

長大トンネルへの坑内Wi-Fi導入による 費用対効果の検証と総括

渡辺 樹也

独立行政法人水資源機構 本社 水路事業部 設計課

(〒441-1338 埼玉県さいたま市中央区新都心11番地2 ランド・アクシス・タワー内)

豊川用水二期事業では地震対策の一環として全長約120kmの併設水路を建設している。その内、現在施工中の大野導水併設水路工事及び東部幹線併設水路浅間風越工区工事は最長6.0kmに及ぶ長大トンネル工事である。長大トンネル工事への坑内Wi-Fiの導入は明かり工事への導入と比較し、コストが非常に大きく、十分な費用対効果が得られるかが課題であった。

本稿は、長大トンネル工事で坑内Wi-Fiを導入することによる費用対効果について検証し、十分な効果が得られたことを確認するとともに、より効果を高めるために今後の設計・積算における課題を提言するものである。

キーワード 建設DX、遠隔臨場、生産性向上、長大トンネル、費用対効果、SDGs

1. はじめに

豊川用水では、最長6.0kmの長大水路トンネルを施工中であり、全ての工事において坑内Wi-Fiを導入し、遠隔臨場を実施している。

昨今では当たり前となりつつある工事現場での遠隔臨場であるが、長大トンネル工事においては、電波の通じる明かり工事と比較してWi-Fi環境の導入コストが数十倍から百倍程度になる傾向が見られることによって、その費用対効果が疑問視された。

よって、はじめに長大トンネル工事にWi-Fi環境を導入する際のコストについて検証する。

2. 工事の特徴と遠隔臨場費用

ここでは、豊川用水二期事業において現在実施中の工事の内、愛知県新城市で施工している代表的な2件の長大トンネル工事について説明する（図-1）。

(1) 工事の特徴

大野導水併設水路工事（以下「大野併設トンネル」という。）は全長約6.0kmの水路トンネル（TBM工法+一部NATM工法）工事であり、下流から上流に向けての掘削及び中間地点から上下流の2方向への12m毎、全498BLの覆工（約24ヶ月）を完了し、覆工の開始（R4.2）から覆工の完了（R6.2）までを遠隔臨場で実施している。

東部幹線併設水路浅間風越工区工事（以下「浅間風越併設トンネル」という。）は全長約4.0kmの水路トンネル（NATM工法）工事であり、上下流の2方向から中間へ向けての掘削（約15ヶ月）及び中間地点から上下流の2方向への9m毎、全435BLの覆工（約18ヶ月）を完了し、掘削1,900m（R3.7）から覆工完了（R6.3）までを遠隔臨場で実施している。



図-1 工事位置図

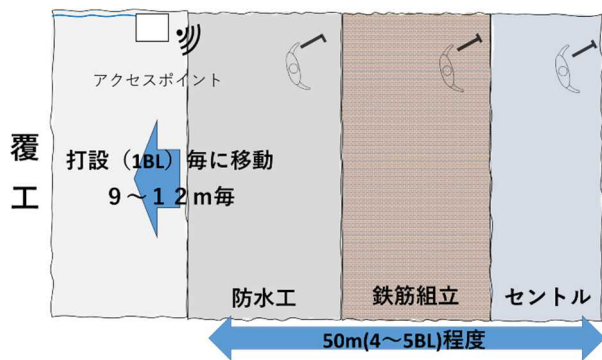


図2 坑内Wi-Fi模式図

(2) 遠隔臨場

a) 坑内Wi-Fi模式図

坑内Wi-Fi模式図を図-2に示す。トンネル内には100m毎にアクセスポイント（以下「AP」という。）が設置され、現場事務所に設置されたWi-Fiルーターと各APをLANケーブルで接続することによって、切羽またはセントルでのWi-Fi環境を構築している。ただし、APは半径50m程度の電波しか拾えないため、掘削や覆工の進行とともに撤去・再設置が必要となる。

b) 各工区の遠隔臨場費用の比較

長大トンネル工事に係る遠隔臨場費用との比較のために東部幹線併設水路オーム石工区工事について記載する。東部幹線併設水路オーム石工区工事は全長約0.5kmの管水路工事（開削工法）であり、令和6年7月に工事（約12ヶ月）を終えている。

各工区の遠隔臨場費用を図-3に示す。なお、機器賃料にはLANケーブル、AP、HUBBOX、カメラ機器等賃料（損料）等が含まれ、人件費には設定・保守・設置・撤去手間が含まれる。

また、各工区の一ヶ月あたり1箇所（100m）毎の遠隔臨場費用を図-4に示す。なお、APの受信半径が半径50mであることから、1箇所当たりの代用として100m毎の費用を算出した。なお、大野併設トンネル及び浅間風越併設トンネルでは施工途中から遠隔臨場を導入しているが、仮に大野併設トンネルで掘削開始から遠隔臨場を導入した場合の費用は約6千万円と試算される。

長大トンネル工事と明かり工事を比較すると、長大トンネル工事は人件費の割合が大きい、これは電波の届く明かり工事と比べて、掘削や覆工の進捗によりAPなどの設置・撤去手間が必要なこと、遠隔臨場の実施期間が長いこと、賃料（損料）が全損価格に達し、頭打ちとなったものが多いことが挙げられる。

以上より、長大トンネル工事では、直接電波が受信可能な明かり工事と比較して、遠隔臨場に要するトータルコストは数十～百倍程度となっているものの、どの工事においてもおよそ一ヶ月当たりのWi-Fi設備の導入箇所数に比例するコストがかかっていることがわかる。

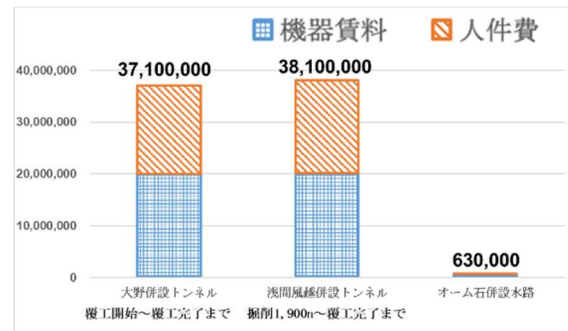


図3 各工区の遠隔臨場費用（経費込み）

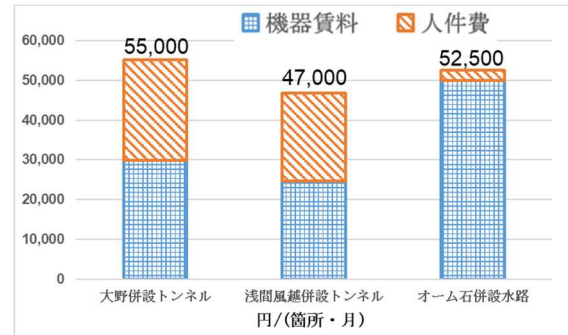


図4 一月当たり1箇所（100m）毎の遠隔臨場費用

3. 遠隔臨場によるコスト縮減

(1) 労働時間の短縮によるコスト縮減

大野併設トンネルでは覆工に伴い、令和4年2月から令和6年2月までの間に約1,960回の立会・段階確認を実施した。浅間風越併設トンネルでは令和3年7月から令和6年3月までの間に約1,750回の立会・段階確認を実施した。このうち、大野併設トンネルでは約1,300回、浅間風越併設トンネルでは約1,100回の遠隔臨場を実施した。

（図-5）



図5 覆工の施工サイクル

「建設DXによる長大トンネルの施工管理と働き方改革への貢献」にて増田らが述べたように、1回当たりの立会につき、坑内移動に往復約1時間、車両運転に往復約1時間要するため、両併設トンネル合計で約4,800時間の労働時間及び約2,400時間の車両運転時間の短縮を達成したり。

(2) 工期縮減によるコスト縮減

大型機械設備の繰り返し作業が工程の大部分を占めるトンネル掘削では、大型機械設備等の作業能力によって発破・ズリ搬出・吹付などの作業に要する時間を積み上げていくサイクルタイムに沿って工事が進行する。これはセントルによってコンクリートの打設を行う覆工についても同様である。

出来形確認には切羽判定や鉄筋被り、覆工妻部など施工断面の確認を伴う他、移動に構内電車を用いるため、立会中はサイクルタイムに沿った工事が制限される。

図-6に大野併設トンネル及び浅間風越併設トンネルでの設計と実績における覆工に要した期間を示す。大野併設トンネルでは、設計工程では覆工開始から完了までに上下流延べ1,384日かかるところ、実績では1,225日（減159日）で施工した。浅間風越併設トンネルでは、設計工程では覆工開始から完了までに上下流延べ960日かかるところ、実績では1,026日（増66日）で施工した。ただし、浅間風越併設トンネルは施工承諾で覆工間隔を1BL=12mから1BL=9mに変更しているため、これを加味すれば設計工程は上下流延べ1,254日となり、実績では228日短縮できたと推測される。

このように大幅な工程の短縮が可能となった理由の一つとして、遠隔臨場を実施することでサイクルタイムへ及ぼす影響を最小限に抑えたことが挙げられる。遠隔臨場1回につき、1.5時間（坑内移動0.5時間、坑内移動1時間）短縮し、大野併設トンネルでは155日（実働108日）、浅間風越併設トンネルでは131日（実働92日）程度の工期縮減ができたと考えられる（一日18時間施工）。なお、浅間風越併設トンネルでは遠隔臨場のほかに大野併設トンネルでのノウハウの転用（同一の施工業者）などが工期縮減に寄与した。

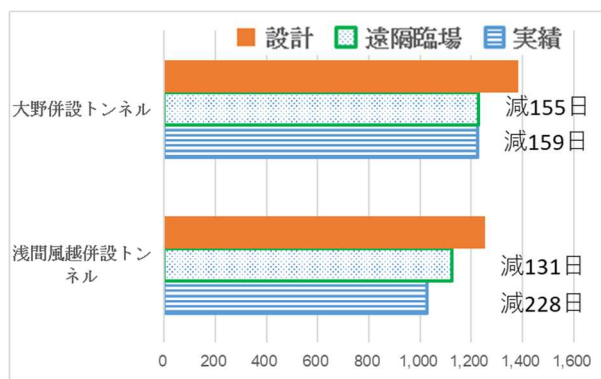


図-6 覆工期間

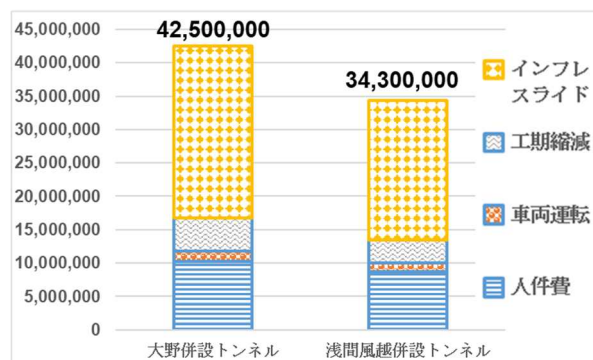


図-7 遠隔臨場によるコスト縮減（直接工事費）

上記の工期縮減の効果として、濁水処理に使用する薬品数量及びトンネル工事期間の地下水・流量観測期間についてコスト縮減を達成した（積算工程上の直接工事費（薬品費及び観測費）：7,000万円（両併設トンネル計）、工期縮減による精算予定額：6,160万円）。

また、設計工程以上に出来高が上がったことで、令和5年度及び令和6年度に実施するはずであったインフレスライドに伴う工事費の増額についてもコスト縮減を図ることができた（積算工程上の直接工事費増額分：6.40億円（両併設トンネル計）、実際のスライド直接工事費増額分：5.94億円）。

以上より、遠隔臨場の導入によるコスト縮減としては、労働時間の短縮及び工期縮減のどちらにおいてもおよそ遠隔臨場の実施回数に比例することがわかる。

4. 費用対効果と今後のトンネル設計

上記で述べた遠隔臨場によるコスト縮減についてまとめた図を図-7に示す。図より、両工区とも遠隔臨場費用に対して十分な費用対効果を得られている（経費込みで大野併設トンネルは約6,000万円、浅間風越併設トンネルは約4,800万円）が、掘削も含めたより長い期間遠隔臨場を実施し、単位箇所当たりの整備コストも小さい浅間風越併設トンネルでは、覆工だけ遠隔臨場を行った大野併設トンネルと比較して、コスト縮減額が小さい結果となった。

本章ではこれらの要因と今後のトンネル設計・積算について述べる。

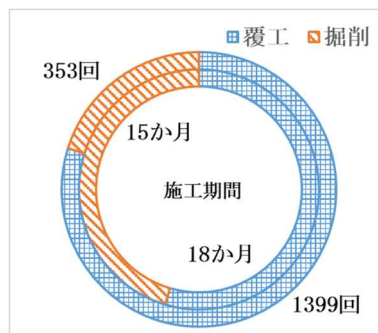


図-8 立会回数内訳

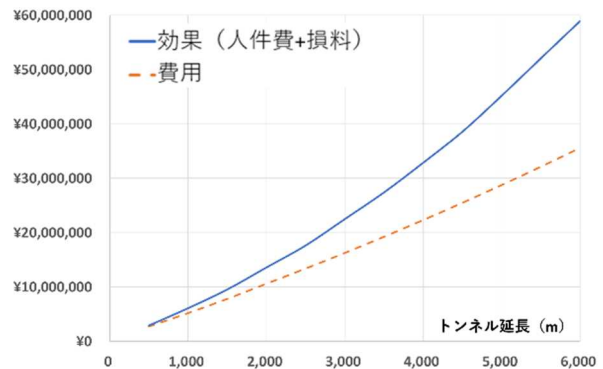


図-10 トンネル延長による費用と効果（経費込み）

(1) 掘削と覆工の費用対効果

IBLの打設ごとに出来形を確認する覆工とは異なり、掘削では地質が変わる毎、または50m毎に出来形の確認を行う。図-8に3.1で述べた浅間風越併設トンネルで実施した計約1,750回の立会（段階確認）内訳を示す。図に示す通り、掘削期間中に実施した立会（段階確認）の回数は一月あたりに換算すると1/3程度となる。よって、本工事における施工条件において、掘削期間中は遠隔臨場によるコスト削減効果が覆工期間と比較して低くなったため、浅間風越併設トンネルでのコスト削減額が大野併設トンネルと比較して小さくなったと推測できる。

(2) 遠隔臨場を前提とした設計

本工事においては遠隔臨場の実施を加味した設計を実施していないため、コスト削減として計上していないが、今後の課題として、当初から遠隔臨場による工期縮減を前提として設計を実施した場合のコスト削減額について記述する。

図-9に浅間風越併設トンネルで使用した大型機械設備の併用日当たり損料を示す（大野併設トンネルでは1併用日当たり約20万円）。なお、一部の機械（濁水処理設備等）については、全損価格として採用しているため、計上していない。

図に示す通り、トンネル工事においては大型機械設備や坑内環境の維持に高額な費用を有する。

これらの日当たり損料に遠隔臨場の実施による工期縮減を加味すれば、大野併設トンネルでは直接工事費で約3,140万円（経費込みで約4,400万円）、浅間風越併設ト

ンネルでは直接工事費で約2,200万円（経費込みで約3,100万円）のコスト削減を図ることができたと試算できる。

図-10に遠隔臨場に係るトンネル延長による費用と効果について、大野併設トンネルの施工条件（φ3400、立坑2箇所、セントル12m 遠隔臨場率65%）を元に示す。ただし、現場条件等に大きく左右される薬品費等の縮減及びインフレに係るコスト縮減は無視した。図より、トンネル延長が大きいほど、臨場時間が削減され、コスト削減効果が費用に対して大きくなることがわかる。また、延長によらず遠隔臨場によるコスト削減が費用を常に上回ることがわかる。ただし、費用・効果ともに現場条件に多分に左右されるため、実際の費用対効果は積上算出するほかないと考える。

(3) CO2削減効果

工事費との直接の関係はないが、社会コストの一つとしてCO2排出量の削減効果についても述べる。なお、計算には環境省が作成した温室効果ガス排出量算定・報告マニュアルを使用した。

削減したCO2排出量は大野併設トンネルで自動車運転30,550km、消費電力量758,524kwhで計422t-CO2。浅間風越併設トンネルは自動車運転25,850km、消費電力量689,480kwhで計383t-CO2となった。これはJ-クレジット換算（1,551円/t 2023年5月省エネ他入札販売価格）で計約125万円の削減効果となる。

以上より、今後のトンネル設計については、特に覆工のサイクルタイムについて遠隔臨場を前提とした設計・積算を実施し、CO2削減という観点も含めコスト比較をした上で、積極的に導入するべきと考える。

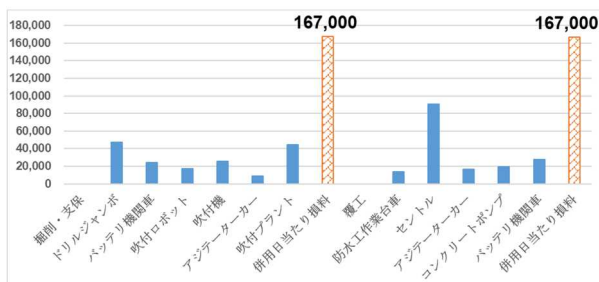


図-9 日当たり損料（賃料）

5. 総括

これまでに述べた結果から、明かり工事と比較して莫大な遠隔臨場の導入コストが発生するトンネル工事においても、特に立会（段階確認）項目の多い覆工においては十分な費用対効果を発揮することが示された。

掘削においては覆工と比較して費用対効果が低い、岩判定や湧き水への対処、肌落ちの危険性など迅速に高度な判断が必要される場合においてもすぐに専門家の意見を仰ぐことができるという面を鑑みれば、安全面でも十分な効果を発揮していると思われる。

本工事においては幸いにも大きな事故や災害もなく無事に掘削を終えることができたという点が掘削期間中の費用対効果の低下につながっているものと考えられる。

6. おわりに

当初は受発注者の働き方改革という期待から始めた長大トンネル工事での遠隔臨場及びそのためのWi-Fi環境の整備であるが、3年間分析を行う中で、労働生産性向上、施工・品質管理、安全管理、SDGs、費用対効果と当初の期待を大きく上回る効果を得ることが出来た。

今後も受発注者及び利水者のためにも、水資源機構として建設DXの推進を行っていく所存である。

参考文献

- 1) 増田 浄, 工藤 正憲, 秋山 健, 対馬 剛 (2023). DXによる長大トンネルの施工管理と働き方改革への貢献. 令和5年度中部地方整備局管内事業研究発表会