

三種のセメントによるコンクリート標準供試体の 推定強度並びに弾性係数について*

加賀美一二三, 国重 雅彦, 長谷川 博

緒 言

コンクリートの短期強度並びに弾性係数より長期強度, 長期弾性係数を推定することは, コンクリート並びに鉄筋コンクリート構造物の設計並びに施工に当って, 重要であり欠くべからざることであると考えられる。そして従来7日強度より28日強度を推定する式については, O. Graf, Slater, Oregon State Highway Commission, 日本セメント技術協会などの式が提案されているが, 3日強度より28日, 42日強度の推定や弾性係数の関係については, ほとんど提案されていない。故に, 著者は構造用セメントの三種によるコンクリートの圧縮破壊試験に基く推定強度並びに推定弾性係数について考察した結果を述べたものである。

1. 供試体の材料とコンクリートの配合設計

(1) セメント

セメントは某社の普通ポルトランドセメント, 高炉セメント, ポゾランセメントの三種を用い, その物理的試験結果は表一1のごとくである。

表一1 セメントの物理的性質

試験項目 セメントの種類	比 重	粉 末 度 ブレン値 (cm^2/g)	凝 結		安定性	曲げ強さ, kg/cm^2			圧縮強さ, kg/cm^2		
			始 発 (時分)	終 結 (時分)		3 日	7 日	28 日	3 日	7 日	28 日
普通ポルトランドセメント	3.15	3300	2-40	3-40	良	34.2	25.2	76.3	136	240	442
高炉セメント	3.04	3850	2-35	5-0	良	52.2	39.0	63.5	91	165	350
ポゾランセメント	2.91	3570	3-15	4-18	良	29.3	43.2	68.3	105	188	338

(2) 骨 材

細骨材及び粗骨材の物理的性質は表一2のごとくである。

表一2 骨材の物理的性質

試験項目 骨 材	比 重	粗 粒 率	単位容積重量 (kg/m^3)	有機不純物
細 骨 材	2.51	1.84	1408	標準色以下
粗 骨 材	2.62	7.73	1520	〃

※ 昭和35年12月土木学会中四国支部講演会にて発表のもの

(3) コンクリートの配合設計

コンクリートの設計強度 σ_{28} を120, 180, 250kg/cm² とし, 割増係数を15%とした表—1の三のセメントについて設計した示方配合は表—3のごとくである。種

表—3 コンクリートの示方配合

セメントの種類	コンクリートの種類 (σ_{28} , kg/cm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	潜入空気 (%)	単位水量 W (kg)	単位セメント量 C (kg)	水セメント比 w/c (%)	細骨材料 s/a (%)	単位細骨材量, S (kg)	単位粗骨材量, G (kg)
普通ポルトランド	120	40	7.5	1	179	289	62	35.9	665	1189
	180	40	8.1	1	177	340	52	33.9	617	1203
	250	40	7.6	1	191	444	43	34.3	580	1116
高炉セメント	120	40	7.5	1	197	317	62	35.9	638	1140
	180	40	7.0	1	190	365	52	35.8	595	1066
	250	40	8.0	1	222	444	50	34.2	550	1056
ポゾランセメント	120	40	7.7	1	180	291	62	35.9	658	1174
	180	40	6.9	1	177	340	52	33.9	612	1189
	250	40	5.3	1	190	441	43	34.1	572	1103

2. 圧縮試験並びにひずみ測定値

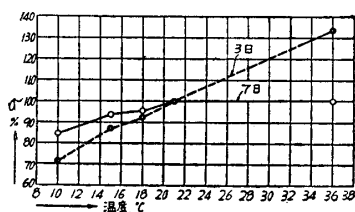
供試体は材令3, 7, 28及び42日の各種について, 圧縮強度は各3個, 圧縮ひずみは圧縮供試体の各2個について供試体側面3点支持の鋼枠取付けの対称2個のダイヤルゲージによって測定した。

圧縮強度試験結果は表—4のごとくにて, 記号Ⅰは σ_{120} , Ⅱは σ_{180} , Ⅲは σ_{250} のコンクリートを意味し, Aは普通ポルトランドセメント, Bは高炉セメント, Cはポゾランセメントである。

表一 4 圧縮強度試験結果

供試体記号	材令 No.	3 日		7 月		28 日		42 日		備 考
		荷重 t	応力 kg/cm ²	荷重 t	応力 kg/cm ²	荷重 t	応力 kg/cm ²	荷重 t	応力 kg/cm ²	
I A	No. 1	19.6	111	27.3	155	36.2	205	40.8	231	I A—No.3 (破損3日)
	No. 2	18.2	103	25.4	144	34.7	196	33.2	288	
	No. 3	—	—	28.6	162	38.6	219	36.9	209	
I B	No. 1	13.0	73.6	24.5	139	40.9	232	45.5	258	
	No. 2	13.6	77.0	22.8	129	40.8	231	44.6	252	
	No. 3	12.6	71.3	22.0	125	37.5	212	41.4	234	
I C	No. 1	12.8	72.4	19.5	110	37.8	212	38.8	219	
	No. 2	12.1	68.5	17.7	100	32.5	184	37.0	209	
	No. 3	12.0	67.9	19.5	110	30.6	173	40.1	227	
II A	No. 1	29.6	168	43.2	245	46.1	261	50.8	288	
	No. 2	30.8	174	41.5	235	43.0	243	49.9	282	
	No. 3	28.5	161	39.8	225	43.2	245	49.4	279	
II B	No. 1	20.3	11.5	30.8	174	47.0	266	48.9	277	
	No. 2	21.0	11.9	32.8	186	49.4	279	46.8	265	
	No. 3	19.3	10.9	33.1	187	49.5	280	48.7	276	
II C	No. 1	16.3	92.3	25.6	145	47.3	268	45.6	258	II C—No.2 破損(28日)
	No. 2	17.3	97.9	24.3	138	—	—	45.5	258	
	No. 3	15.5	87.7	24.4	138	45.0	255	46.7	264	
III A	No. 1	42.7	242	52.7	298	64.7	366	60.0	340	
	No. 2	43.3	245	55.5	314	64.8	367	64.5	365	
	No. 3	37.2	211	52.9	299	59.8	338	64.6	367	
III B	No. 1	239	135	36.8	208	56.1	318	57.5	325	
	No. 2	248	140	36.0	204	51.5	292	57.9	328	
	No. 3	223	126	31.1	175	54.3	307	62.1	351	
III C	No. 1	305	173	43.6	247	51.0	289	59.3	336	
	No. 2	317	179	45.0	255	51.9	294	61.3	347	
	No. 3	300	169	34.6	196	52.0	294	60.2	341	

試験結果は水温最低20.8°C，最高28.0°Cにて養生した供試体であるので，養生温度補正をすることにしたが，図一1（日本ポルトランドセメント技術協会集覧による）にみるように，本実験の場合には3日試験の場合のみ考慮すればよいと考えられる。



図一 1 材令による養生温度補正の関係

これにより補正した結果は表-5のごとくである。

表-5 材令3日供試体の養生温度による補正值

供試体	養生平均温度 °C	測定値	補正值	供試体	養生平均温度 °C	測定値	補正值	供試体	養生平均温度 °C	測定値	補正值		
I A3	No. 1	—	105	II A3	No. 1	168	152	III A3	No. 1	242	220		
	No. 2	23.5	103		No. 2	25.0	174		158	No. 2	25.0	245	223
	No. 3	—	—		No. 3	—	161		147	No. 3	—	211	192
I B3	No. 1	—	67.0	II B3	No. 1	115	100	III B3	No. 1	135	118		
	No. 2	25.0	77.0		No. 2	27.0	119		103	No. 2	27.0	140	122
	No. 3	—	71.3		No. 3	—	109		95	No. 3	—	126	110
I C3	No. 1	—	70.3	II C3	No. 1	92.3	87.2	III C3	No. 1	173	161		
	No. 2	22.5	68.5		No. 2	22.5	97.9		92.5	No. 2	24.3	179	167
	No. 3	—	67.9		No. 3	—	87.7		83.0	No. 3	—	169	158

以上の圧縮破壊試験結果を図示すると図-2のごとくなる。

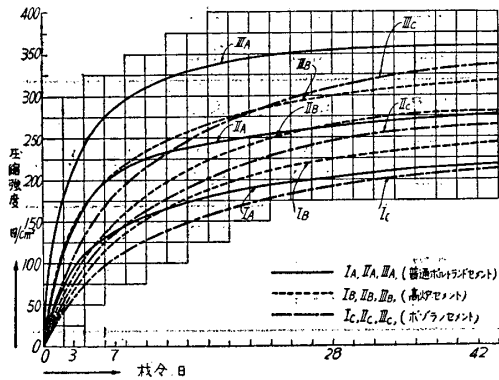


図-2 材令と圧縮強度との関係

本実験における応力とひずみとの関係は図-3, 4, 5となる。

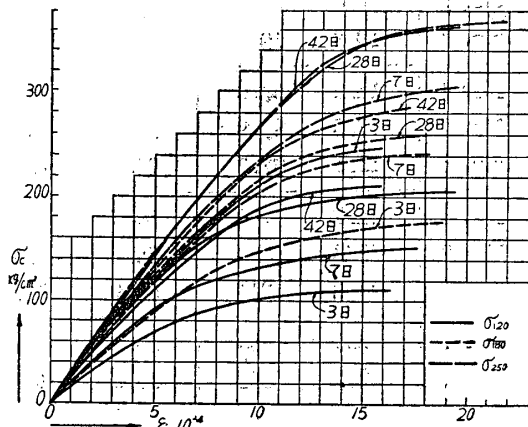


図-3 普通ポルトランドセメントによる供試体の応力-ひずみ関係

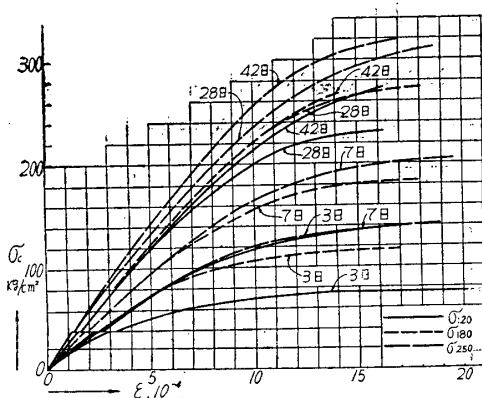


図-4 高炉セメントによる供試体の応力-ひずみ関係

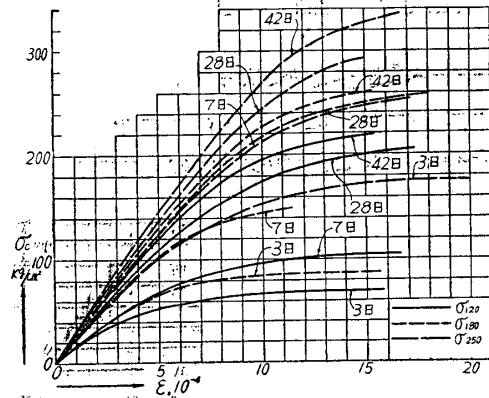


図-5 ボゾランセメントによる供試体の応力-ひずみ関係

3. 実験応力-ひずみ曲線の弾塑性限までの放物線曲線の次数

コンクリートの圧縮圧力-ひずみ曲線は、既報告¹⁾のように全曲線をその特性領域に分けて考えることが力学的意義を表わすものと考えられるが、いま弾塑性限までを簡単な $\epsilon = \alpha \sigma^n$ の関係式で示すと実験値とほとんど一致する放物線がえられる。この場合のコンクリート圧縮強度 σ_{cy} と次数 n との関係は図-6, 7, 8となる。

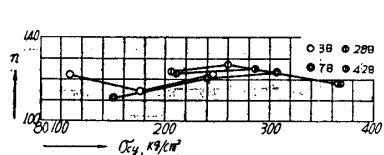


図-6 普通ポルトランドセメントによる供試体の σ_{cy} と n との関係

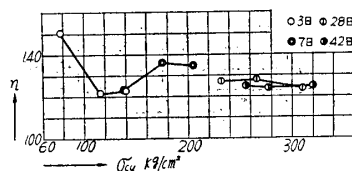


図-7 高炉セメントによる供試体の σ_{cy} と n との関係

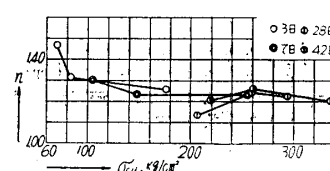


図-8 ポゾランセメントによる供試体の σ_{cy} と n との関係

以上の結果よりわかるように、高炉、ポゾランセメントによる供試体の σ_{cy} の極めて小さい場合を除いては、セメントの区別、 σ_{cy} の大小の差なく n は1.2—1.3程度と考えられる。

4. 推定強度式

図-2に示す材令一応力の関係より、各種セメントによる供試体について $\sigma_3 - \sigma_{28}$, $\sigma_7 - \sigma_{28}$, $\sigma_3 - \sigma_{42}$, $\sigma_7 - \sigma_{42}$ の関係と、 σ_r を推定値 σ_e を実験値とするとほぼ直線関係であらわされるので、推定強度は $r = \alpha \sigma_e + \beta$ の式で示され、これに基づき実験値を整理すると図-9, 10, 11, 12にて示されることになる。

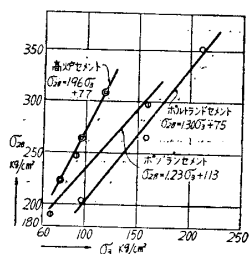


図-9 $\sigma_3 - \sigma_{28}$ の関係

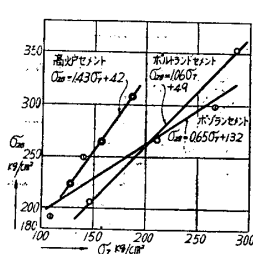


図-10 $\sigma_7 - \sigma_{28}$ の関係

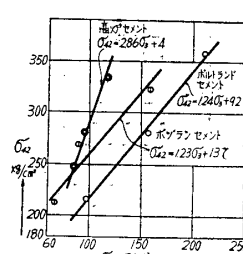


図-11 $\sigma_3 - \sigma_{42}$ の関係

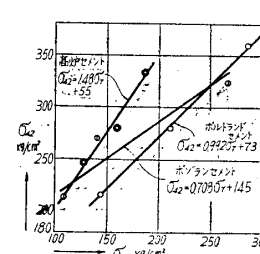


図-12 $\sigma_7 - \sigma_{42}$ の関係

たとえば、普通ポルトランドセメントによる供試体にて、 $\sigma_7 = 120 \text{ kg/cm}^2$ に対する推定強度 σ_{28} を諸種の式で計算すると

推定式	Slater	Or. St. H. W. Com.	日本セメント技術協会	誘導式
	$\sigma_{28} = \sigma_7 + 8\sqrt{\sigma_7}$	$\sigma_{28} = 1.51\sqrt{\sigma_7} + 3.43$	$\sigma_{28} = 1.24\sigma_7 + 66$	$\sigma_{28} = 1.06\sigma_7 + 49$
推定値	207	185	215	176

Oregon State Highway Commission の式は土木工学ハンドブック中に示されている式であるが、誘導式はこれにほとんど一致しかつ安全側の値を示す結果である。

5. コンクリートの σ_c (弾性限, 弾塑性限の応力), σ_{cy} と E_c との関係

コンクリートの応力-ひずみ曲線中の弾性限, 弾塑性限並びに破壊点の割線弾性係数値を示すと、図-13, 14及び15となる。

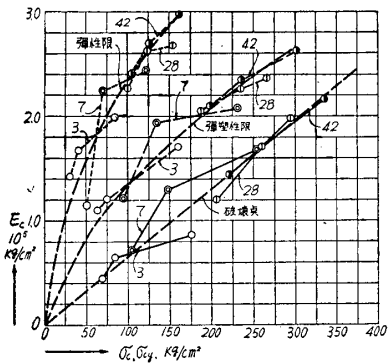


図-13 普通ポルトランドセメントによる供試体の σ_c , σ_{cy} と E_c の関係

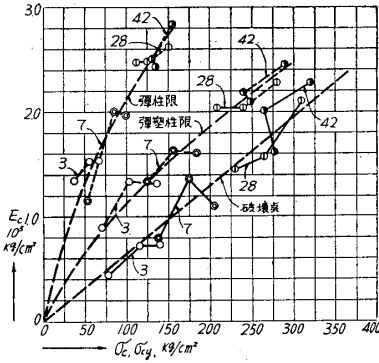


図-14 高炉セメントによる供試体の σ_c , σ_{cy} と E_c の関係

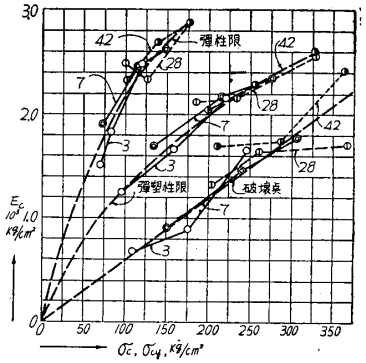


図-15 ポゾランセメントによる供試体の σ_c , σ_{cy} と E_c の関係

以上の実験結果のように各種セメントによる供試体とも弾性限、弾塑性限の E_c は、座標原点に対し $E_c^m = \alpha \sigma_c$ の放物線変化を示すが、破壊点においては直線変化を示すことがわかる。

6. 材令と E_c との関係

実験結果を図示すると図-16, 17, 18となる。図中、Ⅰは σ_{120} , Ⅱは σ_{180} , Ⅲは $\sigma_{250} \text{kg/cm}^2$ のコンクリート供試体にて記号 E_e を弾性限, E_{ep} を弾塑性限, E_u を破壊点の弾性係数值とする。

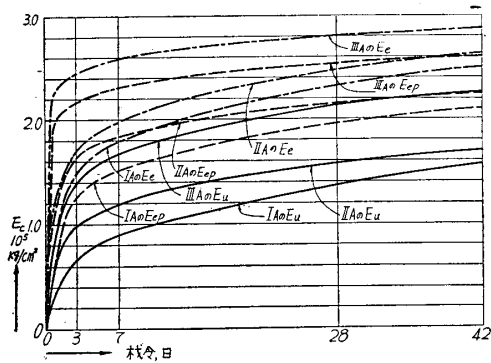


図-16 普通ポルトランドセメントの材令- E_c の関係

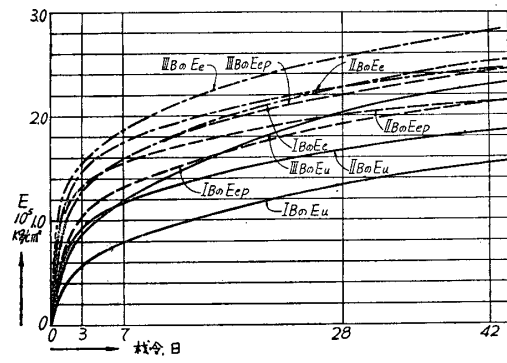


図-17 高炉セメントの材令- E_c の関係

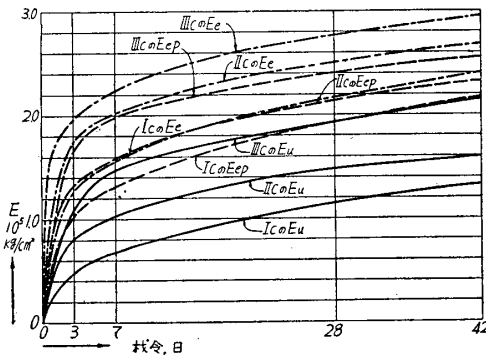


図-18 ポゾランセメントの材令- E_c の関係

7. 推定弾性係数值と式

図-16, 17, 18に示す材令- E_c の関係より、各種セメントによる供試体について、 E_3 , E_7 , E_{28} , E_3 , E_7 - E_{42} の関係を図示すると、図-19, 20, 21, 22, 23及び24となる。

弾性係数値は弾性理論に基く許容設計の場合に主として必要となる係数値であり、極限強度設計では必要としない。いま、この意味において E_r を推定弾性係数値、 E_e を実験値として、 $E_r = \alpha E_e + \beta$ の形の実験式を弾性限について求め図中に示した。

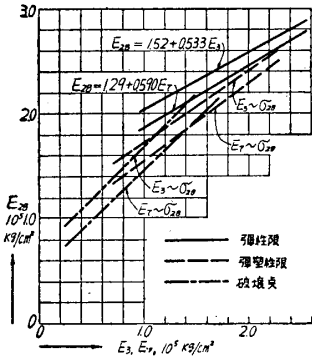


図-19 普通ポルトランドセメントの供試体による E_3 , E_7 — E_{28} の関係

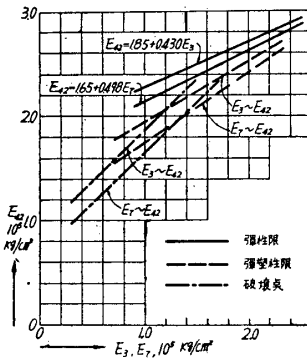


図-20 普通ポルトランドセメントの供試体による E_3 , E_7 — E_{42} の関係

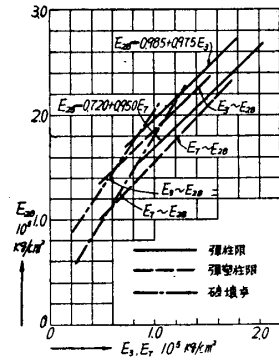


図-21 高炉セメントの供試体による E_3 , E_7 — E_{28} の関係

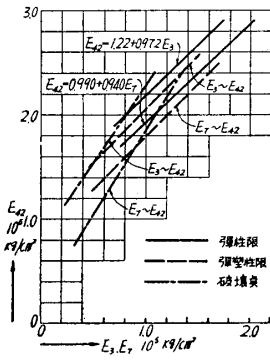


図-22 高炉セメントの供試体による E_3 , E_7 — E_{42} の関係

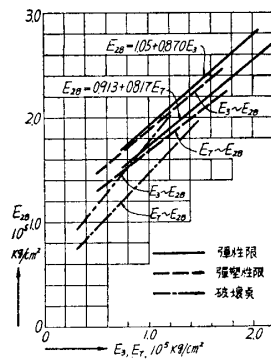


図-23 ポゾラセメントの供試体による E_3 , E_7 — E_{28} の関係

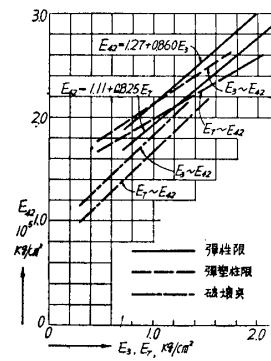


図-24 ポゾランセメントの供試体による E_3 , E_7 — E_{42} の関係

結 言

本実験結果より得られたことがらを要約すると

- (1) 従来の推定強度式は使用セメントの種別、配合、養生などの条件が明示されていないが、これらを明らかにして推定式を求めた。すなわち、 σ_3 , σ_7 — σ_{28} , σ_{42} の関係式を列記すると
 普通ポルトランドセメント $\sim \sigma_{28} = 1.30\sigma_3 + 75$, $\sigma_{28} = 1.06\sigma_7 + 49$,

$$\sigma_{42} = 1.24\sigma_3 + 92, \sigma_{42} = 0.992\sigma_7 + 73$$

- 高炉セメント $\sim \sigma_{28} = 1.96\sigma_3 + 77$, $\sigma_{28} = 1.42\sigma_7 + 42$,

$$\sigma_{42} = 2.86\sigma_3 + 4, \sigma_{42} = 1.48\sigma_7 + 55$$

- ポゾランセメント $\sim \sigma_{28} = 1.23\sigma_3 + 113$, $\sigma_{28} = 0.650\sigma_7 + 132$,

$$\sigma_{42} = 1.23\sigma_3 + 137, \sigma_{42} = 0.708\sigma_7 + 145$$

- (2) セメントの規格試験には材令3日試験が実施されているので、コンクリートにおいても3日強度より推定強度の式を考慮することが望ましく、 σ_3 , σ_7 — σ_{28} , σ_{42} の関係式を求めた。
 (3) 各種セメントによるコンクリートの応力—ひずみ曲線において、弾塑性限までは放物線次数がほぼ1.2—1.3次程度である。

(4) 従来弾性係数値の推定に関しては、ほとんど報告がないので、本文のごとく実験結果を整理し、殊に弾性限については推定式を求めた。

すなわち、 E_3 , E_7 , E_{28} , E_{42} の関係式を列記すると

普通ポルトランドセメント $\sim E_{28} = 0.533E_3 + 1.52$, $E_{28} = 0.590E_7 + 4.29$,

$$E_{42} = 0.430E_3 + 1.85, E_{42} = 0.498E_7 + 1.65$$

高炉セメント $\sim E_{28} = 0.975E_3 + 0.985$, $E_{28} = 0.950E_7 + 0.720$,

$$E_{42} = 0.972E_3 + 1.22, E_{42} = 0.940E_7 + 0.990$$

ポゾランセメント $\sim E_{28} = 0.870E_3 + 1.05$, $E_{28} = 0.817E_7 + 0.913$,

$$E_{42} = 0.860E_3 + 1.27, E_{42} = 0.825E_7 + 1.11$$

上式のEの単位は 10^5kg/cm^2 である。

参 考 文 献

- (1) 著者, 材料試験, 第6巻, 第4号, 1957
著者, セメント, コンクリート, No.132, 1958
- (2) 近藤, 坂, コンクリートハンドブック, 1957