

ロバストなコンクリート材料開発を 目指したパラメータ設計のための基礎実験

徳島大学大学院 学生会員 ○安藤亮介 徳島大学大学院 賛助会員 田中弘晃
徳島大学大学院 正会員 渡辺 健 徳島大学大学院 正会員 滑川 達

1. はじめに

他産業では、品質のばらつきの存在を前提として、余裕を持たせたり、ばらつきの原因自体を除去（品質を「管理」する）したりするのではなく、不確実性（ノイズ）に晒されても、バラつきにくい素材や材料設計を目指すロバスト設計等の品質工学の考え方が採り入れられている。しかしながら、コンクリート業界への導入はほとんど実例がない。そこで、本研究では、数年前より、「ロバストなコンクリート材料開発」のコンセプト（エンジニアードシステム）づくりを試みている。本稿では、「ロバストなコンクリート材料開発」というコンセプトを、パラメータ設計という具体的な開発フェーズに進めるための、基礎的な簡易実験を行った。これにより、長期強度のばらつきに影響を与える、ポルトランドセメント中のクリンカー化合物の存在可能性について、知見を得ることを目的としている。

2. コンクリート版エンジニアードシステム

図 1 が本研究で提案するコンクリート版エンジニアードシステムである。出力 y を 56 日後の長期圧縮強度、入力 M をセメント水比とした。ここで、56 日強度は、実際の構造物の利用・使用者への安定した製品の提供（≒最終顧客志向）を意識している。

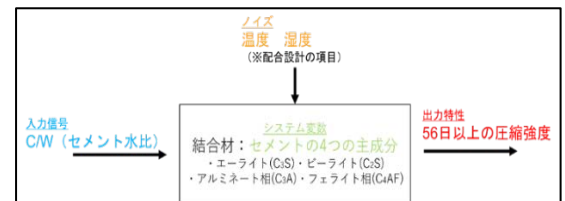


図 1 コンクリート版エンジニアードシステム

そして、一定かつ安定状態の標準水中養生による供試体を使用することとは逆に、温度、湿度をノイズ N として養生時に与え、システム変数を水和セメントペーストと想定して、その成分であるクリンカーのエーライト (C_3S)、ビーライト (C_2S)、アルミネート相 (C_3A)、フェライト相 (C_4AF) を具体的な変数としている。

3. パラメータ設計に用いる直積実験の概要と本簡易実験の位置づけ

パラメータ設計の目的は、どのシステム変数が、出力 y をばらつかせる原因であるノイズ N に影響を与えるか知り、その影響が減衰するシステム変数の水準を選択することである。通常のパラメータ設計では、各システム変数の水準が異なる 18 種類のサンプルを割り付けた L_{18} 直行表（表 1 左）を作成し、その外側（右側）に入力 M とノイズ N を割り付けることで、意図的に出力 y をばらつかせ、その程度を SN 比として示す。表 1 右端の SN 比はサンプルごとの出力 y のばらつきを表しており、各システム変数の水準ごとの SN 比は、

表 1 L_{18} 直交表と外側割り付け

No.	システム変数								出力特性					
	A	B	C	D	E	F	G	H	M_1	M_2	M_3	M_4	SN 比	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	y_{14}	18.10	
2	1	1	2	2	2	2	2	2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	y_{24}	18.24	
3	1	1	3	3	3	3	3	3	...	...	...	...	14.49
4	1	2	1	1	2	2	3	3	...	...	...	...	16.45
5	1	2	2	2	3	3	1	1	...	...	...	...	29.71
6	1	2	3	3	1	1	2	2	...	...	...	...	9.70
7	1	3	1	2	1	3	2	3	...	...	...	...	18.80
8	1	3	2	3	2	1	3	1	...	...	...	...	16.16
9	1	3	3	1	3	2	1	2	...	...	...	...	13.52
10	2	1	1	3	3	2	2	1	...	...	...	...	16.94
11	2	1	2	1	1	3	3	2	...	...	...	...	18.70
12	2	1	3	2	2	1	1	3	...	...	...	...	15.00
13	2	2	1	2	3	1	3	2	...	...	...	...	21.21
14	2	2	2	3	1	2	1	3	...	...	...	...	22.32
15	2	2	3	1	2	3	2	1	...	...	...	...	22.56
16	2	3	1	3	2	3	1	2	...	...	...	...	18.53
17	2	3	2	1	3	1	2	3	...	...	...	...	17.95
18	2	3	3	2	1	2	3	1	...	...	...	...	15.41

対応するサンプルの SN 比の平均を求める要因分析により得られる。各システム変数の水準ごとに、ノイズの影響が小さくなる（SN 比の大きい）水準を選ぶことで、ノイズが存在する環境下でも、出力の安定を目指す。これを直積実験という。本研究のコンセプトに従うと実験には L_{18} 直行表に従ったクリンカー化合物成分比 18 パターンのセメントサンプルが本来必要となるが、現状安定して入手できるセメントが、普通、早強、中庸熱、低熱ポルトランドセメントの 4 種のみであることより、サンプルの数を 4 パターンに絞った簡易実験を行うこととした。サンプルの数を絞ることで、各クリンカーの水準に対応するサンプル数が減り、要因分析結果の統計的な信頼性は落ちることが予想されるが、長期強度のばらつきに影響を与える、セメント中のクリンカーの存在可能性について、一定の知見は得られるのではないかと考えた。

4. 実験の概要

簡易実験の目的は、セメントの長期圧縮強度のばらつきに対する影響が大きい、つまり、水準間の SN 比の変

動が大きいクリンカーを見つけ、最適水準を知ることである。実際に4種のセメントを用い、図1のエンジニアードシステムをもとに簡易実験を行った。1種のセメントにつき、入力をセメント水比(C/W)1.8、2.0、2.2の3水準、ノイズを、温度に関しては0°C、20°C、40°C、湿度は気中養生と水中養生の組み合わせによる6水準とした計18パターン、これがセメント4種分となる総計72パターンのモルタル供試体の圧縮強度を、『JIS R 5201』の強さ試験に準拠し測定した。結果を表2

のように Excel で作成したスプレッドシートを用いて、SN 比を算出した。

表2 SN比及び感度算出用 Excel シート

	M1(C/W=1.8)				M2(C/W=2.0)				M3(C/W=2.2)				S/N (dB)	感度 (dB)	SN比	感度										
	気中養生		水中養生		気中養生		水中養生		気中養生		水中養生															
	0°C	20°C	40°C	0°C	20°C	40°C	0°C	20°C	40°C	0°C	20°C	40°C														
普通	2	1	3	1	42.21875	37.99875	38.29888	58.69938	61.71875	63.23438	58.5	46.625	41.79688	58.625	64.6925	66.5713	52.5825	49.42188	45.625	60.51563	61.46875	69.53125	8.443	28.5762	6.987	720.447
早強	3	1	3	1	44.54688	44.29563	52.48438	62.21875	61.79688	67	60.46875	66.625	56.69513	68.45313	76.1875	78.9713	71.29688	69.95313	63.75	79.23438	65	82.75	11.685	26.4688	14.740	1114.654
中庸熱	2	2	2	2	24.5	23.01667	26.875	41.2613	46.68875	51.76688	44.67188	26.2650	28.4313	37.65313	53.875	62.7013	28.5625	29	26.9664	46.84375	51.91667	54.5013	17.769	26.9164	1.066	407.555
低熱	1	3	1	2	21.62188	23.5	29.54688	44.6925	61.86438	75.19688	26.06584	26.10156	22.2013	51.25	75.92313	80.7013	32.5013	32.79688	50.78666	64.82313	76.78125	82.46625	-0.107	27.69229	0.876	587.805

5. 実験の結果と考察

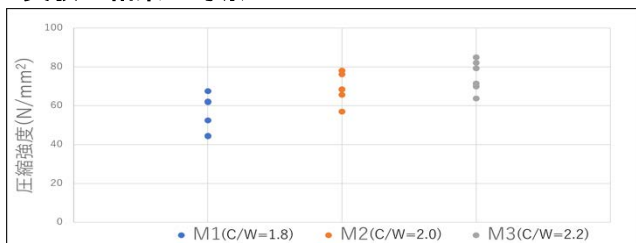


図2 早強ポルトランドセメントの入力(C/W)ごとの圧縮強度のばらつき

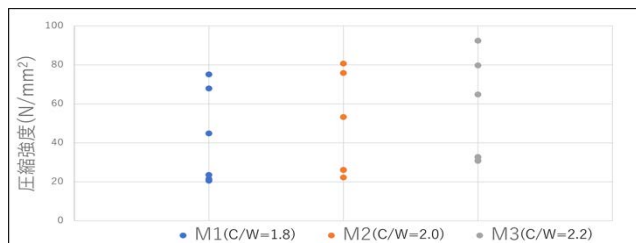


図3 低熱ポルトランドセメントの入力(C/W)ごとの圧縮強度のばらつき

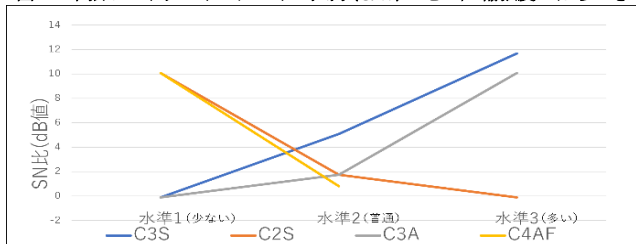


図4 クリンカーごとのSN比要因分析図 (dB 値)

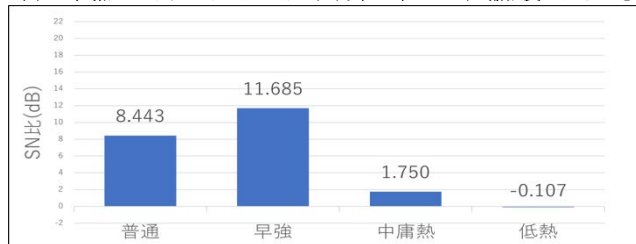


図5 セメントごとのSN比 (dB 値)

本実験の結果を図2~図5に示す。図2と図3は早強、低熱セメントの入力(C/W)ごとの圧縮強度を散布図的に表したものである。これらより、入力(C/W)と出力(長期強度)間に一定の比例関係が確認できるとともに、セメントの種類によって、多様なノイズ(湿度・温度)のもとでの出力(長期強度)のばらつきの出方に差が現れていることがわかる。図4は各クリンカーのSN比要因分析結果を重ねたもので、全クリンカーで水準(配合割合)の違いによりSN比が大きく変化する結果となった。しかし、この結果を鵜呑みにすることはできない。これは、前述したように本実験では、本来必要なL18直交実験を簡易実験として4種のセメント種類のみで行ったため、クリンカーの水準に対応するサンプルが少なく、セメント種類の違いによるSN比の差異=クリンカーの水準の違いによるSN比の差異となる箇所が複数存在するためである。図5に示したようにセメント種類別のSN比にも大きな差が生じている。他方、セメントの種類がクリンカー配合の違いより規定されることを考え合わせれば、クリンカーが圧縮強度のばらつきに影響している可能性は捨てきれないともいえる。このため、本研究の当初目標であった既製セメント以外のサンプルも必要とするL18直行表での実験の実現が今後の課題である。また、本実験より、用いた4種のセメントのうち普通・早強セメントは、中庸熱・低熱セメントと比較しロバスト性が高いと考えられる結果が得られた。この結果より普通・早強セメントが現場で多用されている現状に対して、ロバスト性の観点からも一定の妥当性があるという本実験結果の解釈も可能と考える。

6. おわりに

ISO2394 (2015年)をもとに、2020年に日本でもJIS A 3305: 建築・土木構造物の信頼性に関する設計の一般原則がガイドラインとして制定された。このような国際・国内の潮流を鑑みれば、本稿で提案した品質工学に基づくロバスト設計等の技術開発アプローチは今後、その重要性を増してくると考えている。

《参考文献》

- 1) 立林和夫: 入門タグチメソッド, 日科技連, 2004年4月27日
- 2) JIS A 3305 建築・土木構造物の信頼性に関する設計の一般原則, 日本規格協会, 2020年4月27日