

発電所導水路トンネルの通水能力改善 —イビデン広瀬水力発電所 第3隧道改修—

大本晋士郎* 森 康雄* 小澤 里佳**

イビデン広瀬水力発電所は1925年に共用開始し、約8000kWの出力を有する歴史ある発電所である。現在約100年経過しており、隧道内のインバートの洗掘により通水能力が低下していると考えられた。そこで、隧道（導水路トンネル）の通水能力改善のため、現況通水能力の確認、対策工の計画実施、改善効果の確認を行った。通水能力改善の対策として、インバートを小型自由断面掘削機を用いて20cm下げる工事を行った。その結果、隧道はほぼ満管から8割水深で流れる通水能力を確保し、安全な隧道とすることが出来た。歴史ある隧道の通水能力改善に関して、事前評価～改善計画と実施～事後評価を行った、貴重な事例であるのでここに紹介する。

キーワード：トンネル、通水能、インバート、不等流計算、自由断面掘削機

1. 目的

イビデン広瀬水力発電所は1925年に共用開始し、約8000kWの出力を有する歴史ある発電所である。現在約100年が経過しており、隧道内の劣化が見られた。

発電所の隧道で劣化が進むと以下の2点が問題となる。

- ①隧道の構造的安定性
- ②通水能力の低下

隧道の補修・改修では①を主目的にする場合が多いが、今回はインバートの洗掘が見られ、通水能力の低下も問題となっていた。

詳しくは後ほど示すが、通水能力の低下が隧道内に満管状態を引き起こし、通常、自由水面を有した状態で流れなければならない隧道で、内圧が掛かっている状態になり、隧道の構造的安定性に影響を及ぼす可能性のある状況となっていた。

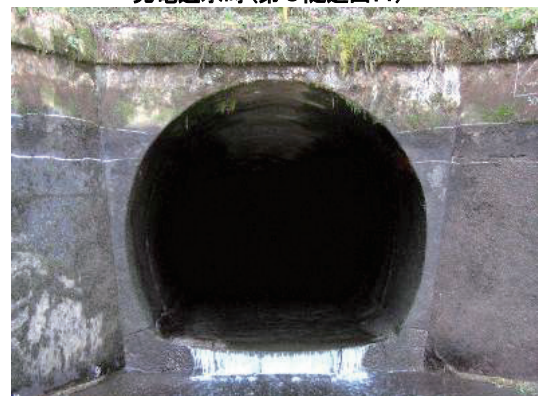


Photo. 1 広瀬水力発電所

そこで、隧道の通水能力改善のため、現況通水能力の確認、対策工の計画実施、改善効果の確認を行ったので、ここに報告する。



発電通水時(第3隧道出口)



点検(抜水)時

Photo. 2 隧道出口の状況

* 土木事業本部 インフラ再生事業部
** 名古屋支店 土木部

Photo. 1 に広瀬水力発電所の鉄管路～発電機建屋の全景を示す。また Photo. 2 に隧道の通水状態と点検（抜水）状態を示す。

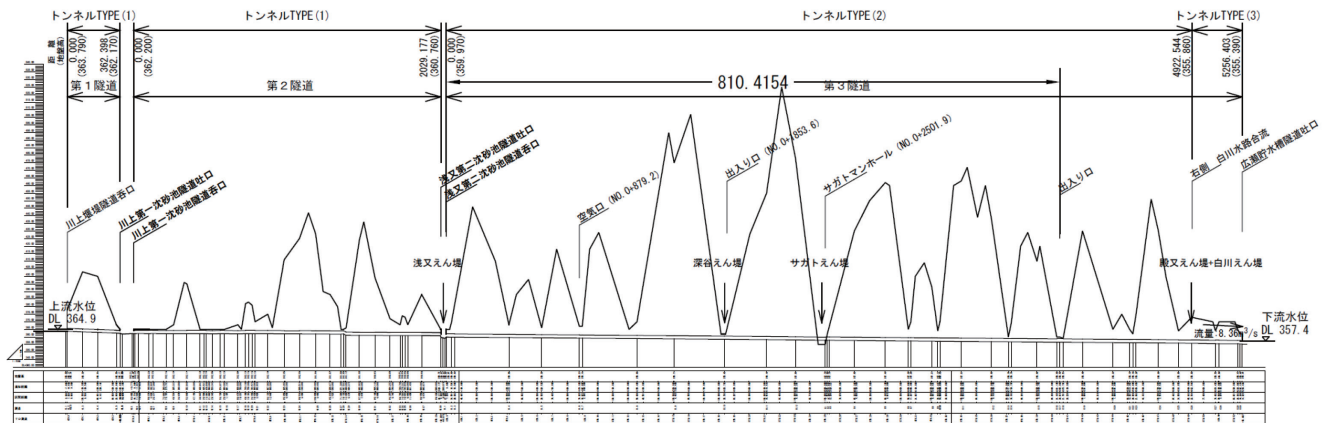


Fig. 1 トンネル縦断面図

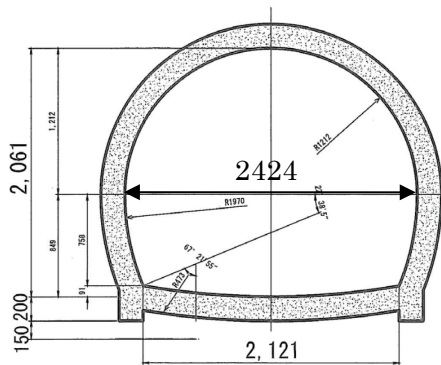


Fig. 2 標準断面図



Photo. 3 インバートの洗掘状況

Photo. 3 にインバートの洗掘状況を示すが、10～15cmの洗掘が主に第3 隧道の各所で見られた。

2. 現況通水能力の調査

2. 1 通水能力の現況確認

隧道は第1 隧道(延長 348m), 第2 隧道(延長 2,030m), 第3 隧道(延長 5,256m)から成る。Fig. 1 に隧道の縦断面図を、Fig. 2 に隧道の標準断面を示す。

隧道の通水能力の現況確認のため、一定流量時の水位計測を実施した(Photo. 4～7)。

第3 隧道は溪流取水を行っているので、これを遮断し、発電を制御して一定流量状態にし、各隧道出入口で流



Photo. 4 流量測定



Photo. 5 水位測定



Photo. 6 流速計



Photo. 7 データ収集状況

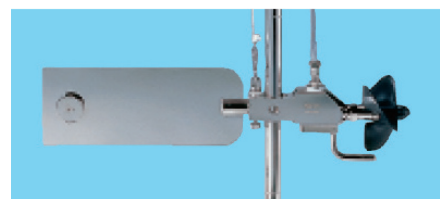


Photo. 8 プロペラ式流速計

速計にて、横断方向に3 測線×深さ方向5 点=計 15 点の流速分布から平均流速を求め、各側線の断面積を乗じて、流量を計測した。

用いた流速計はプロペラ式流速計で、Photo. 8 に示す。また Fig. 3 に流速計測ポイントのイメージを示す。

Fig. 4 に流速分布例を示す。中央付近の流速がやや大きい凸型の分布である事が分かる。

流量測定は第1 隧道の出口と、発電所最下流の放水口で実施した。測定の結果、流量は 5.40m³/s であった。

このとき同時に隧道出入口、点検口等、水位を計測可能なポイントで水位計測を実施した。

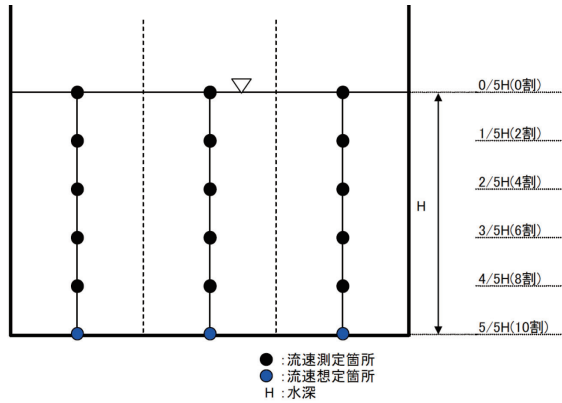


Fig. 3 流速計測ポイント解説図

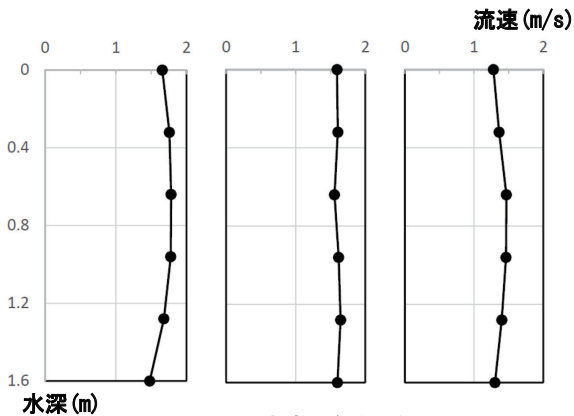


Fig. 4 流速分布実測例

流量計測後、発電停止・隧道内の水抜きを行い、断面計測を行った。断面計測は Fig. 5 に示すように、インバートの標高、幅、SL 幅、内空高さ、喫水線（参考）を対象とし、100m 毎に計測した。

2. 2 不等流計算による通水能力の現況評価

断面計測の値を用いて、逐次計算法により 5.40m³/s 時の不等流の計算を行った。

隧道内の水位は先ほど述べたように流速計測と同時に、隧道出入口、点検口等で水位を測ったものである。隧道内のコンクリートの状態・インバートの状態を勘案し、粗度係数を調整し、計算水位が計測水位と一致するように、シミュレートした。シミュレートの結果粗度係数は側壁の粗度は 0.013 とし、インバートの状態が良い箇所は

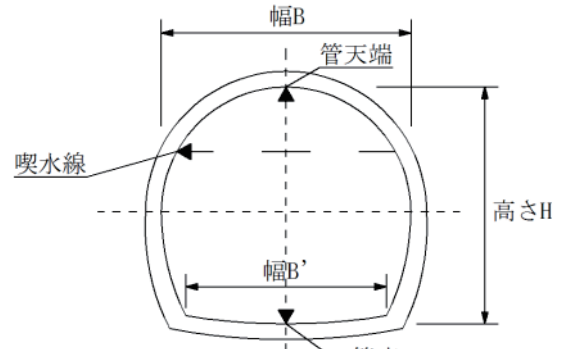


Fig. 5 断面計測位置解説図

0.011 程度、インバートの状態が良くない箇所では 0.015 程度とし、合成粗度で計算すると精度良くシミュレートできた。

距離が最も長く、通水能力が低下していた第3隧道について水位の計算結果を Fig. 6 に示す。

▲は実測水位で、破線は計算水位を表す。良く一致していることが分かる。

粗度係数を確定したので、これを用いて、許可水量（溪流取水を含め 8.36m³/s）に対する不等流計算を実施して、通水能力を評価した。おなじく Fig. 6 に許可水量時の水位計算結果を太実線で示す。水深比は平均 90% を超え、特に隧道入口付近で満管となっていることが分かる。

隧道に内圧が作用しており、構造的に安全でないことが判明した。

3. 対策工の検討と実施

3. 1 対策工の検討

Fig. 6 に示したように、第3隧道で通水能力の低下が判明したので、通水能力向上の対策工を検討した。対策工案と通水能力の改善を Table1 に示す。インバートの粗度を改善するため、鋼板巻き、プレキャスト板の設置を検討したが、現況断面に部材を追加することになるので、粗度係数が改善されるものの、断面が若干であるが減少

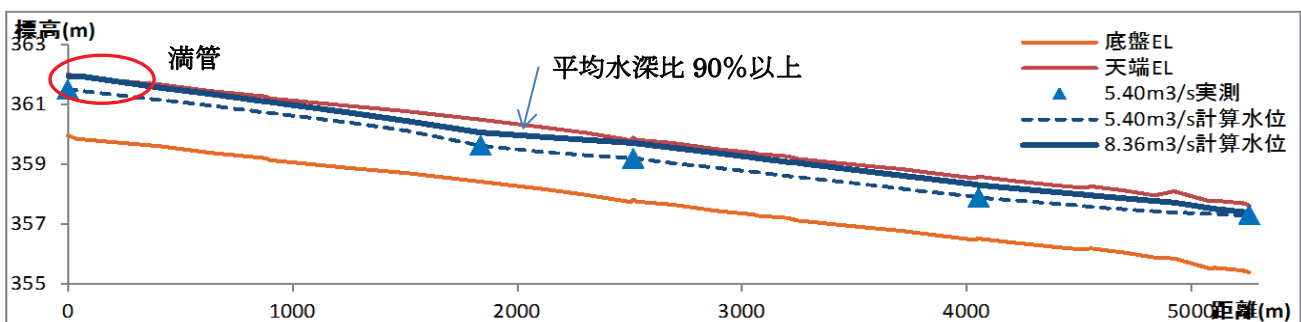


Fig. 6 現況の通水能力 (改善前)

Table 1 対策工と通水能力

現況および対策工法	第3隧道での最大水深比
現況	100%以上×
鋼板内巻工法(1) ・インバート掘削なし ・インバートに鋼板敷設	100%以上×
鋼板内巻工法(2) ・インバート掘削なし ・インバート・側壁に鋼板敷設	100%以上×
プレキャスト板設置(1) ・インバート掘削なし ・インバートにPC板設置	100%以上×
プレキャスト板設置(2) ・インバート掘削なし ・インバート・側壁にPC板設置	100%以上×
インバート掘削案	92.1% ○ (平均 83%)

することとなり、結果的に相殺され、通水能力を改善することが出来ない。

通水能力を改善できるのは、インバートを掘削し、通水断面を拡幅することであった。検討結果に基づきインバートを掘削し約20cm下げる対策を行うこととした¹⁾。

通水能力の改善効果は、最大水深比は92.1%、平均水深比は83%と見込まれた。

改修は既に鋼板巻きで補強済みの区間もあるため、隧道延長5,256mのうち、距離程800~4900m区間の4,100mを施工した。

3.2 対策工の実施

Fig.7に改修後標準断面を示す。インバートを掘削して下げるためには、以下の施工上の課題があり、各種の対策を行った。

①インバート掘削時の構造安定性確保：

無対策でインバートを掘削すると下端が地山圧力に対し抵抗を失い、断面が崩壊する可能性がある。

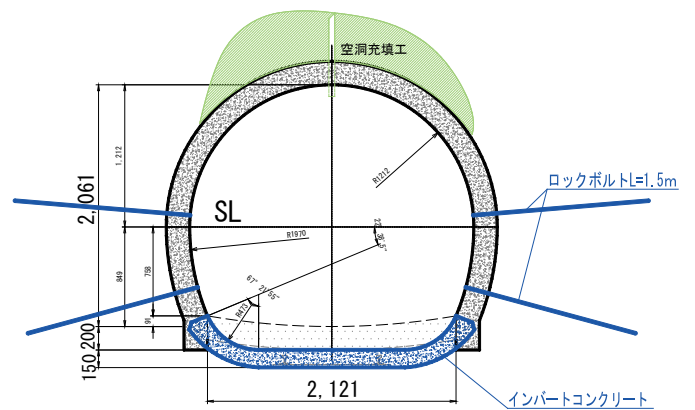


Fig.7 インバート改修計画図

対策として、SLおよび下端にロックボルトを打設してから掘削を行った。Photo.9にロックボルト打設状況を示す

②小断面(隧道断面積約4m²)での掘削：

小型自由断面掘削機(ミゼットマイナー)を導入し、0.04m³のミニブレーカーを併用することで作業の効率化を図った。Photo.10にミゼットマイナーによる掘削状況を示す。

③短期間での施工：

発電停止期間が長期に及ぶと、発電利益の逸失に繋がるため渇水期6ヶ月間(10~3月)という短期間で作業を完了させた。Table2に実施工程を示す。発電停止期間6ヶ月に対し、仮設備の準備撤去期間も含め9ヶ月間で改修工事を行った

Fig.8に施工フローを示す。条件に適した機械の選定と機能的な配置により短期間で安全・確実に作業を行った。

ズリ搬出とコンクリート搬入は沈砂池~坑内はトロッコで行った。沈砂池~発電所ヤードは高低差120mあり、搬入路がないため、モノレールで運搬を行った。

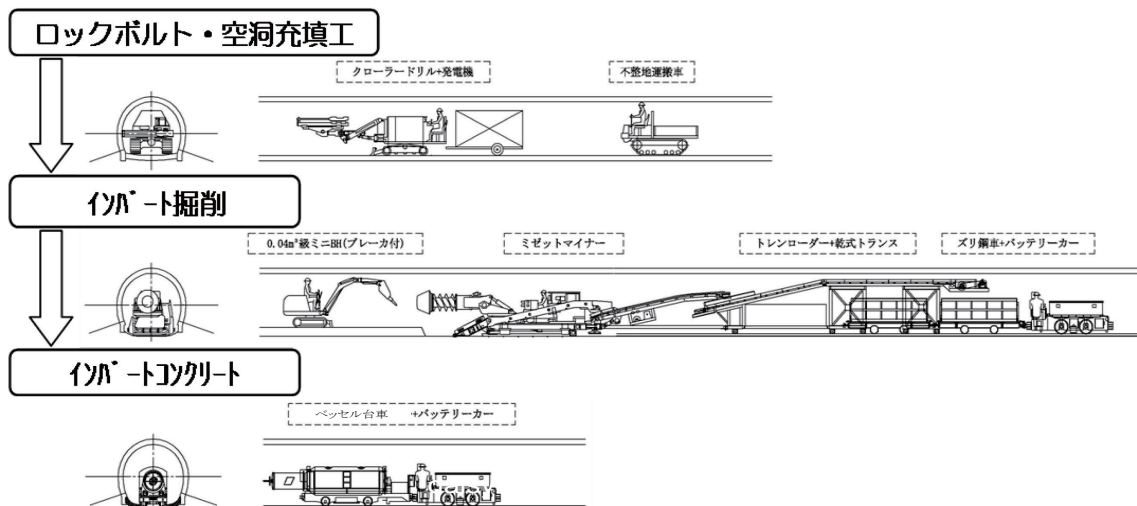


Fig.8 施工フロー図

Table 2 実施工程表

主要工種	数量	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	
発電停止期間				■							
仮設備	1式	■								■	
ロックボルト工	16,400本		■		■						
空洞充填工	1,000m ³			■							
インバート掘削工	4,100m		■								
インバートコンクリート工	4,100m		■								



Photo. 9 ロックボルト打設



Photo. 10 掘削状況



Photo. 11 トロッコ (沈砂池)



Photo. 12 モノレール



Photo. 13 インバート改修完了

Photo. 11 にトロッコを、Photo. 12 にモノレールを示す。
また Photo. 13 にインバート改修完了の状況を示す。

4. 通水能力改善の効果

2章と同様の手法で、通水能力の改善効果の確認を行った。Fig.9 に結果を示す。

底盤について、改修前を細実線で改修後を実線で示す。
すでに補強が入っていたため下げられなかった区間を

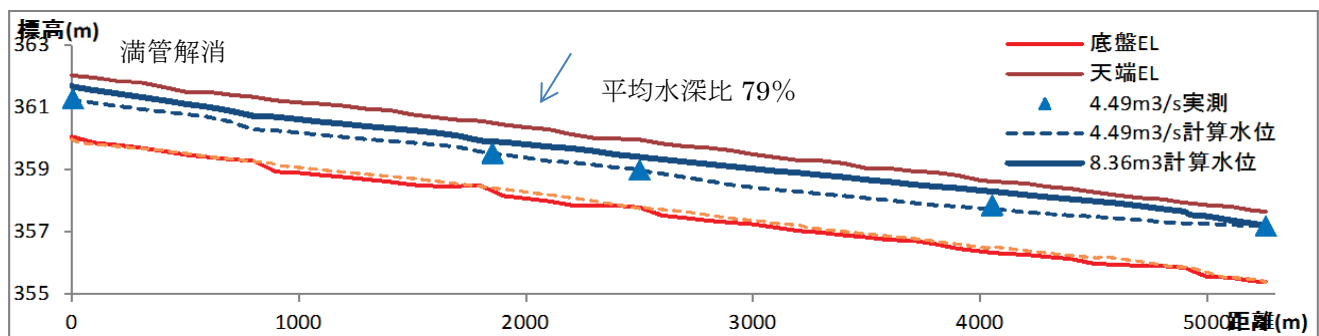


Fig.9 改善後の通水能力

除き、インバート掘削が計画通り行われていることが分かる。

実測流量は $4.49\text{m}^3/\text{s}$ で、その際の水位を▲で示す。

また改修した個所はインバートの粗度係数を 0.012 として水位計算を行った結果を点線で示す。

良く一致していることが分かる。

また、発電流量(溪流取水を含め流量 $8.36\text{m}^3/\text{s}$) に対する計算水位を太実線で示す。水深比の平均が 79% となり、Table1 に示した、計画(平均 83%) 通りの状態にほぼなっており、満管状態が解消し、通水能力が改善し、安全に流下する隧道となった。

謝辞

導水路トンネルの調査・設計・施工にあたりまして、水力発電所の管理者であり、発注者であるイビデン(株)ならびにイビデンエンジニアリング(株)の関係者の皆様にご指導いただき誠にありがとうございました。感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小林高幸, 他: 導水路トンネル改修工事における通水断面の拡大-イビデン広瀬発電所広瀬第3 隧道改修工事施工報告- 熊谷組技術研究報告 第71号/2012.12

Improvement of water flow capacity of the headrace tunnel of hydraulic power plant

Shinjiro OMOTO, Yasuo MORI and Rika OZAWA

Abstract

The service of Ibiden Hirose hydropower plant was started in 1925. The water flow capacity of headrace tunnel has been reduced due to scouring of the invert in the tunnel. Therefore, in order to improve the water flow capability of the headrace tunnel, we confirmed the current water flow capacity, planned the countermeasures, and confirmed the improvement effect as well. As a countermeasure for improving water flow capacity, the construction was carried out to dig the invert by 20 cm using the road header (small face excavator).

As a result, the tunnel is able to secure a water flow capability from 80% in depth to almost full capacity.

Keywords: Headrace tunnel, Water flow capacity, Invert, Non-uniform flow calculation, Road header (small face excavator)
