

品質工学によるコンクリートの強度向上と安定化に関する研究

機械技術部 ○森田春美, 瀬戸口正和*

素材開発部 神野好孝

(株)スパーサー工業 立元 操

1. はじめに

コンクリートの強度は水セメント比によって左右され、この値が大きいほど強度、耐久性、水密性が劣るといわれている。しかし、水セメント比を小さくすれば解決する問題ではなく、小さくすることにより作業性が悪くなり、品質（強度）のばらつきが大きくなる。これらの問題を解決するために業界ではガラス繊維を混入したり、水セメント比を大きくせずモルタルの流動性を高める混和剤の使用により強度を確保している。これらの方法を用いてもコンクリートの強度は安定性が悪く、3割程度のばらつきがあるのが現状である。

本研究はこのような現状を解決するために品質工学の手法を用いて、強度が高くばらつきの少ない製造条件について検討を行った。

2. 実験の計画

コンクリート試験片作成のための条件は4者で協議し決定した。試験片の作成は(株)スパーサー工業が担当し、恒温恒湿機による加温処理後、万能材料試験機を用いて圧縮強さを測定し、得られた強度試験結果のデータを用いて解析する。

2.1 制御因子

コンクリート製造工程において強度及び作業性に影響を及ぼすと思われる8つの要因を表1のとおり選定した。これらの要因を制御因子として表2のようにL18直交表に割り付けた。

表1. 制御因子と水準値

制御因子	水準値		
	1	2	3
A: 骨材	有り	無し	—
B: 水セメント比(%)	25	30	35
C: 混和剤 (%)	2.0	2.2	2.4
D: シリカヒューム(%)	5	10	15
E: ガラス繊維 (%)	4	3	2
F: 養生期間 (日)	3	6	9
G: 処理温度 (°C)	40	60	80
H: 処理時間 (時間)	8	24	48

表2. 制御因子の直交表への割付け

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
・	・	・	・	・	・	・	・	・
・	・	・	・	・	・	・	・	・
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

2.2 信号因子

本研究は強度が高く、安定する条件を制御因子の中から探し出すため、信号因子は設けない。

2.3 誤差因子

誤差因子は意図的に設定することができず、ばらつきを与える条件である。コンクリートの製造過程では1回の混練で数多くの型の中に投入して製品とするため、その製品の強度は同一であることが理想である。しかし、現実には3割程度の強度のばらつきがあることから、3個の試験片を作成し、それぞれ誤差因子とした。

*大島紬技術指導センター

3. 実験の方法

3. 1 コンクリート試験片作成用材料

コンクリート試験片作成用材料は、骨材は5号珪砂(0.21~0.42mm)、セメントは普通ポルトランドセメントを用い、混和剤は高性能A E減水剤(遅延剤)を対セメント比2.0~2.4%、シリカヒュームは対セメント比5~15%、ガラス繊維は日本電気硝子製チョップドストランドを2~4%添加した。

3. 2 試験片の調整

所定の材料を直交表に割り付けた条件で秤量した後、まずオムニミキサーに水と混和剤を投入し、続いてシリカヒュームを混合した。これにセメントを混合し、骨材を混合した後、最後にガラス繊維を混合した。全混合時間は5分間である。混合した材料はφ50×100mmの柱状供試体の型枠に流し込み、室温で一昼夜放置して硬化させた。試験片は各3本ずつ作成した。一昼夜硬化させたものは端面を平滑にするためにキャッピング処理を行い、さらに一昼夜放置した。打ち込みから2日目に脱型し、室温・大気中で養生を行った。養生期間は打ち込みから加温処理までの期間とした。加温処理は恒温恒湿機を用い、所定の温度に調整した水に試験片を浸して処理した。加温処理した試験片は乾燥しないようにポリエチレン袋に保存し、圧縮試験に供した。

3. 3 強度の測定

試験片の圧縮試験は、万能試験機により試験温度20℃、試験速度1mm/minで行い、表3の結果を得た。

表3. 圧縮試験結果

行	強度試験結果			行	強度試験結果		
	1	2	3		1	2	3
1	117.0	122.6	145.8	10	121.4	128.4	129.1
2	157.6	172.2	176.8	11	157.0	145.4	133.8
3	120.4	85.9	124.8	12	187.4	151.8	161.0
4	147.1	148.4	115.8	13	131.6	122.4	166.7
5	105.1	104.3	87.2	14	119.6	136.4	132.4
6	145.3	134.5	163.7	15	110.4	101.6	120.4
7	137.5	124.0	130.5	16	98.3	115.8	98.0
8	104.0	114.6	119.2	17	103.4	108.2	108.8
9	102.9	100.5	122.2	18	112.4	118.2	113.4

4. データの解析

S N比の計算

実験の目的が強度の高い製造条件を求めることから、望大特性のS N比を求めた。一例として表3のデータを用いて次のように算出した。

$$V T = 1 / n (1 / y_1^2 + 1 / y_2^2 + 1 / y_3^2)$$

$$\eta = -10 \cdot \log V T$$

第1行目の場合、

$$\begin{aligned} \eta &= -10 \cdot \log \{1/n (1/y_1^2 + 1/y_2^2 + 1/y_3^2)\} \\ &= -10 \cdot \log \{1/3(1/117.0^2 + 1/122.6^2 + 1/145.8^2)\} \\ &= -10 \cdot \log (0.00006220783) \\ &= 42.06 \text{ (db)} \end{aligned}$$

求められた各行のS N比を表4に示す。

表4. 各行の圧縮強度のS N比

行	S N比 (db)	行	S N比 (db)
1	42.06	10	42.02
2	44.52	11	43.20
3	40.48	12	44.34
4	42.57	13	42.72
5	39.80	14	42.20
6	43.31	15	40.83
7	42.30	16	40.26
8	40.99	17	40.56
9	40.61	18	41.18

5. 制御因子の効果の検討

コンクリート試験片の強度に影響を及ぼす制御因子の効果を検討するためにデンバル値を分散分析する。表4のS N比をもとにして、各制御因子の効果を求めるため、制御因子の各水準ごとのS N比の和と平均値を求めた補助表が表5である。

これより、修正項CFは、

$$CF = (\text{全データの和})^2 / \text{全データ数}$$

$$= (42.06+44.52+\dots+41.18)^2 / 18$$

$$= 31580.0334722$$

となり、全変動STは、

$$ST = (\text{個々のデータ})^2 \text{の和} / \text{全データ数}$$

$$= 42.06^2+44.52^2+\dots+41.18^2 / 18$$

$$= 32.97102$$

骨材の有無の効果SAは、

$$SA = \{(A_1 \text{の和})^2 + (A_2 \text{の和})^2\} / 9 - CF$$

$$= \{(376.64)^2 + (377.31)^2\} / 9 - CF$$

$$= 0.024938911$$

また、水セメント比の効果SBは

$$SB = \{(B1 \text{の和})^2 + (B2 \text{の和})^2 + (B3 \text{の和})^2\} / 6 - CF$$

$$= 9.6797444$$

として求められる。同様にその他の制御因子の効果を求めるため分散分析したものが表6である。各制御因子について水準間のSN比の傾向を示した要因効果図が図1である。

分散分析の結果から、水セメント比、ガラス繊維、加温処理時間、養生期間の順にコンクリートの圧縮強度に対する効果が大きいことがわかる。

6. 最適条件の推定と確認実験

6.1 最適条件の推定

前節で述べたようにコンクリートの圧縮強度に最も効果の大きい要因は水セメント比であり、水セメント比が低いほうがSN比が高く、コンクリートの圧縮強度の高い製造条件となる。同様に他の制御因子についてもSN比の高い方の水準を選べば、その水準を組み合わせたものが最適な製造条件となる。したがって図1をもとに最適な水準を選んだときの最適製造条件は、

$$A_2, B_1, C_1, D_2, E_1, F_1, G_2, H_2$$

となる。この最適条件で製造したときに得られるSN比の推定値 $\hat{\mu}$ を、表5の平均値を用いて計算する。しかし、これらの全ての条件で推定すると過大推定となることが考えられるので効果の大きいB, E, F, Hを用いて計算した。

表5. 分散分析のための補助表と水準別平均値

	SN比の和			SN比の平均		
	1	2	3	1	2	3
A	376.64	377.31	—	41.85	41.92	—
B	256.62	251.43	245.90	42.77	41.91	40.98
C	251.93	251.27	250.75	41.99	41.88	41.79
D	249.83	254.86	249.26	41.64	42.48	41.54
E	254.25	253.51	246.19	42.38	42.25	41.03
F	253.98	253.10	246.87	42.33	42.18	41.15
G	249.27	253.54	251.14	41.55	42.26	41.86
H	246.88	254.62	252.45	41.15	42.44	42.08

表6. 圧縮強度評価のための分散分析表

制御因子	平方和 S	自由度	分散 V
A: 骨材	0.0249389	1	0.0249389
B: 水セメント比 (%)	9.5797444	2	4.7898722
C: 混和剤 (%)	0.1165778	2	0.0582889
D: シリカヒューム (%)	3.1658778	2	1.5829389
E: ガラス繊維 (%)	6.6163111	2	3.3081555
F: 養生期間 (日)	5.0077444	2	2.5038722
G: 処理温度 (°C)	1.5272111	2	0.7636055
H: 処理時間 (時間)	5.3134111	2	2.6567055

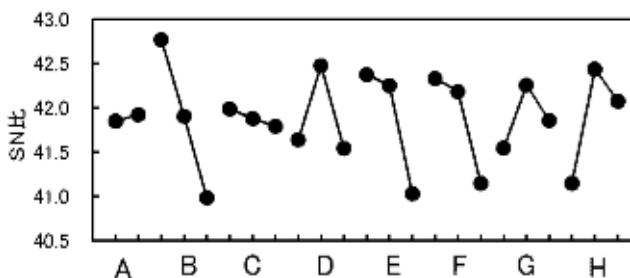


図1. 水準間のSN比の傾向

最適条件

$$\hat{\mu} = B_1 + E_1 + F_1 + H_2 - (3 \times \text{SN比の総平均})$$

$$= 42.77 + 42.375 + 42.33 + 42.437 - (3 \times 41.886)$$

$$= 169.412 - 125.658$$

$$= 43.754(\text{db})$$

また、現行条件を第2水準としたときのSN比の推定は、

$$\hat{\mu} = B_2 + E_2 + F_2 + H_2 - (3 \times \text{SN比の総平均})$$

$$= 168.777 - 125.658$$

$$= 43.119(\text{db})$$

これより推定における利得は

$$\text{最適条件 } \hat{\mu} - \text{現行条件 } \hat{\mu} = 43.754 - 43.119 = 0.635$$

(db)となる。

6. 2 確認実験

実験結果の再現性を確認するために、表7に示した材料の組合せ及び製造条件を最適条件とし、現行条件は第2水準の組合せを採用して確認実験を行った。ただし、最適条件の中で第3列のみ3通りの組合せとし混和剤の効果を確認した。その理由は混和剤の目的はモルタルの流動性を高めることであり、水セメント比を低く押さえて、その結果圧縮強度に影響を及ぼすと判断したためである。モルタルの作成、試験片の調整条件等は前述と同じである。

確認実験での圧縮試験結果を表8に、また表9にSN比の推定値と確認実験のデータ解析結果を示した。

確認実験の結果、最適条件の中で3通りの組合せとした混和剤の効果が大きいことがわかった。この中で混和剤0%の試験片は現行条件の試験片より強度が低い、この原因は水セメント比が低い、混練過程から硬く、流動性が悪く緻密なコンクリートにならなかったためである。また混和剤2.2%の試験片は4.4%のものより、最大強度は高いがばらつきが大きい。したがって安定した強度を得るためには混和剤4.4%が最適である。

解析結果で推定の利得より、確認実験結果の利得が高くなったが、この理由は混和剤の配合比率を間違ったことであり、効果が期待される量が実験時に配合されていなかったためである。

7. おわりに

本実験は品質工学の手法を用いて圧縮強度が高く、ばらつきの少ないコンクリート製品を作るための製造条件について検討したものである。その結果、次のことが明らかになった。

- (1) コンクリートの圧縮強度に最も効果が大きいのは水セメント比であり、大きくなると強度は低下する。
- (2) 混和剤の効果は大きく、水セメント比を高くすることなく流動性が得られるため、圧縮強度が高く、ばらつきの少ない製品を得るために効果的である。
- (3) 養生期間を現状の6日から半分の3日に短縮できた。

今回の実験で圧縮強度が高く、品質の安定したコンクリート製品の製造条件を得ることができた。従来、コンクリートの圧縮強度は120kN程度で、3割程度のばらつきがあるとされており、実際従来の製造条件での圧縮強度は80kN～130kNの範囲であった。実験で得られた最適条件で作成した製品は161kN～169kNとなり、強度の向上と品質の安定化が図れた。

表7. 確認実験の条件

制御因子	最適条件	現行条件(第2水準)
A:骨材	A 2 なし	なし
B:水セメント比(%)	B 1 25	30
C:混和剤 (%)	C 1 0~4.4※	2.2
D:シリカヒューム(%)	D 2 10	10
E:ガラス繊維 (%)	E 1 4	3
F:養生期間 (日)	F 1 3	6
G:処理温度 (°C)	G 2 60	60
H:処理時間 (時間)	H 2 24	24

※印については、0%、2.2%、4.4%の3通り

表8. 確認実験の圧縮試験結果

	圧縮強度 (KN)		
	1	2	3
現行条件	156.4	141.0	144.7
最適条件	1	126.6	126.8
	2	175.9	160.5
	3	161.7	161.5

表9. SN比の推定値と確認実験の結果

	推定値(db)	確認実験(db)
最適条件	43.754	44.31
現行条件	43.119	43.34
利 得	0.635	0.97