

# データ解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

## A STUDY ON THE QUALITY CONTROL SYSTEMS OF CONCRETE BY DATA ANALYSIS

豊福俊泰\*

By Toshiyasu TOYOFUKU

Quality control tests of concrete are usually made by testing compressive strength of hardened concrete at an age of 28 days with specimens taken at the unloading point. But it is important to get a decision on concrete quality at an earliest age possible, and the results be utilized in further concrete production and construction works. From this point of view "the Quality Control Systems of Concrete by Data Analysis" is suggested. In this system the estimating method of concrete quality is utilized as follows: The compressive strength and other qualities of concrete can be calculated by estimation equations using such control data as the test value of materials to be used, the printed record value of batching, the property of fresh concrete, etc.. In the case of the mix design and production control this method can be used efficiently without testing hardened concrete.

*Keywords: quality control, mix design, production control, compressive strength, mix proportion, aggregate, unit cement content, multiple regression analysis*

### 1. 序 論

周知のように、コンクリートは所要の強度、耐久性、水密性等をもち、品質のばらつきの少ないものでなければならぬ<sup>1)</sup>。今日、わが国の建設工事においては、コンクリートとして JIS A 5308「レデーミクストコンクリート」<sup>2)</sup>に基づいて製造された生コンクリート（以後、生コンとよぶ）を使用することが、一般化している。ところが JIS 生コンは、品質規格が荷おろし地点において規定されており、コンクリートの品質管理（以後、QC とよぶ）は、荷おろし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によって行われるのが一般である。しかし、この試験結果が判明した時点では、コンクリート工事が進捗しており、疑義が生じても処置が困難である。しかも、コンクリートを打ち込む前の材料、計量、練りませ、運搬に至る一連の製造条件と硬化コンクリートの品質との関係を定量的に推定する方法が確立していないため、いずれが品質変動の原因であるかを判定しにくいのが現状であり、本来の意味での QC 体制の向上を図る障害となっている。

これらのことから、近年、荷おろし箇所におけるコンクリート品質の早期判定方法に関する研究が行われ、圧縮強度・水セメント比等を推定する種々の試験方法が考案され、試験方法（案）としてまとめられている<sup>3)~5)</sup>など。また、土木学会コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>では、水セメント比によるコンクリートの管理が規定されている。その他の研究としては、重回帰式によって圧縮強度を推定する方法の提案<sup>6)</sup>等がされてきた。生産者（生コン工場）の側からの研究としては、製造管理データと圧縮強度に関する中山の研究<sup>7)</sup>、自動計量記録値（印字記録値）と表面水率から水セメント比を算出して圧縮強度を推定する方法に関する西・曾根らの研究<sup>8)</sup>など、伊予田らの研究<sup>9)</sup>等が展開されてきた。さらに、通産省は生コン品質の早期判定試験方法の JIS 化へ向けて、委員会を発足させている<sup>10)</sup>。

一方、著者は、上流で確実に管理するいわゆる川上管理体制が重要であることに着目し、骨材の品質や QC がコンクリートの品質に及ぼす影響を解明するとともに<sup>11)</sup>など、データ解析（重回帰分析）によるコンクリートの品質推定方法およびこれを利用したコンクリートの QC<sup>12)~14)</sup>などを提言してきた。本文は、これらの研究を総括し、「データ解析によるコンクリートの品質管理システム」を提案するものであり、生コンの生産者（製造者）

\* 正会員 工博 日本道路公団福岡建設局八代工事事務所所長（元・同試験所コンクリート試験室長）  
〒866 八代市本野町池端 662-1

の立場で、生コン工場から荷おろし地点までの納入過程において収集し得る各種の管理データを用いて、圧縮強度やその他のコンクリート品質を迅速に推定解析する方法を明らかにした。

2. 調査概要および解析方法

(1) 特性要因および解析データ

本研究で着目したコンクリートの品質は、荷おろし箇所ので採取したコンクリートの管理試験結果（出荷実績）の圧縮強度  $f'_{kc28}$  のほかに、品質推定が重要な、試験練り（配合設計）によって求められる細骨材率  $s/a$  (%), 単位水量  $W$  (kg/m<sup>3</sup>), 圧縮強度  $f'_{c28}$  (kgf/cm<sup>2</sup>, 材令 28 日), 引張強度  $f_{t28}$  (kgf/cm<sup>2</sup>, 材令 28 日), 曲げ強度  $f_{b28}$  (kgf/cm<sup>2</sup>, 材令 28 日), ヤング係数  $E_{28}$  ( $\times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>, 材令 28 日), 耐久性指数  $DF$  (% , 300 サイクル), 乾燥収縮  $DS_{52}$  ( $\times 10^{-5}$ , 材令 52 週) である<sup>12),15)</sup>。

コンクリートの品質推定式を求めるための解析データとしては、文献 11) で信頼性が確認されたコンクリート試験調査結果（調査 I.  $f'_{c28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $f_{b28}$ ,  $E_{28}$ ,  $DF$ ,  $DS_{52}$  等のデータ）、日本道路公団（以後、公団とよぶ）の建設工事打設コンクリートの品質調査結果（調査 II.  $f'_{c28}$  および  $f'_{kc28}$  の平均値  $\overline{f'_{kc28}}$  のデータ）および日常管理試験調査結果（調査 IV.  $f'_{kc28}$  のデータ）を採用した。

$f'_{kc28}$  のデータを解析した調査 IV は、公団の常磐自動車道建設工事において打設（関東地域の 9 工場から 13 工

事に出荷）されたコンクリートの日常管理試験結果で、請負人から報告されたものである<sup>16)</sup>（表一参照）。特性要因としては、推定に役立ちかつ品質管理しやすい項目に限定して採用した<sup>14)</sup>などが、運搬時間  $TT$  (min) 等の運搬条件は不明である（全項目数  $i=24$ ）。調査したデータは、 $f'_{kc28}$  とこれに対応する使用骨材の粒度、表面水率、計量値等の日間変動であり、この分布範囲は、骨材の品質規準に適合する範囲を変域とする一般的な骨材使用データ（表一参照、曲げ強度で管理される舗装用コンクリートと捨てコンを除外した 4587 配合）である。

また、製造管理方法への実用化を図るため、前述の関東地域の 3 工場（A, B, E）および九州地域の 4 工場の合計 7 工場で、データ解析によるコンクリートの QC を実際に行い、その実用性と有効性を検証した。

(2) 演算方法

コンクリートの品質と材料・配合・製造条件との関係は、単回帰分析および重回帰分析で検討した<sup>14), 17)</sup>など、単回帰分析では、次式を始めとした 16 式から最適推定式を求め、予測精度は、単相関係数  $r$  によって判定した。

$$Y = a + bX \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $a, b$  は定数

また、重回帰分析では、 $p$  個の説明変数  $x_1, x_2, \dots, x_p$  と対応する目的変数の値  $y_1, y_2, \dots, y_n$  が  $n$  組 ( $n \geq p+1$ ) 得られるとき、変数増減法（分散比  $F_{IN} = F_{OUT} = 2.0$ ）により、次の帰式が得られる。

表一 調査工場の概要および解析データ

項目	区分	記号注	単位	A 工場	B 工場	C 工場	D 工場	E 工場	F 工場	G 工場	H 工場	I 工場	全工場
				(千葉県)	(千葉県)	(千葉県)	(千葉県)	(千葉県)	(茨城県)	(茨城県)	(茨城県)		
調査概要	コンクリート	強制練り	m <sup>3</sup>	3.0×1 細骨材	3.0×1 細骨材	3.0×1 細骨材	2軸 細骨材	2軸 細骨材	3.0×2 細骨材	2軸 細骨材	2軸 細骨材	2軸 細骨材	
	表面水率	調整装置		調整装置	調整装置	調整装置	調整装置	調整装置	調整装置	調整装置	調整装置	調整装置	
調査概要	骨材の産地			千葉県川砂	茨城県砂	茨城県砂	茨城県砂	茨城県砂	栃木県砂	茨城県砂	茨城県砂	茨城県砂	
	骨材の表面水率			3回/日	1回/2時間	2~3回/日	3回/日	2回/日	3回/日	4回/日	3回/日	3回/日	
調査概要	調査呼	か月	kgf/cm <sup>2</sup>	47	48	24	29	14	22	7	27	34	4587
	配合	配合	kgf/cm <sup>3</sup>	180,240,300	180,240,300,350	180,240,300	180,240,350	180,240,350	180,240	180,240,300	180,240,300	180,240,300,400	180,240,300,350,400
配合	スランプ	cm		8,15	8,15	8,15	8	8	8	8	8,15	8,20	8,15,20
	圧縮強度 (材令 28 日)	$f'_{c28}$	kgf/cm <sup>2</sup>	254~400	237~437	240~416	227~490	226~480	228~343	283~454	216~392	250~507	216~507
配合	水セメント比	W/C	%	42.2~58.8	40.8~62.1	43.5~60.8	44.0~64.2	40.2~65.1	51.9~68.5	45.0~61.7	41.7~65.5	42.3~63.3	40.6~68.5
	セメント比	C/W	%	1.71~2.37	1.61~2.45	1.65~2.30	1.88~2.27	1.54~2.43	1.46~1.93	1.62~2.22	1.53~2.40	1.58~2.37	1.49~2.49
配合	水セメント比	W/C	%	48.0~69.9	46.4~76.8	49.6~72.5	47.5~72.5	43.2~72.6	59.5~76.9	51.7~74.9	51.0~79.7	48.3~72.7	43.2~79.7
	水セメント比	C/W	%	1.43~2.06	1.32~2.16	1.38~2.02	1.38~2.10	1.38~2.31	1.27~1.68	1.40~1.93	1.25~1.96	1.38~2.16	1.25~2.31
配合	単位水量	W	kg/m <sup>3</sup>	228~369	228~385	229~376	229~352	227~352	228~302	233~320	228~353	239~354	227~385
	単位水量	W	kg/m <sup>3</sup>	179~181	177~181	156~184	140~183	135~149	144~189	136~150	129~157	133~175	127~175
配合	単位水量	W	kg/m <sup>3</sup>	19.4~28.8	20.3~33.6	20.4~27.9	8.4~22.5	6.0~18.8	19.4~29.9	19.6~22.4	31.2~35.4	10.4~22.6	6.0~35.4
	単位水量	W	kg/m <sup>3</sup>	151~183	153~186	158~187	152~179	146~166	166~192	157~170	145~189	145~192	145~192
配合	スランプ	SL	cm	7.0~17.5	7.0~18.5	7.0~18.5	8.0~10.0	8.4~10.4	7.5~9.8	7.0~10.2	6.1~18.5	8.5~20.4	8.0~20.4
	スランプ	A	cm	3.4~4.7	3.3~4.9	3.7~4.7	3.4~4.7	3.2~4.7	3.5~4.5	3.2~4.8	3.3~4.8	3.3~4.8	3.2~4.9
配合	スランプ	CO	°C	7.0~31.0	10.0~31.5	10.0~31.0	10.0~29.0	9.0~29.0	10.0~29.5	10.0~24.0	4.0~31.0	11.0~29.5	4.0~31.5
	スランプ	CO	°C	3.16~3.17	3.14~3.17	3.15~3.15	3.14~3.16	3.14~3.16	3.16~3.16	3.16~3.16	3.16~3.16	3.14~3.16	3.04~3.17
配合	圧縮強度 (材令 28 日)	$f'_{c28}$	kgf/cm <sup>2</sup>	410~416	411~463	417~426	408~508	419~485	413~419	413~415	406~417	412~492	300~508
	圧縮強度 (材令 28 日)	$f'_{c28}$	kgf/cm <sup>2</sup>	2.0~7.0	2.5~5.1	2.0~6.0	0.0~4.0	0.1~5.0	3.0~5.0	2.0~4.0	1.5~4.7	2.0~9.0	0.0~9.0
配合	単位骨材量	$S_{0.15}$	%	2.48~2.85	2.58~2.76	2.58~2.80	2.48~2.89	2.46~2.77	2.82~2.94	2.47~2.69	2.50~2.75	2.83~2.99	2.46~2.89
	単位骨材量	$S_{0.15}$	%	1.580~1.650	1.580~1.680	1.710~1.820	1.684~1.832	1.780~1.820	1.620~1.870	1.680~1.700	1.610~1.630	1.630~1.680	1.580~1.832
配合	骨材比	S	%	2.58~2.80	2.58~2.80	2.61~2.63	2.59~2.61	2.57~2.57	2.57~2.59	2.50~2.60	2.59~2.61	2.60~2.60	2.57~2.63
	骨材比	S	%	1.11~2.10	1.39~1.76	0.87~1.35	0.67~1.91	0.52~1.32	1.38~2.31	1.95~1.65	2.00~2.20	1.80~1.30	0.52~2.31
配合	最大寸法	G <sub>0</sub>	mm	25~40	25~40	25~40	20~40	25~40	25~40	20~40	25~40	25~40	20~40
	最大寸法	G <sub>0</sub>	mm	62.2~64.8	63.5~65.4	62.4~64.8	59.0~62.1	60.8~62.9	62.9~64.1	59.8~60.8	64.0~65.8	63.8~64.8	59.0~65.8
配合	骨材水率	G <sub>w</sub>	%	2.59~2.80	2.60~2.85	2.61~2.67	2.66~2.71	2.60~2.80	2.60~2.82	2.78~2.78	2.61~2.61	2.60~2.62	2.59~2.78
	骨材水率	G <sub>w</sub>	%	0.77~1.25	1.02~1.95	1.17~1.63	0.20~1.11	0.18~0.38	0.32~1.21	0.85~0.77	1.44~1.76	0.40~1.20	0.18~1.95
配合	平均水率	Q	%	1.05~1.43	1.16~1.78	1.09~1.46	0.44~1.18	0.32~1.07	1.04~1.64	1.01~1.14	1.65~1.91	0.55~1.20	0.32~1.91
	平均水率	Q	%	1.05~1.43	1.16~1.78	1.09~1.46	0.44~1.18	0.32~1.07	1.04~1.64	1.01~1.14	1.65~1.91	0.55~1.20	0.32~1.91

注)  $C/W = (C/C_0)/(W/W_0+10A)$ ,  $W_s = S \times S_0 / (100+S_0)$ ,  $G \times G_0 / (100+G_0)$ ,  $W_s = W_s + W_0$ ,  $Q = S \times S / (S + G) + G_0 \times G / (S + G)$  ここで、S: 単位骨材量 (kg/m<sup>3</sup>), G: 単位骨材量 (kg/m<sup>3</sup>) 試験方法は、J T S 等の各試験方法による。

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$  : 偏回帰係数の最良不偏推定値

予測精度は、重相関係数  $R$ , 決定係数  $K$  によって判定するほかに、推定計算値  $Y_a$  および実測値  $y_a$  との残差  $e_a$  ( $=y_a - Y_a$ ) を算出し、 $e_a$  の平均値  $\bar{e}$  および標準偏差  $e_s$ , ( $y_a/Y_a$ ) の平均値  $\bar{z}$  および標準偏差  $z_s$  をそれぞれ求め、 $Y_a$  のばらつきの程度を検定した ( $a=1, 2, \dots, n$ )。

解析にあたって、 $f'_{kc28}$  の代表的な分析で選定した項目は、次に示すとおりである<sup>14)</sup>。

分析②:  $W/C, C/W, c/v, W_T/C, C/W_T, W_a, W_T, C, W, Q, SL, A, CO, C_H, C_{C28}, S_{0.15}, S_{FM}, S_T, S_H, S_Q, G_M, G_C, G_H, G_Q$  ( $i=24$ )

分析⑩:  $C, W, SL, A, CO, C_{C28}, S_T, S_Q, G_M, G_C, G_Q$  ( $i=11$ )

分析⑩L: 分析⑩の  $C$  を  $\log C$  とした場合 ( $i=11$ )

分析⑩L: 分析⑩Lに  $TT$  を追加した場合 ( $i=12$ )

### 3. 調査IVによるコンクリートの管理試験結果 (出荷実績) の圧縮強度と材料・配合・製造条件との関係

#### (1) 単回帰分析結果

単回帰分析結果から、要因として全項目を選定した分析②の場合を代表例に、 $f'_{kc28}$  に対し相関性が強いもの

から順に列記すると、次のとおりである。

$$\begin{matrix} C/W_T, (W_T/C), C, C/W, (W/C), c/v, (G_M), (G_C), \\ \substack{80 \\ 79} \quad \substack{73} \quad \substack{63} \quad \substack{61} \quad \substack{61} \quad \substack{58} \quad \substack{44} \\ G_H, C_{C28}, C_H, (W_a), (S_Q), (Q), W, (G_Q), (SL), \\ \substack{44} \quad \substack{42} \quad \substack{42} \quad \substack{41} \quad \substack{41} \quad \substack{40} \quad \substack{38} \quad \substack{31} \quad \substack{29} \\ S_H, S_T, (S_{0.15}), (W_T), (A) \\ \substack{23} \quad \substack{17} \quad \substack{13} \quad \substack{10} \quad \substack{6} \end{matrix} \quad (n=4430)$$

ここで、( ) 内は負の相関で ( ) なしは正の相関を表わす。下段の数値は、式(1)によって求めた場合の  $r$  を % で表わしたもので、1%以下の危険率で有意な項目を示した。

これから、 $f'_{kc28}$  は、 $f'_{c28}$  の解析結果<sup>14)</sup>とは異なり  $c/v$  よりも  $C/W_T$  との相関が最も強く、次に骨材中の吸水量を考慮した  $W_T/C$  となっており、以下1項目で2変数を表わす項目が上位を占めていることがわかる。1変数の項目としては、 $C$  との相関が同様に最も強く、次に、 $(G_M), (G_C), G_H, (G_Q)$  で表わされる粗骨材の粒度・粒形・材質要因、 $C_{C28}, C_H$  で表わされるセメントの品質、 $(W_a), (Q)$  で表わされる骨材の材質要因、 $W, (SL), (A)$  で表わされる配合条件、 $(S_Q), S_H, S_T, (S_{0.15})$  で表わされる細骨材の粒度・粒形・材質要因の順である。

図-1は、全データに対する  $f'_{kc28}$  と  $W/C, c/v, C/W_T, C, W, SL$  との関係である。これらの図から、製造工場によってある分布範囲があり、それぞれ層別区分されていることがわかる。したがって、 $C/W_T$  が最も相関が良くなった理由は、調査した工場数が9で関東地方

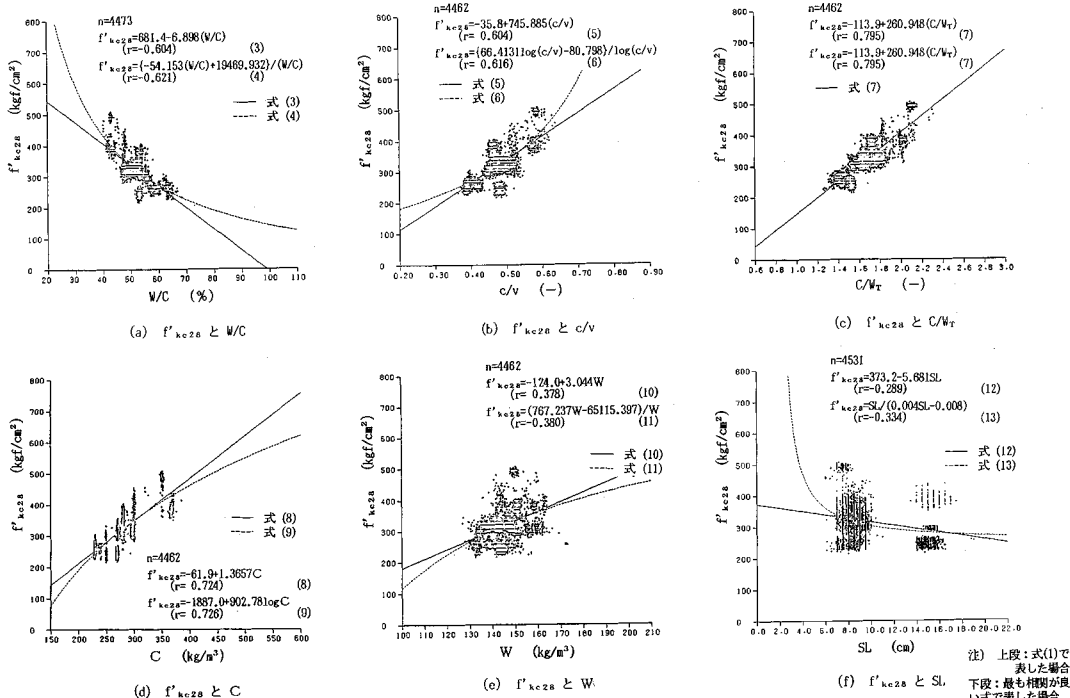


図-1  $f'_{kc28}$  と  $W/C, c/v, C/W_T, C, W, SL$  との関係 (調査IV)

注) 上段: 式(1)で表した場合  
下段: 最も相関が強い式で表した場合

のみのため品質の分布が全国と多少異なるとみなされるが、全体としての相関は今まで解析した他の調査結果とも合っている。 $f'_{kc28}$ とCとの関係式としては、 $f'_{c28}$ の解析結果<sup>14)</sup>、後述する重回帰分析結果等と同様に、対数関数式を採用する方が相関性が良い傾向が認められる(図一(d)参照)。

(2) 重回帰分析結果

全工場データの重回帰分析結果は、表一2、表一3および図一2に示すとおりである。同表から、 $f'_{kc28}$ は、管理項目を1項目とする場合には $C/W_T$ との相関が最も強いが、1項目で2変数以上を表わす項目を除いた場合には $\log C$  [または $C$ ]との相関がきわめて強く、 $R$ が0.72、 $e_s$ が35 kgf/cm<sup>2</sup>である。管理項目を2項目以上とする場合には、 $\log C$  [または $C$ ]、 $(G_G)$ 、 $C_{c28}$ 、 $(SL)$ の4項目が占める寄与率が $(0.92)^2=85\%$ であり、このほかの項目の占める割合が5%程度で小さくなっている。 $f'_{c28}$ の解析結果<sup>14)</sup>と比較すると、 $S_0$ 、 $G_0$ 、 $CO$ との負の相関はその傾向が合っているが、 $S_T$ と負の相関がある点

や、 $W$ の相関が弱くなり、逆に $G_G$ 、 $SL$ の相関が強くなっている点は、傾向が異なっている。この理由は、日常変動の方が大きいコンクリートの $f'_{kc28}$ に対しては、全国的な品質変動とは変域が異なるため、この影響が現われているものとみなされる。 $f'_{kc28}$ に対して $SL$ の相関が強く現われる傾向は、中山の研究でも報告されており、毎日の材料、配合、製造条件によるコンクリートの品質変動が $SL$ に表わされていることによると考えられる。

また、図一2から、計算値と実測値との関係は、全体的には等分散性の仮定に合っている。

(3) 工場別の重回帰分析(分析⑩)の場合

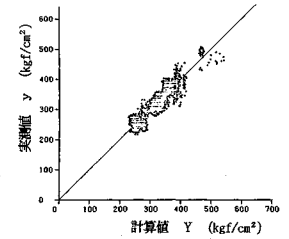
以上の傾向を各生コン工場ごとに分析した結果を、表一3に示す。 $f'_{kc28}$ との相関が強く $t$ 値3.0以上( $F_{IN}=F_{OUT}=9.0$ )の変数として取り込まれたのは、各工場次のとおりである(いずれも $\bar{e}=0$ )。

A工場： $\log C$ 、 $G_M$ の2変数で $e_s=11$  kgf/cm<sup>2</sup>(出荷期間47か月、 $n=614$ で十分多く、骨材の品質変動が少なく、最も推定精度が良い)

表一2  $f'_{kc28}$ の重回帰分析結果(調査IV、全工場)

分析⑨	$f'_{kc28} = 5068.6 - 286.66(C/W_T) - 0.371G_M + 657.37G_M + 1.1578C_{c28} + 192.17G_M + 656.59C_M - 61.7021W_T - 1.814SL + 375.39S_T$ (-17.82) (-5.26) (-5.52) (28.58) (38.37) (7.15) (14.24) (-10.57) (-10.88) (12.2) $+17.28S_T - 1.5266G - 32.500(W/C) + 64.088W + 118.88S_0 + 26.518(W_T/C) + 218.692(C/V) + 581.13Q + 41.06A - 1.8546C$ (5.13) (-3.75) (-11.57) (10.82) (8.71) (10.93) (7.81) (8.17) (8.14) (-5.15)
	( $n=4430$ , $i=24$ , $p=18$ , $R=0.953$ , $K=0.909$ , $e_s=15.2$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.046$ ) 式(14)
分析⑩	$f'_{kc28} = 520.9 + 1.3258C - 11.031G_0 + 0.8260C_{c28} - 3.643SL - 14.12S_0 - 0.6724W - 33.87S_T - 0.102CO - 0.173G_M$ (17.68) (80.08) (-30.65) (28.52) (-19.63) (-13.44) (-9.88) (-4.95) (-2.03) (-2.32)
	$-1.41G_0$ (-1.53)
	( $n=4448$ , $i=11$ , $p=10$ , $R=0.922$ , $K=0.850$ , $e_s=19.5$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.061$ ) 式(15)

注) 下段の( )内は $t$ 値  $p$ : 全項目数 $i$ の自由度



図一2 計算値と実測値との関係 [式(16)]

表一3 工場別の $f'_{kc28}$ の重回帰分析結果(調査IV、分析⑩)

区分	1	2	3	4	5	6	7	8	注1)	演算結果の回帰式	注2)
全体	$\log C$ , $(G_0)$ , $C_{c28}$ , $(SL)$ , $(S_0)$ , $(W)$ , $(S_T)$ , $(CO)$	72 86 35	90 92 26	92 92 22	92 92 20	92 92 19	93 93 19	93 93 19		$f'_{kc28} = -1269.5 + 879.601 \log C - 11.678G_0 + 0.9088C_{c28} - 3.523SL - 14.56S_0 - 0.6110W - 32.82S_T - 0.082CO$ (-38.52) (97.15) (-45.05) (33.87) (-24.91) (-14.86) (-9.89) (-5.18) (-1.70)	( $n=4448$ , $i=11$ , $p=8$ , $R=0.926$ , $K=0.857$ , $e_s=19.1$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.060$ ) 式(16)
A工場	$\log C$ , $G_M$ , $S_T$ , $(G_0)$	88 89 11	90 90 11	90 90 11	90 90 11	90 90 11	90 90 11			$f'_{kc28} = -878.8 + 519.591 \log C + 0.429G_M + 47.23S_T + 0.857SL - 2.74G_0$ (-8.01) (17.83) (2.99) (2.84) (2.01) (-1.78)	( $n=614$ , $i=11$ , $p=5$ , $R=0.897$ , $K=0.805$ , $e_s=10.8$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.034$ ) 式(17)
B工場	$\log C$ , $(SL)$ , $G_M$ , $(G_0)$ , $(A)$ , $G_0$ , $(S_T)$	92 92 13	92 92 13	92 92 12	92 92 12	92 92 12	93 93 12	93 93 12		$f'_{kc28} = -1844.7 + 881.351 \log C - 5.332SL + 0.515G_M - 8.23G_0 - 4.10A + 4.387G_0 - 125.51S_T$ (-10.31) (38.22) (-8.12) (3.28) (-2.78) (-2.22) (2.14) (-2.10)	( $n=788$ , $i=11$ , $p=7$ , $R=0.925$ , $K=0.856$ , $e_s=12.4$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.040$ ) 式(18)
C工場	$\log C$ , $(SL)$ , $(CO)$ , $(W)$ , $C_{c28}$ , $A$	85 87 15	88 88 14	88 88 14	88 88 14	88 88 14	88 88 14			$f'_{kc28} = -1851.2 + 872.081 \log C - 2.821SL - 0.409CO - 1.3250W + 0.5853C_{c28} + 5.85A$ (-17.24) (18.02) (-6.38) (-4.27) (-3.24) (2.87) (2.14)	( $n=717$ , $i=11$ , $p=6$ , $R=0.880$ , $K=0.775$ , $e_s=13.6$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.042$ ) 式(19)
D工場	$\log C$ , $(CO)$ , $(G_0)$ , $(SL)$ , $C_{c28}$ , $S_T$ , $A$	86 86 15	86 86 15	86 86 14	86 86 14	87 87 14	87 87 14	87 87 14		$f'_{kc28} = -828.2 + 404.251 \log C - 0.442CO - 2.994G_0 - 3.468SL + 0.5182C_{c28} + 41.15A + 5.48A$ (-2.54) (2.55) (-4.01) (-4.33) (-3.39) (3.18) (1.94) (1.90)	( $n=808$ , $i=11$ , $p=7$ , $R=0.868$ , $K=0.753$ , $e_s=14.1$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.039$ ) 式(20)
E工場	$\log C$ , $C_{c28}$ , $(W)$ , $(G_0)$ , $S_T$ , $CO$	88 89 16	90 90 15	90 90 13	90 90 13	90 90 13	90 90 13	90 90 13		$f'_{kc28} = -1625.2 + 726.261 \log C + 1.0295C_{c28} - 3.4789W - 9.74G_0 + 127.93S_T + 0.221CO$ (-10.11) (39.13) (-10.16) (-8.02) (-2.91) (1.95) (1.47)	( $n=287$ , $i=11$ , $p=6$ , $R=0.987$ , $K=0.936$ , $e_s=12.6$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.044$ ) 式(21)
F工場	$\log C$ , $(W)$ , $S_T$	82 83 14	84 84 14	84 84 14	84 84 14	84 84 14	84 84 14			$f'_{kc28} = -1224.2 + 605.881 \log C - 1.0885W + 9.17S_0 + 117.78S_T$ (-8.46) (12.92) (-2.86) (2.04) (1.45)	( $n=214$ , $i=11$ , $p=4$ , $R=0.837$ , $K=0.701$ , $e_s=13.5$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.045$ ) 式(22)
G工場	$\log C$	78 78 20	78 78 20	78 78 20	78 78 20	78 78 20	78 78 20			$f'_{kc28} = -2725.6 + 1287.031 \log C$ (-9.17) (10.52)	( $n=70$ , $i=11$ , $p=1$ , $R=0.787$ , $K=0.618$ , $e_s=20.3$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.050$ ) 式(23)
H工場	$(G_0)$ , $\log C$ , $(SL)$ , $(W)$ , $(CO)$ , $(S_T)$ , $G_0$ , $S_0$	76 85 21	91 91 17	91 91 13	91 91 13	91 91 13	91 91 13	91 91 13		$f'_{kc28} = -1079.9 - 1.858G_0 + 873.431 \log C - 2.743SL - 0.9890W - 0.247CO - 398.45S_T + 34.57G_0 + 23.13S_0$ (-3.06) (-4.17) (24.53) (-5.26) (-2.89) (-2.36) (-1.94) (2.28) (1.55)	( $n=553$ , $i=11$ , $p=8$ , $R=0.911$ , $K=0.830$ , $e_s=13.1$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.049$ ) 式(24)
I工場	$\log C$ , $C_{c28}$ , $(W)$ , $(G_0)$ , $(SL)$ , $S_T$ , $S_0$ , $G_M$	95 87 22	97 98 16	98 98 14	98 98 14	98 98 14	98 98 14	98 98 14		$f'_{kc28} = -2957.1 + 959.981 \log C + 1.1528C_{c28} - 0.6856W - 23.14G_0 - 2.878SL + 333.85S_T + 19.24S_0 + 0.459G_M$ (-18.62) (25.75) (24.50) (-2.31) (-5.08) (-3.97) (3.89) (3.23) (2.03)	( $n=589$ , $i=11$ , $p=8$ , $R=0.982$ , $K=0.983$ , $e_s=13.5$ kgf/cm <sup>2</sup> , $z_s=0.041$ ) 式(25)

注1) 上段: 項目名, ( )内は負の相関で( )無しは正の相関 中段: 重回帰係数 $R$ を%で表した値 下段: 回帰残差 $e$ の標準偏差 $e_s$  (kgf/cm<sup>2</sup>)  
注2) 下段の( )内は $t$ 値

- B工場：log C, (SL), G<sub>M</sub> の3変数で e<sub>s</sub>=12 kgf/cm<sup>2</sup> (出荷期間 48 か月と最も長く, n=788 で十分多く, 骨材の品質変動が少なく, 精度の良さの順は A 工場に次ぎ 2 番目である)
- C工場：log C, (SL), (CO), (W) の4変数で e<sub>s</sub>=14 kgf/cm<sup>2</sup>
- D工場：log C, (CO), (G<sub>M</sub>), (SL) の4変数で e<sub>s</sub>=14 kgf/cm<sup>2</sup>
- E工場：log C, C<sub>C28</sub>, (W) の3変数で e<sub>s</sub>=13 kgf/cm<sup>2</sup>
- F工場：log C の1変数で e<sub>s</sub>=14 kgf/cm<sup>2</sup>
- G工場：log C の1変数で e<sub>s</sub>=20 kgf/cm<sup>2</sup> (出荷期間 7 か月で, log C 以外の項目との相関が認められず, QC が適切ではないか, 正しいデータが報告されていないと推察され, 最も推定精度が悪い)
- H工場：(G<sub>M</sub>), log C, (SL), (W), (CO) の5変数で e<sub>s</sub>=13 kgf/cm<sup>2</sup>
- I工場：log C, C<sub>C28</sub>, (W), (G<sub>0</sub>), (SL) の5変数で e<sub>s</sub>=14 kgf/cm<sup>2</sup> (出荷期間 34 か月, n=599 で, QC データが正しくかつ偏りなく分布しており, 9 工場のうち精度の良さの順は 3 番目である)

以上の解析結果から, 各生コン工場の使用材料, 製造設備, QC 体制, データの分布等に起因して, 圧縮強度試験値の推定精度に差が生じていることが判明する. 分析⑩で t 値 3.0 以上の変数として取り込まれ, f'\_{kc28} に対する傾向として矛盾がないのは次の 7 変数であり, 同一工場であればこれらの管理によって, f'\_{kc28} を  $\bar{e} \approx 0$ , e<sub>s</sub>=10~20 kgf/cm<sup>2</sup> 程度の精度で推定できることが示された (A=4±1%).

log C, (SL), (W), (CO), (G<sub>M</sub>), C<sub>C28</sub>, (G<sub>0</sub>)  
 特に, log C が判明しさえすれば, f'\_{kc28} の試験を行わなくても, e<sub>s</sub>=11~22 kgf/cm<sup>2</sup> (r=0.73~0.95) の精度で強度推定が可能であることが示されており, 十分実用上の精度が得られている.

#### 4. 製造管理時の圧縮強度の推定

##### (1) 製造管理時の圧縮強度の推定式

f'\_{kc28} と f'\_{c28} との関係は, 次式で示すように(文献 11)の図-6 参照), 前者は後者に対してほぼ直線関係にあり全体的に強度が低下する傾向が認められた.

$$f'_{kc28} = 13.5 + 0.9086 f'_{c28} \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$f'_{kc28} \approx 0.950 f'_{c28} \quad \dots\dots\dots (27)$$

この関係は, 本調査でも同様の傾向が生じており, 各工場の製造設備および QC の条件に起因するものと判断される. すなわち, 強度の変動は工場によって差が生じると考えられるが, 全国の生コン工場における QC に適合するように, これらの要因をすべて数量化することはきわめて困難である. したがって, f'\_{kc28} の推定式としては, 簡易法として, 全国の試験練り(配合設計)時のデータ(調査 II) から求めた f'\_{c28} の推定式<sup>14)</sup>を用い, 上記の直線関係を利用するのが最適であると考えられる.

図-3 (a)は, 調査 II の重回帰分析で求められた次の式(28) [文献 14]の式(67)]を, 調査 II のデータにあてはめて求めた f'\_{c28} の推定強度(計算値)と f'\_{kc28} の平均値  $\overline{f'_{kc28}}$  (実測値) との関係で, 同図(b)は, 同式(28)を調査 IV のデータにあてはめて求めた f'\_{c28} の推定強度(計算値)と f'\_{kc28} (実測値) との関係である.

$$f'_{c28} = -2041.0 + 917.86 \log C - 1.1589 W + 0.5896 C_{C28} + 130.76 S_T - 1.576 CO - 1.779 G_C - 1.931 SL - 5.08 G_0 \quad \dots\dots\dots (28)$$

したがって, 式の補正には, 式(26), 式(27)または図-3の式(29)が用いられるが, ここでは式(29)によって式(28)を補正し, 次式が得られる.

$$f'_{kc28} = -2024.7 + 904.68 \log C - 1.1422 W + 0.5811 C_{C28} + 128.88 S_T - 1.553 CO - 1.754 G_C - 1.904 SL - 5.00 G_0 \quad \dots\dots\dots (31)$$

##### (2) 推定式の検証

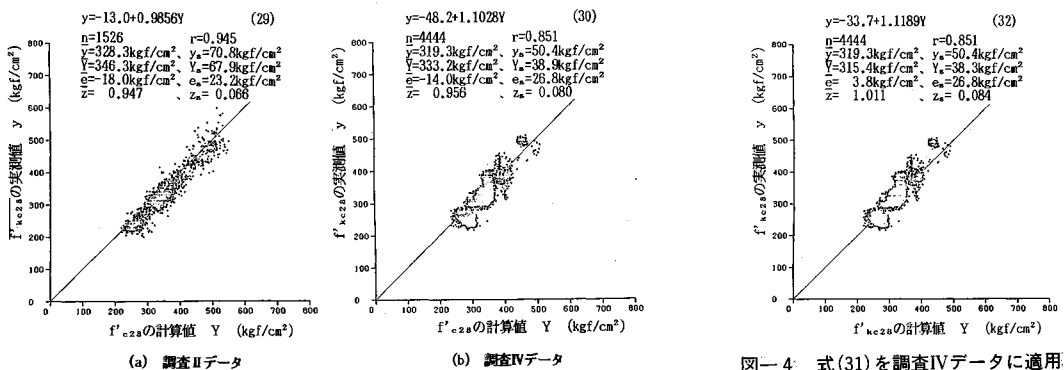


図-3 式(28)を管理試験データに適用した場合の f'\_{c28} の推定計算値と f'\_{kc28} の実測値との関係

図-4 式(31)を調査IVデータに適用した場合の f'\_{kc28} の推定計算結果

式(31)を調査IVデータにあてはめて推定計算を行った結果を、図-4に示す。さらに、各工場ごとに区分して推定計算を行った結果から、推定精度を次に示す。

全工場： $\bar{e} = 3.8$ ,  $e_s = 26.8$ ,  $\bar{z} = 1.011$ ,  $z_s = 8.4$

A工場： $\bar{e} = -6.0$ ,  $e_s = 15.9$ ,  $\bar{z} = 0.983$ ,  $z_s = 5.1$ ,  $b/W = 1.47$

B工場： $\bar{e} = 9.3$ ,  $e_s = 16.2$ ,  $\bar{z} = 1.032$ ,  $z_s = 5.4$ ,  $b/W = 1.63$

C工場： $\bar{e} = -2.1$ ,  $e_s = 16.2$ ,  $\bar{z} = 0.995$ ,  $z_s = 5.0$ ,  $b/W = 1.35$

D工場： $\bar{e} = 39.9$ ,  $e_s = 17.4$ ,  $\bar{z} = 1.122$ ,  $z_s = 5.4$ ,  $b/W = 1.59$

E工場： $\bar{e} = -20.5$ ,  $e_s = 18.0$ ,  $\bar{z} = 0.935$ ,  $z_s = 5.3$ ,  $b/W = 1.11$

F工場： $\bar{e} = -2.3$ ,  $e_s = 20.4$ ,  $\bar{z} = 0.999$ ,  $z_s = 7.2$ ,  $b/W = 1.50$

G工場： $\bar{e} = 40.6$ ,  $e_s = 22.5$ ,  $\bar{z} = 1.112$ ,  $z_s = 6.2$ ,  $b/W = 1.51$

H工場： $\bar{e} = -25.5$ ,  $e_s = 20.5$ ,  $\bar{z} = 0.910$ ,  $z_s = 7.1$ ,  $b/W = 1.09$

I工場： $\bar{e} = 14.1$ ,  $e_s = 23.0$ ,  $\bar{z} = 1.039$ ,  $z_s = 5.9$ ,  $b/W = 1.68$

ここで、単位： $\bar{e}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $e_s$  (kgf/cm<sup>2</sup>)、 $z_s$  (%)  
 $b/W$ ：試験練り時に求めた  $f'_{c28} = a + b(C/W)$  式の係数  $b$  を  $W$  で除した値<sup>(11),(12)</sup>で、代表的なコンクリート配合 4(B<sub>1-1</sub>) [設計基準強度 240 kgf/cm<sup>2</sup>, スランプ 8 cm] の場合

これから、全工場では十分精度が良いが、各工場ごとに推定値の適合性が異なっていることがわかる。変動についてみると、いずれも十分精度が良いと判断されるが、誤差の平均値  $\bar{e}$  については工場によって大きく差が生じており、いずれも実測値が推定値よりも全体的に一側あるいは+側に並行移動している。そこで、 $\bar{e}$  と  $b/W$  とを比べると、実測強度が推定強度よりも 20 kgf/cm<sup>2</sup> 程度低い ( $\bar{e}$  が-側) E, H 工場は、 $b/W$  がそれぞれ 1.11, 1.09 であり、重回帰式の場合の  $C$  の係数 1.25 程度 (log  $C$  の係数 930 程度) と比較しても小さいことがわかる。逆に、D, G 工場は、それぞれ  $b/W$  がそれぞれ 1.59, 1.51 であり、実測強度が推定強度よりも 40 kgf/cm<sup>2</sup> 程度高くなっている。これは、重回帰分析によって求めた推定式は、残差の等分散性の仮定に基づくいわば全平均値を求める式であり、残差が大きいデータに相当する工場に対しては適合性が悪くなっているためである。圧縮強度に対しては単位セメント量の及ぼす影響がきわめて大きいため、log  $C$  の係数を適正に定めることが重要である。

推定式の適用にあたっては、次の方法を採用することによって品質管理への適用がされる。

(a) 式(26)、式(27)または式(29)の関係から、 $f'_{c28}$  の推定式を補正して  $f'_{kc28}$  の推定式を定め、これを用いて  $f'_{kc28}$  を推定計算する。一般には代表例として示した式(31)を使用する。

(b) 推定式を最初のいくつかのデータにあてはめて実測値との残差  $e_1$  を算出し、この平均値  $\bar{e}_1$  だけ推定式の定数を補正した推定式を算出する。以後、この推定式を用いて、 $f'_{kc28}$  の推定計算を行う。

(c)  $f'_{kc28}$  の低強度側と高強度側とで、残差が等分

散性の仮定に合わないときみなされる場合には、それまでのデータに対して推定計算値  $Y_a$  と実測値  $y_a$  との重回帰式  $y_1 = a + bY_1$  を算出し、 $Y_1$  に  $f'_{kc28}$  の推定式を当てはめた補正式を求める。以後、この補正式を用いて  $f'_{kc28}$  の推定計算を行う。特に、log  $C$  の係数の適合性を検討する。

製造管理への適用にあたっては、最初は(a)の方法、データの増加に伴い(b)の方法(場合によってはさらに(c)の方法)によって計算することにより、精度良い品質推定が可能となる。

## 5. データ解析によるコンクリートの品質管理システムの実用化

### (1) コンクリート品質推定のための管理項目

材料・配合・製造条件からコンクリートの品質 ( $s/a$ ,  $W$ ,  $f'_{c28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $f_{b28}$ ,  $E_{28}$ ,  $DF$ ,  $DS_{52}$ ) を推定する方法として、文献(14), (15)の結果から多数の関係式を得たが、これらのうちから推定式を選定するにあたっては、できるだけ少ない項目で精度良く推定計算できることが望ましい。そこで、材料、配合等の各要因と  $s/a$ ,  $W$ ,  $f'_{c28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $f_{b28}$ ,  $E_{28}$ ,  $DF$ ,  $DS_{52}$  との関係から相関の強い順に示すと、次のとおりである。

$W/C$  : ( $f'_{c28}$ ), ( $f_{t28}$ ), ( $f_{b28}$ ),  $DS_{52}$ , ( $E_{28}$ )

$C/W$  :  $f'_{c28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $f_{b28}$ , ( $DS_{52}$ )

$c/v$  :  $f'_{c28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $f_{b28}$ , ( $DS_{52}$ ),  $E_{28}$

$W_T/C$  : ( $f'_{c28}$ ), ( $f_{t28}$ ), ( $f_{b28}$ ), ( $E_{28}$ ),  $DS_{52}$ , ( $DF$ )

$C/W_T$  :  $f'_{c28}$ ,  $f_{b28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $E_{28}$ , ( $DS_{52}$ ),  $DF$

$C$  :  $f'_{c28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $f_{b28}$ , ( $s/a$ ),  $W$ ,  $E_{28}$ , ( $DS_{52}$ )

$W$  :  $DS_{52}$ ,  $f'_{c28}$

$W_a$  : ( $E_{28}$ ), ( $DF$ ), ( $f_{b28}$ ), ( $f_{t28}$ ), ( $f'_{c28}$ )

$W_T$  : ( $DF$ ), ( $E_{28}$ ),  $DS_{52}$ , ( $f_{b28}$ ), ( $f_{t28}$ )

$SL$  :  $s/a$ ,  $W$ , ( $f'_{c28}$ ),  $DS_{52}$ , ( $f_{t28}$ )

$A$  : ( $f_{t28}$ ), ( $f_{b28}$ ), ( $f'_{c28}$ ), ( $E_{28}$ ),  $DS_{52}$ , ( $A$ ),  $s/a$

$CO$  : ( $f'_{c28}$ ),  $W$ , ( $f_{t28}$ )

$C_F$  :  $f'_{c28}$ ,  $W$ ,  $f_{b28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $E_{28}$ , ( $s/a$ )

$C_{C28}$  :  $W$ ,  $f'_{c28}$ ,  $DS_{52}$ ,  $E_{28}$ ,  $f_{t28}$ ,  $f_{b28}$

$S_{0.15}$  :  $s/a$ ,  $W$

$S_A$  :  $W$ ,  $s/a$ ,  $DS_{52}$

$S_{FM}$  :  $s/a$

$S_T$  : ( $W$ ),  $f'_{c28}$

$S_Q$  : ( $E_{28}$ ), ( $f_{b28}$ ), ( $DF$ ), ( $f_{t28}$ ), ( $f'_{c28}$ ),  $s/a$

$G_M$  : ( $W$ ),  $s/a$ , ( $f'_{c28}$ ), ( $DS_{52}$ )

$G_C$  : ( $DS_{52}$ ), ( $W$ ), ( $s/a$ ), ( $f'_{c28}$ )

$G_Q$  : ( $DF$ ), ( $E_{28}$ ), ( $f_{b28}$ ), ( $f_{t28}$ ), ( $W$ )

$G_Y$  : ( $DF$ ), ( $E_{28}$ ), ( $f_{b28}$ ),  $s/a$ , ( $f'_{c28}$ ), ( $DS_{52}$ )

ここで、 $C_F$ ：セメントの粉末度(ブレン値, cm<sup>2</sup>/g)

$S_A$ ：細骨材の洗い試験で失われるもの (%)

$G_V$ : 粗骨材の軟らかい石片 (%)  
 以上の相関性ととも本研究で得られた結果から、コンクリートの品質推定のための一般的な管理項目としては、次の16項目が最適である。  
 ①  $C$  (kg/m<sup>3</sup>), ②  $W$  (kg/m<sup>3</sup>), ③  $SL$  (cm),  
 ④  $A$  (%), ⑤  $CO$  (°C), ⑥  $C_{c28}$  (kgf/cm<sup>2</sup>),  
 ⑦  $C_F$  (cm<sup>2</sup>/g), ⑧  $S_{FM}$  (-), ⑨  $S_{0.15}$  (%) [または

$S_A$ (%), ⑩  $S_T$  (kg/l), ⑪  $S_Q$  (%), ⑫  $G_M$  (mm),  
 ⑬  $G_C$  (%), ⑭  $G_Q$  (%), ⑮  $G_V$  (%), ⑯  $TT$  (min)  
 なお、①および②を算出するための配合計算には、これらのほかに次の10項目が必要である。  
 ⑰ 単位細骨材量  $S$  (kg/m<sup>3</sup>), ⑱ 単位粗骨材量  $G$  (kg/m<sup>3</sup>), ⑲ 単位混和剤量  $aw$  (kg/m<sup>3</sup>), ⑳  $C_H$  (-), ㉑  $S_H$  (-), ㉒  $G_H$  (-), ㉓ 細骨材の表面水率  $S_w$  (%),

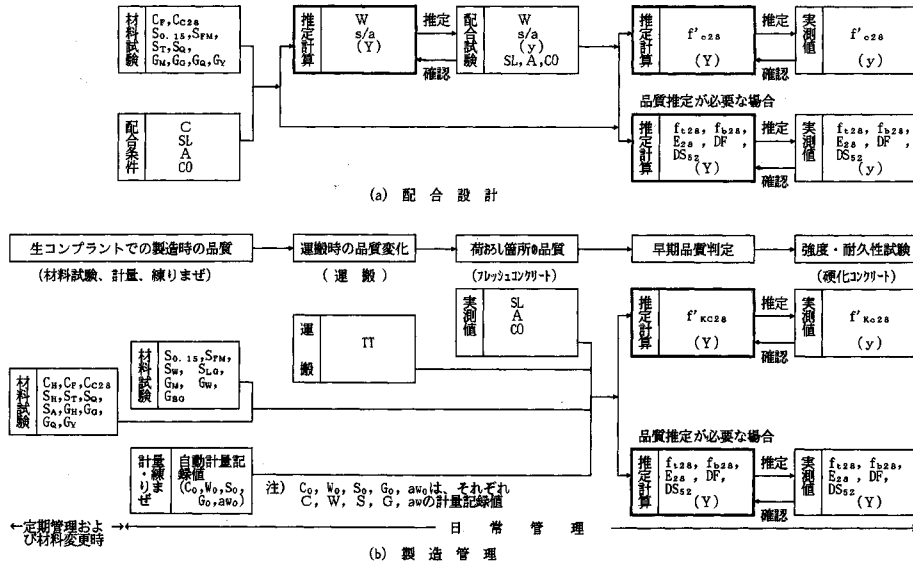


図-5 データ解析によるコンクリートの品質管理システムのフロー

表-4  $s/a$ ,  $W$ ,  $f'_{c28}$  と材料・配合条件との関係

項目	区分	標準示方書(施工編) 4.8解説		本 研 究		注)
		$s/a$ (%) の補正	$W$ (kg/m <sup>3</sup> ) の補正	$s/a$ (%) の関係	$W$ (kg/m <sup>3</sup> ) の関係	$f'_{c28}$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) の関係
細骨材率 $s/a$ が 1% 大きい (小さい) ごとに	—	—	1.5 だけ大きく (小さく) する	—	—	—
水セメント比 $W/C$ が 5% 大きい (小さい) ごとに	—	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 <sup>3</sup> 大きい (小さい) ごとに	—	—	0.02~0.03 だけ小さく (大きく) なる	0.02~0.05 だけ大きく (小さく) なる	1.0~1.5 だけ大きく (小さく) なる	—
単位水量 $W$ が 1 kg/m <sup>3</sup> 大きい (小さい) ごとに	—	—	—	—	1.2~2.0 だけ小さく (大きく) なる	—
スランプ $SL$ が 1 cm 大きい (小さい) ごとに	—	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) なる	1.5~2.2 だけ大きく (小さく) なる	1~5 だけ小さく (大きく) なる
空気量 $A$ が 1% 大きい (小さい) ごとに	—	0.5~1 だけ小さく (大きく) する	3% だけ小さく (大きく) する	—	—	3~15 だけ小さく (大きく) なる
コンクリート温度 $CO$ が 1°C 大きい (小さい) ごとに	—	—	—	0.1~0.4 大きく (小さく) なる	—	1.5~3.0 だけ小さく (大きく) なる
セメントの 28 日圧縮強度 $C_{c28}$ が 1 kgf/cm <sup>2</sup> 大きい (小さい) ごとに	—	—	—	—	—	0.3~0.6 だけ大きく (小さく) なる
砕砂を用いる場合	—	2~3 だけ大きくする	6~8 だけ大きくする	—	—	—
細骨材の 0.15mm 篩るい通過量 $S_{0.15}$ が 1% 大きい (小さい) ごとに	—	—	—	0.1~0.2 だけ大きく (小さく) なる	0.8~1.6 だけ大きく (小さく) なる	—
細骨材の粗粒率 $S_{FM}$ が 0.1 大きい (小さい) ごとに	—	0.5 だけ大きく (小さく) する	補正しない	0.3~0.5 だけ大きく (小さく) なる	—	—
細骨材の単位容積質量 $S_V$ が 0.01 kg/ℓ 大きい (小さい) ごとに	—	—	—	—	0.3~0.6 だけ小さく (大きく) なる	0.5~1.5 だけ大きく (小さく) なる
砕石を用いる場合	—	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 $G_M$ が 5mm 大きい (小さい) ごとに	—	—	—	0.5~1.0 だけ小さく (大きく) なる	2.0~2.7 だけ小さく (大きく) なる	—
粗骨材の実積率 $G_C$ が 1% 大きい (小さい) ごとに	—	—	—	0.4~0.5 だけ小さく (大きく) なる	1.5~2.0 だけ小さく (大きく) なる	1.5~2.0 だけ小さく (大きく) なる
粗骨材の吸水率 $G_Q$ が 0.1% 大きい (小さい) ごとに	—	—	—	—	—	0.5~1.0 だけ小さく (大きく) なる

注) この表に示す値は、 $f'_{c28}=180\sim600$ kgf/cm<sup>2</sup>、 $W/C=30\sim80\%$ 、 $SL=5\sim18$ cm、 $A=3.0\sim6.0\%$ 、 $CO=7\sim32^\circ C$ 、 $G_M=20\cdot25\cdot40$ mm の一般的なコンクリートに對するものである。





差を補正した。

(2) 圧縮強度およびスランプの重回帰分析結果

計量誤差や骨材の品質変動が圧縮強度  $f'_{kc28}$  およびスランプ  $SL$  に及ぼす影響を明らかにするため、全工場のデータを重回帰分析した結果の代表式を次に示す。  
分析⑬。

$$f'_{kc28} = -2217.7 + 1023.07 \log C - 0.5908 W - 3.822SL + 73.84S_T + 0.743G_M - 0.342TT$$

$(-23.49) \quad (31.97) \quad (-4.64)$   
 $(-4.26) \quad (3.81) \quad (3.85) \quad (-3.50)$   
 $(n=236, i=12, p=6, R=0.915, K=0.838,$   
 $e_s=13.5 \text{ kgf/cm}^2, z_s=0.043) \dots\dots\dots (33)$

$$SL = -10.34 + 0.2203G_G - 0.03909TT + 0.01812C + 0.0329G_M - 0.2193S_{0.15}$$

$(-4.08) \quad (6.58) \quad (-5.32) \quad (5.44)$   
 $(2.51) \quad (-2.23)$   
 $[n=237, i=11, p=5 (F_{OUT}: W, A, CO, C_F, S_{FM}, S_T), R=0.501, K=0.251, e_s=0.95 \text{ cm}, z_s=0.122] \dots\dots\dots (34)$

管理データから、表面水の計量誤差は、細骨材の場合 -1.0~0.9%、粗骨材の場合 -0.5~0.9% であり、注意して管理していても ±1% 程度の設定誤差が生じており、単位水量変動の原因となっている<sup>13)</sup>。しかし、 $f'_{kc28}$  には、本試験程度の表面水率補正誤差に起因する  $W$  の変動では影響が特に認められず、前述の調査IV結果と同様に、むしろ骨材の粒度・粒形や配合、製造条件との関係が強い  $SL$  との相関の方が、再現性が良く現われている (A, B, J, L 工場)。

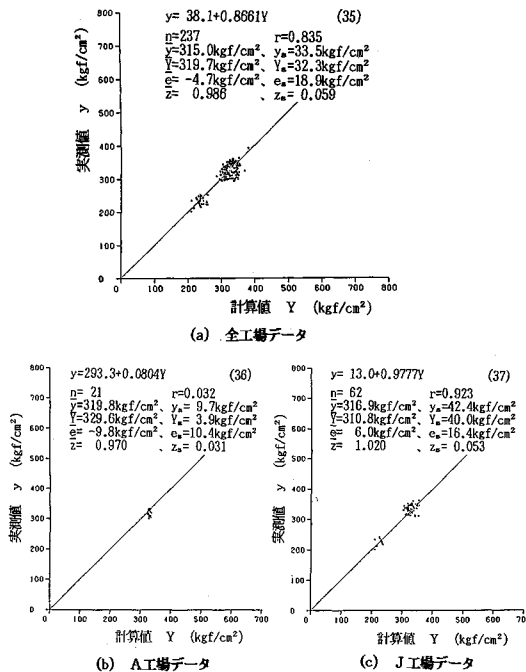


図-6 式(31)による  $f'_{kc28}$  の推定計算結果

そこで、 $SL$  に及ぼす要因を配合設計時の解析結果<sup>15)</sup> と比較すると、 $W$  の影響が小さく現われており、逆に  $TT$  との相関があることが示されている。近藤らの研究<sup>16)</sup>では、運搬によって時間の経過とともに  $SL$  が低下することが報告されており、その値は1時間当たり約2cmである。式(34)からは運搬によるスランプ低下量が、1時間当たり  $0.03909 \cdot TT = 0.03909 \times 60(\text{min}) = 2.35 \text{ cm}$  であり、この値は普遍性があるものとみなされる。

(3) 圧縮強度の推定計算によるQC

圧縮強度の推定精度を確認するため、式(31)を適用して推定計算を行った結果から全工場の場合とA, J工場の場合を図-6に、また、管理図の一例として残差  $e$  の管理図を、図-7に示す。推定精度は、次のとおりである。  
全工場:  $r=0.835, \bar{e}=-4.7, e_s=18.9, \bar{z}=0.986, z_s=5.9$   
A工場:  $r=0.032, \bar{e}=-9.8, e_s=10.4, \bar{z}=0.970, z_s=3.1$   
B工場:  $r=-0.023, \bar{e}=-22.7, e_s=14.8, \bar{z}=0.933, z_s=4.4$   
E工場:  $r=0.065, \bar{e}=-23.0, e_s=19.8, \bar{z}=0.934, z_s=5.6$   
J工場:  $r=0.923, \bar{e}=6.0, e_s=16.4, \bar{z}=1.020, z_s=5.3$   
K工場:  $r=0.975, \bar{e}=5.1, e_s=11.7, \bar{z}=1.017, z_s=4.3$   
L工場:  $r=0.809, \bar{e}=-5.9, e_s=19.3, \bar{z}=0.981, z_s=6.1$   
M工場:  $r=0.807, \bar{e}=-5.1, e_s=15.8, \bar{z}=0.985, z_s=4.7$   
ここで、単位:  $\bar{e}$  (kgf/cm<sup>2</sup>),  $e_s$  (kgf/cm<sup>2</sup>),  $z_s$  (%)

これから、各工場ごとに比較すると  $\bar{e} = -23.0 \sim 6.0 \text{ kgf/cm}^2, e_s = 10.4 \sim 19.8 \text{ kgf/cm}^2, \bar{z} = 0.933 \sim 1.020, z_s = 3.1 \sim 6.1\%$  となっており、前述の調査IV結果と同様に変動についてみるといずれも十分精度が良いと判断されるが、平均値  $\bar{e}$  については工場によって適合性の差が生じており、実測値がいずれも推定値よりも全体的に平行移動している。配合設計時と製造管理とで強度差が生じる原因として運搬によるスランプ低下であると仮定をすると、式(33)の  $SL$  および  $TT$  項に運搬時間の平均値を代入してある程度まで説明されるものとみなされる。

さらに、前述の(b)の方法によって、最初の10個の推定値から求めた残差の平均値  $\bar{e}_1$ 、さらにこれで推定式を補正して11個以後の推定計算を行った結果得られた残差の平均値  $\bar{e}_1$  は、次のとおりである。

A工場:  $\bar{e}_1 = -24.3, \bar{y} = 325.0, \bar{Y} = 318.1 \Rightarrow \bar{e} = -6.9$

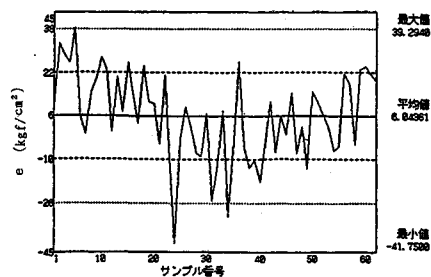


図-7 残差  $e (=y - Y)$  の管理図 (J工場データ)

B工場： $\bar{\epsilon}_1 = -39.5$ ,  $\bar{y} = 318.0$ ,  $\bar{Y} = 315.3 \Rightarrow \bar{\epsilon} = -2.7$

E工場： $\bar{\epsilon}_1 = -43.2$ ,  $\bar{y} = 326.3$ ,  $\bar{Y} = 332.2 \Rightarrow \bar{\epsilon} = -5.9$

J工場： $\bar{\epsilon}_1 = 3.0$ ,  $\bar{y} = 331.4$ ,  $\bar{Y} = 313.9 \Rightarrow \bar{\epsilon} = -17.5$

K工場： $\bar{\epsilon}_1 = -9.5$ ,  $\bar{y} = 300.5$ ,  $\bar{Y} = 293.3 \Rightarrow \bar{\epsilon} = -7.2$

L工場： $\bar{\epsilon}_1 = -38.3$ ,  $\bar{y} = 294.1$ ,  $\bar{Y} = 311.3 \Rightarrow \bar{\epsilon} = 17.2$

M工場： $\bar{\epsilon}_1 = -34.0$ ,  $\bar{y} = 305.3$ ,  $\bar{Y} = 320.8 \Rightarrow \bar{\epsilon} = 15.5$

ここで、単位： $\bar{\epsilon}_1$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{Y}$ ,  $\bar{\epsilon}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)

$\bar{\epsilon} = -17.5 \sim 17.2$  kgf/cm<sup>2</sup>で偏りが小さくなっており、これらのことから、本QCシステムは十分実用的であることが検証された。

## 7. 結 論

本研究により得られた結論は、次のとおりである。

(1) コンクリートの配合設計時および製造管理時に重回帰式による品質推定方法が応用され、図-5に示すように硬化コンクリートの試験を行わなくとも材料・配合・製造条件からコンクリートの強度・耐久性を推定計算することによってQCを行うQCシステムを提案する。また、一般的なコンクリート ( $f'_{c28} = 180 \sim 600$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $W/C = 30 \sim 80\%$ ,  $SL = 5 \sim 18$  cm,  $A = 3.0 \sim 6.0\%$ ,  $G_M = 20 \cdot 25$  および 40 mm) の関係として表-4を得た。

(2) コンクリートのQCにおいて、細骨材率、単位水量、圧縮強度、引張強度、曲げ強度、ヤング係数、耐久性指数、乾燥収縮の推定のための項目としては、次の16項目が最適である。

$C$ ,  $W$ ,  $SL$ ,  $A$ ,  $CO$ ,  $C_{c28}$ ,  $C_F$ ,  $S_{FM}$ ,  $S_{0.15}$  (または  $S_A$ ),  $S_T$ ,  $S_0$ ,  $G_M$ ,  $G_0$ ,  $G_0$ ,  $G_Y$ ,  $TT$

ここで、下線部は日常管理試験項目を表わす。なお、 $C$  および  $W$  を算出するための配合計算には、これらのほかに10項目が必要である。推定精度を向上させるには、説明変数としてこれらの項目の中から変域の大きい項目を採用すれば良い。また、製造管理における圧縮強度推定式の代表例として式(31)を得た。

(3) 高速自動車道建設工事用のコンクリートを製造管理した7生コン工場において、このQCシステムに基づいたQCを実施した結果、工場によってばらつきの差があるが、強度推定精度は残差標準偏差3.1~6.1%で適合することが確認された。また、調査IVの9工場のデータに対しては、残差標準偏差5.0~7.2%で適合することが確認された。十分実用的な精度で品質推定が可能であり、本システムの有効性が実証された。

なお、本論文は、著者が昭和63年6月付で東京大学より工学博士の学位を受けた学位論文<sup>15)</sup>の内容の一部である。

謝 辞：本研究にあたり、東京大学 小林一輔名誉教授のご懇切なるご指導を賜りました。ここに、深甚なる

感謝の意を表します。また、公団本社技術部、試験所、全国10建設局試験課、生コン工場の方々の多大なるご協力を頂きました。ここに、慎んで厚くお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，1985年10月。
- 2) 日本規格協会：JIS A 5308 レデーミクストコンクリート，1989年10月。
- 3) 土木学会：コンクリートの品質管理試験方法，コンクリートライブラリー第38号，1974年9月。
- 4) 日本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年3月。
- 5) 日本建築学会：コンクリートの早期迅速試験方法集，1985年5月。
- 6) 穂積 豊：まだ固まらないコンクリートの性質を用いて圧縮強度を推定する方法について，土木技術，第14巻，第7号，pp.4~16，1959年7月。
- 7) 中山紀男：レデーミクストコンクリート工場の品質管理に関する実験（その1）および同（その2），セメント・コンクリート，No.269，pp.35~40，1969年7月およびNo.270，pp.39~46，1969年8月。
- 8) 西 晴哉・大塩 明・曾根徳明・城国省二・木佐木靖男：マイコン制御による生コンの品質管理，セメント・コンクリート，No.430，pp.10~15，1982年12月。
- 9) 東神俊雄・伊子田直行・高橋潤一：印字記録による水セメント比の管理について，第1回生コン技術大会研究発表論文集，pp.71~76，1981年6月。
- 10) 永田邦博：レデーミクストコンクリート工程管理JIS制定の方向，月刊生コンクリート，Vol.7，No.11，pp.189~196，1988年11月。
- 11) 豊福俊泰：データ解析によるコンクリートの品質変化とその要因に関する研究，土木学会論文集，第408号/V-11，pp.147~156，1989年8月。
- 12) 豊福俊泰・中村修吾・鬼丸良雄：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，土木学会論文集，第366号/V-4，pp.153~162，1986年2月。
- 13) 豊福俊泰・増田 隆・吉岡博幸：迅速乾燥法，RI法および自動計量記録値による単位水量の早期迅速試験法に関する研究，コンクリート工学論文集，第1巻，第1号，pp.165~176，1990年1月。
- 14) 豊福俊泰：データ解析によるコンクリートの圧縮強度の推定方法に関する研究，土木学会論文集，第420号/V-13，pp.125~134，1990年8月。
- 15) 豊福俊泰：データ解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，東京大学学位論文，1988年1月。
- 16) 日本道路公団：コンクリート施工管理要領，pp.1~154，1987年4月。
- 17) 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正：多変量解析法（改訂版），日本科学技術連盟，1981年。
- 18) 近藤泰夫・明石外世樹・渡辺昭彦：コンクリートの輸送に関する研究，セメント技術年報IX，pp.417~421，1955年。  
(1990.2.19・受付)