

# プレーンコンクリートの微小ひびわれと物性評価\*

## MICROCRACKS AND EVALUATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF PLAIN CONCRETE

加藤 清志\*\*

By Kiyoshi Kato

### 1. まえがき

先にコンクリートモデル<sup>1)~8)</sup>、ニートセメントペースト<sup>9)~11)</sup>、モルタル<sup>8), 12)~15)</sup>、プレーンコンクリート<sup>16)~18)</sup>などについての圧縮荷重によって生じる微小ひびわれや、気泡殻ひびわれの特徴および発生機構について述べた。さらに、微小ひびわれを定量的に評価する一つの方法として、コンクリートの内部摩擦としての対数減衰率表示が可能であり、かつ、接線係数とは一次の対応をなすこと、したがって、この関係から応力-ひずみ曲線を求めることができることがわかった。結局、微視的観点からすれば、内部摩擦の増大は非弾性的挙動の要因となり、さらに、耐力低下といった破壊現象に連なる。

本研究は以上の諸現象を踏まえて、各種の配合と養生方法に差のあるプレーンコンクリートが荷重履歴により受ける物性変化と、その非破壊的評価方法について実験・考察し、実施コンクリートの荷重中の物性あるいは力学的挙動を評価するための変形特性値に関する基礎的資料を求めることを目的としたものである。

### 2. 供試体の作成と実験方法

#### (1) 供試体の作成

使用したセメントは普通ポルトランドセメントで、表-1にその物理・化学的性質を示す。粗骨材は川砂利で、比重 2.64, 粗粒率 6.57 である。細骨材は川砂で、比重 2.60, 粗粒率 2.63 で、細・粗骨材の粒度曲線を図-1に示す。粗骨材は高活性洗剤で十分洗浄して使用した。

コンクリートの示方配合を表-2に示す。富配合から貧配合までと、ワーカビリティもやわ練りとかた練りを考慮して、スランプに 15 cm と 3 cm との2種を採用した。練りまぜにはアイリッヒ形ミキサを用い、砂とセ

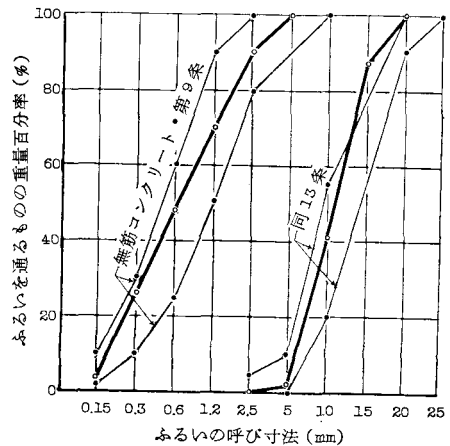


図-1 細・粗骨材の粒度曲線

表-1 普通ポルトランドセメントの物理・化学的性質

比重	粉末度		凝 結					安定性	ig. loss (%)	insol. (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)
	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	標準網フルイ 88μ 残分 (%)	室温 (°C)	湿度 (%)	水量 (%)	始 発 (時一分)	終 結 (時一分)					
3.16	3090	1.4	20.3	85	27.3	2-46	4-03	良	0.5	0.4	21.9	5.4

CaO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	total (%)	フロー値	曲 げ 強 さ (kg/cm <sup>2</sup> )			圧 縮 強 さ (kg/cm <sup>2</sup> )			養生温度 (°C)	
						3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日	室温	水温
64.7	3.2	1.4	1.8	99.3	240	32.7	50.4	71.6	134	238	427	20.0	20.0

\* 土木学会第 26 回年次学術講演会 (昭和 46 年 10 月) で一部発表

\*\* 正会員 防衛大学校助教授 土木工学教室

表-2 示 方 配 合

配合比	スランブ* (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
1:1:2	3(2.8~3.8)	1.0~2.2	37.0	33	200	541	541	1082
	15(15.1~17.0)	1.0~1.5	41.5	33	217	523	523	1046
1:1.5:3	3(1.5~1.8)	1.0~1.3	42.0	33	168	401	600	1202
	15(14.1~15.7)	0.8~1.4	49.0	33	191	391	586	1172
1:2:4	3(3.5~4.3)	0.3~0.7	55.0	33	174	316	632	1264
	15(14.0~16.0)	0.5~1.5	59.0	33	182	309	618	1236
1:3:6	3(1.3~3.8)	0.1~0.8	77.7	33	171	221	662	1323
	15(15.0~16.8)	0~1.0	87.0	33	188	216	649	1298

\* ( )内は実測値の範囲

メントとを3分間から練りし、注水後2分間でモルタルに練り上げ、最後に砂利を投入し3分間でよく練り混ぜた。このまだ固まらないコンクリートを10×10×20cm型わく(凍結融解試験用供試体型わく10×10×42cmを一部改造して使用)に詰め、40回棒突きし、さらに、テーブルバイブレーターで2分間締め固めた。まだ固まらないコンクリートの潜入空気量は、ワシントン型エアメーターで測定したが、その空気量を表-2に併記した。コンクリートの打ち込み後の養生方法により、次の3シリーズに分類した。すなわち、

シリーズ I : 1日湿空, 27日水中養生。

シリーズ II : 1日湿空, 6日水中, 21日気乾養生。

シリーズ III : 28日気乾養生。

なお、1日湿空とは24時間恒温室内(温度21°C, R.H. 88%)で養生したものであり、水中養生は養生水槽内(水温20°C)で標準養生したものである。気乾養生とは特別な養生方法をとらずに、実験室内(26~31°C, R.H. 72~91%)に静置したものである。

全養生期間終了後に、供試体を実験室内で1週間気乾状態にし、供試体の一側面に有効長67mmのひずみゲージをクロス形に貼付した。

配合比の種別とシリーズごとの供試体分類番号一覧表を表-3に示す。

(2) 加圧、ひずみ・超音波伝播速度・対数減衰率・動弾性係数測定などの装置

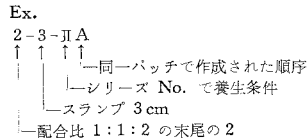
供試体の加圧にはアムスラー形圧縮試験機を使用し、加圧と同時に縦ひずみと横ひずみを、さらに、超音波伝播速度を測定した。縦ひずみには自動平衡形加算式を、横ひずみには手動零位式のひずみ測定器を用いた。

超音波伝播速度は載荷方向と直交する方向(この方向の伝播速度は荷重の増加とともに明りょうな変化が現われることがJones たち<sup>19)</sup>によって報告されている)の超音波の透過伝達時間を計測して求めた。供試体加圧中、透過振動子および受信子が供試体側面に密着するよ

表-3 配合比の種別・シリーズごとの供試体分類

配合比	スランブ	シリーズI		シリーズII		シリーズIII	
		供試体 No.		供試体 No.		供試体 No.	
1:1:2	3cm	2-3-I A	○	2-3-II A		2-3-III A	
		2-3-I B		2-3-II B	○	2-3-III B	○
		2-3-I C		2-3-II C		2-3-III C	○
		2-3-I D		2-3-II D		2-3-III D	
	15cm	2-15-I A	○	2-15-II A	○	2-15-III A	
		2-15-I B		2-15-II B		2-15-III B	○
		2-15-I C		2-15-II C	○	2-15-III C	○
		2-15-I D		2-15-II D	○	2-15-III D	
		2-15-I E	○	2-15-II E			
		2-15-I F					
		2-15-I G					
1:1.5:3	3cm	3-3-I A	○	3-3-II A		3-3-III A	
		3-3-I B		3-3-II B		3-3-III B	○
		3-3-I C		3-3-II C		3-3-III C	○
		3-3-I D		3-3-II D		3-3-III D	
	15cm	3-15-I A	○	3-15-II A		3-15-III A	
		3-15-I B		3-15-II B		3-15-III B	○
		3-15-I C		3-15-II C		3-15-III C	○
		3-15-I D		3-15-II D	○	3-15-III D	
1:2:4	3cm	4-3-I A	○	4-3-II A		4-3-III A	
		4-3-I B		4-3-II B		4-3-III B	○
		4-3-I C		4-3-II C		4-3-III C	○
		4-3-I D		4-3-II D	○	4-3-III D	
	15cm	4-15-I A	○	4-15-II A		4-15-III A	
		4-15-I B		4-15-II B		4-15-III B	○
		4-15-I C		4-15-II C	○	4-15-III C	○
		4-15-I D		4-15-II D		4-15-III D	
1:3:6	3cm	6-3-I A		6-3-II A	○	6-3-III A	
		6-3-I B		6-3-II B		6-3-III B	○
		6-3-I C		6-3-II C	○	6-3-III C	○
		6-3-I D		6-3-II D		6-3-III D	
		6-3-I E	○	6-3-II E	○		
		6-3-I F	○	6-3-II F			
	15cm	6-15-I A		6-15-II A		6-15-III A	
		6-15-I B		6-15-II B	○	6-15-III B	○
		6-15-I C	○	6-15-II C		6-15-III C	○
		6-15-I D		6-15-II D		6-15-III D	
		6-15-I E	○	6-15-II E			

注1. 供試体番号の読み方



注2. シリーズI : 1日湿空, 27日水中養生  
 シリーズII : 1日湿空, 6日水中, 21日気乾養生  
 シリーズIII : 28日気乾養生

注3. ○印は繰り返し載荷供試体

うに、スプリングを介して一定圧力(約4.5kg)でそれらを圧着した。その圧着の状況を写真-1に示す。実験装置の状況を写真-2に示す。

動弾性係数は縦振動法で、対数減衰率は自由減衰波高

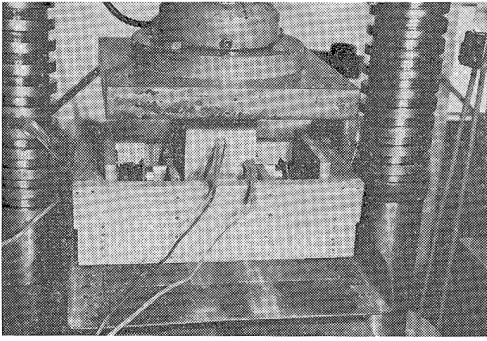


写真-1 超音波振動子の圧着状況

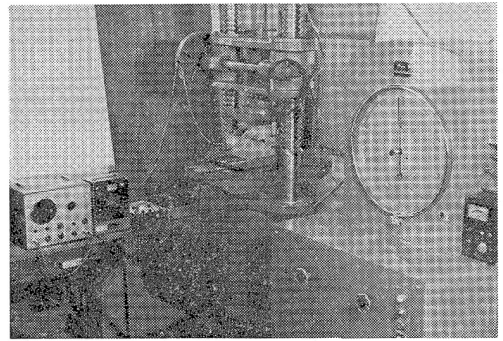


写真-2 供試体の加圧と実験装置

法によった。なお、対数減衰率は 30 個の読みの平均値を取った。

(3) 実験の手順

表-2 で、○印以外の供試体は継続的に単純圧縮载荷したもので、○印のある供試体はそれらの圧縮強度を 5 ~6 分割し、各応力レベルに達した時点で荷重を解放して、動弾性係数・対数減衰率などを測定した。なお、载荷中はどの供試体も縦・横ひずみと供試体厚さ 100 mm の超音波伝達時間とを測定した。

同図中  $\sigma_p$  は見掛けの比例限度で、精密には Tuckerman の差分法<sup>20), 21)</sup> によって求めるべきではあるが、視察によっても実用上大差がないので、ここでは後者によった。 $\sigma_{CR}$  は臨界応力を示し、 $\epsilon_c$  は縦圧縮ひずみ、 $\epsilon_T$  は横引張りひずみである。 $\epsilon_V$  は体積ひずみで  $\epsilon_V = \epsilon_c - 2\epsilon_T$  より計算した値である。 $\sigma_p$  を決定する場合、False

3. 実験結果と考察

(1) 実験結果

圧縮応力-ひずみ曲線・ポアソン比曲線・超音波伝播速度曲線をシリーズ I, II, III のうちの代表的な例について、図-2、図-3 に示す。

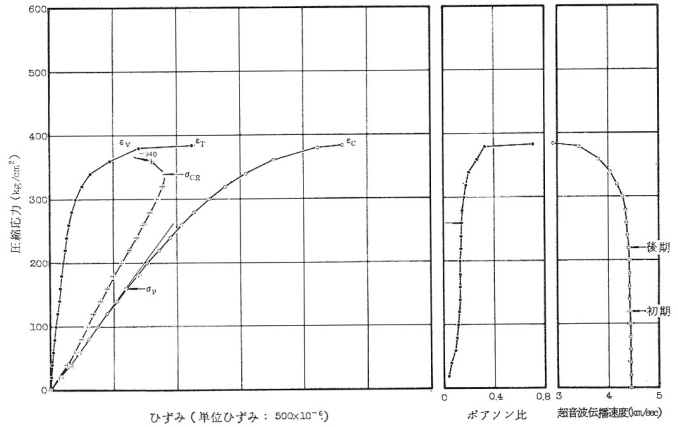


図-2 供試体 No. 3-15-IB の応力-ひずみ・ポアソン比・超音波伝播速度線図

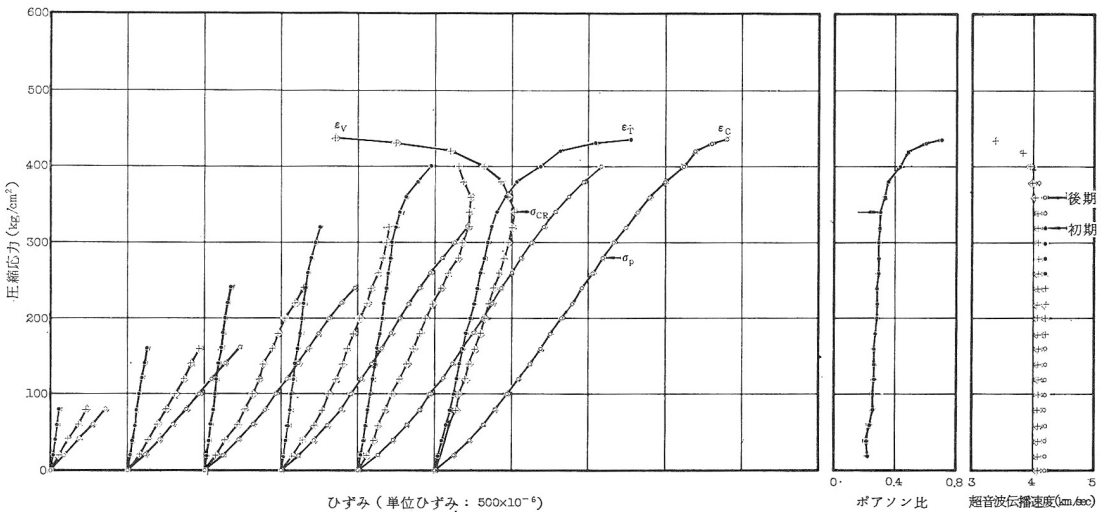


図-3 供試体 No. 3-15-IA の各応力レベルまでの応力-ひずみ・ポアソン比・超音波伝播速度線図

strain のある応力-ひずみ曲線もあるが、このひずみはコンクリートの他の性質には関係がない<sup>23)</sup>とされているので、True origin を視察によって決め、 $\sigma_p$  を求めた。繰り返し载荷によって応力-ひずみ曲線が著しく影響を受けていると推定される場合には、圧縮強度より低い応力レベルの応力-ひずみ曲線から  $\sigma_p$  および  $\sigma_{CR}$  を求めた。圧縮応力-ポアソン比曲線では、連続的にポアソン比が増大開始する点に矢印をつけたが、これは開始応力 (Initiation stress) に相当する。

圧縮応力-超音波伝播速度曲線では、応力レベルごと

に記号を変えて変化のようすを示した。また、低い応力レベルで初めて変化を開始する点に「初期」の矢印を、応力レベルが上昇し伝播速度が大きく変化し始める点に「後期」の矢印をつけた。しかし、超音波伝播速度測定器で「初期」を明らかに捕そくできない場合もあった。おのおのの供試体の変形特性値の平均値と標準偏差を表一4、5、6 にそれぞれシリーズ I, II, III ごとに示す。同表中、 $\epsilon_{VCR}$  は臨界応力に対応する臨界体積ひずみである。 $\sigma_u$  は圧縮強度で、 $\epsilon_u$  はそのときのひずみ度である。 $V_{I0}$ ,  $V_{Iu}$  はそれぞれ载荷前および終局強度に達

表一4 特性値の平均値・標準偏差の一覧表 (シリーズ I)

配合比	スランブ	供試体番号	見掛けの比例限度		臨界点			終局点		$V_{I0}$ (m/sec)	$V_I$ 変化点				$V_{Iu}$ (m/sec)	ポアソン比変化開始点	
			応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ度 ( $\times 10^{-6}$ )	$\sigma_{CR}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{CR}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{VCR}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$ ( $\times 10^{-6}$ )		応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )		ひずみ度 ( $\times 10^{-6}$ )			応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ度 ( $\times 10^{-6}$ )
											初期	後期	初期	後期			
1:1:2	3	2-3-I cm (A~D)	335	910	523	1481	725	580	1864	4400	270	726	525	1475	3747	495	1374
			65	225	39	203	200	20	239	244	94	213	48	228	140	43	217
1:1:2	15	2-15-I cm (A~G)	331	1187	448	1671	794	515	2286	4489	266	966	417	1531	3517	417	1520
			40	188	78	342	389	41	555	171	86	240	54	316	535	71	263
1:1.5:3	3	3-3-I cm (A~D)	350	1263	430	1586	785	511	2110	4556	315	1131	450	1675	3719	410	1500
			30	120	36	212	196	34	216	239	68	253	30	114	561	46	207
1:1.5:3	15	3-15-I cm (A~D)	205	659	350	1202	614	395	1594	4337	207	735	300	959	3450	315	1017
			57	303	30	243	215	37	527	152	84	358	55	258	429	59	201
1:2:4	3	4-3-I cm (A~E)	204	640	340	1277	736	388	1748	4144	212	741	332	1229	3187	332	1212
			29	133	13	299	265	29	206	324	52	227	27	283	331	16	232
1:2:4	15	4-15-I cm (A~D)	165	789	235	1153	510	312	2243	4265	130	670	240	994	3417	228	1095
			17	214	22	375	228	22	847	184	8	194	37	530	263	24	276
1:3:6	3	6-3-I cm (A~G)	156	637	236	1137	581	279	1889	4150	153	670	220	999	3238	224	1026
			37	108	11	187	120	23	281	306	26	27	18	102	325	17	112
1:3:6	15	6-15-I cm (A~E)	100	595	152	1028	534	191	2282	4190	85	546	146	1028	3325	140	1014
			46	267	48	77	77	39	841	223	39	237	36	329	672	28	476

備考：上段 平均値，下段 標準偏差

表一5 特性値の平均値・標準偏差の一覧表 (シリーズ II)

配合比	スランブ	供試体番号	見掛けの比例限度		臨界点			終局点		$V_{I0}$ (m/sec)	$V_I$ 変化点				$V_{Iu}$ (m/sec)	ポアソン比変化開始点	
			応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ度 ( $\times 10^{-6}$ )	$\sigma_{CR}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{CR}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{VCR}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$ ( $\times 10^{-6}$ )		応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )		ひずみ度 ( $\times 10^{-6}$ )			応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ度 ( $\times 10^{-6}$ )
											初期	後期	初期	後期			
1:1:2	3	2-3-II cm (A~D)	315	1001	483	1619	938	523	1824	4578	120	323	440	1439	3804	450	1500
			55	230	32	106	129	45	198	115	20	28	51	228	167	30	138
1:1:2	15	2-15-II cm (A~E)	320	1061	470	1677	864	521	2038	4431	280	994	436	1567	3630	460	1631
			52	233	9	483	290	26	697	110	33	249	23	417	385	18	497
1:1.5:3	3	3-3-III cm (A~E)	280	1067	392	1574	941	462	2154	4610	270	1093	380	1530	3852	392	1566
			52	304	57	250	368	45	270	86	46	310	36	264	308	59	214
1:1.5:3	15	3-15-III cm (A~E)	208	718	306	1094	592	387	1879	4339	127	403	292	1003	3343	288	996
			20	234	56	361	213	36	656	149	68	105	48	250	465	57	255
1:2:4	3	4-3-II cm (A~E)	192	745	304	1304	733	351	1912	4241	170	599	280	1143	3593	288	1190
			48	214	39	228	129	37	765	215	83	278	57	224	436	47	172
1:2:4	15	4-15-II cm (A~E)	174	657	248	1009	521	339	2102	4243	50	285	256	1010	3454	242	957
			34	246	33	382	224	27	609	147	0	0	23	148	263	31	328
1:3:6	3	6-3-II cm (A~G)	127	677	200	1162	580	242	1899	4151	87	466	174	969	3319	186	1024
			21	180	19	235	171	13	435	278	38	226	16	185	362	24	160
1:3:6	15	6-15-II cm (A~E)	70	492	138	1116	594	168	2062	4096	25	176	124	956	3113	116	865
			18	159	13	300	148	10	490	165	9	106	8	295	394	21	271

備考：上段 平均値，下段 標準偏差

表-6 特性値の平均値・標準偏差の一覧表 (シリーズ III)

配合比	スランブ	供試体 番号	見掛けの比例限度		臨 界 点			終 局 点		$V_{I0}$ (m/sec)	$V_I$ 変 化 点				$V_{Iu}$ (m/sec)	ポアソン比変 化開始点	
			応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ度 ( $\times 10^{-6}$ )	$\sigma_{CR}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_{CR}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\epsilon_{VCR}$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\sigma_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_u$ ( $\times 10^{-6}$ )		応 力 度 (kg/cm <sup>2</sup> )		ひ ず み 度 ( $\times 10^{-6}$ )			応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	ひずみ度 ( $\times 10^{-6}$ )
											初期	後期	初期	後期			
1:1:2	3 cm (A~D)	2-3-III	245	1026	378	1575	772	447	2398	4328	265	1101	350	1441	3220	360	1483
		9	196	41	136	182	20	515	83	17	163	41	191	154	49	90	
1:1:2	15 cm (A~D)	2-15-III	223	1174	290	1509	725	403	2785	4316	210	1140	318	1683	3496	278	1468
		23	109	60	181	144	26	187	83	10	219	25	270	103	48	138	
1:1.5:3	3 cm (A~D)	3-3-III	240	1035	315	1370	681	376	2110	4282	230	994	318	1389	3306	310	1345
		14	63	33	90	123	12	159	50	17	62	23	111	134	30	121	
1:1.5:3	15 cm (A~D)	3-15-III	140	775	223	1248	618	295	2599	4157	133	743	198	1074	2641	220	1236
		14	202	4	139	172	12	316	93	13	167	11	179	217	0	154	
1:2:4	3 cm (A~D)	4-3-III	138	894	243	1598	841	289	2583	4102	138	890	228	1473	3241	228	1456
		13	321	8	155	127	9	217	124	33	331	13	188	189	19	304	
1:2:4	15 cm (A~D)	4-15-III	110	769	198	1434	667	253	2819	3842	93	644	183	1313	2701	188	1311
		23	247	16	238	129	7	531	252	35	300	15	148	172	23	222	
1:3:6	3 cm (A~D)	6-3-III	65	451	146	1196	781	175	2318	3849	75	519	130	1004	2500	135	1045
		11	169	21	198	48	19	445	122	25	190	19	167	398	15	104	
1:3:6	15 cm (A~D)	6-15-III	40	373	98	984	463	142	2940	3822	25	234	88	863	2233	93	896
		12	237	16	132	169	4	917	274	9	160	18	182	105	19	197	

備考: 上段 平均値, 下段 標準偏差

したときの超音波縦波伝播速度である。 $V_I$  変化点とは、  
圧縮応力-超音波伝播速度曲線において、「初期」およ  
び「後期」のそれぞれの変化点の応力度とひずみ度とを  
示す。

変形特性値の比率の平均値と応力比およびひずみ比と  
の関係を、それぞれ図-4、図-5 に示す。図-6, 7,  
8, 9 にそれぞれ配合比 1:1:2, 1:1.5:3, 1:2:4,  
1:3:6 の応力比-ひずみ (縦ひずみ  $\epsilon_C$ , 体積ひずみ  
 $\epsilon_V$ ), 超音波伝播速度, 動弾性係数, 対数減衰率等の関  
係を養生条件が変わることによって, どのように変化す  
るかを示した。

(2) 結果の考察

a) 圧縮強度と養生方法

表-4~表-6 から,

- シリーズ I では 580 kg/cm<sup>2</sup>~191 kg/cm<sup>2</sup>,
- シリーズ II では 523 kg/cm<sup>2</sup>~168 kg/cm<sup>2</sup>,
- シリーズ III では 447 kg/cm<sup>2</sup>~142 kg/cm<sup>2</sup>

をそれぞれカバーしており, シリーズ差つまり養生の乾  
・湿の影響が, 他の文献<sup>23)</sup>と同様に明りょうに現われて  
いることがわかる。

b) 見掛けの比例限度と圧縮強度

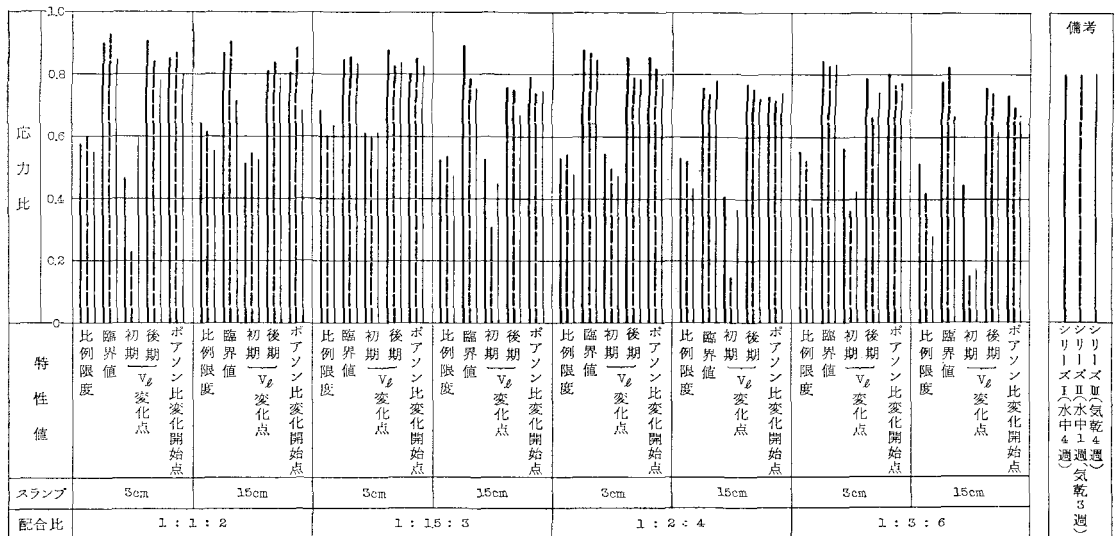


図-4 変形特性値の比率の平均値と応力比との関係

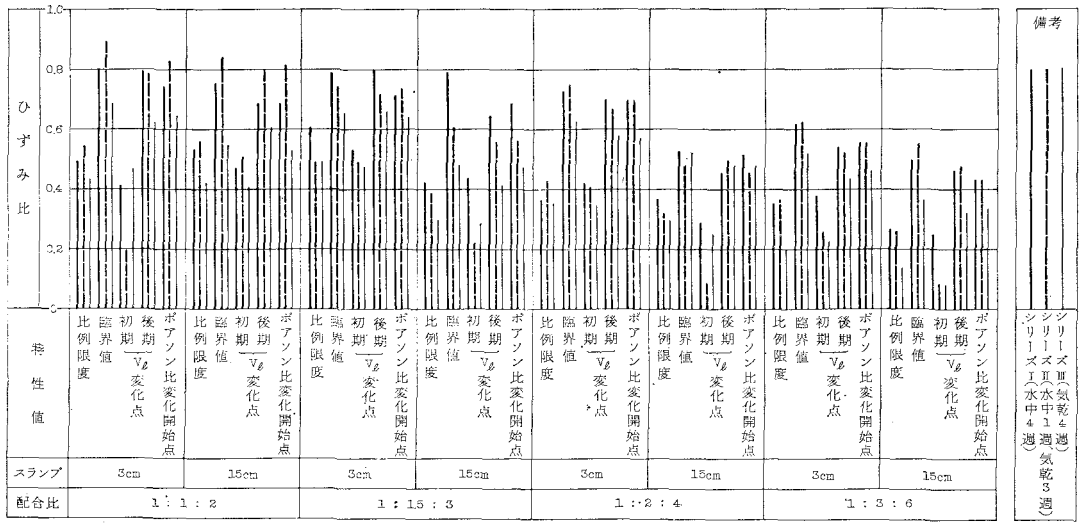


図-5 変形特性値の比率の平均値とひずみ比との関係

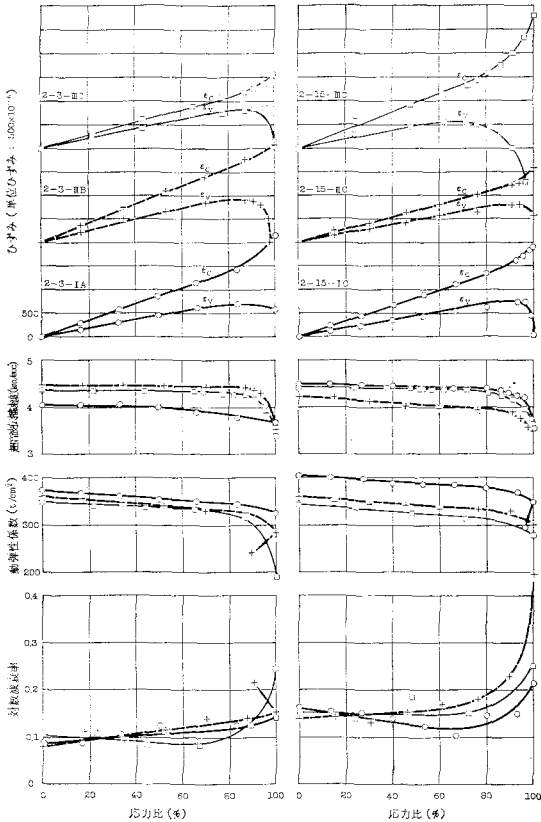


図-6 応力比-ひずみ・超音波伝播速度・動弾性係数・対数減衰率等の関係 (1:1:2)

比例限度は付着ひびわれが開始し、コンクリートの内部構造組織に変化が生じたという外的なパラメーターの一つとして重要な点である<sup>24)</sup>。表-4~表-6 から、

シリーズ I では  $335 \text{ kg/cm}^2 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$ ,

応力比では  $0.64 \sim 0.51$

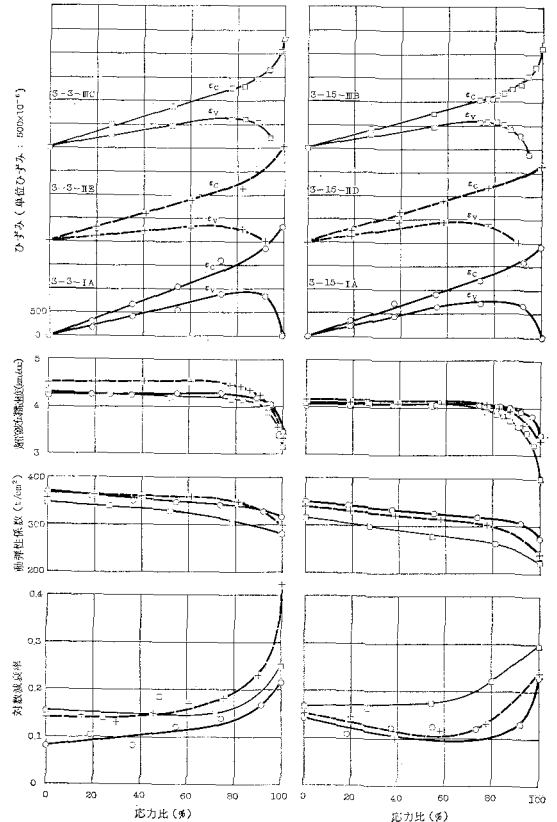


図-7 応力比-ひずみ・超音波伝播速度・動弾性係数・対数減衰率等の関係 (1:1.5:3)

シリーズ II では  $315 \text{ kg/cm}^2 \sim 70 \text{ kg/cm}^2$ ,

応力比では  $0.61 \sim 0.42$

シリーズ III では  $245 \text{ kg/cm}^2 \sim 40 \text{ kg/cm}^2$ ,

応力比では  $0.64 \sim 0.28$

をそれぞれカバーしており、さらに、図-10 に示す圧

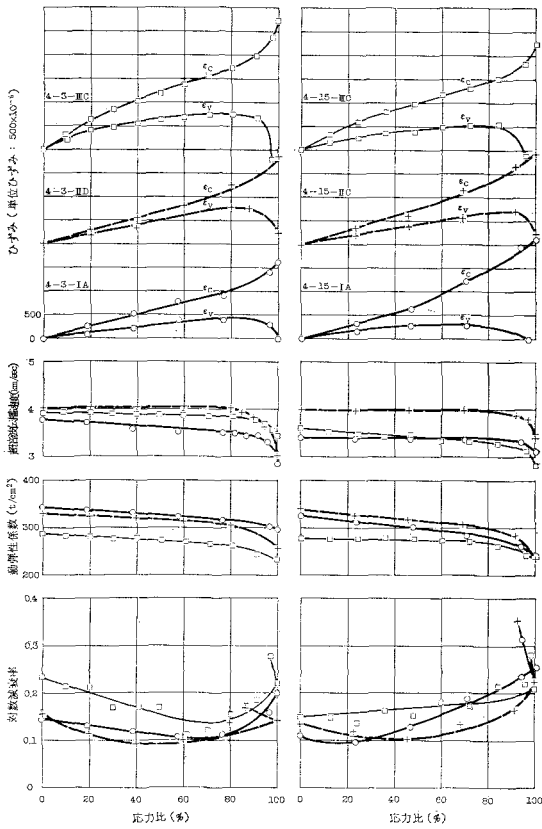


図-8 応力比-ひずみ・超音波伝播速度・弾性係数・対数減衰率等の関係 (1:2:4)

縮強度と見掛けの比例限度の応力比とは式(1)のような二次曲線で近似される。

$$\sigma_p/\sigma_u = 0.163 + 0.00159\sigma_u - 0.00000142\sigma_u^2 \dots\dots\dots (1)$$

$\sigma_p$ : 見掛けの比例限度 (kg/cm<sup>2</sup>)  
 $\sigma_u$ : 圧縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

比例限度は一定応力比ではなく、強度の増大とともに大きくなり、また、圧縮強度が 200 kg/cm<sup>2</sup> 以下の強度では急激に低下することがわかる。

e) 開始応力と圧縮強度

開始応力 (Initiation stress) は付着ひびわれの急激な増加によって、ポアソン比の増大がもたらされる応力度であるが<sup>24)</sup>、この事実は前報<sup>17)</sup>において確認したとおりである。

表-4~表-6 より、ポアソン比変化開始点つまり開始応力比は、

- シリーズIの平均圧縮強度 580 kg/cm<sup>2</sup>~191 kg/cm<sup>2</sup> に対し、開始応力比は 0.88~0.69
- シリーズIIの平均圧縮強度 523 kg/cm<sup>2</sup>~168 kg/cm<sup>2</sup> に対し、開始応力比は 0.88~0.69
- シリーズIIIの平均圧縮強度 447 kg/cm<sup>2</sup>~142 kg/cm<sup>2</sup>

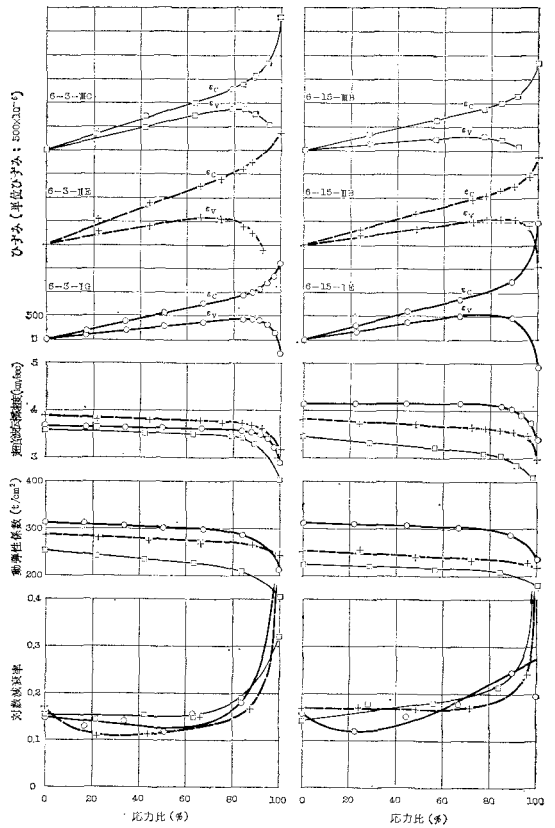


図-9 応力比-ひずみ・超音波伝播速度・弾性係数・対数減衰率等の関係 (1:3:6)

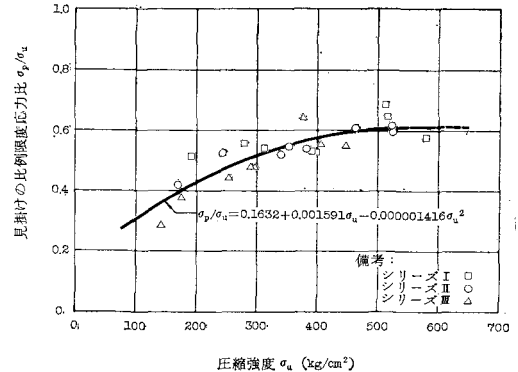


図-10 見掛けの比例限度応力比と圧縮強度との関係 に対し、開始応力比は 0.82~0.65

となり、平均強度範囲 580 kg/cm<sup>2</sup>~142 kg/cm<sup>2</sup> に対し、開始応力比は 0.88~0.65 である。

開始応力比と圧縮強度との関係を 図-11 に示す。開始応力も一定応力比ではなく、強度の増大とともに式(2)の一次関数で近似されて大きくなる。

$$\sigma_i/\sigma_u = 0.660 + 0.000337\sigma_u \dots\dots\dots (2)$$

$\sigma_i$ : 開始応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

d) 臨界応力と圧縮強度

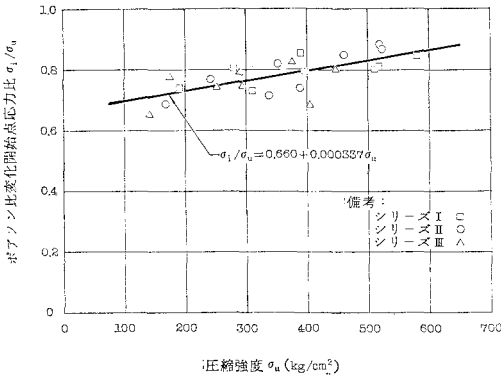


図-11 ポアソン比変化開始点応力比と圧縮強度との関係

臨界応力に達すると、付着ひびわれの急増のほかに、モルタルひびわれが連続ひびわれに成長し始める。

平均強度範囲約 600~150 kg/cm<sup>2</sup> に対し、臨界応力比は約 0.95~0.70 となる。また、臨界応力比と圧縮強度との関係を、図-12 に示す。臨界応力も一定応力比ではなく、圧縮強度の増大とともに式 (3) の一次関数で近似されて大きくなる。

$$\sigma_{CR}/\sigma_u = 0.722 + 0.000287 \sigma_u \dots\dots\dots (3)$$

$\sigma_{CR}$ ：臨界応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

e) 超音波伝播速度と微小ひびわれ

① 載荷前の超音波縦波伝播速度：一般に超音波縦波伝播速度は、コンクリートの配合や乾・湿の程度によって変化するので、圧縮強度そのものを正確に推定することはむずかしいが、大略の格付けは可能である<sup>25)</sup>。

実施コンクリートの強度の判定には<sup>26)</sup>、セメント・骨材・養生方法・粗骨材量などが一定の場合には、あらかじめ速度と強度との関係曲線を作成しておけば、かなり正確に強度が判定できることになる<sup>27)~30)</sup>。また、コンクリートの均一性と品質変化の追跡には適当であるので、ここでは主としてこの目的に利用するものである<sup>26)</sup>。

コンクリートの圧縮強度あるいは品質と超音波伝播速度との相関規準<sup>25), 31), 32)</sup> としては、米・英およびカナダは同一で、品質の評語と伝播速度とで与えられている。

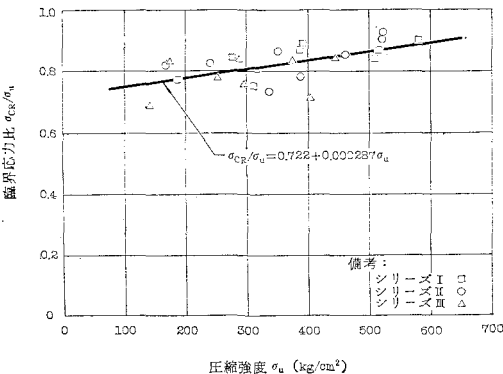


図-12 臨界応力比と圧縮強度との関係

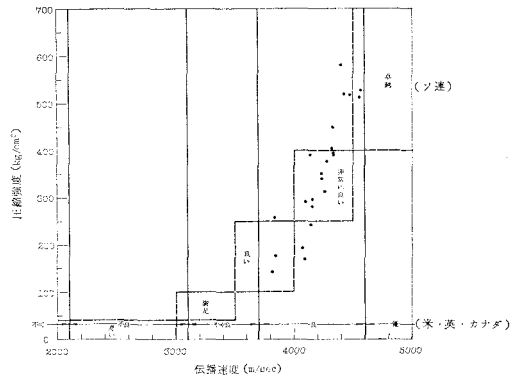


図-13 超音波縦波伝播速度と品質

また、ソ連は品質の評語および強度水準と伝播速度で限定している。表-4~表-6 の圧縮強度と超音波縦波伝播速度とを一括して図-13 に示す。同図には米国、ソ連などの品質規準をも併記した。

図-13 から、ソ連の規準がより木目の細かいものであること、また、合理的であることがわかる。本実験で採用した配合比をもつコンクリートは品質「良」以上の広範な品質を示す普遍性のあるデータといえよう。

② 超音波縦波伝播速度の初期変化点：伝播速度変化点を追跡することは、圧縮力を受けたコンクリートが、供試体中に微小ひびわれを開始する応力度を決めるという意味において重要である。ひびわれは組織の連続性を乱す内部破壊を示すもので、これらの長さは 2~3 mm、幅は 2~3 μ であって、荷重の増加によりひびわれ密度は高まり かつ 成長し、それらが結合して破壊に至るもの<sup>33)</sup>といわれている。

Jones は応力比 0.25~0.30<sup>34)</sup> または 0.30~0.60<sup>35)</sup> で、L'Hermite は 0.50~0.75<sup>33), 36)</sup>、川上は 0.60~0.90<sup>37)</sup> でそれぞれ伝播速度は低下すると報告している。このように大きな差が生じるのは、一つには超音波透過振動子等の周波数特性に強く依存するものとも考えられる。ここでは 200 kHz の周波数特性の振動子を使用し、かつ、市販装置の回路に一部修正を加え、CRT の立ち上がり特性を改良するなどして、きわめて慎重に超音波伝播速度の変化を追跡したもので、後期変化点に比し、微妙な現象で若干のばらつきは免れ得ないようである。

表-4~表-6 より圧縮強度と超音波初期変化点応力比とを図-14 に示す。強度範囲 580~142 kg/cm<sup>2</sup> に対し、初期の伝播速度変化応力比は 0.61~0.15 で、両者は式 (4) のような二次曲線で近似される。

$$\sigma_l/\sigma_u = -0.1687 + 0.003267 \sigma_u - 0.000003644 \sigma_u^2 \dots\dots\dots (4)$$

$\sigma_l$ ：超音波縦波伝播速度の初期変化点応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

③ 超音波縦波伝播速度の後期変化点：超音波伝播速度の後期変化開始点は、臨界応力近傍より急激に低下し



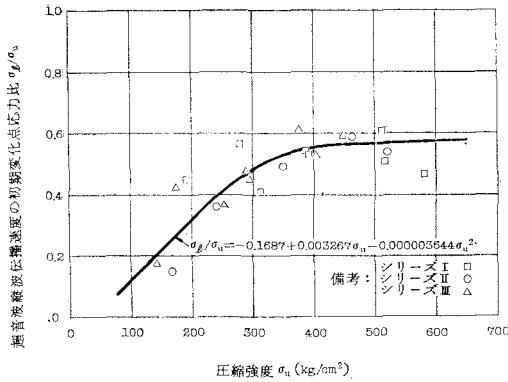


図-14 超音波縦波伝播速度の初期変化点応力比と圧縮強度との関係

始める応力度であり、したがって、付着ひびわれやモルタルひびわれが急増することを意味する。これは下臨界応力 (Lower critical stress)<sup>38)</sup>とも呼ばれている。表-4~表-6より、強度範囲 580~142 kg/cm<sup>2</sup> に対し、後期の伝播速度変化点応力比は 0.90~0.62 で、両者を図-15 に示す。それらの相関式は式 (5) のような一次関数で近似される。

$$\sigma_i'/\sigma_u = 0.6294 + 0.000420 \sigma_u \dots\dots\dots (5)$$

$\sigma_i'$ : 超音波縦波伝播速度の後期変化点応力 (kg/cm<sup>2</sup>)

④ 終局強度における超音波縦波伝播速度: 表-4~表-6 の  $V_{lu}$  は供試体が圧縮強度に達した時点で示す超音波伝播速度であって、強度範囲 580~142 kg/cm<sup>2</sup> に対し、3 850~2 200 m/sec とかなり大きく、図-13 に示すように米国標準によれば、コンクリートの品質は「良」「やや良」また「不良」と格付けされる。

前述のようにコンクリートの内部組織が網状ひびわれによって、完全に連続性が失われているにもかかわらず、超音波伝播速度のみの情報では、このような評価が行なわれる危険があり、強度的信頼性は確保できないことがわかる。

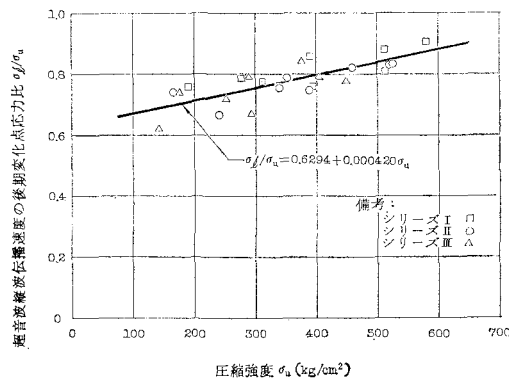


図-15 超音波縦波伝播速度の後期変化点応力比と圧縮強度との関係

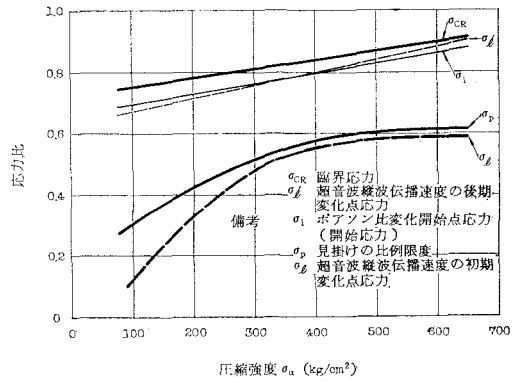


図-16 圧縮強度—変形特性値の応力比曲線

f) 圧縮強度と見掛けの比例限度・臨界点・超音波縦波伝播速度変化点・開始応力等の応力比との関係

前節までの b)~e) より求めた変形特性値の応力比—強度曲線を図-16 に一括して示す。

図から、超音波伝播速度の初期変化点は、見掛けの比例限度より低い応力比で生じ、とくに、圧縮強度が 250 kg/cm<sup>2</sup> より小さい場合には、かなり低い応力比で伝播速度は低下し始める。

圧縮強度が約 350 kg/cm<sup>2</sup> より小さい強度では、超音波伝播速度の後期変化点が開始応力よりも低い応力比で始まり、また、約 350 kg/cm<sup>2</sup> より高い場合には、超音波伝播速度変化点が開始応力よりも遅れる傾向が生じる。しかし、工学的には超音波伝播速度後期変化点と開始応力とは、ほぼ一致するといつてよいであろう。この両者にやや遅れて臨界応力に達する。開始応力、すなわち、ポアソン比の変動開始とか超音波伝播速度の後期変化点は、応力比で 0.05 (5%) ほど高い臨界応力の先駆現象と評価される。

g) 圧縮強度と見掛けの比例限度・臨界点・超音波縦波伝播速度変化点・ポアソン比変化開始点等のひずみ比との関係

畑野<sup>39)</sup>によれば、コンクリートの破壊は過去のひずみ履歴には関係せず、ひずみ能力を破壊の基準と考えてその破壊を論じうるとしており、軸方向平均ひずみ能力を約  $2100 \times 10^{-6}$  としている。

本節では圧縮ひずみ能力を基準にして、おのおのの変形特性値を検討する。表-4~表-6 の終局点の平均応力度 (圧縮強度) と平均ひずみ度を、図-17 に示す。全シリーズの平均終局ひずみ  $\epsilon_u$  は  $2185 \times 10^{-6}$  で、標準偏差は約  $350 \times 10^{-6}$ 、変動係数は 16.0% であった。

前記した  $2100 \times 10^{-6}$  とは大差なく一致している。

各供試体の終局ひずみを基準にした変形特性値のひずみ比の平均値と圧縮強度との関係を、図-18~図-22 に示す。

図-18 は圧縮強度—見掛けの比例限度 ひずみ比曲線

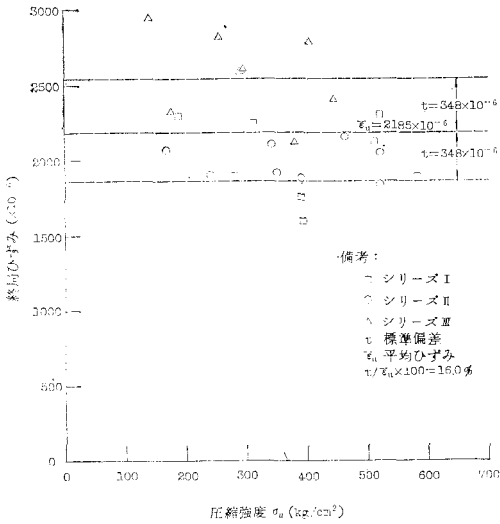


図-17 圧縮強度と終局ひずみとの関係

で、式(6)のようにほぼ二次関係で表わされる。

$$\epsilon_p/\epsilon_u = 0.023 + 0.00125 \sigma_u - 0.00000535 \sigma_u^2 \quad \dots\dots\dots (6)$$

ε<sub>p</sub>: 見掛けの比例限度における縦ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

ε<sub>u</sub>: 圧縮強度に対応する終局ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

図-19 は圧縮強度—超音波縦波伝播速度の初期変化開始点ひずみ曲線で、式(7)の二次関数で近似される。

$$\epsilon_l/\epsilon_u = 0.249 + 0.00280 \sigma_u - 0.00000269 \sigma_u^2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

ε<sub>l</sub>: 伝播速度の初期変化点縦ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

図-20 は圧縮強度—超音波縦波伝播速度の後期変化開始点ひずみ曲線で、式(8)の一次関数で近似される。

$$\epsilon_l'/\epsilon_u = 0.241 + 0.000982 \sigma_u \quad \dots\dots\dots (8)$$

ε<sub>l</sub>' : 伝播速度の後期変化点縦ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

図-21 は圧縮強度—ポアソン比変化開始ひずみ曲線で、式(9)の一次関数で近似される。

$$\epsilon_i/\epsilon_u = 0.266 + 0.000918 \sigma_u \quad \dots\dots\dots (9)$$

ε<sub>i</sub>: 開始応力 (σ<sub>i</sub>) に対応する縦ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

図-22 は圧縮強度—臨界ひずみ比曲線で、式(10)の

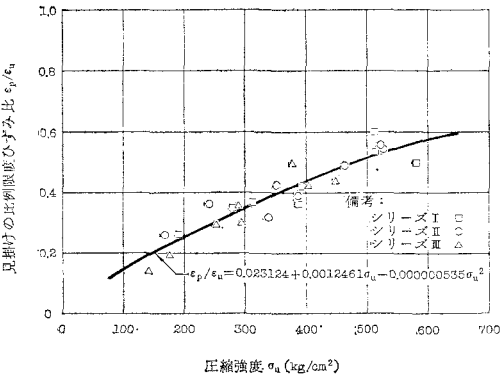


図-18 見掛けの比例限度ひずみ比と圧縮強度との関係

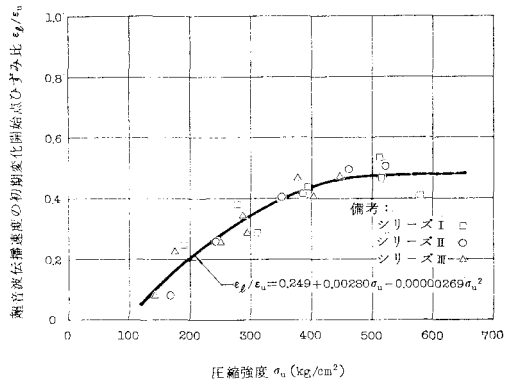


図-19 超音波伝播速度の初期変化開始点ひずみ比と圧縮強度との関係

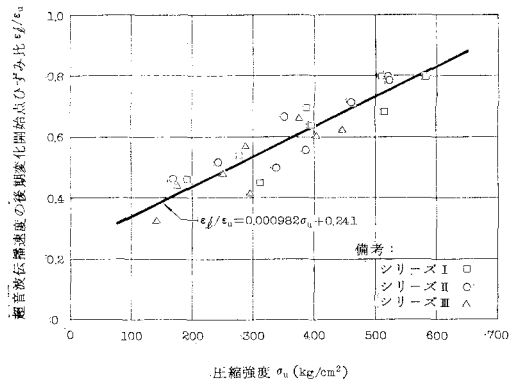


図-20 超音波伝播速度の後期変化開始点ひずみ比と圧縮強度との関係

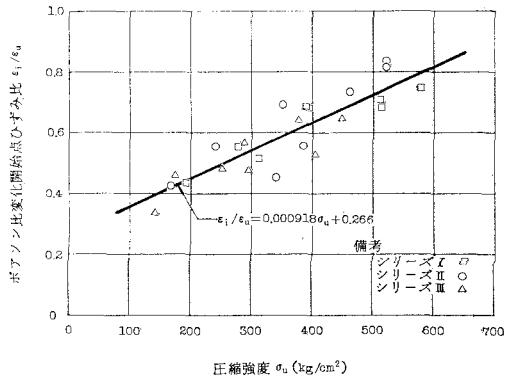


図-21 ポアソン比変化開始点ひずみ比と圧縮強度との関係  
一次関数で近似される。

$$\epsilon_{CR}/\epsilon_u = 0.323 + 0.000882 \sigma_u \quad \dots\dots\dots (10)$$

ε<sub>CR</sub>: 臨界応力 (σ<sub>CR</sub>) に対応する縦ひずみ (×10<sup>-6</sup>)

式(6)~(10)を図-23に一括して示す。図から、圧縮強度 500~250 kg/cm<sup>2</sup>では超音波伝播速度の初期変化点は見掛けの比例限度とほぼ一致し、250 kg/cm<sup>2</sup>以下の低強度では低目のひずみ比で伝播速度は変化し始める。開始応力に対応するひずみは、伝播速度の初期変化点ひずみとほぼ一致し、このひずみよりもやや高い臨

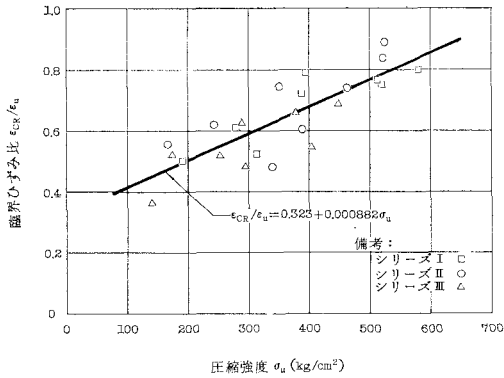


図-22 臨界ひずみ比と圧縮強度との関係

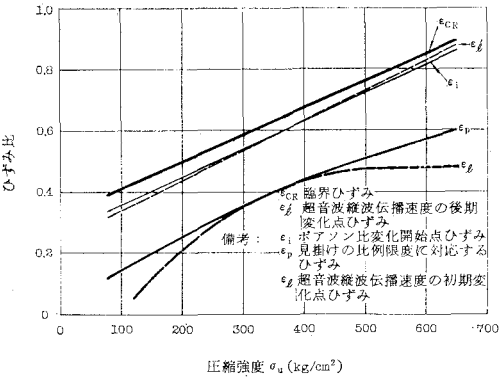


図-23 圧縮強度—変形特性値のひずみ比曲線

界ひずみの先駆現象である。

以上の圧縮強度—変形特性値ひずみ比関係は、圧縮強度—変形特性値応力比関係と全く類似していることがわかる。

h) 変形特性値と配合比

変形特性値の応力比およびひずみ比を、配合比をパラメーターとして図-4、図-5 にそれぞれを示す。

まず、図-4 から

① 見掛けの比例限度は 1:1:2 の富配合から 1:3:6 といった貧配合になるにしたがい、応力比 0.6 程度からしだいに低下し、0.4 程度にまで低下する。1:2:4 のやわ練りあるいは 1:3:6 になると養生方法の差が現われ、気乾養生期間が長いほど比例限度は低くなる。

② 臨界応力は、応力比で 0.9~0.7 程度であり、富配合から貧配合になるにしたがい、スランプ値の大きいほど、気乾養生期間の長いほど低くなる。

③ 超音波伝播速度の初期変化点は、観察技術上微妙な困難性は伴うが、一般に見掛けの比例限度よりも低い応力比で、とくに、強度 250 kg/cm<sup>2</sup> 以下で早期に現われる。

④ 超音波伝播速度の後期変化点は、伝播速度が明りように低下し始める点で比較的容易に捕えることがで

き、配合比・スランプ・養生方法の影響は臨界応力の場合と同様である。しかし、臨界応力よりも約 5% ほど低い応力レベルで出現する。

⑤ ポアソン比変化開始点は、超音波伝播速度の後期変化開始点とほぼ合致し、配合比等の影響も同様である。

図-5 から、

⑥ “ひずみ能力一定” という破壊基準に基づいて、ひずみ比で変形特性値を整理すると、比例限度・臨界値・超音波変化点・ポアソン比変化開始点等の評価は、応力比で表現した場合と比較すると比率の絶対値は小さいが、ほぼ同様であることがわかった。

i) 対数減衰率と応力比および圧縮強度

供試体の内的欠陥に基づく非弾性的性質を、内部摩擦の一つの表示法である対数減衰率で論ずべきことを、先において述べた<sup>17)</sup>。

Jones ら<sup>40)</sup>によると、「減衰はある配合のコンクリートよりも相当モルタルの方が高い。また、減衰は高強度配合の場合よりも、貧配合コンクリートの方が大きく、砕石コンクリートの方が、天然砂利コンクリートよりも、わずかではあるが高い傾向にある。コンクリートの減衰はセメントペースト中の空げき (Water void) とか、ペーストと細・粗骨材粒子間界面がある程度までおもな原因となっている。減衰と動弾性係数・圧縮や曲げ強度間には特別な関係<sup>41), 42)</sup>はない」と報告している。

いま、配合比を 1:1:2、スランプ 15 cm、養生方法はシリーズ II で水中 7 日、気乾 21 日の 3 本の供試体の応力比と対数減衰率との関係を図-24 に示す。

載荷前の対数減衰率は同一配合比のコンクリートであっても、それぞれの供試体に固有の物理的性質やコンクリートの内部組織、ピックアップの位置といった機械的な原因 (セメントペースト中の Water void や Air void

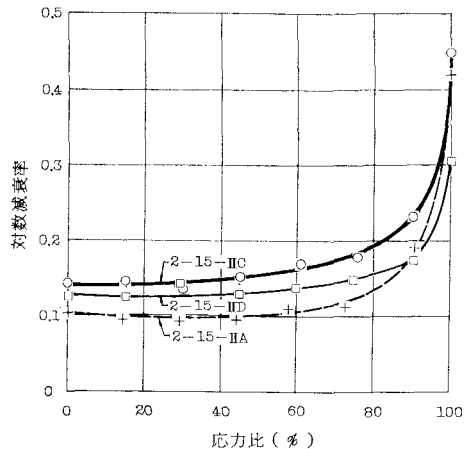


図-24 同一配合比のコンクリートの対数減衰率と応力比 (1:1:2、スランプ 15 cm、シリーズ II)

の存在，材料間の境界でのひびわれや音響的不一致“Acoustical mismatch”など<sup>42),43)</sup>に支配されるので，若干の変動は免れることはできないようである。

また，図-25 に圧縮強度と対数減衰率との関係を示す。両者は式(11)のような一次関数で表現されることがわかる。

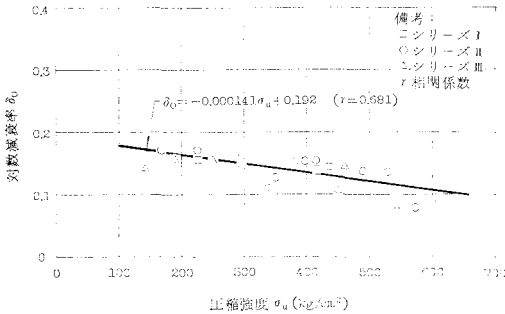


図-25 対数減衰率と圧縮強度との関係

$$\delta_0 = -0.000141 \sigma_u + 0.192 \quad (r=0.681) \dots (11)$$

$\delta_0$ ： 載荷前の対数減衰率

$r$ ： 相関係数

すなわち，コンクリートの圧縮強度の高いものほど対数減衰率は小さく，強度の低いものほど大きくなり，また，他の報告<sup>44)</sup>と同様に供試体の乾燥度の影響はあまり顕著ではないことがわかる。

本研究においてもっとも重要な点は，載荷前の供試体間に対数減衰率の差があるとしても，最初に対数減衰率の値が載荷によって相対的にどのように変化していくかということである。

この考えは「内部摩擦  $Q$  は圧縮力とともに増大し，また，ある材料の  $Q$  値はその個々の履歴に依存する<sup>45)</sup>」という報告と一致する。

図-24 はその一例であるが，ある応力比に達すると対数減衰率は急激に大きくなるのが特徴的である。金属の曲げ疲労試験片にも，ほぼ同様の現象が観察されている<sup>46)</sup>。

圧縮強度に達した供試体から荷重を解放し，その直後の対数減衰率と約 24 時間経過したあとで測定した値とは差がなく，したがって，コンクリートでは Köster 効果<sup>47)</sup>は現われていない。

図-6，図-7，図-8，図-9 には，それぞれ 1:1:2, 1:1.5:3, 1:2:4, 1:3:6 の配合比の場合の対数減衰率と応力比との関係を併記した。

対数減衰率は応力比の増大とともに単調に増大するもの，あるいはまた，見掛けの比例限度と超音波伝播速度の後期変化点(下臨界点)近傍にかけてやや低下し，再び増大開始するものなどがあるが，どちらの挙動を示すかは即断はできない。しかし，共通的にいえることは，対数減衰率は比例限度と下臨界点近傍からしだいに増大

し，臨界応力に達すると，急激に増大するというのである。

以上から，コンクリートへの載荷力が増大すると微小ひびわれが発達し，その結果内部摩擦が増加する。とくに網状モルタルひびわれが形成される臨界応力以上の応力レベルで，対数減衰率の増加が著しくなるものと評価されよう。

### j) 動弾性係数と静弾性係数および応力比

初期接線係数のみは各種の弾性係数のうち，応力度の大きさには関係がなく，同品質のコンクリートには常に一定値を示し，また，動弾性係数はコンクリートの品質のほか強度や耐久性を評価する場合に，非破壊的に求めうる物理定数としてきわめて重要である。

① 動弾性係数と静弾性係数：動弾性係数と静弾性係数との関係については，諸氏の研究がある。たとえば，すでに動弾性係数 ( $E_D$ ) と初期接線係数 ( $E_S$ ) との比  $\lambda = E_D/E_S$  は，種々養生方法を変えた場合材令 7 日で 1.4~1.6, 28 日で 1.3~1.8, 91 日で 1.2~1.5<sup>48)</sup>，材令 4 週~1 年で 1.037~1.370<sup>49)</sup> であること，そのほかコンクリートの養生期間中に養生方法を変えた場合の動弾性係数の変化のようすとか，圧縮強度や曲げ強度と動弾性係数との関係などについても論じられている<sup>50)~52)</sup>。

横道<sup>53)</sup>は 圧縮強度と初期接線係数との関係式を提示している。また，同氏ら<sup>54)</sup>はコンクリートの瞬間変形ひずみから求めた初期接線係数は，動弾性係数に近似していると述べている。

ここでは載荷前の動弾性係数が，載荷に伴ってどのように変化するかを中心に論じるが，表-7 に載荷前のコンクリート供試体の動弾性係数と初期接線係数，およびそれらの比率等の平均値を示す。表から，動弾性係数と初期接線係数との比は  $\lambda = 1.045 \sim 1.750$  で，低強度のコンクリートほど，また，乾燥度の影響のあるものほど大きいという一般的な傾向が認められる。

② 動弾性係数と応力比：図-6~図-9 に，それぞれ 1:1:2, 1:1.5:3, 1:2:4, 1:3:6 の配合比の場合の動弾性係数と応力比との関係を併記した。

図から，動弾性係数は配合比や養生方法を問わず，一様に応力比の増大とともに比例限度近傍まで直線的に低下し，さらに，しだいに低下率を増し，臨界応力近傍から顕著に低下する。

この現象は 内部摩擦と応力比との関係と同様に，微小ひびわれ成長の観点から説明できる。

k) 弾性係数をパラメーターとした応力-ひずみ線図前項 i) において，対数減衰率と圧縮強度との関係は式(11)で与えられることがわかったが，書き換えると式(12)となる。

$$\sigma_u = 1361 - 7092 \delta_0 \dots (12)$$

表-7 動弾性係数と初期接線係数

配合比	スランブ	シリーズ I					シリーズ II					シリーズ III				
		$E_D$	$E_S$	$E_a$	$E_D/E_S$	$E_a/E_S$	$E_D$	$E_S$	$E_a$	$E_D/E_S$	$E_a/E_S$	$E_D$	$E_S$	$E_a$	$E_D/E_S$	$E_a/E_S$
1:1:2	3 cm	392 18	375 38	316 41	1.045	0.843	365 5	320 45	269 23	1.140	0.841	357 7	248 52	199 57	1.432	0.802
	15 cm	355 36	284 82	240 62	1.250	0.845	344 19	317 89	251 84	1.085	0.792	351 11	227 5	146 19	1.460	0.643
1:1.5:3	3 cm	367 5	275 15	243 11	1.334	0.884	361 14	272 60	217 31	1.327	0.800	313 26	233 28	179 18	1.343	0.768
	15 cm	354 8	260 4	219 76	1.325	0.842	342 1	231 29	198 55	1.480	0.857	281 42	190 38	115 14	1.478	0.605
1:2:4	3 cm	341 5	265 41	225 30	1.286	0.849	304 28	241 34	209 65	1.261	0.867	309 37	218 6	113 7	1.417	0.518
	15 cm	333 5	249 9	156 47	1.359	0.627	342 8	246 55	161 38	1.390	0.654	247 39	167 24	92 15	1.479	0.551
1:3:6	3 cm	312 28	259 22	151 24	1.204	0.583	277 24	190 31	136 40	1.457	0.716	266 9	169 18	77 8	1.574	0.456
	15 cm	302 21	211 39	112 22	1.431	0.531	264 5	152 42	86 19	1.736	0.566	231 12	132 20	54 18	1.750	0.409

備考：上段  $E_D$  動弾性係数 (ton/cm<sup>2</sup>),  $E_S$  初期接線係数 (ton/cm<sup>2</sup>),  $E_a$  割線係数 (ton/cm<sup>2</sup>) 下段 標準偏差 (ton/cm<sup>2</sup>)

また、対数減衰率と縦ひずみとは式(13)で示される<sup>55)</sup>。

$$\delta = K_1 + K_2 \cdot \epsilon \dots \dots \dots (13)$$

ただし、 $K_1, K_2$ ：定数  $\delta$ ：対数減衰率  $\epsilon$ ：縦ひずみ  
ここで、

$$\left. \begin{aligned} \epsilon = 0 \text{ で } \delta = \delta_0 \\ \epsilon = \epsilon_u \text{ で } \delta = \delta_u \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (14)$$

ただし、 $\epsilon_u$ ：圧縮強度  $\sigma_u$  に対応する終局ひずみで、たとえば、 $\mathbf{g}$ )に示したように畑野は  $2100 \times 10^{-6}$ 、筆者の実測値は  $2185 \times 10^{-6}$  である。

$\delta_0$ ：載荷前の初期対数減衰率

$\delta_u$ ：圧縮強度  $\sigma_u$  に達したときの終局対数減衰率  
よって、

$$\left. \begin{aligned} K_1 = \delta_0 \\ K_2 = (\delta_u - \delta_0) / \epsilon_u^2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (15)$$

接線係数  $E_t$  と対数減衰率とは式(16)で与えられる<sup>55)</sup>。

$$E_t = a + b \cdot \delta \dots \dots \dots (16)$$

ただし、 $a, b$ ：定数

初期接線係数  $E_S$  は式(16)から、

$$(E_t)_{\delta=\delta_0} = a + b \cdot \delta_0 = E_S \equiv E_D / \lambda \dots \dots \dots (17)$$

式(13)、(15)から、

$$\delta = \delta_0 + (\delta_u - \delta_0) (\epsilon / \epsilon_u)^2 \dots \dots \dots (18)$$

式(16)、(18)から、

$$\sigma = \int_0^\epsilon E_t d\epsilon = \left\{ (a + b \delta_0) + \frac{b}{3} (\delta_u - \delta_0) (\epsilon / \epsilon_u)^2 \right\} \epsilon \dots \dots \dots (19)$$

式(19)の境界条件として

$$\epsilon = \epsilon_u \text{ で } \sigma = \sigma_u \dots \dots \dots (20)$$

とすると、式(19)は

$$a + \{ \delta_0 + (\delta_u - \delta_0) / 3 \} b = \frac{\sigma_u}{\epsilon_u} \equiv E_a \dots \dots \dots (21)$$

ただし、 $E_a$ ：割線係数

式(17)、(21)から、

$$\left. \begin{aligned} a = E_S + 3(E_S - E_a) / (\delta_u - \delta_0) \cdot \delta_0 \\ b = -3(E_S - E_a) / (\delta_u - \delta_0) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (22)$$

式(19)、(22)から、

$$\sigma = \{ E_S - (E_S - E_a) (\epsilon / \epsilon_u)^2 \} \cdot \epsilon \dots \dots \dots (23)$$

または、

$$\sigma = E_S \{ 1 - (1 - E_a / E_S) (\epsilon / \epsilon_u)^2 \} \cdot \epsilon \dots \dots \dots (24)$$

なお、 $E_a$  を  $E_a / E_S$  とともに表-13に併記した。圧縮強度と  $E_a / E_S$  との関係を図-26に示す。図から、圧縮強度が  $300 \text{ kg/cm}^2$  以上であれば  $E_a / E_S$  は約 0.84 程度であるが、それ以下では急激に減少する。したがって、 $E_a / E_S$  は強度の関数で一定値とならないことがわかる。

一例として、供試体 No. 3-15-IB (図-2 参照) の非破壊試験値

$$E_D = 362\,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$\delta_0 = 0.133$$

であった。推定圧縮強度は式(12)より

$$\sigma_u = 418 \text{ kg/cm}^2 \text{ (実測値 } 383 \text{ kg/cm}^2)$$

ひずみ能力の破壊基準として、 $\epsilon_u = 2100 \times 10^{-6}$  とすると

$$E_a = 199\,000 \text{ kg/cm}^2$$

表-7 から 配合比 1:1.5:3、シリーズ I の場合で

$$\lambda = E_D / E_S = 1.33$$

よって、初期接線係数は

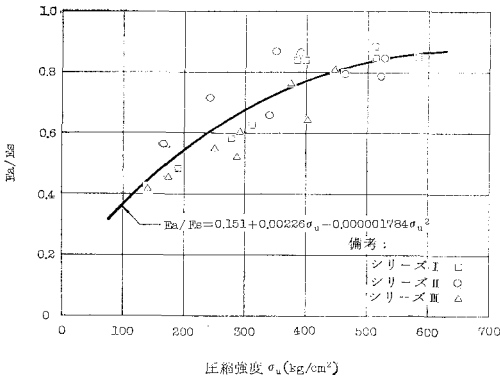


図-26  $E_a/E_s$  と圧縮強度との関係

$$E_s = 362\,000 / 1.33 = 272\,000 \text{ kg/cm}^2$$

(実測値  $290\,000 \text{ kg/cm}^2$ )

式 (23) にそれぞれの値を代入すると、  
 $\sigma = 0.272 \times 10^6 \cdot \varepsilon - 0.01655 \times 10^{12} \cdot \varepsilon^2 \dots\dots (25)$

図-2 の実測圧縮応力-ひずみ曲線と、式 (25) から求めた推定応力-ひずみ曲線を図-27 に示す。

両者はほぼ一致し、圧縮強度の推定が良くなればいっそう合致することになる。

数多くの応力-ひずみ曲線式が提案されているが<sup>56)~58)</sup>、式 (23) または式 (24) で与えられる圧縮応力-ひずみ曲線の特徴は、対数減衰率を媒介して誘導されたもので、諸元が全く非破壊的に求めることができ、応力度の大きさに関係せず、同品質のコンクリートには常に一定値を示す初期接線係数や終局強度までの接線係数の平均を与える割線係数といったように、コンクリートの品質や力学的性質を評価するパラメーターを含むことである。さらに、“ひずみ能力一定”の破壊基準にのっとっているため、一つの破壊理論式ともいえるのである。なお、圧縮強度は必ずしも式 (12) によらなくともよいことは当然であるが、動弾性係数を測定する場合コンクリート供試体の一次の共振周波数を求めつつ、さらに

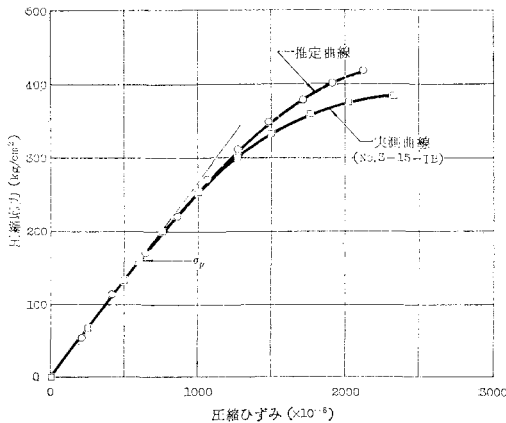


図-27 実測および推定応力-ひずみ曲線

対数減衰率をも合わせて求め、式 (12) から算定される圧縮強度と他の方法たとえば<sup>59), 60)</sup>によって求めた強度とを総合的に検討し、もっとも妥当性のある圧縮強度を推定して式 (23)、または式 (24) を求めるのがよい。

#### 4. む す び

前報<sup>1)~18)</sup>までのコンクリートの微小ひびわれと物性との基礎的実験研究に基づき、実施コンクリートの力学的性質あるいは挙動を評価するための基礎的資料を求めるため、各種の配合比とワーカビリティ（スランプ 3 cm と 15 cm）、また、養生方法としてシリーズ I（水中 28 日養生）・シリーズ II（水中 7 日、21 日気乾養生）・シリーズ III（28 日気乾養生）で作成された角柱供試体 113 個によって、次の結論を求めることができた。

(1) 上記の配合比による強度範囲は 580~142 kg/cm<sup>2</sup> で、養生条件 シリーズ I・II・III によって変化し、気乾養生期間が長いほど圧縮強度は低下する。

(2) 見掛けの比例限度は強度に対し一定応力比ではなく、0.3~0.7 の範囲にあり、強度とともに大きくなり、200 kg/cm<sup>2</sup> 以下の強度では急激に低下する。圧縮強度と見掛けの比例限度応力比とは二次関数で表現される。

(3) ポアソン比変化開始点、すなわち、開始応力 (Initiation stress) は応力比 0.7~0.9 で、強度の増大とともに増大し、両者は一次関数で表現される。

(4) 臨界応力は従来報告されているように、一定の応力比ではなく、約 0.95~0.70 で、強度の増大とともに増大し、両者は一次関数で表現される。

(5) 載荷前の超音波縦波伝播速度と圧縮強度との関係については、ソ連の品質規準が合理的であること、また、この規準によれば本研究のコンクリートの品質は「良」以上のデータであった。

(6) 超音波伝播速度の初期変化点応力比は、振動子の周波数特性にも依存するものと思われるが、従来の報告では 0.25~0.90 の大きな範囲をカバーしている。慎重に測定した結果では 0.15~0.61 で、その応力比と圧縮強度とは二次関数で表現される。

(7) 超音波伝播速度の後期変化点応力比は、下臨界応力 (Lower critical stress) とも呼ばれ、応力比で 0.62~0.90 で、圧縮強度とは一次関数で表現される。

(8) 圧縮強度に達した時点の超音波伝播速度は、3850~2200 m/sec とかなり大きく、残存強度があるにしても強度的に信頼性はないので、伝播速度のみから品質を判定することはむずかしいことがわかる。

(9) 変形特性値を応力比で表わした場合の相対的關係

超音波伝播速度の初期変化点は、一般には見掛けの比例限度より低い応力比で変化を開始する。ポアソン比変化点と超音波伝播速度の後期変化点とは、工学的にはほぼ一致するといつてよい。

下臨界応力比より約5%高い応力比で、臨界応力に達する。したがって、超音波伝播速度の後期変化点は臨界応力状態の先駆現象といえる。

(10) 変形特性値をひずみ比で表わした場合の相対的關係

コンクリートに圧縮破壊が生じる場合のひずみ能力はほぼ一定であることから、一つの破壊規準が提案されている。このような意味で、変形特性値をひずみ比で表現し相対比較を行なったが、応力比で比較した場合とほぼ同様の形況を示した。

(11) 特性値と配合比との關係

(i) 見掛けの比例限度の応力比は 富配合(1:1:2)から貧配合(1:3:6)になるにしたがい、また、気乾養生期間が長くなると0.6から0.4程度にまで低下する。

(ii) 臨界応力比は 富配合から貧配合になるにしたがい、スランプの大きいほど、気乾養生期間が長いほど0.9から0.7へと低下する。

(iii) 超音波伝播速度の初期変化点は、一般に見掛けの比例限度よりも低い応力比で、とくに 貧配合で強度が低いほど早期に現われる。

(iv) 超音波伝播速度の後期変化点は、臨界応力よりも約5%低い応力比で捕えられ、配合比・スランプ・養生方法の影響は臨界応力の場合と同じである。

(v) ポアソン比変化点は 超音波伝播速度の後期変化点とほぼ合致し、配合比等の影響も同様である。

(vi) 変形特性値をひずみ比で比較した場合、数値の絶対値は小さいが、応力比で表現した場合とほぼ同様である。

(12) 載荷前の対数減衰率と圧縮強度とは一次関数で表わされ、圧縮強度の高いものほど対数減衰率は小さくなる。また、供試体の乾燥度の影響はあまり顕著ではない。

(13) 応力比の上昇とともに、対数減衰率は放物線的に単調に大きくなるもの、また、見掛けの比例限度と下臨界点にかけやや低下し、再び増大開始するものもある。しかし、いずれにしても 臨界応力度から急激に増大する。これは網状モルタルひびわれの形成が主要因と考えられる。

(14) 本研究で実験した供試体の動弾性係数と静弾性係数との比は  $\lambda=1.045\sim 1.750$  で、“低強度コンクリートほど乾燥度のあるものほど、大きい”という一般的傾向が認められた。

(15) 動弾性係数は応力比の上昇とともに比例限度近

傍まで直線的に低下し、さらに低下率を増し、臨界応力近傍から顕著な低下を示す。微小ひびわれとの観点から、対数減衰率と同様に説明される。

(16) 従来 数多くの応力-ひずみ曲線が提案されているが、本研究で求めた式は 対数減衰率を媒介して誘導されたもので、その特徴は

(i) 式中の諸元が全く非破壊的に求める。

(ii) コンクリートの品質や力学的性質を評価する初期接線係数や割線係数、終局ひずみなどのパラメーターを含む。

(iii) “ひずみ能力 一定”の破壊基準ののっとっているので、一つの破壊理論式ともいえる。

以上の諸結果から、現在使用中のコンクリート構造物の各メンバーの品質を超音波伝播速度、あるいは、あらかじめ埋め込んだカールソン型ひずみ計などのひずみ量を継続的に追跡し、その変化点(特異点)をキャッチすることにより、内部微小ひびわれ状態との関連性において、「構造物のメンバーがどの程度耐久限度に近づいているのか」という情報として認識し、かつ、対処すべき方策を講じる判断の基準として利用しうる。

## 5. あとがき

本研究を行なうに当たり 寒暑・深更をもちとわず、長期間の実験にご助力をいただいた防衛大学校 近江雅夫助手、同 荻野雪男技官に深謝申しあげる。

なお、本研究の一部は昭和45年度防衛大学校特別研究費よつたが、付記して謝意を表する。

### 参考文献

- 1) Kato, K. and Johoji, A.: Strain Distribution in Plain Concrete, Memoirs of the Defense Academy, Vol. VII, No. 3, Dec. 1967, pp. 1135-1146.
- 2) 加藤清志・浄法寺朝美:ブレンコンクリート内部の歪分布, 土木技術研究会報, 第8号, 昭和43年4月, pp. 93-97.
- 3) 加藤清志:コンクリートの組成構造と弾性係数に関する研究, 第22回年次学術講演会講演概要, 第IV部, 昭和42年5月, pp. 1.1-1.4.
- 4) 加藤清志:ブレンコンクリート内の気泡殻の亀裂, 防衛大学校理工学研究報告, 第5巻, 第4号, 昭和43年3月, pp. 369-381.
- 5) 加藤清志:ブレンコンクリートのひびわれ発生機構について, コンクリート・ジャーナル, Vol. 6, No. 5, 昭和43年5月, pp. 11-17.
- 6) Kato, K., and Johoji, A.: Microcracks in Lightweight Aggregate Concrete, Memoirs of the Defense Academy, Vol. VIII, No. 1, Oct. 1968, pp. 379-392.
- 7) 加藤清志:ブレンコンクリート中のクラッキングパターン, セメント技術年報, XXII, 昭和44年2月, pp. 326-328.
- 8) 加藤清志・浄法寺朝美:ブレンコンクリート中の気泡殻亀裂の生長と増殖, 土木技術研究会報, 第9号, 昭和44年2月, pp. 49-55.

- 9) 加藤清志：プレーンコンクリート中の組織敏感性マイクロクラック，第24回年次学術講演会講演集，第4部，昭和44年9月，pp. 45-48.
- 10) Kato, K. : Microcracks of Structure Sensitive Properties in Hardened Neat Cement Paste, *Memoirs of the Defense Academy*, Vol. IX, No. 3, pp. 565-623.
- 11) 加藤清志：硬化したニートセメントペーストの微視的きれつ発生機構について，コンクリート・ジャーナル，Vol. 8, No. 2, Feb. 1970, pp. 24-34.
- 12) 加藤清志・浄法寺朝美：プレーンコンクリート中の気泡殻亀裂の生長，第23回年次学術講演会講演概要，第IV部，昭和43年10月，pp. 109-112.
- 13) Kato, K. : Growth and Multiplication of the Shell Cracks in Mortar, *Memoirs of the Defense Academy*, Vol. VIII, No. 3, Dec. 1968, pp. 721-776.
- 14) 加藤清志：モルタル中の気泡のきれつと増加，コンクリート・ジャーナル，Vol. 7, No. 2, Feb. 1969, pp. 8-16.
- 15) Kato, K. : Increase of Cracking in Air Bubbles in Mortar, *ACI Journal*, Proc. V. 68, No. 4, Technical Reviews, April 1971, p. 317.
- 16) 加藤清志：プレーンコンクリートのマイクロクラックと内部摩擦，土木技術研究会報，第11号，昭和46年3月，pp. 63-67.
- 17) 加藤清志：プレーンコンクリート中のマイクロクラックと物性，土木学会論文報告集，第188号，1971年4月，pp. 61-72.
- 18) 加藤清志：プレーンコンクリート中のマイクロクラックと物性，第25回年次学術講演会講演集，第5部，昭和45年11月，pp. 75-78.
- 19) Jones, R. : A Method of Studying the Formation of Cracks in a Material Subjected to Stresses, *British Journal of Applied Physics*, Vol. 3, No. 7, July 1952, pp. 229-232.
- 20) Kaplan, M.F. : Strains and Stresses of Concrete at Initiation of Cracking and Near Failure, *ACI Journal*, Proc. V. 60, No. 7, July, 1963, pp. 853-880.
- 21) Templin, R.L. : The Determination and Significance of the Proportional Limit in the Testing of Metals, *Proc. of ASTM*, Vol. 29, Part II, 1929, pp. 523-553.
- 22) Liebenberg, A.C. : A Stress-Strain Function for Concrete Subjected to Short-Term Loading, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 14, No. 41, July 1962, pp. 85-90.
- 23) 近藤森夫・坂 静雄：コンクリート工学ハンドブック，朝倉，昭和40年10月，pp. 291-293.
- 24) Shah, S.P., and Chandra, S. : Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete, *ACI Journal*, Proc. V. 65, No. 9, Sept. 1968, pp. 770-781.
- 25) 国分正胤：土木材料実験，技報堂，昭和44年2月，pp. 391-392.
- 26) Akroyd, T.N.W., and Jones, R. : Non-Destructive Testing of Structural Concrete by the Ultrasonic Pulse Technique, *Proc. of the Fourth International Symposium*, London, 1964, pp. 230-234.
- 27) 既出 23), pp. 395-402.
- 28) Neville, A.M. : Properties of Concrete, Sir Isaac Pitman & Sons, 1963, pp. 422-426.
- 29) McGonnagle, W.J. : Nondestructive Testing, Gordon and Breach, Second Edition, pp. 209-278.
- 30) Stanford, E.G., and Fearon, J.H. : Progress in Non-Destructive Testing, Vol. 1, Heywood & Company, 1958, pp. 35-56.
- 31) 既出 28), p. 427.
- 32) 既出 23), p. 398.
- 33) L'Hermite, R.G. : Volume Changes of Concrete, *Chemistry of Cement*, Proc. of the Fourth International Symposium, Washington, 1960, p. 676.
- 34) 既出 19), p. 230.
- 35) Jones, R. : The Development of Microcracks in Concrete, *RILEM*, Bulletin No. 9, Dec. 1960, p. 112.
- 36) L'Hermite, R. : Present Day Ideas on Concrete, *RILEM*, Bulletin No. 18, June 1954, p. 29.
- 37) 川上英男：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究(その3)，日本建築学会論文報告集，第186号，昭和46年8月，p. 5.
- 38) Desayi, P., and Viswanatha, C.S. : True Ultimate Strength of Plain Concrete, *RILEM*, Bulletin No. 36, Sept. 1967, p. 185.
- 39) 畑野 正：コンクリートの如き脆性体のひずみに立脚した破壊論，土木学会論文報告集，第153号，昭和43年5月，pp. 34-35.
- 40) Jones, R., and Welch, G.B. : The Damping Properties of Plain Concrete; Effect of Composition and Relations With Elasticity and Strength, *RRL Report*, LR III, 1967, pp. 1-2.
- 41) Kesler, C.E., and Higuchi, Y. : Problems in the Sonic Testing of Plain Concrete, *RILEM*, International Symposium on Nondestructive Testing of Materials and Structures, Proc. Vol. 1, 1954.
- 42) Kesler, C.E., and Chang, T.S. : Utilization of Data Obtained in Sonic Tests of Plain Concrete, *ASME Preprint Paper* No. 55-5-3.
- 43) Savage, J.C. : Attenuation of Elastic Waves in Granular Mediums, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 70, No. 16, Aug. 1965, p. 3935.
- 44) 既出 41), pp. 400-401.
- 45) 既出 43), p. 3941.
- 46) 桂伊津美・高橋義雄・石川昇治：17-7 PH ステンレス鋼の内部摩擦(第1報)，日本材料強度学会誌，Vol. 5, No. 4, Jan. 1971, pp. 125-136.
- 47) 既出 46), p. 133.
- 48) 高林利秋：コンクリートの無破壊試験法，日刊工業新聞，昭和28年10月。
- 49) 坂 静雄：コンクリートの静弾性係数と動弾性係数，セメント技術年報，VIII，昭和29年，pp. 322-325.
- 50) 既出 23), pp. 350-352.
- 51) 狩野春一：コンクリート技術事典，オーム，昭和43年4月，pp. 152-153.
- 52) Jones, R. : Non-Destructive Testing of Concrete, Cambridge University Press, 1962, pp. 24-33.
- 53) 横道英雄：コンクリート橋，技報堂，昭和40年7月，p. 19.
- 54) 橋道英雄・高田宣之・宇貫秀典：コンクリートの変形について，第22回年次学術講演会講演概要，第IV部，昭和42年5月，pp. 85.1-85.4.
- 55) 既出 17), p. 70.
- 56) 坂 静雄：鉄筋コンクリート学教程，産業図書，昭和30年5月，pp. 73-84.
- 57) Popovics, S. : A Review of Stress-Strain Relationships for Concrete, *ACI Journal*, Proc. V. 67, No. 3, Mar. 1970, pp. 243-248.
- 58) Neville, A.M. : Hardened Concrete; Physical and Mechanical Aspect, *ACI*, The Iowa State University Press, 1971, pp. 107-110.
- 59) 既出 23), pp. 282-299, pp. 376-406.
- 60) 既出 58), pp. 116-118.