

UDC 519.24 : 614.8-06 : 624.19

トンネル建設工事における労働災害の分析(4)

花 安 繁 郎*

Analysis of Accidents in Tunnel Construction Work (4)

by Shigeo HANAYASU*

1. Introduction

Every year many casualties take place in the construction industry. In particular, labour accidents associated with construction work account for about one third of all occupational accidents and represent nearly a half of the number of death in all the industries. Among them, the tunnel construction sector has a higher accident frequency rate and a higher severity rate than those of other construction sectors.

This paper presents statistical analysis of labour accidents occurred in a large construction project, with particular emphasis on tunneling work, in order to clarify the basic labour accident situation in construction site.

2. Data collection and monitoring

The tunnels under the present investigation are those in a part of the New Sanyo bullet train construction project ranging from Hiroshima to Yamaguchi prefectures, which numbers 75 construction sites. The accident data were made available from the reports on industrial accident, which were submitted to the labour standard inspection offices concerned. In addition, information concerning construction site features was collected from the project records compiled by Japan National Railway.

So far as the variables on construction site features are concerned, 13 kinds numerical variables (eg. length of tunnel excavated, construction periods, index of rock grading of site, total hours consumed in excavation, etc.), including the number of accidents and 3 kinds of categorical data such as method of excavation, transportation system, and on type of entrances in each construction site, were obtained from the construction record.

After compiling these data on all construction sites, numerical variables in each site were divided by the length of tunnel excavated in order to make these variables comparative between each site. In order to find the outliers in these normalized data 3rd moment (skewness) and 4th moment (kurtosis) of these variables were used. This detecting resulted in 6 construction sites had some discordant values with respect to the construction variables. Hence, for the purpose of assuring the homogeneity of data structure, variables within this 6 construction sites were excluded from the data set, so that the final number of construction sites for the analysis was to be 69.

3. Analysis and results

Various multivariate analysis methods were applied for the study of the basic relationship between labour accidents and tunnel construction features on site. The main conclusions reached in this work are as follows :

1) From the correlation analysis, there is a strong correlation between the total number of accidents and the total volume of construction materials consumed. However, the accident frequency rate (The number of accidents per 1 km) has no positive relation to the unit volume of the construction variables concerned. In contrast to the overall accident frequency rate, the fatal accident frequency rate depends on the geological characteristics of the strata on site and decreases in accordance with the increase of unit volume of construction

*土木建築研究部 Construction Safety Research Division

variables.

2) According to the principal component analysis, many selected numerical variables can be explained by such a few factors as of the size of construction work, the geological factors of the tunnel, and labour accident-factors. Since accidents constitute a major component in PCA analysis, statistical evaluation, with reference to accidents, between construction sites can be conducted by making use of the accident frequency rate. The poisson distribution also could be employed for the statistical analysis of the number of occurrences of accidents in a site.

3) A discriminant function was developed to distinguish with high accuracy whether or not work place may have fatal accidents during its construction periods. From the analysis, fatal accidents are more likely to occur in a work place where the geological conditions are relatively better, and the execution of the construction work was accomplished within a short or period of time. Interpretation of the variables employed in the proposed discriminant function were explained similar to the ones given in the correlation and the principal component analyses.

4) Finally, multiple regression equation was proposed to predict the number of occurrences of accident in a construction site with a relatively high multiple correlation coefficient. Total volume of steel arches erected, method of excavation, and index of rock grade have played an important role for establishing the regression equations. These explanatory variables could also give the same implications of the accident situation as revealed in the preceding paragraphs.

Keywords : Tunnel, Occupational Accidents, Statistical Analyses

1. まえがき

我が国での毎年の労働災害のほぼ3割、とくに死亡災害では4割以上もの多くが建設工事で発生している。このうち、土木工事における災害は、昭和58年の統計によれば、発生数では全建設工事災害の約1/3の29.9%、死亡災害では半数もの52.2%を占めており、建築工事に比べて発生数は少ないが、死亡数が多い特徴がある。また、災害発生の頻度率を示す災害度数率や、発生した災害の傷病程度を示す災害強度率などの災害指標も、他の屋外型産業と同様に、建設業は高い値を示している¹⁾。

この建設業にあって、トンネル工事では、作業対象が自然地山であり、その挙動の正確な予知・予測に困難が伴うこと、あるいは狭い作業空間内で多くの重機類、資材を取扱わなければならないことなど、労働安全衛生面でいくつかの不利な点が存在し、これらが労働災害が頻発する原因となっており、また、重篤災害を招いていることがこれまでの分析により知られている²⁻⁴⁾。

ところで、工事中に発生するこれらの労働災害は、作業対象、作業環境・条件、施工法などの差により、その発生特性も異なると思われるが、そのことを明らかにする災害分析法には、災害を1件ずつ丹念に原因や背景を系統的に調べ上げて災害の発生過程を解き明かし、その結果を災害防止対策に結びつけてゆこうとするFTAやCTAなどのミクロ的な分析法と⁵⁾、同一の工種や作業内容によって発生した災害をとりまとめ、そこでの共通的な災害特性を解明しようとするマクロ的な分析法とに分けられる。工事条件と労働災害との関連のように、比較的まとまったレベルでの分析を行うには、マクロな分析法によることとなる。

本報告は、トンネル建設工事において発生した労働災害を事例としてとりあげ、工事に関するさまざまな条件と労働災害との関連を明らかにすることを目的として、多変量解析法を用いて分析した結果をとりまとめたものである。分析の対象としたトンネルは、国鉄山陽新幹線工事で建設されたトンネルのうち、広島・山口県内で建設されたトンネル(86本、総延長158.8km)である。

2. 基本データの作成と吟味

調査の対象としたトンネル数は全部で86であるが、長大トンネルでは複数の工区に分割して施工されたり、あるいは短小トンネルではひとつの事業所がいくつかのト

ンネルをまとめて施工した場合があったので、分析対象の個体には、事業者がひとつの事業所を形成した、いわゆる工区と呼称されるものを単位としたので、全部の工区数は75であった。

各工区の施工条件に関連した資料には国鉄がとりまとめた工事記録⁶⁾を利用し、労働災害の資料には事業所より所轄労働基準監督署へ報告された労働者死傷病報告によった。工事記録より分析可能なデータとして、施工長(延長)、施工月数、総掘進時間、平均岩種など11種の連続変量を変数としてとりあげることが出来、これらの変数の一覧をTable 1に示した。同表で平均岩種とは、国鉄制定の岩分類の分類コードの数値と岩種ごとの施工距離との積和を延長で除して平均化した値で、工区の平均的岩特性を示す数値である。また総掘進時間数は、上記の岩分類においてそれぞれの岩種に対する1m当りの所

Table 1 List of data items collected
データ項目一覧

No.	項 目	単 位 等
1	災 害 数	(人)労働者死傷病報告による
2	死 亡 数	(人)同上
3	延 長	(100m)工区施工距離
4	施 工 月 数	(月)
5	工 費	(億円)
6	掘 進 時 間	(1000hour)
7	平 均 岩 種	$\frac{\sum g_i \cdot l_i}{L}$ 国鉄岩分類 長さ別重み付け
8	支 保 工 建 込 本 数	(100本)
9	支 保 工 建 込 量	(1000本cm)
10	コンクリート打設量	(10000cm ³)厚さ×長さ
11	下盤コンクリート打設量	インバート 2 (100m)りょう盤 1
12	下盤コンクリート敷設割合	(%)延長に対する割合
13	電 力 設 備	(km)最大設備容量
14	掘 削 工 法	1. 底設導坑上部半断面 2. 上部半断面先進工法 3. 側壁導坑上部半断面 4. 混合方式
15	運 搬 シ ス テ ム	1. タイヤ方式 2. レール方式 3. 混合方式
16	坑 口 形 式	1. 普通坑口 2. 斜坑・立坑 3. 横坑 4. 複数坑

要掘進時間数が与えられているので⁷⁾、各岩種の施工距離と所要時間数との積和として求めた。支保工建込数は上半での建込数とし、ロックボルトは10本をもって100H支保工1本に換算した。支保工建込量とは、鋼アーチ支保工の建込本数と、それぞれの断面積の積和である。コンクリート打設量には、コンクリートの各覆工厚とその打設長の積和として求め、下盤打設量はインバートを2、りょう盤を1と重みづけた施工長とし、全延長に対する割合が下盤覆工割合である。電力設備には最大電力容量(kW)を用いた。またカテゴリー変数として、掘削工法(底設導坑先進工法など4分類)、ずりや資材等の運搬システム(タイヤ方式など3分類)、および坑口形式(立坑、斜坑など4分類)の3個の変数を加えた。労働災害の資料は、工区ごとに発生数と死亡数とに分けて集計した。全災害発生数とは別に死亡災害をとりあげたのは、死亡災害は休業災害とは異なり、工事の遅延、作業員の士気の低下など、工事全般にさまざまな影響を与える場合が多いからである。

76工区のそれぞれについて上に述べた変数を調べたのち、工区間の相互の比較を容易にするために、各工区の施工長で残り12個の連続変数を除いてデータを基準化した。基準化のための変数として施工距離を選んだのは、他の工費や施工月数、あるいは掘進時間数などが工事の結果として定まる数値であるのに対し、施工長は変動のない固定された値だからである。

分析に先立ち、まず得られたデータが均質であるか否かの検証のために、12個の基準化された変数を1変数ごとに、3次積率(skewness)及び4次積率(kurtosis)を用いて異常値有無のチェックを行なった。その結果、たとえば海底トンネルでの工区や、施工長が500m未満の短いトンネルを中心に、全部で6工区に外れ値(ある

値がほかの値と比べて著しく大きかったり、あるいは小さかったりする値)と思われる値が検出された。そこでデータの均質化のために、これらと工区を分析の対象から除いた結果、最終的に分析の対象とする工区数は全部で69工区となった。Table 2には基準化された12個の計量変数の基本統計量を示した。表中での4次のモーメント kurtosisは実績値より3が差引かれ、skewnessと同様、正規分布のとき0になるよう標準化されている。

3. 多変量解析法による分析

3.1 変量間の相関関係の分析

一口にトンネル工事と言っても、施工距離、掘削工法、岩種、施工工期など工事に関連した変量は各工区ごとに異なっており、また工事中に発生した労働災害数も工区ごとに大きなばらつきがみられる。これら工事に関連した変量と災害との相互関係、および各工事変量間の相互関係を知るために、69工区での実績値による13変量データ間の相関係数を求めた結果をTable 3に示した。同表より、各変量間の相互関係が知られるが、変量のうち下盤覆工割合と平均岩種が比の形で表わされている他はすべて総量値を示す変量なので、上記の2変数を除くと変量間の相関係数はすべて正となっており、延長一総掘進時間数、延長一工費を始めとして多くの項目との間に強い相関関係がみられる。

施工距離が長くなるに従って災害発生数はもとより、工費、掘進時間数、支保工建込量などの工事変量が増えるのは当然であるが、下盤覆工割合が多くの変量と負相関にあることは興味もたれる。これは施工距離が長くなれば工事変量が増加すると同時に、平均岩種の値も高

Table 2 Fundamental statistics of normalized data

基準化データ基本統計量

	AVERAGE	MINIMUM	MAXIMUM	SIGMA	C.V.(%)	SKEWNESS	KURTOSIS
災害率	12.3531	0.0000	30.6350	6.2786	50.8261	0.7259	0.3356
死亡率	2.7371	0.0000	11.8760	3.2605	119.1209	0.7991	-0.4542
単位工期	16.2752	5.5570	42.5200	7.4226	45.6067	1.2542	1.4181
単価	7.9372	6.2000	11.0620	1.0934	13.7759	1.1510	0.9163
掘進時間	48.2751	40.1910	70.0000	7.5307	15.5996	1.5524	1.5484
平均岩種	2.7880	1.0000	3.7900	0.7444	26.6951	-0.9280	-0.0890
支保工数	80.6514	54.5820	110.7540	12.5300	15.5360	0.4213	-0.2151
建込量	43.0991	7.9230	70.3120	12.1063	28.0896	0.1688	-0.1063
覆工厚	59.0296	50.7890	70.9370	5.7320	9.7104	0.5025	-0.9792
下盤量	52.4064	2.8250	200.0000	44.8147	85.5138	1.2092	1.0263
下盤率	40.8505	2.2000	100.0000	31.9538	78.2213	0.6238	-1.0522
電力	42.0051	16.9230	104.0890	17.1495	40.8272	1.3583	1.8971

Table 3 Correlation matrix of actual data
実績値相関マトリックス

	災害数	死亡数	延長	施工月数	総工費	掘進時間	平均岩種
災害数	1.0000	0.5495	0.6744	0.5197	0.7052	0.6703	0.3717
死亡数	0.5495	1.0000	0.6810	0.5074	0.6482	0.6496	0.3957
延長	0.6744	0.6810	1.0000	0.7356	0.9692	0.9808	0.5292
施工月数	0.5197	0.5074	0.7356	1.0000	0.7377	0.7262	0.4015
総工費	0.7052	0.6482	0.9692	0.7377	1.0000	0.9712	0.4298
掘進時間	0.6703	0.6496	0.9808	0.7262	0.9712	1.0000	0.3783
平均岩種	0.3717	0.3957	0.5292	0.4015	0.4298	0.3783	1.0000
支保工数	0.7146	0.6454	0.9485	0.7392	0.9604	0.9573	0.4068
総建込量	0.6777	0.5228	0.8232	0.6746	0.8642	0.8648	0.2235
総打設量	0.6817	0.6678	0.9868	0.7501	0.9785	0.9906	0.4355
総下盤量	0.3134	0.0578	0.1702	0.2078	0.3178	0.2919	-0.4193
下盤率	-0.2781	-0.4037	-0.4926	-0.3589	-0.3683	-0.3688	-0.8571
電力容量	0.7429	0.4811	0.7399	0.6159	0.8087	0.7442	0.3780
	支保工数	総建込量	総打設量	総下盤量	下盤率	電力容量	
災害数	0.7146	0.6777	0.6817	0.3134	-0.2781	-0.7429	
死亡数	0.6454	0.5228	0.6678	0.0578	-0.4037	-0.4811	
延長	0.9485	0.8232	0.9868	0.1702	-0.4926	0.7399	
施工月数	0.7392	0.6746	0.7501	0.2078	-0.3589	0.6159	
総工費	0.9604	0.8642	0.9785	0.3178	-0.3683	0.8087	
掘進時間	0.9573	0.8648	0.9906	0.2919	-0.3688	0.7442	
平均岩種	0.4068	0.2235	0.4355	-0.4193	-0.8571	0.3780	
支保工数	1.0000	0.9242	0.9675	0.3487	-0.3311	0.7623	
総建込量	0.9242	1.0000	0.8764	0.5480	-0.1025	0.6906	
総打設量	0.9675	0.8764	1.0000	0.2902	-0.3868	0.7441	
総下盤量	0.3487	0.5480	0.2902	1.0000	0.6151	0.3492	
下盤率	-0.3311	-0.1025	-0.3868	0.6151	1.0000	-0.2689	
電力容量	0.7623	0.6906	0.7441	0.3492	-0.2689	1.0000	

くなるので ($\gamma=0.53$), 岩種の値が大きくなるに従い下盤が施工される率が下ったため ($\gamma=-0.86$) とと思われる。

また、基準化されたデータ間での相関係数を求めた結果を Table 4 に示した。データが単位距離当りの値となったので、工事変量間では Table 3 に示されたほどの強い相関関係はみられない。災害に関しては、まず、災害発生率がどの変数ともほぼ無相関に近いこと、および死亡災害発生率が全災害発生率と平均岩種以外の工事変量とはすべて負の相関にあることが特徴としてあげられる。また Table 3 での下盤覆工率に代って Table 4 では平均岩種が多くの変量との負の相関にある。工区の平均的な岩性値を示す平均岩種はこの数値が大きいほど地山性状が良いことを示している。従ってこの値が大きくなれば、距離当りに要する支保工建込数、コンクリート覆工厚などの単位工事量が少なくて済むので負相関になっている。

単位距離当りの工事量が大きくなるほど、あるいは平均岩種の値が小さくなるに従って死亡災害発生率が小さ

くなっているが、これは、平均岩種（地山指標）が低いほど、掘削地山の性状が悪く難工事となる場合が多いので、単位距離当りに要する工事量が増すと同時に、難工事のため工事が慎重かつ安全に進められた（単位工期と岩種が負相関であるように、地山が悪いほど施工速度が遅くなっている）結果を示していると思われる。

また、全体の災害発生率を掘削工法別、あるいは坑口形式別などのカテゴリ変数によって層別化し、その分布形状を調べてみたところ、どのカテゴリ変数で分類しても、項目間での平均値の差の有意性を認めることは出来なかった。(Fig. 1～3)

3.2 主成分分析による情報集約⁸⁾

連続変量として与えられた13個の実績値データ、および基準化された12個の変数を、より少ない次元に情報を集約して解釈を試みるために、実績値、基準化変量とにそれぞれ主成分分析を適用してみた。

Fig. 4, Table 5 は実績値による主成分分析の結果であり、表中の各変量に対応した数値は、各主成分と元の変

Table 4 Correlation matrix of normalized data
基準化データ相関マトリックス

	災害率	死亡率	単位工期	単 価	掘進時間	平均岩種
災害率	1.0000	0.0466	0.0181	0.2162	-0.0703	0.0553
死亡率	0.0466	1.0000	-0.4149	-0.2359	-0.3940	0.3726
単位工期	0.0181	-0.4149	1.0000	0.1203	0.4250	-0.5174
単 価	0.2162	-0.2359	0.1203	1.0000	0.5235	-0.5240
掘進時間	-0.0703	-0.3940	0.4250	0.5235	1.0000	-0.9445
平均岩種	0.0553	0.3726	-0.5174	-0.5240	-0.9445	1.0000
支保工数	0.1625	-0.2768	0.4186	0.6115	0.6244	-0.6903
建込量	0.1190	-0.3754	0.5008	0.5623	0.6937	-0.7697
覆工厚	0.0051	-0.3347	0.4784	0.6093	0.7737	-0.8553
下盤量	0.0199	-0.3873	0.4280	0.6088	0.7340	-0.8072
下盤率	0.0290	-0.3894	0.4982	0.5811	0.7725	-0.8571
電 力	0.2298	-0.2933	0.4489	0.3152	0.3554	-0.3296

	支保工数	建込量	覆工厚	下盤量	下盤率	電 力
災害率	0.1625	0.1190	0.0051	0.0199	0.0290	0.2298
死亡率	0.2768	-0.3754	-0.3347	-0.3873	-0.3894	-0.2933
単位工期	0.4186	0.5008	0.4784	0.4280	0.4982	0.4489
単 価	0.6115	0.5623	0.6093	0.6088	0.5811	0.3152
掘進時間	0.6244	0.6937	0.7737	0.7340	0.7725	0.3554
平均岩種	0.6903	-0.7697	-0.8553	-0.8072	-0.8571	-0.3296
支保工数	1.0000	0.8944	0.7497	0.7205	0.7759	0.3354
建込量	0.8944	1.0000	0.8223	0.8032	0.8638	0.3274
覆工厚	0.7497	0.8223	1.0000	0.8332	0.9031	0.2717
下盤量	0.7205	0.8032	0.8332	1.0000	0.9326	0.3315
下盤率	0.7759	0.8638	0.9031	0.9326	1.0000	0.3258
電 力	0.3354	0.3274	0.2717	0.3315	0.3258	1.0000

数との相関係数を示す因子負荷量であり、また表中での主成分のもとで個々の変数が説明される割合が変数累積寄与率によって示されている。今回の主成分分析では相関係数行列を用いて分析を行ったので、解釈の対象とする主成分は、主成分の分散である固有値が1.0以上の軸と

し、同表より、固有値が1.0以上の主成分は2つあり、その2主成分によって全分散の83%が集められている。第1主成分の特性を調べるために、各変数の因子負荷量を見ると、下盤率が負以下他の変数はすべて正でかつ延長、総工費、掘進時間、支保工数、総建込量、総打設量など

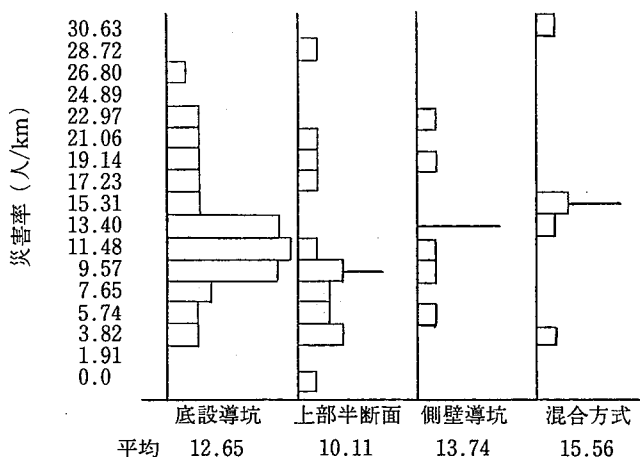


Fig. 1 Distribution of accident frequency rate classified by excavation method
掘削工法別災害発生率分布

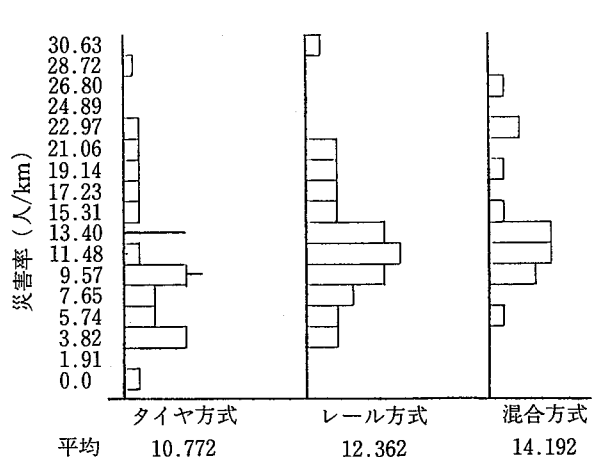


Fig. 2 Distribution of accident frequency rate classified by transportation system
運搬システム別災害発生率分布

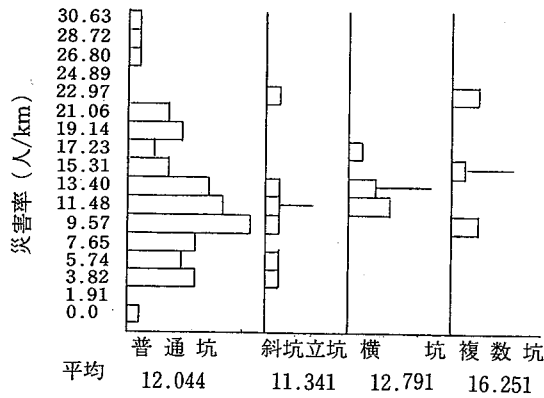


Fig. 3 Distribution of accident frequency rate classified by type of entrance approach
坑口形式別災害発生率分布

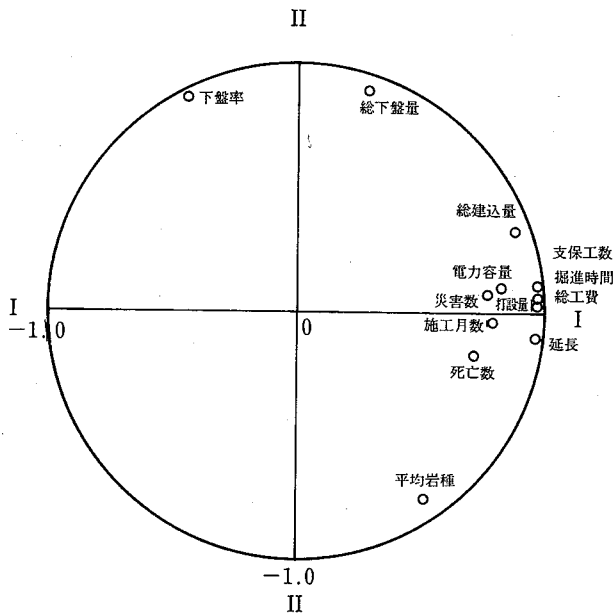


Fig. 4 Factor loading corresponding to the 1st and 2nd principal component by actual data

実績値による主成分分析因子負荷量 (I, II 軸)

が高い相関であることがわかる。これらの変量はいずれも工事全体の量を表わす変量であり、数値が大きいほど工事規模も大きい。従って、この第1主成分軸は、工事の大きさ、規模を示す因子と考えられる。69工区を第1主成分のスコアの順に並べると、これは工事の総合的な大きさの順になっていると思われる。また、第2主成分での係数は正負のものが混じっているが、負の方向で平均岩種が、正方向で総下盤覆工量、下盤率が大きな値を示しており、明らかにこの主成分は地質性状を示す成分と考えることができる。第3以下の主成分は、固有値

Table 5 Principal component analysis by actual data
実績値による主成分分析

主成分	1	2	3	
固有値	8.4313	2.2968	0.5980	変数累積 寄与率
寄与率	0.6486	0.8252	0.8712	
災害数	0.7741	0.0818	0.5073	0.8632
死亡数	0.7110	-0.1620	-0.1666	0.5595
延長	0.9719	-0.0896	-0.1308	0.9697
施工月数	0.7891	-0.0228	-0.1486	0.6453
総工費	0.9762	0.0658	-0.0658	0.9617
掘進時間	0.9644	0.0664	-0.1654	0.9619
平均岩種	0.5072	-0.7503	0.2051	0.8623
支保工数	0.9707	0.1057	-0.0896	0.9615
総建込量	0.8800	0.3389	-0.0558	0.8924
総打設量	0.9763	0.0412	-0.1470	0.9764
総下盤量	0.2848	0.8918	0.1190	0.8905
下盤率	-0.4369	0.8649	-0.0343	0.9401
電力容量	0.8228	0.1119	0.3897	0.8414
備考	工事規模 地質			

が1.0以下であったので解釈の対象とはしなかった。

同じく Fig. 5, Table 6は基準化変量に対して主成分分析を行った結果である。同表より、固有値が1.0以上の主成分は3つあり、その3主成分によって全変動のほぼ8割が説明され、特に第1主成分だけで58%の説明力が

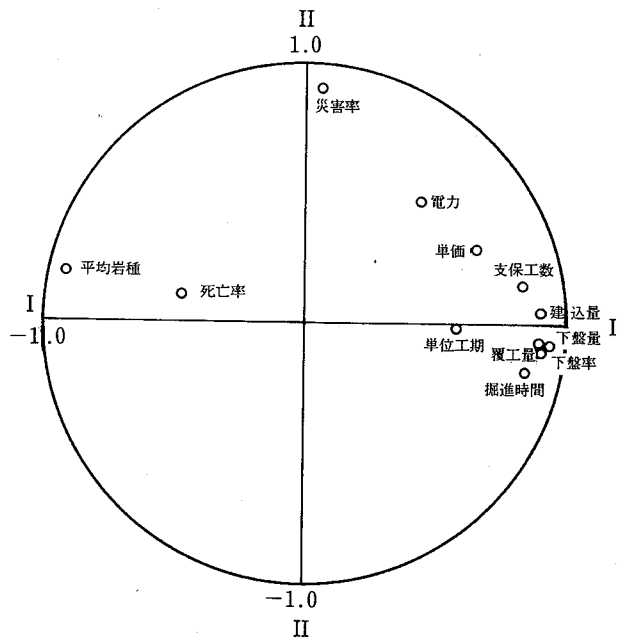


Fig. 5 Factor loading corresponding to the 1st and 2nd principal component by normalized data

基準化変量による主成分分析因子負荷量 (I, II 軸)

Table 6 Principal component analysis by normalized data
基準化変量による主成分分析

主成分	1	2	3	変数累積寄与率
固有値	6.9006	1.2504	1.1700	
寄与率	0.5750	0.6793	0.7767	
災害率	0.0716	0.9006	-0.0927	0.8248
死亡率	-0.4763	0.1043	-0.5513	0.5417
単位工期	0.5811	-0.0110	0.6122	0.7126
単 価	0.6709	0.2931	-0.3474	0.6568
掘進時間	0.8592	-0.1932	-0.0063	0.7757
平均岩種	-0.9148	0.1970	0.0238	0.8762
支保工数	0.8480	0.1513	-0.1823	0.7753
建込量	0.9085	0.0478	-0.0982	0.8372
覆工厚	0.9166	-0.1105	-0.1534	0.8760
下盤量	0.9064	-0.0685	-0.1196	0.8406
下盤率	0.9454	-0.0831	-0.0999	0.9107
電 力	0.4533	0.4662	0.5202	0.6934
備 考	地質・規模 災害			

あった。また、これら3個の主成分のもとでの変数累積寄与率は変数によっても異なるが、最も小さな比率である死亡災害率でも50%以上あることが示されている。

第1主成分の因子負荷量をみると、負方向で平均岩種と死亡災害発生率に関連し、特に平均岩種の相関は高い一方で、他の掘進時間、支保工数、建込量、覆工厚など多くの単位工事変量は正方向で強い相関にあることがわかる。トンネル工事では一般に、掘削地山が悪ければ、単位施工長当りの支保工建込数、覆工量などの工事変量が増え、かつ単位長さに要する施工月数(単位工期)も増加し、掘削地山が良ければこの逆になる傾向があること、および、掘削地山が悪くなれば難工事となる可能性が高いので、慎重に工事を進めることから死亡災害の発生が少なくなる傾向があることを前節で述べたが、主成分分析ではこのことが第1軸に示されている。すなわち第1主成分はトンネルの地質性状とそれに対応した単位当りの工事量・規模を表わす成分とみなされる。一方、第2主成分では全体の災害発生率が強い相関を示しているが、ほかには電力容量を除くとほとんど無相関に近い状態にある。従って第2主成分は災害に関する成分軸と解することが出来る。また災害発生率がほぼ単独で主成分軸を構成しているため、工区間で災害を評価するには、災害発生率による一元的評価が可能と思われる。第3主成分では単位工期、電力が正方向で、また死亡率が負方向で比較的高い相関関係があるほかは特徴的なことはあまり無く、明確な解釈は出来なかった。

また工区ごとに第1および第2主成分の成分得点を求め、その得点を二次元座標(横軸-第1主成分得点、縦軸-第2主成分得点)にプロットすると Fig. 6 を得る。同図に全分散のほぼ2/3が集約されているので、サンプルの散布状態の大まかな傾向は同図でわかる。また、各工区は工事変量、災害特性が以下の内容に即して各象限

- 第1象限：地質悪、単位工事量大、災害発生率高
- 第2象限：地質良、単位工事量小、災害発生率高
- 第3象限：地質良、単位工事量小、災害発生率低
- 第4象限：地質悪、単位工事量大、災害発生率低

に布置している。このうちのいくつかについて(図中の●印の工区)、基本統計量との関係を調べて、工区の特性をより詳しく調べた結果を Table 7 に示した。

3.3 判別分析による死亡災害の分析

全体の災害発生率ほどの工事変量ともほとんど無相関な状態で明確な特徴を見出しえなかった一方で、死亡災害発生率は多くの工事変量と負相関、あるいは主成分第1軸で平均岩種とともに負方向にあることなど、全体の災害発生率とはかなり異なった様相を呈していることがわかった。そこでここでは、判別関数を用いて工事中に死亡災害が発生した工区と、発生しなかった工区とに、2群に分類することを試みた。

判別関数は出来るだけ少数の変数によって構成され、

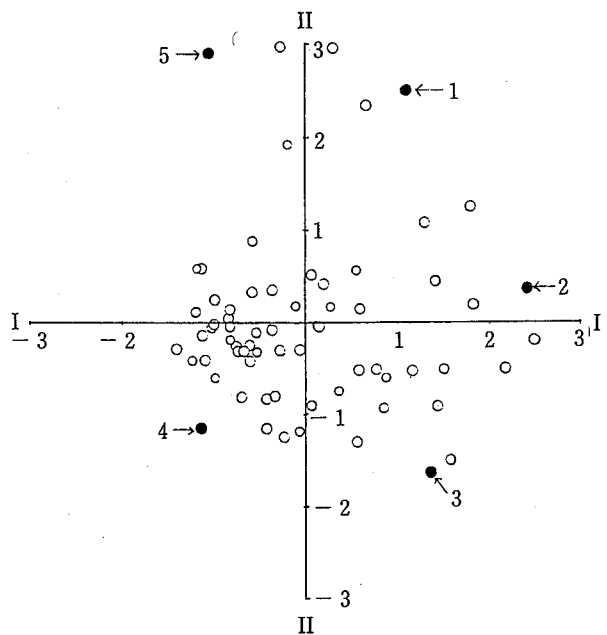


Fig. 6 Scatter diagram of sample scores corresponding to two major principal components
主成分分析主成分得点分布 (I, II軸)

Table 7 Description of the characteristics of variates of construction sites
いくつかの工区の変量特性

工区	特 徴
1	ほぼ平均的な地質のトンネルだが、単位工事量はどれも比較的大きい。災害発生率は6番目に大きい。
2	悪い地質で、どの変量も一様に大きく、特に支保工数、建込量、下盤量など1番、2番の大きさである。災害発生率は平均的値であり、施工速度はやや遅い。
3	あまり良い地質でなく、下盤覆工量や単価が大きな値を示す。災害発生率は2番目に小さい。
4	岩性状はやや良い。支保工数、建込量が少く、施工速度は2番目に速い。災害発生率は5番目に小さい。
5	岩性状は非常に良く、どの工事変量も平均して低く特に掘進時間と覆工厚は2番目に小さい値である。施工速度は平均的であり、災害発生率は1番高い。

かつ出来るだけ判別効率が高く、誤判別となる確率の少ないものが望ましい。判別効率の高い変数を逐次的に選択し、判別確率を調べながらさまざまな変数の組合せの判別関数を求める過程を Table 8 に示した。表中の $D^{**}2$ は2群間のマハラノビス距離、Pro. は正規近似による判別値の誤判別確率⁹⁾、D は判別関数を用いて判別し、誤分類された工区数、J.K. は判別式の良さを検証する Jack-knife¹⁰⁾ によって評価した際の誤分類の工区数である。同表より、選択変数の組合せとしては X_3 、 X_{10} の2変数が適切と思われ、また X_3 のみでもかなり有力な判別関数たりえることがわかる。上記2変数による判別関数と判別基準は以下のとおりである。

$$Z = -3.621 + 0.174X_3 + 0.016X_{10}$$

$Z < 0$: 死亡有り, $Z > 0$: 死亡無し

Table 8 Discriminant analysis (stepwise variable selection)
判別分析における変数選択

変 数	$D^{**}2$	Pro.	D	J.K.
X_3	1.597	26.37	14	14
X_3, X_6	1.875	24.68	15	16
X_3, X_8	1.879	24.65	16	17
X_3, X_9	1.676	25.87	17	17
X_3, X_{10}	1.990	24.03	13	14
X_3, X_{11}	1.881	24.64	13	16
X_3, X_9, X_{10}	2.115	23.36	14	15
X_3, X_5, X_9, X_{10}	2.317	22.33	15	17

X_3 : 単位工期 X_5 : 単位掘進時間 X_6 : 平均岩種
 X_8 : 単位建込量 X_9 : 平均覆工厚 X_{10} : 下盤打設量
 X_{11} : 下盤コンクリート敷設割合

同判別式による誤判別率は13/69 (約19%) であった。同式より、 X_3 : 単位工期 (月/km) が判別に大きく影響し、施工速度が速いほど(単位工期が小さくなる)、死亡有りと判断される確率が高くなり、逆に遅くなると死亡無しと判別されやすくなることがわかる。同様に、 X_{10} (下盤打設量) も多いほど死亡無しと判別されやすくなるが、判別に与える影響は単位工期ほどには大きくない。そこで、 X_3 のみによる判別関数を求めると、

$$Z = -3.232 + 0.203X_3$$

となり、同式より単位工期が、 $X_3 > 16.08$ 月/km であれば、その工区は死亡無しと判別され、同式による誤分類確率は約20%である。いずれの判別関数にせよ、単位工期、あるいは下盤覆工量などが多いほど死亡災害が少なくなる事実は、前節での相関分析や主成分分析で得られた解釈結果(掘削地山の地質性状が悪くなれば、施工速度が遅くなったり単位工事量が増加する一方で、死亡災害の発生が少なくなる)と一致し、これらの判別関数が、これまでの分析結果とも整合性を有していることが示されている。

3.4 重回帰分析による災害発生数の予測

今回抽出した工事変数によって発生した災害数をどの程度予測することが可能であるかを調べるために、重回帰分析を適用してみた。目的変数には各工区の災害発生数、説明変数群には11個の連続変数の実績値、および3個のカテゴリ変数を用いた。実際の重回帰方程式では判別関数と同様に、これらの変数がすべて取り入れられる訳ではなく、説明変数間の相関があまり高くなく、操作や観測がしやすかつ目的変数の変動をよく説明出来る少数の変数が選択されることとなる。

さて前節での主成分分析により、今回取りあげた変数群が、いくつかの主成分によってその変動の大半が説明されることがわかっている。そこでここでは、これらの変数をいくつかの特性の似かよったグループに分けることを目的として、バリマックス法によって変数の分類を行った¹¹⁾。Table 9 は実績値による分析結果であり、表中の数値は各成分軸と変数との間の相関係数である。同表より、今回抽出した変数群は主成分分析と同様に、工事規模、災害、地質などの因子にグループ化出来ることが示されている。そこで、それぞれの変数グループより説明変数として1個ずつ変数を選び出し(同一グループから複数個の変数を選んでも、多重共線性関係が生じて信頼性の低い回帰式となることが多い¹²⁾) それらの変数による重回帰方程式の計算を行った。

Table 9 Factor analysis by direct varimax method
因子分析(バリマックス法)

	STRUCTURE		VECTOR	
	I	II	III	IV
災害数	0.6189	0.7830	0.0237	0.0469
死亡数	0.5780	0.2171	0.2064	0.0434
延長	0.9567	0.0962	0.2362	-0.0203
施工月数	0.7031	0.0946	0.1403	-0.1173
総工費	0.9648	0.1383	0.0907	-0.1068
掘進時間	0.9832	0.0757	0.0845	-0.0170
平均岩種	0.3056	0.2036	0.8382	-0.0907
支保工数	0.9661	0.1435	0.0562	-0.0204
総建込量	0.9033	0.1478	-0.1698	0.0221
総打設量	0.9794	0.0893	0.1123	-0.0089
総下盤量	0.3469	0.1440	-0.8145	-0.1021
下盤率	-0.2699	-0.1113	-0.9326	0.0121
電力容量	0.7129	0.4179	0.0245	-0.5624
備考	規模	災害	地質	電力

算出された重回帰式は、分散分析や重相関係数(寄与率)、あるいは残差分析により式全体の有効性の評価が行われ、また、選択された説明変数についても、偏回帰係数の検定による評価がなされた。さまざまな変数の組合せに対して、重回帰式の導出とその評価が繰返され、そのうちで有効と思われた分析結果を Table 10 に示した。ただし分析の過程で、目的変数(災害発生数)が実績値のままでは誤差の等分散性が保証されないことが残差分析によって明らかとなったので、誤差分散安定化のために実績値に平方根変換を施し、その変換値を新たな目的変数として重回帰式の導出が行われた。

同表に示された4変数での重回帰式によって災害の変動の約2/3が説明され、また、カテゴリ変数では掘削工

法が変数として採択され、かつ分類区分も4区分よりは、上部半断面先進工法とそれ以外の工法の2区分のほうが統計的に有意な分類区分となった。地質関連の変数では平均岩種が採択され、地山が良くなるに従って災害数が増えることは、悪地質であれば死亡災害が少なくなることと軌を一にして興味深い。偏相関係数およびT値より、掘削工法と電力容量が災害に対してほぼ同程度の説明力を有していることがわかるが、電力容量と災害との因果関係を明らかにすることは出来なかった。そこで、電力容量を除き再度重回帰分析を行い、Table 11にその結果を示した。

同表より3変数の場合でも、Table 10とまったく同じ変数が採択され、かつ偏回帰係数の符号にも変化が無いことが示されている。重相関係数は0.81から0.78へと下がったがなお6割ほどの寄与率を示している。また、変数では支保工建込量の説明力が大きな値となっている。これは鋼アーチ支保工の導入により、トンネル工事の労働災害の発生形態が、落盤災害のように大規模偶発型から、落石災害や重量物取扱中の災害などの小規模頻発型へと移行している調査結果¹³⁾と一致している。

要するに、判別分析と同様に、これまでに得られた知見と整合性を有する重回帰分析の結果と思われる。

4. 結語

以上、トンネル工事での労働災害を事例としてとりあげ、多変量解析法により施工条件と労働災害との関連を分析したが、その要点を記すと、

- 1) 実績値による災害発生件数、死亡数は多くの工事

Table 10 Multiple regression analysis by 4 selected variables
重回帰分析分析結果(4変数選択)

変数	偏回帰係数	T 値	偏相関係数	標準偏回帰係数	単相関係数
平均岩種	0.4609	2.2802*	0.2741	0.1816	0.4305
アーチ建込量	0.0126	2.5216*	0.3006	0.2763	0.6866
電力設備	0.1473	3.2729**	0.3787	0.3493	0.6921
工法：底設等	0.2810	3.270**	0.3784		0.5461
上半	-0.9310				
常数項	1.5162				
重相関係数	0.8116	* 5% 有意			
寄与率	0.6587	** 1% 有意			

Table 11 Multiple regression analysis by 3 selected variables
重回帰分析結果(3変数選択)

変数	偏回帰係数	T 値	偏相関係数	標準偏回帰係数	単相関係数
平均岩種	0.6745	3.2888**	0.3777	0.2658	0.4305
アーチ建込量	0.0231	5.6604**	0.5746	0.5078	0.6866
工法：底設等	0.2610	2.841**	0.3324		0.5461
上 半	-0.8650				
常数項	1.2259	** 1% 有意			
重相関係数	0.7756				
寄与率	0.6016				

変量と正相関にあるが、施工距離で基準化した災害発生率は、カテゴリー変数を始め多くの変量と相関関係がみられなかった。一方死亡災害発生率は、地山が悪く、距離当りの工事量が多く、施工速度が遅いなど、難工事であるほど低くなるという興味ある結果を示した。

2) 主成分分析によれば、実績値では工事規模成分、地質成分の2成分に情報が集約出来ること、また基準化変量では地質・規模成分、災害成分で全変動の7割が説明されることがわかった。災害発生率はほぼ単独で主成分軸を形成しているので、災害については、発生率による一元的評価が可能であり、他の変量とは無相関なので、発生数で評価する場合には、ポアソン分布を適用することが出来ると思われる。

3) 単位工期や下盤覆工量などの変数を用いて、死亡災害発生有無について比較的高い確率で判別分類を行うことが出来、また判別関数に選択された変数やその符号についても、相関分析や主成分分析での分析結果と一致している。

4) 平均岩種や支保工建込量、掘削工法などの変数を用いて、災害数を目的変数とする重回帰式が求められ、式の解釈についても判別分析と同様に、これまでの分析結果と整合性をもって説明することが出来た。

あとがき

工事中発生した災害の特性をいくつか見出すことが出来たが、今回対象としたトンネル工事は、新幹線工事という大規模なものであることや、また施工法も鋼アーチ支保工建込、コンクリート覆工という伝統的な工法が主体となっている。従って、中小トンネルや、また最近急

速に普及しつつあるロックボルト建込、コンクリート吹付による、広く NATM 工法と呼ばれる工法については触れていない。これらのトンネルについても、今後データを積み重ねて分析を進めてゆきたいと考えている。

最後に、本研究を進めるに当っては、多変量解析法の修得のための総務庁統計研修所での講習が大いに役立ちました。また、実際の分析には、芳賀敏郎慶応義塾大学病院・病院情報システム部長が開発された会話型多変量解析用プログラムを利用させて頂きました。更に、大橋靖雄東京大学医学部講師から有益な御助言を頂いたほか、松原望筑波大学社会工学系助教授からも貴重なコメントを頂きました。また資料整理に当っては阿部真和君の助力を得ました。ここにこれらの関係各位に対して、厚く感謝の意を表する次第です。

(昭和61年2月3日受理)

参考文献

- 1) 産業安全年鑑(昭和59年版)、中央労働災害防止協会刊、pp. 147~179, 1984
- 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)、労働省産業安全研究所技術資料、RIIS-TN-75-8, 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)、労働省産業安全研究所技術資料、IISR-TN-75-8, 1976
- 4) 前 郁夫・花安繁郎・堀井宣幸：トンネル建設工事における労働災害の分析(3)、労働省産業安全研究所研究報告、RIIS-RR-27-1, 1978
- 5) 鈴木芳美：CTAを用いた災害分析法について、労

働省産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-83-5, 1984

- 6) 山陽新幹線岡山・博多間工事誌, 日本国有鉄道新幹線建設局, 昭和52年3月
- 7) 斎藤 徹: 鉄道技術研究報告, No. 965(設備編第435号), 鉄道技術研究所, 1975
- 8) 奥野忠一ほか: 多変量解析法(改訂版), 日科技連, pp. 159~226, 1981
- 9) 奥野忠一ほか: 続多変量解析法, 日科技連, pp. 77~80, 1976
- 10) M.G. ケンドール(奥野忠一・大橋靖雄共訳): 多変量解析培風館, pp. 247, 1981
- 11) 芝 祐順: 行動科学における相関分析法, 東京大学出版会, pp. 131~149, 1972
- 12) S. チャタジー・B. プライス(佐和隆光・加納悟共訳): 回帰分析の実際, 新曜社, pp. 158~192, 1983
- 13) 前 郁夫・花安繁郎: トンネル工事における労働災害の動向, 労働省産業安全研究所技術資料, RIIS-TN-74-6, 1975