

高速道路営業線に接続する避難坑の施工

Construction of an Evacuation Tunnel under an Expressway in Service

原 田 進 ^{*1}	吉 田 譲 ^{*1}
Susumu Harada	Yuzuru Yoshida
宮 村 憲 正 ^{*1}	仮 屋 謙 一 ^{*1}
Norimasa Miyamura	Kenichi Kariya

【要旨】

敦賀避難坑は北陸自動車道敦賀トンネルの上下線を連絡するトンネルで、車道部と人道部の2本の連絡坑からなる。

車道連絡坑は上り線、人道連絡坑は下り線へとそれぞれ接続するものであるが、高速道路営業線を規制しながらの避難坑新設工事は当社でも施工事例がなく、また人道連絡坑における上り勾配25%斜坑の掘削は国内でも殆ど施工事例がない極めて特殊な工事でもある。

消防法等のトンネルの防災基準が見直され、比較的古い時期に建設された高速道路トンネルでは、今後当工事と類似した避難坑工事が多くなっていくことが見込まれるため、施工事例として紹介するものである。

【キーワード】 小断面 近接施工 高速道路との接続 急勾配トンネル 割岩工法 シングルシェル

1. はじめに

北陸自動車道敦賀トンネルは、地形的制約上急峻な斜面に位置するため、通常2~3D（Dはトンネル掘削幅）の離隔程度で建設されるトンネルとは異なり、敦賀方坑口では上下線の離隔が水平で約300m、高低差で約58m

となっており、坑口より約1,200m地点で高低差38mをもって立体交差する分離断面構造となっている。トンネル延長は上り線が3,225m、下り線が2,925mで、昭和52年に暫定2車線、昭和55年に完成4車線として供用された。



写真-1 敦賀トンネル坑口（敦賀方）

敦賀避難坑は立体イメージ図に示すように、車道連絡坑が上り線へ、人道連絡坑は車道連絡坑より分岐し、下り線へ接続する。

本工事の大きな特徴を以下に述べる。

- ① 避難坑連絡坑は営業線に対し、離隔距離 20m の近接施工である。
- ② 人道連絡坑は小断面で、上り急勾配 (25%) トンネルである。
- ③ 高速道路営業線に避難坑を接続する。
- ④ 一次支保工の長期耐久性の検証を目的としたシングルシェル構造である。

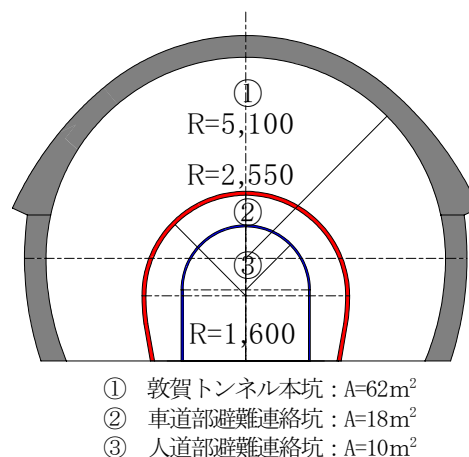


図-2 トンネル断面の比較

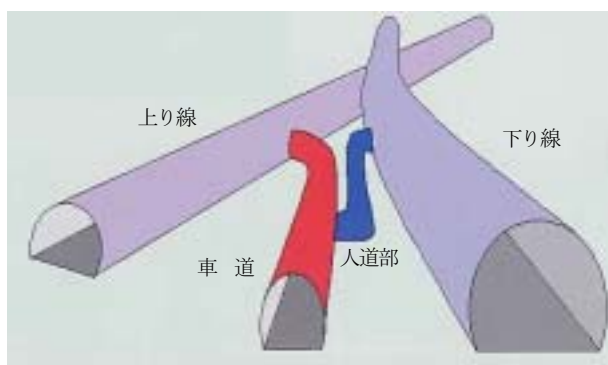


図-1 避難連絡坑と営業線の立体イメージ

2. 工事概要

2.1 工事概要

- ・工事名：敦賀避難坑補修工事
- ・発注者：日本道路公団北陸支社
- ・工事場所：福井県敦賀市横浜地先
- ・工期：H15. 7. 29～H17. 3. 19
- ・工事内容：

車道連絡坑	内空断面 18.0m ²	延長 530m
	下り勾配 i=8.0%	
人道連絡坑	内空断面 10.0m ²	延長 142m
	上り勾配 i=25.0%	
掘削工法	発破 NATM タイヤ工法	
	営業線との接合部は機械掘削	
支保構造	シングルシェル	
	高強度繊維吹付け t=5～15 cm	

2.2 地形・地質の概要

(1) 地形

敦賀トンネルの周辺の地形は、敦賀市と南条郡今庄町との境界をなす分水嶺が存在し、その最高峰は鉢伏山 (762m) である。また、この分水嶺を境にして西部地域 (敦賀湾側) では花崗岩が分布し、谷は分水嶺に直交する比較的短い急流小河川の発達が顕著である。

(2) 地質

敦賀トンネルの地質は中生代白亜紀の花崗岩を主体としており、所々に安山岩岩脈が貫入する。

車道連絡坑の坑口部付近は広く花崗岩の強風化による崖錐堆積物が分布している。以降は亀裂に沿って粘土が薄層に挟在するものの、概ね硬質の花崗岩が人道連絡坑も含めて連続しており、接続する営業線付近の一軸圧縮強度は、車道連絡坑と接続する上り線で 180N/mm²程度、人道連絡坑と接続する下り線で 150N/mm²程度であり、地山等級はB級相当である。

トンネルの湧水については、車道連絡坑が坑口より 100m 当り 0.4～0.5t の割合で漸増していき、TD450m 付近で最大約 25t/h、人道連絡坑では、車道との分岐点からの TD70m 付近で最大 10t/h が確認された。

車道連絡坑の地質縦断面図を図-3 に、人道連絡坑の地質縦断面図を図-4 に示す。

ダンプトラック (4t) の組合せも選択肢のひとつであったが、破碎したずりの掻き込みにおいて、施工効率の低下が予想された。このため、車道連絡坑のずり出しはロードホウルダンプによるロード&キャリア方式を採用した。

積替え兼回転場所として、坑口から約 320mで分岐する人道連絡坑の坑口を利用し、その他その位置と坑口との中間付近に横坑を設けて利用した。その場合の車道連絡坑におけるずり出し方法を表-1に示す。

表-1 車道連絡坑のずり出し方法

掘削程	坑内運搬方式	坑外運搬方式
坑口～TD 70m	ロードホウルダンプによるロード&キャリア方式 坑口でダンプに積替え	オフロードダンプ 15t
坑口～TD150m	ロードホウルダンプによるロード&キャリア方式 坑口でダンプに積替え	オフロードダンプ 15t ダンプトラック 10t
TD150～TD320m	ロードホウルダンプによるロード&キャリア方式 横坑Aでダンプに積替え	オフロードダンプ 15t, 20t で仮置場まで直送
TD320～TD530m	ロードホウルダンプによるロード&キャリア方式 横坑Bでダンプに積替え	オフロードダンプ 15t, 20t で仮置場まで直送

- ※ 横坑A：積替え・回転場所（積替え用仮設横坑）
- ※ 横坑B：積替え・回転場所（人道連絡坑を兼用）
- ※ 坑口～ずり仮置場運搬距離：L=150m

(2) 人道部掘削（急勾配施工）

人道連絡坑の施工条件を以下に述べる。

- ① 掘削断面が 10m²と小断面である。
- ② 縦断勾配が上り 25%の急勾配である。



写真-2 車道ずり積み替え (RHD:3.0m³→ORD:15t)

- ③ 平面線形が車道部と営業線の交差点付近で、ほぼ直角に近い形状である。

上記に示す条件下でのずり出しは、ロード&キャリア方式で、その都度車道連絡坑との交差点まで運搬し、オフロードダンプ（間に 4t ダンプをかませる）に積み替え、坑外へ搬出する方法が最善である。このため、人道連絡坑への適用が困難なロードホウルダンプに代わり、断面適合性と登坂能力に適した 0.8m³積のクローラショベルを使用した。しかし、発破によって飛散したずりの集積や積込において作業能力が著しく低下し、斜坑を約 10m掘削した時点で、同機種における能力の限界と判断された。そのため 20 cm程度の盤下げで断面的に適合する 1.5m³積クローラショベルに変更して、ずり出しを継続した。

なお、車道との交差点部の平面線形は、クローラジャンボ通過時のクリアランスを確保するため、最小限の断面拡幅と隅切りを行った。

表-2 積込機械の作業性比較（こそく時間除く）

機種名	作業性	1 サイクルのずり出し時間と作業性の評価
D31S 0.8m ³	集積・積込性：困難 移動・走行性：良好 積込(実績)率：0.4～0.5	240～280 分 機動性に優れるが積込で施工効率低下
CAT953 1.5m ³	集積・積込性：良好 移動・走行性：劣る 積込(実績)率：0.9～1.0	100～120 分 機動性で劣るも積込で施工効率向上



写真-3 人道ずり積み替え (CAT953:1.5m³→ORD:15t)

3.2 吹付

(1) スラリーショットシステムの適用

敦賀避難坑においては、①吹付時粉じんの低減による坑内環境の改善、②吹付跳ね返り率の低減、③吹付壁面における鋼繊維突出の低減、を図るという目的から、車道連絡坑における吹付コンクリートをスラリーショットシステムで行った。この時の坑内平均粉じん濃度の実績を表-3に、また、併せて行った跳ね返り率の測定結果を表-4に示す。なお、鋼繊維の突出については、スラリーショット吹付が粉体吹付に比べ極初期の立上り強度が若干遅いため、エア吹き押しの効果で突出の低減が可能と判断された。目視における判断では、粉体に比べ鋼繊維の突出は少なく、スラリー吹付の効果があったと判断できる。

表-3 平均粉じん濃度の比較

測定場所	粉体急結剤	スラリーショット
10m地点(mg/m ³)	10.96	6.92
50m地点(mg/m ³)	2.86	2.14

表-4 跳ね返り率の比較

測定項目	粉体急結剤	スラリーショット
吹付跳ね返り率(%)	22.8	17.4
鋼繊維の跳ね返り率(%)	36.7	24.0

(2) 長距離圧送（人道連絡坑吹付）

吹付コンクリートは、シングルシェルの長期耐久性検証という観点から、品質の変動の少ない湿式方式が採用されていた。しかし、人道連絡坑の場合、切羽までのコンクリート供給がトラックミキサーでは不可能である。このため、供給方法を車道連絡坑交点よりのポンプ圧送方式とした。

湿式方式においては、最大圧送距離 L=150m、最大高さ H=30mという条件を、能力的にクリアする専用の吹付機械が開発されていないのが現状である。また、コンクリートの圧送性は、地域性で異なる骨材によって大きく変化することより、NATM吹付はポンプ圧送性において適さないことが多いと言われている。

シンテック社は、明かり高法面用モルタル吹付機を試作しており、このデモ機の適用の可能性を検討した。

その結果、吹付に鋼繊維が入っていることで圧送性に不安があるものの、

①高強度仕様のため、単位セメント量が多いことから閉塞の発生低減と圧送負荷の軽減効果がある。

②絞り管を使用しないことで、配管内の閉塞と材料変質の抑制効果がある。

が期待できると判断し、代替機もないまま採用に踏み切ったものである。

実施工においては、スランプや吐出量の増減変動によって吐出効率も変化していくため、実際の吐出量は理論吐出量に対し、約80～85%程度で推移していた。この結果より、本機での吹付コンクリートの最大施工能力を予測した場合、圧送距離としては配管長約300m程度（この時の高低差は約60m）まで可能と言える。しかし、吐出効率の低下、圧送圧力によるスランプロス、材料の配管内での残留時間等を考慮すると、実施工の約80%（配管長250m、高低差50m）程度までが適当と推測され、今後類似工事を行う上での指標になると思われる。

3.3 施工機械

敦賀避難坑のような小断面トンネルの場合、掘削・支保工に使用する機械の選定要素としては、掘削断面積や断面形状、掘削勾配などの施工条件の他に、機械の汎用性（市場性）を考慮したうえで、条件に適した機械を選定する必要があった。

トンネルに使用する機械については、大型化・高速施工化に対応した機種の開発は進んでいるものの、小断面においては旧式機械の組合せで、しかもこれらの機械は、国内でもその数が限られており、ある意味で重宝されているのが実情であると言える。

敦賀避難坑で使用した機械を表-5に示すが、殆どの機械が車道部と人道部の施工で共有出来ていないことがわかる。

3.4 近接施工における発破振動対策

(1) 発破振動推定式

車道及び人道連絡坑を営業線トンネルへ接続するに際しては、発破振動による動的影響が及ばない範囲を事前に予測しておき、発破掘削へフォローしていく

表-5 掘削・支保工使用機械

名称	作業名称	機械名称	型式・能力	台数	摘要
車道連絡坑	せん孔	ドリルジャンボ	B352 ホイール式2ブーム1ゲージ ドリフト重量150kg	1台	
	ずり出し	ロードホウルダンプ	LHD914 3.0m ³ 積	1台	
	ずり出し	オフロードダンプ	アイムコME985 T-15 15t積 アイムコME985 T-20 20t積	2台	
	ずり出し	ダンプトラック	普通 10t積	1台	坑口～坑外仮置場 TD70m～TD150mの間
	吹付	吹付ロボット	小断面用ミニロボット A304	1台	
	吹付	吹付機	定置式コンクリートポンプ MKW-25SNT 22kw 吐出力25m ³ /h	1台	
	吹付	急結剤添加装置	縦型100kg級 (2t積トラック搭載)	1台	スラリーショット搭載
	換気	送風機	1,000m ³ /min 37kw×2 φ800	1台	送気方式
人道連絡坑	せん孔	ドリルジャンボ	THCJ1400 クローラ式1ブーム ドリフト重量135kg級	1台	
	ずり出し	クローラショベル	CAT-953 1.5m ³ 積	1台	斜坑掘削 10mまで D31S 0.8m ³ 積を使用
	ずり出し	オフロードダンプ	アイムコME985 15t積	1台	車道交点部～坑外仮置場
	ずり出し	ダンプトラック	普通 4t積	1台	車道交点部～坑外仮置場
	吹付	吹付ロボット	小断面用ミニロボット MRⅡ-2	1台	
	吹付	吹付機	定置式コンクリートポンプ SP-7 22kw 吐出力1～7m ³ /h	1台	シンテック社
	吹付	急結剤添加装置	縦型50kg級 (3t積キャリアダンプ搭載)	1台	
	運搬	キャリアダンプ	3t積, 1t積	3台	
	換気	ターボブローア	115m ³ /min 37kw×1 φ300	1台	排気方式
	換気	ウルトラファン	500m ³ /min (1t積キャリアダンプ搭載)	1台	切羽局所用
共通	掘削	大型ブレーカ	0.3t級 0.20m ³ ベースマシーン	1台	
	掘削	バックホウ	0.25m ³ 級	1台	
	吹付	トラックミキサー	10t積 4.5m ³ 積	1台	
	ロックボルト	マイポンプ	950 $\frac{1}{2}$ "/h	1台	

ことが重要である。このためには、発破振動の管理値を設け、既設トンネルとの接続付近に振動速度計を設置し、振動速度を測定しながら発破掘削を管理していく必要がある。

車道連絡坑の坑口から 200m区間は下り営業線とトンネル中心間 30mの距離で近接しており、発破振動を管理しながら施工している。この区間の施工での測定結果より最小自乗法を用い、以下の発破振動推定式を得た。

$$V = K \times W^m \times D^{-n}$$

$$= 3137 \times W^{0.8358} \times D^{-2.6133}$$

V : 振動速度 [cm/sec]

W : 芯抜き1段当りの斉発薬量 [kg]

m : 薬量に関するべき乗定数項 [0.8358]

D : 受信点と発信点の距離 [m]

n : 離隔距離に関するべき乗定数項 [-2.6133]

K : 発破条件や地山条件による定数 [3137]

(2) 発破振動管理値

発破振動の管理値は統一的な設定はなされていないが、本工事においてはJH東名改築都夫良野トンネル(新設トンネルから営業線に向け避難坑を構築)の実績や既設トンネル覆工の健全度によって許容振動速度を設定した。

敦賀トンネルの避難連絡坑の接続部付近は、空洞充填やひび割れ注入などの対策工がなされ、健全度が判定区分A以上に回復していると位置づけ、都夫良野トンネルの管理値³⁾と同様の4 cm/sec (Kine)とした。

表-6 振動速度の許容値²⁾

健全度判定区分	一般的状況	許容振動速度
B, OK	損傷無しか小さい。補修の必要性検討	4 cm/sec
A	損傷大きく補修の必要性検討	3 cm/sec
AA	損傷著しく緊急補修が必要	2 cm/sec

(3) 通常発破施工の限界距離設定

坑口付近の施工で得られた発破振動推定式をもとに、硬質花崗岩を対象とした通常発破は（1 発破進行長L=1.5m, 芯抜き薬量W=2.4 kgの場合）、接続部より約18mが通常発破の施工限界点と予測され、以降の掘削方法についての対策をたて、掘削工法変更についての施工協議を事前に行なった。

(4) 制御発破と機械掘削への変更

発破振動推定式による通常発破限界距離約18mは概ね予測どおりであった。以降の営業線との近接施工における発破振動管理値と掘削工法の変更位置及び対策を表-7に示すが、人道連絡坑については小断面で分割発破が困難であるため、貫通点より11.5mで割岩に変更した。

表-7 発破振動管理値と掘削変更位置及び対策

測定値 (Kine)	貫通点からの施工位置	処置及び対策
		・図-6に基づき事前に検討し、対策工を立案
3.0以下	18m	・通常発破で施工継続
3.0~4.0	18m~12m ※人道坑は~11.5m	・測定値の再確認、予測値修正 ①発破パターンの変更 (斉発段数(MS雷管)の変更) ②一発破進行長調整(1.0m以下)
	12m~8m	③断面分割発破
4.0以上	8m~貫通点 ※人道坑は11.5m~	・発破施工中止 ・測定システムの再確認、営業線トンネル内目視計測・安全確認 ④割岩掘削

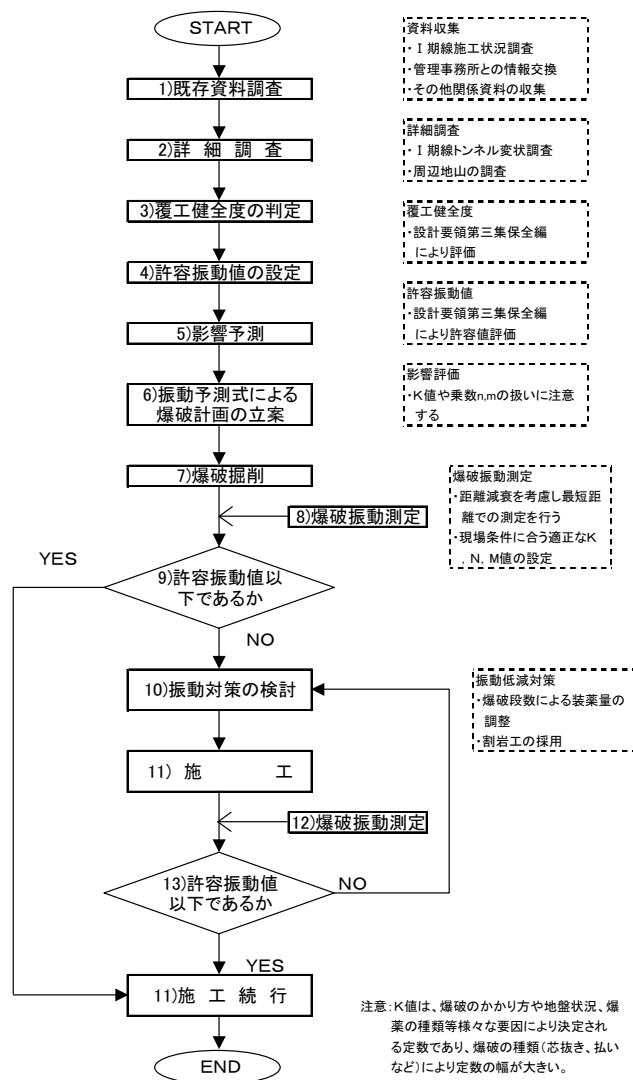


図-6 動的影響（爆破振動）を受ける時の検討フロー

4. 営業線への避難坑接続

4.1 車線規制による営業線内の工事

営業線を規制しながらトンネル内で工事を行う場合、断面の制約により作業効率が著しく低下する。また、トンネル全線（3 km以上）にわたる規制関連の設備や、この維持管理に係わる労力等のコスト面において負担が大きくなっていく。さらに、規制期間が雪氷時期や週末、あるいは行楽シーズンなどで制限されるため、できるだけ短期間に集中して、かつ効率的に工事を行うことが要求される。今回営業線内で実施した主な車線規制による工事は、上下線共大きく3回に分けて施工した。この時の規制方法と工事の内容を表-8に示す。

表-8 営業線内の主な規制工事

規制分類		主な作業名	規制日数
I	① 昼間	既設トンネルの健全度調査 地質ボーリング調査	上り線：5日 下り線：5日
	② 昼間	覆工背面空洞注入，線導水 覆工ひび割れ注入	上り線：22日 下り線：18日
II	③ 昼間	既設トンネルへの補強RB TD24 L=4.0m 上り線：106本 下り線：119本	上り線：13日 下り線：9日
	④ 昼間	計測機器類設置撤去 振動計，覆工応力計，覆工ク ラック計，RB軸力計	上り線：2日 下り線：2日
	⑤ 昼間	覆工接続箇所縁切り せん孔径φ102mm，間隔25cm せん孔長1.5m	上り線：1日 下り線：1日
III	⑥ 昼夜	既設監査廊撤去→水道・電線 管切廻し→覆工取壊し(貫通) →接合部覆工→監査廊復旧	上り線：19日 下り線：18日

4.2 営業線の補強工

(1) 営業線の覆工現況

敦賀トンネル本坑は昭和40年代後半～昭和50年代前半にわたって、矢板工法によって建設されている。

事前に行なわれた敦賀トンネル現況調査では、補修ランクをⅢとしているものの、ひびわれ発生密度は0～32.7cm/m²で、補修ランクⅡのスパンも50%程度確認されている。

＜補修ランク＞²⁾

※¹⁾補修ランクⅡ(20～50cm/m²)：ひびわれが全域で発生し、将来コンクリート片落下の危険性がある。

※²⁾補修ランクⅢ(20cm/m²以下)：一般に見られるひび割れに加えて部分的なひび割れ集中箇所があるひびわれが全域で発生し、将来コンクリート片落下の危険性がある。

(2) 営業線への補強方法

避難坑を営業線へ接続するのに際し、既設トンネルの変状防止を主な目的として、表-9に示す補強工を上下線に対して行った。

表-9 既設トンネルへの補強工

No.	補強の種類	当初数量 実施数量	摘 要
①	覆工背面への空洞充填	96m ³ 435m ³	補強範囲50m 可塑性エアモルタル σ=1N/mm ² 以上
②	覆工面のひび割れ注入	5m 298m	補強範囲50m エポキシ系樹脂
③	アーチ内面より補強RB	234本 225本	補強範囲12m 防錆亜鉛メッキ製 TD24 L=4.0m

4.3 営業線の計測管理

(1) 管理値の設定

敦賀避難坑におけるB計測管理値を表-10に示す。なお、管理値の設定については、北陸自動車道柳ヶ瀬トンネル(平成15年)で得られた解析結果⁴⁾を準用した。この解析では、避難坑の掘削による影響を偏土圧と仮定し、二次元FEMで営業線本坑覆工の許容応力、限界応力が発生する状態を創出し、その時の部材応力(覆工応力、ロックボルト軸力、地中変位)を算出、管理値のランクを設定した。

- ・ 管理レベルⅠ：許容応力ー初期応力
- ・ 管理レベルⅡ：管理レベルⅢ×50%
- ・ 管理レベルⅢ：(限界応力ー初期応力)×75%

※二次元 FEM での本坑施工後の応力状態を初期応力としている。

表-10 敦賀トンネルにおけるB計測管理値

名 称	計測位置	管理レベル		
		I	II	III
覆工応力 (KN/mm ²)	30° (T2・T3)	3800	6500	12900
	天 端 (T1)	2200	3800	7600
B軸力 (KN)	30° (M2・M3)	44.8	67.2	134.4
	天 端 (M1)	44.8	67.2	134.4
ひび割れ 変動幅 (mm)	30°，天端 (K2・K3，K1)	1.5 以下	1.5～ 3.0	3.0 以下

※ 上表においてA計測工は省略する。

(2) 計測管理と緊急時の対策

計測管理に基づく、緊急時の対策工実施フローを図-7に示す。いずれかの計測項目が管理レベルⅡに達した場合は警戒体制、Ⅲに達した場合は緊急体制をとることとした。また、各管理レベル段階における営業線本坑及び避難連絡坑の補強対策工を表-11に示す。

【緊急体制】敦賀管理事務所に管理事務所長を本部長とした対策本部を設置し、緊急時に備える。本部には連絡要員として飛島職員も常駐する。

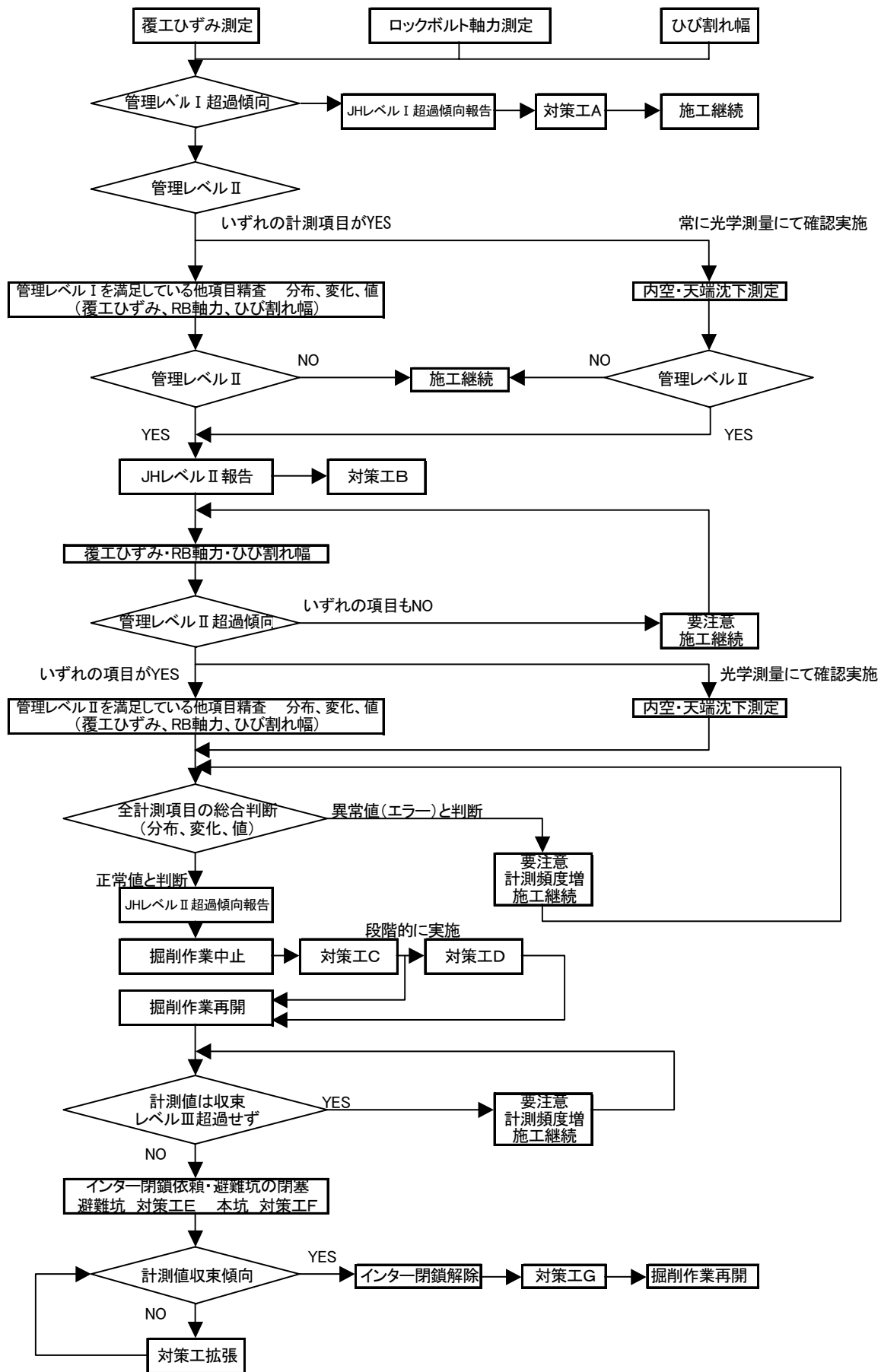


図-7 計測管理並びに対策工の実施フロー

表-11 緊急時の補強対策工

名称	具体的な対策工	
避難坑	A	増し吹付, 増しRB
避難坑	B	インバート閉合, 鋼製支保工間隔変更(1.0m→0.5m), RB長変更(2.0m→4.0m)
本坑	C	追加補強RB (走行車線側)
本坑	D	追加補強RB (追い越し車線側)
避難坑	E	避難坑閉塞 (ストラッド, ジャッキ補強)
本坑	F	内面補強 (炭素繊維シート)
避難坑	G	注入式鋼管先受け工 (本線走行車線側より施工)

※ 走行車線側：避難坑接続側 追い越し車線側：開放側

(3) 施工における計測の結果

避難坑が営業線に接続する 100m地点より計測を行った時の、各計測項目の最大値を表-12に示す。

計測結果については、最大でも管理レベルIに対して、覆工応力が約45%程度、ロックボルト軸力が50%程度、ひび割れが20%程度であり、既設トンネルの安全性が確保されたと言える。

表-12 計測結果 (最大値)

名称	位置	上り線 (車道接続)	下り線 (人道接続)	摘要
覆工応力 (KN/mm ²)	T1	-1012	990	上り線: (圧縮) 下り線: (引張)
	T2	440	-814	上り線: (引張) 下り線: (圧縮)
	T3	-374	-880	上り線: (圧縮) 下り線: (圧縮)
RB軸力 (KN)	M1	-11.76	-4.62	上:1.5m(圧縮) 下:4.0m(圧縮)
	M2	-11.69	-21.91	上:2.0m(圧縮) 下:1.5m(圧縮)
	M3	-10.29	-20.65	上:3.0m(圧縮) 下:2.0m(圧縮)
ひび割れ 変動幅 (mm)	K1	-0.02	-0.002	上り線: (圧縮) 下り線: (圧縮)
	K2	0.02	0.34	上り線: (引張) 下り線: (引張)
	K3	-0.06	-0.06	上り線: (圧縮) 下り線: (圧縮)

※ RB軸力の摘要欄数値は覆工背面よりの位置を示す。

4.4 接続部における機械掘削 (割岩工法)

(1) 機械掘削工法の選定

連絡坑の接続部は高速道路営業線との近接施工であり、発破に変わる機械掘削工法を選定する必要があるが、避難坑の断面やその他の施工条件、当該地山の岩盤強度を考慮した場合、営業線との接続部付近の機械掘削工法は必然的に割岩掘削が選択肢された。

図-8に示すように、割岩工法は大きく、①自由面形成、②割岩孔せん孔、③割岩 (一次破碎)、④切削・砕岩 (二次破碎) の4工種に分類される。さらにそれらは工法・技術に分類でき、実際の施工では工法・技術のなかから施工条件に応じて適切なものが選定され、組み合わせて用いられる。敦賀避難坑においては、施工の確実性、使用する機械の適合性・汎用性及びコスト等を総合的に比較検討した結果、それぞれ表-13に示す工法の組合せを選択した。

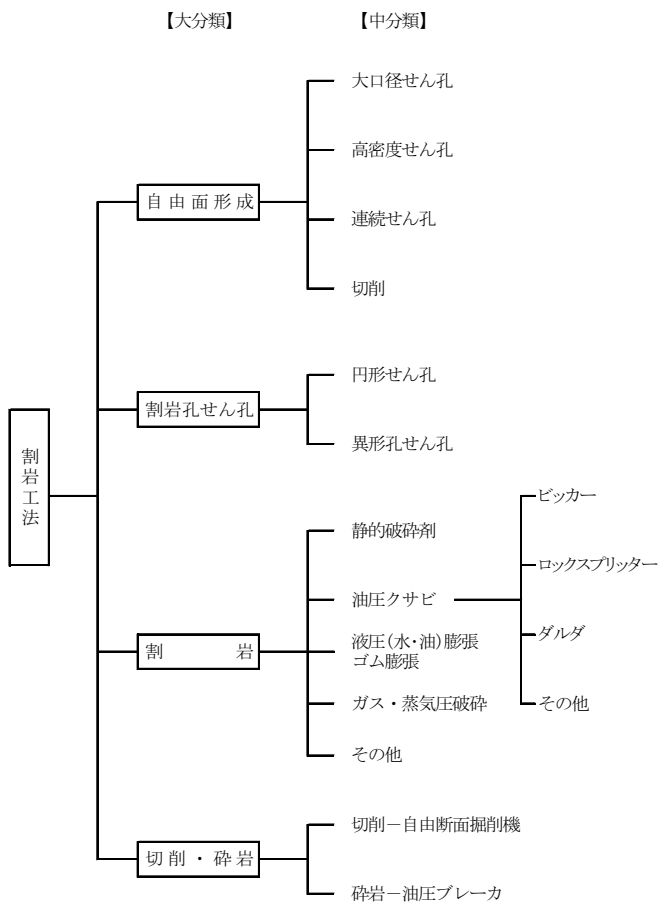


図-8 割岩工法の分類

(2) 割岩使用機械の選定

割岩掘削に使用する機械の選定に際しては、

- ① 既存の割岩専用機械を使用する。
- ② 掘削で使用しているせん孔機械を使用する。
- ③ 割岩専用機械が掘削断面・平面形状に適合する。

などの条件をもとに、過去の施工事例を考慮して決定した。表-13 に車道部及び人道部における割岩掘削の使用機械を示す。

(3) 車道連絡坑割岩（トンネルビッカー）

トンネルビッカーはバックホウをベースマシンとして、これに油圧クサビ装置を搭載した割岩専用機で、確実な割岩実績より最近は施工事例も多い。割岩の破碎効率を高めるうえで最も重要となるのは自

由面である。この自由面の形成方法は連続せん孔方式が望ましいが、専用の装置が別途に必要であることや割岩延長も短いなどの理由で、車道部割岩における自由面形成方法は、高密度せん孔方式を採用した。

高密度せん孔は、自由面としての効果は連続せん孔方式より劣るものの、小口径で30 cm程度の間隔をもって高密度にせん孔することで、大型ブレイカによる砕岩が可能である。

車道部断面においては、割岩～砕岩～ずり出しの作業が繰り返しとなり、これらの作業において機械同士の離合が困難となる。このため、一部断面を拡幅して対処したが、前述した割岩機械の組合せによる割岩掘削としては限界の断面であったと考えられる。



写真-4 ビッカーによる割岩

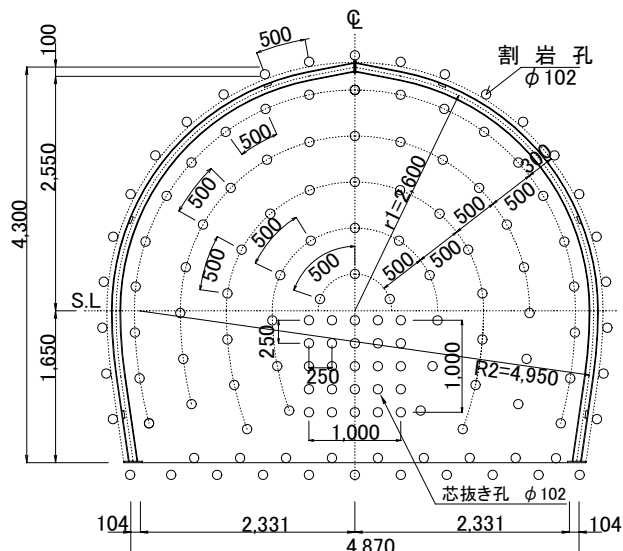


図-9 車道連絡坑割岩削孔パターン図

表-13 割岩使用機械

連絡坑名称	作業名称	機械名称	型式・能力	台数	摘要
車道連絡坑	自由面形成	ドリルジャンボ	B352 ホイール式2ブーム1ゲージ ドリフタ重量150kg級	1台	せん孔径102mm 高密度せん孔方式
	割岩孔せん孔			1台	せん孔径102mm
	割岩	トンネルビッカー	YTB-1120 割岩力1,100t 0.45m ³ バックホベースマシン	1台	
	切削・砕岩	大型ブレイカ	0.8t級 ショートリーチ型 0.45m ³ バックホベースマシン	1台	
人道連絡坑	自由面形成	ドリルジャンボ	THCJ1400 クローラ式1ブーム ドリフタ重量135kg級	1台	せん孔径65mm
	割岩孔せん孔			1台	せん孔径46mm
	割岩	ダ ル ダ	C-11SL 割岩力720t	2台	
		スプリングバランサー	EW型 450～1,500mm	2台	ダルダ吊下げ
	切削・砕岩	大型ブレイカ	0.3t級 0.20m ³ バックホベースマシン	1台	

(4) 人道連絡坑割岩（ダルダ）

ダルダもトンネルビッカーと同じくクサビの原理を応用した割岩機械のひとつであり、人力による作業が可能のため、手持ち割岩工法として比較的高所や狭隘な箇所など、大型の破碎機械が使用出来ない場合に用いられる。

人道連絡坑は人力主体の割岩作業であることや、破碎能力の高い大型ブレーカが使用できないなど、施工効率面の低下をカバーするために、できるだけ多くの自由面を連続して形成することが重要である。

人道部割岩掘削においては、この連続自由面を形成するにあたり、既存の1ブームジャンボ専用の「連続孔せん孔装置」を製作し、使用した。これは、ジャンボのガイドセルにスリット孔専用の装置を取り付け、先行して削孔された孔にロッドを挿入し、これをガイドとして隣接孔を連続して削孔するもので、工法的には「単一孔連続せん孔方式」と言える。

なお、スリットせん孔径はφ65mmとしたが、これはドリフタのせん孔能力を考慮したもので、使用機械が施工条件に適合すれば、せん孔径は102mmとした方がさらに高いせん孔効果が期待できると言える。

割岩の施工能力は岩盤亀裂に大きく左右されるが、トンネル掘削の場合、ダルダ単体では割岩効果が低いとされる。このため、ダルダ二連装備として施工した。この時自由面は削孔長1.5m、ダルダは0.35～0.40mを3～4サイクル繰り返して施工したものである。

また、今回使用したダルダ単体の重量は約35kg/台であるため、スプリングバランサーを使用することで人力取り扱いを容易にし、作業効率の向上が図れた。

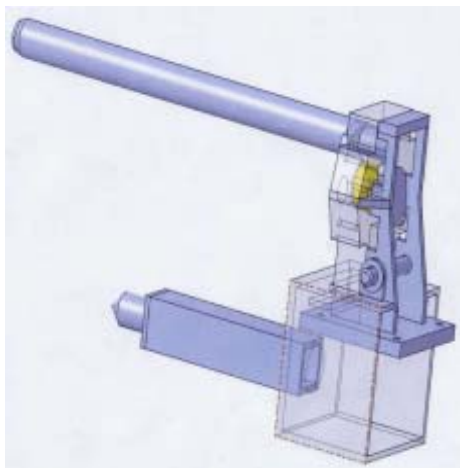


図-10 連続孔せん孔装置



写真-5 二連装備によるダルダ割岩状況

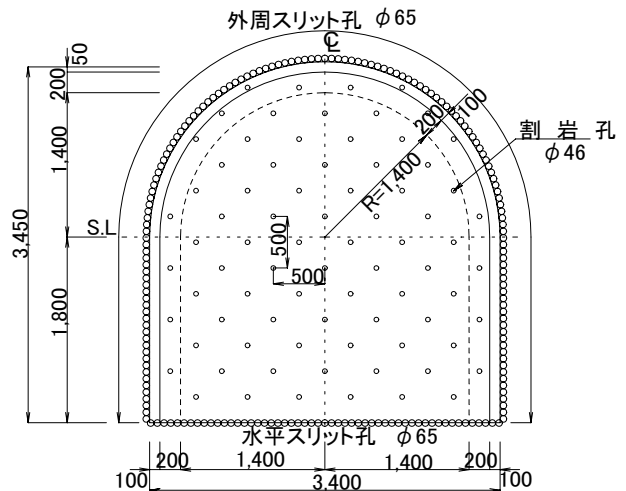


図-11 人道連絡坑割岩削孔パターン図

(5) 割岩掘削の施工実績

割岩による掘削実績を表-14に示す。トンネルにおけるダルダ割岩掘削の施工事例が極めて少なく、過去における施工実績も2～3m³/日程度ということ consideringすれば、今回の実績で得た4.3m³/日は、連続自由面形成とダルダ二連装備による効率化の効果と考えられる。

表-14 割岩掘削施工実績

施工箇所	割岩長	日進長	摘要
車道連絡坑 (ビッカー)	8.0m	1.07m/日	19.8m ³ /日
人道連絡坑 (ダルダ)	8.0m	0.40m/日	4.3m ³ /日

4.5 営業線への接続方法

トンネル間を避難坑で連絡する場合、Ⅰ期線の建設時点でⅡ期線方向へ、約10m程度の掘削や覆工を実施するのが一般的である。このため、一部の安全措置を講じる以外は、営業線を規制しての工事は行わない。しかし、敦賀避難坑のようなケースの場合は、規制規模（規制期間・延長）や交通に与える影響が大きいため、短期間で、かつ安全で確実性の高い接続方法が求められる。

避難坑と営業線を接続（貫通）する方法として、坑内より機械掘削を進めながら、同時に約5～6m程度の迎え掘削を行い、トンネル内で貫通させる方法も考えられたが、今回の車道及び人道連絡坑と営業線との接続の場合は、規制が必要な作業を最小限にとどめるため、既設トンネルの覆工背面までを割岩で掘削し、最終的には大型ブレーカで営業線側と坑内の双方から覆工を取壊し、接続させた。この時の状況を図-12及び写真-6に示す。

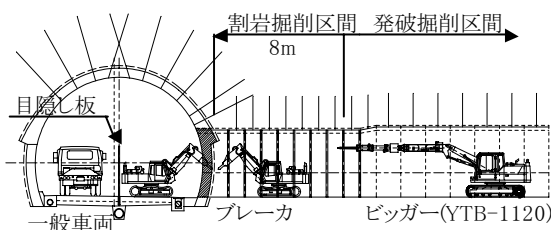


図-12 接続部覆工取壊し状況図



写真-6 車道部貫通

4.6 換気

換気については、車道断面よりの分岐、人道断面形状、上り斜坑といった条件を考慮して、ターボブロー

ーによる排気方式で計画した。しかし、切羽付近においては機械熱による坑内温度の上昇や吹付時の坑内環境が改善できず、結果的に送気方式で施工している。なお、吹付時はファンによる切羽の局所換気や、小型のプロアーを約30m間隔で設置するなどの対策を試みたが、満足できる結果には至っていない。したがって、換気方法については今後課題を残したと言える。

5. シングルシェル

従来、トンネル構造物は吹付コンクリートやロックボルトを主体とする一次支保により掘削を行い、その後トンネルの安定性が確認された後に防水工を兼ねたアイソレーションを施し、二次覆工コンクリートを施工する。

地山条件が良好な場合は、これによらず一次支保のみで恒久的な構造物とすることも考えられ、実現すればトンネル構造物の合理化、経済化が図られることになる。

JHでは、地質的に花崗岩主体の良好な地山が想定される敦賀避難坑をモデル現場として位置づけ、一次支保工の長期耐久性の検証を行うこととした。公共施設としての完成構造物としては国内初の事例となるため、技術検討会を設け検討を継続している。これらの結果については、将来的にその報告がなされる予定であり、本稿では詳細を割愛するものであるが、最終的な吹付コンクリートの長期耐久性評価は主に下記①～③の項目について行うこととなっている。

- ① 材料自体の長期耐久性
- ② シェル構造体としての長期耐久性
- ③ 地山と一体化して機能する支保構造としての長期耐久性

敦賀避難坑での実施内容のように、吹付コンクリートの性状を長期間に渡り調査した例はなく、本調査及び試験で得られたデータは重要な基礎資料となり、今後の吹付コンクリートの発展に大きく貢献することが期待されている。平成16年12月1日に現地で行われた検討会で提案された今後の長期耐久性評価の計画を表-15に示す。

表-15 吹付コンクリート長期耐久性の評価に対する試験計画

検証時期	① 材料自体			② シングルシェル構造体			③ 支保構造	
施工時				★				☆
極初期	○ ^{※1}							
初期	○ ^{※2}	△ 24hour						
長期	○ ^{※3}	△ 28day	□ 28day	● 28day			◎ 28day	
経年変化	1年	○ 1year	△ 1year		▲ 1year	● 1year	◎ 1year	
	3年	○ 3year			▲ 24hour	● 3year	◎ 3year	
	5年	○ 5year			▲ 28day	● 5year	◎ 5year	
	10年	○ 10year			● 10year	● 10year	◎ 10year	

○：圧縮強度試験(箱型枠) [※1 5, 10, 15, 30min ※2 1, 3, 6, 24hour ※3 7, 28, 91day]

△：乾燥収縮試験(箱型枠) □：曲げ強度試験(箱型枠)

●：圧縮強度試験(現位置) ▲：乾燥収縮試験(現位置) ■：中性化試験(現位置) ★：ひび割れ等の目視観察

◎：付着強度試験(現位置) ☆：切羽観察・内空変位測定・地山資料試験

6. おわりに

敦賀避難坑は、計測による営業線への影響評価、小断面での割岩、急勾配トンネル掘削、シングルシェルといった工事の特殊性の他、高速道路を供用しながらトンネルを接続させるという、当社においても初めての工事であった。このような施工条件のなかで、施工・品質・安全面においてトラブルもなく、無事に完成させることができたのも、計画から携わった土木技術部や技術研究所など、全社的なバックアップがあったからこそと言える。また、中間検討会や規制工事期間中などにおいて、職員応援などの支援を頂いた他支店関係者も含め、この紙面をお借りして謝意を表します。

【参考文献】

- 1) (社)日本トンネル技術協会：トンネル工事用機械便覧
- 2) 日本道路公団：設計要領第3集トンネル本体工保全編(近接施工)
- 3) 日本道路公団敦賀管理事務所：平成13年度北陸自動車道柳ヶ瀬トンネル避難連絡坑工事逆解析・設計検討解析
- 4) 菊池晋，佐藤寛：大交通量のトンネルに向って連絡坑を掘る－東名・都夫良野トンネル・発破掘削の影響監視－，トンネルと地下，1989.12

Summary Tsuruga evacuation tunnel is connected with the up lane and down lane of Tsuruga Tunnel on the Hokuriku Expressway and includes two crosscut tunnels for driveway and walkway.

The driveway crosscut tunnel is connected to the up lane, and the walkway crosscut tunnel is connected to the down lane. The construction of an evacuation tunnel to an expressway while regulating the traffic and the construction of an inclined crosscut tunnel for walkway with a gradient of 25% are both rare cases with few references in the past.

This report is provided for future reference, as the number of construction projects related to similar evacuation tunnels is expected to increase for relatively old expressway tunnels under revised disaster prevention standards for tunnels, such as the Fire Defense Law.

【Keywords】 small section tunnel, neighboring construction, access to expressway, steep inclination tunnel, single shell lining, rock split method