

# 水力発電所導水路トンネル改修 —イビデン東横山発電所—

金子伸和\* 柳浩二\* 小澤里佳\*\* 雨森登\*\*\* 大本晋士郎\*\*\*\* 森康雄\*\*\*\*

イビデン株式会社では、自社で保有する東横山発電所（12,100kW、水力発電）をFIT（固定価格買取制度）に適用すべく、2015年に施設を更新した。1921年運用開始以降、95年経過している。当社では、導水路トンネル（幅3.33m、高さ3.18m、延長7.23km）の改修に向けて、調査から設計・施工まで一貫して実施した。

導水路トンネルの課題は、①取水量の最大化、②トンネル全線についての構造的な安定化を図ることであった。取水量の最大化では、現況のシミュレーションと対策の効果について不等流計算を行い検討した。洗掘により劣化したインバートは、表面をはつり高強度コンクリートを打設し粗度を改善した。覆工厚さが薄く、覆工背面に空洞がある箇所には可塑性注入材を注入しトンネルの安定性を向上させた。

キーワード：導水路トンネル、インバート改修、空洞注入、不等流計算

## 1. はじめに

東横山発電所は1921年6月運用開始以降、95年経過している。既往の資料から判断すると、導水路トンネルではアーチ部の覆工崩落が繰り返されていたようで、鋼板が貼り付けられている箇所が数多くあり、地表面まで影響を及ぼしたこともあるようである。また、地圧の作用に伴う覆工の変状箇所もあり、支保工（レール支保工、鋼板）の設置やアンカーボルトの打設などで対策してきた。最近では、2006年に集中的に改修工事が実施され、トンネル全線にわたって補修工事を行ったが、補強工事は劣化や変状が著しい箇所だけを対象に実施した。水路橋での漏水対策としてシート内巻きが行われたが、剥がれや、シート継目の接着不良により、対策の効果が十分には発揮されていないようであった。

当社は、この時、放水庭と水槽の改修工事を行っている。それ以降、川上発電所、広瀬発電所の導水路トンネルの改修にあたり、継続的に調査から設計・施工まで一貫して関わってきた。

ここでは、東横山発電所（水力発電）をFIT（固定価格買取制度）に適用すべく更新計画された発電所施設のうち導水路トンネルの改修（調査、設計、施工）に携わったので、その内容を報告する。

## 2. 東横山発電所の概要

*	名古屋支店	東横山作業所
**	名古屋支店	土木事業部土木部
***	名古屋支店	岐阜営業所
****	土木事業本部	インフラ再生事業部

イビデン（株）は岐阜県揖斐郡揖斐川町に揖斐川流域に3箇所の水力発電所を保有している。上流から川上発電所、広瀬発電所、東横山発電所である。

概要をTable 1に示す。

Table 1 イビデン保有の水力発電所

	川上発電所	広瀬発電所	東横山発電所
運用開始	1935年12月	1925年5月	1921年6月
発電形式	ダム水路式	水路式	水路式
発電方式	調整池式	流込み式	流込み式
出力	4,000kW	8,000kW	12,100kW
最大使用水量	4.7m <sup>3</sup> /s	8.36m <sup>3</sup> /s	16.7m <sup>3</sup> /s

場 所：岐阜県揖斐郡揖斐川町東横山

主要施設：

- ・導水路トンネル  
馬蹄形、幅3.333m、高さ3.183m、断面積8.908m<sup>2</sup>
- ・沈砂池（第一、第二）、水槽、放水庭
- ・水圧鉄管（内径1.5m、4条、延長180m、有効落差95.6m）
- ・発電所建屋（壁：レンガ造、屋根：RC造、水車4基）

東横山発電所の導水路トンネルの概要をTable 2とFig.1に示す。

Table 2 導水路トンネルの延長と勾配

	延長 (m)	勾配 (%)
第一隧道	318.762	1.594
第二隧道	972.322	0.758
第三隧道	7,233.22	0.664

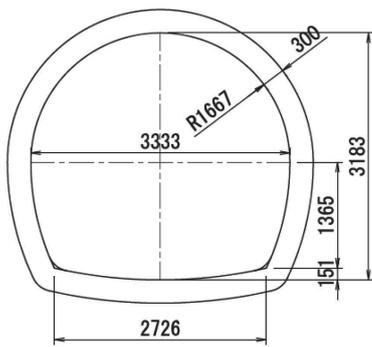


Fig. 1 導水路トンネルの標準断面図

### 3. 全体計画

今般は、東横山発電所の FIT 適用のため、発電所施設の改修の一環として導水路トンネルの課題である①取水量の最大化 (16.7m<sup>3</sup>/s)、②トンネル全線についての構造的な安定化を図るために、調査、解析、対策工の検討を行い、2015年に改修工事を行った。

導水路トンネル改修の全体計画を Table 3 に示す。

Table 3 導水路トンネル改修 全体計画

工種	2013年度		2014年度		2015年度	
	4月	12月	4月	12月	4月	12月
調査・析解	■					
対策工検討(概略)		■				
追加調査			▼	▼		
対策工検討(詳細)				■	■	
河川協議				▼		
改修工事					■	■

### 4. 導水路トンネルの調査

#### 4. 1 調査概要

前述 2 つの課題を解決すべく対策工を検討するにあたり、2013年11月に Table 4 に示す項目について調査を行った。以下に調査結果を示す。

Table 4 調査項目

	仕様	数量	備考
水準測量	レベル測量	8,524m	@100m
内空断面測量	概略：レーザー距離計、リザンボール	8,524m	@20m、3箇所/断面
	詳細：3Dレーザースキャナー	580m	第三隧道
目視調査	目視調査(覆工・インバート)	8,524m	@20m
削孔調査	コアボーリング・圧縮強度試験	6ヶ所	
覆工調査	電磁波レーダー	8,524m	覆工厚さ・空洞深さ
水位調査	坑内：喫水線観測	8,524m	
	坑外：水位調査	10ヶ所	

#### 4. 2 調査結果

##### (1) 内空断面

概略測量としてスケールメジャー、スタッフ等によりトンネルの内空高さ、幅(スプリングライン、インバート)を20mピッチで測定した。測定結果を Table 5 に示す。

す。設計断面積は 8.908m<sup>2</sup>である。

第一隧道は、数年前にインバートの増打ちを行っているためおよそ 0.6m<sup>2</sup>小さい。第三隧道の TD1,940~2,600m において平均より断面の小さな区間が連続していたが、第一~第三隧道全線にわたり断面積に大きなバラツキは見られなかった。

Table 5 トンネル断面積(単位:m<sup>2</sup>)

	平均値	最小値	最大値
第一隧道	9.14	8.62	9.85
第二隧道	9.72	9.17	10.15
第三隧道	9.75	10.36	10.36

##### (2) インバート

###### ① 第一隧道

全線のインバートを増打ちしていることもあり、部分的に洗掘されている程度で、表面の凹凸はほとんどなかった。

###### ② 第二隧道

全体的にインバートの凹凸は少ないが洗掘されていた。特に、終点付近約 200m にわたっては所々で大きな洗掘が見られた。

###### ③ 第三隧道

全線にわたってインバートが洗掘されており、隧道中間付近(TD2,900m~TD3,800m)では凹凸が著しかった。

##### (3) 覆工

第三隧道の TD1,500 以降において、18 箇所アーチ部に鋼板が設置されており、TD2,003~2,060 の区間で断続的にレール支保工で補強されていた。

レール支保工による補強区間は 3D レーザースキャナーで断面形状を詳細に調査した。この区間は、地山の偏圧により断面形状が偏平していたが、既に帯鋼板+ロックボルト、裏込め注入により補強が行われており、現時点では変状の進展は見られなかった。

また、運用上の関係で部分的に満管となる区間があり、覆工厚さが薄い箇所では覆工が部分的に崩落していた。このような箇所については鋼板を表面に設置して覆工崩落の拡大を防止していた。

##### (4) 覆工厚さと空洞深さ

電磁波レーダー(周波数 900MHz)により、第一隧道~第三隧道(全長 8,524m)の覆工天端中央 1 測線について覆工厚さと空洞深さを調査した。結果を Table 6 に示す。

Table 6 覆工厚さと空洞深さ

場所		第一隧道	第二隧道	第三隧道
範囲(距離程)		TD10.5~318	TD2~972	TD2~7,233
覆工厚さ	平均値	15.2cm	22.8cm	14.0cm
	最小値	9.0cm	10.0cm	5.0cm
空洞深さ	平均値	22.9cm	19.1cm	15.9cm
	最大値	41.0cm	36.0cm	46.0cm

(5) コンクリートの圧縮強度

電磁波レーダーのキャリブレーションのために覆工アーチ部の天端を6ヶ所(第二, 第三隧道の起点・終点付近, 矢中谷水路橋付近2ヶ所)をコンクリートコアボーリングマシンで削孔し覆工厚さ, 空洞深さを実測した。

採取されたコンクリートコアの圧縮強度をTable 7に示す。

10供試体で圧縮強度試験を行い, 最大値は51.09 N/mm<sup>2</sup>, 最小値は15.75 N/mm<sup>2</sup>, 平均値は31.8 N/mm<sup>2</sup>であった。設計基準強度が不明であったが, 平均値から判断すると覆工コンクリートとしては十分な強度を有している。

Table 7 コンクリートの圧縮強度

削孔No	隧道	削孔位置(距離)	覆工厚さ(cm)	空洞深さ(cm)	背面地山状況	構造	コアの圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )
1	第二隧道	TD46	34	0	土砂	トンネル	50.76
							51.09
2	第二隧道	TD922	46	0		第4有蓋渠	24.49
							15.75
3	第三隧道	TD70	44	0	岩砕(土砂)	第5有蓋渠	24.44
							25.08
4	第三隧道	TD2.400	8	0	岩	トンネル	23.57
5	第三隧道	TD2.520	14.5	32.5		トンネル	31.19
6	第三隧道	TD7.170	31	0		トンネル	30.47
							40.94

5. 改修設計

前述の通り, 導水路トンネルの改修の目的は①取水量の最大化, ②トンネル全線についての構造的な安定化を図ることである。

5. 1 対策工の検討

5. 1. 1 取水量の最大化

設計取水量を確保するための方策としては, ①断面積を大きくする, ②粗度係数を小さくして流速を大きくするかのいずれかである。断面積を大きくする対策は3年前に施工した広瀬隧道において小型のロードヘッダーでインバートを30cm盤下げた実績があるが, 通常の導水路トンネルでの断面幅は極めて稀である。一方, 粗度係数についてはレジンパネルや鋼板を覆工表面に設置, 張り付けることにより粗度係数の低下を図っている例が多く見られる。

本導水路トンネルでは, 中間の溪流取水口から大雨の際に大量の玉石, 土砂, 砂利が流入するようで, インバートが洗掘されてコンクリートがなくなっている箇所も見られる。側壁やアーチ部と比較するとインバートの凹凸が著しいためインバートの粗度係数を改善することにより設計流量を確保することとした。

インバートの表面粗度改善対策の比較をTable 8に示す。ここでは, 経済性, 施工性を考慮してJIS 配合高強度コンクリート(36-12-25N)にて補修することとした。

第一隧道は, 前述の通り過去の補修工事にて全線のインバートを増し打ちしているため, 今回工事では施工対象外とした。

第二隧道は, 大きな洗掘が見られる下流部約300mは全面補修を行い, 上流部は洗掘されている箇所のみ部分補修とした。

Table 8 インバート表面粗度改善対策

工 法	現場打ち	張付け工法			
概 要	耐摩耗性に優れたコンクリートを打設する。	耐摩耗性に優れた板をインバート上に設置、固定して隙間にモルタルを充填する。			
材 料	高強度コンクリート 通常のコンクリートプラントで調達できる配合で強度が最も大きなコンクリートを打設する。	ダクトル板 ダクトルとは、セメント、珪砂、反応性微粉末、鋼繊維、減水剤を使用した超高強度繊維補強コンクリートである。 圧縮強度は210N/mm <sup>2</sup> 厚さ2~3cm	レジンコンクリート板 結合材として液状レジン(樹脂)のみを使用して骨材を結合させたモルタル製の板である。 レジンとしては不飽和ポリエステルやアクリル樹脂などがある。厚さは1cm。	鋼板 鋼板(SS400等)を既設構造物表面にアンカー固定する工法である。 厚さ: 6~10mm	弾性板 衝撃を緩和するような材料(合成ゴム・合成樹脂)をアンカーボルト等で既設構造物表面に固定する。 厚さ: 20~50mm 大きさ: □0.5~2m
施工性	JISコンクリートで対応が可能であるため材料の調達は容易である。プラントからの運搬、坑内運搬によるスランプロス、材料分離への対応が必要。	パネル1枚当りの寸法(重量)は施工方法をもとに決定する。 高さ調整用のボルトと固定用のアンカーボルトでレベル調整して固定する。 耐摩耗板の製造に期間が必要となる。			
	◎	○	○	○	△
耐摩耗性	現状の構造物より耐摩耗性は優れているが、他工法よりは劣る。	普通コンクリート(36N/mm <sup>2</sup> )の1/8、高強度コンクリート(60N/mm <sup>2</sup> )の1/2~1/3程度である。	掃流式磨耗試験では普通コンクリートに比べ1/2から2/3磨耗深さが小さくなる。	磨耗量はコンクリートに比べ1/10以下に抑えることができる。	耐摩量は鋼板と比較して数分の一~数十分の一とされる。
	△	○	○	◎	◎
経済性	1	1.6	1.6	1.6	2.2
評価	◎	○	○	○	△

第三隧道は、全線にわたり洗掘が見られるため、全線を全面補修とした。ただし、全線をコンクリートで補修した場合の水理計算によると、下流部 TD5, 500m 付近以降で水深比が高くなるため、TD5, 500m 以降はインバートを200mm 掘削して 100mm 打設することで、トンネル高さを100mm 拡幅することとした。

また、コンクリートの厚さが 100mm であるため、ひび割れに起因するインバートコンクリートの細分化や剥離を防止することを目的として、Fig. 2 に示すようにインバートコンクリート中に溶接金網（100×100mm）を設置した。さらに、既設コンクリートと新規コンクリートとの一体性を持たせるため、溶接金網は鉄筋（D10）にて既設コンクリートに固定した。

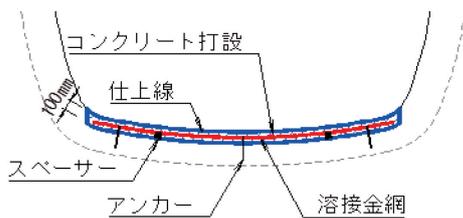


Fig. 2 インバート補修概要図

5. 1. 2 トンネルの構造的な安定化

運用開始以降の大きな変状としては、土かぶりの小さい箇所では崩落があり部分的に支保工、ロックボルト、裏込め注入等により補強を行っている。それ以外では、天端の覆工が幅 2m 程度で部分的に崩落した箇所が数多く（19 箇所、総延長 253m）見られ、暫定的に鋼板を設置している。それ以外の箇所は、覆工が薄い箇所や空洞深さが大きい箇所も見られるが、経年 95 年で覆工が大きく

変状している所は見られない。すなわち、地山は健全で、安定化しており、現時点では覆工を本格的に補強する必要はないと判断し、過去に覆工が崩落し鋼板を設置してある区間を対象に覆工背面の空洞充填を行うこととした。施工範囲を Table 9 に示す。

Table 9 空洞注入工

範囲	注入量 (m <sup>3</sup> )
TD1,300m～TD1,700m	414
TD1,900m～TD2,000m	90
TD2,400m～TD2,600m	240
TD3,100m～TD3,400m	504
TD3,900m～TD4,000m	174
TD4,800m～TD4,900m	222
計	1,644

注入プラントは第三隧道の上流側坑口と、藤波谷（TD3, 995m）の 2 箇所に限られていたため、坑内を長距離圧送できる可塑性注入材（AZ グラウト、熊谷組製）を採用した。ただし、TD6, 250～TD6, 350m は土被りが薄く、民家が近接しており、沢水を農業用水として利用しているため、発泡ウレタンにて充填を行うこととした。

可塑性注入材と発泡ウレタンの特性を Table 10 に示す。

5. 2 水理検討

導水路トンネル改修の目的である取水量の最大化について、最大使用水量 16.7m<sup>3</sup>/s に対し、改修前には隧道通水能は、内部の劣化により 15.7m<sup>3</sup>/s と最大使用水量の 94% 程度しか取水できない状態であり、発電の非効率化の原因となっていた。

Table 10 空洞注入材料

材 料		可塑性材料	ウレタン樹脂	
概 要		現地に材料製造プラントを設置して、セメント、砂、ベントナイト、フライアッシュ、水、混和剤（増粘剤）等を攪拌混合して材料を製造する。材料は生コン車で運搬するか配管で圧送する。	簡易プラントを現場近傍まで運搬し、2種類の薬液を混合し空洞に注入する。10秒程度で発泡が開始し、1分で発泡が終了し、硬質発泡ウレタンフォームを形成する。	
特 徴		水ガラスなどの薬剤を使用しないで可塑性をもたせたセメント系材料である。他のセメント系注入剤と比べ、湧水に対して逸散抵抗に優れる。	一般的に、発泡ウレタンが使用される。他のセメント系注入材と比べ湧水に対して逸散抵抗に優れる。水質汚染の影響について注意が必要である。	
品 質	強 度	1.5N/mm <sup>2</sup> 以上	0.2～1N/mm <sup>2</sup> 程度	
	粘 性	可塑性	液体 (ポリイソシアネート成分とポリオール成分)	
	水中分離抵抗性	水中分離抵抗性が高いため水に溶出せず、水の希釈を受けにくい。	ゲルタイムを調整することにより水の影響を受けにくくすることが可能。	
	漏出性	厚さ35cmの構造物で、幅5mmのひび割れから漏出ししない	ひび割れやジャンカ部から漏出することはない。	
		比重	1.1～1.5	0.03～0.1 (発泡倍率によって異なる)
耐久性		セメント（無機）系であるため通常環境であれば耐久性は良好である。	気泡は独立しているため止水性に優れる。加水分解しやすいので、長期的安定性には課題がある。	
施工性	プラント	通常は、基材、可塑性材料を製造するプラントが必要である。	簡易なミキシング装置と薬液タンクを設置。プラントヤードが不要。	
	圧送性	圧送が可能な材料が多い	不可	
	限定注入	可塑性を有するため限定注入が容易である。	1分で発泡終了するため、限定注入が可能であるが、逆に必要な場所へ充填できない可能性もある。	
	充填性	水中分離抵抗性に優れるため湧水の多い場所でも充填性を確保できる。		

そこで通水能を最大使用水量まで引き上げ、発電効率が向上させることを目的とし、水理検討により、現況の通水能を評価→改修方針を提示→改修により通水能力がどの程度向上するかを評価した。

5. 2. 1 改修前の評価

改修前の状況把握のためにトンネル(=隧道) 内空調査時に、隧道内の喫水線調査を行った (Photo. 1) . 喫水線を Fig. 3 に赤線で示す. 改修前の通水能 15.7m<sup>3</sup>/s と対応している. また調査最終日、隧道に一定流量 10.4m<sup>3</sup>/s を流し、各隧道の両坑口及び横坑開口部各地点でメジャーで水位を計測した (Photo. 2) . Fig. 3 に青△で示す。



Photo. 1 水位痕 (15.7m<sup>3</sup>/s) Photo. 2 水位計測 (10.4m<sup>3</sup>/s)

第三隧道 TD2, 500m 付近で水位 (赤線) に段差が生じているのは、矢中谷から 2.4m<sup>3</sup>/s 流入しているためで、約 60cm 水位上昇している。つまり、第一～第二～第三隧道 (矢中谷) までは 13.3m<sup>3</sup>/s、矢中谷で 2.4m<sup>3</sup>/s が加わり、第三隧道 (矢中谷)～出口で 15.7m<sup>3</sup>/s の流量が流れていることが確認できた。なお一定流量 10.4m<sup>3</sup>/s での計測は矢中谷からの流入を止めた状態で行った。

隧道全線において、満管になっている箇所はないが水深比が 90% を超えている。

縦断勾配は第一隧道が最も急で、第三隧道が最も緩である。しかし第一～第三隧道中流まで同じような水深で流れることから、第三隧道の流況が上流に影響を与えていると考えられた。

第三隧道の水位観測結果に基づき Manning 式による①等流、②不等流計算を実施し、隧道の粗度係数を算定し、各隧道の通水能を評価した。

- ①等流計算 : 設計断面・勾配一様で水位計算 → 平均的な簡易計算
- ②不等流計算 : 内空断面計測に基づき 100m 毎の、実断面・勾配変化で、各断面の水位計算 → 断面毎の詳細計算

5. 2. 2 水理計算結果

(1) 等流計算

等流計算結果を Table 11, Fig. 4 に示す。

第三隧道について通水能 15.7m<sup>3</sup>/s とする粗度係数を算定すると 0.018 と評価された。調査からインバートは全線にわたり洗掘され、荒れていたことが分かっており、妥当と考えられる。またアーチ側壁の粗度は小さく評価されたがコンクリートの標準値内であり、妥当と考えられる。第一隧道のインバートは一部改修済みであることから粗度係数を 0.014 とした。またインバート調査から第二隧道は第三隧道より劣化が少なかったことから 0.014~0.018 の中間値の 0.016 と評価した。

Table 11 等流計算による粗度係数と流量の評価

隧道	平均勾配	粗度係数		通水能力
		アーチ側壁	インバート	
第一	1.59×10 <sup>-3</sup>	0.012	0.014	26.3m <sup>3</sup> /s
第二	0.76×10 <sup>-3</sup>	0.012	0.016	17.3m <sup>3</sup> /s
第三	0.66×10 <sup>-3</sup>	0.012	0.018	15.7m <sup>3</sup> /s

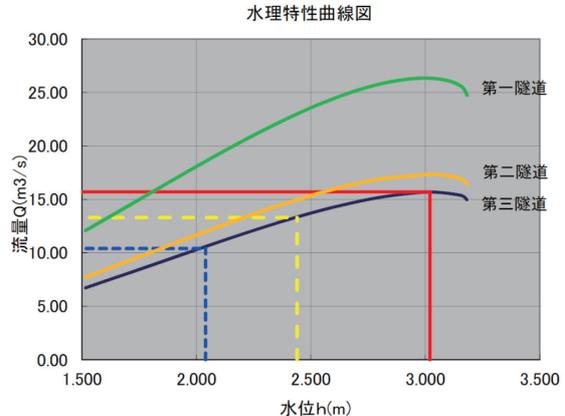


Fig. 4 等流計算に基づく各隧道通水能

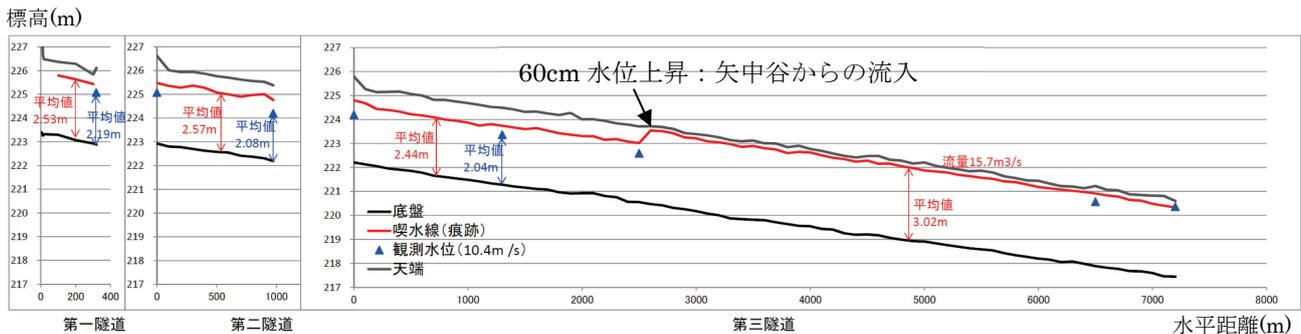


Fig. 3 水位計測結果

勾配が最も緩く、かつインバートの状態が悪い第三隧道の通水能が低いことが判明した。

(2) 不等流計算

第一隧道、第二隧道は距離が比較的短く、等流計算で現況を評価出来ると考えられた。そこで第三隧道を対象とし、不等流計算を実施した。

等流計算で得られた粗度係数をそのまま不等流計算に用い水位を計算したところ、水位計測結果と計算値に若干差異が見られた。そこで粗度係数を Table 12 のように 0.0195 に見直したところ、不等流計算で改修前の水位を非常に精度よく再現出来た (Fig. 5)。

Table 12 不等流計算で算定された粗度係数

第三隧道粗度係数			備考
アーチ・側壁	全線	0.012	等流計算に基づく
	0~2000m	0.018	〃
インバート	2000~2500m	0.014	インバート調査に基づく
	2500mより下流	0.0195	等流計算での評価値0.018を調整

不等流計算からもインバートの粗度係数が大きい状況であることが分かる。したがって、インバート粗度を改善すると通水能力を改善できると考えられた。

5. 2. 3 通水能の改善案

最大使用水量 16.7m<sup>3</sup>/s を全隧道が確保できる改修案を検討した。

あらためて Fig. 6 に改修前の通水能の評価を示す。第一隧道は現状で十分な通水能がある。第二隧道は最大使用水量を若干上回る程度、第三隧道では最大使用水量を流す能力が無い状態である。

したがって、第二、第三隧道のインバートを改修した場合、通水能力がどのように改善するか検討した。

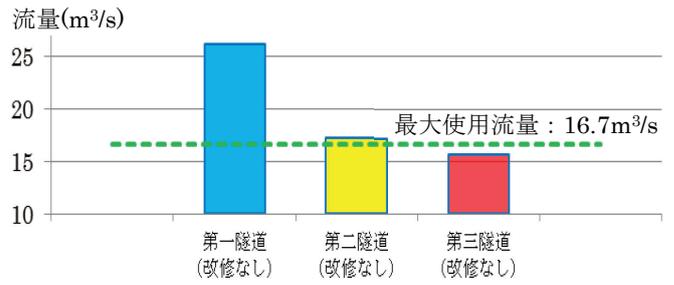


Fig. 6 改修前の通水能評価

(1) 改修案1 (第三隧道インバート改修)

第三隧道のインバートコンクリートを打ち直し、粗度を 0.014 に改善する案を検討した。結果を Fig. 7, Table 13 に示す。第三隧道の通水能は 17.8m<sup>3</sup>/s に改善するが、第二隧道が 17.3m<sup>3</sup>/s のままのため、ネックとなる可能性がある結果となった。

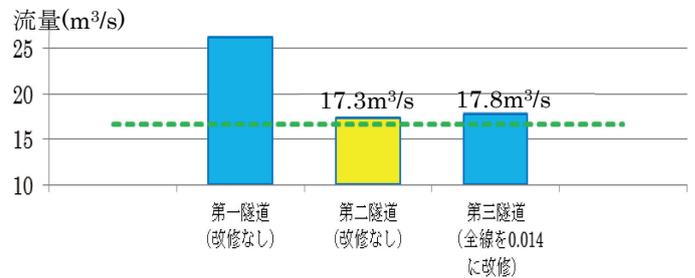


Fig. 7 改修案1の通水能評価

Table 13 改修案1の通水能評価一覧

	第一隧道	第二隧道	第三隧道		
			0~2000	2000~2500	2500より下流
インバート	0.014	<b>0.016</b>	<b>0.014 (改修)</b>	0.014	<b>0.014 (改修)</b>
通水能力	26.3 m <sup>3</sup> /s	17.3 m <sup>3</sup> /s	17.8 m <sup>3</sup> /s		
備考		改修後ここがネック	水深100%時17.8m <sup>3</sup> /s 設計流量16.7m <sup>3</sup> /s時 水深は87%		

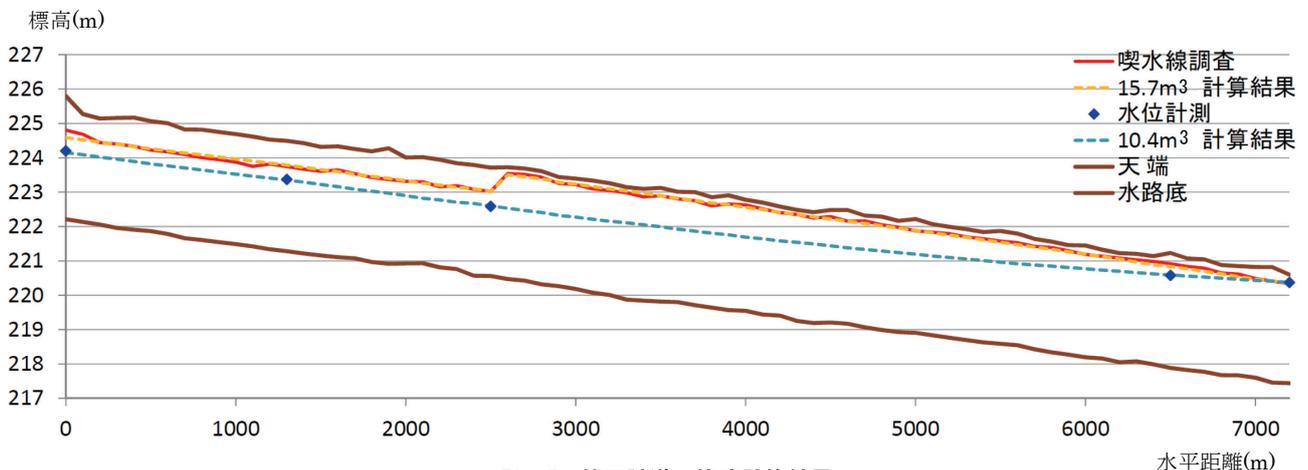


Fig. 5 第三隧道不等流計算結果

## (2) 改修案2 (第二, 第三隧道インバート改修)

さらに第二隧道のインバートも粗度を0.014に改修する案を検討した。結果をFig. 8, Table 14に示す。第二隧道の通水能は18.3m<sup>3</sup>/sとなる。

その結果, 第三隧道の通水能は17.8m<sup>3</sup>/sとなるので, 最大使用水量に対し, 106%の流量を流すことが可能であり, 最大使用水量を余裕を持って, 流下させることが出来る隧道となる。

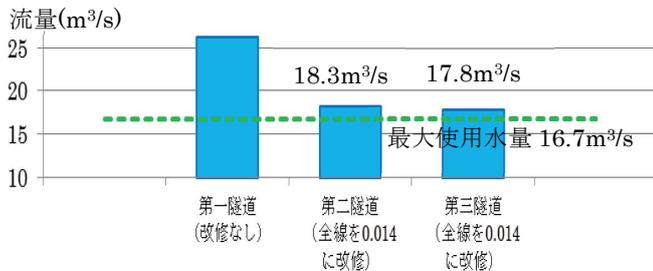


Fig. 8 改修案2の通水能評価  
Table 14 改修案2の通水能評価一覧

	第一隧道	第二隧道	第三隧道		
			0~2000	2000~2500	2500より下流
インバート	0.014	0.014 (改修)	0.014 (改修)	0.014	0.014 (改修)
通水能力	26.3 m <sup>3</sup> /s	18.3 m <sup>3</sup> /s	17.8 m <sup>3</sup> /s		

## 5. 2. 4 水理検討まとめ

以上の検討から, 改善案2に基づき, 第二隧道, 第三隧道のインバートをコンクリートで改修し, 粗度係数を0.014まで低減することとした。

さらに第三隧道の矢中谷より下流は, 流量が増加し水深が増加するので, インバートを10cm下げる措置を行った。

## 5. 3 インバート切削機械の選定

表面に凹凸のあるインバートを平滑に切削する機械の比較表をTable 15に示す。ここでは, 坑内での作業能力, 動力方式(電動, 内燃機関), ベースマシンの改良に要する費用, 工期等を考慮してスキッドステアローダを採用した。

## 6. 導水路トンネルの改修工事

2015年6月から2016年1月の期間発電所を停止して断水し, 改修工事を行った。工程をTable 16に示す。

断水期間中に坑内作業を効率良く進めるため, 仮設備の設置や作業ヤードの整備を2015年4月から開始し, 断水と同時に坑内作業を開始した。

### 6. 1 仮設備

坑内の資機材運搬方法について, 第三隧道では運搬距離が坑口から最長で約4,900mあるため, 全線にレールを敷設するか検討した。しかし, 工程及び利便性を考慮してレールは敷設せず, 坑内で転回できるタイヤ式の運搬機械を採用して施工した。

仮設電気について, 坑外から受電して坑内全線に電気を引き込み, 約150mごとに分電盤(200V)を設置した。照明は約20mごとに蛍光灯を設置し, 作業用通路としての照度を確保した。

坑内の湧水及び濁水処理について, 清濁分離方式を採用した。全線に排水管(3~6インチ)及び水中ポンプ(2~6インチ)を設置し, 清水は既設の横坑(5箇所)を利用して排水した。作業により発生した濁水は, 上流側坑口(TD0m)及び下流側坑口(TD7, 300m)付近2箇所に設置した濁水処理設備(処理能力30m<sup>3</sup>/h)にて濁度とpHの調整を行い, 河川に放流した。

Table 15 インバートコンクリート切削機械の比較表

	ロードヘッダ	ツインヘッダ	エクセルカッタ	ブレーカ	スキッドステアローダ
概要	ロードヘッダとは自由断面掘削機と言われ, 機体先端上部に設置してある切削チップが配列されたドラムを回転させて掘削する機械である。	ツインヘッダは別名油圧式切削機と言われ, 油圧モータと歯車の組み合わせにて切削チップが配列されたドラムを回転させて, 掘削する機械である。	エクセルカッタとはツインヘッダのドラムがひとつで小規模な掘削, はつり用として開発されたものである。	ブレーカのビットが空気圧で上下することにより対象物に衝撃を与えて破碎する。	左右のタイヤの回転差により旋回し, ほぼ全長以外の空間を必要としない小旋回を可能にしたのがスキッドステア方式。各種アタッチメントを装着することで様々な作業を行うことができる。
ベースマシン	H1.7m × W2.0m × L7.9m	0.1~0.2m <sup>3</sup> /バックホウ	0.16m <sup>3</sup> /バックホウ	0.1~0.2m <sup>3</sup> /バックホウ	H1.8m × W1.1m × L2.6m
重量	24t	2~5t	2~5t	2~5t	1.3t
駆動方式	電動	内燃機関	内燃機関	内燃機関	内燃機関
はつり原理	切削	切削	切削	打撃	切削
作業範囲	下面は不可能ではないが不適	上面は不可能ではないが不適	側面および下面	基本的に下面	基本的に下面
はつり精度	△	○	○ △	×	○
作業能力	○	△	0.3~0.5m <sup>3</sup> /日	△	△
走行性				2.5~5km/h	10km/h
評価	△	△	△	×	○

Table 16 工事工程表

工種		平成27年										平成28年					
		4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月				
仮設置撤去	排水、仮設電気	予定	仮設置												坑内撤去、坑外撤去		
		実績	仮設置												坑内撤去、坑外撤去		林道補修
インバート補修工	第二隧道 (L=972m)	予定											第二隧道				
		実績											第二隧道				
	第三隧道 (L=7,298m)	予定											第三隧道				
		実績											第三隧道				
空洞充填工	セメント系	予定											プラント設置→注入				
		実績											プラント設置→注入				
	ウレタン系	予定											プラント設置→注入				
		実績											プラント設置→注入				
覆工止水作業	ウォータージェット研り ポリマーセメント塗布	予定											はつり→ポリマーセメント				
		実績											はつり→ポリマーセメント				
	覆工補修工(追加工事)	実績											覆工補修				

← 通水停止期間 →



Photo 3 濁水処理設備

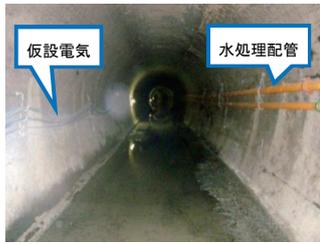


Photo 4 坑内仮設備

坑内の換気について、換気計算に基づき、既設の横坑等を利用して排気方式にて行った。吸気ファンを5箇所（メイン換気1箇所、補助換気4箇所）設置し、メイン換気にはコントラファン（750m<sup>3</sup>/min）を、補助換気にはSFファン（260m<sup>3</sup>/min）を使用した。



Photo 5 コントラファン



Photo 6 SFファン設置状況

## 6.2 インバート補修工

導水路トンネル内での作業となるため、工程短縮を目的として施工は昼夜3交替で行った。昼間作業にてインバートコンクリートの打設を行うため、夜間作業にて既設コンクリートの切削と研り殻の運搬を行った。夏季は最高気温が30℃以上、冬季は最低気温が氷点下となることもあったが、坑内温度は平均的に15～20℃の範囲内で、コンクリートの打設やポリマーセメント（フィックスLS）の施工において、材料の性状が大きく変動することなく

施工できた。

既設コンクリート切削は、スキッドステアローダ（商品名：ボブキャット Photo.7）に切削用アタッチメントを取り付けて切削を行い、不整地運搬車併用でガラ（砕石）の運搬・搬出を行った。坑内にて運搬車のすれ違いができないため、途中にガラ中継地点を設けて一旦ガラを下ろし、再度中継地点にて積み込むピストン輸送を行った。平均運搬量は15m<sup>3</sup>/日程度であった。



Photo 7 スキッドステアローダ

コンクリート打設は、コンクリート供給箇所を当初2箇所から3箇所に増設し、コンクリートの運搬距離を最大4,900mから2,400mに短縮した。平均打設量は30m<sup>3</sup>/日程度であった。なお、スキッドステアローダ3台、切削用アタッチメント2台、ブレーカーアタッチメント1台、0.1m<sup>3</sup>級バックホウ2台、不整地運搬車3台にて施工を行った。



Photo 8 切削状況



Photo 9 切削ガラ搬出状況

### 6.3 空洞充填工

セメント系空洞充填工は最大圧送距離が2,500mであったが、注入箇所直前での静止ミキサーによる合流練り混ぜ、注入孔での圧力管理を行うことにより、既設覆工を傷めることなく注入できた。既設覆工が薄い箇所（100mm以下）については、パイプサポートで補強した（Photo. 11参照）。また可塑性グラウト（AZ グラウト）の特性および圧力管理により坑外への溢出も無かった。



Photo. 10 注入プラント



Photo. 11 覆工仮受け状況

### 6.4 断面修復工

#### (1) 全断面補修工

第二隧道入口部（第一沈砂池接続部）、第三隧道矢中谷水路橋下流部及び灰田谷付近において導水路からの漏水が認められるため、軽量・速硬性ポリマーセメントモルタル（フィックスLS、エレホン・化成工業株）にて補修した（ $t=20\text{mm}$ ）。施工状況を Photo. 12 に示す。なお、予め既設覆工の脆弱部をウォータージェットにより除去し、CFRP 格子筋を配置してポリマーセメントモルタルをコテ塗りにて施工した。水抜きホース等による導水工により湧水処理をしながら施工した。



Photo. 12 施工状況

#### (2) 部分補修工

部分的に覆工が断面欠損している箇所の補修工は、脆弱な部分を人力にてはつり、セメント系断面補修材（リフレモルセット、住友大阪セメント（株））を使用して補修した。

## 7. おわりに

東横山発電所の FIT 適用事業のうち導水路トンネル改修工事の調査、設計、施工に携わった。取水量の最大化、トンネルの安定性の確保を目的としてトンネルを改修した。取水量の最大化に関しては、現地調査をもとに水理検討（不等流計算）した。現況の流量から粗度を逆計算し、対策実施後の流量を最大化すべく高強度コンクリートを打設した。また、TD5,500m より下流はインバートを100mm 下げ、最大使用水量  $16.7\text{m}^3/\text{s}$  を確保した。さらに、トンネルの安定性の確保については、過去に覆工天端が部分的に崩落した（鋼板を設置）箇所を中心に、覆工の背面空洞に可塑性注入材を充填した。

施工は2015年4月に開始され2016年3月に無事竣工した。

### 謝辞

導水路トンネルの調査、設計、施工にあたりましては、水力発電所の管理者であり、今回の改修工事の発注者であるイビデン（株）ならびに調査、設計、施工監理におきまして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。

紙面を借りて感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 高速道路（株）3社、矢板工法トンネルの背面空洞注入工 設計・施工要領、平成18年10月

## **Repair of the headrace tunnel of the hydroelectric power station — Ibaden Higashi-Yokoyama power station —**

Nobukazu KANEKO, Kouji YANAGI, Rika OZAWA, Noboru AMAMORI, Shinjiro OMOTO  
and Yasuo MORI

### Abstract

Ibaden Co., Ltd. renovated its Higashi-Yokoyama hydroelectric power plant (12,100kW) in order to apply to the FIT (Feed-in Tariff Program) in 2015. The ninety five years have passed since operation started in 1921. Kumagai Gumi Co., Ltd. has investigated, renovate-designed and constructed the headrace tunnel (width, height 3.33m, extension 7.23km) consistently. The important task of headrace tunnel renovation was ①maximization of water intake and ②achievement the structural stabilization of tunnel. In order to maximize water intake, we simulated the current regime and verified the effect of the following measures by non-uniform flow calculation. The surface roughness of invert was improved by removing the invert surface degraded by scouring and placing high strength concrete. Also, at the point of thin lining thickness or the cavity of lining back, the stability of tunnel was improved by filling plastic injection material.

Keywords: Headrace tunnel, Invert repair, Hollow infusion, Nonequivalent flow calculation

---