

論文 粒子充填を考慮した高流動コンクリートの配（調）合設計への単位水量および空気量の組込み

陶山 裕樹*1・高巢 幸二*2・小山田 英弘*2

要旨：本研究では、既往の粒子充填の理論に基づく従来の高流動コンクリートの配（調）合設計手法に、練混ぜ水と空気量の変数を取り込んで拡大したモデルを提案した。同モデルでは、水を微小粒子と解釈し、空気も便宜的に水と同様に扱う。係数 q を0.134としたAndreasen & Andersen式の粒子径分布曲線を理想とするひとつの理論に基づき、固形物の構成割合だけでなく、水セメント比や単位水量、空気量まで策定できる配（調）合設計手法の可能性が、モルタル供試体による実験を通じて示唆された。

キーワード：高流動コンクリート、配（調）合設計、粒子充填、流動性、塑性粘度、V漏斗流下時間

1. はじめに

フレッシュコンクリートのレオロジー特性は複雑で、複数のパラメータと試験によって定義される必要があるといわれる。ほとんどの研究者は、フレッシュコンクリートの流動性をBinghamモデル¹⁾で記述できることに同意する。Bingham関係とは、降伏値を持った粘塑性流体を扱う2変数モデルである（図-1）。その降伏応力（yield stress）は、スランプ試験と相関関係を示すことが指摘されている²⁾。一方、塑性粘度（plastic viscosity）は高流動コンクリートにおいて適切な充填性（filling ability, unconfined flowability）と材料分離抵抗性（stability, segregation resistance）を両立させるために特に調整が求められる特性値であり、かつ調整が比較的困難な特性値でもある。塑性粘度はスランプ試験時のフロー50 cm到達時間やV漏斗流下時間に強い影響を与えることが知られ³⁾、その推奨範囲や管理目標値が各種指針類^{3)~7)}などで定められている。粉体系高流動コンクリートにおいて、降伏応力の調整は化学混和剤の添加量に委ねられ、専ら塑性粘度が配（調）合によって調整される傾向にある。このことを言い換えるならば、粉体系高流動コンクリートの配（調）合設計は、適切なスランプフロー（降伏応力に依存）が得られるときに適切な塑性粘度が得られるよう構成要素の割合を決定するものといえよう。

実務において高流動コンクリートの配（調）合は、指針類に示された初期値を参照し、試験練りを通じて決定される場合が多い。一方、学術領域では多くの研究者によって異なる理論または設計変数に基づく様々な配（調）合設計の手法が提案・改良され続けている。著名なものを列挙すると、岡村ら⁸⁾は、単位粗骨材かさ容積およびモルタル中の細骨材の絶対容積を固定した後、モルタルのレオロジー特性に基づいてペーストの構成割合を調整する手法を提案した。Suら⁹⁾は、PF（Packing Factor）、

細骨材率および表乾状態の骨材が突き固められることなく緩く充填されたときの単位容積質量から、骨材の単位量を決定する手法を提案した。Buiら¹⁰⁾は、骨材の平均間隔および平均径を変数とし、ペーストのレオロジーの適切範囲を定める手法を提案した。BrouwersとRadix¹¹⁾は、数式化された理想の粒子充填モデルに基づいて構成割合を調整する手法を提案した。

本研究は、BrouwersとRadix¹¹⁾によって提案された粒子充填の理論に基づく粉体系高流動コンクリートの配（調）合設計手法の改良を試みたものである。同手法の適用範囲は、固形物（粉体と骨材）の混合比の導出に限定される。適切な水セメント比や単位水量、空気量の導出方法については考慮されていない。本報では、既往の粒子充填の理論に練混ぜ水と空気要素を組み込み、単位水量および空気量も一括して決定できる配（調）合設計手法を提案した。そのうえで、モルタル供試体の流動性（フロー値およびV漏斗流下時間）の測定を通じ、提案手法の理論の妥当性について考察を行った。

2. 既往理論およびその拡大

BrouwersとRadix¹¹⁾によって発案された高流動コンクリートの粒子充填の理論は、AndreasenとAndersen¹²⁾による式(1)（以下、A&A式）の粒子径分布曲線（ $P(D)$ 曲

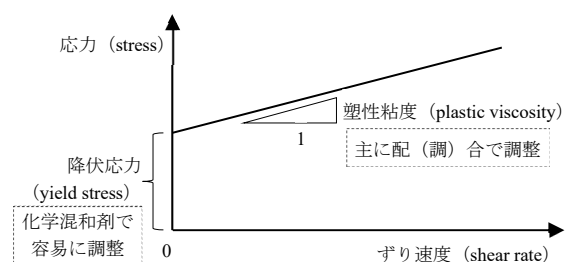


図-1 Bingham モデル¹⁾

*1 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科准教授 博士（工学）（正会員）

*2 北九州市立大学 国際環境工学部建築デザイン学科教授 博士（工学）（正会員）

線)を理想とする。配(調)合設計では、理想との差の平方和が最小となるように固形物(粉体と骨材)の構成割合が調整される。更に、実際の固形物には最小の直径があることから、最小粒子径を考慮した Funk と Dinger¹³⁾ による式(2)(以下、F&D 式)に修正された。高流動コンクリート中の固形物の粒子径分布は、 $q=0.25$ とした式(2)の $P(D)$ 曲線に従う必要があるとされている¹¹⁾。

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{max}} \right)^q \quad (1)^{12)}$$

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (2)^{13)}$$

ここで、 $P(D)$ ：寸法 D の網ふるいの通過率、

D_{max} ：最大粒子径、

D_{min} ：最小粒子径、

q ：係数 ($0 < q < 1$)。

本研究では、既往の粒子充填の理論に水と空気の変数を取り込んで拡大する。具体的には、A&A 式(式(1))の従属変数である $P(D)$ を累積の構成割合と捉え、コンクリートを構成する全ての要素の割合を水および空気の体積を含めて一括して表すモデル(図-2)に修正することを提案する。このとき、水は分子スケールの微小粒子と解釈する。空気は、分子がほぼ存在しない空間であるが、水と同様にずり応力に殆ど抵抗できない性質から、便宜的に水と同じ扱いとする。係数 q は、既往モデル¹¹⁾にフィッティングさせるため、0.25 よりも小さい値が用いられることになる。ある $P(D)$ 曲線を理想として構成要素の割合を決定する考えは、既往理論と同じである。本研究で提案する手法の利点は、単位水量および空気量までを、ひとつの理論で策定できることに尽きる^{注1)}。

以下、提案手法の妥当性を考察するために行った実験について報告する。実験はモルタル供試体で実施し、提案手法で理想とする $P(D)$ 曲線と実際の配(調)合との差が、塑性粘度に与える影響を評価した。

3. 実験概要

3.1 使用材料

実験に用いたモルタル供試体の使用材料の種類・物性などを表-1 に示す。本報の実験では、セメントとして普通ポルトランドセメント(OPC)もしくはシリカフェームがプレミックスされたセメント(SFC)のどちらかを使用した。併せて水(上水道水, W)、細骨材(海砂, S)、高性能 AE 減水剤、AE 剤および空気量調整剤(消泡剤)を使用した。レーザー回折式粒子径分布測定装置^{注2)}を用いて測定した粉体(2 種類のセメントおよび細骨材の微粒分)およびふるい分け試験(JIS A 1102)で測定した細骨材の粒子径分布を表-2 に示す。

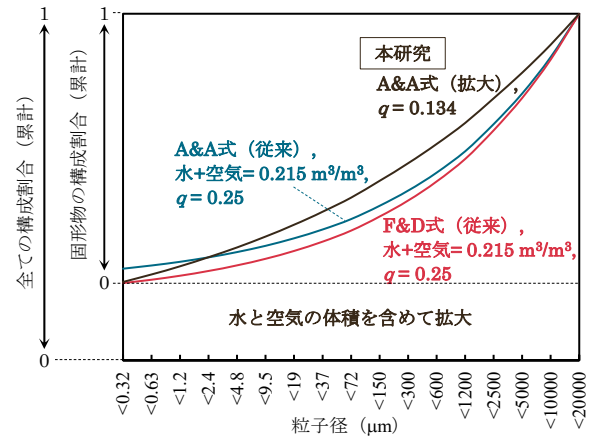


図-2 既往理論の拡大

表-1 使用材料の種類・物性

使用材料	種類・物性など
W	上水道水
OPC	密度：3.13 g/cm ³ , ブレン比表面積：3440 cm ² /g, 強さ：53.5 MPa, フロー値：156
SFC	密度：3.08 g/cm ³ , ブレン比表面積：9270 cm ² /g, 強さ：45.4 MPa, フロー値：143
S	海砂, 表乾密度：2.59 g/cm ³ , 吸水率：0.95%, 粗粒率：2.14
高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系
AE 剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
空気量調整剤	ポリアルキレングリコール誘導体

表-2 粒子径分布(累計)

粒子径, μm	OPC	SFC	S
<0.16	0	0	0
<0.32	0.025	0.040	0.000
<0.63	0.066	0.139	0.000
<1.2	0.105	0.233	0.000
<2.4	0.157	0.318	0.000
<4.8	0.242	0.464	0.000
<9.5	0.425	0.771	0.000
<19	0.745	0.985	0.001
<37	0.955	1	0.001
<72	1	1	0.003
<150	1	1	0.027
<300	1	1	0.367
<600	1	1	0.660
<1200	1	1	0.844
<2500	1	1	0.961
<5000	1	1	1

粒子径分布測定装置で測定
JIS A 1102 で測定

3.2 配(調)合および供試体作成

モルタル供試体の配(調)合を表-3 に示す。ACI237R-07¹⁵⁾では、自己充填コンクリートの試験練りの初期値として水セメント比を32%~45%、ペースト体積を34%~40%、モルタル体積を68%~72%とすることが提案されており、これらの推奨範囲をもとに実験の配(調)合を決定した。また、目標空気量はコンクリートに換算したとき3.0%~10.0%になる範囲で設定した。10%の領域まで目標空気量を設定した理由は、海外の事例¹⁶⁾や梁ら¹⁷⁾

表－3 配（調）合および測定結果

記号	配（調）合条件			セメント 種類	モルタル配（調）合			目標 空気量	測定結果		
	W/C	ペースト 体積	モルタル 体積		W L/m ³	セメント L/m ³	S L/m ³		空気量 (実測)	相対フロー 面積比	相対漏斗 速度比
O_01	0.35	0.37	0.70	OPC	254	232	471	4.3%	2.3% / 4.2%	3.75 / (9.46)	1.29 / (2.07)
O_02	0.40	0.37	0.70	OPC	270	216	471	4.3%	3.3% / 3.1%	3.59 / 6.45	1.16 / 1.20
O_03	0.32	0.37	0.70	OPC	243	243	471	4.3%	2.6% / 1.5%	4.86 / 6.24	0 / 0.31
O_04	0.35	0.40	0.70	OPC	276	252	429	4.3%	2.8% / 1.1%	4.78 / 6.10	1.41 / 1.62
O_05	0.35	0.34	0.70	OPC	232	211	514	4.3%	2.0% / 4.9%	3.75 / 6.34	0 / 0
O_06	0.40	0.34	0.70	OPC	246	197	514	4.3%	1.9% / 1.4%	3.79 / 5.45	0 / 0
O_07	0.40	0.40	0.70	OPC	294	235	429	4.3%	3.0% / 1.3%	4.29 / 5.27	1.87 / 2.71
O_08	0.45	0.34	0.70	OPC	259	184	514	4.3%	2.6% / 2.1%	4.54 / 5.50	0 / 0
O_09	0.40	0.37	0.70	OPC	286	228	471	1.4%	1.5% / 1.9%	3.69 / 6.51	1.12 / 1.88
O_10	0.45	0.40	0.70	OPC	309	219	429	4.3%	3.6% / 2.3%	3.52 / 6.26	2.91 / 3.86
O_11	0.35	0.37	0.70	OPC	243	222	471	6.4%	4.4% / 10.2%	4.48 / 5.25	0.37 / 0.40
O_12	0.35	0.37	0.70	OPC	202	184	471	14.3%	12.0% / 13.7%	3.84 / 5.47	0 / 0
O_13	0.40	0.40	0.70	OPC	282	225	429	6.4%	6.5% / 6.6%	4.27 / 5.00	2.18 / 3.11
O_14	0.32	0.37	0.70	OPC	238	190	429	14.3%	12.5% / 12.6%	3.58 / 5.38	2.59 / 3.40
O_15	0.32	0.37	0.70	OPC	232	232	471	6.4%	5.5% / 7.3%	3.52 / 5.18	0.47 / 0.54
O_16	0.32	0.37	0.70	OPC	193	193	471	14.3%	13.5% / 11.5%	4.04 / 6.02	0.10 / 0.11
O_17	0.45	0.40	0.70	OPC	297	211	429	6.4%	9.7% / 5.2%	4.29 / 5.45	4.46 / 4.93
O_18	0.45	0.40	0.70	OPC	251	178	429	14.3%	14.1% / 14.7%	3.73 / 6.16	4.88 / 5.18
S_01	0.35	0.37	0.70	SFC	252	234	471	4.3%	3.6% / 2.5%	4.09 / 5.25	2.54 / 2.75
S_02	0.35	0.37	0.70	SFC	241	223	471	6.4%	12.3% / 9.9%	3.80 / 5.08	2.88 / 3.11
S_03	0.35	0.37	0.70	SFC	200	186	471	14.3%	10.1% / 14.0%	3.62 / 5.08	3.23 / 3.30
S_04	0.40	0.37	0.70	SFC	268	218	471	4.3%	2.2% / 5.1%	3.95 / 5.20	3.97 / 4.55
S_05	0.40	0.37	0.70	SFC	256	208	471	6.4%	7.7% / 5.9%	4.71 / 5.13	4.72 / 4.85
S_06	0.40	0.37	0.70	SFC	213	173	471	14.3%	12.0% / 11.7%	3.82 / 5.03	4.65 / 4.98
S_07	0.35	0.40	0.70	SFC	274	254	429	4.3%	2.6% / 1.6%	4.22 / 6.34	3.77 / 3.80
S_08	0.35	0.40	0.70	SFC	263	244	429	6.4%	5.7% / 5.6%	3.86 / 5.33	4.33 / 4.17
S_09	0.35	0.40	0.70	SFC	222	206	429	14.3%	11.8% / 8.5%	3.93 / 5.84	4.08 / 4.65
S_10	0.32	0.37	0.70	SFC	241	245	471	4.3%	6.0% / 5.8%	3.54 / 5.15	2.49 / 2.75
S_11	0.30	0.37	0.70	SFC	233	252	471	4.3%	1.7% / 1.9%	4.74 / 5.68	1.11 / 1.19
S_12	0.28	0.37	0.70	SFC	225	261	471	4.3%	2.3% / 5.7%	3.80 / 6.13	1.02 / 1.30

の提案する気泡増量コンクリートの配（調）合を想定したためである。

供試体の練混ぜには、JIS R 5201 に規定されたミキサを用いた。まず、細骨材とセメントを投入し、低速で 30 秒間練り混ぜた。次に水と化学混和剤を投入し、低速で 60 秒間練り混ぜた。その後、ミキサに付着したモルタルをかき落として、高速で 90 秒間練り混ぜた。なお、1 回の練混ぜ量は約 1.5 L とした。使用材料の保管から練混ぜまでは、気温 20℃の恒温室内で実施した。

3.3 測定項目および測定方法

実験の測定項目は、空気量、相対フロー面積比および相対漏斗速度比とした。

(1) 空気量

練上がり直後の供試体の空気量を、JIS A 1128（空気室圧力方法）に準じてモルタル供試体を対象とする容量 1.0 L の測定器を用いて測定した。

(2) 相対フロー面積比

フロー値を、ガラス板の上で底面の直径 100 mm、上面の直径 70 mm、高さ 60 mm のコーン（JIS R 5201 と同寸法）を用いて落下運動を与えずに測定した。得られたフロー値から、式(3)の定義に基づいて相対フロー面積比⁸⁾を求めた。

$$F_p = \left(\frac{F_p}{F_0} \right)^2 - 1 \quad (3)^8$$

ここで、 F_p ：相対フロー面積比、

F_p ：フロー値（mm）、

F_0 ：フローコーン底面の直径（100 mm）。

(3) 相対漏斗速度比

V 漏斗流下時間を、挿入口 270x30 mm、吐出口 30x30 mm、本体高さ 240mm、足長 60 mm の漏斗を用いて測定した。得られた V 漏斗流下時間から、式(4)の定義に基づいて相対漏斗速度比⁸⁾を算定した。なお、モルタル供試体が漏斗内で閉塞^{注3)}した場合、相対漏斗速度比は 0 として扱った。

$$R_m = \frac{10}{t_r} \quad (4)^8$$

ここで、 R_m ：モルタルの相対漏斗速度比、

t_r ：V 漏斗流下時間（sec）。

4. 実験結果および既往理論の検証

各供試体で測定された空気量（実測）、相対フロー面積比 F_p および相対漏斗速度比 R_m は、表－3 に示した通りである。同表には、ひとつの配（調）合につき、高性能 AE 減水剤の添加率を調整してフロー値を変えて測定した 2

回の測定結果を記載している。

本報では、既往の指針類に倣って相対漏斗速度比 R_m を塑性粘度の指標として扱った。そのうえで、供試体の相対フロー面積比 Γ_p を一定の基準値に揃えて相対漏斗速度比 R_m を評価した。これは、適切な降伏応力に調整されたときに適切な塑性粘度が得られる配（調）合が高流動コンクリートに求められるとした冒頭の考えと、供試体の降伏応力を揃えることで相対漏斗速度比 R_m をより正確に塑性粘度を表す指標とする狙いに基づく。岡村らの設計法⁸⁾において、高流動コンクリートを構成するモルタルの相対フロー面積比 Γ_p を 5.0 とすることが提案されている。これに倣って本報の相対フロー面積比 Γ_p の基準値を 5.0 とした。しかしながら、相対フロー面積比 Γ_p が 5.0 丁度のモルタル供試体を作ることが困難であったため、相対フロー面積比 Γ_p が 3.5～5.0 のときと 5.0～6.5 のときの相対漏斗速度比 R_m を線形補間し、相対フロー面積比 Γ_p が 5.0 のときに相当する相対漏斗速度比 R_m を算定した。

得られた実験データを用いて既往理論¹¹⁾を検証した。固形物の構成割合が理想とする $P(D)$ 曲線から外れた度合いを残差和^{注4)}で評価し、残差和と相対フロー面積比 Γ_p が 5.0 のときの相対漏斗速度比 R_m との関係を検証した。 $P(D)$ を $q=0.25$, $D_{min}=0.161\text{ }\mu\text{m}$ とした F&D 式とした場合、図-3 に示す通り、両者の間には正の相関関係が認められた（Pearson の相関係数 $=.405$, $p=.026$ ）。なお、既往理論がモルタル成分ではなくコンクリートの配（調）合を対象としていることを加味して係数 q を 0.20 まで低下させても、相関係数は殆ど変化しなかった。

5. 提案モデルの考察

A&A 式の $P(D)$ を構成要素全て^{注5)}に拡大した場合（本研究の提案）における係数 q を、配（調）合毎に最小二乗法によって導出した。岡村らの設計法⁸⁾では、高流動コンクリートを構成するモルタルの相対漏斗速度比 R_m を 1.0 ± 0.1 の範囲で調整することが提案されている。これに倣って本報では相対漏斗速度比 R_m の理想値を 1.0 とした。相対フロー面積比 Γ_p が 5.0 のときの相対漏斗速度比 R_m が極端に高かった、1.0 に近かった、もしくは極端に低かった代表的な供試体における構成材料の割合を図-4 に示す。O_18 供試体では、単位水量や空気量が大きかったようで、相対漏斗速度比 R_m が理想の 1.0 に対して過大となった。同供試体の配（調）合を A&A 式に近似した係数 q を 0.106 としたモデルでは、塑性粘度が小さ過ぎる流動性しか得られないことが伺える。一方、O_06 供試体では、比較的粗大な固形物の割合が多かったようで、相対漏斗速度比 R_m が過小となった。係数 q を 0.147 としたモデルでは、逆に塑性粘度が大き過ぎる流動性しか得られないことが伺える。

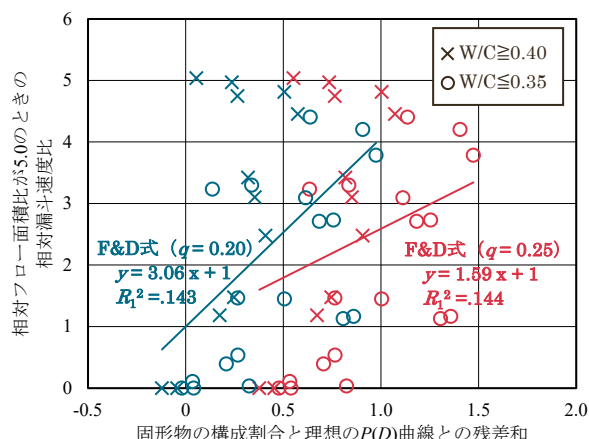


図-3 既往理論の検証

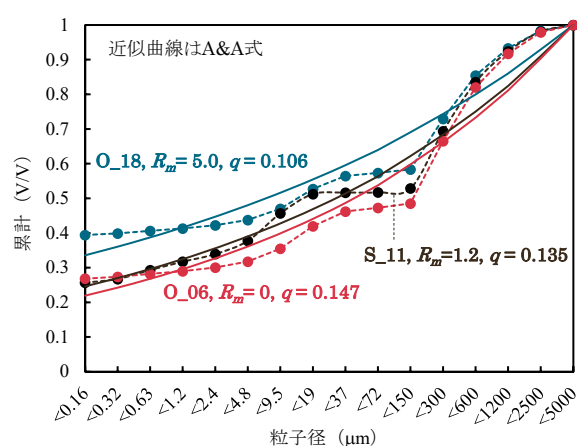


図-4 構成要素の粒子径別の割合

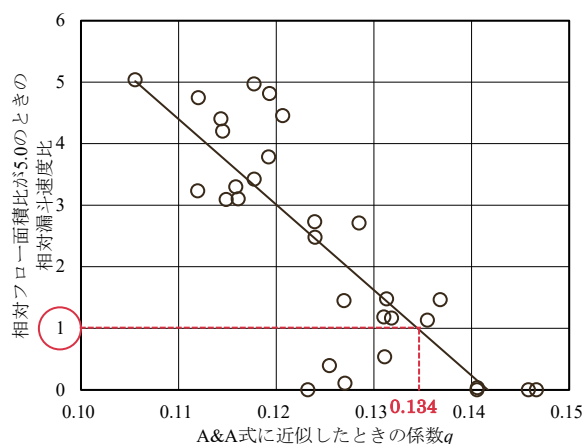


図-5 係数 q の検討

各供試体の配（調）合を A&A 式に近似したときの係数 q と相対フロー面積比 Γ_p が 5.0 のときの相対漏斗速度比 R_m との関係を図-5 に示す。両者の近似直線から相対漏斗速度比 R_m が 1.0（理想）のときの切片として係数 q を読み取ると、およそ 0.134 となる。つまり、係数 q を 0.134 とする A&A 式の $P(D)$ 曲線が、適切な流動性を持つ高流動コンクリートのモルタル成分⁸⁾の構成割合になることが予想される。

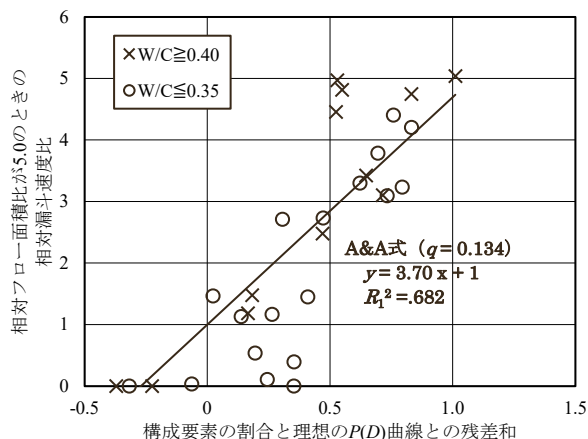


図-6 提案手法で理想とする $P(D)$ 曲線の考察

実際の配（調）合と $q=0.134$ とした理想の $P(D)$ 曲線との残差和^{注6)}と、相対フロー面積比 Γ_p が 5.0 のときの相対漏斗速度比 R_m との関係を図-6 に示す^{注7)}。両者の関係は、正の相関関係にあり（Pearson の相関係数 = .836, $p < .001$ ），切片を 1 とした直線に近似できることが読み取れる（ $R_1^2 = .682$ ）^{注8)}。切片が 1 は、構成要素の割合が理想の $P(D)$ 曲線と一致したときに相対漏斗速度比 R_m が 1 となることを意味する。そのうえで、構成要素の割合が理想の $P(D)$ 曲線から上にずれる（単位水量や空気量、微細な固形物が過剰になる）と相対漏斗速度比 R_m が大きくなり、下にずれる（粗大な固形物が過剰になる）と相対漏斗速度比 R_m が小さくなることを意味する。これらはある程度今回の実験結果に対応しており、係数 q を 0.134 近傍に設定した A&A 式の $P(D)$ 曲線を理想とする本研究の提案は、今回の実験の範囲内で理論的に誤りがないことが考察される。

本研究の提案において空気を便宜的に水（超微細粒子）と同じ扱いとしたが、この扱いには疑問が残る。そこで、空気を除く構成要素の割合を定めるモデルとして、水と固形物の構成割合を 100% とした場合についても同様に検討した。このときの配（調）合と理想の $P(D)$ 曲線との残差和と、相対漏斗速度比 R_m との関係（図-6 相当）における R_1^2 は .367 に留まった（ $q=0.152$ ）^{注9)}。実現象への当てはまりを優先する場合、空気を水と同様に扱った方が良いことが伺える。

6. まとめ

本研究では、既往の粒子充填の理論に基づく従来の高流動コンクリートの配（調）合設計手法に、練混ぜ水と空気量の変数を取り込んで拡大したモデルを提案した。同モデルでは、水を分子スケールの微小粒子と解釈し、空気も便宜的に水と同様に扱う。係数 q を 0.134 とした A&A 式の $P(D)$ 曲線を理想とするひとつの理論で、固形物の構成割合だけでなく、水セメント比や単位水量、空

気量まで策定できる配（調）合設計手法の可能性が示唆された。

本報は、モルタル実験で教師データを収集し、モデルを作成して理論の妥当性を考察したもの過ぎない。今後コンクリート供試体などで別途検証データを収集し、モデルを検証する必要がある。

謝辞

研究遂行にあたり、当時北九州市立大学卒論生三浦聡太氏（現：住友林業株式会社）の助力を頂きました。

注釈

- 注 1) たとえば Koehler と Fowler¹⁴⁾ によって提案された ICAR 配（調）合は、高流動コンクリートの全ての構成要素の割合を策定するものであるが、骨材の混合比率の決定は粒子充填の理論に、ペースト体積の決定は余剰ペーストの理論に基づいており、複数の理論を組み合わせたものといえる。
- 注 2) 装置は HORIBA 社製 LA-300 を用いた。
- 注 3) 流下開始から 5 分経っても終了しなかった場合、閉塞と判断した。
- 注 4) 既往理論¹¹⁾では残差平方和を小さくするとしていますが、残差平方和では正負のどちら側に外れているか評価できないため、便宜的に残差和を用いた。ただし、外れ具合を残差和で一元的に評価することには議論の余地がある。残差は固形物の構成割合から理想の $P(D)$ を減じた値とし、ここでの残差和は、 $<0.32 \mu\text{m}$, $<0.63 \mu\text{m}$, $<1.2 \mu\text{m}$, …（公比が約 2 の等比数列）…、 $<5000 \mu\text{m}$ の項で算定した。
- 注 5) 供試体の空気量（実測）に合わせて、他の材料の単位量も補正した。このときの空気量（実測）には、相対漏斗速度比 R_m と同様に線形補間して相対フロー面積比 Γ_p が 5.0 のときに相当する値を用いた。
- 注 6) ここでの残差和は、 $<0.16 \mu\text{m}$, $<0.32 \mu\text{m}$, $<0.63 \mu\text{m}$, …、 $<5000 \mu\text{m}$ の項で算定した。供試体を構成する固形物に $<0.16 \mu\text{m}$ の成分は認められなかったが、 $<0.16 \mu\text{m}$ の項が水と空気が占める割合に相当するものとして扱った。
- 注 7) 定数項を固定して近似したが、近似直線への当てはまりの度合いを検討するため、図中の決定係数には Kvalseth¹⁸⁾ の R_1^2 を用いた。
- 注 8) 既往理論¹¹⁾と同様に本研究の提案においても粒子の形や角張りを考慮していない。これらを考慮して修正することで R_1^2 が向上することが期待される。
- 注 9) 図-5 と同じ手順で $y=1$ の切片から係数 q を求め

直した。

参考文献

- 1) Bingham, E.C. and Reiner, M.: The Rheological Properties of Cement and Cement-Mortar-Stone, Physics, No.4, pp.88-96. 1933
- 2) Ferraris, C.F. and de Larrard, F.: Testing and Modelling of Fresh Concrete Rheology, NISTIR 6094, 1998
- 3) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針（案）・同解説，日本建築学会，1997
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 コンクリート工事，2022
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー136 高流動コンクリートの配合設計・施工指針，2012
- 6) ACI 309.1R-08, Report on Behavior of Fresh Concrete During Vibration, 2008
- 7) The European Guidelines for Self-Compacting Concrete, 2005
- 8) 岡村甫，小沢一雅，前川宏一：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993
- 9) Su, N., Hsu, K. and Chai, H.: A simple mix design method for Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.31, pp.1799-1807, 2001
- 10) Bui, V.K., Akkaya, Y. and Shah, S.P.: Rheological model for self-consolidating concrete, ACI Materials Journal, Vol.99, pp.549-559, 2002
- 11) Brouwers, H.J.H. and Radix, H.J.: Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study, Cement and Concrete Research, Vol.35, pp.2116-2136, 2005
- 12) Andreasen, A.H.M. and Andersen, J.: Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Kornern (mit einigen Experimenten), Kolloid-Zeitschrift, Vol.50, pp.217-228, 1930
- 13) Funk, J.E. and Dinger, D.R.: Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspension, Applied to Ceramic Manufacturing, Boston: Kluwer Academic, 1994
- 14) Koehler, E.P. and Fowler, D.W.: ICAR Mixture Proportioning Procedure for Self-Consolidating Concrete, RESEARCH REPORT ICAR 108-1, International Center for Aggregates Research University of Texas at Austin, 2007
- 15) American Concrete Institute: ACI 237R-07 Self-Consolidating Concrete, 2007
- 16) Desnerck, P. et al.: Mixture Compositions and Fresh Properties of Self-Compacting Concrete: Analysis of 25 Years of Research, SCC 2016 - 8th International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, Washington DC, USA, pp.65-75, 2016
- 17) 梁俊，坂本淳，丸屋剛，大内雅博：気泡増量コンクリートに関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41, No.1, pp.1049-1054, 2019
- 18) Kvalseth, T.O.: Cautionary Note About R^2 , The American Statistician, Vol.39, No.4, pp.279-285, 1985