

微粉碎シラス混合コンクリート製造の最適条件に関する研究

機械技術部 森田春美, 神野好孝*, 袖山研一*, 立元 操**

A Study on Optimum Conditions of Pulvarised Fine Shirasu mixed Concrete Preparation

Harumi MORITA, Yoshitaka KAMINO, Ken'iti SODEYAMA and Misao TATEMOTO

コンクリートはセメント、水、骨材などを配合し作成される。そ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。また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といわれていたが、筆者らは品質工学手法により最適製造条件を見いだし、強度向上と安定化を図った。

本研究では、従来強度向上を目的に用いていたガラス繊維が取り扱いにおいて健康上好ましくないことから、当センターで開発した微粉碎シラスがコンクリートの緻密化に有効で、かつ強度向上に影響が大きいことに着目し、強度向上と軽量化を目的に検討した。その結果、ガラス繊維を含まずに圧縮強度が、最適条件では80~85 N/mm²となり、強度の向上と品質の安定化を図ることができた。また製品は従来の製造方法より10%程度の軽量化を図ることができた。

1. 緒言

これまでにPC橋梁張り出し工法に用いるコンクリート製打放し施工用埋め込み部品の強度向上に関して研究を行い、80N/mm²の圧縮強度が得られる製造条件を得ることが出来た。製造条件の最適化により強度向上が図られたことは明らかであるが、これまでの製品にはガラス繊維を混入しており、このことが強度向上に大きな役割を果たしていることは否定できない。しかしガラス繊維は水セメント比にもよるがモルタルとの混合がうまくいかなかったり、取り扱い時に飛散し、健康管理上からも好ましくない。

本研究では、ガラス繊維を含まずに微粉碎シラスを配合することにより強度が高くしかも軽量化を目的として製造条件を確立することにした。

2. 実験の計画

コンクリート試験片作成のための条件は、現状の製造条件を基本として材料配合割合や養生条件等は前回は実験結果を考慮して決定した。試験片の作成は(株)スパーサー工業が担当し、加温処理は恒温恒湿機を用い、強度試験は万能材料試験機を用いて圧縮強さを測定し、得られたデータを用いて解析した。

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要因を表1のとおり選定した。この中でガラス繊維を選定した理由は、微粉碎シラスの強度に及ぼ

す効果を確認するために選定した。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: ガラス繊維	有り	なし	-
B: シラス置換率 (%)	100	50	25
C: 水セメント比 (%)	45	50	55
D: シリカヒューム (%)	10	5	0
E: 混和剤 (%)	1	2	4
F: 養生期間 (日)	2	4	6
G: 処理温度 (°C)	80	70	60
H: 処理時間 (時間)	8	24	48

表2 制御因子の直行表への割付け

	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さがしだすため、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

*素材開発部, ** (株)スパーサー工業

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、現実には強度のばらつきがあることから、作成した10個の試験片をそれぞれ誤差因子とした。

3. 実験の方法

3.1 コンクリート用材料

コンクリート試験片作成用材料は、骨材は5号珪砂(0.42~0.21mm)、セメントは普通ポルトランドセメント(平均粒径16.4μm)を用い、混和剤はポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤(遅延剤)を対セメント比1~3%、シリカヒューム(平均粒径10.2μm)は対セメント比0~10%、ガラス繊維は日本電気硝子製チョップドストランドを0又は4%添加した。微粉碎シラス(平均粒径30μm)は垂水産シラス(960μm以下)を振動ミルで粉碎して用いた。図1に使用した材料の累積ふるい下曲線を示す。

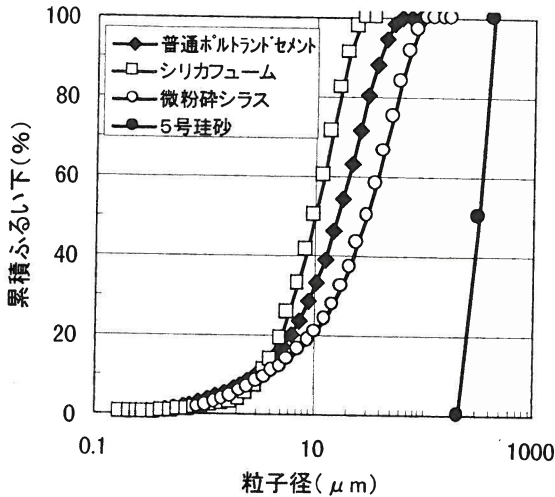


図1 材料の累積ふるい下曲線

3.2 試験片の調整

所定の材料を直行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、骨材及び微粉碎シラスを混合した後、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JISR5201に規定する型枠に詰め、5時間以上経た後、供試体をいためないように注意して型の上の盛り上げを削り取り、型詰めから1昼夜経過した後、型枠から取り外し水槽に入れ、完全に水中で養生した。試験片は各5本ずつ作成した。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。

強度試験は、所定の処理を経た後、各試験片につき左右2カ所、計10個の供試体について行った。圧縮試験は供試体を成形したときの両側面を加圧面とし、加重用加圧板(加圧面40mm×40mm)を用いて供試体中央部に、1mm/minの速度で載可して最大荷重を求め、以下の式により圧縮強さを算出した。

$$c = P/1600 \tag{1}$$

ここに、c:圧縮強さ(MPa)、P:最大荷重(N)である。

3.3 強度の測定

表3に2行目の圧縮試験結果を示す。

表3 圧縮試験結果

行	強度試験結果(kN)				
	1	2	3	4	5
2	123.8	130.5	126.2	128.7	127.7
	6	7	8	9	10
	130.9	120.3	126.7	126.3	124.8

4. データの解析

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SN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。

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

$$\eta = -10 \cdot \log VT \tag{2}$$

第2行目の場合、

$$\eta = -10 \cdot \log \{1/n (1/y_1^2 + 1/y_2^2 + \dots + 1/y_{10}^2)\}$$

$$= -10 \cdot \log \{1/10 (1/77.38^2 + 1/81.56^2 + 1/78.88^2 + \dots + 1/78.00^2)\}$$

$$= -10 \cdot \log (0.000160019454)$$

$$= 37.96 \text{ (db)}$$

求められた各行のSN比を表4に示す。

表4 各行の圧縮強度のSN比

行	SN比(db)	行	SN比(db)
1	27.89	10	35.57
2	37.96	11	36.11
3	34.30	12	33.84
4	38.07	13	37.47
5	35.83	14	38.01
6	34.67	15	34.60
7	34.69	16	37.34
8	31.70	17	33.65
9	30.89	18	31.47

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シベル値を分散分析する。表4のSN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SN比の和と平均値を求めた補助表が表5である。

表5 分散分析のための補助表と水準別平均値

	SN比の平均			SN比の平均		
	1	2	3	1	2	3
A	306.00	318.06	-	34.00	35.34	-
B	205.68	218.64	199.74	34.28	36.44	33.29
C	211.02	213.24	199.74	35.17	35.54	33.29
D	201.24	211.26	211.62	33.54	35.21	35.27
E	202.86	213.54	207.72	33.81	35.59	34.62
F	199.20	211.98	212.88	33.20	35.33	35.48
G	203.82	211.14	209.10	33.97	35.19	34.85
H	197.04	214.44	212.58	32.84	35.74	35.43

これより、修正項CFは、

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

$$= (27.89+37.96+\dots+31.47)^2 / 18$$

$$= 21637.10325$$

となり、全変動STは、

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

$$= (27.89^2+37.96^2+\dots+31.47^2) / 18$$

$$= 1209.50176$$

ガラス繊維の有無の効果SAは、

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

$$= \{(306)^2 + (318.06)^2\} / 9 - CF$$

$$= 7.13717$$

また、シラス置換率の効果SBは

$$SB = (B_1 \text{の和})^2 + (B_2 \text{の和})^2 + (B_3 \text{の和})^2 / 6 - CF$$

$$= \{(205.68)^2 + (218.64)^2 + (199.74)^2\} / 6 - CF$$

$$= 30.19337$$

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。

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 : ガラス繊維	7.13717	1	7.13717
B : シラス置換率 (%)	30.19337	2	15.09669
C : 水セメント比 (%)	12.36437	2	6.18219
D : シリカヒューム (%)	14.78837	2	7.39419
E : 混和剤 (%)	12.74837	2	6.37442
F : 養生期間 (日)	18.57257	2	9.28629
G : 処理温度 (°C)	3.81337	2	1.90669
H : 処理時間(時間)	29.48537	2	14.74269

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2である。

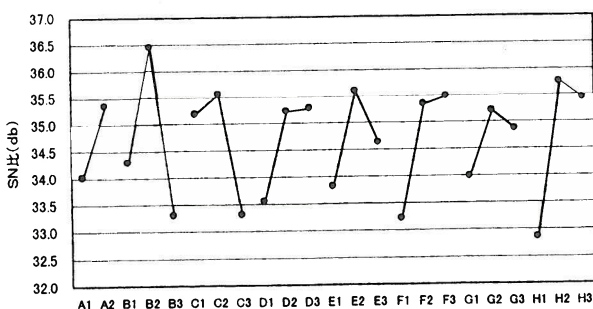


図2 水準間のSN比の傾向

分散分析の結果から、シラス置換率、加温処理時間、養生期間、シリカヒューム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。また前回のシラスを含まない実験で効果の大きかった水セメント比の効果が小さくなっている。この理由は他の要因効果が大きくなったためと考えられる。

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シラス置換率であり、珪砂と50%置換した場合が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。従って図2をもとに最適な水準を選んだときの最適製造条件は、

$A_2, B_2, C_2, D_3, E_2, F_3, G_2, H_2$

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, D, F, Hを用いて計算した。

最適条件

$$\hat{\mu} = B_2 + D_3 + F_3 + H_2 - (3 \times \text{SN比の総平均})$$

$$= 36.44 + 35.27 + 35.48 + 35.74 - (3 \times 34.67)$$

$$= 38.92 \text{ (db)}$$

また、現行条件はシラス配合は初めての試みであったため最悪条件とした。このときのSN比の推定値は、

$$\hat{\mu} = B_3 + D_1 + F_1 + H_1 - (3 \times \text{SN比の総平均})$$

$$= 33.29 + 33.54 + 33.20 + 32.84 - (3 \times 34.67)$$

$$= 28.86 \text{ (db)}$$

これより推定における利得は

$$\text{最適条件 } \hat{\mu} - \text{現行条件 } \hat{\mu} = 38.92 - 28.86 = 10.06 \text{ (db)}$$

である。利得とは最適と現行の差で、この差の関係は推定と確認実験の結果の再現性を評価する尺度となる。

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、現行条件は最悪条件の組合せを採用して確認実験を行った。ただし、最適条件および現行条件ともガラス繊維の効果を再確認するために2通りの条件を設定した。その理由は今回の実験においてコンクリートの圧縮強度に影響が大きいと言われているガラス繊維の効果が現れず、含まない方が強度が高かったことを検討するためである。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。

表7 確認実験の条件

制御因子	最適条件	現行条件 (最悪条件)
A: ガラス繊維	有り, なし	有り, なし
B: シラス置換率 (%)	B ₂ 50	B ₃ 25
C: 水セメント比 (%)	C ₂ 50	C ₃ 55
D: シリカム (%)	D ₃ 5	D ₁ 10
E: 混和剤 (%)	E ₂ 2	E ₁ 1
F: 養生期間 (日)	F ₃ 6	F ₁ 2
G: 処理温度 (°C)	G ₂ 70	G ₁ 80
H: 処理時間 (時間)	H ₂ 48	H ₁ 8

表8にSN比の推定値と確認実験のデータ解析結果を示した。

表8 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	繊維なし	38.92	38.03
	繊維有り	—	36.50
現行条件	繊維なし	28.86	33.29
	繊維有り	—	32.36
利得		10.06	4.74

確認実験の結果、最適条件、現行条件ともガラス繊維を含まない組み合わせの方が圧縮強度の高い結果になった。

推定の利得と確認実験の利得は一致していないが、その差は5デシベル程度であり、概ね再現したものと判断する。

7. 結 言

本実験は微粉碎シラスを配合して圧縮強度が高く、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) ガラス繊維を含まずに、80N/mm²以上の高い圧縮強度を得るためのコンクリート製造条件を確立することができた。
- (2) 微粉碎シラスをモルタルに配合することにより、モルタルの流動性が良くなり、製品外観の向上とコンクリートの緻密化を図ることができた。
- (3) ガラス繊維を含まないため、混練時の繊維の飛散がなくなり作業環境の改善を図ることができた。

今回の実験で従来から配合していたガラス繊維を用いずに、また珪砂の代わりに微粉碎シラスを配合して、圧縮強度が高く、製品外観の美しい強度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。同時に従来製品より10%程度の軽量化が図られ、輸送コストの軽減も図ることができた。またモルタルとの混合時に飛散して健康管理上も好ましくなかったガラス繊維が不要になり、作業環境の改善にも役立った。実験で得られた最適条件で作成した製品は80~85N/mm²であり、前回得られた強度を満足する新しい製造方法が得られた。