006)

Ricobayo Dam 溢洪道位於花崗岩層之上，地質圖如圖 2-3 所示，附近構造包含 1 條斷層及 1 條背斜構造，斷層通過處有密集剪裂痕跡，岩層破碎。附近區域共計有 2 組主要節理，A 組包含 A 及 A'，均為接近垂直之高角度節理，B 組包含 B 及 B'，角度較為水平。A 及 B 組節理中以 B 組較為連貫持續。兩組節理沿溢洪道地形剖面之分佈型態如圖 2-4 所示。

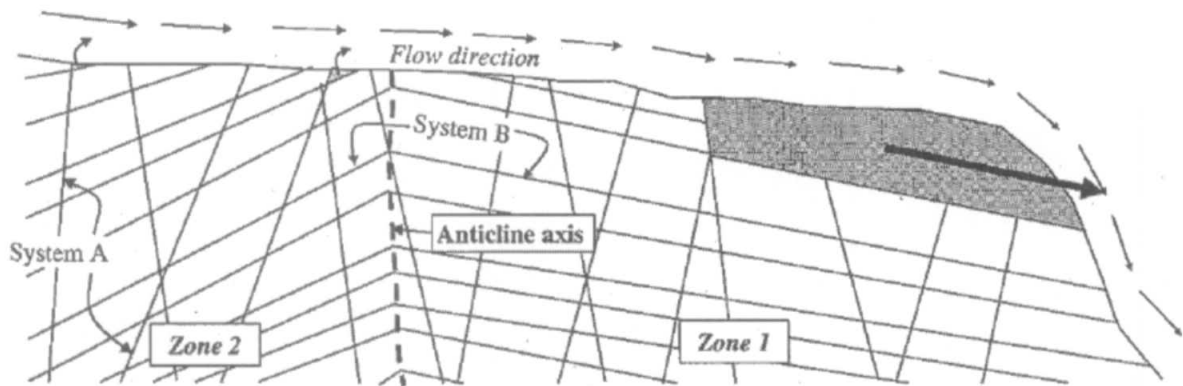


圖 2-3 沿溢洪道地形剖面之節理分佈型態示意圖

(Annandale,2006)

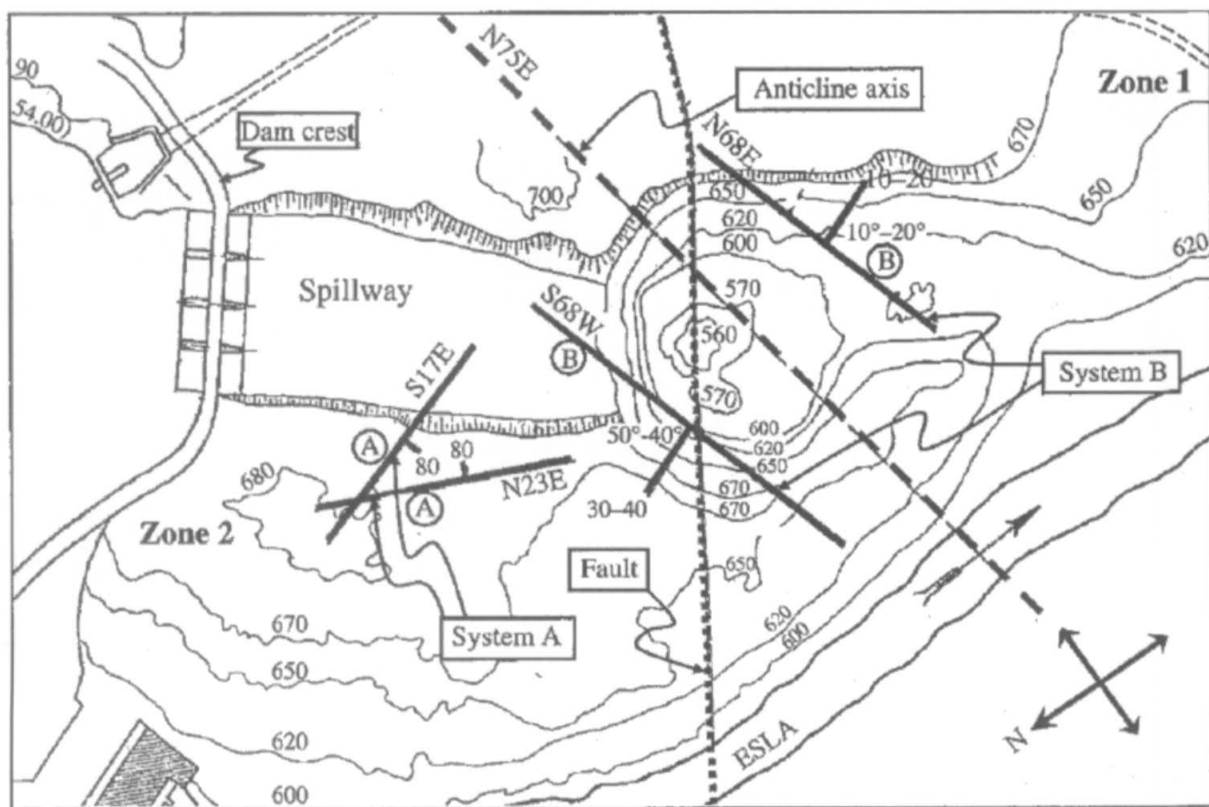


圖 2-4 Ricobayo Dam 溢洪道附近地質圖(Annandale,2006)

Ricobayo Dam 完工營運後隨即發生 5 次沿溢洪道的重大岩盤沖刷事件，沖刷範圍示意圖標示於沿溢洪道之地形剖面圖上，如圖 2-5 所示。發生時間分別是西元 1934 年 1 月(洪峰流量 100

cms)、1934 年 3 月(洪峰流量 400 cms)、1935 年 3 月(洪峰流量 1000 cms)、1936 年 3 月(洪峰流量 1280 cms)。圖中可看出沖刷範圍受到構造及節理影響，背斜軸右(南)側沖刷屬水平方向發展(事件 2 及 3)背斜軸左(北)側沖刷則為垂直方向進行(事件 4)。

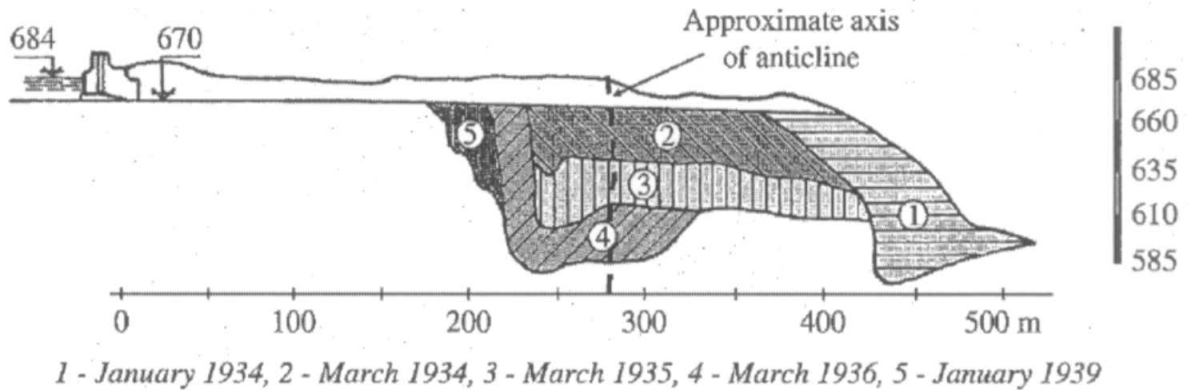


圖 2-5 Ricobayo Dam 溢洪道地形剖面沖刷範圍示意圖
(Annandale, 2006)

Annandale 於西元 2005 年至 Ricobayo Dam 進行現地勘查並蒐集壩址地質資料進行抗沖蝕能力評分，評分結果如表 2-5 所示，花崗岩地層抗沖蝕能力區分為高、低 2 種係由節理裂隙平均 5 毫米及最高 10 毫米所造成，計算混凝土材料抗沖蝕能力則是溢洪道跌水池曾採用混凝土襯砌進行保護，所以進行計算與岩盤材料進行比較，混凝土材料的抗沖蝕能力區分高、低 2 種則是由於早期之保護工程已無法確認混凝土採用之強度所造成。

圖 2-6 及圖 2-7 分別為針對 1935 年及 1936 年兩場洪水沖刷事件所進行的抗沖蝕能力與洪水沖蝕能量比較表。1935 年洪水中，溢洪道跌水池之高程由 640 公尺降低至 600 公尺，1936 年洪水中則由 600 公尺降至 570 公尺，其洪水沖刷能量隨跌水池深度增加而降低，直至岩盤抗沖蝕能力可以抵抗沖蝕能量而

停止，結果大致與現地沖蝕資料量測相吻合。

表 2-5 Ricobayo Dam 之 K_h 調查與沖刷門檻值計算表
(Annandale, 2006)

Unit	UCS (Mpa)	M_s	RQD	J_n	K_b	J_r	J_a	K_d	J_s	Erodibility index (K)	Resisting power (kW/m^2)
Granite-zone 2-high	75	75	70	2.73	25.64	1.50	2	0.75	0.5	721.15	139.16
Granite-zone 2-low	75	75	70	2.73	25.64	1.50	4	0.38	0.5	360.58	82.75
Concrete (high)	35	35	100	1.5	66.67	3.00	1	0.58	1	1347.15	222.36
Concrete (low)	15	15	100	1.5	66.67	3.00	1	0.58	1	577.35	117.78

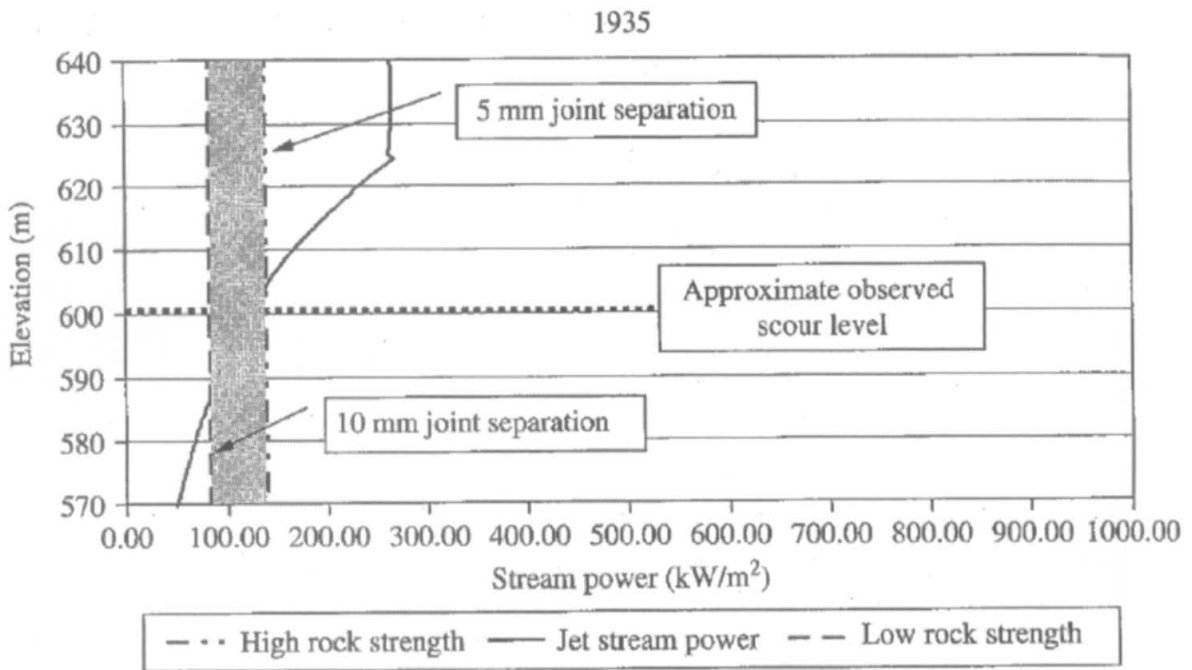


圖 2-6 1935 年溢洪道沖刷岩盤沖刷門檻值與洪水能量比較圖

(Annandale, 2006)

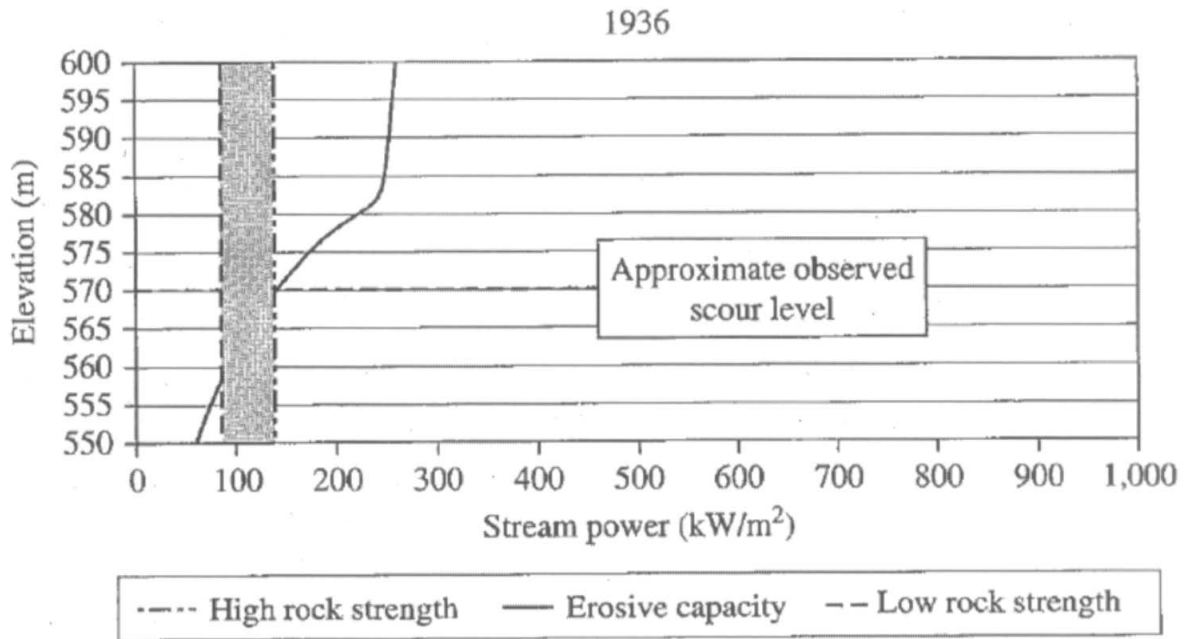


圖 2-7 1936 年溢洪道沖刷岩盤沖刷門檻值與洪水能量比較圖

(Annandale, 2006)

三、水文資料

基於研究需要，本計畫進行收集目標攔河堰鄰近河段之水文測站之水文資料。由於台灣目前攔河堰建造物皆有實測水位流量或率定曲線可供參考，因此研究分析採用之水文資料將以石岡壩攔河堰管理中心提供之實測資料為主。以下針對本(民國 99)年度探討重點大甲溪石岡壩鄰近河段之水文資料與收集概況進行說明。

大甲溪主流共有松茂、久良栖、天輪、天冷及白鹿橋等五個水文觀測站，流域水系之水文測站位置如圖 2-8 所示，歷年水文資料觀測列表如表 2-6 所示，石岡壩附近河段及斷面如圖 2-9 所示。根據民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討(河口至天輪壩下游河段)」，大甲溪各河段重現期距洪峰流量如表 2-7、圖 2-10 所示，石岡壩(斷面 36)之計畫流量為 8,800 cms，斷面 68 以下河段公告以 100 年重現期距洪峰流量為計畫流量，以上河段水規所現階段之實施計

畫以 25 年重現期距洪峰流量為計畫流量，但尚未辦理公告。石岡壩歷年洪峰流量如表 2-8 所示，實測流量水位如圖 2-11 所示。

泥砂資料方面，依據民國 96 年「石岡壩清淤及排砂作業之研究」分析，由於白鹿橋站資料僅觀測至民國 92 年，因此取九二一地震後(民國 89~92 年)實測資料進行流量、輸砂量之迴歸，製作率定曲線如圖 2-12 所示。

表 2-6 石岡壩河段鄰近水文測站歷年資料統計

站名	紀錄年份			所屬流域
	流量	水位	含砂量	
白鹿橋	1979~2003	1978~2004	1978~2003	大甲溪
天冷	1993~2001	1993~2001	1993~2001	
石岡	1963~迄今	1963~迄今	1963~迄今	

表 2-7 大甲溪各重現期距洪峰流量

控制點	重現期距 (年)(單位:cms)							
	200	100	50	25	20	10	5	2
河口	11,500	10,300	8,900	7,570	7,300	5,900	4,500	2,600
石岡壩	9,800	8,800	7,600	6,430	6,200	5,000	3,800	2,200
天冷	8,840	8,000	6,900	5,820	5,600	4,500	3,400	1,980
橫流溪匯流前	8,490	7,630	6,590	5,570	5,370	4,330	3,290	1,910
東卯溪匯流前	7,850	7,050	6,090	5,160	4,970	4,010	3,040	1,760
民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討(河口至天輪壩下游河段)」								

表 2-8 石岡壩歷年發生最大流量統計表

年別(民國)	最大洪峰流量(cms)		年別(民國)	最大洪峰流量(cms)	
52	7,840	*	76	978	@
53	358	*	77	315	@
54	1,570	*	78	3,062	@
55	2,990	*	79	2,788	@
56	1,440	*	80	835	@
57	1,110	*	81	1,419	@
58	2,710	*	82	1,542	@
59	3,940	*	83	4,140	@
60	2,030	*	84	663	@
61	4,540	*	85	3,668	@
62	1,120	*	86	2,106	@
63	2,040	*	87	933	@
64	927	*	88	484	@
65	2,940	*	89	790	@
66	2,290	*	90	3,954	@
67	635	@	91	709	#
68	1,647	@	92	594	#
69	3,119	@	93	6,195	#
70	3,149	@	94	3,541	◎
71	1,527	@	95	1,227	◎
72	3,361	@	96	2,589	◎
73	896	@	97	4,225	◎
74	2,411	@	98	5,621	◎
75	983	@			

資料來源：*民國 52~66 年採石岡站實測流量(大甲溪治理規劃報告，民國 82 年)；@民國 67~90 年採石岡壩實測最大入流量(大甲溪流域聯合整體治理規劃，民國 92 年)；
#民國 91~93 年採石岡壩操作紀錄最大洩洪量(石岡壩管理中心提供資料)。
◎民國 94~98 年採石岡壩操作紀錄最大洩洪量(石岡壩管理中心提供資料)

(大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究1/4，水規所，民國97年)



圖 2-8 大甲溪水系與水文測站位置圖

(資料來源：大甲河流域聯合整體治理規劃檢討成果報告，民國94年)

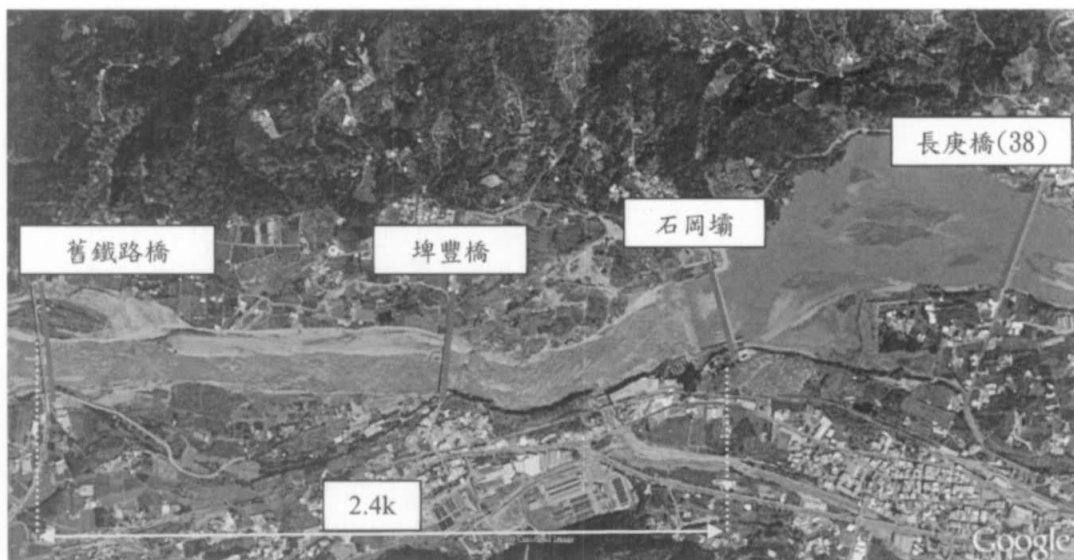
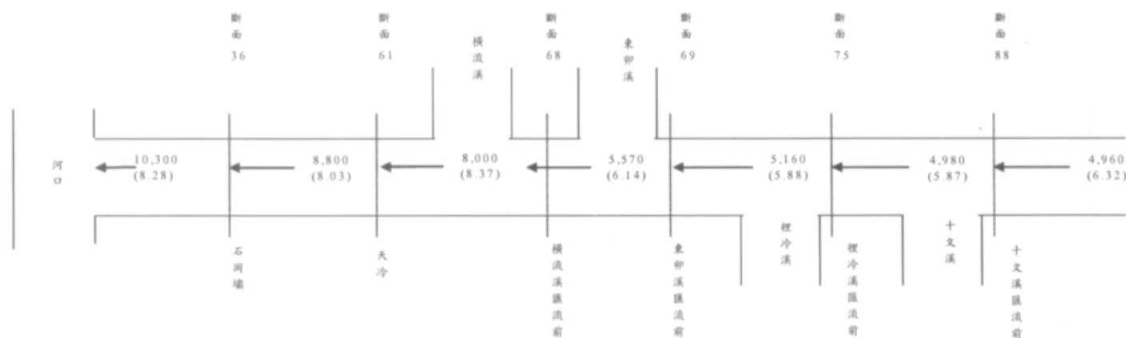


圖 2-9 大甲溪石岡壩附近河段及斷面



註：1. 上行為計畫流量(立方公尺/秒)。
 2. 下行()內為相對比流量(立方公尺/秒/平方公里)
 3. 計畫洪水量，斷面68以下河段採用100年重現期距，斷面68以上河段採用25年重現期距

圖 2-10 大甲溪各河段計畫流量(單位：cms)

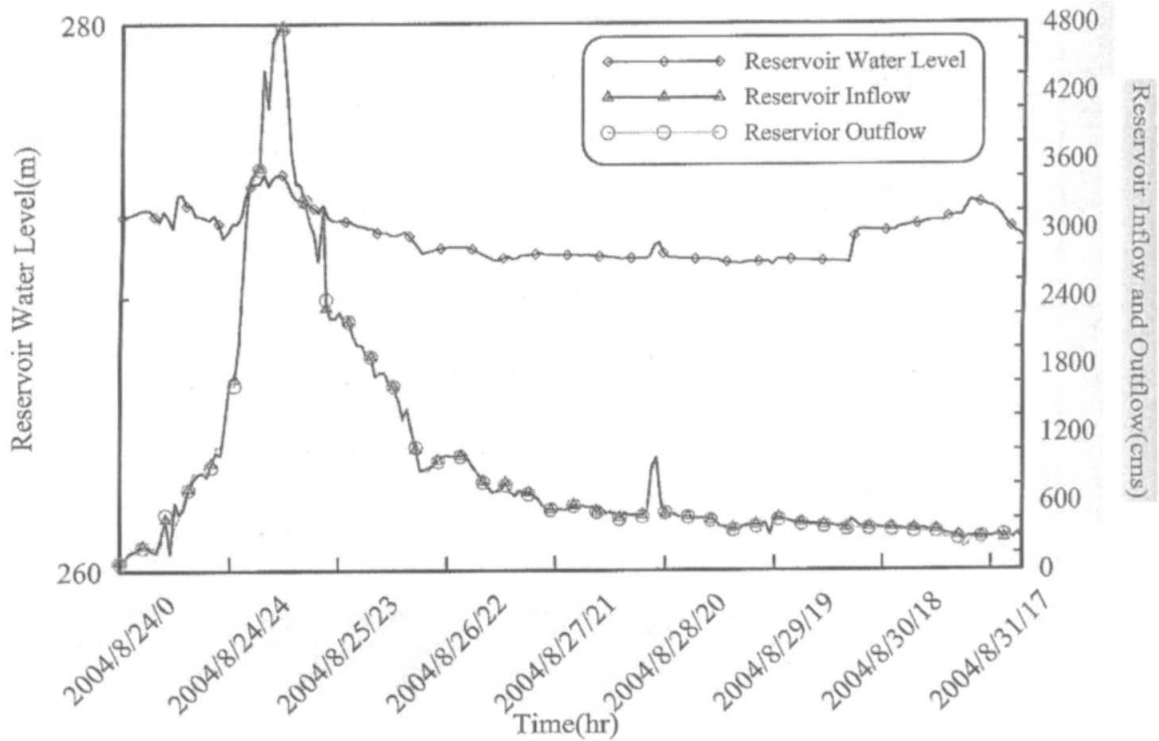


圖 2 - 11 石岡壩艾莉颱風實測流量水位

(資料來源：大甲河流域防洪預警系統先期規劃，民國95年)

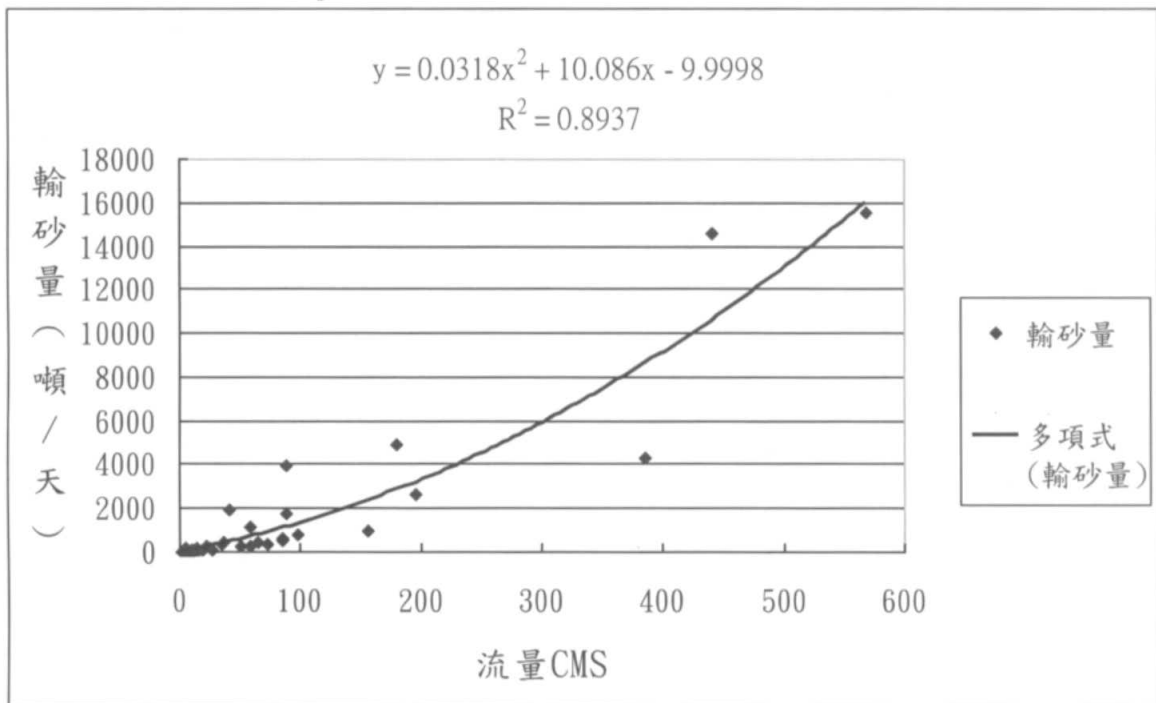


圖 2 - 12 白鹿橋站流量與懸浮載輸砂量迴歸曲線圖

(資料來源：大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(1/4)，民國97年)

第參章 西部重要攔河堰之岩盤局部 沖蝕特性補充調查

為探討攔河堰下游岩盤沖刷之評估方法，本計畫於第 1(民國 98)年度之調查工作乃針對西部重要攔河堰岩盤局部沖蝕特性進行普查工作，內容包括後村堰(大漢溪)、義興壩(大漢溪)、龍泉圳攔河堰(烏溪)、集集攔河堰(濁水溪)、觸口攔河堰(八掌溪)、東口攔河堰(曾文溪)、及甲仙攔河堰(高屏溪)等 8 座攔河堰之岩性種類、地層位態與水流流向關係、水流狀況與沖蝕特徵、岩石強度、節理狀況、節理風化程度、節理面粗糙程度及填充物狀況，其成果已呈現於第 1(民國 98)年度成果報告中。

延續第 1(民國 98)年度工作成果與調查經驗，本(民國 99)年度進行查察各攔河堰是否產生新的沖蝕特徵，並檢核第 1(民國 98)年度調查之沖蝕特徵是否完整涵蓋，所以進行本沖蝕特性補充調查工作。

調查對象將以攔河堰前之岩盤為主，瞭解沖刷範圍的岩盤特性，若堰前狀況水流深急、或受到砂石覆蓋不適合調查進行調查時，則透過文獻資料及航空照片判釋結果，或附近區域露頭的岩層位態的延伸，調查與沖刷坑相同岩性之岩層。調查內容擬包含是否發生沖蝕、其沖蝕位置、沖蝕現象與特徵、沖蝕規模、水流條件、岩性、及地層位態等。本補充調查工作之調查項目包括：

- 1、岩性種類。
- 2、地層位態與水流流向關係。
- 3、岩石強度：藉史密特錘量測以估計岩石強度。
- 4、調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物。
- 5、沖刷特徵探討：根據以上現地調查資料，評估攔河堰下游岩盤的抗沖蝕能力指數(Annandale, 2006)。並輔以本(民國 99)年度所補充蒐集各攔河堰航空照片，綜合評估攔河堰下游岩盤沖刷位

置、規模及特徵。另外不定期在每 1 座攔河堰以固定的方位及角度拍攝照片，作為沖刷特徵之比對資料。

本工作項目之沖蝕特性補充調查成果將用來驗證第 1(民國 98)年度所歸納之沖刷機制是否完備，以及各沖刷機制之主控因子。這些成果將於後續工作項目「攔河堰下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析」做歸納探討。本計畫所提及的「沖蝕」、「沖蝕規模」、「沖蝕位置」，是指水流流經攔河堰或附屬構造物(如靜水池尾檻、副壩)後，造成的下游岩盤形成沖刷坑或槽溝之沖刷行為。

一、後村堰(大漢溪)

後村堰於民國 67 年發包，至民國 72 年全部完成，位於大漢溪上游距離鳶山堰 6 公里處，位置如圖 3-1 所示。主要用途為抬高該區域水頭，確保灌溉農業用水無虞，並用以滿足板新及石門地區公共給水。後村堰堰址大漢溪河道寬闊，河寬近 1 公里，河道坡度則約為 1/300。民國 93 年 8 月艾利颱風，後村攔河堰堰體遭洪水侵蝕流失約 100 公尺長，並形成深 15 公尺之深水河槽。後村堰民國 98 年照片如圖 3-2 所示，方框為堰體破損部分。

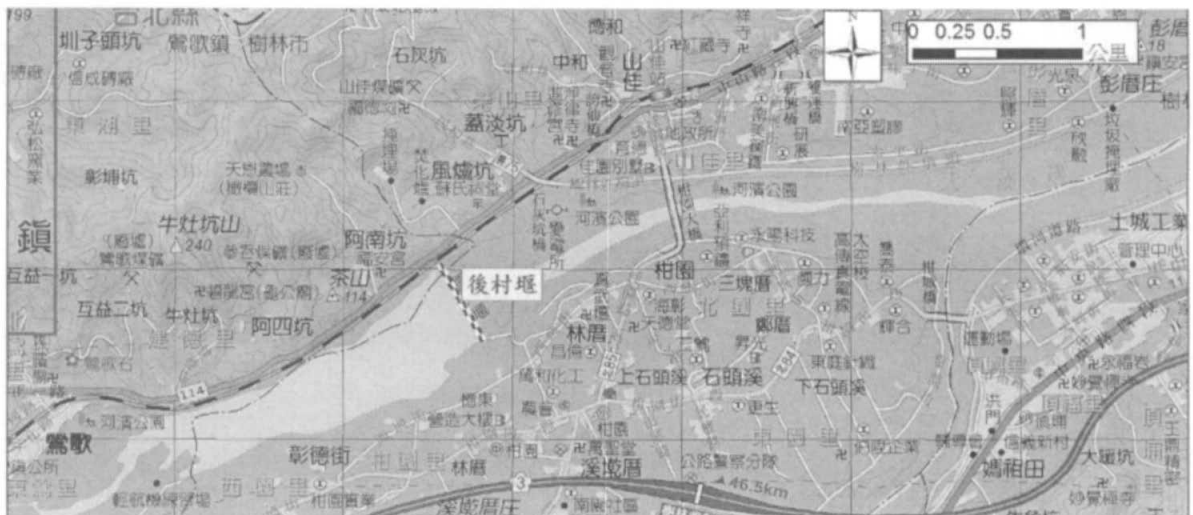


圖 3-1 後村堰位置圖



圖 3-2 後村堰 98.08.03 照片

(一) 岩性種類

後村堰附近之地層為南莊層，以白色及白灰色層狀細粒至粗粒砂岩、砂頁岩薄互層為主，夾有深灰色頁岩及煤層。砂岩膠結疏鬆，具有交錯層、波痕、砂棒等構造，並含有多量之碳質物或煤線，屬於濱海環境之沉積。

經現地調查判釋，後村堰堰址及上下游主要岩性以極厚層砂岩、極厚層砂頁岩互層兩者的互層所組成。岩層層厚定義(陳汝勤與莊文星，民國 81 年)，如表 3-1 所示。次要岩性為砂頁岩薄互層、粉砂岩、泥質頁岩與砂岩等 4 種。圖 3-3 為現地岩性判釋拍攝之照片。

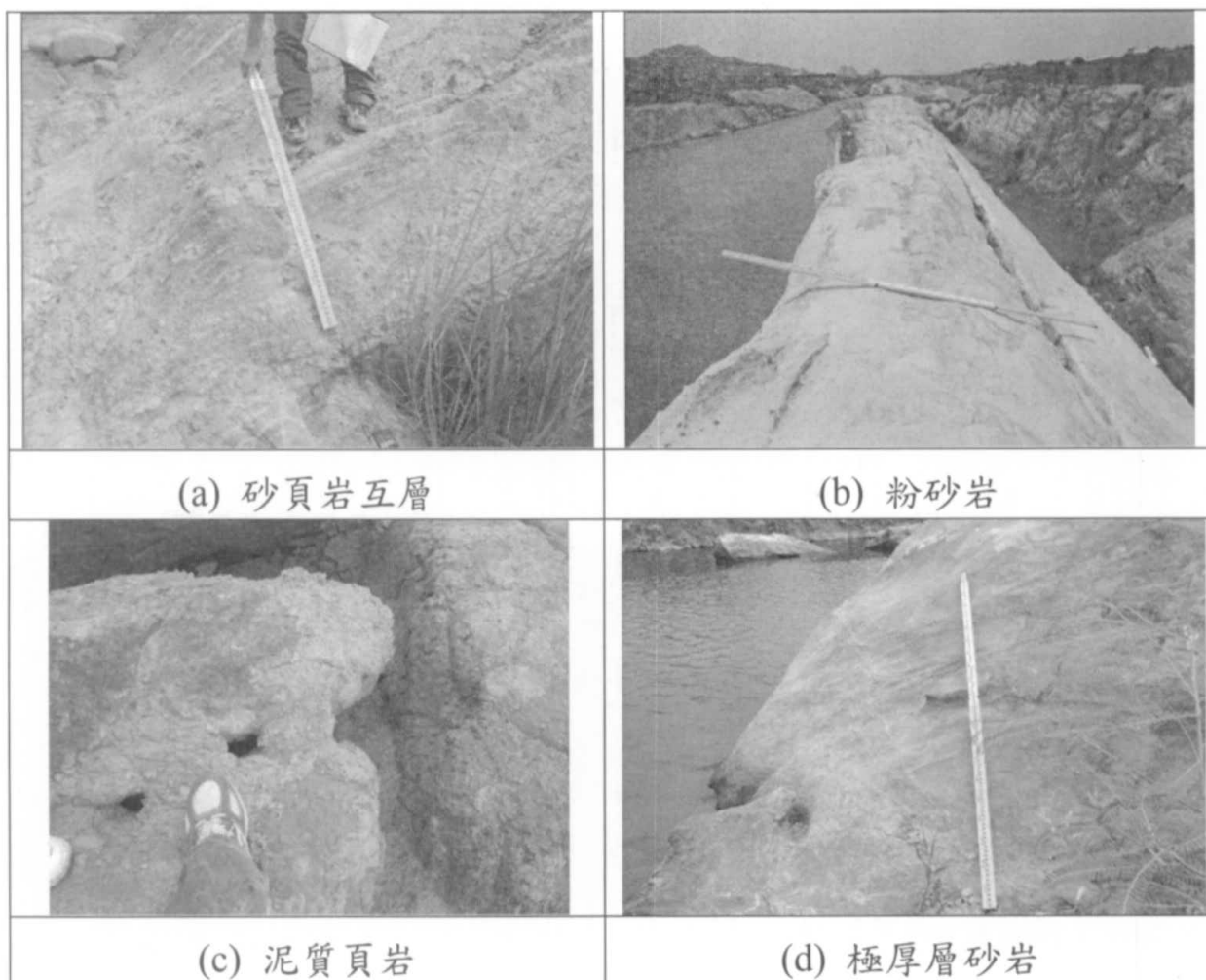


圖 3-3 後村堰現地岩性露頭照片

表 3-1 岩層層厚定義

岩層厚度描述	層厚尺度
極厚岩層	厚度 > 1 m
厚岩層	30~100 cm
中厚度岩層	10~30 cm
薄岩層	3~10 cm
極薄岩層	1~3 cm
厚葉層	0.3~1 cm
薄葉層	厚度 < 0.3 cm

(二)地層位態與水流流向關係

於後村堰現地岩盤露頭調查結果，堰址附近之地層平均位態 N68E/52S，岩層之走向與水流流向幾近平行。後村堰現地之露頭量測位置包含第 1(民國 98)年度調查堰址位置與本(民國 99)年度，其量測位置如圖 3-4 所示。後村堰之岩層分層與描述則如表 3-2。

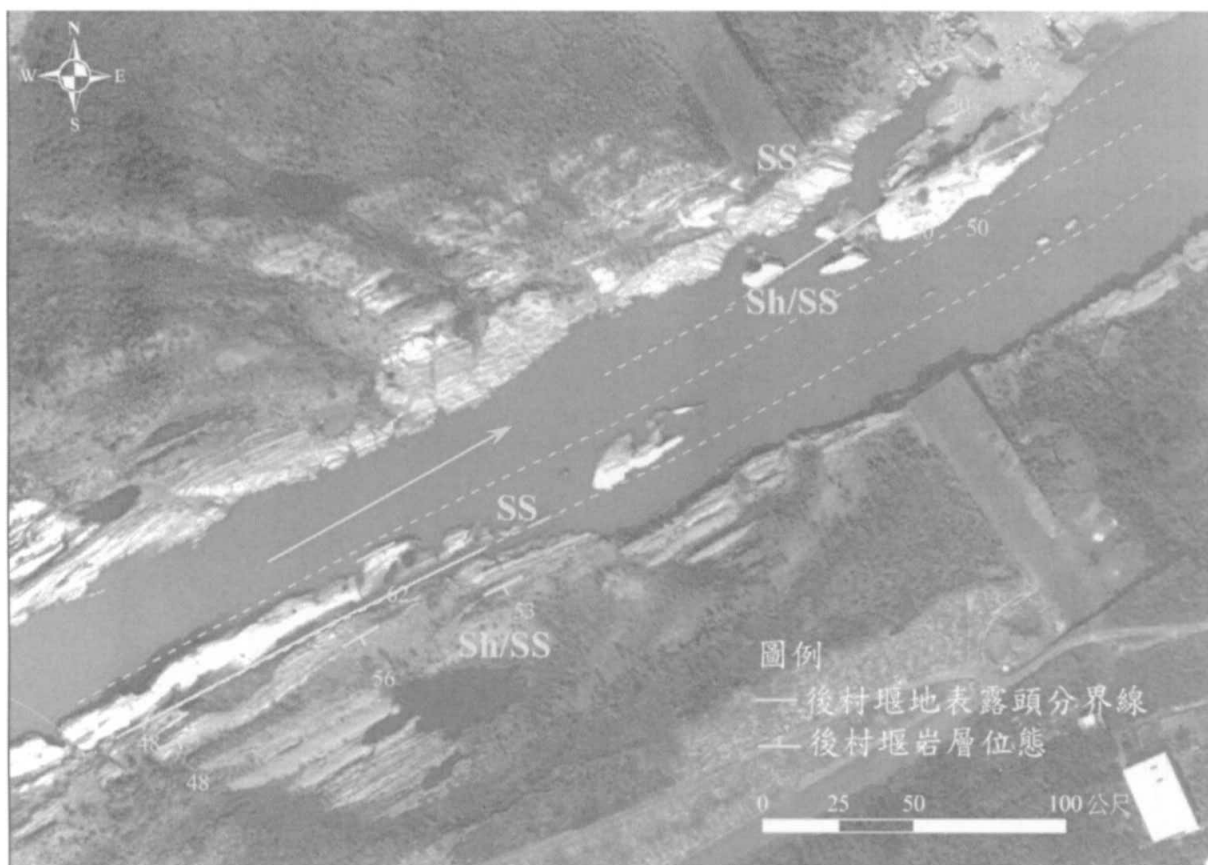


圖 3-4 後村堰地表地質圖

表 3-2 後村堰堰址岩層分層與描述

分層	岩性	地層描述
Sh/SS	砂頁岩薄互層	以砂岩及頁岩之薄葉狀互層為主，偶夾煤層。此層含一層厚約 0.5 m 之厚砂岩層偶夾薄頁岩層。
SS	極厚層砂岩	此層為灰白色極厚層砂岩層，低度風化，節理不發達。

(三) 岩石強度

本團隊使用瑞士 PROCEQ BL Type 史密特錘加上 Silver Schmidt BN 試驗錘，用來估計現地岩石之單壓強度(符合 ASTM C 805 規範)。依據現地史密特錘量測結果，節理較不發達之極厚層砂岩與極厚層粉砂岩單壓強度約介於 10~20 MPa。現地單壓強度推估值最低則為薄砂頁岩互層，其單壓強度落於 5~10 MPa 之間，有時因表面風化程度高、節理發達造成破碎而使得單壓強度低於 3 MPa。

(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物

後村堰下游岩盤常見的岩性之弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物調查結果如下：

- (1) 砂岩及粉砂岩：節理不發達且風化程度低，節理面緊密接合且堅硬，少數節理可發現鏽染，節理面之粗糙度大致上呈現平滑平面狀，內無填充物，如圖 3-5(a)。
- (2) 泥頁岩：節理不發達，且表面受乾濕循環鬆軟龜裂、風化程度高較無法調查出節理面狀態，如圖 3-5(b)。
- (3) 砂頁岩互層：此區砂頁岩互層可分為厚砂岩偶夾薄頁岩層與砂頁岩薄互層，兩者的節理均不發達，弱面主要為互層間的層面，層面閉合、無鏽染，粗糙度為平滑平面狀，內無填充物，風化程度視頁岩含量而定，如圖 3-5 (c)、圖 3-5 (d)。

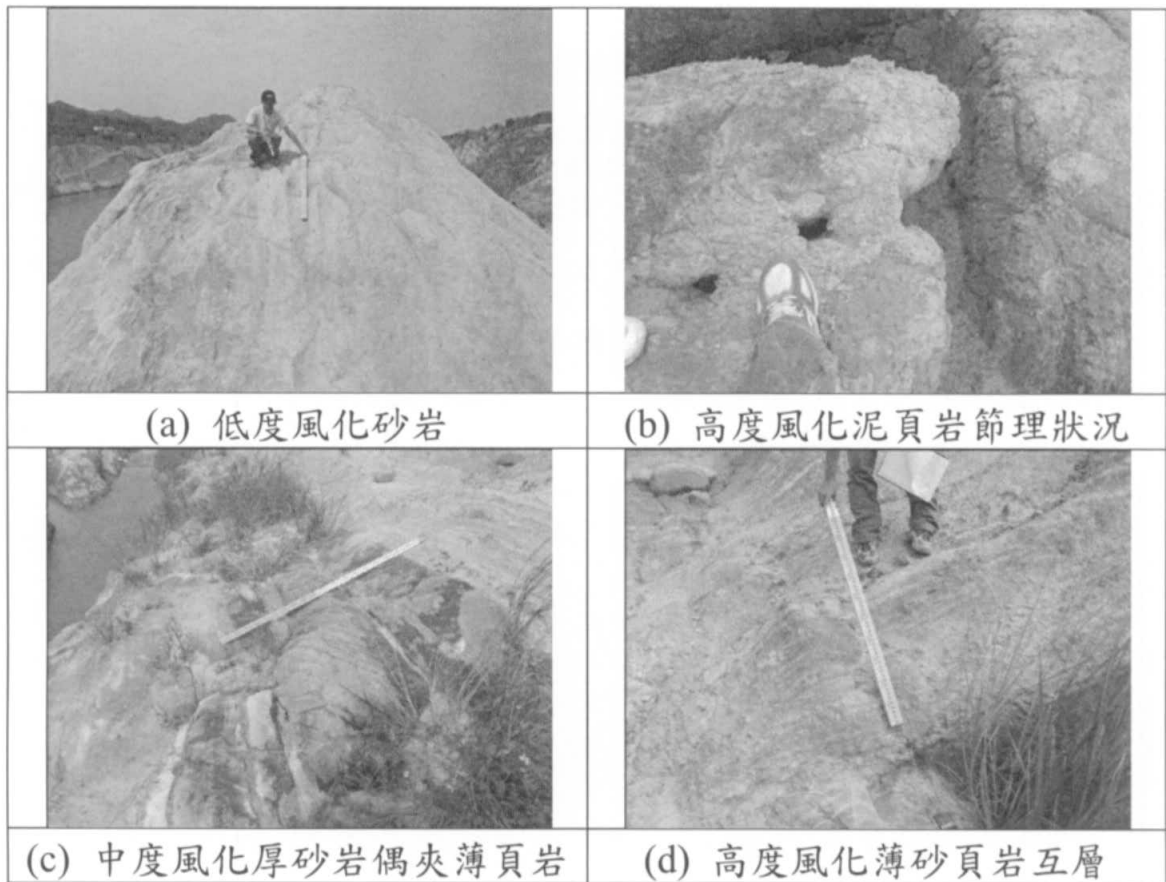


圖 3-5 後村堰岩層弱面狀況調查

(五)沖蝕特徵探討

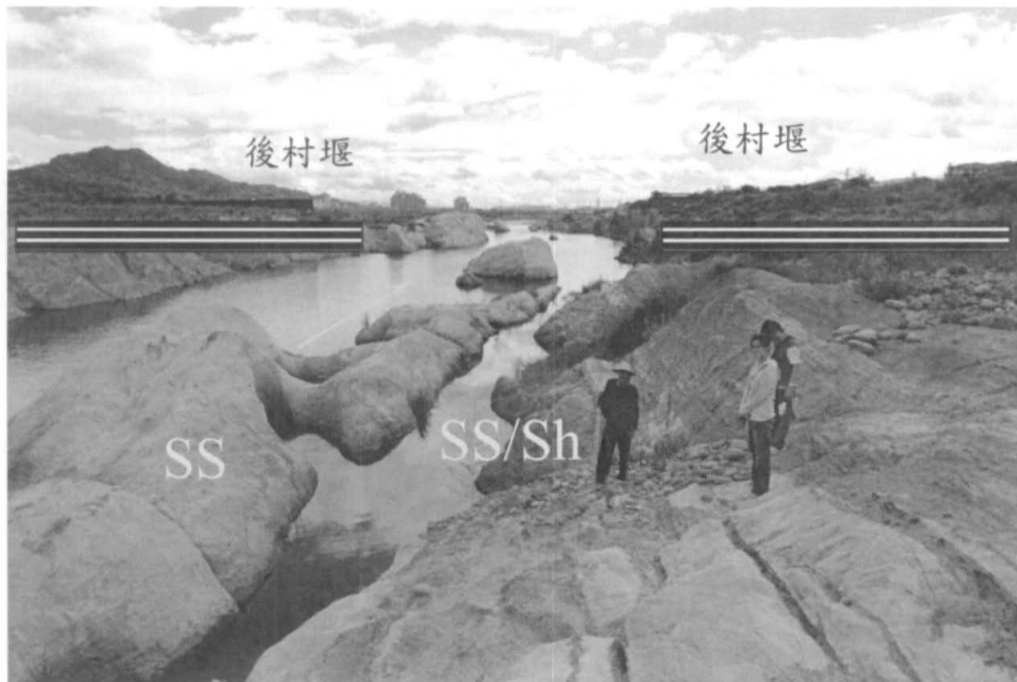
於文獻資料中顯示，後村堰於民國 93 年以前未沖毀前之主要沖刷問題為堰址下游河道沖刷下切直至岩盤，由於後村堰所在位置大致為厚層砂岩與砂頁岩互層兩者所形成之互層，因互層間之差異侵蝕遂形成數道小峽谷產生。民國 93 年 8 月艾利風災過後，堰體流失近 100 公尺長，並形成數道深水河槽通過原堰址下方(根據本計畫第 1(民國 98)年度量測，已累計向下沖刷超過 15 公尺)。

經現地調查結果，當水流在後村堰下方形成沖刷坑後，容易沿著抗沖蝕能力較差的岩層開始侵蝕，並向上游及下游發展，由於此區地層屬於抗沖蝕能力有顯著不同的互層構造，因此沖刷坑成數道槽溝狀發展。下游的岩層走向與水流流向平行，造成這些由堰前沖刷坑發展而成的沖刷槽溝向上游發展時，會順

著抗沖蝕能力較弱的岩層，逐漸侵蝕堰體下方、淘空基礎而沖毀。觀察現地的沖蝕特徵發現在槽溝下切處、沖刷較為迅速的岩層主要是抗沖蝕能力較差之極厚層砂頁岩互層，表面易受風化形成碎屑剝落(如圖 3-6)。目前仍出露於河道上，相對沖刷速率較慢的岩層主要是節理不發達的極厚層砂岩，表面較不易受風化裂解(如圖 3-6)。

由後村堰之航空照片進行立體判釋與觀察，後村堰於未沖毀前主要之沖刷問題為下游河道砂頁岩互層間差異侵蝕，形成數處深槽化。茲將後村堰之槽溝下切與堰體沖毀過程航照整理說明如圖 3-7 所示。

根據民國 99 年 6 月 1 日現地抗沖蝕能力調查，此區各岩性之單壓強度差異不大，但砂頁岩互層、頁岩等因受風化影響，其抗沖蝕能力 K_h 較低，而較不易風化之砂岩下切速度慢，抗沖蝕能力 K_h 較高。岩盤抗沖蝕能力現地調查點位及調查表如圖 3-8、表 3-3。



(288426, 2761277, N55E, 980803)

圖 3-6 後村堰岩盤沖蝕特徵



(a) 72.10.22 1~2 為堰前沖刷坑；3~6 為下切之深槽(方框為堰體未沖毀時位置)。



(b) 93.06.14 艾利颱風前，1~4 為下切之深槽。

圖 3-7 後村堰下游岩盤沖刷演進



(c) 93.11.07 艾利颱風後。右岸壩體被洪水切穿，河道形成單一深槽，方向大致平行岩層走向。



(d) 97.05.17 河道深槽拓寬，岩盤侵蝕範圍擴大。

圖 3-7 後村堰下游岩盤沖刷演進(續)

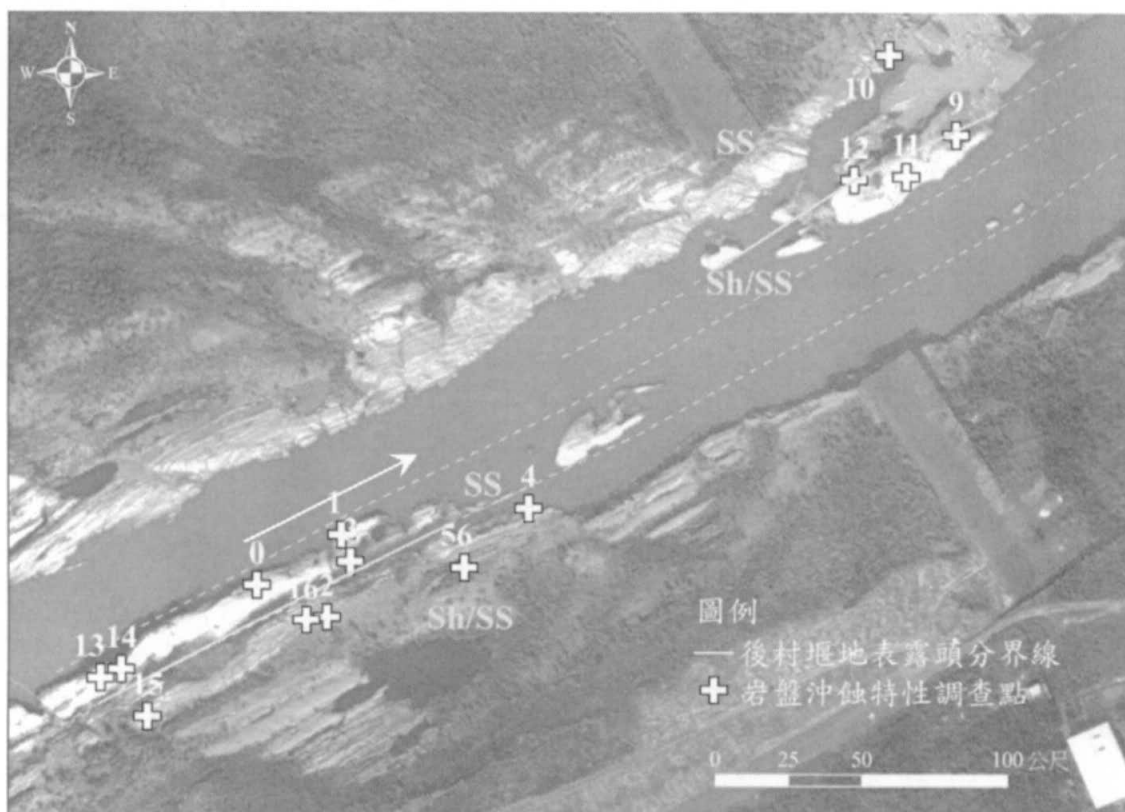


圖 3-8 後村堰岩盤沖蝕特性調查點位

表 3-3 後村堰岩盤沖蝕特性補充調查表

調查點	岩性	位態	UCS(MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	粉砂岩夾零星煤層	N80E/68S	9	43	1	1.14	381	98.08.03
1	粉砂岩夾零星煤層	N63E/62S	13	40	1	1.14	590	98.08.03
2	砂岩偶夾頁岩	N60E/56S	19	43	1	1.02	841	98.08.03
3	厚層頁岩偶夾薄層砂岩(破碎)	N60E/54S	7	1	1	1.09	1.78	98.08.03
4	厚層頁岩偶夾煤層(破碎)	N66E/50S	7	1	1	1.09	0.33	98.08.03
5	煤層	N64E/53S	7	21	2	1.14	212	98.08.03
6	煤層(破碎)	N64E/53S	7	1	2	1.14	1.41	98.08.03
7	厚層砂岩	N69E/46S	13	35	1	1.14	519	98.08.03
8	受侵蝕頁岩(破碎)	N64E/42S	7	1	1	1.02	0.27	98.08.03
9	厚層砂岩	N74E/50S	10.5	40	1	1.14	484	98.08.03
10	厚層塊狀砂岩(完整)	N74E/50S	13	33	1	1.14	490	98.08.03
11	厚層泥頁岩(表面風化、破碎)	N74E/50S	7	1	1	1.14	0.06	98.08.03
12	厚層砂岩	N74E/50S	13	32	1	1.14	473	98.08.03
13	灰白色極厚粉砂岩層,節理不發達	N68E/48S	3.5	100	1	1.02	295	99.06.01
14	灰白色極厚粉砂岩層,節理不發達	N68E/48S	3	82	1	1.02	206	99.06.01
15	薄砂頁岩互層	N66E/48S	2	1	1	1.14	0.50	99.06.01
16	薄砂頁岩互層	N62E/44S	2	1	1	1.14	0.27	99.06.01

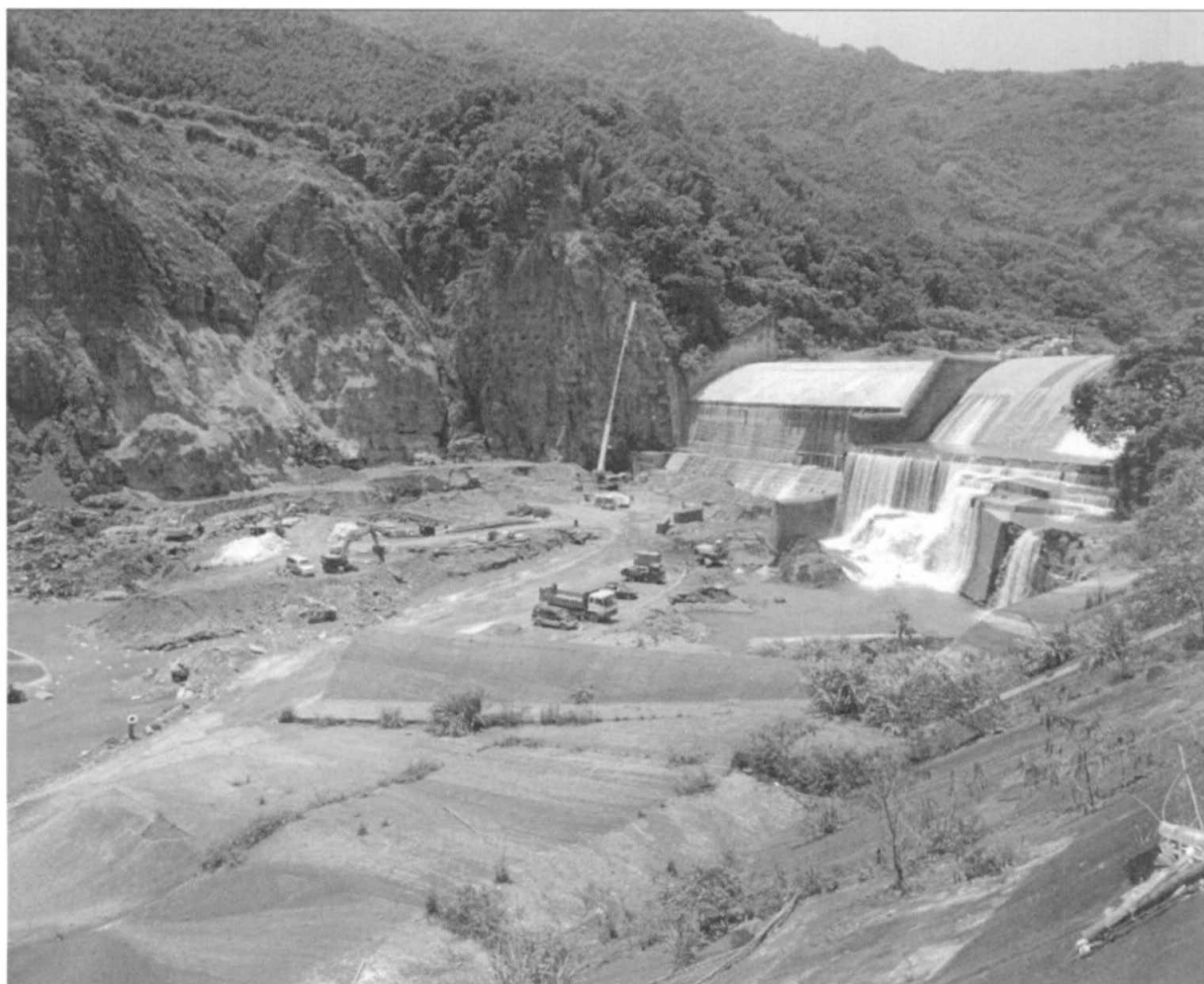
註： M_s 材料強度、 K_b 顆粒/塊體尺寸、 K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件

二、義興壩(大漢溪)

義興壩建造於大漢溪主流，位於石門水庫上游約 3 公里處。義興壩之位置如圖 3-9 所示。義興壩於民國 55 年 12 月竣工，壩長 100 公尺，主要為一混凝土重力式格籠壩及混凝土重力式溢流壩所組成之防砂壩。義興壩於民國 58 年即大部分淤滿，旋即進行義興防砂壩加高工程，於民國 62 年完工。民國 93 年艾利颱風造成山坡地嚴重沖刷，導致淤砂量達到極限。因此自民國 94 年起進行義興壩逐年淤積清除工作。義興壩目前正在進行「壩體整體修復及下游河道第二階段整治工程」，民國 99 年現況照片如圖 3-10 所示。



圖 3-9 義興壩位置圖



(268713, 2740965, S20E, 990601)

圖 3-10 義興壩 99.06.01 照片

(一) 岩性種類

義興壩址之基層岩盤為木山層，以厚層之白灰色、黃灰色及白色，細粒至粗粒砂岩為主，夾有灰色頁岩，或細粒砂岩及頁岩之互層，偶夾有薄煤層。砂岩大部份為正石英砂岩，含少量之粘土礦物，淘選頗佳，有交錯層和漣痕，部份露頭有生物擾痕如砂棒等沉積構造並含有煤線，頁岩則為深灰色，含多量之碳質物及煤碎片。圖 3-11 為現地拍攝照片及岩層分佈示意圖，在壩基與壩址下游主要以極厚層塊狀砂岩為主。義興壩之岩層分層與描述則如表 3-4。



(286843, 2740836, E, 990601)

圖 3-11 義興壩現地岩性露頭照片

(二)地層位態與水流流向關係

依據現地調查量測，義興壩附近下游左岸地層位態約為 N16E/8N，右岸及壩基附近位態約 N16E/16N，右岸之地層傾角稍大於左岸，整體壩址區域地層走向與水流流向大致平行，露頭量測位置為壩體下游左右兩岸及壩基附近之岩層，如圖 3-12 義興壩地表地質圖所示。壩址及其下游之岩層分層與描述則如表 3-4。

表 3-4 義興壩壩址地質岩性與描述

分層	岩性	地層描述
SS	極厚層 塊狀砂岩	以極厚層砂岩層為主，偶夾有薄煤層。次要之岩層為中厚度砂岩層。岩層節理非常發達，呈現三組正交之節理。



圖 3-12 義興壩地表地質圖

(三) 岩石強度

現地使用史密特錘量測推估岩石單壓強度，此區之砂岩層強度多落在 50 MPa 左右，若依地調所兩萬五千分之一岩性分佈圖與「都會區及周緣坡地環境地質資料庫圖集說明書」資料，此區之砂岩分類屬中強岩，單壓強度落於 20~50 MPa 與現地量測值差異不大。但此區域地表之砂岩層節理發達，欲考慮此區新鮮岩盤之單壓強度值，本計畫進一步參考北水局民國 98 年「石門水庫整治計畫緊急供水工程安全複核及義興壩下游河道整治工程設計委託技術服務地質鑽探及試驗報告」，義興壩附近之粉砂岩單壓強度平均可達 80 MPa。

(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物

本區域砂岩節理發達，有 2 組垂直河道且互相正交的解壓節理，節理間距約 0.25~1.5 公尺，層面間距約 0.7~1.5 公尺。

本區域砂岩風化程度不高，節理面弱化程度不高，解壓節理間距約為 1~5 釐米，粗糙度為不規則平面狀，填充物多為岩石碎屑或無凝聚性土壤。

(五)沖蝕特徵探討

水流溢過義興壩之後，在義興壩底下形成一巨大的沖刷坑，如圖 3-13 所示。由民國 92 年義興壩安全檢查於評估水中檢查報告(水利署，92 年)，義興壩靜水池池底嚴重淘空，淘空範圍約 40 公尺x50 公尺，坑底位於水面下 17.5 公尺，洞底高程已經低於義興壩基礎面，97 年之水中檢查(北水局，97 年)格籠段下方淘空深度約 6 公尺，且向基礎內側延伸約 7.5 公尺。民國 98 年底，北水局開始進行「義興壩整體修復及下游河道整治第二階段工程」，壩址下方淘空處已灌漿修補，壩址下游形成之沖刷坑已因修復工程之進行而土石回填，由第 1(民國 98)年度與本(民國 99)年度之定點定向攝影觀察可了解沖刷坑現況，如圖 3-13 所示。

義興壩下游岩盤沖刷特徵是節理發達，岩塊形成容易塊體造成抽離的潛能，如圖 3-14。岩塊沿著節理面及層面脫落的現象均相當明顯，沖刷坑下游處亦可見到許多塊體堆積，可能是被抽離的塊體被水流沖離至此，如圖 3-15 所示。

根據民國 99 年 6 月 1 日現地抗沖蝕能力調查，此區岩性較單純為屬中強岩(硬岩)之砂岩單壓強度可達 80 MPa 以上，其抗沖蝕能力 K_h 非常高。現地抗沖蝕能力調查點位及調查表如圖 3-16、表 3-5。

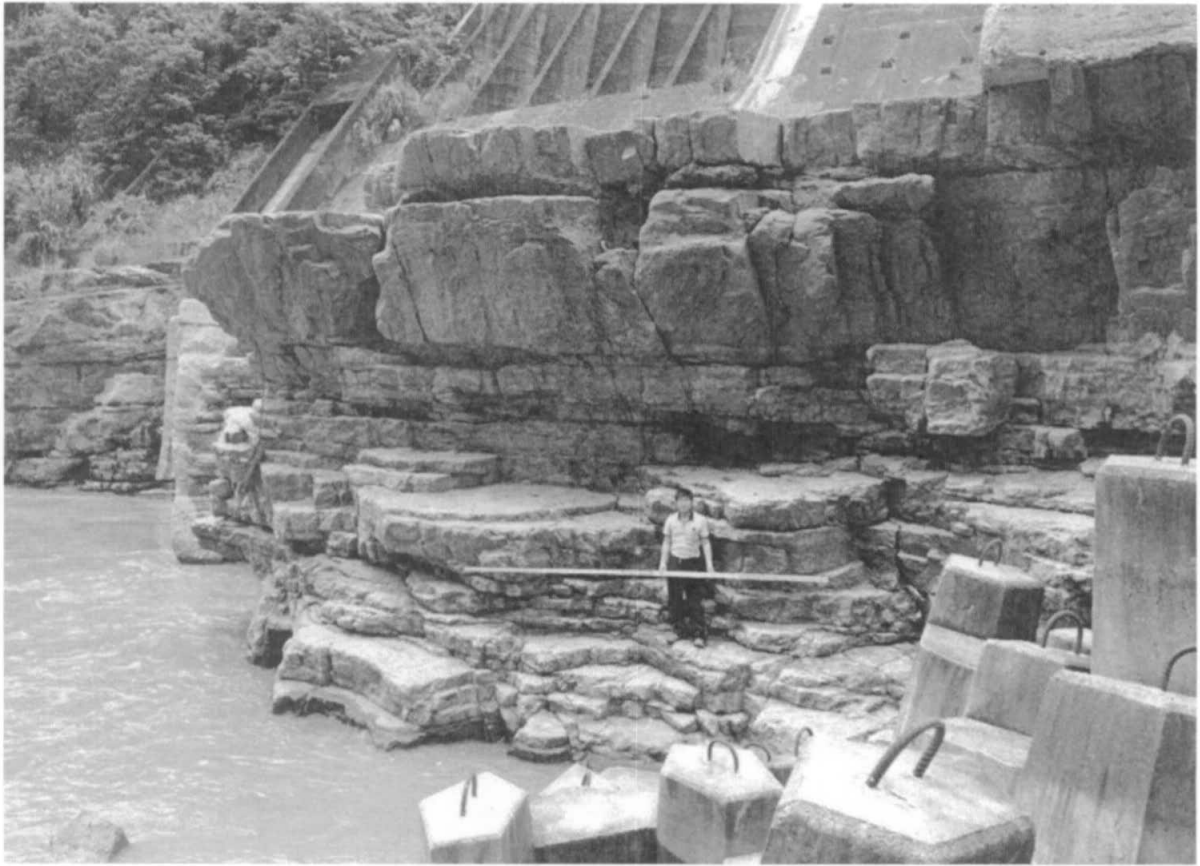


(a) 98.08.05 義興壩下游冲刷形成之冲刷坑。



(b) 99.06.01 莫拉克風災未對北部照成重大差害，經歷民國 98 年汛期過後，義興壩進行修復工程，冲刷坑回填土石覆蓋。

圖 3-13 義興壩下游岩盤冲刷演進



(286763, 2740949, N80W, 980805)

圖 3-14 義興壩岩盤沖蝕特徵



(286763, 2740949, S20E, 980805)

圖 3-15 義興壩沖刷坑塊體抽離至下游之岩塊



圖 3-16 義興壩岩盤沖蝕特性調查點

表 3-5 義興壩岩盤沖蝕特性補充調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	極厚層塊狀砂岩	N16E/8N	80	36	0.75	1.14	2480	98.08.05
1	極厚砂岩層 (節理發達)	N16E/8N	80	31	0.75	1.05	1937	98.08.05
2	極厚砂岩層 (節理發達)	N18E/18N	58	35	1	1.05	2154	99.06.01
3	極厚砂岩層 (節理發達、破碎)	N16E/14N	60	29	1	1.09	1872	99.06.01
4	極厚砂岩層 (節理發達)	N18E/16N	58	36	1	1.14	2379	99.06.01
5	極厚砂岩層 (節理發達)	N18E/18N	55	31	1	1.14	1962	99.06.01

註： M_s 材料強度、 K_b 顆粒/塊體尺寸、 K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件

三、石岡壩(大甲溪)

石岡壩位於大甲溪中游於民國 63 年 10 月 31 日正式開工，民國 66 年 10 月 15 日竣工，為大甲溪流域最下游水庫，主要設施包括：壩體、溢洪道、排砂道及取水口等。主要功能為調節尖峰發電尾水與河川水資源，並提供台中地區公共用水。石岡壩位置如圖 3-17 所示。

民國 88 年九二一大地震造成石岡壩壩址地層隆起，導致壩體及相關設施損毀，中區水資源局乃進行緊急復建工作，已於民國 90 年 12 月底完工。石岡壩民國 98 年狀況如圖 3-18 所示。

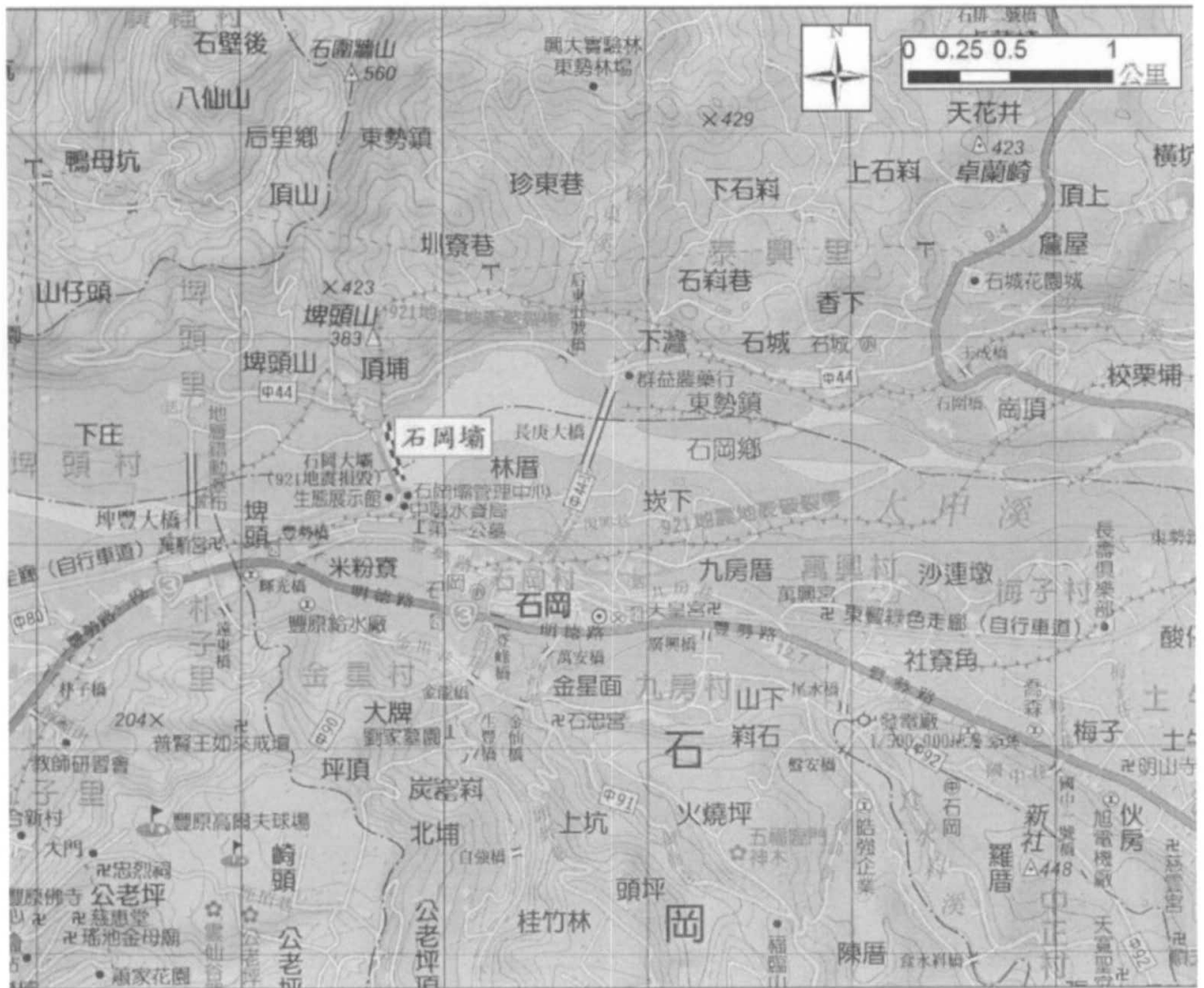


圖 3-17 石岡壩位置圖



(226465, 2686051, N15E, 990322)

圖 3-18 石岡壩 99.03.22 照片

(一) 岩性種類

石岡壩附近之地層應為卓蘭層，其岩層由砂岩、粉砂岩、泥岩、及頁岩之互層組成，岩性單調重覆，無顯著之指準層可將其再細分為較小岩層單位。本層之砂岩多呈淡青灰色或淡灰色，以細粒為主，有時含有炭質小片及富含雲母質，砂岩層厚多在 1~5 公尺之極厚層砂岩，常呈現鐵染。夾於砂岩中之泥岩或頁岩呈青灰色或深灰色，層厚多為 0.2~0.5 公尺，但亦常成厚層夾於塊狀砂岩之中。圖 3-19 為民國 99 年 4 月 26 日所進行的地表地質調查結果，經由現場調查，石岡壩堰前地質可區分為以下幾類：

1、砂岩偶夾頁岩(SS)

本層層厚介於 0.5~1 公尺，偶夾薄層頁岩，現地代表岩性照片如圖 3-20，本層常見 1 組平行河道與 1 組正交河道之解壓節理。

2、厚層頁岩(Sh)

本層層理介於 0.3~1 公尺之間，現地觀察易受乾濕循環而風化，現地代表岩性照片如圖 3-21。圖中左側頁岩因乾濕循環而風化崩解為碎屑狀。圖右之頁岩相對較新鮮，通常除了頁

岩層面外，尚可見到 1 組平行河道，平滑延伸之節理。

3、層狀砂岩(LSS)

圖 3-22 為層狀砂岩層，岩層膠結不佳。此類岩層特徵砂岩層中層理發達，層厚約 0.1~0.3 公尺。除常見兩組解壓節理外，由地表地質調查發現，堰前沖刷坑的層狀砂岩可能位處斷層附近影響，地層傾角較高，同時該處岩層節理發達，岩體較破碎（圖 3-23）。

4、極厚層砂岩(MSS)

砂岩層厚往往超過 1 公尺以上(圖 3-24)，層面膠結較佳，常存在 1 組寬約 1 公尺以上之平行河道之平滑延伸之節理，局部偶見走向與河道正交之節理。

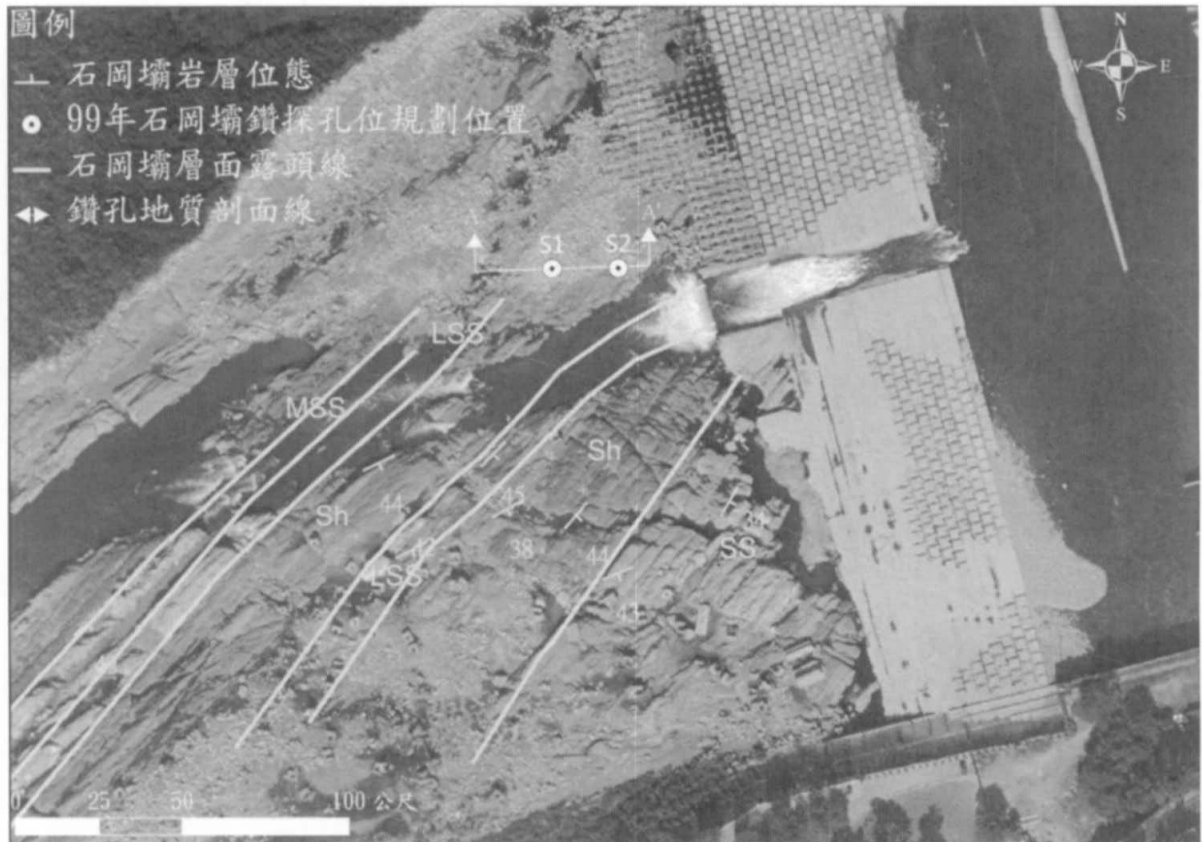


圖 3-19 石岡壩堰前地表地質圖



圖 3-20 石岡壩堰前砂岩偶夾頁岩(SS)

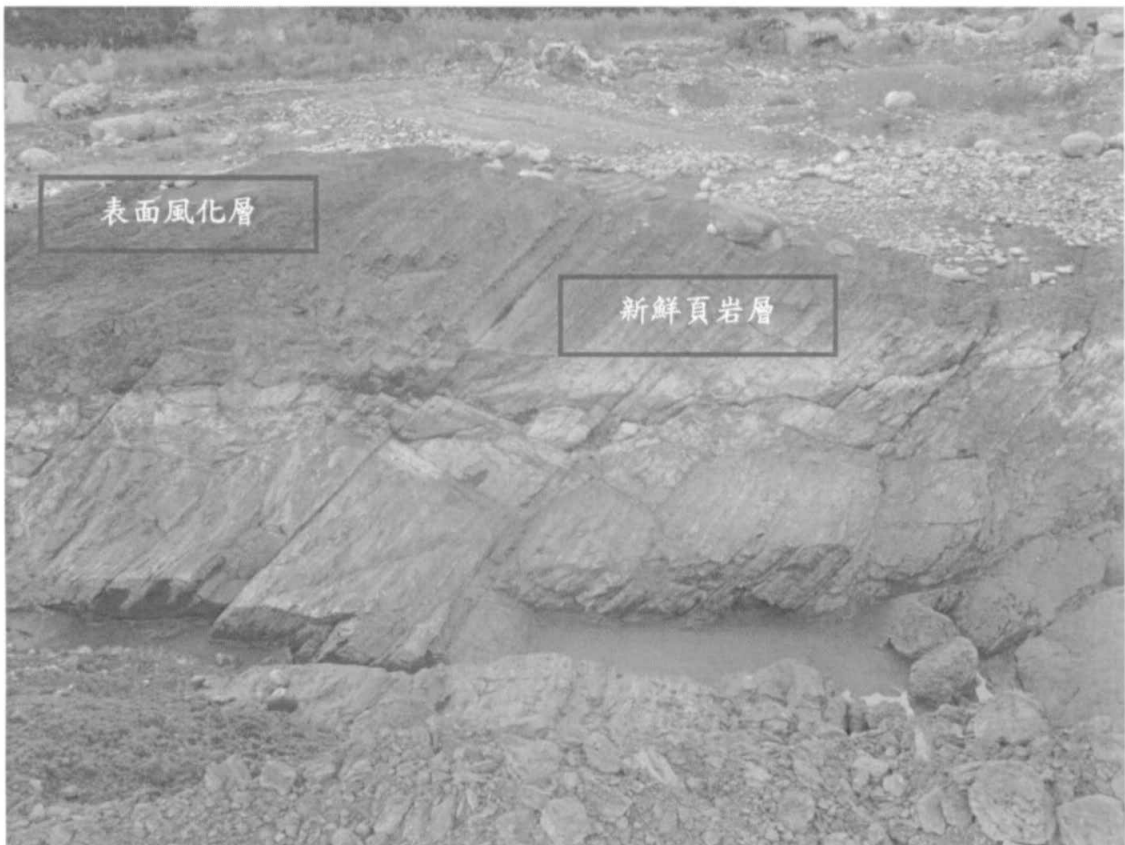


圖 3-21 石岡壩堰前厚層頁岩(Sh)



圖 3 - 22 石岡壩堰前層狀砂岩(LSS)



圖 3 - 23 石岡壩堰前層狀砂岩之高傾角傾角且岩層破碎圖



圖 3-24 石岡壩堰前極厚層砂岩(MSS)

(二)地層位態與水流流向關係

根據現地量測，石岡壩附近的地層位態約為 N45E/50S，地層走向與水流流向夾角約 20 度，呈斜交。露頭量測位置包含壩體下游右岸、壩體下方裸露岩床河道即為具有代表性之岩層，如圖 3-25 所示。堰前岩性分層與描述如表 3-6。

表 3-6 石岡壩岩層分層與描述

分層	岩性	地層描述
MSS	極厚層砂岩	層厚大於 1~2 m，節理面常有鏽染，呈塊狀結構。
LSS	層狀砂岩	層厚約為 0.1~0.3 m，層理發達。
SS	砂岩偶夾頁岩	厚層之砂岩為主，偶夾薄層頁岩。
Sh	厚層頁岩	深灰色頁岩，表面高度風化。



圖 3-25 石岡壩堰前地表地質圖

(三)岩石強度

本計畫使用史密特錘推估岩石單壓強度，此區各岩層的單壓強度都介於 9~13 MPa 之間，而由本所(民國 99 年)進行之鑽探及試驗成果，如表 3-7 所示，各岩層的單壓強度則介於 2~12 MPa 之間，結果大致吻合。本(民國 99)年度計畫中亦於堰前沖刷坑緊鄰北側處進行 2 孔共 50 公尺之鑽探採樣及試驗工作，試驗結果說明於本報告第肆章內容中。

表 3-7 石岡壩下游鑽探岩心試驗成果(水規所，民國 98 年)

岩石 單 軸 壓 縮 試 驗	孔號	深度或高度 (m)	單位重 $\gamma_t(t/m^3)$	含水量 $W_n(\%)$	單壓強度 $\sigma_c(kg/cm^2)$	破壞應變 $\epsilon_f(\%)$
	B-4	0.15-0.25	2.62	3.7	67.3	1.9
	B-5	0.40-0.50	2.22	6.3	87.9	1.2
	B-6	0.40-0.50	2.46	4.7	23.3	2.1
	B-10	0.55-0.65	2.40	6.5	28.6	3.9
	WRA-a-1	0.1065/0.1135	--	--	45/58	--
	WRA-a-2	0.1103/0.1085	--	--	32/37	--
	WRA-b-1	0.1122/0.1130	--	--	46/69	--

(四)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物

本區域以解壓節理為主，受到車籠埔斷層影響造成局部區域地層較破碎，如圖 3-26。河道附近的岩層風化度不高，節理粗糙度為平滑平面狀，無填充物或偶有無凝聚性土壤填充。

(五)沖蝕特徵探討

第 1(民國 98)年度莫拉克颱風過後(98.8.11)之現地勘查，石岡壩洩洪的水流於跌水工盡頭與岩床交界處產生劇烈的消能現象，如圖 3-27。在石岡壩停止洩洪之後(98.8.27)再次前往調查，發現跌水工盡頭有部分基礎破壞、基礎底下淘空的情形，如圖 3-28(a)。此區域的水流狀況以跌水產生之紊流為主，並在跌水工盡

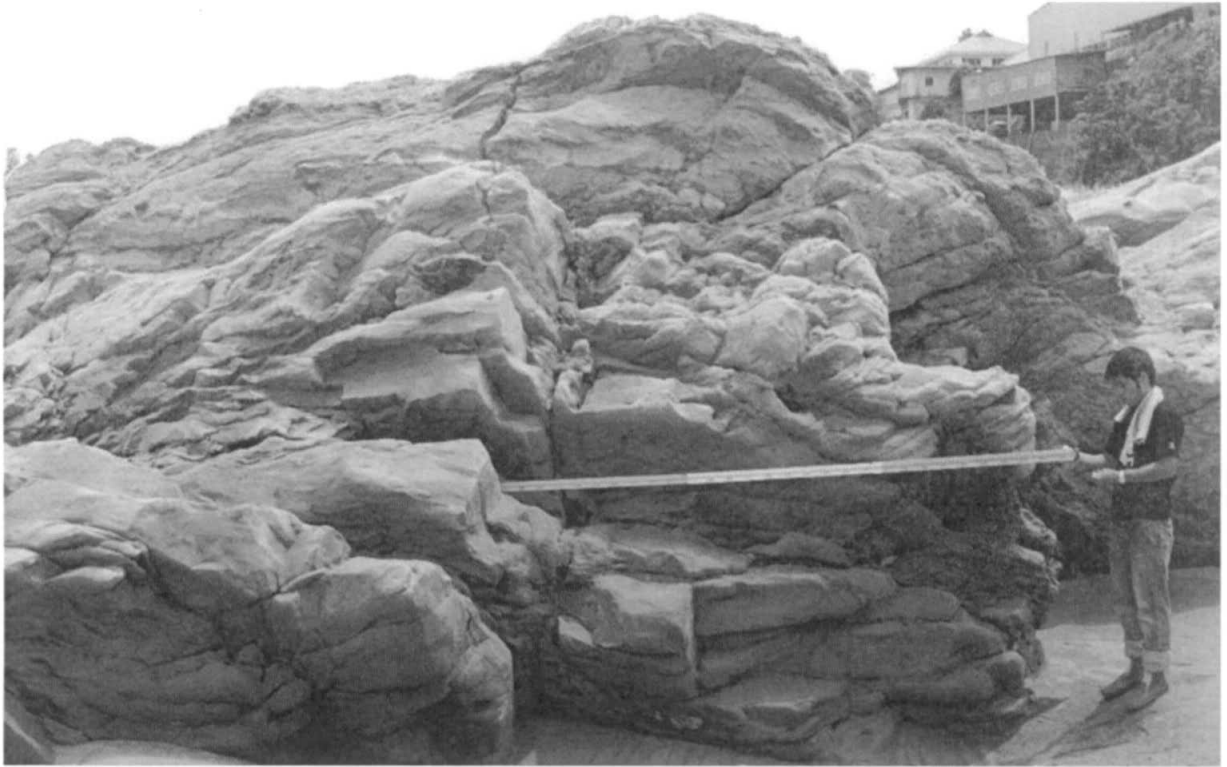
頭與岩床交界處產生一小型沖刷坑特徵，本(民國 99)年度(99.01.05)現地勘查，沖刷坑已完全顯露。民國 99 年 3 月，跌水工盡頭之沖刷坑已因進行壩體下游沖刷改善工程經卵礫土石填復。民國 99 年 4 月，沖刷坑已完成固床工設施，石岡壩跌水工下游沖刷坑現況如圖 3-28(d)所示。

圖 3-25 為石岡壩堰前沖刷坑地質圖，目前堰前已形成 1 個長寬約 30 公尺，最深達 6 公尺之沖刷坑，水流與岩層走向呈低角度斜交，愈接近下游則發現流向逐漸受岩層槽溝發展影響，導致水流由低角度斜交逐漸形成平行岩層走向發展。圖 3-25 地質剖面圖顯示，堰前沖刷坑受到劇烈侵蝕的岩層為層狀砂岩，兩旁抗沖蝕能力較高的厚層頁岩則形成了槽溝的岸壁。

堰前沖刷坑下游之槽溝下切現象，是由沖刷速率較快的厚層頁岩與層狀砂岩，及沖刷速率較慢的節理間距較寬的極厚層砂岩所形成，在這樣沖蝕速率有明顯差異的岩層組合，加上與岩層走向呈約 30 度的水流方向，壩體下方約 300~600 公尺處的河道遂發展成槽溝狀下切地形，如圖 3-29 所示。

綜合上述，由於水流之流向與岩層走向呈低角度斜交，以及岩層抗沖蝕能力之差異，最終影響河道與沖刷坑發展，使得本區之主要沖蝕機制為槽溝下切型沖刷。

根據現地抗沖蝕能力調查，此區岩性單壓強度差異不大，但層狀砂岩與厚層頁岩之抗沖蝕能力 K_h 多在 100 以下，極厚層砂岩則平均在 250 左右，此差異主要由節理性質及平均塊體尺寸所造成。現地抗沖蝕能力調查點位及調查表如圖 3-30、表 3-8。堰前各岩性 K_h 值統計如表 3-9。



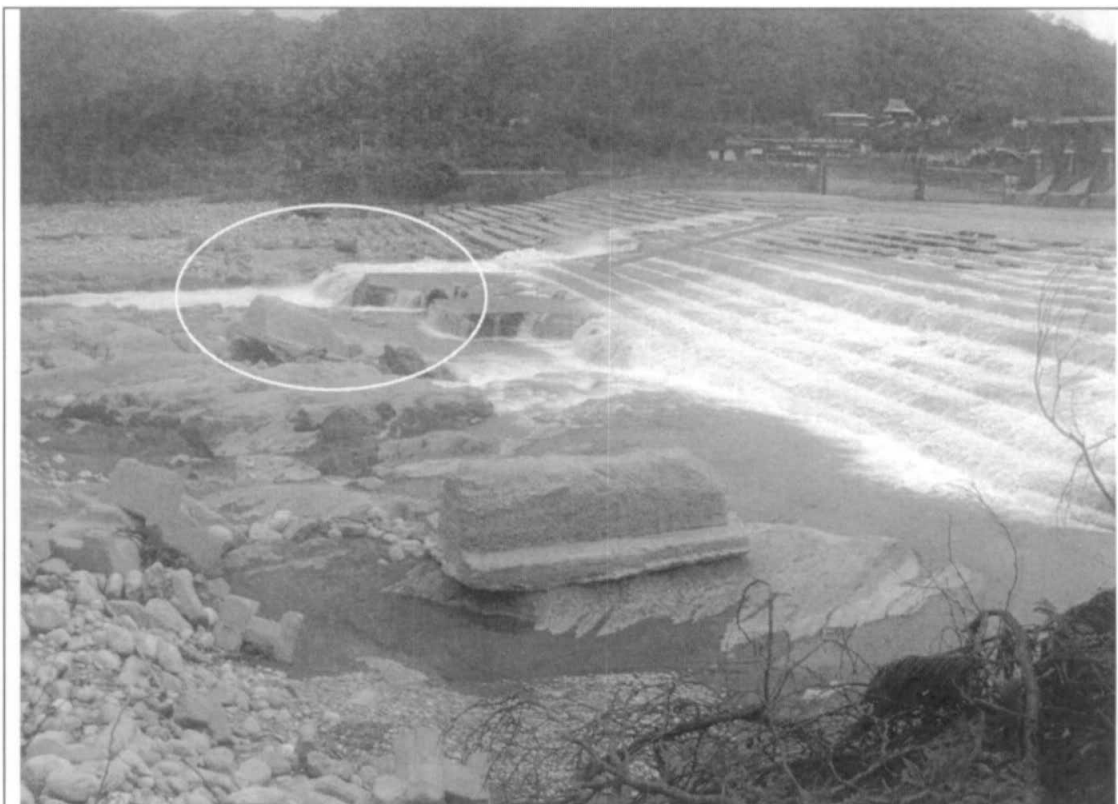
(226186, 2686086)

圖 3-26 斷層附近的破碎岩體



(226515, 2686070, N20W, 980811)

圖 3-27 莫拉克颱風後石岡壩洩洪



(a) 98.08.27 莫拉克颱風過後，跌水工盡頭有部分基礎破壞、基礎底下淘空



(b) 98.12.09 堰前沖刷坑汛期過後情況

圖 3-28 石岡壩堰前沖刷坑

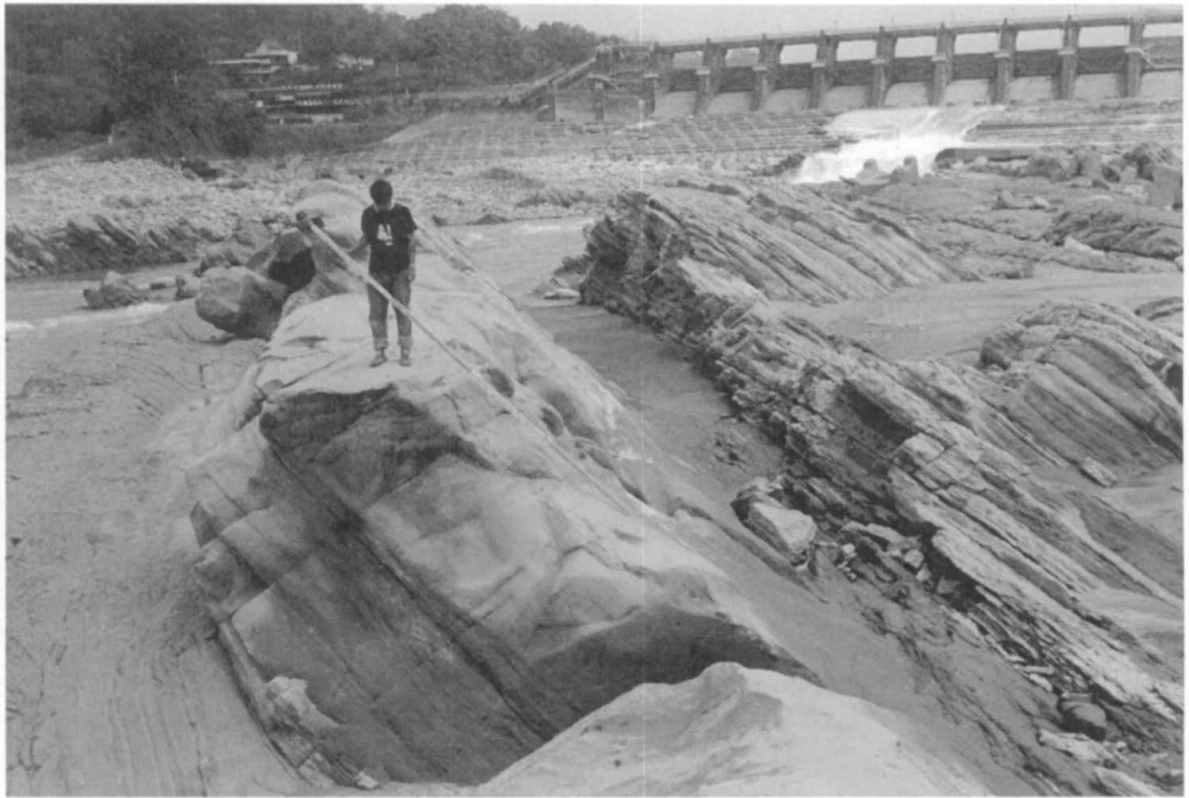


(c) 99.03.22 沖刷坑已因進行壩體下游沖刷改善工程經卵礫土石填覆



(d) 99.04.23 沖刷坑已完成固床工設施

圖 3-28 石岡壩堰前沖刷坑(續)



(226213, 2686090, N45E, 980827)

圖 3-29 石岡壩下游河道呈槽溝狀



圖 3-30 石岡壩岩盤沖蝕特性調查點

表 3-8 石岡壩岩盤抗沖蝕能力補充調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K _b	K _d	J _s	K _h	調查日期
0	極厚層砂岩	N30E/58S	9	34	1	0.63	169	98.08.11
1	極厚層砂岩	N60E/68S	12.5	36	1	0.91	407	98.08.27
2	極厚層砂岩	N50E/42S	13	36	1	0.67	314	98.08.27
3	層狀砂岩	N58E/60S	12.5	23	0.33	0.63	60	98.08.27
4	層狀砂岩	N40E/50S	11	7	0.33	0.53	15	98.08.27
5	層狀砂岩	N47E/47S	13	23	0.33	0.53	53	99.01.05
6	層狀砂岩	N44E/44S	10	24	0.33	0.51	36	99.01.05
7	厚層頁岩	N40E/44S	9.5	49	0.33	0.52	70	98.08.27
8	厚層頁岩	N40E/40S	9.5	40	0.33	0.49	55	99.01.05
9	厚層砂岩偶夾頁岩	N38E/40S	13	25	0.5	0.52	86	98.08.27
10	厚層砂岩偶夾頁岩	N62E/58S	13.5	30	0.5	0.62	126	99.04.26
11	厚層砂岩偶夾頁岩	N38E/28S	13.5	30	0.5	0.57	117	99.04.26
12	厚層砂岩偶夾頁岩	N47E/48S	15	29	0.5	0.51	110	99.04.26
13	厚層砂岩偶夾頁岩	N68E/43S	13	28	0.5	0.54	98	99.04.26
14	厚層砂岩偶夾頁岩	N30E/34S	10	30	0.5	0.5	65	99.04.26
15	厚層砂岩偶夾頁岩	N30E/45S	10	29	0.5	0.51	65	99.04.26
16	厚層砂岩偶夾頁岩	N36E/40S	10	31	0.5	0.49	66	99.04.26
17	厚層砂岩偶夾頁岩	N67E/61S	10	26	0.5	0.63	71	99.04.26
18	層狀砂岩	N62E/42S	12.5	26	0.33	0.55	60	99.04.26
19	層狀砂岩	N38E/44S	10	23	0.33	0.51	34	99.04.26
20	層狀砂岩	N40E/45S	10	25	0.33	0.51	37	99.04.26
21	層狀砂岩	N25E/42S	10	28	0.33	0.5	40	99.04.26
22	層狀砂岩	N65E/56S	10	21	0.33	0.58	35	99.04.26
23	層狀砂岩	N40E/45S	10	27	0.33	0.57	45	99.04.26
24	厚層頁岩	N38E/42S	13	28	0.33	0.55	67	99.04.26
25	厚層頁岩	N60E/38S	10	32	0.33	0.52	48	99.04.26
26	厚層頁岩	N42E/42S	13.5	39	0.33	0.56	98	99.04.26
27	厚層頁岩	N64E/44S	10	36	0.33	0.57	60	99.04.26
28	厚層頁岩	N68E/38S	10	40	0.33	0.49	57	99.04.26
29	極厚層砂岩	N58E/52S	10	44	1	0.55	211	99.04.26
30	極厚層砂岩	N58E/52S	10	44	1	0.55	211	99.04.26
31	極厚層砂岩	N58E/52S	10	37	1	0.55	176	99.04.26

註：M_s 材料強度、K_b 顆粒/塊體尺寸、K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件

表 3-9 石岡壩抗沖蝕能力調查點統計

岩性	調查點	K_h (平均值)
層狀砂岩	10	41
厚層頁岩	7	65
砂岩偶夾頁岩	9	89
極厚層砂岩	6	248

四、龍泉圳攔河堰(烏溪)

龍泉圳攔河堰位於南投縣國姓鄉烏溪流域，於民國 71 年竣工，龍泉圳位置如圖 3-31 所示。主要使用標的乃為提供附近農業灌溉用水，最初下游利用混凝土塊作為護床工，後來堰體損毀，修復時於堰下游加建一靜水池作為消能工。龍泉圳民國 99 年現況照片如圖 3-32 所示。



圖 3-31 龍泉圳位置圖



(232809, 2657986, N60E, 990628)

圖 3 - 32 龍泉圳 99.06.28 照片

(一)岩性種類

根據現地勘查，攔河堰所位區域地層屬中期中新世猴洞坑層與中期中新世之福隆原層，猴洞坑層以塊狀頁岩組成，偶夾薄層砂岩之砂頁岩互層，福隆園層岩性以厚層塊狀砂岩及砂頁岩互層為主。此區域主要之地層以猴洞坑層為主，岩性大部份由灰黑色塊狀頁岩組成，部份頁岩內夾 0.1~0.3 公尺薄層細粒緻密砂岩而成為砂頁岩互層，如圖 3 - 33(a)。堰體附近有 1 層厚度約 5 公尺的粉砂岩，如圖 3 - 33(b)。

(二)地層位態與水流流向關係

依據現場地表岩層露頭調查結果，地層位態約為 NS/80E，岩層走向呈南北走向，傾角高角度向東傾。地層傾向與水流方向相反。堰址下游露頭量測位置如圖 3 - 34 所示。堰前岩性分層與描述如表 3 - 10。



(a) 灰黑色塊狀頁岩夾 1~3 cm 薄層細粒緻密砂岩(232394, 2657997, N80E, 980806)



(b) 堰體下方岩盤為厚層砂岩偶夾頁岩(232835, 2658010, N30E, 980806)

圖 3-33 龍泉圳露頭照片



圖 3-34 龍泉圳地表地質圖

表 3-10 龍泉圳地質岩性與描述

分層	岩性	地層描述
Sh	極厚層頁岩	以頁岩為主，部份頁岩內夾 1~3 cm 薄層細粒緻密砂岩。
SS/Sh	極厚層砂岩 偶夾薄頁岩	層厚超過 5 m 之極厚層砂岩，砂岩中又偶夾薄頁岩。

(三) 岩石強度

依據現地量測結果，極厚層之砂岩單壓強度可達 35~40 MPa。極厚層塊狀砂岩與砂頁岩互層單壓強度介於 10~25 MPa。

(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物

本區域節理並不發達，大致新鮮，風化程度隨暴露時間成正比，粗糙度為平滑平面狀或不規則平面狀，無填充物。

(五)沖蝕特徵探討

龍泉圳的水流狀況平穩、無明顯的高低落差，其沖蝕特徵大致可分為兩類，(1)完整厚層頁岩的沖蝕，以表面風化造成的小碎屑被水流帶走、及水流磨蝕為主，如圖 3-35(a)所示。(2)解壓節理較發達的砂頁岩互層，或膠結較差的粉砂岩成塊狀抽離，如圖 3-35(b)所示。

龍泉圳曾堰體受損，堰體修復後加設靜水池。由於平時水流不大，自第 1(民國 98)年度至本(民國 99)年度持續定點定向觀測攔河堰下游並未於堰址下游造成進一步之明顯刷深下切加劇或使沖刷坑明顯擴大之情形，如圖 3-36 所示。

根據民國 99 年 6 月 28 日現地抗沖蝕能力調查，此區岩性單壓強度平均達 25 MPa，抗沖蝕能力除極厚層頁岩中偶夾出現之極厚層砂岩 K_h 特別高以外，無論是極厚層頁岩或是薄砂頁岩互層抗沖蝕能力 K_h 差異不大。現地抗沖蝕能力調查點位及調查表如圖 3-37、表 3-11。

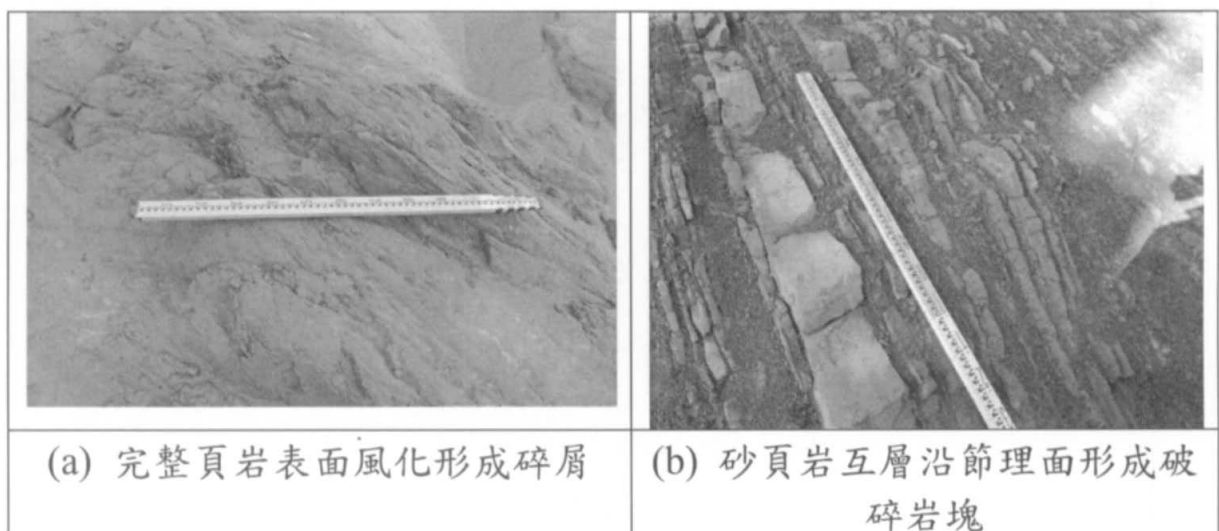
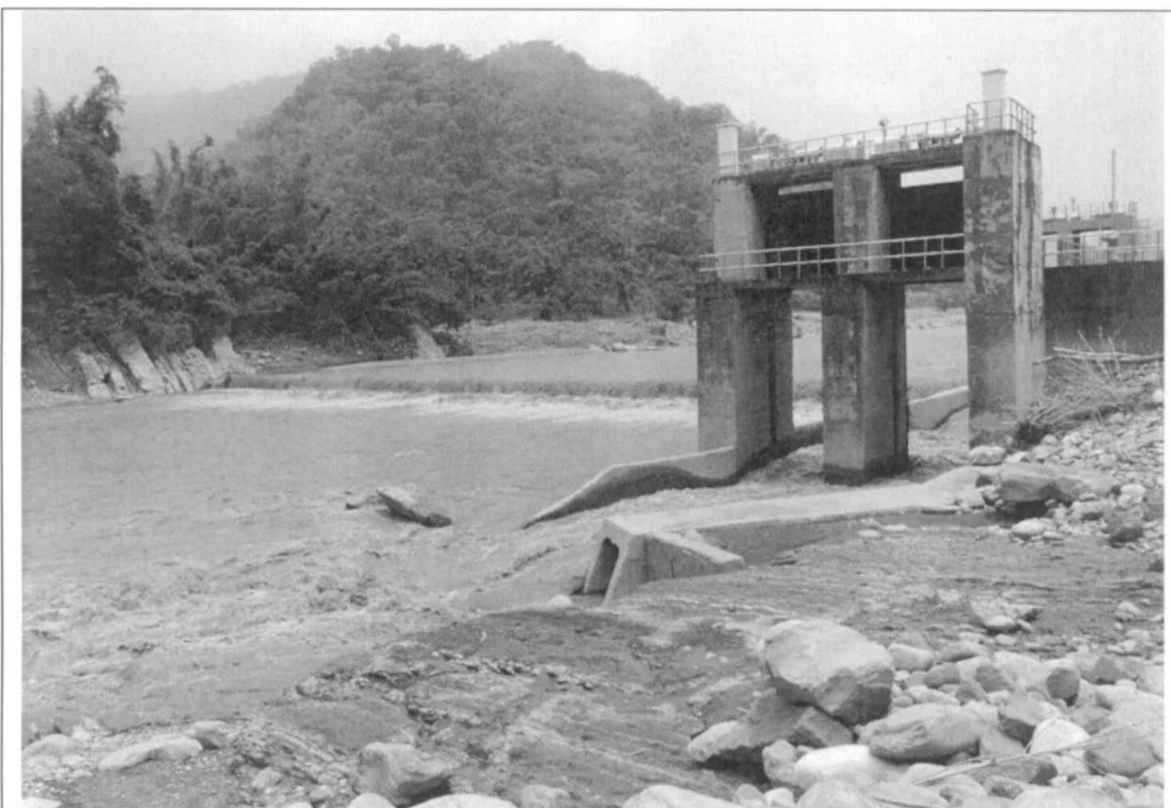


圖 3-35 龍泉圳現地露頭照片



(a) 98.08.19 莫拉克颱風後，龍泉圳堰體完整，流況穩定



(b) 99.06.28 堰址流況穩定，無太大變化

圖 3-36 龍泉圳堰址流況



圖 3-37 龍泉圳岩盤沖蝕特性調查點

表 3-11 龍泉圳岩盤沖蝕特性補充調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	厚粉砂岩(出露範圍 40 m)	N16W/56N	36	24	1.5	0.59	765	98.08.06
1	砂頁岩互層	N2W/81N	25.5	1	1.5	1.41	43	98.08.06
2	厚層砂岩	N2W/81N	37.5	18	0.75	1.26	626	98.08.06
3	砂頁岩互層	N4W/82N	25.5	28	0.75	1.26	685	98.08.06
4	砂頁岩互層	N4W/82N	25.5	30	0.75	1.26	711	98.08.06
5	砂頁岩互層	NS/80E	25.5	27	0.75	1.26	640	98.08.06
6	塊狀砂岩	NS/80E	40	30	0.75	1.26	1129	98.08.06
7	厚層頁岩	N2W/80N	10	28	0.75	1.26	235	98.08.06
8	厚層砂岩	N16W/56N	36	31	0.75	0.59	490	98.08.06
9	薄砂頁岩互層	NS/70E	27.5	12	0.75	0.84	213	99.06.28
10	薄砂頁岩互層	NS/60E	24	23	0.75	0.63	262	99.06.28
11	極厚層砂岩	NS/70E	8.5	54	0.5	0.91	181	99.06.28
12	薄砂頁岩互層	NS/80E	25	9	0.75	1.26	220	99.06.28
13	薄砂頁岩互層	NS/80E	31.5	29	0.5	1.26	595	99.06.28

註： M_s 材料強度、 K_b 顆粒/塊體尺寸、 K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件

五、集集攔河堰(濁水溪)

集集攔河堰壩址位於濁水溪中游集集鎮林尾隘口河道狹窄處，於民國 80 年 7 月發包施工，於民國 90 年 6 月竣工，其間並遭受集集大地震的嚴重影響而進行工程修復。集集攔河堰位置如圖 3-38 所示。集集攔河堰之標的係以充分有效應用濁水溪水源為目的，供應濁水溪兩岸之灌溉引水設施，並藉增加調蓄水量，供應雲林離島工業區用水，此外亦於豐水期時補注地下水，用以緩和地下水超抽及地層下陷問題。集集堰堰前沖刷坑目前已被卵礫石及砂石覆蓋，民國 99 年現況照片如圖 3-39 所示。

(一)岩性種類

根據現地勘查，本區域岩層屬於更新世卓蘭層，以青灰色至淡灰色泥質細粒至粗粒混濁砂岩、粉砂岩，砂質頁岩及砂頁岩互層所組成。砂岩單層厚度約 0.1~0.5 公尺，部份砂岩常複合形成 1~2 公尺的厚砂岩，砂岩的沉積構造以平行層理、低角度交錯層理、圓丘狀交錯層理、大型交錯層理、波狀與壓扁狀層理為主。夾於砂岩之中的砂質頁岩呈灰黑色，層厚多為 0.2~0.5 公尺，亦有厚層頁岩 5~8 公尺夾於塊狀砂岩間。而集集攔河堰堰址及下游側則大致可細分出露層狀砂岩、砂頁岩互層與與呈現塊狀之極厚層砂岩 3 種岩性，如圖 3-40。

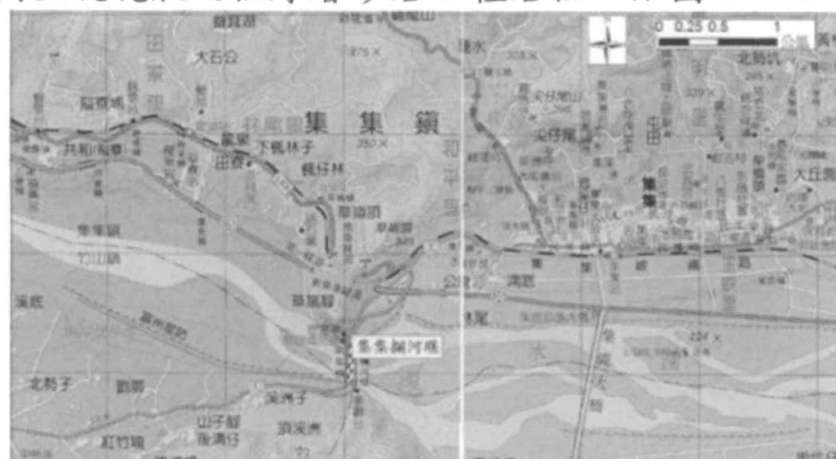
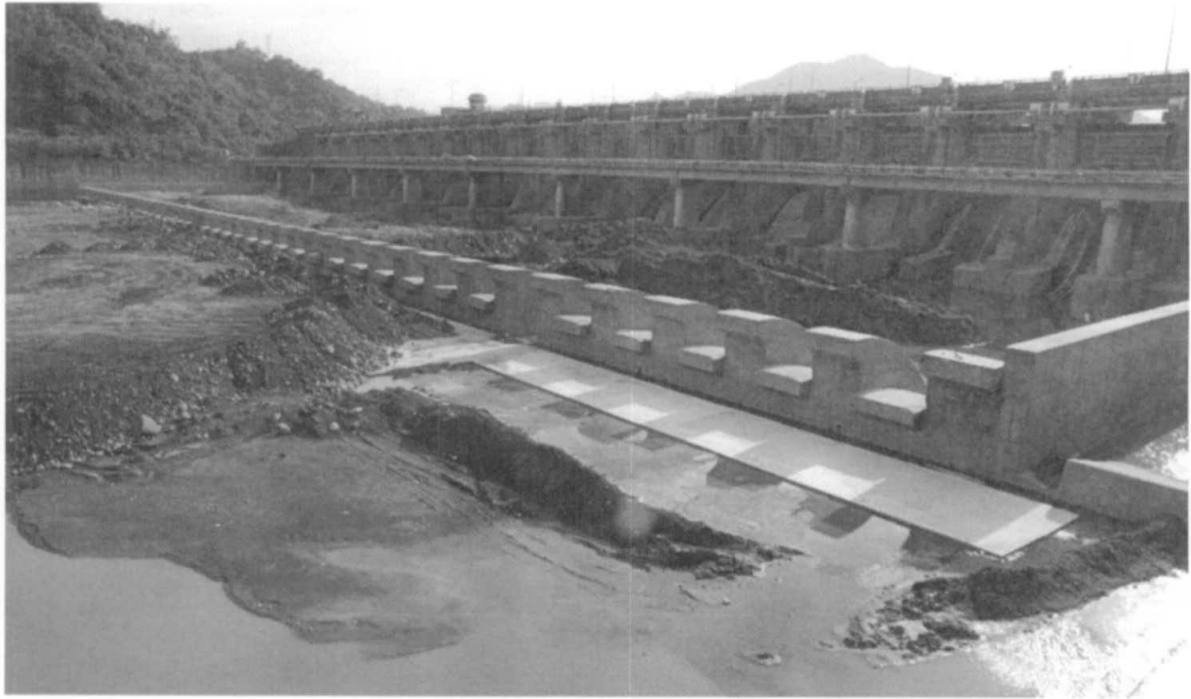


圖 3-38 集集攔河堰位置圖



(225666, 2634753, N22E, 990502)

圖 3-39 集集攔河堰 99.05.02 照片

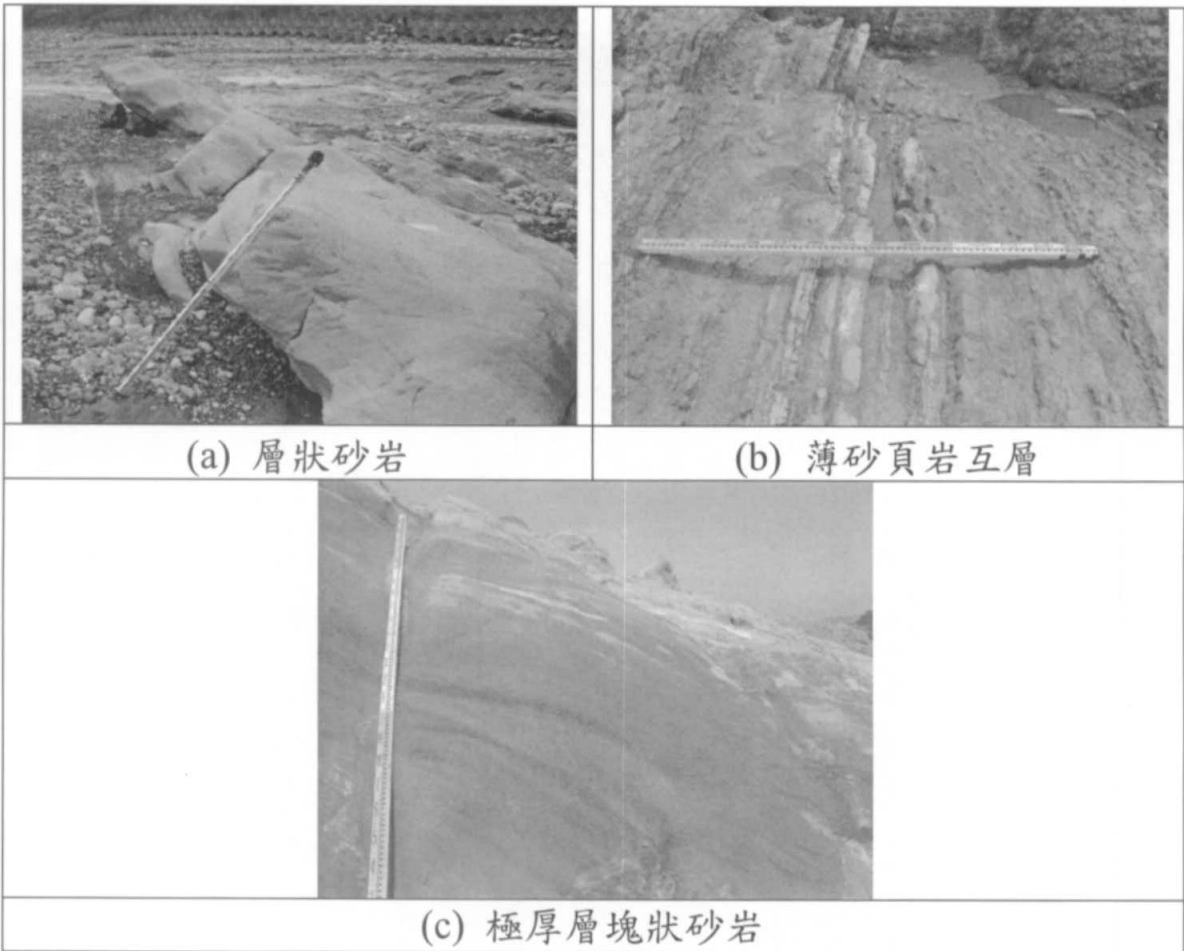


圖 3-40 集集堰現地岩性露頭照片

(二)地層位態與水流流向關係

根據現地量測，集集攔河堰下游 150 公尺附近的地層位態約為 N20W/40N。水流量小時，水流順著地層走向沿著槽溝較低處沖刷，水流量大時，採全面溢流沖刷。露頭量測位置主要為堰下游初鄉斷層之前的岩層，如圖 3-41 所示。堰前地質分層之岩性與描述如表 3-12。

依現地之調查結果，集集攔河堰下游岩層走向與河道斜交，中等角度傾向上游，岩性包含砂頁岩互層及厚塊狀砂岩。自攔河堰靜水池下游側約 300 公尺後，岩層位態出現劇烈變化，直至攔河堰下游約 750 公尺處，研判此岩層位態之變化應是受到初鄉斷層之影響。



表 3-12 集集堰地質岩性與描述

分層	岩性	地層描述
BS	層狀砂岩	此層層厚不超過 2 m，有時亦在 1 m 以下，屬厚岩層。
SS/Sh	砂頁岩互層	此層為薄砂頁岩互層，層理、節理均較發達。
MS	極厚層砂岩	此層層厚超過 2 m 以上，屬極厚層砂岩，較屬塊狀結構，節理間距達 0.6 m，節理面粗糙，呈波浪狀。

註：以上之岩性係依水利局，「集集共同引水計畫攔河堰工程基本設基-地質鑽探與試驗報告」分類，民國 80 年。

(三) 岩石強度

根據現地量測結果，砂岩單壓強度約為 30 MPa，砂頁岩互層單壓強度介於 16~41.5 MPa，水利局(民國 80 年)之鑽探試驗單壓強度平均值介於 14~38 MPa 之間，以砂岩最高，砂頁岩互層最低。地表面上砂頁岩互層，則因裸露於河床之頁岩多風化，於現場僅能測得砂頁岩互層中薄互層砂岩單壓強度。

依據本計畫第 1(民國 98)年度岩力試驗結果顯示，砂岩單壓強度最高(平均值 30 MPa)，其次為頁岩(平均值 10 MPa)，砂頁岩薄互層最弱(平均值 2 MPa，沿層面破壞)。切線模數與單壓強度比介於 100~300。巴西人試驗結果可看出砂岩與頁岩之張力強度差距不大，約為 1.6~1.75 MPa。砂頁岩互層則在 0.21~0.8 MPa。

(四) 調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物

由於本區域有斷層通過，因此岩層有局部受大地應力影響所產生的剪力節理，以及解壓節理。其風化度不一，隨暴露時

間而改變，粗糙度多為平滑平面狀及粗糙平面狀，內無填充物。

(五)沖蝕特徵探討

本計畫第 1(民國 98)年度於莫拉克颱風後至集集攔河堰現地勘查，攔河堰下方河道的水位高度約 1.5 公尺，靜水池尾攔下游側以及水泥護坦下游側均有顯著跌水落差，如圖 3-42，為造成堰前局部沖刷的主因。河道整體沖蝕狀況之主要特徵皆為沿岩層走向方向的槽溝狀差異侵蝕，岩性上以砂頁岩互層、頁岩下切幅度較大較深，如圖 3-43。

集集攔河堰水流狀況約與該區域岩層走向呈約略 60 度之斜交，堰前地層由層狀砂岩與砂頁岩薄互層交互出現。由於兩者抗沖蝕能力不同，造就了集集攔河堰堰前產生差異侵蝕特性。最終僅層狀砂岩佇立於河床上，而砂岩間的薄互層受侵蝕形成溝槽。

圖 3-41 為集集攔河堰壩堰前地質圖。由圖 3-41 堰前地質剖面圖與現場調查發現，堰前 150 公尺以內岩層露頭不明顯，且地形起伏平緩，整體高差約在 1 公尺以內。而愈往下游才看到抗沖蝕能力較佳的層狀砂岩露頭形成側壁，兩砂岩間抗沖蝕能力較差之砂頁岩互層受沖蝕而形成槽溝。

水流與岩層走向呈高角度斜交，沖刷坑堰前 100 公尺處愈接近下游則發現流向逐漸受岩層槽溝發展影響，導致水流由低角度斜交逐漸形成平行岩層層面發展。

綜觀上述，水流之流向與岩層走向呈高角度斜交，以及水流能量大小，搭配為岩層之岩性抗沖蝕特性差異，造就了集集攔河堰不同的沖刷機制：

- 1、堰前因水流能量較大，超過了堰前地層抗沖蝕能力之門檻值，導致堰前 150 公尺內地層起伏平緩，即使抗沖蝕能力較佳的層狀砂岩也無法抵抗水力沖刷(圖 3-44)，故無

槽溝狀發展。

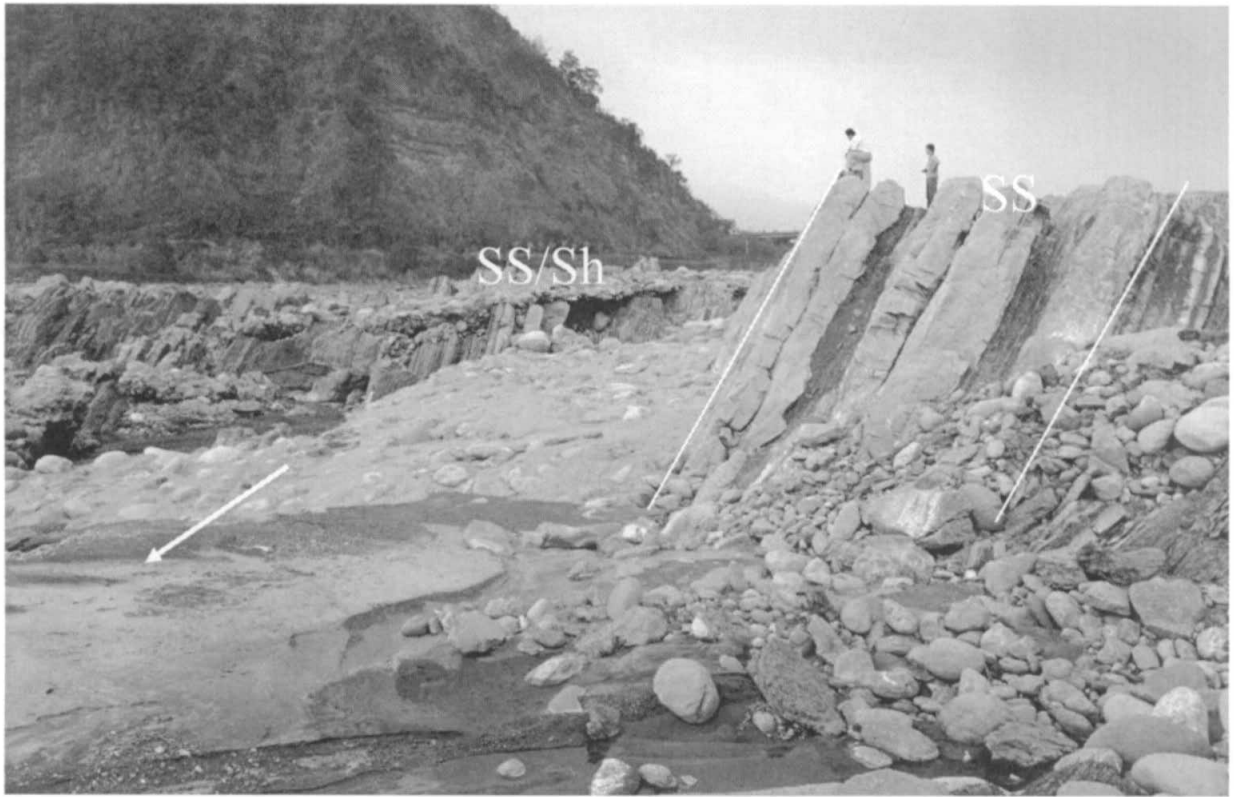
- 2、愈接近下游水流能量較小，抗沖蝕能力較高之層狀砂岩淘刷速率較慢，而砂頁岩薄互層相對沖蝕速率較快，最終層狀砂岩形成溝槽之側壁，而砂頁岩薄互層則受侵蝕形成溝槽(圖 3 - 45)。
- 3、由於水流流向與岩層走向呈大角度斜交，儘管造成槽溝狀侵蝕，但與後村堰或石岡壩相較，因為槽溝形成流路而朝堰址溯源侵蝕通過堰址之趨勢較為緩和。

根據第 1(民國 98)年度汛期結束，現地抗沖蝕能力調查，此區岩性單壓強度在層狀砂岩與砂頁岩薄互層兩種岩性中有明顯差異。層狀砂岩抗沖蝕能力 K_h 明顯高於砂頁岩薄互層。現地抗沖蝕能力調查點位及調查表如圖 3 - 46、表 3 - 13。



(225666, 2634753, N22E, 980811)

圖 3 - 42 莫拉克颱風後集集攔河堰洩洪



(225250, 2634963, N60E, 980303)

圖 3-43 集集攔河堰下游河道因岩性造成之差異侵蝕



圖 3-44 集集攔河堰堰前層狀砂岩



圖 3-45 集集攔河堰下游層狀砂岩



圖 3-46 集集堰岩盤沖蝕特性調查點

表 3-13 集集攔河堰岩盤沖蝕特性補充調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	層狀砂岩	N20W/30N	28	51	1	0.50	719	98.08.22
1	層狀砂岩	N24W/52N	30	54	1	0.55	889	98.08.22
2	層狀砂頁岩互層 (破碎)	N20W/40N	2	7	0.33	0.49	2	98.08.22
3	砂頁岩互層	N10W/56N	2	5	0.33	0.60	1	98.08.22
4	層狀砂岩	N5E/45S	33	31	1	0.51	517	98.10.12
5	層狀砂岩	N5E/50S	21	30	1	0.53	336	98.10.12
6	砂頁岩互層	N5E/40S	2	25	0.33	0.49	7	98.10.12
7	砂頁岩互層	N5E/45S	2	48	0.33	0.49	13	98.10.12
8	層狀砂岩	N10W/35N	21	53	1	0.55	614	98.10.12
9	層狀砂岩	N10W/45N	21	51	1	0.58	619	98.10.12

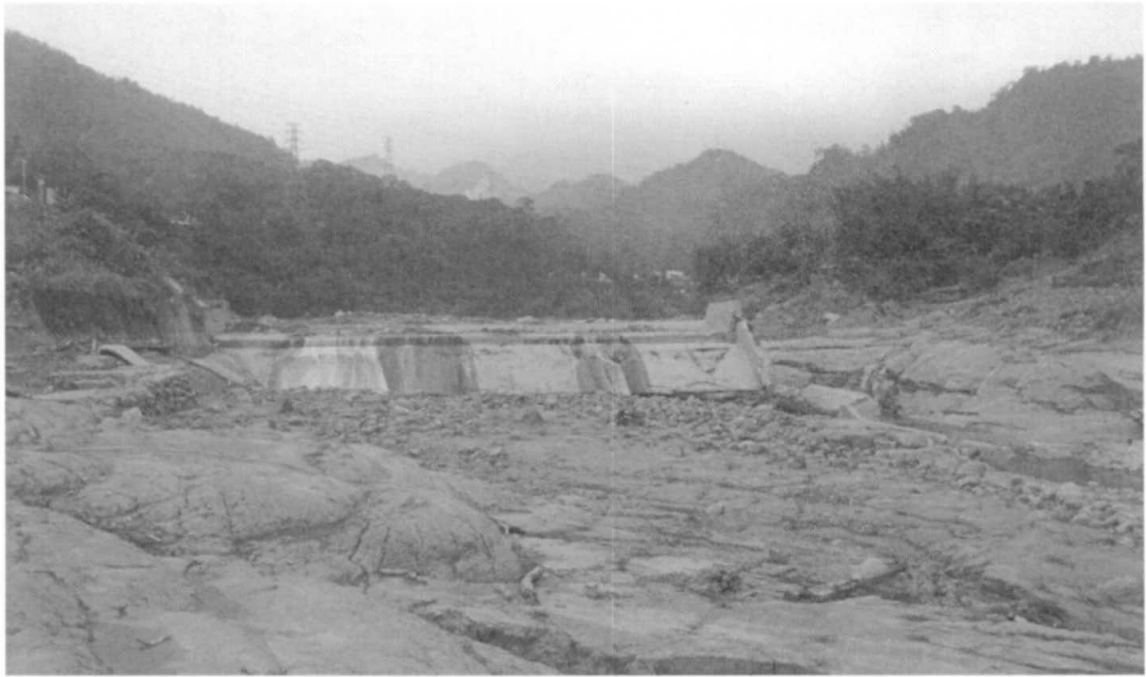
註： M_s 材料強度、 K_b 顆粒/塊體尺寸、 K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件

六、觸口攔河堰(八掌溪)

觸口攔河堰於民國 88 年 5 月 7 日完成，位於嘉義縣觸口村八掌溪流域，集水面積約 85 平方公里，壩體型式為自由溢流堰，觸口堰位置如圖 3-47 所示。觸口攔河堰完工後曾多次進行保護及修復工程，由最初之自由溢流堰及靜水池，至民國 98 年 7 月修復後計有堰體、2 道溢流道及 4 階靜水池，但於民國 98 年八八水災後多數被沖毀淹埋。觸口堰民國 99 年照片如圖 3-48 所示。



圖 3-47 觸口攔河堰位置



(208636, 2593087, E, 990510)

圖 3-48 觸口攔河堰 99.05.10 照片

(一) 岩性種類

觸口攔河堰附近地層屬上新世之六重溪層，地層可比對於中北部之卓蘭層，岩性以泥質砂岩、砂頁岩互層、及砂質頁岩為主，礦物主要為石英、方解石、長石、黏土，含有孔蟲、貝類為主密集層和分散產狀化石。觸口攔河堰堰址及附近區域之岩性大致以泥質粉砂岩與泥岩組成為主，如圖 3-49。

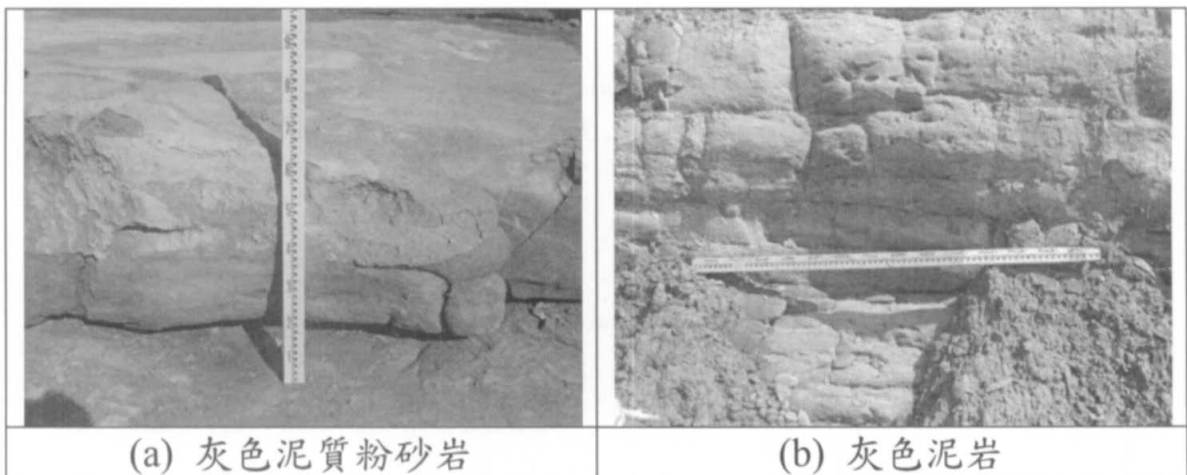


圖 3-49 觸口堰現地岩性露頭照片

(二)地層位態與水流流向關係

根據現地量測，觸口攔河堰堰址附近的地層位態約為N60E/10N，地層走向與水流流向大致平行，距堰址較下游之河道岩層走向則略為與水流流向呈斜交，露頭量測位置包含堰體上游、左側及右岸及較下游河道段具代表性之岩層，如圖 3-50 所示。觸口堰之堰前地質岩性與描述如表 3-14。

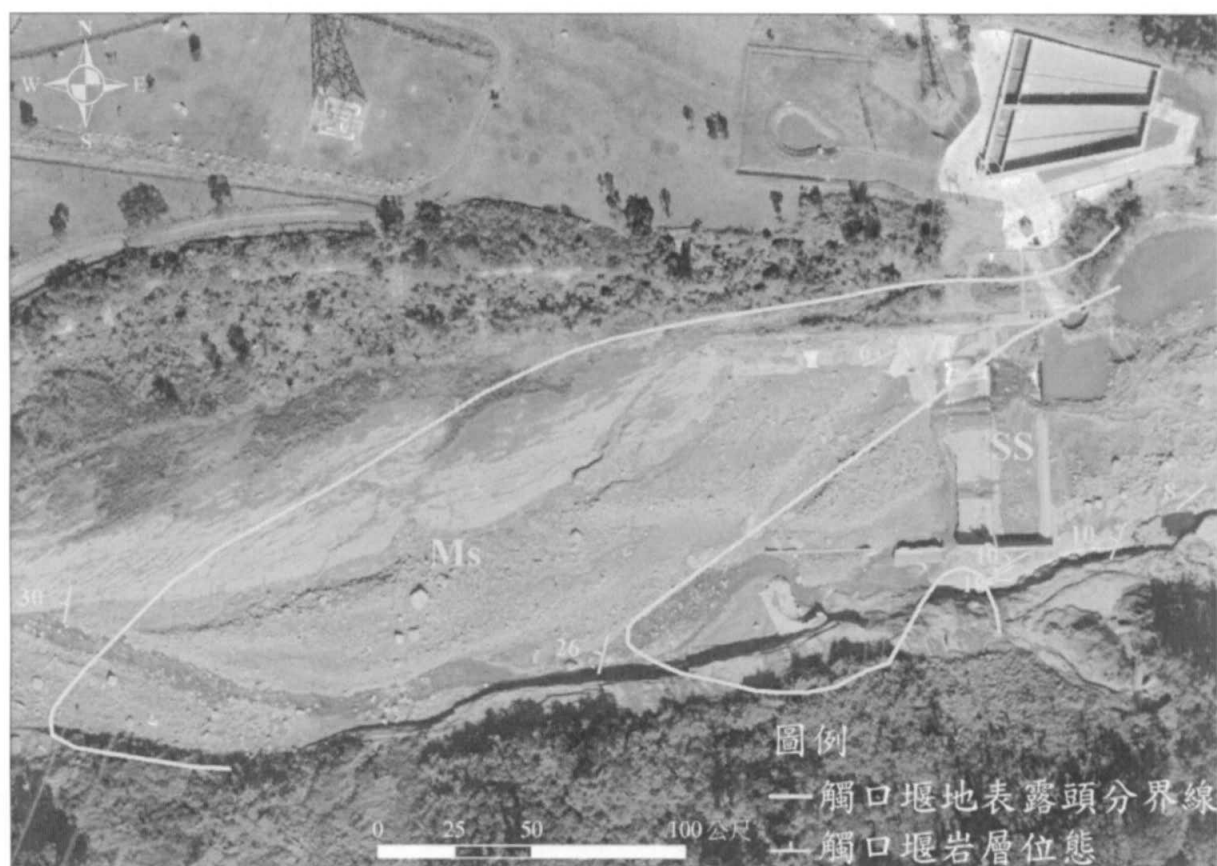


圖 3-50 觸口攔河堰地表地質圖

表 3-14 觸口攔河堰地質分層與描述

分層	岩性	地層描述
SS	灰色泥質粉砂岩	節理不發達之極厚層泥質粉砂岩。
Ms	灰色泥岩	極厚層泥岩，此層常見解壓節理，且表面易風化且因乾濕循環而形成碎裂小塊體。

(三)岩石強度

根據現地史密特錘推估單壓強度量測結果，表面風化程度較低之灰色泥質粉砂岩單壓強度約為 10 MPa，表面風化程度較高的泥岩單壓強度約為 5 MPa。

(四)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物

本區域並無明顯因應力環境所產生的節理，但泥岩或是泥頁岩表面多因風化而產生的解壓節理，其風化度不一，隨暴露時間而不同。粗糙度多為平滑平面狀，節理面新鮮無填充物。

(五)沖蝕特徵探討

根據民國 98 年 3 月的現地勘查，觸口攔河堰正由自來水公司第五區管理處發包進行「觸口攔河堰跌水工基礎淘空修復工程」。莫拉克颱風過後再度現地勘查，發現原左側混凝土牆多數已沖毀，堰體遭破壞淤埋，水流改道攔河堰外左側，基礎旁下切出一條新河道，如圖 3-51。此處之泥質粉砂岩節理不發達，岩層表面多有滑槽(flute)形成，水流沿粉砂岩岩層表面之滑槽伴隨窩流產生而逐漸下切，形成下切切穿與壺穴沖蝕(cavitation)之沖蝕特徵，如圖 3-51、圖 3-52 所示。觸口堰之堰體破壞淤埋狀況如圖 3-53 所示。

根據民國 99 年 5 月 1 日，現地抗沖蝕能力調查，此區岩性單壓強度在泥質粉砂岩與泥岩薄兩種岩性中明顯差異不明顯。泥岩抗沖蝕能力因受到高度乾濕循環風化產生解壓節理，使得 K_h 低於堰址附近之泥質粉砂岩。現地抗沖蝕能力調查點位及調查表如圖 3-54、表 3-15。

單寬流量與河道下切的速率有很大的關係，以觸口攔河堰為例，在莫拉克颱風之前八掌溪流經觸口堰上方(圖 3-55)，雖然下游岩盤也有沖刷情形，但並不迅速。圖 3-56 虛線為莫拉

克颱風之洪水沖毀觸口堰左側護岸，水流沿著左岸窄小區域沖刷，造成單寬流量遽增，單一洪水事件河道下切量可達5公尺，並使觸口堰失去取水功能，可見單寬流量對沖刷行為之影響。



(208744, 2593050, N80E, 980821)

圖 3 - 51 觸口攔河堰莫拉克颱風後堰外左側改道下切狀況



圖 3 - 52 觸口堰堰體左岸切穿與壺穴沖蝕



(a) 98.03.03 攔河堰修復



(b) 98.08.21 左岸混凝土牆沖毀，切穿出新河道



(c) 99.05.01 左岸新河道無太大變化，土石漸淤積於堰體上

圖 3 - 53 觸口攔河堰堰體破壞淤埋狀況



圖 3-54 觸口攔河堰岩盤沖蝕特性調查點



圖 3-55 觸口堰正射影像(莫拉克颱風前)



圖 3-56 觸口堰正射影像 99.1.10(莫拉克颱風後)

表 3-15 觸口攔河堰岩盤沖蝕特性補充調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	灰色極厚泥質粉砂岩	N60E/10N	9	30	1	1.05	246	98.08.21
1	灰色極厚泥質粉砂岩	N60E/10N	5	21	1.5	1.14	149	98.08.21
2	灰色極厚泥質粉砂岩	N60E/10N	11.5	31	1	1.09	385	98.08.21
3	厚層泥岩	N50E/8N	5	15	1	1.09	68	98.08.21
4	厚層泥岩	N65E/6N	5	29	1	1.09	132	98.08.21
5	灰色極厚泥質粉砂岩	N22E/10N	9.5	31	1	1.14	295	99.05.01
6	灰色極厚泥質粉砂岩	N22E/10N	9	40	1	1.14	357	99.05.01
7	厚層泥岩	N14E/26N	5	36	1	1.09	168	99.05.01
8	厚層泥岩	N10E/30N	5	29	1	1.09	132	99.05.01
9	厚層泥岩	N70E/10N	5	29	1	1.09	132	99.05.01

註： M_s 材料強度、 K_b 顆粒/塊體尺寸、 K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件

七、曾文東口攔河堰(曾文溪)

曾文水庫大壩、溢洪道、電廠及東口導水堰等主體工程於民國 62 年 4 月 28 日完成。東口導水堰採用溢流式混凝土重力堰，建造於大壩下游 6 公里，位於烏山頭水庫東口進水口下游約 40 公尺處，東口堰之位置如圖 3-57 所示。東口堰橫跨曾文溪，主要為截取水庫放水量使導經東口隧道流入烏山頭水庫調節應用。東口堰民國 99 年現況照片如圖 3-58 所示。



圖 3-57 東口攔河堰位置圖



(198267, 256563, W, 990628)

圖 3-58 東口攔河堰 99.06.28 照片

(一)岩性種類

依地調所五萬分之一地質圖，東口堰附近地層屬上新世之鹽水坑頁岩層或隘寮腳層。兩地層約與臺灣北部出磺坑剖面十六分頁岩以及中部魚藤坪砂岩岩性相近。東口堰堰址以鹽水坑頁岩為主，鹽水坑頁岩以巨厚、塊狀之頁岩為主，受強烈之生物擾動，偶夾黃灰色砂岩或泥質砂岩，常呈凸鏡狀向兩端尖滅。砂岩多半具有平行層理，偶有波痕和交錯層理。隘寮腳層則由薄層的頁岩和粉砂岩所組成的帶狀互層為主。東口堰堰址區域下游出露之岩盤如圖 3-59 所示。



圖 3-59 東口攔河堰下游出露之鹽水坑頁岩

(二)地層位態與水流流向關係

依現有地質資料與現地調查比對，此區域之岩層位態大致呈現東北走向，向東南傾斜(N65E/44SE)，水流之流向大致由北向南與地層走向成斜交，如圖 3-60 所示。東口堰堰址地質岩性與描述如表 3-16。



圖 3-60 東口堰地表地質圖

表 3-16 東口攔河堰地質分層與描述

分層	岩性	地層描述
Sh	極厚層灰黑色頁岩	頁岩為主，偶夾黃灰色砂岩或泥質砂岩。

(三) 岩石強度

依地調所兩萬五千分之一岩性分佈圖與「都會區及周緣坡地環境地質資料庫圖集說明書」資料，東口堰之主要岩性為厚層、塊狀之頁岩為主，其單壓強度分類屬弱岩類(軟岩)，單壓強度落在 10~25 MPa 之間。

(四) 沖蝕特徵探討

依第 1(民國 98)年度 7 月現地勘查，東口堰堰前沖刷形成一大型沖刷坑。民國 98 年 8 月經歷莫拉克颱風洪水退卻後勘查，堰前沖刷坑範圍擴大，沖刷坑被卵礫石覆蓋且右岸護岸局部破損，如圖 3-62(b)。民國 99 年 6 月汛期前現地調查並持續定點定向攝影觀測，沖刷坑維持現狀無擴大，如圖 3-61 所示，堰址下游右岸破損之護岸已修復，如圖 3-62(c)。



(198042, 2568652, S10E, 990628)

圖 3-61 東口堰堰前沖刷坑



(a) 98.07.13 莫拉克風災前



(b) 98.08.22 右岸護岸局部破損



(c) 99.06.28 右岸護岸破損修復

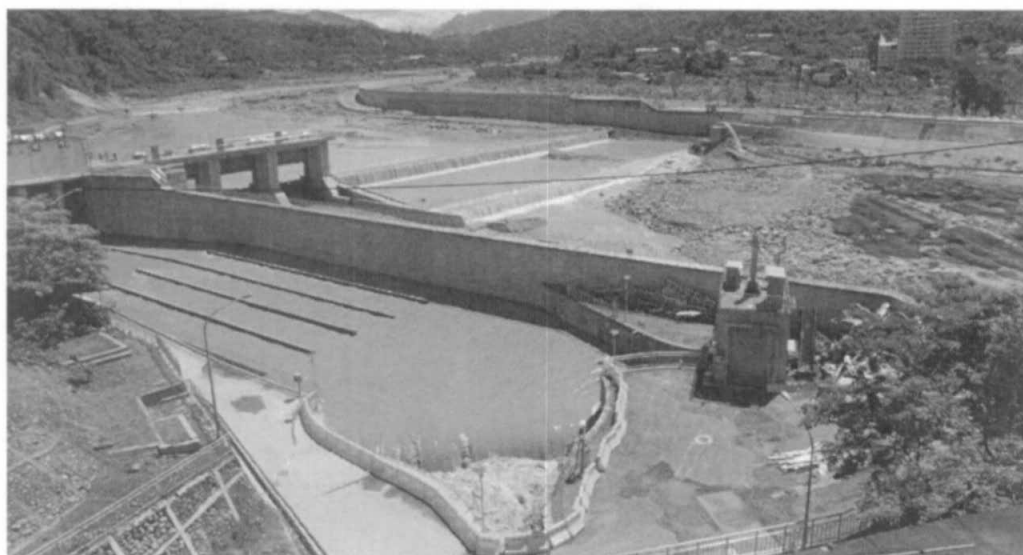
圖 3 - 62 東口堰下游右岸護岸破損情形

八、甲仙攔河堰(高屏溪)

甲仙攔河堰於民國 88 年 4 月完工，位於於高雄縣甲仙鄉旗山溪，新甲仙大橋上游約 400 公尺處，其位置如圖 3-63 所示。甲仙攔河堰壩高 7 公尺，長約 120 公尺，為混凝土重力式堰。主要功能以輸水隧道將旗山溪豐水期之剩餘水量引入南化水庫。甲仙攔河堰民國 99 年照片如圖 3-64 所示。



圖 3-63 甲仙攔河堰位置圖



(207223, 2553602, N50E, 990628)

圖 3-64 甲仙攔河堰 99.06.28 照片

(一)岩性種類

甲仙攔河堰附近地層屬中新世之鹽水坑頁岩，地層可比對於中北部之桂竹林層，岩性上鹽水坑頁岩以深灰色頁岩為主，偶夾黃灰色砂岩或泥質砂岩，常呈凸鏡狀向兩端尖滅。砂岩多半具有平行層理，偶有波痕和交錯層理。甲仙堰下游出露之岩層如圖 3-65 所示。



圖 3-65 甲仙攔河堰下游出露之鹽水坑頁岩

(二)地層位態與水流流向關係

依據現地地質露頭調查，本區岩層位態為 N45E/40S。經現地初步判釋，此區域水流流向與地層傾向相同，大約夾 10 度，屬於順向河類型。甲仙堰現地岩層位態調查如圖 3-66 所示。地質岩性與描述如表 3-17。



圖 3 - 66 甲仙堰地表地質圖

表 3 - 17 甲仙堰堰址地質岩性與描述

分層	岩性	地層描述
Sh	極厚層 灰黑色頁岩	以極厚層頁岩為主，偶夾有薄砂岩層層。新鮮岩層較呈現塊狀形式。河道上多屬高度風化之極厚層頁岩，除層理發達，亦常見解壓節理。

(三)岩石強度

現地地質調查結果，位於堰前之岩層屬極厚層頁岩，其新鮮頁岩岩盤單壓強度可達 10~25 MPa。現地另偶夾有一薄層砂岩，其單壓強度則較高約為 30~40 MPa。

(四)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物

本區域新鮮頁岩除層理發達外，亦可見到解壓節理，節理粗糙度多為平滑平面狀，內無填充物。頁岩暴露於河道表面上風化後，崩解成片狀或碎屑狀，如圖 3-67 所示。

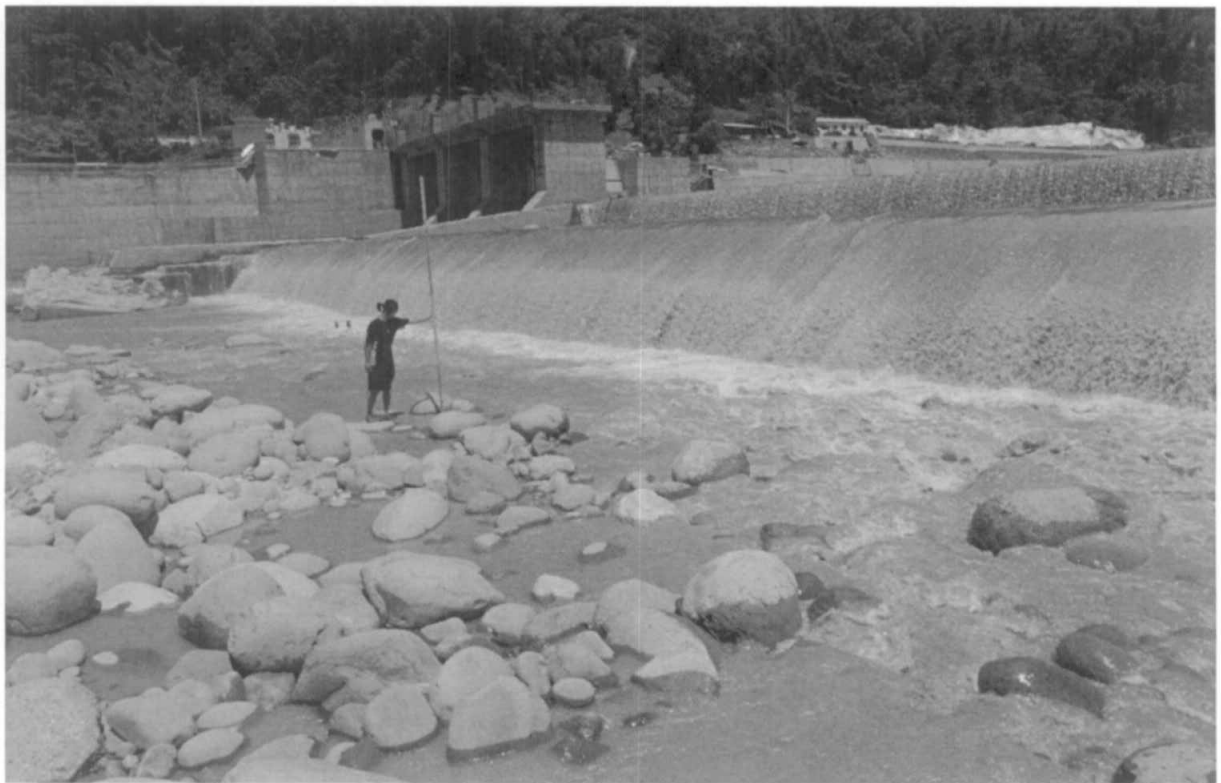


圖 3-67 甲仙堰頁岩之解壓節理及風化現象

(五)沖蝕特徵探討

此區水流在靜水池前與河道岩床交界處有高程落差，水流

的跌水效應在岩床上形成沖刷坑，如圖 3-68，為此區域岩盤主要的沖刷問題。另外，河道上伴隨有岩層沖刷下降的現象，主要應與容易沖刷風化的頁岩岩性相關，而於民國 98 年 8 月莫拉克颱風後，堰體下游護坦被沖毀，靜水池基礎下方岩盤暴露形成沖刷坑。本(民國 99)年度持續對堰體下游靜水池與甲仙堰下游河道沖刷情形等進行定點定像攝影觀測。沖刷坑民國 99 年現況如圖 3-68 所示，形成演變如圖 3-69 所示。堰體下游河道除莫拉克颱風後覆蓋於河道上之卵礫石護甲層被洪水沖走，但河道沖蝕現象不甚明顯，如圖 3-70 所示。堰體之現況如所示。根據民國 99 年 6 月 1 日現地抗沖蝕能力調查，此區岩性以極厚層頁岩為主，其抗沖蝕能力由風化之程度略有差異。現地調查點位及調查表如圖 3-71、表 3-18。

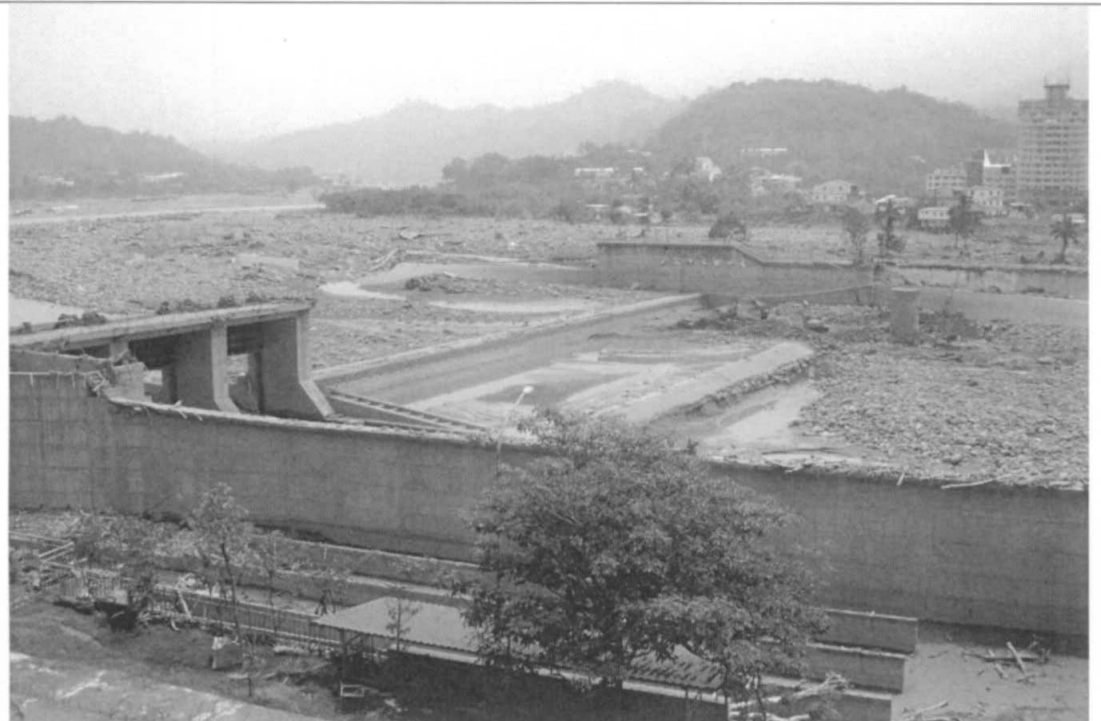


(207380, 2553694, N30W,990629)

圖 3-68 甲仙堰靜水池下方沖刷坑現況

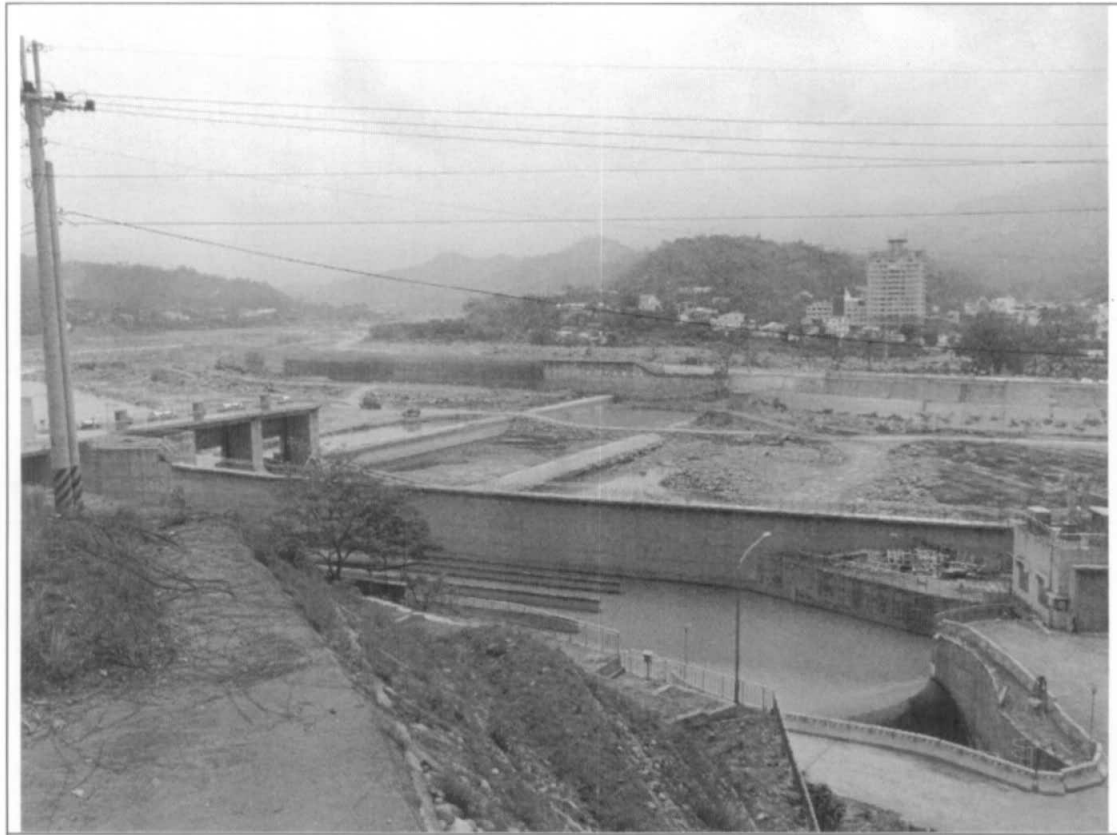


(a) 98.07.13 護坦施作完畢

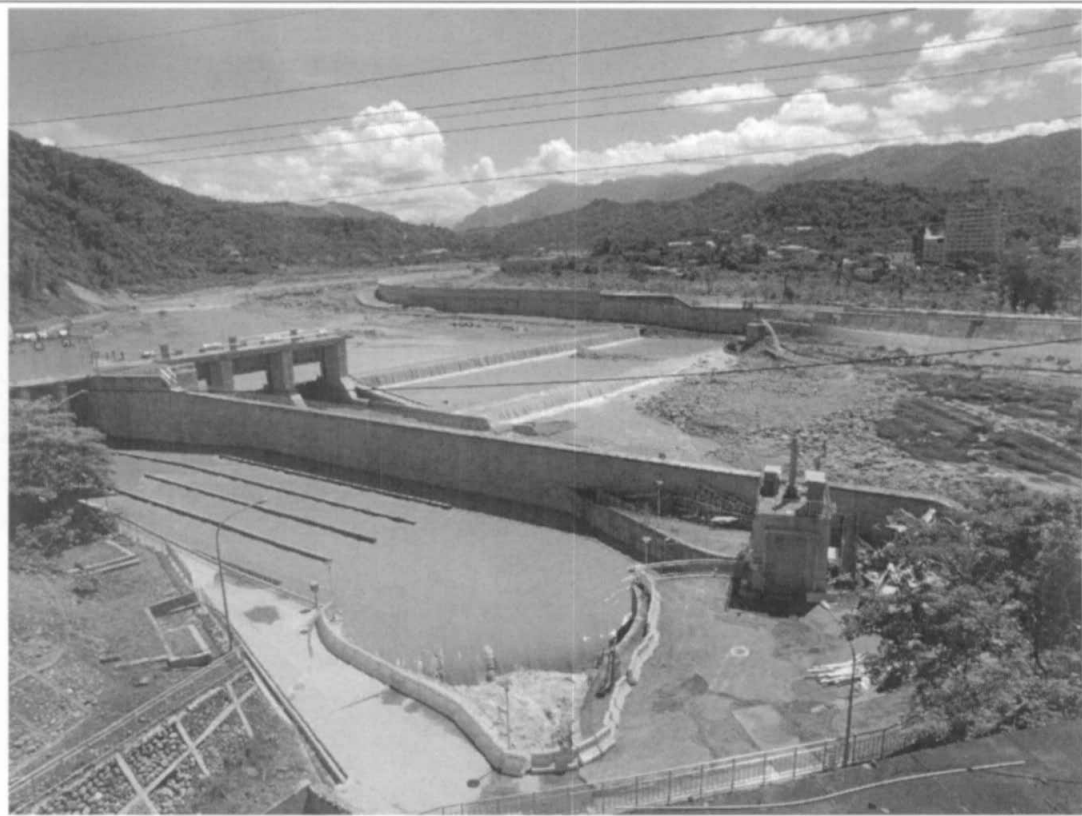


(b) 98.08.22 莫拉克風災後，護坦被沖毀，靜水池下方形成沖刷坑

圖 3 - 69 甲仙堰靜水池與下游沖刷坑現況



(c) 99.05.06 堰體上游堤岸施工，冲刷坑出露



(d) 99.06.29 淨水池下方冲刷坑無太大變化

圖 3 - 69 甲仙堰靜水池與下游冲刷坑現況(續)



(a) 98.3.2 靜水池前岩盤裸露



(b) 98.7.13 於裸露岩盤上覆蓋卵石保護



(c) 98.8.22 覆蓋卵石被大水沖走，但河道沖蝕現象不明顯



(d) 99.5.6 下游河道沖刷無太大變化

圖 3 - 70 甲仙堰下游河道變化



圖 3-71 甲仙攔河堰抗沖蝕能力調查點

表 3-18 甲仙攔河堰沖蝕特性補充調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	極厚層頁岩	N40E/45S	17.5	32	1	0.51	289	98.10.12
1	極厚層頁岩	N40E/45S	25	31	1	0.51	398	98.10.12
2	極厚層頁岩	N40E/45S	13	32	1	0.51	211	98.10.12
3	極厚層頁岩	N55E/45S	9.5	30	1	0.53	132	98.10.12
4	薄層砂岩	N40E/50S	41.5	32	1	0.54	725	98.10.12
5	薄層砂岩	N40E/45S	28	24	1	0.53	359	98.10.12
6	極厚層頁岩	N40E/40S	28	30	0.5	0.53	225	99.06.29
7	極厚層頁岩	N40E/40S	17	30	1	0.53	270	99.06.29
8	極厚層頁岩	N40E/40S	17.5	30	1	0.49	255	99.06.29
9	極厚層頁岩	N40E/40S	21.5	29	1	0.46	291	99.06.29
10	極厚層頁岩	N40E/40S	16.5	29	1	0.46	223	99.06.29

註： M_s 材料強度、 K_b 顆粒/塊體尺寸、 K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件

第肆章 石岡壩下游岩盤之抗沖蝕能力調查

為進行石岡壩下游岩盤的沖刷過程的詳細評估工作，調查工作上必須更加完整，以充分獲得必要的岩盤沖刷相關參數，包括水力特性、岩石特性、沖蝕狀況、以及岩石力學參數等，調查之工作數量整理如表 4-1 所示。

由水力特性分析可以獲得石岡壩下游岩盤於不同流況之下的水深、流速、剪應力等參數，由沖蝕特性調查包含了地形資料的蒐集、地表露頭調查，可以獲得堰前地質圖及沖刷坑演進過程等地形、地質參數，鑽探及試驗可以獲得單壓強度、張力強度等力學參數，這些參數將提供岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析使用。

表 4-1 石岡壩下游岩盤抗沖蝕能力調查工作數量表

工作項目	數量
(一)攔河堰下游水力特性分析	1 式
(二)沖蝕特性調查	1 式
(三)鑽探取樣及現地試驗	1 式
1.鑽探及取樣	50 公尺
2.孔內造影	40 公尺
(四)室內岩石試驗	1 式
1.物性試驗	12 組
2.消散耐久試驗	6 組
3.單壓試驗	6 組
4.張力試驗	6 組

一、石岡壩下游水力特性分析

由以往研究可知，岩盤之抗沖蝕能力與水流條件具有高度相

關。為獲得攔河堰下游河段之水力特性，在現有分析工具及模式功能限制下，本工作區分為 2 個主要階段，(1)由攔河堰上、下游河段之水理分析結果，獲得各區域或不同斷面下之水力條件，此可由一般水深平均之一維、二維水理模式分析而得。(2)獲得攔河堰上、下游河段之水深平均水力條件後，再以此水力條件為基礎，配合局部區域因為構造物、地形特徵引起之水躍(hydraulic jump)或噴流(jet flow)等效應，造成如 headcut、slope chagne 等形式對下游岩盤表面所施加的能量進行分析，作為岩盤局部沖刷評估工作之水力輸入參數。本研究水力特性分析之流程如圖 4-1 所示。

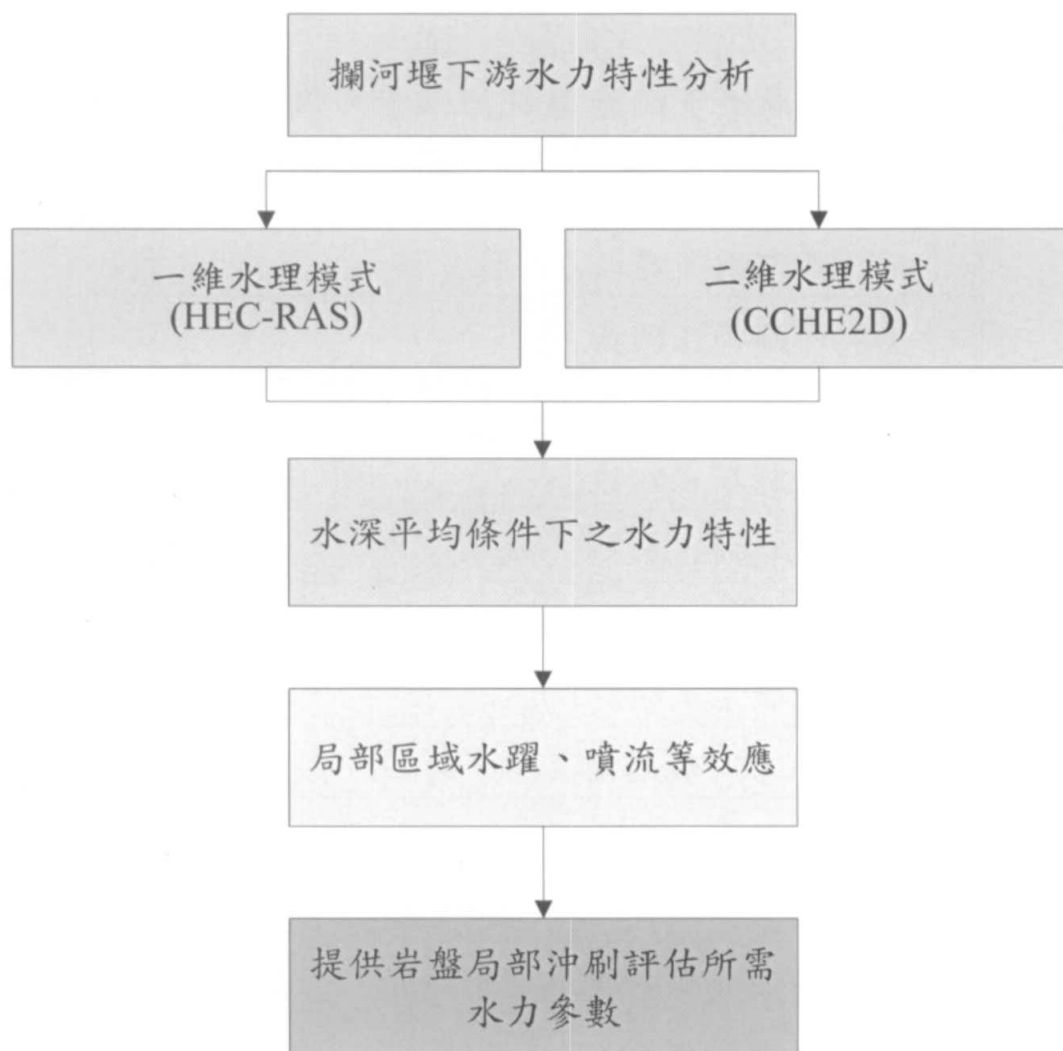


圖 4-1 攔河堰下游水力特性分析流程圖

(一)一維水力特性分析

一維水力分析採用 HEC-RAS 模式模擬，以瞭解攔河堰構造物所在斷面位置與鄰近河段之水力條件。該程式為美國陸軍工兵團所發展的一維模式，能分析簡易河道或複雜河道、單一河道或網狀河道、自然管道或人工管道、定量流或變量流演算，以及可應用於超、亞臨界交替出現之混合流況，及水工結構物、跨河建造物等情況，並可快速計算獲得結果。

HEC-RAS 模式之參數設定條件如下：

1. 地形資料：民國 97 年「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(1/4)」報告施測之河道大斷面，斷面範圍由河口至 91 號斷面。
2. 上游邊界條件：「大甲溪流域聯合整體治理規劃檢討」所分析 100 年重現期距洪峰流量。
3. 下游邊界條件：常水深水位。
4. 河床糙度值：參考民國 94 年「大甲溪流域聯合整體治理規劃檢討」設定各斷面之糙度值。

模擬民國 97 年斷面不同重現期距流量下之水位、福祿數、流速分佈等，表 4-2 為石岡壩河段於 100 年重現期距洪水流量下之模擬成果，可發現石岡壩位置 100 年重現期距洪水流量下(8,800 cms)之最高斷面平均流速可達每秒 11.46 公尺，下游亦呈現超亞混合流流況，為相當複雜之水流條件。

表 4-2 大甲溪石岡壩段計畫洪水量水理因素成果表

断面	河心距 (m)	計畫洪水量(100年重現期距)水理因素						備註
		水位 (m)	福祿數	流速 (m/s)	水面寬 (m)	通水面積 (m ²)	能量坡降	
31	20,016	224.63	1	6.37	337.57	1382.38	0.0101	
31-1	20,211	227.34	0.41	3.54	326.28	2485.74	0.0014	
32	20,601	229.3	1	6.53	313.51	1348.04	0.0101	
32-1	20,943	232.02	1.21	7.37	317.26	1193.89	0.0167	舊山線鐵路橋
33	21,217	235.63	0.59	3.95	490.64	2226.39	0.0035	
34	21,824	240.59	1.01	5.6	498.95	1571.82	0.0113	
35	22,516	244.16	1.54	10.61	171.82	829.6	0.0229	埤豐橋
35-1	22,610	243.77	1.66	11.46	157.72	768.07	0.0271	
36	23,356	273.6	1.02	6.53	319.26	1346.74	0.0138	石岡壩
36-1	23,364	275.04	0.53	4.23	317.71	2081.98	0.0025	
37	23,418	276.84	0.71	4.33	533.82	2030.59	0.0051	
38	24,538	279.2	0.58	4.2	388.75	2096.72	0.0031	長庚橋
39	25,076	281.9	0.65	3.77	686.56	2334.51	0.0045	
40	25,724	285.38	0.71	4.08	642.74	2154.61	0.0055	
41	26,406	296.13	1	7.33	220.32	1200.52	0.0093	
42	27,045	301.48	0.92	6.12	320.51	1437.66	0.0086	
43	27,558	304.03	0.85	7.03	179.87	1250.94	0.0067	
44	28,141	309.27	0.58	3.67	582.92	2399.53	0.0033	
45	28,749	312.87	1.01	5.24	616.2	1680.85	0.0119	
46	29,309	317.16	0.86	4.56	680.78	1929.4	0.0085	
47	29,843	323.03	1.01	5.56	515.87	1583.35	0.0113	

(二)二維水力特性分析

二維水力特性分析主要分析不同重現期距之局部二維水理因子，以作為堰址下游採沙坑等沖刷機制評估之用。二維水理

分析採用 CCHE2D 模式，該模式由美國國家計算水科學與工程中心所研發，曾應用於國外多條河川之水力算相關案例，成效頗為良好。

1、模擬條件及檢定

本研究石岡壩二維水理局部模擬條件方面，以石岡壩壩址上游約 360 公尺處至石岡壩壩址下游約 730 公尺之區域為局部模擬範圍，長約 1100 公尺，如圖 4-2 所示。地形資料則以民國 96、98 年「石岡壩庫區淤積測量報告」之地形測量結果為基礎，將其轉換數值地形高程資料作為模式初始地形。其餘模式相關參數參考「美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用(2/3)」。

邊界條件方面，上游邊界採用石岡壩址河段不同重現期距洪水量，參考水規所民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討」之成果，如表 4-3 所示。下游邊界則以民國 97 年大甲溪大斷面資料為基礎，採用 HEC-RAS 模擬各頻率年流量下之流況，以斷面 35 埤豐橋之水位高程為參考。

模式檢定方面，模擬 2、5、10、20、50 及 100 年重現期距下，不同洪水流量下水位高程成果，比較 CCHE2D 模擬石岡壩斷面水位高程與民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討」分析各重現其流量下之水位高程之差異，作為模式檢定之依據，其檢定成果如表 4-4 所示。

曼寧 n 值依據民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討」之成果，採用建議值 0.04 為模式參數設定。石岡壩壩址區域之曼寧 n 值，與一維水理分析集集攔河堰堰址斷面水位高程比較，經檢定後仍採建議曼寧 n 值 0.04 為模擬參數設定。

表 4-3 石岡壩堰址重現期距洪水量

控制點	重現期距(年)							
	200	100	50	25	20	10	5	2
河口	11,500	10,300	8,900	7,570	7,300	5,900	4,500	2,600
石岡壩	9,800	8,800	7,600	6,430	6,200	5,000	3,800	2,200
天冷	8,840	8,000	6,900	5,820	5,600	4,500	3,400	1,980
橫流溪匯流前	8,490	7,630	6,590	5,570	5,370	4,330	3,290	1,910
東卯溪匯流前	7,850	7,050	6,090	5,160	4,970	4,010	3,040	1,760

民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討(河口至天輪壩下游河段)」

表 4-4 二維水理演算檢定成果

重現期距(年)	民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討」分析成果	CCHE2D 模擬成果
100	8800cms	8800cms
	275.96m	275.43m
50	7600cms	7600cms
	275.45m	274.76m
20	6200cms	6200cms
	274.79m	274.01m
10	5000cms	5000cms
	275.19m	273.38m
5	3800cms	3800cms
	273.55m	273.38m
2	2200cms	2200cms
	272.55m	271.81m

2、模擬結果

根據水文資料蒐集結果，民國 98 年石岡壩最大流量為 5,621 cms，約與 20 年重現期(6,200 cms)相等。以下說明民國 98 年地形 Q_{20} 之水理分析結果。民國 98 年地形圖如圖 4-3，副壩中央有一道中央排水路(95 年完工)，排水路下游有一長、寬各約 20 公尺的消能池(民國 96 年 6 月完工)，堰前沖刷坑深度約 7 公尺。根據二維水理演算模擬結果可知，堰前沖刷坑

及排砂道有流速集中的現象(如圖 4-4),流速約每秒 9 公尺。副壩壩體部分剪應力較大,達 2000 Pa。若比較作用於岩盤的剪應力,於堰前形成沖刷坑處及排砂道前流速明顯較高,所受到的床面剪應力也因而較大,約達 750 Pa(圖 4-5)。受到地形影響,中央排水路的單寬流量最大,可超過每秒 80 平方公尺(如圖 4-6),單寬流量越大的區域流功也會越大,這可說明石岡壩堰前沖刷坑快速形成之原因。圖 4-7 為福祿數的分佈,可知副壩下游流況由超臨界流變成亞臨界流,產生水躍伴隨著部分消能,但消耗的能量似乎仍不足,仍然繼續造成下游岩盤之沖刷。「附錄三」依序為 200 年、100 年、50 年、20 年、10 年、5 年重現期距洪水流量下於民國 96、98 年地形條件下之流速、福祿數、水深、單寬流量與剪應力分佈圖。流速整體趨勢與 20 年重現期距流量下分佈相似,流速大小隨洪峰流量降低而減小。其餘水力特性如福祿數、水深、單寬流量與剪應力等整體趨勢皆與 20 年重現期距流量下分佈相似,其值皆隨流量降低而減小。



圖 4-2 石岡壩二維水力特性模擬範圍

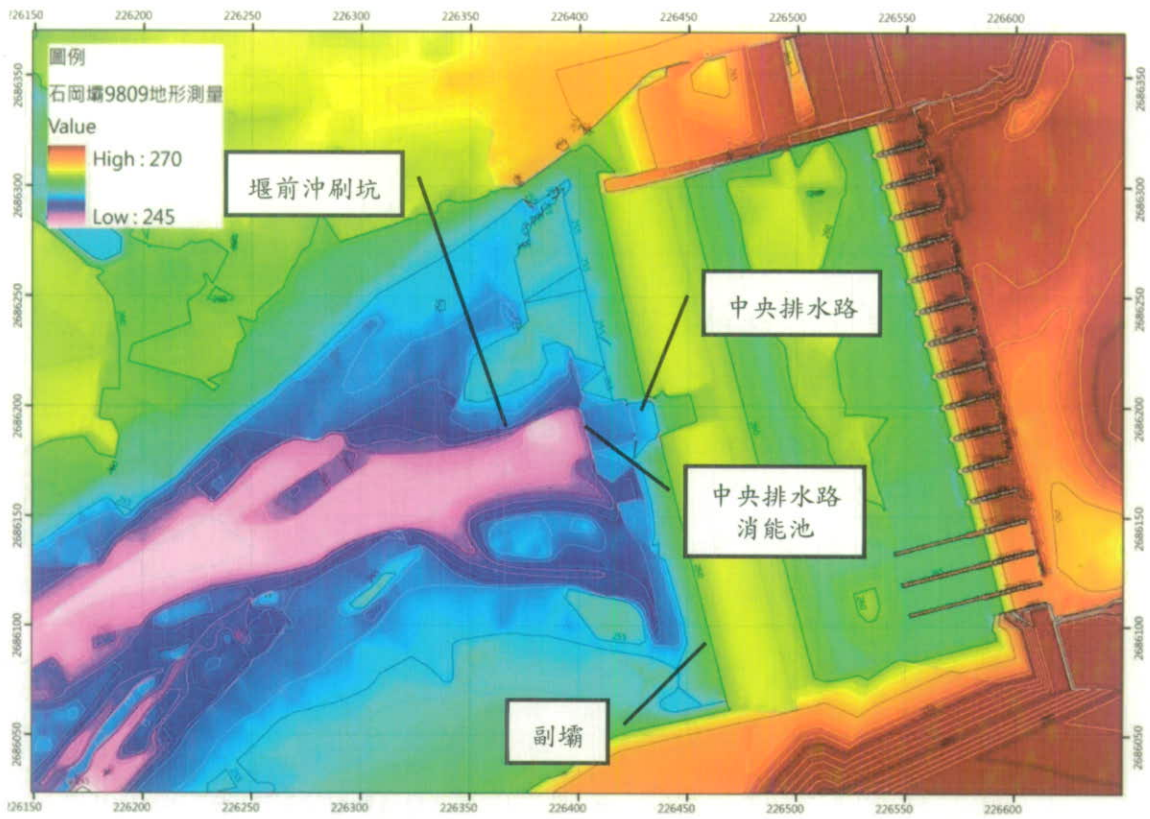


圖 4-3 石岡壩民國 98 年地表地形測量高程圖

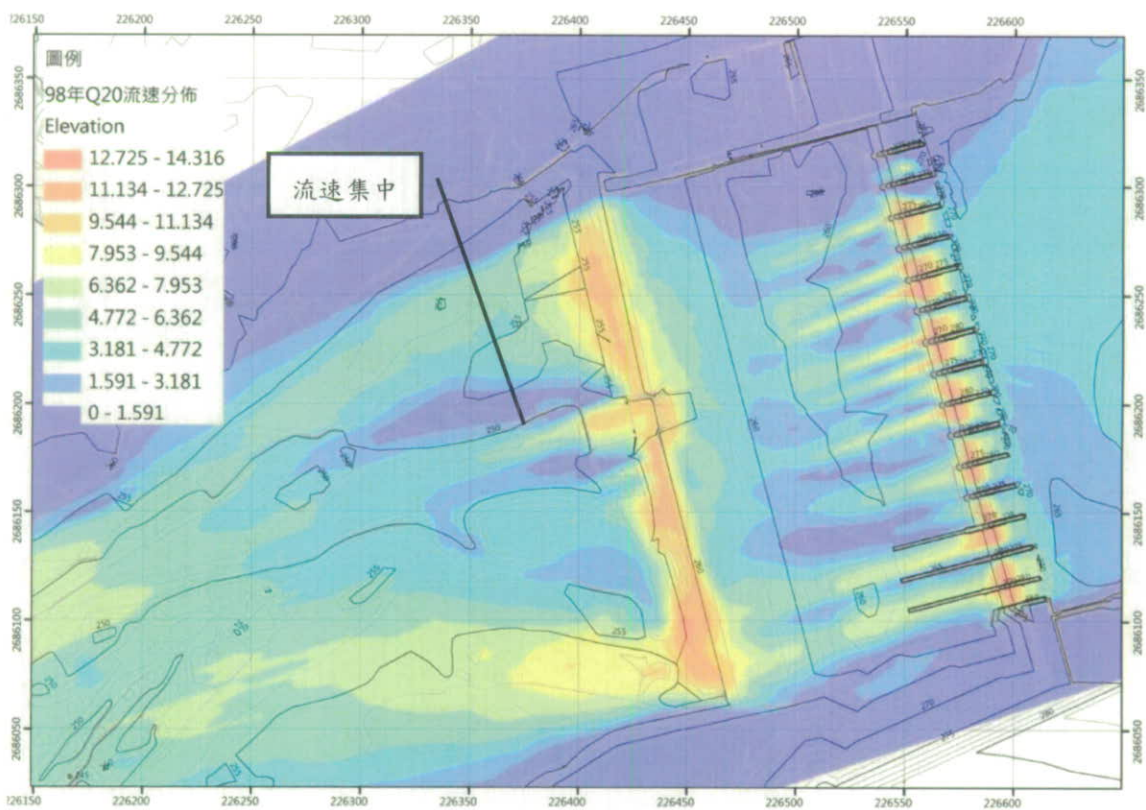


圖 4-4 民國 98 年地形 Q₂₀ 流速分佈

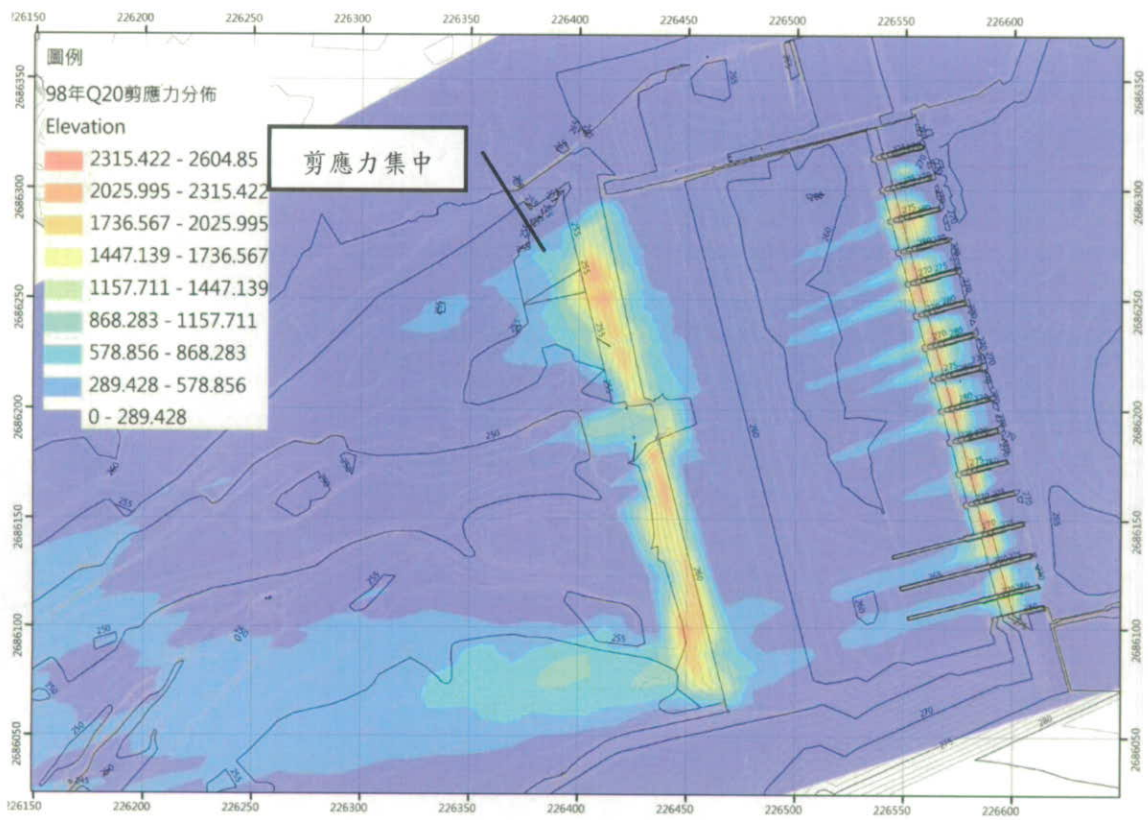


圖 4-5 98 年地形 Q_{20} 剪應力分佈

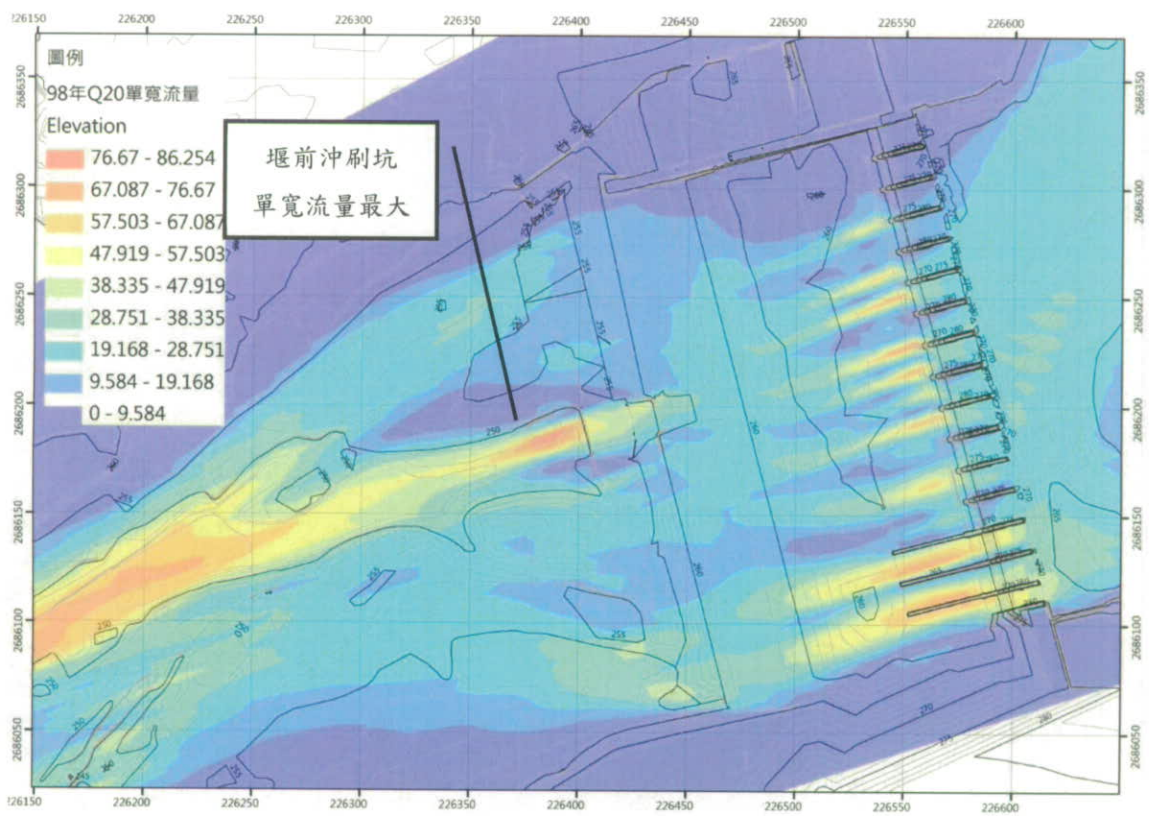


圖 4-6 98 年地形 Q_{20} 單寬流量分佈

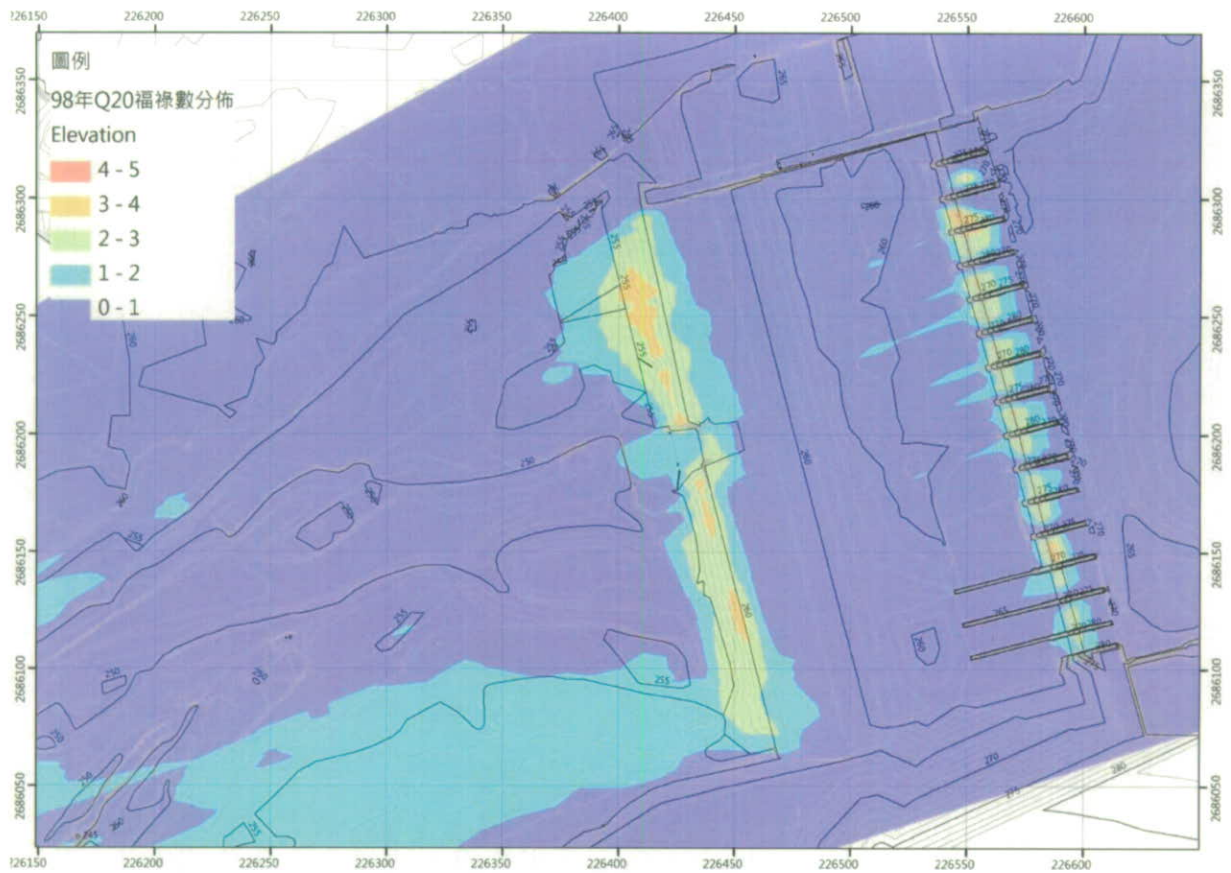


圖 4-7 98 年地形 Q₂₀ 福祿數分佈

二、沖蝕特性調查

第 1(民國 98)年度莫拉克颱風過後(98.8.11)之現地勘查，石岡壩洩洪的水流於跌水工盡頭與岩床交界處產生劇烈的消能現象。在石岡壩停止洩洪之後(98.8.27)再次前往調查，發現跌水工盡頭有部分基礎破壞、基礎底下淘空的情形。此區域的水流狀況在洪水時全面溢流，在平時以跌水為主，並在跌水工盡頭與岩床交界處產生一小型沖刷坑特徵。本(民國 99)年度(99.01.05)現地勘查，沖刷坑已完全顯露。民國 99 年 3 月，跌水工盡頭之沖刷坑已因進行壩體下游沖刷改善工程經卵礫土石填復。民國 99 年 4 月，沖刷坑已完成固床工設施，石岡壩跌水工下游沖刷坑現況如圖 3-28(d)所示。

石岡壩之沖刷行為與機制由現地地質調查佐證，石岡壩堰前地質由極厚層砂岩、砂岩偶夾頁岩、層狀砂岩與厚層頁岩組成。各岩層抗沖蝕能力不同同時影響了河道與沖刷坑發展。

目前堰下游已形成 1 個長寬約 30 公尺，最深達 6 公尺之沖刷坑，水流與岩層走向呈低角度斜交，愈接近下游則發現流向逐漸受岩層槽溝發展影響，導致水流由低角度斜交逐漸形成平行岩層走向發展。圖 3-25 地質剖面圖顯示，堰前沖刷坑受到劇烈侵蝕的岩層為層狀砂岩，兩旁抗沖蝕能力較高的厚層頁岩則形成了槽溝的岸壁。

堰前沖刷坑下游之槽溝下切現象，是由沖刷速率較快的厚層頁岩與層狀砂岩，及沖刷速率較慢的節理間距較寬的極厚層砂岩所形成，在這樣沖蝕速率有明顯差異的岩層組合，加上與岩層走向呈約 30 度的水流方向，壩體下方約 300~600 公尺處的河道遂發展成槽溝狀下切地形。

綜合上述，由於水流之流向與岩層走向呈低角度斜交，以及岩層抗沖蝕能力之差異，最終影響河道與沖刷坑發展，使得本區之主要沖蝕機制為槽溝下切型沖刷。

根據現地抗沖蝕能力調查，此區岩性單壓強度差異不大，但層狀砂岩與厚層頁岩之抗沖蝕能力 K_h 多在 100 以下，極厚層砂岩則平均在 250 左右，此差異主要由節理性質及平均塊體尺寸所造成。現地抗沖蝕能力調查點位及調查表如圖 3-30、表 3-8。堰前各岩性 K_h 值統計如表 3-9。詳細的現地沖蝕特性調查結果與沖蝕特徵請見第參章第三節。

三、鑽探採樣及現地試驗

(一)鑽探採樣計畫

1、鑽探目的

本鑽探工作將於堰前附近進行岩層鑽孔取樣，其目的包含 3 個部分：(1)利用取樣品質優良之岩心施作室內試驗，提供評估局部沖蝕所需之岩石參數，(2)利用鑽探孔進行孔內造影，瞭解現地岩體之岩性組成及節理分佈，(3)試圖以鑽探成果、孔內造影與室內岩石力學試驗，評估石岡壩沖刷坑地層抗沖蝕能力與深度之相關性。

2、鑽探考量

鑽孔佈置位置及鑽孔深度之選定主要有以下之考量原則：

(1)施工安全與施工機具進出方便

本計畫位於攔河堰堰前，於颱風或豪雨期間河面將大幅升高。為確保施工安全，故盡可能避免於颱風或豪大雨期間河水可能淹沒區域進行。另外，為確保施工機具進出可行，儘可能將鑽孔位置佈於運送機具車輛可達之道路旁。

(2)岩心可足以取樣得到各地層具代表性材料以供試驗

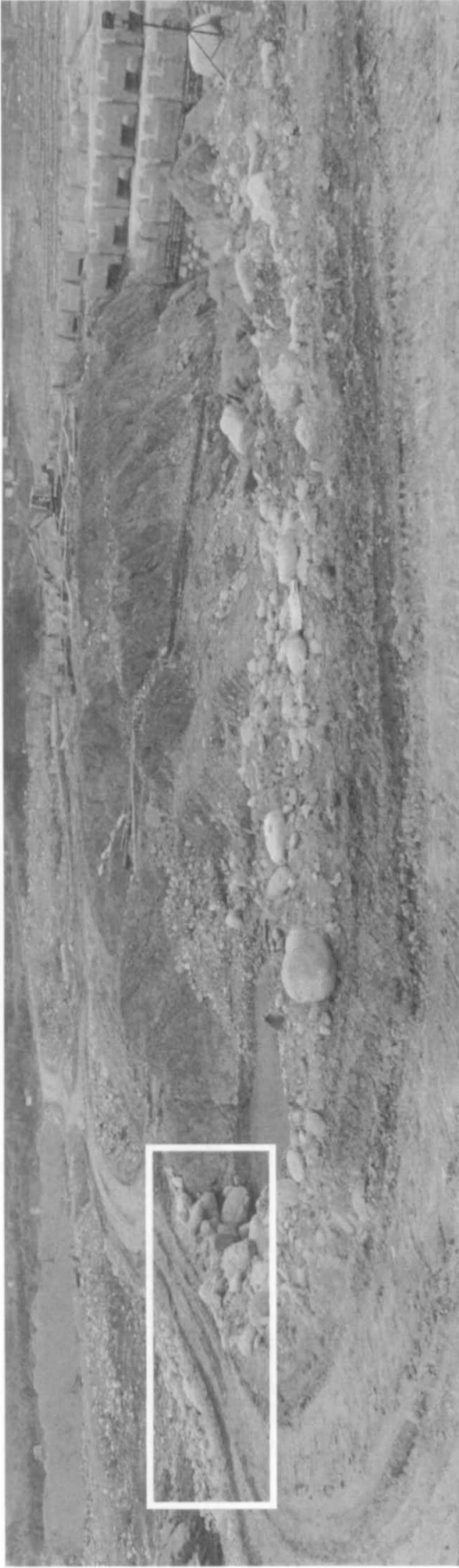
本計畫岩性屬軟弱岩石，河岸接近地表岩盤受乾溼循環及解壓影響，相較於河道水面下受沖蝕之新鮮材料，強度可能偏低。除近地表面受解壓與乾溼循環風化影響，卓蘭層為上新世地層，地層年代年輕，岩層膠結不良，從地表下鑽出後易沿砂頁岩互層界面開裂，完整試體製作不易。因此利用鋼索取岩心法搭配 3 層岩心取樣管儘可能減少對試體的擾動。

3、孔位規劃

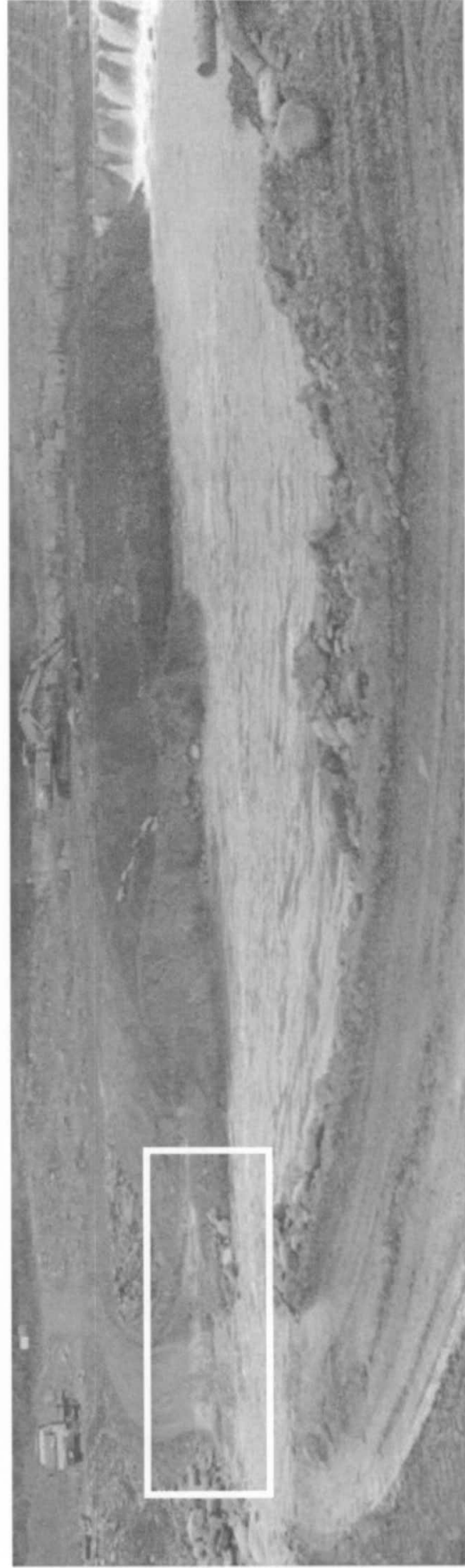
經現場地表地質調查，沖刷坑下方岩盤也受到斷層擾動，位態與特性與河道北岸較類似。圖 4-8(a)為民國 99 年 4 月 26 日進行堰前地表地質調查時堰前沖刷坑情形，堰前河道處尚有工程進行，施工便道存在(見圖 4-8(a)方框處)。當民國 99 年 5 月 7 日進行鑽探進機前工址調查時，此時原有的施工便道(如圖 4-8(b)方框)已被淹沒。為得到與沖刷坑地質相同力學與構造特性之材料，同時考量施工安全，最終決定將兩孔鑽孔均佈於堰前河道北岸，並儘可能接近沖刷坑，以期望得到與堰前劇烈沖刷岩層岩性與構造條件相似之岩層露頭上進行地質鑽探，藉此推估堰前劇烈沖刷岩盤力學及弱面位態分布情形。鑽孔位置詳見圖 3-19。深度與座標詳見表 4-5。

表 4-5 鑽孔位置與深度表

編號	TWD97X	TWD97Y	預計深度(m)	實際鑽孔深度(m)
S-1	226355	2686200	25	26
S-2	226375	2686200	25	27



(a) 民國 98 年 4 月 26 日



(b) 民國 98 年 5 月 7 日

圖 4-8 石岡壩壩前施工便道情形

(二)鑽探成果

本計畫鑽探成果柱狀圖請參閱附錄二，本計畫鑽孔均位於頁岩露頭上，頁岩表面因乾溼循環而風化崩解。藉由鑽探取樣發現乾溼循環的風化層厚約為地表面下 0.3~0.5 公尺，之後則為較新鮮之岩心。圖 4-9 為本次鑽孔與 AA'地質剖面示意圖，鑽探所取得之岩心總共包含層狀砂岩層(LSS)與厚層頁岩層(Sh)，其中 S-1 孔 0~8 公尺與 S-2 孔 19~27 公尺涵蓋重疊地層。由於石岡壩堰前在 921 地震曾遭斷層抬昇，因此近堰前之岩心傾角較現場地表地質調查結果大，且因受斷層擾動影響，岩心較破碎。各孔岩心描述如下：

1、S-1 孔(孔深 26 公尺，全孔岩心主要可分為下列數段)

- (1)0~4.2 公尺屬極厚層頁岩層(Sh)，岩心外表完整，但表面微裂隙發達。
- (2)4.2~26 公尺為層狀砂岩層(LSS)，砂岩為泥質砂岩，層理發達。全段岩心膠結不佳。層理發達且取樣過程中易產生開裂，岩心節理發達，局部節理較密集之岩心段形成剪裂泥或軟弱帶。

2、S-2 孔(孔深 27 公尺，全孔岩心則可分為下列數段)

- (1)0~23.7 公尺屬極厚層頁岩層(Sh)，其中 0~11.8 公尺頁岩層理發達，11.8~23.7 公尺頁岩層層理不發達，但常見微裂隙或節理。
- (2)23.7~27 公尺為層狀砂岩層(LSS)，砂岩為泥質砂岩，層理發達。岩心膠結不佳，且微裂隙發達。

(三)孔內造影成果

本計畫今年度於兩個鑽孔進行孔內聲波造影儀探測，兩孔探測範圍為 S-1 孔 1.94~25.5 公尺，S-2 孔 1.95~25.45 公尺。兩

孔資料透過 RGLDIP V6.2 軟體進行分析。圖 4-10 為節錄本次造影結果，資料中可利用 RGLDIP 內建功能進行孔內節理或弱面位態分析深度。而各層面和節理均有相關註釋，以提供判釋參考。由於聲波造影需在圖中 NESWN 為 360 度展開之聲波造影影像，利用反射能量來記錄鑽孔面弱面情形，因此當孔壁有弱面時，則反射能量較低，造影則會顯現較深之顏色。0~90 度則代表各層面或節理之傾角，N315 以及 N45 為觀察孔內造影之方位角，在圖中顯示之方位角為弱面傾向。

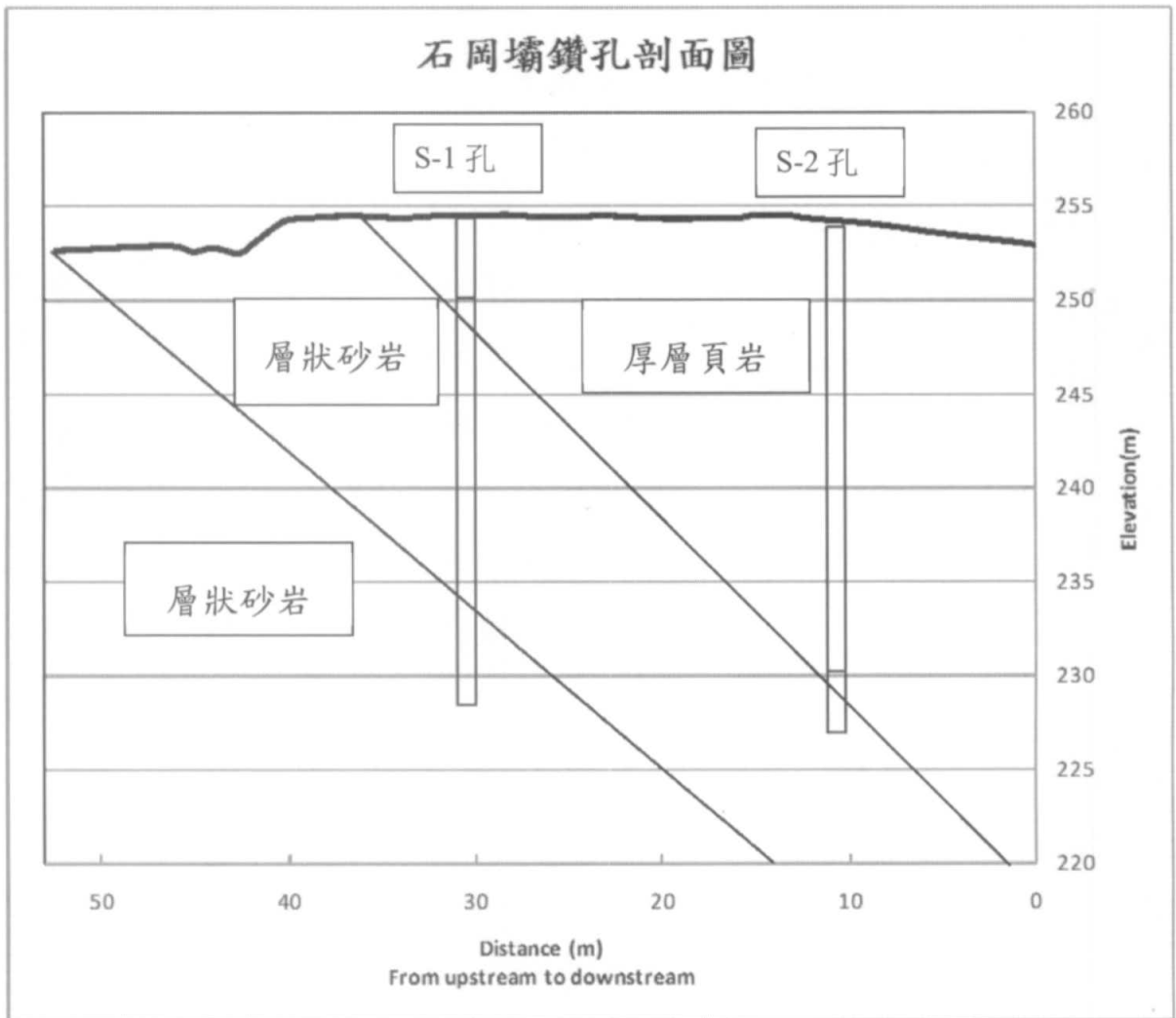


圖 4-9 鑽孔地質圖剖面圖

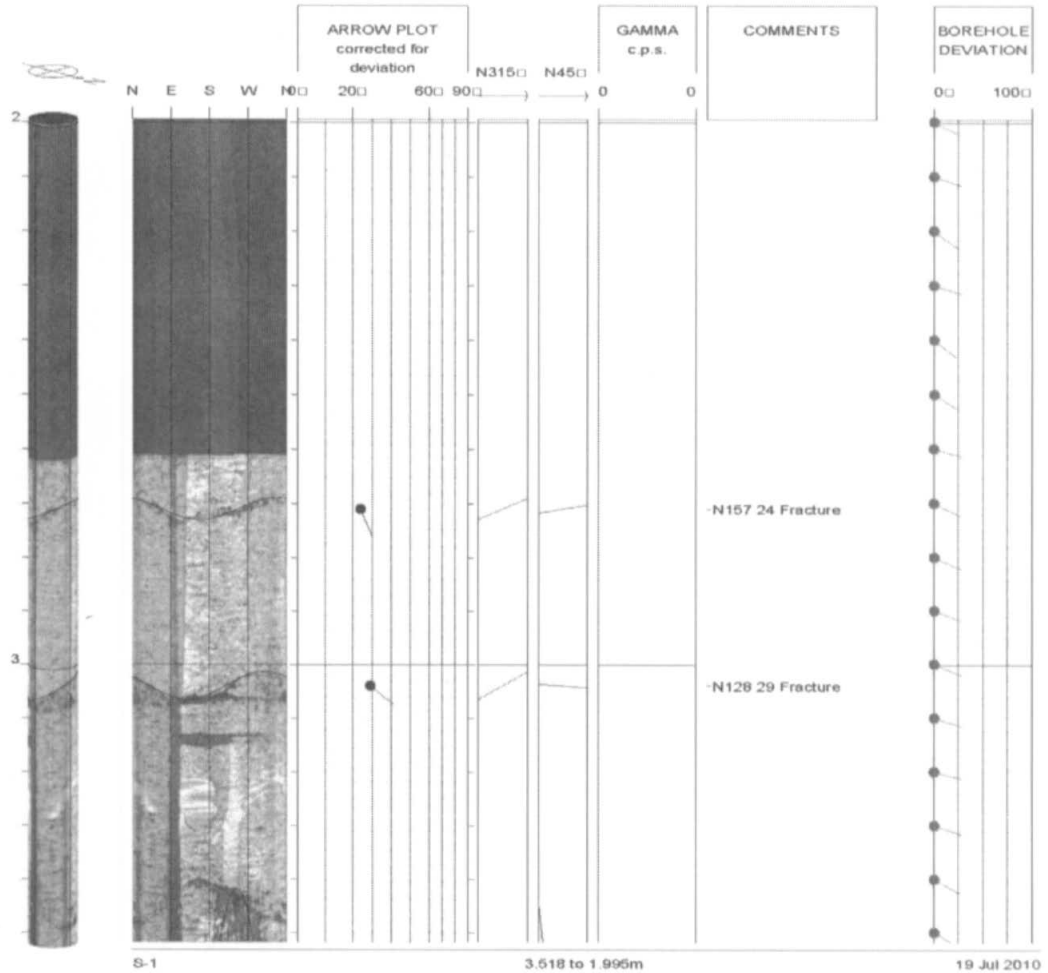


圖 4-10 孔內聲波造影儀分析結果節錄(S-1 2~3 公尺)

1、S-1

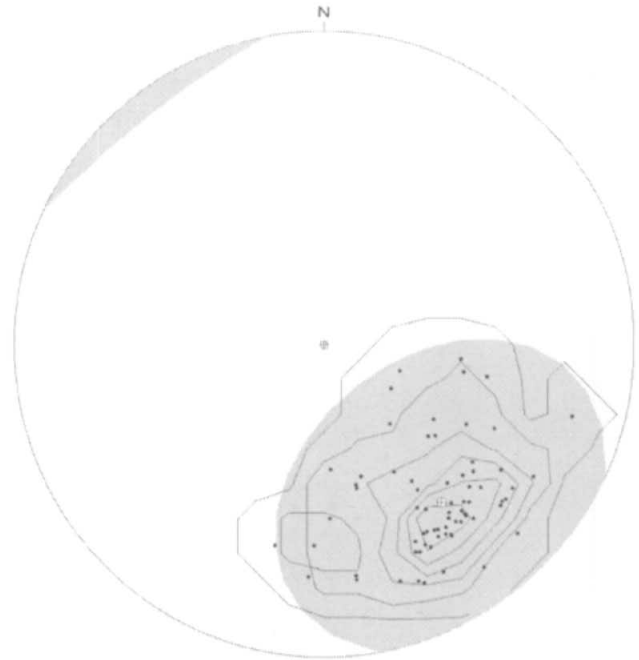
圖 4-11 為經過軟體分析的層面立體投影圖，S-1 全孔共辨識出 69 組層面，平均走向為 N53E，向南傾 53 度。S-1 孔隨著深度愈深傾角愈緩，推測石岡壩堰前地質受逆衝斷層影響，在近地表或接近斷層處正向力較小，地層傾角較高，距離斷層愈遠或深度愈深則因正向力較大或斷層影響較小，傾角較緩。

節理統計結果立體圖如圖 4-12 所示，由統計可發現，本孔第 1 組節理為編號 a 的小圓，平均走向為 N59E，向北傾 43 度。而 b 小圓則為另 1 組節理，全孔僅量得 3 組資料，平均走向為 N26W，向北傾 75 度。

Zone 0. 4.139 - 25.490m
Deviation 0.20 N351.90

dipdata sets.....
BHTV dips
• Highlighted dips: Aquifer

	mean dip	n	dsp	zone axis	n	dev
N143 53	N143 53	69	26.7			



equal-area upper-hemisphere 0-90

contour-levels 1,3,6,10,15,21,

⊕ mean dip

⊙ zone axis

□ well axis

圖 4-11 S-1 層面統計分析立體投影圖

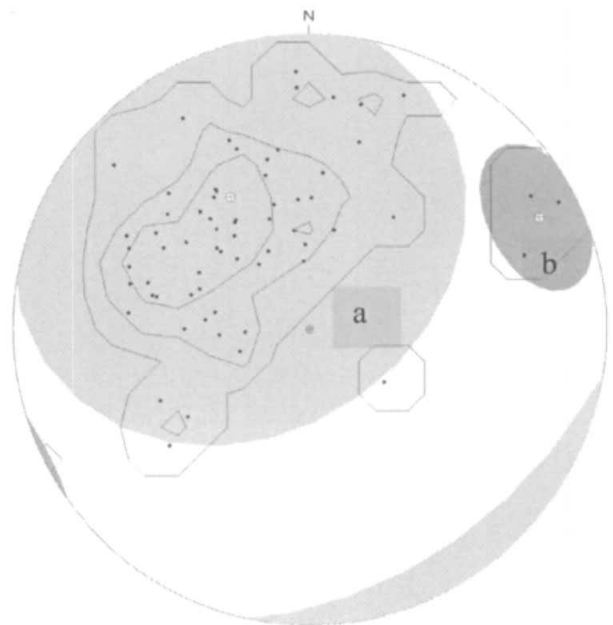
Zone 0. 2.941 - 25.490m
Deviation 0.20 N357.50

dipdata sets.....
BHTV dips
• Highlighted dips: Aquifer

	mean dip	n	f
N329 43	N329 43	61	3.71
N064 75	N064 75	3	(0.52)

intersections

	N329 43	N064 75
N329 43	X	41 N348
N064 75	41 N348	X



equal-area upper-hemisphere 0-90

contour-levels 1,3,6,

⊕ mean dip

□ well axis

圖 4-12 S-1 節理面統計分析立體投影圖

2、S-2

為經過分析後，結合全孔之層面所統計出之層面分析立體投影圖。總計 S-2 鑽孔可辨認之層面共有 21 組，層面主要方位為 N50E，圖 4-13 為 S-2 孔全孔層面與深度關係圖，圖中可發現 S-2 接近地表處岩層接近東西走向，與現場沖刷坑露頭地表地質調查結果一致。

節理之整體統計結果立體圖如圖 4-14 所示，圖中包含主由統計可發現，本孔僅有一組節理，平均走向為 N60E，向北傾 28 度。

3、孔內造影結果討論

表 4-6、表 4-7、為孔內造影結果之彙整，S-1 孔層面位態走向為 N53E，向南傾 53 度，S-2 走向為 N50E，向南傾 57 度。圖 4-15 為鑽孔平均位態與現地量測結果比較，從圖中可看出鑽孔位態走向與現地位態調查結果約略一致，傾角則可能因堰前地層受斷層擾動影響較高，角度較大。

節理統計發現 S-1 孔與 S-2 孔均有 1 組走向約 N60E 之主要節理面，而 S-1 孔則另有 1 組節理面，但該組節理並不發達。

孔內造影分析結果將應用於後續判釋抗沖蝕能力 K_h 與深度變化關係，決定堰前沖刷坑岩層節理組數 J_n 。

表 4-6 層面分析彙整表

層面分析		
孔號	走向	傾角
S-1	N53E	53S
S-2	N50E	57S

Zone 0. 0.000 - 25.004m
 Deviation 0.40 N223.90
 dipdata sets.....
 BHTV dips
 * Highlighted dips: Aquifer

	mean dip	n	dsp	zone axis	n	dev
N140 57	N140 57	21	26.2			



圖 4-13 S-2 層面統計分析立體投影圖

Zone 0. 4.639 - 25.440m
 Deviation 0.40 N222.60
 dipdata sets.....
 BHTV dips
 * Highlighted dips: Aquifer

	mean dip	n	f
N330 28	N330 28	21	1.15

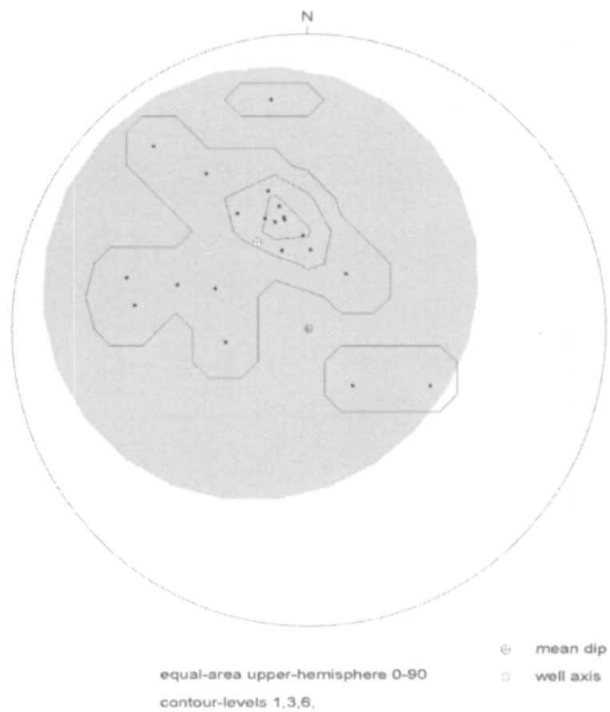


圖 4-14 S-2 節理統計分析立體投影圖

表 4-7 節理面分析彙整表

孔號	平均位態
S-1	N59E/43N、N64W/75N
S-2	N60E/28N



圖 4-15 石岡壩鑽孔平均位態與現地位態

四、室內岩石試驗

本計畫利用將利用現地鑽探所取得之岩心試樣，進行一系列的物性與力學實驗，主要為了解堰前劇烈沖刷岩盤之一般與力學特性。試驗所得之相關參數可供未來各項分析參考評估用。流程如圖 4-16 所示，試驗及方法如後續說明。試驗數量與完成數量表見表 4-8。

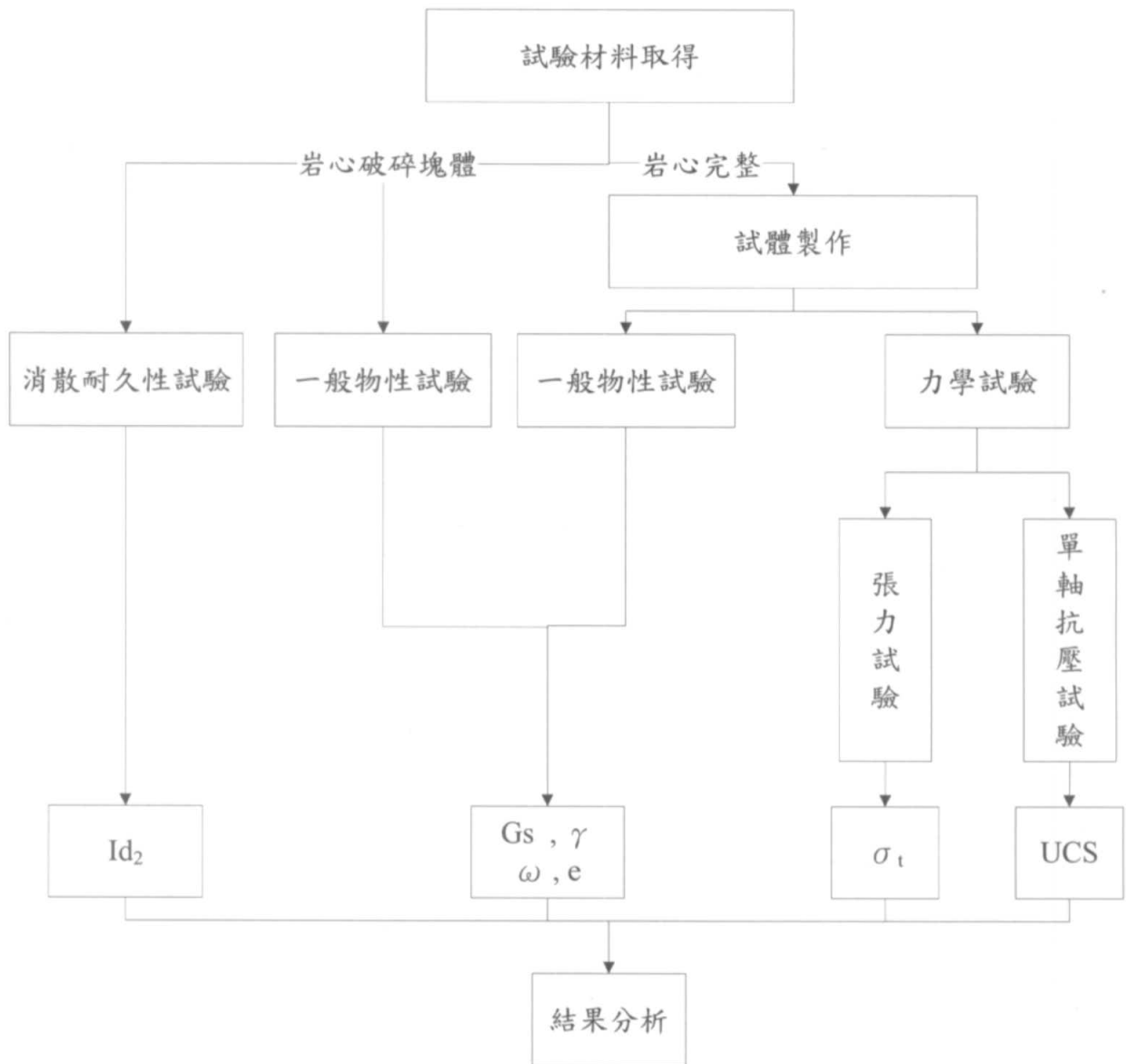


圖 4-16 室內試驗規劃流程圖

(一)試體準備

由於由於軟岩岩心試體的採樣製作比硬岩岩心不容易，依據 ISRM 建議，試體需符合下列條件：

1. 試體需為垂直之圓柱體，長徑比至少需為 2.0，直徑不得小於 54 毫米。且需大於試體中最大粒徑尺寸之 10 倍。試體兩端表面粗糙度須小於 0.02 毫米，與試體軸線之垂直偏差須小於 0.001 徑度(約 0.05 毫米/50 毫米)。本報告中室內試驗試體尺寸統一為 HQ 尺寸(直徑約 61 毫米)，符合 ISRM 建議。
2. 圓柱體表面平滑，表面突起或起伏小於 0.3 毫米。

(二)一般物性試驗

一般物性試驗目的主要為得知岩石材料基本物理性質如單位重、比重，含水量、孔隙比。試驗方法參照 ISRM 規範建議方法，分別由以下兩種岩樣施作：

1. 岩心中無法製作試體之岩塊。
2. 經切割後用於施作力學試驗之圓柱體試體。

一般物理性質試驗結果見表 4-9。由結果可知兩種岩性的比重介於 2.64~2.65 之間。自然含水量介於 5~8% 之間，孔隙率則介於 5~10%。其中層狀砂岩孔隙率與含水量較厚層頁岩高，同時層狀砂岩接近地表可能因解壓影響，膠結較鬆散，孔隙率較高。

表 4-8 室內試驗工作數量表

試驗種類	工作數量	完成數量
物性試驗	12 組	17 組
消散耐久試驗	6 組	6 組
單壓試驗	6 組	11 組
張力試驗	6 組	8 組

表 4-9 一般物性試驗結果表

孔號	深度	岩性	比重	濕單位重 (t/m ³)	含水量 (%)	乾單位重 (t/m ³)	孔隙率 (%)	試體 用途
S-2	25.4-25.52	層狀 砂岩	2.64	2.450	6.09	2.314	7.05	單壓
	25.5-25.63			2.446	7.51	2.322	8.05	單壓
	25.6-25.8			2.422	5.76	2.290	8.24	單壓
	25-26m-1			2.572	5.12	2.512	6.7	巴西
	25-26m-2			2.561	5.72	2.509	6.80	巴西
	5.2-5.35	層狀 砂岩	2.65	2.356	7.70	2.188	10.96	單壓
	5.35-5.5			2.372	8.01	2.195	10.38	單壓
	5.7-5.84			2.350	7.44	2.187	11.2	單壓
S-1	3.22-3.33	厚層 頁岩	2.64	2.495	5.68	2.362	5.714	單壓
	9.52-9.65			2.485	5.89	2.346	6.13	單壓
	9.05-9.18			2.480	6.20	2.33	6.32	單壓
	21.26-21.39			2.509	5.22	2.428	5.18	單壓
	21.42-21.54			2.488	5.4	2.36	5.99	單壓
	2-3m-1			2.546	5.66	2.409	8.55	巴西
	2-3m-2			2.474	5.02	2.356	10.61	巴西
	2-3m-3			2.505	5.12	2.383	9.55	巴西
	2-3m-4			2.455	5.44	2.330	11.64	巴西

(三)消散耐久性試驗

消散耐久性試驗將岩樣暴露於乾溼循環下，模擬受風化而崩解之情形。根據 ISRM 標準，選取 10 塊 40~60 公克之岩塊，總重介於 450~550 公克間；岩塊中最大粒徑尺寸小於 3 毫米。且岩塊選擇需接近球體形狀，放入直徑 140 毫米，高 100 毫米；周圍有 2 網孔之篩鼓。實驗方法如下：

1. 將篩鼓與岩塊放入烘箱，以 105°C 之溫度烘 2 至 6 小時，記錄此時之岩塊與篩鼓重 A。
2. 將篩鼓靜置冷卻後置於消散性耐久水槽，篩鼓邊緣需距離水槽底面 40 釐米，液面灌注直到鼓軸下方 20 釐

米。液體通常為 20°C 水。

3. 啟動馬達使鼓軸翻轉，控制速度為每分鐘 20 轉，速度變化介於 5% 內，持續 10 分鐘共 200 轉。
4. 將篩鼓及剩餘之岩塊取出放入烘箱烘乾。量測此時之岩塊與篩鼓重 B。此時為第一次消散耐久循環指數 Id_1
5. 重複 2~4 步驟，量測 2 次循環後岩塊與篩鼓重 C。
6. 篩鼓以鋼絲絨刷清除表面殘餘碎屑，紀錄重量 D。此時第 2 次消散耐久性循環指數 Id_2 即為

$$Id_2 = \frac{C - D}{A - D} \times 100\%$$

本計畫施做之消散耐久試驗結果詳見表 4-10，材料取用不同深度的層狀砂岩，結果顯示層狀砂岩屬於低至非常低耐久性。頁岩屬於高耐久性。

表 4-10 石岡壩岩心消散耐久試驗結果表

編號	岩性	深度範圍(m)	Id_1 (%)	Id_2 (%)	評分	
1	層狀 砂岩	S-2	24-25	45.5	32.0	低
2			25-26	65.1	45.17	
3		S-1	5-6	45.0	18.2	非常低
4			4-5	73.78	49.6	低
5	厚層 頁岩	S-1	3-4	93.29	84.70	高
6			2-3	93.23	85.58	

(四)單軸抗壓試驗

單軸抗壓試驗可得到岩石材料知單壓強度，並可於試驗中應力應變關係求切線楊式模數 E_{50} 。根據 ISRM 描述施加單壓試

驗之儀器需具備提供軸向加壓及量測之加壓及變形量系統。本計畫之單軸抗壓試驗、巴西人試驗及岩石三軸試驗皆利用國立交通大學岩石力學實驗室自行組裝之 MTS-810 多功能岩石力學試驗機見圖 4-17。

根據 ISRM 建議，本計畫單壓試驗之試驗方法如下：

1. 參照「(一)試體製作」製作圓柱狀試體。
2. 拍照描述試體岩性，特徵、孔位、深度。
3. 記錄試體之直徑與高度及重量，根據 ISRM 建議，直徑需分別量測上、中、下部之試體直徑平均值，高度量測不同方向取平均。
4. 試體置於 MTS-810 試驗系統中，確定各項擷取系統校正準確無誤。建議加壓速率為每秒 0.5~1.0 MPa，ISRM 規範建議岩石試體於試驗進行 2~10 分鐘內破壞。因此，本計畫設計加壓速率每分鐘 0.3%，進行同時於試驗中利用安捷倫擷取卡持續紀錄 MTS-810 中荷重計與內建 LVDT 之變化情形。本報告所定義之破壞強度為當材料超過尖峰強度或應變量達到 1.5% 時之軸向壓力。
5. 當試體破壞後拍照記錄破壞情形，放入烘箱 105°C 之溫度烘乾秤重，求出試體單位重、孔隙率及自然含水量。

本計畫共進行了 11 組單壓試驗，包含 6 組層狀砂岩與 5 組頁岩，試驗結果見表 4-11。本計畫岩心破壞形式有兩種：劈裂破壞與沿著層面破壞(圖 4-18)，代表石岡壩岩石材料因為層面膠節不佳的影響而呈現高度異向性。

單壓試驗結果顯示層狀砂岩單壓強度及楊式模數相當低，單壓強度介於 0.28~1.82 MPa，楊式模數介於 14~206 MPa。厚層頁岩強度介於 2.51~5.22 MPa。楊式模數約為 358~910 MPa。

室內單軸抗壓試驗結果將有助於後續抗沖蝕能力指標 K_h 與深度變化關係工作中決定材料強度參數 M_s 。

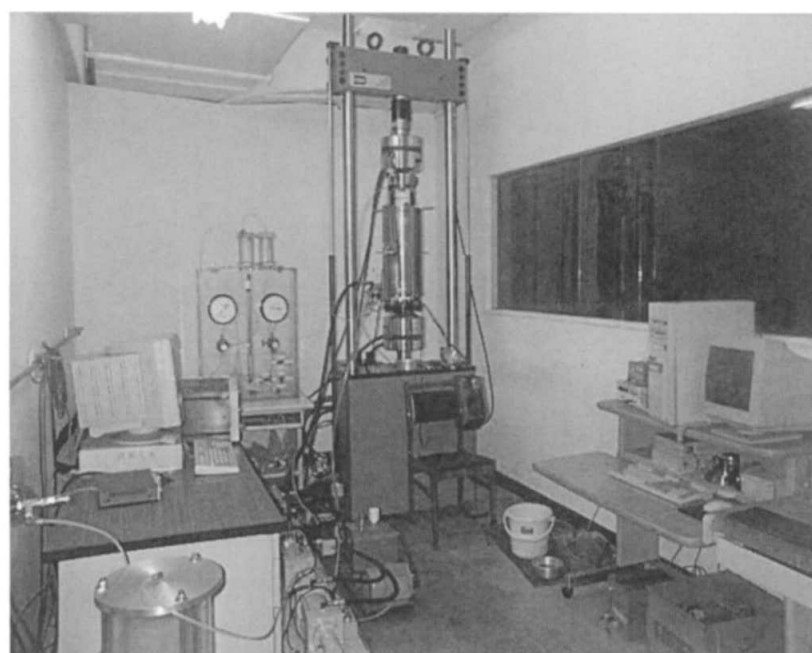
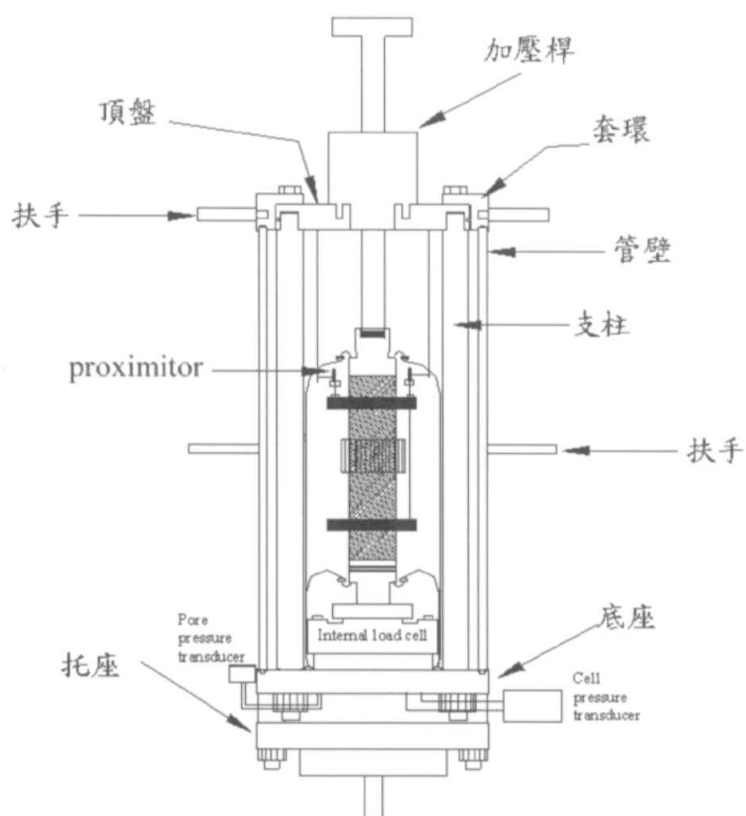


圖 4-17 交通大學軟岩三軸試驗系統圖

表 4-11 石岡壩單軸抗壓強度結果表

孔號	深度(m)	岩性	長 (cm)	直徑 (cm)	長徑 比	含水量	單壓 強度 q_u (MPa)	切線 模數 E_{50} (MPa)	E_{50}/q_u	破壞 型式
S-2	25.4-25.52	層狀砂岩	12.63	6.102	2.1	6.09	0.83	110	132.5	層面破壞
	25.5-25.63		12.22	6.146	2.0	5.34	1.82	173	96	劈裂破壞
	25.6-25.8		12.46	6.146	2.0	5.75	1.52	206	135	劈裂破壞
S-1	5.2-5.35	層狀砂岩	12.43	6.182	2.0	7.70	0.4	22	55	層面破壞
	5.35-5.5		13.28	6.104	2.2	8.01	0.57	60	105	層面破壞
	5.7-5.84		12.44	6.202	2.0	7.44	0.28	14	50	層面破壞
	3.2-3.33	厚層頁岩	14.266	6.072	2.3	5.67	2.79	358	128	劈裂破壞
	9.52 -9.65		13.38	6.101	2.2	5.89	2.51	567	225	層面破壞
	9.05-9.18		13.505	6.095	2.2	6.20	2.99	608	203	層面破壞
	21.26-21.39		13.31	6.094	2.18	4.33	5.22	910	174	劈裂破壞
21.42-21.54	13.12	6.095	2.15	5.40	4.89	790	162	劈裂破壞		

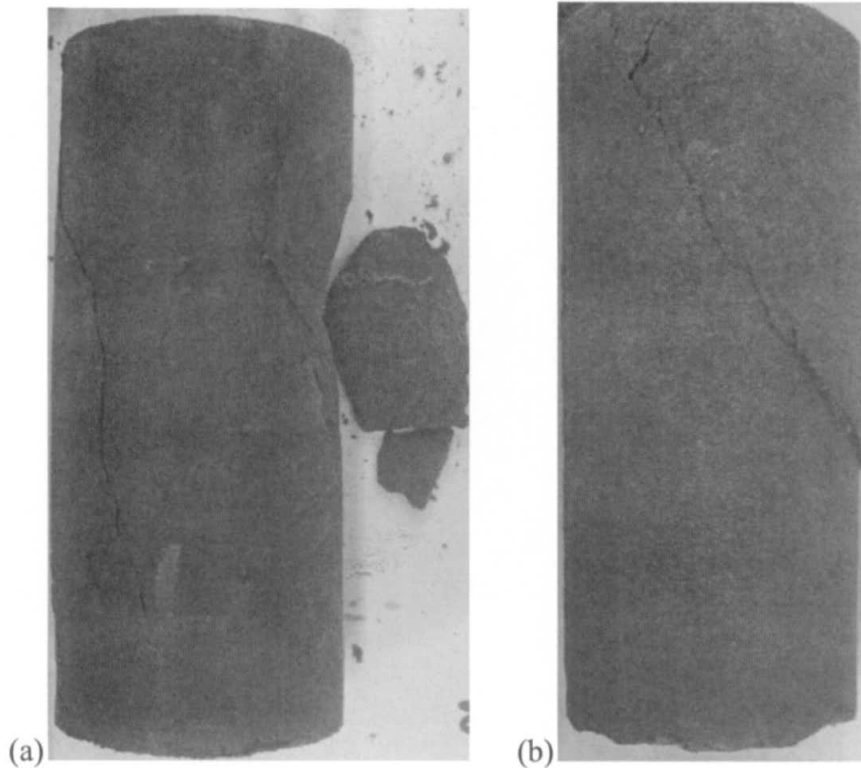


圖 4-18 石岡壩單壓試體破壞形式(a)劈裂破壞 (b)沿層面破壞

(五)巴西人抗張試驗

本計畫利用巴西人抗張試驗求出岩樣材料之抗張強度。根據 ISRM 規範，本計畫實驗方法如下：

1. 製作切割試體過程中利用潔淨水，圓周表面無明顯受到切割所造成之擦痕或粗糙面。試體直徑不小於 NX 尺寸(54 毫米)，而試體厚度約等於岩心半徑。
2. 拍照描述試體岩性，特徵、孔位、深度。
3. 紀錄試體之直徑與厚度，並秤重，放入夾具置入 MTS-810(圖 4-17)中。
4. 軸向壓力施加方向需通過試體之直徑，破壞面在試驗加壓速率每分鐘 0.2%。
5. 紀錄試體破壞情形，並烘乾秤重。可反算試體材料一般物理性質。

本計畫利用單軸抗壓試驗岩心相同材料，施做巴西人試驗。當試體中央裂縫貫穿時，此時之強度則為岩體抗張強度。表 4-12 為巴西人試驗結果，總計 4 組層狀砂岩與 4 組厚層頁岩，從結果可看出層狀砂岩與頁岩兩者張力強度差距不大，層狀砂岩抗張強度略低於頁岩，介於 0.06~0.22 MPa，而頁岩介於 0.12~0.29 MPa。

表 4-12 石岡壩巴西人抗張試驗結果表

孔號	深度(m)	岩性	厚(cm)	直徑 (cm)	長徑比	含水量(%)	張力強 度(MPa)
S-2	25-26 m-1	層狀 砂岩	2.274	6.092	0.38	5.12	0.22
	25-26 m-2		3.162	6.14	0.51	5.72	0.15
S-1	5-6 m-1		2.812	6.139	0.47	10.14	0.06
	5-6 m-2		3.588	6.123	0.53	10.44	0.12
S-1	2-3 m -1	厚層 頁岩	2.981	6.101	0.48	5.66	0.13
	2-3 m -2		3.082	6.091	0.5	5.02	0.28
	2-2 m -3		3.182	6.091	0.51	5.11	0.12
	2-3 m -4		2.856	6.082	0.47	5.44	0.29

(六)室內試驗結果綜合討論

石岡壩室內岩石試驗結果，岩性包含了鄰近沖刷坑之層狀砂岩與厚層頁岩，其中兩者比重接近，約 2.64~2.65。孔隙率介於 7~8%，消散耐久試驗結果則顯示，層狀砂岩屬於低至非常低耐久性，足見其膠結不佳，泡水容易崩解，且抗風化性質弱。而頁岩消散耐久試驗則顯示了較高耐久性。

本次力學試驗材料均利用地下水位面以下之濕試體，由單壓試驗結果顯示，材料因為層面膠結不佳的影響，有的試體為劈裂破壞，有的則沿著層面滑動破壞，如圖 4-18。本報告單

軸抗壓試驗目的主要用於下節抗沖蝕能力 K_h 與深度變化之關係中決定堰前岩層材料強度評分 M_s 。而 M_s 根據 Annandale 定義為完整岩石材料強度，因此本報告認為破壞行為為劈裂破壞之試體單壓結果較接近石岡壩材料完整岩石強度。石岡壩層狀砂岩與厚層頁岩抗張強度則差異不大，約介於 0.14~0.21 MPa。石岡壩岩石材料物性及力學強度建議值參照表 4-13。

表 4-13 石岡壩岩石材料物性及力學強度建議值

岩性	比重	孔隙率 (%)	耐久性	完整岩石 (劈裂破壞材料)		抗張強度 (MPa)
				單壓強度 (MPa)	楊式模數 (MPa)	
層狀砂岩	2.65	8.67	低至非常 低耐久性	1.67	190	0.14
厚層頁岩	2.64	7.74	高耐久性	4.3	686	0.21

五、抗沖蝕能力指數 K_h 與深度變化之關係

本計畫於石岡壩堰前沖刷坑右岸鑽取與堰前劇烈沖刷岩盤相同力學及構造條件之岩層，包含層狀砂岩與厚層頁岩，由孔內造影與力學試驗結果，試圖推估沖刷坑下岩層抗沖蝕能力 K_h 隨深度之變化，各參數來源依據如表 4-14，本工作將藉由室內試驗、鑽探成果以及孔內造影試驗，決定沖刷坑不同深度的抗沖蝕能力指數 K_h 。

表 4-14 堰前抗沖蝕能力指標與深度變化中各項參數依據表

抗沖蝕能力指標 K_h 各項參數	參數來源
材料強度 M_s	室內單壓試驗
塊體尺寸評分 K_b (RQD/J_n)	由岩心判釋，搭配孔內造影 結果給定評分
塊體剪力強度評分 K_d (J_r/J_a)	
塊體構造評分 J_s	

(一)參數採用原則

1、岩石材料強度評分 M_s

岩石材料強度評分 M_s 為完整岩石(Intact rock)的材料單壓強度，本報告採用室內單軸抗壓試驗完整岩石強度建議值評估，如表 4-15，層狀砂岩材料強度 M_s 為 1.34，厚層頁岩 M_s 則為 3.60。

表 4-15 堰前劇烈沖刷岩層材料強度評分 M_s

岩性	單軸壓縮強度(MPa)	材料強度(M_s)
層狀砂岩	1.67	1.34
厚層頁岩	4.3	3.60

2、塊體尺寸評分 K_b (RQD/J_n)

影響塊體尺寸評分的兩個因子為岩體品質評分 RQD 以及弱面組數 J_n ，本計畫利用鑽孔判釋時所記錄各段岩心的 RQD 。弱面組數 J_n 則由孔內造影分析結果決定。由孔內造影弱面統計結果，S-1 孔共有 1 組層面與兩組節理(如圖 4-12)，但因其中 1 組節理僅有 3 組資料，因此將該組節理列入隨機節理，故定

義 S-1 孔弱面組數為 1 組層面+1 組節理+隨機節理。節理組數評分 J_n 為 2.24，S-2 孔弱面組數則為層面及節理各 1 組， J_n 為 1.83(如表 4-16)。

表 4-16 堰前劇烈沖刷岩層弱面組數評分 J_n

孔位	弱面組數	節理組數評分 J_n
S-1 孔	1 組層面+1 組節理+隨機節理	2.24
S-2 孔	1 組層面+1 組節理	1.83

3、塊體剪力強度評分 K_d

塊體剪力強度評分為中弱面粗糙度評分 J_r 與現地調查結果相近，同屬弱面平滑且弱面平順沿伸，S-1 孔與 S-2 孔弱面粗糙度評分 J_r 均為 1。如表 4-17。弱面剪力強度評分則依據岩心中弱面寬及弱面特性作評分。

表 4-17 堰前劇烈沖刷岩層弱面剪力強度評分 J_r

孔位	弱面粗糙度描述	弱面粗糙度評分 J_r
S-1 孔	弱面光滑，且弱面平順延伸 (smooth, planar)	1
S-2 孔		

4、塊體構造評分 J_s

塊體構造評分 J_s 主要利用孔內造影結果，石岡壩岩盤走向向上游傾斜，層面傾角約 50 度。塊體幾何大小利用現場觀察而得，塊體構造評分如表 4-18。

表 4-18 塊體構造評分 J_s

孔位	水流與塊體幾何關係	塊體構造評分 J_s
S-1 孔	逆向，塊體幾何大小(1:2)	0.63
S-2 孔		

(二)抗沖蝕能力指數隨深度變化之探討

圖 4-19、圖 4-20 分別為 S-1 孔與 S-2 孔 K_h 值隨鑽探深度變化之關係，整體而言 K_h 值平均值隨著深度變化不大，但某些深度的 K_h 值特別低。靠近地表處受到風化影響，岩石材料強度評分 M_s 低，所以 K_h 值較低。除了靠近地表處，其他區域部分深度的岩心受到近斷層效應影響，節理較為發達，RQD 分數較低，造成 K_h 值隨著深度呈現不穩定的變化。根據分析結果，沖刷坑在深度變化不大的情況下(如本次鑽探 25 公尺內)，岩體的單壓強度、位態等變化很小，但是若有構造在附近通過則會影響節理的組數及間距，造成抗沖蝕能力降低。

表 4-19 為堰前劇烈沖刷岩盤抗沖蝕能力平均值與現場調查平均值比較，S-1 孔因節理發達(兩組弱面+一組隨機節理)故抗沖蝕能力最低，而堰前劇烈沖刷岩盤抗沖蝕能力較本計畫現場調查結果低，其原因為：

1. 材料強度評分 M_s 於現地調查時利用史密特錘施作，現地岩盤因含水量較低且多施作於膠結較良好之岩層露頭處，因此強度可能較室內濕試體單軸抗壓試驗高。
2. 堰前沖刷坑因靠近斷層，岩層較破碎導致岩體品質指標 RQD 分數普遍偏低，影響塊體尺寸評分 K_b 分數。

因此，本節抗沖蝕能力指數 K_h 值隨深度之變化結果，僅能適用於堰下游沖刷坑附近因近斷層效應而較為破碎之岩盤。受

到區域地質構造的影響，不能反應到石岡壩下游其他未受斷層影響區域，若是未受斷層影響區域之 K_h 值隨深度之變化，應較為穩定且一致，變異性不會太大。

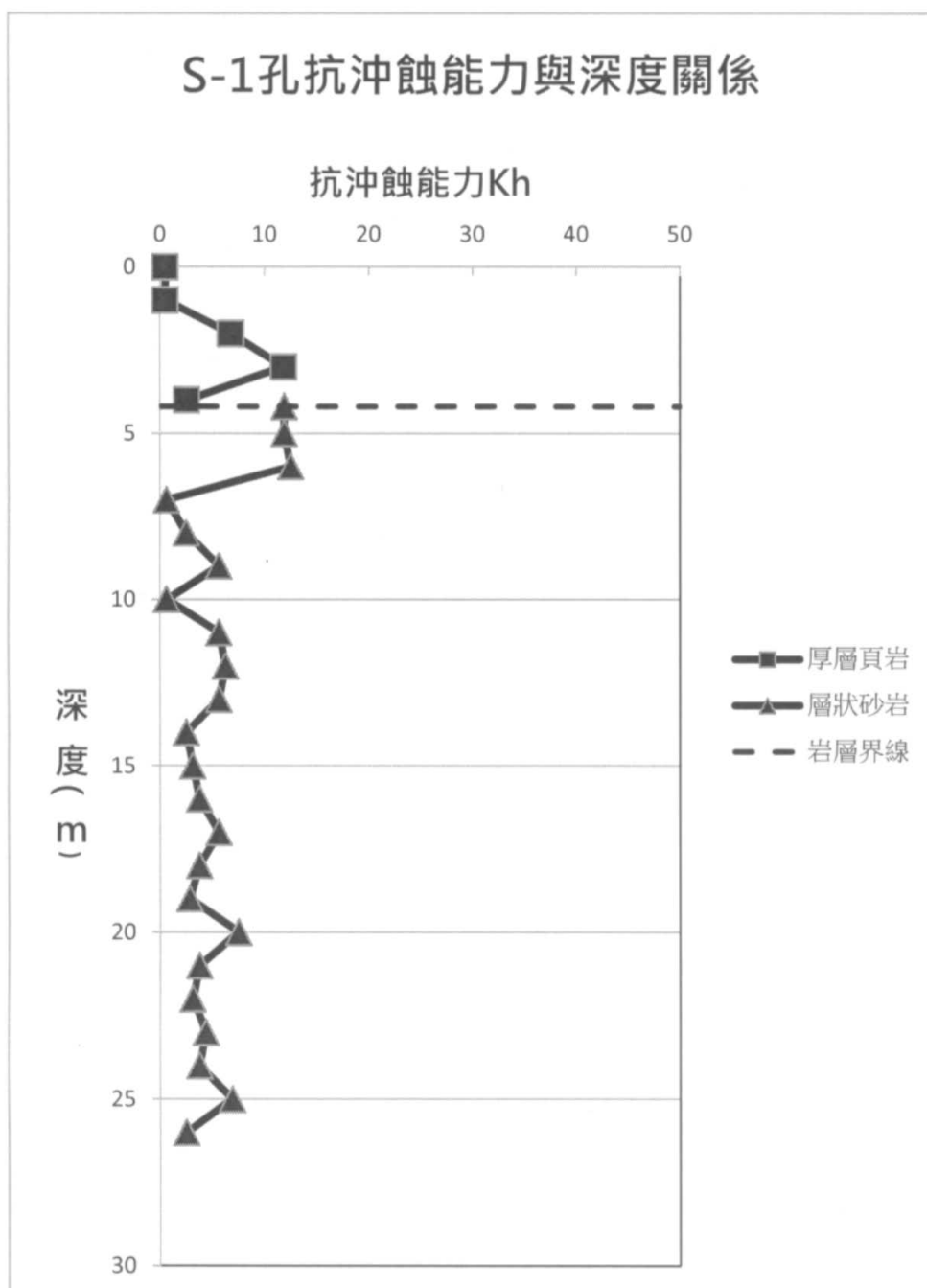


圖 4-19 S-1 孔抗沖蝕能力 K_h 深度變化關係

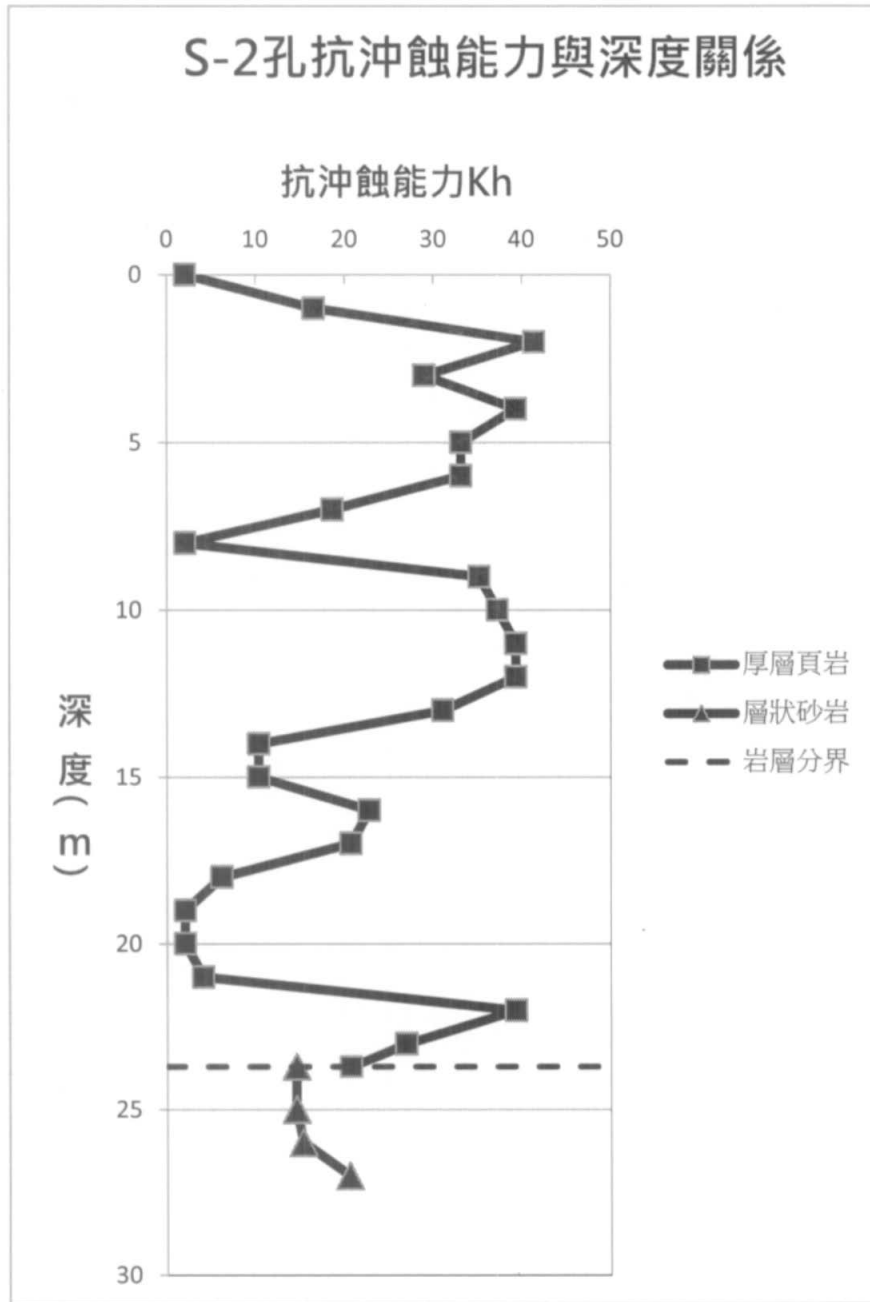


圖 4-20 S-2 孔抗沖蝕能力 K_h 與深度變化關係

表 4-19 堰前抗沖蝕能力 K_h 與石岡壩現場調查結果比較表

區域		抗沖蝕能力 K_h (平均值)	
		層狀砂岩	厚層頁岩
堰前劇烈沖 刷岩層	S-1 孔	4.7	5.4
	S-2 孔	16.8	23.4
現場調查結果		41	65

第五章 攔河堰下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析

第 1(民國 98)年度普查 8 座攔河堰之岩盤局部沖蝕特性，藉由現地地質、堰前沖蝕特徵、以及資料蒐集比對，並參考既有相關研究文獻，歸納 8 座攔河堰下游岩盤的沖刷機制且簡化為 3 種模型，分別為塊體抽離型(義興壩)、均勻下切型(龍泉圳攔河堰、觸口攔河堰、甲仙攔河堰)、槽溝下切型(後村堰、石岡壩、集集攔河堰)，本(民國 99)年度繼續整理西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性調查結果，歸納 8 座攔河堰沖刷機制之必要條件。

透過對各類型沖刷機制必要條件的瞭解，掌握何種地質條件下可能發生何種沖刷機制，有助於分析岩盤之抗沖蝕能力。也可用於評估沖刷坑未來可能之發展趨勢，作為未來攔河堰設置選址及設計考量及既有攔河堰沖刷穩定策略之參考，工作流程圖如圖 5-1。

一、攔河堰下游岩盤沖刷機制

本計畫由現地地質、堰前沖蝕特徵、資料蒐集比對、參考相關研究文獻及本(民國 99)年度沖蝕特性補充調查結果，配合示意圖說明各攔河堰下游岩盤沖刷坑形成的過程及機制。受限於攔河堰前水深及流速影響，且難以觀察河床面洪水沖刷實況，因此本計畫係針對各攔河堰堰前沖刷特徵，綜合過去學者及文獻中所提及之各種沖刷破壞特性，合理推測堰前沖刷坑之發展情形。本節所討論的水力條件及岩性如表 5-1 所示。水力條件包含越過水工構造物的水柱及挾帶的河床載直接衝擊岩盤的衝擊力，水柱進入深潭所形成的渦流及壓力波動，水流流向下游時因為壓力差所形成的水流拖曳力及水壓放大效應。岩性則考慮節理岩體及節理不發達的完整岩體，探討在各種水力條件下的主要沖刷型態。

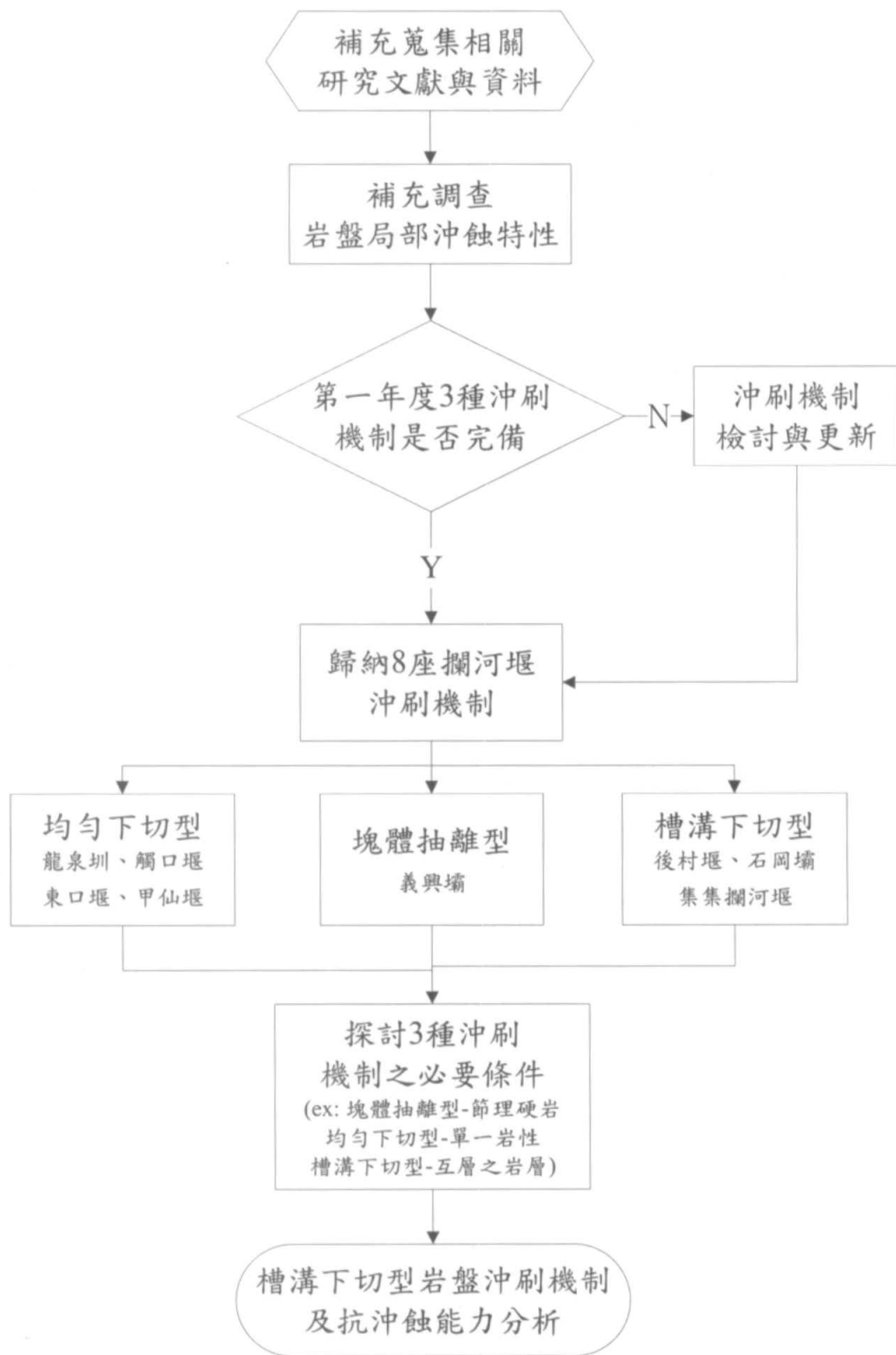


圖 5-1 探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷機制與
抗沖蝕能力分析流程圖

表 5-1 攔河堰下游岩盤沖刷機制表

水力條件	岩性與沖刷型態	
	完整岩體	節理岩體
<ul style="list-style-type: none"> ● 水流衝擊力 ● 河床載撞擊力 	表面裂縫產生	
<ul style="list-style-type: none"> ● 渦流 ● 壓力波動 	新裂縫/既有節理延伸至連通	
	形成岩石碎屑	形成岩石塊體
<ul style="list-style-type: none"> ● 水流拖曳力 ● 裂縫水壓放大效應 	磨蝕： 帶走碎屑，並從 表層均勻下切	抽離： 塊體克服摩擦力 並上舉

(一)後村堰

後村堰已於民國 93 年沖毀，因此本計畫從目前河道的沖蝕現況，推估若此區堰體仍完好的情況下對下游岩盤沖刷之影響。根據現地勘查與航空照片判釋，此區岩性主要以厚層砂岩、砂頁岩互層、夾煤層為主，砂岩的抗沖蝕能力較強，其餘岩層的抗沖蝕能力較弱，此抗沖蝕能力之差異，造成此區域如溝槽狀的河道，見圖 5-2、圖 5-3。

後村堰之沖刷機制以槽溝下切型為主，從航空照片判釋可發現，砂岩之沖刷速率較砂頁岩互層慢，因而矗立於河道之中槽溝下切型機制發展特徵可藉由歷年之航空照片看出，如圖 5-4。河道側岸的砂頁岩薄互層表面受高度風化之影響，抗沖蝕能力指數 K_h 量測值幾乎小於 1，因此洪水或豪雨時河岸的風化層很容易被沖蝕。但實際上影響岩盤下切的河道底床砂頁岩薄互層，未受乾濕循環影響，單壓強度及節理間距的評分都會較高， K_h 值大約 20。

頁岩的抗沖蝕能力較差，於相同水流作用力(沖擊、磨蝕、渦流等)條件下，其沖蝕下切速率在本區域所有岩層中最快。而當頁岩被沖蝕後，相鄰的砂岩薄層失去束制後因應力集中而產生裂縫，當裂縫受水流壓力波動而連通後即成塊狀或片狀脫落。

砂岩的抗沖蝕能力較強，抗沖蝕能力指數 K_h 值介於 200~600 之間，明顯高於砂頁岩薄層 K_h 值，因此受水流作用力時表面的磨蝕量不大，但是當周圍的岩層被沖刷後，孤立的砂岩層失去束制且受水流作用的凸懸尺寸變大，撓曲後容易在岩體表面產生張力裂縫，當裂縫經水流壓力波動而連通之後即成獨立塊狀脫離。



圖 5-2 後村堰現地沖蝕狀況照片



圖 5-3 後村堰沖蝕機制航空照片



(a) 93.06.14 艾利颱風前，堰前即形成下切之深槽(數字 1~4 處)。

圖 5-4 後村堰槽溝下切機制發展特徵



(b) 93.11.07 艾利颱風後。右岸壩體被洪水切穿，砂岩矗立河道(虛線方框處)，堰址下游亦可看出有槽狀河溝之情形(圓圈處)。



(c) 97.05.17 與圖 5-4(b)比較，堰前與圓圈處河道深槽拓寬，岩盤侵蝕範圍擴大。在圓圈處亦可明顯看見如堰址之砂岩層矗立於河道(虛線方框)。而形成槽溝下切機制發展特徵。

圖 5-4 後村堰槽溝下切機制發展特徵(續)

(二)義興壩

根據過去文獻資料及現地勘查，義興壩下游之岩盤以節理發達的砂岩為主，單壓強度約 80 MPa，岩盤沖蝕特性指數 K_h 值範圍介於 1800~2500 之間。雖然抗沖蝕能力指數相當高，但觀察現場沖蝕後的河岸形狀(圖 5-5)，其節理發達，有 2 組垂直河道且互相正交的解壓節理，節理間距約 0.25~1.5 公尺，層面間距約 0.7~1.5 公尺，解壓節理間距約為 1~5 毫米，故易形成塊體脫落。此區岩盤的沖刷機制以塊體抽離(plucking)為主，沖刷坑下方河道許多殘留之岩石塊體，如圖 5-6 虛線圓圈處。

節理發達的岩體承受水流沖擊力、渦流與壓力波動後，逐漸貫通砂岩岩體原本的節理，形成獨立塊體，隨後水流拖曳力、水壓放大效應將塊體抽離，沖刷坑因而逐漸擴大與加深。



圖 5-5 義興壩下游節理發達岩體沖蝕狀況



圖 5-6 義興壩正射影像(97.11.29)

(三)石岡壩

根據現地勘查與航空照片判釋，石岡壩於堰前階梯式消能工前出現許多不連續的橫向沖刷坑，河道中央有較大的沖刷坑，現地勘查照片如圖 5-7 所示，估計當時沖刷坑深度約為 3 公尺。

石岡壩跌水工下游接近沖刷坑中央之上游段岩性為中厚度砂岩層，而沖刷坑兩側為厚層頁岩。根據現地岩層條件之觀察，沖刷坑所在之中厚度砂岩層之因受節理發達之影響，使其刷深速率稍大於兩側的厚層頁岩，沖刷機制過程說明如下：

- 1、初始條件：攔河堰下游岩盤完整，跌水能量直接衝擊岩盤，表面形成裂隙，形成小塊體被水流沖離形成沖刷坑。

- 2、隨著沖刷坑逐漸發展，水流的直接沖擊力向岩盤四周擴散形成渦流並伴隨壓力波動，磨蝕厚層頁岩表面並隨著深度均勻下切。中厚度砂岩層(LSS)的層理發達，層厚約0.1~0.3公尺，且因靠近斷層附近，岩體較為破碎，使得其抗沖蝕能力反而比兩側厚層頁岩弱，沖蝕速率較快。中厚度砂岩層被沖蝕後，頁岩失去束制而產生張力裂縫，再加上頁岩表面常因乾濕循環生成裂隙，水流壓力波動逐漸貫通這些裂隙及既有節理而造成塊體鬆動而抽離。
- 3、石岡壩壩體下游之中厚度砂岩層(LSS)，其抗沖蝕能力指數 K_h 介於 30~60 之間，厚層頁岩(Sh)的 K_h 介於 60~100。而極厚層砂岩(MSS)的 K_h 則介於 100~300。由於抗沖蝕能力之差異，使得堰下游河道形成平行走向之狹長槽溝狀，沖刷坑之發展過程如圖 5-8。



圖 5-7 石岡壩堰前沖蝕狀況



(a) 96.01.31 堰前階梯式消能工前有橫向沖刷坑，下游固床鼎型塊沖毀，中央開始有較大的沖刷坑出現。



(b) 96.10.29 沖刷坑沿著河道中央節理發達、岩體破碎抗沖蝕能力較低之層狀砂岩(LSS)沖刷，發展成平行走向的不對稱槽溝狀。

圖 5-8 石岡壩槽溝狀下切機制與沖刷坑發展



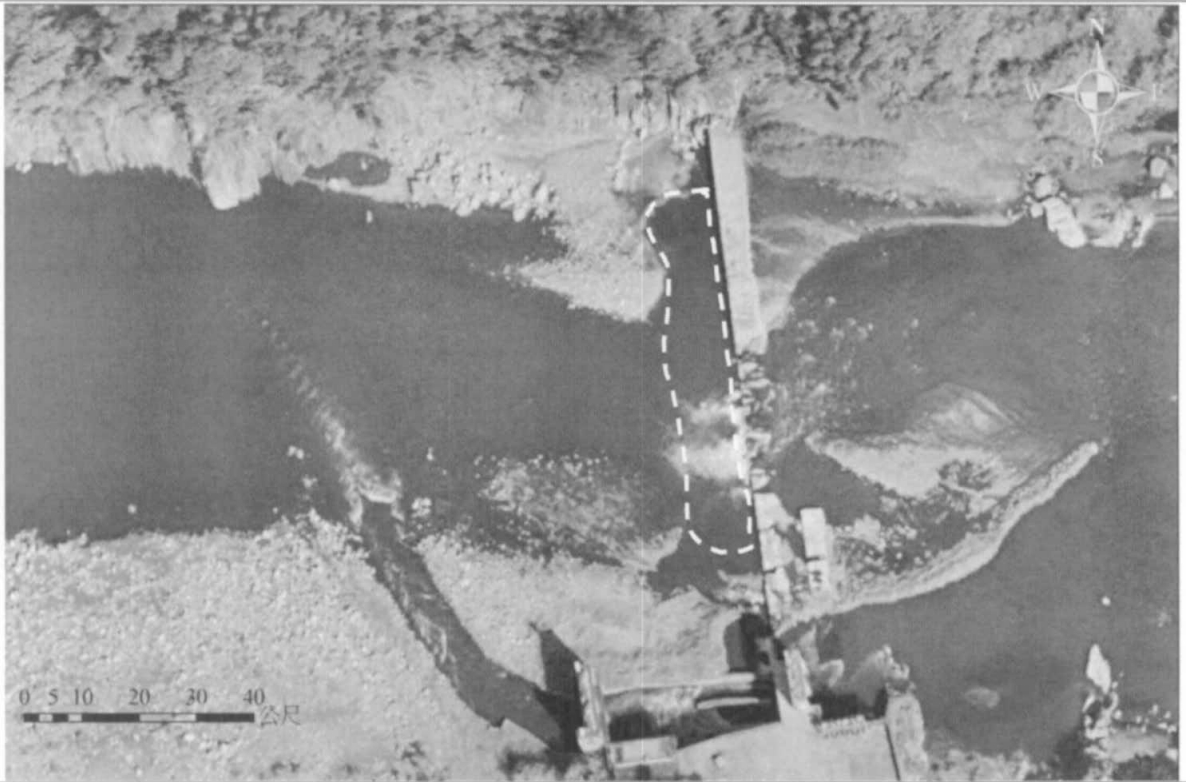
(c) 97.11.28 沖刷坑下游岩盤形成許多平行走向的槽溝，圖中虛線框選處為 99.01.20 現地量測之沖刷坑範圍，為狹長且平行走向的沖刷槽溝。

圖 5-8 石岡壩槽溝狀下切機制與沖刷坑發展(續)

(四)龍泉圳攔河堰

根據現地勘查，龍泉圳攔河堰下游岩性大部份由頁岩組成，其抗沖蝕能力指數 K_h 介於 100~200 之間。水流沖擊力在頁岩表面形成裂縫，渦流與壓力波動將這些裂縫延伸並連通岩石碎屑，然後水流拖曳力、水壓放大效應將這些岩石碎屑帶走並均勻下切，沖刷坑逐漸形成。

由民國 95 年正射影像(圖 5-9(a))可判釋堰前所形成之沖刷坑為全面均勻沖刷而形成。民國 98 年現勘結果堰體已修復，沖刷坑位置亦因加設靜水池而覆蓋，如圖 5-9 (b)。下游出露頁岩及沖蝕狀況如圖 5-10。



(a) 民國 95 年 堰體破損，河道約略可見岩盤。經判釋於堰體破壞前即已形成沖刷坑(圖中虛線處)。



(b) 98.12.12 堰體已修復。堰前沖刷坑已因加設靜水池而覆蓋(圖中虛線方框處)。

圖 5-9 龍泉圳堰前沖刷坑形成發展

(五)集集攔河堰

根據現地勘查，集集攔河堰下游主要岩性為砂頁岩互層與厚層砂岩兩種岩層之互層(如圖 5-12)。其沖刷機制如下所述：

1. 初始條件：攔河堰剛興建完成，下方岩盤仍完整，大部分的跌水能量直接沖擊岩盤，形成裂隙並逐漸出現沖刷坑。
2. 隨著沖刷坑逐漸發展，水流的直接沖擊力向岩盤四周擴散形成渦流並伴隨壓力波動，砂頁岩互層中的頁岩沖蝕速率較砂岩快，因此砂頁岩互層的表面會呈現砂岩凸頁岩凹的槽溝狀，其中頁岩沖蝕機制仍以磨蝕為主，砂岩抗沖蝕能力較強，僅造成表面少量磨蝕，但若鄰近的頁岩被磨蝕下切，會造成砂岩失去束制而撓曲產生張力裂縫，水流的壓力波動會連通這些裂縫及既有節理造成塊體鬆動而抽離。層狀砂岩的抗沖蝕能力較強，因此受水流作用時表面的磨蝕量不大，但是當周圍的岩層被沖刷後，孤立的砂岩層失去束制且受水流作用凸懸尺寸變大，容易在岩體表面產生張力裂縫，當裂縫經水流壓力波動而連通之後即成獨立塊狀脫離。
3. 集集堰下游之砂頁岩互層(SS/Sh)，其抗沖蝕能力指數 K_h 幾乎小於 10，相對於層狀砂岩(SS)(K_h 介於 500~800)低很多，使得堰下游河道形成明顯之槽溝狀下切機制如圖 5-11 與圖 5-13 正攝影像之判釋，堰前沖刷坑亦逐漸向下游成槽溝狀發展。



圖 5-10 龍泉圳攔河堰下游出露頁岩及沖蝕狀況

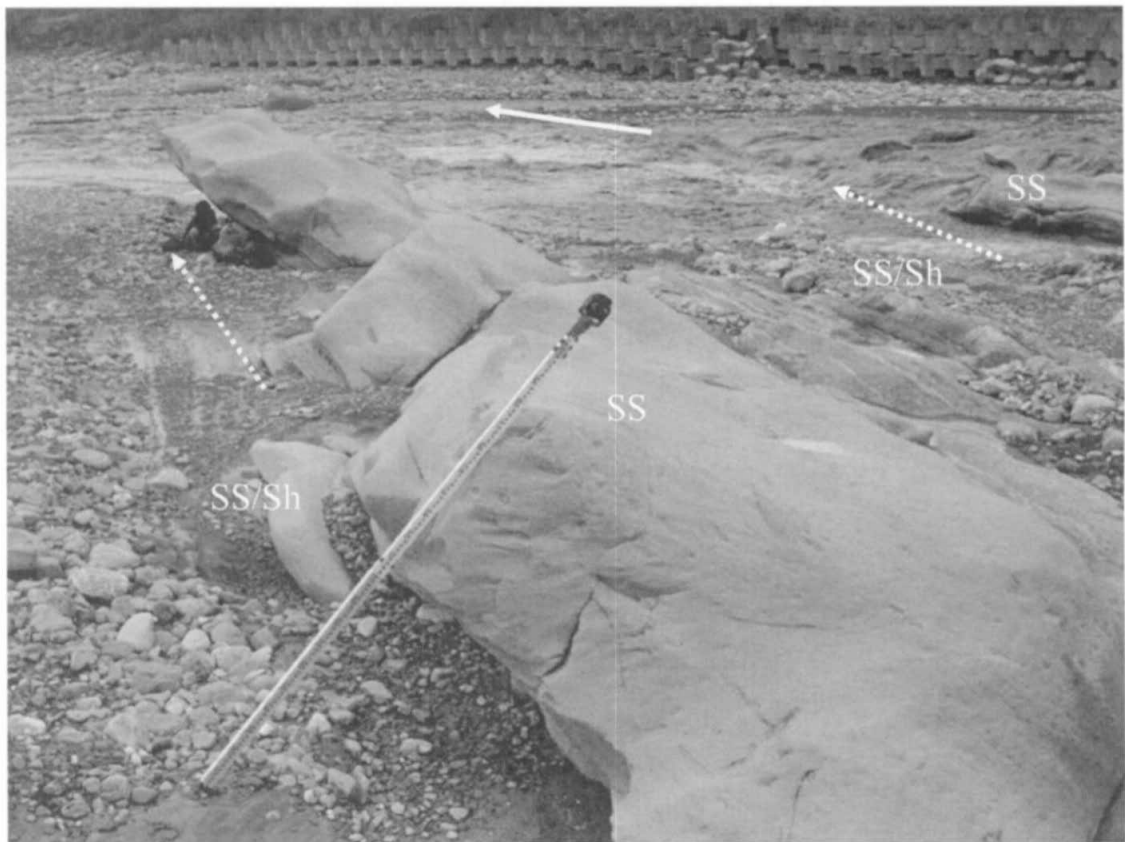
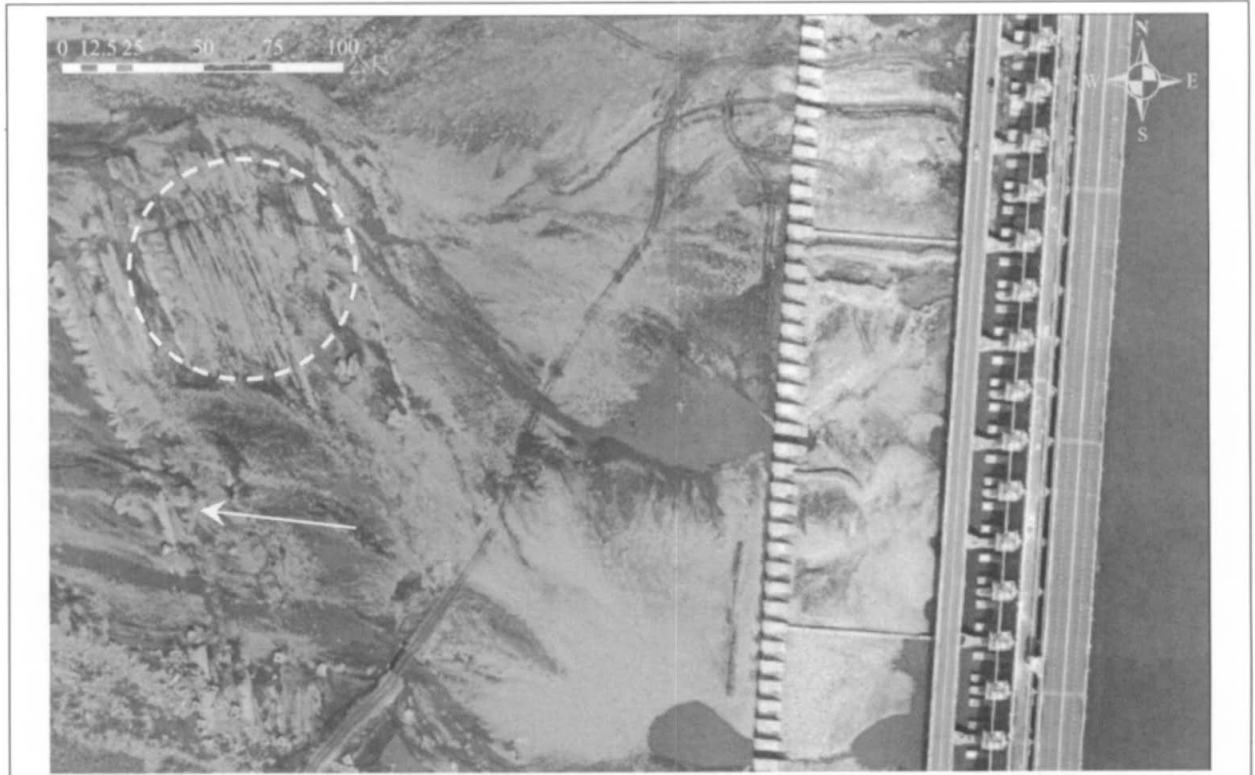


圖 5-11 集集攔河堰下游出露岩層及沖蝕狀況



(a) 96.01.28 堰前有沖刷坑形成，且被砂土覆蓋。河道下游岩盤呈成槽溝狀(虛線圓圈處)。



(b) 97.06.10 堰前岩盤出露，沖刷岩盤之沖刷坑形成(實線框選處)，下游河道槽溝下切加深(虛線圓圈處)。

圖 5-13 集集堰河道槽溝下切與沖刷坑發展



(a) 98.12.05 沖刷坑稍擴大，並往下游延伸逐漸形成平行岩層走向的槽溝狀發展(實線框選處)。

圖 5-13 集集堰河道槽溝下切與沖刷坑發展(續)

(六)觸口攔河堰

根據現地勘查，攔河堰下游岩性大部份由泥質粉砂岩組成，如圖 5-14，抗沖蝕能力指數 K_h 介於 150~300 之間。水流衝擊力在粉砂岩表面形成裂隙，渦流與壓力波動將這些裂縫延伸並連通岩石碎屑，然後水流拖曳力、水壓放大效應將這些岩石碎屑帶走並均勻下切，沖刷坑逐漸形成。

觸口攔河堰自民國 88 年興建完成，主要設施包含堰體及下游約 70 公尺處 1 道固床工，如圖 5-15(a)，河道主要均由軟礫石覆蓋，但局部區域已有岩盤出露。民國 94 年時下游固床工已

經沖毀約三分之一，且攔河堰下游側排列之固床混凝土塊已經大多流失，攔河堰下方增建階梯式消能設施，堰前有沖刷坑形成圖 5-15(b)。民國 96 年時堰前階梯式消能設施部分損毀，沖刷坑擴大如圖 5-15(c)，堰下游左岸形成岩床主深槽，且整個河道高度下降，河道上主要均為岩床。後經多次進行保護及修復工程，由最初之自由溢流堰及靜水池，至民國 98 年 7 月修復後計有堰體、2 道溢流道及 4 階靜水池。民國 98 年 8 月，經歷莫拉克颱風，堰址左岸堰體沖毀，刷深下切型成新河道，圖 5-15(d)。

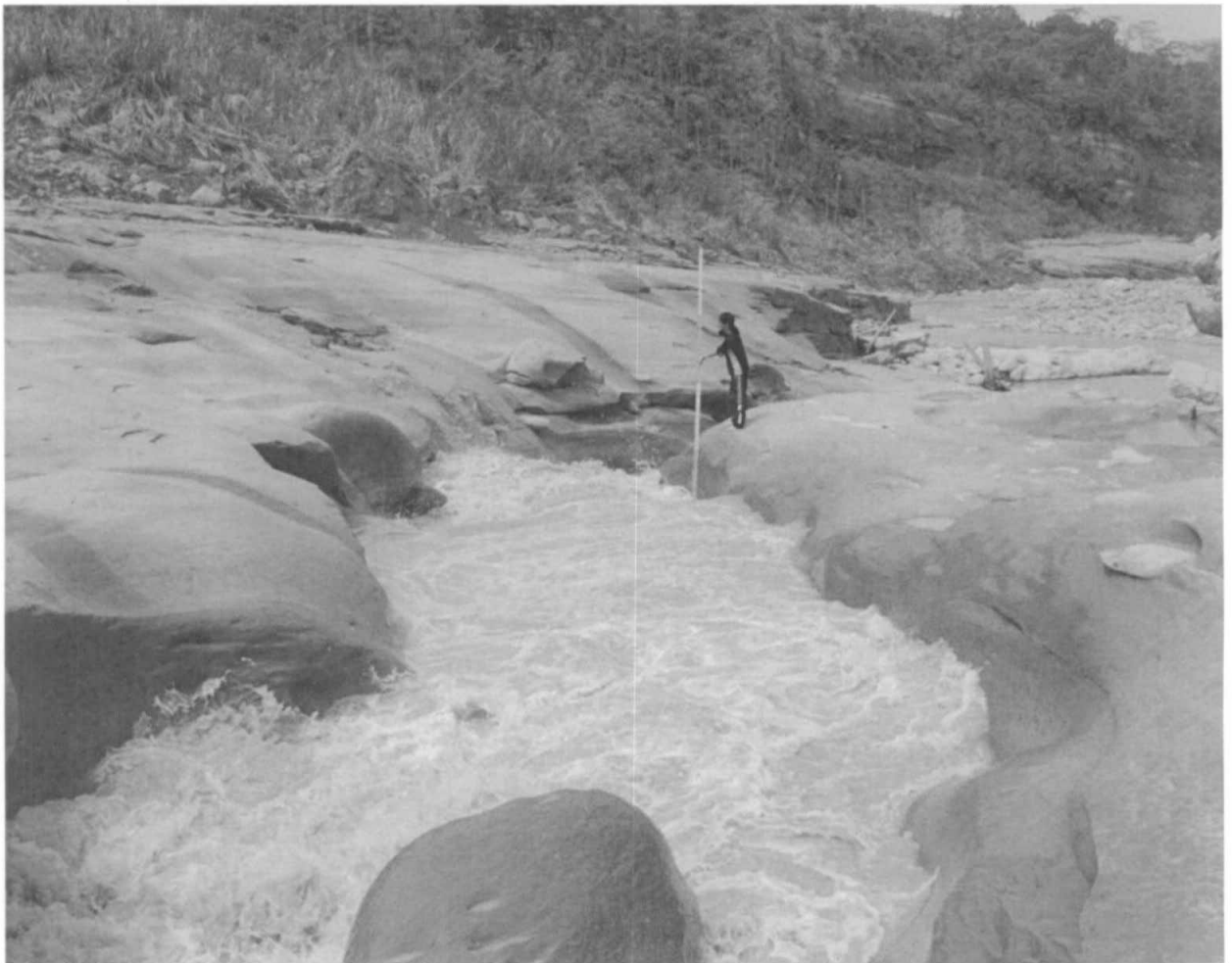


圖 5-14 觸口攔河堰下游出露之岩層



(a) 88.12.24 年 觸口堰興建完成，主要設施包含堰體及下游固床工。



(b) 94.11.27 下游固床工部分沖毀，堰下游固床混凝土塊流失，沖刷坑形成(圖中虛線處)。

圖 5-15 觸口堰下游沖刷與沖刷坑



(c) 96.02.03 堰前消能設施沖毀，沖刷坑擴大(圖中虛線處)。



(d) 99.01.10 莫拉克颱風後，堰體左岸沖毀，切穿形成新河道(虛線方框處)。

圖 5 - 15 觸口堰下游沖刷與沖刷坑(續)

(七)東口堰

根據本計畫歷次調查結果顯示，相較於其他攔河堰，東口堰沖刷坑相當穩定，即使曾文水庫於莫拉克颱風期間的大規模長時洩洪，所造成的變化亦不大，研判應該與該區域有豐富的卵礫石料來源有關。河川沉積料對於岩盤沖刷所扮演的角色，移動之河床載雖然會在高流量時磨蝕岩盤，但在中低流量時也會扮演保護岩盤的角色，因此充足的卵礫石形成良好之護甲層，應該與此地區攔河堰下游側有限的沖刷坑與河床穩定有很大的關係，如圖 5-16。



圖 5-16 東口堰下游卵礫石形成護甲層

(八)甲仙攔河堰

根據現地勘查，攔河堰下游岩性大部份由頁岩組成(圖 5-18)。侵蝕作用由水流沖擊力以及乾濕循環在頁岩表面形成裂隙，如圖 5-17，渦流與壓力波動將這些裂縫延伸並連通岩石碎屑，然後水流拖曳力、水壓放大效應將這些岩石碎屑帶走並下切，逐漸形成沖刷坑。此區岩性均勻、節理不發達，屬於均勻下切型沖刷坑。

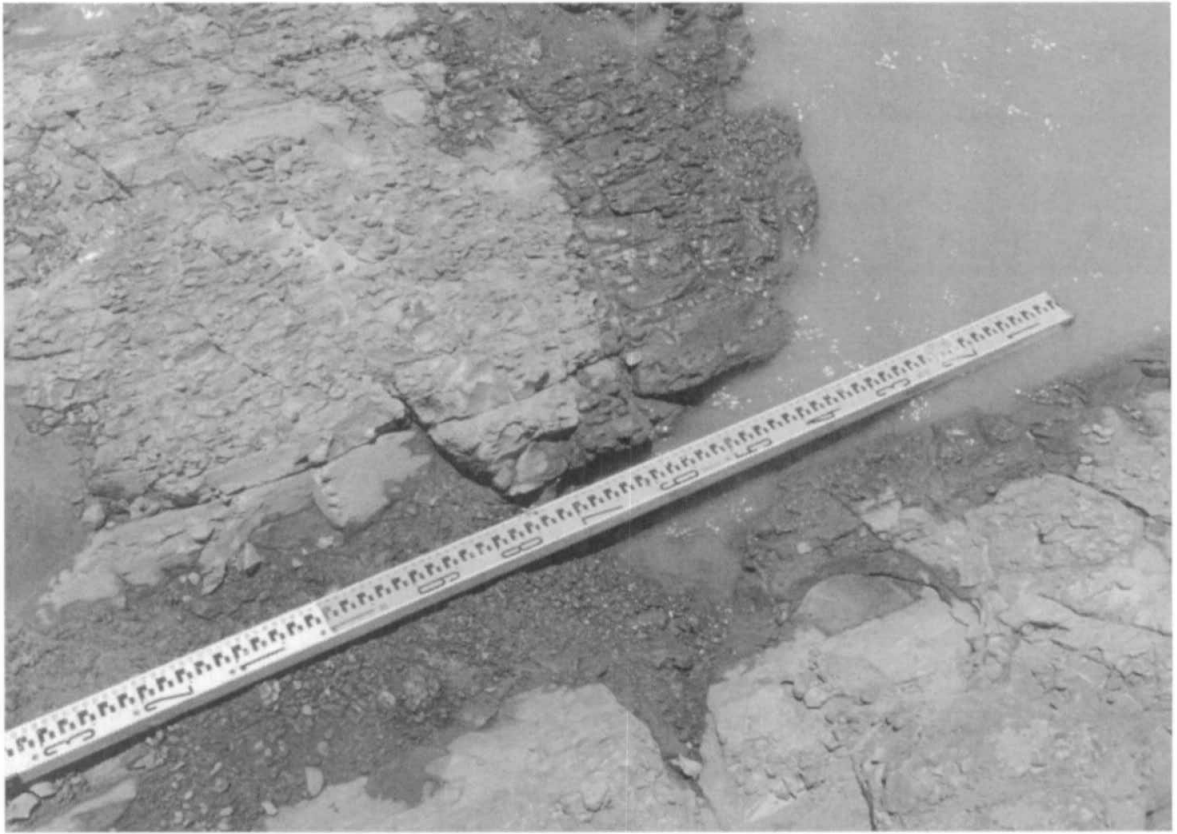


圖 5-17 甲仙堰堰前頁岩表面裂隙



圖 5-18 甲仙攔河堰下游出露之頁岩

二、各類型沖刷機制必要條件及抗沖蝕能力分析

根據第 1(民國 98)年度的調查結果，均勻下切型沖刷機制的特徵為岩盤屬於節理不發達的厚層頁岩，或強度較弱的砂岩及粉砂岩。塊體抽離型沖刷機制的特徵為岩盤單壓強度強且遠大於節理面強度、岩體節理發達。槽溝下切型的沖刷機制的特徵為兩種以上硬、軟岩層交錯出現的岩盤，通常為砂岩、頁岩交替出現的地層，岩層走向與河道平行或斜交。本(民國 99)年度針對這些特徵進行探討並描述，藉由 Annandale(2006)所提出 K_h 值的概念，評估單壓強度、節理間距、節理面狀態、水流流向與岩層走向等因素對不同沖刷機制所扮演的角色重要性，嘗試瞭解在何種地質條件下容易造成相對應之沖刷類型，成果整理如表 5-2。

三、攔河堰沖蝕機制綜合探討

傳統上對於水利構造物之沖刷問題，若地層條件為岩石材料時，一般僅在處理高壩及溢洪道之沖刷時予以討論，對於攔河堰等水利構造物則認為因為高差較小，跌水產生之能量有限而不予考慮，僅聚焦於無凝聚力之顆粒材料上，以顆粒材料之力平衡為準則計算河道沖淤行為，較少討論岩盤之沖刷特性。

但台灣西部麓山帶地區出露的上新世及更新世的地層組成岩石，大多由節理並非十分發達、厚度不一的砂岩、頁岩、及砂頁岩互層所組成，此類岩石普遍具有膠結不良、遇水極易軟化且極易受沖蝕之特性，進而引起引水設施損壞或喪失功能。

綜合相關文獻之論述，沖刷坑之形狀及其規模，往往與地層岩性及水流特性（型態、流量大小）兩個因素息息相關。沖刷坑若逐漸向上游擴展，將嚴重威脅堰壩基礎之穩定性；沖刷坑若朝左右兩岸擴展，則將影響兩岸邊坡之安定；若攔河堰下

游側之岩性不佳，消能又不足時，高速沖擊水流不只侷限於形成具有沖刷坑，甚而可能使沖刷作用直接向下游發展，使得下游河床面降低，沖刷坑雖變身、尾水位卻無法加深，進一步增加上下游之水頭差，使沖刷能量增加，惡性循環之結果即使得下游面沖刷持續發展。

根據第 1(民國 98)年度及本(民國 99)年度調查結果，均勻下切型沖刷機制的特徵為岩盤屬於節理不發達的厚層頁岩，或是強度較弱的砂岩及粉砂岩。塊體抽離型沖刷機制的特徵為岩盤單壓強度強且遠大於節理面強度、岩體節理發達。槽溝下切型的沖刷機制的特徵為兩種以上硬、軟岩層交錯出現的岩盤，通常為砂岩、頁岩交替出現的地層，岩層走向與河道平行或斜交。以下針對這些特徵進行探討並描述，藉由 Annandale(2006)所提出的岩盤抗沖蝕能力的概念，評估單壓強度、節理間距、節理面狀態、水流流向與岩層走向等因素對不同沖刷機制所扮演的角色重要性，試圖瞭解在何種地質條件下容易造成相對應之沖刷類型，目前初步成果整理如表 5-2，其抗沖蝕能力分析成果如下：

1、塊體抽離型(義興壩)

此類沖刷現象乃由塊體抽離主控的沖刷形式，其特色是岩石強度較強，遠大於節理面強度，且節理發達。岩石強度強，代表水流作用力對岩盤本身材料的磨蝕較少，且較不易因撞擊產生新裂隙。當岩石強度遠大於節理面強度，節理又發達，則控制了破壞型態，水流沖擊力、顆粒撞擊力、渦流及壓力波動皆會令既有節理延伸及連通。當節理連通造成塊體孤立後，經由水流拖曳力及裂縫間的水壓放大效應將塊體上舉脫離，其示意如圖 5-19。

2、均勻下切型(龍泉圳攔河堰、觸口攔河堰、甲仙攔河堰)

均勻逐層下切的沖刷模式主要出現在厚層頁岩、砂頁岩互層中的頁岩或是強度較弱的砂岩及粉砂岩，其特色是岩石強度較弱，但節理不發達。岩石強度弱，代表水流造成之床面剪應力對岩盤表層磨蝕的影響相對較大，節理不發達的岩體無特定之破壞面，水流沖擊力及顆粒撞擊力造成裂隙均勻產生，受到渦流及壓力波動之後岩盤表面產生岩石碎屑再被水流沖離，其示意如圖 5-20。

3、槽溝下切型(後村堰、石岡壩、集集攔河堰)

槽溝下切型主要出現在兩種以上岩層交錯出現的岩盤，通常為砂岩與頁岩交替出現的地層，岩層走向與河道平行或斜交，傾角又頗高，由於頁岩的沖蝕速率較快，當頁岩被侵蝕後，尚未侵蝕的砂岩孤立失去了原有之束制且凸顯之範圍增加，放大了水流沖擊力、顆粒撞擊力、渦流及壓力波動對孤立砂岩的影響，造成撓曲斷裂，加速塊體脫離的潛能。因此若要合理簡化並掌握槽溝下切型的沖刷速率，只要掌握抗沖蝕能力較低的岩層將成為主控沖刷之岩層的原則，便可掌握沖刷坑之發展，其示意如圖 5-21。

1. 渦流及壓力波動造成節理連通，塊體抽離
2. 壩底附近受渦流影響，向下掏刷6 m，向內掏刷7.5 m

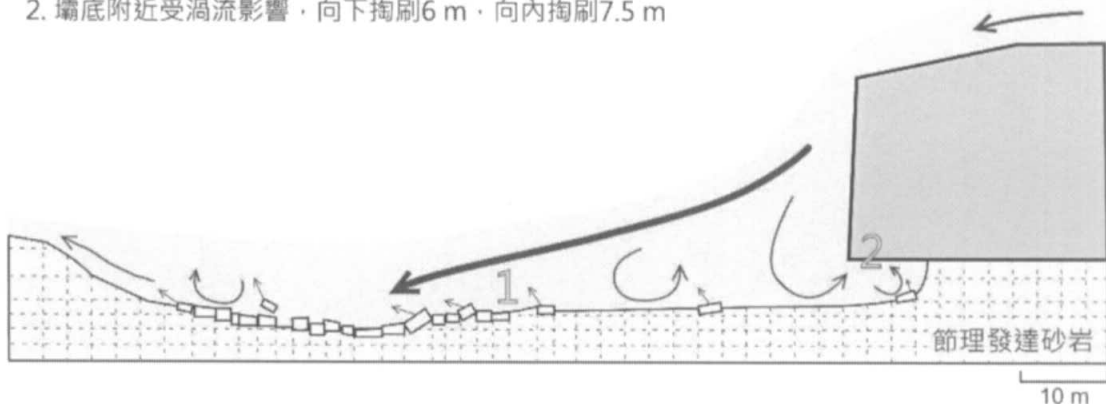


圖 5-19 塊體抽離型沖刷示意圖

- ① 水流直接衝擊岩盤，並向四周擴散形成渦流
- ② 渦流自頁岩表層逐層下切磨蝕，形成沖刷坑

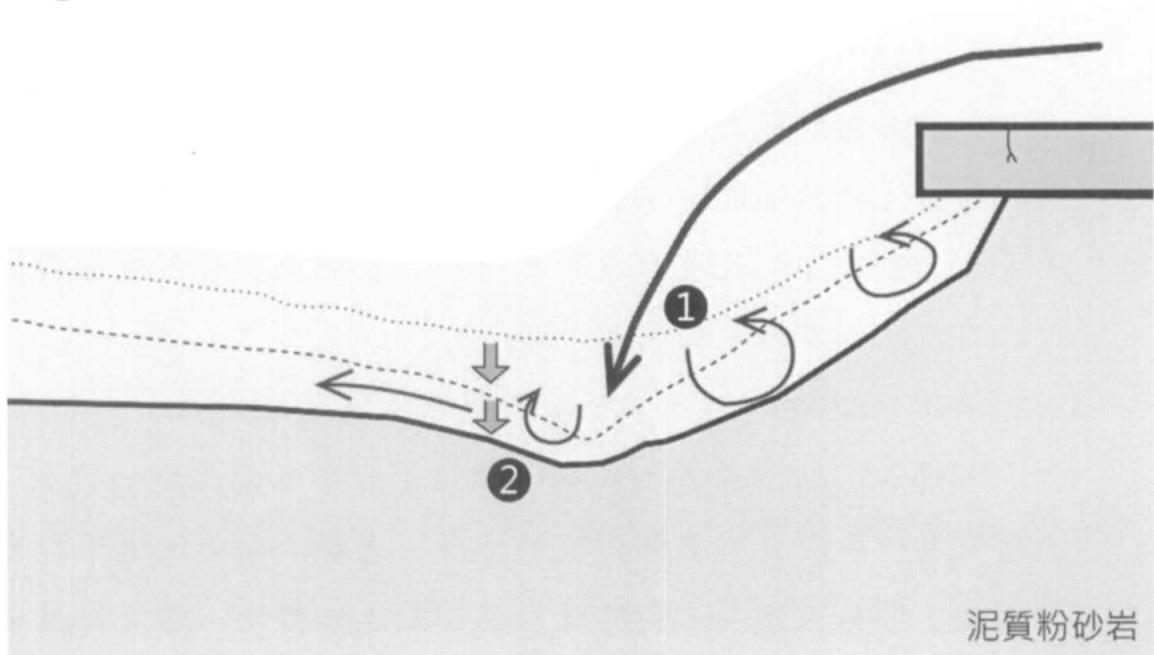


圖 5-20 均勻下切型沖刷示意圖

- ① 水流作用力直接沖擊岩盤，並擴散形成渦流
- ② 砂頁岩互層沖蝕速率較快，層狀砂岩失去束制後產生裂縫形成塊狀脫落

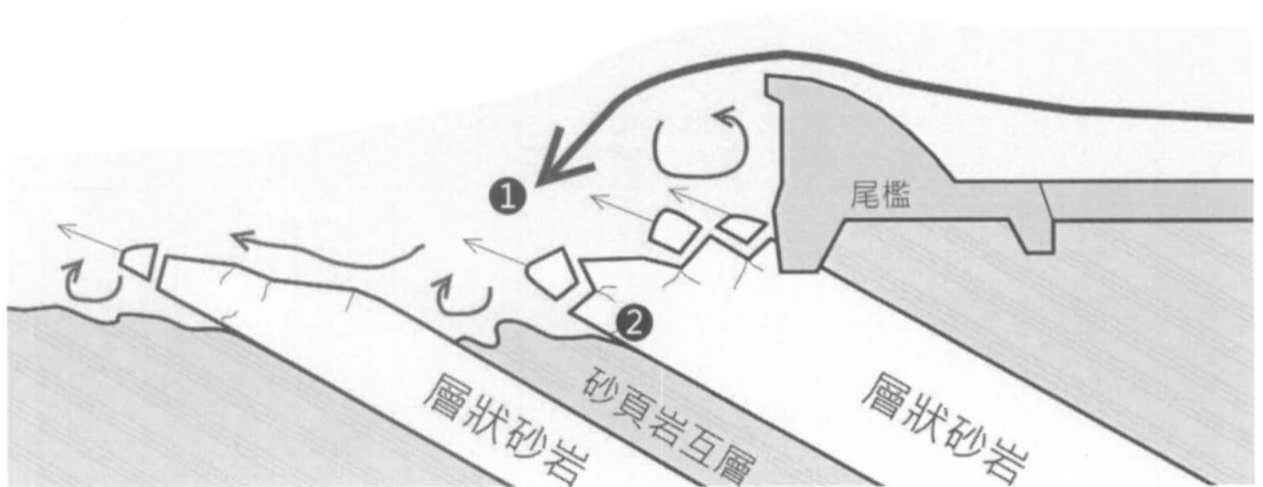


圖 5-21 槽溝下切型沖刷示意圖

第陸章 探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷深度 評估方法

本計畫針對國外之局部沖刷評估方式之文獻探討，以 Annandale(2006)以及 Bollaert(2002)兩種方法於近年相關研究中被引用得較多，且為 ASCE 出版之工程師手冊中 Sedimentation Engineering(2008)所推薦，因此本計畫採用此 2 方法進行攔河堰下游岩盤沖刷深度評估，並探討其結果及適用性。

由第 1(民國 98)年度所採用之國外局部沖刷評估方式於台灣適用性初步探討，Annandale 與 Bollaert 法各有其適用性範圍，本章節以第 1(民國 98)年度集集堰、義興壩之初步探討成果為基礎，加入本(民國 99)年度石岡壩的案例進行綜合探討。經檢討第 1(民國 98)年度的水流流功計算所採用之參數無法確切掌握射流流功隨跌水距離及尾水深度之變化趨勢，本(民國 99)年度提出較為完整之射流流功計算方式，重新計算集集堰、義興壩、石岡壩的沖刷深度。最後就現有評估方法不足之處提出改良建議，供後續研究計畫參考。

本工作項目流程圖如圖 6-1 所示，沖刷坑深度評估方式之參數來源，可分為以下 3 個部分：

- (1) 水理分析：由 CCHE2D 水理特性分析獲得流速、水深、剪應力、射流水柱厚度、尾水高程等。
- (2) 地形資料：由文獻蒐集之地形測量資料獲得研究區域沖刷坑歷年演進狀況，包含範圍的擴大與深度的增加。
- (3) 抗沖蝕能力調查：由鑽探或現地取樣的試體試驗結果(如單壓強度、節理面剪力強度等)、現地調查結果(節理間距、層面位態、風化程度)所得到的攔河堰壩下游岩盤抗沖蝕能力指數。

將以上參數帶入 Annandale(2006)及 Bollaert(2002)岩盤沖刷評估方法，計算攔河堰沖刷深度，並比較分析結果與現地趨勢是否吻合。若大致吻合，則探討分析所選用的參數是否能反映隨著沖刷坑發展時，射流流功的衰減趨勢，作為評估攔河堰下游岩盤沖刷深度之建議方法，並針對不足之處提出後續相關研究計畫之建議。若明顯不吻合，則探討既有深度計算方式之假設條件是否無法反應台灣現地沖刷機制，並提出說明。

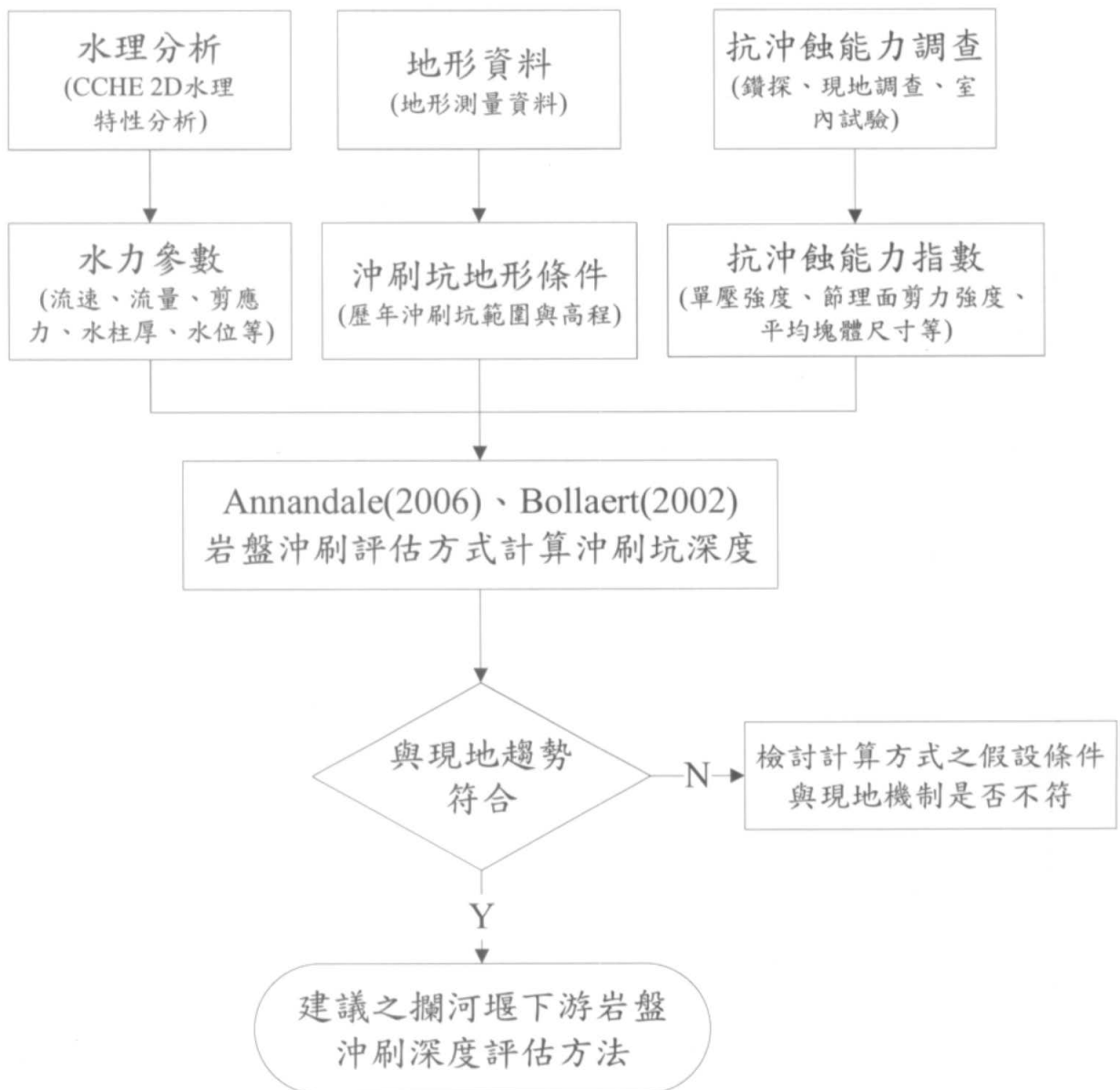


圖 6-1 攔河堰(壩)下游岩盤沖刷深度評估方法流程圖

一、Annandale (2006)岩盤沖刷評估方式

Annandale 試圖建立 1 套仿照岩體品質評分系統之抗沖蝕指數(erosibility index)，抗沖蝕指數($K_h = M_s K_b K_d J_s$)等於 4 項參數的乘積，這 4 項參數分別為 M_s (材料強度)、 K_b (顆粒/塊體尺寸)、 K_d (弱面抗剪強度)、與 J_s (地盤構造條件)，各參數依不同條件給予不同之指定值。

Annandale 計算了約 200 處不同河道之抗沖蝕指數，又依不同河道流況(如陡降、水躍、河床坡度突然改變、均勻明渠)依明渠流體力學理論計算各處河道之能量消耗，並紀錄現場是否發生沖蝕，將單位面積流功與抗沖蝕能力指數繪出雙對數圖關係(如圖 6-2)，進而推估對應特定抗沖蝕指數條件恰發生沖蝕時所需之能量消耗門檻值： $SP_{threshold} = K_h^{0.75}$ 。

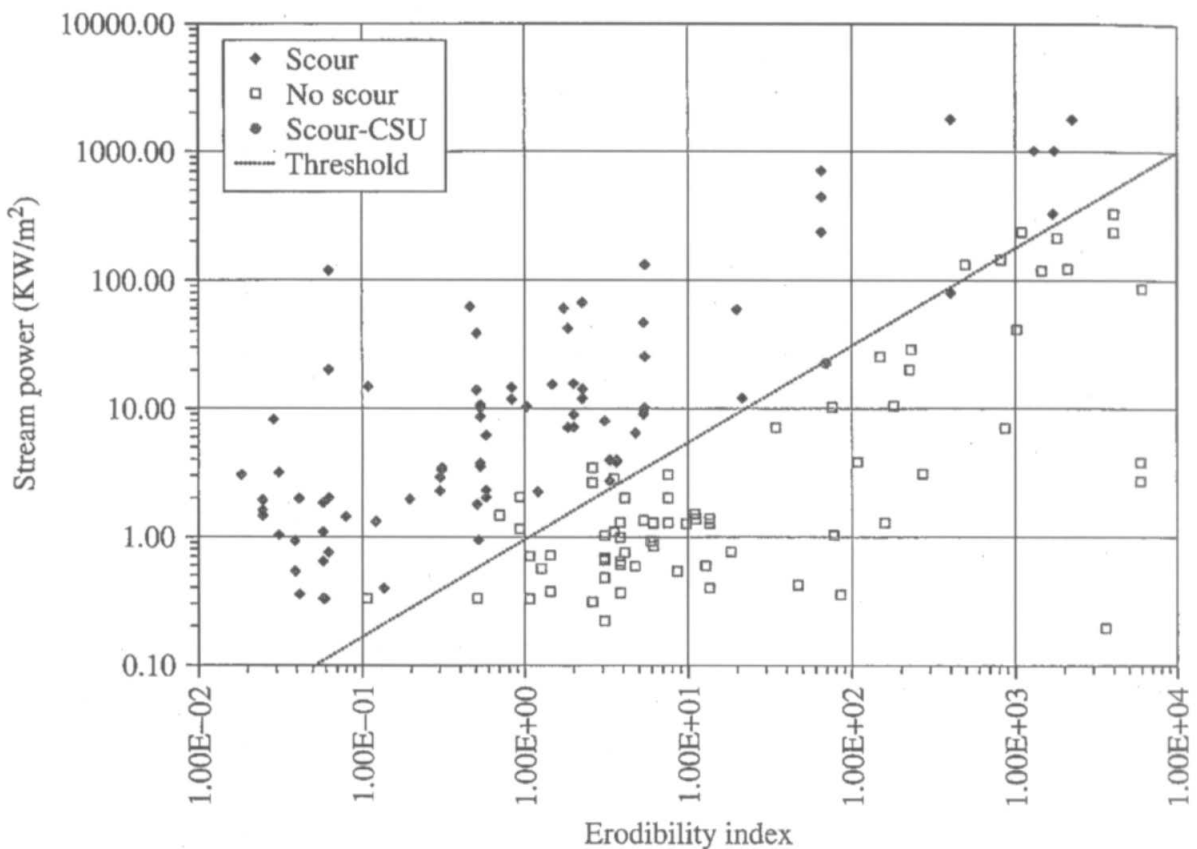


圖 6-2 單位面積流功與抗沖蝕能力指數圖(Annandale, 1995)

Annandale 又進一步延伸其抗沖蝕能力指數概念到岩石沖刷深度的評估上面，如圖 6-3 所示：(1)計算沖刷坑在不同深度流況下可能的流功(stream power)，(2)藉由鑽探等調查方式，對不同深度之材料加以評估其抗沖蝕能力指數，將上述 2 者以深度高程為基準加以合併比較，判斷可能穩定之沖刷深度。

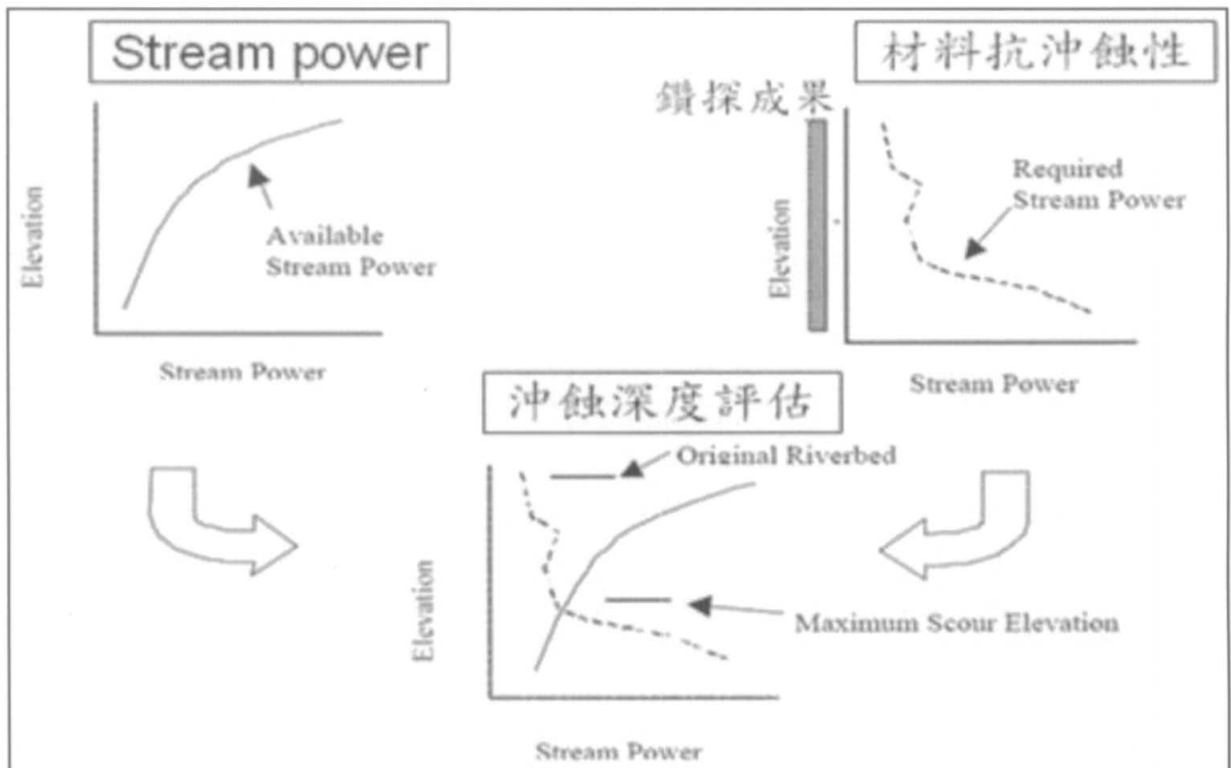


圖 6-3 評估沖蝕坑的可能沖蝕深度

(一)抗沖蝕能力指數 K_s 評估方式

抗沖蝕能力指數 K_s 透過現地調查岩石的特性，類似岩體評分法的概念，用來評估岩盤抵抗沖蝕的能力。分別評估材料強度參數(M_s)、顆粒或塊體尺寸參數(K_b)、弱面抗剪強度參數(K_d)、地盤構造條件參數(J_s)，詳細評分方式請參考附錄四。

(二)射流至水面之流功(P_{jet})評估方式

總射流流功計算方式依 hydropower potential 之計算公式如下：

$$P_{jet} = \gamma QH$$

式中：

P_{jet} = 射流的總流功(the total stream power of the jet)

γ = 水流單位重(unit weight of water)

Q = 總流量(total discharge)

H = 射流至水面的垂直距離(vertical distance)

總射流流功可能衝擊於水面或岩石上，作用於表面的能量可以用總流功除以衝擊的面積，如下：

$$P_{jet} = \frac{\gamma QH}{A}$$

式中：

P_{jet} = 單位面積的流功(stream power per unit area)

A = 水流衝擊面積(footprint area)

射流自堰頂射出之後，會隨著射流軌跡長度(L)增加，射流邊緣與空氣混合，造成射流表面擾動且紊亂，導致衝擊消能池表面的面積擴大並伴隨壓力波動產生，射流軌跡的長度可以用以下公式估計(Ervine et al., 1997)，並估計射流擴大後的厚度(D_{out})，相關參數位置可以參考圖 6-4。

$$L = \int_0^x \sqrt{1 + \left[\tan \theta - \frac{2x}{K_2 [4(D_j + h_v)(\cos \theta)^2]} \right]^2} dx$$

$$x = \left[\tan \theta + \sqrt{(\tan \theta)^2 - \frac{(-1)z}{K_2 (D_i + h_v)(\cos \theta)^2}} \right] \times 2K_2 (D_i + h_v)(\cos \theta)^2$$

$$D_{out} = D_i + 2 \times 0.38 (T_u L_j)$$

式中：

x = 射流水平距離

z = 射流垂直距離

θ = 射流射出角度

K_2 = 射流中的空氣阻力效應係數，通常等於 0.75

D_i = 射流厚度

$$h_v = V_i^2 / 2g$$

V_i = 射流初始速度

θ = 射流初始角度

D_{out} = 射流擴大厚度

T_u = 典型紊流強度，在溢流射流等於 0.03

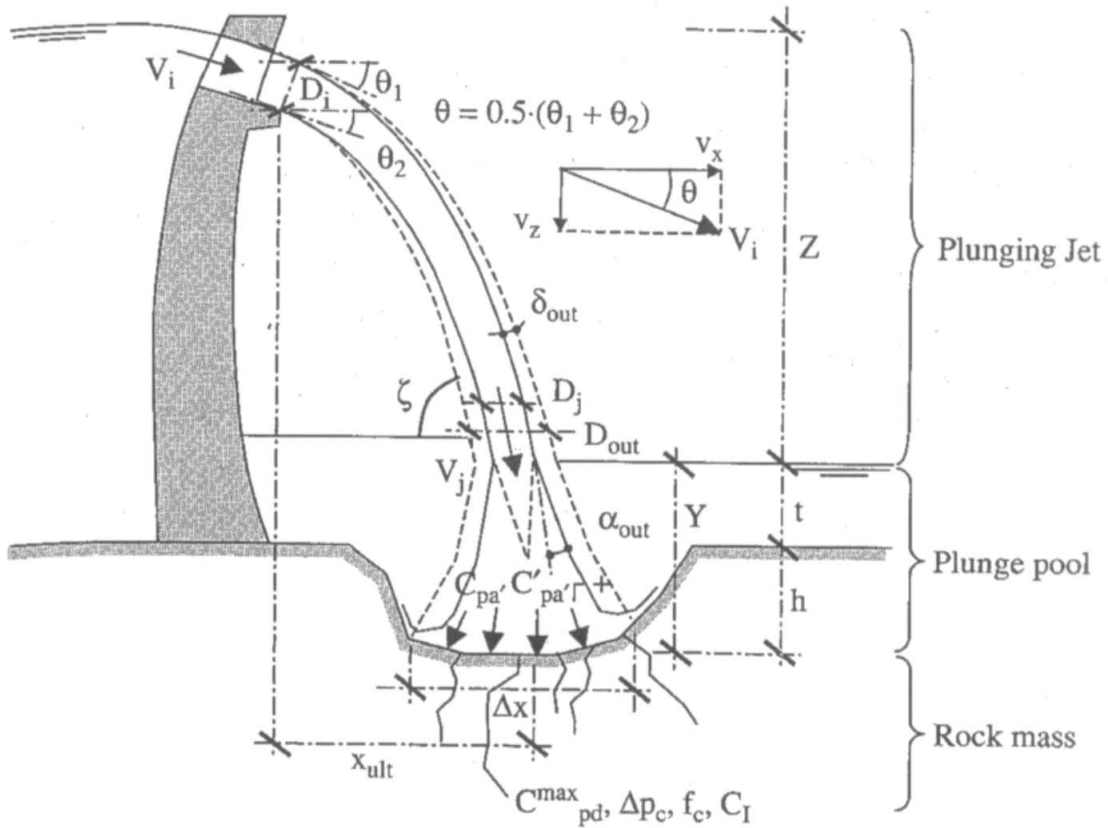


圖 6-4 水流過溢洪道進入消能池之示意圖(Bollaert, 2002)

(三)水面射流流功在消能池的消散評估方式

射流自水面進入消能池之後，流功會隨著消能池的深度衰減，可以用平均及波動流功衰減係數(average and fluctuating stream power decay coefficients)來表示。消能池的平均動態壓力估計可以利用平均動態壓力係數 C_p (average dynamic pressure coefficient)，計算公式如下(Hanson et al., 2000)，示意圖如圖 6-4：

$$C_p = \frac{D_p}{\frac{1}{2} \rho V_j^2}$$

式中：

D_p = 平均動態壓力(average dynamic pressure)

$$D_p = \frac{1}{2} \rho V_j^2 \quad \text{if } J \leq J_p$$

$$D_p = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{J_p}{J} V_j \right)^2 \quad \text{if } J > J_p$$

V_j = 水柱衝擊到水面的速度 (impact velocity)

$$V_j = \sqrt{V_i^2 + 2gZ}$$

V_i = 水柱初始速度 (issuance velocity)

J_p = 射流核心計算長度 = $K_j D_j$

$K_j = 6.3$, 經驗參數

J = 實際射流長度 (actual length of jet)

平均動態壓力係數與平均流功衰減係數 (average stream power decay coefficient) 與正規化的消能池深度 (Y/D_j) 有關，如圖 6-5。

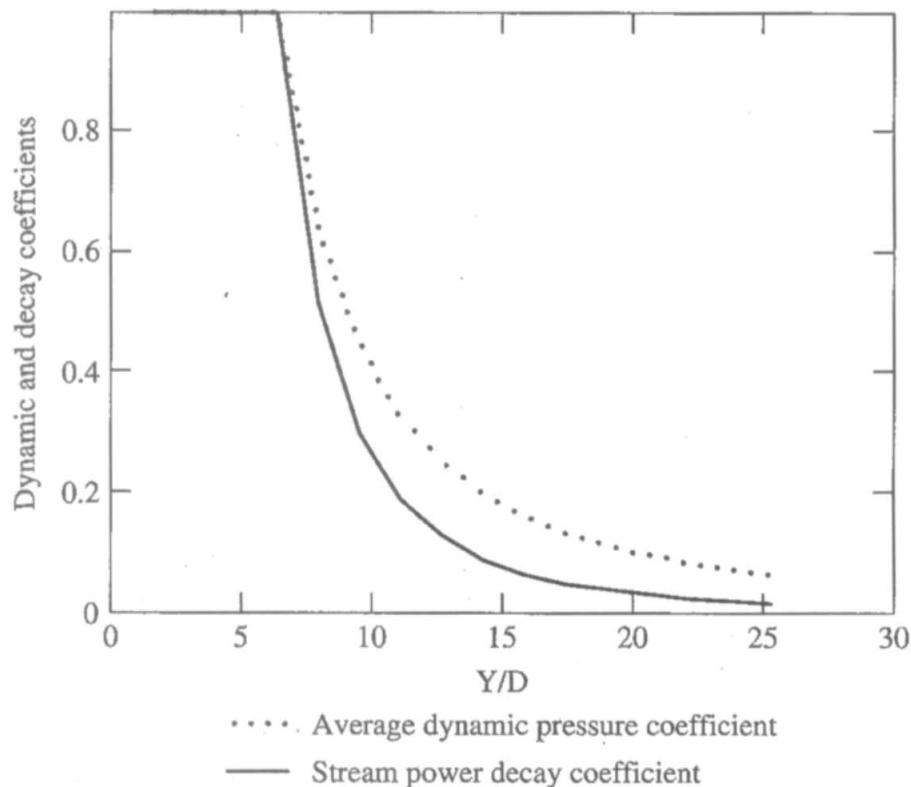


圖 6-5 平均動態壓力係數與正規化消能池深度關係

壓力波動也會隨著正規化消能池深度而衰減，因此可以導出作用於岩盤表面的單位面積流功，如下式：

$$P_{total} \left(\frac{Y}{D} \right) = P_{jet} \left(\frac{Y}{D} \right) + P'_{jet} \left(\frac{Y}{D} \right)$$

式中：

$$P_{jet} \left(\frac{Y}{D} \right) = C_p \left(\frac{Y}{D} \right) \frac{\gamma Q H}{A} = \text{平均壓力流功}$$

$$P'_{jet} \left(\frac{Y}{D} \right) = C'_p \left(\frac{Y}{D} \right) \frac{\gamma Q H}{A} = \text{波動壓力流功}$$

(四)消能池內壓力波動的定量

本法用來定量跌水所造成的紊流所產生的壓力波動，在消能池中的實際強度。總動態壓力(total dynamic pressure)由兩個要素所組成，可定義如下：

$$P_{max} = (C_{pa} + C'_{pa}) \gamma \phi \frac{V_j^2}{2g}$$

式中：

P_{max} = 總動態壓力(total dynamic pressure)

C_{pa} = 平均動態壓力係數(mean dynamic pressure coefficient)

C'_{pa} = 波動動態壓力係數(fluctuating dynamic pressure coefficient)

γ = 水流單位重(unit weight of water)

ϕ = 動能速度係數(kinetic energy velocity coefficient)，通常

假設為 1

V_j = 水柱衝擊到水面的速度(impact velocity)

Ervine et al. (1997)利用實驗與理論，在消能池上方的圓形射流破裂長度比(breakup length ratio)等於 0.5 的時候，並考慮自由空氣含量(free air content)，導出正規化消能池深度與平均動態壓力係數之函數關係，如圖 6-6。

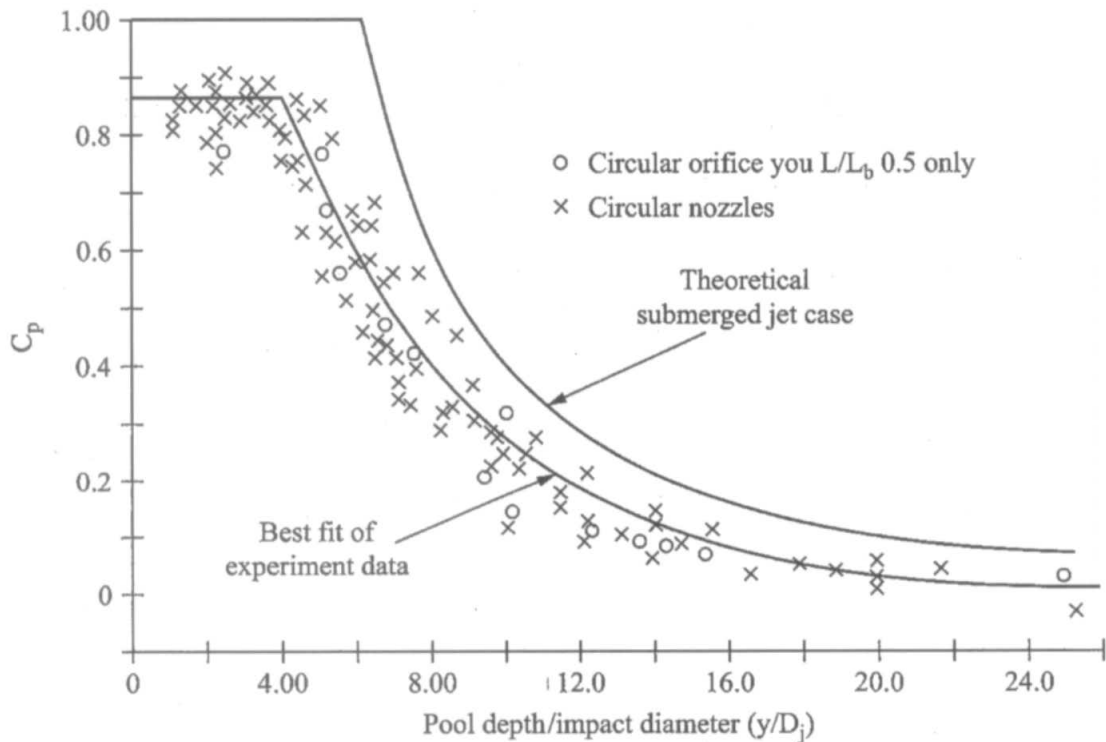


圖 6-6 正規化消能池深度與平均動態壓力係數之函數關係圖

Castillo(2004)考慮不同的矩型射流破裂長度比，進行一連串正規化消能池深度與矩型水柱之平均動態壓力係數的試驗，結果如圖 6-7 及表 6-1，並提出以下經驗式：

$$C_p = a e^{-b(y/B)}$$

式中：

a, b = 射流破裂長度比參數(見表 6-1)

B = 矩型水柱厚度

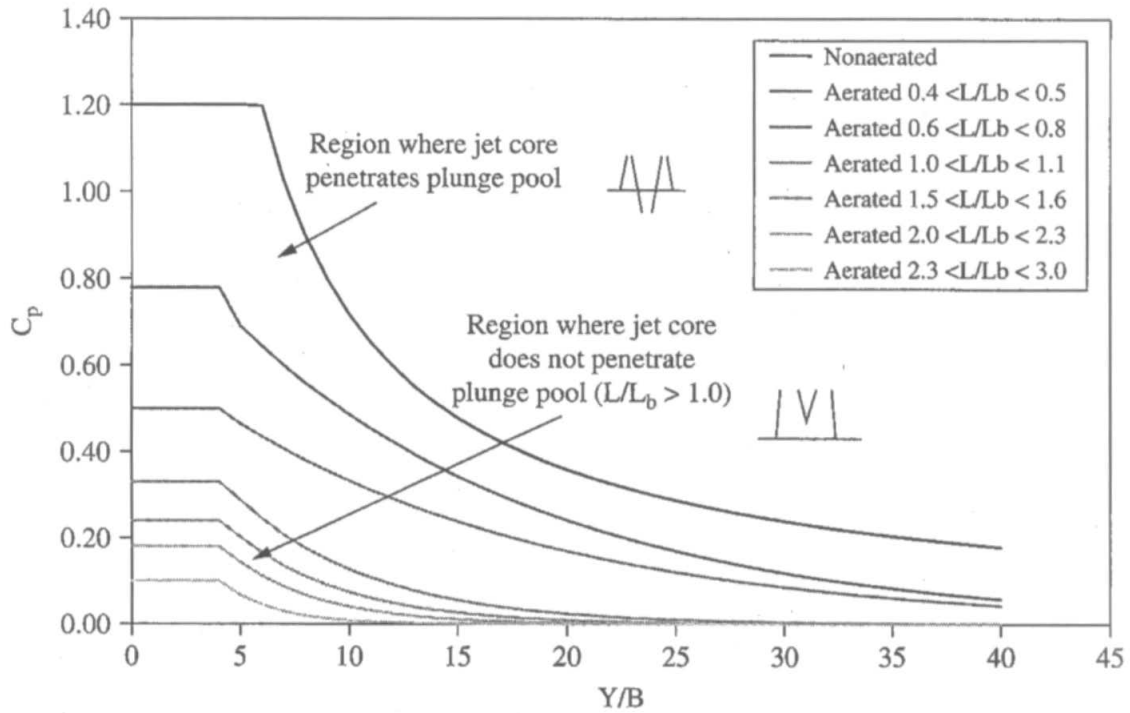


圖 6-7 正規化消能池深度、平均動態壓力係數在不同射流破裂長度比之函數關係圖(Castillo, 2004)

表 6-1 不同射流破裂長度比之平均動態壓力係數參數表

L/L_b	a	b	$C_p(Y/B < 4)$
0.4-0.5	0.98	0.070	0.78
0.5-0.6	0.92	0.079	0.69
0.6-0.8	0.65	0.067	0.5
1-1.10	0.65	0.163	0.33
1.1-1.3	0.65	0.185	0.31
1.5-1.6	0.55	0.200	0.24
1.8-1.9	0.55	0.250	0.20
2.2-2.3	0.50	0.250	0.18
2.3-3.0	0.50	0.400	0.10

Ervine et al. (1997), Castillo (2004), May and Willoughby (1991), Bollaert (2002)等學者，發展了數種評估波動動態壓力與正規化消能池深度的關係式(如圖 6-8、表 6-2、表 6-3)，考慮到參數選用之適用性，本研究參考 Bollaert(2002)發展的關係式：

$$C'_{pa} = a_1 \left(\frac{Y}{D_j} \right)^3 + a_2 \left(\frac{Y}{D_j} \right)^2 + a_3 \left(\frac{Y}{D_j} \right) + a_4 \quad \text{當 } Y/D_j \leq 20$$

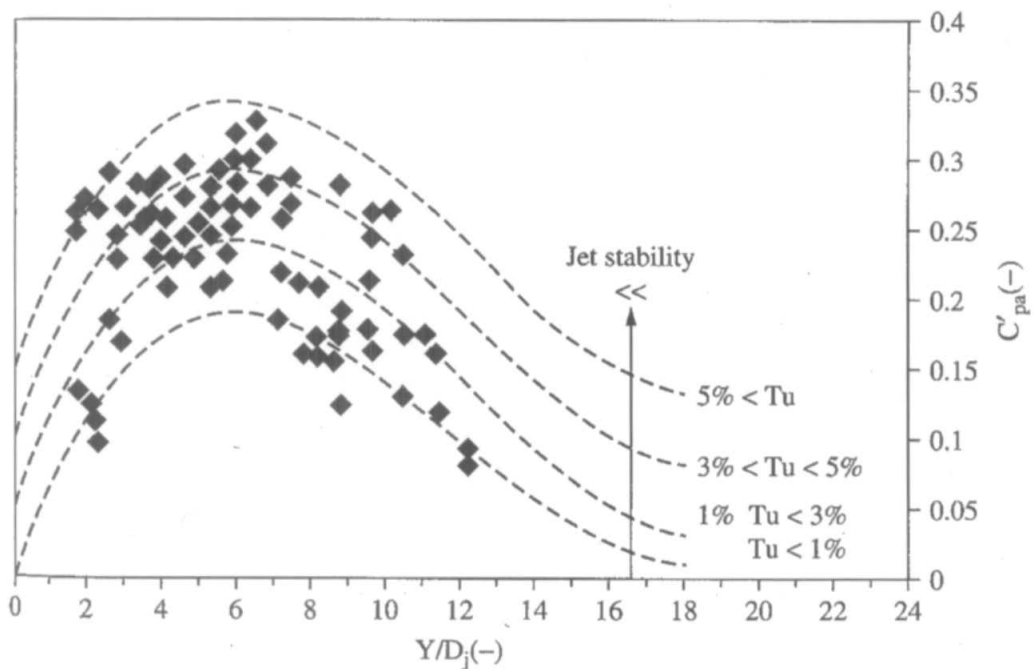


圖 6-8 正規化消能池深度與波動動態壓力係數之函數關係圖

(Bollaert, 2002)

表 6-2 波動動態壓力係數之參數選用表(Bollaert, 2002)

T_u (%)	a_1	a_2	a_3	a_4	Type of jet
<1	0.00220	-0.0079	0.0716	0.00	Compact
1-3	0.00215	-0.0079	0.0716	0.050	Low turbulence
3-5	0.00215	-0.0079	0.0716	0.100	Moderate turbulence
>5	0.00215	-0.0079	0.0716	0.150	High turbulence

表 6-3 不同結構出水口之典型紊流強度 T_u

Type of outlet structure	Turbulence intensity T_u
Free overfall	0.00–0.03
Ski jump outlet	0.03–0.05
Valve	0.03–0.08

二、Annandale (2006) 岩盤沖刷深度評估結果

以 Annandale(2006)沖刷深度評估方法的水流條件共分 2 種情況，(1)計算垂直射流流功，用於當流況屬於類似大壩溢洪道下方跌水至消能池，射流衝擊於沖刷坑岩盤的流功。(2)計算水躍所消耗的流功，用於當流況屬於全面溢流時，可能作用於岩盤的最大流功。

當沖刷坑深度評估完成之後，亦需評估沖刷坑末端岩盤的穩定性，若沖刷能夠趨於穩定則有助維持堰下游水位高程，讓流況不至於有太大改變。若沖刷坑末端岩盤有持續下刷之潛能，則堰下游水位會降低，造成上下游落差增加，原本屬於全面溢流流況之沖刷坑可能逐漸轉變為垂直射流。

因沖刷坑末端岩盤的沖刷機制與本計畫欲探討之攔河堰堰下游沖刷機制迥異，前者較類似於河道沖刷情況，與現地複雜的水流、地形、地質等因素相關，實際作用在沖刷坑末端岩盤的流功不易計算評估，因此本研究採用地形測量資料及現地勘查結果綜合評估判斷沖刷坑末端岩盤的穩定性。

以下將以 Annandale(2006)所提出之岩盤沖刷深度評估方法，計算義興壩、石岡壩、集集攔河堰之最大沖刷深度。

(一)義興壩

義興壩正射影像、地形測量成果及分析剖面位置如圖 6-9，分析時所採用的地形資料及水理參數來源如表 6-4，沖刷坑剖面圖 AA'如圖 6-10。

攔河堰下游岩盤沖刷深度之評估之水流條件，採用垂直射流流功計算方式。首先計算射流初始流功，再計算在民國 90 年之地形條件時，射流衝擊岩盤處(如圖 6-10 的 U 點)之流功，與岩盤沖刷啟動門檻比較，計算所採用之參數及計算結果如表 6-5。計算結果顯示分析期間最大之水文事件所造成之射流衝擊岩盤流功為 184 kW/m^2 (單位面積流功單位：每平方公尺千瓦)，已低於岩盤沖刷啟動門檻 314 kW/m^2 ，沖刷坑應屬於穩定的情況。與地形測量結果相比較，民國 90~97 年沖刷坑深度介於高程 242~246 公尺之間，沖刷深度並無明顯變化，與分析結果相吻合。

為評估沖刷坑末端岩盤的穩定性，可檢視民國 90 年~97 年沖刷坑末端岩盤(如圖 6-10 的 D 點)是否有明顯沖刷之行為。評估結果顯示目前沖刷坑末端岩盤處於相對穩定的狀況，高程介於高程 257~260 公尺之間，可以提供一穩定的逆坡讓沖刷坑維持消能池的型態，提供足夠的尾水深度消散射流流功，穩定沖刷坑岩盤之沖刷深度。

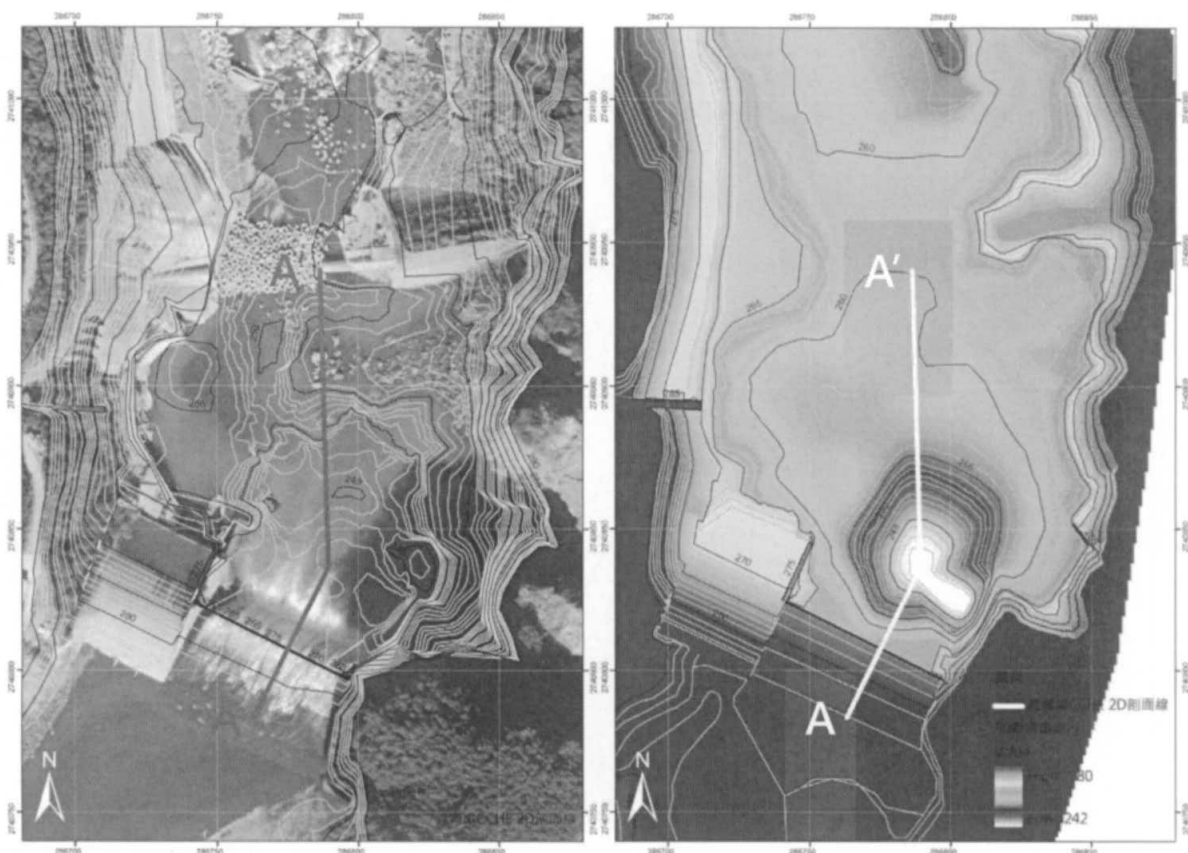


圖 6-9 義興壩民國 97 年航空照片及民國 90 年地形測量

表 6-4 義興壩地形資料及水理參數來源表

地形資料	民國 60、90、97 年地形測量資料
水理參數	分析期間最大洪水量為民國 93 年敏督利颱風，流量為 8,527 cms，與 50 年重現期距之洪水量(8,222 cms)相近，故水理參數採用 CCHE 2D 於 Q_{50} 時的分析結果

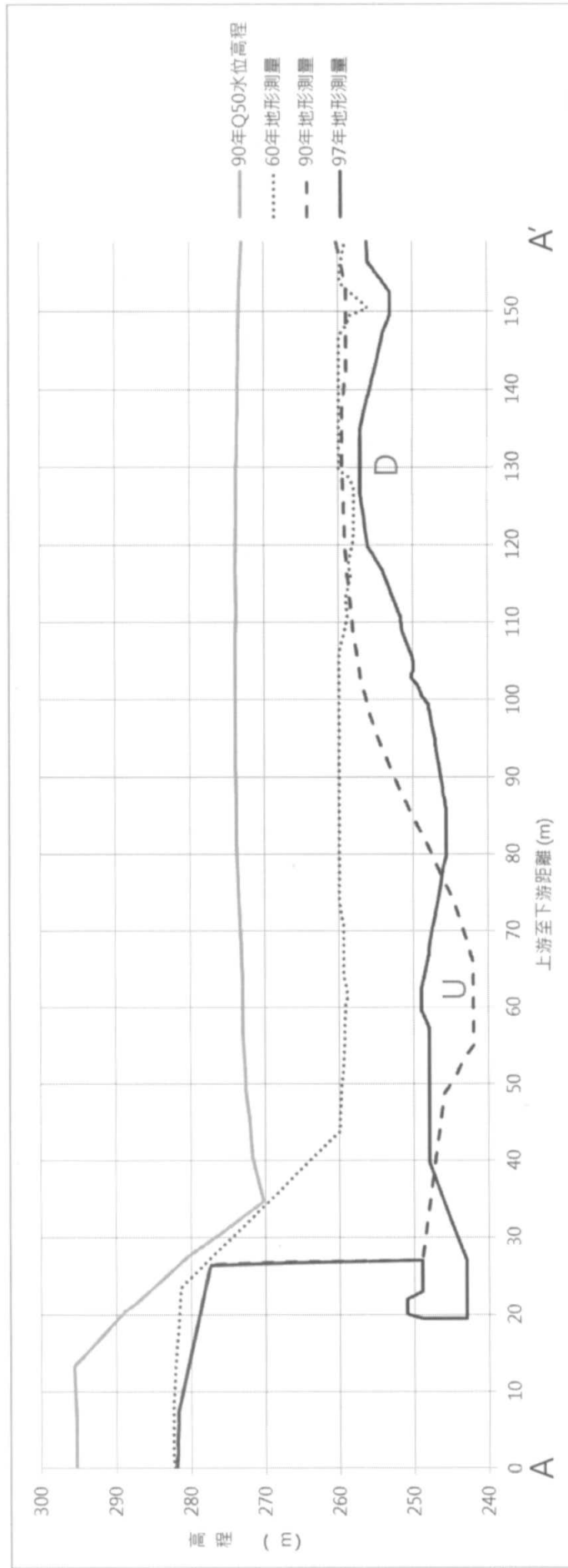


圖 6-10 義興壩沖刷坑剖面圖

表 6-5 義興壩沖刷深度評估參數及計算結果表

水流單位重	$\rho =$	1000 kg/m^3
單寬流量	$q =$	$56.7 \text{ m}^2/\text{s}$
跌水距離	$H =$	7.4 m
尾水深	$Y =$	31 m
沖刷坑深度	$H + Y - D_j =$	35.4 m
射流水柱厚	$D_j =$	3.0 m
正規化消能池深度	$Y/D_j =$	10.5
水平流速	$V_x =$	18.4 m/s
射流軌跡長度	$L =$	28.7 m
射流破裂長度	$L_b =$	21.8 m
射流破裂長度比	$L/L_b =$	1.3
射流水柱擴散厚度	$D_{out} =$	3.6 m
射流擴散衝擊面積	$A/W =$	6.6 m
水面射流流功	$P_{jet} =$	628.2 kW/m^2
平均動態壓力係數	$C_p =$	0.09
波動動態壓力係數	$C'_p =$	0.2
射流衝擊岩盤流功	$P_{total} \left(\frac{Y}{D} \right) =$	184 kW/m^2
岩盤抗沖蝕能力指數	$K_h =$	2131
岩盤沖刷啟動門檻	$P_{threshold} =$	314 kW/m^2

(二)石岡壩

石岡壩正射影像、地形測量成果及分析剖面位置如圖 6-11、圖 6-12 所示，分析時所採用的地形資料及水理參數來源如表 6-6，沖刷坑剖面圖 AA' 如圖 6-13。

根據歷年颱風照片顯示，在颱風期間石岡壩主要的流況都呈現全面溢流，並在副壩下游產生水躍的狀況，水躍發生的位置與沖刷坑位置一致，目前沖刷坑在中央排水道仍持續下切成深槽狀，在副壩其他區域雖有沖刷但不嚴重。

本研究以民國 98 年地形資料為基礎，計算民國 98 年最大洪水事件(莫拉克颱風，流量約與 Q_{20} 相等)，在副壩下游因水躍所消耗的流功(以下簡稱水躍流功)，保守估計為作用於岩盤的最大流功。分析結果如表 6-7，在 Q_{20} 水流條件下中央排水道水躍流功大於岩盤沖刷啟動門檻，仍會持續沖刷，副壩其他區域的水躍流功小於岩盤沖刷啟動門檻，顯示屬於較穩定的狀況，與現實情況相符。針對中央排水道更進一步分析 Q_2 水流條件，結果顯示水躍流功約略與岩盤沖刷啟動門檻相等，但現地岩盤較為破碎，容易受到風化降低岩盤沖刷啟動門檻，因此仍有沖刷潛能。

沖刷坑現況穩定性評估完畢後，接著評估沖刷坑末端岩盤的穩定性。根據地形測量成果及正射影像顯示在民國 96~98 年間沖刷坑及下游河道仍持續下刷，主要沿著較弱岩層成槽溝狀發展，河道高程已降低約 5 公尺(見圖 6-13)。本研究於沖刷坑末端岩盤切一橫剖面(見圖 6-11 之 BB' 剖面)，試圖就其沖刷潛能進行探討，由圖 6-14 可知目前沖刷坑下方受到副壩中央排水路影響，主深槽屬於高沖刷潛能的下切型河道，水流沿著主深槽(寬約 20 公尺)下切約 5 公尺，現地調查結果亦顯

示本地區仍在繼續沖刷。

沖刷坑末端岩盤若持續沖刷，會導致攔河堰上下游落差越來越大，流況可能會從全面溢流變成垂直射流。本團隊針對此可能性，進行 1 個虛擬案例計算(如表 6-8)，當流況轉變為垂直射流時，中間排水道由於流功過於集中，評估結果顯示下游沖刷坑即使深達 40 公尺仍難以穩定，副壩其他區域沖刷坑深度需達 25 公尺才得以穩定。

需注意以上之分析中乃假設 Q_2 、 Q_{20} 之水流條件下可以維持一段足夠長的時間，足以令沖刷坑深度能夠往下充分發展。然而實際 1 場洪水過程其洪峰時間必然有限，不致於立刻讓沖刷坑到達穩定最終深度，因此本分析之結果與實地現況相比，屬於保守評估。

表 6-6 石岡壩地形資料及水理參數來源表

地形資料	民國 96 年 12 月、民國 98 年 9 月地形測量資料
水理參數	由現地調查及地形測量資料，可知目前沖刷坑仍持續下刷。本團隊選用最新地形資料，模擬民國 98 年莫拉克(流量 5,621 cms)颱風的流量。流量約介於 10 年重現期距洪水量(5,000 cms)與 20 年重現期距洪水量(6,200 cms)之間，故水理參數採用 CCHE 2D 於 Q_{20} 時的分析結果

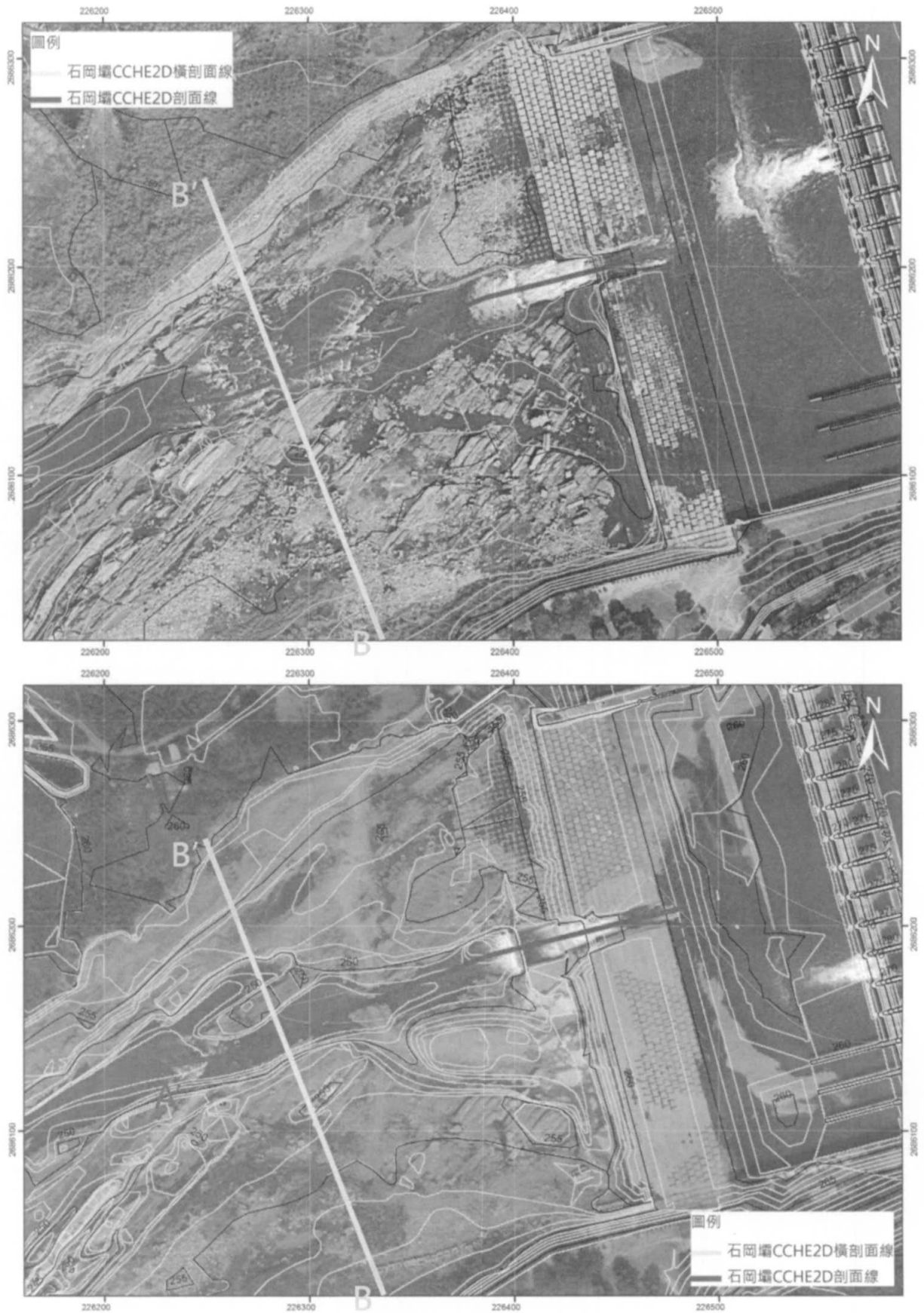


圖 6-11 石岡壩 961029(上)、981021(下)正射影像及分析剖面

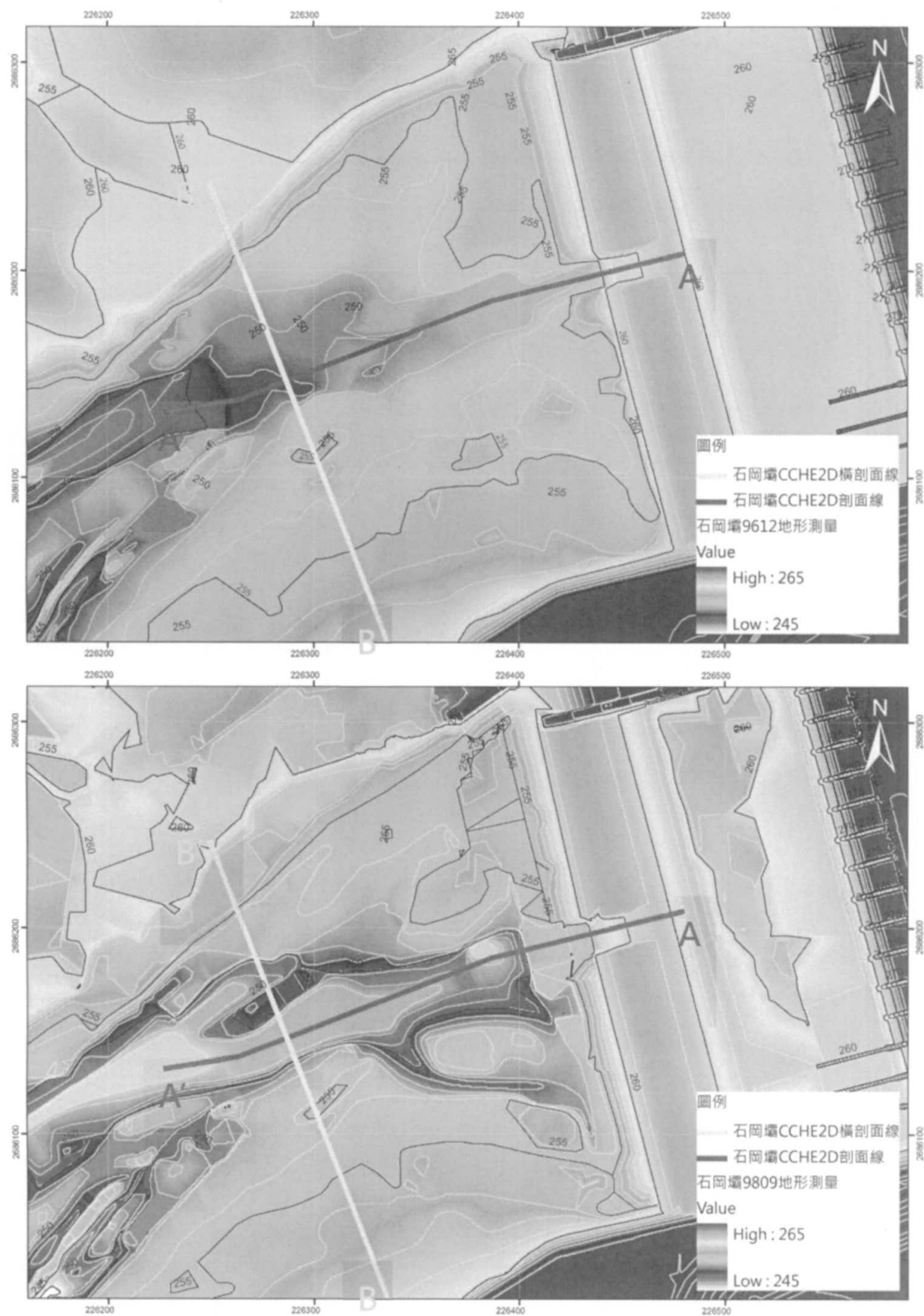


圖 6-12 石岡壩 9612(上)、9809(下)地形測量及分析剖面

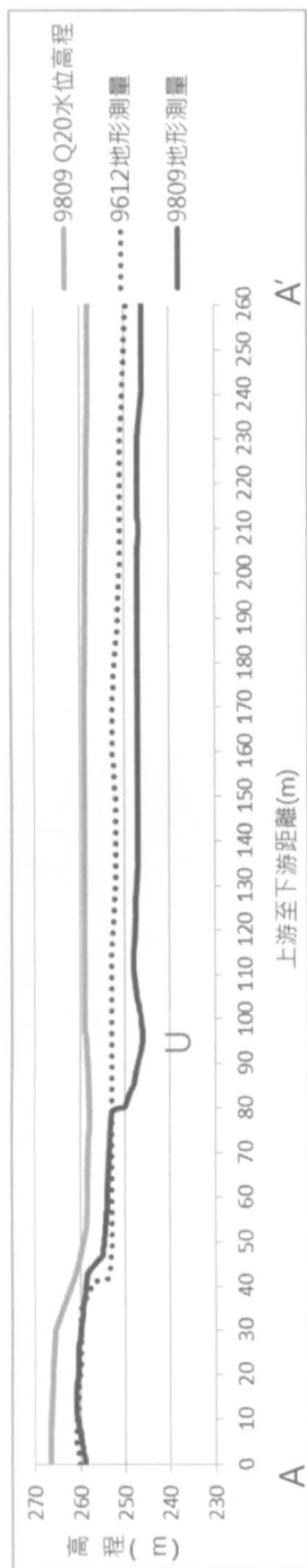


圖 6-13 石岡壩沖刷坑 AA'剖面圖

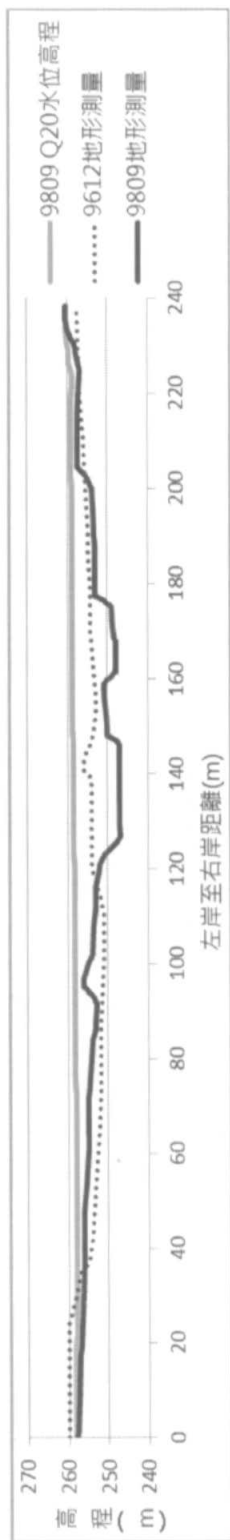


圖 6-14 石岡壩沖刷坑 BB'剖面地形圖

表 6-7 石岡壩沖刷深度評估參數及計算結果表

流況	上游水深 y_1 (m)	單寬流量 q (m^2/s)	上游福祿數 Fr_1	能量消耗 ΔE	水流單位重 γ (kN/m^3)	水躍長度 L (m)	水躍流功 (kW/m^2)	岩盤沖刷啟動門檻 (kW/m^2)
中央排水道 Q_{20}	5.0	54.4	1.5	0.58	10	20	15.8	3.2
副壩其他區域 Q_{20}	2.3	23.3	2.5	0.21	10	20	2.4	16.2
中央排水道 Q_2	3.4	29.0	1.5	0.17	10	20	2.5	3.2

表 6-8 石岡壩虛擬案例沖刷深度評估參數及計算結果表

流況及地形		Q ₂₀ , 沖刷坑 40 m, 中央排水道下游	Q ₂₀ , 沖刷坑 25 m, 副壩下游
水流單位重	$\rho =$	1000 kg/m ³	1000 kg/m ³
單寬流量	$q =$	54.4 m ² /s	17 m ² /s
跌水距離	$H =$	4.2 m	4.2 m
尾水深	$Y =$	40.8 m	22.3 m
沖刷坑深度	$H + Y - D_j =$	40 m	25 m
射流水柱厚	$D_j =$	5.0 m	1.5 m
正規化消能池深度	$Y/D_j =$	8.1	14.9
水平流速	$V_x =$	10.3 m/s	12 m/s
射流軌跡長度	$L =$	13.8 m	12.8 m
射流破裂長度	$L_b =$	21.6 m	14.9 m
射流破裂長度比	$L/L_b =$	0.6	0.9
射流水柱擴散厚度	$D_{out} =$	5.3 m	1.8 m
射流擴散衝擊面積	$A/W =$	7.0 m	2.9 m
水面射流流功	$P_{jet} =$	319 kW/m ²	241 kW/m ²
平均動態壓力係數	$C_p =$	0.14	0.04
波動動態壓力係數	$C'_p =$	0.23	0.04
沖刷坑底部流功	$P_{total} \left(\frac{Y}{D} \right) =$	119 kW/m ²	23 kW/m ²
岩盤抗沖蝕能力指數	$K_h =$	41	41
岩盤沖刷啟動門檻流功	$P_{threshold} =$	16.2 kW/m ²	16.2 kW/m ²

(三)集集攔河堰

集集攔河堰正射影像及分析剖面位置如圖 6-15 所示，分析時所採用的地形資料及水理參數來源如表 6-9，沖刷坑剖面圖 AA'如圖 6-16。

根據歷年颱風照片顯示，在颱風期間集集堰主要的流況是呈現全面溢流，並在尾檻末端產生水躍的狀況，水躍發生的位置與沖刷坑位置一致，根據民國 98、99 年的現地調查，目前沖刷坑雖有沖刷但無迅速加快的趨勢，相對較為穩定。

本計畫以 97 地形資料為基礎，計算 97 年最大洪水事件(卡玫基颱風，流量約與 Q_{10} 相等)，在副壩下游因水躍所消耗的流功，保守估計為作用於岩盤的最大流功。分析結果如表 6-9， Q_{10} 水流條件下尾檻下游水躍流功小於岩盤沖刷啟動門檻，顯示屬於較穩定的狀況，與現實情況相符，但現地岩盤較為軟弱，容易受到風化降低岩盤沖刷啟動門檻，因此長期而言仍有沖刷潛能。

沖刷坑現況穩定性評估完畢後，接著評估沖刷坑末端岩盤的穩定性。根據正射影像顯示在民國 96~98 年間集集攔河堰下游岩盤河道深槽主要集中於兩側排砂道發展，在下游 500 公尺處逐漸集中匯流成一條主深槽，目前無跡象顯示堰下游岩盤會快速下切，沖刷坑流況暫無變化為垂直射流之可能。

表 6-9 集集攔河堰地形資料及水理參數來源表

地形資料	中水局 97 年 12 月之航拍數值地形高程資料
水理參數	分析期間最大洪水量為 97/07/18 卡玫基颱風，流量為 10,906 cms，與重現期距 10 年之洪水量(11,900 cms)相近。故水理參數採用 CCHE 2D 於 Q_{10} 時的分析結果

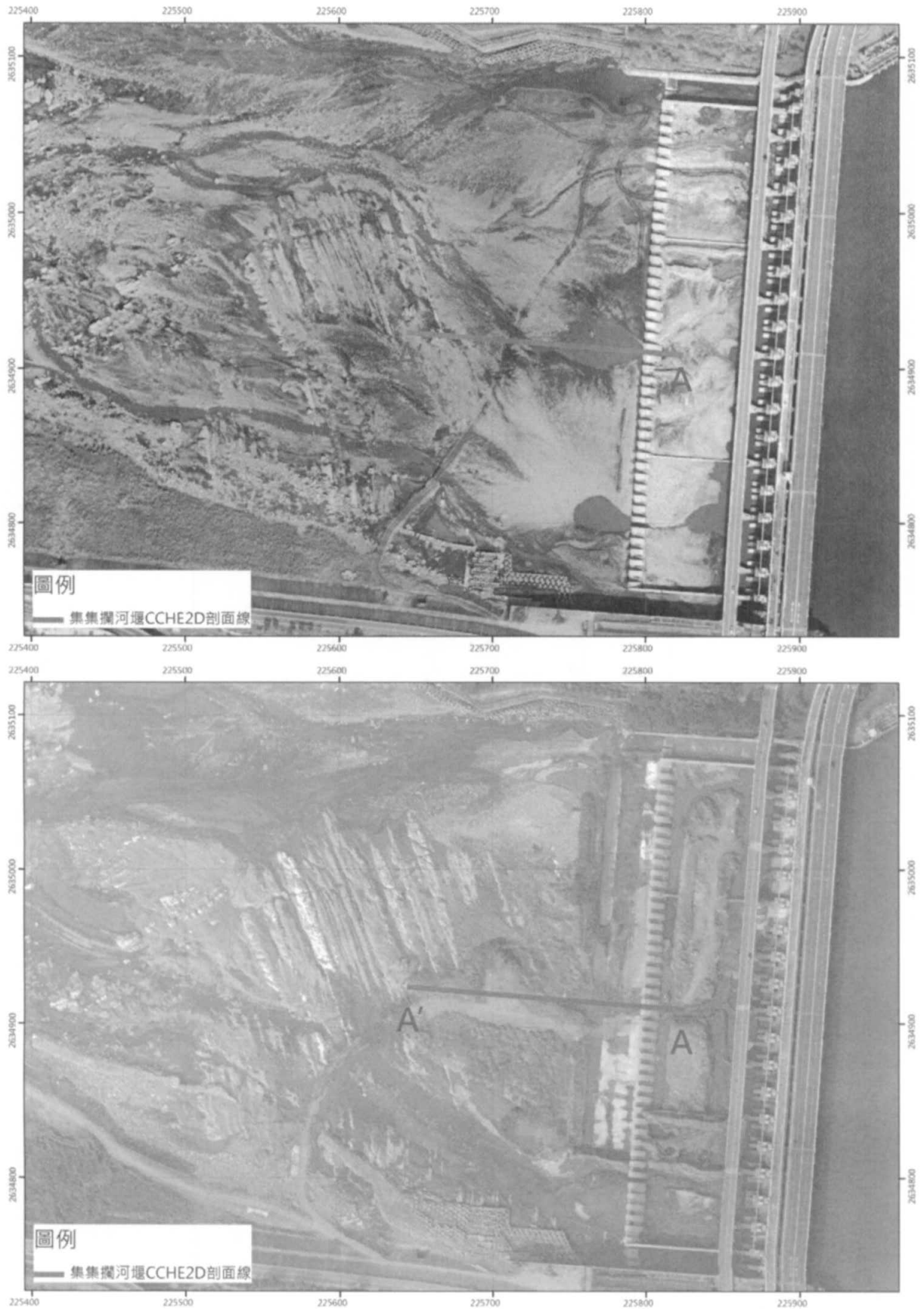


圖 6-15 集集堰 960128(上)、981209(下)正射影像及分析剖面

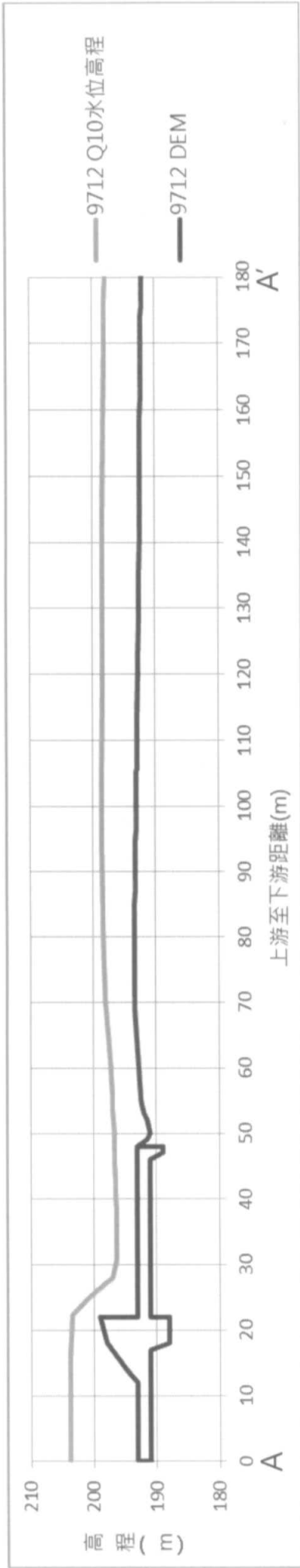


圖 6-16 集集攔河堰沖刷坑 AA'剖面圖

表 6-10 集集堰沖刷深度評估參數及計算結果表

流況	上游水深 y_1 (m)	單寬流量 q (m^2/s)	上游福祿數 Fr_1	能量消耗 ΔE	水流單位重 $\gamma(kN/m^3)$	水躍長度 L (m)	水躍流功 (kW/m^2)	岩盤沖刷啟 動門檻 (kW/m^2)
尾檻下游 Q_{10}	3	35.2	1.7	2.28	10	5	161	124

三、Bollaert (2002)岩盤沖刷評估方式

攔河堰因跌水產生之能量及紊流之情形必然明顯大於一般河道條件，Bollaert 利用圖 6-17 來描述溢洪道下方在高速水流沖擊下岩盤發生沖蝕之過程。他將岩盤沖蝕分成下列 3 個步驟：

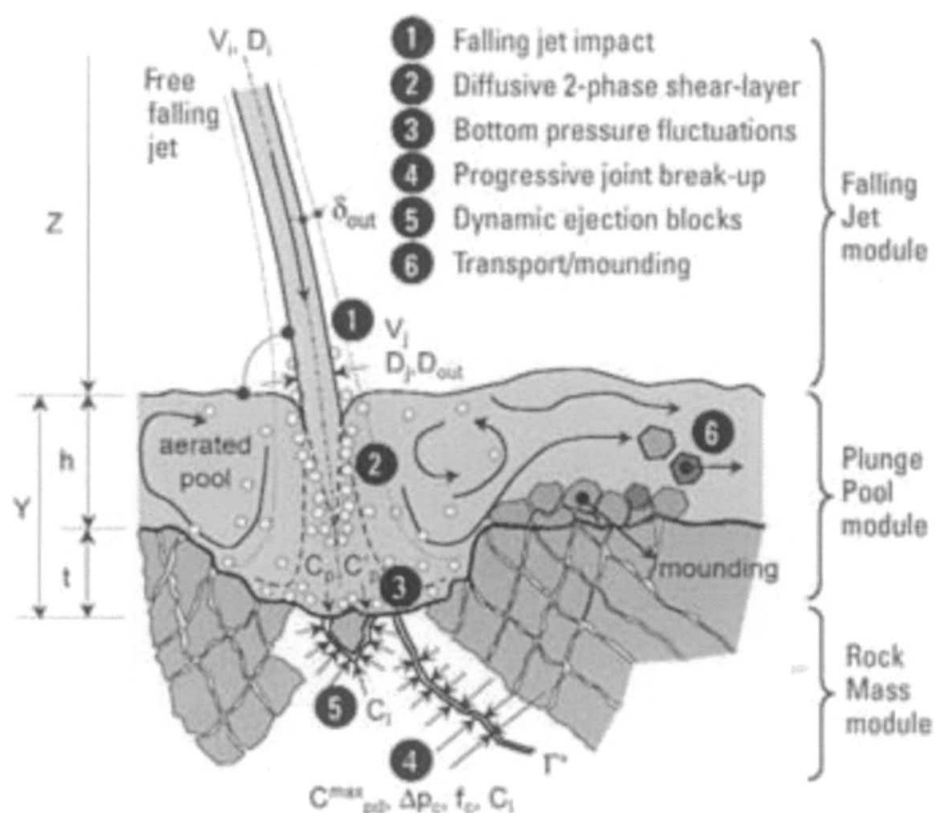


圖 6-17 水流沖擊引致之沖蝕機制示意圖

1. 水流沖擊力量作用在岩盤表面，沖擊力量傳遞至裂隙內部導致裂隙延伸連通，使部份岩塊脫離岩盤而形成獨立岩塊。
2. 裂隙內部之波動放大效應使得岩塊底部與上方形成壓力差，當向上作用力大於岩塊的水中重量時，岩塊向上運動脫離原有位置。
3. 岩塊向脫離原有位置後，堆積於沖蝕坑下游側或隨水流向下

游移動。

Bollaert 利用上述概念提出了一套岩石沖刷坑評估模式，整個模式區分為三個模組來進行：

1. 沖刷水柱模組(falling jet module)：計算水柱沖擊位置、面積、及流速。
2. 跌水潭模組(plunge pool module)：採用沖刷水柱模組計算成果，計算水深流量比、平均水壓、以及波動水壓等參數。
3. 岩體模組(rock mass module)：區分為兩大部分，第一部份計算底床節理(含開口節理、閉口節理)內的動水壓力荷載(hydrodynamic loading)；第二部分定義底床節理(含開口節理、閉口節理)的破壞準則。

綜合上述，此評估模式採用三個模組進行評估流程，概念上相當完整，但在節理的相關計算評估上面，需要掌握完整之節理力學性質是較為困難之處。

四、Bollaert (2002) 岩盤沖刷深度評估結果

(一) 義興壩

1、地形資料、水理參數來源如表 6-4、表 6-5。

2、單位流體所含空氣量 q_a (Ervine, 1998):

$$q_a = 0.0002(V_j - 1)^3 + 0.0003(V_j - 1)^2 + 0.0074(V_j - 1) - 0.0058$$

3、計算自由空氣含量(free air content)

$$\beta = \frac{q_a}{q}$$

4、計算混合流體統體密度， ρ_{air} 取 1.29 kg/m^3 ， ρ_{liq} 取 1000 kg/m^3 。

$$\rho_{mix} = \rho_{air} \times \beta + \rho_{liq} \times (1 - \beta)$$

5、計算混合流體之壓力波傳遞速度。

$$c_{mix} = \sqrt{\frac{1}{\rho_{mix}} \times \frac{1}{\frac{(1-\beta)}{\rho_{liq} \times c_{liq}^2} + \frac{\beta}{\rho_{air} \times c_{air}^2}}}$$

6、計算淨動態推動係數(Bollaert, 2002)。

$$C_l = 0.0035 \left(\frac{Y}{D_j} \right)^2 - 0.119 \left(\frac{Y}{D_j} \right) + 1.2$$

7、計算在不同岩塊尺寸條件下，因波動壓力所能上舉的最大距離，當上舉距離>1/2 岩塊高度，視之為可脫離。

$$h_{up} = \left[2 \frac{(x_b + 2z_b)}{c} \right]^2 \cdot \frac{1}{2g \cdot x_b^4 \cdot Z_b^2 \cdot \rho_s^2} \left[C_l \cdot \phi \cdot \gamma \cdot \frac{V_j^2 L}{2g} \cdot x_b^2 - (\gamma_s - \gamma) \cdot x_b^2 \cdot z_b - F_{sh} \right]^2$$

式中 Z_b 為塊體厚度， X_b 為塊體寬度， F_{sh} 為作用於塊體上的剪力總和。

8、現地平均節理間距：1~1.5 公尺。

9、隨著沖刷深度刷深，尾水深增加， Y/D_j 增加，可帶走的塊體越來越小。將分析結果之可帶離塊體尺寸與現地塊體尺寸作比較，本區沖刷坑於民國 60 年條件下仍會繼續沖刷，當民國 90、97 年時平均可抽離節理間距 1~1.5 公尺的塊體，與現地塊體尺寸相近。分析結果如圖 6-18，沖刷坑分析模型如圖 6-10。

(二)石岡壩

1、地形資料、水理參數來源如表 6-6。

2、計算步驟與義興壩步驟 2~7 相同。

3、現地層狀砂岩(LSS)平均節理間距：0.2 公尺。

4、隨著沖刷深度加深，尾水深增加（在此仍假設沖刷坑尾端出口處不隨著沖刷深度加深而同步下切，尾水深可隨沖刷深度加深而增加）， Y/D_j 增加，可帶走的塊體越來越小。將分析結果之可帶離塊體尺寸與現地塊體尺寸作比較，當沖刷坑深度達 35 公尺時，平均可抽離節理間距 0.2 公尺的塊體，與現地節理間距相近。若分析無中央排水道的假設案例（即假設中央排水道不存在），則沖刷坑深度達 15 公尺可達穩定。分析結果如圖 6-19，Bollaert 沖刷深度評估方法僅能適用於水流條件為垂直射流之情況，與現地水流條件狀況並不相符，此結果僅能作為若沖刷無法抑止，沖刷坑持續發展至最終自然穩定之深度之參考。

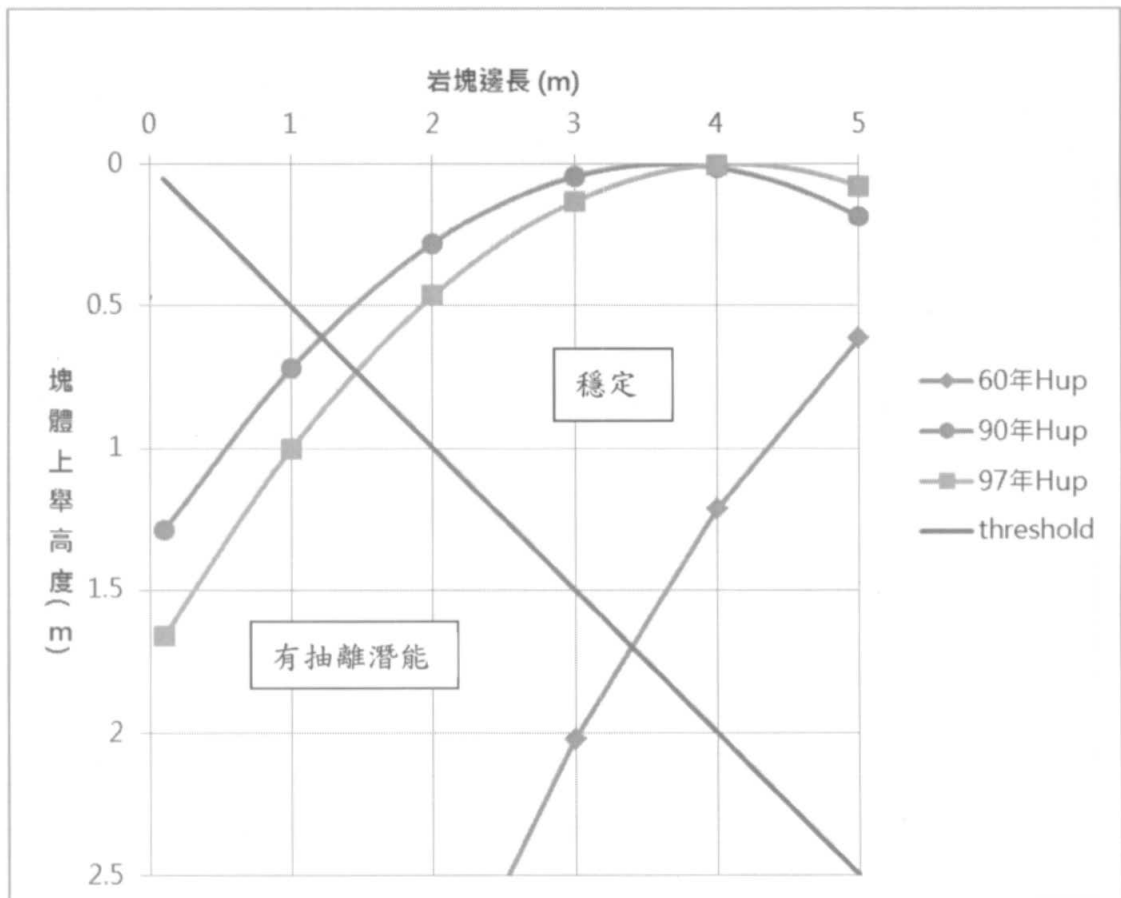


圖 6-18 義興壩可攜走最大岩塊尺寸

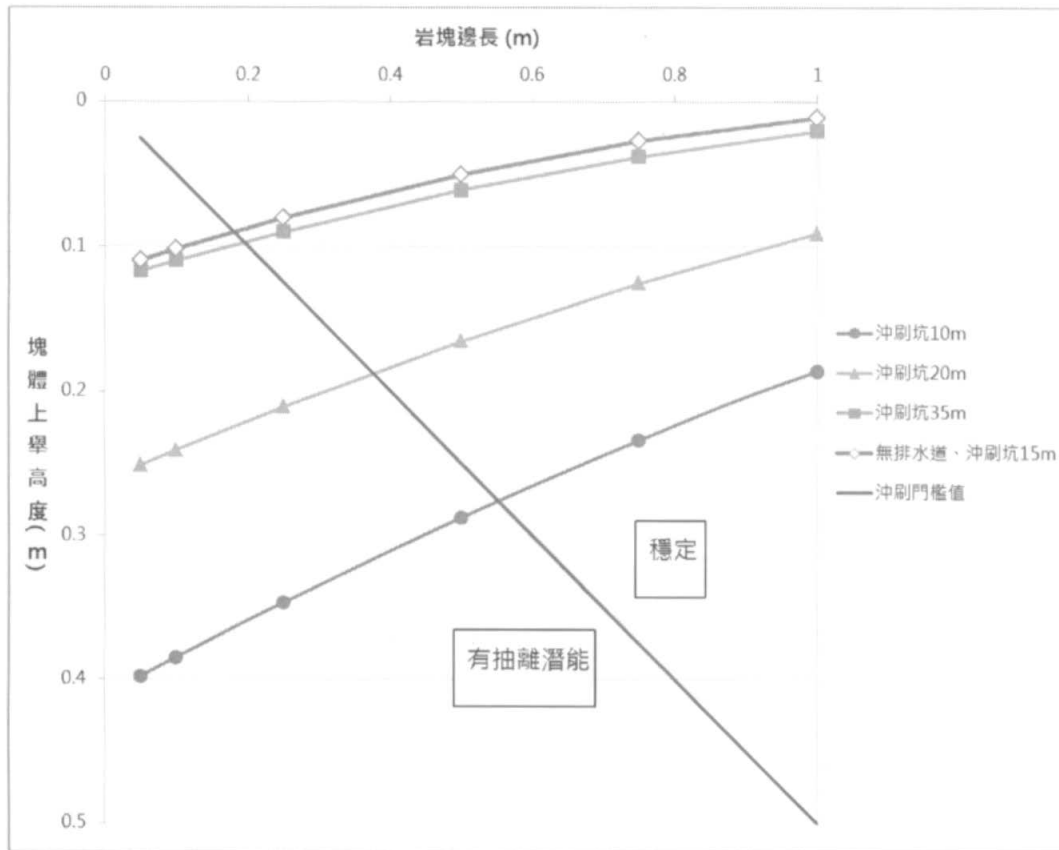


圖 6-19 石岡壩可攜走最大岩塊尺寸

(三)集集攔河堰

- 1、地形資料、水理參數來源如表 6-9。
- 2、計算步驟與義興壩步驟 2~7 相同。
- 3、現地平均節理間距：砂岩 1 公尺、砂頁岩互層 0.1 公尺。
- 4、隨著冲刷深度刷深，尾水深增加， Y/D_j 增加（在此仍假設冲刷坑尾端出口處不隨著冲刷深度刷深而同步下切，尾水深可隨冲刷深度刷深而增加），可帶走的塊體越來越小。將分析結果之可帶離塊體尺寸與現地塊體尺寸作比較，本區冲刷坑深度要達 23 公尺才穩定不再沖蝕，分析結果如圖 6-20。Bollaert 冲刷深度評估方法僅能適用於水流條件為垂直射流之情況，與現地水流條件狀況並不相符，此結果僅能作為若冲刷無法抑止，冲刷坑持續發展至最終自然穩定之深度之參考。

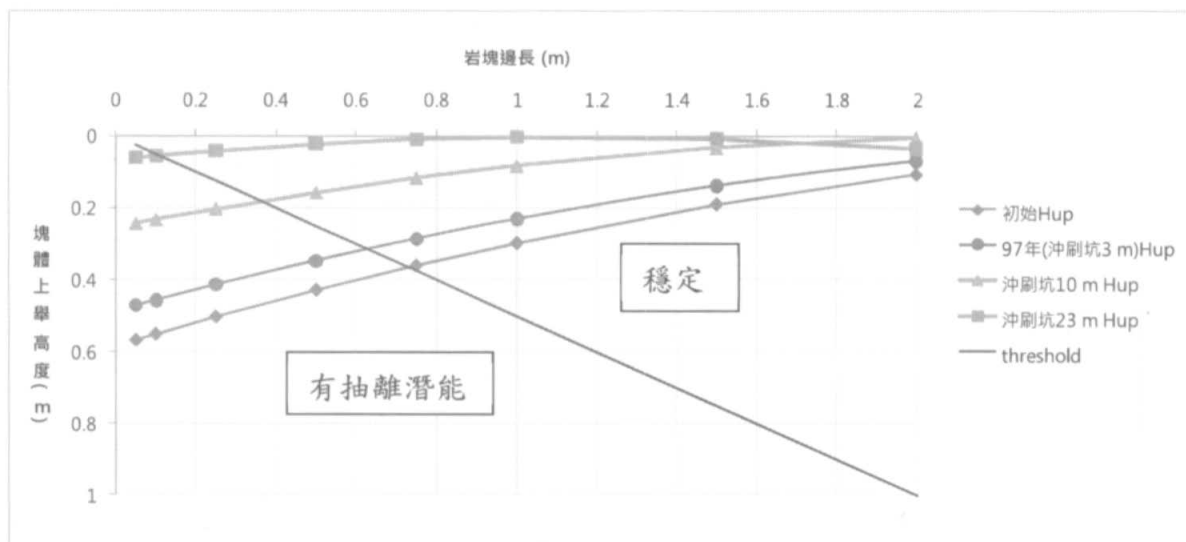


圖 6-20 集集堰可攜走最大岩塊尺寸

五、岩盤沖刷深度評估方式探討

本(民國 99)年度採用 Annandale(2006)及 Bollaert(2002)兩種沖刷深度評估方式，在義興壩、石岡壩、集集堰進行適用性探討。在評估水流狀況為垂直射流情況下的義興壩，因為 Annandale 及 Bollaert 沖刷深度評估方法的水流作用力，皆考慮「垂直射流」的壓力波動隨沖刷深度變深(尾水位越高)而遞減，最終與岩盤抗沖蝕能力平衡之關係，兩種方法皆適用。

Bollaert 沖刷深度評估方法並不適用在評估水流狀況為水平全面溢流情況下的石岡壩與集集堰，因為此法僅考慮垂直射流，假設水流方向與岩盤面垂直，水流作用力直接衝擊岩盤。但實際上，石岡壩與集集堰的水平流況，水流流功大部分會直接傳遞至更下游的河道，非直接衝擊岩盤，因此本法會高估攔河堰堰下游沖刷深度。

Annandale 沖刷深度評估方法的水流作用力除了考慮垂直射流，亦可考慮全面溢流在副壩/尾檻與岩盤交界處之水躍流功。用於評估全面溢流情況之石岡壩與集集堰，結果顯示目前石岡壩中

央排水道仍會繼續沖刷，副壩其他區域相對穩定，集集堰尾檻下游岩盤相對穩定，與現地觀察結果吻合。但實際上岩層受到風化影響，抗沖蝕能力會越來越低，因此長期沖刷穩定仍需注意。

以上分析模式都建立在攔河堰沖刷坑下游岩盤沒有形成深槽化河槽，若下游岩盤隨著沖刷坑底部同步下刷，則水流跌水距離(堰頂水流高程至沖刷坑水面高程)持續增加，射流流功會持續增加，造成沖刷坑的深度及往下游延伸的範圍必然難以穩定。

六、岩盤沖刷深度評估方法後續建議

Annandale 的沖刷深度評估方法是以硬岩、溢洪道的案例進行迴歸，並考慮岩體的強度、節理面狀況等參數對岩體進行評估。這個評估方法運用於本計畫 3 座攔河堰模擬初步評估尚可接受，但仍有以下幾項值得後續研究更進一步探討：

- 1、軟岩的強度較低、膠結性較差，受到水流的動態壓力波動時，較硬岩容易產生內部之裂隙，容易形成小片岩屑陸續剝離。
- 2、軟岩的風化速率較硬岩快，若沖刷坑附近乾濕循環明顯，則岩盤表面的抗沖蝕能力可能會高估。
- 3、大壩溢洪道的射流在進入消能池時，是以幾近垂直角度進入，且消能池的水平流速並不大。攔河堰尾檻/靜水池出口射流在進入沖刷坑水面時，多以幾近水平的角度進入，且水流水平流速較大，因此在計算射流的平均動態壓力及波動動態壓力的折減，應與既有經驗公式有出入，此複雜流況之動態壓力計算現階段仍缺乏確認適用之理論可直接計算。
- 4、Bollaert 的沖刷深度評估方法是以理論解配合室內試驗的結果，計算壓力波動作用於節理塊體底部，能被上舉的塊體尺寸，以下幾項可供後續研究探討：

(1)沒有考慮到塊體本身是否會沿著材料內部損壞，與軟岩實際破壞的情況可能不盡相符。

(2)水平水流是否能引用垂直射流壓力波動的概念，解決現有水平水流僅考慮剪應力，造成低估沖刷深度的盲點。

5、考慮到軟弱岩盤材料的特性，在評估沖刷深度時，建議未來能以 Annandale(2006)沖刷深度評估方式為基礎進行延伸。後續應加強、修正材料的疲勞效應以及水平射流流功的消散，並期望可以利用流功的概念分析沖刷坑末端岩盤的穩定性。

第柒章 探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷穩定策略

由文獻整理得知，岩盤沖刷與否取決於水理條件以及河床抗侵蝕能力。過去國內攔河堰設計多偏重考慮水流條件是否造成堰體破壞，或攔河堰工址座落基礎之承载力問題，往往忽略了因攔河堰造成之水位抬高及攔砂影響導致下游護甲層流失造成岩盤裸露，而台灣河床岩盤常屬軟弱岩盤，沖刷一旦發生則無回復可能。即使於堰址下游設置護坦甚至固床工，也僅讓岩盤沖刷於緊鄰護坦或固床工之下游處發生，最終仍然可能因為向源沖刷而影響壩體本身之穩定與安全。

綜合本計畫之彙整資料及現地調查所見，目前既有攔河堰面臨的局部沖刷問題為相當嚴峻，因為攔河堰下游護甲層流失，下方岩盤沖刷之發展相當快速，且目前多數採用之對抗沖刷加固措施常無法達到預期之作用與時效，對於部分重要攔河堰之管理而言，每年均需投入大量金錢人力進行修復。

本工作藉由文獻補充蒐集、攔河堰岩盤局部沖刷機制歸納成果、攔河堰下游岩盤沖刷深度評估成果及國外最新抑止沖刷之概念，提出攔河堰下游岩盤沖刷穩定策略。本工作除針對既有攔河堰之岩盤沖刷進行探討外，亦希望使相關問題防範於未然，對未來新設之攔河堰提出預防沖刷相關建議，提出概念性的策略。本計畫分以下 2 部分進行探討：

- 1、既有攔河堰沖刷穩定策略。
- 2、未來攔河堰設置選址及設計考量策略。

一、既有攔河堰沖刷穩定策略

針對既有攔河堰沖刷穩定之對策，現階段多以於攔河堰下方設置消能池、副壩、護坦為主，並於洪水過後檢查沖刷現象，若沖刷過於嚴重則往往繼續往下游加設消能池、副壩、護坦、

透水式護床工，若輕微沖刷則進行塊石混凝土鑲補及堆置鼎塊，此種以補強為主的抗沖刷方式目前仍無經濟有效的沖刷穩定策略可供依循。

本計畫除收集有關穩定策略之既有文獻，將試圖從兩個方向著手，(1)歸納各類之沖刷機制之必要條件，定性探討若要預防攔河堰的沖刷啟動、降低沖刷速率或控制沖刷坑深度，並針對不同沖蝕機制之必要條件，宜朝那些方向著手可望能較有效率提升岩盤之抗沖蝕能力。(2)檢討現行堰壩於洪水時，是否能減少作用於岩盤表面之水流流功，提出控制或改善之策略性建議。

(一)提升岩盤抗沖蝕能力

若以提升岩盤抗沖蝕能力的概念，無明顯節理、單壓強度較弱的岩層可能以均勻下切沖刷機制為主，必須注意岩石的抗風化能力(是否容易降低岩盤表層強度)，單向張力強度(河床載撞擊造成表層剝離)、是否容易產生解壓節理(造成塊體抽離)。節理發達、單壓強度較高的岩層可能以塊體抽離沖刷為主，必須注意岩體層面、節理面間距的大小(塊體尺寸越大，不易被水流帶動抽離)、節理面的性質(越粗糙摩擦力越大強度越強，不易抽離)、節理連通性(越連通透水性越高，容易將塊體抽離)。砂頁岩互層岩層可能由抗沖蝕能力較低的頁岩為主控層先行沖刷，形成槽溝下切型的沖刷機制，必須以弱層的沖刷能力視為主控因素進行分析，抗沖蝕能力較強的砂岩雖然可以支撐較久，但當周圍的頁岩都被侵蝕掉之後砂岩失去束制力，容易被河床載撞擊而形成塊體脫離。槽溝下切型沖刷機制必須避免水流沿著岩層走向進行侵蝕，形成槽溝狀的V型沖刷槽，造成水流快速下切。但根據台灣過去的經驗，提升岩盤抗沖蝕能力所能降

低的沖刷行為非常有限。傳統上國內既有攔河堰多設置護坦保護下游岩盤，常採表面灌漿，但往往成效不彰。德國專家 Heibaum 主張「部分灌漿拋石護層」(Partial Grouted Riprap, PGR) 新觀念，在岩盤表面鋪設拋石並點狀的灌漿，保留約 30~40% 的孔隙維持拋石護層的滲透性，如圖 7-1 所示。從土壤力學的觀點，較高的滲透性可以快速消散水壓波動所引起的超額孔隙水壓，避免如同傳統護坦因為水流進入與岩盤介面，形成強大的上舉力無法消散，造成整片剝離的現象，且 PGR 相較於全面灌漿具柔性，容許變位。並藉由 PGR 的概念串連拋石，讓小塊拋石組合成拋石層，或許可以解決現有放淤護層容易被水流沖走的問題。



圖 7-1 部分灌漿拋石護層施作方式

(二)降低流功

若以降低作用於攔河堰下游岩盤表面水流流功的概念著手，可分為消能、減能兩個方向。消能為目前最常用的方式，常用策略無非是建造靜水池、尾檻、副壩等水工構造物，透過水躍的產生來消能。然而仍未必能有效抑止下游之沖刷。或是以護坦保護岩床但卻相對降低河道表面粗糙度，讓水流能量無法在

攔河堰附近岩盤消耗，直接向下游傳遞，但是這樣只是讓更下游的岩盤沖刷。本計畫建議若為長期沖刷穩定策略考量，務本之道應盡可能採用能減少水流能量的概念。水流能量與單寬流量、流速(縱向坡度)成正相關，以下分 2 個方向討論：

- 1、降低單寬流量的方式可以考慮興建分洪隧道或分流暗渠，洪水時將部分流量直接繞過攔河堰堰前岩盤或由堰底通過，平時則可供取水。對堰前淨水池、副壩、消能池之基礎宜加強保護，在不危及堰壩基礎的前提下，允許適當深度的沖刷坑形成，僅而藉由產生水墊的作用消能，令沖刷坑形成後自然地提供消能池之功效，降低直接衝擊在下游岩盤的流功。
- 2、降低流速與坡度的方式可考慮將攔河堰全部或部分堰體改建為洪水時可全開之操作方式，讓河道暫時回到未興建攔河堰前之原始坡降，如此可減少因為堰體所提升之水頭高程引起的額外水流流功，減少洪水時的沖刷。河道坡度的一致性，也可提供穩定的流速，讓退水時河床載均勻停留在攔河堰上下游岩盤表面，減少上游淤積，增加下游護甲層，保護岩盤免受退水時的水流沖刷以及常時水流沖刷。

(三)避免流量過度集中

對於既有的堰前淨水池、副壩、消能池，修復時絕對應避免束縮河道，反而應考慮擴大河道寬度，增加河道通水斷面積，以減少單寬流量。當副壩損壞，應盡可能避免將流量集中於 1 處（譬如石岡壩副壩損壞後，修復方案採興建中央排水路，而未全面修復副壩），一旦流量過於集中，因而使其流功會遠大於下游側原本平均分攤的流功，而使沖刷坑之發展加劇。

二、未來攔河堰設置選址及設計考量策略

攔河堰設計主要目的為抬高水位以順利取水，在設置攔河堰後卻往往改變河川原有之輸砂沖淤平衡狀態，導致下游護甲層流失速率加快，再者，水位抬升後的造成水流能量增加，促使下游沖刷作用更加活躍。

因此，未來攔河堰設置的選址及設計工作勢必需將下游可能啟動的沖刷機制及必要條件納入考量，以及能減少下游岩盤沖刷行為之堰壩形式進行策略性的探討。

(一)堰址之地形地質條件

根據本(民國 99)年度抗沖蝕能力調查歸納，良好的地形地質條件可減少沖刷的發展，於地質條件相對不佳的西部麓山帶區域，透過對岩性構造的篩選，亦應有部分相對抗侵蝕之區域。例如針對節理不發達的岩體必須針對受到水流衝擊、河床載顆粒撞擊等外力，岩盤表面產生裂縫對岩體弱化程度的影響。

區域岩性是否容易受到乾濕循環形成碎屑狀，對於評估岩盤之抗沖蝕能力亦扮演著重要角色。如相同單壓強度的頁岩與粉砂岩相比，頁岩容易風化形成小塊體被水流沖離，抗沖蝕能力就會明顯比較低。但從河道側岸所看到的風化度較高的現象，並不完全能反映河道底床受到沖刷的行為(因為長期在水位面下，較為新鮮)，必要時必須輔以鑽探、進行室內試驗瞭解該區岩盤之特性。

考量波動水壓下節理發達的岩體將易於出現節塊抽離機制之沖刷，岩體抵抗節塊抽離沖刷之能力與岩塊大小正相關，岩塊大小又決定於岩體中弱面組數與節理間距。因此節理發達的岩層必須考量弱面組數與節理間距之影響，節理越密集，岩層

越容易形成小型獨立塊體抽離，波動水壓下也將越容易被帶走因而造成劇烈沖刷。而岩體之破碎程度有常深受區域應力擾動之影響，斷層通過處受到應力擾動而產生的剪力節理，易使該地區節理發達且出現成對之共軛節理，更造成塊體抽離的潛能大幅提升。

針對台灣西部麓山帶最常出現的砂頁岩互層，抗沖蝕能力強弱差異很大，需將重點放在較易風化、較易侵蝕的岩層(通常為頁岩層)作為沖蝕深度評估之主控層，且必須避免水流方向與岩層方向一致的沖刷情況。砂頁岩互層的層理厚度及砂岩與頁岩所佔的比例也會影響到沖刷的行為。

層狀岩床沖刷之發展與岩層位態有密切之關連，影響攔河堰前局部沖刷範圍與擴展趨勢。岩層位態與水流方向之夾角也是選址時必須考量的重點因素，若沖刷機制屬於槽溝下切型且岩層走向與水流流向平行或小角度斜交，則水流容易沿著既有弱層岩層位態向上游侵蝕形成狹長型的槽溝型沖刷坑(如後村堰、石岡壩)，若此槽溝之延伸通過攔河堰底部則造成基礎淘空，將嚴重危及攔河堰基礎穩定。以上堰址地質條件均可藉由抗沖蝕能力調查之概念進行量化之描述。

(二)堰壩型式與排砂消能設施

攔河堰下方岩盤的沖刷行為多發生於洪水期間，洪水期間攔河堰亦無取水之需求，堰壩型式可朝向洪水期間可暫時降低跌水高、能彈性調整攔抬水高度之閘門形式(如採橡皮壩或 Drum-gate 型態之堰壩閘門控制)，如此可減少洪水時期攔河堰上下游之水頭差所形成的地形陡降點，降低水流因為垂直射流而產生的流功。

可調整式的堰壩高亦為控制河道縱向坡度的方法，現有的

堰壩形式在退水時容易造成河床載大顆粒淤積於攔河堰裡面，除了減少堰壩壽命，下游岩盤亦失去保護，造成水流直接沖刷岩盤表面。

當攔河堰上下游坡度差異不大，洪水退水時流速分佈均勻，河床載才有可能停留在下游岩盤表面，作為抵抗常時水流沖刷之護甲層。排洪設計原則上應採以消能為主、固床為輔、增強排砂效率、減少堰壩上游的洄砂率等策略。

除了暫時降低跌水高之策略，另一策略為降低單寬流量，以減少作用於岩盤表面之水流流功。在降低單寬流量之考量下，以往常傾向於河道束縮段選擇攔河堰堰址之作法可能應該重新檢討。為降低單寬流量，必要時可考慮於河道設置暗渠通過攔河堰下方河床，平時可兼做取水用途，洪水時期則關閉取水閘門，往下游分洪，減少通過攔河堰上方跌水之單寬流量，降低攔河堰前之流功，抑制局部沖刷之潛能。

若嘗試人為提高尾水位，也不妨考慮於沖刷坑尾端設置如興建副壩、梳子壩，以控制洪水時的尾水高度。但副壩前端卻必然有高程落差，其上、下游間之位能差，往往反而提高了下游端局部沖刷之潛能。變通之道可考慮設置梳子壩，小水量時水流可有效通過，大水量時梳子壩內之水位將自然湧高，提供暫時之較高尾水位，增加水墊作用之消能效應。因為部分之流量可經過梳子壩間通過，減低梳子壩上、下游間之平均位能水頭差，可降低其下游端局部沖刷之潛能，可能能有雙向之優點。

參考文獻

1. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110, "Sedimentation Engineering." Marcelo H. Garcia Eds, ASCE, 2008.
2. Akhmedov, T.H., "Calculation of the depth of scour in rock downstream of a spillway." International Water Power and Dam Construction, 40(12): 25-27, 1988.
3. Annandale, G.W., "ERODIBILITY." Journal of Hydraulic Research, 33(4): 471-494, 1995.
4. Annandale, G.W., "Scour technology." 430pp. McGraw Hill, New York, 2006.
5. Bollaert, E., "Transient water pressure in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact." Ph. D. thesis, Lausanne, EFPL, 2002.
6. Bollaert, E., and A. Schleiss, "Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review," Journal of Hydraulic Research, Vol. 41, No. 5, pp 451-464, 2003.
7. Michael Heibaum and Justus Trentmann., "Partial Grouted Riprap for Enhanced Scour Resistance," Scour and Erosion (GSP 210), pp. 1-10, 2010.
8. Hsu, C.T. and Yeh, K.C., "Iterative explicit simulation of 1-D surges and dam-break flows." Int. J. for Numerical Methods in Fluids, 38, 647-675, 2002.
9. Lin, E.T., Hsu, C.T., and Yeh, K.C., "Depth-integrated modeling for aggradating/degrading mobile channel I model development", International Journal of Sediment Research, 2005.
10. Martins, R., "Contribution to the knowledge on the scour action of free

- jets on rocky river beds”, Proceedings of the 11th Congress on Large Dams, Madrid, pp. 799–814, 1973.
11. Spurr, K.J.W., “ENERGY APPROACH TO ESTIMATING SCOUR DOWNSTREAM OF A LARGE DAM.” International Water Power and Dam Construction, 37(7): 81-89, 1985.
 12. Whipple, K.X., Hancock, G.S. and Anderson, R.S., “River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation.” Geological Society of America Bulletin, 112(3): 490-503, 2000.
 13. Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y., “Nonuniform sediment transport in alluvial rivers.” J. Hydr. Res., IAHR, 38(6), 427-434, 2000.
 14. Wu, W. and Wang, S. S. Y., “Depth-averaged 2-D calculation of flow and sediment transport in curved channels,” Int. J. Sediment Res., 19(4), 241–257, 2004a.
 15. Wu, W. and Wang, S. S. Y., “Depth-averaged 2-D calculation of tidal flow, salinity and cohesive sediment transport in estuaries,” Intl. J. Sediment Res., 19(3), 172–190, 2004b.
 16. 石門水庫管理局，「義興防砂壩加高工程」，民國 60 年。
 17. 行政院公共工程委員會，「跨河構造物防制沖刷技術手冊之研擬」，民國 89 年。
 18. 經濟部中央地質調查所，「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-桃園」，民國 85 年。
 19. 經濟部中央地質調查所，「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-國姓」，民國 88 年。
 20. 經濟部中央地質調查所，「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-甲仙」，民國 89 年。

21. 經濟部中央地質調查所，「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-東勢」，民國 89 年。
22. 經濟部中央地質調查所，「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-埔里」，民國 89 年。
23. 經濟部水利署中水局，「石岡壩九二一震災損害及功能修復成果評估報告」，民國 90 年。
24. 經濟部水利署北水局，「復興鄉義興電廠附近數值地形圖及河川橫斷面測繪成果」，民國 90 年。
25. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「濁水溪河槽水庫可行性規劃(一)-河道水理及輸砂分析」，民國 91 年。
26. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「大甲溪流域聯合整體治理規劃報告」，民國 92 年。
27. 經濟部水利署北水局，「榮華大壩(含義興電廠)第二次整體安全檢查與評估報告」，民國 92 年。
28. 行政院農委會水土保持局，「濁水溪流域聯合整體治理規劃報告」，民國 92 年。
29. 經濟部水利署，「集集共同引水工程竣工報告」，民國 94 年。
30. 經濟部水利署中區水資源局，「中區水資源營運管理系統建置計畫-石岡壩清淤及排砂作業之研究」，民國 94 年。
31. 經濟部水利署第二河川局，「頭前溪中正橋段跨河及河防結構物對整體合性影響之研究」，民國 94 年。
32. 經濟部水利署第四河川局，「集集攔河堰下游段河道沖淤與治理策略研究」，民國 95 年。
33. 經濟部水利署，「曾文水庫越域引水工程計畫攔河堰與沈砂池設計要領研擬」，民國 95 年。
34. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「八掌溪仁義潭下游沖刷河段治理

- 方案之研析」，民國 95 年。
35. 經濟部水利署第四河川局，「濁水溪常受損河段治理工法研究」，民國 96 年。
 36. 經濟部水利署中區水資源局，「集集堰泥砂觀測分析研究及觀測站建置」，民國 96 年。
 37. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「九二一地震後濁水溪下游輸砂關係之研究(2/2)」，民國 96 年。
 38. 經濟部水利署中區水資源局，「96 年度集集攔河堰營運階段水域生態及水質監測成果報告」，民國 97 年。
 39. 經濟部水利署北水局，「石門水庫整治計畫緊急供水工程安全複核及義興壩下游河道整治工程，地形測量報告」，民國 97 年。
 40. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(1/4)」，民國 97 年。
 41. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(2/4)」，民國 98 年。
 42. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「砂質河川深槽變遷對河防建造物安全影響之分析(1/2)」，民國 97 年。
 43. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「水工結構物位於軟弱岩層沖刷機制探討」，民國 97 年。
 44. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究(1/2)」，民國 98 年。
 45. 經濟部水利署水利規劃試驗所，「美國國家計算水科學及工程中心河道變遷模式之引進及應用研究(2/3)」，民國 97 年。
 46. 經濟部水利署，「全台河川攔河堰現有功能評估及其存廢檢討」，民國 97 年。
 47. 經濟部水利署北水局，「石門水庫整治計畫緊急供水工程安全複核

- 及義興壩下游河道整治工程，地質鑽探及試驗報告」，民國 98 年。
48. 經濟部水利署中水局，「集集堰初次使用安全評估」第二次期中報告，黎明工程顧問，民國 98 年。
 49. 經濟部水利署中水局，「集集堰初次使用安全評估」地質補充調查及試驗報告，黎明工程顧問，民國 98 年。
 50. 臺灣省水利局，「集集共同引水計畫攔河堰工程基本設計報告，附錄 1、地質鑽探及試驗」，民國 80 年。
 51. 臺灣省水利局規劃總隊，「集集共同引水工程沈砂池水工模型試驗總報告（民國 79~84 年）」，民國 84 年。
 52. 臺灣省水利局規劃總隊，「濁水溪水系治理規劃報告（濁水溪本流及支流東埔蚋溪）」，民國 85 年。

附錄一 報告審查意見與辦理情形

委託專業服務評選會議評選委員詢問題目及辦理情形 (1/3)

壹、開會時間：民國 98 年 3 月 16 日上午 10 時

貳、開會地點：水利規劃試驗所舊正辦公區大地課會議室

參、主持人：廖副所長培明

記錄：蔡宗翰

委託專業服務評選會議評選委員詢問題目及辦理情形	
委員 1	
審查意見	意見回應
1.由第一年成果顯示岩盤沖刷評估方法各有適用條件，而本年度也同樣採用相同評估方式計算沖刷坑深度，請說明本年度其修正因子指標參數有哪些？如何考慮其各參數影響權重百分比，以所選台灣案例說明來驗證其抗沖蝕能力。	第 1(民國 98)年度所採用的兩種岩盤沖刷深度評估方法理論各有不同之假設基礎。本(民國 99)年度將比較台灣的沖刷機制是否與這兩種相符？若有不符合之處則探討其原因，必要時提出後續修正建議。
2.沖刷坑穩定策略之擬定方式，如何考慮各策略方向之量化目標，而不是條列式之策略性建議。	本計畫旨在對台灣西部重要攔河堰之岩盤局部沖刷穩定提出整體、策略性的探討。由於各攔河堰沖刷條件不一，若要量化有待針對個別攔河堰考量之計畫中進行。
委員 2	
審查意見	意見回應
1.請說明第一期工作遭過之問題或困難，及其在第二期研究之改善方式。	受限於時間因素，第 1(民國 98)年度許多的外業調查成果並沒有很完整有條理的呈現。今年將充分整理去年外業調查成果及今年的補充調查，有助於沖蝕機制之描述與沖刷深度評估方法之建立。
2.S1 及 S2 鑽孔之位置選擇原則為何，請說明。	已於四、(三)鑽探採樣及現地試驗，文中說明。
3.鑽探工作建議提早進行，以免因雨季造成延誤。	本團隊將盡速與第三河川局協調以利工作進行。
4.請將上期期末報告意見之回覆附於本期服務建議書或工作計畫書。	已將上期期末報告審查意見附於本報告附錄二。
委員 3	
審查意見	意見回應
1.曾文溪東口堰 65 年及 96 年比較變化不大且岩盤也沒裸露情形，其原因應探討。	東口堰位處曾文水庫下游，平時流量較少，因此沖刷現象亦較不明顯。

委託專業服務評選會議評選委員詢問題目及辦理情形 (2/3)

委員 3	
審查意見	意見回應
2. 強調以 Annandale 及 Bollaert 兩種之評估方法建議應列入其他評估方法比較以作為最後選擇。	本計畫於第 1(民國 98)年度曾分別針對 Annandale (1995, 2006)、Bollaert (2002)、Spurr (1985)、Akhmedov (1988)等 4 種不同的岩盤沖刷深度評估方法進行分類評選。Annandale 及 Bollaert 兩組學者所提出之評估方法是目前國際上較為普及，且較能周詳考慮岩盤特性的理論模型。
委員 4	
審查意見	意見回應
1. 請說明預期成果中分析改良攔河堰下游岩盤沖蝕機制之意義。	第 1(民國 98)年度限於時間較為匆促，調查結果仍未盡完善，期望藉由今年補充調查成果為修正依據，能更完整的描述岩盤沖蝕機制與沖蝕演進。
2. 預定進度表中四、五、六項之進度應於 10 月 20 日前完成。	工作項目會於期末初稿前完成，但考慮到仍可能依審查意見必須進行補充工作，故訂定此期程。
委員 5	
審查意見	意見回應
1. 曾文溪東口堰目前沖刷坑穩定之緣由請補充說明。(與其他七座攔河堰相比對穩定之原因)	東口堰位處曾文水庫下游，平時流量較少，因此沖刷現象較為不明顯。
2. 本年度針對大甲溪石岡壩未來辦理鑽探取樣及現地試驗之目標為何請補充說明。	鑽探工作進行岩層鑽孔取樣，其目的包含兩個部分：第一部份乃為利用取樣品質優良之岩心施作室內試驗，以提供評估局部沖蝕所需之岩石參數；第二部分則期望利用鑽探孔進行孔內造影，瞭解現地岩體之岩性組成及節理分佈。
委員 6	
審查意見	意見回應
1. 本研究採用 Annandale 及 Bollaert 兩種岩盤沖刷深度公式，其推估深度有很大的差異，如何決定較合適之推估公式？	Annandale 及 Bollaert 所提出的兩種岩盤沖刷深度評估方法理論各有不同之假設基礎，例如 Annandale 可以考慮較為均質的岩盤，Bollaert 考慮節理較為發達的硬岩，必須依照不同的現地狀況採用適合之評估方式。

委託專業服務評選會議評選委員詢問題目及辦理情形 (3/3)

委員 6	
審查意見	意見回應
2.本計畫第二年重點為對攔河堰下游岩盤沖刷穩定提出具體建議，有何具體策略？解決目前下游嚴重沖刷問題的攔河堰。	沖刷作用多發生於洪水期間，洪水期間攔河堰亦無取水之需求，堰壩型式可朝向降低壩高、彈性調整攔抬水高度(如採用橡皮壩、Drum-Gate 型閘門控制)，或採連續之低壩取代高壩，採降低流功排洪佈置、或降低單寬流量等概念。排洪設計原則上應採以消能為主、固床為輔、增強排砂效率、減少堰壩上游的洄砂率等策略。
委員 7	
審查意見	意見回應
1.軟岩沖刷機制受水力特性影響甚鉅。去年莫拉克颱風對全台造成重大影響，建議再補充調查加入莫拉克颱風對水文資料及對岩盤沖蝕特性之探討，以顯現與前期研究之區隔。	將補充蒐集莫拉克颱風影響較大的攔河堰相關資料。
2.現地試驗有關岩盤單壓強度 P.40 以 MPa 表示，而 P.41 表 3-7 以 kg/cm ² 建議統一單位表示。	感謝委員建議，已遵照辦理。
委員 8	
審查意見	意見回應
1.石岡壩及集集攔河堰為中部水資源調度中心，對壩之安全相對重要，以目前其下游河床下切愈趨嚴重，依本研究其原因護甲層後砂岩，粉砂岩以塊體抽離為主。近幾年上游因土砂淤積嚴重，而下游河段嚴重沖刷。砂源因攔河堰被阻斷，對於下游河床穩定其沖刷極為重要，本研究對兩攔河堰下游分兩年度作詳細調查，研究期望本次研究進一步提出穩定策略，以供河道整治之參。	感謝委員建議，石岡壩與集集堰下游沖刷模式很相似，主要是以槽溝下切侵蝕為主。若要穩定沖刷，可以考慮先從加強軟弱岩層的抗沖蝕性著手，長期目標則可考慮改變堰壩形式，減少上游洄砂現象，例如可以於洪水時掩臥閘門的鼓型壩(drum gate)等等手段。本(民國 99)年度會將兩攔河堰下游詳細調查，進一步提出穩定策略，以供河道整治之參考。

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形 (1/8)

壹、開會時間：民國 98 年 5 月 4 日上午 9 時 30 分

貳、開會地點：水利規劃試驗所舊正辦公區大地課會議室

參、主持人：廖副所長培明

記錄：蔡宗翰

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形

陳委員義平

審查意見

意見回應

1. 依第一年度採用 Annandale 及 Bollaert 兩種方法之沖刷深度評估成果相差頗大，以不同地質條件其中 Annandale 推估其沖刷深度均較淺，未來如何探討較適合台灣各種不同條件之評估模式。

本(民國 99)年度將探討影響各類沖刷機制的必要條件並分類，與 Annandale 及 Bollaert 兩種沖刷深度評估模式的假設條件及參數選用做比較。探討在何種沖刷條件下，所相對應的沖刷深度評估模式。

2. 既有攔河堰沖刷穩定策略針對三種岩盤沖刷機制，其中對塊體抽離型沖刷採用灌漿補節理強度，槽溝下切型沖刷，針對弱層進行補強，或儘速補滿層面間隙，以石岡壩下游河道穩定中興顧問公司建議擴寬河道降低單寬流量，並建議將上游之礫石疏浚放置下游河道，以石岡壩之地質條件及其水理因素是否適宜，另依調查資料八座攔河堰有五座為逐層下切型沖刷，其對策又為何。

本團隊將於本(民國 99)年度探討石岡壩下游岩盤之抗沖蝕能力，瞭解在不同水流、地形及地質條件下對沖刷深度的影響。並綜合西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性進行歸納，比較各類沖刷機制之必要條件，作為堰壩下游岩盤穩定策略探討之基礎，提出一般性的岩盤沖刷穩定策略建議。相關研究成果可提供攔河堰維修整治工程作為參考。

3. 對於未來攔河堰之規畫如為防止下游河道之沖刷，以降低單寬流量及流速與坡度並盡量避免於隘口為宜，依目前規劃攔河堰設置需以取水功能、壩之地質條件、及建造成本，對下游之沖刷河道穩定所能預先考慮因素常被疏忽，本研究未來對於攔河堰規劃應有所有助益，今年水規所正在規劃之烏嘴潭攔河堰目前布置應可提供意見。

感謝委員肯定及建議。

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形

(2/8)

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形	
洪委員勝榮	
審查意見	意見回應
1. 本年度之工作計畫、目標、方法正確可行。	感謝委員肯定。
2. 石岡壩之洪水放流均有人為操作，是否影響沖刷坑之深度與範圍。	目前本計畫探討之沖刷深度評估方式，所採用的流量資料是石岡壩操作紀錄最大洩洪量(由石岡壩管理中心提供)。
3. 現地鑽探應知會管理中心，並配合放流時間位置以保障人員及機具安全。	已遵照辦理。
4. 去年度調查之八座攔河堰其中曾文溪東口堰受沖蝕變化最少。應深入探討其原因，亦可作為往後選址設計參考。	東口堰位處曾文水庫下游坡度平緩，且卵礫石供應充足可以保護岩盤，因此沖刷現象亦較不明顯。本團隊於八八風災後進行調查，即使如此大的流量對沖刷坑亦無明顯影響。
5. 以石岡壩及集集攔河堰之操作方式對減能之效果可能有影響，如何克服及操作之方式如何改變？	根據目前觀察，各攔河堰顯著的沖刷行為多發生於颱風時期，堰壩之操作方式可能係著重於颱風影響，操作規則之改變尚須經過嚴謹之探討。
國立成功大學資源工程系 李教授振誥	
審查意見	意見回應
1. 請對第一年成果掌握攔河堰下游之沖刷機制因子，詳細列出影響機制因子項目，類比 NGI-Q 值之評估項目、因子，以供第二年調查之用。	抗沖蝕能力指數評估法之各項因子與權重，已整理如附錄四。
2. 估計岩盤抵抗水流沖蝕能力，目前從現場勘查取樣與試驗項目，僅與岩盤幾何構造與力學性質著手，建議加入河流之水理性質，特別水流方向與水流狀態之探討。	本計畫於評估岩盤沖刷深度時有考慮許多水理性質，如流速、剪應力等。

國立成功大學資源工程系 李教授振誥	
審查意見	意見回應
3. 建議對岩體不連續面評估，以 ISRM 建議十項內容調查評估，並建議將層面與節理調查區分開調查說明。	感謝委員建議，本團隊隊岩體不連續面評估乃依據 Annadale 抗沖蝕能力評分法，該方法對不連續面描述中，已涵蓋 ISRM 評估中弱面的(1)方位與傾角(2)弱面間距(3)弱面延續性(4)弱面粗糙度(5)弱面內壁強度(6)弱面內寬(7)弱面填充物(8)弱面組數與(9)弱面幾何等 9 項項目。同時每項描述均有其評分依據，應足夠對節理岩體抗沖刷之特性之優劣作描述。 (10)弱面滲水實際上在調查沖刷坑附近軟岩時，並無法很明確的反應真實的狀況，但本團隊亦針對節理的風化程度做評分。在軟岩的抗沖蝕能力評分中，層理與節理均屬於弱面。因此弱面條件則依據現場判斷對最有利及最不利造成岩塊脫離的弱面做評估。
4. 請定義「沖蝕」名詞，爾後再定義「沖蝕規模」、「沖蝕位置」，「抗沖蝕能力指數」。	遵照辦理，以定義於 p. 3-2
5. 請說明哪些機制導致「逐層下切型」、「塊體抽離型」、「槽溝下切型」沖刷現象產生。	遵照辦理，已於「第五章 攔河堰下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析」進行初步探討，如 p. 5-23。
6. 沖刷穩定策略研擬，請注意其整體攔河堰之合適性。	感謝委員提醒。
國立中興大學土木系 壽教授克堅	
審查意見	意見回應
1. 石岡壩下游岩盤之沖刷為槽溝下切型，受層面節理等弱面之控制；而風化侵蝕作用對弱面及岩石力學性質影響大，不同深度不同溝深可能有不同之岩石及弱面特性。地表調查應考慮不同溝深位置，鑽探時應注意淺層處鑽孔保護以得到表層之岩石、弱面特性。	為保護淺層鑽孔之岩石，本團隊因此採用對孔壁擾動較低的鋼索取樣法搭配三層岩心管以及穩定液，由上述方法儘管近地表岩層膠結不佳，但仍能取得品質較佳之岩心。

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形

(4/8)

國立中興大學土木系 壽教授克堅	
審查意見	意見回應
2. 石岡壩處有斷層通過，應考慮近斷層效應，即靠近斷層地層較破碎，局部地應力可能造成之節理面或剪裂帶；上述效應可能造成岩性之異向性應進一步考慮，並納入鑽探或分析。	本團隊鑽探目的包含利用鑽孔岩心進行試驗取得力學參數提供岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析，並以孔內造影分析孔內岩層與節理分佈。因此，佈孔上主要考量為盡可能於近沖刷坑之露頭進行鑽探，以期降低鑽孔與沖刷坑因距斷層遠近而造成不同之影響，後續分析上亦將考量其影響。
3. 上述之近斷層效應可能造成北岸附近地層破碎，建議鑽探之乙案重新佈設孔位。如果可能建議將鑽孔進尺分別佈於3孔(槽溝處、北側及南側)。	經現地調查結果，堰前沖刷坑地層高角度傾角代表可能亦受到斷層擾動影響(如圖4-15)，其與沖刷坑北岸地層條件相當類似，再者受到石岡壩沖刷改善工程施工及現地流量變大淹沒部分區域之影響，最後鑽孔於北岸近沖刷坑處進行，詳細說明請參照第四章第三節。
私立逢甲大學水利工程與資源保育學系 廖教授清標	
1. 台灣的自然環境與日本相近，建議收集日本相關文獻，以供本計畫參考。	已蒐集鄰近國家(大陸)的沖刷坑深度評估文獻並放入期中報告。根據本團隊文獻蒐集結果，目前日本沖刷議題多著重於流域尺度的沖淤變化對河川整體的影響，以及橋墩所產生的局部沖刷坑，對於攔河堰下游岩盤的沖刷很少提及。本團隊仍會持續注意是否有新的相關參考文獻可供本計畫參考。
2. 石岡壩河段歷年洪峰流量並不大，大概在 Q5~Q20，為何仍會引致下游岩盤沖刷?主因是否為岩盤組成軟弱?	岩盤組成軟弱絕對是造成岩盤沖刷的不利因素。為探討岩性對沖刷深度之影響，本計畫會針對石岡壩進行下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析，並加入水理性質及地形條件，探討下游岩盤沖刷因子。
台灣世曦工程顧問股份有限公司 張資深協理順忠	
審查意見	意見回應
1. 現地地質調查有無順向坡發現。攔河堰設置考量應強調避免砂頁岩順向坡之地盤。	感謝委員提醒。

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形

(5/8)

台灣世曦工程顧問股份有限公司 張資深協理順忠	
審查意見	意見回應
2. 穩定策略中消能及減能概念，建議考量抗能，如以高性能混凝土或材料之策略。	目前許多攔河堰皆以高強度混凝土補強堰體或靜水池本身(如甲仙堰、集集堰、石岡壩等)，但大多僅獲得短期成效。本計畫將涵蓋相關可能方法提供消能的概念或策略，作為攔河堰下游岩盤沖刷穩定策略之參考。
3. 觸口攔河堰(99.5.1)相片莫拉克颱風後損壞分析頗具意義。驗證第一年度三個歸納沖刷機制是否吻合，可取得福衛二號為最新圖資資料，更新圖資於本案報告中顯現。	觸口攔河堰新的航照已經補充。福衛二號解析度(2 m)與航空照片有不少差距，應用於局部沖刷分析工作仍有困難。
4. 建議石岡壩岩體單壓強度與史密特錘之相關，並簡單說明史密特錘之施作方式。	本團隊使用瑞士 PROCEQ BL Type 史密特錘加上 Silver Schmidt BN 試驗錘，用來估計現地岩石之單壓強度(符合 ASTM C 805 規範)，施作方式依照 ASTM 的規範於現地固定範圍內等間距測 10 個點，對強度作平均，若強度標準偏差 12% 超過則重新施作。
水利規劃試驗所 徐課長世定	
審查意見	意見回應
1. 不同沖刷機制是否可以一視同仁以相同公式去探討?可能因子評估方法可能不同，是否須先判別沖刷機制再作細部探討。	的確由第一年沖刷深度評估結果顯示，不同沖刷機制有可能不同的主控因子，可能是造成第 1(民國 98)年度沖刷深度評估方法某些情況不適用的原因。本(民國 99)年度將探討各沖刷機制的必要條件，提出不同沖刷機制所對應的沖刷深度評估方法。
2. 鑽探 50 公尺的原因是否為驗證地表調查的成果。	鑽探的目的包含兩個部分：第一部份為利用取樣品質優良之岩心施作室內試驗，提供評估壩前局部沖蝕所需之岩石參數；第二部分則是利用鑽探孔進行孔內造影，瞭解現地岩體之岩性組成及節理分佈。
3. 請說明預期成果如何使用於現實問題?	本計畫預期於期末報告中針對以下二部分進行策略探討：(1)未來攔河堰設置選址及設計考量策略、(2)既有攔河堰沖刷穩定策略。

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形

(6/8)

水利規劃試驗所 徐課長世定	
審查意見	意見回應
4. 是否可以在對預定的堰址作探討瞭解可能發生的岩盤沖刷問題？	對於未來攔河堰設置選址及設計考量，本計畫預期對：(1)堰址之地形地質條件、(2)堰壩型式與排砂消能設施，提出策略建議。
經濟部水利署 楊工程司國賢	
1. 本計畫期初簡報內容與報告書內容有部分不相同，簡報新增圖、表及內容更新部分，建議新增於報告中。	遵照辦理，已經簡報中的資料新增至期中報告中。
2. 簡報 P.16 表應對應 P.17 岩盤沖刷機制的圖作集中適當的分類，如(第一類義興壩，第二類觸口攔河堰、甲仙攔河堰等)	遵照辦理，修正如表 5-2。
3. 本年度沖刷機制的探討似乎針對第三類槽溝下切型來分析，第一類及第二類是否要分析，若沒有要分析，對於沖刷穩定策略如何研訂，請說明。	本團隊將於本(民國 99)年度探討石岡壩下游沖刷機制與抗沖蝕能力分析，探討石岡壩下游岩盤沖刷深度評估方法。 第一類與第二類雖然沒有進行水理演算，但本(民國 99)年度補充調查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性的部分會針對沖刷機制作歸納，探討各類沖刷機制之必要條件，以供穩定策略之探討。
經濟部水利署水利規劃試驗所 林研究員峰璋	
審查意見	意見回應
1. P12, "大甲溪各河段重現期洪峰流量如表 3-3, 圖 2-4 所述", 文述疑有誤, 請再確認。	已修正於 p. 2-14。
2. P18, 石岡壩初步調查圖 2-7, 各調查點顯得分散, 建議找 2~3 個橫剖面, 將其岩性序列予以調查分析, 或許可得更為貼切的資料。	實際上堰體下方的露頭有些風化、有些被卵礫石堆積, 若要依固定的剖面直線調查有其難度。但本計畫現地勘查依地形及岩層位態, 對層面分界線進行合理的推估, 並繪製地質圖及地質剖面圖(p. 3-25)
3. 表 2-6 中的參數 M_s 、 K_b 、 K_d 、 J_s 、 K_h 請加註標示。	遵照辦理, 各攔河堰調查資料都已修正, 如表 3-3。

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形

(7/8)

經濟部水利署水利規劃試驗所 林研究員峰璋	
審查意見	意見回應
4. 本年度石岡壩要施作2孔共50公尺鑽探，目前孔位的佈置只針對堰前劇烈沖刷岩盤鑽探，是否太可惜。因本地區岩層傾角甚大，若垂直鑽孔僅能取得1~2種岩性，建議是否採用斜孔，以垂直層面方式進行鑽探，以取得較多岩性供試驗分析。	由於沖刷坑附近的層面及節理發達，若採用斜孔鑽探會影響到試體內的層面及弱面位態之角度，無法模擬現地垂直向應力下的岩體強度。
5. 堰前岩層遭受沖刷破壞都從表層開始，若能將重點放在表層被掏刷破壞機制的探討，即無必要探討岩盤抗沖刷能力隨深度變化的特性，畢竟堰址區出露的岩層並非單一岩性。	本計畫希望能由探討岩盤抗沖蝕能力隨深度之變化趨勢，評估沖刷坑最終發展深度。同時亦試圖由深度變化特性，預測若遭逢單一洪水時，流功高於岩盤抗沖蝕能力門檻所可能造成之沖刷深度。
經濟部水利署水利規劃試驗所 蔡工程員宗翰	
審查意見	意見回應
1. 石岡壩下游大甲溪河床鑽探已行政協助取得第三河局同意辦理，請交大團隊務必於核定之期限(5月22日前)內完工，並報本所備查。	遵照辦理。
2. 依工作計畫書內容，不同評估方法(Annandale及Bollaert)係根據不同的岩性條件選用，未來執行評估時，是否能以具體建議的量化參考指標來決定選擇適用的評估方法，請考量。	本團隊將由現地補充調查岩盤局部沖蝕特性的經驗，製作現地沖刷因子調查檢核表。
3. 若未來公式驗證模擬結果與實際狀況不同時，將進行公式修正，請敘明修正的依據與方法為何？	根據目前試算結果，的確有與實際狀況不同之處，已於P.6-14針對現階段修正的依據與方法進行探討。
4. 現場工作目視調查或簡易調查項目繁多，建議先擬建置查核表(Check list)，再進行現地調查，以便後續問題的釐清。	現地抗沖蝕能力調查項目與評分如附錄四所示。
5. P.12，倒數第5行，「表3-3」→「表2-4」；P.33，「參照(三)」→「參照(四)」。	已修正。
6. 簡報內容，「均勻下切」與「逐層下切」請統一。	已修正為「均勻下切」。

期初簡報暨工作執行計畫書審查意見及辦理情形

(8/8)

經濟部水利署水利規劃試驗所 蔡工程員宗翰	
審查意見	意見回應
7. 石岡壩附近正進行相關工程，請將其規劃內容或施工內容資料，一併蒐集納入。	目前「石岡壩堰體橋樑及副壩下游沖刷改善工程」已施工完畢，已於圖 3-28 納入施工前後照片供沖刷坑變化情形之比較。
主席結論	
審查意見	意見回應
1. 本次工作執行計畫書審查及期初簡報原則認可。	敬悉。
2. 請國立交通大學依各位委員及單位代表之意見在契約範圍內修正，並在期中報告中回應。	遵照辦理。
3. 期中報告書請於 99 年 7 月 31 日前提送本所。	遵照辦理。
4. 石岡壩下游水力特性分析採用 CCHE2D 二維水理模式推估，其上下游邊界條件如何界定。輸砂特性分析如何選定，在期中報告時需敘明。	遵照辦理。
5. 石岡壩現地鑽探之原因及方式需說明，並於 99 年 5 月 7 日前擬妥鑽探工作計畫修正稿送所憑辦。	遵照辦理。
6. 圖資需更新至最新方能加以比較。	遵照辦理。
7. 現地調查岩石特性試驗相關成果納入作相關性研究。	遵照辦理。
8. 蒐集地域性較接近的日本或中國大陸之相關研究資料。	遵照辦理，已補充至第貳章。
9. 沖刷機制因子需要以明確、易於調查分析、使用為原則。	遵照辦理。
10. 「沖蝕」請加以定義清楚。	遵照辦理，已補充至 p.3-2。
11. 既有及未來新建攔河堰之穩定策略將為本年度之工作重點，因此國內適用之評估方式將為首要工作，希能藉由二年之調查資料及國外資料之彙整作基礎，檢定分析再作建議。	遵照辦理。
12. 製作現地沖刷因子調查檢核表。	遵照辦理。

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(1/9)

壹、開會時間：民國 98 年 8 月 20 日上午 9 時 30 分

貳、開會地點：水利規劃試驗所舊正辦公區大地課會議室

參、主持人：廖副所長培明

記錄：蔡宗翰

陳委員義平	
審查意見	意見回應
1. 本報告對於選定八個攔河堰下游岩盤基本資料(岩性種類、岩石特性、地質位態與水流流向關係、沖蝕特性)甚為詳盡，可供未來攔河堰新設之選址條件參數。	感謝鼓勵與肯定。
2. 本年度研究對於石岡壩下游二維水力特性分析採用 CCHE2D 模式，就石岡壩之邊界條件模擬結果，有關流速與剪力分析頗為吻合，並可進一步作為抗沖蝕能力分析參數，期望進一步探討該模式參數，適用之條件，作為攔河堰下游岩盤沖刷深度之研究。	CCHE 2D 模式之理論、功能限制及適用條件，已整理於「附錄五 CCHE2D 模式理論」。
3. 有關攔河堰下游岩盤沖刷深度評估方法分別以 Annandale 及 Bollaert 兩種方法，從石岡壩、集集堰及義興堰，因岩盤地質條件不同，其適用方法有所區別，建議研究歸納不同條件適用方法。	以整理於 p.6-11，「五、岩盤沖刷深度評估方式探討」。
4. 有關攔河堰(壩)下游岩盤沖刷穩定策略，水規所另委託環興工程顧問公司就石岡壩下游河床穩定其主要策略「增加消能設施」「下游固床」及「增加主深槽單寬流量」，因該研究並未考慮岩盤沖刷機制，本研究是否有進一步之思維以供水利署做為整治大甲溪石岡壩下游河段之參數。	本研究主要探討攔河堰下游岩盤(沖刷坑附近)的局部沖刷行為，有別於河床穩定之概念，沖刷坑附近應儘量避免深槽快速下切，以免向後掏刷構造物之基礎。 本計畫於「第七章 探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷穩定策略」提出攔河堰下游岩盤沖刷 穩定策略及概念，可供相關單位之參考。

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(2/9)

徐委員世定	
審查意見	意見回應
1. 目前報告中探討多以洪水事件，對於常水位的水流是否對沖刷也是影響因素之一，尤其此類的頻率很高對於軟弱岩盤而言。	不可否認常水位的水流一定也會對沖刷造成影響。 目前本計畫對於攔河堰沖刷深度評估之研究仍在定性、初期定量階段，期望能於後續計畫針對各種影響因素進行更進一步探討。
2. 由附錄四 Annandale 評估方法，以水庫溢洪道下游沖刷為主，並沒有考量河床載顆粒沖刷之因素，如何修正、說明，使適合台灣的攔河堰下游沖刷須進一步探討。	由於國外許多案例及試驗結果均是以清水進行模擬(如大壩溢洪道、水工模型)，因此當初所迴歸之經驗式並沒有考慮河床載顆粒沖刷之作用力。本(民國 99)年度評估結果顯示 Annandale 評估方法，目前對於攔河堰下方沖刷深度模擬有一定之適用性，後續希望能對其他外力形式進行更進一步探討。
3. 目前計畫執行是否對於沖刷機制的主控沖刷的關鍵因子有初步成果，且沖刷之必要條件。	已更新於 p.5-49「三、攔河堰沖蝕機制綜合探討」
4. P6-5 分析模型如圖 6-2 應為圖 6-5，P6-6 如圖 6-5 應為圖 6-6，P6-7 評估成果如圖 6-6 應為圖 6-4。	本章節文敘已重新檢查修正。
5. P7-5 針對不連續面以灌漿補強節理強度，是否可行請再考量，對於槽溝補滿是否可行請考量，是否與簡報說法不符。	已更正。
6. 希望期末成果對於評估方法有明確詳細的評估流程說明，是否辦理教育訓練。	對於沖刷深度評估方法之所採用的參數選取接詳敘於第陸章。另外根據合約，本期計畫尚無預期舉辦教育訓練。
國立成功大學資源工程系 李教授振誥	
審查意見	意見回應
1. 目前期中報告已對於八座攔河堰進行沖蝕特性調查並進行方法評估，未來應可達到工作計畫目標。	感謝鼓勵與肯定。

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(3/9)

國立成功大學資源工程系 李教授振誥	
審查意見	意見回應
2. 目前已嘗試利用前人方法進行岩盤沖刷坑深度評估，唯成果指出沖刷機制有三種型態，表 5.2 已對此三種分類討論，建議未來應用前人方法評估時，亦請依其特性分類討論，爾後再依抗沖蝕能力，訂立其抗沖蝕指標變異性，以利量化。	感謝委員建議，三種類型之沖刷特性已於 p.5-49「三、攔河堰沖蝕機制綜合探討」進行討論。抗沖蝕能力指數各項評分的變異性及評分量化方式，如「附錄四 Annandale(2006)抗沖蝕能力指數評估法」說明。
3. 沖刷穩定策略，已提出概念性說明，建議未來除依其沖刷機制擬定外，應提供有效具體消能與減能穩定沖刷策略要項與程序。	已於「第柒章 探討攔河堰壩下游岩盤沖刷穩定策略」中說明。
4. 水理分析請包括含砂石或土砂石之水理分析，以了解含砂石時，當時水流功下，其沖刷能力之發展。	因採用之沖刷坑評估方法、模式理論基礎及現地勘查成果，目前沖刷坑評估僅考量沖刷坑區域之地質參數條件與定量流模擬不同入流條件之水力特性條件，期可回歸分析出適用本土之沖刷坑評估計算方式。洪水時期河床質、推移質等河道動床變遷影響可依據本研究成果於未來相關進階研究中加入考量。
5. 統一名詞；“抗沖蝕能力”與“抗磨蝕能力”，“逐層下切型”與“均勻下切型”。	遵照辦理。
台灣世曦工程顧問股份有限公司 張資深協理順忠	
審查意見	意見回應
1. 攔河堰下游的岩盤沖刷機制已歸納出 Page5-23 之均勻下切、塊體抽離、槽溝下切等三類，表 5-2 所述沖刷機制建議比照一致。	遵照辦理。
2. 室內岩石試體建議選擇 NX 或 HQ 尺寸，期使研究一致化。(P.4-24 及 P.4-31)	本計畫統一採用 ISRM 規範規定，室內試驗不得小於 54 mm。本報告中岩心材料統一採用 HQ 尺寸。

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(4/9)

台灣世曦工程顧問股份有限公司 張資深協理順忠	
審查意見	意見回應
3. P.6-3 圖 6-1 流程圖建議於以 Annandale、Bollaert 方法計算岩盤沖刷坑深度，之前先敘明沖刷機制類別以利推估查核。(四)攔河堰下游的岩盤沖刷機制已歸納出 Page5-23 之均勻下切、塊體抽離、槽溝下切等三類，表 5-2 所述沖刷機制建議比照一致。	遵照辦理。
4. 仍未見大陸的沖刷坑深度評估文獻於期中報告，請續補充。	大陸文獻資料蒐集於貳、二、(一)補充蒐集沖刷坑深度之評估方式。
5. 以沖刷坑深度之研究而言，Annandale 適用於均質岩盤，Bollaert 適用於節理發達的硬岩，因此對國內適用性限制檢討，確有後續研究歸納的必要，建議於期末報告加以補充。	針對兩種沖刷深度評估方法之適用性，已於 p.6-11，「五、岩盤沖刷深度評估方式探討」歸納比較。
經濟部水利署水利規劃試驗所 王課長國樑	
審查意見	意見回應
1. 本計畫為兩年期工作，本年度為第 2 年，除須完成本年度專題報告外，另依本所慣例應將兩年的成果扼要彙整成總報告，建議年度的專題報告及總報告目錄應盡早與本所大地課聯繫並適時完成，以利未來成果報告撰寫。	總報告目錄已與主辦工程師於 9 月 30 日聯繫並完成。
2. 第壹章章名請修正為前言，並區分計畫緣起、計畫目標、工作項目及內容、工作範圍、工作構想及流程、歷年規劃或研究成果等節較妥適。	遵照辦理。
3. P3-1 就台灣西部重要攔河堰岩盤沖刷特性進行普查工作選定的原則為何？如新店溪的直潭壩、大漢溪上游之巴陵壩、大漢溪石門水庫下游之鳶山堰、頭前溪上游支流上坪溪之上坪堰、中港溪上游支流南庄溪之田美堰、大安溪之士林堰及曾文溪中游之玉峰堰等為何未納入？	本計畫當初選取攔河堰的原則是盡量包含台灣西部地區，北中南的軟弱岩床，盡量包含不同沖刷特性的攔河堰。其中也包含了硬岩岩床(義興壩)、沖刷坑有卵礫石堆積(東口堰)的攔河堰供比較。

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(5/9)

經濟部水利署水利規劃試驗所 王課長國樑	
審查意見	意見回應
4. P3-2 後村堰部分文詞言及位置如錯誤！找不到參照來源應為誤植，請檢討後修妥。	已修正。
5. P3-58 部分東口堰岩性種類如兩地對於與台灣北部出礦坑剖面之十六分頁岩主部以迄魚藤坪砂岩？語意不明，請檢討後修妥。	已修正。
6. 針對第參章針對台灣西部 8 座重要攔河堰的岩盤沖刷特性調查，建議於該章最後應增列一節進行綜評盡量歸納可能的本土岩盤沖刷機制。	第參章針對 8 座攔河堰之調查工作成果，已於「第五章 攔河堰下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力分析」進行歸納探討。
7. 第肆章選定石岡壩下游岩盤之抗沖蝕能力調查之選定理由為何？建議補充說明，為何不選定八掌溪之竹山堰？	石岡壩為大甲溪重要攔河堰，目前下游岩盤沖刷劇烈明顯，且相關基本資料(如地形、水文資料)較為完整，因此列為本計畫深入調查抗沖蝕能力的依據，供第陸章分析使用。 竹山堰的案例，國內學者已經進行非常多相關研究，因此暫不納入。
8. P4-4 二維水力特性分析採用 CCHE2D 模式的理由為何？建議強化補充；另應將本模式在本計畫所用的邊界、初值條件及模式參數的檢定、模式的驗證、演算結果及演算的流程圖等扼要於成果報告附錄內檢附較完整。	採用水深平均假設之 CCHE2D 模式模擬分析計畫區域水力特性成果，相較於 HEC-RAS 等斷面平均一維模式之分析成果細膩而精確。CCHE2D 模式發展自今，採用許多實驗室與現場案例進行模式之檢定驗證，模式可靠度佳，故採用此模式進行計畫區域水力特性分析。相關邊界、初值條件與參數設定方式於報告中說明。
9. 第五章攔河堰（集集堰及石岡壩）下游岩盤沖刷機制與抗沖蝕能力是否僅針對集集堰及石岡壩進行探討？似乎不是，故應將章名中之（集集堰及石岡壩）刪除。	考慮章節名稱簡潔性與清晰度，遵照辦理。

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(6/9)

經濟部水利署水利規劃試驗所 王課長國樑	
審查意見	意見回應
10. 第陸章探討攔河堰壩下游岩盤沖刷深度評估方法可否就 Annandale 及 Bollaert 等兩種方法所進行的探討表列比較後再進行分析結果綜合探討較妥適。	針對兩種沖刷深度評估方法之適用性，已於 p.6-11，「五、岩盤沖刷深度評估方式探討」歸納比較。
11. 第柒章探討攔河堰壩下游岩盤沖刷穩定策略本文內容似乎尚為概念式的說明，未來應有具體及務實的呈現較妥適。	於第柒章列舉實際案例，強化沖刷穩定策略之說明。
12. 委託專業評選會議及期初簡報暨工作執行計畫審查意見及辦理情形等的格式請依本所相關規定調整較妥適。	遵照辦理。
經濟部水利署 楊工程司國賢	
審查意見	意見回應
1. P.3-2、P.3-43、圖 3-40、P.4-24 “規畫”，文章錯誤部分請修正。	已修正。
2. P.2-6 補充蒐集國外相關文獻中，補充蒐集沖刷坑深度之評估方式其蒐集資料略顯不足，另在沖刷深度評估法國外實際應用案例僅有一例，建議儘量蒐集補充。	本計畫已於第 1(民國 98)年度針對國外沖蝕坑深度評估方式進行彙整與比較，評選出較可能應用於台灣的 5 種評估方式並詳細介紹。本(民國 99)年度僅以委員意見補充大陸學者評估方式，本計畫所蒐集之評估模式將會於總報告中完整呈現。
3. P.1-20 “明年度…” ，本年度為計畫第二年，是否還有後續年度研究，建議修正並加入年份。	該處為第 1(民國 98)年度摘要，以就文敘不清之處於 p.1-20 進行修正。
4. 攔河堰下游岩盤沖刷穩定策略中，應針對三種沖刷機制，提出因應策略。	已於第柒章列舉實際案例，強化沖刷穩定策略之說明。
5. P.4-1 水力特性分析章節中，模擬結果未看出如何驗證，如何得知二種模式推估的合理性，請說明。	模式驗證部分已補充說明於 p.4-5 及表 4-4。

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(7/9)

經濟部水利署水利規劃試驗所河川課 尹研究員伯亮

審查意見	意見回應
<p>1. 簡報 p46 頁 Bollaert 沖刷深度評估方法，「集集攔河堰、石岡壩因每年都會進行堰前沖刷坑修補，現有沖刷坑深度確有持續沖刷之潛能，但穩定深度為何未知。」若以每年不進行人為堰前沖刷坑修補的假設條件，在現階段研究成果，是否能推估集集攔河堰、石岡壩沖刷坑最終穩定深度？供規劃設計參考。</p>	<p>第陸章新增石岡壩、集集攔河堰，假設數種沖刷深度之穩定性評估。</p>
<p>2. 簡報 p23~25 頁「以水理分析所得之水力條件作為岩盤局部沖刷評估之水力輸入參數，而採用各重現期距洪水量之水理因素，是否能反應所蒐集現場不同年份的沖刷坑深度資料？是否考量改以歷年流量紀錄較符實際？而各重現期距洪水量用以模擬預測不同條件下的沖刷坑深度。</p>	<p>本研究於沖刷深度評估時所採用的流量資料，乃參考現場不同年份的實際流量資料，然後選用相近的重現期距洪水量之水理分析結果。</p>
<p>3. 本計畫以現場觀測資料為基礎，而現場攔河堰下沖刷坑的形成，屬含砂水流、礫石與岩盤交替沖刷與三維水理等複雜因素；以往國內未針對沖刷坑作現場觀測，故資料欠缺是必然，推導適宜台灣軟弱岩盤的沖刷坑公式非短期間兩年的研究計畫可以完成。本計畫是一個拋磚引玉的研究，期末報告建議將目前研究所遭遇問題、困難、未來應如何配合解決詳述。</p>	<p>已於 p.6-11，「五、岩盤沖刷深度評估方式探討」，針對目前遭遇的問題與未來可以繼續發展的方向進行探討。</p>

經濟部水利署水利規劃試驗所 蔡工程員宗翰

審查意見	意見回應
<p>1. P2-6 除前年度國外 5 種評估方式外，本年度補充蒐集的大陸學者(Pei-Qing Liu, 2005)沖刷坑深度評估方式是否適用於台灣攔河堰，請於報告內敘明或進行計算驗證。</p>	<p>此法需要準確的沖刷坑地形，目前台灣西部地區沖刷坑形狀並不如同此法假設條件這麼規則與單純，且此法考慮對於岩性的假設過於簡略，實際上難以在本土運用。</p>

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(8/9)

經濟部水利署水利規劃試驗所 蔡工程員宗翰

審查意見	意見回應
<p>2. 本計畫未來修正完成的沖刷深度評估公式是否僅個案適用於本計畫調查的壩堰，可否通用於其他同地質狀況(槽溝下切、塊體抽離)的壩堰?或是未來是否再找其他同地質攔河堰進行修正公式的驗證的動作，請考量。</p>	<p>本計畫所建議之沖刷深度評估方式，是反應水流射流功與岩盤抗沖蝕能力之間的關係，若能充分掌握地質狀況應能加以對照及應用。但根據分析結果顯示，目前攔河堰下游岩盤沖刷行為，仍有一些變因無法充分掌握，期許未來能繼續更進一步研究。</p>
<p>3. 第柒章，除定性大方向的探討攔河堰(壩)下游岩盤沖刷穩定策略外，建議可另專節針對本計畫調查的這幾個既有攔河堰分別詳細提出穩定策略，供各管理單位參考。</p>	<p>第柒章以石岡壩為例，探討其沖刷的成因與進程，配合第陸章岩盤沖刷深度評估之結果，提出較詳細的穩定策略。</p>
<p>4. P6-7，圖 6-4，$P_c=16\text{kw/m}^2$ 與 $P_c=24\text{kw/m}^2$ 於圖上位置似有誤，請再確認。</p>	<p>本章節文敘已重新檢查修正。</p>
<p>5. P.3-26地質剖面B-B' 與P5-15地質剖面 A-A'，模糊不清，請移至其他頁面呈現。</p>	<p>為符合地質圖繪製比例尺需一致之規範，已於 p.3-26、p5-56 進行調整，提高畫面清晰度。</p>
<p>6. 文字錯誤部份如下，請確認後修正： (1)P2-10，「錯誤！找不到參照來源」→「圖 2-5」。 (2)P3-2，「錯誤！找不到參照來源」→「圖 3-1」。 (3)P3-13，倒數第二行，「後村堰」→「義興壩」。 (4)P5-4，第十行，「潮」→「槽」。 (5)P6-5，「圖 6-2」→「圖 6-5」。 (6)P6-6，「圖 6-5」→「圖 6-6」。 (7)P6-7，「圖 6-6」→「圖 6-4」。</p>	<p>已全部修正。</p>
<p>主席結論</p>	
審查意見	意見回應
<p>1. 本次期中簡報暨報告書審查原則認可。</p>	<p>敬悉。</p>

期中簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(9/9)

主席結論	
審查意見	意見回應
2. 請依各單位及各委員意見在合約要求的範圍內修正，並在期末報告內有所回應。	遵照辦理。
3. 不同抗沖刷機制評估分析方法於下游不同岩盤，宜分別採用，並應嘗試進行分別歸類。	遵照辦理。
4. 請補充抗沖蝕指標之變異性分析。	遵照辦理。
5. 本報告應以能完成本土型之抗沖蝕公式為目標，若無法完成時，未來尚待辦理之工作項目及內容，應於期末報告書內提較具體之建議。	遵照辦理。
6. 報告內圖表之用詞用語與文敘需一致，並力求嚴謹。	遵照辦理。
7. 本研究涉及河川與水資源領域，於期末報告審查時，請邀本所河川課、水源課派員參與。	遵照辦理。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(1/12)

壹、開會時間：民國 98 年 11 月 16 日上午 9 時 30 分

貳、開會地點：水利規劃試驗所舊正辦公區大地課會議室

參、主持人：廖副所長培明

記錄：蔡宗翰

陳委員義平	
審查意見	意見回應
<p>1. 本計畫選定台灣西部八座攔河堰調查分析評估其下游岩盤沖刷之機制，歸納簡化為三類沖刷模型：1.塊體抽離型(義興壩)，2.均勻下切型(龍泉圳、觸口、甲仙等三座攔河堰)，3.槽溝下切型(後村堰、石岡壩、集集堰)，並針對石岡壩及集集攔河堰，下游岩盤做鑽探，了解其岩盤控制，並以數模(CCH2D)了解攔河堰下游水流沖刷特性，並提出下游岩盤沖刷之穩定策略，成果豐碩。</p>	<p>感謝委員指導與肯定。</p>
<p>2. 本研究採用國外二個模式 Annandale (2006)及 Bollaert (2002) 做岩盤沖刷深度評估；以集集攔河堰及石岡壩下游岩盤沖刷比較，建議以 Annandale(2006)沖刷深度評估方式做為基礎，並期望可以利用流功的概念分析攔河堰末端岩盤之穩定，惟因其參數複雜，未能在此階段提出合適本土之經驗公式，尚待進一步研究。</p>	<p>結論與建議內已就本計畫的成果，提出後續的研究方向之建議。</p>
<p>3. 以往規劃攔河堰，僅考慮堰址之地質條件及取水功能。未來規劃應考慮堰後下游岩盤之沖刷危及堰壩之安全，本研究提出未來攔河堰設置選址及設計考量策略，除堰址之地形地質條件，更重要應考慮堰壩型式及排砂消能設施，另對於目前石岡壩及集集攔河堰下游岩盤抗沖刷穩定策略，可提供管理單位對下游整治之參考。</p>	<p>本計畫所探討的攔河堰岩盤沖刷穩定策略主要分為消能、減能及保護河床幾個方向，其減緩與控制沖刷的概念應可供管理單位之參考。</p>

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(2/12)

徐委員世定	
審查意見	意見回應
1. 結論請針對本計畫成果及預期成果論述。	已修改於結論與建議 p. XXXII 頁。
2. 由附錄四 Annandale 評估方法，以水庫溢洪道下游沖刷為主，並沒有考量河床載顆粒沖刷之因素，如何修正、說明，使適合台灣的攔河堰下游沖刷須進一步探討。	根據現場調查結果，目前攔河堰下游端皆為岩盤出露，不適合以 D_{50} 表示河床最大粒徑。基本資料表屬於文獻等基本資料蒐集的部分，破壞機制及成因之描述將統一彙整於表 5-2。建造年代已補充至表 1-1，如 p. 1-11 頁。
3. P1-13 集集攔河堰水流量小時及水流量大，則水流方向與地層傾向不同，請說明。P1-20 最後一段文敘請修正。P2-6 是否就文敘之主要位置作標示。P2-9 公式與圖 2-1 標示請修正。P2-10 中 2-12 式請修正。P2-11 圖 2-1， h_2 、 h_3 請標示清楚；公式 (3) $A=1/2(h_3+h_2)*Li/\cos \alpha$ 請修正。P3-1 文敘標示請修正。P3-3 岩性種類文敘請修正。P3-4 是否將圖 3-3 標示於圖 3-2 中。P3-5 表 3-2，SS 岩性描述與 P3-3 說明不符。	已修正於 p. 1-13、p. 1-19、p. 2-6、p. 2-11、p. 2-10、p. 3-1 頁，圖 3-3 主要岩性已標示於圖 3-6，表 3-2 已修正。
4. 如何看待表 3-3、3-5，是否由 K_h 值可以推估其沖蝕還是會繼續？可否作整體性評論。	從 K_h 評分方法僅能知道岩盤抵抗沖蝕的能力，若能加上水流流功一起比較才能推估沖蝕是否會繼續。 K_h 各項目可以提供若沖蝕行為發生，會以什麼機制開始沖刷，若要減緩沖刷速率可以從什麼地方著手才有功效。
5. P7-1 文敘標示請修正。	已修正於 p. 7-1。
6. 明確說明適合本省之沖刷評估及深度計算之方法或使用條件，是否聚焦在軟岩。	本計畫沖刷深度評估方法所探討的對象以軟岩為主，且針對其適用性以及與硬岩的差異所可能造成的影響，提出後續攔河堰下游軟岩沖刷相關研究之建議。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(3/12)

徐委員世定	
審查意見	意見回應
7. $SP > K_h$ ， K_h 是否會因沖刷坑的大小而改變，請說明。	K_h 僅僅反映了岩盤抵抗沖蝕的能力，若探討範圍內無斷層通過，則局部區域內的 K_h 不會有顯著之差異，隨著沖刷深度漸增也不會有顯著的影響。若該區域附近有斷層通過，則 K_h 則會視節理發展程度而有差異。沖刷坑的大小主要是影響水流流況，造成流功的改變。
8. 主控因素的選擇是否較主觀，是否以多項條件的組合較客觀。	主控因素之選擇是由現地 K_h 調查結果所歸納，已經包含多項控制岩盤沖刷的條件，期能達到客觀的組合。
9. 如何預估新址的可能沖刷行為及必要調查項目。	透過抗沖蝕能力指數調查，包括單壓強度、節理間距、節理狀態、岩層位態等(詳見附錄四)，可以推測若此區域開始沖刷，可能的沖蝕行為及機制。
10. 建議(一)建議頻率及範圍尺寸。	斷面或地形測量的頻率與範圍因地制宜，需視實際沖刷速率的快慢及範圍進行判斷，當沖刷速率加快時，建議量測頻率也必須隨之增加。
國立成功大學資源工程系 李教授振誥	
審查意見	意見回應
1. 本年度所提報告內容，大致合乎原提之工作項目內容，達到工作計畫成果，同時，亦提出本 2 年期總報告與結論成果。本研究可對攔河堰建置後引致下游岩盤沖刷機制與評估方法，提出合理建議，以供未來建置新攔河堰後，沖刷問題有效改善策略，相當有價值。	感謝委員指導與肯定。
2. 本案提出 Annandale 與 Bollaert，兩模式為主要深沖刷評估方法，同時，應用於多個台灣已有攔河堰提供評估，顯示有較好成果，未來應再加以長期驗證，以確信兩模式有效性，並真正落實於台灣攔河堰沖刷深度評估。	感謝委員的肯定，若後續有相關的研究及經費將會繼續致力於台灣本土沖刷深度評估模式之修正。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(4/12)

國立成功大學資源工程系 李教授振誥	
審查意見	意見回應
3. 本案提出岩盤沖刷穩定策略，主要以水流、岩盤特性與地形為問題核心，來建立穩定策略考量核心，唯此問題皆存在互制行為，且台灣氣候水文，地形與地質皆左右相當大變異性。建議對新欄河堰規劃到考量策略，除考量目前所提策略方式外，應加入氣候水文、地形與地質變異性問題策略，並配合攔河堰護工方式，加以規劃策略。	氣候水文的變異性必須仰賴長期且詳細的觀測資料，新欄河堰之規劃確實宜能考量未來數十年內可能的氣候變化，作為新欄河堰規劃之基礎。地質變異性有賴現地調查，調查岩性、節理、位態等參數，並藉由 Annandale 所提出的抗沖蝕能力指數的觀念進行定量。根據本計畫針對義興壩、石岡壩及集集堰之調查結果，不同的地形的確會造成相當顯著的流況差異，其抑止沖刷的策略性探討已於「第七章、一、」補充說明。
4. 建議增加穩定岩盤沖刷應考量因子或修改之項目，於規劃策略之內，其因子或係數為調查可量測或量化項目。	已補充於「第七章、二、」。
5. 參考文獻之作者排序，請統一。	遵照辦理。
國立中興大學土木工程系 壽教授克堅	
審查意見	意見回應
1. 報告格式及完整性請再加強，如： 1.P3-28 圖 3-25 標題字體及位置。 2.P4-27 消散耐久指數 Id，未定義，但 P4-28 表 4-9 有使用。	已修正圖表標題，已於 p.4-24 已補上 Id ₁ 的定義。
2. 單壓強度試驗結果差異性很大，如： 1. P3-33 表 3-8 與 P4-31 表 4-10 之內容差異超過 1 個 order 請再檢查正確性，並檢討或討論之。 2. P4-31 表 4-10 中 S-1 層狀砂岩之 q_u 及 E_{50} 較其他試體低很多，請討論其原因。 3. 鑽心試體之特性與取樣”深度”關係大，建議特別注意。	1. 表 3-8 為現地史密特錘試驗結果，現地史密特錘多施作於含水量較低之岩石。而表 4-10 的單壓試驗採用濕試體作試驗，因此強度會低於史密特錘結果。 2. 原表 4-10 S-1 孔層狀砂岩因較接近地表，受斷層擾動效應較大，造成內部裂隙發達且層面膠結不良且單壓試體呈現沿著層面破壞，所以強度特別低。 3. 感謝委員提醒，已於「第四章、五、(二)」進行探討

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(5/12)

國立中興大學土木工程系 壽教授克堅	
審查意見	意見回應
3. 沖刷機制分類為三種(塊體抽離、均勻下切、槽溝下切)是否已完整，是否可能有複合型模式？	實際上三種沖刷機制並非獨立事件，例如以塊體抽離為主的義興壩，一定也會伴隨著少許的磨蝕，槽溝下切為主的石岡壩，也會有塊體抽離的現象。本計畫主要闡明各攔河堰下游「主控」沖刷機制，以提供後續沖刷深度分析或穩定策略之探討。
4. 沖刷之評估方式結論中提及”部份可用”，但未能具體提出未來如何應用或改良。	已於「第陸章、六」進行探討。
台灣世曦工程顧問股份有限公司 張資深協理順忠	
審查意見	意見回應
1. 本期末報告對沖蝕特性補充調查內容詳實。尤以石岡壩收集彙整 66 年建壩完成至 98 年之航空照片進行探討沖刷之演進結果清晰完整。對沖刷穩定策略建議中肯。	感謝委員指導與肯定。
2. Annandale 抗沖蝕指數 K_h ，對國內攔河堰沖刷機制之適用性是否建議採用(於報告前頁之結論與建議)(建議如簡報第 70 頁之結論)。	已修正結論與建議。
3. 報告所附照片多處未註明日期，仍請改進以利完整性。	凡內文中有提及沖刷現象或歷程之照片，皆已補上日期。
4. P4-28 錯別字請修正。	已修正。
經濟部水利署水利規劃試驗所 廖副所長培明	
審查意見	意見回應
1. 第六章既有攔河堰非僅針對石岡壩，其他壩堰請一併考量。	已於「第柒章、一」文敘進行修正。
2. 摘要內勿分兩年度分開撰寫，以整體性工作範圍、項目及內容呈現即可，另計畫工作執行流程圖請一併修改。	感謝委員建議，已修正。
3. 摘要第三點，「本年度延續第一年度…」，請修正刪除。	感謝委員建議，已修正。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(6/12)

經濟部水利署水利規劃試驗所 廖副所長培明	
審查意見	意見回應
4. 摘要第七點，「第一年度…」，請修正為「本年度」。	感謝委員建議，已修正。
5. 摘要第八點，「本工作圖藉由本計畫文獻補充蒐集…」，請修正為「本工作擬藉由本計畫文獻蒐集…」。	感謝委員建議，已修正。
6. 結論與建議，請依照簡報內容之小結語結論再酌修後重新撰寫。	感謝委員建議，已修正。
7. 結論與建議，P1-3 請修正末段之排版內容。	感謝委員建議，已修正。
8. 結論與建議，請補充研究本土型下游攔河堰抗沖刷能公式未來之項目及工作內容。	感謝委員建議，已補充於「結論與建議」。
9. 第一章 P1-3，工作範圍內請增加本計畫調查之壩堰的選定原則。	本工作團隊對台灣西部許多攔河堰的現地勘查，先進行初步的分類，選取原則盡量包含常見的沖刷類型，區域則盡量涵蓋從北到南的西部主要河川。
10. 第二章 P2-1 及 P2-3，請修正「1.2.3.4.」之編碼；第五章 P5-1 之「3.」亦同；第六章 P6-1 之「3.4.」亦同。	感謝委員建議，已修正。
11. 第二章 P2-5、P2-17、P2-104 空白處請利用並重新調整格式。	感謝委員建議，已修正。
12. 第二章 P2-135 攔河堰相關調查研究資料，本項應置於第二章文獻回顧為宜，請修正。	感謝委員建議，已修正。
13. 第三章 P3-1，請分集集攔河堰與石岡壩兩章節陳述。	感謝委員建議，已修正。
14. 第三章 P3-11、P3-12、P3-13，「Q20」→下標「Q ₂₀ 」。	感謝委員建議，已修正。
15. 第三章 P3-14，第二「沖蝕特性調查」，此段請以彙整方式，將第二章之調查成果納入。	感謝委員建議，已修正。
16. 第六章 P6-4，「錯誤!找不到參照來源」，請修正。	感謝委員建議，已修正。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(7/12)

經濟部水利署水利規劃試驗所 王課長國樑	
審查意見	意見回應
1. 報告格式請依本所相關規定調整，另未來成果報告請補充 Abstract (英文摘要)。	已補充於 P. XXXI。
2. P1-10 第壹章第六節歷年規「畫」或研究成果請修正為歷年規「劃」或研究成果。	感謝委員建議，已修正。
3. P2-1 本計畫調查之 8 座攔河堰之選定原則為何，建請加以補充說明。	本工作團隊對台灣西部許多攔河堰的現地勘查，先進行初步的分類，選取原則盡量包含常見的沖刷類型，區域則盡量涵蓋從北到南的西部主要河川。
4. P3-37 圖 3-33 龍泉圳露頭照片請勿分頁，請修正。	感謝委員建議，已修正。
5. P3-49 表 3-13 集集攔河堰岩盤沖刷特性補充調查表及 P.3-52 圖 3-49 觸口堰現地岩性露頭照片及表 3-14 觸口攔河堰地質分層與描述亦發生切頁，亦建請修妥。	感謝委員建議，已修正。
6. P4-1 石岡壩下游水力特性分析中針對利用一維水理模式及二維水理模式模擬的關聯性請加以說明；另二維水理模式採用 CCHE2D 的選定理由為何？為何不採用常用之 SOBEK 或 FLOW2D 模式？	石岡壩下游水力特性分析中同時採用 HEC-RAS 一維水理模式及 CCHE2D 二維水理模式進行模擬，目的為利用 HEC-RAS 一維模式大範圍模擬探討整體河段水力特性，了解研究區域上下游大範圍之水力特性；模擬結果同時可作為 CCHE2D 二維模式下游邊界設定數值，彌補二維模式於小範圍模擬時缺乏實測水位資料作為下游邊界數值設定之困難。CCHE2D 模式為美國國家計算水科學及工程中心所研發，經嚴謹之檢定與驗證後，應用至美國及其他國家甚多河川海岸問題上，成效顯著。CCHE2D 引進後亦應用於濁水溪集集堰上下游區段模擬，成效良好，其餘相關模式說明於附錄中詳述。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(8/12)

經濟部水利署水利規劃試驗所 王課長國樑	
審查意見	意見回應
7. P6-1 言及之 3.沖刷坑深度…及 4.將以上參數…之序號應分為 1.及 2.，請修正。	感謝委員建議，已修正。
8. P7-1 言及之 3.既有攔河堰沖刷…及 4.未來攔河堰設置…之序號應分為 1.及 2.，請修正。	感謝委員建議，已修正。
9. P7-12 本兩年度計畫已調查台灣 8 座攔河堰，並建立相關的沖刷機置及分析模式，相關的資料是否足具代表性？未來是否應更進一步廣泛性的調查並分析，應做未來本計畫可能延伸的具體建議工作或項目較完整。	已於「第陸章、六」、「第陸章、七」進行探討。
10. P 參-1 參考文獻未來儘可能補充相關電子書，並呈現參考文獻引用於本文中何處較妥適。	若有無版權限制的參考資料會補充，有直接引用到的文獻都有於文章中直接標明。
經濟部水利署 楊工程司國賢	
審查意見	意見回應
1. 在 P7-1 既有攔河堰沖刷穩定策略僅對於石岡壩作相關性探討，其他攔河堰(如集集堰)未見於文章中，建議補充說明。	已於「第柒章、一」文敘進行修正。
2. P7-4” …證明副壩…；但算是有貢獻”，副壩是否有何貢獻，建議補充說明。	此部分文敘不佳，第柒章已重新修正敘述方式。
3. 石岡壩沖刷穩定策略探討，所提出的方案僅見諸於文字，是否有相應的數據，以佐證其敘述的正確性，且本策略的研訂受到各長官及相關單位的注目，建議再具體陳述評析。	本計畫的沖刷穩定策略，僅限於概念性的探討。配合現地調查、文獻蒐集、航照判釋等資料，對各攔河堰主要的沖刷機制提出建議之沖刷穩定策略，供施工管理單位之參考。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(9/12)

經濟部水利署 楊工程司國賢	
審查意見	意見回應
4. 未來攔河堰設置選址及設計考量應具有實用性，若要為工程師所用，建議設計相關檢核表(如地質、設計流程)，以利相關工程師思考應用。	針對新設攔河堰的沖刷穩定策略已於「第柒章、二」說明。如同委員所說，未來攔河堰之規劃應當思考攔河堰對河道水流、地形、岩性可能的影響，進行水理計算(如圖 4-1 流程圖)及抗沖蝕能力指數調查(見附錄四)做一通盤考量，恐無法利用單一檢核表進行選址及設計。
5. 本計畫總報告請增加文獻回顧。	感謝委員建議，已修正。
6. 本計畫之結論是否能明確建議未來設置攔河堰應避免在軟弱岩層，若一定要設置會遇到的問題，及其補救的措施，建議於結論中補述。	若沖刷現象已開始，可考慮之穩定策略已補充於結論中。
經濟部水利署水利規劃試驗所河川課 尹研究員伯亮(書面意見)	
審查意見	意見回應
1. P4-4~7 二維水力特性分析採用 CCHE2D，模式相關參數建議能增加說明(或表列)；模式之檢定，模擬石岡壩斷面水位高程與民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討」分析各重現其流量下之水位高程之差異，是否合宜？建議應依石岡壩實測水位與放流量資料為基準。	二維水力特性分析採用 CCHE2D 模式模擬，模擬方式採用定量流模擬方式進行分析，分析特定重現期距流量下石岡壩上下游流況，參數設定中僅曼寧 n 值需檢定，該數值引用及檢定流程於報告中詳述。民國 94 年「大甲溪治理規劃檢討」與民國 98 年「大甲溪流域整體治理規劃檢討」分析百年重現期距流量於石岡壩壩址水位，分別為 275.95m 及 276.06m，數值相近，但民國 98 年「大甲溪流域整體治理規劃檢討」僅包含單一重現期距流量下水力特性分析，故採用 94 年「大甲溪治理規劃檢討」之數值，以多個重現期距流量條件下水位資料檢定 CCHE2D 模式參數值。若後續能蒐集完整實測流量及水位資料率定待資料，再與模擬結果進行比較。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(10/12)

經濟部水利署水利規劃試驗所河川課 尹研究員伯亮(書面意見)	
審查意見	意見回應
2. 表 6-10、13、15、17 之射流水柱厚(Dj) 是否有問題？表 6-12~15 中跌水距離 Q20=4.2m、Q2=4.6m 是否有問題？ P.6-28~31 表 6-13~15 被分頁切割不易閱讀，建議能改善。	數據已重新檢查並修正。
3. P6-22~23 石岡壩沖刷坑，是否僅止於「副壩中央排水道」下游沖刷範圍？文章描述因排水道束縮水流，造成單寬流量、水柱厚度、射流流功集中…；表 6-12~15 所採用上述 3 個參數，是否以中央排水道束縮水流情況下計算？	感謝委員建議，是以中央排水道束縮水流情況下進行計算，已將計算之假設狀況列於表中。
4. 本計畫兩年來，對集集攔河堰、石岡壩之岩盤抗沖蝕能力所作調查，建議以此資料嘗試能否反推，在多少流量以上會啟動現況沖刷坑繼續下切？	根據沖刷深度評估結果，在 Q ₂ 流量下之水流作用力，已經足夠讓石岡壩中央排水道下游沖刷坑開始下切。在更小的流量下，水流流況受到地形影響會有更明顯之差異，可能會轉變為射流方式之沖刷。此一議題有待後續研究，目前尚無如此詳細的地形、水位與流量資料可供深入探討。
5. P6-44~45 Annandale 係以硬岩、溢洪道案例進行迴歸，應用在軟岩、攔河堰，在計算射流的平均動態壓力及波動動態壓力的折減，現階段無法用理論直接計算，是否可用物理模型試驗推得？若攔河堰尾檻/靜水池出口之水平流速降低，是否有助於沖刷坑之穩定？靜水池之消能效率是否先應檢討？	目前垂直射流的平均動態壓力及波動動態壓力的折減理論已經成熟，經本計畫驗證也適用，但對於全面溢流時作用於岩盤表面的流功，目前仍無直接計算方式。若攔河堰尾檻/靜水池出口之水平流速降低，有助於沖刷坑之穩定。若靜水池的消能效率提高，應能有助於降低堰下游岩盤沖刷，建議相關單位更進一步研究。
6. 報告有用『攔河堰堰前』或用『攔河堰堰下游』等描述，建議一致採用『攔河堰堰下游』一詞較不易混淆。	遵照辦理。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(11/12)

經濟部水利署水利規劃試驗所河川課 尹研究員伯亮(書面意見)	
審查意見	意見回應
7. P7-1 『3.既有攔河堰沖刷穩定策略。』、『4.未來攔河堰設置選址及設計考量策略。』多餘，建議刪除。P7-2 「(一)提昇岩盤抗沖蝕能力」台灣經驗效能有限，國外是否有相關之工法？若採高壓灌漿水泥鑲補，能否提高岩盤抗沖蝕能力？	已於「第柒章、一」進行探討。
8. P7-11 人為提高尾水位，本計畫建議採用梳子壩，其與透水性固床工之利弊差異為何？	梳子壩或是透水性固床工的功用不同，梳子壩一方面提高水位，一方面容許部分水流穿過構造物直接傳遞至下游，降低因提高水位而造成下游岩盤沖刷之潛能，此概念可作為沖刷穩定策略之參考。
經濟部水利署水利規劃試驗所 蔡工程員宗翰	
審查意見	意見回應
1. P6-44 第六章 Annandale 與 Bollaert 係於不同情境下針對石岡壩、義興壩及集集堰進行模擬評估沖刷深度，最後評估結果建議以表列方式比較。	兩種評估方式的差異，已於「第陸章、五」進行探討。
2. P7-4 沖刷演進及沖刷穩定策略探討，除石岡壩外，建議將本計畫調查的壩堰(目前尚有沖刷問題者)做逐一沖刷穩定策略探討，以利其他管理單位做參考。	本計畫調查的壩壩已經依照沖刷機制先行分類，其沖刷機制與問題已於第伍章詳述。第柒章主要是希望能提供沖刷穩定策略(如降低流功、岩盤採 PGR 保護)，供管理單位參考。
3. 本計畫評估公式引用眾多參數，是否有進行檢討假設條件與現地機制是否符合?或進行修正?	關於沖刷深度評估方法之適用條件與檢討，已補充至「第陸章、六」進行探討。
4. P6-39 之 Bollaert 沖刷深度公式中部份符號建議預先定義(如 Z_b, X_b, F_{sh} ...等)。	已於 p. 6-33 說明。
5. P6-3 之 Annandale(2006)沖刷理論與附錄四重複，建議與 Bollaert(2002)岩盤沖刷理論(P6-37)一併移至附錄即可。	遵照辦理，已修改於 p. 6-4。

期末簡報暨報告書審查意見及辦理情形

(12/12)

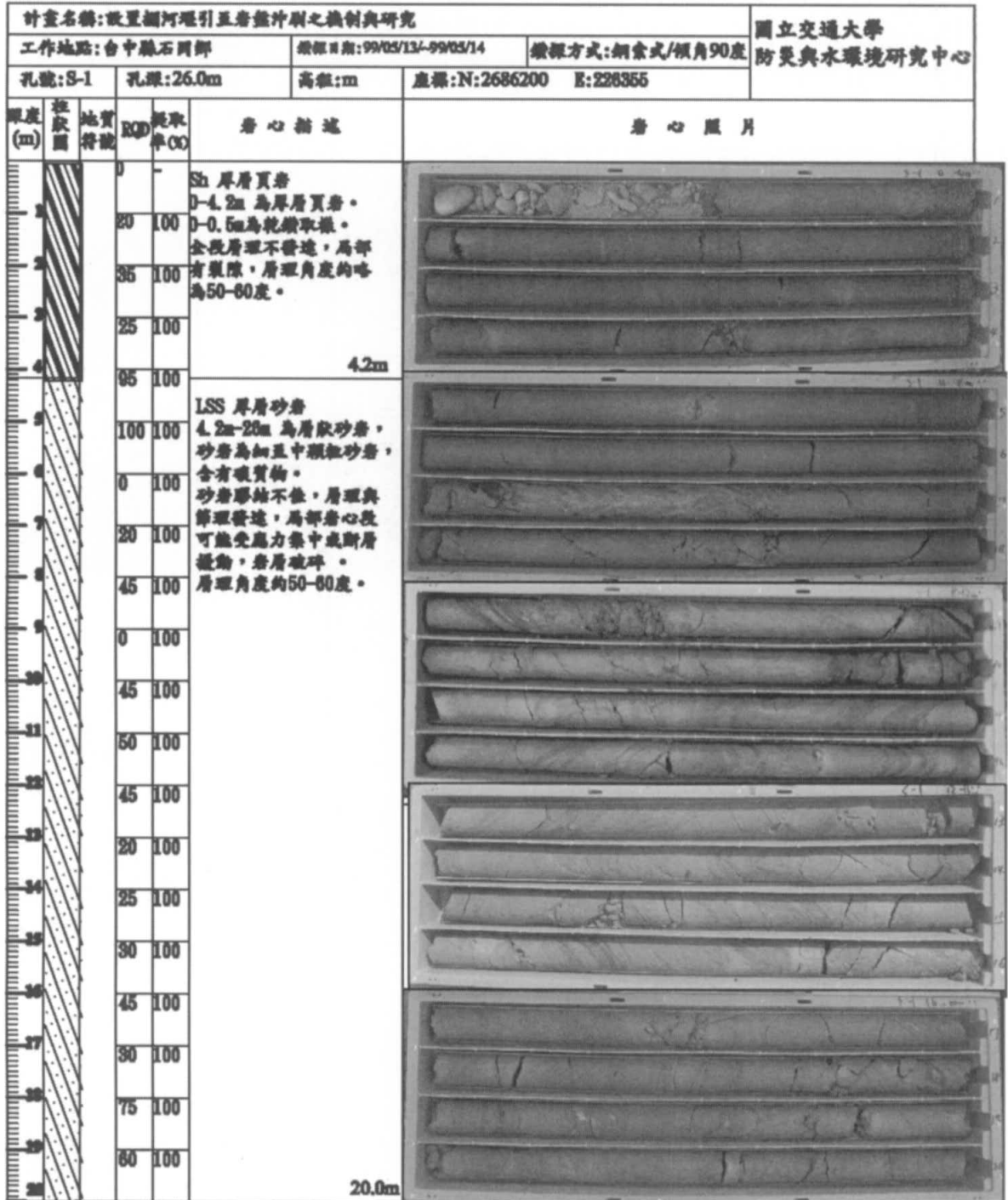
經濟部水利署水利規劃試驗所 蔡工程員宗翰	
審查意見	意見回應
6. 報告缺英文摘要 Abstract，總報告建議將第一年度計畫之集集堰鑽探柱狀圖資料納入附錄內。	遵照辦理。
主席結論	
審查意見	意見回應
1. 本次期末簡報暨報告書審查原則認可。	敬悉。
2. 請依各單位及各委員意見在合約要求的範圍內作必要補充與修正，修正稿於 11 月 30 日前送達本所，由大地課本於權責自行審核。	遵照辦理。
3. 報告書撰寫，請採用本所慣用格式。	遵照辦理。
4. 總報告書的撰寫方式不宜分年度敘述，宜將兩年度相關的調查統計分析彙整。	遵照辦理。
5. 總報告的結論宜將簡報內所描述的小結及結論重新整理，並做較具體的文述。	遵照辦理，已補充至結論與建議。
6. 有關 Annandale 及 Bollaert 二種分析模式在國內岩盤沖刷深度及評估方式，其適用性須作具體性的建議。	遵照辦理，已補充至 p.結-3。
7. 是否有可能開發本土型沖刷公式或評估模式，若可能性高則請提後續研究之方針、工作項目及內容，並列為建議的項目。	遵照辦理，已補充至結論與建議。
8. 依水理、岩性及本年度調查成果提較具體之穩定策略，非僅個案之敘述且能提供規劃者參考。	遵照辦理，第柒章撰寫方式已重新修改。

附錄二 石岡壩鑽探柱狀圖

S-1 孔鑽探柱狀圖(0-20 m)

地質鑽探柱狀圖

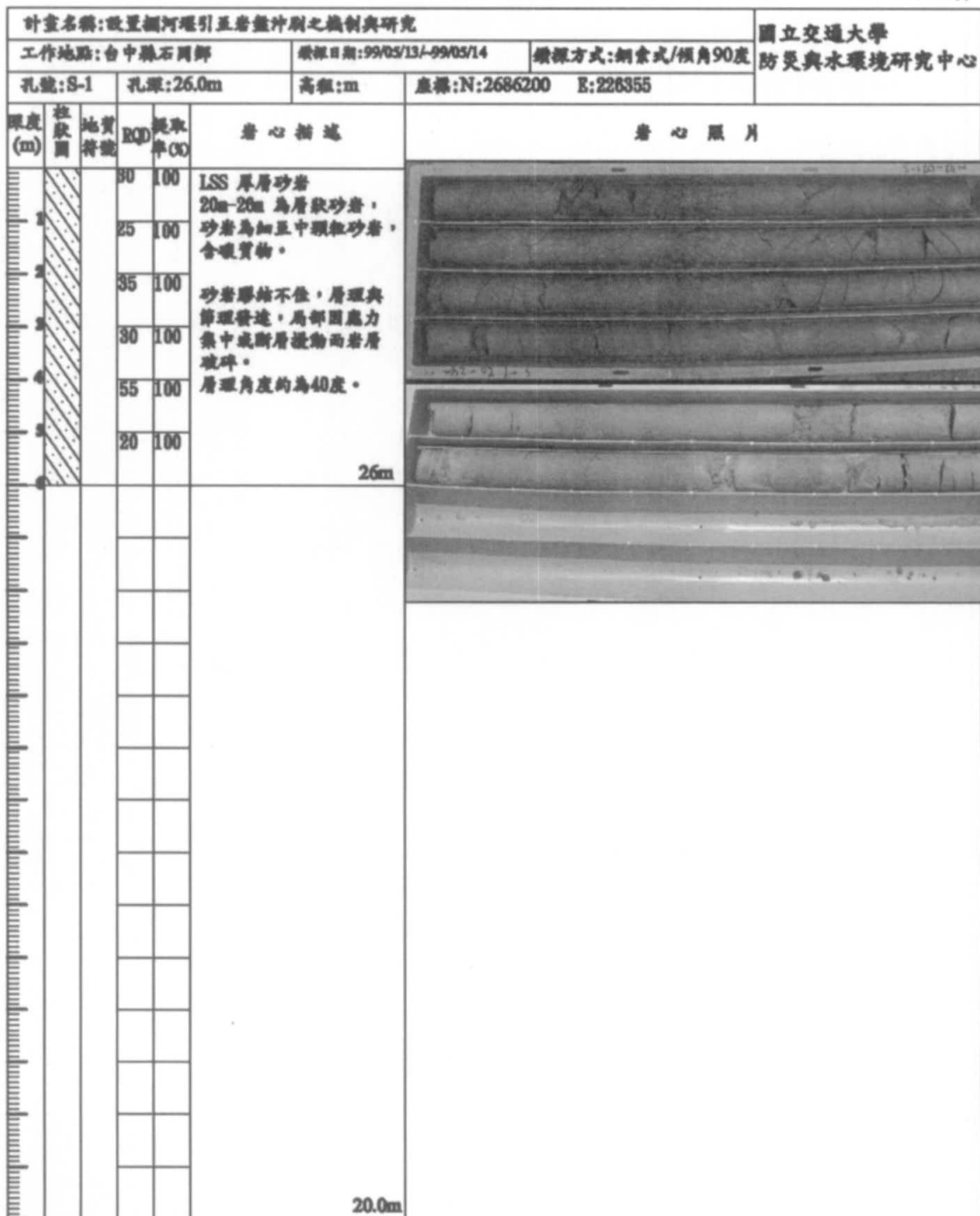
2之1頁



S-1 孔鑽探柱狀圖(20-26 m)

地質鑽探柱狀圖

2之1頁

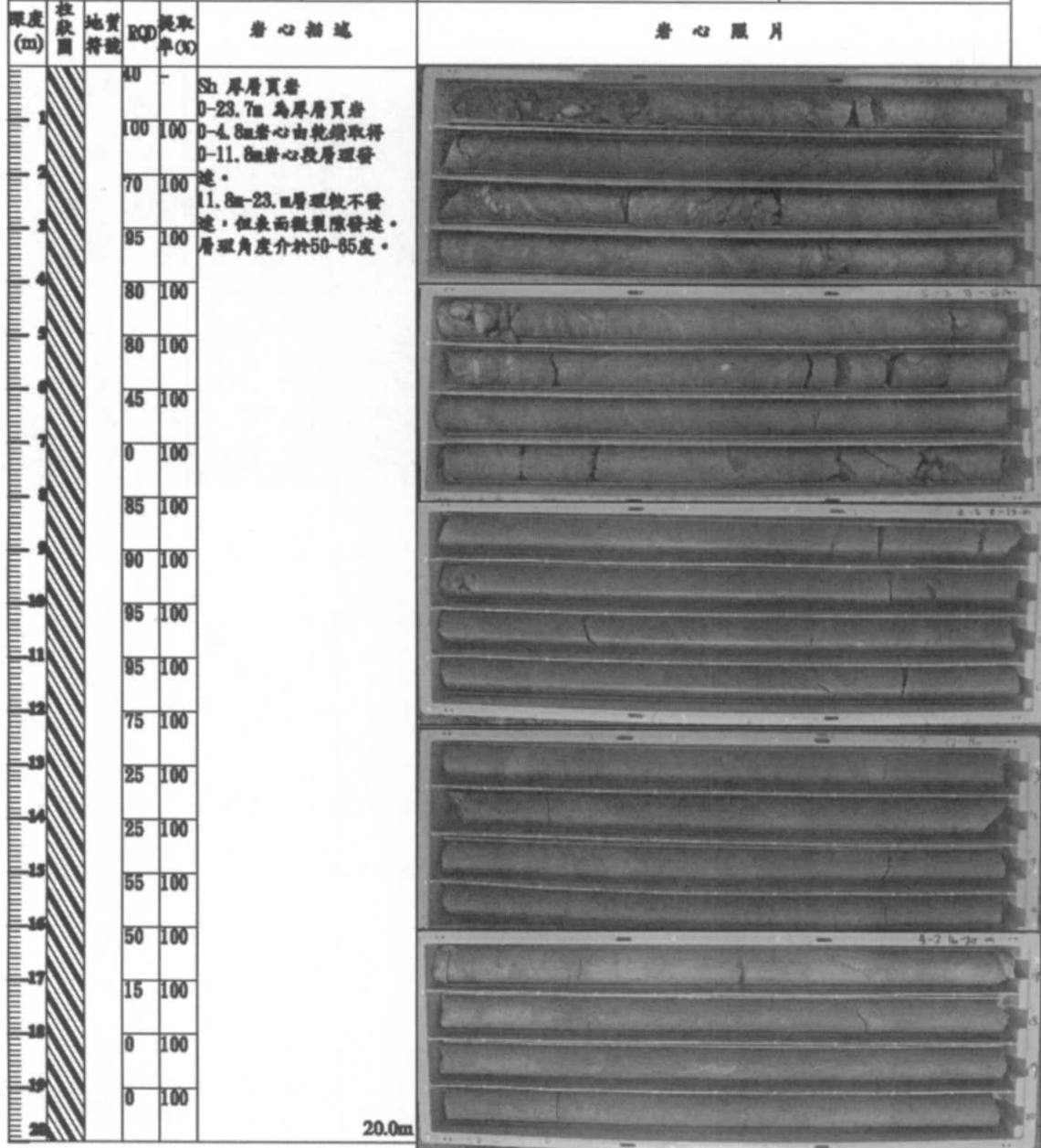


S-2 孔鑽探柱狀圖(0-20m)

地質鑽探柱狀圖

2之1頁

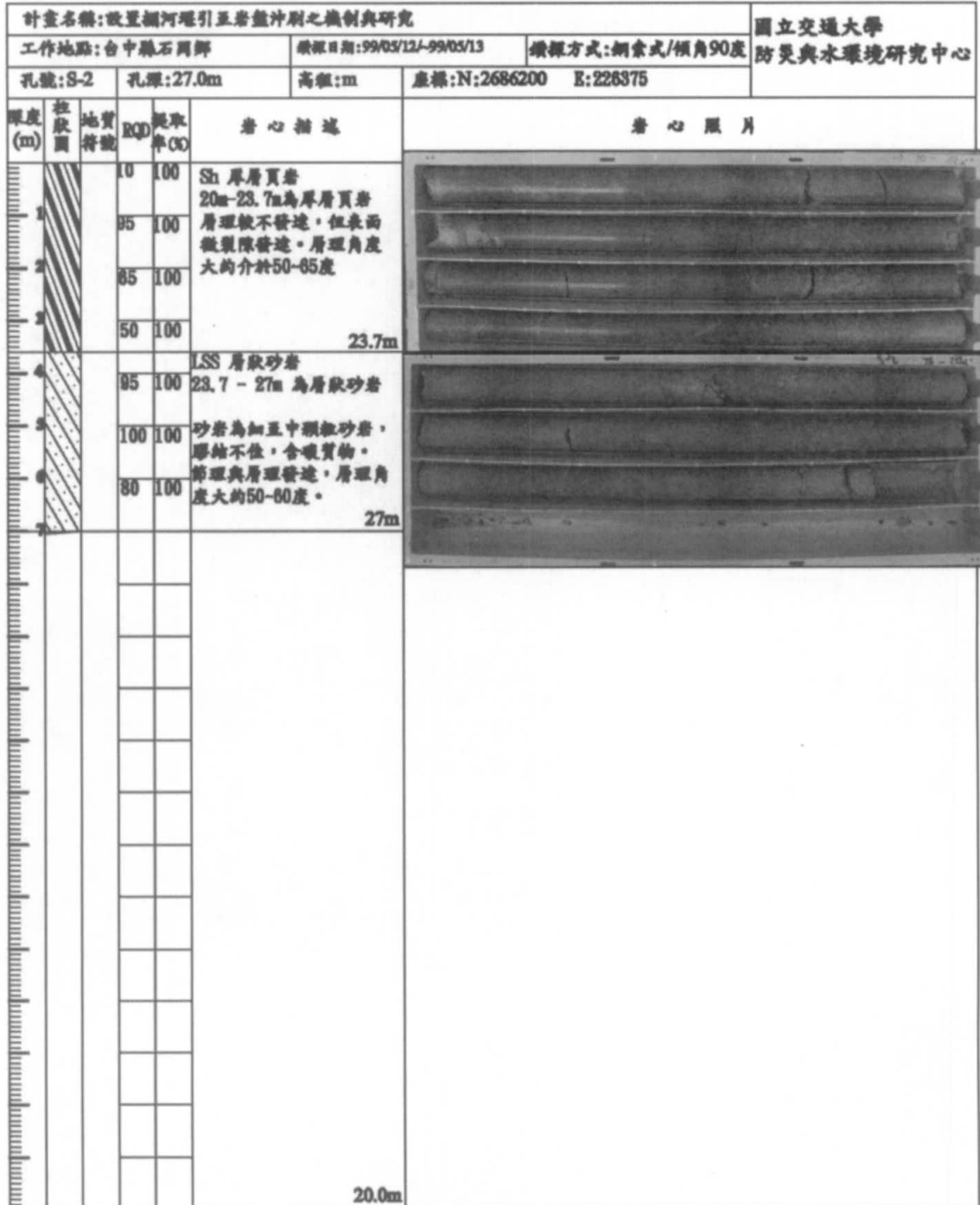
計畫名稱: 設置湖河堰引五岩盤冲刷之機制與研究			國立交通大學	
工作地點: 台中縣石岡鄉		鑽探日期: 99/05/12-99/05/13	防災與水環境研究中心	
孔號: S-2	孔深: 27.0m	高程: m	座標: N: 2686200	E: 226375



S-2 孔鑽探柱狀圖(20-27m)

地質鑽探柱狀圖

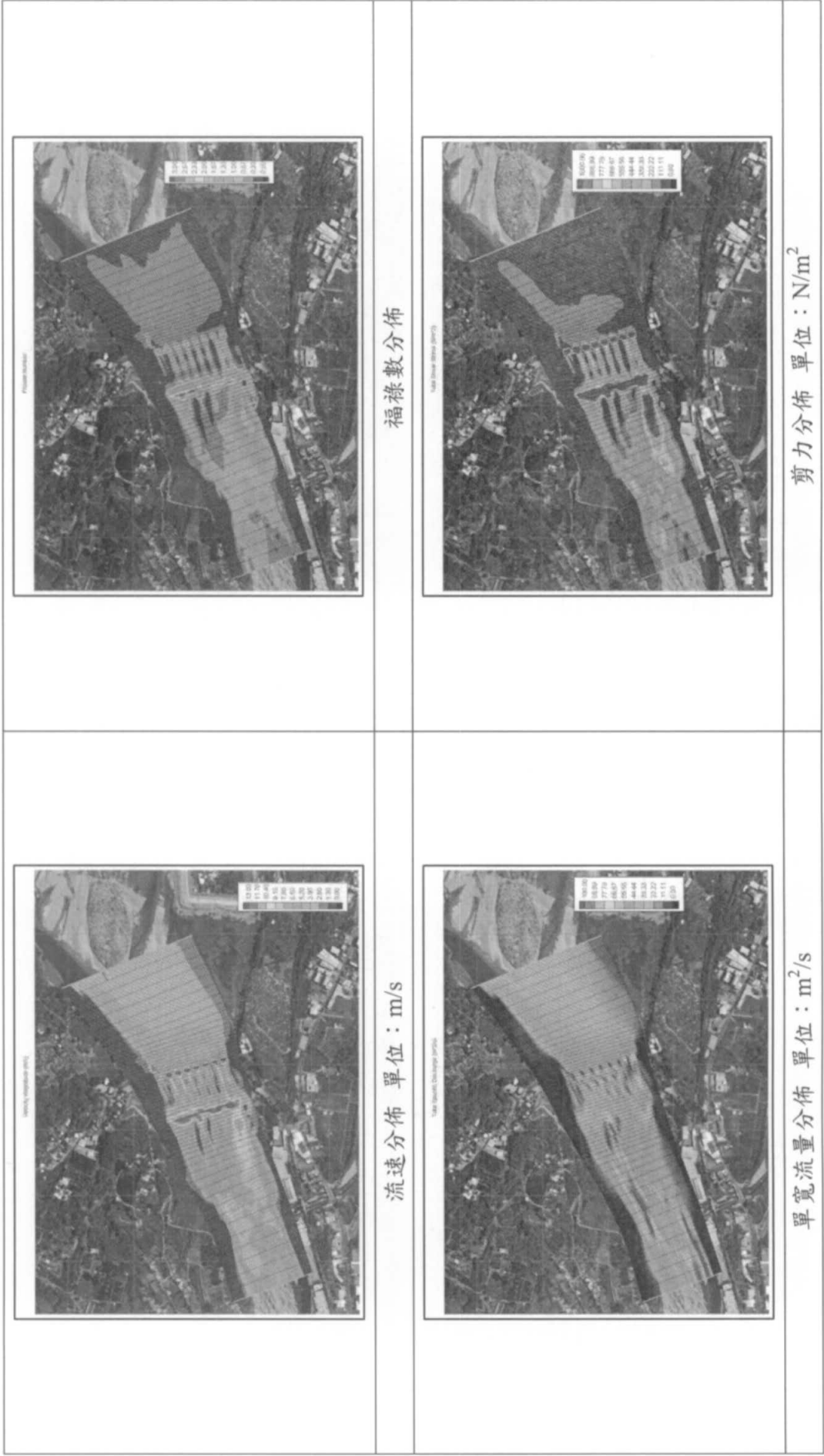
2-1頁



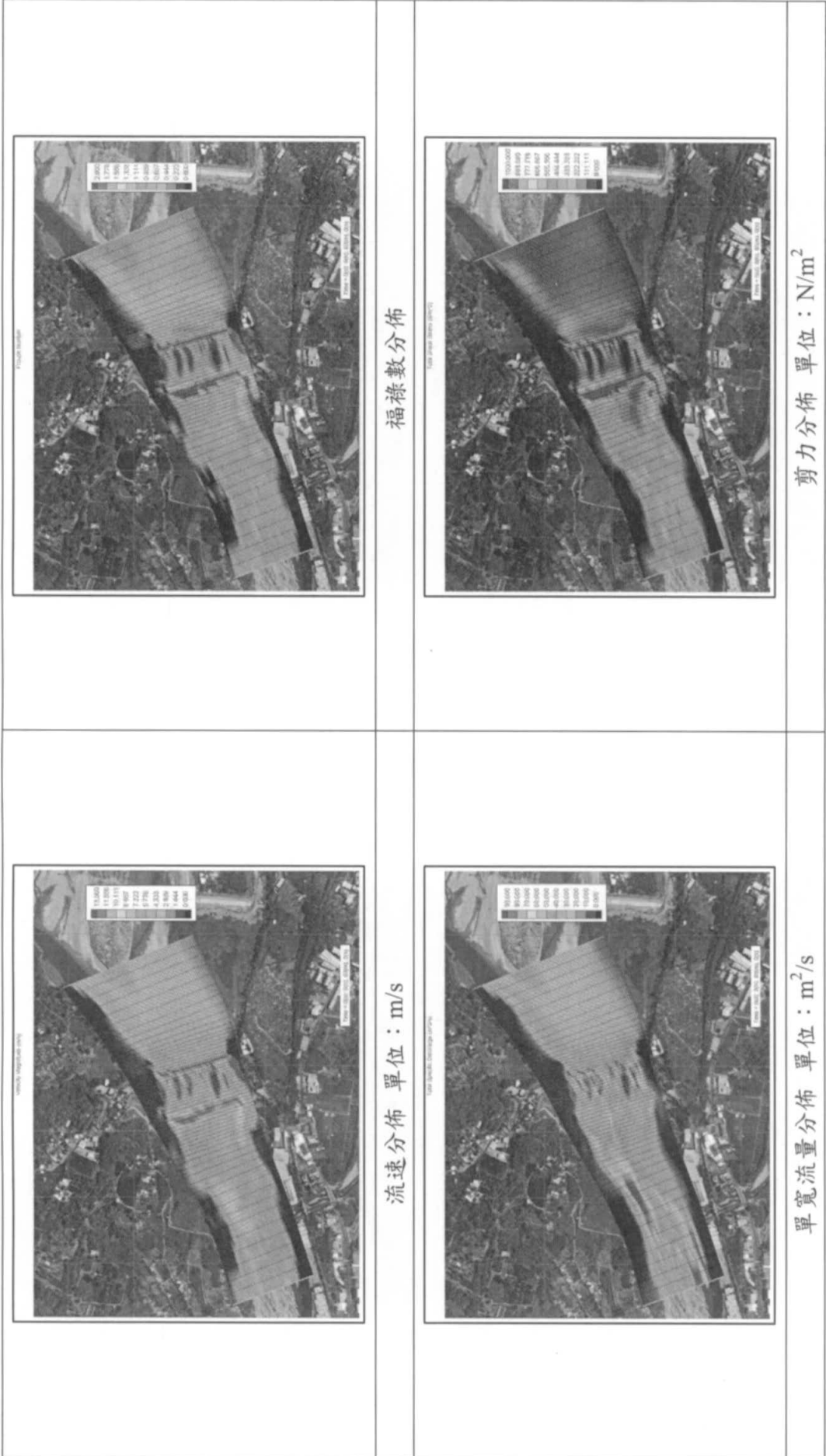
附錄三 石岡壩各重現期距洪水量 CCHE2D 模擬成果



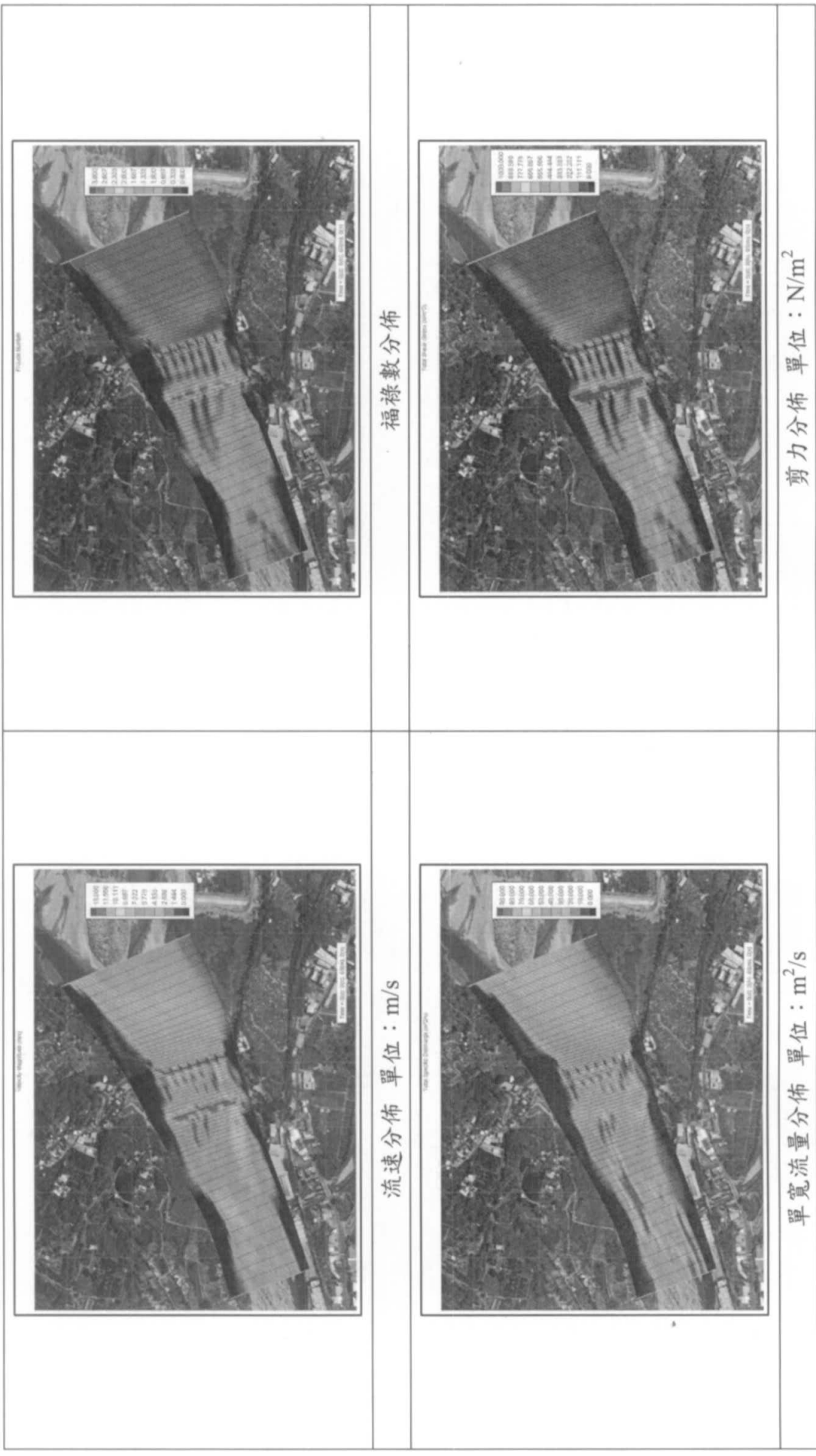
附圖 3-1 96 年地形 200 年重現期距洪水水力特性分佈圖



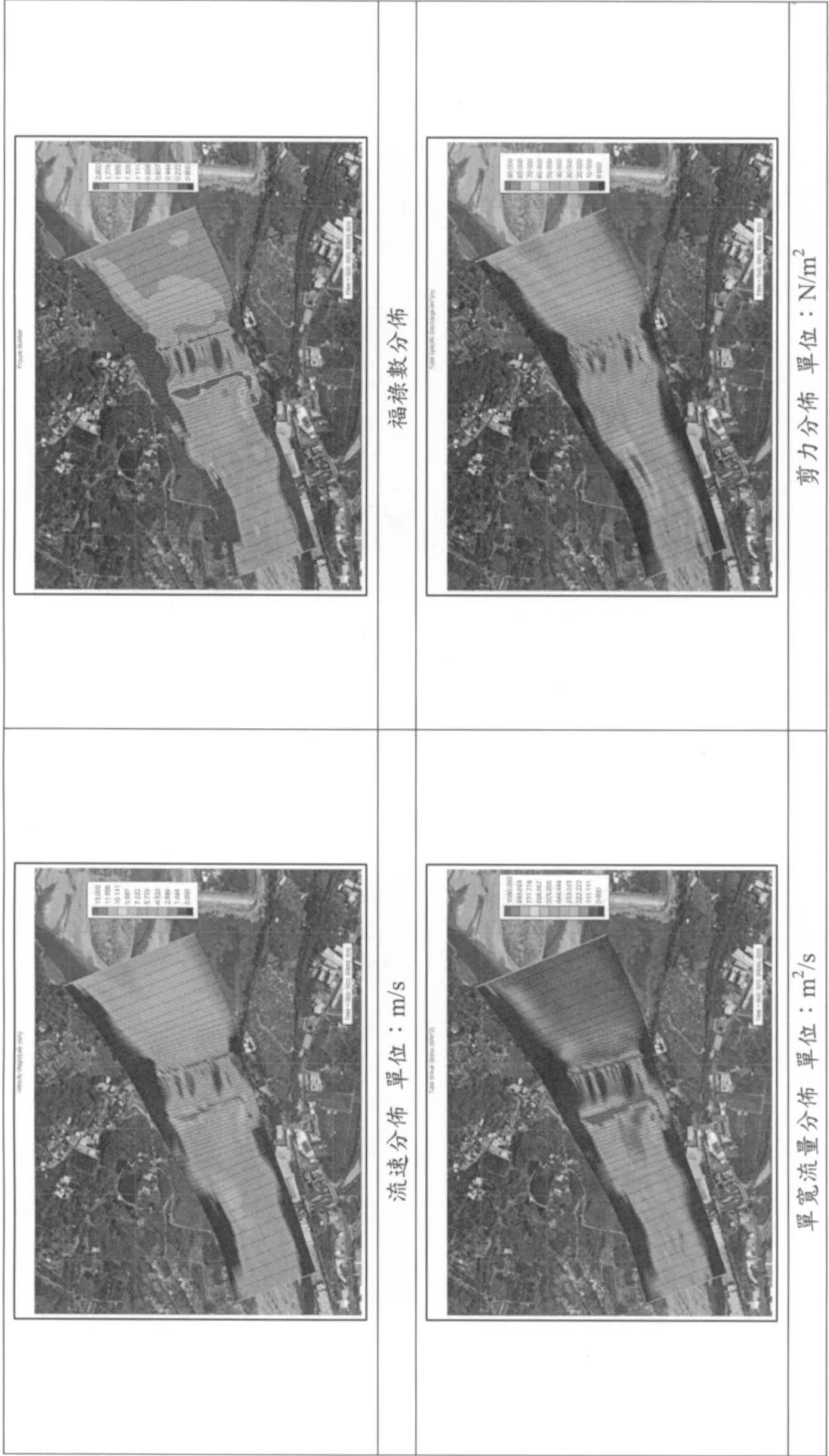
附圖 3-2 民國 98 年地形 200 年重現期距洪水水力特性分佈圖



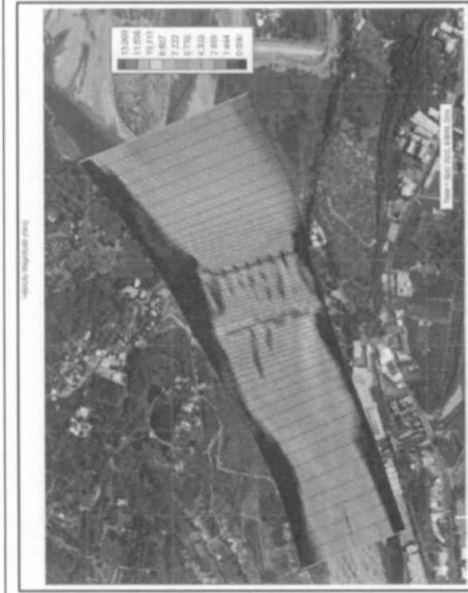
附圖 3-3 96 年地形 100 年重現期距洪水水力特性分佈圖



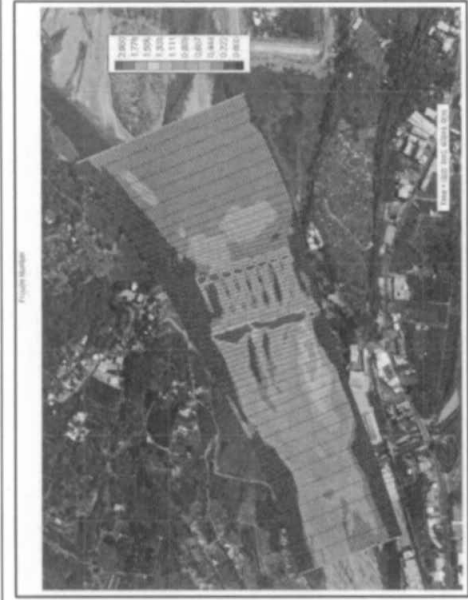
附圖 3-4 民國 98 年地形 100 年重現期距洪水水力特性分佈圖



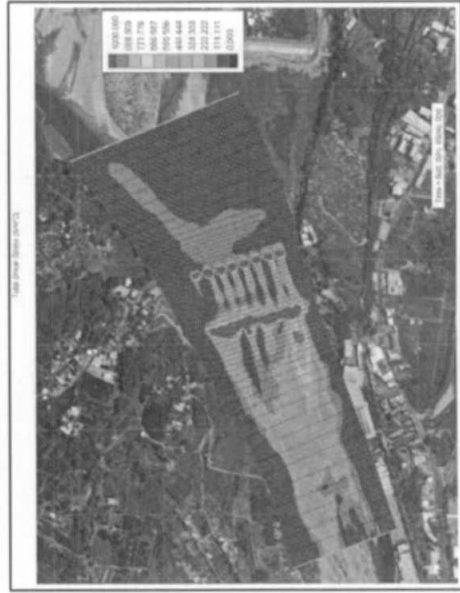
附圖 3-5 96 年地形 50 年重現期距洪水水力特性分佈圖



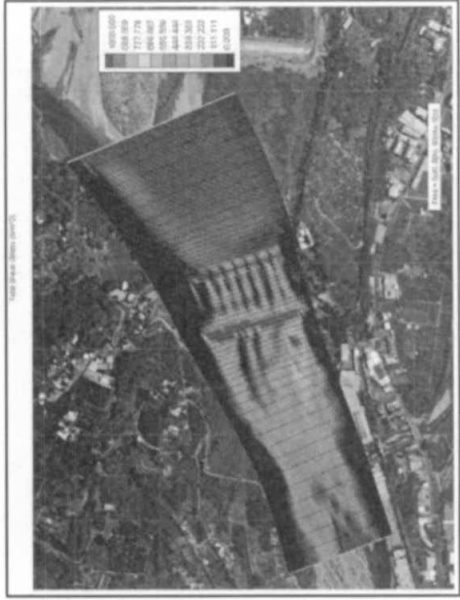
流速分佈 單位：m/s



福祿數分佈

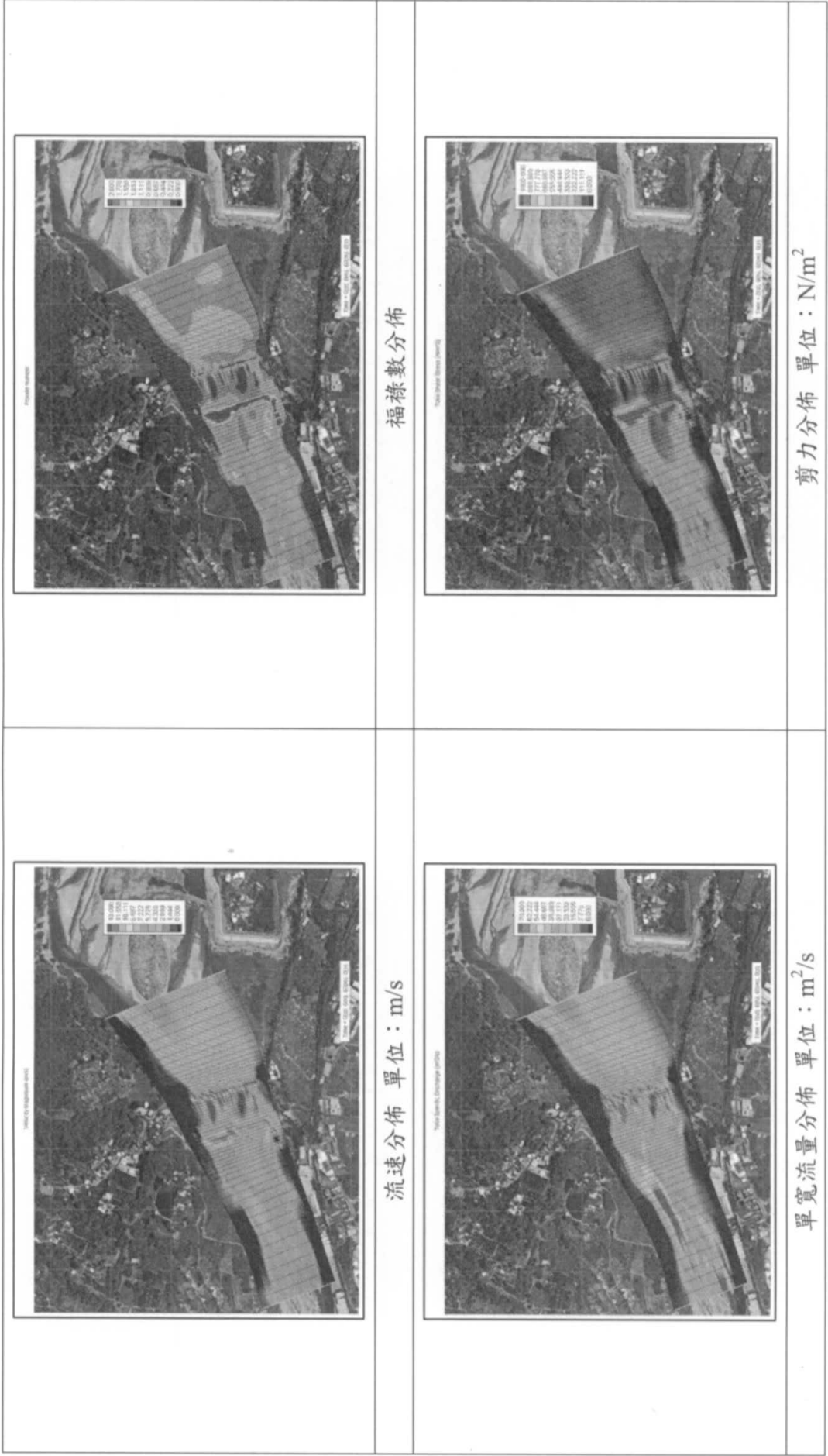


單寬流量分佈 單位：m²/s

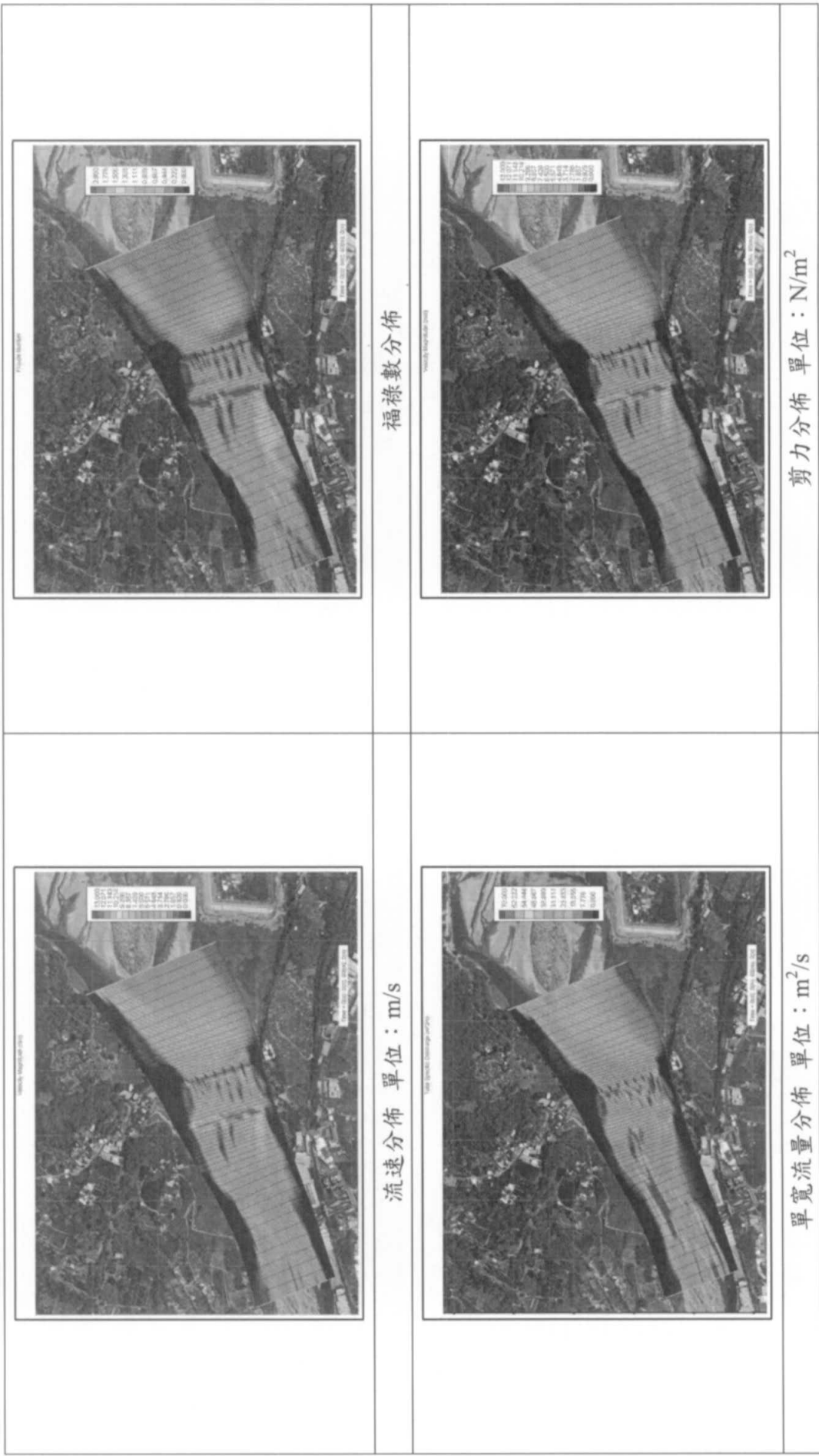


剪力分佈 單位：N/m²

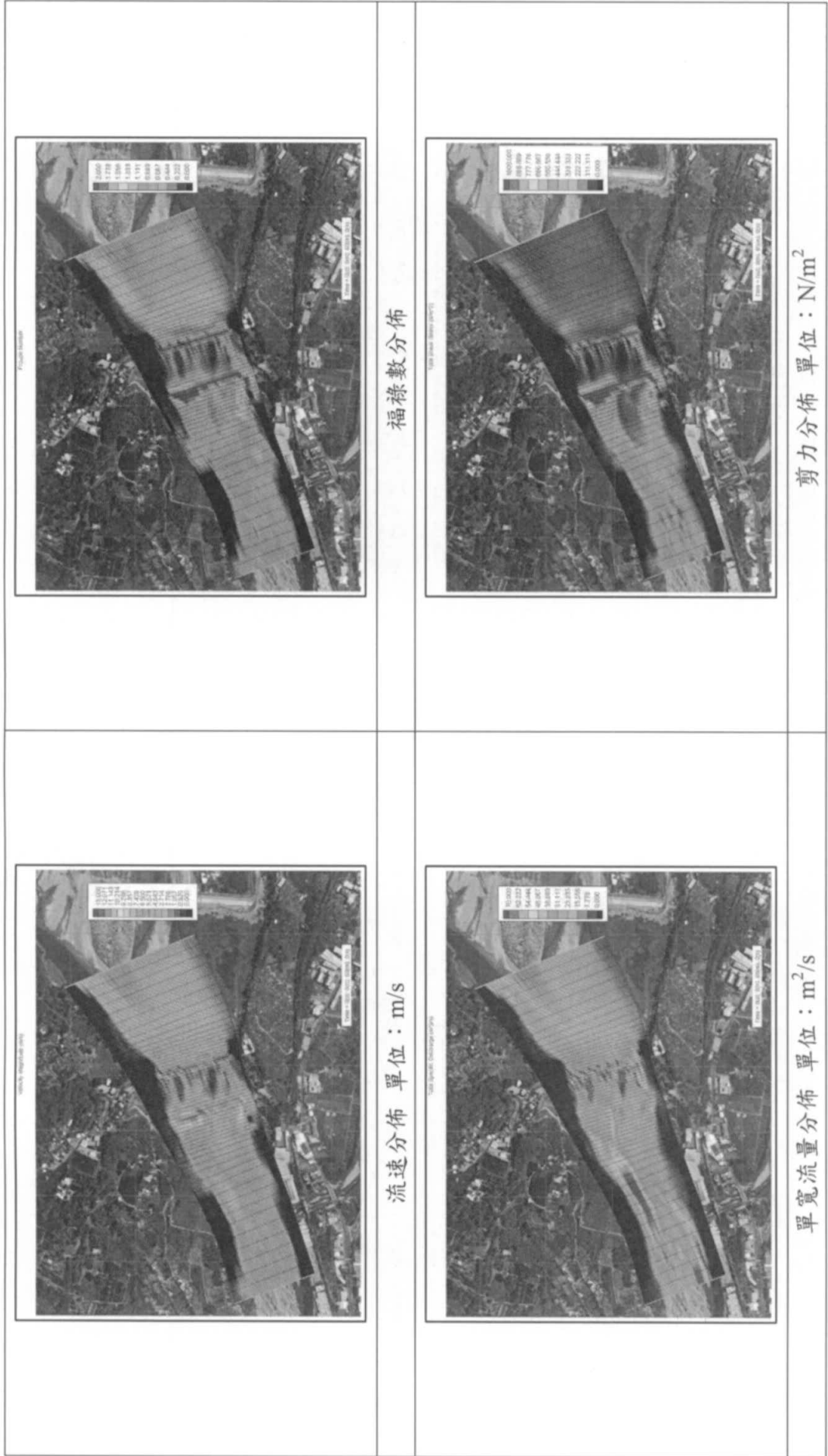
附圖 3-6 民國 98 年地形 50 年重現期距洪水水力特性分佈圖



附圖 3-7 96 年地形 25 年重現期距洪水水力特性分佈圖



附圖 3-8 民國 98 年地形 25 年重現期距洪水水力特性分佈圖



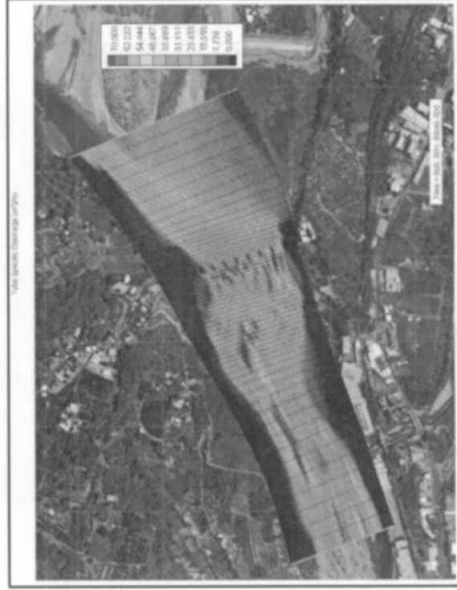
附圖 3-9 96 年地形 20 年重現期距洪水水力特性分佈圖



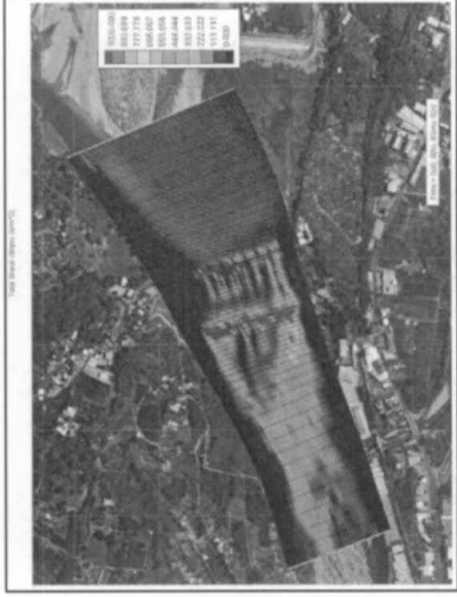
流速分佈 單位：m/s



福祿數分佈

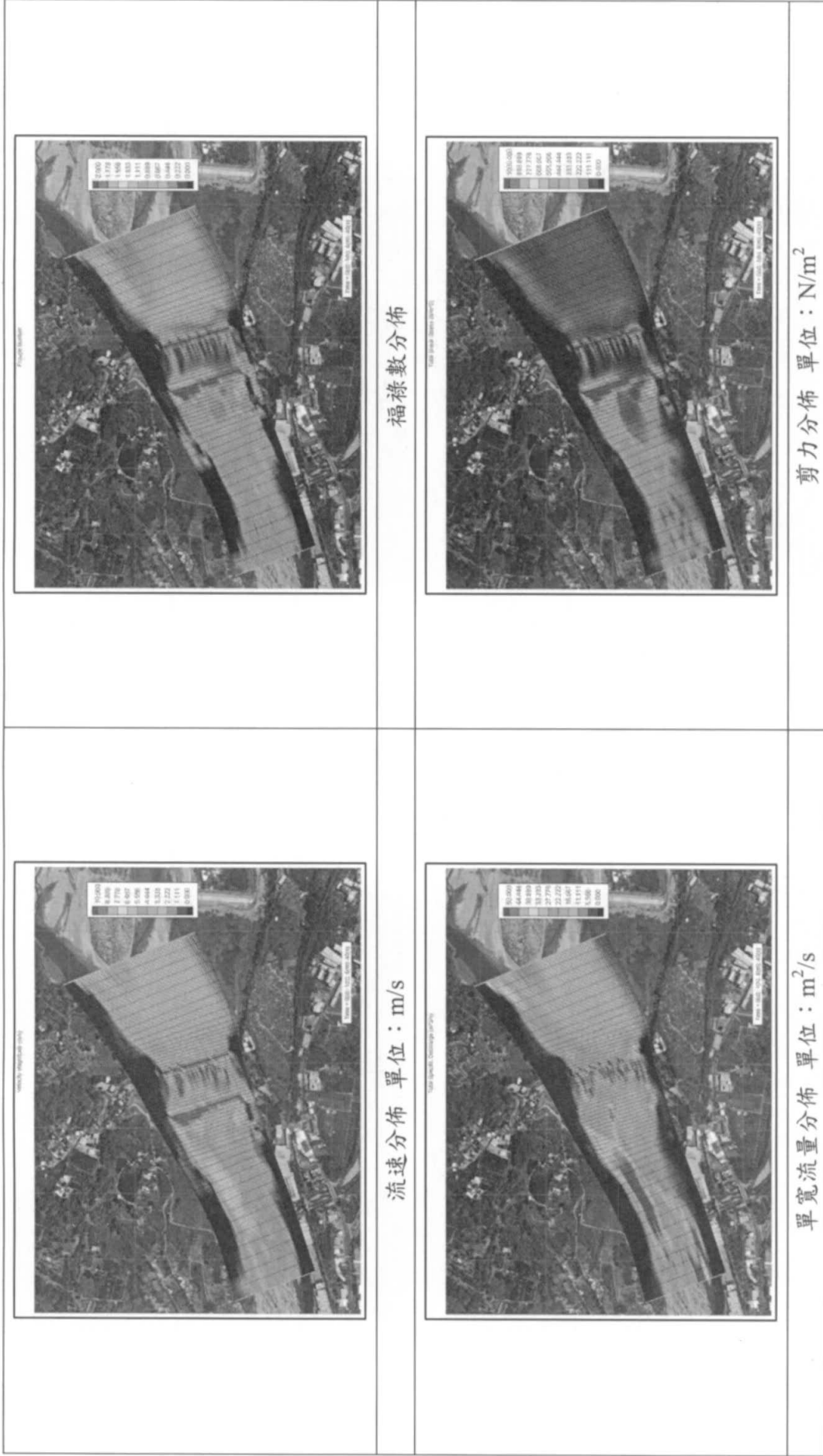


單寬流量分佈 單位：m²/s

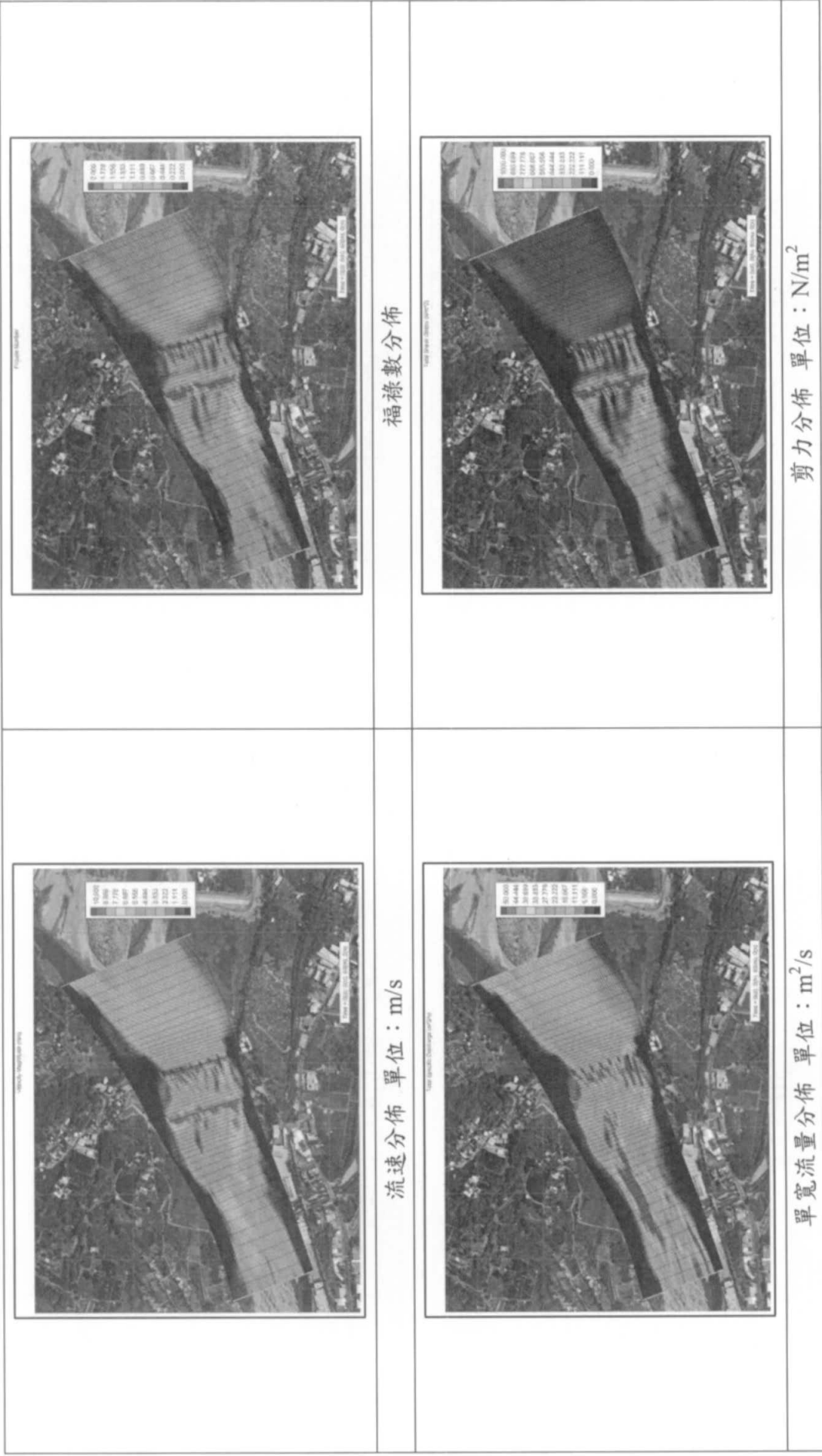


剪力分佈 單位：N/m²

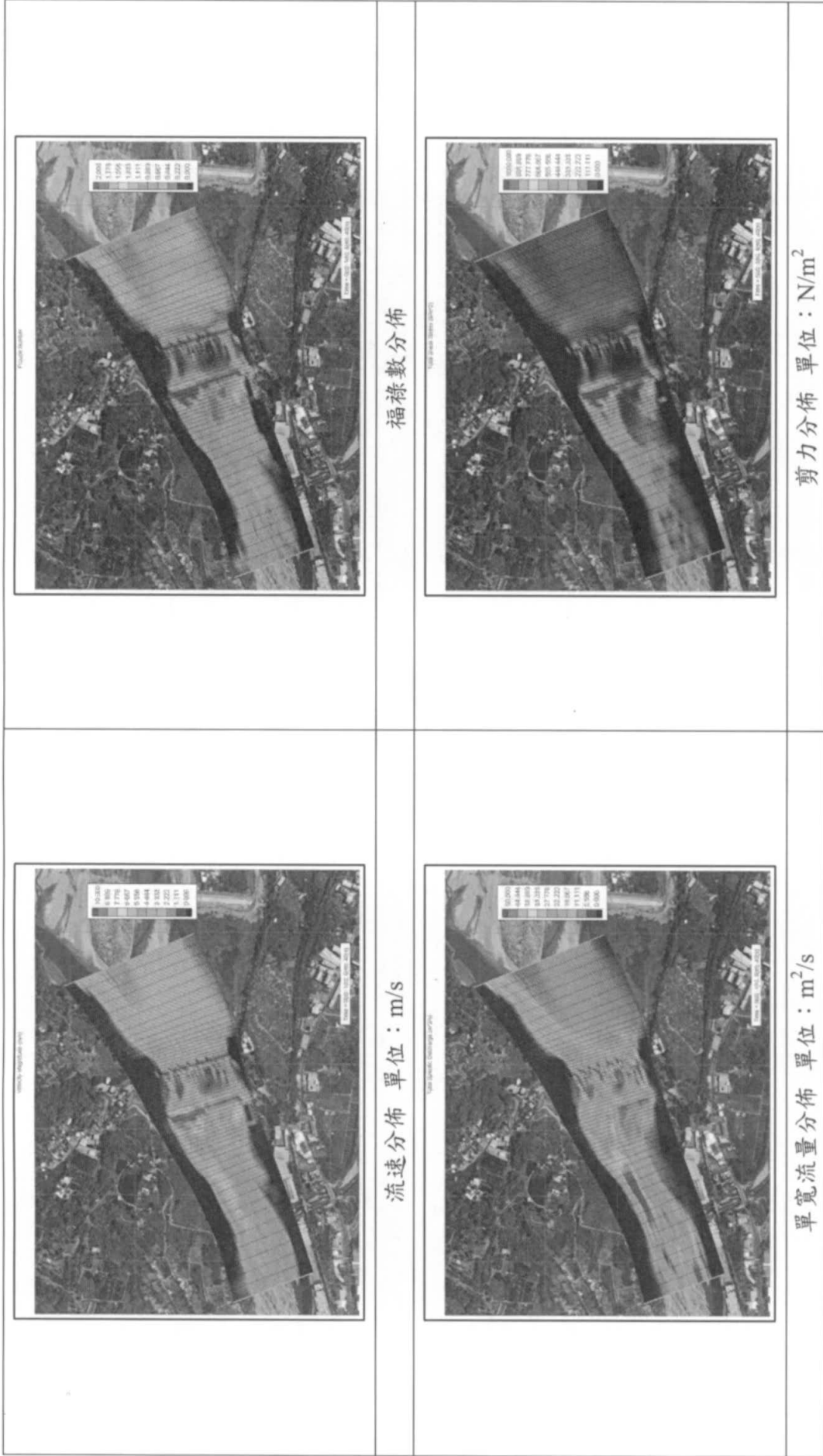
附圖 3-10 民國 98 年地形 20 年重現期距洪水水力特性分佈圖



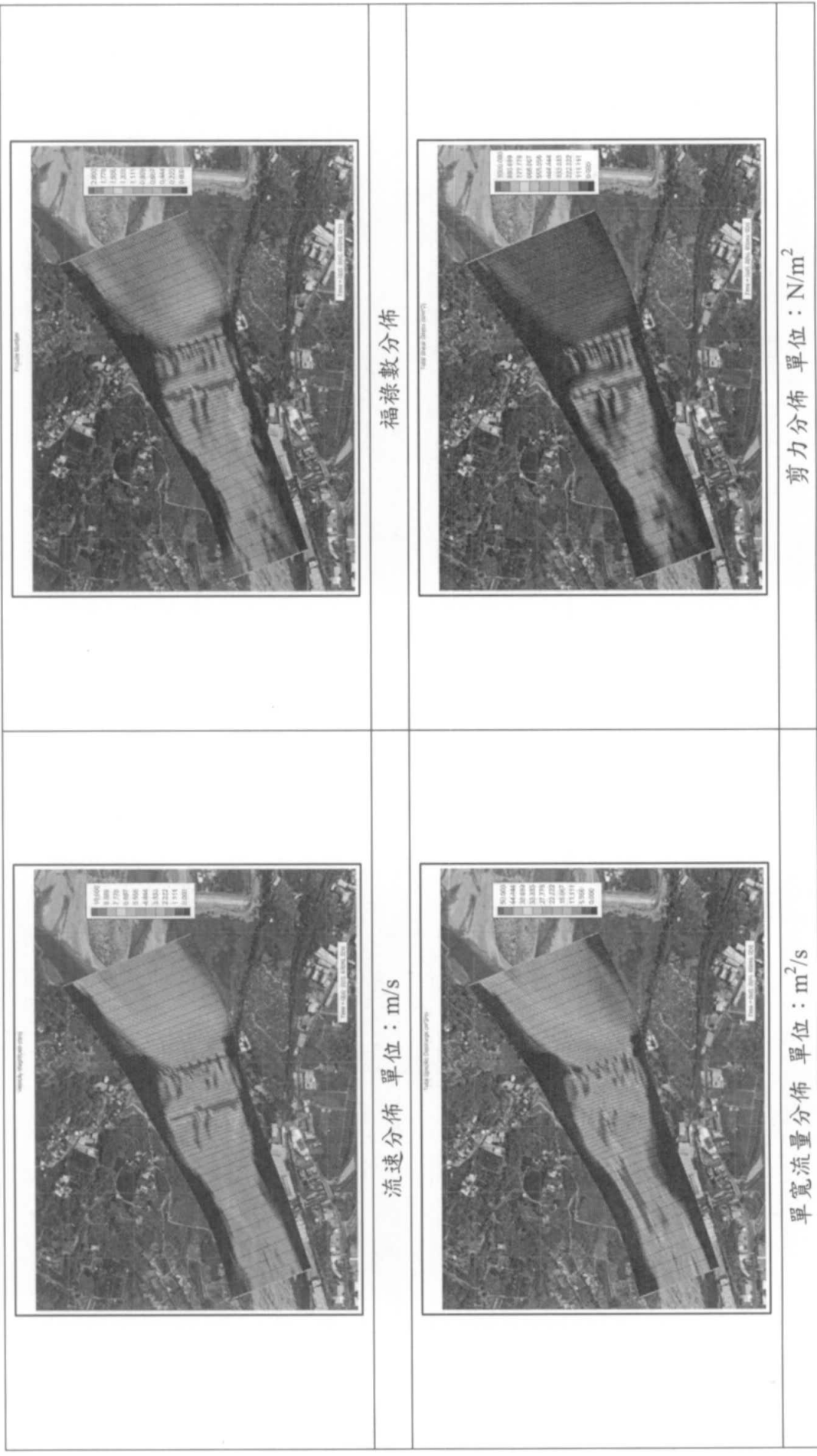
附圖 3-11 96 年地形 10 年重現期距洪水水力特性分佈圖



附圖 3-12 民國 98 年地形 10 年重現期距洪水水力特性分佈圖



附圖 3-13 96 年地形 5 年重現期距洪水水力特性分佈圖



附圖 3-14 民國 98 年地形 5 年重現期距洪水水力特性分佈圖

附錄四 Annandale(2006)
抗沖蝕能力指數評估法

Annandale 試圖建立一套仿照岩體品質評分系統之抗沖蝕指數 (erodibility index), 抗沖蝕指數($K_h = M_s K_b K_d J_s$)等於四項參數的乘積, 這四項參數分別為 M_s 材料強度、 K_b 顆粒/塊體尺寸、 K_d 弱面/或顆粒間之抗剪強度、與 J_s 地盤構造條件。各參數依不同條件給予不同之指定值, 各參數依不同條件給予不同之指定值, 由四項值之乘積得到抗沖蝕指數。

Annandale 計算了一、兩百處不同河道之抗沖蝕指數, 又依不同河道流況 (如陡降、水躍、河床坡度突然改變、均勻明渠) 依明渠流體力學理論計算各處河道之能量消耗如下式:

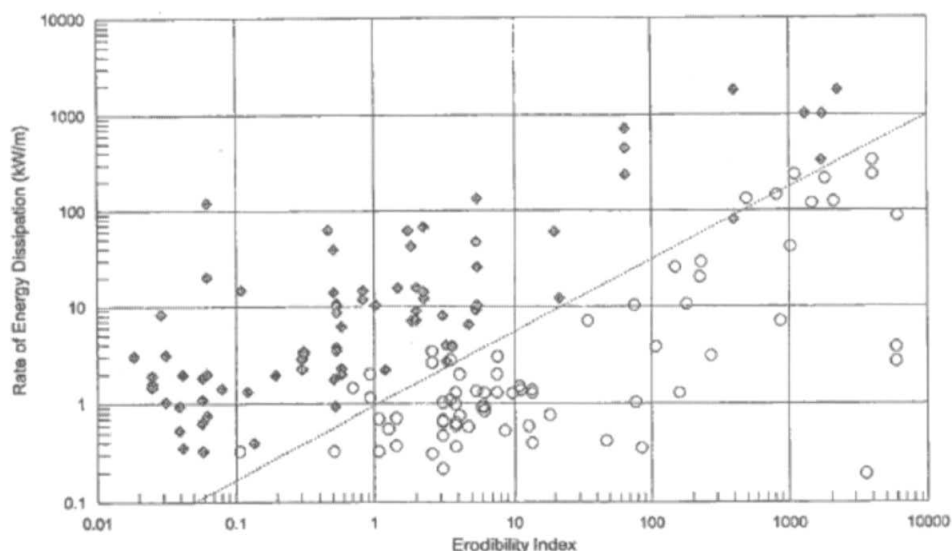
$$\text{河道之能量消耗 } P = \gamma q \Delta E$$

γ : 水單位重

q : 單寬流量

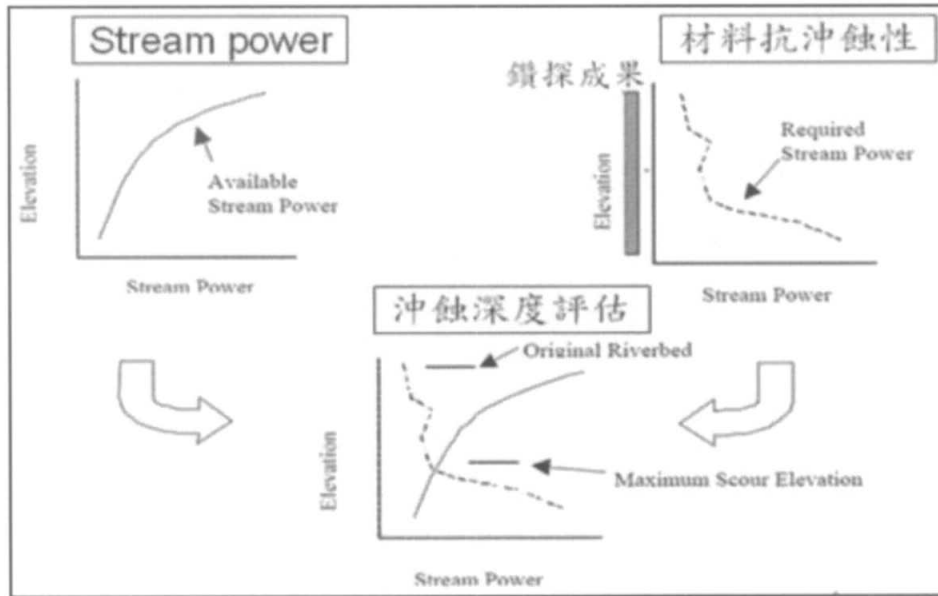
ΔE : 能量消耗

並紀錄現場是否發生沖蝕, 將能量消耗對抗沖蝕指數繪出雙對數圖關係 (如附圖 4-1), 進而推估對應特定抗沖蝕指數條件恰發生沖蝕時所需之能量消耗門檻值 $P_C = K_h^{0.75}$:



附圖 4-1 能量消耗 vs. 抗沖蝕指數圖

Annandale 又進一步延伸其抗沖蝕指數概念到岩石沖刷深度的評估上面，如附圖 4-2 所示，計算沖刷坑在不同深度流況下可能的流功(stream power)，另一方面則藉由鑽探等調查方式，對不同深度之材料加以評估其抗沖蝕指數，將上述二者以深度高程為基準加以合併比較，判斷可能之沖刷深度。



附圖 4-2 評估沖蝕坑的可能沖蝕深度

以下說明抗沖蝕指數 K_h 各參數之評分方式：

1、材料強度參數(mass strength number, M_s)：

岩體材料評估強度的代表參數是無圍壓縮強度(UCS)，

M_s 值計算方式如下，也可採用附表 4-1：

$$M_s = C_r \cdot (0.78) \cdot (UCS)^{1.05} \quad \text{when } UCS \leq 10MP \text{ a}$$

$$M_s = C_r \cdot (UCS) \quad \text{when } UCS > 10MP \text{ a}$$

其中：

UCS：無圍壓縮強度(MPa)

C_r ：相對密度係數； $C_r = \frac{g \cdot \rho_r}{27 \times 10^3}$ 。

g ：重力加速度(9.82 m/s^2)

ρ_r ：岩塊密度(kg/m^3)

附表 4-1 岩石材料強度評分表

材料強度數值(M_s)		
岩石硬度	無圍壓縮強度-UCS(MPa)	材料強度數值, M_s
極軟岩	< 1.7	0.87
	1.7~3.3	1.86
軟岩	3.3~6.6	3.95
	6.6~13.2	8.39
硬岩	13.2~26.4	17.70
極硬岩	26.4~53.0	35.0
	53.0~106.0	70.0
極堅硬硬岩	> 212.0	280.0

材料強度與 M_s 值存在正相關的關係，強度越高則材料抗侵蝕能力越強。

2、顆粒或塊體尺寸參數(block or particle size number, K_b)：

K_b 值由岩體的岩心的岩石品質指標 RQD 與節理組數參數 J_n 來定義：

$$K_b = RQD / J_n, \text{ 其中 } 5 \leq RQD \leq 100, \quad 1 \leq J_n \leq 5$$

當沒有鑽孔取樣時， RQD 值可以用經驗公式推得：

$$RQD = \left[105 - \frac{10}{(J_x \cdot J_y \cdot J_z)^{0.33}} \right]$$

J_x 、 J_y 、 J_z 分別為 xyz 三個方向上每公尺出現的節理組數。另外節理組數參數 J_n 非直接使用節理組數的值，查附表 4-2。

因此， RQD 越大、節理組數越少則 K_b 越大，即岩體越完整(塊體尺寸越大)抗侵蝕能力越高。

3、弱面或顆粒間抗剪強度參數 (discontinuity/interparticle bond shear strength number, K_d)：

K_d 值由岩體的節理面粗糙參數(joint roughness number, J_r)與節理改變參數(joint alteration number, J_a)來定義：

$$K_d = J_r / J_a$$

附表 4-2 節理組數參數評分表

節理組數值(J_n)	
節理組數	J_n
完整岩石或有少數節理與裂隙	1.00
一組節理/裂隙	1.22
一組節理/裂隙，附加不規則節理	1.50
兩組節理/裂隙	1.83
兩組節理/裂隙，附加不規則節理	2.24
三組節理/裂隙	2.73
三組節理/裂隙，附加不規則節理	3.34
四組節理/裂隙	4.09
多組複合節理/裂隙	5.00

節理面粗糙參數 J_r (附表 4-3)表示不連續面分離的兩個面間的粗糙度，受到不連續面的形狀影響。判斷上依據節理的兩面是否分離，之後再考慮不同的接觸面形狀。

節理改變參數 J_a (附表 4-4)與不連續面的空隙內填充材料有關，如植生、鏽染、凝聚性或非凝聚性材料填充，會影響到不連續面的磨擦力。評分上先依據節理分離的程度，後再檢視空隙的填充材料性質。

附表 4-3 節理面粗糙參數評分表

節理粗糙數值(J_r)		
節理分離程度	節理面狀態	J_r
挖掘過程中，節理/裂隙保持緊密狀態	階梯狀節理/裂隙	4.00
	粗糙或不規則，成波浪狀	3.00
	平滑波浪狀	2.00
	摩擦過之平面，成波浪狀	1.50
	粗糙或不規則，成平面狀	1.50
	平滑平面狀	1.00
	摩擦過之平面，成平面狀	0.50
挖掘過程中，節理/裂隙張開並保持其張開程度狀態	在挖掘後，節理/裂隙呈現張開狀或呈現相當程度之有效溝槽厚度使得節理/裂隙無法閉合	1.00
	有粉碎或細微粉碎黏土	1.00

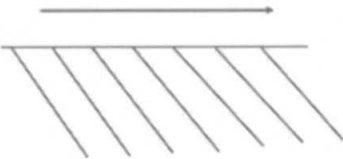
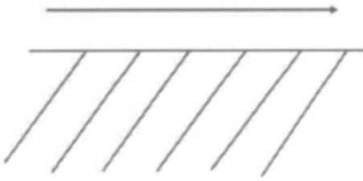
附表 4-4 節理風化參數評分表

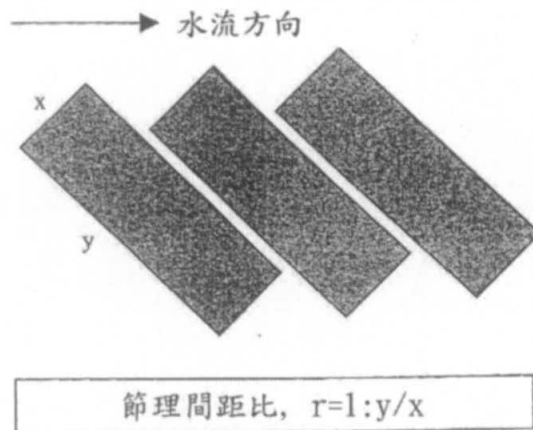
節理風化數值(J_a)			
節理面間描述	不同節理開口程度之風化數值(J_a)		
	1.0 (mm)	1.0~5.0 (mm)	5.0 (mm)
緊密接合，堅硬，無軟弱填充物可侵入填充	0.75	--	--
節理面無風化，僅表面有污跡	1.0	--	--
節理面輕微風化，無軟弱填充物、無凝聚性岩石礦物或是破碎岩石填充	2.0	2.0	4.0
無軟弱之輕微黏土質的無凝聚性材料填充	3.0	6.0	10.0
無軟弱過壓密黏土礦物填充；破碎岩石可能填充其中	3.0	3.0	10.0
軟弱或低摩差性黏土礦物附著且有少量膨脹性黏土填充	4.0	8.0	13.0
有適量之軟弱過壓密黏土礦物填充；破碎岩石可能填充其中	4.0	8.0	13.0
有粉碎或細微粉碎(膨脹性)黏土填充；破碎岩石可能填充其中	5.0	10.0	18.0

4、地盤構造條件參數(relative ground structure number, J_s)：

相對地盤構造參數 J_s (附表 4-5) 的影響因素包括：水流流向與岩床主要節理傾向的相對關係、節理傾角、以及岩塊形狀。岩塊的形狀因素採用節理間距比(ratio of joint spacing, r) 來代表，可由水流與岩層之縱剖面(附圖 4-3)看兩個方向的岩塊長度比值 y/x 來作 r 的計算，其中 y/x 值最大取到 8。 r 參數能反應出岩石河床材料受到侵蝕時，瘦長的塊體較等邊的塊體抗侵蝕能力高的行為。

附表 4-5 地盤構造條件參數評分表

地盤構造條件參數					
節理之傾向 (單位：度)	節理之傾角 (單位：度)	節理間距比, r			
		1:1	1:2	1:4	1:8
180/0	垂直 90	1.14	1.20	1.24	1.26
順向 	89	0.78	0.71	0.65	0.61
	85	0.73	0.66	0.61	0.57
	80	0.67	0.60	0.55	0.52
	70	0.56	0.50	0.46	0.43
	60	0.50	0.46	0.42	0.40
	50	0.49	0.46	0.43	0.41
	40	0.53	0.49	0.46	0.45
	30	0.63	0.59	0.55	0.53
	20	0.84	0.77	0.71	0.67
	10	1.25	1.10	0.98	0.90
	5	1.39	1.23	1.09	1.01
	1	1.50	1.33	1.19	1.10
	0/180	水平 0	1.14	1.09	1.05
逆向 	-1	0.78	0.85	0.90	0.94
	-5	0.73	0.79	0.84	0.88
	-10	0.67	0.72	0.78	0.81
	-20	0.56	0.62	0.66	0.69
	-30	0.50	0.55	0.58	0.60
	-40	0.49	0.52	0.55	0.57
	-50	0.53	0.56	0.59	0.61
	-60	0.63	0.68	0.71	0.73
	-70	0.84	0.91	0.97	1.01
	-80	1.26	1.41	1.53	1.61
	-85	1.39	1.55	1.69	1.77
	-89	1.50	1.68	1.82	1.91
	180/0	垂直-90	1.14	1.20	1.24

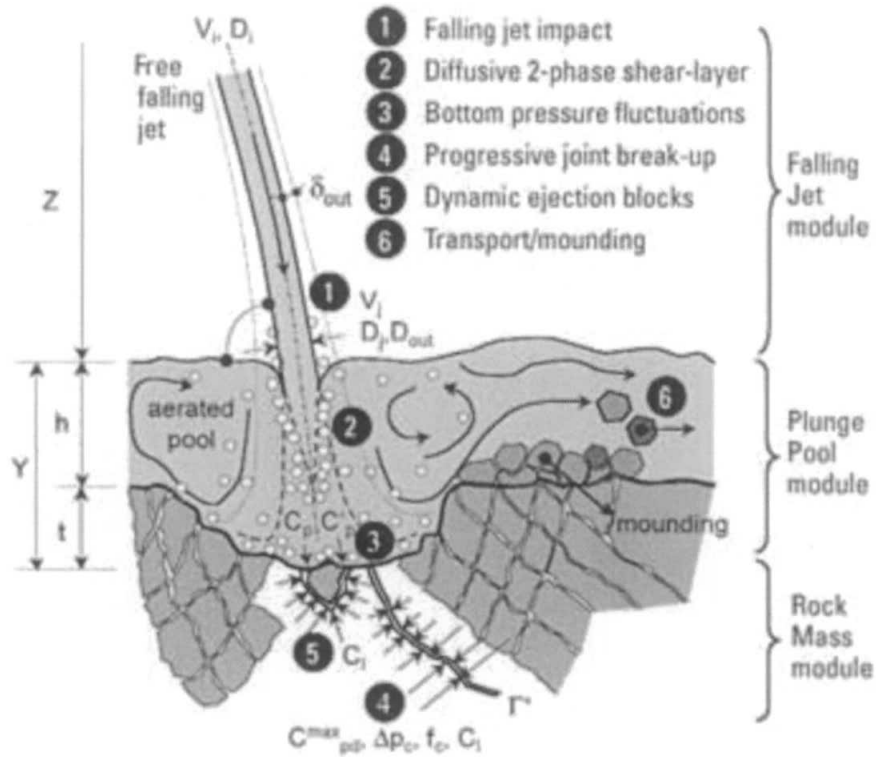


附圖 4-3 岩塊長度比值 y/x 示意圖

綜合上述，Annandale 歸納發展沖蝕指數時所取用之岩石沖刷資料庫多來自大壩之溢洪道，一般基於大壩之選址考量，壩址岩石基礎之抗沖蝕能力大多相當良好，與本計畫涵蓋壩堰場址(多在西部麓山帶或丘陵帶，其地層多為年輕軟弱岩層)之地質條件其實可能有不小之差異，再者，大壩溢洪道一般應無河床載之撞擊作用，Annandale 提出的沖蝕指數使否可以適用於攔河堰下方岩盤沖刷深度之評估方式，或需加以改良，仍有待加以探討釐清。

附錄五 Bollaert(2002)冲刷深度評估法

攔河堰因跌水產生之能量及紊流之情形必然明顯大於一般河道條件，Bollaert 利用附圖 5-1 來描述溢洪道下方在高速水流沖擊下岩盤發生沖蝕之過程。他將岩盤沖蝕分成下列 3 個步驟：



附圖 5-1 水流沖擊引致之沖蝕機制示意圖

1. 水流沖擊力量作用在岩盤表面，沖擊力量傳遞至裂隙內部導致裂隙延伸連通，使部份岩塊脫離岩盤而形成獨立岩塊。
2. 裂隙內部之波動放大效應使得岩塊底部與上方形成壓力差，當向上作用力大於岩塊的水中重量時，岩塊向上運動脫離原有位置。
3. 岩塊向脫離原有位置後，堆積於沖蝕坑下游側或隨水流向下游移動。

Bollaert 利用上述概念提出了一套岩石沖刷坑評估模式，整個模式區分為三個模組來進行：

1. 沖刷水柱模組(falling jet module)：計算水柱沖擊位置、面積、及流速。
2. 跌水潭模組(plunge pool module)：採用沖刷水柱模組計算成果，計算水深流量比、平均水壓、以及波動水壓等參數。
3. 岩體模組(rock mass module)：區分為兩大部分，第一部份計算底床節理(含開口節理、閉口節理)內的動水壓力荷載(hydrodynamic loading)；第二部分定義底床節理(含開口節理、閉口節理)的破壞準則。

綜合上述，此評估模式採用三個模組進行評估流程，概念上相當完整，但在節理的相關計算評估上面，需要掌握完整之節理力學性質，然因節理性質本身就有相當大的不確定性，應用上必須相當謹慎。此外，此模式之發展乃基於硬岩材料之特性出發，與台灣攔河堰常見地質條件仍存在差異，是否完全適用，也待探討。

附錄六 CCHE2D 模式理論

一、CCHE2D 模式理論

CCHE2D 模式採用隱式時間推進有效元素法 (efficient element method)，水理模組採用交錯格網求解連續方程式之水位，特別之速度校正法來求解系統方程式；變量流模擬採用隱式時間推進法求解，乾濕點問題之處理採用移動邊界法；紊流模式部分，除了兩種零方程渦黏滯模式，另有 k-ε 紊流模式；懸浮載傳輸為求解對流傳輸方程式，河床載傳輸採用非平衡輸砂方程式，且考慮底床坡度與彎道二次流效應。

明渠流多為淺水波問題，垂直方向之運動通常可忽略，水深積分之二維控制方程式通常可合理及有效地被採用。在卡式座標下水深積分之動量方程式可表示如下：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor} v \quad (\text{附式 6-1})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho h} - f_{Cor} u \quad (\text{附式 6-2})$$

式中，u 與 v 為 x 與 y 方向水深積分後之速度分量，t 為時間，g 為重力加速度，η 為水面高程，ρ 為水之密度，h 為局部水深，f_{Cor} 為科氏力參數，τ_{xx}、τ_{yy}、τ_{yx}、τ_{xy} 為水深積分之雷諾剪應力，τ_{bx}、τ_{by} 為底床剪應力，由於不考慮風力，因此忽略水表面之剪應力，自由水面之高程藉由求解水深積分之連續方程式，假設 η 為水面高程，ζ 為底床高程，連續方程式可表示如下：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (\text{附式 6-3})$$

此方程式廣泛被應用在計算二維模式之自由表面高程，當底床高程受到沖淤影響急速改變時，∂ζ/∂t 項不為零且應考慮

之。

式(附 6-1)、(附 6-2)中之雷諾剪應力取決於 Bousinesq 之假設，與水深積分流場之渦黏滯係數有關：

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \rho v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (\text{附式 6-4})$$

渦黏滯係數為流體之函數，且與流體性質有關，在 CCHE2D 中採用兩種方法計算渦黏滯係數，一為使用水深積分拋物線渦黏滯係數公式：

$$v_t = A_{sv} C_s \kappa u_* h \quad (\text{附式 6-5})$$

式中 u_* 為剪力速度， κ 為馮卡門係數(0.41)， h 為水深， A_{sv} 為渦黏滯係數之校正係數，預設值為 1 且其值介於 1-10 間。另一為採用深度積分之混合長度模式計算渦黏滯係數：

$$v_t = l^{-2} \sqrt{2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \quad (\text{附式 6-6})$$

$$\text{式中，} \bar{l} = \frac{1}{h} \int \kappa z \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h} \right)} dz = \kappa h \int_0^1 \zeta \sqrt{(1-\zeta)} d\zeta \approx 0.267 \kappa h \quad (\text{附式 6-7})$$

沿著垂直方向之水深積分速度梯度可解釋為底床表面之紊流效應，(附 6-6)式中決定之渦黏滯係數在均勻流況下可忽略為零，在缺乏其他項之情況下，渦黏滯係數可視為與均勻流相同，假設流速沿著水深方向為對數分佈，其垂直梯度可表示為：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa z} \quad (\text{附式 6-8})$$

將式(附 2-8)積分，可得水深垂直梯度之積分，可表為：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{h} \int \frac{\partial U}{\partial z} dz = \frac{u_*}{h \kappa} \int_{z_0}^z \frac{1}{z} dz = C_m \frac{u_*}{h \kappa} \quad (\text{附式 6-9})$$

式中 U 為總速度， C_m 為係數， C_m 不直接計算，此係數可以某種方式給定，模式中給定為 2.34375，使得在所有均勻流之水平方向速度梯度計算中，可採用式(附 6-6)取代式(附 6-5)。除了上述兩種零方程渦黏滯模式，另可考慮採用 k - ε 紊流模式：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] = P - \varepsilon + P_{kv} \quad (\text{附式 6-10})$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] = c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P - c_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + P_{\varepsilon v} \quad (\text{附式 6-11})$$

11)

$$P = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = v_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (\text{附式 6-12})$$

$$P_{kv} = C_k \frac{U_*^3}{h}, \quad P_{\varepsilon v} = C_\varepsilon \frac{U_*^4}{h^2} \quad (\text{附式 6-13})$$

$$U_* = \sqrt{c_f (u^2 + v^2)}, \quad C_k = \frac{1}{\sqrt{c_f}}, \quad C_\varepsilon = 3.6 \frac{c_{2\varepsilon}}{c_f^{3/4}} \sqrt{c_\mu} \quad (\text{附式 6-14})$$

式中 $c_\mu = 0.09$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 、 $c_{\varepsilon 1} = 1.44$ 、 $c_{\varepsilon 2} = 1.92$ ，渦黏滯係數可由下式計算：

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{附式 6-15})$$

P_{kv} 、 $P_{\varepsilon v}$ 增列於二維模式中，用來模擬由於底床摩擦所造成之紊流能量與消散。

總載對輸砂模式來講，通常可分離為河床載與懸浮載，或依泥砂來源，可區分為河床質載與沖洗載。因此，CCHE2D 模式使用兩種概念計算總載，其一為分離河床載與懸浮載，其二合併為河床質載(一般地形變遷動床模式模擬時忽略沖洗載對床形影響)，前者之控制方程式如下所示。

懸浮載之對流傳輸方程式：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(\varepsilon_s \frac{\partial C_k}{\partial x} + D_{sxk} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(\varepsilon_s \frac{\partial C_k}{\partial y} + D_{syk} \right) \right] + \alpha_d \omega_{*k} (C_{*k} - C_k) \end{aligned} \quad (\text{附式 6-16})$$

式中 C_k 為某一粒徑 k 懸浮載之水深平均濃度； C_{*k} 為某一粒徑 k 平衡條件下懸浮載之水深平均濃度， ε_s 為泥砂之擴散係數； α_d 為懸浮載之延散係數； D_{sxk} 、 D_{syk} 為水深方向非均勻流速與泥砂濃度所造成之消散通量； ω_{*k} 為泥砂粒徑 k 之沈降速度。

非平衡河床載輸砂方程式可表示如下：

$$\frac{\partial(\delta \bar{c}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_{bx} q_{bk})}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_{by} q_{bk})}{\partial y} + \frac{1}{L}(q_{bk} - q_{b* k}) = 0 \quad (\text{附式 6-17})$$

式中， δ 為河床載區域之厚度； \bar{c}_{bk} 為河床載區域之平均濃度； α_{bx} 、 α_{by} 為河床載運動之餘弦函數，通常假設沿著底床剪應力方向，但當考慮彎道二次流效應與陡坡之重力影響時需做調整； q_{bk} 為某一粒徑 k 河床載之實際輸砂率； $q_{b* k}$ 為粒徑 k 河床載輸砂能力； L 為泥砂非平衡調適長度。

調適長度 L 可特徵化泥砂由非平衡到平衡之間距，對推移載而言，調適長度 L_b 為相對於床形之維度；對懸浮載而言，調適長度 $L_s = uh/\alpha\omega_{*k}$ ，式中 α 為調適係數，其中 α 可由 Armanini and de Silvio's (1988) 提出之方法計算，或當嚴重淤積時， α 可採 0.25，嚴重沖刷時， α 可採 1.0，輕微淤積與沖刷時， α 採 0.5， U 為水流平均流速， h 為水深， ω_{*k} 為泥砂沈降速度；對河床質載而言，調適長度可給定為 L_s 與 L_b 之最大值；對沖洗載而言，由於忽略其與底床間之交換，因此調適長度 L 可視為無限大。

底床改變可由下式計算：

$$(1 - p'_m) \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = \alpha \omega_{sk} (C_k - C_{*k}) + \frac{1}{L} (q_{bk} - q_{b*k}) \quad (\text{附式 6-18})$$

式中， p'_m 為河床質孔隙率； $(\partial z_b / \partial t)_k$ 為某一粒徑k之底床改變率。

CCHE2D 模式中有四種輸砂公式可計算 C_{*k} 與 q_{b*k} 。此四種輸砂公式之挑選，乃由數十個經由實驗與現場資料檢定驗證而得 (Wu and Wang, 2003)，可考慮非均勻輸砂之各種效應，此四種輸砂公式又可寫成以下一般化形式：

$$C_{*k} = p_{bk} C_k^* ; \quad q_{b*k} = p_{bk} q_{bk}^* \quad (\text{附式 6-19})$$

式中， p_{bk} 為混合層之床質粒徑分佈， q_{bk}^* 與 C_k^* 分別為某一粒徑k之潛勢河床載、懸浮載輸砂量。

床質粒徑分佈通常沿著垂直方向變化，因此不沖刷層以上之河床可再分為數層，最上層定義為混合層，此層與移動之泥沙直接參與交換，在混合層中之粒徑分佈可以下式計算：

$$\frac{\partial (\delta_m p_{bk})}{\partial t} = \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k + p_{bk}^* \left(\frac{\partial \delta_m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t} \right) \quad (\text{附式 6-20})$$

式中， δ_m 為混合層厚度； $\partial z_b / \partial t$ 為底床總變形率，由 $\partial z_b / \partial t = \sum_{k=1}^N (\partial z_b / \partial t)_k$ 累加計算，N 為代表粒徑總數；當 $\partial \delta_m / \partial t - \partial z_b / \partial t > 0$ ，式中 p_{bk}^* 可由混合層之床質分佈 p_{bk} 替代之，反之當 $\partial \delta_m / \partial t - \partial z_b / \partial t \leq 0$ ， p_{bk}^* 為混合層下層粒徑k所佔之百分比。

此外，CCHE2D 模式可模擬凝聚性沈澱 (Wu and Wang, 2004b)，可考慮植生影響之水流與輸砂作用 (Wu et al., 2005)，考慮彎道之二次流效應輸砂 (Wu and Wang, 2004a)，並且能模擬岸壁基腳沖刷與破壞過程，該模式詳細之水理與輸砂理論可參考 NCCHE 之相關出版刊物。

二、CCHE2D 模式功能限制

CCHE2D 水理輸砂模式於美國 NCCHE 發展 15 多年來，其

功能持續被擴充增加。模式可模擬複雜天然環境之自由液面流、輸砂、水質、污染傳輸等機制，同時模式可應用於實驗室或天然河川之定量流、變量流、紊流流場等分析。

CCHE2D 模式可模擬穩態及非穩態明渠流、亞臨界、超臨界、混合流，大尺度之天然河川與小尺度之實驗渠道同樣經過檢定驗證程序。總結來說，模擬之底床改變與河道變遷比傳統水深積分模式來得合理。附表 6-1 為 CCHE2D 模式功能與限制之彙整。

附表 6-1 CCHE2D 河道變遷模式功能與限制彙整

CCHE2D模式之功能	CCHE2D模式之限制
<ul style="list-style-type: none"> ● 穩態、非穩態流模擬 ● 隱式時間推進有效元素法 ● 亞臨界、混合流、超臨界流模擬 ● 非平衡、非均勻輸砂模擬 ● 考慮凝聚性沈澱 ● 考慮水工結構物：壩、堰、閘門 ● 考慮植生影響 ● 考慮河川彎道影響與岸壁沖刷 ● 乾濕點處理 ● 污染傳輸模擬 ● 圖形化使用者介面 	<ul style="list-style-type: none"> ● 不適用非水深平均二維流場之問題 ● 突變區域 (sharp changing zone)之模擬準確度較差 ● 不適用岸壁基腳掏刷 (bank toe erosion)與崩塌問題

三、CCHE2D 模式代表案例

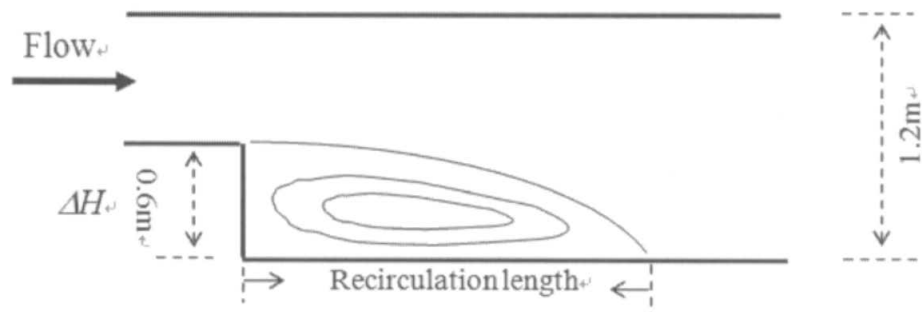
CCHE2D 發展至今，曾採用許多實驗室與現場案例進行模式之檢定驗證，其部分實驗案例經過美國 ASCE 與 EWRI 工作委員會挑選，皆為具有嚴謹假設與可信度之代表案例，將其彙整如附表 6-2 所示，並進行案例之說明。

附表 6-2 CCHE2D 代表性之檢定驗證案例

實驗案例	現場案例
● 突闊渠槽流場模擬	● 德國內卡河南德水庫模擬
● 正弦彎道流場模擬	● 中國贛江萬安水庫下游河道丁壩模擬
● 超亞混合流模擬	● 中國黃河下游輸砂模擬
● Yen & Lee(1995)彎道動床模型試驗	● 集集攔河堰上下游河段模擬

1、突闊渠槽流場模擬

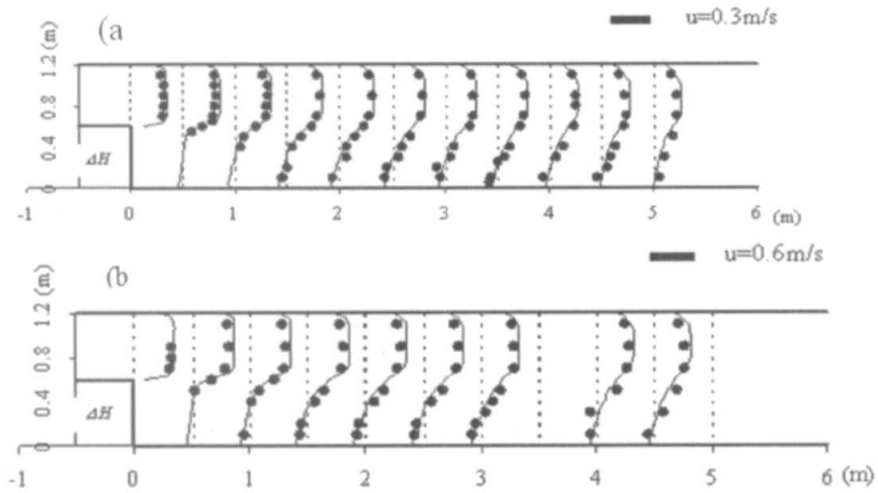
CCHE2D模式曾採用突闊水槽實驗案例進行模式之檢定驗證工作，實驗案例為考慮兩組不同流量，流速資料是藉由測量突闊斷面至下游環流區之11個斷面位置而，實驗渠槽底床與岸壁皆為混凝土，且渠道為固定坡度之定床，所有固體邊界在計算時假設為水力平滑，渠道之幾何形狀與佈置如附圖6-1所示，由測量的流速分佈可看出在此兩組不同流量案例其環流長度幾乎相同。



附圖 6-1 突闊渠槽試驗與流場示意圖

此模擬案例採用 $k-\varepsilon$ 紊流模式，附圖6-2為兩組不同流量案例模擬與實測流速分佈之比較，由圖可看出實測資料與模擬結果相當吻合，主槽及環流區之流場與實測趨勢相當，在剪力層中計算之流速分佈與實測資料具有相同斜率，複合長度 (reattachment length) 約4.6m，約為 $7.83\Delta H$ ， ΔH 為突闊之寬度，

預測之複合點(reattachment point)幾乎落在同樣位置。

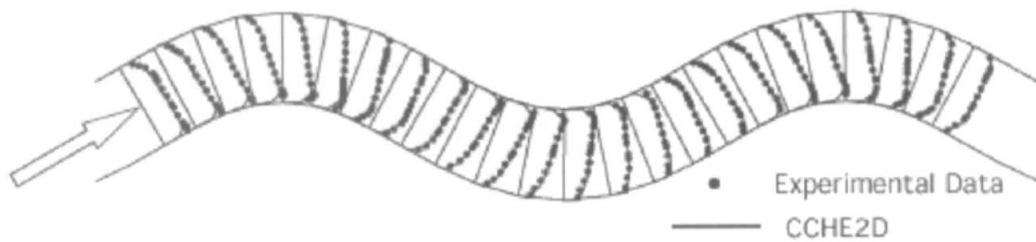


附圖 6-2 突闊渠槽模擬與實測比較

(a) $Q=0.018\text{m}^3/\text{s}$, (b) $Q=0.039\text{m}^3/\text{s}$

2、正弦彎道流場模擬

附圖6-3為模擬與實測流速比較圖，模擬之主流與側向方向格網為結構性規則格網，格網點數為(17x42)，實驗渠槽之流速測量依循渠道之正弦函數形狀，模擬結果靠近凸岸之流速有些許誤差，但其他位置幾乎吻合，當水流靠近凸岸時有加速作用，此加速導致水流改變方向。

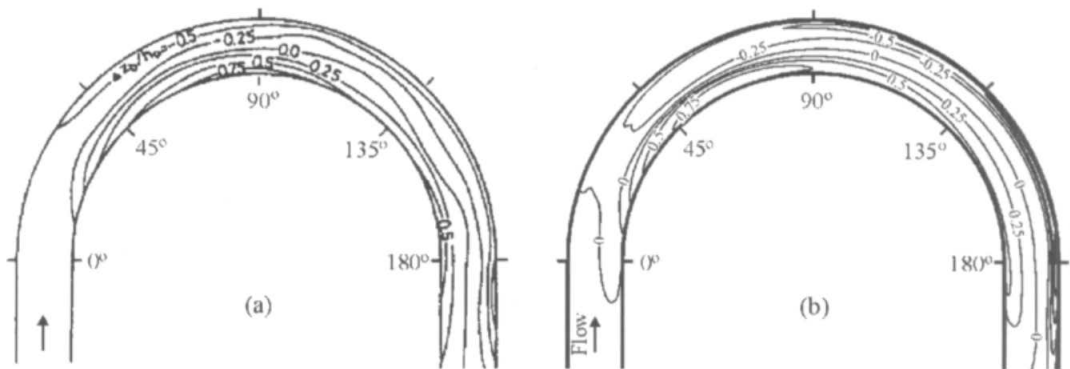


附圖 6-3 正弦彎道模擬與實測流速比較： $\theta_0=30^\circ$

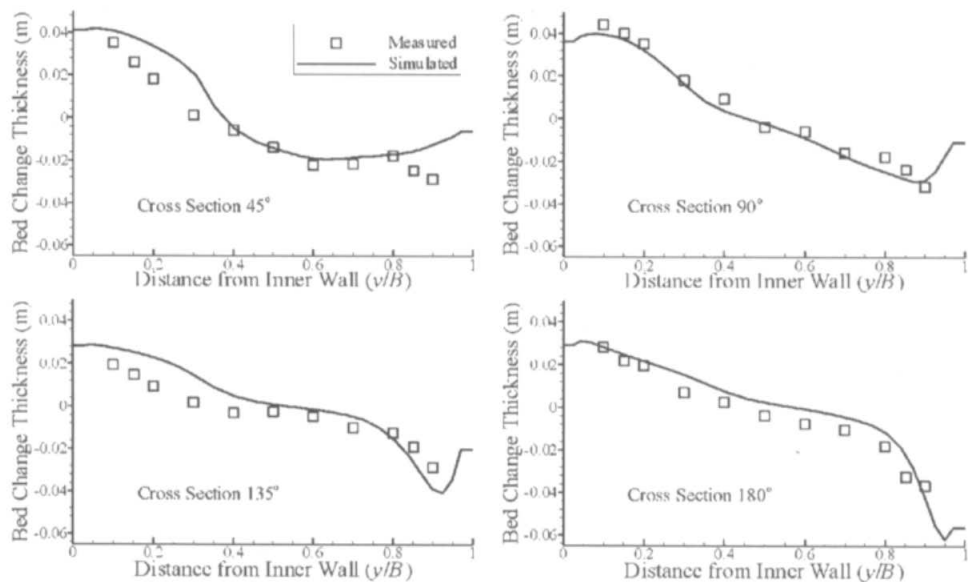
3、彎道動床模擬

Wu and Wang (2004a)曾模擬Yen and Lee (1995)之彎道動床模型試驗，模型渠道為 -180° 急彎，渠寬1m，曲率半徑為4m，

初始底床坡度為0.002。為變量流流況，上游入流歷線為三角形歷線，基流為 $0.02\text{m}^3/\text{s}$ ，基流水深 h_0 為 0.054m ，於run4模擬案例中，洪峰流量為 $0.053\text{m}^3/\text{s}$ ，延時為240分鐘，洪峰發生時間為總延時之前1/3處，泥砂條件為非均勻砂，中值粒徑為 1.0mm ，標準偏差為2.5，計算格網點為 (91×31) ，時間間距為1分鐘。附圖6-4為模擬與實測彎道部分底床等高線比較圖，附圖6-5為四個斷面之底床變化剖面圖，計算之床形變化與實測值趨勢相同。



附圖 6-4 (a)實測, (b)計算床形等高線圖($\Delta z_b/h_0$)

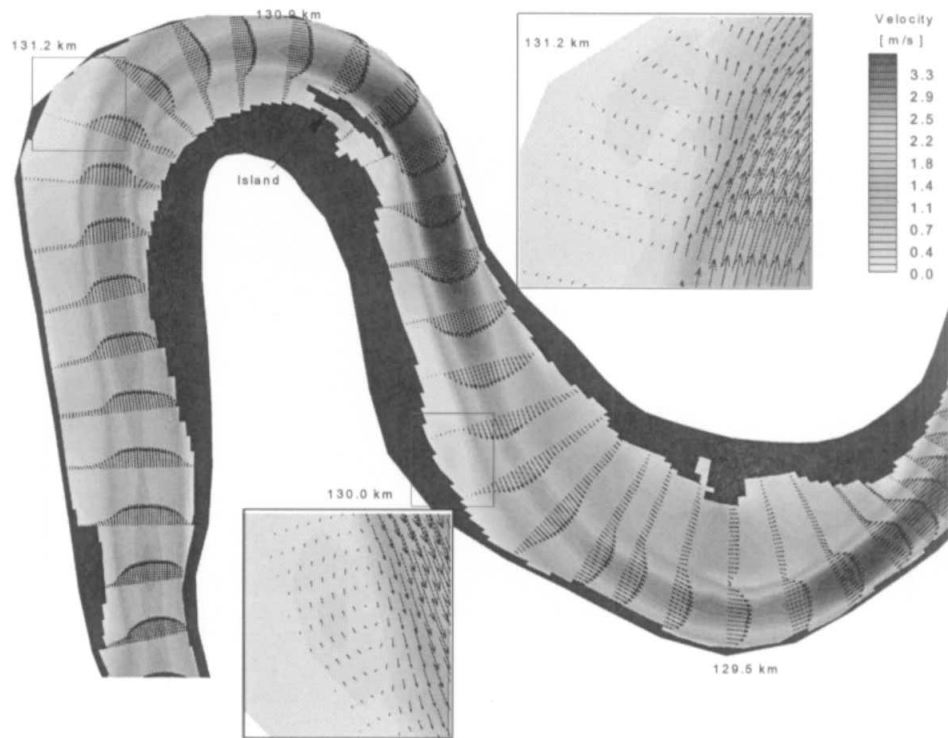


附圖 6-5 底床變化斷面剖面圖 (Yen and

Lee(1995))

4、德國內卡河南德水庫模擬

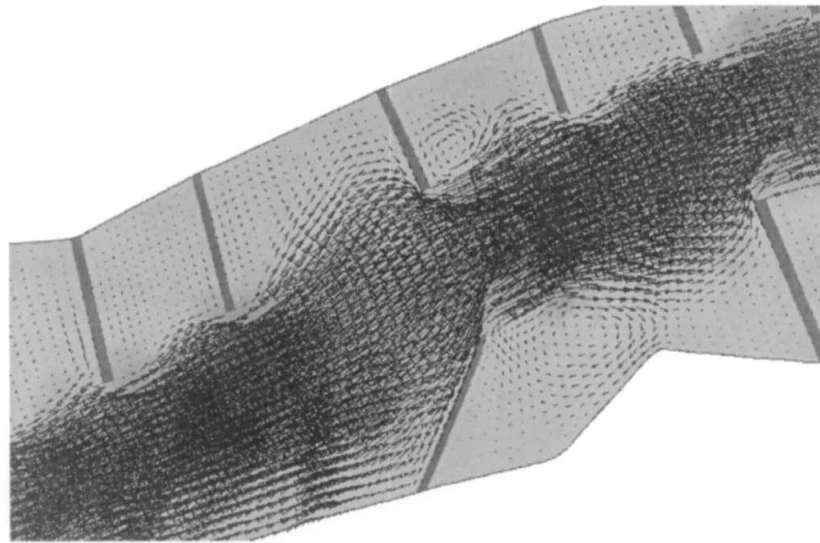
南德水庫(Lauffen Reservoir)位於德國斯圖加特(Stuttgart)之內卡河(Neckar River)上，為一個河槽型水庫，全長約12km，由上游比迪堪(Bietigheim)至下游南德，在河心距129.0km~132.3km處經由兩段180°之急彎，且於主槽兩岸有大片之高灘地。自1950年起，由於河川上游建置一系列共13座壩，使得水庫上游懸浮載入砂量減少。南德流量站之流量變化約介於 $14.1\text{m}^3/\text{s}$ ~ $1,650\text{m}^3/\text{s}$ 間，平均流量約為 $88.5\text{m}^3/\text{s}$ 。模式於變量流條件下模擬其水位與流速，利用現場測量資料率定曼寧係數等參數，率定後之模式採用更多洪水期間之現場測量資料進行驗證，模擬結果證實CCHE2D模式之水位符合現況，且證明CCHE2D模式具有模擬天然現場河川變量流於急彎與廣闊高灘地等複雜幾何形狀之功能。附圖6-6為變量流模擬結果，洪峰流量約為 $1,644\text{m}^3/\text{s}$ ，圖中藍色區塊代表岸壁高程高於水位之區域，即所謂之乾點區，從河心距130km~131.2與130.55km~130.8km可看出主槽流場與高灘地區域交界之二次流效應；此外，主槽靠近凹岸之流速大於凸岸流速。



附圖 6-6 內卡河之變量流模擬

5、萬安水庫下游河道丁壩流場模擬

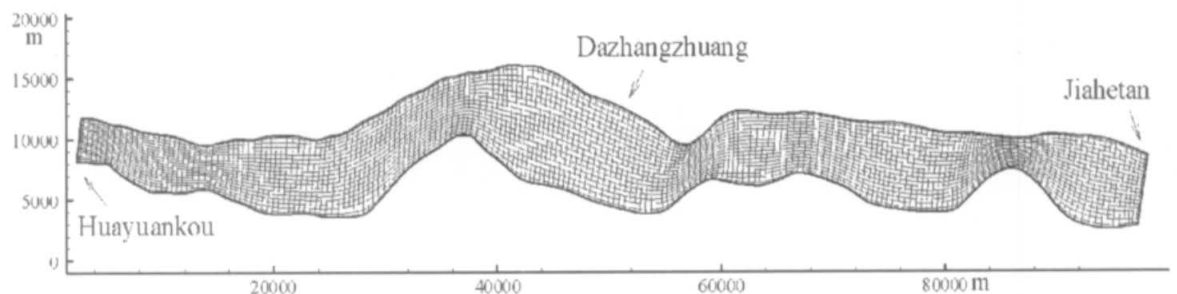
萬安水庫位於中國贛江，自從1970年運轉以來，下游河道產生嚴重淘刷問題，為了保持水路運輸之暢通及防止岸壁嚴重沖刷，於兩岸建置許多不同角度之丁壩。此案例之模擬在測試CCHE2D模式於一長25km、寬600m河道佈有許多丁壩之流場模擬，由於丁壩的方向並不完全垂直於主流方向，且有些丁壩與岸壁呈現尖銳之夾角，因此模擬格網之佈設相當不規則，床形部分亦相當複雜，主槽之坡度相當陡峭，部分介於丁壩與高灘地之河道隨時間變化浸沒於水中，因此須使用移動邊界技巧處理，模擬結果如附圖6-7所示。



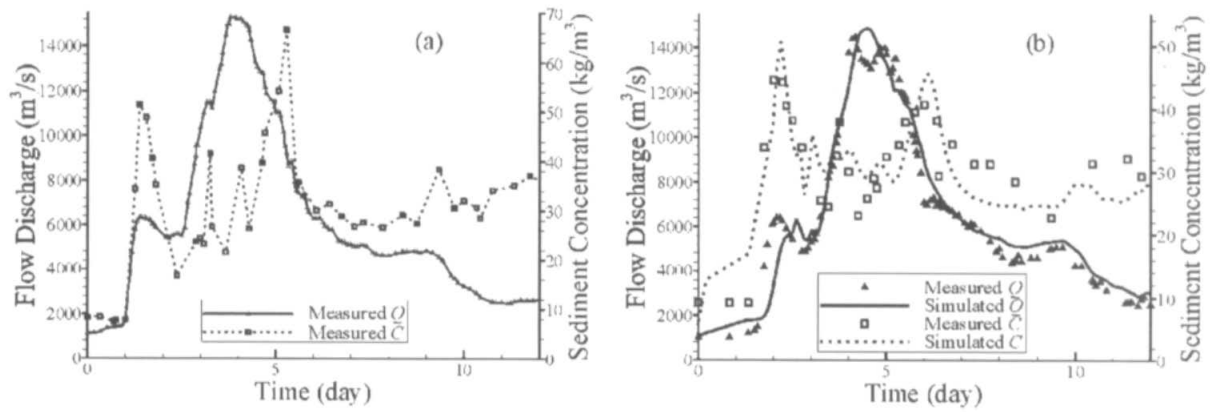
附圖 6-7 萬安水庫下游河道丁壩流場模擬

6、黃河下游輸砂模擬

Wu et al. (2006)以1982年洪水事件模擬黃河下游之輸砂行為，模擬範圍由花園口至夾河灘，全長約103km，以三門峽下游259km處之花園口為上游邊界，計算格網點如附圖6-8所示，格點數為(201x21)，附圖6-9 a)為上游邊界花園口之實測流量、含砂濃度歷線，計算時間從1982/7/30至8/11，時間間隔為15分鐘。附圖2-9(b)為夾河灘位置模擬與實測之流量、含砂濃度歷線，模擬結果與實測趨勢相當吻合。附圖6-10為上游花園口流量 $4,000\text{m}^3/\text{s}$ 時模擬範圍之流場分佈，圖中向量代表流場方向與流速大小，顏色等高線代表水深，可看出蜿蜒主槽與高灘地之流場。

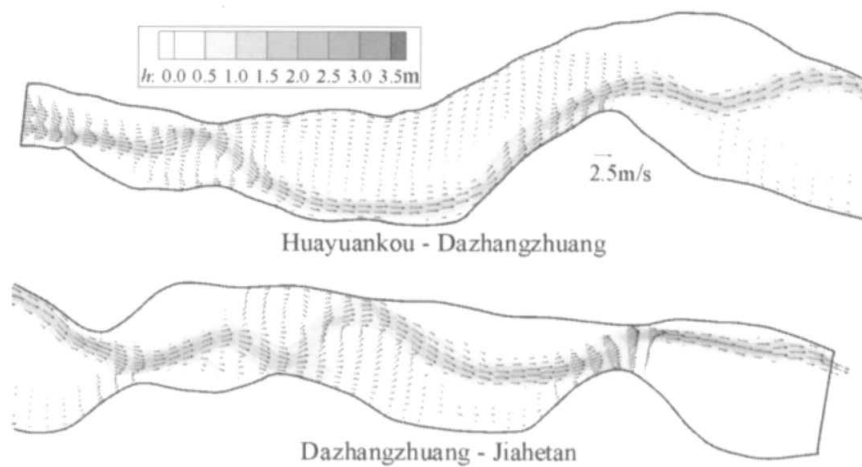


附圖 6-8 花園口至夾河灘模擬格網點



附圖 6-9 流量與含砂濃度歷線：(a)花園口, (b)夾河

灘



附圖 6-10 上游入流 4,000 cms 情況下之流場分佈