

トンネル建設工事における労働災害の調査・分析

～落盤・土砂崩壊災害の傾向～

Analysis of labour accidents in tunnel construction ~ trend of labour accidents due to cave-in and slope failure ~

吉川直孝*, 伊藤和也*, 堀智仁*, 玉手聡**

Naotaka Kikkawa, Kazuya Ito, Tomohito Hori, Satoshi Tamate

*工博, 研究員, 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 1-4-6)

** 工博 上席研究員, 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 1-4-6)

Fatality in tunnel construction was around 10 labourers per a year recently, however, the accident frequency rate and the accident severity rate were higher than that in all construction industry. In order to propose the improvement scheme of the environment in tunnel construction, in this study, the fatal accidents in tunnel construction from 1992 to 2005 were analysed in details, especially for the accidents due to the cave-in and failure. As a result, the New Austrian Tunneling Method (NATM) caused the fatal accidents more than the Shield Tunneling Method and Jacking Method. The heading of tunneling was most dangerous place and the blasting for excavating drives a rock mass instable. Therefore, the prevention against cave-in and failure should be taken account into the rock mass instability due to blasting in the heading of tunneling.

Key Words: tunnel construction, cave-in, slope failure, labour accident

キーワード: トンネル建設工事, 落盤, 土砂崩壊, 労働災害

1. 序論

我が国は山岳部が多く、道路や鉄道による交通網を発達させるために戦後から現在まで多くのトンネルを建設してきた。1950~80 年代まで、黒部ダムの連絡路である大町トンネル（現在の関電トンネル）、大清水トンネル、青函トンネルなど、高度経済成長と相まって、トンネル建設工事数が増加傾向にあった。また、トンネル工事は多くの労働者が被災する重大災害が多発していた。

近年、公共事業の減少と相まって、トンネル建設工事数も減少傾向にある。また、トンネル施工技術の発展や機械化施工により、現在ではトンネル建設工事中の労働災害は少なくなっている。

しかしながら、東京外環自動車道、中央リニア新幹線、石油備蓄基地や核廃棄物処分場としての地下空洞などの建設に伴い、依然として、トンネルや地下構造物の建設に対する需要が多くあり、安全に対する取り組みは不可欠である。

本研究では、建設業とトンネル建設工事における労働災害の推移を比較した。その中で特徴的だった落盤・土

砂崩壊災害に焦点を絞り、調査および分析を行った結果を報告する。

2. トンネル建設工事での労働災害の傾向

ここでは、1992~2008 年までの建設業の就業者数、死亡者数の推移を調査し、トンネル建設工事の労働災害との比較を行った。また、トンネル建設工事の労働災害の特徴を示した。

2.1 建設業全体から見たトンネル建設工事の労働災害

図-1 は 1992~2008 年における建設業の就業者数¹⁾の推移を示す。全就業者数は、1997 年をピークに減少していることがわかる。これは、バブル経済崩壊に伴う建設市場の大幅な縮減などによる雇用調整が影響したものと考えられる。

次に、建設業における労働災害について調査した。図-2(a)は、建設業全体の死亡者数の推移を示している。建設業における全死亡者数は、1996 年まではおよそ 1000 人前後で横這いであり、その後、減少傾向となり近年では 400 人強まで減少している。この傾向は就業者数の推

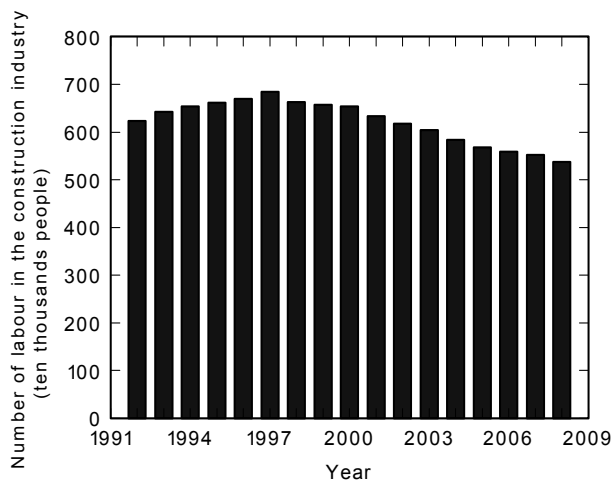


図-1 建設業の就業者数の推移（1992～2008年）¹⁾

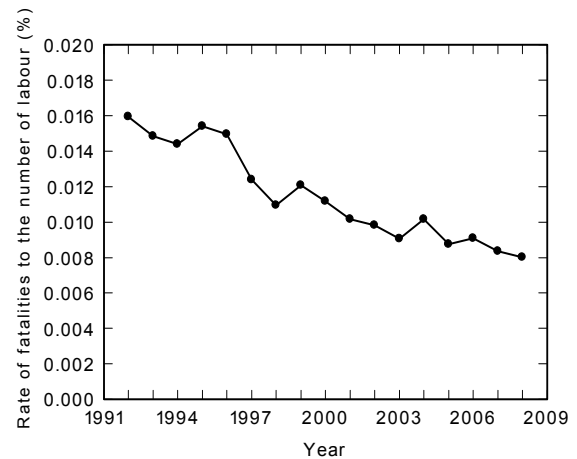
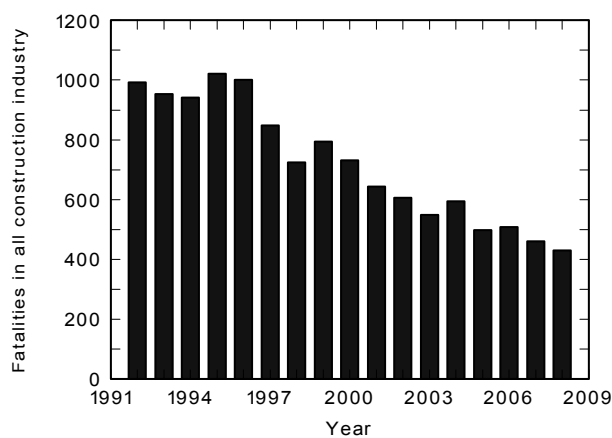
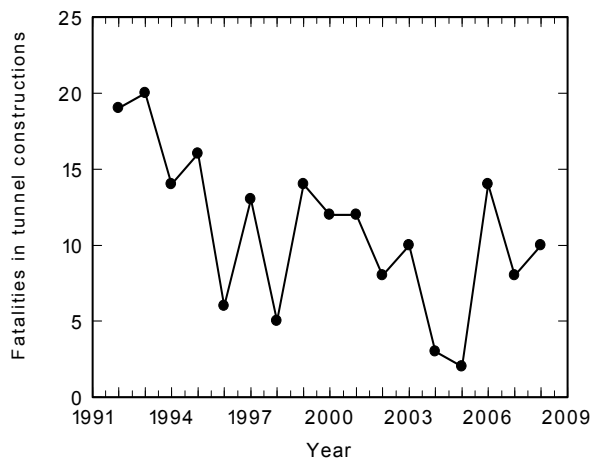


図-3 建設業全体の就業者数に占める死亡者数の割合の推移（1992～2008年）



(a) 建設業全体の死亡者数



(b) トンネル建設工事における死亡者数

図-2 建設業全体の死亡者数とトンネル建設工事における死亡者数の推移（1992～2008年）

移（図-1）と対応している。図-3は全就業者数に対する死亡者数の比率を示す。全就業者数に対する死亡者数の比率は年々減少傾向にあり、企業の安全対策の実施や国土交通省、厚生労働省など関係機関の啓蒙活動などによる効果が発揮されたものと推察される。トンネル建設工

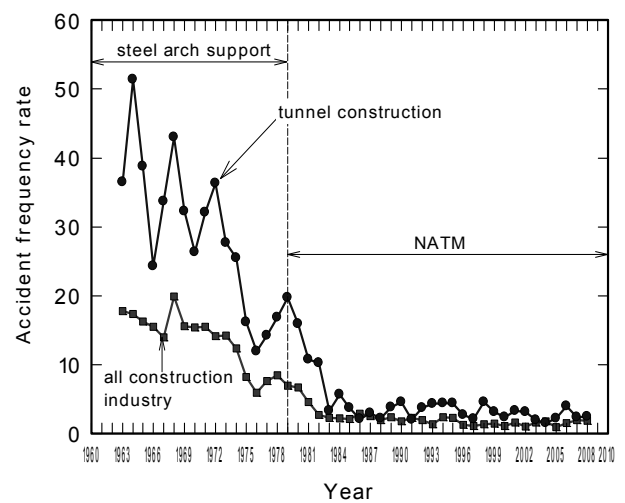


図-4 建設業とトンネル建設工事における度数率の推移（1963～2008年）

事における死亡者数は、図-2(b)を見ると1992年から2001年まで減少傾向であったが、それ以降は10件程度で横這いとなっている。

1992～2008年における建設業およびトンネル建設工事の度数率の推移を図-4に示す。ここで、度数率とは災害発生の頻度を表す²⁾。トンネル建設工事での災害発生の頻度は、建設業全体のそれよりも大きく、より労働災害の発生しやすい工事種類であることがわかる。

図-5に示す強度率は、災害の重さの程度を示す²⁾。こちらもほぼ建設業全体よりもトンネル建設工事の程度の方が大きく、トンネル建設工事で労働者はより重大な災害となるケースが多くなることがわかる。2006年度に強度率が非常に大きくなっているが、これは風速50m/s以上の竜巻が発生し、事務所を襲ったためである。

2.2 トンネル建設工事における労働災害の特徴

図-6(a)は、トンネル建設工事における死亡災害の種類別発生状況を示している。また、図-6(b)は、それぞれの

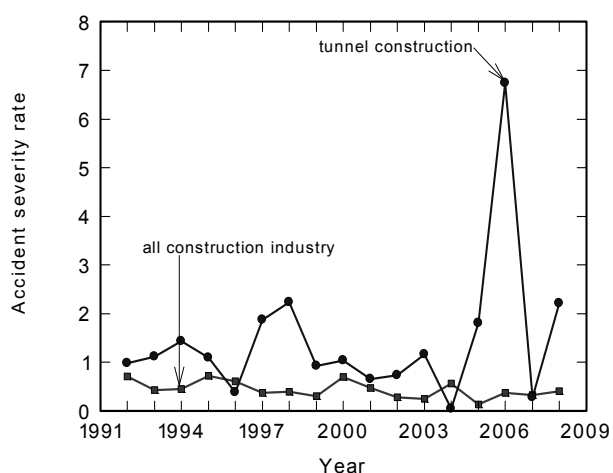
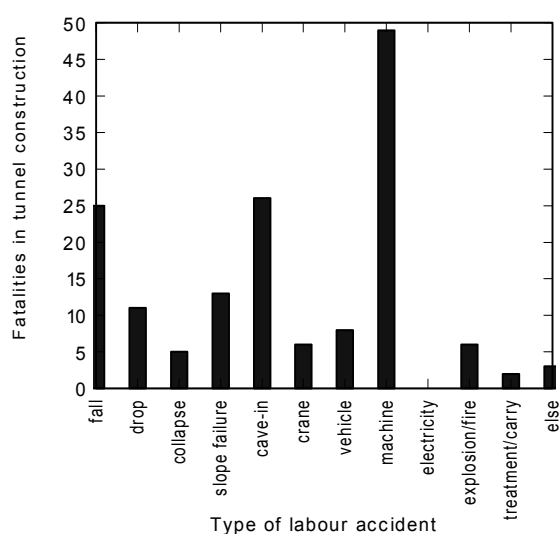
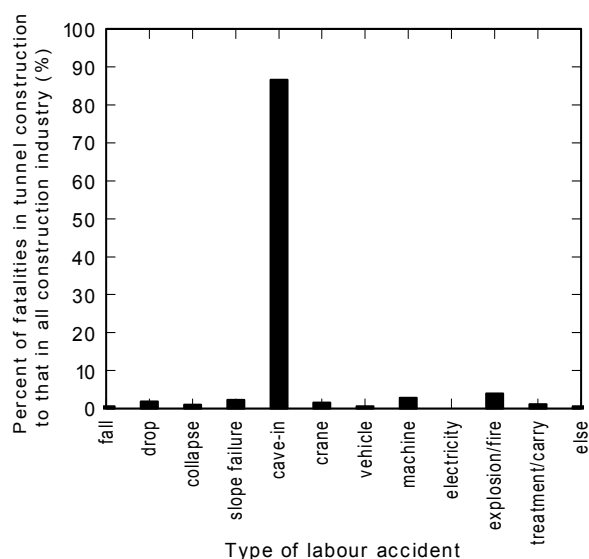


図-5 建設業とトンネル建設工事における強度率の推移 (1992~2008 年)



(a) トンネル建設工事



(b) 建設業全体の死亡者数に対するトンネル建設工事における死亡者数の割合

図-6 死亡災害の種類別発生状況 (1992~2005 年)

災害の種類において、全建設業の死亡者数に対するトンネル建設工事の死亡者数の割合である。トンネル建設工事では、建設機械による事故が最も多い。次いで落盤が多く、墜落、土砂崩壊と続く。ここで、全建設業において、墜落と建設機械による災害は、死亡者数が最も多いことが示されている¹⁾。また、トンネル建設工事においても、墜落と建設機械による死亡者数が多い。しかしながら、全建設業の死亡者数に対するトンネル建設工事の死亡者数の割合は、墜落、建設機械ともに非常に小さい。

一方、落盤の割合は90%近くあり、トンネル建設工事に特徴的な災害であるといえる。なお、落盤と土砂崩壊を分ける定義が明確でない。落盤が1~3つの岩塊の崩壊であるのに対し、土砂崩壊は多数の岩塊もしくは多量の土砂が崩壊するもので分類されている。

3. トンネル建設工事における落盤・土砂崩壊災害の発生状況の分析

1992~2005年に発生したトンネル建設工事中の落盤・土砂崩壊災害について、労働災害の発生状況を分析した。災害数は、落盤が26件、土砂崩壊災害が13件である。以下に調査・分析した結果を示す。

3.1 トンネル概要

トンネル建設の目的は、道路、鉄道、水路、電力・通信などに分けられる。図-7に示すように、道路を建設する際のトンネル建設工事において災害が多く発生している。トンネルの断面形状は、図-8に示すように、円形もしくは半円形である場合が多く、上部半断面先進ベンチカット工法や補助ベンチ付全断面掘削工法が多いため、事故発生時は、半円形であることが多い。トンネルの標準断面は、図-9に示すように、50~100m²の大きさのトンネルが最も多い。また、トンネル延長は、図-10から、0.5km~3kmが最も多い。

3.2 施工法および掘削工法

図-11は施工法と死亡者数の関係を示す。山岳工法での災害がほとんどである。シールド工法では、シールド機による掘削が行われ、労働者が切羽に近づく必要がないため、災害が少ないものと考えられる。

図-12は、社団法人日本トンネル技術協会がまとめた「トンネル工事の推移と災害発生状況」³⁾の報告書から、施工法別に見たトンネル施工数の推移を示す。平成18年(2006年)をみると、山岳工法でのトンネル建設工事がおおよそ450件あり、シールド工法がおおよそ200件である。山岳工法の施工数は、シールド工法のおおよそ2.3倍である。しかしながら、山岳トンネルで発生した落盤・土砂崩壊災害は、シールド工法の約31倍である。つまり、山岳工法の方がより労働者にとって危険である。

山岳工法では、NATM (New Austrian Tunneling Method)

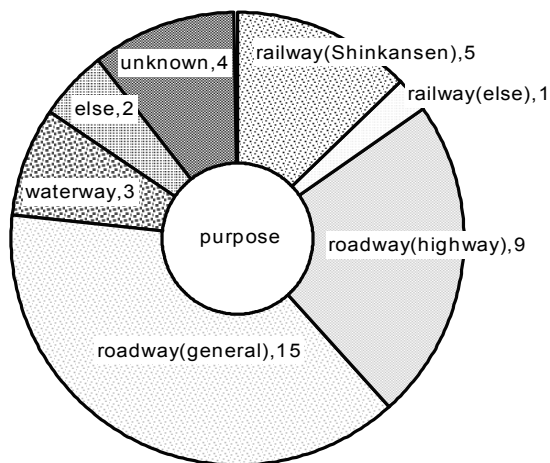


図-7 トンネル建設工事の目的

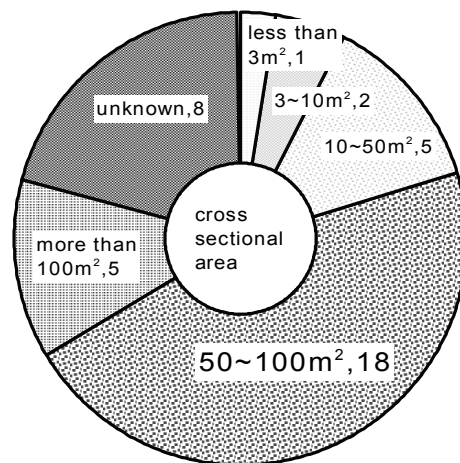


図-9 トンネルの標準断面

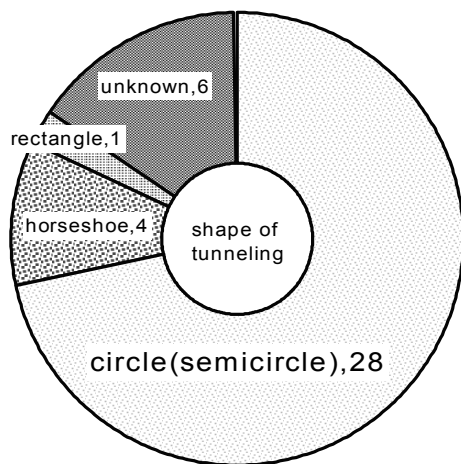


図-8 トンネルの断面形状

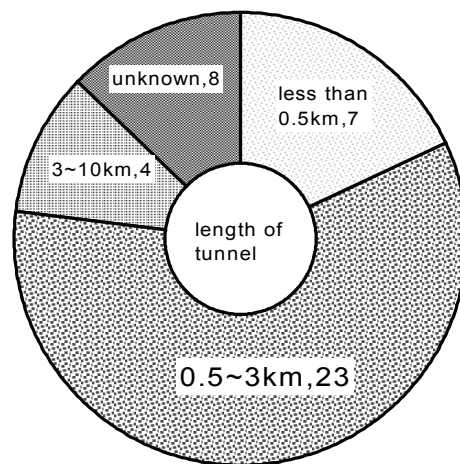


図-10 トンネル延長

と呼ばれる工法が多く採用されている。その他、TBM（Tunnel Boring Machine）が採用される場合もある。NATM は 1975 年以降導入されたが、それ以前は木製支保工や鋼製支保工によりトンネルが施工されていた。図-4 に示したように、1970 年前半に 30 前後で推移していた度数率は、NATM 導入以降大幅に減少し、一桁の値にまで減少した。

しかしながら、図-13 に示すように、発破により掘削することが多く、発破装填、コソク、ずり出し、支保工設置の際に、労働者が切羽に近づく必要があるため災害が発生する。NATM の災害の中に TBM（Tunnel Boring Machine）も用いられているケースもあるが、先進導坑を掘るために用いられる場合が多い。TBM は、トンネルを掘削する全区間で岩盤が均質であれば有効であるが、日本の岩盤は断層や地殻運動によって揉まれているため、均質であることが少なく、この場合トンネル全区間で TBM を用いることは困難となる。ここで、シールド機を用いた現場で死亡災害が 1 件生じているが、これはシールド機を用いていたトンネル坑でなく、補助的な配水管を設置する作業中に土砂崩壊災害が生じたものである。

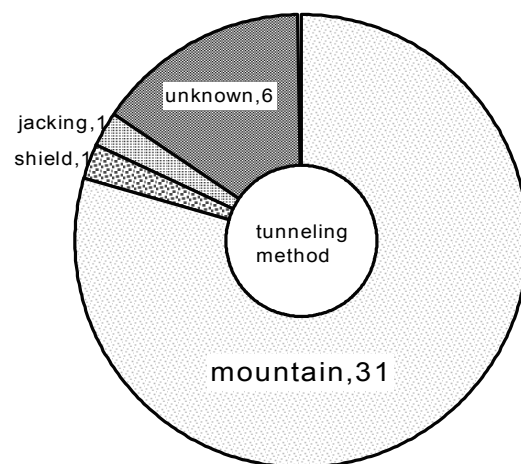


図-11 トンネル施工法と落盤・土砂崩壊災害による死亡者数。

3.3 災害発生状況

図-14 は、災害が生じた箇所の地山等級を示している。地山等級とは、定量的な因子にもとづいて地山分類を行う際の基準である。国内では、岩種、割れ目の状態、地山の弾性波速度値を因子としている例が多い。目安とし

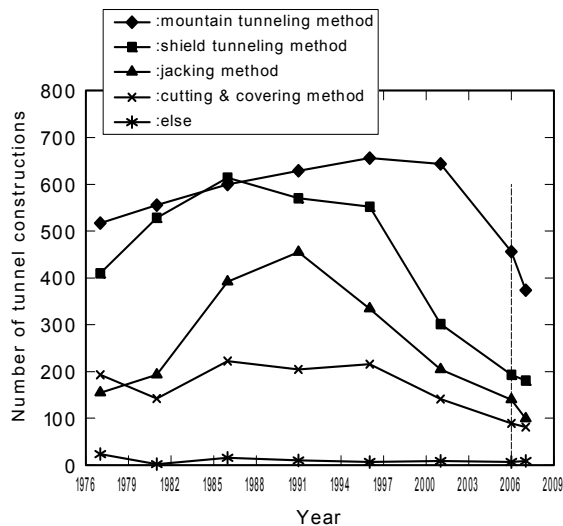


図-12 施工数に占める工法の内訳とその推移

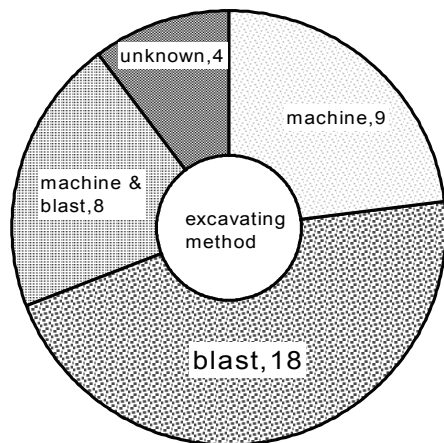


図-13 トンネル掘削工法と落盤・土砂崩壊災害による死者数

て、等級 C 以上では切羽は自立し、D 以下では切羽の自立が困難である。道路トンネル、鉄道トンネルで用いられている地山等級が異なるが、道路トンネルの事例が多いことやどちらも弾性波速度の閾値が設けられていることから、ここでは鉄道トンネルの場合の地山等級を道路トンネルのそれに変換し、統計データを整理した。同図から、最も落盤・土砂崩壊災害が生じている箇所は、地山等級が C もしくは D と判別された箇所であることがわかる。

図-15 は、落盤・土砂崩壊による労働災害が発生した箇所の内訳を示す。災害発生箇所は、31 件が切羽（鏡面）であり、最も不安定な箇所であることがわかる。坑内にはおよそ 1.0~2.0m ピッチで支保工が設置されて補強されるが、切羽は地山がむき出しとなる場合が多く、その掘削面は垂直である。すなわち、切羽が自立しなければ、落盤・土砂崩壊が発生する。また、節理、層理を含んだ亀裂性の地山は、応力解放により膨張するため、落盤・土砂崩壊が生じる可能性は高くなる。加えて、トンネルには上部の岩盤の重さによる大きな圧力も作用して

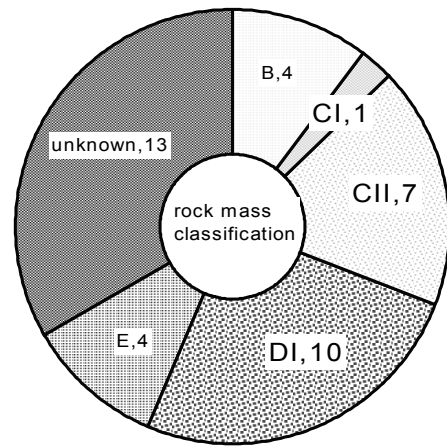


図-14 地山等級

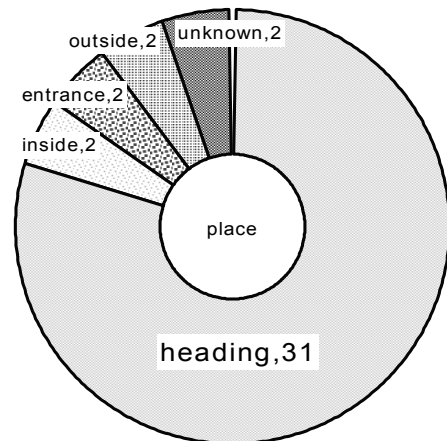


図-15 落盤・土砂崩壊による労働災害が発生した箇所

いる。トンネルの掘削は、もともと水平応力と鉛直応力の比である K_0 状態で安定を保っていたところに、急に水平応力が 0 になるという作用をもたらす。節理、層理を含んだ亀裂性の地山が、応力解放により膨張する等により、落盤・土砂崩壊が生じる。これを完全に防止するためには、掘削前の K_0 状態を保つよう、水平応力を鏡面に対し作用させる必要がある。

事故発生時の切羽付近の土被りは、図-16 に示すように、0~100m が最も多い。例えば、湿潤単位体積重量 γ_t を 20kN/m^3 とすると、100m の深さの鉛直応力は、 2MPa となり、 $K_0=0.5$ とすると、水平応力は 1MPa である。このような応力を水平方向に加えることは容易ではない。

事故発生時に行っていた工種を図-17 に示す。掘削中もしくは覆工中に最も多い。掘削中は、発破のための削孔、発破の装填、コソク、ずり出しを含む。また、覆工はコンクリート吹き付け、支保工の設置を含む。

このように、掘削だけでなく、覆工中にも災害は生じていることから、落盤は時間差で生じるものと考えられる。つまり、発破により多くの亀裂が生じ、切羽が不安定になる。コソク、ずり出しにより、不安定な岩盤の多くは取り除かれたものの、完全には取り除くことができず、いくらかの不安定岩塊は取り残された状態である。その岩塊は、地下水の被圧、応力解放、粘板岩や粘性土

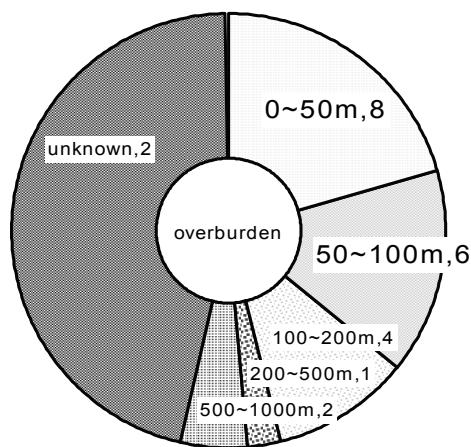


図-16 土被り

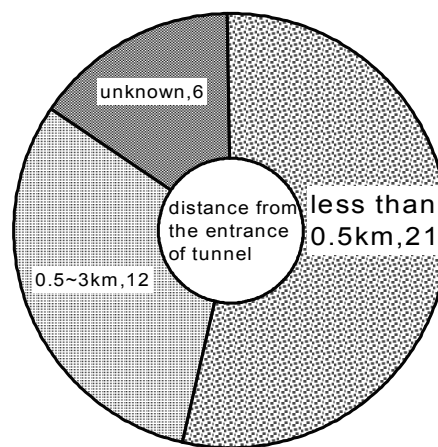


図-18 坑口から災害発生場所までの距離

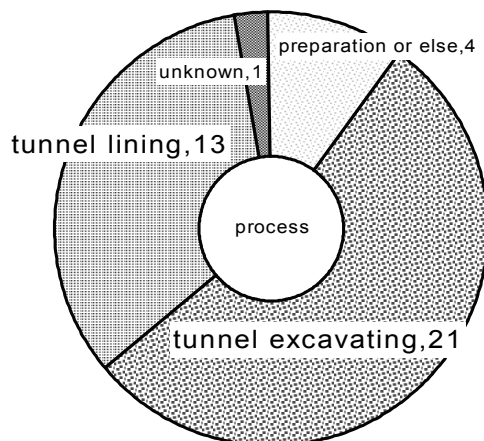


図-17 事故発生時の工種

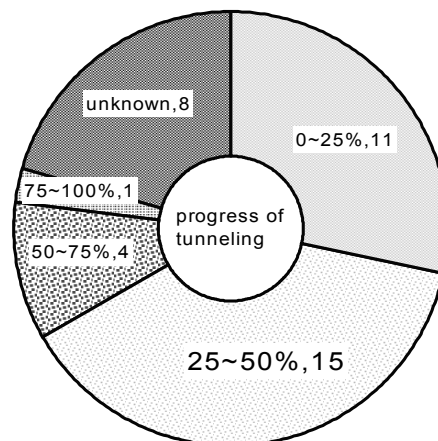


図-19 トンネル掘削の進捗状況

の介在により、ゆっくりとすべり落ちようとし、掘削中には生じなかった災害が覆工中に生じたものと推察される。つまり、コソクやずり出しで、一度見掛け上安定だと判断しても、切羽には近づくべきではなく、切羽での作業を必要最小限に留める努力をする必要がある。

図-18 は、災害発生時の坑口から災害発生場所までの距離と災害件数を示した円グラフである。同図から、0.5m 未満が最も多く、図-10 でトンネル延長が 0.5~3km が最も多かったことから考えても、掘り始めてからそれほど進んでいない箇所が生じていることがわかる。

図-19 は、災害発生時の坑口から災害発生場所までの距離をトンネル延長で除し、%表示したものである。同図から、ほとんどの災害が切羽で発生していることを考えると、掘削が 25%以上 50%未満ほど進んだ際に、事故が多く発生していることがわかる。

4. まとめ

トンネル建設工事中の落盤・土砂崩壊災害に焦点を絞り、調査・分析を行った。その結果、非常に限られた条件のもとで災害が生じていることが分かった。

1. NATM がシールド工法、推進工法よりも落盤・土砂崩壊災害が多い。

2. 災害が多く発生している場所は、切羽であり、坑口から 0.5km 未満、土被りは 100m 未満の箇所である。
3. 災害が多く発生している掘削方法は、発破による掘削である。
4. 災害が多く発生している地山等級は、自立が危くなる等級(道路トンネルの地山等級で C もしくは D)である。

以上のことから、落盤・土砂崩壊災害を防止するためには、切羽を安定させることが重要である。また、岩盤の音や鏡面の変位を計測するなどして、いち早く落盤・土砂崩壊を予測することである。

参考文献

- 1) 建設業労働災害防止協会：建設業安全衛生年鑑，平成 5 年版-平成 21 年版，1993-2009。
- 2) 厚生労働省：平成 21 年労働災害動向調査，<http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/44-21.html>，2010。
- 3) 社団法人日本トンネル協会技術委員会安全環境小委員会：トンネル工事の推移と災害発生状況，2009。
(2010 年 8 月 6 日受付)