

鉄筋コンクリート構造物に於けるコンクリートの問題について

東京都技師 高 橋 久 雄
東京都立大学 小 林 輝 一 郎

1 序

安全性を検討するには、大別して、材料施工（設備を含む）構造となる。此等は物論専門に研究される事は必要であるが、此等の関係がどのような繋がりを持つかが必要な事は更に大事な事である。そこでこの関係を求める手段として統計的方法を用い、取扱いとして、Operation Research 的な考へ方がある。然し乍ら、実際には非常に困難且つ広範囲なものである。

此々では主としてセメント及びコンクリート圧縮強度について述べるが、今後のこの方法の発展の何等かの足掛かりになれば幸である。

Operation Research については

・Theory of Games and Economic Behavior・

・科学 Jan. 1954

Operation Research における数学的方法 河 田 夫

・日本規格協会発行

かけひきの科学

・Morse-Kimball: Method of operations research

MIT (1951)

2 セメント

使用せるDataはA、B 2 会社の製造時、出荷時の工場に於ける試験課にて取扱い、昭和27年度2ヶ月分のもので、茲では4週圧縮強度のみを取扱った。

セメントの品質を一定にすべきことは、必要な事で、その為には品質管理が必要な事は論を俟たない。然して実際市場のセメントはバラツキが大きい様であり又これを管理する場合管理図に使用する平均値、標準偏差が要求されてる強度を持ち、更に正規分布として保証され、而も統計学的にその値が相当信頼性が与えられなくてはならない。

特に強度が均一であること。実測値のバラツキが要求された立場に充分即応しており、その要求する限界内にあることが大切である。この様な観点から強度の均一性の検討、実測値の持つバラツキ即ち変動を作り出す原因を把握、不明な変動要求に依る影響を極力少くすることが重要な事となつてくる。

この事に依つて変動の大きさと同時に要求が既知であることの二つに依つて、強度の均一性にすべき条件が知られると思ふ。

以上の様な観点でDataを解析した。

オ1表 セメント4週圧縮強度の平均値及標準偏差表

月 別	種 別	平 均 値		標 準 偏 差	
		A	B	A	B
I	出荷時	361	412	11.70	11.82
	製造時	368	405	22.03	11.23
II	出荷時	381	397	18.71	15.50
	製造時	373	393	23.34	10.66
全 平 均		370	403	22.13	14.96

オ1表は抽出せるセメント4週圧縮強度の標本平均及標準偏差であり、全平均とは夫々I、II、共同一母集団と考えて求めたものであつて、製品としては、月毎に変はつては、不都合であるので、この様な取扱いをした。

(i) 正規性の検定

夫々観測値より、平均値($\bar{x}$)、標準偏差(σ)を求め、これの持つ、正規分布、曲線N($\bar{x}, \sigma$)を求め、この正規分布曲線に当て嵌めた場合の適合さ見るとオ1図、オ2図となる。

オ1図 Aセメント4週圧縮強度の分布

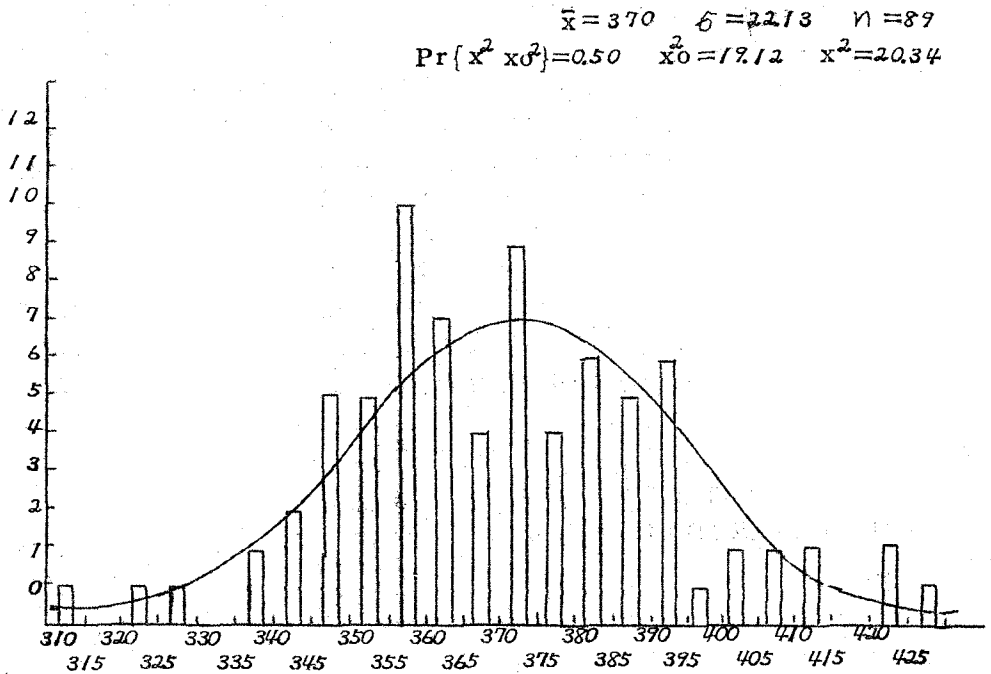
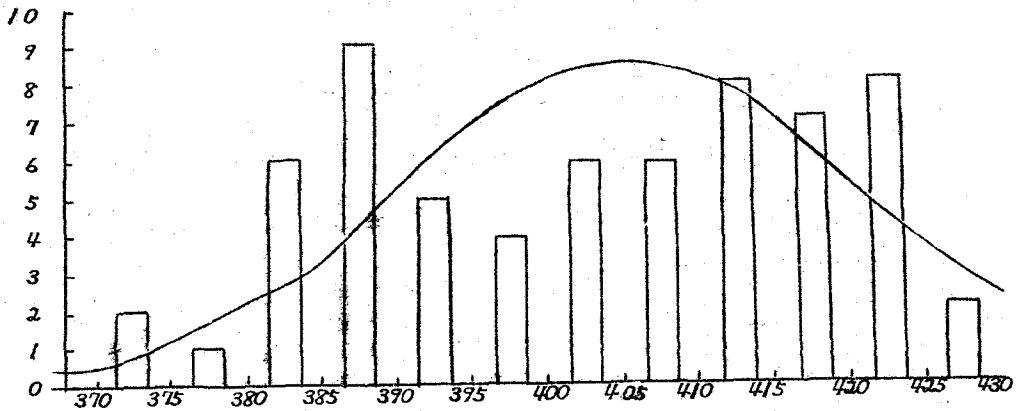


図2 Bセメント4週圧縮強度の分布

$$\bar{x} = 403 \quad s = 14.76 \quad n = 65$$

$$Pr\{x^2 > x_0^2\} = 0.025 \quad x_0^2 = 22.44$$



何れも工場製品としては正規分布とは認められない。

A $Pr = 0.50$ B $Pr = 0.025$

然して、コンクリートの強度を考へた場合、そのバラツキも大きい、尚Bの場合は2つの正規分布が重なつてゐる様にも考へられ、このバラツキの大きい原因を詳べる為には要因分析を行つた。

こゝでは製造と出荷時について行つてゐるが、製造→出荷→打込の過程にて詳べた(昭和30年、建築春季大会の 機集参照の事)がますますそのバラツキは大きくなる。

(ii) 要因分析

正規分布と抽出標本を仮定し、下記の様な要因に分けて行つた。

即ち、 $SA \cdot a \cdot B = SA + Sa + SB + SA \times a + Sa \times B + SA \times a \times B$

$SA \cdot a \cdot B$: 全変動、 SA : 製造と出荷間の変動

Sa : 月別間の変動 SB : 日別間の変動

$SA \times a$: A要因とa要因との交互作用に依る変動

$SA \times B$: A要因とB要因との交互作用に依る変動

$Sa \times B$: a要因とB要因との交互作用に依る変動

$SA \times a \times B$: 偶然的要因に依る誤差変動

この様な事に基いて、A、Bの夫々の要因分析表は図2表、図3表となる。

図2表 A会社の要因分析表

要 因	分 散	目 由 度	不 偏 分 散	分 散 比
SA	2799	1	2799	0.53°
Sa	49	1	49	0.13
SB	7478	17	440	1.03
SA×a	1020	1	1020	2.38°

SA×B	4680	17	275	0.64
Sa×B	14843	17	8670	20.20 ^{ooo}
SA×a×B	7272	17	427	
SA・a・B	38161	72	530	

オ 3 表 B会社の要因分析表

要 因	分 散	目 由 度	不 偏 分 散	分 散 比
SA	702	1	702	3.05°
Sa	390	1	390	1.70°
SB	231	8	29	0.13
SA×a	424	1	424	1.84°
SA×B	2626	8	328	1.43
Sa×B	1253	8	157	0.73
SA×a×B	1840	8	230	
SA・a・B	7466	35	213	

分散比の右上の°は、1%で有意、°°は10%で有意、°°°0.5%で有意を示してゐる。

A会社の場合SAが、バラツキの原因で、従つて、SA×a也多き事を示しており、且つSa×B即ち、a要因とB要因が相乗した時非常に大きなバラツキとなつてゐることを示してゐる。

B会社ではSA及SaそれとSA×aが原因であり、何れも、このバラツキを小さくする為には以上の様な要因の変動を小さくする対策が必要である事が知られる。

又A、B会社は夫々の特性値の持った製品を製造している事も知られるが、ポルトランドセメントの型として、均一性の確定の点からも規格値以上あればよいのではなく、規格値と、同一値となる様にしなければならない。

セメントについては、

- ・1955年2月建築学会関東支部研究発表会「モルタルの3日強度7日強度と28日強度の相関関係の棄却 円について」
- ・1955年、建築学会春季大会「出荷期と打込時との関係に於けるモルタル圧縮強度の変動管理方式の設計に就いて」
- ・1955年、セメント技術大会「モルタル圧縮強度に対する品質管理方式の設計についての研究」

等に述べてある。

3 コンクリート

セメントの場合と観点を交えて、コンクリート強度は下記の様な事より成立つてると考へ

て、実際の現場にて、Sampling をして解析を行つた。即ち

$$x_0 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + e$$

x_0	: コンクリート4週圧縮強度	Kg/cm^2
x_1	: セメント4週圧縮強度	Kg/cm^2
x_2	: セメント使用量	Kg/m^3
x_3	: 水セメント比	%
x_4	: 空気量	% (1 m ³ 当り)
e	: 誤差項	

a_1 、 a_2 、 a_3 、及 a_4 は夫々の係数

尚混和剤としては、4種使用したが、原則的には之等を混入しても、上記の事は、成立するものと考へた。又 factor としては、他に温度、湿度、骨材の性質等考えられるが実施不可能であつたので、4つの factor を取り出した。

混和剤に応じて、A、B、C及Dと、分け、夫々の平均値(5)、標準偏差(6)、変位係数(C、V、%)を示せば第4表となる。

第4表 平均値(5)、標準偏差(6)、変位係数(C、V、%)

種別	名称	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
A (n=44)	$\bar{x}$	214	344	314	55.7	3.2
		33.906	18.307	10.149	4.642	0.482
	c.v	15.84	5.32	3.23	0.83	15.06
B (n=27)	$\bar{x}$	219	345	305	55.5	3.2
		30.25	16.43	7.64	2.06	0.66
	c.v	13.81	4.76	3.16	3.72	20.63
C (n=24)		221	341	273	57.6	2.1
		40.572	20.421	2.677	1.467	0.482
		18.31	5.99	0.98	2.55	22.95
D (n=25)		222	349	287	57.9	3.4
		42.85	8.31	7.86	3.94	0.60
		19.30	2.38	2.74	6.80	17.65

次に夫々の相関々係を求めると第5表となり、例えば「0・1」と示せるは、コンクリート4週圧縮強度とセメント4週圧縮強度の組合せを意味しているのである。

※5表 共分散(S_{xy})及相関係数(r)

種別	名称	0.1	0.2	0.3	0.4	1.2	1.3
A	S_{xy}	+202.545	+101.182	-68.775	+1.257	+37.705	-32.857
	r	+0.326	+0.274	-0.437	+0.077	+0.214	-0.387
B	S_{xy}	+37.185	+32.259	-16.963	-4.633	-17.111	+26.985
	r	+0.075	+0.111	-0.272	-0.232	-0.121	+0.797
C	S_{xy}	-43.292	+18.958	-6.208	-2.576	-28.500	-6.946
	r	-0.052	+0.175	-0.014	-0.133	-0.521	-0.232
D	S_{xy}	+7.20	+15.936	-4.71	+1.083	-18.12	-5.76
	r	+0.020	+0.473	-0.024	+0.421	-0.277	-0.176
A	S_{xy}	1.4	2.3	2.4	3.4		
	r	+2.161	-36.577	-0.093	-0.130		
B	S_{xy}						
	r	+0.245	-0.776	-0.017	-0.058		
C	S_{xy}	-0.215	-2.244	-1.437	+0.047		
	r	-0.198	-0.113	-0.235	+0.036		
C	S_{xy}	+5.175	+0.963	-1.167	-0.402		
	r	+0.526	+0.245	-0.705	-0.567		
D	S_{xy}	-0.71	+14.532	-3.06	-0.27		
	r	-0.142	+0.469	-0.647	-0.123		

以上の結果に基いて、重相関係数を求むると、※6表となる

※6表 重相関係数(r)

A	B	C	D
+0.515	-0.480	+0.427	-0.571

従つて推定予測式は※7表となる。

※7表 推定予測式

種別	a_1	a_2	a_3	a_4	e	δ
A	-1.1702 x_1	+3.341 x_2	+8.757 x_3	+232.346 x_4	-1470.721	± 35
B	-2.393 x_1	-2.685 x_2	+18.634 x_3	-16.271 x_4	-940.017	± 30
C	-0.087 x_1	-17.930 x_2	-14.259 x_3	-14.259 x_4	-660.49317	± 40
D	+27.347 x_1	-6.079 x_2	-0.033 x_3	+402.790 x_4	-892.7806	± 42

このDataの適用範囲は※8表である。

表8 適用範囲

種別	x_1	x_2	x_3	x_4
A	308~382	304~333	46~61	24~40
B	311~368	272~312	53~58	16~40
C	303~375	266~276	55~60	15~30
D	335~362	278~305	53~65	20~45

検討、現場に於ける容積調合のコンクリート打と併行して、抽出して求めたのであるが、表5を見ると夫々の相関係数は種々の値を示してゐるし且係数は例えば「0.1」に於いても正、負の値があり、この事は後記する事でも知られるが、試験に相当の誤差が含まれてゐるのではなからうか、即ち水セメント比に例をとれば使用せる水量は、既知であるが、砂は砂利に含まれてゐる表面水量が適確に掴めないものである。現在これを知る方法はない様であるが、要は抽出せる試料が、母集団を推定出来るものかどうかを前提した検出方法、換言すればその様な検出設備を施して、それが砂及砂利のバツチに反映させて、修正する様にして、求めなければ推定、予測式は、成り立たないであらう。

又斯様な方法をすれば、コンクリート強度に及ぼす、水セメント比は全体のa%、セメント強度はb%……と云う事が知られ、これに基いて設備も改良すべき点が判明することになる。

次にコンクリート圧縮強度の要因分析をする。コンクリート圧縮強度値の構造式を $x_i = m + w_i + B_i$ として行へば表9表となる。

表9 変量分析表

変動因	分散	自由度	不偏分散	分散比
群内変動 S_b	149682	112	1337	3.47△
群間変動 S_w	770	2	385	
全変動	150452	114		

△1%で有意

但し、

m : 4週コンクリート圧縮強度

w_i : 混和剤内特有の偏差値

B_i : 混和剤別相違に依る偶然的変動としての偏差値

S_b : 混和剤内の分散 (w_i の表現量)

S_w : 混和剤間の分散 (B_i の表現量)

$$E(w_i) = 0 \quad E(w_i^2) = \hat{\sigma}_w^2$$

$$E(B_i) = 0 \quad E(B_i^2) = \hat{\sigma}_B^2$$

表9表よりも S_b の値が大で、1%で有意なる事を示してゐる。即ち混和剤間の変動は少く、バツチ間変動の大なることを示しており上記の結果と同じ事が云え、この点に現場管理としては、ポイントがある事を示してゐる。

コンクリートについては、

・1955年 建築学会春季大会「コンクリート強度推定予測式」

・1955年 セメント技術大会「コンクリート強度に及ぼす現象分析」

4 結

現在建築物の構造理論は材料の性質が均等なものとして取扱はれて成立っており、取扱い方として平均値を用いている。然して材料は、Homogeneousであるかどうかを考察すると云い換えれば正規分布しているかどうか裏付ける必要が生ずる。こゝではセメント及コンクリートについてその検討を行つたのであるが残念乍ら正規分布とは見做せない様である。又鉄筋鉄骨に於ても然りであらう。

従つて正規分布をさせるにはどのような操作手段が必要であつて、現場で行はれ易い様にするにはどのようにすればよいか又正規分布させる事が困難な場合はnon-parametric testを用いて行ふ必要もあろうし、構造理論の方に於ても平均値を用いず、その強度の範囲を考へて行はなくてはならない問題も当然起つて来る。この関係を解析する手段としては、Operation Research的な統計的品質管理が、必要である事が痛感される。

この事はコンクリートの所にも述べたが、コンクリート圧縮強度について云えば、コンクリートの強度に及ぼす影響の要因は単に水セメント比のみではなく空気量、セメント強度、セメント使用量、骨材の問題、温度、湿度、ミキシング等が挙げられ、これが互にどのような関係にあつて、全体としてどのような影響をするかを知り、それを調節する設備を施せばどのような強度分布になるかに依り、構造理論の考へ方も生じて来るであらう。

以上の事は用いる材料が、Homogeneousと考へた場合であつて、現実には材料の品質も問題になるので、従つて夫々の諸材料を作る工場及プラントの合理的な設備改善も、生じて来る。

次に安全性を客観的に決まるには、序にても述べた様に、材料、施工、構造をfactorとしたOperation Research活動(O・R・活動)となるのであるが、結局は最大の有用性を持つ。安全性を定めるのが、安全性を立場にした考へ方であるが、更に重要な事は、このような設備を施せば出来上る建物は高価になつてしまつたのでは、有用性がないのであつて、実用的にする為には材料、施工、構造、更に経済性を加味したO・R・活動によつて、進められて行くべきものと考えらる。