特集≫≫　防災，安全／安心を確保する社会基盤整備

老朽化した狭小導水路トンネルリニューアルの機械化施工

小　澤　里　佳・金　子　伸　和・森　　康　雄

岐阜県揖斐川町の東横山発電所（12,100 kW, 水力発電）では, 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 年に発電を開始してから 94 年経過していた。水力発電所の導水路トンネル（幅 3.33 m，高さ 3.18 m，延長 7.23 km）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。

導水路トンネルの改修における課題は，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。取水量の最大化については, 現状における導水路トンネル内の流況のシミュレーションと対策の効果についての確認（不等流計算）をおこなった。洗掘により凹凸が激しくなったインバートの表面をはつり，その上に高強度コンクリートを打設し表面粗度を改善した。また，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，狭小断面，スキッドステアローダ

1. はじめに

東横山発電所は 1921 年 6 月運用開始以降，94 年経過していた。既往の資料によると，導水路トンネルでは覆工の崩落が発生して，鋼板で補強されている箇所が数多くあり，土被りの小さい場所では，地表面まで影響を及ぼしたこともある。また，地圧の作用に伴い覆工が変状している箇所もあり，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ており，劣化や変状が著しい箇所を対象に補強工事が行われた。水路橋では漏水対策として防水シートを内巻きしたが, シートの剥がれや, 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かった。

当社は，2006 年に放水庭と水槽の改修工事を行っており，それ以降の川上発電所および広瀬発電所の導水路トンネルの改修においては継続的に調査から設計・施工まで一貫して行った。

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，計画されている更新工事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. 水力発電所の概要

同様の 3 箇所の水力発電所の概要を**表―1** に示す。

表―1　水力発電所の概要

	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	4,000 kW	8,000 kW	12,100 kW
最大使用水量	4.7 m^3/s	8.36 m^3/s	16.7 m^3/s

場　所：岐阜県揖斐郡揖斐川町

主要施設：

・導水路トンネル
　馬蹄形，幅 3.333 m，高さ 3.183 m，断面積 8.908 m^2

・沈砂池（第一，第二），水槽，放水庭

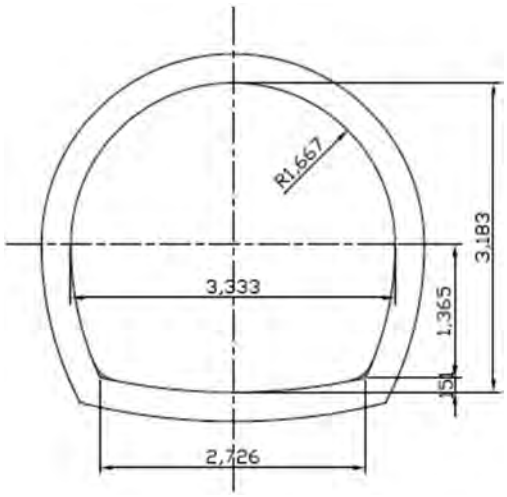
・水圧鉄管（内径 1.5 m，4 条，延長 180 m，有効落差 95.6 m）

・発電所建屋（壁：レンガ造, 屋根：RC 造, 水車 4 基）

水力発電所の導水路トンネルの概要を**表―2** と**図―1** に示す。

表―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	7,233.222	0.664



図―１ 導水路トンネルの標準断面図

3. 取水量の最大化の検討

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ったが，ここでは，主に取水量の最大化に関わる設計，施工について述べる。

(1) 対策工の選定

設計取水量を確保するための方法としては，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方法としては隣接する広瀬発電所の導水路トンネルにおいて小型のロードヘッダーでインバートを 30 cm 盤下げした実績があるが，通常の導水路トンネルでの断面拡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，中間の渓流取水口から大雨の際に流入する玉石，土砂，砂利の影響で，インバートが洗掘されてコンクリートが欠損し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**表―３**に示す。ここでは，経済性，施工性を考慮して高強度コンクリート（36-12-25N）にて補修することとした。

(2) 対策工の詳細設計

第一隧道は，過去に全線のインバートを増し打ちしているため，今回工事では補修はしなかった。

第二隧道は，洗掘による凹凸が著しい下流部約 300 m のインバートを全面補修し，上流部は洗掘され

表―３ インバートの表面粗度改善対策 比較表

工 法	現場打ち	張付け工法			
概 要	耐磨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	ダクタル板	レジンコンクリート板	鋼板	弾性板
	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。	ダクタルとは，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 210 N/mm^2 厚さ：2 ～ 3 cm	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を。 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（SS400 等）をコンクリートにアンカー固定する工法である。 厚さ：6 ～ 10 mm	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インバートに固定する。 厚さ：20 ～ 50 mm 大きさ：□ 0.5 ～ 2 m
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磨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（36 N/mm^2）の 1/8，高強度コンクリート（60 N/mm^2）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。	耐磨量は鋼板と比較して数分の 1 ～数十分の 1 とされる。
	△	○	○	◎	◎
経 済 性	1	1.6	1.6	1.6	2.2
評 価	◎	○	○	○	△

ている箇所のみを部分的に補修した。

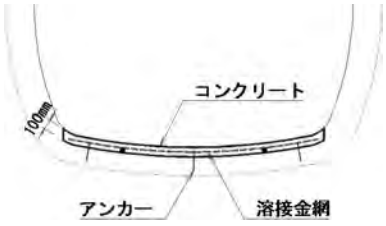
第三隧道は，全線にわたり洗掘による凹凸が見られたため，全線を全面補修とした。ただし，全線をコンクリートで補修した場合，TD5,500 m 付近から下流で水深比が高くなるため，TD5,500 m より下流はインバートを 200 mm 掘削して 100 mm 打設することで，トンネルの内空高さを 100 mm 大きくすることとした。

また，新しく打設するコンクリートの厚さが 100 mm であるため，ひび割れの発生によるインバートコンクリートの細片化や剥離を防止するために，**図**―2 に示すように溶接金網（100 × 100 mm）を設置した。さらに，既設コンクリートと新たに打設するコンクリートとの一体性を向上させるために，アンカー筋（D10）を既設コンクリートに打設した。

(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**表**―4 に示す。ここでは，狭小断面のトンネル内での作業能力，駆動方式（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（**写真**―1, **図**―3）。

スキッドステア方式とは，左右のタイヤの回転差により旋回し，ほぼ全長分の幅で旋回する究極の小回転（その場旋回）を可能にしたものである。今回使用し



図―2　インバート補修概要図

写真―1　スキッドステアローダ

図―3　スキッドステアローダ回転イメージ

表―4　インバートコンクリート切削機械の比較表（社内評価の概要）

	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砕する。	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多くの作業を行うことができる。
ベースマシン	H 1.7 m × W 2.0 m × L 7.9 m	0.1 ～ 0.2 m^3 バックホウ	0.16 m^3 バックホウ	0.1 ～ 0.2 m^3 バックホウ	H1.8 m × W1.1 m × L2.6 m
重量	24 t	2 ～ 5 t	2 ～ 5 t	2 ～ 5 t	1.3 t
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 ～ 0.5 m^3/ 日	△	△
走行性				2.5 ～ 5 km/h	10 km/h
評価	△	△	△	×	○

たS70は前幅が915 mm，最小回転半径1,620 mmであり，乗用タイプのローダとしては最小クラスである。また，最大の特徴としてはアタッチメントが豊富であり，専用機としてではなく汎用機として使用することができることである。今回の工事においても，インバートコンクリートの切削，はつりだけでなく，コンクリートガラの集積，運搬，コンクリートの運搬など多くの用途に利用した。

4. 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改修工事を行った。工程を**表―5**に示す。実線が計画，破線が実施である。

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。

(1) 仮設備

(a) 坑内運搬

坑内の資機材の運搬方法についてレール式とタイヤ式について比較検討した。第三隧道では運搬距離が坑口から最長で約4,900 mと長い。レール式では，駆動方式が電動であり換気への負荷が少ないため換気設備の規模が小さくなる。しかし，坑内でその場で旋回できるタイヤ式の運搬機械を採用することにより工程及び施工性が有利になるためタイヤ式を採用した。

(b) 仮設電気

電気は坑外から受電して坑内全線に電気を引き込み，150 mごとに分電盤（200 V）を設置した。照明は20 m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。

(c) 排水

坑内の湧水及び濁水処理は，清濁分離方式を採用した。トンネル全線に排水管（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）から排水した。作業により発生した濁水は，上流側坑口（TD0 m）及び下流側坑口（TD7,300 m）付近2ヶ所に設置した濁水処理設備（処理能力30 m^3/h）で濁度とpHの調整を行い，河川に放流した。

(d) 換気

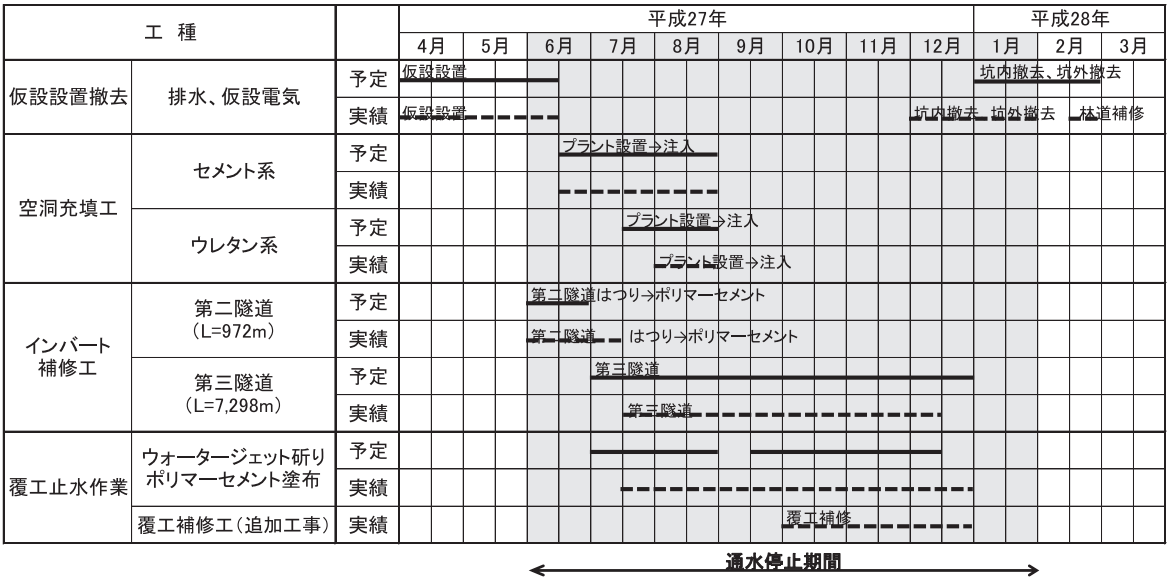
坑内の換気については，換気計算に基づき，既設の横坑等を利用して排気方式にて行った。吸気ファンを5箇所（メイン換気1箇所，補助換気4箇所）設置し，メイン換気にはコントラファン（750 m^3/min）を，補助換気にはSFファン（260 m^3/min）を使用した。

(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，作業騒音の近隣への影響も少なく，工程短縮のために施工は昼夜3交替で行った。昼間作業でインバートコンクリートの打設を行い，夜間作業で既設コンクリートの切削とはつりガラの運搬を行った。気温は夏季では最高で30℃以上，冬季では最低で氷点下となることもあったが，坑内温度は平均的に15～20℃でコンクリート打設や断面修復の施工において，材料のフレッシュ性状に大きな影響を与え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に切削用アタッチメントを取り付けて切削を行い（**写真―2**），不整地運搬車併用でガラの運搬・搬出を行っ

表―5 導水路トンネルの改修工事 工程表



写真―２　切削状況

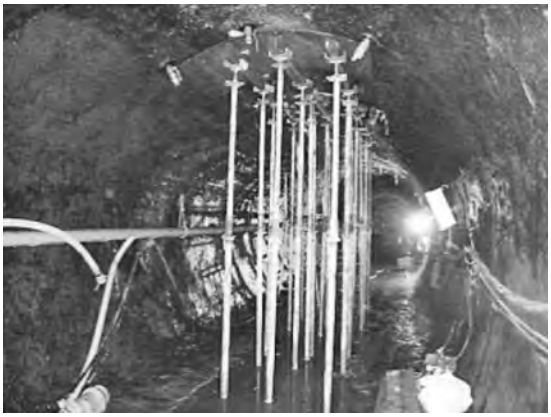
写真―３　コンクリートはつりガラ搬出状況

た（**写真**―３）。坑内では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。スキッドステアローダは狭小断面トンネルでもその場回転ができるため，常に前進運転が可能であり，作業の安全性，効率性が向上した。平均運搬量は 15 m^3／日程度であった。

坑内へのコンクリート搬入（供給）箇所は当初計画では２箇所であったが，施工効率を上げるためにコンクリート搬入箇所を３箇所に増設することにより，コンクリートの運搬距離を最大 4,900 m から 2,400 m に短縮することができた。コンクリートの平均打設量は 30 m^3／日であった。なお，使用した機械はスキッドステアローダ３台，切削用アタッチメント２基，ブレーカアタッチメント１基，0.1 m^3 級バックホウ２台，不整地運搬車３台である。

(3) 空洞充填工

セメント系空洞充填工は最大圧送距離が 2,500 m で，注入箇所直前での静止ミキサーによる合流練り混ぜ，注入口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



写真―４　覆工仮受け状況

（100 mm 以下）については，パイプサポートで補強した（**写真**―４）。

(4) 断面修復工

(a) 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は，湧水やジャンカが多く見られた。WJ 工法で表面の脆弱部をはつり，CFRP 格子筋を配置して軽量・速硬性ポリマーセメントモルタルにより左官工法で断面補修した（t = 20 mm）。施工状況を**写真**―５に示す。湧水は事前に水抜きホース等による導水工により処理をした。

写真―５　全断面補修工　施工状況

(b) 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は，脆弱な部分を人力にてはつり，ポリマーセメントモルタルで断面修復した。

5. おわりに

水力発電所の 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，TD5,500 m より下流はインバートを 100 mm 下げ，最大取水量を確保した。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㈱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㈱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。

誌面を借りて感謝の意を表します。

JCMA

［筆者紹介］

小澤　里佳（おざわ　りか）
㈱熊谷組
名古屋支店土木部
係長

金子　伸和（かねこ　のぶかず）
㈱熊谷組
名古屋支店土木部
工事部長

森　康雄（もり　やすお）
㈱熊谷組
本社土木事業本部インフラ再生事業部
技術部長