

## 岩盤物性のデータベース化とその利用

今津 雅紀  
(大崎研究室)

### § 1 はじめに

土木構造物、とりわけ大規模な地下空間(岩盤構造物)を設計施工する際には、調査の段階で数多くの室内岩石試験や原位置試験が行なわれている。しかし、これらの試験結果は当初の目的を果たした後、各関係機関や調査会社に散在し、有効に利用されている場合は少ない。一方、近年になって地下空間をインフラストラクチャーの充実からの利用ばかりでなく、多様な用途に利用しようとするケースが増えてきている。現在有望なものとしては超電導エネルギー貯蔵施設、圧縮空気貯蔵発電施設、石油類地下貯蔵施設、熱水地下貯蔵施設、地下(冷凍、低温、情報)倉庫、高レベル放射性廃棄物処分施設などが挙げられる。なかでも、石油類地下貯蔵施設はすでに実証済<sup>1)</sup>である。このような施設を考える場合、概念設計が行なわれるのが普通であるが、岩盤物性に関する情報は周辺岩盤の岩種あるいは硬軟の別は与えられても、その物性までは与えられない場合が多い。そこで、過去に得られた岩盤物性をデータベース化し、地下空間設計に対する本格的な地盤調査および室内試験、原位置試験が行なわれるまでの、概念設計に対する基礎資料として岩盤物性が提供されることが望まれる。

技術分野におけるデータベースとしては、日本科学技術情報センター(JICST)のオンライン情報検索システムのほかに、成岡による有限要素法文献収集およびそのデータバンクの作成などがある<sup>2)</sup>。

地盤工学においても、地盤情報の管理を合理的に行ない情報の利用度を高め、より有効な情報を引き出すために各所でボーリング柱状図のデータベース化がなされ、地層の地盤特性を検索する方法が検討されている<sup>3)-13)</sup>。幾志らは、東京大田区や川崎を中心としたボーリングデータのデータベース化によって、任意断面での地図、柱状図、土質断面図、等N値深度分布図、流動化砂層分布図を出力するシステムを作成している<sup>3)-5)</sup>。他地区においても、名古屋市内<sup>6)</sup>、渥美半島<sup>7)</sup>、佐賀平野<sup>8)-9)</sup>のボー

リングデータを中心とした地盤のデータベース化が試みられている。また、秋田地盤のデータベースを用いて液状化判定に用いている例<sup>10)</sup>もある。港湾技研<sup>11)</sup>では、港湾、空港諸施設の建設地点のデータベースシステムを開発している。国鉄<sup>12)</sup>では、NATMにより建設された新設トンネルの地山条件、設計・施工・計測データのデータベースを作成して活用を図っている。

ここで、データベースとデータバンクの定義を明確にしておく、データベースとは広い分野、大きな分野をカバーするものを一般に示し、データバンクはある特定の項目についての情報を集積したものを示す。つまり、データベースのような大規模のものは大きな組織でなければできないが、データバンクの作成は少人数の協力によって行なうことができるとしている<sup>13)</sup>。

このような背景にかんがみ、本研究は岩盤物性のデータベース化を行ない、このデータベースを用いて岩盤物性相互間の関係を明らかにし、概念設計の際に用いる岩盤物性を提供することを目的としている。さらに、このデータベースから得られた物性間の関係を用いて、岩盤の弾性係数とNATMトンネルで計測された内空変位から得られる弾性係数を比較検討することによって、岩石試験結果からNATMトンネルの設計管理値である内空変位をほぼ推定できることを示した。ただし、あくまでも設計定数としての岩盤物性を得ることが目的のため、本報でのデータベース化は検索機能は設けず、検索を要すると考えられる各岩種の岩石・岩盤物性の頻度分布および各サイトごとの岩盤物性に関しては、データシートの形式で保存されている。

### § 2. 岩盤物性のデータベース化

データベースを構成しているデータバンクの基礎データとしては、ダム基礎を中心とした世界各地の岩石物性や岩盤物性、および日本国内における大規模地下発電所

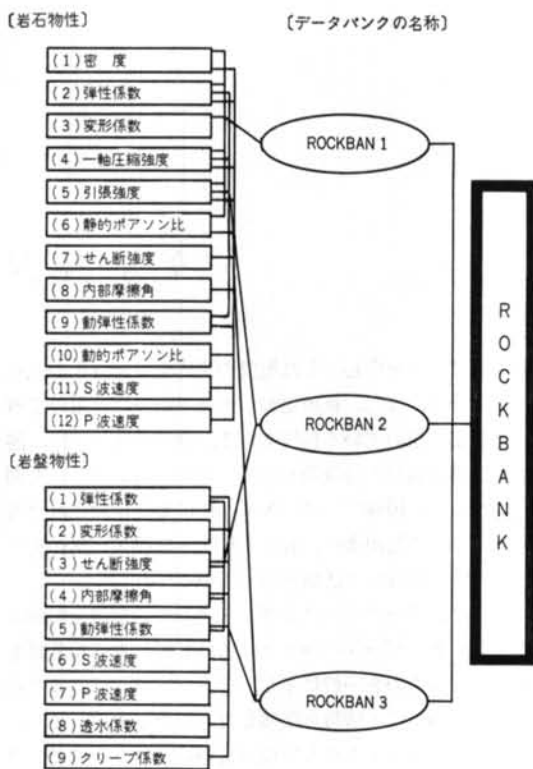


図-1 データベース ROCKBANK の構成  
 や原子力発電所, NATM で施工されたトンネルなどの岩盤構造物で得られた岩石物性や岩盤物性である。その構成, およびデータバンク化した物性とデータベース「ROCKBANK」との関係を示したものが, 図-1である。岩石物性, 岩盤物性, 岩盤構造物の岩盤物性のデータバンク名は, 各々「ROCKBAN1」, 「ROCKBAN2」, 「ROCKBAN3」とする。  
 ここで, 言葉の定義を明確にしておく以下のように

ある。室内岩石試験で得られた物性に対しては岩石物性とし, それに対比して原位置試験で得られた物性に対しては狭義の岩盤物性とする。また, 岩石物性および岩盤物性を総称して広義の岩盤物性ということとする。すなわち, 「ROCKBAN1」において岩石物性を, 「ROCKBAN2」, 「ROCKBAN3」においては室内岩石試験で得られた岩石物性および原位置試験で得られた岩盤物性双方を含む岩盤物性をデータバンク化したものとする。ただし, ここでいうデータバンクとは, 岩石物性や岩盤物性についての特性把握に関する研究を目的としたものであり, データの蓄積と検索を目的としたシステム, すなわちすでに各所で作成されているボーリング柱状図等のデータベース<sup>10)</sup>とは異なるシステムである。

## 2.1 岩石物性のデータバンク「ROCKBAN1」<sup>10)</sup>

現在までに調べ上げられた岩石の物性をデータバンク化し, その岩石特性を把握することを目的として, 代表的岩種の岩石物性, すなわち(a)密度, (b)弾性係数, (c)変形係数, (d)ポアソン比, (e)一軸圧縮強度, (f)引張強度のおおのの頻度分布, および物性相互間の相関を調べたものである。

### 2.1.1 データバンクの仕様

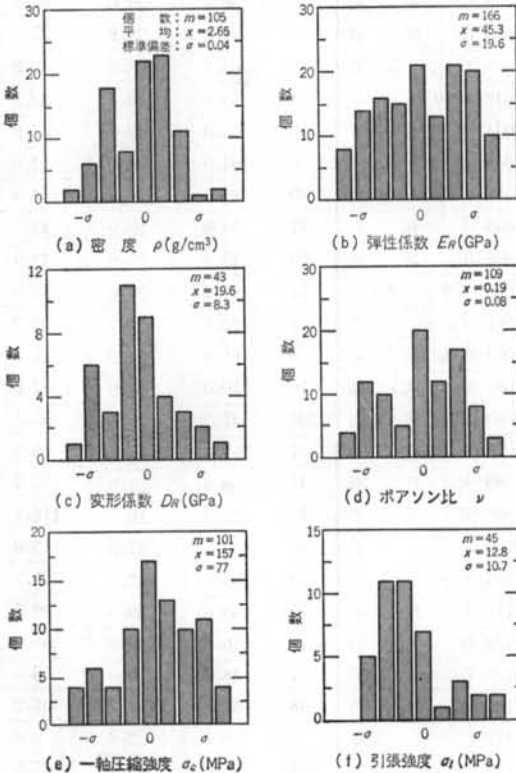
データバンク「ROCKBAN1」の基礎データは, R.D. Lamaら<sup>17)</sup>が調べた室内岩石試験結果とする。これは, 世界各地の岩石物性について収集したものである。データバンク「ROCKBAN1」には, 図-2に示す1試料10項目を1枚のデータファイルとして編集する。入力単位はSI単位とし, データそのものから換算することなしにチェックできるよう, また今回の目的が研究であるということから考え合わせてコード化は極力避け, 「岩石の種類」および「国名」については, そのまま英名で入力することとする。また, データバンクの基礎となる室

データ	岩種	国名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	弾性係数 (GPa)	変形係数 (GPa)	ポアソン 比	一軸圧縮 強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	備考
L-667	GRANITE	USSR		66.69		0.24	294.2		P=7.2
L-668	GRANITE	USSR		62.76		0.22	267.0		P=6.6
L-669	GRANITE	USSR		62.76		0.24	235.4		P=7.2
L-670	GRANITE	USSR		46.09		0.23	209.4		P=7.3
L-671	GRANITE	USA	2.72	66.88		0.32	227.5	13.1	
L-672	GRANITE	USA	2.62	14.79	9.45	0.24	203.1	22.8	
L-673	GRANITE	USA	2.64	34.47		0.19			

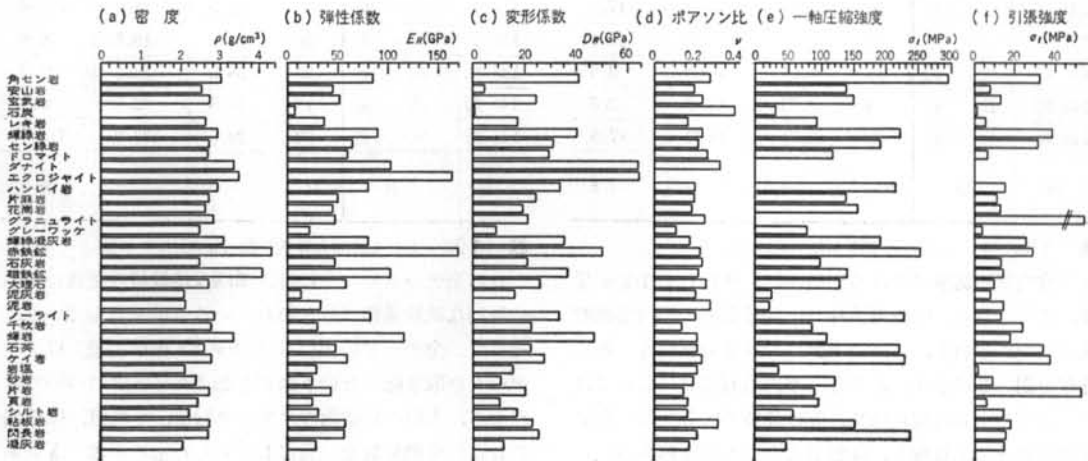
図-2 ROCKBAN1におけるデータフォーマット例

内岩石試験結果が明らかな誤りと考えられる場合、たとえばポアソン比が0.5以上の場合などはデータなしとして登録する。ここで、全体のシステムについて呼ぶときはデータバンクとし、一つ一つを構成する要素についてはデータファイルと呼ぶことにする。

「ROCKBAN 1」においてデータバンク化したデータ



図一三 岩石物性の頻度分布 (花崗岩)



図一四 ROCKBAN 1 における各岩種の岩石物性平均値

は148岩種、2,143試料に及んだが、試験条件が様々であることや一定地域のデータが多いなど、データに片寄りがあることにも注意しておかねばならない。

### 2.1.2 岩石物性の頻度分布

データファイル化した148種の岩石のうち、比較的試料数の多い主な岩石36種を選んで、各々の岩石物性すなわち(1)密度、(2)弾性係数、(3)変形係数、(4)ポアソン比、(5)一軸圧縮強度、(6)引張強度に関する頻度分布を調べた。一例として、図一三に花崗岩の例を示しておく。各岩石物性の平均値については、岩石相互の比較をするため図一四に示しておく。また、密度および弾性係数についての各岩石におけるデータ個数、平均値、標準偏差および変動係数を、表一に示す。変動係数のばらつきが大きい要因は、岩種の地域的特質や供試体の大きさ、状態の違い、および物性を測定する際の方法や測定機器の相違によるものと考えられる。密度については変動係数が1桁と小さく、同一岩種でばらつきも小さい。

## 2.2 岩盤物性のデータバンク「ROCKBAN 2」<sup>18)</sup>

### 2.2.1 データバンクの仕様

データバンク「ROCKBAN 2」の基礎データは、R.D. Lama ら<sup>19)</sup>が調べたダムサイトを中心とした世界各地の原位置岩盤試験結果、および室内岩石試験結果とする。データバンクは、表二に示す1試料19項目についてのデータファイルとして編集されている。

今回、データバンク化したデータは261サイト939試料におよんだが、仕様等は「ROCKBAN 1」と同様である。

### 2.2.2 岩盤物性の頻度分布

データファイル化した261サイトの原位置岩盤試験お

No	岩種	個数	平均値	標準偏差	変動係数(%)
007	角セシ岩	12	3.05	0.06	2.0
008	安山岩	10	2.55	0.19	7.5
014	玄武岩	40	2.75	0.16	5.8
032	石炭	0	—	—	—
033	レキ岩	5	2.64	0.13	4.5
036	輝緑岩	26	2.95	0.11	3.7
039	セシ緑岩	18	2.76	0.24	8.7
042	ドロマイト	16	2.72	0.16	5.9
044	ダナイト	5	3.39	0.21	6.2
045	エクロジャイト	10	3.50	0.06	1.7
050	ハンレイ岩	21	2.99	0.11	3.7
053	片麻岩	58	2.74	0.17	6.2
056	花崗岩	105	2.65	0.04	1.5
060	グラニュライト	6	2.86	0.35	12.2
061	グレーワッケ	15	2.52	0.11	4.4
062	輝緑凝灰岩	7	3.11	0.14	4.5
067	赤鉄鉱	13	4.34	0.46	10.6
083	石灰岩	134	2.50	0.32	12.8
088	磁鉄鉱	8	4.10	0.58	14.1
089	大理石	36	2.74	0.08	2.9
091	泥灰岩	21	2.14	0.19	8.9
100	泥岩	51	2.15	0.22	10.2
105	ノーライト	3	2.90	0.07	2.4
114	千枚岩	9	3.81	0.44	15.7
122	輝岩	13	3.36	0.43	12.8
123	石英	5	2.63	0.13	4.9
124	ケイ岩	23	2.80	0.36	12.9
127	岩塩	1	2.16	—	—
128	砂岩	155	2.44	0.26	10.7
129	片岩	24	2.74	0.09	3.3
133	頁岩	30	2.46	0.44	17.9
137	シルト岩	51	2.25	0.34	15.1
138	粘板岩	15	2.77	0.10	3.6
140	閃長岩	8	2.73	0.07	2.6
146	凝灰岩	20	2.11	0.37	17.5
総計		974	—	—	7.8

表一1(a) 主たる岩石の密度  $\rho(\text{g/cm}^3)$  一覧

よび室内岩石試験における岩盤物性, すなわち(1)変形係数, (2)弾性係数, (3)動弾性係数, (4)粘着力, (5)内部摩擦角について検討し, 各々の試験における岩盤物性の頻度分布を図一5に示す。ただし, 室内岩石試験においてはデータそのものに変形係数, 弾性係数の区分がないため弾性係数として処理し, (4)粘着力と(5)内部摩擦角の代わりに, (4)引張強度および(5)一軸圧縮強度が示してある。

No	岩種	個数	平均値	標準偏差	変動係数(%)
007	角セシ岩	12	85.0	35.3	41.5
008	安山岩	13	45.3	23.5	51.9
014	玄武岩	51	52.6	22.0	41.8
032	石炭	21	7.3	12.0	164.8
033	レキ岩	12	36.6	29.6	80.9
036	輝緑岩	37	89.4	24.8	27.7
039	セシ緑岩	21	65.7	28.2	42.9
042	ドロマイト	35	59.5	23.4	39.3
044	ダナイト	13	103.0	49.0	47.6
045	エクロジャイト	6	164.0	36.0	22.0
050	ハンレイ岩	30	81.3	26.3	32.3
053	片麻岩	71	50.3	23.5	46.7
056	花崗岩	166	45.3	19.6	43.3
060	グラニュライト	11	47.2	33.6	47.9
061	グレーワッケ	24	22.1	20.7	93.7
062	輝緑凝灰岩	8	81.4	17.3	21.3
067	赤鉄鉱	10	170.0	132.0	77.6
083	石灰岩	232	47.2	26.0	55.1
088	磁鉄鉱	7	103.0	57.0	55.3
089	大理石	44	58.8	21.0	35.7
091	泥灰岩	14	14.2	16.2	114.1
100	泥岩	10	33.1	37.6	113.6
105	ノーライト	12	83.0	17.7	21.3
114	千枚岩	15	30.6	30.5	99.7
122	輝岩	13	116.0	49.0	42.2
123	石英	7	48.3	28.0	58.0
124	ケイ岩	48	59.8	27.0	45.2
127	岩塩	5	28.7	2.8	9.8
128	砂岩	184	25.6	19.7	77.0
129	片岩	36	43.3	24.7	57.0
133	頁岩	73	25.0	21.9	87.6
137	シルト岩	26	31.2	18.6	59.6
138	粘板岩	20	58.5	24.1	41.2
140	閃長岩	13	56.8	22.6	39.8
146	凝灰岩	32	29.5	33.2	112.5
総計		1,332	—	—	58.5

表一1(b) 主たる岩石の弾性係数  $E_R(\text{GPa})$  一覧

これら全データのなかには, 極端な地域特性を含むものや特別な試験条件で行なわれているものを含んでいる。そこで, 全データの中から  $\pm 2 \cdot \sigma (2 \times \text{標準偏差})$  以上のデータを取り除くという修正を加えたデータについて検討する。上記の岩盤物性のデータ個数, 平均値, 標準偏差および変動係数を一覧にして示したものが表一3である。これらの頻度分布や一覧表から一概には傾向を述べ

	データファイル項目	データ名
ディスクリプション	① データベース種別(F-)	SEC
	② データ番号	NUM
	③ サイト名	SITE
	④ 国名	NAT
	⑤ 岩石の種類	ROK
	⑥ タイプ	TYPE
岩石物性	⑦-① 変形or弾性係数, MPa	AELE
	⑦-② 動弾性係数, MPa	ADEL
	⑦-③ 引張強度, MPa	ATEN
	⑦-④ 一軸圧縮強度, MPa	ACOM
岩盤物性	⑧-① 圧力, bars	FPOR
	⑧-② 変形係数, MPa	FRIG
性	⑧-③ 弾性係数, MPa	FELE
	⑧-④ 動弾性係数, MPa	FDEL
	⑧-⑤ 粘着力, MPa	FCOH
	⑧-⑥ 内部摩擦角, °	FPHI
	⑧-⑦ 備考	FRMK
	⑧-⑧ 参考文献	REFA
	⑧-⑨ 年号	LYER

表-2 ROCKBAN 2におけるデータファイル項目

ることにはできないが、全データの場合、どのデータもばらつきが大きく、地域依存性をもつ極端に大きな岩盤物性値の影響が大きく、修正したデータより大きな値を示している。ただし、ここで取り上げられている岩盤物性は世界各地で得られたものであり、割れ目が発達し脆弱な岩盤が多い日本のサイトに、そのまま適用できるものではないことは認識しておく必要がある。

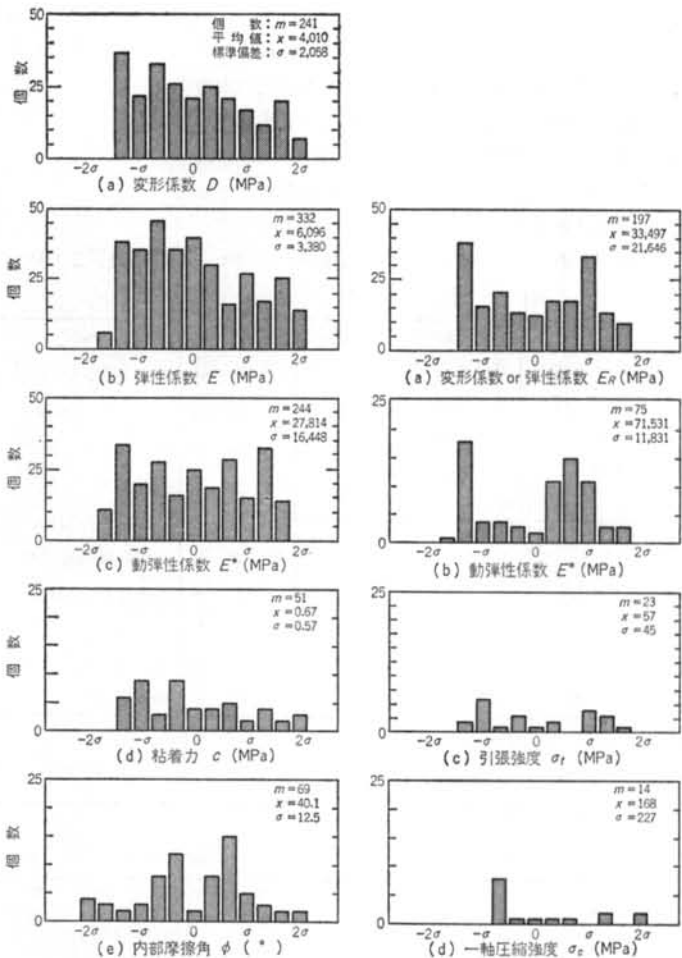


図-5 岩盤物性の頻度分布

		個 数		平 均 値		標 準 偏 差		変 動 係 数 (%)	
		全データ	修 正 済	全データ	修 正 済	全データ	修 正 済	全データ	修 正 済
岩石物性	弾性係数 $E_R$ (MPa)	205	197	34,347	33,497	23,239	21,646	67.7	64.6
	動弾性係数 $E_R^*$ (MPa)	105	75	58,868	71,531	27,715	11,831	47.1	16.5
	引張強度 $\sigma_t$ (MPa)	26	23	2,231	57	8,041	45	360.4	78.9
	一軸圧縮強度 $\sigma_c$ (MPa)	15	14	211	168	273	227	129.4	135.1
岩盤物性	変形係数 $D$ (MPa)	432	241	10,285	4,010	13,831	2,058	134.5	51.3
	弾性係数 $E$ (MPa)	600	332	16,155	6,096	19,412	3,380	120.2	55.4
	動弾性係数 $E^*$ (MPa)	284	244	31,398	27,814	21,071	16,448	67.1	59.1
	粘着力 $c$ (MPa)	66	51	3.80	0.67	10.87	0.57	286.1	85.1
	内部摩擦角 $\phi$ (°)	71	69	40.1	40.1	13.4	12.5	33.4	31.2

表-3 ROCKBAN 2における岩盤物性一覧

### 2.3 岩盤構造物における岩盤物性のデータバンク

「ROCKBAN 3」<sup>20)</sup>

#### 2.3.1 データバンクの仕様

「ROCKBAN 3」におけるデータバンクの基礎データは、これまでに既往文献に発表された日本国内の大規模地下発電所（略称：CAVN）<sup>21)</sup>、原子力発電所基礎（略称：GNPT）<sup>22)</sup>、NATMで施工されたトンネル（略称：NATM）<sup>23)</sup>などで得られた室内岩石試験結果および原位置岩盤試験結果とする。データバンクを構成するデータファイルは、表-4に示す32項目から成り、そのサイト数およびデータ数は表-5に示すとおりである。

#### 2.3.2 岩盤構造物における岩盤物性一覧

データバンク化した岩盤構造物における岩石物性と岩盤物性のデータ個数、平均値、標準偏差および変動係数を一覧に示したものが表-6である。

	サイト数	データ数
CAVN	44	65
GNPT	24	26
NATM	56	87

表-5 ROCKBAN 3 に登録したデータソース数

種別	①	データ種別(U-, G-, N-)	⑧-①	密度, g/cm <sup>3</sup>	⑨-①	P波速度, km/sec	
							②
別	③	データ番号	⑧-③	S波速度, km/sec	⑨-③	動弾性係数, MPa	
	④	サイト名	⑧-④	動弾性係数, MPa	⑨-④	せん断強度, MPa	
	⑤	国名	⑧-⑤	動的ポアソン比	⑨-⑤	内部摩擦角, °	
	⑥	岩石の種類	⑧-⑥	引張強度, MPa	⑨-⑥	弾性係数, MPa	
	ディ ス ク リ プ シ ョ ン	⑦-①	岩盤構造物区分	⑧-⑦	一軸圧縮強度, MPa	⑨-⑦	透水係数, cm/sec
		⑦-②	トンネルの高さ, m	⑧-⑧	弾性係数, MPa	⑨-⑧	クリープ係数 $\alpha$
⑦-③		トンネルの幅, m	⑧-⑨	静的ポアソン比	⑨-⑨	クリープ係数 $\beta$ , 1/day	
⑦-④		トンネルの長さ, m	⑧-⑩	せん断強度, MPa			
⑦-⑤		計測位置の土被り, m	⑧-⑪	内部摩擦角, °			
⑦-⑥		NATM 区分	⑧-⑫				

表-4 ROCKBAN 3 におけるデータファイル項目

調査項目	岩盤構造物全体				CAVN				GNPT				NATM			
	個数	平均値	標準偏差	変動係数 (%)	個数	平均値	標準偏差	変動係数 (%)	個数	平均値	標準偏差	変動係数 (%)	個数	平均値	標準偏差	変動係数 (%)
密度, g/cm <sup>3</sup>	95	2.28	0.35	15.4	23	2.49	0.23	9.2	18	2.21	0.39	17.6	54	2.21	0.35	15.8
P波速度, km/sec	38	3.24	1.58	48.8	0	—	—	—	13	3.06	1.58	51.6	25	3.33	1.61	48.3
S波速度, km/sec	28	1.67	0.89	53.3	0	—	—	—	11	1.41	1.03	73.0	17	1.85	0.77	41.6
動弾性係数, MPa	22	27,415	19,591	71.5	0	—	—	—	12	24,217	21,789	90.0	10	31,253	16,892	54.0
動的ポアソン比	22	0.33	0.07	21.2	0	—	—	—	14	0.34	0.08	23.5	8	0.30	0.05	16.7
引張強度, MPa	61	4.00	5.07	126.8	25	2.01	4.19	208.5	13	3.94	4.12	104.6	23	6.19	5.68	91.8
一軸圧縮強度, MPa	83	52.2	63.2	121.1	11	120.1	54.8	45.6	18	40.3	50.6	125.6	54	42.3	60.7	143.5
弾性係数, MPa	63	25,428	86,320	339.5	6	145,502	244,930	168.3	8	24,568	24,815	101.0	47	10,282	35,869	348.9
静的ポアソン比	81	0.30	0.08	26.7	30	0.27	0.06	22.2	9	0.28	0.09	32.1	42	0.33	0.08	24.2
せん断強度, MPa	57	2.48	4.25	171.4	0	—	—	—	12	5.96	7.09	119.0	45	1.55	2.49	160.6
内部摩擦角, °	55	27.1	17.1	63.1	0	—	—	—	12	24.4	23.2	95.1	43	27.9	15.3	54.8
P波速度, km/sec	41	3.25	1.18	36.3	0	—	—	—	20	3.01	1.26	41.9	21	3.48	1.09	31.3
S波速度, km/sec	20	1.34	0.68	50.7	0	—	—	—	19	1.35	0.70	51.9	1	1.20	—	—
動弾性係数, MPa	13	18,360	17,041	92.8	0	—	—	—	13	18,360	17,041	92.8	0	—	—	—
せん断強度, MPa	51	1.94	2.53	130.4	38	1.91	1.85	96.9	13	2.03	4.02	198.0	0	—	—	—
内部摩擦角, °	35	46.2	9.1	19.7	22	47.4	9.0	19.0	13	44.2	9.1	20.6	0	—	—	—
弾性係数, MPa	58	6,830	7,106	104.0	41	8,974	7,420	82.7	14	2,005	1,333	66.5	3	35.8	39.8	111.2
透水係数, cm/sec	28	0.0013	0.0052	400.0	12	0.00001	0.00001	100.0	6	0.00002	0.00007	350.0	10	0.00368	0.00838	227.7
クリープ係数 $\alpha$	33	0.438	0.301	68.7	33	0.438	0.301	68.7	0	—	—	—	0	—	—	—
クリープ係数 $\beta$ , 1/day	33	2.55	5.97	234.1	33	2.55	5.97	234.1	0	—	—	—	0	—	—	—

表-6 ROCKBAN 3 における岩盤物性一覧

### § 3. データベースを用いた岩盤評価

#### 3.1 データベースによる岩盤物性相互間の関係

ここでは「ROCKBANK」のうち、「ROCKBAN 1」と「ROCKBAN 2」から得られる岩石物性および岩盤物性相互間の相関関係について明らかにする。

##### 3.1.1 岩石物性間の関係

ここでは、一軸圧縮強度を指標として種々の物性との比較を行なう。一軸圧縮強度に対する弾性係数やポアソン比、および引張強度との比較をしたものが図-6であ

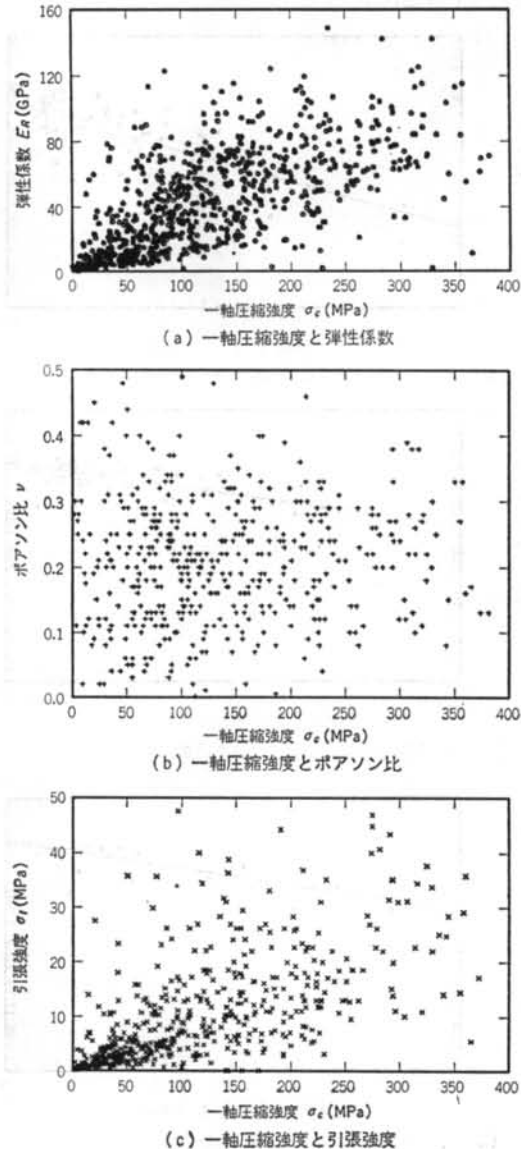


図-6 一軸圧縮強度に対する岩石物性

る。ポアソン比を除いて、他の物性は一軸圧縮強度と相関があると考えられるので、一軸圧縮強度で除した各々の値の頻度分布を調べてみる。弾性係数と引張強度の例が図-7である。これは全データを表わしたものであるから、極端な地域特性を含むものや特殊な岩石、すなわち磁鉄鉱や赤鉄鉱などを含んでいる。(密度/一軸圧縮強度)と一軸圧縮強度に関しては明らかな相関関係が認められるので、 $y = \rho/\sigma_c$ ,  $x = \sigma_c$  とおいて、関係式を式(1)と推定する。

$$y = \frac{c}{x} + d \quad \dots\dots(1)$$

ここで、最小二乗法を用いて630試料のデータを代入すると  $c=2.40$ ,  $d=0.00179$  となる(図-8)。ゆえに、一軸圧縮強度と密度の関係は下式のようなになる。

$$\frac{\rho}{\sigma_c} = \frac{2.40}{\sigma_c} + 0.00179 \quad \dots\dots(2)$$

$$\rho = 2.40 + 0.00179 \cdot \sigma_c \quad \dots\dots(3)$$

以上のことより、一軸圧縮強度  $\sigma_c$ (MPa) をパラメータとして、密度については式(3)、他の物性については一

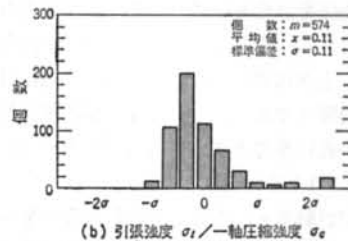
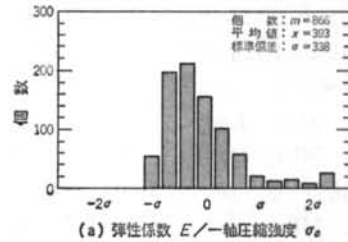


図-7 一軸圧縮強度に対する岩石物性の頻度分布

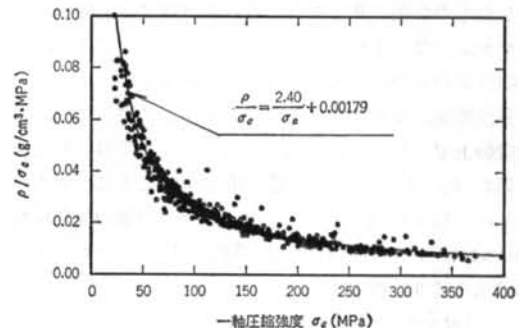


図-8 一軸圧縮強度と密度の関係

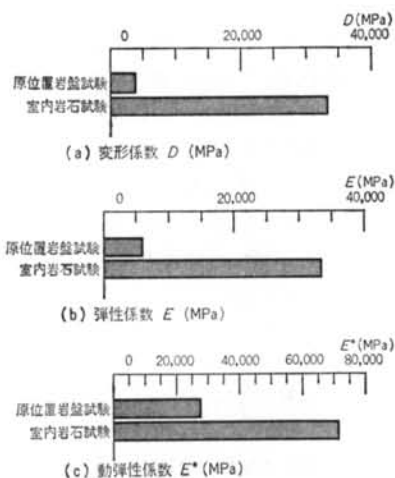


図-9 岩石物性と岩盤物性の比較

軸圧縮強度で除したものの頻度分布から、以下のような関係式を提案できる。密度に関しては相関性がよいためばらつきを考慮せず、ポアソン比については一軸圧縮強度に関わりなく(平均値±標準偏差)で考えることとする。ただし、算出に当たって極端な値を取り除くため、 $\pm 2 \cdot \sigma (2 \times \text{標準偏差})$  以上の値を除外してある。

[密度,  $g/cm^3$ ]  $\rho = 2.40 + 0.00179 \times \sigma_c \quad \dots(4)$

[弾性係数, MPa]  $E_R = (303 \pm 141) \times \sigma_c \quad \dots(5)$

[変形係数, MPa]  $D_R = (120 \pm 42) \times \sigma_c \quad \dots(6)$

[ポアソン比]  $\nu = (0.21 \pm 0.08) \quad \dots(7)$

[引張強度, MPa]  $\sigma_t = (0.074 \pm 0.037) \times \sigma_c \quad \dots(8)$

上式は一軸圧縮強度を指標として、各々の岩石物性を示したものである。設計などの際、一軸圧縮強度しか得られていないときに密度、弾性係数、変形係数、引張強度を算出する簡便式であり、ともに有限要素解析などで入力定数設定の際に参考とされる岩石物性の一つである。

### 3.1.2 岩石物性と岩盤物性との相関

原位置岩盤試験値と室内岩石試験値の違いをみるために、(a)変形係数、(b)弾性係数、(c)動弾性係数について比較したものが図-9である。岩石供試体は、岩盤におけるマッシュなどから採取するのが一般的であり、岩石物性は岩盤物性に比べて大きい値を示す。

弾性係数、変形係数および動弾性係数に関しては、両対数軸上ではあるが、室内岩石試験によって得られた弾性係数  $E_R$  を指標として図-10に示すように、明らかに互いの相関が認められるので、 $y = [\text{岩盤の変形係数 (MPa) etc.}]$ ,  $x = [\text{岩石の弾性係数 (MPa)}]$  とおいて、関係式を式(9)と推定する。

$$\log y = A + B \cdot \log x \quad \dots(9)$$

式(9)に対して、最小二乗法を用いてデータベースに登

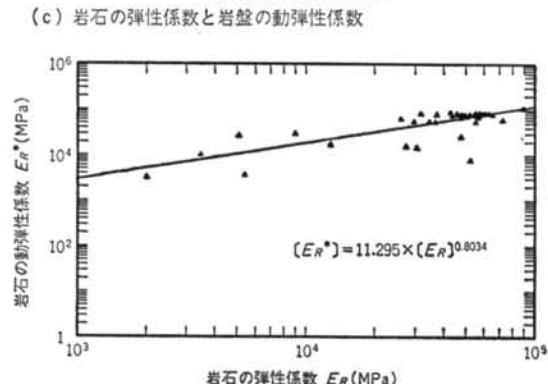
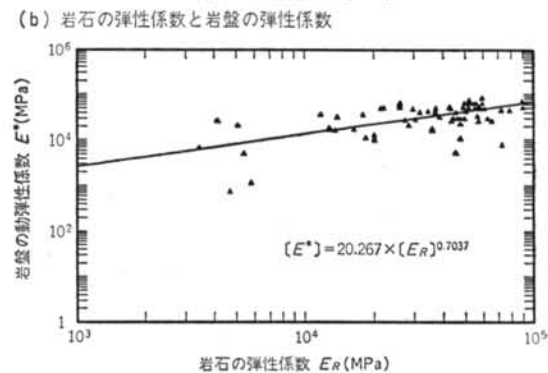
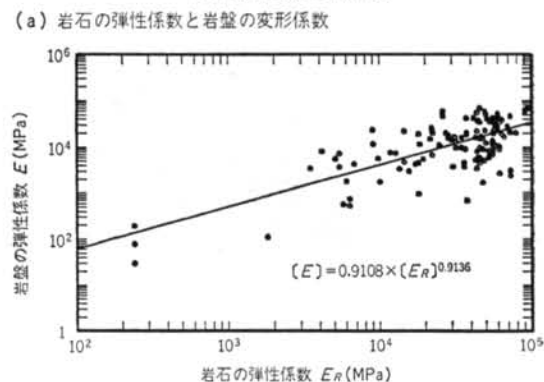
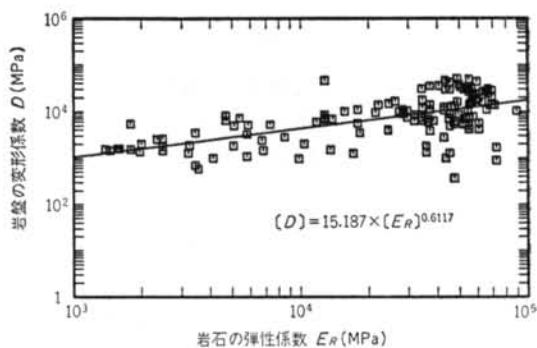
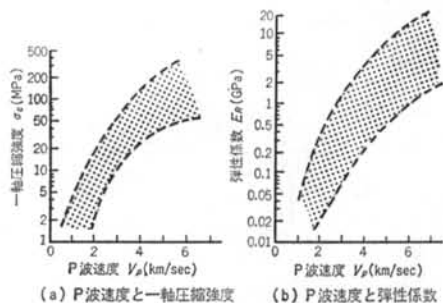


図-10 岩石の弾性係数と岩盤物性の関係



岩種		P波速度 $V_p$ (km/sec)						
		1	2	3	4	5	6	7
第三紀層	頁岩		—					
	砂岩および礫岩		—	—				
	凝灰岩		—					
	凝灰角礫岩			—				
中生層	粘板岩				—	—		
	砂岩および礫岩				—	—		
古生層	石灰岩					—	—	
	珪岩					—	—	
	輝緑凝灰岩					—	—	
火成岩	深成岩	花崗岩				—	—	
		閃緑岩					—	—
	火山岩	安山岩				—	—	
		玄武岩				—	—	
変成岩	千枚岩				—	—		
	片麻岩					—	—	
	蛇紋岩					—	—	
	ホルンフェルス					—	—	

表一七 各種岩石のP波速度 (文献24) より抜粋)



図一11 P波速度と岩石物性との関係 (文献25) より  
録されているデータファイルからA, Bを定めると、以下ようになる。ここで、原位置岩盤試験の変形係数をD, 弾性係数をE, 動弾性係数をE\*, 室内岩石試験の動弾性係数をER\*とする。

$$[D] = 15.184 \times [ER]^0.0117 \quad \dots\dots(10)$$

$$[E] = 0.9108 \times [ER]^0.9136 \quad \dots\dots(11)$$

$$[E^*] = 20.267 \times [ER]^0.7037 \quad \dots\dots(12)$$

$$[ER^*] = 11.295 \times [ER]^0.9034 \quad \dots\dots(13)$$

式(10)~(13)は、岩石の弾性係数を指標として各々の岩盤物性を表わしたものである。設計などの際、岩石の弾性係数しか得られていないとき、岩盤の弾性係数、変形係数、動弾性係数および岩石の動弾性係数を算出する簡便式として使い得る。また、仮に岩石の弾性係数が得られていない場合でも、岩石における弾性係数  $E_R$ (MPa)と

一軸圧縮強度  $\sigma_c$ (MPa) との間には式(5)がすでに得られている。ゆえに、一軸圧縮強度が測定されていれば岩石の弾性係数が推定でき、岩盤の弾性係数等を容易に推定することができる。

### 3.1.3 その他の岩盤物性相互間の関係

地下空間を設計する場合に用いる岩盤物性のうち、静的物性においてはP波速度  $V_p$  や一軸圧縮強度  $\sigma_c$  を指標として設定できると考えられる。指標として用いる地質ごとのP波速度  $V_p$  を、表一七に示しておく。一般に、岩石供試体のP波速度  $V_p$  は密度、有効間隙率、一軸圧縮強度、弾性係数などかなり高い相関関係を示す。大久保・寺崎<sup>25)</sup>はP波速度  $V_p$  と一軸圧縮強度  $\sigma_c$  の関係、およびP波速度  $V_p$  と岩石の弾性係数  $E_R$  との関係を図一11に示すように、ある程度の幅で求めている。

### 3.2 データベースの利用方法

データベースの利用法としては、各岩種の岩石物性一覽や頻度分布から設計に用いる物性を設定することや、3.1で述べた相関関係を用いて設計に用いる岩盤物性を設定することである。また、「ROCKBAN3」においては岩盤構造物に対するバックデータということで、「ROCKBAN3」に登録した各々のサイトの岩盤物性および地盤特性をデータシートで作成してある。その一例として、NATMで施工されたトンネルなどのデータシートを図一12に示しておく。

## § 4. NATM トンネルに対する岩盤物性の評価

上記データベースを用いて推定できる岩盤の弾性係数と、NATM トンネルで計測された内空変位を用いて弾性論で得られる弾性係数を比較した。

トンネル地山を理想状態とすると、トンネルが地表より十分深い位置にあり、かつその深さに比して径が小さい水平トンネルでは、二次元ひずみ状態にある無限有孔板と考えられる。図一13に示すような無限地山内円形トンネルを考えると、岩盤内の半径方向変位は以下のようになる<sup>26)</sup>。

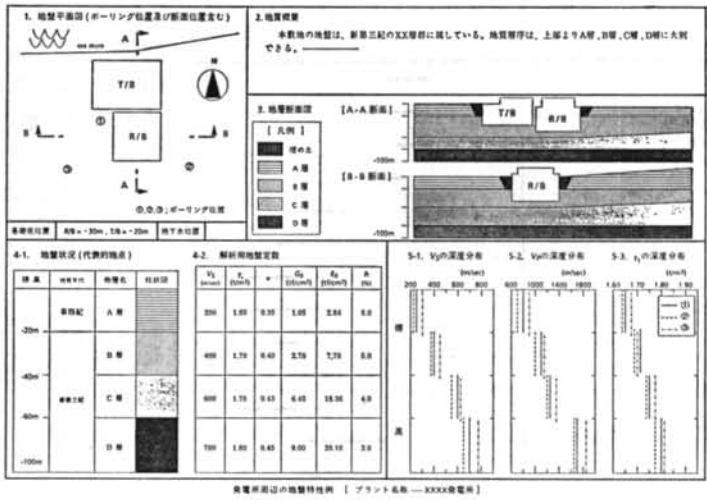
$$u = \frac{3\alpha - \beta}{E} \cdot r \cdot \left\{ \frac{1}{4}(-P_x - P_y) - \frac{1}{2}(P_x - P_y) \left(\frac{a}{r}\right)^2 \cos 2\theta \right\} - \frac{1+\nu}{E} \cdot r \cdot \left\{ \frac{1}{2}(-P_x - P_y) \cdot \left(\frac{1}{2} - \left(\frac{a}{r}\right)^2\right) + \frac{1}{2} \cdot (P_x - P_y) \cdot \left(1 - \left(\frac{a}{r}\right)^2 - \left(\frac{a}{r}\right)^4\right) \cdot \cos 2\theta \right\} \quad (14)$$

(a) 地下発電所の場合

地下発電所(サイ)の地質一覧 No. 12-11

地下発電所名	新島嶼川発電所	所在地	鹿児島県
所在地	鹿児島県鹿嶋市	建設年度	1955年度
定容量(万kW)	15.0	27	105
電圧	15kV	変圧率	100%
地質概要	花崗岩質粘板岩・花崗閃緑岩・花崗岩・砂岩		
室内試験	一軸圧縮強度 $\sigma_{1c}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 1500-2000 弾性係数 $E$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 400-61000 ボアソン比 $\mu$ 0.25 せん断弾性係数 $G$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 200 引張強度 $\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 142 せん断強度 $\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 35/14 せん断弾性係数 $G$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 207/102 膨張係数 $\alpha$ (1/cm) 0.1-0.2 圧縮係数 $\beta$ (1/cm) 0.25 プラズマ係数 $\gamma$ (1/cm) 0.701 最大空位率 $P_v$ (%) 30-110 中位空位率 $P_{50}$ (%) 20-70 最小空位率 $P_{10}$ (%) 0-45 実測最大空位率 $P_{max}$ (%) 200		
その他	1) 中位空位率(地下空位率)の変動は、主として地質的変動によるものと考えられる。 2) 膨張係数は、地質的変動によるものと考えられる。 3) 圧縮係数は、地質的変動によるものと考えられる。 4) プラズマ係数は、地質的変動によるものと考えられる。 5) 最大空位率は、地質的変動によるものと考えられる。 6) せん断弾性係数は、地質的変動によるものと考えられる。 7) せん断強度は、地質的変動によるものと考えられる。 8) 引張強度は、地質的変動によるものと考えられる。 9) 弾性係数は、地質的変動によるものと考えられる。 10) 一軸圧縮強度は、地質的変動によるものと考えられる。		

(b) 原子力発電所基礎の場合



(c) NATMトンネルの場合

NATM(サイ)の地質一覧 No. 12-12

トンネル名	北山トンネル	所在地	東京都
所在地	東京都荒川区	建設年度	1970年
定容量	1.50	27	105
電圧	15kV	変圧率	100%
地質概要	花崗岩質粘板岩・花崗閃緑岩・花崗岩・砂岩		
室内試験	一軸圧縮強度 $\sigma_{1c}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 1500-2000 弾性係数 $E$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 400-61000 ボアソン比 $\mu$ 0.25 せん断弾性係数 $G$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 200 引張強度 $\sigma_t$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 142 せん断強度 $\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 35/14 せん断弾性係数 $G$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 207/102 膨張係数 $\alpha$ (1/cm) 0.1-0.2 圧縮係数 $\beta$ (1/cm) 0.25 プラズマ係数 $\gamma$ (1/cm) 0.701 最大空位率 $P_v$ (%) 30-110 中位空位率 $P_{50}$ (%) 20-70 最小空位率 $P_{10}$ (%) 0-45 実測最大空位率 $P_{max}$ (%) 200		
その他	1) 中位空位率(地下空位率)の変動は、主として地質的変動によるものと考えられる。 2) 膨張係数は、地質的変動によるものと考えられる。 3) 圧縮係数は、地質的変動によるものと考えられる。 4) プラズマ係数は、地質的変動によるものと考えられる。 5) 最大空位率は、地質的変動によるものと考えられる。 6) せん断弾性係数は、地質的変動によるものと考えられる。 7) せん断強度は、地質的変動によるものと考えられる。 8) 引張強度は、地質的変動によるものと考えられる。 9) 弾性係数は、地質的変動によるものと考えられる。 10) 一軸圧縮強度は、地質的変動によるものと考えられる。		

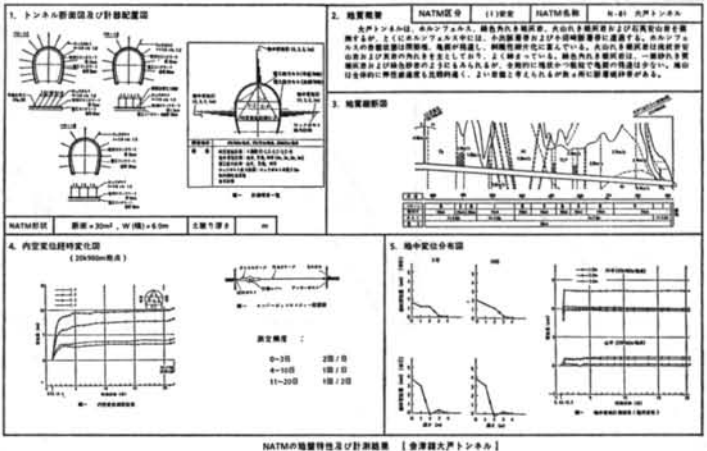


図-12 データシート例

ここで、 $\alpha=1-\nu^2$   
 $\beta=\nu \cdot (1+\nu)$   
 $E$ : 弾性係数  
 $u$ : 半径方向変位  
 $a, r, P_x, P_y, \theta$ ; 図-13参照

円形トンネル周辺地山のひずみは、近似的に以下のよう表わされ、内空変位率  $\varepsilon$  と呼ばれている<sup>27)</sup>。

$$\varepsilon = \frac{u}{a} \quad \dots\dots(15)$$

トンネル壁面における内空変位率を用いて得られるトンネル周辺の弾性係数  $E_m$  は、式(14)において  $r=a, P_x=$

$P_y$  とすると、

$$E_m = \frac{2 \cdot P_y}{\varepsilon} \cdot (1-\nu^2) \quad \dots\dots(16)$$

である。

ここでは内空変位率が得られ、かつ岩盤物性(一軸圧縮強度または岩石の弾性係数)が得られている NATM トンネル20サイト<sup>28)</sup>について検討した。20サイトのトンネルについて、内空変位率の計算に必要なデータを示したのが表-8である。岩石試験から得られる岩盤の弾性係数は、データベースより得られた関係式を用いて、

①岩石の弾性係数  $[E_R]$  のみ得られている場合: 式(1)

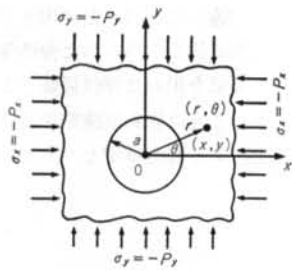


図-13 無限地山円形トンネル (文献26) による

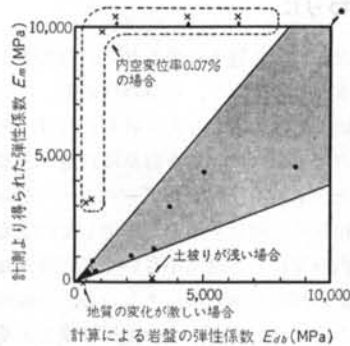


図-14 計算値と計測値の比較

② $[E_R]$  が得られず  $[\sigma_c]$  のみ得られている場合: 式(5)の平均値を式(1)に代入して得られる次式,

$$E = 168.4 \times [\sigma_c]^{0.9136} \quad \dots\dots(7)$$

より算出される。

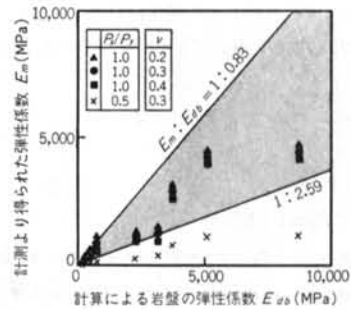


図-15 地盤条件の影響

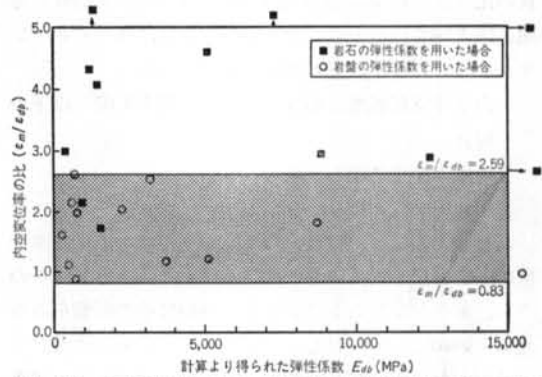


図-16 内空変位率に対する岩石物性と岩盤物性を用いた場合の影響

トンネル No	計 算 値			計 測 値				$\frac{E_{db}}{E_m}$
	一 軸 圧 縮 強 度 $\sigma_c$ (MPa)	岩 石 の 弾 性 係 数 $E_R$ (MPa)	岩 盤 の 弾 性 係 数 [式(5)or(7)] $E_{db}$ (MPa)	土 被 り $H$ (m)	鉛 直 荷 重 $P_v$ (MPa)	内 空 変 位 率 (%)	岩 盤 の 弾 性 係 数 [式(10)] $E_m$ (MPa)	
N-106	11.9	—	1,617	190	4.75	0.06	14,700	0.11
N-114	52.5	7,300	3,083	8	0.20	0.27	136	22.72
N-115	8.0	2,350	1,093	45	1.13	0.02	9,936	0.11
N-116	8.3	950	478	36	0.90	0.05	3,187	0.15
N-117	8.0	1,250	615	50	1.25	0.07	3,237	0.19
N-118	28.1	16,500	6,494	100	2.50	0.01	46,386	0.14
N-120	17.1	11,000	4,475	55	1.38	0.02	12,430	0.36
N-121	75.4	8,820	3,664	26	0.65	0.04	2,979	1.23
N-125	24.3	—	3,106	100	2.50	0.37	1,242	2.50
N-131	74.8	—	8,669	20	0.50	0.02	4,587	1.89
N-132	16.8	—	2,211	29	0.73	0.12	1,106	2.00
N-133	4.0	—	598	21	0.53	0.34	281	2.13
N-134	3.2	—	480	21.5	0.54	0.22	444	1.08
N-204	2.9	1,550	748	356	9.13	4.32	382	1.96
N-205	5.0	—	733	280	7.00	1.44	883	0.83
N-207	2.2	—	351	40	1.00	2.20	84	4.17
N-211	40.3	42,500	15,414	250	6.25	0.07	16,225	0.95
N-212	41.2	—	5,032	162	4.05	0.17	4,338	1.16
N-350	6.5	460	247	112	2.80	3.33	153	1.61
N-360	13.7	1,350	660	60	1.50	1.07	255	2.59

表-8 計算値と計測値の比較

計測結果より得られる内空変位率から、以下の仮定条件のもとで、式(10)を用いて岩盤の弾性係数  $E_m$  が求められる。

$$\gamma = 2.5 \text{ t/m}^3$$

$$P_y = \gamma \cdot H \quad (H: \text{土被り})$$

$$\nu = 0.3$$

$$P_x : P_y = 1 : 1$$

20トンネルのうち、データベースで得られる岩盤の弾性係数  $E_{ab}$  と、計測結果から得られる弾性係数  $E_m$  を比較したものが図-14である。図-14によれば、弾性係数の比(計算値  $E_{ab}$ /計測値  $E_m$ )が0.83から2.59の範囲に収まっているものが12トンネルある。残りの8トンネルについては、以下の特殊事情がある。

①内空変位が極端に小さく、内空変位率0.07%以下の場合

②地質の変化が激しい場合

③土被りが浅い場合

ただし、①については、12トンネルのなかでも内空変位率0.07%以下のものを一部含んでいる。12トンネルのうち、ポアソン比および側圧比についてその影響をみるため、 $\nu=0.2, 0.4$  および  $P_x/P_y=0.5$  の場合についても検討した(図-15)。図によれば、ポアソン比は結果にそれほど影響を与えないことが分かる。一方、側方比  $P_x/P_y=1.0$  の場合に比べて  $P_x/P_y=0.5$  の場合は大きく  $E_m$  が異なり、初期地圧が結果におよぼす影響が大ききことが分かる。図-16は、データベースを通して得られる岩盤の弾性係数  $E_{ab}$  と内空変位率の比(計測値  $\epsilon_m$ /計算値  $\epsilon_{ab}$ )の関係を示したものである。図には、岩盤の弾性係数の代わりに、岩石の弾性係数を用いた場合(■印)も併記してあるが、その場合得られる結果は大きめに評価される。

トンネルの場合は、支保工や吹付、掘削方法や計測時

期、地形・地質状況の違いなど様々な要因を含んでいるにもかかわらず、計測変位から得られた弾性係数はデータベースで得られた関係を用いた弾性係数とよい相関をみた。すなわち、このことは岩石試験結果から設計管理値である内空変位を、ある程度推定しようといえることができる。

## § 5. おわりに

本研究においては、過去に得られた岩盤物性をデータベース化することによって、岩盤物性に関して周辺岩盤の岩種あるいは硬軟の別が与えられていれば、地下空間の概念設計のための岩盤物性を容易に設定できる基礎資料を提供した。本報で作成したデータベースから得られた岩盤物性相互間の関係を用いて推定した内空変位は、実測された内空変位が極端に小さいなどの特殊なケースを除いて、よい相関を示した。すなわち、一般的なケースを想定する概念設計には、十分適用可能であるといえる。ただし、データベース化に当たってはすべての岩盤物性を取り込んだものでないため、ここで得られた結果は基礎とした岩盤データに依存していることを認識しておく必要がある。

地盤工学の分野においても、経験的知識をコンピュータ上に表現するエキスパートシステム(人工知能の一技術領域)が将来において適用されると考えられ、その際の基礎データとして今回作成したデータベース ROCK-BANK の活用が期待される。

空洞の安定性にかかわる岩盤の力学的特性についてデータベース化したのが、多様な地下空間利用に対応するには、岩盤の地質学的特性、熱特性、透水特性などについてもデータベース化していく必要があろう。

## <参考文献>

- 1) 宮下国一郎, 青木謙治, 花村哲也, 田島孝也: “岩盤内原油備蓄タンクの計測技術” 土木学会論文集 第355号(1985年3月) pp. 30~37
- 2) 川本脩万, 林正夫: “地盤工学における有限要素解析—土質力学と岩盤力学へのアプローチ” 培風館(1987年4月) pp. 440~444
- 3) 幾志新吉, 菅原正巳, 清水良作: “電算機による都市地盤土質柱状図資料の一検索法(第一報)” 土と基礎 Vol. 19, No. 4(1971年4月) pp. 23~30
- 4) 幾志新吉, 菅原正巳, 清水良作: “電算機による都市地盤土質柱状図資料の一検索法(第二報)” 土と基礎 Vol. 19, No. 5(1971年5月) pp. 9~14
- 5) 幾志新吉: “情報の集め方と利用の方法, (2)地盤資料(土質柱状図)の電算化と検索方法” 土と基礎 Vol. 21, No. 3(1973

- 年3月) pp.89~94
- 6) 多賀直恒, 富樫豊, 岩佐政徳: “都市地盤資料のデータベース化の試み” 第18回土質工学研究発表会発表講演集 (1983年6月) pp.23~24
  - 7) 栗林栄一, 河邑真, 由井洋三, 高田敦: “地盤資料データによる地盤特性検索法” 第20回土質工学研究発表会発表講演集 (1985年6月) pp.5~6
  - 8) 岩尾雄四郎, 堀田昭則, 住田光生: “佐賀平野の地盤データベースと運用” 第40回土木学会年次大会学術講演会講演概要 第4部門 (1985年9月) pp.225~226
  - 9) 岩尾雄四郎, 堀田昭則, 住田光生: “パソコンによる地盤資料の情報処理システムと運用—佐賀平野の例—” 土と基礎 Vol.34, No.4 (1986年4月) pp.29~33
  - 10) 諾星敏一: “土質柱状図データベースを用いた液状化可能性の簡易推定” 昭和59年度土質工学会東北支部研究討議会「日本海中部地震シンポジウム」講演概要集 (1984年11月) pp.1~6
  - 11) 石井一郎: “土質データベースシステムの開発について” 港湾技研資料 No.515 (1985年3月)
  - 12) 諏訪靖二, 山本嘉一郎, 中堀和英: “土質情報管理システム (SOIL) について” 第14回土質工学研究発表会発表講演集 (1979年6月) pp.1~4
  - 13) 森島和之, 三木幸蔵, 古谷正和: “地盤調査資料の電算化と管理・利用について” 第18回土質工学研究発表会発表講演集 (1983年6月) pp.21~22
  - 14) 北井良吉, 朝倉俊弘, 小野田滋: “トンネルデータバンクの構築” 第40回土木学会年次大会学術講演会講演概要 第3部門 (1985年9月) pp.255~256
  - 15) 成岡昌夫: “データバンク作成のすすめ” 土木学会誌 (1977年12月) pp.47~52
  - 16) 今津雅紀: “岩石物性におけるデータベース化の試み” 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集 (1985年2月) pp.71~75
  - 17) R.D. Lama & V.S. Vutukuri: “Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol. II” Trans Tech Pub. (1978) pp.315~453
  - 18) 今津雅紀: “岩盤物性におけるデータベース化の試み” 第20回土質工学研究発表会発表講演集 (1985年6月) pp.919~922
  - 19) R.D. Lama & V.S. Vutukuri: “Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol. III” Trans Tech Pub. (1978) pp.325~375
  - 20) 今津雅紀: “岩盤構造物における岩盤物性のデータベース化” 第40回土木学会年次大会学術講演会講演概要 第3部門 (1985年9月) pp.727~728
  - 21) 例えば, 御牧陽一: “今市地下発電所の設計” 電力土木 No.173 (1981年7月) pp.24~38
  - 22) 各原子力発電所原子炉設置許可申請書 (添付書類) など
  - 23) 例えば, 日本トンネル技術協会: “NATM の設計と施工実例集, 1” 土木工学社 (1980年3月) p.232
  - 24) 神田裕太郎: “弾性波探査法によるずい道地質の調査とその実例” 物理探査 Vol.8 (1963年)
  - 25) 大久保彪, 寺崎晃: “岩石の物理的性質と弾性波速度” 土と基礎 Vol.19, No.7 (1971年7月) pp.31~38
  - 26) 樗木武: “トンネル力学” 共立出版 (1977年10月) pp.104~112
  - 27) 塩釜幸弘, 永井博史: “NATM の内空変位率による施工管理” 第39回土木学会年次大会学術講演会講演概要 第3部門 (1984年10月) pp.479~480
  - 28) 例えば, 岡林信行, 永井博史, 塩釜幸弘: “NATM 支保設計の考察” 鹿島建設技術研究所年報 No.32 (1984年6月) pp.43~52

