

マイクロフィルム用資料

ISSN 0386-5878

土木研究所資料 第3728号

土木研究所資料

電気探査を用いたトンネルの 地山評価に関する研究報告書

平成12年3月

建設省土木研究所
道路部トンネル研究室

Copyright © (2000) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

電気探査を用いたトンネルの 地山評価に関する研究報告書

道路部トンネル研究室	室長	真下 英人
	主任研究員	石村 利明
	研究員	鈴木 正彦
		真弓 英大

要旨

本研究は、岩石の比抵抗値と物理特性および力学特性等との関係をコアサンプル試験により把握するとともに、事前調査から得られた地山の比抵抗値と施工時における地山状況との関係を検討することにより、事前調査としての電気探査のトンネルの地山評価への適用性について考察を加えたものである。

キーワード：トンネル、事前調査、地山評価、電気探査、比抵抗値

目 次

第1章 はじめに	1
第2章 コアサンプルによる岩石の比抵抗値の特性	2
2.1 概説	2
2.2 測定方法	2
2.2.1 供試体および試験項目	2
2.2.2 物理的特性試験	7
2.2.3 比抵抗値測定	7
2.2.4 超音波伝播速度測定	9
2.2.5 一軸圧縮強度試験	10
2.2.6 陽イオン交換容量試験	10
2.3 測定結果	12
2.3.1 測定時間が比抵抗値に及ぼす影響	12
2.3.2 浸透水の比抵抗値が岩石の比抵抗値に及ぼす影響	13
2.3.3 比抵抗値と物理的・力学的・鉱物化学的特性との関係	14
2.4 まとめ	62
第3章 事前調査としての電気探査のトンネルの地山評価への適用性	63
3.1 概説	63
3.2 地山比抵抗値とトンネル施工時の地山状態との関係	63
3.2.1 検討方法および対象トンネル	63
3.2.2 各トンネルの地山比抵抗値と地山状態との関係	66
3.2.3 総合評価	109
3.3 現場採取コアを用いた比抵抗値の評価	113
3.3.1 検討方法および対象トンネル	113
3.3.2 コア比抵抗値と地山状態との関係	118
3.3.3 コア比抵抗値と地山比抵抗値との関係	130
3.4 まとめ	133
第4章 結論および今後の課題	134

第1章 はじめに

山岳トンネルの計画・設計にあたっては、地山状態を十分に把握することが必要となる。このため、現在では、地表地質踏査、弾性波探査、ボーリング試験、地山試料試験等の事前調査が実施され、これらの事前調査結果に基づき地山分類、支保構造の設計が行われている。特に、弾性波探査は、地山分類を行うための重要な指標として用いられているが、地下水の状態や高い速度帯下部の低速度帯の存在などを検知できないなどの問題がある。最近では、これらを検知できる手法として地山の比抵抗値を測定する電気探査による事前調査の事例が増加してきた。しかしながら、地山の比抵抗値は、岩種や地山の飽和度および間隙率などにより異なるため、今後、トンネルの事前調査として地山分類および支保設計のための指標として活用していくためには、地山の比抵抗値の評価方法の確立が必要となる。

本研究は、電気探査から得られた地山の比抵抗値の評価方法および事前調査としての電気探査の適用性について検討することを目的として、コアサンプルを用いた試験から各種岩石の比抵抗値と物理的特性および力学的特性等との関係について把握するとともに、実トンネルで実施された事前調査結果とトンネル施工時の地山状態との関係について調査したものである。

第2章 コアサンプルによる岩石の比抵抗値の特性

2. 1 概説

事前調査から得られる地山の比抵抗値から地山の適正な評価を行うためには、岩石毎の飽和度や間隙率などに応じた比抵抗値の変化を把握することが重要となる。そこで、代表的な岩種を対象として、コアサンプルを用いて岩石の比抵抗値を測定するとともに、各種物理試験および力学強度試験を行い、比抵抗値と各試験結果との関連を明らかにすることにより、事前調査で得られた地山の比抵抗値から地山の状態を把握する上で基礎となる資料を得ることとした。

2. 2 測定方法

2. 2. 1 供試体および試験項目

岩石のコアサンプルによる比抵抗値の測定は、種々の岩種に対して行うこととし、施工中のトンネル切羽などから採取した供試体を用いて実施した。供試体は、1岩種につき1個～5個の供試体を作成し、後述する各種物理試験の他、力学強度試験を実施した。なお、試験を行った供試体は、直径30mm、高さ60mmの寸法に整形した大きさとし、合計45条件としたが、花崗岩の一部の供試体については供試体の状態が悪いため一辺が50mmの立方体とした。表-2.1～2.2に供試体とその産地、年代および試験結果の一覧を示す。表-2.1～2.2の施工中のトンネル切羽などから採取した供試体は、現地においてブロック状で採取し、整形したものを用いた。

実施した試験項目は、各供試体について見掛け比重、吸水率、有効間隙率、飽和度、含水比および体積含水率などの物理的特性を求める試験、比抵抗値測定、超音波伝播速度測定とした。なお、比抵抗値測定および超音波伝播速度測定に関しては、石英閃緑岩のコアサンプルを除く各供試体は4種類の含水状態（水分飽和度100%、70%、50%、30%）での値を求めた。また、コアサンプルの比抵抗値は、浸透水の比抵抗値により変化することが考えられるため、その影響を把握するため、代表的なサンプルに対しては、25、100、400 $\Omega \cdot m$ の3種類の異なる浸透水比抵抗値で測定を行った。その他、力学強度試験として一軸圧縮強度試験を各岩種について1～3供試体実施するとともに、粘土鉱物の含有量の試験として陽イオン交換容量試験を行った。

表-2.1(1) 供試体一覧表

試料区分		産地	年代	形態	物理試験結果										一軸圧縮試験結果				
岩種	試料 NO.				密度試験		見掛け比重			吸水率	有効 間隙率	含水比	飽和度	一軸圧縮 強度	静弾性係数		静ポアソン比		
					自然	強制湿潤	自然	強制湿潤	乾燥						ひずみゲージ	ダイヤルゲージ			
					γ g/cm3	γ_s g/cm3	γ_n —	γ_s —	γ_d —						Wab %	ne %		Wn %	Sr %
凝灰岩	1-1	静岡県賀茂郡河津町	新第三紀 中新世	—	—	—	2.173	1.940	11.980	23.245	—	—	40.7	8.59	—	—			
	1-2			—	—	2.125	1.897	12.040	22.835	—	—	38.1	8.31	—	—				
	1-3			—	—	2.142	1.870	14.576	27.252	—	—	38.7	5.46	—	—				
凝灰岩	2-1	栃木県宇都宮市大谷町	新第三紀 中新世	—	—	—	1.876	1.502	24.960	37.480	—	—	18.1	3.19	—	—			
	2-2			—	—	1.859	1.476	25.940	38.300	—	—	18.6	3.16	—	—				
	2-3			—	—	1.876	1.527	22.910	34.970	—	—	21.0	3.58	—	—				
複雲母花崗岩	3-1	愛知県岡崎市米河内	中生代 白亜紀	—	—	—	2.617	2.611	0.208	0.543	—	—	107.2	15.97	—	—			
	3-2			—	—	2.618	2.613	0.198	0.517	—	—	119.6	14.80	—	—				
	3-3			—	—	2.619	2.613	0.221	0.579	—	—	138.0	14.41	—	—				
緑泥片岩	4-1	埼玉県秩父郡親鼻橋	中生代 白亜紀	目に平行	—	—	2.952	2.945	0.259	0.762	—	—	114.5	13.13	—	—			
	5-1			目に直交	—	—	—	2.981	2.974	0.217	0.646	—	—	55.7	14.60	—	—		
	4-2			目に平行	—	—	—	2.970	2.963	0.230	0.683	—	—	149.1	17.05	—	—		
	5-2			目に直交	—	—	—	2.973	2.965	0.264	0.782	—	—	75.7	12.45	—	—		
	4-3			目に平行	—	—	—	2.966	2.961	0.176	0.521	—	—	168.0	14.31	—	—		
	5-3			目に直交	—	—	—	2.974	2.967	0.222	0.658	—	—	103.5	17.35	—	—		
砂岩	6	静岡県藤枝市鬼岩寺	古第三紀末～新第三紀	—	—	—	2.475	2.377	4.141	9.842	—	—	87.0	9.90	—	—			
チャート	7	群馬県甘楽郡南牧村	古生代 二疊紀	—	—	—	2.641	2.637	0.154	0.405	—	—	192.4	42.34	—	—			
石灰岩	8	東京都西多摩郡大久野	古生代 二疊紀	—	—	—	2.680	2.678	0.081	0.218	—	—	101.6	36.26	—	—			
頁岩	9	宮城県石巻市井内	中生代 三疊紀	目に平行	—	—	2.738	2.735	0.114	0.313	—	—	158.9	37.14	—	—			
	10			目に直交	—	—	—	2.734	2.731	0.110	0.299	—	—	198.5	40.87	—	—		
石英安山岩	11	宮城県白石市小原	新第三紀 中新世	—	—	—	2.531	2.490	1.647	4.100	—	—	62.8	12.64	—	—			
流紋岩	12	長野県長野市塩生	新第三紀 中新世	目に平行	—	—	2.356	2.312	1.884	4.357	—	—	141.6	25.87	—	—			
	13			目に直交	—	—	—	2.385	2.360	1.050	2.479	—	—	267.4	32.44	—	—		
カンラン石玄武岩	14	兵庫県豊岡市玄武洞	新第三紀 中新世	—	—	—	2.767	2.717	1.837	4.990	—	—	163.9	23.03	—	—			
角閃石片麻岩	15	岐阜県吉城郡神岡町	古生代	目に平行	—	—	2.875	2.872	0.122	0.350	—	—	147.7	37.73	—	—			
	16			目に直交	—	—	—	2.865	2.860	0.164	0.470	—	—	171.2	39.59	—	—		
標準砂	17	山口県豊浦郡豊浦町	—	—	—	—	1.897	1.493	27.102	40.452	—	—	—	—	—	—			
マサ	18	広島県広島市佐伯区	—	—	—	—	2.471	2.385	3.615	8.622	—	—	9.1	0.52	—	—			
土丹	19	神奈川県横浜市	第四紀	—	—	—	1.838	1.354	35.680	48.326	—	—	9.0	1.08	—	—			
普通輝石紫蘇輝石安山岩	20-1	神奈川県小田原市根府川	第四紀 更新世	—	—	—	2.657	2.614	1.647	4.305	—	—	290.4	24.89	—	—			
	20-2			—	—	—	—	2.660	2.617	1.641	4.294	—	—	232.7	22.64	—	—		
	20-3			—	—	—	—	2.661	2.618	1.647	4.312	—	—	250.2	23.91	—	—		
フズリナ石灰岩	21-1	栃木県安蘇郡葛生町	古生代 二疊紀	—	—	—	2.712	2.710	0.061	0.164	—	—	177.9	49.98	—	—			
	21-2			—	—	—	—	2.705	2.704	0.047	0.128	—	—	155.4	46.35	—	—		
	21-3			—	—	—	—	2.706	2.704	0.064	0.173	—	—	85.3	23.91	—	—		
凝灰質砂岩	22-1	千葉県安房郡鋸山	新第三紀 中新世	—	—	—	2.074	1.728	20.000	34.570	—	—	14.6	1.81	—	—			
	22-2			—	—	—	—	2.061	1.710	20.550	35.140	—	—	15.9	1.95	—	—		
	22-3			—	—	—	—	2.052	1.692	21.260	35.980	—	—	10.6	1.27	—	—		
凝灰質砂岩	23-1	宮城県鳴瀬町	新第三紀 中新世	—	—	—	1.587	1.013	56.635	57.366	—	—	5.49	0.63	—	—			
	23-2			—	—	—	—	1.583	1.010	56.690	57.281	—	—	5.21	0.51	—	—		
	23-3			—	—	—	—	1.612	1.042	54.665	56.974	—	—	2.77	0.33	—	—		
	23-4			—	—	—	—	1.639	1.101	48.891	53.892	—	—	2.96	0.19	—	—		
泥岩	24-1	茨城県水戸市	新第三紀 中新世	—	—	—	2.197	1.759	24.860	43.740	—	—	18.8	1.65	—	—			
	24-2			—	—	—	—	2.227	1.777	25.310	44.980	—	—	18.0	1.64	—	—		
	24-3			—	—	—	—	2.120	1.668	27.060	45.140	—	—	17.2	1.47	—	—		
泥岩	25-1	千葉県安房郡鋸山	新第三紀 中新世	—	—	—	1.828	1.404	30.162	42.352	—	—	10.11	1.79	—	—			
	25-2			—	—	—	—	1.706	1.324	28.861	38.216	—	—	27.77	3.98	—	—		
	25-3			—	—	—	—	1.857	1.432	29.700	42.530	—	—	29.08	5.17	—	—		
	25-4			—	—	—	—	1.838	1.407	30.590	43.051	—	—	21.79	2.85	—	—		
熔結凝灰岩	26-1	熊本県人吉市	第四紀 更新世	—	—	—	2.406	2.363	1.813	4.284	—	—	46.06	8.22	—	—			
	26-2			—	—	—	—	2.354	2.272	3.612	8.208	—	—	49.45	8.36	—	—		
	26-3			—	—	—	—	2.043	1.716	19.007	32.622	—	—	2.77	0.70	—	—		
	26-4			—	—	—	—	2.195	1.964	11.756	23.085	—	—	23.59	3.04	—	—		

表-2. 1(2) 供試体一覧表

試料区分		超音波伝達速度								比抵抗試験					陽イオン交換容量試験(CEC)			備考
岩種	試料 NO.	P波速度				S波速度				比抵抗				浸透水 比抵抗	細粒 meq/100g	区別なし meq/100g	粗粒 meq/100g	
		飽和度:100%				飽和度:70%				飽和度:50%				ρ_w				
		km/sec	km/sec	km/sec	km/sec	km/sec	km/sec	km/sec	km/sec	Ω·m	Ω·m	Ω·m	Ω·m	Ω·m				
凝灰岩	1-1	3.0051	2.9488	2.9010	2.9451	1.4852	1.4910	1.5644	1.6668	113	146	170	245	100			18.3	
	1-2	2.7360	2.7912	2.7135	2.7999	1.4535	1.4923	1.4084	1.5369	87	114	141	187	400			20.3	
	1-3	2.8393	2.7633	2.7353	2.8012	1.4520	1.4444	1.4299	1.5122	64	83	109	149	25			21.3	
凝灰岩	2-1	2.1740	1.8150	1.7570	1.8240	0.9290	0.9470	0.9940	1.0340	27	29	37	69	100			108.0	
	2-2	2.1820	1.8720	1.7450	1.8440	0.8950	0.9250	0.9510	1.0080	27	28	36	76	100			105.0	
	2-3	2.1790	1.8530	1.7880	1.8800	0.9050	0.9620	1.0280	1.0870	26	27	37	72	100			108.0	
複葉母花崗岩	3-1	4.3720	4.1547	4.0269	4.0364	2.1318	2.1383	2.1174	2.2601	1458	2815	5647	34197	100			2.7	
	3-2	4.2555	4.0951	3.9637	3.9167	2.1547	2.1285	2.1201	2.2112	2089	4063	8630	46920	400			3.0	
	3-3	4.2115	4.1182	3.9697	3.9977	2.1979	2.1563	2.1424	2.2192	1554	3322	7514	44627	25			2.1	
緑泥片岩	4-1	4.2914	3.6193	3.1691	3.2801	2.2226	2.2267	2.2585	2.3393	10068	16024	26804	87410	100			4.6	
	5-1	5.3021	5.1534	4.9871	5.1921	2.2225	2.2337	2.2195	2.2274	1430	1910	2822	9095	100			2.9	
	4-2	4.7784	3.8272	3.4821	3.4673	2.2454	2.1633	2.3065	2.3976	11362	18208	36086	90929	400			6.3	
	5-2	5.1506	5.1511	5.2336	5.1193	2.1978	2.1972	2.2833	2.3083	1097	1552	2406	8610	400			3.0	
	4-3	4.1073	3.4622	3.2641	3.3570	2.2582	2.1965	2.2695	2.3927	9828	19386	34385	100885	25			5.2	
砂岩	5-3	5.5051	5.1248	5.1716	5.2222	2.2306	2.2337	2.1594	2.2689	1224	1853	3030	10569	25			2.9	
	6	3.0102	2.6751	2.4747	2.6370	1.3205	1.2233	1.2005	1.5125	79	105	142	399	100			4.2	
チャート	7	5.2027	4.8661	4.8144	5.1574	2.7112	2.5029	2.6558	2.5764	8053	18900	32270	88904	100			1.0	
石灰岩	8	5.4654	5.4357	5.7390	5.4149	2.6957	2.5974	2.5485	2.7830	30668	44570	57456	200000	100			0.1	
頁岩	9	5.7184	5.3197	5.0534	5.1976	2.5439	2.4616	2.5732	2.3826	1104	1906	2444	5565	100			2.0	
	10	5.4323	5.2488	5.1547	4.9711	2.5584	2.4367	2.5746	2.6388	5515	9024	13489	20456	100			1.9	
石英安山岩	11	4.2177	4.1462	4.1753	4.1095	2.3163	2.2947	2.1852	2.2426	2981	4359	7185	12648	100			4.5	
流紋岩	12	4.3691	3.9521	4.0502	4.1097	2.1252	2.1740	2.1149	2.1877	8648	12217	19742	39841	100			5.3	
カンラン石玄武岩	13	4.2466	4.0978	4.0352	4.2101	2.2903	2.2402	2.2778	2.1733	2029	3012	5768	18272	100			5.4	
	14	4.5930	4.5932	4.6102	4.3986	2.2964	2.2712	2.3045	2.1860	1406	1800	2367	3946	100			2.3	
角閃石片麻岩	15	5.2867	5.0639	4.9354	4.9761	2.5353	2.4410	2.4258	2.5726	4701	6950	12883	36196	100			2.2	
	16	5.6138	5.5015	5.2391	5.1525	2.4856	2.4077	2.4115	2.4184	1637	2335	4818	15189	100			2.4	
標準砂	17	1.3598	1.3319	1.2556	1.2112	1.0243	1.0527	1.0134	0.9686	64	89	272	2677	100			2.2	
マサ	18	1.8198	0.9054	0.8238	0.8924	0.5881	0.5451	0.5514	0.6157	313	287	1045	4182	100			2.9	
土丹	19	1.0750	0.9365	0.9458	0.8397	0.5713	0.6042	0.6193	0.6435	9	11	15	23	100			29.4	
普通輝石紫蘇輝石安山岩	20-1	4.6890	4.2470	4.3640	4.2260	1.8870	1.9320	1.9890	2.0410	279	364	919	5982	100			4.1	
	20-2	4.6890	4.4150	4.3070	4.3100	1.9530	1.9510	1.9470	1.9670	262	342	900	6819	100			3.9	
	20-3	4.3490	4.3930	4.2780	4.3750	1.9830	1.9340	2.0490	2.1170	267	360	915	6823	100			3.8	
フズリナ石灰岩	21-1	7.0870	6.7840	6.6160	6.6190	2.4280	2.5900	2.4780	2.5380	421200	450200	479500	700300	100			0.3	
	21-2	6.2500	6.1650	6.2180	6.4360	2.3260	2.4110	2.3890	2.6250	198200	259000	295700	417000	100			0.2	
	21-3	6.1280	6.2260	6.3100	6.5480	2.5050	2.5350	2.5860	2.6290	295100	295300	307600	555100	100			0.3	
凝灰質砂岩	22-1	1.9960	1.5740	1.5270	1.4820	0.8200	0.8180	0.8560	0.8660	22	29	34	51	100			14.8	
	22-2	1.9960	1.6070	1.5310	1.4920	0.7940	0.8270	0.9580	0.8670	21	26	33	50	100			15.2	
	22-3	1.9610	1.5260	1.5090	1.4560	0.7670	0.7860	0.8220	0.8370	20	25	30	48	100			14.2	
凝灰質砂岩	23-1	2.0800	1.7750	1.7870	1.7380	0.9700	1.0380	1.0670	1.1010	37	35	46	60	100			21.8	
	23-2	2.1100	1.5870	1.5790	1.6300	0.9400	0.9580	0.9930	1.0100	37	34	43	61	100			21.1	
	23-3	2.4200	1.8620	1.8800	1.9010	1.0700	1.0490	0.9910	0.9910	42	40	51	71	100			17.8	
	23-4	2.2100	1.3270	1.5380	1.4400	0.9000	0.9620	0.8810	0.8670	36	40	43	51	100			21.4	
泥岩	24-1	1.7990	1.4130	1.3850	1.3600	0.7350	0.7670	0.7910	0.8040	7	12	30	107	100			40.4	
	24-2	1.9810	1.3300	1.2420	1.3030	0.7630	0.8220	0.8200	0.8150	5	12	18	112	100			38.5	
	24-3	1.9340	1.3920	1.2130	1.3840	0.8150	0.8580	0.8570	0.9170	5	18	28	67	100			42.6	
泥岩	25-1	1.6260	1.5470	1.3480	1.8050	0.7300	0.8480	0.7720	1.0230	5	3	4	15	100			33.8	
	25-2	1.9480	1.8090	1.8090	1.9740	0.9090	0.9580	1.0430	1.1020	9	7	10	30	100			30.8	
	25-3	1.8090	1.7100	1.7460	1.7860	0.8940	0.9630	1.0160	1.1440	11	8	13	34	100			33.2	
	25-4	1.8500	1.6480	1.6700	1.7440	0.8790	0.9800	1.0120	1.1070	13	9	12	39	100			28.1	
熔結凝灰岩	26-1	3.6550	3.6660	3.7020	3.4600	1.8060	1.8190	1.8030	1.6410	774	799	1040	3160	100			2.4	
	26-2	3.9000	3.5050	3.4480	3.4480	2.0300	2.0080	2.0430	2.1150	193	233	395	2575	100			6.3	
	26-3	2.5000	2.1250	2.0450	2.0220	1.0300	1.0050	1.0610	1.1420	23	20	26	44	100			9.4	
	26-4	2.5000	2.5000	2.5000	2.4330	1.3160	1.3460	1.3070	1.4330	22	22	26	29	100			5.1	

表-2. 2(1) 供試体一覧表

試料区分		産地	年代	形態	物理試験結果										一軸圧縮試験結果					点荷試験結果	
岩種	試料 NO.				密度試験		自然 γ _n g/cm ³	見かけ比重		乾燥 γ _d	吸水率 Wab %	有効 間隙率 n _e %	含水比 Wn %	飽和度 Sr %	一軸圧縮 強度 σ _c MPa	静圧性係数		静水圧比 ν	点荷強度 Is50 KPa	軸圧縮強度 (推定) C0 KPa	
					自然 γ _n g/cm ³	強制浸潤 γ _s g/cm ³		自然 γ _n	強制浸潤 γ _s							ひずみ率 E50 GPa	ダイヤル率 DE50 GPa				
石英閃緑岩	27-1	SKトンネル (Sta.20+70)	中生代	—	2.775	—	2.874	2.876	2.842	1.200	3.400	1.140	95.3	60.9	12.3	12.2	0.211				
	27-2			—	2.705	—	2.810	2.812	2.768	1.590	4.400	1.540	97.1	83.9	33.6	20.3	0.245				
	27-3			—	2.761	2.761	2.856	2.857	2.827	1.070	3.030	1.010	94.5	126.4	43.0	37.0	0.211				
	27-4			—	2.786	2.786	2.893	2.895	2.867	0.985	2.770	0.921	95.4	126.4	38.8	30.6	0.277				
石英閃緑岩	28-1	SKトンネル (Sta.20+36.8)	中生代	—	2.812	—	2.942	2.942	2.926	0.550	1.610	0.539	98.0	150.9	63.0	42.4	0.286				
	28-2			—	2.797	—	2.785	2.785	2.755	1.080	2.980	1.060	98.1	109.8	57.8	35.8	0.210				
	28-3			—	2.833	2.834	2.882	2.883	2.866	0.596	1.710	0.585	98.1	132.3	53.9	41.7	0.243				
	28-4			—	2.796	2.797	2.769	2.769	2.747	0.813	2.230	0.801	98.5	124.5	55.4	49.0	0.276				
石英閃緑岩	29-1	SKトンネル (Sta.19+89.8)	中生代	—	2.804	—	2.801	2.801	2.790	0.395	1.100	0.386	97.7	226.4	66.8	46.2	0.285				
	29-2			—	2.807	—	2.795	2.795	2.786	0.328	0.914	0.328	100.0	254.8	70.0	53.0	0.223				
	29-3			—	2.783	2.784	2.808	2.808	2.799	0.320	0.895	0.310	97.0	212.7	64.2	44.9	0.284				
	29-4			—	2.812	2.812	2.816	2.816	2.808	0.292	0.819	0.292	100.0	199.9	69.7	49.9	0.287				
石英閃緑岩	30-1	SKトンネル (Sta.19+79)	中生代	—	2.734	—	2.763	2.763	2.754	0.301	0.829	0.301	100.0	159.7	55.5	42.3	0.289				
	30-2			—	2.757	—	2.756	2.756	2.745	0.416	1.140	0.416	100.0	147.0	54.5	41.5	0.237				
	30-3			—	2.763	2.764	2.769	2.770	2.760	0.331	0.914	0.320	96.8	153.9	57.1	41.9	0.276				
	30-4			—	2.759	2.760	2.771	2.771	2.759	0.430	1.190	0.430	100.0	156.8	50.9	41.6	0.317				
石英閃緑岩	31-1	SKトンネル (Sta.19+70.3)	中生代	—	2.864	—	2.850	2.850	2.835	0.544	1.540	0.544	100.0	144.1	58.8	42.4	0.282				
	31-2			—	2.848	—	2.867	2.867	2.849	0.620	1.770	0.620	100.0	147.0	67.5	45.3	0.271				
	31-3			—	2.864	2.864	2.833	2.833	2.816	0.603	1.700	0.588	97.6	120.5	51.6	38.3	0.280				
	31-4			—	2.878	2.878	2.854	2.854	2.838	0.543	1.540	0.543	100.0	126.4	55.9	43.1	0.284				
石英閃緑岩	32-1	SKトンネル (Sta.19+55.3)	中生代	—	2.831	—	2.749	2.749	2.737	0.446	1.280	0.466	100.0	165.6	49.0	40.5	0.301				
	32-2			—	2.810	—	2.749	2.749	2.739	0.381	1.040	0.381	100.0	100.0	49.1	44.0	0.316				
	32-3			—	2.809	2.809	2.755	2.755	2.745	0.382	1.050	0.382	100.0	203.8	70.4	47.9	0.261				
	32-4			—	2.815	2.815	2.752	2.752	2.741	0.396	1.080	0.396	100.0	92.4	69.9	50.1	0.298				
頁岩	33-1	WCトンネル (Sta.301+00)	中生代	—	2.644	—	2.661	2.661	2.653	0.316	0.838	0.316	100.0	94.5	39.0	36.6	0.157				
	33-4			—	2.630	2.631	2.638	2.639	2.630	0.353	0.928	0.307	87.0	136.2	69.3	38.3	0.107				
チャート	33-2	WCトンネル (Sta.301+00)	中生代	—	2.664	2.664	2.670	2.670	2.663	0.297	0.790	0.286	96.4	130.3	67.2	35.3	0.488				
	33-3			—	2.657	2.658	2.670	2.670	2.662	0.314	0.836	0.290	92.3	124.5	63.9	33.1	0.423				
チャート	34-1	WCトンネル (Sta.302+10)	中生代	—	2.723	—	2.680	2.680	2.673	0.294	0.785	0.288	98.1	56.9	23.4	20.7	0.124				
	34-2			—	2.734	2.734	2.705	2.705	2.697	0.295	0.795	0.295	100.0	65.7	36.6	22.1	0.241				
	34-3			—	2.721	2.721	2.678	2.678	2.674	0.128	0.344	0.128	100.0	71.5	33.4	26.8	0.164				
	34-4			—	2.700	2.701	2.719	2.719	2.708	0.394	1.070	0.394	100.0	76.0	24.0	22.3	0.205				
頁岩	35-1	WCトンネル (Sta.304+10)	中生代	—	2.655	—	2.671	2.673	2.629	1.640	4.310	1.570	95.6	72.6	35.5	33.5	0.145				
	35-2			—	2.655	2.661	2.669	2.672	2.621	1.920	5.030	1.820	95.1	115.6	54.7	39.2	0.202				
	35-3			—	2.654	2.690	2.654	2.658	2.621	1.310	3.690	1.150	88.0	29.8	22.2	15.2	0.274				
	35-4			—	2.671	2.675	2.679	2.680	2.634	1.740	4.570	1.700	97.9	32.2	13.1	9.9	0.120				
頁岩	36-1	WCトンネル (Sta.306+00)	中生代	—	2.716	—	2.709	2.709	2.664	1.690	4.500	1.690	100.0	19.9	25.7	10.0	0.150				
	36-2			—	2.742	2.743	2.727	2.728	2.701	1.010	2.720	0.962	95.5	65.7	64.8	35.8	0.127				
	36-3			—	2.708	2.710	2.723	2.724	2.699	0.917	2.470	0.896	97.7	71.5	41.5	28.0	0.350				
	36-4			—	2.705	2.707	2.708	2.710	2.680	1.100	2.940	1.040	95.2	68.4	59.5	33.6	0.386				
砂岩	37-1	SMTンネル (Sta.921+00)	新第三紀 中新世	—	2.594	—	2.595	2.595	2.537	2.280	5.770	2.280	100.0	64.9	20.9	11.7	0.240				
	37-2			—	2.582	2.582	2.595	2.595	2.541	2.140	5.440	2.140	100.0	92.4	18.8	16.6	0.197				
	37-3			—	2.599	2.600	2.617	2.617	2.577	1.550	3.990	1.550	100.0	63.0	29.2	20.9	0.164				
	37-4			—	2.598	2.599	2.614	2.614	2.569	1.750	4.500	1.750	100.0	92.8	28.9	23.3	0.195				
砂岩	38-1	SMTンネル (Sta.921+60)	新第三紀 中新世	—	2.561	—	2.538	2.538	2.446	3.780	9.200	3.740	99.4	22.2	5.5	5.5	0.385				
	38-2			—	2.533	2.533	2.555	2.562	2.477	3.450	8.530	3.140	91.2	43.4	10.2	8.9	0.235				
	38-3			—	2.530	2.532	2.531	2.532	2.442	3.880	8.990	3.660	99.4	19.8	7.1	6.6	0.247				
	38-4			—	2.582	2.583	2.575	2.577	2.501	3.020	7.540	2.950	97.7	71.2	16.3	12.0	0.343				
花崗岩	39-1	YSTンネル (Sta.3+70)	中生代 白亜紀	—	2.041	2.102	(2.012)	(5.420)	(10.900)	(1.320)	(24.4)							108.8	2401.0		
	39-2			—	2.010	2.072	(1.970)	(6.300)	(12.400)	(1.950)	(30.9)							33.7	719.3		
	39-3			—	2.071	2.149	(2.038)	(6.510)	(13.300)	(1.400)	(21.5)							44.7	989.8		
	39-4			—	2.096	2.185	(2.037)	(7.950)	(16.200)	(0.810)	(10.2)							22.1	490.0		
花崗岩	40-1	YSTンネル (Sta.4+30)	中生代 白亜紀	—	1.960	2.090	(1.901)	(10.900)	(20.800)	(2.830)	(25.9)							55.1	1215.2		
	40-2			—	1.895	1.989	(1.860)	(8.530)	(15.900)	(1.620)	(19.0)							25.1	548.8		
	40-3			—	2.061	2.138	(2.033)	(6.510)	(13.200)	(1.040)	(15.9)							64.4	1421.0		
	40-4			—	2.121	2.182	(2.029)	(8.310)	(16.900)	(2.430)	(29.3)							59.7	1313.2		
花崗岩	41-1	YSTンネル (Sta.6+20)	中生代 白亜紀	—	2.638	—	2.631	2.632	2.611	0.802	2.090	0.779	97.1	17.5	63.8	51.2	0.166				
	41-2			—	2.634	2.636	2.628	2.630	2.603	1.020	2.650	0.965	94.6	68.3	26.2	20.1	0.319				
	41-3			—	2.613	2.615	2.612	2.613	2.578	1.370	3.530	1.330	97.5	63.7	17.3	15.9	0.350				
	41-4			—	2.619	2.621	2.618	2.620	2.586	1.320	3.420	1.230	93.0	71.8	22.1	16.8	0.260				
花崗岩	42-1	YSTンネル (Sta.6+90)	中生代 白亜紀	—	2.531	—	2.525	2.531	2.425	4.350	10.600	4.100	94.2	7.3	3.3	2.5	0.463				
	42-2			—	2.556	2.559	2.561	2.564	2.484	3.220	7.990	3.110	96.7	36.9	9.6	7.9	0.232				
	42-3			—	2.541	2.545	2.548	2.551	2.463	3.580	8.810	3.420	95.7	30.4	10.7	7.2	0.183				
	42-4			—	2.541	2.546	2.549	2.551	2.461	3.680	9.020	3.550	97.0	40.6	10.7	7.6	0.282				
花崗岩	43-1	YSTンネル (Sta.7+20)	中生代 白亜紀	—	2.450	—	2.489	2.504	2.398	4.400	10.600	3.790	86.0	15.3	3.4	2.9	0.360				
	43-2			—	2.449	2.455	2.509	2.523	2.428	3.910	9.490	3.330	85.1	26.6	4.3	4.0	0.313				
	43-3			—	2.511	2.530	2.540	2.548	2.473	3.040	7.510	2.710	89.3	25.1	7.1	5.2	0.201				
	43-4			—	2.481	2.502	2.536	2.544	2.467	3.140	7.740	2.810	89.4	20.3	3.7	3.6	0.279				
花崗岩	44-1	YSTンネル (Sta.8+61)	中生代 白亜紀	—	2.649	—	2.660	2.661	2.651	0.364	0.965	0.350	96.3	9.8	62.4	29.8	0.218				
	44-2			—	2.654	—	2.645	2.646	2.635	0.401	1.060	0.362	90.4								
	44-3			—	2.656	—	2.663	2.663	2.653	0.											

表-2. 2(2) 供試体一覧表

試料区分		超音波伝播速度								比抵抗試験						陽イオン交換容量試験 (CEC)			備考
岩種	試料 NO.	自然				強制濡潤				比抵抗					浸透水 比抵抗 ρ _w Ω・m	細粒 meq/100g	区別なし meq/100g	粗粒 meq/100g	
		P波速度 V _p km/sec	S波速度 V _s km/sec	動弾性係数 E _d GPa	動ポアソン比 ν _d —	P波速度 V _p km/sec	S波速度 V _s km/sec	動弾性係数 E _d GPa	動ポアソン比 ν _d —	自然状態 Q _m	飽和度100% Q _m	飽和度70% Q _m	飽和度50% Q _m	飽和度30% Q _m					
石英閃緑岩	27-1	4.55	2.27	38.2	0.334					137						4.80			
	27-2	5.07	2.70	51.3	0.302					190						4.66			
	27-3	5.70	2.95	63.2	0.317	5.70	2.95	63.21	0.317	226	195							3.78	
	27-4	5.58	2.84	59.5	0.325	5.58	3.03	66.05	0.291	197	177							3.36	
石英閃緑岩	28-1	6.02	3.06	69.9	0.326					358						2.96			
	28-2	5.96	3.06	69.1	0.321					241						3.35			
	28-3	6.16	3.08	71.5	0.333	6.16	3.28	79.38	0.302	612	539							1.84	
	28-4	6.05	3.13	72.3	0.317	6.16	3.34	80.56	0.292	358	337							2.24	
石英閃緑岩	29-1	6.35	3.29	80.1	0.317					435								0.72	
	29-2	6.29	3.39	83.5	0.295					735								0.60	
	29-3	6.23	3.23	76.3	0.316	6.23	3.36	81.44	0.295	553	133							0.77	
	29-4	6.31	3.46	86.6	0.285	6.31	3.50	87.91	0.278	794	212							0.60	
石英閃緑岩	30-1	6.08	3.23	74.3	0.303					1099								0.36	
	30-2	5.89	3.15	71.1	0.300					1109								0.36	
	30-3	6.02	2.98	65.6	0.338	6.12	3.03	67.91	0.338	1109	649							0.32	
	30-4	5.69	3.04	66.2	0.300	5.88	3.03	66.93	0.319	1070	673							0.48	
石英閃緑岩	31-1	6.25	3.43	86.6	0.285					355								0.89	
	31-2	6.49	3.37	85.1	0.315					739								1.09	
	31-3	6.25	3.24	79.2	0.316	6.48	3.30	82.61	0.325	291	293							1.01	
	31-4	6.27	3.25	80.0	0.316	6.50	3.44	88.98	0.305	257	264							0.93	
石英閃緑岩	32-1	6.29	3.20	76.8	0.325					1135								0.52	
	32-2	6.49	3.30	81.0	0.326					1268								0.50	
	32-3	6.52	3.38	84.4	0.316	6.52	3.38	84.38	0.316	1161	493							0.50	
	32-4	6.52	3.39	85.1	0.315	6.52	3.39	85.06	0.315	727	552							0.50	
頁岩	33-1	5.74	2.86	57.8	0.335					289					100			2.40	
	33-4	5.21	2.58	46.9	0.338					201	199	273	296	484	100			2.60	
チャート	33-2	5.21	2.44	43.2	0.360					3647	3640	7461	9755	523715	100			1.70	
	33-3	5.15	2.56	46.6	0.336					3559	3758	6786	8258	97773	100			2.10	
チャート	34-1	4.81	2.31	39.2	0.350					2564					100			2.40	
	34-2	4.70	2.07	32.4	0.380					4706	4318	6568	40697	93674	100			2.50	
	34-3	4.75	2.33	39.7	0.342					10347	10002	13107	20283	143213	100			2.00	
	34-4	4.73	2.29	38.0	0.347					2434	2416	2873	4410	10274	100			3.10	
頁岩	35-1	5.68	2.27	38.5	0.405					25					100			3.00	
	35-2	5.82	2.22	37.1	0.415					21	18	90	181	510	100			2.50	
	35-3	4.97	2.17	34.7	0.382					113	128	140	166	217	100			2.50	
	35-4	3.25	1.68	19.9	0.318					290	303	364	481	1260	100			5.20	
頁岩	36-1	4.25	2.08	31.6	0.343					7					100			3.20	
	36-2	5.74	1.98	30.9	0.432					19	21	23	32	78	100			3.00	
	36-3	5.17	1.91	28.1	0.421					14	17	40	50	77	100			2.90	
	36-3	5.29	1.93	28.7	0.423					11	11	21	27	43	100			3.30	
砂岩	37-1	4.57	2.13	32.0	0.361					87					100			8.70	
	37-2	4.54	2.13	31.9	0.359					134	104	172	314	818	100			9.40	
	37-3	4.82	2.42	40.5	0.331					209	129	187	221	784	100			9.10	
	37-4	4.84	2.33	38.1	0.349					122	119	176	247	1455	100			10.00	
砂岩	38-1	3.86	1.56	17.4	0.402					53					100			13.70	
	38-2	3.76	1.63	18.6	0.384					33	42	58	110	2641	100			13.10	
	38-3	3.78	1.54	16.8	0.400					34	43	58	101	349	100			21.80	
	38-4	4.19	1.66	20.0	0.407					73	77	129	277	27373	100			12.30	
花崗岩	39-1									2766	244	252	349	368	36.2				
	39-2									845	230	258	368	681	36.2				
	39-3									7770	279	344	486	749	36.2				
	39-4									2655	232	276	454	442	36.2				
花崗岩	40-1									2353	127	129	190	227	28.3				
	40-2									3418	185	176	243	338	28.3				
	40-3									4888	214	335	459	534	28.3				
	40-4									330	157	207	275	325	28.3				
花崗岩	41-1									1508					43.1				
	41-2									1202	968	1580	3994	11619	43.1				
	41-3									1382	1151	3463	9960	27735	43.1				
	41-4									1362	998	3086	11117	29183	43.1				
花崗岩	42-1									113					50				
	42-2									173	170	198	322	2490	50				
	42-3									126	135	173	231	2215	50				
	42-4									135	129	166	276	2356	50				
花崗岩	43-1									542					50				
	43-2									538	511	630	706	1893	50				
	43-3									540	522	670	723	3025	50				
	43-4									536	521	600	651	2235	50				
花崗岩	44-1									10316					50				
	44-2									9162	8714	25647	81430	307087	50				
	44-3									10090	9994	30664	71822	296077	50				
	44-4									10707	9979	23123	58037	241310	50				
花崗岩	45-1									10942					50				
	45-2									15593	14649	43052	192980	374499	50				
	45-3									12334	13274	75482	191553	398471	50				
	45-4									13970	11001	49302	164240	342370	50				

2. 2. 2 物理的特性試験

供試体を所定の比抵抗値を示す浸透水で浸したデシケーターに入れ、真空ポンプを用いて強制湿潤させて重量を測定し、次に、乾燥炉で強制乾燥させた後の重量を測定することにより、供試体の物理的特性として見掛け比重、吸水率、有効間隙率、飽和度、含水比および体積含水率を求めた。見掛け比重、吸水率、有効間隙率、飽和度、含水比および体積含水率は以下の式により求めた。

見掛け比重（湿潤）

$$r_s = W_s / (W_s - W_w)$$

見掛け比重（乾燥）

$$r_d = W_d / (W_s - W_w)$$

吸水率

$$w_{ab} = (W_s - W_d) / W_d \times 100 (\%)$$

有効間隙率

$$\Phi = (W_s - W_d) / (W_s - W_w) \times 100(\%)$$

飽和度

$$S = (W - W_d) / (W_s - W_d) \times 100(\%)$$

含水比

$$w = (W - W_d) / W_d \times 100(\%)$$

体積含水率

$$\theta_v = (W - W_d) / (W_s - W_w) \times 100(\%)$$

ここに W_s : 強制湿潤状態の空中重量

W_w : 強制湿潤状態の水中重量

W : 供試体の重量

W_d : 強制乾燥状態の空中重量

2. 2. 3 比抵抗値測定

(1) 測定方法

供試体をサンプルホルダーにはさみ、外側の2本の電流電極間で電流を流し、内側の電位電極で供試体の両端の電位差を測定した。電位差を比抵抗値 ρ に換算するためには次の式を用いた。

$$\text{比抵抗値 } \rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{S}{L} \quad (\Omega \cdot m)$$

ここで、 V は電位差、 I は電流値であり、 S および L はそれぞれ供試体の断面積と高さを表わす。比抵抗値と後述する超音波伝播速度値は、供試体の水分飽和度を完全飽和から乾燥に至る間の4段階の含水状態で求めることとしたが、測定時の飽和度はすべての測定が終了し、試料を強制乾燥させた後でしか求まらない。このため、実際の測定ではあらかじめ試料の小片を用いて試験測定した値をもとに、所定の飽和度に相当するであろう状態を含む数回（5～10回）の測定を行い、測定後にデータを補間することにより、所定の4段

階の状態に対応する値を求めた。

なお、乾燥させていく過程で供試体の表面だけが乾燥するのを避けるために恒温恒湿槽を用いて槽内温度を摂氏20度、湿度98%に保ってゆっくり乾燥させた。

(2) 測定装置

測定装置は電流送信機、電位差測定器およびサンプルホルダーから構成される。装置の概要を図-2. 1に示す。

・装置の仕様

1) 電流送信機

製品名：IP-L (フランス、IRIS社製)

最大出力：10V

出力電流：1 μ A、10 μ Aおよび100 μ A

電流精度：1%以内

2) 電位差測定器

製品名：ELREC-6 (フランス、IRIS社製)

最大測定電位差：8V

標準精度：0.3%

分解能：1 μ V

入力インピーダンス：10M Ω

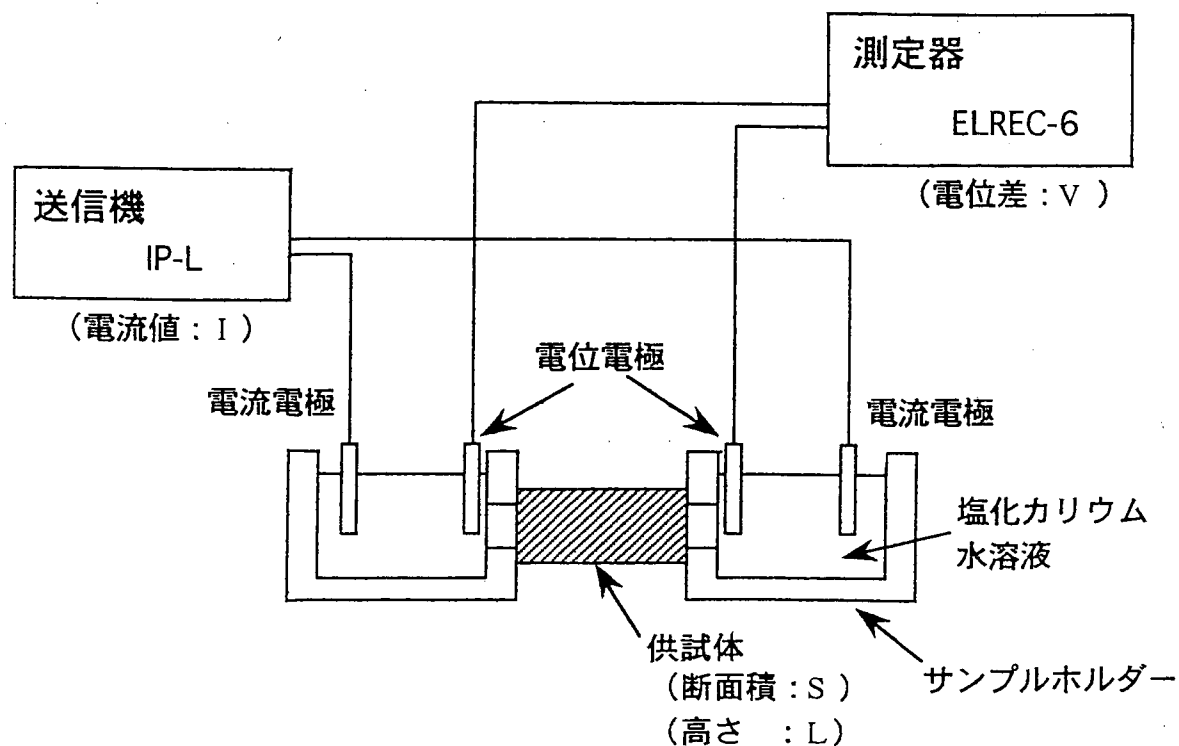


図-2. 1 比抵抗値測定方法の概要図

2. 2. 4 超音波伝播速度測定

(1) 測定方法

超音波パルス透過法によりP波およびS波の伝播速度を測定した。測定は、P波あるいはS波の発振子と受信子の間に供試体をはさみ、パルス波の到達時間より、超音波速度を求めた。発振子から受信子までの波の伝播時間は、デジタルオシロスコープの時間軸上で試料の有無による初動の立ち上がり時間の差として読み取った。P波およびS波の速度は、供試体の高さをLその伝播時間tで除することによって以下の式により算出される。また、測定は、供試体を上下逆にしてそれぞれ2回行った。

$$\text{超音波伝播速度 } V = \frac{L}{t}$$

(2) 試験装置

測定に用いる超音波速度測定装置の概要を図-2. 2に示す。

・装置の仕様

製品名：ソニックビューア（応用地質製）

利得：10～10000倍

周波数帯域：1～650kHz

A/D変換：8ビット

加算回数：任意

測定レンジ：20 μ sec～20msec

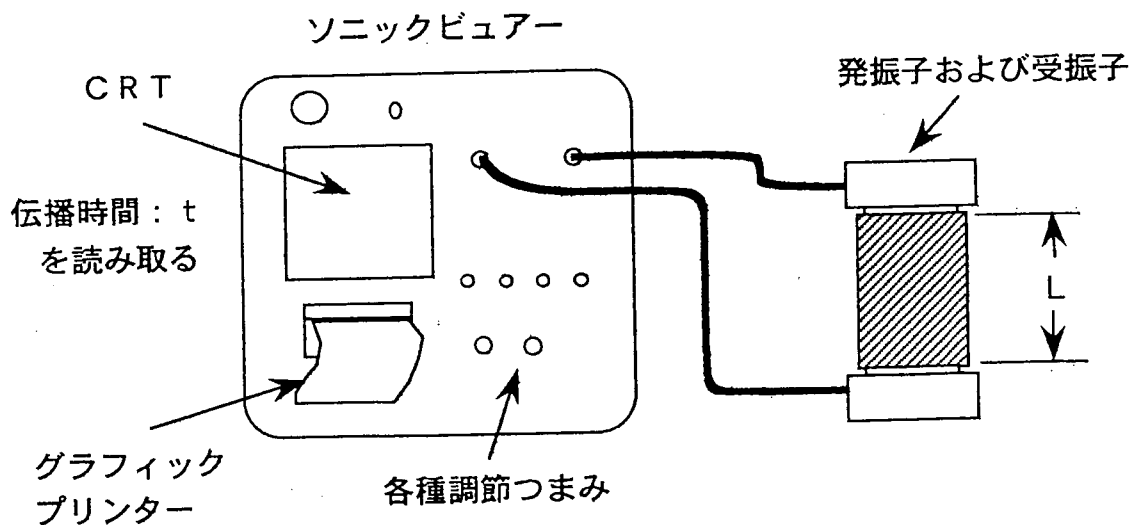


図-2. 2 超音波速度測定装置の概要

2. 2. 5 一軸圧縮強度試験

(1) 試験方法

供試体を加圧板の中央におき、試験器、加圧板、供試体のそれぞれの中心線が一致していることを確かめ、また供試体の両端面と加圧板の表面とが良く密着していることを確認の上、荷重を加える。そのときの応力-歪み関係 (σ - ε 曲線) を測定する。 σ - ε 曲線から、次のようにして各物性値を求めた。

- ・ 一軸圧縮強度 (q_u) : σ - ε 曲線上の最大応力値
- ・ 変形係数 (E_{50}) : σ - ε 曲線における $\sigma = q_u/2$ の割線勾配

(2) 試験装置

一軸圧縮試験器の最大軸荷重は980kNである。データはパーソナルコンピュータに自動収録され、応力-歪み関係 (σ - ε 曲線) はX-Yプロッターにより自動記録させた。

2. 2. 6 陽イオン交換容量試験

陽イオン交換容量とは、多くの粘土鉱物などに一般的に見られる性質であり、これらの鉱物を塩類溶液に浸漬するとその鉱物に存在する陽イオンと溶液中の陽イオンとの間に可逆的な交換反応を生じる。このような性質の大きさを陽イオン交換容量(CEC: Cation Exchange Capacity)といい、交換される陽イオンを交換性陽イオンと呼ぶ。CECは通常その乾燥試料100gに保持されているすべての交換性陽イオンのミリグラム当量(meq; 元素の原子量を原子価で割った値が(化学)当量である。その1/1000の単位)で表わされる。陽イオン交換性を示す機構は、鉱物によって必ずしも同一でない。たとえばカオリン鉱物(2層構造ケイ酸塩鉱物)の陽イオン交換性は、主に結晶末端における不飽和基の解離(破壊原子価とも呼ぶ)によって生じると考えられているが、モンモリロナイト鉱物(3層構造ケイ酸塩鉱物)の場合は結晶格子内の同形置換による電荷不足が大きな原因であるとされている。とくにモンモリロナイト鉱物はCEC値が大きいことで知られており、ベントナイト(Na^+ -モンモリロナイト)に水を加えると著しく膨張することはこのCEC値が関連する一例である。陽イオン交換容量試験の流れ図を図-2.3に示す。

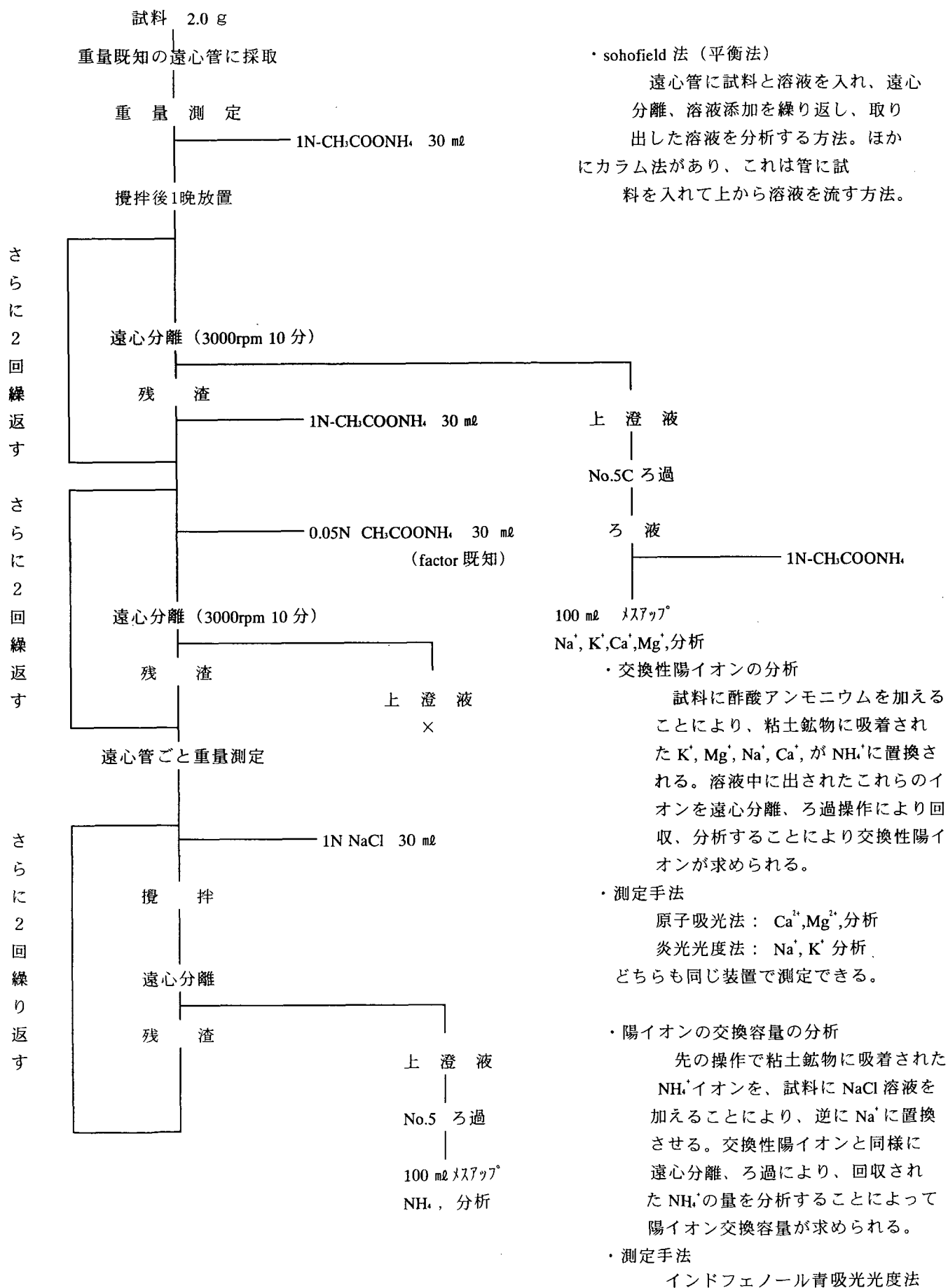


図-2.3 陽イオン交換容量試験の流れ図

2. 3 測定結果

2. 3. 1 測定時間が比抵抗値に及ぼす影響

比抵抗測定では、測定中に供試体が時間とともに乾燥していくため、測定値が変化することが懸念される。本測定に先立ち、室内に放置した状態での比抵抗測定を5分間隔で約1時間にわたり測定を行い、時間による測定への影響を確認した。測定を行ったコアサンプルは、凝灰岩と緑泥片岩である。測定結果を図-2.4に示す。これより、両供試体ともに時間とともに少しずつ比抵抗値の上昇がみられるが、1時間後の初期測定値に対する割合は、凝灰岩で約8%、緑泥片岩では約2%程度である。この結果から、時間変化の影響はさほど大きいとはいえないが、供試体を恒温恒室槽から取り出したら、できるだけ迅速に測定を行うことが必要であると考えられる。なお、実際に比抵抗値測定に要した平均的な時間は、約2~3分程度であった。

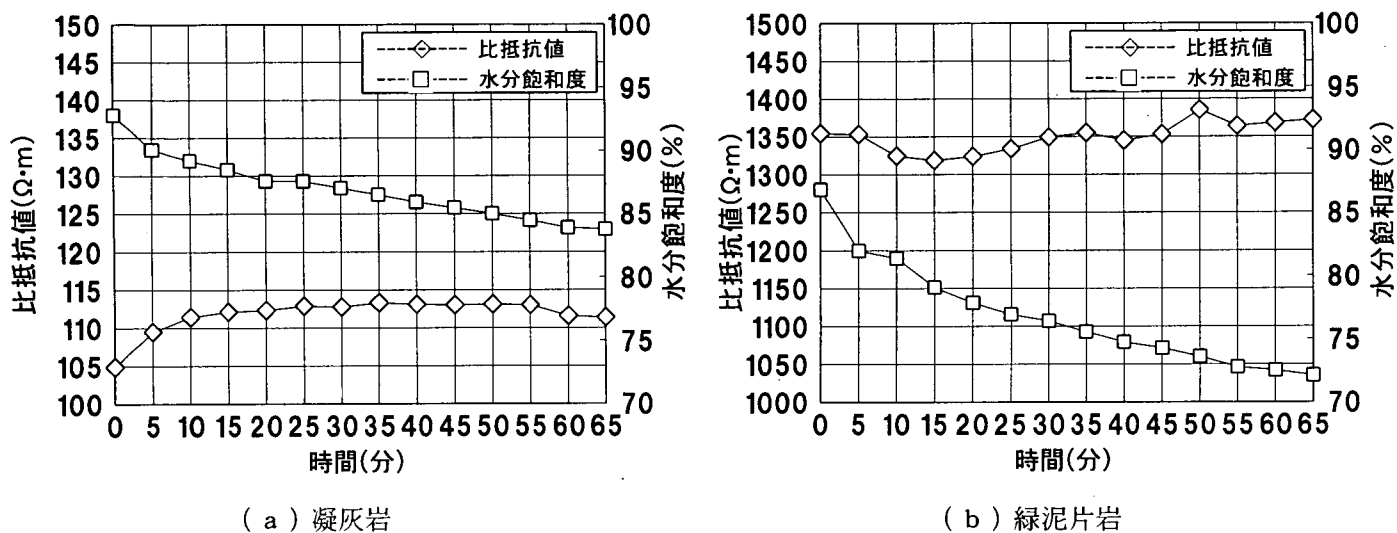


図-2.4 比抵抗値測定の時間変化

2. 3. 2 浸透水の比抵抗値が岩石の比抵抗値に及ぼす影響

図-2. 5に浸透水の比抵抗値による岩石比抵抗値への影響について示す。これより、凝灰岩、複雲母花崗岩、緑泥片岩ともに浸透水の比抵抗値の変化による顕著な差は認められない。また、千葉ら¹⁾によれば浸透水の比抵抗値が数 $\Omega \cdot m$ 以上の場合には浸透水の比抵抗値の変化によって花崗岩および凝灰岩の比抵抗値には影響を与えないことが報告されている。本試験が同一の供試体を用いて浸透水の比抵抗値を変化させた条件でなく、試料固有の違いによる影響も含んでいると考えられるが、上記の結果およびこれまでの報告を考えると、海岸付近で海水などにより浸透されていない通常の地下水程度の比抵抗値であれば、浸透水の比抵抗値が岩石の比抵抗値に大きく影響を与えることはないものと考えられる。

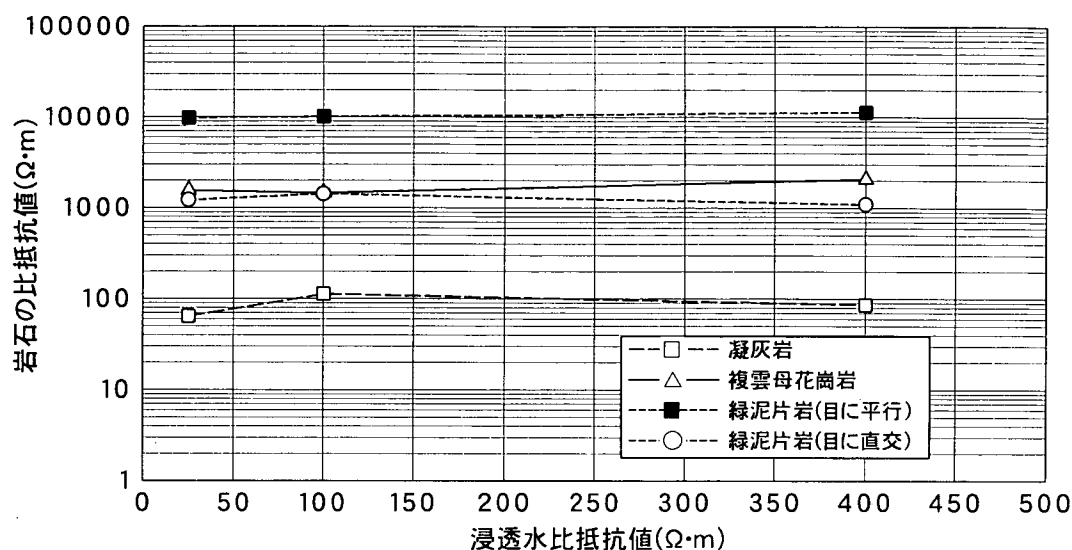


図-2. 5 浸透水の比抵抗値による岩石の比抵抗値への影響

2. 3. 3 比抵抗値と物理的・力学的・鉱物化学的特性との関係

(1) 比抵抗値と水分飽和度、有効間隙率および体積含水率との関係

図-2. 6～2. 26に各岩種毎の比抵抗値と水分飽和度、有効間隙率、体積含水率との関係を示す。ただし、有効間隙率と比抵抗値との関係は水分飽和度が100%の場合についてのみ示している。

これらの図から岩石の種類によって岩石の比抵抗値が異なるとともに、水分飽和度と比抵抗値との関係については有効間隙率が同一であれば水分飽和度が高くなると岩石の比抵抗値は指数関数的に小さくなることが分かる。ただし、水分飽和度に対する比抵抗値の減少割合は岩石によって大きく異なり、例えば、泥岩、凝灰岩等は減少割合が大きいのにに対して、頁岩、石灰岩等は減少割合が小さいと言える。有効間隙率と比抵抗値との関係については、水分飽和度が100%の場合は有効間隙率が大きいほど岩石の比抵抗値は低くなる傾向を示している。ただし、凝灰岩や熔結凝灰岩の例のように有効間隙率が大きいサンプルでも水分飽和度が小さい場合では、水分飽和度が高く有効間隙率が小さい場合の比抵抗値と同程度の高い比抵抗値を示すことが分かる。したがって、地下水位が高く地山が飽和状態にあることが解っている場合には、比抵抗値が高く現れた箇所は有効間隙率が小さいと言えるが、不飽和状態にある場合は、比抵抗値が高いからといって有効間隙率が高いとは必ずしも言えず、地山状態を評価する場合には地下水の位置を十分考慮する必要がある。体積含水率と比抵抗値との関係については、いずれの岩種の場合も体積含水率が増加すると比抵抗値は減少する傾向を示しているため、比抵抗値は岩石に含まれている水分量の評価に有効と考えられるが、体積含水率に対する減少割合も岩種によって大きく異なる。また、頁岩、流紋岩、緑色片岩、角閃石片麻岩については亀裂の目の方向による影響を調べているが、目と平行(供試体の端面が岩石の目に対して平行)の場合が、目と直交(供試体の端面が岩石の目に対して直交)の場合よりも高い値を示すことが分かる。

なお、岩石の比抵抗値と岩石の有効間隙率および飽和度との関係は、一般に次式のアーチの式により近似できることが知られている。

アーチの式

$$\rho = a \phi^{-m} S^{-n} \rho_w \quad (2.1)$$

$$F = \rho / \rho_w = a \phi^{-m} S^{-n}$$

ここに、 ρ : 岩石の比抵抗値 ρ_w : 浸透水の比抵抗値 ϕ : 有効間隙率 S : 飽和度

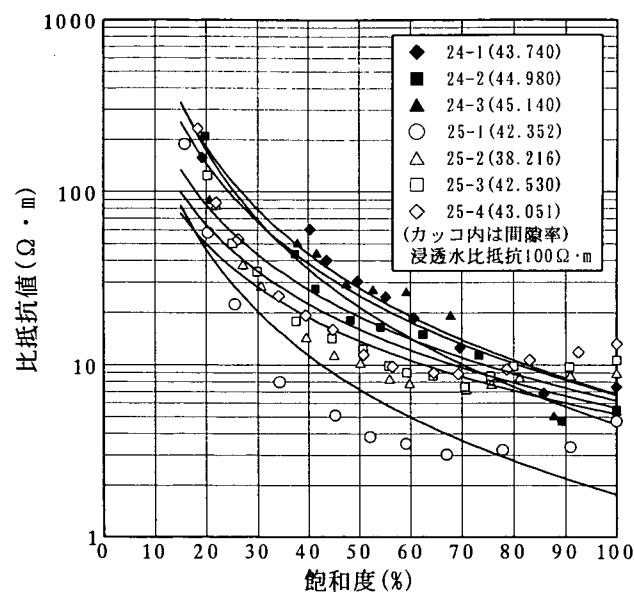
F : 地層比抵抗係数 a : 迂回率係数 m : 膠結定数 n : 飽和指数

また、式(2.1)から飽和度が100%の時の比抵抗値を ρ_{100} とすると、次式が得られる。

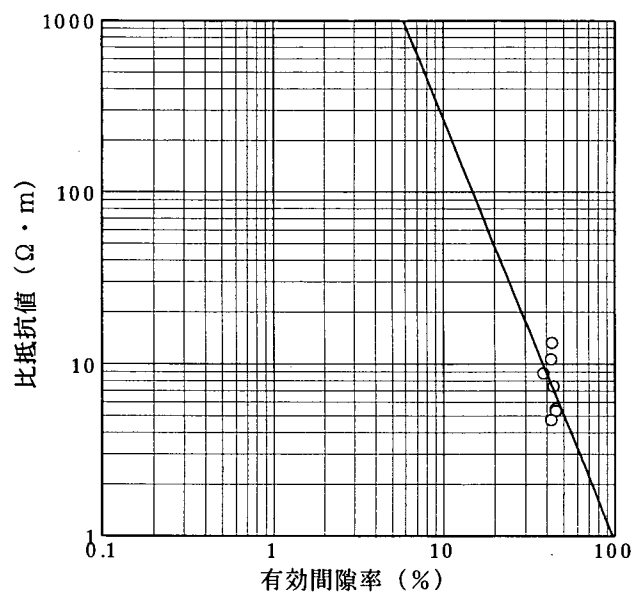
$$\rho_{100} = a \phi^{-m} \rho_w \quad (2.2)$$

$$\rho = \rho_{100} S^{-n} \quad (2.3)$$

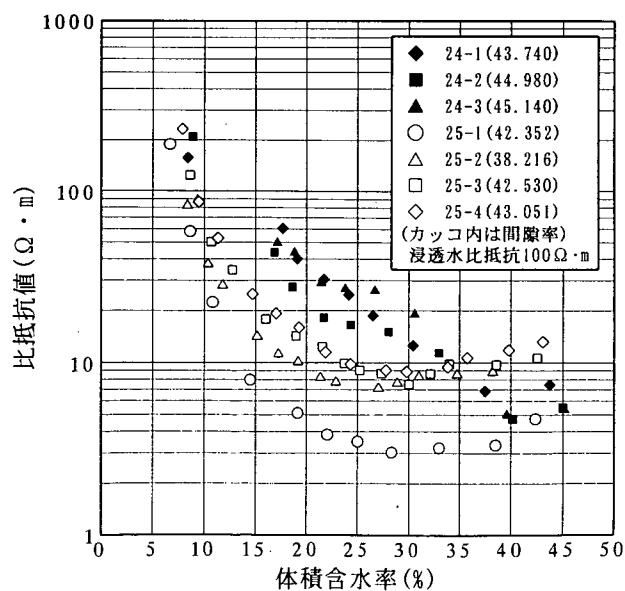
したがって、アーチの式に現れる係数のうち、迂回率係数 a および膠結定数 m については飽和度が100%の時の比抵抗値 ρ_{100} と有効間隙率 ϕ との関係を示す図に式(2.2)を当てはめた回帰曲線を最小自乗法により求めることにより、 ρ_{100} および飽和指数 n については比抵抗値と飽和度との関係を示す図に式(2.3)を当てはめた回帰曲線を最小自乗法により求めることにより得ることが可能となる。表-2.3はこのような方法によって得られた a 、 m 、 ρ_{100} 、 n の値を示したものであり、図-2.6～2.26の図中に示した曲線および直線は表-2.3の値を用いて得られた回帰曲線を示したものである。



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

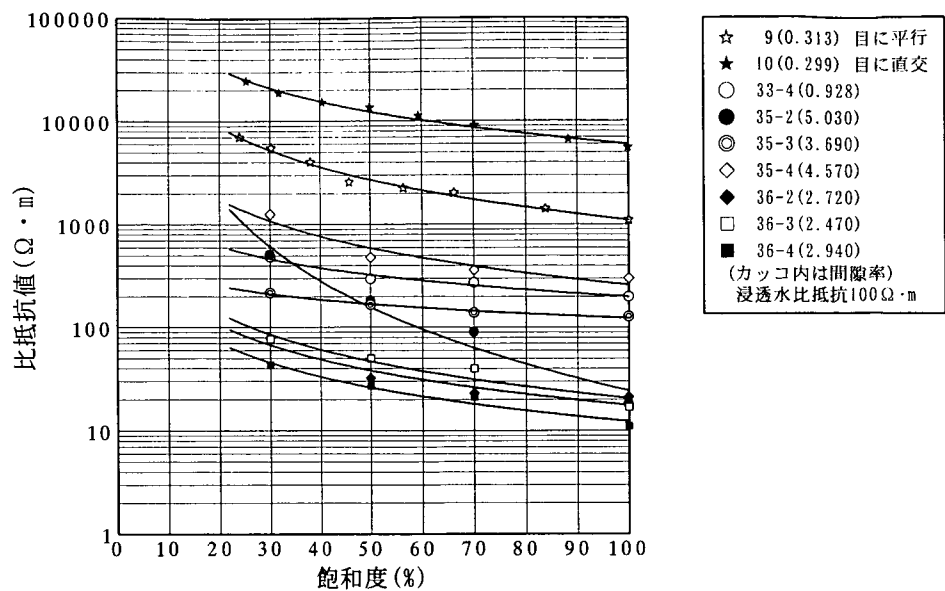


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

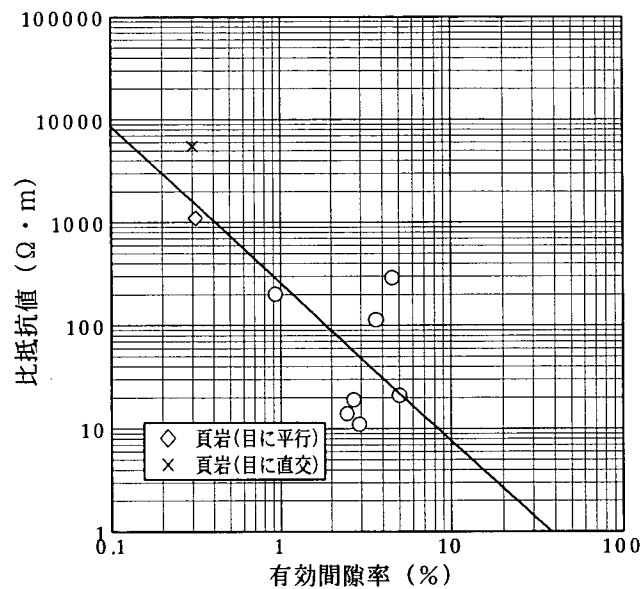


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

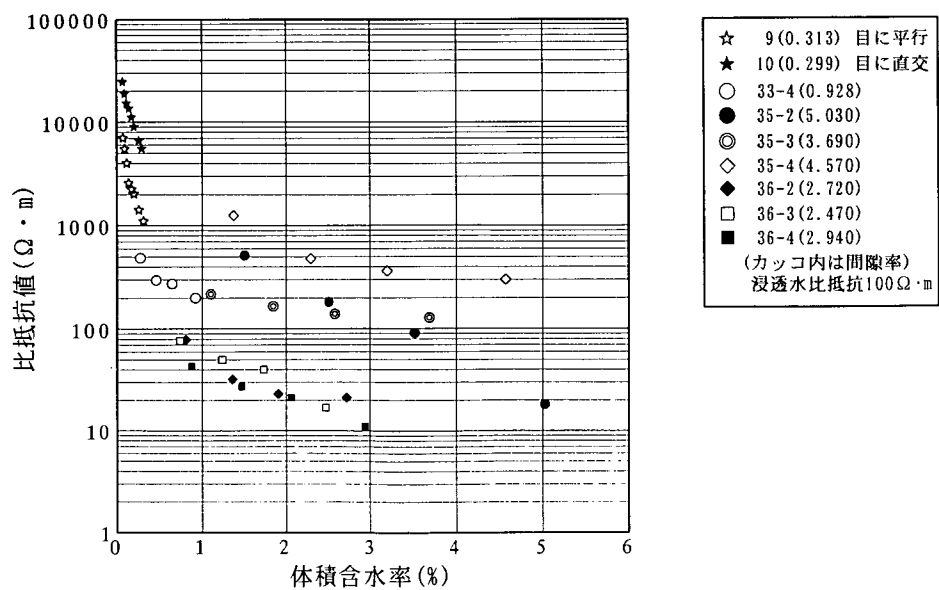
図-2.6 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(泥岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

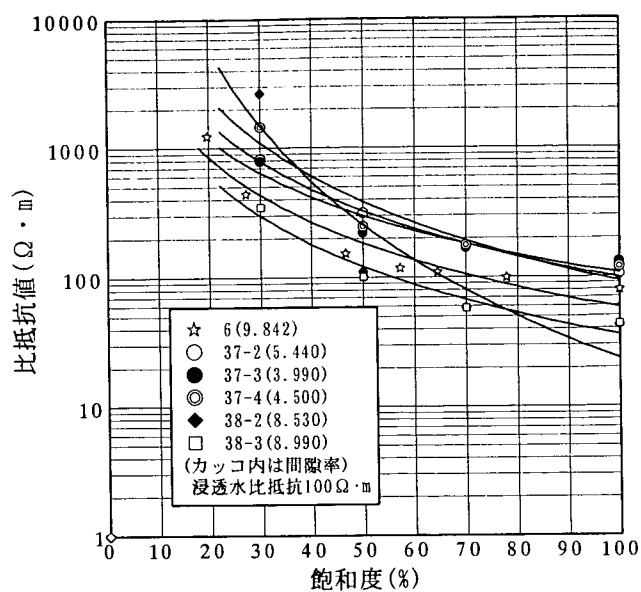


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

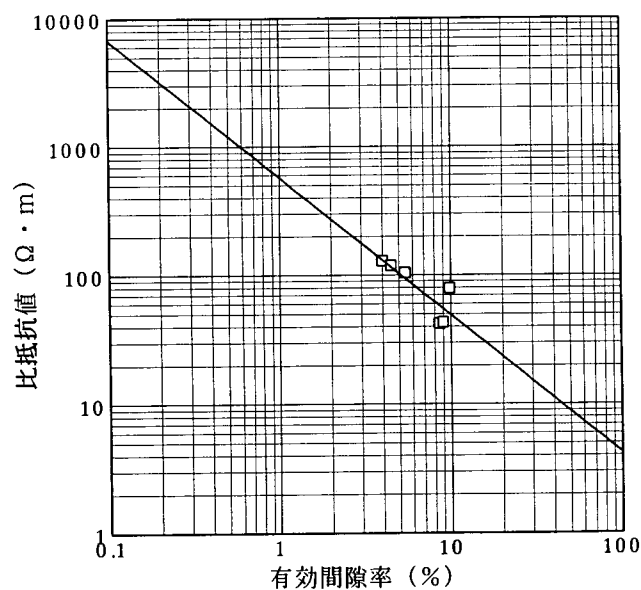


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

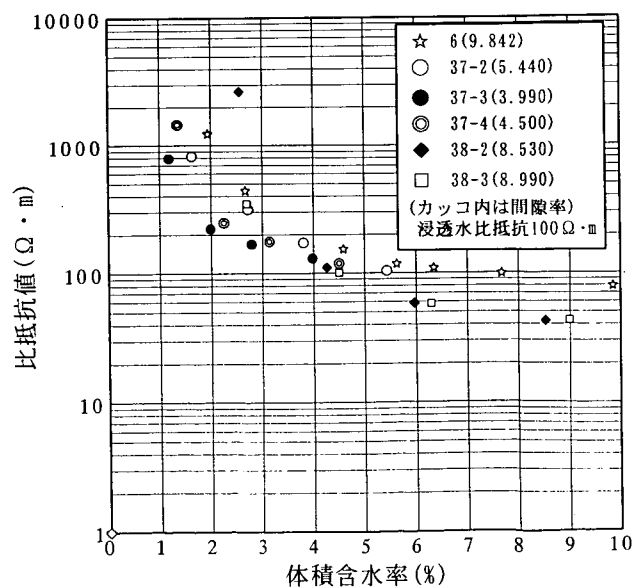
図-2. 7 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係 (頁岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

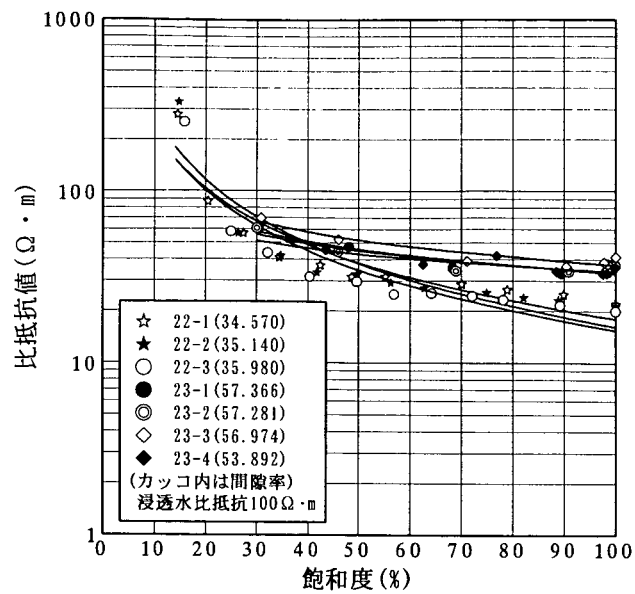


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

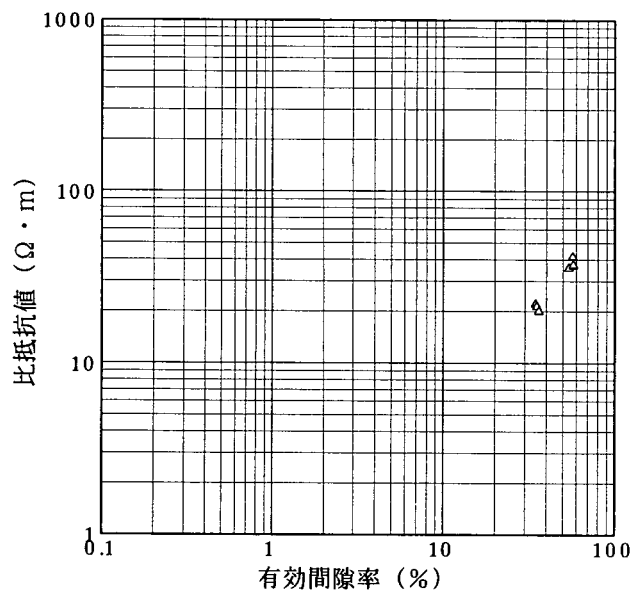


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

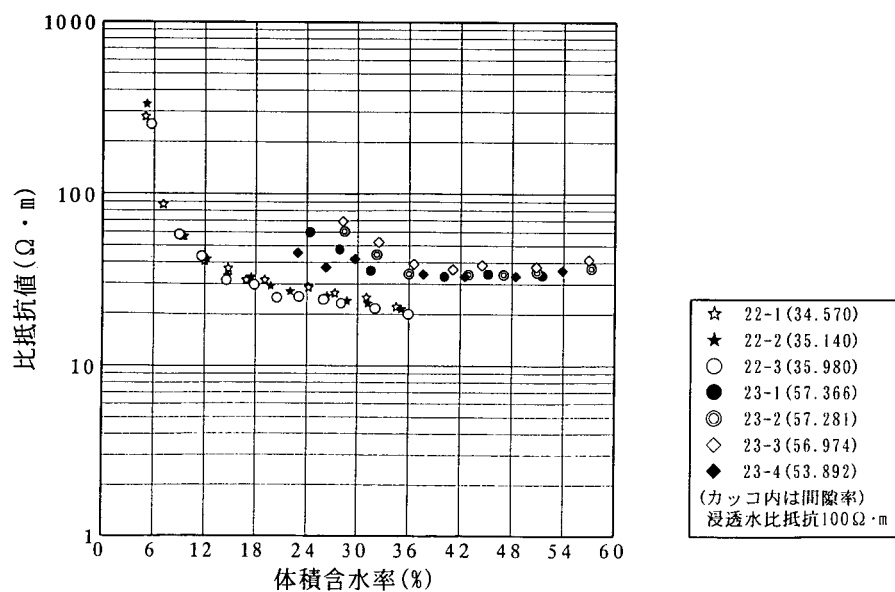
図-2. 8 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(砂岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

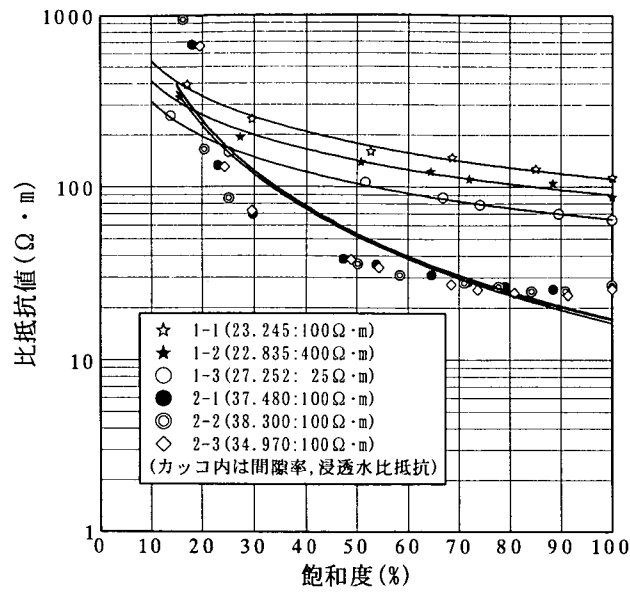


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

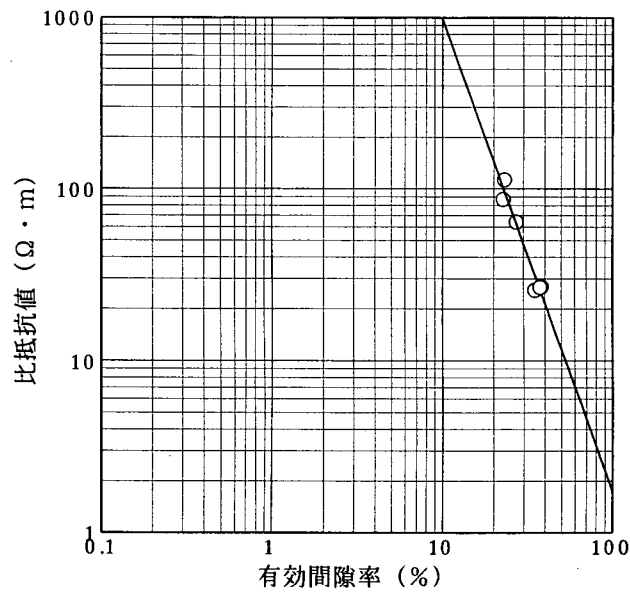


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

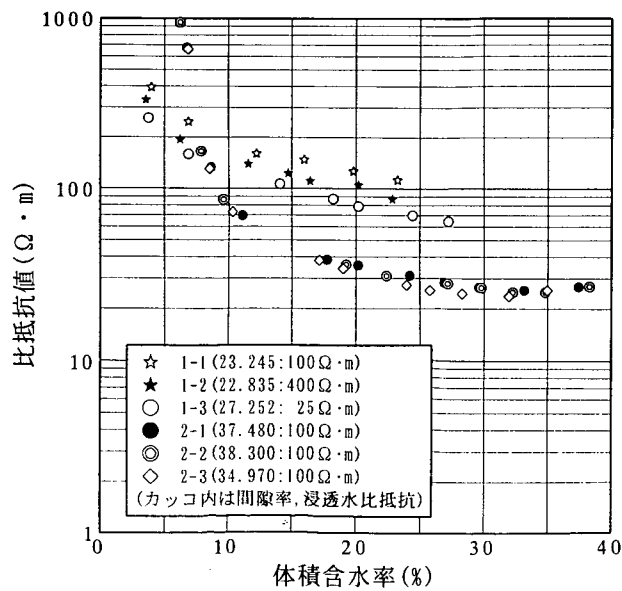
図-2.9 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(凝灰質砂岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

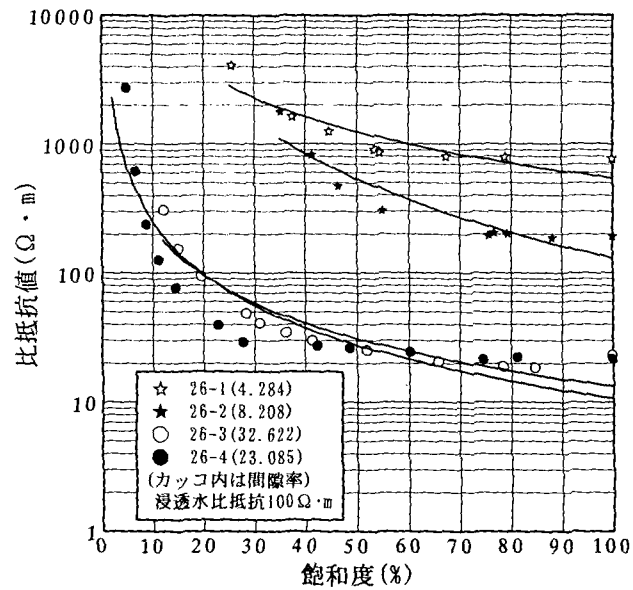


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

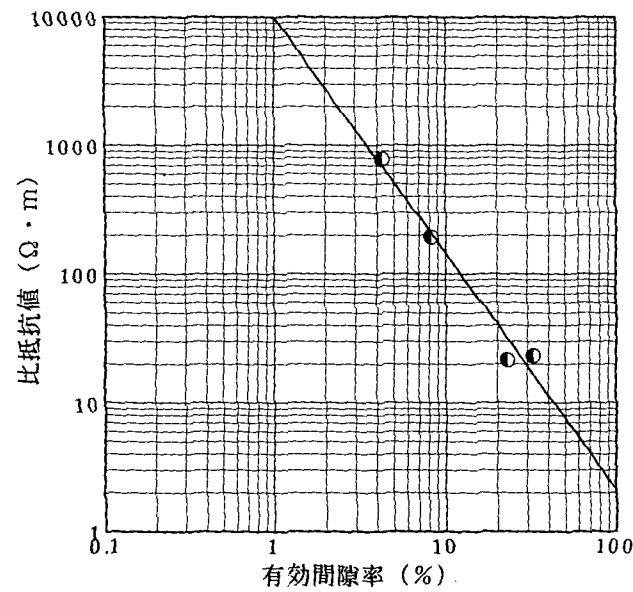


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

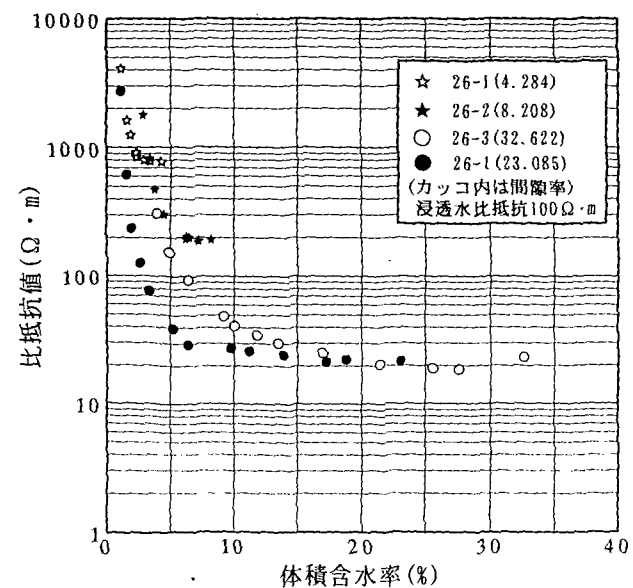
図-2. 10 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(凝灰岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

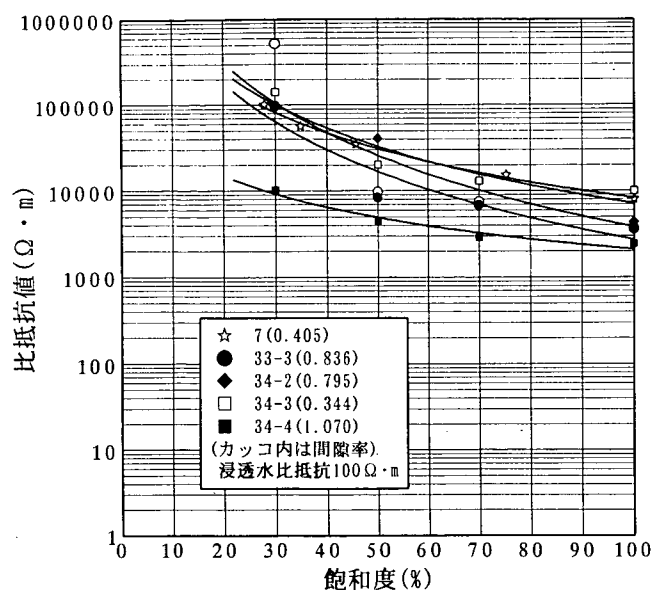


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

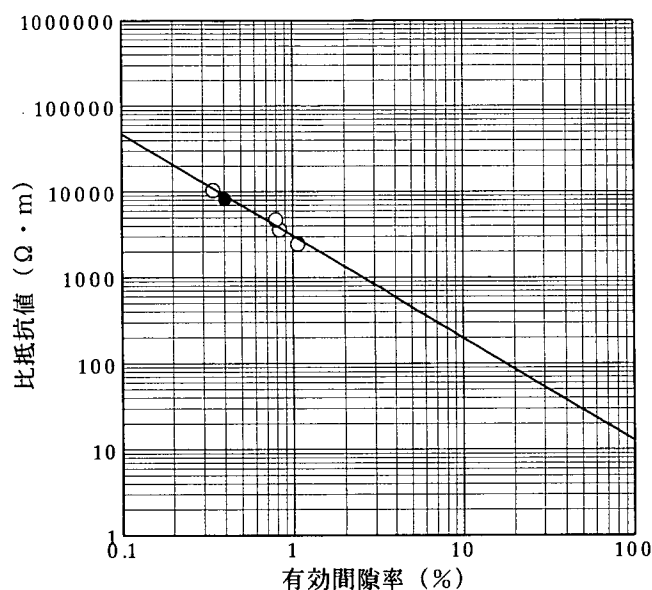


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

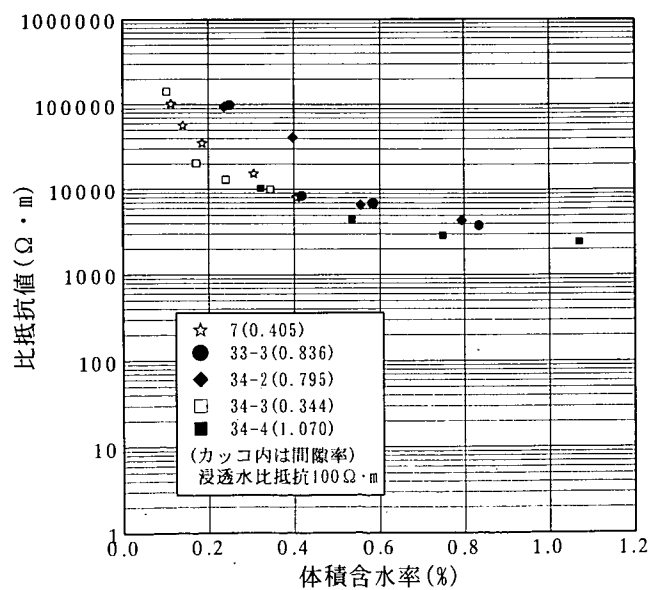
図-2. 1.1 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(熔結凝灰岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

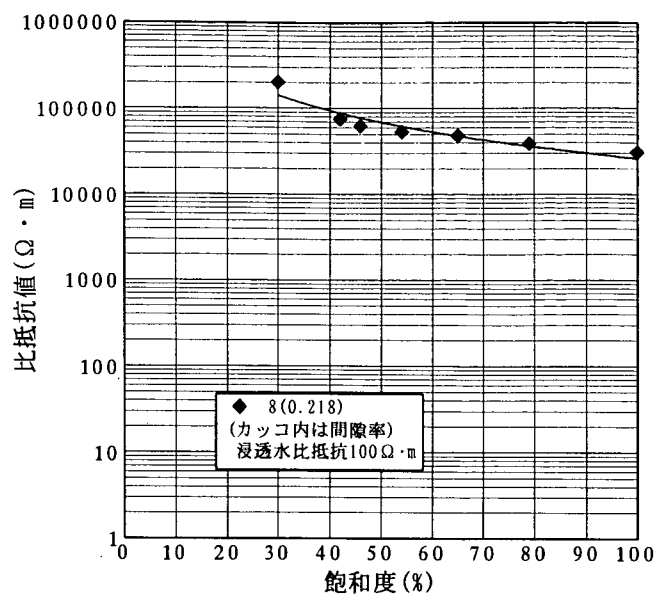


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

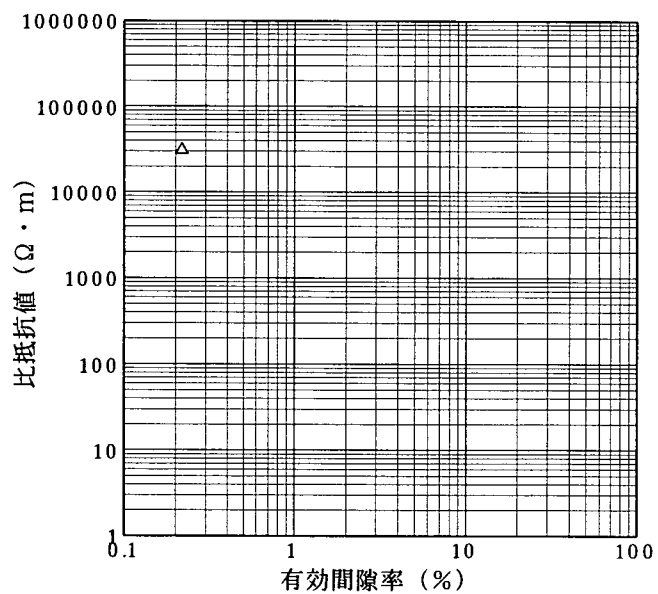


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

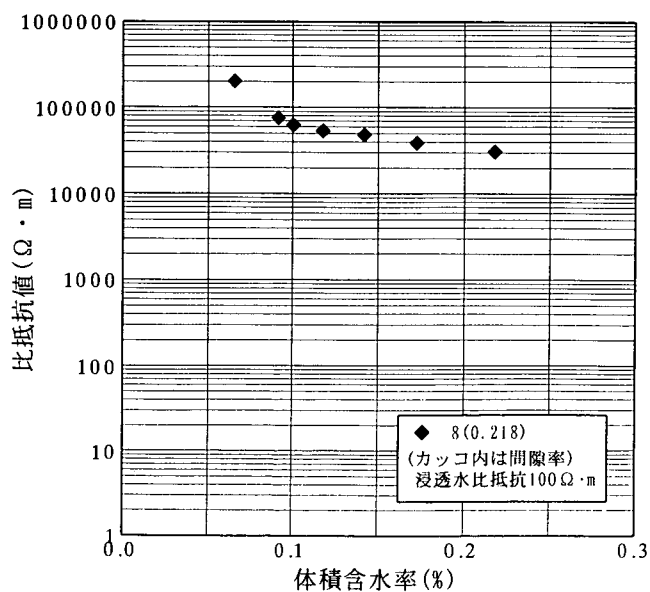
図-2. 12 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(チャート)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

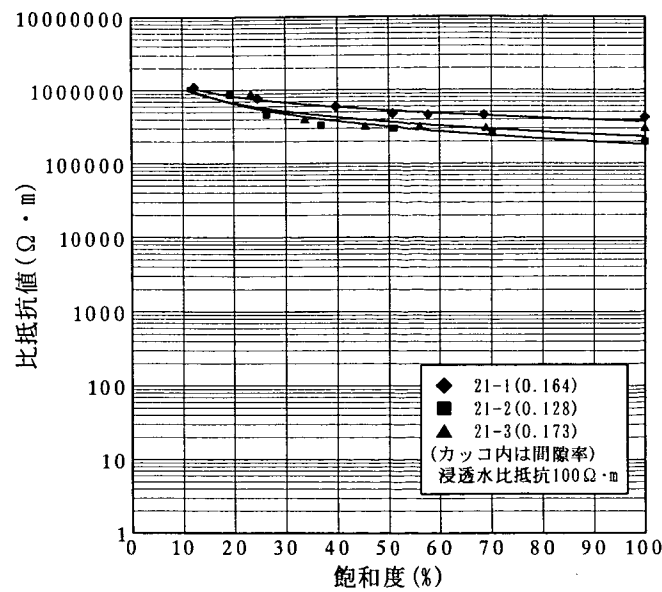


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

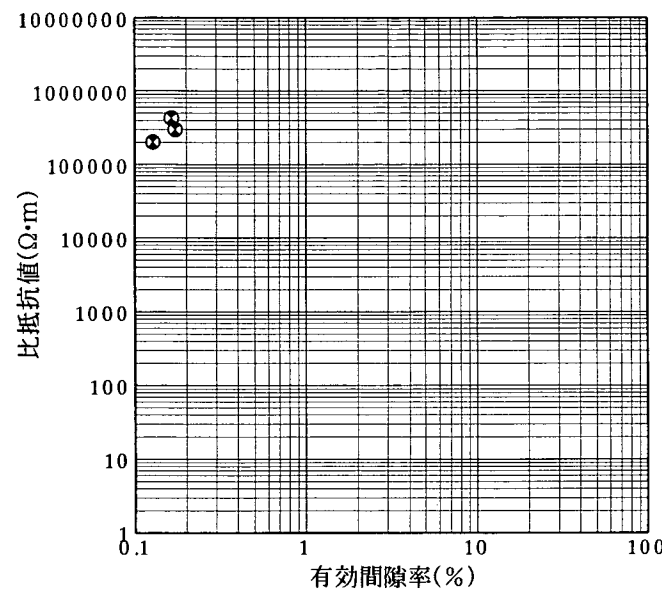


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

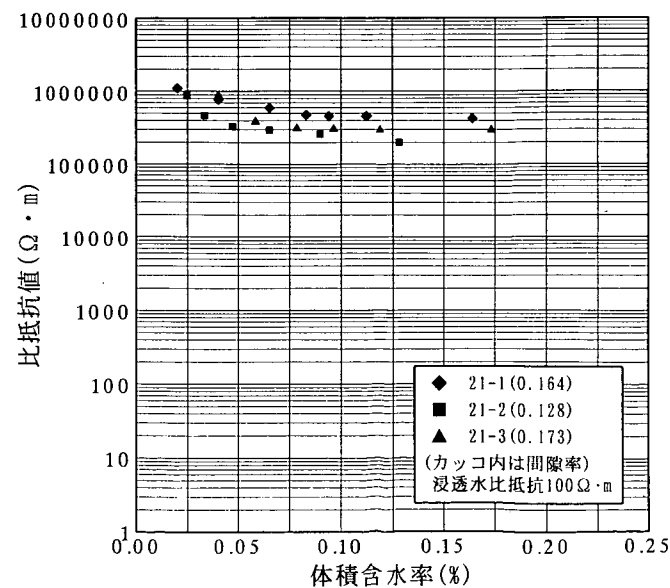
図-2. 13 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(石灰岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

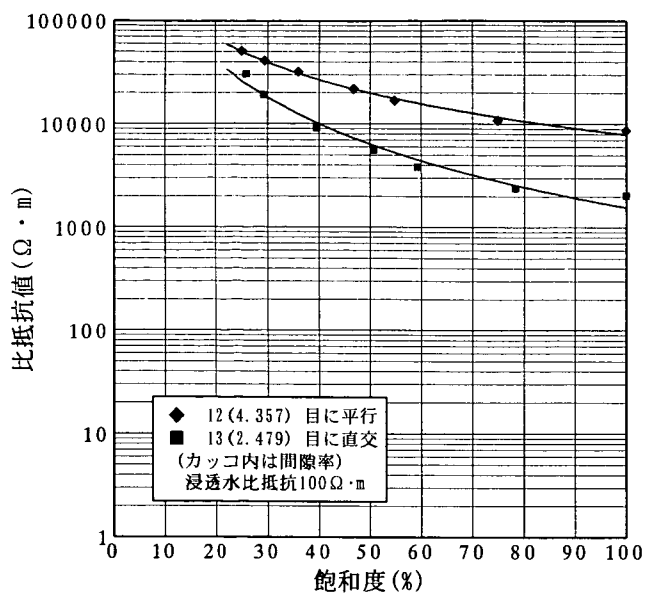


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

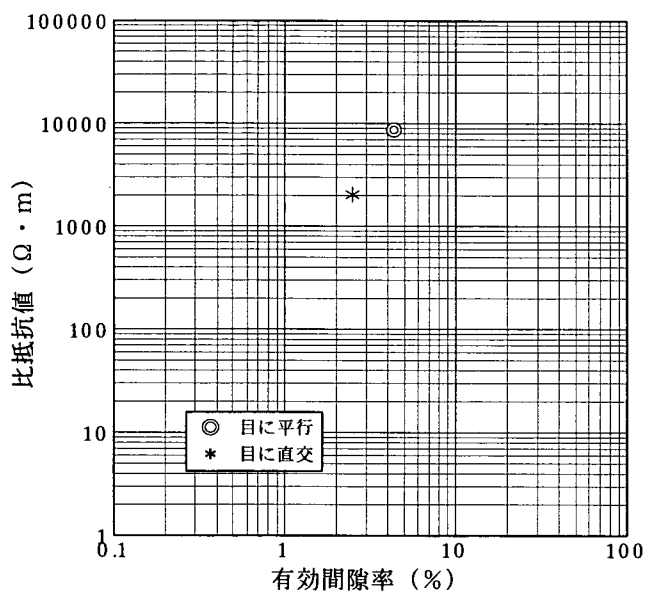


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

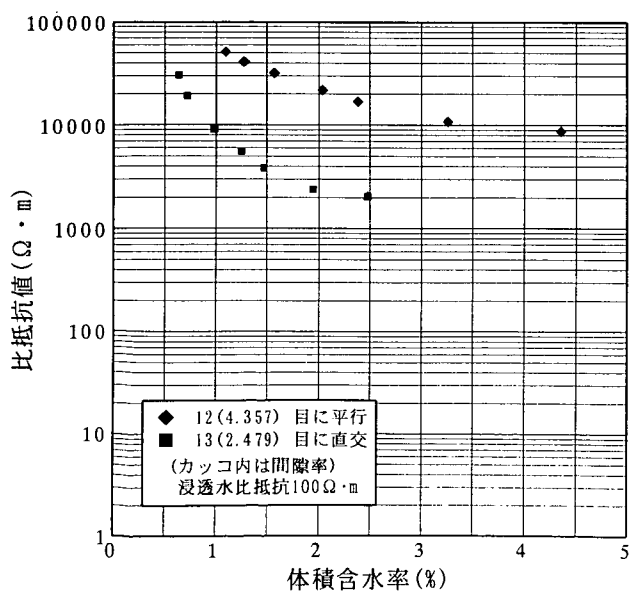
図-2. 14 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(フズリナ石灰岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

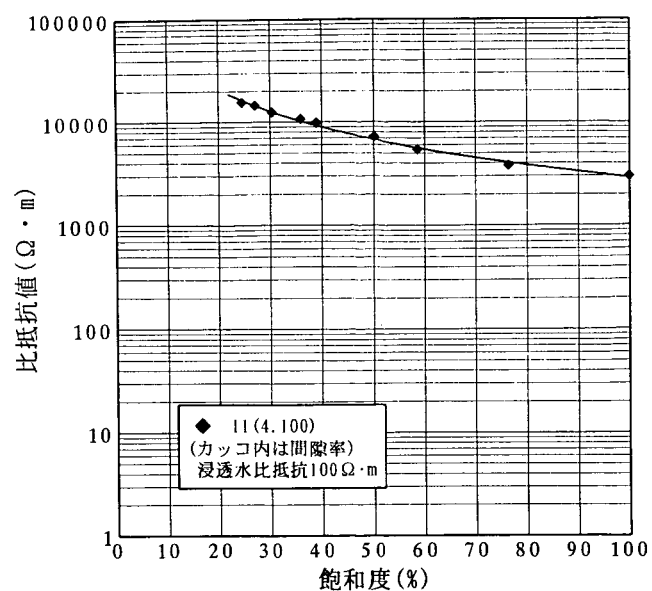


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

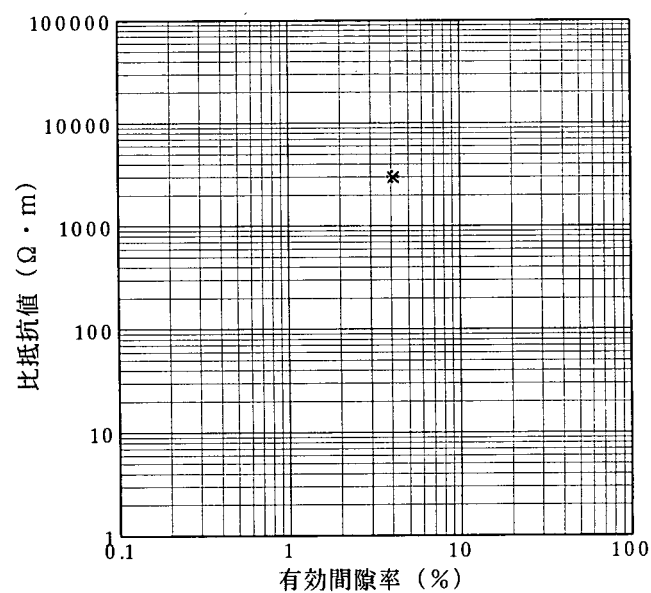


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

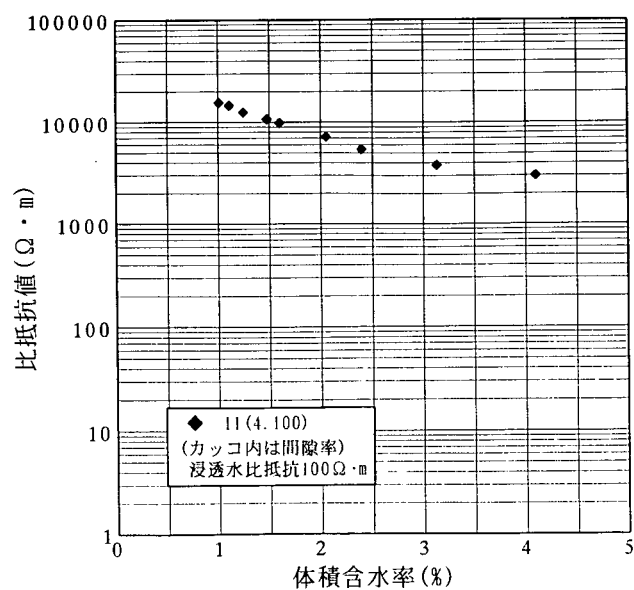
図-2.15 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(流紋岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

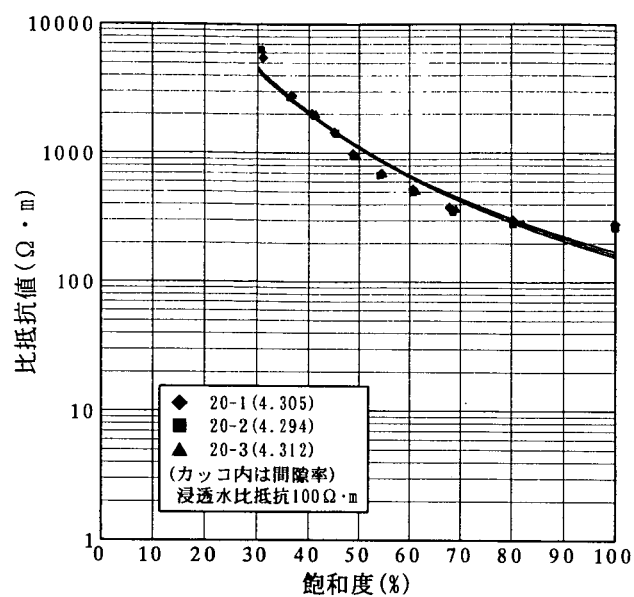


(b) 有効空隙率と比抵抗値の関係

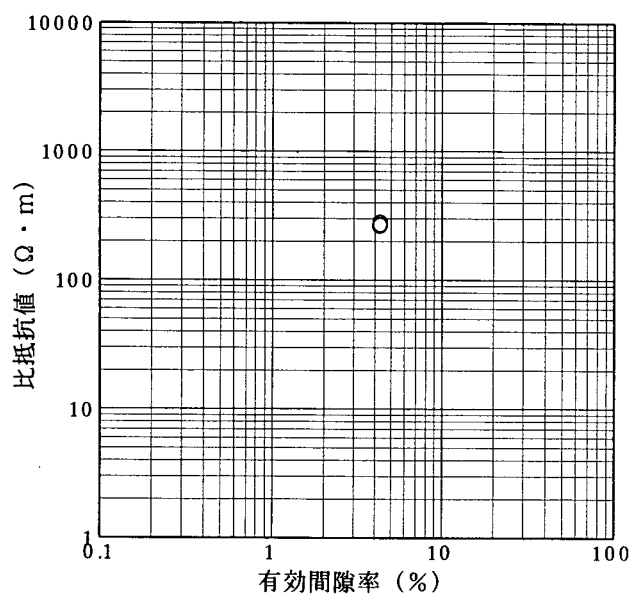


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

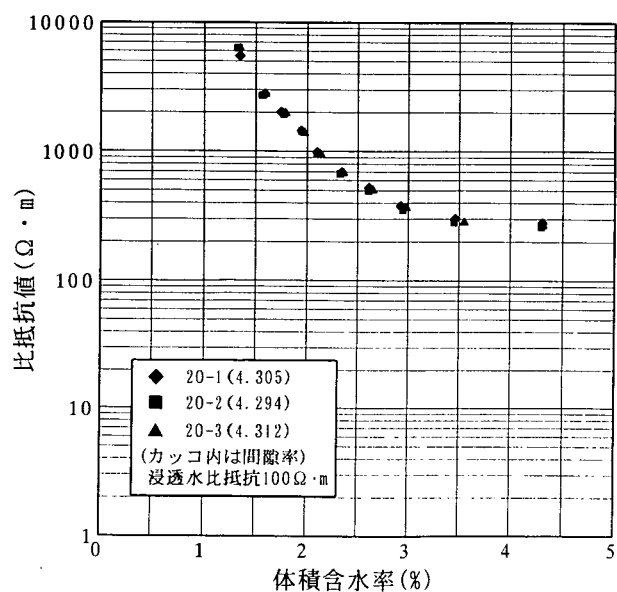
図-2. 16 飽和度、有効空隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(石英安山岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

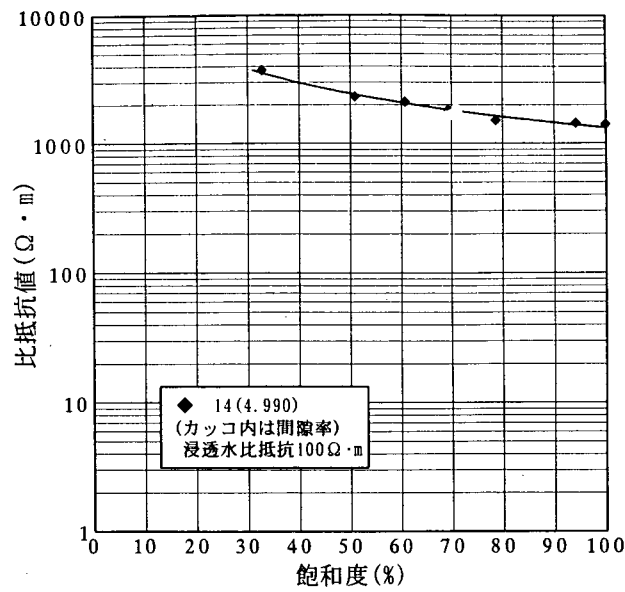


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

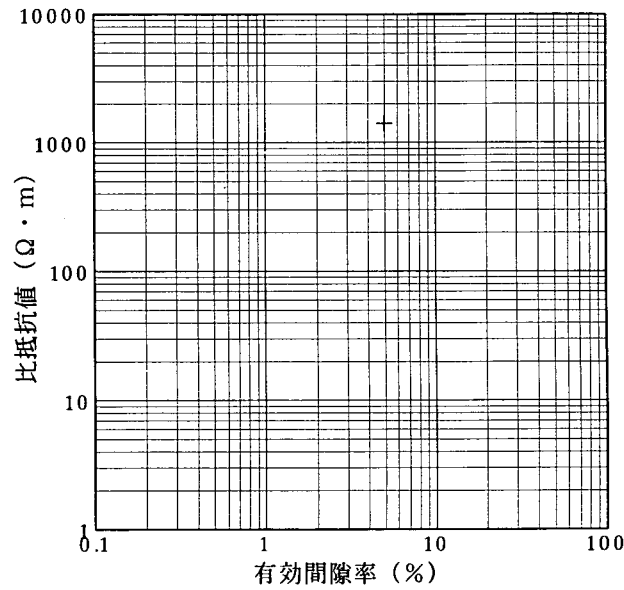


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

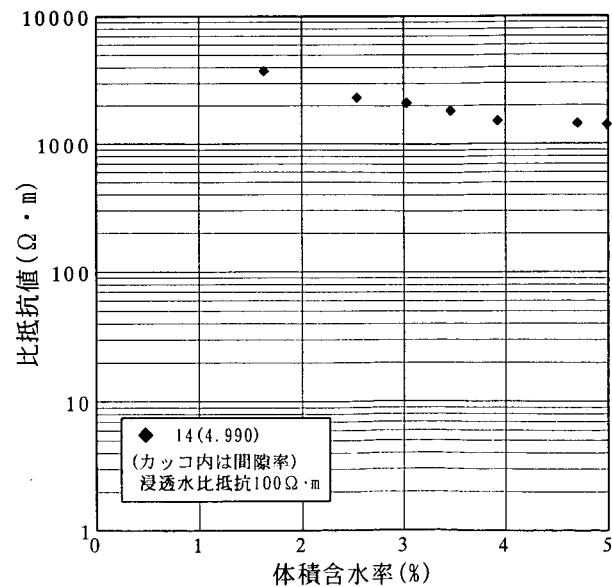
図-2. 17 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(普通輝石紫蘇輝石安山岩)



(a) 飽和度と比抵抗の関係

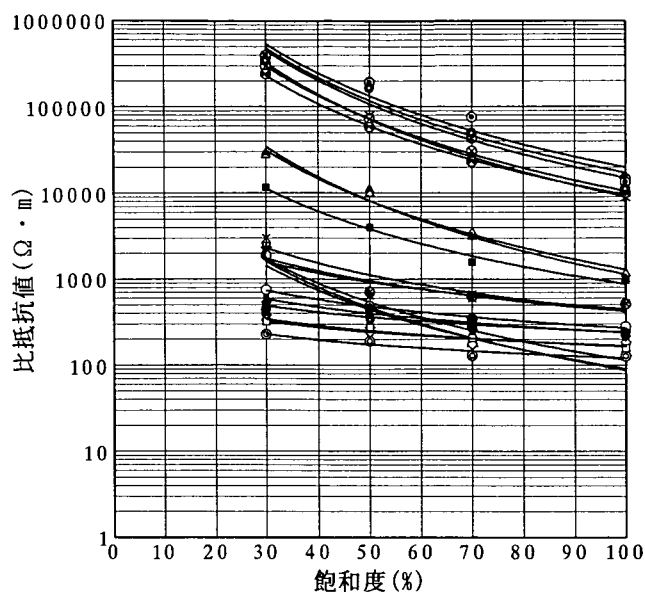


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

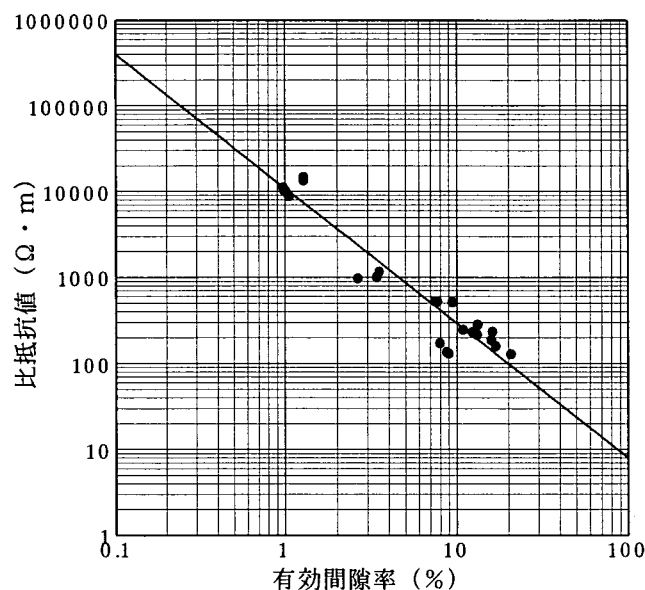


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

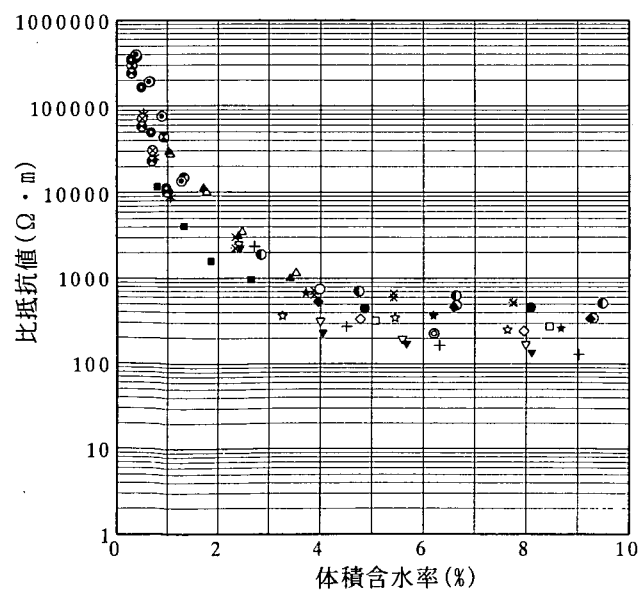
図-2. 18 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(カンシ石玄武岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係



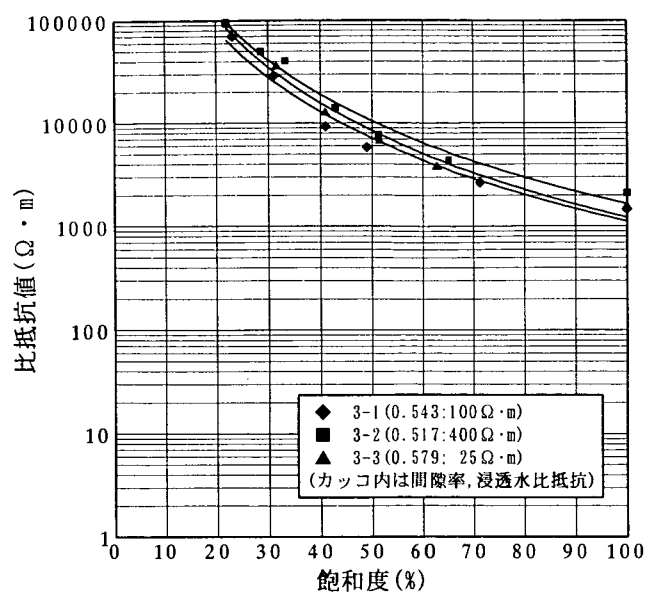
(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係



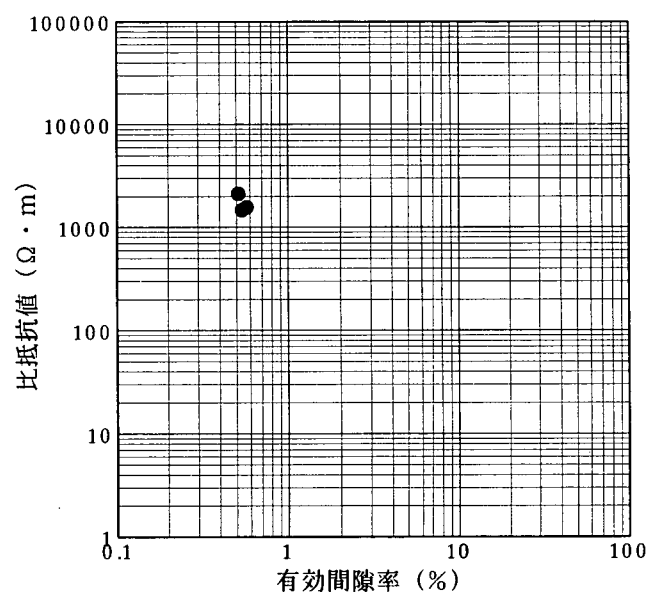
(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

- ☆ 39-1(10.90:36.2 $\Omega \cdot m$)
 - ★ 39-2(12.40:36.2 $\Omega \cdot m$)
 - 39-3(13.30:36.2 $\Omega \cdot m$)
 - 39-4(16.20:36.2 $\Omega \cdot m$)
 - ⊙ 40-1(20.80:28.3 $\Omega \cdot m$)
 - ◇ 40-2(15.90:28.3 $\Omega \cdot m$)
 - ◆ 40-3(13.20:28.3 $\Omega \cdot m$)
 - 40-4(16.90:28.3 $\Omega \cdot m$)
 - 41-2(2.650:43.1 $\Omega \cdot m$)
 - △ 41-3(3.530:43.1 $\Omega \cdot m$)
 - ▲ 41-4(3.420:43.1 $\Omega \cdot m$)
 - ▽ 42-2(7.990:50 $\Omega \cdot m$)
 - ▼ 42-3(8.810:50 $\Omega \cdot m$)
 - + 42-4(9.020:50 $\Omega \cdot m$)
 - ⊕ 43-2(9.940:50 $\Omega \cdot m$)
 - × 43-3(7.751:50 $\Omega \cdot m$)
 - ※ 43-4(7.740:50 $\Omega \cdot m$)
 - * 44-2(1.060:50 $\Omega \cdot m$)
 - ⊗ 44-3(1.010:50 $\Omega \cdot m$)
 - ⊙ 44-4(0.996:50 $\Omega \cdot m$)
 - ⊕ 45-2(1.280:50 $\Omega \cdot m$)
 - ⊗ 45-3(1.280:50 $\Omega \cdot m$)
 - 45-4(0.982:50 $\Omega \cdot m$)
- (カッコ内は間隙率, 浸透水比抵抗)

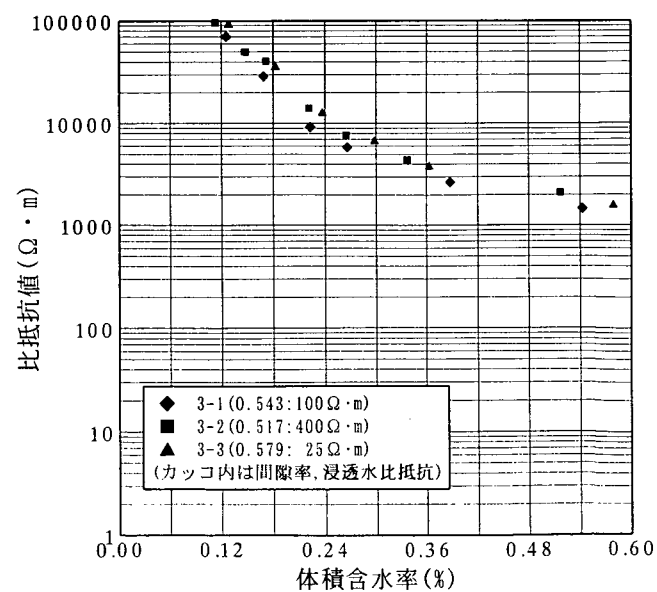
図-2. 19 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(花崗岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係



(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係



(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

図-2. 20 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(複雲母花崗岩)

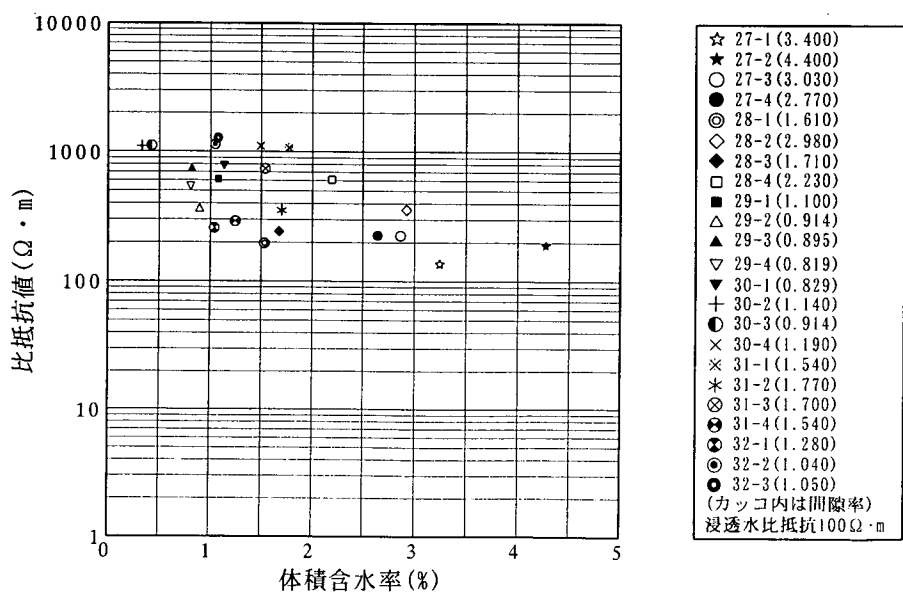
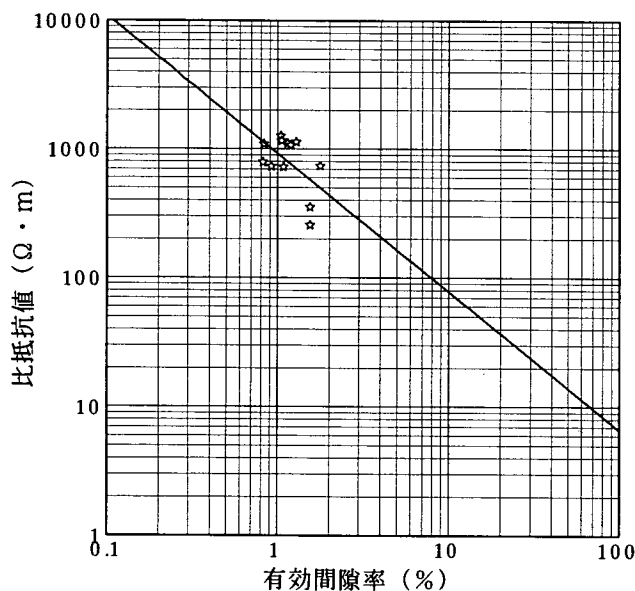
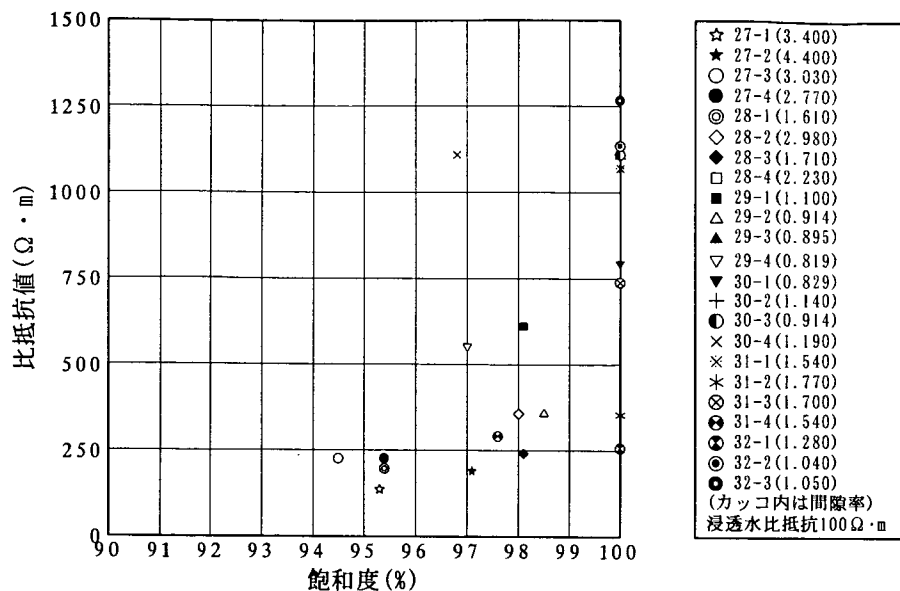
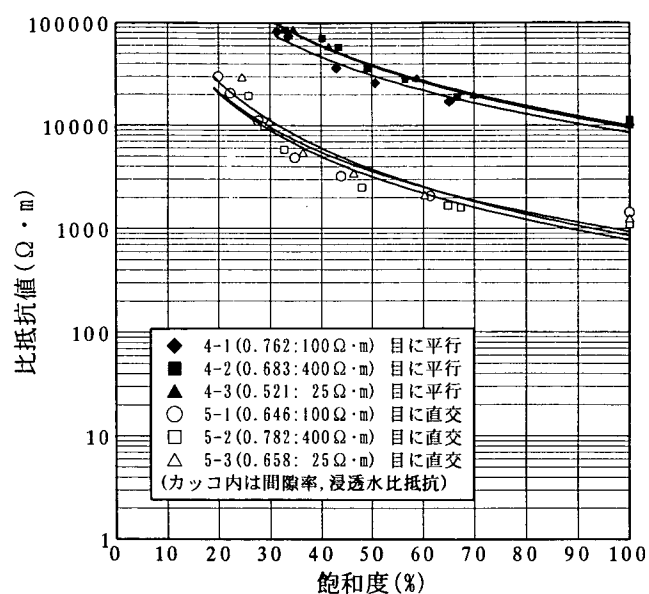
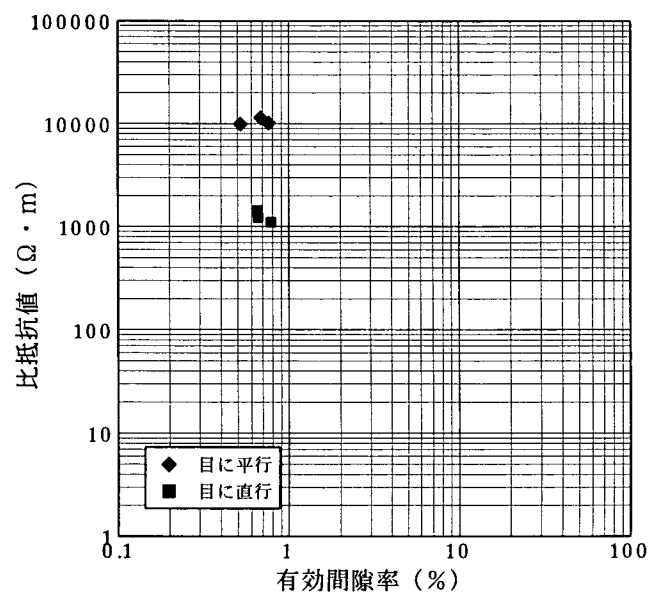


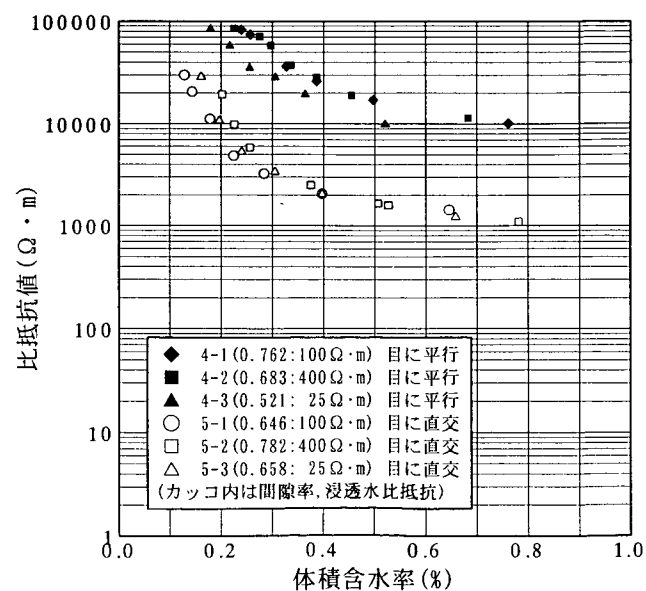
図-2. 21 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(石英閃緑岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

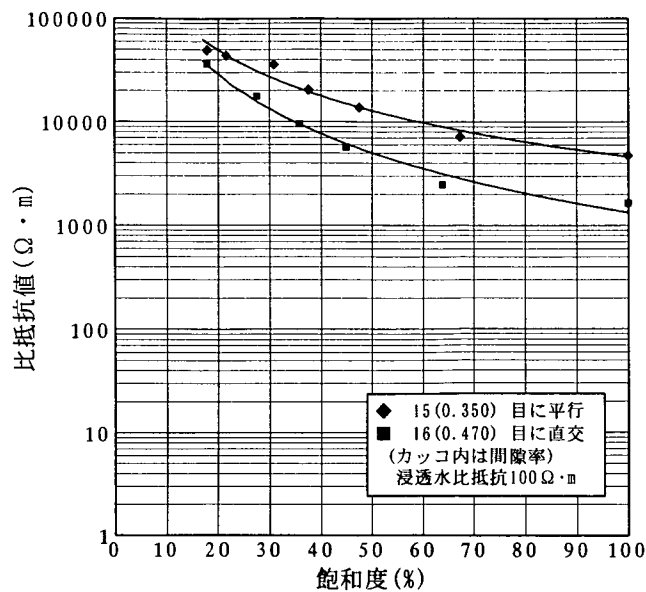


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

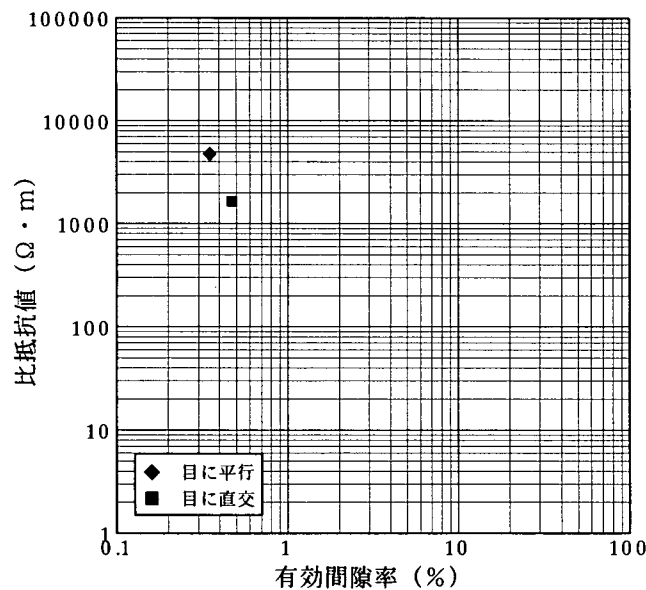


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

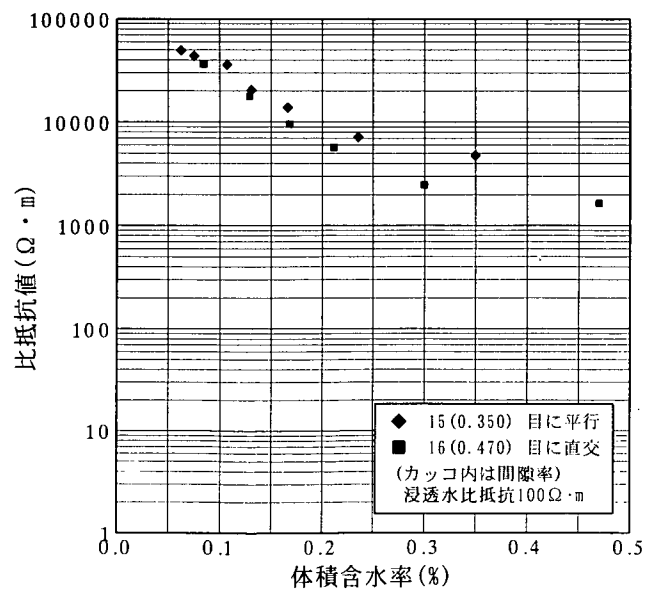
図-2. 2.2 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(緑泥片岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

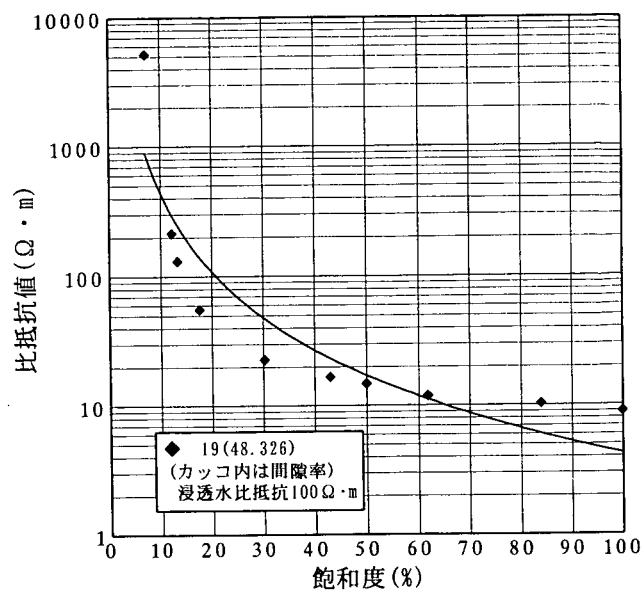


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

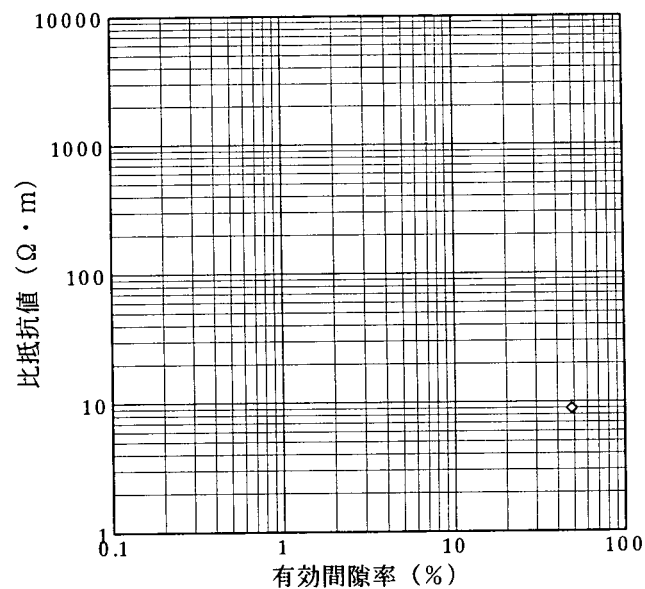


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

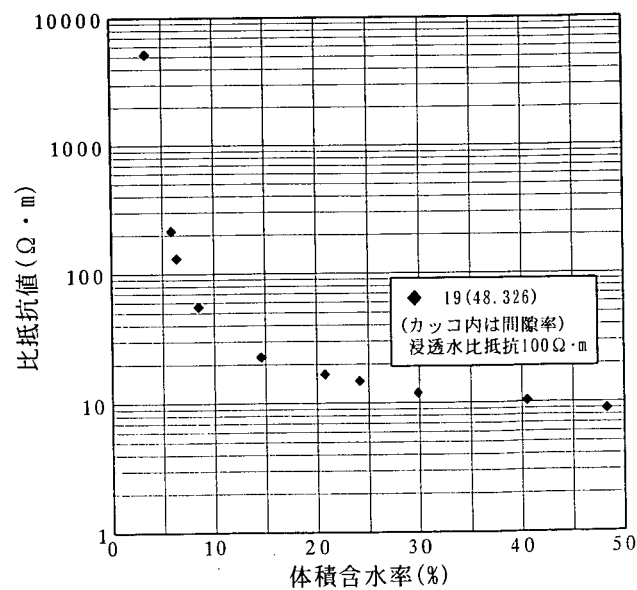
図-2. 23 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(角閃岩片麻岩)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

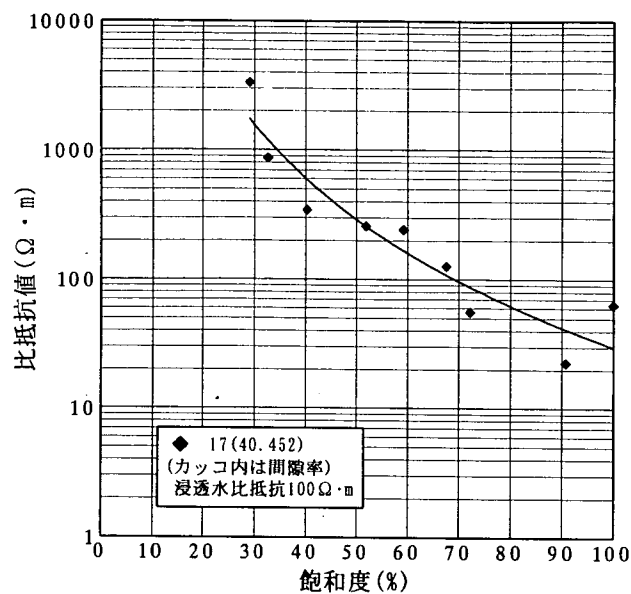


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

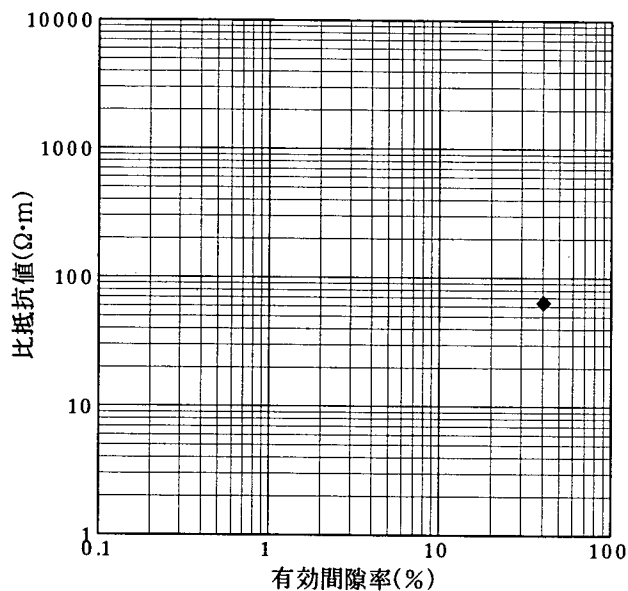


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

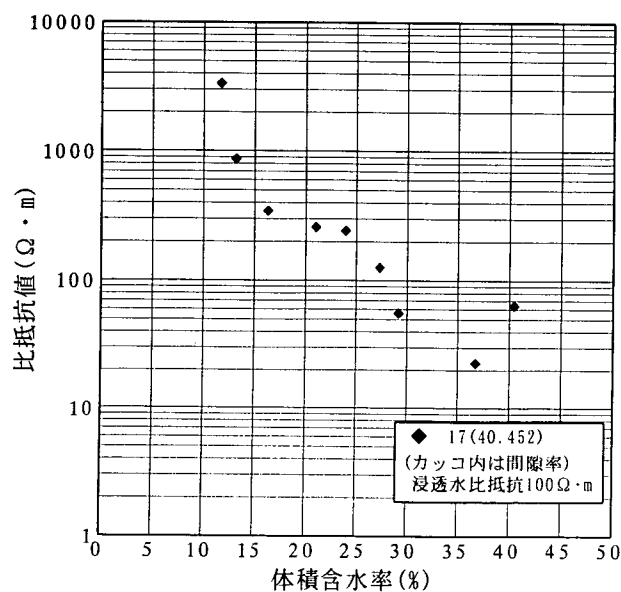
図-2. 24 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(土丹)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係

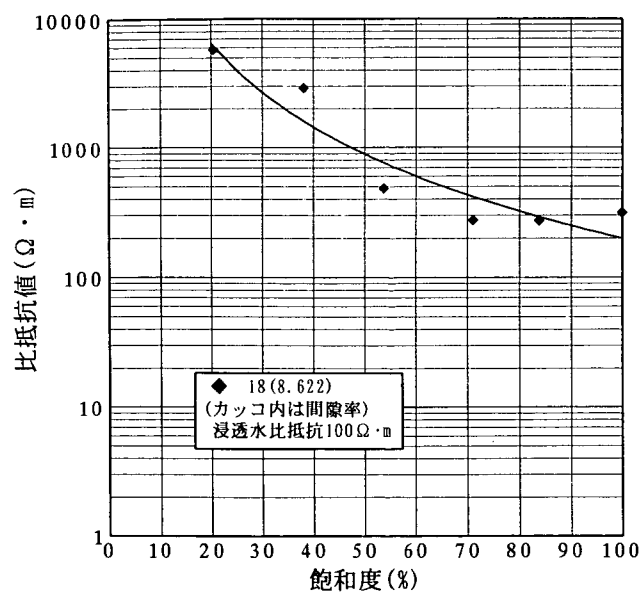


(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係

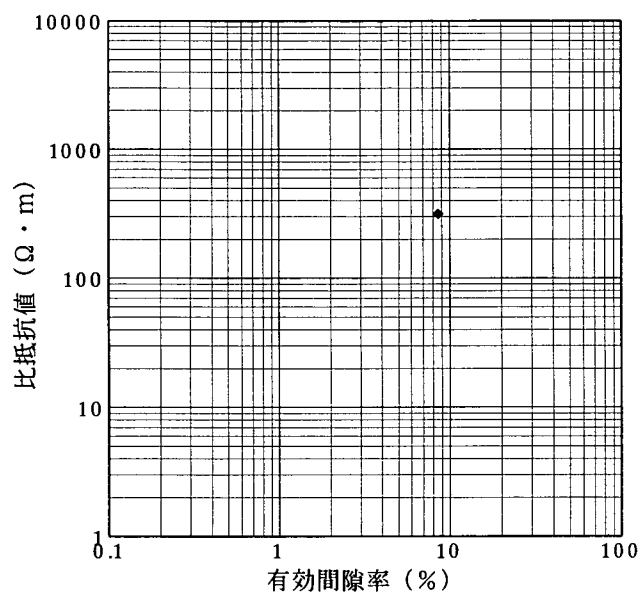


(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

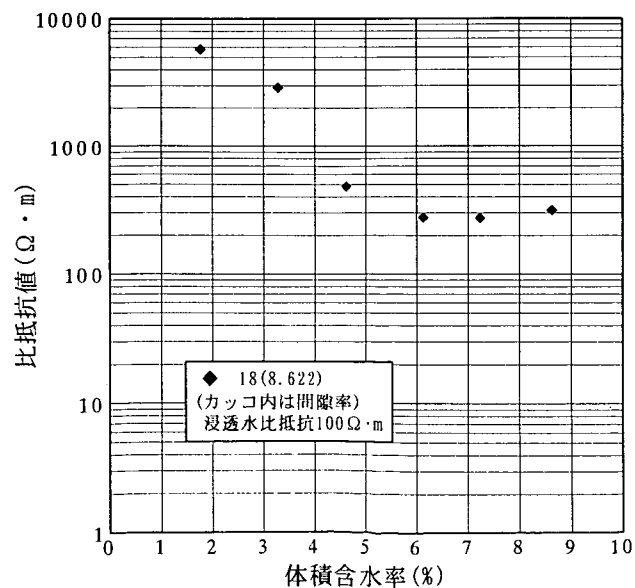
図-2.25 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(標準砂)



(a) 飽和度と比抵抗値の関係



(b) 有効間隙率と比抵抗値の関係



(c) 体積含水率と比抵抗値の関係

図-2. 26 飽和度、有効間隙率、体積含水率と比抵抗値の関係(マサ)

表-2. 3 (1) アーチの式の係数 (堆積岩)

岩 種		比抵抗値と飽和度との関係				比抵抗値と有効間隙率との関係		
		有効間隙率 ϕ	飽和指数 n	飽和度 100% 比抵抗値 ρ_{100}	相関係数 R	迂 回 率 数 a	膠結定数 m	相関係数 R
堆 岩	泥 岩	38.20	1.41	5	0.89	0.0093	2.46	0.36
		42.35	2.03	2	0.91			
		42.53	1.51	6	0.90			
		43.05	1.61	6	0.89			
		43.74	2.04	7	0.98			
		44.98	2.26	5	0.99			
		45.14	1.91	7	0.94			
	頁 岩	0.313	1.29	1122	0.99	0.0022	1.53	0.78
		0.299	1.05	5963	0.99			
		0.928	0.71	195	0.98			
		2.47	1.18	21	0.95			
		2.72	1.11	18	0.95			
		2.94	1.09	12	0.98			
		3.69	0.45	123	0.99			
積	砂 岩	4.57	1.19	257	0.96	0.042	1.07	0.83
		5.03	2.68	24	0.98			
		3.99	1.49	106	0.95			
		4.50	2.05	94	0.95			
		5.44	1.73	97	1.00			
	凝灰質砂岩	8.53	3.44	24	0.93	—	—	—
		8.99	1.77	35	0.98			
		34.6	1.08	18	0.92			
		35.1	1.22	16	0.91			
		36.0	1.16	16	0.91			
岩	凝 灰 岩	57.4	0.46	34	0.95	0.017	2.75	0.98
		57.3	0.42	34	0.93			
		57.0	0.48	38	0.95			
		53.9	0.34	34	0.85			
		22.8	0.67	88	0.99			
	熔結凝灰岩	23.2	0.69	111	0.99	0.021	1.84	0.98
		27.3	0.69	64	1.00			
		35.0	1.68	16	0.91			
		37.5	1.61	17	0.91			
		38.3	1.63	18	0.91			
	チャート	4.3	1.20	529	0.90	0.13	1.19	0.77
		8.2	2.04	130	0.93			
		23.1	1.37	11	0.91			
		32.6	1.23	13	0.94			
		0.344	2.21	7173	0.94			
	石 灰 岩	0.405	1.91	8273	1.00	—	—	—
		0.795	2.76	3871	0.97			
		0.836	2.63	2674	0.93			
		1.070	1.23	2104	0.98			
		0.218	1.41	25877	0.94			
	フ ス リ ナ 石 灰 岩	0.128	0.80	183729	0.95	—	—	—
		0.164	0.50	365890	0.98			
		0.173	0.66	236967	0.82			

表-2. 3 (2) アーチの式の係数 (火成岩)

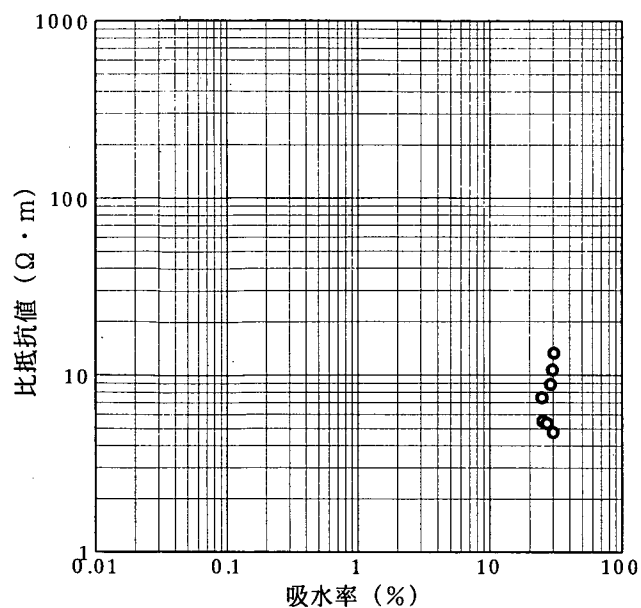
岩 種		比抵抗値と飽和度との関係				比抵抗値と有効間隙率との関係		
		有効間隙率	飽和指数	飽和度 100% 比抵抗値	相関係数	迂 回 率 係 数	膠結定数	相関係数
		ϕ	n	ρ_{100}	R	a	m	R
火	流 紋 岩	2.479 4.357	2.03 1.33	1554 7866	0.99 1.00	—	—	—
	石英安山岩	4.1	1.23	2942	1.00	—	—	—
	普 通 輝 石 紫 蘇 輝 石 安 山 岩	4.294 4.305 4.312	2.80 2.69 2.79	157 169 160	0.97 0.97 0.97	—	—	—
	カ ン ラ ン 石 玄 武 岩	4.99	0.89	1309	0.99	—	—	—
成 <								

表-2. 3 (3) アーチの式の係数 (変成岩、その他)

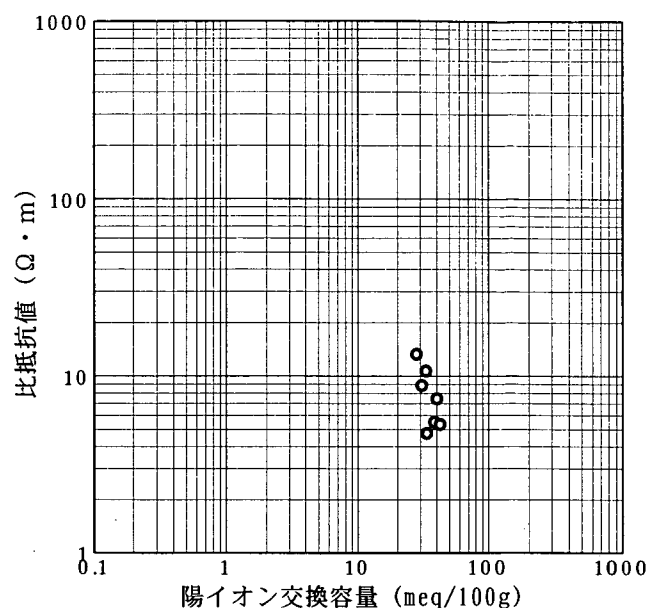
岩 種		比抵抗値と飽和度との関係				比抵抗値と有効間隙率との関係		
		有効間隙率	飽和指数	飽和度 100% 比抵抗値	相関係数	迂 回 率 数	膠 結 定 数	相関係数
		ϕ	n	ρ_{100}	R	a	m	R
変 成 岩	緑 泥 片 岩	0.521	2.00	7450	0.96	—	—	—
		0.683	1.97	10120	0.98	—	—	—
		0.762	1.86	8708	0.98	—	—	—
		0.646	1.94	922	0.96	—	—	—
		0.658	2.14	849	0.95	—	—	—
		0.782	2.04	761	0.96	—	—	—
	角 閃 石 片 麻 岩	0.350	1.47	4694	0.99	—	—	—
		0.470	1.91	1320	0.99	—	—	—
	土 丹	48.326	2.01	4	0.91	—	—	—
	標 準 砂	40.452	3.28	30	0.94	—	—	—
そ の 他	マ サ	8.622	2.16	198	0.95	—	—	—

(2) 比抵抗値とその他の物理的・力学的・鉱物化学的特性との関係

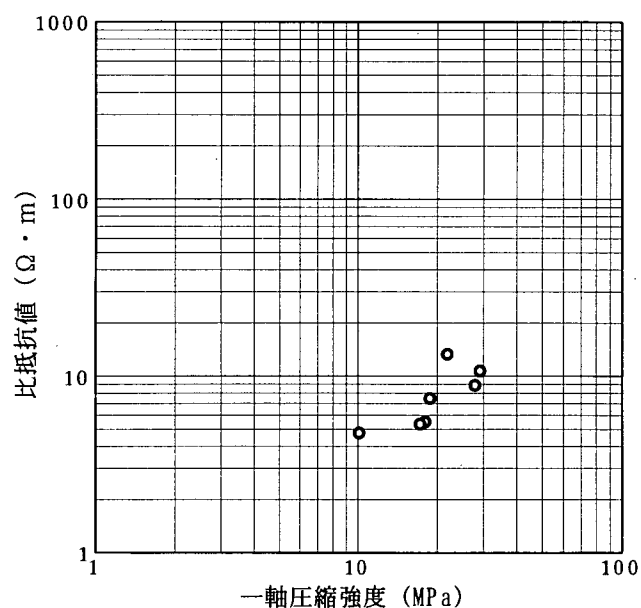
図-2. 27~2. 47に水分飽和度が100%の時の各岩種の比抵抗値と吸水率、陽イオン交換容量、超音波伝播速度(P波)、一軸圧縮強度との関係をそれぞれ示す。岩種によっては吸水率、陽イオン交換容量、超音波速度、一軸圧縮強度の各値が示す範囲が狭いために、あるいはデータ数そのものが少ないために比抵抗値との関係を見ることができないものがあるが、一般に吸水率、陽イオン交換容量が大きくなると比抵抗値は小さくなり、超音波伝播速度(P波)、一軸圧縮強度が大きくなると比抵抗値も大きくなる傾向にあることが読みとれる。これらの関係のうち、吸水率については有効間隙率と密接な関係にあり、前述したように有効間隙率と比抵抗値との関係は個々の岩種によって大きく異なるため、すべての岩種を一括りにして関係を議論することは意義のあることとは思われない。しかし、超音波伝播速度(P波)、一軸圧縮強度、陽イオン交換容量に関してはそれぞれが岩石の物理的、力学的、鉱物化学的特性を表す一つの指標となるものであり、岩種に関係なく比抵抗値と一定の関係が認められれば比抵抗値を用いてこれらの特性を把握することが可能となる。そこで、全岩種に対する比抵抗値と陽イオン交換容量、超音波伝播速度(P波)、一軸圧縮強度との関係をまとめたものを図-2. 48に示した。これらの図からわかるように、全岩種でまとめてみても陽イオン交換容量が大きくなると比抵抗値は小さくなり、一軸圧縮強度、超音波伝播速度(P波)が大きくなると比抵抗値は大きくなる傾向にあると言える。特に、陽イオン交換容量は粘土鉱物の含有量を示すものであり、飽和度、有効間隙率と同様に岩石の風化、変質の程度と密接な関係にあることから、事前調査において得られた比抵抗値の解釈にあたってはどの要因が比抵抗値に影響を与えているかを推定することが重要となる。



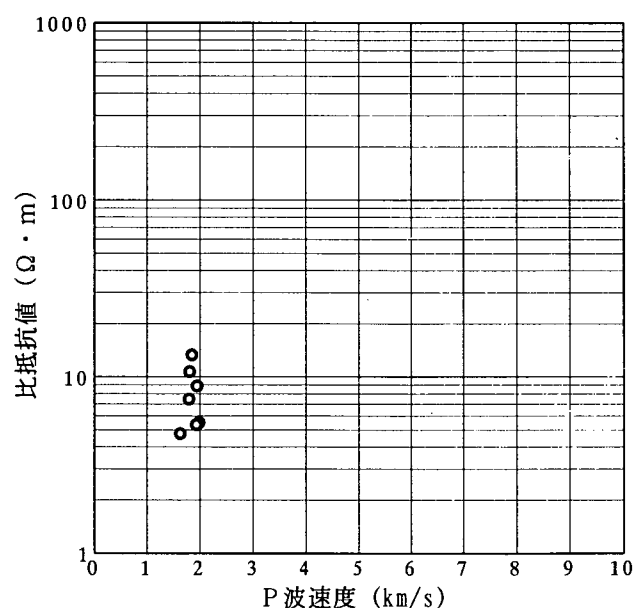
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

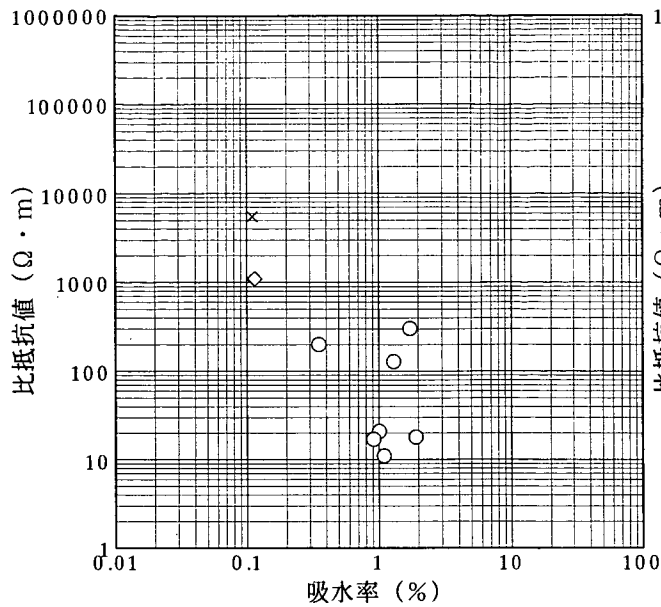


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

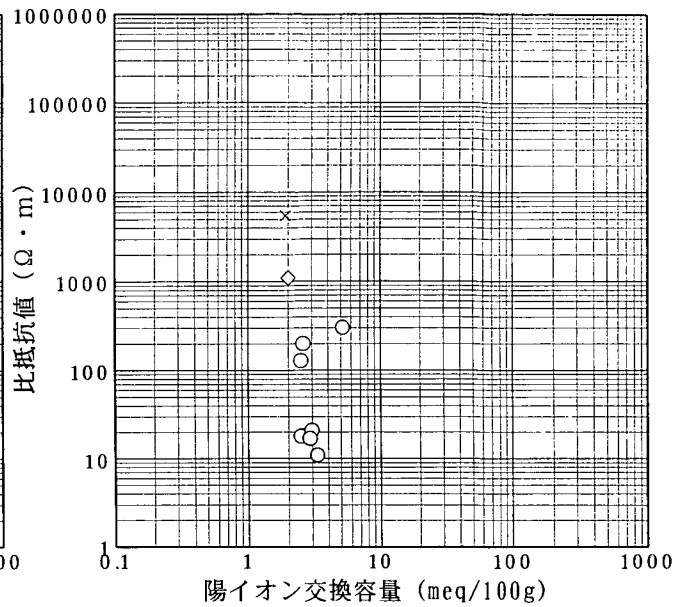


(d) P波速度と比抵抗値の関係

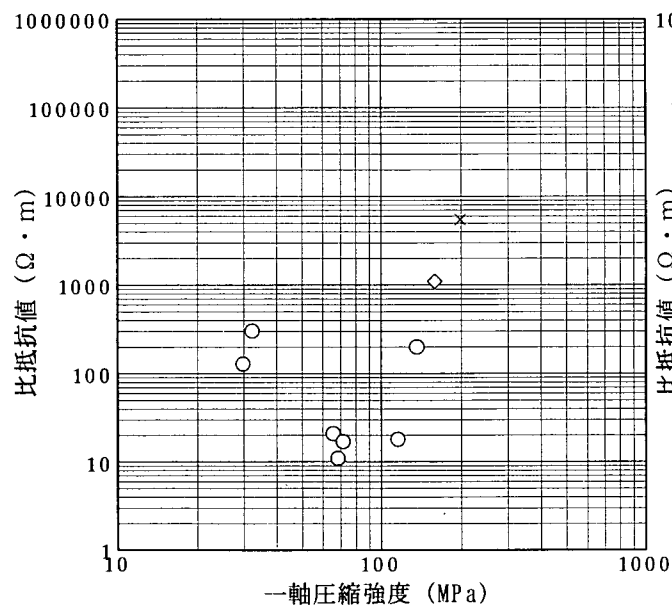
図-2. 27 その他の特性と比抵抗値の関係(泥岩)



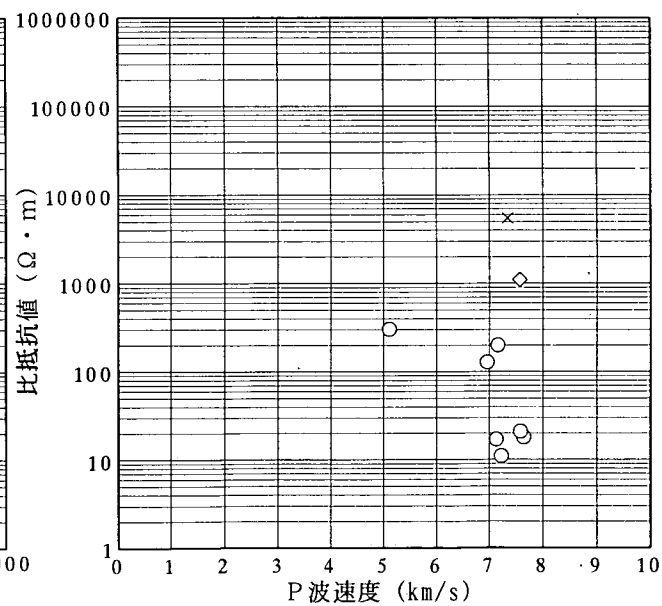
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

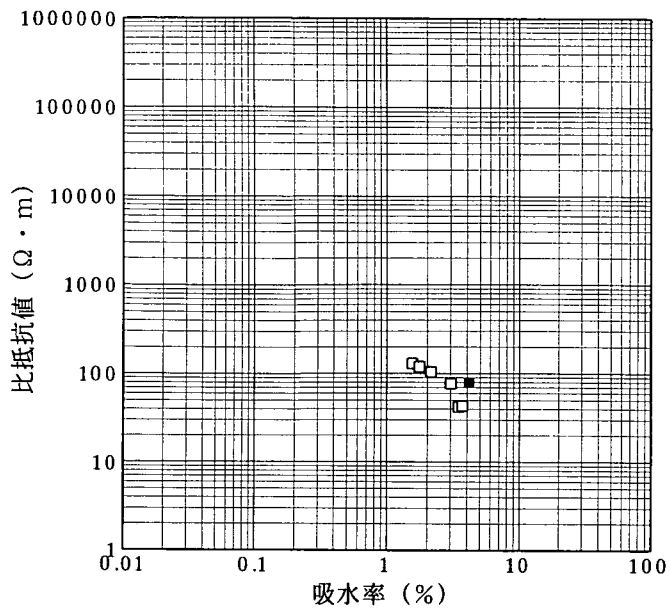


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

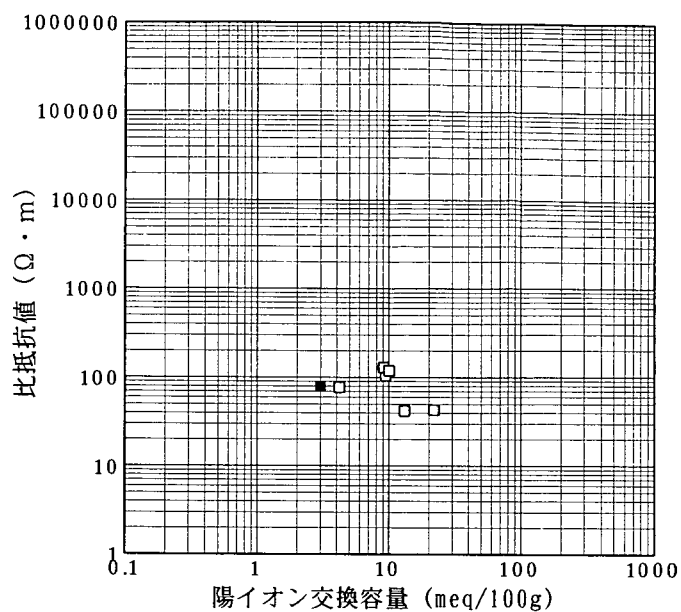


(d) P波速度と比抵抗値の関係

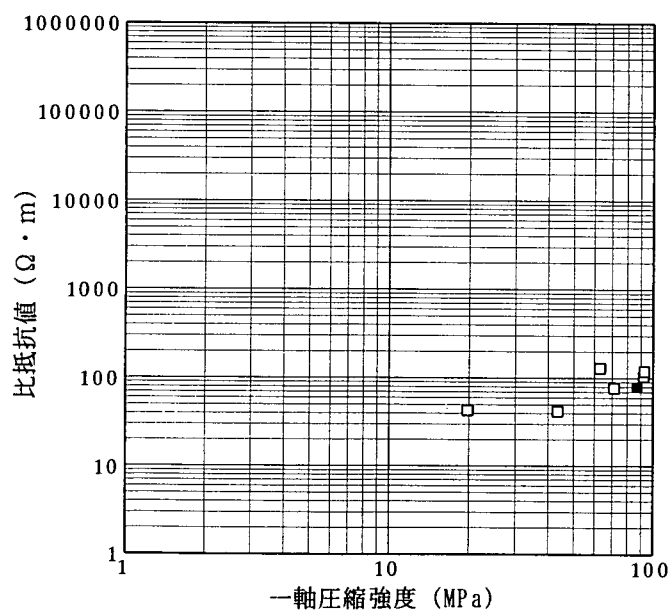
図-2. 28 その他の特性と比抵抗値の関係(頁岩)



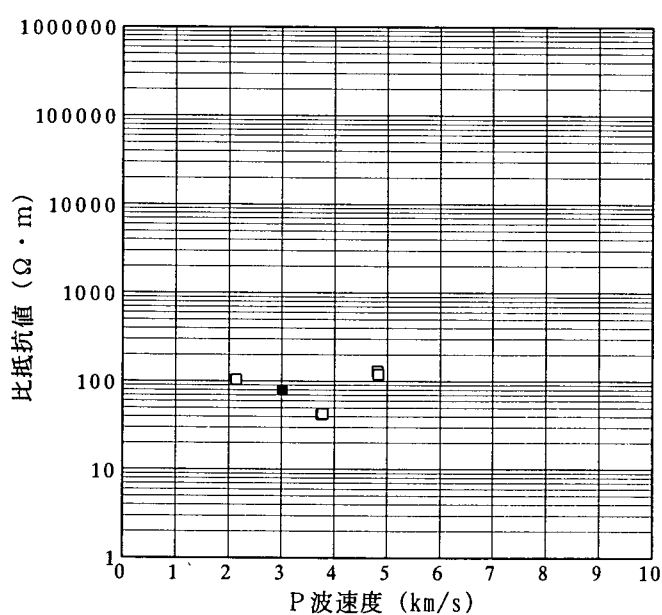
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

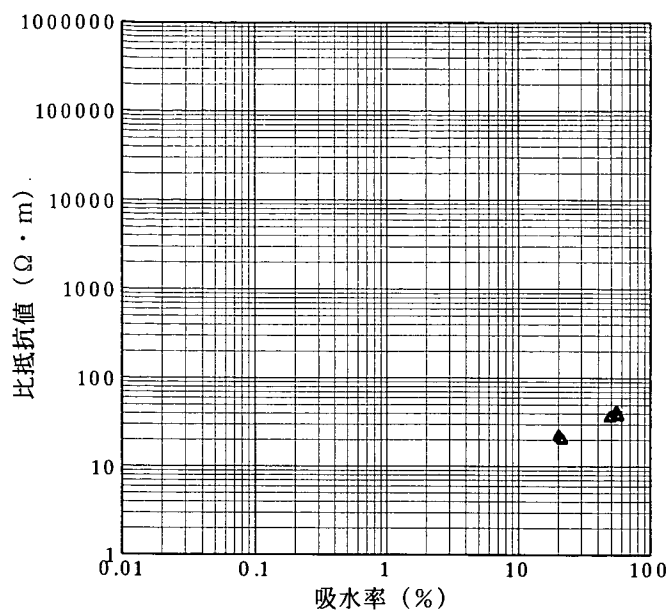


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

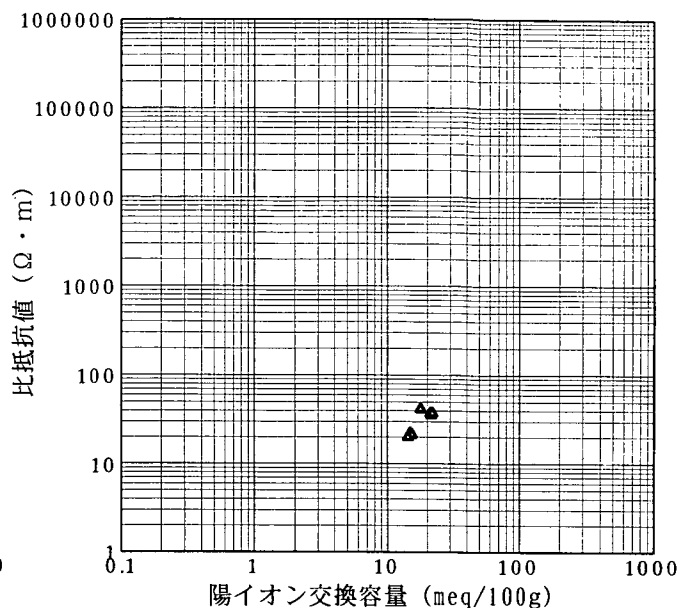


(d) P波速度と比抵抗値の関係

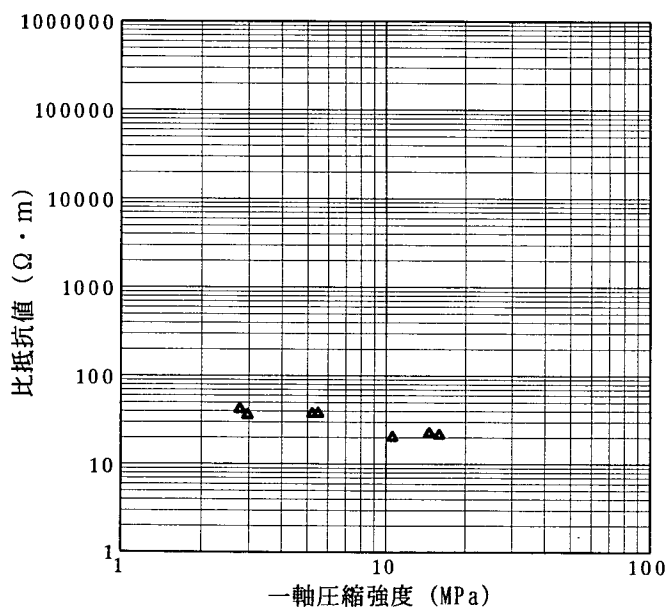
図-2. 29 その他の特性と比抵抗値の関係(砂岩)



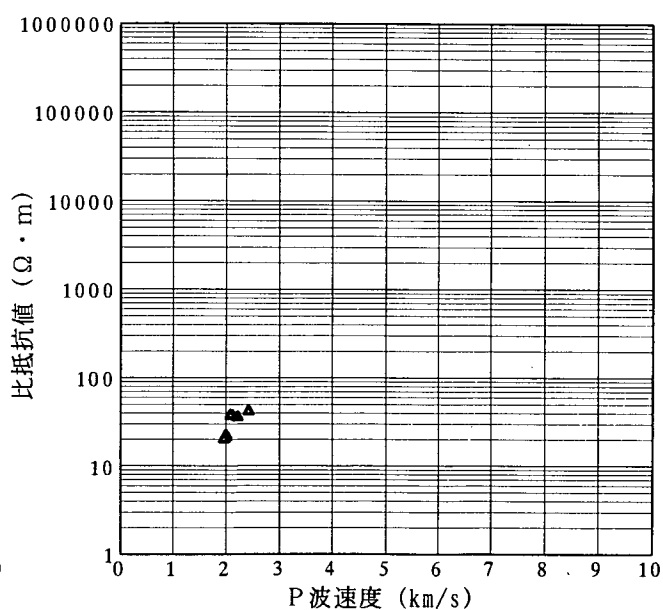
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

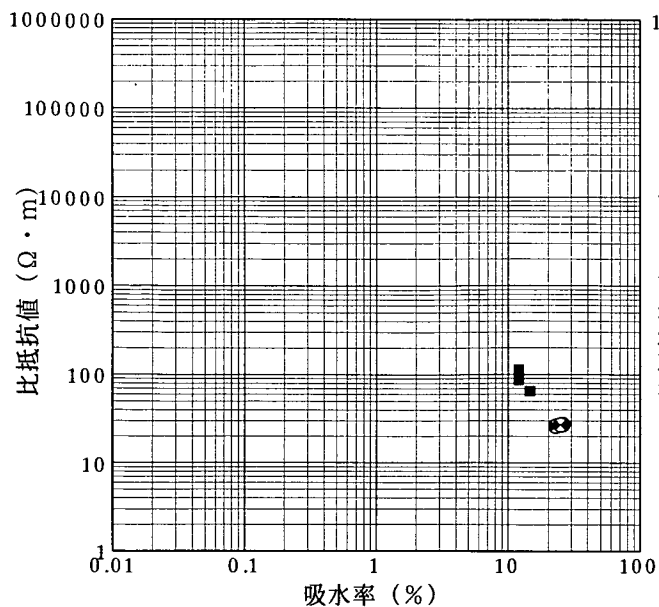


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

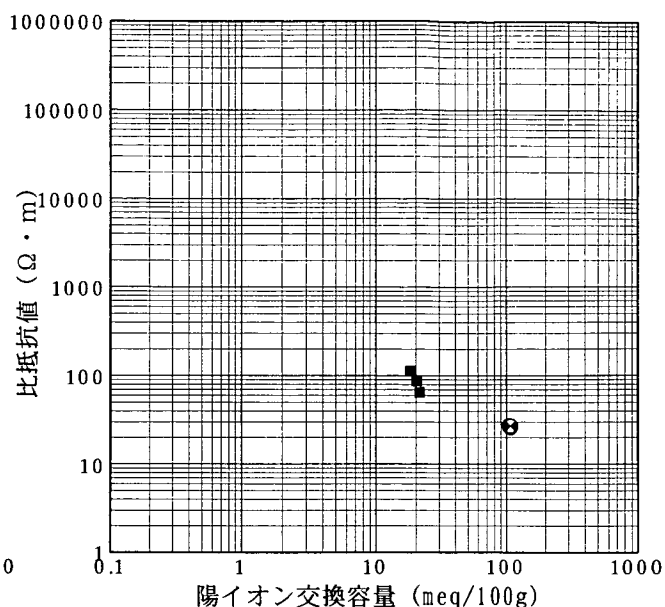


(d) P波速度と比抵抗値の関係

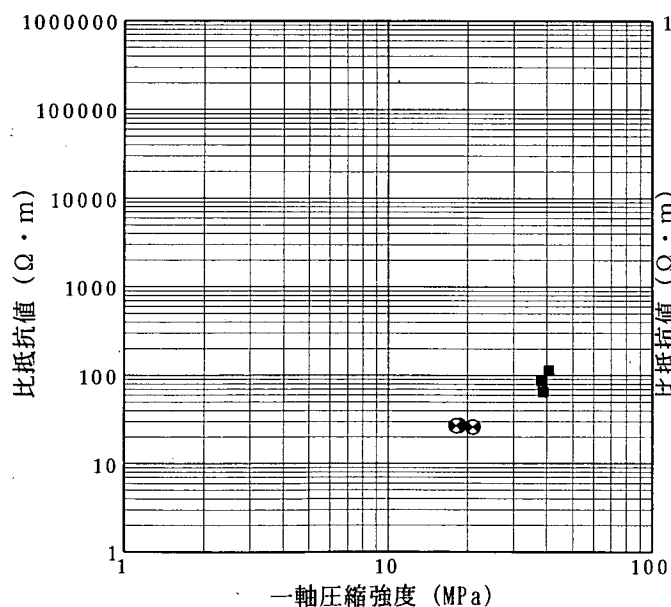
図-2.30 その他の特性と比抵抗値の関係(凝灰質砂岩)



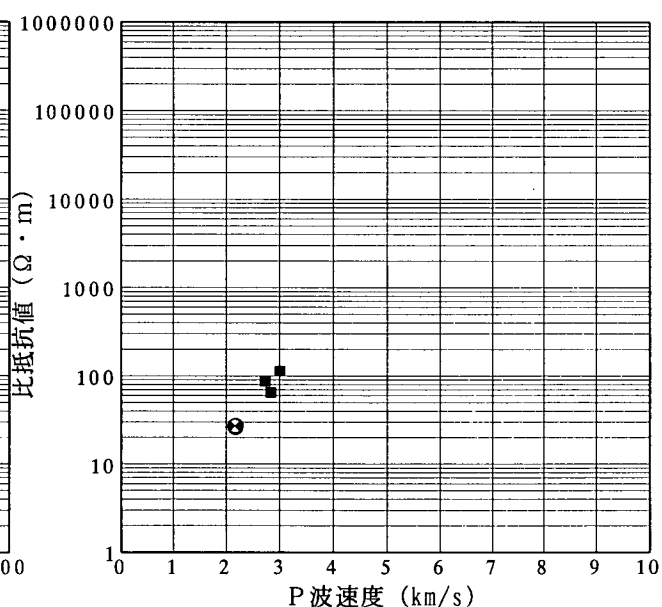
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

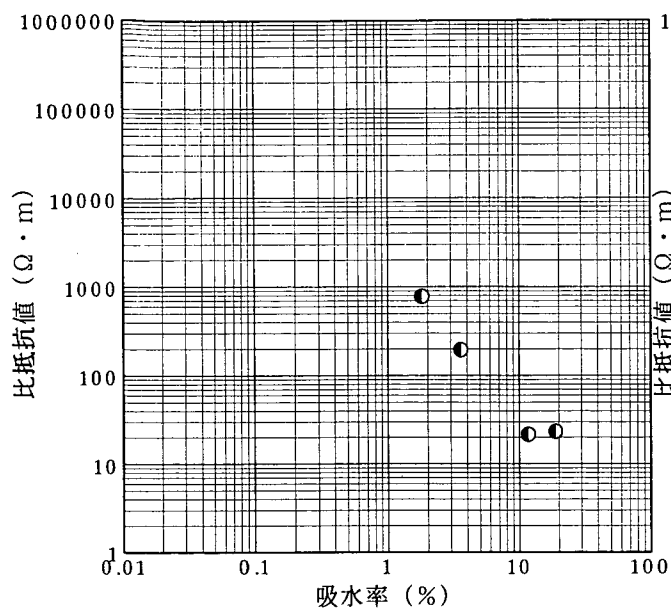


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

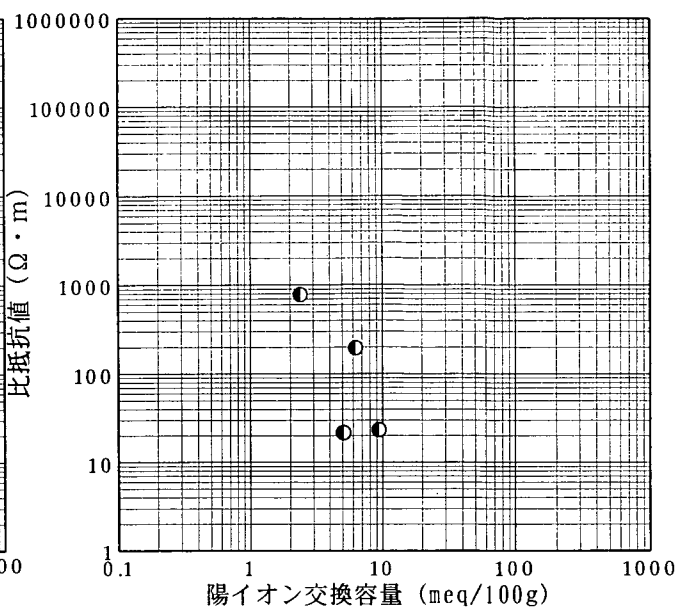


(d) P波速度と比抵抗値の関係

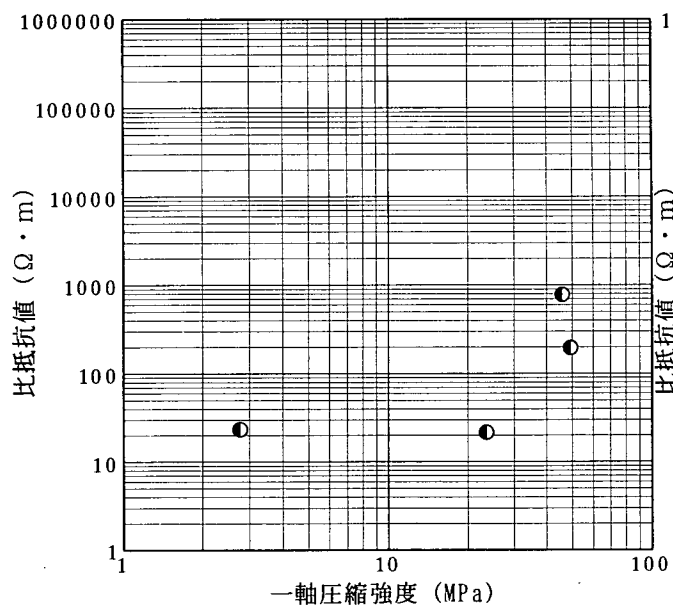
図-2. 31 その他の特性と比抵抗値の関係(凝灰岩)



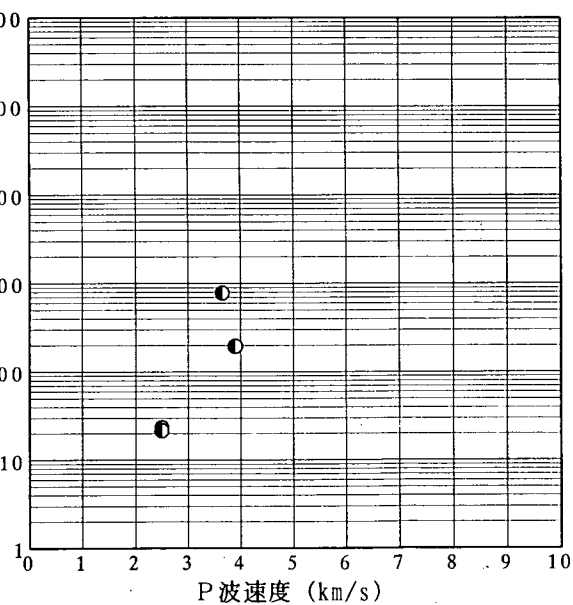
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

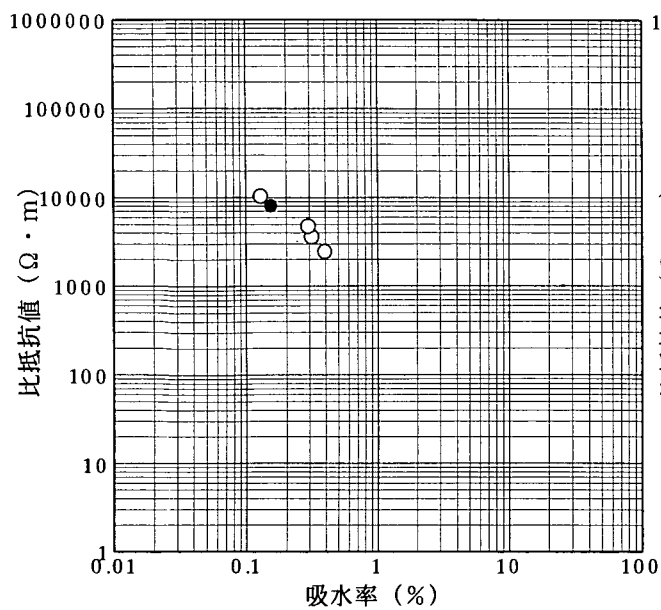


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

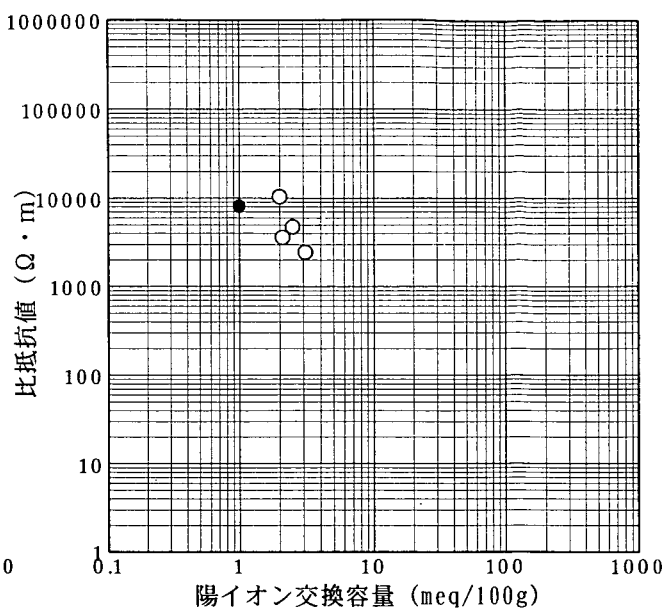


(d) P波速度と比抵抗値の関係

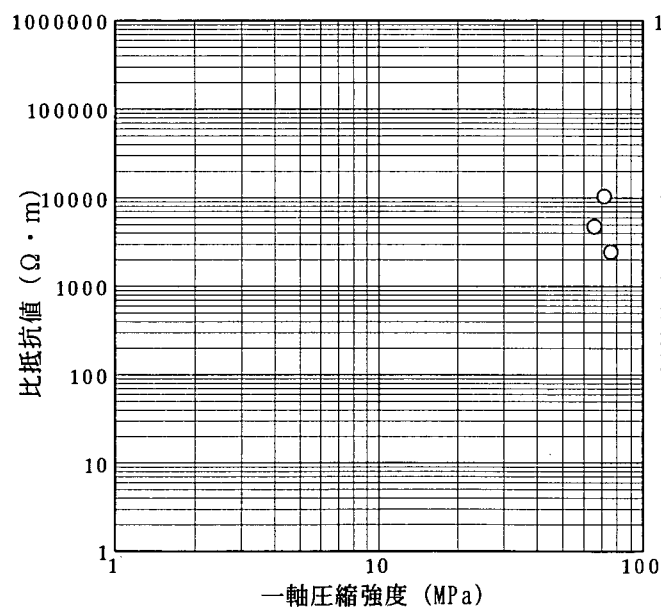
図-2.32 その他の特性と比抵抗値の関係(熔結凝灰岩)



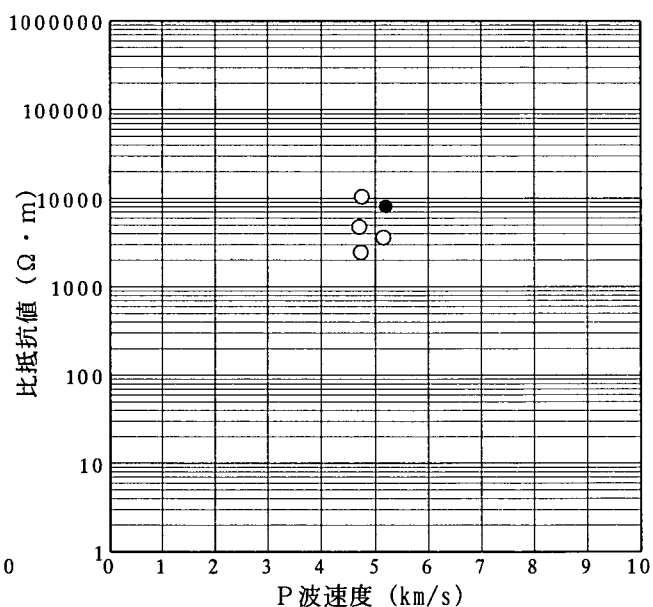
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

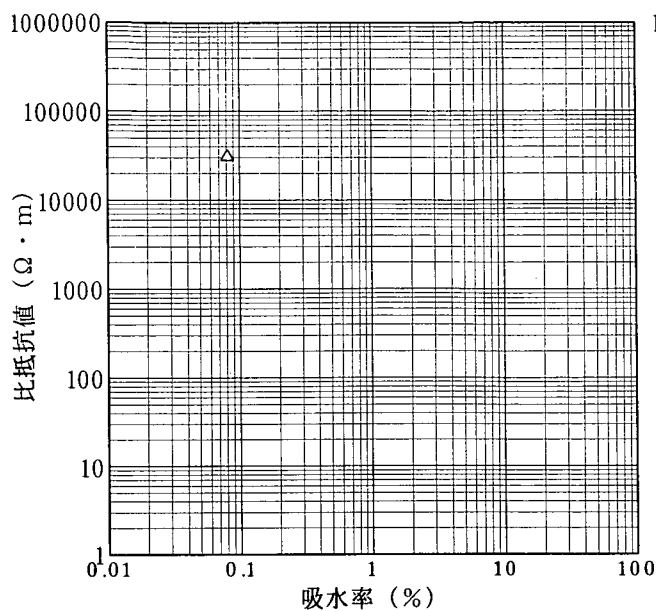


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

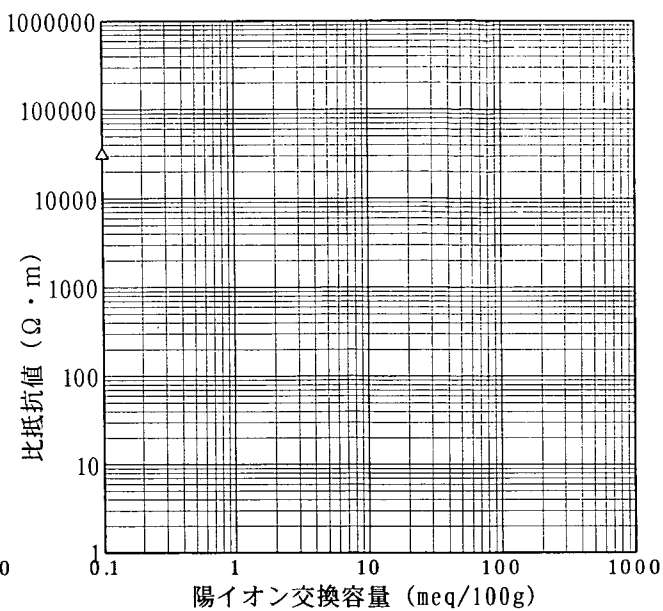


(d) P波速度と比抵抗値の関係

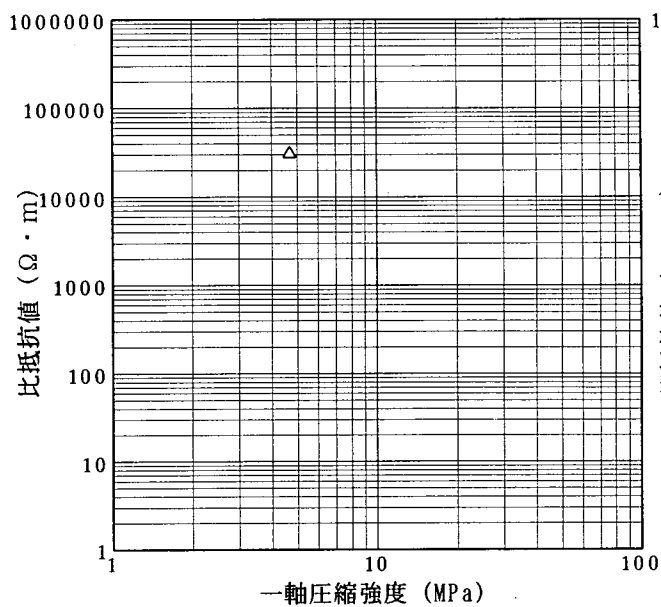
図-2.33 その他の特性と比抵抗値の関係(チャート)



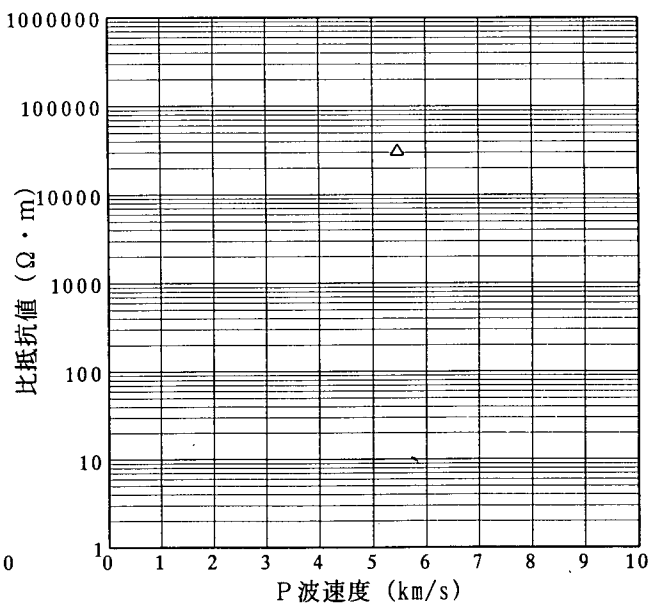
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

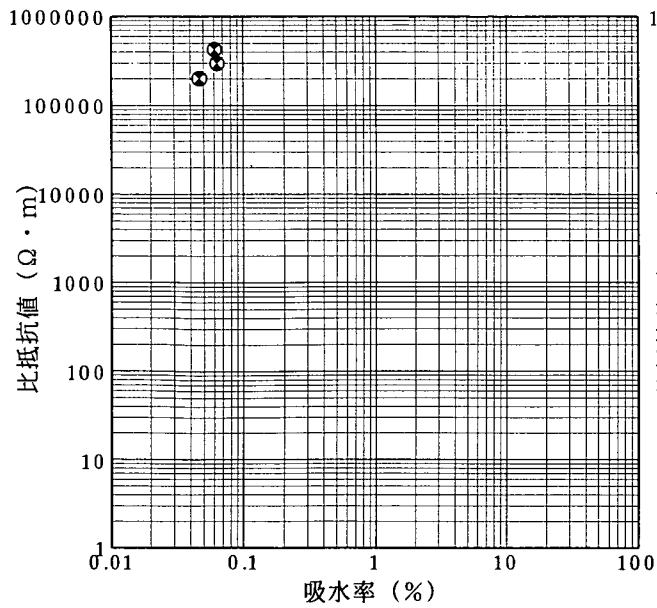


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

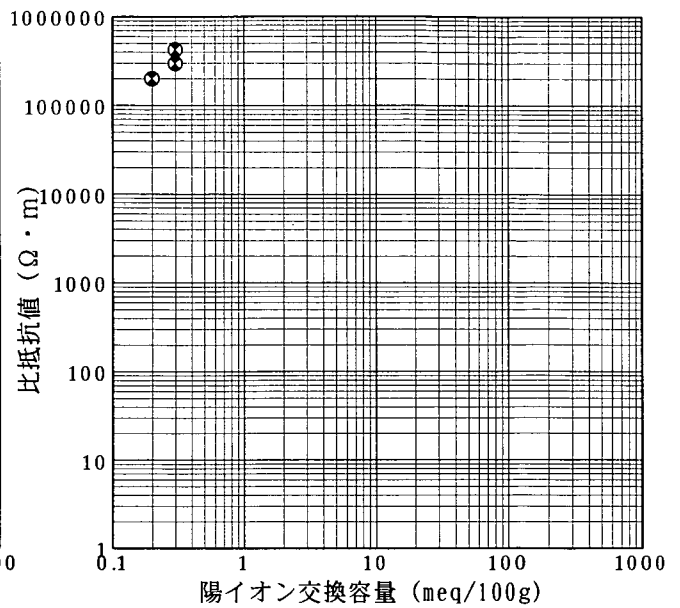


(d) P波速度と比抵抗値の関係

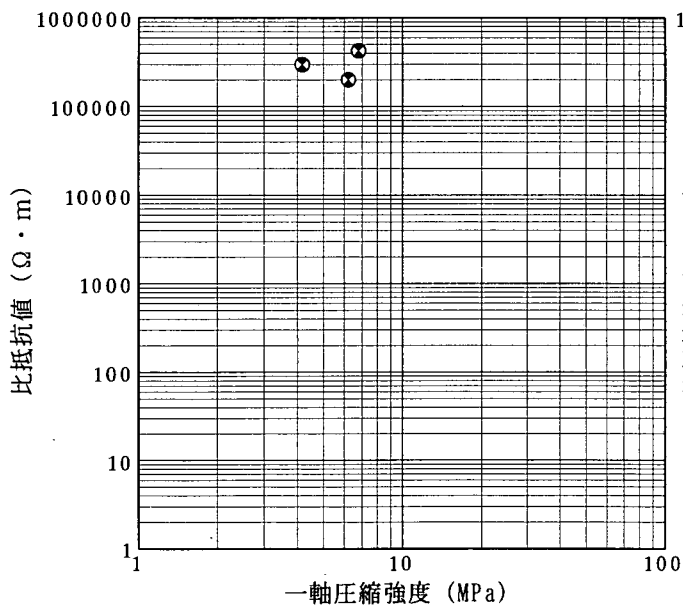
図-2.34 その他の特性と比抵抗値の関係(石灰岩)



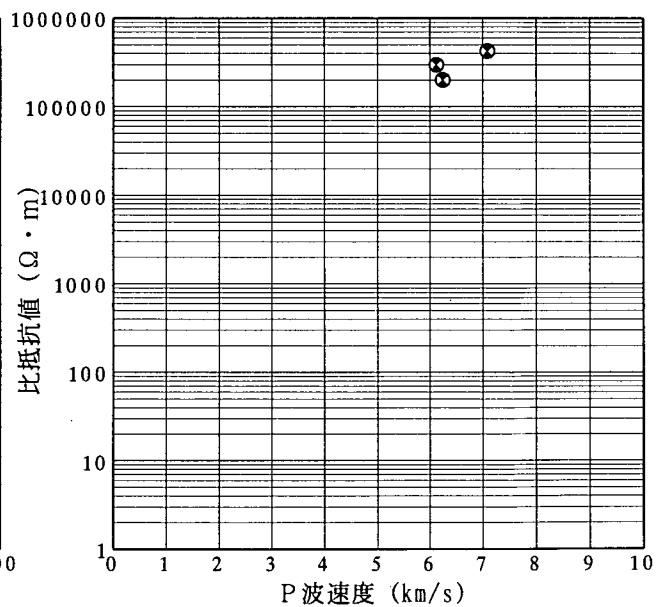
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

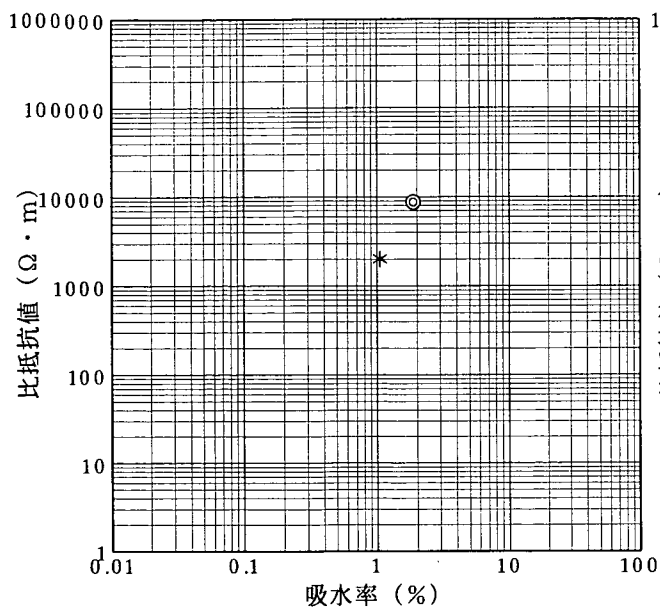


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

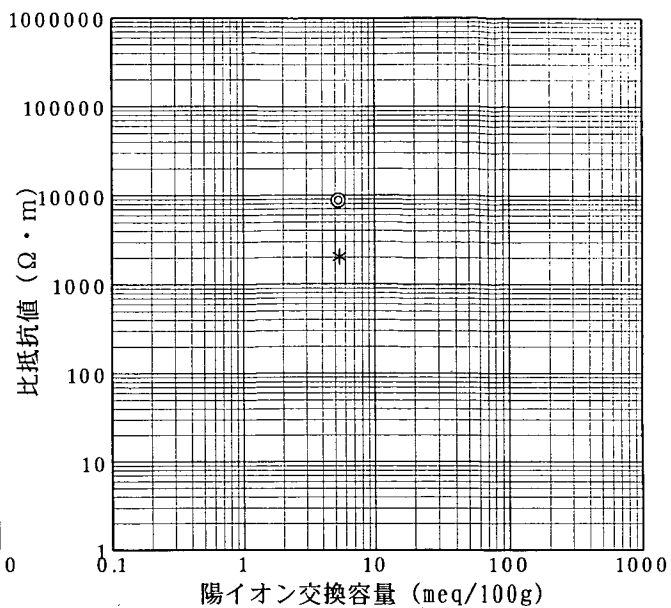


(d) P波速度と比抵抗値の関係

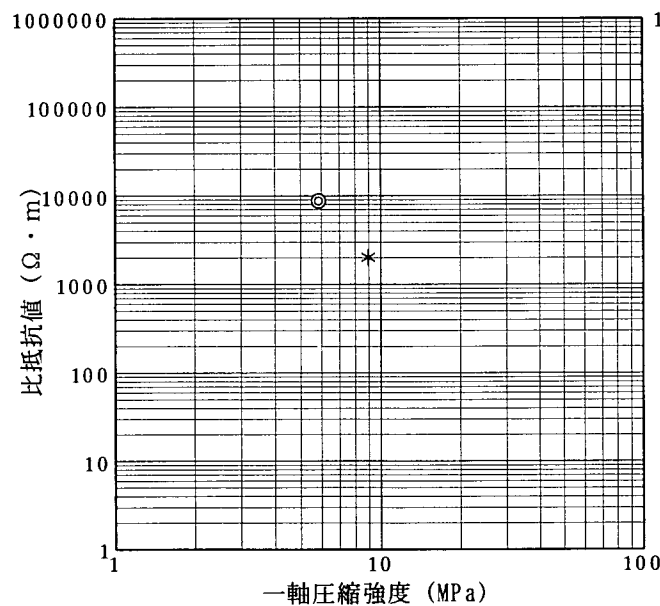
図-2. 35 その他の特性と比抵抗値の関係(フズリナ石灰岩)



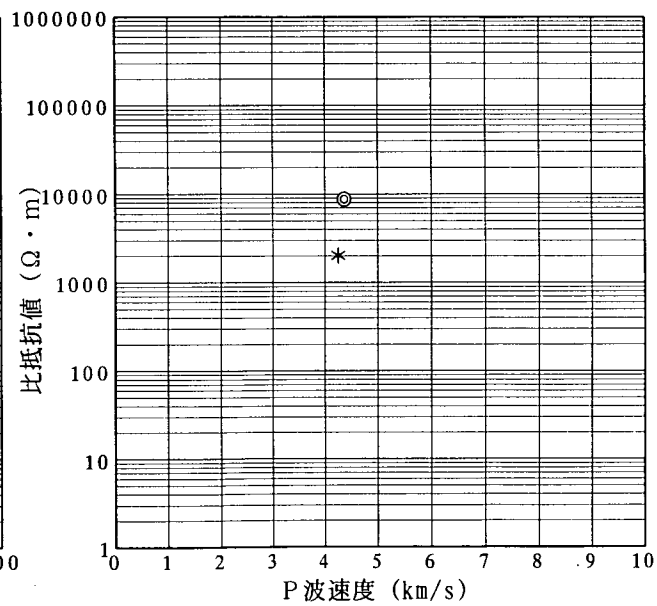
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

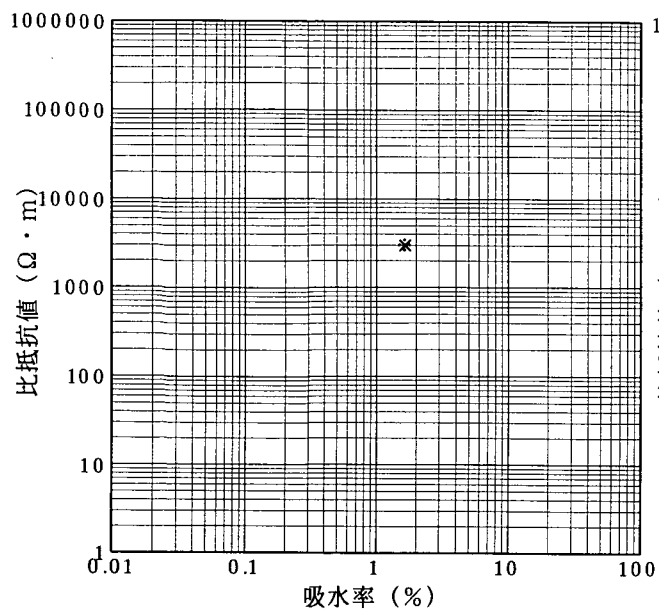


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

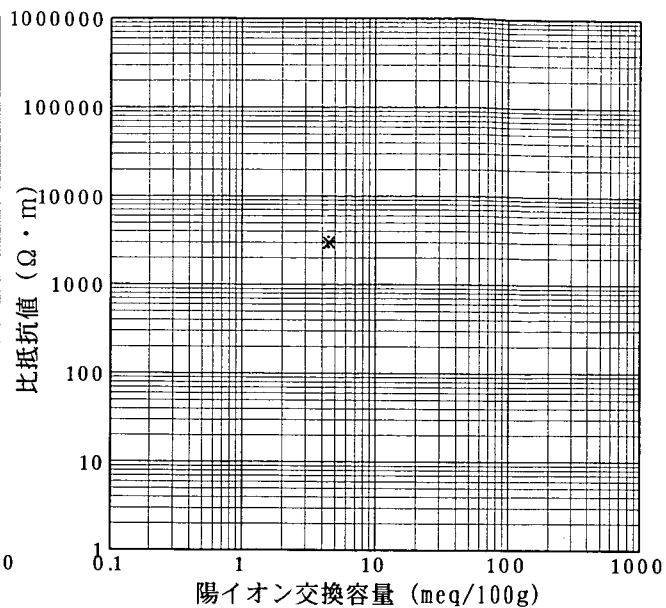


(d) P波速度と比抵抗値の関係

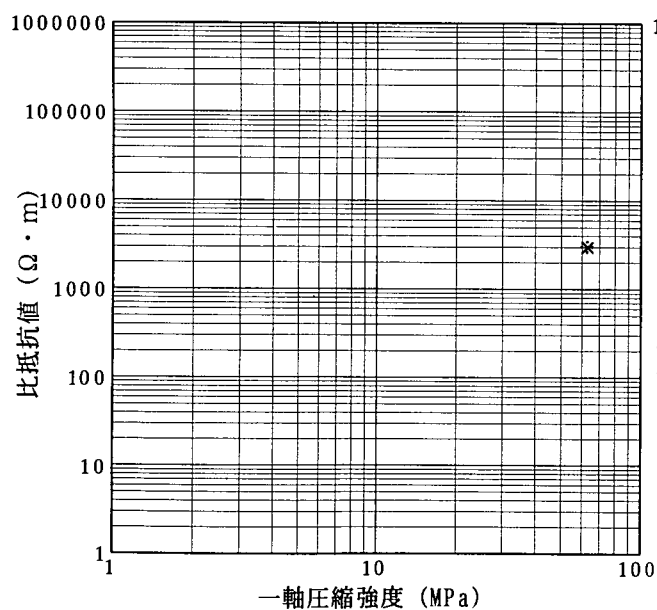
図-2.36 その他の特性と比抵抗値の関係(流紋岩)



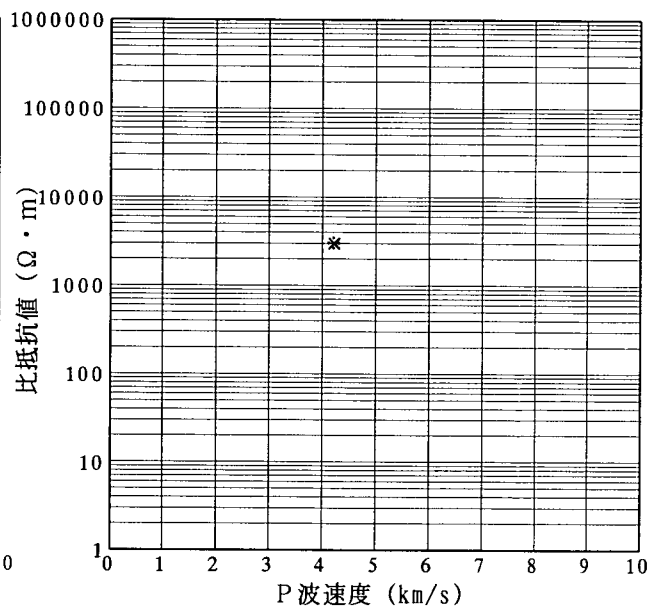
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

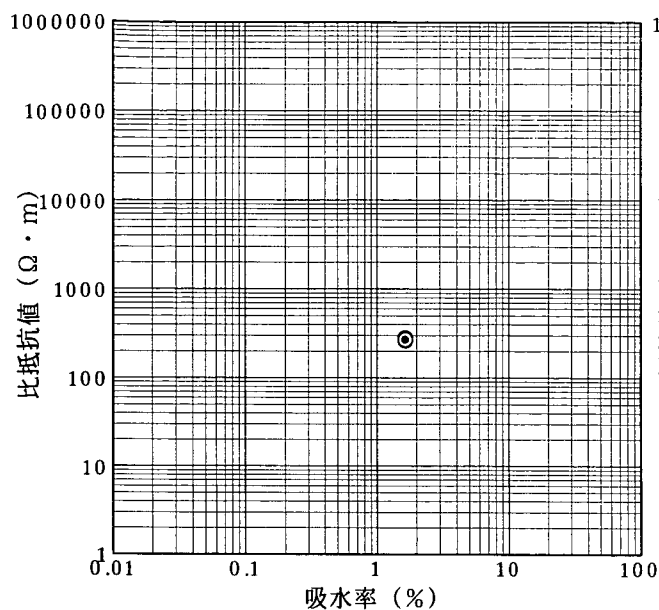


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

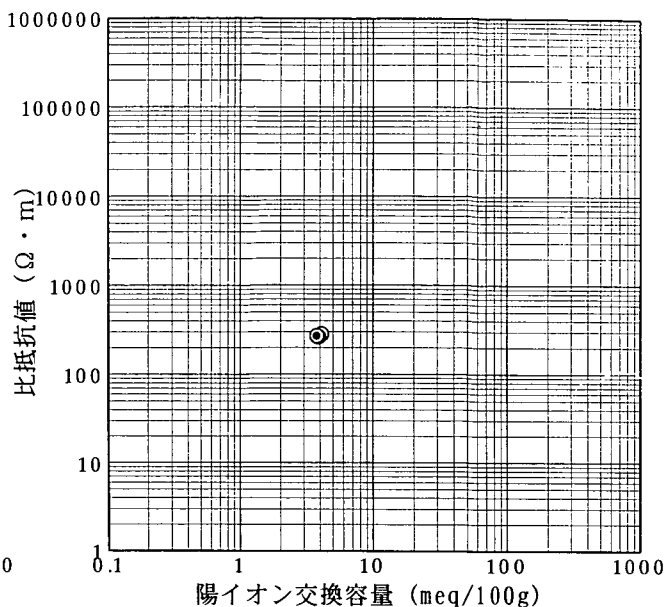


(d) P波速度と比抵抗値の関係

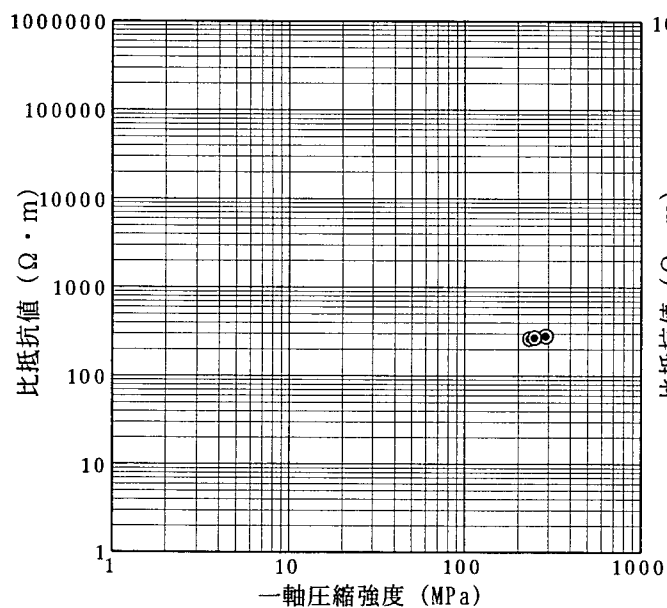
図-2. 37 その他の特性と比抵抗値の関係(石英安山岩)



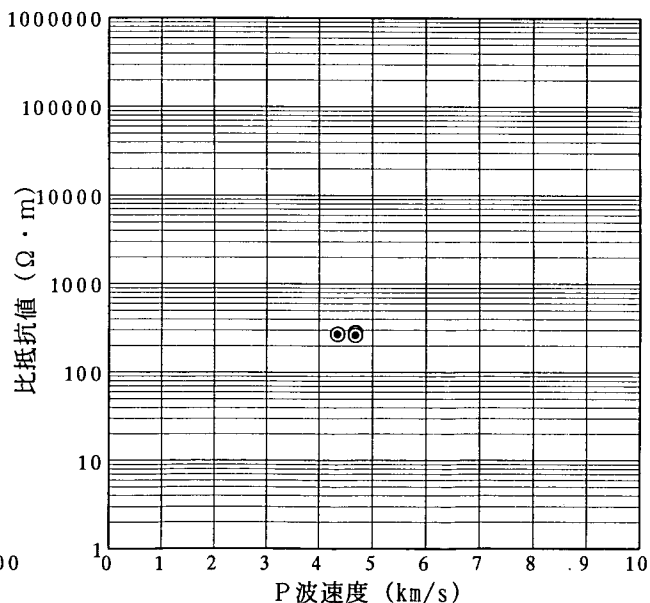
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

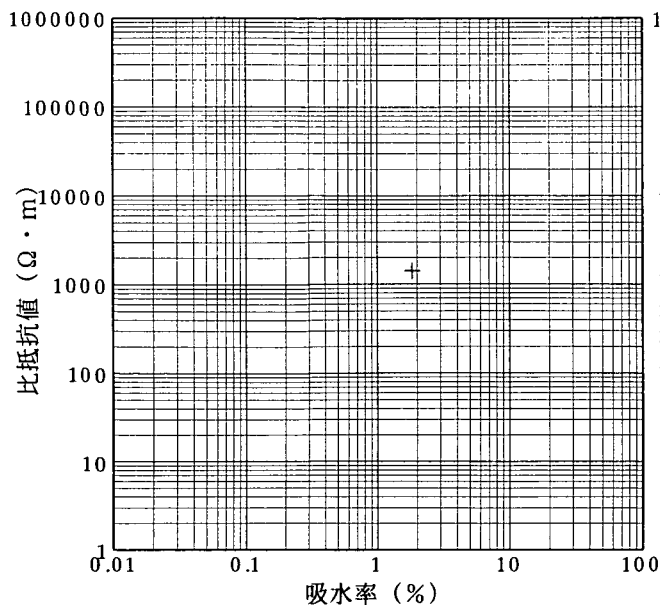


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

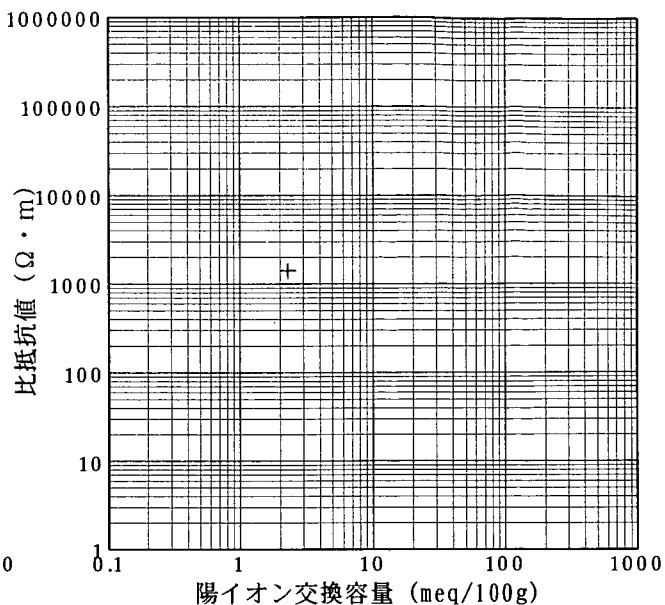


(d) P波速度と比抵抗値の関係

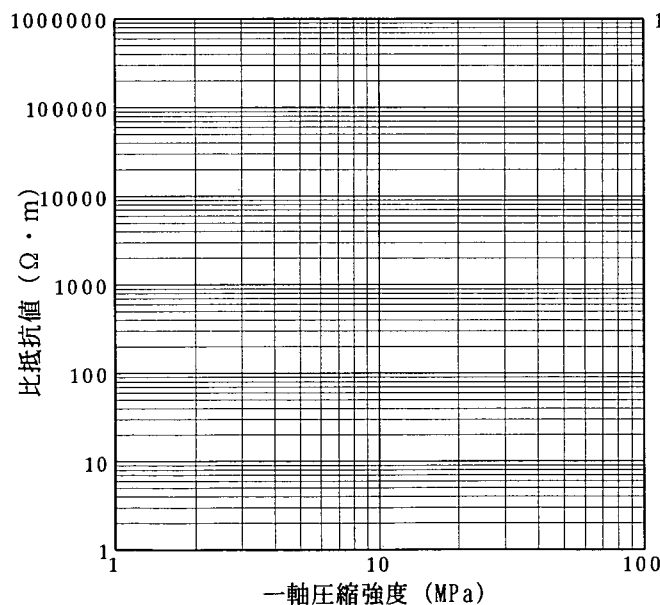
図-2.38 その他の特性と比抵抗値の関係(普通輝石紫蘇輝石安山岩)



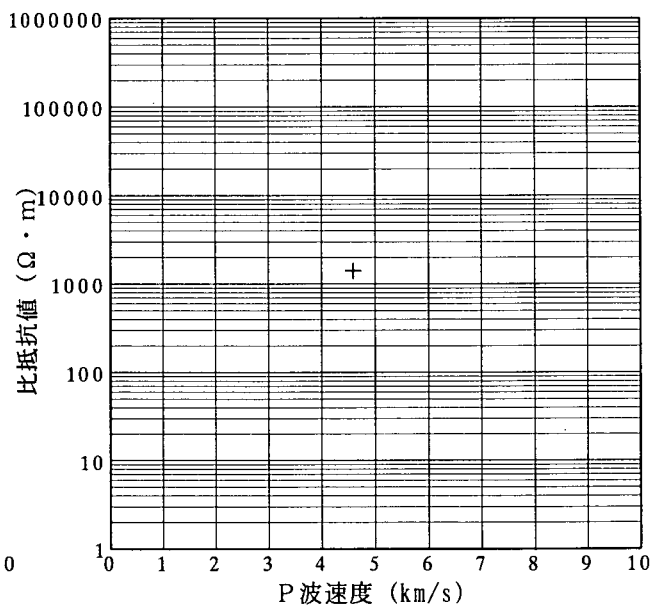
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

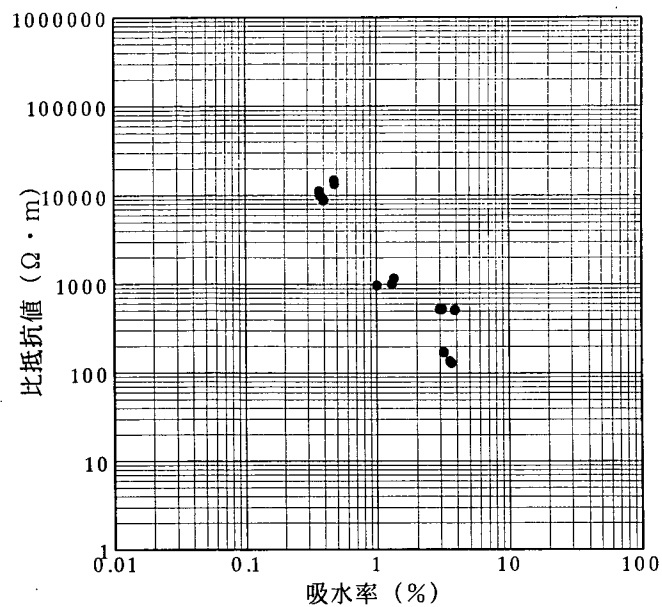


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

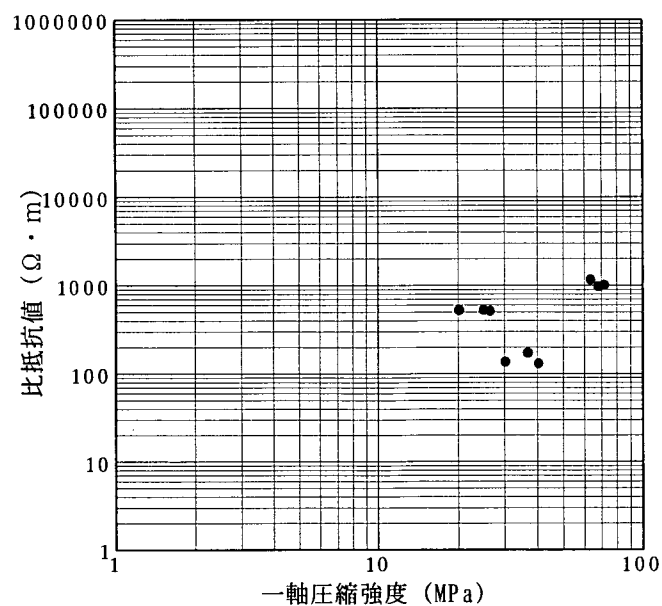


(d) P波速度と比抵抗値の関係

図-2. 39 その他の特性と比抵抗値の関係(カンラン石玄武岩)

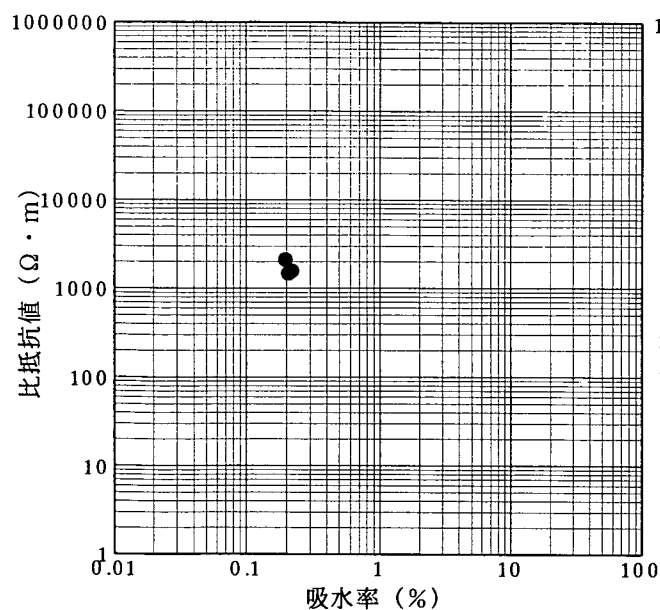


(a) 吸水率と比抵抗値の関係

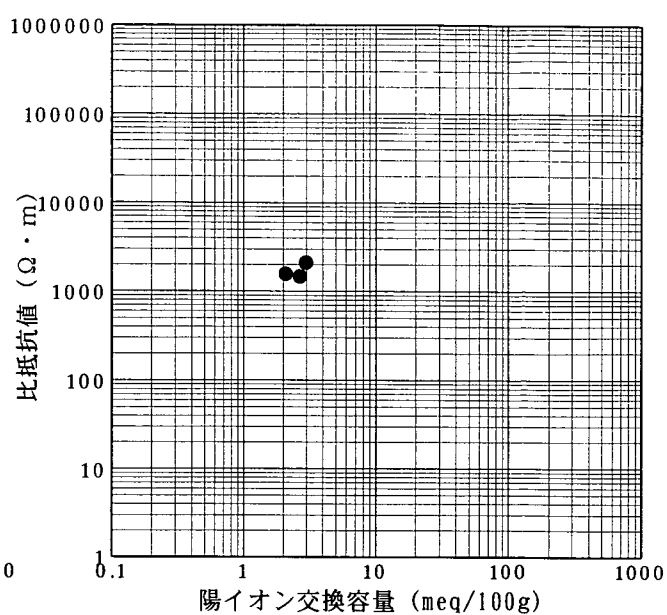


(b) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

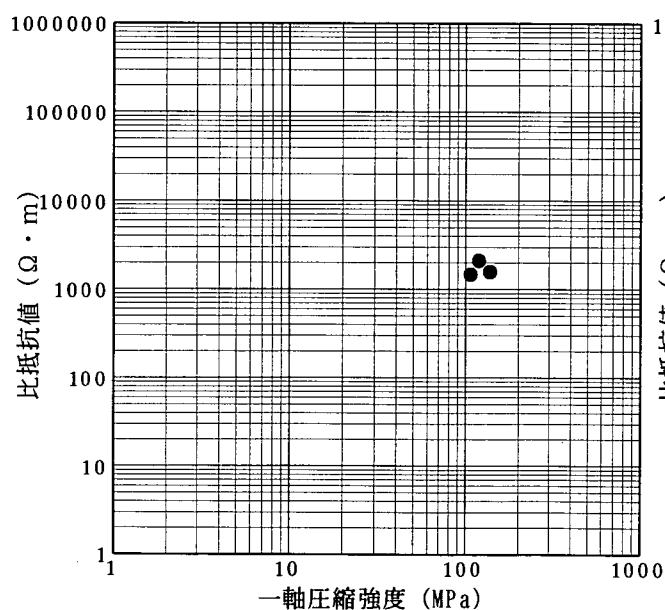
図-2. 40 その他の特性と比抵抗値の関係(花崗岩)



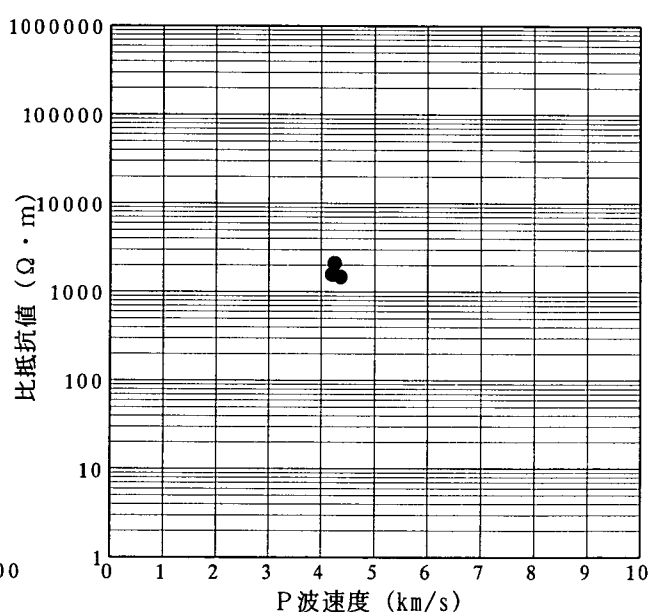
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

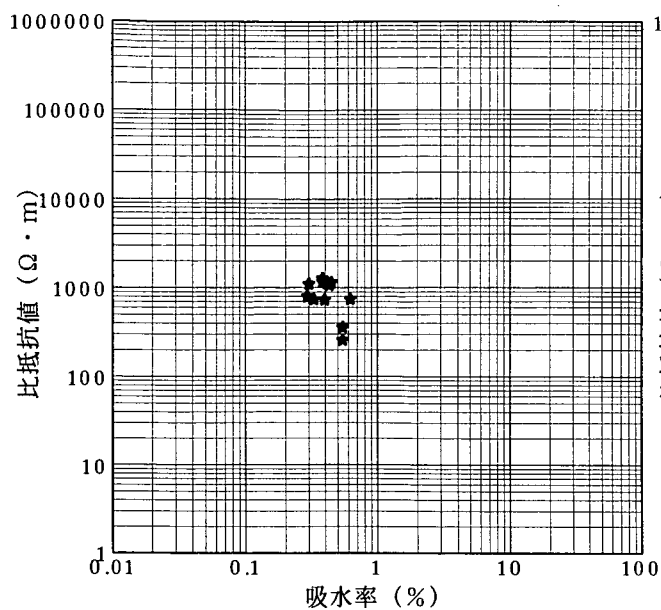


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

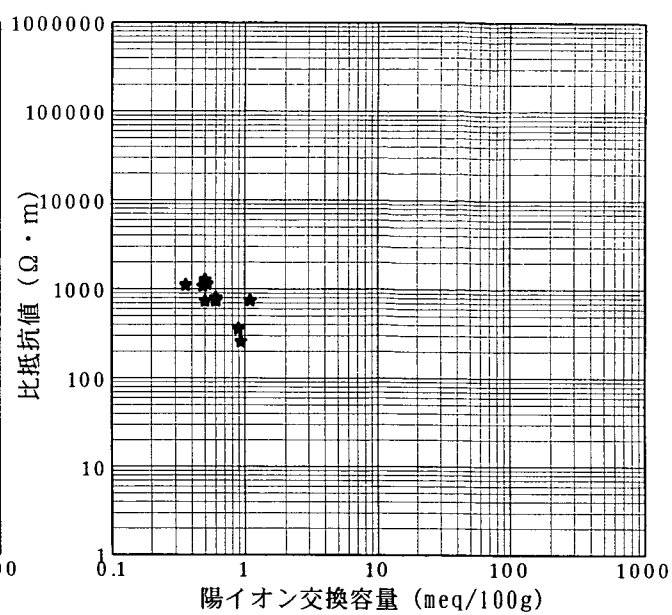


(d) P波速度と比抵抗値の関係

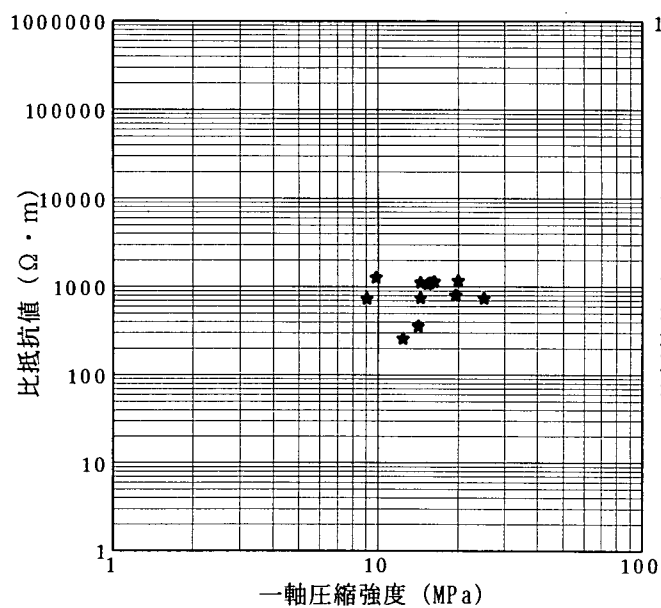
図-2. 41 その他の特性と比抵抗値の関係(複雲母花崗岩)



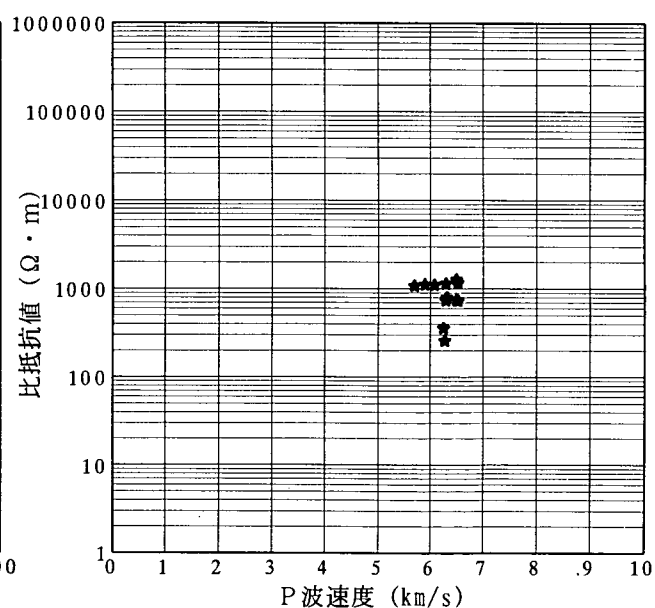
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

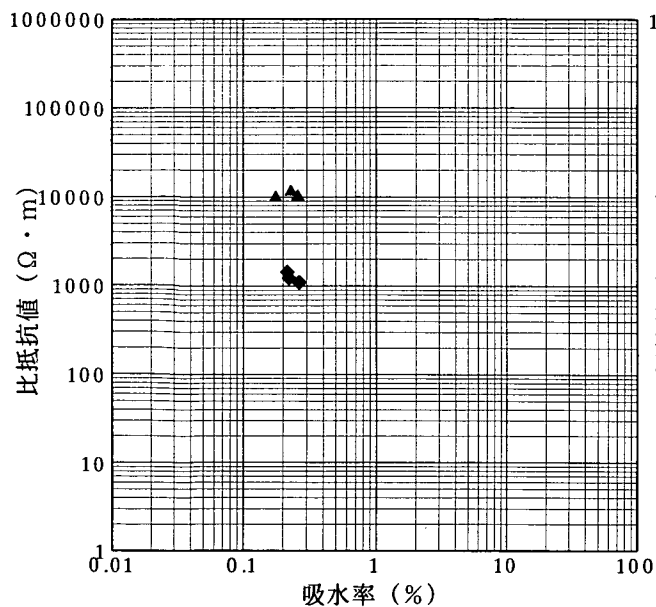


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

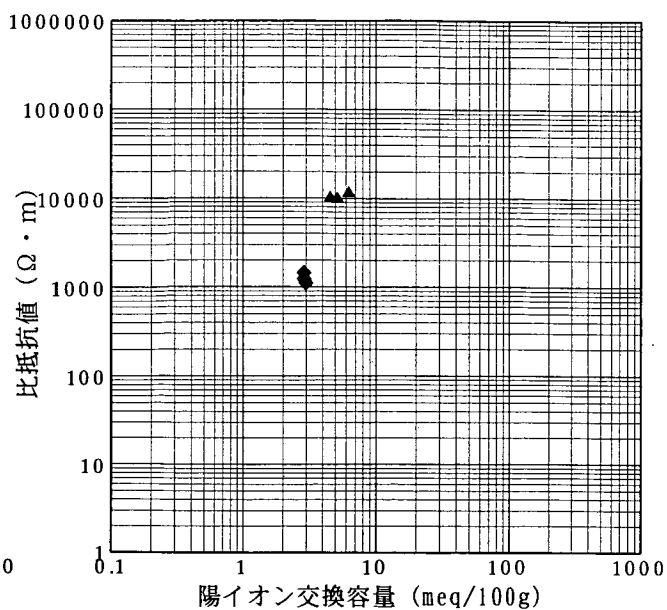


(d) P波速度と比抵抗値の関係

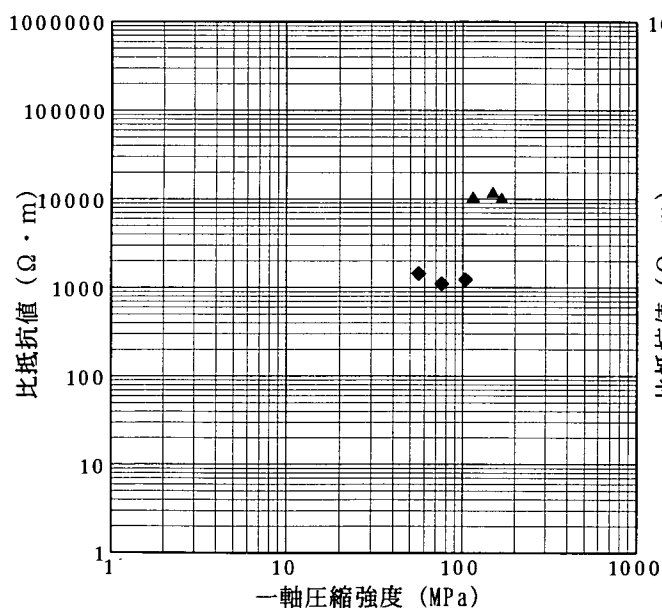
図-2.42 その他の特性と比抵抗値の関係(石英閃緑岩)



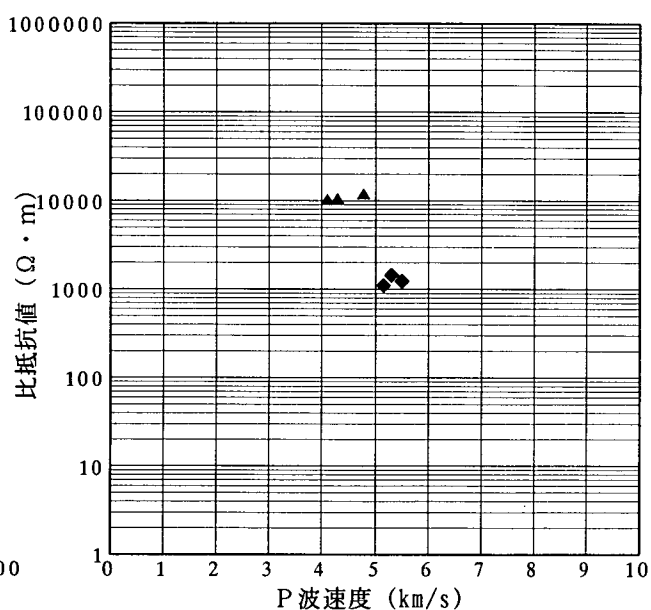
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

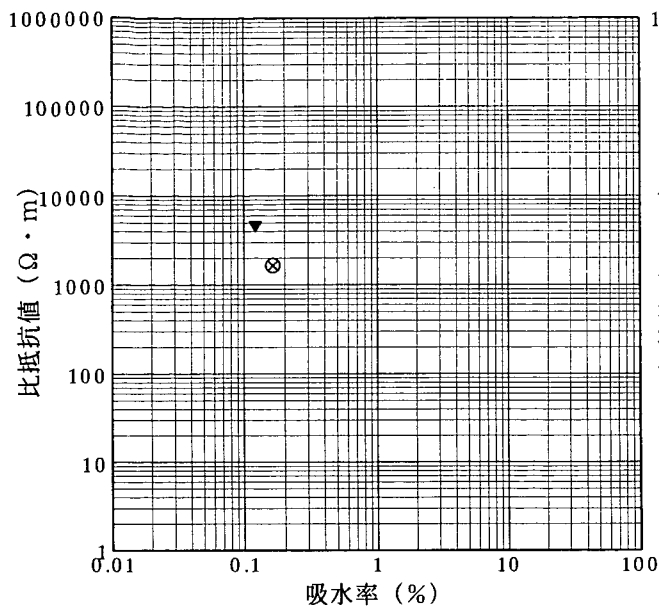


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

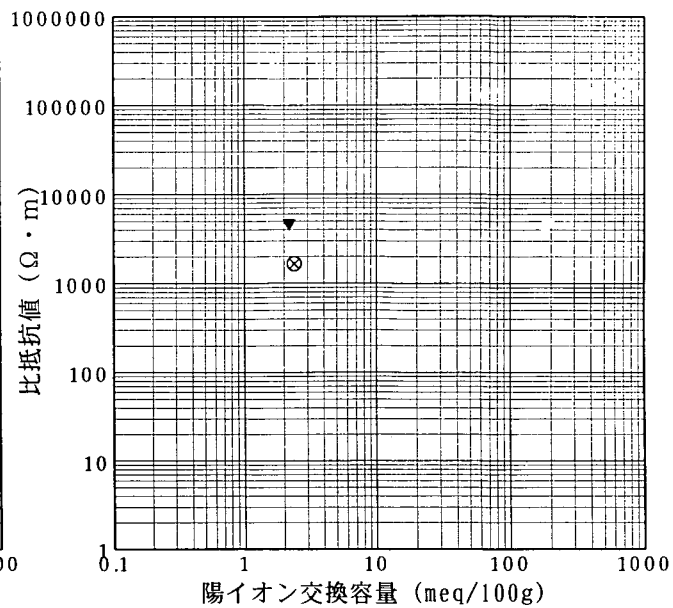


(d) P波速度と比抵抗値の関係

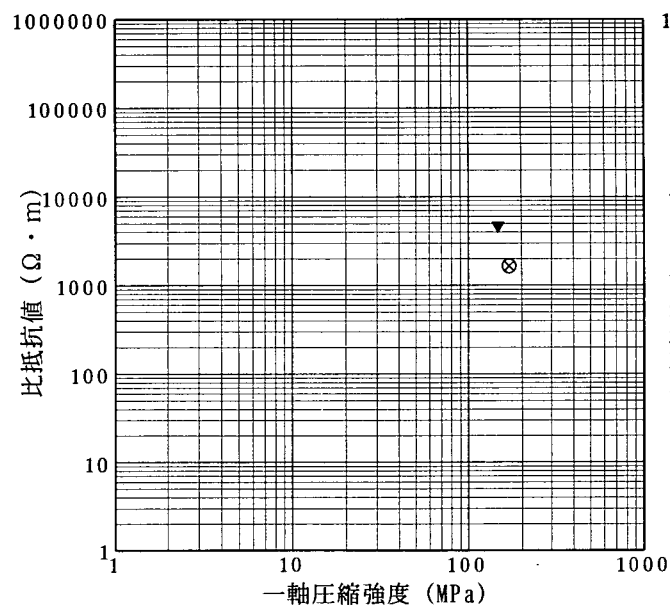
図-2. 4.3 その他の特性と比抵抗値の関係(緑泥片岩)



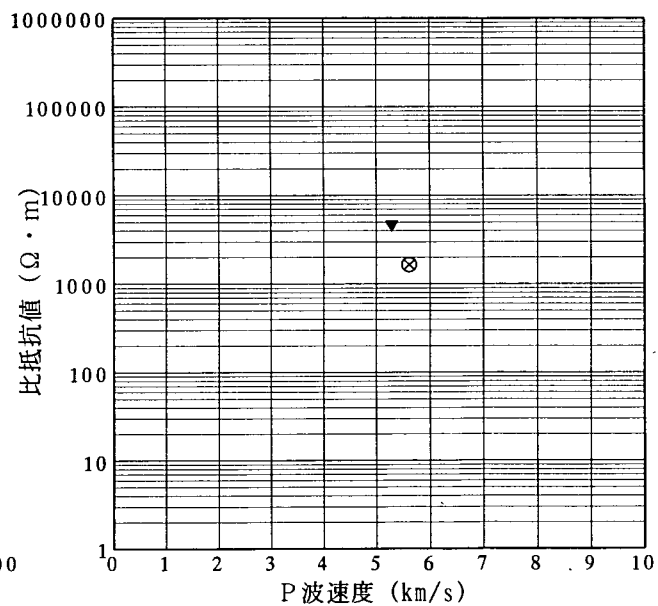
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

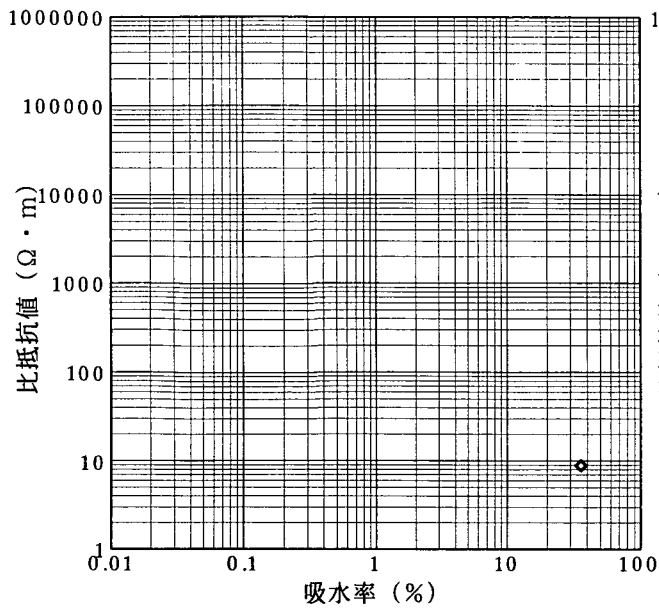


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

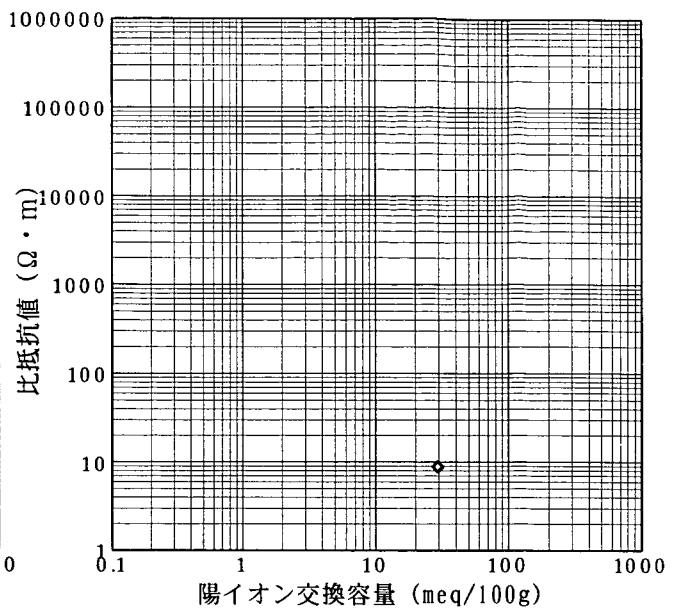


(d) P波速度と比抵抗値の関係

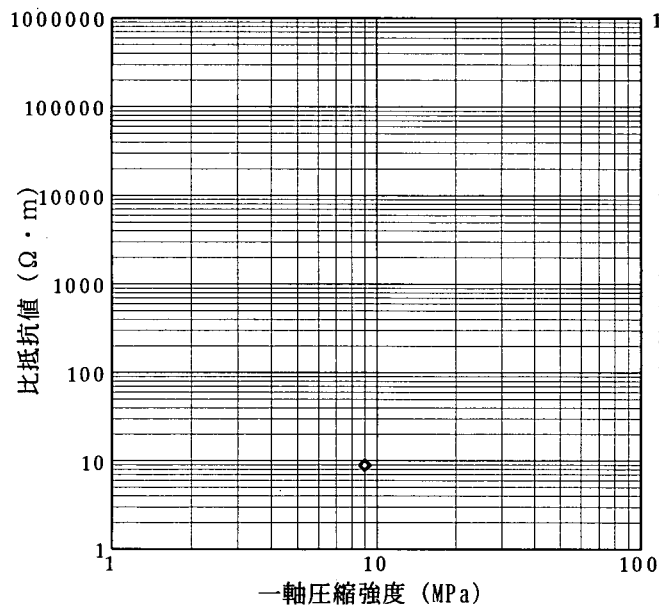
図-2.44 その他の特性と比抵抗値の関係(角閃岩片麻岩)



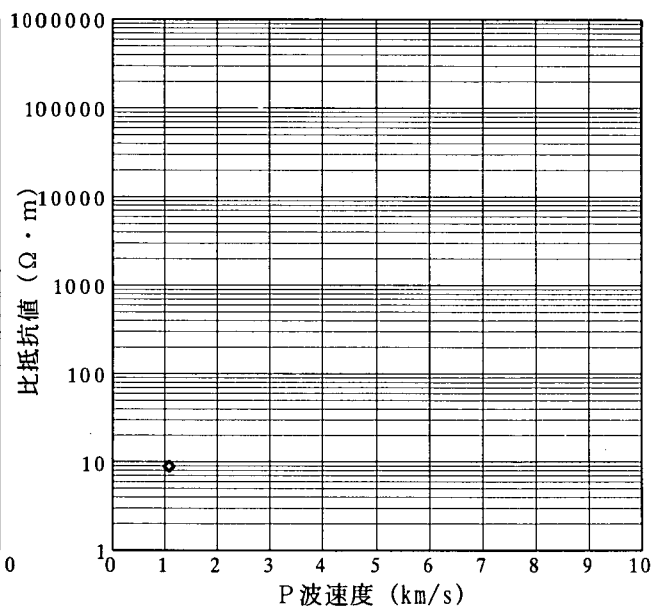
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

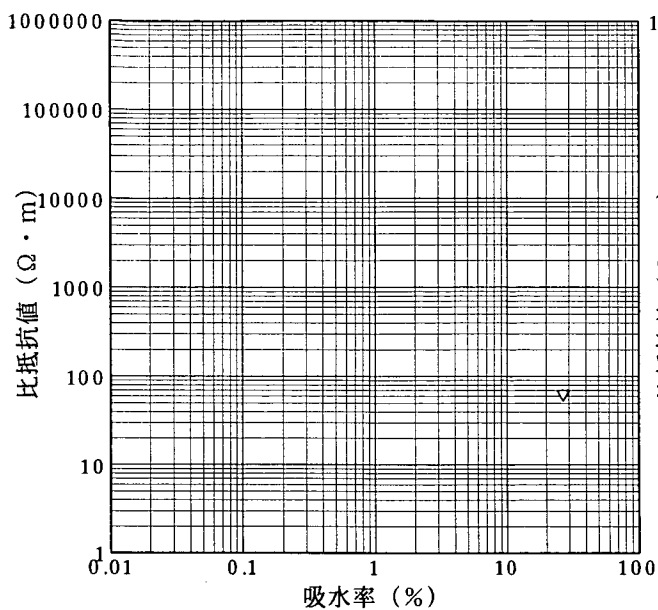


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

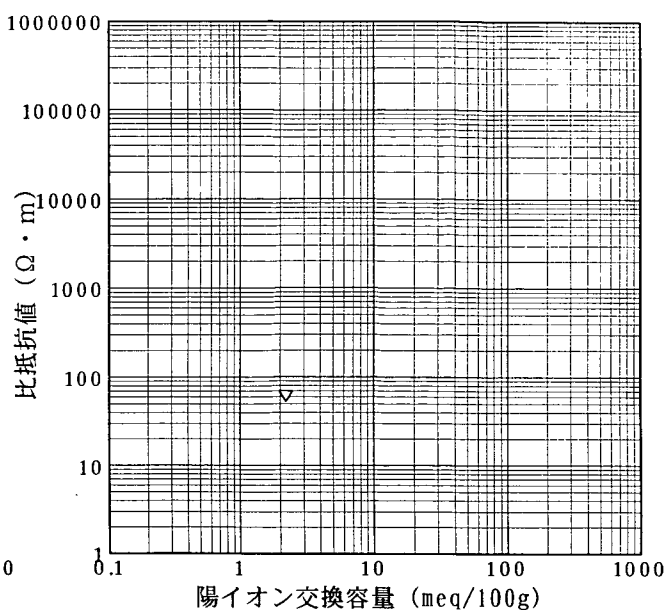


(d) P波速度と比抵抗値の関係

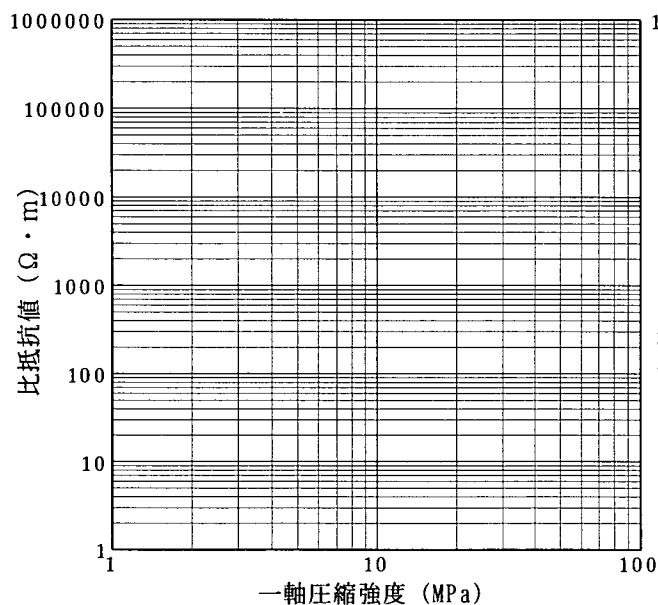
図-2.45 その他の特性と比抵抗値の関係(土丹)



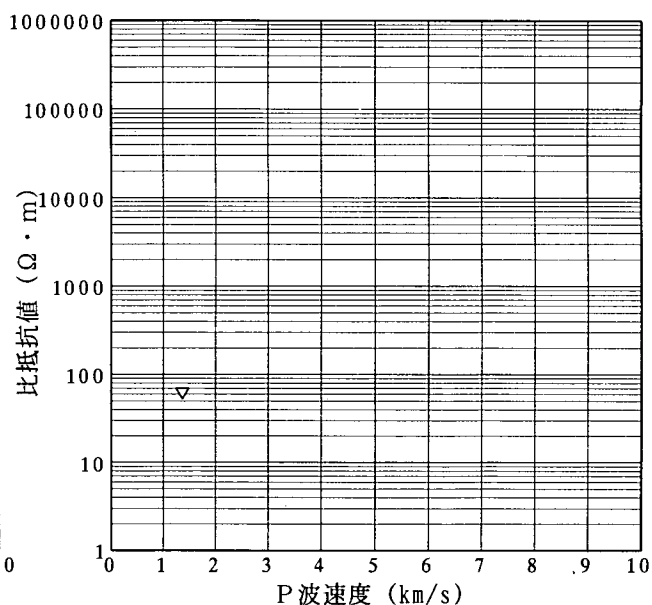
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

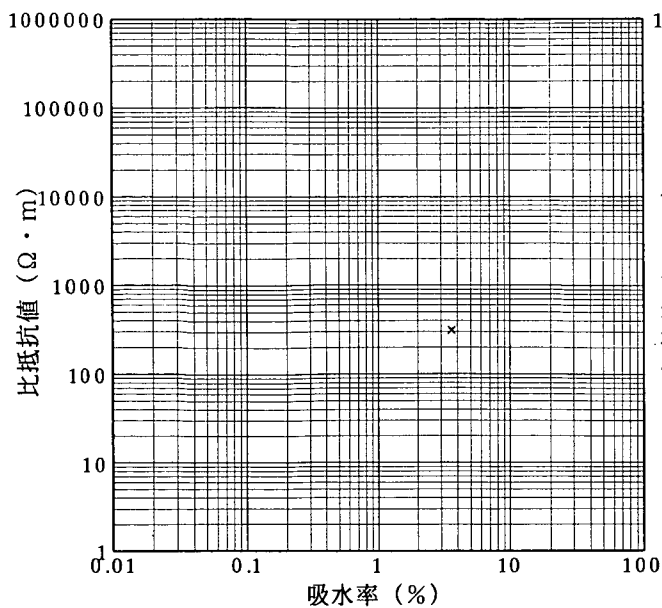


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

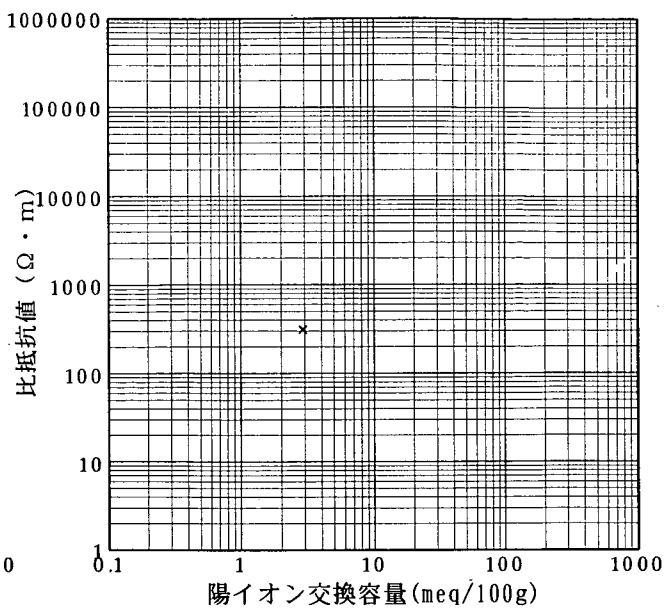


(d) P波速度と比抵抗値の関係

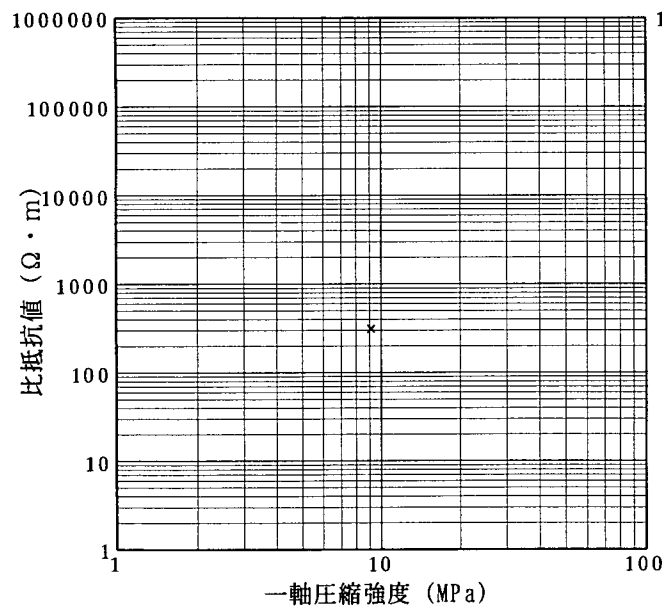
図-2.46 その他の特性と比抵抗値の関係(標準砂)



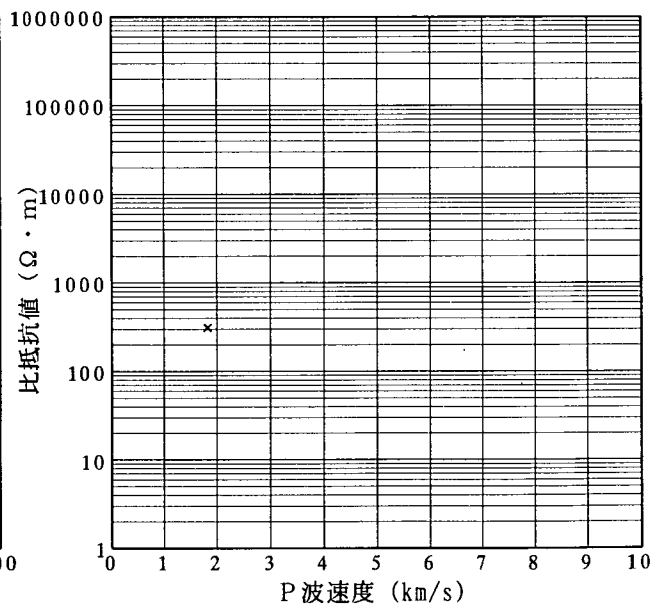
(a) 吸水率と比抵抗値の関係



(b) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係

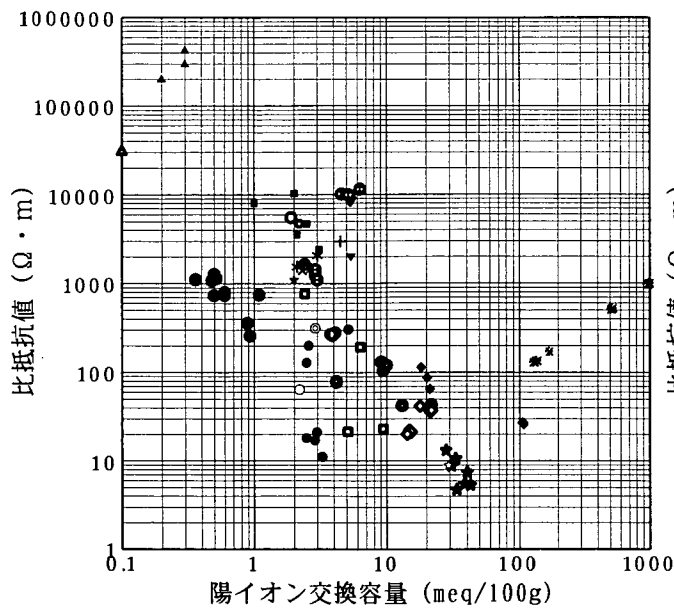


(c) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係

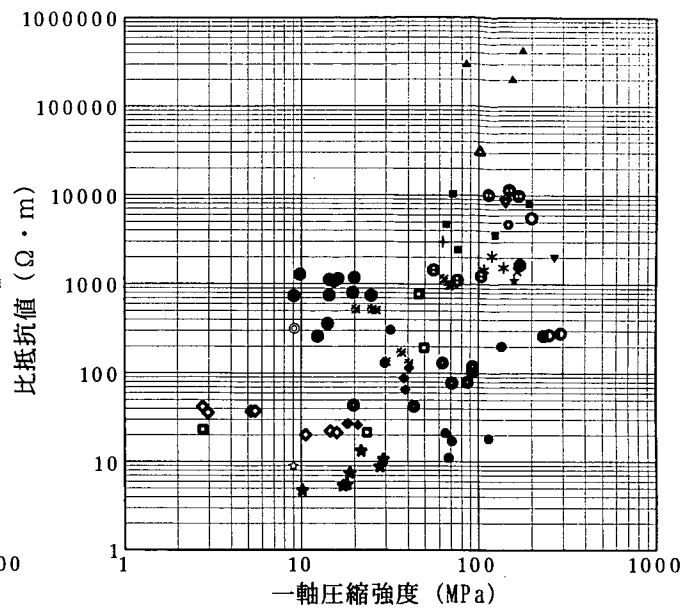


(d) P波速度と比抵抗値の関係

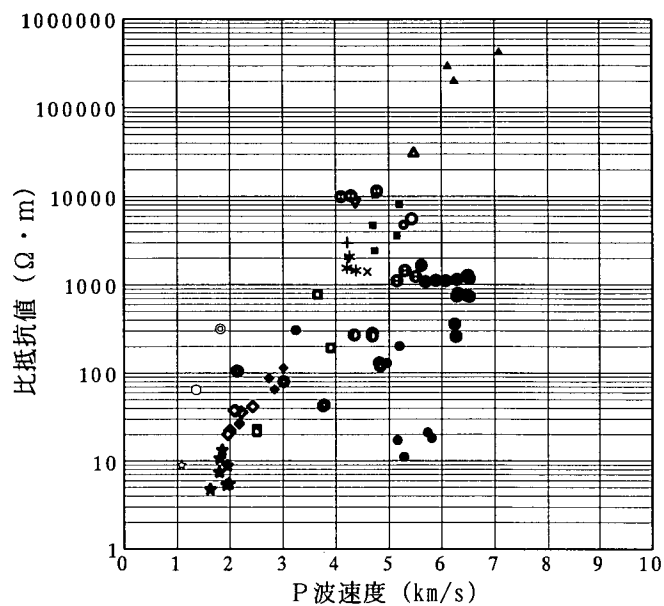
図-2.47 その他の特性と比抵抗値の関係(マサ)



(a) 陽イオン交換容量と比抵抗値の関係



(b) 一軸圧縮強度と比抵抗値の関係



(c) P波速度と比抵抗値の関係

- | | | | | |
|-------------|------------|------------|---------|---------------|
| ★ 泥岩 | ★ 頁岩 (平行) | ○ 頁岩 (直行) | ● 頁岩 | ● 砂岩 |
| ◆ 凝灰質砂岩 | ◆ 凝灰岩 | □ 溶結凝灰岩 | ■ チャート | ▲ 石灰岩 |
| ▲ フズリナ石灰岩 | ▼ 流紋岩 (平行) | ▼ 流紋岩 (直行) | + 石英安山岩 | ● 普通輝石紫蘇輝石安山岩 |
| × カンラン石玄武岩 | ★ 花崗岩 | ★ 複雲母花崗岩 | ● 石英閃緑岩 | ● 緑泥片岩 (直交) |
| ● 緑泥変岩 (平行) | ● 片麻岩 (直交) | ○ 片麻岩 (平行) | ★ 土丹 | ○ 標準砂 |
| ◎ マサ | | | | |

図-2. 48 その他の特性と比抵抗値の関係(全岩種)

2. 4 まとめ

第2章で得られた結果をまとめると以下が得られる。

- (1) 浸透水が岩石の比抵抗値に及ぼす影響については、浸透水の比抵抗値が数十 $\Omega \cdot m$ 以上の場合は小さい。
- (2) 岩石の比抵抗値は岩石の種類によって大きく異なるとともに、有効間隙率および水分飽和度の影響を大きく受け、有効間隙率あるいは水分飽和度が大きくなると小さくなる傾向にある。また、比抵抗値と水分飽和度および有効間隙率との関係は、指数関数を用いたアーチの式により近似できる。
- (3) 岩石に亀裂がある場合は、亀裂の方向によって岩石の比抵抗値は大きく異なり、亀裂の方向が電流が流れる方向と平行の場合の方が直交する場合よりも小さな値を示す。
- (4) 岩石に含まれる陽イオン交換容量と比抵抗値との関係は、陽イオン交換容量が大きくなると比抵抗値は小さくなる傾向にある。また、超音波伝播速度（P波）、一軸圧縮強度と比抵抗値との関係は一軸圧縮強度、超音波伝播速度（P波）が大きくなると比抵抗値は大きくなる傾向にある。
- (5) 水分飽和度が100%の場合の結果から、一般的な傾向としては、調査対象とする区域が地下水位以下であれば、比抵抗値からこれらの物理的特性、力学的特性がある程度推定することが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 千葉昭彦、熊田政弘：花崗岩および凝灰岩試料の比抵抗測定、物理探査、第47巻3号、1994

第3章 事前調査としての電気探査のトンネルの地山評価への適用性

3. 1 概説

前章においてはコア供試体を用いた各種試験を行い、コア供試体の比抵抗値と岩石の物理的・力学的・鉱物化学的特性との関係を調べることで比抵抗値によって岩石のどのような特性が把握できるかについて検討を加えた。本章ではトンネルの事前調査として実施される電気探査から得られた地山の比抵抗値（本報告書では以降地山比抵抗値と呼ぶ）を用いて支保パターンの設定に用いる地山等級の分類がどの程度可能か、また、事前調査から得られた地山比抵抗値は掘削中の切羽の地山状態を表わすどのような評価項目と密接な関係にあるのかなどを把握することを目的として、事前調査として電気探査が実施された14本のトンネルについて地山比抵抗値と採用された地山等級および施工時に得られた切羽での観察記録表との関係について検討を加えた。さらに、電気探査が実施された14本のトンネルのうち4本のトンネルに対しては切羽において得られたずりからコアを採取し、コアの比抵抗値、物理的特性を調べることでコアの比抵抗値と地山状態および地山比抵抗値との関係について検討を加えた。

3. 2 地山比抵抗値とトンネル施工時の地山状態との関係

3. 2. 1 検討方法および検討対象トンネル

(1) 検討方法

地山比抵抗値とトンネル施工時における切羽の地山状態との関係は、地山比抵抗値が計測された区間においてトンネル掘削前に実施された地表からの弾性波探査試験結果、施工時に採用された地山等級および切羽観察表の各評価項目と地山比抵抗値との対応について調べた。なお、地山等級はトンネル構造を構成する支保部材の組み合わせである支保パターンと密接に対応しており、設計段階ではこれまでは主として弾性波速度およびボーリングのコア状態を指標として分類が行われている。B、CⅠ、CⅡ、DⅠ、DⅡの順に地山状態が悪くなっており、DⅢaは坑口部や土被りが非常に浅い区間に適用されている。また、切羽観察表は切羽近傍での作業の安全性の確保、切羽の地山状態に応じた適切な支保パターンおよび対策工の選定の資料として使用するために切羽で観察された地山状態を記録するものであり、現在、一般道の道路トンネルで用いられている切羽観察表の代表的なものを表-3.1に示す。この観察表においては評価項目は9つの項目から構成されており、各項目ともに評価ポイントが大きくなるほど状態が悪くなっていることを意味している。

表－３．１ 切羽観察表の評価項目と評価ポイント

評価ポイント 評価項目	1	2	3	4
切羽の状態	安定	鏡面から岩塊が抜け落ちる	鏡面の押し出しを生じる	鏡面は自立せず崩れあるいは流出
素掘面の状態	自立	時間がたつと緩み肌落ちする	自立困難掘削後早期に支保する	掘削に先行して山を受けておく必要がある
圧縮強度	ハンマー打撃はね返る	ハンマー打撃で碎ける	軽い打撃で碎ける	ハンマー刃先食い込む
風化・変質	なし・健全	岩目に沿って変色、強度やや低下	全体に変色、強度相当に低下	土砂状、粘土状、破碎、当初より未固結
割れ目の頻度	間隔 $d \geq 1m$	$1m > d \geq 20cm$	$20cm > d \geq 5cm$	$d > 5cm$ 、当初より未固結
割れ目の状態	密着	部分的に開口	開口	粘土を挟む、当初より未固結
割れ目の形態	ランダム方向	柱状	層状、片状、板状	土砂状、細片状、当初より未固結
湧水	なし、水程度	滴水程度	集中湧水	全面湧水
水による劣化	なし	緩みを生ず	軟弱化	崩壊・流出

(2) 検討対象トンネル

検討対象とした14本のトンネルの概要を表-3. 2に示す。

表-3. 2 対象トンネルの概要

トンネル名	トンネル延長(m)	検討対象延長 (m)	主な岩質	採用された地山等級
HRトンネル	1 4 1 3	1 4 1 3	粘板岩、砂岩 凝灰岩、チャート	C I , C II , D I , D II , D III a
OBトンネル	4 4 5	4 4 5	砂岩、頁岩、 石灰岩、チャート	C II , D I , D II , D III a
WCトンネル	6 9 5	2 6 5	チャート、頁岩、 粘板岩	C I , C II , D II , D III a
SMトンネル	1 1 2 0	3 4 0	泥岩と砂岩の互層	B , C I , C II , D II , D III a
SIトンネル	7 3 7	7 3 7	熔結凝灰岩	C I , D I , D III a
YDトンネル	2 4 1 3	6 0 0	流紋岩、凝灰岩	C II , D I
SSトンネル	2 4 2	1 9 0	流紋岩	C II , D I , D III a
MZトンネル	2 3 7 0	2 3 0	石英閃緑岩	C II , D I , D II , D III a
SKトンネル	1 0 5 5	2 8 5	石英閃緑岩	C I , C II , D I , D III a
MCトンネル	9 8 0	9 8 0	花崗岩・安山岩 真砂土、ヒン岩	C II , D I , D III a
FNトンネル	2 2 0	2 2 0	強風化花崗岩	D I , D II , D III a
YSトンネル	1 7 0 6	9 9 5	花崗岩	C II , D I , D III a
KTトンネル	1 0 3 0	5 1 0	蛇紋岩	D I , D II , D III a
OCトンネル	7 7 6	5 0 0	緑色片岩, 黒色片岩	C II , D III a

3. 2. 2 各トンネルの地山比抵抗値と地山状態との関係

(1) 堆積岩

①HRトンネル(図-3.1参照)

a) 地質概要

粘板岩を主体とし、チャート、凝灰岩、砂岩が介在する。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は $300\Omega\cdot m$ から $2000\Omega\cdot m$ の範囲で推移しており、STA.688、STA.686およびSTA.681～679付近に周囲と比べてやや低い領域が認められる。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

当初の支保パターンに比較して施工時の支保パターンが重くなっているSTA.688～687付近の一部の区間においては地山比抵抗値は周辺に比較して低い値を示しているとともに、地山比抵抗値が低いところにおいて支保規模が大きくなる傾向がところどころに認められる。また、全体的に支保パターンが変化する境界は地山比抵抗値が変化する境界とほぼ対応している。ただし、地山比抵抗値が最高値である $2000\Omega\cdot m$ を示すSTA.677付近はDⅢaパターンが採用されており、地山比抵抗値が大きいにもかかわらず支保規模が大きい区間も認められる。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

STA.689.4, STA.687, STA.684.7付近に弾性波速度が周辺に比較して低くなる箇所が認められるが、地山比抵抗値には特段の変化は認められない。また、地山比抵抗値が低い区間における弾性波速度にも特段の変化は認められない。

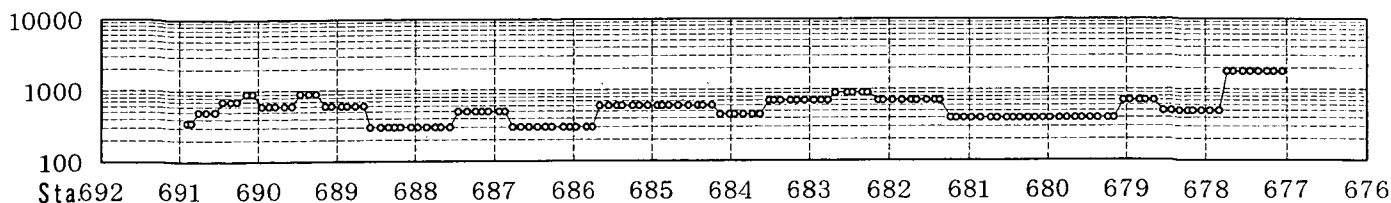
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

周囲と比較して地山比抵抗値の低下が見られた箇所のうち、STA.688付近においては「湧水」「水による劣化」の評価ポイントが他区間よりも1ランク程度悪くなっており、「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の状態」「割れ目の頻度」の評価ポイントが周囲と比較すると相対的に悪くなっている。同様に周囲と比較して地山比抵抗値の低下が見られたSTA.686付近においては「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」の評価ポイントが、STA.681～679付近においては「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「湧水」「水による劣化」の評価ポイントがそれぞれ周囲と比較して悪くなっている。

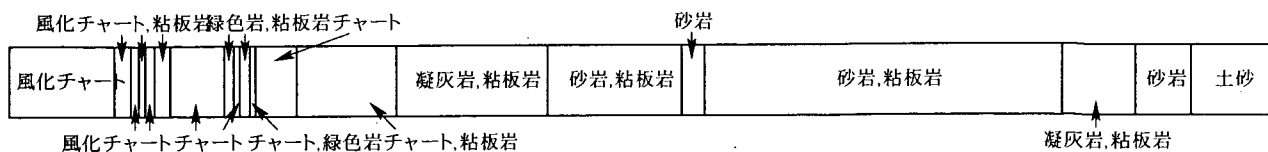
f) 総合評価

STA.688付近は事前に実施した弾性波速度ではこの付近の値が周辺と変わらないことから施工前は地山状態は比較的良いものと評価されていたが、採用された支保パターンおよび施工中の切羽観察表の評価から考えると実際の地山は相当悪い状態にあったものと推察される。この付近の地山比抵抗値は比較的強く現れていることから、本トンネルでは地山比抵抗値を地山評価の指標に加えることにより地山状態が悪い区間の予測がある程度できるものと判断される。

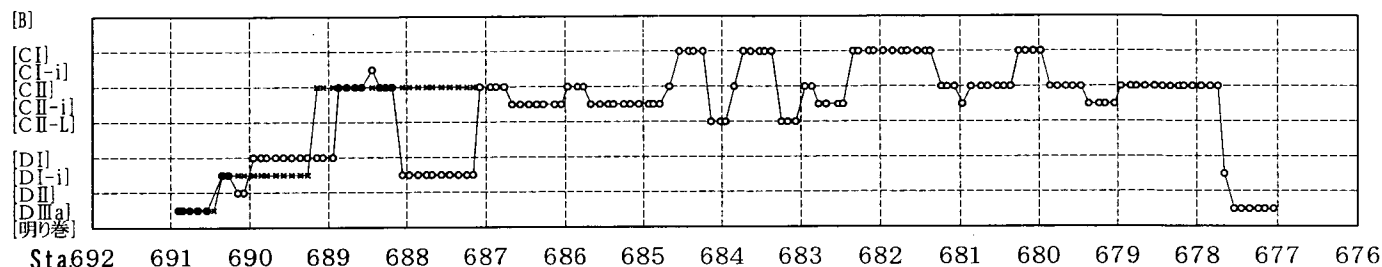
地山比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)



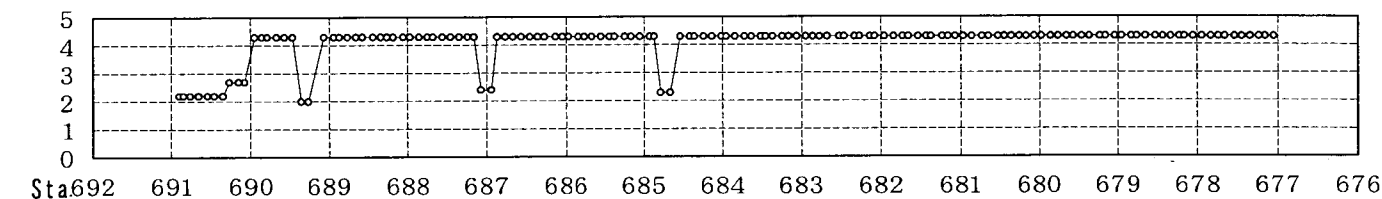
岩種



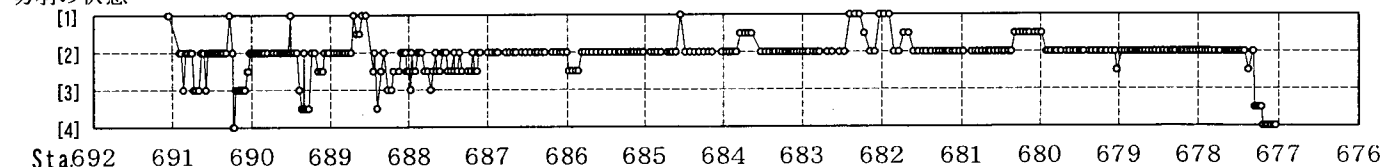
地山等級(施工時:○,当初パターン:×)



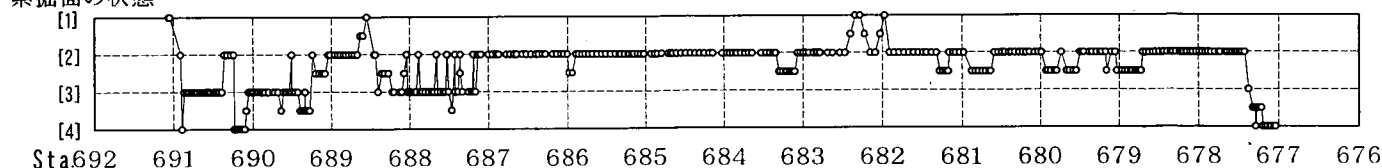
弾性波速度 (km/s)



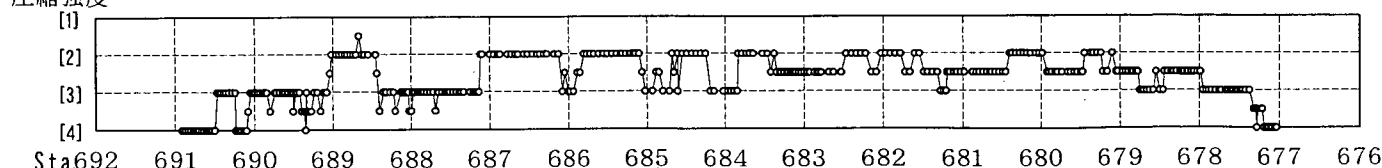
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

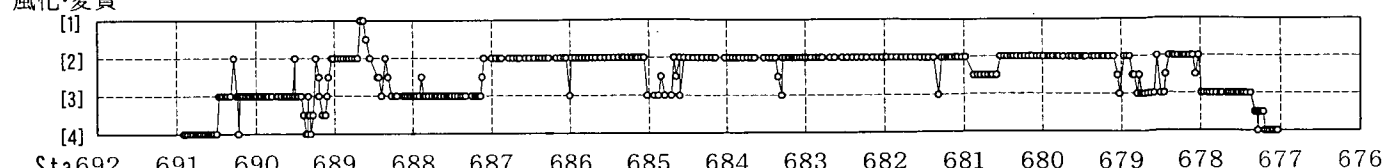
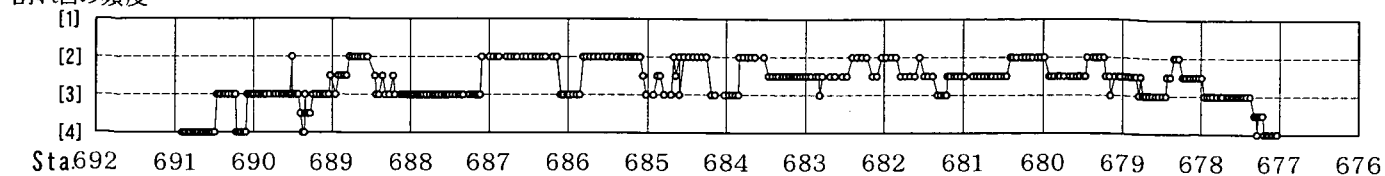
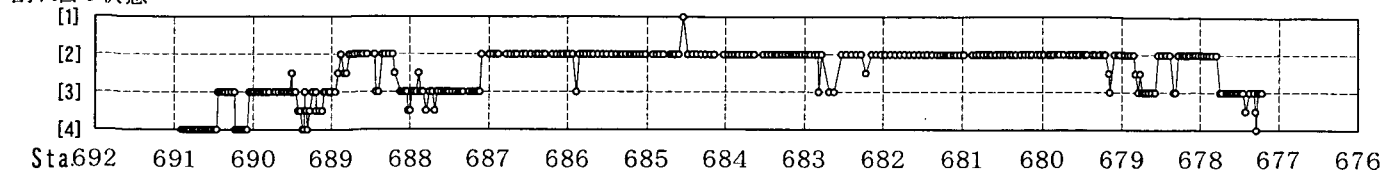


図-3. 1 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗との関係 (H Rトンネル)

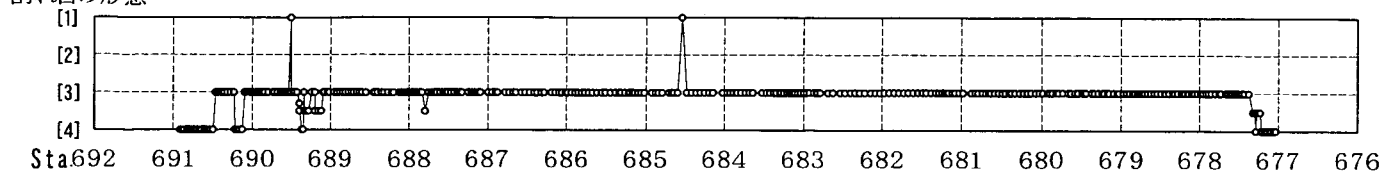
割れ目の頻度



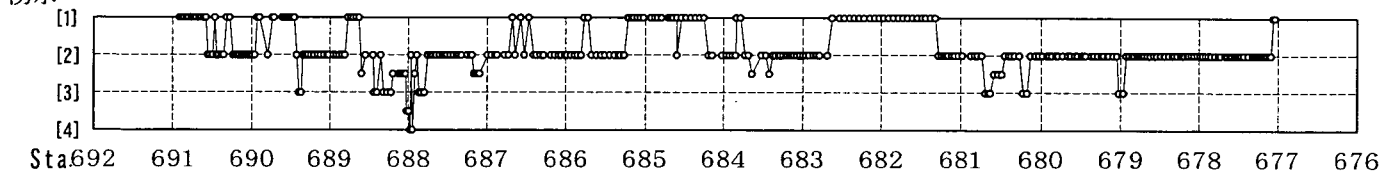
割れ目の状態



割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔:100m, 坑口:Sta. 691+6.0

図-3. 1 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (HRトンネル)

②OBトンネル（図－3．2参照）

a) 地質概要

砂岩、頁岩、石灰岩、チャート等の互層からなっている。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は $400\Omega\cdot m$ から $5000\Omega\cdot m$ までの広範囲の値を示しているが、 $2000\Omega\cdot m$ 以上の高い値を示している区間はSTA.173～174、STA.183～185、STA.189～190、STA.194付近の4区間に限定され、その他の区間においては $1000\Omega\cdot m$ 程度以下の値を示している。また、全体的にはSTA.184を境にしてSTA.184よりもSTA.番号が大きい区間のほうが地山比抵抗値は大きくなる傾向にあると言える。なお、本トンネルにおいては比較的多くの岩種が混ざっているが、これら地山比抵抗値が高い区間と岩種の対応は明確には認められない。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

施工時の地山等級は全体的にはSTA.184を境にしてSTA.184よりもSTA.番号が大きい区間の支保が軽い支保パターンへ変化しており、地山比抵抗値もSTA.184を境にして全体的に大きくなる傾向にあると言える。ただし、地山比抵抗値が高い値を示したSTA.173～174、STA.183～185、STA.189～190、STA.194の各区間においては支保パターンが軽くなる傾向は認められず、むしろSTA.194では坑口ということで重い支保パターンが採用されている。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

弾性波速度はSTA.174～184においては 2km/sec 、STA.184～193においては 3km/sec の値を示しており、地山比抵抗値が全体的に大きくなるSTA.184付近を境にして弾性波速度も大きくなる傾向を示している。

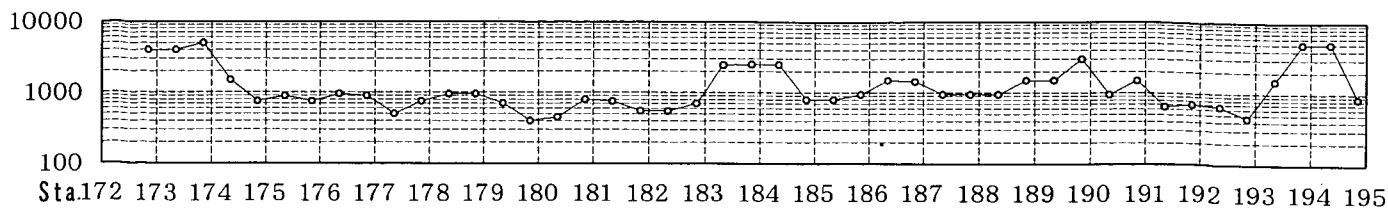
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

地山比抵抗値が全体的に大きくなる境界であるSTA.184付近よりもSTA.番号が大きい区間の「切羽の状態」「素掘面の状態」はSTA.184よりもSTA.番号が小さい区間に比べると評価ポイントが良くなっている。また、周囲と比較して地山比抵抗値が高く現れたSTA.183～185においては「圧縮強度」「割れ目の頻度」の評価が他の区間よりも高くなっているとともに、「風化・変質」「湧水」の各項目の評価が他の区間よりも1ランク以上低いSTA.179～180付近の地山比抵抗値は全区間において最も低い地山比抵抗値を示している。ただし、STA.178付近に全区間を通じて「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「割れ目の形態」の評価が最も悪い区間が認められるが、地山比抵抗値には特段の傾向は認められない。

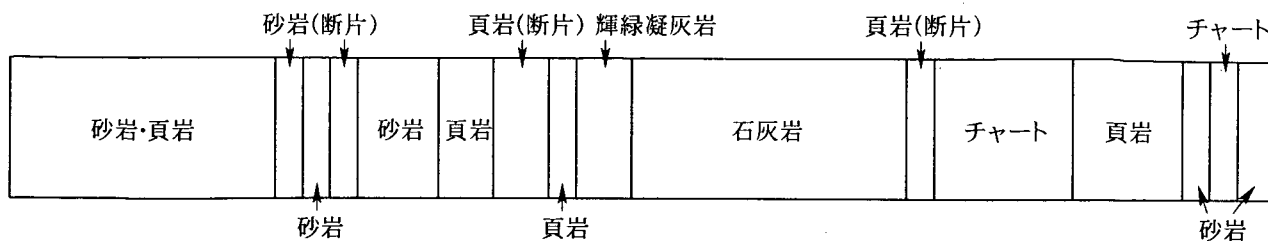
f) 総合評価

トンネル全線を通じての「切羽の状態」「素掘面の状態」の評価に関する傾向は地山比抵抗値の大きさと概ね対応が認められた。弾性波速度も大きくはSTA.184付近を境にして変化しているため、地山全体としての状態を把握するには弾性波速度から得られた情報で足りるとも言えるが、「風化・変質」「湧水」の評価が全区間を通じて悪くなっている区間においては弾性波速度には特段の変化が現れていないのに対して、比抵抗値は全区間を通じて最も低い値を示しており、本トンネルの場合は狭い区間での地山状態の変化を把握する上で地山比抵抗値は有用な情報を与えているものと判断される。

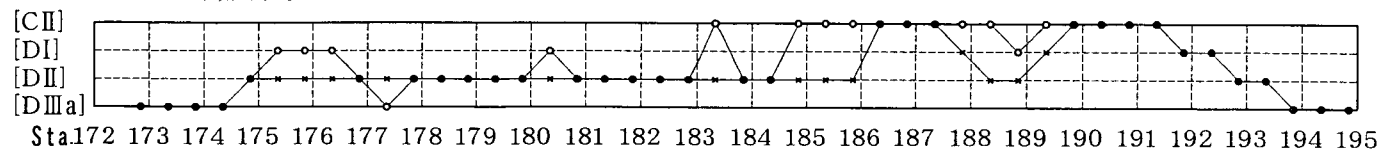
地山比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)



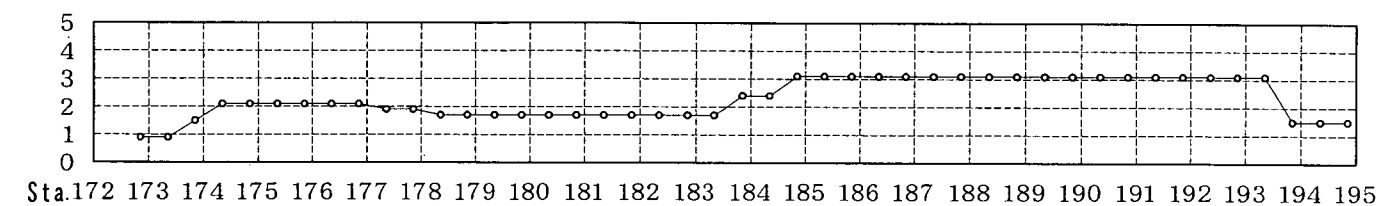
岩種



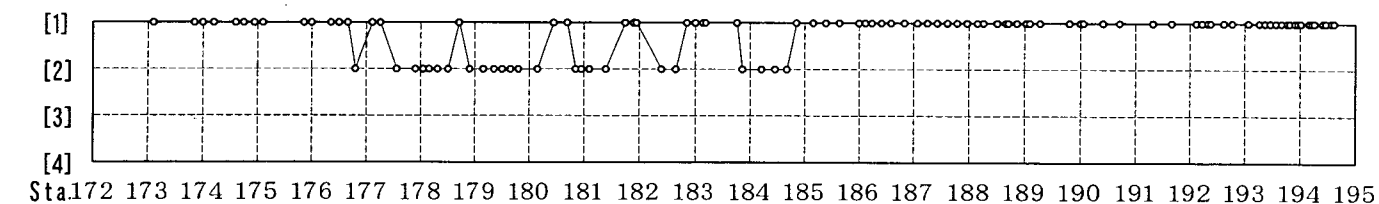
地山等級(施工時:○,設計時:×)



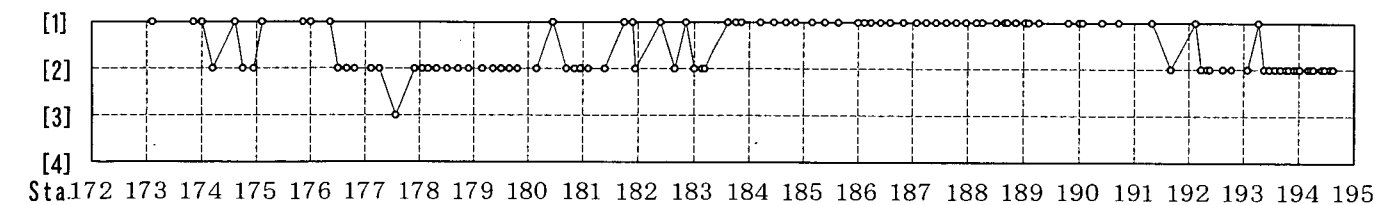
弾性波速度 (km/s)



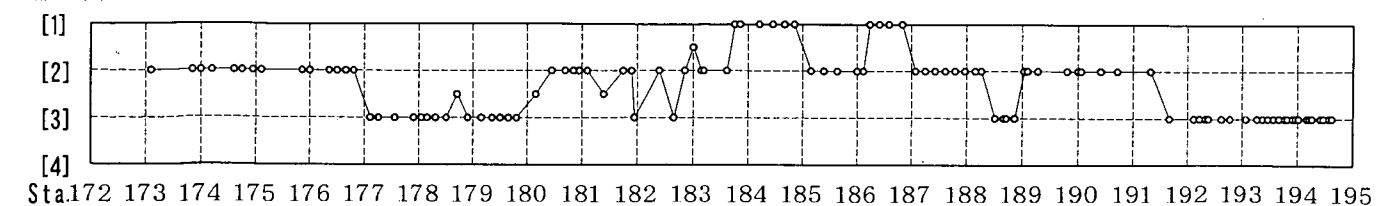
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

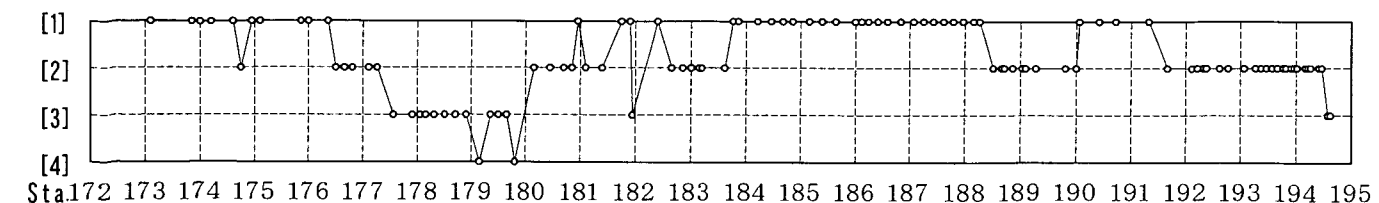
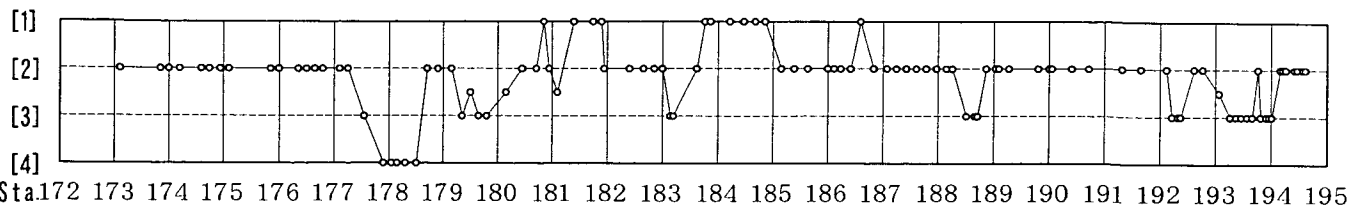
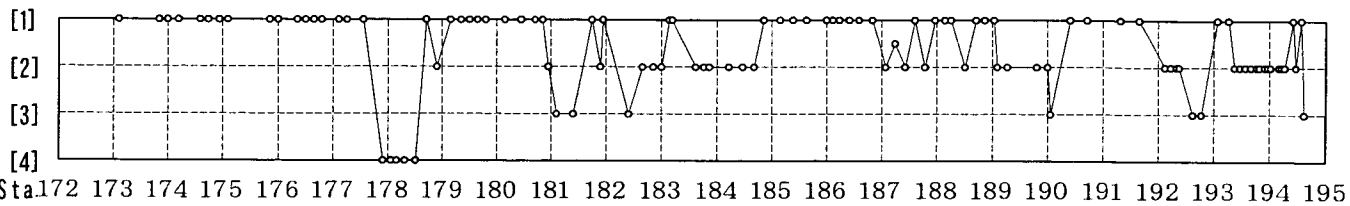


図-3. 2 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (OBトンネル)

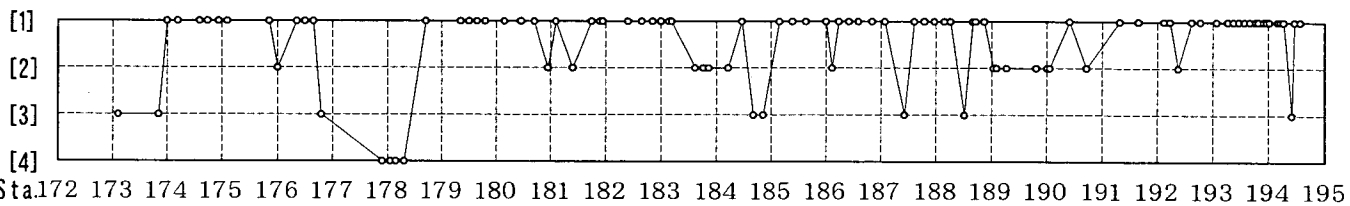
割れ目の頻度



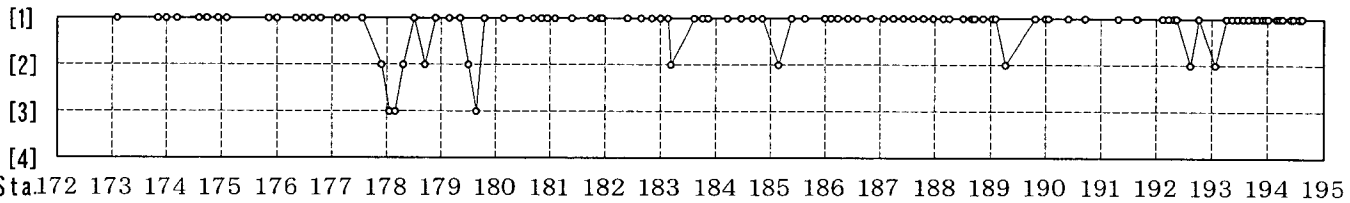
割れ目の状態



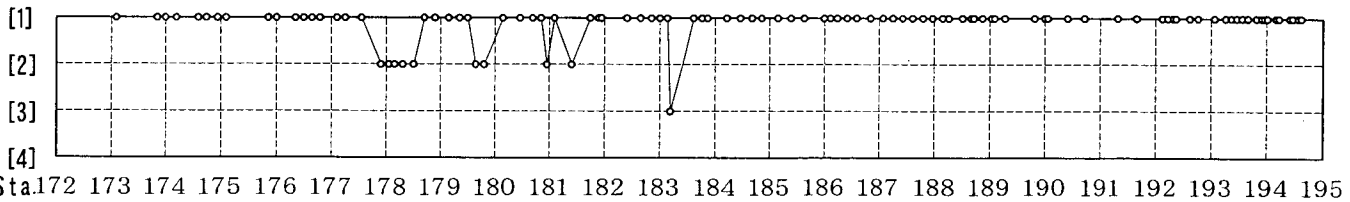
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔:20m, 坑口:Sta. 172+17.0

図-3. 2 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (OBトンネル)

③WCトンネル（図－3、3参照）

a) 地質概要

チャートまたは頁岩を主体とし、ところどころに粘板岩が介在している。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は数 $\Omega \cdot m$ から40 $\Omega \cdot m$ 程度までと全体的に変動の範囲は非常に小さいが、STA.299～301、STA.303、STA.305～306付近に周囲と比べて高い区間が認められる。

コアサンプルを用いた比抵抗値の測定結果によればチャートは数千 $\Omega \cdot m$ の値を示していたが、本トンネルにおいてはチャートが現れる箇所においても地山比抵抗値は非常に小さいのが特徴となっている。また、岩種と地山比抵抗値が高い区間との対応は明確には認められない。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

STA.299～304付近の地山等級はDⅢ aが採用されて他の区間に比較すると悪くなっているが、この区間の地山比抵抗値はむしろ周囲の値よりも高い値を示しており、一般に地山比抵抗値が低いほど地山等級が悪くなる傾向とは逆の傾向を示している。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

弾性波速度はSTA.297までが5km/sec、STA.297以降が4km/secとなり、わずかではあるがSTA.297以降に下がる傾向が認められており、STA.299～301、STA.303、STA.305～306付近の地山比抵抗値が周囲よりも大きくなる傾向とは逆の傾向が認められる。

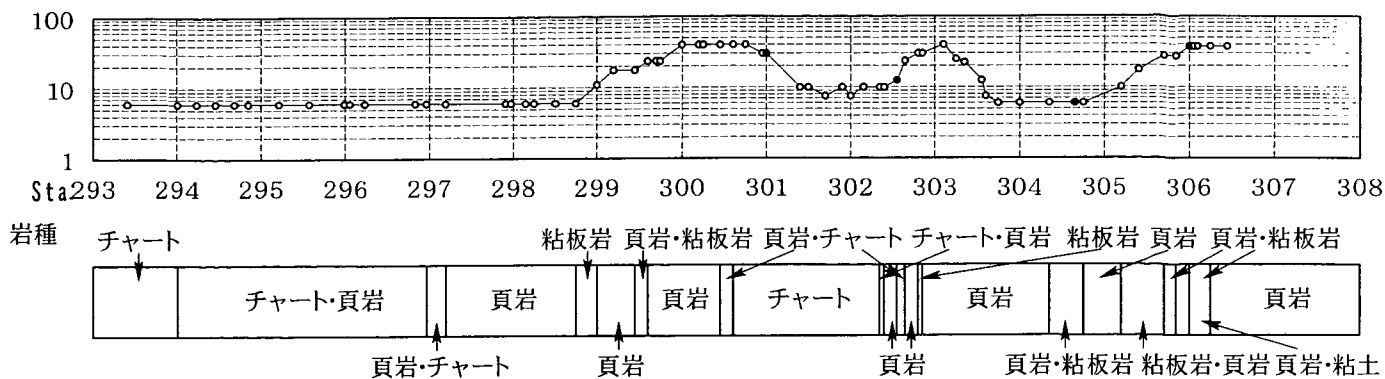
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「割れ目の状態」「水による劣化」に関しては評価ポイントが周囲に比較して相対的に良くなる区間がSTA.301～302付近に見られるが、この区間はむしろ地山比抵抗値が高いSTA.299～301、STA.303に挟まれて周囲よりも相対的に低い区間に該当している。一方、「湧水」に関してはSTA.301、STA.306付近の評価が全区間の中で最も良くなっており、地山比抵抗値が高い領域との対応が認められる。

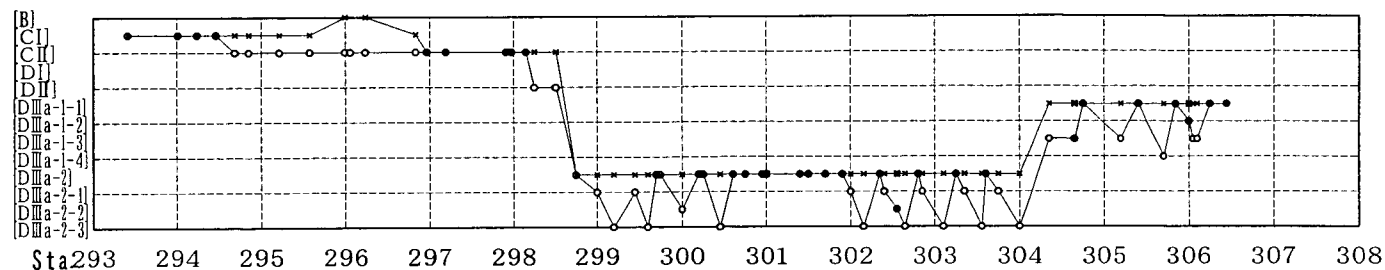
f) 総合評価

本トンネルにおいては、切羽観察表での評価が良いにもかかわらず採用された地山等級が悪い区間が認められるなど地山状態と地山等級との関係が必ずしも明確になっているとはいえないが、地山等級が掘削時の地山状態を反映しているものとするならば、地山比抵抗値が高くなるほど地山状態が悪くなるといった傾向となっており、一般に考えられていることとは逆の解釈が必要となる。

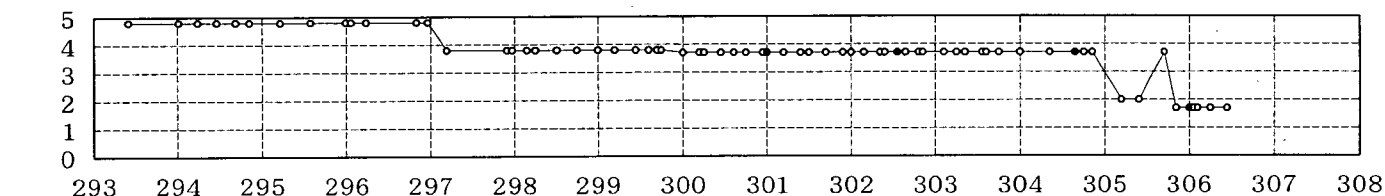
地山比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)



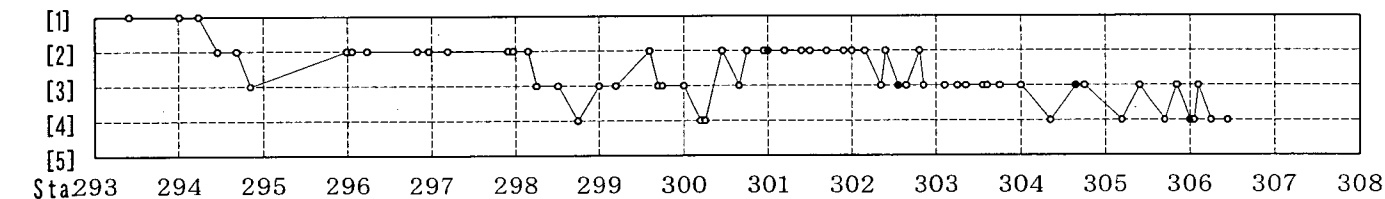
地山等級(施工時:○,当初パターン:×) ※施工時[DⅢa-1-1]:当初パターン[DⅢa-1]



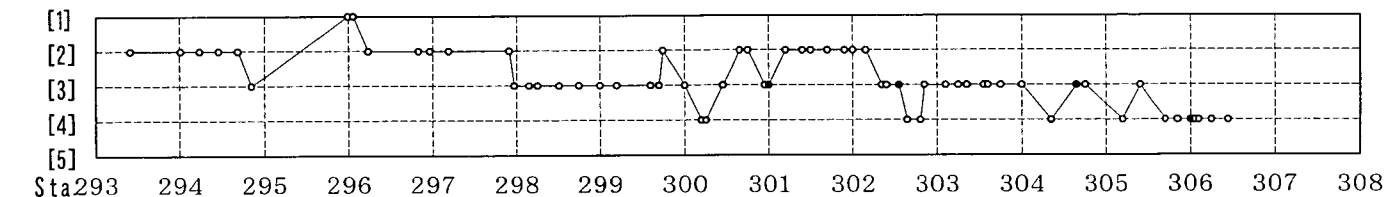
弾性波速度 (km/s)



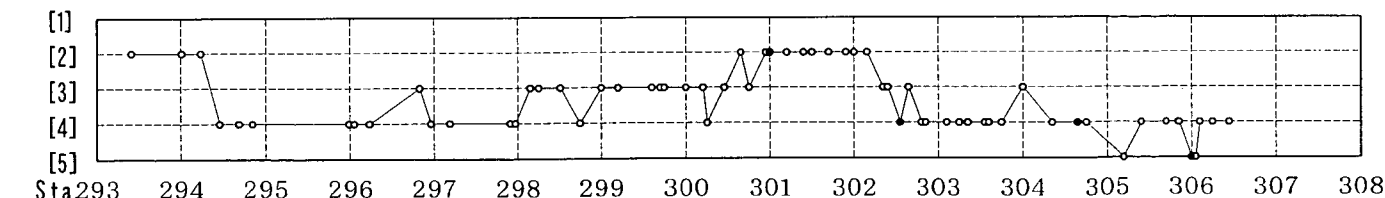
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

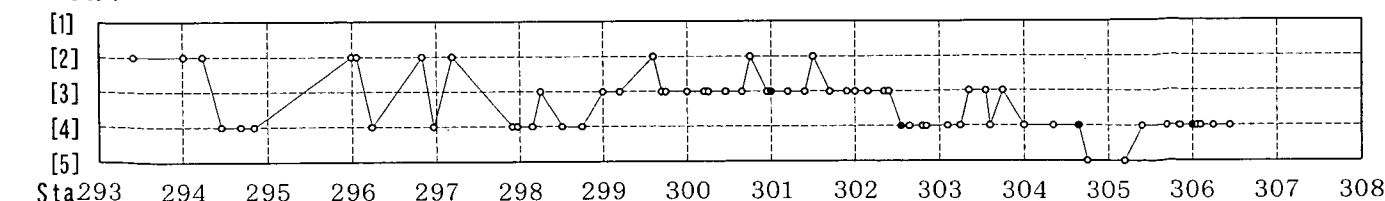
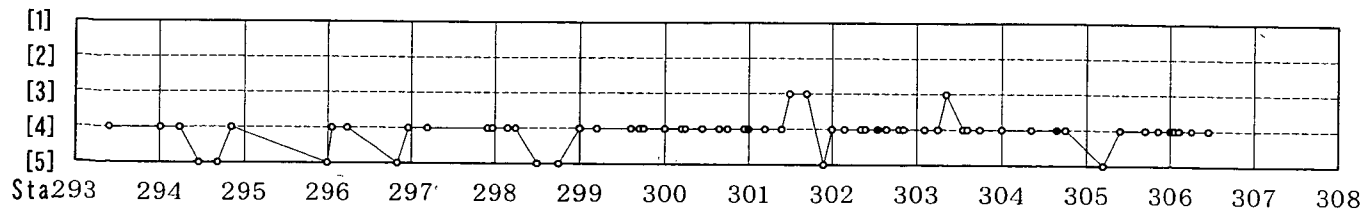
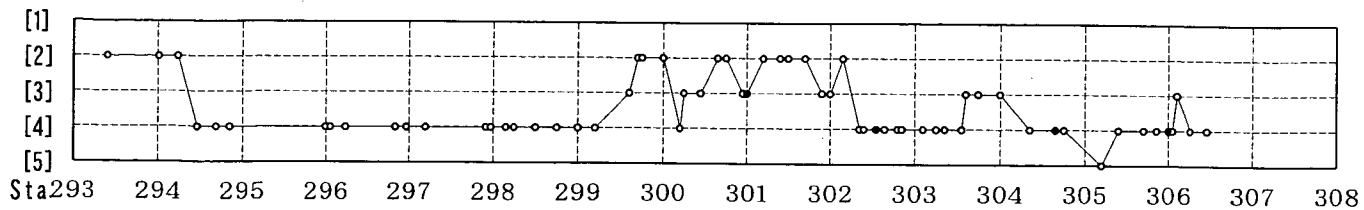


図-3.3 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (WCトンネル)

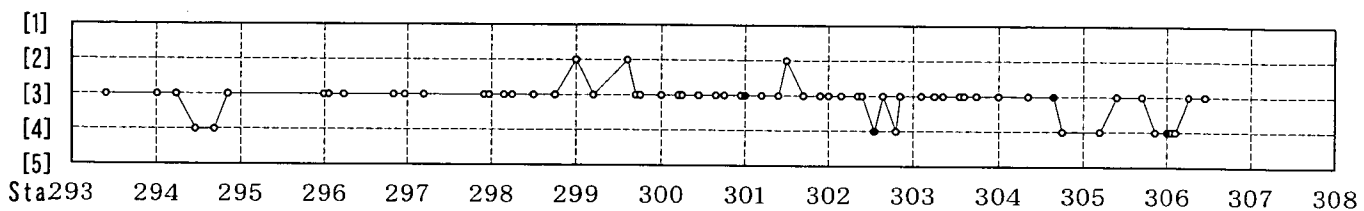
割れ目の頻度



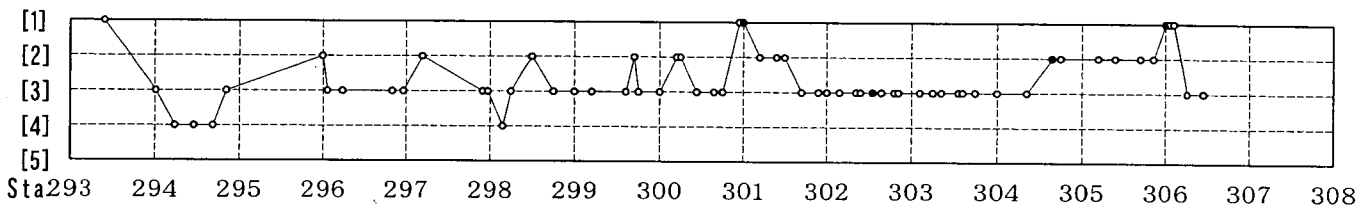
割れ目の状態



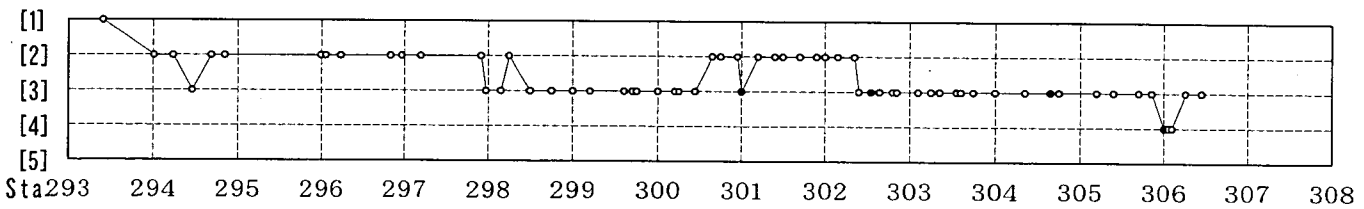
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔：20m，坑口：Sta. 270+0，黒印：コア採取地点

図-3.3(1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (WCトンネル)

④SMトンネル（図－3. 4 参照）

a) 地質概要

泥岩と砂岩の互層状態が全区間にわたって現れている。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は全区間にわたって $40\Omega \cdot m$ から $50\Omega \cdot m$ の範囲に収まっており、変動は非常に小さい。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

地山等級はB等級からDⅢ等級までの広範囲で変化しているが、各地山等級と地山比抵抗値の間には明確な対応は認められない。ただし、STA.920を越える付近からは地山等級がCⅡからDⅡへと2ランク悪くなっており、STA.920を越えた地点における地山比抵抗値の相対的な変化とは対応している。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

STA.920を境にして弾性波速度が低下しており、STA.920を越えた地点における地山比抵抗値の相対的な変化とは対応が認められる。

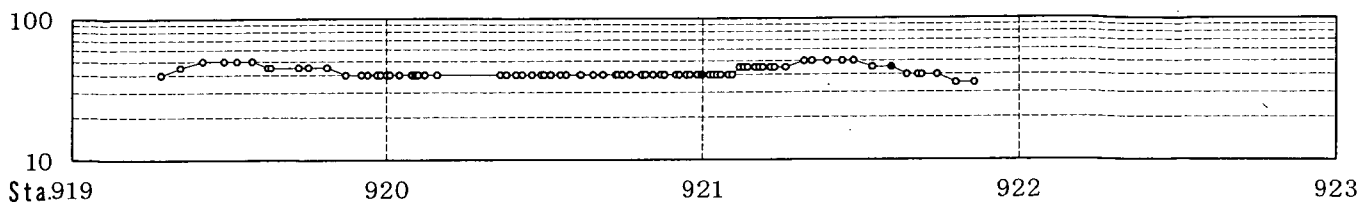
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

切羽はSTA.920を越えた位置で「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「湧水」の評価が全区間を通じて最も悪くなる箇所が認められるが、地山比抵抗値には明確な変化は認められない。

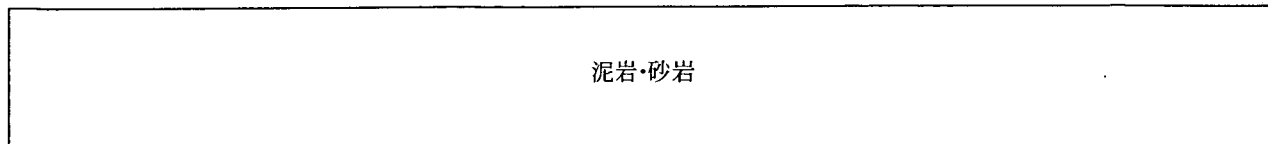
f) 総合評価

本トンネルにおいては、詳細に見れば地山状態の評価が周囲に比較して相対的に低下する区間において地山比抵抗値もわずかに減少する傾向が認められる箇所もあるが、地山比抵抗値の絶対的な変化が非常に小さいために地山比抵抗値を用いて切羽の地山状態を推定することは困難と考えられる。

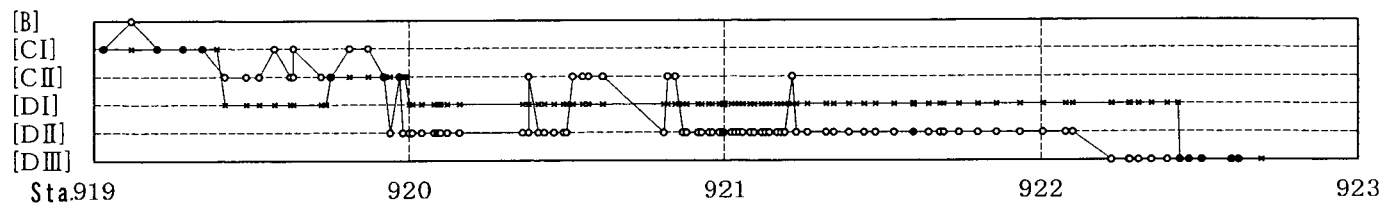
地山比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)



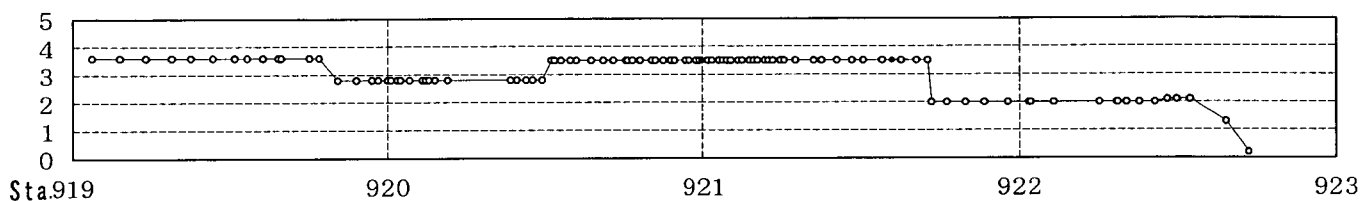
岩種



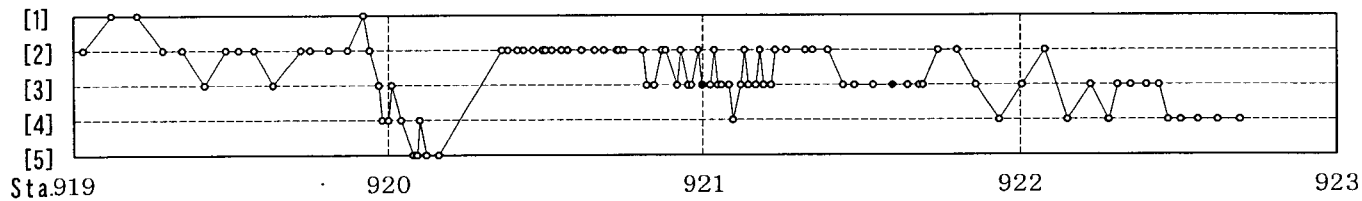
地山等級(施工時:○,当初パターン:×)



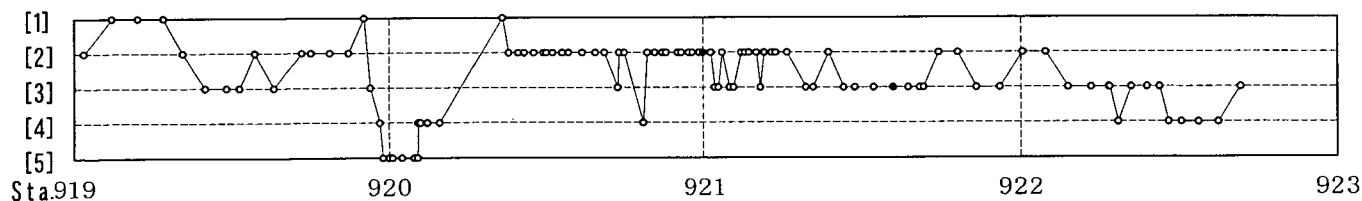
弾性波速度 (km/s)



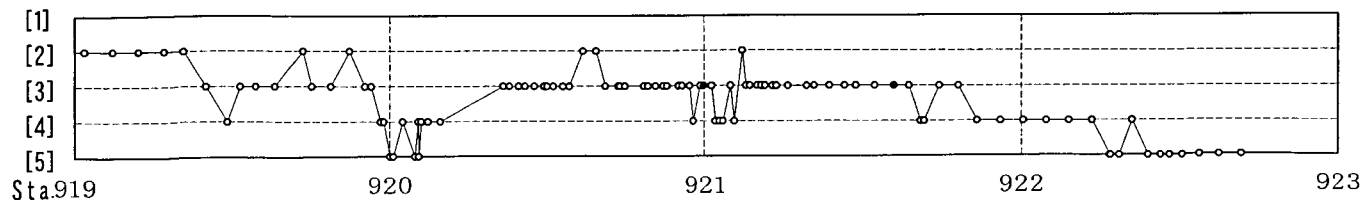
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

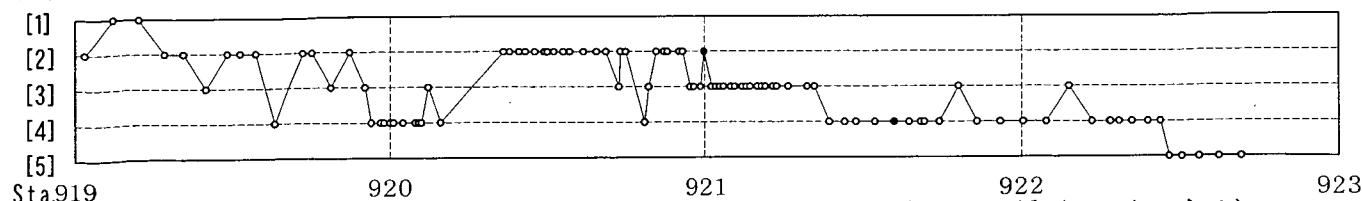
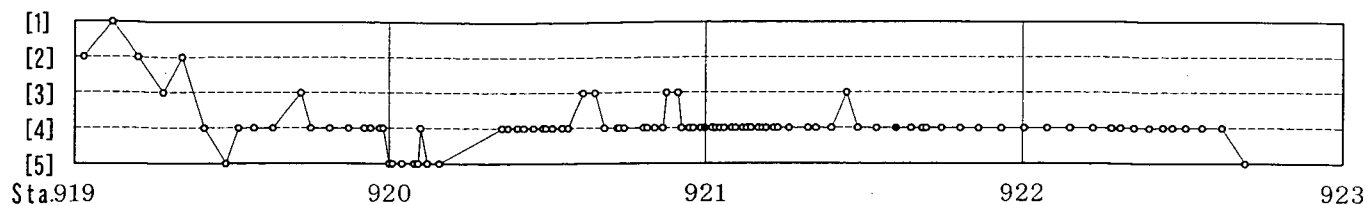
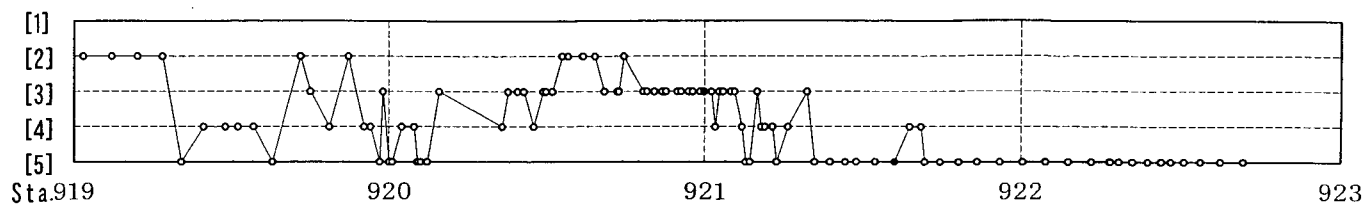


図-3. 4 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (SMトンネル)

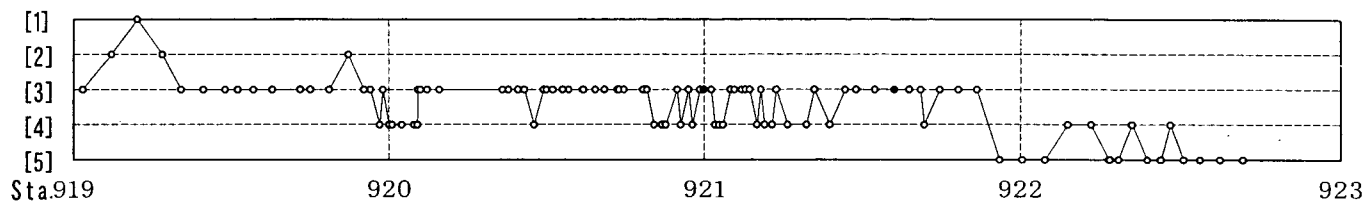
割れ目の頻度



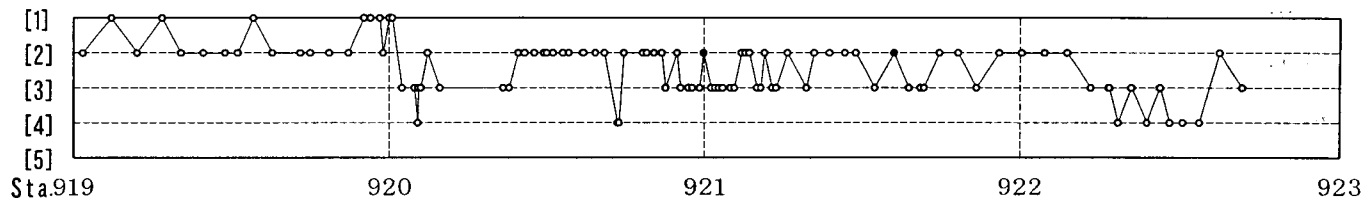
割れ目の状態



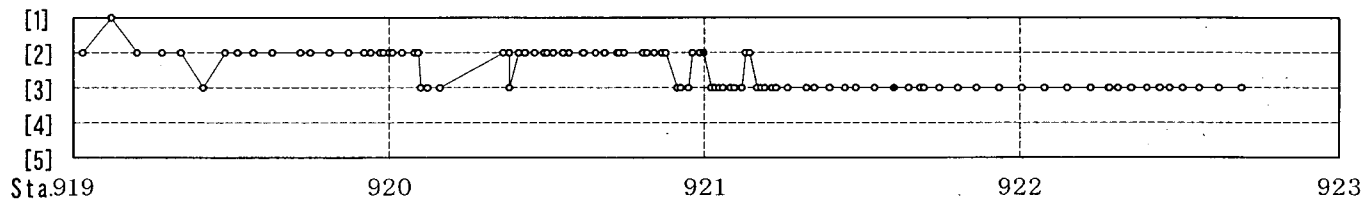
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔：100m, 坑口：Sta. 911+73, 黒印：コア採取地点

図-3.4(2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (SMトンネル)

⑤SIトンネル（図－3. 5参照）

a) 地質概要

全区間を通じて熔結凝灰岩が現れている。

b) 地山比抵抗値の傾向

STA.38付近まではほぼ一定で $1000\Omega \cdot m$ 程度の値を示しているが、STA.38付近から減少し始め、STA.42以降は一定で全区間を通じて最も低い値を示す。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

地山等級はCⅠ、DⅠ、DⅢaの3通りのものが採用されているが、各地山等級が設定されている区間と地山比抵抗値は相対的にはほぼ対応していると言える。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

相対的な変化については弾性波速度と地山比抵抗値とは比較的に対応していると言えるが、弾性波速度が変化する箇所と地山比抵抗値とが変化する箇所は対応していない。特に、STA.38付近から地山比抵抗値は大幅に減少し始めるが、弾性波速度が大きく減少し始めるのはSTA.45付近となっている。

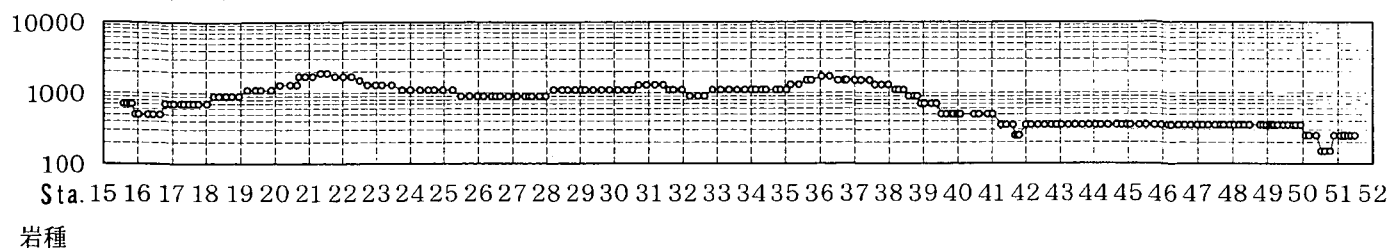
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

地山比抵抗値が減少し始めるSTA.38付近においては「湧水」の評価ポイントが周囲と比べると悪くなり、「切羽の状態」「圧縮強度」の評価が相対的に悪くなっていく境界とも対応している。しかし、同様に周囲と比較して「湧水」の評価が悪いSTA.29～30付近においては地山比抵抗値に明確な変化は認められない。また、STA.27付近は全区間を通じて「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「割れ目の頻度」「水による劣化」の評価が最も低くなっているが、地山比抵抗値には特段の変化が認められない。

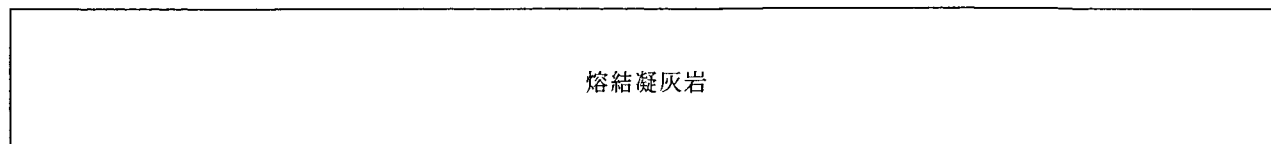
f) 総合評価

本トンネルにおいては、地山等級が悪くなっていく地点および切羽観察表の「切羽の状態」「圧縮強度」「湧水」の評価が悪くなっていく地点は弾性波速度の変化点よりはむしろ地山比抵抗値の変化点に対応しており、地山比抵抗値の相対的な変化に着目することによって切羽の地山状態の推定精度を上げることが可能になるものと判断される。

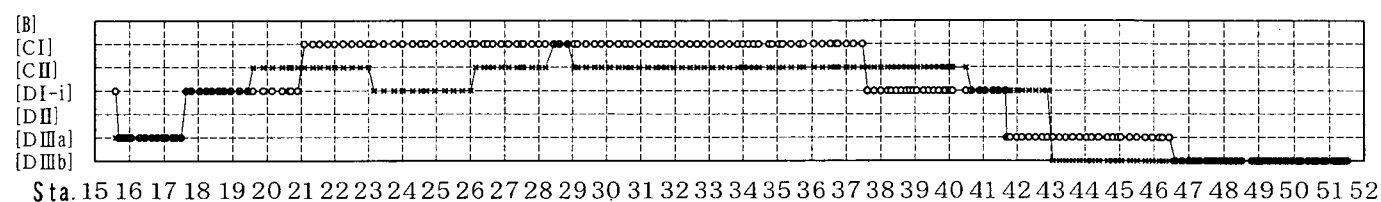
地山比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)



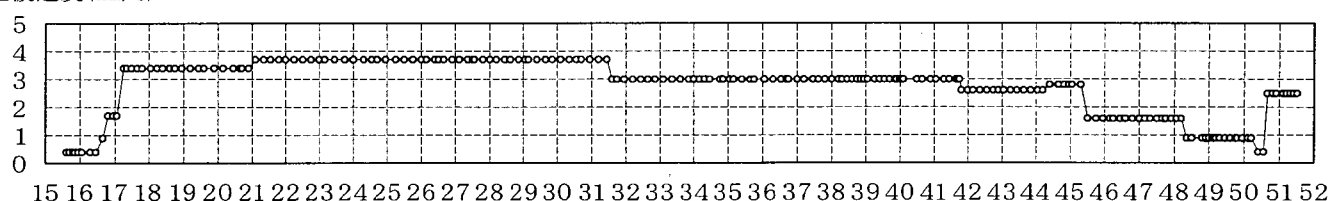
岩種



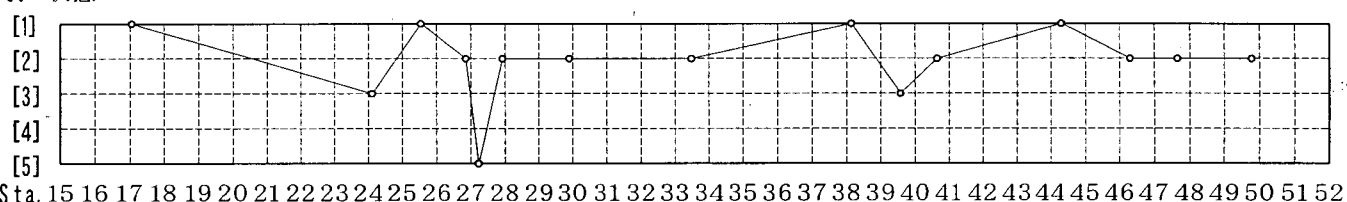
地山等級(施工時:○,当初パターン:×)



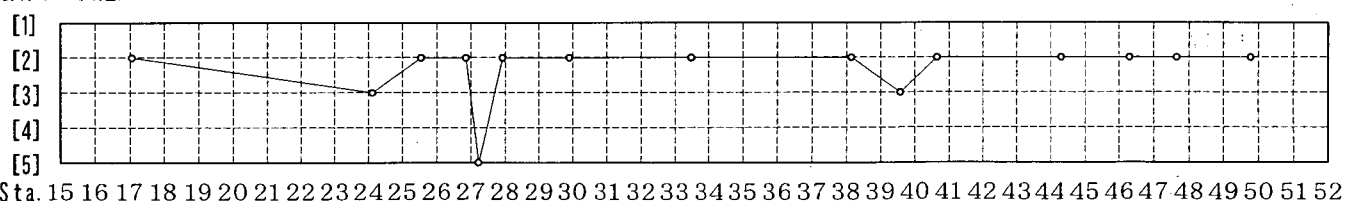
弾性波速度 (km/s)



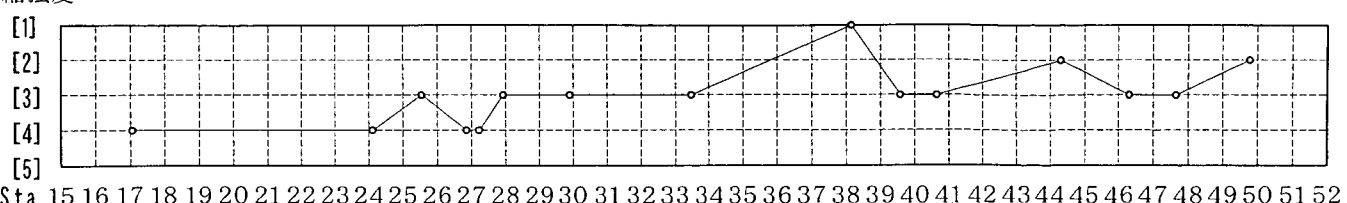
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

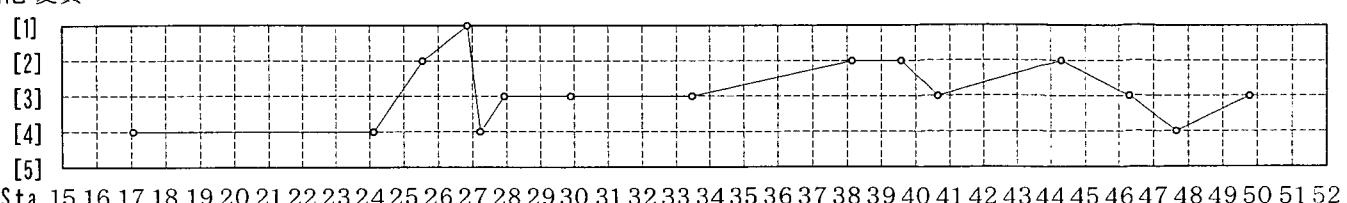
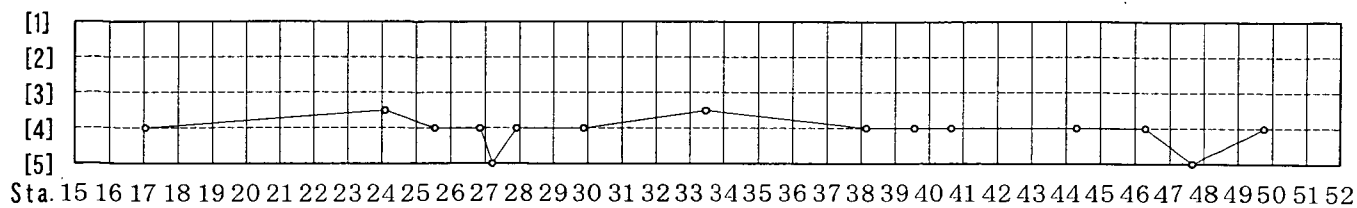
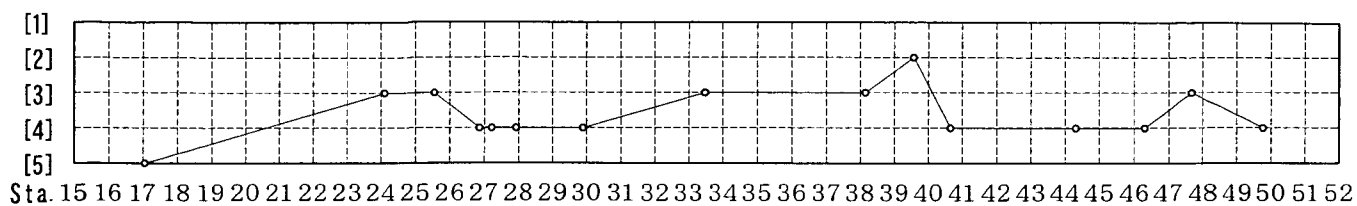


図-3. 5 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (S1トンネル)

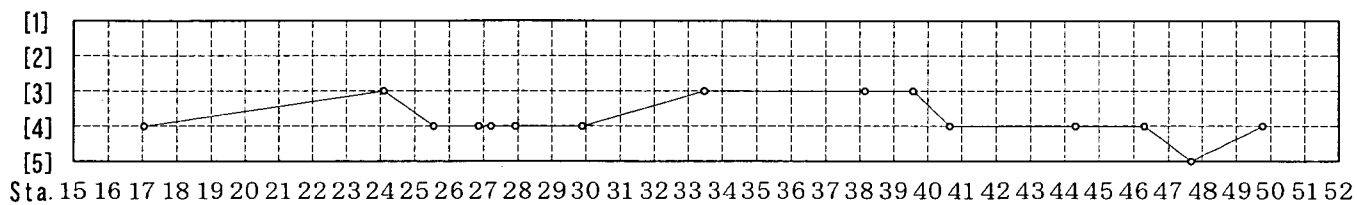
割れ目の頻度



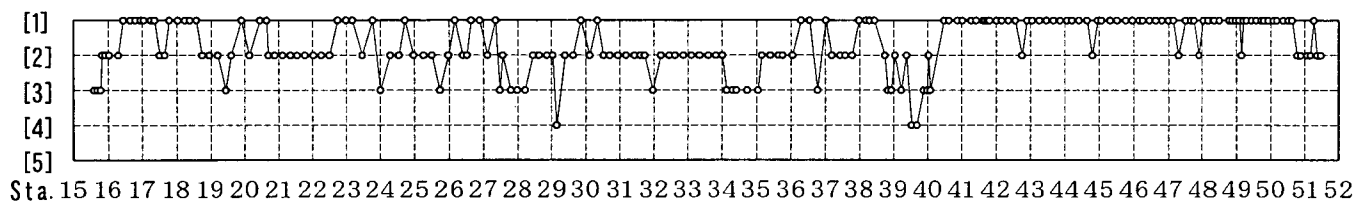
割れ目の状態



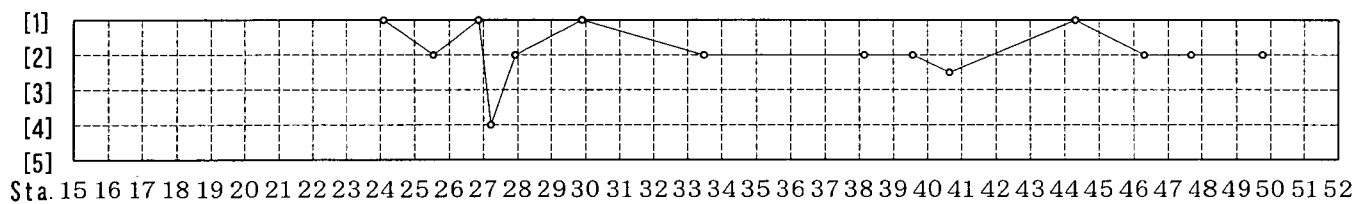
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔:20m, 坑口:Sta. 15+90

図-3.5(2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (SⅠトンネル)

(2) 火成岩

① YDトンネル (図-3.6 参照)

a) 地質概要

流紋岩を主体とし、ところどころに凝灰岩あるいは凝灰岩と流紋岩の互層が現れている。

b) 地山比抵抗値の傾向

$10\Omega \cdot m$ から $300\Omega \cdot m$ の比較的広い範囲の値を示しており、STA.164.5 および STA.166 付近に $100\Omega \cdot m$ を越える全区間を通じて最も高い区間が認められる。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

地山等級は D I から C I の範囲で推移しているが、地山比抵抗値が高い区間と地山等級が良好な区間が明確に対応しているわけではない。ただし、地山比抵抗値が $10\Omega \cdot m$ と最も低い領域においては地山等級は最も悪い D I が採用されている。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

STA.166~167.5 付近に全区間を通じて弾性波速度が最も高い領域が、STA.163.7~164 付近に全区間を通じて最も低い領域が認められるが、それぞれは地山比抵抗値が高い領域、低い領域とは明確には対応していない。また、前後の区間との相対的な変化に着目して弾性波速度と地山比抵抗値を比較しても明確な対応は認められない。

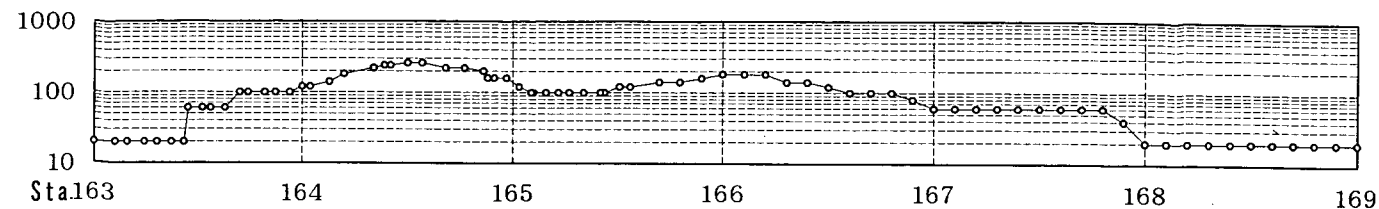
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

STA.165.3~165.6 付近においては切羽観察表の「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の状態」「割れ目の形態」の各評価が周囲に比較して悪くなり、地山等級も D I の評価がなされていることから地山状態は悪かったものと推定される。しかし、この箇所の地山比抵抗値は周囲に比較しても特別に低いわけではない。また、地山比抵抗値が最も高い STA.164.5 付近の「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の状態」「割れ目の形態」は周辺に比較して相対的に悪くなっており、一般に理解されている地山比抵抗値と地山状態との関係とは逆の関係を示している。

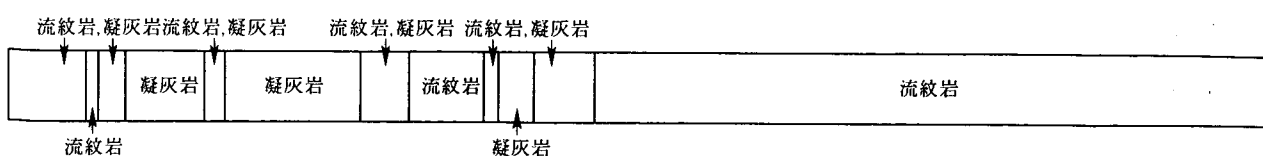
f) 総合評価

本トンネルにおいては、切羽観察表に関する情報が地山比抵抗値の計測が実施された全区間に対しては得られていないことや、切羽観察表の評価と地山等級との関係が必ずしも明確でないこともあり、地山比抵抗値と切羽での地山状態との関係については十分な評価を加えることは難しい。ただし、地山等級と地山比抵抗値との関係だけに着目すれば、D I の地山等級が採用されている区間の地山比抵抗値は $10\Omega \cdot m$ と極端に低い区間に対応しているのに対して、当該区間の弾性波速度が特段に低い値を示しているものではないことから、弾性波速度により評価された地山状態を補足するのに有用となる場合があると言える。

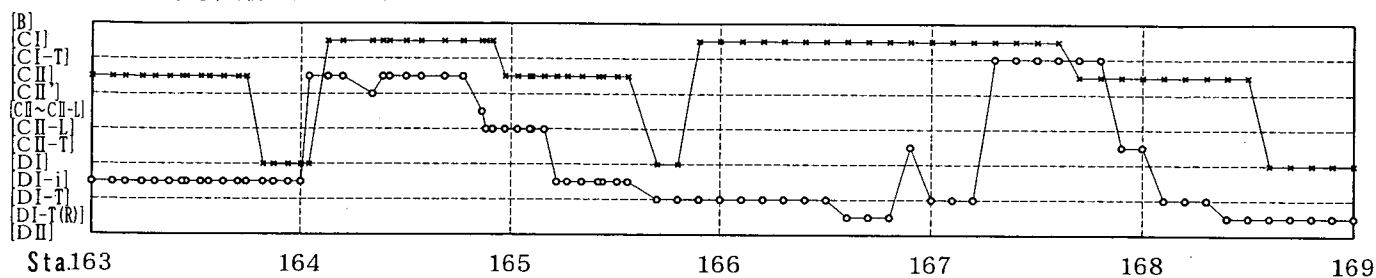
地山比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)



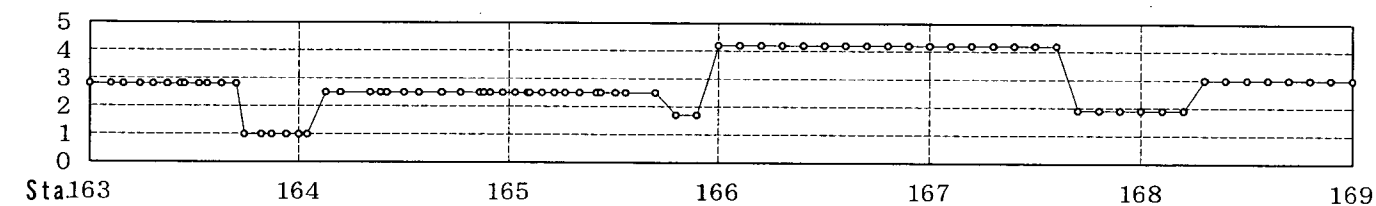
岩種



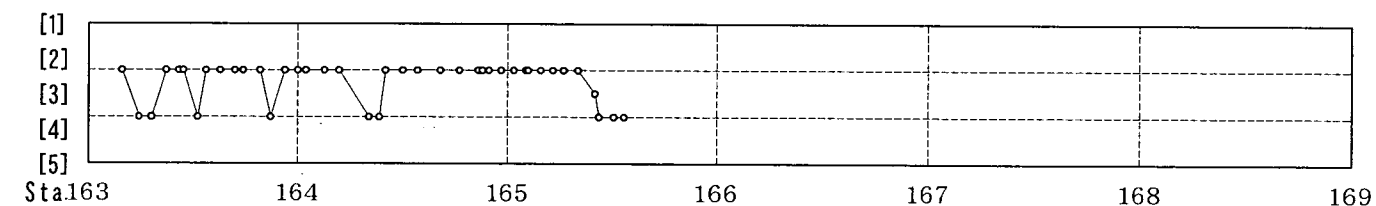
地山等級 (施工時:○, 当初パターン:×)



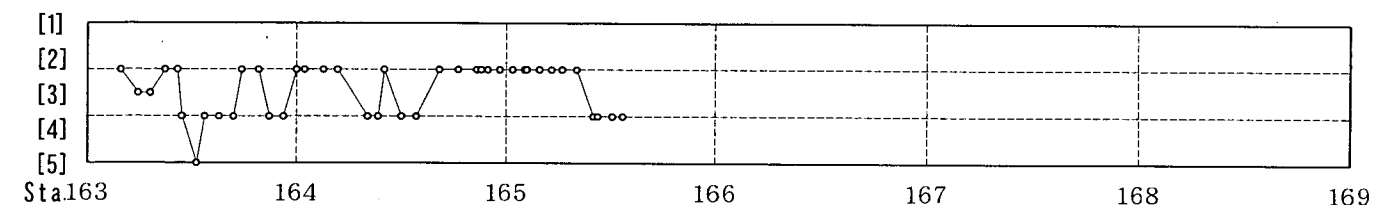
弾性波速度 (km/s)



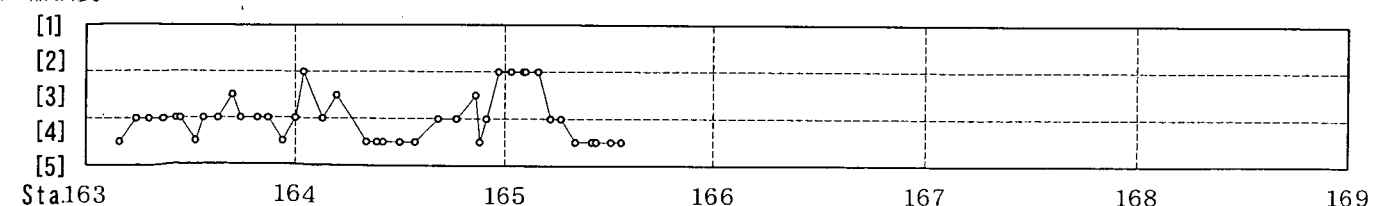
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

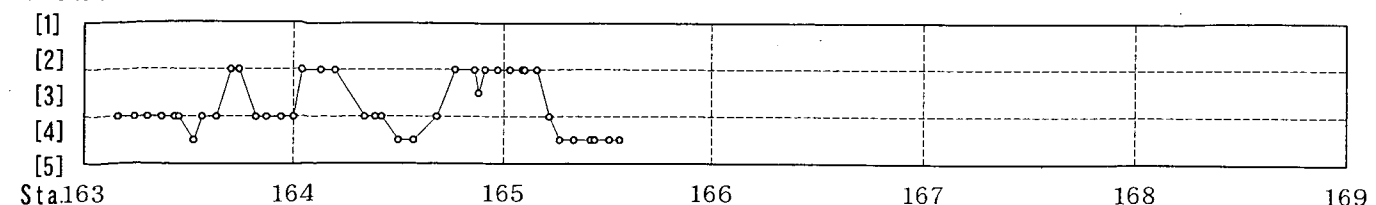
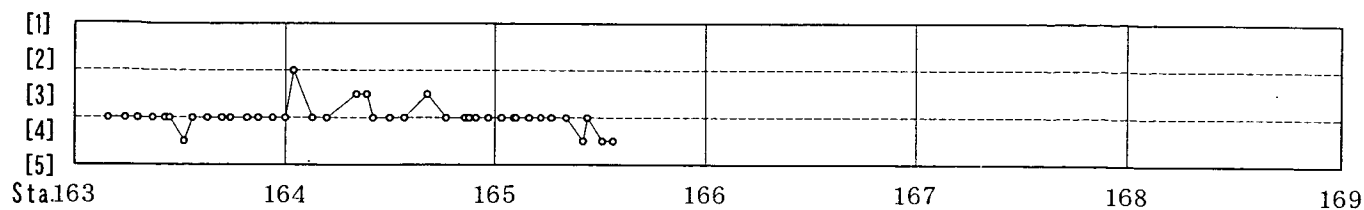
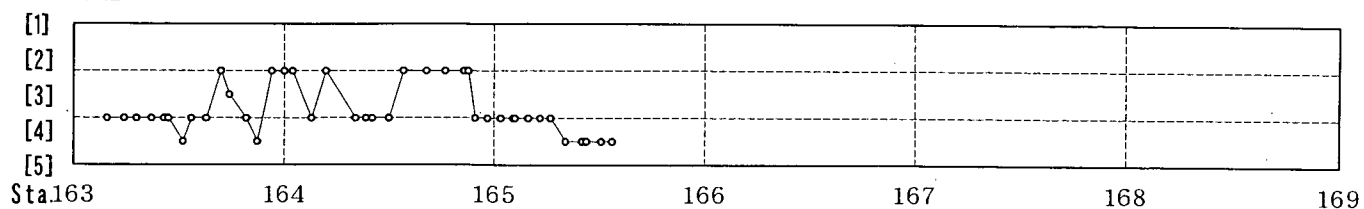


図-3. 6 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (YDトンネル)

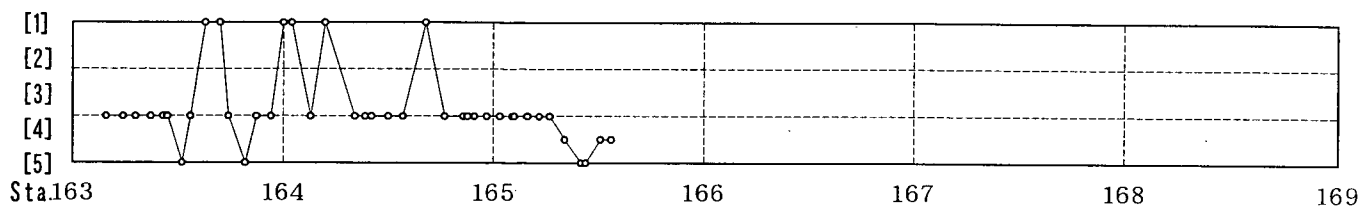
割れ目の頻度



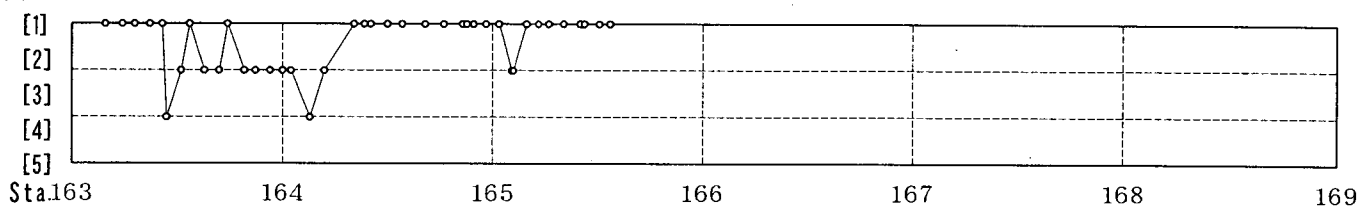
割れ目の状態



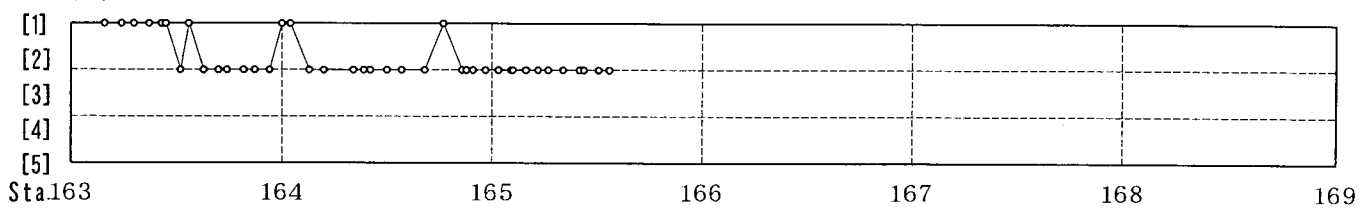
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔 : 100m

図-3. 6 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (YDトンネル)

②SSトンネル（図－3．7参照）

a) 地質概要

全区間を通じて流紋岩が一様に現れている。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は200～800 $\Omega \cdot m$ の範囲を示しており、比較的变化は大きいと言える。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

CⅡ、DⅠおよび坑口部で適用されるDⅢaが用いられているが、地山等級と地山比抵抗値の間には明確な対応は認められない。むしろ、STA.13付近においては地山比抵抗値が周辺に比較すると相対的に低いにもかかわらず、地山等級の評価は比較的高くなっている。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

弾性波速度が高い区間と地山比抵抗値が高い区間は必ずしも対応していない。むしろ、STA.13付近においては地山比抵抗値が周辺に比較すると相対的に低いのにに対して、弾性波速度は相対的に高くなっている。

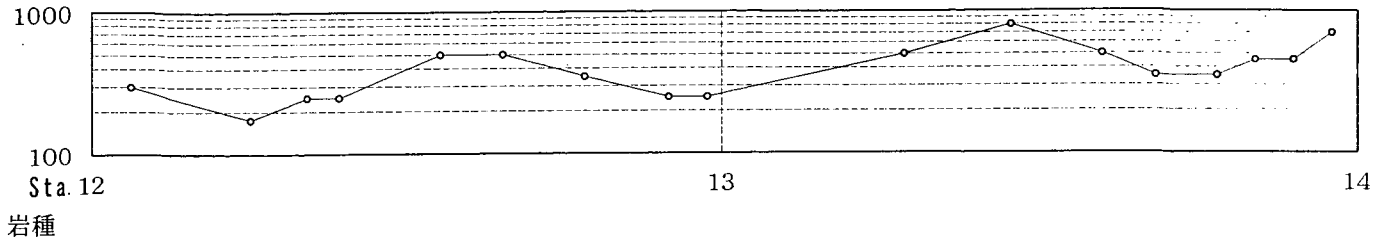
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

STA.12.6～12.7付近およびSTA.13.6付近に「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」の評価が周囲と比較して相対的に良い区間が見られ、若干位置がずれているものもあるが、これらの区間における地山比抵抗値も周囲に比較して相対的に高いと言える。また、STA.12.4付近に「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の形態」「湧水」「水による劣化」の評価が低い箇所が認められ、この付近の地山比抵抗値は周辺の地山比抵抗値に比較すると若干低い値を示している。ただし、この箇所の地山等級は周辺に比較して特段悪いわけではない。

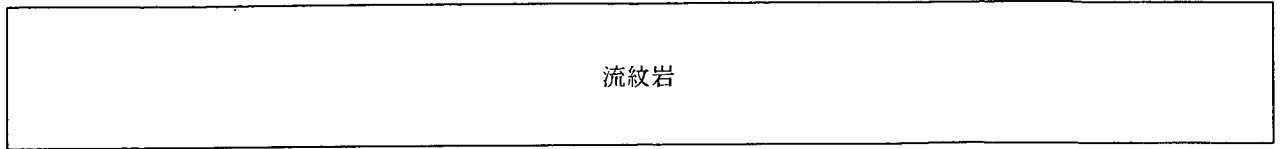
f) 総合評価

本トンネルにおいては切羽観察表の評価と地山等級との関係が明確でないこともあって、地山等級との関係について見れば地山比抵抗値よりはむしろ弾性波速度の方が見かけ上の対応は良いことになっている。しかし、切羽観察表の各項目と地山比抵抗値の相対的な変化に着目すると、比較的多くの項目が地山比抵抗値と良い対応を示しており、地山比抵抗値により地山状態の相対的な評価を行うことは可能と考えられる。

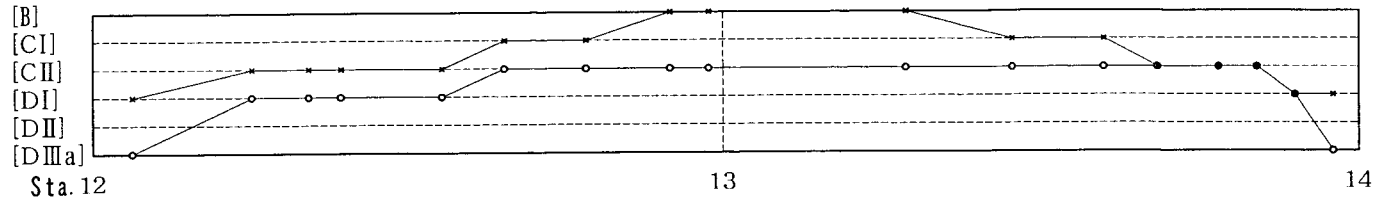
地山比抵抗値($\Omega \cdot m$)



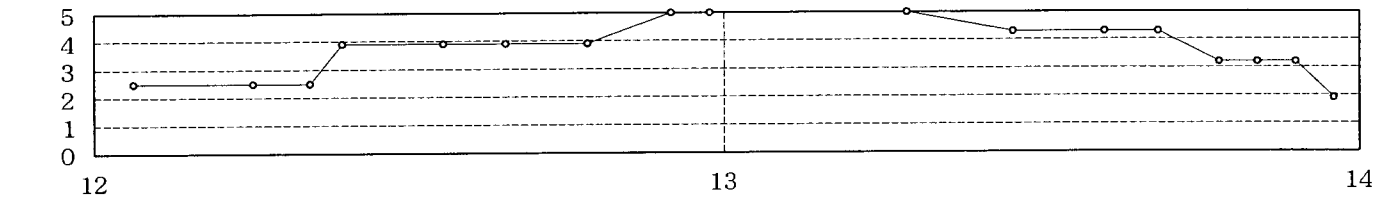
岩種



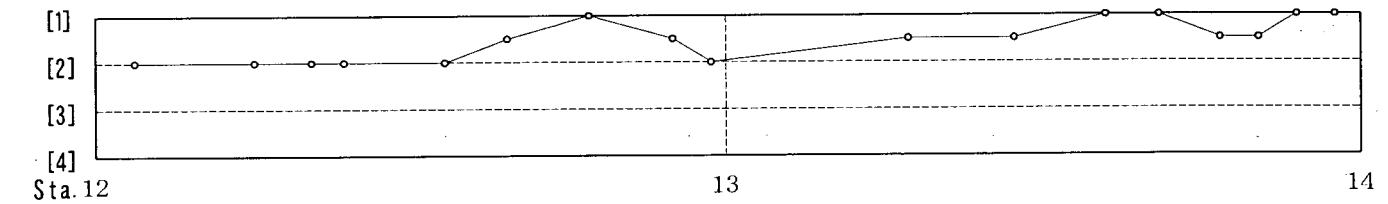
地山等級(施工時:○,当初パターン:×)



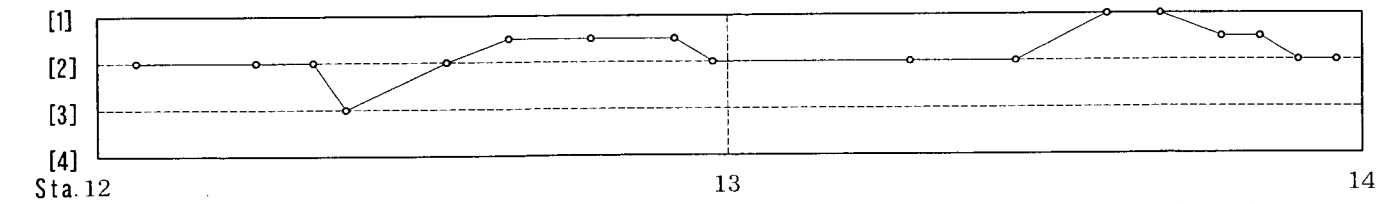
弾性波速度(km/s)



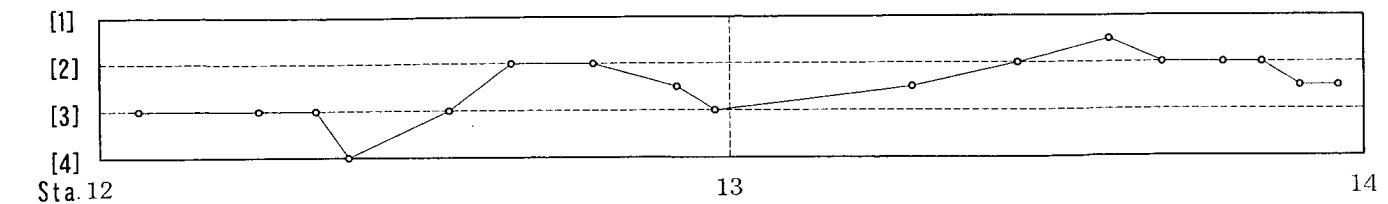
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

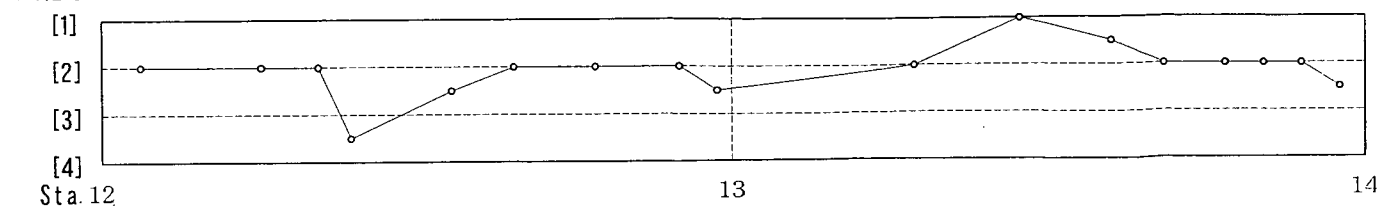
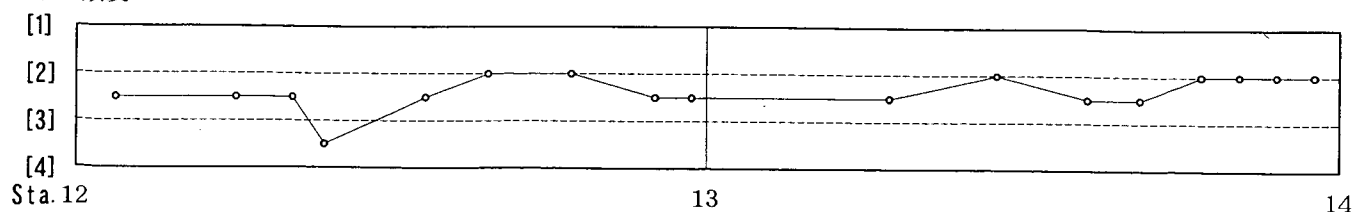
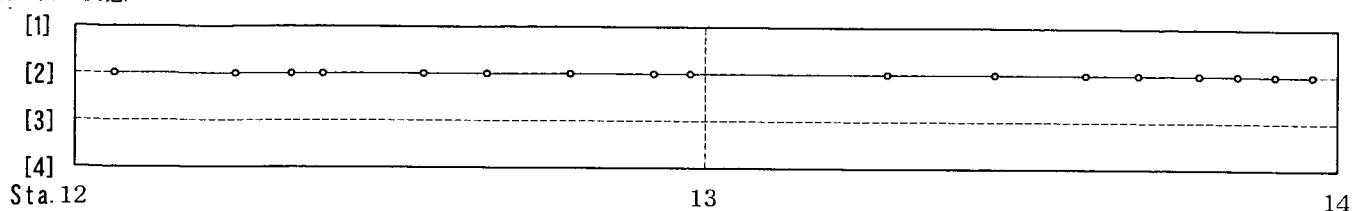


図-3.7(1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係(SSトンネル)

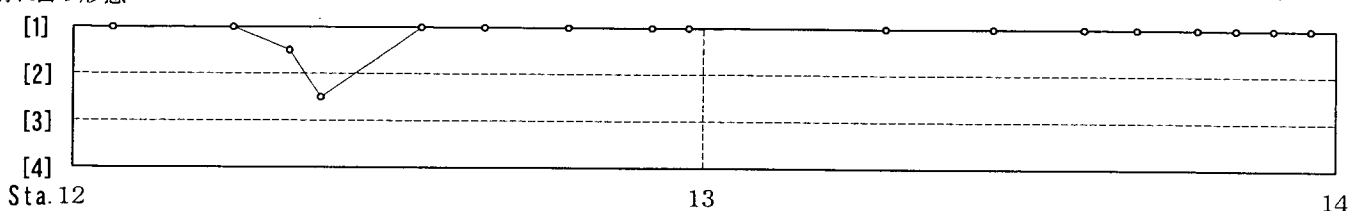
割れ目の頻度



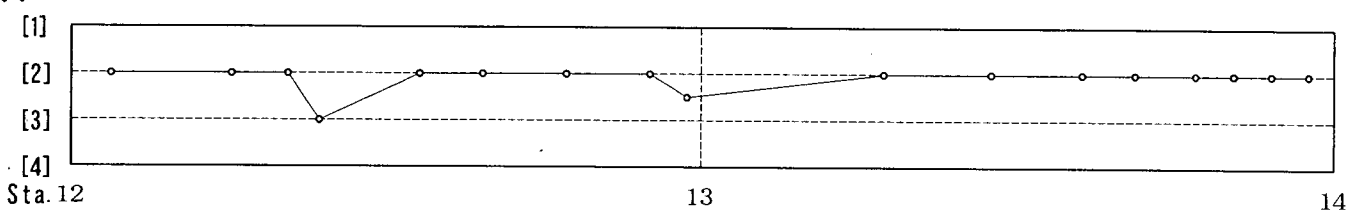
割れ目の状態



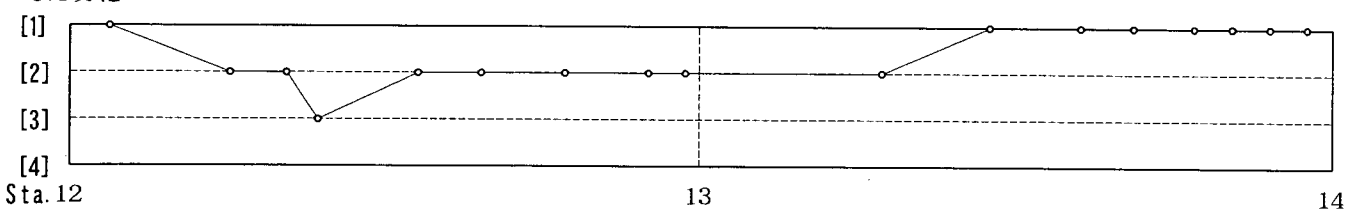
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔：100m，坑口：Sta. 11+82.5

図-3.7(2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗との関係 (SSトンネル)

③MZトンネル（図－3. 8参照）

a) 地質概要

石英閃緑岩を主としてところどころに変質岩が介在している。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は $100\sim 1000\Omega\cdot m$ の比較的広い範囲で変化しており、STA.32.3、STA.33.8、STA.37～38、STA.41.5付近に地山比抵抗値が低い区間が認められる。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

地山等級はCⅠ、CⅡ、DⅠ、DⅡのものが採用されており、総じて地山比抵抗値が低い箇所における地山等級の評価は悪くなっていると言えるが、地山比抵抗値が高いにもかかわらず地山等級の評価が悪い箇所や地山比抵抗値が高いにもかかわらず地山等級の評価が良い箇所も認められ、明確な対応は認められない。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

坑口部を除けば弾性波速度は $4\sim 5\text{km/sec}$ の値を示し、ところどころに 2km/sec 程度の低い値を示す箇所が認められる。地山比抵抗値が低いSTA.32.3付近は弾性波速度が 2km/sec の低い値を示す箇所の一つに対応しており、STA.33.8付近の比抵抗値が全区間を通じて最も低い値を示す箇所の弾性波速度は 4km/sec と値そのものは高いものの、周囲に比較すると相対的に低くなっている。

e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

STA.36～37付近においては「風化・変質」「湧水」の評価が全区間を通じて最も低い値を示しているが、地山比抵抗値が特別に低い値を示しているものではない。ただし、切羽観察表が入手できた区間が80mと非常に短いためにこれだけの結果により評価を行うことは難しい。

f) 総合評価

地山比抵抗値が低い箇所においては施工時に採用された地山等級が低くなっているという点で地山比抵抗値を用いて地山等級の評価がある程度行うことができることが示されたが、切羽観察表のデータが非常に不足しているため、地山状態との関係について総合的に評価を行うことができない。

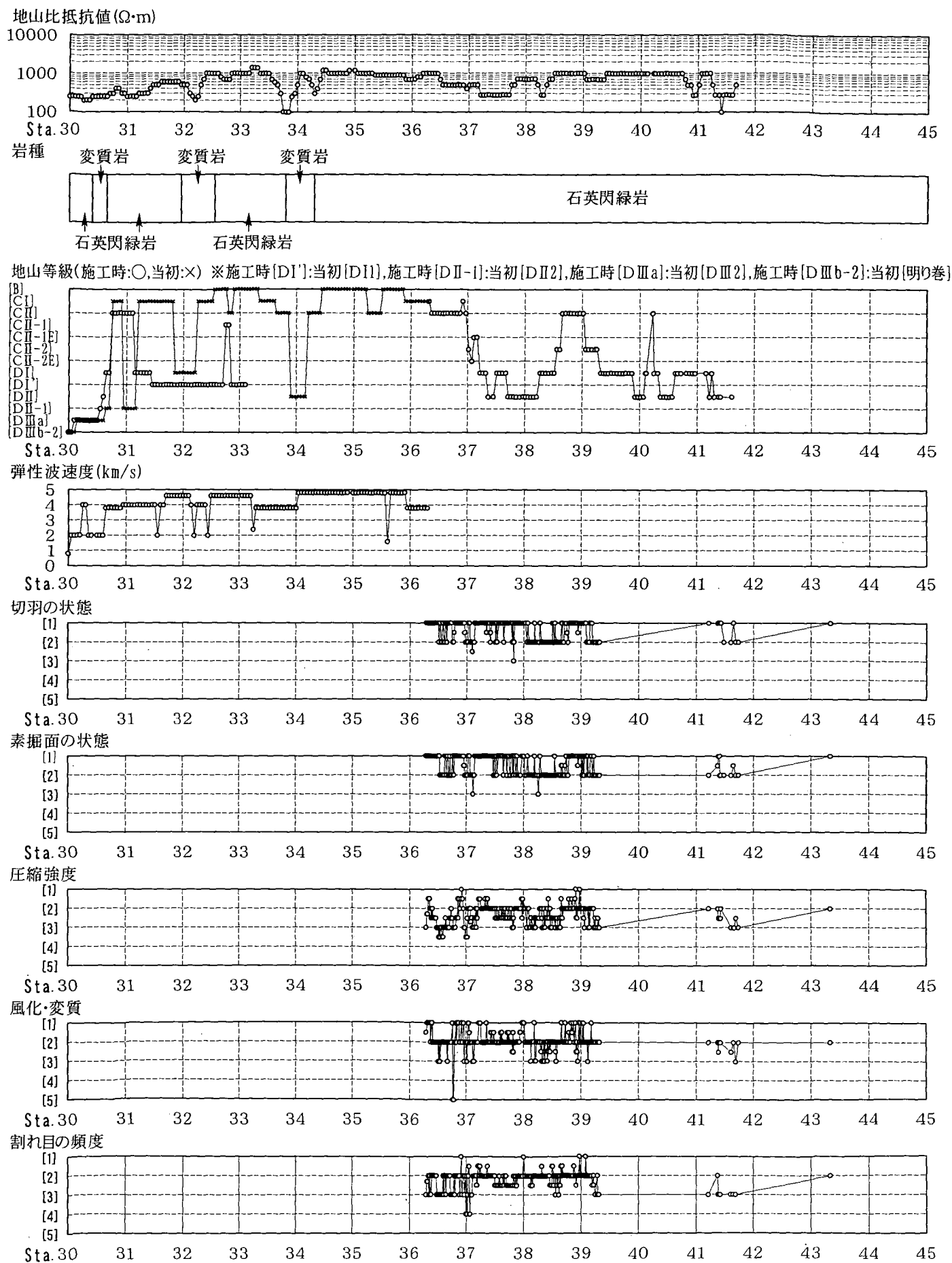
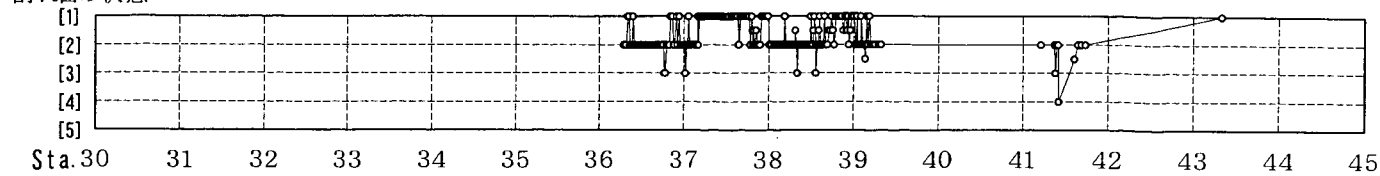
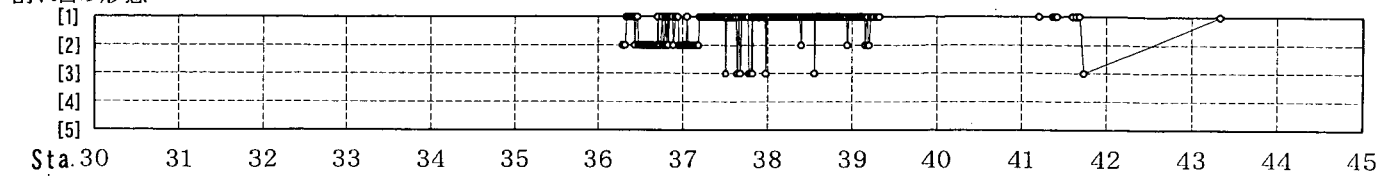


図-3.8(1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (M Zトンネル)

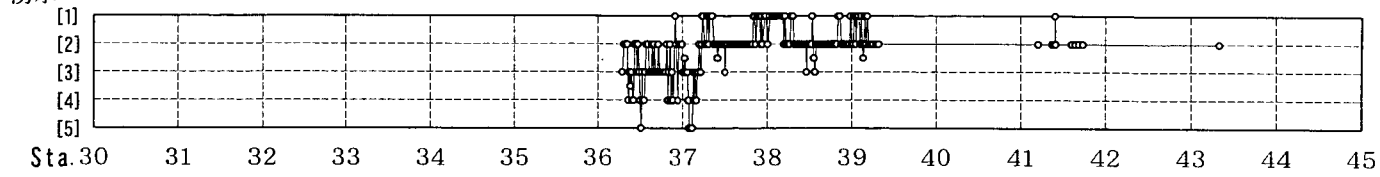
割れ目の状態



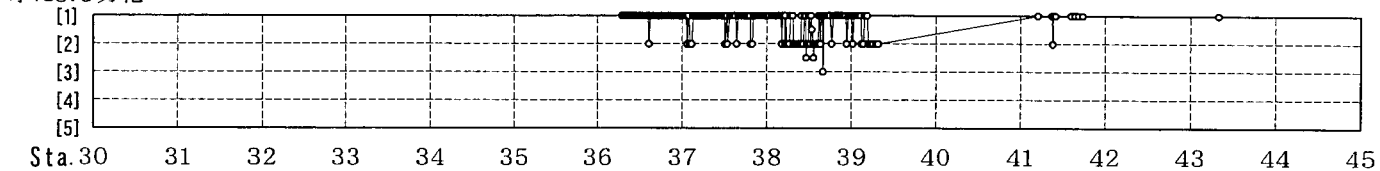
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔:20m, 坑口:Sta. 30+0

図-3. 8 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (M Z トンネル)

④SKトンネル（図－3.9参照）

a) 地質概要

石英閃緑岩が主体で一部区間において花崗岩が介在している。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は $200\Omega \cdot m$ から $2000\Omega \cdot m$ までの広い範囲で変化しており、STA.19.8付近から減少し始めてSTA.20.3付近で最小値を示した後増加し始め、STA.20.7付近から $1000\Omega \cdot m$ で一定値を示すようになる。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

地山等級はD I からC I の範囲で変化しており、地山比抵抗値が変化し始める箇所は地山等級が変わる箇所にはほぼ対応し、また、地山等級が低い箇所の地山比抵抗値も低い値を示しているなど地山比抵抗値と地山等級は概ね対応していると言える。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

弾性波速度はSTA.19.8付近を境にして $6km/sec$ から $3km/sec$ に低下しており、地山比抵抗値が減少し始める境界と概ね一致している。しかし、STA.20.3付近においては地山比抵抗値は増加し始めるのに対して弾性波速度は変化しないなど、対応が認められないところもある。

e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

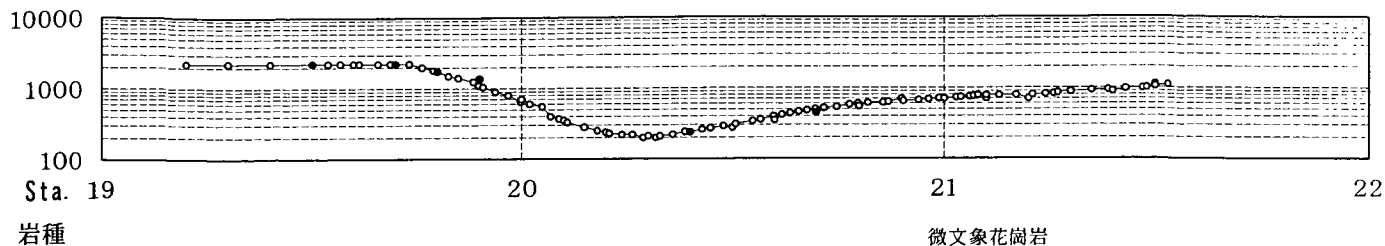
地山比抵抗値がSTA.19.8付近から減少し始め、STA.20.3付近で最小値を示すことに着目すると「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「水による劣化」に関する評価の相対的な変化は地山比抵抗値の相対的な変化と対応していると言える。特に、「切羽の状態」「素掘面の状態」「水による劣化」については全区間を通じて評価ポイントの相対的な変化は地山比抵抗値の変化と良く対応している。

また、STA.20.2付近における「切羽の状態」「素掘面の状態」「湧水」の評価がそれぞれ全区間を通じて最も悪くなっているが、当該箇所は地山比抵抗値が最小値を示す箇所であるSTA.20.3付近とも非常に近い位置にあることがわかる。

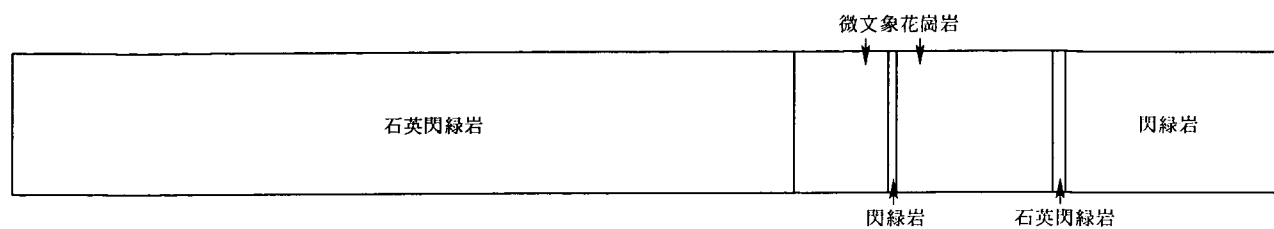
f) 総合評価

本トンネルにおいては、地山比抵抗値と地山等級および地山状態との関係は比較的対応していると言える。特に、「切羽の状態」「素掘面の状態」「湧水」などの評価について相対的な変化に着目すれば弾性波速度よりも地山比抵抗値の方が整合がとれており、弾性波速度で得られない情報を得るのに有用な手法になるものと考えられる。

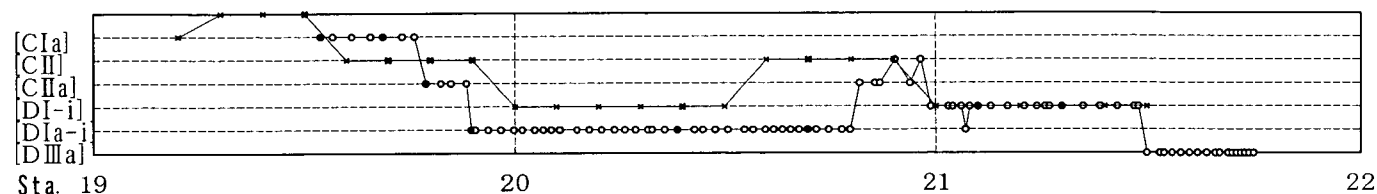
地山比抵抗値($\Omega \cdot m$)



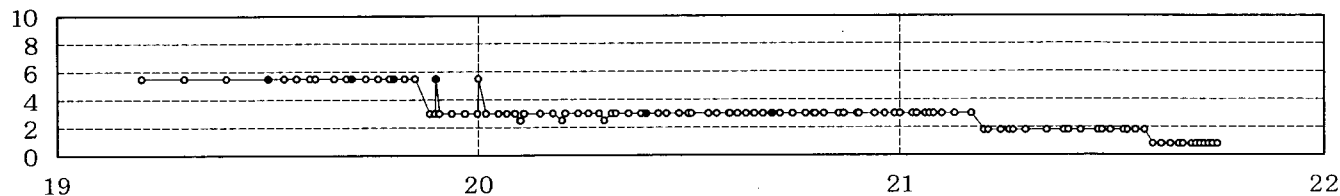
岩種



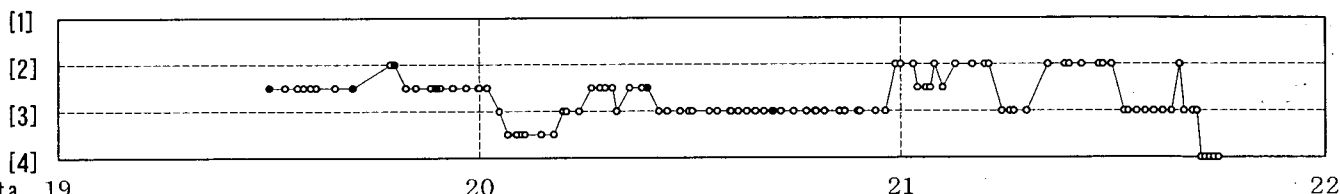
地山等級(施工時:○,当初パターン:×) ※施工時[CⅠa]:当初パターン[CⅠ],施工時[DⅠ-i]:当初パターン[DⅠ-i]



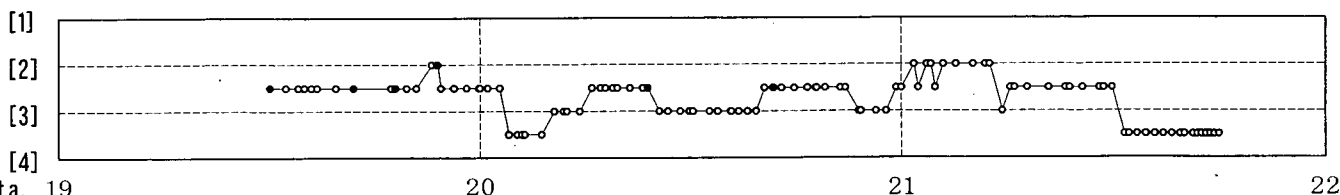
弾性波速度(km/s)



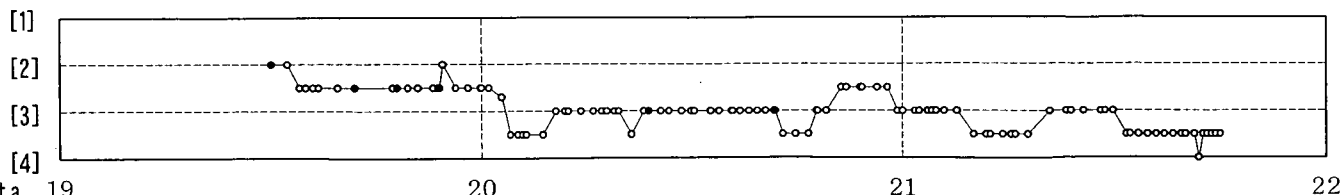
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

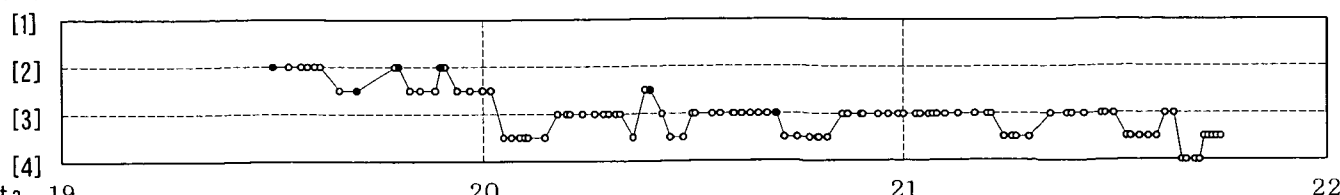
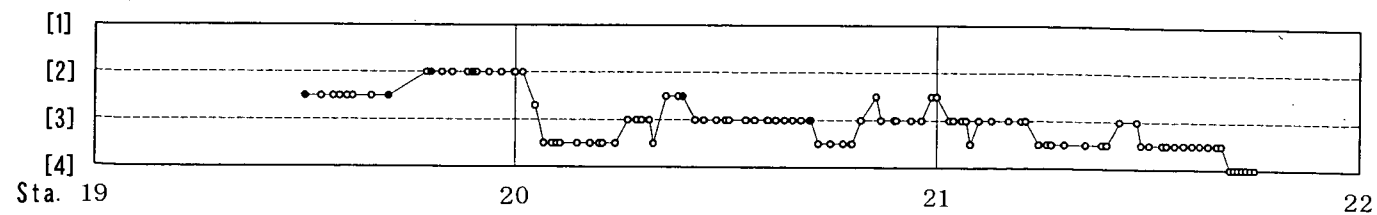
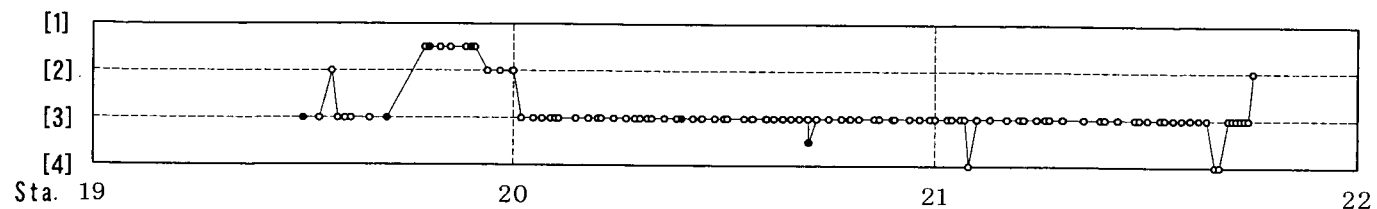


図-3. 9 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (S Kトンネル)

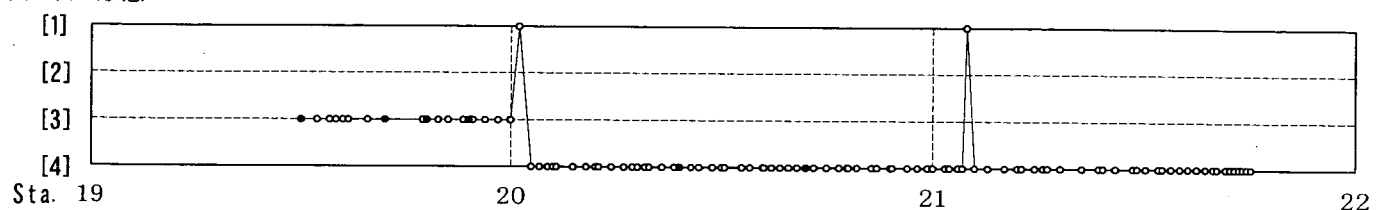
割れ目の頻度



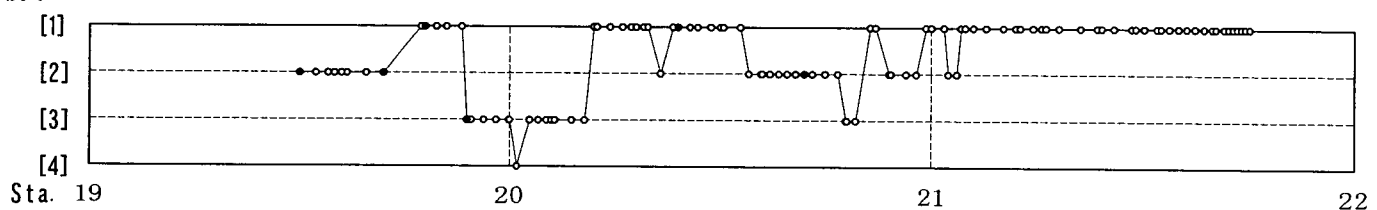
割れ目の状態



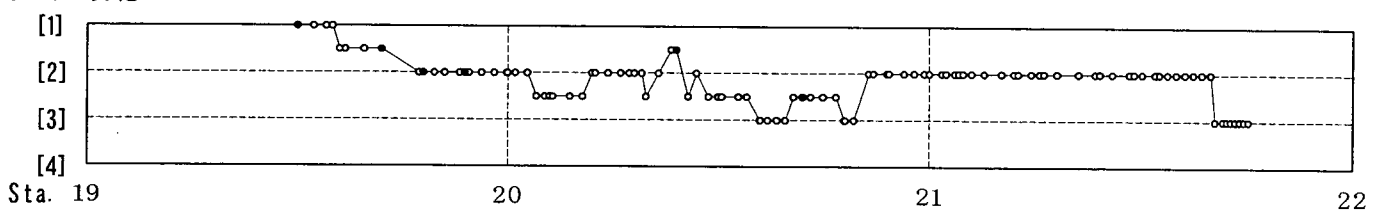
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔：100m，坑口：Sta. 21+80，黒印：コア採取地点

図-3.9(2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (SKトンネル)

⑤MCトンネル（図－3、10参照）

a) 地質概要

花崗岩を主体とするが、ところどころでマサ化したものが現れるとともに安山岩、ヒン岩が介在している。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は $100\Omega \cdot m$ から $2000\Omega \cdot m$ までの広い範囲の値を示している。地山比抵抗値は坑口部のSTA.248からSTA.225付近までは漸増し、STA.225付近で最大値を示した後わずかながら減少する傾向を示すが、STA.236、STA.233、STA.218およびSTA.213付近においてそれぞれ周辺と比較して地山比抵抗値が小さくなる箇所が認められる。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

採用された地山等級は坑口部のDⅢa、CⅡ、DⅠの3等級であり、地山比抵抗値が大きく変化しているのに比べると地山等級の変化は小さく、坑口部などの一部の区間を除くと地山等級と地山比抵抗値との間には明確な対応は認められない。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

弾性波速度は坑口部およびSTA.237、STA.234、STA.227付近を除くと4～5km/secのほぼ一定の値を示しており、弾性波速度と地山比抵抗値の間には明確な対応は認められない。特に、STA.227付近では比抵抗値が高いにもかかわらず、弾性波速度が周辺に比較すると非常に小さい値を示すなど、一般に理解されていることとは逆の傾向を示している。

e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

STA.218付近においては「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「割れ目の形態」の評価が坑口部を除いた全区間を通じて最も悪くなっている。しかし、当該箇所における地山比抵抗値は周囲に比較して低下が見られるものの、全区間を通じて比較した場合には相対的には地山比抵抗値は高い部類に属するものと考えられる。また、STA.241からSTA.238の区間における「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」の評価は全区間を通じて最も高くなっているが、当該区間における地山比抵抗値は全区間を通じて相対的には低い部類に属している。なお、地山比抵抗値が周辺に比較して小さくなっている区間のうち、STA.218付近については「湧水」、STA.213付近については「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「割れ目の形態」の評価が周囲に比較するとわずかながら悪くなっていると言える。

f) 総合評価

地山等級および切羽観察表での評価が悪い区間での地山比抵抗の絶対値は必ずしも低いわけではなく、地山比抵抗値の絶対値に着目するだけでは地山状態の評価を十分に行うことは難しいものと判断される。ただし、弾性波速度は全区間を通じてほぼ一定の値を示しているのに対して、地山比抵抗値の変化は比較的大きく、周囲と比較して地山比抵抗値が下がる箇所において切羽の状態が悪くなっている区間もところどころ認められることから、地山比抵抗値の変化に注意を払えば弾性波速度で判別できないような地質が悪い場所を特定するのに有用な情報を与える場合があると言える。

10000
1000
100
Sta. 248 243 238 233 228 223 218 213 208 203 198

岩種
真砂・花崗岩 花崗岩・安山岩 花崗岩・真砂土 真砂土 風化花崗岩 花崗岩・粘土 花崗岩・真砂土
真砂土 花崗岩 花崗岩 花崗岩 花崗岩 真砂土・風化花崗岩 花崗岩 花崗岩・ひん岩 花崗岩・真砂土 風化花崗岩
半花崗岩 半花崗岩・ひん岩 花崗岩 花崗岩・石英斑岩 花崗岩・ひん岩 花崗岩・真砂土 風化花崗岩

強風化花崗岩 花崗岩・真砂土 風化花崗岩

地山等級(施工時:○,当初パターン:×)

[B]
[CI]
[CII]
[DI]
[DII]
[DIIIa]

Sta. 248 243 238 233 228 223 218 213 208 203 198

弾性波速度(km/s)

5
4
3
2
1
0

248 243 238 233 228 223 218 213 208 203 198

切羽の状態

[1]
[2]
[3]
[4]

Sta. 248 243 238 233 228 223 218 213 208 203 198

素掘面の状態

[1]
[2]
[3]
[4]

Sta. 248 243 238 233 228 223 218 213 208 203 198

圧縮強度

[1]
[2]
[3]
[4]

Sta. 248 243 238 233 228 223 218 213 208 203 198

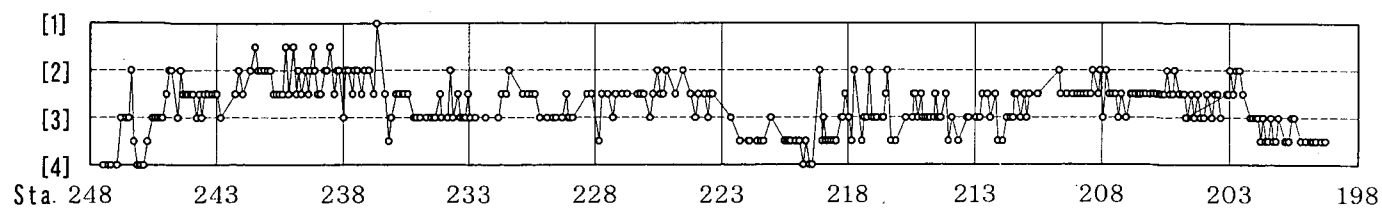
風化・変質

[1]
[2]
[3]
[4]

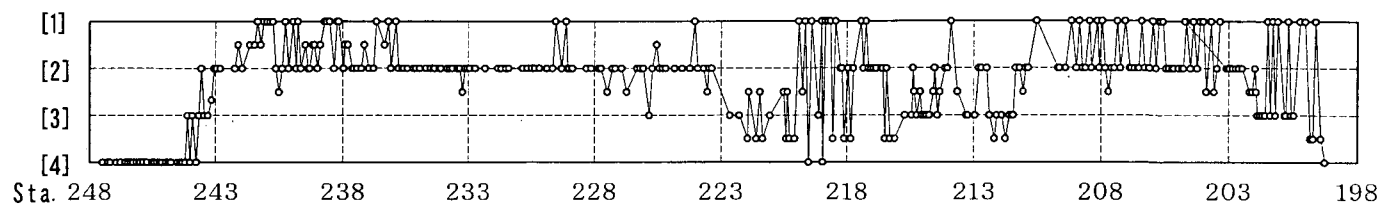
Sta. 248 243 238 233 228 223 218 213 208 203 198

図-3. 10 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (MCトンネル)

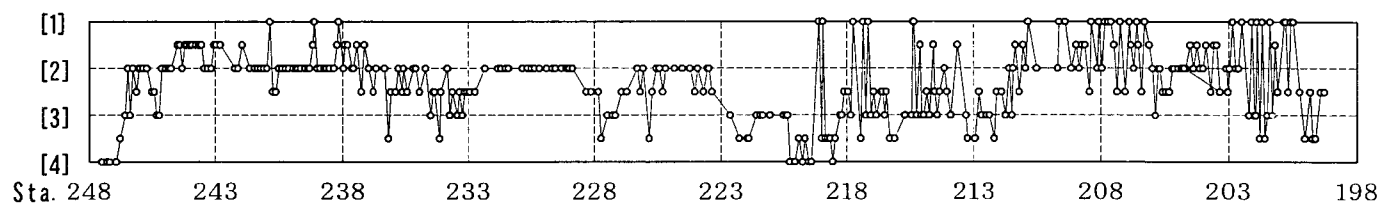
割れ目の頻度



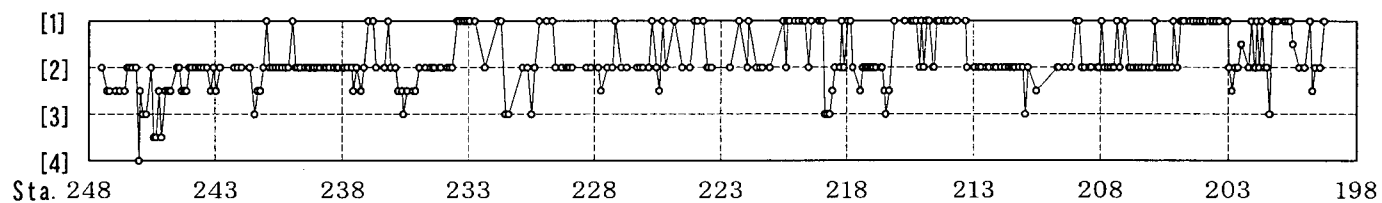
割れ目の状態



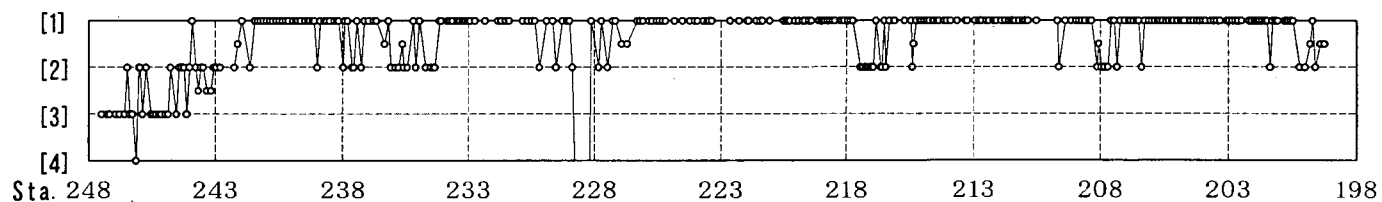
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔：20m，坑口：Sta. 247+19.3

図－3. 10 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (MCトンネル)

⑥FNトンネル（図－3. 11 参照）

a) 地質概要

全区間を通じて強風化花崗岩が現れている。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は $400\sim 2000\Omega\cdot m$ の比較的広い範囲で推移している。坑口部のSTA.170～STA.171を除けばSTA.177まではほぼ一定の $1000\sim 2000\Omega\cdot m$ を示しているが、STA.177以降徐々に低下する傾向にある。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

採用されている地山等級は坑口部に適用されるDⅢa、DⅡ、DⅠの3等級であり、地山等級と地山比抵抗値との間には明確な対応は認められないが、相対的な変化に着目すると地山等級と地山比抵抗値は概ね対応していると言える。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

坑口部を除けば弾性波速度は 0.7km/sec でほぼ一定の値を示しており、地山比抵抗値とは対応していない。

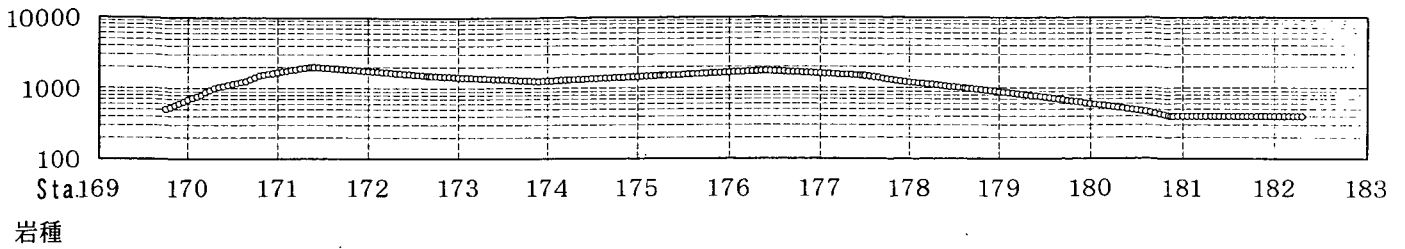
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

STA.173からSTA.177の区間においては「切羽の状態」「素掘面の状態」「湧水」「水による劣化」の各項目の評価が全区間を通じてみれば最も悪くなっているが、これらの区間の地山比抵抗値はむしろ全区間を通じて最も良くなっている。また、STA.178～180付近に「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「湧水」「水による劣化」の評価が周囲に比較して高くなる箇所が認められるが、地山比抵抗値との関係で見るとこれらの箇所においては地山比抵抗値は減少する傾向にある。一方、STA.171.5付近を境に「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「湧水」「水による劣化」の評価が悪くなる傾向を示しているが、これらの箇所の地山比抵抗値はピークを過ぎてわずかながらも減少し始める傾向が認められる。

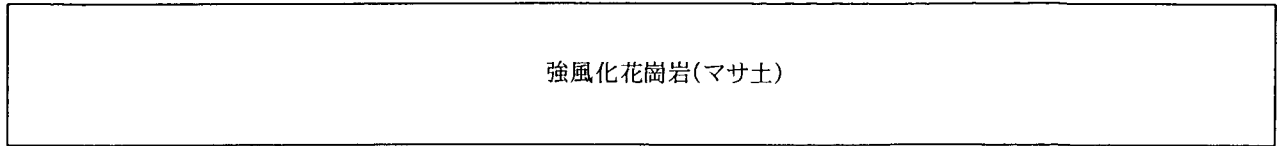
f) 総合評価

地山比抵抗値と地山等級とは比較的対応しており、弾性波速度の変化がほとんど認められないことと併せて考えると、結果だけからは地山等級の評価を行う上で地山比抵抗値は有用な情報を与えているかのように見える。しかし、切羽観察表との関係で見ると地山比抵抗値が高いほど地山状態は悪い傾向を示しており、地山比抵抗値から地山状態を評価するには地下水位との関係についても検討する必要があるものと思われる。

地山比抵抗値($\Omega \cdot m$)

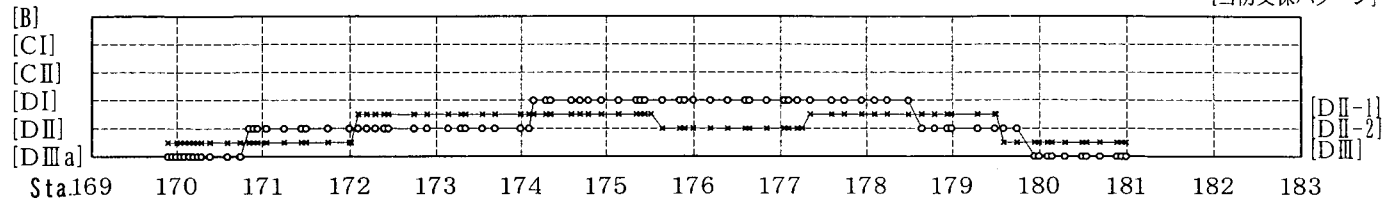


岩種

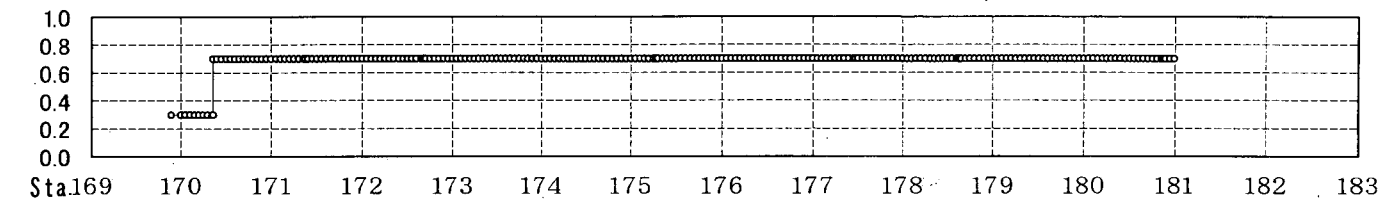


地山等級(施工時:○,当初支保パターン:×)

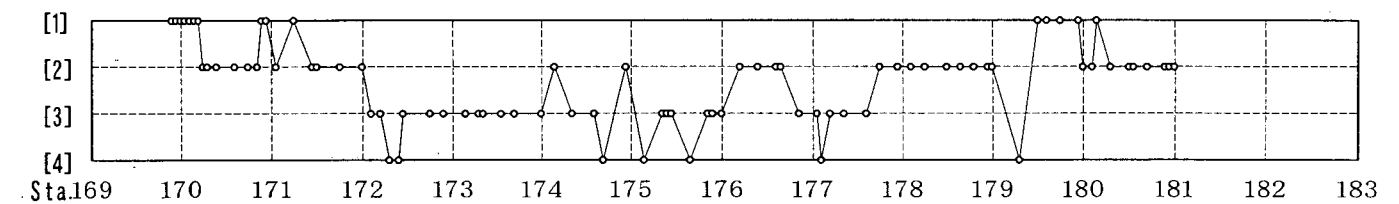
[当初支保パターン]



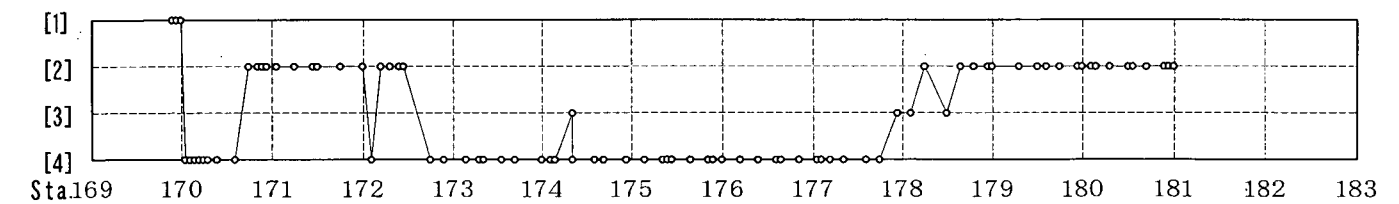
弾性波速度(km/s)



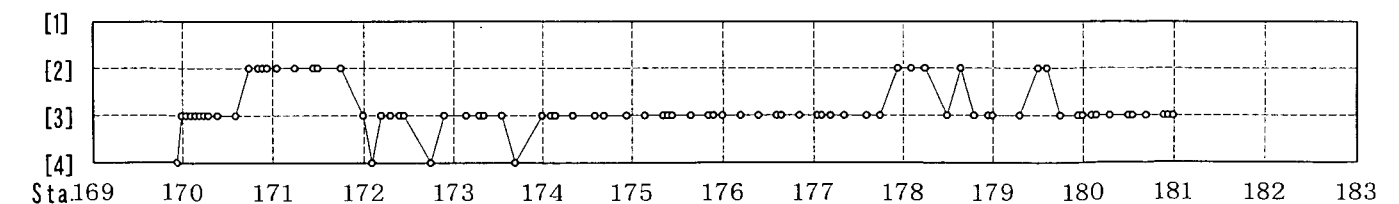
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

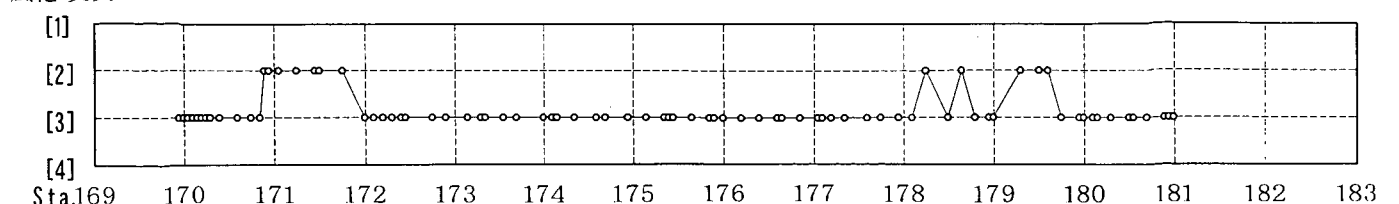


図-3.11(1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係(FNトンネル)

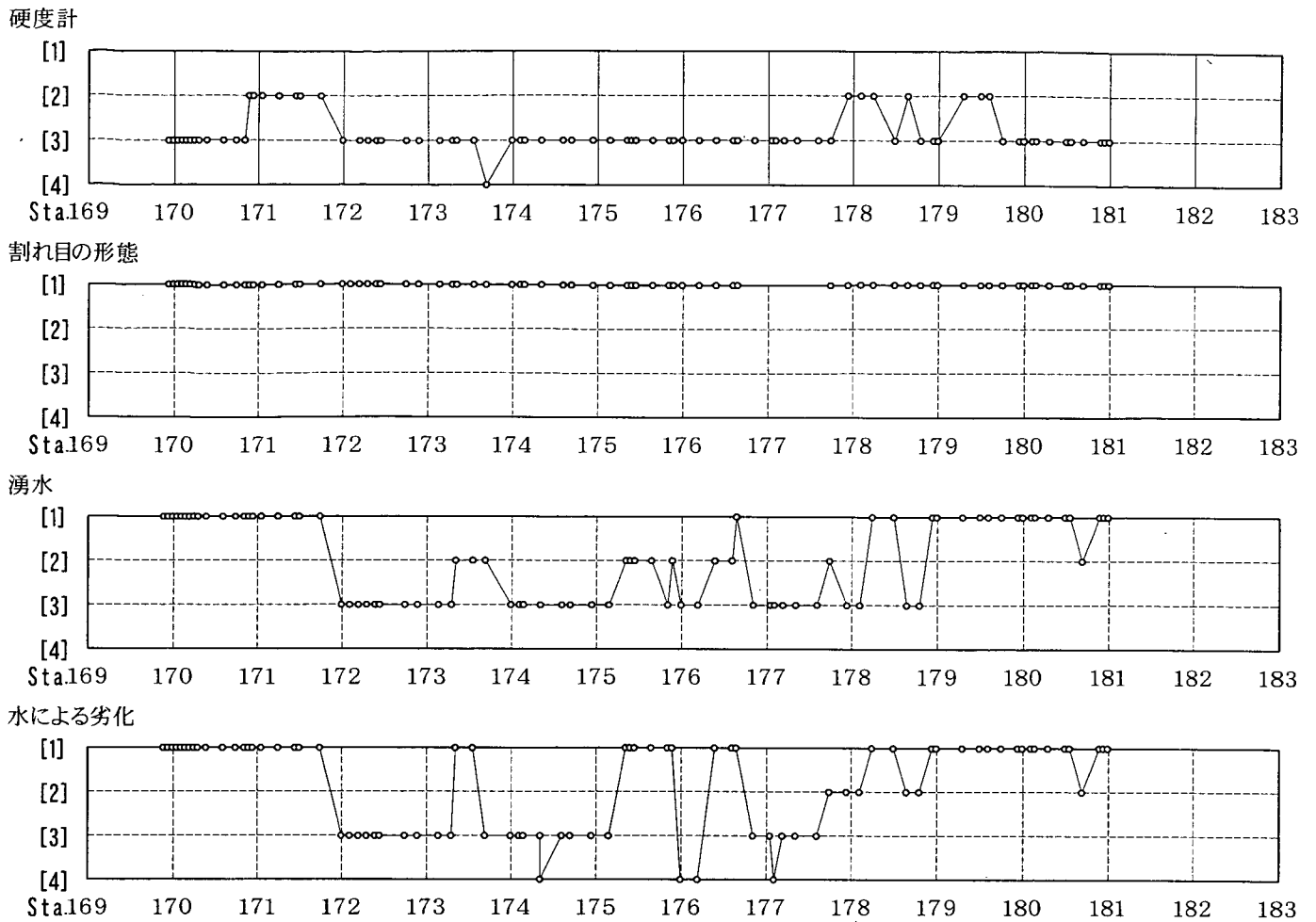


図-3. 11 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (FNトンネル)

⑦YSトンネル（図－3. 12 参照）

a) 地質概要

花崗岩を主体として部分的にヒン岩を介在している。

b) 地山比抵抗値の傾向

地山比抵抗値は数十 $\Omega \cdot m$ から2000 $\Omega \cdot m$ までの比較的広い範囲で変化している。全体的には坑口から深部に行くほど比抵抗値は大きくなる傾向にあるが、STA.5.80～STA.6.50付近およびSTA.9.50～STA.11.00付近においては前後の区間に比較して地山比抵抗値が低くなっている。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

地山等級は、DⅢa、DⅠ、CⅡ、CⅠが採用されて全体的には坑口から深部に行くほど良くなっており、これらの傾向は地山比抵抗値の変化の傾向とも概ね対応している。地山比抵抗値が前後の区間に比較して低くなった区間のうち、STA.5.80～STA.6.50付近においては地山等級は特に大きな変化は認められないが、STA.9.50～STA.11.00付近においてはSTA.10.50～STA.10.90の区間の地山等級が前後の区間に比較すると1等級悪くなっている。また、STA.12.50付近においては地山等級が前の区間よりも1等級悪くなっているが、この区間の地山比抵抗値に大きな変化は認められない。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

弾性波速度は、坑口部から深部に行くほど大きくなっており、全体的な変化の傾向は地山比抵抗値と概ね一致している。しかし、地山比抵抗値においてはSTA.5.80～STA.6.50付近およびSTA.9.50～STA.11.00付近の値が前後の区間よりも低くなる傾向が現れたが、これらの区間の弾性波速度は一定で変化は認められない。

e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

全体的な傾向は「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「水による劣化」の評価は地山比抵抗値の変化と比較的対応しているが、「湧水」に関しては対応はあまり良くない。坑口からSTA.4.30付近までは切羽観察表の各項目の評価は低く、坑口部に適用されるDⅢaが採用されているのに対して、地山比抵抗値はSTA.3+70付近から比較的高い値を示すようになっており、地山状態が良くなり始める前に地山比抵抗値が高くなる区間が現れている。また、STA.12.50付近においては「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「水による劣化」の評価が前の区間に比較して急激に悪くなっているが、この区間における地山比抵抗値には大きな変化は認められない。地山比抵抗値が前後の区間に比較して低くなる傾向が現れたSTA.5.80～STA.6.50付近においてはSTA.5.90～STA.6.00の区間ですべての項目の評価が、STA.9.50～STA.11.00付近においてはSTA.10.50～STA.10.90の区間で「圧縮強度」「湧水」「水による劣化」の評価が前後の区間よりも悪くなる傾向が認められた。

f) 総合評価

地山等級および地山状態と地山比抵抗値との間には比較的良好な対応が見られた。弾性波速度と地山比抵抗値との対応も比較的良好であるため、弾性波速度に加えて地山比抵抗値を活用することの利点はあまり見あたらないが、STA.10.50～STA.10.90の地山等級が1等級下がっている箇所は弾性波速度には変化が見られなかったため、地山比抵抗値が有用な情報を与えていると言える。しかし、坑口部と同じ地山状態が続いて

いるSTA.4.30付近やSTA.12.50付近に見られた地山状態が急激な悪化する区間においては地山比抵抗値からはこれらを事前に把握できる有用な情報を得ることができておらず、問題箇所を事前に把握する上では十分とは言えない。

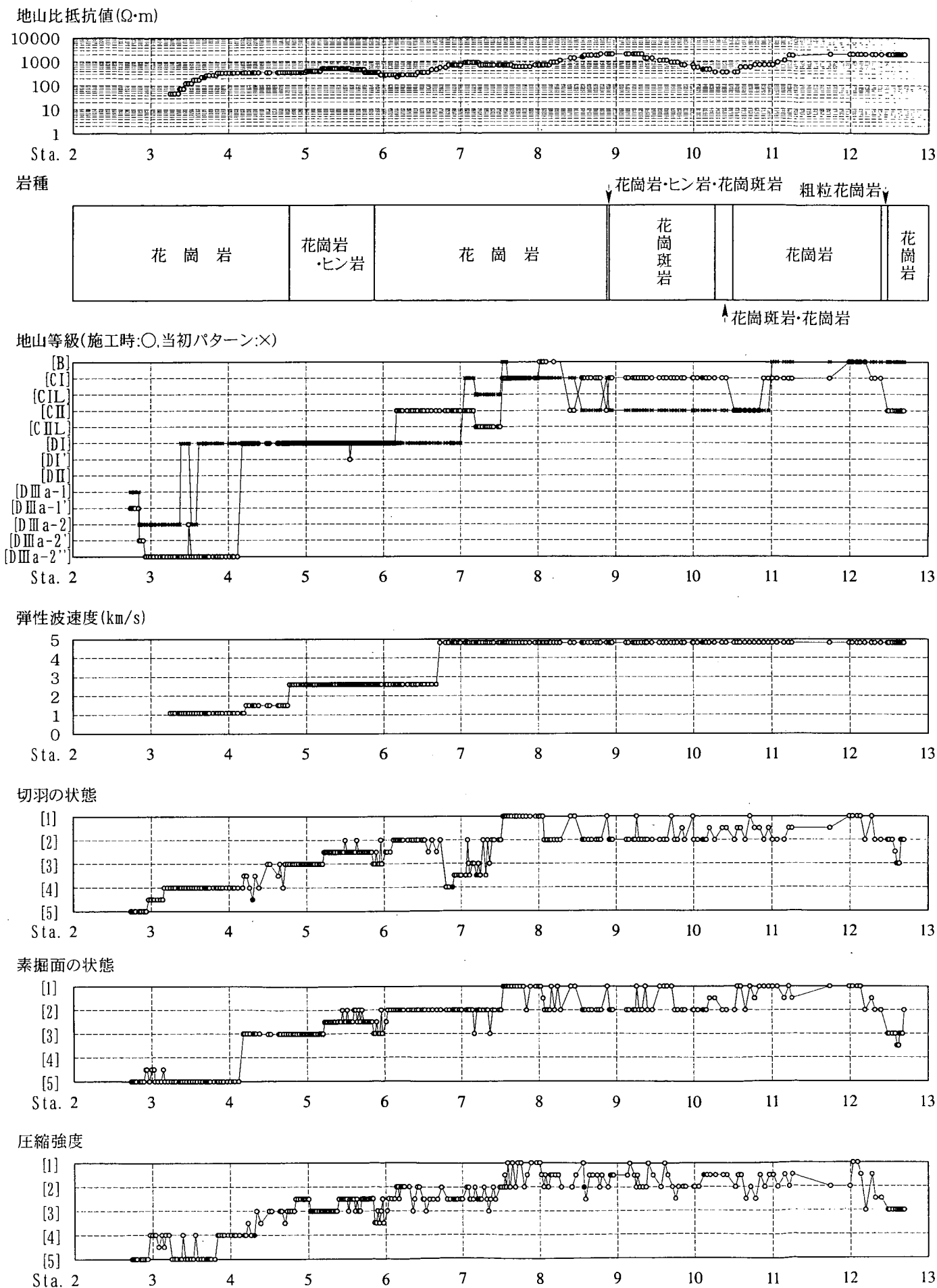
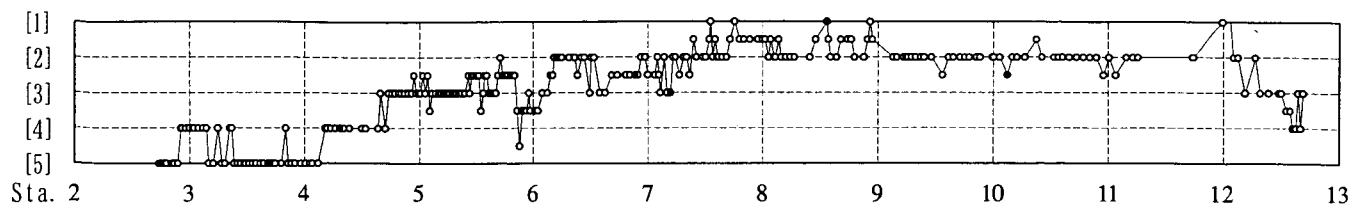
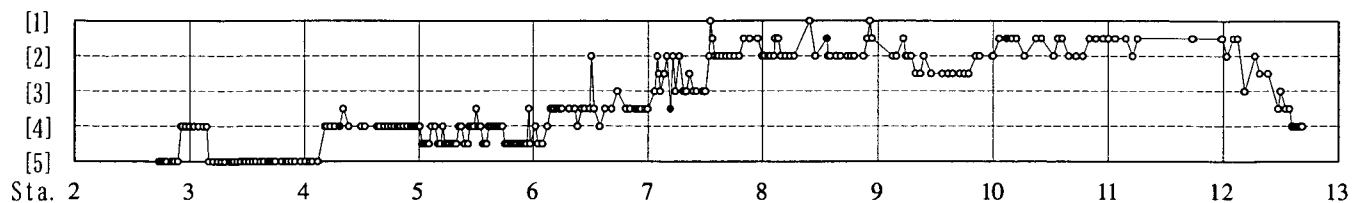


図-3. 12 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (Y S トンネル)

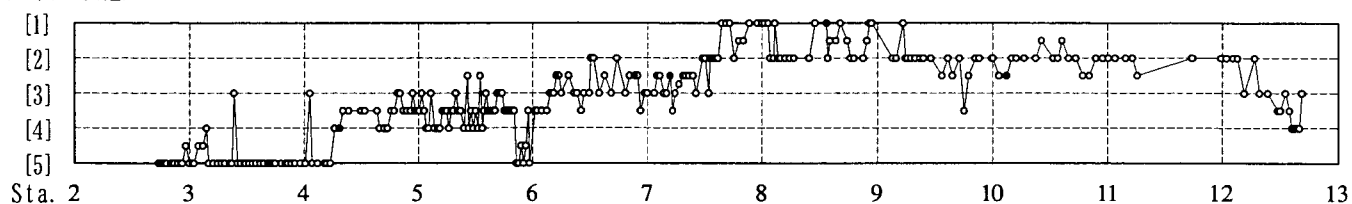
風化・変質



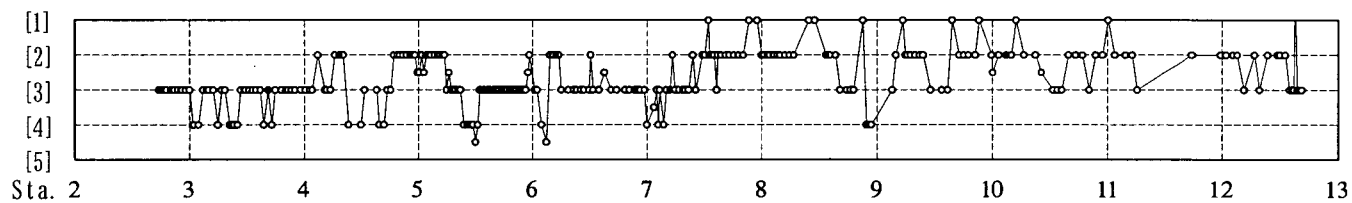
割れ目の頻度



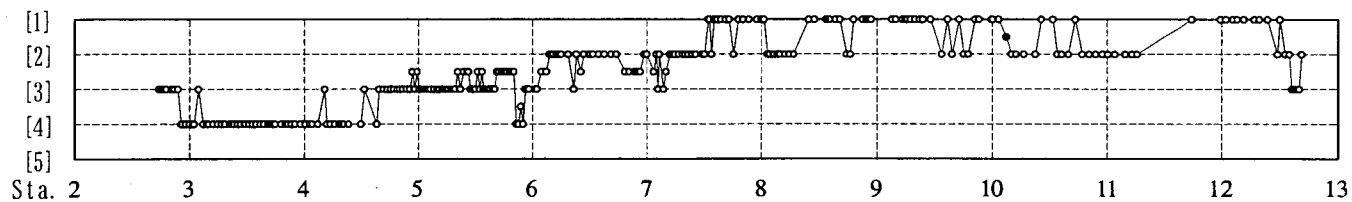
割れ目の状態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔：100m, 坑口：Sta. 2+50, 黒印：コア採取地点

図-3. 12 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (Y S トンネル)

(3) 変成岩

①KTトンネル(図-3. 13 参照)

a) 地質概要

坑口部に表土・崩積土が現れているが、この部分を除けば探査区間全線にわたって蛇紋岩が現れている。

b) 地山比抵抗値の傾向

STA.190からSAT.196付近までは数十 $\Omega \cdot m$ の範囲の中でわずかながらも減少し、STA.196付近で最小値を示した後増加し始め、STA.213付近で600 $\Omega \cdot m$ 程度のピークを示した後再び減少する。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

CⅡ、DⅠ、DⅡ、DⅢaの4つの等級が採用されており、地山等級の相対的な変化と地山比抵抗値の変化は比較的对応していると言える。ただし、STA.198~200の区間では周囲よりも1ランク評価が良いDⅠが採用されているが、この区間の地山比抵抗値には特に大きな変化は認められない。また、STA.213付近の地山比抵抗値は全区間の中で最高値を示しているが、地山等級の評価が最も良い区間は当該区間よりも坑奥のSTA.206~209付近であり、STA.213を境にして坑口部で用いられるDⅢaが採用されている。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

坑口部(STA.213~216)付近の弾性波速度が低下する箇所を除けば弾性波速度は3.5~4km/secのほぼ一定値を示しており、地山比抵抗値との間には明確な対応は認められない。

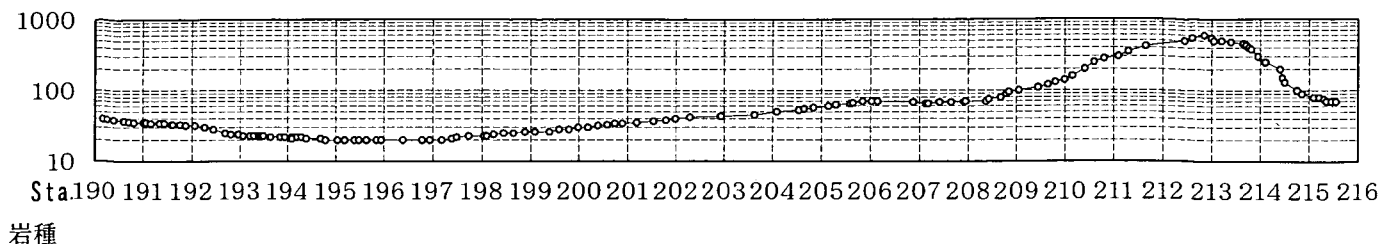
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

STA.193付近においては「切羽の状態」「素掘面の状態」「風化・変質」「割れ目の状態」「割れ目の形態」「湧水」の評価が全区間を通じて最も悪くなっているのに対して、STA.193付近における地山比抵抗値は周囲に比較すると低くなっており、相対的な変化に関しては比較的对応が認められる。しかし、STA.207~210付近においては「切羽の状態」「素掘面の状態」「圧縮強度」「割れ目の状態」の評価が全区間を通じて最も良くなるが、当該箇所は地山比抵抗値が最高値を示すSTA.213付近よりは坑奥に位置しており、若干のずれが見られる。

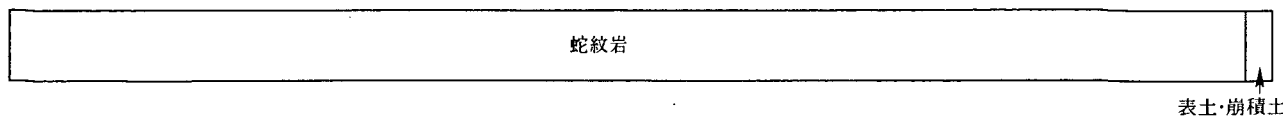
f) 総合評価

弾性波速度はほとんど変化が見られないのに対して地山比抵抗値は広い範囲の変化を示しており、地山比抵抗値の相対的な変化と地山等級および切羽観察表の幾つかの項目の相対的な変化は概ね一致していることから、地山比抵抗値に着目することにより弾性波速度では捉えられなかった地質の相対的な変化を把握することはある程度可能になるものと考えられる。ただし、地山状態が最も良い区間と比抵抗値が最高値を示す区間との間には若干のずれが見られることや、地山状態が最も悪い区間の比抵抗値は周辺に比べて極端に下がるわけではないため、地山比抵抗値だけで地質状態の絶対的な評価を下すことは難しい。

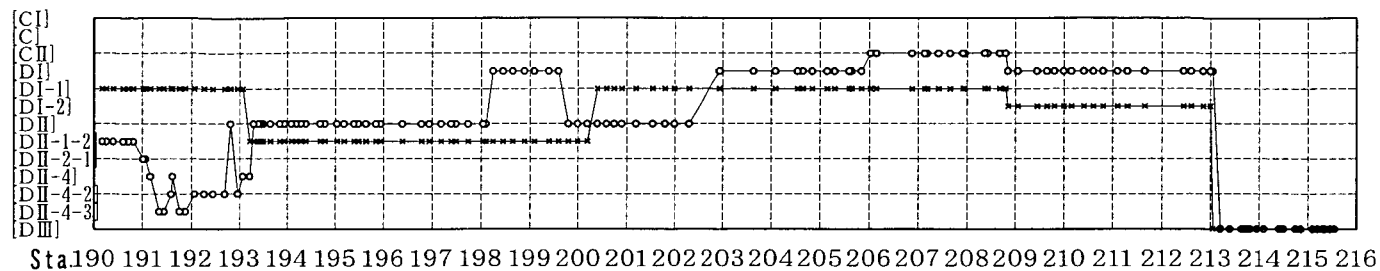
地山比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)



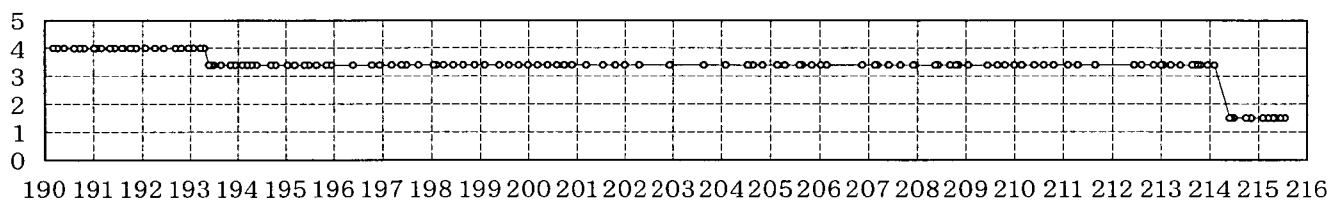
岩種



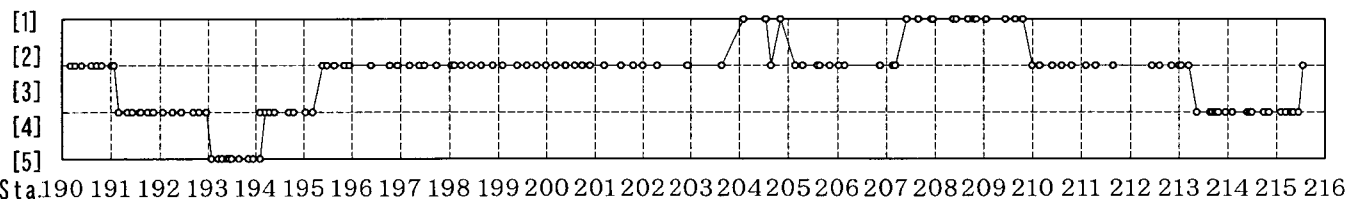
地山等級(施工時:○,当初パターン:×) ※施工時[DⅡ-1-2]:当初パターン[DⅡ-1],施工時[DⅢ]:当初パターン[DⅢa-2]



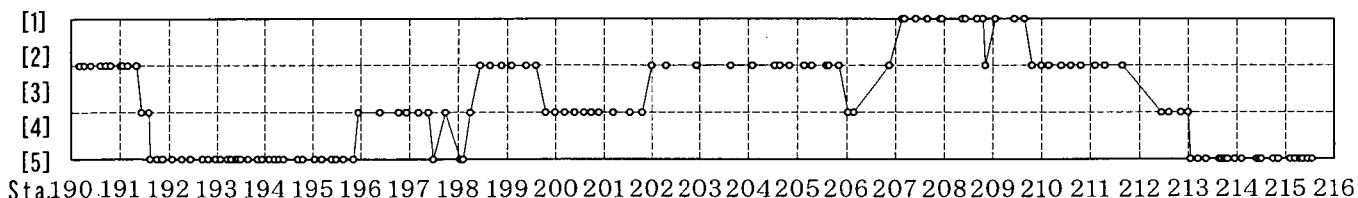
弾性波速度(km/s)



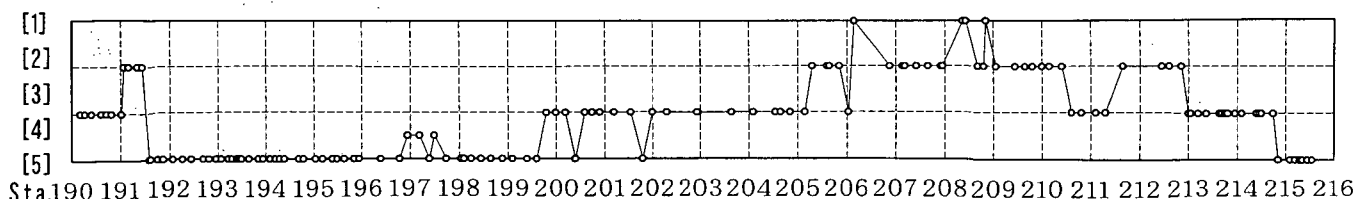
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

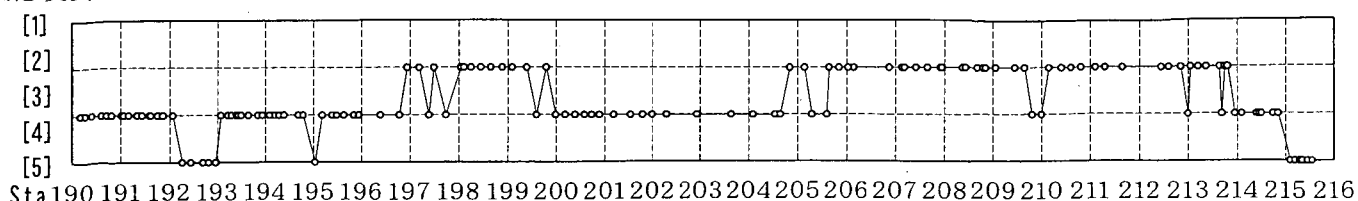
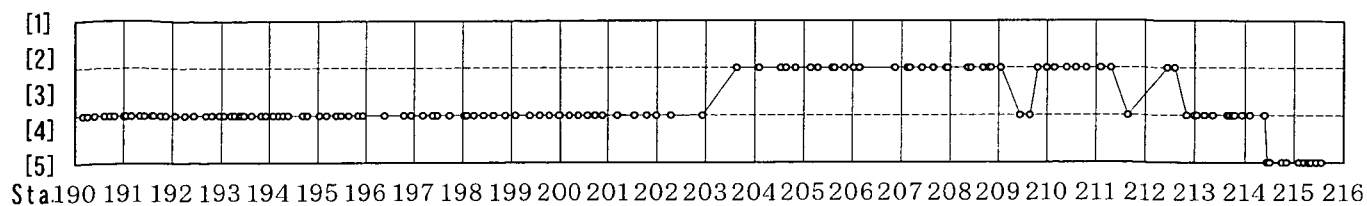
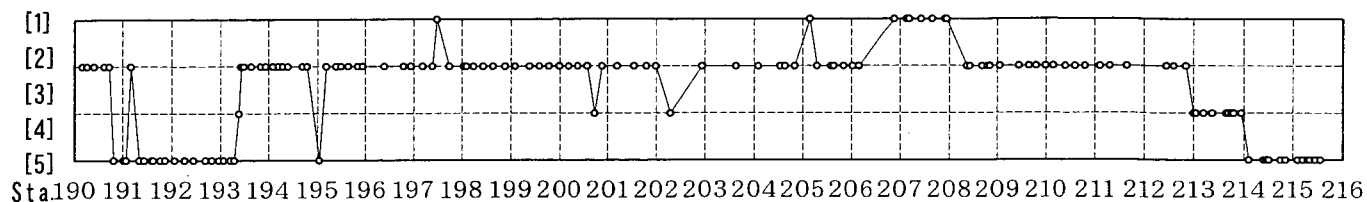


図-3. 13 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (KTトンネル)

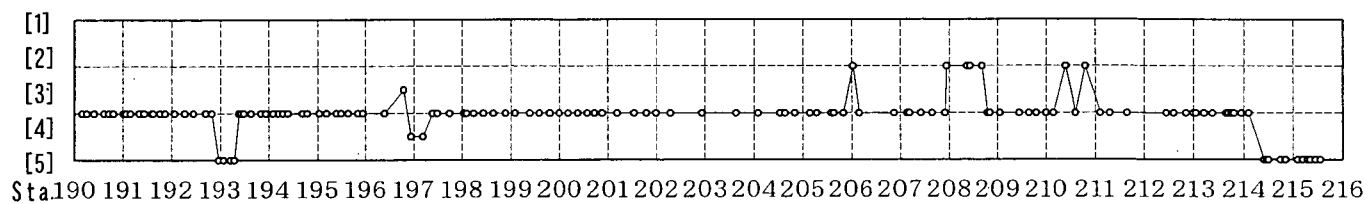
割れ目の頻度



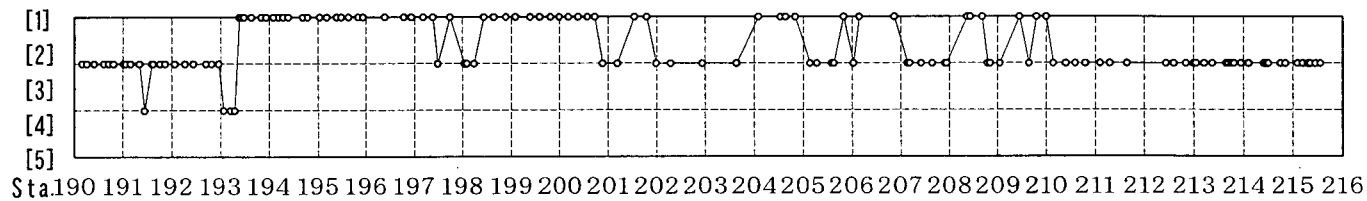
割れ目の状態



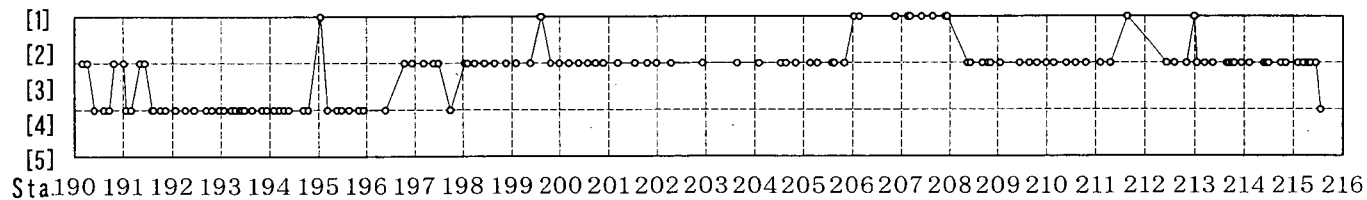
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔 : 20m, 坑口 : Sta. 215+17

図-3. 13 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (KTトンネル)

②0Cトンネル（図－3. 14 参照）

a) 地質概要

緑色片岩、黒色片岩を主体とし、一部の区間で流紋岩が現れる。

b) 地山比抵抗値の傾向

100～3,000 $\Omega \cdot m$ の広い範囲で変化しており、STA.115.4およびSTA.119付近にピークが認められる。また、STA.116.5およびSTA.119.7付近に全区間を通じて地山比抵抗値が最も低い区間が認められる。

c) 地山等級と地山比抵抗値との関係

地山等級は坑口部のDⅢaを除けばCⅡで一定となっており、地山比抵抗値との間には明確な対応は認められない。

d) 弾性波速度と地山比抵抗値との関係

弾性波速度はSTA.114.8からSTA.115.4付近までの領域においては増加する傾向を示しており、これらの領域における地山比抵抗値の相対的な変化は弾性波速度と比較的対応しているものと言える。しかし、地山比抵抗値はSTA.115.4以降急激に減少するのに対して弾性波速度の変化は非常に小さく、また、弾性波速度にはSTA.117.7およびSTA.118.7付近に低速度の箇所が認められるが、地山比抵抗値ではとくに変化は認められないなど、整合が見られない箇所も多く見られる。

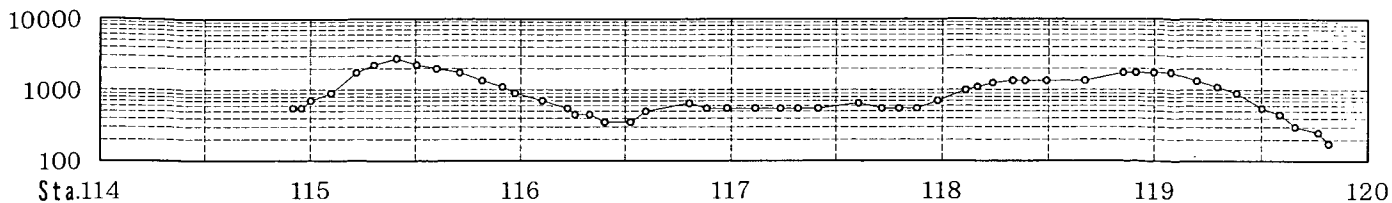
e) 切羽観察表と地山比抵抗値との関係

「湧水」に関してはSTA.115.5付近に全区間を通じて最も評価が良くなる区間が、STA.116.4付近に全区間を通じて最も評価が悪くなる区間が認められ、これらの区間はそれぞれ地山比抵抗値が最大値を示す区間と最小値を示す区間に概ね対応している。また、「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」に関してはSTA.115.5付近に周囲よりも評価が良い区間が認められるが、これらの区間は比抵抗値が最高値を示す区間と概ね対応している。さらに、STA.118.8付近においては「切羽の状態」「風化・変質」の評価が全区間を通じて最も良くなるが、この区間は地山比抵抗値が第2のピーク値を示すSTA.119に比較的近い。

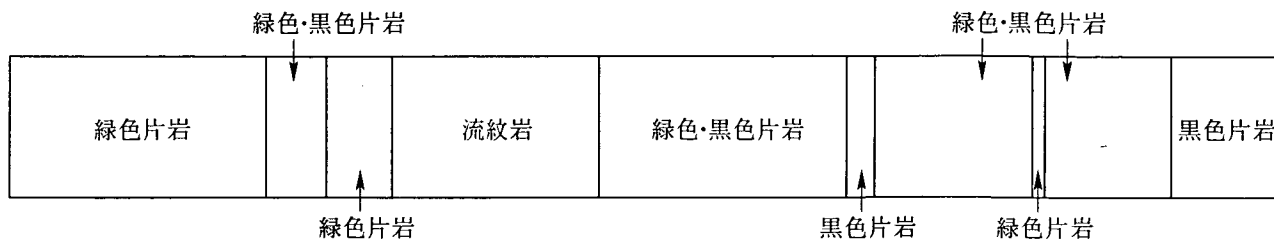
f) 総合評価

地山等級と地山状態との関係が明確ではないが、切羽観察表における「湧水」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」の状態に関しては地山比抵抗値の相対的な変化に着目すれば良否の判断を行うことがある程度可能になるものと思われる。特に、「湧水」の評価が低かった区間においては弾性波速度に大きな変化が現れていなかったことから、地山比抵抗値は「湧水」の評価に関して弾性波速度を補う情報を与えていることとなる。

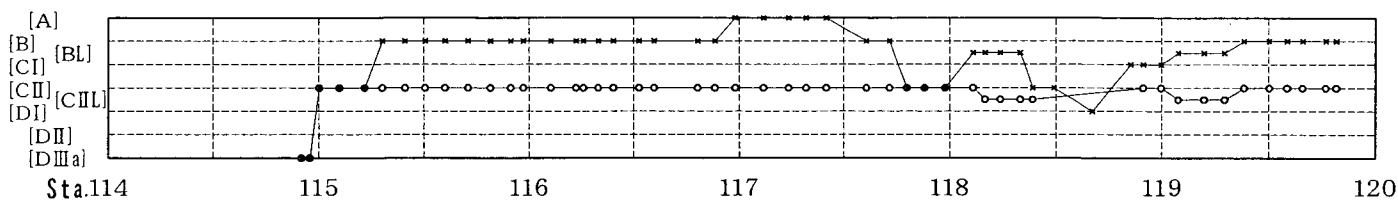
地山比抵抗値($Q \cdot m$)



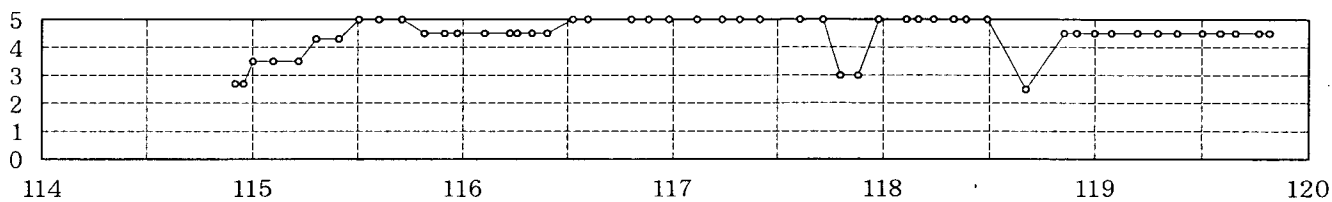
岩種



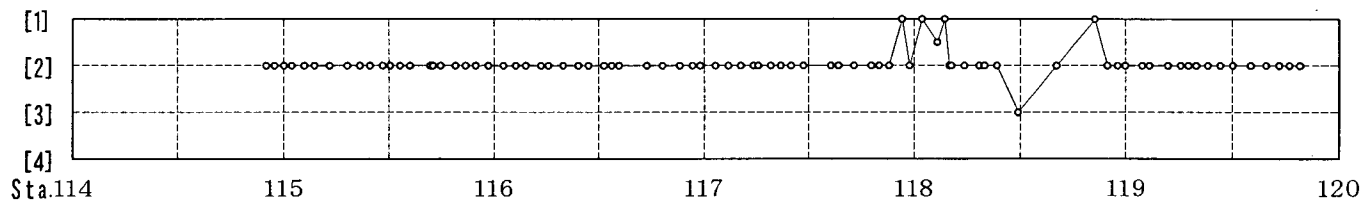
地山等級(施工時:○,当初パターン:×)



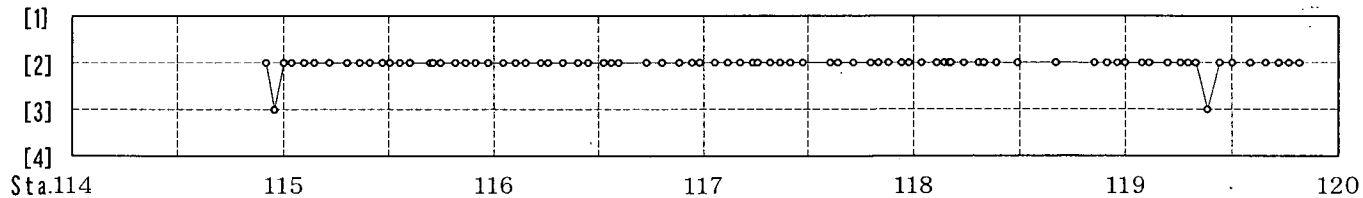
弾性波速度(km/s)



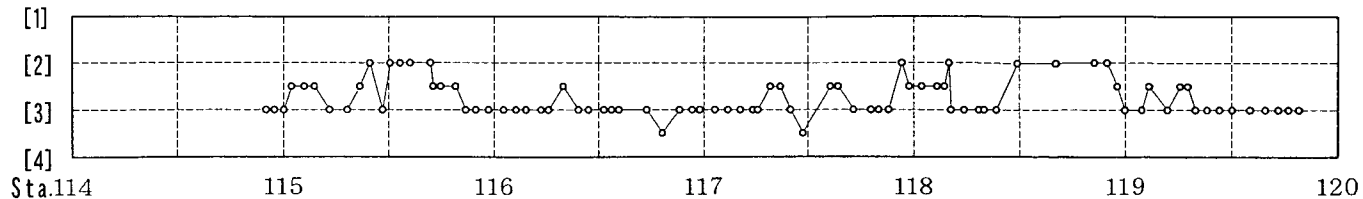
切羽の状態



素掘面の状態



圧縮強度



風化・変質

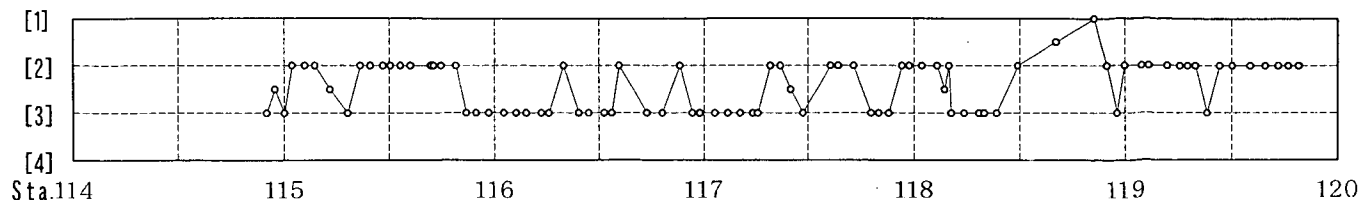
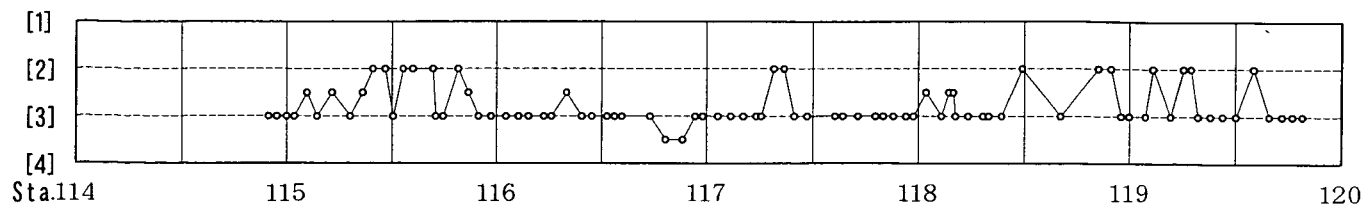
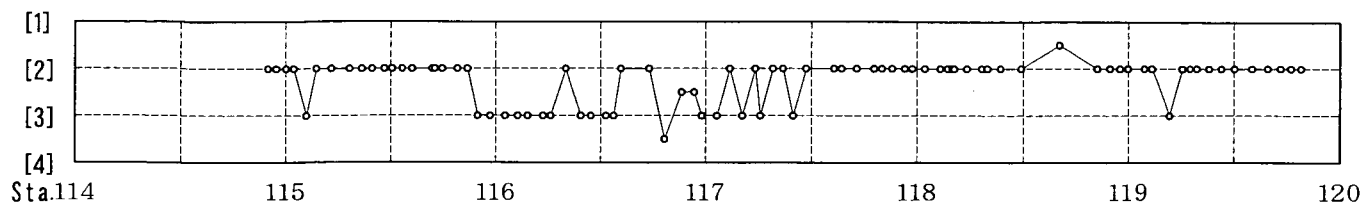


図-3. 14 (1) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (OCトンネル)

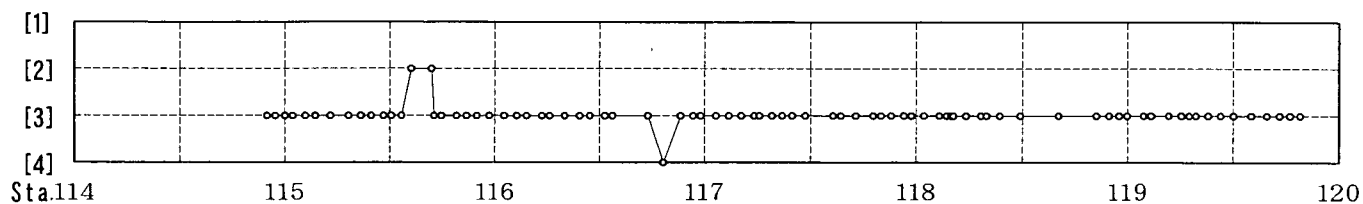
割れ目の頻度



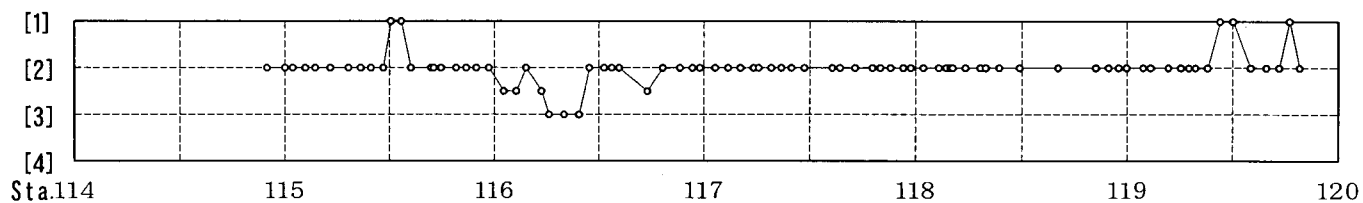
割れ目の状態



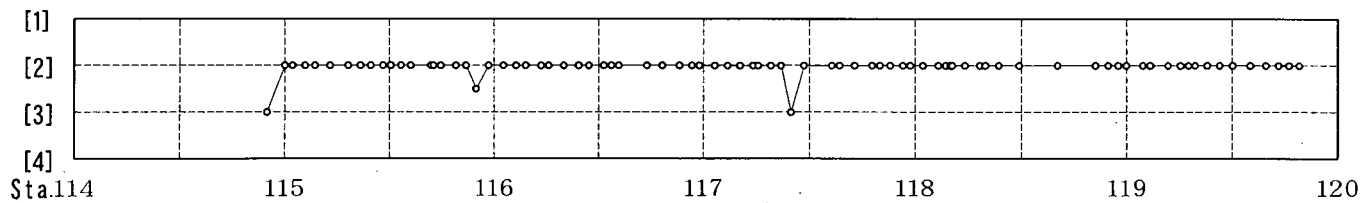
割れ目の形態



湧水



水による劣化



※Sta. 間隔:100m, 坑口:Sta. 114+78.0

図-3. 14 (2) トンネル施工時の地山状態と地山比抵抗値との関係 (OCトンネル)

3. 2. 3 総合評価

表-3. 3に各トンネルから得られた地山比抵抗値と弾性波速度、地山等級および切羽観察表の各項目との関係に関する定性的な評価を示す。

堆積岩に関しては、調査対象となったトンネルの多くは複数の岩種で構成されているために各岩種と地山比抵抗値との関係を明確に分離できないところもあるが、粘板岩、頁岩、砂岩は全体的に地山比抵抗値が高くなると地山状態は良くなる傾向が認められ、比較的对応が良いと言える。チャートは地山比抵抗値が高くなると地山状態は悪くなるといった一般に考えられていることとは逆の傾向を示す場合が認められたため、地山比抵抗値の解釈に際しては注意を要する。泥岩と砂岩の互層は地山比抵抗値との対応は非常に悪いが、地山比抵抗値そのものの大きさが小さいことが地山比抵抗値から地山状態を推定することを難しくしていると言える。熔結凝灰岩は全体的な対応は良いとは言えないが、地山比抵抗値の相対的な変化に着目すれば地山状態の相対的な変化をある程度捉えることができる場合があると言える。火成岩に関しては、石英閃緑岩、花崗岩は全体的に地山比抵抗値が高くなると地山状態は良くなる傾向が認められ、対応は良いと言えるが、強風化花崗岩においては一部逆の傾向が認められた。また、流紋岩については地山比抵抗値が高くなると地山状態が良くなる傾向が認められたが、凝灰岩との互層として現れた場合には逆の傾向が認められた。変成岩に関しては、蛇紋岩、緑色片岩・黒色片岩ともに全体的には地山比抵抗値と地山状態との対応は良いとは言えないが、地山比抵抗値の相対的な変化に着目すれば地山状態の相対的な変化を捉えることはある程度可能になるものと考えられる。

表-3. 4は各トンネルの事前調査から得られた地山比抵抗値が示した範囲を岩種毎に区分し、第2章で得られたコア供試体の比抵抗値がとり得る範囲と併せて示したものである。一般に事前調査として実施された地山比抵抗値を用いてトンネルの地山状態を評価する場合には、コア供試体を用いた試験から得られた物理的・力学的・鉱物化学的特性に関する知見が用いられているようであるが、このような評価を行う場合には地山比抵抗値とコア供試体の比抵抗値が比較的近い値を示すことが前提であり、両者に間に大きな差が認められる場合には少なくとも地山比抵抗値の絶対値そのものを評価すること自体意味が無いこととなる。大部分のトンネルでは地山比抵抗値とコア比抵抗値のとりうる範囲は概ね一致しているが、チャート、流紋岩を主とするトンネルにおいては地山比抵抗値とコア比抵抗値のとりうる範囲に大きな差が認められる。

表-3. 5は各トンネルの事前調査から得られた地山比抵抗値と施工時に採用された地山等級との関係について岩種毎に示したものである。データ数が十分でないために、地山等級の種類をすべて網羅していない岩種や地山比抵抗値の範囲が限定されている岩種も見られるが、堆積岩に関しては頁岩、砂岩、泥岩、粘板岩、熔結凝灰岩何れも地山等級の違いによる地山比抵抗値の差は明確には認められない結果となっている。また、チャートは地山比抵抗値が大きくなるとわずかであるが、地山等級は悪くなる傾向が認められる。火成岩に関しては花崗岩、石英閃緑岩は地山等級は地山比抵抗値によって比較的確に区別される結果が得られているが、流紋岩は地山等級の違いによる地山比抵抗値の差は明確に認められない。変成岩に関しては、緑色・黒色片岩は採用された地山等級の種類が限られているために評価はできないが、蛇紋岩はわずかの差であるが地山等級によって地山比抵抗値がとりうる値に差が認められる。

表－3. 3 地山比抵抗値と弾性波速度、地山等級、切羽観察表との関係

	トンネル名 (主な岩質)	弾性 波 速度	地山 等級	切羽観察表								
				切羽 状態	素掘面 状態	圧縮 強度	風化 変質	割目 頻度	割目 状態	割目 形態	湧水	水 劣化
堆積岩	HRトンネル (粘板岩、砂岩、 凝灰岩、チャート)	×	△	△	△	△	△	△	△	×	△	△
	OBトンネル (砂岩、頁岩、 石灰岩、チャート)	△	△	○	○	△	△	△	×	×	△	×
	WCトンネル (チャート、頁岩、 粘板岩)	▲	●	▲	▲	▲	×	×	▲	×	△	▲
	SMトンネル (泥岩と砂岩の互層)	△	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	SIトンネル (熔結凝灰岩)	△	○	△	×	△	×	×	×	×	△	×
火成岩	YDトンネル (流紋岩、凝灰岩)	×	△	▲	▲	▲	▲	×	▲	▲	×	×
	SSトンネル (流紋岩)	×	×	○	○	○	○	○	×	△	△	△
	MZトンネル (石英閃緑岩)	△	△	－	－	－	－	－	－	－	－	－
	SKトンネル (石英閃緑岩)	△	○	○	○	△	△	△	×	×	△	○
	MCトンネル (花崗岩・安山岩 真砂土、ヒン岩)	▲	×	×	△	△	△	△	△	△	△	×
	FNトンネル (強風化花崗岩)	×	△	▲	▲	▲	▲	×	×	×	▲	▲
	YSトンネル (花崗岩)	△	○	○	○	○	○	○	○	－	△	○
変成岩	KTトンネル (蛇紋岩)	×	△	△	△	×	△	×	△	△	△	×
	OCトンネル (緑色片岩、黒色片岩)	△	×	×	×	△	△	△	×	×	○	×

○：地山比抵抗値が大きくなると評価が良くなる対応が概ね認められた

△：地山比抵抗値が大きくなると評価が良くなる対応が一部の区間で認められた

●：地山比抵抗値が大きくなると評価が悪くなる対応が概ね認められた

▲：地山比抵抗値が大きくなると評価が悪くなる対応が一部の区間で認められた

×：対応認められず

表-3. 4 地山比抵抗値およびコア比抵抗値がとりうる範囲

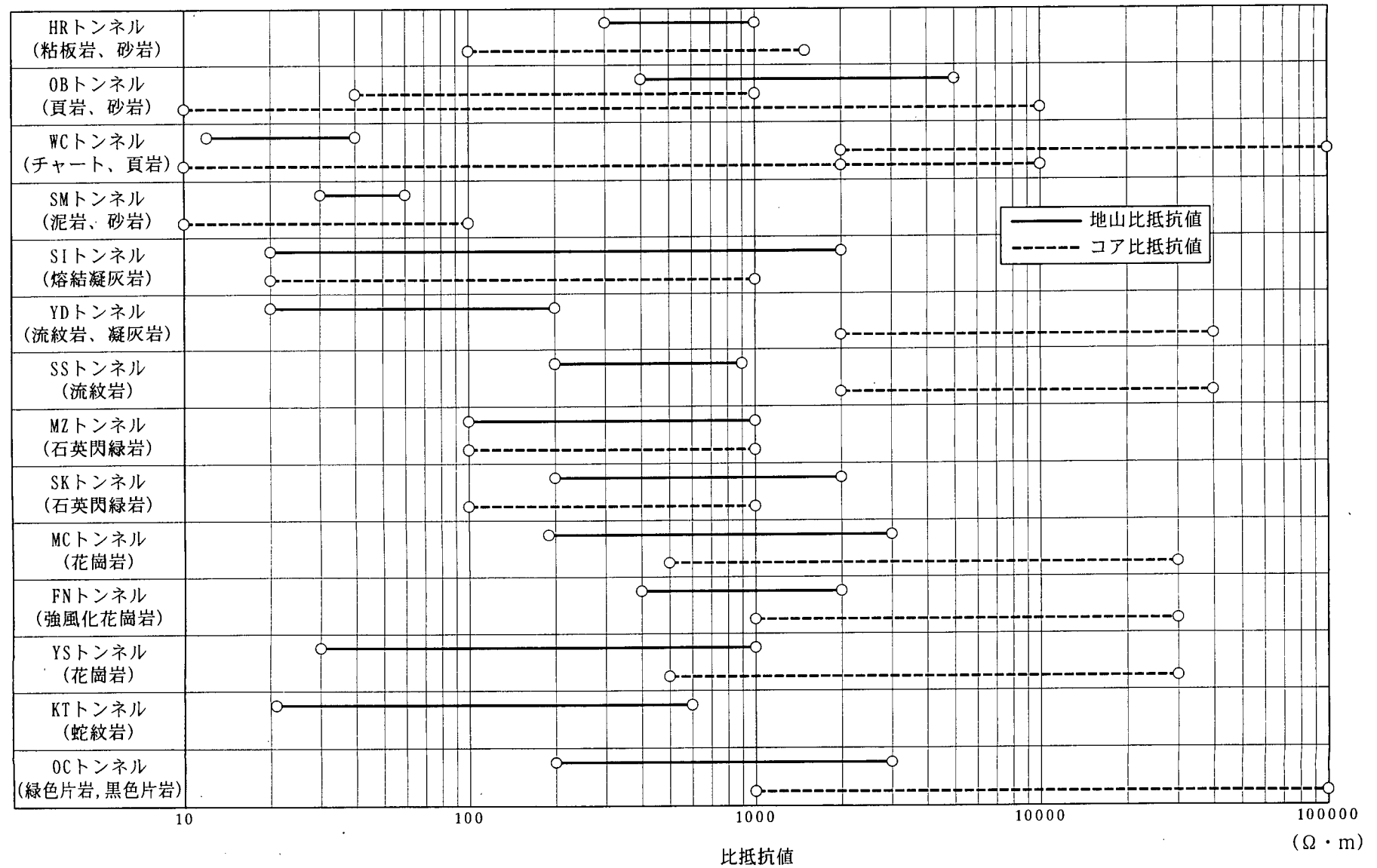
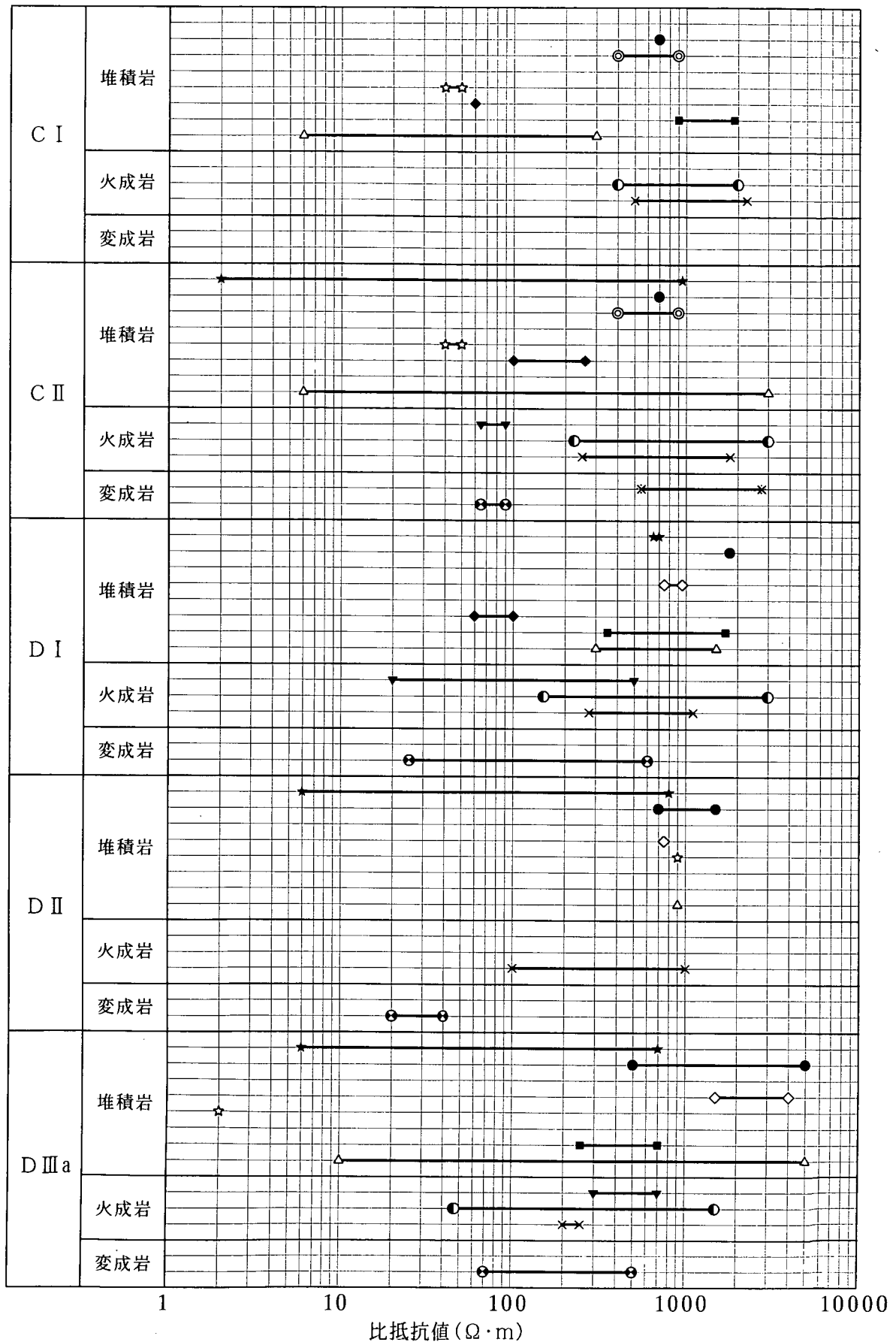


表-3.5 地山等級と比抵抗値の関係



- | | | | | |
|---------|-----------|----------|---------|---------|
| ★ 頁岩 | ● 砂岩 | ◎ 砂岩・粘板岩 | ◇ 砂岩・頁岩 | ☆ 泥岩・砂岩 |
| ◆ 凝灰岩 | ■ 熔結凝灰岩 | △ チャート | ▼ 流紋岩 | ● 花崗岩 |
| × 石英閃緑岩 | ※ 緑色・黒色片岩 | ⊙ 蛇紋岩 | | |

3. 3 現場採取コアを用いた比抵抗値の評価

3. 3. 1 検討方法および対象トンネル

前節では、トンネル掘削前に実施された電気探査から得られた地山比抵抗値と切羽における地山状態との関係について考察を加えることにより地山比抵抗値の地山評価への適用性に関して検討を行ったが、地山比抵抗値と地山状態との関係は岩種によって異なり、幾つかのトンネルにおいては地山比抵抗値と施工時における地山状態との対応は必ずしも良くないことが明らかとなった。この原因として、コア比抵抗値が地山比抵抗値と整合していないことやコア比抵抗値が必ずしも地山状態を適切に反映していないことが考えられる。すなわち、地山比抵抗値から地山状態を評価する場合に基本となるのは主としてコアを用いた各種試験から得られたコア比抵抗値とコアの物理的特性との関係に関する知見であるが、地山比抵抗値とコア比抵抗値の値に整合性が見られないようであれば、コア試験から得られたコア比抵抗値とコアの物理的特性との関係を用いて地山比抵抗値の評価を行うこと自体意味が無いことになる。また、地山比抵抗値とコア比抵抗値との間に整合性が認められた場合でも、コア比抵抗値と地山状態との間に明確な対応関係が見られない場合には、コアの物理的特性と地山状態とは切り離して考えるべきものとなり、地山比抵抗値から地山状態の評価を行うことは難しくなる。

このため、本節では前節で対象としたトンネルの中から4本のトンネルを選定し、トンネル切羽で得られたコアを用いてコア比抵抗値および物理的特性を測定し、これらと切羽観察表に記された切羽における地山状態との関係について考察を加えるとともに、事前調査で得られた地山比抵抗値とコア比抵抗値との関係を調べた。具体的には、事前調査の比抵抗分布図を参考に地山比抵抗値が異なる複数断面の切羽を選定し、掘削中のトンネルにおいて自然状態における含水比が変化しないように岩塊を採取し、自然状態下におけるコアサンプルとして整形した試料を用いて各種の試験を行った。試験項目は、比抵抗値の他、有効間隙率、含水比、飽和度、体積含水率とした。

対象としたトンネルは、石英閃緑岩が主な地質となるSKトンネル、チャートおよび頁岩が主な地質となるWCトンネル、泥岩と砂岩の互層が主な地質となるSMトンネル、花崗岩が主な地質となるYSトンネルであり、このうちSKトンネル、YSトンネルについては地山比抵抗値と切羽での地山状態との間に比較的良好な対応関係が認められたのに対して、SMトンネルについては明確な対応が認められず、また、WCトンネルについては通常とは逆の対応が認められた。図-3. 15～3. 18に各対象トンネルの事前の電気探査から得られた地山比抵抗値の分布図および検討の対象断面を示した。

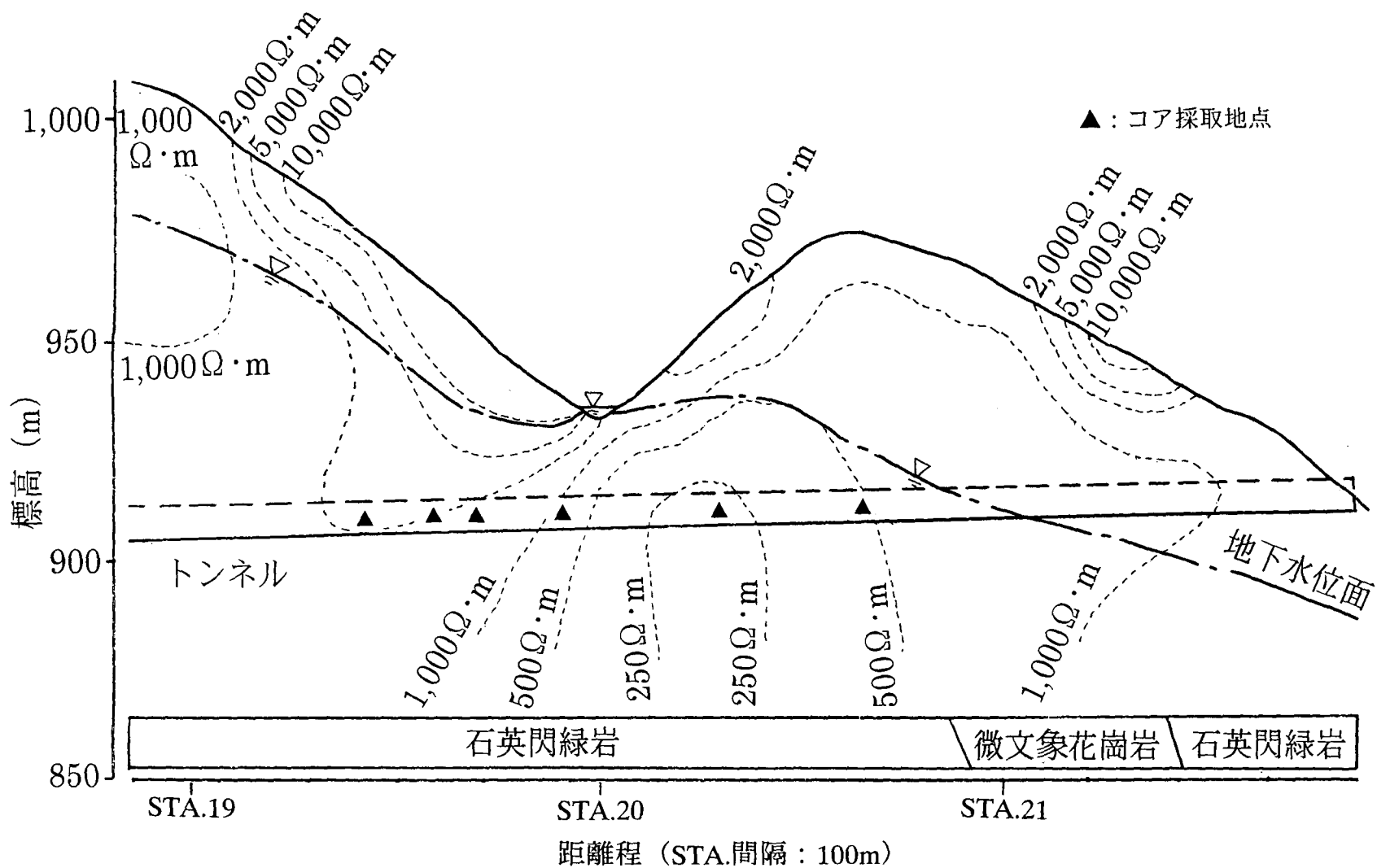


図-3. 15 SKトンネルの地山比抵抗値分布

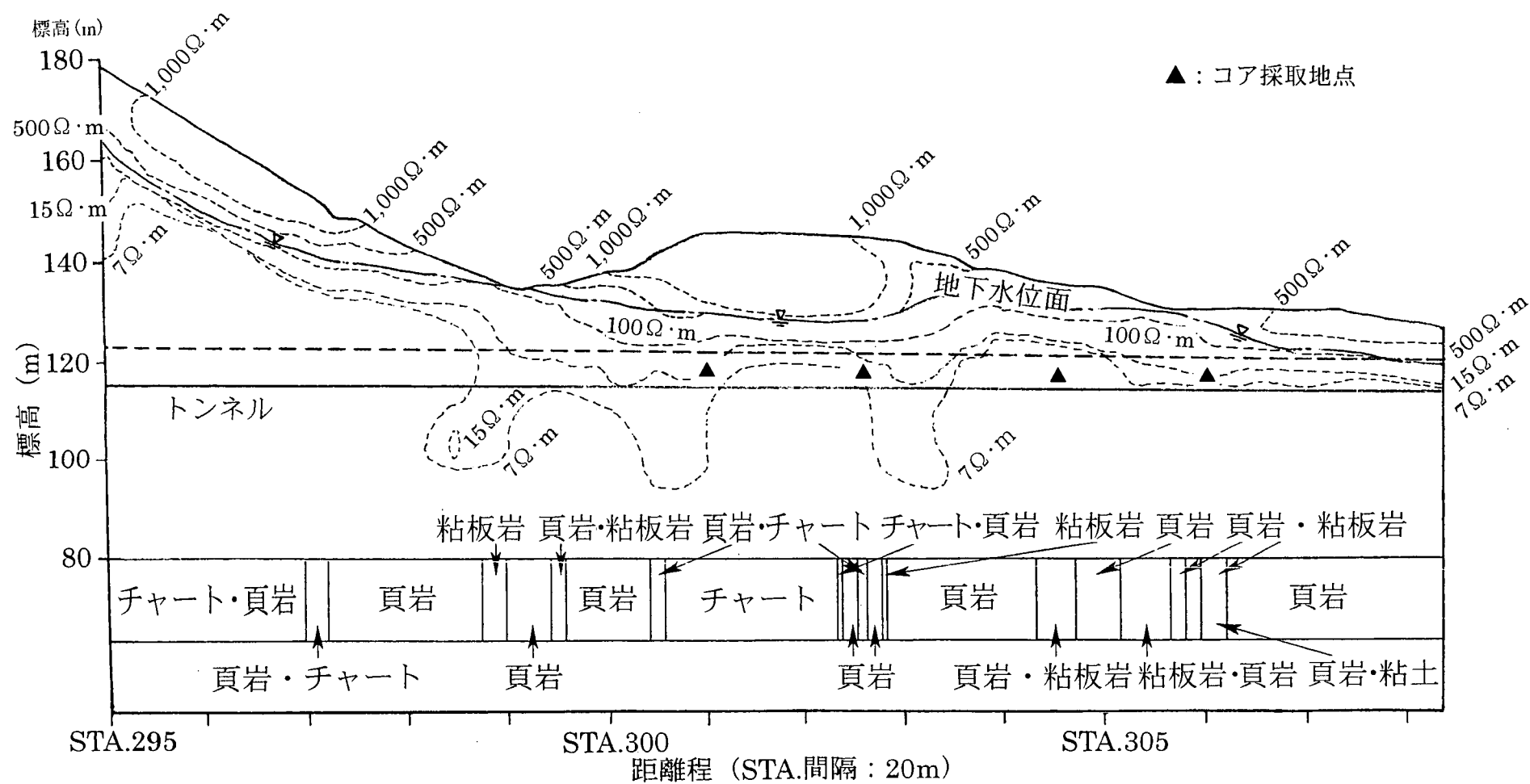


図-3.16 WCトンネルの地山比抵抗値分布

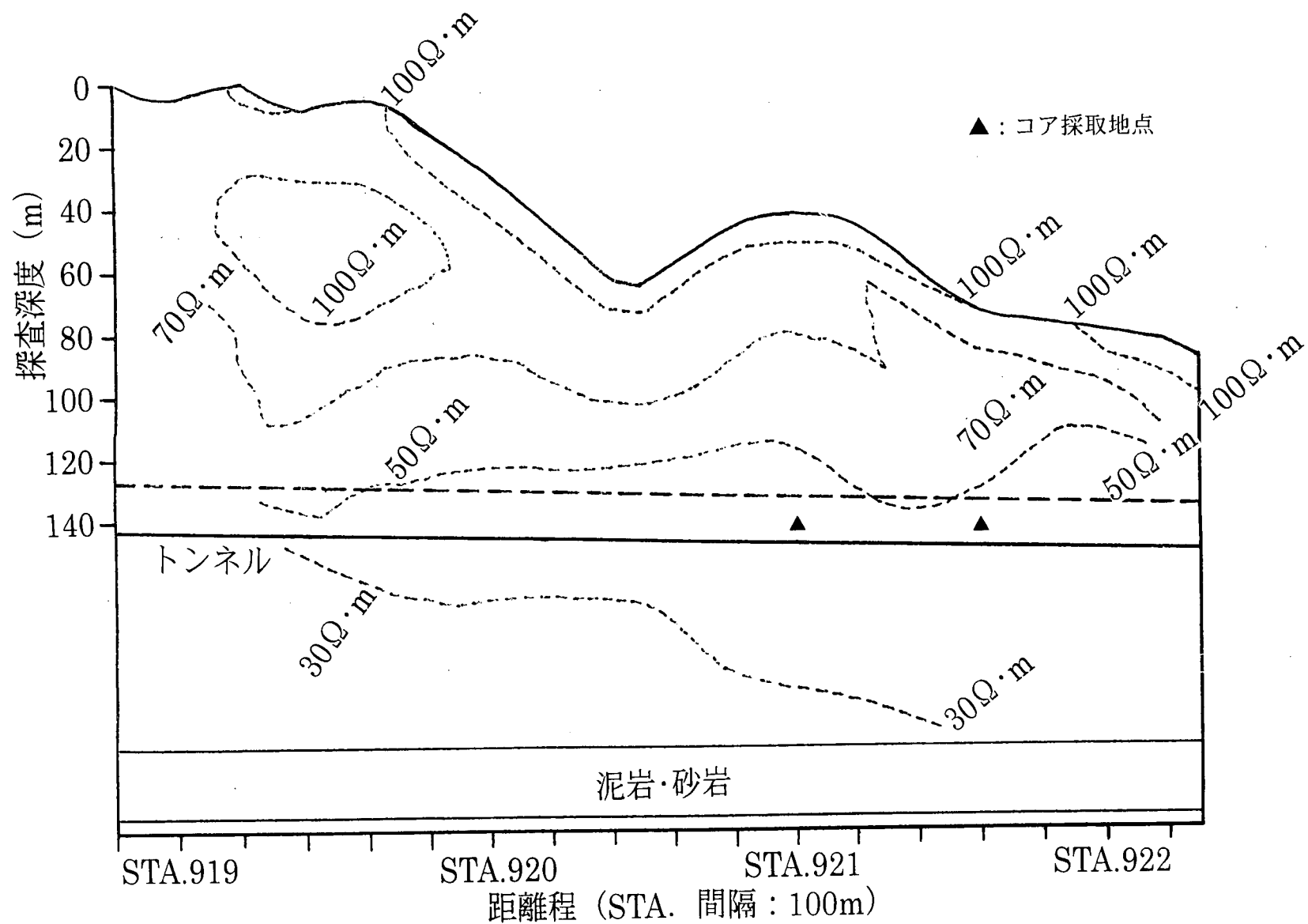


図-3. 17 SMトンネルの地山比抵抗値分布

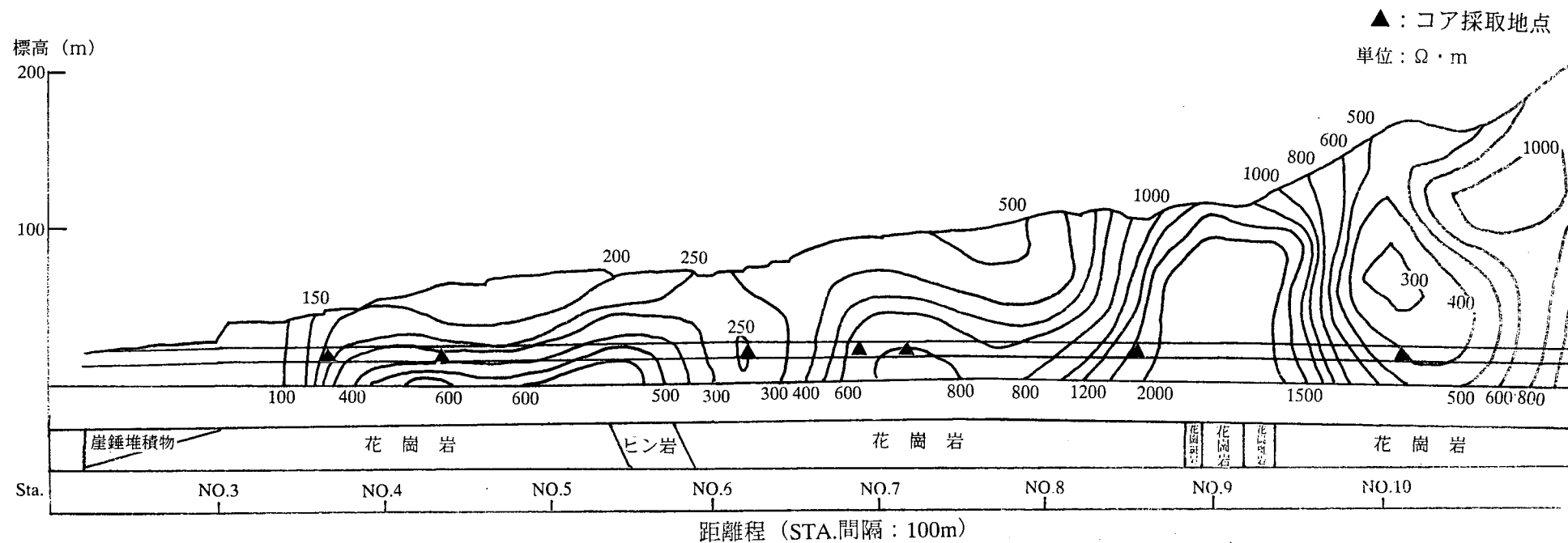


図-3. 18 YSトンネルの地山比抵抗値分布

3. 3. 2 コア比抵抗値と地山状態との関係

(1) コア比抵抗値と物理的特性との関係

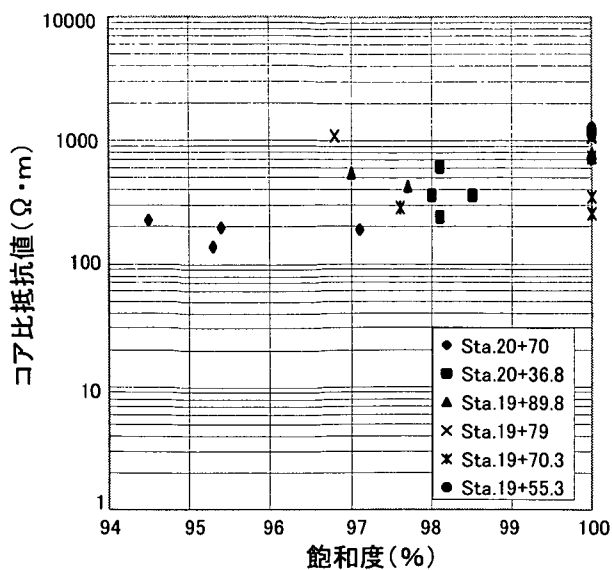
図-3. 19はSKトンネルの6断面の切羽から得られたコア供試体の飽和度、有効間隙率、含水比、体積含水率とコア比抵抗値の関係を示したものである。コア比抵抗値と飽和度については飽和度によってコア比抵抗値の値は異なっているが、本現場における飽和度は、約94%以上とほぼ飽和に近い状態となっており、第2章で述べたように水分飽和度がある程度高い場合は、水分飽和度の影響をあまり受けないことから、コア比抵抗値は他の要因によって変化したものと考えられる。一方、コア比抵抗値と有効間隙率との関係は、図に示すように有効間隙率が数パーセント変化するだけで比抵抗値が急激に変化することが分かる。したがって、飽和状態に近い石英閃緑岩が地山となる本トンネルにおいて、コア比抵抗値に大きな影響を及ぼした要因としては、有効間隙率の違いが考えられ、含水比および体積含水率の増加に伴ってコア比抵抗値が減少したことも有効間隙率の影響が大きいものと考えられる。

図-3. 20はWCトンネルの4断面の切羽から得られたコア供試体の飽和度、有効間隙率、含水比、体積含水率とコア比抵抗値の関係を示したものである。飽和度に関してはSTA.301+00で採取された供試体については最も低いものでは86%近い値を示すものが認められ、同程度の有効間隙率を有する供試体の100%近い飽和度における比抵抗値と比べると1オーダー近い変化が見られることから、比抵抗値の変化には飽和度の影響が大きく現れているものと考えられる。また、有効間隙率と比抵抗値との関係については、STA.302+10およびSTA.306+00で採取された供試体は100%に近い飽和度を有しているが、有効間隙率が数%変化するだけで比抵抗値は2オーダーも減少しており、有効間隙率の変化も比抵抗値が変化することの大きな要因となっていることがわかる。したがって、チャート、頁岩が主体となる本トンネルの場合はコア比抵抗値の変化の要因としては有効間隙率と飽和度が挙げられ、含水比および体積含水比とコア比抵抗値との関係も有効間隙率と飽和度の変化を反映したものと考えられる。

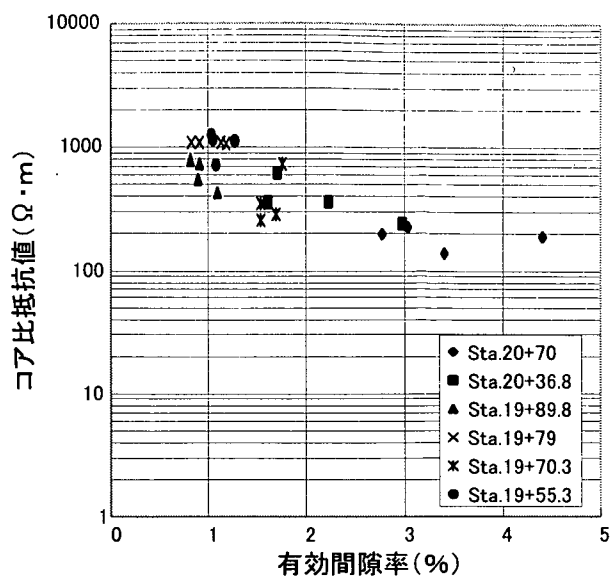
図-3. 21はSMトンネルの2断面の切羽から得られたコア供試体の飽和度、有効間隙率、含水比、体積含水率とコア比抵抗値の関係を示したものである。本トンネルの場合は、泥岩、砂岩が主体となっているが、飽和度に関しては90%以上の値を示していることから飽和度が比抵抗値に及ぼす影響は比較的小さいと言える。一方、有効間隙率と比抵抗値との関係については、有効間隙率の増加に伴って比抵抗値が減少する傾向が認められるものの、有効間隙率の変化に対するコア比抵抗値の変動幅は比較的小さく、その結果、含水比および体積含水率の変化がコア比抵抗値に及ぼす影響も小さいものとなっている。

図-3. 22は、YSトンネルの7断面の切羽から採取したコア供試体の飽和度、有効間隙率、含水比、体積含水率とコア比抵抗値との関係を示したものである。STA.3+70およびSTA.4+30の断面から採取された供試体の飽和度は10~30%と他の5断面の飽和度が85%以上あるのに比較すると極めて小さくなっていることが分かる。このため、STA.3+70およびSTA.4+30の有効間隙率は10~20%と他の5断面に比較すると大きくなっているにもかかわらず、比抵抗値は有効間隙率が数%の場合とほぼ同程度の値を示している。一方、飽和度が85%以上となる残りの5断面について見れば、有効間隙率がほぼ同一であれば飽和度が比抵抗値に及ぼす影響は小さいのに対して有効間隙率が数%変化するだけで比抵抗値は1オーダー近く減少することが分かる。このように、花崗岩が主体となる本トンネルにおいては飽和度が高い領域においてはコア比抵抗値の変化は有効間隙

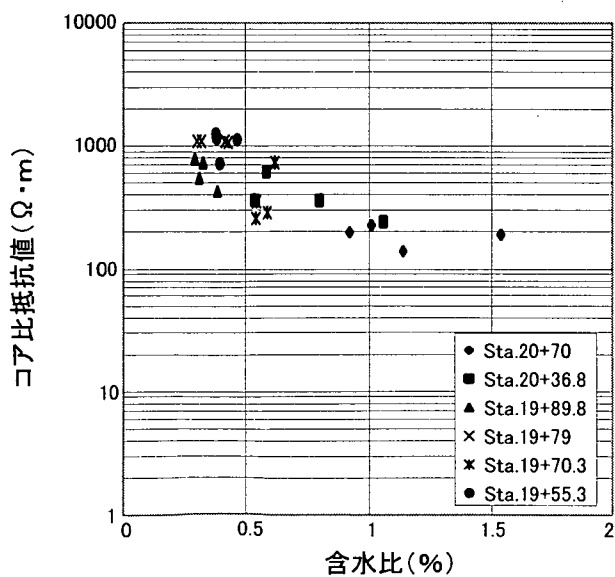
率を反映したものとなるが、飽和度が低い領域においては飽和度と有効間隙率の両者を反映したものとなるため、その解釈に当たっては地下水位の位置に十分留意する必要があることが分かる。なお、含水比および体積含水率とコア比抵抗値との関係については、他の岩種の場合と同様に含水比、体積含水率が増加するとコア比抵抗値も減少する傾向にある。



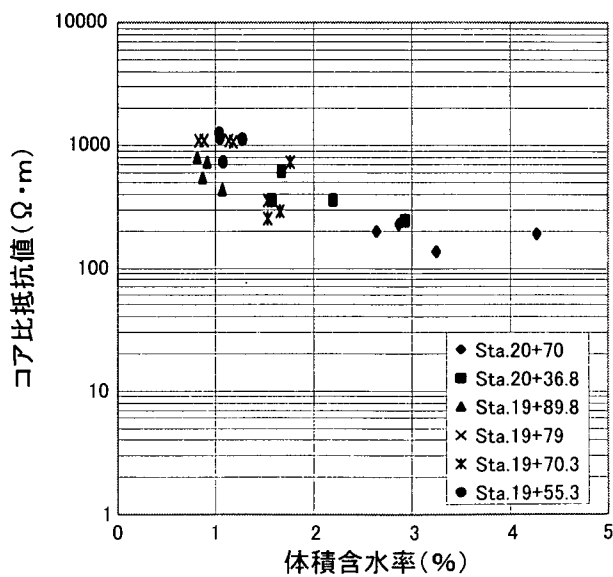
(a) 飽和度



(b) 有効間隙率

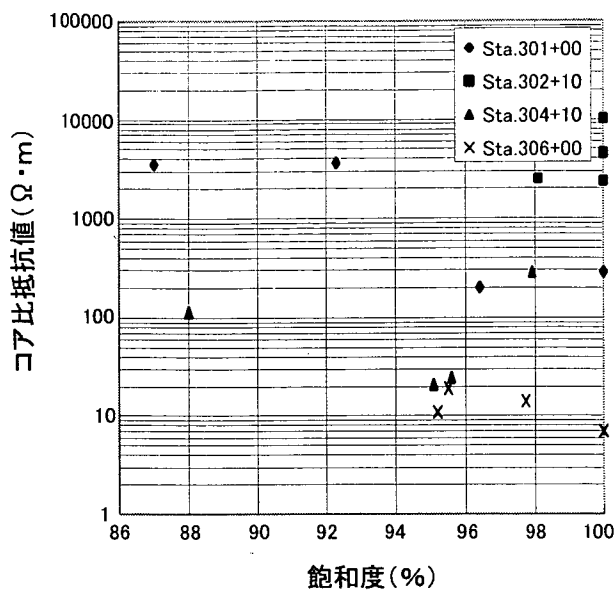


(c) 含水比

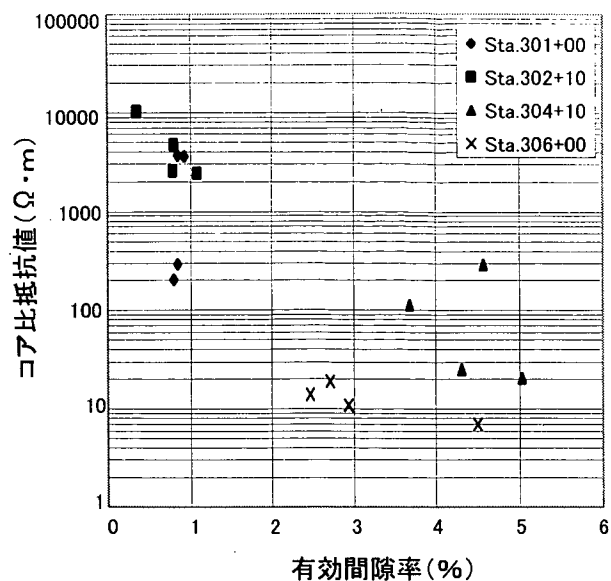


(d) 体積含水率

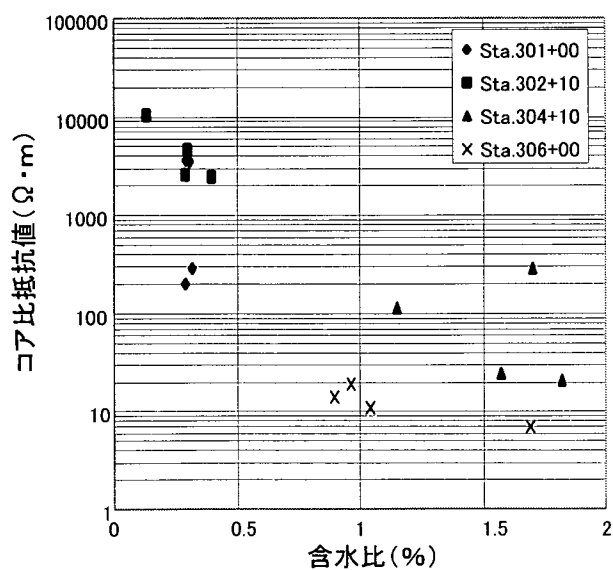
図-3. 19 コア比抵抗値と地山物性値の関係
(SKトンネル)



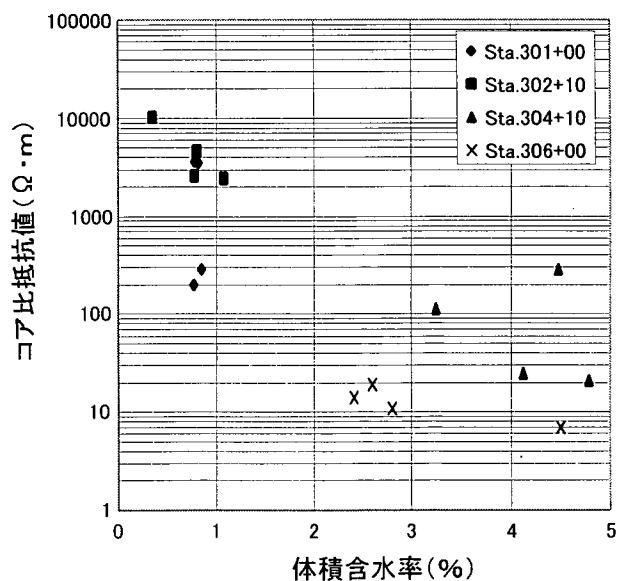
(a) 飽和度



(b) 有効間隙率

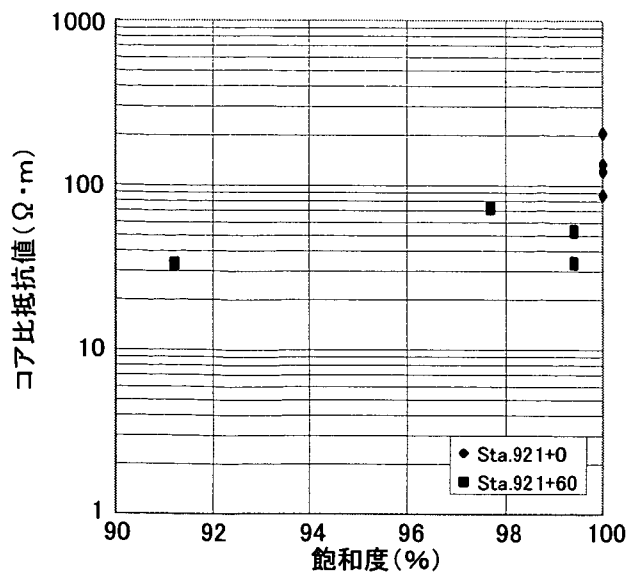


(c) 含水比

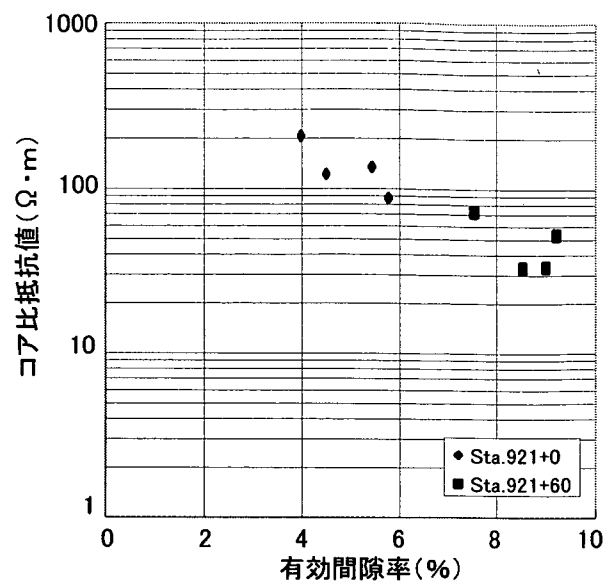


(d) 体積含水率

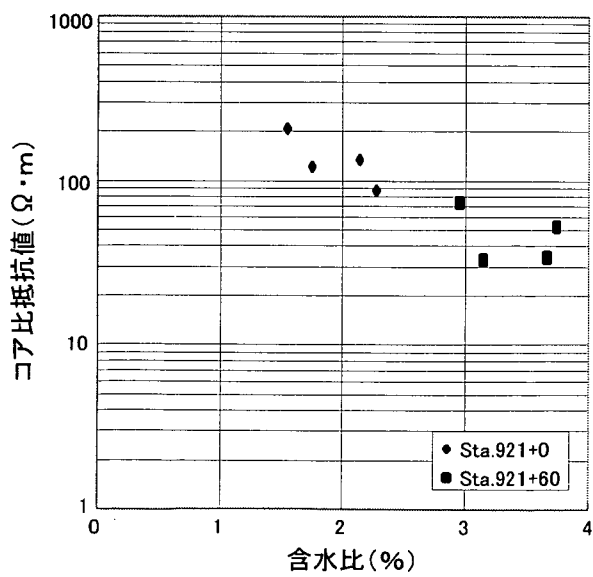
図-3. 20 コア比抵抗値と地山物性値の関係
(WCトンネル)



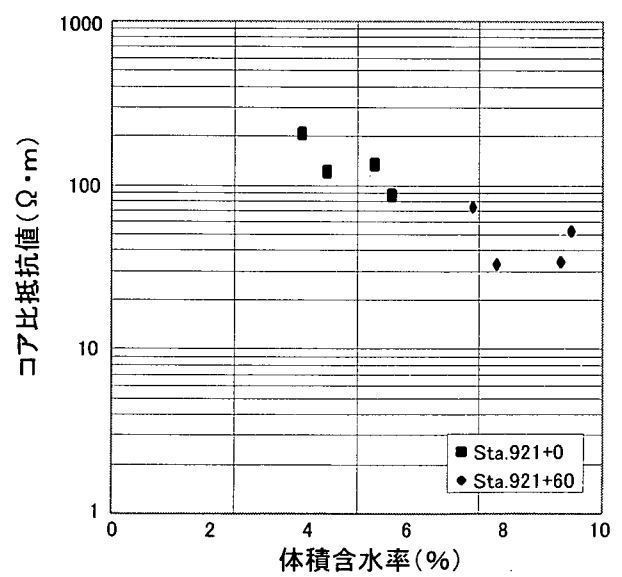
(a) 飽和度



(b) 有効間隙率

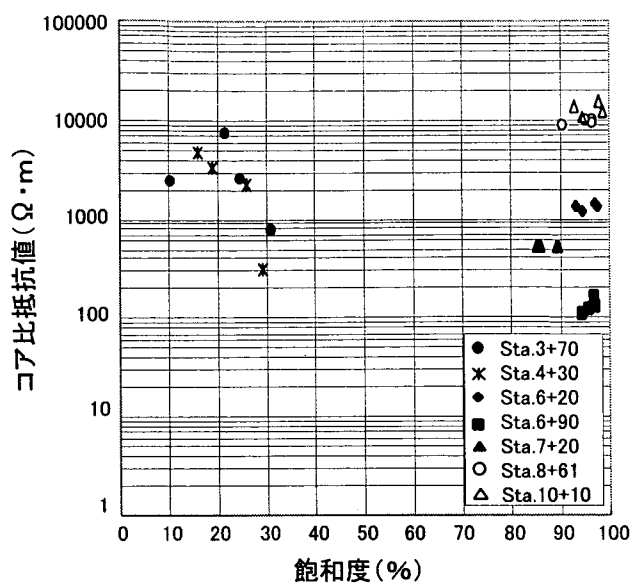


(c) 含水比

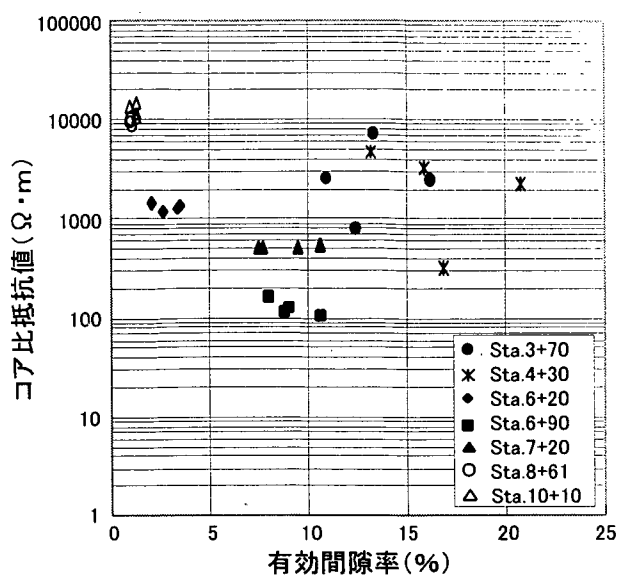


(d) 体積含水率

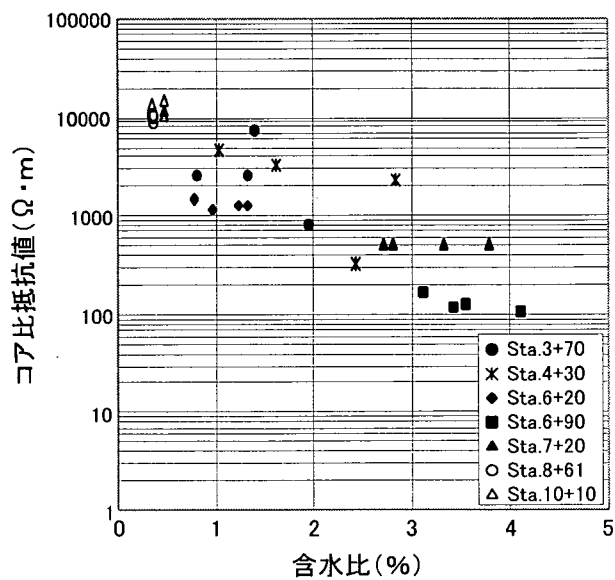
図-3. 21 コア比抵抗値と地山物性値の関係 (SMトンネル)



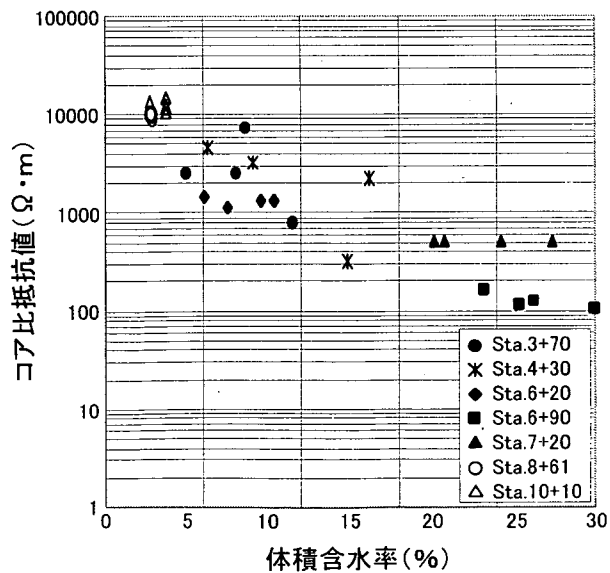
(a) 飽和度



(b) 有効間隙率



(c) 含水比



(d) 体積含水率

図-3. 2 2 コア比抵抗値と地山物性値の関係 (Y S トンネル)

(2) コア比抵抗値と切羽状態との関係

図-3. 23はSKトンネルの5断面の切羽から得られたコア供試体の比抵抗値と同断面における切羽観察表の各項目の評価結果との関係を示したものである。「切羽の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「水による劣化」は比抵抗値が減少すると評価ポイントが大きくなる傾向、すなわち地山状態が悪くなる傾向を示していることがわかる。コア供試体を用いた試験結果によれば自然状態にあるコア供試体の比抵抗値の変化は有効間隙率の変化を反映しており、比抵抗値との対応が明確に認められた観察項目のうち「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」は有効間隙率とも密接な関係にあることから、コア供試体の比抵抗値から切羽観察表の有効間隙率と関係のある項目の評価が行えるものと考えられる。また、比抵抗値と「水による劣化」との間にも比較的良好な対応が認められているが、これは飽和度が高いために有効間隙率の変化が「水による劣化」の現象として顕著に現れたものと考えられる。

図-3. 24はWCトンネルの4断面の切羽から得られたコア供試体の比抵抗値と同断面における切羽観察表の各項目の評価結果との関係を示したものである。本トンネルの場合は、「湧水」に関しては一般に考えられていることとは逆に評価が悪くなるに伴って比抵抗値が高くなるといった傾向がやや認められるものの、その他の評価項目に関しては明確な対応が認められない。したがって、コア供試体を用いた試験結果によれば、本トンネルの場合はコア比抵抗値の変化は飽和度や有効間隙率を反映したものとなっているが、コア比抵抗値からマクロな地山の状態を評価することは難しいと言える。

図-3. 25はSMトンネルの2断面の切羽から得られたコア供試体の比抵抗値と同断面における切羽観察表各項目の評価結果との関係を示したものである。本トンネルの場合は検討対象断面が2断面と少ないが、「素堀面の状態」「風化・変質」「水による劣化」に関しては、比抵抗値が小さくなるに伴って評価が悪くなる傾向が認められる。コア供試体を用いた試験結果によれば、本トンネルの場合はコア比抵抗値の変化は有効間隙率の変化を反映したものとなっているために、有効間隙率と密接な関係にある「風化・変質」および有効間隙率が変化した結果が反映される「水による劣化」との間に対応が認められたものと思われる。

図-3. 26はYSトンネルの7断面の切羽から得られたコア供試体の比抵抗値と同断面における切羽観察表各項目の評価結果との関係を示したものである。前述したようにSTA.3+70およびSTA.4+30のデータは飽和度が低いために有効間隙率が大きいにもかかわらずコア比抵抗値が大きく現れていることを考慮して、これらを除いた飽和度が高い5つの断面について考察すると、「切羽の状態」「圧縮強度」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「水による劣化」の各項目は何れも比抵抗値が小さくなるに伴って評価が悪くなる傾向が明確に認められ、「風化・変質」「湧水」の項目も一部のデータを除けば、比抵抗値が小さくなるに伴って評価が悪くなる傾向が認められる。コア供試体を用いた試験結果によれば、本トンネルの場合は飽和度が高い領域ではコア比抵抗値の変化は有効間隙率を反映したものとなっていることから、「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」には有効間隙率の変化が、また、「湧水」「水による劣化」には有効間隙率が変化した結果の現象が反映されて現れたものと考えられる。一方、飽和度が低いSTA.3+70およびSTA.4+30の断面について見れば、コア比抵抗値が大きいにも関わらず「素堀面の状態」「圧縮強度」「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「水による劣化」の評価が他の断面に比較して悪くなっているが、「風化・変質」「割れ目の頻度」「割れ目の状態」「水による劣化」の各項目は何れも有効間隙率と密接な関係

があり、有効間隙率が大きいことを反映したものとなっていることが分かる。

以上のように事前調査の地山比抵抗値と切羽での地山状態との間に比較的良好な対応が見られたSKトンネルおよびYSトンネルについては、地下水位が高い箇所ではコア比抵抗値と切羽観察表における幾つかの項目との間にも良好な対応関係が認められ、これらは主として有効間隙率の変化を反映した結果であることが明らかとなった。また、地下水位が低い箇所では有効間隙率と密接な関係にある切羽観察表の項目には有効間隙率を反映した評価が現れているが、飽和度が低いためにコア比抵抗値との関係については対応は良くないことが分かった。一方、明確な対応が認められなかったWCトンネルとSMトンネルのうち、WCトンネルについてはコア比抵抗値と切羽観察表の各項目との対応も良くないことが明らかとなった。しかし、SMトンネルにおいては、コアの比抵抗値と切羽観察表の項目との間には対応が見られることから、SMトンネルにおいて事前調査の地山比抵抗値と地山状態との間に対応が見られなかった原因として他の要因を考える必要がある。

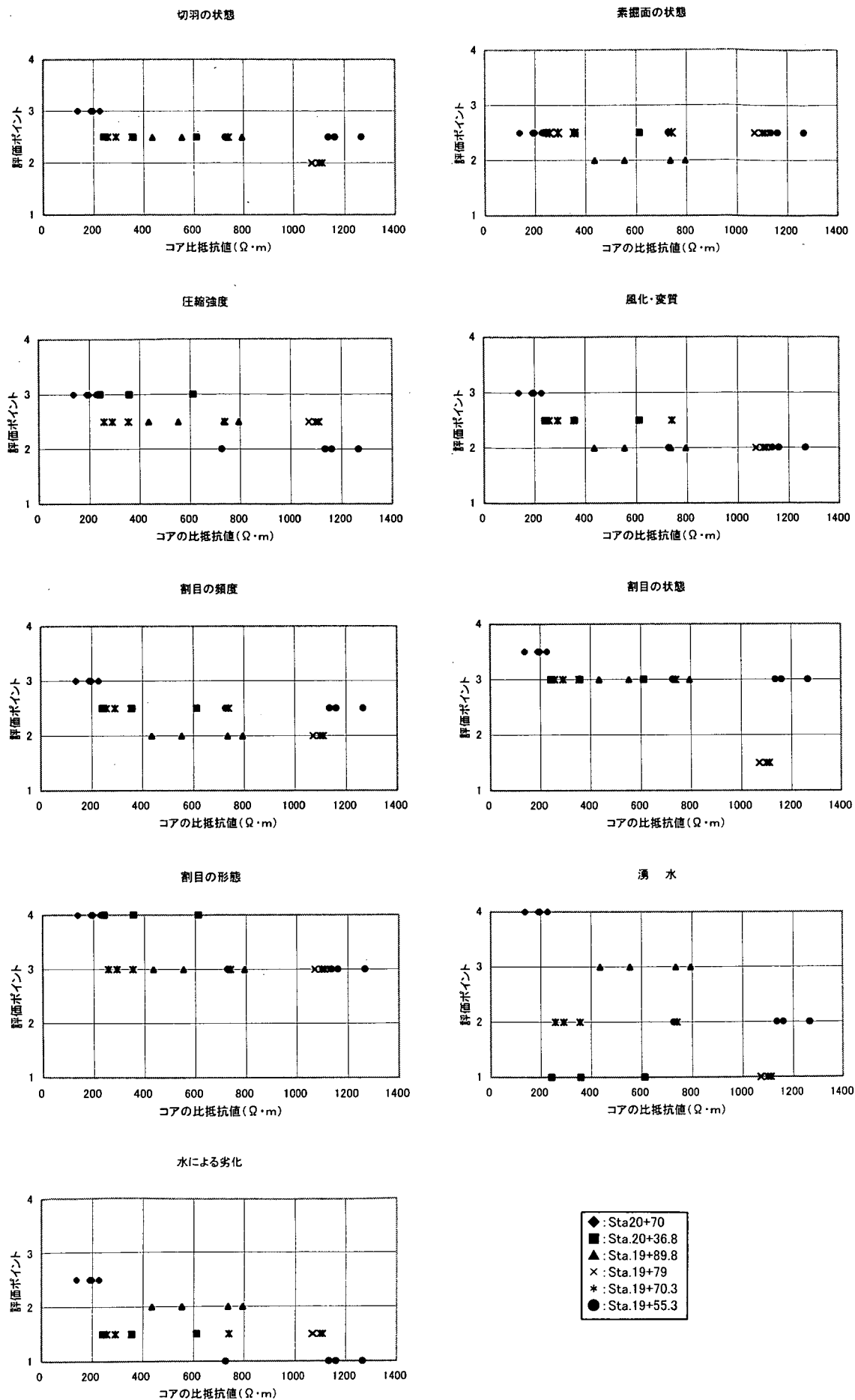


図-3. 23 切羽観察項目とコア比抵抗値の関係 (SKトンネル)

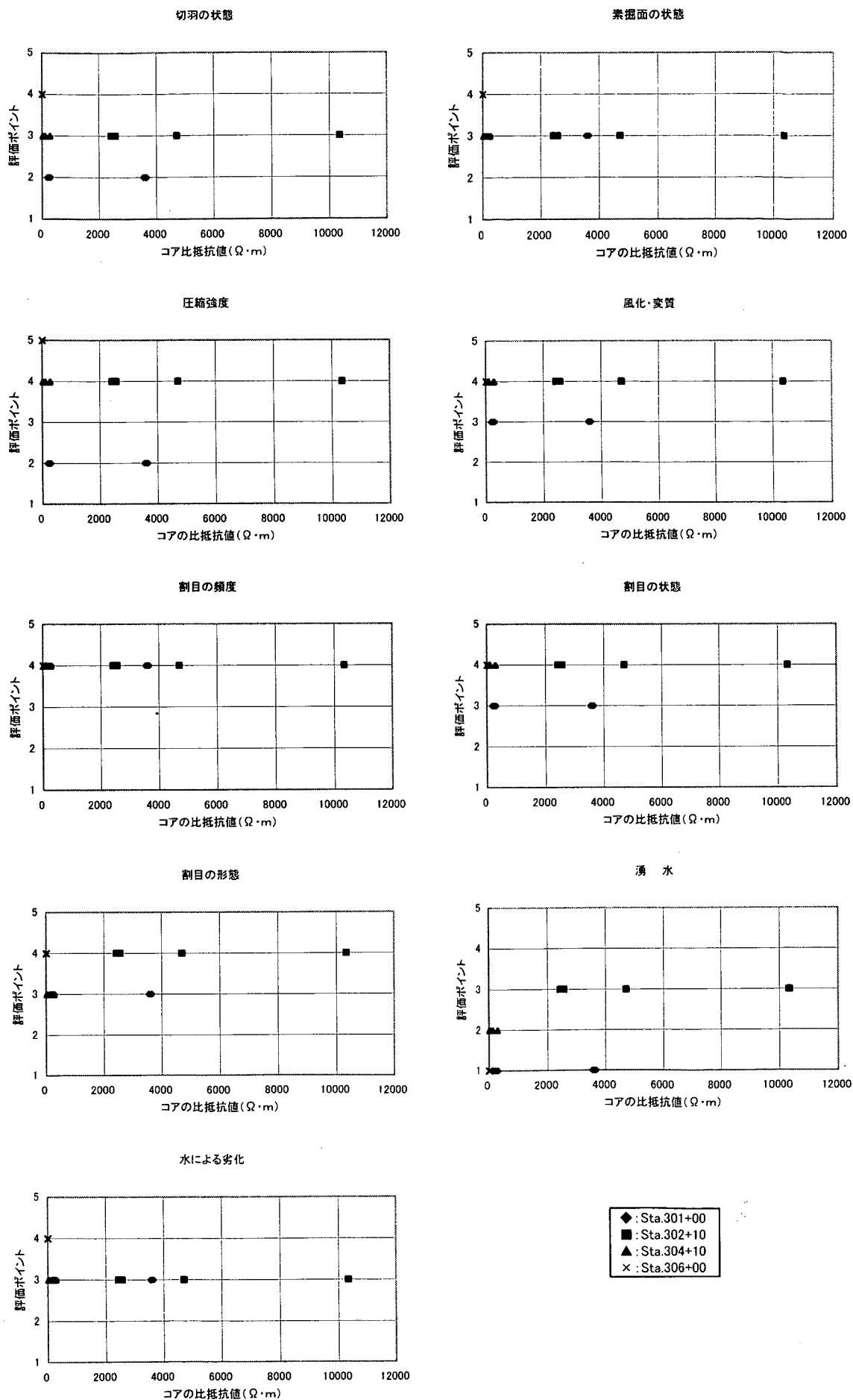


図-3. 24 切羽観察項目とコア比抵抗値の関係 (WCTンネル)

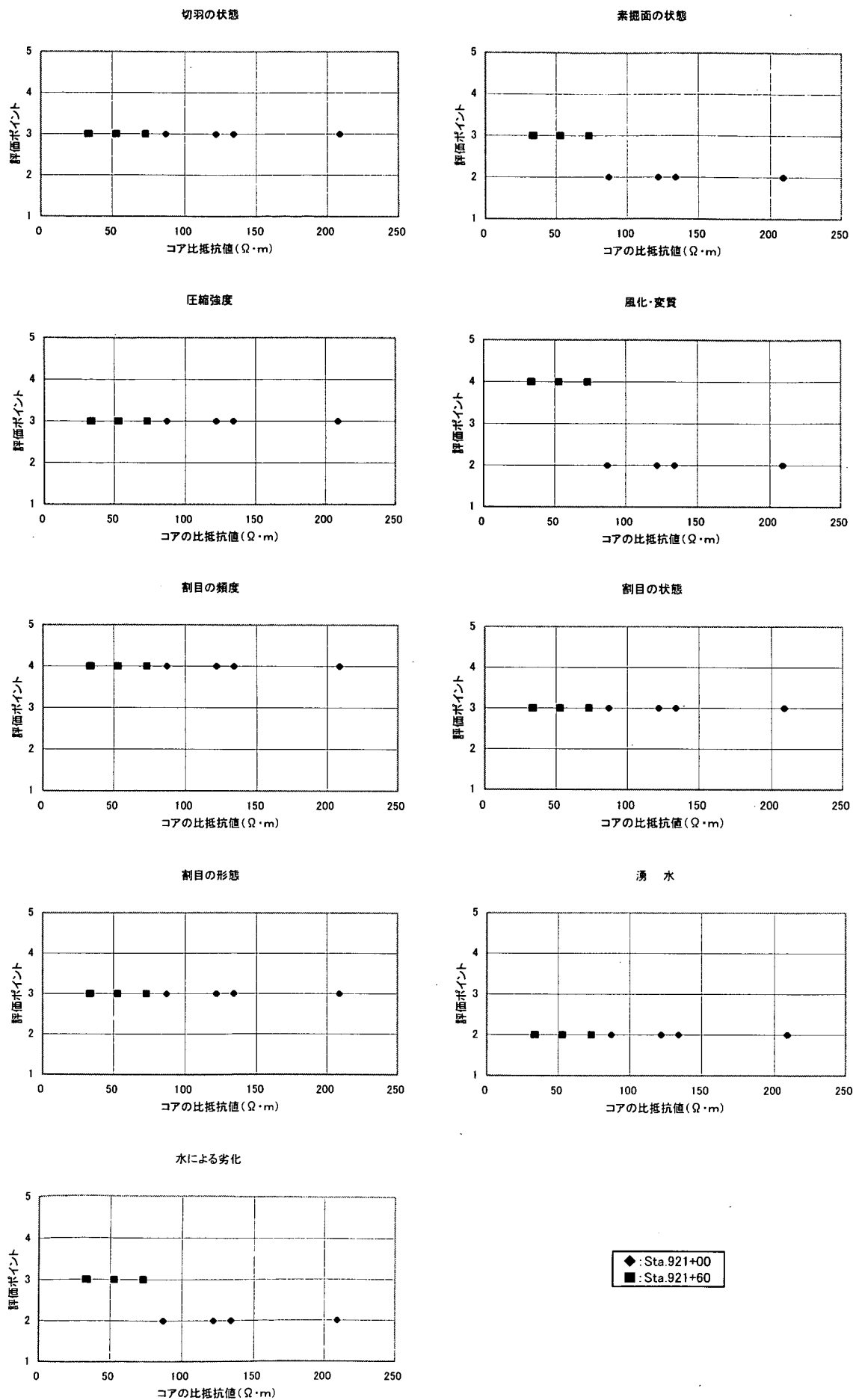


図-3.25 切羽観察項目とコア比抵抗値の関係 (SMTトンネル)

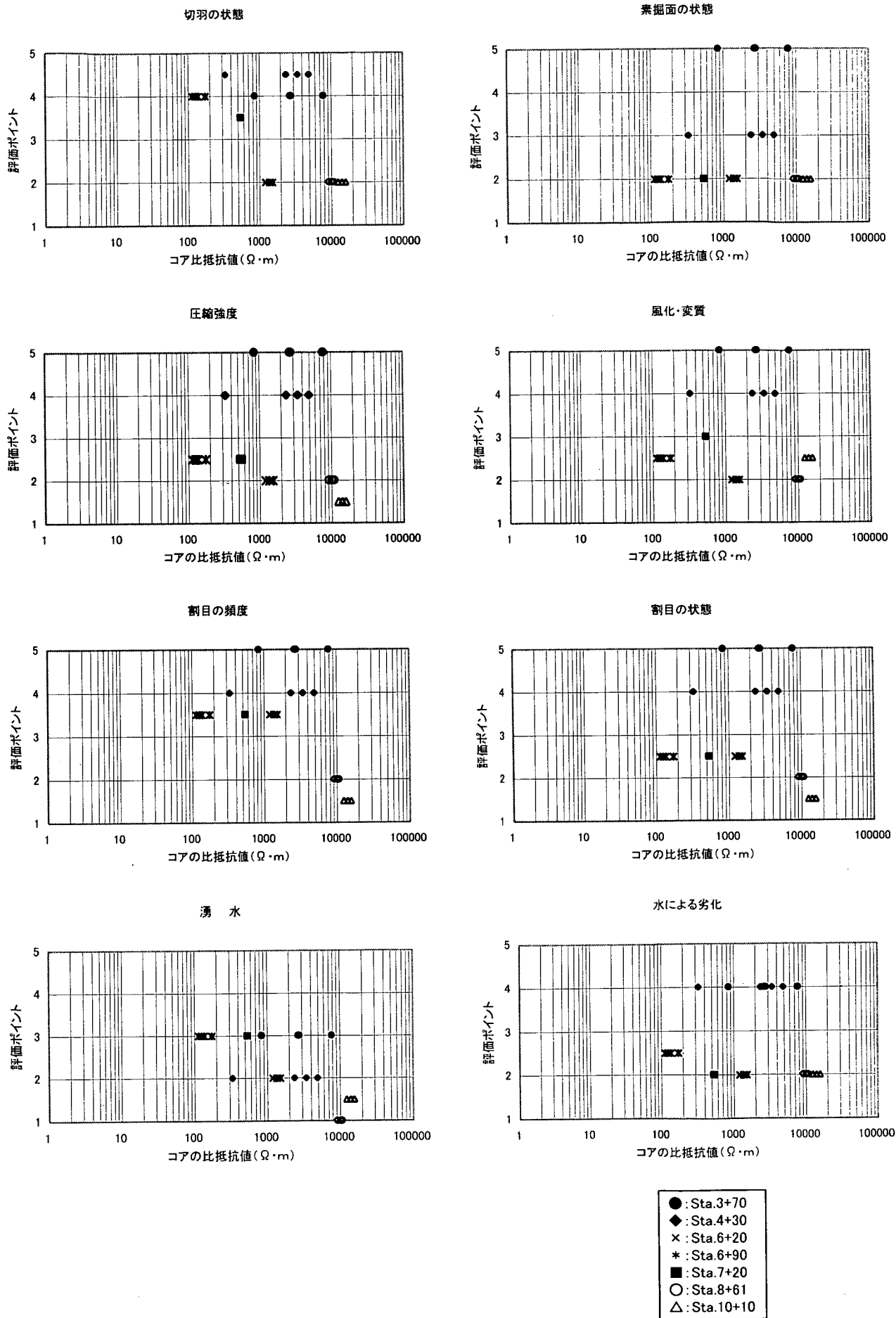


図-3. 26 切羽観察項目とコア比抵抗の関係(YSTンネル)

3. 3. 3 コア比抵抗値と地山比抵抗値との関係

図-3. 27～3. 30はSKトンネル（石英閃緑岩）、WCトンネル（チャート、頁岩、粘板岩）、SMトンネル（砂岩、泥岩互層）、YSトンネル（花崗岩）のトンネル切羽（SKトンネルは6断面、WCトンネルは4断面、SMトンネルは2断面、YSトンネルは7断面）から採取したコア供試体の比抵抗値とコア供試体を採取した地点における地山比抵抗値との関係を示したものである。

SKトンネルについてはSTA.20+36.8の断面を除けば各断面ともに地山比抵抗値はコア比抵抗値よりも若干高い値を示す傾向にあるが、断面の違いによる地山比抵抗値とコア比抵抗値の相対的な変化は同じ傾向を示しており、地山比抵抗値とコア比抵抗値の整合性は概ねとれたものとなっている。したがって、本トンネルにおいてはコア比抵抗値とコアの物理的特性との関係を用いて地山比抵抗値から地山状態を評価することが可能であるものと判断される。

WCトンネルについては、STA.306+00の頁岩部においては地山比抵抗値はコア比抵抗値に比較的近い値を示しているが、STA.301+00、STA.302+10のチャート部およびSTA.304+10の頁岩部においては地山比抵抗値はコア比抵抗値に比較して2～3オーダも低い値を示している。また、断面の違いによる地山比抵抗値とコア比抵抗値の相対的な変化は、STA.304+10の断面を除くと逆の傾向を示しており、このような特徴を示す地山に関してはコア比抵抗値と地山状態との間に明確な対応関係が認められても事前調査の地山比抵抗値から切羽の地山状態を推定することは難しくなる。

SMトンネルについては、STA.921+0の断面においてはコア比抵抗値の方が地山比抵抗値よりも若干高い値を示しているが、全体的には地山比抵抗値とコア比抵抗値は近い値を示していると言える。しかし、STA.921+0とSTA.921+60の断面を比較するとコア比抵抗値では最大値と最小値とは1オーダ程度の開きが認められたのに対して、地山比抵抗値にはほとんど差が現れておらず、断面の違いによるコア比抵抗値と地山比抵抗値との相対的な変化も逆の傾向を示している。したがって、本トンネルにおいてはコア比抵抗値と地山状態との間には比較的良好な対応が認められたものの、地山比抵抗値から地山状態を評価することは難しいものと考えられる。

YSトンネルについては、STA.6+90、STA.7+20の断面を除けばコア比抵抗値は事前調査から得られた地山比抵抗値よりも全体的に大きくなっているが、断面の違いによる地山比抵抗値とコア比抵抗値の相対的な変化は概ね整合しており、コア比抵抗値とコアの物理的特性との関係を用いて地山比抵抗値から地山状態を評価することは可能であるものと考えられる。一方、STA.6+90、STA.7+20の断面においてはコア比抵抗値と切羽での地山状態は比較対応しているにも関わらず、地山比抵抗値はコア比抵抗値よりも大きな値を示していることから、地山比抵抗値により地山状態を評価すると実際の状態よりも良い方に評価してしまうことになる。

以上のようにコア比抵抗値と地山比抵抗値との関係は、一部の断面を除けば地山比抵抗値よりもコア比抵抗値の方が高い値を示す場合が多く、地山比抵抗値と地山状態との間に比較的良好な対応が認められた場合においても1オーダ程度の開きが認められる場合があることが明らかとなった。このことは、地下水位の位置が事前に分かっていたとしてもコア試験結果と地山比抵抗値の絶対値を照らし合わせて地山状態を評価することには限界があることを意味しており、地山状態の評価は地山比抵抗値の相対的な変化に着目して行う

べきと言える。なお、地山比抵抗値とコア比抵抗値との間に開きが見られた原因としては、一般的にはコアサンプルは比較的良好な地山部分から採取されることが多いため、コア比抵抗値としては地山比抵抗値よりも高くなったことが推測される。また、SKトンネルやWCトンネル、YSトンネルの一部の断面ではコア比抵抗値に比べて地山比抵抗値が高い値を示したが、この要因としては土被りが比較的少ない地表部分に高比抵抗値を示す箇所がある場合には、トンネル深度程度においても地表部分の高比抵抗値による影響により解析結果が実際の比抵抗値に比べて高い比抵抗値を示したことが考えられる。一般に崖錐部の不飽和部分においては高比抵抗値を示す¹⁾ことが明らかとなっていることから、特に、比較的土被りが浅い崖錐地域で、かつ地下水位が地表面から数mのところにある場合にはこのような傾向が著しく現れるものと考えられる。したがって、今後、このような条件下の地山比抵抗値の精度向上のために解析方法の検討が必要であるとともに、解釈・評価を行う際にも注意が必要となる。

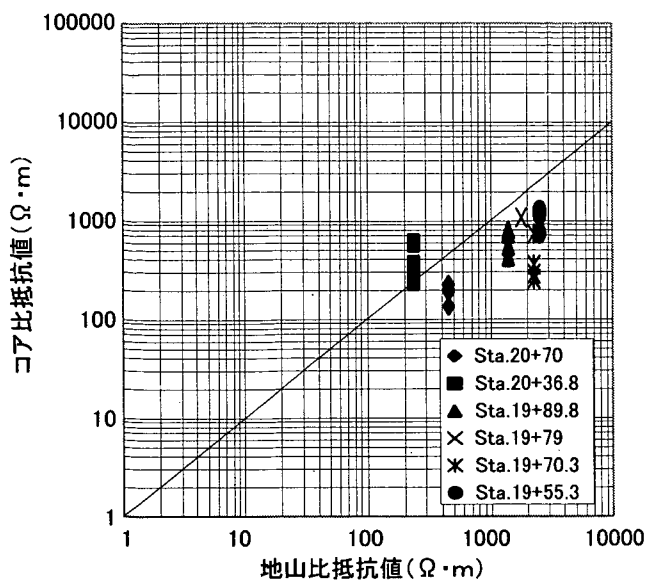


図-3. 27 地山比抵抗値とコア比抵抗値の関係 (SKTトンネル)

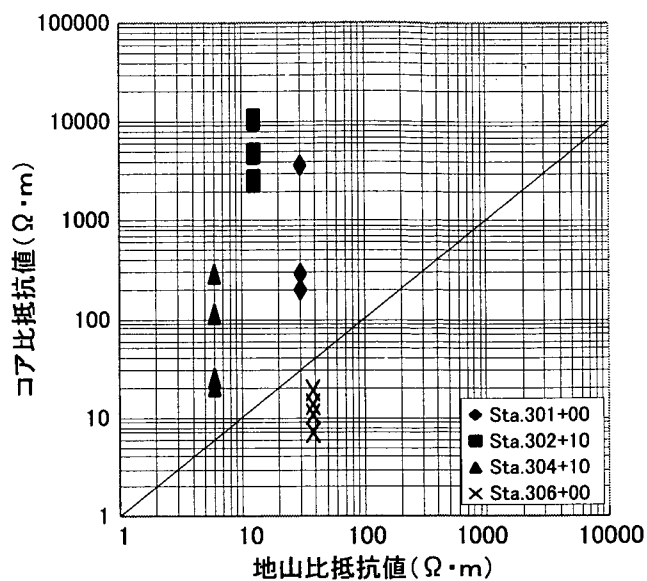


図-3. 28 地山比抵抗値とコア比抵抗値の関係 (WCTトンネル)

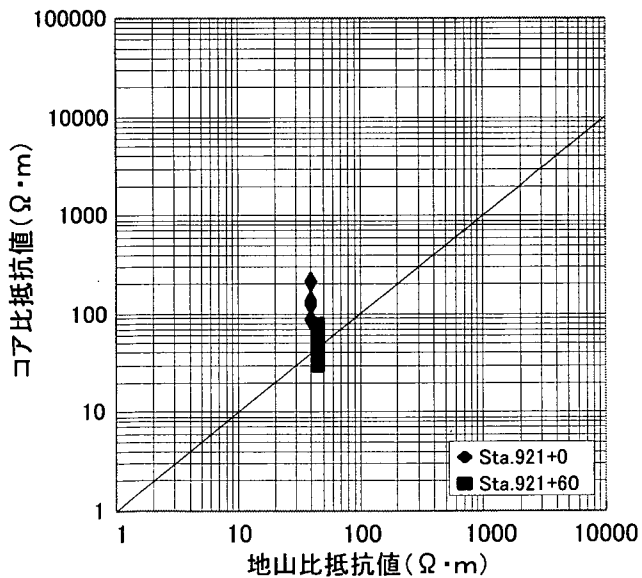


図-3. 29 地山比抵抗値とコア比抵抗値の関係 (SMTトンネル)

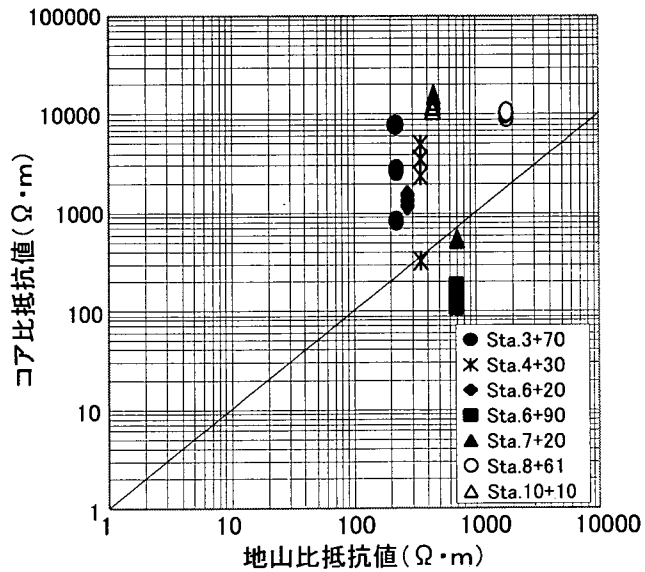


図-3. 30 地山比抵抗値とコア比抵抗値の関係 (YSTトンネル)

3. 4 まとめ

第3章で得られた結論をまとめると以下が得られる。

- (1) 事前調査から得られた地山比抵抗値と切羽での地山状態との関係については、堆積岩の粘板岩、頁岩、砂岩、火成岩の石英閃緑岩、花崗岩、流紋岩の場合は地山比抵抗値が高くなると地山状態は良くなる傾向が認められた。これらに対して、堆積岩のチャート、火成岩の流紋岩と凝灰岩の互層、強風化花崗岩の場合は、地山比抵抗値が高いと地山状態が悪くなると言った一般とは逆の傾向が認められた。また、堆積岩の泥岩と砂岩の互層、熔結凝灰岩、変成岩の蛇紋岩、緑色片岩・黒色片岩の場合は地山比抵抗値と地山状態との対応は良いとは言えないが、熔結凝灰岩、蛇紋岩、緑色片岩・黒色片岩については地山比抵抗値の相対的な変化に着目すれば地山状態の相対的な変化を捉えることが可能な場合があることが明らかとなった。
- (2) 地山比抵抗値と施工時に採用された地山等級との関係については、地山等級の違いによる地山比抵抗値の差が明確に現れた岩種は少なかったが、花崗岩、石英閃緑岩の場合は地山等級毎の地山比抵抗値に比較的明確な差が現れた。
- (3) コア比抵抗値と地山比抵抗値との関係は、一般的にはコア比抵抗値の方が地山比抵抗値よりも1オーダー程度は大きな値を示す場合が多いが、地表部に高比抵抗値を示す箇所がある等の場合には、地山比抵抗値はコア比抵抗値よりも高い値を示すことがある。したがって、コア比抵抗値と切羽での地山状態との間に比較的良好な対応が認められる場合においても地山比抵抗値の絶対値から地山状態を評価することには限界があり、地山比抵抗値から地山状態を評価するに際しては地山比抵抗値の相対的な変化に着目すべきである。

参考文献

- 1) 島裕雅、梶間和彦、神谷英樹編：比抵抗映像法、古今書院、1995

第4章 結論および今後の課題

今回実施した調査は対象岩種が限られており、トンネルが掘削されるすべての岩種を網羅したものではないが、幾つかの岩種についてはコアの比抵抗値に関する基本的特性や事前調査から得られた地山比抵抗値を用いて地山状態を評価する上で参考となる知見が得られた。

本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 岩石の比抵抗値は岩石の種類によって大きく異なるとともに、有効間隙率および水分飽和度の影響を大きく受け、有効間隙率あるいは水分飽和度が大きくなると比抵抗値は小さくなる傾向にある。また、比抵抗値と水分飽和度および有効間隙率との関係は、指数関数を用いたアーチの式により近似できる。
- (2) 岩石に含まれる陽イオン交換容量と比抵抗値との関係は、陽イオン交換容量が大きくなると比抵抗値は小さくなる傾向にある。また、超音波伝播速度（P波）、一軸圧縮強度と比抵抗値との関係は一軸圧縮強度、超音波伝播速度（P波）が大きくなると比抵抗値は大きくなる傾向にある。
- (3) 水分飽和度が100%の場合のコア比抵抗値と物理的特性、力学的特性との関係に関する結果から、一般的な傾向としては、調査対象とする区域が地下水位以下であれば、事前調査として得られた地山比抵抗値からこれらの物理的特性、力学的特性をある程度推定することが可能であると考えられる。
- (4) 事前調査から得られた地山比抵抗値と切羽での地山状態との関係については、堆積岩の粘板岩、頁岩、砂岩、火成岩の石英閃緑岩、花崗岩、流紋岩の場合は地山比抵抗値が高くなると地山状態は良くなる傾向が認められた。これらに対して、堆積岩のチャート、火成岩の流紋岩と凝灰岩の互層、強風化花崗岩の場合は、地山比抵抗値が高いと地山状態が悪くなり、一般に考えられている傾向とは逆の傾向が認められた。また、堆積岩の泥岩と砂岩の互層、熔結凝灰岩、変成岩の蛇紋岩、緑色片岩・黒色片岩の場合は地山比抵抗値と地山状態との対応は良いとは言えないが、熔結凝灰岩、蛇紋岩、緑色片岩・黒色片岩については地山比抵抗値の相対的な変化に着目すれば地山状態の相対的な変化を捉えることが可能な場合があることが明らかとなった。
- (5) 地山比抵抗値と施工時に採用された地山等級との関係については、地山等級の違いによる地山比抵抗値の差が明確に現れた岩種は少なかったが、花崗岩、石英閃緑岩の場合は地山等級毎の地山比抵抗値に比較的明確な差が現れた。。
- (6) コア比抵抗値と地山比抵抗値との関係は、一般的にはコア比抵抗値の方が地山比抵抗値よりも1オーダー程度は大きな値を示す場合が多いが、地表面に高比抵抗値を示す箇所がある等の場合には、地山比抵抗値はコア比抵抗値よりも高い値を示すことがある。したがって、コア比抵抗値と切羽での地山状態との間に比較的良好な対応が認められる場合においても地山比抵抗値の絶対値から地山状態を評価することには限界があり、地山比抵抗値から地山状態を評価するに際しては地山比抵抗値の相対的な変化に着目すべきである。

今後の課題としては、今回実施した調査の対象岩種は限られていることから、今後、より多くの岩種についてコア比抵抗値と水分飽和度、有効間隙率等との関係に関する基礎的データを蓄積するとともに、事前調査として電気探査が実施されたトンネルのデータを収集し、より多くの岩種に関して地山比抵抗値と地山状態との関係について検討を加えることが必要である。また、事前調査で得られた地山比抵抗値だけから地山状態を十分な精度で推定することには限界があることから、地下水位、弾性波速度等との情報と合わせて地山状態を評価する手法を確立することが重要となる。

謝辞

本研究を実施するに当たり、多数のトンネル現場から貴重なデータの提供をいただいた。ここに、協力をいただいた関係各機関に深甚の謝意を表する。