ISSN　2186-6910

労働安全衛生総合研究所技術資料

TECHNICAL DOCUMENT
OF
THE NATIONAL INSTITUTE OF OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH

JNIOSH-TD-No.2（2012）

トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案

JNIOSH
独立行政法人 労働安全衛生総合研究所

トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案

目次

1．　はじめに 3
2．　トンネル建設工事の現況と労働災害の傾向 4
　2．1　トンネル建設工事の現況 4
　2．2　トンネル建設工事中の死亡災害 4
　2．3　トンネル建設工事中の肌落ちによる死傷災害 5
　　（1）　肌落ちによる死傷災害が発生した施工方法と条件 6
　　（2）　肌落ちの発生場所及び作業内容 7
　　（3）　肌落ちの大きさと落下高さ 8
3．　切羽における肌落ち災害防止対策の検討 8
　3．1　肌落ち発生のメカニズム 8
　3．2　ナトム工法の考え方 9
　3．3　肌落ち災害防止対策 10
　　（1）　鏡吹付 10
　　（2）　鏡ボルト 12
　　（3）　浮石の除去（コソク） 12
　　（4）　導水・さぐり削孔 12
　　（5）　切羽変位計測 12
　　（6）　十分な照度の確保 13
　　（7）　労働者の防護対策 14
　　（8）　設計段階から考慮する対策 14
　3．4　施工上の留意事項 14
　　（1）　鏡吹付 15
　　（2）　鏡ボルト 18
　　（3）　浮石の除去（コソク） 19
　　（4）　導水・さぐり削孔 19
　　（5）　切羽変位計測 20
　　（6）　十分な照度の確保 20
　　（7）　労働者の防護対策 21
　　（8）　設計段階から考慮する対策 21
　3．5　標準的な施工手順における肌落ち災害防止対策 22
4．まとめ 23
謝辞 24
参考文献 24
付属表 26

Technical Document of the National Institute
of Occupational Safety and Health, JNIOSH-TD-No.2 (2012)
UDC 624.19:614.8

トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案

吉川直孝*, 伊藤和也*, 豊澤康男*, 堀　智仁*, 玉手　聡*

Analysis of Labour Accidents due to Rock Fall Events at the Cutting Face in Tunnels and Proposals for Prevention Measures

by **Naotaka KIKKAWA, Kazuya ITOH, Yasuo TOYOSAWA, Tomohito HORI and Satoshi TAMATE**

Abstract: At present, almost all mountain tunnels are excavated and constructed utilizing the New Austrian Tunneling Method (NATM) in Japan. This tunneling method was advocated by Prof. Rabcewicz from Austria in 1964. In Japan, this method has been applied to tunnel construction since around 1978, after which there has been a subsequent decrease in the number of fatalities and casualties in tunnel construction. However, there is still a relatively higher incidence of labour accidents caused during tunnel construction than when compared to incidence rates in the construction industry in general. In tunnel construction, rock fall events at the cutting face, are particularly characteristic of the types of accident that occur.

In this document, we analyse labour accidents that possess the characteristics of being a rock fall event at a work site, which were collected by the Association of Nihon Tunnel Construction Sub-Contractors. We also propose accident prevention measures against rock fall events by considering the mechanisms of such events and the theory of NATM.

The contents of this document are summarized as follows:

（1）It is clear that many of the labour accidents due to rock fall events happen when workers set off explosive charges or install steel arch supports in the cutting face during tunnel construction using the mountain tunneling method, especially NATM. In addition, it was found that the dimensions of the fallen rock are on average 1.0m in length, 0.6m in width and 0.3m in thickness, and that these relatively small-scale and few rocks are the cause of deaths or injuries to workers.

（2）Prevention measures that were proposed against labour accidents due to rock fall events during tunnel construction include shotcreting the cutting face, bolting to the cutting face, removing rock masses in the cutting face, drilling the cutting face for drainage, measuring the displacement of the cutting face, sufficient lighting in order to observe the cutting face, and protecting workers directly using nets, mats and man cage guards and individual protection kits. These measures are shown in “Table-3” in this document.

（3）In the prevention measures against labour accidents due to rock fall events during tunnel construction, shotcreting the cutting face is very effective because it can control any weakness in the integrity of the mountain rock, protect against exposing mountain rock to the air, and makes it easier to observe new cracks and deformations in the rock face, etc. In addition, shotcreting the cutting face is very useful in terms of construction and economic aspects. It is, however, more important to use shotcreting in combination with

other prevention measures because some labour accidents due to rock fall events occurred even after shotcreting had been implemented. The cause of such accidents is thought to be insufficient thickness in the shotcreting or a weakening in cohesive strength due to the upwelling of groundwater.

(4) Therefore, not only shotcreting alone, but also sufficient lighting in order to observe the cutting face, removing rock masses from the cutting face, and measuring the displacement of the cutting face, etc., should be used in combination to ensure that all prevention measures work synergistically. To this end it is important to ensure that these measures are implemented appropriately, paying due attention the "Items to Bear in Mind" detailed in Section 3.4 of this document, which, if complied with, are thought to be effective means of implementing prevention measures for accidents caused by rock fall events, which are a requirement under the stipulations of Article 384 of the Ordinance on Industrial Safety and Hygiene.

(5) In situations where the risk of rock falls remains high even after the above prevention measures have been applied, it is preferable for the contractor and the construction operator to engage in discussions to consider prevention measures from the design stage and other auxiliary measures, including forehand piling to a tunnel roof, and bore holing for drainage.

Keywords*; tunnel construction, NATM, cutting face, rock fall events, labour accidents*

*建設安全研究グループ Construction Safety Research Group

1．はじめに

日本のトンネル建設工事の施工方法は，安全性確保の観点から，矢板工法（木製支保工，鋼製支保工）からナトム工法（NATM: New Austrian Tunneling Method）へと大きく技術変化を遂げてきた。

図-1 はトンネル建設工事と全建設業の 1963 年から 2009 年までの年別災害発生頻度（度数率：（労働災害による死傷者数／延実労働時間数）×100 万）の推移を示したものである。

矢板工法（鋼製支保工）が施工方法の主流であった 1960 年において，トンネル建設工事による災害発生頻度は，全建設業の約 2.5 倍であり，高い頻度で災害が発生していた [1)]。

その後，1974 年の労働安全衛生法の施行を受け，度数率は大きく減少した。1976 年以降，東北新幹線や上越新幹線の施工に伴う大規模トンネル建設工事の増加（**表-1** 参照）により度数率は再度上昇し始め，1979 年には，上越新幹線大清水トンネル火災事故において 16 名が死亡 [5)]し，1976 年以降で度数率が最大となっている（**図-1** 参照）。

1978 年度以降に日本国有鉄道（現　東日本鉄道株式会社等）が全ての鉄道トンネルの施工にナトム工法を採用することを決定した [6)]。また，1980 年に労働安全衛生法が一部改正され，3000m 以上のトンネルについては，労働大臣（現　厚生労働大臣）への計画の届出及び審査が必要になった。

このように，安全性を確保する施工方法の技術革新や行政の施策等により，1979 年以降，度数率は劇的に減少し全建設業のそれに漸近した（**図-1** 参照）。

しかしながら，**図-1** 右上の 1990 年以降の拡大図を見ると，トンネル建設工事による災害発生頻度は，全建設業のそれよりも依然として高い状態にある。

また，技術革新という意味では，トンネル建設工事において，ナトム工法以降，特に大きなものは見られない。ナトム工法では，様々な補助工法（フォアポーリング，水抜きボーリング，鏡吹付等）が採用されて，安全性の向上が図られているのが現状である。

一方，2011 年 5 月に国土交通省が中央新幹線の建設に関する整備計画を決定したこと [7)]もあり，今後，

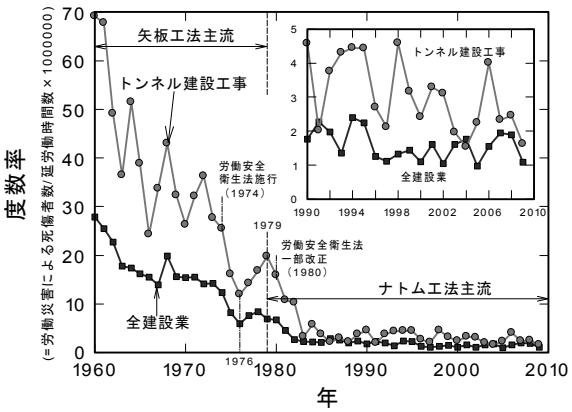


図-1 トンネル建設工事と全建設業の度数率の推移

表-1 主な新幹線のトンネル建設工事中の死亡者数（文献 1）から 6）までを参考に作成。）

線名	トンネル延長 (km)	工期	死亡者数 (名)	施工方法
東海道新幹線 東京から新大阪まで	67	‘59~’64	74	矢板工法（鋼製支保工）
山陽新幹線 新大阪から岡山まで	58	‘67~’72	33	
山陽新幹線 岡山から博多まで	223	‘70~’75	88*	
東北新幹線 東京から盛岡まで	112	‘71~’82	31	
上越新幹線 大宮から新潟まで	107	‘71~’82	69	中山工区のみナトム工法が採用された。

*死亡者数ではなく，死亡災害発生件数である。

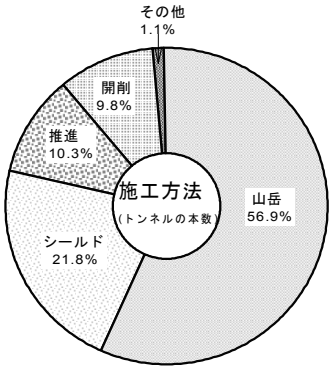


図-2 トンネルの施工方法の内訳

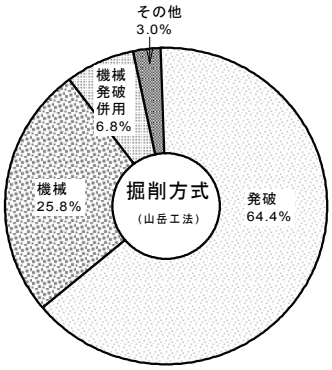


図-3 山岳工法における掘削方式の内訳

山岳トンネルの建設工事が多少なりとも増加することが予想される。

本資料では，まず近年のトンネル建設工事中の死亡災害とトンネル工事特有の肌落ちによる死傷災害について調査分析する。労働者が肌落ちにより被災すると，休業 4 日以上の重篤な災害になる場合が多い。本資料では，労働者が切羽からの肌落ちの危険性を認識しながらも，切羽で作業しなければならない現状を考慮し，より安全に作業できるよう，肌落ち災害防止対策を提案する。

２．トンネル建設工事の現況と労働災害の傾向

２．１　トンネル建設工事の現況

トンネル建設工事の現状を把握するため，2009 年の施工状況を調査分析した。分析資料には，社団法人　日本トンネル技術協会が発行するトンネル年報 2010[8)]を用いた。

トンネル年報 2010 の調査対象は以下のとおりである。

「2009 年（平成 21 年）12 月 1 日施工中のトンネル工事（掘削・覆工）等の土木工事のうち，完成内空断面 2m^2 以上（推進工法にあたっては 0.5m^2）でトンネル完成延長 100m 以上を主な対象とした。ただし，鉄道トンネルの駅部等特殊な工事の場合は，完成延長 100m 以下の工事も対象とした。なお，地下街，地下駐車場は，公共用地内の公共施設に限定し，建築工事として施工しているものも対象としこれを含めた。また，海外工事も別区分により対象とした。」

調査対象となったトンネルは，トンネルの数にして 641 件であった。

図-2 にトンネルの施工方法の内訳を示す。同図は，トンネルの数に対するそれぞれの施工方法の内訳である。同図から，山岳工法が半数以上を占めていることがわかる。シールド工法は 21.8%にとどまっており，山岳工法の約半分以下である。山岳工法は，ナトム工法，矢板工法，TBM（Tunnel Boring Machine）に分類される [9)]。**図-3** は山岳工法における掘削方式の内訳を示したものである。トンネル掘削は，発破が最も多く，機械による掘削は 25.8%と少ない。発破，機械，機械発破併用を合わせると 97.0%であるが，この大部分はナトム工法であり，現在もナトム工法は山岳工法の代表的な工法である。

２．２　トンネル建設工事中の死亡災害

トンネル建設工事中の死亡災害を調査した。用いた資料は，建設業安全衛生年鑑 [10)]である。

図-4 は，2000 年から 2009 年までのトンネル建設工事中の死亡者数 84 名を災害の種類別に示したものである。トンネル建設工事中の労働災害において，最も多い災害は，建設機械によるものであることがわかる。これは，トンネル坑内のスペース上の制約等のため，建設機械と労働者が接触する災害の発生頻度が他の建設工事と比べて高いことが推察される。

次に多い災害は，落盤であり，その死亡者数は 15 名である。したがって，毎年 1 名から 2 名の労働者が落盤により死亡していることになる。これは，墜落によ

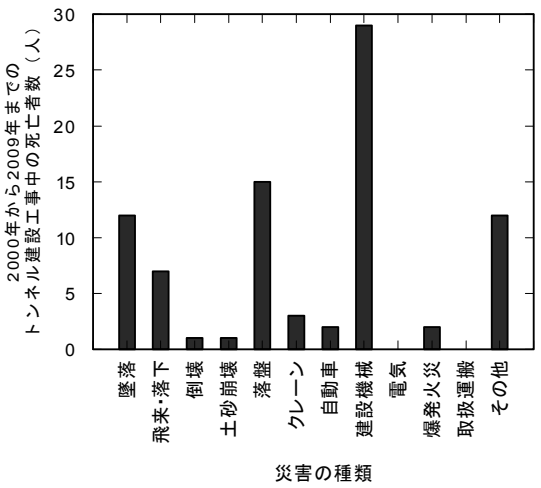


図-4 災害の種類別にみたトンネル建設工事中の死亡者数（2000 年～2009 年）

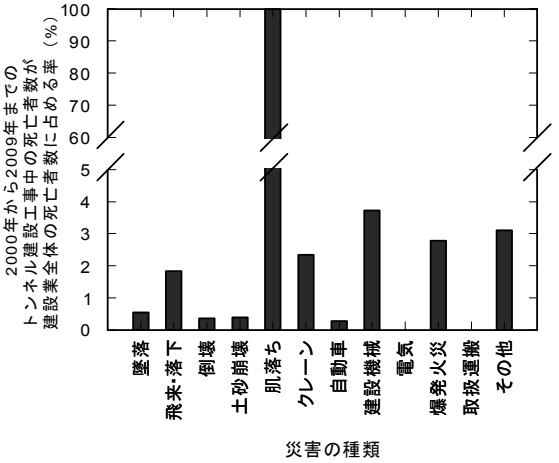


図-5 災害の種類別にみた全建設業に占めるトンネル建設工事の死亡者数の割合（2000 年～2009 年）

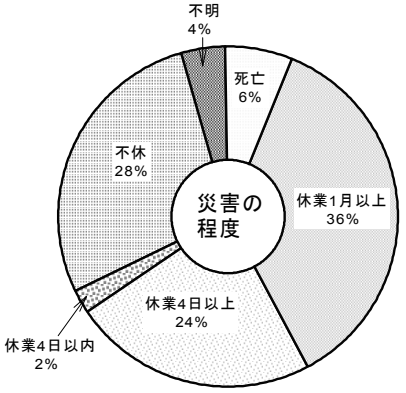


図-6 災害の程度による内訳

る災害よりも多いものとなっている。

ここで，建設業安全衛生年鑑では，「落盤」を災害の種類として定めているが，ほとんどの災害事例が小規模の岩塊，土砂等の落下によることがわかり，本資料でいう「肌落ち」とほぼ同等である。そこで，本資料では，以降，「落盤」も「肌落ち」と表記する。

図-5 は，2000 年から 2009 年までの 10 年間の労働災害について，災害の種類ごとにトンネル建設工事中の死亡者数を建設業全体の死亡者数で除し，その占める割合をパーセンテージで示したものである。同図から，肌落ちによる災害は，全てトンネル建設工事において発生しており，当然ではあるがトンネル建設工事に特有の災害であることがわかる。

建設機械や墜落による災害は，全建設業においても多い災害である。したがって，トンネル建設工事における特殊性を考慮しつつ，全建設業を対象とした災害防止対策を図ることで，トンネル建設工事中の建設機械や墜落による災害を減らすことも可能であると考えられる。一方，肌落ちによる災害はトンネル建設工事に特有の災害であることから，その災害防止に特化した対策を推進することが必要である。

２．３　トンネル建設工事中の肌落ちによる死傷災害

前節から，肌落ちによる災害がトンネル建設工事において特有の災害であることが明らかとなった。ここでは，災害発生要因を明らかにするため，トンネル建設工事中の肌落ちによる死傷災害（不休災害も含む。）について調査分析した。

調査分析の対象とした災害事例は，一般社団法人　日本トンネル専門工事業協会が所属の各企業から収集したアンケート（付属表 A 参照）である。このアンケート用紙は，社団法人　日本トンネル技術協会が実施した災害調査アンケート用紙[11]に適宜追加修正したものである。

収集された事例は，2000 年から 2010 年までに発生した 44 件の肌落ちによる死傷災害である。この 44 件の死傷災害における全死傷者数は 47 名である。1 件の災害で 2 名以上の死傷者が発生した災害は 3 件のみであり，ほとんどの災害では 1 件の災害で死

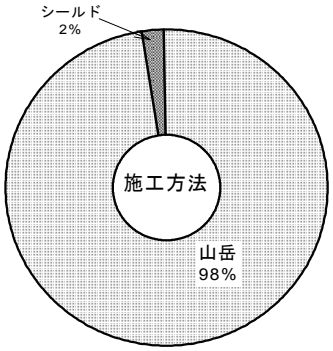


図-7 肌落ち災害が発生したトンネル建設工事における施工方法の内訳

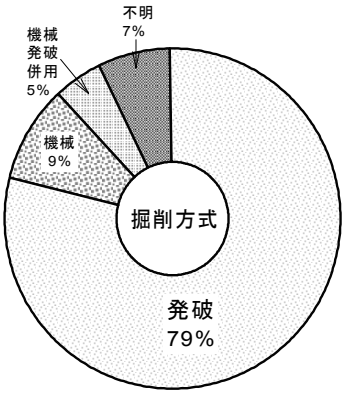


図-8 肌落ち災害が発生した山岳工法における掘削方式の内訳

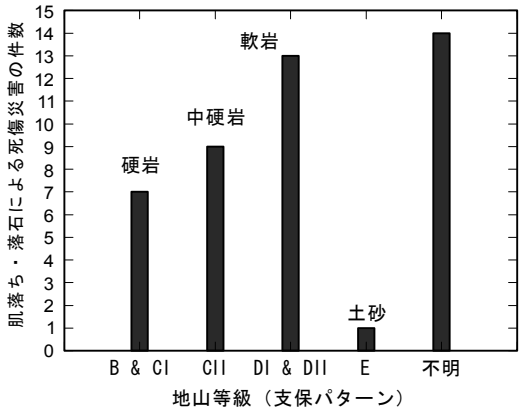


図-9 災害件数と支保パターン（地山等級）の関係

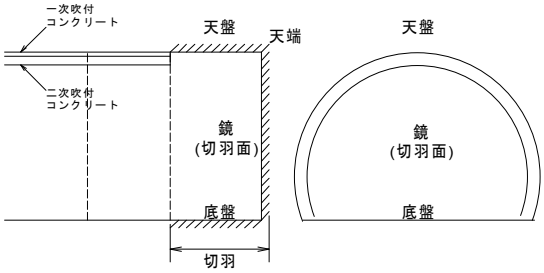


図-10 トンネル掘削面付近の主な用語

傷者は 1 名である。**図-6** に全死傷者 47 名の災害の程度による内訳を示す。肌落ちによる死傷災害は，62%が休業 4 日以上であり，重篤な災害となる場合が多い。また，傷病の種類は骨折が最も多い。以下に，これら 44 件の死傷災害について詳細に分析した結果を示す。

（1） 肌落ちによる死傷災害が発生した施工方法と条件

図-7 に，肌落ちによる死傷災害があった工事の内訳を示す。山岳工法での災害が 98%であり，シールド工法に比べて著しく多い。建設工事中のトンネルの施工方法の比率（**図-2**）を踏まえると，山岳工法における災害発生頻度は著しく高いことがわかる。**図-8** は肌落ちが発生した山岳工法における掘削方式の内訳である。発破掘削方式における災害が 79%と多い。建設工事中の山岳工法の掘削方式の内訳（**図-3**）と合わせて見ると，機械，機械発破併用の割合が，24.7%から 9%，6.8%から 5%へと，ともに減少しているのに対し，発破の割合は 64.4%から 79%へと増加している。

図-9 に災害件数と支保パターン（地山等級）の関係を示す。地山等級（付属表 B1，B2，C1，C2）とは，地山の弾性波速度，一軸圧縮強度等の定量的な因子に基づいて地山分類を行う際の基準である[12), 13)]。トンネルの設計及び施工は，地山等級と関連して行われ，標準一掘進長，ロックボルトの長さ，鋼製支保工の建込間隔等が地山等級から決定される（付属表 D1，D2，E）。

設計段階においては，岩種，弾性波速度，一軸圧縮強度等によって地山等級は決定されることが多い。施工段階においては，新たな切羽が出現するたび，切羽観察データシート（付属表 F，G）を用いて，圧縮強度，割目状態，湧水量等を評価し，各点数から地山等級が決定される。

ここで，「切羽」とは，地盤工学用語辞典[14)]によると，

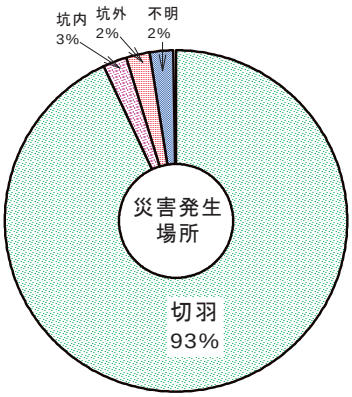


図-11　災害発生場所の内訳

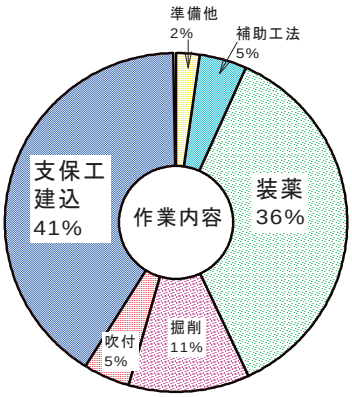
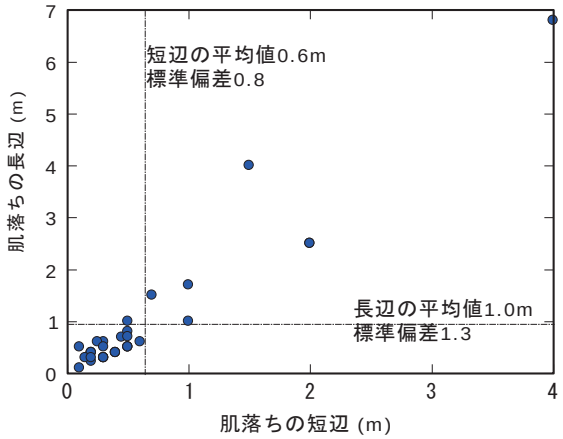


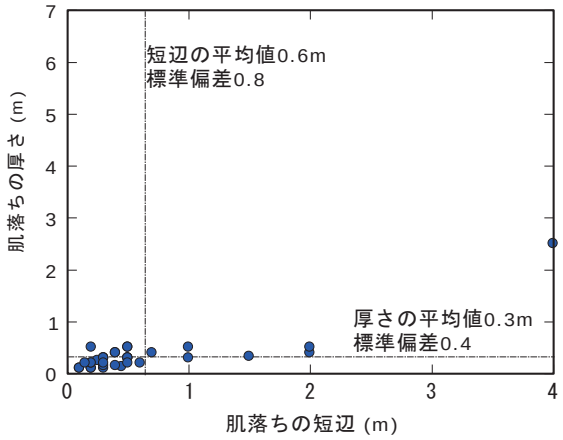
図-12　災害発生時の作業内容

写真-1　ナトム工法における装薬作業

「トンネル掘進方向における掘削面をいい，切端，鏡，切羽面（face）ともいう。切羽面を含む無支保区間（heading）を切羽と呼ぶ場合もある。」とある。本資料において，「切羽」とは，**図-10** に示すように，「切羽面を含む無支保区間」とした。また，「鏡（切羽面）」とは，**図-10** に示すように，「トンネル掘進方向における掘削面」とした。



(a)肌落ちの長辺と短辺の関係



(b)肌落ちの厚さと短辺の関係

図-13　肌落ちの大きさと厚さ

切羽観察結果，変位計測結果等をもとに，必要と判断された場合には，発注者と施工業者が協議の上，地山等級を変更することもある。

地山等級と地山弾性波速度 [15]との関係（付属表 B1，B2，C1，C2，H 参照）から，硬岩でも 7 件の災害が発生しており（**図-9** 参照），硬岩から土砂までを含めた肌落ちに対する災害防止対策が必要であることを示唆している。

（２）　肌落ちの発生場所及び作業内容

肌落ちによる死傷災害の発生場所及び作業内容の内訳をそれぞれ**図-11**，**図-12** に示す。災害発生場所は，切羽がほとんどを占め，装薬，支保工建込作業中に災害が発生している。これらの作業は，作業員が切羽に近付いて行うことが多い（**写真-1** 参

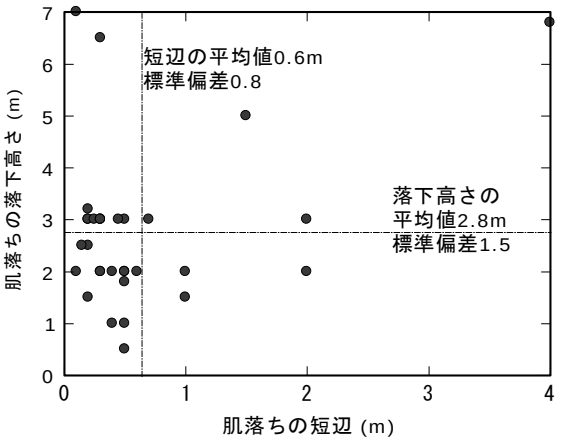


図-14 肌落ちの落下高さ(m)

照)。

(3) 肌落ちの大きさと落下高さ

図-13 に，肌落ちの大きさについて，長辺と短辺の関係(**図-13(a)**)及び厚さと短辺の関係(**図-13(b)**)を示す。それぞれの平均値は，長辺 1.0m，短辺 0.6m，厚さ 0.3m となる。また，それぞれの肌落ちの短辺，長辺，厚さから計算された体積の平均値は，0.212m^3 となる。肌落ちの湿潤単位体積重量をおおよそ 26.5 kN/m^3 (2.70 g/cm^3)とすると，その重量は，5.61 kN (572 kgf)となる。

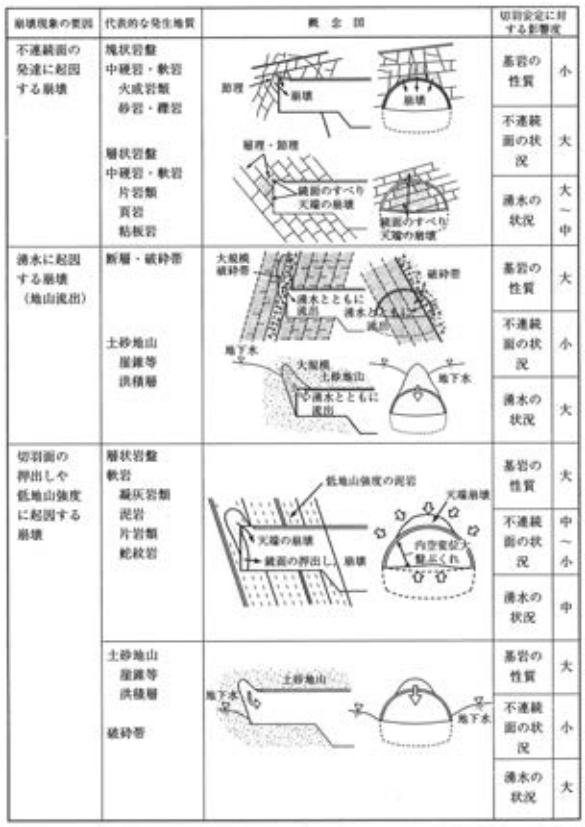
また，**図-14** に，肌落ちの落下高さと短辺の関係を示す。落下高さは，肌落ちの元の位置から被災者(ドリルジャンボのマンケージに乗っていた場合を含む。)までの落下距離であり，同図から平均 2.8m の落下高さで被災していることがわかる。

ここでは，肌落ちの大きさや落下高さの平均値をそれぞれ算出したが，ばらつきが大きく，0.5m 以下の大きさの肌落ちや 1.0m 以下の落下高さにより被災している場合も多い。したがって，小片の肌落ちが危惧される場合やトンネルの断面積が小さい場合でも肌落ち災害防止対策を施す必要がある。

3. 切羽における肌落ち災害防止対策の検討

前章から，トンネル建設工事中において労働災害の起因物となった肌落ちは，①山岳工法による発破掘削を採用している現場で多いこと，②切羽での装薬作業や支保工建込作業中に発生していること，③

表-2 切羽の崩壊現象の概念 [16)]



(出典:社団法人 日本道路協会: 道路トンネル観察・計測指針 平成 21 年改訂版, p.204, 2009.)

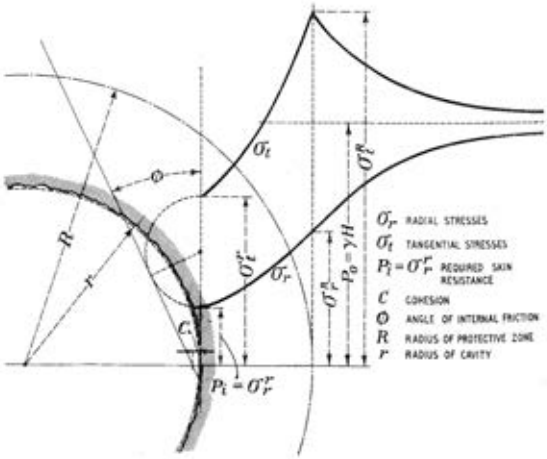
その岩塊は，1.0m×0.6m 程度の大きさで，厚さは 0.3m 程度であること，等が明らかとなった。そこで，ここでは，切羽での肌落ち発生のメカニズム，ナトム工法に関する文献調査を行った後，切羽での肌落ち災害防止対策について検討した。

3. 1 肌落ち発生のメカニズム

社団法人 日本道路協会では，「道路トンネル観察・計測指針(平成 21 年改訂版)」[16)]において，**表-2** に示すように，肌落ち発生のメカニズムを 3 つに分けている。また，上記の参考文献の記述を以下に要約する。

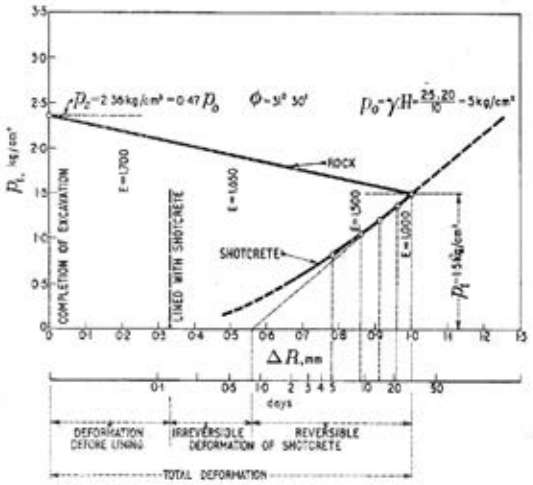
「a)不連続面の発達に起因する崩壊(滑落，はく離・はく落，層すべり等)

不連続面に沿った岩塊の滑落や岩片の剥離や剥落，さらに地層境界等の大きな不連続面に沿った層すべり等がある。硬岩から軟岩ま



図−15 トンネル内空周辺に作用する応力[17)]

（出典：Rabcewicz, L. V.: The New Austrian Tunneling Method, part one, Water Power, pp. 453-457, November 1964.）



図−16 トンネル内空を安定化させるために必要な抵抗力とトンネル内空の緩み領域の増加量との関係，及び吹付コンクリート強度と日数の関係[19)]

（出典：Rabcewicz, L. V.: The New Austrian Tunneling Method, part three, Water Power, pp. 19-24, January 1965. ）

での広範囲の地質で発生する。

b)湧水に起因する崩壊（流出，流砂等）

地下水を伴い地山が切羽から流れ出す現象である。断層・破砕帯，土砂地山で発生しやすく，湧水を伴うためにその規模は大規模になることも多い。

c)鏡（切羽面）の押出しや低地山強度に起因する崩壊

土圧による鏡（切羽面）の押出しやトンネル壁面の変形量が大きい場合の崩壊現象である。地山強度比の小さい軟岩や膨張性地山で発生する。」

また，本資料では，上記した3つの肌落ち発生のメカニズムに加え，

d) 地山を空気に触れさせること（曝気）による地山性状の変化に起因する崩壊

もあると考えている。

これらの崩壊は，トンネルを掘削することにより，今まで存在していた岩塊や土砂が無くなり，地山の応力が解放されるため生じる。これを防ぐためには，早期に地山を閉塞することが崩壊防止に効果的である。

ナトム工法は，地山の応力開放を抑制し，トンネル内空を安定化させるのみならず，地山の早期閉塞による曝気防止の観点からも有効な工法である。

３．２　ナトム工法の考え方

ナトム工法は，1964 年から 1965 年にかけて Rabcewicz によりはじめて提唱された[17), 18), 19)]。ここでは，トンネル内の肌落ちを防止するため，ナトム工法が提唱された当初の考え方を引用する。

図−15 は，トンネル内空周辺に作用する応力を示す。トンネル内空を安定化させるために必要な抵抗力 p_i は次式により与えられる。

$$p_i = -c\cot\phi + p_0\left[c\cot\phi + (1-\sin\phi)\right]\frac{r}{R}^{\frac{2\sin\phi}{1-\sin\phi}} \tag{1}$$

ここで，c: 粘着力，ϕ: 内部摩擦角，R: 塑性化領域（地山の緩みが拡がった領域），r: トンネルの半径，p_0: 土被り圧（$p_0 = \gamma H$, H: 土被り），である。

上式から，p_i は R が大きくなるにつれて小さくなることがわかる。つまり，トンネル周面から地山が緩みはじめ，その領域が拡がることにより，トンネル内空を安定化させるために必要な抵抗力も減少する。

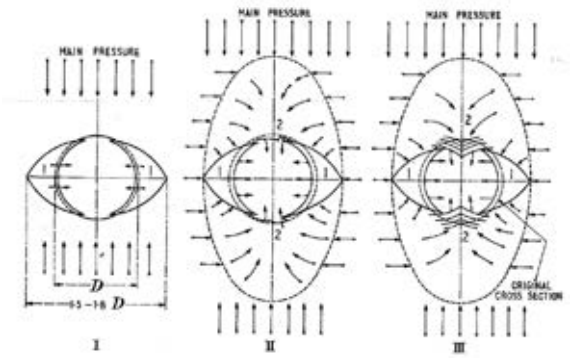


図-17 トンネル掘削に伴う緩み領域の拡大[17)]
（出典：Rabcewicz, L. V.: The New Austrian Tunneling Method, part three, Water Power, pp. 19-24, January 1965.）

図-16 は，トンネル掘削後の p_i とトンネル内空の緩み領域の増加量ΔR の関係，及び吹付コンクリート強度と日数の関係を示す。図の横軸は，ΔR を示すものと，日数を示すものとがある。図の左上から右下にかけて負の勾配を持った直線が，p_i とΔR の関係である。一方，図の中央から右上にかけて正の勾配を持った直線が，吹付コンクリート強度と日数の関係を示す。負の勾配を持った直線から，緩み領域が拡がっていくにつれ（ΔR が増加するにつれ），p_i が減少していることがわかる。これに対し，正の勾配を持った直線から，コンクリートをトンネル周面に吹き付けた後，日数の経過に伴って吹付コンクリートの強度が上昇していき，p_i と交わる。この時以降，トンネル内空は，吹付コンクリートにより安定化する。これが当初のナトム工法の考え方である。もし，仮に，トンネル内空を吹付コンクリートで安定化させないと，**図-17** に示すように，緩み領域が側面，上下面と拡がり，肌落ちへと至る。

また，Rabcewicz は，吹付コンクリートによりトンネル内空が安定化したことを確認するため，トンネル周面の変位を計測する必要性について言及している[19)]。

これらは，トンネル横断面について述べたものであるが，作用する応力の大小はあるが，縦断面についても同様のことが言える。つまり，トンネルの切羽においても，コンクリート吹付を行わないとその緩み領域が次第に拡がり，肌落ちへと至る可能性がある。

ナトム工法の考え方を踏まえると，これを防ぐためには，掘削後速やかに，天盤や底盤を含めて鏡（切羽面）に対してコンクリート吹付を行うことが有効であると考えられる。

３．３　肌落ち災害防止対策

これまでに示した肌落ちによる労働災害の事例，肌落ち発生のメカニズム，ナトム工法の考え方から，肌落ち災害防止対策を**表-3** のようにまとめた。

同表には，それぞれの肌落ち災害防止対策に対して，「地山の状態」，「期待される効果」，「施工性」の項目を設け，「最適　◎」，「適　○」，「可能　△」，「該当しない　-」，と 4 段階で示した。

また，表中の「施工段階でも対応可能な対策」は，現場レベルで対応できる項目であり，小規模の肌落ちを防止するという主目的のもと，実施の簡便さを優先させた。

これらの対策を実施しても切羽において肌落ちにより作業員の安全が保たれない可能性がある場合，「設計段階から考慮する対策」を積極的に取り入れる必要がある。施工中の場合は，発注者と施工業者が協議の上，決定することが望まれる。

どちらの対策においても，発注者が切羽からの肌落ちの危険性を十分に認識し，計画時に対策を盛り込むことが望まれる。

以下に各対策の概要を示す。

（１）鏡吹付

鏡吹付とは，鏡（切羽面）に対し，コンクリートを吹き付けることである。上述したように，トンネルの鏡（切羽面）だけでなく切羽全体に対して行うことが望ましい。つまり，掘削により露出した岩肌を早期に吹付コンクリートにより閉塞する。これにより，トンネル横断面だけでなく，縦断面の緩みも抑えることができる。

また，鏡吹付により，鏡（切羽面）がコンクリートで覆われるため，切羽の変形に伴い新たに発生した亀裂や切羽の変状が視認しやすくなる。

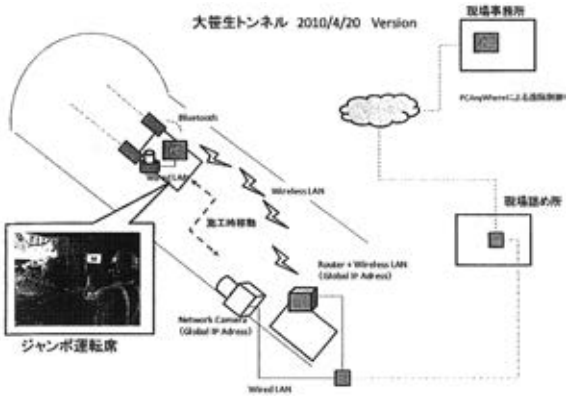
さらには，地山を空気に触れさせること（曝気）も防げるため，膨張性地山に対しても有効である。

しかしながら，鏡吹付を施していても，吹付厚不足や湧水により付着強度が弱まったことが原因で，災害

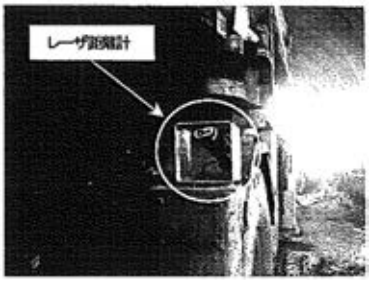
表-3 肌落ち災害防止対策

対策の時期	肌落ち災害防止対策		地山の状態				期待される効果						施工性（対策実施の容易さ）
			硬岩	中硬岩	軟岩	土砂	肌落ちのメカニズムの抑止				その他		
							①	②	③	④	⑤	⑥	
			地山弾性波速度（km/sec）（*1）				不連続面に起因する肌落ちの防止	湧水に起因する肌落ちの防止	鏡（切羽面）の押出しや低地山強度に起因する肌落ちの防止	曝気による地山性状の変化に起因する肌落ちの防止	切羽の変化を見極める	落石から人体を守る	
			3 以上	2~4	0.7~2.8								
			一軸圧縮強さ（MN/m^2）（*2）										
			50 以上	15~50	2~15	2 以下							
施工段階でも対応可能な対策	肌落ち要因の除去・低減対策	鏡吹付	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	◎	◎	-	◎
		鏡ボルト	△	○	◎	◎	◎	○	◎	○	-	-	○
		浮石の除去（コソク）	◎	◎	◎	△	◎	◎	◎	△	△	-	◎
		導水・さぐり削孔	○	○	◎	◎	-	◎	○	-	-	-	○
	肌落ちの把握	切羽変位計測	△	○	◎	◎	○	△	◎	○	◎	-	○
		切羽監視員の配置 十分な照度の確保	-	-	-	-	-	-	-	-	◎	-	◎
	労働者の防護対策	設備的防護対策	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	△
		個人用保護具	-	-	-	-	-	-	-	-	-	△	○
※設計段階から考慮する対策	肌落ち要因の除去・低減対策	フォアポーリング フォアパイリング	△	○	◎	◎	◎	○	◎	○	-	-	△
		水抜きボーリング	○	○	◎	◎	-	◎	○	-	-	-	△

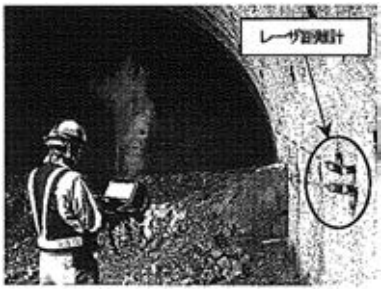
注：◎ = 最適，○ = 適，△ = 可能，- = 該当しない
※：地山の状態，施工現場の周辺環境，現地の施工性，安全性等を考慮し，必要であれば，設計変更を行うことも含む。
*1：国土交通省関東地方整備局：土木工事共通仕様書，p.33，2011.
*2：独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，p.41，2008.



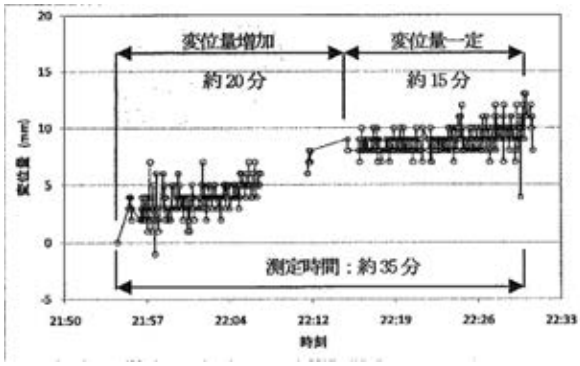
(a)切羽監視システムの構成例



(b) レーザ距離計をドリルジャンボに設置



(c) レーザ距離計を鋼製支保工に設置



(d) 鏡吹付後の鏡面の変位量の経時変化

図-18 切羽変位計測の事例①[20)]

（出典：寺島佳宏，小川勲，熊谷幸樹，松田浩朗，楢岡民幸：多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と不良地山における試験適用，トンネル工学報告集第 20 巻, pp. 219-223, 2010.11. ）

に至った事例もあるため，適切な吹付厚を確保するとともに，湧水を除去する等，追加の対策を実施することが重要である。

（２）鏡ボルト

鏡ボルトは，鏡（切羽面）にボルトを打設し，鏡（切羽面）の安定性を高めるものである。

鏡吹付でも鏡（切羽面）の自立が確保できない場合に，鏡吹付と鏡ボルトを併用することが望ましい。

（３）浮石の除去（コソク）

浮石の除去（コソク）は，不連続面に起因する岩塊等，比較的小さな岩塊を予め落とす作業である。これにより，引き続く作業中の肌落ちを防止することを目的とする。

浮石の除去（コソク）は，標準的な工程に含まれているが，その重要性からここであえて表に掲載した。

（４）導水・さぐり削孔

導水・さぐり削孔は，地下水脈を発見し，水が鏡（切羽面）に浸透する前に，削孔穴に水を導くものである。また，鏡（切羽面）が濡れていると吹付コンクリートがよく付着しないため，できる限り水を抜くことが望まれる。

（５）切羽変位計測

切羽変位計測とは，鏡（切羽面）の変位を計測機器により測定することである。

切羽での作業中，新たな亀裂の発生や地山の変状を確認するため，切羽監視員を配置し，終始切羽を監視することが必要である。それに加えて，目視では確認できない微小な変位を捉えるため，切羽の変

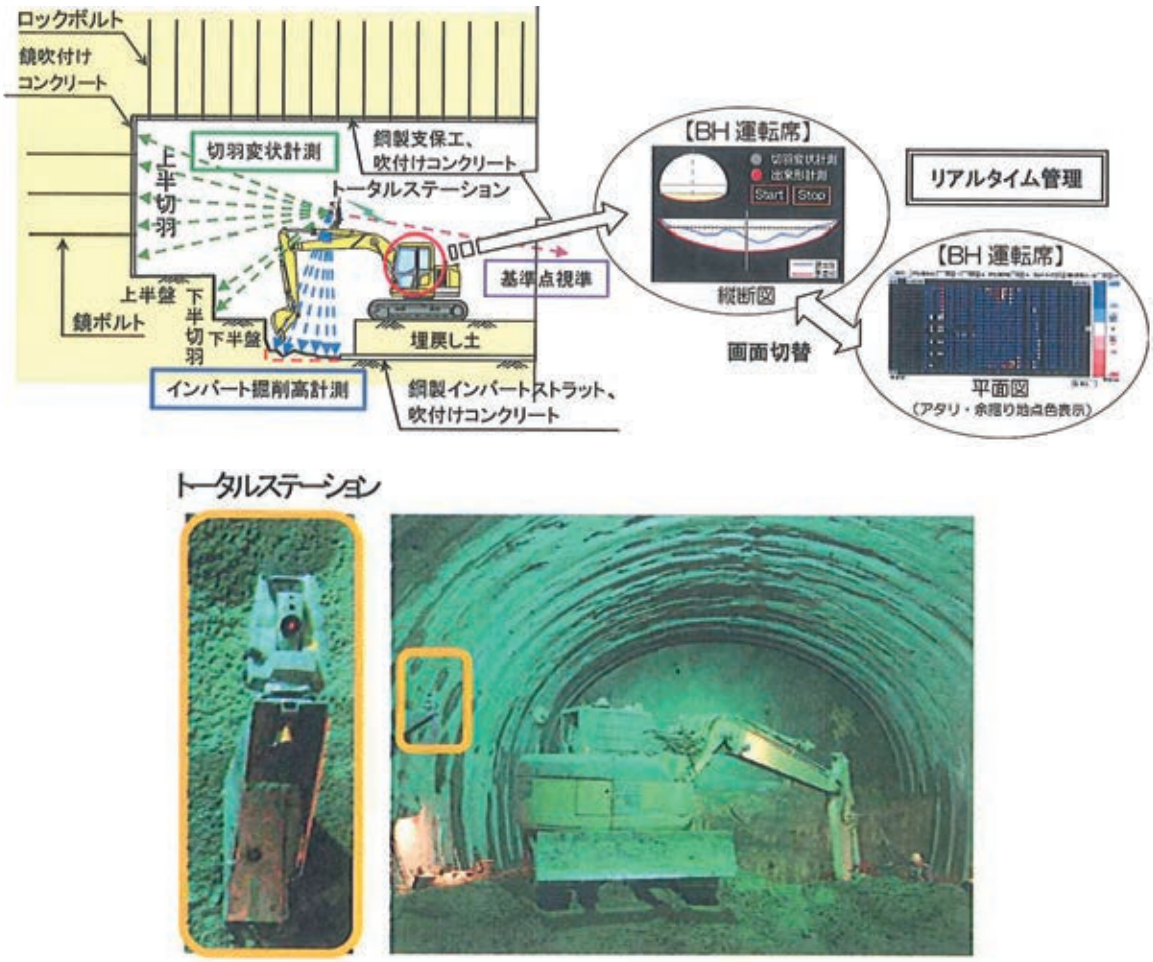


図-19 切羽変位計測の事例②[21)]

（出典：鬼頭夏樹，高橋誠二，石山宏二，大谷達彦：全断面早期閉合の合理化施工の取り組み―能越自動車道　七尾トンネル及び氷見第 8 トンネル―，第 68 回施工体験発表会（山岳），社団法人　日本トンネル技術協会，pp. 1-8, 2011.）

位を計測することも望まれる。

切羽変位計測について，昨今，新しい切羽監視システムが提案されている。**図-18** に示すように，寺島ら[20)]によると，レーザ距離計をドリルジャンボ，鋼製支保工等に設置することにより，鏡（切羽面）の変位を多点同時計測できることが示されている。また，鏡（切羽面）が前面に押し出してくる現象や鏡吹付により鏡（切羽面）の変位が落ち着いた様子が計測されている（**図-18(d)**）。さらに，鏡吹付前後の鏡（切羽面）の変位差から，鏡吹付厚を管理できることも言及されている[16)]。

自動追尾ノンプリズムトータルステーションを用いた切羽変位計測の例として，**図-19** に示すように，鬼頭ら[21)]は，一次インバート掘削時の切羽面の押出し状況を計測し，リアルタイムで切羽を監視しているものもある。

このような切羽監視システムを導入することにより，一定以上の加速度，変位速度等になると警報を鳴らすといった肌落ち災害防止対策も可能になる。

（６）切羽監視員の配置，十分な照度の確保

切羽監視員を配置し，新たな亀裂の発生や地山の変状を確認する必要がある。また，切羽に生じた亀裂や地山の変状をより視認しやすくするため，十分な照度の確保が重要である。さらに，作業性の向上のためにも，十分な照度の確保は有効である。これは，

写真-2 トンネルの切羽の照度確保の例

建設機械と作業員との接触による災害のほか，つまずきによる転倒やこれに起因する墜落・転落災害の防止にも効果的である(**写真-2** 参照)。

（７）労働者の防護対策

ここでは，労働者の防護対策を「設備的防護対策」と「個人用保護具」とに分類する。「設備的防護対策」は，作業員の上部に器具を設置して，人体を守るものである。「個人用保護具」は，作業員が装着し，直接的に人体を守る装具である。

「設備的防護対策」としては，ネット，マット，マンケージガード等がある。

ネットは，**写真-3** に示すように，労働者の上部にネットを設置し，労働者の上部からの落石をネットで受けようとするものである。

マットは，**写真-4** に示すように，労働者の上部にマットを設置し，落石の衝撃をマットで吸収しようというものである。

マンケージガードは，**写真-5** に示すように，マンケージの前面及び天井部に柵を設置し，マンケージに搭乗した作業員を肌落ちから防護する器具である。また，マンケージ下部に柵を設置し，マンケージの下部で作業中の作業員を肌落ちから防護する器具もある。

「個人用保護具」としては，保護帽(ヘルメット)，体の保護具(プロテクター)，安全靴等がある。

写真-3 ネットの使用状況

写真-4 マットの使用状況

写真-5 マンケージガード

（８）設計段階から考慮する対策

フォアポーリング，フォアパイリングは，天盤の安定性を高めるために有効な補助工法である。

水抜きボーリングは，導水やさぐり削孔では対応できない湧水量がある場合に検討する必要がある。

３．４　施工上の留意事項

ここでは，各対策について，施工上の留意事項を示す。以下の点に注意して各対策に当たる必要がある。

表-4 岩塊の1辺の長さとその岩塊を落下させないために必要な吹付厚の関係[22)]

	抵抗する岩塊(ピラミッド型)の 1 辺の長さ(5cm 単位)		
吹付厚 cm	15 分後	30 分後	1 時間後
1	30 cm	35 cm	45 cm
2	40 cm	50 cm	65 cm
3	50 cm	65 cm	80 cm
5	65 cm	80 cm	105 cm
7.5	80 cm	100 cm	130 cm
10	95 cm	115 cm	150 cm

(出典:一般社団法人　日本トンネル専門工事業協会: トンネル工事における肌落ち労働災害防止のハンドブック, 一般社団法人　日本トンネル専門工事業協会, pp. 25-26, 2007.)

(1) 鏡吹付

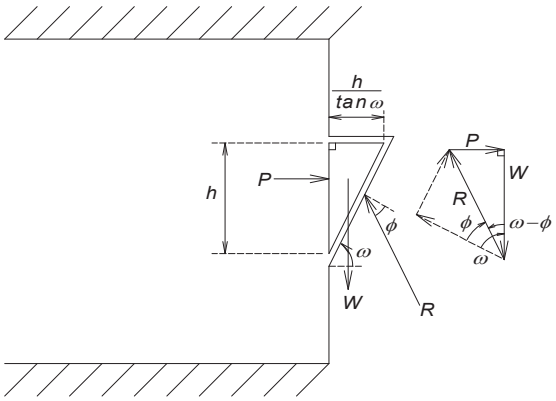
鏡吹付の施工に当たっては, 地山の性状を踏まえ, 適切な吹付厚さを確保する必要がある。

一般社団法人　日本トンネル専門工事業協会が発行したハンドブック[22)]では, ピラミッド型(正四角錐)の岩塊の大きさと吹付厚の関係を**表-4** のように示している。災害事例から, 肌落ちの大きさの平均値は, 1.0m×0.6m で, 厚さの平均値は 0.3m である(**図-13** 参照)ことを考慮すると, 同表から, 15 分の養生時間で, 1 辺 65cm のピラミッド型の岩塊を落下させないためには, 5cm の吹付厚が必要であることがわかる。

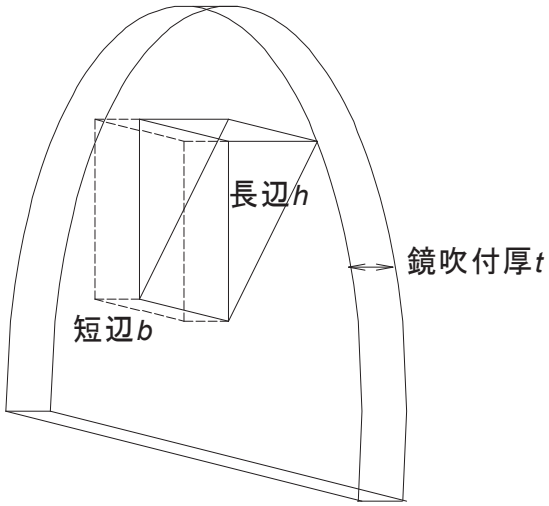
また, 各機関の一次吹付厚に関する設計基準を参考にするという方法も考えられる。付属表 D2, E に示すように, 鉄道トンネルや道路トンネルの標準支保パターン表を参考に, 標準支保パターン IV_{NP}, B の場合は 5cm, III_{NP}, CI, CII の場合は 7cm というように, 標準支保パターン(地山等級)に応じて, 吹付厚さを厚くすることも考えられる。

本資料でも, 参考までに必要な吹付厚の検討を試みる。

図-20(a)に示すように, 鏡(切羽面)に直線すべり岩塊を設定し, すべり面の釣合いから鏡(切羽面)の



(a) 剥離した岩塊を支えるために必要な力



(b) 鏡吹付コンクリートの押抜きせん断強度

図-20 必要な鏡吹付厚の計算例

岩塊の安定性を評価する。ここで, すべり面は, 地山の層理, 節理又は亀裂を表している。岩塊は完全に地山から剥離しているものとし, 地山の土被り圧は作用しないものとする。このように仮定すると, 岩塊に作用する力の連力図が同図(a)のように描け, 岩塊を落とさないための力 P は, 以下の式で与えられる。

$$P = W \cdot \tan(\omega - \phi) \tag{2}$$

$$W = h \cdot \frac{h}{\tan\omega} \cdot \frac{1}{2} \cdot b \cdot \gamma \tag{3}$$

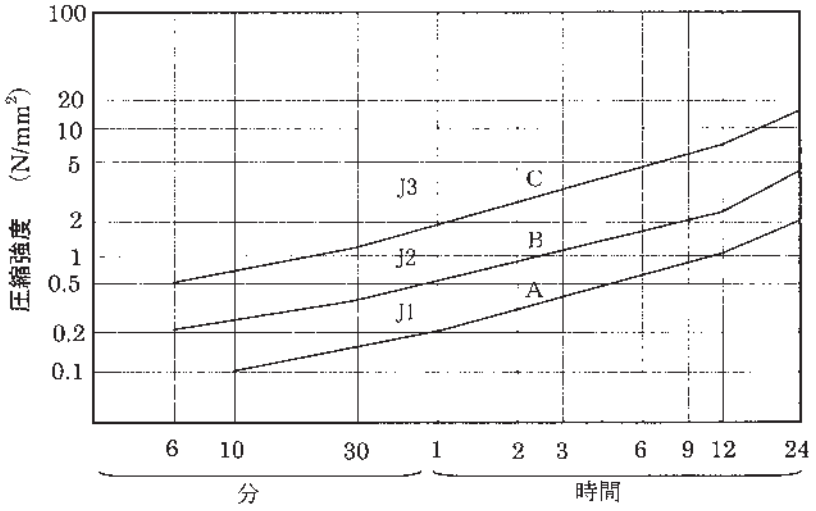
ここで, W: 岩塊の重量 (kN), ω: すべり面の角度, ϕ: 岩塊の摩擦角, h: 岩塊の長辺, b: 岩塊の短辺, γ: 岩塊の単位体積重量(kN/m^3), である。

上式から, P はωの関数となる。これは, クーロンの主働土圧と同様である[23)]。P が最大となるωは, 以下

表-5 吹付コンクリートの初期強度の設定事例 [26)]

機関名	種別	材齢 3 時間 圧縮強度	材齢 24 時間 圧縮強度
日本道路協会	**吹付コンクリート**	-	**5 N/mm^2**
鉄道建設・運輸施設 整備支援機構	高品質吹付コンクリート	1.5 N/mm^2	8 N/mm^2
日本道路公団	**吹付コンクリート**	-	**5 N/mm^2**
	高強度吹付コンクリート	2 N/mm^2	10 N/mm^2
	高強度繊維補強 吹付コンクリート	2 N/mm^2	10 N/mm^2

（出典：土木学会コンクリート委員会 吹付コンクリート研究小委員会: コンクリートライブラリー121 吹付コンクリート指針（案）[トンネル編]，社団法人 土木学会, p. 14, 2005.）



J1：(A～B 間)：特別な荷重に対する挙動および特に低い粉じん濃度やはね返り率が要求されない場合で，乾燥した基盤へ薄い層を施工する場合に適用される。

J2：(B～C 間)：厚い層を出来るだけ早く施工する必要がある場合や，湧水があったり後続の作業により荷重が直ちに作用するような地山に適用される。

J3：(C 以上)：特殊条件下のみに適用される。(例えば，湧水が非常に多い場合)

（出典：Sprayed Concrete Guideline in Austria ， 1999）

図-21 吹付コンクリートの初期強度区分の事例 [26)]

のようになる。

$$\omega = 45° + \frac{\phi}{2} \qquad (4)$$

つまり，P が最大となるすべり面を考慮しておけば，その他のすべり面は，その P 以下となるため，安全側になる。摩擦角 ϕ は，材料により異なるが，ここでは，剥離した岩塊と地山の摩擦であるから，粘着力は作用しないとし，最上[24)]の粒状体の力学から ϕ= 30°とした。したがって，岩塊の長辺，短辺が求まれば，P が決定される。災害事例から，肌落ちの長辺，短辺の平均値は，それぞれ1.0m，0.6m である（図-13 参照）ことから，岩塊の単位体積重量を26.5kN/m^3

表-6 コンクリートの許容応力度（N/mm^2）[27]

本表のホームページへの転載は許可されていないため削除しています。

（出典：社団法人　日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説―許容応力度設計法―，技報堂，p. 41，1999.）

（2.7g/cm^3）とすると，計算される P は，2.65kN となる。ここで，鏡吹付を実施するだけでは完全に切羽を安定化させることは困難であり，本資料では施工上の標準を示すことを意図しているため，肌落ちの大きさの最大値ではなく，平均値を用いた。

次に，**図-20**(b) に示すように，岩塊を落とさないためには，作用反作用の関係から，P の力で鏡吹付コンクリートを押しても，コンクリートが押抜きせん断破壊しないことが必要である。したがって，鏡吹付コンクリートと岩塊が接触している周面からせん断され，厚さ方向に平行にせん断破壊されると仮定する。このとき，せん断応力が作用する領域は，岩塊とコンクリートが接触している周長に鏡吹付厚を乗じた値である[25]。したがって，押抜きせん断応力は以下の式で与えられる。

$$\tau = \frac{P}{2\cdot(h+b)\cdot t} \tag{5}$$

ここで，t: 鏡吹付厚，である。

上式の τ が，鏡吹付コンクリートに作用する押抜きせん断応力である。ここで，鏡吹付厚を 0.03m（3cm），0.05m（5cm），0.07m（7cm）とすると，鏡吹付コンクリートに作用する押抜きせん断応力は，それぞれ 27.6，16.6，11.8kN/m^2 となる。この押抜きせん断応力が，せん断に関する吹付コンクリートの許容応力度よりも小さければよい。

吹付コンクリートの設計基準強度 F_c は，「吹付コンクリート指針（案）[トンネル編]」[26]に示されているが，材齢28日圧縮強度である。また，鏡（切羽面）の安定を十分確保できるように，吹付コンクリートの初期強度として，材齢 24 時間圧縮強度が示されており，5N/mm^2（5000 kN/m^2）である（**表-5** 参照）。

ここでは，鏡吹付後すぐに支保工建込の作業に移行することを考えると，より材齢が短い場合を検討することが望ましい。同じく「吹付コンクリート指針（案）[トンネル編]」[26]では，材齢 24 時間以内の初期強度を吹付コンクリートに要求される初期の力学的性能に応じて，幅広く段階的に，しかも材齢に応じて連続的に規定している例を引用している（**図-21** 参照）。

同図から，要求される初期の力学的性能として，J1（A~B 間），J2（B~C 間），J3（C 以上）の 3 つが示されている。ここでは，鏡吹付後すぐに支保工建込の作業に移行するため，「後続の作業により荷重が直ちに作用するような地山に適用される。」に該当する J2（B~C 間）とした。また，図中の曲線 B は，材齢 24 時間圧縮強度が 5 N/mm^2（5000 kN/m^2）程度であり，日本の基準に最も近い。さらに，図中の曲線 C よりも曲線 B の値が小さいため，初期強度を小さく見積もることとなり，安全側の計算となる。したがって，必要な初期強度は，10 分間の養生時間でおおよそ 0.3N/mm^2（300kN/m^2）であり，3 時間の養生時間でおおよそ 1.2N/mm^2（1200kN/m^2）である。

養生時間が 10 分間と 3 時間の圧縮強度を設計基準強度とし，許容応力度を求め，吹付コンクリートに作用する押抜きせん断応力との大小関係について検討する。

設計基準強度と許容応力度の関係は，日本建築

表-7　鏡ボルトの標準設計パターン例[29)]

設計パターン		I	II	III
打設間隔	縦方向	1.2m 程度	1.5m 程度	1.8m 程度
	横方向	1.2m 程度	1.5m 程度	1.8m 程度
適用地山		・非常に軟質な地山，若しくは土砂地山 ・岩塊や土砂の崩壊した地山 ・非常に空隙の多い地山 ・非常に押出し性地圧の大きい地山	・崖錐や破砕帯等 ・切羽が崩壊しやすい地山 ・押出し性地圧のある地山	・固結度の低い地山 ・亀裂の多い地山 ・切羽の肌落ちが見られる地山
参考　地山等級（道路）		E 等級	D 等級	C 等級

注）鏡面に湧水のある場合は，事前に排水対策を採用することを基本とする。なお湧水が十分に処理できない場合は，上表の設計パターンを 1 ランク上げる。

（出典：地下開発技術ジェオフロンテ研究会：補助工法の設計―坑内から行う地山先行補強工の設計手法―, p. 114, 2007.）

学会が発行している「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説―許容応力度設計法―」[27)]に規定されており，**表-6** のとおりである。材齢 10 分間及び 3 時間は短期に相当するから，せん断に関する許容応力度は，以下の式で与えられる。

$$\tau_c \leq \frac{1}{30} \cdot F_c \cdot 1.5 \qquad (6)$$

ここで，10 分間の養生時間での初期強度を設計基準強度とすると，F_c= 300kN/m^2 となり，$\tau_c \leq$ 15.0kN/m^2 となる。吹付厚 7cm での吹付コンクリートに作用する押抜きせん断応力は 11.8kN/m^2 であるから，許容応力度以内となり，長辺 1.0m，短辺 0.6m の岩塊を落下させないことになる。一方，吹付厚 5cm だと，作用する押抜きせん断応力が 16.6kN/m^2 となり，許容応力度を超えてしまい，鏡吹付面がせん断破壊する可能性がある。

また，3 時間の養生時間での初期強度を設計基準強度とすると，F_c= 1200kN/m^2 となり，$\tau_c \leq$ 60.0kN/m^2 となる。吹付厚 3cm での吹付コンクリートに作用する押抜きせん断応力は 27.6kN/m^2 であるから，許容応力度以内となり，長辺 1.0m，短辺 0.6m の岩塊を落下させないことになる。

これらの計算例は，非常に限定された条件で得られた結果であるため，トンネルの施工条件に応じた検証により，精査することとしている。

なお，鏡吹付により，肌落ちを完全には防止できないため，併せて，十分な照度下における監視，切羽変位計測，鏡ボルト等，他の対策についても検討することが望ましい。

（２）鏡ボルト

鏡ボルトの施工にあたっては，自立の困難な切羽での作業となることが多いため，肌落ちの可能性を十分認識する。そのため，鏡吹付との併用が望ましい。

鏡吹付と併用した場合，鏡ボルトの打設中，吹付コンクリートのひび割れの発生，進行に十分注意する。特に，注入式の鏡ボルトでは，施工時に注入材が鏡吹付けコンクリートの背面や緩んだ岩盤の亀裂に浸透し注入圧で崩落を引き起こすことがあるので注意が必要である[28)]。

表-8　切羽変位計測技術の概要と特徴[20)]

計測方法	①　自動追尾ノンプリズムトータルステーション	②　レーザ変位計	③　レーザ距離計
概要	専用ターゲットを設置しなくても任意箇所の三次元変位を計測する.	ノンターゲットで測定器から被測定物までの距離をレーザ光線を用いて高精度に測定する.	ノンターゲットで測定器から被測定物までの距離をレーザ光線を用いて測定する.
3 次元計測	可能	困難	困難
測定精度	±数 mm	数μm	±数 mm
測定頻度	10 秒程度/点	数十 ms/点	1 秒/点
同時多点計測	測点数が増えると同時計測はきわめて困難	サイクルを通じての連続的な同時計測が困難	測点数が増えても同時計測が可能

（出典：寺島佳宏，小川勲，熊谷幸樹，松田浩朗，楢岡民幸：多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と不良地山における試験適用，トンネル工学報告集第 20 巻, pp. 219-223, 2010.11.）

鏡ボルトは，その長さに応じて，短尺鏡ボルト（ボルト長 6m 以下）と長尺鏡ボルト（ボルト長 6m 超）に分類される。

短尺鏡ボルトの場合，「補助工法の設計―坑内から行う地山先行補強工の設計手法―」[29)]に示されているように，**表-7** に示す打設間隔とすることが望ましい。

長尺鏡ボルトの場合，簡易計算による設計法や数値解析によって，打設間隔を決定する[28)]ことが望ましい。

鏡ボルトに用いる材料は，後の掘削時の切断しやすさを考慮して，GFRP（Glass Fiber Reinforced Plastics）が採用されることが多い。一方で，鋼管膨張型ボルトも使用された事例がある。これは，折り畳んだ鋼管製のチューブの状態で穿孔内に挿入後，高圧水で拡張することでボルトの周囲の地盤に密着させる工法である。

鏡ボルトの施工方法は，GFRP 製の鏡ボルトを使用する場合，定着材の施工方式により充填式と注入式に分けられる。充填材，注入材は，セメント系，プレミックスモルタル，ウレタン系がある。充填材，注入材の選定に際しては地山の状態（特に湧水の有無）や施工性などを考慮し，適切な材料を選定する。

（３）浮石の除去（コソク）

浮石の除去（コソク）が不十分であった場合，肌落ちに直結するため，十分に浮石の除去（コソク）を行う必要がある。一方で，浮石の除去（コソク）に多くの時間がかかると，掘削した地山を長時間大気に開放することとなり，地山性状に変化が生じることも考えられる。これにより，肌落ちに繋がるおそれがあるため，浮石の除去（コソク）の作業時間をあらかじめ定め，終了後直ちにアタリトリ（設計掘削線の内側に残った岩塊，土砂を除去する作業），鏡吹付を行う等，肌落ち災害防止対策に努めることが重要である。トンネル内空の断面積が 80m^2 以内であれば，浮石の除去（コソク）の時間の目安は 10 分程度とすることが望ましい。

また，浮石の確認を容易にするため，十分な照度を確保することが必要である。

さらに，浮石の除去（コソク）は，ブレーカなどの建設機械を用いて行い，作業員が切羽に近付かないことが重要である。やむを得ず作業員が切羽に近付いて浮石の除去（コソク）を行う場合，労働者の防護対策を行った上，長尺の治具を使用し，浮石を除去することが望ましい。

（４）導水・さぐり削孔

導水・さぐり削孔は，鏡（切羽面）の左右どちらかの端から削孔する。地山の状態や湧水量にもよるが，

表-9 日本工業規格 JIS Z 9110 : 2010 に定められた基本的な照明要件その 2（屋外作業）[30)]

領域，作業又は活動の種類	$\bar{E}_m$ (lx)	U_o	GR_L	R_a	注記
非常に粗い短時間作業	10	-	-	20	
非常に粗い作業 （例：大きな貨物を手早く動かすなどの作業）	20	0.25	55	20	
粗い作業 （例：連続的に行われる大きな物，危険物の取扱い作業など）	50	0.40	50	20	
正確な作業 （例：工具を使う作業，大工仕事など）	100	0.40	45	40	
細かい作業 （例：電気・機械設備などの作業）	200	0.50	45	60	

注）$\bar{E}_m$ (lx)：維持照度，ある面の平均照度を，使用期間中に下回らないように維持すべき値。

U_o：照度均斉度，ある面における平均照度に対する最小照度の比。

GR(Glare Rating)：グレア，1994 年に国際照明委員会が屋外スポーツ及び広場照明施設のために規定した不快グレア評価方法に基づく値（以下，*GR* という。）。

GR_L：グレア制限値，屋外照明施設に対して許容できる *GR* 値の上限値（以下，*GR* 制限値という。）。

R_a：平均演色評価数

（出典：日本工業規格 JIS Z 9110 : 2010 照明基準総則, http://www.jisc.go.jp/app/JPS/JPSO0020.html）

削孔穴は基本的に1本とされることが多い。湧水量が多い場合には，2 本，3 本と増やす。また，削孔場所も変更し，地下水脈に削孔穴を到達させる。それでも湧水量が多い場合は，水抜きボーリングを行う。

ただし，導水・さぐり削孔を行う場合は，周辺地盤の地下水位の低下を招くため，薬液注入工法などによりトンネル前方の地山の亀裂を薬液により固めてしまうなど，その他の補助工法を取り入れることも検討する必要がある。

（５）切羽変位計測

切羽変位計測技術の概要と特徴を**表-8** に示す [20)]。切羽変位計測は，基本的に点での計測であるため，1 点の計測間隔が短い方が良い。また，特に硬岩，中硬岩では，落下前の変位が微小であることも考えられるため，計測精度も高い方が良い。さらに，点での計測では，その計測点が不安定岩塊を補足していればよいが，必ずしもそうではないため，鏡吹付と併用することが望まれる。これにより，不安定岩塊が前面に押し出してくれば，その付近の鏡吹付コンクリートを面で押し出すため，完全に不安定岩塊を補足していなくとも，その周辺を計測していれば，不安定岩塊の変位を計測することが可能であると考えられる。

（６）切羽監視員の配置，十分な照度の確保

労働安全衛生規則第 604 条では，次のように規定されている。

「事業者は，労働者を常時就業させる場所の作業面の照度を，次の表の上欄に掲げる作業の区分に応じて，同表の下欄に掲げる基準に適合させなければならない。

作業の区分	基準
精密な作業	300 ルクス以上
普通の作業	150 ルクス以上
粗な作業	70 ルクス以上

ただし，感光材料を取り扱う作業場，坑内の作業場その他特殊な作業を行なう作業場については，この限りでない。」

また，日本工業規格 JIS Z 9110 : 2010 照度基準総則 [30]では，屋外作業の基本的な照度要件を**表-9** のように示している。それによれば，正確な作業（例：工具を使う作業，大工仕事など）は 100 ルクス，細かい作業（例：電気・機械設備などの作業）は200ルクスに推奨されている。

ここで，トンネル施工中の切羽は，労働安全衛生規則 604 条の「坑内の作業場」に当たると考えられ，条文の適用外である。しかしながら，労働安全衛生規則第 388 条に基づき準用される第 367 条において，ずい道等の建設の作業については「作業を安全に行なうため必要な照度を保持しなければならない。」とされている。このことに鑑みると，装薬や支保工建込といった作業が必要であるため，必要かつ十分な照度の目安として，普通の作業に区分される 150 ルクス以上の照度を確保することが望ましい。

（７）労働者の防護対策

「設備的防護対策」であるネット，マット，マンケージガード等は，切羽で装薬中の労働者を肌落ちから防護するため，労働者の上部に設置する。

ネット，マットは，ドリルジャンボのアームを利用して設置するため，ドリルジャンボの大きさを踏まえると，トンネル内空の断面積が中断面以上での適用に限られる。また，マンケージガードについては，ロックボルトの打設時にガードが邪魔になるため，装薬，浮石の除去（コソク）の時に適用が限られる。

このように，各種の防護設備については，その選択に当たり，施工上の制約が生ずる場合があることから，掘削断面，作業の種類，作業方法に応じ，適切な防護設備を選定する必要がある。

また，これらの防護対策は，大きな肌落ちに対して装置自体の耐力を超えてしまうことも予想され，それぞれの装置の防護性能を示すとともに限界があることに留意する必要がある。

「個人用保護具」については，労働安全衛生規則に着用が義務付けられていることから，労働者が必ず着用するようにする。

保護帽（ヘルメット）の着用は，労働安全衛生規則第 388 条に基づき準用される第 366 条において，ずい道等の建設の作業については，「物体の飛来又は落下による労働者の危険を防止するため，当該作業に従事する労働者に保護帽を着用させなければならない。（第 2 項） 前項の作業に従事する労働者は，同項の保護帽を着用しなければならない。」と規定されている。

体の保護具（プロテクター）の着用は，ずい道等の建設の作業と明記されていないものの，労働安全衛生規則第 538 条において，「事業者は，作業のため物体が飛来することにより労働者に危険を及ぼすおそれのあるときは，飛来防止の設備を設け，労働者に保護具を使用させる等当該危険を防止するための措置を講じなければならない。」と規定されている。保護具には，**写真-4** の労働者が装着している切羽の作業員のために開発されたプロテクターもある。

安全靴の着用は，ずい道等の建設の作業と明記されていないものの，労働安全衛生規則第 558 条において，「事業者は，作業中の労働者に，通路等の構造又は当該作業の状態に応じて，安全靴その他の適当な履物を定め，当該履物を使用させなければならない。（第 2 項） 前項の労働者は，同項の規定により定められた履物の使用を命じられたときは，当該履物を使用しなければならない。」と規定されている。

ただし，大きな岩塊や土砂に対して労働者を保護するものではないため，**表-3** に示す「施工段階でも対応可能な対策」の中から適宜選択し，「個人用保護具」以外の対策も講じなければならない。

（８）設計段階から考慮する対策

フォアポーリング，フォアパイリング，水抜きボーリングを採用し，設計するに当たり，地山の状態や施工現場の周辺環境に応じて，種々の採用基準，設計基準が設定されている [28]。

また，施工中であっても，地山の状態，施工現場の周辺環境，現地の施工性，安全性等を考慮し，①切羽の変状や変位計測の結果，②施工段階で講じた肌落ち災害防止対策の状況等をもとに，発注者と施工業者が協議の上，必要と判断された場合，設計変更することが望ましい。

フォアポーリング，フォアパイリングでは，作業員が

表-10 肌落ち災害防止対策を考慮した標準的な施工手順案

作業内容	安全対策
① 穿孔 （必要であれば，導水・さぐり削孔。）	ドリルジャンボにて，主に鏡（切羽面）のボーリングを行う。 作業員はドリルジャンボ内にて作業を行い，鏡（切羽面）に近付かない。
② 装薬 （必要であれば，労働者の防護対策。）	作業員が鏡（切羽面）に近付かなければならず，肌落ちによる災害の可能性が高い作業である。作業員は，保護帽（ヘルメット），体の保護具（プロテクター），安全靴等の保護具を着用して作業する。ネット，マット，マンケージガード等を設置して，労働者の防護対策を行うことが望まれる。
③ 発破	爆薬を取り扱うので，火薬類取締法，火薬類取締法施行規則に従い作業を行う。
④ ずりだし	ショベル・ローダーなどの建設機械を用いて行う。作業員は鏡（切羽面）に近付かない。また，十分な照度を確保した環境で作業を行うこと。
⑤ 浮石の除去（コソク）	ブレーカなどの建設機械を用いて行う。作業員は鏡（切羽面）に近付かない。また，十分な照度を確保した環境で作業を行うこと。
⑥ アタリトリ	ブレーカなどの建設機械を用いて行う。作業員は鏡（切羽面）に近付かない。また，十分な照度を確保した環境で作業を行うこと。
⑦ 切羽変位計測	ドリルジャンボ，鋼製支保工等にレーザ距離計などの計測機器を取り付け，鏡（切羽面）の変位を多点計測することが望ましい。変位速度の上昇の際は自動的に警報を鳴らすようにする。また，十分な照度を確保した環境で作業を行うこと。
⑧ 一次吹付（鏡吹付も含む。）	機械を用いて行い，作業員が鏡（切羽面）に近付くことなく，遠隔操作できるようにする。
⑨ 支保工建込	作業員が鏡（切羽面）に近付かなければならず，肌落ちによる災害の可能性が高い作業である。作業員は，保護帽（ヘルメット），体の保護具（プロテクター），安全靴等の保護具を着用して作業する。
⑩ 二次吹付	機械を用いて行い，作業員が鏡（切羽面）に近付くことなく，遠隔操作できるようにする。
⑪ ロックボルトの打設	ドリルジャンボを用いて行う。作業員が鏡（切羽面）に近付かなければならず，肌落ちによる災害の可能性が高い作業である。作業員は，保護帽（ヘルメット），体の保護具（プロテクター），安全靴等の保護具を着用して作業する。

切羽に近付く必要があるため，また，打設間隔が広い場合，その隙間から岩塊や土砂が落ちてくる可能性もあるため，鏡吹付，鏡ボルト，その他の対策と併用し，施工に当たることが望ましい。

水抜きボーリングでは，地下水位の低下を引き起こすため，周辺環境への影響を検討し，必要であれば薬液注入工法などの補助工法を取り入れることも望まれる。

３．５　標準的な施工手順における肌落ち災害防止対策

表-10 に，肌落ち災害防止対策を考慮した標準的なトンネル施工手順を示す。①から⑪までの一連の作業を繰り返すことにより，トンネル建設工事中の切羽での作業員の安全を確保できると考えられる。

まず，湧水があると判断された場合，導水・さぐり削孔を行い，切羽の湧水量を低減させる。これは，吹付コンクリートと掘削面が水に濡れていると，付着し難く

なるからである。穿孔作業は，ドリルジャンボにて行い，作業員は切羽に近付かせない。

装薬作業は，作業員が切羽に近付くため，危険性の高い作業である。機械的に装薬作業を行う技術を用いたり，遠隔で装薬することが望ましいが，現行では作業員により手作業で装薬を行うことが多いようである。そのため，装薬作業中の作業は，一次吹付（鏡吹付も含む。）により，切羽の安定が比較的保たれた状態で行う。また，ネット，マット，マンケージガード等を設置し，労働者の防護対策も併用することが望ましい。さらに，作業員は，保護帽（ヘルメット），体の保護具（プロテクター），安全靴等の保護具を着用して作業する。

ずりだし，浮石の除去（コソク），アタリトリ（設計掘削線の内側に残った岩塊，土砂を除去する作業）は，建設機械を用いて行い，作業員は切羽に近付かないようにする。

一次吹付（鏡吹付も含む。）は，機械を遠隔操作して行い，作業員は鏡（切羽面）に近付かせない。

支保工建込は，最も危険性の高い作業である（**図-12** 参照）。現行の作業においては，支保工の位置合わせのため，作業員が切羽に立ち入る必要がある。作業員が切羽に立ち入る前に，切羽の変状がないこと，切羽の変位が落ち着いていること等を確認する。

以上をトンネル施工手順の標準的なモデルとし，肌落ち災害防止対策に当たることとする。それでもなお切羽からの肌落ちの危険性があると判断された場合，特に，切羽の変状や変位等が観測された場合には，発注者と施工業者が協議の上，その他の補助工法を積極的に取り入れることが望ましい。

4．まとめ

労働安全衛生規則第 384 条においては，「ずい道等の建設の作業を行なう場合において，落盤又は肌落ちにより労働者に危険を及ぼすおそれのあるときは，ずい道支保工を設け，ロックボルトを施し，浮石を落す等（※）当該危険を防止するための措置を講じなければならない。」旨が事業者の義務として規定されている。（※「浮石を落す等」の「等」には，地山にセメント，モルタルを吹き付けること等が含まれる。）

しかしながら，トンネル工事においては，工事の進捗に伴い掘削対象となる地山の性状が異なるほか，地山の状況が時々刻々と変化しているため，「労働者に危険を及ぼすおそれ」についても，地山の種類のみならず，作業の進捗に応じて変化することとなる。

本資料では，このような特殊性を有するトンネル工事における肌落ちによる労働災害を対象として，一般社団法人　日本トンネル専門工事業協会が収集した死傷災害等を調査分析するとともに，肌落ちの発生メカニズム，ナトム工法の考え方に鑑みて，肌落ち災害防止対策を提案した。

本資料の内容を要約すると，以下のとおりである。

(1) 肌落ちによる労働災害は，山岳工法，特にナトム工法によるトンネル施工中，装薬や支保工建込作業中の切羽で多く生じていることが明らかとなった。また，肌落ちの平均的な大きさは，1.0m×0.6m 程度であり，その厚さは 0.3m 程度であることから，比較的小規模かつ少数の岩塊が落下し災害に至っていることがわかった。

(2) 施工段階で実施可能な肌落ち災害防止対策として，鏡吹付，鏡ボルト，浮石の除去（コソク），導水・さぐり削孔，切羽変位計測，十分な照度の確保，労働者の防護対策を挙げ，**表-3** に提示した。

(3) 施工段階で実施可能な肌落ち災害防止対策のうち，鏡吹付は，地山の緩みを抑えること，地山の曝気を防ぐこと，新たに発生した亀裂や変状を視認しやすくさせること等の効果がある。これに加え，鏡吹付の実施は，施工性や経済性の面から優れている。しかしながら，鏡吹付を施していても，吹付厚不足や湧水により付着強度が弱まったことが原因で，災害に至った事例もあるため，その他の対策と併用することが重要である。

(4) 鏡吹付の実施だけでなく，地山の性状や作業の実情に応じ，十分な照度下における監視，浮石の除去（コソク），切羽変位計測等，複数のものを併用することにより相乗効果が得られるため，上記 3.4 に示した「施工上の留意事項」に留意の

上，適切にこれらを実施することにより，労働安全衛生規則第384条において義務付けられた肌落ち災害防止対策の確実な実施に資するものと考えられる。

(5) 施工段階でも対応可能な対策を実施しても肌落ちの危険性が高い場合には，発注者と施工業者が協議の上，フォアパイリング，フォアポーリング，水抜きボーリングの設計段階から考慮する対策，その他の補助工法を取り入れることが望まれる。

謝辞

一般社団法人　日本トンネル専門工事業協会に肌落ちによる死傷災害の貴重な事例を提供していただいた。また，同協会の「技術・情報委員会」では，建設的な御意見を多くいただいた。ここに記して，感謝の意を表します。

参考文献

1) 前郁夫，花安繁郎: トンネル建設工事における労働災害の動向，産業安全研究所技術資料，15p, 1974.
2) 前郁夫，花安繁郎，鈴木芳美: トンネル建設工事における労働災害の分析(1)(山陽新幹線六甲トンネルについて)，産業安全研究所技術資料, 12p, 1976.
3) 前郁夫，花安繁郎: トンネル建設工事における労働災害の分析(2)(山陽新幹線広島・山口県内のトンネル災害について)，産業安全研究所技術資料, 19p, 1977.
4) 花安繁郎，鈴木芳美: 新幹線建設工事における労働災害の統計分析，産業安全研究所　研究報告, pp. 89-101, 1987.
5) 鈴木芳美: 労働災害の発生過程についての事例分析―上越新幹線建設工事における労働災害事例の分析―，産業安全研究所　研究報告, pp. 99-112, 1985.
6) 吉村恒　監修，横山章，下河内稔，須賀武　著: トンネルものがたり―技術の歩み―，山海堂, 265p, 2001.
7) 国土交通省: 中央新幹線の整備計画の決定について, http://www.mlit.go.jp/common/000145486.pdf, 5月 26 日, 2011.
8) 社団法人　日本トンネル技術協会: トンネル年報 CD-ROM, 2010.
9) 土木学会岩盤力学委員会編: トンネルの変状メカニズム，社団法人土木学会, 269p, 2003.
10) 建設業労働災害防止協会: 建設業安全衛生年鑑，平成 11 年版～平成 22 年版, 2001~2010.
11) 社団法人　日本トンネル技術協会: トンネル工事の推移と災害発生状況, http://www.japan-tunnel.org/report_2010Msaigai, 2009.
12) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社: 設計要領第三集 トンネル編.
13) 独立行政法人　鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説，467p, 2008.
14) 地盤工学会地盤工学用語辞典改訂編集委員会: 地盤工学用語辞典，社団法人　地盤工学会, p. 359, 2006.
15) 国土交通省関東地方整備局: 土木工事共通仕様書, p.33, 2011.
16) 社団法人　日本道路協会: 道路トンネル観察・計測指針　平成 21 年改訂版, p.204, 2009.
17) Rabcewicz, L. V.: The New Austrian Tunneling Method, part one, Water Power, pp. 453 - 457, November 1964.
18) Rabcewicz, L. V.: The New Austrian Tunneling Method, part two, Water Power, pp. 511 - 515, December 1964.
19) Rabcewicz, L. V.: The New Austrian Tunneling Method, part three, Water Power, pp. 19 - 24, January 1965.
20) 寺島佳宏，小川勲，熊谷幸樹，松田浩朗，楢岡民幸: 多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と不良地山における試験適用，トン

ネル工学報告集第 20 巻, pp. 219-223, 2010.11.
21) 鬼頭夏樹，高橋誠二，石山宏二，大谷達彦: 全断面早期閉合の合理化施工の取り組み―能越自動車道　七尾トンネル及び氷見第8トンネル―, 第 68 回施工体験発表会（山岳），社団法人　日本トンネル技術協会, pp. 1-8, 2011.
22) 一般社団法人　日本トンネル専門工事業協会: トンネル工事における肌落ち労働災害防止のハンドブック，一般社団法人　日本トンネル専門工事業協会, pp. 25-26, 2007.
23) 例えば，粟津清蔵　監修，安川郁夫，今西清志，立石義孝　共著: 絵とき　土質力学（改訂第 2 版），オーム社, pp. 146-149, 2000.
24) 土木学会　監修，最上武雄　著: 土質力学，技報堂, pp. 979-980, 1969.
25) 松岡茂，土井至朗，伊藤哲男，赤木渉，堀井秀之，吹付けコンクリートの押し抜きせん断に関する一考察，土木学会第 58 回年次学術講演会概要集, pp. 47-48, CD-ROM, 2003.
26) 土木学会コンクリート委員会　吹付コンクリート研究小委員会: コンクリートライブラリー121　吹付コンクリート指針（案）［トンネル編］，社団法人　土木学会, pp. 13-15, 2005.
27) 社団法人　日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説―許容応力度設計法―，技報堂, pp. 34-46, 1999.
28) 土木学会トンネル工学委員会技術小委員会　山岳トンネル補助工法改訂部会:トンネル・ライブラリー20　山岳トンネルの補助工法―2009 年版―, 社団法人　土木学会, pp. 94-98, 2009.
29) 地下開発技術ジェオフロンテ研究会:「補助工法の設計―坑内から行う地山先行補強工の設計手法―, p.114, 2007.
30) 日本工業規格 JIS Z 9110 : 2010 照明基準総則, http://www.jisc.go.jp/app/JPS/JPSO0020.html

（平成 24 年 1 月 18 日受理）

付属表

付属表 A　本資料で用いた災害事例アンケート

災害事例	No.	
トンネル概要	発注者	1.国, 2.県, 3.市, 4.町村, 5.民間, 6.その他, 7.不明
	構成	1.単独, 2.JV, 3.その他, 4.不明
	目的	1.鉄道（新幹線）, 2.鉄道（その他）, 3.道路（高速）, 4.道路（一般）, 5.水路, 6.電力用・通信用, 7.その他, 8.不明
	断面形状	1.円形, 2.卵形, 3.馬蹄形, 4.長方形, 5.その他, 6.不明
	施工場所	1.山岳, 2.都市, 3.海底, 4.河底, 5.その他, 6.不明
	断面（切羽）の幅（数字の記入）	m
	断面（切羽）の高さ（数字の記入）	m
	標準断面（数字の記入）	m^2
	延長（数字の記入）	m
	地質	1.土砂, 2.軟岩, 3.中硬岩, 4.膨張性, 5.その他, 6.不明
	地山等級（支保パターン）（鉄道トンネルの場合は地質や弾性波速度から道路トンネルの表記に変換）	1.A, 2.B, 3.CI, 4.CII-a, 5.CII-b, 6.DI, 7.DII, 8.DIII, 9.E
	補助工法（事故に関係があれば）	1.核残し, 2.鏡吹付, 3.鏡ボルト, 4.フォアポーリング, 5.長尺フォアパイリング, 6.水平ジェットグラウト, 7.スリットコンクリート, 8.パイプルーフ, 9.ウィングリブ, 10.排水, 11.薬液注入, 12.坑口補強, 13.その他の工法, 14.補助工法なし
	鏡吹付の場合, その巻厚（数字の記入）	mm
	ガス（事故に関係があれば）	1.なし, 2.あり, 3.滲み出し, 4.不明
	湧水（事故に関係があれば）	1.なし, 2.あり, 3.滲み出し, 4.不明
	ナトム工法の場合（掘削工法）	1.上半先進ショートベンチ（支保工有り）, 2.補助ベンチ付全断面（支保工有り）, 3.補助ベンチ付全断面, 4.全断面, 5.特殊部（断面）, 6.その他, 7.不明
	掘削方式	1.機械, 2.発破, 3.機械発破併用, 4.その他, 5.不明
	ずり出し方法	1.レール, 2.タイヤ, 3.ベルコン, 4.その他, 5.不明
事故の状況	年（数字の記入）	年
	月（数字の記入）	月
	日（数字の記入）	日
	曜日（曜日の記入）	曜日
	時間（24:00 のように記入）	
	事故発生場所	1.切羽, 2.坑内, 3.坑口, 4.坑外, 5.その他, 6.不明
	坑口からの距離（数字の記入）	m
	土被り（数字の記入）	m
	作業内容	1.準備他, 2.補助工法（鏡吹付やフォアポーリング）, 3.装薬, 4.掘削, 5.吹付, 6.支保工建込, 7.覆工, 8.歩行中, 9.その他, 10.不明
	被災者数（数字の記入）	名
肌落ちについて	長辺 m（数字の記入）	m
	短辺 m（数字の記入）	m
	厚さ m（数字の記入）	m
	土量 m^3（数字の記入）	m
	質量（重さ）kg（数字の記入）	kg
	落下高さ m（数字の記入）	m
被災者①	年齢（数字の記入）	歳

	被災者生年	年
	性別	1.男, 2.女
	経験年数	年
	職種	1.主任, 2.坑夫, 3.その他坑内作業員, 4.その他, 5.不明
	協力会社	1.元請, 2.一次, 3.二次, 4.三次以下, 5.その他, 6.不明
	事故の程度	1.死亡, 2.休業 1 ヵ月以上, 3.休業 4 日以上, 4.休業 4 日以内, 5.不休, 6.その他, 7.不明
	岩塊が当たった部位	1.頭, 2.耳, 3.肩, 4.胸, 5.腹, 6.背中, 7.腰, 8.腕, 9.脚, 10.その他
	死傷病内容（具体的に記載）	
被災者②	被災者①と同様に記載	
被災者③	被災者①と同様に記載	

付属表 B1　鉄道トンネルの地山等級（計画段階における地山分類基準）

（出典：独立行政法人　鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp. 39-40, 2008）

地山種類 ＼ 地山等級	A岩種	B岩種	C岩種	D岩種	E岩種	F、G岩種	
						粘性土	砂質土
V_S	$V_p \geqq 5.2$	－	$V_p \geqq 5.0$	$V_p \geqq 4.2$	－	－	－
IV_S	$5.2 > V_p \geqq 4.6$	－	$5.0 > V_p \geqq 4.4$	$4.2 > V_p \geqq 3.4$	－	－	－
III_S	$4.6 > V_p \geqq 3.8$	$V_p \geqq 4.4$	$4.4 > V_p \geqq 3.6$	$3.4 > V_p \geqq 2.6$ かつ $G_n \geqq 5$	$2.6 > V_p \geqq 1.5$ かつ $G_n \geqq 6$	－	－
II_S	$3.8 > V_p \geqq 3.2$	$4.4 > V_p \geqq 3.8$	$3.6 > V_p \geqq 3.0$	$2.6 > V_p \geqq 2.0$ かつ $5 > G_n \geqq 4$	$2.6 > V_p \geqq 1.5$ かつ $6 > G_n \geqq 4$	－	－
I_{S-2}	$3.2 > V_p \geqq 2.5$	－	$3.0 > V_p \geqq 2.5$	$2.6 > V_p \geqq 2.0$ かつ $4 > G_n \geqq 2$ あるいは $2.0 > V_p \geqq 1.5$ かつ $G_n \geqq 2$	$2.6 > V_p \geqq 1.5$ かつ $4 > G_n \geqq 3$	－	－
I_{S-1}	－	$3.8 > V_p \geqq 2.9$	－	－	$2.6 > V_p \geqq 1.5$ かつ $3 > G_n \geqq 2$	$G_n \geqq 2$	$D_r \geqq 80$ かつ $F_c \geqq 10$
I_S	$2.5 > V_p$	$2.9 > V_p$	$2.5 > V_p$	$1.5 > V_p$ あるいは $2 > G_n \geqq 1.5$	$1.5 > V_p$ あるいは $2 > G_n \geqq 1.5$	$2 > G_n \geqq 1.5$	－
I_L						－	$D_r \geqq 80$ かつ $10 > F_c$
特S				$1.5 > G_n$	$1.5 > G_n$	$1.5 > G_n$	－
特L						－	$80 > D_r$

V_p：弾性波速度（km/sec）、G_n：地山強度比、D_r：相対密度（%）、F_c：細粒分含有率（%）

*　一般的な地山の等級Ⅰ～Ⅳについては、Sのサフィックスをつける。

特殊な地山のうち標準支保パターンが示されているものは等級の後に、塑性化地山についてはS（squeezing）、未固結地山についてはL（loose）のサフィックスをつける。これらの標準支保パターンでは、不十分と考えられる地山に対する等級は特S、特Lとする。

**　E岩種で$V_p \geqq 2.6$の場合はD岩種に準じて評価する。

***　A、B、C岩種のI_Sは、断層破砕帯、断層による擾乱帯、貫入岩等に伴う変質帯等で適用される。

注）1　この表は土被り500m>H>2D（D：トンネル幅）程度のトンネルの計画に用いるものとする。ただしI_Lについては0.50以上のものに適用できるものとするが、適用にあたっては十分検討のうえ計画するものとする。

2　幅の広い断層破砕帯、偏圧地形や偏圧を及ぼす地質の地山、また、トンネル断面が著しく小さいか大きい場合、作業に支障する湧水があると考えられる場合あるいは水圧を設計に考慮しなければならない場合および市街地、重要構造物下、近接、併設トンネル等については十分検討のうえ適用するものとする。

3　V_p：地山の弾性波速度（P波：km/sec）

G_n：地山強度比（$\sigma_c / \gamma H$）

D_r：相対密度（%）

F_c：細粒分含有率（%）

（σ_c：地山の一軸圧縮強さ（kN/m²）（1kN/m²=1/1000N/mm²）
γ：地山の単位体積重量（kN/m³）
H：土被り高さ（m））

なお、地山の一軸圧縮強さは亀裂等の存在が無視できる地山においては試料の一軸圧縮強さを適用できるが、準岩盤強度σ_c'（kN/m²）を用いてもよい。

$\sigma_c' = (V_p/v_p)^2 \cdot q_u$

v_p：試料の超音波（弾性波）速度（km/s）

q_u：試料の一軸圧縮強さ（kN/m²）

なお、軟岩で$V_p > v_p$となることがあるが、その場合には（V_p / v_p）－1とする。

4　岩種の区分は池田和彦（1969年）の区分を一部変更した表－3.9の岩種分類による。

5　F・G岩種の砂質土と粘性土の土質区分は「鉄道構造物等設計標準（土構造物）」（平成19年1月）より以下を目安とする。

砂質土：細粒分（粒径75μm以下の土粒子）含有率が30%未満の土

粘性土：細粒分含有率が30%以上の土

付属表 B2　鉄道トンネルの地山等級（岩種分類表）

（出典：独立行政法人　鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp. 41, 2008）

岩種	形成時代、形態、岩石名	硬さによる分類
A	①中生代、古生代の堆積岩類（粘板岩、砂岩、礫岩、チャート、石灰岩等） ②深成岩（花崗岩類）③半深成岩（ひん岩、花崗はん岩等） ④火山岩の一部（緻密な玄武岩、安山岩、流紋岩等） ⑤変成岩（片岩類、片麻岩、千枚岩、ホルンフェルス等）	一軸圧縮強さは、以下の数値を目安とする
	塊状の硬岩（亀裂面の剥離性が小さい）	
B	①はく離性の著しい変成岩類（片岩類、千枚岩、片麻岩） ②はく離性の著しいまたは細層理の中生代、古生代の堆積岩類（粘板岩、頁岩等） ③節理等の発達した火成岩	硬岩　$50N/mm^2 \leqq q_u$
	硬岩でありながら、亀裂が発達し、著しいはく離性を示す	
C	①中生代の堆積岩類（頁岩、粘板岩等） ②火山岩類（流紋岩、安山岩、玄武岩等） ③古第三紀の堆積岩類（頁岩、泥岩、砂岩等）	
D	①新第三紀の堆積岩類（頁岩、泥岩、砂岩、礫岩）、凝灰岩等 ②古第三紀の堆積岩類の一部 ③風化した火成岩	中硬岩　$15N/mm^2 \leqq q_u < 50N/mm^2$
E	①新第三紀の堆積岩類（泥岩、シルト岩、砂岩、礫岩）、凝灰岩等 ②風化や熱水変質および破砕の進行した岩石（火成岩類や変成岩類および新第三紀以前の堆積岩類）	軟岩　$2N/mm^2 \leqq q_u < 15N/mm^2$
F	①第四紀更新世の堆積物（礫、砂、シルト、泥および火山灰等より構成される低固結～未固結な堆積物） ②新第三紀堆積岩の一部（低固結層、未固結層、土丹、砂等） ③マサ化した花崗岩類	
G	表土、崩積土、崖錐等	土砂　$q_u < 2N/mm^2$

注）主な岩石名を列記したものであって、分類の困難なものは地質技術者が判断するものとする

q_u：一軸圧縮強さ

付属表 C1　道路トンネルの地山等級（岩石グループ）

※NEXCO で建設する 2 車線及び 3 車線の道路トンネルの設計に適用する。

（出典：東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領　第三集　トンネル編）

本表のホームページへの転載は許可されていないため削除しています。

付属表 C2　道路トンネルの地山等級（地山分類表）

※NEXCO で建設する 2 車線及び 3 車線の道路トンネルの設計に適用する。

（出典：東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領　第三集　トンネル編.）

本表のホームページへの転載は許可されていないため削除しています。

付属表 D1 鉄道トンネルの標準支保パターン（標準支保パターンの選定表）

（出典：独立行政法人　鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp. 64, 2008）

地山等級＼岩種	A岩種	B岩種	C岩種	D岩種	E岩種	F、G岩種	
						粘性土	砂質土
V_S	IV_{NP}	—	IV_{NP}	IV_{NP}	—	—	—
IV_S	IV_{NP}	—	IV_{NP}	IV_{NP}	—	—	—
III_S	III_{NP}	III_{NP}	III_{NP}	III_{NP}	III_{NP}	—	—
II_S	II_{NP}	II_{NP}	II_{NP}	II_{NP}	II_{NP}	—	—
I_{S-2}	I_{S-2P}	—	I_{S-2P}	I_{S-2P}	I_{S-2P}	—	—
I_{S-1}	—	I_{S-1P}	—	—	I_{S-1P}	I_{S-1P}	I_{S-1P}
I_S	I_{SP}	I_{SP}	I_{SP}	I_{SP}	I_{SP}	I_{SP}	—
I_L	I_{LP}	I_{LP}	I_{LP}	I_{LP}	I_{LP}	—	I_{LP}
特S	*	*	*	*	*	*	—
特L						—	*

注）*は特殊設計範囲を示す。

付属表 D2 鉄道トンネルの標準支保パターン（標準支保パターン）

（出典：独立行政法人　鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp. 65, 2008）

(a) 在来線単線トンネル

標準支保パターン＼支保部材	ロックボルト			吹付けコンクリート厚（cm）		鋼製支保工
	配置	長さ×本数*1 (m)　(本)	縦断間隔 (m)	アーチ、側壁	インバート	種類
IV_{NP}	—	—	—	5（平均）	—	—
III_{NP}	アーチ	2×0～4	(随意)	10（平均）	—	—
II_{NP}	アーチ	2×6	1.5	10（平均）	—	—
I_{N-2P}	アーチ、側壁	3×6	1.2	10（最小）	—	100H（上半）
I_{N-1P}	アーチ、側壁	3×10	1.0	10（最小）	—	100H
I_{SP}	アーチ、側壁	3×12	1.0	10（最小）	(10(最小)) *2	100H
I_{LP}	アーチ、側壁	3×8	1.0	15（最小）	—	100H

(b) 在来線複線トンネル

標準支保パターン＼支保部材	ロックボルト			吹付けコンクリート厚（cm）		鋼製支保工
	配置	長さ×本数*1 (m)　(本)	縦断間隔 (m)	アーチ、側壁	インバート	種類
IV_{NP}	—	—	—	5（平均）	—	—
III_{NP}	アーチ	2×0～5	(随意)	10（平均）	—	—
II_{NP}	アーチ	3×8	1.5	10（平均）	—	—
I_{N-2P}	アーチ、側壁	3×8	1.2	12.5（最小）	—	125H（上半）
I_{N-1P}	アーチ、側壁	3×12	1.0	15（最小）	—	125H
I_{SP}	アーチ、側壁、(インバート)	3×12 (3×4) *2	1.0	15（最小）	(15(最小)) *2	150H
I_{LP}	アーチ、側壁	3×10	1.0	20（最小）	—	125H

(c) 新幹線複線トンネル

標準支保パターン＼支保部材	ロックボルト			吹付けコンクリート厚（cm）		鋼製支保工
	配置	長さ×本数*1 (m)　(本)	縦断間隔 (m)	アーチ、側壁	インバート	種類
IV_{NP}	—	—	—	5（平均）	—	—
III_{NP}	アーチ	2×0～5	(随意)	10（平均）	—	—
II_{NP}	アーチ	3×10	1.5	10（平均）	—	—
I_{N-2P}	アーチ、側壁	3×10	1.2	12.5（最小）	—	125H（上半）
I_{N-1P}	アーチ、側壁	3×14	1.0	15（最小）	—	125H
I_{SP}	アーチ、側壁、(インバート)	3×14 (3×4) *2	1.0	15（最小）	(15(最小)) *2	150H
I_{LP}	アーチ、側壁	3×12	1.0	20（最小）	—	125H

*1 ロックボルトの長さ、本数は標準的なものを示しており、その配置は、第25条による。

*2 I_{SP} のインバート部のロックボルトおよび吹付けコンクリートは、あくまでも標準的なものを示しており、新第三紀以降の泥岩、凝灰岩等、盤ぶくれ等の変状が懸念される場合には、地山の状況を見ながら適切な支保工の施工を行う。

（その他）標準支保パターンの分類記号は、地山等級と区別するためP(Pattern)のサフィックスつけた。

付属表 E 道路トンネルの標準支保パターン

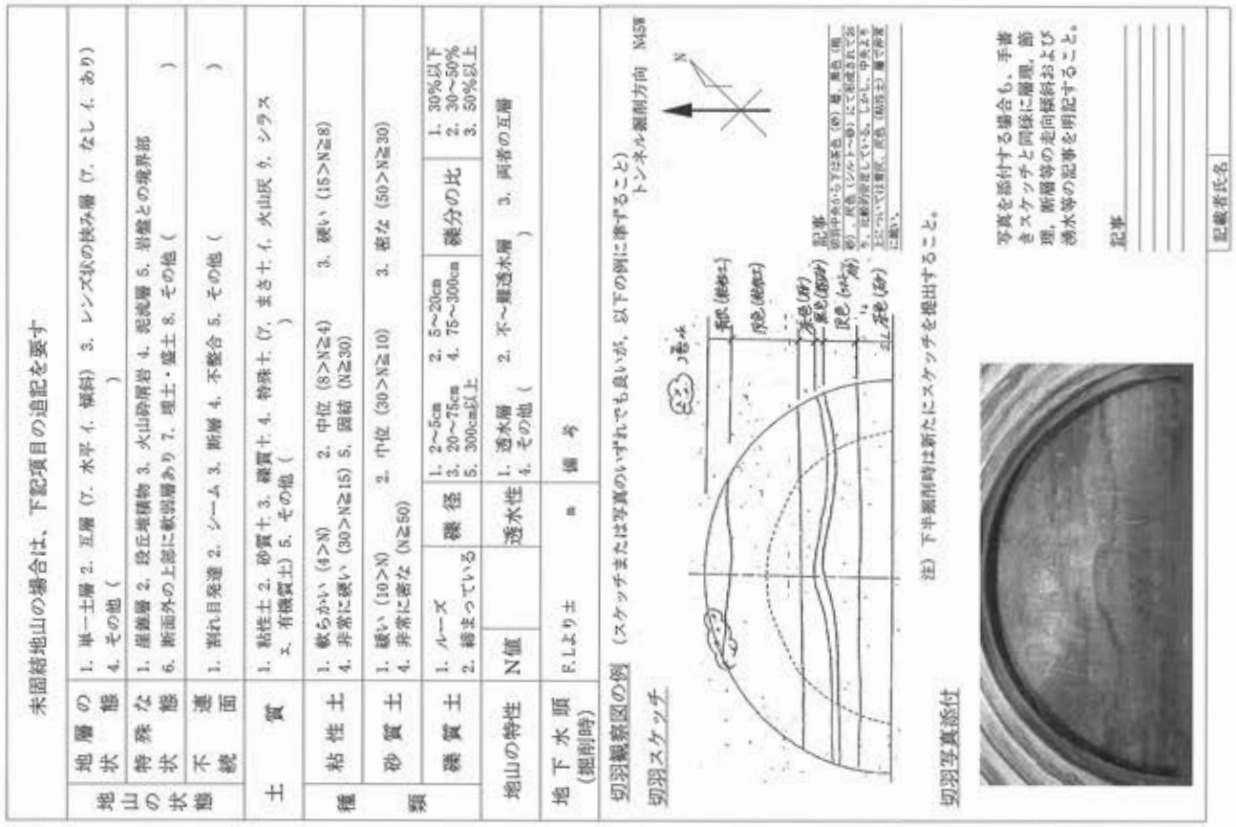
※NEXCO で建設する 2 車線の道路トンネルの設計に適用する。

（出典：東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領 第三集 トンネル編.）

本表のホームページへの転載は許可されていないため削除しています。

付属表 F　鉄道トンネルの切羽観察データシート（坑内観察調査の記録様式の例）

（出典：独立行政法人　鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp. 272, 2008）



未固結地山の場合は、下記項目の追記を要す

地山の状態	地層の状態	1. 単一土層 2. 互層（7. 水平 4. 傾斜） 3. レンズ状の挟み層（7. なし 4. あり） 4. その他（　　）
	特殊な状態	1. 崖錐層 2. 段丘堆積物 3. 火山砕屑岩 4. 泥流層 5. 岩盤との境界部 6. 断面外の上部に軟弱層あり 7. 埋土・盛土 8. その他（　　）
	不連続	1. 割れ目発達 2. シーム 3. 断層 4. 不整合 5. その他（　　）
土質	種類	1. 粘性土 2. 砂質土 3. 礫質土 4. 特殊土（7. まさ土 4. 火山灰 9. シラス ェ. 有機質土）5. その他（　　）
	粘性土	1. 軟らかい（8>N） 2. 中位（8>N≧4） 3. 硬い（15>N≧8） 4. 非常に硬い（30>N≧15） 5. 固結（N≧30）
	砂質土	1. 緩い（10>N） 2. 中位（30>N≧10） 3. 密な（50>N≧30） 4. 非常に密な（N≧50）
	礫質土	1. ルーズ 2. 締まっている 礫径：1. 2～5cm 2. 5～20cm 3. 20～75cm 4. 75～300cm 5. 300cm以上 礫分の比：1. 30%以下 2. 30～50% 3. 50%以上
地山の特性	N値	透水性：1. 透水層 2. 不～難透水層 3. 両者の互層 4. その他（　　）
地下水頭（掘削時）	F.Lより上　m	備考

切羽観察図の例（スケッチまたは写真のいずれでも良いが，以下の例に準ずること）

切羽スケッチ

トンネル掘削方向　N45W

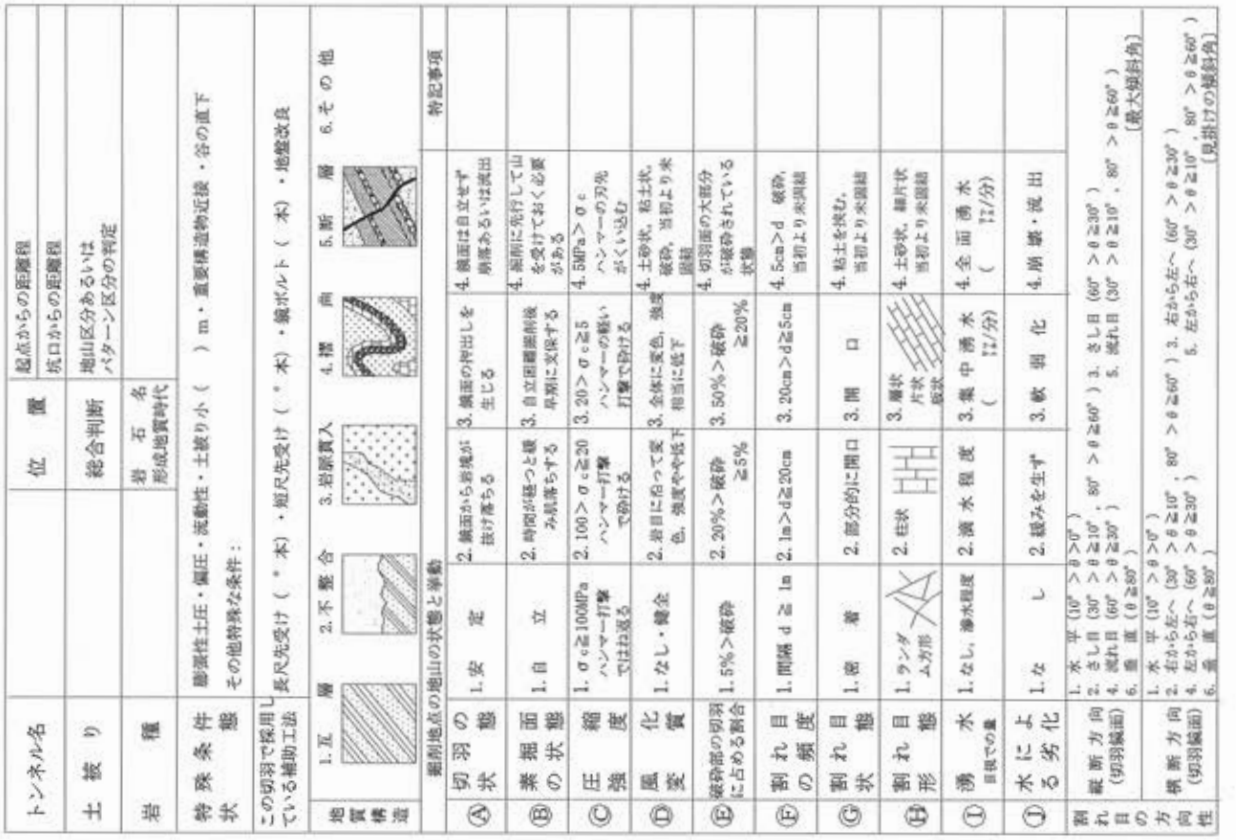
注）下半掘削時は新たにスケッチを提出すること。

切羽写真添付

写真を添付する場合も、手書きスケッチと同様に層厚、節理、断層等の走向傾斜および湧水等の記事を明記すること。

記事

記載者氏名



トンネル名		位置	起点からの距離程 坑口からの距離程
土被り		総合判断	地山区分あるいはパターン区分の判定
岩種		岩石名 形成地質時代	
特殊条件状態	膨張性土圧・偏圧・流動性・土被り小（　　）m・重要構造物近接・谷の直下 その他特殊な条件：		
この切羽で採用している補助工法	長尺先受け（＊木）・短尺先受け（＊木）・鏡ボルト（　木）・地盤改良		
地質構造	1. 互層　2. 不整合　3. 岩脈貫入　4. 褶曲　5. 断層　6. その他		

掘削地点の地山の状態と挙動

						特記事項
Ⓐ切羽の状態	1. 安定	2. 鏡面から岩塊が抜け落ちる	3. 鏡面の押出しを生じる	4. 鏡面は自立せず崩落あるいは流出		
Ⓑ素掘面の状態	1. 自立	2. 時間が経つと鏡み肌落ちする	3. 自立困難崩壊非常に支保する	4. 鏡所に先行して山を受けておく必要がある		
Ⓒ圧縮強度	1. σc≧100MPa ハンマー打撃ではね返る	2. 100>σc≧20 ハンマー打撃で砕ける	3. 20>σc≧5 ハンマーの軽い打撃で砕ける	4. 5MPa>σc ハンマーの刃先がくい込む		
Ⓓ風化変質	1. なし・軽微	2. 岩目に沿って変色、強度やや低下	3. 全体に変色、強度相当に低下	4. 土砂状、粘土状、破砕、当初より未固結		
Ⓔ破砕部の切羽に占める割合	1. 5%>破砕	2. 20%>破砕≧5%	3. 50%>破砕≧20%	4. 切羽面の大部分が破砕されている状態		
Ⓕ割れ目の頻度	1. 間隔 d ≧ 1m	2. 1m>d≧20cm	3. 20cm>d≧5cm	4. 5cm>d 破砕、当初より未固結		
Ⓖ割れ目の状態	1. 密着	2. 部分的に開口	3. 開口	4. 粘土を挟む、当初より未固結		
Ⓗ割れ目の形態	1. ランダム方形	2. 柱状	3. 層状 片状 板状	4. 土砂状、細片状 当初より未固結		
Ⓘ湧水 目視での量	1. なし、滲水程度	2. 滴水程度	3. 集中湧水（　ℓ/分）	4. 全面湧水（　ℓ/分）		
Ⓙ水による劣化	1. なし	2. 緩みを生ず	3. 軟弱化	4. 崩壊・流出		
割れ目の方向性	縦断方向（切羽鏡面）	1. 水平（10°>θ≧0°） 2. さし目（30°>θ≧10°，80°>θ≧30°） 4. 流れ目（60°>θ≧30°） 6. 垂直（θ≧80°）	3. さし目（60°>θ≧30°） 5. 流れ目（30°>θ≧10°，80°>θ≧60°） （最大傾斜角）			
	横断方向（切羽鏡面）	1. 水平（10°>θ≧0°） 2. 右から左へ（30°>θ≧10°，80°>θ≧60°） 4. 左から右へ（60°>θ≧30°） 6. 垂直（θ≧80°）	3. 右から左へ（60°>θ≧30°） 5. 左から右へ（30°>θ≧10°，80°>θ≧60°） （見出けの傾斜角）			

付属表 G　道路トンネルの切羽観察データシート

※NEXCO で建設する 2 車線及び 3 車線の道路トンネルの設計に適用する。

（出典：東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領　第三集　トンネル編.）

本表のホームページへの転載は許可されていないため削除しています。

付属表 H　土及び岩の分類表

（出典:国土交通省関東地方整備局:土木工事共通仕様書, p.33, 2011.）

名称 A	名称 B	名称 C		説明		摘要
土	礫質土	礫まじり土		礫の混入があって掘削時の能率が低下するもの。	礫の多い砂、礫の多い砂質土、礫の多い粘性土	礫(G) 礫質土(GF)
土	砂質土及び砂	砂		バケット等に山盛り形状になりにくいもの。	海岸砂丘の砂 マサ土	砂(S)
土	砂質土及び砂	砂質土（普通土）		掘削が容易で、バケット等に山盛り形状にし易く空げきの少ないもの。	砂質土、マサ土 粒度分布の良い砂 条件の良いローム	砂(S) 砂質土(SF) シルト(M)
土	粘性土	粘性土		バケット等に付着し易く空げきの多い状態になり易いもの、トラフィカビリティが問題となり易いもの。	ローム 粘性土	シルト(M) 粘性土(C)
土	粘性土	高含水比粘性土		バケットなどに付着し易く特にトラフィカビリティが悪いもの	条件の悪いローム 条件の悪い粘性土 火山灰質粘性土	シルト(M) 粘性土(C) 火山灰質粘性土(V)有機質土(O)
岩または石	岩塊玉石	岩塊玉石		岩塊、玉石が混入して掘削しにくく、バケット等に空げきのでき易いもの。 岩塊、玉石は粒径7.5cm 以上とし、まるみのあるのを玉石とする。		玉石まじり土岩塊起砕された岩、ごろごろした河床
岩または石	軟岩	軟岩	I	第三紀の岩石で固結の程度が弱いもの。 風化がはなはだしくきわめてもろいもの。 指先で離しうる程度のものでき裂の間隔は１～５cmくらいのものおよび第三紀の岩石で固結の程度が良好なもの。 風化が相当進み多少変色を伴い軽い打撃で容易に割れるもの、離れ易いもので、き裂間隔は５～10cm程度のもの。		地山弾性波速度700～2800m／sec
岩または石	軟岩	軟岩	II	凝灰質で堅く固結しているもの。 風化が目にそって相当進んでいるもの。 き裂間隔が10～ 0cm程度で軽い打撃により離しうる程度、異質の硬い互層をなすもので層面を楽に離しうるもの。		
岩または石	硬岩	中硬岩		石灰岩、多孔質安山岩のように、特にち密でなくても相当の固さを有するもの。 風化の程度があまり進んでいないもの。 硬い岩石で間隔30～50cm程度のき裂を有するもの。		地山弾性波速度2000～4000m／sec
岩または石	硬岩	硬岩	I	花崗岩、結晶片岩等で全く変化していないもの。 き裂間隔が１m内外で相当密着しているもの。 硬い良好な石材を取り得るようなもの。		地山弾性波速度3000m／sec以上
岩または石	硬岩	硬岩	II	けい岩、角岩などの石英質に富む岩質で最も硬いもの。風化していない新鮮な状態のもの。 き裂が少なく、よく密着しているもの。		

労働安全衛生総合研究所技術資料　　JNIOSH-TD-No.2（2012）

発行日　平成24年3月2日　発　行
発行者　独立行政法人　労働安全衛生総合研究所
〒204－0024　東京都清瀬市梅園1丁目4番6号
電話　(042)491－4512(代)

印刷所　株式会社　アトミ