Nov. 1978

RIIS-RR-27-1

UDC 614.8-06 : 624.19

産業安全研究所研究報告

RESEARCH REPORT OF
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

RR-27-1

トンネル建設工事における労働災害の分析（3）

前　郁　夫
花　安　繁　郎
堀　井　宣　幸

労働省産業安全研究所
MINISTRY OF LABOUR
THE RESEARCH INSTITUTE OF INDUSTRIAL SAFETY

トンネル建設工事における労働災害の分析（3）

前　郁　夫
花　安　繁　郎
堀　井　宣　幸

Analyses of Accidents in Tunnel Construction Works (3 rd report)

Ikuo MAE*
Shigeo HANAYASU*
Noriyuki HORII*

It is well known that accidents associated with tunnel construction have a very high accident frequency rate and also are of extreme severity. The authors have been conducting accident analysis in this field in these three years in order to provide a better understanding of the nature of recent accidents at tunnel construction works.

In the present work, study was planned mainly in three parts : first, to determine the basic relationships between work accidents and various tunnel characteristics ; second, to throw light on the variations in workdays lost through accidents and on the relation between workdays lost and tunnel characteristics ; and thirdly, statistical and stochastic analyses of 2 kinds of accident rates (number of injuries per 1,000 m and number of injuries per month), assuming that these rates are random variables.

The tunnels under investigation at this time and the available data are about the same as in the prevous report. (i. e. New Sanyo Line railway tunnels constructed in Hiroshima and Yamaguchi prefectures : 86 in number, total length 158 km, total injuries 1931)

The main points obtained in this study are as follows :

(1) Relationships between work accidents and tunnel characteristics picked up in this study show positive correlation in all respects and also have a relatively high intercorrelation, except for mean rock grade. The number of accidents could not be related adequately to one characteristic. (Table 1, Fig. 1, 2)

(2) An analysis of variance on the 2 kinds of accident rates show that there are significant differences between excavation methods and excavated length. Hence, the accident rate increases in the following order : Upper half section advanced method, Bottom drift and upper half section cutting method, and Side drift and upper half section cutting method. Futhermore, the longer the tunnel excavated, the higher the accident rate indicated. (Table 2, 3)

* Civil Engineering and Construction Research Division

(3) Each of the cumulative accident curves show the convex curves. This reveals that accidents do not occur uniformly throughout tunnel length constructed and also that accidents are concentrated at the workplaces in which the accident rate is highly indicated. (Fig. 3, 4, 5)

(4) Workdays lost through accidents (not including fatal accidents) are influenced neither by excavation method nor tunnel length. (Fig. 6, 7) On the other hand, the proportion of fatal accidents (fatal accidents/total accidents) changes greatly in relation to the length excavated. As reported in reference 7, the inverse relationship between accident rate and the number of days of absence is also recognized in this study. (Table 4, Fig. 8)

(5) If accidents take place at random, the frequency of occurrence in fixed intervals of length excavated or construction period have Poisson distribution. For the convenience of calculation, Normal distribution can be employed to test significant changes in the accident rate. (Fig. 9, 10, 11) Using regression line, approximate statistical assessment can be conducted without calculating confidence intervals. (Fig. 12) The difference of influence of tunnel characteristics on accidents between significant and non-significant workplades was studied briefly. (Fig. 13)

1. はしがき

我が国のトンネル施工技術は，戦後著しい発展を遂げており，それに伴い災害安全の面に於いても，過去の発生状況と現在を較べてみると，格段の進歩がみられている。しかしながら，他産業に比して災害危険性が高いとされている建設工事の中でも，トンネル工事は一段と高い度数率，強度率を未だに示している。

これはトンネル建設工事が，地質，湧水等自然条件に大きな影響を受け，施工条件，作業環境などにも制限がある他，労働力についても，季節労働者への依存性，労働者の高令化等不利な条件が存在し，これらが労働災害防止を困難なものとしている為と思われる。

一方これらの状況に対応して，トンネル標準示方書の制定（土木学会），各種安全技術指針の作成（日本トンネル技術協会[1]）などが行なわれ，トンネル建設工事の計画，設計，および施工の各段階において，工事の安全を重視する思想は，発注者，受注者双方共に定着しつつある。

我々はこれまで，これらトンネル建設工事の実態を把握すべく，山陽新幹線Ⅱ期トンネル工事において発生した災害を例に，調査・分析を進めてきており[2)3)4)]，前報までにおいて，発生した災害のさまざまな基本的統計調査に関してはおおよその完了をみた。しかしながら，災害発生の偶然性による発生数や発生率の変動に関する問題や，工事要素と災害との関連についての問題は，災害研究を進める上で基本的な課題でもあり，また実際の安全計画・管理を遂行する上でも非常に重要な問題でもあるにも拘らず，未だ残された問題としてある。したがって，ここでは上記災害発生数および災害発生率の変動，工事関連要素と災害との関連の問題を中心に，各種統計的，確率的な分析手法を用いて分析を試みた。以下にそれらの結果と考察をまとめて報告する。

尚分析の対象としたトンネル，及び用いた災害資料，工事関連資料は前報[4)]と同じく，山陽新幹線Ⅱ期工事のうち広島，山口県内で建設されたトンネルに関するものであるが，前回用いた資料に一部修正を加えた結果，最終的な資料として，86トンネル，75工区，延長157.9km，災害数1,931件（うち死亡55件）を用いた。山陽新幹線Ⅱ期工事中のトンネル建設工事の概要は，前報[4)]を参照されたい。

2. 災害統計分析

2.1 工区諸元の相関

一口にトンネル工事と言っても，施工距離，岩種，掘削工法，施工工期など工事に関連した多数の要素は各トンネル（今回の場合は施工工区を単位とした）ごとに相違しており，また工事中に発生した災害数も各工区ごとに大きなばらつきを示している。これらトンネル工事に関連した要素と災害との相互関係を知る為と，各工事要素間の相互関係を知る為に，まず災害発生数，及び各工事要素に関する基本的な集計が必要となってくる。ここでは，トンネル工事に関連した要素として数量的に得られるものを取りあげ，全工区（75工区）のデーターより，災害発生数，及びこれらの諸数値間の相関係数を求め，その結果を **Table 1** に示した。ここで，表中の平均岩種とは，国鉄制定の岩分類の数値と，岩種ごとの施工距離とを掛け，施工距離で平均化したもので，工区の平均的岩特性を示すものである。総工事費には本坑建設に必要とした費用を用い，また総掘削時間は，上記の岩分類において，それぞれの岩に対する1m当りの掘削必要時間が求められているので[5)]，各岩種の距離と所要時間との積和として求めた。支保工建込数に於いて，ロックボルトは10本を以て100H鋼アーチ1本に換算し，総建込量とは，鋼アーチ支保工の建込本数と，それぞれの鋼アーチ断面積の積和である。打設量は，各コンクリート覆工厚とその打設長の積和として求め，電力設備には最大設備容量（kW）を用いた。

同表より，トンネル間のこれらの要素の相互関連が知られるが，表中の平均岩種のみが比の形で表わされており，他の項目は総て総数的意味を持つ数値なので，相関係数は総て正の値を示しており，かつ平均岩種以外の項目間の相関はかなり高い値を示している。2つの項目の組合せ数は，取り上げた項目が10個あるので，全部で45組あるが，そのうちの例として，施工距離-総工費，及び施工距離-災害発生数の関係を調べたのがそれぞれ **Fig. 1**，**Fig. 2** である。（図中の○印と●印の相違は3-2で述べる）Fig. 1より，工事費用と施工距離とは極めて強い直線関係にあり，単位距離当りの工費がほぼ一定であることが分かる。またFig. 2より，災害発生数と施工距離との間には，相関

Table 1 Correlation coefficient matrix of tunnel construction characteristics
工区諸元相関マトリックス

	災害発生数 number of accidents	施工距離 constructed length	施工月数 construction period	総工費 cost of construction	総掘削時間 excavation time	平均岩種 grade of rock	支保工本数 number of steel arches erected	総建込量 volume of steel arch erected	総打設量 volume of concrete lined	電力容量 capacity of electrical facility
災害発生数	1.000	0.712	0.534	0.708	0.708	0.386	0.742	0.720	0.718	0.742
施工距離	0.712	1.000	0.717	0.937	0.983	0.522	0.950	0.864	0.989	0.741
施工月数	0.534	0.717	1.000	0.699	0.714	0.309	0.722	0.686	0.731	0.613
総工費	0.708	0.937	0.699	1.000	0.940	0.426	0.954	0.918	0.947	0.832
総掘削時間	0.708	0.983	0.714	0.940	1.000	0.386	0.959	0.902	0.992	0.747
平均岩種	0.386	0.522	0.309	0.426	0.386	1.000	0.414	0.267	0.439	0.368
支保工本数	0.742	0.950	0.722	0.954	0.959	0.414	1.000	0.969	0.968	0.780
総建込量	0.720	0.864	0.686	0.918	0.902	0.267	0.969	1.000	0.911	0.748
総打設量	0.718	0.989	0.731	0.947	0.992	0.439	0.968	0.911	1.000	0.747
電力容量	0.742	0.741	0.613	0.832	0.747	0.368	0.780	0.748	0.747	1.000

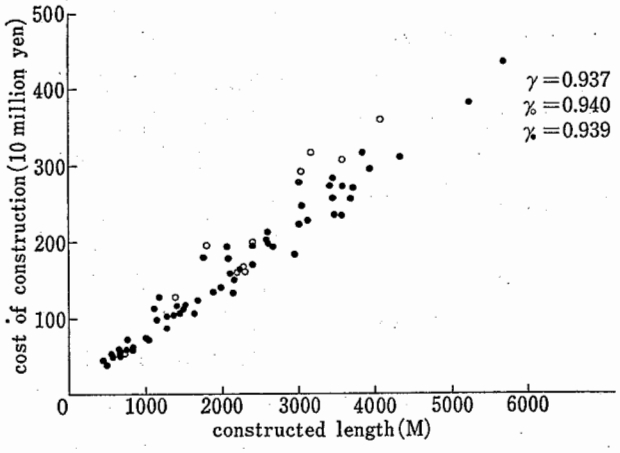

Fig. 1 Relation between cost of construction and tunnel length constructed
施工距離～総工費（×1,000万円）の関係

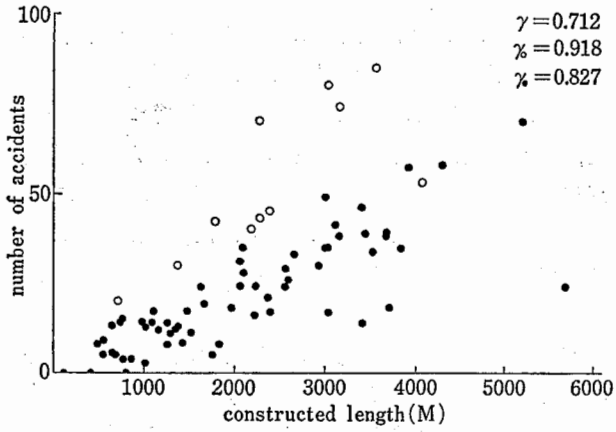

Fig. 2 Relation between number of accidents and tunnel length constructed
施工距離～災害発生数(人)の関係

係数 $r=0.712$ が示すように，全体としては施工距離が長くなるに従い，災害発生数も増えることが示されているが，同じ施工距離であっても，災害発生数に相当大きなばらつきがみられ，災害発生数を施工距離のみの関数として表現するにはやや不十分と思われる。このことは施工距離ばかりでなく，他の工事要素に就いてもほぼ同様なことが言え，災害発生数と工事要素を関連づけるには，単一の要素だけでなく複数の要素を綜合させる必要があることを示唆している。尚2変量間の純粋な相関を調べるには，求めようとする変量から他の変量の影響を取り除いた後の相関，いわゆる偏相関を求めなければならないが，今回は災害発生数，工事関連要素の基本的な関連を調べることが目的であったので，一般的な相関関係のみで留めた。

2.2 災害発生率

工区ごとの災害発生状況を表わす指標として何を選ぶかは，前述の通り工区ごとに施工条件が異なっており，また Fig. 2 に示した如く，施工条件の相違に応じて災害発生数も変動しているので，一概に決められず様々なものが考えられるが，得られた資料内容にも限度があるので，災害発生指標としてここでは，施工距離 1km 当りの災害発生数（km 当り災害発生率）と，工事期間1ケ月当りの災害発生数(月当り災害発生率)の2種類の災害発生率を便宜的に定義した。

それぞれの災害発生率ごとに，全工区についてその分布形状を調べてみると，km 当り災害発生率はほぼ正規分布に近い形状を示しており，また月当り災害発

Table 2 Analysis of variance on accident rate for excavation method
災害発生率分散分析表（工法別分類）

	分散 variance	自由度 d. o. f.	不偏分散 unbiased variance	分散比 variance ratio	1% 点 1% point
工法別変動 inter-method variance	3.81	2	1.905	6.29	4.91
誤差変動 error variance	21.84	72	0.303	※1% 有意 significant at 1% level	
全変動 total variance	25.65	74			

Table 3 Analysis of variance on accident rate for excavated length
災害発生率分散分析表（距離別分類）

	分散 variance	自由度 d. o. f.	不偏分散 unbiased variance	分散比 variance ratio	1% 点 1% point
距離別変動 inter-length variance	9.76	3	3.253	14.53	4.07
誤差変動 error variance	15.89	71	0.224	※1% 有意 significant at 1% level	
全変動 total variance	25.65	74			

生率は正規分布がやや歪んだ形状をしていることが分かった。また施工条件の相違によるこれらの災害発生率の変動への影響を調べるために，ここでは施工条件の相違を表わす代表的なものとして掘削工法，施工距離（工区距離）を取り上げ，掘削工法別，工区距離別に各々の災害発生率の分類を行なってみた。その結果，掘削工法別によるそれぞれの災害発生率の平均値は，側壁導坑先進工法（13.7人/km，1.24人/月），底設導坑先進工法（12.5人/km，0.95人/月），上部半断面先進工法（9.8人/km，0.50人/月）となり，また工区距離別の平均値は，1,000m未満（10.4人/km，0.35人/月），1,000～2,000m未満（10.6人/km，0.60人/月），2,000～3,000m未満（13.5人/km，1.06人/月），3,000m以上（12.6人/km，1.28人/月）の各数値が得られた。上記の数値をみると，両災害発生率ともに掘削工法別では，側壁導坑先進，底設導坑先進，上部半断面先進の順で発生率が高く，また施工距離が長くなるに従い，災害発生率もまた高くなる傾向にあることが分かる。そこで分散分析により，工法別，距離別の各平均値間の差の検定を行なってみると，月当り災害発生率で掘削工法別，施工距離別とも有意な結果が得られ，前記のことが確かめられた。この月当り災害発生率による分散分析の結果を **Table 2**，**Table 3** に示した。

尚この災害発生率（特にkm当り災害発生率）については，確率的考察も加え，次章で更に詳しく論ずることとした。

2.3 災害発生率順位別災害累計曲線

前節で述べた災害発生率と災害発生数との関係を調べるために，各工区の災害発生数，工区距離，施工工期，および災害発生率等をもとに災害累計曲線を求めてみた。災害累計曲線の求め方には，

（1） 各工区の災害発生数の多い順に災害数，延長，工期，損失日数などの累計を求める方法（**Fig. 3**）

（2） 各工区の災害発生（km率当り，月当り災害発生率）の高い順に上記の諸数値の累計を同様に求める方法（**Fig. 4**，**Fig. 5**）

とがある。工区の施工距離が同様であっても発生する災害に違いのあること，即ち施工長さに対して均等に災害が発生していないことは，Fig. 2 にも示されているが，このことは Fig. 3 の災害発生数順位別累計曲線が凸曲線であることによっても同様に確かめられる。同図より，発生した災害の 50% は施工延長にして 37%，施工月数の 27%（工区数 24%）内でそれぞれ発生していることが分かる。また Fig. 4 の km 当り災害

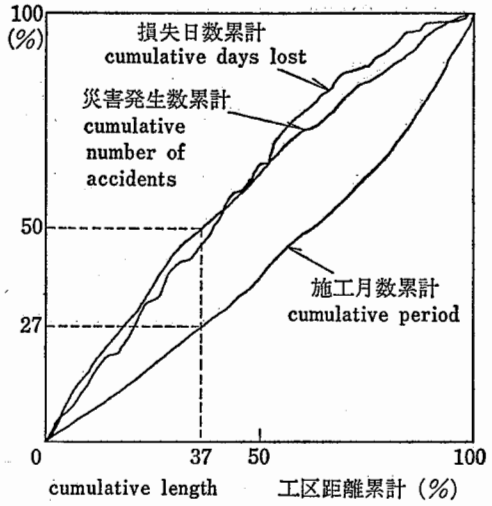

Fig. 3 Chronological cumulative number of accidents' curve
発生数順位別災害累計曲線

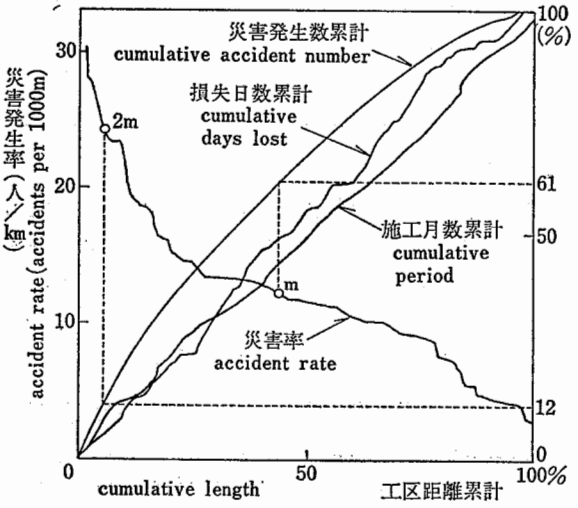

Fig. 4 Cumulative accident number curve in accident order rate (number of accidents per 1,000 m)
km当り災害発生率順位別災害累計曲線

率順位別累計曲線，或いは Fig. 5 の月当り災害率順位別累計曲線では，2つの災害発生率の間にはかなり高い相関があるので(r=0.750)，両曲線ともほぼ似た傾向を示しており，両災害発生数累計曲線とも凸曲線となっている。即ち km 当り，月当り災害発生率とを問わず，災害発生率の高い工区に災害数も集中して発生していることが分かる。この傾向は月当り災害発生率の場合の方がより顕著であり，平均値以上の災害発生率を有する工区で災害発生数の 64%（距離別災害発生率の場合 61%）を占め，同じく平均値の2倍以上の

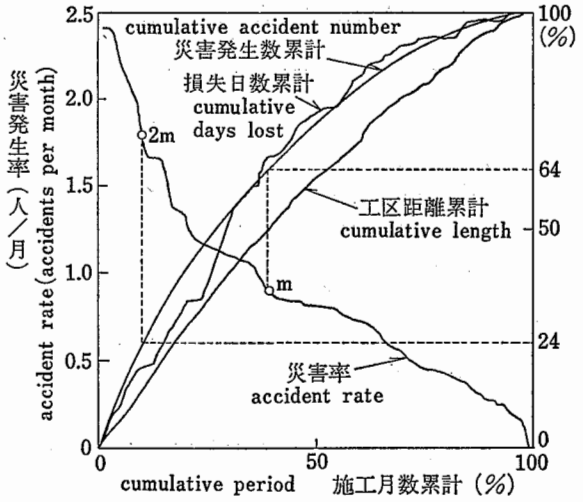

Fig. 5. Cumulative accident number curve in accident order rate (number of accidents per month)
月当り災害率順位別災害累計曲線

災害発生率の工区で災害発生数の 24%（同距離別災害発生率で 12%）を占めていることがこれらの図から明らかになった。

2.4 災害強度特性

ここでは発生した災害の特性として重要であるにも拘わらず，これまで余り検討されていなかった災害の強度特性としての労働損失日数（休業日数）を取り上げ，トンネル施工条件との関連について検討を行なった。尚災害のうち死亡災害に対する換算損失日数は，現在 7,500 日とされているが，この数値は便宜的に定められたものであるので，そのままの数値を用いて分析することには問題があると思われたので，ここでは死亡災害を含んだ災害と，含まない災害とに分けて分析を行なった。

まず **Fig. 6** は，非死亡災害について，被災者の属していた工区の施工距離をもとに，工区距離ごとの労働損失日数の分布を調べ，施工距離の災害強度に対する影響を調べたものである。全体として，どの距離分類もほぼ同様な分布パターンを示しており，施工距離の相違による労働損失日数の影響は余り無いようである。このことは分散分析によって，平均値間の差の検定を行なってみても，有意な結果が得られなかったことからも確かめられた。また労働損失日数の分布を掘削工法別に分類して調べてみたのが **Fig. 7** であるが，距離別分類で得られたことと同様な結果が得られた。このことより，トンネル建設工事において発生した災

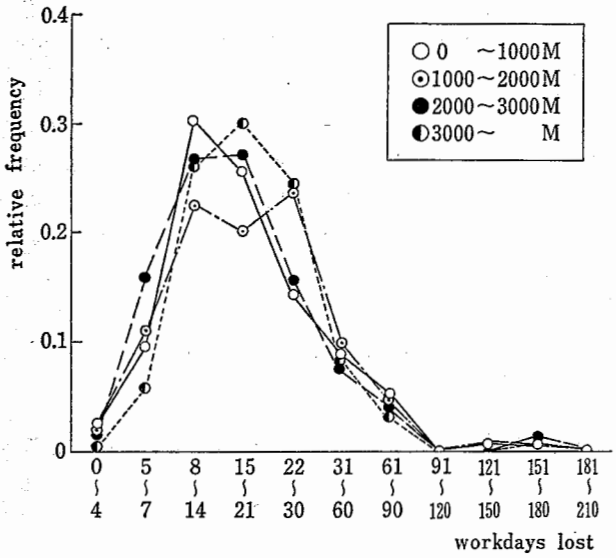

Fig. 6 Frequency distribution of workdays lost through accidents, classified by constructed length
工区距離別労働損失日数分布

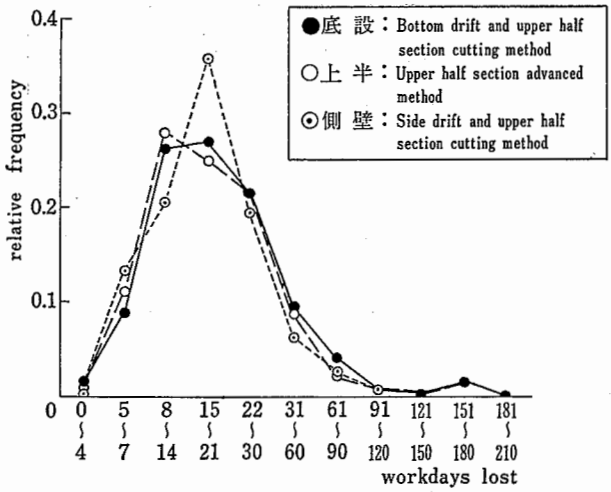

Fig. 7 Frequency distribution of workdays lost through accidents, classified by excavation method
掘削工法別労働損失日数分布

害（死亡災害を除く）による労働損失は，施工距離，掘削工法などの影響を受けず，ほぼ一定のパターンを有することが明らかとなった。

一方死亡災害については，発生した災害の中での死亡災害の割合を死亡率と定義し，掘削工法別，工区距離別に分類し調べてみたのが **Table** 4 である。表中の上段は各区分における災害1件当りの平均損失日数（非死亡災害），及びその標準偏差であり，下段に死亡率(%)を示した。同表より，掘削工法の違いによる死亡率の差は余り見られないが，工区距離による影響は明瞭に表われており，施工距離が長くなるに従い，死亡率が高くなる傾向が認められる。

また各工区の災害発生状況と，災害強度（労働損失日数）との関連を調べるために，各工区の災害発生率（1km 当りの災害発生数）と，災害1件当りの平均労働損失日数との関係を調べたのが **Fig.** 8 であり，

Table 4 Average days lost, fatal accident ratio, & correlation coefficient between accident rate and average days lost
平均損失日数，死亡率(%)，災害率と損失日数との相関係数

工法 method / 距離 length (m)	底設 bottom drift	上半 upper half	側壁 side drift	平均 average	相関係数 correlation coefficient
0～1,000	29.9 (17.6) —	27.2 (9.3) 1.27	— —	27.6 (10.3) 0.86	−0.06
1,000～2,000	30.0 (13.6) —	30.3 (11.2) 2.63	— —	30.8 (12.9) 1.33	−0.45
2,000～3,000	25.5 (8.6) 2.61	— —	21.9 2.78	24.6 (8.1) 2.63	−0.22
3,000～	29.5 (7.3) 3.94	23.9 (9.7) 1.57	26.0 2.31	28.3 (7.1) 3.71	−0.27
平均 average	28.2 (10.4) 2.90	28.5 (9.7) 2.84	24.3 (4.7) 2.48	28.1 (9.8) 2.85	
相関係数 correlation coefficient	−0.34	−0.21	−0.92		−0.33

Legend : A(B) / C
A : Average days lost
B : Standard deviation of average days lost
C : Fatal accident ratio (%)

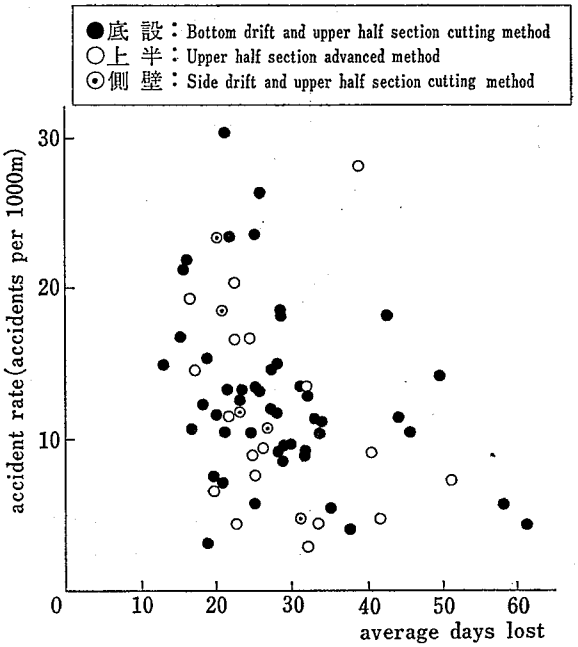

Fig. 8 Relation between average days lost and accident rate
災害発生率(人/km)と損失日数(日/件)の関係

Table 4には，掘削工法別，施工距離別に両指標間の相関係数を示した。同図及び同表より，各工区の災害発生率と労働損失日数との関係には，かなりのばらつきはみられるが，掘削工法別，或いは施工距離を問わず総て負の相関にあり，工区の災害発生率が小さくなる程，1件当りの労働損失日数が大きくなることが示されている。尚この関係は Haper，Lister 及び Middleton によって英国の炭坑における労働災害でも同様であることが指摘されており[6]，(但し英国の災害発生率は 10 万労働時間当りの非死亡災害数としている) 彼等はこの事象を“予期せぬ知見”として，その原因を，災害の多い所では各災害の損失日数が少なくなり，また逆に災害が少なくなると損失日数が多くなる，ある種のバランス過程があるのだろうと推測している。一方最近になってこの関係を Senneck は[7]，災害が報告として現われてくるには，その災害の強度(労働損失日数) が関係し，或る災害が発生した場合，その災害を報告するか，報告しないかを判断する際の基準となる労働損失日数は，その時の個人，企業，及び社会の経済的，社会的要因になって影響を受け変動するという，災害強度閾値モデル (severity threshold model) によって説明しようとした。つまり死亡災害のような高強度の災害しか報告しなければ，災害強度は高く災害発生率は低くなるが，数多く存在する軽傷災害も含めて報告すれば，全体として災害強度は低く，災害発生率は高くなるであろうと言う説明である。この両説とも，特に Senneck の説明には説得力はあるが，実証的に十分に検討されてはおらず，今回の調査・分析に於いても，このことを確証するまでには至らなかった。

3. 災害発生率の確率的考察

一般に災害は多数の要因が複雑に重なり合って起こるので，その発生は偶然性に左右されると考えられる。既に述べた様に，同一施工距離，或いは同一工期であっても，発生した災害数にはかなりの差があり，従って工区ごとに算出される災害発生率にも相当な変動が見られる。

本章では，災害発生数，或いは災害数を或る基準値に換算した災害発生率は，偶然性により変動はするが，その出現の仕方は或る確率法則に従う確率変数と考え，確率分布によって災害発生の危険性を評価しようとするものである。災害発生における偶然変動の影響を確率的に考慮したものとしては，既に英国に於いて D. W. Widginton[8] により鉱山災害の分析に用いられた例などがあるが，ここでは M. Nordon 等[9]，及び斉藤[10]によって交通事故のデーター解析に応用された統計的品質管理手法を用いて，災害発生の危険性の評価を行った。

3.1 災害発生数の確率分布

扨て，災害の発生が全く偶然性のみに依存し，しかも独立に発生するランダムな事象と仮定すると，一定施工距離，施工工期に於ける災害発生数の分布は，二項分布，乃至は(1)式で示されるポアソン分布に従うことが知られている。

$$P(x)=\frac{(\lambda_0\cdot L)^x}{x!}e^{-(\lambda_0\cdot L)} \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

ここで　L：工区距離（或いは施工工期）
λ_0：総平均災害発生率
$P(x)$：x件の災害が発生する確率

(1)式に於ける $\lambda_0\cdot L$ は，施工距離（或いは施工工期）Lに対する期待災害発生数と考えることが出来るので，それを $a=\lambda_0\cdot L$ と置き換えると(2)式となる。

$$P(x)=\frac{a^x}{x!}e^{-a} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

既ち，偶然性のみによって x 件の災害が発生する確率 $P(x)$ は，災害件数 x と期待災害発生数 a とで表現されることが分かる。そこで，災害発生の偶然変動による影響を調べる為に，ポアソン分布の母数が a のときの，同分布の信頼区間を求めることとする。危険率 α のときのポアソン分布の下側，及び上側信頼限界をそれぞれ LL, UL とすると，LL, UL はそれぞれ(3)，(4)式を満足する最大，及び最小の整数として示される。

$$\sum_{x=0}^{LL}\frac{a^x}{x!}e^{-a}\leqq\frac{\alpha}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

$$\sum_{x=UL}^{\infty}\frac{a^x}{x!}e^{-a}\leqq\frac{\alpha}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

ポアソン分布は，分布の平均値 a が大きくなれば，正規分布によって近似可能なことが知られており，正規分布近似による信頼区間を求めると，UL，LL はそれぞれ(5)，(6)式で示される。

$$UL=a+\Phi\sqrt{a}+\frac{1}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

$$LL=a-\Phi\sqrt{a}-\frac{1}{2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

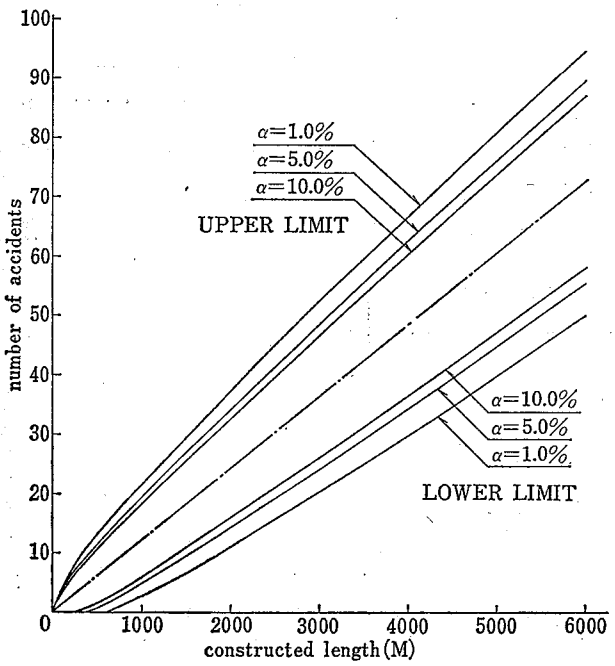

Fig. 9 Confidence intervals of number of accidents
災害発生数の信頼区間

ここで　Φ：危険率 α に対する規準正規分布の値

(5)，(6)式に於ける第1，2項は正規分布近似より得られ，第3項は離散型変数を連続型変数で近似する際に，一般的に用いられている補正値である。

Fig. 9 は，期待災害発生数を km 当り総平均災害発生率：12.168 人/km と施工距離の積より求めて，危険率がそれぞれ1％ (Φ=2.576)，5％ (Φ=1.960)，10％ (Φ=1.645) のときの，各施工距離に対する災害発生数の信頼区間を(5)，(6)式から求めたものである。

災害発生数は，各施工距離ごとに偶然変動によって変動はするが，災害発生に影響を与えるファクターが大きく変化しない限り，発生数はある限界内で変動し，逆にこの限界を越える変動が示された時は，災害発生に影響を与えるファクターが変化しているか，或いは他のファクターが存在し，結果としてその工区の災害発生率が，全体の平均災害発生率よりも有意に高いか，或いは逆に低いかを，この図を通して知ることが出来る。

3.2 確率分布による災害危険性の評価

扨て前記の分布を用いて，各工区の災害発生状況を確率的に検討する訳であるが，災害の発生状況を工区間で比較するには，各工区の施工条件が異なるので，直接的な災害発生数よりも，むしろ災害発生数を或る基準値に換算した災害発生率の方が便利であるから，(5)，(6)式を工区距離（或いは施工工期）L で除して災害発生率の UL, LL を求めると，(7)，(8)式を得る。

$$UL=\lambda_0+\Phi\sqrt{\frac{\lambda_0}{L}}+\frac{1}{2L} \quad \cdots\cdots\cdots(7)$$

$$LL=\lambda_0-\Phi\sqrt{\frac{\lambda_0}{L}}-\frac{1}{2L} \quad \cdots\cdots\cdots(8)$$

或る工区で，災害発生に影響を与える要因が変化している場合や，災害発生に大きく影響する特異な要因が存在する場合には，その工区の災害発生率は(7)，(8)式より得られる信頼限界を越えて変動すると考えられる。ところで，既に2-2に於いて示したように，月当り災害発生率（人/月）は，掘削工法，施工距離等の影響を受けることが分かっているので，以下では km 当り災害発生率（人/km）を用いて，災害発生危険性の評価を行なうこととする。

扨て **Fig. 10** は，危険率 α がそれぞれ1％，5％，10％のときの各距離に於ける UL, LL を(7)，(8)式

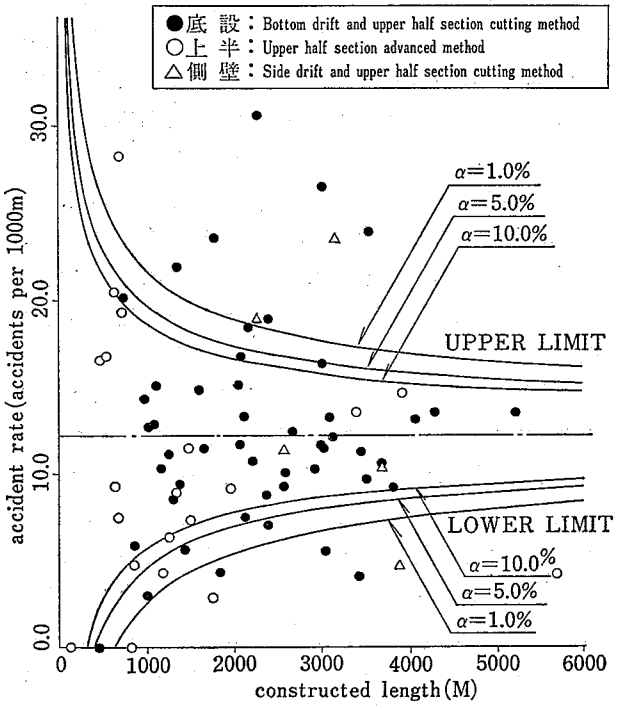

Fig. 10 Confidence intervals of accident rate and actual accident rate
災害発生率（人/km）の信頼区間と実際の災害発生率

より求め，併せて今回対象としたトンネル工事に於ける実際の災害発生率を示したものである。同図より，危険率の違いによる UL, LL の変動は，危険率5％を越すと余り大きくなく，また工区距離が長くなるに従い，平均災害発生率に収束していることが分かる。そこで，統計学上一般に用いられている危険率5％を用いて危険性の評価を行なうこととし，各工区のUL, LL を求め，これらの信頼限界，及び各工区の実際の災害発生率を掘削工法別に分類して示したのが **Fig. 11** である。Fig. 10 より，施工距離が 4km を越える工区の災害発生率は，いずれも上側信頼限界 10% 値以下であることが分かっているが，Fig. 11 からは，どの工区の災害発生率が統計的に有意かどうかが示されており，上側信頼限界を越えている工区は 11 工区あり，また下側信頼限界よりも低い工区は 14 工区であることが分かる。上側信頼限界を越えた 11 工区に就いて掘削工法別にみると，底設導坑先進上半掘削工法が多いものの，総ての工法にわたっており，掘削工法の差異は余り見られない。

さきに述べたように，正規確率変数としての災害発生率は，工区距離Lの関数であるので，Fig. 11 に示される如く，工区距離の長短に応じて，各工区の信頼区間の幅に変動が見られる。そこで，各工区の災害発生率と信頼区間の関係を統一的に論ずる為に，災害発生率と上側信頼限界値との比を求め，これを危険指数と定義し，危険指数と災害発生率との関係を調べたのが **Fig. 12** である。同図より，危険指数と災害発生率との間には，相関係数 $r=0.976$ の極めて高い相関関係がみられる。そこで，危険指数を HL，災害発生率をλとして，危険指数の災害発生率への回帰直線を求めてみると(9)式が得られ，統計的に有意な限界 $HL=1.0$ に対する災害発生率は $\lambda=17.78$人/km であることが分かった。

$$HL=0.0556\lambda+0.0113 \cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

この回帰式を用いれば，工区ごとに信頼区間を計算することなく，単に災害発生率のみを用いて，統計的危険性のおおよその評価が可能であると思われる。

また，以上の分析より明らかとなった，統計的に有

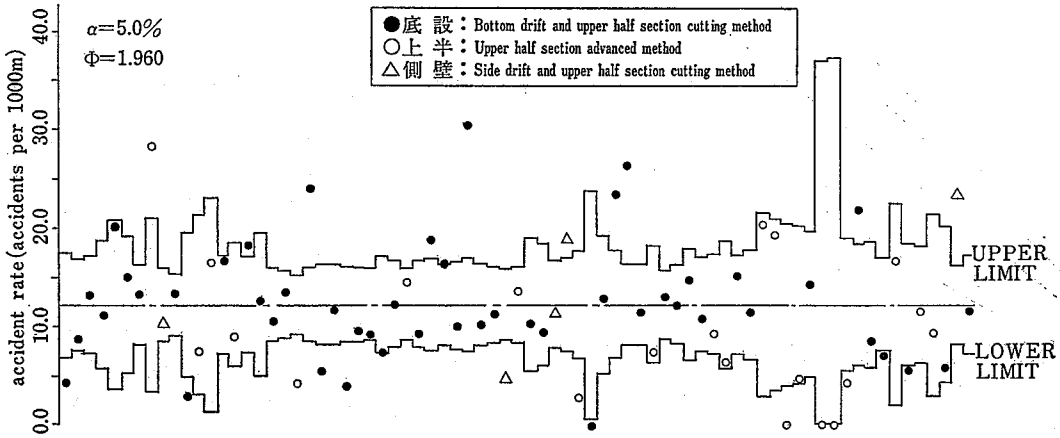

Fig. 11 Confidence intervals of accident rate for each workplace and actual accident rate
工区別の災害発生率信頼区間と実際の災害発生率

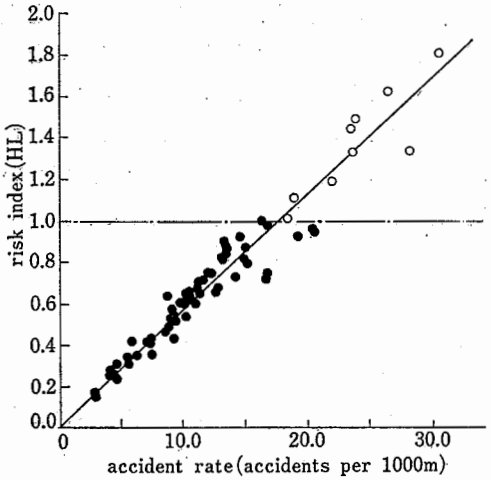

Fig. 12 Relation between accident rate and risk index (ratio of accident rate to upper limit value)
災害発生率(人/km)と危険指数 (HL)の関係

意な $HL \geqq 1.0$ 工区と，有意でない $HL < 1.0$ 工区との間での，工区諸元の災害発生数に対する影響の差異を調べる為に，2-1 で示した代表的9種の施工諸元と災害発生数との相関係数を，危険側に有意な工区と有意でない工区とに分けて調べたのが **Fig. 13** である。Table 1に示される通り，災害発生数と各施工諸元との相関は，全体としてみると高い値でも $r=0.742$(支保工本数，電力設備容量)と比較的不鮮明であったが，有意な工区と有意でない工区とにグループ分けを行なってみると，施工諸元によっては災害との関連がより明確に捉えることが可能となる。例えば施工距離との関係では Fig. 1 に示される如く（○が有意な工区，●は有意でない工区），有意な工区にあっては $r=0.918$ と極めて高い直線関係が見出せる。また Fig. 13 を通して，平均岩種，総建込量を除く工区諸元は，いずれも有意な工区の方が高い相関を示し，更に2つの工区間で相関係数が大きく変動し，災害に対して比較的敏感に反応する工区諸元は，施工月数，平均岩種，電力設備容量などであることが分かる。

4. 結　　論

以上，山陽新幹線II期工事のうち，広島，山口県内で行なわれたトンネル工事の労働災害をとりあげ，災害の実態を把握する為に，工事関連要素と災害との関連を示す各種基本集計の他，発生災害の強度特性，および災害発生率の分布特性と確率的考察に就いて検討を行なってきたが，以下にその要約を記す。

（1） 災害発生数，および数値的に表わされる施工諸元との相互関連は，いずれも正の相関を示し，かつ平均岩種を除くとかなり高い相関にある。しかし災害

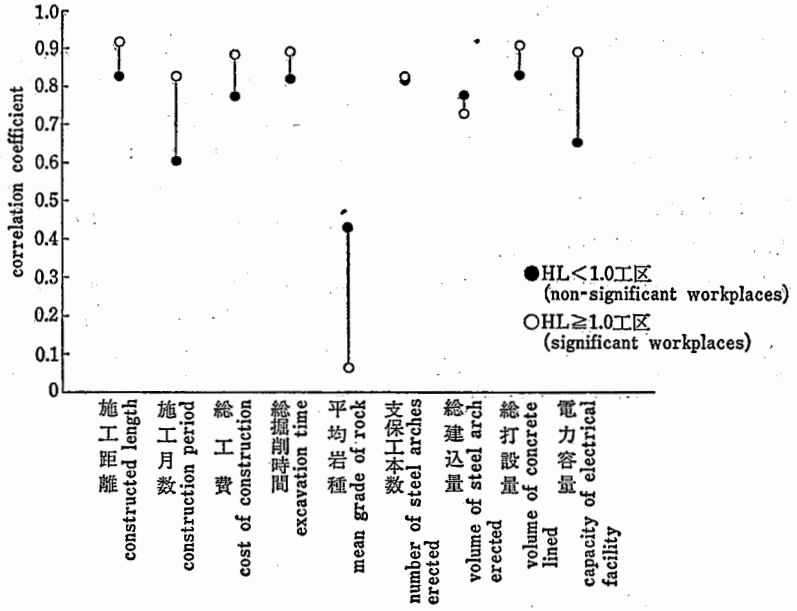

Fig. 13 Correlation coefficient between number of accidents and tunnel construction characteristics
災害発生数と工区諸元の相関

発生数を単一の施工諸元を以て説明するには不十分なきらいがあった。(Table 1, Fig. 1, 2)

（2） 各工区の災害発生状況を示す指標として，km当り災害発生率(人/km)と月当り災害発生率（人/月）を定義し，掘削工法別，工区距離別に各々分散分析を行なってみると，月当り災害発生率で有意な結果が得られ（1％危険率），掘削工法別では，側壁導坑先進，底設導坑先進，上部半断面先進の順で，また工区距離別では，施工距離が長くなるに従い，災害発生率がそれぞれ高くなることが認められた。(Table 2, 3)

（3） 各工区の災害発生数と災害発生率との関係を調べる為に，災害発生数および災害発生率の大きい順に災害累計曲線を求めてみた結果，施工距離に対して均等に災害が発生していないこと，或いは災害発生率の高い工区に災害発生数も集中していることなどが，災害累計曲線が凸曲線であることから明らかとなった。(Fig. 3, 4, 5)

（4） 災害発生強度特性を示す労働損失日数（死亡災害を除く）の分布は，掘削工法，或いは工区距離に関係無く，ほぼ一定のパターンを有することが明らかとなった。(Fig. 6, 7) 一方，災害死亡率（死亡災害/全災害)は，掘削工法による違いは余り見られないが，工区距離による影響は明瞭に現われており，工区距離が長くなるに従い，死亡率は高くなる傾向にある。また各工区の災害1件当りの平均損失日数と，1km当りの災害発生数の関係を調べてみると，掘削工法別，工区距離別とを問わず総て負の相関にあり，災害発生率が小さくなる程，1件当りの損失日数が大きくなることが認められた。(Table 4, Fig. 8)

（5） 災害の発生がランダムであれば，発生数の分布は二項分布，乃至はポアソン分布となる。したがって正規分布近似により簡単に，災害発生数，或いは災害発生率の信頼区間を任意の施工距離に対して求めることが出来，実際の災害発生率とを比較することによって，その工区の災害発生率の有意差検定が行なえる。(Fig. 9, 10, 11) また実際の災害発生率と上側信頼限界値との比（危険指数）と，災害発生率との回帰直線を用いることによって，災害発生率のみで統計的危険性のおおよその評価が可能となった。(Fig. 12) 更に，統計的に危険側に有意な工区と有意でない工区の，施工諸元の災害（発生数）に対する影響の差異も一部明らかとなった。(Fig. 13)

（付記）

本研究で行なった一連の計算は，産業安全研究所電子計算機 FACOM 230-35 システムによったことを付記すると共に，最後に，数多くの図表等の整理に当って御協力を頂いた中島光三君に感謝の意を表します。

（昭和53年6月30日受理）

参 考 文 献

1) 例えば“トンネル工事における運搬設備による危害防止に関する技術基準”：日本トンネル技術協会，昭和51年（1976）3月
2) 前　郁夫，花安繁郎：産業安全研究所技術資料，RIIS-TN-74-6, 1974
3) 前　郁夫，花安繁郎：鈴木芳美，産業安全研究所技術資料，RIIS-TN-75-8, 1976
4) 前　郁夫，花安繁郎：産業安全研究所技術資料，RIIS-TN-76-7, 1977
5) 斉藤　徹：鉄道技術研究報告，No. 965（施設編第435号）鉄道技術研究所，1975年4月
6) D.G.Happer, E.G.Lister, and M. Middleton : Accident Analysis and Prevention, Vol. 3, pp. 229～236, 1971
7) C. R. Senneck : Applied Ergonomics, Vol. 6, No. 3, pp. 147～153, 1975
8) D. W. Widginton : SMRE Research Report, No. 127, 1956
9) M. Norden, J. Oransky, and H. Jacobs : H. R. B. Bull : No. 117, pp. 17～31, 1956
10) 斉藤和夫：土木学会北海道支部論文報告集, pp. 77～81, 1975

産業安全研究所研究報告　RIIS-RR-27-1

昭和 53 年 11 月 15 日　発行

発行所　労働省産業安全研究所
〒108　東京都港区芝5丁目35番1号
電　話 (03) 453—8441 (代)
印刷所　新日本印刷株式会社

UDC 614.8-06：624.19

トンネル建設工事における労働災害の分析（3）

前　郁夫・花安繁郎・堀井宣幸

産業安全研究所研究報告
RIIS-RR-27-1，1～12（1978）

災害度数率および強度率の極めて高いトンネル工事における災害の実態を把握するために，幾つかの観点から調査・分析を行なった。対象としたトンネルは，山陽新幹線Ⅱ期工事のうち，広島・山口県内で建設されたものである。（86トンネル，75工区，延長 159 km，災害数 1931）今回行なった分析の主な点は，（1）災害発生数および工事関連要素間の基本的な相関関係，（2）2種類の災害発生率の分布特性および，災害発生率と工事関連要素との関連，（3）災害発生率と災害発生数との関連について，（4）災害強度特性（労働損失日数）の分布と工事関連要素との関係，（5）災害発生率の確率論的検討などである。（図-13，表-4，参-10）

UDC 614.8-06：624.19

Analyses of Accidents in Tunnel Construction Works (3rd report) by Ikuo Mae, Shigeo Hanayasu, and Noriyuki Horii

Research Report of the Research Institute of Industrial Safety
RIIS-RR-27-1，1～12（1978）

This paper deals with accidents investigation and analyses in order to provide a better understanding of the nature of recent accidents at tunnel construction works.

Study was divided mainly into three parts : first, to determine the basic relationships between work accidents and various tunnel characteristics ; second, to throw light on the variations in workdays lost through accidents and on the relation between workdays lost and tunnel characteristics ; and thirdly, statistical and stochastic analyses of 2 kinds of accident rates, (number of injuries per 1,000 m and number of injuries per month) assuming that these rates are random variables. (13 Figures, 4 Tables, 10 References)