

土質データのばらつきと設計

3. 地盤データの二次処理(統計的処理手法と実際)

伊藤 ひろし*

3.3 岩石、岩盤物性値の統計的性質

岩盤はその成因、生成年代、産出状態、変動・変質による影響などによってその性状が大きく異なる。そのため、岩盤の調査・試験結果は岩盤の性状に応じた分類に基づいた整理をしなければかなり複雑なものとなり、岩盤の工学的性質を把握する上で岩盤分類が必要となる。岩盤分類は一般に、岩石の種類、岩石の硬さ、風化の程度、割れ目の性状などの地質要素に基づいて行うが、対象とする構造物ごとにさらに細かな要素区分を用いて分類が行われている。岩盤分類の詳細は文献(25)、(26)などを参考にされたい。

このように岩盤分類は岩盤の不均質性、不連続性などに関連する諸要因を一定の規準に従って特徴づけるための大まかな評価区分である。そのため、岩盤分類上同じ区分がなされた岩盤でもその工学的性質は、土質材料のデータに比べ大きいばらつきの幅をもっているのが普通である。すなわち、岩石の工学的性質は岩石自体を構成している構成粒子、粒度分布、含有鉱物の種類と密度、粒子間膠結物質の種類とその状態などによって支配され、岩盤の工学的性質は岩盤を構成している岩石の性質、岩盤中に存在する層理、片理、節理等の割れ目の方向性、連続性、傾度、挟在物、凹凸の度合に影響されるが、岩盤分類ではこれらすべてを定量的に評価、区分しきれないからである。一方、岩石と岩盤では同じ工学的性質、例えば強度、変形係数を求めたとしても、上述のように岩石と岩盤の支配要因の違いが試験法や供試体寸法の規模の違いに直接反映されるため、両者の得られる結果は異なりそのばらつきの程度もまた異なる場合が多い。特に硬質岩盤ほどその傾向は強い。

以上の観点から、岩石・岩盤物性値の個々の統計的性質の把握にあたっては基本的には同一サイトの同一評価区分、同一試験ごとにデータを収集し、整理・分析する必要がある。しかしながら、現状では岩石・岩盤に関する調査・試験が土質試験に比べ大規模となることから、ほとんどの場合最小限のデータを取得する調査・試験しか実施されておらず統計的な論議に耐えるだけの資料がないのが実態である。したがって、以下に示す統計的性質は可能な限り同じ岩石・岩盤の評価区分の下で実施されたデータを収集、分析し、その結果について述べたものである。

*(財)電力中央研究所我孫子研究所立地部

ところで、主要な土質諸係数に比べ、岩盤諸係数では一、二次処理という概念が明確になってない。そこで、本節に述べる内容が本講座の趣旨に沿わない点もあるが、現時点で明らかになってきた岩盤諸係数の統計的性質を示すのは工学的に有用であると考え、以下に示すことにする。

3.3.1 各種物性値のばらつき

(1) 物理試験、速度測定による各種係数

ここでは物理特性のばらつきの実態を理解するために岩石の種類ごとの主な物理係数の調査例を2、3紹介する。

表-3.7はボーリングコアまたはブロックサンプリングしたもの同士の岩石試料を用いて物理試験、超音波試験により得られた結果である。表に示す値は岩盤分類で同一と判定された箇所より抽出した試料を用いて得られたばらつきの指標である。また、図-3.15は岩石の単位体積重量を

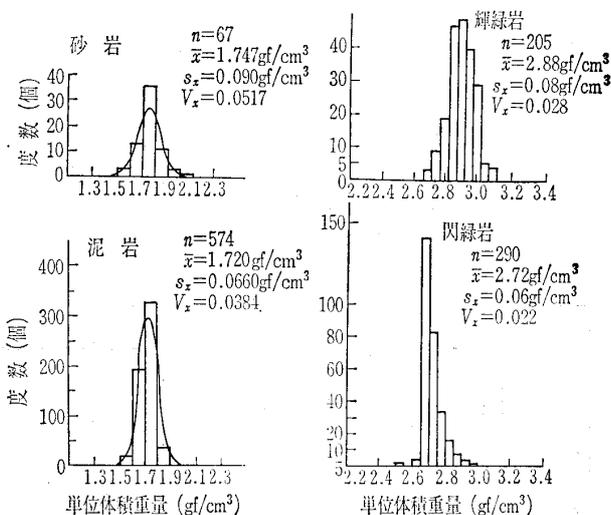


図-3.15 岩石の単位体積重量のばらつきの分布

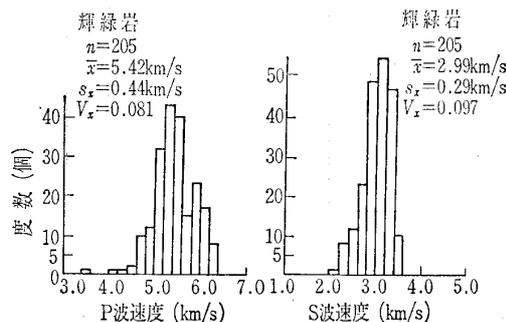


図-3.16 輝緑岩のP波速度、S波速度のばらつき(岩石の超音波試験による)

表-3.7 岩石試料の物理試験による各種係数の

岩石の種類	物理試験									超音波速度試験									
	単位体積重量			吸水率*			有効間隙率**			P波速度			S波速度			動弾性係数			
	\bar{x}	S_x	V_x	\bar{x}	S_x	V_x	\bar{x}	S_x	V_x	\bar{x}	S_x	V_x	\bar{x}	S_x	V_x	\bar{x}	S_x	V_x	
	(g/cm^3)	(g/cm^3)		(%)	(%)		(%)	(%)		(km/s)	(km/s)		(km/s)	(km/s)		$\times 10^4$ (kg/cm^2)	$\times 10^4$ (kg/cm^2)		
泥岩	①	1.68	0.05	0.029	49.7	5.6	0.112	1.37	0.13	0.094	1.78	—	—	0.67	—	—	2.22	—	—
	②	1.74	0.04	0.022	45.2	5.0	0.110	1.26	0.13	0.103	1.69	—	—	0.62	—	—	1.99	—	—
	③	2.02	0.06	0.029	21.4	4.2	0.196	0.62	0.10	0.161	—	—	—	—	—	—	—	—	—
凝灰角礫岩	2.21	0.18	0.081	11.2	3.1	0.277	22.0	5.3	0.241	3.52	0.31	0.088	1.86	0.22	0.118	20.5	4.4	0.215	
凝灰岩	2.17	0.09	0.042	14.2	3.7	0.261	26.7	5.2	0.195	3.18	0.37	0.116	1.75	0.27	0.154	17.7	4.9	0.277	
閃緑岩	2.72	0.06	0.022	0.45	—	—	1.21	—	—	5.03	0.44	0.087	2.79	0.32	0.115	55.2	9.7	0.176	
輝緑岩	2.88	0.08	0.028	0.27	—	—	0.79	—	—	5.42	0.44	0.081	2.99	0.29	0.097	67.4	12.4	0.184	
粘板岩	2.73	0.02	0.007	0.48	—	—	1.31	—	—	5.26	0.26	0.049	2.89	0.29	0.100	59.8	10.6	0.177	
砂岩	①	2.33	0.026	0.011	8.46	0.45	0.053	18.3	0.89	0.048	2.32	0.33	0.146	1.34	0.14	0.104	10.3	2.7	0.262
	②	2.28	0.056	0.025	12.5	1.33	0.106	25.3	2.04	0.081	2.26	0.29	0.128	1.31	0.17	0.130	10.0	2.9	0.29
頁岩	2.57	0.052	0.020	4.43	0.52	0.117	10.9	1.02	0.093	3.31	0.27	0.082	2.01	0.17	0.085	25.5	3.9	0.153	

(注) *: 泥岩については含水比を示す。 **: 泥岩については間隙率を示す。

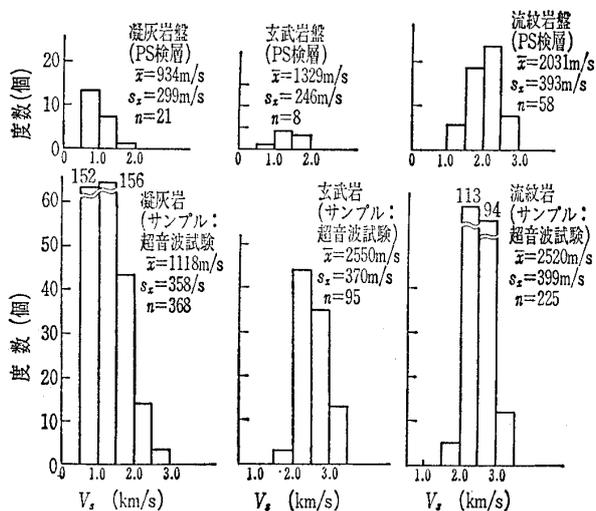


図-3.17 岩盤と岩石とのせん断弾性波速度のばらつきの実態 (PS 検層結果と超音波試験結果の比較)

度数分布表示した例を示したものである。

これらの結果によれば、単位体積重量のばらつきは岩石の種類や強さにあまり関係なく、変動係数も 0.02~0.04 と小さい範囲にあり、土質材料と同様ほぼ正規分布する傾向を示す。吸水率、有効間隙率のばらつきは火成堆積岩（凝灰岩など）で最も大きく変動係数が 0.2~0.3 の範囲にあり、ついで水成堆積岩（砂岩、泥岩）が 0.1~0.18 と単位体積重量に比べ、若干大きい傾向を示している。

さらに、図-3.16は輝緑岩の弾性波速度（P波速度 V_p 、S波速度 V_s ）の測定例を示したものであり、図-3.17は同一地点の岩石と岩盤を対象に、岩石の超音波試験による V_s と PS 検層による岩盤の V_s との測定例を比較して示したものである。これらの結果からも分かるように、これまでの多くの測定例と同様、岩石の V_s 、 V_p のばらつきを表す変動係数は 0.1 前後の値を示す。また、岩石と岩盤の弾

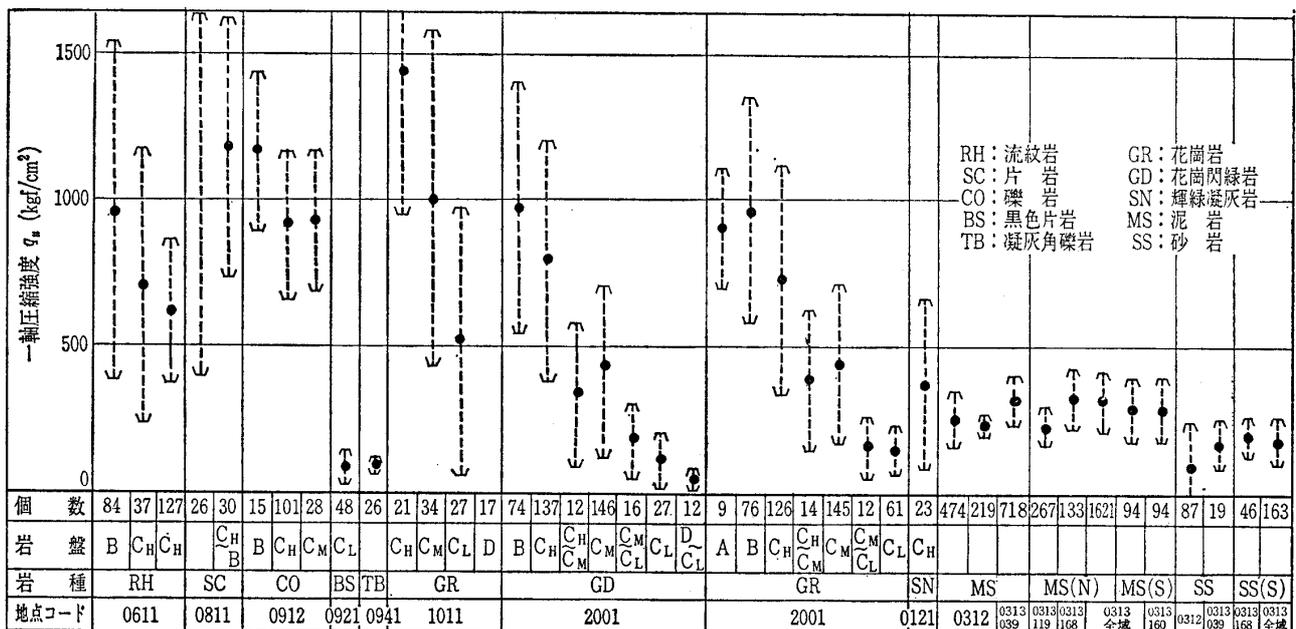


図-3.18 岩種・岩級ごとの一軸圧縮強度のばらつきの実態 (平均値と標準偏差)⁶⁾

ばらつきの指標

動ポアソン比			備考(力学試験)					
			一軸圧縮強度			引張り強度		
\bar{v}	S_v	V_v	$\bar{\sigma}$	S_{σ}	V_{σ}	$\bar{\sigma}$	S_{σ}	V_{σ}
			(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)		(kgf/cm ²)	(kgf/cm ²)	
0.42	—	—	31.9	7.6	0.238	6.4	1.12	0.175
0.42	—	—	33.6	10.0	0.297	5.9	0.73	0.124
—	—	—	24.2	11.3	0.467	—	—	—
0.30	0.04	0.133	218	89	0.408	24.6	8.4	0.341
0.28	0.04	0.143	315	121	0.384	26.5	8.1	0.306
0.27	0.05	0.185	997	496	0.50	84.2	34.8	0.413
0.28	0.05	0.179	1094	534	0.488	78.6	30.2	0.384
0.28	0.05	0.179	1082	—	—	48.2	—	—
0.23	0.08	0.348	137	20	0.146	7	3	0.429
0.25	0.05	0.260	30	6	0.20	3	1	0.333
0.20	0.06	0.30	156	34	0.218	25	2	0.08

性波速度のばらつきの分布特性は図のようにほぼ対応するものがあるが、一般には岩石の方が大きい値を示す場合が多い。

以上のように岩石の物理的な特性、波動伝播特性に関するデータは土質材料のデータと比べ値の大小は異なるものの、データのばらつきを表す分布特性はほとんど同じ傾向を示すものとする。さらに、設計係数として最も使用される単位体積重量でもほぼ0.02~0.04程度の変動係数であることから、設計計算結果に及ぼすばらつきの影響は一般に少ないものと判断できよう。

(2) 力学試験による係数

i) 岩石の強度・変形に関する係数

図-3.18は各地点別の岩種、岩級ごとの一軸圧縮強度のばらつきの幅を平均値と標準偏差の関係で示したものである。また、図-3.19にはこの平均値と標準偏差との相関関係を示す。なお、ここに示すデータは地点ごとに電研式岩盤分類²⁷⁾あるいはそれに準じて分類された岩盤よりポー

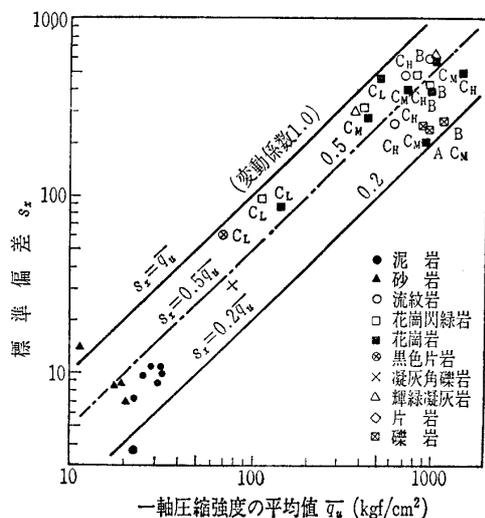


図-3.19 岩種・岩級ごとの一軸圧縮強度の平均値と標準偏差との関係⁶⁾

リングあるいはブロックサンプリングした試料を用いて行った一軸圧縮試験の結果をとりまとめたものである。これらより概括的には岩種、岩級においてばらつきの大きさは大きく異なり、個々にかかなりの幅があることがわかる。すなわち、同じ花崗岩でも収集地点が異なると一軸圧縮強度の平均値はC_H級同士でも700 kgf/cm²、C_L級同士でも400 kgf/cm²の幅がある例のように収集地点が異なると同一岩種でも大きな開きが認められる。また、同一地点の岩種に限定すれば一般に岩級の低下とともに一軸圧縮強度の平均値は低下する傾向となる。また、一軸圧縮強度の変動係数は0.2~1.0の広範囲にあり、B級岩盤より採取した試料では0.2~0.6、C_L級では0.6~0.9となり、全体的には岩級の低下にしたがい変動係数は大きくなる傾向にある。

なお、一軸圧縮強度のばらつきの分布を度数分布表示した2~3の例を図-3.20に示した。

次に、三軸圧縮試験データが比較的多い泥岩、砂岩の堆積軟岩の例を対象に種々の拘束圧下における三軸圧縮強度($\sigma_1 - \sigma_3$)_r、変形係数E₅₀のばらつきについて示す。図-3.21は同一地点における泥岩、砂岩のばらつきの指標を拘束圧別に示したものである。これらの結果によれば、三軸圧縮強度、変形係数の平均値は拘束圧の増加とともに大きくなるが、その標準偏差、変動係数には拘束圧の違いによる顕著な傾向は認められない。さらに、三軸圧縮強度、変形係数の変動係数はおのおの0.25~0.35、0.25~0.45の

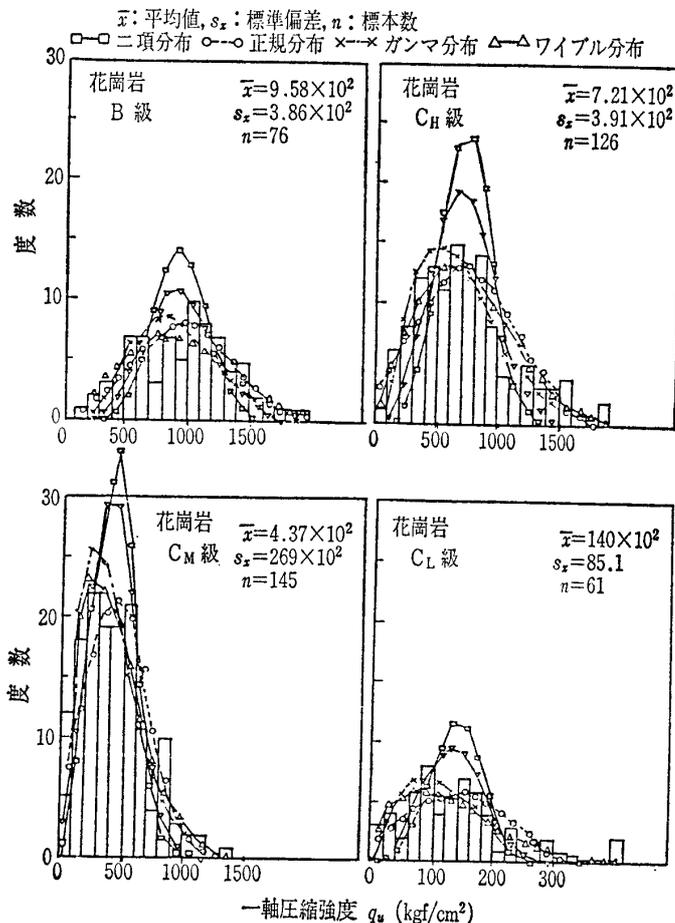


図-3.20 岩種・岩級ごとの一軸圧縮強度のヒストグラム⁶⁾

講座

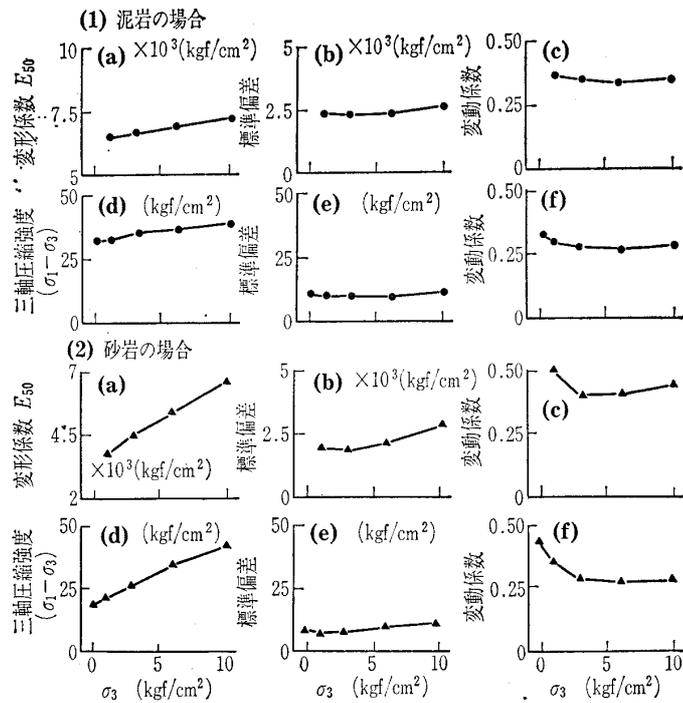


図-3.21 拘束圧と三軸圧縮強度・変形係数のばらつきの指標の関係⁶⁾

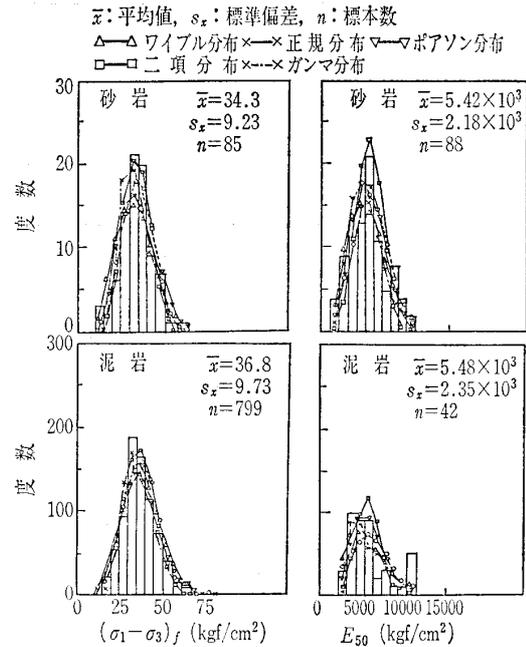


図-3.22 三軸状態下の圧縮強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と変形係数 E_{50} のばらつきの分布 ($\sigma_3 = 6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合)⁶⁾

範囲にあり、若干、変形係数のばらつきの幅が大きい傾向を示している。参考のために図-3.22に拘束圧 $\sigma_3 = 6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合のばらつきの分布を度数分布として表示した例を示す。

一方、比較的簡単に求められる物性値のデータを用いて岩石の強度係数 (c, ϕ) のばらつきの分布を近似的に評価する方法が松尾らによって提案されている²⁸⁾。すなわち、岩石の一軸圧縮強度 S_c および引張り強度 S_t に関する平均値をそれぞれ μ_{S_c}, μ_{S_t} 、分散を $\sigma_{S_c}^2, \sigma_{S_t}^2$ 、変動係数を V_{S_c}, V_{S_t} とすれば、 ϕ の分布パラメーター (平均値 μ_ϕ 、分散 σ_ϕ^2 、変動係数 V_ϕ) および c の分布パラメーター (平均値 μ_c 、分散 σ_c^2 、変動係数 V_c) はおのこの以下のようなことになることを示している。

$$\begin{cases} \mu_\phi = \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \sqrt{\frac{\mu_{S_t}}{\mu_{S_c}}} \quad (\text{rad}) \\ \sigma_\phi^2 = \frac{\mu_{S_c} \cdot \mu_{S_t}}{(\mu_{S_c} + \mu_{S_t})^2} (V_{S_c}^2 + V_{S_t}^2) \quad (\text{rad}^2) \\ V_\phi = \frac{\sigma_\phi}{\mu_\phi} \\ \mu_c = \mu_{S_c} \frac{1 - \sin \mu_\phi}{2 \cos \mu_\phi} \\ \sigma_c^2 = \left(\frac{1 - \sin \mu_\phi}{2 \cos \mu_\phi} \right)^2 \left[\sigma_{S_c}^2 + \frac{\mu_{S_c}^2 \cdot \sigma_\phi^2}{\cos^2 \mu_\phi} \left(\frac{\pi}{180} \right)^2 \right] \end{cases}$$

表-3.8 岩盤変形試験による各係数のばらつきの指標とその適合確率密度分布関数

岩種	物性値	岩級	個数	平均値	標準偏差	変動係数	カイ2乗検討による 適正分布関数
				$\bar{x} (\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2)$	$S_x (\times 10^4 \text{ kgf/cm}^2)$		
深成岩	割線弾性係数 E_s	C _H	27	8.93	6.50	0.73	ガンマ分布、ワイブル分布
		C _M	25	2.46	1.72	0.70	ポアソン分布、正規分布、ガンマ分布、ワイブル分布
		C _L	23	0.79	0.66	0.83	ポアソン分布、ガンマ分布、ワイブル分布、二項分布
火成堆積岩	変形係数 D	C _H	—	—	—	—	—
		C _M	—	—	—	—	—
		C _L	43	0.72	0.39	0.54	(適合性が悪い)
		D	26	0.35	0.18	0.51	(適合性が悪い)
水成堆積岩 (頁岩、チャート)	割線弾性係数 E_s	B	22	6.55	3.04	0.46	ポアソン分布、ガンマ分布、ワイブル分布
		C _H	22	4.36	1.99	0.46	ポアソン分布、正規分布、ガンマ分布、ワイブル分布、二項分布
水成堆積岩 (泥岩)	割線弾性係数 E_s	—	142	0.54	0.22	0.41	(適合性が悪い)
深成岩	変形係数 D	C _H	38	6.90	3.57	0.52	ポアソン分布、ワイブル分布
		C _M	24	1.50	1.13	0.75	ポアソン分布、ガンマ分布、ワイブル分布
		C _L	24	0.35	0.21	0.60	正規分布、ポアソン分布、ガンマ分布、ワイブル分布、二項分布
火成堆積岩	変形係数 D	C _H	31	4.36	2.21	0.51	(適合性が悪い)
		C _M	35	1.37	0.71	0.52	正規分布、ポアソン分布、ガンマ分布、ワイブル分布、二項分布
		C _L	40	0.36	0.18	0.50	同上
		D	24	0.20	0.16	0.80	(適合性が低い)
水成堆積岩 (砂岩、礫岩)	割線弾性係数 E_s	B	24	14.58	7.36	0.50	ポアソン分布、正規分布、ワイブル分布、二項分布
		C _H	26	2.77	1.75	0.63	(適合性が低い)
水成堆積岩 (泥岩)	割線弾性係数 E_s	—	142	0.49	0.18	0.37	正規分布、二項分布
深成岩	接線弾性係数 E_t	C _H	21	13.10	7.05	0.54	ポアソン分布、二項分布、ガンマ分布、ワイブル分布、正規分布
		C _M	44	2.50	1.38	0.55	ポアソン分布、ガンマ分布、ワイブル分布、二項分布
		C _L	24	1.06	0.75	0.71	ポアソン分布、ガンマ分布、正規分布、ワイブル分布、二項分布
火成堆積岩	接線弾性係数 E_t	C _H	31	6.16	2.77	0.45	ポアソン分布、ワイブル分布
		C _M	30	3.07	1.74	0.57	ガンマ分布、ワイブル分布
		C _L	30	0.77	0.41	0.53	ポアソン分布、ガンマ分布、ワイブル分布
		D	20	0.35	0.18	0.51	ポアソン分布、正規分布、ガンマ分布、ワイブル分布、二項分布
水成堆積岩 (砂岩、礫岩)	接線弾性係数 E_t	B	25	21.10	9.52	0.45	正規分布
		C _H	31	6.23	2.35	0.38	ガンマ分布、二項分布
水成堆積岩 (泥岩)	接線弾性係数 E_t	—	144	0.57	0.27	0.47	(適合性が悪い)

$$V_c = \sqrt{V_{S_c}^2 \left[\frac{\mu_\phi \cdot V_\phi}{\cos \mu_\phi} \left(\frac{\pi}{180} \right)^2 \right]}$$

しかも上式より算定した結果は実際のデータのばらつきの分布ともよく一致することも示されている。なお、評価方法の詳細については文献 28) を参照されたい。

ii) 岩盤の強度, 変形

岩盤の場合, その力学特性を把握するため調査・試験は大きくなり, 土質試験に比べ多くの経費が必要となるため同一地点で実施される試験の数は非常に少ないのが現状である。そのため, ほとんどの場合岩種, 岩級ごとに統計的処理が行えるほど岩盤物性値のデータ数が十分あるとは言い難い。以下に示す岩盤物性値に関する統計的性質は岩石の成因, 類似性を考慮し, ①深成岩(花崗岩, 花崗閃緑岩, 閃緑岩), ②半深成岩(石英斑岩, 玢岩, 輝緑岩), ③火山岩(流紋岩, 石英安山岩, 安山岩), ④火成堆積岩(凝灰岩, 輝緑凝灰岩, 凝灰角礫岩), ⑤礫岩, 砂岩, 泥岩の水成堆積岩, ⑥頁岩, チャートの水成堆積岩, ⑦変成岩(粘板岩, 片岩, 片麻岩, ホルンヘンス), の岩種に統合するとともに, 電研式あるいはそれに準じた岩質等級区分で分類されたデータの分析結果の例である。対象とした岩盤物性値は岩盤変形試験から得られる変形係数 D , 割線弾性係数 E_s , 接線弾性係数 E_t ならびに岩盤せん断試験によるせん断強度である。なお, これら試験法とその評価についての詳細は文献(29)を参照されたい。

表-3.8は試験時の応力レベルに配慮して整理した岩盤の変形性に関する各係数のばらつきの指標をとりまとめたものであり, 図-3.23は深成岩からなる岩盤の岩級別の各係数のばらつきの実態を一例としてヒストグラムで示したものである。これらの結果によれば, 各係数のばらつきの幅はかなり大きく各係数ごとあるいは岩級ごとの明確な傾向はない。すなわち, 各係数の変動係数は深成岩盤の場合0.6~0.8, 火成堆積岩盤で0.5~0.6, 水成堆積岩盤で0.4~0.6の範囲にある。このようにばらつきの分布幅が大きい原因は前述したように岩盤の区分を拡大したこと, 多くの地点のデータをとりまとめて分析したこと, など母集団の精度低下にあるものと考えられる。

一方, 図-3.24は深成岩からなる岩盤のせん断強度のばらつきの分布をヒストグラム表示したものである。一般に強度特性は設計上, 強度係数(粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ)として評価し議論すべきものと考えられるが, ここでは図-3.24に示すように破壊時の垂直応力とせん断応力(σ_N, τ_f)の値とその値より求めた回帰曲線($\tau_f = c + \sigma_N \tan \phi$)との差分量($\Delta\tau_1, \Delta\tau_2, \dots$)を各岩級ごと整理し, せん断強度のばらつきとして評価したものである。これによると岩級が低下すると回帰曲線からのばらつきの幅は小さくなり直線近似による破壊の包絡線もよく適合することが理解されよう。

以上, 岩盤の力学係数のばらつきの分布の一例を示したが, 岩種, 岩級ごとのデータは不足しており, 今後岩盤の統計的性質を明確にするため

にはさらに同一条件下で統一的に実施されるデータの集積が待たれるところである。

3.3.2 物性値のばらつきの分布と確率モデル

調査・試験によって得られる地盤の物性値を確率的な量とし統計的に地盤の安定問題を取り扱う場合, 基本的にはばらつきの分布形状を最も合理的と思われる確率モデルで表現する必要がある。この確率モデルの設定に際しては前節のカイ2乗検定の方法が一般に用いられている。以下に岩石・岩盤の強度, 変形特性を表す物性値のばらつきの分布について確率モデルを検討した結果の例を示す。

前述の図-3.20には一軸圧縮強度のばらつきを示す度数分布に二項分布, ポアソン分布, 正規分布, ワイブル分布, ガンマ分布の5つの分布関数により確率モデルのあてはめを行った例を示してある。また, 表-3.9は岩種・岩級ごとに得られた一軸圧縮強度の度数分布に対する適性分布関数とばらつきの指標との関係をとりとまとめたものである。岩種別にみると泥岩, 砂岩のように比較的ばらつきの幅の少ないものに対しては正規分布やポアソン分布が確率モデルとして適切であり, 花崗岩や花崗閃緑岩のような深成岩

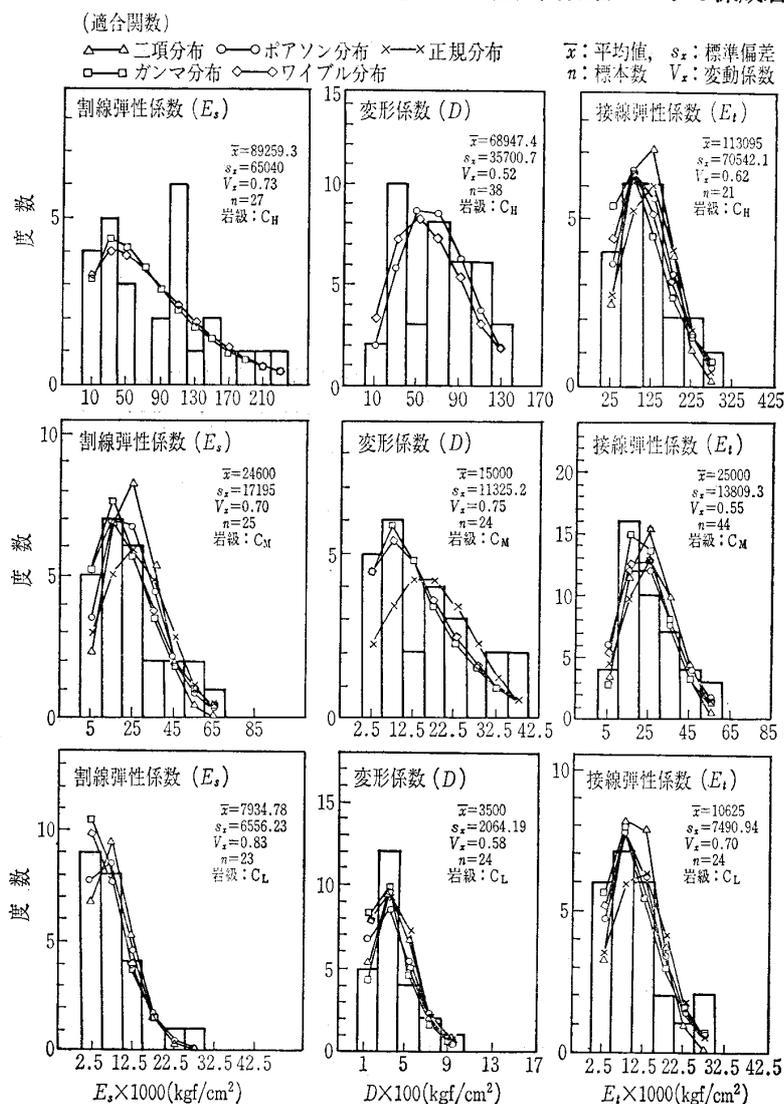


図-3.23 深成岩(花崗岩, 閃緑岩など)からなる岩盤の変形特性のばらつきの実態

講座

の場合岩級が低下するに従い、ガンマ分布やワイブル分布などがよく適合する傾向を示している。

一方、泥岩、砂岩の岩石の三軸圧縮強度とその変形係数のヒストグラムについて同様の確率モデルのあてはめを行った結果の一例が前述の図-3.22に示されている。三軸圧

縮強度、変形係数のばらつきの分布に対してはほとんどの場合分布関数として正規分布が適合し、ガンマ分布、ポアソン分布の適合度もよいこと、分布関数のパラメーターがデータの個数や拘束圧の違いに対して著しく変化しないこと、などが報告されている。詳細は文献(30)を参照され

表-3.9 一軸圧縮強度の岩種、岩級ごとの適正確率密度分布関数とばらつきの指標^{*)}

岩種	岩級	検定	適正分布関数	平均値(kgf/cm ²)	標準偏差(kgf/cm ²)	変動係数	最大値(kgf/cm ²)	最小値(kgf/cm ²)	標本数(個)
泥岩(MS)		○	正規分布, ワイブル分布	23.2~32.7	3.78~10.9	0.162~0.387	28.6~63.4	7.3~17.4	94~718
砂岩(SS)		○	ポアソン分布, ガンマ分布	11.3~20.4	6.78~14.2	0.332~0.463	5.4~62.8	4.4~8.0	19~163
凝灰岩(CO)	B		[ワイブル分布, 正規分布]	1,150	266	0.231	1,603	670	15
	C _H	○	ワイブル分布, ガンマ分布	896	255	0.385	1,577	480	101
	C _M	○	ワイブル分布, ポアソン分布	914	238	0.260	1,474	492	28
片岩(SC)			[ワイブル分布, ガンマ分布]	1,000	619	0.619	2,102	59	26
	C _L	○	ワイブル分布, ガンマ分布	70.8	59.9	0.846	209	0.50	48
流紋岩(RH)	B	○	ガンマ分布, ワイブル分布	948	580	0.612	2,487	138	84
	C _H	○	ポアソン分布, ガンマ分布	608~699	248~467	0.408~0.678	1,343~2,191	98.3~185	37~127
	C _M		[ワイブル分布, ガンマ分布]	—	—	—	—	—	—
	C _L		[ワイブル分布, ガンマ分布]	—	—	—	—	—	—
花崗閃緑岩(GD)	B	○	ワイブル分布, 正規分布	962	431	0.448	2,020	155	74
	C _H	○	正規分布, ワイブル分布	789	481	0.609	1,970	51	137
	C _M	○	[ワイブル分布, ガンマ分布]	410	312	0.736	1,422	5.2	146
	C _L		[ワイブル分布, ガンマ分布]	109	94.1	0.836	575	4.5	27
花崗岩(GR)	A		[正規分布, ガンマ分布]	898	204	0.227	1,150	603	9
	B	○	正規分布, ガンマ分布	958	386	0.403	2,200	158	76
	C _H	○	ワイブル分布, ガンマ分布	721~1,430	391~491	0.343~0.542	1,870~2,373	87.3~553	21~126
	C _M	○	ワイブル分布, ガンマ分布	437~988	269~588	0.587~0.615	1,790~2,071	6~105	34~145
	C _L	○	ガンマ分布, ワイブル分布	140~589	85.1~452	0.609~0.888	395~1,316	5~41	27~61
D		[ガンマ分布, ワイブル分布]	0.58	0.21	0.362	0.97	0.28	17	
輝緑凝灰岩(SN)	C _H		[ガンマ分布, ワイブル分布]	372	295	0.793	1,398	5.8	23
凝灰角礫岩(TB)			[ワイブル分布, ポアソン分布]	80.4	30.9	0.384	155.1	39.1	26

注1 ○は分布関数の適合度検定済のもの
 注2 []内は変動係数から推定した分布関数
 注3 ~は複数のデータがある場合の範囲を示す

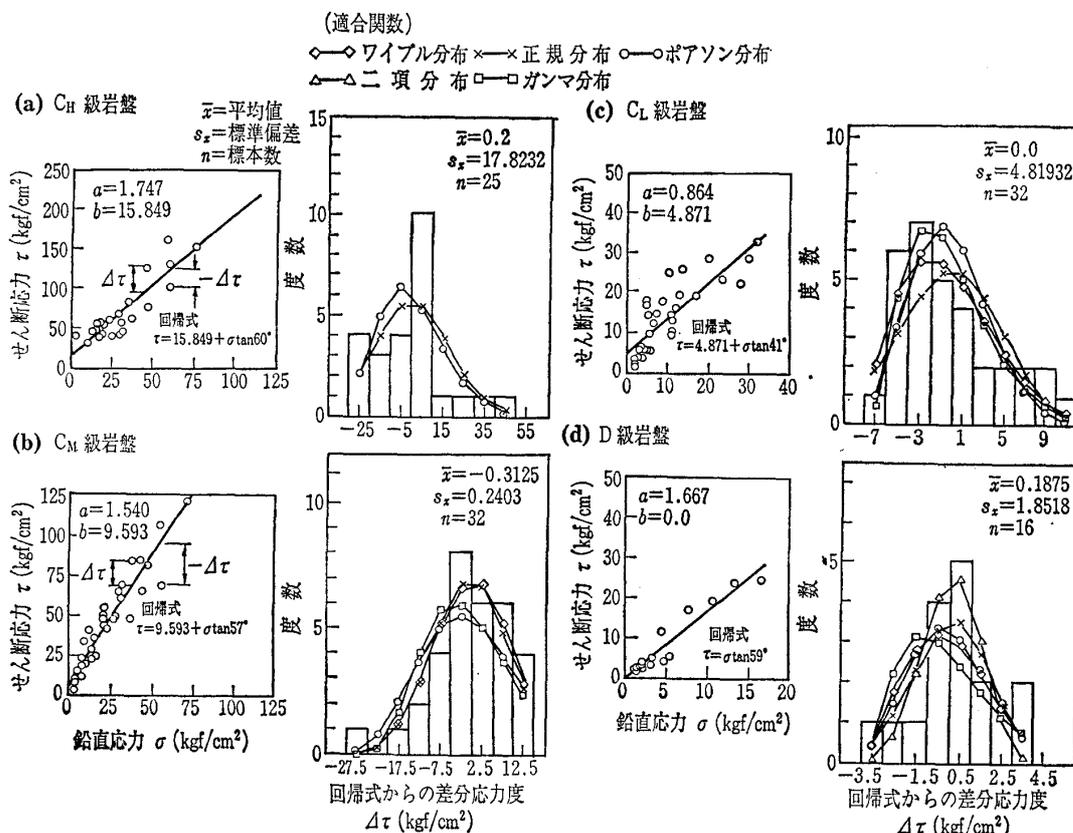
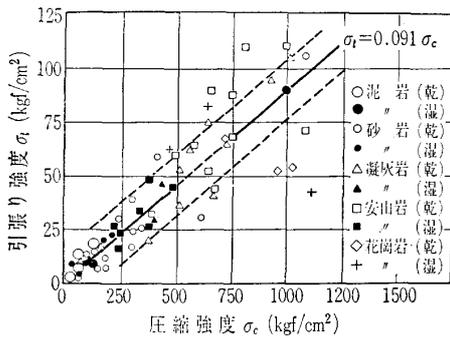


図-3.24 深成岩(花崗岩, 閃緑岩)からなる岩盤せん断強度のばらつきの実態

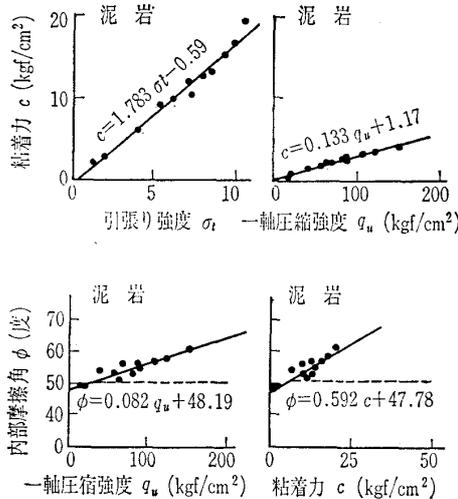
たい。

また、岩盤の変形特性を表す割線弾性係数、変形係数および接線弾性係数の度数分布の形状に対して確率モデルのあてはめを行った結果の一例を前述の図—3.23および表—3.8に示した。図表に示されるように確率モデルの分布形状として余裕度のあるワイブル分布ならびにガンマ分布の適合度がかなり高いが、岩級別あるいは各係数別に一般的な傾向はない。同様に岩盤せん断強度について上述のデータ整理によって得られた度数分布に対して確率モデルのあてはめを行った結果を前述の図—3.24に参考のため示した。

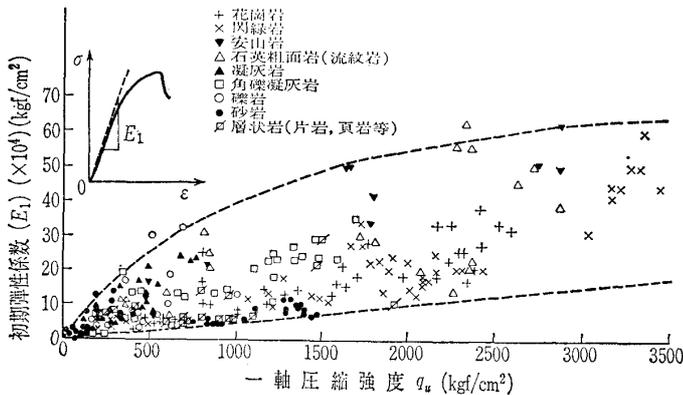
以上のように岩石・岩盤物性値のばらつきの分布形状に



図—3.25 圧縮強度と引張り強度の相関⁶⁾



図—3.26 泥岩の植物値同士の相関例⁶⁾



図—3.27 各種岩石の一軸圧縮強度と初期弾性係数 E_1 との相関関係⁷⁾

対してはほとんど正規分布で近似しうるものの、ここに示した例のように変動係数が0.5以上と大きい場合には、実務上、正規分布の適用範囲を限定するか、あるいは確率モデルの分布関数としてはガンマ分布やワイブル分布などの関数形を用いる方がよいものと考える。

3.3.3 各種物性値の相関

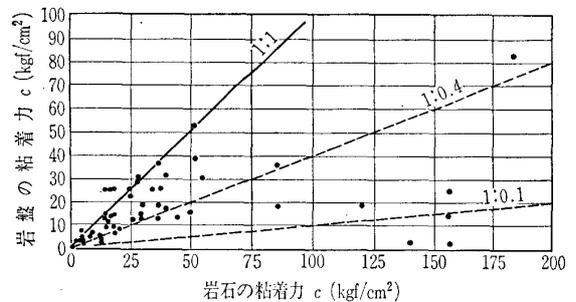
ここでは、岩石および岩盤の力学特性に関する主な物性値同士の相互関係を示す。なお、各種岩石の物理係数と力学試験によって得られる係数との相関については文献25), 30)などに例が多いので参照されたい。

i) 岩石試験による物性値の相関

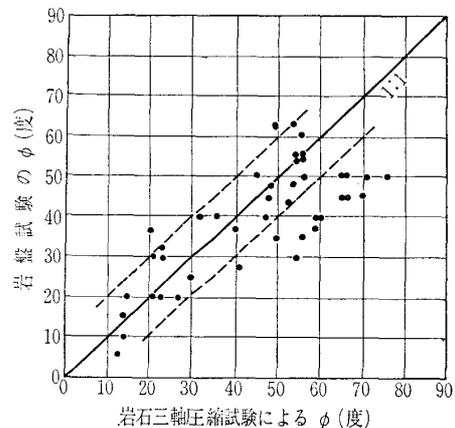
図—3.25は岩種ごとの一軸圧縮強度と圧裂試験による引張り強度との相関を示した例であり、図—3.26は一軸圧縮強度、引張り強度と強度係数(粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ)との関係を軟質な泥岩の場合について示したものである。また、図—3.27は各種岩石の一軸圧縮強度と弾性係数 E_1 (図中の定義参照)との相関である⁷⁾。これらの図から判断されるように、一軸圧縮強度と粘着力との間にはかなりの相関が認められるものの、変形特性の間には強い相関があると言い難い傾向にある。なお、文献32)では一般に一軸圧縮強度の増加に従い粘着力も増加するが、内部摩擦角は一軸圧縮強度が100~150 kgf/cm²以上になると45°~65°の範囲で頭打ちの状態となることを報告している。

ii) 岩石と岩盤との物性値の相関

図—3.28~29は岩石の三軸圧縮試験と岩盤せん断試験に

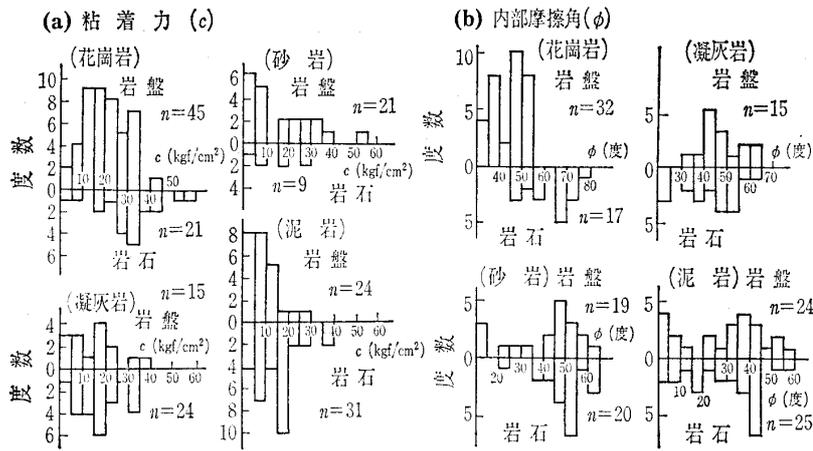


図—3.28 岩石の三軸圧縮試験と岩盤せん断試験による粘着力の相関⁶⁾



図—3.29 岩石の三軸圧縮試験と岩盤せん断試験による内部摩擦角の相関⁶⁾

講座

図-3.30 岩種ごとの岩石と岩盤強度係数(c, ϕ)の分布¹⁰⁾

よる強度係数(c, ϕ)同士の相関例である。図に示されるように内部摩擦角 ϕ を除き、両者の相関はほとんどなく、かなりの範囲にばらついている。このばらつきは岩種の違い、節理や亀裂の影響などによるものと考えられる。それゆえ、岩石と岩盤の試験データの相関とそのばらつきの特性の把握にあたっては岩石試料と岩盤試験体の試験状況・状態をよく観察・分析し、岩石・岩盤の力学特性に及ぼす要因ごとのデータの収集や、節理や割れ目の本数と力学諸係数との関係を比較できるようなとりまとめを行うなど、岩石・岩盤の相関を基本的な要因ごとに整理していくことが今後、大切なことと考える。なお、図-3.30は岩種ごとに強度係数を度数分布で比較したものであるが、泥岩、砂岩、凝灰岩の場合には岩盤と岩石の両者の強度係数の度数分布の分布範囲や形状は類似している。しかしながら、花崗岩のような節理性岩盤では図の例のように節理や潜在クラックの影響の少ない岩石強度の方が一般には大きくなる傾向を示すことが多い³⁴⁾。

一方、文献31)、32)では岩石の一軸圧縮強度と岩盤せん断試験によって得られた強度係数(c, ϕ)、あるいは岩盤の変形試験による各種弾性係数などとの関係は同一地点の測定値であってもばらつきが大きく、両者に強い相関がある

とは言い難いと報告している。

以上述べたように、岩石と岩盤の物理・力学諸係数の相関性は低く、各物性値同士の値の差も硬質岩岩盤になるほど大きくなる傾向が一般にある。しかしながら、個々の力学諸係数のばらつきが大きくてもサイトごとに諸物理係数と岩石(あるいは岩盤)の物性値との相互関係を調べ、その関係から得られる力学諸係数値やばらつきの特性を設計に取り入れることが概略的な設計の段階では実施されることもある。この場合、基本的には設計上安全側となるようにデータの中から下限値を採用するか、経験的な設計係数と同等の値で安全性を検討することが

多い。なお、これら物性値の設計上の取扱いについては後述の「4. 土質データのばらつきを考慮した設計」の項を、岩級ごとの岩石と岩盤の物性値の相関等については文献32)、33)などに若干詳しいので各々、参照されたい。

参考文献

- 25) 土質工学会編：岩の工学的性質と設計・施工への応用，p. 342, 1974.
- 26) 日本応用地質学会：岩盤分類—応用地質特集号一，応用地質特別号，1984.
- 27) 土木学会編：ダム地質調査，p. 101, 1977.
- 28) 松尾 稔・川村国夫・板橋一雄：岩石強度の統計的性質に関する推定法，土と基礎，Vol. 31, No. 8, 1983.
- 29) 土木学会編：原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針—解説と設計への適用—，1983.
- 30) 伊藤 洋・北原義浩：地盤物性のバラツキの評価法(その1) 地盤物性のバラツキの実態とその表示法，電力中央研究所報告，研究報告，384025, 1985.
- 31) 糟谷憲司：既往資料による岩種・岩級と E_R の関係ならびに室内試験と現場試験の相関性について，電力中央研究所報告，第2号印刷物，1981.
- 32) 糟谷憲司：既往資料による岩種・岩級と岩盤せん断強度，内部摩擦角との関係ならびに室内試験と現場試験の相関性について，電力中央研究所報告，第2号印刷物，1981.
- 33) 土木学会岩盤力学委員会：岩盤のせん断強度調査報告(ボーリングコアとの相関)，土木学会誌，55-6, p. 60, 1970.
- 34) 土木学会原子力土木委員会：「原子力発電所地質・地盤の調査・試験法および地盤の耐震安定性の評価法」報告書，第3編地盤調査・試験法，1985.