

1.1 土砂バイパスによる堆砂対策の事例分析（日本と台湾の事例から）

研究年度：平成30年度

研究分野：ダムに関する研究

調査研究名：堆砂対策の事例分析

研究者：櫻井寿之、安田成夫、吉田等

【要約】

ダム貯水池の堆砂は我が国のみならず世界のダムで課題となっている。堆砂対策の一つである土砂バイパスは、貯水池内に分派施設等を設置し、土砂を含む流入水をトンネル水路または開水路によってダムの下流にバイパスする技術であり、流入土砂量が多く、比較的回転率の小さい貯水池において有効で、出水時に運用することで下流河川の環境に優しい土砂流下が期待される手法である。近年、土砂バイパスに関する国際ワークショップが開催され様々な情報交換がなされており、日本でも新しい土砂バイパストンネルが建設または計画され、台湾でも大きなプロジェクトが複数実施されているなど技術的な進展がみられている。

そこで、今後の堆砂対策検討に資するため、日本と台湾の土砂バイパストンネルについて現地調査や資料収集などを行い、その特性を比較・分析し取りまとめた。

【キーワード】

堆砂、土砂バイパス、排砂量、土砂粒径、摩耗対策

【背景・目的】

ダム貯水池の堆砂は我が国のみならず世界のダムで課題となっている。堆砂対策の一つである土砂バイパスは、貯水池内に分派施設等を設置し、土砂を含む流入水をトンネル水路または開水路によってダムの下流にバイパスする技術であり、排砂バイパスと称されることもある。土砂バイパスは、流入土砂量が多く、比較的回転率の小さい貯水池において有効で、出水時に運用することで下流河川の環境に優しい土砂流下が期待される手法である。

土砂バイパスは日本とスイスが世界をリードしてきており、2015年にはスイスで第1回の排砂バイパスに関する国際ワークショップ¹⁾が開催され、2017年には日本で第2回²⁾が、2019年4月には台湾で第3回³⁾が開催された。近年、日本でも新しい土砂バイパストンネルが建設または計画され、台湾でも大きなプロジェクトが複数実施されているなど進展がみられている。

そこで、今後の堆砂対策検討に資するため、日本と台湾の土砂バイパストンネルについて現地調査や資料収集などを行い、その特性を比較・分析することとした。

【平成30年度の研究内容】

(1) 国内の土砂バイパスの事例収集

① 概要

日本では100年近く前に建設された歴史的な立ヶ畑ダム（烏原貯水池）（1905、神戸市：土砂バイパス施設の完成年とダム管理者を表し以降も同様の表記とする）と布引ダム（1908、神戸市）の土砂バイパスの他、旭ダム（1998、関西電力）、美和ダム（2005、

国土交通省）、松川ダム（2015、長野県）、小渋ダム（2016、国土交通省）の合計6つの完成事例がある。また、矢作ダム（国土交通省）では堆砂対策として土砂バイパストンネルが2019年4月時点において有力案として検討されている⁴⁾。

平成30年度には、美和ダム、小渋ダム、松川ダムの土砂バイパスの現地調査及び他のダムも含めた文献調査を行った。

日本の7つの土砂バイパス事例の諸元を取りまとめた結果を表-1に示す。

表-1に示した各ダムの土砂バイパス施設の概要を以下に示す。

i 立ヶ畑ダム

- 日本で最初に設置された土砂バイパス施設。
- ダム建設当初より土砂バイパス施設が設置された。日本の事例では、立ヶ畑ダム以外は全てダム建設後に設置されている。
- 水質の良くない水を貯水池に入れられないよう導水する役割も有しており、施設は延長132.72m、139.39m、78.78mの3つのトンネル水路部と合計333.09mの開水路部から構成される⁵⁾。

ii 布引ダム

- ダム建設当初には貯水池上流に貯砂ダムが設置されたが、すぐに土砂で満砂になり、数年で貯水池が堆砂で埋まる懸念があったため、ダム建設後に土砂バイパス施設が建設された。

iii 旭ダム

- 近代的な土砂バイパストンネルとして1998年に建設された。

表-1 日本の土砂バイパス事例の諸元

| ダム名 | 管理者 | ダム及び貯水池 | | | | | | 土砂バイパストンネル | | | | | | | |
|---------------|---------------|---------|----------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------|---------|-----------------|------|--------|--------|-------|--------|------|--------------------------|
| | | 完成年 | 目的 | 流域面積 (km ²) | 貯水容量 (×1000m ³) | 型式 | ダム高 (m) | 2019年3月時点の事業の状況 | 完成年 | 延長 (m) | 勾配 (%) | 幅 (m) | 高さ (m) | 断面形状 | 最大流量 (m ³ /s) |
| 立ヶ畑ダム (鳥原貯水池) | 神戸市 | 1905 | 水道用水 | 18.9 | 1,248 | 重力式コンクリート | 33.3 | 運用 | 1905 | 684 | 1.33% | — | — | — | — |
| 布引ダム | 神戸市 | 1900 | 水道用水 | 9.8 | 760 | 重力式コンクリート | 33.3 | 運用 | 1908 | 264 | 1.33% | 3.00 | 3.00 | 幌型 | 39 |
| 旭ダム | 関西電力 | 1978 | 揚水発電 (下池) | 39.2 | 15,470 | アーチ | 86.1 | 運用 | 1998 | 2,350 | 2.94% | 3.80 | 3.80 | 幌型 | 140 |
| 美和ダム | 国土交通省 中部地方整備局 | 1959 | 発電、灌漑、洪水調節 | 311.1 | 29,952 | 重力式コンクリート | 69.1 | 試験運用 | 2005 | 4,308 | 1.00% | 7.80 | 7.00 | 馬蹄形 | 300 |
| 松川ダム | 長野県 | 1975 | 洪水調節、生活用水、灌漑 | 60.0 | 7,400 | 重力式コンクリート | 84.3 | 運用 | 2015 | 1,417 | 4.00% | 5.20 | 5.20 | 幌型 | 200 |
| 小洪ダム | 国土交通省 中部地方整備局 | 1969 | 発電、灌漑、洪水調節 | 288.0 | 58,000 | アーチ | 105.0 | 試験運用 | 2016 | 3,982 | 2.00% | 7.90 | 7.20 | 馬蹄形 | 370 |
| 矢作ダム | 国土交通省 中部地方整備局 | 1971 | 洪水調節、灌漑、水道用水、工業用水、発電 | 504.5 | 80,000 | アーチ | 100.0 | 計画 | 計画中 | 約7,900 | 1.25% | 9.60 | 8.75 | 馬蹄形 | 500 |

注1：事業が進行中のため内容が変更される可能性があります。

- ・濁水長期化対策にも用いられ、堆砂の軽減と水質改善に効果を発揮している。
- ・下流河川環境の変化やトンネル施設の摩耗損傷などの知見が多く蓄積され、公表されている。

iv 美和ダム⁶⁾

- ・日本で洪水調節機能を有するダムに土砂バイパストンネルが建設された初めての事例。
- ・世界的にみて、現存する土砂バイパストンネルとしては、延長が約4.3 kmであり最大級である。
- ・土砂バイパストンネル流入部の上流で、砂礫をトラップする構造となっており、シルト・粘土をバイパス対象としている。
- ・2019年3月現在、土砂バイパストンネル流入部の上流に土砂のストックヤードを建設中であり、非洪水期に土砂バイパスの分派堰より下流の貯水池の土砂を浚渫してストックヤードにストックして、洪水時に土砂バイパストンネルへ流下させる湖内堆砂対策が実施される予定である。

v 松川ダム⁷⁾

- ・2015年に完成した新しい土砂バイパストンネルであり、日本の事例では4%と最も勾配が急である。
- ・計画では、粒径2 mm程度以下の土砂がバイパス対象とされている。

vi 小洪ダム⁸⁾

- ・2016年に完成した日本では最新の土砂バイパストンネルであり、設計最大流量の370 m³/sは国内最大である。
- ・計画では、粒径100 mm程度以下の土砂がバイパス対象とされている。
- ・摩耗対策として日本の土砂バイパストンネルとしては初めて流入部付近の水路のライニングにラバーペースチール（鋼板が入ったゴムプレート）が用い

られた。

vii 矢作ダム⁴⁾

- ・矢作ダムの堆砂対策の有力な案として土砂バイパストンネルが検討されている。実現すれば、トンネル延長、バイパス流量ともに、日本最大となる。

(2) 台湾の土砂バイパスの事例収集

① 概要

筆者らは、2018年7月にダム技術センターの自主研究の一環として、台湾を訪問し、南化ダム (Nanhua dam) で建設中の土砂バイパストンネルの工事現場を現地調査する機会を得た⁹⁾。また、2019年4月には、台湾の台北で開催された第3回排砂バイパス国際ワークショップに参加し、ワークショップのスタディーツアーにて、台湾の石門ダム (Shihmen dam)、白河ダム (Baihe dam)、曾文ダム (Zengwen dam) の3つのダムの土砂バイパスプロジェクトを視察した。

これらの機会において情報収集を行うとともに文献調査を行った。

台湾で現在実施中または運用中の主要な4つの土砂バイパスプロジェクトの諸元を取りまとめた結果を表-2に示す。なお台湾では、これら4つの他に、阿公店ダム貯水池 (Agongdian Reservoir) で貯水池の水位を低下させてほぼ空の状態に土砂フラッシングを行うプロジェクトが運用されている。表-2に示した4ダムの土砂バイパスプロジェクトの概要を以下に示す。また本稿の最後に参考資料を掲載する。

i 石門ダム (Shihmen dam)

- ・2019年時点建設中で2022年完成予定のAmupingトンネルは、トンネルから直接土砂を含んだ水を放流することが主目的ではない。貯水池の浚渫土砂を運ぶパイプラインを通すことでその運搬距

表-2 台湾の土砂バイパス事例の諸元

| ダム名 | 管理者 | ダム及び貯水池 | | | | | 土砂バイパストンネル | | | | | | | | | |
|--------------------|-------------------------|---------|--------------------|-------------------------|-----------------------------|--------|------------|--------------|-----------------|--------|--------|----------------|-------|--------|--------|--------------------------|
| | | 完成年 | 目的 | 流域面積 (km ²) | 貯水容量 (×1000m ³) | 型式 | ダム高 (m) | 施設 | 2019年3月時点の事業の状況 | 完成年 | 延長 (m) | 勾配 (%) | 幅 (m) | 高さ (m) | 断面形状 | 最大流量 (m ³ /s) |
| 石門ダム (Shihmen dam) | 政府 (經濟部水利署) | 1964 | 灌漑、洪水調節、生活用水、発電、観光 | 763.4 | 309,000 | ロックフィル | 133.1 | Amuping トンネル | 建設 | (2022) | 3,702 | 2.86% | 8.00 | 7.00 | 幌型 | 700 |
| 曾文ダム (Zengwen dam) | 政府 (經濟部水利署) | 1973 | 灌漑用水、生活用水、発電、洪水調節 | 481.0 | 748,400 | アースダム | 134.0 | 土砂スルーストンネル | 運用 | 2017 | 863 | 5.32% | 9.00 | 9.00 | 幌型、馬蹄形 | 1,000 |
| 南化ダム (Nanhua dam) | Taiwan Water Co. (水道企業) | 1994 | 生活用水 | 108.3 | 158,000 | アースフィル | 87.5 | 土砂スルーストンネル | 建設 | (2019) | 1,287 | 1.85% | 9.50 | 9.50 | 馬蹄形 | 1,000 |
| 白河ダム (Baihe dam) | 嘉南農田水利会 (農業関係組織) | 1965 | 灌漑用水、水道用水、観光 | 26.6 | 25,090 | アースフィル | 42.8 | 土砂スルーストンネル | 建設 | (2019) | 589 | 2.36% | 5.00 | 5.00 | 幌型 | 287 |
| | | | | | | | | 土砂バイパストンネル | 設計 | 設計中 | 1,563 | 1.00% 1.50% | 5.00 | 7.00 | 幌型 | 200 |

注1：既往の文献等²⁾で諸元が異なっているものがあるが、今回は、出典³⁾に記載の情報を基に諸元を整理した。

注2：事業が進行中のため内容が変更される可能性があります。

離を短縮すること、トンネルの出口下流に約20万 m³の容量を持つストックヤードを設置して、そこに有効利用できない土砂をストックして、洪水時にトンネルからの放流で土砂を河川へフラッシュすることを目的としている。また、トンネルの最大放流量は700 m³/sと大きく、ダムの放流機能を増強する目的も有している。

- 石門ダムでは、Amuping トンネルの他に、2012年から運用が開始されているダム堤体近傍の発電放流管を改造したダム底部排砂施設によって、洪水時の高濃度濁水を密度流排砂する運用が行われている。
- さらにダム堤体近傍にある底部放流設備（台湾ではPermanent River Outlet (PRO) と英語表記される）からも密度流排砂が運用されている。
- 2012年からのダム底部排砂設備の運用後、放流水の濁度が非常に高濃度なため、排砂中は下流河川の取水が不可能になる問題が生じた。そのため、下流河川の取水口付近に利水補給のための遊水池が2013年から2017年にかけて建設された。この遊水池は690万 m³の容量があり、排砂時には最大で8.6日分の給水のバックアップが可能である。

ii 曾文ダム (Zengwen dam)

- 1,000 m³/sの大きな放流能力を有する土砂スルーストンネル（シルトスルーストンネルとも称されている）が2017年より運用開始されている。この設備も石門ダムのAmuping トンネルと同様にダムの放流機能を増強する目的も有している。
- 土砂スルーストンネルの流入部には、取水位置を低標高とするための象の鼻形状の鋼製取水管（直径10 m、延長56.11 m）が設置されている。
- 土砂スルーストンネルは18~31 m/sの高速泥流が流下することから、キャビテーション損傷対策として、エポキシ樹脂と砂を混合したコーティング

がインバート表面に厚さ8~10 mmで塗布されている。

- 土砂スルーストンネルの放流部の減勢工は地山内の地下構造となっており、1,000 m³/sの大流量を減勢するために、幅18 m、最大高さ42 mの大規模地下空洞構造となっている。これは建設中の日本の天ヶ瀬ダムトンネル洪水吐きの地山内減勢工（幅23 m、最大高さ25.5 m）をしのぐ規模である。
- 曾文ダムでは土砂スルーストンネルの他に、ダム堤体近傍にある底部放流設備（PRO）からも密度流排砂が運用されている。これは2008年から2009年（台風Morakot）の間に厚さ10 m以上の堆砂進行が生じ、放流設備に損傷が生じたため、ハウエルバンパーバルブのジェットフローゲートへの変更等の改造が行われたものである。
- また、貯水池内の土砂を常時に浚渫して下流河道に臨時の土堤を築いてその上流にストックし、洪水時にフラッシュする対策も検討されている。

iii 南化ダム (Nanhua dam)

- 曾文ダムと同規模の1,000 m³/sの大きな放流能力を有する土砂スルーストンネル（シルトスルーストンネルとも称されている）が建設中である。
- トンネルの流入部はダム堤体から約1 km上流の貯水池内の右岸側に位置し、貯水池の湖底を流入してくる高濃度の濁水を流入させるため標高の低い位置に流入口が配置されている。
- 流入口から水路に沿って60 m程度下流に立坑が設置され、高圧ラジアルゲートの主ゲートとその上流に維持管理用のローラーゲートが配置されている。
- この主ゲートは、設計水深約60 m、扉体の幅が6 m、高さ6.8 m（面積40.8 m²）であり日本の既往の高圧ラジアルゲートと比較しても最大級の水压荷重が作用するゲートとなっている。

表-3 日本と台湾の主要ダムの比堆砂量

| | ダム名 | 完成年 | 目的 | 当初総貯水容量 (百万m ³) | 流域面積(km ²) | 比堆砂量(m ³ /km ² /年) | 調査年 |
|----|------|------|-----------|--------------------------------|------------------------|--|------|
| 日本 | 高瀬 | 1979 | P | 76.2 | 131.0 | 4.789 | 注1 |
| | 黒部 | 1963 | P | 199.3 | 184.5 | 3.395 | |
| | 畑窪第一 | 1962 | P | 107.4 | 318.0 | 2.915 | |
| | 魚梁瀬 | 1970 | P | 104.6 | 100.7 | 1.904 | |
| | 井川 | 1957 | P | 150.0 | 459.3 | 1.759 | |
| | 川治 | 1983 | F,N,A,W,I | 83.0 | 144.2 | 1.592 | |
| | 小渋 | 1969 | F,N,A,P | 58.0 | 288.0 | 1.391 | |
| | 三保 | 1978 | F,W,P | 64.9 | 158.5 | 1.305 | |
| | 手取川 | 1979 | F,W,I,P | 231.0 | 247.2 | 1.274 | |
| | 高滝 | 1990 | F,N,W | 143.0 | 107.1 | 1.172 | |
| 台湾 | 日月潭 | 1934 | P,R | 171.6 | 15.0 | 40.670 | 1988 |
| | 南化 | 1994 | F,W,A,R | 154.4 | 108.3 | 37.700 | 2009 |
| | 烏山頭 | 1930 | W,A,I | 154.2 | 60.0 | 20.950 | 1986 |
| | 白河 | 1965 | F,W,A,I | 25.1 | 26.6 | 12.730 | 1992 |
| | 阿公店 | 1952 | F,W,A | 20.5 | 31.9 | 11.740 | 1991 |
| | 尖山埤 | 1938 | I | 7.0 | 10.3 | 9.100 | 1992 |
| | 曾文 | 1973 | F,W,A,P,R | 708.0 | 481.0 | 8.520 | 1991 |
| | 德基 | 1974 | P | 232.0 | 592.0 | 7.830 | 1986 |
| | 鹿寮溪 | 1939 | I | 3.8 | 7.5 | 6.800 | 1988 |
| | 霧社 | 1959 | P | 148.6 | 219.0 | 6.110 | 1991 |
| | 石門 | 1964 | F,W,A,P,R | 309.1 | 763.4 | 4.010 | 1988 |
| | 明德 | 1970 | W,A,I | 17.7 | 61.0 | 2.980 | 1989 |
| | 大捕 | 1960 | A | 9.0 | 100.0 | 1.590 | 1989 |
| | 徳元埤 | 1956 | A | 3.9 | 32.1 | 1.490 | 1987 |
| | 虎頭埤 | 1921 | A | 1.4 | 72.0 | 920 | 1990 |
| | 谷関 | 1961 | P | 13.2 | 707.8 | 620 | 1975 |

注1：出典（文献¹⁰⁾、文献¹¹⁾）

注2：台湾のダムは流域面積5 km²未満、当初貯水容量百万 m³未満、調査年がダム完成後10年未満のものを除く

注3：日本のダムは総貯水容量百万 m³以上かつ供用年数10年以上かつ流域面積100km²以上のもの

注4：目的（F：洪水調節、W：上水道、A：かんがい、I：工業用水、P：水力発電、R：レクリエーション）

- 主ゲート下流には1,287 mの湾曲部のない直線のトンネルが建設される。トンネル断面は馬蹄形で直径が9.5 mと大きい（日本の土砂バイパストンネルの最大断面は小渋ダムの7.95 m）。
- トンネルの下流端は水路が拡幅されバッフルブロックで減勢しつつ水脈を水溜池（減勢池）に落下させる減勢方式が採用されている。
- 南化ダムの土砂スルーストンネルについても、コーティングがインバート表面に塗布される予定である。

iv 白河ダム (Baihe dam)

- 2019年時点建設中で2019年中に完成予定の土砂スルーストンネル（土砂通過トンネル：Sediment pass-through tunnelとも称される）は、全長約590 mの内、上流の約126 mは円形断面の管路流であり、中間にゲートがあり、その下流は、約129 mの開水路流トンネルと約271 mの開水路となっており下流端はスキージャンプ式の減勢工となっている。
- 白河ダムではその他に、延長約1,600 mの土砂バイパストンネルが設計中であり、さらに延長2,450 mの導水路が計画中である。将来的には、貯水位を低下させた排砂（Empty flushing）、密度流排砂、土砂バイパス、掘削を組み合わせた土砂管理を行う計画となっている。

② 台湾の貯水池堆砂の状況

台湾は中国大陸から続くユーラシアプレートの上ののっており、フィリピン海プレートがユーラシア

プレートにもぐり込む位置にある。東部を中心に標高が高く、玉山（旧称：新高山、標高3,952 m）をはじめ標高3,000 mを超える山も多く、急峻な地形を有するとともに、地震も頻発している。気象的には、台風の襲来があり、平均年間降水量は2,500 mmを超える。これらの地形的、気象的要因から、河川上流域からの土砂生産が極めて大きくなっている。

少し古いデータになるが、日本と台湾の主要ダムの比堆砂量（平均的な年間の堆砂量を流域面積で除した値）¹⁰⁾、¹¹⁾を表-3に示す。日本のダムは、総貯水容量100万 m³以上かつ供用年数10年以上かつ流域面積100 km²以上のダムの中で、比堆砂量の上位10ダムを示しているが、最も多い高瀬ダムでも5 km³/km²/年以下であり、4位以降は2千 m³/km²/年以下となっている。一方台湾では、比堆砂量が数千 m³/km²/年を超えるダムが多数あり、流域面積がやや小さめのダムもあるが1万 m³/km²/年を超えるダムが5ダムあるなど、台湾の土砂生産量は多い。

(3) 土砂バイパスの事例分析

日本と台湾の土砂バイパスプロジェクトの事例を比較・分析し、以降に①延長、対象流量、設計流速、②対象とする土砂粒径、③流入部の位置、④堆砂対策工法の組合せ、⑤濁水対策、⑥摩耗対策の6項目について特徴を整理した。

① 延長、対象流量、設計流速

表-4に、日本と台湾のバイパス事例とその他の国の主要なバイパストンネルについての延長、設計流量、設計流速を比較して示す。

表-4 世界の主要な土砂バイパストンネルの比較

| 国名 | ダム名 | 延長 (m) | 設計流量 (m ³ /s) | 設計流速 (m/s) |
|-------|-----------------|--------|--------------------------|------------|
| 日本 | 立ヶ畑ダム | 684 | - | - |
| | 布引ダム | 264 | 39 | - |
| | 美和ダム | 4,308 | 300 | 10.8 |
| | 旭ダム | 2,350 | 140 | 11.4 |
| | 小渋ダム | 3,982 | 370 | 15.8 |
| | 松川ダム | 1,417 | 200 | 15.0 |
| スイス | Egschiダム | 360 | 50 | 10.0 |
| | Palragenedraダム | 1,760 | 250 | 13.0 |
| | Pfaffensprungダム | 282 | 220 | 14.0 |
| | Rempenダム | 450 | 80 | 12.0 |
| | Runcahezダム | 572 | 110 | 9.0 |
| | Solisダム | 968 | 170 | 11.0 |
| 台湾 | 石門ダム (Shihmen) | 3,702 | 700 | 20.0 |
| | 曾文ダム (Tsengwen) | 1,266 | 995 | 30.0 |
| | 南化ダム (Nanhua) | 1,287 | 1,000 | 24.5 |
| | 白河ダム (Baihe)* | 589 | 287 | 20.9 |
| | 白河ダム (Baihe)** | 1,563 | 287 | - |
| フランス | Rizzaneseダム | 133 | 200 | - |
| エクアドル | CHESPIダム | 2,240 | 400 | - |
| パキスタン | Patrind水力発電事業 | 150 | 650 | - |

* : 白河ダムで建設中の土砂スルーストンネル、** : 白河ダムで設計中の土砂バイパストンネル

表-4 より、日本とスイスは設計流量と設計流速は同程度で、トンネル延長はやや日本の方が長い事例が多い。一方台湾のバイパストンネルは、設計流量と設計流速が大きい。これは、台湾のバイパストンネルの目的に放流能力の増強が含まれていること、目標とする排砂量が大きいことが理由と考えられる。

日本やスイスの土砂バイパストンネルは、シルト・粘土といった細粒土砂の他、砂礫もバイパスの対象としているものが多く、施設の損傷を軽減するために大きな流速が生じる構造としていないが、台湾の場合は、砂礫を含まない細粒土砂を対象としており、大きな流速で施設が設計されていると推測される。

② 対象とする土砂粒径

日本では、立ヶ畑ダム、布引ダム、旭ダムでは流入してくる全ての土砂を対象としており、小渋ダムでは粒径 100 mm 程度以下、松川ダムでは粒径 2 mm 程度以下を対象としている。美和ダムでは、粘土・シルトのみを対象とした施設となっている。これらの対象とする土砂粒径に応じて、設計、維持管理手法での配慮がなされている。

台湾では、堆砂の課題が大きいダムでは、対象としている土砂粒径が小さい傾向がある。例として、南化ダム貯水池の流入土砂の粒度分布を図-6 に、流量と土砂濃度の関係を図-7 に示す。これらより、粒度分布は粒径 0.1 mm 以下の細粒土砂が 9 割程度を占めており、土砂濃度がかなり大きく、流量 1,000 m³/s の場合で約 6 万 mg/L の土砂濃度となっている。実際に大量の土砂流入が生じた、2008 年台風 7 号と 2009 年台風 8 号の出水時にはダム貯水池の上層の濁

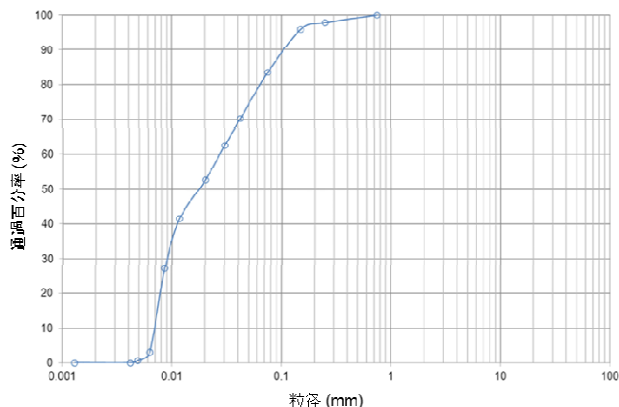


図-6 南化ダム流入土砂の粒度分布 (台湾 水利署資料に加筆)

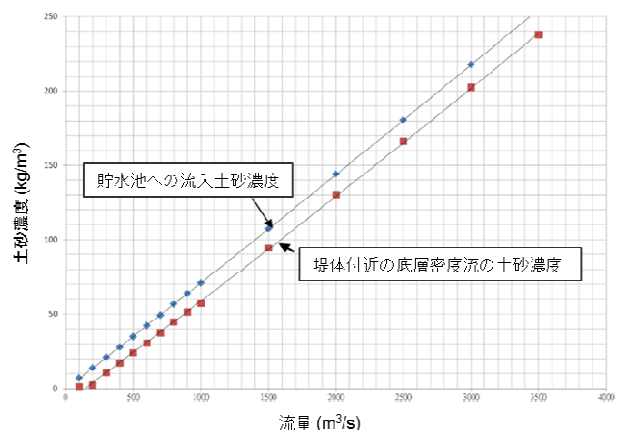


図-7 南化ダムの流量と土砂濃度の関係 (台湾 水利署資料に加筆)

度として 59,000 NTU (ホルマジンを濁度標準液とした濁度単位) と 69,000 NTU の高濃度の観測結果が得られている。日本の多くの貯水池では大規模出水時

でも数百～数千 mg/L 程度の土砂濃度のオーダーとなる場合が多いが、南化ダムの土砂濃度は非常に大きい。このように粒径が小さく濃い土砂濃度の濁水が貯水池内に流入し、貯水池の底を進んでダム近傍まで達することが南化ダム貯水池の土砂流入の大きな特徴となっている。

台湾のその他のダムでも、ダム堤体近傍に流入部を有する土砂バイパス施設では、シルト程度以下の細粒土砂を主な対象とされている。

③ 流入部の位置

日本の事例では全てバイパストンネルの呑み口が貯水池上流端付近に設置されている。

これに対して台湾では、流入部が貯水池の中間位置やダム堤体近傍に位置している。台湾でこのような配置が可能な理由は、前述の②に示したように貯水池に流入する土砂が細粒であり非常に大きな土砂濃度の濁水として流入し、大量の土砂が貯水池の下流まで密度流として輸送されることから、貯水池下流の底部からの排水により効率よく土砂を排出できるためである。このような配置のため、台湾のバイパストンネルの流入部のゲートの設計水深は比較的大きい。

台湾のバイパストンネルの流入部の構造は、日本のバイパストンネルよりも鹿野川ダムや天ヶ瀬ダムで建設中のトンネル洪水吐き（土砂の排出は目的としない施設）の構造と類似している。ただし、日本のトンネル洪水吐きの流量調節を行う主ゲートはトンネル下流端に配置されているが、台湾のバイパストンネルでは、掃流力を高めるために、トンネルの上流端付近またはトンネルの途中で主ゲートが配置されており、トンネル内は開水路流で流下する構造となっている。

スイスの事例の中には貯水池内に呑み口を設置し、貯水位低下操作と組み合わせた運用がされているバイパス施設（Solis ダム）もあり、今後日本でも検討の余地があると考えられる。

④ 堆砂対策工法の組合せ

日本の土砂バイパスによる対策を行っているダムでは、1つの土砂バイパストンネル施設があり、施設単独での運用か掘削や浚渫を組合せた運用とされている場合が多い。美和ダムでは、バイパストンネルの流入部上流に、バイパスできずに貯水池内に堆積した土砂を非洪水時に浚渫した土砂をストックするストックヤードを建設中であり、補助的な対策が実施される予定である。

これに対して台湾では、1つのダムに土砂排出施設が複数検討されている事例が多く、トンネル施設も複数計画される事例もある。その用途も、密度流

排砂を行うもの、浚渫した土砂を運搬しストックした土砂を放流水でフラッシュするためのもの、日本のような土砂バイパスを想定しているもの、水位低下を伴うフラッシングを想定しているものなど、多岐にわたっている。台湾の流入土砂量、堆砂量のボリュームが大きいため、単一の施設では対応しきれないことが伺われる。

また、予算制度の面では、台湾の南化ダム、白河ダムは利水者が所有し、政府が所有するダムではなく、治水目的のないダムであるが、利水機能の重要度が高いという理由から、政府の組織（経済部水利署）が予算を負担し堆砂対策事業を実施しており、日本との相違がみられる。

⑤ 濁水対策

日本の堆砂対策の検討においては、ダム下流河川に土砂を流下させる場合に濁水発生への配慮を慎重に行うことが多い。

一方台湾のダム下流河川に土砂を流下させる対策においては、対象とする土砂の粒径が小さく土砂量も多いため、かなり高い土砂濃度で下流河川に放流されているようである。石門ダムでは、密度流排砂によって、下流での取水に課題が生じたため、対策として大規模な遊水池が建設されている。ダムの堆砂軽減と、下流の利水や環境への影響とのトレードオフをどのように考えるか、また技術的にどう解決するかが重要と考えられる。

⑥ 摩耗対策

土砂バイパス施設は、対象とする土砂粒径とその通過量、通過時の流速や水深（掃流力）によって、施設に摩耗・損傷が生じるため、各種の対策が実施されている。

日本では、美和ダムのバイパス施設はシルト程度以下の粒径の小さい土砂を対象としており、試験運用後も施設の損傷はみられていない。砂礫を流下させる旭ダム、松川ダム、小渋ダムでは、ライニングに高強度コンクリートを使用するとともに補修が可能なように摩耗代が設定されている。施設の中で大きな流速となる部分には鋼製ライニングが用いられる場合もある。また、小渋ダムの流入部周辺の保護には、ラバースチールが採用されている。

台湾の土砂スルーストンネルでは、日本の土砂バイパストンネルでは事例のないエポキシ樹脂と砂を混合したコーティングによる表面保護が採用されている事例がある。これは砂礫を含まない細粒土砂が対象であることや、台湾の施設の流速がかなり大きく、キャビテーション損傷への対策のために、表面の凹凸を無くす目的もあるようである。

スイス、日本、台湾などの国々で、ライニング材の工夫や損傷量の予測手法に関する研究が進められており、進展を期待したい。

【結果とりまとめ】

今後の堆砂対策検討に資するため、日本と台湾の土砂バイパストンネルについて現地調査や資料収集などを行い、日本の7事例、台湾の4事例の情報を整理し、①延長、対象流量、設計流速、②対象とする土砂粒径、③流入部の位置、④堆砂対策工法の組合せ、⑤濁水対策、⑥摩耗対策の6項目について特徴を整理した。

台湾の貯水池の流入土砂の性状や流入特性は日本と異なっており、それに応じた土砂バイパス施設が検討されている。こうした事例の情報を収集し日本の事例と比較することで、新しい視点から計画や設計を見直すことが可能になるものと考えられる。

今後、台湾の土砂バイパス関連の大規模プロジェクトが複数運用開始される予定であり、運用後の施設の効果や損傷状況、下流河川への影響などに関心を持って情報収集し、日本の堆砂対策への参考としていきたい。

【謝辞】

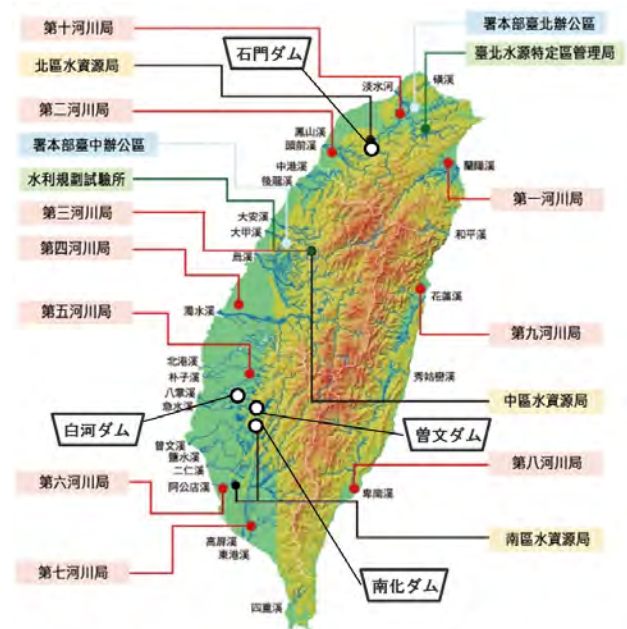
現地調査にご協力いただいた国土交通省中部地方整備局各位、京都大学角教授をはじめとする排砂バイパス国際ワークショップ関係各位、南化ダム視察にご協力いただいた西田鉄工株式会社および南寧工程有限公司各位に対し感謝の意を表します。

【参考文献】

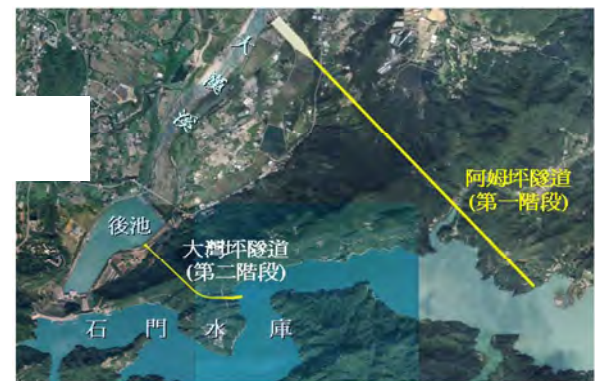
- 1) First International Workshop on Sediment Bypass Tunnels April 27-29 in Zurich, 2015.
- 2) Proceedings of the 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Kyoto-Japan, 2017.
- 3) Conference Proceedings, 3rd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Taipei, Taiwan, 2019.
- 4) 安藤尚也：矢作ダムにおける堆砂対策、ダム技術、No. 389、pp. 107～114、2019.
- 5) Makoto Matsushita: Clear water separation and sediment bypass of the oldest masonry dam in Japan, Proceedings of the 2nd International Workshop on Sediment Bypass Tunnels, Kyoto-Japan, 2017.
- 6) 尾畑伸之、鬼頭政徳：美和ダム土砂バイパストンネルのモニタリング調査結果、ダム技術、No. 389、pp. 51～58、2019.
- 7) 中塚和司、西村匡弘、成澤悟史：松川ダムの堆砂対策、ダム技術、No. 389、pp. 59～67、2019.

- 8) 竹内寛幸、石田勝志、田中史也：土砂バイパス（小渋ダム）、ダム技術、No. 389、pp. 43～50、2019.
- 9) 櫻井寿之、安田成夫：台湾の土砂バイパスプロジェクトについてー建設中の南化ダム土砂バイパストンネルの視察からー、ダム技術、No. 388、pp. 50～59、2019.
- 10) 角哲也：台湾における貯水池土砂管理、ダム技術、No. 159、pp. 41-52、1999.
- 11) (財)ダム水源地環境整備センター：ダムの堆砂対策技術ノートーダム機能向上と環境改善に向けてー、p. 19、2008.

【参考：台湾の土砂バイパスプロジェクトの資料】



参考-1 本稿で事例を整理した台湾のダム位置



参考-2 石門ダムのAmupingトンネル（建設中）のレイアウト³⁾



参考-3 石門ダムの Amuping トンネル（建設中）概要³⁾

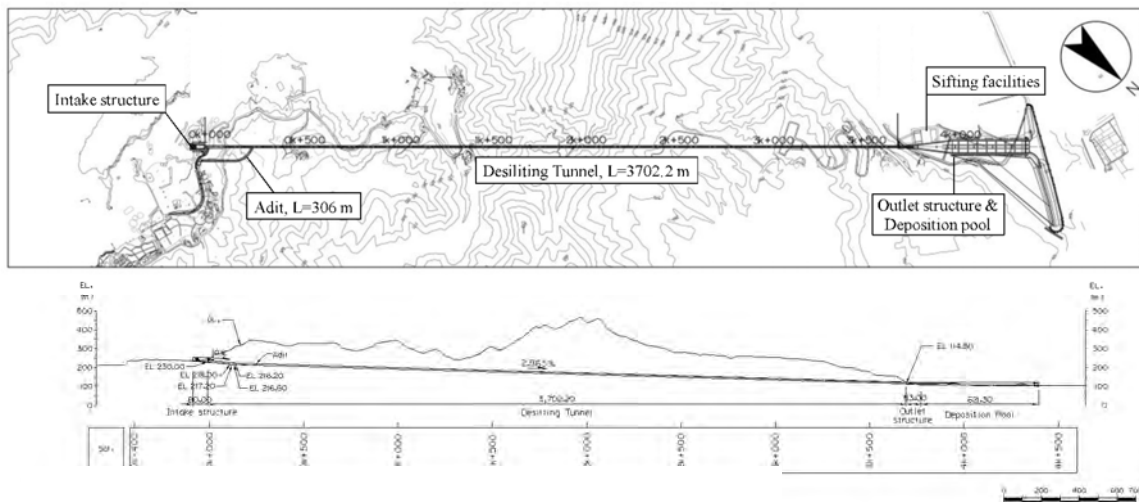
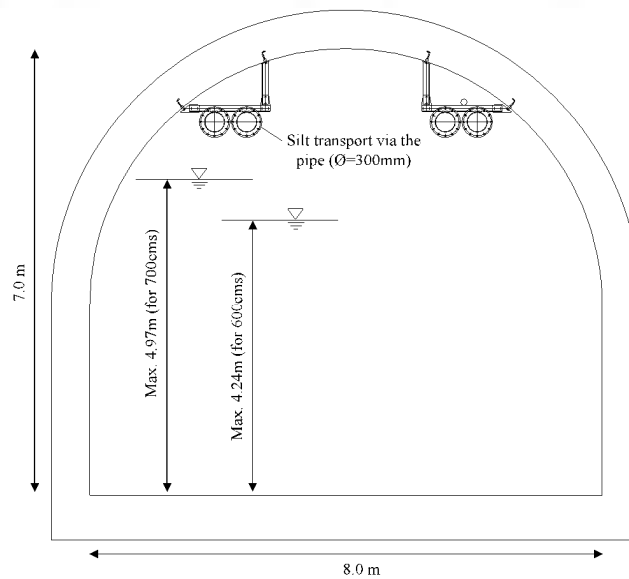


Figure 4: Plan view and profile of the desilting tunnel at Shihmen Reservoir



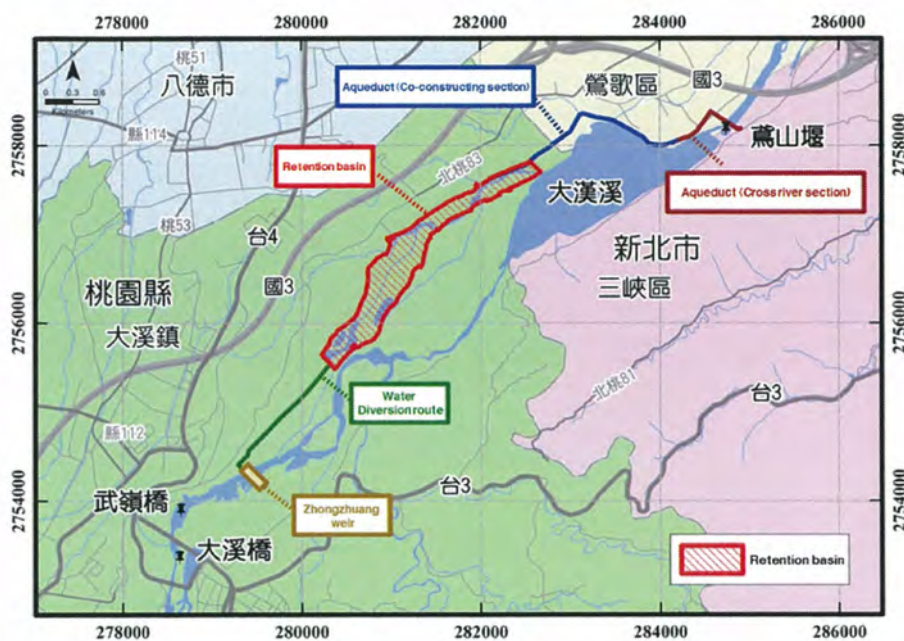
参考-4 石門ダムの Amuping トンネル（建設中）概要図³⁾



参考-5 石門ダム底部放流設備（運用中）からの土砂排出状況³⁾



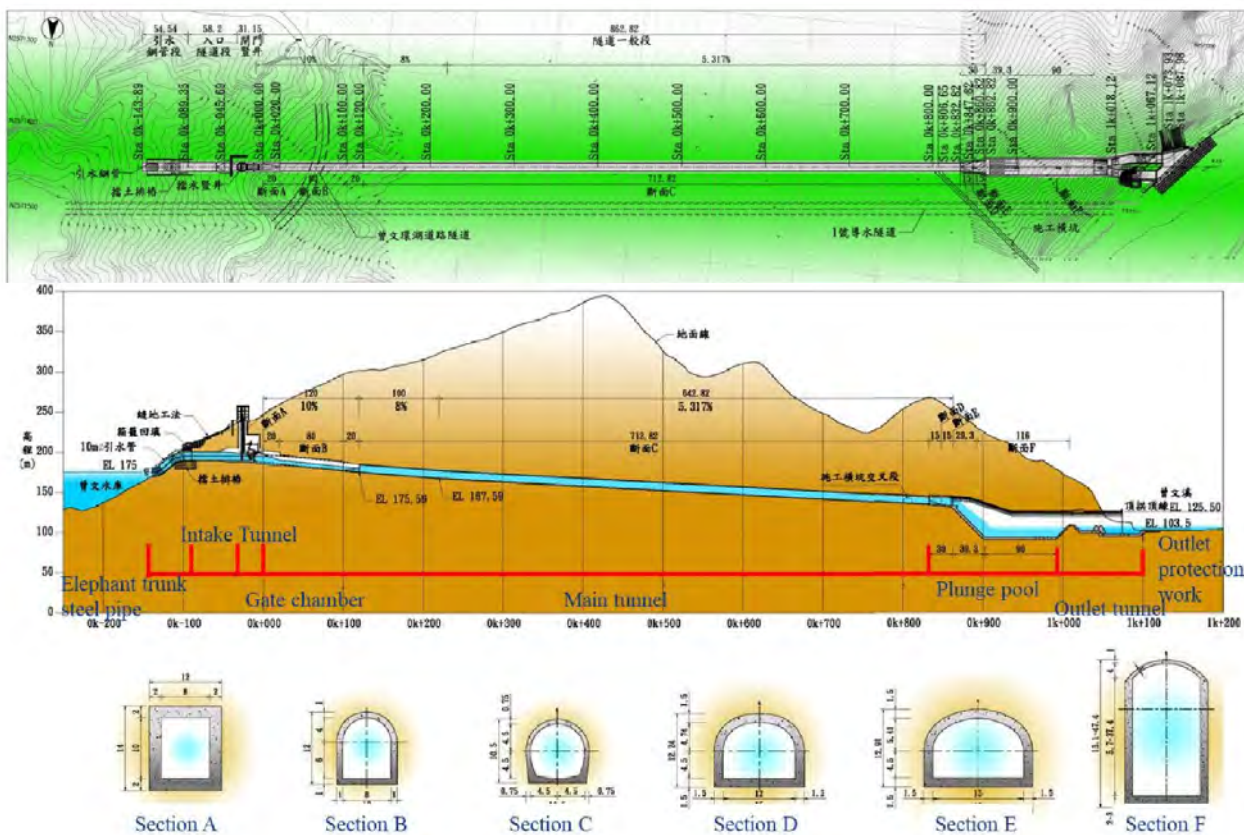
参考-6 石門ダム下流河川に設置された排砂中の取水を行うための遊水池（運用中）³⁾



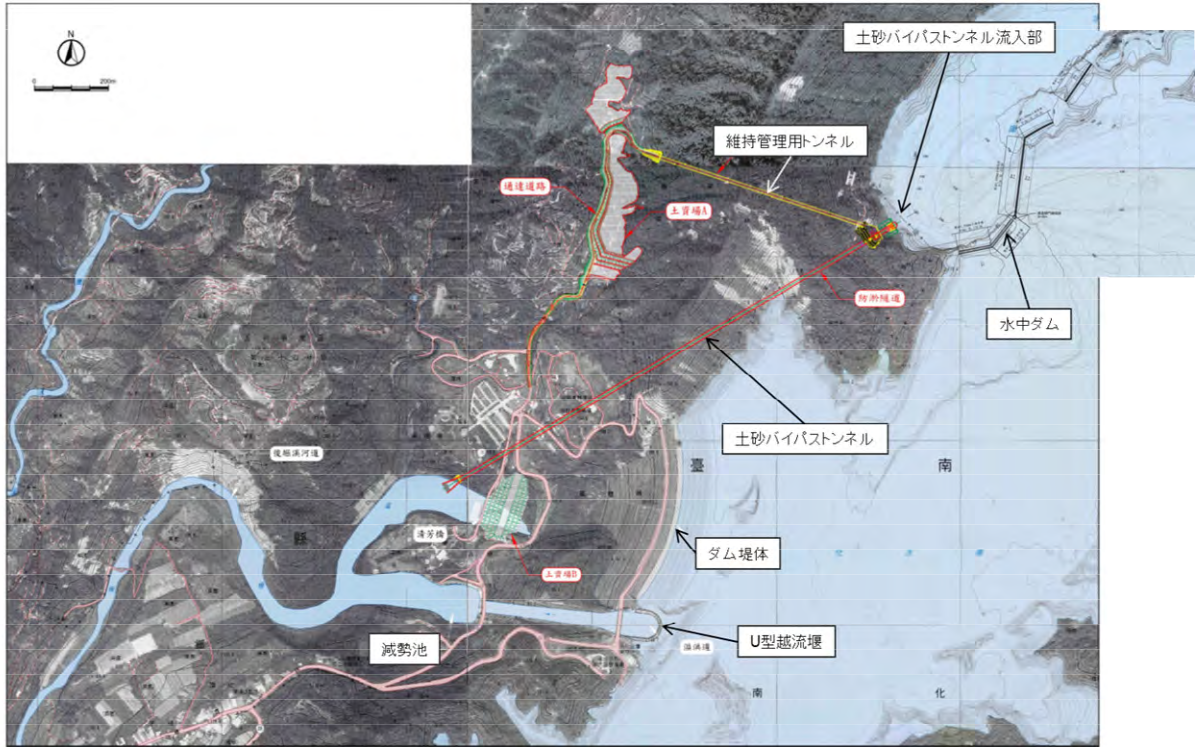
参考-7 石門ダム下流河川に設置された排砂中の取水を行うための遊水池（運用中）の平面レイアウト³⁾



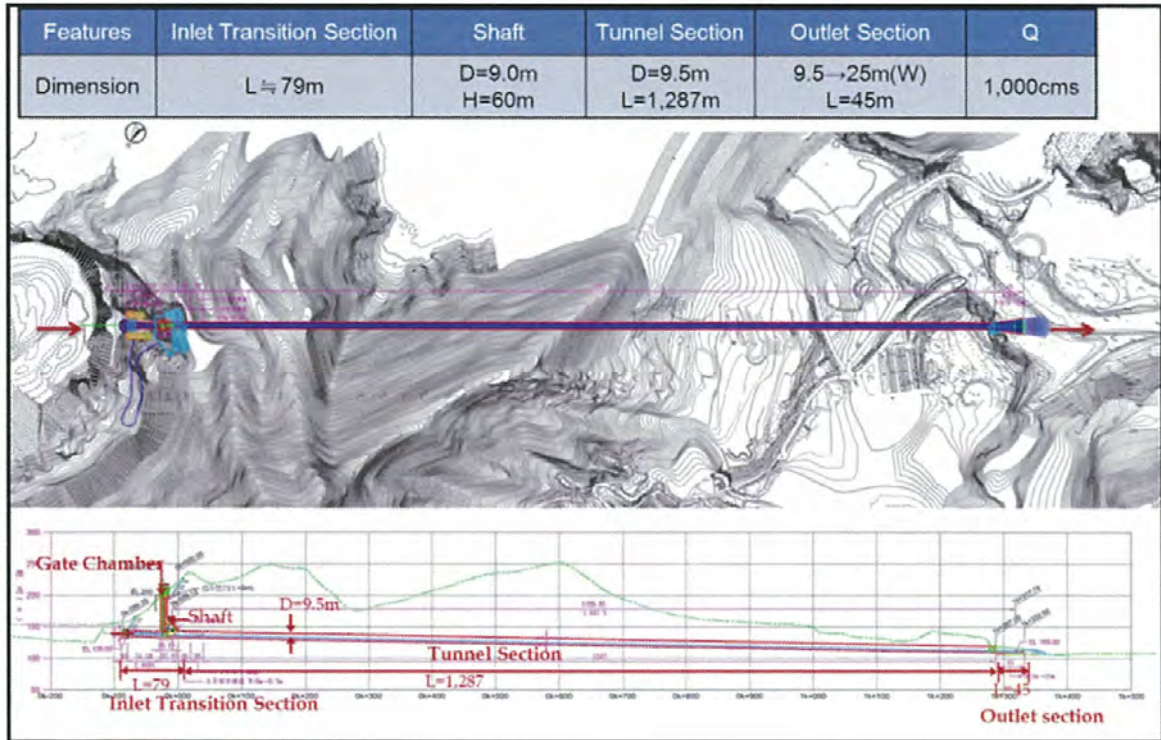
参考-8 曾文ダムの土砂スルーストンネル（運用中）の平面レイアウト³⁾



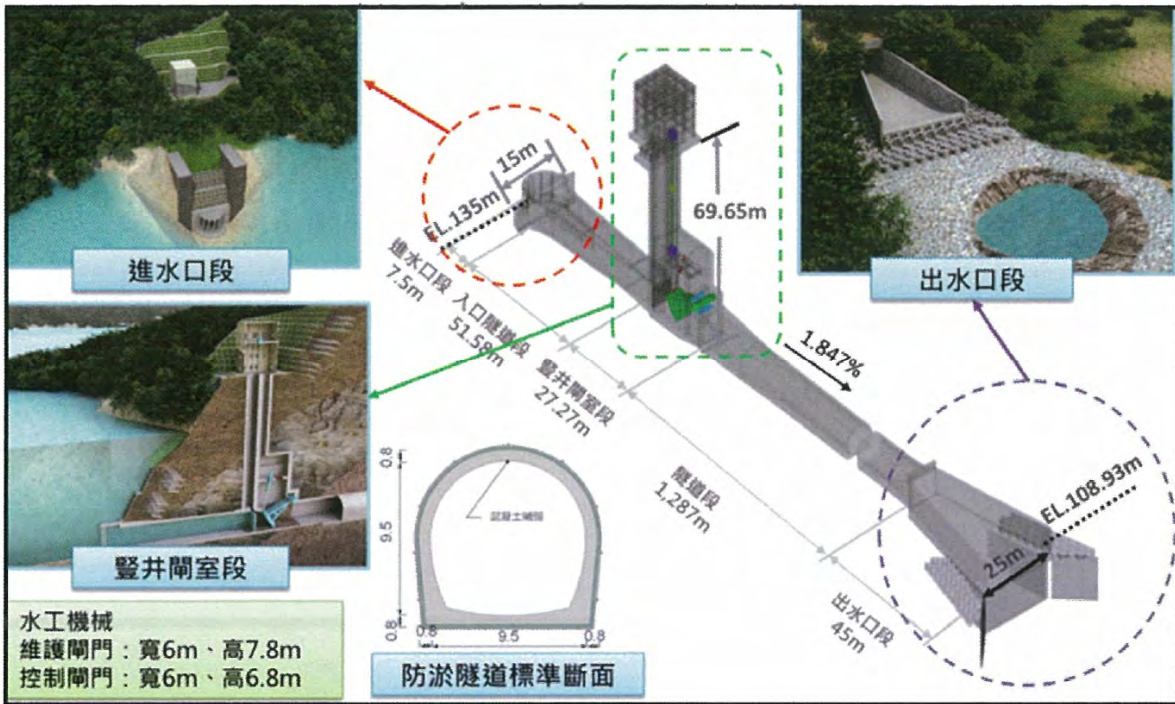
参考-9 曾文ダムの土砂スルーストンネル（運用中）の概要図³⁾



参考-10 南化ダムの土砂スルーストンネル（建設中）の平面レイアウト³⁾



参考-11 南化ダムの土砂スルーストンネル（建設中）の概要図³⁾



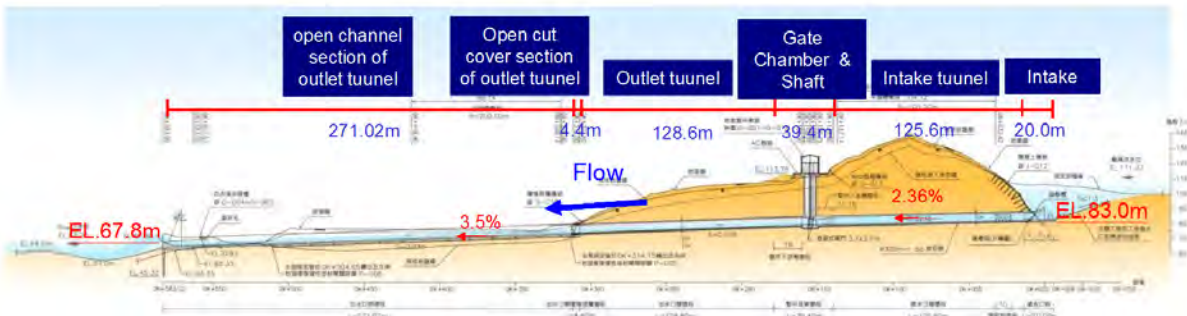
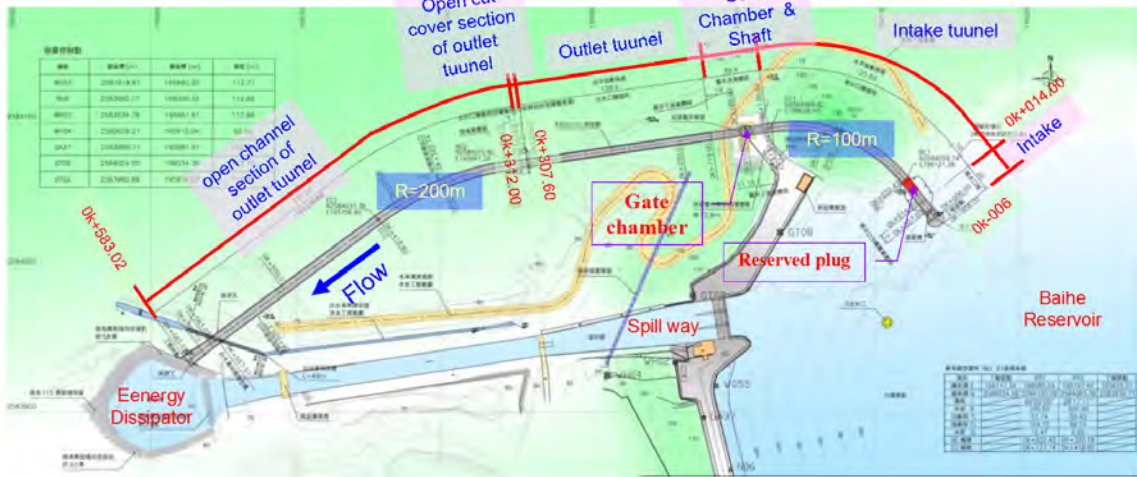
参考-12 南化ダムの土砂スルーストンネル（建設中）の概要³⁾



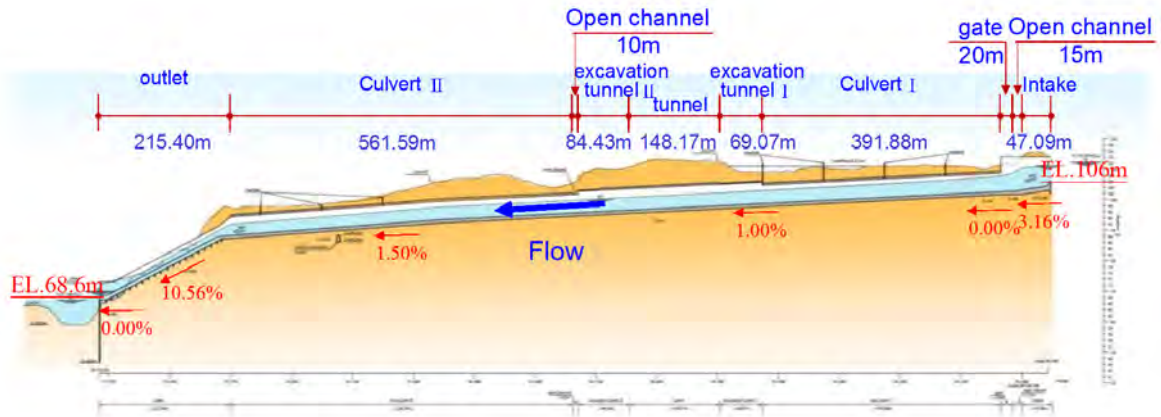
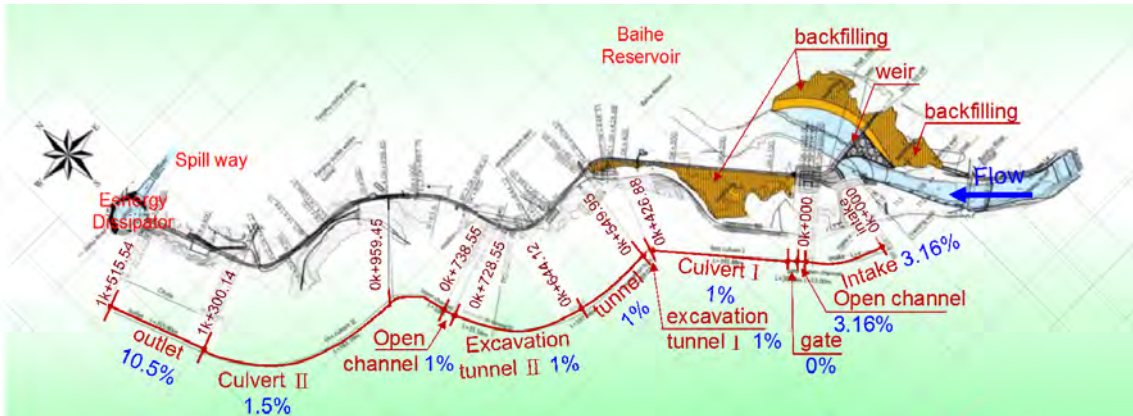
参考-13 南化ダムの土砂スルーストンネル（建設中）のトンネル内（現地調査時撮影）



参考-14 南化ダムの土砂スルーストンネル（建設中）の流入部施工状況（現地調査時入手資料）



参考-15 白河ダムの土砂スルーストンネル（建設中）の概要³⁾



参考-16 白河ダムの土砂バイパストンネル（設計中）の概要³⁾