



經濟部水利署南區水資源局

Southern Region Water Resources Office, WRA, MOEA

107 年度曾文水庫 1 號導水 隧道磨耗檢測分析

計畫主持人： 劉玉雯 教授

協同主持人： 林宜清 教授

朱健松 副教授

卓世偉 助理教授



國立嘉義大學

NATIONAL CHIAYI UNIVERSITY

摘要

關鍵詞：導水隧道、混凝土、磨耗、防淤隧道、環氧樹脂砂漿

本計畫主要工作範圍為 1 號導水隧道自消能環至下游第二尾檻間，含隧道內積水水面以上各項構造物(包括仰拱、側牆與第一尾檻等構造)，以及防淤隧道環氧樹脂砂漿自閘門豎井段下游 0k+000 至 0k+800。

1 號導水隧道於 107 年度為因應 0823、0826 及 0907 豪雨，分別於 8 月 23-29 日及 9 月 7-9 日進行 7 次放水作業，放流量為 50-100 cms，總時數為 158 小時，總放水量分別為 $3,294 \times 10^4 \text{m}^3$ ，泥砂濃度 53-2572 ppm，總排砂量 74,942T。本計畫執行期間總共進行 1 號導水隧道內三維雷射掃描 2 次、導波與精準電阻混凝土磨耗檢測 3 次、第一尾檻鋼板超音波磨耗檢測 3 次、抽水作業 3 次，以及耐磨混凝土層磨耗觀/檢測 3 次等現場作業。由 107.09.05 與 107.10.12 兩次三維影像比對差異結果顯示，點位最大差異量發生在靠近第一尾檻上游面(點號 1-4)，差異量為 23cm-26.87cm，其中點號 2 之差異量最大；另一差異量較大處位於第一尾檻與第二尾檻間(點號 17-20)，差異量約 15.69cm-25.02cm。兩次比對結果，點號 2 與點號 3 約有 05-2.6cm 之差距，對照現場量測結果，107.10.12 之三維影像比對差異與實際情形較接近，主要誤差為掃描處積水所造成。

另一方面，由現場觀測發現，導水隧道第一尾檻、底部與兩側牆混凝土經 0823 與 0826 豪雨放水後，靠近第一尾檻底部混凝土出現大片剝落損壞及鋼筋斷裂情形，最大破壞深度 27 cm。而 0907 豪雨放水後，已產生混凝土剝落損壞之區域，並無產生明顯擴大損壞。由上述檢/觀測結果探討本年度導水隧道混凝土破壞之主因，初步研判為當放水量達 100 cms 時，強勁射流水受到第一尾檻阻擋，並於其腳趾處引起渦流作用而形成負壓，使得耐磨層混凝土與第一尾檻交接面處

發生裂縫，最後導致大片混凝土剝落損壞及鋼筋斷裂，此現象與原先預期的漸進式混凝土磨耗有所不同。但本年度僅依據一次的觀察結果進行初步推論，仍有待後續觀察已確認此現象。

防淤隧道於 107 年度分別於 8 月 20-21 日進行有水試運轉，以及於 8 月 23-29 日、9 月 7-10 日進行 8 次排砂作業。放流量為 20-450 cms，總放水量分別為 $9,599 \times 10^4 \text{m}^3$ ，泥砂濃度 20-3166 ppm，總排砂量 225,311T。本計畫執行期間總共進行 3 次防淤隧道環氧樹脂砂漿耐磨層觀測。本年度造成防淤隧道磨損破壞之主因，為施工時殘留的混凝土塊對環氧樹脂砂漿之撞擊及滑/滾動作用。破壞情形包括(1)環氧樹脂砂漿因破裂或與底層混凝土介面黏結較差而被翹起剝落；(2)兩個破損區間環氧樹脂砂漿再承受含泥砂水流沖擊後產生剝落，進而造成兩個破損區連通成一個大破損面積；(3)環氧樹脂砂漿與底層混凝土介面黏結良好，其表面出現不同深度之磨損及刮痕；(4)環氧樹脂砂漿受混凝土塊或大石塊撞擊產生破裂及剝落，部分區域介面黏結力較差，破裂面積較大。

Abstract

Keywords: water-conducting tunnel, concrete, abrasion, anti-sludge tunnel, epoxy mortar

The main scope of work of this project is the No. 1 water guiding tunnel from the energy-dissipating ring to the second downstream stern, including the structures above the water surface in the tunnel (including the inverted arch, the side wall and the first stern structure), and The anti-silting tunnel epoxy mortar is from 0k+000 to 0k+800 downstream of the gate shaft section.

In 2018, the No. 1 water guiding tunnel was used for the discharge of water from 0823, 0826 and 0907. It was carried out 7 times on August 23-29 and September 7-9 respectively. The discharge flow was 50-100 cms. The total number of hours was At 158 hours, the total water discharge was $3,294 \times 10^4 \text{m}^3$, the mud sand concentration was 53-2572 ppm, and the total sand discharge was 74,942T. During the execution of this project, a total of 2 three-dimensional laser scanning in the No. 1 water guiding tunnel, three times of guided wave and precision resistance concrete abrasion detection, three times of first-tail slab steel ultrasonic abrasion detection, three pumping operations, and wear resistance were performed. On-site operation such as abrasion of concrete layer/testing 3 times. The difference between the two-dimensional image comparison of 2018.09.05 and 2018.10.12 shows that the maximum difference of the point occurs near the upstream surface of the first scorpion (point number 1-4), and the difference is 23cm-26.87cm, of which the point No. 2 has the largest difference; the other difference is located between the first tail and the second tail (points 17-20), and the difference is about 15.69cm-25.02cm. For the two comparison results, the difference between the point number 2 and the point number 3 is about 05-2.6cm. Compared with the field measurement results, the difference between the three-dimensional image comparison of 2018.10.12 is close to the actual situation. The main error is the water at the scanning station. Caused.

On the other hand, it was found by field observation that after the first stern, the bottom and the two side walls of the water guiding tunnel were discharged by the 0823 and 0826 heavy rains, the concrete near the bottom of the first tail sill showed large pieces of flaking damage and steel fracture, and the maximum damage depth was 27 Cm. After the 0907 heavy rain was released, the area where the concrete was peeled off was damaged, and no obvious expansion damage occurred. Based on the above inspection/observation results, the main cause of concrete failure of the water-conducting tunnel in this year is discussed. It is preliminarily judged that when the water discharge amount reaches 100 cms, the strong jet water is blocked by the first tail stern

and causes eddy current at its toe to form a negative pressure. Cracks occur at the interface between the wear-resistant layer concrete and the first tail sill, which eventually leads to large pieces of concrete peeling damage and steel fracture. This phenomenon is different from the originally expected progressive concrete wear. However, this year only preliminary inferences were made based on the observations once, and this phenomenon has yet to be confirmed by subsequent observations.

In 2018, the anti-silting tunnel was commissioned with water on August 20-21, and 8 sand discharge operations were carried out on August 23-29 and September 7-10. The discharge rate is 20-450 cms, the total water discharge is $9,599 \times 10^4 \text{m}^3$, the mud sand concentration is 20-3166 ppm, and the total sand discharge is 225,311T. During the execution of this project, a total of 3 anti-silting tunnel epoxy wear layer observations were observed. The main cause of the wear and tear of the anti-silting tunnel this year is the impact of the concrete block remaining on the epoxy mortar and the sliding/rolling effect. The damage includes (1) the epoxy mortar is peeled off due to cracking or poor adhesion to the underlying concrete interface; (2) the two damaged sections of the epoxy mortar are subjected to the impact of the muddy water flow, causing spalling, thereby causing two The damaged area is connected to a large damaged area; (3) the epoxy mortar and the bottom concrete interface are well bonded, and the surface has different depths of wear and scratches; (4) the epoxy mortar is hit by the concrete block or the large stone block. Cracking and spalling occur, and the adhesion of the interface in some areas is poor and the area of rupture is large.

結論與建議

結論

計畫自107年4月28日開始執行，執行期間總共進行1號導水隧道內三維雷射掃描2次、導波與精準電阻混凝土磨耗檢測3次、第一尾檻鋼板超音波磨耗檢測3次、抽水作業、3次耐磨混凝土層磨耗觀/檢測3次，以及防淤隧道環氧樹脂砂漿層磨耗觀測3次等現場作業(詳附錄六)。此外，由現場作業所得之相關資料，分別進行1號導水隧道耐磨層磨耗檢測數據與磨耗行為分析，以及防淤隧道抗磨層環氧樹脂砂漿磨耗行為分析。隧道內現場作業前已會同曾文水庫管理中心與台灣電力公司曾文電廠召開安全衛生告知說明會(附錄一)。各項工作摘要總表，如表1所示。

表1 107年度各項工作摘要總表

項次	工作項目	完成日期	工作概要
1	PRO 導波與精準電阻之混凝土磨耗檢測(3次)	04月27日	本年度第1次量測底板混凝土預埋鋼棒長度。
		09月05日	0823與0826豪雨放水後，量測底板混凝土預埋鋼棒長度。
		10月12日	0907豪雨放水後，量測底板混凝土預埋鋼棒長度。
2	PRO 第一尾檻鋼板超音波磨耗檢測 (3次)	04月27日	本年度第1次量測第一尾檻鋼板厚度。
		09月05日	0823與0826豪雨放水後，量測第一尾檻鋼板厚度。
		10月12日	0907豪雨後，量測第一尾檻鋼板厚度。

表 1 107 年度各項工作摘要總表(續)

項次	工作項目	完成日期	工作概要
3	PRO 耐磨混凝土層 磨耗觀/檢測 (3次)	04月27日	觀/檢測混凝土構造磨耗情形。
		09月05日	觀/檢測混凝土構造磨耗情形。
		10月12日	觀/檢測混凝土構造磨耗情形。
4	三維雷射掃描(2次)	09月05日	0823與0826豪雨放水後，建立隧道內三維影像資料。
		10月12日	0907豪雨放水後，建立隧道內三維影像資料。
5	防淤隧道環氧樹脂 砂漿層磨耗觀測	08月08日	完工後，觀測環氧樹脂砂漿磨耗情形。
		08月22日	有水試運轉後，觀測環氧樹脂砂漿磨耗情形。
		10月17日	0823、0826與0907豪雨放水後，觀測環氧樹脂砂漿磨耗情形。
6	抽水作業(3次)	04月27日	隧道內積水抽除。
		09月05日	隧道內積水抽除。
		10月12日	隧道內積水抽除。
7	1號導水隧道耐磨層 磨耗檢測數據分析	11月05日	三維影像、超音波導波磨耗檢測結果及混凝土磨損深度、破壞情形綜合分析。
8	防淤隧道環氧樹脂 砂漿拉拔強度與厚度 檢測資料彙整及 磨耗行為分析	11月05日	建立環氧樹脂砂漿厚度點位圖，磨損破壞示意圖及磨損行為分析。

經由各工作項目之執行可獲以下結論：

1. 三維雷射掃描作業

本年度1號導水隧道二次掃描結果進行模型資料套疊，差異量誤差值均落在5mm屬於合理範圍內。三維影像比對差異結果顯示，點位最大差異量發生在靠近第一尾檻上游面(點號1-4)，差異量為23cm-24.4cm，另一差異量較大處位於第一尾檻與第二尾檻間(點號17-20)，差異量約15.69cm-25.02cm。

2. 導波與精準電阻之混凝土磨耗檢測

本計畫採用超音波導波法與精準電阻磨耗檢測裝置法均為首創應用在混凝土磨耗檢測上。後續混凝土磨耗檢測可以超音波導波法為主，精準電阻磨耗檢測裝置為輔。本年度耐磨層混凝土構造在水流沖擊時，因混凝土於短時間內產生大片剝落(編號1、2、3，最大磨損深度約27cm)，並非磨耗損壞，從而造成檢測鋼棒露出但未磨損之現象，進而影響超音波導波法與精準電阻磨耗檢測之結果。

目前超音波導波磨耗檢測所得成果應屬良好，由於目前磨耗不明顯，大部分鋼棒仍埋在原先施工混凝土偏厚之裡面，導致無法進行超音波施測。混凝土澆置高程控制較佳之點位，已經都能達到磨耗量測之目的，且量測辨識度可以達到0.1 mm等級。若要再精進，可以往自動監測方向努力，但是必須在施工期間就要埋入自動監測用感測器，可做為未來工程精進參考用。

3. 第一尾檻鋼板超音波磨耗檢測

第一尾檻鋼板採用超音波測厚儀進行磨耗檢測，其精度小於0.1 mm，由二個年度現場六次量測結果可以得知該檢測法確實可以量測得到鋼板厚度之微小變化，且具有高度穩定性與一致性，應該是一個相當適用的現場鋼板厚度量測技術。本年度第一尾檻鋼板因潮濕與水流沖擊，已出現明顯鏽斑，檢測時磨掉該鏽斑測得之厚度與起始值比

較，已經有因為鋼板表面腐蝕造成明顯減薄現象(約0.31mm)。

4. 耐磨混凝土層磨耗觀/檢測

本年度導水隧道第一尾檻、底部與兩側牆混凝土經0823與0826豪雨放水後，靠近第一尾檻底部混凝土出現大片剝落損壞及鋼筋斷裂情形，最大破壞深度27 cm，。而0907豪雨放水後，已產生混凝土剝落損壞之區域，並無產生明顯擴大損壞。

5. 1號導水隧道混凝土構造磨耗檢測綜合分析

本年度導水隧道混凝土破壞之主因，初步研判為當放水量達100 cms時，強勁射流水受到第一尾檻阻擋，並於其腳趾處引起渦流作用而形成負壓，使得耐磨層混凝土與第一尾檻交接面處發生裂縫，最後導致大片混凝土剝落損壞及鋼筋斷裂，此現象與原先預期的漸進式混凝土磨耗有所不同。但本年度僅依據一次的觀察結果進行初步推論，仍有待後續觀察已確認此現象。

6. 防淤隧道環氧樹脂砂漿抗磨層磨耗行為分析

本年度造成防淤隧道磨損破壞之主因，為施工時殘留的混凝土塊對環氧樹脂砂漿之撞擊及滑/滾動作用。破壞情形包括(1)環氧樹脂砂漿因破裂或與底層混凝土介面黏結較差而被翹起剝落；(2)兩個破損區間環氧樹脂砂漿再承受含泥砂水流沖擊後產生剝落，進而造成兩個破損區連通成一個大破損面積；(3)環氧樹脂砂漿與底層混凝土介面黏結良好，其表面出現不同深度之磨損及刮痕；(4)環氧樹脂砂漿受混凝土塊或大石塊撞擊產生破裂及剝落，部分區域介面黏結力較差，破裂面積較大。

建議

1. 本年度1號導水隧道混凝土構造破壞區域之修補，除需依原設計修復補強鋼筋外，因受限於隧道內環境潮濕積水，為避免材料發生介面脫離現象，建議以高強度混凝土材料為主。另，為達到施工之便利性，建議可採現場拌合工法，並加強搗實以獲得較佳之耐磨性。
2. 防淤隧道環氧樹脂砂漿耐磨層之磨損處，仍應以原材料修補。唯環氧樹脂砂漿施工時，建議先以試槌敲擊修補處周圍的環氧樹脂砂漿，若發現其與底層混凝土鬆脫時，應先敲除之，再塗覆修補材。此外，原材料表層(混凝土或環氧樹脂砂漿)必須保持乾燥狀態，始可獲得設計應有之耐磨性。
3. 本年度依據一次的觀察結果進行初步推論，第一尾檻前趾處因高速水流(100cms)造成渦流負壓造成，而形成破壞。建議日後持續進行觀察已確認此現象。另，為進一步分析水流條件與磨損關係，水理計算及配合感測元件之研發，可納入後續工作計畫。
4. 防淤隧道環氧樹脂砂漿耐磨層為國內首次應用案例，建議後續進行長期觀測，以掌握其磨損行為，並做為日後設計修補工法/材料之依據。
5. 為減少後續防淤隧道環氧樹脂砂漿耐磨層檢測之人力，建議研發現場之「最小」破壞性檢測試驗。
6. 基於現有之試驗法，僅能對各試體做定性比較而無法做定量分析，且亦未能模擬現場結構物實際受磨損之情形。因此，研發可模擬導水/防淤隧道現場實際水流含泥砂沖擊情狀之試驗儀器，以供耐磨材料及修補後之磨損測試，並建立材料性質(如強度)與磨損量之關係式，作為耐磨層設計標準之參考。

由於 ASTM C1138、ACI544.2R、含砂水流沖擊試驗在國內外並無定量標準可供參採，建議未來研究可建立基準混凝土進行 ASTM

C1138、ACI544.2R、與含砂水流沖擊試驗結果資料庫，以提供未來
耐磨水泥質材料配比設計時，採相對基準混凝土之耐撞或耐磨或耐
衝擊之提升百分率為驗收標準。