

地すべり面・破碎帯下における 海老坂トンネル施工について

濱田 大輔¹

²高島土木事務所 道路計画課

(仮称)海老坂トンネルは、同区間内に位置する延長294mの山岳トンネルであり、両坑口部においては円弧すべりが確認され、近畿圏ではあまり例を見ないトンネル全線に亘り破碎帯が分布する未固結地山が確認された。そのため、トンネル掘削に伴い天端の安定および切羽面の安定が非常に重要な課題となった。

本論文は、トンネル掘削開始から貫通までに行った長尺鋼管フォアパイリング、鏡ボルトおよび注入式フォアポーリングといった掘削補助工法の中でも、特に長尺鋼管フォアパイリングおよび注入式フォアポーリング施工中に発生した問題および対策について紹介するものである。

キーワード 地すべり、破碎帯、長尺鋼管フォアパイリング、鏡ボルト
注入式フォアポーリング

1. はじめに

本トンネルは、国道303号全体道路整備区間(4.1km)内に位置する延長294mの山岳トンネルである。

図-1に事業全体の計画平面図を示す。

起点側、終点側の両坑口部は地すべりが認められ崖錐性堆積物からなる偏圧地形であり、一般部についてはトンネル全線に亘り破碎帯(層状チャート)が分布する未固結地山となっている。このような条件下での施工となるため、トンネル掘削に伴う地すべり対策、天端の安定対策および鏡面の安定対策が不可欠である(図-2参照)。

本トンネルにおいては、地山条件を踏まえ、対策効果、施工実績、施工性、経済性を考慮した最適な掘削補助工法を計画した。



図-1 事業全体計画平面図

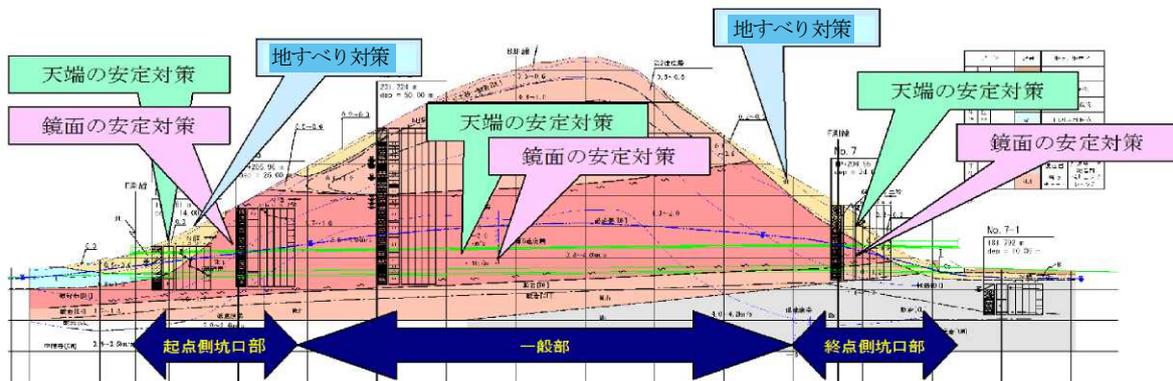


図-2 地質縦断面図及び各種対策

2. 掘削補助工法の計画

掘削補助工法とはロックボルト、吹付けコンクリート、鋼製支保工など通常の支保パターンでは対処できないか、対処することが不経済もしくは技術的に困難な場合に、切羽の安定性・トンネルの安全性確保ならびに周辺環境の保全のため、主に地山条件の改善を図る目的で適用される補助的または特殊な工法のことである。

(1) 工法選定

a) 一次選定

表 - 1 により一次選定を行い、専用機械を必要とせず、地山条件においても効果の期待できる先受工および鏡補強工を選定した。

表 - 1 一次選定

工法	目的と適用地山	補助工法の目的				適用地山条件
		安定対策	天端の安定対策	鏡面の沈下対策	地表面	
先受工	フォアポーリング	◎	○		◎	
	注入式フォアポーリング	◎	○	○	◎	
	長尺鋼管フォアパイリング	○	○	○	◎	
	パイプルーブ	○	○	◎	○	
	水平ジェットグラウト	○	○	○	○	
鏡面の補強	鏡吹付コンクリート		◎		◎	
	鏡ボルト		◎		○	

◎：比較的好く用いられる工法、○：場合によって用いられる工法

b) 二次選定

表 - 2 により二次選定を行い、施工箇所に応じた先受工を選定した。

表 - 2 二次選定

比較項目	注入式フォアポーリング	長尺鋼管フォアパイリング
工法概要	切羽面から上半アーチ外周部に5m未満の短尺ボルトを打設し、急硬性注入材にて地山改良する工法。	切羽面から上半アーチ外周部に10m以上の長尺鋼管を打設し、セメントやウレタンで地山改良する工法。
天端・鏡面安定効果	○ 効果は同程度	○ 効果は同程度
緩み抑制効果	△ 地すべり抑制効果に不安が残る。	◎ 地すべり抑制効果が高い。
施工性	○ 専用機不要	○ 専用機不要
経済性	135万円/m	150万円/m
評価	一般部に適用	両坑口部に適用

(2) 先受工

a) 両坑口部

両坑口部における天端の安定対策および地すべり対策としては、地山の緩み抑制を備えた長尺鋼管フォアパイリング（以下AGF工法）を採用した。

地質は崖錐性堆積物および破碎帯（層状チャート）で

あることから砂質土と評価し、注入材は砂質土での適用性の高いウレタン系のシリカレジンを採用した。

b) 一般部

一般部については天端の安定対策として、地山注入改良により天端部の崩落を防ぐことができ、AGF工法より経済性で勝る注入式フォアポーリングを採用した。

地質は破碎帯（層状チャート）であることから砂質土と評価し、両坑口部と同様に注入材はウレタン系のシリカレジンを採用した。

(3) 鏡補強工

表 - 3 に切羽安定性評価の検討結果を示す。地山が破碎帯であることを考慮すると粘着力は低く評価することが妥当であり、切羽は自立しない可能性が高く、鏡面の安定対策の補助工法が必要である。

表 - 3 切羽安定性評価の検討結果

検討手法	検討結果	備考
1. 見かけの弾性係数と土被り比による実績	切羽評価は不安定～崩壊	
2. 切羽安定に必要な $c/\gamma D$ と土被り比、内部摩擦角の関係	粘着力 10kN/m ³ の場合、崩壊 粘着力 45kN/m ³ の場合、安定	
3. 極限解析法： 村山の式	粘着力 10kN/m ³ の場合 坑口部：切羽の自立性が悪い ゆるみは切羽前方 3.0m 水平押し力 166.2kN 一般部：切羽の自立性が悪い ゆるみは切羽前方 1.5m 水平押し力 167.8kN	坑口部：崖錐性堆積物 一般部：破碎帯（層状チャート）
4. 極限解析法： 簡易安定計算法	粘着力 10kN/m ³ の場合、安全率 0.38 安全率を満足しない 粘着力 45kN/m ³ の場合、安全率 0.70 安全率を満足しない	
5. 数値解析法	補助工法なし、核残し、長尺鋼管フォアパイリングでは限界ひずみの上限値を超えるため切羽の自立が懸念される。一方、長尺 GFRP 鏡補強工を入れることで切羽は安定する。	

当該トンネルにおいては、水平押し力が大きく切羽前方に緩み領域があると考えられるため、鏡吹付けコンクリートだけでは地山の押出しを抑制することは困難であり、鏡ボルトによる切羽面の拘束と緩み領域外への定着が必要である。

よって、表 - 1 による一次選定により選定した鏡吹付けコンクリートおよび鏡ボルトの両方を採用した。

3. 掘削補助工法の施工

(1) 両坑口部

a) 概要

両坑口部における断面図および縦断図を図 - 3 に示す。また、AGF工法の注入工詳細図を図 - 4 に示す。AGF鋼管打設・注入については隣接管への注入材の逸脱を防止するため、先行管打設注入→後行管打設注入の順に行う。なお、後行注入については注入圧の上昇に注意しながら最大で定量（133kg/本）の2倍まで注入を行う。

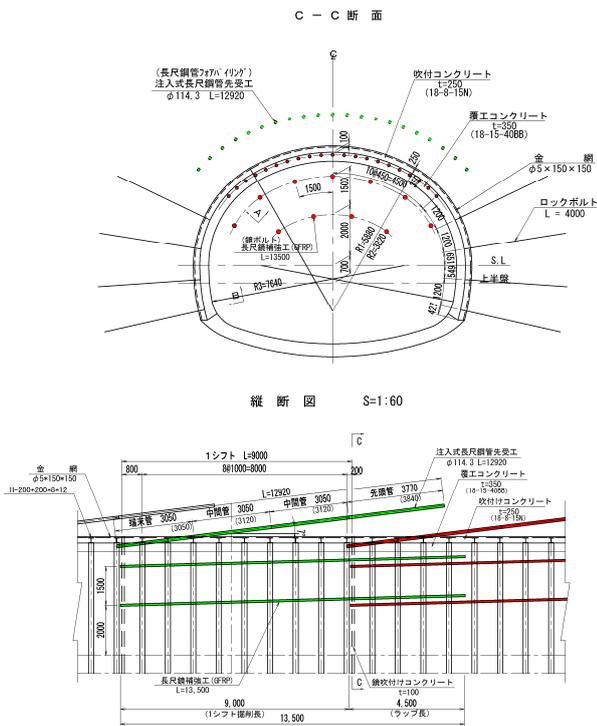


図-3 両坑口部における断面図および縦断面図

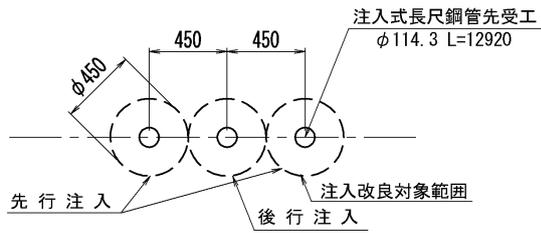


図-4 AGF工法注入工詳細図

b) 天端鋼管下部の剥落と対応策

両坑口部の測点No. 26+78付近およびNo. 28+70付近において、図-5に示すように天端鋼管下部からの剥落が発生した。



図-5 天端鋼管下部からの剥落 (t=700mm)

剥落の原因としては、両箇所ともに地すべり面付近であり、地山が崖錐堆積物で形成されており想定以上に緩み大きいことが考えられる。

また、当該トンネルで採用したAGF工法は無拡幅方式であり鋼管と支保工の間隔が大きくなったことも要因と考えられる。表-4に拡幅方式と無拡幅方式の特徴を示す。

表-4 拡幅方式と無拡幅方式の一般的な得失

方式	拡幅方式	無拡幅方式
概要図		
概要	鋼管を掘削断面外に打設し、打設角度に合わせて断面を拡幅する。	鋼管をスリット付き鋼管、地び管などとし、断面拡幅をせずに鋼製支保工の上端部まで打ち込む。 専用ガイド付き支保工を用いて、断面拡幅を最小限にする工法もある。
長所	鋼管と支保工の間隔が少なく一定であるため、鋼管下部の地山の削削が少ない。 一般に、打設角度は4~6°程度である。 地山荷重を鋼製支保工に分散できる。 ラップ部分の鋼管間隔が小さい。 鋼管を切断・撤去しない。	掘削土量、吹付け量、支保工形状、二次覆工量などが増加することなく一定である。 地山状況が変化した場合などに、断面の拡幅を必要とせず、任意の位置から施工が可能である。
短所	掘削土量、吹付けコンクリート量などが増加する。 掘削断面の支保工もしくは掘削ピースが必要となる。 掘削部分がトンネル掘削方向の凹凸となり、防水工や二次覆工の材料が増え、施工性も悪くなる。 縦断方向の凹凸をなくするためには、掘削部分を吹付けコンクリートですり付ける必要がある。 鋼管打設断面の変更が難しく、地山の急変などの対応が困難。	一般に、打設角度が8~10°と大きくなる。 鋼管と支保工の間隔が大きくなり、地山によっては鋼管下部の地山が剥落する可能性がある。 このため、別途フォアボーリングなどの対策が必要になる場合もある。 鋼管と地山の離隔を小さくするために、地山によっては1シフト当りの長さを短くする必要がある。 鋼管の切断・撤去が必要となる。

このような剥落が天端の大規模崩落へとつながる危険性があるため、補助工法断面を1断面追加（鏡ボルトについては起点側のみ追加）しシフト間隔を9m→6m（終点側9m→5m+4m）と短くすることによって、AGF鋼管と支保工の離隔を最大離隔900mm→500mm（終点側900mm→400mm）と小さくすることで対応した（図-6参照）。また、終点側坑口部においては、すべり面に沿って掘削するためさらに条件が悪くなるため、AGF注入量についても1.5倍（200kg/本）に増量することとして対応した。

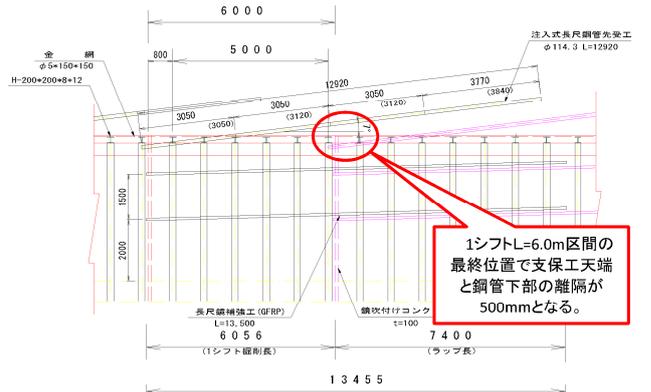


図-6 鋼管下部の剥落への対応策（起点側）

c) 切羽肩付近からの崩落と対応策

測点No. 28+84において切羽肩付近を掘削中に、約5m3程度の崩落が生じた（図-7参照）。崩落は切羽肩付近上部から既に設置した手前の支保工背面にまで及んでおり、奥行きは肩付近で約4m程度であった（図-8参照）。崩落の原因としては崩落土砂からこの付近の堆積

層は砂と細かい破碎岩から形成されており、地山強度が低いことが考えられる。そのため、前述 b) にも記述したようにAGF工施工間隔を小さくすることによって大規模な崩落は防ぐことができたものの、鋼管間からの抜け落ちが発生したと考えられる。



図 - 7 切羽肩付近からの崩落



図 - 8 鋼管間からの抜け落ち (約4m)

今回の崩落は奥行きが約4m程度あり通常の吹付けコンクリートで充填することは困難である。そのため、一旦支保工を建込み、吹付けコンクリートを行った後に肩付近上部および支保工背面の2箇所から注入式フォアポーリングにて崩落個所の充填を同時に行った。注入材についてはAGF工法同様にウレタン系のシリカレジンをし、注入量については、崩落土砂量および崩落個所の検尺から算出した。

地山の地質が変わらず、掘削が進むにつれ土被りがさらに小さくなることから、今後の掘削においても同様の崩落が生じる可能性が非常に高いと言える。そのため、掘削前に注入式フォアポーリングにて抜け落ち防止対策を行うこととした。打設箇所については、図 - 9 に示すとおり鏡面より堆積層を判断し、その周辺について行うこととし、打設ピッチは鋼管間に配置するため、450mmピッチとした。また、必要に応じてAGF打設範囲端部付近についても打設を行うこととした。

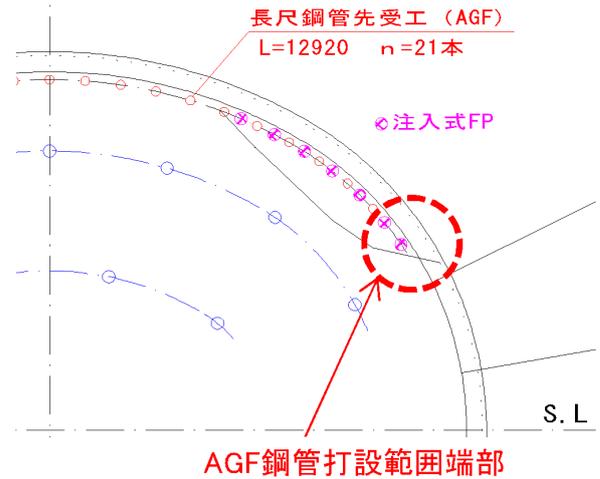


図 - 9 堆積層に対する注入式フォアポーリング

(2) 一般部

a) 概要

一般部における断面図および縦断面図を図 - 10 に示す。

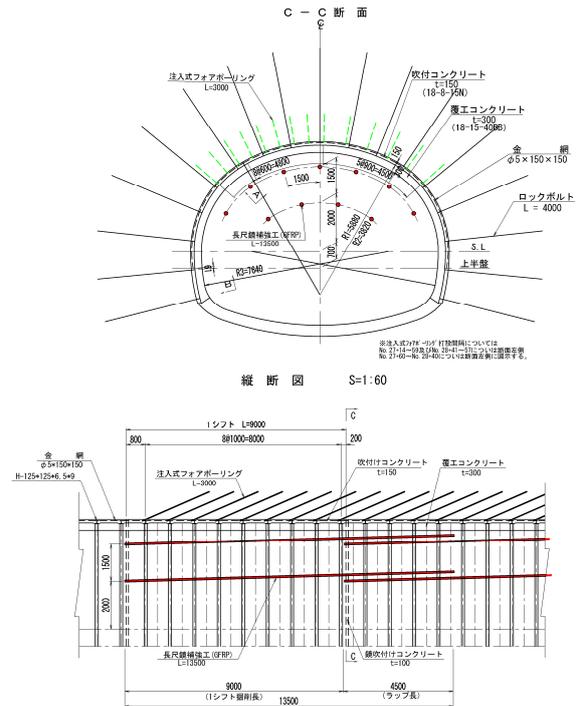


図 - 10 一般部における断面図および縦断面図

注入式フォアポーリング注入管打設・注入については図 - 1 1 に示すようにAGF工法同様に隣接管への注入材の逸脱を防止するため、先行管（奇数管）打設注入→後行管（偶数管）打設注入の順に行う。なお、後行注入については注入圧の上昇に注意しながら最大で定量（30kg/本）の2倍まで注入を行う。

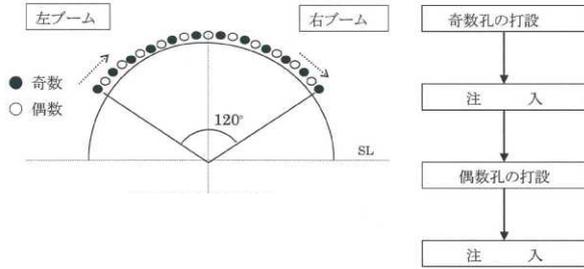


図 - 1 1 注入式フォアポーリング打設注入順序

b) 注入式フォアポーリング打設本数の変更

6月20日に実施した第4回岩判定委員会において、発注者およびJV双方にて切羽面の評価を行った。

切羽鏡面については、両側においては割れ目が開口しており不安定に見受けられるが、それ以外については割れ目も密着しており安定しているとの結論に至った。

また、表 - 5 に示すように直近10断面での注入式フォアポーリング注入量は17.8kg/本と定量30kg/本の6割程度で推移していることから、測点No. 27+60より打設本数を図 - 1 0 の断面図左側に示す17本/断面から断面図右側に示すように11本/断面とし打設間隔を600mmから900mmに広げることとした。

表 - 5 注入式フォアポーリング注入量

施工箇所	支保工 No.	断面区分	施工日	打設本数 (本)	注入量(kg)		
					1断面	1本当り	
No. 27 + 500	92	D I -b(PF)	2013/6/15	昼	17	293.2	17.2
No. 27 + 510	93	D I -b(PF)	2013/6/17	夜	17	290.0	17.1
No. 27 + 520	94	D I -b(PF)	2013/6/17	夜	17	369.8	21.8
No. 27 + 530	95	D I -b(PF)	2013/6/18	昼	17	279.1	16.4
No. 27 + 540	96	D I -b(PF)	2013/6/18	昼	17	262.8	15.5
No. 27 + 550	97	D I -b(PF)	2013/6/18	夜	17	257.3	15.1
No. 27 + 560	98	D I -b(PF)	2013/6/18	夜	17	316.5	18.6
No. 27 + 570	99	D I -b(PF)	2013/6/18	夜	17	297.3	17.5
No. 27 + 580	100	D I -b(PF)	2013/6/19	昼	17	352.0	20.7
No. 27 + 590	101	D I -b(PF)	2013/6/19	昼	17	305.5	18.0
					170	3023.5	17.8

しかし、掘削が進み終点側坑口部に近づくにつれて図 - 1 2 に示すように地山の風化変色が著しくなり、割れ目の開口度も大きくなり天端および肩部からの剥落が多くなってきた。

また、図 - 1 3 に示すように注入式フォアポーリング注入量は増加する反面、注入圧力は減少傾向となった。これは、割れ目間隔が細かい上に開口度が大きくかつ方向性も不連続であるためである。また注入間隔も大きいため、注入量は増加するが注入圧の上昇は見られず、ボ

ルト周辺での剥落は見られないものの、ボルト周辺に十分な固結体が形成されず割れ目間の接着力の低下したボルト間で剥落が生じたと考えられる。

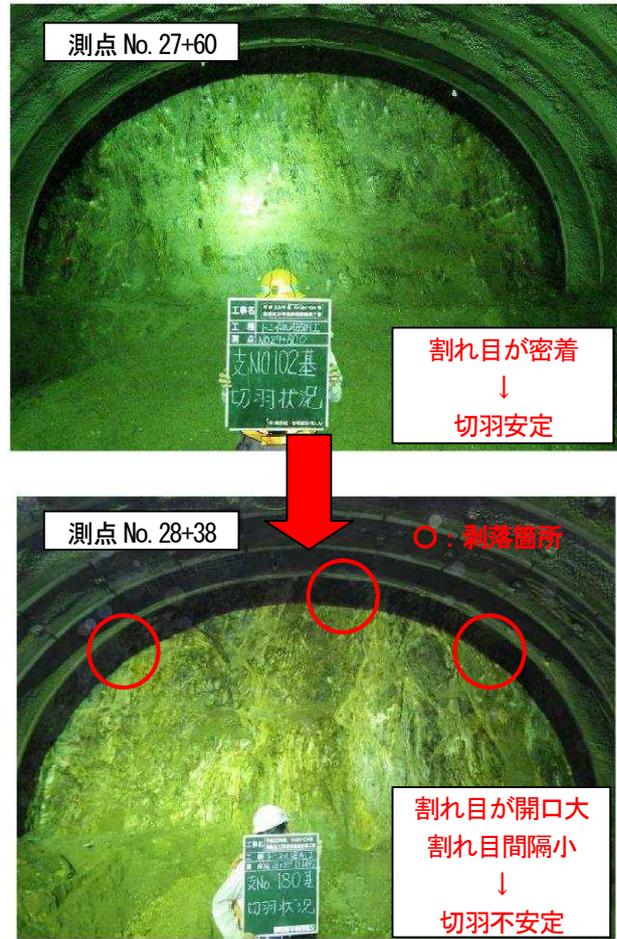


図 - 1 2 切羽鏡面の推移



図 - 1 3 注入量および注入圧の推移

今後の掘削においては、土被りも小さくなり地質も堆

積層へと変わっていくことから地山の状況は確実に悪化すると考えられるため、測点No. 28+41から打設本数を17本/断面に戻すことによって対応した。

c) 鏡ボルトについて

両坑口部および一般部全体に亘って鏡ボルトの施工を行ったが、鏡面については天端付近のように目立った問題は発生しなかった。しかし、適切な鏡ボルトの施工により鏡面の押出しを抑制したためであると考えられる。

4. おわりに

海老坂トンネルは全長294mと長大トンネルではないものの、両坑口に地すべり面が存在し、全線に亘り破碎帯が分布する非常に難しい条件下での掘削となった。しかし、施工者・設計者および発注者の3者が一体となって適切な施工管理・地山評価および対策工の検討を重ねることによって、2013年10月8日に無事に貫通を迎えることができた。

今後は、覆工・コンクリート舗装および坑門工と目に見える箇所となるため、なお一層の品質の向上および無事故無災害での竣工、さらには一日も早く供用を目指して努力していく所存である。

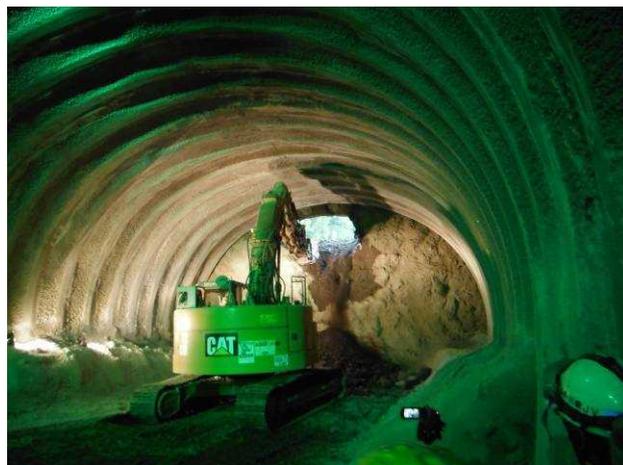


図 - 1 4 トンネル貫通 (2013年10月8日)

謝辞：本報告は桑原組・杉橋建設共同企業体ならびに株式会社エイト日本技術開発関西支社との施工協議事項を基に作成しました。本稿作成にあたり御教授いただいたすべての方々、また、若輩者の私に当工事を担当させていただき、アドバイスをいただいた高島土木事務所および道路課の方々に、この場を借りて感謝の意を表します。