

神戸市水道局

布引ダム堤体補強工事と これを機会とした水源の利活用

(2006年10月掲載)

1. はじめに

布引ダム（正式名称：布引五本松堰堤）は、神戸水道創設当時の水源として明治33年に完成した日本で最古の重力式粗石コンクリートダムで、平成10年には国の登録有形文化財に登録されました。

建設時には、当時の技術先進国であったヨーロッパの技術を取り入れ、高度な止水性の確保、堤体の安定を確保するための揚圧力の排除のため、コンクリートの配合や施工目地の構造など、材料や施工において繊細な配慮が施されました。また、布引ダムの設計・建設にたずさわった技術者佐野藤次郎が、後に日本各地および韓国各地の都市水道建設やダム建設に関与していることから、布引ダムが水道技術及びダム建設技術の伝播と発展に寄与する重要構造物であったといえます。

布引ダムは、100余年を経過した現在も神戸市の貴重な自己水源として活用されていますが、兵庫県南部地震により、ダム堤体からの漏水量が大幅に増大したことから、災害復旧工事としてグラウト工事を実施しました。さらに、ダム堤体を新たな耐震基準に適合させることを主目的として、建設100年という節目を機に本格的なリニューアル工事を行いました。

本工事は大きく分けて、

- ① 堤体補強工事
 - ② 堆積土砂撤去工事
 - ③ 水辺環境整備工事
- の3つからなります。

本工事は、維持管理時代の先駆として、従来のスクラップ・アンド・ビルド方式ではなく、先人

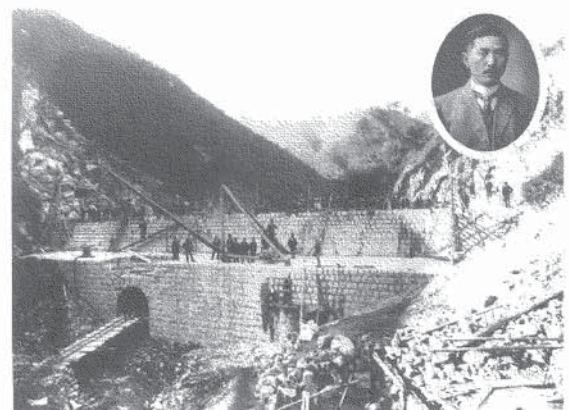


写真1 布引ダムの建設状況と佐野藤次郎

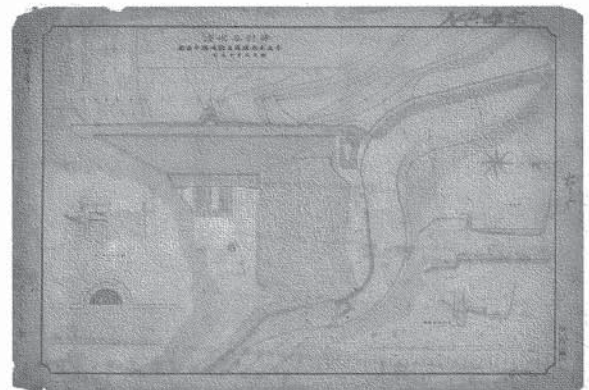


写真2 布引ダム建設当時の設計図面

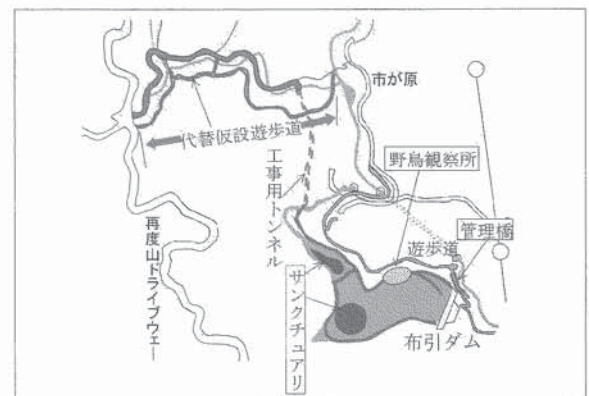


図1 布引ダムリニューアル工事の概要

が様々な工夫を施して建造された土木遺産を、当時の技術や景観を生かしつつ、必要最小限に現代の技術を加え、次世代に引き継いでいく、といった観点で設計・施工に創意工夫を加えました。また、ダム周辺が自然環境に恵まれ、ハイキング道等として多くの市民に親しまれていることから、親水空間の整備や市民見学会の開催など、市民に水辺環境をはじめとした地球環境の保全について理解を深めていただくよう配慮しました。

このような経緯を経て、平成18年7月5日に布引ダムを含む布引水源地下水道施設が国重要文化財に指定されました。これを機にした取り組みについても紹介したいと思います。

2. 布引五本松堰堤補強及び堆積土砂撤去工事の概要

- ① 工期：平成13年（2001年）8月29日～平成17年（2005年）3月31日
- ② 工事概要：資機材搬入路工
 堆積土砂撤去工 [202,430 m³]
 補強コンクリート工 [3,350 m³]
 補強コンクリート部グラウト注入 [ボーリング延長2,261m、注入量46.5t]
 管理橋復元・公園整備・野鳥観察所の新設・配管取替など

堰堤の耐震補強に併せて、貯水池内の堆積土砂（約20万m³）を搬出し、貯水容量を約60万m³に増

やすこととしました。 先ず、堆積土砂搬出及び機材搬入のための工事用トンネル（延長：321.5m、幅：5.1m×高さ：4.8m）を施工し、進入道路を整備しました。

堰堤の耐震性向上のため施工した補強コンクリートは、図2に示すように、貯水池側へ勾配が付いたフィレット部及びそれと岩盤とを固定するフーチング部分からなります。フィレット部の施工にあたっては、既設堤体と一体となるよう、せん断補強筋を入れ、有害なクラック等が発生しないよう、打設高さ・目地・養生等に配慮しました。フーチング部については、ダム左岸の堤体底部の岩質は風化が進行していたため、基礎岩盤の清掃後に、一部掘削してコンクリートに置換えました（写真3参照）。

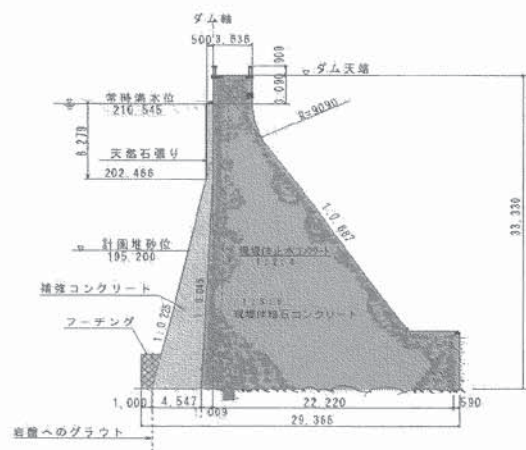


図2 補強コンクリート断面図

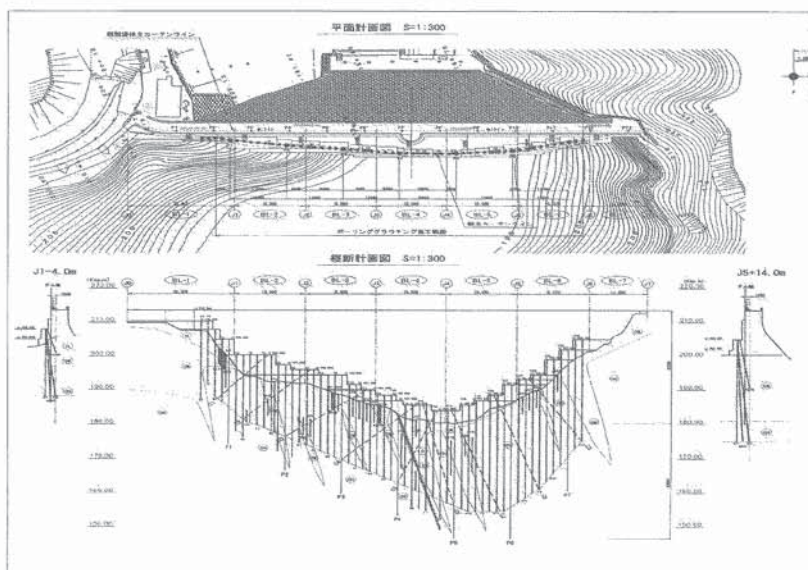


図3 グラウト範囲図



写真3 置換コンクリート

堤体本体のグラウト工については、平成9年に施工済みであったため、今回のグラウト工の施工範囲は、堰堤前面の補強コンクリート部分の基礎岩盤部としました。そこに遮水壁を構築することにより、貯留水の漏水を防止して、補強コンクリートと堰堤に作用する揚圧力を低減することを目的としたものです。

3. 工事における特徴

本ダムは、

1. 日本最古の重力式粗石コンクリートダムであること
2. 建設当時イギリスの技術を導入し、水密性確保等に工夫がなされていること
3. 当時の設計図書等が保存されていること

などから、この度設計をするにあたり

- ① 当時の資料を調査研究し、極力設計諸元や使用材料を明確にする
- ② 堤体の健全性をコンクリート強度等の調査により確認する
- ③ 瀬戸内海国立公園に指定されている周辺の優れた景観に配慮する

ことを主眼としました。

当時の文献によれば、建設当時コンクリートは堤体部位別にセメント：砂：砂利の比率を変え、5種類使い分けられており、堤体上流面や管貫通部など水密性が求められる部位には、当時高価な材料であったセメント量を増やし、その他の部位では骨材量を増やすといった工夫が施されていました。また、千本搦き（φ9cm長さ120cmの棒）による締固めや莖による養生など現在と変わらぬ



写真4 切り出したコンクリート

品質管理を行い、水密性を確保するための工夫が多くみられました。このことは、排泥管付近から切り出したコンクリートが、目視調査の結果、密実で良質なコンクリートであったこと、さらにテストハンマーで強度試験を実施した結果、推定強度 $\sigma = 21 \sim 23 \text{N/mm}^2$ を大きく上回る $\sigma = 35 \text{N/mm}^2$ 以上を示し、堤体コンクリートが、100年経過した現在も健全であることが判明したことから裏付けられました。

(1) 補強コンクリートによる耐震補強

布引ダムは、明治30年の設計計算書では、洪水時水位の状態を外力の作用点が底面のmiddle thirdに入るよう設計されているが、地震力は考慮されていない。よって、既設堤体の安全性を確認するため、現行のダム設計基準に適合するか検討しました。その結果、満水時及びサーチャージ水位時に設計水平震度 $k=0.15$ の地震荷重が作用した場合、堤体上流端で若干の引張応力が発生し、現行基準を満足しないことが判明し、耐震補強を行うこととなりました。

補強方法は、

- ① 発生する引張応力に対して鉄筋で補強を行う
- ② プレストレスを導入し引張応力を解消する
- ③ 堤体を増築することにより補強する

この3案について検討を行った結果、①②による方法は、技術面及び維持管理上の問題点が多いため、既設堤体上流部に補強コンクリート（ダムの基本三角形の上流部に設けられた三角形部分）を設け、安定性を確保する③を採用しました。補強コンクリートの形状は、底面幅4.5m、高さ24.7mとしました。

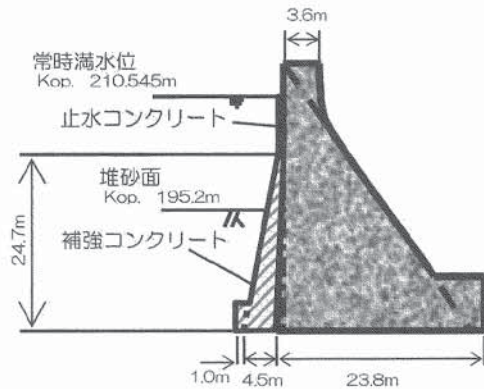


図4 堤体補強工事の概要

また、現堤体への影響を考慮し、表面の石張りは撤去せず打設を行うため補強コンクリートと既設堤体との一体化が問題となりました。そのため、応力解析と実際に増築する部分に試験ブロックの打設を行い、引張試験とせん断試験を実施し一体化の検討を行いました。その結果、堤体下部での安全率が低いことから、せん断補強を行い既設堤体との一体化向上を図りました。

また、ダムを全体系としてとらえ性能向上をはかるため、補強コンクリートの上部から常時満水位までの区間に、止水コンクリートを打設し既設堤体の漏水防止を行いました。

(2) 景観に配慮した補強コンクリート表面処理

布引ダムは、瀬戸内海国立公園内に位置し、表面に石積みを施した周辺の自然に調和した美しいダムであり、訪れる市民の方々が目をとめる、ビューポイントとなっています。このため、増築する補強コンクリートもそのような現堤体の景観に配慮した、違和感のない形状及び表面処理をおこないました。現堤体への影響を考慮して表面の石積みは取り除かないことから、①間知石案、②石張り案、③人造石張り案、④化粧型枠案の4案を検討しました。④案では当初の色調は合うが、経年変化があまり生じないので、既設堤体と違和感が生じる可能性がある。③案の人造石は凹凸がなく、遠景から見るとフラットな面を呈するため、下流面の石積みの景観とは違和感が生じる。残りの2案については、両者とも天然石を用い、表面の凹凸も表現できることから、経済比較の結果②案を採用しました。補強コンクリートは、上流部



写真5 補強コンクリート表面処理

にも既設堤体の姿を残すため常時満水位以下としており、施工範囲は、経済性を考慮して、常時満水位から平年の低水位以下のフィレット断面変化点までとしました。

(3) 水密コンクリート施工のための堤体打継面処理における敷モルタルの廃止

ダムコンクリートに使用される粗骨材は、単位結合材量を少なくし水和熱による温度上昇を抑制するため、また莫大なコンクリート量や経済性からコンクリート製造プラントが現場に設置されることが多く、最大寸法120mmや150mmといった、標準的な土木用コンクリートと比べて大きな粗骨材を用いることが多い。そのため、打継面の凹凸が大きくなることから、新旧打設ブロックの付着強度や水密性向上のため、打継面に敷きモルタルを行うことが一般的です。

本工事では、補強コンクリート量が3,300m³程度とダムコンクリートとしては少なく、また現場が市街地に近接した位置にあり、練り混ぜ開始から1.5時間以内に荷卸しができることから、レディーミクストコンクリート採用の検討を行いました。その結果、適正な温度管理を行うことで水和熱の影響を少なくすることができ、また1m³あたりのコンクリート製造単価も経済的なことから、JIS規格に適合した最大粗骨材寸法40mmのレディーミクストコンクリートを採用しました。

粗骨材最大寸法が40mmの場合、120mmや150mmと比べて打継面の凹凸が小さいことから、十分なレイタンス処理を行えば、敷モルタルを行わなくとも付着強度や水密性は確保される

・敷きモルタルとコンクリートのなじみが悪くなることにより、その両者の界面がクラック・水みちの発生源になる等、逆に悪影響を与えると考えられるため、新旧コンクリート打設ブロック間の敷きモルタルを廃止し、補強コンクリートの水密性向上を図りました。

(4) 補強コンクリート締固めにおける法面パイプレーターの使用

補強コンクリート上流面の型枠は、1：0.225の傾斜を有することから、十分な締固めを行った場合でも、材料分離による余剰水や空気泡により、コンクリート表面に表面気泡が発生することが予想されました。表面気泡は、外観を損なうだけでなく、表面部コンクリートの品質を低下させ、構造物の耐久性低下を引き起こします。この原因としては、水あばたのように表層部にブリージング水が残りがやすくなり、表層部の水セメント比が大きくなることや、エアあばたのように表層部がポーラスになり、強度低下や中性化に対する抵抗性が低くなることが考えられます。よって、補強コンクリートの品質を低下させないよう、先端が板状でコンクリートと型枠の近傍を十分に締固めることができる、法面用パイプレーター（写真6）を使用しました。その結果、良質なコンクリートを施工することができました。

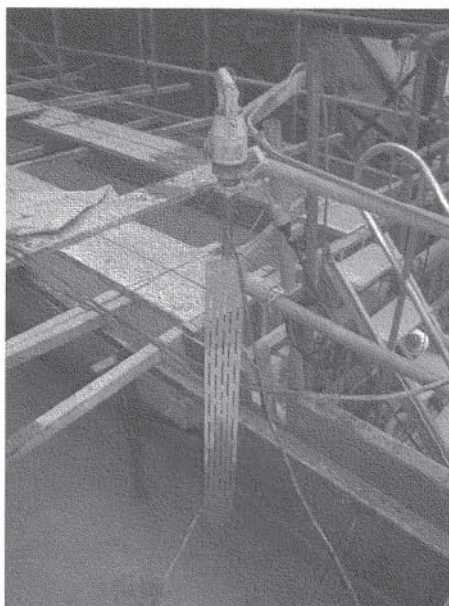


写真6 法面用パイプレーター

(5) 建設当時の部材を有効活用した管理橋架替

ダム創設期に架設された管理橋が堤体左岸にあります。現在ではハイキング道として市民の方々に慣れ親しまれています。しかし、老朽化が著しく橋脚もひび割れが発生しており、十分な耐力を有しているかが問題となっていました。今回そこで、余水吐きの能力を確保しつつ管理橋の耐力を確保するとともに、ダムおよび貯水池の景観との調和に配慮した補修・補強をおこなうこととなりました。

また、管理橋は、ダム建設時のセメント輸送用軽便鉄道に使われたレールが構造部材として再利用されていました。そこで、先人の資材有効利用の精神を継承し、本工事においても既設部材を可能な限り再利用し、さらに現行の安全基準にあわせて再生しました。

具体的には、鋼材の劣化度をランク分けし、再利用可能な部材を選択することにより、建設当初の部材を可能な限り使用するとともに、現況橋梁形式を極力変更せず、デザインに違和感のないよう配慮しました。特に、補強の必要な新規の横桁には既設とほぼ同形状のJIS 6 kg レールを増設することとしました。

また、鋼材の補強は、現場から既設部材を工場に持ち込み、補強及び組立てを行い、現地で架設を行いました。これは、工場加工が施工精度・品質確保の点で優位なことから、美観や品質の向上に配慮することにより、次世代にも末永く愛され、親しまれるような管理橋となるよう整備を行ったものです。

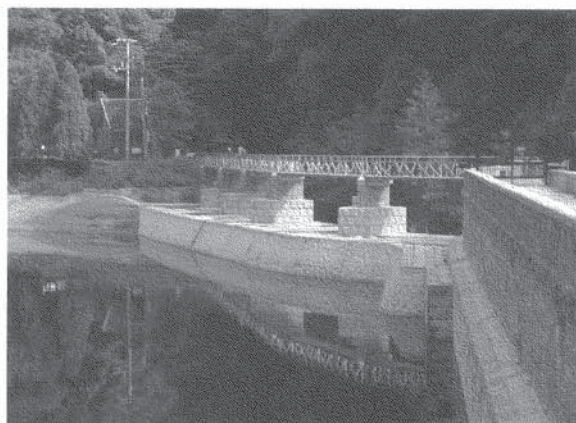


写真7 リニューアルされた管理橋

(6) 貴重な自己水源としての水源機能回復

神戸市における数少ない自己水源の一つである布引貯水池は、建設当初は759,000m³の有効貯水量を有していましたが、過去の度重なる大水害などにより約340,000m³の堆砂量があり、建設当初の約半分近くが土砂に埋まっていました。そこで、堤体補強工事に伴い貯水池を空にする期間を有効利用し、堆積した土砂の撤去を行い、水源能力の回復を図りました。

堆積土砂の撤去にあたっては、長期に水源を空にすることを避ける観点から、堤体補強工事の工期内で平行して実施可能な規模である200,000m³とした（2年間の作業期間）。その結果、現在、布引貯水池の有効容量は約600,000m³に回復しています。

(7) 市民が憩える親水空間の創出

布引貯水池は市街地から徒歩30分ほどの位置にあることから、多くの市民が訪れる観光スポットになっています。そこで、市民の憩いの場とし



写真8 土砂撤去前の状況



写真9 土砂撤去後の状況

て堤体左岸側に休憩所を設けました。休憩所では、布引ダム建設当時上流にあった水車小屋で使用されていた石臼を設置し、ダムの歴史に触れる場を創出するとともに、4カ国語（日本語・英語・ハンガール・中国語）で布引ダムの概要を記した看板を設置し、観光交流都市を目指す神戸市として、ユニバーサルデザインを意識した整備を行いました。

また、ダム湖百選にも選ばれたように、周辺は緑豊かな自然環境に恵まれており、多くの市民の方々が訪れる憩いの場所となっています。また人目につきにくい貯水池の右岸や上流側では、水鳥などが羽を休める姿が見られ、野鳥にとってのサンクチュアリとなっています。

このため、市民の方々によりよい親水空間を創出できるよう、ダムやサンクチュアリが見渡せる位置に布引ダムを訪れる野鳥を紹介した看板やベンチのある野鳥観察所を設置しました。また、土砂の撤去にあたっては、野鳥の生息できる環境を確保するため、貯水位が低下しても水辺を広く確保できるよう配慮しました。具体的には、工事期間中に貯水池上流に洪水調整用として用いた土堰堤を、貯水池内の工事完了後、これまでの冬期の低水位である標高204mまで天端高をカットし、潜堤として有効活用しました。この潜堤により水鳥が訪れる冬場でも水面が確保されるようになります。

布引貯水池は神戸市内でも有数のオシドリの飛来地であり、多いときには二百羽を超える姿が確

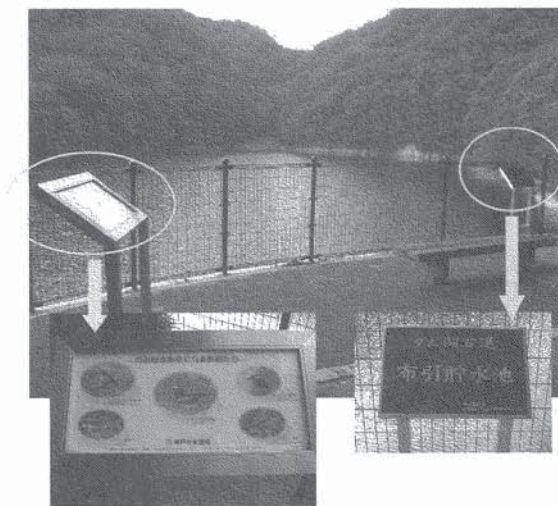


写真10 野鳥観察所

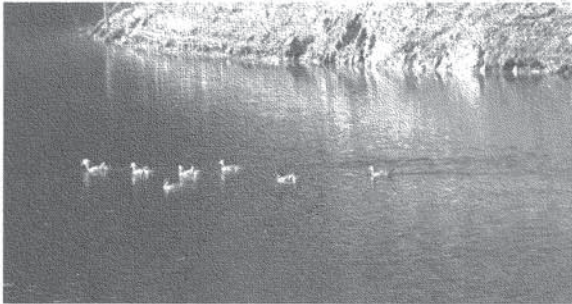


写真11 帰って来たオシドリ (H17.10.20撮影)

認されていました。工事完了後、冬季に向けオシドリの再飛来を心待ちにされていた市民の方々も多かったが、現在、貯水池では4年ぶりにオシドリの羽を休める姿が確認されました。

(8) 見学会による水環境への理解促進

本工事が、国内外の自治体や技術者にとっては、既設ダムの補強や補修工事の先例として、興味のある工事であったことは、多くの自治体、学識者や技術者が、特に技術者は国外からも見学に訪れたことから推察できます。

また、工事期間中、10回にわたる市民見学会を含め105回の工事見学、のべ7,000人が本工事現場に訪れました。特に市民見学会では、土砂撤去後の湖底に入っただき、100年間に堆積した土砂量の凄さや、補強後の堰堤の姿を間近に見てもらい、布引ダム・貯水池にこれからも愛着を持っていただくとともに、水源保全や水環境整備の重要性について理解を深めていただきました。

4. 重要文化財の指定と布引ウォーターの販売

かつて、布引の水は「赤道を越えても腐らない」と海外の船乗りに賞賛されるなど内外で親しまれてきました。現在では、量に限りがあり、高度浄水処理水とブレンドしてお届けしていますが、その復活を望む声が寄せられていました。今回の重要文化財の指定を記念し、布引水だけを使い「神戸の水だより～布引～」を製作しました。

5. おわりに

現在日本では、大量の土木構造物を社会資本としてかかえており、今後はこれらの社会資本を良好に維持しつつ、後世に伝えていくことが求められています。



写真12 工事見学会の実施状況 (リニューアル前)

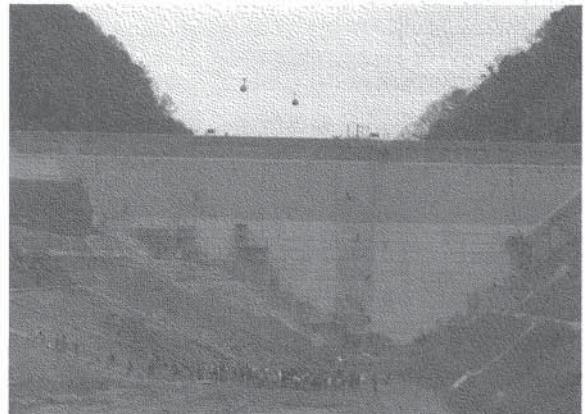


写真13 工事見学会の実施状況 (リニューアル後)



写真14 布引ウォーター

先人が様々な工夫をして建設した土木構造物である日本最古の重力式ダムを、当時の技術や景観を活かしつつ、現代の技術を必要最小限に加えて未来に伝えていくという思想で整備した本工事は、この時代の求めに対する一つの方向性を示すものと考えています。

また、こうしたことを契機に市民に愛される水道づくりにつとめていくことは、大変意義のあることと思います。