曾文水庫庫區豎井消能工水工模型試驗

成果報告

Physical Model Experiment on the Baffle Drop of

Tsengwen Reservoir

經濟部水利署水利規劃試驗所

中華民國 109 年 4 月

曾文水庫庫區豎井消能工水工模型試驗

成果報告

Physical Model Experiment on the Baffle Drop of Tsengwen Reservoir

經濟部水利署水利規劃試驗所

中華民國 109 年 4 月

目錄

目錄 目-1
表目錄 表-1
圖目錄 圖-1
照片目錄 照-2
摘要 摘-1
Abstract A-1
結論與建議 結-1
第一章　前言 1-1
第二章　資料蒐集 2-1
一、 工程設計背景 2-1
二、 設計理念 2-2
三、 設計原則 2-4
四、 消能設計方案 2-4
第三章　模型設計與試驗條件 3-1
一、 模型設計 3-1
二、 試驗條件 3-3
第四章 試驗成果 4-1
一、 無階梯式豎井消能工之試驗結果 4-2
二、 階梯式豎井消能工試驗結果 4-13
三、 模型比 1/20 試驗成果比較分析 4-24
四、 模型比 1/13.1 試驗成果分析 4-40
五、 模型試驗成果綜合評估 4-46
參考文獻 參-1
附錄一、工作人員名單 附-1
附錄二、「曾文水庫庫區豎井消能工水工模型試驗」期中報告書審查意見及處理情形 附-2
附錄三、「曾文水庫庫區豎井消能工水工模型試驗」期末報告書審查意見及處理情形 附-10

表目錄

摘表 1 原體與模型間各物理量之比尺關係.....摘-3
摘表 2 不同輸水量下豎井所需水頭.....摘-4
摘表 3 不同輸水量下模型比 1/20 試驗豎井水頭.....摘-5
摘表 4 無階梯式豎井消能工內部壓力彙整表.....摘-7
摘表 5 有階梯式消能工豎井定量流內部壓力彙整表.....摘-8
摘表 6 不同輸水量有無階梯式豎井消能工壓力量測值比較.....摘-11
表 2- 1 消能閥室方案與階梯式豎井消能工方案比較 2-7
表 3-1 原體與模型間各物理量之比尺關係 3-2
表 3-2 不同輸水量下豎井所需水頭 3-4
表 3-3 不同輸水量下模型比 1/20 試驗豎井水頭 3-6
表 4-1 無階梯式豎井消能工定量流內部壓力量測彙整表 4-12
表 4-2 有階梯式豎井消能工定量流內部壓力彙整表 4-23
表 4-3 有無階梯式豎井消能工壓力比較表 4-26
表 4-4 無階梯式豎井消能工及有階梯式豎井消能工投潭深度比較 4-26
表 4-5 模型比 1/20 試驗投潭深度與模型比 1/13.1 試驗成果比較.....4-41

圖目錄

摘圖 1 階梯式豎井消能工示意圖.....摘-2
摘圖 2 階梯式豎井消能工上視圖隔板與垂直隔牆位置示意圖.....摘-2
摘圖 3 階梯式豎井消能工最大輸水量流場及相關尺寸名稱示意圖 摘-3
摘圖 4 階梯式豎井消能工試驗測壓點位置.....摘-6
摘圖 5 無階梯式豎井消能工試驗測壓點位置.....摘-6
摘圖 6 不同輸水量有無階梯式豎井消能工壓力量測之平均值.....摘-9
摘圖 7 不同輸水量有無階梯式豎井消能工壓力量測之標準偏差.....摘-10
摘圖 8 不同輸水量有無階梯式豎井消能工壓力量測之最大振幅.....摘-10
圖 2-1 曾文南化聯通管與南化淨水場及南化高屏聯通管系統關聯性示意圖
.....2-3
圖 2-2 興建大型閥室管中消能平面圖 2-5
圖 2-3 大型閥室控制閥佈置示意圖 2-5
圖 2-4 階梯式豎井消能工設計圖 2-7
圖 2-5 水庫取水管段至調整池與豎井消能工平面及縱剖面配置圖 2-8
圖 2-6 水庫取水管段至調整池與豎井消能工平面及縱剖面局部配置圖 ...2-9
圖 2-7 階梯式豎井消能工配置圖 2-10
圖 3-1 東平橋消能設施平面佈置圖 3-5
圖 3-2 階梯式豎井消能工設計圖(俯視).....3-7
圖 3-3 階梯式豎井消能工設計圖(側視).....3-8
圖 3-4 無階梯式豎井消能工設計圖(俯視).....3-9
圖 3-5 無階梯式豎井消能工設計圖(側視).....3-10
圖 4-1 階梯式豎井消能工試驗測壓點位置 4-1
圖 4-2 無階梯式豎井消能工試驗測壓點位置 4-2
圖 4-3 10 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化 4-3
圖 4-4 20 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化 4-4
圖 4-5 30 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化 4-5
圖 4-6 40 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化 4-6

圖 4-7 50 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化.....4-7
圖 4-8 60 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化.....4-8
圖 4-9 70 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化.....4-9
圖 4-10 80 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化.....4-10
圖 4-11 10 萬 CMD 變量流過程無階梯式豎井內測壓值之變化.....4-11
圖 4-12 10 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值.....4-14
圖 4-13 20 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值.....4-15
圖 4-14 30 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值.....4-16
圖 4-15 40 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值.....4-17
圖 4-16 50 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值.....4-18
圖 4-17 60 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值.....4-19
圖 4-18 70 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值.....4-20
圖 4-19 80 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值.....4-21
圖 4-20 10 萬 CMD 變量流過程豎井內量測壓力變化.....4-22
圖 4-21 入水管氣液交界示意圖.....4-39

照片目錄

照片 3-1 模型比 1/20 採用軟管調整高度控制豎井水頭之裝置照片 3-6
照片 3-2 豎井消能工模型基礎平台 3-11
照片 3-3 豎井壓克力模型初步防漏 3-11
照片 3-4 豎井壓克力模型組裝定位 3-11
照片 3-5 豎井水位採直立鋼管接閥門調整 3-11
照片 3-6 豎井水位採直立鋼管接閥門、透明聯通管與水位標尺調整 3-12
照片 4-1 下游出水管段距離豎井 35 公分設置一壓力計 4-13
照片 4-2 10 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片 4-27
照片 4-3 20 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片 4-28
照片 4-4 30 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片 4-29
照片 4-5 40 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片 4-30
照片 4-6 50 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片 4-31
照片 4-7 60 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片 4-32
照片 4-8 70 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片 4-33
照片 4-9 80 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片 4-34
照片 4-10 無階梯式消能工氣泡進入下游管段 4-35
照片 4-11 跌水時水位震盪超過通氣孔高度.....4-35
照片 4-12 水流經過階梯式消能板之流況 4-36
照片 4-13 水流撞擊第一階消能板及隔牆之流況 4-37
照片 4-14 10 萬 CMD 第一階消能板流況 4-37
照片 4-15 40 萬 CMD 第一階消能板流況 4-38
照片 4-16 70 萬 CMD 第一階消能板流況 4-38
照片 4-17 輸水管有入口彎管之流況(70 萬 CMD).....4-39
照片 4-18 高流量需豎井內高水位劇烈震盪範圍很小 4-42
照片 4-19 輸水量 10 萬 CMD 捲氣深度約 1.8 公尺 4-43
照片 4-20 輸水量 20 萬 CMD 捲氣深度約 1.9 公尺 4-43
照片 4-21 輸水量 30 萬 CMD 捲氣深度約 2.4 公尺 4-44

照片 4-22 輸水量 40 萬 CMD 捲氣深度約 3.2 公尺 4-44
照片 4-23 輸水量 50 萬 CMD 捲氣深度約 3.8 公尺 4-45
照片 4-24 輸水量 60 萬 CMD 捲氣深度約 4.1 公尺 4-45
照片 4-25 Odggard 教授指導豎井消能流況 4-47
照片 4-26 消能板建議略微退縮.....4-47
照片 4-27 調整池入水管前端灣頭頂部測試設置通氣孔之影響 4-48

摘要

一、前言

曾文水庫目前僅能透過烏山頭水庫供水，對南部地區水資源供水調度存在風險，為配合經濟部水利署南區水資源局辦理曾文水庫增設豎井消能工研提本項試驗計畫，確保水庫既有設施新增下游聯通管路工程之安全無虞。本項聯通管路工程起點為曾文水庫電廠壓力鋼管取水，採重力輸水方式至台南南化淨水場之調節池及南化區北寮銜接既有南化高屏聯通管，設計最大輸水能力為 80 萬 CMD。豎井消能工設計內部直徑 7.6 公尺，淨高度 61 公尺，為了解豎井消能工之水理流況、夾氣排除與消能效果，爰辦理水工模型試驗檢討。模型設計比尺採 1/20 及 1/13.1，模型範圍包含豎井消能工前段之調整池、豎井消能工、豎井消能工出口部份管段。

二、資料蒐集

臺灣南部地區雨量豐枯比懸殊 9:1 為全臺灣之最，枯水季長(10 月至隔年 5 月)，近年來極端氣候旱澇兩極、用水成長、汛期高濁度及水庫防淤操作等需聯合調度情境下，既有供水設施及調度系統已無法滿足跨區調度支援需求，相較臺灣其他地區，南部地區整體缺水風險較高。

原規劃方案為閥室消能設施，係依據流量之高低採用三條平行管線，因操作複雜且後續維護成本較高。因此規劃設計單位於消能方案再檢討時，發現水庫下游曾庫公路西側上邊坡有適合建置豎井消能工的工作平台，稱為木瓜園台地。此台地高程介於 EL.175~200m 之間，高程適中，屬於國有地且由南水局管轄。因此消能設施改採具有消能井、調整池與消能豎井(Baffle-drop)方案，即於木瓜園台地興建消能井與調整池進行第一階段消能。調整池設計水位係考量最大輸水量(80 萬 CMD)有足夠能量輸送至南化淨水場及內門減壓池；第二階段消能係利用近年來美國愛荷華水利學院(Iowa Institute of Hydraulic Research) 開發的階梯式豎井消能工(Baffle-drop structure)，調整不同輸水量所需之位能。豎井直徑 D 由流量 Q 概估，每個階梯高度為 h，隔牆位置為 B，版厚度為 t，本設計案符合此 3 項設計原則

(1)1/2D≦B≦2/3D (2)0.12<F=$(Q^2/(B^5g))^{1/3}$<0.23 (3)0.26<(h-t)/B<0.47，詳如摘圖 1~3 所示。

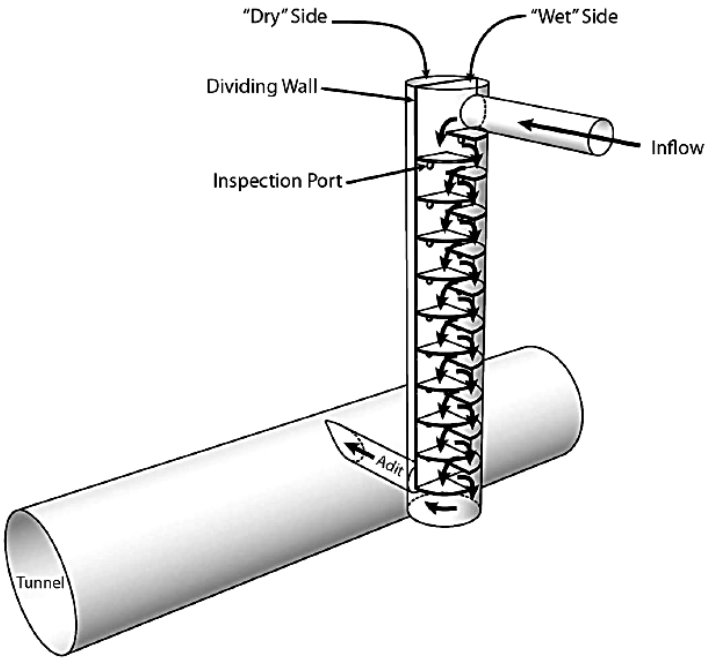


Fig. 1. Schematic of a baffle-drop structure

摘圖 1 階梯式豎井消能工示意圖

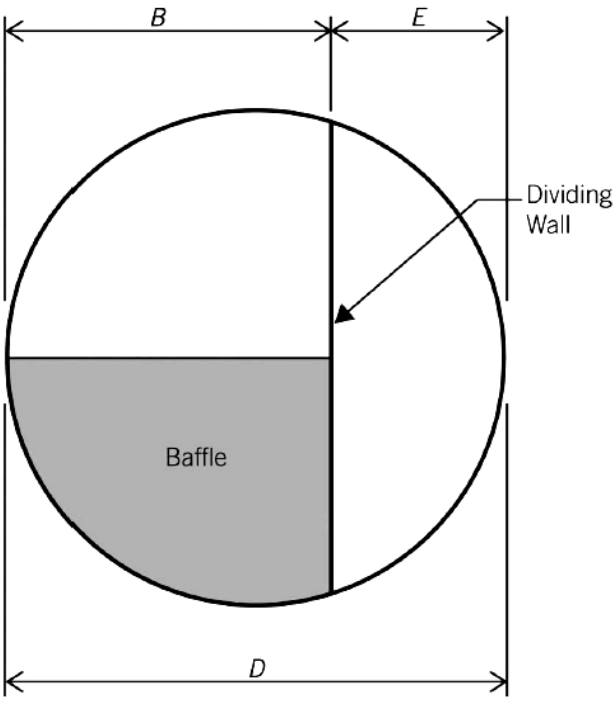


Fig. 2. Schematic top view of drop shaft showing baffle and vertical wall

摘圖 2 階梯式豎井消能工上視圖隔板與垂直隔牆位置示意圖

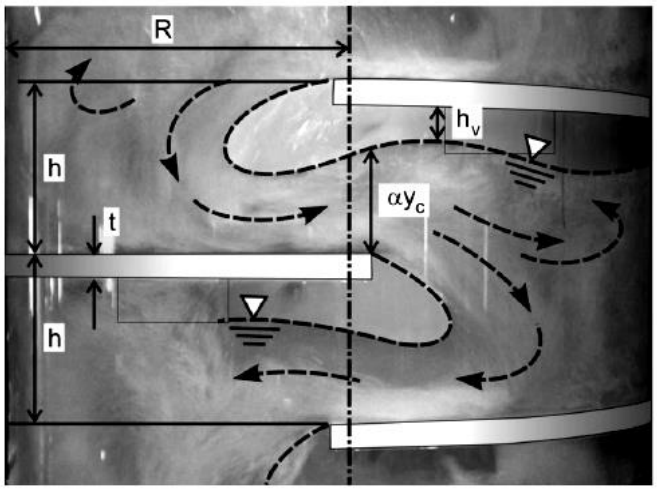


Fig. 3. Baffle flow schematic and related notation for a typical maximum discharge

摘圖 3 階梯式豎井消能工最大輸水量流場及相關尺寸名稱示意圖

三、模型縮比與試驗條件

本項試驗研究之水理流況主要是探討豎井消能工之明渠流況，因此模型設計主要根據福祿相似律進行各項物理量之轉換。豎井消能工水工模型設計建造，係以階梯式消能工為主體，模擬現場上游定量輸水經調整池進入豎井，本計畫局部模型係探討豎井內部消能流況及效果。模型比尺採用 1/20 及 1/13.1，相關物理量之比尺關係，詳如摘表 1 所示。

摘表 1 原體與模型間各物理量之比尺關係

模型比尺	長度	流速	時間	流量	糙率	福祿數比	坡度比
關係式	L_r	$L_r^{1/2}$	$L_r^{1/2}$	$L_r^{5/2}$	$L_r^{1/6}$	$\frac{V_r}{\sqrt{g_r H_r}}$	$\frac{H_r}{L_r}$
比尺	1/20	1/4.47	1/4.47	1/1,789	1/1.65	1	1
比尺	1/13.1	1/3.62	1/3.62	1/621	1/1.54	1	1

規劃輸水路線可由曾文水庫輸水至南化淨水場，以及至內門減壓池兩條路線，因為南化淨水場及內門減壓池皆為明渠開放水池，可由此兩處水池水位作為下游邊界條件。於不同輸水量條件下，由南化淨水場及內門減壓池反算至豎井消能工內部所需水頭，並分別計算新管(光滑管)與舊管(粗糙管)兩種不同糙度管材所需之水頭。因此同一輸水量會有四種豎井內部水頭之計算結果，各輸水量計算所需水頭，如摘表 2 所示。模型比 1/20 試驗豎井內部水頭採用計算之最高值與最低值之中值為豎井試驗條件，不同輸水量豎井內部水頭試驗條件，如摘表 3 所示。模型比 1/20 為控制豎井內部水頭，因此設計一下游管段銜接可以調升不同高度之軟管以控制豎井內部水頭與輸水量。

摘表 2 不同輸水量下豎井所需水頭

木瓜園至南化淨水場(光滑管情境)				**木瓜園至南化淨水場(粗糙管情境)**			
輸水量(萬 CMD)	能量損失(光滑管)(m)	南化淨水場調整池水位(m)	木瓜園調整池/消能豎井水位(光滑管)(m)	輸水量(萬 CMD)	能量損失(粗糙管)(m)	南化淨水場調整池水位(m)	木瓜園調整池/消能豎井水位(粗糙管)(m)
10	0.42	145	145.42	10	0.47	145	145.47
20	2.10	145	147.10	20	2.31	145	147.31
30	4.63	145	149.63	30	5.08	145	150.08
40	8.19	145	153.19	40	9.01	145	154.01
50	12.79	145	157.79	50	14.09	145	159.09
60	18.47	145	163.47	60	20.34	145	165.34
70	24.97	145	169.97	70	27.50	145	172.50
80	32.75	145	177.75	80	36.06	145	181.06
木瓜園調整池至內門減壓池段(光滑管情境)				**木瓜園調整池至內門減壓池段(粗糙管情境)**			
輸水量(萬 CMD)	能量損失(光滑管)(m)	內門減壓池/東平橋水力高程(m)	木瓜園調整池/消能豎井水位(光滑管)(m)	輸水量(萬 CMD)	能量損失(粗糙管)(m)	內門減壓池/東平橋水力高程(m)	木瓜園調整池/消能豎井水位(粗糙管)(m)
10	0.57	144	144.57	10	0.64	144	144.64
20	2.68	144	146.68	20	2.96	144	146.96
30	5.96	144	149.96	30	5.96	144	149.96
40	10.57	144	154.57	40	11.72	144	155.72
50	16.50	144	160.50	50	18.26	144	162.26
60	23.83	144	167.83	60	26.39	144	170.39
70	44.10	114	158.10	70	48.83	114	162.83
80	57.82	114	171.82	80	64.01	114	178.01

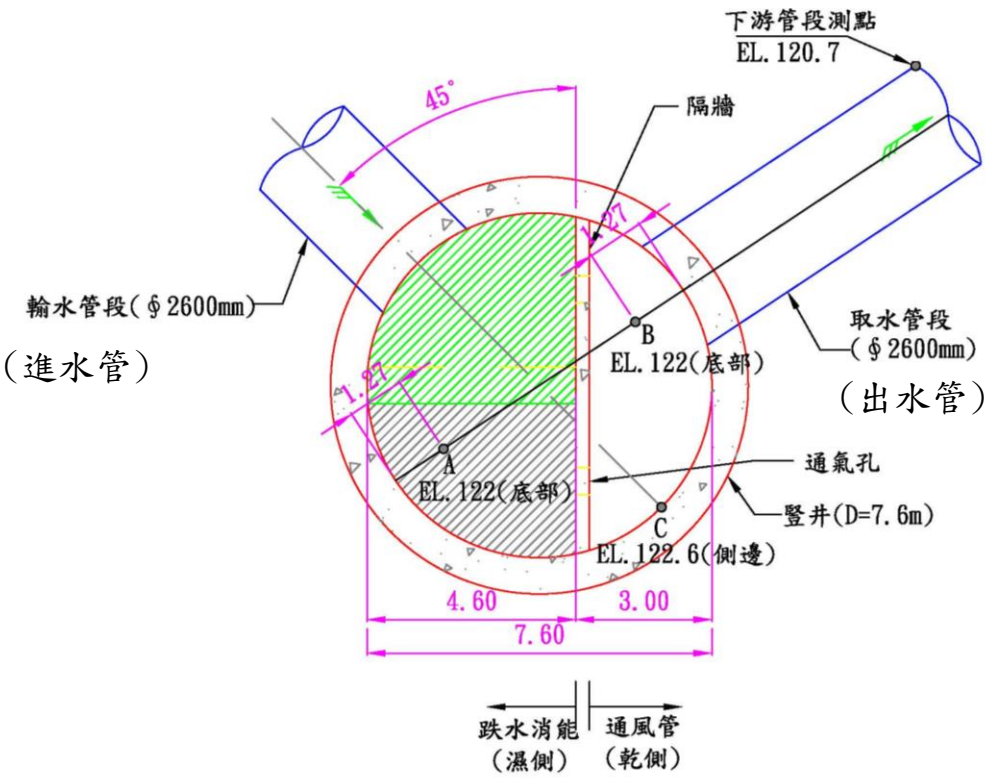
備註：巨廷工程顧問有限公司提供

摘表 3 不同輸水量下模型比 1/20 試驗豎井水頭

輸水量 (萬 CMD)	所需豎井 最大水位(m)	所需豎井 最小水位(m)	試驗豎井水頭 (m)
10	145.47	144.57	145.0
20	147.31	146.68	147.0
30	150.08	149.63	149.8
40	155.72	153.19	154.5
50	162.26	157.79	160.0
60	170.39	163.47	166.9
70	172.50	158.10	167.0
80	181.06	171.82	176.8

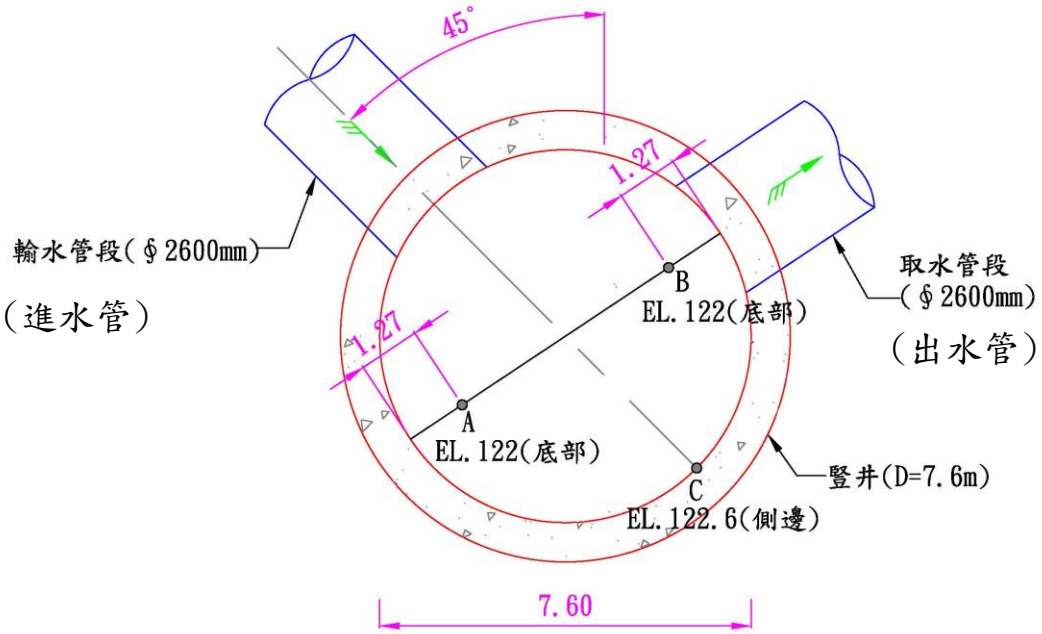
四、模型比 1/20 試驗成果分析

本項試驗主要以壓力計量測壓力變化，量化豎井消能工水位及壓力變化範圍。設計 A、B、C 三處壓力量測點，如摘圖 4 及摘圖 5 所示。A 點及 B 點在取水管(出水管)同一軸線上，高程設置在豎井底部 EL.122 公尺，A 點設置在階梯式消能側、B 點設置在通風側，距離豎井邊壁為豎井半徑之 1/3(即距離豎井中心 2.53 公尺)，以比較有階梯式消能側及通風側之壓力差異性。C 點則設置在輸水管(入水管)軸線上對角之邊壁上 EL.122.6 公尺(即距離豎井中心 3.80 公尺)，藉以了解無階梯式豎井消能工在直接投潭時，量化投潭產生之壓力變化。有階梯式豎井消能工與無階梯式豎井消能工之測壓位置相同，以利評估豎井有無階梯式消能之壓力變化與差異程度。



摘圖 4 階梯式竪井消能工試驗測壓點位置

(即 A 及 B 距離竪井中心 2.53 公尺、C 距離竪井中心 3.80 公尺)



摘圖 5 無階梯式竪井消能工試驗測壓點位置

(即 A 及 B 距離竪井中心 2.53 公尺、C 距離竪井中心 3.80 公尺)

(一)無階梯式豎井消能工之試驗結果

無階梯式豎井消能工進行定量流試驗，分別進行 10 萬 CMD 到 80 萬 CMD 等 8 組試驗，以及試驗一組 10 萬 CMD 變量流，即試驗模擬豎井於充水過程之壓力變化。試驗結果在低流量 10 萬 CMD 及 20 萬 CMD 時，由調整池進入豎井直接投潭，跌水正對測壓點 C 且接近投潭影響深度，以致測壓點 C 產生最大振幅。但是隨著流量增加豎井內部水位上升，則測點 C 逐漸避開投潭影響範圍，測點 C 之最大振幅逐漸變小，且小於測點 A 及測點 B。變量流 10 萬 CMD 流量充水時，因測點 B 及測點 C 較接近投潭影響範圍，所以測點 C 及測點 B 之壓力震盪較測點 A 大。測點 A 及測點 B 所量測之標準差及振幅則較為相近，標準差大多在 0.2~0.5 公尺左右，以波高來看則為 0.4~1.0 公尺左右；而最大振幅 2.1 公尺是 50 萬 CMD 測點 A，亦即最大波高可達 2 公尺甚至 4 公尺，詳細數據比較，如摘表 4。

摘表 4 無階梯式豎井消能工內部壓力彙整表

	壓力點 A			壓力點 B			壓力點 C		
流量 (萬 CMD)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)
10	23.12	0.23	0.85	23.12	0.24	0.90	23.04	0.25	1.12
20	25.28	0.25	1.11	25.09	0.40	1.38	24.80	0.54	1.90
30	28.00	0.32	1.13	27.79	0.39	1.47	27.61	0.18	0.80
40	32.77	0.43	1.95	32.57	0.36	1.72	32.38	0.21	0.82
50	38.28	0.55	2.10	38.00	0.48	2.00	37.96	0.24	0.85
60	45.42	0.34	1.23	45.14	0.30	1.14	44.97	0.19	0.86
70	45.42	0.34	1.23	45.14	0.30	1.14	44.97	0.19	0.86
80	55.27	0.11	0.56	54.95	0.23	0.73	54.85	0.18	0.62

(二)有階梯式豎井消能工試驗結果

試驗有階梯式豎井消能工於定量流情況下，分別進行 10 萬 CMD 到 80 萬 CMD 等 8 組壓力量測值，另試驗一組變量流，從 0 至 10 萬

CMD，即模擬豎井於低水位時充水過程之壓力變化。試驗 10 萬 CMD 變量流於充水過程，因測點 A'較接近消能板跌水影響範圍，所以測點 A'及測點 B'之壓力震盪較測點 C'大。測點 A'及測點 B'所量測之標準差及振幅則較為相近，標準差大多在 0.02~0.13 公尺左右，以波高來看則為 0.04~0.26 公尺左右；而最大振幅在 0.05~0.80 公尺左右，亦即最大波高可達 0.1~1.6 公尺；另於下游出水管段距離豎井 7 公尺設置壓力計，量測結果進入下游管段後壓力值之標準差小於 0.04 公尺，最大振幅小於 0.17 公尺，即壓力最大波高可能達 0.35 公尺，詳細數據比較如摘表 5。

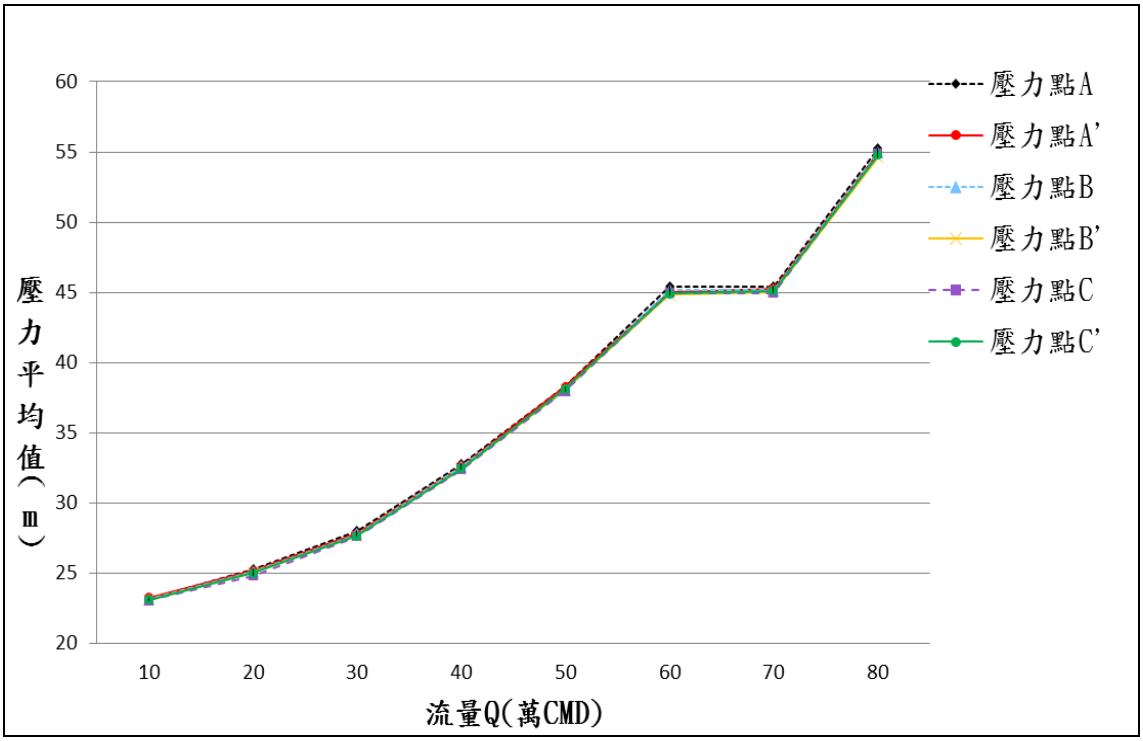
摘表 5 有階梯式消能工豎井定量流內部壓力彙整表

	壓力點 A'			壓力點 B'			壓力點 C'		
流量 (萬 CMD)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)
10	23.26	0.02	0.04	23.10	0.01	0.05	23.10	0.01	0.05
20	25.15	0.03	0.09	25.00	0.03	0.09	25.00	0.03	0.09
30	27.82	0.03	0.07	27.66	0.03	0.08	27.68	0.05	0.45
40	32.60	0.03	0.17	32.41	0.03	0.12	32.46	0.03	0.24
50	38.26	0.05	0.29	38.06	0.07	0.38	38.12	0.04	0.22
60	45.04	0.10	0.68	44.82	0.14	0.56	44.91	0.07	0.52
70	45.26	0.12	0.73	45.04	0.14	0.84	45.12	0.08	0.46
80	54.90	0.03	0.09	54.62	0.03	0.0910	54.79	0.03	0.08

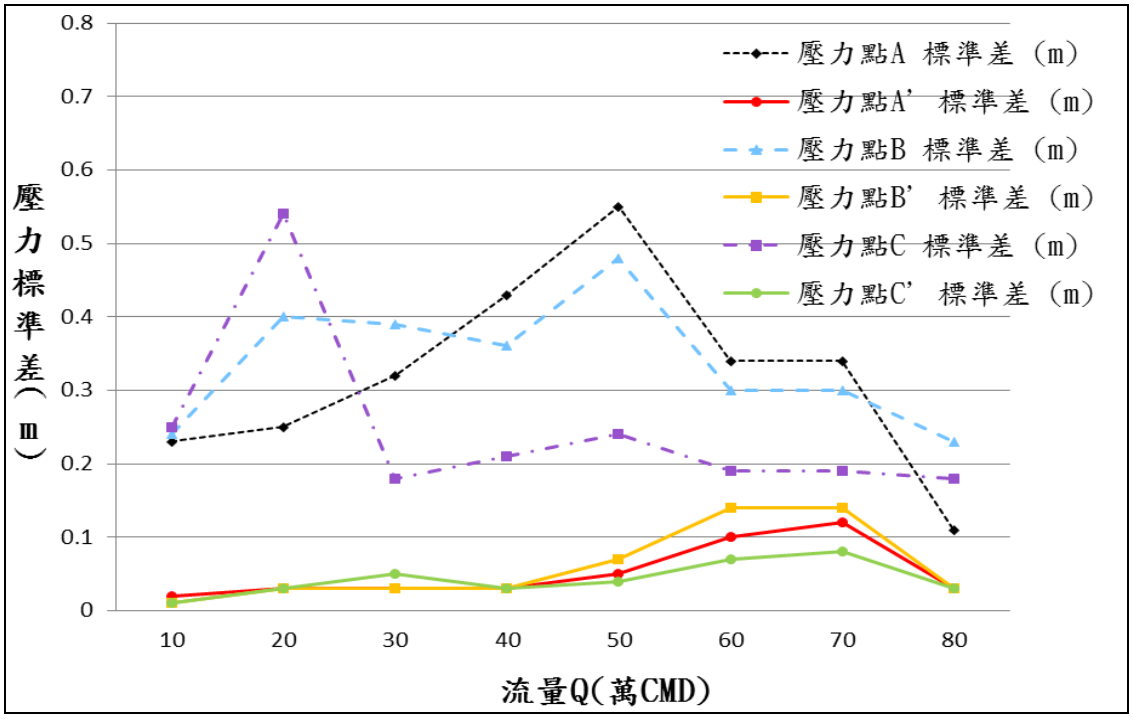
	壓力下游管段		
流量 (萬 CMD)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)
10	22.43	0.05	0.05
20	24.31	0.06	0.06
30	26.97	0.05	0.05
40	31.72	0.06	0.06
50	37.33	0.09	0.09
60	44.07	0.12	0.12
70	44.23	0.17	0.17
80	53.84	0.10	0.10

(三)模型比 1/20 試驗成果比較分析

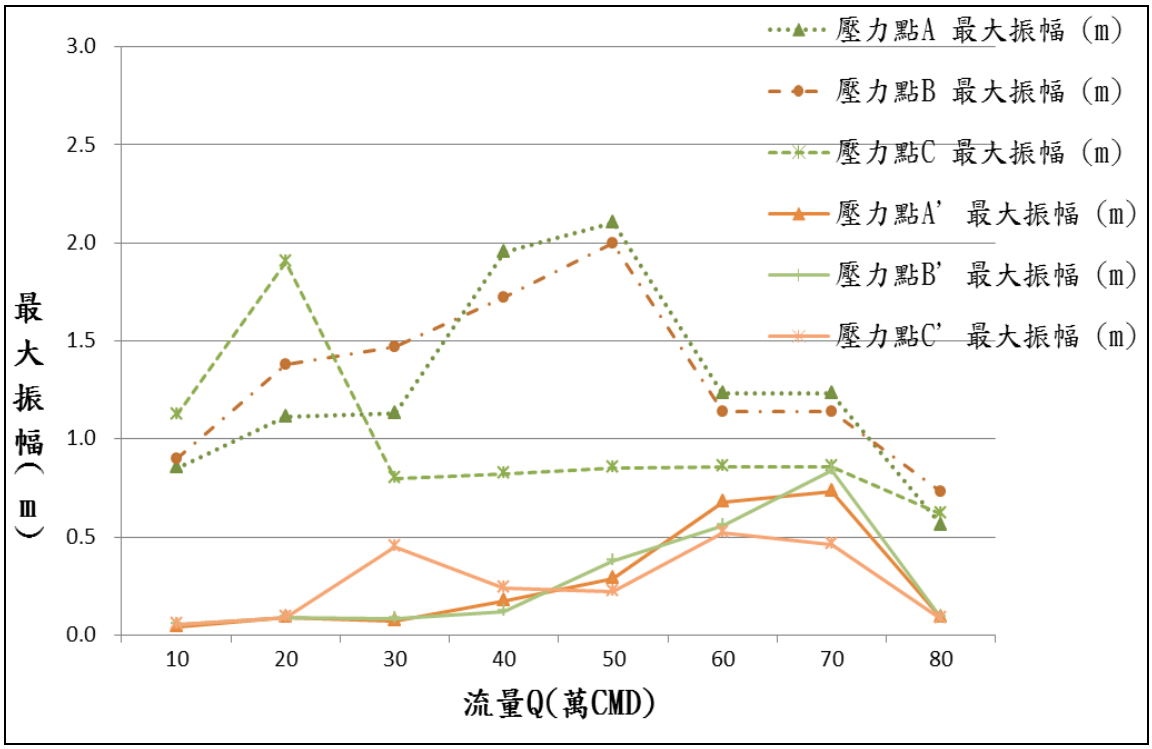
經過試驗評估無階梯式與有階梯式豎井消能工之差異性，基本上消能效率差異不大，呈現出各測點壓力量測之平均值相近，無階梯式豎井消能工壓力量測之平均值略大，詳如摘圖 6 所示，圖中標註 A、B、C 為無階梯式豎井消能工之壓力量測值，標註 A'、B'、C' 為有階梯式豎井消能工之壓力量測值。惟無階梯式豎井消能工投潭速度快，投潭後產生大量夾氣且捲氣影響深度大。量化水面劇烈震盪以致量測壓力產生較大標準偏差及最大振幅，詳如摘圖 7~8 及摘表 6 所示。無階梯式豎井消能工之壓力標準偏差與最大振幅隨著不同輸水量投潭位置轉移產生明顯變化。階梯式豎井消能工不僅降低投潭流速、減少夾氣量與捲氣深度，減少水面震盪達到穩定供水與降低下游排氣閥負擔。因此豎井消能工應採用具有階梯式之豎井消能工。



摘圖 6 不同輸水量有無階梯式豎井消能工壓力量測之平均值



摘圖 7 不同輸水量有無階梯式豎井消能工壓力量測之標準偏差



摘圖 8 不同輸水量有無階梯式豎井消能工壓力量測之最大振幅

摘表 6 不同輸水量有無階梯式豎井消能工壓力量測值比較

壓力(mH_2O)	無階梯式豎井消能工@點B			有階梯式豎井消能工@點B		
流量	平均值	標準差	最大振幅	平均值	標準差	最大振幅
10萬CMD	23.12	0.24	0.90	23.10	0.01	0.05
20萬CMD	25.09	0.40	1.38	25.00	0.03	0.09
30萬CMD	27.79	0.39	1.47	27.66	0.03	0.08
40萬CMD	32.57	0.36	1.72	32.41	0.03	0.12
50萬CMD	38.00	**0.48**	**2.00**	38.06	0.07	0.38
60萬CMD	45.14	0.30	1.14	44.82	**0.14**	0.56
70萬CMD	45.14	0.30	1.14	45.04	**0.14**	**0.84**
80萬CMD	54.95	0.23	0.73	54.62	0.03	0.09

五、模型比 1/13.1 試驗成果

經過模型比 1/20 試驗成果，基本上已確認需採用有階梯式豎井消能工，接著 108 年度進行模型比 1/13.1 試驗是評估不同模型比尺之比對驗證。模型比 1/13.1 之試驗項目，係進行不同輸水量(由 10 萬 CMD 至 80 萬 CMD)與控制不同豎井水位之清水試驗。其中不同豎井水位，包括木瓜園輸送至南化淨水場與木瓜園輸送至內門減壓池所需之豎井水位，以及考慮光滑管與粗糙管不同情境下之水位變化。模型比 1/13.1 之試驗結果，其水理現象與模型比 1/20 的試驗成果相近，其中捲氣量及捲氣深度略大於模型比 1/20，呈現模型比尺效應。試驗過程中可觀測到各階梯均能阻擋氣泡下移，由模型比 1/13.1 試驗結果階梯式豎井消能工可達到預期之消能與控制投潭捲氣影響，詳如摘表 7 所示。

摘表 7 模型比 1/20 試驗投潭深度與模型比 1/13.1 試驗成果比較

輸水量(萬CMD)	試驗竪井水頭(m)	無階梯式竪井消能工(1/20模型)投潭氣泡深度(m)	有階梯式竪井消能工(1/20模型)投潭氣泡深度(m)	試驗竪井水頭(m)	有階梯式竪井消能工(1/13.1模型)投潭氣泡深度(m)
10(變量)	--	0~7	**0~3**	--	**--**
10(定量)	145.0	7	幾乎無	145.5	1.8
20(定量)	147.0	12	幾乎無	147.3	1.9
30(定量)	149.8	15	1	150.1	2.4
40(定量)	154.5	20	2	155.7	3.2
50(定量)	160.0	**25**	**2~3**	162.3	**3.8**
60(定量)	166.9	20	**2~3**	170.4	**4.1**
70(定量)	167.0	20	**3**	172.5	**3.2**
80(定量)	176.8	無	無	181.1	無

六、模型試驗成果綜合評估

經過竪井消能工模型比 1/13.1 的清水試驗，發現隨著輸水量增大所需竪井水位越高。雖然高流量時在階梯式竪井消能工水體交替震盪流況較劇烈，但是高流量所需削減的水頭越小。惟考量尚需微調改善水理流況，經由模型比 1/20 及模型比 1/13.1 試驗成果綜合評估如下：

（一）竪井消能工各階梯間的垂直隔牆分別設置通氣孔，考量未來維護檢查通道，建議適度調整通氣孔水平位置、尺寸及維護通道，以利工作人員進出。

（二）考量適度退縮消能板長度與調整隔牆位置增加跌水空間，以降低水流跌水時擠壓在消能板末端，改善水體交替震盪流況。

（三）考量微調降低入水管與第一階跌水板之高差(現況 2 公尺)，並建議最下層增加一階消能隔板(即增設第 16 階)，以及入水管進入竪井水流之方向，盡量與跌水板流向平行。

（四）調整池銜接竪井之入水管，其前端設置彎頭有其必要性，且兼具抗渦功能。經補充試驗彎頭最高點，設置 10 英吋通氣孔對短管輸水之水理流況影響不大，考量無需設置通氣管。

Abstract

In southern Taiwan, the rainfall amount in wet season is 9 times that of the dry season, which is the highest in Taiwan, and the dry season is very long (from October to May). In recent years, the water supply facilities and allocation systems are no longer available because of the impact under extreme rainfall events and growing demand.

To meet the needs of cross-regional water allocation, the overall risk of water shortage in the southern region is higher than in other parts of Taiwan. Therefore, the complete and flexible water source allocation and management mechanism is one of the necessary measures to reduce the risk of water shortage.

Water in Tainan is mainly supplied by Tsengwen, Wushantou and Nanhua Reservoirs. The demand for potable and industrial water is about 920,000 CMD. Tsengwen-Wushantou Reservoir is responsible for 40% of the water demand, 40% comes from Tsengwen Wushantou Reservoir and Nanhua Reservoir is responsible for the remaining60%. Tsengwen Reservoir conveys water via a tunnel to Wushantou Reservoir to meet the demand for water. Nanhua Reservoir supplies water for Tainan and provides backup support for Kaohsiung. The existing raw water pipeline system does not have a backup. During drought, earthquake or other emergency events, Tainan will face water shortage.

To improve water supply for residence in southern Taiwan, WRA puts forward the Tsengwen/Nanhua Reservoirs Interconnecting Pipeline Project. The pipeline conveys water south when needed and connects Nanhua purification plant and Kaohsiung system.

The pipeline will begin at the penstock of Tsengwen hydropower plant in the left abutment of the dam. Energy dissipation takes place on Muguyan

Terrace, then the pipeline conveys water further downstream. A new tunnel will be built to connect the penstock of Tsengwen hydropower plant, the pipeline is laid in #2 diversion tunnel. The pipeline is jacked below Tsengwen river and then linked to an energy dissipation section. The operator can control discharge in accordance with water level in the reservoir and water demand. Dissipation can be achieved through the baffle-drop structure.

Physical model will review and adjust the baffle-drop structure and will physical model testing provides a visual representation of complex hydraulics and can assist the design unit in providing useful references for planning and design modifications as well as decision-making processes.

Keyword：Tsengwen/Nanhua Reservoir Interconnecting Pipeline, Baffle drop

結論與建議

一、結論

(一)經過試驗結果顯示，第二階段(階梯式豎井消能工)可達預期消能效果與改善投潭輸水夾氣問題。即採用階梯式豎井消能工，有效減緩高落差的投潭速度，明顯改善投潭水體夾氣捲入深度與夾氣量。

(二)兩種不同模型比加以比對驗證，隨著模型比尺放大發現夾氣量與夾氣捲入深度會略微增加，經過多層隔板可發揮阻斷夾氣捲入深度，惟考量現場尺度效應，建議微調豎井內部消能空間冀期水理流況更臻理想，詳如建議事項。

(三)經由調整池進入豎井消能工之輸水管路，其前端設置彎頭有其必要性，且兼具抗渦功能。經補充試驗彎頭最高點，設置 10 英吋通氣孔對短管輸水之水理流況影響不大，考量無需設置通氣管。

二、建議

(一)豎井消能工各階梯間的垂直隔牆分別設置通氣孔，考量未來維護檢查通道，建議適度調整水平位置、尺寸及維護通道，以利工作人員進出。

(二)考量適度退縮消能板長度與微調隔牆位置增加跌水空間，以降低水流跌水時擠壓在消能板末端。

(三)考量調降低入水管與第一階跌水板之高差(現況 2 公尺)，並建議最下層增加一階消能隔板(增設第 16 階)，以及入水管進入豎井水流之方向，盡量與跌水板流向平行。

(四)階梯式豎井消能工於定量輸水情況下，冀期下游長距離滿管流穩定輸水，考量下游閘閥避免於最大輸水量 (80 萬 CMD)時緊急關閉閘閥，導致豎井產生異常水位的發生。

(五)本項階梯式豎井消能工營運管理階段所需埋設感測器的初步建議，第一項是錐形閥控制流量(前端設置壓力感測器及超音波流量計)；第二項調整池水位包括傳統水位尺與影像感測器，以及自動

化水位壓力計比對分析；第三項豎井水位與結構震動感測器，包括通風側軌道式或鋼索道式之活動式水面感測器或壓力感測器，以及豎井結構震動感測器，第四項豎井下游輸水管排氣閥排氣頻率與壓力感測器。

第一章 前言

曾文水庫目前僅能透過烏山頭水庫供水，對南部地區水資源供水調度存在風險，尤其未來南化水庫如果執行防淤操作期間，如有缺水風險則曾文水庫備援供應需求增加，故擬在曾文水庫下游增設供水管路工程。經濟部水利署水利規劃試驗所(以下簡稱本所)配合經濟部水利署南區水資源局(以下簡稱南水局)辦理曾文水庫庫區範圍(木瓜園台地)設置豎井消能工之水工模型試驗，以確保水庫既有設施新增管路系統之安全無虞。

南水局即將執行曾文水庫下游新增聯通管路工程，本項工程起點由曾文水庫電廠壓力鋼管取水，採重力輸水方式至台南南化淨水場之調節池及南化區北寮銜接既有南化高屏之聯通管，設計最大輸水能力為 80 萬 CMD (每日 80 萬噸)，輸水控制點為既有南化高屏聯通管之東平橋(EL.144 公尺)。如曾文水庫水位 195m 以上能輸送 80 萬 CMD 至內門減壓池或南化淨水場，當水庫水位 185m 以上能輸送 50 萬 CMD 至內門減壓池或南化淨水場。然而在水庫最高水位 230m 於低輸水量情況下，聯通管的上游端需消耗約 86 公尺的水頭，為避免下游管內流速過快產生穴蝕。因此分兩階段消能，第一階段經消能井消能再進到調整池，第二階段消能工採用美國愛荷華水利學院開發的階梯式豎井消能工，取代傳統閥室消能設施。階梯式豎井消能工係藉由調整池至曾庫公路高差約 60 公尺，豎井內標高 172m 至標高 140m 分 15 個階段消能每階高程差 2.25m。此設計優點在於底部輸水管壓力的變化反應於豎井中水位的高低，因而操作時只需確保進出入調整池流量的平衡，即可維持調整池水位。該豎井內以垂直中隔牆分成二區，其中一區為通風側，提供通氣空間，另一側裝置階梯式的水平擋板，水流經擋板逐階往下掉落，所需挾帶的空氣可由通氣孔與通風側天井互通，設計豎井內部直徑 7.6 公尺，淨高度 61 公尺(標高 122m 至 183m)之階梯式豎井消能工，為了解階梯式豎井消能工之消能與排氣效果，爰此南水局委託本所成立本計畫辦理模型試驗。

第二章 資料蒐集

本章資料主要摘錄自「曾文南化聯通管工程設計及環境影響檢討-基本設計報告」。

一、工程設計背景

臺灣南部地區雨量豐枯比 9:1 為全臺灣之最，枯水季長(10 月至隔年 5 月)，近年來極端氣候旱澇兩極、用水成長及水庫防淤操作時需聯合調度等情境下，既有供水設施及調度系統已無法滿足跨區調度支援需求，相較臺灣其他地區，南部地區整體缺水風險較高。

依據民國 105 年統計資料，臺南地區公共用水平均約 89.8 萬噸/日，全仰賴水庫供給，其中 40%來自於曾文-烏山頭水庫，其餘 60%來自南化水庫。根據民國 106 年 10 月淤積測量曾文水庫有效蓄水量 4 億 5,373 萬立方公尺、民國 104 年淤積測量烏山頭水庫 7,828 萬立方公尺，南化水庫因莫拉克颱風造成水庫淤積嚴重，民國 107 年 11 月淤積測量南化水庫有效蓄水量為 9,145 萬立方公尺。因此，曾文與烏山頭水庫總有效蓄水量為南化水庫有效蓄水量的 5.8 倍。換言之，南化水庫有效蓄水量僅為曾文與烏山頭水庫兩水庫庫容的 17.2%，卻需負擔較多的公共用水。此外，目前臺南地區於枯旱時期除提前預警及調度管理外，依不同階段加強工業用水節水、收取耗水費及民生節水等措施，農田水利會亦配合水利署及南水局供水協調會議，提前採行加強灌溉管理，將水蓄存於曾文水庫，以盡可能延長供水期程。

若以民國 104 年枯旱事件為例，當年 4 月 22 日曾文-烏山頭水庫尚有 1 億 3,221 萬噸水量，而南化水庫蓄水量僅剩 2,100 萬噸，即使在嚴密的管控出水情形下，仍需實施第二階段限水，如果當年曾文南化聯通管已完成，則可彈性調度曾文水庫蓄水，南部地區限水風險確實可以大為降低。

此外，高雄地區民國 105 年公共用水平均 157 萬噸/日，近 7 成之供水來自高屏溪攔河堰，惟川流水豐枯水期水質水量變化相當懸

殊，無蓄豐濟枯之大型蓄水設施，另若遭遇濁度太高超過淨水場處理能力或水質污染等緊急事件則無法供水，目前在此期間主要仰賴南化水庫經由既有南化高屏聯通管輸送每日最大 50 萬噸原水備援高雄，由南高清水幹管支援約每日最大 20 萬噸清水，以及其他調度管理措施，以盡可能維持供水穩定，由此可見，南化水庫除了負擔臺南地區約 60%公共用水外，尚需支援高雄，供水負擔相當沉重。

基此，完備彈性的水源調度與管理機制，為降低缺水風險必要方法之一，故考量未來氣候變遷導致旱澇加劇下彈性調度能力、既有管路現況、影響供水之緊急事件等因素，冀期透過曾文南化聯通管之建設，使曾文水庫及南化水庫能彼此支援調度，以提升南部地區供水穩定，進一步確保民生安定及經濟發展。

二、設計理念

曾文南化聯通管定位為備援系統，如圖 2-1 所示；當有備援臺南地區需求時，曾文水庫水源將經由曾文南化聯通管輸送至南化淨水場調節池，原水由南化淨水場處理後送往臺南地區；當有備援高雄地區需求時，曾文水庫水源將經由曾文南化聯通管輸送至北寮銜接點進入南化高屏聯通管，經過內門減壓池再送往高雄地區淨水場處理。本工程設計理念如下：

(一)本計畫設計僅包含主管段，不含銜接南化淨水場分管段。

(二)設計流量應能滿足備援南化淨水場及南化高屏聯通管需求。

(三)取水管段應避免影響既有設施安全及其使用。

(四)消能設施設置地點應考量現地地形及地質條件，消能設施構造應能自動調節下游輸水管能量需求。

(五)輸水管路線應儘量減少徵收土地。

(六)應儘量減少土石開挖。

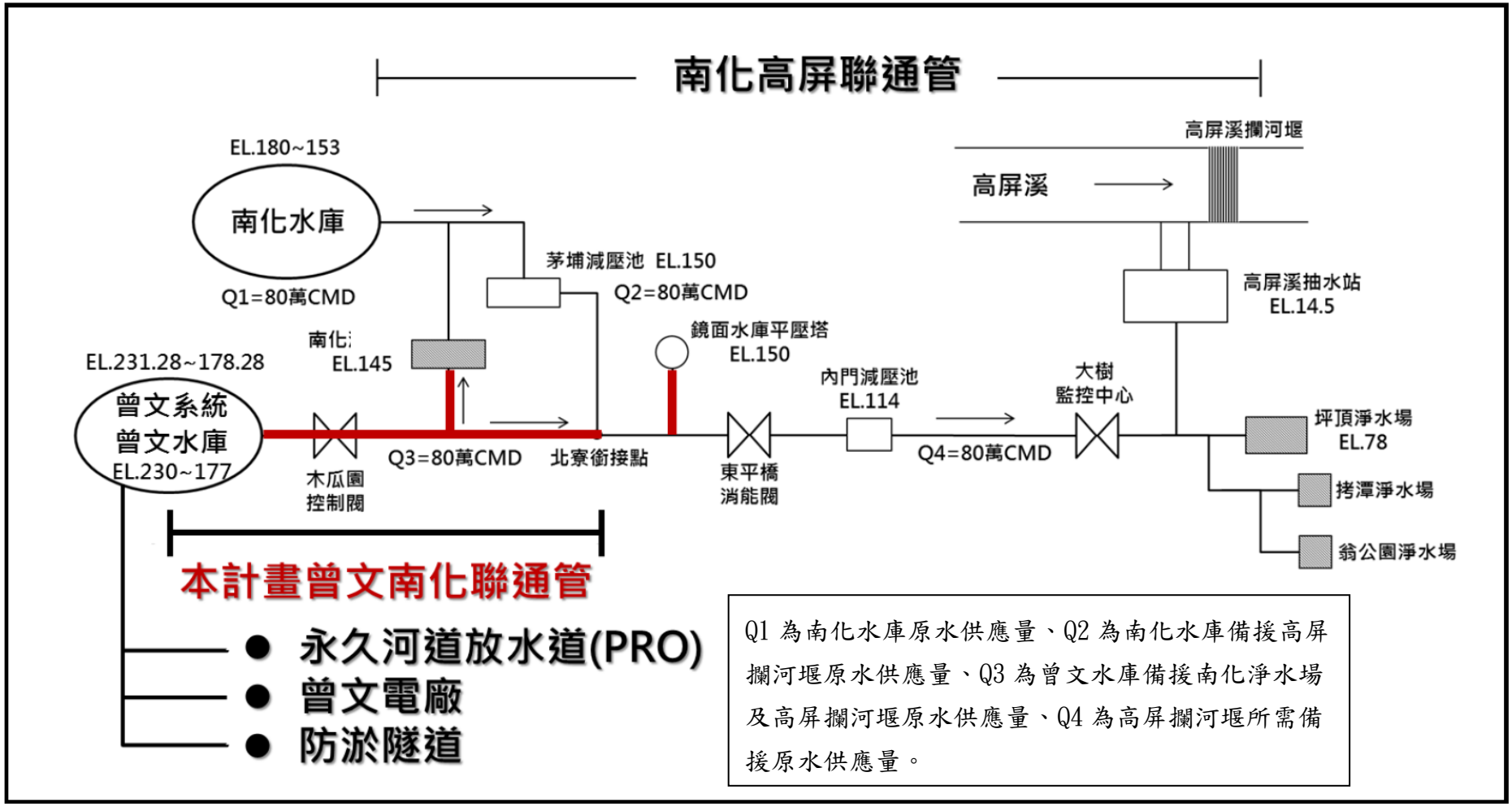


圖 2-1 曾文南化聯通管與南化淨水場及南化高屏聯通管系統關聯性示意圖

三、設計原則

(一)曾文水庫 195m 以上可輸送 80 萬 CMD 至內門減壓池或南化淨水場，且曾文水庫水位 185m 以上可輸送 50 萬 CMD 至內門減壓池或南化淨水場。

(二)曾文南化聯通管設計輸水能力為 80 萬 CMD，消能設施上游輸水路採直徑 D=2.2m SP，下游輸水路採直徑 D=2.6m SP。

(三)南化高屏聯通管於北寮橋至東平橋既有管段設計壓力 70m，本工程設置後變量流分析之水錘壓力不高於此值。

(四)管線埋設方法：管線埋設方式以明挖覆蓋為主，深度以管頂距路面 1.5m 為原則；穿越一般結構物採降挖工法時，原則應與吊掛或復舊之結構物間距 0.4m 以上；穿越重要設施或結構物採推進工法時，原則應保留 2 倍管徑之淨空；降挖穿越主要溪流時，管頂應距計畫渠底或床底工 2m 以上。

(五)水管橋設計底高程將高於最新公告河川計畫洪水位加出水高。

(六)人口密集地區為降低交通影響，將採推進方式辦理。

四、消能設計方案

(一)原規劃方案

原規劃採用大型閥室管中消能方案，興建大型閥室管中消能設計條件為內政部 1 等 1 水準系統水庫最高水位 EL.231.28m (曾文高程系統水庫最高水位 EL.230.0m)，輸水流量 10 萬~80 萬 CMD。在低輸水量情況下，管路損失量約 0.64m 及東平橋水力控制高程 144m，聯通管的上游端需消耗水頭高達 86.64m (231.28-0.64-144)。考慮閥門消能必須控制穴蝕(cavitation)的發生，該設計採三條平行的管線，如圖 2-2 所示，提供低、中、高流量操作，雖三條管線閥門消能操作複雜，但可避免閥體穴蝕現象。

原規劃方案擬定閥室控制閥之佈置，如圖 2-3 所示，每條線的隔離閥將採蝶閥，其尺寸之選擇以每條線之設計流速不超過 4.0m/s 為

原則， 故低、中、高流量線之隔離閥分別選為 D=1,200mm、1,500mm 及 2,200mm。

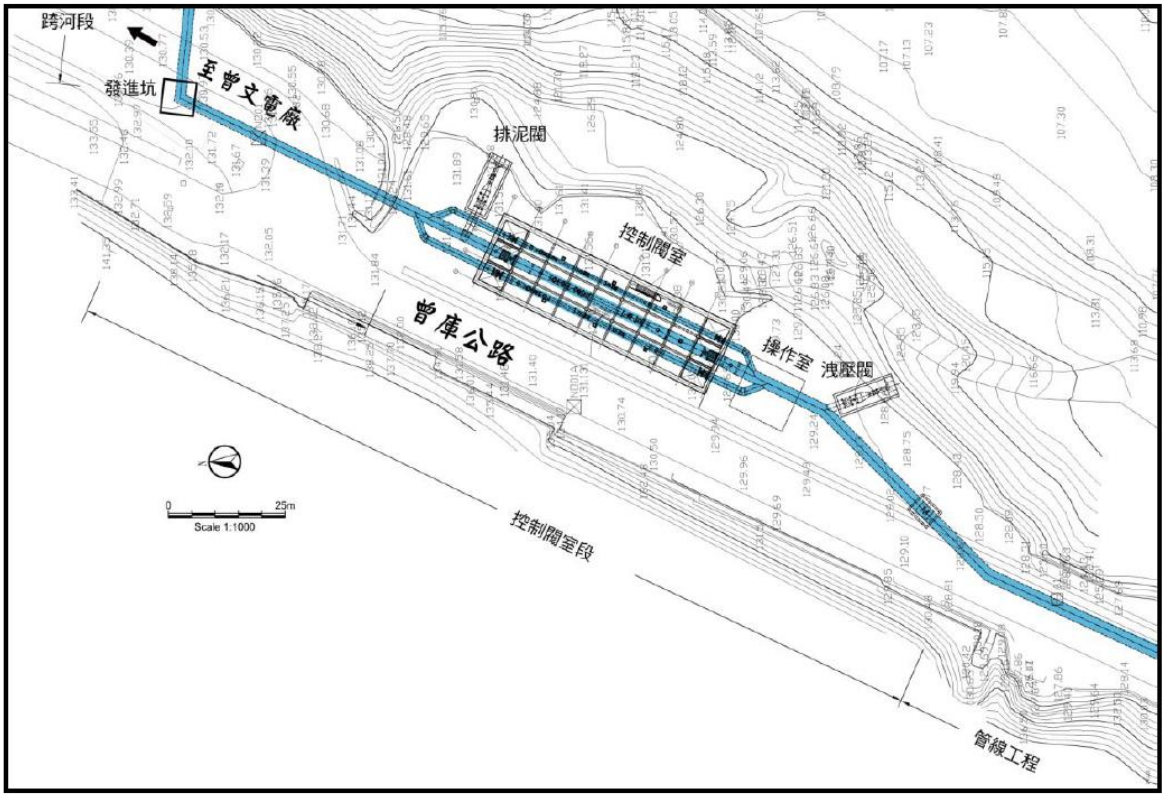


圖 2-2 興建大型閥室管中消能平面圖

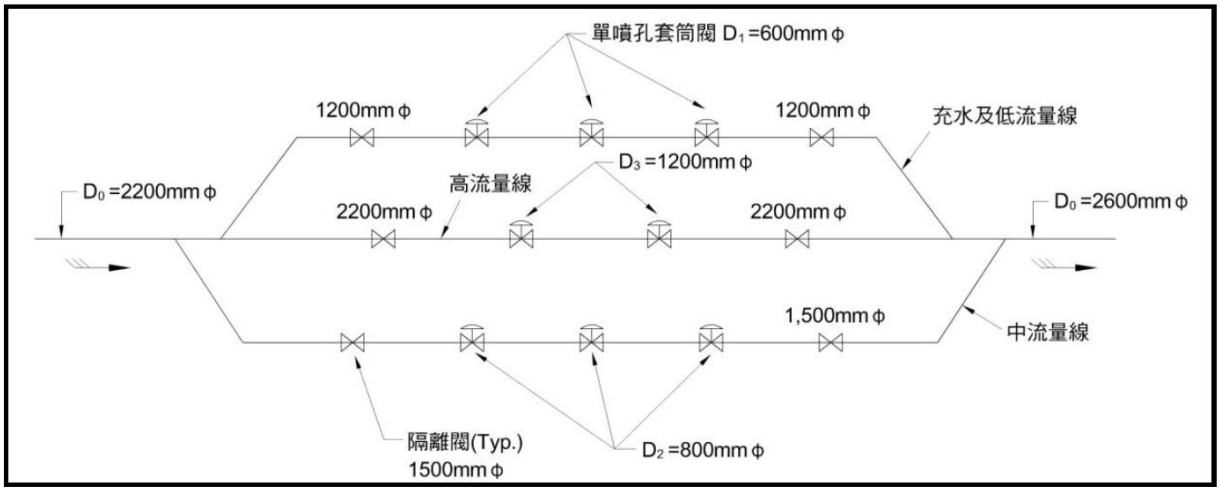
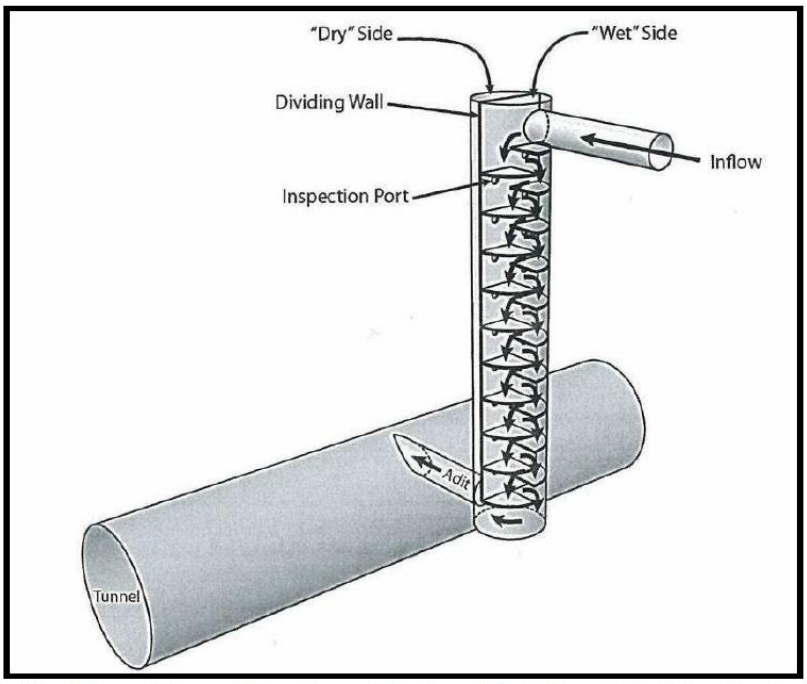


圖 2-3 大型閥室控制閥佈置示意圖

(二)新檢討方案

原規劃方案閥室依據流量之高低採用三條平行管線，操作複

雜，規劃設計單位進行消能方案檢討時，發現曾庫公路西側上邊坡有俗稱木瓜園台地，此台地高程介於 EL.175~200m 之間，高程適中，且屬國有地，由南水局管轄。故建議消能設施分階段改採消能井及調整池/消能豎井(Baffle-drop)方案，於木瓜園台地興建消能井於調整池前進行第一階段消能及流量控制，即採錐形閥開度控制流量進入調整池，並設計調整池於最高水位有足夠能量輸送 80 萬 CMD 至南化淨水場及內門減壓池，此調整池水位隨著輸水量變化依重力方式進入階梯式豎井消能工，故無需人為操作調整池水位；第二階段消能利用近年來美國愛荷華水利學院(Iowa Institute of Hydraulic Research) 開發的階梯式豎井消能工(Baffle-drop structure)，如圖 2-4 所示。做為調整池及下游輸水管段的媒介，此結構優點在於底部輸水管壓力的變化反應於消能豎井中水位的高程，因此消能豎井中水位至出水端無需人為操作。只需操作錐形閥開度確保進出調整池的流量平衡即可。詳細設計內容，如圖 2-5~圖 2-7 所示。與原規劃方案比較，如表 2-1 所示。有關階梯式豎井消能工的水位，係依據規劃設計單位考量至各淨水場管路損失，從設計最大輸水量 80 萬 CMD 至 10 萬 CMD，於光滑管情況下尚有 4.25 公尺至 36.58 公尺的餘裕水頭，於粗糙管情況下尚有 0.94 公尺~36.53 公尺的餘裕水頭，確保有足夠輸水能量水頭。



資料來源："Baffle-Drop Drop Structure Design Relationship" by A. Jacob Odgaard.

圖 2-4 階梯式豎井消能工設計圖

表 2- 1 消能閥室方案與階梯式豎井消能工方案比較

比較項目	原規劃方案 大型控制閥室消能	新檢討方案 調整池/消能豎井(Baffle-drop)
施工費	3.81 億元	3.77 億元
維護費	機械維護較土木維護費高，且因輪班需耗費較多人力	低
運轉操作	於不同流量時需於三處控制閥操作不同區間開度，人為疏失機率較高	僅需操作一處錐形閥開度控制流量，人為疏失機率較低
既有構造物影響	既有輸泥管影響工程進出	無
環境影響	水流聲音大，對環境影響衝擊大	在高地水流聲音較小，對環境影響衝擊小
防洪影響	緊鄰河岸，風險較高	遠離河岸，風險較低
交通因素	在曾庫公路旁，交通便利	車輛能到達，但須注意安全
工期因素	可在預定期限內完成，因需製作設備多，工程進度不易掌握	可在預定期限內完成，因一般土木設施多，工程進度較易掌握

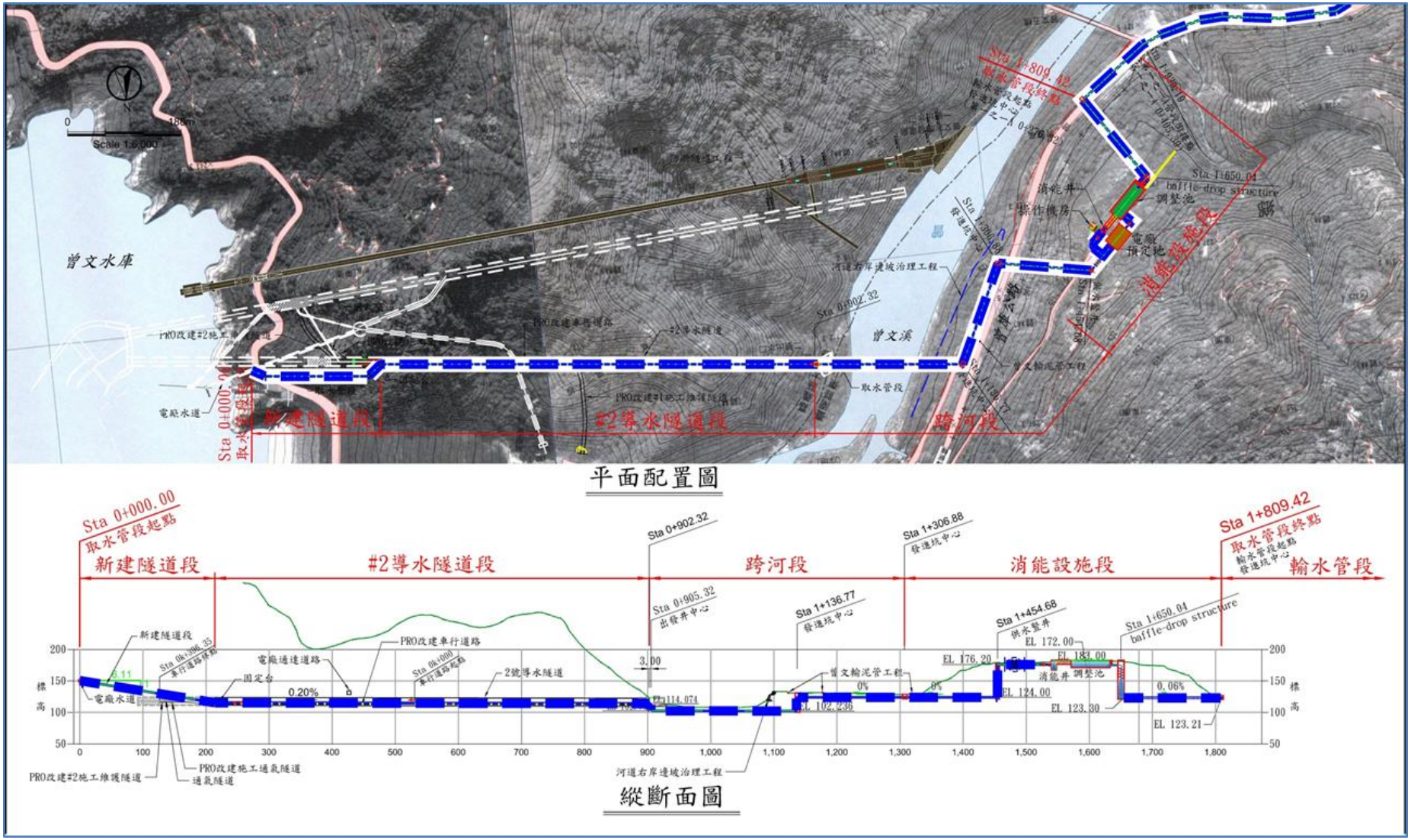


圖 2-5 水庫取水管段至調整池與豎井消能工平面及縱剖面配置圖

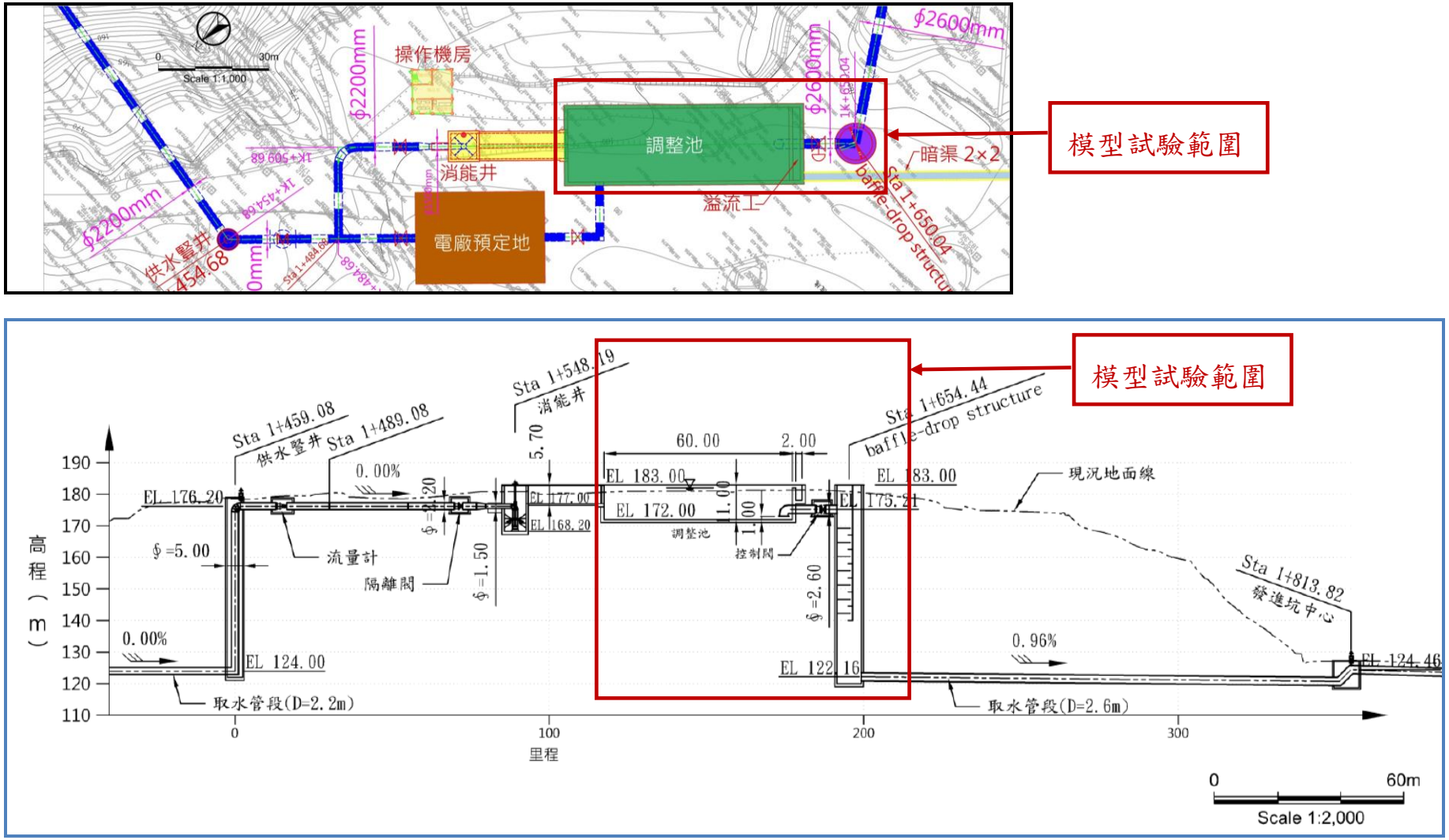


圖 2-6 水庫取水管段至調整池與豎井消能工平面及縱剖面局部配置圖

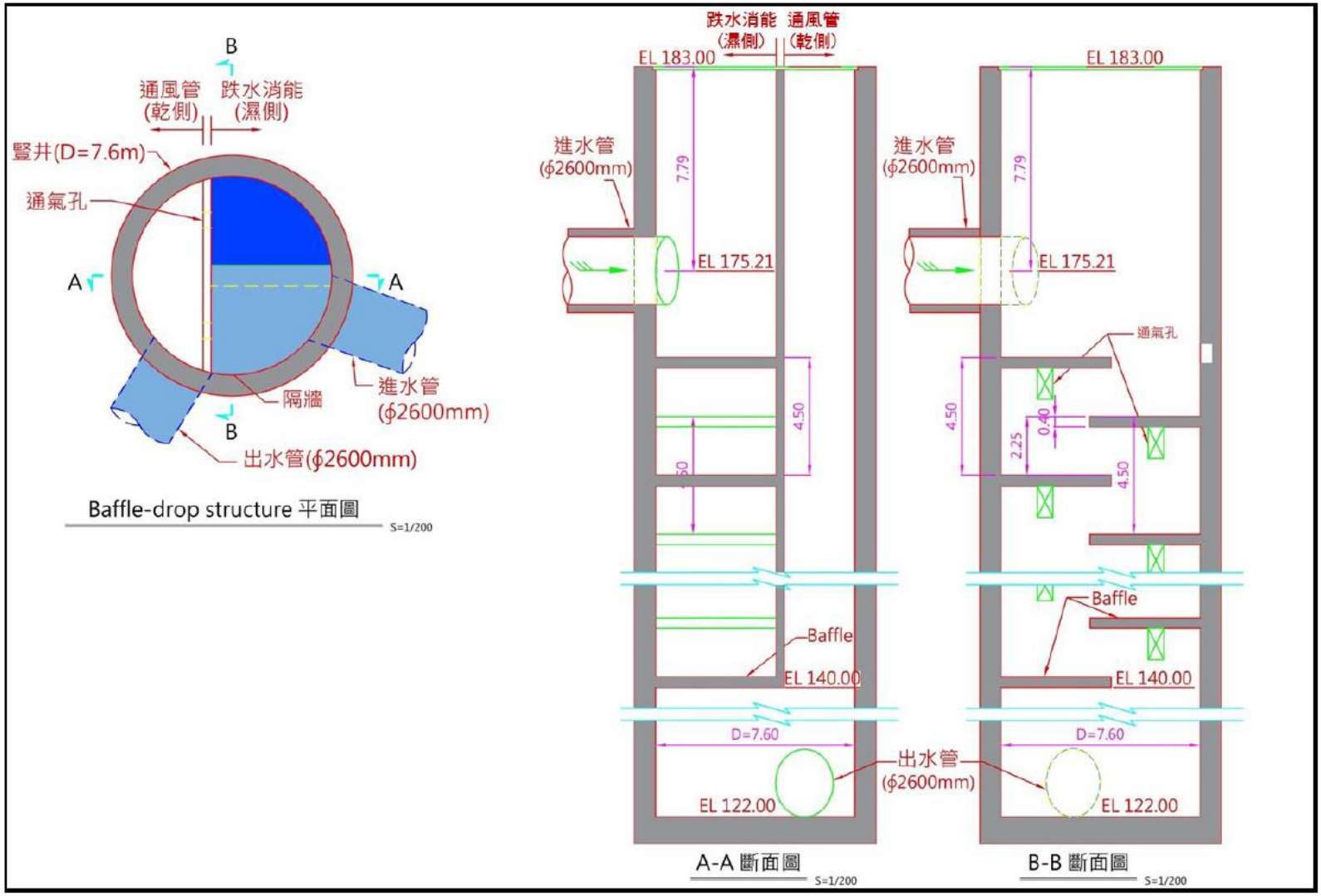


圖 2-7 階梯式豎井消能工配置圖

第三章 模型設計與試驗條件

一、 模型設計

本計畫試驗研究範圍之水理流況主要是明渠水流，因此模型設計主要根據福祿相似律（F_r=1）進行各項物理量之轉換，以下為重要模型比尺之物理量轉換關係式（模型/原體）之推導過程。

∵ 福祿數比 = $F_r = \frac{V_r}{\sqrt{g_r H_r}} = 1$ ∴ $V_r = \sqrt{g_r H_r}$ ……(1)

符號說明 F_r：福祿數比 ， V_r：流速比

g_r：重力加速度比 ， H_r：高度比

因為 g_r＝1 且採用等比模型，即 H_r＝L_r

符號說明 L_r：長度比

由（1）式得 $V_r = \sqrt{H_r} = \sqrt{L_r}$ ＝ $L_r^{\frac{1}{2}}$ …….(2)

∴ 時間比 $T_r = \frac{L_r}{H_r^{1/2}}$ ＝ $L_r^{\frac{1}{2}}$ ……..……(3)

∴ 流量比 $Q_r = L_r H_r V_r$ ＝ $L_r^{\frac{5}{2}}$ ……..……..…...(4)

∴ 坡度比 $S_r = \frac{H_r}{L_r} = 1$ ……..……(5)

符號說明 T_r：時間比 ， Q_r：流量比 ， S_r：坡度比

∴ 糙率比 $n_r = \frac{H_r^{2/3} S_r^{1/2}}{V_r} = \frac{L_r^{\frac{2}{3}}}{L_r^{\frac{1}{2}}}$ ＝ $L_r^{\frac{1}{6}}$ ……..……(6)

符號說明 n_r：糙率比

階梯式豎井消能工之水工模型設計建造，係以階梯式豎井消能工為主體，模擬現場上游定量輸水經調整池進入豎井，本計畫局部模型係探討豎井內部消能水理流況及消能效果。模型比尺先採用 1/20 測試，再進行 1/13.1 模型比尺比對驗證，相關物理量比尺關係，詳如表

3-1 所示。

模型以鐵板水槽模擬調整池，以透明壓克力製作模擬主體豎井消能工，除了便於觀察水理流態外，亦考慮糙率縮比問題（RC 混凝土的糙率為 0.014，計算 1/20 模型糙率為 0.014/1.65＝0.0085，1/13.1 模型糙率為 0.014/1.54＝0.0091，選用壓克力材料的糙率為 0.008 尚可反映）。

表 3-1 原體與模型間各物理量之比尺關係

模型比尺	長度	流速	時間	流量	糙率	福祿數比	坡度比
關係式	L_r	$L_r^{1/2}$	$L_r^{1/2}$	$L_r^{5/2}$	$L_r^{1/6}$	$\frac{V_r}{\sqrt{g_r H_r}}$	$\frac{H_r}{L_r}$
比尺	1/20	1/4.47	1/4.47	1/1,789	1/1.65	1	1
比尺	1/13.1	1/3.62	1/3.62	1/621	1/1.54	1	1

二、試驗條件

由於不同輸水量豎井所需之水頭亦不相同，惟模型試驗範圍無法建置下游邊界至數十公里輸水管段，因此採用設計單位水理計算於不同輸水量下豎井內部所需水頭，模型僅控制豎井內部所需水頭作為試驗的下游邊界條件。

規劃輸水路線可由曾文水庫輸水至南化淨水廠，以及至內門減壓池兩條路線，因為南化淨水場及內門減壓池皆為明渠開放水池，可由此兩處水池水位作為下游邊界條件，於不同輸水量條件下由南化淨水場及內門減壓池反算至豎井消能工內部所需水頭，並分別計算新管(光滑管)與舊管(粗糙管)兩種不同糙度管材所需之水頭。因此同一輸水量會有四種豎井內部水頭之計算結果，以 10 萬 CMD 為例，至南化淨水廠以新舊管所需之豎井水頭分別為 EL.145.42、145.47 公尺，至內門減壓池以新舊管所需之豎井水頭分別為 EL.144.57、144.64 公尺。因此同一輸水量會有四種計算所需水頭，各輸水量計算所需水頭，如表 3-2 及圖 3-1 所示。

(一) 模型比 1/20

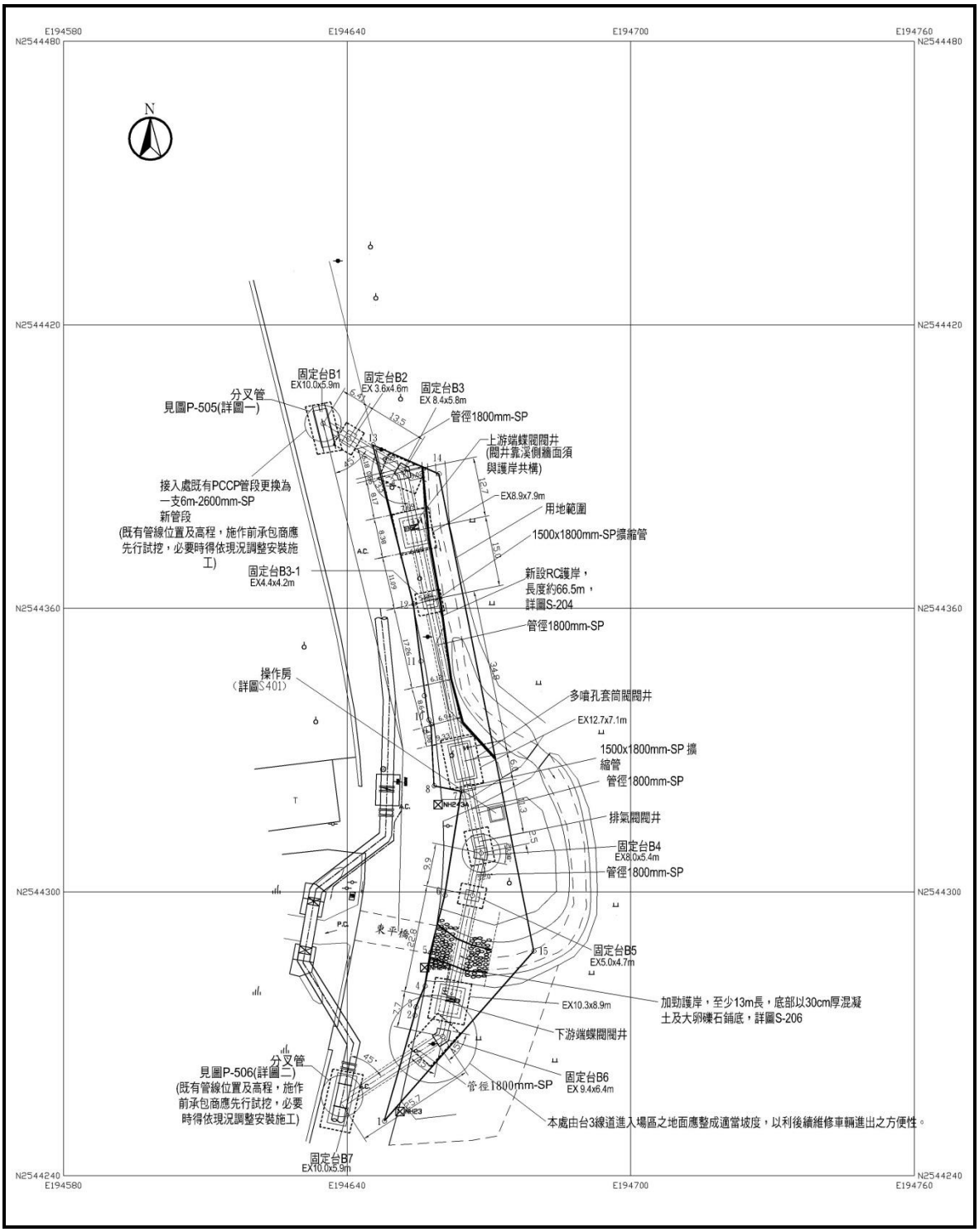
以 10 萬 CMD 為例，計算之水頭介於 EL.144.57~145.47 公尺之間，模型比 1/20 試驗豎井內部水頭採用計算之最高值與最低值之中值為豎井試驗條件，不同輸水量豎井內部水頭試驗條件，如表 3-3 所示。為控制豎井內部水頭，因此設計下游管段銜接可以調升不同高度之軟管以控制豎井內部水頭，如照片 3-1 所示。

為了解消能工之消能效果，除依據設計圖配置有階梯式消能工在豎井內部之模型豎井內部設計圖，如圖 3-2 及圖 3-3 所示。另外亦配置同樣尺寸，但是無階梯式豎井消能工作為對照組，無階梯式豎井消能工設計圖，如圖 3-4 及圖 3-5 所示。

表 3-2 不同輸水量下豎井所需水頭

木瓜園至南化淨水場(光滑管情境)				木瓜園至南化淨水場(粗糙管情境)			
輸水量(萬CMD)	能量損失合計(光滑管)(m)	南化淨水場調整池水位 NWL	木瓜園調整池/消能豎井水位(光滑管)(m)	輸水量(萬CMD)	能量損失合計(粗糙管)(m)	南化淨水場調整池水位 NWL	木瓜園調整池/消能豎井水位(粗糙管)(m)
10	0.42	145	145.42	10	0.47	145	145.47
20	2.10	145	147.10	20	2.31	145	147.31
30	4.63	145	149.63	30	5.08	145	150.08
40	8.19	145	153.19	40	9.01	145	154.01
50	12.79	145	157.79	50	14.09	145	159.09
60	18.47	145	163.47	60	20.34	145	165.34
70	24.97	145	169.97	70	27.50	145	172.50
80	32.75	145	177.75	80	36.06	145	181.06
木瓜園調整池至內門減壓池段(光滑管情境)				木瓜園調整池至內門減壓池段(粗糙管情境)			
輸水量(萬CMD)	能量損失合計(光滑管)(m)	內門減壓池/東平橋水力高程(m)	木瓜園調整池/消能豎井水位(光滑管)(m)	輸水量(萬CMD)	能量損失合計(粗糙管)(m)	內門減壓池/東平橋水力高程(m)	木瓜園調整池/消能豎井水位(粗糙管)(m)
10	0.57	144	144.57	10	0.64	144	144.64
20	2.68	144	146.68	20	2.96	144	146.96
30	5.96	144	149.96	30	5.96	144	149.96
40	10.57	144	154.57	40	11.72	144	155.72
50	16.50	144	160.50	50	18.26	144	162.26
60	23.83	144	167.83	60	26.39	144	170.39
70	44.10	114	158.10	70	48.83	114	162.83
80	57.82	114	171.82	80	64.01	114	178.01

備註：巨廷工程顧問有限公司提供



備註：巨廷工程顧問有限公司提供

圖 3-1 東平橋消能設施平面佈置圖

表 3-3 不同輸水量下模型比 1/20 試驗豎井水頭

輸水量 (萬 CMD)	所需豎井最大水位 (m)	所需豎井最小水位 (m)	試驗豎井水頭 (m)
10	145.47	144.57	145.0
20	147.31	146.68	147.0
30	150.08	149.63	149.8
40	155.72	153.19	154.5
50	162.26	157.79	160.0
60	170.39	163.47	166.9
70	172.50	158.10	167.0
80	181.06	171.82	176.8

照片 3-1 模型比 1/20 採用軟管調整高度控制豎井水頭之裝置照片

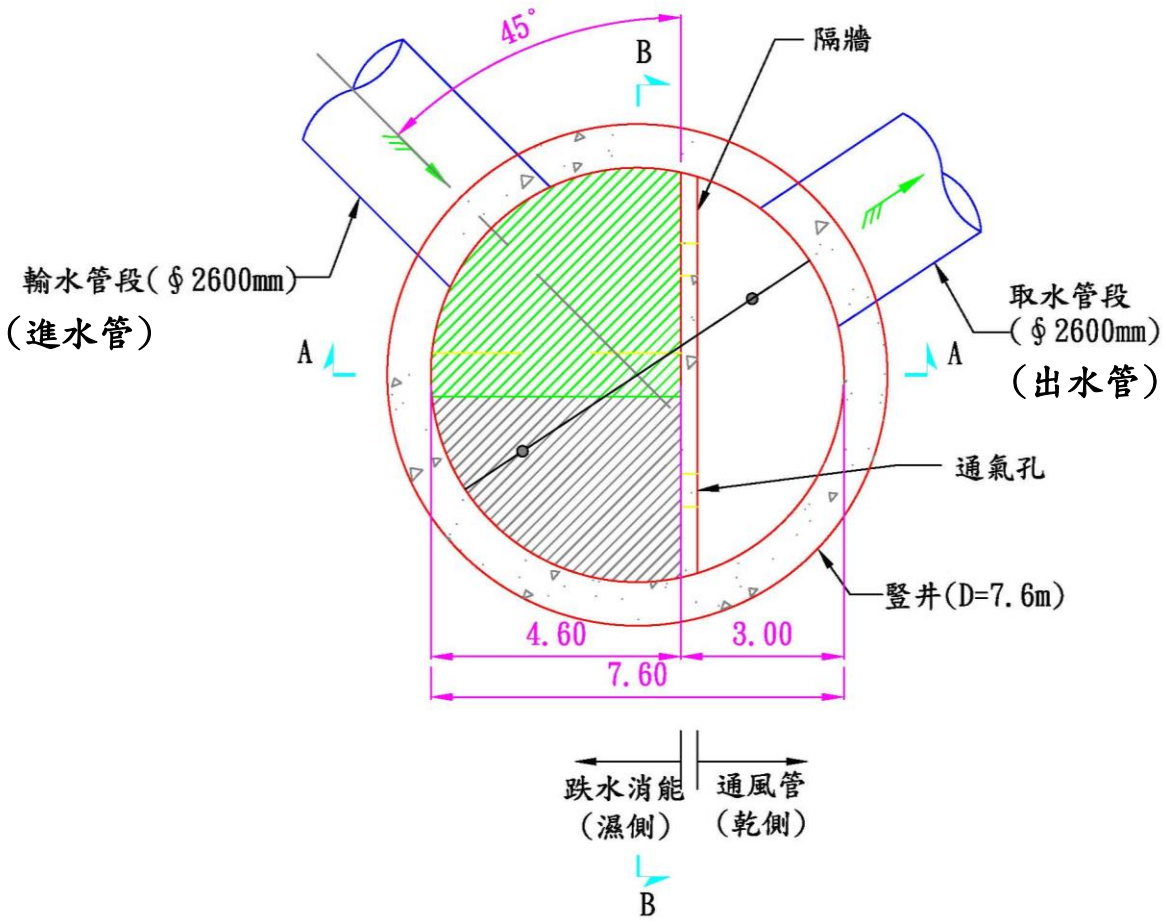


圖 3-2 階梯式豎井消能工設計圖(俯視)

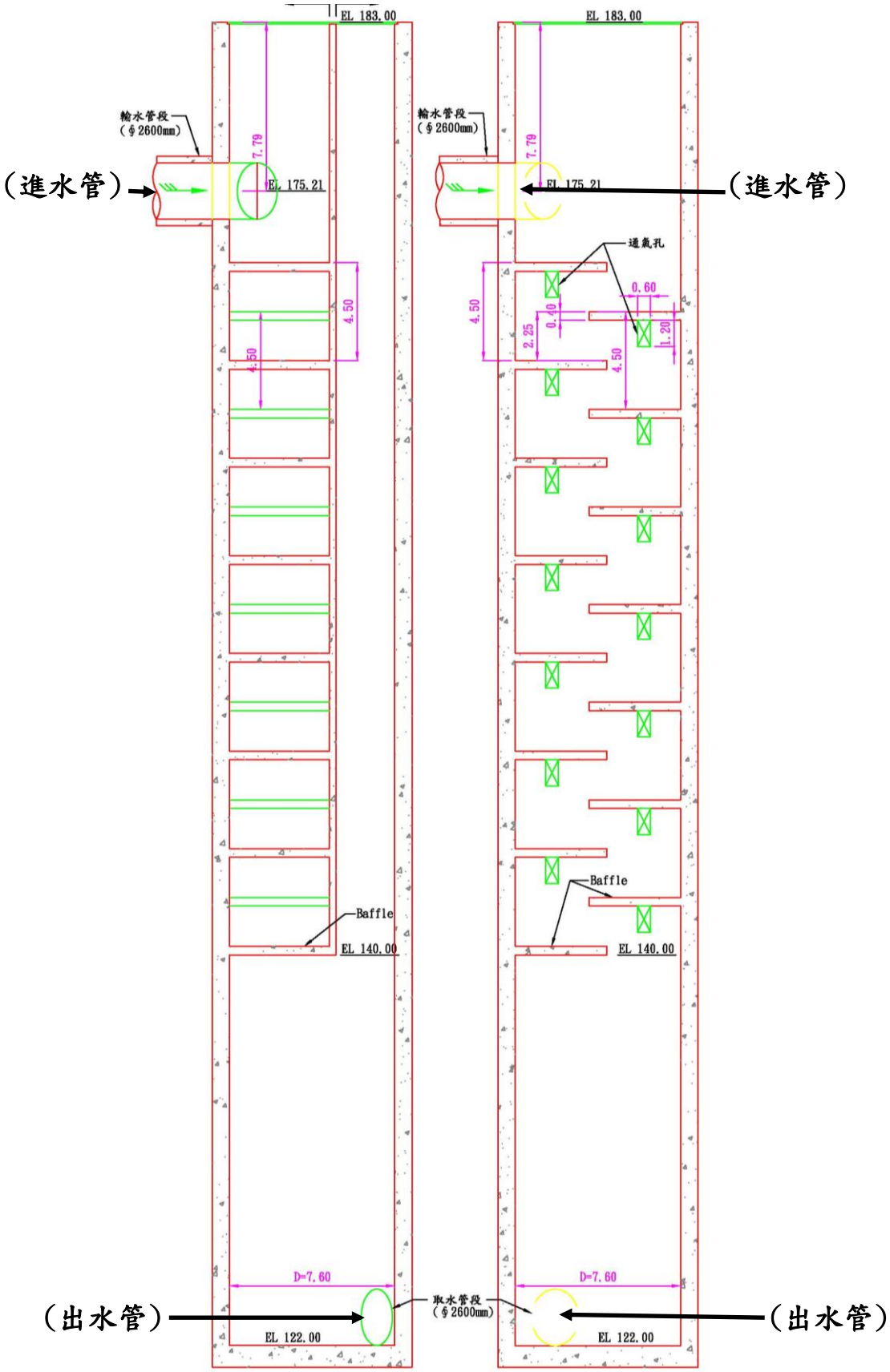


圖 3-3 階梯式豎井消能工設計圖(側視)

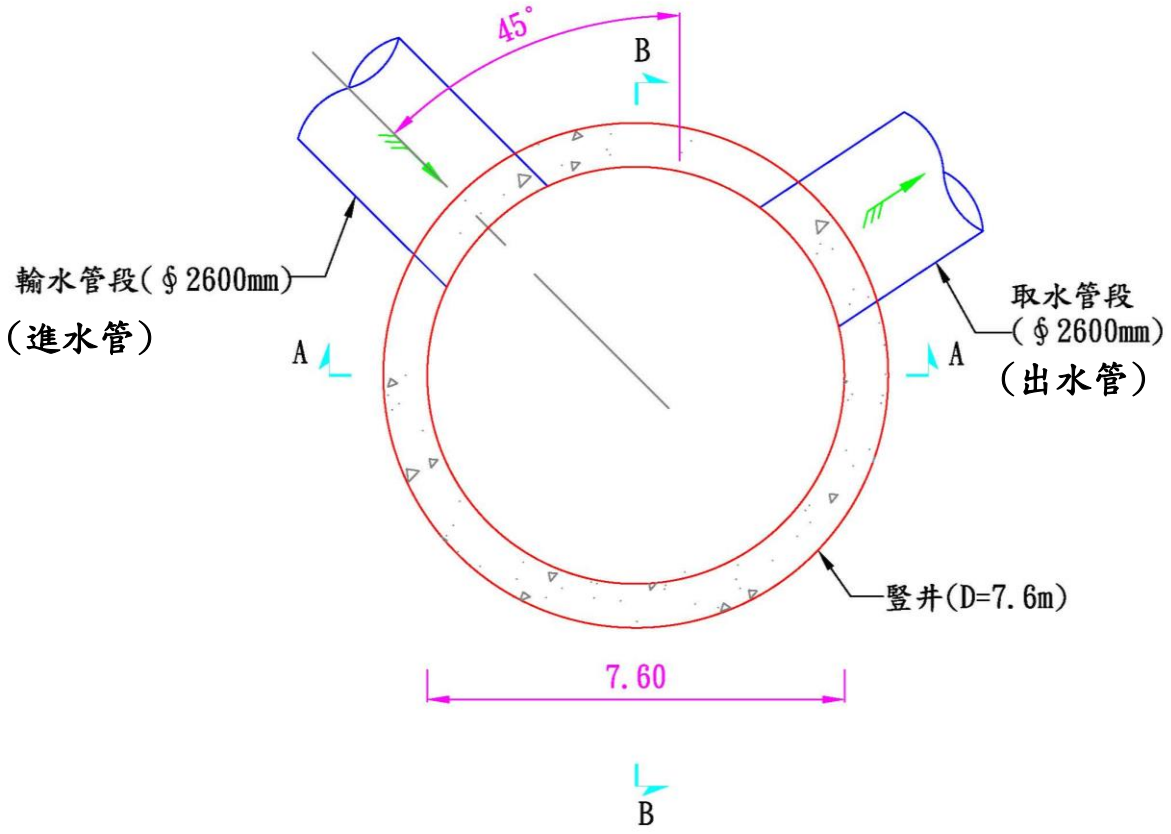


圖 3-4 無階梯式豎井消能工設計圖(俯視)

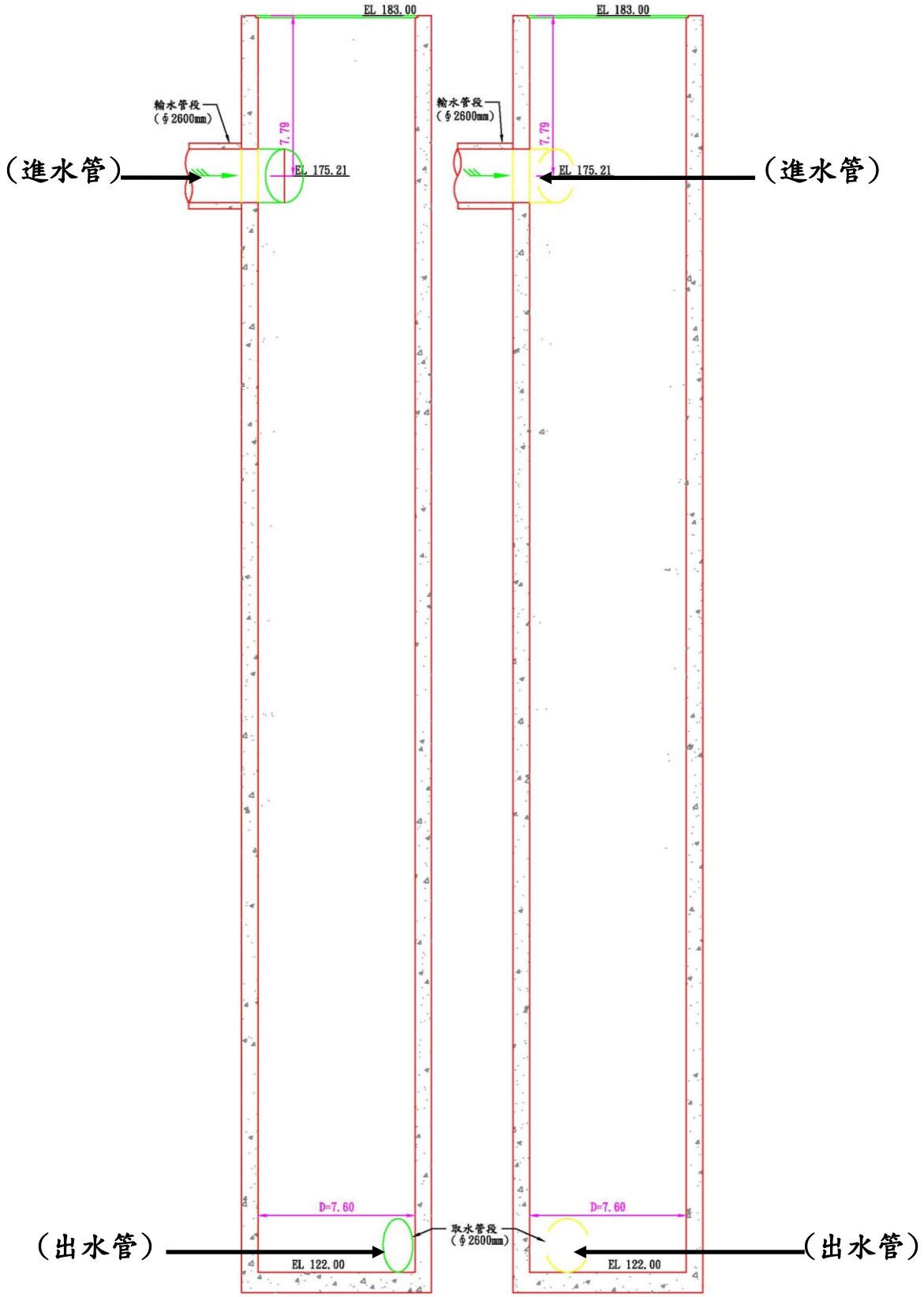


圖 3-5 無階梯式豎井消能工設計圖(側視)

(二) 模型比 1/13.1

階梯式豎井消能工模型比 1/13.1，建置在模型比 1/20 的東側，即原配置之位置，如照片 3-2 所示。模型組裝定位前，先將各分段之階梯式豎井消能工之壓克力模型，加強銜接處防漏處理，如照片 3-3 所示。階梯式豎井消能工壓克力模型組裝定位後再細部防漏處理，如照片 3-4 所示。豎井水位採用直立式鋼管接閥門調整開度，加上水位標尺與透明聯通管呈現豎井水位，如照片 3-5~3-6 所示。

照片 3-2 豎井消能工模型基礎平台

照片 3-3 豎井壓克力模型初步防漏

照片 3-4 豎井壓克力模型組裝定位

照片 3-5 豎井水位採直立鋼管接閥門調整

照片 3-6 豎井水位採直立鋼管接閥門、透明聯通管與水位標尺調整

第四章 試驗成果

本項試驗主要以壓力計量測壓力變化，量化豎井消能工水位及壓力變化範圍。因此設計 A、B、C 三處壓力量測點，如圖 4-1 及圖 4-2 所示。A 點及 B 點在取水管段同(即出水管)同一軸線上，高程設置在豎井底部 EL.122m，A 點設置在消能板側(消能側)、B 點設置在無消能板側(通風側)，距離豎井邊壁為豎井半徑之 1/3(距離豎井中心 2.53 公尺)，藉以比較在有階梯式消能側及無階梯式通風側之壓力差異性。C 點則設置在輸水管(即入水管)軸線上對角之邊壁上，藉以了解無階梯式豎井消能工在直接投潭時，量化投潭產生之壓力變化。有階梯式豎井消能工與無階梯式豎井消能工之測壓位置相同，以利評估豎井有無階梯式消能工之差異性，即量化兩者壓力變化程度。

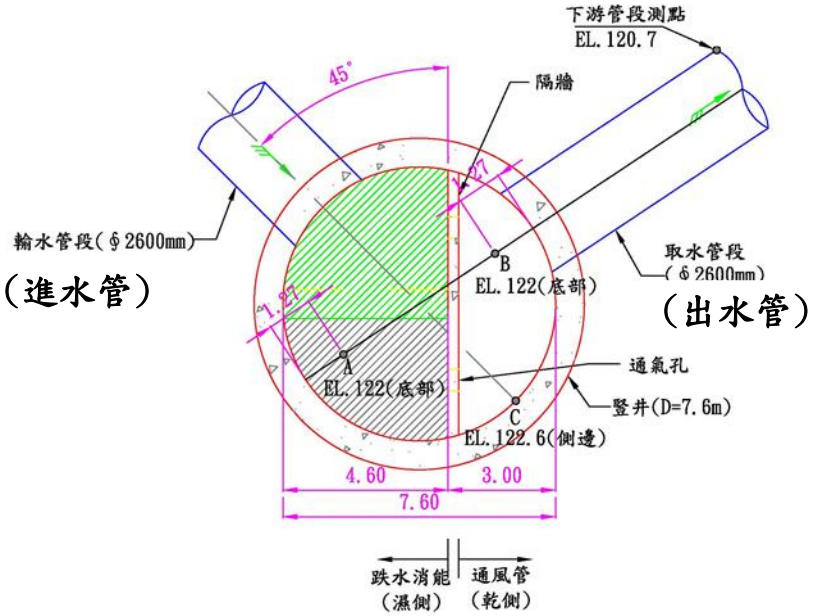


圖 4-1 階梯式豎井消能工試驗測壓點位置

(即 A 點及 B 點距離豎井中心 2.53 公尺、C 點距離豎井中心 3.80 公尺)

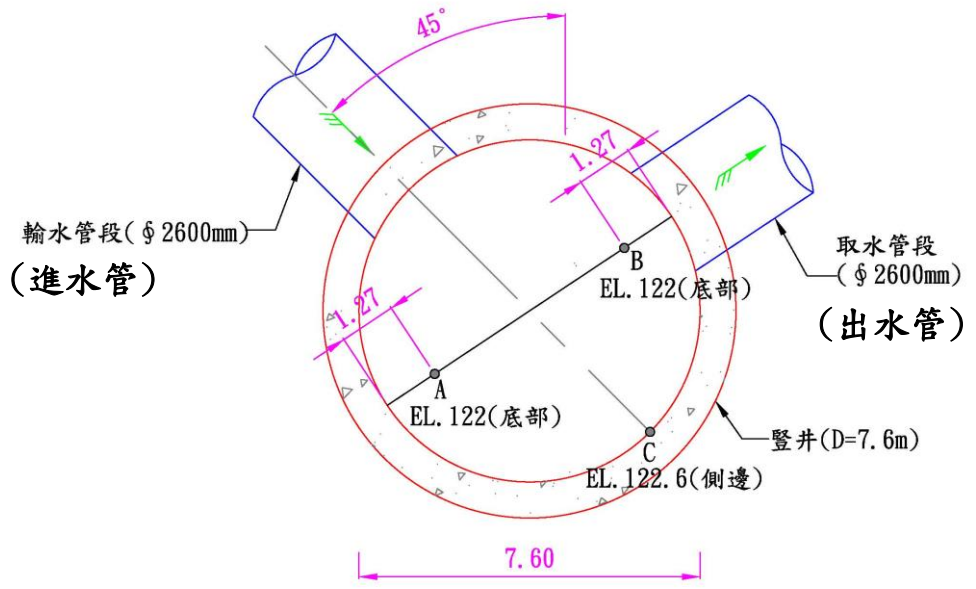
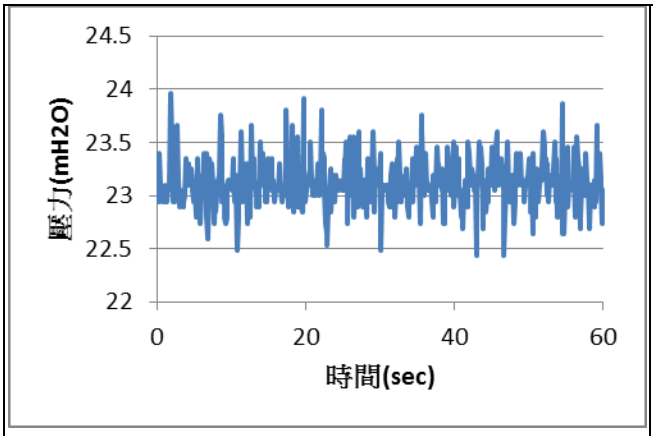


圖 4-2 無階梯式豎井消能工試驗測壓點位置

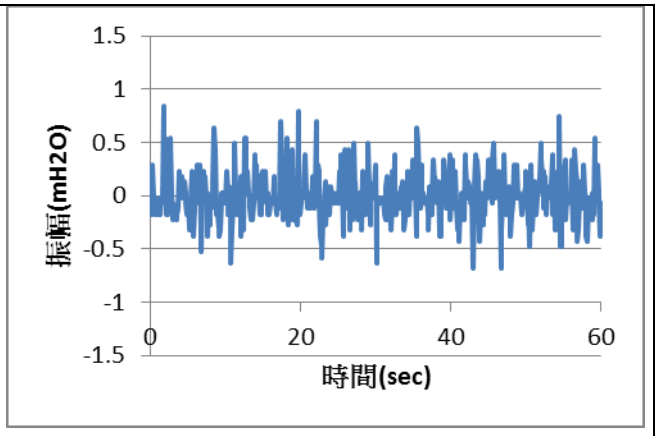
(即 A 點及 B 點距離豎井中心 2.53 公尺、C 點距離豎井中心 3.80 公尺)

一、無階梯式豎井消能工之試驗結果

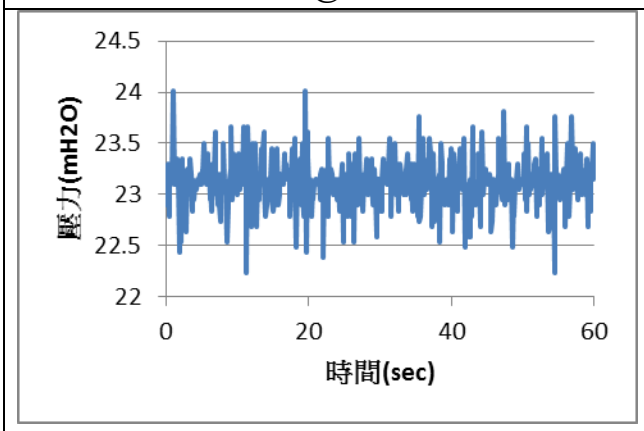
無階梯式豎井消能工於定量流 10 萬 CMD 到 80 萬 CMD 之壓力試驗值，如圖 4-3~圖 4-10 所示，另做一組 10 萬 CMD 變量流，於豎井充水過程壓力變化，如圖 4-11 所示。在低流量 10 萬 CMD 及 20 萬 CMD 時，因進入豎井直接投潭正對測壓點 C 且接近投潭影響深度，以致產生最大振幅，隨著輸水流量增加豎井內部水位上升，測點 C 逐漸遠離投潭影響範圍，測點 C 之最大振幅(max│P-$\overline{P}$│)轉變成小於測點 A 及測點 B，P 為壓力量測值，$\overline{P}$為壓力量測平均值。變量流 10 萬 CMD 流量充水時，因測點 B 及測點 C 較接近投潭影響範圍，所以測點 C 及測點 B 之壓力震盪較測點 A 大。測點 A 及測點 B 所量測之標準差及振幅(P-$\overline{P}$)則較為相近，標準差大多在 0.2~0.5 公尺左右，以波高來看則為 0.4~1.0 公尺左右；而最大振幅 2.1 公尺是發生於輸水量 50 萬 CMD 的測點 A，亦即最大波高可達 2.0 公尺甚至 4.0 公尺，詳細數據比較，如表 4-1。



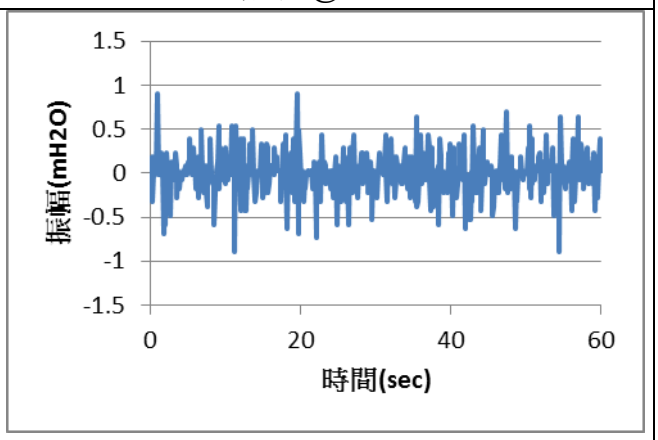
壓力@點 A



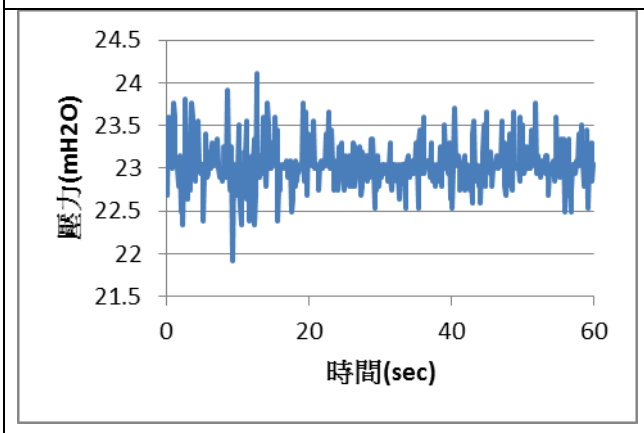
振幅@點 A



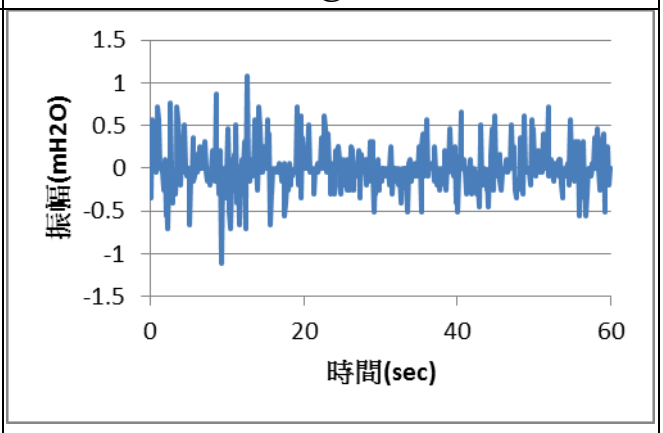
壓力@點 B



振幅@點 B

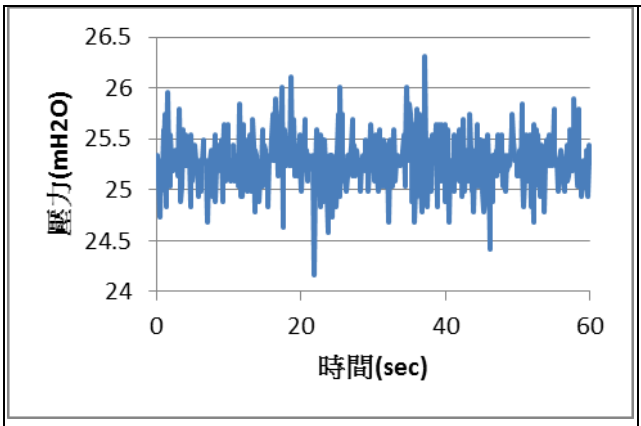


壓力@點 C

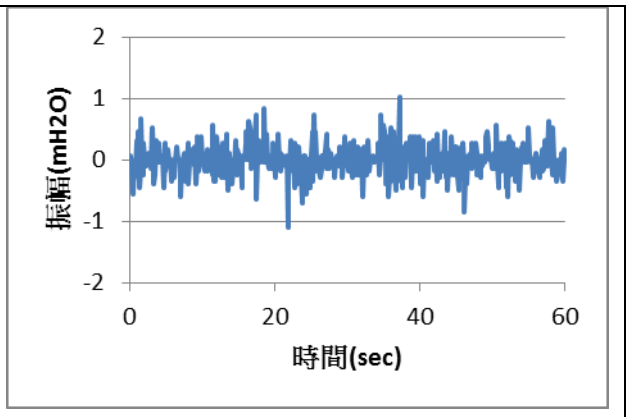


振幅@點 C

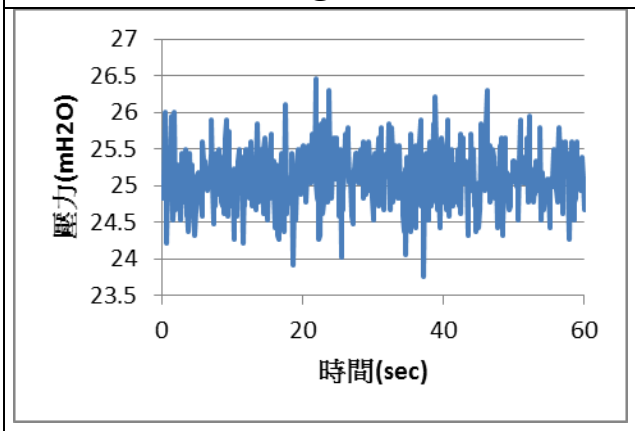
圖 4-3 10 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化



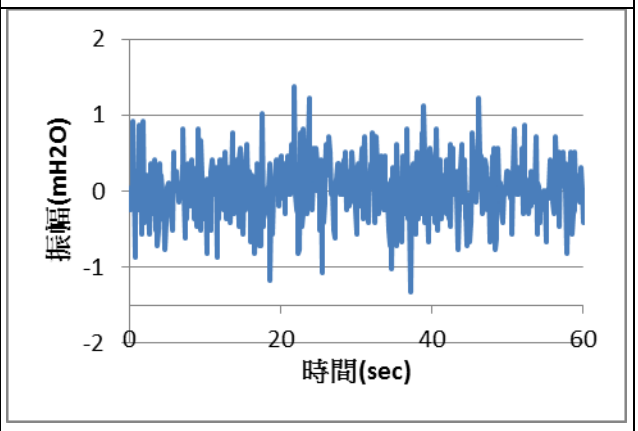
壓力@點 A



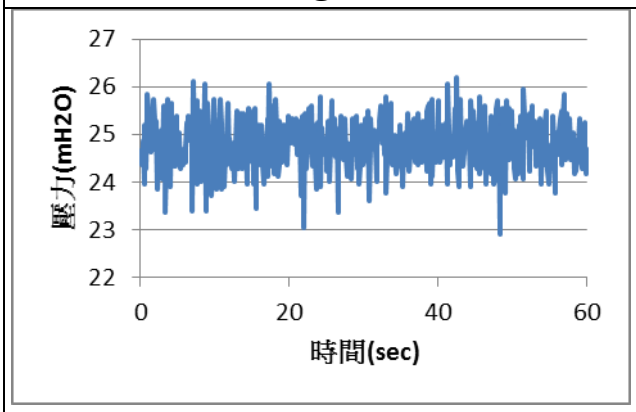
振幅@點 A



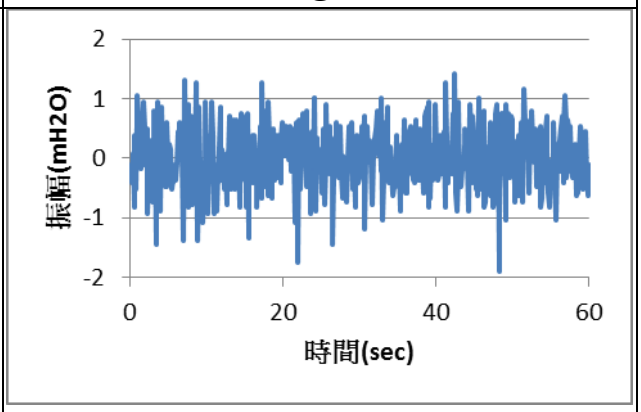
壓力@點 B



振幅@點 B

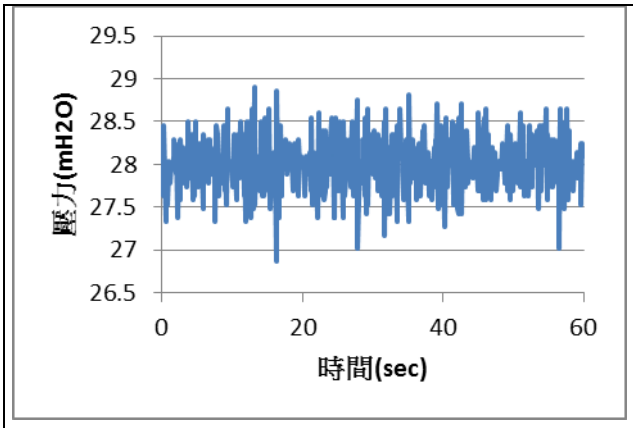


壓力@點 C

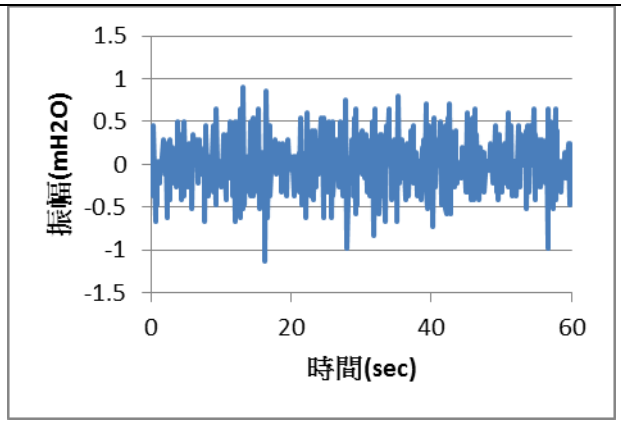


振幅@點 C

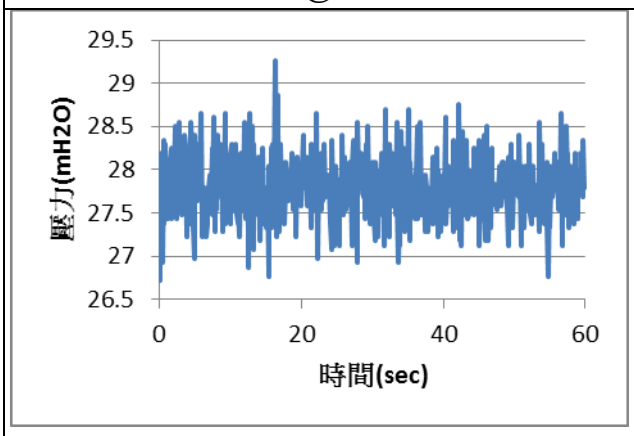
圖 4-4 20 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化



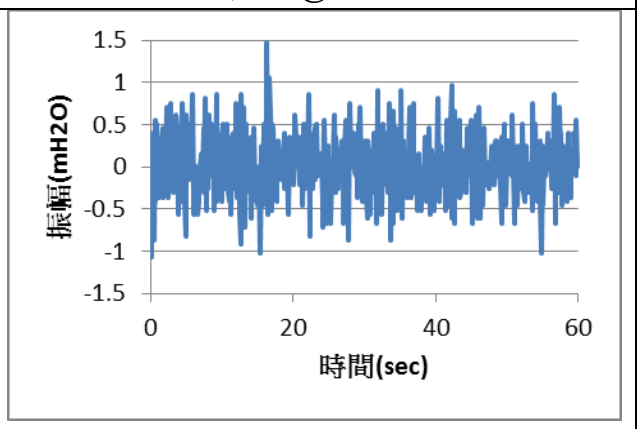
壓力@點 A



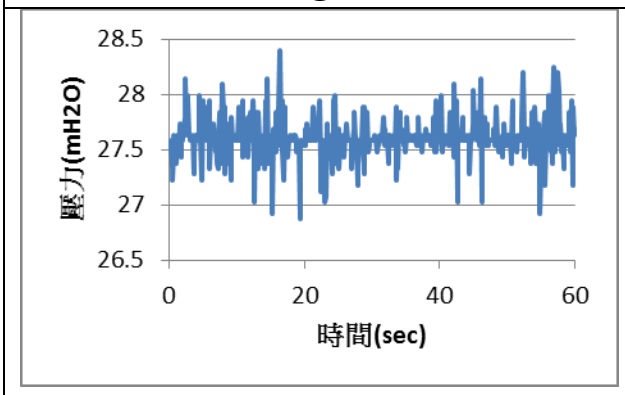
振幅@點 A



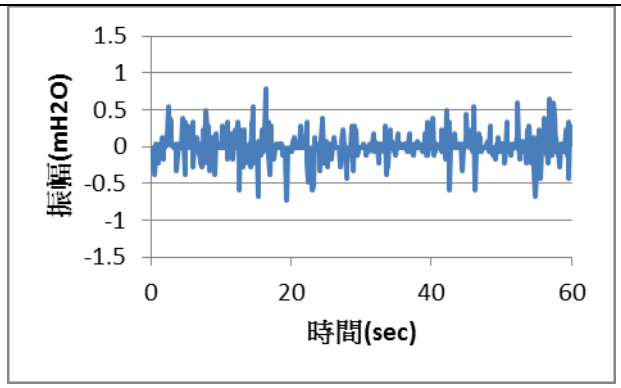
壓力@點 B



振幅@點 B

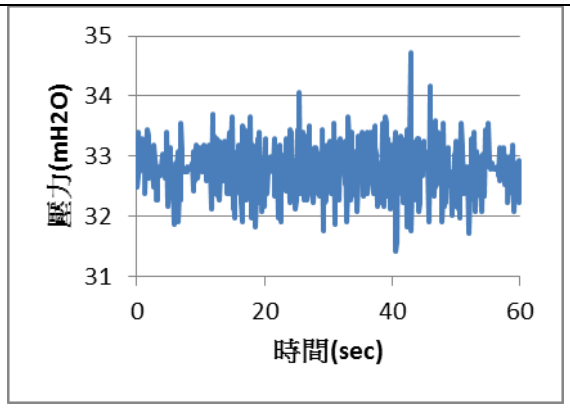


壓力@點 C

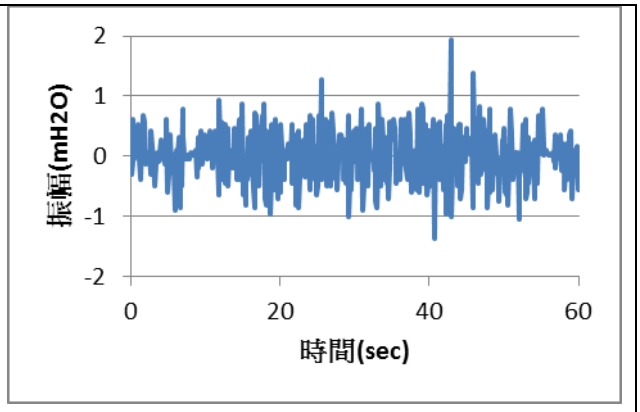


振幅@點 C

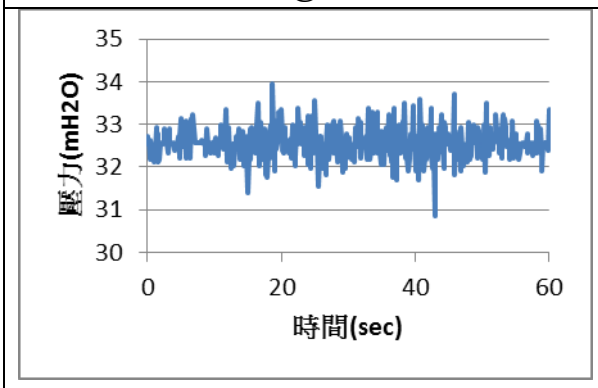
圖 4-5 30 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化



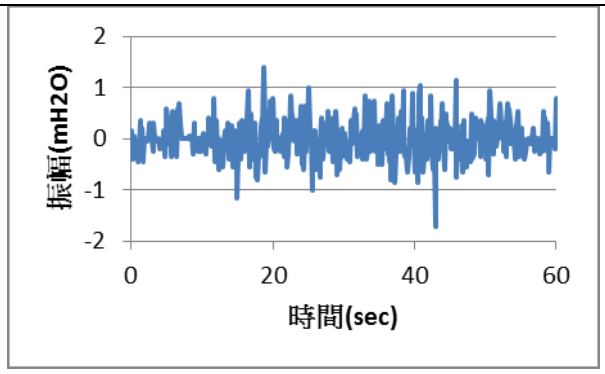
壓力@點 A



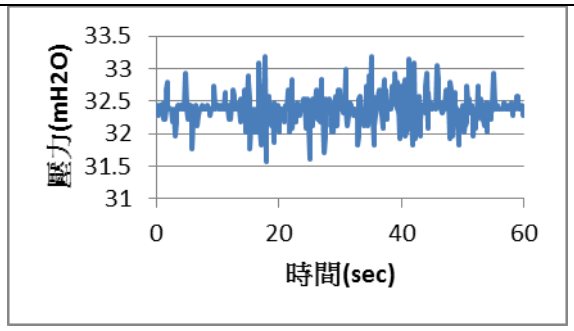
振幅@點 A



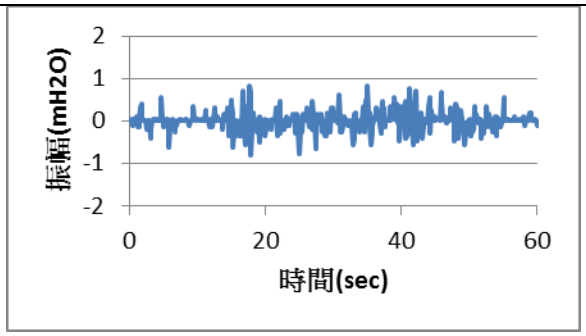
壓力@點 B



振幅@點 B

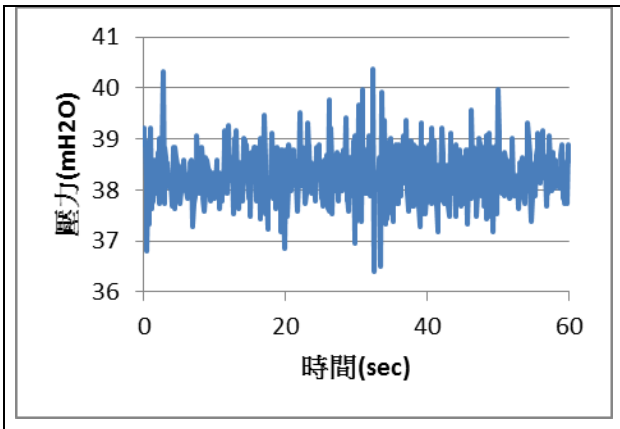


壓力@點 C

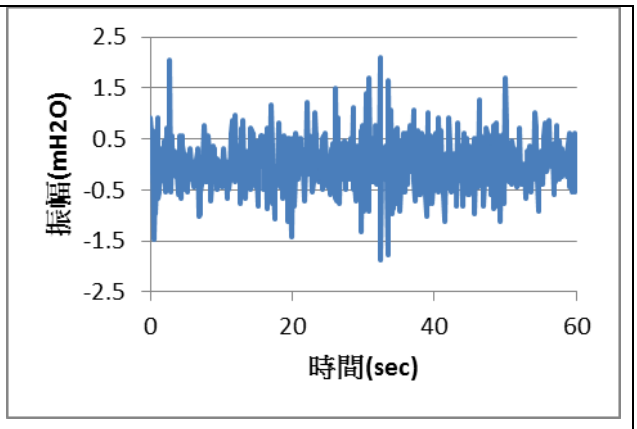


振幅@點 C

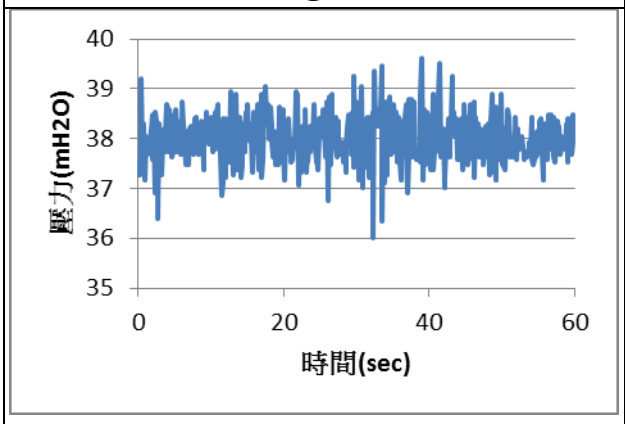
圖 4-6 40 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化



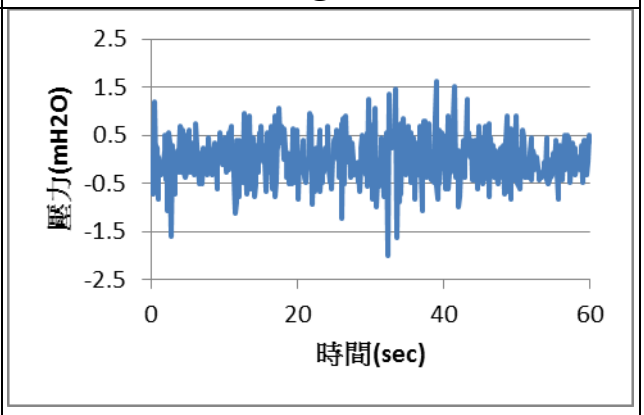
壓力@點 A



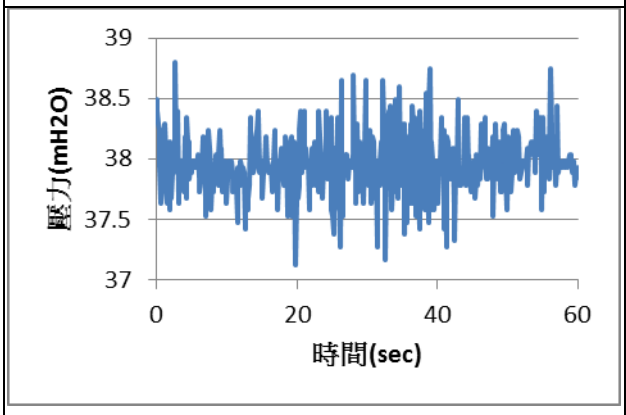
振幅@點 A



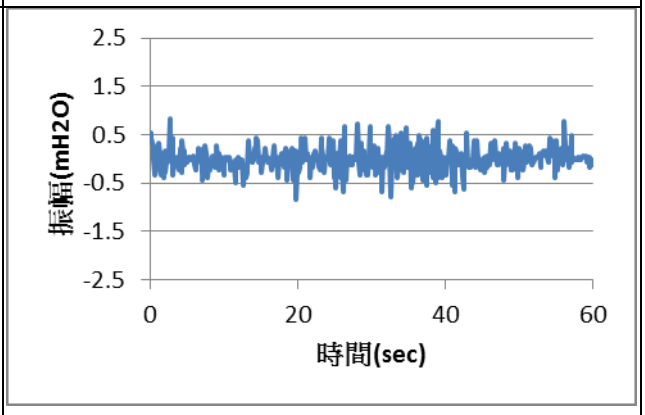
壓力@點 B



振幅@點 B

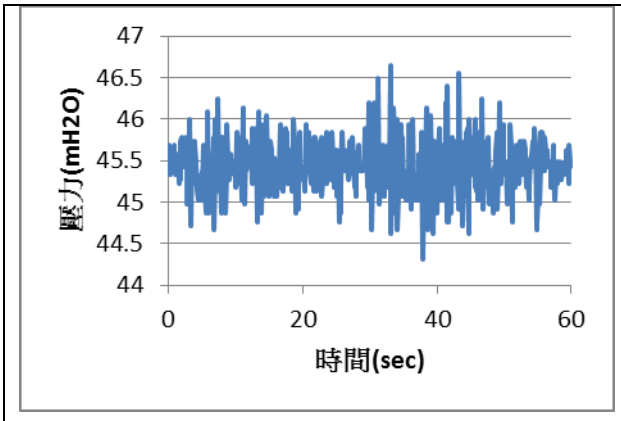


壓力@點 C

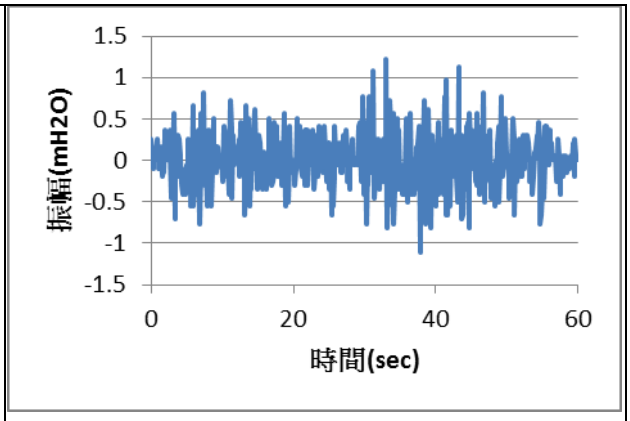


振幅@點 C

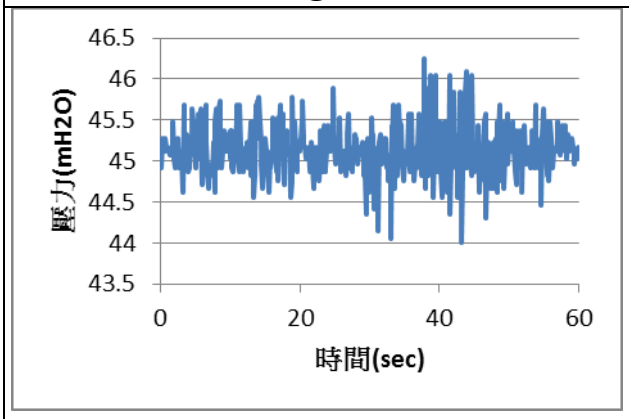
圖 4-7 50 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化



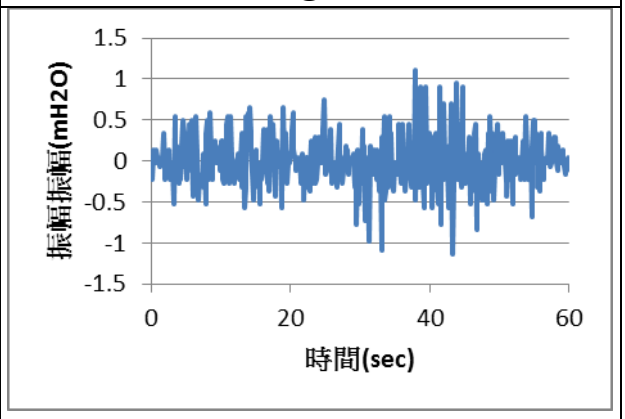
壓力@點 A



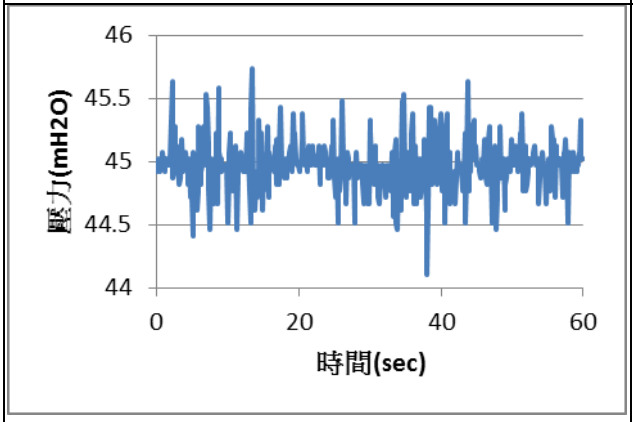
振幅@點 A



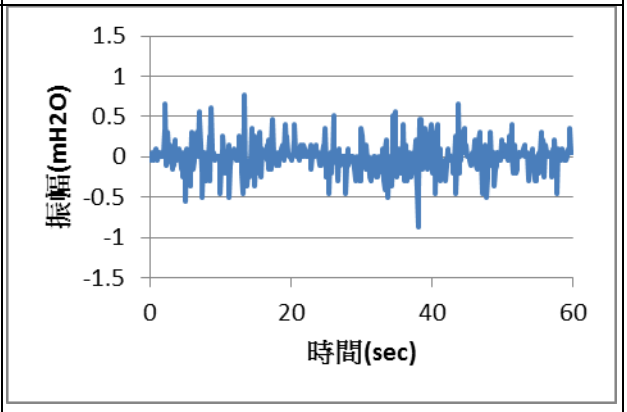
壓力@點 B



振幅@點 B



壓力@點 C



振幅@點 C

圖 4-8 60 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化

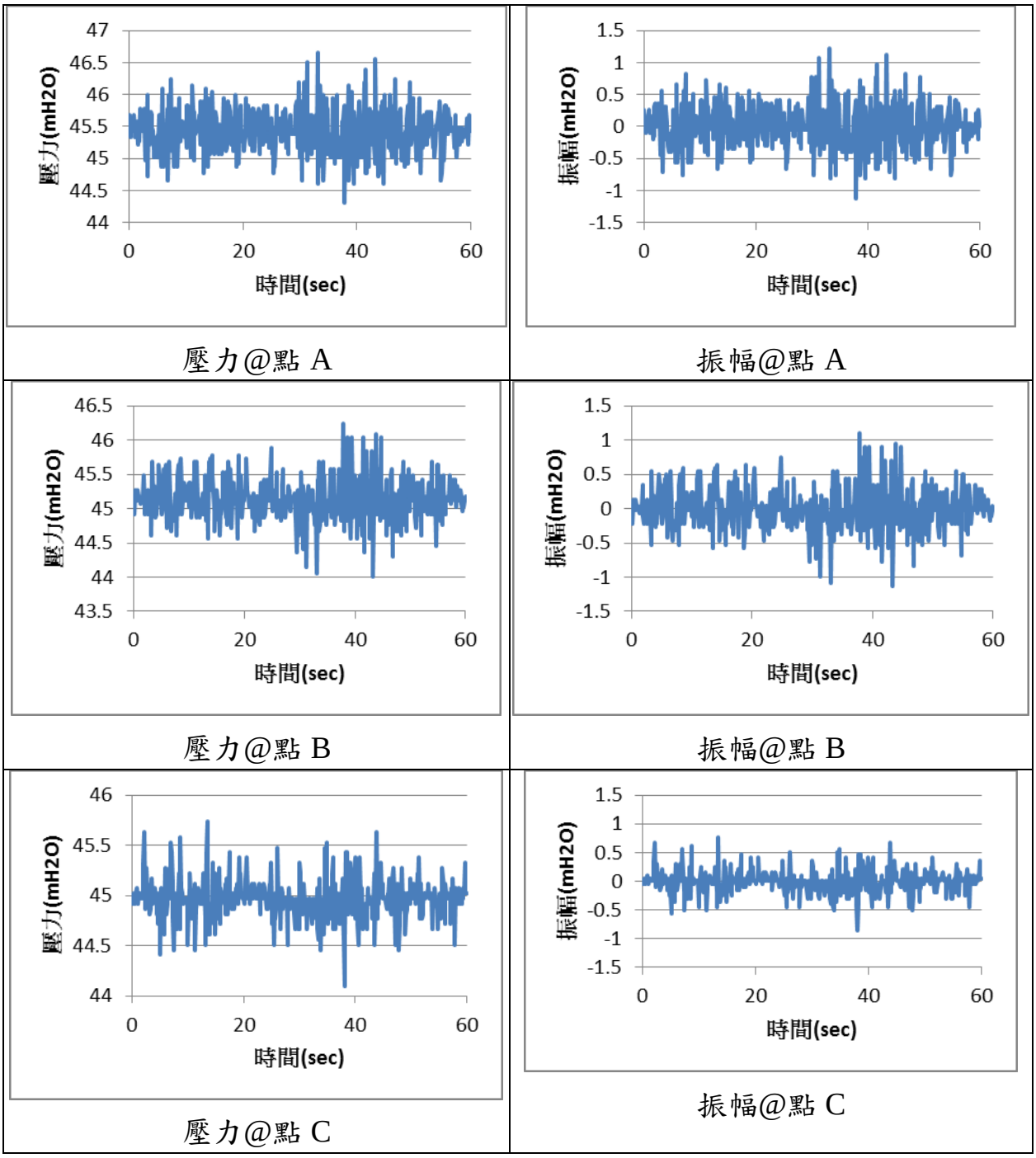


圖 4-9 70 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化

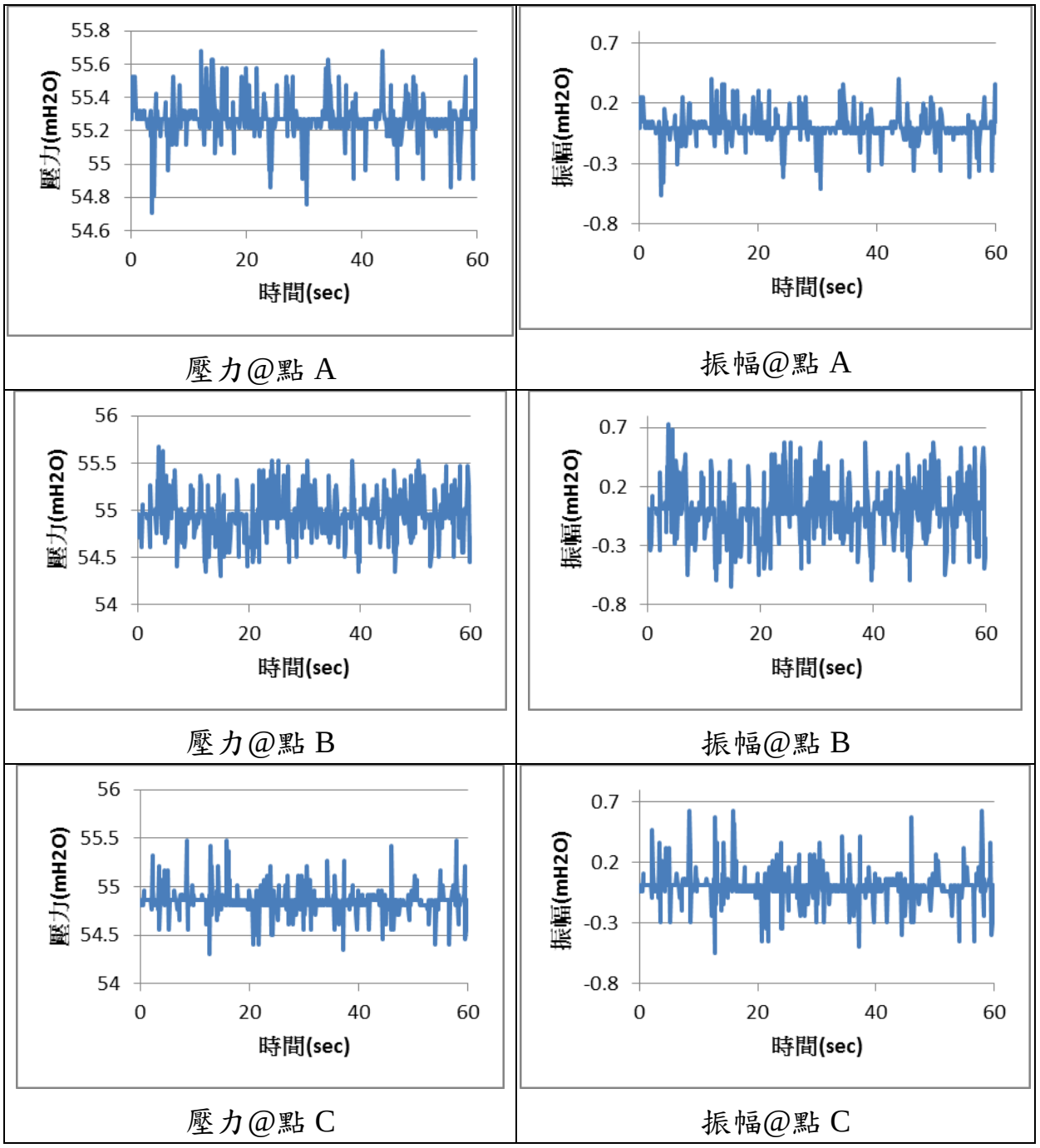


圖 4-10 80 萬 CMD 定量流無階梯式豎井內測壓值之變化

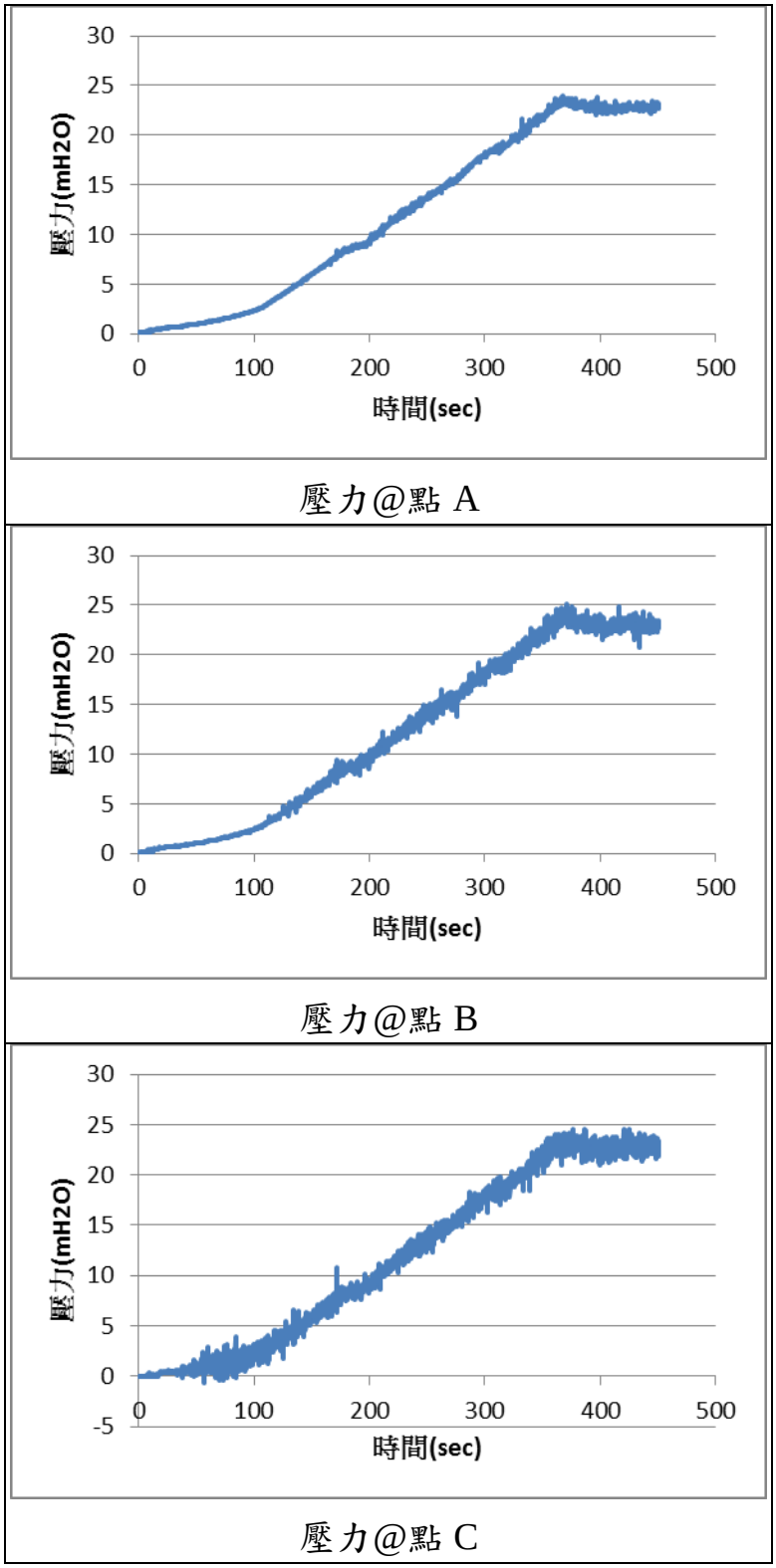


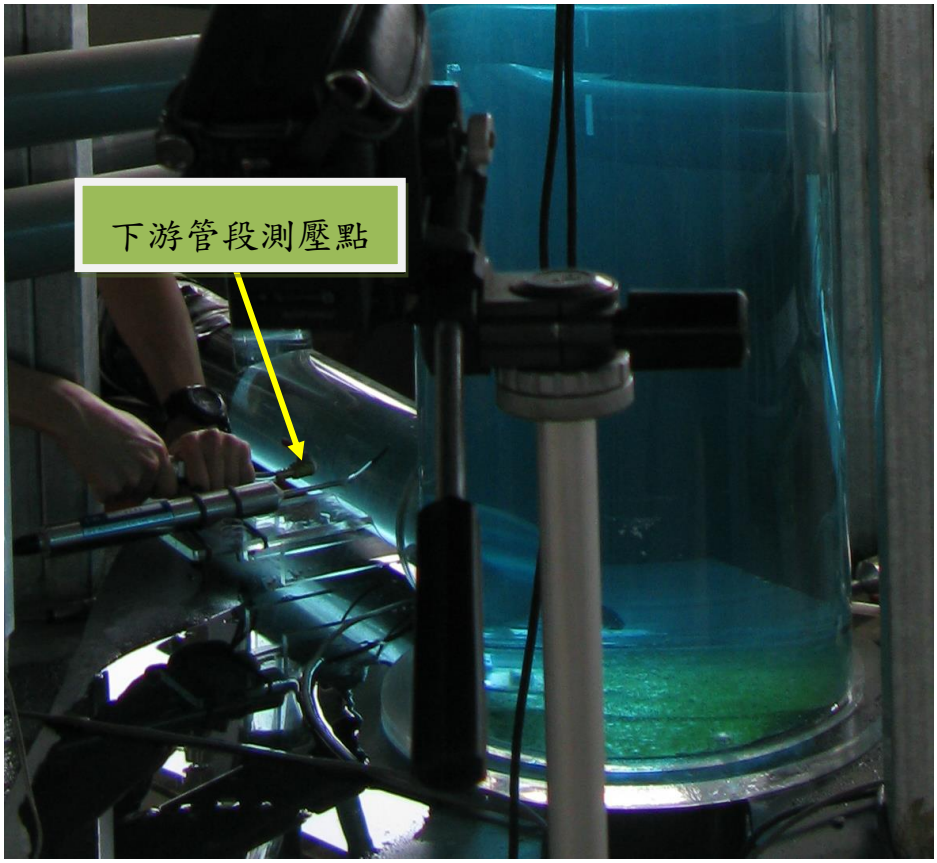
圖 4-11 10 萬 CMD 變量流過程無階梯式豎井內測壓值之變化

表 4-1 無階梯式豎井消能工定量流內部壓力量測彙整表

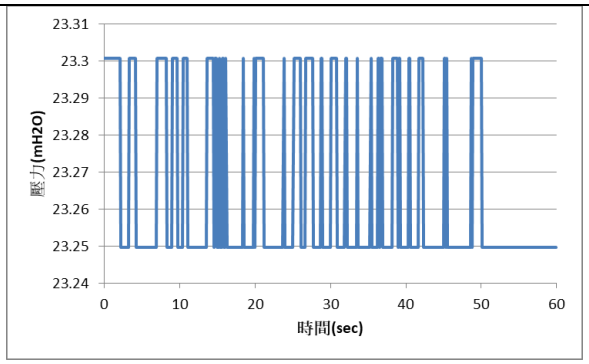
	壓力點 A			壓力點 B			壓力點 C		
輸水量 (萬 CMD)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)
10	23.12	0.23	0.85	23.12	0.24	0.90	23.04	0.25	1.12
20	25.28	0.25	1.11	25.09	0.40	1.38	24.80	0.54	1.90
30	28.00	0.32	1.13	27.79	0.39	1.47	27.61	0.18	0.80
40	32.77	0.43	1.95	32.57	0.36	1.72	32.38	0.21	0.82
50	38.28	0.55	2.10	38.00	0.48	2.00	37.96	0.24	0.85
60	45.42	0.34	1.23	45.14	0.30	1.14	44.97	0.19	0.86
70	45.42	0.34	1.23	45.14	0.30	1.14	44.97	0.19	0.86
80	55.27	0.11	0.56	54.95	0.23	0.73	54.85	0.18	0.62

二、階梯式豎井消能工試驗結果

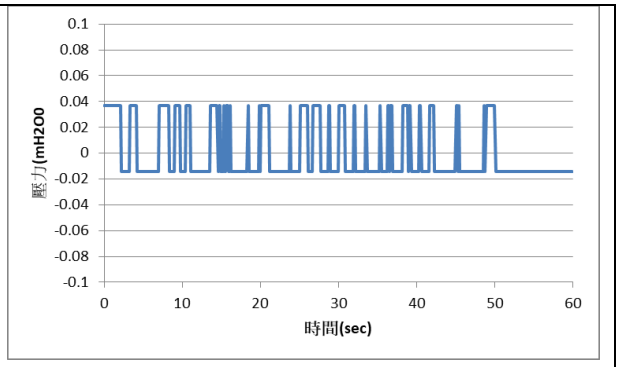
階梯式豎井消能工於定量流 10 萬 CMD 到 80 萬 CMD 之壓力試驗值，如圖 4-12~圖 4-19 所示，另試驗量測一組 10 萬 CMD 變量流，豎井充水時壓力變化，如圖 4-20 所示。10 萬 CMD 變量流於充水過程時，因測點 A 較接近消能板落水影響範圍，所以測點 A 及測點 B 之壓力震盪較測點 C 大。測點 A 及測點 B 所量測之標準差及振幅則較為相近，標準差大多在 0.02~0.13 公尺左右，以波高來看則為 0.04~0.26 公尺左右；而最大振幅在 0.05~0.8 公尺左右，亦即最大波高可達 0.1~1.6 公尺；另於下游出水管段距離豎井 35 公分(現場原型 7 公尺)設置一壓力計，如照片 4-1 所示。可以看到進入下游管段後壓力值之標準差小於 0.04 公尺，最大振幅小於 0.17 公尺，即壓力最大波高可能達 0.35 公尺，詳如表 4-2。



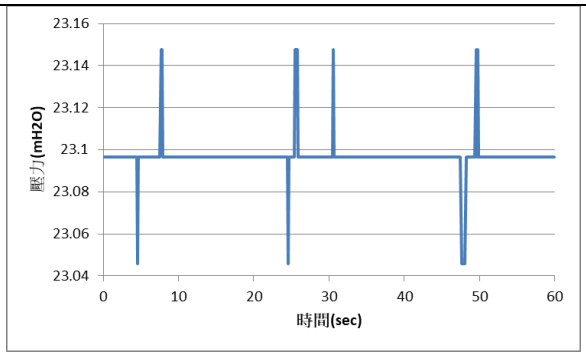
照片 4-1 下游出水管段距離豎井 35 公分設置一壓力計



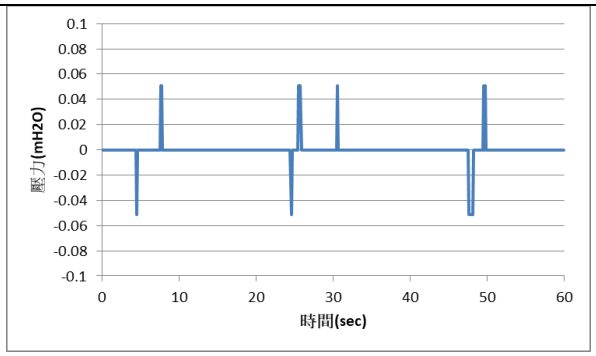
壓力@點 A



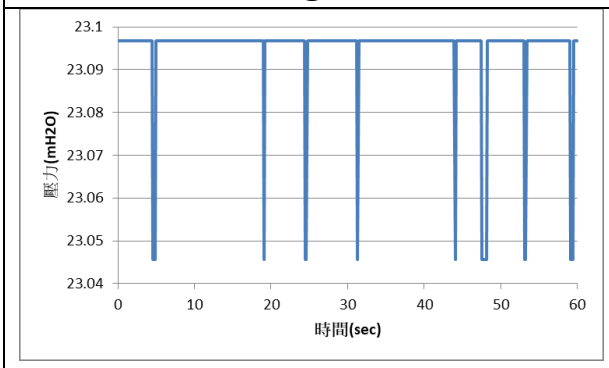
振幅@點 A



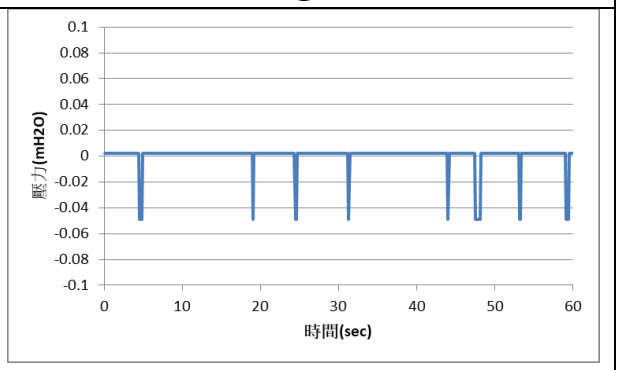
壓力@點 B



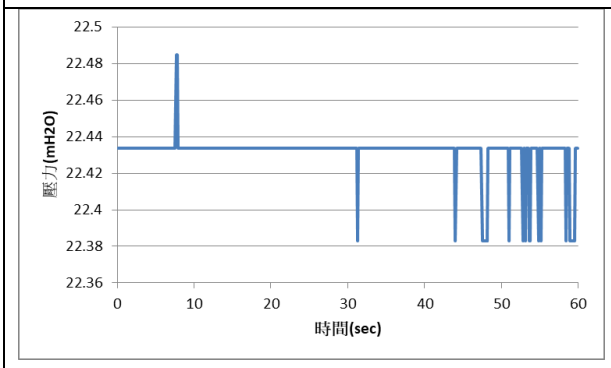
振幅@點 B



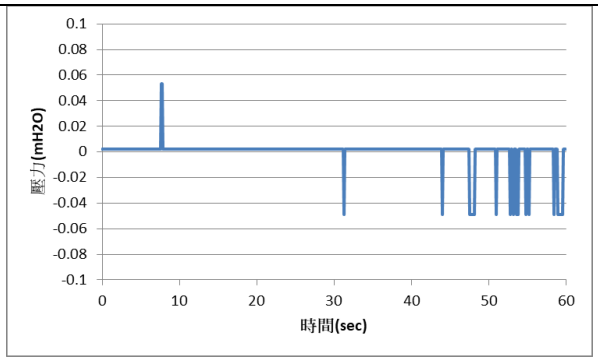
壓力@點 C



振幅@點 C

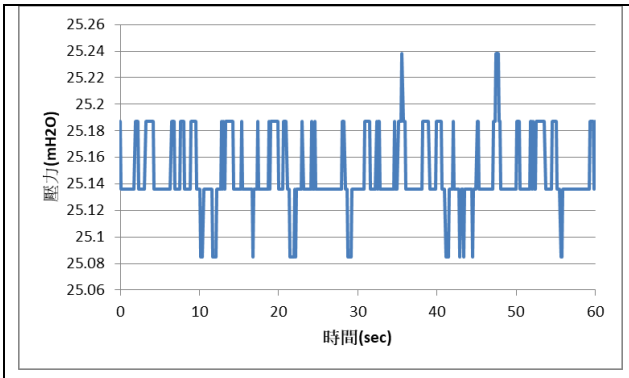


壓力@下游管段

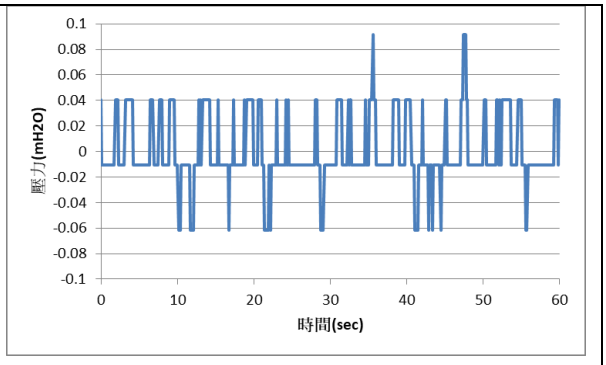


振幅@下游管段

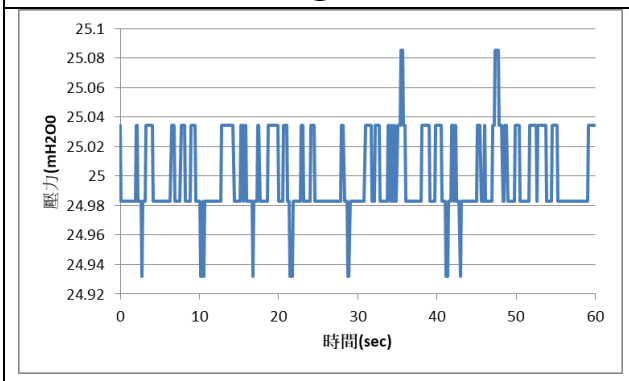
圖 4-12 10 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值



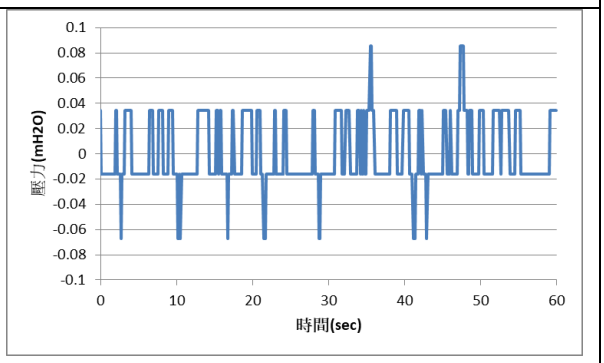
壓力@點 A



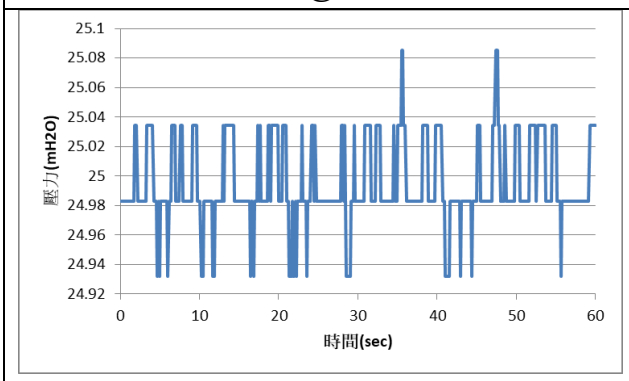
振幅@點 A



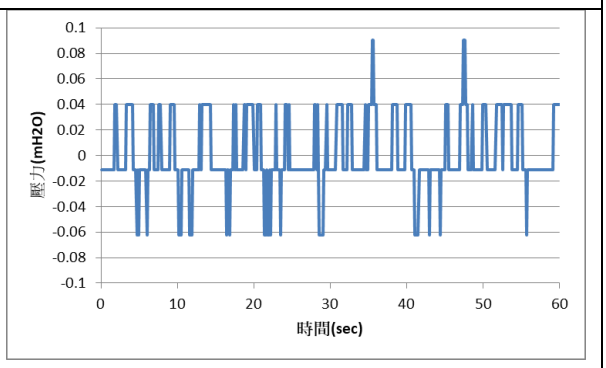
壓力@點 B



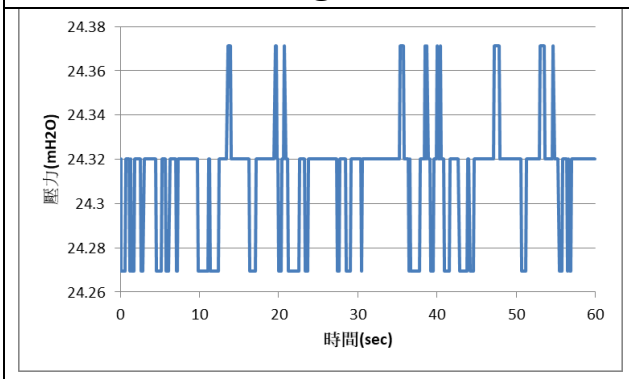
振幅@點 B



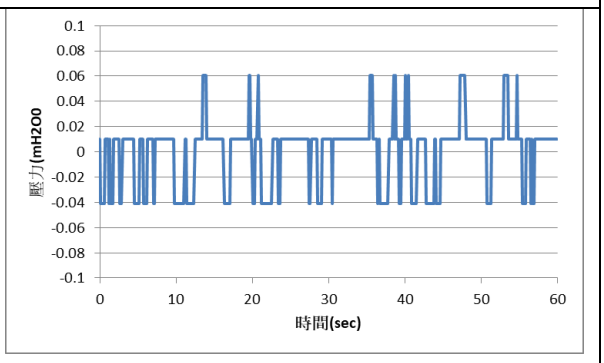
壓力@點 C



振幅@點 C

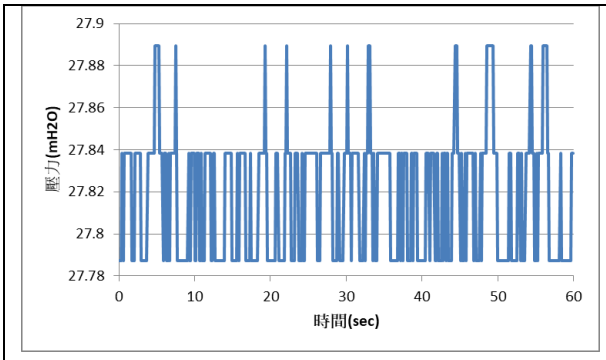


壓力@下游管段

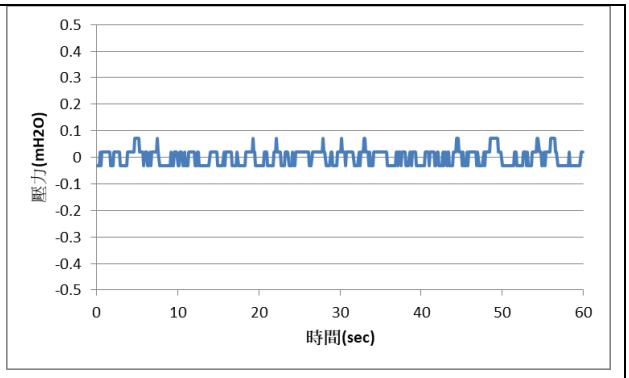


振幅@下游管段

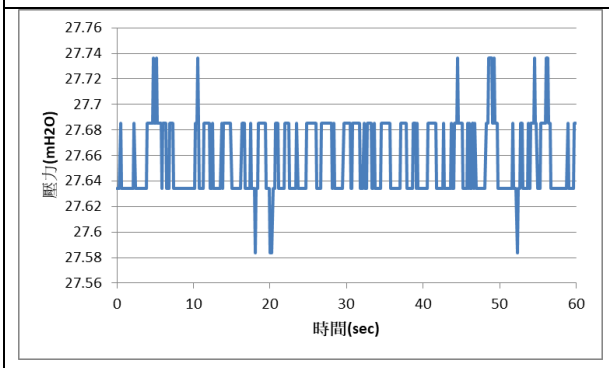
圖 4-13 20 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值



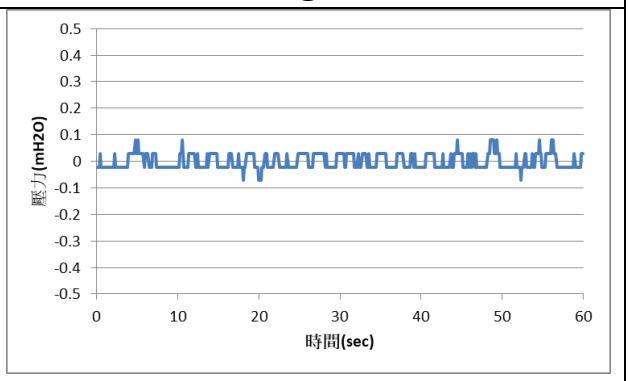
壓力@點 A



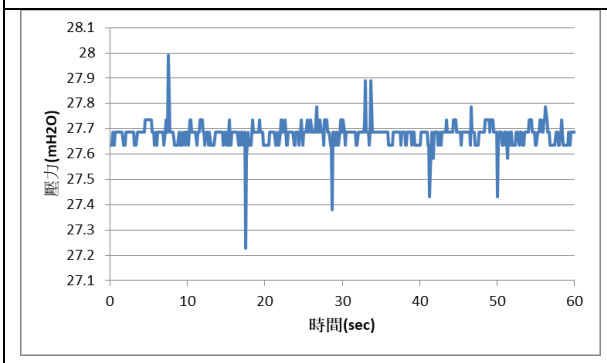
振幅@點 A



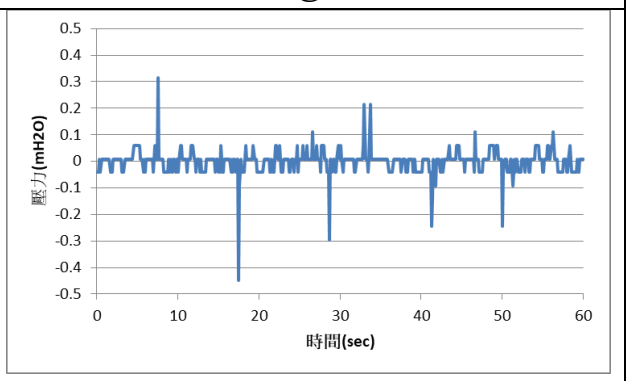
壓力@點 B



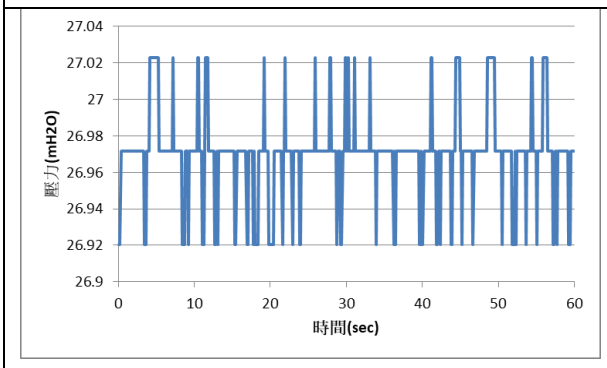
振幅@點 B



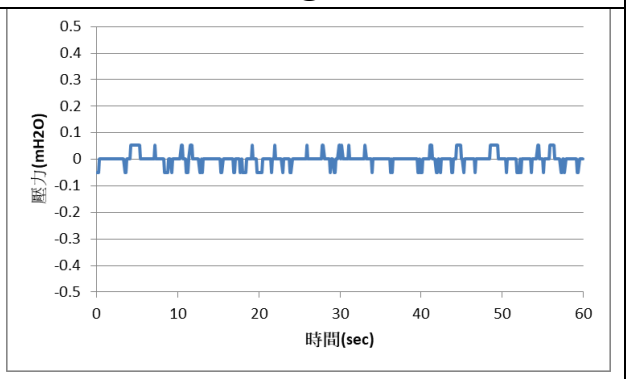
壓力@點 C



振幅@點 C

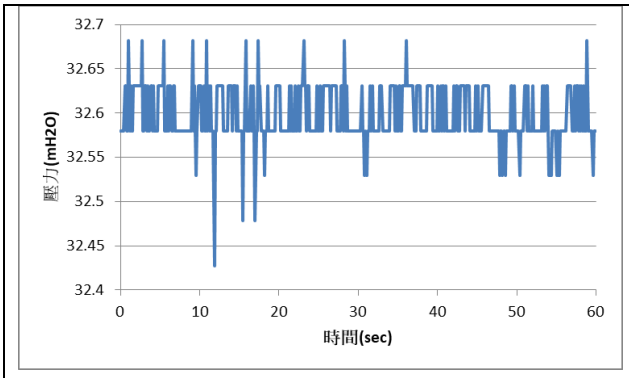


壓力@下游管段

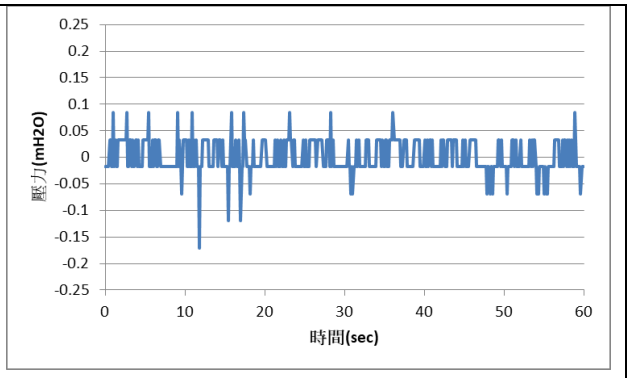


振幅@下游管段

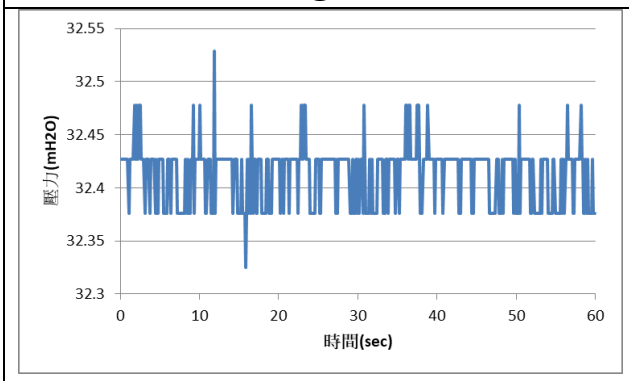
圖 4-14 30 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值



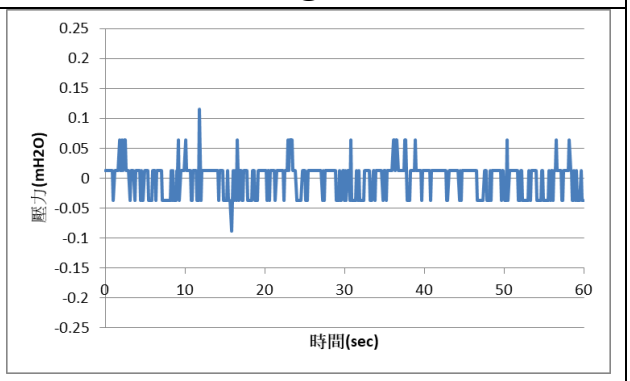
壓力@點 A



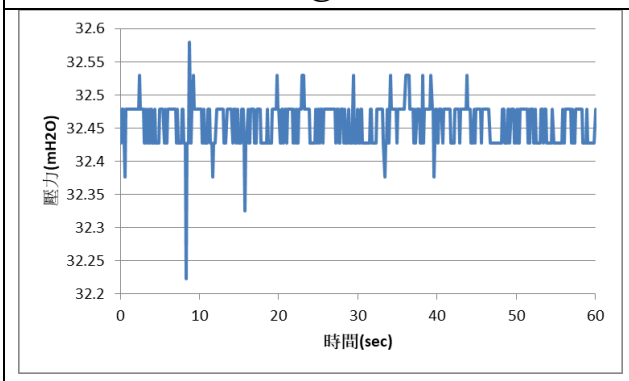
振幅@點 A



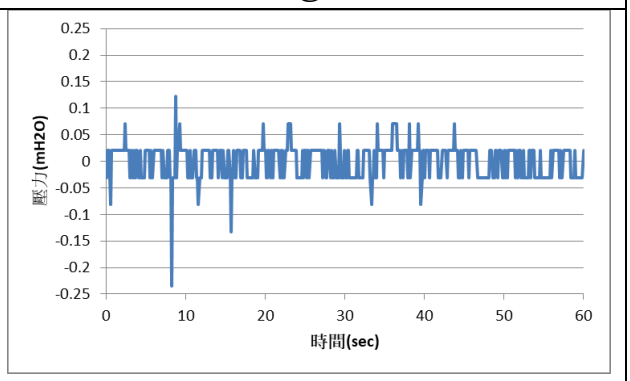
壓力@點 B



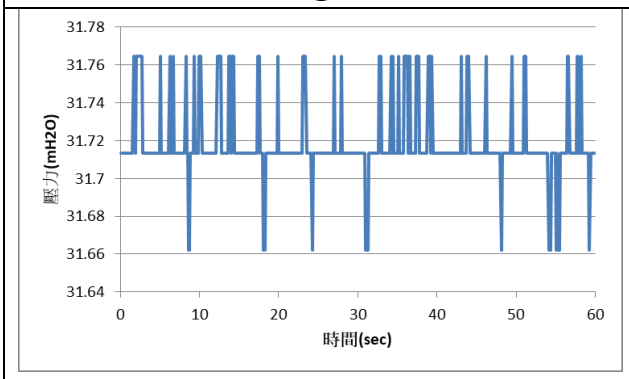
振幅@點 B



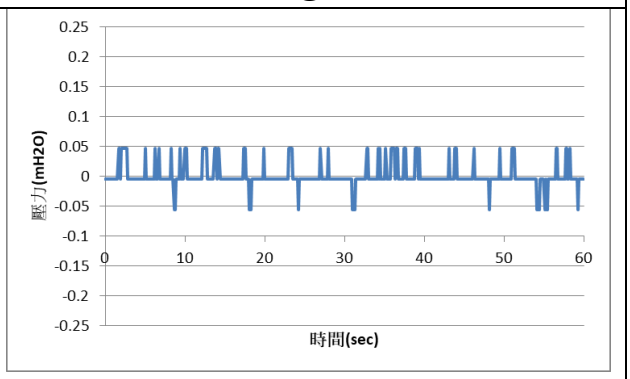
壓力@點 C



振幅@點 C

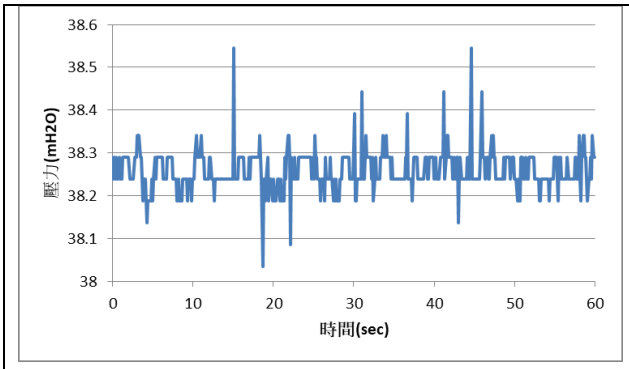


壓力@下游管段

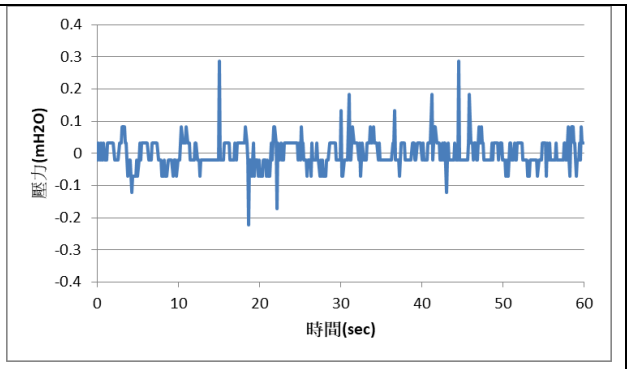


振幅@下游管段

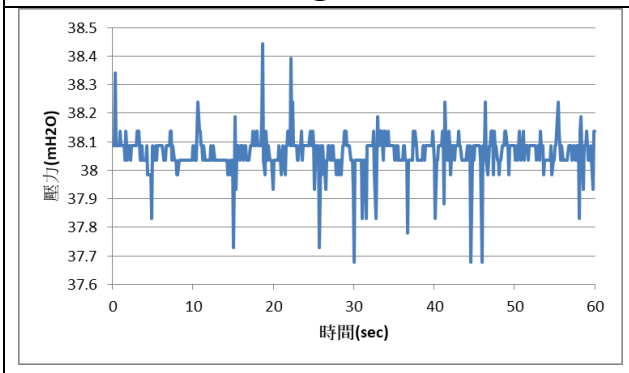
圖 4-15 40 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值



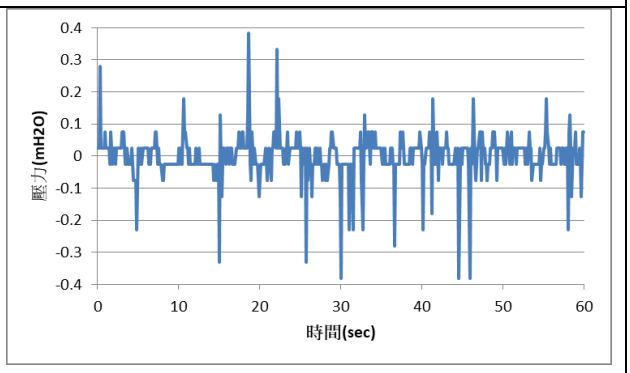
壓力@點 A



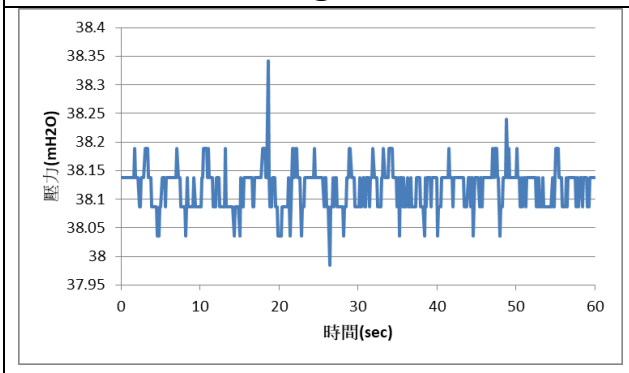
振幅@點 A



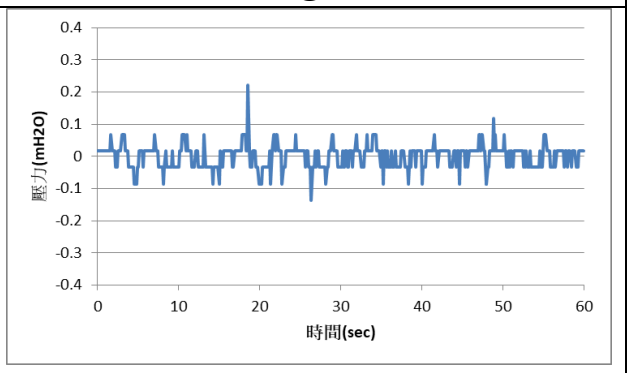
壓力@點 B



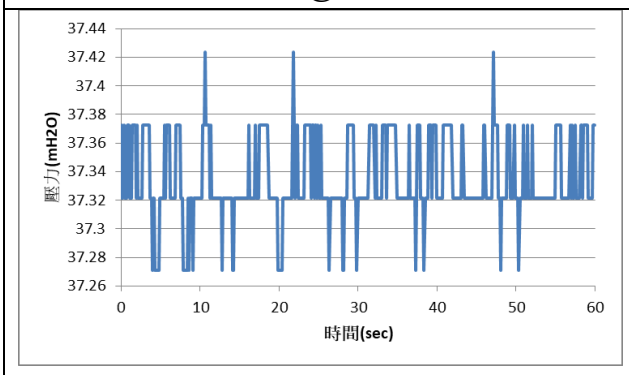
振幅@點 B



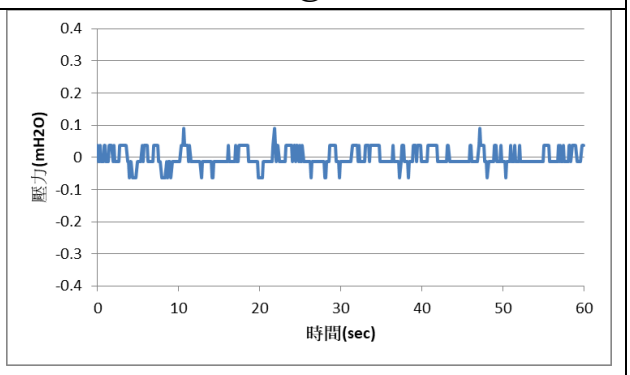
壓力@點 C



振幅@點 C

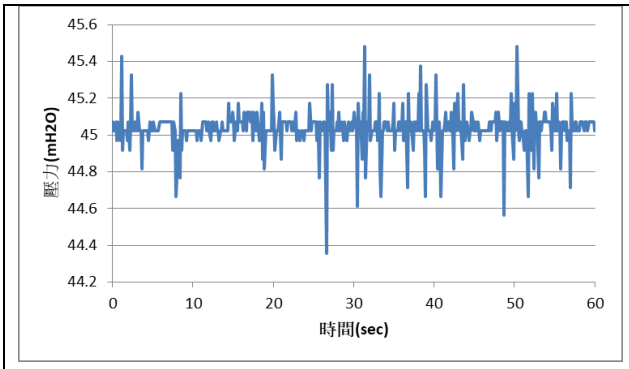


壓力@下游管段

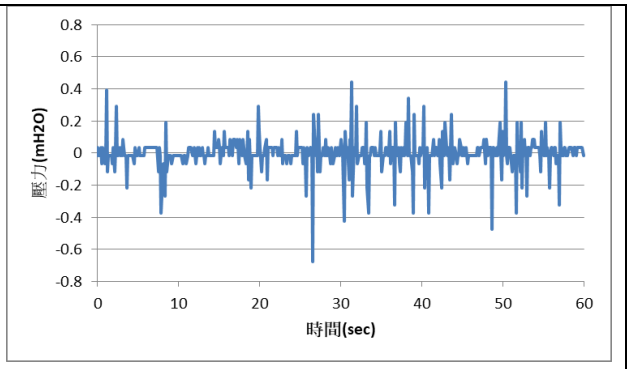


振幅@下游管段

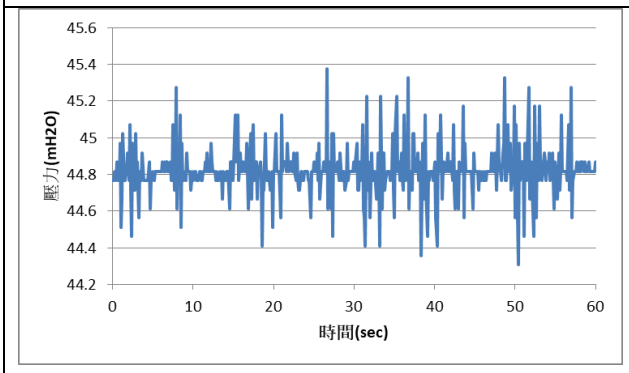
圖 4-16 50 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值



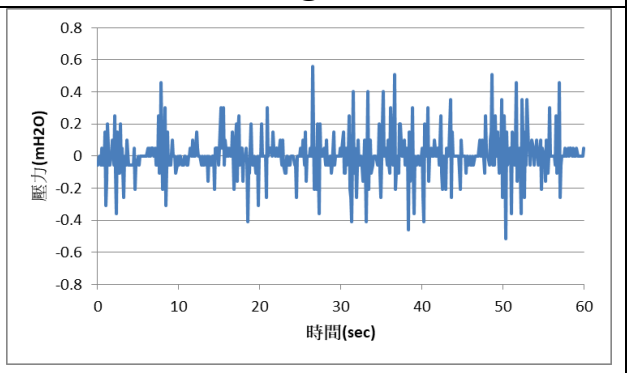
壓力@點 A



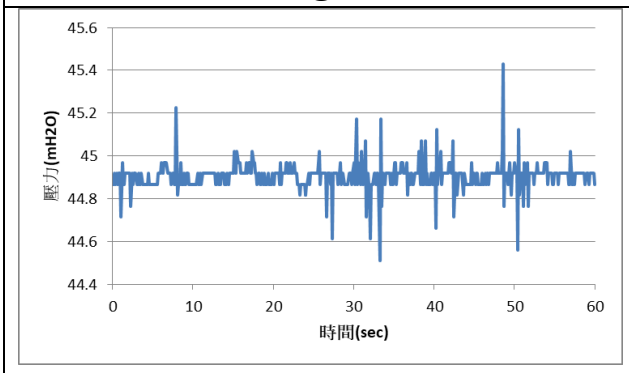
振幅@點 A



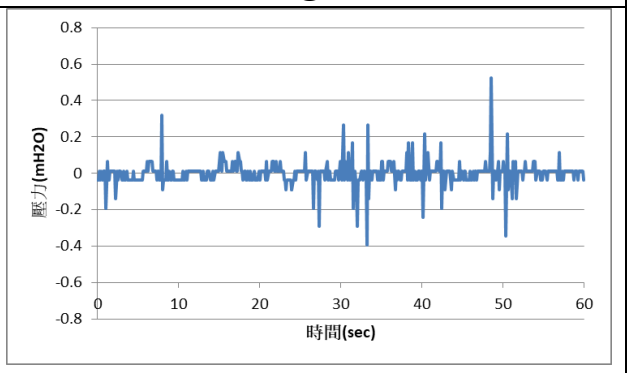
壓力@點 B



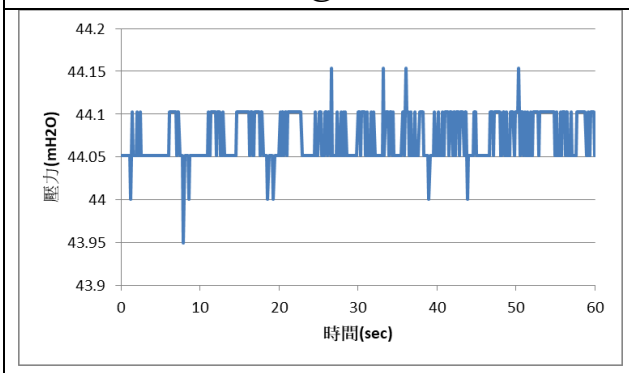
振幅@點 B



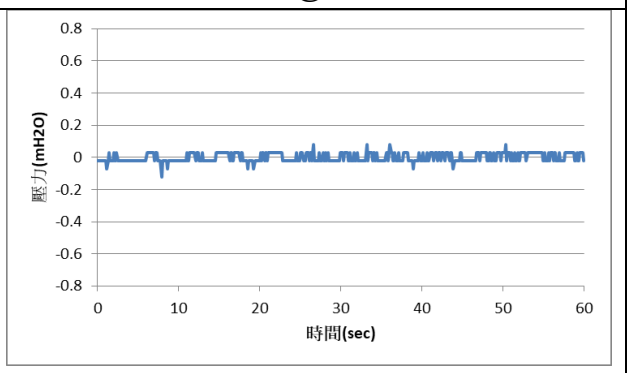
壓力@點 C



振幅@點 C

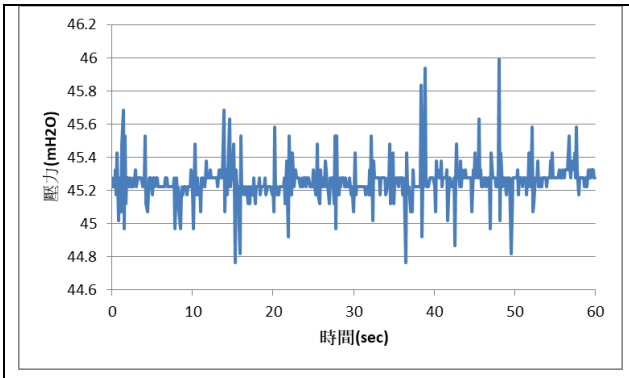


壓力@下游管段

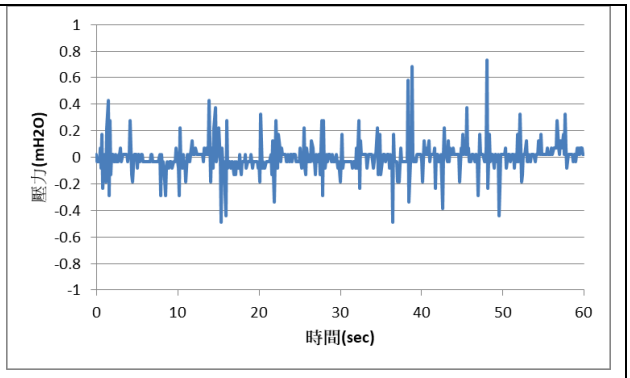


振幅@下游管段

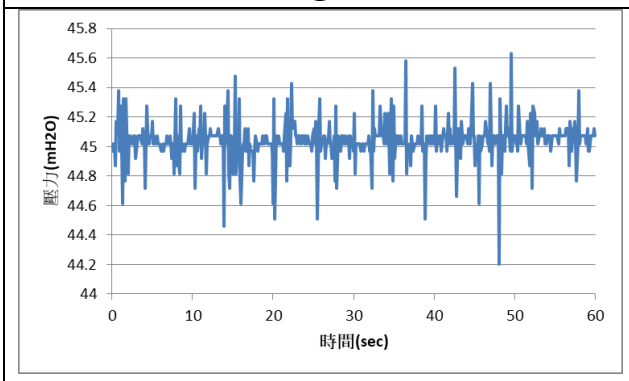
圖 4-17 60 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值



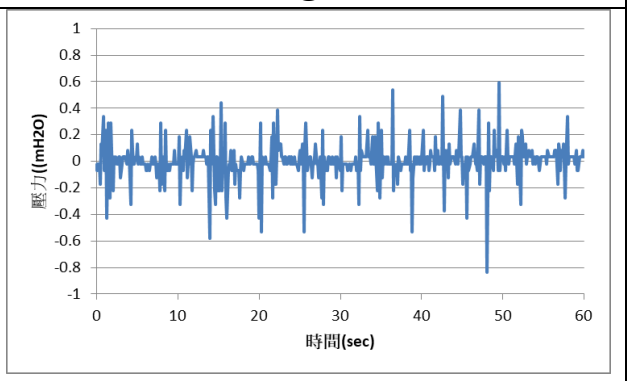
壓力@點 A



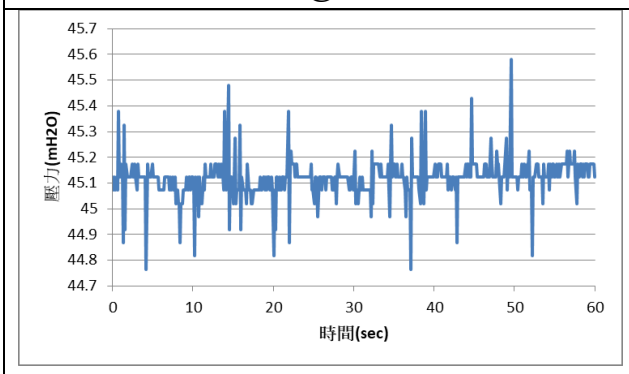
振幅@點 A



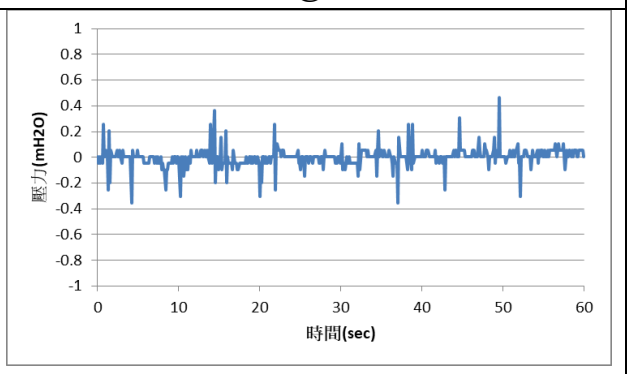
壓力@點 B



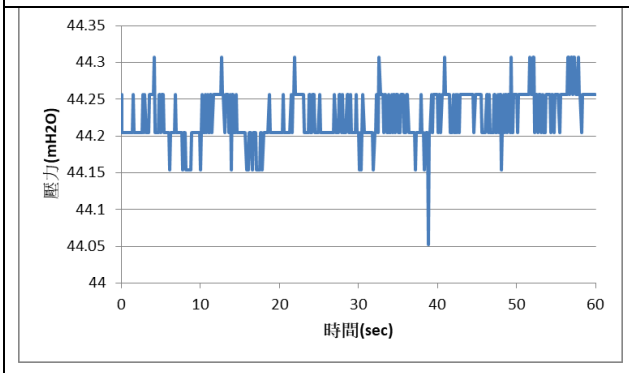
振幅@點 B



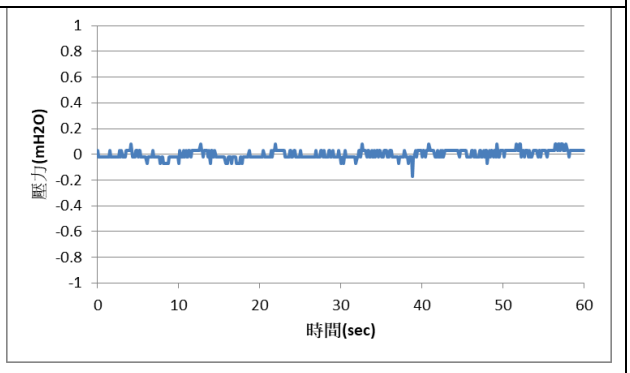
壓力@點 C



振幅@點 C

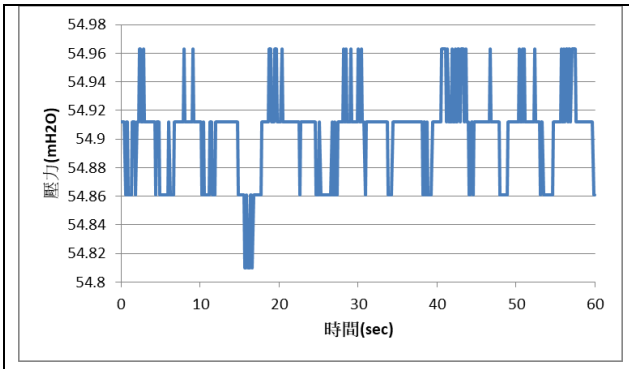


壓力@下游管段

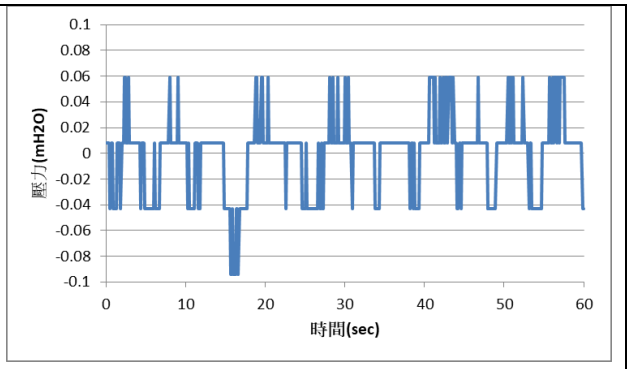


振幅@下游管段

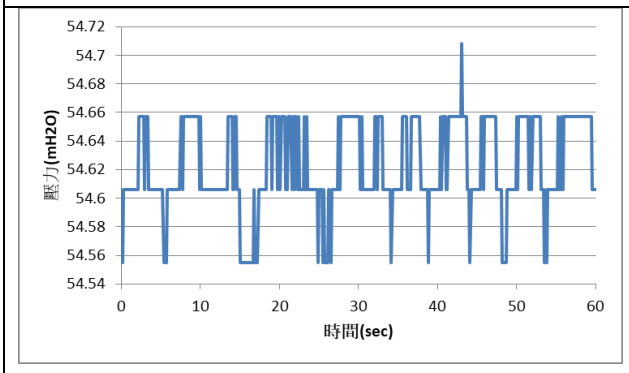
圖 4-18 70 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值



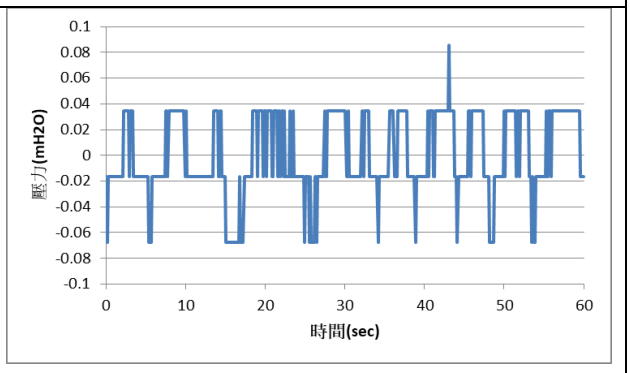
壓力@點 A



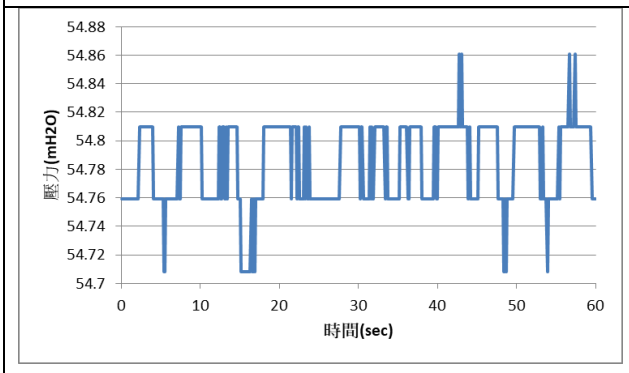
振幅@點 A



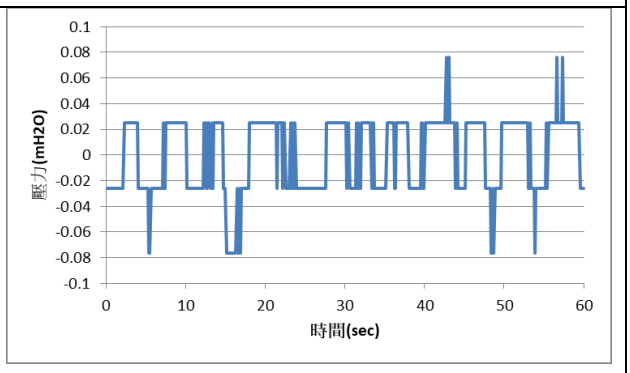
壓力@點 B



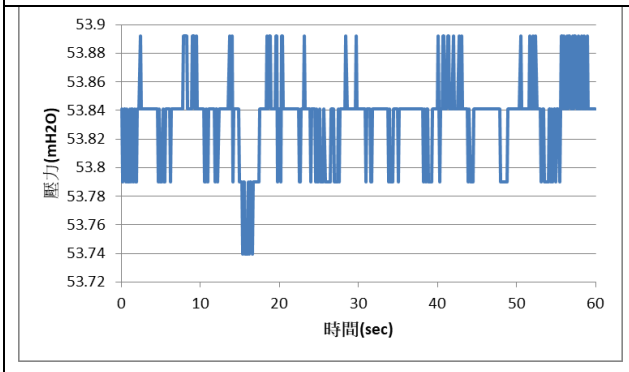
振幅@點 B



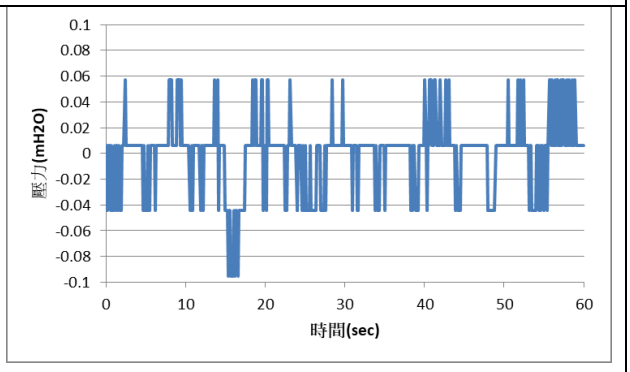
壓力@點 C



振幅@點 C

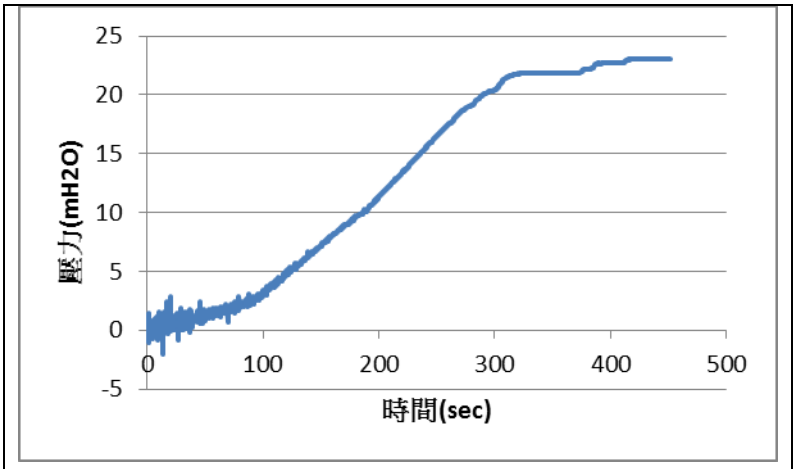


壓力@下游管段

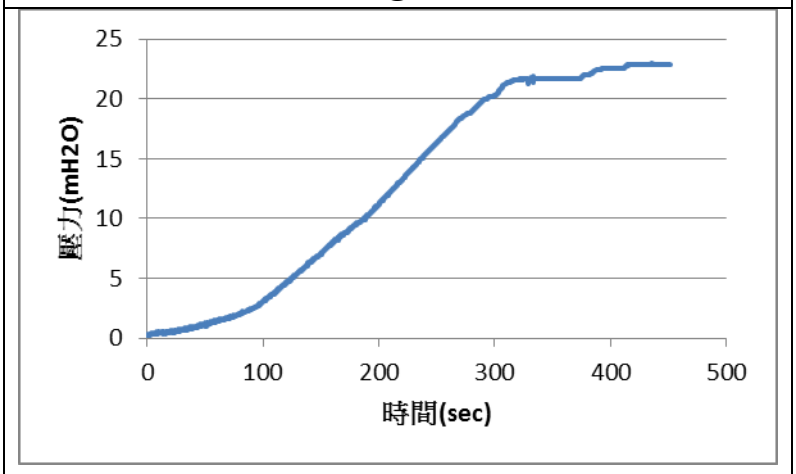


振幅@下游管段

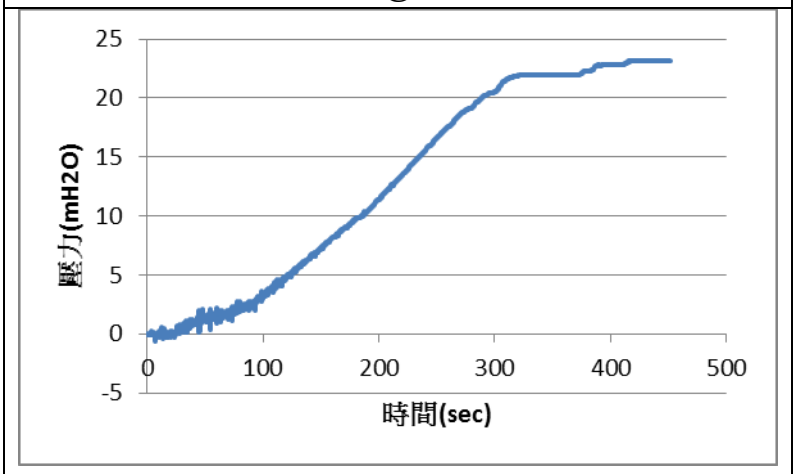
圖 4-19 80 萬 CMD 定量流豎井內及下游管段壓力量測值



壓力@點 A



壓力@點 B



壓力@點 C

圖 4-20 10 萬 CMD 變量流過程豎井內量測壓力變化

表 4-2 有階梯式豎井消能工定量流內部壓力彙整表

	壓力點 A			壓力點 B			壓力點 C			壓力下游管段		
流量 (萬 CMD)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)	平均值 (m)	標準差 (m)	最大振幅 (m)
10	23.26	0.02	0.04	23.10	0.01	0.05	23.10	0.01	0.05	22.43	0.01	0.05
20	25.15	0.03	0.09	25.00	0.03	0.09	25.00	0.03	0.09	24.31	0.03	0.06
30	27.82	0.03	0.07	27.66	0.03	0.08	27.68	0.05	0.45	26.97	0.02	0.05
40	32.60	0.03	0.17	32.41	0.03	0.12	32.46	0.03	0.24	31.72	0.02	0.06
50	38.26	0.05	0.29	38.06	0.07	0.38	38.12	0.04	0.22	37.33	0.03	0.09
60	45.04	0.10	0.68	44.82	0.14	0.56	44.91	0.07	0.52	44.07	0.03	0.12
70	45.26	0.12	0.73	45.04	0.14	0.84	45.12	0.08	0.46	44.23	0.03	0.17
80	54.90	0.03	0.09	54.62	0.03	0.0910	54.79	0.03	0.08	53.84	0.03	0.10

三、模型比 1/20 試驗成果比較分析

階梯式豎井消能工及無階梯式豎井消能工之量測壓力變化，詳如表 4-3 所示。試驗結果顯示有階梯式豎井消能工之壓力變化，最大振幅縮減至 0.84 公尺以下，標準差在 0.14 公尺以下，明顯減少壓力之震盪。階梯式豎井消能工定量流輸水量由 10 萬 CMD 增加至 80 萬 CMD 之試驗成果，如照片 4-2~照片 4-9 所示。

(一)無階梯式豎井消能工：

無階梯式豎井消能工可以明顯看出，由調整池進入的輸水流量直接投潭時，受到重力加速會捲入較多的氣泡與較劇烈的水位震盪以達到消能效果。尤其在中低輸水量時，豎井水位越低投潭速度越快會捲入更多氣泡，細微氣泡會捲入下游輸水管路，以致增加下游排氣閥的負擔，如果氣泡量太大來不及排除會累積成壓縮氣體產生不理想的輸水流況。因此，無階梯式豎井消能工之輸水過程，於低流量與低水位情況下，會夾帶較多氣泡進入下游管段，如照片 4-10 所示。因此，建議應設置階梯式豎井消能工，確保長距離管路輸送前之理想流況。

(二)階梯式豎井消能工：

階梯式豎井消能工不論高輸水量或低輸水量，經過逐階消能與減速，豎井內氣泡細化與氣泡潛入深度減少，氣泡較不易被帶入輸水管路中。即豎井內水面下夾氣量少透光度佳，豎井內投潭水深比較，如表 4-4 所示。觀察下游輸水管段，階梯式豎井消能工在定量流情況下，觀察幾乎無氣泡進入下游輸水管段，僅在 10 萬 CMD 變量流充水時會有氣泡進入下游輸水管段，此短暫變量流過程夾氣問題，設計單位已考量下游輸水管段適當位置設計排氣閥。

(三)豎井內通風側與消能側間之通氣孔：

通氣孔採用垂直長條矩形，當流量大於(40 萬 CMD 時，部分震盪水流會越過通氣孔進入豎井通風側，如照片 4-11 所示。試驗過程發現僅少量水體經由通氣孔跌落通風側，對通氣量與水位震盪影響不大。

建議通氣孔考量未來維護檢修通道，可適度微調水平位置、尺寸與附設爬梯，以利工作人員進出。

(四)逐階跌水消能與旋轉流況：

階梯式豎井消能工之流況，水流在逐階交替轉換方向，藉由延長運行距離消耗水流能量，降低水體進入水面的流速，減少水面下氣泡量與氣泡潛入深度，以及降低豎井水位震盪。豎井內部跌水過程水理現象複雜，再加上夾氣量的變化，即在整個由上而下的跌水過程水流有交替旋轉消能，如照片 4-12 所示。未來實際營運時輸水量越大豎井水位越高，需要消能的水位範圍越小，旋轉流況很短，捲氣運行水體受到隔板阻斷的運行距離越長，觀察到微小氣泡潛入 2~3 階即受阻擋上浮，因此下層水體明顯清晰。中低流量逐階消能左右震盪跌水流況，試驗結果尚能達到穩定輸水與消減夾氣問題。如能考量階梯式豎井消能工發明者 Odgaard 教授建議略微退縮隔板降低旋轉流況，則於細設階段試驗檢討評估。

(五)第一階消能板之流況分析：

第一階消能板受到 45 度入水管與隔牆阻擋，會有局部超高之水理流況，如照片 4-13 所示。分別呈現 10 萬 CMD、40 萬 CMD 及 70 萬 CMD 第一階水理流況，如照片 4-14~照片 4-16 所示。入水管尚能跌水至第一階隔板，並結合隔牆導引至第二階隔板，達到逐階消能效果。如考量改善豎井旋轉起始流況，則建議調整水平入射角試驗評估。

(六)調整池與豎井銜接管段：

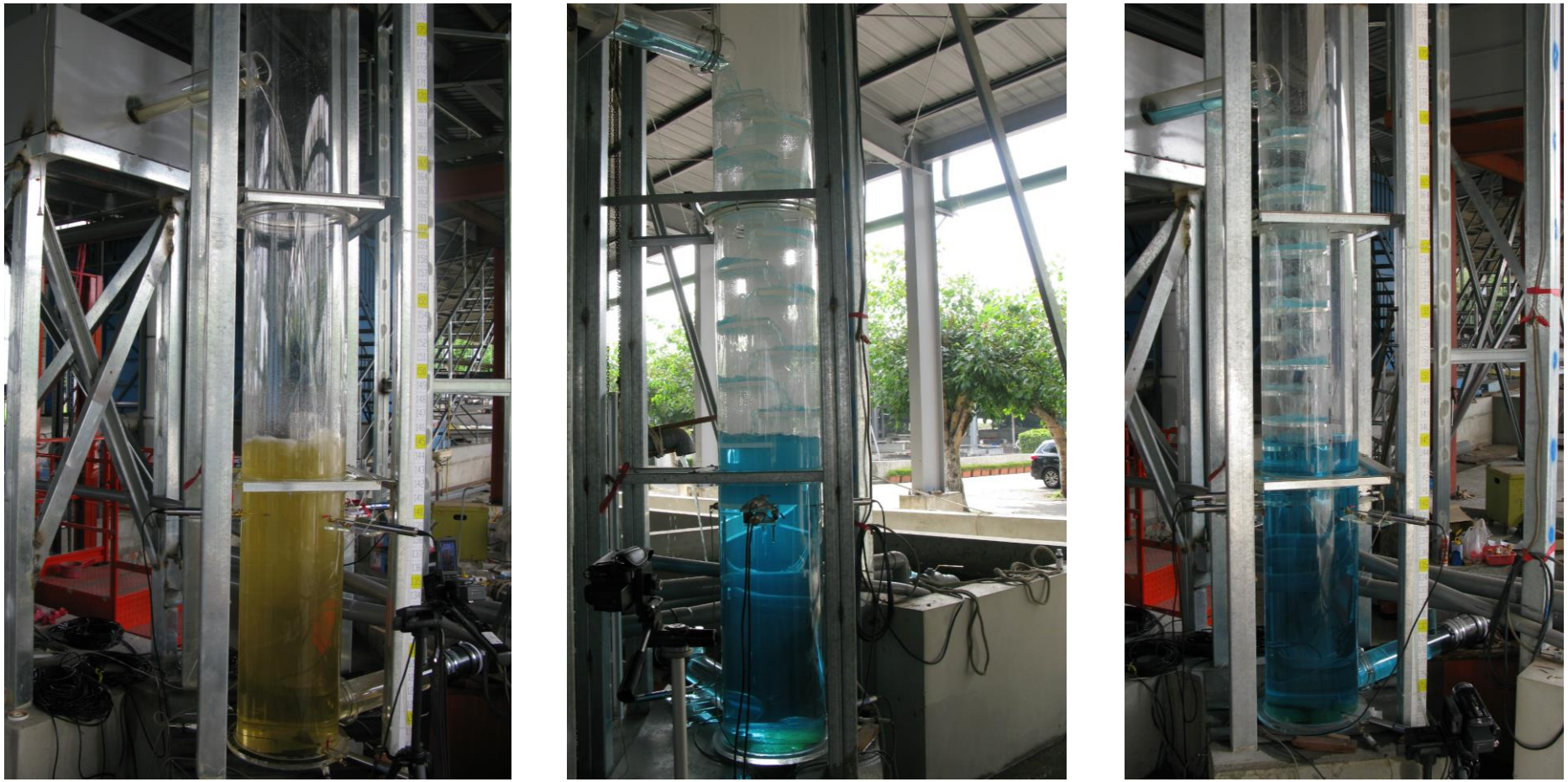
設計入水管上游在調整池部份之入口採用一彎頭向下，此設計降低漩渦捲氣進入管段。在非滿管時，因彎頭朝下且水流在管內流向下游，導致空氣無法從上游補充，僅由下游出口補充於流量 60 萬 CMD 時，入水管液面略微不平，在 70 萬 CMD 時則液面較為起伏，如照片 4-17 及圖 4-21 所示。

表 4-3 有無階梯式豎井消能工壓力比較表

壓力(mH_2O)	無消能工@點 B			有消能工@點 B		
流量	平均值	標準差	最大振幅	平均值	標準差	最大振幅
10 萬 CMD	23.118	0.239	0.896	23.097	0.009	0.051
20 萬 CMD	25.085	0.398	1.377	25.000	0.028	0.086
30 萬 CMD	27.793	0.390	1.473	27.656	0.028	0.081
40 萬 CMD	32.568	0.355	1.722	32.414	0.028	0.115
50 萬 CMD	37.999	0.484	2.003	38.061	0.070	0.383
60 萬 CMD	45.138	0.299	1.138	44.820	0.136	0.557
70 萬 CMD	45.138	0.299	1.138	45.040	0.139	0.835
80 萬 CMD	54.946	0.232	0.731	54.623	0.032	0.085

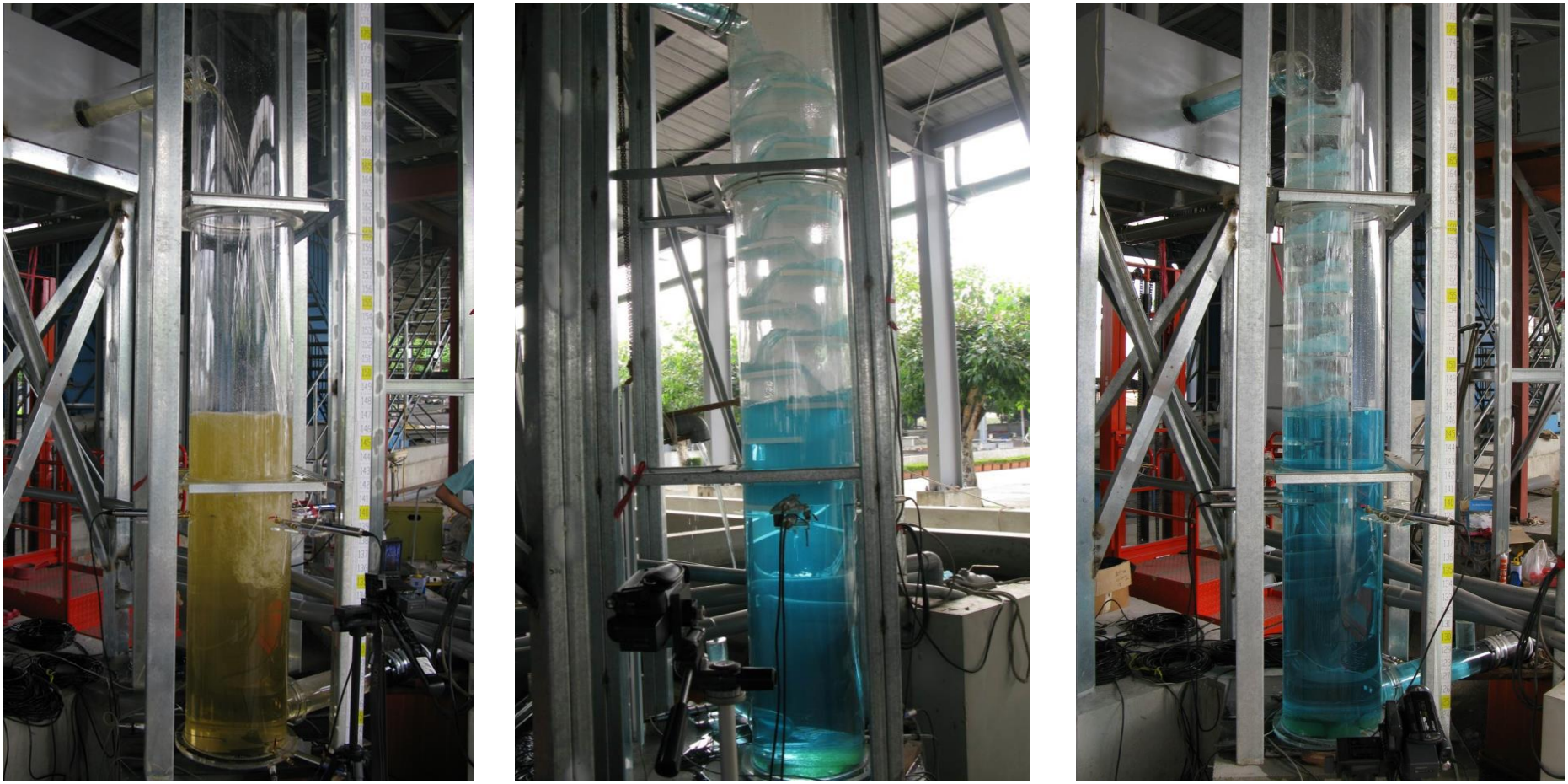
表 4-4 無階梯式豎井消能工及有階梯式豎井消能工投潭深度比較

輸水量 (萬 CMD)	試驗 豎井水頭 (m)	無階梯式消能工 投潭氣泡深度 (m)	有階梯式消能工 投潭氣泡深度 (m)
10(暫態)	--	0~7	0~3
10	145	7	幾乎無
20	147	12	幾乎無
30	149.8	15	1
40	154.5	20	2
50	160	25	2~3
60	166.9	20	2~3
70	167	20	3
80	176.8	無	無



備註：無階梯式豎井消能工流況(左)、有階梯式豎井消能工正面流況(左)、有階梯式豎井消能工側面流況(右)

照片 4-2 10 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片



備註：無階梯式豎井消能工流況(左)、有階梯式豎井消能工正面流況(左)、有階梯式豎井消能工側面流況(右)

照片 4-3 20 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片

備註：無階梯式豎井消能工流況(左)、有階梯式豎井消能工正面流況(左)、有階梯式豎井消能工側面流況(右)

照片 4-4 30 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片

備註：無階梯式豎井消能工流況(左)、有階梯式豎井消能工正面流況(左)、有階梯式豎井消能工側面流況(右)

照片 4-5 40 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片

備註：無階梯式豎井消能工流況(左)、有階梯式豎井消能工正面流況(左)、有階梯式豎井消能工側面流況(右)

照片 4-6 50 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片

備註：無階梯式豎井消能工流況(左)、有階梯式豎井消能工正面流況(左)、有階梯式豎井消能工側面流況(右)

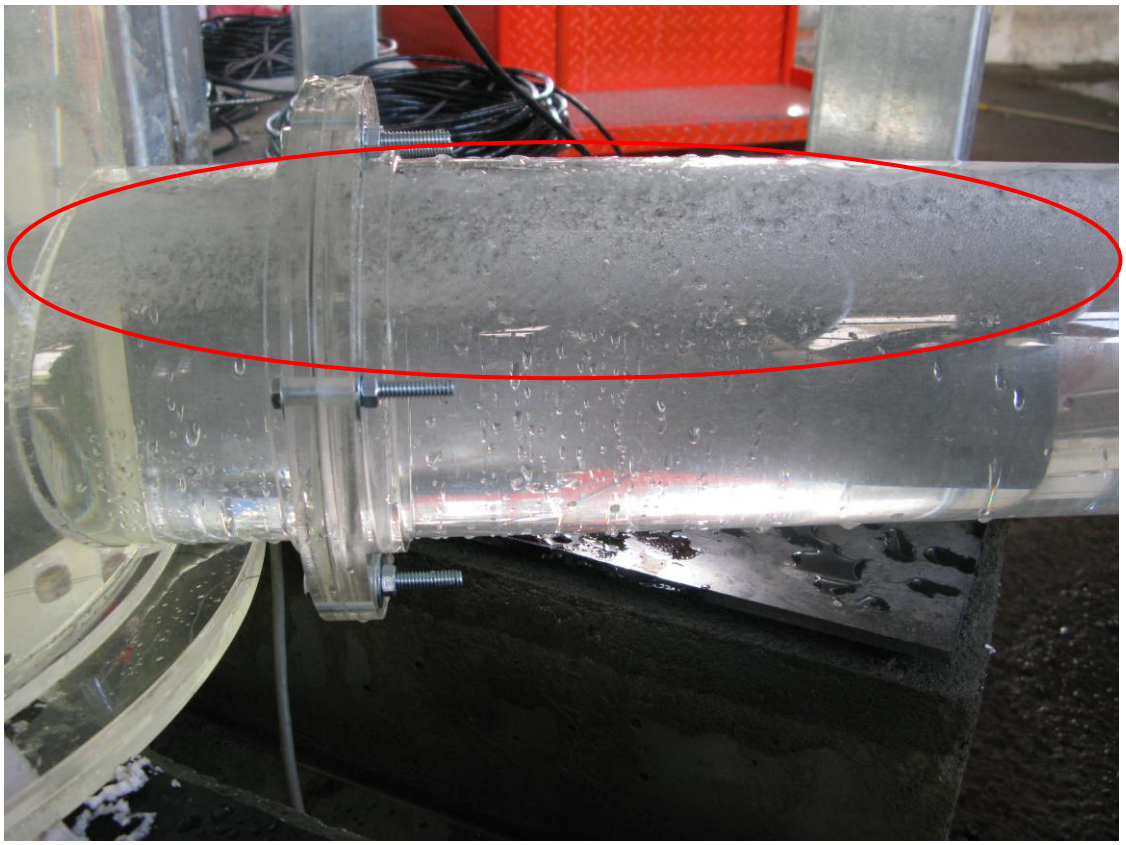
照片 4-7 60 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片

備註：無階梯式豎井消能工流況(左)、有階梯式豎井消能工正面流況(左)、有階梯式豎井消能工側面流況(右)

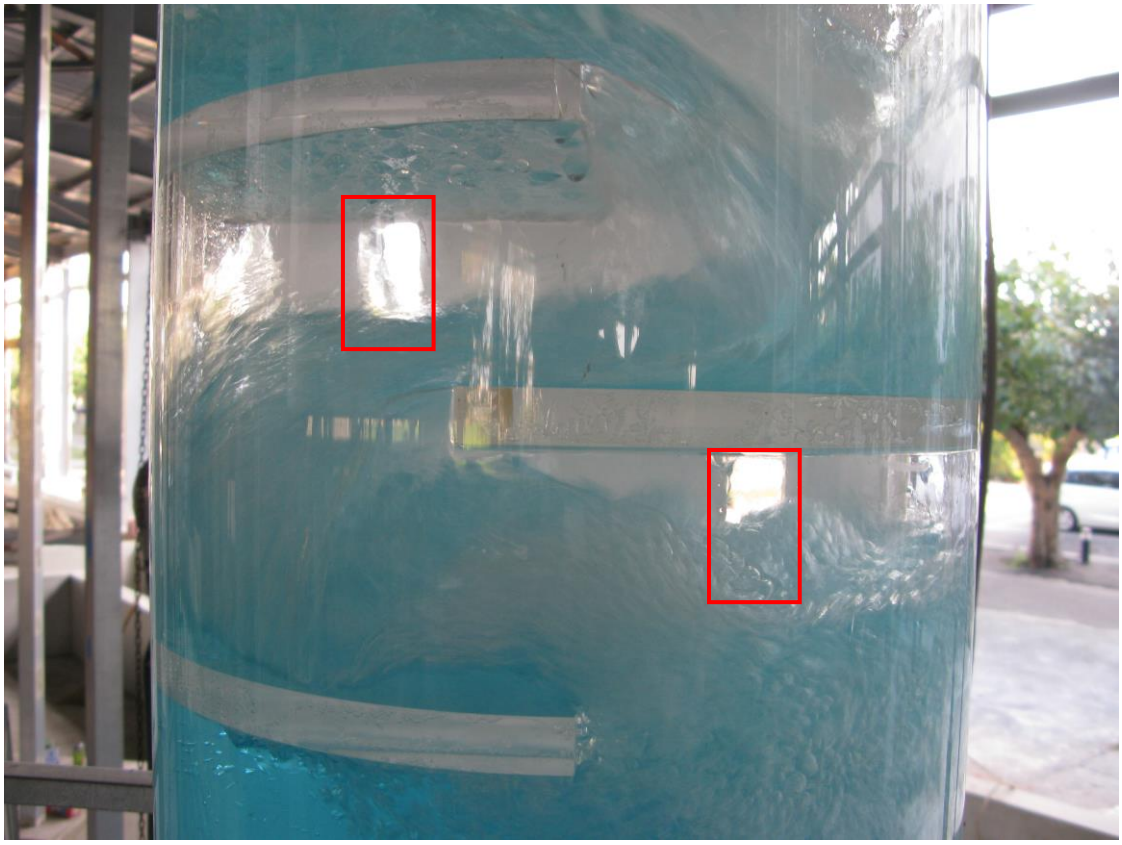
照片 4-8 70 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片

備註：無階梯式豎井消能工流況(左)、有階梯式豎井消能工正面流況(左)、有階梯式豎井消能工側面流況(右)

照片 4-9 80 萬 CMD 定量流豎井內部流況比較照片

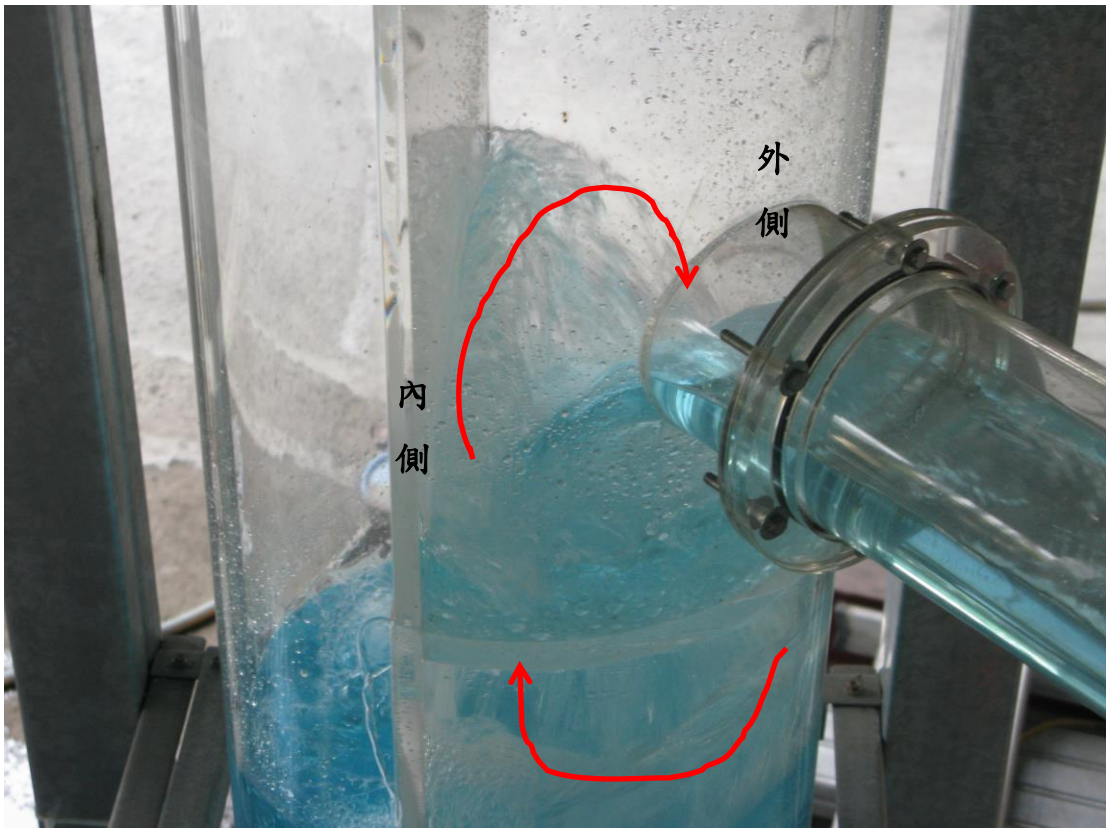


照片 4-10 無階梯式消能工氣泡進入下游管段

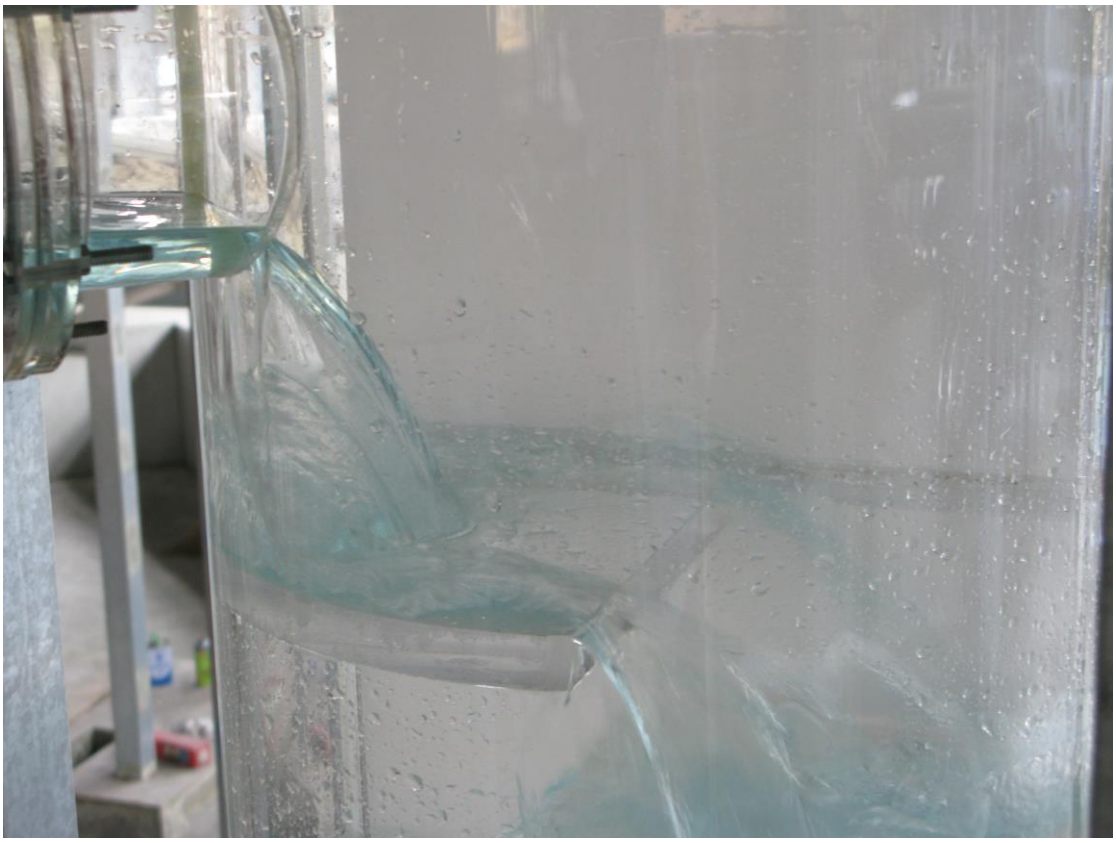


照片 4-11 跌水時水位震盪超過通氣孔高度

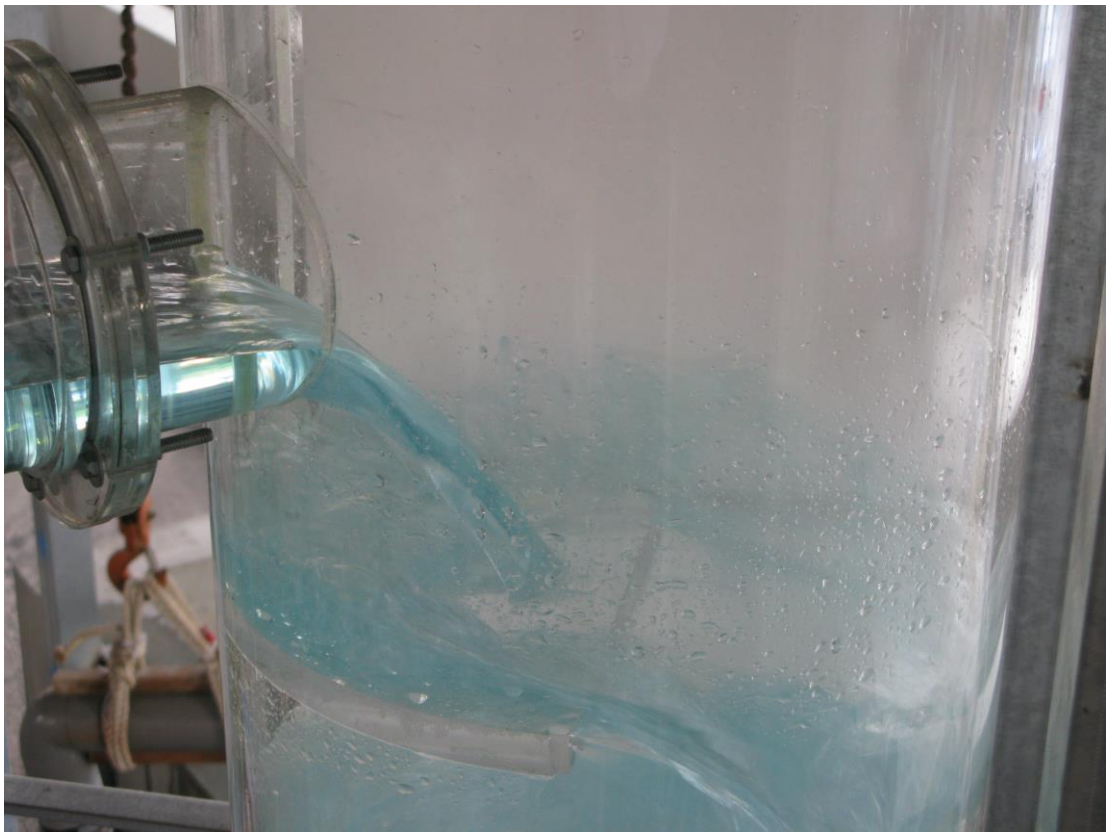
照片 4-12 水流經過階梯式消能板之流況



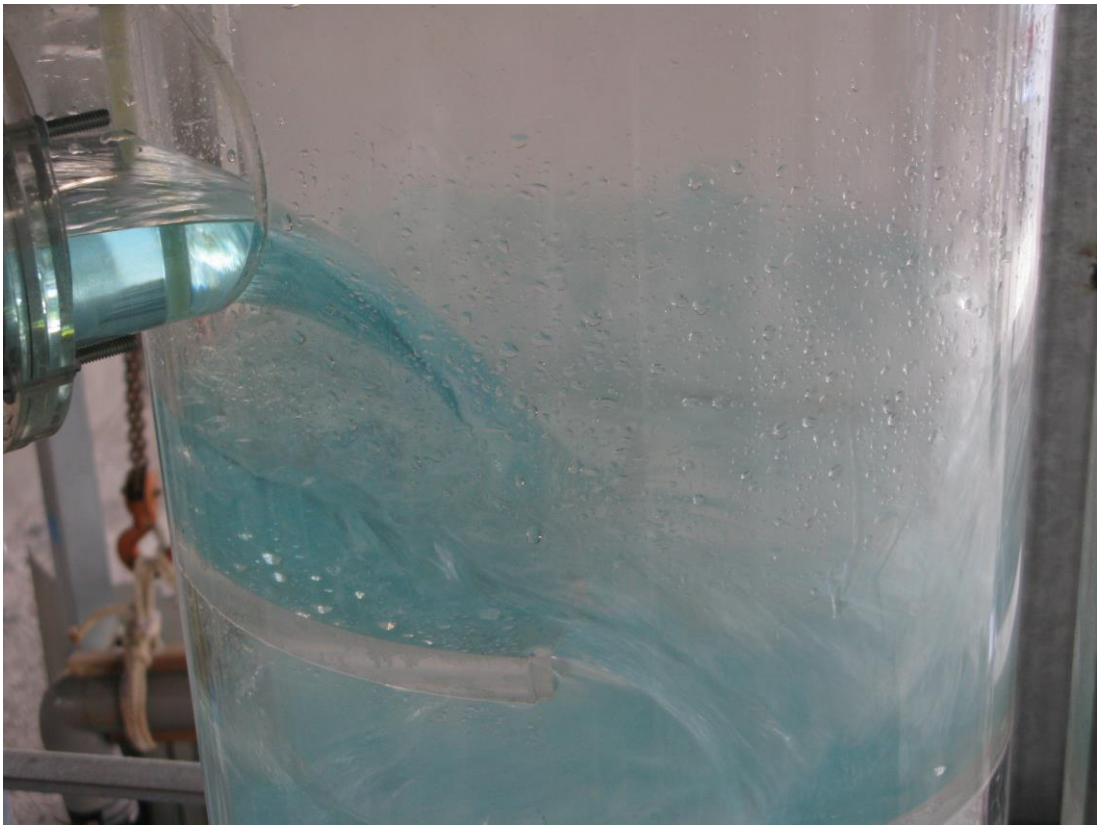
照片 4-13 水流撞擊第一階消能板及隔牆之流況



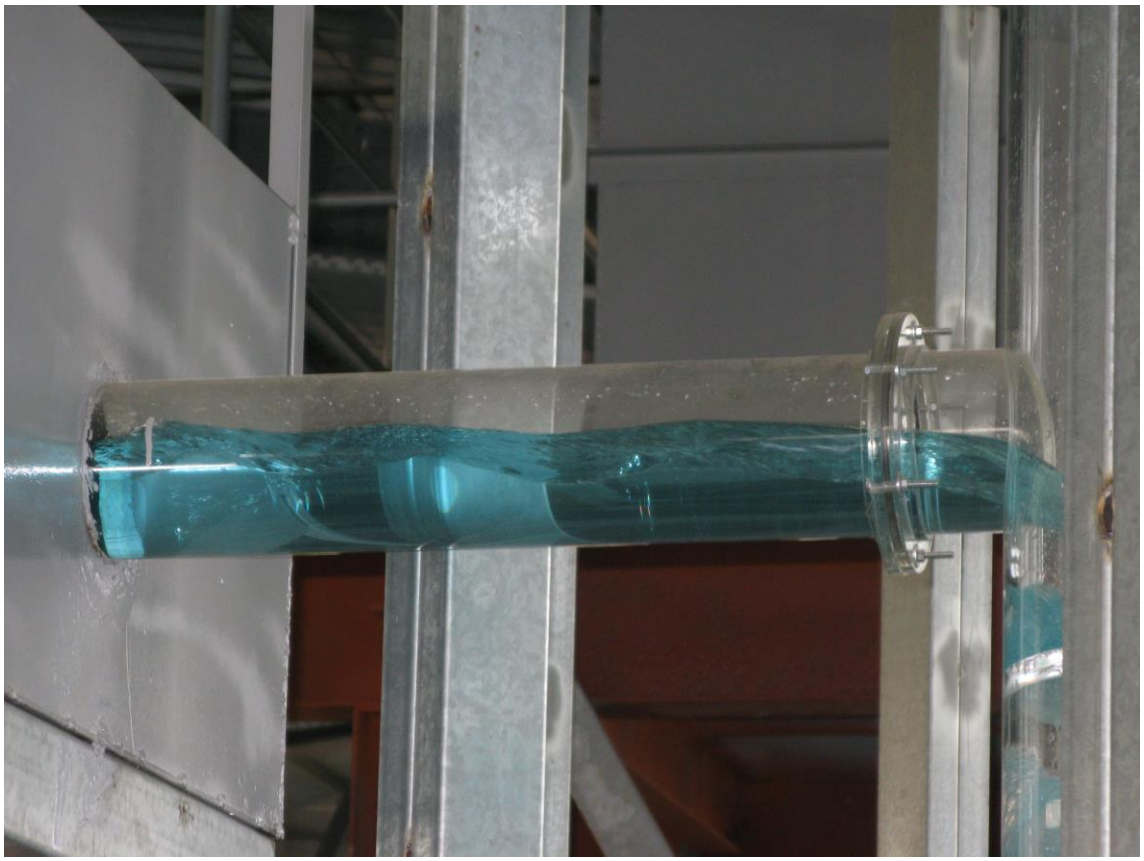
照片 4-14 10 萬 CMD 第一階消能板流況



照片 4-15 40 萬 CMD 第一階消能板流況



照片 4-16 70 萬 CMD 第一階消能板流況



照片 4-17 輸水管有入口彎管之流況(70 萬 CMD)

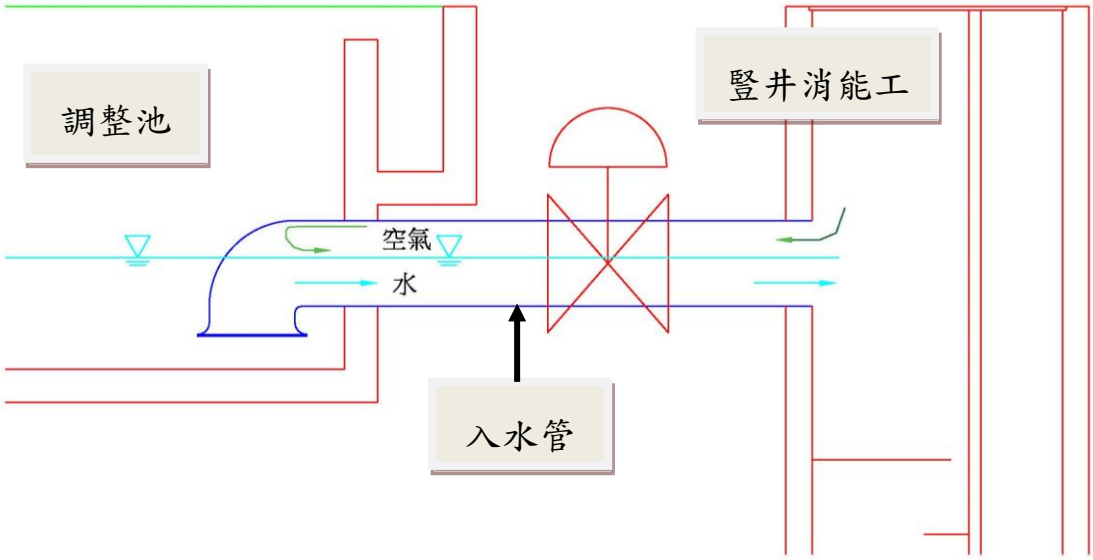


圖 4-21 入水管氣液交界示意圖

四、模型比 1/13.1 試驗成果分析

將階梯式豎井消能工模型比 1/13.1 的壓克力模型與豎井水位控制設施組裝完成後，即進行不同輸水量(由 10 萬 CMD 至 80 萬 CMD)與不同豎井水位的清水試驗。其中不同豎井水位，包括木瓜園輸送至南化淨水場與木瓜園輸送至內門減壓池所需之豎井水位，以及考慮光滑管與粗糙管不同情境下的水位變化。試驗結果顯示，階梯式豎井消能工其水理現象與模型比 1/20 的試驗成果相近。顯示階梯式豎井消能工基本上是可以達到預期的消能效果，也兼具逐階消能降低投潭速度減少氣泡進入下游輸水滿管段，冀期下游長距離滿管流穩定輸水之目的。試驗過程觀測調整池水位隨輸水量自然變動，無需人為操作，模型試驗結果輸水量 10 萬 CMD 至 80 萬 CMD，調整池水位介於 EL.174.6m~181.1m 之間，均低於調整池溢流頂水位 EL.182m。

經過階梯式豎井消能工模型比 1/13.1 的清水試驗，發現隨著輸水量越大所需的豎井水位越高。雖然高流量時在階梯式豎井消能工水體交替震盪流況較劇烈，但是高流量所需削減的水頭越小，如照片 4-18 所示。經過模型比 1/20 試驗成果，基本上已確認採用有階梯式豎井消能工，接著 108 年度進行模型比 1/13.1 試驗是評估不同模型比之比對驗證。模型比 1/13.1 之主要試驗項目，係進行不同輸水量(由 10 萬 CMD 至 80 萬 CMD)與控制不同豎井水位之清水試驗。其中不同豎井水位，包括木瓜園輸送至南化淨水場與木瓜園輸送至內門減壓池所需之豎井水位，以及考慮光滑管與粗糙管不同情境下之水位變化。模型比 1/13.1 之試驗結果，水理現象與模型比 1/20 的試驗成果相近，惟其中捲氣量及捲氣深度略大於模型比 1/20，呈現模型比尺效應。試驗過程中可觀測到各階梯均能阻擋氣泡下移，由模型比 1/13.1 試驗結果階梯式豎井消能工尚可達到預期之消能與控制投潭捲氣影響，詳如表 4-5 及照片 4-19~4-24 所示。

表 4-5 模型比 1/20 試驗投潭深度與模型比 1/13.1 試驗成果比較

輸水量(萬CMD)	試驗竪井水頭(m)	無階梯式竪井消能工(1/20模型)投潭氣泡深度(m)	有階梯式竪井消能工(1/20模型)投潭氣泡深度(m)	試驗竪井水頭(m)	有階梯式竪井消能工(1/13.1模型)投潭氣泡深度(m)
10(變量)	--	0~7	**0~3**	--	**--**
10(定量)	145.0	7	幾乎無	145.5	1.8
20(定量)	147.0	12	幾乎無	147.3	1.9
30(定量)	149.8	15	1	150.1	2.4
40(定量)	154.5	20	2	155.7	3.2
50(定量)	160.0	**25**	**2~3**	162.3	**3.8**
60(定量)	166.9	20	**2~3**	170.4	**4.1**
70(定量)	167.0	20	**3**	172.5	**3.2**
80(定量)	176.8	無	無	181.1	無

照片 4-18 高流量需豎井內高水位劇烈震盪範圍很小

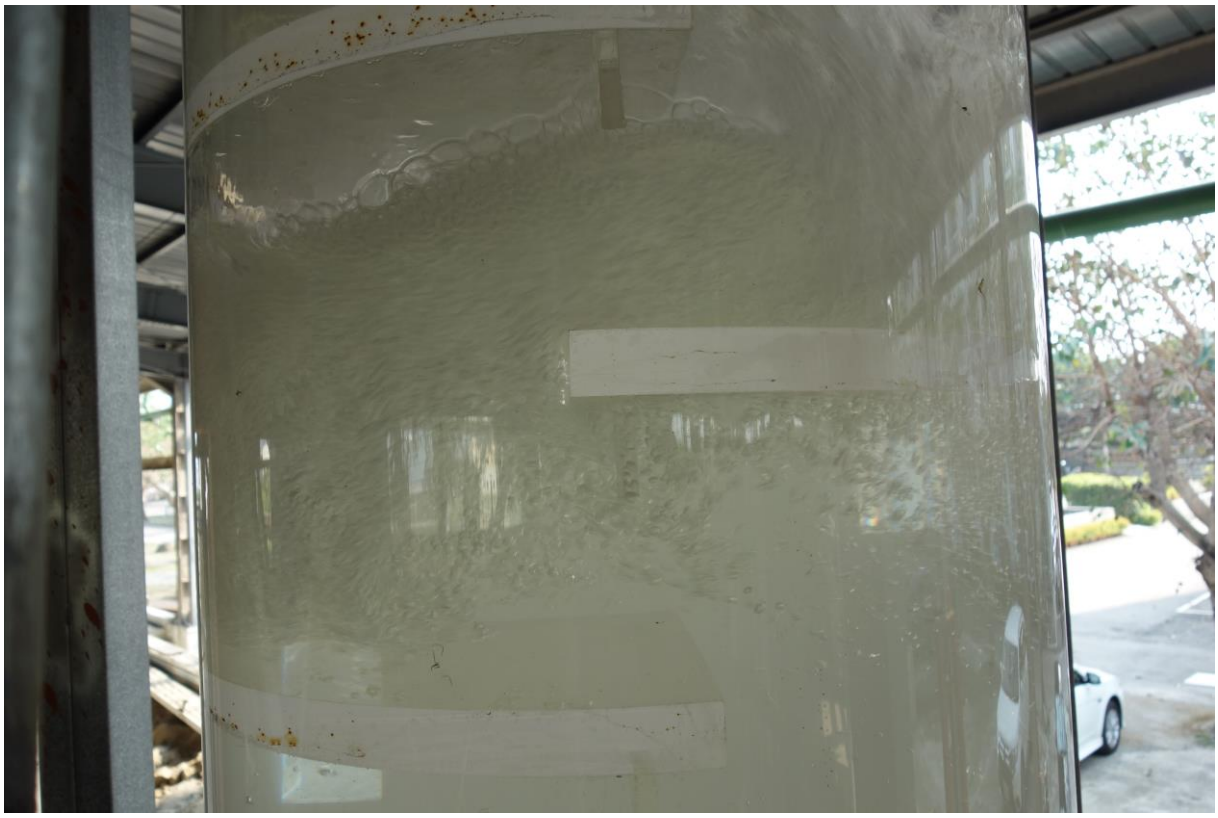
照片 4-19 輸水量 10 萬 CMD 捲氣深度約 1.8 公尺

照片 4-20 輸水量 20 萬 CMD 捲氣深度約 1.9 公尺

照片 4-21 輸水量 30 萬 CMD 捲氣深度約 2.4 公尺

照片 4-22 輸水量 40 萬 CMD 捲氣深度約 3.2 公尺

照片 4-23 輸水量 50 萬 CMD 捲氣深度約 3.8 公尺



照片 4-24 輸水量 60 萬 CMD 捲氣深度約 4.1 公尺

五、模型試驗成果綜合評估

經由模型比 1/20 試驗結果顯示，階梯式豎井消能工內跌水過程呈現的水理流況，於民國 107 年 12 月邀請階梯式豎井消能工發明者 Odgaard 教授蒞臨指導，如照片 4-25。Odgaard 教授提出兩點建議，第一點目前出流方向跌水板超過豎井之中心線較多，容易跌水時水流擠壓在跌水板末端形成旋轉水流，建議將跌水板長度略微往後退縮，如照片 4-26；第二點目前通氣孔為矩形垂直方向較長，水流在跌水板震盪時容易從通氣孔噴至通風側，影響通風側水位穩定，建議將通氣孔採用橫放，減少部分水體從消能側震盪跳越至通風側。

經過豎井消能工模型比 1/13.1 的清水試驗，彙整兩種不同模型比的試驗成果，加以比較綜合評估如下：

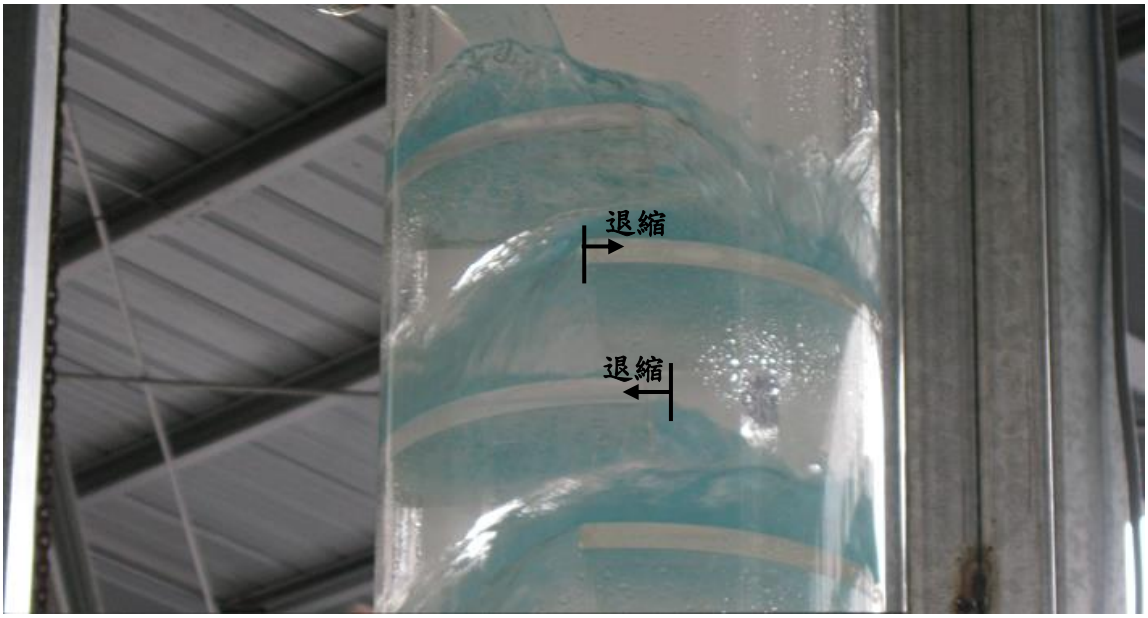
（一）豎井消能工各階梯間的垂直隔牆分別設置通氣孔，考量未來維護檢查通道，建議適度調整水平位置、尺寸及維護通道，以利工作人員進出。

（二）考量適度退縮消能板長度與調整隔牆位置增加跌水空間，以降低水流跌水時擠壓在消能板末端及改善水理流況。

（三）如考量微調降低入水管與第一階跌水板之高差(現況 2 公尺)，則建議最下層增加一階消能隔板(即增設第 16 階)，以及入水管進入豎井水流之方向，盡量與跌水板流向平行。

（四）調整池銜接豎井之入水管，其前端設置彎頭有其必要性，且兼具抗渦功能。經補充試驗彎頭最高點，設置 10 英吋通氣孔對短管輸水之水理流況影響不大，建議無需設置通氣管，如照片 4-27。

照片 4-25 Odggard 教授指導豎井消能流況



照片 4-26 消能板建議略微退縮

照片 4-27 調整池入水管前端灣頭頂部測試設置通氣孔之影響

參考文獻

1.水工模型試驗理論與案例研究分析暨模型試驗參考手冊研擬(2/2)，經濟部水利署水利規劃試驗所，民國 100 年 12 月。

2.曾文水庫聯通管工程設計及環境影響檢討基本設計報告，經濟部水利署南區水資源局，民國 107 年 11 月。

3.″ Baffle-Drop Structure Design Relationship″ (Journal of Hydraulic Engineering, September ,2013 , Prof. A. Jacob Odgaard.

附錄一、工作人員名單

職　位	姓　名	工　作　項　目	備　註
課　長	謝 天 元	工作方針指導、策劃、報告審查	107.1.1~107.3.2
	陳 春 伸		107.3.2~108.2.1
	徐 必 杰		108.2.1~108.12.31
工 程 員	粟 群 超	工作策劃、報告撰寫	107 年計畫主辦
正工程司	吳 慶 現	工作策劃、報告撰寫	108 年計畫主辦
專業研究助理	楊 婷 卉	基本資料蒐集、繪圖及協助試驗	計畫協辦
技　工	賴 明 士	協助模型材料採購及模型組裝製作	
技　工	蕭 孟 福	協助模型組裝製作及人力調配	
試驗助理	汪 百 得	協助模型組裝製作與防漏處理	
試驗助理	王 麗 輕	協助模型組裝製作與試驗量測	
試驗助理	陳 玉 如	協助文書打字、影印及公文	
試驗助理	洪 春 暖	攝影及拍照	

附錄二、「曾文水庫庫區豎井消能工水工模型試驗」期中報告書審查意見及處理情形

壹、會議日期：民國 108 年 2 月 21 日（星期五）上午 10 時 00 分

貳、會議地點：本所舊正辦公區 4 樓會議室

參、主持人：陳所長春宏

肆、記錄人：吳慶現

審查意見	處理情形	答覆說明納入報告	
		章節/圖/表	頁次
一、行政院政務顧問 黃委員金山			
1.報告之內，對於位於何處應在位置圖上標明，如以樁號表示，則從起點起至豎井之中心點為多少，應標示。	1.感謝指導，詳如報告內容。	第四章	4-1~4-2
2.通氣孔之位置應於最高水位之上，避免淹水。	2.豎井消能工分階消能，各階間的隔牆均設置通氣孔，應無法避免淹水問題。即當豎井水位尚未潛沒通氣孔時為通氣功能，如果豎井水位潛沒通氣孔時則兼具通水功能。	第四章第五節	4-44
3.各不同流量經豎井消能之後，能量消能百分比有多少。	3.不論是有無階梯式豎井消能工，各不同輸水流量均能百分之百消能，達到下游輸水路所需水位。惟兩者的差異在於投潭速度、氣泡大小、夾氣量影響深度以及氣泡是否會捲入輸水管段。	第四章第五節	4-44
4.南水局應訂定本送水管路之操作利用之規則，使嘉南水利會安心配合，原則上應依民國九十年經濟部所公告之「農業用水調度使用協調作業要點」辦理。	4.感謝指導，建請南水局配合辦理。		
5.是否有必要分乾濕兩部分，建議檢討。	5.遵照辦理，已修改為消能側與通風側。		
二、水利署退休副署長 賴委員伯勳			
1.調整池及豎井之位置，請再確認地質狀況。	1.本項地質補充調查業於民國 107 年 3 月完成補充地質調查，地質狀況尚符合設計需求。		

2.調整池將來操作採用常水位EL.183m，或是水位變動請再確認。	2.調整池水位隨輸水量變動，模型試驗結果10萬CMD至70萬CMD調整池水位174.6m至175.9m，輸水量80萬CMD水位上升至181.1m，調整池水位均低於調整池溢流頂水位EL.182m。	第四章第五節	4-47
3.調整池上游仍有極大之能量差，是否能改變以發電之方式來消能，並以調整池作為定常尾水。	3.目前所規劃設計豎井消能工為備援調度用，使用機率尚無法確定，因此於設計圖中預留電廠預定地。	第二章第三節	2-7
4.豎井構造物，消能板承受之loading如何訂定，建議能提供參考。	4.豎井構造物中消能板承受之loading，模型試驗尚無法量化提供。設計單位參考美國相關階梯式豎井消能工設計，例如流量30cms，豎井內徑12公尺，每階落差3公尺，其設計板厚25公分。本案設計消能板厚40公分，業已充分考量結構安全，包括最大暫存水體重量與衝力，以及抗震與結構本身的自重。	第三章	3-2
5.豎井的高度，建議考量下游閘閥緊急關閉時可能產生之Surge高度。	5.本工程緊急關閉流程，先由上游消能井錐型閥關閉後，再啟動下游閥門關閉，其閥門關閉時間約25分鐘，屬於緩慢關閉，因此其所產生之Surge高度有限。	第四章第五節	4-47
6.消能水壓之變化及振幅，建議能補充頻率，以提供構造物振動安全設計之參考。	6.試驗消能水壓觀測最大振幅，建議考量納入消能板結構設計中，以確保構造物振動安全。		
7.調整池上游消能井之規模，能夠滿足多少之消能，建議能進一步達到調整池之流況穩定為原則。	7.本項調整池上游消能井錐形閥之消能規模與北水局分層取水工程相當，現況石門水庫運轉消能井搭配錐型閥消能後，流態穩定地排放至石門大圳。		
三、水利署退休副總工程司 蔡委員奇成			
1.投潭產生的水泡對下游引水管不利，故由表4-4，10萬CMD(暫態)之0~3m氣泡深，要如何防止不流入引水管，若在技術上不可解決，建議以操作方式來防止。。	1.10萬CMD暫態變量流影響0~3m氣泡深度，其影響時間與氣泡量有限，設計單位已考量下游輸水路設有排氣閥克服短時間氣泡捲入輸水段的問題。	第四章第三節	4-24

2.考慮供水頻度，應該 20~50 萬 CMD 機會最多，消能板之縮退與否以此流量之水理來衡量，至於水量多集在井壁，認為是管徑問題，但對消能及結構無太大不利，認為以經濟為考量為宜。	2.感謝指導，本工程以 80 萬 CMD 設計可符合備援使用機率最大的輸水量 20~50 萬 CMD 之消能需求，並納入相關經濟考量，後續建議豎井最佳化水理試驗評估。	第四章 第五節	4-44
3.另外消能板之縮退，也請考慮小水量之垂直落下情形。消能板是否可再往下多加幾階?	3.消能板最低階標高 140m 均低於 10 萬 CMD 的正常操作水位 144.6m~145.5m，如考量降低第一階跌水落差，則建議增設第 16 階確保低流量跌水削減氣泡空間。	第四章	4-2
4.入口彎管之通氣問題，建議按一般做法裝通氣管即可，認為不必改彎管。	4.感謝指導，本項入口彎管為短管段，氣體不易累積影響流量，且發生滿管機率很低，經補充試驗通氣管之功能，建議應無需考量通氣問題。	第四章	4-2
5.濕室通乾室之通氣孔其橫放或直放，若乾室水面之靜穩要求不高時，認為並不重要。	5.感謝指導，通氣孔直放可作為人員檢查通道，因此建議維持直立式通氣孔，可適當調整水平位置及尺寸，以利檢修人員進出。		
四、中興大學退休教授 盧委員昭堯			
1.期中報告已完成有無消能工之豎井水理試驗，進行兩者之綜合比較，並提出 9 項相關建議，實屬難得。	1.感謝指導與肯定。		
2.關於圖 2-6(豎井配置圖)，請補充消能板(baffle)設計間距、長度與隔牆位置之背景說明，及其與 Odgaard(2013)分析(含 3 項假設)之異同。	2.豎井直徑 D 先由流量概估，本設計 D=7.6m、消能板厚 t=0.4m、消能板長度 B=4.6m，設計間距 h=2.25m，均符合設計原則範圍(1)1/2D=3.8m≦B≦2/3D=5.07m(2)0.12<F<0.23(3)0.26<(h-t)/B<0.47。	第四章	4-2
3.表 3-2(P.3-4)中，請簡略說明能量損失之估算。	3.輸水管路損失之估算主要是磨擦損失，次要損失包含彎管及閥門等。		
五、水利署退休副署長 楊委員豐榮			
1.豎井消能工經水工模型驗證，其減壓功能可達到理想效果，尤其其在操控方便性，及流況穩定性方面，甚具優勢，是值得嘗試。。	1.感謝指導與肯定。。	第一章	1-2~ 1-3

2.整個豎井消能工設計的原理，包括入射角度、井的大小、消能板之高差、豎井之最小井深…等，應有其條件，是否有制式的規格?	2.豎井消能工入射角度無明顯限制角度的標準，豎井的直徑大小根據流量估算，消能板之高差根據試驗範圍，豎井之最小井深根據預計消能範圍，並依據 Odgaard(2013)設計原則研選。		
3.調整池上游的「消能井」，一要控制流量，二要控制調整池之水位，請教在控制上有否困難?	3.消能井錐形閥控制輸水流量，調整池操作水位隨著輸水量變動，模型試驗結果 10 萬 CMD 水位 174.6m 至 70 萬 CMD 水位 175.9m，輸水量 80 萬 CMD 水位 181.1m，調整池操作水位均低於溢流頂水位 EL.182m，無需人為控制調整池之水位。	第四章 第五節	4-47
4.取水彎管因通氣問題，造成流況不穩，建議在入口彎頭頂加設通氣孔。	4.感謝指導，本項入口彎管為短管段，氣體不易累積影響流量，且發生滿管機率很低，經補充試驗通氣管之功能，建議應無需考量通氣問題。。		
5.通氣孔除非有特殊考量，否則通氣孔改為橫式，應無不可。	5.感謝指導，通氣孔直放可作為人員檢查通道，因此建議維持直立式通氣孔，可適當調整水平位置及尺寸，以利檢修人員進出。。		
6.基於經濟考量，豎井之深度，豎井之尺寸、消能板之數目，如果稍加調整，是否會影響既定功能?	6.感謝指導，本項階梯式豎井消能工的基本設計案業依設計原理擬定，並經水理計算、結構設計及經濟考量等因素優選定案。		
7.簡報 P.9，乾、濕標示錯誤，P.10，乾、濕側，建議改以”通氣側”及” 消能側”表示，較符實際。	7.感謝指導，業已修訂。		
六、成功大學退休教授 蔡委員長泰			
1.圖 2-1（p.2-3）中南化淨水場之位置不明，並說明 Q1,Q2,Q3,Q4 之意義。	1.Q1 為南化水庫原水供應量，Q2 為南化水庫備援高屏攔河堰原水供應量。Q3 為曾文水庫備援南化淨水場及高屏攔河堰原水供應量。Q4 為高屏攔河堰所需備援原水供應量。	第二章 第二節	2-3
2.請說明圖 2-1 中內門減壓池高程 114m 與表 3-2（p.3-4）中內門減壓池/東平橋水力高程 144m(輸水量 10 至 60 萬 CMD)及 114m（輸水量 70 及 80 萬 CMD）之關係。。	2.輸水量 10~60 萬 CMD 以東平橋操作控制水力高程，確保上游處於滿管狀態。當輸水量 70 萬及 80 萬 CMD 時，則改由內門減壓池控制使全線為滿管狀態。		

3.圓形入流管跌水豎井流況不均勻（照片 4-11 至 4-15，p.4-36 至 4-38）。若出口為矩形底，第一階段可較接近均勻跌水，建議評估對左右震盪狀況（p.4-25）之影響。	3.因考慮上游管路設計蝶閥控制後，此管段短距離不足無法漸變成矩形管，所以考量維持原設計圓形入水管。		
4.請說明表 4-3 中，輸水量 50 萬 CMD 之有消能工點 B 之壓力大於無消能工。	4.輸水量 50 萬 CMD 之有消能工點 B 之壓力 38.061m 大於無消能工 37.999m，兩者相差 0.062m=62mm，換算成模型尺寸 3.1mm，此微量變化可能模型下游端水位控制產生的差異。		
5.豎井深超過五十公尺，建議測試在無消能工豎井以多孔介質（p.4-40）或整流佈置以抑制震盪及整流的可能性。	5.感謝指導，建議多孔介質或整流佈置之尺寸形式與配置位置，以利提供設計單位參考。		
6.建議評估進水管及豎井均為矩形佈置的可能性（圖 2-6，p.2-8）。	6.設計單位經評估豎井超過 50 公尺之深基礎結構,不宜採用矩形豎井佈置。		
七、交通大學退休教授 楊委員錦釧			
1. Drop Baffle 的消能概念原是用在防洪下水道，但經由試驗的初步結果，現應用在水資源壓力流之情境下，效果亦甚為顯著。但較為可惜的是沒有具體的量測數據，作為設計改善之參。	1.感謝指導，有關建議量測具體的數據，請提供量測項目與位置，以利提供相關設計改善之參採。。		
2.請補充說明 Shaft Dia D，Baffle spacing h，及隔牆位置 B 的設計條件及研選的原則供參。	2.豎井直徑 D 由流量概估，試驗範圍 (1)1/2D≦B≦2/3D (2)$0.12<F=(Q^2/(B^5\mathbf{g}))^{1/3}<0.23$ (3)$0.26<(h-t)/B<0.47$ 符合此 3 項設計原則。		
3.依據上述設計條件及原則的了解之後，再研議未來擬續作的試驗項目。基本上若沒有挾氣現象且流量已能滿足設計的需求,水流偏向旋轉及 shaft 水面的震盪應可與予以忽略。	3.感謝指導，經檢核本案均符合設計條件及原則，經後續 1/13.1 模型比比對驗證，尚能滿足設計的需求。如後續考量豎井最佳化水理試驗，則配合細設試驗檢討評估。		
4. 試驗水位為何採表 3-3，最大及最小水位的中值請說明。	4.經模型比 1/13.1 驗證比對試驗，均測試最大及最小水位之水理流況，都能滿足設計的需求。		

5.出水口的流況非常重要，應盡量避免產生渦流的現象，建議試驗上斟酌考量。	5.感謝指導，調整池出水口於入口端採彎管向下即避免產生渦流捲氣現象，此銜接短管段，氣體不易累積影響流量，且發生滿管機率很低，試驗水理流況尚能滿足設計需求。。		
八、經濟部水利署 林雅谷			
1.本案期程 107 年 1 月至 108 年 6 月，爰建請水規所於期限內完成，並將相關成果提供南水局，以利該局納入曾文南化聯通管工程庫區標細部設計。	1.本項試驗業已完成相關試驗及相關設計水理功能檢核，尚符合階梯式豎井消能工的設計原則與相關規範，可提供曾文南化聯通管工程細部設計參考。		
2.消能板長度有建議退縮多少，以利產生最佳消能效果。	2.消能板長度與相關尺寸均符合文獻的水理設計條件，如需要達到最佳消能效果，則建議成立基礎試驗計畫以利後續相關工程之參採。		
3.豎井內消能板如何佈置(長度、寬度、間距)，請補充。。	3.豎井直徑 D 由流量概估，試驗範圍 (1)$1/2D \leqq B \leqq 2/3D$ (2)$0.12<F=(Q^2/(B^5g))^{1/3}<0.23$ (3)$0.26<(h-t)/B<0.47$ 符合此 3 項設計原則。。		
九、南水局設計課 許正工程司秀真			
1.「無消能工」建議改為「直接投潭」避免誤解其配置無法消能。	1.感謝建議,「無消能工豎井」配合修訂為「無階梯式豎井消能工」		
2.報告第一、二章建議就本案緣由及設計背景條件說明清楚，並帶出本試驗之關鍵議題。	2.感謝建議，詳如第一、二章本案緣由及設計背景條件。		
3.Baffle drop 及直接投潭消能之優劣差別，在於消減氣泡的效果，惟挾氣量難以量化，前經討論暫以氣泡深度及範圍述明，請補充說明。	3.感謝建議，詳如第一、二章本案緣由及設計背景條件。		
十、南水局設計課 劉副工程司建宏			

1.壓力計C點則設置在輸水管(入水管)軸線上對角之邊壁（藉以了解無消能工直接投潭時，投潭方向之壓力震盪變化），圖4-1、4-2 試驗測壓點位置上標示高程為 EL.121.6m，但依圖3-2、3-4 所示豎井底部高程為EL.122.0m？	1. C 點壓力計設置位置，係聯通管銜接至標高 EL.121.6m 係試驗工作平台，豎井 C 點鑽孔位置為 EL.122.6m，詳如報告內容修訂。		
2.P.4-13 二、有消能工試驗結果：略以…，因測點 A 較接近消能板落水影響範圍，所以測點 A 及測點 B 之壓力震盪較「測點 A」大…略以，是否誤植？應為比測點 C 大。	2.業已修訂,「10 萬 CMD 變量流於充水過程時，因測點 A 較接近消能板落水影響範圍，所以測點 A 及測點 B 之壓力震盪較測點 C 大。」		
3.P.4-13 二、有消能工試驗結果：…以波高來看則為 0.04～0.26 公尺左右；而最大振幅在0.05～0.80 公尺左右，亦即最大波高可達 0.1～1.60 公尺應為誤植，最大波高應為 1.06 公尺。	3.波高是振幅的 2 倍，「而最大振幅在0.05～0.80 公尺左右，亦即最大波高可達 0.1～1.60 公尺」是正確的。		
4.P.4-13 二、有消能工試驗結果所述，…另於下游出水管段距離豎井 35 公分(原型 7 公尺)設置壓力計，可以看到進入下游管段後壓力值…，建議以圖說或照片標示俾利了解壓力量測位置。	4.此「下游出水管段距離豎井 35 公分(原型 7 公尺)設置壓力計，可以看到進入下游管段後壓力值」詳如照片4-1。		
十一、水規所 石副工程司振洋			
1.建議補充「曾文南化聯通管工程設計及環境影響檢討」基本設計報告，補充表 3-2 內門減壓池/東平橋水力高程資料及相關說明及配置圖，俾供參考。	1.補充表 3-2 內門減壓池/東平橋水力高程資料及相關說明及配置圖，如圖4-1。	第四章	
會議結論			
1.本計畫期中報告請參酌各位委員及各單位代表意見修正，於期末報告完整呈現。。	1.遵照辦理。		

2.有關量化豎井消能效率，後續列表呈現不同流量與不同配置方案之比較，以利研判其差異性。	2.不同流量與不同配置方案之豎井消能效率均相同，主要差異在於投潭速度、挾氣量與挾氣影響深度，以及挾氣是否影響下游輸水管路。		
3.出口邊界條件的影響，請設計單位評估流量變化時可能產生的壓力變化範圍，以利後續試驗模擬之檢討。	3.本工程緊急關閉流程，先由上游消能井錐型閥關閉後，再啟動下游閥門關閉，其閥門關閉時間約 25 分鐘，屬於緩慢關閉，因此其所產生壓力變化範圍有限。		
4.後續試驗內容及項目，再與南水局召開工作會議討論，以利後續工展。	4.業已研商論確定後續試驗內容及項目。		

附錄三、「曾文水庫庫區豎井消能工水工模型試驗」期末報告書審查意見及處理情形

壹、會議日期：民國 109 年 1 月 13 日（星期一）上午 10 時 00 分

貳、會議地點：本所舊正辦公區 4 樓會議室

參、主持人：陳所長春宏

肆、記錄人：吳慶現

審查意見	處理情形	答覆說明納入報告	
		章節/圖/表	頁次
一、行政院政務顧問 黃委員金山			
1.總體的能量必須消除的能量，一定要確認是總曾文水庫輸送到南化淨水場及與南化高屏堰聯通管的內門消能池所必要的能量。	1.豎井消能工於不同輸水量所需的總體位能，係由設計單位推算之水位。模型試驗評估平滑管或粗糙管於不同管路損失所需不同位能，模型試驗檢討不同輸水量與不同管路損失水位下之水理流況。		
2.本案是否考慮與烏山頭水庫供水專管合併一案，建議南水局謹慎檢討。	2.感謝委員指導，本項興建專管供應烏山頭水庫所需水源案，南水局已另案檢討評估。		
3.為解決曾文水庫淤砂的問題，考量水庫下游靜水池至東口段之河床暫置堆砂的需要，以利暫置淤砂藉水庫洩洪沖刷入海案。因此需興建專管供應烏山頭水庫所需水源案，建議南水局另案評估決定。	3.感謝委員指導，本項興建專管供應烏山頭水庫所需水源案，南水局已另案檢討評估。		
4.水工模型試驗的部分解釋很詳細，敬表其試驗的過程及成果。	4.感謝黃顧問的肯定。		
二、水利署退休副總工程司 蔡委員奇成			
1.經 1/13.1 模型驗證試驗後，對 1/20 模型試驗之建議做了修正，值得肯定。	1.感謝蔡副總的肯定。		

2.本型消能工確實有可應付80萬CMD以下各種流量之消能，唯由進水管流入之水要能碰到每層隔板而非直接跌落水面，造成水面波動與引起水泡為最重要。	2.模型試驗結果 10 萬 CMD 至 70 萬 CMD 均能逐階消能，唯輸水量 80 萬 CMD 時豎井水位潛沒各階梯，無需逐階消能。	第四章	4-24
3.由試驗現象因管徑之限制，自進水管流入之水直落第一階隔版之外會沿隔版碰到隔牆，並因隔牆之導引，管內會產生環旋流況，應屬必然。但該環旋流也是消能之作為，故不必太強調要消除該旋流，以及進水管流入角度問題。	3.感謝蔡副總指導，遵照辦理。	第四章	4-25
4.隔版要設置潛堰之事，因由上版跌落下版，下版可承接，在版上之水流情況建議不要太強調。	4.感謝蔡副總指導，報告內容配合修訂。	第四章	4-25
5.小流量小水位時之挾氣情況應多說明，並附照片以明實景為宜。	5.後續補充試驗發現 10 萬 CMD 至 30 萬 CMD 氣泡僅影響跌落的下一階，即被隔版遮斷上浮，40 萬 CMD 至 60 萬 CMD 氣泡影響跌落的下層 2~3 階，即被下層隔版遮斷上浮，詳如報告內容相關照片。	第四章	4-47~4-49
6.進水彎管附設通氣管，可以明白提示。	6.進水彎管附設通氣管，經補充試驗後發現僅 70 萬 CMD 附近水位接近滿管時才會短時間需要通氣孔，且 10 英吋通氣孔打開與關閉對輸水管流態影響不大，因此短管輸水通道應無需設置通氣管。	第四章	4-25
三、中興大學退休教授 盧委員昭堯			
1.期中審查後，本階段完成 1/13.1 比尺模型試驗，並針對前一階段(1/20 比尺)9 項相關議題，進行可行性評估(表 4-5)，且提出具體建議(P.結-1)，值得肯定。。	1.感謝盧老師的肯定。	第四章 第三節	4-24
2.文字修正： (1)壓力變化圖(如圖 4-3 等)，壓力圖縱座標壓力→壓力 P，振幅圖縱座標壓力→P-$\bar{P}$。 表 4-1&表 4-2 下，加註最大振	2.感謝指導，配合盧老師意見修訂，詳如報告內容。	第四章	4-2 及對應頁次

幅=Max｜P-$\overline{P}$｜。 (2)第四章圖號(含文敘之一般性)請檢校。 (3)P.4-25 line 14 照片 4-10 ；line-2 照片 4-11。 (4)P.4-26 line-1 圖 4-12 → 照片 4-17。 (5)P.4-44、P.4-41 ， 照片 4-210 → 照片 4-21。			
四、水利署退休副署長 楊委員豐榮			
1.以下游控制點之高程，考慮水管、彎頭之損失，反算到豎井之水位，由不同的流量反應不同的豎井水位，應該很合理、很 OK。但請在沿管損失之估算上，加上一安全係數，保留部分水頭，以因應施工後一些不明損失或淤積增加的損失，以確保水量能百分之百送達下游控制點。。	1.感謝楊副署長的指導與肯定，有關管路損失至淨水場部分，設計單位已考量輸水量 80 萬 CMD~10 萬 CMD，於光滑管情況下有 4.25 公尺~36.58 公尺的餘裕水頭，粗糙管尚有 0.94 公尺~36.53 公尺的餘裕水頭，確保足夠輸水能量。	第二章	2-6
2.P.3-8，圖 3-3，消能側與通風側標示顛倒，P.4-25 「…如照片 4-10…」應為「…照片 4-11…」之誤。	2.遵照辦理。	第三章	3-8
3.107 年 12 月，豎井消能發明者 Odgaard 教授蒞所指導，所提出兩點之改善意見，在報告內檢討都加以否決，之所以會提改善意見，一定是現況有某些缺點存在，如都加以否定，則要有更詳細的說明論述，並一併說明「不必改善」所存之缺點，並不影響既定功能或流況。。	3.遵照辦理，目前設計案經不同模型比尺比對驗證尚能達到消能與降低氣泡進入輸水管段。如後續考量優化豎井水理功能，則建議細設修訂時配合試驗檢討評估。	第四章	4-25~4-26

4.若要考慮聯通管與發電尾水專用管共構，基本上就時機、功能、成本及效益各方面來看，已不具可行性: (1)如要共構，則管線要同時考慮能量的保留作為發電之用，既設之消能設施必須刪除，同時加大管線輸水能力達 55cms，及增加一座 5 萬瓩的發電廠，既有之曾文發電廠將會閒置。 (2)時機不對，聯通管第一標已完成發包，要作大更動已不可能。 (3)共構增加的經費不貲，效益待評估。 (4)增設專管除可減少滲漏損失，又可提供一較無環境衝擊，較無抗爭之淤泥暫置場，促使水庫永續利用成為可能，效益匪淺。	4.感謝指導，本項很好的建議，南水局已另成立專案規劃設計。		
五、成功大學退休教授 蔡委員長泰			
1.建議圖 2-5(P.2-8)、圖 2-6(P.2-9)及圖 4-1、圖 4-2（P.4-1、P.4-2)之進水管、入水管及輸水管段，取水管段及出水管等在圖及文中應說明或是相同。。	1.感謝指導，報告內容配合說明與修訂。	第二章及第四章	
2.說明輸水管控制閥（圖 2-5，P.2-8,及圖 4-12，照片 4-17，P.4-40)操作對非滿管液面是否會增加起伏而影響水理現象（P.4-26, P.4-41)，並討論控制閥對輸水管跌水現象（照片 4-17）的影響。	2.輸水管控制閥基本上是全開狀態，僅維修或發生緊急狀況時才會關閉。因此，輸水管控制閥模型未納入模型中。		
3.豎井水位採用直立式鋼管接閥門調整開度(P.3-11)，建議在照片 3-4 及照片 3-5(P.3-11)註明各項設備，如入水管、輸水管、鋼管、閥門等，並配合照片 3-1(P.3-6）及照片 4-2 等(P.4-2 至 P.4-9)說明模型比 1/20 之控制豎井內部水位（P.3-3)的試驗方法。	3.遵照辦理。	第三章及第四章	

4.建議由有階梯式豎井消能工定量流試驗下游輸水管段（照片 4-2 至 4-9 側面流況之下方）流況觀察滿管段，確保長距離滿管流穩定輸水，並為考量下游閘閥避免於最大輸水量時緊急關閉閘閥，導致豎井產生異常水位的建議（P.4-45)。	4.遵照辦理。	**結論與建議**	
5.圖 4-1（P.4-1)在下游出水管段距豎井 35 公分處應有「壓力計」（P.4-13)。在表 4-2 之有階梯式豎井消能工對下游輸水管段壓力量測顯示最大振幅縮減現象效果（P.4-25)，說明表 4-5 之第 7 點：減少下游管段壓力震盪之需求（P.4-45,46)。	5.遵照辦理。	**第四章**	
六、水利署退休副署長 賴委員伯勳			
1.建議補充自水庫不同水位到消能工及到南化淨化場之調整池及內門減壓池之能量線。	1.已請南水局提供計算成果。	第二章 第二節	2-3
2.里程(Sta. 1K+548.19)消能井是否能完全消能，設計布置及準則請參考 Design of small canal structures1978 資料。	2.設計單位建議施工時加強管控，以及鋼板加厚與局部弱點增強結構，即可確保消能井功能。		
3.壓力管線送內門輸水量之控制點分內門減壓池及東平橋兩個位置，建議是否可評估統一為一個控制點。	3.不同輸水量時其能量坡降線不同，考量管路需要越過道路的最高點與管壓承受值，因此需要不同控制點才能達到設計限制條件。		
七、交通大學退休教授 楊錦釧			
1.本試驗理論上「挾氣」應該是重點，雖然由模型的試驗結果，有階梯式的豎井挾氣現象不明顯，但在低水位時之挾氣現象是否會受模型比尺影響，似可稍作了解；目前做了不同比例尺的試驗，這部份的結果，最好能有較多的討論，說明挾氣量與挾氣影響深度是否受比尺之影響。	1.遵照辦理，增辦補充試驗階梯式豎井消能工，進行模型比 1/13.1 細部觀測挾氣影響深度明顯大於模型比 1/20 試驗結果，因此推估未來現場挾氣影響深度會再增加，呈現比尺效應，試驗成果詳如表 4-5。	第四章 第四節	4-41

2.豎井中間隔牆的位置，理論上對消能、挾氣及豎井的結構應力應有影響，試驗上可否考慮其他佈置的案例供設計之參。	2.本案設計單位業已參考國外基礎試驗文獻與相關現場竣工案例，評估豎井中間隔牆位置的影響，且將可能影響因素納入設計中考量。如後續考量優化豎井水理功能，則建議細設修訂時配合試驗檢討評估。		
3.豎井輸水管入口端銜接處可否作較平順的設計，在低水位時對下游的流況應有助益。。	3.本項輸水管路最大流速均小於2公尺/秒，因非高速水流易產生分離負壓區，且管徑 2.6 公尺非場鑄鋼管，施工上有其困難。		
4.調整入流的方向及低堰的考量，其必要性請再斟酌。	4.感謝指導，有關調整入流的方向及低堰，經與設計單位研商尚有微調空間，其中調整入流的方向建議納入後續細設考量。		
5.本豎井消能工的主要目的最好再予以說明清楚。	5.豎井消能工的主要目的建置經費較興建大型閥室低，且後續維護成本低、簡化人力與安全操作等，後續報告內容補充說明。	第二章第四節	2-7
八、南區水資源局設計課 何課長達夫			
1.曾文南化聯通管路工程 A 標已發包，未來豎井工程細部設計時，請協助模型試驗。	1.本所會盡量配合細設需求，如需大幅調整模型,建請南水局提供所需經費。		
2.增列基本設計階段水庫水位，消能原理等相關資訊以利參閱。	2.配合補充相關資訊，如曾文水庫水位 195m 以上能輸送 80 萬 CMD 至內門減壓池或南化淨水場，當水庫水位 185m 以上能輸送 50 萬 CMD 至內門減壓池或南化淨水場。	第二章第三節	2-4
九、南區水資源局工務課 曾正工程司炫學			
1.有無階梯式豎井消能工之效果，建議以簡單易於理解方式量化，並呈現於摘要或結論。	1.列表及圖評估以利閱讀。	摘要	摘-8~摘-10
2.未來通氣孔兼具維護檢視功能，故其尺寸若放大或酌調整位置會否影響消能功能嗎？	2.適度放大通氣孔尺寸或水平調整位置不會影響消能功能，建議以結構考量為主與輔助維修爬梯。		
3.會否保留本模型，供工程履約階段若有微調時可作驗證。	3.本模型已提列為貴局財產帳，在財產帳年限內應會保留及提供微調驗證試驗用。		

4.對於消能豎井於營運管理階段若需埋設感測器，能否給予消能部份或振動的原則性建議？細部配置再由統包商負責設計。	4.消能豎井於營運管理階段所需埋設感測器，初建議項目傳統水位(水位尺及影像)、自動化水位計(超音波、水壓式)，以及壓力感測器與監視器。	摘要	摘-13~摘-14
十、南水局設計課 許正工程司秀真			
1.隔版消能井豎井與直接投潭消能最大差別之一為消氣效果，報告書中相關敘述及照片比較少。雖然目前僅能目視，係以氣泡在井內高度進行比較，難以確實量化，惟仍建議補充。	1.經由不同模型比尺試驗，發現氣泡產生與速度有關，明顯模型比 1/13.1 在不同流量試驗情況下，均較模型比尺 1/20 的氣泡在井內高度深，惟尚不足捲入下游輸水管段，報告內容補充說明。		
2.依照國外交獻(ex.中國水利水電科學研究院)，針對 baffle drop 之水工模型試驗結果，首層隔版之定位在於”承接並調節來流，使其較平順地跌向次層版，故首層隔版與入流口間距過小，會使入流越過首層版直接跌向次層版，而衝擊豎井邊緣，反不利豎井結構安全，即表 4-5，摘表 6，第 4 點建議，仍宜進一步探討。	2.感謝建議，摘表 6 第 4 點建議修訂為維持原設計入射角度。		
3.水下隔版主要功能為消能及消氣，有隔版延長流程，確保在達穩態前之消氣效果，故若此 baffle drop 結構未來若有調整間距，仍宜參考國外經驗控制水下隔版有 2-3 階。	3.水下隔版在最低設計輸水量 10 萬 CMD，剛好滿足水下隔版有 2-3 階，隨著輸水量增大豎井水升高，水下隔版數量增加均能滿足設計需求。		
4.建議將表 4-1，表 4-2，以不同流量下，尖峰壓力變化圖以利於閱讀，亦可回饋於細部設計。	4.配合補充繪圖說明。	摘要	摘-8~摘-10
5.部份圖號及內文格式有誤，請再檢視修正。另建議將相關文獻及聯通管基本設計納入，以利報告完整性。	5.配合補充辦理。		
6.本報告將公開於本局全球資訊網，建議水規所於定稿後提供。	6.配合辦理。		

十一、經濟部水利署水源組 林副工程司雅谷 (書面意見)			
1.豎井消能工在國外案例主要運用在汙水 or 雨水下水道，有運用在水資源工程上的案例嗎?	1.目前國外尚無運用在水資源工程上的案例。		
2.豎井裡的通氣孔，設計的大小有依據嗎?。	2.通氣孔設計的大小主要依據人員進出通道，其通氣是附加功能。		
十二、水利規劃試驗所水源課 石副工程司振洋 (書面意見)			
1.摘要建議補充圖 2-5 水庫取水管段至調整池與階梯式豎井消能工配置圖，並標示本水工模型試驗之試驗範圍，俾供參閱。	1.本水工模型試驗範圍補充於圖 2-6。	第二章第四節	2-9
2.摘表 5 及摘表 4 分別為有、無階梯式消能豎井定量流內部壓力彙整表，建議以圖方式呈現，較易呈現其差異，俾供參閱。	2.配合補充繪圖說明。	摘要	摘-8~摘-10
3.摘表 6 第 7 點，經 1/13.1 水工模型評估，建議不宜於下游管段進入前設置多孔介質整流，建議敘明下游管段壓力變化幅度，以供後續實務操作參考。	3.定量流輸水過程下游管段壓力變化幅度不大，僅於變量流沖水過程會有較大變化幅度，後續穩定輸水操作應無影響。		
4.P.摘-2 南化淨水”廠”，建議修正為南化淨水”場”。	4.配合修訂。		
十三、水利規劃試驗所水工課 粟群超(書面意見)			
1.豎井消能工 1/20 與 1/13.1 模型試驗成果，建議合併為一敘述，避免前後論述不一。	1.不同時間的試驗成果與建議，會綜整考量修訂。	第四章第五節	4-46
2.豎井消能工 1/13.1 模型試驗並無測壓力點，故無法與 1/20 試驗相互佐證，但建議可目測量測 1/13.1 試驗水位震盪範圍及投潭氣泡深度。	2.補充試驗比較分析，試驗水位震盪範圍受階梯影響不易量化。	第四章第四節	4-41
3.豎井消能工 1/20 試驗之建議較為開放，為讓顧問公司重新思考可改進之處。	3.後續細部設計建請多面向思考，提升設計功能。		

4.附錄一工作人員名單請修正。	4.配合修訂。		
綜合決議			
1.本計畫緣起、目的與採用修訂案之補充文敘，請南水局提供資料。	1.遵照辦理。		
2.試驗重點成果為消能效果、壓力變化、挾氣及輸水能量等，與設計值加以比較分析，以達到試驗檢核目的。	2.遵照辦理。		
3.考量豎井消能工於後續營運操作需求，研提後續觀測項目及建置位置供南水局參採。	3.遵照辦理。		
4.豎井消能工水工模型試驗彙整不同比尺之試驗成果，補充尺度效應之差異性，以利評估現場水理流況。	4.遵照辦理。		
5.有關豎井消能工通氣孔大小及位置調整，後續協助南水局細部設計水理檢討評估。	5.遵照辦理。		
6.本計畫期末報告請參酌各位委員及各單位代表意見修正,於2月底前完成成果報告書。	6.遵照辦理。		

經濟部水利署水利規劃試驗所出版品版權頁資料

曾文水庫庫區豎井消能工水工模型試驗成果報告

出版機關： 經濟部水利署水利規劃試驗所

地址： 臺中市霧峰區吉峰里中正路 1340 號

電話： (04) 2330-4788

傳真： (04) 2332-3303

網址： https://www.wrap.gov.tw/

編著者： 經濟部水利署水利規劃試驗所水工試驗課

出版年月： 109 年 04 月

版次： 初版

定價： 新台幣 300 元

EBN： 10109F0009

著作權利管理資訊： 經濟部水利署水利規劃試驗所保有所有權利。欲利用本書全部或部分內容者，須徵求經濟部水利署水利規劃試驗所同意或書面授權。

電子出版： 本書製有光碟片

聯絡資訊： 經濟部水利署水利規劃試驗所

電　　話： (04) 2330-4788

廉潔、效能、便民

經濟部水利署水利規劃試驗所

地址：臺中市霧峰區吉峰里中正路 1340 號

網址：http://www.wrap.gov.tw/

總機：(04)23304788

傳真：(04)23300282