



設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與 評估研究(1/2)

A study on the mechanisms and evaluation of
rockbed erosion after weir installation (1/2)



經濟部水利署水利規劃試驗所

中華民國 98 年 12 月

設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與 評估研究(1/2)

A study on the mechanisms and evaluation of
rockbed erosion after weir installation (1/2)

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 98 年 12 月

目 錄

目錄	I
表目錄	VIII
圖目錄	XI
摘要	XIX
Abstract.....	XXXV
結論與建議	XXXVIII
第壹章 計畫說明	1-1
一、計畫緣由及目的	1-1
二、工作項目及內容	1-1
三、工作範圍	1-3
四、工作分期執行構想	1-3
第貳章 資料蒐集與整理	2-1
一、後村堰(大漢溪)	2-3
(一)攔河堰概述	2-3
(二)地質資料	2-7
(三)地形資料	2-7
(四)水文資料	2-10
二、義興壩(大漢溪)	2-11
(一)攔河堰概述	2-11
(二)地質資料	2-15
(三)地形資料	2-16
(四)水文資料	2-21
三、石岡壩(大甲溪)	2-22
(一)攔河堰概述	2-22

(二)地質資料	2-26
(三)地形資料	2-28
(四)水文資料	2-30
四、龍泉圳攔河堰(烏溪)	2-31
(一)攔河堰概述	2-31
(二)地質資料	2-32
(三)地形資料	2-32
(四)水文資料	2-35
五、集集攔河堰(濁水溪)	2-36
(一)攔河堰概述	2-36
(二)地質資料	2-39
(三)地形資料	2-46
(四)水文資料	2-51
(五)集集攔河堰相關研究文獻	2-54
六、觸口攔河堰(八掌溪)	2-54
(一)攔河堰概述	2-54
(二)地質資料	2-56
(三)地形資料	2-56
(四)水文資料	2-60
七、東口堰(曾文溪)	2-61
(一)攔河堰概述	2-61
(二)地質資料	2-63
(三)地形資料	2-64
(四)水文資料	2-66
八、甲仙攔河堰(高屏溪)	2-67
(一)攔河堰概述	2-67

(二)地質資料	2-68
(三)地形資料	2-70
(四)水文資料	2-71
九、攔河堰相關調查研究資料	2-72
第參章 普查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性	3-1
一、後村堰(大漢溪)	3-2
(一)岩性種類	3-2
(二)地層位態與水流流向關係	3-2
(三)水流狀況與沖蝕特徵	3-3
(四)岩石強度	3-5
(五)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-5
(六)沖刷行為探討	3-6
二、義興壩(大漢溪)	3-8
(一)岩性種類	3-8
(二)地層位態與水流流向關係	3-9
(三)水流狀況與沖蝕特徵	3-10
(四)岩石強度	3-11
(五)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-11
(六)沖刷行為探討	3-12
三、石岡壩(大甲溪)	3-13
(一)岩性種類	3-13
(二)地層位態與水流流向關係	3-13
(三)水流狀況與沖蝕特徵	3-14
(四)岩石強度	3-16
(五)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物	3-16
(六)沖刷行為探討	3-16

四、龍泉圳攔河堰(烏溪).....	3-18
(一)岩性種類.....	3-18
(二)地層位態與水流流向關係.....	3-19
(三)水流狀況與沖蝕特徵.....	3-19
(四)岩石強度.....	3-20
(五)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物.....	3-20
(六)沖刷行為探討.....	3-20
五、集集攔河堰(濁水溪).....	3-22
(一)岩性種類.....	3-22
(二)地層位態與水流流向關係.....	3-22
(三)水流狀況與沖蝕特徵.....	3-23
(四)岩石強度.....	3-25
(五)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物.....	3-25
(六)沖刷行為探討.....	3-25
六、觸口攔河堰(八掌溪).....	3-27
(一)岩性種類.....	3-27
(二)地層位態與水流流向關係.....	3-28
(三)水流狀況與沖蝕特徵.....	3-28
(四)岩石強度.....	3-30
(五)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物.....	3-30
(六)沖刷行為探討.....	3-31
七、曾文東口攔河堰(曾文溪).....	3-34
(一)岩性種類.....	3-34
(二)地層位態與水流流向關係.....	3-35
(三)水流狀況與沖蝕特徵.....	3-35
(四)沖刷行為探討.....	3-37

八、甲仙攔河堰(高屏溪).....	3-37
(一)岩性種類.....	3-37
(二)地層位態與水流流向關係.....	3-38
(三)水流狀況與沖蝕特徵.....	3-38
(四)岩石強度.....	3-38
(五)調查弱面狀況、風化程度、粗糙度及填充物.....	3-38
(六)沖刷行為探討.....	3-38
第肆章 集集攔河堰下游岩盤之抗沖蝕能力調查.....	4-1
一、集集攔河堰下游水力特性分析.....	4-1
(一)一維水力特性分析.....	4-2
(二)二維水力特性分析.....	4-3
二、沖蝕特性調查.....	4-6
三、鑽探採樣及現地試驗.....	4-7
(一)鑽探採樣計畫.....	4-7
(二)鑽探成果.....	4-8
(三)孔內造影成果.....	4-10
四、室內岩石試驗.....	4-16
(一)試體準備.....	4-17
(二)一般物性試驗.....	4-17
(三)消散耐久性試驗.....	4-18
(四)單軸抗壓試驗.....	4-19
(五)巴西人試驗.....	4-22
五、抗沖蝕能力 K_h 與深度變化之關係.....	4-23
(一)抗沖蝕能力評估方法與假設.....	4-23
(二)抗沖蝕能力評估結果.....	4-26
(三)小結.....	4-26

第五章 攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力初步探討.....	5-1
一、文獻回顧與討論.....	5-1
(一)攔河堰下游面沖蝕成因與影響.....	5-1
(二)攔河堰局部沖刷影響因子.....	5-2
(三)攔河堰跌水沖刷與沖刷坑形成特性.....	5-3
(四)岩盤沖刷破壞特性.....	5-6
二、攔河堰下游岩盤沖刷機制.....	5-8
(一)後村堰.....	5-8
(二)義興壩.....	5-11
(三)石岡壩.....	5-12
(四)龍泉圳攔河堰.....	5-14
(五)集集攔河堰.....	5-16
(六)觸口攔河堰.....	5-18
(七)東口堰.....	5-20
(八)甲仙攔河堰.....	5-20
三、攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力初步探討.....	5-22
四、攔河堰沖蝕機制綜合探討.....	5-25
第陸章 國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性初步探討.....	6-1
一、局部沖刷評估方式分類評選.....	6-1
二、局部沖刷評估方式介紹.....	6-4
(一)常用壩堰下游側顆粒性材料局部沖刷坑深度方法.....	6-4
(二)Annandale (1995, 2006)岩盤沖刷評估方式.....	6-5
(三)Bollaert (2002)岩盤沖刷評估方式.....	6-11
(四)Spurr(1985)岩盤沖刷評估方式.....	6-12
(五)Akhmedov(1988)岩盤沖刷評估方式.....	6-15
三、Annandale (1995, 2006)岩盤沖刷評估方式案例分析.....	6-17

(一)集集攔河堰.....	6-17
(二)義興壩.....	6-18
四、Bollaert (2002)岩盤沖刷評估方式案例分析.....	6-18
(一)集集攔河堰.....	6-18
(二)義興壩.....	6-21
五、岩盤沖刷評估方式適用性探討.....	6-24

參考文獻

- 附錄一 報告審查意見與辦理情形
- 附錄二 CCHE2D 模式理論
- 附錄三 鑽探柱狀圖
- 附錄四 集集攔河堰各重現期洪水 CCHE2D 模擬成果

表 目 錄

表 2-1	本計畫調查攔河堰基本資料表.....	2-2
表 2-2	後村堰堰址各重現期洪水量表.....	2-10
表 2-3	後村堰歷年發生最大流量統計表.....	2-10
表 2-4	義興壩鑽孔岩心單壓強度試驗成果表(北水局，98 年).....	2-16
表 2-5	義興壩壩址各重現期洪水量表.....	2-21
表 2-6	義興壩歷年發生最大流量統計表.....	2-22
表 2-7	石岡壩下游鑽探岩心試驗成果(水規所，98 年).....	2-27
表 2-8	石岡壩址各重現期洪水量表.....	2-30
表 2-9	石岡壩歷年發生最大流量統計表.....	2-31
表 2-10	龍泉圳攔河堰址各重現期洪水量表.....	2-35
表 2-11	龍泉圳攔河堰歷年發生最大流量統計表.....	2-35
表 2-12	集集攔河堰重要工程數據(水利署，94 年).....	2-39
表 2-13	歷年鑽探岩層分類比較表.....	2-41
表 2-14	單壓試驗結果表(水利局，80 年).....	2-45
表 2-15	水利局(民國 80 年)張力試驗結果表.....	2-46
表 2-16	單壓強度試驗結果表(中水局，98 年).....	2-46
表 2-17	集集攔河堰河段大斷面與地形資料彙整表.....	2-47
表 2-18	集集攔河堰址各重現期洪水量表.....	2-51
表 2-19	集集攔河堰河段鄰近水文測站歷年資料統計表.....	2-51
表 2-20	濁水溪各重現期洪峰流量表.....	2-52
表 2-21	集集攔河堰河段歷年洪峰流量表.....	2-52
表 2-22	觸口堰堰址各重現期洪水量表.....	2-60
表 2-23	觸口堰歷年發生最大流量統計表.....	2-60
表 2-24	東口堰歷年發生最大流量統計表.....	2-66
表 2-25	東口堰堰址各重現期洪水量表.....	2-67

表 2-26	旗山溪歷年發生最大洪水量表.....	2-71
表 2-27	甲仙攔河堰堰址重現洪水量.....	2-72
表 2-28	工程會(89 年)調查 25 座取水設施跨河構造物名稱表.....	2-73
表 2-29	台灣地區 54 座堰壩綜合評估屬性分類結果表	2-74
表 3-1	後村堰岩盤沖蝕特性調查表.....	3-8
表 3-2	義興壩岩盤沖蝕特性調查表.....	3-12
表 3-3	石岡壩岩盤沖蝕特性調查表.....	3-17
表 3-4	龍泉圳岩盤沖蝕特性調查表.....	3-21
表 3-5	集集攔河堰岩盤沖蝕特性調查表.....	3-26
表 3-6	觸口攔河堰岩盤沖蝕特性調查表.....	3-31
表 3-7	甲仙攔河堰岩盤沖蝕特性調查表.....	3-40
表 4-1	集集攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力調查工作數量表	4-1
表 4-2	濁水溪集集堰河段計畫洪水量水理因素成果表	4-3
表 4-3	集集攔河堰堰址各重現期洪水量表.....	4-4
表 4-4	層面分析彙整表	4-15
表 4-5	節理面分析彙整表	4-16
表 4-6	一般物性試驗結果表	4-18
表 4-7	岩心消散耐久試驗結果.....	4-19
表 4-8	集集攔河堰單軸抗壓強度結果表.....	4-21
表 4-9	本計畫巴西人試驗結果表.....	4-23
表 4-10	鑽孔 C01 抗沖蝕能力評分結果表.....	4-27
表 4-11	鑽孔 C02 抗沖蝕能力評分結果表.....	4-28
表 4-12	各岩性隨深度變化之 K_h 值.....	4-30
表 4-13	沖刷坑抗沖蝕能力建議值.....	4-30
表 5-1	攔河堰下游岩盤沖刷機制表.....	5-9
表 5-2	攔河堰下游岩盤抗沖刷能力比較.....	5-23

表 6-1	沖蝕坑深度評估方式彙整與比較表.....	6-3
表 6-2	岩石材料強度評分表.....	6-7
表 6-3	節理組數參數評分表.....	6-8
表 6-4	節理面粗糙參數評分表.....	6-8
表 6-5	節理風化參數評分表.....	6-9
表 6-6	地盤構造條件參數評分表.....	6-10
表 6-7	集集堰 Annandale 方式評估結果表	6-17
表 6-8	義興壩 Annandale 方式評估結果表	6-18

圖 目 錄

圖 1-1	調查攔河堰位置圖	1-5
圖 1-2	計畫分期工作執行流程圖	1-6
圖 2-1	後村堰位置圖	2-4
圖 2-2	後村堰 95 年照片	2-4
圖 2-3	後村堰平面佈置圖	2-5
圖 2-4	後村堰排砂道及溢流堰剖面圖	2-6
圖 2-5	後村堰地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 桃園圖幅)	2-7
圖 2-6	後村堰 72 年 10 月 22 日航空照片	2-8
圖 2-7	後村堰 93 年 6 月 14 日(艾利颱風前)航空照片	2-8
圖 2-8	後村堰 93 年 11 月 7 日(艾利颱風後)航空照片	2-9
圖 2-9	後村堰 97 年 5 月 17 日航空照片	2-9
圖 2-10	義興壩位置圖	2-12
圖 2-11	義興壩 98 年照片(98.8.5)	2-12
圖 2-12	義興壩加高工程配置圖	2-13
圖 2-13	義興壩加高工程壩體剖面圖	2-14
圖 2-14	義興壩地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 桃園圖幅)	2-15
圖 2-15	義興壩附近鑽探孔位置圖	2-16
圖 2-16	義興壩附近民國 60 年地形圖	2-17
圖 2-17	義興壩附近民國 90 年地形圖	2-18
圖 2-18	義興壩附近民國 97 年地形圖	2-18
圖 2-19	義興壩下游靜水池掏刷坑範圍及深度(水利署, 92 年)	2-19
圖 2-20	義興壩格籠段下方孔洞淘刷示意圖(北水局, 97 年)	2-20
圖 2-21	義興壩 68 年 7 月 16 日航空照片	2-20
圖 2-22	義興壩 95 年 12 月 14 日航空照片	2-21
圖 2-23	石岡壩位置圖	2-24

圖 2-24	石岡壩 98 年 4 月照片	2-24
圖 2-25	石岡壩平面佈置圖	2-25
圖 2-26	石岡壩溢洪道(上)及排砂道(下)標準剖面圖	2-25
圖 2-27	石岡壩地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 東勢圖幅)	2-26
圖 2-28	石岡壩下游地質鑽孔位置圖(水規所, 98 年).....	2-27
圖 2-29	石岡壩 66 年 11 月 11 日航空照片	2-28
圖 2-30	石岡壩 87 年 4 月 29 日航空照片	2-29
圖 2-31	石岡壩 88 年 9 月 22 日航空照片	2-29
圖 2-32	石岡壩 96 年 1 月 31 日航空照片	2-30
圖 2-33	龍泉圳攔河堰位置圖	2-32
圖 2-34	龍泉圳 98 年照片(98.8.19).....	2-33
圖 2-35	龍泉圳地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 國姓圖幅)	2-33
圖 2-36	龍泉圳攔河堰 72 年 7 月 5 日航空照片	2-34
圖 2-37	龍泉圳攔河堰 96 年 11 月 19 日航空照片	2-34
圖 2-38	集集攔河堰位置圖	2-37
圖 2-39	集集攔河堰 98 年 3 月照片	2-37
圖 2-40	集集攔河堰平面佈置圖(水利署, 94 年).....	2-38
圖 2-41	集集堰溢洪道(上)與排砂道(下)剖面圖(水利署, 94 年)...	2-38
圖 2-42	集集堰地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 埔里圖幅)	2-40
圖 2-43	集集攔河堰岩盤地質圖	2-42
圖 2-44	集集攔河堰河道中心線(圖 2-44 B-B')剖面圖	2-43
圖 2-45	集集攔河堰堰址附近歷年鑽孔位置圖	2-44
圖 2-46	集集攔河堰地表地質圖(水規所, 97 年).....	2-44
圖 2-47	集集攔河堰附近斷面位置圖(中水局, 98 年).....	2-48
圖 2-48	921 地震破裂帶通過名竹大橋(摘自農航所「震痕」).....	2-49
圖 2-49	濁水溪集集攔河堰下游底床縱剖面.....	2-49

圖 2-50	集集堰 90 年 9 月 15 日航空照片.....	2-50
圖 2-51	集集堰 97 年 10 月 30 日正射影像.....	2-50
圖 2-52	濁水溪水系與水文測站位置圖.....	2-53
圖 2-53	濁水溪集集攔河堰河段.....	2-53
圖 2-54	濁水溪各河段計畫流量.....	2-53
圖 2-55	觸口攔河堰位置圖.....	2-55
圖 2-56	觸口攔河堰修復狀況照片(98.7.14).....	2-55
圖 2-57	觸口攔河堰地質圖(中油 1/100,000 地質圖).....	2-56
圖 2-58	觸口攔河堰 88 年 12 月 24 日航空照片.....	2-57
圖 2-59	觸口攔河堰 90 年 11 月 17 日航空照片.....	2-58
圖 2-60	觸口攔河堰 92 年 3 月 3 日航空照片.....	2-58
圖 2-61	觸口攔河堰 94 年 11 月 27 日航空照片.....	2-59
圖 2-62	觸口攔河堰 96 年 2 月 3 日航空照片.....	2-59
圖 2-63	東口攔河堰位置圖.....	2-61
圖 2-64	東口堰 98 年 3 月照片.....	2-62
圖 2-65	東口堰下游設置之消能池.....	2-62
圖 2-66	東口堰平面佈置圖.....	2-63
圖 2-67	東口攔河堰地質圖(中油 1/100,000 地質圖).....	2-64
圖 2-68	東口堰 65 年 12 月 1 日航空照片.....	2-65
圖 2-69	東口堰 96 年 2 月 3 日航空照片.....	2-65
圖 2-70	甲仙攔河堰位置圖.....	2-68
圖 2-71	甲仙攔河堰照片.....	2-68
圖 2-72	甲仙攔河堰平面配置圖.....	2-69
圖 2-73	甲仙堰地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 甲仙圖幅).....	2-69
圖 2-74	甲仙攔河堰 89 年 4 月 21 日航空照片.....	2-70
圖 2-75	甲仙攔河堰 98 年莫拉克颱風後航空照片.....	2-70

圖 2-76	工程會(89年)調查攔河堰沖刷問題成因統計圖	2-73
圖 3-1	後村堰露頭照片	3-2
圖 3-2	後村堰地表露頭量測點	3-3
圖 3-3	抗沖蝕能力較強之砂岩突出於河道上	3-4
圖 3-4	後村堰堰體下方沖刷照片	3-4
圖 3-5	低度風化之砂岩節理狀況	3-5
圖 3-6	中度風化之砂頁岩互層節理狀況	3-6
圖 3-7	高度風化之砂頁岩互層節理狀況	3-6
圖 3-8	後村堰岩盤沖蝕特性調查點位	3-7
圖 3-9	夾煤層、砂頁岩互層經風化、解壓形成破碎岩體	3-7
圖 3-10	義興壩露頭照片	3-9
圖 3-11	義興壩地表露頭量測點	3-9
圖 3-12	塊狀砂岩與砂頁岩互層沿節理面及層面之沖蝕狀況	3-10
圖 3-13	義興壩下方塊體抽離之岩塊	3-11
圖 3-14	義興壩岩盤沖蝕特性調查點位	3-12
圖 3-15	石岡壩地表露頭量測點	3-13
圖 3-16	莫拉克颱風後石岡壩洩洪	3-14
圖 3-17	石岡壩跌水工基礎前方沖刷坑	3-15
圖 3-18	石岡壩下游河道呈槽溝狀	3-15
圖 3-19	斷層附近的破碎岩體	3-16
圖 3-20	石岡壩岩盤沖蝕特性調查點位	3-17
圖 3-21	龍泉圳露頭照片	3-18
圖 3-22	龍泉圳地表露頭量測點	3-19
圖 3-23	膠結較差的砂頁岩互層沿節理面形成破碎岩塊	3-20
圖 3-24	龍泉圳岩盤沖蝕特性調查點位	3-21
圖 3-25	集集攔河堰露頭照片	3-22

圖 3-26	集集攔河堰地表露頭量測點.....	3-23
圖 3-27	莫拉克颱風後集集攔河堰洩洪(98.8.11).....	3-24
圖 3-28	集集攔河堰下游河道因岩性造成之差異侵蝕.....	3-24
圖 3-30	集集攔河堰 96 年底靜水池及護坦歲修檢查結果.....	3-26
圖 3-31	集集攔河堰護坦前鋪設礫石作業(97 年 3 月).....	3-27
圖 3-32	觸口攔河堰露頭照片.....	3-27
圖 3-33	觸口攔河堰地表露頭量測點.....	3-28
圖 3-34	觸口攔河堰修復.....	3-29
圖 3-35	觸口攔河堰莫拉克颱風後堰體破壞淤埋狀況.....	3-29
圖 3-36	觸口攔河堰莫拉克颱風後堰外左側改道下切狀況.....	3-30
圖 3-37	觸口攔河堰岩盤沖蝕特性調查點位.....	3-32
圖 3-38	觸口攔河堰左側新河道沖蝕特徵.....	3-32
圖 3-39	觸口攔河堰靜水池前局部沖刷狀況(94.4.13).....	3-33
圖 3-40	觸口攔河堰靜水池前局部沖刷狀況(96.11.4).....	3-33
圖 3-41	觸口攔河堰靜水池前局部沖刷狀況(97.10.18).....	3-34
圖 3-42	觸口攔河堰靜水池前局部沖刷狀況(98.8.21).....	3-34
圖 3-43	東口堰下游出露之鹽水坑頁岩.....	3-35
圖 3-44	東口堰於莫拉克颱風前後之比較.....	3-36
圖 3-45	東口堰前沖刷坑(98.3.2).....	3-37
圖 3-46	甲仙堰新鮮頁岩的解壓節理.....	3-39
圖 3-47	甲仙堰抗沖蝕能力調查點.....	3-40
圖 3-48	甲仙堰靜水池前於莫拉克颱風前後之比較.....	3-41
圖 3-49	甲仙堰下游河道於莫拉克颱風前後之比較.....	3-42
圖 4-1	攔河堰下游水力特性分析流程圖.....	4-2
圖 4-2	二維水力特性模擬範圍.....	4-5
圖 4-3	100 年重現期洪水水力特性分佈圖(流速分佈放大).....	4-6

圖 4- 11	鑽孔規劃位置圖	4-8
圖 4- 12	層狀砂岩層(C02 0-5 m).....	4-9
圖 4- 13	砂頁岩互層(C02 15-20 m).....	4-9
圖 4- 14	頁岩偶夾砂岩(C01 20-25 m).....	4-9
圖 4- 15	孔內聲波造影儀分析結果節錄(C02 4-5 m 附近).....	4-11
圖 4- 16	C01 鑽孔傾斜變化圖	4-12
圖 4- 17	C01 層面統計分析立體投影圖	4-12
圖 4- 18	C01 弱面統計分析立體投影圖	4-13
圖 4- 19	C02 鑽孔傾斜變化圖	4-14
圖 4- 20	C02 層面統計分析立體投影圖	4-14
圖 4- 21	C02 弱面統計分析立體投影圖	4-14
圖 4- 22	集集攔河堰現場位態調查結果.....	4-15
圖 4- 23	室內試驗規畫流程圖	4-16
圖 4- 24	消散性耐久試驗儀器圖.....	4-19
圖 4- 25	交通大學軟岩三軸試驗系統圖.....	4-20
圖 4- 26	集集攔河堰岩心材料單壓試驗應力應變圖	4-22
圖 4- 27	材料中節理間填充物，層面夾泥或軟弱帶	4-24
圖 4- 28	裸露岩盤上兩組解壓節理.....	4-25
圖 4- 29	C01 孔 K_h 隨深度變化圖	4-29
圖 4- 30	C02 孔 K_h 隨深度變化圖	4-29
圖 5- 1	攔河堰水流流況示意圖(工程會，89 年).....	5-2
圖 5- 2	水流沖擊引致之沖蝕機制示意圖.....	5-4
圖 5- 3	Farchad、Kariba、Picoti 三處沖刷坑深度隨時間變化圖	5-6
圖 5- 4	岩床侵蝕的裂隙延伸機制示意圖(Whipple et al, 2000).....	5-7
圖 5- 5	後村堰沖蝕狀況.....	5-10
圖 5- 6	後村堰沖蝕機制剖面位置圖.....	5-10

圖 5- 7	後村堰下游岩盤沖刷機制示意圖.....	5-11
圖 5- 8	義興壩下游節理發達岩體沖蝕狀況.....	5-11
圖 5- 9	義興壩下游岩盤沖刷機制示意圖.....	5-12
圖 5- 10	石岡壩堰前沖蝕狀況.....	5-13
圖 5- 11	石岡壩沖蝕機制剖面位置圖.....	5-13
圖 5- 12	石岡壩下游岩盤沖刷機制示意圖.....	5-14
圖 5- 13	龍泉圳攔河堰下游岩盤沖刷機制示意圖	5-15
圖 5- 14	龍泉圳攔河堰下游出露頁岩及沖蝕狀況	5-16
圖 5- 15	集集攔河堰下游出露岩層及沖蝕狀況	5-17
圖 5- 16	集集攔河堰下游岩盤地質圖.....	5-17
圖 5- 17	集集攔河堰下游岩盤沖刷機制示意圖	5-18
圖 5- 18	觸口攔河堰下游出露之岩層.....	5-18
圖 5- 19	觸口攔河堰下游岩盤沖刷機制示意圖	5-19
圖 5- 20	東口堰下游沖刷機制示意圖.....	5-20
圖 5- 21	甲仙攔河堰下游沖刷機制示意圖.....	5-21
圖 5- 22	甲仙攔河堰下游出露之頁岩.....	5-22
圖 5- 23	塊體抽離型沖刷示意圖.....	5-28
圖 5- 24	均勻下切型沖刷示意圖.....	5-28
圖 5- 25	槽溝下切型沖刷示意圖.....	5-29
圖 6- 1	能量消耗 vs. 抗沖蝕指數圖	6-5
圖 6- 2	評估沖蝕坑的可能沖蝕深度.....	6-6
圖 6- 3	岩塊長度比值 y/x 示意圖.....	6-10
圖 6- 4	水流沖擊引致之沖蝕機制示意圖(同圖 5- 2)	6-11
圖 6- 5	發展中沖刷坑之噴射水流示意圖(Spurr, 1985).....	6-13
圖 6- 6	沖刷坑水流示意圖.....	6-16
圖 6- 7	集集堰可攜走最大岩塊尺寸.....	6-20

圖 6-8	集集堰沖刷坑分析模型.....	6-20
圖 6-9	義興壩可攜走最大岩塊尺寸.....	6-22
圖 6-10	義興壩沖刷坑分析模型.....	6-23

摘 要

一、計畫緣由及目的

攔河堰設置後，河川坡度改變，一方面造成上游泥砂淤積，另一方面則造成下游水流能量增加，往往引致局部沖刷或形成攔河堰下方之沖刷坑。傳統之河川沖刷議題多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。

本計畫期針對岩盤之沖刷力學機制進行研究，提出可行之沖刷坑沖刷深度評估方法以及研擬抗沖蝕穩定工法，以供規劃設計單位參考，防範相關問題於未然。

二、工作範圍及工作項目

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，廣闊分佈於台灣西部區域。計畫工作項目及執行流程如圖摘-1所示。

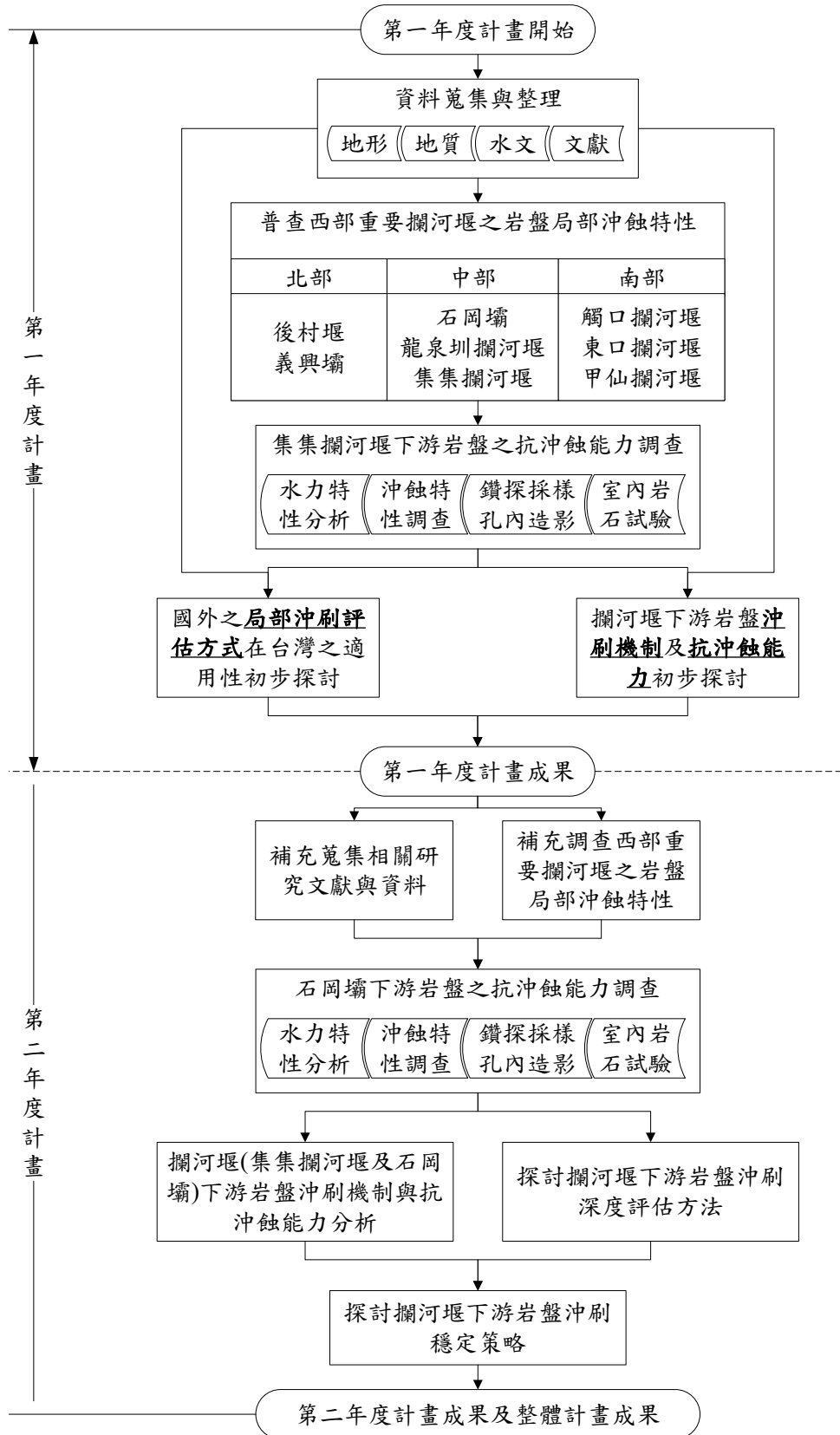
(一)第一年度(本年度)工作重點

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)第二年度(99年)

延續第一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。



圖摘-1 計畫分期工作執行流程圖

三、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，表摘- 1 為本計畫預定普查沖蝕特性之 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。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。

四、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。

表摘-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
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
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
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
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
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
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
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
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

(本計畫綜合資料整理)

(一)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。

(二)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都是由塊體抽離所主控。

(三)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。

(四)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。

(五)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，水流流向大致順著地層走向，水流量大時，地層傾向與水流流向相反。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。初鄉斷層經過之區域節理組數較多且發達，岩體成破碎狀被水流抽離。其餘部分的沖刷行為則多為水流沿著岩層層面侵蝕，抗沖蝕能力較弱的砂頁岩互層、

頁岩下切速度較快，抗沖蝕能力較強的砂岩下切速度較慢，呈平行層面的槽溝狀河道。

(六)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，一為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。另一為懸浮載對岩床表面的磨蝕作用，造成許多滑槽殘留。

(七)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65年及96年航照發覺並無太大差異，顯示河道穩定性佳，且沖刷坑亦無明顯變化。

(八)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。本次 88 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。

五、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，工作數量整理如表摘-2 所示。

表摘-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

鑽探岩心可分為三類：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 鑽孔有一組節理面，C02 鑽孔共有三組節理面。

整理一般物理性質試驗結果，三種岩性的比重介於 2.62-2.70 之間。自然含水量介於 2.0%-7.5% 之間，頁岩孔隙比最小，範圍為 0.052-0.068，砂頁岩互層孔隙比變化較大，介於 0.07-0.276 間。砂岩則介於 0.187-0.199 間。消散耐久試驗結果材料 Id2 皆大於 70% 以上，評分為中耐久性至高耐久性。6 組單軸抗壓試驗，包含三種岩性，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，其次為頁岩，砂頁岩薄互層最弱。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。

六、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，一是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)，另一則是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（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三類沖刷模型：

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，其示意圖如圖摘-2。

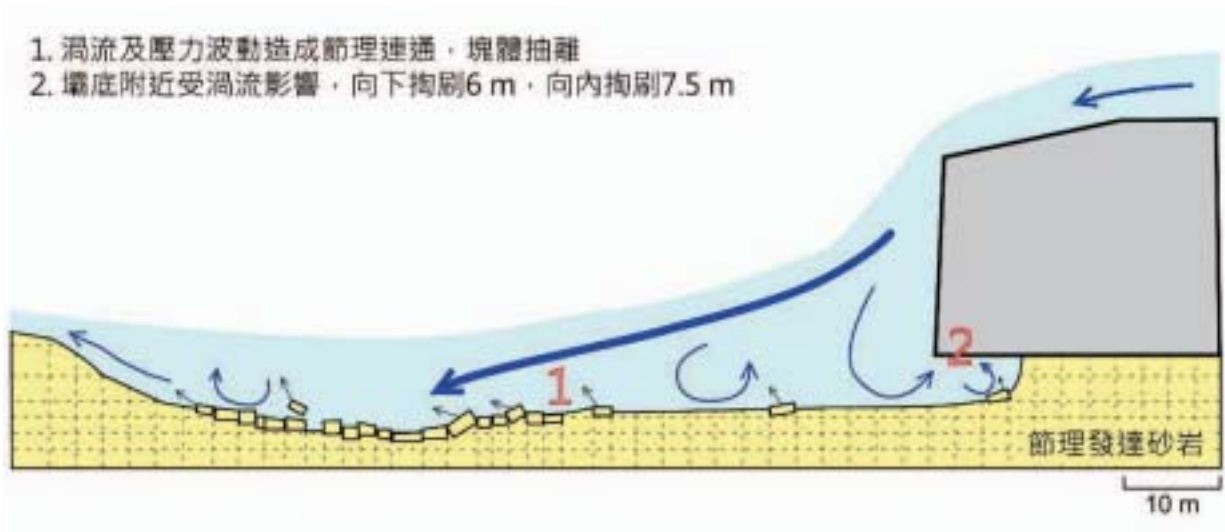
2、均勻下切型(龍泉圳攔河堰、觸口攔河堰、甲仙攔河堰)

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，其示意圖如圖摘-3。

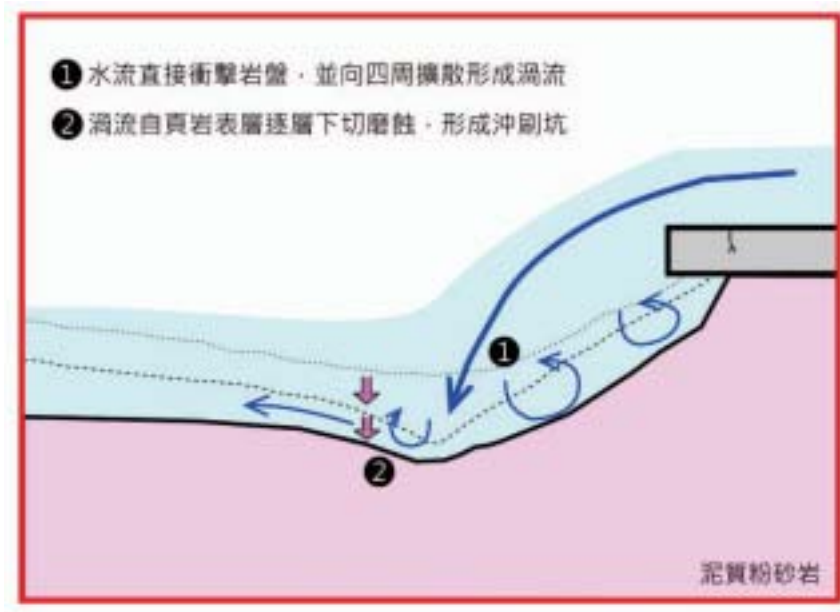
3、槽溝下切型(後村堰、石岡壩、集集攔河堰)

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

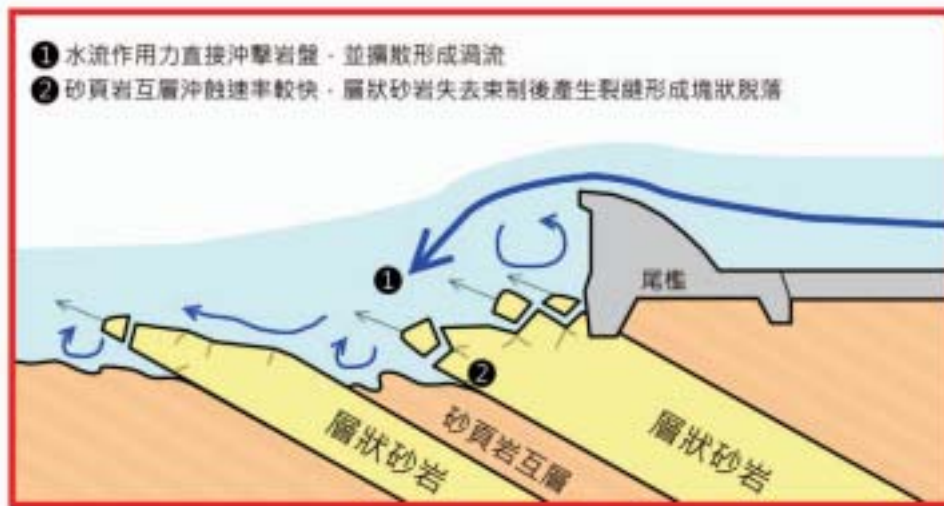
斜交，傾角又頗高，由於頁岩的沖蝕速率較快，當頁岩被侵蝕後，尚未侵蝕的砂岩孤立，失去了束制且凸顯範圍增加，放大了水流沖擊力、顆粒撞擊力、渦流及壓力波動對孤立砂岩的影響，造成撓曲斷裂，加速塊體脫離的潛能。若要合理簡化並掌握槽溝下切型的沖刷速率，只要掌握抗沖蝕能力較低的岩層乃主控沖刷之岩層的原則，便可掌握沖刷坑之發展，其示意圖如圖摘-4。



圖摘-2 塊體抽離型沖刷示意圖



圖摘-3 均勻下切型沖刷示意圖



圖摘-4 槽溝下切型沖刷示意圖

七、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。

較為完整考量岩石特性的沖刷深度評估方法有限，僅有 Spurr(1985)、Annandale (1995, 2006)、以及 Bollaert(2002)等三種。此三種方式中，以 Annandale(1995, 2006)以及 Bollaert(2002)兩種方式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 Sedimentation Engineering(2008)中所推薦，所以本工作初步擬針對 Annandale et al.(1995, 2006)以及 Bollaert(2002)兩種評估方式為主進行適用性探討。

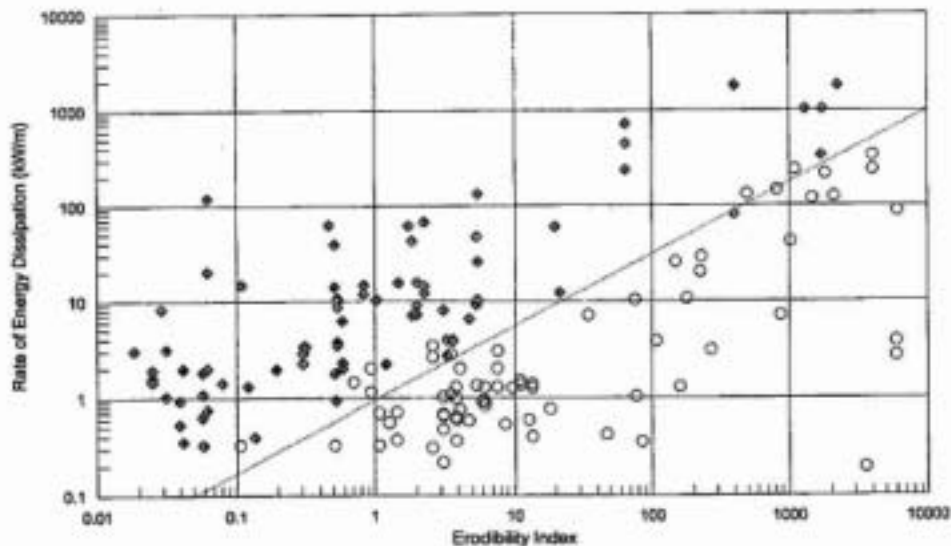
(一)Annandale (1995, 2006)岩盤沖刷評估方式

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。依明渠流體力學理論計算各處河道之能量消耗：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

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，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(圖摘-5)。



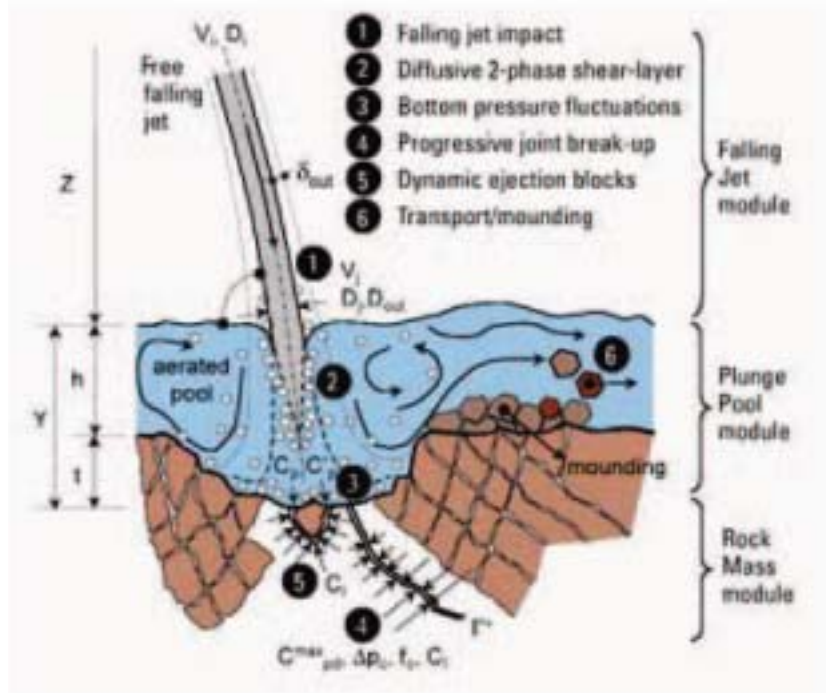
圖摘-5 能量消耗 vs. 抗沖蝕指數圖

(二)Bollaert (2002)岩盤沖刷評估方式

Bollaert 以圖摘-6 之示意圖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：

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。



圖摘-6 水流沖擊引致之沖蝕機制示意圖

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。

(三)岩盤沖刷評估方式適用性探討

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，針對結果作以下說明：

1. 依 Annandale 之分析方式，在集集堰受到卡玫基颱風($Q_{\max} = 10,906 \text{ cms}$)作用可在堰前造成 3 m 的沖刷深度，與實際沖刷狀況(約達 3 m)大致相符。
2. 依 Annandale 之分析方法，在義興壩受到 $Q_{\max} = 8,527 \text{ cms}$ 作用下所分析的沖刷坑深度於 1.5 m 即達平衡，與實際量測沖刷坑深度 15 m 差異甚大。
3. 依 Bollaert 之分析方式，在集集堰受到卡玫基颱風($Q_{\max} = 10,906 \text{ cms}$)作用，沖刷坑需達 23 m 深才能穩定，於現地沖刷坑深度 3 m 的情況下仍可抽離邊長 0.65 m 的塊體，相較於實際發生情形，似過於保守。
4. 依 Bollaert 之分析方法，在義興壩受到 $Q_{\max} = 8,527 \text{ cms}$ 作用下，60 年與 90 年的沖刷坑的地形條件仍有下刷的潛能，與實際狀況相符。97 年的分析結果顯示最大可抽離的塊體尺寸邊長為 1.4 m，現地也確有看到尺寸相近之岩塊，目前現地岩體節理間距約為 1.6 m 及 0.5 m，應屬沖刷較為穩定的狀況。

就本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，明年度可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，未來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。

Abstract

To elevate river water table for providing public water supply, weirs were usually built across rivers in Taiwan. Most of the river beds in western foothills of Taiwan are composed soft sedimentary rocks, such as sandstone, siltstone, and mudstone. 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) preliminary 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.

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 geomaterials (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 and the Yi-Sin Dam.

Based on the erodibility indexes evaluated in field, the scouring depths in the Chi-Chi weir and the Yi-Sin Dam predicted by the Annandale's model were compared with what has actually occurred in field. The scouring depth in the Chi-Chi weir predicted by the Annandale's model agrees more or less with real situation. The scouring hole in the Yi-Sin Dam, however, is not well predicted by the Annandale's model.

The model of Bollaert and Schleiss reasonably predicts the real situation in the case of the Yi-Sin Dam. But, the depth of scouring hole in the Chi-Chi weir predicted by the model of Bollaert and Schleiss is largely different from the real situation. Its reason is likely due to (1) the dissimilar mechanical behavior and water-jet condition; and (2) the scouring process downstream of a weir built on soft rocks (e.g., the Chi-Chi weir) is not exactly what proposed by Bollaert and Schleiss. The results from field investigation reveal that the shape of scour hole on

soft rocks is very different from the cases on hard rocks. The scour hole on soft rocks exhibits low sloping inclination in the upstream side and tends to progress to the downstream.

It appears that both of the two models are only partially successful and are not generally applicable. The applicability and limitation of both methods deserve further deliberation and examination.

結論與建議

一、結論

- (一) 攔河堰下游側岩盤若為軟弱岩石，往往出現劇烈之局部沖刷。
- 本計畫針對西部八座攔河堰下游側岩盤的局部沖刷進行深入調查研究。本年度已經蒐集豐富之攔河堰地質、地形、水文、及相關研究文獻，對下年度工作將有甚大助益。
- (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。本計畫採用岩盤抗沖蝕指數來描述軟弱岩石河床之抗沖蝕能力。
- (三) 本計畫透過現地地質調查、鑽探取樣、現地試驗、力學試驗、堰前沖蝕特徵調查、以及資料蒐集比對，並參考既有相關研究文獻，詳細調查與評估所調查之八座攔河堰下游岩盤抗沖蝕指數，並釐清此等攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力之主控因素如表摘-3 所示。

表摘-3 攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力之主控因素表

攔河堰	抗沖蝕能力主控因素
後村堰	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	岩體中之節理間距。
石岡壩	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	堰址之厚層頁岩。
集集攔河堰	堰址之砂頁岩互層。
觸口攔河堰	堰址之泥質粉砂岩以及頁岩。
甲仙攔河堰	堰址之泥質粉砂岩以及頁岩。

(四)綜合各攔河堰下游岩盤的沖刷機制，本研究將攔河堰下游側軟弱岩石岩盤的局部沖刷機制歸納為三種沖刷模型：

1. 塊體抽離型(義興壩)，此類型岩盤之岩石強度較強，遠大於節理面強度，且節理發達。水流沖擊力、顆粒撞擊力、渦流及壓力波動皆可能令既有節理延伸及連通。當節理連通造成塊體孤立後，水流拖曳力及波動水壓力將塊體上舉脫離。
2. 均勻下切型(龍泉圳攔河堰、觸口攔河堰、甲仙攔河堰)，此類型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。水流沖擊力或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。
3. 槽溝下切型(後村堰、石岡壩、集集攔河堰)，此類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，撓曲斷裂塊體脫離。

(五)為瞭解攔河堰下游側河段之水力特性，本計畫由攔河堰上、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；以攔河堰上、下游河段之水深平均水力條件為基礎，作為岩盤局部沖刷評估工作之水力輸入參數，配合選擇之局部沖刷評估模式、攔河堰及地形條件，進行攔河堰前局部沖刷之分析評估。

(六)為探討國外局部沖刷評估方式在台灣之適用性方面，本計畫採用 Annandale et al.(1995, 2006)以及 Bollaert(2002)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，Annandale 的岩體抗沖蝕指數評分法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；Bollaert 的節理硬岩岩體評估方式，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，但皆各有其有限之適用範圍。

二、建議

- (一)台灣之主要河川一般均僅數年進行一次大斷面測量，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於沖刷坑可能出現範圍增加河道測量之次數與斷面間隔。
- (二)本年度已就 8 個攔河堰進行詳細沖蝕特性調查，未來可基於這些沖蝕機制為基礎，提出因應局部沖蝕之策略建議。
- (三)依據本計畫實例評估結果，Annandale et al.(1995, 2006)以及 Bollaert(2002)評估方式都各有其適用範圍，未來仍須針對其分析概念及參數選用方式進一步研究。

第壹章 計畫說明

一、計畫緣由及目的

攔河堰設置後，河川坡度改變，一方面造成上游泥砂淤積，另一方面則造成下游水流能量增加，往往引致局部沖刷或形成攔河堰下方之沖刷坑。傳統之河川沖刷議題多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。

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

二、工作項目及內容

第一年度：98 年度(本年度)

(一)資料蒐集與整理

1. 區域地質資料
2. 歷年地形資料
3. 水文資料
4. 文獻資料

(二)普查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性

第一年度調查後村堰(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)等下游岩盤之局部沖蝕特性，包含是否發生沖蝕、沖蝕位置、沖蝕現象、沖蝕規模、及岩性位態等。

(三)攔河堰(集集攔河堰)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。

(四)攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力初步探討

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初步評估。

(五)國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性初步探討

蒐集國外之局部沖刷評估方式(如 Annandale 之抗沖蝕能力評估方式)，探討這些方式在台灣之適用性。

第二年度：99 年度

(一)補充蒐集相關研究文獻與資料。

(二)補充調查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性。

(三)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。

(四)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。

(五)探討攔河堰下游岩盤沖刷深度評估方法。

(六)探討攔河堰下游岩盤沖刷穩定策略。

三、工作範圍

依據本計畫工作項目及內容，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，廣闊分佈於台灣西部區域，北至台北縣柑園，南至高雄縣甲仙，8個壩堰址之分佈位置如圖 1-1 所示。

四、工作分期執行構想

本計畫將針對設置攔河堰引致岩盤沖刷進行資料蒐集與普查 8 座台灣西部之攔河堰，並針對集集攔河堰(本年度)及石岡壩(第二年度)進行抗沖蝕能力調查，據以瞭解局部沖刷及沖刷坑形成機制，探討可能沖刷深度評估方法，進而建議沖刷穩定策略。

依據本案委託服務說明書，本計畫屬二年度計畫，本年度(98年)為第一年度，第二年度工作則將於 99 年度內執行。以下就二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。本計畫二年分期執行構想如圖 1-2，並說明如下：

(一)第一年度(本年度)

第一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) 第二年度(99 年)

第二年度之工作係延續第一年度之工作成果深入探討相關議題，針對新發表之相關文獻資料補充蒐集，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等抗沖蝕能力調查。

第二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。

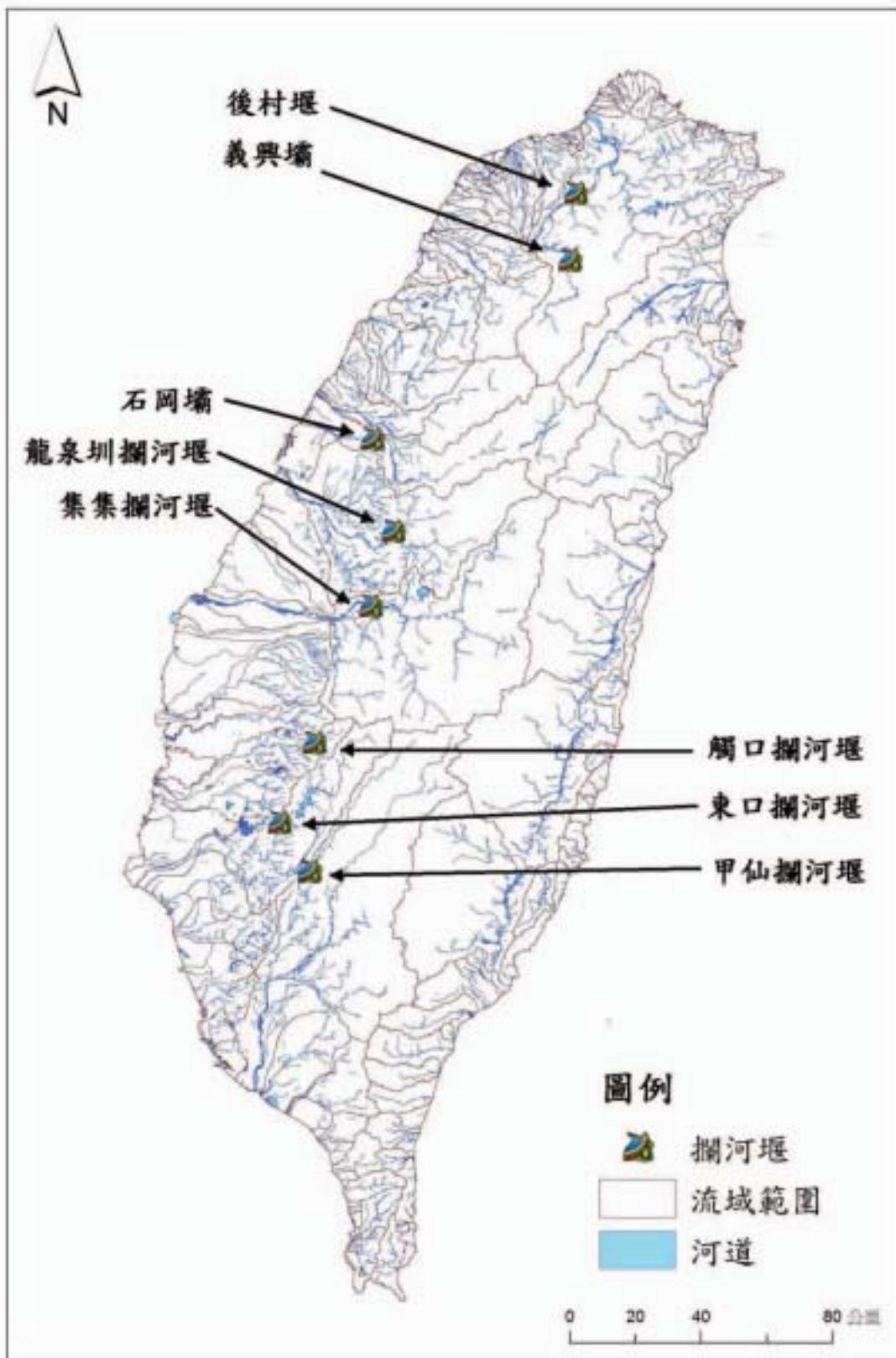


圖 1-1 調查攔河壩位置圖

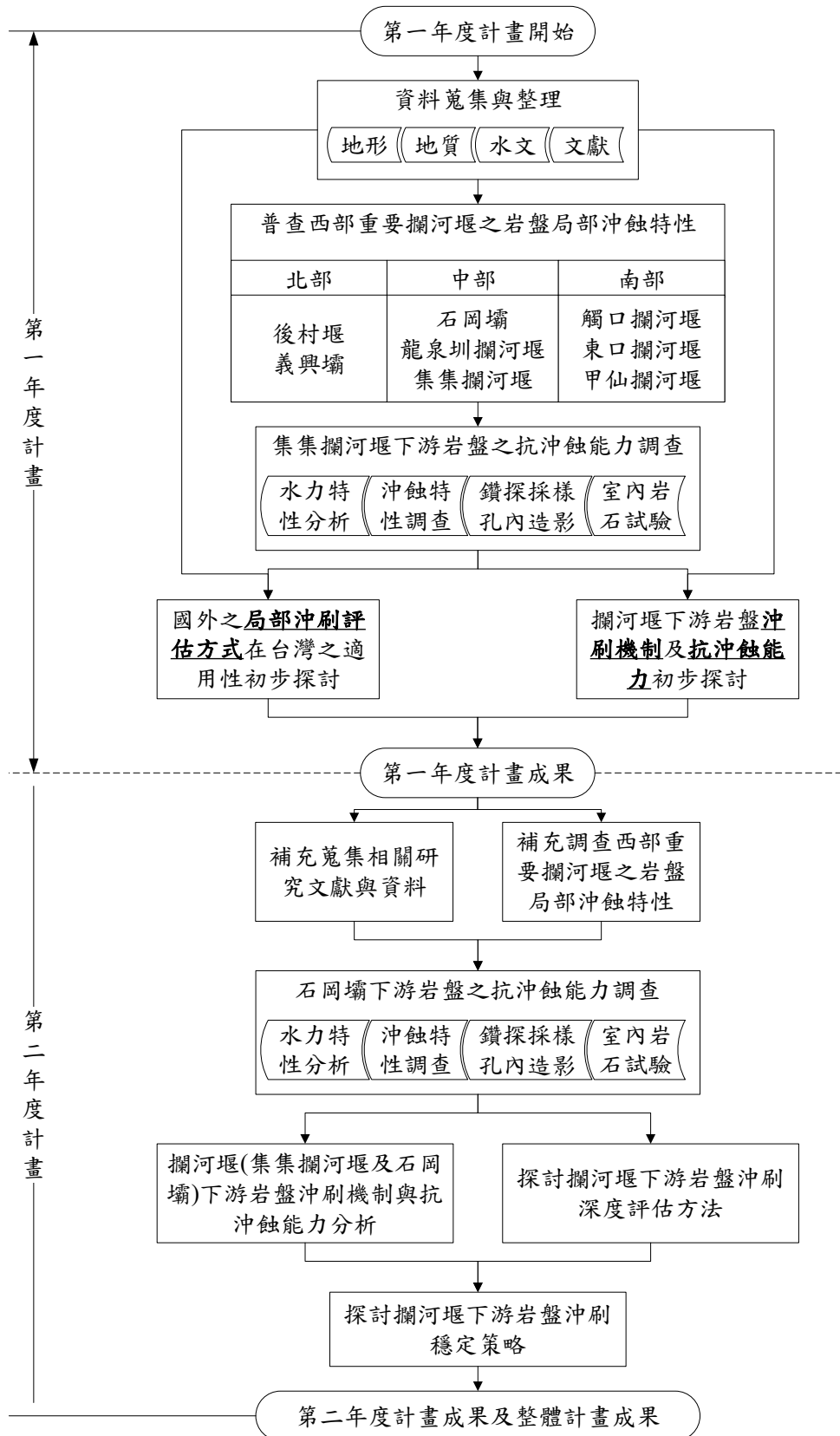


圖 1-2 計畫分期工作執行流程圖

第貳章 資料蒐集與整理

本計畫資料蒐集與整理之對象內容包含區域地質資料、歷年地形資料、水文資料、以及文獻資料等，蒐集資料之方向及其目的如以下說明：

1. 地質資料：目的在於獲得各攔河堰附近之區域地質概況，瞭解主要之地層岩性及區域地質構造，作為現地普查攔河堰岩盤局部沖蝕特性之參考。
2. 地形資料：蒐集攔河堰建造時期之地形或原始設計圖，以及現況地形資料，地形之變化可作為研判沖蝕狀況之參考。
3. 水文資料：配合攔河堰之型式以及操作狀況，瞭解一般流量以及颱風時期的流量，作為探討沖刷特性之依據。
4. 文獻資料：包含兩個方向，一是各攔河堰之相關研究報告，瞭解各攔河堰之基本資料及相關研究資料，敘述於本章內容中。另一則是國外針對岩盤沖刷坑形成機制以及評估沖刷坑深度方法的相關研究文獻，分別於第五章及第陸章中進行說明。

表 2-1 為本計畫預定普查沖蝕特性之 8 座攔河堰之基本資料整理，表中所整理列出之資料包含堰壩型式、目前河床型態，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，將於後續章節說明。

八座攔河堰中石岡壩、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。

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
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
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
3	石岡壩	民國 66 年	大甲溪	公共用水 農業用水	21.4	240	混凝土重力式壩 靜水池及階梯式
4	集集攔河堰	民國 90 年	濁水溪	公共用水 農業用水	15	352.5	混凝土重力式壩 靜水池及水泥護
5	龍泉圳攔河堰	民國 71 年	烏溪	農業用水	3	80	混凝土重力式壩 混凝土塊護床工
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
7	東口攔河堰	民國 62 年	曾文溪	公共用水	約 5 公尺	220.8	混凝土重力式壩 靜水池式消能工
8	甲仙攔河堰	民國 88 年	旗山溪	公共用水	7	120	混凝土重力式壩 靜水池式消能工

(本計畫綜合資料整理)

一、後村堰(大漢溪)

(一)攔河堰概述

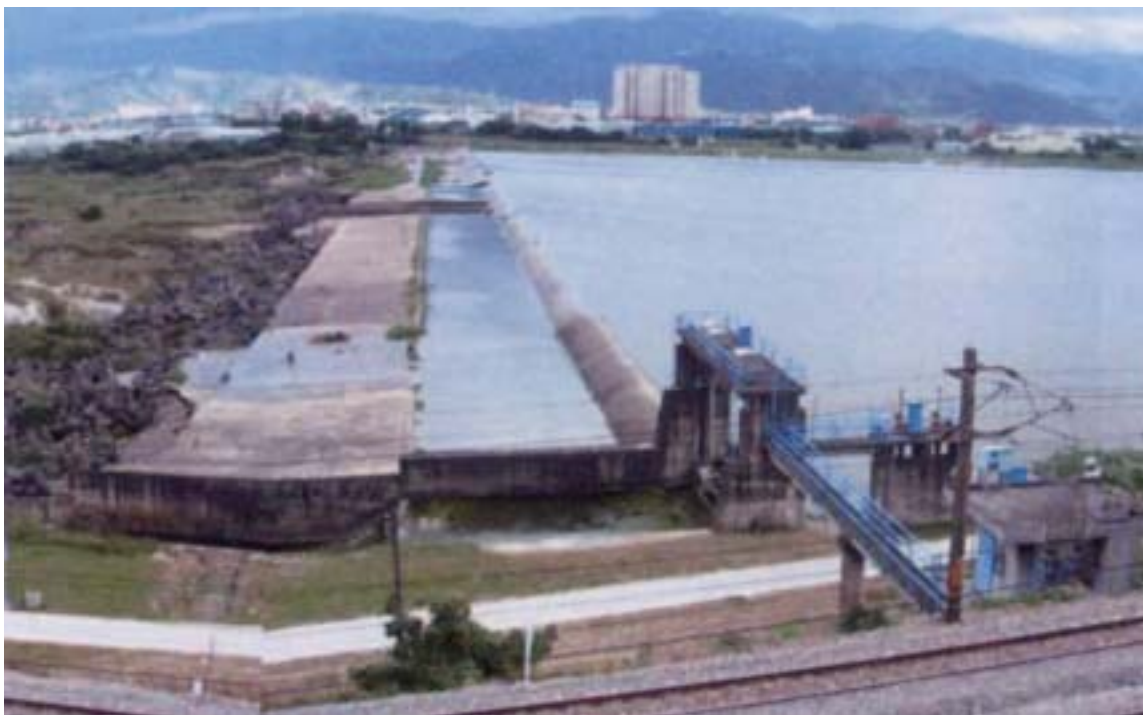
後村堰於民國 67 年發包，至民國 72 年全部完成，位於大漢溪上游距離鳶山堰 6 公里處，位置如圖 2-1 所示。主要用途為抬高該區域水頭，確保灌溉農業用水無虞，並用以滿足板新及石門地區公共給水。後村堰堰址大漢溪河道寬闊，河寬近 1 公里，河道坡度則約為 1/300。後村堰 95 年照片如圖 2-2 所示。

後村堰原設計壩高 3 公尺，型式為浮式混凝土堰+混凝土心牆堆石壩，堰長為混凝土堰 282.7 公尺，堆石堰 273.6 公尺，堰體下游利用靜水池消能，後村堰屬主要之相關設計資料如下(圖 2-3、圖 2-4)：

1. 攔河堰堰址座落於岩盤上，河道深槽 120 公尺處設置垂直跌落式(臥箕式)自由溢流之固定堰，堰頂標高 28 公尺。下游設靜水池，靜水池底部標高 25.3 公尺，尾欄高程 26.11 公尺，靜水池下游拋石至高程 25 公尺。於兩側設置翼牆以導正水流。固定堰向兩岸沙洲設置沉箱以作為防淘牆(長 480 公尺)，牆頂標高 28.5 公尺，全部沉箱沉至河床岩盤並灌漿，以減少河床滲漏。
2. 排砂道設於左岸，取水口分兩孔位於排砂道左岸上游 10 公尺處，每孔寬 15 公尺，高 1.2 公尺，正常取水位標高 27.7 公尺，設計最大流量 3.946 cms，取水流速可達 1.5 m/s，前端設置攔汙柵。
3. 設計洪峰流量為 9,770 cms(100 年)，固定堰設計單寬流量 17c s。利用護床工達到消能作用。

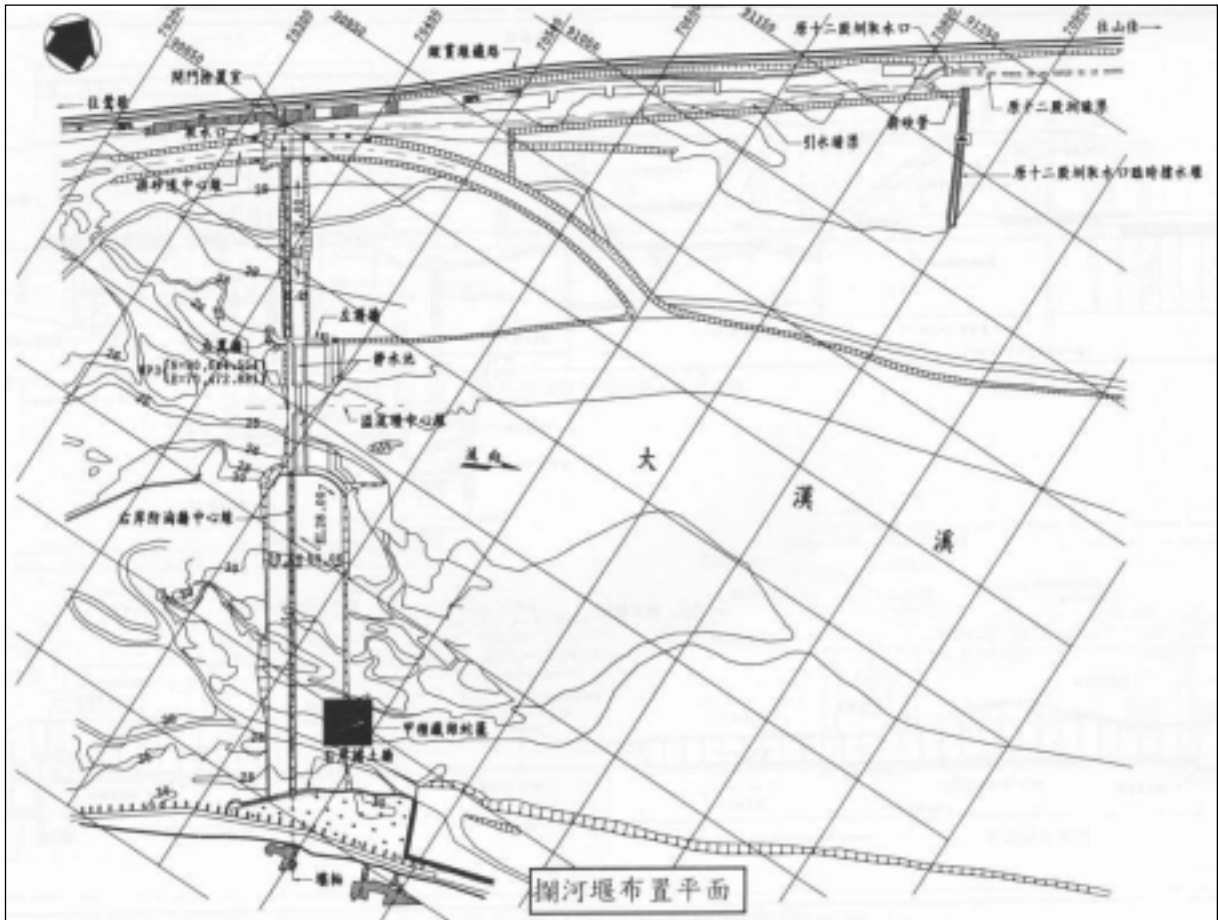


圖 2-1 後村堰位置圖



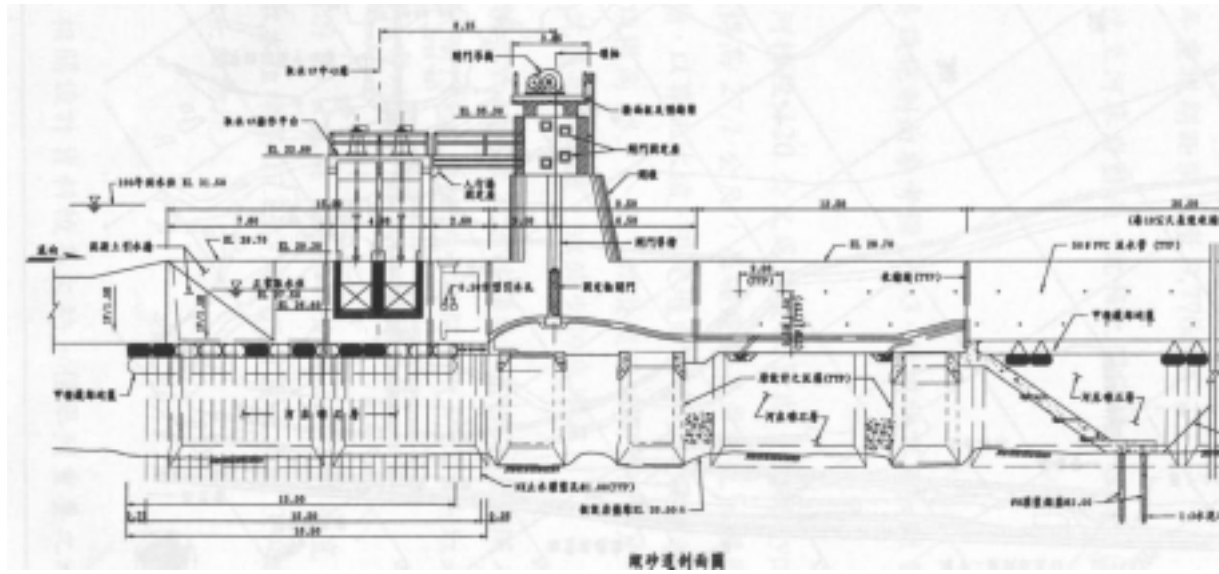
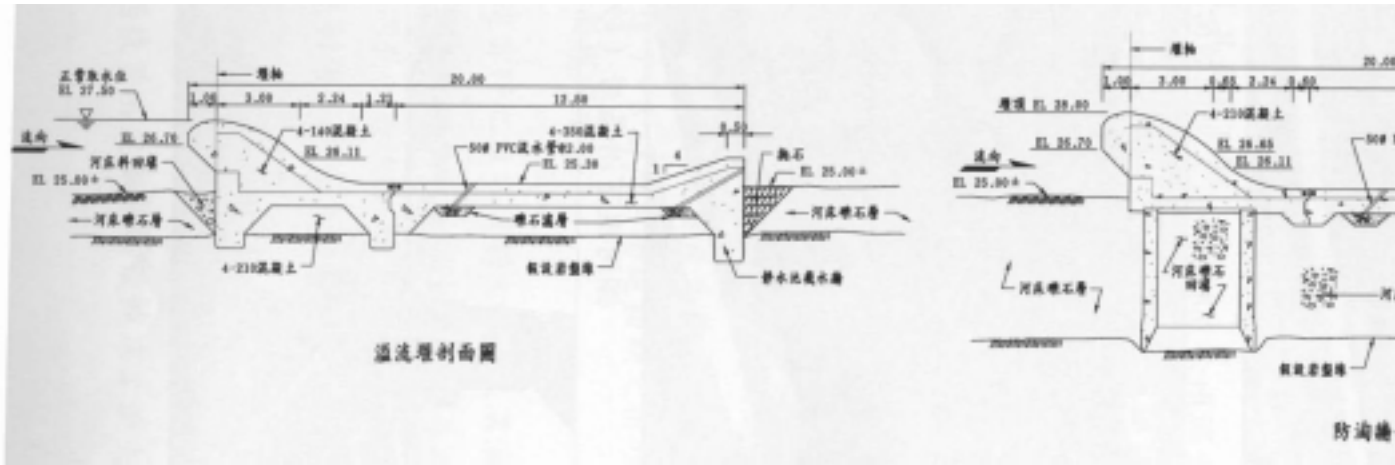
(「曾文水庫越域引水工程計畫攔河堰與沈砂池設計要領研擬」，水利署，95 年)

圖 2-2 後村堰 95 年照片



(「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」，水利署，95年)

圖 2-3 後村堰平面佈置圖



(「曾文水庫越域引水工程計畫攔河堰與沉砂池設計要領研擬」，水利署，

圖 2-4 後村堰排砂道及溢流堰剖面圖

(二)地質資料

河床原本由厚層砂礫及卵礫石覆蓋，但受上游因砂及下游疏浚影響，河床刷深明顯。堰址出露岩層為南莊層或桂竹林層岩盤(見圖 2- 5)，岩性為砂岩、頁岩與砂頁岩互層。

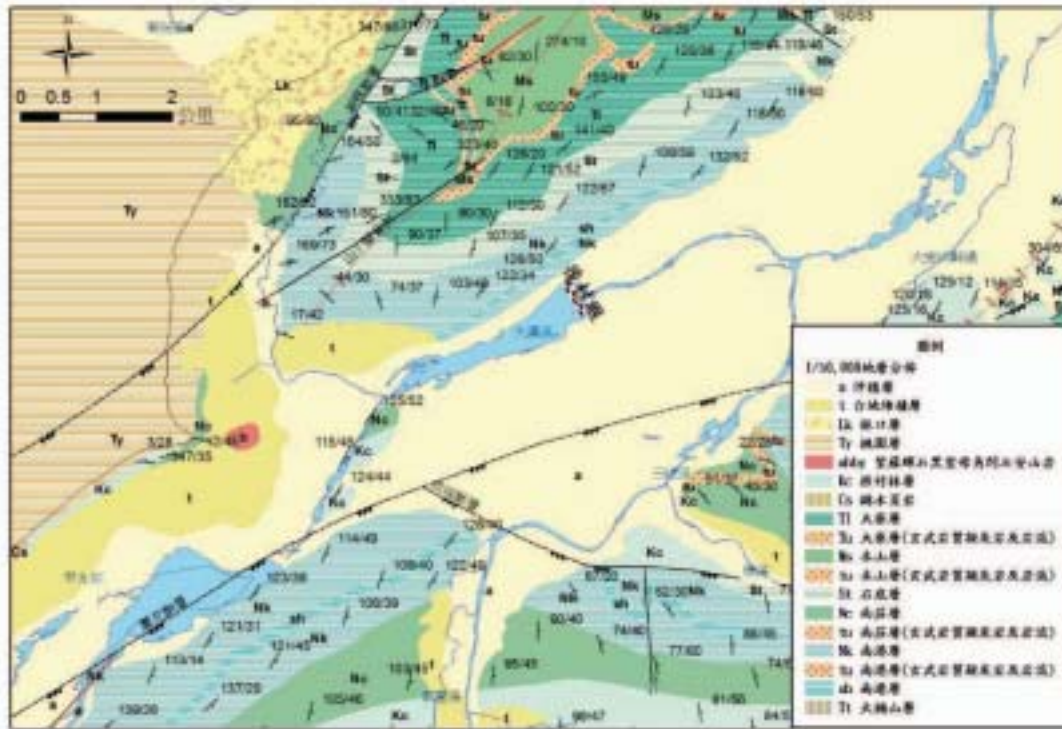


圖 2-5 後村堰地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 桃園圖幅)

(三)地形資料

由後村堰之航空照片進行立體判釋與觀察(圖 2- 6、圖 2- 7、圖 2- 8、及圖 2- 9)，後村堰堰體沖毀前主要沖刷問題係下游河道沖刷下切至岩盤，砂頁岩互層間差異侵蝕，形成數道小峽谷，最大落差可能 7、8 公尺(水利署，95 年)，所採用之防治措施乃利用混凝土型塊與抬高固床工高度以保護下游。

民國 93 年 8 月艾利颱風侵襲台灣造成北部河川嚴重災情，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(水利署，95 年)之深水河槽。



航照判釋結果：1、2 為堰前沖刷坑；3~6 為下切之深槽。

圖 2-6 後村堰 72 年 10 月 22 日航空照片



航照判釋結果：紅框為連續的堰前沖刷坑槽，堰體有多處破損；1~4 為下切之深槽。

圖 2-7 後村堰 93 年 6 月 14 日(艾利颱風前)航空照片



航照判釋結果：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。

圖 2-8 後村堰 93 年 11 月 7 日(艾利颱風後)航空照片



航照判釋結果：河道深槽拓寬，岩盤侵蝕範圍擴大。

圖 2-9 後村堰 97 年 5 月 17 日航空照片

(四)水文資料

大漢溪流域河川流量於 5 至 10 月屬豐水期，11 月至次年 4 月屬枯水期，依據民國 97 年「大漢溪河川治理規劃檢討」之成果，彙整後村堰河段各重現期距之洪峰流量如表 2-2 所示。

依據民國 97 年「大漢溪河川治理規劃檢討」之成果，後村堰河段歷年實測之最大洪水量如表 2-3 所示。

表 2-2 後村堰堰址各重現期洪水量表

重現期距	5 年	10 年	20 年	50 年	100 年	200 年
洪水量(cms)	4,600	6,500	8,100	10,400	11,500	13,800

(大漢溪河川治理規劃檢討，水規所，民國 97 年)

表 2-3 後村堰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)
59	2,000	79	3,510
60	4,250	80	610
61	5,720	81	1,560
62	215	82	458
63	496	83	2,620
64	753	84	274
65	760	85	5,360
66	910	86	2,830
67	910	87	3,990
68	1,110	88	477
69	225	89	1,640
70	959	90	3,430
71	920	91	2,536
72	1,010	92	410
73	2,180	93	8,594
74	4,610	94	5,166
75	1,600	95	863
76	1,620	96	4,637
77	921	97	3,184
78	2,450		

(大漢溪河川治理規劃檢討，水規所，民國 97 年)

二、義興壩(大漢溪)

(一)攔河堰概述

義興壩建造於大漢溪主流，位於石門水庫上游約 3 公里處。圖 2- 10 為義興壩位置圖。義興壩為防砂壩，於民國 55 年 12 月竣工，壩長 100 公尺，由混凝土重力式格籠壩及混凝土重力式溢流壩所組成，壩高 25.5 公尺。格籠壩下游為寬 60 公尺、長 34 公尺之靜水池，池底為 1.5 公尺厚之鋼筋混凝土底板，靜水池下端設高約 4 公尺之尾水欄。

原始義興壩於民國 58 年即大部分淤滿，石門水庫管理局遂進行義興防砂壩加高工程，於民國 62 年完工，加高工程之配置圖如圖 2- 12 所示，壩體剖面圖如圖 2- 13 所示。加高工程概分為六項，1.格籠段加高 6 公尺至標高 282.8 公尺，2.溢流段亦加高約 6 公尺至標高 283.4 公尺，3.左岸壩座混凝土，4.右岸壩座混凝土，5.下游副壩，6.下游岸壁混凝土護牆。

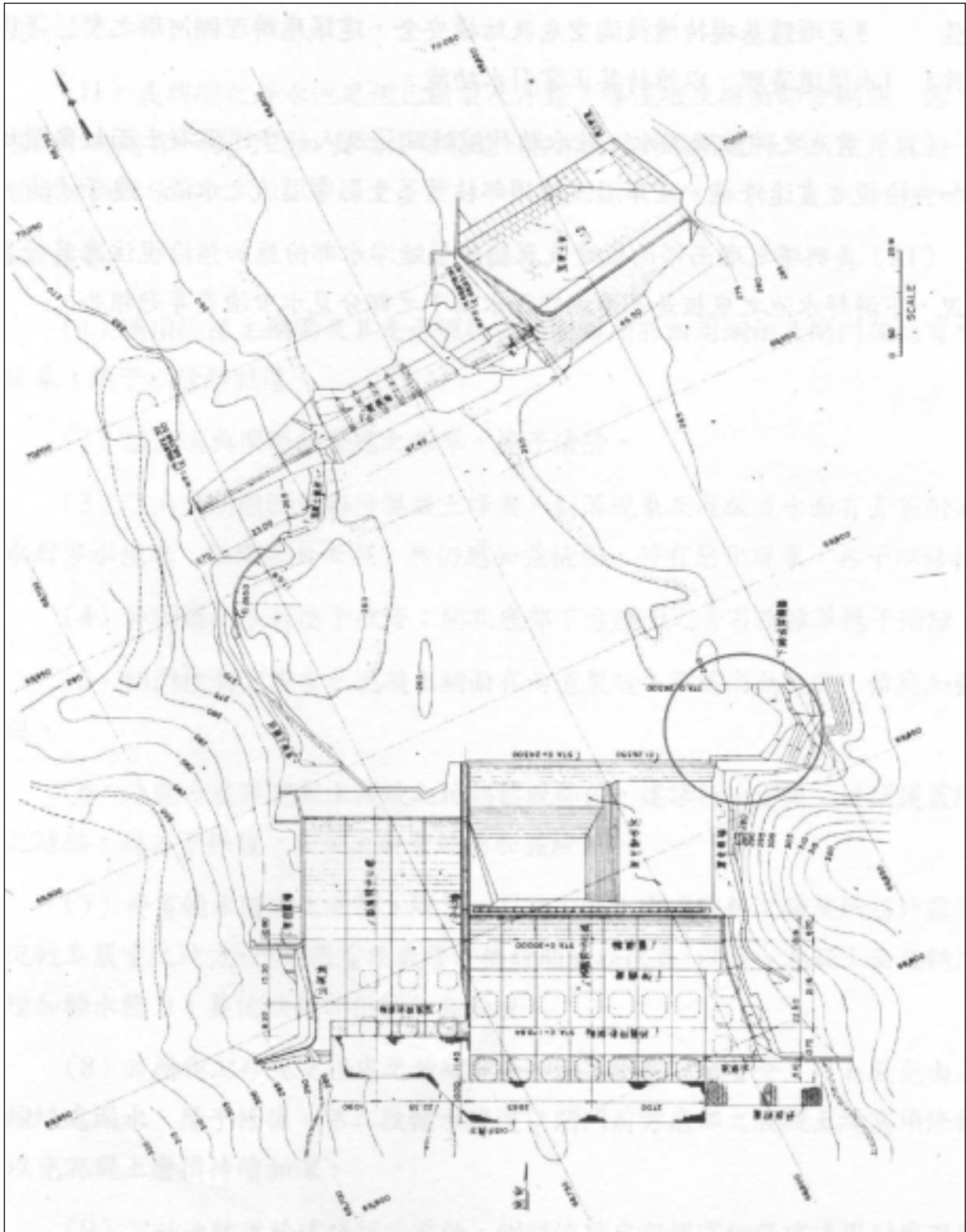
義興壩設計之淤砂量為 920 萬立方公尺，民國 93 年艾利颱風造成山坡地嚴重沖刷，導致淤砂量達到極限。自民國 94 年，由經濟部水利署北區水資源局辦理「石門水庫集水區義興防砂壩」淤積清除工作，預定每年清除 25 萬立方公尺淤積。圖 2- 11 為義興壩 98 年時概況，壩上游已經淤滿，壩下游可見一大型沖刷坑，為消能池損壞後擴大而成，下游之副壩功能為抬高壩下游尾水位達到消能作用，然副壩中央已經沖毀，現拋置鼎塊以增加抬高水位作用。



圖 2-10 義興壩位置圖

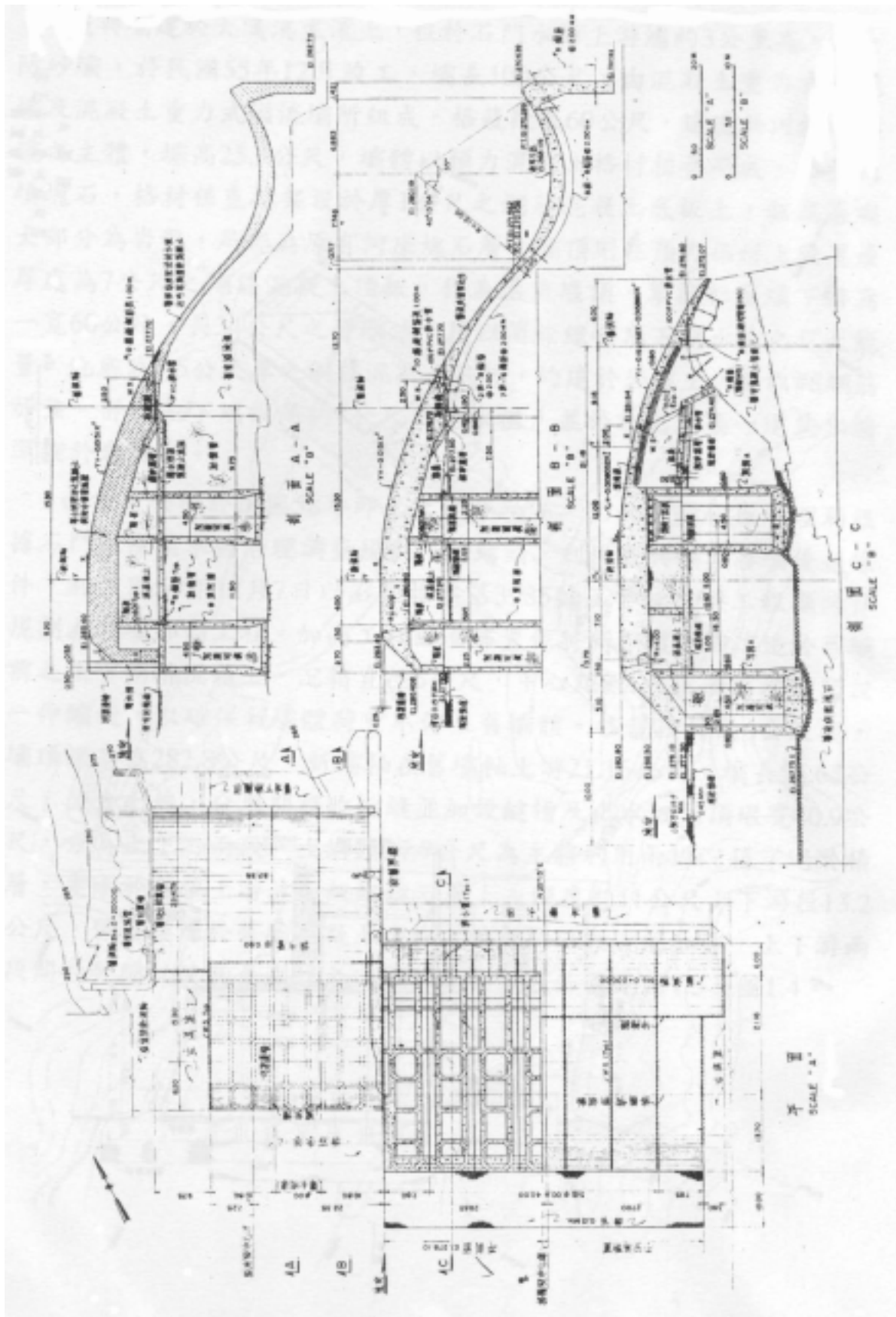


圖 2-11 義興壩 98 年照片(98.8.5)



(榮華大壩(含義興電廠)第二次安全檢查與評估，水利署，92年)

圖 2-12 義興壩加高工程配置圖

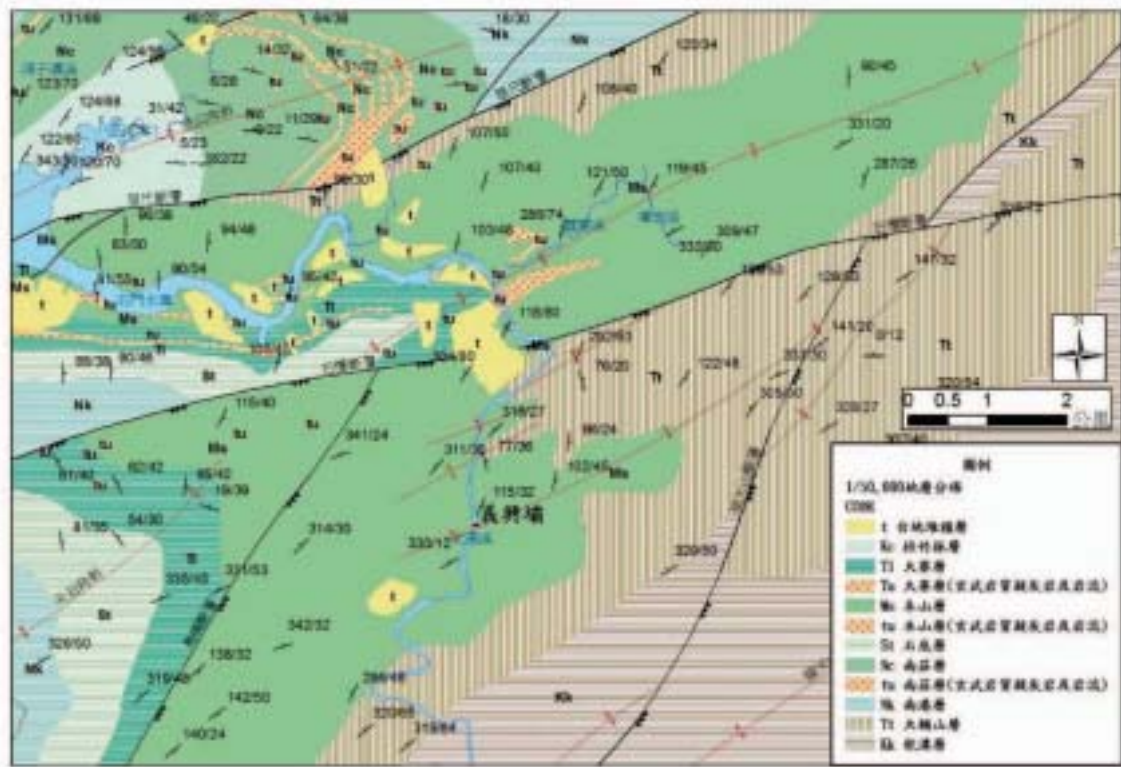


(榮華大壩(含義興電廠)第二次安全檢查與評估, 水利署, 92 年)

圖 2-13 義興壩加高工程壩體剖面圖

(二)地質資料

依經濟部中央地調所五萬分之一地質圖顯示(圖 2-14)，義興壩址之基層岩盤為木山層，其岩性為砂岩及頁岩互層並偶夾煤層，壩址附近有高坡向斜通過。



經濟部北區水資源局(民國 98 年)於「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中進行 3 孔岩層地質鑽探，位置如圖 2-15 所示，所得之岩層為粉砂岩，表 2-4 為室內試驗結果，結果顯示此區粉砂岩強度介於 24~105 MPa，依據 ISRM 分類屬於中強度(R3)或(R4)強岩。



圖 2-15 義興壩附近鑽探孔位置圖

表 2-4 義興壩鑽孔岩心單壓強度試驗成果表(北水局，98 年)

試驗編號	孔號	深度(m)	含水量 (Wn)%	單位重 $\gamma_s(t/m^3)$	單壓強度 (MPa)	岩性
RUC-1	BH-1	25.43-25.56	0.5	2.69	87.32	粉砂岩
RUC-2	BH-1	31.57-31.7	0.6	2.7	97.94	粉砂岩
RUC-3	BH-1	37.68-37.81	0.5	2.7	58.94	粉砂岩
RUC-4	BH-1	39.72-39.85	1.7	2.7	50.53	粉砂岩
RUC-5	BH-2	38.55-38.68	1	2.66	24.39	粉砂岩
RUC-6	BH-2	39.4-39.53	0.9	2.67	29.05	粉砂岩
RUC-7	BH-3	2.1-2.24	0.6	2.71	91.45	粉砂岩
RUC-8	BH-3	6.25-6.39	0.5	2.71	104.55	粉砂岩
RUC-9	BH-3	9.7-9.84	0.5	2.71	77.12	粉砂岩
RUC-10	BH-3	14-14.14	0.9	2.79	57.68	粉砂岩

(三)地形資料

針對義興壩附近河道之地形變化，計蒐集到 3 筆資料，分別是：

1. 民國 60 年石門水庫管理局進行「義興防砂壩加高工程」

之規劃地形圖(圖 2-16)。

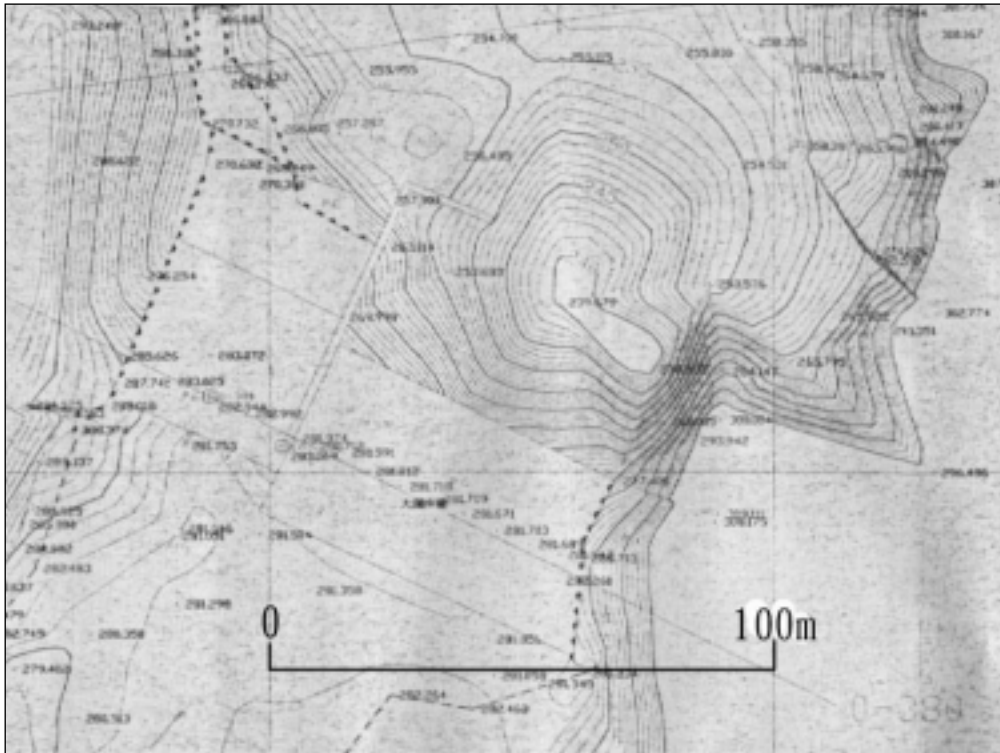
2. 民國 90 年北水局進行之「復興鄉義興電廠附近數值地形圖及河川橫斷面測繪成果」之地形圖(圖 2-17)。
3. 民國 97 年北水局進行之「石門水庫整治計畫緊急供水工程安全複核及義興壩下游河道整治工程」之地形圖(圖 2-18)。

由這三個年度地形資料觀察，格籠壩(右岸)壩前河道高程最低點變化由 60 年的 260 公尺、90 年的 240 公尺、而至 97 年的 248 公尺，顯示 60 年至 90 年為持續刷深，90 年以後則有淤積現象，推測可能與 93 年艾利颱風帶下之大量土砂有關。



說明：加高工程前，壩前高程約 260 公尺，未見沖刷坑。

圖 2-16 義興壩附近民國 60 年地形圖



說明：由於格籠壩前靜水池沖毀，所以壩前形成沖刷坑，圖上顯示最低點約為 240 公尺。

圖 2-17 義興壩附近民國 90 年地形圖



說明：格籠段前高程最低為 248 公尺。

圖 2-18 義興壩附近民國 97 年地形圖

由 92 年義興壩安全檢查與評估水中檢查報告(水利署，92 年)中說明，義興壩靜水池池底嚴重淘空(圖 2-19)，淘空範圍約 40 x50 m，坑底最深約標高 243 公尺(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)結果，義興壩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(圖 2-20)。

圖 2-21、圖 2-22 分別為義興壩 68 年與 95 年之航空照片，最大之差異在於 95 年時靜水池已經毀損，而且下游側用以抬高靜水池下游水位之副壩也已經沖毀。



圖 2-19 義興壩下游靜水池掏刷坑範圍及深度 (水利署，92 年)

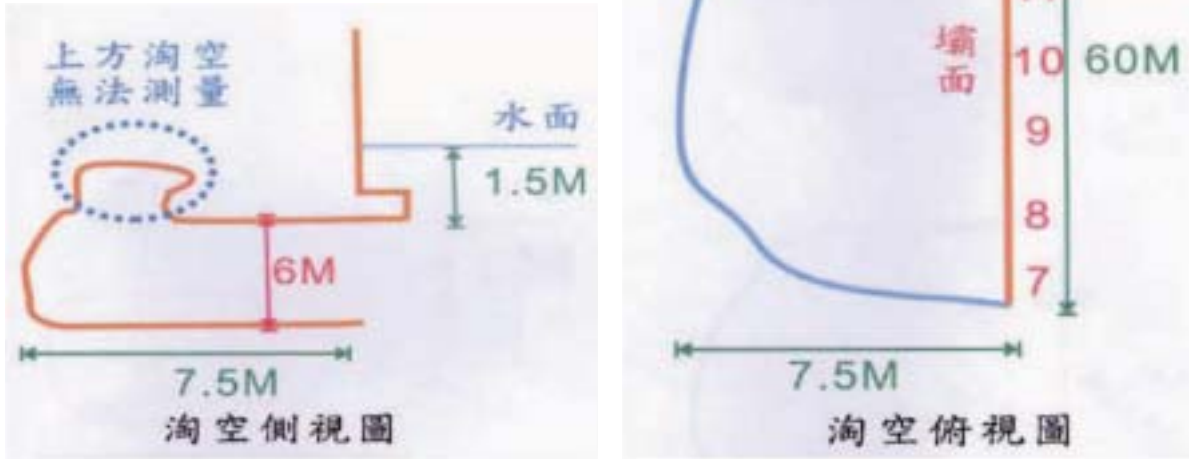


圖 2-20 義興壩格籠段下方孔洞淘刷示意圖(北水局，97 年)



圖 2-21 義興壩 68 年 7 月 16 日航空照片



圖 2-22 義興壩 95 年 12 月 14 日航空照片

(四)水文資料

大漢溪流域河川流量於 5 至 10 月屬豐水期，11 月至次年 4 月屬枯水期，依據民國 90 年之「石門水庫集水區攔砂壩淤積調查及清淤計畫」成果，彙整義興壩各重現期距洪峰流量如表 2-5 所示。

依據水利署水文水資源資料管理供應系統資料，彙整義興壩河段歷年發生最大流量如表 2-6 所示。

表 2-5 義興壩壩址重現期洪水量表

重現期距	5 年	10 年	20 年	50 年	100 年	200 年
洪水量(cms)	3,170	4,868	6,322	8,222	9,624	10,987

(石門水庫集水區攔砂壩淤積調查及清淤計畫，黎明工程顧問社，民國 90 年)

表 2-6 義興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	9,040	75	1,828
53	107	76	1,300
54	1,498	77	344
55	1,796	78	2,481
56	948	79	3,553
57	943	80	558
58	4,406	81	1,727
59	2,808	82	149
60	4,257	83	2,469
61	4,951	84	119
62	642	85	5,762
63	731	86	2,601
64	1,449	87	1,826
65	4,515	88	79
66	2,203	89	863
67	459	90	2,828
68	1,598	91	2,515
69	987	92	407
70	1,119	93	8,527
71	1,030	94	5,281
72	396	95	971
73	1,679	96	5,259
74	3,954	97	3,419

備註：利用霞雲站實測流量，比面積推估義興壩位址流量。
 霞雲站集水區面積：622.83 km²
 義興壩集水區面積：615.66 km²

三、石岡壩(大甲溪)

(一)攔河堰概述

石岡壩位於大甲溪中游，如圖 2-23 所示，圖 2-24 為石岡壩 98 年狀況，石岡壩係於民國 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，

管理單位為水利署中區水資源局石岡壩管理中心。

石岡壩之主要設施包括：壩體、溢洪道、排砂道及取水口等。921 震災前，由於消能防沖效果受到下游河床降低、尾水降低增加水流淘刷能量，乃於第一道靜水池下游增設第二道靜水池，並於第二道靜水池擺放混凝土消波塊，始延緩下游沖刷問題。921 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，中水局乃進行緊急復建工作，已於民國 90 年 12 月底完工，現今主要工程佈置(圖 2-25、圖 2-26)如下說明：

1. 壩型為混凝土重力壩，壩頂長度 275.5 公尺，最大壩高為 21.4 公尺，壩頂標高 283 公尺。
2. 溢洪道共 15 座(其中 1 座尺寸為 11.4 公尺寬×8 公尺高，13 座尺寸為 12.8 公尺寬×8 公尺高，其餘 1 座尺寸為 11.7 公尺寬×8 公尺高)。
3. 溢洪道型式為閘門控制溢流堰，設計排洪量 8800 cms(100 年頻率洪水時)，溢流堰頂標高平均 270.58 公尺，溢流堰總長度為 224 公尺。
4. 排砂道 2 座，尺寸為 8 公尺寬×6 公尺高，排洪量分別為 584.7 cms 及 581.2 cms(100 年頻率洪水時)，堰頂平均標高為 267.28 公尺及 267.41 公尺。
5. 溢洪道及排砂道下游設有靜水池，溢洪道下游靜水池長 42 公尺，尾檻頂部標高 250.3 公尺。排砂道下游靜水池常 40 公尺，標高 250.8 公尺。

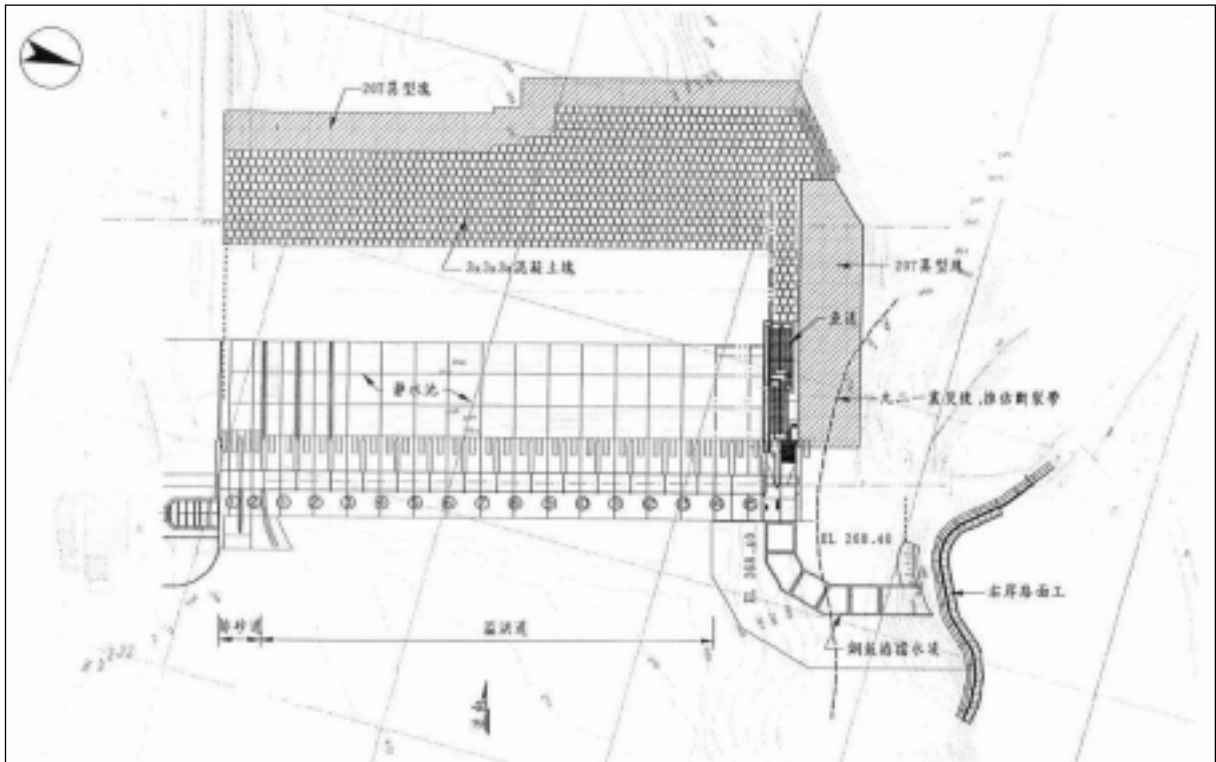
民國 93 年 7 月敏督利颱風所帶來的豪大雨，使大甲溪溪水暴漲並夾帶大量土石，石岡壩瞬間洪峰量達 5000 cms 以上，造成壩址下游副壩局部流失，災情原因研判除因大洪水外，下游河床持續下降亦是主要因素。



圖 2-23 石岡壩位置圖

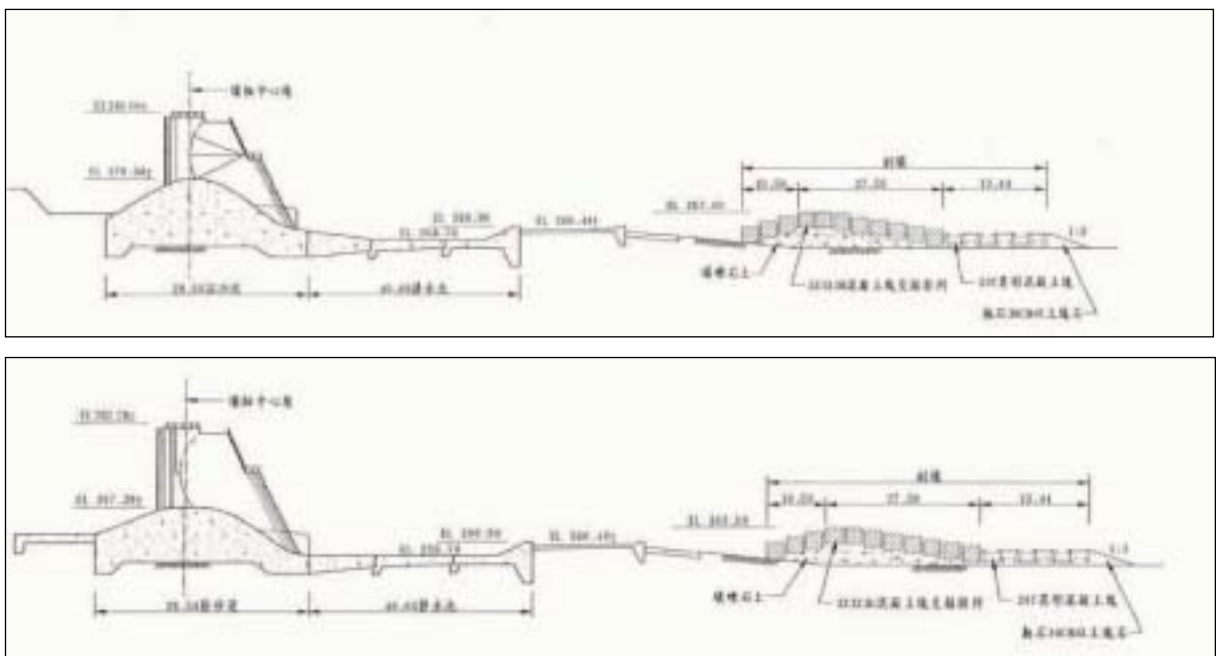


圖 2-24 石岡壩 98 年 4 月照片



(大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究 1/4, 水規所, 97 年)

圖 2-25 石岡壩平面佈置圖



(大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究 1/4, 水規所, 97 年)

圖 2-26 石岡壩溢洪道(上)及排砂道(下)標準剖面圖

(二)地質資料

壩址由礫石與砂土之台地堆積層所覆蓋，層厚約 4~11 公尺，岩層主要由粉砂岩、砂岩與泥岩(頁岩)與其互層組成為主之卓蘭層，靠近下游則為錦水頁岩層(圖 2- 27)。

依據水規所「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究」報告，98 年 2 月間石岡壩附近曾辦理 15 處鑽孔及室內試驗，石岡壩下游之鑽孔位置圖如圖 2- 28 所示，表 2- 7 為鑽探岩心之試驗成果彙整，消散耐久試驗結果，岩層多為非常低耐久性至中耐久性，僅一組砂岩夾頁岩為高耐久性；而單壓試驗則顯示石岡壩下游岩盤單壓強度約介於 2~9 MPa(應力單位，M 為 10^6 , Pa 為 N/m^2 ，牛頓/平方公尺，即每平方公尺所承受的力)。

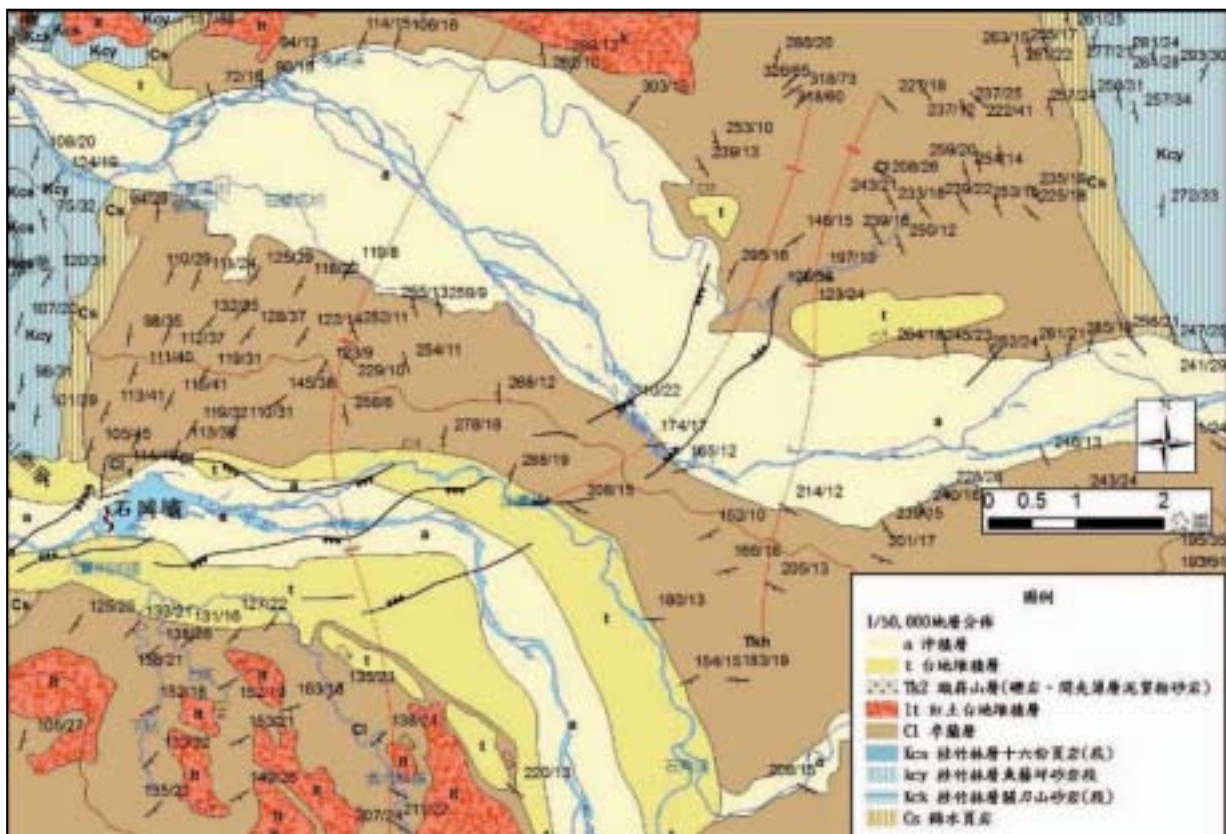


圖 2- 27 石岡壩地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 東勢圖幅)

表 2-7 石岡壩下游鑽探岩心試驗成果(水規所，98 年)

消散耐久試驗成果表

	孔號	深度 (m)	含水量 $W_n(\%)$	消散耐久性指數(%)					指數分類 Id_2	岩性
				Id_1	Id_2	Id_3	Id_4	Id_5		
消散耐久試驗	B-4	0.25-0.40	2.2	98.1	95.5	89.5	86.4	84.4	高耐久性	砂岩夾頁岩
	B-5	0.25-0.40	5.0	57.3	34.8	26.4	19.8	14.3	低耐久性	砂岩
	B-6	0.65-0.85	4.2	95.0	75.4	46.9	35.4	29.7	中等耐久性	頁岩
	B-10	0.30-0.50	4.5	97.3	82.2	53.5	39.2	34.8	中等耐久性	砂岩夾薄頁岩
	WRA-a-1	--	--	78.74	67.19	60.71	54.83	49.01	低耐久性	砂岩
	WRA-a-2	--	--	88.22	52.69	31.41	21.55	17.26	中等耐久性	含泥質砂岩
	WRA-b-1	--	--	56.56	43.21	39.62	35.08	33.00	非常低耐久性	砂岩

單壓強度試驗成果表

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-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	--	



圖 2-28 石岡壩下游地質鑽孔位置圖(水規所，98 年)

(三)地形資料

圖 2-29、圖 2-30、圖 2-31、圖 2-32 分別為石岡壩 66 年、87 年、88 年(921 地震後)、及 96 年航空照片，66 年與 87 年間石岡壩下游河道有相當大之變化，河道由寬廣變為束縮向左岸，豐富之礫石覆蓋變為岩盤出露。921 地震後至 96 年間，由於埤豐橋上游河段抬昇數公尺，雖河道亦出現拓寬現象，但下切作用興盛卻令河道深槽化的現象相當明顯。

堰前普遍均有沖刷坑形成，且互相連貫成橫向的坑槽，並有局部區域之較大沖刷坑形成。



說明：堰下游河道寬廣，覆蓋良好，靜水池前僅有局部沖刷坑。

圖 2-29 石岡壩 66 年 11 月 11 日航空照片



說明：堰下游河道大幅束縮偏向左岸，岩盤裸露，靜水池前均有沖刷坑出現。

圖 2-30 石岡壩 87 年 4 月 29 日航空照片



說明：堰前護床工破損岩盤裸露，兩岸排砂道前沖刷坑明顯，岩盤有多處局部沖刷坑。

圖 2-31 石岡壩 88 年 9 月 22 日航空照片



說明：堰前階梯式消能工前有橫向沖刷坑，中央有較大之沖刷坑。

圖 2-32 石岡壩 96 年 1 月 31 日航空照片

(四)水文資料

大甲溪流域河川流量於 5-10 月屬豐水期，11 月後至次年 4 月屬枯水期，依據「大甲溪流域聯合整體治理規劃檢討」成果，彙整石岡壩各重現期距洪峰流量如表 2-8 所示。

依據水利署水文水資源資料管理供應系統資料、「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(1/4)」，石岡壩歷年最大洪峰流量統計如如表 2-9 所示。

表 2-8 石岡壩址各重現期洪水量

重現期距	5 年	10 年	50 年	100 年	200 年
洪水量(cms)	3,800	5,000	7,600	8,800	9,800

(大甲溪流域聯合整體治理規劃檢討成果報告，水規所，94 年)

表 2-9 石岡壩歷年發生最大流量統計表

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

資料來源：*民國 52 年至 66 年採石岡站實測流量(大甲溪治理規劃報告，1993)；
 @民國 67 年至 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，2003)；#民國 91 年至 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)。

(摘自：大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究 1/4，水規所，97 年)

四、龍泉圳攔河堰(烏溪)

(一)攔河堰概述

龍泉圳攔河堰於民國 71 年竣工，位於烏溪流域(圖 2-33)，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。龍泉圳攔河堰(與柑子林進水口共構)位於南投

縣國姓鄉，壩高 3 公尺，長 80 公尺，為混凝土重力式壩，於民國 71 年完工，目前是由南投農田水利會所負責管理；壩體型式為自由溢流堰，原先設計取水量 7,283.52(萬噸/年)，目前現況取水量為 4,454.5(萬噸/年)。圖 2- 34 為龍泉圳攔河堰 98 年使用狀況。

(二)地質資料

參考經濟部中央地調所 1/50,000 地質圖幅 (圖 2- 35)，此攔河堰處之岩層分為早中新世晚期至中期中新世的猴洞坑層與中期中新世的福隆園層，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，局部偶夾厚層頁岩。

(三)地形資料

比較 72 年及 96 年航空照片(圖 2- 36、圖 2- 37)，96 年時龍泉圳攔河堰之堰體已經不同於 72 年狀況，且中央部分破損，現況勘查結果顯示堰體已經修復，並加設靜水池。



圖 2- 33 龍泉圳攔河堰位置圖



圖 2-34 龍泉圳 98 年照片(98.8.19)

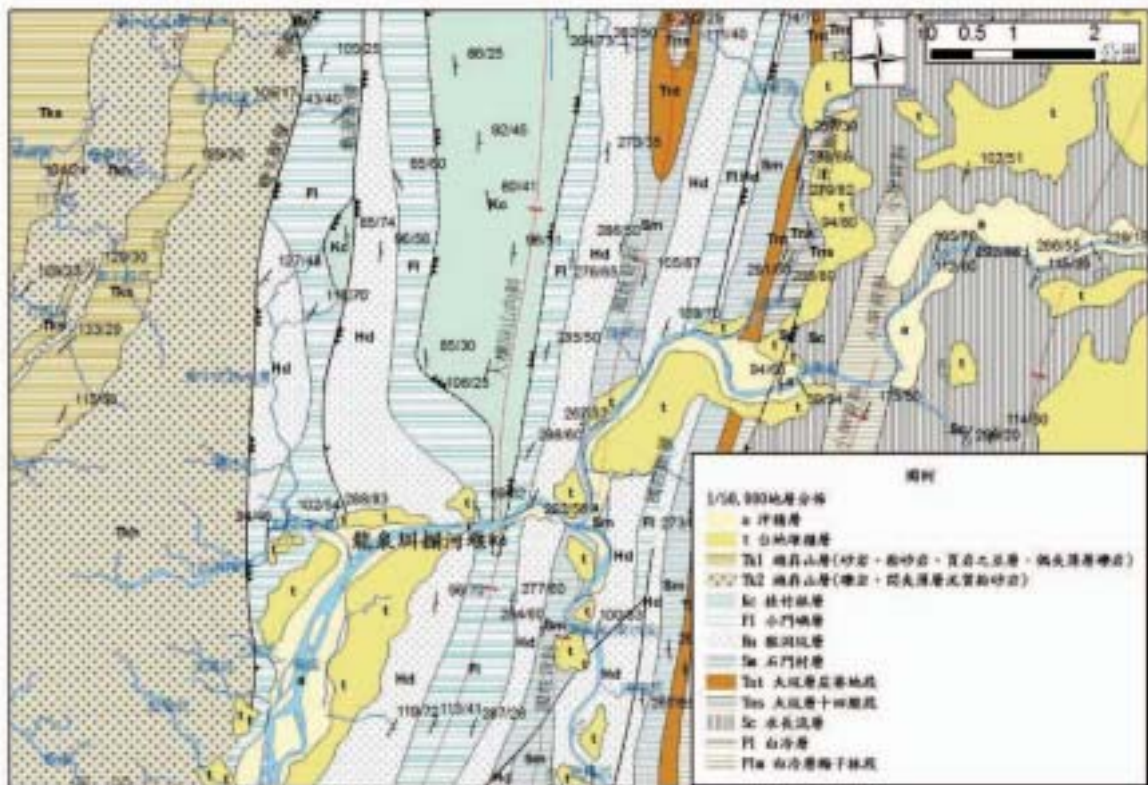


圖 2-35 龍泉圳地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 國姓圖幅)



說明：簡易之攔河堰與取水口，河道無特別變化。

圖 2-36 龍泉圳攔河堰 72 年 7 月 5 日航空照片



說明：堰體破損，河道較 72 年狀況束縮，河道約略可見薄覆蓋下的岩盤。

圖 2-37 龍泉圳攔河堰 96 年 11 月 19 日航空照片

(四)水文資料

烏溪流域河川流量於 5 至 9 月屬豐水期，10 月至次年 4 月為枯水期，依據民國 92 年「烏溪流域聯合整體治理規劃」之成果，彙整龍泉圳各重現期距洪峰流量如表 2-10 所示。

依據水利署水文水資源資料管理供應系統資料，彙整龍泉圳河段歷年最大發生洪峰流量如表 2-11 所示。

表 2-10 龍泉圳攔河堰址各重現期洪水量表

重現期距	5 年	10 年	50 年	100 年	200 年
洪水量(cms)	4,000	5,090	7,590	8,910	10,500

(烏溪流域聯合整體治理規劃，水規所，民國 92 年)

表 2-11 龍泉圳攔河堰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)
65	305	82	-
66	157	83	449
67	-	84	-
68	320	85	297
69	237	86	153
70	391	87	-
71	296	88	-
72	-	89	-
73	-	90	439
74	299	91	157
75	111	92	178
76	278	93	1,807
77	-	94	210
78	280	95	-
79	313	96	225
80	-	97	476
81	181		

五、集集攔河堰(濁水溪)

(一)攔河堰概述

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(圖 2-38)，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。圖 2-39 為集集堰 98 年實景。

集集攔河堰平面佈置圖、溢洪道及排砂道剖面圖分別如圖 2-40、圖 2-41 所示，工程主要數據如表 2-12，相關重要設施簡述如下：

1. 攔河堰軸長度約 359 公尺，攔河堰共設排洪閘門 18 座、排砂閘門四座，預估有效蓄水容量 1,500 萬立方公尺。攔河堰兩端各設共同引水取水口一座，引取水量分別為南岸每秒 108 立方公尺及北岸每秒 77 立方公尺。攔河堰附屬設施包含南北岸沉砂池及南岸魚道。
2. 排洪道溢流堰頂標高 203.5 公尺，堰頂設弧形閘門，消能池頂面底板標高 191 公尺，尾堰頂面標高 197 公尺及 194 公尺，靜水池末端再銜接混凝土護坦。排砂道溢流堰頂標高 196.9 公尺，排砂道下游消能池底板標高 191 公尺。
3. 排洪與消能：設計洪水量 18,914 cms (200 年重現期洪水量) 時，相對應之排洪道單寬流量 (排砂道不參與排洪) 可達 70 cms。



圖 2-38 集集攔河堰位置圖



圖 2-39 集集攔河堰 98 年 3 月照片

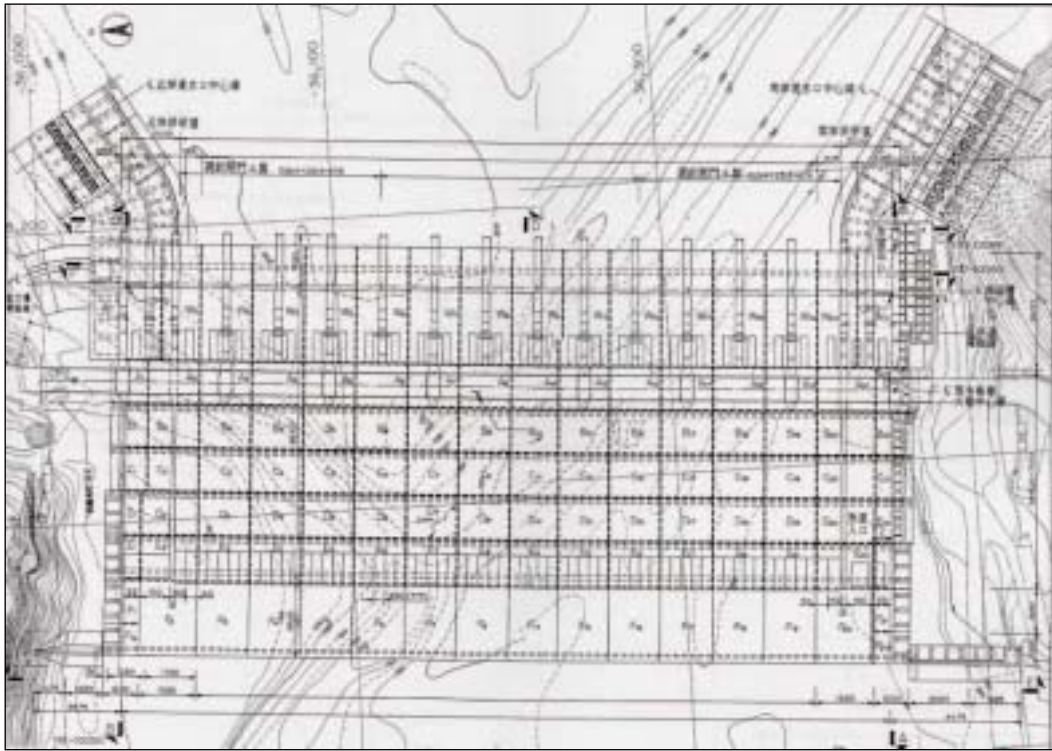


圖 2-40 集集攔河堰平面佈置圖(水利署，94 年)

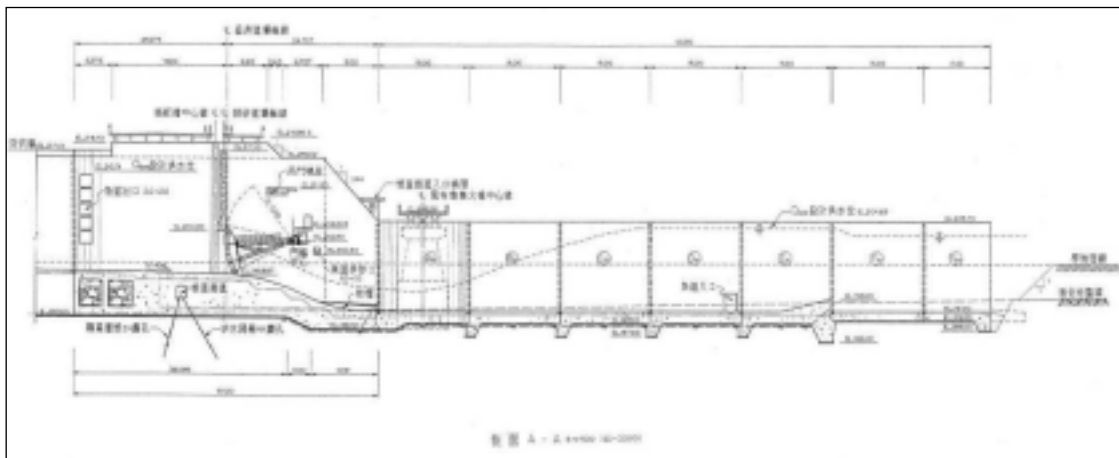
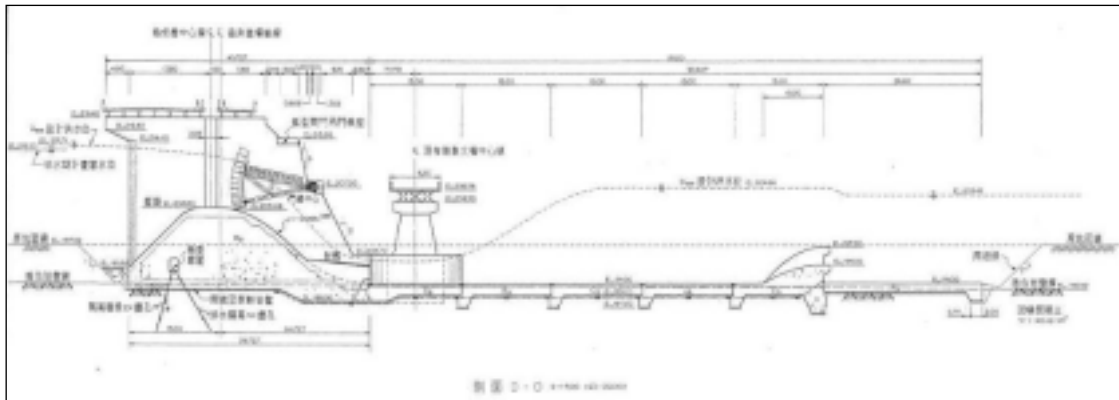


圖 2-41 集集堰溢洪道(上)與排砂道(下)剖面圖(水利署，94 年)

表 2-12 集集攔河堰重要工程數據(水利署，94 年)

1. 攔河堰	
滿水位面積	242 公頃
設計洪水位 (200 年)	EL. 213.71m (215.472)
常水位 (枯水期)	EL. 213.00m (214.762)
常水位 (洪水期)	EL. 205.50m (207.262)
總蓄水容量	1,448*10 ⁶ m ³
堰軸長度 (含溢洪道、排砂道及魚道)	359m
溢洪道	
設計洪水量 (200 年頻率)	18,914m ³ /sec
溢流堰堰頂標高	EL. 203.50m (205.262)
溢流堰弧型閘門底水封座標高	EL. 203.168m (204.93)
堰體基礎最低標高	EL. 188.00m (189.762)
溢流堰每門通水寬度	15m
溢流堰弧型閘門 18 門	每門 15.0m 寬*10.33m 高
堰頂調節閘門 8 門	每門 16.074m 寬*2.0m 高
消能池底板頂面標高	EL. 191m (192.762)
尾堰頂面標高	EL. 197m (198.762) 及 EL. 194m (195.762)
排砂道	
通水口尺寸	每門 6.25m 寬*7.103m 高
排砂閘門底水座標高	EL. 196.897m (198.659)
排砂閘門 (弧形) 南北岸各 2 門	每門 6.25m 寬*7.58m 高
下游消能池底板頂面標高	EL. 191m (192.762)
魚道	
魚道長度 (土木結構物)	100m (設 70 槽)
魚道坡度	1/10
門孔尺寸 (魚槽) 15 孔	每孔 0.7m 寬*1.3m 高
門孔尺寸 (排砂閘門) 1 孔	每孔 1.0m 寬*2.5m 高
2. 北岸取水工	
北岸進水口	
進水口型式 (鐘形)	取水口分置上下兩層每層 8 個取水口
設計取水量	77m ³ /sec
取水口底封座標高	下層取水口 EL. 201.50m (203.262)
	下層取水口 EL. 204.10m (205.862)
取水口尺寸	每門 4.0m 寬*2.0m 高
緊急閘門孔尺寸 (一門)	5.6m 寬*5.6m 高

(二)地質資料

堰址原始河床覆蓋層厚約 8 公尺至 11.5 公尺之礫石，地層以初鄉斷層為界分為頭嵙山層與卓蘭層，在本區域頭嵙山層主要為香山段，岩性以厚層砂岩及砂頁岩偶夾透鏡狀礫石層為主，

而卓蘭層岩性為砂岩、頁岩及其互層組成，偶夾粉砂岩與泥岩，區域地質圖詳見圖 2-42。

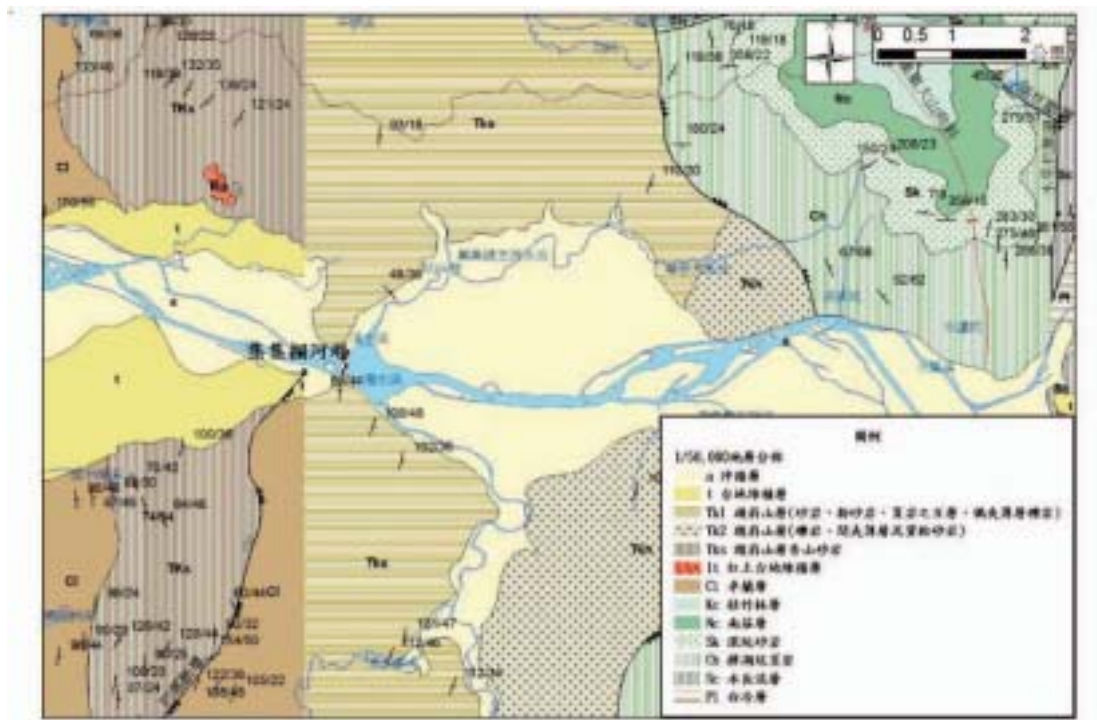


圖 2-42 集集堰地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 埔里圖幅)

水利局於民國 80 年在集集共同引水計畫攔河堰工程基本設計報告中，對攔河堰河床堰址與南北岸暗渠進行地質鑽探，配合地表露頭完成攔河堰堰體附近地質圖(圖 2-44、圖 2-44)。水利局將集集攔河堰河床岩層分為三類：厚層砂岩、層狀砂岩與砂頁岩互層。

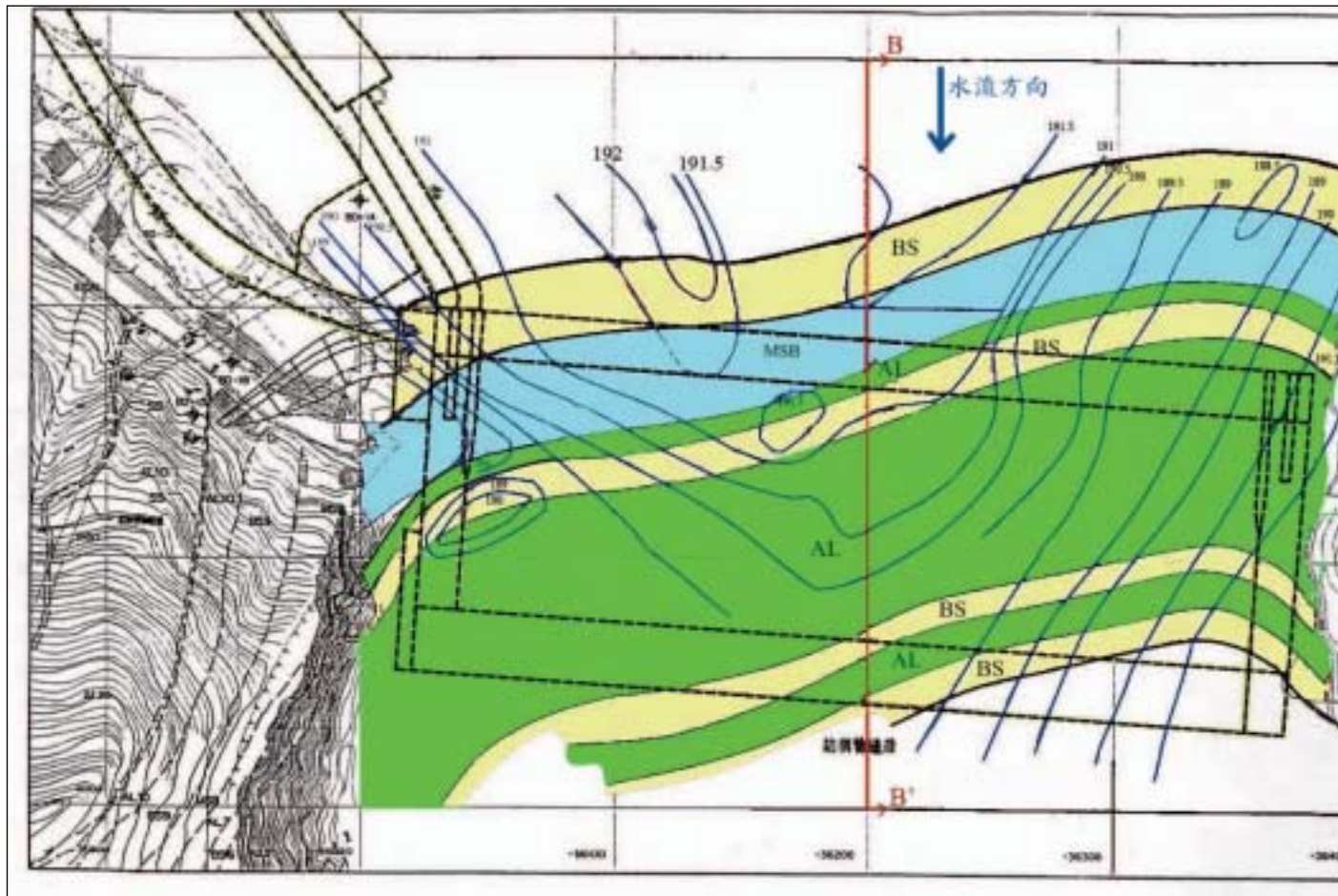
水利局(80 年)之岩層分類依據如下：厚層砂岩(MS)為砂岩之層厚超過 2m 以上，其中層理不明顯者，可歸屬此類。RQD 約在 58 以上，節理面呈波狀非平滑狀。層狀砂岩(BS)為砂岩層後不超過 2m，層理較顯著者。岩質均勻堅實，RQD 在 85 以上，節理面呈粗糙、波狀。砂頁岩互層(AL)又分砂頁岩互層以砂岩為主，砂頁岩互層以頁岩為主。RQD 在 50 以上，節理面平滑狀。

堰址附近的歷年鑽孔試驗資料包含水利局(80 年)並在集集堰相關工程範圍進行 18 孔共計 533.5 公尺(壩址 2 孔共計 50 公尺)的鑽探採樣試驗；本計畫於堰址下游進行 2 孔共 50 公尺的鑽探；以及中水局(98 年)於集集堰初次使用安全評估計畫中為探查初鄉斷層位置進行之鑽探孔。以上鑽孔位置分佈如圖 2-45 所示。上述鑽探工作中對岩層之分類比較如表 2-13 所示。

表 2-13 歷年鑽探岩層分類比較表

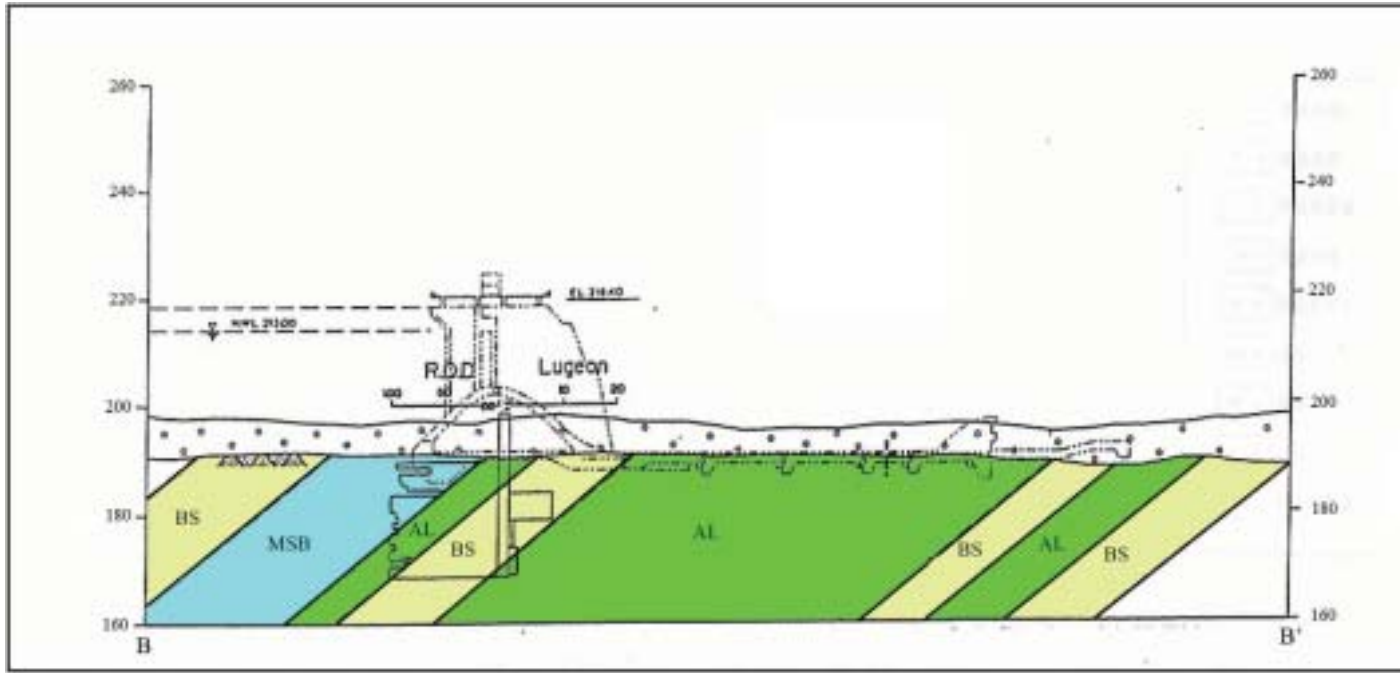
主要岩性	水利局(1991)	中區水資源局(2009)	本計畫(2009)
厚層砂岩	厚層砂岩	青灰色細粒砂岩 含黑色炭質物	鑽孔未含
層狀砂岩	層狀砂岩	青灰色細粒砂岩 間夾薄層頁岩	層狀砂岩
砂頁岩互層	砂頁岩互層以砂岩為主	砂頁岩互層	砂頁岩互層
	砂頁岩互層以頁岩為主		
頁岩	未分類	深灰色頁岩	頁岩偶夾砂岩

水規所(97 年)於「水工結構物位於軟弱岩層沖刷機制之探討」計畫中曾於堰址下游進行地表地質調查(圖 2-46)，圖上標示出岩盤露頭範圍，但岩層僅區分為頭嵙山層及卓蘭層，另有針對砂岩及頁岩各一孔 1 公尺的岩心採樣，單壓強度試驗的結果均不到 2 MPa。



(水利局，80年；重繪自四河川局，95年，「集集攔河堰下游段河道沖淤與治理策略研

圖 2-43 集集攔河堰岩盤地質圖



(水利局，80年；重繪自四河川局，95年，「集集攔河堰下游段河道沖淤與治理策略研

圖 2-44 集集攔河堰河道中心線(圖 2-44 B-B')剖面

以下將水利局(80年)及中水局(98年)之鑽探岩心試驗結果整理如下，本計畫進行之岩石力學試驗成果則於第肆章內容中說明之。

1. 單壓強度試驗結果(水利局，80年)

水利局對各類岩層施做室內單壓試驗結果見下表 2-14，從結果可看出，岩層單壓強度約介於 13.4MPa~37.8MPa。厚層砂岩最高，層狀砂岩次之，砂頁岩互層以頁岩為主最低。

表 2-14 單壓試驗結果表(水利局，80年)

岩性	厚層砂岩	層狀砂岩	砂頁岩互層 (以砂岩為主)	砂頁岩互層 (以頁岩為主)
試驗平均值	37.8	25.5	19.5	13.4
建議值	32	25	20	10

*單位為 MPa

2. 彈性模數試驗結果(水利局，80年)

根據試驗結果砂岩楊式模數介於 1818 MPa~5600 MPa，剪力模數 6493~20143 MPa，柏松比介於 0.38~0.42。頁岩楊式模數介於 208MPa~12135 MPa，剪力模數介於 794~5006 MPa，柏松比介於 0.2~0.31。

3. 張力強度試驗結果(水利局，80年)

張力試驗結果整理於表 2-15，岩層張力強度介於 0.93~1.75 MPa，砂頁岩互層以頁岩為主抗張強度最高，砂頁岩互層以頁岩為主最低。由於試驗量不足，水利局建議利用實驗岩石力學統計經驗取單壓強度建議值 1/6。

4. 岩心消散耐久試驗結果(中水局，98年)

岩心消散耐久試驗結果 Id_2 約從 72%~87%，為中等耐久性至中等高耐久性。

5. 單壓強度試驗結果(中水局，98 年)

如表 2- 16，岩層單壓強度約介於 0.59 MPa~13.7 MPa，砂頁岩互層之單壓強度高於以頁岩為主之岩層，但若沿層面破壞時，強度則大幅降低至 1 MPa 以下。

表 2- 15 水利局(民國 80 年)張力試驗結果表

岩性	厚層砂岩	層狀砂岩	砂頁岩互層 以砂岩為主	砂頁岩互層 以頁岩為主
試驗平均值	1.09	1.09	0.93	1.75
建議值	5.4	4.2	3.3	1.7

表 2- 16 單壓強度試驗結果表(中水局，98 年)

孔號	單壓 強度 q_u (MPa)	岩心敘述	楊式模數 E_{50} (MPa)
F-1	13.7	灰色頁岩夾砂岩，岩質弱	675.5
F-2	9.2	灰色砂岩、頁岩互層，岩質弱	549.5
F-3	3.95	灰色頁岩，岩質甚弱	767.5
F-4	0.59	灰色砂岩、頁岩互層，沿層面破壞岩質甚弱	70.8

(三)地形資料

表 2- 17 為集集攔河堰附近河段歷年所曾進行之大斷面與地形資料彙整，圖 2- 47 為集集攔河堰附近斷面位置圖，集集攔河堰下游區域民國 92 年至 97 年間總計有 8 次斷面測量、4 次航拍及 DTM 資料，對於本計畫進行岩盤沖刷研究應可提供相當大之助益。

表 2-17 集集攔河堰河段大斷面與地形資料彙整表

資料類型	測量年份	測量範圍	資料來源
大斷面	民國87~88年	斷面1~119	四河局
	民國89年	斷面118~151	
	民國90年	斷面1~119	
	民國93年	斷面1~151	
	民國92~95年	集集堰庫區斷面編號 S1~S30	中水局
	民國96年1月 民國96年8月 民國97年6月 民國97年12月	名竹大橋(斷面106)~ 集鹿大橋(斷面121)	
數值高程 DEM	民國92年	斷面1~151	四河局
	民國96年1月 民國96年8月 民國97年6月 民國97年12月	名竹大橋(斷面106)~ 集鹿大橋(斷面121)	中水局
航拍圖	民國92年	斷面1~151	四河局
	民國96年1月 民國96年8月 民國97年6月 民國97年12月	名竹大橋(斷面106)~ 集鹿大橋(斷面121)	中水局

民國 88 年 921 大地震，車籠埔斷層之逆衝錯動導致部分地區地形及河川之變遷，破裂帶通過名竹大橋(圖 2-48)，東側為地盤升側。依據地調所(88 年)調查報告，名竹大橋附近右岸升側垂直抬昇量均小於 2 公尺，左岸升側垂直落差約為 2~4 公尺。

斷層之破裂抬昇除造成名竹大橋斷橋之災害外，亦使原河道沖積層下之岩層漸裸露於河床上，在歷經民國 90 年桃芝及 93 年敏督利、艾利颱風後，集集攔河堰下游之軟弱岩盤逐漸裸露，並產生局部下刷之深槽化現象。

由水利署中區水資源局、第四河川局等提供之歷年實測大斷面資料，可將集集攔河堰下游至名竹大橋深槽縱剖面高程繪出，如圖 2-49 所示，集集堰下游自民國 90 年後，河道深槽有逐年沖刷之趨勢，集集堰下游 2km 範圍內尤其明顯，同一斷面之各年份最大底床高程差約可達 11 m 之多。

圖 2-50、圖 2-51 為集集堰 90 年及 97 年的航照影像，兩者河道之差異著實巨大，河寬及河道表面截然不同。

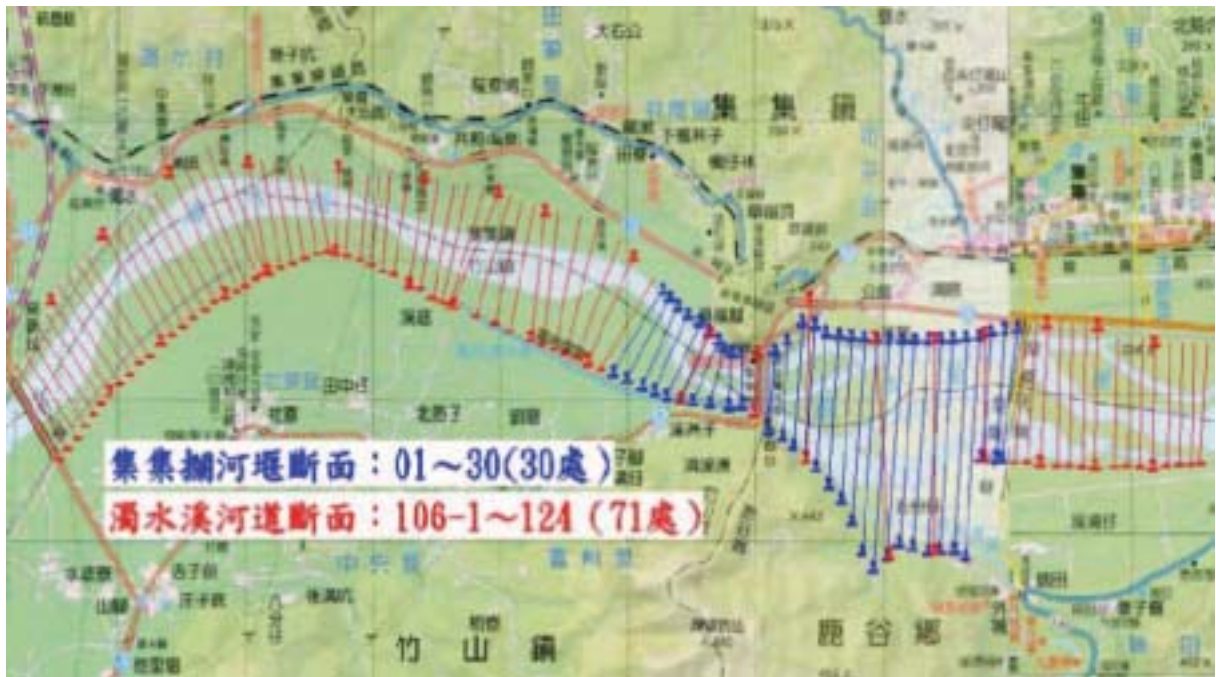


圖 2-47 集集攔河堰附近斷面位置圖(中水局，98 年)



圖 2-48 921 地震破裂帶通過名竹大橋 (摘自農航所「震痕」)

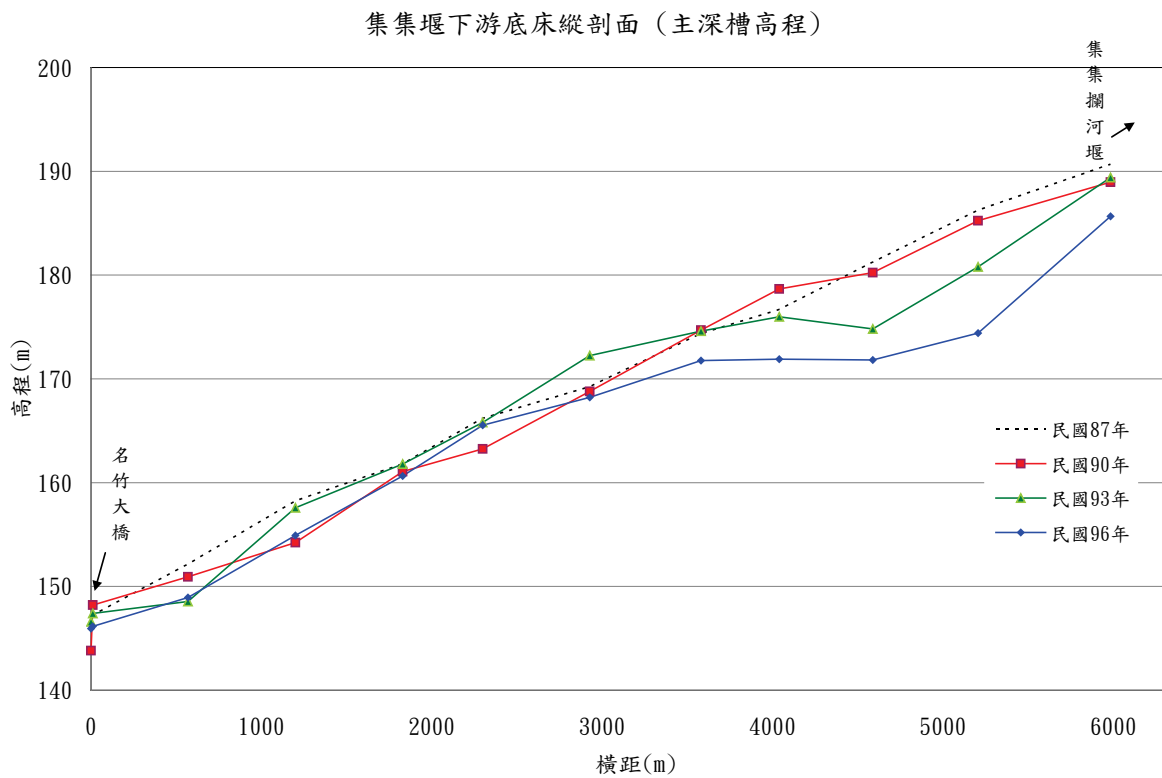


圖 2-49 濁水溪集集攔河堰下游底床縱剖面



圖 2-50 集集堰 90 年 9 月 15 日航空照片



圖 2-51 集集堰 97 年 10 月 30 日正射影像

(四)水文資料

集集攔河堰有較詳細之實測水位流量與率定曲線可供參考，因此本研究分析採用之水文資料以集集堰管理中心提供之實測資料為主。以下針對集集堰鄰近河段之水文資料與收集概況進行說明。

集集攔河堰豐水期為6至9月，豐水期平均流量為244 cms。堰址河段不同重現期洪水量如表 2- 18 所示。

表 2- 18 集集攔河堰址各重現期洪水量表

重現期距	1.1	2	5	10	20	25	50	100
洪水量(cms)	2,000	5,500	9,300	11,900	14,500	15,300	17,900	20,500

(濁水溪水系治理規劃檢討報告，水利規劃試驗所，96 年)

濁水溪水系之水文測站位置如圖 2- 52 所示，集集攔河堰河段上下游鄰近水文站觀測列表如表 2- 19 所示，其中集集攔河堰(斷面 117)位於玉峰橋站(斷面 133.5)至彰雲大橋站(斷面 86.5)間，集集攔河堰管理中心主要管理河段位置如圖 2- 53 所示，自上游集鹿大橋至堰址下游約 1.0km 位置。根據民國 96 年「濁水溪水系治理規劃檢討報告」，濁水溪各河段重現期洪峰流量如表 2- 20、圖 2- 54 所示，河口段設計洪水流量 Q_{100} 為 26,600 cms，集集站河段設計洪水流量 Q_{100} 為 20,500 cms。集集站河段歷年洪峰流量如表 2- 21 所示，最大者發生在民國 90 年桃芝颱風期間，約為 11,000 cms。

表 2- 19 集集攔河堰河段鄰近水文測站歷年資料統計表

站名	紀錄年份			所屬流域
	流量	水位	含砂量	
玉峰橋	1994~迄今	1994~迄今	1994~2005	濁水溪
集集	1941~1994	1941~1994	1948~1994	
彰雲大橋	1985~迄今	1985~迄今	1987~2005	

表 2-20 濁水溪各重現期洪峰流量表(單位：cms)

斷面	重 現 期 距 (年)								
	200	100	50	25	20	10	5	2	1.1
0~89	30,700	26,600	22,700	19,000	17,900	14,400	11,100	6,500	2,600
89~100	24,400	21,600	18,800	16,100	15,200	12,500	9,700	5,700	2,100
100~141	23,200	20,500	17,900	15,300	14,500	11,900	9,300	5,500	2,000
141~151-1	14,600	13,100	11,600	10,100	9,600	8,000	6,300	3,700	1,200

表 2-21 集集攔河堰河段歷年洪峰流量表

颱風(暴雨) 名稱	洪峰流量 (cms)	發生 時間	颱風(暴雨) 名稱	洪峰流量 (cms)	發生 時間
諾瑞斯	3,110	69/08/28	0607 暴雨	1460	87/06/08
裘恩	2,730	70/06/21	碧利斯	4,660	89/08/23
安迪	4,730	71/07/29	桃芝	11,100	90/07/30
-	4,260	72/06/04	納莉	1,580	90/09/17
-	1,820	73/05/29	雷馬遜	513	91/07/04
尼爾森	2,810	74/08/23	敏督利	7,126	93/07/04
艾貝	2,980	75/09/20	艾利	5,157	93/08/25
琳恩	2,760	76/10/25	南瑪都	1,756	93/12/04
-	2,750	77/08/14	海棠	3,894	94/07/20
莎拉	6,190	78/09/12	馬莎	4,405	94/08/05
黛特	4,320	79/09/08	泰利	4,256	94/09/01
艾美	2,240	80/07/19	龍王	2,016	94/10/02
寶莉	2,010	81/08/31	0609 暴雨	5,530	95/06/09
-	850	82/06/08	聖帕	4,919	96/08/18
道格	6,840	83/08/08	韋帕	1,376	96/09/19
荻安娜	1,150	84/06/12	柯羅莎	3,703	96/10/07
賀伯	8,350	85/07/31	卡玫基	10,906	97/07/18
溫妮	460	86/08/18	鳳凰	4,865	97/07/28

民國69~82年為集集水位站流量資料；民國83~91年為玉峰橋水位站流量資料；民國93~97年為集集攔河堰時放流量資料。(資料來源：水利署水文水資源資料管理供應系統)



圖 2-52 濁水溪水系與水文測站位置圖



圖 2-53 濁水溪集集攔河堰河段

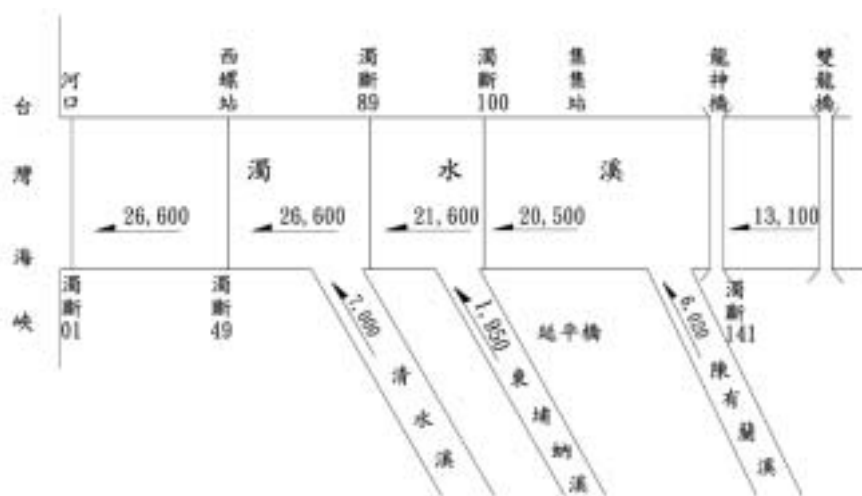


圖 2-54 濁水溪各河段計畫流量 單位：cms

(五)集集攔河堰相關研究文獻

1. 經濟部水利署第四河川局(2006),「集集攔河堰下游段河道沖淤與治理策略研究」。
2. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2007-2008),「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(1/3-2/3)」。
3. 經濟部水利署第四河川局(2008),「集集攔河堰下游河道穩定及水流消能治理工法佈置方案」。
4. 經濟部水利署水利規劃試驗所, (2008), 「台灣西部多砂河川沖淤模式研發及復育研究計畫(Predicting Rock Scour in Rivers).」
5. Blair P. Greimann and Lai, Yong G., (2008) "Rock Erosion Modeling on Selected Alluvial Rivers in Taiwan," Technical Report No. SRH-2008-08, Bureau of Reclamation, Technical Service Center, Denver, Colorado.
6. 經濟部水利署水利規劃試驗所(2008),「水工結構物位於軟弱岩層沖刷機制之探討」。
7. 經濟部水利署中水局(2009),「集集堰初次使用安全評估」第二次期中報告,黎明工程顧問。
8. 經濟部水利署中水局(2009),「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。

六、觸口攔河堰(八掌溪)

(一)攔河堰概述

觸口攔河堰於88年5月7日完成,位於嘉義縣觸口村八掌溪流域(圖2-55),集水面積約85平方公里,壩體型式為自由溢

流堰，溢流堰高程為 208.50 公尺，堰寬 70 公尺，堰高 1.5 公尺，取水量為 0.08 CMS，供水量為 7,000 噸原水(竹崎淨水場)，主要用途乃提供公共用水，由台水公司五區處管理。

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 98 年 7 月修復後計有堰體、2 道溢流道及 4 階靜水池(圖 2-56)，但在 98 年度 88 水災後多數被沖毀淹埋，現地勘查僅見堰體、1 階靜水池及 1 道溢流道，詳細情形說明於第參章。



圖 2-55 觸口攔河堰位置圖



圖 2-56 觸口攔河堰修復狀況照片(98.7.14)

(二)地質資料

依據中油十萬分之一地質圖，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。

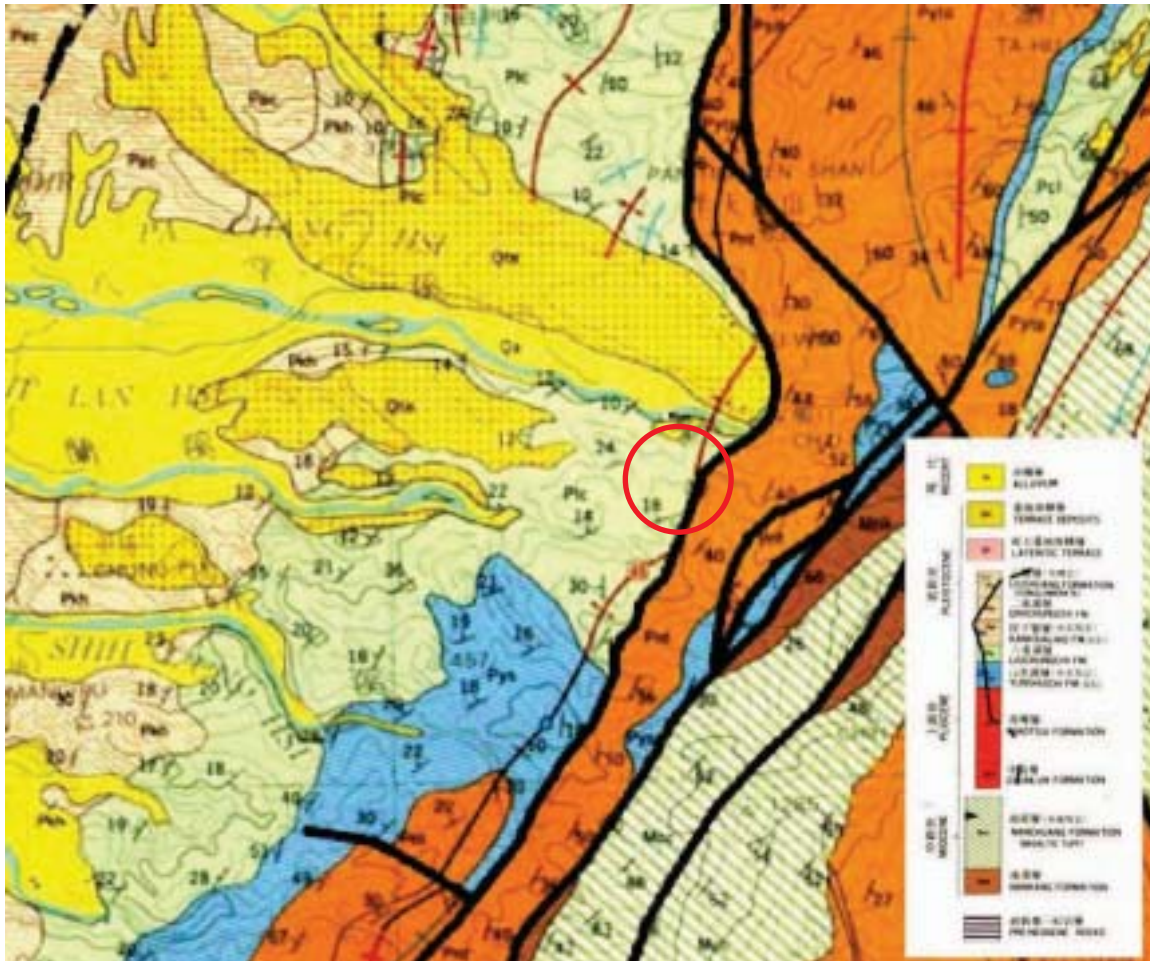


圖 2-57 觸口攔河堰地質圖(中油 1/100,000 地質圖)

(三)地形資料

觀察觸口攔河堰自 88 年興建完成至 96 年之歷年航空照片(圖 2-58 至圖 2-62)，觸口堰主要設施包含堰體及下游約 70 公尺處之一道固床工，河道主要均由軟礫石覆蓋，但局部區域已有岩盤出露；90 年時水流流經攔河堰後即偏向左岸，沖蝕固床工左岸岸壁形成深槽流路而損毀左岸部分固床工；94 年時固床

工已經沖毀約 1/3，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；96 年時堰前階梯式消能設施部分損毀，沖刷坑擴大，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。



圖 2-58 觸口攔河堰 88 年 12 月 24 日航空照片



圖 2-59 觸口攔河堰 90 年 11 月 17 日航空照片



圖 2-60 觸口攔河堰 92 年 3 月 3 日航空照片



圖 2- 61 觸口攔河堰 94 年 11 月 27 日航空照片



圖 2- 62 觸口攔河堰 96 年 2 月 3 日航空照片

(四)水文資料

八掌溪流域河川流量於 5 至 9 月屬豐水期，10 月至次年 4 月為枯水期，依據民國 89 年「八掌溪河道平衡及改善方案研擬」成果，彙整觸口堰各重現期距洪峰流量如表 2-22 所示。

依據水利署水文水資源資料管理供應系統資料、民國 95 年「八掌溪仁義潭攔河堰下游沖刷河段治理方案之研析報告」，觸口站歷年最大洪峰流量如表 2-23 所示。

表 2-22 觸口堰堰址各重現期洪水量表

重現期距	5 年	10 年	50 年	100 年	200 年
洪水量(cms)	1,091	1,367	1,806	1,932	2,031

(八掌溪河道平衡及改善方案研擬，水規所，民國 89 年)

表 2-23 觸口堰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)
56	1,450	78	1,200
57	198	79	2,510
58	965	80	550
59	851	81	966
60	678	82	213
61	908	83	676
62	256	84	310
63	564	85	1650
64	844	86	-
65	490	87	-
66	583	88	-
67	431	89	-
68	395	90	244
69	760	91	-
72	244	92	-
73	567	93	169
74	-	94	455
75	509	95	322
76	-	96	487
77	-	97	359

七、東口堰(曾文溪)

(一)攔河堰概述

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(圖 2-63)，橫跨曾文溪，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。

此工程結構自左岸算起，計截水牆 66 公尺，溢流堰 128 公尺，排砂道 26.8 公尺，總長度 220.8 公尺，全部為鋼筋混凝土構成，建於岩盤基礎上，平面佈置圖如圖 2-66 所示。



圖 2-63 東口攔河堰位置圖



圖 2-64 東口堰 98 年 3 月照片



圖 2-65 東口堰下游設置之消能池

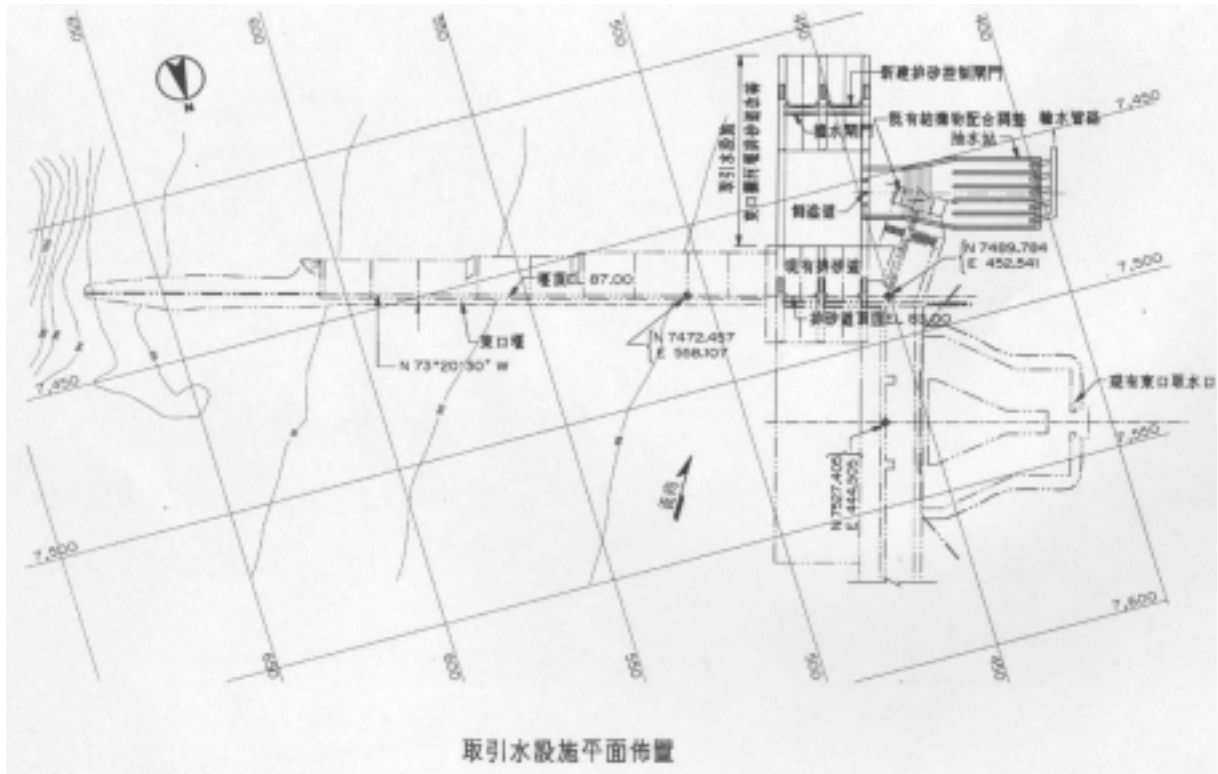


圖 2-66 東口堰平面佈置圖

(二)地質資料

依據中油十萬分之一地質圖，東口堰附近地層屬中新世之鹽水坑頁岩或糖恩山砂岩，地層可比對於中北部之桂竹林層(圖 2-67)，岩性上鹽水坑頁岩以深灰色頁岩為主，偶夾凸鏡狀粉砂岩或砂岩，糖恩山砂岩則以淡青灰色細粒砂岩為主，常見不規則節理，為混濁砂岩，含泥質物，夾有許多厚層灰色頁岩。

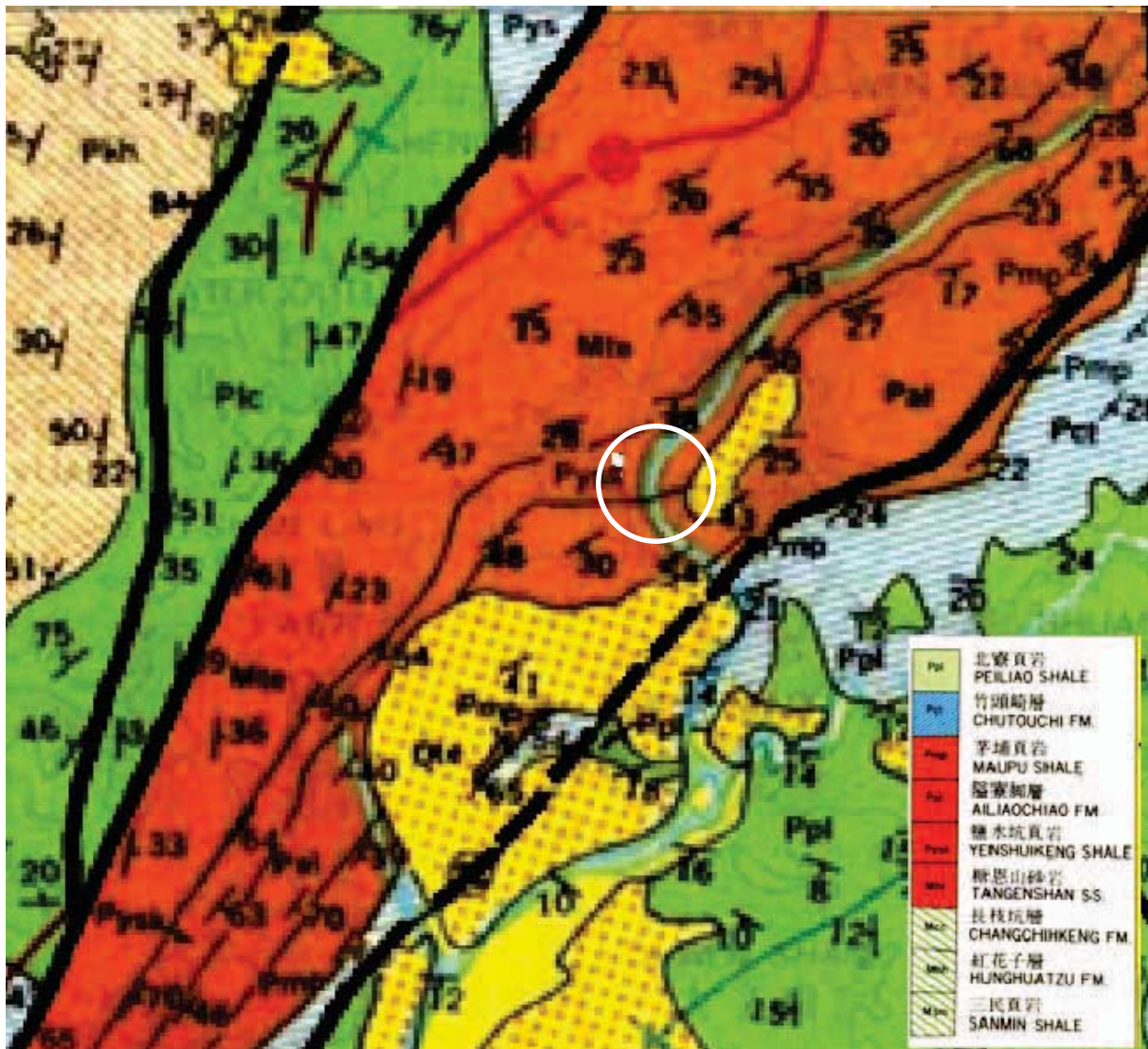


圖 2- 67 東口攔河堰地質圖(中油 1/100,000 地質圖)

(三)地形資料

圖 2- 68 為東口堰 65 年航空照片，圖 2- 69 為 96 年航照，比較兩張照片相差 30 年，河道狀況卻幾乎沒有改變，顯示該處河道相當穩定，兩者堰前之沖刷坑規模亦相近，但深度方面則屬未知。



圖 2-68 東口堰 65 年 12 月 1 日航空照片



圖 2-69 東口堰 96 年 2 月 3 日航空照片

(四)水文資料

曾文溪流域河川流量於 5 至 9 月屬豐水期，10 月至次年 4 月為枯水期，依據水利署水文水資源資料管理供應系統資料，彙整東口堰河段歷年最大洪峰流量如表 2-24 所示。

依據民國 82 年「曾文溪水系治理規劃報告」成果，彙整東口堰河段各重現期期距洪峰流量如表 2-25 所示。

表 2-24 東口堰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)
48	717	73	178
49	533	74	124
50	551	75	159
51	402	76	154
52	403	77	-
53	-	78	411
54	572	79	326
55	380	80	-
56	-	81	540
57	104	82	-
58	472	83	118
59	372	84	-
60	356	85	108
61	260	86	-
62	-	87	-
63	106	88	-
64	379	89	2,190
65	365	90	821
66	646	91	-
67	-	92	-
68	406	93	-
69	-	94	1,072
70	288	95	667
71	149	96	778
72	-	97	1,171

表 2-25 東口堰堰址各重現期洪水量表

重現期距	5 年	10 年	50 年	100 年	200 年
洪水量(cms)	4,000	4,770	6,130	6,600	7,020

(曾文溪水系治理規劃報告，台灣省水利局，民國 82 年)

八、甲仙攔河堰(高屏溪)

(一)攔河堰概述

甲仙攔河堰於民國 88 年 4 月完工，於高雄縣甲仙鄉甲仙大橋上游約 450 公尺處取水(圖 2-70)，以輸水隧道將旗山溪豐水期之剩餘水量引入南化水庫。

圖 2-71 為甲仙攔河堰全景，甲仙攔河堰壩高 7 公尺，長約 120 公尺，為混凝土重力式堰，堰體以下設置靜水池，堰址附近平均坡度 1/100，甲仙攔河堰主要配置(圖 2-71、圖 2-72)簡述如下：

1. 攔河堰左側為垂直跌落式固定堰(臥箕式)，堰體下方為靜水池。攔河堰右側為活動堰(排砂道)長 36 公尺，設置 3 門寬 10 公尺之直提式閘門。
2. 設計洪水量 5,316cms(100 年)，固定堰單寬流量約 34.8cms。固定堰及排砂道下游皆設置靜水池。然因靜水池下游河道岩盤出露，故未設護床工。



圖 2-70 甲仙攔河堰位置圖

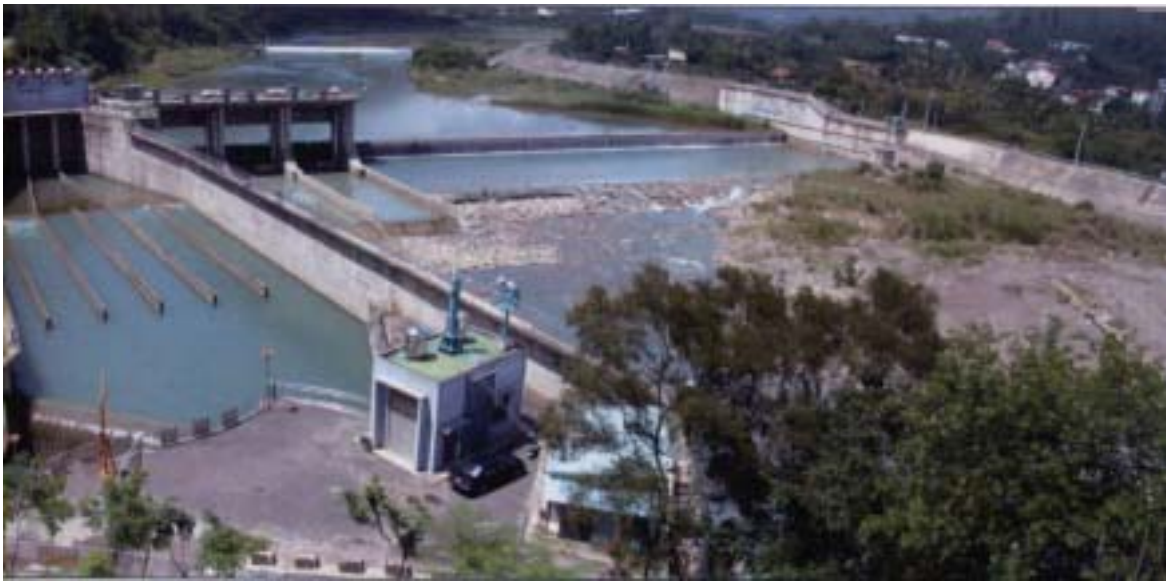


圖 2-71 甲仙攔河堰照片

(二)地質資料

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(圖 2-73)，岩性上鹽水坑頁岩以深灰色頁岩為主，偶夾凸鏡狀粉砂岩或砂岩。

本河段旗山溪河床上卵礫石覆蓋層不厚，河道上常可見岩盤出露，甲仙攔河堰上游有滴水斷層通過，該處附近有一大型崩塌地，但受公館攔河堰攔阻砂源下移。旗山溪下游有河床下降問題，河床沖刷往往達到岩盤。

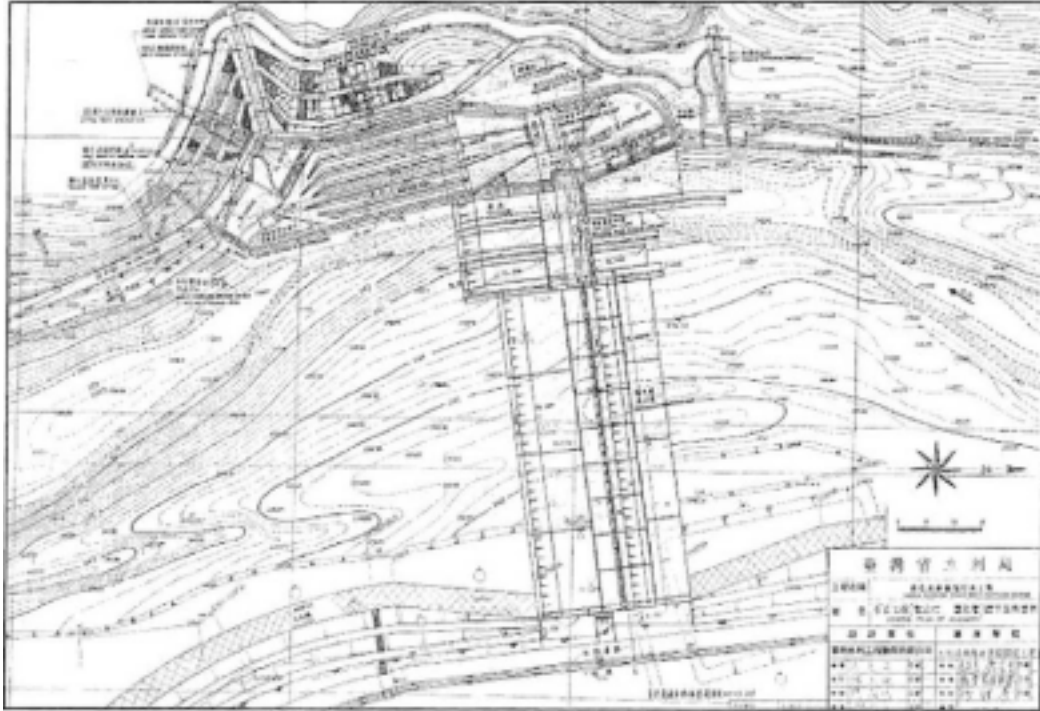


圖 2-72 甲仙攔河堰平面配置圖



圖 2-73 甲仙堰地質圖(經濟部中央地調所 1/50,000 甲仙圖幅)

(三)地形資料

圖 2-74 及圖 2-75 分別是甲仙攔河堰 89 年及 96 年的航空照片，兩個年度河道差異不大，96 年河道有岩盤出露現象。



圖 2-74 甲仙攔河堰 89 年 4 月 21 日航空照片



圖 2-75 甲仙攔河堰 98 年莫拉克颱風後航空照片

(四)水文資料

高屏溪流域河川流量於 5 至 9 月屬豐水期，10 月至次年 4 月為枯水期，依據民國 96 年「高屏溪上游段(荖濃溪、旗山溪)治理規劃報告」及水利署水文水資源資料管理供應系統資料，彙整甲仙堰河段歷年最大洪峰流量如表 2-26 所示。

依據民國 96 年「曾文水庫越域引水工程計畫攔河堰與沉砂池設計要領研擬」成果，彙整甲仙堰河段各重現期距洪峰流量如表 2-27 所示。

表 2-26 旗山溪歷年發生最大洪水量表

年別(民國)	最大洪峰流量(cms)	年別(民國)	最大洪峰流量(cms)
48	5,750	75	785
49	4,410	76	1,720
50	2,170	77	2,560
51	2,540	78	2,910
52	2,570	79	1,920
53	740	80	-
54	2,720	81	-
55	2,900	82	-
56	2,240	83	-
57	1,120	84	-
58	3,750	85	-
59	2,970	86	160
60	1,370	87	224
61	1,740	88	-
62	840	89	383
63	1,650	90	1,130
64	3,030	91	107
65	3,820	92	108
66	3,270	93	-
67	3,500	94	430
68	952	95	459
73	1,640	96	570
74	1,430	97	497

表 2-27 甲仙攔河堰各重現期洪水量表

重現期距	5 年	10 年	50 年	100 年	200 年
洪水量(cms)	2,300	3,020	4,090	5,320	5,920

(曾文水庫越域引水工程計畫攔河堰與沉砂池設計要領研擬，水利署，民國 96 年)

九、攔河堰相關調查研究資料

水利署於民國 95 年所進行之「曾文水庫越域引水工程計畫」報告中，曾彙整公共工程委員會於民國 89 年對台灣地區 25 座取水設施跨河構造物的調查結果，如表 2-28 所示。綜合整理沖刷問題成因(如圖 2-76)，顯示共 17 座(68%)發生(一座兼有)下游河道下降或局部沖刷問題，12 座(48%)河道已有岩盤出露，顯示攔河堰下游沖刷至岩盤之問題其實已相當普遍，亟需能有適當評估方法及穩定策略加以因應。

該報告中對此調查成果有以下之論述：台灣地區取水設施跨河構造物之沖刷問題已對取水設施管理單位造成經年維護之困擾。針對取水設施跨河構造物所作之現場調查與分析統計，將沖刷問題成因按所佔百分率大小排列，依序為下游河道普遍下降(人為或天然因素)、消能措施不足、柔性堰體或護床工強度不足、溢洪設施通水能力不足等。惟這些致災成因通常是相互關連的，即於現場所調查之災因並非僅由單獨某項災因所造成，而是普遍具有數項致災機理同時發生、相互影響。

水利署亦曾於於民國 96-97 年所進行之「全台灣河川攔河堰現有功能評估及其存廢檢討」計畫，廣泛針對台灣地區各單位所轄之 54 座攔河堰進行現有功能加以調查，並就經濟、安全、環境生態、水理、水資源、法規、永續利用等方面探討其存廢之正負面影響。但其調查項目並未包含攔河堰下游面之沖刷狀

況，表 2-29 為該計畫針對攔河堰屬性所做之分類表，其中 5 座堰壩目前已經沖毀或損毀。

表 2-28 工程會(89 年)調查 25 座取水設施跨河構造物名稱表

新店溪	青潭堰、直潭壩
大漢溪	鳶山堰、後村堰
頭前溪	隆恩堰、燥樹排攔河堰
大安溪	士林壩
大甲溪	石岡壩
烏溪	阿罩霧第一圳攔河堰、龍泉圳攔河堰、福龜溪攔河堰、能高大圳攔河
濁水溪	八堡圳攔河堰
朴子溪	中興圳攔河堰
八掌溪	道將圳攔河堰、仁義潭攔河堰、隆恩圳攔河堰
曾文溪	東口攔河堰
高屏溪	高屏溪攔河堰、曹公圳攔河堰、甲仙攔河堰、旗山圳攔河堰、隘寮攔
宜蘭溪	充館圳攔河堰
鹿野溪	卑南上圳攔河堰

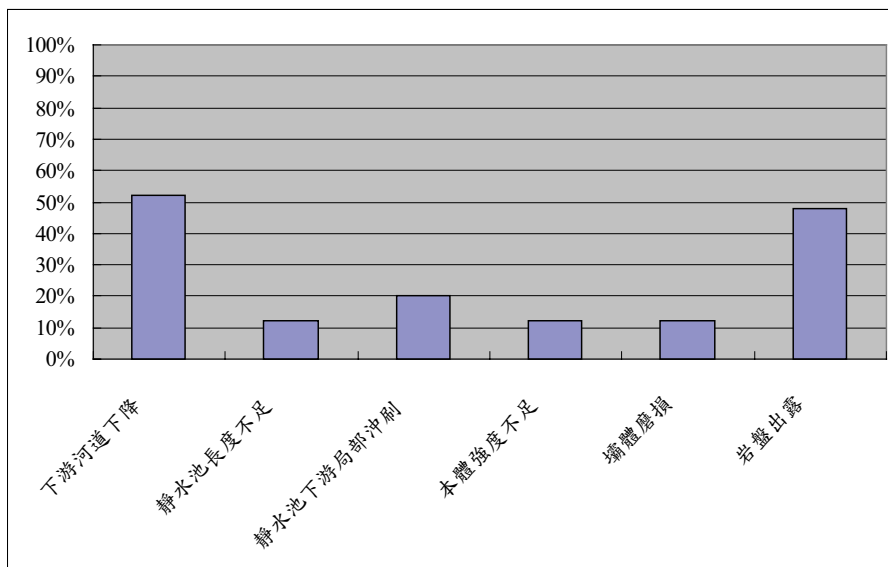


圖 2-76 工程會(89 年)調查攔河堰沖刷問題成因統計圖

表 2-29 台灣地區 54 座堰壩綜合評估屬性分類結果表

屬性類別	屬性意涵		主標的別			
	功能狀態	環境生態影響	公共用水	農業用水	攔砂	發電引水
I	良好	不敏感	1.東勢坑溪攔河堰 8.直潭壩 9.青潭堰 15.三峽河堰 20.士林攔河堰* 37.仁義潭攔河堰 38.觸口攔河堰 46.東港溪攔河堰 54.酬勤水庫	36.道將圳攔河堰 45.曹公圳攔河堰	16.粗坑二號防砂壩(粗坑溪粗坑堰)	20.士林攔河堰* 22.青山壩 (效能不佳) 23.谷關水庫 24.天輪壩 25.馬鞍壩 30.奧萬大壩 31.武界壩
II	不佳		3.友蚋溪堰	34.新虎尾溪攔河堰(橡皮壩已損毀)	無	無
III	喪失		無	14.後村堰(已沖毀)	11.巴陵壩	無
IV	良好	敏感	2.瑪陵坑溪攔河堰 13.鳶山堰 17.羅東攔河堰 (效能不佳) 18.隆恩堰 19.上坪堰 21.田美攔河堰 26.石岡壩 33.集集攔河堰 39.甲仙攔河堰 40.玉峰堰 43.高屏溪攔河堰 48.美崙溪攔河堰	35.龍泉圳攔河堰 42.隘寮堰 44.月眉堰 53.卑南上圳攔河堰	12.榮華壩	4.阿玉壩 5.羅好壩 6.桂山壩 7.粗坑壩(新店溪) 29.北山坑堰 32.銃櫃壩 41.土龍灣堰 47.溪畔壩 49.龍溪壩 50.龍鳳壩 51.木瓜壩 52.水簾壩
V	不佳		無	10.碧潭攔河堰	無	無
VI	喪失		27.大旗堰(已沖毀) 28.鹿谷堰(已沖毀)	無	無	無
備註			*士林攔河堰主標的同時計列「公共用水」及「發電引水」兩者。			

(摘自水利署 97 年「全台河川攔河堰現有功能評估及其存廢檢討」)

第參章 普查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性

為探討攔河堰下游岩盤沖刷之評估方法，本計畫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，調查對象包括後村堰(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 個堰壩下游岩盤之局部沖蝕特性，作為沖刷評估方法的案例資料基礎。

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，量測岩石材料沖刷之必要參數，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。本普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. 水流狀況與沖蝕特徵：是否發生沖蝕、其沖蝕位置、沖蝕現象與特徵、沖蝕規模。
4. 岩石強度：以史密特錘量測。
5. 調查節理狀況(開口、閉口、形狀)、節理風化程度、節理面粗糙程度及填充物狀況。
6. 拍攝照片。
7. 記錄 GPS 座標值。

以下整理各攔河堰已完成之勘查結果，包含岩性、沖蝕狀況、以及沖蝕位置等等。

一、後村堰(大漢溪)

(一)岩性種類

後村堰附近之地層經現地判釋應為南莊層，以白色及白灰色層狀細粒至粗粒砂岩及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，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。圖 3-1 為現地拍攝照片及岩性判釋示意圖，大致由厚層砂岩及砂頁岩互層兩者組成的互層，中間偶有約 1 m 厚的煤層出現。



圖 3-1 後村堰露頭照片

(二)地層位態與水流流向關係

根據現地量測，後村堰附近的地層位態約為 N68E/53S S(走向/傾角，N68E/53S 表示地層走向為北偏東 68 度，傾角為朝南邊，由水平面向下傾 53 度)，地層走向與水流流向大致平行，露頭量測位置包含堰體上游及下游及具代表性之岩層，露頭位置如圖 3-2 所示。



圖 3-2 後村堰地表露頭量測點

(三)水流狀況與沖蝕特徵

根據過去文獻資料顯示，本區域在民國 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，形成數道小峽谷，最大落差可能深達 7、8 公尺。民國 93 年 8 月艾利颱風，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。

根據現地勘查，民國 93 年堰體沖毀後，後村堰已經失去攔水作用，由於此區域地層走向與水流方向幾近平行，水流會沿著層面侵蝕，由於抗沖蝕能力較弱的砂頁岩互層及夾煤層下切速度較快，砂岩抗沖蝕能力較強下切速度較慢，隨著沖刷歷程發展，最終將只剩下砂岩突出於河道上，深槽化之河道為其沖蝕特徵(圖 3-3)。沖刷範圍根據現地觀察及航空照片判釋，其沖刷範圍自堰體向上游 350 m，向下游 400 m 處仍有岩盤出露。堰體正下方的沖刷深度根據現地量測，河道水位面附近的岩盤

高程較原本設計的攔河堰基礎高程低 14 m(如圖 3-4)，顯示後村堰的岩床沖刷下切情形之劇烈。



(288517, 2761389, N55E, 980803)

圖 3-3 抗沖蝕能力較強之砂岩突出於河道上



(288622, 2761506, S30E, 980803)

圖 3-4 後村堰堰體下方沖刷照片

(四)岩石強度

本計畫使用史密特錘推估岩石單壓強度，其原理為利用彈簧壓縮釋放後，重錘撞擊岩石表面造成回彈，由重錘回彈位移的紀錄經正規化，可得到試體強度的推估值。根據現地量測結果，表面風化程度較低的砂岩單壓強度約介於 10~20 MPa，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，表面風化程度較高的岩床則因為太過破碎、勁度較低，造成史密特錘回彈量不足無法量測。

(五)調查弱面(層面、節理面)狀況、風化程度、粗糙度及填充物

本區域風化程度較低的砂岩節理並不發達，節理面閉合、少鏽染，粗糙度為平滑平面狀或不規則平面狀，內無填充物，如圖 3- 5。砂頁岩互層受到風化的影響，表層鬆軟無法看出節理面的狀況，砂岩與頁岩之間的層面閉合，無鏽染，粗糙度多為平滑平面狀，視風化度會有少許的無凝聚性的土壤填充物，如圖 3- 6、圖 3- 7。



圖 3- 5 低度風化之砂岩節理狀況



圖 3-6 中度風化之砂頁岩互層節理狀況



圖 3-7 高度風化之砂頁岩互層節理狀況

(六) 冲刷行為探討

現地冲刷行為勘查的位置及結果如圖 3- 8、表 3- 1，其結果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（如圖 3- 9），導致較容易受水流沖蝕而下切，其抗沖蝕能力 K_h 較低；而較不易風化的砂岩沖蝕下切較慢，其抗沖蝕能力 K_h 較高，此為本區域沖蝕型態成槽溝狀之原因。



圖 3-8 後村堰岩盤沖蝕特性調查點位



圖 3-9 夾煤層、砂頁岩互層經風化、解壓形成破碎岩體

表 3-1 後村堰岩盤沖蝕特性調查表

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	382	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	1.5	1.14	213	98.08.03
6	煤層(破碎)	N64E/53S	7	1	1.5	1.14	1.41	98.08.03
7	厚層砂岩	N69E/46S	13	35	1	1.14	520	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	485	98.08.03
10	厚層塊狀砂岩(完整)	N74E/50S	13	33	1	1.14	491	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	厚層塊狀砂岩	N74E/50S	13	32	1	1.14	474	98.08.03

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，參數說明於第陸章、二、(二)內容。

二、義興壩(大漢溪)

(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- 10 為現地拍攝照片及岩層分佈示意圖，在壩基部分主要以厚層塊狀砂岩及砂頁岩互層為主。



圖 3-10 義興壩露頭照片(286721, 2740981, S45E, 980805)

(二)地層位態與水流流向關係

根據現地量測，義興壩附近的地層位態約為 N16E/8N，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岸及具代表性之岩層，如圖 3-11 所示。



圖 3-11 義興壩地表露頭量測點

(三)水流狀況與沖蝕特徵

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 3-10 所示，在第貳章第二節之義興壩地形資料中，已針對壩體之水中檢查結果加以說明，義興壩靜水池池底嚴重淘空(圖 2-19)，淘空範圍約 40m×50m，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，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(圖 2-20)。

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(圖 3-12)，岩塊沿著節理面及層面脫落的現象均相當明顯，沖刷坑周圍亦可見到諸多大塊石堆積(圖 3-13)。



(286763, 2740949, N80W, 980805)

圖 3-12 塊狀砂岩與砂頁岩互層沿節理面及層面之沖蝕狀況



圖 3-13 義興壩下方塊體抽離之岩塊

(四) 岩石強度

若使用史密特錘推估岩石單壓強度，此區岩石單壓強度已大於儀器所能測定之最大值(70 MPa)。參考北水局 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約為 80 MPa。

(五) 調查弱面(層面、節理面)狀況、風化程度、粗糙度及填充物

本區域砂岩節理很發達，有兩組垂直河道的解壓節理與一組平行河道的層面，形成大約成 1.5 m 立方的岩塊。砂頁岩互層的節理亦很發達，有兩組垂直河道的解壓節理與一組平行河道的層面，解壓節理間距較長，約 0.7 m，層面之間的間距較短，約 0.25 m。此區砂岩及砂頁岩互層之風化程度不高，節理面弱化程度不高，因解壓節理間距約為 1~5 mm，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。

(六)沖刷行為探討

現地勘查的位置及結果如圖 3-14 及表 3-2，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，因此表面磨蝕之沖刷行為較不明顯，從現場現象觀察大部分呈現的沖蝕機制都是由塊體抽離所主控。

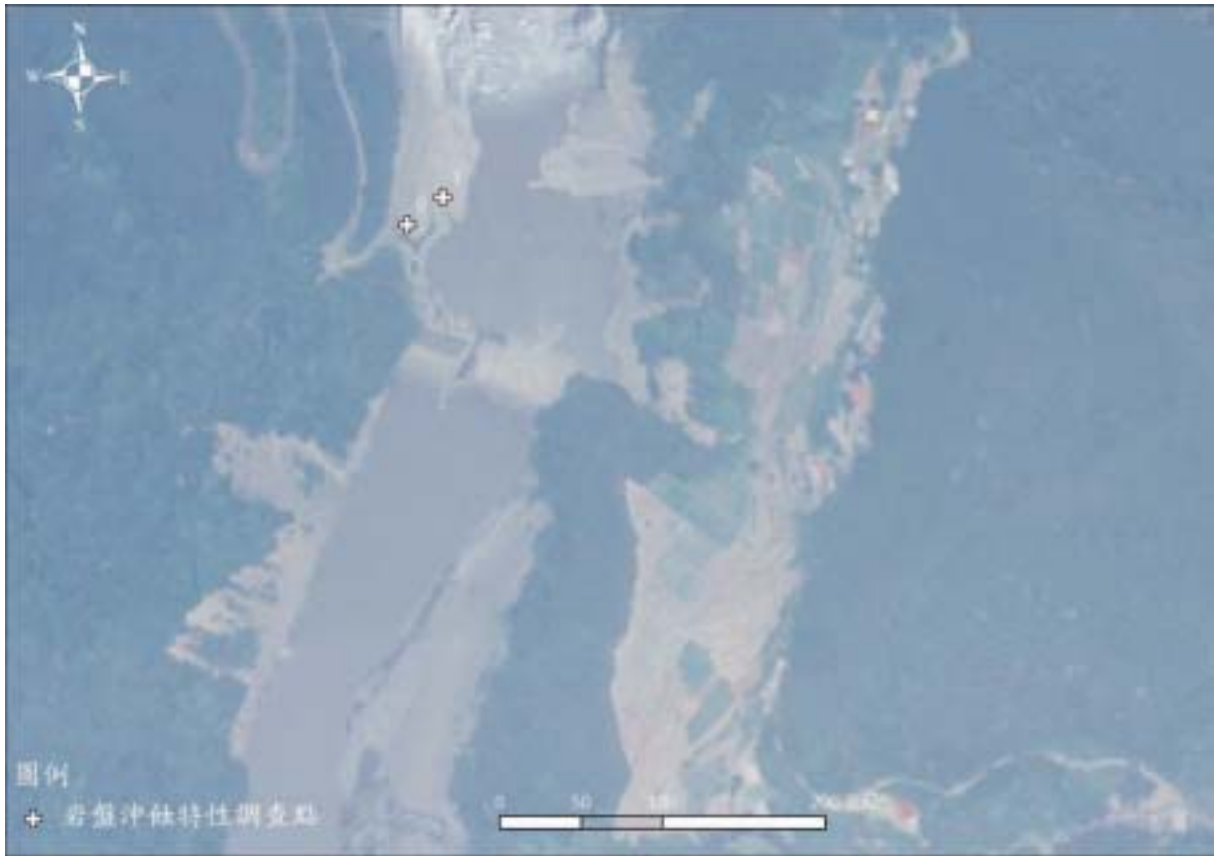


圖 3-14 義興壩岩盤沖蝕特性調查點位

表 3-2 義興壩岩盤沖蝕特性調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	厚層塊狀砂岩	N16E/8N	80	36	0.75	1.14	2480	98.08.05
1	砂頁岩互層 (節理發達)	N16E/8N	80	31	0.75	1.05	1937	98.08.05

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，參數說明於第陸章、二、(二)內容。

三、石岡壩(大甲溪)

(一)岩性種類

經現地判釋，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 m 之厚層砂岩，常受鐵液浸染。夾於砂岩中之泥岩或頁岩呈青灰色或深灰色，層厚多為 20~50 cm，但亦常成厚層夾於塊狀砂岩之中。

(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，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 3-15 所示。



圖 3-15 石岡壩地表露頭量測點

(三)水流狀況與沖蝕特徵

根據莫拉克颱風過後(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 3-16。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 3-17，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。

壩體下方約 300~600 m 處的河道呈現槽溝狀，其成因研判為岩性與節理性質的不同產生差異侵蝕，如圖 3-18。



(226515, 2686070, N20W, 980811)

圖 3-16 莫拉克颱風後石岡壩洩洪



圖 3-17 石岡壩跌水工基礎前方沖刷坑(226448, 2686040, N, 980827)



圖 3-18 石岡壩下游河道呈槽溝狀(226213, 2686090, N45E, 980827)

(四)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，而由水規所(98 年)進行之鑽探及試驗成果(表 2- 7)，各岩層的單壓強度則介於 2~12MPa 之間，結果大致吻合。

(五)調查弱面(層面、節理面)狀況、風化程度、粗糙度及填充物

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，如圖 3- 19。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。



圖 3- 19 斷層附近的破碎岩體(226186, 2686086)

(六)沖刷行為探討

現地沖刷行為勘查的位置及結果如圖 3- 20 及表 3- 3，由於斷層之抬昇作用造成許多局部的岩體破碎，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，程度上大於岩性(例如砂岩相對於頁岩)本身的影響，調查時將特別注意岩塊局部破碎的分佈區域。



圖 3-20 石岡壩岩盤沖蝕特性調查點位

表 3-3 石岡壩岩盤沖蝕特性調查表

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，節理發達，可能受斷層影響	N30E/58S	9	34	1	1.14	306	98.08.11
1	厚層泥質粉砂岩(完整)	N60E/68S	12.5	36	1	1.09	488	98.08.27
2	厚層泥質粉砂岩(破碎)	N58E/60S	12.5	19	1	1.14	267	98.08.27
3	厚層砂岩偶夾頁岩(破碎)	N40E/50S	11	6	1	1.05	71	98.08.27
4	砂岩(完整)	N50E/42S	13	44	1	1.02	583	98.08.27
5	泥岩偶夾砂岩	N44E/44S	9	29	1	1.09	246	98.08.27
6	厚層泥岩	N40E/44S	9.5	33	1	1.09	296	98.08.27
7	砂岩偶夾頁岩	N38E/40S	13	25	1.5	1.09	538	98.08.27

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，參數說明於第陸章、二、(二)內容。

四、龍泉圳攔河堰(烏溪)

(一)岩性種類

根據現地勘查，本區域地層屬猴洞坑層，岩性大部份由灰黑色塊狀頁岩組成，部份頁岩內夾 1~3 cm 薄層細粒緻密砂岩而成為砂頁岩互層，如圖 3- 21(a)。堰體附近有一層厚度約 5 m 的粉砂岩，如圖 3- 21(b)。



(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- 21 龍泉圳露頭照片

(二)地層位態與水流流向關係

根據現地量測，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，露頭量測位置為堰體下游左岸河道旁，如圖 3-22。



圖 3-22 龍泉圳地表露頭量測點

(三)水流狀況與沖蝕特徵

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，一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。另一類為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 3-23。

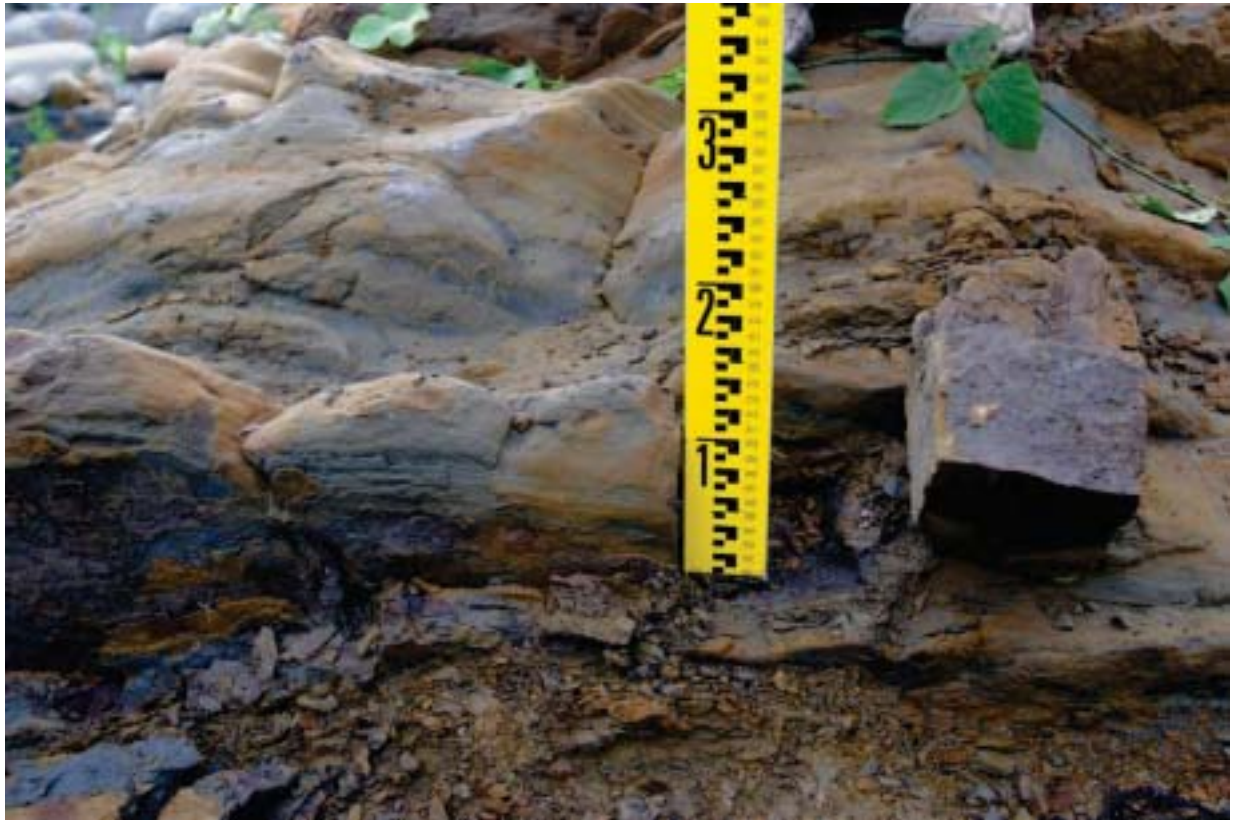


圖 3-23 膠結較差的砂頁岩互層沿節理面形成破碎岩塊

(四)岩石強度

根據現地量測結果，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。

(五)調查弱面(層面、節理面)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。

(六)沖刷行為探討

現地沖刷行為勘查的位置及結果如圖 3-24、表 3-4，由於龍泉圳平時水流並不大，所以沖刷行為並不明顯。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磨蝕為主。解壓節理較發達的砂頁岩互層或膠結較差的粉砂岩之沖蝕行為，則以塊狀抽離為主。



圖 3-24 龍泉圳岩盤沖蝕特性調查點位

表 3-4 龍泉圳岩盤沖蝕特性調查表

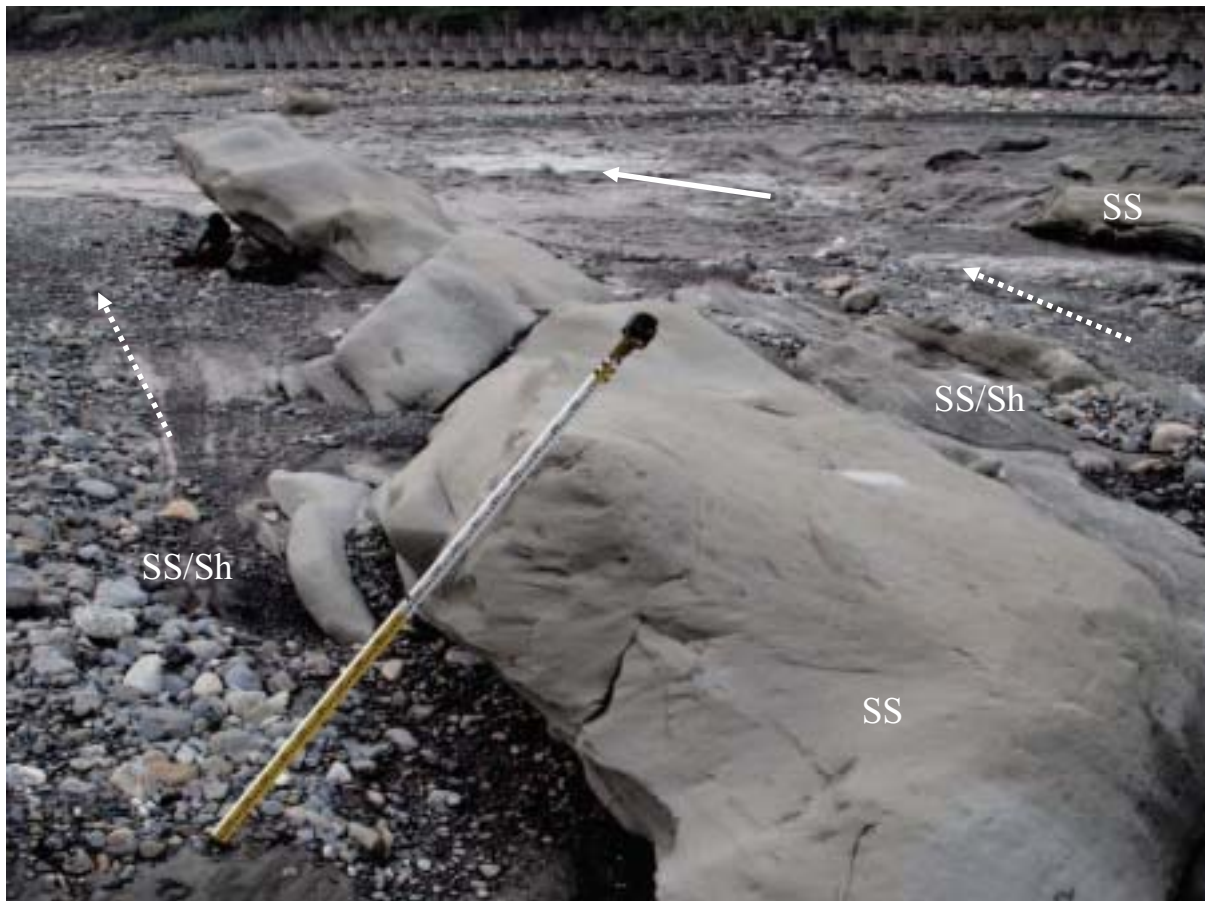
調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	厚粉砂岩(應力集中區域，出露範圍 40 m)	N16W/56N	36	24	1.5	0.59	765	98.08.06
1	砂頁岩互層	N2W/81N	25.5	1	1.5	1.41	43	98.08.06
2	厚層砂岩	N2W/81N	37.5	18	0.75	1.26	626	98.08.06
3	砂頁岩互層	N4W/82N	25.5	28	0.75	1.26	685	98.08.06
4	砂頁岩互層	N4W/82N	25.5	30	0.75	1.26	711	98.08.06
5	砂頁岩互層	NS/80E	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

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，參數說明於第陸章、二、(二)內容。

五、集集攔河堰(濁水溪)

(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 10~50 cm，部份砂岩常複合形成 1~2 m 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 20~50 cm，亦有厚層頁岩 5~8 m 夾於塊狀砂岩間，如圖 3-25。



(225647, 2634983, N, 980822)

圖 3-25 集集攔河堰露頭照片

(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 m 附近的地層位態約

為 N20W/40N。水流量小時，水流流向大致順著地層走向，水流量大時，地層傾向與水流流向相反。露頭量測位置主要為堰下游初鄉斷層之前的岩層，如圖 3-26 所示。

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 m 後，岩層位態出現劇烈變化，直至攔河堰下游約 750 m 處，研判此岩層位態之變化應是受到初鄉斷層之影響。

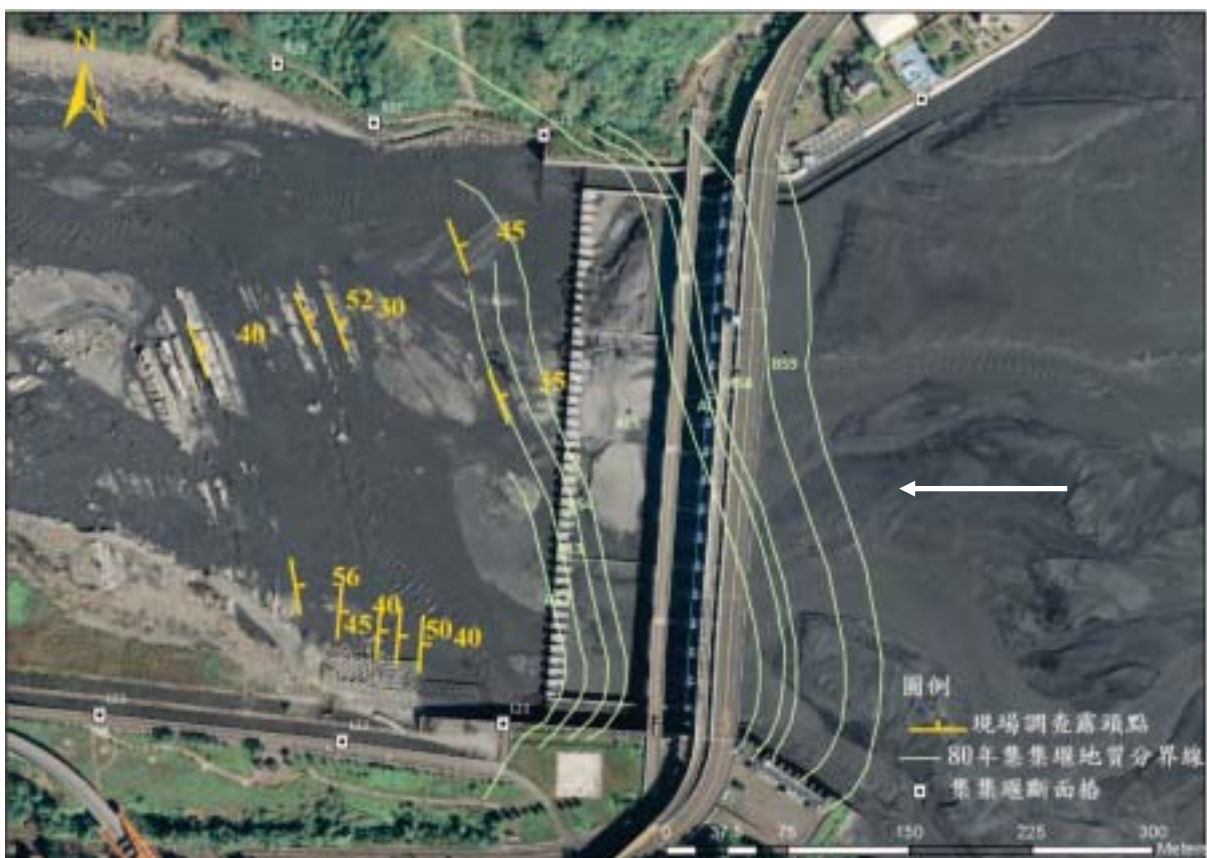


圖 3-26 集集攔河堰地表露頭量測點

(三)水流狀況與沖蝕特徵

根據莫拉克颱風後之現地勘查，攔河堰下方河道的水位高度約 1.5 m，靜水池尾欄下游側以及水泥護坦下游側均有顯著跌水落差，如圖 3-27，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 3-28。



圖 3-27 莫拉克颱風後集集攔河堰洩洪(98.8.11)



(225250, 2634963, N60E, 980303)

圖 3-28 集集攔河堰下游河道因岩性造成之差異侵蝕

(四)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(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。因此將以室內單壓試驗結果(詳見第肆章)代表砂頁岩互層之單壓強度。由本計畫室內試驗得到，砂頁岩薄互層單壓強度約為 2 MPa。

(五)調查弱面(層面、節理面)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。

(六)沖刷行為探討

現地勘查的位置如圖 3-26 露頭量測點所示、結果如表 3-5，在河道沖刷部分，初鄉斷層經過之區域節理組數較多且發達，岩體成破碎狀被水流抽離。其餘部分的沖刷行為則多為水流沿著岩層層面侵蝕，抗沖蝕能力較弱的砂頁岩互層(K_h 4~17)、頁岩下切速度較快，抗沖蝕能力較強的砂岩(K_h 482~825)下切速度較慢，呈平行層面的槽溝狀河道。

堰前之沖刷部分，由集集堰之定期檢查結果及護坦前鋪設礫石作業觀察(圖 3-29、圖 3-30)，水流沖擊在尾欄下之水泥護坦造成深度不一之局部沖刷坑，最深可達 2 公尺以上，而在水泥護坦下游側可發現淤積相當深度之泥沙碎石，應為岩盤沖蝕後所淤積。由於集集堰前之局部沖刷均由例行歲修所修復，難以觀察到累積之局部沖刷發展，每年之局部沖刷概況，須綜合歲修資料進行研判。

表 3-5 集集攔河堰岩盤沖蝕特性調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	砂岩	N20W/30N	28	34	1	0.50	482	98.08.22
1	砂岩	N24W/52N	30	54	1	0.55	889	98.08.22
2	砂頁岩互層(破碎)	N20W/40N	2	3	1.5	0.49	4	98.08.22
3	砂頁岩互層	N10W/56N	16	3	1	0.60	3	98.08.22
4	砂岩	N5E/45S	33	31	1	0.51	517	98.10.12
5	砂岩	N5E/50S	21	30	1	0.53	336	98.10.12
6	砂頁岩互層	N5E/40S	2	11	1	0.49	9	98.10.12
7	砂頁岩互層	N5E/45S	2	21	1	0.49	17	98.10.12
8	砂岩	N10W/35N	21	53	1.33	0.55	818	98.10.12
9	砂岩	N10W/45N	21	51	1.33	0.58	825	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，參數說明於第陸章、二、(二)內容。

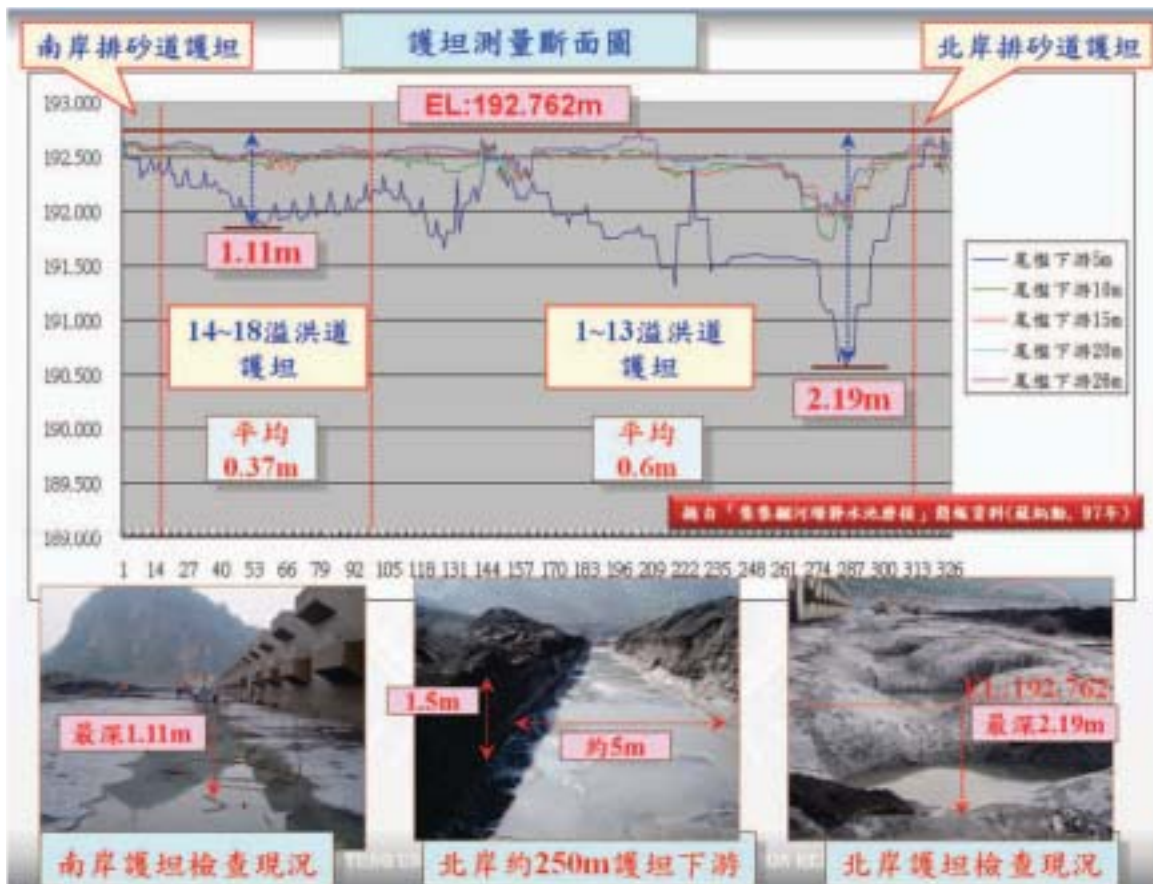


圖 3-29 集集攔河堰 96 年底靜水池及護坦歲修檢查結果



圖 3-30 集集攔河堰護坦前鋪設礫石作業(97年3月)

六、觸口攔河堰(八掌溪)

(一)岩性種類

根據現地勘查，本區屬於六重溪層，其岩性由淺灰色泥質粉砂岩，夾深灰色頁岩或灰色砂質頁岩、泥岩組成，如圖 3-31。



(208789, 2593127, S, 980821)

圖 3-31 觸口攔河堰露頭照片

(二)地層位態與水流流向關係

根據現地量測，觸口攔河堰附近的地層位態約為 N60E/10N，地層走向與水流流向大致平行，露頭量測位置包含堰體上游、左側及右岸及具代表性之岩層，如圖 3-32 所示。



圖 3-32 觸口攔河堰地表露頭量測點

(三)水流狀況與沖蝕特徵

根據 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」，完工後如圖 3-33。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(圖 3-34)，水流改道攔河堰外左側，基礎旁下切出一條新河道，如圖 3-35 所示，岩層表面多為滑槽(flute)之沖蝕特徵。



圖 3- 33 觸口攔河堰修復



(208789, 2593137, S, 980821)

圖 3- 34 觸口攔河堰莫拉克颱風後堰體破壞淤埋狀況



(208744, 2593050, N80E, 980821)

圖 3-35 觸口攔河堰莫拉克颱風後堰外左側改道下切狀況

(四)岩石強度

根據現地量測結果，表面風化程度較低的灰色細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。

(五)調查弱面(層面、節理面)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。

(六)沖刷行為探討

本年度現地勘查岩性量測位置如圖 3-36、表 3-6 所示，從河床表面多圓滑滑槽(flute)以及大型塊體抽離痕跡(圖 3-37)，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，一為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。另一為懸浮載對岩床表面的磨蝕作用，造成許多滑槽殘留。

根據歷年多次之勘查，觸口攔河堰 88 年完工至今，陸陸續續進行至少四次較大規模修復工程，由歷年照片觀察可以發現(圖 3-38~圖 3-41)，觸口堰之損毀與堰前局部沖刷行為有密切之關係，局部沖刷造成堰前沖刷坑形成，進而後退沖蝕堰體基礎，嚴重影響攔河堰穩定性。

表 3-6 觸口攔河堰岩盤沖蝕特性調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	灰色泥質粉砂岩、 表面多滑槽	N60E/10N	9	30	1	1.05	246	98.08.21
1	頁岩	N60E/10N	5	21	1.5	1.14	149	98.08.21
2	灰色泥質粉砂岩、 表面多滑槽	N60E/10N	11.5	31	1	1.09	385	98.08.21
3	頁岩	N50E/8N	5	15	1	1.09	68	98.08.21
4	頁岩	N65E/6N	5	29	1	1.09	132	98.08.21

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，參數說明於第陸章、二、(二)內容。



圖 3-36 觸口攔河堰岩盤沖蝕特性調查點位



(208812, 2593063, S80W, 980821)

圖 3-37 觸口攔河堰左側新河道沖蝕特徵



圖 3-38 觸口攔河堰靜水池前局部沖刷狀況(94.4.13)



圖 3-39 觸口攔河堰靜水池前局部沖刷狀況(96.11.4)



圖 3- 40 觸口攔河堰靜水池前局部沖刷狀況(97.10.18)



圖 3- 41 觸口攔河堰靜水池前局部沖刷狀況(98.8.21)

七、曾文東口攔河堰(曾文溪)

(一)岩性種類

依據中油十萬分之一地質圖，比對現場出露岩盤(圖 3- 42)，東口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巨厚、塊狀之頁岩為主，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。



圖 3-42 東口堰下游出露之鹽水坑頁岩

(二)地層位態與水流流向關係

經由地質圖資料及現地勘查，此區域水流流向大至與地層走向平行。

(三)水流狀況與沖蝕特徵

根據 98 年 7 月勘查結果，東口堰前有一大型沖刷坑，經莫拉克颱風退水後之現地勘查，發現莫拉克颱風造成東口堰下游右岸護岸部分破損，如圖 3-43，堰前沖刷坑的範圍擴大，但沖刷坑仍是由卵礫石所覆蓋組成。



(a) 攝於左岸道路(98.7.13)



(b) 攝於左岸道路(98.9.17)

圖 3-43 東口堰於莫拉克颱風前後之比較

(四)沖刷行為探討

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(圖 3- 44)，本區河道地形經比較 65 年及 96 年航照發覺並無太大差異，顯示河道穩定性佳，且沖刷坑亦無明顯變化。

研判沖刷坑的穩定應與良好之卵礫石覆蓋有直接關係，但沖刷坑底部深度的變化則無資料可以佐證。



圖 3- 44 東口堰前沖刷坑(98.3.2)

八、甲仙攔河堰(高屏溪)

(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，偶夾凸鏡狀粉砂岩或砂岩。

(二)地層位態與水流流向關係

根據地質圖顯示，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，確切地層位態待進一步現地勘查。

(三)水流狀況與沖蝕特徵

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。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。

(四)岩石強度

根據現地量測結果，新鮮頁岩層單壓強度約為 13~25MPa。現地另有一薄層砂岩，單壓強度較高，為 28~41.5 MPa。

(五)調查弱面(層面、節理面)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，如圖 3-45 所示。至於頁岩本身表面暴露於河表面上，造成物理風化崩解成片狀或碎屑狀。

(六)沖刷行為探討

現地勘查的位置及結果如表 3-7、圖 3-46 所示，由於攔河堰會攔截上游之沈積料，造成下游沈積料供給減少失去保護作用，岩床持續遭受水流沖蝕而下切刷深，此現象對堰前靜水池的基礎不利。根據現勘結果，相關單位已於莫拉克颱風前在靜水池前施作卵礫石護坦，保護岩床不直接受水流沖蝕，但於莫拉克颱風之後護坦全部損毀，其原因可能為護坦材質由卵石與混凝土組成，無法抵抗水壓波動所造成的擾動破壞，或者護坦與岩床之間無完全固結氣密，造成水壓從縫細或介面中滲入，其上舉力將護坦與岩床直接分離，其災損結果如圖 3-47。

根據本年度四次現勘，判斷攔河堰下方的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，如圖 3-48。

本次 88 水災造成甲仙攔河堰功能幾乎全毀，僅堰體受損較為輕微。具當地居民描述，旗山溪水位在連續降雨後起初並無明顯上升，後來的溢淹災害是由突然而來的超大洪水所造成，是否係由於上游堰塞湖所造成尚須經過相關單位確認。



圖 3-45 甲仙堰新鮮頁岩的解壓節理



圖 3-46 甲仙堰抗沖蝕能力調查點

表 3-7 甲仙攔河堰岩盤沖蝕特性調查表

調查點	岩性	位態	UCS (MPa)	K_b	K_d	J_s	K_h	調查日期
0	頁岩	N40E/45S	17.5	32	1	0.51	289	98.10.12
1	頁岩	N40E/45S	25	31	1	0.51	398	98.10.12
2	頁岩	N40E/45S	13	32	1	0.51	211	98.10.12
3	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

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，參數說明於第陸章、二、(二)內容。



(a) 護坦施作完畢(98.7.13)



(b) 莫拉克颱風後護坦被沖毀，靜水池基礎下方岩盤暴露形成沖刷坑(98.8.22)

圖 3-47 甲仙堰靜水池前於莫拉克颱風前後之比較



(a) 靜水池前岩盤裸露(98.3.2)



(b) 於裸露岩盤上覆蓋卵石保護(98.7.13)



(c) 覆蓋卵石全被大水沖走，但河道沖蝕現象不明顯(98.8.22)

圖 3- 48 甲仙堰下游河道於莫拉克颱風前後之比較

第肆章 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（即第參章內容）外，本年度並擇定集集攔河堰進行詳細之抗沖蝕能力調查評估工作，第二年度則選定於石岡壩進行。

調查工作必須充分獲得必要的岩盤沖刷相關參數，以利進行後續之岩盤沖刷相關研究探討，工作項目包括水力特性、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 4-1 所示。

表 4-1 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	兩孔共 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、集集攔河堰下游水力特性分析

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，本工作項目擬區分為二個主要階段，一是由攔河堰上、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；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，作為岩盤局部沖刷評估工作之水力輸入參數，配合選擇之局部沖刷評估模式、構造物及地形條件，進行攔河堰前局部沖刷之分析評估。本研究水力特性分析之流程如圖 4-1 所示。

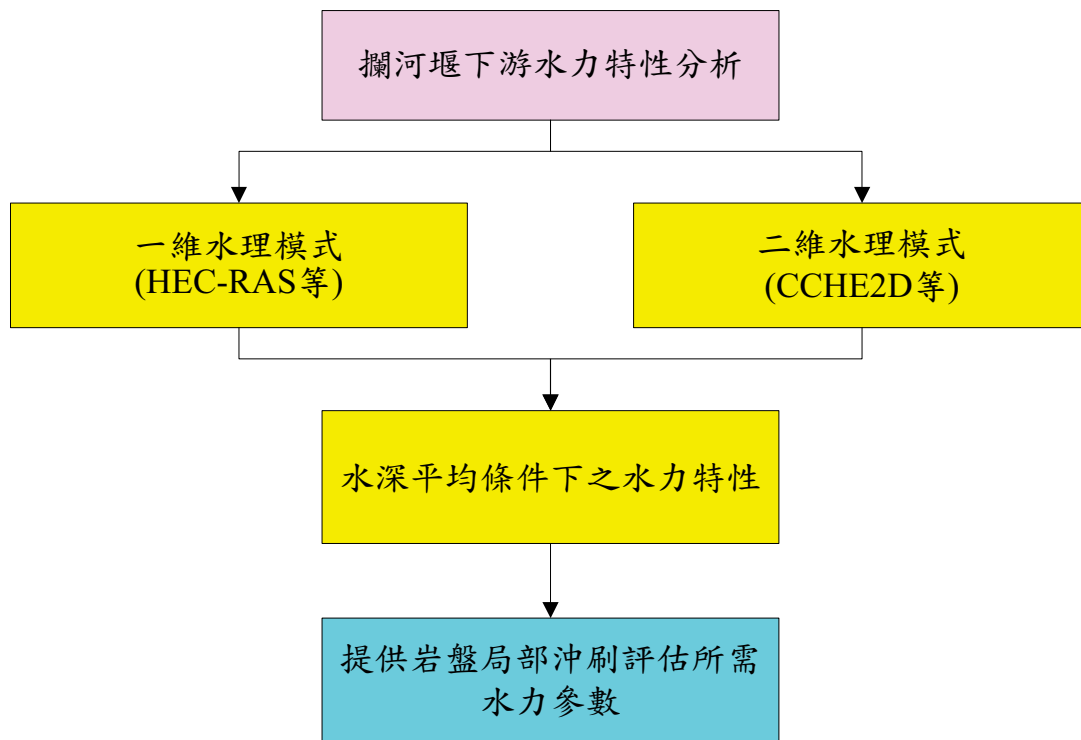


圖 4-1 攔河堰下游水力特性分析流程圖

(一)一維水力特性分析

一維水理分析參考採用既有相關研究與治理規劃報告之水理分析成果，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，不足之處再加以補充分析。參考民國 96 年「濁水溪水系治理規劃檢討報告」之水理分析成果，該報告採用一維水理模式 HEC-RAS 進行水理分析，模擬民國 96 年斷面不同重現期流量下之沿程水位、福祿數、流速分佈等，表 4-2 為集集堰河段與計畫洪水流量下之模擬成果，可發現集集堰位置 100 年

重現期流量下(20,500cms)之最高斷面平均流速可達 14.32 m/s，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 濁水溪集集堰河段計畫洪水量水理因素成果表

斷面	河心距 (m)	計畫洪水量(100年重現期)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	
106.5	49,858	155.76	0.85	7.07	584	3295.71	0.006	名竹大橋
106.51	49,891	156.97	0.69	6.28	606.56	3843.65	0.0037	
107	50,427	158.52	1.13	9.61	630.98	2864.48	0.0107	
108	51,057	165.76	0.96	7.33	786.44	3395.98	0.0081	
109	51,687	170.52	0.71	5.73	931.25	4461.99	0.0042	
110	52,157	173.18	1.31	9.94	564.54	2531.34	0.0149	
111	52,785	181.11	0.88	6.96	735.91	3341.57	0.0066	
112	53,438	185.01	0.48	4.67	727.55	5500.02	0.0017	
113	53,897	186.2	0.71	6.57	837.56	4393.4	0.0038	
114	54,446	185.01	1.24	10.01	510.23	2264.26	0.013	
115	55,063	192.44	1.04	10.43	815.04	3109.01	0.0078	
116	55,841	199.59	0.89	8.2	507.59	3009.19	0.0061	
117	56,331	198.63	2.25	14.32	346.22	1431.3	0.0513	
117.05	56,340	198.24	2.61	15.83	346.19	1294.66	0.0715	
117.49	56,362	199.28	2.39	16.26	284.41	1283.66	0.0536	集集堰
117.5	56,367	209.8	1	8.65	313	2370.11	0.0241	
117.51	56,372	213.25	0.28	3.79	355	5758.23	0.0005	
118	56,594	214.19	0.11	1.37	1100.76	15468.69	0.0001	
119	57,132	215.27	0.98	5.44	1134.47	3680.32	0.0103	
120	57,602	218.31	0.57	4.35	1065.8	5246.51	0.0028	

(資料來源：濁水溪水系治理規劃檢討報告，2007)

(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之局部二維水理因子，以作為堰址下游採砂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計算相關案例，於台灣亦有大安溪、濁水溪等案例之應用經驗，成效頗為良好，模式基本理論與功能限制可參考附錄二所示。

1、模擬條件

本研究集集堰二維水理局部模擬之條件方面，以集集堰址上游400m處至濁水溪斷面116為模擬局部範圍，長約980m，如圖4-2所示。採用民國98年中水局提供之實測DEM高程作為初始地形，集集堰址、閘門與排砂道幾何之設定，參考民國90年「集集攔河堰水門操作規定」，設定攔河堰設施及閘門相關尺寸高程。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)」之檢定驗證結果。

邊界條件方面，上游邊界採用集集堰址河段不同重現期洪水量，參考水規所民國96年「濁水溪水系治理規劃檢討報告」之成果，如表4-3所示。下游邊界參考民國96年「濁水溪水系治理規劃檢討報告」之一維水理分析成果，採用濁水溪斷面116於不同重現期距洪水量之水位高程。

曼寧n值依據民國96年「濁水溪水系治理規劃檢討報告」成果，採用建議值0.04為模式參數設定。集集堰址區域之曼寧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 集集攔河堰堰址各重現期洪水量

重現期距	2年	5年	10年	20年	25年	50年	100年
洪水量(cms)	5,500	9,300	11,900	14,500	15,300	17,900	20,500



圖 4-2 二維水力特性模擬範圍

2、模擬結果

100 年重現期流量下(20,500 cms)之水力分析結果如圖 4-3 所示，由二維模擬結果得知，模擬範圍內高流速多集中於堰址入流口與排砂道下游處。其中最高流速可達 19 m/s 以上(等高線統一以 10 m/s 為顯示上限)，最大單寬流量、最大水深與最大剪力強度同樣位於堰址左岸排砂道流路，最大單寬流量約為 160 m²/s，最大水深約達 23 m，最大剪應力約為 4,200 N/m²。右岸排砂道也有高流速集中之現象，最高流速約達 17 m/s，最大單寬流量約為 140 m²/s，最大水深約為 20 m，最大剪應力約為 3,500 N/m²。水流流經排洪、排砂道後，流況屬超亞混合流流況，沿排洪道、排砂道流線流速約為 10 m/s，超亞臨界流交錯流況下低流速區域流速約為 0.5 m/s，流況複雜，經跌水後水流流況轉為亞臨界流，平均流速約為 6 m/s。堰址出口處水流經尾艦抬升後轉為超亞混合流流況，平均流速約為 10 m/s，此區間最大流速位於兩側排砂道下游段。

重現期 50 年、25 年、20 年、10 年、5 年及 2 年重現期洪水流量下流速、福祿數、水深、單寬流量與剪應力分佈圖可參考附錄四。流速整體趨勢與 100 年重現期流量下分佈相似，最大流速亦位於堰址入流口與排砂道下游處，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 100 年重現期流量下分佈相似，其值皆隨流量降低而減小，各重現期洪水水力特性分佈圖請參考附錄四。

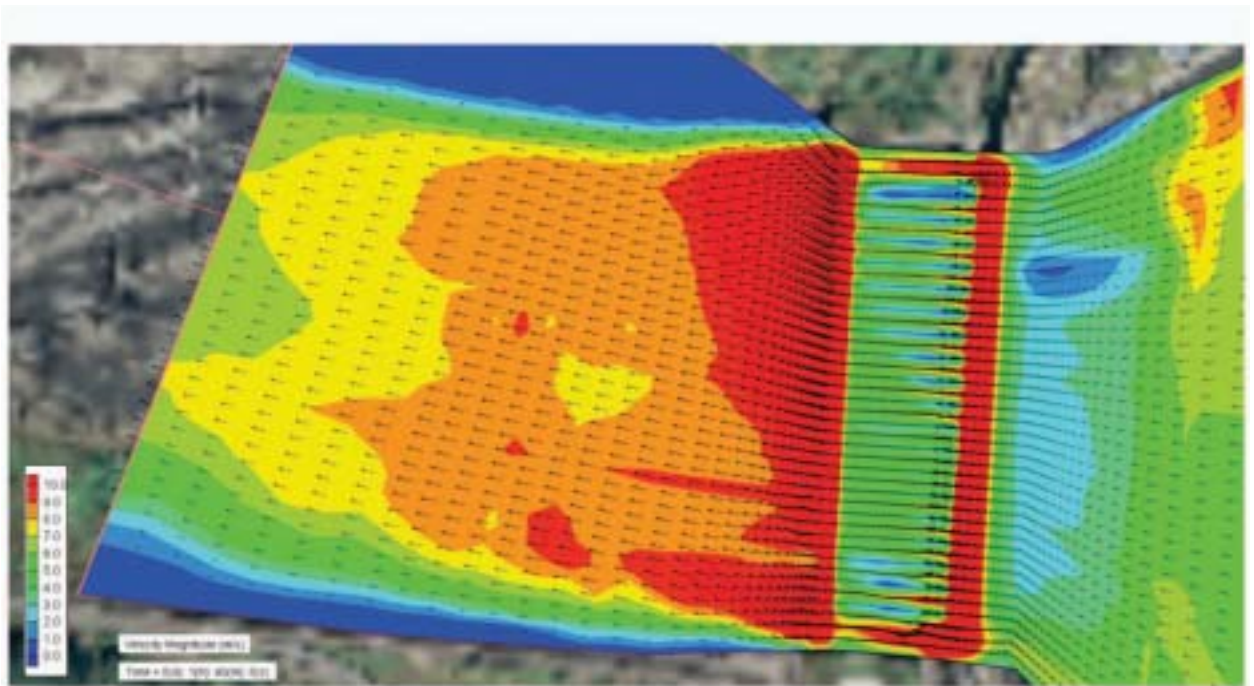


圖 4-3 100 年重現期洪水水力特性分佈圖(流速分佈放大)

二、沖蝕特性調查

集集攔河堰沖蝕特性調查成果已經說明於第參章第五節中，在此不再重複敘述。

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。

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：

本計畫位於集集攔河堰，於颱風或豪大雨期間河水暴漲，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介面開裂，完整試體製作不易。此外，集集攔河堰下游 300 公尺處有初鄉斷層通過，為確保岩心品質，鑽孔深度與位置選擇應儘可能遠離斷層擾動帶。

3、孔位規劃

孔位規劃主要依據集集攔河堰堰址岩盤地質圖(圖 2-43，水利局，80 年)以及現地勘查結果，集集堰堰址地層岩性主要由砂

頁岩互層(英文代碼 AL)、及層狀砂岩(BS)所組成，堰址上游側有一厚約 15 公尺之厚層砂岩(MS)。

本計畫鑽探採樣工作進尺總深度為 50 m，詳細鑽孔位置見圖 4-4，共鑽取 2 孔，兩孔各佈於攔河堰左右岸。



圖 4-4 鑽孔規劃位置圖

(二)鑽探成果

本計畫鑽探成果柱狀圖請參閱附錄三，根據鑽孔成果，本計畫岩心總共可分為三類：分別為層狀砂岩、頁岩偶夾砂岩，與砂頁岩互層。

層狀砂岩：砂岩層厚不超過 2 m，偶夾頁岩層理，且層理明顯者。此種岩性單壓強度(詳見下節岩石力學試驗)與張力強度皆為三種岩性最高者，偶有節理，如圖 4-5。

砂頁岩互層：為砂岩與頁岩之薄互層，主要分布於集集攔

河堰河道上鑽孔 C02，岩層特色為層理膠結較差，層面偶夾泥，從地底下取樣出來常沿層理開裂，有時可見數十公分之剪裂泥或軟弱帶，此種岩性因為面膠結不佳，反應於單壓強度與張力強度皆差。(詳見下節岩石力學試驗，如圖 4- 6)

頁岩偶夾砂岩：為頁岩為主，偶夾薄砂岩，孔號 C01 除了數公尺層狀砂岩外，其餘皆為頁岩偶夾砂岩。此岩性層面膠結較砂頁岩互層佳，無夾泥或軟弱帶，材料單壓強度與張力強度因頁岩含料高，較砂岩低而高於砂頁岩互層，如圖 4- 7。



圖 4- 5 層狀砂岩層(C02 0 至 5 m)



圖 4- 6 砂頁岩互層(C02 15 至 20 m)



圖 4- 7 頁岩偶夾砂岩(C01 20 至 25 m)

鑽孔 C01 孔深 25 m，全孔岩心主要可分為下列數段：

1. 0 至 5.3 m 表土或崩積層，主要為右岸山壁崩落堆積之崩積層或表土層。岩心中偶見小於 1m 之砂岩岩心，但走向與下方岩心不符，推測極可能為山壁崩落堆積之砂岩塊體。
2. 5.3 至 6.2 m 為層狀砂岩，岩心偶夾薄層頁岩，RQD 為 100。
3. 6.2 至 10 m 為頁岩偶夾砂岩，砂岩與頁岩層面膠結較佳，岩心完整。RQD 均為 100，層面角度約 45 度。
4. 10 至 12 m 為層狀砂岩，砂岩中偶見節理，節理角度約 50 度。岩心完整，RQD 均為 100，層面角度約 45 度。
5. 12 至 25 m 為頁岩偶夾砂岩，砂岩與頁岩層面膠結較佳，局部受生物擾動層面較不明顯。岩心完整，RQD 均為 100，層面角度約 45 度。

鑽孔 C02 孔深 27 m，全孔岩心主要分為以下數段：

1. 0 至 7.4 m 為層狀砂岩層，其中 0-0.8 m 砂岩裸露於河床上，風化呈黃色，下方則為青灰色砂岩，偶有頁岩夾層，砂岩與頁岩層面偶夾軟弱泥，局部有節理。RQD 從 45-100。層面角度約 45 度。
2. 7.4 m 至 27 m 為砂頁岩互層，層面膠結較差，層面偶夾泥，或軟弱帶，偶有節理通過，RQD 從 20-100。層面角度約 45 度。

(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 C01 孔 1.41 至 23.75 m，C02 孔 1.41 至 27 m。其兩孔資料透過 RGLDIP V6.2 軟體進行分析。圖 4-8 為節錄

本次造影結果，資料中並標示了層面（以綠色符號表示之）以及節理（以藍色符號表示之）之方位傾角和所在深度。而各層面和節理均有相關註釋，以提供判釋參考。圖中 NESWN 為 360 度展開之聲波造影影像，色彩分佈為反射能量，愈深之顏色代表反射能量愈低。而 0 至 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。

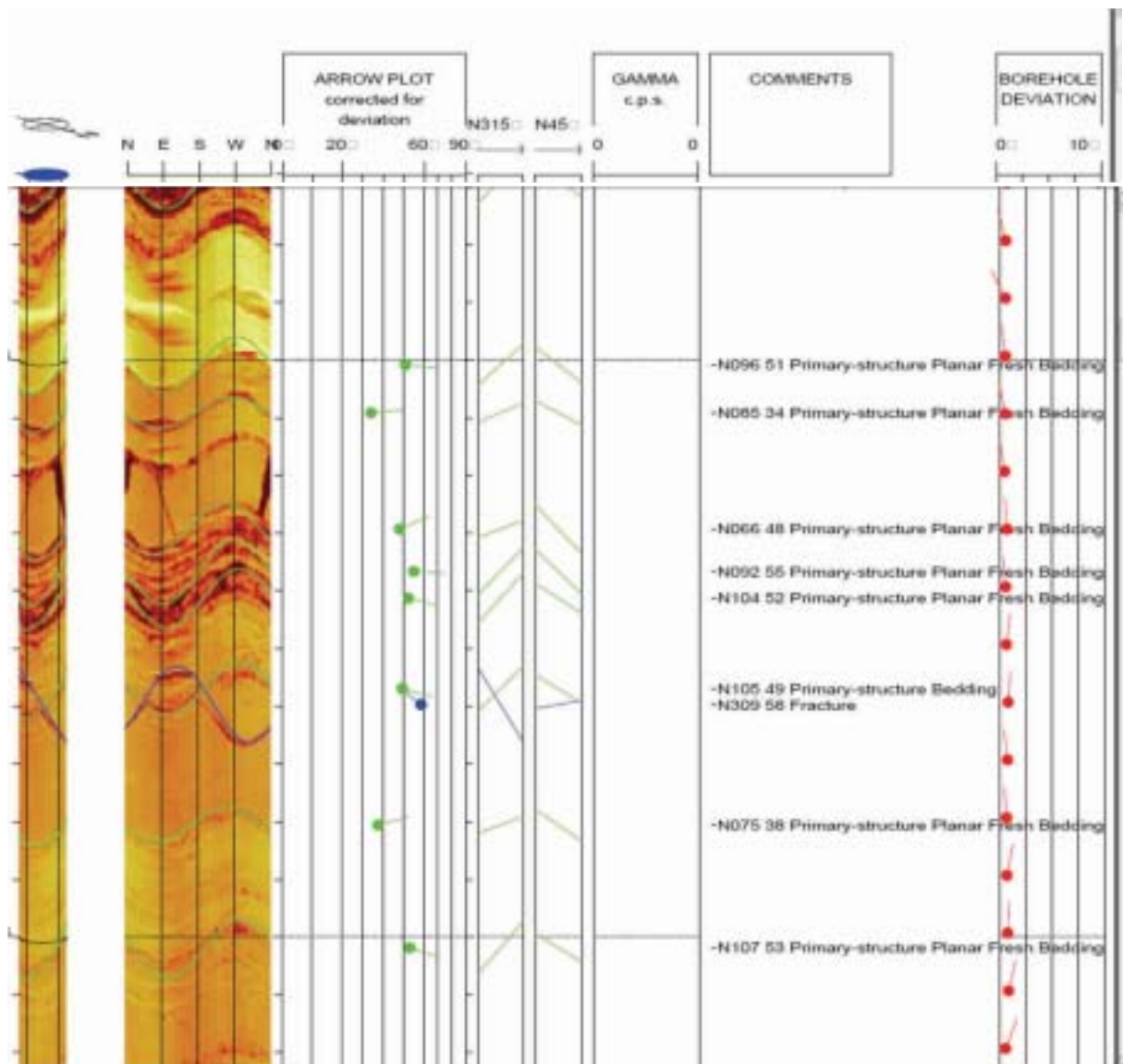


圖 4-8 孔內聲波造影儀分析結果節錄(C02 4-5m 附近)

1. C01

圖 4- 9 為本孔之垂直傾斜變化，其孔底方位與洞口偏差方向大小為北方 0.151 m，西方 0.082 m；平均傾斜偏差向 N331.64 度，偏差值 (deviation) 為 0.44。圖 4- 10 為經過軟體分析後，結合全孔之層面所統計出之層面分析立體投影圖。

總計 C01 鑽孔可辨認之層面共有 132 組，層面主要方位為 N16W，向東傾 40 度，分散程度 (dispersion) 為 21.7 度，表示平均層面位態與量測層面資料的最大偏差角度。弱面之整體統計結果立體圖如圖 4- 11 所示，圖中包含主要節理面平均傾角方位 (mean dip) 以及節理發生頻率 f 。其中圓 a 為層面，圓 b 為 C01 鑽孔可辨識之節理，總計 3 組，為 N36W 向南傾 47 度。

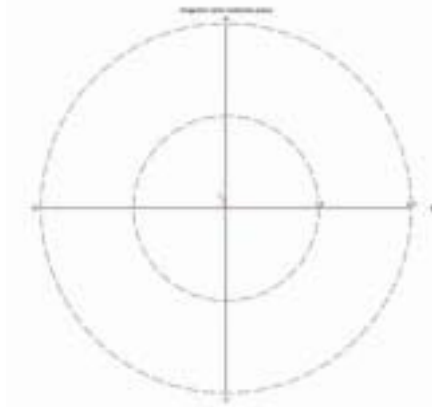


圖 4- 9 C01 鑽孔傾斜變化圖

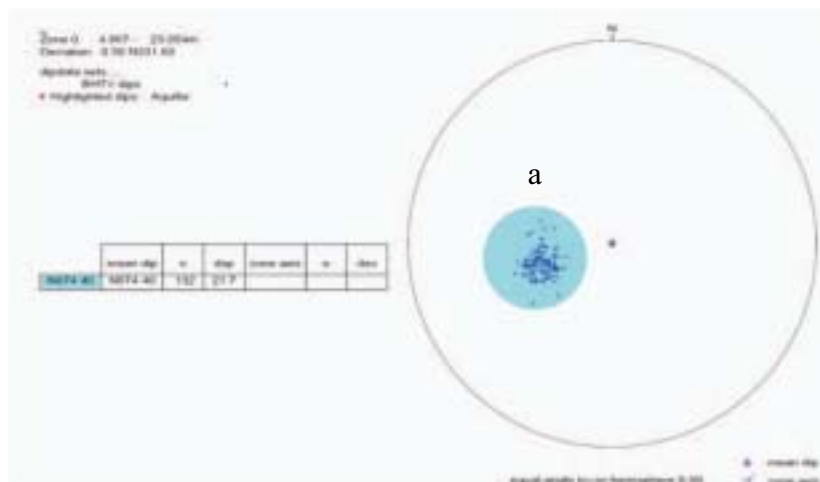


圖 4- 10 C01 層面統計分析立體投影圖

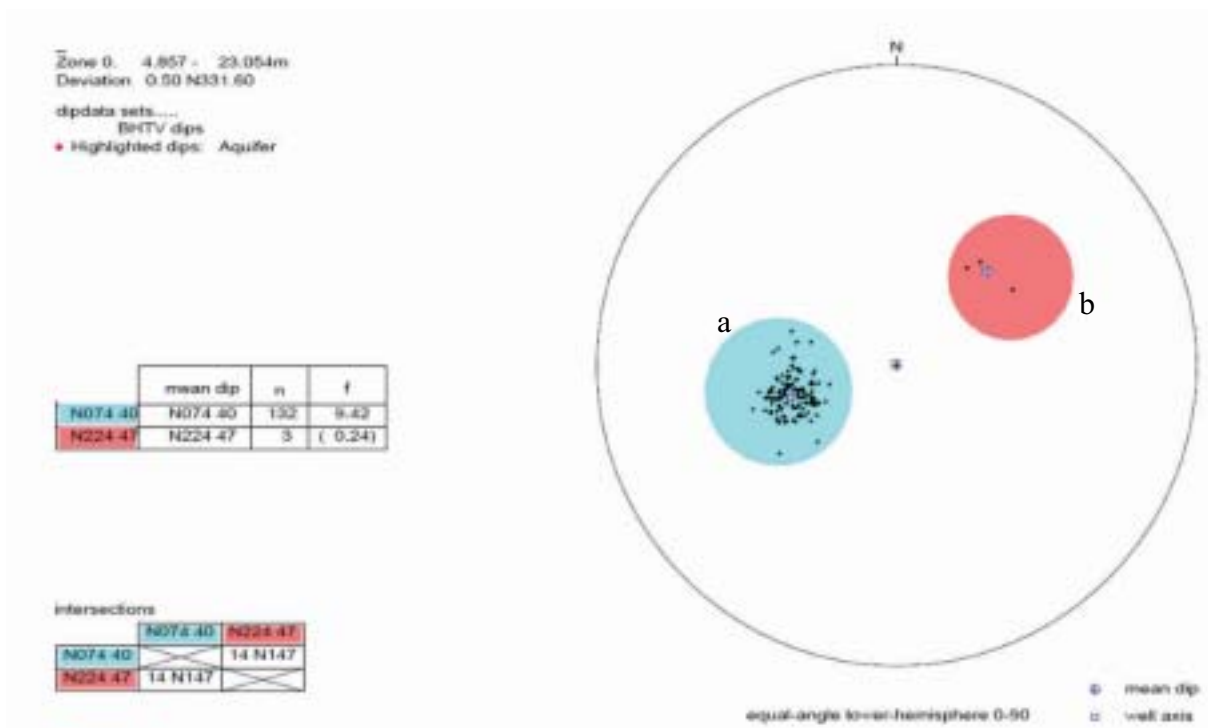


圖 4-11 C01 弱面統計分析立體投影圖

2. C02

圖 4-12 為本孔之垂直傾斜變化，其孔底方位與洞口偏差方向大小為北方 0.272 m，西方 0.041 m；平均傾斜偏差向 N351.33 度，偏差值（deviation）為 0.62。圖 4-13 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 C01 鑽孔可辨認之層面共有 87 組，層面主要方位為 N3E，向東傾 45 度，分散程度(dispersion)為 23.5 度，。弱面之整體統計結果立體圖如圖 4-11 所示，圖中包含主要節理面平均傾角方位(mean dip)以及節理發生頻率 f。其中圓 a 為層面，圓 b 與圓 c 與圓 d 為 C01 鑽孔可辨識之節理。圓 b 共有 6 組節理，走向為 N42W，向南傾 71 度；圓 c 共有 8 組節理，走向為 N20E，向西傾 60 度；圓 d 有 1 組節理，方位角 N73E，向南傾 47 度。

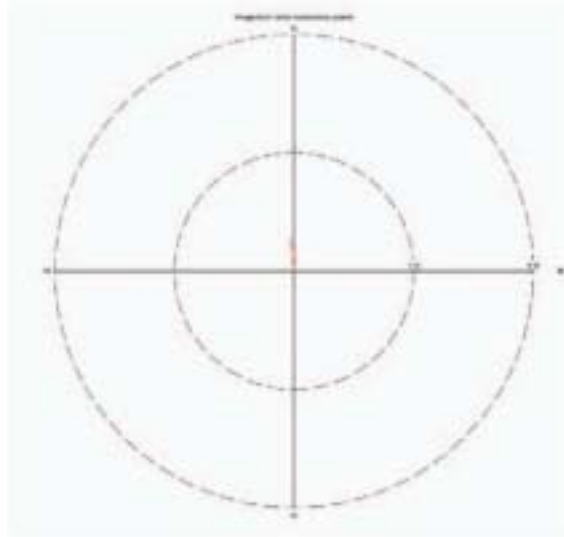


圖 4-12 C02 鑽孔傾斜變化圖

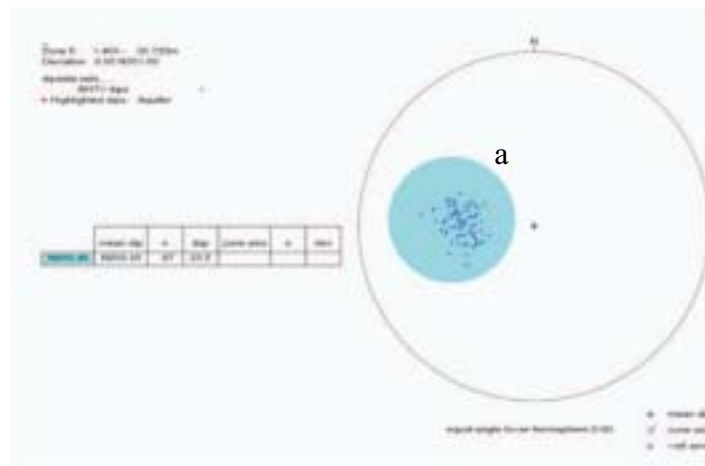


圖 4-13 C02 層面統計分析立體投影圖

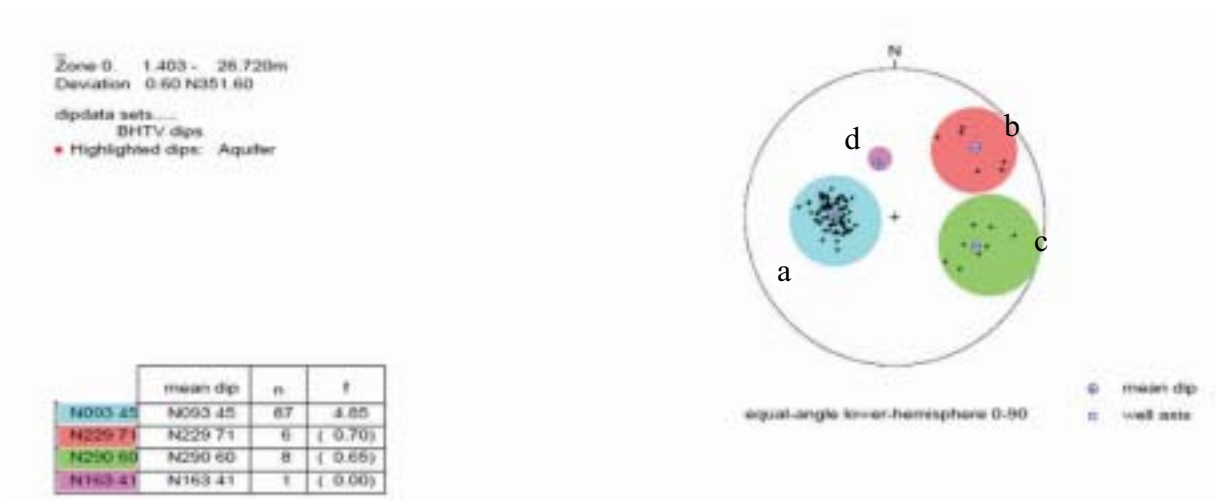


圖 4-14 C02 弱面統計分析立體投影圖

3. 小結

表 4- 4、表 4- 5 為孔內造影結果之彙整，C01 層面位態為 N16W，向東傾 40 度，C02 為 N3E 向東傾 45 度。圖 4- 15 顯示本計畫現地層面位態調查結果，從圖中可看出鑽孔位態與現地位態調查結果約略一致。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。

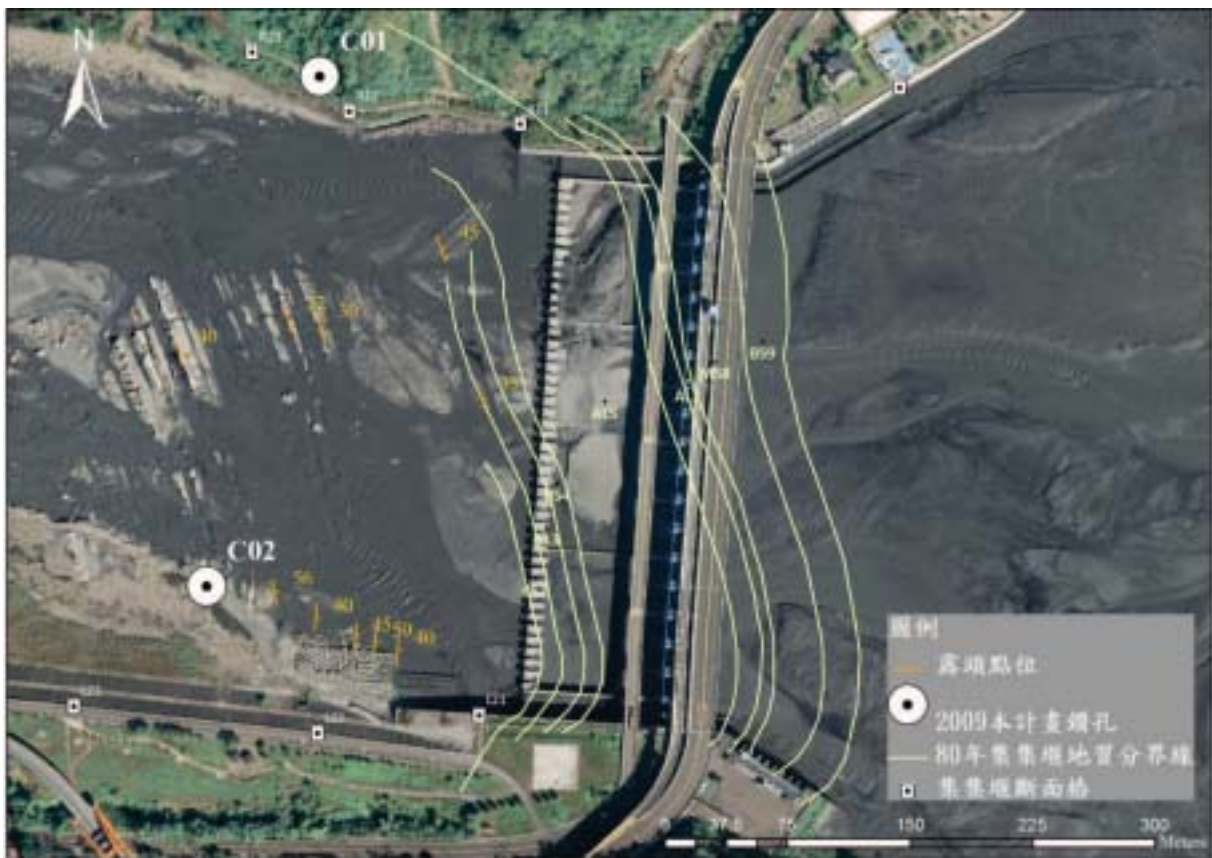


圖 4- 15 集集攔河堰現場位態調查結果

表 4- 4 層面分析彙整表

層面分析			
孔號	走向	傾角	Dispersion
C01	N16W	40E	21.7
C02	N3E	45E	23.5

表 4-5 節理面分析彙整表

孔號	深度	岩層分類	平均走向	平均傾角	節理數
C01	9.5-11 m	層狀砂岩	N46W	47S	3
C02	4-8 m	層狀砂岩	N41W	71S	6
	18-22 m	砂頁岩互層			
	4-8 m	層狀砂岩	N20E	60W	8
	13.5-17.5 m	砂頁岩互層			
	17-18 m	砂頁岩互層			
	17-18 m	砂頁岩互層	N73E	41S	1

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，所得知相關參數可供未來各項分析參考評估用。流程圖如圖 4-16 所示，試驗及方法如後續說明。

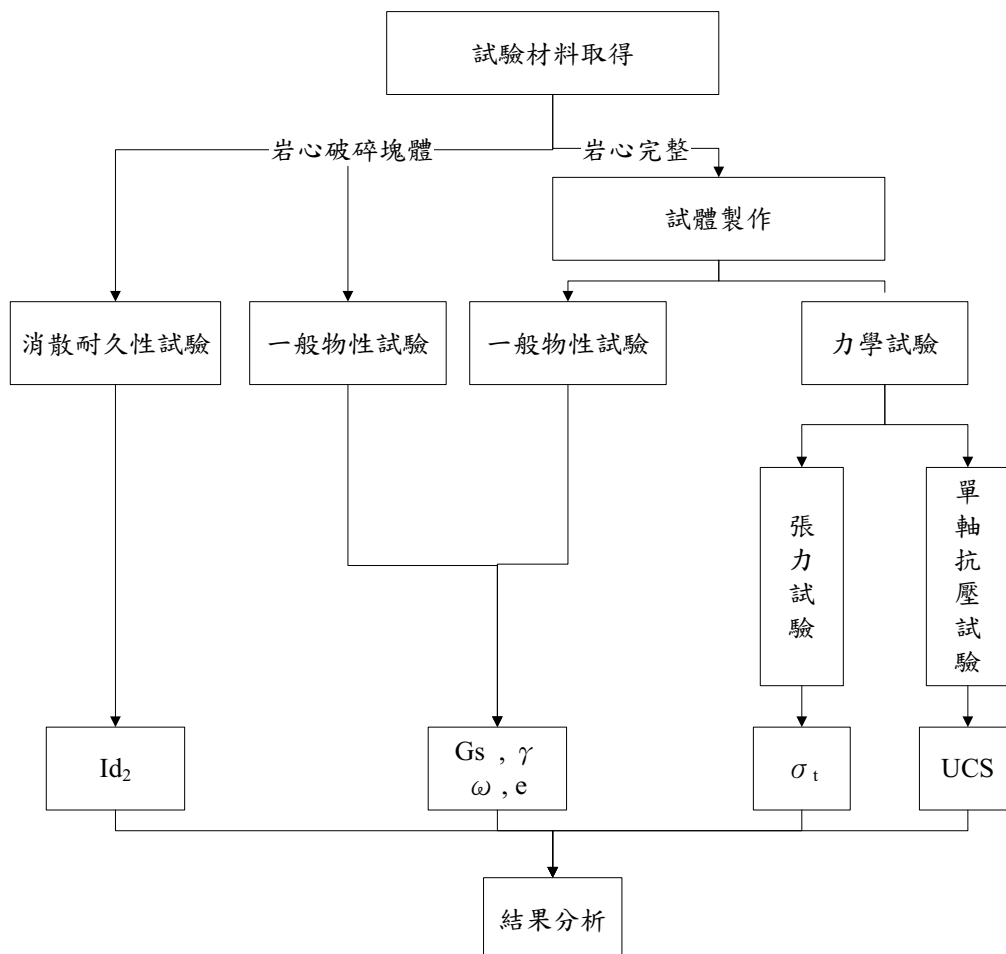


圖 4-16 室內試驗規畫流程圖

(一)試體準備

由於軟岩岩心試體的採樣製作比硬岩岩心不容易，依據 ASTM 建議以及本中心多年進行軟岩力學試驗之經驗，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 NX 尺寸，約 54 mm。且需大於試體中最大粒徑尺寸之 10 倍。
2. 試體兩端表面粗糙度須小於 0.02 mm，與試體軸線之垂直偏差須小於 0.001 rad (約 0.05 mm / 50 mm)。
3. 圓柱體表面平滑，表面突起或起伏小於 0.3 mm。

(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 與 ASTM D-2216 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。

本計畫共施作 12 組一般物理性質試驗，結果見表 4-6。由表中可整理得三種岩性的比重介於 2.62-2.70 之間。自然含水量介於 2.0 至 7.5% 之間，頁岩孔隙比最小，範圍為 0.052 至 0.068，砂頁岩互層孔隙比變化較大，介於 0.07 至 0.276 間。砂岩則介於 0.187 至 0.199 間。

表 4-6 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)	孔隙比
C01	11-12m-1	砂岩	2.62	2.365	7.13	2.208	0.187
	11-12m-2		2.62	2.357	7.51	2.192	0.195
	11-12m-3	砂岩	2.62	2.357	7.08	2.201	0.190
	11-12m-4		2.62	2.338	7.04	2.184	0.199
	13-14m-1	頁岩	2.68	2.572	2.41	2.512	0.067
	13-14m-2		2.68	2.561	2.09	2.509	0.068
	13-14m-3		2.68	2.606	2.31	2.547	0.052
	13-14m-4		2.70	2.627	2.46	2.564	0.053
		12-13m	砂頁岩 薄互層	2.66	2.438	4.09	2.342
C02	8-9m-1	2.66		2.359	5.19	2.243	0.186
	8-9m-2	2.65		2.179	4.97	2.076	0.276
	8.9m-3	2.63	2.559	4.18	2.456	0.071	

(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 至 60 g 之岩塊，總重介於 450 至 550 g 間；岩塊中最大粒徑尺寸小於 3 mm。且岩塊選擇需接近球體形狀，放入直徑 140 mm，高 100 mm；周圍有 2 mm 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 cm，液面灌注直到鼓軸下方 20 cm。液體通常為 20°C 水。如圖 4-17 所示。
3. 啟動馬達使鼓軸翻轉，控制速度為 20 rpm，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。

5. 重複 2 至 4 步驟，量測二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。此時第二次消散耐久性循環指數 Id_2 即為

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

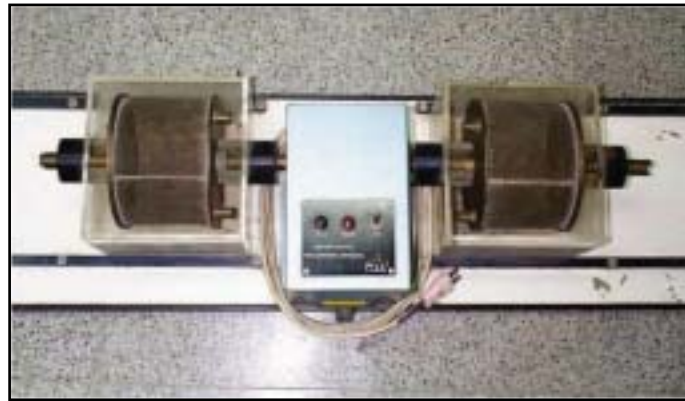


圖 4-17 消散性耐久試驗儀器圖

本計畫施做之消散耐久試驗結果詳見表 4-7，材料 Id_2 皆大於 70% 以上，評分為中耐久性至高耐久性。

表 4-7 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	SH	CO1	13~14	98.14	95.15	高耐久性
2	SS/SH		12-13	91.76	77.65	中耐久性
3	SS		11-12	95.62	92.50	中高耐久性
4	SH		6~7	97.51	94.88	中高耐久性
5	SS/SH	CO2	24~25	87.24	71.25	中耐久性
6	SS		4~5	97.9	97.5	高耐久性

(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楊式模數 E。根據 ISRM 描述施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 4-18。

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. 紀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，高度同理量測不同方向取平均。

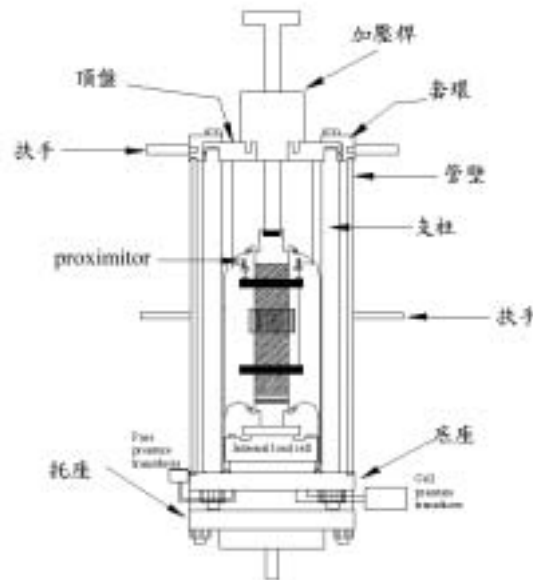


圖 4-18 交通大學軟岩三軸試驗系統圖

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 0.5 至 1.0 MPa /sec，ASTM D7012 規範建議岩石試體於試驗進行 2 至 10 分鐘內破壞。根據陳賀瑞(1997)卓蘭層軟弱砂岩力學行為以 0.5 MPa /sec 進行試驗，試體多在 1.5 %應變量達到尖峰而破壞。因此本計畫設計加壓速率 0.3 % / min 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。
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，可反求出試體單位重、孔隙比及自然含水量。

本計畫利用鑽探取樣所獲得岩心進行 6 組單軸抗壓試驗，包含三種岩性，分別為砂岩、頁岩與砂頁岩互層。試驗結果見表 4-8。應力應變曲線如圖 4-19。試驗結果顯示，砂岩單壓強度最高，其次為頁岩，砂頁岩薄互層最弱。切線模數與單壓強度比介於 100 至 300。

表 4-8 集集攔河堰單軸抗壓強度結果表

孔號	深度(m)	岩性	長(cm)	直徑 (cm)	長徑 比	重量 (g)	單位重	單壓強 度 q_u (MPa)	切線模 數 E_{50} (MPa)	E_{50}/q_u
C01	11.62-11.75 m	砂岩	12.598	5.065	2.5	600.3	2.365	33.7	3788	112.4
	11.5-11.62 m		11.973	5.066	2.4	568.8	2.357	23.09	6517	282.2
C01	13-13.12 m	頁岩	12.71	5.17	2.5	695.2	2.606	11.5	2480	215.7
	13.12-13.25 m		12.25	5.146	2.4	669.3	2.627	9.5	2191	230.6
C02	8-8.15 m	砂頁 岩薄 互層	11.813	5.171	2.3	540.65	2.179	2.04	380.73	186.6
	8.16-8.32 m		11.897	5.155	2.3	635.42	2.559	1.85	472.4	255.4

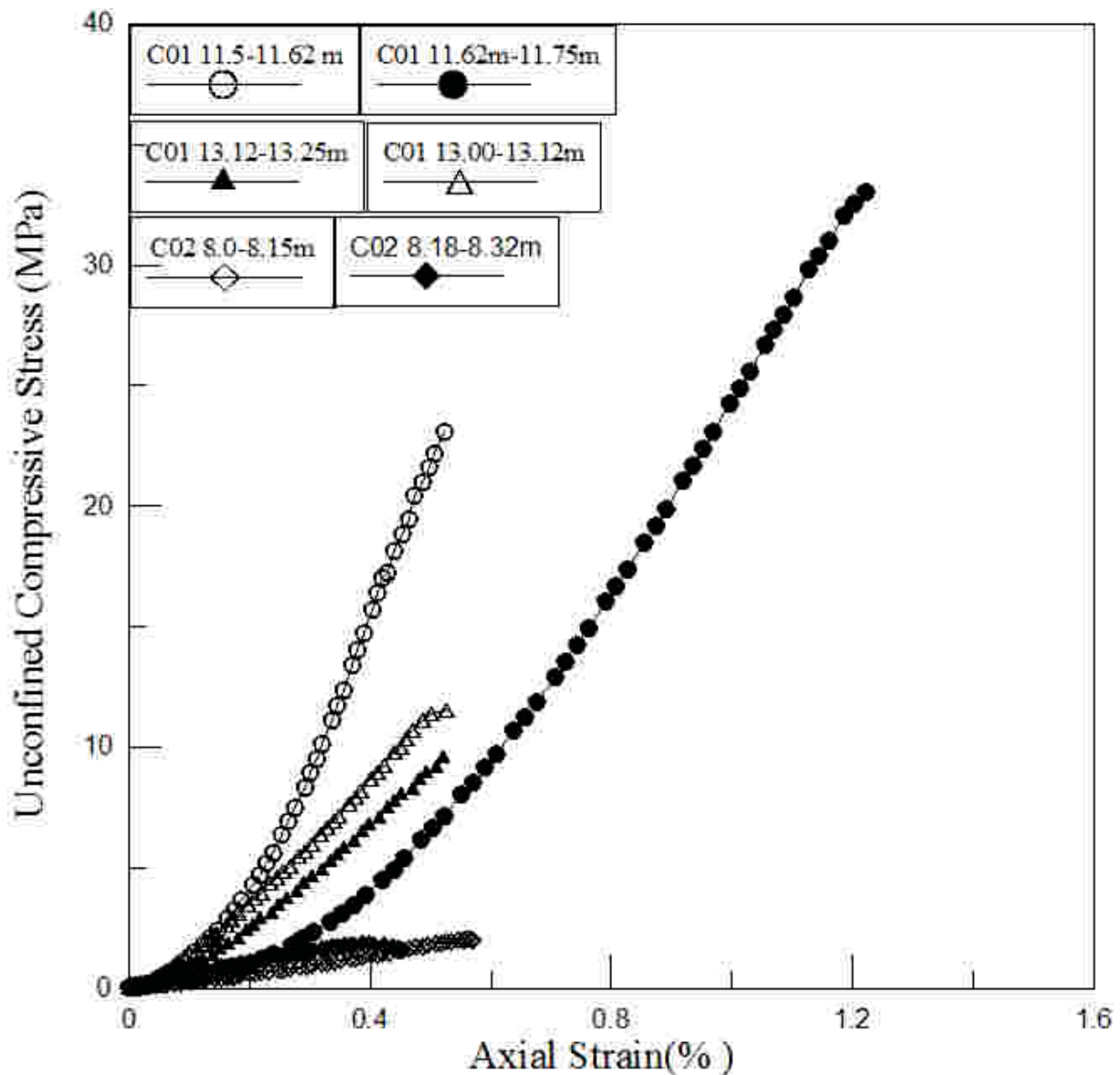


圖 4-19 集集攔河堰岩心材料單壓試驗應力應變圖

(五)巴西人試驗

根據過去經驗，當大部分的岩石材料單壓強度為抗張強度之 3 倍。故本計畫利用巴西人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 mm)，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 4-18)中。
4. 軸向壓力施加方向需通過試體之直徑，破壞面在試驗開始 15 至 30 秒發生。建議加壓速率 200 N/s。
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附近材料，施做巴西人試驗，於試驗加载中搭配錄影，觀察試體破壞情形，當試體中央裂縫貫穿時，此時之強度則試為岩體抗張強度。表 4-9 為巴西人試驗結果，從結果可看出砂岩與頁岩之張力強度差距不大，約為 1.6 至 1.75 MPa。砂頁岩互層則從 0.21 至 0.8 MPa。

表 4-9 本計畫巴西人試驗結果表

孔號	深度	岩性	長(cm)	直徑 (cm)	長徑比	重量 (g)	濕單位重 (t/m ³)	張力強 度(MPa)
C01	11-12 m	砂岩	2.412	5.063	0.5	114.45	2.357	1.75
	11-12 m		2.789	5.067	0.6	131.5	2.338	1.68
C01	13-14 m	頁岩	2.35	5.145	0.5	125.68	2.572	1.64
	13-14 m		2.483	5.176	0.5	133.8	2.561	1.71
C01	12-13 m	砂頁岩	2.293	5.061	0.5	112.45	2.438	0.8
C02	8-9 m	薄互層	3.062	5.191	0.6	152.9	2.359	0.21

五、抗沖蝕能力 K_h 與深度變化之關係

(一)抗沖蝕能力評估方法與假設

抗沖蝕能力 K_h 各項目詳細定義請參照第陸章、二 Annandale 岩盤沖刷評估方式。本計畫於集集攔河堰鑽取 2 孔共 50 m 之岩石取樣，由岩心柱狀圖搭配孔內造影結果與室內試

驗結果，試圖歸納出抗沖蝕能力與深度之變化之關係。集集攔河堰岩心抗沖蝕能力各項給分方法與假設條件如下：

1. 材料 M_s ：

依照室內已施作室內單壓試驗之平均強度，個別設定砂岩(28.5 MPa)、頁岩偶夾砂岩(10 MPa)與砂頁岩互層(2 MPa)之強度。

2. 塊體尺寸評分 K_b (RQD/ J_n)：

RQD 以每公尺岩心做計算，節理組數評分 J_n 利用孔內造影判釋，本計畫之岩心評分為 1 組弱面(即層面)與偶有節理。

3. 塊體剪力強度評分 K_d ：

節理粗糙度沿用現場調查之節理粗糙度，為平滑平面狀；節理換質評分則觀察層面間之情形，若夾泥與遭遇軟弱帶，則以表上非軟化過壓密黏土或破碎岩石填充物，搭配弱面縫隙間距評分。



(C02 孔 10-15m，編號 1 為軟弱帶查表後 $K_d=0.1$ ，標號 2 為層面夾泥， $k_d=0.3333$)

圖 4-20 材料中節理間填充物、層面夾泥或軟弱帶

4. 塊體構造評分 J_s :

本計畫於初鄉斷層前之岩層走向大約一致，故與水流方向大致為斜交逆向，層面傾角約 45 度。塊體大小利用現場觀察而得(約 1：2)評分。

5. 解壓影響深度 :

從現場裸露之岩盤發現，現場可見平行河道及與河道正交之解壓節理(圖 4- 21)。但於鑽探與孔內造影並無此結果。故假設解壓節理影響範圍僅達地表下 5 m，亦即地表下 5 m 以內之節理情形假設與地表相同。



圖 4-21 裸露岩盤上兩組解壓節理

(二)抗沖蝕能力評估結果

表 4- 10、表 4- 11 為此次鑽孔評分結果，鑽孔 C02 岩心中砂頁岩互層間偶有夾泥，或材料已呈軟弱粉土， K_d 評分大幅下滑；圖 4- 22 與圖 4- 23 為本次計畫鑽孔柱狀圖與 K_h 與深度變化圖，並將資料點依照各岩層與孔深整理於表 4- 12。由結果發現，抗沖蝕能力並不全然隨鑽孔深度增加而增加，如頁岩大致維持定值，而解壓節理影響範圍以外之砂岩與砂頁岩互層，其平均值約為地表量測之資料點之 1.3~5.1 倍(表 4- 12)。若以此類推，將頁岩接近地表之 K_h 平均值以上述折減係數折減，則接近地表上之頁岩 K_h 應介於 86~341。

(三)小結

依上述作法，若有鑽孔資料以及岩石力學試驗結果，或可以此折減係數為依據，由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。

根據水利局民國 80 年所做之攔河堰地表露頭地質圖所繪，本計畫沖刷坑涵蓋層狀砂岩與砂頁岩互層。受限於目前現地條件，並無法直接調查堰前之層狀砂岩抗沖蝕指數，僅能透過以往規劃設計階段鑽探與試驗結果推估，建議堰前之岩石材料地表抗沖蝕指數採用現地調查平均值，砂岩採用 645，砂頁岩互層採用 8；地表下未受解壓節理影響之材料則利用鑽探結果平均值，砂岩採 842，砂頁岩互層採 41(表 4- 13)。

表 4-10 鑽孔 C01 抗沖蝕能力評分結果表

C01	岩性	M _s	K _b	J _r /j _a	J _s	K _h	備註
0-1	上層表土或崩積層。						
1-2							
2-3							
3-4							
4-5							
5-6	砂岩	28	82	1	0.54	1239	
6-7	頁岩	10	82	1	0.54	443	
7-8	頁岩	10	82	1	0.54	443	
8-9	頁岩	10	82	1	0.54	443	
9-10	頁岩	10	82	1	0.54	443	
10-11	砂岩	28	67	1	0.54	1008	
11-12	砂岩	28	67	1	0.54	1008	
12-13	頁岩	10	82	1	0.54	443	
13-14	頁岩	10	82	1	0.54	443	
14-15	頁岩	10	82	1	0.54	443	
15-16	頁岩	10	82	1	0.54	443	
16-17	頁岩	10	82	1	0.54	443	
17-18	頁岩	10	82	1	0.54	443	
18-19	頁岩	10	82	1	0.54	443	
19-20	頁岩	10	82	1	0.54	443	
20-21	頁岩	10	82	1	0.54	443	
21-22	頁岩	10	82	1	0.54	443	
22-23	頁岩	10	82	1	0.54	443	
23-24	頁岩	10	82	1	0.54	443	
24-25	頁岩	10	82	1	0.54	443	

表 4-11 鑽孔 C02 抗沖蝕能力評分結果表

C02	岩性	M _s	K _b	J _r /j _a	J _s	K _h	備註
0	砂岩					645	現地平均值
0.5	砂岩	28.00	37	1	0.5	513	
1.5	砂岩	28.00	27	0.33	0.5	128	層面夾泥
2.5	砂岩	28.00	29	1	0.5	410	
3.5	砂岩	28.00	26	1	0.5	359	
4.5	砂岩	28.00	16	1	0.5	231	
5.5	砂岩	28.00	74	1	0.5	1033	
6.5	砂岩	28.00	60	1	0.5	840	
7.5	砂岩	28.00	47	0.33	0.5	218	層面夾泥
8.5	砂頁岩互層	1.62	40	0.33	0.5	11	層面夾泥
9.5	砂頁岩互層	1.62	61	1	0.5	50	
10.5	砂頁岩互層	1.62	82	1	0.5	66	
11.5	砂頁岩互層	1.62	66	0.1	0.5	5	岩心內含 軟弱帶
12.5	砂頁岩互層	1.62	82	1	0.5	66	
13.5	砂頁岩互層	1.62	67	1	0.5	54	
14.5	砂頁岩互層	1.62	82	1	0.5	66	
15.5	砂頁岩互層	1.62	67	1	0.5	54	
16.5	砂頁岩互層	1.62	67	1	0.5	54	
17.5	砂頁岩互層	1.62	67	1	0.5	54	
18.5	砂頁岩互層	1.62	49	0.3	0.5	12	層面夾泥
19.5	砂頁岩互層	1.62	78	0.3	0.5	19	層面夾泥
20.5	砂頁岩互層	1.62	50	1	0.5	40	
21.5	砂頁岩互層	1.62	40	0.33	0.5	11	層面夾泥
22.5	砂頁岩互層	1.62	74	1	0.5	60	
23.5	砂頁岩互層	1.62	74	0.33	0.5	20	層面夾泥
24.5	砂頁岩互層	1.62	82	0.1	0.5	7	岩心內含 軟弱帶
25.5	砂頁岩互層	1.62	82	1	0.5	66	
26.5	砂頁岩互層	1.62	82	1	0.5	66	

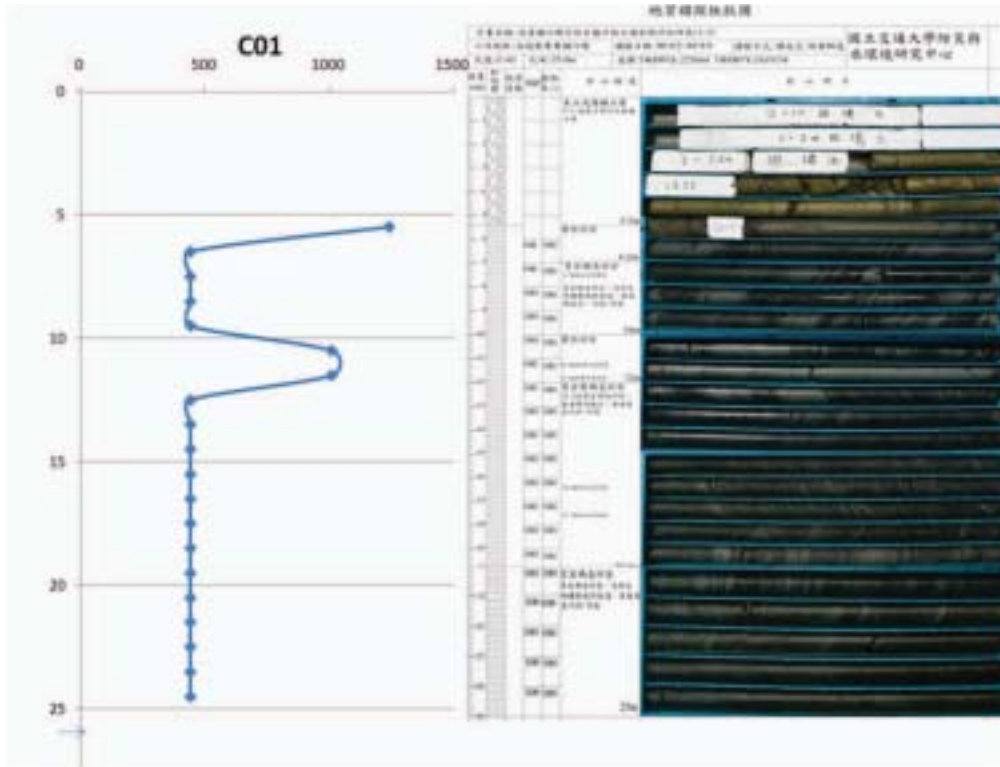


圖 4-22 C01 孔 K_h 隨深度變化圖

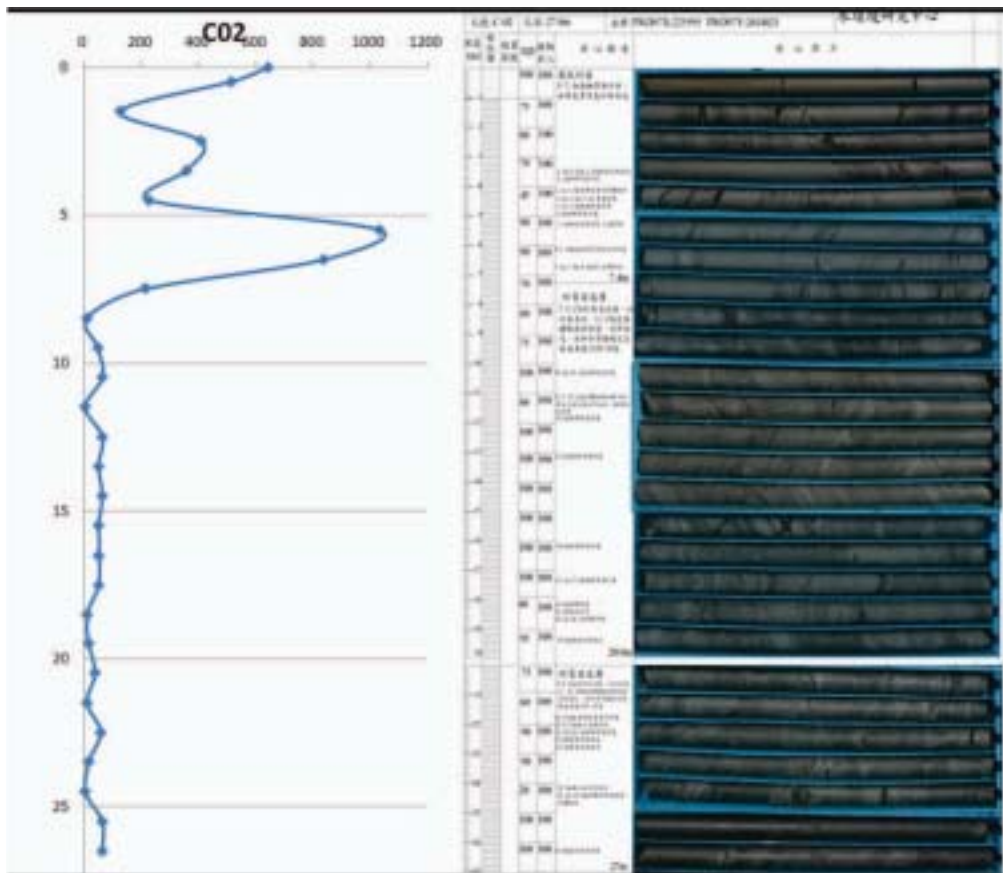


圖 4-23 C02 孔 K_h 隨深度變化圖

表 4-12 各岩性隨深度變化之 K_h 值

深度(m)	砂岩 K_h	砂頁岩 K_h	頁岩 K_h
現地地表平均值	645	8	無(建議值 86-341)
0-1m	513	-	-
1-2m	128	-	-
2-3m	410	-	-
3-4m	359	-	-
4-5m	231	-	-
5-6m	1136	-	-
6-7m	840	-	443
7-8m	218	-	443
8-9m	-	11	443
9-10m	-	50	443
10-11m	1008	66	-
11-12m	1008	5	-
12-13	-	66	443
13-14m	-	54	443
14-15m	-	66	443
15-16m	-	54	443
16-17m	-	54	443
17-18m	-	54	443
18-19m	-	12	443
19-20m	-	19	443
20-21m	-	40	443
21-22m	-	11	443
22-23m	-	60	443
23-24m	-	20	443
24-25m	-	7	443
地表 5 m 以下平均值	842	41	443
與地表面 K_h 倍數	1.31	5.1	-

表 4-13 沖刷坑抗沖蝕能力建議值

岩性	層狀砂岩	砂頁岩互層
地表抗沖蝕建議值	645	8
地表下抗沖蝕建議值	842	41

第五章 攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力 初步探討

本章節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，從兩個方向開始著手，一是文獻回顧的方式歸納國外相關研究成果，另一是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。

一、文獻回顧與討論

(一)攔河堰下游面沖蝕成因與影響

工程會(89年)研究報告中曾針對攔河堰下游河床面沖刷之發生以流況變化之觀點進行概念性的說明。以圖 5-1 示意說明，一旦興建攔河堰後，上游水位抬高，進而將造成堰體上下游水位顯著差異，而在興建堰體後，河道通水面積一般均會比原始河道束縮，造成水流之單寬流量增加，雖然攔河堰一般都會設置消能固床設施，但水流之流速通常還是比原有河床之流速高，因此會促進攔河堰下游面之沖刷現象，形成沖刷坑。

攔河堰下游沖刷坑之形成後，隨著深度之發展，因深度變化會造成基礎承載能力減少，若堰壩設計時未能正確考慮沖刷坑之影響，可能使堰體因滑動、或傾覆破壞，若沖刷情形未能改善，使沖刷延伸進入基礎下方，堰體因而懸空，一般攔河堰之設計理念為重力式，僅配置少量之鋼筋，不能承受張應力作用，進而引起堰體斷裂破壞。

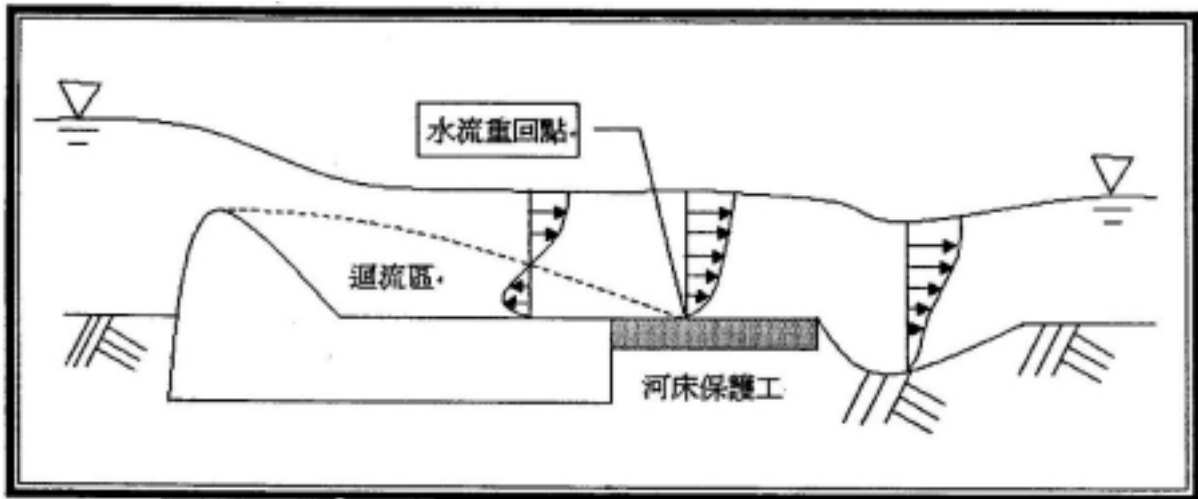


圖 5-1 攔河堰水流流況示意圖(工程會，89 年)

(二)攔河堰局部沖刷影響因子

Martins(1973)及 Bollaert and Schleiss (2003)提出一般狀況下作用在岩盤內影響沖刷深度之主要因素，包括：

1. 流量(單寬流量)及初始流速：流量影響初始之跌水形狀，初始流速影響跌水面積之擴散程度。
2. 跌水高差及角度：高差愈大則流體能量愈大，跌水角度則影響跌水能量之傳遞比率。
3. 尾水高度：對跌水之能量傳遞而言，尾水可視為一消能設施，兩者之擾流導致能量消散，若尾水高度足夠則可能無能量傳遞至岩盤面。
4. 岩石性質：包含節理間距、節理位態、抗侵蝕力、風化程度及岩塊尺寸等。
5. 河床載：包含粒徑分佈、泥沙濃度、懸浮載以及河床載的比例、運移速度、及運移距離等。

6. 流體中空氣含量：空氣含量影響能量波在流體間之波傳速度，進一步影響岩體裂間之共振頻率。

(三)攔河堰跌水沖刷與沖刷坑形成特性

攔河堰因跌水產生之能量及紊流之情形明顯大於一般河道條件，Bollaert and Schleiss(2003)利用圖 5-2 來描寫溢洪道下方在高速水流沖擊下岩盤發生沖蝕之過程。將岩盤沖蝕之步驟分成下列 6 個步驟：

1. 水流離開原始束制邊界，以自由落體方式向下運動，除水流周圍因擴散及磨擦效應而使流速變慢外，水流中心大部份仍維持初始之流速。
2. 水流投射進入尾水，以 2 D 擴散方式在尾水內形成渦流，並將周圍之空氣攜帶進入尾水中形成氣泡。
3. 水流沖擊力量作用在岩盤表面。
4. 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。
5. 裂隙內部之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。
6. 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。

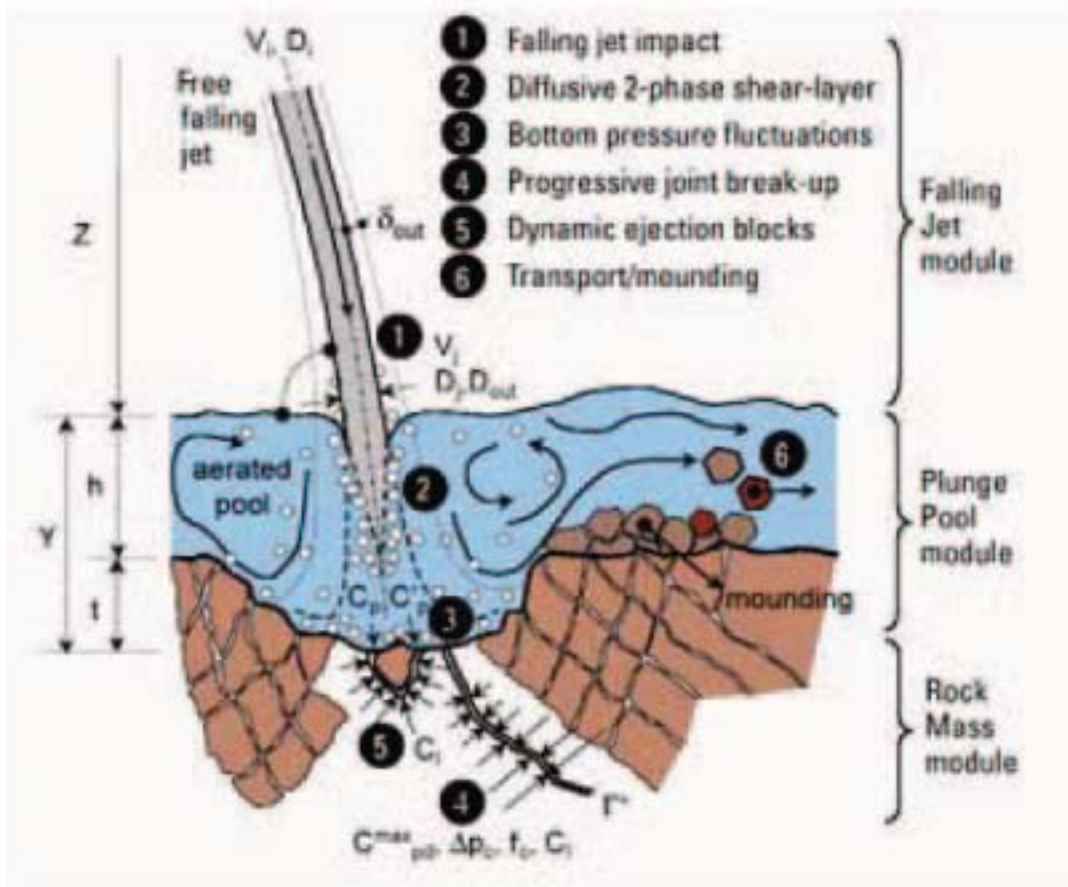


圖 5-2 水流沖擊引致之沖蝕機制示意圖(Bollaert and Schleiss, 2003)

Spurr(1985)曾提出溢洪道靜水池的沖刷特性如下：

1. 沖刷坑：沖刷坑包含兩個主要部分，一是直接受到水流沖擊的沖刷活躍區域，另一則是沖刷區域外圍受到沖擊後水流形成的紊流影響區域。
2. 自由跌水：跌水的沖刷潛能可以採用單位面積的的沖擊能量來表示，但必須考量其他兩個因素，一是跌水過程中空氣所產生之阻力，另一則是跌水過程中水流中空氣含量的增加，將緩衝掉部分沖擊岩石的能量。
3. 沖刷坑中的水力作用：水流在沖刷坑中除了直接沖擊於岩石表面的能量作用外，其跌水角度將造成坑中不同的紊流循環作用，以及壅高水位產生對側壁的水流波動作用。

4. 岩盤上的水力作用：沖刷坑開始發展時，沖刷深度淺，大部分之跌水能量均直接沖擊於岩盤上，壓力作用可造成岩盤的水力破裂，水力破裂裂隙可能沿正交方向發展，有助益於岩塊的脫離。跌水沖擊所造成的壓力波動，可能造成水錘作用或穴蝕作用，加速岩盤的破壞。跌水沖擊角度與岩盤構造位態的關係，也會對岩塊脫落尺寸及形狀造成影響。
5. 沖刷坑的發展：如 1 所述，沖刷坑包含沖刷活躍區域(坑底)以及側壁兩部分，沖刷坑唯有在側壁束制能力足夠時才可能漸進發展；當側壁沖蝕速度比坑底快時，沖刷坑不會形成，將造成其他類型的沖刷問題。

Akhmedov(1988)認為沖刷坑的發展可區分為三個階段：

1. 沖刷坑發展初期，水流沖刷能量大，沖刷型態以岩塊的移除為主，所以在本階段中岩體節理面的性質為主要影響因素，通常沖刷速率也較快。
2. 當沖刷坑深度逐漸發展增加，尾水深度增加可以增加消能作用，造成水流能量降低，但仍可藉水壓力波動以鬆動岩塊，或進一步促使岩塊碎裂成更小塊體後再被運移出沖刷坑。
3. 隨著沖刷坑深度的增加，尾水深度已足以消耗掉大多數的水流能量，沖刷的進行方式逐漸以沖刷坑內殘留岩塊對岩體的磨蝕為主，沖刷速率也大幅減緩趨近於穩定。

Akhmedov 將三處大壩 (Farchad、Kariba、Picoti) 溢洪道下方之沖刷坑深度隨時間變化的觀測數據繪製如圖 5- 3 所示，他藉此圖為例，認為應可分辨上述三個沖刷坑發展的三個階段。

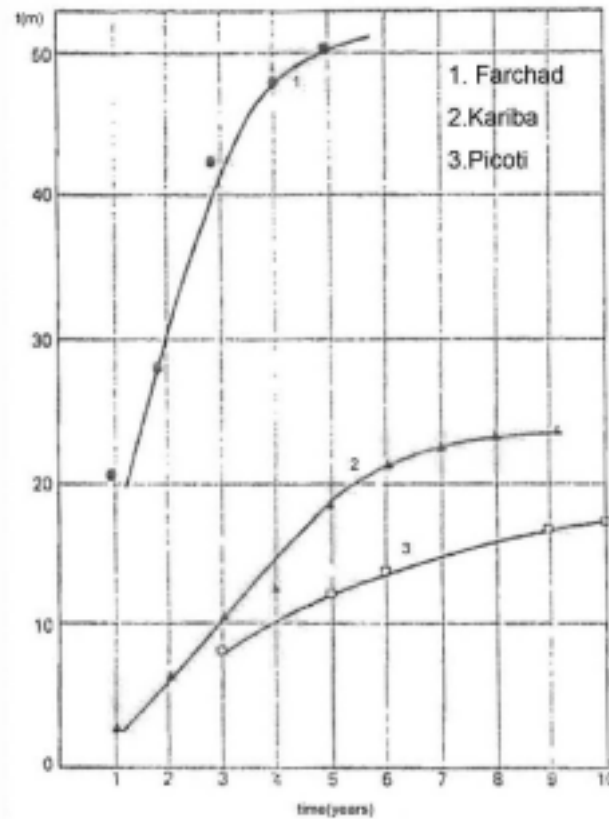


圖 5-3 Farchad、Kariba、Picoti 三處沖刷坑深度隨時間變化圖

(四)岩盤沖刷破壞特性

評估高速水流沖擊對岩體沖蝕之機制，可區分為岩體表面之磨蝕，以及岩塊抽離兩種，其中又以岩塊抽離之影響較大，快速、大規模的岩體沖刷作用均受岩塊抽離的影響為主。

岩塊抽離作用可依據岩體節理裂隙之發展情形不同，分成以下兩種類型：

1. 若裂隙之發展尚未完全使岩塊與岩體脫離時，裂隙之波動壓力導致裂隙增加，稱為水力破裂(Hydraulic jacking or hydraulic wedging)。Whipple et al(2000)研究河道沖蝕時用以描述塊石沖擊岩盤面對沖蝕之影響說明如圖 5-4，認為過程中可能先需小裂縫經水力推張擴大為破裂面，隨著河床顆粒逐漸地透過磨蝕作用沖蝕弱面，再加上物理或化學風化作用，讓弱面完全擴展連通，最後終

於導致獨立岩塊之鬆動、脫離。將塊石沖擊改變為水流沖擊亦可利用該說明其作用。岩床面受力衝擊時，瞬時的高動量傳遞造成不均勻的應力作用，而使得垂直向及水平向的裂隙逐漸延伸發展。Bollaert(2003)也以圖 5-2 來說明沖刷坑中水流沖擊引致之塊體抽離機制。兩位學者說明塊體脫離之機制概念相當類似，但不同的是 Bollaert 強調高速水流沖擊下所造成的壓力波動效應。

2. 當裂隙之發展使岩塊與岩體完全脫離時，岩體裂隙之向上波動壓力若能克服岩塊之重量及側邊之摩擦力時，稱為塊體抽離(plucking)。

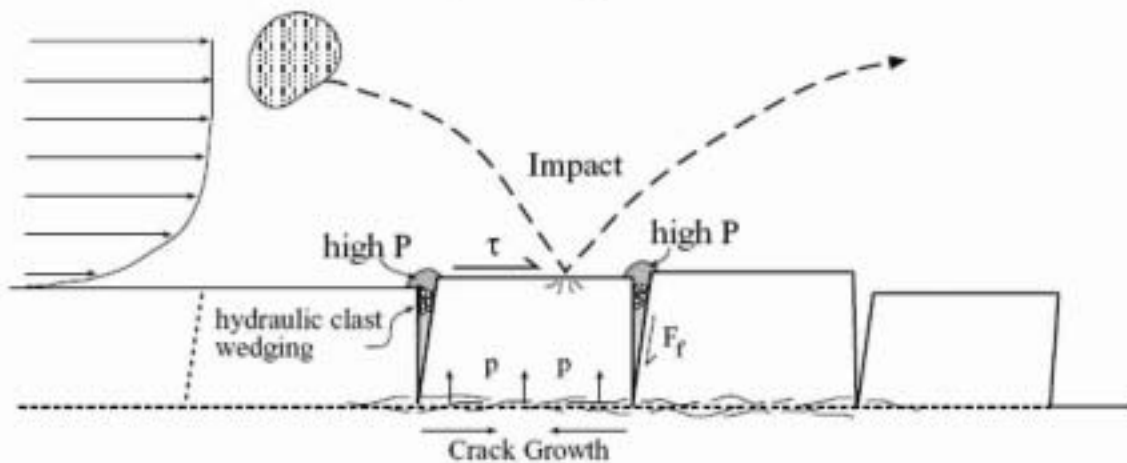


圖 5-4 岩床侵蝕的裂隙延伸機制示意圖(Whipple et al, 2000)

岩盤局部沖刷及沖刷坑形成機制，具備下列特性，且均與岩體之抗沖蝕能力相關：

1. 軟岩材料弱化碎裂機制：水流帶來之反覆作用力或波動壓力，因放大效應使得使材料內部之裂隙隨著能量累積而逐漸延伸。當裂隙完成連通時，以岩石碎屑、或獨立岩塊形式脫離岩體被流水帶走。
2. 河床顆粒之沖擊效用：相較於溢洪道條件，攔河堰之水流夾帶有顆粒不一的卵礫石，隨水流直接撞擊岩床面，

當攔河堰下游側之水深有限時，則對此撞擊力之消能作用有限時，卵礫石撞擊岩床面之衝擊效應更為重要。

3. 累積水力能量效應：相較於溢洪道通水時間少及輸出能量為一定性之條件，攔河堰之水流能量有隨水文事件而依時間變化之特性。藉由考慮其不同洪流量之作用時間長短及重現機率，由累積水力效應進行現地沖刷觀測資料之印證。

二、攔河堰下游岩盤沖刷機制

綜合上述文獻中提及之攔河堰下游岩盤沖刷影響因子及沖刷坑形成過程，本節將就本年度所調查之八座攔河堰現地勘查的結果，配合示意圖來說明各攔河堰下游岩盤沖刷坑的沖刷形成過程及機制，最後簡化歸納成三種主要的攔河堰下游岩盤沖刷機制。

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，因此本計畫係針對堰前沖刷特徵，並結合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。

歸納前述文獻及現地勘查的結果，整理本計畫所調查 8 個攔河堰下游岩盤沖刷坑發展機制如表 5-1。以下將運用現地照片及沖刷機制示意圖對各攔河堰的沖刷機制做更進一步的說明。

(一)後村堰

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 5-5、圖 5-6。

後村堰已於 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。本研究取一條平行攔河堰的橫斷面說明此區域的沖刷機制，橫斷面位置如圖 5-6，沖刷機制示意圖如圖 5-7，沖刷過程如下所述：

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"> ● 水流沖擊力 ● 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 表層逐層下切	抽離： 塊體克服摩擦力 並上舉

1、砂頁岩互層：

由於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，其沖蝕下切速率為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。

2、砂岩：

砂岩的抗磨蝕能力較強，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 5-5 後村堰沖蝕狀況



圖 5-6 後村堰沖蝕機制剖面位置圖

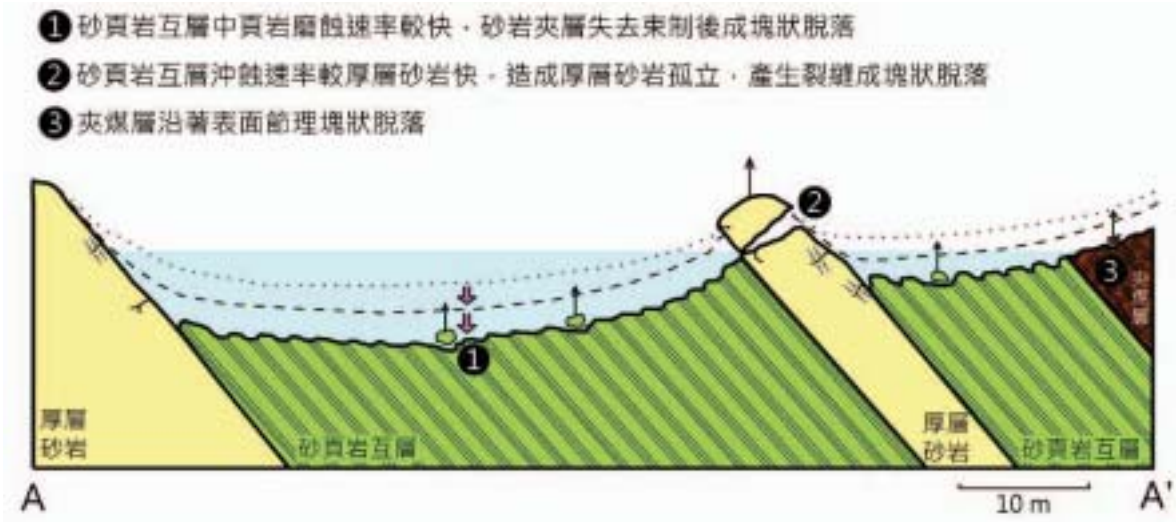


圖 5-7 後村堰下游岩盤沖刷機制示意圖

(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 80MPa。觀察現場沖蝕後的河岸形狀(圖 5-8)，研判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正可說明此區之主要沖刷機制確實為塊體抽離。

推測沖刷坑的沖刷機制亦以抽離為主，其沖刷機制示意圖如圖 5-9。承受水流沖擊力、渦流與壓力波動後，逐漸令砂岩岩體原本的節理延伸至連通，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 5-8 義興壩下游節理發達岩體沖蝕狀況

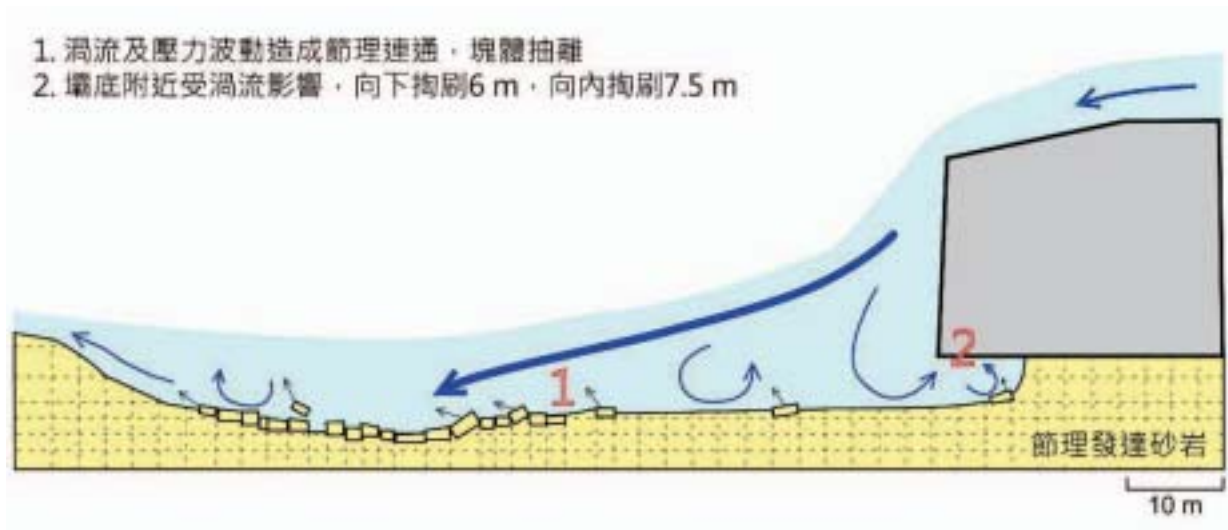


圖 5-9 義興壩下游岩盤沖刷機制示意圖

(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 5-10 所示，估計沖刷坑深度約為 3 公尺。

石岡壩跌水工下游沖刷坑之上游段岩性為砂頁岩互層，下游段為厚層頁岩，根據現地岩層條件之觀察，沖刷坑所在岩層之頁岩刷深速率大於砂頁岩互層，而砂頁岩互層中的頁岩層沖刷速度又大於砂岩層，茲以圖 5-11 中之 AA'剖面繪製沖刷機制示意圖(如圖 5-12 所示)，說明其沖刷機制如下：

1. 初始條件：攔河堰剛興建完成，下方岩盤完整，跌水能量直接沖擊岩盤，形成裂隙，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，磨蝕頁岩表面，造成頁岩沖蝕機制為隨著深度逐層下切。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，砂岩抗磨蝕能

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。



圖 5-10 石岡壩堰前沖蝕狀況



圖 5-11 石岡壩沖蝕機制剖面位置圖

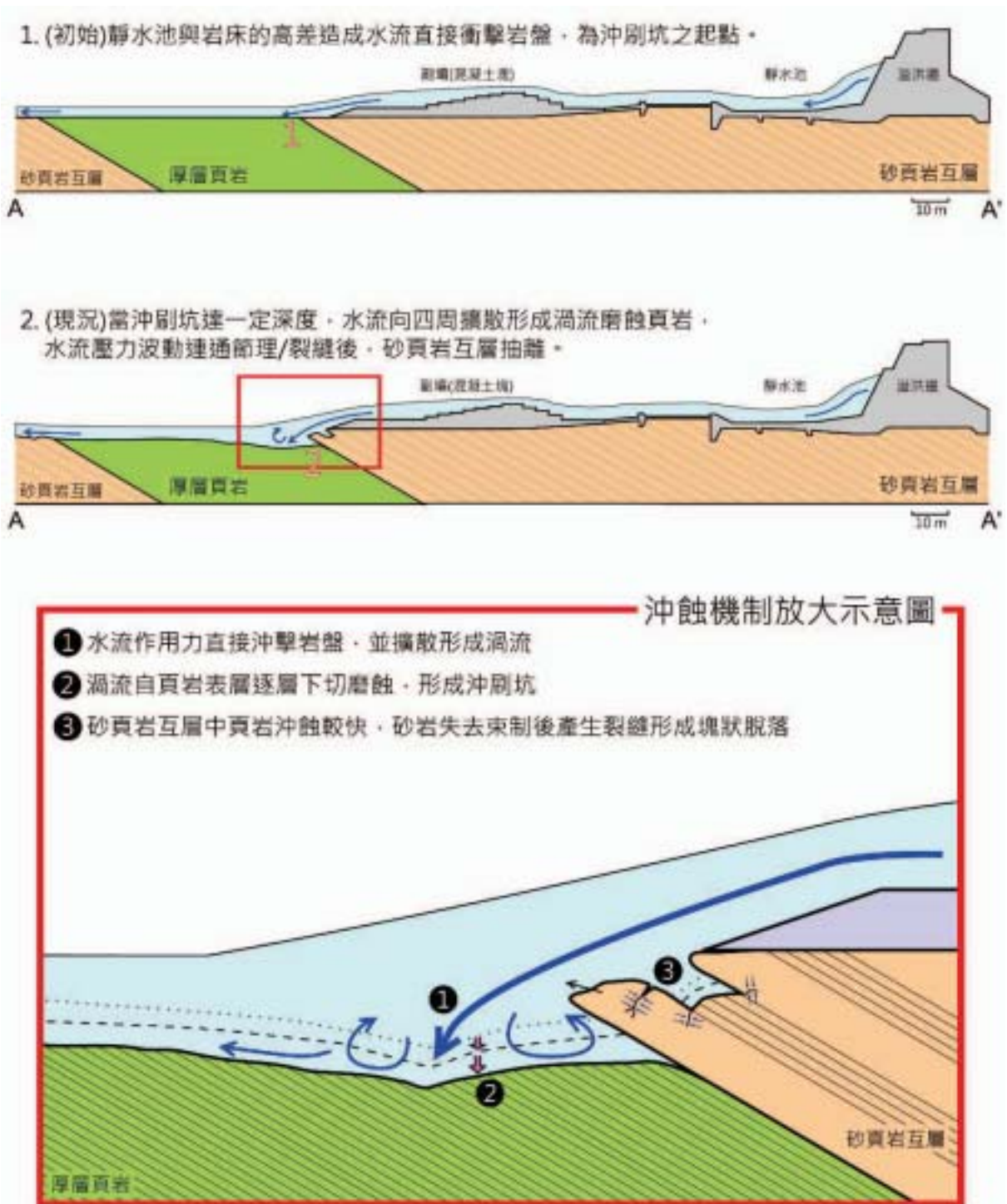


圖 5-12 石岡壩下游岩盤沖刷機制示意圖

(四)龍泉圳攔河堰

圖 5-13 所示為龍泉圳攔河堰沖刷機制之示意圖。根據現地勘查，龍泉圳攔河堰下游岩性大部份由頁岩組成(如圖 5-14)。水流衝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逐層下切，沖刷坑逐漸形成。

1. (初始)靜水池與岩床的高差造成水流直接衝擊岩盤，為沖刷坑之起點。



2. (現況)當沖刷坑達一定深度後，水流中心之衝擊力向四周擴散形成渦流磨蝕。

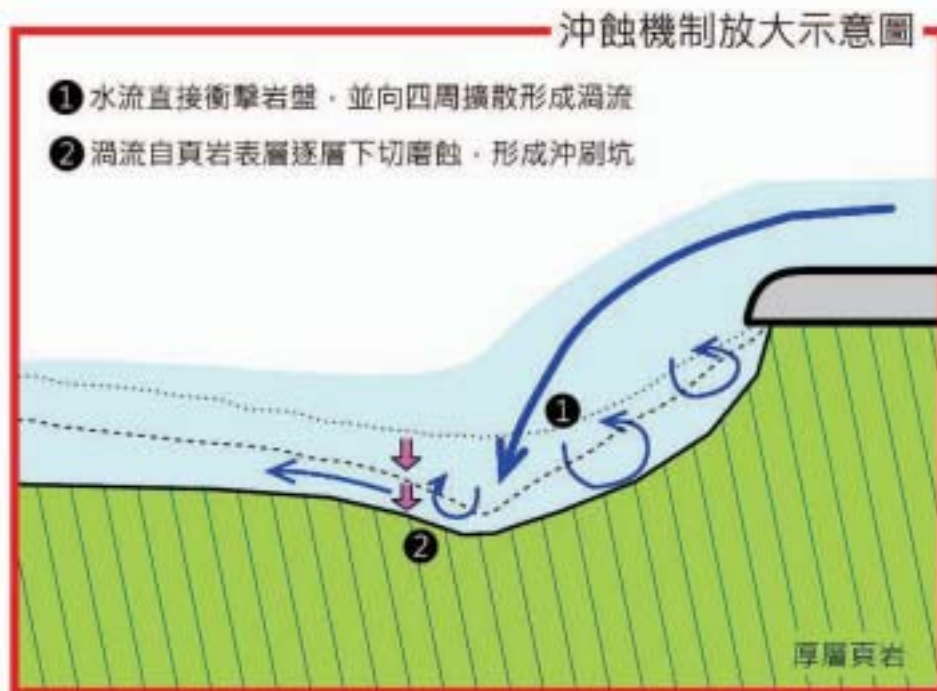
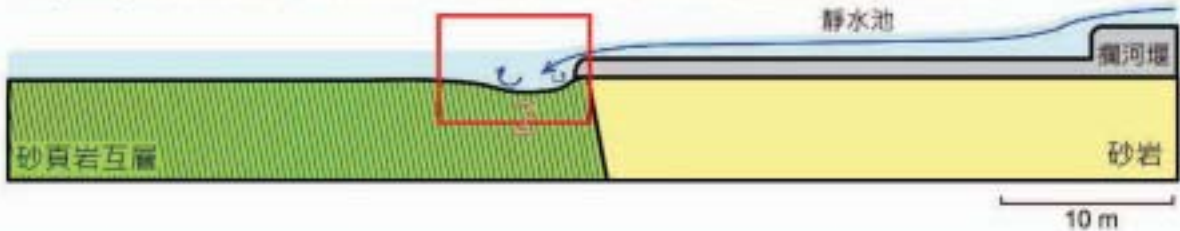


圖 5-13 龍泉圳攔河堰下游岩盤沖刷機制示意圖



圖 5-14 龍泉圳攔河堰下游出露頁岩及沖蝕狀況

(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 5-15）。以河道中央之 AA'剖面（圖 5-16）來說明集集攔河堰下游側之沖刷機制示意圖（圖 5-17），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，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，砂岩抗磨蝕能力較強，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。層狀砂岩的抗磨蝕能力較強，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。

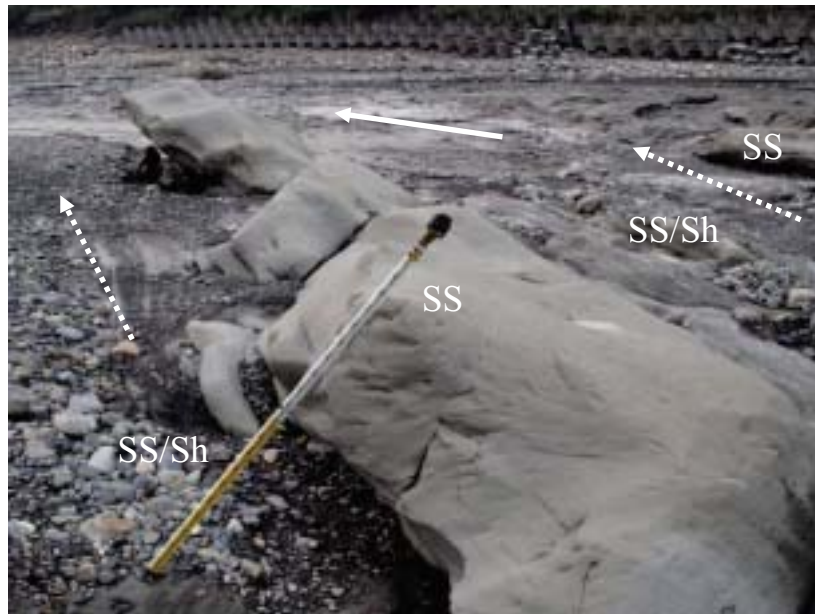


圖 5-15 集集攔河堰下游出露岩層及沖蝕狀況

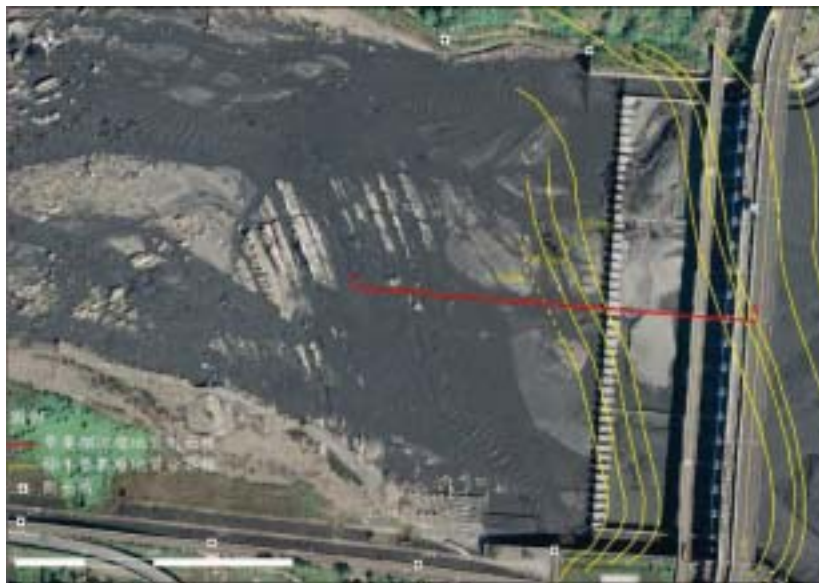


圖 5-16 集集攔河堰下游岩盤地質圖

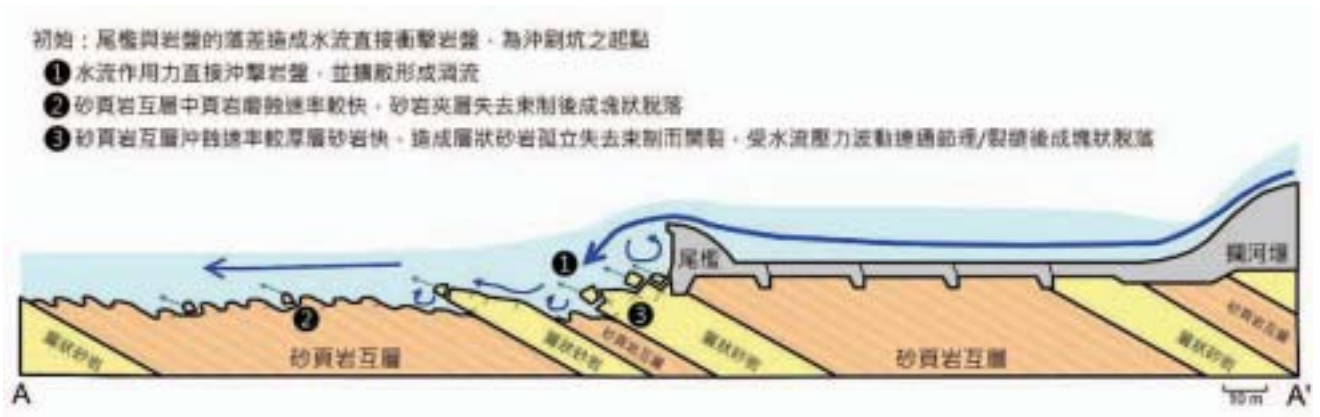


圖 5-17 集集攔河堰下游岩盤沖刷機制示意圖

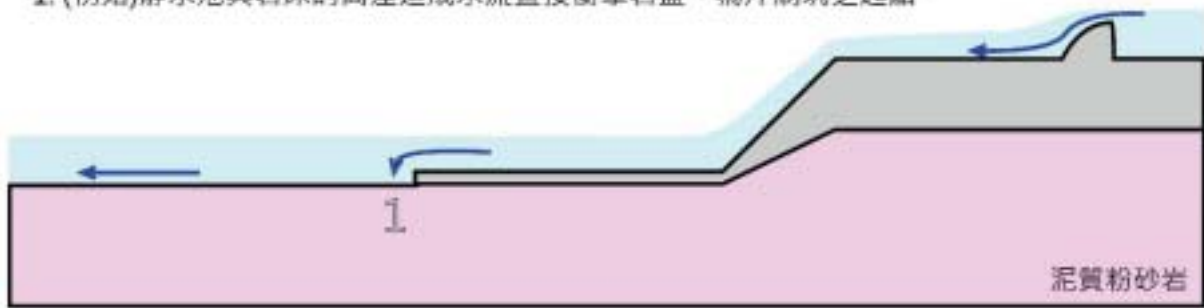
(六)觸口攔河堰

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 5-18。沖刷機制示意圖如圖 5-19，水流沖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逐層下切，沖刷坑逐漸形成。



圖 5-18 觸口攔河堰下游出露之岩層

1. (初始)靜水池與岩床的高差造成水流直接衝擊岩盤，為沖刷坑之起點。



2. (現況)當沖刷坑達一定深度後，水流中心之衝擊力向四周擴散形成渦流磨蝕。

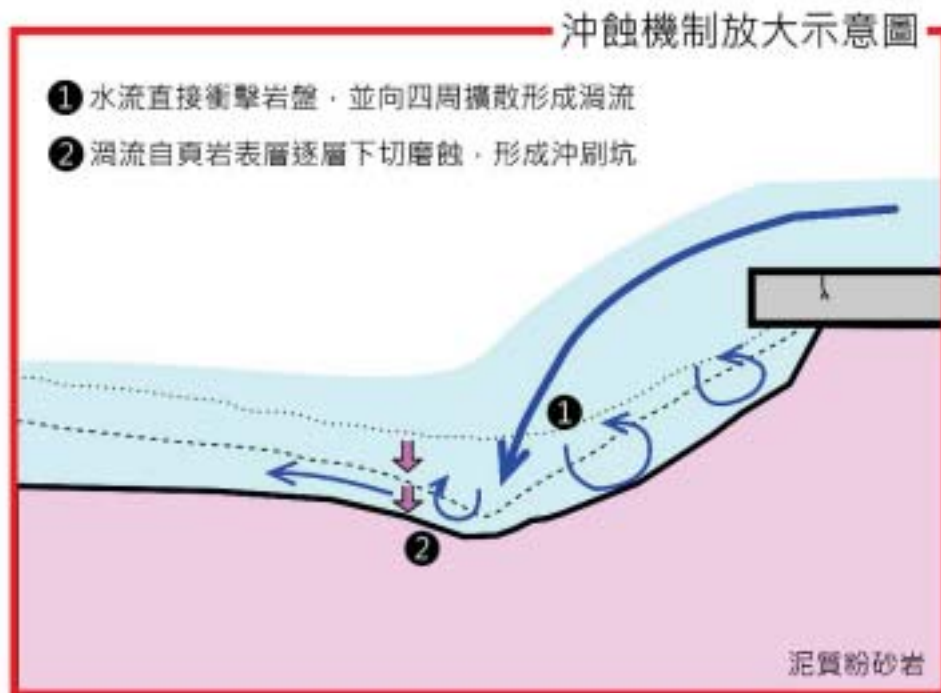
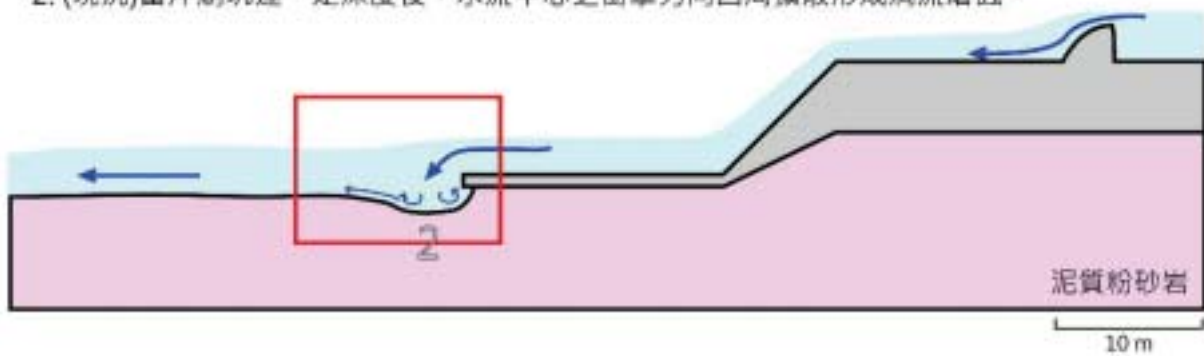


圖 5-19 觸口攔河堰下游岩盤沖刷機制示意圖

(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。河川沈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，應該與此區域攔河堰下游側有限的沖刷坑與河床穩定有很大的關係，其卵礫石層的沖刷機制如圖 5-20 所示。

1. (初始)靜水池與岩床的高差造成水流直接衝擊護甲層，為沖刷坑之起點

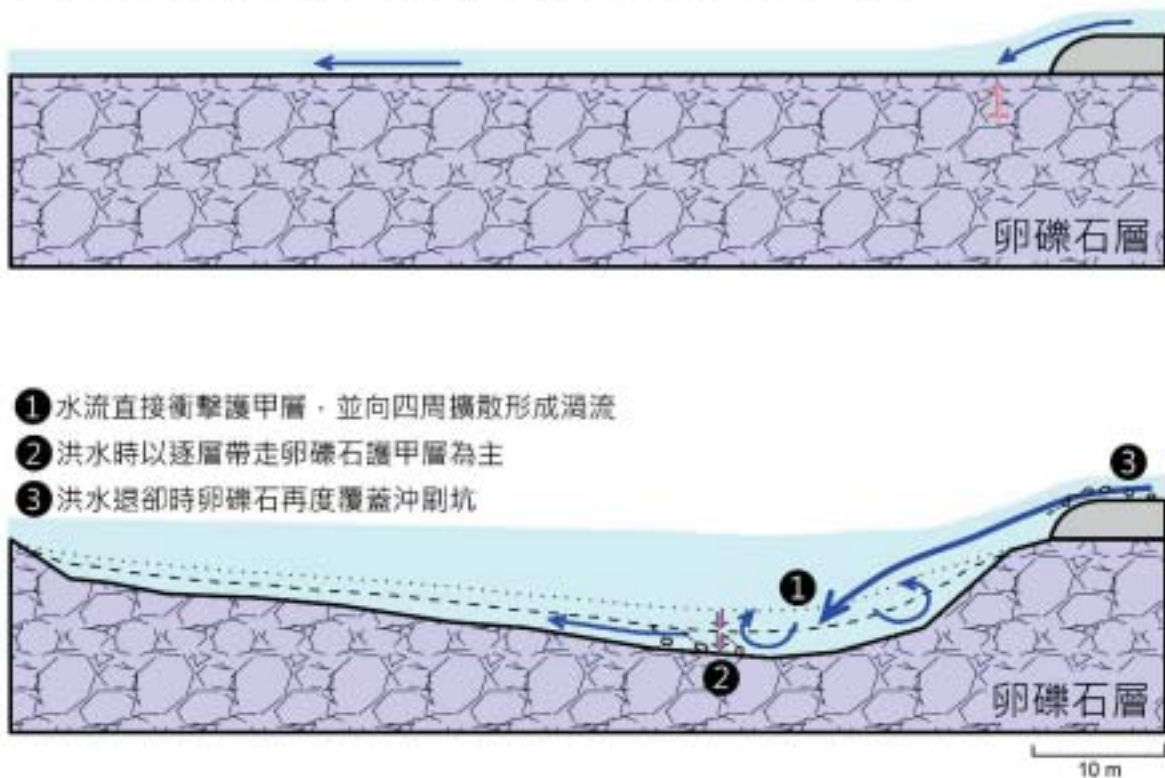


圖 5-20 東口堰下游沖刷機制示意圖

(八)甲仙攔河堰

圖 5-21 所示為甲仙攔河堰之沖刷機制示意圖。根據現地勘查，攔河堰下游岩性大部份由頁岩組成(圖 5-22)。侵蝕作用由水流衝擊力在頁岩表面形成裂隙，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逐層下切，逐漸形成沖刷坑。

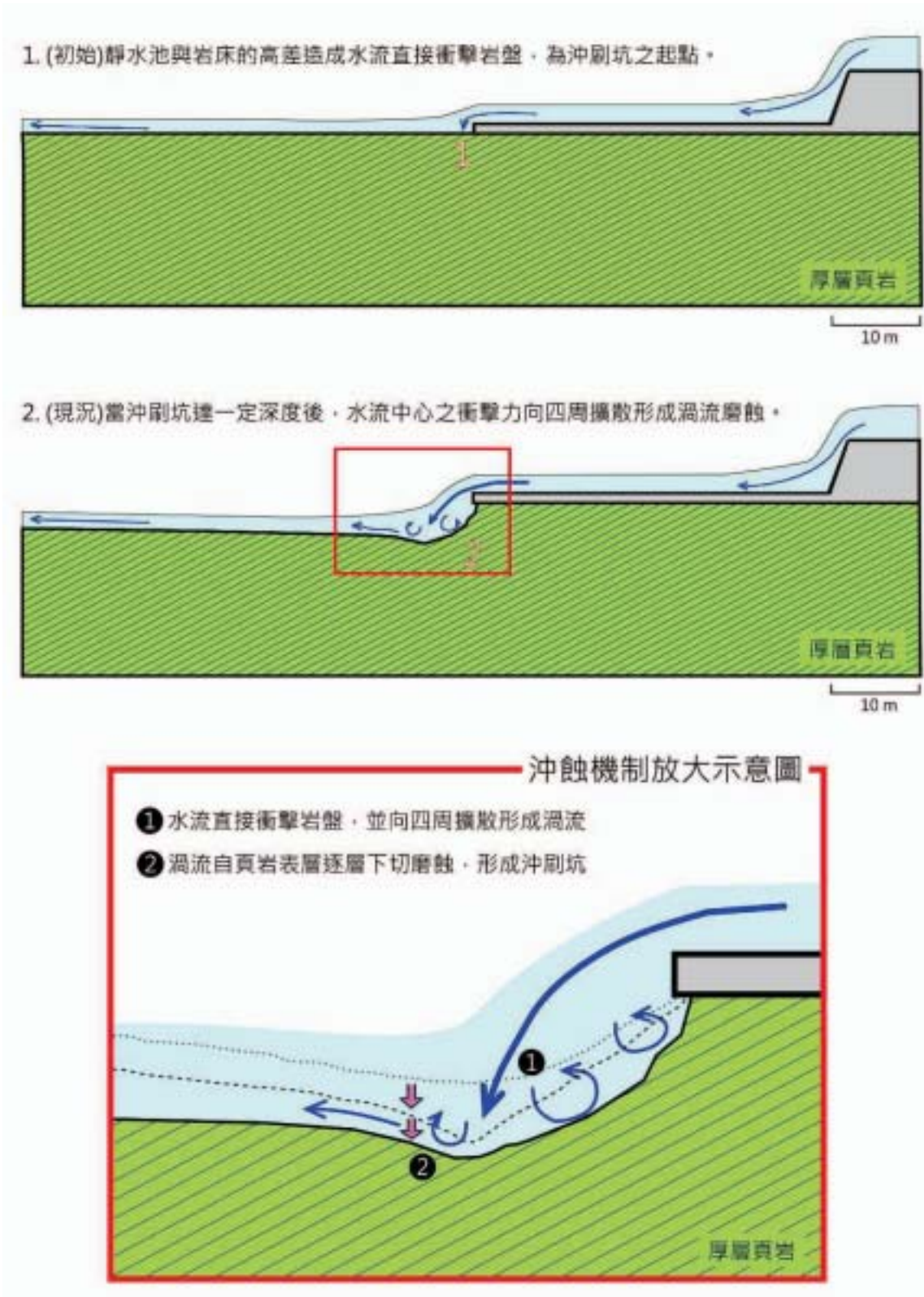


圖 5-21 甲仙攔河堰下游沖刷機制示意圖



圖 5-22 甲仙攔河堰下游出露之頁岩

三、攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力初步探討

以下歸納本計畫所調查八個攔河堰下游側岩盤之沖刷機制，為討論攔河堰下游側岩盤之抗沖蝕能力，將分別就 Annandale(2006)所提出的抗沖蝕能力指標參數、現地觀察到的沖刷現象以及上一小節所歸納的岩盤沖刷機制做比較。表 5-2 比較攔河堰下游岩盤抗沖刷能力，以初步探討各攔河堰的抗沖蝕能力。

表 5-2 攔河堰下游

攔河堰	沖刷機制	岩性	抗沖蝕能力指數	水流流向與岩層傾向	現地照片
後村堰	槽溝下切	砂岩	506	流向與走向平行	
		砂頁岩互層	8		
		夾煤層	251		
義興壩	塊體抽離	砂岩 (層厚約 2 m)	2462	水平地層	
		砂岩(層厚約 0.25 m)	1953		
石岡壩	槽溝下切	砂岩	436	斜交逆向	
		砂頁岩互層	275		
		頁岩	342		
龍泉圳攔河堰	逐層下切	砂頁岩互層	675	正交逆向	
		砂岩	322		
		頁岩	265		

表 5-2 攔河堰下游岩

攔河堰	沖刷機制	岩性	抗沖蝕能力指數	水流流向與岩層傾向	現地照片
集集攔河堰	槽溝下切	砂岩	543	斜交逆向	
		砂頁岩互層	9		
觸口攔河堰	逐層下切	泥質粉砂岩	321	水平地層	
		頁岩	135		
甲仙攔河堰	逐層下切	頁岩	258	斜交順向	
		砂頁岩互層	326		
東口堰	沖刷坑穩定	卵礫石覆蓋，堰體下游側未出現岩盤沖刷行為。			

四、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，而較少討論岩盤之沖刷特性。

但台灣西部麓山帶地區出露的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，高速沖擊水流不只侷限於形成具有消能作用的（局部跌水下方）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，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。

軟岩沖刷評估理論之發展尚未能達完善，相關理論發展之初大多以定性為主，僅能針對發生沖刷與否進行判斷，而對沖刷之深度則無法估算，而且偏重於岩石材料之特性，並未考慮地層弱面之影響。一般以摩損率評估岩石沖刷行為之方法，均將複雜的交互影響機制簡化成合理化公式，藉由集水區面積及河川坡度等，配合現地觀測資料進行回歸，建立一個整體的侵

蝕速率關係式。或是利用水力參數之估算，如平均河床剪應力、或單位流功(Stream Power)等提出半經驗公式，但是該類半經驗公式中的磨損率卻很難具體的去歸納其物理意義，也無法於現地或是實驗室中經量測決定其材料性質。其中以流功為考慮參數之半經驗公式，雖納入考慮時間效應，但卻仍忽略地質因素之影響。至於沖蝕指數(Erodibility index)方法雖考慮地層弱面之影響，對岩石特性有較完整之涵蓋度，但因研究案例皆屬大壩之溢洪道，一般溢洪道總通水時間皆有限，因此並難考慮時間因素之影響，又因該法之發展係由溢洪道下方岩床沖刷資料歸納而來，是否合於一般攔河堰沖刷之評估，仍有待進一步探討。

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，綜合以上針對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，可知在當岩性（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。

基於前節沖刷現象與機制的示意圖，可將本研究調查發現的沖刷機制歸納與簡化為三類沖刷模型：

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，其示意圖如圖 5-23。

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，其示意圖如圖 5-24。

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，其示意圖如圖 5-25。

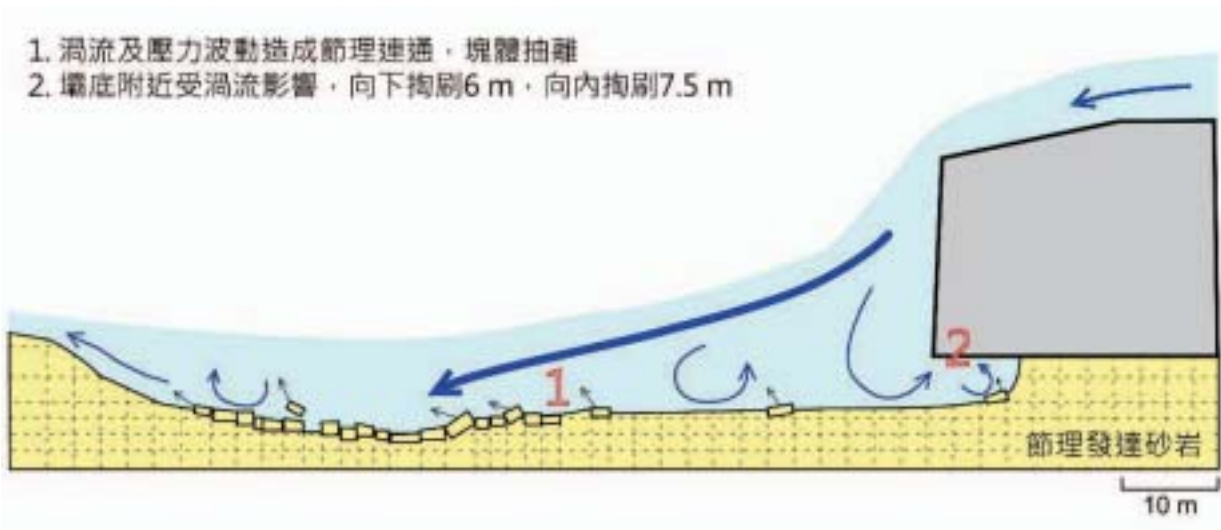


圖 5-23 塊體抽離型沖刷示意圖



圖 5-24 均勻下切型沖刷示意圖

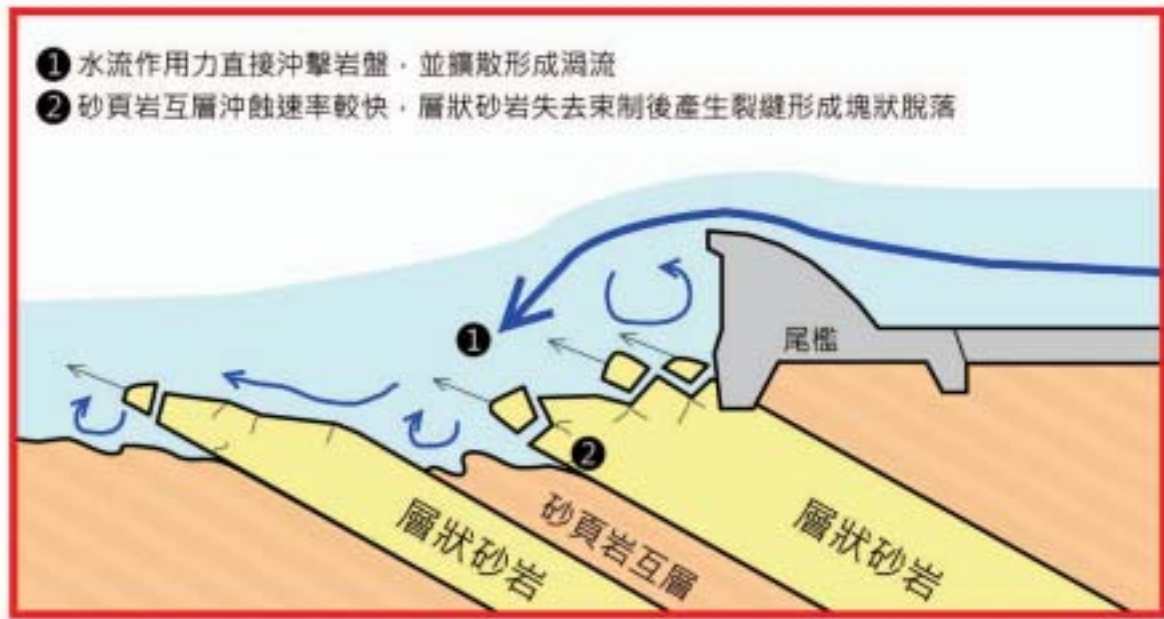


圖 5-25 槽溝下切型沖刷示意圖

第陸章 國外之局部沖刷評估方式在台灣之適用性初步探討

本章節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。

一、局部沖刷評估方式分類評選

岩盤沖刷是高度動態的複雜三面向耦合作用問題，包含水流、空氣、以及岩體，面對此複雜問題，國內外的研究迄今仍未有完整的掌握處理，水流對於岩體表面的磨蝕、在岩體高度不規則的裂隙裡的作用、空氣的含量又將影響水流的動態行為、高度的空間相關性以及時間相關性，面對時必須做一定程度的假設簡化，藉由室內模型試驗及現地觀測資料，有相當多之沖刷經驗公式及評估方法被提出，此類經驗公式藉由對觀測成果進行統計回歸，或將力學及物理模式配合觀測成果進行參數率定，提出定性或限定應用範圍之定量公式。

Bollaert and Schleiss(2003)曾針對過去曾發表之沖刷坑深度評估方式做了完整的回顧(表 6- 1)，他將評估方式區分為經驗公式 (emperical)、半經驗公式(semi-emperical)、沖刷坑底床壓力波動方式(plunge pool bottoms pressure fluctuations)、壓差方式 (pressure difference techniques)等類別，這些公式各有其發展應用之標的，如一般評估方式、高速沖擊水流、岩塊上浮等等。

Bollaert and Schleiss(2003)也對中也對各種方式中考量的參數進行分類，包含水力特性、大地材料特性、空氣特性、以及時

間因素等等（如表 6-1）。

對於岩盤之局部沖刷問題而言，不同於顆粒性材料已經是分離的塊體的考量，最重要的因素包括以下兩點：

1. 水流如何使完整岩體發生破壞：包含水流對岩體表面的磨蝕作用，以及岩體裂隙或節理在水力作用下之延伸發展，最終使得塊體與岩體分離。
2. 水流作用如何帶走與岩體分離的塊體：塊體與岩體分離後未必脫離其原本的位置，塊體仍可能受到重力以及周遭完整岩體的拘束。

因此，採用參數類別(包含水力特性、大地材料特性、空氣特性、以及時間因素等)是否可以完全反應出不同岩性材料所具備之沖蝕作用差異性，將是本工作重要的考量重點。

由表 6-1 的考量參數列表比較中可以發現，大部分之公式對於岩體考量的參數均僅有代表粒徑(d_m)或是岩塊代表尺寸(z)，代表粒徑(d_m)參數主要係應用於顆粒性材料的沖刷運移，岩塊代表尺寸(z)則多用於河道拋石或混凝土塊尺寸的估算，對於岩體材料的參數代表性而言相當不足。後續內容將就 Schoklitsch (1932)、Veronese(1937)、與 Zimmerman and Maniak (1967)等三種國內經常採用的方式進行說明。表 6-1 中較為完整考量岩石特性的沖刷深度評估方法僅有 Spurr(1985)、Annandale (1995, 2006)、以及 Bollaert(2002)，此三種評估方式將於後續內容中進行說明。

在此三種方式中，以 Annandale(1995, 2006)以及 Bollaert(2002)兩種方式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 Sedimentation Engineering(2008)中所推薦，所以本工作初步擬針對 Annandale et al.(1995, 2006)以及 Bollaert(2002)兩種評估方式為主進行適用性探討。

表 6-1 沖蝕坑深度評估方式彙整與比較表 (Bollaert and Sch...)

Type	Year	Author(s)	Applicability	Time	Hydraulic characteristics								Geotechnical characteristics				
					Hydraulic				Hydrodynamic				Geom. soil		Jointed soil		
					T [-]	q [m ² /s]	h [m]	H [m]	q [m ³ /s]	V _j [m/s]	θ [°]	RMS [-]	S _{eq} (t) [m ²]	s _{max} [-]	d ₅₀ [mm]	c _v [m/s]	γ _v [kg/m ³]
Empirical	1912	Schultrich	plunging jet	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1917	Venezze A	lowe & plunging jet	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1917	Venezze B	no. A, low d ₅₀ = 0.005 m	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1938	Jagan	plunging jet	—	■	■	■	—	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1953	Dohlan et al.	plunging jet	■	■	—	■	—	—	—	—	—	—	■	■	—	—
	1957	Biering	plunging jet	—	■	—	■	■	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1961	Hobanovic	slingshot, rock surface	—	—	—	■	■	■	■	■	—	—	—	—	—	—
	1966	Darda et al.*	slingshot	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1967	Kimada	plunging jet	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1969	Cher and Poluye	fly bucket	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1974	Cher and Kong	plunging jet	—	■	—	■	■	—	■	—	—	—	■	—	—	—
	1975	Martin A	plunging jet, rock surface	—	■	■	■	—	—	■	—	—	—	—	—	—	—
	1975	Martin B	slingshot	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1978	Terziavich	slingshot	—	—	—	—	—	■	■	—	—	—	—	■	—	—
	1981	DNCTH	plunging jet	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1982	Machado A	plunging jet, rocky bed	—	■	—	■	■	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1982	Machado B	plunging jet, rocky bed	—	■	—	■	■	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1985	Mora and Arangoen*	plunging jet	—	■	■	■	■	—	—	—	—	—	■	—	—	—
	1989	Mora	plunging jet	—	■	■	■	■	—	—	—	—	—	■	—	—	—
Semi-empirical	1989	Mikhalev	plunging jet	—	■	■	■	■	—	■	—	—	—	■	—	—	—
	1987	Merkulova et al.*	plunging jet, rocky bed	—	■	■	■	■	—	■	—	—	—	—	■	■	■
	1987	Ponk and Heler	air, submerg. imp. jet	—	■	—	■	—	—	—	—	—	—	—	■	—	—
	1975	Zvonibia	slingshot	—	—	■	—	—	■	■	—	—	—	—	—	—	—
	1983	Mih and Kato	air, submerg. imp. jet	—	—	■	—	—	■	■	—	—	—	■	—	■	—
	1995	Cher and Yoon	plunging jet	—	■	—	■	■	—	■	—	—	—	■	—	—	—
	1989	Spey*	plunging jet	■	■	■	■	■	■	■	—	—	—	■	—	—	■
	1990	Bassam and Billie*	grate-covered, plung. jet	—	■	—	—	■	■	■	—	—	—	■	—	—	—
	1993	Vetin et al.	plunging jet	■	■	—	—	■	■	■	—	—	—	■	—	—	—
	1984	Faldutich	gunnel	—	■	■	—	■	■	■	—	—	—	■	—	—	■
	1998	Amendola & et.*	gunnel	—	■	■	■	■	■	■	—	—	—	■	—	—	■
	1998	Hoffman	gunnel	—	■	■	—	■	■	■	—	—	—	■	—	—	■
Flange pool pressure fluctuations	1983	Ni Das Ming	nozzling, impinging jet	—	■	■	■	■	■	■	■	■	—	—	—	—	—
	1983	Chi Ung Tai	nozzling, impinging jet	—	■	■	■	■	■	■	■	■	—	—	—	—	—
	1997	Prasanna and Tomke	circular impinging jet	—	■	■	■	■	■	—	■	—	—	—	—	—	—
	1990	Anasayas	nozzling, falling nappe	—	■	■	■	■	■	—	■	—	—	—	—	—	—
	1990	May and Willoughby	rectangular, air jet	—	■	■	■	■	■	—	■	—	—	—	—	—	—
	1984	Peeters and Dohr	nozzling, falling nappe	—	■	■	■	■	■	—	■	—	—	—	—	—	—
	1997	Erwin & et.	circular impinging jet	—	■	■	■	■	■	—	■	—	—	—	—	—	—
Pressure difference techniques	1961	Vedrick	oblique imp. noz. jet	—	■	—	—	■	—	■	—	—	—	—	—	■	—
	1988	Brisson	parallel flow impact	—	—	■	—	■	■	—	—	—	—	—	—	■	—
	1989	Ono	oblique imp. noz. jet	—	—	—	—	■	■	—	—	—	—	—	—	■	—
	1982	Fiorino and Rimoldi	concrete slab uplift	—	■	■	■	■	■	—	■	—	—	—	—	■	—
	1988	Liu & et.	rock block uplift	—	■	■	■	■	■	■	—	—	—	—	—	■	—
	1989	Liu & et.	vibration, slab uplift	—	—	■	■	■	■	■	—	—	—	—	—	■	—
	2000	Fiorino and Silandri	inclined slab uplift	—	■	■	■	■	■	—	■	—	—	—	—	■	—
Transient pressure techniques	2002	Bollaert	vertical and oblique impinging jets and nozz, concrete slab and rock block uplift	■	■	■	■	■	■	■	■	■	—	—	—	■	■

二、局部冲刷評估方式介紹

(一)常用壩堰下游側顆粒性材料局部冲刷坑深度方法

美國墾務局技術手冊「Computing Degradation and Local Scouring」(1984)及國際水利研究協會(IAHR)水工結構設計物設計手冊「Scouring」(1991)中列出下列公式以估算局部冲刷坑深度：

1. Schoklitsch (1932)

$$h_s = \frac{4.7 \times H^{0.2} \times q^{0.57}}{D_{90}^{0.32}} - h_m$$

2. Veronese(1937)

$$h_s = \frac{3.68 \times H^{0.225} \times q^{0.54}}{D_{50}^{0.42}} - h_m$$

3. Zimmerman and Maniak (1967)—靜水池

$$h_s = 2.89 \times \frac{q^{0.82}}{D_{85}^{0.23}} \times \left(\frac{h_m}{q^{2/3}} \right)^{0.93} - h_m$$

其中 h_s = 局部冲刷深度(m);

H = 結構物上、下游水位差(m);

q = 單位寬流量(m^2/s);

h_m = 下游平均水深(m);

D_{50} = 河床質粒徑累積通過 50%之粒徑大小(mm);

D_{90} = 河床質粒徑累積通過 90%之粒徑大小(mm);

D_{85} = 河床質粒徑累積通過 85%之粒徑大小(mm);

然而，上述三個常用之估算冲刷深度方法原則上僅適用於沖積材料河床面，其原因在因為此等公式中所考量冲刷材料的

方式均為河床質之代表粒徑。

(二) Annandale (1995, 2006) 岩盤沖刷評估方式

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（如圖 6-1），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 $P_C = K_h^{0.75}$ ：

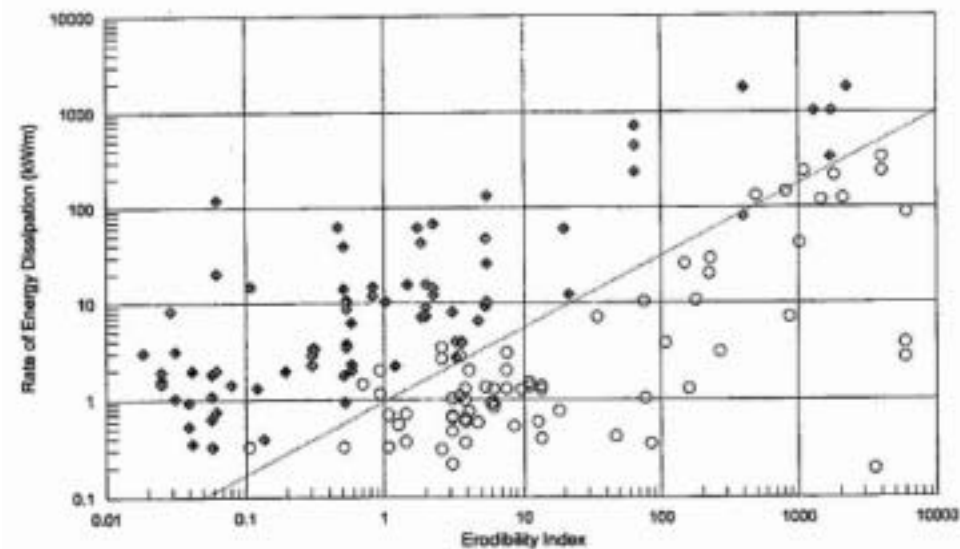


圖 6-1 能量消耗 vs. 抗沖蝕指數圖

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，如圖 6-2 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。

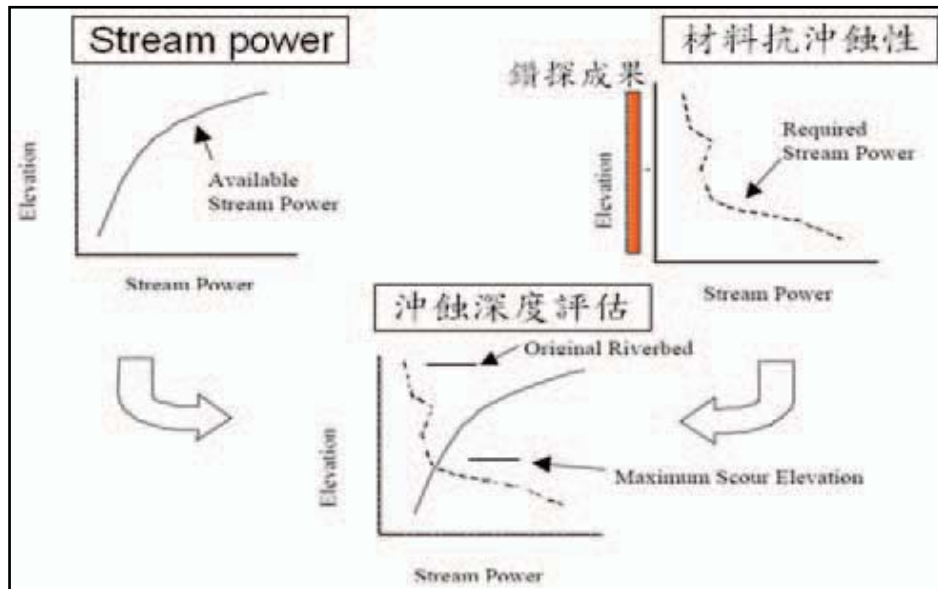


圖 6-2 評估沖蝕坑的可能沖蝕深度

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，也可採用表 6-2：

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

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

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)

表 6-2 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，必須查表 6-2。

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：

$$K_d = J_r / J_a$$

表 6-3 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 (表 6-4) 表示不連續面分離的兩個面間間的粗糙度，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 (表 6-5) 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。

表 6-4 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

表 6-5 節理風化參數評分表

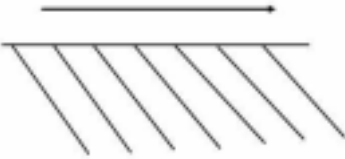
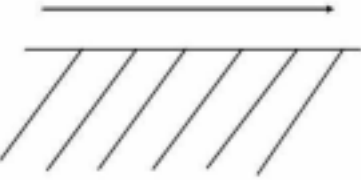
節理風化數值(J_a)			
節理面間描述	不同節理開口程度之風化數值(J_a)		
	1.0 (mm)	1.0~5.0 (mm)	5.0 (mm)
緊密接合，堅硬，無軟弱填充物可侵入填充	0.75	--	--
節理面無風化，僅表面有污跡	1.0	--	--
節理面輕微風化，無軟弱填充物、無凝聚性岩石礦物或是破碎岩石填充	2.0	2.0	4.0
無軟弱之輕微黏土質的無凝聚性材料填充	3.0	6.0	10.0
無軟弱過壓密黏土礦物填充；破碎岩石可能填充其中	3.0	3.0	10.0
軟弱或低摩差性黏土礦物附著且有少量膨脹性黏土填充	4.0	8.0	13.0
有適量之軟弱過壓密黏土礦物填充；破碎岩石可能填充其中	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 (表 6-6) 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(圖 6-3)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。

表 6-6 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	1.26

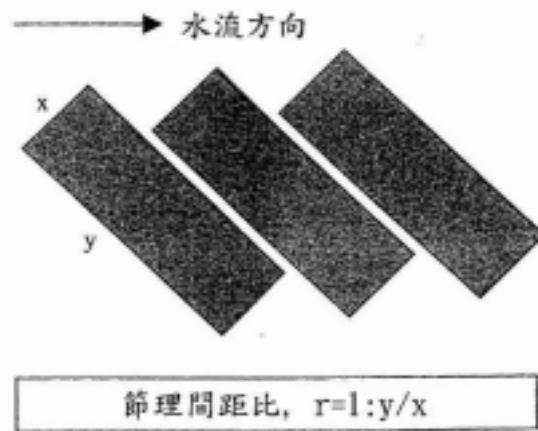


圖 6-3 岩塊長度比值 y/x 示意圖

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。

(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- 4 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:

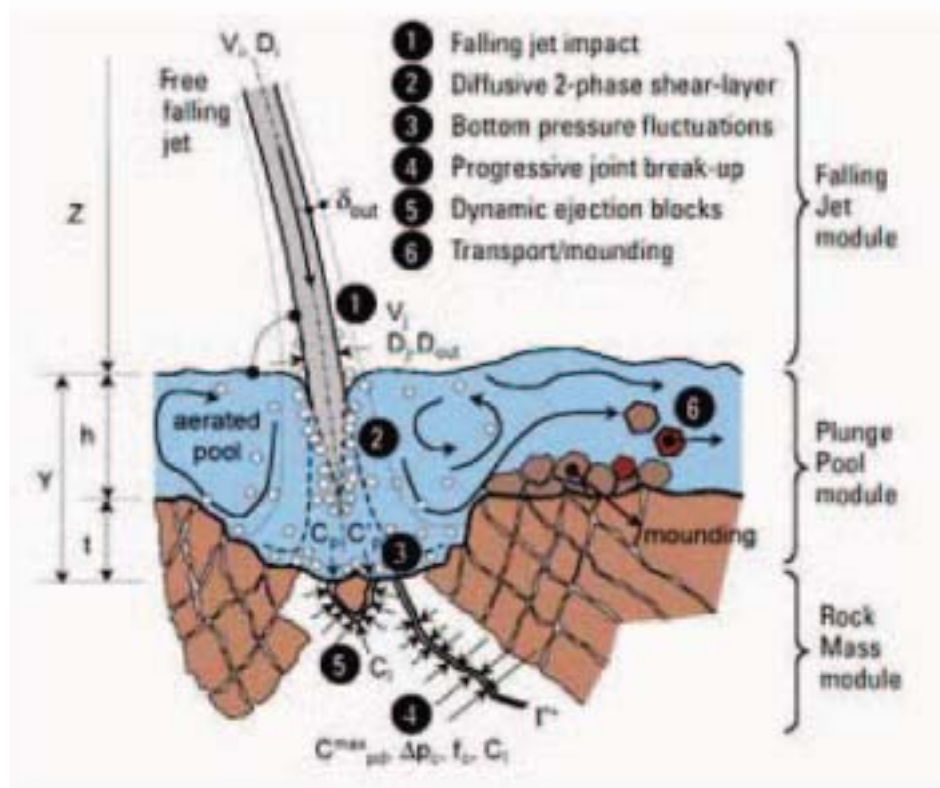


圖 6-4 水流沖擊引致之沖蝕機制示意圖(同圖 5-2)

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。

(四)Spurr(1985)岩盤沖刷評估方式

Spurr(1985)由能量之觀點提出估計沖刷坑深度的方法，他認為任一時間 t 時的沖刷深度 $d(t)$ ，乃作用於岩石表面的能量

E_a 、岩石能吸收的阻抗能量 E_{TH} 、以及岩床反射的能量 E_x 等三種能量參數的函數，可表示如下式：

$$d(t)=f(E_a - E_{TH} - E_x)$$

參考圖 6-5，當沖刷坑剛開始發展(t_0)時，深度很淺，此時作用於岩石表面的侵蝕能量 E_a 最大，由岩石表面的反射的能量 $E_x(t_0)$ 也相當大：

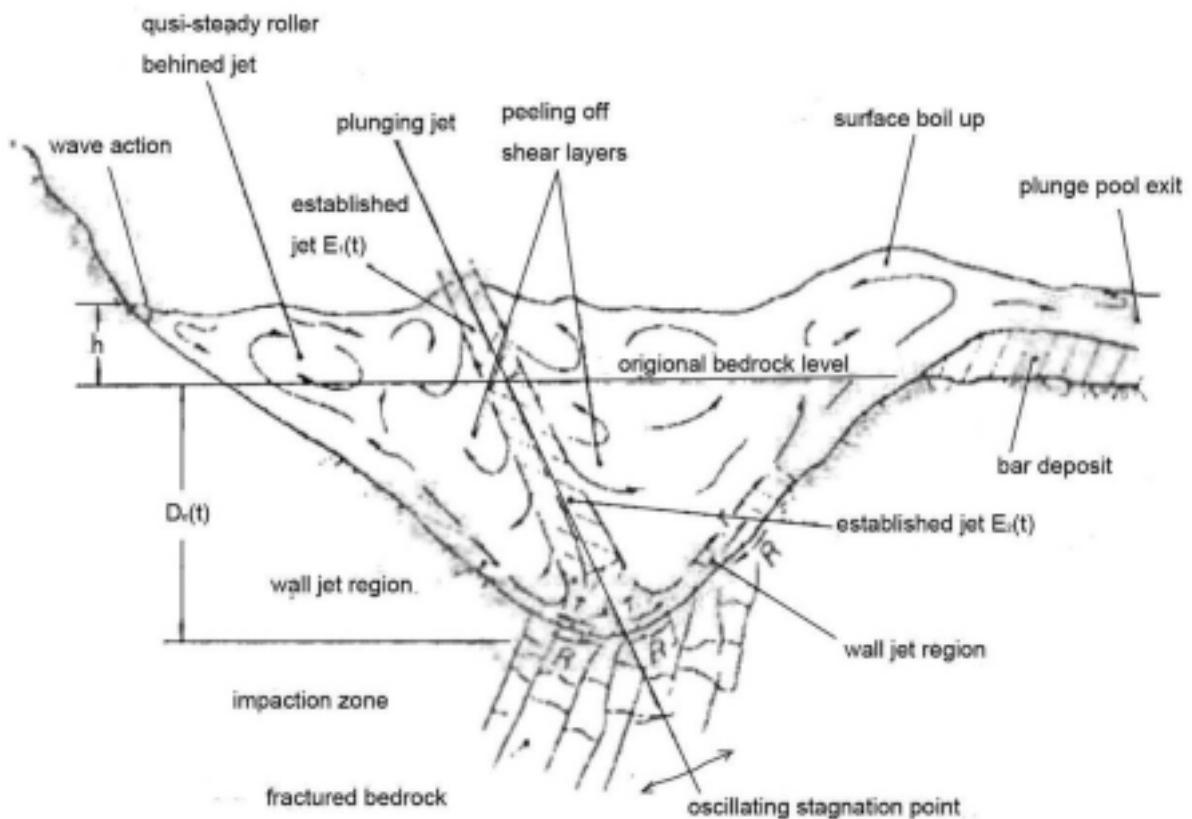


圖 6-5 發展中沖刷坑之噴射水流示意圖(Spurr, 1985)

$$E_a = E - E_1(t_0) > E_{TH} + E_x(t_0)$$

其中

E 為噴射水流的能量

$E_1(t)$ 、 $E_2(t)$ 均為噴射水流到達岩石表面以前的能量損失項目

($E_1(t)$ 原始岩盤面以上的能量損失， $E_2(t)$ 為岩盤面以下)。

當時間趨近於沖刷坑到達平衡狀態時間(t_e)，由岩石表面的反射的能量 $E_x(t_e)$ 已變的很小，而噴射水流於沖刷坑中已消耗了大部

分的能量 $E_2(t_e)$:

$$E_a \doteq E - E_1(t_e) - E_2(t_e) \doteq E_{TH}$$

Spurr 提出之估計沖刷坑深度的方法係基於以下的概念，假如有一個沖蝕條件(沖蝕流量、沖刷坑平衡深度)已知的參考場址，能充分符合一個沖蝕深度經驗公式的估計，則可利用此經驗公式來估計另一個研究場址在一沖蝕流量下的沖刷坑平衡深度，再將此深度利用**能量沖蝕指數**(Energy Scour Index, ESI)進行修正後獲得研究場址的沖刷坑深度估計值。整個沖刷坑深度估計流程主要分成以下三個步驟：

1. 選擇參考場址的沖刷坑深度經驗公式：

例如深度估計經驗式之一般型式為

$$d_{e1} = K(q^n H^m h^r / g^s d_{50}^y)_1$$

其中 d_e 為平衡沖刷深度， q 為單寬流量， H 為水頭差， h 為尾水深度， g 為重力加速度， K 為常數， d_{50} 為床質粒徑， n 、 m 、 r 、 s 、 y 等均為經驗方式率定之次方數。

2. 率定能量沖蝕指標 ESI：

ESI 係定義為二個場址總侵蝕能量比值再乘以周圍岩體對沖刷坑束制性(confinement)的差異，最後之計算式如下：

$$ESI = \frac{\frac{Q_1 H_1 \rho}{A_1} - \left(\frac{d_e \sigma'_c}{t_e}\right)_1}{\frac{Q_2 H_2 \rho}{A_2} - \left(\frac{d_e \sigma'_c}{t_e}\right)_2} \times \frac{t_{e1}}{t_{e2}} \times F$$

其中 Q 為總流量， H 為水頭差， ρ 為水的密度， A 為噴射水流沖擊面積， d_e 為平衡沖刷深度， σ'_c 為有效岩石單軸壓縮強度， t 為水流沖刷時間， F 為周圍岩體對沖刷坑束制性差異的估計值(介於 1~1.25)。

3. 計算研究場址的沖刷坑深度

$$d_{e2} = K(q^n H^m h^r / g^s d_{50}^y)_2 / (1/ESI)^u$$

其中當噴射水流為圓柱形 $u=1$ ，方形時 $u=2$ ；當噴射水流軌跡路徑很長時，方形水流會趨近於圓柱形。

除上述沖刷坑深度估計方式外，Spurr 也針對沖刷速率方面提出建議，他認為沖刷坑之沖刷速率大致為時間的某一指數函數，他建議借用穩態水刀鑽削(stationary jet drilling)的公式來估算沖刷速率，一般表式如下：

$$d(t) = d_e(1 - e^{-at/t_e})$$

其中 a 隨場址不同而改變。

綜合上述，Spurr 提出以的沖刷坑深度評估方式雖然導入了沖刷能量的概念，但是沖刷深度評估的基礎仍來自於顆粒性材料的沖刷經驗式，再以能量沖蝕指標 ESI 的方式率定另一場址的沖刷深度，應用上略顯繁複且必須以經驗方式預估沖刷時間等參數後才可以進行評估，為此方法引入相當程度的不確定性。此外，在沖刷速率部分，是否宜引用水刀鑽削速率公式也難確定。此法在應用上最大問題是沖刷深度評估的基礎仍來自於顆粒性材料的沖刷經驗式，所以本計畫中僅參考其概念，而不納入評估方式之中。

(五)Akhmedov(1988)岩盤沖刷評估方式

Akhmedov 之沖刷坑評估方式可參考圖 6-6，此評估方式之發展基礎來自於以下兩個重要條件：

1. 沖刷坑內水流之軸向相對速度(relative axial velocity)隨軌跡路徑發生變化的關係可以加以定義如下式：

$$\bar{U}_m = \frac{U_m}{U_0} = b_0 \times \sqrt[1.8]{\frac{\alpha}{\chi - 2.2}}$$

b_0 為水柱寬度；

U_m 為軸向速度(水流速度剖面最大值)；

U_0 為噴射水柱初速；

α 為水柱初始角度；

χ 為水柱之軌跡長度。

2. 水柱於沖刷坑中的軌跡長度可採用圖 6- 6 中的幾何關係加以計算(假設最終沖刷深度為 t ， c 為渦流常數，於此等於 0.3)：

$$\chi = \left(t - \frac{b_0 + ct}{2} \right) \frac{1}{\sin\alpha} + (b_0 + ct) + \left(t - \frac{b_0 + ct}{2} - \frac{h}{2} \right) \frac{1}{\sin\psi}$$

聯立求解上述二式即可獲得沖刷深度之估計值。

綜合上述，Akhmedov 的深度評估方式看似相當簡單易用，但必須在兩個重要基礎條件都成立下才可使用。對於岩盤抗沖刷能力而言，其所考量的唯一參數為沖刷坑坡面的摩擦角 φ ，可否廣泛應用於不同場址的評估仍屬未知。Akhmedov 考慮之沖刷坑受局部束制，並假設上、下游坡面角度皆為 φ ，對於台灣多數攔河堰而言，年輕之地質條件似乎多未能提供有效之束制而形成沖刷坑，此深度評估方式是否合宜，仍難肯定。此方式最大困難點在於必須形成假設形狀之沖刷坑，方能計算正確之能量損耗關係，所以本計畫擬暫不將此法納入評估，僅參考其評估概念。

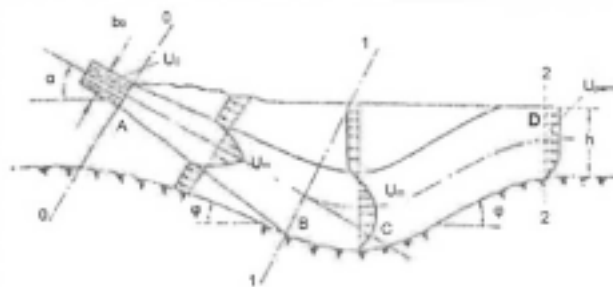


圖 6- 6 沖刷坑水流示意圖

三、Annandale (1995, 2006)岩盤沖刷評估方式案例分析

(一)集集攔河堰

- 1、地形資料：採用中水局 97 年 12 月之航拍數值地形高程資料。
- 2、水文資料：採用 97 年最大洪水量(97/07/18)卡玫基颱風，流量為 10,906 cms，介於重現期 5 年之洪水量(9,300 cms)，尾檻流速=10.72m/s，及重現期 10 年之洪水量(11,900 cms)，尾檻流速=10.80m/s 間。以內插方式求得流量 10,906 cms 之尾檻流速為 10.77m/s。
- 3、依據 Annadale(2006)提出之 Head Cut 型式之水流侵蝕能量公式(式 6-1)，計算隨沖蝕深度增加之水流侵蝕能量變化情形，成果整理成表 6-7 所示。

$$SP_{impact} = \gamma Q y_c \left[\frac{\Delta z}{y_c} + \frac{3}{2} - \frac{y_1}{y_c} - \frac{1}{4} \left(\frac{3}{2} + \frac{\Delta z}{y_c} \right) \left(1 + \frac{1.06}{\sqrt{\frac{\Delta z}{y_c} + \frac{3}{2}}} \right)^2 \right] \quad (\text{式 6-1})$$

- 4、依據現地調查所得之資料，評估本區之抗沖蝕指數(K_h)在砂岩為 600，則以 Annandale 建議之關係式，則岩盤容許沖蝕能量 P_c 值為 121KW/m²。頁岩抗沖蝕指數(K_h)為 10，岩盤容許沖蝕能量 P_c 值為 5.6 kW/m²。

表 6-7 集集堰 Annandale 方式評估結果表

岩盤高程 (m)	單寬流量 (cms)	跌水高 (m)	初始流速 (m/s)	臨界水深 (m)	下游水深 (m)	沖蝕能量 (KW/m ²)
195	33.30	4.77	10.80	4.82	1.81	600.65
194	33.30	5.77	10.80	4.82	2.81	462.60
193	33.30	6.77	10.80	4.82	3.81	326.61
192	33.30	7.77	10.80	4.82	4.81	192.48
191	33.30	8.77	10.80	4.82	5.81	60.01
190	33.30	9.77	10.80	4.82	6.81	0

(二)義興壩

- 1、地形資料採用 60 年及 97 年地形測量。
- 2、60 年及 97 年期間流量最大為 93 年之 8,527 cms。約為重現期 50 年之洪水量(8,222 cms)，跌水初始流速=19.73 m/s。
- 3、依據 Annandale(2006)提出之 head cut 型式之水流侵蝕能量公式(式 6-1)，計算隨沖蝕深度增加之水流侵蝕能量變化情形，成果整理成表 6-8 所示。
- 4、依據現地調查所得之資料，以地質評方法求得本地區之抗沖蝕指數(K_h)為 2,000，則以 Annandale 建議之關係式，則岩盤容許沖蝕能量 P_c 值為 299 KW/m²。

表 6-8 義興壩 Annandale 方式評估結果表

岩盤高程 (m)	單寬流量 (cms)	跌水高 (m)	初始流速 (m/s)	臨界水深 (m)	下游水深 (m)	沖蝕能量 (KW/m ²)
260.9	56.65	21.11	19.73	6.87	12.82	580.62
259.9	56.65	22.11	19.73	6.87	13.82	369.36
258.9	56.65	23.11	19.73	6.87	14.82	159.16
257.9	56.65	24.11	19.73	6.87	15.82	0

四、Bollaert (2002)岩盤沖刷評估方式案例分析

(一)集集攔河堰

- 1、地形資料：97 年 DEM
- 2、最大流量：卡玫基颱風流量 10,906 cms。
- 3、沖刷坑沖刷深度：3 m(歲修檢查結果)
- 4、現地平均節理間距：砂岩 1 m、砂頁岩互層 0.1 m。
- 5、水文參數：以 97 年底 DEM 進行 CCHE 定床分析，模擬 $Q_2 \sim Q_{100}$ 下的水文參數。最大流量為 97 年卡玫基颱風 10,906 cms，與 $Q_{10} = 11,900$ cms 近似，故本分析採用 Q_{10} 的水文參數。
- 6、沖刷坑水深(Y)=初始 3.5 m，97 年底 6.5 m。

7、堰前水流厚度(Jet diameter at impact D_j)：2.5 m

8、靜水池尾檻前水流初始流速=10.8 m/s

9、單位流體所含空氣量 q_a (Ervine, 1998):

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

10、計算自由空氣含量(free air content)

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

11、計算混合流體統體密度， ρ_{air} 取 1.29 kg/m³， ρ_{liq} 取 1000kg/m³。

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

12、計算混合流體之壓力波傳遞速度。

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

13、計算淨動態推動係數(Bollaert, 2002)。

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

14、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。

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

15、隨著沖刷深度刷深，跌水深加深， 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，本區沖刷坑深度要達 23 m 才穩定不再沖蝕，分析結果如圖 6-7，沖刷坑分析模型如圖 6-8。

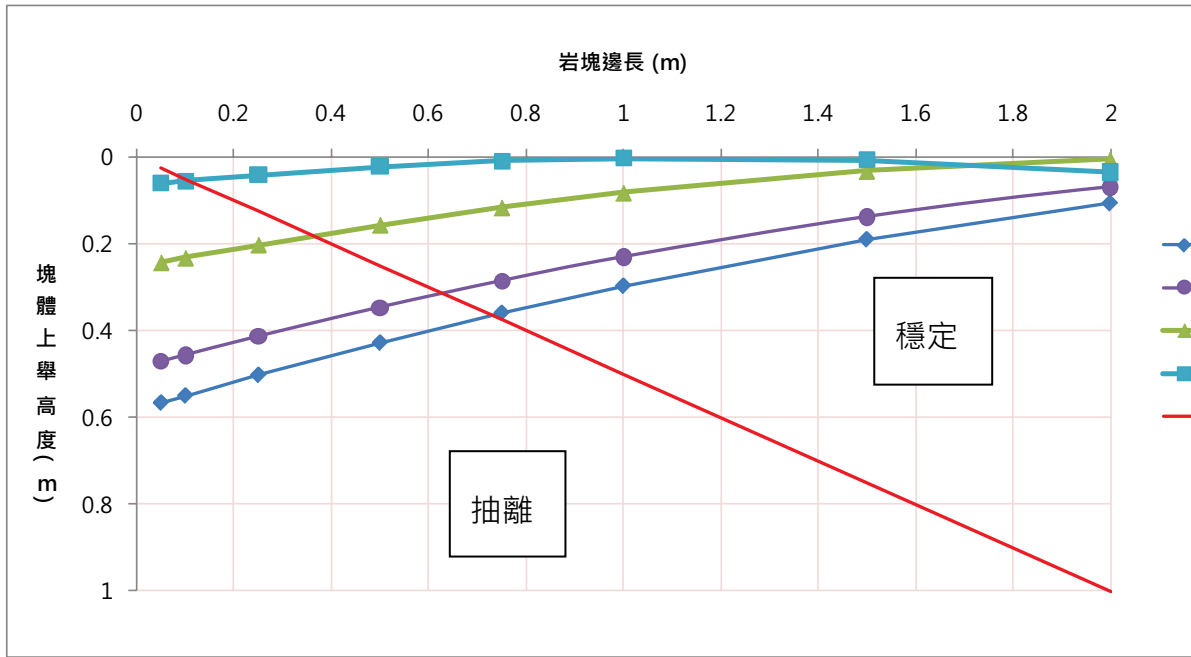


圖 6-7 集集堰可攜走最大岩塊尺寸

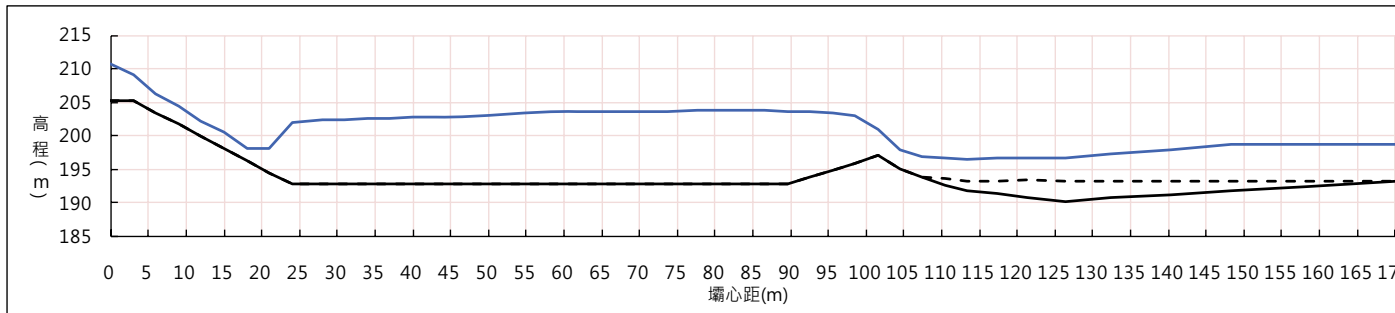


圖 6-8 集集堰沖刷坑分析模型

(二)義興壩

- 1、地形資料：60年、90年、97年DEM。
- 2、最大流量：93年8,527 cms。
- 3、沖刷坑沖刷深度：60至90年8.8 m，90至97年6.2 m(測量資料)。
- 4、現地平均節理間距：1.6 m及0.5 m。
- 5、水文參數：以90年地形進行CCHE定床分析，模擬 $Q_2 \sim Q_{100}$ 下的水文參數。義興壩62年至97年最大流量為93年8,527 cms，與 $Q_{50}=8,222$ cms近似，故本分析採用 Q_{50} 的水文參數。
- 6、沖刷坑水深(Y)=60年14 m，90年22 m，97年29 m
- 7、堰前水流厚度(Jet diameter at impact D_j)：3.1 m
- 8、堰前水流初始流速=18.4 m/s
- 9、單位流體所含空氣量 q_a (Ervine, 1998):

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

- 10、計算自由空氣含量(free air content)

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

- 11、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 。

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

- 12、計算混合流體之壓力波傳遞速度。

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

- 13、計算淨動態推動係數(Bollaert, 2002)。

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

14、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。

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

15、隨著沖刷深度刷深，跌水深加深，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 60 年與 90 年的條件下仍會繼續沖刷，97 年則趨於穩定，分析結果如圖 6- 9，沖刷坑分析模型如圖 6- 10。

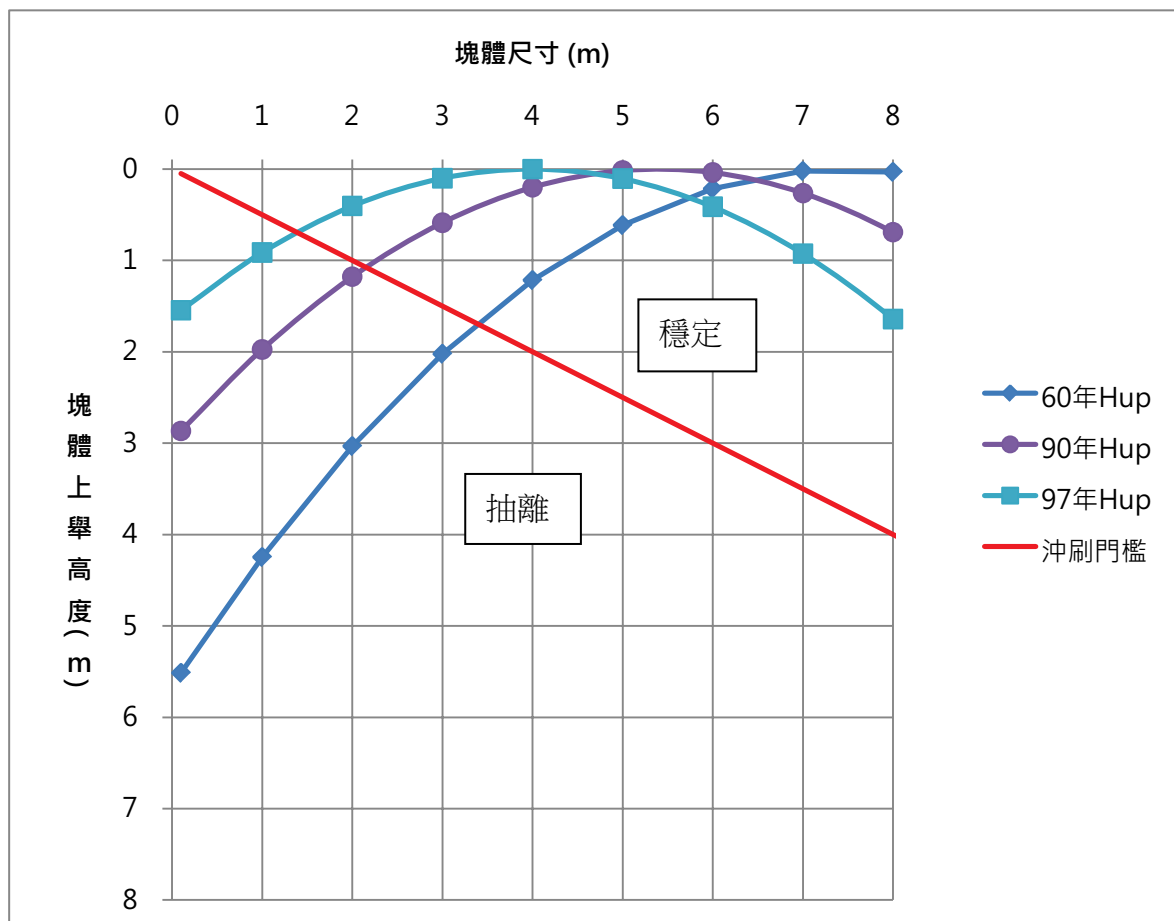


圖 6-9 義興壩可攜走最大岩塊尺寸

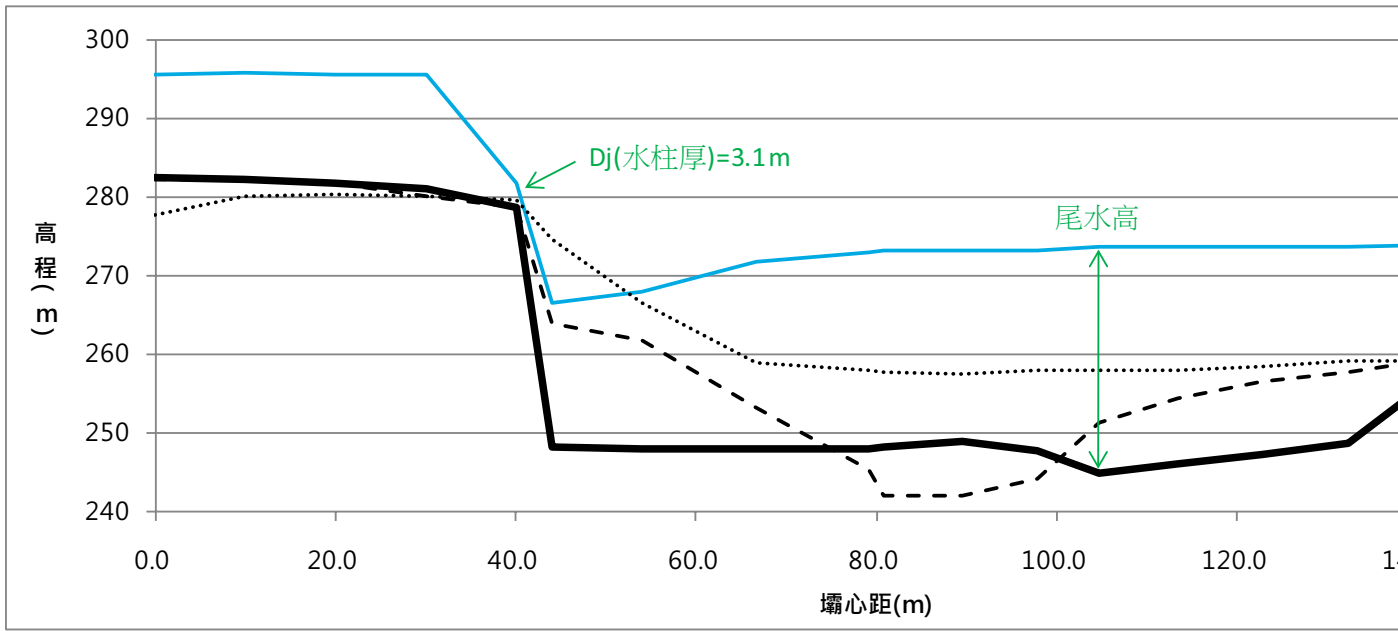


圖 6-10 義興壩冲刷坑分析模型

五、岩盤沖刷評估方式適用性探討

綜合第四節中採用 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，針對結果作以下說明：

1. 依 Annandale 之分析方式，在集集堰受到卡玫基颱風($Q_{\max} = 10,906 \text{ cms}$)作用可在堰前造成 3 m 的沖刷深度，與實際沖刷狀況(約 3 m)大致相符。
2. 依 Annandale 之分析方法，在義興壩受到 $Q_{\max} = 8,527 \text{ cms}$ 作用下所分析的沖刷坑深度於 1.5 m 即達平衡，與實際量測沖刷坑深度 15 m 差異甚大。
3. 依 Bollaert 之分析方式，在集集堰受到卡玫基颱風($Q_{\max} = 10,906 \text{ cms}$)作用，沖刷坑需達 23 m 深才能穩定，於現地沖刷坑深度 3 m 的情況下仍可抽離邊長 0.65 m 的塊體，與現況相較，預測值似過大。
4. 依 Bollaert 之分析方法，在義興壩受到 $Q_{\max} = 8,527 \text{ cms}$ 作用下，60 年與 90 年的沖刷坑的地形條件仍有下刷的潛能，與實際狀況相符。97 年的分析結果顯示最大可抽離的塊體尺寸邊長為 1.4 m，現地也確有看到尺寸相近之岩塊，目前現地岩體節理間距約為 1.6 m 及 0.5 m，沖刷應已趨向較為穩定的狀況。

就本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，明年度可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，尚能符合歷年沖刷量測資料變化的趨勢，未來仍須針對其分析概念及參數選用方式進一步研究。

綜合本計畫現地觀察的沖刷機制以及國外局部沖刷的評估方式，提出兩者差異之處及原因分析如下：

1. 一般大壩溢洪道之水流常係自由溢流方式，初始流速主要受重力及水位高度影響；而攔河堰因位處河川上，初始流速除重力外，尚有上游流速之影響。
2. 就一般攔河堰之流況而言，因高程相對有限使重力之影響變小，而呈現與河床岩盤在高程方向上斜交之作用形態，這可能可以解釋攔河堰下游之沖刷坑深度多不明顯及明顯向下游呈低角度之坡面形態。
3. 對軟岩地區攔河堰沖刷坑不明顯之初步看法：
 - i. 因水流以斜交方式作用，使得沖刷坑局部垂直向下發展之動能較小，而以向下游發展之程度較大。
 - ii. 因無足夠之沖刷坑形成，使能量未能有效消能，向下游之高速水流意味著高剪力、高能量，因而令下游岩盤沿著弱面或弱帶以磨損方式形成流槽。
 - iii. 因軟岩抵抗乾濕循環能力不佳，深槽向兩側擴展之能力反而可能大於常時為水流淹沒之底部。

參考文獻

1. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110, (2008) "Sedimentation Engineering." Marcelo H. Garcia Eds, ASCE.
2. Akhmedov, T.H., (1988) "Calculation of the depth of scour in rock downstream of a spillway." International Water Power and Dam Construction, 40(12): 25-27.
3. Annandale, G.W., (1995) "ERODIBILITY." Journal of Hydraulic Research, 33(4): 471-494.
4. Annandale, G.W., (2006) "Scour technology." 430pp. McGraw Hill, New York.
5. Bollaert, E., (2002) "Transient water pressure in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact." Ph. D. thesis, Lausanne, EFPL.
6. Bollaert, E., and A. Schleiss (2003) "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.
7. Hsu, C.T. and Yeh, K.C. (2002), "Iterative explicit simulation of 1-D surges and dam-break flows." Int. J. for Numerical Methods in Fluids, 38, 647-675.
8. Lin, E.T., Hsu, C.T., and Yeh, K.C. (2005), "Depth-integrated modeling for aggradating/degrading mobile channel I model development", International Journal of Sediment Research.
9. Martins, R. (1973), "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.
10. Spurr, K.J.W., 1985. ENERGY APPROACH TO ESTIMATING

SCOUR DOWNSTREAM OF A LARGE DAM. *International Water Power and Dam Construction*, 37(7): 81-89.

11. Whipple, K.X., Hancock, G.S. and Anderson, R.S., 2000. River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. *Geological Society of America Bulletin*, 112(3): 490-503.
12. Wu, W., Wang, S.S.Y., and Jia, Y. (2000), "Nonuniform sediment transport in alluvial rivers." *J. Hydr. Res., IAHR*, 38(6), 427-434.
13. Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2004a), "Depth-averaged 2-D calculation of flow and sediment transport in curved channels," *Int. J. Sediment Res.*, 19(4), 241–257.
14. Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2004b), "Depth-averaged 2-D calculation of tidal flow, salinity and cohesive sediment transport in estuaries," *Intl. J. Sediment Res.*, 19(3), 172–190.
15. 石門水庫管理局(60年),「義興防砂壩加高工程」。
16. 台灣省水利局(80年),「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」。
17. 台灣省水利局規劃總隊(84年),「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)」。
18. 台灣省水利局規劃總隊(85年),「濁水溪水系治理規劃報告(濁水溪本流及支流東埔蚋溪)」。
19. 經濟部中央地質調查所(85年),「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-桃園」。
20. 經濟部中央地質調查所(88年),「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-國姓」。
21. 行政院公共工程委員會(89年),「跨河構造物防制沖刷技術手冊之

研 究」。

22. 經濟部中央地質調查所(89 年),「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-甲仙」。
23. 經濟部中央地質調查所(89 年),「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-東勢」。
24. 經濟部中央地質調查所(89 年),「五萬分之一台灣地質圖說明書圖幅-埔里」。
25. 經濟部水利署中水局(90 年),「石岡壩九二一震災損害及功能修復成果評估報告」。
26. 經濟部水利署北水局(90 年),「復興鄉義興電廠附近數值地形圖及河川橫斷面測繪成果」。
27. 經濟部水利署水利規劃試驗所(91 年),「濁水溪河槽水庫可行性規劃(一)-河道水理及輸砂分析」。
28. 經濟部水利署水利規劃試驗所(92 年),「大甲溪流域聯合整體治理規劃報告」。
29. 經濟部水利署北水局(92 年),「榮華大壩(含義興電廠)第二次整體安全檢查與評估報告」。
30. 行政院農委會水土保持局(92 年),「濁水溪流域聯合整體治理規劃報告」。
31. 經濟部水利署(94 年),「集集共同引水工程竣工報告」。
32. 經濟部水利署中區水資源局(94 年),「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」。
33. 經濟部水利署第二河川局(94 年),「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」。
34. 經濟部水利署第四河川局(95 年),「集集攔河堰下游段河道沖淤與治理策略研究」。

35. 經濟部水利署(95 年),「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」。
36. 經濟部水利署水利規劃試驗所(95 年),「八掌溪仁義潭下游沖刷河段治理方案之研析」。
37. 經濟部水利署第四河川局(96 年),「濁水溪常受損河段治理工法研究」。
38. 經濟部水利署中區水資源局(96 年),「集集堰泥砂觀測分析研究及觀測站建置」。
39. 經濟部水利署水利規劃試驗所(96 年),「九二一地震後濁水溪下游輸砂關係之研究(2/2)」。
40. 經濟部水利署中區水資源局(97 年),「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」。
41. 經濟部水利署北水局(97 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,地形測量報告」。
42. 經濟部水利署水利規劃試驗所(97-98 年),「大甲溪石岡壩下游河段河床穩定方案之研究(1/4-2/4)」。
43. 經濟部水利署水利規劃試驗所(97 年),「砂質河川深槽變遷對河防建造物安全影響之分析(1/2)」。
44. 經濟部水利署水利規劃試驗所(97 年),「水工結構物位於軟弱岩層沖刷機制探討」。
45. 經濟部水利署水利規劃試驗所(97 年),「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)」。
46. 經濟部水利署(97 年),「全台河川攔河堰現有功能評估及其存廢檢討」。
47. 經濟部水利署北水局(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,地質鑽探及試驗報告」。

48. 經濟部水利署中水局(98 年),「集集堰初次使用安全評估」第二次
期中報告,黎明工程顧問。
49. 經濟部水利署中水局(98 年),「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。

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

一、開會時間：98年5月21日上午11時

二、開會地點：水利規劃試驗所霧峰辦公區A棟4樓會議室

三、主持人：廖副所長培明

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	
1、Akhmedov 之沖蝕模型理論其結論為河床的沖蝕作用可能同時包含磨蝕和因雜流所導致之岩塊搬移行為。該理論運用於本研究的適用性為何？請詳述	Akhmedov 之沖蝕模型理論回顧整理於第貳章、三、(七)節內容中，評估方式乍看簡單易用，但必須在兩個重要基礎條件都成立下才可使用。對於岩盤沖刷阻抗而言，唯一參數為沖刷坑岩盤的摩擦角 ϕ ，可否廣泛應用於不同岩盤場址的評估仍不明確。對於台灣多數攔河堰而言，年輕之地質條件似乎多未能提供有效之束制而形成沖刷坑。
2、簡報中提及對水規所 2008 年所做水工結構物位於軟弱岩盤沖刷機制之探討，其結論有所保留，請簡述原因。	該報告中認為隆恩堰、集集堰、與竹山堰之沖刷機制均以溶蝕與磨損為主，並未針對岩體之塊體破壞運移行為加以說明。
3、本研究是否可輔以航拍資訊以利勾稽。	中水局於 96 年-97 年共進行了 4 次航拍及 DTM 製作，資料可應用於本計畫，若仍有不足之處可考慮購買農航所航拍資料。
委員 2	
1、請補充說明所選定之普查的	普查的八座攔河堰係依據本計畫

委託專業服務評選會議評選委員詢問題目及辦理情形

<p>八座攔河堰之選取基準為何？是否可就岩盤特性，河道特性，壩高等因素之一致性或獨特性進行初步篩選？</p>	<p>招標內容進行，其基本資料及沖刷問題整理如表 2-3，八座攔河堰均位於台灣西部，四座位於中新世地層四座位於上新-更新世地層，岩性均由砂岩、頁岩、及其互層所組成，部分有較高之含泥量，壩高介於 3~20 公尺，應可涵蓋多數之岩盤沖刷特性，若仍有不足之處，未來可就不同特性之攔河堰進行補充調查。</p>
<p>委員 3</p>	
<p>1、有關對於八座攔河堰之岩盤局部沖蝕特性如何做比較評估且如何檢討因護甲層破壞之影響？請補充說明。</p>	<p>沖蝕特性擬就沖蝕影響因素來進行比較歸納，包含岩性、水文特性、及沖蝕狀況等。本計畫將著重於岩盤沖刷之探討，而岩盤發生沖刷必然發生於護甲層失去保護能力之後，護甲層之破壞可由顆粒性材料之動床數模來進行。</p>
<p>2、本案集集攔河鑽孔取樣時鑽孔佈置之原則請扼要說明。</p>	<p>說明於第貳章、四、(五)節內容中，鑽探採樣主要針對攔河堰下游可能產生沖刷坑之岩層來進行。</p>
<p>委員 4</p>	
<p>1、岩盤之抗沖蝕能力研討是否選擇每次颱風前後之沖蝕情形做</p>	<p>颱風退去後本團對將至現場進行勘查，並於集集攔河堰進行簡易</p>

委託專業服務評選會議評選委員詢問題目及辦理情形	
比較？	之現場沖刷量測，提供計畫執行參考。
2、工作項目無測量，如何瞭解岩盤之沖蝕情形？	本計畫將採用攔河堰管理單位之測量資料進行分析，並輔以簡易之現地沖刷量測。
委員 5	
1、完好之攔河堰，並具有優良之消能設施，維持原設計之水文，地形邊界條件，本研究如何將岩盤沖刷，應用於營運操作措施提出規範？	岩盤沖刷評估探討對於完好之攔河堰並無迫切之需求，但岩盤沖刷發生的機制及預防策略可提供有用的營運操作參考。
委員 6	
1、請說明本計畫預期成果對岩盤沖刷之應用為何？	岩盤沖刷機制及沖刷坑深度評估為研擬沖刷穩定策略的重要基礎，並可提供新設攔河堰之選址、規劃、設計之參考。
委員 7	
1、攔河堰下游河道岩盤沖刷之原因主要係河道護甲層流失後，河道因水流作用造成岩盤弱面沖刷，然此河道岩盤下刷，近期部分學者提出係因剪裂帶所造成岩盤弱面，此建議本計畫亦應針對此提出相關研究。	剪裂帶為地層受到地殼活動影響而形成的破碎岩層集中區帶，其岩性通常比原始地層弱化許多，受到水流侵蝕的速率增大。惟攔河堰建造前均經過地質調查及選址工作，避開剪裂帶區域，所以該項因素一般並非攔河堰下游沖刷坑發展的重要影響因素。

委託專業服務評選會議評選委員詢問題目及辦理情形

2、有關結構物下游河道沖刷機制，近年來應有相關之研究(水利局)，建議應針對相關成果進行檢討與分析。

謝謝委員建議，本計畫將針對相關研究成果進行回顧。

工作執行計畫書審查意見及辦理情形

一、開會時間：98年7月6日下午2時

二、開會地點：水利規劃試驗所霧峰辦公區A棟4樓會議室

三、主持人：徐課長世定

工作執行計畫書審查意見及辦理情形	
逢甲大學水利系 廖教授清標	
1. 沖刷坑深度之推估方法中 Annandale、Spurr、Akhmedov 等三篇國外重要文獻，請列入參考文獻中。	遵照辦理，已補充於參考文獻。
2. 沖刷坑深度推估可能採用 Bollaert 及 Annandale 的方法，原因何在？建議引用這些公式所需的資料，一併調查蒐集。	採用原因說明於第陸章第一節，相關參數均已著手進行調查。
3. 攔河堰下游岩盤沖刷穩定策略，能否針對所調查的個案提出其建議方案。	沖刷穩定策略屬本計畫第二年度工作項目，將於期末報告中進一步說明。
台灣世曦工程顧問股份有限公司 張資深協理順忠	
1. 穩定策略：相對於河床顆粒材料及岩盤因應策略國外比較實例。	謝謝建議，後續將嘗試蒐集國內外文獻之相關研究。
2. 水文資料：應不限於流量資料之蒐集應包含水力特性及材料等(q.h.v)。	針對重點評估之集集攔河堰，將進行水力特性分析；至於其他攔河堰若有相關研究分析資料，亦將盡量納入蒐集。
3. 岩盤分類之依據及選用如是	岩盤分類一般係採用 ISRM 標

工作執行計畫書審查意見及辦理情形

<p>否以 ISRM 之岩體分類為主，應於本報告中提出。</p>	<p>準，但分類並不影響本計畫之評估分析。</p>
<p>陳委員義平</p>	
<p>1. 水利單位以往對河床沖刷大都著力在非凝聚性材料（礫石或砂），因之在水工結構物設施對下游岩體之沖刷，並未考慮造成攔河堰下游河道沖刷，雖做了許多結構物並未能有效之保護，本研究係針對岩盤材料沖刷，期望能提供水利單位做有效防護，並可提供未來規劃攔河設施期可能對下游河道沖擊，在規劃時能利用本計畫對下游岩盤沖刷穩定策略做未來工程佈置參考。</p>	<p>謝謝委員肯定本計畫研究內容。</p>
<p>2. 為了解在颱風期洪水對岩盤沖刷破壞情形，建議中水局本年度能配合對目前已沖刷嚴重河段在颱風過後做實地測量，以了解水力對河床岩盤沖刷情形，以供本研究對該採用模式參數之選定。</p>	<p>中水局已經提供本計畫許多寶貴資料，後續仍將持續查詢蒐集新測資料。</p>
<p>洪委員勝榮</p>	
<p>1. 河道內常因設置攔河堰而導</p>	<p>岩體性質若僅採用代表粒徑進行</p>

工作執行計畫書審查意見及辦理情形

<p>致河床沖刷、岩盤裸露之現象，然國外之探討均以河床材料代表粒徑如 d_{50}、d_{85}、d_{90} 等為探討沖刷坑深度之依據，其是否可代表各種岩盤之性質應予考慮？如何符合需求(實際)。</p>	<p>分析，其代表性並不足夠，本計畫將採用考量岩體特性之 Annandale et al.(1998) 以及 Bollaert(2002)兩種方式進行評估。</p>
<p>2. 台灣河川之護甲層均甚單薄，如何維持護甲層不被沖刷穩定亦應為考慮方向。</p>	<p>護甲層若可有效加以保護，則岩盤將不會裸露遭受侵蝕，第二年度之穩定策略工作項目中將針對此部分提出必要建議。</p>
<p>3. 各頻率流量之含砂量對沖刷坑之沖蝕影響如何？調查各攔河堰之水文資料亦一併調查。</p>	<p>水流之含砂量定性上而言將加劇沖蝕作用，唯其對於岩體沖刷上的定量分析方式目前仍未見於相關研究。</p>
<p>國立中興大學土木系 壽教授克堅(書面資料)</p>	
<p>1. 岩石河床沖刷除與岩石材料力學性質及水利特性相關，也與河相變遷趨勢及地殼變動(活斷層活動引起)相關。建議也將上、下游之河相，九二一地震之影響等納入考慮。</p>	<p>各攔河堰附近若有遭受九二一地震抬昇之影響，將提出說明，如集集攔河堰之影響說明於第貳章地形資料蒐集中。至於緩慢之地殼運動恐難於本計畫中工作項目中加以考慮。</p>
<p>2. 攔河堰下游岩盤抗沖蝕能力調查中有”沖蝕特性調查”，其調查方法未說明；是否含不同</p>	<p>本計畫沖蝕特性調查係針對沖刷現況及既有資料進行，現勘工作中僅進行必要之簡易量測，不進</p>

工作執行計畫書審查意見及辦理情形

<p>時期之斷面量測(共幾個量次),或會釘沖蝕釘監測?請說明。</p>	<p>行地形或斷面測量。洪水時局部沖刷之規模一般均大於沖刷釘可監測範圍,故暫不考慮採用。</p>
<p>3. “泥砂濃度”對河床沖刷影響大,對於水理分析之假設及律定很重要,是否已有數據或是將進行量測?請說明。</p>	<p>水流之含砂量定性上而言將加劇沖蝕作用,唯其對於岩體沖刷上的定量分析方式目前仍未見於相關研究。但在水理分析尚可加以考量。</p>
<p>4. 沖刷深度評估方法將於第一年做台灣適用性之探討,驗證將於何時進行?驗證用之案例及事件時間為何?是否會用計畫期間之數據?請說明。</p>	<p>適用性之探討主要將採用蒐集到的地形資料加以驗證,若計畫期間內有新測資料,亦可納入分析。</p>
<p>水利署 楊國賢</p>	
<p>1. 本計畫第一年度調查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性,其中包含石岡壩、集集攔河堰等,但於去(97)年度「水工結構物位於軟弱岩層沖刷機制之探討」中亦有,石岡壩與集集攔河堰之相關調查資料,本年度相較於去年度所蒐集的資料有何不同,如何整合去年度的研究成果,建請說明。</p>	<p>去(97)年度「水工結構物位於軟弱岩層沖刷機制之探討」計畫探討方向偏重於顆粒性材料的沖刷,並未及於岩盤材料的分析,與本計畫方向並不相同,但該計畫之研究成果可作為本計畫參考。</p>

工作執行計畫書審查意見及辦理情形

<p>2. 本計畫於文獻回顧中介紹幾種國外的研究方法，本研究擬採用的方法為何？因事涉後續實驗參數的確立，建議應盡早確定。</p>	<p>謝謝建議，採用方法之選定說明於第陸章內容中，相關參數亦已經著手調查收集。</p>
<p>3. 本計畫若有若干研究成果，對於普查8座攔河堰有何建議的改善方案，對於未來攔河堰設計及選址上有何建議，建議於第二年報告中呈現。</p>	<p>遵照辦理。</p>
<p>水利規劃試驗所 徐課長世定</p>	
<p>1. 簡報所示的顆粒性材料是沖刷材料還是被沖刷材料？請說明。</p>	<p>簡報所說明之顆粒性材料係屬於被沖刷材料。</p>
<p>2. 如何與本所相關河川沖刷研究議題做區分？</p>	<p>本計畫著重於攔河堰前跌水所造成之岩盤沖刷，與河道岩盤沖刷並不互相重疊。</p>
<p>3. 鑽孔佈置左右2孔的用意？預計可以得到幾種岩體？</p>	<p>說明於本報告第肆章第三節內容，可採集到砂頁岩互層及層狀砂岩等集集堰堰址主要岩層。</p>
<p>4. P.9、二、資料蒐集與整理，應該了解河床材料，目前收集中未見上游河床之河床料調查。</p>	<p>遵照辦理。</p>
<p>5. P.15 相關設計資料如下，1.河道深槽…之固定堰，請說明。</p>	<p>遵照辦理，已就文字誤植處進行修正。</p>

工作執行計畫書審查意見及辦理情形	
6. P.15、1.第二行”27.7 公尺”與第七行”27.7 公尺”，是否有誤。	遵照辦理，已就文字誤植處進行修正。
7. P.15、(三)義興壩，第一行，位於台七線下邊坡…，請說明。	遵照辦理，已就文字誤植處進行修正。
8. P.15 義興壩，未來應該針對所調查的攔河堰做現地的地質剖面。	進行沖刷評估工作時，將就地質上必要說明處提出。
9. P.18、表 2-6，請說明國際岩石力學學會劃分標準(卓蘭層、壩址…)	岩盤分類一般係採用 ISRM 標準。
10. P.19 第一行，根據中水局(89 年)，是否應有更新資料。	遵照辦理，更新至 94 年治理規劃資料。
11. P.30、第三行，沖刷坑若逐漸向上游…兩岸邊坡之安定，朝上游或左右兩岸是受何影響？二者機制是否不同？	沖刷坑如何發展為本計畫主要目的之一，後續將就研究成果提出說明。
12. P.31、(三)，第七行，(2003)”也對中”也對各種方式中考量…，請刪除。	遵照辦理，刪除多餘敘述。
13. P.68、(五)鑽探採樣及現地試驗，是否對於什麼東西去磨損岩體亦應一併調查。	河床質資料將視分析需求進行補充資料蒐集或調查。
水利規劃試驗所 簡副研究員煒烈	
1. 請國立交通大學研究團隊確定期中簡報時間為 98 年 8 月	遵照辦理，確認為 98 年 8 月 31 日。

工作執行計畫書審查意見及辦理情形	
31 日，時間是否恰當。	
2. 現地鑽探取樣試驗，請研究團隊提鑽探計畫書再由本所函轉四河局及中水局。	遵照辦理，感謝提供協助。
3. 依目前大斷面與地形資料如何來量測沖刷？	集集攔河堰 96 及 97 年度共進行 4 次數值地形測量，透過地形分析可得知其堰前沖刷變化。
4. 沖刷之機制如何分類？如依岩體的脆性及疲勞破壞，顆粒撞擊及泥砂磨蝕及水流等。	說明於第五章文獻探討內容中。
5. 普查 8 座攔河堰之勘查如何顯現在報告書內？是否依堰名稱或總合論述？	依據各攔河堰進行說明，最後並進行歸納，如本報告第參章內容說明。
主席結論	
1. 工作執行計畫書內容及期初簡報原則同意。	
2. 各位委員意見，請在計畫契約範圍內納入考量。	
3. 期中報告書請在 8 月 31 日前提送本所。	
4. 鑽探工作請依契約內規定辦理。	

期中報告審查意見及辦理情形

一、開會時間：98年9月9日上午9時30分

二、開會地點：水利規劃試驗所舊正辦公區大地課2樓會議室

三、主持人：廖副所長培明

期中報告審查意見及辦理情形	
中興大學土木工程系 壽教授克堅	
1、P2-14 中所述河道高程變化“似有矛盾”之原因，是否與附近施工或上游新生崩坍有關，請再加以探討。	遵照辦理，修正說明於 P2-17，推測應與 93 年艾利颱風帶來大量土石淤積相關。
2、P2-37，圖 2-41，地質圖品質請改良（不清楚）。	遵照辦理，重繪如圖 2-43、圖 2-44。
3、抗沖蝕能力評分中：	
(1). 調查點如何選取請說明，並請將調查點標示於平面圖，以了解與局部沖刷之關係。	遵照辦理，說明於 P3-1，若堰前確實難以進行調查時，則於堰下游測相同岩性處進行調查。
(2). 單一堰址之 K_b 值差異性很大，為 K_h 值之決定性因子，因此調查點之分布及總點數很重要，如何決定之宜採一致之標準。	本計畫中 K_h 值調查均採一致之調查方式，現場計算，內業檢核，矛盾不清之處在至現場檢核釐清，以避免調查誤差。
(3). K_b 之量測是否考慮方向性（地層方向及水流方向等），請說明之。	請參閱第陸章、二、(二)節內容說明。
(4). J_r ， J_a ， J_s 在現地如何量測，請說明。	請參閱第陸章、二、(二)節內容說明。
(5). 深度如何考慮（不同深度 K_h	請參閱第肆章、五節內容說明。

期中報告審查意見及辦理情形

值可能不同)，請說明。	
4、Bollaert(2002)， Bollaert(2003)是否為不同文獻？Annandale (2006)文獻請加上。	文獻混淆部分已經修正，Bollaert(2002)及 Annandale (2006)文獻已經加上，Bollaert(2003)應為 Bollaert and Schleiss(2003)。
5、抗沖蝕評估模式在台灣之適用性，請再加強說明。	請參閱第陸章之分析與說明。
洪委員勝榮	
1、短時間內蒐集八座攔河堰之基本資料並作初步的分析，工作團隊的工作精神值得嘉許。	謝謝委員嘉許。
2、尚有二孔鑽探未施作，現在還是汛期對於工作人員及機具安全，應多注意，是否檢討鑽孔位置？	鑽探工作已經依據檢送核定之鑽探工作計畫書完成，感謝委員關心。
3、台灣之攔河堰多興建在麓山帶之軟弱岩盤之上，而所推介的 Annandale 及 Bollaert 二氏之推算公式，其資料來自壩址岩石基礎坑沖蝕能力良好及硬岩材料與台灣攔河堰常見之地質，條件有差異，適用在台灣之攔河堰沖刷坑深度之推估，是否適用值得檢討，邊界條件	請參閱第陸章之分析與說明，Annandale 及 Bollaert 二氏之推算公式依據目前評估結果，尚無法適用於台灣區域。

期中報告審查意見及辦理情形

如何設定？	
4、台灣之攔河堰設置因受自然條件及實際需要，無法選擇很理想之設置地點，然可否用工法克服減低沖刷坑之浸蝕，如加長消能池或復流堰之形式等，宜值得檢討。	本年度工作首要在調查瞭解攔河堰局部沖蝕機制，建議於第二年度中再依據沖蝕機制提出策略建議。
成功大學資源工程系 李教授振誥 (書面意見)	
1、請將符號 UCS、 K_b 、 K_d 、 J_s 與 K_h (表 3-1 至表 3-6) 先定義，加以說明，並對岩盤沖蝕特性中，岩盤之描述依 ISRM 之岩體描述方式描述。	遵照辦理，補充註記於表 3-1~表 3-7。
2、請將表 6-1 沖蝕坑深度評估方式之比較，詳加討論，以利了解其內容與各方式主要內容項目。	遵照辦理，表 6-1 之參數及方式分類概要說明於 P6-1~P6-2，第陸章、二節內容就重要評估方式作說明。
3、第 6-4 頁內主要公式，以沖積材料為主，請說明如何應用於岩盤內之沖蝕深度？	謝謝委員指正，沖積材料為主之評估方式僅作說明，並不應用於岩盤材料之評估。
4、請比較第 6-5 頁之抗沖蝕指數 K_h 與第 6-14 頁之能量沖蝕指數 ESI 之異同及相關性。	抗沖蝕指數 K_h 與能量沖蝕指數 ESI 並相似之模式，共同點僅在於採用能量觀點。
5、目前本計畫 8 座攔河堰之岩盤特性及建置堰址特性皆不盡相	謝謝委員寶貴建議。

期中報告審查意見及辦理情形

<p>同，應用沖蝕公式或抗沖蝕能力公式來評估，應有不同考慮，如何分辨是地層因素，或是地形與水文（水流）為主，請於預先加以規劃考量。</p>	
<p>水利規劃試驗所灌排課 徐正工程司必杰</p>	
<p>1、第貳章，資料蒐集與整理，各攔河堰水文資料蒐集，有些僅有月平均流量或僅有重現期洪水量，建議能補充蒐集使兩者都有，另部分重現期洪水量資料引用之報告年代較早，建議能蒐集較新的資料，如甲仙攔河堰（可找旗山溪上游段規劃報告）、觸口堰等。</p>	<p>遵照辦理，第貳章均已經蒐集較新資料補充。</p>
<p>2、第參章，各堰之岩盤沖蝕特性調查表，如 P3-8 頁、表 3-1，建議補充各欄位的中文名稱以利了解。</p>	<p>遵照辦理，補充註記於表 3-1～表 3-7。</p>
<p>3、P5-9 頁、表 5-1，水力條件以「壩高」×「單位壩長洪水量」應屬合理，但就單位壩長洪水量以 100 年重現期洪水量為代表是否合宜呢？若要以此判定是否形成沖刷的水力條件，建</p>	<p>表 5-1 僅作為初步比較探討，已經刪除。</p>

期中報告審查意見及辦理情形

<p>議用壩完成後曾發生之最大的洪水量的代替是否較為合理。</p>	
<p>4、集集攔河堰的調查，除本計畫的鑽探採樣外，建議是否可以補充蒐集在集集堰興建前所做的相關鑽探採樣資料，本次規劃的採樣位置是否先與民國 80 年水利局採樣位置比較過再決定。</p>	<p>集集攔河堰堰址附近地質調查資料已經補充蒐集水利局(80 年)及中水局(98 年)並加以整理。</p>
<p>水利規劃試驗所大地課 徐課長世定</p>	
<p>1、現地勘查成果討論岩體抗沖排序、方式意義為何？</p>	<p>表 5-1 僅作為初步比較探討，已經刪除。</p>
<p>2、由現地調查感覺，攔河堰上游都有顆粒性材料，是否也是沖蝕的主因之一。</p>	<p>為釐清主要沖蝕機制，建議初步先確立評估方式，後續再考量納入河床質(含砂水流)影響。</p>
<p>3、岩盤沖刷是否可以不討論上游河床質顆粒特性。</p>	<p>初步暫不討論，先確立評估方式，後續再考量其影響。</p>
<p>4、在了解國外公式的同時，是否可以收集國外沖蝕河川的情形，國外案例是否有類似台灣的狀況，可能更能了解各種模式的背景。</p>	<p>目前之文獻蒐集尚未發現類似案例，若有相關文獻再行納入。</p>
<p>5、P2-1，(一)攔河堰概述，後村堰何時完工？</p>	<p>後村堰於民國 67 年發包，至民國 72 年全部完成，補充說明於第貳章第一節。</p>

期中報告審查意見及辦理情形	
6、P2-3，圖 2-1，請說明。	遵照辦理，補充說明於 P2-3。
7、P2-7，圖 2-6，完工後是否有洪水事件？	72 年之最大流量紀錄僅 1,010cms，遠小於 Q_5 ，應不屬於洪水。
8、P2-14，第八行，義興壩 92 年，請修正為 90 年。	遵照辦理，修正於 P2-17。
9、P2-59，圖 2-68，是否可放入 98 年照片。	遵照辦理，更換 96 年圖資為 98 年，圖 2-75。
水利署 楊工程司國賢	
1、本報告建議補充莫拉克颱風過後，各攔河堰之情況並評析之。	受莫拉克颱風影響之觸口堰、東口堰、甲仙堰均已針對影響狀況說明於第參章對應小節中。
2、P2-59，第 2 章第 9 節中，只有引用工程會 89 年對台灣地區 25 座取水設施跨河構造物調查結果，未見承辦單位的評析，建議請補充說明。	遵照辦理，補充該表之說明於 P.2-72。
3、表 3-1，表頭各英文縮寫代表何意，建議加註註解或中英並列表示，另調查點 0~12 未見於圖中表示，圖 3-27 請表示日期。	遵照辦理，補充註記於表 3-1~表 3-7。調查點 0~12 標示於圖 3-8 中。圖 3-27 拍照日期為 98/8/11。
4、本計畫重點係沖刷之評估機制，在第 6 章中評估國外學者公式的結果均要再探討釐清，但可行的機制為何宜，儘速提	遵照辦理，詳閱第伍、陸章內容。

期中報告審查意見及辦理情形	
出討論確認，以利後續研究執行。	
5、報告中有關“本團隊”之字眼，建議刪除。	遵照辦理，“本團隊”之文字均已刪除改寫。
6、圖 3-43，看不出來其岩性種類，建議補充說明。	謝謝委員指正，該圖為現場露頭，說明於 P3-34。
水利規劃試驗所大地課 簡副研究員煒烈	
1、P2-25 圖 2-27~圖 2-30 說明... 靜水池前均有沖刷坑、堰前階段梯式消能工前有橫向沖刷坑，如何來判讀？	藉由航空照片立體對方式加以判讀。
2、第參章普查西部重要攔河堰之岩盤局部沖蝕特性：提到岩石強度，是否可列表說明單壓強度弱至強之判別。	國際岩石力學協會(ISRM)依據完整岩石的單軸抗壓強度將大地材料加以分類，單壓強度介於 0.5 MPa~25 MPa 之間的大地材料可歸類於軟岩。
3、表 3-1~表 3-6 表內調查點無法顯現位置，是否可部份放大？	遵照辦理，已經加強對應位置圖之清晰程度。
4、第五章攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力初步探討要多著墨研究，因 99 年度對於沖刷深度評估方法及穩定策略有延伸關係。	遵照辦理，詳閱第伍、陸章內容。
5、建議第陸章另闢一節來討論沖刷評估方式在台灣之適用性。	遵照辦理，詳閱第陸章、五節內容

期中報告審查意見及辦理情形	
6、研究團隊請在 98 年 11 月 1 日前提正式報告書初稿。	遵照辦理。
7、88 水災造成攔河堰損壞情形，是否可驗證本計畫之部份內容	甲仙堰與集集堰之堰前均有顯著沖刷，第參章內容中有相關說明。
8、抗沖蝕指數值從 0.27~841 其指數差距大其意義如何？	抗沖蝕指數可依據 Annandale 建議方式轉換為流功。
主席結論	
1、本次期中報告書審查及期中簡報原則認可。	
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，並在期末報告中回應。	
3、8 個攔河堰上下游地質及河床質概況請詳加研討分析。	
4、選取鑽探位置及鑽探目的請說明，鑽探期間請注意安全。	
5、水文資料請補實並要一致性。	
6、相關基本資料宜更新至最近較宜。	
7、計算之參數定義請說明。	
8、P5-9 表 5-1 攔河堰普查結果比較表其表達方式請修正。	
9、參考國外之局部沖刷評估公式在台灣其適用性如何？	
10、Kh 表達方式，宜依 8 個攔河堰研究成果來評析並針對下年度對石岡壩確認研究方向。	
11、水利相關條件如何應用在本計畫研判上？如完成後之最大洪水量及發生年份等。	
12、第貳章資料蒐集各堰之水文資料請依石岡壩水文資料來整理。	

期末報告審查意見及辦理情形

一、開會時間：98年11月15日下午16時0分

二、開會地點：水利規劃試驗所舊正辦公區大地課2樓會議室

三、主持人：徐課長世定

期末報告審查意見及辦理情形	
(一) 陳委員義平	
1、本計畫今年度調查八個攔河堰含蓋台灣西部不同類型之河川各攔河堰下游河道岩盤沖蝕情形；並蒐集相關資料（含堰址原始地形、地質、地質位態、堰壩形式、壩高、壩長、消能設施、河床質等）相當完整，惟對於專業名稱單位（如地質位態 N16E/8N，單壓強度 MPa 等）建議加中文註解，讓非專業人員了解。	已將本報告採用之地質位態表示方式標示於 XXIII、單壓強度等單位詳列 P.2-26。
2、有關集集堰下游岩盤之沖蝕能力調查，本年度有鑽孔二處，其中一處做孔內攝影，並對取樣之岩石，做各種物理試驗，由試驗結果堰前之層狀砂岩近地表沖蝕指數 K_h 值，砂頁岩互層採 8、地表下未受解壓節理之層狀砂岩採 840，砂頁岩互層採 41，本項指數有無單位，其意義如何，是否做為評估岩石沖刷之參數。	K_h 值為評估岩石抗沖蝕能力之無因次單位，Annandale 利用實際觀測資料，回歸沖蝕發生時之 K_h 值與對應沖蝕能量之關係， K_h 值之詳細參數說明請參閱第陸章、二、(二)內容。

期末報告審查意見及辦理情形

<p>3、對於岩盤沖刷評估，本報告採用 Annandle 及 Bollaert 二種方式，報告中說明此兩種方式，均難以適用於預測台灣之攔河堰下游岩盤之沖刷狀況，台灣以往對攔河堰之規劃著重於堰址條件（地質、地形）、取水功能、消能設施，對於下游河道沖刷規劃設計階段常忽略，故常因洪水沖蝕致使壩體受損，甚至沖毀，期望本計畫第二年度能建立一套適合台灣攔河堰下游岩盤沖刷深度之方式，讓未來在規劃設計階段即能探討此種沖刷之問題，研擬對策。</p>	<p>謝謝委員建議，第二年度工作項目包含探討攔河堰下游岩盤沖刷深度評估方法及穩定策略，將於該工作項目中提出建議。</p>
<p>(二) 洪委員勝榮</p>	
<p>1、短時間內將八座攔河堰之地質、地形、水文及相關研究文獻蒐集，並做深入分析，對下年度工作助益很大，團隊之工作精神值得嘉許。</p>	<p>感謝委員鼓勵。</p>
<p>2、由資料蒐集及比較岩體之性質砂頁岩層之抗沖蝕能力普遍偏低，這是否為以後選擇堰址應考慮之條件，又後村堰及集集攔河堰之抗沖蝕能力指數與其他攔河堰比較均甚低。</p>	<p>1. 岩層抗沖蝕能力應為選擇堰址之考慮因素之一。 2. 後村堰及集集攔河堰的砂頁岩互層層厚較小，且在風化後節理間距較小，因此抗沖蝕能力指數相對較低。</p>

期末報告審查意見及辦理情形

<p>3、以 Annandale 及 Bollaert 來分析沖刷之深度，用集集攔河堰及義興堰兩種不同岩性作分析，比較其他攔河堰之調查分析如何？</p>	<p>目前各攔河堰的岩性皆有調查，但大多缺乏足夠之流量資料及沖刷坑演進地形資料，如有足夠資料即可一起納入分析，明年度將納入模擬石岡壩的案例以進行比較。</p>
<p>(三) 國立成功大學 (資源工程系) 李教授振誥</p>	
<p>1、建議計畫應先簡略收集國外有關沖蝕 (或沖刷) 治理策略之原由。</p>	<p>此為明年度預定工作，將於明年度蒐集及整理。</p>
<p>2、目前已對 8 個案例進行分類檢討國外已有模式來預測沖蝕特性，然而建議對國外已有模式請先討論各模式之假設與應用限制，進行討論，再討論國內案例物理特性，再評估其應用合理性。</p>	<p>本年度以於第陸章、二，就國外已有模式的發展條件作說明，第二年度將繼續就應用限制加以探討與評估。</p>
<p>3、地質條件 (特別互層情形與斜交情形) 與河道結構物位置引致排水方向，對河道沖刷引致原因，未來請以探討。</p>	<p>互層的地質條件會造成河道呈現槽溝型下切，與結構物(水流)的斜交情形對於沖刷機制確實有所影響，擬於第二年度納入討論。</p>
<p>4、建議未來請討論結構物 (或固床工) 沖蝕指數與岩層沖蝕指數高低差異，並比較兩者介面水理情形，再討論介面間差異沖蝕。</p>	<p>本計畫之重點在於討論攔河堰下游言盤之沖刷機制與發展，因此關心重點乃在於岩盤之抗沖蝕指數。水理分析則已盡量合理考量攔河堰與固床工所造成之地形變化，以便正確計算得攔河堰下游之水理條件。</p>

期末報告審查意見及辦理情形

(四) 台灣世曦工程顧問股份有限公司 張資深協理順忠

1、採用岩盤抗沖蝕指數來描述軟弱岩河床抗沖蝕能力，方向應屬正確。報告中評估結果 Annandale 等國外方式均難以適用國內實況，P.6-18 僅以集集攔河堰及義興壩引用國外方式求得岩盤容許沖蝕能量，如何難以適用於國內，請予敘明。

根據更進一步分析計算，Annandale 與 Bollaert 的評估方法各有其適用性，已於第陸章、五內容說明，唯後續仍須針對各方式之適用條件進行研究探討。

2、P.6-19 之表 6-7 沖蝕能量與岩盤容許沖蝕能量 P_c 值為 5.6kW/m^2 如何計算，請予說明，P.5-24 表 5-2 抗沖蝕能力指數之相關。

感謝委員提醒，已補充至 P.6-5 之說明。

3、沖刷機制初步歸納為三種沖刷模型，為能處理後續之策略建議，是否可參考 NATM 新奧工法以岩體強度、節理、RQD (大於十公分之完整岩心總長度)、含水量等因素將岩體分類，並據以決定開挖隧道時在第幾類岩體分類所須用之支撐、噴凝土厚度及數量。運用於本計畫中則建議參考 P.5-26 以岩體強度、厚度、節理等地層岩性及流量、流速等水流特性做出適用於本國之岩盤沖刷分類。

NATM 新奧工法一般用於隧道之開挖工法與支撐初步選擇。擬試圖仿效運用抗沖蝕指數預測岩盤沖刷型態分類，因為無法完全考量現地條件，其可行性恐怕不高。本計畫於第一年度探討攔河堰下游沖刷坑之沖刷機制，及岩盤抗沖蝕能力初步探討，第二年度將探討岩盤沖蝕深度評估方法及下游岩盤沖蝕穩定策略。待策略確定之後，再行於後續相關計畫進行建議工法之研究。

期末報告審查意見及辦理情形	
4、孔內聲波造影儀顯示之節理面及層面影像示意圖請補充說明其與現地是否一致。	感謝委員提醒，現地與孔內造影結果一致，已補充圖文至 P.4-15 中
(五) 國立中興大學(土木工程系) 壽教授克堅(書面意見)	
1、地質圖引用「中央地質調查所 1/50,000 地質圖」，請列於文獻並註明圖幅。	遵照辦理，已於文獻中增列地質圖幅。
2、圖 4-28、4-29 及表 4-10 使用之 K_h 未定義即出現，請先定義說明之。	感謝委員提醒，已於 P.4-23 加註， K_h 之定義說明於第陸章、二 Annandale 岩盤沖刷評估方式。
3、請列表說明產生圖 4-28、4-29 及表 4-10 使用之不同深度 M_s 、 K_d 、及 J_s 。	感謝委員提醒，已於 P.4-27~P.4-30 說明。
4、結論(六)指出 Annandale 及 Bollaert 方法均不適用台灣之攔河堰分析；請速提出將如何進行後續之評估分析。	根據更進一步分析計算，Annandale 與 Bollaert 的評估方法各有其適用性，已於第陸章、五內容說明，唯第二年後續研究仍須針對各方式之適用條件進行研究探討。
5、針對觸口攔河堰、曾文東口攔河堰及甲仙攔河堰受莫拉克颱風之損害或沖刷，建議增加定量之量測以利後續之分析。	限於經費與研究內容，本計畫以收集既有之測量資料為主。集集攔河堰、石岡壩及觸口攔河堰之資料相對較多，其他攔河堰若有具體資料，本計畫亦將盡可能收集。
(六) 本所大地工程試驗課 徐課長世定	
1、建議事項中，第一點，請說明大斷面測量所需之範圍。	若要瞭解攔河堰沖刷坑地形演化趨勢，建議視各攔河堰前沖刷特性，

期末報告審查意見及辦理情形

	於堰前至堰下游 50~150 m 加測 2~3 斷面。
2、對團隊引用之模式時之各項因素數據的選擇是否合理性作評估。	本計畫岩石力學性參數或資料均由室內試驗或過去文獻蒐集而得，節理間距則由現場觀測而得，水理參數則由 CCHE 配合現地地形及水文資料模擬。
3、研究成果是否可以預測，預定設置攔河堰可能會發生之可能沖刷情形。	若有攔河堰的設計斷面及河道地形資料，由水理分析獲得水文參數，若再加上現地岩體抗沖蝕能力評估並由岩石力學試驗掌握所需參數，則應能概估攔河堰可能發生沖刷之趨勢。
(七) 本所大地工程試驗課 林研究員峰瑋	
1、表摘-1、表 2-1 沖刷成因多僅是現象非真正的成因。	感謝委員建議，已將沖蝕成因刪除。
2、P.2-3 圖 2-1、圖 2-2 文敘與 P.2-4 圖之次序倒置。	感謝委員，誤植處已更正。
3、圖 2-15、圖 4-11 請補鑽孔孔號，並增清晰度。	感謝委員，孔號已補充於圖中。
4、圖 2-19、2-21、2-36、2-37、2-47、2-61、2-62、2-72、3-11、3-14 清晰度不足；圖 2-65、圖 2-68、圖 2-69 圖號誤植。	感謝委員，誤植處已更正。
5、第貳章自 2-67 頁起頁碼及圖幅編號	感謝委員，誤植處已更正。

期末報告審查意見及辦理情形

多處誤植。	
6、圖 3-10、圖 3-22 岩性種類示意圖？如何從照片研判岩性種類？	圖標題已改為”岩層露頭照片”，岩層並標示於圖中。
7、第 2-40 頁第 2 段文敘，以 RQD 作岩層分類，是否妥當。	感謝委員提醒，該段為引用水利局(80 年)計畫之文敘，本計畫岩層分類採用表 2-13。
8、圖 2-57、圖 2-67 圖例位置不妥，並改善圖面清晰度，圖 2-73 請補圖例。	感謝委員提醒，已做更正。
9、第 3-3 頁第 2 段文敘...與水流方向幾近水平？	感謝委員提醒，此為文敘誤植，已改為與水流方向”平行”。
10、第 3-16 頁(四)最後 1 行是否遺漏哪些文敘？	感謝委員提醒，原文誤植缺遺之處已補上。
11、第 3-19 頁圖 3-21 (b) 堰體為厚層砂岩偶夾頁岩？	感謝委員提醒，誤植處已更正。
12、第伍、陸章，前言...目的主要在探討...文敘不妥。	感謝委員提醒，文敘已做修正。
13、第 6-26 頁，五、編輯內容是否遺漏了 1.與 2.？	感謝委員提醒，誤植處已更正。
(八) 本所大地工程試驗課 簡副研究員煒烈	
1、摘要六、攔河堰下游岩盤沖刷機制及抗沖蝕能力初步探討圖摘-2~圖摘-4 請改一致性較妥(P.5-29 圖 5-23~圖 5-25 圖示較佳)。	感謝委員建議，已將沖刷機制名稱改為一致。
2、摘要七，最後一段對應建議(三) ...均難正確評估台灣攔河堰前之局部	根據更進一步分析計算，Annandale 與 Bollaert 的評估方法各有其適用

期末報告審查意見及辦理情形	
沖刷狀況...。 在履約標的(五)、(六)是否定的， 可否請敘述下年度評估之方向。	性，已於第陸章、五內容說明，唯 後續仍須針對各方式之適用條件進 行研究探討。
3、建議(一)增加河道測量之次數與 斷面間隔有何意義？	若要瞭解攔河堰沖刷坑地形演化趨 勢，建議視各攔河堰前沖刷特性， 於堰前至堰下游 50~150 m 加測 2 ~3 斷面。
4、結論(三)沖蝕能力之主控因素， 請列表說明。	感謝委員提醒，以列表至表摘-3。
5、P.3-1 岩石強度以史密特錘量測其準 確度如何？	感謝委員建議，史密特錘量測強度 與室內試驗單壓強度相近。
6、P.4-37 表 4-11、表 5-2 沖刷坑抗沖蝕 能力建議值，請詳加說明。	感謝委員提醒，已於 P.4-27~P.4-30 說明。
7、東口攔河堰目前並無明顯沖刷問題 是否與有沖蝕之攔河堰比較。	東口攔河堰卵礫石覆蓋，堰體下游 側未出現岩盤沖刷行為。
8、會議地點因委員交通方便性改在舊 正辦公區。	遵照辦理。
主席結論	
1、本次期末報告書審查及期末簡報原則認可。	
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 報告中回應。	
3、本次期末報告書修正本 3 本，請在 11 月 30 日前函送本所審查。	

附錄二 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：

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho h} \left(\frac{\partial h \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}}{\partial y} \right) - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + f_{Cor} v \quad (\text{附 2-1})$$

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

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_{xy} 、 τ_{yx} 、 τ_{yy} 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：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (\text{附 2-3})$$

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， $\partial \zeta / \partial t$ 項不為零且應考慮之。

式(附 2-1)、(附 2-2)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：

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

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：

$$\nu_i = A_{xy} C_s \kappa u_* h \quad (\text{附 2-5})$$

式中 u_* 為剪力速度， κ 為馮卡門係數(0.41)， h 為水深， A_{xy} 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：

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

$$\text{式中，} \bar{l} = \frac{1}{h} \int \kappa z \sqrt{\left(1 - \frac{z}{h} \right)} dz = \kappa h \int_0^1 \zeta \sqrt{(1-\zeta)} d\zeta \approx 0.267 \kappa h \quad (\text{附 2-7})$$

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 2-6)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：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa z} \quad (\text{附 2-8})$$

將式(附 2-8)積分，可得水深垂直梯度之積分，可表為：

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{h} \int \frac{\partial U}{\partial z} dz = \frac{u_*}{h \kappa} \int_{z_0}^z \frac{1}{z} dz = C_m \frac{u_*}{h \kappa} \quad (\text{附 2-9})$$

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 2-6)取代式(附 2-5)。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：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u \frac{\partial k}{\partial x} + v \frac{\partial k}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right] = P - \varepsilon + P_{kV} \quad (\text{附 2-10})$$

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

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

$$P_{kV} = C_k \frac{U_*^3}{h}, \quad P_{\varepsilon V} = C_\varepsilon \frac{U_*^4}{h^2} \quad (\text{附 2-13})$$

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

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：

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{附 2-15})$$

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：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(hC_k)}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_k)}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_k)}{\partial y} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[h \left(\varepsilon_s \frac{\partial C_k}{\partial x} + D_{sxk} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[h \left(\varepsilon_s \frac{\partial C_k}{\partial y} + D_{syk} \right) \right] + \alpha_d \omega_{sk} (C_{*k} - C_k) \end{aligned} \quad (\text{附 2-16})$$

己去看...

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_{sk} 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：

$$\frac{\partial(\delta\bar{c}_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_{bx}q_{bk})}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha_{by}q_{bk})}{\partial y} + \frac{1}{L}(q_{bk} - q_{b*k}) = 0 \quad (\text{附 2-17})$$

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 $L_s = uh/\alpha\omega_{sk}$ ，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_{sk} 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：

$$(1 - p'_m) \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k = \alpha\omega_{sk}(C_k - C_{*k}) + \frac{1}{L}(q_{bk} - q_{b*k}) \quad (\text{附 2-18})$$

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:

$$C_{*k} = p_{bk} C_k^*; \quad q_{b*k} = p_{bk} q_{bk}^* \quad (\text{附 2-19})$$

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, 此層與移動之泥砂直接參與交換, 在混合層中之粒徑分佈可以下式計算:

$$\frac{\partial(\delta_m p_{bk})}{\partial t} = \left(\frac{\partial z_b}{\partial t} \right)_k + p_{bk}^* \left(\frac{\partial \delta_m}{\partial t} - \frac{\partial z_b}{\partial t} \right) \quad (\text{附 2-20})$$

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流量、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 2-1 為 CCHE2D 模式功能與限制之彙整。

附表 2-1 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 ● 考慮凝聚性沈滓 ● 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

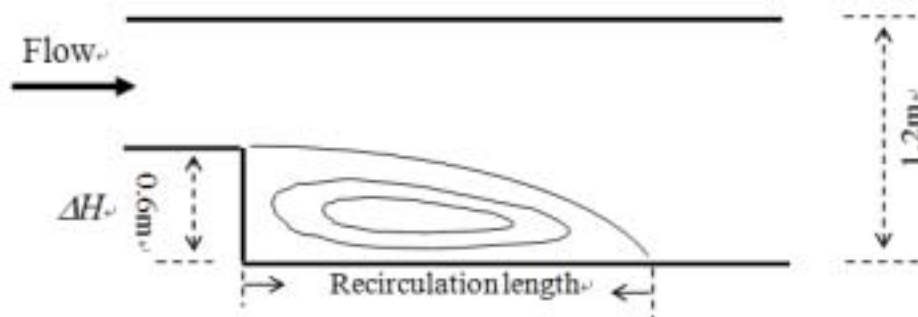
CCHE2D 發展至今，曾採用許多實驗室與現場案例進行模式之檢定驗證，其部分實驗案例經過美國 ASCE 與 EWRI 工作委員會挑選，皆為具有嚴謹假設與可信度之代表案例，將其彙整如附表 2-2 所示，並進行案例之說明。

附表 2-2 CCHE2D 代表性之檢定驗證案例

實驗案例	現場案例
<ul style="list-style-type: none"> ● 突闊渠槽流場模擬 ● 正弦彎道流場模擬 ● 超亞混合流模擬 ● Yen & Lee(1995)彎道動床模型試驗 	<ul style="list-style-type: none"> ● 德國內卡河南德水庫模擬 ● 中國贛江萬安水庫下游河道丁壩模擬 ● 中國黃河下游輸砂模擬 ● 集集攔河堰上下游河段模擬

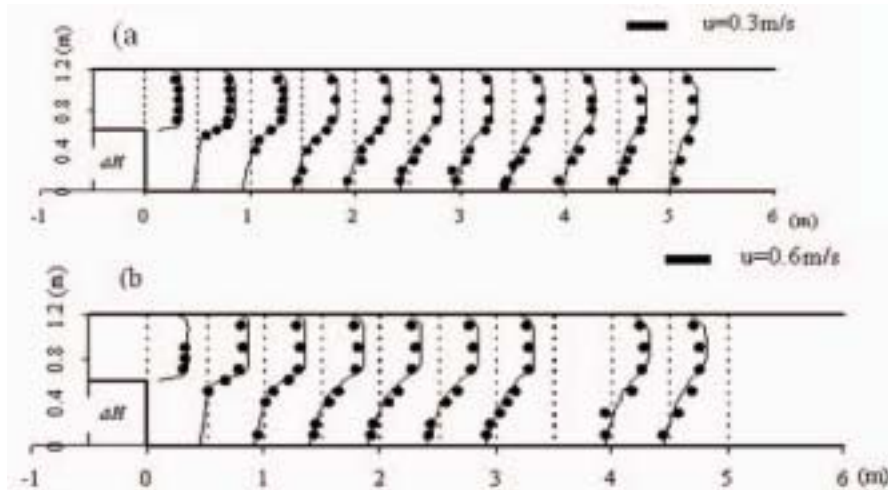
1、突闊渠槽流場模擬

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2-1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 2-1 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2-2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 ΔH ， ΔH 為突闊之寬度，預測之複合點(reattachment point)幾乎落在同樣位置。

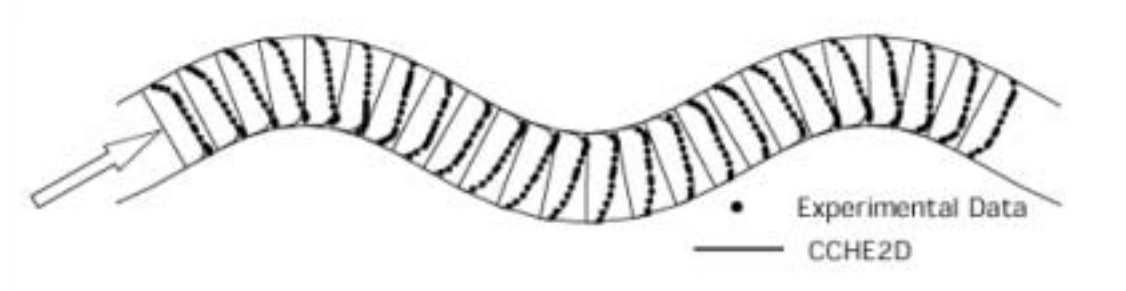


附圖 2-2 突闊渠槽模擬與實測比較

(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2-3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。

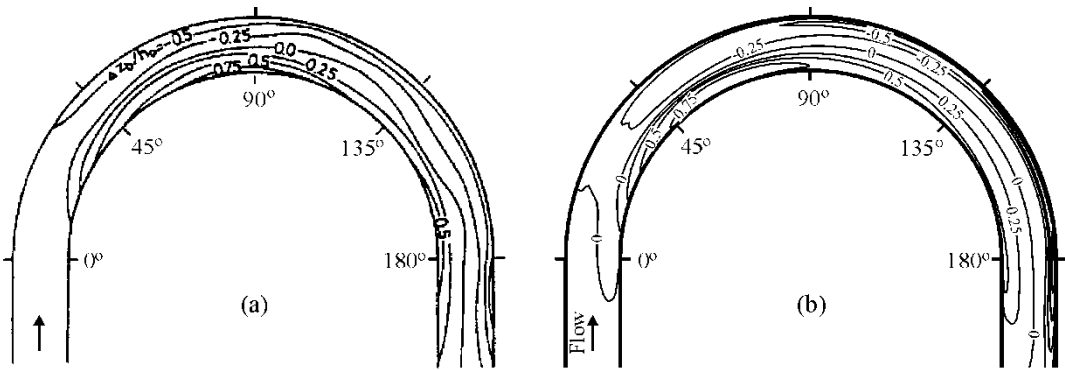


附圖 2-3 正弦彎道模擬與實測流速比較： $\theta_0=30^\circ$

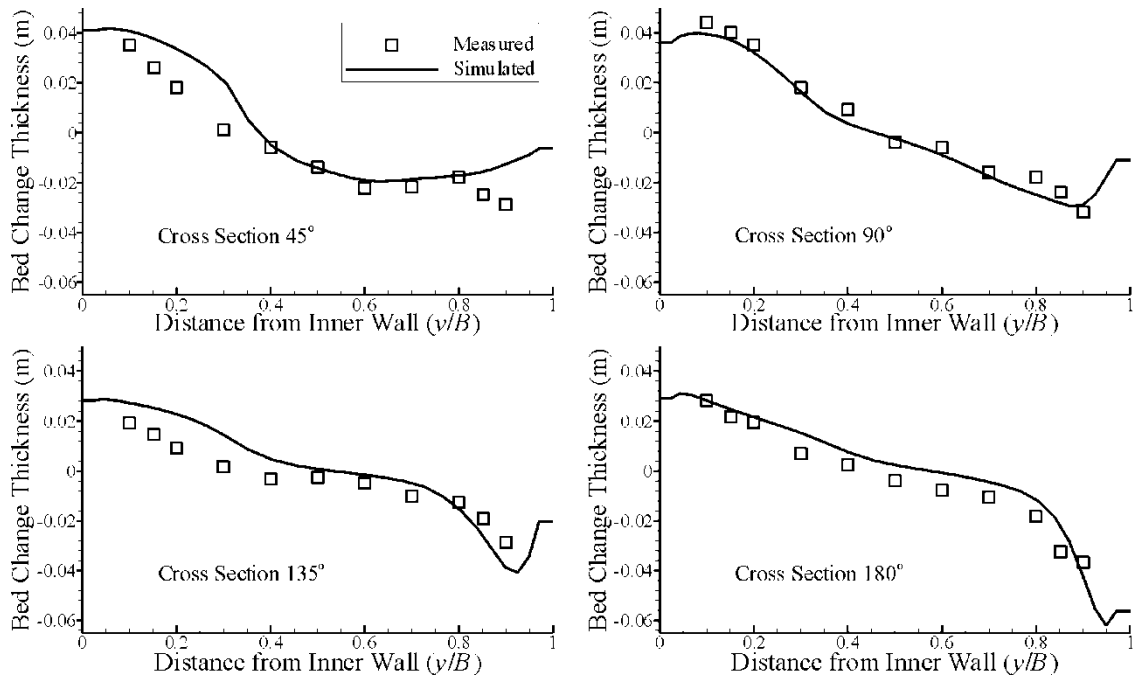
3、彎道動床模擬

Wu and Wang (2004a)曾模擬Yen and Lee (1995)之彎道動床模型試驗，模型渠道為一 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2-4為模擬與實測彎道部分底床等高線比較圖，附圖2-5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 2-4 (a)實測, (b)計算床形等高線圖($\Delta z_b/h_0$)

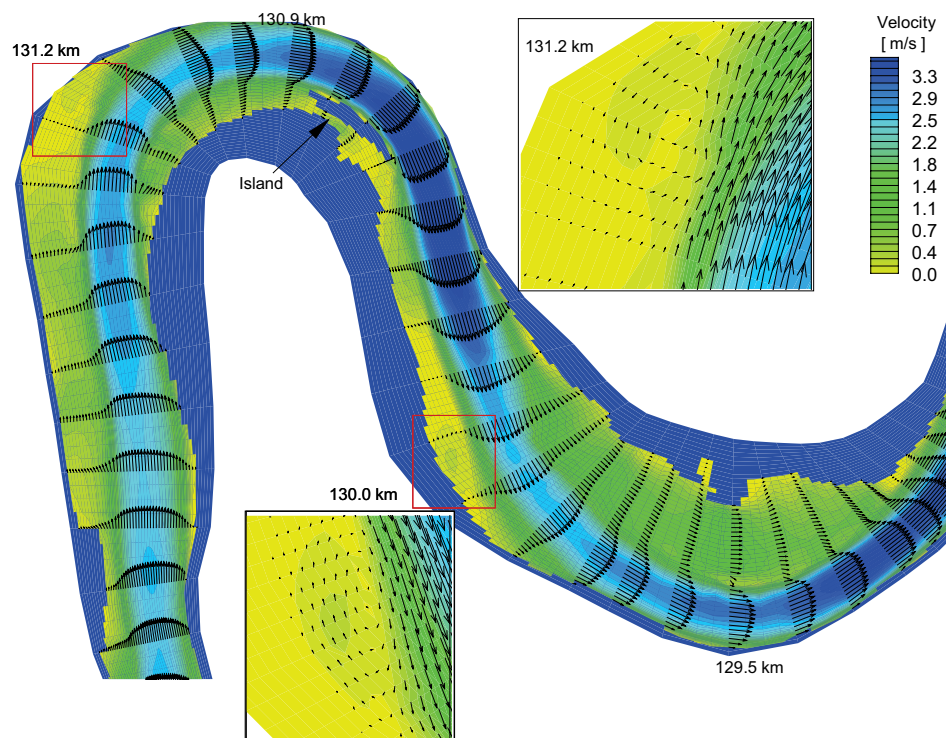


附圖 2-5 底床變化斷面剖面圖 (Yen and Lee(1995))

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

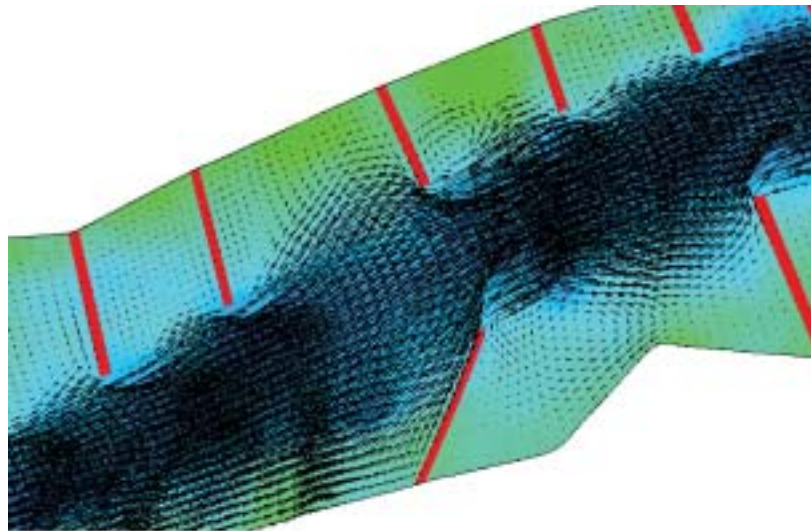
內卡河(Neckar River)上，為一個河槽型水庫，全長約12km，由上游比迪堪(Bietigheim)至下游南德，在河心距129.0km~132.3km處經由兩段180°之急彎，且於主槽兩岸有大片之高灘地。自1950年起，由於河川上游建置一系列共13座壩，使得水庫上游懸浮載入砂量減少。南德流量站之流量變化約介於 $14.1\text{m}^3/\text{s}$ ~ $1,650\text{m}^3/\text{s}$ 間，平均流量約為 $88.5\text{m}^3/\text{s}$ 。模式於變量流條件下模擬其水位與流速，利用現場測量資料率定曼寧係數等參數，率定後之模式採用更多洪水期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2-6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 2-6 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2-7所示。

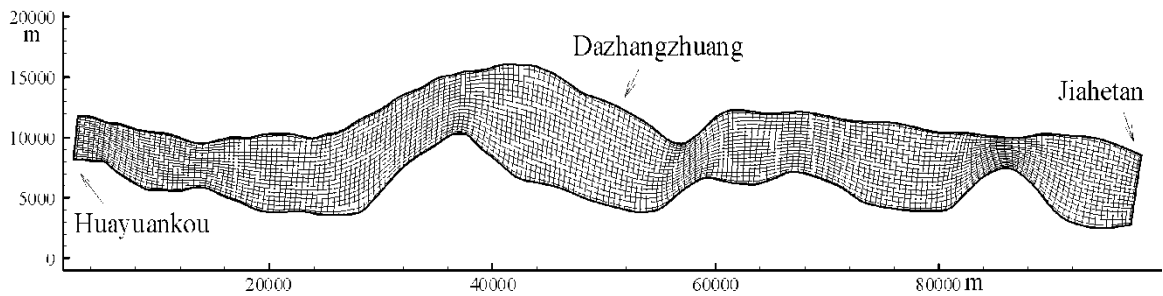


附圖 2-7 萬安水庫下游河道丁壩流場模擬

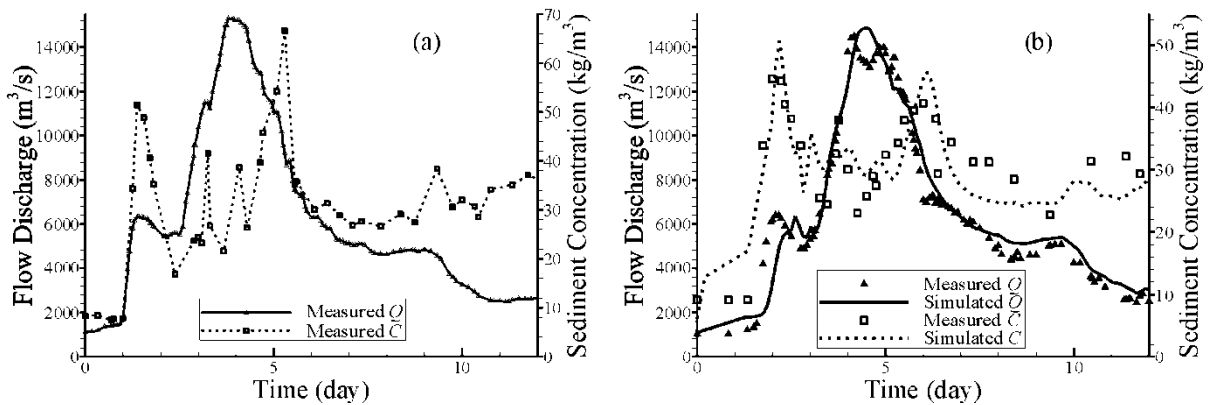
6、黃河下游輸砂模擬

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2-8所示，格點數為(201x21)，附圖2-9(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)

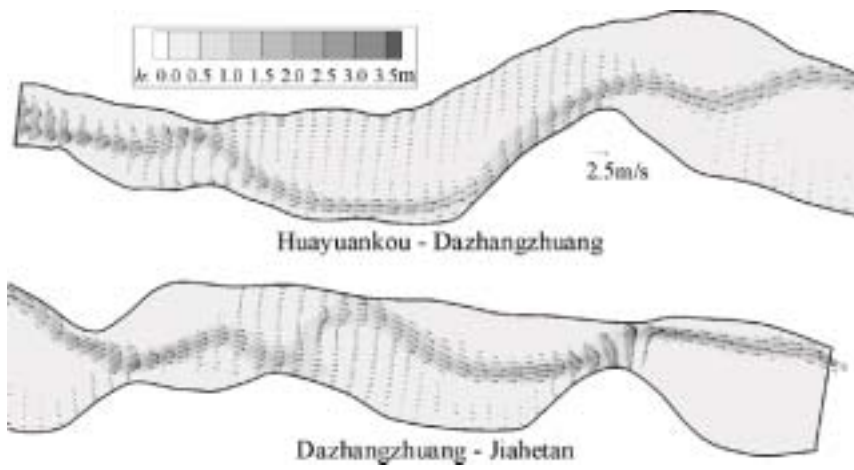
為夾河灘位置模擬與實測之流量、含砂濃度歷線，模擬結果與實測趨勢相當吻合。附圖2-10為上游花園口流量 $4,000\text{m}^3/\text{s}$ 時模擬範圍之流場分佈，圖中向量代表流場方向與流速大小，顏色等高線代表水深，可看出蜿蜒主槽與高灘地之流場。



附圖 2-8 花園口至夾河灘模擬格網點



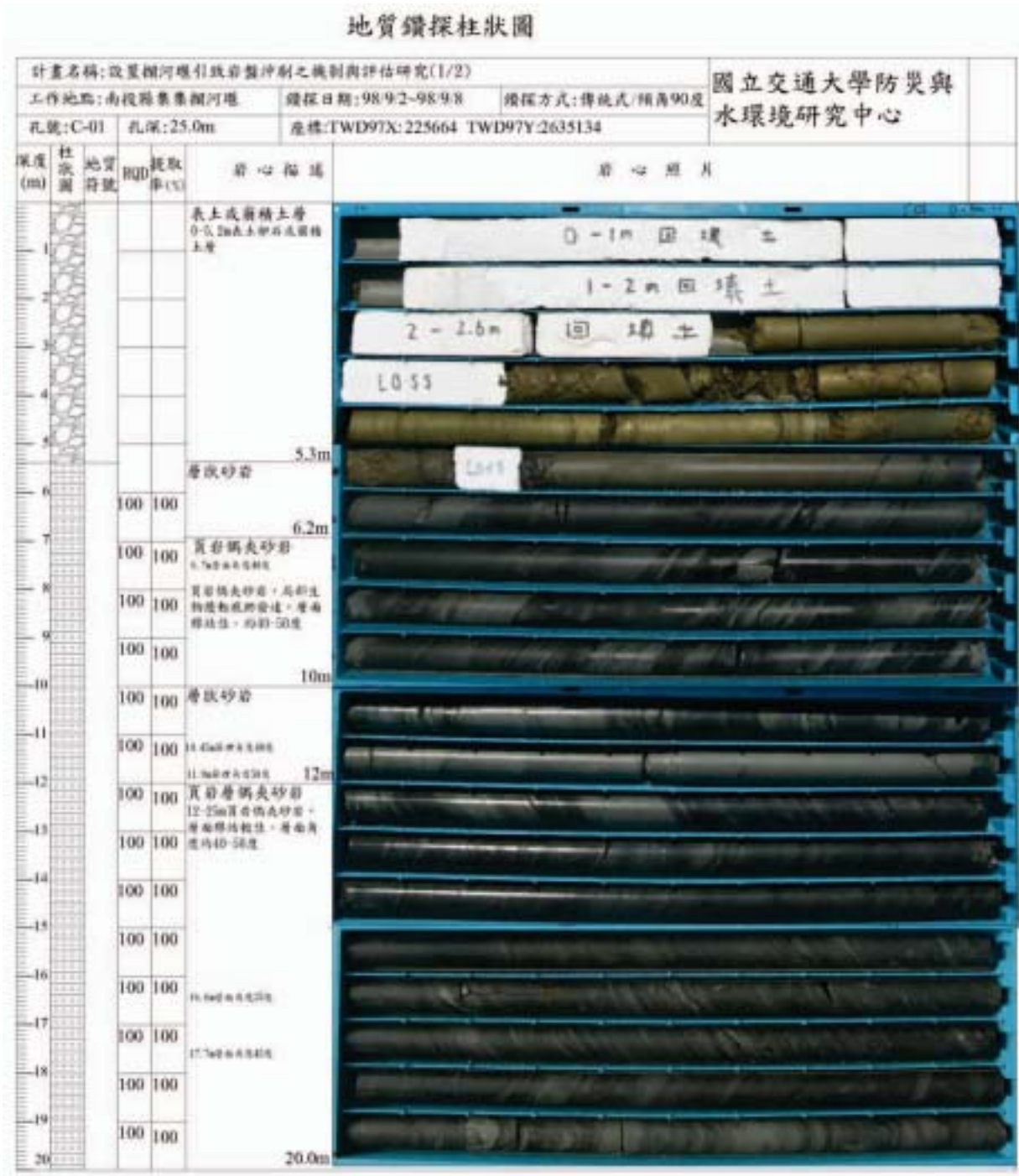
附圖 2-9 流量與含砂濃度歷線：(a)花園口, (b)夾河灘




附圖 2-10 上游入流 4,000 cms 情況下之流場分佈

附錄三 鑽探柱狀圖

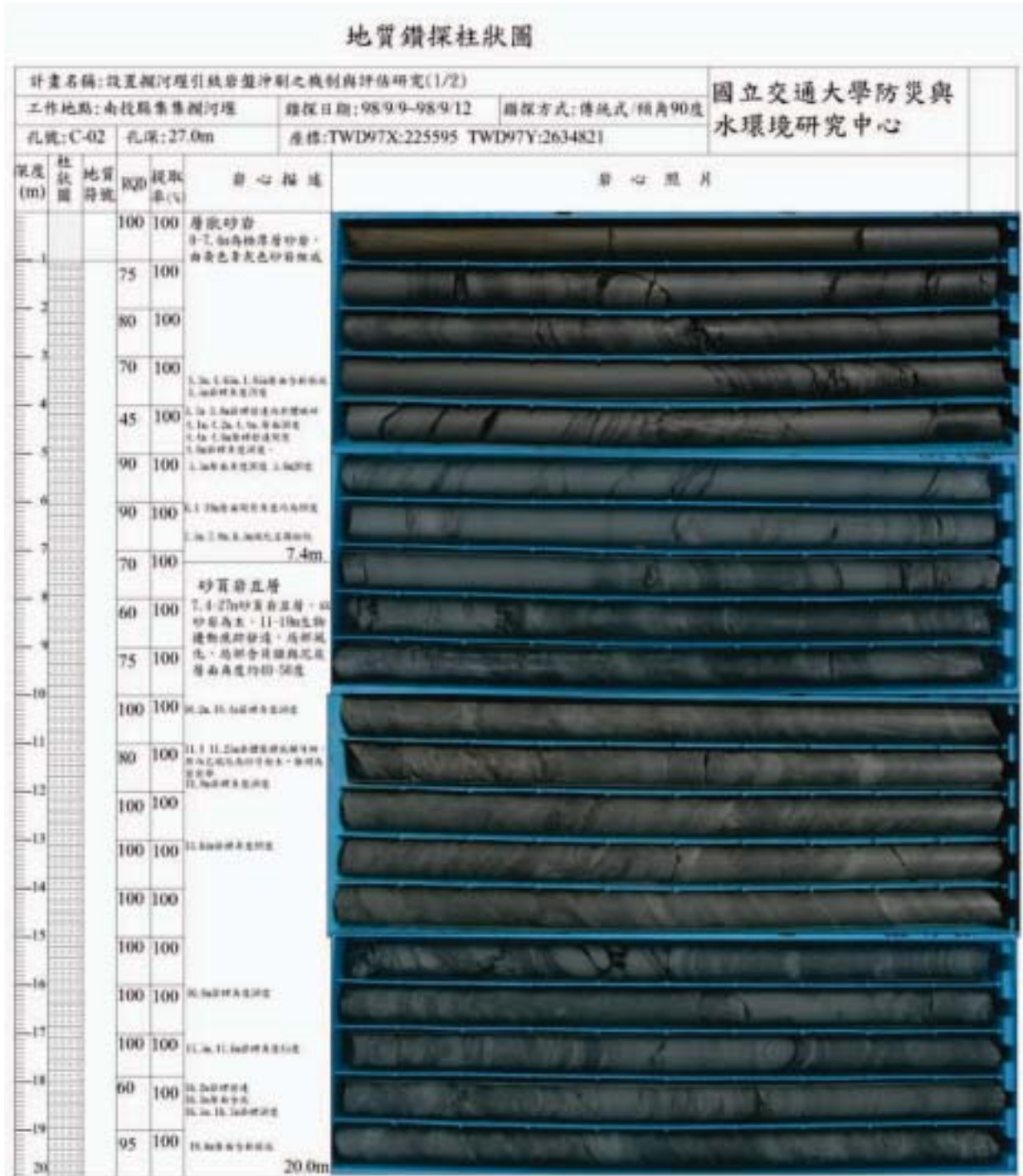
C01 孔鑽探柱狀圖(0-20 m)



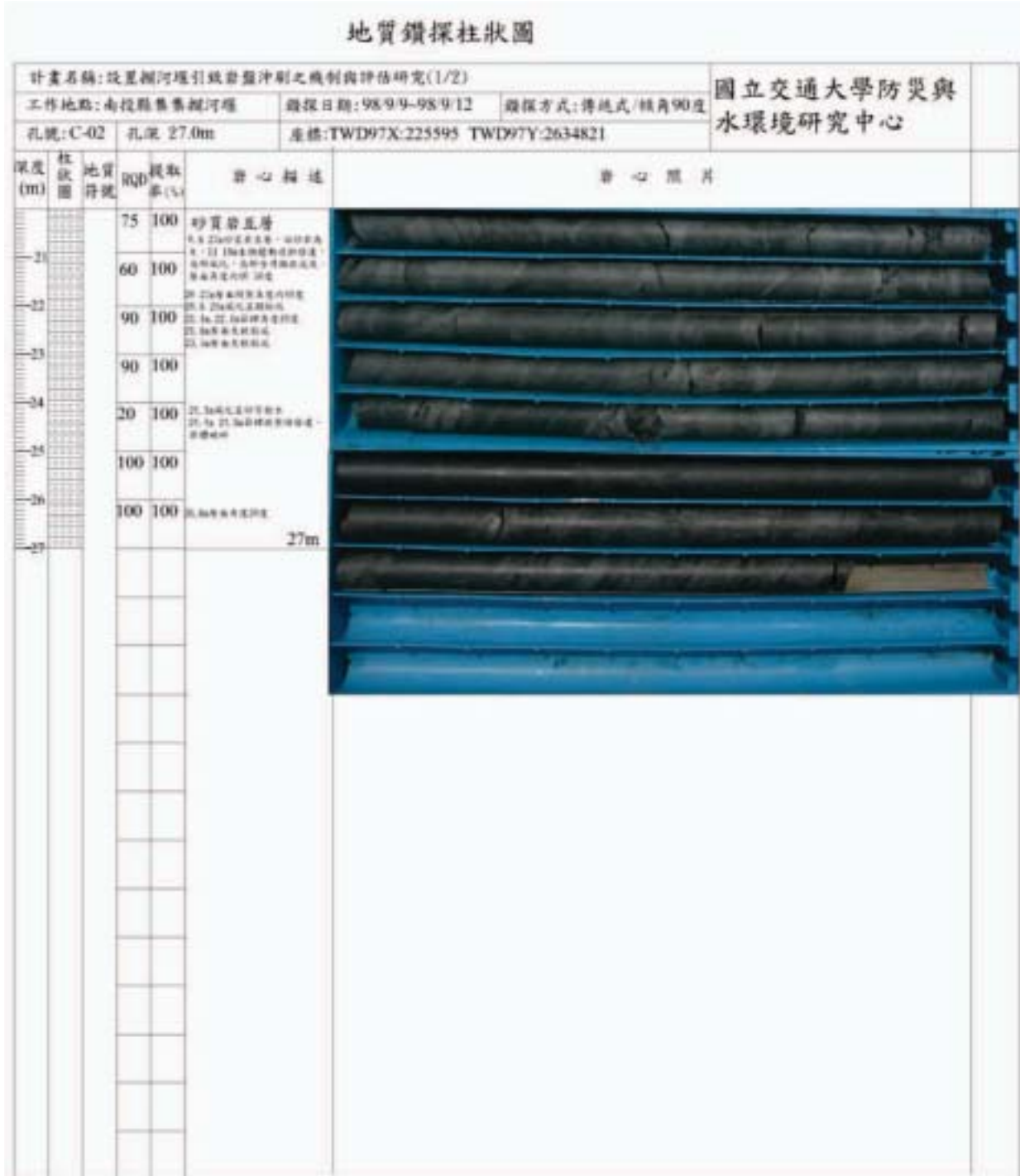
C01 孔鑽探柱狀圖(20-25 m)

地質鑽探柱狀圖						
計畫名稱: 設置潮河壩引致淤積沖刷之機制與評估研究(1/2)					國立交通大學防災與 水環境研究中心	
工作地點: 南投縣集集潮河壩		鑽探日期: 98/9/2~98/9/8	鑽探方式: 鉆索式/傾角90度			
孔號: C-01		孔深: 25m	座標: TWD97X:225664 TWD97Y:2635134			
深度 (m)	柱狀 圖	地質 符號	取 樣 率 (%)	岩 心 描 述	岩 心 照 片	
-21			100	頁岩偶夾砂岩 頁岩偶夾砂岩、局部生 物殘骸或砂岩、局部具 厚約100-500度		
-22			100			
-23			100			
-24			100			
-25			100			
25m						

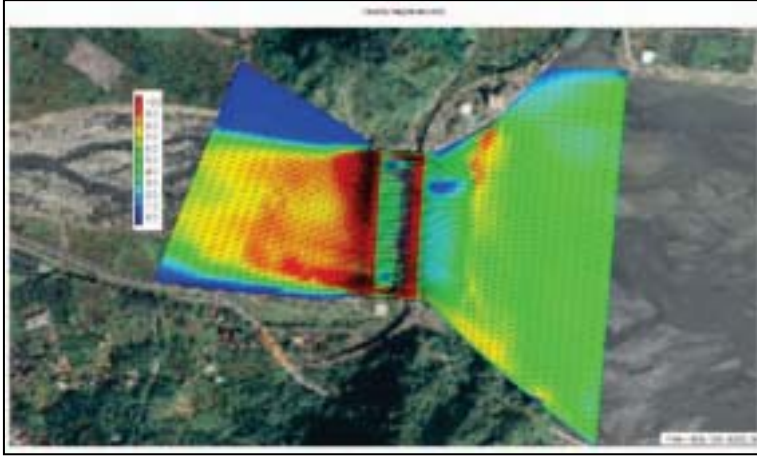
C02 孔鑽探柱狀圖(0-20m)



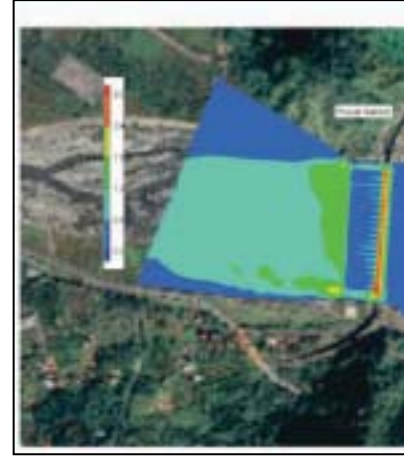
C02 孔鑽探柱狀圖(20-27m)



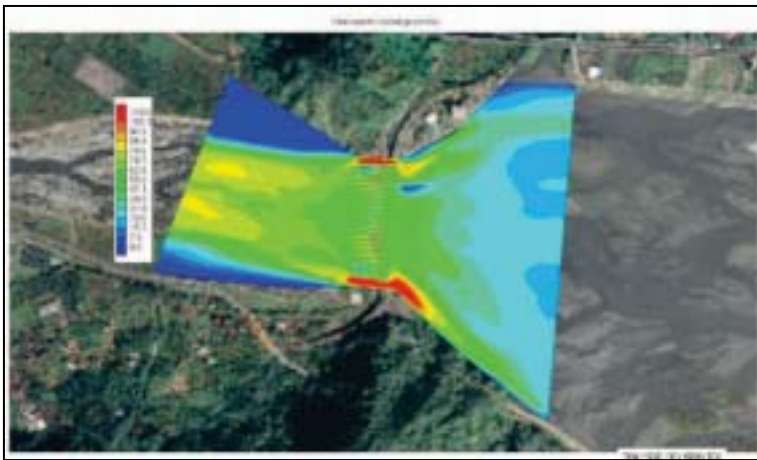
附錄四 集集攔河堰各重現期洪水量 CCHE2D 模擬成果



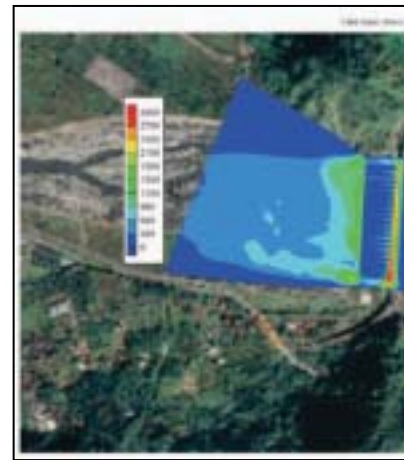
流速分佈 單位：m/s



福祿數

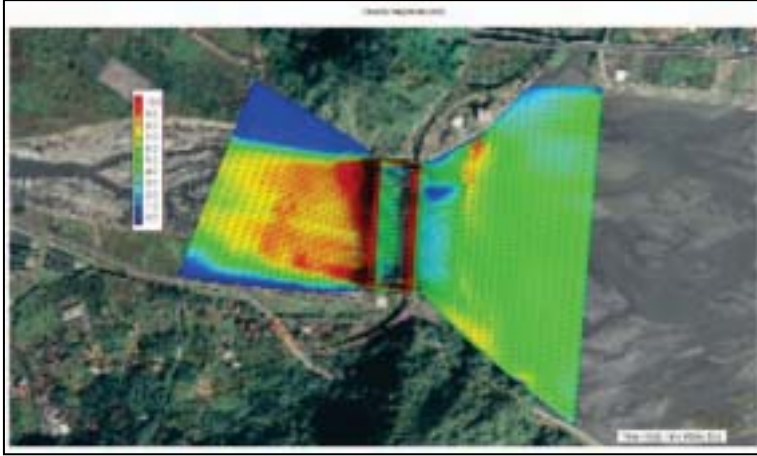


單寬流量分佈 單位：m²/s

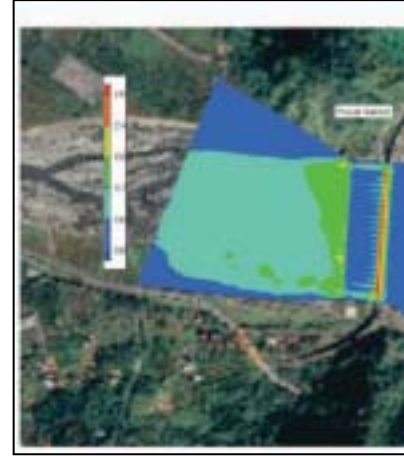


剪應力分佈

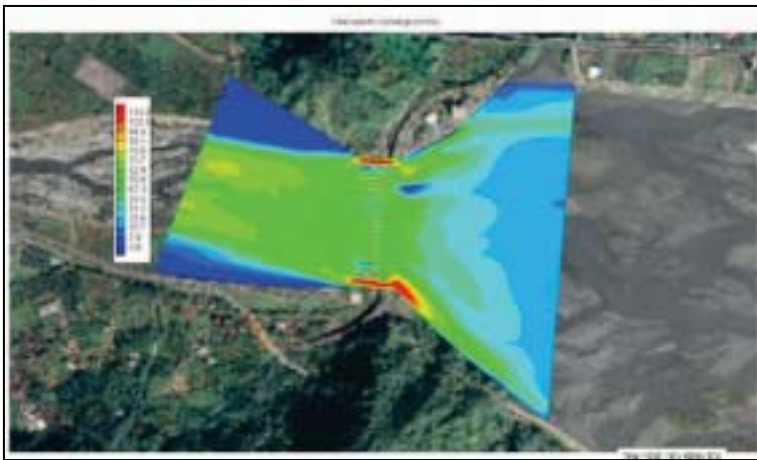
附圖 4-1 100 年重現期洪水水力特性分佈圖



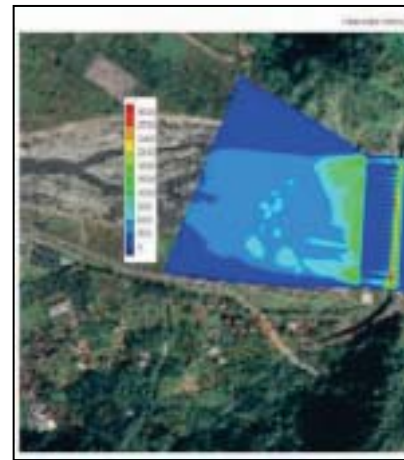
流速分佈 單位：m/s



佛祿數

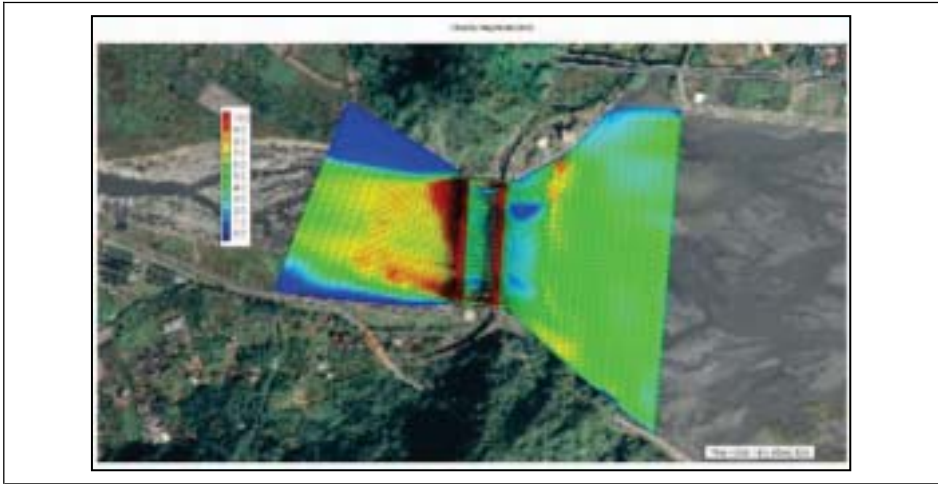


單寬流量分佈 單位：m²/s

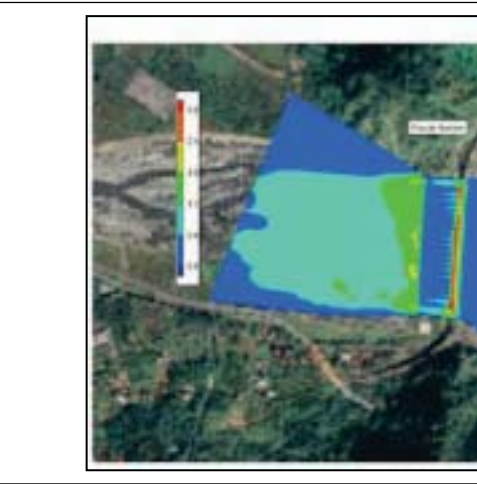


剪應力分佈

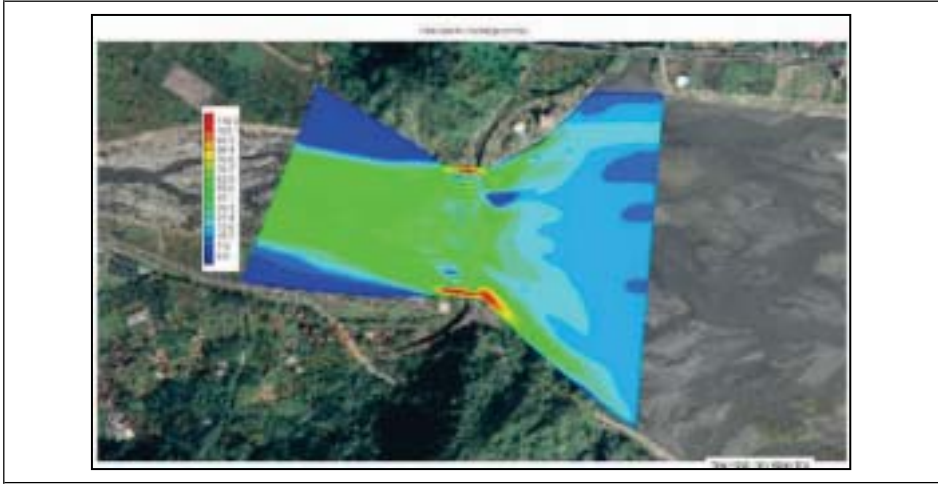
附圖 4-2 50 年重現期洪水水力特性分佈圖



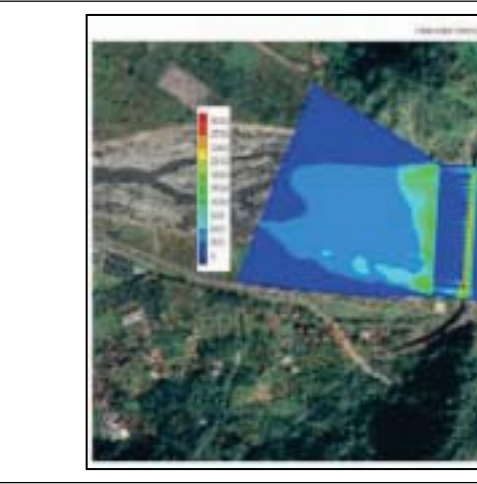
流速分佈 單位：m/s



福祿數

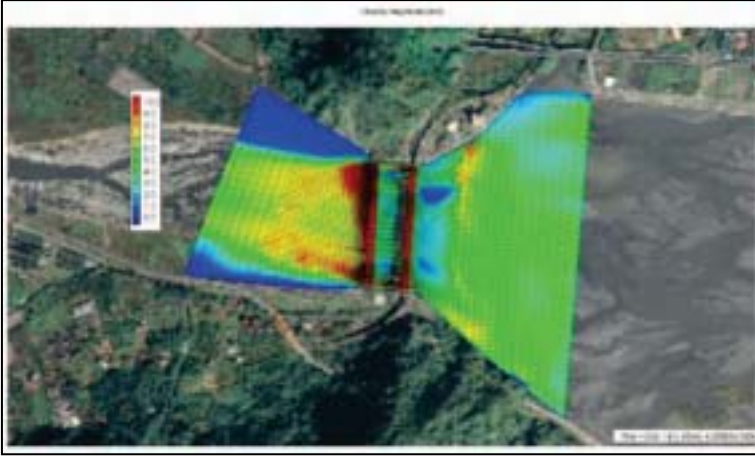


單寬流量分佈 單位：m²/s

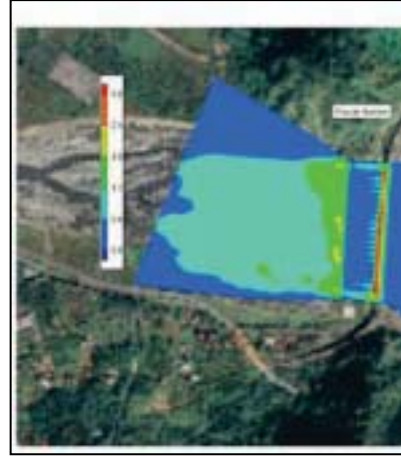


剪應力分佈

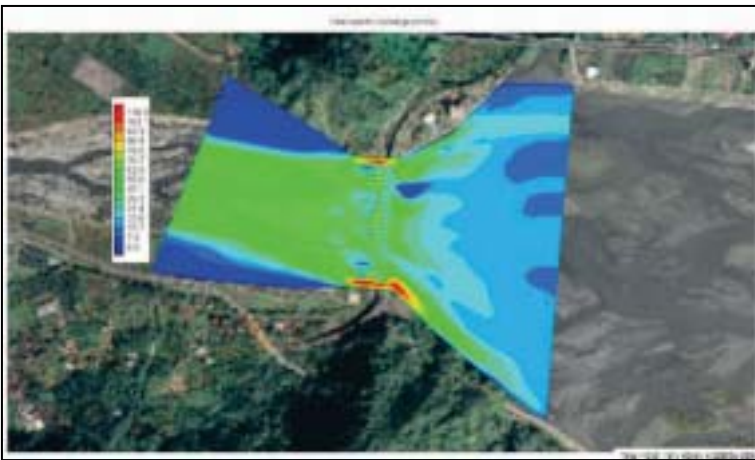
附圖 4-3 25 年重現期洪水水力特性分佈圖



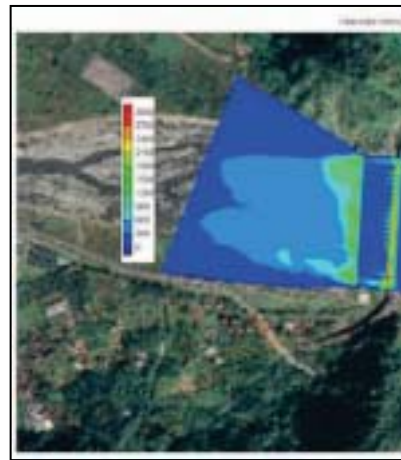
流速分佈 單位：m/s



佛祿數

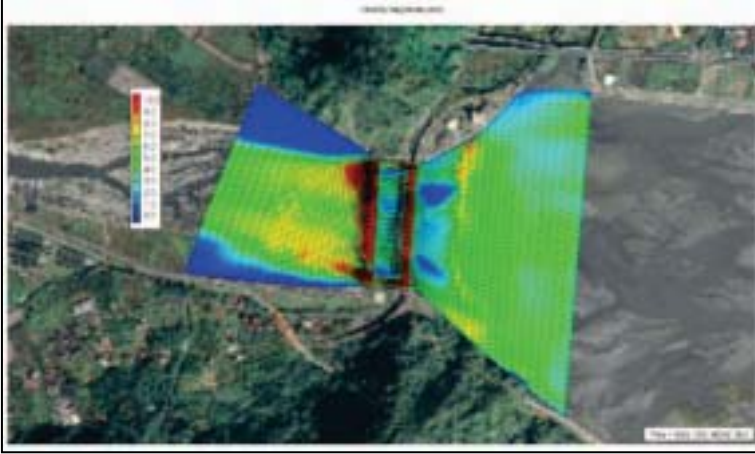


單寬流量分佈 單位：m²/s

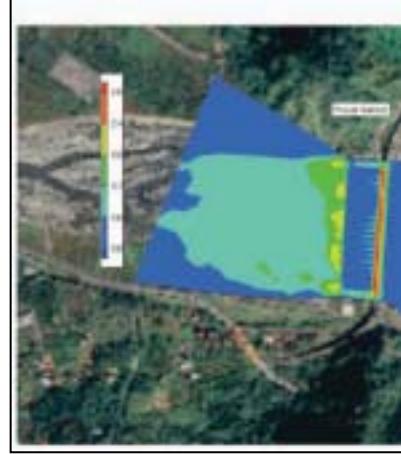


剪應力分佈

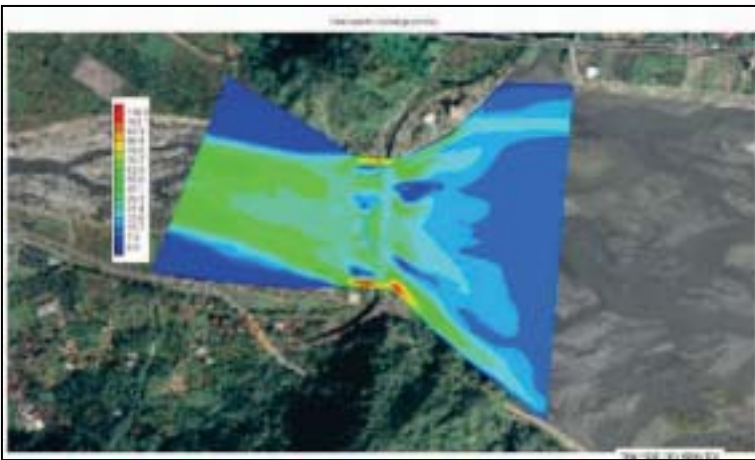
附圖 4-4 20 年重現期洪水水力特性分佈圖



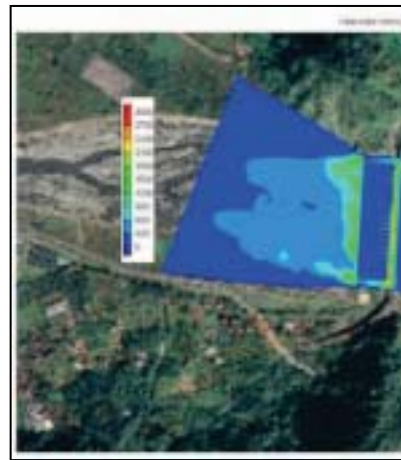
流速分佈 單位：m/s



佛祿數

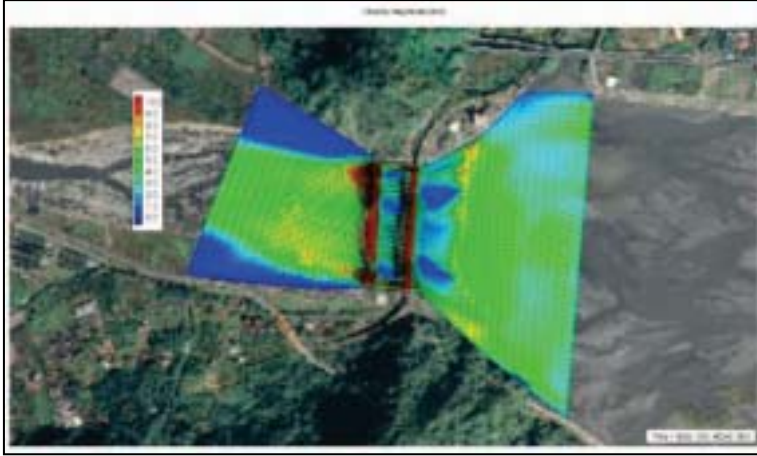


單寬流量分佈 單位：m²/s

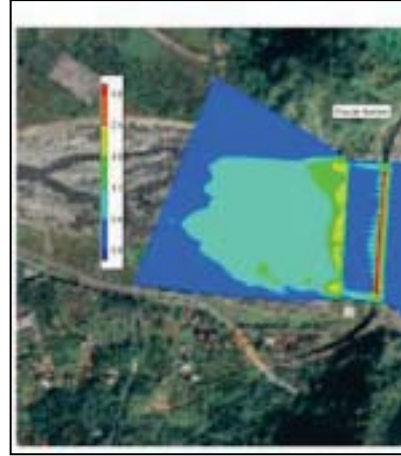


剪應力分佈

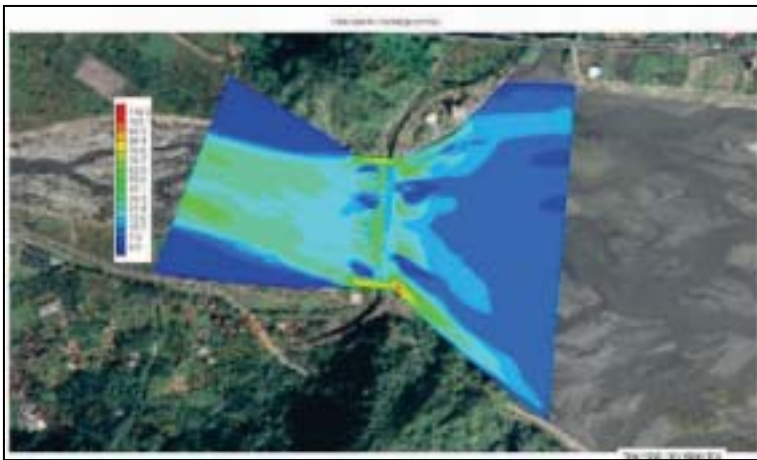
附圖 4-5 10 年重現期洪水水力特性分佈圖



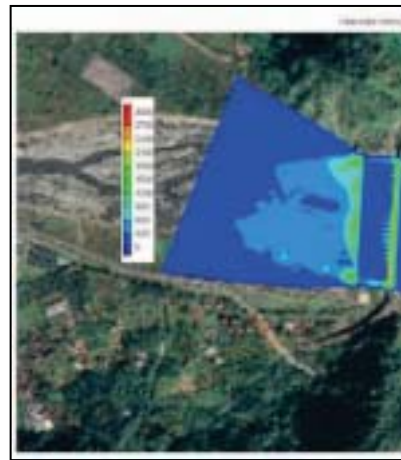
流速分佈 單位：m/s



佛祿數

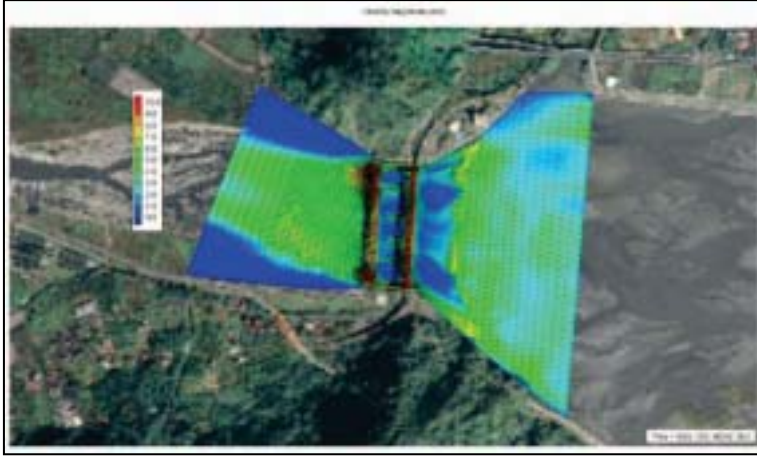


單寬流量分佈 單位：m²/s

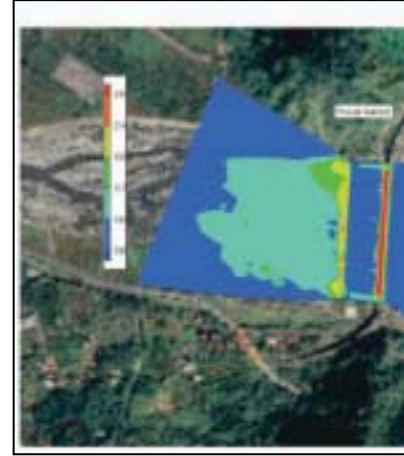


剪應力分佈

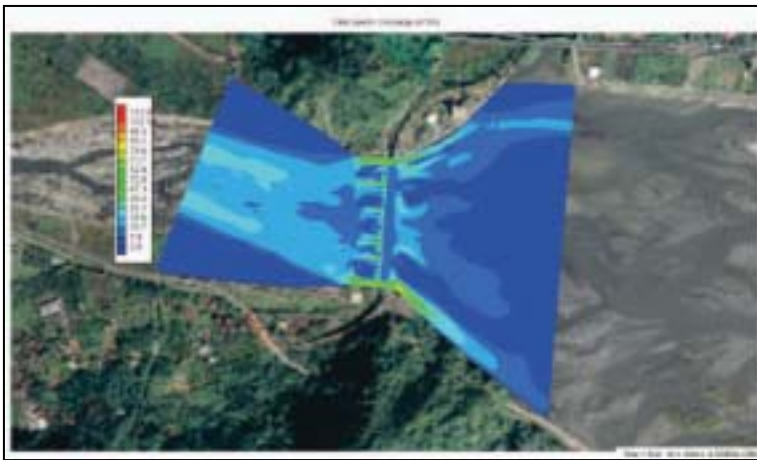
附圖 4-6 5 年重現期洪水水力特性分佈圖



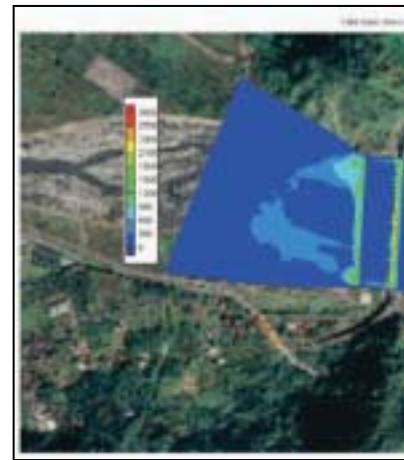
流速分佈 單位：m/s



福祿數



單寬流量分佈 單位： m^2/s



剪應力分佈

附圖 4-7 2 年重現期洪水水力特性分佈圖

國家圖書館出版品預行編目資料

設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究. (1/2) /
國立交通大學防災與水環境研究中心編著. -- 第一
版. -- 臺中縣霧峰鄉：水利署水規所, 2009. 12

面； 公分

參考書目：面

ISBN 978-986-02-0854-2(平裝)

1. 河川工程 2. 岩層 3. 環境監測

443.62

98021591

設置攔河堰引致岩盤沖刷之機制與評估研究(1/2)

發行人：陳弘由

發行所：經濟部水利署水利規劃試驗所

編著者：國立交通大學(防災與水環境研究中心)

地址：台中縣霧峰鄉吉峰村中正路 1340 號

電話：(04)23304788 傳真：(04)23300282

出版年月：2009 年 12 月

版次：第一版

GPN 1009803403

ISBN 978-986-02-0854-2

版權所有，翻印必究



廉潔、效能、便民



經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：台中縣霧峰鄉吉峰村中正路 1340 號

網址：<http://www.wrap.gov.tw/>

總機：(04)23304788

傳真：(04)23300282

ISBN 978-986-02-0854-2

ISBN 號碼及條碼

GPN：1009803403

定價：新臺幣 600 元