

1. はじめに

構造体におけるコンクリートの強度・弾性係数等の力学的性状は、養生条件によって著しく左右される。打込み後初期のコンクリートには、特に適当な温度と湿潤状態を保つことが養生の主目的となるが、実際には温度は適当でも部材の乾燥は打込み直後より異なり、また長期的にはほとんどの部材で乾燥が進行するので、その性状も各部材により異なっていると考えられる。乾燥と強度性状の関係についての論文もあるが、空中放置あるいは水中養生後の試験体によるものが多い。そこで本研究では、構造体各部材の養生条件に合わせた試験体により、杖令2年迄の乾燥過程と圧縮強度・静ヤング係数・ポアソン数の関係を求め、標準養生値等と比較検討した。

2. 実験方法

実験は主としてスラブ、壁、柱など各部材の養生条件に合わせて、表-1.のように試験体の形状、脱型の時期と方法、および乾燥過程が異なるように放置場所と条件を変えて行なった。実験範囲を表-2.に示す。

コンクリートは同一バッチのレミコン(普通セメント、広島錦周混砂、当別川砂利、AE剤使用。W/C=0.57, sl.=19.5 cm, F<sub>28</sub>(角柱型)=252 kg/cm<sup>2</sup>)を使用した。打込み日は、昭和51年8月上旬であり、スラブ状態はそれぞれの放置場所において打込み乾燥過程を調べた。試験体形状は、10×10×20 cmの角柱型(横打ち)を主とし、スラブ厚・壁厚は部材による差を調べるため今回は一定とした。また、マッシュな柱状態の性状を調べるため40×40×20 cmとその他10<sup>φ</sup>×20 cmも作製した。力学的性状測定用の他に、乾湿程度を表わすための「湿潤係数測定用」と、内部相対湿度測定用(長手方向に9mm<sup>φ</sup>の穴があり、電気抵抗式鋭感湿度計により測定する)も同時に作製した。杖令1日, (5日), 7日, (18日), 4週, 3ヵ月, 6ヵ月, 1年, 2年において、乾燥程度と圧縮強度、静ヤング係数(圧縮強度の1/3の応力度における割線ヤング係数)を求めた。ポアソン数は、性状が安定したと考えられる杖令1, 2年に求めた。柱型試験体はコアボーリングにより10<sup>φ</sup>×20 cmを採取し、両面イオウキャッピングを行なって試験した。これらの力学的性状試験は、すべてその杖令時の乾燥状態のまま試験した。

乾燥程度は、以下に示す方法により求めて次式で表わされるものを「湿潤係数(C<sub>s</sub>)」として指標とした。

$$C_s = \frac{\text{試験体の試験時湿潤空隙量}(V_w)}{\text{試験体の全空隙量}(V_a)} \times 100(\%)$$

ここで、V<sub>a</sub>は試験体の真空吸水(5mmHg1日真空, 4週吸水)による飽水重量と絶乾重量の差から求めた。V<sub>w</sub>は試験時重量と絶乾重量の差から求めた。

乾燥程度は、以下に示す方法により求めて次式で表わされるものを「湿潤係数(C<sub>s</sub>)」として指標とした。

ここで、V<sub>a</sub>は試験体の真空吸水(5mmHg1日真空, 4週吸水)による飽水重量と絶乾重量の差から求めた。V<sub>w</sub>は試験時重量と絶乾重量の差から求めた。

3. 実験結果 および考察

(1) 部材養生条件と乾燥過程

各部材の内部相対湿度変化を、図-1, 2.に示す。湿空中では表面部と中心部の差が小さく乾燥も遅く、部材による差も小さい。しかし、室内気中では、薄い部材の乾燥が速く、表面部と中心部の約4cmによる差は最大15%RHと大きい。杖令6ヵ月より周囲湿度に近づいている。柱型はマッシュなため、表面部であっても乾燥が遅く、表面部と中心部の約19cmによる差は最大25%RHであり、部材の厚みによる差が明瞭

表-1. 試験体の形状、養生条件と記号

形状	脱型方法	記号	放置場所とその方法	記号
角柱 (10×10×20 <sup>cm</sup> )	全面脱型 (打設後封かん、杖令1日で全面脱型)	1	恒温恒湿室 (20±2℃, 60±5%)	普通放置 D
	スラブ状態 (打設後上面封かんなし、18日目底板のみ脱型)	2	湿空 (20±2℃, 85±5%)	普通放置 M
円柱 (10 <sup>φ</sup> ×20 <sup>cm</sup> )	壁状態 (打設後封かん、5日目両側板のみ脱型)	3	室内気中 (温湿度変化有)	普通・I 南面・I(s)
	密封 (打設後封かん継続)	4	屋外気中 (RC造2階屋根スラブ上)	O
柱型 (40×40×20 <sup>cm</sup> )	柱状態 (打設後封かん、5日目4側板のみ脱型)	5	標準水中 (20±2℃)	W

\*杖令40~150日加湿不足、また杖令231日に試験体を室内気中へ移動した。

表-2. 実験範囲

記号	形状	脱型方法	放置場所
1-D	角柱 10×10×20 <sup>cm</sup>	1 (全面脱型)	恒温 恒湿室 記号: D
2-D		2 (スラブ状態)	
3-D		3 (壁状態)	
4-D		4 (密封)	
5-D		5 (柱状態)	
1-M	角柱 10×10×20 <sup>cm</sup>	1 (全面脱型)	湿空
2-M		2 (スラブ状態)	
2-M(w)		2 (スラブ・散水)	
3-M	3 (壁状態)	記号: M	
2-I	角柱 10×10×20 <sup>cm</sup>	2 (スラブ状態)	室内気中
3-I(s)		3 (壁・南面)	
5-I		5 (柱状態)	
5-I	柱型 40×40×20 <sup>cm</sup>	5 (柱状態)	記号: I
2-O	柱型 10 <sup>φ</sup> ×20 <sup>cm</sup>	2 (スラブ状態)	屋外気中(記号: O)
W	角柱 10×10×20 <sup>cm</sup>	1 (全面脱型)	標準水中 記号: W
	円柱 10 <sup>φ</sup> ×20 <sup>cm</sup>	1 (全面脱型)	
	円柱 10 <sup>φ</sup> ×20 <sup>cm</sup>	1 (全面脱型)	標準水中 1週, 4週, 3ヵ月 ↓ 恒温恒湿室 標準水中4週 ↓ 恒温恒湿室 3ヵ月, 1年で標準水中5段階

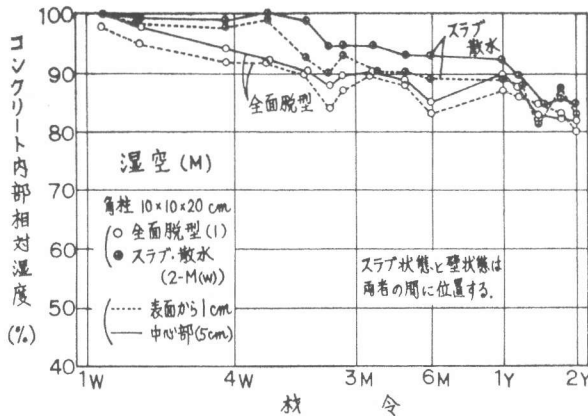


図-1. 試験体内部の相対湿度変化(湿空中)

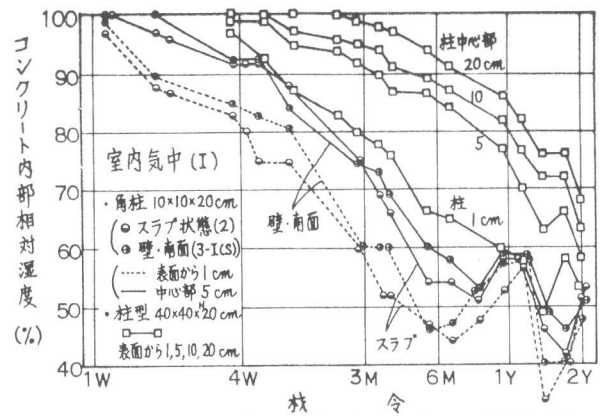


図-2. 試験体内部の相対湿度変化(室内気中)

である。枝令2年でも中心部は乾燥途中にある。

これらの乾燥過程を湿潤係数により図-3.に示す。本実験のこの求め方による全空隙量はコンクリート容積の21.5%であった。部材による脱型の時期と方法、および放置場所の湿度差により、乾燥過程が明瞭に異なっている。水平の薄い部材であるスラブは、打込み直後から硬化までの乾燥が大きく、これには周囲湿度の影響が大きく現われている。水中・屋外・室内散水スラブなどを除いて、普通の室内側コンクリートは、湿空中であっても50%前後にあり、室内気中では30~40%の乾燥状態において、ほぼ平衡となっている。

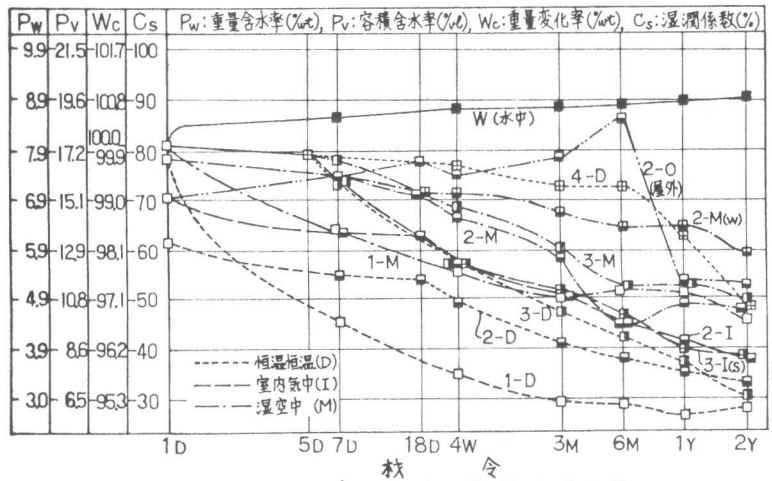


図-3. 養生条件と乾燥湿潤過程

(2)部材および養生条件による強度・ヤング係数

圧縮強度・静ヤング係数測定結果を表-3.に示す。これを、養生場所の主として湿度差による影響を図-4.に、部材の差による影響を図-5.に示す。

図-4.の養生場所の湿度差によって強度とヤング係数に大きな差が生じており、乾燥養生を受けたコンクリートは強度・ヤング係数の増大が小さく、4週~6か月から低下傾向を示す。一方、湿空中のコンクリートは強度・ヤング係数ともに増大し低下もほとんどないので、乾燥気中にあるものとの性状差が大きい。湿空中と恒湿恒湿・室内気中の湿度30~40%RHの差で、枝令2年では強度で平均112% $\mu\text{m}^2$ 、ヤング係数で平均 $0.84 \times 10^5$  % $\mu\text{m}^2$ の非常に大きな差が生じている。この差は、全面脱型やスラブ状態では枝令初期より生じているが、壁状態では特に強度が枝令6か月迄は同様に大きく、枝令1~2年において養生場所による差が現われてくる。

図-5.の部材の差では、恒湿恒湿や室内の乾燥気中では、乾燥が速い全面脱型やスラブの性状低下が著しく最も低下しており、枝令2年の強度で150% $\mu\text{m}^2$ 以下、ヤング係数で $1.48 \times 10^5$  % $\mu\text{m}^2$ (対四週水中比50~60%)以下である。壁状態は乾

表-3. 圧縮強度・静ヤング係数測定結果

記号	形状	脱型方法	1日	5日	7日	18日	4週	3ヵ月	6ヵ月	1年	2年
1-D	全面脱型	恒湿恒湿	53	135		167	148	138	135	120	
			1.37	1.70		1.54	1.36	1.17	1.26	1.33	
2-D	スラブ状態	恒湿恒湿		129	153	187	166	174	156	150	
				1.74	2.01	1.82	1.66	1.43	1.51	1.34	
3-D	壁状態	20±1%	160	180		224	272	255	221	195	
			216	227		2.01	1.98	2.00	1.68	1.80	
4-D	角柱	密封		173		232	267	319	320	239	
				202		2.53	2.78	2.72	2.47	2.18	
1-M	全面脱型	湿空		152		200	212	260	269	232	
				2.16		2.29	2.44	2.23	2.46	2.26	
2-M	10x10x20 cm	スラブ状態		160		213	231	218	231	260	
				2.27		2.09	2.22	1.80	1.89	2.33	
2-M	20x20 cm	スラブ散水		160		205	254	279	268	251	
				2.27		2.32	2.39	2.44	2.49	2.48	
3-M	壁状態	85±5%		186		252	275	255	261	301	
				209		2.30	2.47	2.13	2.26	2.40	
2-I	スラブ状態	室内気中		151		203	211	214	174	141	
				1.97		2.02	1.94	1.63	1.74	1.48	
3-I	壁・角面	湿湿時変化		175		261	255	264	241	172	
				2.26		2.10	2.10	1.88	1.75	1.51	
2-O	スラブ状態	屋外気中		147		228	258	259	264	278	
				1.97		2.32	2.62	2.59	2.45	2.35	
W	再柱 10x20 cm	全面脱型	53	192		252	300	353	326	306	
			1.37	2.33		2.96	3.04	2.98	2.98	3.11	
			43	170		293	342	349	326	333	
			1.19	2.10		2.61	2.81	2.59	2.86	2.77	
5-D	柱型	柱					242		275	287	
							2.07		2.13	2.19	
5-I	40x40x20 cm	壁状態					243		285	247	
							1.97		2.21	2.01	

燥気中で脱型後急激に乾燥しても特に強度で大きな性状を示すが、枚令6か月以降の低下が大きく、枚令2年では強度  $200 \text{ kg/cm}^2$  以下、ヤング係数も  $1.8 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  以下であるが、スラブ状態よりは良い性状を示し、打込み初期に封かん状態にあることが有利に作用している。柱状態はマツシブなため乾燥による影響は少なく、四週水中強度をやや上回る強度を示している。しかし、ヤング係数は  $2.0 \sim 2.2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  のやや小さな値を示し、今後の乾燥に伴ない若干の低下も予想される。一方、湿空中では、全面脱型やスラブ状態でも枚令2年で良好な性状を示しており、部材による差もそう大きくはない。

図-6,7のように、コンクリートの強度とヤング係数は単なる吸放水によっても変化し、強度は乾燥により最大  $50 \text{ kg/cm}^2$  も増大し、吸水によって  $C_s$  84% 位迄は大きく低下し、その後増大する。ヤング係数は  $C_s$  約70% 以下では大きく低下する。このように含水程度の変化する位置により性状変化も大きく異なることに注意を要する。

図-8. の水中養生後の乾燥では、水中養生が長い程強度やヤング係数が大きく、水中養生なしに比べ著しい差がある。水中養生が長くてもその後気中養生により、ヤング係数は  $2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$  以下に低下してくる。

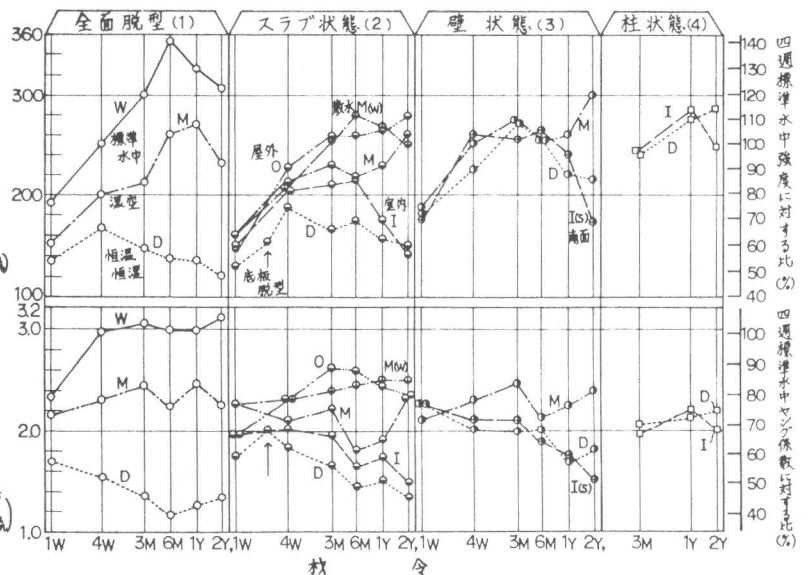


図-4. 養生場所の乾湿状態と力学性状

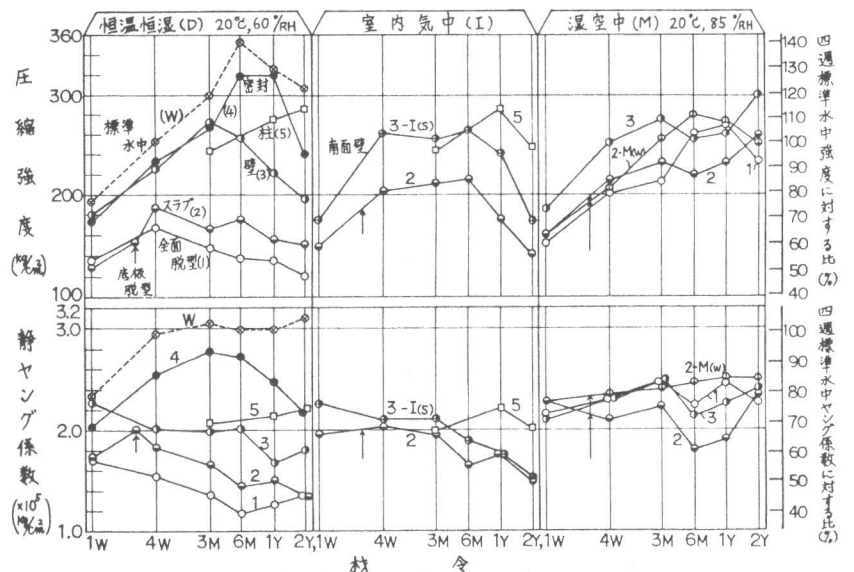


図-5. 部材養生条件と力学性状

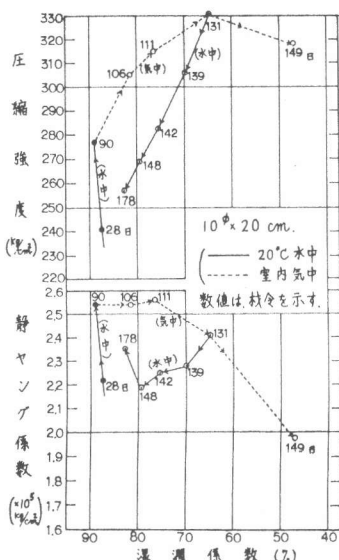
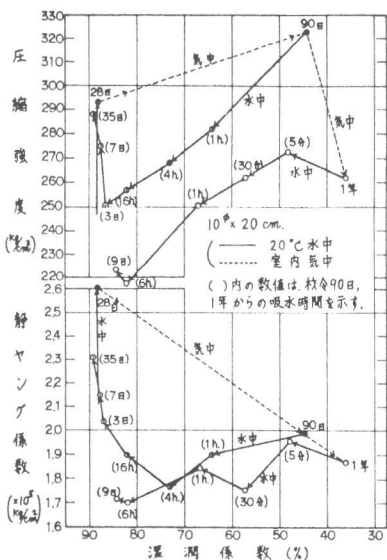


図-6. 吸放水による力学性状の変化(模範値) 図-7. 吸放水による力学性状の変化(別実験値)

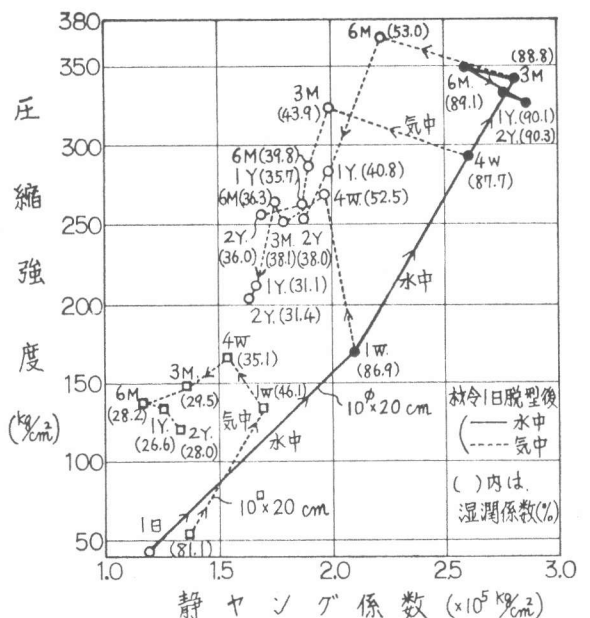


図-8. 乾燥前の水中養生の差と力学性状

(3) 乾燥によるヤング係数の低下 乾燥程度を表わす湿潤係数とヤング係数の関係を図-9に示す。ヤング係数は、打込み初期の湿潤時に大きくても乾燥の進行に伴ない低下し、乾燥しているものほどヤング係数が小さいことに注意を要する。枚令が進み、周囲湿度と平衡状態に乾燥した室内側コンクリートは、湿潤係数でおよそ40%以下であり、ヤング係数が $2.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 以下の非常に小さくなることは避けられない。

(4) 強度とヤング係数の関係 本実験値の強度とヤング係数の関係を、湿潤係数により図-10に示す。試験時のコンクリートの乾湿状態によって両者の関係が非常に大きく異なっており、同強度であっても乾燥しているものほどヤング係数が小さい。同強度でのヤング係数の差は、 $1.0 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 前後もあり、単に強度からヤング係数を推定することはできない。建築学会では、応力あるいは弾性変形の計算に用いるヤング係数は、通常  $E_c = 2.1 \times 10^5 \left(\frac{Y}{2.3}\right)^{1.5} \sqrt{\frac{F_c}{200}}$  によって求めているが、この式は乾燥してくる室内側コンクリートのヤング係数よりも大きく算出され危険側となっている。このため、より多くのデータのもとに式の改訂を検討する必要がある。

(5) ポアソン数について、乾燥がほぼ平衡状態となった枚令1,2年におけるポアソン数測定結果を、図-11に示す。ポアソン数は部材により多少異なり、乾燥状態や枚令によっても傾向は一定しないが、4.3~7.1の範囲内にあり、全平均は5.3と通常用いられている6よりもやや小さい傾向が得られた。今後さらに検討を加えたい。

#### 4. まとめ

- (1) 養生時の周囲湿度が強度・ヤング係数に及ぼす影響は極めて大きく、室内の乾燥気中での性状低下が大きい。
- (2) スラブは、打込み直後から乾燥する場合には、強度・ヤング係数ともに設計値以下に小さい。
- (3) 壁は、室内気中でも特に初期強度は大きい。長期強度は大きく低下する傾向を示す。
- (4) 柱は、現在迄強度的には良好であるが、乾燥に伴ないヤング係数が低下する可能性もある。
- (5) ヤング係数は乾燥に伴ない低下し、室内側の乾燥では設計値以下の危険性が大きい。
- (6) 強度とヤング係数の関係は、乾燥程度により大きく異なり、建築学会のヤング係数算出式は、乾燥が進んだ場合の実状と合わない。
- (7) ポアソン数は、平均5.3とやや小さめの値が得られた。

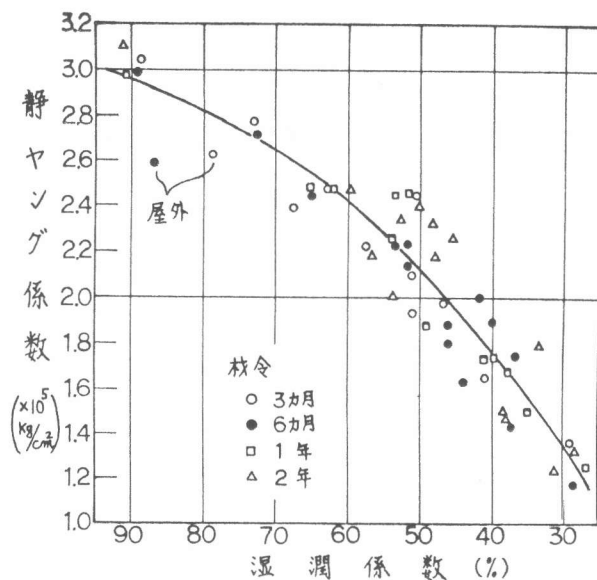


図-9. 静ヤング係数と湿潤係数の関係

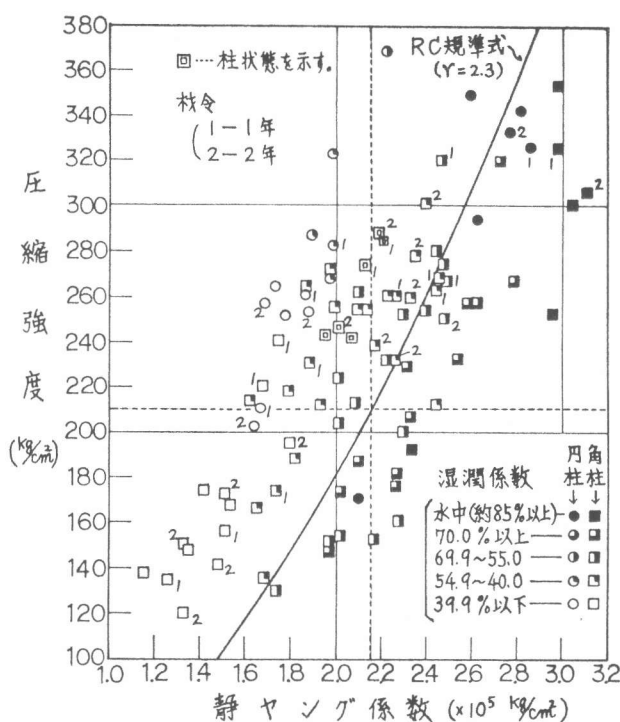


図-10. 圧縮強度と静ヤング係数の関係

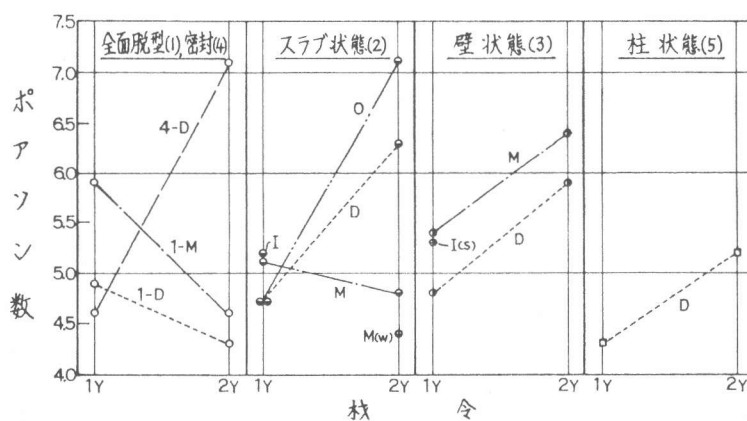


図-11. ポアソン数測定結果