

## 神戸布引ダム改修と建設時の工法・材料について\*

### Refurbishment of Kobe Nunobiki Dam - Its original materials and construction methods

中西敬次郎\*\*、中川 広志\*\*

坂下 良一\*\*、松下 眞\*\*\*

By K. NAKANISHI, H. NAKAGAWA,  
R. SAKASHITA and M. MATSUSHITA

#### Abstract

Kobe Water's Nunobiki Dam was completed in 1900 as the first gravity dam in Japan. The original materials and construction methods were known a little according to some documents. From August 2001 Kobe Water launched refurbishment of Nunobiki dam based on research of Dam Committees. The plan includes the attachment of concrete fillet in order to increase stability against an earthquake in case of reservoir full. And more this refurbishment work reveals many facts concerning concrete and cast iron pipes in the 19 century. Authors will explore the construction methods of dam and what Tojiro Sano had done against dam failure.

#### 1. はじめに

神戸市水道の布引五本松堰堤（以下、「布引ダム」という。）は、1900 年（明治 33）完成のわが国初の重力式粗石コンクリートダムとして知られている。このダムの安全性については、ことあるごとに関心が持たれ、神戸市水道局はそのたびに調査をおこなってきた。早くは関東大震災後の 1924 年に物部長穂による耐震性調査（以下、「物部調査」という。）が実施され、それ以降も委員会を設置して検討し、補強工事を実施してきた。このたび、1999 年（平成 11）の第 3 次布引ダム調査委員会（委員長：田中茂神

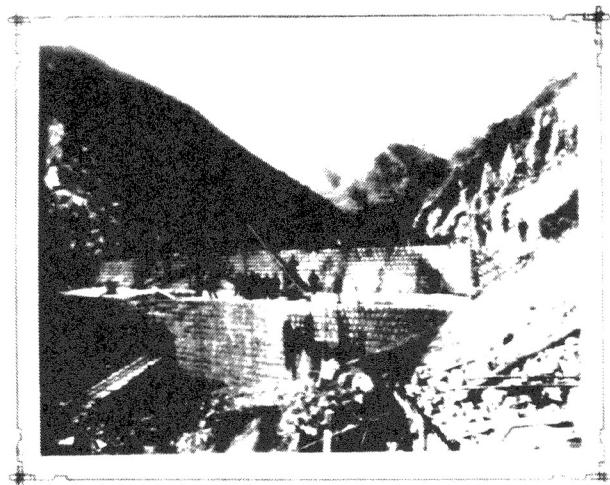
戸大学名誉教授）の検討結果を受けて 2001 年（平成 13）から大規模な補強工事を実施することになった。この工事に伴い堤体上流側の基部が姿を見せることになるため、堤体からのコンクリート採取や鑄鉄管の交換を行い、建設当時の建設材料や工法などについて調査を実施した。

布引ダムの設計については、佐野藤次郎の部下にあたる水野廣之進が佐野の指導を得て工学会誌に「神戸布引水道水源<sup>(1)</sup>」を発表している。一方、建設に伴う細かい施工技術および使用材料については、『神戸水道誌』<sup>(2)</sup>および工学会誌に掲載された佐野の論文<sup>(3)</sup>に一部が記載されている。近年、五十畑は ICE（イギリス土木学会）に眠る佐野の未発表論文と写真<sup>(4)</sup>を紹介し、写真の分析から布引ダムの施工経過の一端を明らかにしている<sup>(5)(6)</sup>。

本論では、まず布引ダムに関する安全性調査の経過について述べ、今回の大規模な補強工事の背景を解説する。次に、文献に記された材料や施工法を拾い出し、改修工事現場から得られた知見と照合することにより当時の施工技術、材料の状況について明らかにすることとしたい。なお、今回の補強工事は古い構造物の再生技術という視点から見ても大変興味深く、その成果を紹介することも重要であるが、これについては別途報告することとしたい。

#### 2. 布引ダムに関する安全性検討の経過

布引ダムの安全性調査は、前述のとおり 1924 年（大正 13）の物部調査に遡る。布引ダムは当初、地震力に対する配慮がなされていなかったこと、堤体からの漏水量が増加してきたこと、過去の洪水時に土砂の流入被害にあい、ダムの安全性について調査委員会を設けることになったものである。その後、「原口委員会」（1940 年、委員長：原口忠次郎内務省神戸土木出張所長）、「米田委員会」（1951



写真－1. 建設当時の布引ダム（1899 年頃）

\* Keyword：神戸水道、佐野藤次郎、布引ダム

\*\* 神戸市水道局技術部工事事務所

(〒652-0004 神戸市兵庫区楠谷町 37-1)

\*\*\* 正会員 工修 神戸市水道局東部センター

(〒658-0081 神戸市東灘区田中町 5 丁目 3-23)

年、委員長：米田正文建設省近畿地方建設局長）から「ダム調査委員会（第1次）」（1978年、委員長：田中茂神戸大学教授）、「第2次ダム調査委員会」（1995～1997年、委員長：田中茂）、「第3次ダム調査委員会」（1999年、委員長：田中茂）に引き継がれてきた。各委員会の概要を表-1に示すとともに検討結果の概略を以下に述べる。

表-1. ダム調査及び委員会等の経過

| 年         | 名 称          | 委員長   | 検討のきっかけ        |
|-----------|--------------|-------|----------------|
| 1924      | 物部調査         | 物部長穂  | 関東大震災          |
| 1940      | 原口委員会        | 原口忠次郎 | 阪神大水害          |
| 1951      | 米田委員会        | 米田正文  | 戦後のダム活用        |
| 1968      | (丹羽委員会)      | 丹羽義次  | グラウト実施に伴う安全性検討 |
| 1978      | ダム調査委員会（第1次） | 田中茂   | 古いダムの安全性       |
| 1995～1997 | 第2次ダム調査委員会   | 田中茂   | 阪神淡路大震災        |
| 1999      | 第3次ダム調査委員会   | 田中茂   | フィレット増築        |

#### (1) 物部調査<sup>(7)</sup>

1923年（大正12）の関東大震災を受けて、布引ダムの安定性について物部長穂博士（震災予防調査会委員）に依頼して耐震性調査を実施した。結論としては、「直ちに補強工事を実施する必要はないが、奔流を海に導くため放水路を拡幅しておく必要がある。」とした。放水路拡幅は、1967年（昭和42）の大水害の後1970年代に実施された。

#### (2) 原口委員会（布引堰堤調査委員協議会）

1938年（昭和13）の阪神大水害によって布引貯水池内に大量の土砂が流入し、貯水池容量が約75万m<sup>3</sup>から約50万m<sup>3</sup>に減少した。この対策を検討するために設置された。結論としては、

- ① 最高水位を低下させ、洪水水量を排除するために越流堤を改造する。
- ② 貯水量復元のためには、上流に新ダムを建設する方が有利。完成後に既存ダムの漏水防止工事を実施。
- ③ ダム上流に砂防工事を施工する。

この答申を受けて、新ダム建設の仮設工事に着手したが、戦時中でもあり、工事は中止となった。なお、砂防工事については、別途、六甲砂防事務所等により実施されている。

#### (3) 米田委員会

戦後、原口委員会の答申である新ダム建設の再開を図ったが、経済的理由その他から困難となり、既存ダムを補強して有効活用することになった。この時の結論としては、

- ① 上流面にセメントガンによる吹き付けをおこなう。
- ② 下流側にロックフィルを施工し、安定度を増す。

であった。①については昭和26年に施工し相当の効果を

あげたが、②については実施されなかった。

#### (4) グラウト工事に伴う検討<sup>(8)</sup>

1967年（昭和42）7月の水害により、ダム堤体には異常がなかったものの大量の土砂流入があり、11体の遺体も埋没したため貯水池を空にする必要が生じた。この機会に漏水防止工事を施工することになり、丹羽義次氏（京都大学教授）の指導により、以下の方針で実施された。

- ① 堤体上流面に近い所にグラウトカーテンを形成する。
- ② 基礎岩盤にもカーテンを形成し、漏水を防止する。
- ③ 堤体にたわみ計を設置して挙動を観測していく。

米田委員会による吹付工事と本グラウト工事の前後3回にわたって漏水調査がおこなわれ、図-2に示すように対策工事の効果が漏水量の減少によって確認されている。

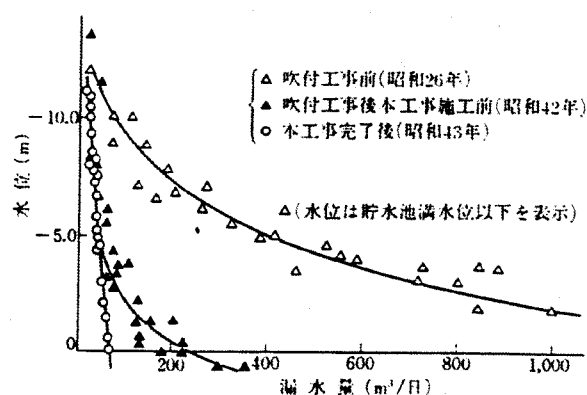


図-1. 対策工事と漏水量の変化 (S26, S42, S43)  
(水道協会雑誌 (S44.8) <sup>(8)</sup>より)

#### (5) ダム調査委員会（第1次）<sup>(9)</sup>

ダムが築造されて相当な年月が経過し、ダムの安全性を調査する必要があるため、鳥原ダム・千苅ダムも含め検討がおこなわれた。布引ダムに関する結論としては、

- ① 応力集中の問題から、追加の堤体グラウトが必要
  - ② 基礎岩盤自体は堅硬
  - ③ 2次元慣用計算から堤踵部に引張応力が発生するが、FEM3次元解析からは直ちに危険とは判定できない
  - ④ 堤体グラウト、漏水防止用の岩盤グラウトを実施し、変位観測設備を堤頂下8mに移設し、観測を続ける。
- この結果を受けて、昭和53年にたわみ計の移設工事が実施された。

#### (6) 第2次ダム調査委員会<sup>(10)</sup>

1995年（平成7）1月の阪神淡路大震災を受け、地震によるダムへの影響を検討するために開催され、次のような結論が得られた。

- ① ダム基礎岩盤は漏水が増加し、かなり損傷を受けた
- ② この地点における地震の最大加速度は150～200gal程度とみられる
- ③ 地震時には水位が5.6m低下していたので転倒・活動・圧壊に対する安全性は満足していた。

- ④ 満水位で $k=0.15$ の地震に対しては堤踵部に引張応力が発生する
- ⑤ 堤体の恒久的補強策としては、堤体上流側にフィレットを増築する案が最適である。

この結果を受け、1996～1997年に阪神淡路大震災の災害復旧工事としてグラウトが実施された。

#### (7) 第3次ダム調査委員会<sup>(11)</sup>

地震時満水位で発生する堤踵部の引張応力を解消するため、第2次ダム調査委員会以最適とされたフィレット増築について、その規模や温度応力の影響などが詳細に検討された。検討内容は次のとおりである。

- ① 安定性を確保されるフィレットの規模
- ② 新設コンクリート増築時の温度応力
- ③ 現堤体とフィレットの一体化
- ④ フィレットの表面処理による景観保全
- ⑤ 管理橋は可能な限り建設当初の部材により再生する

フィレット築造による補強工事を前に、重力式ダムに係構造安定性について、現堤体の安定計算をおこなった結果は次のとおりである。なお条件として、①転倒については作用外力の合力が堤体水平断面の middle-third に作用し、上流端に引張応力が発生しないこと、②滑動については堤体底面のせん断摩擦安全率が4以上であること、③圧壊については堤体内の圧縮・引張・せん断応力が許容値を超えないこと、を照査した。

この結果から、フィレット規模は底面幅 4.5m、高さ 24.7m に決定し、既設堤体から常時満水位までは止水コンクリートを打設することになった。また温度応力については、施工時期と温度抑制策を講じ、さらに目地間隔を小さくすることで所定の安全率を確保する。さらに既設堤体との一体化については、事前に試験ブロックを作成し、引張試験・せん断試験を実施し安全率を確認するとともに、旧堤体下部に打ち継ぎ面のせん断補強をおこない安全を確保した。補強前後における安定計算の結果を表-2に示す。

表-2. 補強前後の安定計算結果（堰堤底面）

※ 上段は補強前、下段( )内は補強後の結果を示す

|                                                                                                                                                                | せん断安全率             | 上流端応力              | 下流端応力                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| 設計洪水位                                                                                                                                                          | 5.99 ○<br>(7.22 ○) | 0.7 ○<br>(17.0 ○)  | 69.9 ○<br>(58.2 ○)       |
| サーチャージ水位                                                                                                                                                       | 5.06 ○<br>(6.01 ○) | -13.2 ×<br>(6.5 ○) | 83.8 ○<br>(68.8 ○)       |
| 常時満水位                                                                                                                                                          | 4.75 ○<br>(5.57 ○) | -15.5 ×<br>(3.4 ○) | 86.6 ○<br>(71.8 ○)       |
| 安定条件                                                                                                                                                           | $n > 4$            | $\sigma_u > 0$     | $\sigma_d < \text{許容応力}$ |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>地震力は<math>k=0.15</math>を用いた</li> <li>過去の強度試験結果から許容圧縮応力を 375tf/m<sup>2</sup>、許容引張応力を 37.5tf/m<sup>2</sup>とした。</li> </ul> |                    |                    |                          |

#### 3. 補強工事の実施

以上のような検討を経て2001年（平成13）8月に布引ダム補強工事が発注された。この工事では併せて堆積土砂の撤去工事および野鳥観察所などの周辺整備工事も実施されることになった。工事概要を表-3に示す。

表-3. 布引ダム補強工事の概要

|      |                                                                                          |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 工事名  | 布引五本松堰堤補強工事及び堆積土砂撤去工事                                                                    |
| 工 期  | 平成13年（2001）8月～17年（2005）3月                                                                |
| 工事内容 | 堤体補強工事（補強コンクリート 3300m <sup>3</sup> ）<br>堆積土砂撤去（20万 m <sup>3</sup> ）<br>周辺整備工事（野鳥観察所、休憩所） |
| 請負業者 | 奥村・三井住友・青木あすなろ特定建設工事<br>共同企業体                                                            |
| 請負金額 | 約 26 億円                                                                                  |

#### 4. 創設時の建設材料について

布引ダム建設工事の使用材料について、過去の文献等の記述と今回確認された事項を、以下、項目別に整理することとする。

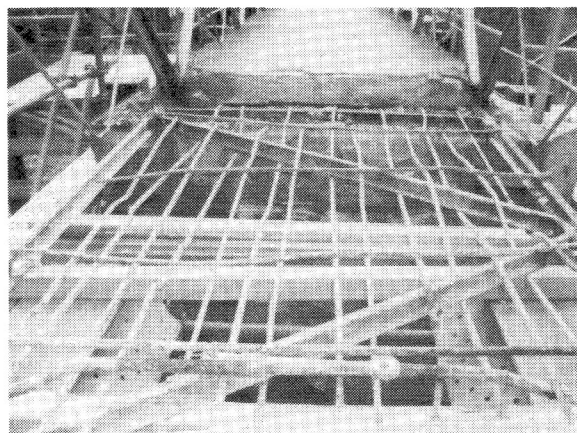


写真-2. レールが使われた既設管理橋

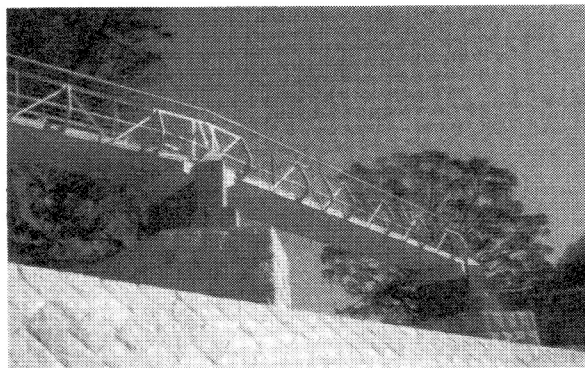


写真-3. レールを使って再生された管理橋

#### (1) セメント輸送のレールと管理橋

大坂セメント、中央セメント、日本セメントの3社から購入。生田川尻に倉庫を設け、軽便鉄道で麓まで運び、さらに人力にて現場に持ち込んだ<sup>(12)</sup>。

鉄道に使われたレールは、管理橋の構造部材として再利用されており、今回も部材を手すり等に再々利用し、さらに現在の安全基準に合わせつつ再生した。

## (2) コンクリート配合

文献<sup>(12)</sup>には5種類の配合が記され、それぞれ使用箇所が異なっている。このような使い分けにより貴重なセメントを有効に利用しようとしていたことがわかる。表-4に使用された配合の一覧表を示す。なお、佐野の教科書と考えられるバルトン(W. K. Burton, 1856-1899)の“The Water Supply of Towns and the Construction of Waterworks<sup>(13)</sup>”(1894年)には、当時最先端であったイギリスのVyrnwy Dam 建設に関し次のような記載がある。「施工の初期には材料として割石の周囲にモルタル(配合1:2)を充填したが、その後の実験によりセメント1に対しあらかじめ砂:碎石=1:2に混合したもの2(すなわち1:2:4)という配合が良好な成績を示したため、施工後半ではこれを採用した」<sup>(13)</sup>。(著者訳)さらに上記の本より6年前の1888年に出版されたE. Wegmannの“The Design and Construction of Masonry Dams<sup>(14)</sup>”にも建設中のVyrnwy Dam に関して、同じコンクリート配合で良好な結果を得たことが記されている。

また、バルトンは、「現在の主材料は粗石とモルタルであるがHong KongのTytam Damにおいて粗石コンクリートの使用が成功しており、今後広がっていくと思われる」とも記している<sup>(13)</sup>。(著者訳)従って、布引ダムのコ

ンクリート配合を決めるにあたり、佐野はVyrnwy Damの成果を活かしつつ新しい流れであるコンクリートの採用に踏み切った、と推測することができる。ただ結果として、布引ダムでは漏水量が多かったため、対策立案のためインド視察をおこない、やはり粗石モルタル構造がよいという結論を得ており、その後に建設された鳥原ダム・千刃ダムでは粗石モルタル構造になっている。

今回、文献のとおり5種類のコンクリート配合が確認された。コンクリートそのものは非常にいい施工がされており、十分な強度が発現していた。基底にある排泥管周囲から、戊号コンクリートが密実で人工碎石を使用していることが確認され、テストハンマーでの試験値は $\sigma=28$  N/mm<sup>2</sup>以上の高強度であった。

## (3) 鉄管材料

ほとんどが外国製であり、鉄管類は三井物産を通じて英国GlasgowのD. Y. Stewart社に、バルブ類は日支テレーン商会を介し米国New YorkのKennedy社、その他補助設備は神戸石田鉄工所に発注された。<sup>(15)</sup>なお、佐野自身は大阪水道創設工事時代に鉄管の製造監督としてD. Y. Stewart社に1年半にわたり派遣されており、神戸水道の鉄管製造については蔵重哲三技師が派遣されている。

今回、Stewart社を示す「D.Y.S.」、「Kennedy」という鋳出しの他、「神戸石田製」という鋳出しも確認された。

表-4. 布引ダムにおけるコンクリートの種類

| 種類 | 配 合<br>セメント:砂:碎石 | 使 用 先         |
|----|------------------|---------------|
| 甲号 | 1:2:4            | 堤体上流側の石積沿い    |
| 乙号 | 1:3:5            | 堤体下部基礎上19尺まで  |
| 丙号 | 1:3:6            | 堤体基礎上19~78尺まで |
| 丁号 | 1:4:8            | 堤体基礎上79尺~堤頂   |
| 戊号 | 1:2:3            | 管の貫通部         |

・ 『東洋諸国ノ石堰堤概況』より著者作成

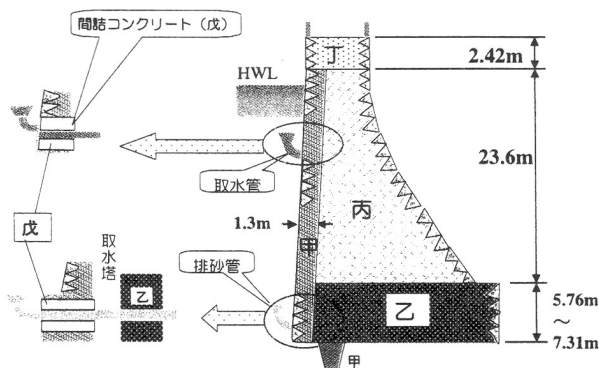


図-2. コンクリートの配合別使用箇所



写真-3. 鉄管の鋳出し（D. Y. Stewart 社）



写真-4. バルブの鋳出し（Kennedy 社）

また、神戸市水道局の「六剣水」マーク（1898 年制定）も鑄込まれていることが確認された。



写真-5. 神戸石田の鑄出し

## 5. 当時の施工について確認された事項

細かい施工技術については、論文等に記載されている事項は少ない。今回、細かい点でダムの止水に関して、さまざまな工夫がされていることが確認された。以下にコンクリート打設、目地部の施工および揚圧力について紹介する<sup>(16)</sup>。

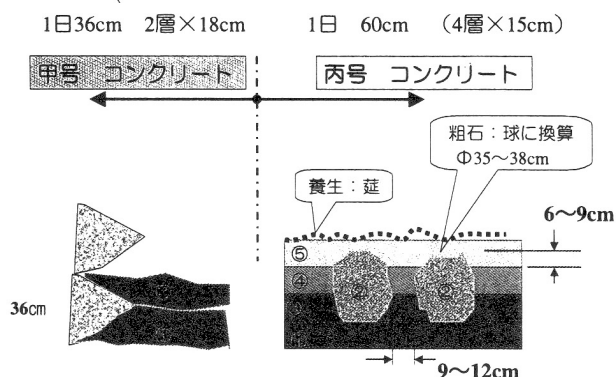


図-3. コンクリートの打設順序



写真-6. 切り出しコンクリートの状況

## (1) コンクリートの打設方法

堰堤下部のコンクリートをチェーンソーで切り出し確認した（写真-6）ところ、本体築造時に型枠代わりに積んだ石積と石積の間のコンクリートは、打設を2回に分けるなどして空隙が生じないようにされていた。（図-3）

## (2) 石積目地の止水

堰堤上流側下部の石積の目地部は特に入念な施工がされている。『神戸水道 70 年史』には、表面から既存の目地材をはぎ取り、再度、接水側から新たに特殊な目地材を充填して漏水を防いでいることが記載<sup>(17)</sup>されており、コアを採取して確認された。（写真-7）これは高水圧を受けるため、特に浸透水を防止に配慮したもので、単に化粧としての目地ではなく、止水目的であったことがわかる。なお、止水材料の材質については現在確認中である。

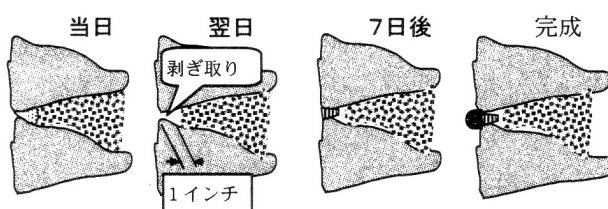


図-4. 確認された石積目地の施工順序

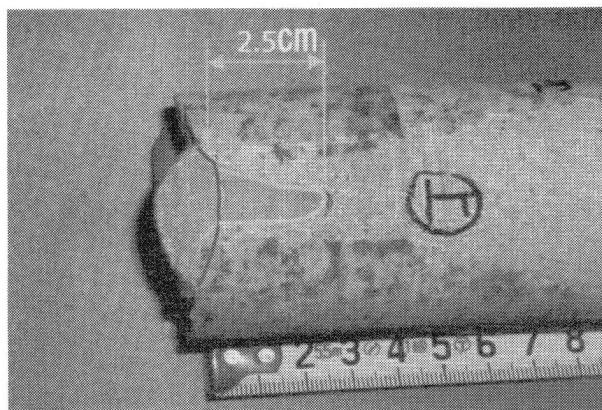


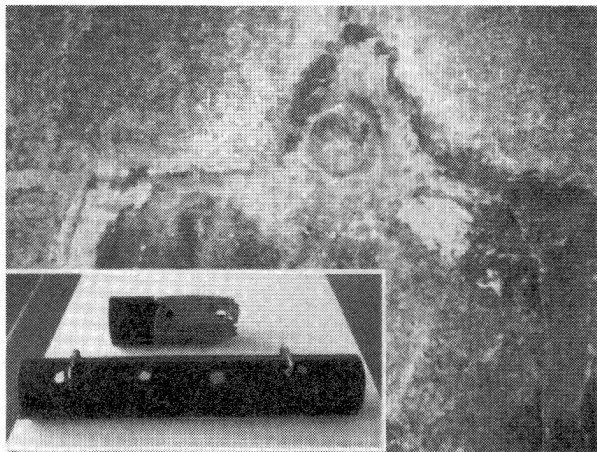
写真-7. コア採取による目地確認

## (3) 揚圧力対策

揚圧力は 1880 年代からダムの安定条件のひとつとして考慮されつつあり、Vyrnwy Dam（1891 年竣工）においても堤体底部に排水管ネットワークを配置し揚圧力削減対策としていた<sup>(14)</sup>。布引ダムでも同様に堤体底部に排水管を設けていたが、1895 年のフランス Bouzey Dam 崩壊において、揚圧力の作用が原因のひとつ<sup>(18)</sup>とされ、佐野は布引ダム本体にも浸透水排除のため 157 本の集水管を入れる<sup>(19)</sup>などの対策を講じた。

今回、堤体上流側は止水に留意してセメント量の多いコンクリートであったこと、下部石積の目地が入念に施工されていたこと、浸透路長確保のためカットオフを設けてあったこと、基礎岩盤付近は丁寧な施工がされ、堅固な岩盤上に本体が施工されていたこと、浸透水排除のための配管

が確認されたこと等であり、揚圧力対策として材料と施工の工夫により対処しようとしたことが確認された。写真－8に堰堤下流側に取付けられた状態と取り出した状態の集水管（多孔管）を示す。



写真－8. 揚圧力対策の集水パイプ

#### 6. おわりに

今回、布引ダムのフィレット増築工事に伴いわが国初の重力式コンクリートダムである布引ダムの施工について、文献に記載された事項が確認されるとともに細かい実際の工夫についても知見を得ることができた。

特にコンクリートの施工については、堤体の部位によって配合を変え、特に管貫通部など高度の止水性が求められる箇所には非常に水密性の高いコンクリートであったことが確認された。また、この部分を水平に切り出すことにより、堰堤基部の止水に配慮したコンクリート施工が明らかになった。これらの工夫は現場施工に関わった技術者のノウハウとして、その後のダム建設にも役立てられていったものと推測することができる。

ダムの安定については、当時 middle-third rule など設計上はほぼ確立されていたが、揚圧力対策については排水管網の設備以外に施工上、浸透水による漏水を防止することが重要であった。今回の調査により、佐野はダムの破壊防止の観点から、まず基礎岩盤の処理を丁寧に行い、堤体の止水を確実なものとするためコンクリートの配合や施工目地の構造など、材料と施工に非常に気を使っていたことが明らかになった。結論として、佐野は布引ダム施工にあたり、細部にまで相当詳細な研究を積んでおり、破壊原因を総合的かつ体系的に排除する工夫がおこなわれていたということがいえる。

今回明らかになった施工技術と主要材料（鑄鉄管・バルブ類とコンクリート）の状況については、明治期のダム築造の記録として大切に保管し後世に伝えていくことにしている。

#### <参考文献>

1. 水野廣之進、「神戸市水道布引水源貯水池堰堤」（工学会誌 206 巻, pp.145－171、1899 年 3 月）
2. 神戸市役所、『神戸水道誌および附図』（1910 年）
3. 佐野藤次郎、「東洋諸国ノ石堰堤概況」（工学会誌 237 巻, pp.4－47、1902 年 1 月）布引については pp.26-47
4. T. Sano, "Kobe Waterworks", (ICE Paper No.3552, 1905, 未定稿)
5. 五十畑弘、「神戸布引ダム、および関連施設」（土木史研究 第 19 号、pp.281-292、1999 年 5 月）
6. 五十畑弘、「神戸布引ダムの建設」（水道協会雑誌 第 785 号、pp.24-36、2000 年 2 月）
7. 物部長穂、『神戸市上水道堰堤耐震性調査書』（神戸市水道局、1924 年 10 月）
8. 山崎博・村尾正信・碓井昭彦、「布引ダム漏水防止工事」（水道協会雑誌、第 419 号、pp.12－19、1969 年 8 月）
9. 神戸市水道局、『布引五本松ダム調査研究会報告書』（1978 年 3 月）
10. 神戸市水道局、『第 2 次布引ダム調査研究会報告書』（1997 年 3 月）
11. 神戸市水道局、『第 3 次布引ダム調査研究会報告書』（2000 年 3 月）
12. 文献 2 の pp.668-669
13. W. K. Burton, "The Water Supply of Towns and the Construction of Waterworks", Crosby Lockwood, London 1898 (2<sup>nd</sup> edition), pp.76-77
14. E. Wegmann, "The Design and Construction of Masonry Dam", John Wiley & Sons, New York, 1889 (2<sup>nd</sup> edition), pp.71-72
15. 文献 2 の pp.672
16. 坂下、中川、中西、「布引五本松堰堤（布引ダム）建設時の材料および施工について」（日本水道協会第 55 回全国水道研究発表会講演集、2004.5）
17. 神戸市水道局、『神戸市水道 70 年史』（1973 年）、pp.127
18. ロバート・ヤンセン（君島博次訳）、「ダムと公共の安全性、世界の重大事故例と教訓」（東海大学出版会、pp.54、1983 年）、pp.138-142
19. 文献 4 の pp.5