

供用線に接続する避難連絡坑の施工

— 阪和自動車道 藤白トンネルII期線北工区 —

Construction of the crosspassage tunnel connecting the in-service expressway
— Case study of the Fujishiro Tunnel on the Hanwa Expressway —
(North section of four-lane construction)

入江壮太¹・杉田幸浩²・柚木崎守³・平田亮⁴・川島義和⁵
Souta Irie, Yukihiro Sugita, Mamoru Yukizaki,
Ryo Hirata and Yoshikazu Kawashima

¹西日本高速道路株式会社 関西支社 和歌山工事事務所 (〒640-8341 和歌山市黒田50)

²工修 西日本高速道路株式会社 関西支社 和歌山工事事務所 (〒640-8341 和歌山市黒田50)

³鉄建建設株式会社 東京支店 JVリニア御坂中作業所 (〒406-0032 山梨県笛吹市石和町四日市場1544-1)

⁴正会員 工修 鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町二丁目5-3)

E-mail:ryou-hirata@tekken.co.jp

⁵鉄建建設株式会社 エンジニアリング本部 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町二丁目5-3)

To cope with increased traffic, existing expressways have been recently widened to four lanes. Emergency evacuation cross-passages for motor vehicles linking two tunnels are planned in many of these construction sites. In the project discussed here, the evacuation cross-passage was constructed while continuing service of the existing tunnels, because it was difficult to regulate the traffic in this location.

The present paper reports the excavation method of this cross-passage, with efforts to minimize impact of the construction upon the tunnels in service, and the reinforcing technique of the connections of the cross-passage with the existing tunnels, referring to the past construction projects.

Key Words: cross-passage tunnel, upon the tunnels in service, reinforcing technique

1. はじめに

阪和自動車道 海南～有田間(旧海南湯浅道路)は、1984年に京阪神圏と和歌山県南部地域を連結する自動車専用道路として供用された。その一区間である藤白トンネル(I期線)は、和歌山県海南市の南方に位置し、当時は完成2車線のトンネルとして供用を迎えた。しかし、商業や観光産業の発展に伴って交通量が増大し、頻繁に渋滞が発生するようになった。そのため、II期線(4車線化)工事が計画された。II期線のトンネルの構築にあたっては、緊急時の避難経路として両トンネルを接続する避難連絡坑(車両通行用1箇所、人道用1箇所)が必要となった。

将来的に4車線化計画のある暫定2車線トンネルにおける避難連絡坑の施工では、将来計画を見越してI期線より10m程度施工し、II期線施工時にI期線に向かって迎え掘りするのが一般的である。しかし、本トンネルは完成2車線施工であったため、供用中であるI期線に新たに避難連絡坑を接続させる必要があった。そのため、避難連絡坑の発破掘削によるI期線への影響や、接続によるI期線および避難連絡坑の安定性を確保して施工する必要があった。

本報告では、避難連絡坑掘削時の発破振動がI期線覆工に与える影響を最小限に抑制するための掘削方法およびI期線接続部の補強対策について述べる。

2. 工事概要

本工事は、藤白トンネルⅡ期線(延長2136m)の北側工区(延長1151m)およびⅠ期線に接続する避難連絡坑(車両通行用)をNATMにより建設するものである。

本工事の概要を表-1に示す。避難連絡坑は、北側坑口から約720mの地点に位置する。避難連絡坑施工平面図を図-1に、標準断面図を図-2に示す。

表-1 工事概要

工事件名	近畿自動車道(紀勢線) 藤白トンネル北工事
発注者	西日本高速道路㈱関西支社
施工者	鉄建建設㈱・金下建設㈱特定建設工事共同企業体
施工場所	和歌山県海南市藤白～和歌山県海南市下津町
工期	平成16年8月26日～平成20年4月6日
施工内容	本坑 : 延長1151m, 掘削断面70.3m ² , 縦断勾配0.46%
	非常駐車帯 : 掘削断面108.9m ²
	避難連絡坑 : 延長62m, 掘削断面19.5m ² , 縦断勾配11.9%
掘削方式	本坑 : 発破掘削, 機械掘削
	避難連絡坑 : 発破掘削, 割岩掘削

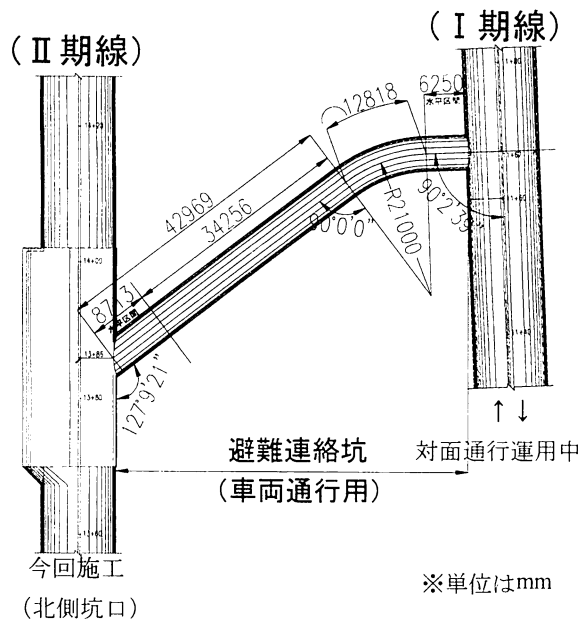


図-1 避難連絡坑位置図

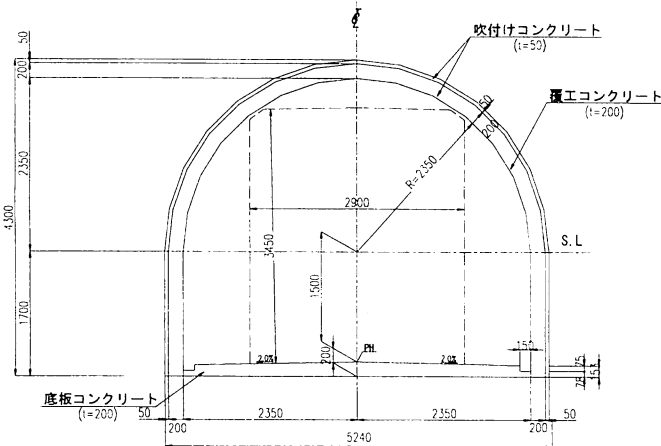


図-2 標準断面図

3. 地形・地質概要

(1) 地形

当該地区は紀伊山地の西縁にあたり、和歌山東山地の標高200～400mの小起伏山地に属し、比較的緩やかな稜線を持つ山体が連なっている。山地の北斜面は急傾斜であるが、南斜面は北斜面より緩傾斜である。

(2) 地質

和歌山県付近は、西南日本外帯最北部に位置し紀伊半島を東西に横断する三波川帯の分布域である。本トンネルの地層は、この三波川帯の南側に接し、分布する岩石は、高压低温型の変成作用を受けた結晶片岩より構成される。表-2に主な地質を示す。

避難連絡坑付近におけるⅡ期線本坑施工時の地質は、黒色片岩が主体で部分的に緑色片岩が混在する比較的安定した地質(C等級)であった。また、Ⅰ期線の施工実績では、同様に黒色片岩および緑色片岩で構成され(C等級)、部分的に粘土層が挟在しており、湧水も確認されている。以上のことから、避難連絡坑の地質は、C等級に分類されると推定できる。

表-2 地質構成

地質年代	地質名	記号	記事
新生代 第四紀 完新世	崖錐堆積物	dt	山腹斜面, 山麓部, 沢部等に分布する。礫混じり土砂よりなる。
中生代 三波川帯	黒色片岩	Bs	泥質片岩とも言われる。片理が発達し剥離性に富む。
	緑色片岩	Gs	塩基性片岩とも言われる。片理の発達した岩～弱い片理を示す岩～塊状岩と岩相変化が激しい。
	石英片岩	Qs	珪質片岩とも言われる。黒色片岩中に層厚1cm～数mで頻繁に挟まれている。
	蛇紋岩	Sp	葉片状～粘土状岩体からなる。岩質はやや軟質である。トンネルにとって要注意岩である。
	輝緑岩	Dm	塊状岩体であるが、弱い片理を示す。

4. 避難連絡坑の掘削方法

避難連絡坑の掘削にあたり、発破掘削による振動で、I期線の覆工コンクリートの脆弱部が剥落し、車両の通行を阻害することが最も懸念された。そこで、発破振動計測による掘削方法の検討を行うこととした。

(1) I期線覆工コンクリートの健全度評価

既存の点検報告書によると、避難連絡坑接続部のI期線覆工コンクリートは、開口したひびわれが天端部や肩部に点在するが、ひびわれの進行性は見られず、表-3に示す判定区分のBに該当する箇所が大部分を占めていた。しかしながら、発破振動によるひびわれの進展が考えられるため、着手前のI期線夜間保全工事にあわせ再点検を行った。その結果、早急な補修の必要があるひびわれは見られなかったが、部分的に幅0.2mm程度開口したひびわれやコンクリートの浮きが見られたため、炭素繊維シートにより剥落防止措置を行った。

表-3 トンネル健全度点検結果の判定区分¹⁾

判定区分	一般的状況
AA	損傷・変状が著しく、機能面からみて速やかに補修が必要である場合。
A	損傷・変状があり、機能低下がみられ補修が必要であるが、速やかに補修を要しない場合。
B	損傷・変状はあるが、機能低下がみられず、損傷の進行状態を継続的に観察する必要がある場合。
OK	損傷・変状がないか、もしくは軽微な場合。

注)上記の補修とは、変状対策のための総合的な対策工のことをいう。

(2) 避難連絡坑の掘削方法の検討

発破振動によるI期線覆工への動的影響を考慮するため、以下の式(1a)¹⁾を用いて振動速度を予測し、発破パターンや掘削距離を検討した。K値の算出にあたっては、II期線の本坑掘削時の発破振動速度から逆算している。

$$V = K \frac{W^{0.75}}{D^2} \quad (1a)$$

ここで、V：振動速度 (cm/sec)

K：係数

W：段当たりの薬量 (kg)

D：爆源からの距離 (m)

発破計画を行うにあたり、前述のI期線覆工コンクリートの健全度にもとづき、表-4から振動速度の管理基準値を定めた。健全度Bであれば振動速度の許容値は4.0cm/secに該当するが、安全率2.0を考慮し、限界許容値を2.0cm/secとした。表-5に本工事における発破振動計測管理基準値を示す。

表-4 供用線トンネル覆工における振動速度の許容値¹⁾

健全度判定区分	許容振動速度
B, OK	4cm/sec
A	3cm/sec
AA	2cm/sec

注) コンクリート片の落下の恐れのある場合は、その処置を前提とする。

表-5 発破振動計測管理基準値

管理レベル	III	II	I
	1次管理値 (限界値の50%)	2次管理値 (限界値の75%)	3次管理値 (管理限界値)
振動速度	1.0cm/sec	1.5cm/sec	2.0cm/sec

この管理値を満足する発破パターン、薬量および掘削距離の検討を行った。その結果、掘進長1.2mを標準発破とし、振動速度が管理値に近づいたら、1発破あたりの掘進長を0.6mとする制御発破に変更することとした。また、制御発破に変更後も振動速度が管理値に近い値を示す場合は、1段あたりの薬量を低減することとした。最終的に切羽が発破限界地点に達した時点で、大型油圧くさびによる割岩掘削に変更することとした。

図-3に掘削距離計画図を示す。

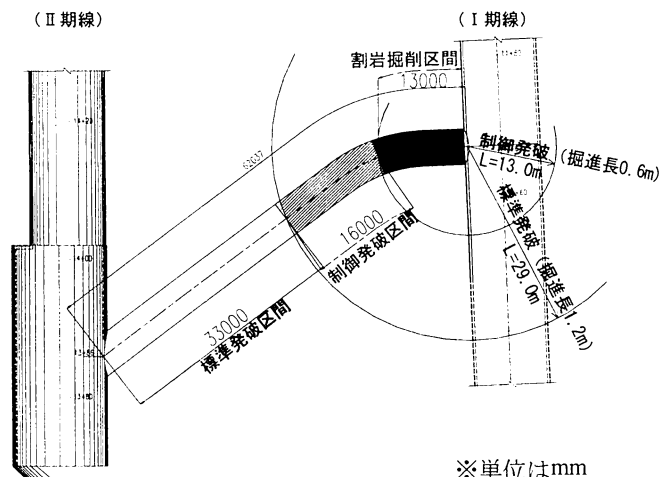


図-3 掘削距離計画図

(3) 避難連絡坑の掘削実績

避難連絡坑掘削開始後の振動計測結果からK値の見直しを行うと、表-6に示すようにII期線本坑掘削時の値と大きな相違が見られたため、避難連絡坑掘削時における実績K値の平均値を発破ごとに算出し次発破へフィードバックしながら掘削を行った。発破振動値は薬量の多い払い部のほうが芯抜き部より大きな値を示す結果となった。図-4に払い部の段当たり薬量と発破振動結果の関係を示す。標準発破区間では、II期線近接施工となるため、坑口から10mまでは飛石等を考慮し薬量を控えて掘削した。15m付近で振動速度が1.0cm/secを超えたため、掘進長を半分の0.6mに変更して制御発破にシフトした。その後、変位速度は管理レベルI以下で推移したが、32m付近で1.9 cm/secを示したため、薬量を半減した。その後も段階的に薬量を低減したにもかかわらず、振動速度は変動しないため、42m地点で振動の影響のない大型油圧くさびによる割岩掘削へシフトした。表-7に避難連絡坑掘削時の計画値と実施結果を示す。

表-6 K値の比較

	本坑掘削時 (当初値)	避難連絡坑掘削時 (変更値)
芯抜き部	634	1594
払い部	342	658

表-7 発破振動計測の計画値と実施結果

掘削方法		掘削距離 (m)	段当たり薬量(kg) (平均値)		振動速度 (cm/sec)	
			芯抜き	払い	芯抜き	払い
標準発破 (掘進長1.2m)	計画	33.0	3.6	5.6	1.97～0.43	1.48～0.32
	実施	14.8	1.5	2.3	1.20～0.40	1.05～0.30
制御発破 (掘進長0.6m)	計画	16.0	0.4	1.5	1.25～0.98	1.81～1.43
	実施	26.7	0.9	2.2	1.80～0.20	1.90～0.35
割岩掘削	計画	13.0				
	実施	20.5				
			0.26～0.69			

割岩掘削とは、図-5に示すように切羽にドリルジヤンボにてφ102mmの割岩孔を連続的に削削し自由面を形成することで、岩盤の引張強度が圧縮強度の1/8～1/20程度となることを利用して、写真-1に示す大型油圧くさびにより割岩孔壁面に力を与え、自由面に向けて引張応力を発生させることにより亀裂を発生させ破砕する工法²⁾である。

表-7の結果から、割岩掘削に変更後の振動速度は管理基準値以下で推移し、I期線の覆工に影響を与えることなく掘削を完了した。

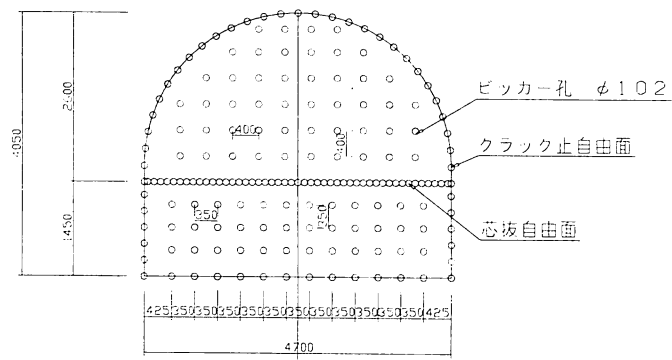


図-5 割岩掘削標準施工断面図



写真-1 割岩掘削状況

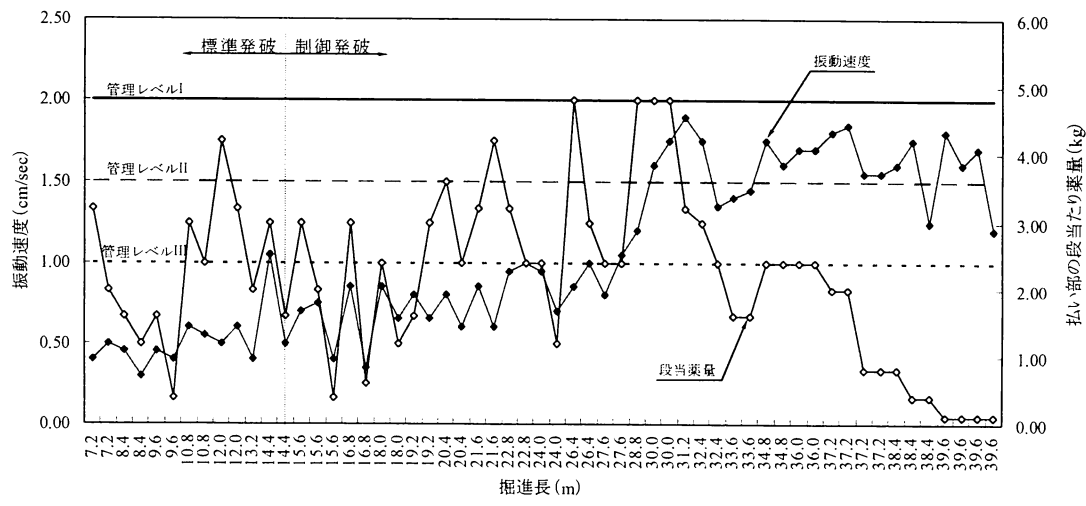


図-4 払い部における発破振動速度

5. 避難連絡坑とⅠ期線接続部の補強対策の検討

車両用避難連絡坑を既設トンネルに接続することによって、現状で安定している覆工コンクリートに断面欠損を生じさせることになる。また、既往の研究³⁾によれば、接続トンネルの掘削の緩みによってお互いのトンネルの地山応力が干渉することになる。したがって、現状で安定している覆工コンクリートに応力状態の変化が生じることが想定される。一般的に、これらの応力性状の変化はトンネルの交差点に支配される。

本施工に先立ち、事前に既設トンネルの覆工健全度を確認した上で、交差角度に応じた補強範囲および補強方法について、既往の実績⁴⁾や研究を踏まえて検討を実施するものとした。

(1) 補強対策の基本方針

補強対策を検討するにあたり、基本方針を以下のとおり定めた。

- ・Ⅰ期線は対面通行で通行止めが困難であるため、避難連絡坑の接続はⅠ期線を供用させた状態で実施する。また、接続部の補強についても避難連絡坑内から行う。
- ・接続箇所の既設覆工の健全度はBであり、炭素繊維シートによる補修を実施した上で、健全な覆工構造であることを前提とする。

(2) 過去の接続事例および既往の研究の整理

供用線に接続する避難連絡坑の施工については、数例の事例がある(例えば⁴⁾⁵⁾。既往の研究によれば、交差部の角度が約90°であるため、交差角度からは有利な状態である。さらに、弾性状態におけるトンネル交差部の応力性状変化は、接続するトンネルが本トンネルに交差する部分の応力集中が卓越し、接続箇所から離れた部分(天端部、接続対面側の側壁部)は影響を受けないことが知られている。

本トンネルにおいては、Ⅰ期線の接続箇所の施工実績によると、地質は黒色片岩を主体とし、層理面に緑色片岩が混在する状態であった。また、地山等級はC級程度であり、基岩は堅固であるが、やや亀裂が発達した状態であった。内空変位の実績によれば、10mm程度で収束しており、弾性範囲内と考えられ、計測結果からも地山は安定していると想定された。ここで、施工中には亀裂からの湧水が確認されており、湧水によるⅠ期線周辺の地山の緩みが懸念されたが、現在は覆工の外観目視からは漏水等湧水の存在は確認されていない状態であった。

これらを総合的に判断し、地山が安定状態である

ため、Ⅰ期線の覆工コンクリートを健全な状態に補修することを前提に、避難連絡坑からの対策により施工が可能と判断した。

(3) 補強方法の検討

既往の実績にもとづいて接続部の補強方法の検討手順を以下に示す。

手順1：地山の変形係数および、供用線の周辺地山の緩み領域の設定

手順2：避難連絡坑の緩み領域の設定

手順3：欠損を考慮したⅠ期線覆工コンクリートの検討

手順4：避難連絡坑(一次支保)の検討

手順5：避難連絡坑(覆工コンクリート)の検討

a) 手順1

接続箇所付近のⅠ期線の施工実績(上半水平測線収束値：10mm)から、2次元弾性FEM解析によって、地山の変形係数および、Ⅰ期線施工時のトンネル周辺の緩み領域を予測した。

その結果、変形係数は $E=7.0 \times 10^{-5} \text{ kN/m}^2$ であると想定した。ここで、地山等級ごとの地山物性値⁶⁾を表-8に示す。変形係数からもCII～DI程度の地山であることがわかる。さらに、この物性値により、再度2次元弾性FEM解析を実施し、トンネル掘削時の緩み領域を最大せん断ひずみと限界ひずみを比較することにより算出した。なお、弾性係数と限界ひずみの関係は既往の文献⁷⁾を参考にした。その結果、Ⅰ期線の緩み領域はトンネル周辺約0.8m程度となった。

表-8 トンネル断面の地山物性値⁶⁾

地山等級	B	CI	CII	DI	DII
変形係数 (kN/m^2)	5.0×10^{-6}	2.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}	5.0×10^{-5}	1.5×10^{-5}

b) 手順2

次に手順1にて算定した変形係数を用いて、2次元弾性FEM解析により、一次支保CIIとして避難連絡坑の掘削による緩み領域を算定した。その結果、約0.5m程度の緩み領域が発生することになった。

c) 手順3

避難連絡坑の接続に伴って、Ⅰ期線の覆工コンクリートの欠損を生じることになる。そこで、欠損断面が最大となる避難連絡坑のトンネルセンターの断面において、許容応力度法により覆工構造の検討を行った。

既往の研究によれば交差角が 90°の場合、応力集中度は 1.6 倍になる。したがって、欠損に伴って覆工コンクリートに作用する緩み荷重は、掘削時の想定緩み荷重の 1.6 倍とした。解析モデル図を図-6 に示す。

I 期線の覆工コンクリートが健全であることを前提に、許容応力度法により覆工検討を実施した結果、無筋コンクリートであっても、過大な応力性状の変化がみられなかった。

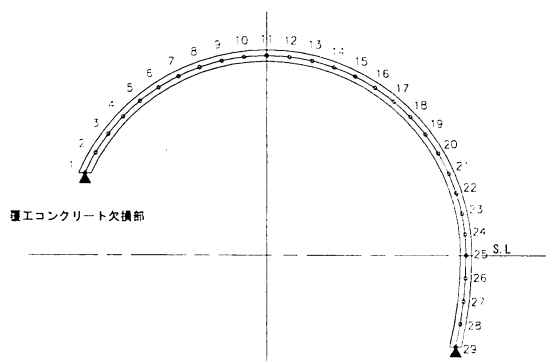


図-6 覆工コンクリート解析モデル

d) 手順 4

手順 3 において欠損部の影響は小さいと予測した。しかし、欠損により一時的に I 期線覆工の荷重バランスが不安定になることが想定される。また、覆工コンクリートが無筋であるため、想定以上の荷重が作用した場合には、脆性的にひびわれが進行する恐れがある。

したがって、覆工に欠損を生じる際には、円滑に欠損部の荷重を一次支保に伝達する構造とし、緩み領域を最小限に抑制することを目的で、剛性を高めた一次支保の構造検討を実施した。なお、一次支保に作用する荷重は、欠損部の反力とした（手順 3 にて算出）。

その結果、接続部の一次支保の補強構造を以下のように示した。補強対策工図を図-7 および図-8 に示す。

- ・補強アンカーボルト（D25，L=500mm，41 本@ 300mm）
- ・補強ロックボルト（D25，L=2 000mm，8 本×2 シフト）
- ・補強支保工（H100×100×6×8，2 基）
- ・高強度吹付コンクリート（ 36N/mm^2 ， $t=300\text{mm}$ ）

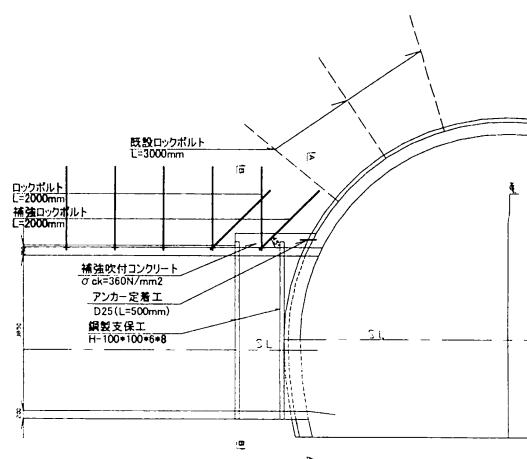
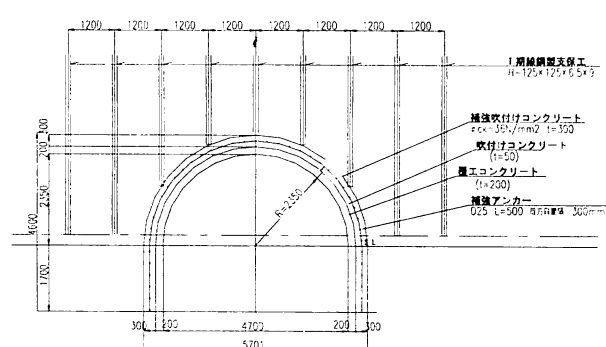


図-7 接続部補強対策工側面図

A — A



B — B

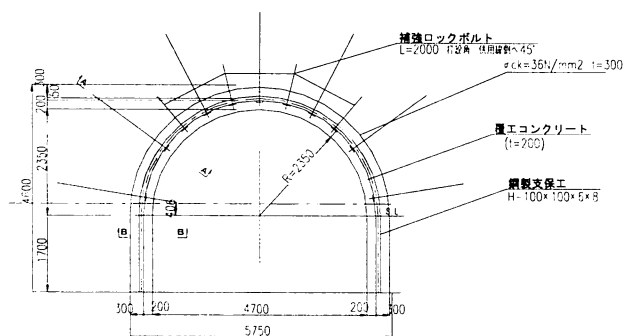


図-8 接続部補強対策工断面図

e) 手順 5

一般的にトンネルにおける覆工コンクリートは、荷重を負担しない構造として位置付けられている。しかし、避難連絡坑を接続する場合、覆工構造の応力性状は複雑になること、さらには、I 期線の覆工構造はある程度経年劣化していることから、長期的な安定を目的に I 期線覆工の欠損に伴う想定荷重を避難連絡坑の覆工コンクリートで負担する構造とした。

その補強範囲は安全側に I 期線近傍の 1 スパンとした。構造検討の結果、引張応力が無筋コンクリー

トの許容値以上になることが確認されたため、補強鉄筋（D13@250）が必要となった。そのほかの対策として、トンネル標準設計図集⁸⁾に準拠し、剥落防止を目的とした非鋼製繊維コンクリート構造とした。覆工構造の補強範囲を図-9に示す。

6. 避難連絡坑の早期供用

本工事の避難連絡坑施工完了時（平成19年11月上旬）には、反対工区である南工区はすでに本坑および避難連絡坑（人道用）ともに竣工していた。当工区の本坑も掘削完了し覆工および中央排水を残すだけの状況であった。そこで、坑内の残工事は少ないことから、年末年始の混雑期を見越して、I期線利用者の安全性向上のため、緊急時の避難経路として施工中のII期線を使用し、避難連絡坑を早期供用することとなった。

供用にあたり図-10に示すように、I期線からの避難者が通行できる避難通路を、II期線の避難連絡坑入口から本坑起点側坑口まで整備し、避難連絡坑の非常扉が開放された場合には、自動的にII期線内の避難通路の非常灯が点灯し、サイレンおよび赤色灯にて異常を現場内に知らせる設備を設置した。

同時に、道路管制センターおよび現場事務所、職員の携帯電話にも異常を知らせる電話が自動的に発信され、即刻作業を中止させ、避難者の誘導を行い、迅速かつ安全に避難できる体制を構築した。

また、緊急時において消防工作車が両トンネル間を往来できるように、常に通行可能な通路を確保した状態で施工を進めた。

竣工を迎えるまで火災等の緊急事態はなく、故障車のドライバーが非常用扉を開放して非常電話を使用したことがあったが、システムは正常に作動し、迅速な対応ができた。

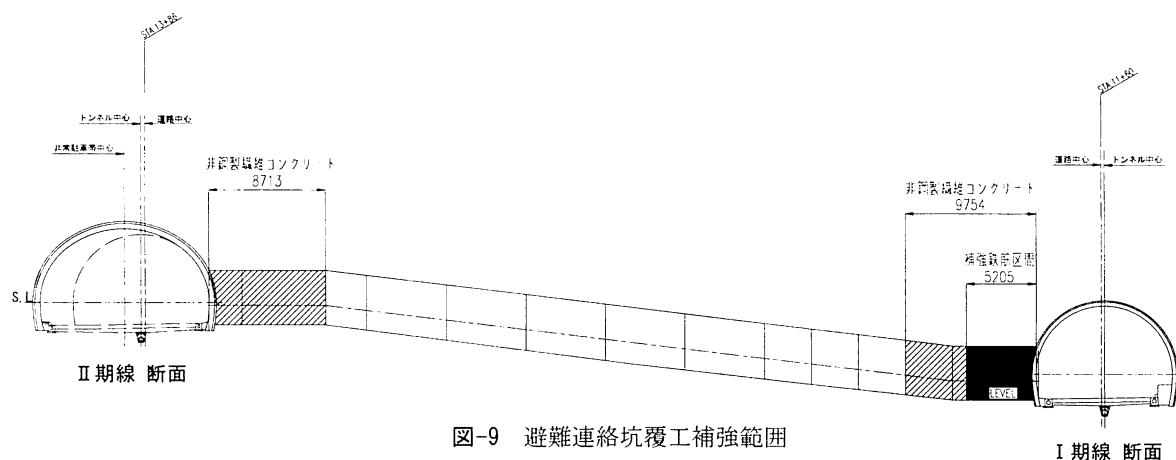


図-9 避難連絡坑覆工補強範囲

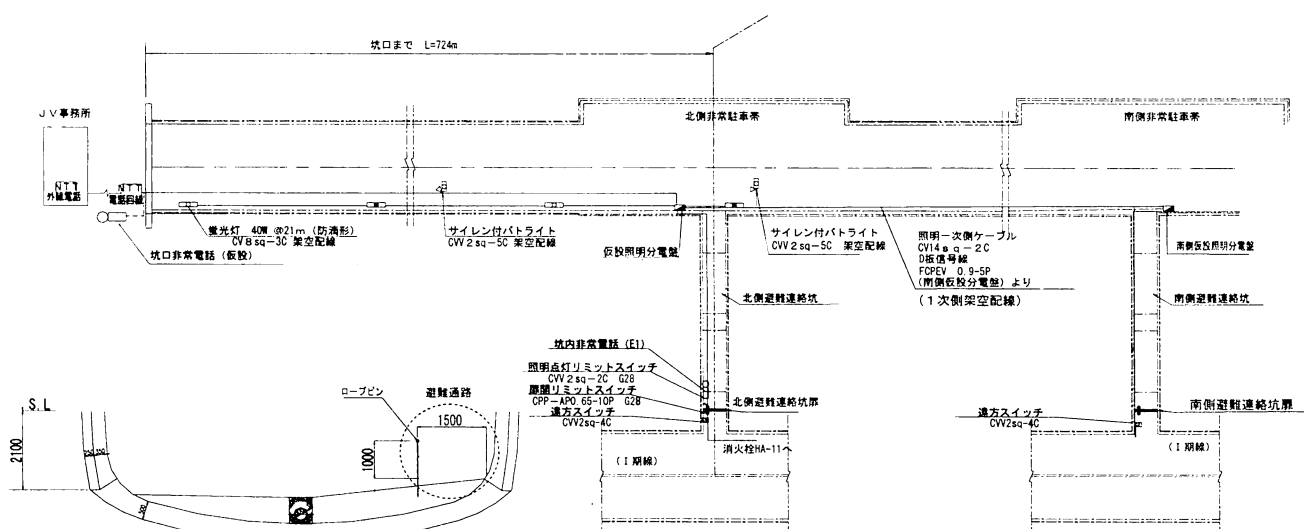


図-10 II期線避難通路設備系統図

7. おわりに

本工事は、通行規制を実施せずに供用線に避難連絡坑を接続しなくてはならなかった。そのため、事前の安定解析から断面欠損による応力再配分に伴う周辺地山および覆工の安定度低下の予測と対策の選定を行った。またⅠ期線の覆工の発破振動計測を継続的に行い、発破ごとの計測値から発破パターンや薬量および掘削工法の見直しを行った結果、Ⅰ期線覆工および通行車両へ支障を与えることなく施工を完了することができた。

さらに避難連絡坑の完成と同時に、避難経路として避難連絡坑およびⅡ期線の既掘削部をⅡ期線完成前に供用する必要があった。Ⅱ期線施工中でありながら、避難通路の確保や緊急時に迅速に対応できる体制を構築し、供用線通行者に対して安全かつ安心な通行環境を提供することができた。

本報告が今後の同様な条件下における供用線近接工事を施工するうえで参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 東/中/西日本高速道路（株）：設計要領第三集 トンネル本体工保全編（近接対策），2006.
- 2) 野間，土屋：硬岩の小断面避難連絡坑における割岩掘削，トンネル工学報告集第15巻，pp.181-187,2005.
- 3) （社）日本トンネル技術協会：山岳トンネルの坑内交差部の設計・施工に関する研究報告書，1985.
- 4) 緒方，橋，阿部，谷口：供用中のトンネルに避難連絡坑を接続，（社）日本トンネル技術協会 トンネルと地下，2005.
- 5) 加藤，諸岡，若原，中谷：供用下の高速自動車道に避難連絡坑を掘る，（社）日本トンネル技術協会 トンネルと地下，2004.
- 6) 日本道路公団試験研究所：試験研究所技術資料 第358号，トンネル数値解析マニュアル，1998.
- 7) 櫻井，足立：都市トンネルと NATM，鹿島出版会 1988.
- 8) 東/中/西日本高速道路（株）：トンネル標準図集，2006.