

ネパール国ナグドゥンガトンネルの設計概要と施工上の留意点

(株)エイト日本技術開発 正会員 ○富田 哲平
(株)エイト日本技術開発 正会員 満尾 淳, 山貝 廣海
ナグドゥンガトンネル建設計画開発事務所 浅井 隆治
日本工営(株) 正会員 野末 康博

1. ナグドゥンガトンネル概要

本論文では、ネパール国初の NATM による道路トンネルとなるナグドゥンガトンネルプロジェクトの設計概要と施工上の留意点について述べる。

ネパールは国土の約 8 割が山岳地帯となり、また運輸交通の約 9 割を道路に依存している。経済の安定成長に伴い車両台数も増加しているが、その反面道路整備は遅れを取っている状況である。ナグドゥンガトンネルはカトマンズと主要都市を結ぶ幹線道路上の一区間であり、日々の渋滞や降雨期の斜面崩壊など多くの問題を抱える山岳道路のバイパストンネルとして期待されている (図-1)。プロジェクト延長は 2,688m のトンネルを含む全長 5,560m となり、設計内容にはトンネル本体・設備設計および維持管理施設設計まで含まれる。トンネルは 2 車線断面の本坑とそれに並行する避難坑、本坑と避難坑を結ぶ連絡坑からなる (図-2)。



図-1 ナグドゥンガトンネル位置図

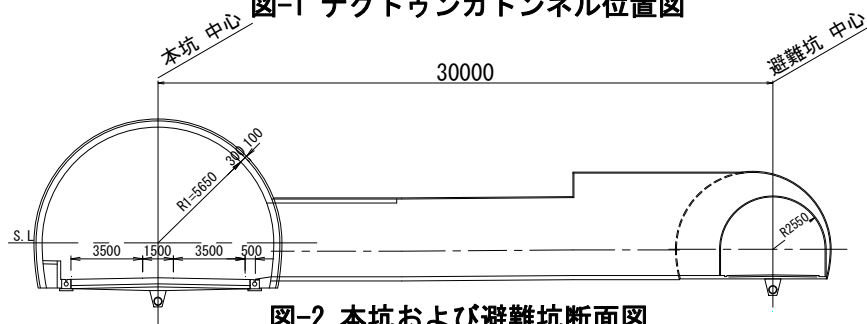


図-2 本坑および避難坑断面図

キーワード ネパール, 千枚岩, 逆断層, 常時微動アレイ観測, 避難坑, ゼロ風速制御
連絡先 〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11 (株)エイト日本技術開発 国際支社 TEL 03-5341-5156

2. 地質調査

(1) 地質概要

当プロジェクト区域における地層は主に変成岩に分類される Tistung 層と Sopyang 層からなる。トンネル施工上支配的となる Tistung 層は主にプロジェクト区域の北部に分布し、中～高度に風化し亀裂の発達した千枚岩と中程度に風化した変成砂岩から構成される。またトンネル線形においては西坑口に出現する Sopyang 層は Tistung 層の下層となり、同様に千枚岩と変成砂岩の互層となる。図-3 に示すように断層破碎帯や不整合面が北西から南東に欠けて平行に存在しているのが特徴である。これはインド大陸がプレート移動によりユーラシアプレートを南方から押し上げることで生じるリニアメントと考えられ、したがってこれにより発生する断層破碎帯は基本的に逆断層と考えることができる。

東側坑口区間には、礫を主体として破碎された千枚岩、砂岩などを含む崩積土が堆積している。崩積土は透水性が高く、非常に緩んだ状態である。

湧水については、北部から供給される地形となっている。

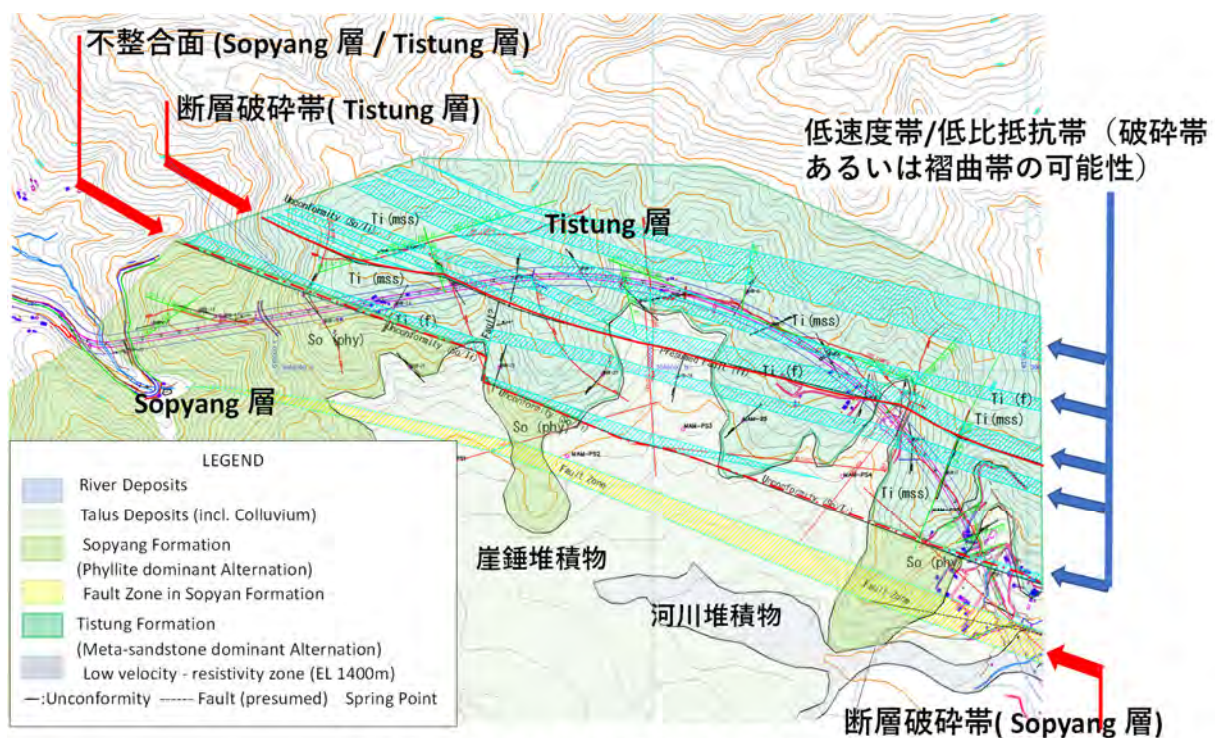


図-3 トンネル周辺区域における地質マップ

(2) 主な調査項目

主な調査項目としては、日本と同様にボーリング調査および弾性波探査を主体とするが、弾性波探査は起震用火薬の許可に時間を要するため、比較的簡便に地盤の S 波速度分布が推定できる常時微動アレイ観測 (MAM) を実施し、S 波と P 波の相関関係からトンネル設計上の弾性波速度を推定し、地山評価を行った。弾性波探査は火薬使用許可後に改めて実施した。また滞水状況を把握するために比抵抗電気探査を実施した。

表-1 に地質調査項目一覧を示す。また図-4 にはボーリング調査位置および各探査測線を示す。

表-1 地質調査項目一覧表

調査項目	仕様・数量
ボーリング調査および標準貫入試験、透水試験	鉛直：7本（延長 565m）、水平：1本（延長 40m）
常時微動アレイ観測	25点
弾性波探査	測線数 16 測線、測線長 4,249m
比抵抗電気探査	測線数 9 測線、測線長 5,289m
室内試験	
・単位体積重量試験、一軸圧縮試験、引張強度試験	6 深度（3 ボーリング地点で各 2 深度）
・超音波弾性波試験	4 深度（3 ボーリング地点で 1～2 深度）

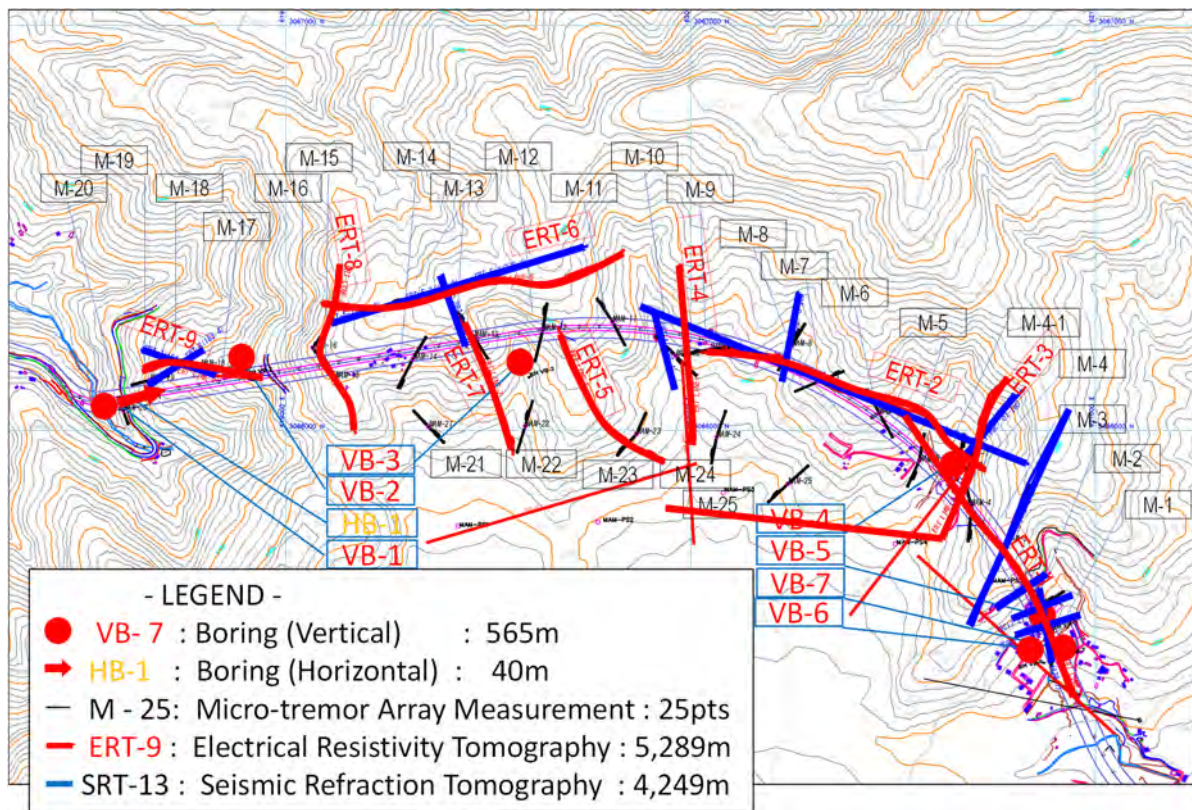


図-4 ボーリング調査位置および各探査測線

(3) 調査結果

a) 常時微動アレイ観測(MAM)結果

常時微動は、波・風や交通、工場などの稼働により常に地盤内に発生している微振動を言い、これを利用した調査手法が常時微動アレイ観測である。地山評価の指標となる弾性波（P波）速度は、探査に必須の火薬の使用許可等に多大の時間を要する途上国が多い。常時微動アレイ観測は比較的簡便に行える探査であり、S波速度による地盤種別の概略判定を早期に行うことができる。常時微動アレイ観測結果のS波速度から推定したP波速度分布（図-5）は、後日実施した弾性波探査結果と比較し、ほぼ同様だったことが判明し、設計上の大きな支障とならない精度であったと評価できた。ただし、常時微動アレイ観測は大局的に低速度帯を把握することは可能であり、一部深部まで風化が進んでいる区間を把握したが、観測点ごとのデータの間を補完した推定であるため、地質構造による詳細な低速度帯構造は弾性波探査により修正することとなった。

b) ボーリング調査結果

ボーリング調査結果から、トンネル通過部が千枚岩の場合は、非常に破碎された層となっており、変成砂岩の場合は亀裂も少なく比較的健全な層が出現すると想定された。一般部のN値は50以上となるが、坑口の崩積土が堆積している区間についてはN=10~30程度の層が分布している。

サンプルコアを利用して行った室内試験では、一軸圧縮強度が30~120 N/mm²の範囲内で分布している。

c) 弾性波探査結果

図-6の弾性波探査結果に示すように、低速度帯が縦断的にも横断的にも深部まで部分的に入り込んでおり、断層破碎帯あるいは褶曲帯の存在が考えられた。弾性波速度分布断面では、トンネル部の深度に3.0~4.0km/secあるいはそれ以上の速度が示される。

しかし、速度の高い砂岩層が低い千枚岩に挟まれ、探査測線が地層の急傾斜面の走向とほぼ並行する場合には、地表で発生した弾性波は、鉛直下方でなく、側方の浅い部分にある高速度層を通過するため、結果として良好な岩盤が実際より浅く表現される。設計上の地質想定断面では、地層の傾斜を考慮して、基盤速度層をより深い位置に推定した。

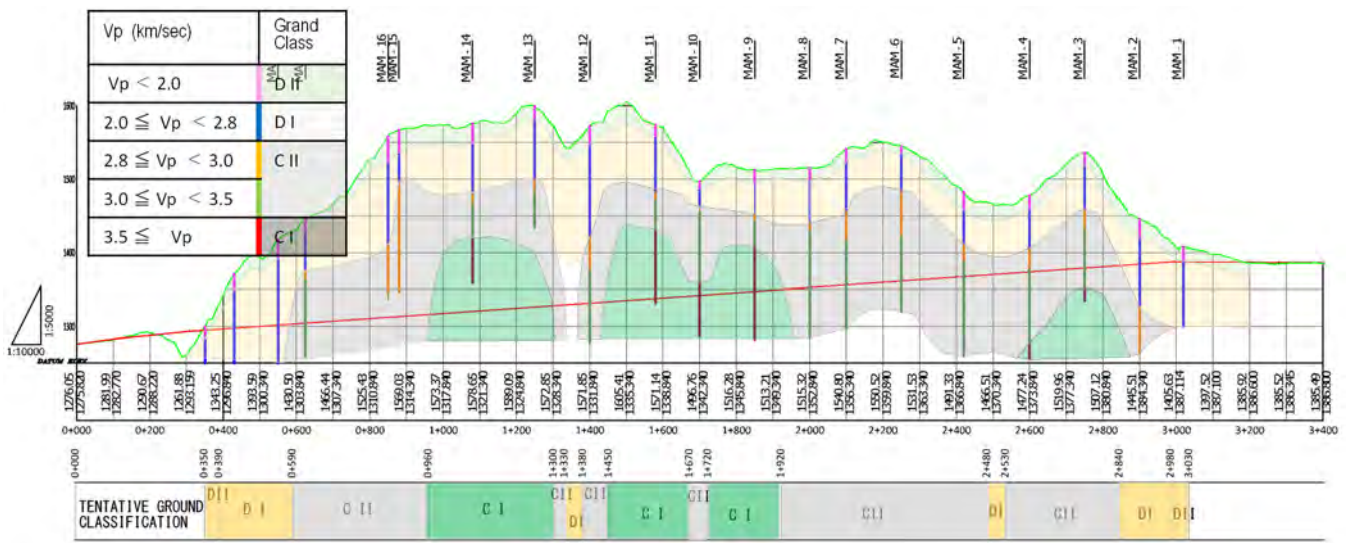


図-5 常時微動アレイ観測結果

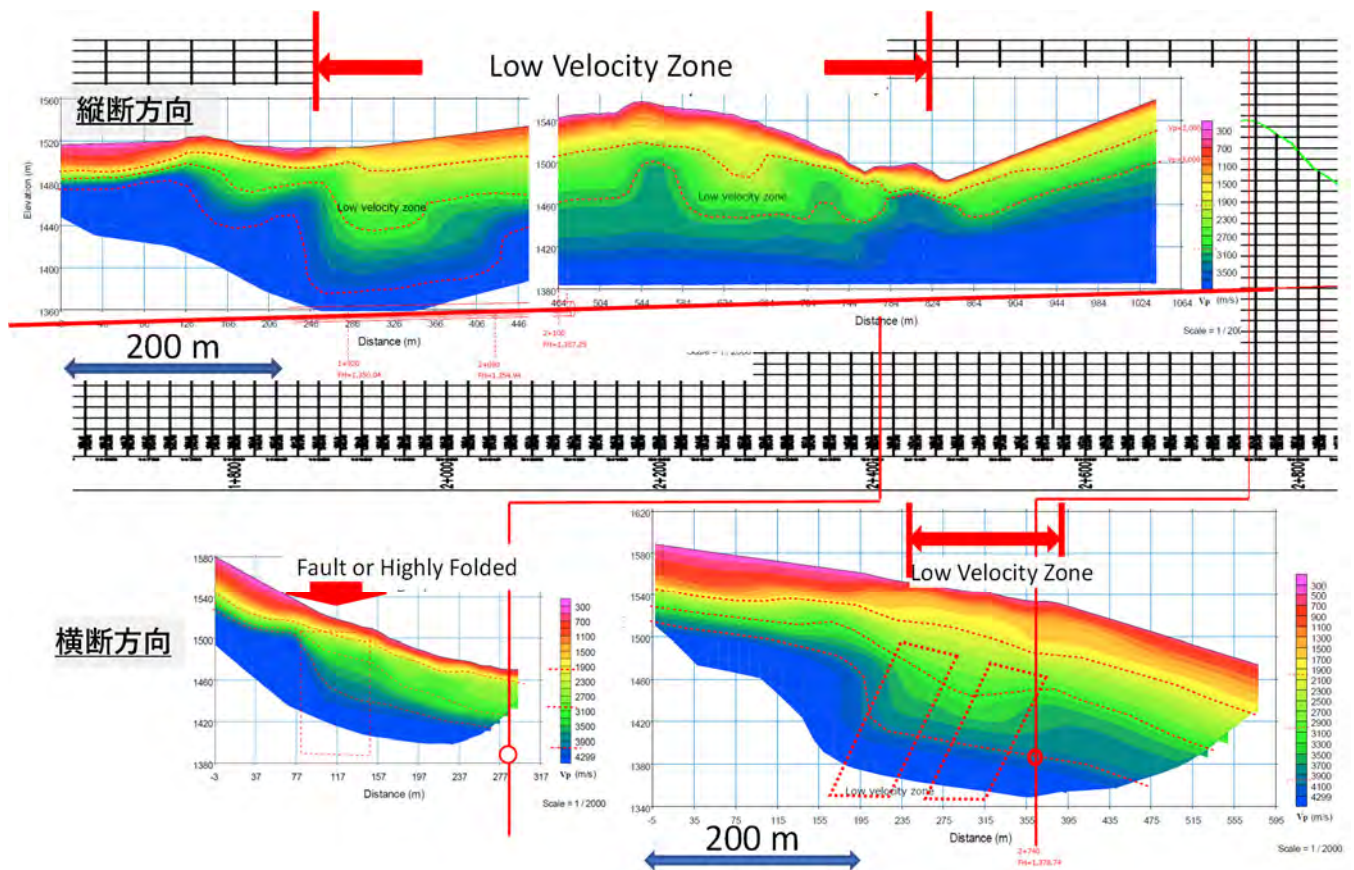


図-6 弾性波探査結果

d) 比抵抗電気探査結果

地盤の比抵抗値は地盤の間隙率および水分含有量を反映する。図-7 の探査結果からわかるように、各層は約 70~80 度の角度で傾いていることから、低比抵抗ゾーン（青色）と高比抵抗ゾーン（赤色）が交互に現れる傾向にあり、さらにこれが 200m 近くの深部まで続く。低比抵抗ゾーンは風化を受けているあるいは破碎され亀裂が発達している可能性を示しており、すなわち高透水ゾーンと考えられる。一方、高比抵抗ゾーンは透水性が低いことが考えられ、これらがトンネル内に交互に現れることから施工時には突発湧水の可能性に注意する必要がある。

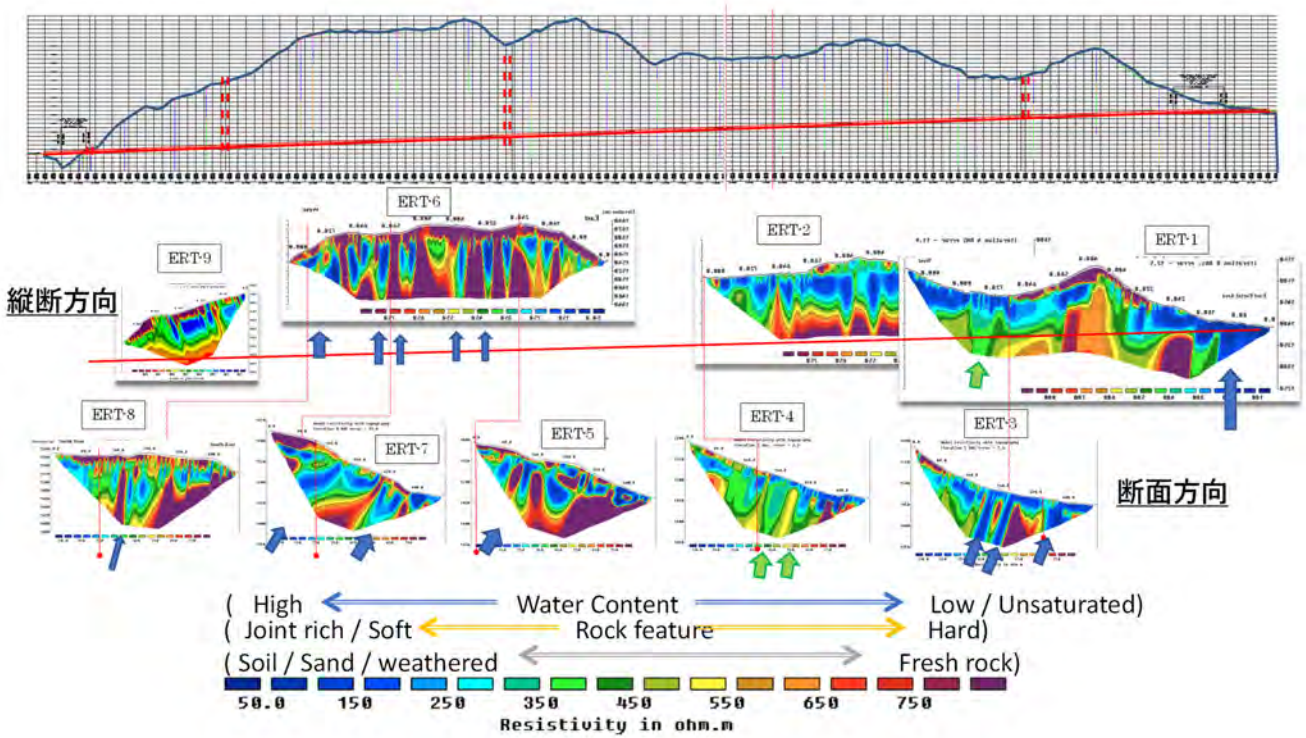


図-7 比抵抗電気探査結果

3. 設計概要

(1) 設計手法

主な設計上の留意点としては、非常に急峻な地形のなかで断層破碎帯を極力避け、かつ、坑口位置としてリスクの少ないトンネルルートを選定、トンネル掘削による近接道路や周辺利水への影響評価、供用時における火災発生時の非常時対応などが挙げられる。

トンネルルートについては、常時微動アレイ観測結果をもとに地質条件に関するルート比較を行った結果、断層破碎帯を避け、かつ最も地山条件の良い線形を選定することができた。

本トンネルにおける断面設計手法としては、ネパールの地質が非常に複雑であり日本の地山分類が適していると考えられることから、基本的には日本における標準支保パターン設計を用いた。西側坑口部においては、既存道路と土被り 6m で本坑トンネルが交差することから 3次元有限差分解析手法(FDM)により必要となる補助工法の検証を行っている。

以下でトンネルの構造および設備について述べる。

(2) トンネル断面とトンネル構造

a) トンネル断面

表-2 にトンネル断面諸元, 図-8 に本坑トンネル標準断面図を示す。

表-2 トンネル断面諸元

項目	諸元
車線数	2
車線幅(m)	3.5
中央分離帯(m)	1.5
路肩(m)	0.5
監査歩廊(m)	0.75
建築限界幅 幅(m)	9.5
高さ(m)	5.0

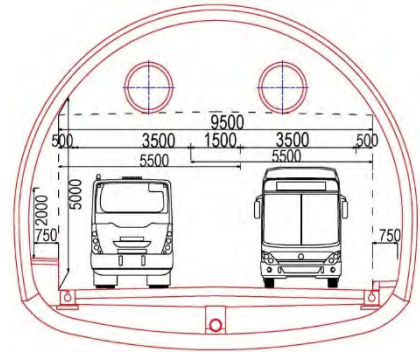


図-8 本坑トンネル標準断面

b) 避難坑の設定

本トンネルは延長 2688m, 計画交通量 9200 台/日となり日本の防災基準では A 等級に属し, 避難経路を確保することとなっているが, 独立した避難坑の設置は必須ではない。しかしながら本設計ではインド基準, 欧州基準を参考にしたうえでネパールにおける一般車両のメンテナンス状況の悪さなどを加味し避難坑を設置することとした。避難坑断面は緊急車両の通行を想定し, また本坑と避難坑のトンネル中心離隔は 30m とした。

c) 非常駐車帯及び連絡坑

非常駐車帯の設置ピッチは日本基準に則り 750m 間隔として 3 か所設けることとした。連絡坑については, ジェットファンのゼロ風速制御を前提としたシミュレーションを実施し, 火災時に人が安全に移動できる距離として 350~400m と算出されたため, 非常駐車帯の設置間隔 750m を考慮し, 375m 間隔での設置とした。

(3) 坑口部の設計

本トンネルの施工は東西両坑口からの発進となるが, 西側坑口は既存道路の急カーブ区間に挟まれた谷地を埋め立ててからの発進となる。本坑坑口前は谷が深いことから埋め土に時間がかかるため図-9 に示すように作業坑から発進して避難坑および本坑の掘削を開始し, 埋め土終了後に本坑坑口区間の掘削を行う計画とした。

本坑西側坑口は既存道路と土被り 6m で交差するため, 施工時の切羽安定・地表面沈下防止対策を検討した。対策工として長尺先受け工, 長尺鏡ボルト工, 早期閉合法を候補として 3 次元有限差分法により検証した結果, 地表面沈下の制限値 20mm を満足する対策工として長尺先受け工および長尺鏡ボルト工を採用した。

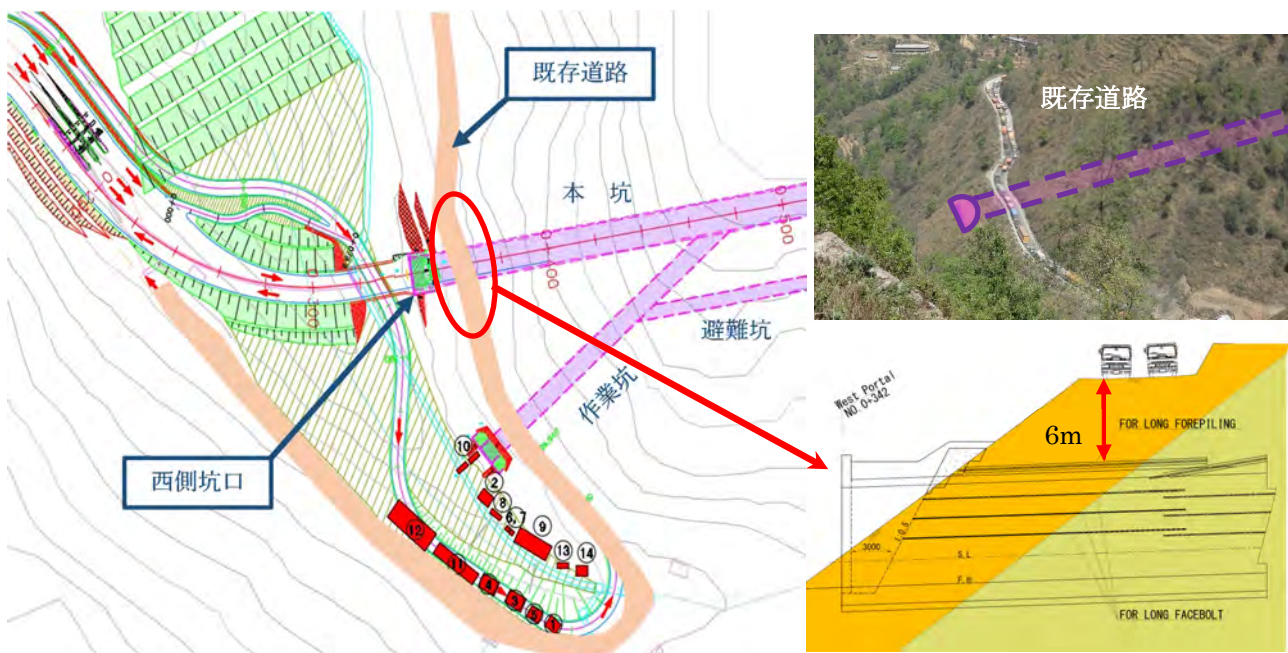


図-9 西側坑口における既存道路との位置関係

(4) 施工への反映点

調査・設計において施工へ反映すべき留意点について以下に述べる。

- ①トンネルは逆断層の走向とほぼ平行に計画されており、側圧が卓越した状態と考えられる。
- ②高透水ゾーンと低透水ゾーンがトンネルにおいて交互に現れると想定され、低透水から高透水に移る際の突発湧水に注意する必要がある。
- ③高透水ゾーンが繰り返しトンネル内に出現すると考えられることから掘削に伴う湧水が多くなることが予想され、周辺家屋や地下水利用に対して影響を与える可能性がある。
- ④避難坑施工時の地質の変化や湧水状況などは本坑施工のための重要な情報となるため、その変化に留意し本坑施工時に役立たせる必要がある。
- ⑤上記のように地質上の懸念点が多いことが予想され、地盤リスクに関するマネジメントが重要となる。

(5) 設備設計

本トンネルは、日本の防災基準ではA等級に属することから消火設備、火災検知器やラジオ再放送など種々の設備を設置することとなるが、ここでは換気システムおよび電力、水供給システムについて述べる。

a) 換気システム

本トンネルでは、換気システムとして最も経済的で一般的に採用されているジェットファン併用型の縦流換気システムを採用している。インバーター制御ジェットファンを用いることにより火災時の空気の流れをゼロ風速にして煙を上方に追いやり拡散させない方式とすることで人が避難する時間を確保することができる。費用について、初期費用は大きくなるが運転費用は通常システムに対して抑えられるため運用8年目で通常システムの費用を下回ることができる試算となっている。

b) 電力および水供給システム

図-10に電力および水供給システム概略図を示す。

電力については外部からの11kV高電圧がトンネル東側坑口に送られ、変圧器によって400Vまで落とされてトンネル内に送電され、照明、ジェットファン、非常用機器用に使用される。また停電時の非常用電源が別途東側坑口に設置される。

トンネル内消火設備のための給水システムについては、トンネルが東から西へ向けての下り勾配となるため、西側坑口に設けられた取水タンクにトンネル内湧水が集められ、ここからポンプアップによりトンネル内を通過して東側坑口に設けられた主タンクまで送られる。トンネル内の消火設備には、この主タンクから水が供給される。

また東側坑口には主タンクと分離して周辺住民への給水のためのタンクが予備的に設けられている。

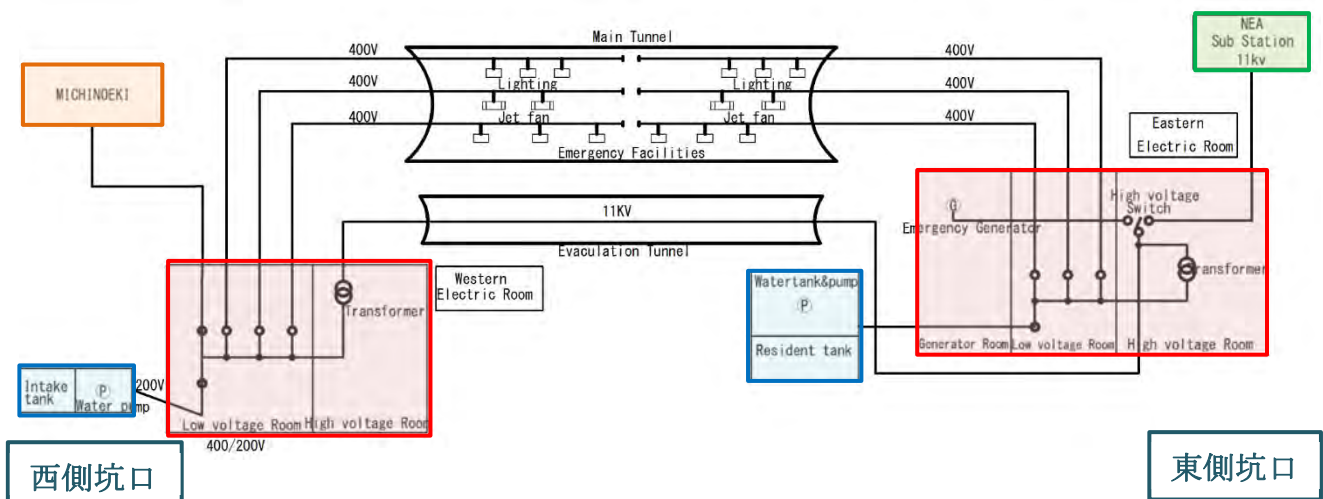


図-10 電力および水供給システム

4. あとがき

本論文では、ネパール国におけるナグドゥンガトンネルプロジェクトの設計概要と施工上の留意点について述べた。

ネパール国初の NATM による道路トンネルということもあり、本プロジェクトに対するネパール国道路局の期待は大きい。このプロジェクトを機に自国でトンネルを計画できる技術を身に付けようとのローカルエンジニアたちの前向きな気持ちも感じられる。

プロジェクトは現在設計ステージから施工ステージに移行しているが、施工開始を目前にしてコロナ禍に見舞われ、また施工においては現地における補助工法などをはじめとする材料調達の困難さ、地質状況の複雑さ、周辺で発生する自然災害の影響など種々の困難な局面に遭遇している。

今後は、海外のトンネルプロジェクト遂行という観点からの施工から設計へのフィードバックなども実施し、より有意義な海外でのトンネル設計技術に関する知見を残していきたいと考えている。



図-11 西側坑口完成予想図