

重回帰分析によるコンクリートの品質管理システムに関する研究

STUDIES ON QUALITY CONTROL SYSTEM OF CONCRETE BY MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS

豊福俊泰*・中村修吾**・鬼丸良雄***

By Toshiyasu TOYOFUKU, Shugo NAKAMURA and Yoshio ONIMARU

This study has made a multiple regression analysis using data results of various concrete testings and data from the construction sites of the expressways.

Then we have clarified the relationship between compressive strength (Y) and condition of material, mix proportion, etc. (X_1, X_2, \dots, X_n).

Furthermore, we propose the concrete quality control system by which the compressive strength of concrete can be calculate by use of the multiple regression expression instead of strength tests as follows; $Y = A + B_1 X_1 + B_2 X_2 + \dots + B_n X_n$

where, A, B_1, B_2, \dots, B_n : constant

1. まえがき

周知のように、コンクリートの品質管理においては、強度試験の結果をすみやかにコンクリートの製造や施工に反映させることができが肝要であり、近年、コンクリート品質の早期判定に関する研究が種々行われ、示方書類が制定されるに至っている^{1), 2)}。

一方、日本道路公団（以後、公団とよぶ）試験所において、著者らは、良質な河川産骨材の枯渇に伴う骨材品質の劣化、多様化がコンクリート品質に及ぼす影響を解明するため、昭和48年度から種々のコンクリート試験を開始するとともに、実際に全国の生コンクリート工場で出荷されているコンクリートの品質調査および公団施行の土木工事で打設されているコンクリートの品質調査を実施してきた^{3)~10)}。また、これらの広範囲にわたる試験・調査結果を総合的にデータ解析し、コンクリートの品質に及ぼす骨材、配合条件等の要因との関係を定量的に求め、多変量解析によるコンクリートの品質推定法、

配合設計法を提案した^{11), 12)}。さらに、これらの研究成果から、コンクリートの品質判定をバッチャープラントで行うものとし、材料試験値、配合設定値等からコンクリートの強度・耐久性を推定するプログラムを組み込んだ計量装置を設置して、品質を即時に判定することにより所要の品質のコンクリートを練りませする方法を提案した¹³⁾。

ここ数年コンピュータの普及はめざましく、実用への試みとしては、その後、配合設計法の提案¹⁴⁾、品質管理法の提案^{15), 16)}などがなされたが、いずれも強度の推定は、材令28日における圧縮強度 σ_{28} とセメント水比 (C/W) との単相関から求めていたにすぎず、さらに精度がよくかつ簡単なプログラムと品質管理への適用の方法とにに関する研究の積み重ねが、必要であるといえよう。

本文は、このような観点に基づき、今までの研究から重回帰分析による解析方法、種々の試験・調査データの解析結果を総括し、重回帰式を用いた品質管理システムについて、提言するものである。

2. 解析方法

(1) 演算方法

p 個の説明変数 x_1, x_2, \dots, x_p とそれに対応する目的変数の値 y_1, y_2, \dots, y_p が n 組 ($n \geq p+1$) 得られるとき、重回帰モデルは次式で与えられる¹⁷⁾。

$$y_a = \beta_0 + \beta_1 x_{a1} + \beta_2 x_{a2} + \dots + \beta_p x_{ap} + \varepsilon_a$$

* 正会員 工修 日本道路公団試験所コンクリート試験室
(前・福岡建設局人吉工事事務所淡島工事区工事長)
(〒194 町田市忠生1-4-1)

** 正会員 八洋コンクリートコンサルタント(株)常務取締役
(元・日本道路公団試験所次長)
(〒106 港区六本木3-16-26)

*** 日本道路公団新潟建設局構造技術課課長
(前・日本道路公団試験所コンクリート試験室室長)
(〒950 新潟市東大通1-1-1 三越プラザ共同ビル)

ここで、 β_0 は定数、 $\beta_i (i=1, 2, \dots, p)$ は y の x_i に対する偏回帰係数、 ε_a は残差とする。また、 ε_a については、次の仮定を設けるものとする。

- ① ε_α と $\varepsilon_{\alpha'}$ とは互いに独立である ($\alpha \neq \alpha'$, $\alpha, \alpha' = 1, 2, \dots, n$).
 - ② ε_α の期待値(平均)は 0 である.
 - ③ ε_α の分散はすべて等しい.

このとき、最小二乗法は偏回帰係数の最良不偏推定値 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ を与え、次の回帰式が得られる。

また、個々の測定値 $x_{\alpha 1}, x_{\alpha 2}, \dots, x_{\alpha p}$ ($\alpha = 1, 2, \dots, n$) に対しては、次式を得る。

$$Y_\alpha = b_0 + b_1 x_{\alpha 1} + b_2 x_{\alpha 2} + \dots + b_p x_{\alpha p} \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

予測の精度は、 y_a と Y_a との単相関係数にあたる重相関係数 R によって判定される。各説明変数の目的変数に対する相関は、偏相関係数によって判定され、偏相関係数の有意性は、 r -表を使って検定される。

さらに、偏回帰係数や回帰推定値などの検定・区間推定のため、多くの場合、次の仮定を導入している。

- ④ ε_a は正規分布に従う.

しかし、この方法では、一般にコンクリートの品質管理に用いられている仮定「コンクリートの試験値の分布は正規分布する.」に適用することが煩雑になること、 Y の大きさに比例して残差のばらつきが大きくなることになり仮定③とは矛盾するが、強度が大きいほど標準偏差が大きくなる傾向があることを考慮して、次の仮定

- ④ (Y_α / y_α) は正規分布に従う。

を導入して、回帰推定値 \hat{Y}_a の実験値 y_a に対するばらつきの程度を検定する方法を採用した。

これによって、 (Y_α/y_α) の平均値 \bar{X} および標準偏差 σ が求まり、無作為に計算した 1 回の回帰推定値 Y_α は、母集団に対し危険率 γ で次の範囲内に分布する。

$$X = \bar{X} \pm t_{\gamma/2} \sqrt{\sigma/(n-1)} = \bar{X} \pm t_{\gamma/2} \sigma_{n-1} \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここで、 $t_{\gamma/2}$ ：正規偏差

(2) 特性要因

一般に、コンクリートの強度は、打込み箇所において採取した供試体の材令 28 日における圧縮強度試験結果から判定している。 σ_{28} に及ぼす諸要因を大別すると、打込み時までに決まる要因とそれ以後の要因とに区分され、前者に対する影響要因としては、材料、配合、製造、気象条件、運搬など、後者としては試験条件であることなどが、既往の研究で知られている（図-1 参照）¹⁸⁾など。

これらの諸要因と σ_{28} との関係を求めるにあたり、特性値の選定条件として、次のことが考えられる。

- ① σ_{28} の予測に役立つ変数であること（変域の大きさが大きく、他の変数と併用しても独自の役割をもつ）。

- ② 管理しやすい変数であること。

- ③ 説明変数間の相関は、なるべく小さいこと。

本文では、上記の①、②を考慮して、 σ_{28} との1変量解析例があり固有技術的な解釈がしやすいことが判明しているもので、かつ、生コン製造時に品質管理しやすいものを特性値として選定し、変数指定法と変数増減法によって、 σ_{28} とのできるだけ簡便な相関式を求めることを試みた（表-1参照。以後、同表に示す記号で表わす）。③は重相関分析上からは重要であるが、現実の品質管理においては、これらの特性はそれぞれ独立した変動をすることから、変数指定により管理項目の選定に重点をおいた。また、コンクリートの使用区分を考慮して、セメントの種類および粗骨材の最大寸法で層別区分し、AE 減水剤使用の場合に限定して解析した。セメントの

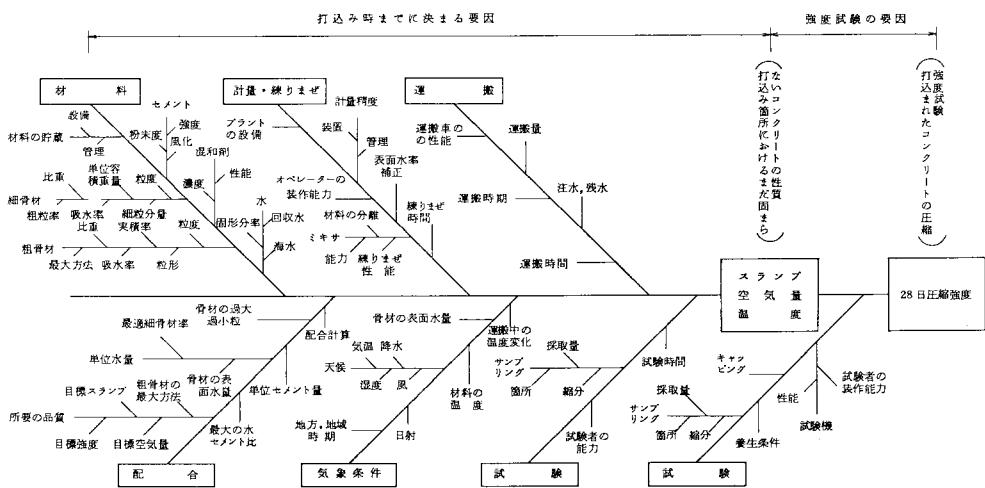


図-1 圧縮強度に及ぼす特性要因

表一 独立変数として採用した要因

要因	区分	記号	影響をおよぼす特性(注)						備考
			材料	配合条件	気象条件	運搬	管理試験品度		
配合	水セメント比、セメント水比	W/C _{ct}	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○						
	単位セメント量 単位水量	C W	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○						骨材の表面水補正
まだ固まらないコンクリートの性質	空気量 湿度	S _L A CT	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○						日常管理試験項目
	セメント	C _F C ₂₈	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○						試験成績表
材料	粗骨材	S _{FM} S _T S _Q	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○						日常管理試験項目
	粗骨材	G _{max} G _G G _q	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○ ○						

注) ○: 因果が強いもの, △: やや因果があるもの, ×: 因果がないもの

品質の変域としては、種類の差のほか、製造工場の差があるが^{19, 22)}、製造工場の試験成績表の C_F , C_{28} で代表させた。

目的変数としては、配合設計時の配合推定が可能のように、 W および s/a についても、 σ_{28} と同時に解析した。

解析データとしては、土木学会規準に適合しない不良骨材まで広範囲の骨材を用いた各種のコンクリート試験結果（調査Ⅰ）から、各種要因の影響度を調べ、次に、実際に全国の生コン工場で出荷されているコンクリートの調査結果（調査Ⅱ・調査Ⅲ）を解析することにより、本システムの実用性を検証した。

3. コンクリート試験調査結果（調査Ⅰ）による強度と材料・配合条件との関係

(1) 解析データ

解析データは、表二に示すように、公団の諸機関で

表二 調査Ⅰの解析データ

項目	コンクリートの種類(注)		全 体 1		普 通 1	
	(N, H, M, B) (n = 7 977 ~ 7 344)		(N) (n = 4 355 ~ 4 077)			
	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
圧縮強度(材令28日)	σ_{28} (kgf/cm ²)	392	708	85	354	547
まだ固まらないコンクリートの性質	SL (cm)	9.4	20.2	1.1	11.0	14.0
	A (%)	4.6	7.5	2.0	4.8	6.8
	CT (°C)	19.1	32.0	6.0	19.4	32.0
	S/a (%)	38.9	50.0	24.0	41.6	50.0
配合	W/C (%)	48.3	99.0	31.5	52.0	99.0
	セメント水比	2.070	1.010	1.375	1.923	1.010
	単位セメント量	335	518	162	320	454
	単位水量	158	198	115	162	198
細骨材	織りこまき時間(秒)	128	180	60	127	180
	粉末度(グレン値)	3334	1440	3000	3144	3240
	セメント	412	481	254	418	431
	圧縮強度(材令28日)	C_{28} (kgf/cm ²)				
粗骨材	粗粒率	2.77	3.75	2.26	2.77	3.75
	粒度試験で失われるもの(%)	2.2	20.0	0.6	2.5	20.0
	比重	(—)	2.57	2.71	2.14	2.55
	単位容積重量	1.610	1.901	1.424	1.692	1.901
粗骨材	空積率	64.2	73.9	58.6	64.4	73.9
	吸水率	S _q (%)	2.4	5.5	0.9	2.7
	最大寸法比	G _{max} (mm)	28.9	40.0	15.0	24.2
	重さ	(—)	2.65	2.96	2.35	2.64
粗骨材	単位容積重量	(kg/L)	1.587	1.860	1.410	1.561
	吸水率	G _q (%)	68.8	71.0	64.5	68.3
	吸水率	G _q (%)	1.7	7.8	0.3	1.9
	吸水率	G _q (%)	2.4	5.5	0.9	2.7

注) 全体: 全体コンクリート, 香油: 香油ボルトランドセメント使用コンクリート, () 内はセメントの種類とデータ数(n), N: 香油ボルトランドセメント, I: 強張ボルトランドセメント, M: 中張ボルトランドセメント, B: 高炉セメントB種

表三 調査Ⅰの重相関分析結果

Y	コンクリートの種類	式	X ₁ , X ₂ , …, X _p の偏相関係数										注1)	n (個)	Y の精度 注2)					
			C	W	SL	A	CT	C _F	C ₂₈	S _{FM}	S _T	S _q	G _{max}	G _G	G _q					
σ_{28}	全体1	(6)	85 *3		(37) *3	(6)	(16) *3		22 *3	(13) *2	27 *3	(5)	(3)	14 *3	(16) *3	6 52	91 *3	0.105	0.129	
		(7)	88 *3	(47) *3		(20) *3	(12) *2		26 *3	(9) *2	17 *3	(10) *2	(9) *2	(8) *2	(28) *3	6 52	92 *3	0.102	0.115	
		(8)	87 *3	(52) *3												7 72	87 *3	0.109	0.140	
	普通1	(9)	89 *3		(18) *3	0	(23) *3							(12) *	32 *3	(10) *	6	(19) *3	3 85	91 *3
		(10)	90 *3	(35) *3		(7)	(14) *2							(1)	20 *3	(14) *2	(15) *	(26) *3	3 85	92 *3
		(11)	86 *3	(39) *3													4 33	87 *3	0.108	0.140
W	全体1	(12)	14 *3		39 *3	(1)	5	33 *3		14 *3	(30) *3	(13) *2	(36) *3	(56) *3	(5)	6 60	90 *3	1.002	0.046	
	普通1	(13)	(0)		11 *	(4)	19 *3			27 *3	(40) *3	(16) *2		(59) *3	(12) *	3 87	72 *3	1.002	0.046	
	全体1	(14)	(67) *3		49 *3	(3)	(4)	(8)		43 *3	16 *3	7	(56) *3	(63) *3	16 *3	6 60	93 *3	1.002	0.047	
	普通1	(15)	(69) *3		32 *3	2	(17) *3			56 *3	16 *2	18 *3		(75) *3	19 *3	3 87	88 *3	1.002	0.042	

注1) 記号は表二参照。数値は偏相関係数を百分率(%)で表わしたもので、(—)書きは負の相関、(+)をなしは正の相関を示す。

*: 危険率5%以下で有意, *2: 危険率1%以下で有意, *3: 危険率0.1%以下で有意。

注2) R: 数値は重相関係数を百分率(%)で表わしたもので、正の相関を示す。*3: 危険率0.1%以下で有意。

$$\sigma_{28} = -133.4 + 1.238C - 7.043SL - 4.66A - 1.677CT + 0.5394C_{28} - 29.41S_{FM} + 174.73S_T - 2.49S_q - 0.2946G_{max} + 2.192G_G - 6.91G_q \quad (6)$$

$$\sigma_{28} = 138.7 + 1.3512C - 2.2771W - 13.84A - 1.186CT + 0.6207C_{28} - 19.35S_{FM} + 110.25S_T - 4.87S_q - 0.7390G_{max} - 1.416G_G - 11.03G_q \quad (7)$$

$$\sigma_{28} = 165.7 + 1.4836C - 1.7088W \quad (8)$$

$$\sigma_{28} = -238.7 + 1.4309C - 5.430SL + 0.36A - 2.487CT - 2.24S_{FM} + 174.52S_T - 3.97S_q + 0.785G_G - 5.98G_q \quad (9)$$

$$\sigma_{28} = 215.6 + 1.4398C - 1.7006W - 4.86A - 1.474CT - 1.88S_{FM} + 107.45S_T - 5.45S_q - 2.170G_G - 7.85G_q \quad (10)$$

$$\sigma_{28} = 171.6 + 1.3898C - 1.6150W \quad (11)$$

$$W = 288.6 + 0.0215C + 1.413SL - 18A - 0.097CT + 0.00917C_F + 5.42S_{FM} - 33.63S_T - 1.21S_q - 0.535G_{max} - 2.021G_G - 0.38G_q \quad (12)$$

$$W = 314.0 - 0.0004C + 0.650SL - 0.66A + 0.435CT + 9.95S_{FM} - 46.84S_T - 1.36S_q - 1.883G_G - 0.75G_q \quad (13)$$

$$S/a = 68.45 - 0.03136C + 0.4256SL - 0.097A - 0.0178CT - 0.00048C_F + 4.222S_{FM} + 4.390S_T + 0.164S_q - 0.2183G_{max} - 0.5536G_G + 0.290G_q \quad (14)$$

$$S/a = 63.79 - 0.0332C + 0.4795SL + 0.084A - 0.0908CT + 6.156S_{FM} + 4.084S_T + 0.350S_q - 0.6715G_G + 0.295G_q \quad (15)$$

実施した 23 室内試験結果の合計 797 配合であり、練りませには 50~100 l 練りの強制練り・重力式ミキサが使用されている。使用材料は、8 社のセメント、1 社の AE 減水剤、低品質骨材を含む全国の広範囲にわたる品質の細骨材（川砂、陸砂、山砂、海砂、碎砂、混合砂）および粗骨材（川砂利、陸砂利、碎石、混合粗骨材）であり、粗骨材の最大寸法 15 mm から 40 mm までの AE 減水剤使用コンクリートの全般を、ほぼ代表している。

(2) 解析結果

表-3 の解析結果から、 σ_{28} 、W および s/a に対し、偏相関係数が 0.1% の危険率で有意な特性値を順に示す（（ ）なしは正の相関、（ ）書きは負の相関を表わす）。

σ_{28}	全体 1 : C, (W), (SL), (G_q), C_{28} , (A), S_T 普通 1 : C, (W), (SL), (G_q), S_T
W	全体 1 : (G_c), SL, (G_{\max}), C_F , (S_T), C, S_{FM} 普通 1 : (G_c), (S_T), S_{FM} , CT
s/a	全体 1 : (C), (G_c), (G_{\max}), SL, S_{FM} , S_T , G_q 普通 1 : (G_c), (C), S_{FM} , SL, G_q , S_q , (CT)

上記のように、 σ_{28} は C との相関がきわめて強く、次に W, SL, G_q , C_{28} , S_T の 6 変数との相関が認められる。寄与率 R^2 で評価すると、全体の約 70 % が C で説明され、約 15 % が他の要因、すなわち σ_{28} の全変動の約 85 % まで説明される。また、表-4 に示す単相関分析結果からも、C が σ_{28} を支配することが判明する。

W は G_c , SL, G_{\max} , S_T , C_F の 5 変数、s/a は C, G_c , G_{\max} , SL, S_{FM} の 5 変数との相関が強く認められ、いずれも粗骨材の粒形の影響が大きい。

σ_{28} に及ぼす骨材品質の影響は、 S_T と G_q が大きく、W と S_T との関係を考え合わせると、 σ_{28} は S_T との相関が最も強く、細骨材品質の影響が大きいことが判明する⁶⁾。一方、粗骨材の場合、 G_c は W および s/a との相

関が強いのに対し、 σ_{28} との相関性がやや小さく、 G_q に代表されるように、材質の影響が大きいことが示されている。

4. コンクリート打設実態調査結果（調査Ⅱ・調査Ⅲ）による強度と材料・配合条件との関係

(1) 解析データ

解析データの変域の大きさが σ_{28} の予測に影響するため、実際に打設されているコンクリート品質の実態調査結果を、3. と同様に解析した（表-5 参照）。調査Ⅱは、全国の高速道路建設工事で打設されたコンクリートの配合設計時の示方配合（156 工事の 501 配合）であり、調査Ⅲは、全国の高速道路計画網沿線の生コン工場で出荷されたコンクリートの出荷実績の配合（1045 配合）である^{6),7)}。前者に使用された材料は、公団で材料の品質を検査しているため土木学会規準に適合する良質材料のみであり、後者は生コン工場各社で自主管理しているものであるため、一部には不良骨材も含まれている。また、後者は出荷実績であることから、SL, A, CT および σ_{28} は各工場の平均値（試し練りも可）となっており、s/a は最適細骨材率が採用されているかどうか不明である。

(2) 解析結果

重相関分析結果を、表-6 および表-7 に示す。調査Ⅱの場合、相関が強い要因から順に列記すると、次のとおりである。

σ_{28}	全体 2 : C, (W), C_{28} , (SL), (A), (CT) 普通 2・3 : C, (W), (SL), (CT) 普通 2 : C, (W), (SL) 普通 3 : C, (W), (CT), (SL)
---------------	--

表-4 調査Ⅰの単相分分析結果

コンクリート の区分 (区)	n (例)	W / C		C / W		C		W	
		式	R'	式	R'	式	R'	式	R'
全体 1	772	$\sigma_{28} = 799.2 - 8.368(W/C)$ (16)	(85) *3	$\sigma_{28} = 32.4 + 190.8(C/W)$ (17)	83 *3	$\sigma_{28} = -87.0 + 1.432C$ (18)	82 *3	$\sigma_{28} = 586.8 - 1.229W$ (19)	(22) *3
普通 1	433	$\sigma_{28} = 736.6 - 7.344(W/C)$ (20)	(86) *3	$\sigma_{28} = -59.5 + 208.5(C/W)$ (21)	85 *3	$\sigma_{28} = -100.9 + 1.424C$ (22)	85 *3	$\sigma_{28} = 716.1 - 2.230W$ (23)	(29) *3

注) n : データ数、R' : 単相関係数を百分率(%)で表わしたもので、（ ）書きは負の相関、（ ）なしは正の相関を示す。*3 : 危険率 0.1% 以下で有意。

表-5 調査Ⅱ・調査Ⅲの解析データ

項目 コンクリート の区分 (注)	コンクリート の種類数 (種類)		セメント の種類 (注)	粗骨材の 最大寸法 G_{\max} (mm)	設計基準強度 σ_{CK} (kgf/cm ²)		スランプ SL (cm)		空気量 A (%)	調査 配合数 (配合)
	全 体	2	3 4	N, H, B	20, 25, 40	180, 200, 240, 300, 350, 375, 400, 450	3~8, 5~10, 10~15, 10~18, 17~22	2~4, 3~6		
調査Ⅱ	普通 2・3	普通 2	1 7	N	20, 25	180, 200, 240, 300, 350, 375, 400	3~8, 5~10, 10~18, 17~22	2~4, 3~6	287	501
	普通 4・5	普通 3	1 0	*	40	180, 200, 240	5~10, 10~15, 10~18	3~6		
調査Ⅲ	普通 4・5	普通 4	2	*	20, 25	240, 400	5±1.5, 8±2.5	4±1	486	1045
	普通 5	普通 5	3	*	40	180, 225, 曲げ 45	2.5±1.8±2.5, 15±2.5	*	559	

注) 表-2 の注) 参照

表一六 調査IIの重相関分析結果

Y	コントロール区分	式	X ₁ , X ₂ , ..., X _p の偏相關係数												注1)	n (個)	Y の精度注2)		
			W/C	C	W	SL	A	CT	CF	C ₂₈	S _{FM}	S _T	S _Q	G _{max}	G _C	G _Q	R	X	σ_{n-1}
全体2	σ_{28}	(24)	81 *3	(47) *3		(25) *3	(10) *		41 *3		5	(0)	(10) *	(12) *	(6)	397	91 *3	1.006	0.076
		(25)	83 *3	(33) *3	(24) *3	(20) *	(15) *2		39 *3	10 *	6		(1)	(2)		394	91 *3	1.005	0.073
		(26)	81 *3	(36) *3	(20) *3	(12) *2	(11) *		38 *3		7	4		4	(5)	399	91 *3	1.006	0.074
		(27)	85 *3	(45) *3	(29) *3	(21) *	(19) *3									442	91 *3	1.006	0.076
		(28)	84 *3	(40) *3	(36) *3	(30) *3	(17) *3									456	89 *3	1.006	0.081
		(29)	(78) *3				(10) *	(43) *3	(11) *							456	85 *3	1.008	0.094
		(30)	86 *3	(37) *3	(46) *3											500	87 *3	1.007	0.082
		(31)	83 *3	(48) *3												501	83 *3	1.008	0.092
		(32)	83 *3	(43) *3	(20) *3	(5)	(13) *									335	86 *3	1.005	0.068
普通2-3	普通2	(33)	83 *3	(56) *3	(26) *3	(9)	(20) *3									376	84 *3	1.005	0.071
		(34)	83 *3	(55) *3	(26) *3	(10) *	(21) *3									387	84 *3	1.006	0.073
		(35)	82 *3	(52) *3	(29) *3											426	82 *3	1.006	0.074
		(36)	80 *3	(58) *3												426	80 *3	1.006	0.078
		(37)	79 *3	(42) *3	(13) *	(9)	(6)									224	82 *3	1.005	0.068
		(38)	80 *3	(50) *3	(26) *3	(8)	(16) *									255	81 *3	1.005	0.070
普通2	普通3	(39)	79 *3	(47) *3	(24) *3	(9)	(16) *2									260	80 *3	1.006	0.074
		(40)	77 *3	(54) *3												287	77 *3	1.006	0.077
		(41)	83 *3	(40) *3	(33) *3	3	(33) *3									111	88 *3	1.004	0.063
		(42)	79 *3	(67) *3	(23) *2	(12)	(33) *3									126	85 *3	1.006	0.075
		(43)	74 *3	(64) *3												139	78 *3	1.006	0.080
W	普通2-3	全体2	(44)	23 *3		60 *3	(4)	19 *3	9		5	(34) *3		(30) *3	(59) *3	407	86 *3	1.002	0.042
		(45)	37 *3		57 *3	3	14 *2			7	(36) *3		(59) *3		343	85 *3	1.002	0.043	
		(46)	36 *3		56 *3										381	84 *3	1.002	0.044	
		普通2	(47)	25 *3		56 *3	(1)	12			10	(34) *3		(60) *3		226	86 *3	1.002	0.039
S/a	普通3	(48)	27 *3		56 *3											251	85 *3	1.002	0.038
		(49)	7		56 *3	6	20 *			(1)	(40) *3		(62) *3		117	84 *3	1.002	0.043	
		(50)	12		51 *3										130	80 *3	1.002	0.047	
		全体2	(51)		(36) *3	44 *3	5	5	3	26 *3	3		(48) *3	(57) *3	407	76 *3	1.002	0.050	
S/a	普通2-3	普通2-3	(52)		(14) *2	38 *3				25 *3					383	66 *3	1.003	0.059	
		普通2	(53)		(39) *3	44 *3	2	3		20 *2	8				226	68 *3	1.002	0.051	
		(54)			(39) *3	44 *3				23 *3					252	67 *3	1.002	0.051	
		普通3	(55)		(33) *3	51 *3				40 *3					131	79 *3	1.002	0.044	

注1), 注2) 表-3(注)参照

$$\sigma_{28} = 168.9 + 1.2786C - 1.8822W - 12.30A - 0.549CT + 0.5071C_{28} + 24.33S_T - 0.10S_Q - 0.398G_{max} - 1.487G_C - 3.10G_Q \quad (24)$$

$$\sigma_{28} = -27.6 + 1.3380C - 1.3813W - 3.221S_L - 9.70A - 0.791CT + 0.4691C_{28} + 16.01S_{FM} + 30.19S_T - 0.052G_{max} - 0.225G_C \quad (25)$$

$$\sigma_{28} = 119.4 + 1.2902C - 1.5568W - 2.656SL - 6.08A - 0.578CT + 0.03506CF + 10.87S_{FM} + 21.56S_T + 0.016G_{max} - 0.596G_C \quad (26)$$

$$\sigma_{28} = 66.4 + 1.3306C - 1.3134W - 3.570SL - 10.39A - 0.995CT + 0.4310C_{28} \quad (27)$$

$$\sigma_{28} = 259.4 + 1.3758C - 1.2438W - 4.744SL - 15.26A - 0.973CT \quad (28)$$

$$\sigma_{28} = 885.4 - 7.617(W/C) - 1.272SL - 25.74A - 0.728CT \quad (29)$$

$$\sigma_{28} = 147.3 + 1.4574C - 1.1485W - 6.091SL \quad (30)$$

$$\sigma_{28} = 170.5 + 1.4317C - 1.6828W \quad (31)$$

$$\sigma_{28} = 202.5 + 1.2581C - 1.6592W - 2.255SL - 2.28A - 0.638CT + 8.97S_{FM} + 43.90S_T - 0.597G_C \quad (32)$$

$$\sigma_{28} = 188.0 + 1.2790C - 1.5840W - 2.818SL - 4.30A - 0.982CT + 0.1824C_{28} \quad (33)$$

$$\sigma_{28} = 266.9 + 1.21.2595C - 1.5513W - 2.810SL - 4.62A - 1.029CT \quad (34)$$

$$\sigma_{28} = 223.1 + 1.2251C - 1.4353W - 3.162SL \quad (35)$$

$$\sigma_{28} = 245.2 + 1.1474C - 1.6609W \quad (36)$$

$$\sigma_{28} = 290.3 + 1.1909C - 1.7531W - 1.530SL - 3.68A - 0.295CT + 11.39S_{FM} + 30.83S_T - 1.324G_C \quad (37)$$

$$\sigma_{28} = 146.7 + 1.2366C - 1.4405W - 2.766SL - 3.68A - 0.760CT + 0.2414C_{28} \quad (38)$$

$$\sigma_{28} = 251.3 + 1.2082C - 1.3976W - 2.728SL - 4.11A - 0.808CT \quad (39)$$

$$\sigma_{28} = 233.9 + 1.0938C - 1.6059W \quad (40)$$

$$\sigma_{28} = -63.0 + 1.4353C - 1.3038W - 4.234SL + 1.36A - 1.767CT + 9.52S_{FM} + 78.94S_T + 1.463G_C \quad (41)$$

$$\sigma_{28} = 298.8 + 1.3506C - 1.8232W - 2.883SL - 5.89A - 1.589CT \quad (42)$$

$$\sigma_{28} = 233.9 + 1.2355C - 1.7571W \quad (43)$$

$$W = 298.0 + 0.0492C + 1.823SL - 0.51A + 0.255CT + 0.00195CF + 2.24S_{FM} - 42.72S_T - 0.301G_{max} - 1.818G_C \quad (44)$$

$$W = 290.0 + 0.0825C + 1.697SL + 0.42A + 0.194CT + 3.00S_{FM} - 47.25S_T - 1.841G_C \quad (45)$$

$$W = 303.7 + 0.0832C + 1.669SL - 47.11S_T - 1.845G_C \quad (46)$$

$$W = 287.7 + 0.0619C + 1.699SL - 0.16A + 0.159CT + 3.74S_{FM} - 42.29S_T - 1.788G_C \quad (47)$$

$$W = 298.3 + 0.0656C + 1.700SL - 41.50S_T - 1.805G_C \quad (48)$$

$$W = 325.2 + 0.0166C + 1.698SL + 0.80A + 0.327CT - 0.28S_{FM} - 52.83S_T - 1.930G_C \quad (49)$$

$$W = 329.4 + 0.0331C + 1.602SL - 56.44S_T - 1.814G_C \quad (50)$$

$$S/a = 68.85 - 0.02419C + 0.3584SL - 0.195A + 0.0204CT + 0.000175CF + 3.234S_{FM} + 1.130S_T - 0.1544G_{max} - 0.5090G_C \quad (51)$$

$$S/a = 60.86 - 0.10235C + 0.3348SL + 3.434S_{FM} - 0.4979G_C \quad (52)$$

$$S/a = 64.92 - 0.03287C + 0.3955SL + 0.078A + 0.0124CT + 2.446S_{FM} + 2.932S_T - 0.4915G_C \quad (53)$$

$$S/a = 67.20 - 0.03185C + 0.3892SL + 2.718S_{FM} - 0.4590G_C \quad (54)$$

$$S/a = 59.60 - 0.02183C + 0.3769SL + 4.961S_{FM} - 0.5221G_C \quad (55)$$

表-7 調査Ⅲの重相関分析結果

Y	コンクリ 区 分	式	X ₁ , X ₂ , ..., X _P の偏相関係数										n (個)	Y の標準			注2)
			W/C	C	W	SL	A	CT	S _{FM}	S _T	S _Q	G _G		R	\bar{x}	σ_{est}	
σ_{28}	普通4・5	(56)	92 *3	(49) *3	(21) *3	10 *2	(8) *	1	19 *3	(7) *			984	94 *3	1.006	0.077	
		(57)	94 *3	(65) *3			(7) *		11 *3	(13) *3	(16) *3	(4) .	988	94 *3	1.006	0.077	
		(58)	92 *3	(66) *3	(22) *3	10 *2	(7) *						995	94 *3	1.007	0.079	
		(59)	(92) *3			(27) *3	5	(3)					995	94 *3	1.005	0.082	
		(60)	92 *3	(66) *3	(20) *3								1044	94 *3	1.007	0.080	
	(61)	93 *3	(73) *3										1045	93 *3	1.007	0.080	
W	普通4	(62)	82 *3	(43) *3	(41) *3	24 *3	(7)	(5)	14 *2				456	95 *3	1.004	0.065	
	(63)	82 *3	(62) *3	(39) *3	22 *3	(6)							461	95 *3	1.004	0.067	
	(64)	94 *3	(67) *3										486	94 *3	1.005	0.071	
普通5	(65)	90 *3	(56) *3	(18) *3	8	(10) *	5	21 *3		(12) *			528	91 *3	1.006	0.079	
	(66)	89 *3	(70) *3	(19) *3	9 *	(8)							534	91 *3	1.006	0.081	
	(67)	90 *3	(79) *3										559	90 *3	1.006	0.081	
S/a	普通4・5	(68)	39 *3		59 *3	(8) *	10 *2	(3)	(37) *3	(60) *3			984	80 *3	1.002	0.052	
	(69)	40 *3		59 *3					(38) *3	(60) *3			1033	80 *3	1.002	0.052	
	普通4	(70)	28 *3		24 *3	(16) *2	9	5	(37) *3	(66) *3			456	82 *3	1.002	0.044	
普通5	(71)	27 *3		21 *3					(37) *3	(66) *3			481	81 *3	1.002	0.044	
	(72)	19 *3		20 *3	(8)	12 *2	0	(42) *3	(54) *3			528	83 *3	1.002	0.054		
	(73)	21 *3		20 *3				(42) *3	(54) *3			553	83 *3	1.002	0.054		
S/a	普通4・5	(74)	(21) *3		(2)	11	(2)	22 *3	(3)	(44) *3			984	51 *3	1.005	0.074	
	(75)	(23) *3		1				21 *3		(49) *3			1033	51 *3	1.005	0.075	
	普通4	(76)	(30) *3		11 *	(4)	(1)	32 *3	12 *	(53) *3			456	71 *3	1.003	0.059	
普通5	(77)	(30) *3		10				30 *3		(62) *3			481	71 *3	1.003	0.060	
	(78)	(36) *3			27 *3	11 *	(5)	33 *3	(5)	(40) *3			528	58 *3	1.004	0.064	
	(79)	(37) *3			31 *3			31 *3		(44) *3			553	57 *3	1.004	0.064	
注1), 注2) 表-3 の注 参照																	
$\sigma_{28} = 138.5 + 1.2809C - 1.8890W - 1.795SL + 6.35A - 0.461CT + 1.391S_{FM} + 79.36S_T - 0.910G_G \quad (56)$																	
$\sigma_{28} = 339.8 + 1.3242C - 2.3762W - 0.377CT + 47.35S_T - 6.61S_Q - 1.898G_G - 1.96G_Q \quad (57)$																	
$\sigma_{28} = 231.0 + 1.2820C - 2.0236W - 1.693SL + 6.77A - 0.409CT \quad (58)$																	
$\sigma_{28} = 753.5 - 8.302(W/C) - 1.9375W + 3.32A - 0.143CT \quad (59)$																	
$\sigma_{28} = 253.2 + 1.2757C - 0.0391W - 1.494SL \quad (60)$																	
$\sigma_{28} = 258.5 + 1.3204C - 2.2513W \quad (61)$																	
$\sigma_{28} = 278.9 + 0.9885C - 1.6600W - 12.662SL + 17.46A - 0.354CT - 10.497S_{FM} + 57.08S_T - 0.508G_G \quad (62)$																	
$\sigma_{28} = 324.4 + 1.0020C - 1.7841W - 11.805SL + 16.08A - 0.319CT \quad (63)$																	
$\sigma_{28} = 272.0 + 1.2164C - 2.0962W \quad (64)$																	
$\sigma_{28} = 129.0 + 1.4328C - 2.0691W - 1.334SL + 4.44A - 0.497CT - 10.136S_{FM} + 79.64S_T - 1.344G_G \quad (65)$																	
$\sigma_{28} = 211.7 + 1.4377C - 2.1750W - 1.215SL + 5.14A - 0.450CT \quad (66)$																	
$\sigma_{28} = 245.8 + 1.4325C - 2.3946W \quad (67)$																	
$W = 344.4 + 0.0620C + 1.452SL - 1.55A + 0.165CT - 1.67S_{FM} - 44.84S_T - 2.265G_G \quad (68)$																	
$W = 338.4 + 0.0644C + 1.417SL - 45.66S_T - 2.279G_G \quad (69)$																	
$W = 347.7 + 0.0533C + 1.905SL - 3.11A + 0.134CT + 2.67S_{FM} - 42.36S_T - 2.445G_G \quad (70)$																	
$W = 350.1 + 0.0527C + 1.600SL - 42.57S_T - 2.481G_G \quad (71)$																	
$W = 328.4 + 0.0441C + 1.680SL - 1.48A + 0.202CT + 0.158S_{FM} - 50.93S_T - 1.937G_G \quad (72)$																	
$W = 327.8 + 0.0476C + 1.647SL - 50.83S_T - 1.968G_G \quad (73)$																	
$S/a = 64.07 - 0.01272C - 0.0126SL + 0.801A - 0.0149CT + 5.753S_{FM} - 1.519S_T - 0.5832G_G \quad (74)$																	
$S/a = 68.07 - 0.01332C + 0.0058SL + 5.296S_{FM} - 0.6173G_G \quad (75)$																	
$S/a = 74.80 - 0.02120C + 0.3056SL - 0.249A - 0.0027CT + 6.704S_{FM} - 4.532S_T - 0.6288G_G \quad (76)$																	
$S/a = 72.54 - 0.02129C + 0.2742SL + 6.371S_{FM} - 0.7085G_G \quad (77)$																	
$S/a = 52.58 - 0.02839C + 0.1589SL + 0.661A - 0.0303CT + 7.489S_{FM} - 1.784S_T - 0.4363G_G \quad (78)$																	
$S/a = 55.20 - 0.02932C + 0.1794SL + 6.971S_{FM} - 0.4656G_G \quad (79)$																	

W { 全体2 : $(SL, (G_G), G_{\max}, C, CT)$
 普通2・3 : $(G_G, SL, (S_T), C)$
 普通2 : $(G_G, SL, (S_T), C)$
 普通3 : $(G_G, SL, (S_T))$
 全体2 : $(G_G, (G_{\max}), SL, (C), S_{FM})$
 普通2・3 : (G_G, SL, S_{FM})
 普通2 : $(G_G, SL, (C), S_{FM})$
 普通3 : $(G_G, SL, S_{FM}, (C))$

s/a { 同様に、調査Ⅲの場合、次のとおりである。
 | 普通4・5 : $C, (W), (SL), S_T, (S_Q)$

σ_{28} { 普通4 : $C, (W), (SL), A$
 普通5 : $C, (W), S_T, (SL)$
 普通4・5 : $(G_G, SL, C, (S_T))$
 W { 普通4 : $(G_G, (S_T), C, SL)$
 普通5 : $SL, (G_G), (S_T), C$
 | 普通4・5 : $(G_G, S_{FM}, (C))$
 s/a { 普通4 : $(G_G, S_{FM}, (C))$
 普通5 : $(G_G, (C), S_{FM}, SL)$

いずれも変数として採用した項目は、パラメーターとして各特性をよく表わしており多少の層別区分により多少の

相関性の相違が認められるが、 σ_{28} に対して最も影響が大きいのは C であり、次に W, C_{28} , SL, A, CT, S_T との関係が強いことがわかる。特に、C, W の次に C_{28} との相関が強く、JIS に適合していてもセメントの種類・製造工場による品質差が影響する傾向が認められることは、注意を要する(文献 19)参照)。一方、W は SL, G_6 , S_T , G_{max} , C との相関が、 s/a は G_6 , G_{max} , SL, C, S_{FM} との相関が強く認められる。3. の結果と比較すると、骨材品質の変域が小さいためこの影響がやや小さくなっているが、全体としては同様の関係が示されている。調査Ⅱと調査Ⅰとの解析結果は、いずれも試験練り結果であることから、傾向がよく合っている。

これらの関係のうち、 A および G_{\max} が σ_{28} に及ぼす影響は、 W/C が一定の場合、 A または G_{\max} が増すと σ_{28} はほとんど常に減少するが、 C および SL を一定にした場合には、所要のコンシスティンシーを得るのに必要な W が減少するため、強度減少が相殺または緩和され、配合によっては A または G_{\max} が増すほど σ_{28} が大きくなることがある²⁰⁾。調査Ⅲの結果にこの傾向が現われており、 A の増加に伴い W が減少、 σ_{28} が増加し、調査Ⅱとは逆の相関が示されている。

層別区分を G_{\max} で行ったが、 G_{\max} は s/a 、 W との相関があるのに対し、 σ_{28} との相関が小さく、 σ_{28} の推定にあたっては、変数として W を採用すれば G_{\max} の影響も説明され、層別区分の必要性は小さい。

(3) 推定式の検証

推定式 Y は、変数が多いほど寄与率 R^2 が増大し、推定値と実験値との比率の変動係数 (σ_{n-1}/\bar{X}) が小さくなる。

くなつており、強度推定精度は6~9%となつてゐる。しかし、変数としては、日常的に管理しやすく、どのデータに対しても再現性をもつ見込みが大きく、かつ項目数ができるだけ少ないことが望ましい。この意味からは、 C と W のほかに、 C_{28} 、 SL 、 A 、 CT 、 S_T を加えた7変数、このうち特に同一製造工場のセメントを使用し C_{28} の変動が小さい場合には、 SL を加えた3変数が最適であり、推定強度 Y_a を変動係数7~8%の精度で算出することが可能である。 SL が増加すれば α_{28} が低下する傾向は、ダムコンクリートの品質管理でも確認されており²¹⁾、 SL はコンクリートの製造から気象条件、運搬、試験に至る全要因の変動の程度を表わし、ワーカビリチーの判定のみならず強度判定にも利用できることが判明した。

また、 σ_{28} に対し C の影響がきわめて大きいことから、 C と W の 2 变数でも、変動係数が 0~1.1% 大きくなるにすぎず、この場合、各種の早期判定試験の推定精度^{22)~24)} 7~10% と比較しても、同程度以上の推定が可能である。この関係は、单一材料を使用した実験によっても検証されており、次の関係が報告されている²⁵⁾。

さらに、表-8に示す σ_{28} の単相関分析結果と比較すると、これからも C との相関がきわめて強いことがわかる。すなわち、 σ_{28} は 1 変数との関係であれば C/W との相関が最も強いが、式(2)で表わされる 2 変数以上の関係を含んで比較すると、後者の方が相関性がよく、しかも回帰係数の大きさから各要因の影響度を判断することができる。ちなみに、表-9は調査Ⅲの結果の一部

表-8 調査II・調査IIIの単相関分析結果

コンクリート の区分	n (個)	W / C		C / W		C		W	
		式	R'	式	R'	式	R'	式	R'
調査 全體 2・3	501	$\sigma_{28} = 774.4 - 8.279(W/C)(80)$	(78)*3	$\sigma_{28} = -87.3 + 221.6(C/W)(81)$	80 *3	$\sigma_{28} = 11.2 + 1.158C$	(82)	$\tau_{28} = 238.7 - 0.6642W$	(83) (14)*2
	426	$\sigma_{28} = 660.6 - 6.298(W/C)(84)$	(79)*3	$\sigma_{28} = -9.5 + 176.5(C/W)(85)$	79 *3	$\sigma_{28} = 77.4 + 0.837C$	(86)	$\tau_{28} = 329.7 - 0.0172W$	(87) (1)
	287	$\sigma_{28} = 674.8 - 6.529(W/C)(88)$	(76)*3	$\sigma_{28} = 6.5 + 169.6(C/W)(89)$	76 *3	$\sigma_{28} = 89.2 + 0.799C$	(90)	$\tau_{28} = 346.0 - 0.0551W$	(91) (2)
	139	$\sigma_{28} = 606.1 - 5.401(W/C)(92)$	(78)*3	$\sigma_{28} = 1.9 + 167.3(C/W)(93)$	78 *3	$\sigma_{28} = 32.4 + 1.002C$	(94)	$\tau_{28} = 481.6 - 1.162W$	(95) (36)*3
調査 普通 4・5	1045	$\sigma_{28} = 764.8 - 8.566(W/C)(96)$	(93)*3	$\sigma_{28} = -89.5 + 204.2(C/W)(97)$	94 *3	$\sigma_{28} = -39.0 + 1.144C$	(98)	$\tau_{28} = 372.6 - 0.4735W$	(99) (9)*2
	486	$\sigma_{28} = 810.9 - 9.519(W/C)(100)$	(93)*3	$\sigma_{28} = -63.6 + 194.4(C/W)(101)$	94 *3	$\sigma_{28} = 16.2 - 1.167C$	(102)	$\tau_{28} = 363.5 - 0.2016W$	(103) (3)
	559	$\sigma_{28} = 692.8 - 7.431(W/C)(104)$	(91)*3	$\sigma_{28} = -96.0 + 205.0(C/W)(106)$	92 *3	$\sigma_{28} = -33.6 + 1.07C$	(106)	$\tau_{28} = 439.2 - 1.095W$	(107) (27)*3
	559	$\sigma_{28} = 692.8 - 7.431(W/C)(104)$	(91)*3	$\sigma_{28} = -96.0 + 205.0(C/W)(106)$	92 *3	$\sigma_{28} = -33.6 + 1.07C$	(106)	$\tau_{28} = 439.2 - 1.095W$	(107) (27)*3

注) 表-4の注)参照, *2: 危険率1%以下で有意, *3: 危険率0.1%以下で有意

表-9 28日圧縮強度 σ_{28} と C/W, C&W との関係推定計算例

項目 地方名	データ 数 n (個)	骨材配合				σ_{28} $a+b/(C/W)$	σ_{28} (kgf/cm^2)	math>\sigma_{28}の推定計算値						
		S/t (kg/m ³)	G/c (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)			a	b	b/w	式(21)	式(11)	式(89)	式(40)
北海道	36	1689	63.7	277	145	-140	224	1.549	292	331	316	324	319	300
東北	48	1600	62.1	297	154	-182	246	1.603	297	343	336	334	321	299
関東	58	1675	64.1	277	149	-147	236	1.598	301	329	316	323	318	297
中部	79	1650	63.5	287	152	-160	239	1.577	302	336	325	328	324	305
近畿	47	1599	62.0	289	159	-144	234	1.451	295	319	316	314	315	295
中国	56	1544	59.2	313	172	-171	252	1.461	289	320	319	315	320	292
四国	45	1595	61.0	294	161	-145	230	1.445	283	319	320	315	317	289
九州・沖縄	55	1573	60.6	303	165	-154	237	1.439	292	325	325	319	320	295
全国	424	1616	61.9	291	157	-157	238	1.521	295	328	322	322	326	297

注) 調査田の配合(粗骨材の最大寸法 20~25mm, スランプ 8±2.5cm, 空気量 4±1%, 設計基準強度 240 kg/cm², 普通ボルトランドセメント・減水剤使用コンクリート)の他別途記載。実用計算値はこの平均値による。

であるが、 $\sigma_{28} - (C/W)$ との関係から $\sigma_{28} - C$ との関係を求めるため、配合設計時には W をほぼ一定として σ_{28} と C/W との関係が求められていることから、近似的に

$$\sigma_{28} = a + b(C/W) = a + (b/W)C = a + b'C$$

と変形し b' を計算すると、 σ_{28} と C との単相関が求められる。同表から、海砂など低品質骨材を使用する近畿以西の地方は、 S_T 、 G_c が小さく W が多く、 b' の値が全国平均1.521より小さくなっていることから、骨材品質の影響が大きく C の寄与率が小さくなる傾向があることがわかる。

次に、表-9の調査値に対し、 σ_{28} と C/W 、 C & W との関係式を用いて推定計算を行い σ_{28} の調査値と比較すると、調査Ⅲの推定値はよく合っているが、調査Ⅰ・調査Ⅱの推定値は約9%高くなっている。前述のように、前者のデータは出荷実績であり後2者が試験練り結果であることが原因で、これを考慮すると適合性がよいといえよう。

また、調査Ⅱの普通コンクリートを例に、式(36)の C & W を変数とする推定値 Y_a と σ_{28} の調査値 y_a との関係を図-2に、 $e = y_a - Y_a$ の分布および Y_a/y_a の分布を図-3に、それぞれ示す。残差のばらつきは等分散性の仮定に合っており、推定値の大きなところと小さなところで残差の符号が異なっているのは、他に独立な考慮すべき因子が残っていることを示唆している。 Y_a/y_a が正規分布するとした当初の仮定は、十分実用でき、推定精度を簡便に検定し得るものと考える。

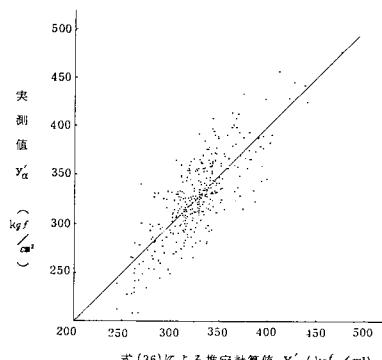


図-2 28日圧縮強度の推定計算値と実測値との関係
(普通2・3コンクリート)

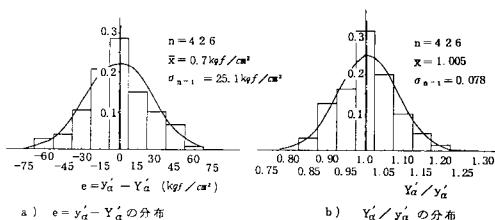


図-3 推定計算値の誤差

以上のことから、コンクリートの強度と品質との関係は、重回帰式(2)を用いて変域が大きくかつ σ_{28} との相関が強い項目を選定して関係式を求める方法が、合理的であるものと提言する。

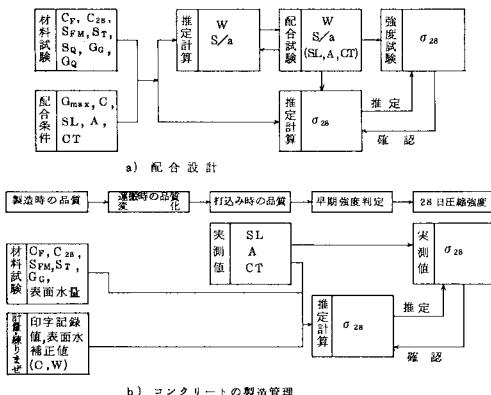
5. 重回帰式によるコンクリートの品質管理システム

コンクリートの品質管理において品質早期判定の必要性が生じる最大の原因是、レデミクストコンクリートの場合、コンクリートの品質規格が荷卸し地点における規格であり、材料の選定から配合の決定、練りませ、運搬に至る一連の製造過程を、生産者(生コン工場)の自管理にまかせているため、購入したコンクリートが、所要の強度等を満足するかどうかが不明であることに起因するといつても過言ではない。このため、今まで提言されているコンクリート品質の早期判定法は、いずれも購入者の立場で考案されたものであるといえ、大別すると2方法がある²⁾。1つは練りませ完了後のまだ固まらないコンクリートの配合分析結果から、他の1つは早期材令の圧縮強度試験結果から、それぞれ材令28日におけるコンクリートの品質を推定する方法である。

ところが、前者の場合、まだ固まらないコンクリート中の使用材料の品質および配合は、荷卸し地点において分析するまでもなく、パッチャーブラントにおいて練りませに使用されている材料の品質および配合計量値を確認すれば、最も正確に把握されることは論を待たない。また、後者の場合、早いもので試料採取後約1時間で結果が判明するが、いずれにせよ試験結果が判明する頃には、コンクリートの打込みは完了している。したがって、試験の結果コンクリート品質に疑義が生じた場合、打ち込まれたコンクリート構造物に対して何らかの処置を要することに変わりはない、しかも、使用材料、計量・練りませの設備・方法、運搬方法等のうち、いずれが原因であるか判定しがたい。すなわち、荷卸し地点でコンクリートの品質早期判定をより効率的に行い、本来の意味での品質管理体制を確立するためには、生コン工場から荷卸し地点までの納入過程において、コンクリートの品質変動の原因となる材料条件、製造条件、運搬条件等のデータを逐次収集・分析し、コンクリート品質との関係を数値分析しておくことが、不可欠である。

図-4は、本研究による品質管理の流れ図であり、コンクリートの配合設計およびコンクリートの製造管理(品質早期判定)に、重回帰分析による推定方法が応用され、推定式として式(6)～(107)が参考になろう。

配合設計時には、材料試験値と配合条件とが判明すれば、前述の重回帰式によって σ_{28} 、 W および s/a を推定計算することが、容易にできる。



一方、コンクリートの製造過程における推定の手順は、練りまぜるミキサにできるだけ近い箇所において、セメント、細骨材および粗骨材の試料を採取して材料試験 (C_F , C_{28} , S_{FM} , S_T , G_C , 表面水量) を行うとともに、計量時の印字記録値・表面水補正值 (C , W) を読み取り、荷卸し箇所におけるまだ固まらないコンクリートの性質の測定値 (SL , A , CT) が判明すれば、この時点で強度試験を実施しなくとも早期に σ_{28} の推定計算を行うことができ、前述のように、本来の意味での品質管理体制の向上が図れるものと考える。なお、セメントの品質は、一般には製造工場の試験成績表の値でよいが、製造工場間の品質差があるので、試験データの確認をしておく必要がある。

本研究では、調査Ⅰ～Ⅲの全データによる重回帰分析を省略したが、これは変域の大きさが推定計算に大きく影響するためである。層別区分、変数の組合せ、変動範囲によって偏回帰係数の大きさに差が生じ、重回帰分析を適用して導き出された結論は、そこで用いた変数の組合せに依存することに留意する必要がある。一方、本解析データは全国から集計したもので、これから得られた重回帰式は、不可避の試験誤差をも含んだ現実的な実用式であるといえよう。以上のこと考慮して、試験練り結果である調査Ⅰ・調査Ⅱの結果を中心に s/a , W および σ_{28} の補正表を作成し、表-10に示した¹⁾。一般に用いられている材料、配合に対する補正表として、目安となろう。なお、規準外の低品質骨材を用いた場合には、3. で示されたように、骨材を因

の影響度が大きくなることはいうまでもない。また、式(6)～(107)の使用にあたっては、解析データの範囲内にあるかを確認する必要がある。

6. 結 論

重回帰分析によるコンクリートの品質管理方法を実用化するため、推定式の導き方、品質管理システムなどについて、以上に述べた検討を加えた。本研究によって、次の成果が得られた。

(1) コンクリート品質の推定方法として、多変数一次式で表わす重回帰式(2)は、簡便でかつ精度がよい関係式として実用できる。

(2) 配合設計時または製造過程に、強度試験を行わなくともコンクリート強度を推定できる実験式として、表-3～4 および表-6～7 の関係を得た。これらの説明変数として相関がよい項目は、次に示すとおりである。

$$C, W, C_{28}, SL, A, CT, S_T, G_C, G_G$$

(3) コンクリートの強度推定式としては、1 変量推定式としては単相関式 $\sigma_{28} = (C/W)$ との関係が相関性がよいが、強度に影響を及ぼす要因は多変量であることを考慮すると、重回帰式(2)の方が合理的である。精度を向上させるには、説明変数として前述の(2)の項目の中から変域の大きい項目を採用すればよく、 C の偏回帰係数の大きさから、他の要因、特に骨材品質の及

表-10 s/a , W および σ_{28} の補正表

区分	RC 示方書 (100 条解説表 7)		本研究注		
	s/a の補正	$W(kg/cm^3)$ の補正	s/a の補正	$W(kg/cm^3)$ の補正	$\sigma_{28}(kgf/cm^2)$ の補正
細骨材率 S_T が 1.0 大きい (小さい) ことに			1.5 だけ大きく (小さく) する		
水セメント比 W/C が 0.5 多 大きい (小さい) ことに	1 だけ大きく (小さく) する	補正しない			
単位セメント量 C が $1 kg/m^3$ 大きい (小さい) ことに	—	—	0.02～0.03 大きく (小さく) する	0.02～0.08 大きく (小さく) する	1.0～1.5 だけ増加 (減少) する
単位水量 W が $1 kg/m^3$ 大きい (小さい) ことに	—	—	—	—	1.2～2.0 だけ減少 (増加) する
スランプ L が $1 cm$ 大きい (小さい) ことに	補正しない	1.2 だけ大きく (小さく) する	0.3～0.4 だけ大き く (小さく) する	1.4～1.8 だけ大き く (小さく) する	1.0～1.0 だけ減少 (増加) する
空気量 A が 1.0 大きい (小さい) ことに	0.5～1.0 だけ小さく (大きく) する	3 倍だけ小さく (大きく) する	—	—	5～15 だけ減少 (増加) する
コンクリート温度 T が $10^\circ C$ 大きい (小さい) ことに	—	—	—	0.1～0.4 だけ大き く (小さく) する	0.5～1.5 だけ減少 (増加) する
セメントの C_{28} が $1 kgf/cm^2$ 大きい (小さい) ことに	—	—	—	—	0.2～0.6 だけ増加 (減少) する
砂石を用いる場合	2～3 だけ大きく する	6～9 だけ大き く する	—	—	—
細骨材の粗粒率 S_{FM} が 0.1 大きい (小さい) ことに	0.5 だけ大き く (小さく) する	補正しない	0.3～0.6 だけ大き く (小さく) する	—	—
細骨材の单位容積重量 S_T が $0.01 kg/cm^3$ 大きい (小さい) ことに	—	—	—	0.4～0.5 だけ大き く (小さく) する	0.5～1.5 だけ増加 (減少) する
砂石を用いる場合	3～5 だけ大き く する	9～15 だけ大き く する	—	—	—
粗骨材の最大寸法 G_{max} が $5 mm$ 大きい (小さい) ことに	—	—	0.8～1.1 だけ大き く (小さく) する	1.5～2.7 だけ大き く (小さく) する	—
粗骨材の充満率 G_C が 1.0 大きい (小さい) ことに	—	—	0.5～0.6 だけ大き く (小さく) する	1.8～2.3 だけ大き く (小さく) する	0.5～1.5 だけ増加 (減少) する
粗骨材の吸水率 G_W が 0.1 大きい (小さい) ことに	—	—	—	—	0.2～1.0 だけ減少 (増加) する

注) この表に示す値は、 $W/C = 95 \sim 30\%$, $SL = 20 \sim 1cm$, $A = 7.5 \sim 2.0\%$, $CT = 35 \sim 5^\circ C$, $G_{max} = 40 \cdot 25 \cdot 20 mm$ のコンクリートに対するものである。

ぼす影響を判定することが可能である。一般には、Cの偏回帰係数は、1.0~1.5である（表-10参照）。

(4) 配合設計時に単位水量および細骨材率 s/a を推定する実験式として、表-3 および表-6, 7 の関係を得た。また、これらの説明変数として相関がよい項目は、それぞれ次に示すとおりである。

$$W : SL, G_a, S_T, G_{\max}, C, CT$$

$$s/a : G_a, G_{\max}, SL, C, S_{FM}$$

(5) 重回帰式の検定のため、推定値と実験値との比率 (Y_a/y_a) が正規分布するという仮定を導入したが、推定値の精度を簡便に判定可能である。既往の早期強度判定試験の推定精度は 7~10% であり、これらと比較して本研究の重回帰式の強度推定精度 6~9% は、強度試験の実施なしに強度推定可能なことを考慮すると、十分実用的な精度で品質推定可能といえよう。

(6) コンクリートの配合設計および製造管理に重回帰分析による推定方法が応用され（図-4 参照）、日常管理試験項目として骨材の材料試験値、計量・練りませ時の印字記録値、表面水補正値および荷卸し時まだ固まらないコンクリートの性質の測定値が得られれば、28 日圧縮強度の早期判定が図れる。また、一般的なコンクリートの品質管理に用いる補正表として、表-10を得た。

(7) JIS に適合していても、セメントの種類（普通、早強など）、製造工場（銘柄）による品質差がコンクリートの強度に影響する。また、骨材の品質低下・多様化に伴い、コンクリートの強度に及ぼす骨材品質の影響が強いのは、細骨材の品質であり、細骨材の単位容積重量 S_T によって影響度を判定できる。

7. あとがき

本研究にあたり、全国の公團関係機関、セメント協会および全国の生コン工場の多大なるご協力を頂いてデータを収集させて頂くとともに、多数の文献を引用・参考にさせて頂いた。ここに、謹んで厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 土木学会：無筋および鉄筋コンクリート標準示方書解説、1980.
- 2) コンクリート工学協会：コンクリート品質の早期判定指針、1985.
- 3) 中村：海砂の品質、コンクリート工学、Vol. 12, No. 10, pp. 11~17, 1974.
- 4) 飯岡・豊福・細田：コンクリートの強度におよぼす骨材および配合の影響、土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集、pp. 26~27, 1977.
- 5) 飯岡・豊福：コンクリートの強度および耐久性におよぼす骨材粒の特質、セメント技術年報 31, pp. 191~195, 1977.
- 6) 赤井・豊福：細骨材がコンクリートの配合・強度および耐久性におよぼす影響、第 1 回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp. 153~156, 1979.
- 7) 赤井・豊福：骨材の地域特性—全国生コンクリート工場使用骨材の品質実態—、コンクリート工学、Vol. 17, No. 8, pp. 37~46, 1979.
- 8) 赤井・豊福：レディーミクストコンクリートの地域特性—全国生コンクリート工場における品質実態—、セメントコンクリート、No. 395, pp. 12~22, 1980.
- 9) 遠藤：全国の骨材品質概況、セメントコンクリート、No. 415, pp. 21~30, 1981.
- 10) 中村：コンクリート構造物の早期劣化の問題点—材料・施工・維持管理—、土木学会第 38 回年次学術講演会研究討論会資料、pp. 18~23, 1983.
- 11) 赤井・豊福：多変量解析によるコンクリートの配合設計法の提案、土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集、pp. 225~226, 1978.
- 12) 飯岡・豊福：コンクリートの配合・強度および耐久性の推定法、セメント技術年報 32, pp. 213~216, 1978.
- 13) 赤井・豊福：コンクリートの品質管理における品質早期判定法について、コンクリート品質の早期判定に関するシンポジウム発表論文集、pp. 101~104, 1979.
- 14) 阿部・後藤・長島：電算機による生コンクリートの品質管理のための配合計算法、コンクリート工学、Vol. 20, No. 10, pp. 18~26, 1982.
- 15) 杉本・和田・谷出：現場でできるコンクリート早期品質判定法の実用化、コンクリート工学、Vol. 21, No. 7, pp. 47~51, 1983.
- 16) 村上・瀬戸口・曾根・木佐木：自動計測・制御を応用した生コンクリートの製造方法の開発、第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 333~336, 1985.
- 17) 奥野・久米・芳賀・吉澤：多変量解析法、1981.
- 18) 建設材料研究会：生コンの製造と品質管理、pp. 101, 1983.
- 19) 小林：コンクリート構造物の早期劣化とセメントの品質、土木学会論文集第 354 号/V-2, pp. 27~41, 1985.
- 20) Walker, S. and Bloem, D. L. : Effect of Aggregate Size on Properties of Concrete, Jour. ACI, Proc. Vol. 57, pp. 283~298, 1960.
- 21) 永田：ダムコンクリートの品質管理について、土木学会論文集第 84 号、pp. 83~84, 1962.
- 22) 池田：コンクリート強度即時判定方法の実用化に関する研究、土木学会論文報告集第 266 号、pp. 131, 1977.
- 23) 石田・二見：新幹線高架橋工事におけるコンクリート強度早期判定法の現場試験、コンクリート品質の早期判定に関するシンポジウム、pp. 61~64, 1979.
- 24) Soshiroda, T. and Fujisawa, Y. : Earlier Evaluation of Concrete Quality by a Complex Method using a Rapid Analysis of Fresh Concrete and a Accelerated Strength Test, RILEM Symposium, Stockholm, 1979.
- 25) 阪田・池田：コンクリートのクリープの予測に関する研究、土木学会論文報告集、第 340 号、pp. 186, 1983.

(1985.7.12・受付)