骨材の粒度分布がコンクリートおよびモルタルの流動性に及ぼす影響

EFFECT OF AGGREGATE GRADING ON FLUIDITY OF CONCRETE AND MORTAR

寺西 浩 司*, 谷 川 恭 雄**

Kohji TERANISHI and Yasuo TANIGAWA

The ultimate purpose of this study is to establish the method that can estimate the effect of aggregate grading on the fluidity of concrete. Therefore we focused on the size and grading range of aggregate, which are basic elements of grading, and clarified the relationships between them and consistency and rheology constants of mortar and concrete by experiment. By the way, in terms of reduction of drying shrinkage, autogenous shrinkage and hydration heat, it is important to determine the most appropriate grading which yields a given fluidity of concrete and maximum aggregate volume. To achieve this goal, we clarified based on the above experimental results that the aggregate volume ratio in concrete with a given fluidity was described mathematically by the distance of dispersion, solid content, maximum size and grading range of aggregate based on the excess paste theory.

Keywords : Aggregate size, Grading, Excess paste theory, Consistency, Rheology, Two point test

骨材寸法, 粒度分布, 余剰ペースト膜厚理論, コンシステンシー, レオロジー, 回転翼型粘度計

1. まえがき

コンクリートにとって最適な骨材の粒度分布の探究は、調合設計理論の草創期以来の古典的な課題である。粒度分布の設定方法は時代とともに変遷し、これまでに様々な理論が提案されてきたが¹⁾、その原則は、一貫して「コンクリートのワーカビリティを確保したうえで、骨材量を最大化する(または、ペースト量を最小化する)」ことであったと考えられる。そして、この原則に則した粒度分布を検討することは、岩崎も指摘しているように²⁾、乾燥収縮・自由収縮や水和熱の低減、あるいはヤング係数の増大などの観点から³⁾、今日でも依然として重要な課題であるといえる。

一方、我が国では、現在、骨材は細骨材と粗骨材に区分され、そのそれぞれの粒度分布はJISにより狭い範囲に固定されている。そして、調合の設定にあたっては、コンクリートのワーカビリティが適正になるように、試し練りにより試行錯誤的に細骨材率を調整している。すなわち、細粗混合骨材の粒度分布を調整している。しかし、この方法の上記原則との対応は必ずしも明確ではない。また、骨材の粒度分布とコンクリートのワーカビリティの関係が未だ定量的に把握されていないことが、調合設計の過程において経験と勘に頼る部分を残し、所定のワーカビリティを得るための試し練りを省略できない原因の一つとなっているものと考えられる。

骨材の粒度分布や量とコンクリートの流動性を関係づける調合理論は、前述のように、これまでに種々提案されているが、その中の一つに Kennedy⁴⁾ の余剰ペースト膜厚理論がある。これは、骨材の周囲を覆うセメントペーストの膜の平均厚さによってコンクリートのコンシステンシーが決定されると考えるものである。また、この理論は、適用のための手間がやや煩雑なため、実務的な調合設計法としては普及していないが、フレッシュコンクリートに関する研究の理論基盤としては、イメージとして理解しやすいなどの優れた面がある。そのため、我が国でも、近田⁵⁾、吉野⁶⁾、橋爪⁷⁾らが主にモルタルにこの理論を適用し、コンシステンシーやレオロジー定数との関係を整理している。ただし、その結論は研究者によって相違し、必ずしも一致していない。また、これらの研究は、一般的な粒度分布の骨材あるいは単一粒度の骨材を対象としたものであり、粒度分布の影響を積極的に検討したものではない。

以上の背景から、本研究では、①骨材の粒度分布がコンクリートの流動性に及ぼす影響を予測する方法、②コンクリートが所定の流動性を保持し、かつ、骨材量が最大となるような骨材の粒度分布を合理的に設定する方法、の確立を最終目的とした検討を行った。本報では、研究の第一段階として、まず、粒度分布を決定する基本的な要素である骨材の寸法および粒度幅に着目し、それらがコンクリ

* 名城大学理工学部建築学科 助教授・博士(工学)

** 名城大学理工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science & Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science & Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.

ートやモルタルのコンシステンシーやレオロジー一定数に及ぼす影響について検討した。また、余剰ペースト膜厚理論によりスランプおよび降伏値の試験結果を考察し、それに基づいて上記②に対する基礎的な考え方を整理した。なお、本研究は、調査設計の本質を検討するためには、骨材を細骨材と粗骨材に区分するのではなく、一つのものと捉えることが重要であるとの立場に立つものである。

2. 実験概要

2.1 実験要因とその水準

本研究では、3つのシリーズの実験を行った。表1に実験要因とその水準を示す。シリーズⅠでは、単一粒度（JISに規定される各ふるい目に留まる単一の粒度）の骨材を用いたコンクリートを試料とし（本報では、表記上の煩わしさを避けるため、骨材の最大寸法が5mm以下の場合でも、その試料をコンクリートと呼ぶ）、骨材寸法の影響を調べた。また、シリーズⅡおよびⅢでは、各ふるい目に留まる骨材の体積が同一であるような連続的な粒度分布（以下、等分布粒度という）の骨材を用いたコンクリートを試料とし、骨材の粒度幅の影響を調べた。その際、シリーズⅡでは、最小寸法を0.3mm一定として最大寸法を0.6～20mmの範囲で変化させ、シリーズⅢでは、最大寸法を5mm一定として最小寸法を2.5～0.3mmの範囲で変化させた。また、いずれのシリーズにおいても、骨材体積比 V_a （コンクリート中に占める骨材の体積比率）を要因とし、4章に後述する骨材分散距離が適当な間隔になるようにその水準を定めた。

2.2 使用材料

(1) 骨材

本実験では、表2に示すような、予めほぼ単一粒度に調整されている珪砂と、5～10mmおよび10～20mmに分級した碎石を用意し、これらを単一粒度骨材とした（珪砂の場合、単一粒度以外の骨材も一部含まれているが、少量であるため、これを無視した）。また、必要な寸法の単一粒度骨材を等量ずつ混合して等分布粒度骨材を作製した。表3に、これらの骨材の粒度分布および性質を示す（表中には、骨材試験のみ実施したケースも併せて示す）。なお、表中に示した平均寸法は、徳光により提示され⁸⁾、近田・橋爪により整理された次式⁹⁾により求めた面積体積平均粒径である。

$$D_a = \frac{1}{\sum_{n=1} \frac{(\ln D_{n+1} - \ln D_n)}{D_{n+1} - D_n} V_n} \quad (1)$$

ここに、 D_a ：骨材の平均寸法（mm）、 n ：呼び寸法が小さい方から数えたふるいの順番、 D_n ： n 番目のふるいの呼び寸法（mm）、 V_n ： n 番目のふるいに留まる骨材の体積割合

(2) その他の材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）を用い、化学混和剤として、高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸系）および消泡剤（ポリアルキレングリコール誘導体）を使用した。

2.3 コンクリート試料

コンクリートの調合は、表4に示す調合のマトリックスセメントペーストと骨材の比率が表1に示した骨材体積比の各水準となるよ

表1 実験ケース

シリーズ	粒度種別	寸法 (mm)	骨材体積比 V_a (%)
Ⅰ	単一粒度	0.3～0.6*	37.5, 42.5, 45.0, 47.5
		0.6～1.2	45.0, 47.5, 50.0, 52.5
		1.2～2.5	45.0, 50.0, 52.5, 55.0
		2.5～5*	54.0, 55.0, 56.0, 56.5
Ⅱ	等分布粒度 (最小寸法一定)	0.3～0.6*	37.5, 42.5, 45.0, 47.5
		0.3～1.2	40.0, 45.0, 47.5, 50.0
		0.3～2.5	45.0, 50.0, 55.0, 57.5
		0.3～5*	50.0, 52.5, 55.0, 57.5
Ⅲ	等分布粒度 (最大寸法一定)	0.3～20	55.0, 57.5, 60.0, 62.5
		2.5～5*	54.0, 55.0, 56.0, 56.5
		1.2～5	53.0, 55.0, 56.0, 57.0
		0.6～5	52.0, 54.0, 56.0, 58.0
		0.3～5*	55.0, 57.5, 60.0, 62.5

*シリーズ間で重複する水準

表2 単一粒度骨材

銘柄	主な粒度範囲 (mm)	性質		
		絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
豊田産珪砂	1号	2.60*	2.61*	0.61*
	2号			
	4号			
	6号			
春日井産碎石 (2005)	5～10	2.67	2.69	0.61
	10～20			

*密度、吸水率は、1号、2号、4号、6号の各粒度を体積割合で等量ずつ混合した骨材に対して測定した。

表3 骨材の粒度分布および性質

シリーズ	粒度種別	寸法 (mm)	粒度 (mm)								粗粒率	実積率 C _a (%)	平均寸法 D _a (mm)	
			質量分率 (%) **											
			25 ～ 20	20 ～ 10	10 ～ 5	5 ～ 2.5	2.5 ～ 1.2	1.2 ～ 0.6	0.6 ～ 0.3	0.3 ～ 0.15				0.15 ～ 0.075
Ⅰ	単一粒度	0.3～0.6						0.3	97.5	2.2		1.98	54.5	0.42
		0.6～1.2					10.6	87.9	1.5			3.09	56.3	0.90
		1.2～2.5				6.1	88.9	5.0				4.01	58.0	1.73
		2.5～5			6.3	89.3	4.2	0.2				5.02	57.8	3.54
		5～10*			100.0							6.00	59.0	7.21
		10～20*		100.0								7.00	58.7	14.43
Ⅱ	等分布粒度 (最小寸法一定)	0.3～0.6						0.3	97.5	2.2		1.98	54.5	0.42
		0.3～1.2					5.3	44.1	49.5	1.1		2.54	59.3	0.58
		0.3～2.5				2.0	33.2	31.1	33.0	0.7		3.03	63.6	0.74
		0.3～5			1.6	23.9	25.9	23.4	24.8	0.6		3.53	64.9	0.92
		0.3～10*			21.3	19.1	20.7	18.7	19.8	0.4		4.02	67.5	1.12
		0.3～20		16.7	17.7	15.9	17.3	15.6	16.5	0.4		4.52	69.1	1.32
Ⅲ	等分布粒度 (最大寸法一定)	2.5～5			6.3	89.3	4.2	0.2				5.02	57.8	3.54
		1.2～5			3.2	47.7	46.6	2.6				4.51	58.7	2.33
		0.6～5			2.1	31.8	34.6	31.0	0.5			4.04	60.6	1.52
		0.3～5			1.6	23.9	25.9	23.4	24.8	0.6		3.53	64.9	0.92

*骨材試験のみ実施したケース、**表中の網掛け部分は主な粒度範囲を示す。

うに定めた。本実験では、ペーストの調合は全てのケースで同一とし、水セメント比を 30%とした。また、空気量をできるだけ低く抑えるために、消泡剤を $C \times 0.01\%$ と比較的多量に添加した。

コンクリートの練混ぜには強制二軸練りミキサ（容量 55l）を用い、セメントおよび骨材を投入して 30 秒間空練りし、その後に水および化学混和剤を加えてさらに 4 分間練り混ぜた。このように長時間の練混ぜを行ったのは、後述の回転翼型粘度計による試験の際などに、さらなる練混ぜ効果により試料の性状が変化することを防ぐためである。

2.4 試験項目

本実験では、コンクリートに対しても適用可能なレオロジー試験装置である回転翼型粘度計⁹⁾を用いて、見掛けの降伏値 g および見掛けの塑性粘度 h を測定した。また、コンシステンシー試験としてスランプ試験（JIS A 1101）を行い、この他に、空気量試験（JIS A 1128）を行った。なお、これらの試験は、試料の性状が安定するのを待つために、注水から 12 分後に開始した。

図 1 に、回転翼型粘度計の概要を示す。この試験では、容量 30l の鋼製容器に試料を詰め、図中に示す形状の回転翼の回転数を 20, 40, 60rpm の順に 3 種類に変化させてトルクを測定した。その際、回転翼の回転に伴う試料中での骨材の偏在化や分離の影響をなるべく抑えるため、一つの回転数の測定を終えるごとに容器から試料を取り出して練返しを行った。そして、以上の測定により得られたトルク・回転数関係に対して回帰直線を求め、その切片を見掛けの降伏値 g 、傾きを見掛けの塑性粘度 h とした。

3. 実験結果

3.1 スランプおよび見掛けの降伏値

図 2 および 3 に、スランプおよび見掛けの降伏値 g と骨材体積比

V_a の関係を示す。図 3 によると、見掛けの降伏値 g は、いずれのシリーズにおいても、骨材の粒度分布が同一の場合、 V_a が大きいほど指数的に大きくなっている。また、骨材の粒度分布の影響については、シリーズごとに次のことがいえる。

- ①シリーズⅠ（単一粒度の場合）：見掛けの降伏値 g は、 V_a が同一の場合、骨材寸法が小さいほど大きくなる。
- ②シリーズⅡ（等分布粒度で最小寸法が一定の場合）：見掛けの降伏値 g は、 V_a が同一の場合、骨材の最大寸法が小さいほど、すなわち、粒度幅が狭いほど大きくなる。
- ③シリーズⅢ（等分布粒度で最大寸法が一定の場合）：見掛けの降伏値 g は、 V_a が同一の場合、骨材の最小寸法が大きいほど、すなわち、

表 4 マトリックスセメントペーストの調合

水セメント比 (%)	空気量 (%)	絶対容積 (l/m^3)		高性能 AE 減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
		水	セメント		
30	0	487	513	1.0	0.01

図 1 回転翼型粘度計の概要および回転翼の形状

(a) シリーズⅠ

(b) シリーズⅡ

(c) シリーズⅢ

(a) シリーズⅠ

(b) シリーズⅡ

(c) シリーズⅢ

図 3 見掛けの降伏値と骨材体積比の関係

粒度幅が狭いほどやや大きい傾向となる。ただし、その差は他のシリーズに比べて小さい。

なお、スランプは、周知のように、降伏値に支配されるコンシステンシーの試験値であり、一般に、降伏値が大きいほど小さくなる¹⁰⁾。本実験においても、スランプと見掛けの降伏値 g は、図 4 に示すように、これと同様の関係になっている。

3.2 見掛けの塑性粘度

図 5 に、見掛けの塑性粘度 h と骨材体積比 V_a の関係を示す。同図によると、見掛けの塑性粘度 h は、 g の場合と同様に、骨材の粒度分布が同一の場合、 V_a が大きいほど大きくなっている。ただし、個々の回帰曲線は g の場合よりも直線的である。また、見掛けの塑性粘度 h に対する骨材の寸法（シリーズ I）および粒度幅（シリーズ II および III）の影響も g に対する場合と同様である。

4. 余剰ペースト膜厚理論による考察

4.1 骨材分散距離の計算

Kennedy による余剰ペースト膜厚理論⁴⁾では、フレッシュコンクリートをマトリックスセメントペーストと骨材から成る 2 相材料とみなし、図 6 に示すように、最密充填状態の骨材間隙がペーストで満たされたうえで、さらに余剰のペーストが存在することによって骨材が分散されると考える。また、この理論によれば、フレッシュコンクリートの流動性は、ペーストの流動性と骨材表面に形成される余剰ペーストの平均膜厚によって決定され、余剰ペースト膜厚の 2 倍が骨材分散距離となる¹¹⁾。

本研究では、骨材分散距離 D_{ep} の計算式として、Weymouth による次式¹¹⁾を採用した。同式は、骨材の最密充填状態と分散状態の幾何学的関係から導出されたものであり、骨材分散距離を正確に計算することができる。

$$D_{ep} = \left(\sqrt[3]{\frac{C_a}{V_a}} - 1 \right) D_a \quad (2)$$

ここに、 D_{ep} : 骨材分散距離 ($\times 10^3 \mu\text{m}$),
 C_a : 骨材の実積率 (%), V_a : 骨材体積比 (%),
 D_a : 骨材の平均寸法 (mm)

上式中の C_a および D_a には表 3 中に示した値を用いた。また、本実験では、空気量の試験値が 0.8~7.2% の範囲にあったが、Kennedy をはじめとして多くの研究者がペースト中の空気存在を無視して骨材分散距

離を計算しており¹¹⁾、また、その方が、コンクリートの流動性との間に良好な関係が得られることから¹²⁾、本研究でもこれに倣った。

4.2 スランプおよび見掛けの降伏値

図 7 および 8 に、スランプおよび見掛けの降伏値 g と骨材分散距離 D_{ep} の関係を示す。これらの図によると、 D_{ep} が大きいほど、スランプは増大し、見掛けの降伏値 g は減少している。また、それぞれの関係は、骨材体積比や骨材の粒度分布にかかわらず一つの曲線で表され、それらは次式の形で表示される。

$$Sl = -\exp\{\alpha_1(D_{ep} - \alpha_2)\} + \alpha_3 \quad (3)$$

$$g = \exp\{\beta_1(D_{ep} - \beta_2)\} \quad (4)$$

ここに、 Sl : スランプ (cm), g : 見掛けの降伏値 ($\text{N}\cdot\text{m}$), D_{ep} : 骨材分散距離 (μm), $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2$: ペーストの性質により決定される定数

以上のように、本実験の結果からは、コンクリートの流動性に対する骨材の粒度分布の影響は、ペーストが同一の場合、骨材分散距離 D_{ep} により一義的に表されるものと判断される。ただし、既往の研究では、Kennedy⁴⁾ や吉野ら⁶⁾ が本実験と同様な結果を得ているのに対し、近田ら⁵⁾ や橋爪ら⁷⁾ は、骨材分散距離よりも、それを骨材の平均寸法で除した値 (D_{ep}/D_a) の方がコンクリートの流動性に対して支配的であると報告しており、この点については、今後さらに検討を要するものと考えられる。

なお、図 7 によると、建築・土木用コンクリートに適用されるスランプ 5~18cm 程度の領域では、回帰曲線の勾配が極めて急になっている。すなわち、骨材分散距離の微妙な変化がスランプに大きな影響を及ぼす。そして、このことが、調査設計の過程において使用骨材ごとに試し練りが必要であることの大きな原因になっているも

図 4 スランプと見掛けの降伏値の関係

(a) 最密充填状態 (b) 分散状態
図 6 余剰ペースト膜厚理論の概念

(a) シリーズ I

(b) シリーズ II

(c) シリーズ III

図 5 見掛けの塑性粘度と骨材体積比の関係

図7 スランプと骨材分散距離の関係

図8 見掛けの降伏値と骨材分散距離の関係

図9 見掛けの塑性粘度と骨材分散距離の関係

のと考えられる。

4.3 見掛けの塑性粘度

図9に、見掛けの塑性粘度 h と骨材分散距離 D_{ep} の関係を示す。同図によると、見掛けの塑性粘度 h は D_{ep} が大きいほど減少する傾向を示している。ただし、回帰曲線の寄与率は0.22と低く、両者の相関は低い。すなわち、塑性粘度に対する骨材の粒度分布の影響を骨材分散距離 D_{ep} によって精度良く表すことはできない。本研究では、 D_{ep} の他にも様々な指標を用いて見掛けの塑性粘度 h との関係を検討したが、十分に相関の高い指標を見出すことはできなかった。この点については、今後の課題としたい。

図10 R_d^3 に対する骨材の平均寸法および骨材分散距離の影響

5. 任意の流動性に対応する骨材体積比と粒度分布の関係の検討

前述のように、コンクリートにとっては、所定の流動性を保持し、かつ、骨材量が最大となるような骨材の粒度分布を設定することが重要である。そこで、本章では、このような粒度分布を設定するための基礎的な考え方を整理するために、前章までに得られた知見を踏まえ、任意の流動性に対応する骨材体積比と骨材の寸法および粒度幅の関係を論理的に考察する。

5.1 骨材体積比に対する各種因子の影響の定式化

骨材分散距離 D_{ep} の計算式である式(2)を骨材体積比 V_a について整理すると次式が得られる。

$$V_a = R_d^3 \cdot C_a \quad (5)$$

$$\text{ここに、} R_d = \frac{D_a}{D_a + D_{ep}}$$

上式からわかるように、 V_a は、実積率 C_a に係数 R_d^3 を乗じた形で表される。また、 R_d は、値が小さいほどコンクリート中での骨材の分散度が高いことを表す。ここで、 R_d の因子である D_{ep} は、4.2 節に示したように、本実験の範囲では、ペーストが同一の場合、スランプや降伏値、すなわちコンクリートの流動性と一義的に対応する。したがって、他の条件が一定であれば、式(5)は、コンクリートの流動性と骨材体積比の関係を表すことになる。また、同式の因子である R_d 、 D_a および C_a に関しては以下のことがいえる。

(1) R_d と D_a および D_{ep} の関係

図10に、式(5)中の R_d^3 と骨材の平均寸法 D_a の関係を示す。同図は、 D_{ep} が大きいほど、すなわち、コンクリートの流動性が高いほど、骨材の平均寸法 D_a が小さい場合に最密充填状態 ($V_a = C_a$ の状態) に対して低い比率でしか骨材を混入できないことを示している。また、このことを概念的に表すと図11のようになる。コンクリートの

図11 余剰ペースト膜で覆われた骨材の充填状況

流動性を一定にするために D_{ep} を同一とした場合、図(a)と図(b)の比較からわかるように、骨材寸法 D が小さいほど D_{ep} は骨材寸法に対して相対的に大きくなる。その結果、コンクリート中に占める余剰ペーストの体積比率が増大し、その分、骨材体積比 V_a が減少することになる。

(2) D_a と粒度分布の関係

R_d の因子である骨材の平均寸法 D_a は以下のように誘導される。まず、橋爪の研究¹³⁾を参考にすると、骨材の平均寸法として面積体積平均粒径を採用した場合、 D_a は次式のように表される。

$$D_a = \frac{1}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} \frac{f'(D)}{D} dD} \quad (6)$$

ここに、 D_a : 骨材の平均寸法 (mm), D : 骨材寸法 (mm), D_{max} : 骨材の最大寸法 (mm), D_{min} : 骨材の最小寸法 (mm), $f'(D)$: 骨材の粒度分布曲線を表す関数 $f(D)$ の導関数

ここで、等分布粒度骨材および単一粒度骨材の粒度分布曲線を図示すると図12のようになり、 $f(D)$ は式(7)により表される。また、その導関数 $f'(D)$ は式(8)のように計算される。

$$f(D) = \frac{\ln(D) - \ln(D_{\min})}{\ln(D_{\max}) - \ln(D_{\min})} \quad (7)$$

$$f'(D) = \frac{1}{\ln(D_{\max}) - \ln(D_{\min})} \cdot \frac{1}{D} \quad (8)$$

そして、式 (6) を図 12 に合わせて修正し、それに式 (8) を代入すると、次式のように D_a が得られる。

$$D_a = \frac{1}{\int_{\ln(D_{\min})}^{\ln(D_{\max})} \frac{f'(D)}{D} dD} = \frac{\ln(W)}{W-1} \cdot D_{\max} \quad (9)$$

ここに、 $W = D_{\max}/D_{\min}$

上式からわかるように、等分布粒度骨材および単一粒度骨材の平均寸法 D_a は、最大寸法 $D_{\max}$ に、骨材の粒度幅を表す W (以下、最大最小比という) によって決定される係数を乗じた形で表される。図 13 に、式 (9) による骨材の平均寸法 D_a と最大寸法 $D_{\max}$ の関係を示す。同図からわかるように、 D_a は、 $D_{\max}$ に比例し、最大最小比 W が大きいほど、すなわち、骨材の粒度幅が広いほど小さくなる。また、図 14 に、シリーズⅡおよびⅢの実験で用いた等分布粒度骨材の D_a の計算値と最大最小比 W の関係を示す。同図によると、 W が大きいほど、最小寸法が一定の場合 (シリーズⅡ) は D_a が増加し、その逆の場合 (シリーズⅢ) は D_a が減少している。

(3) C_a と粒度分布の関係

図 15 に、式 (5) の因子である実積率 C_a の試験値 (表 3 中に示した値) を示す。同図によると、単一粒度骨材 (シリーズⅠ) の実積率は、骨材寸法が大きいほどやや大きくなっており、このような試験結果は、鈴木ら¹⁴⁾ や大井¹⁵⁾ によっても報告されている。ただし、理論的には、実積率は、幾何学的相似則により骨材寸法にかかわらず一定になるはずであり¹¹⁾、本研究では、一応、実積率は骨材寸法に依存しないものと考えることとする。一方、等分布粒度骨材の場合は、次式により試験値を回帰すると、 C_a と W の間に高い相関が得られる。

最小寸法が一定の場合 (シリーズⅡ)

$$C_a = C_{am} + \delta \left[\ln \{ \ln(W) \} - \ln \{ \ln(2) \} \right] \quad (10)$$

最大寸法が一定の場合 (シリーズⅢ)

$$C_a = C_{am} + \gamma (W - 2)$$

ここに、 C_a : 骨材の実積率 (%), C_{am} : 単一粒度骨材 ($W=2$) の実積率 (%), δ, γ : 実験定数

上式からわかるように、等分布粒度骨材の実積率 C_a は、単一粒度骨材の実積率 C_{am} に、最大最小比 W 、すなわち骨材の粒度幅にかかわる増分を加えた形で表示される。したがって、 C_{am} の幾何学的相似則を是認すれば、等分布粒度骨材の場合も、 C_a は骨材寸法に依存しないことになる。なお、式中の実験定数 δ, γ が骨材の種類によって変化するか否かは本実験の範囲では明らかにならない。ただし、仮に変化するとすれば、それは骨材の粒形の変化に伴うものであると推察される。

5.2 骨材体積比が最大となる粒度分布

前節の考察結果によると、所定のスランプや見掛けの降伏値 g に対応する骨材分散距離 D_{ep} は、ペーストごとに式 (3) や式 (4) より得られる。また、その D_{ep} に対応する骨材体積比 V_a は、式 (5) とそれに付随する式 (9) および (10) より求められる。そこで、以上の手

図 12 骨材の粒度分布曲線

図 13 骨材の平均寸法と最大寸法の関係

図 14 等分布粒度骨材の平均寸法の計算値

(a) シリーズⅠ

図 15 骨材の実積率

順により本実験の条件下における V_a を計算すると、その結果は図 16 に示すようになる。ここで、図中の $D_{ep}=20, 30, 40 \mu\text{m}$ の各曲線は、式 (3) によるとスランプ 5, 18, 23cm 程度に相当し、式 (4) によると見掛けの降伏値 $g=60, 29, 14 \text{N}\cdot\text{m}$ 程度に相当する。

同図によると、単一粒度骨材を用いる場合 (シリーズⅠ) は、骨材寸法が大きいほど、 D_{ep} が大きくても、すなわち、コンクリートの流動性が高くても、 V_a を大きくすることができる。また、最小寸法を固定して最大寸法を定めるとの方針により骨材の粒度分布を設計する場合 (シリーズⅡ) は、粒度幅を広くするほど V_a を大きくすることができる。さらに、骨材の最大寸法を固定して最小寸法を定める場合 (シリーズⅢ) は、粒度幅を広くすると (すなわち、最大最小比 W を大きくすると)、図 14 (b) からわかるように、平均寸法 D_a が小さくなり、式 (5) 中の R_d^3 が減少するのに対し (図 10 参照)、

図 16 骨材体積比に対する骨材の寸法・粒度分布および骨材分散距離の影響

同式中的実積率 C_a は、図 15 (c) からわかるように、逆に増加するため、 V_a が増加するか減少するかは一概には定まらない。

今後、コンクリートが所定の流動性を保持し、かつ、骨材量が最大となるような骨材の粒度分布を設計するためには、定性的には、以上のことを考慮すればよいものと考えられる。また、本研究で取り上げたような単純化された粒度分布の範囲に限れば、このような粒度分布を本論に示した手順により合理的に定めることが可能である。そして、コンクリートの調合設計では、これらにより設定した骨材体積比が乾燥収縮や自由収縮などの性能を満足するものであるか否かを、骨材の性質を考慮しつつ検討すればよい^{16), 3)}。ただし、実際のコンクリートの場合、細粗混合骨材の粒度分布はさらに複雑である。この点に関しては、今後、骨材の粒度分布が等分布粒度からどの程度逸脱しているかとの観点から検討すれば、本研究の成果を比較的容易に拡張できるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、骨材の粒度分布がコンクリートの流動性に及ぼす影響を予測する方法の確立を最終目的とし、コンクリートやモルタルのコンシステンシーやレオロジー定数に対する骨材の寸法および粒度幅の影響を検討した。また、余剰ペースト膜厚理論により、コンクリートが所定の流動性を保持し、かつ、骨材量が最大となるような骨材の粒度分布の設定方法についてその考え方を整理した。本研究で得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 骨材の粒度分布が同一の場合、骨材体積比が大きいほど、コンクリートの降伏値は大きくなり、スランプは低下する。また、塑性粘度は増加する。
- (2) 骨材体積比が一定の場合、コンクリートの流動性に対して骨材の粒度分布が及ぼす影響は、次の通りである。すなわち、①単一粒度の場合、骨材寸法が小さいほど流動性が低下する。②等分布粒度で最小寸法が一定の場合、骨材の粒度幅が狭いほど流動性が低下する。③等分布粒度で最大寸法が一定の場合、骨材の粒度幅の変化に伴う流動性の変動は小さい。
- (3) 降伏値およびスランプに対する骨材体積比および骨材の粒度分布の影響は、骨材分散距離により一義的に表される。なお、建築・土木用のスランプの領域 (5~18cm 程度) では、骨材分散距離の微妙な変化がコンクリートの流動性に大きな影響を及ぼす。
- (4) 任意の流動性を保持するコンクリートの骨材体積比は、骨材の実積率に、骨材の平均寸法と骨材分散距離により決定される係数を

乗じた形で表される。また、これらの因子のうちの平均寸法は、骨材の最大寸法に、粒度幅に関する係数を乗じた形で表され、実積率は、等分布粒度骨材の場合、単一粒度骨材の実積率に粒度幅に関する増分を加えた形で表される。

- (5) 任意の流動性に対応する骨材体積比は、単一粒度骨材の場合、骨材寸法が大きいほど増加する。また、等分布粒度骨材の場合、最小寸法が一定で最大寸法が変化するケースでは、粒度幅が広いほど増加し、逆のケースでは、粒度幅の増減に伴う変化は一概には定まらない。

参考文献

- 1) 白山和久：コンクリートの調合設計の発展，コンクリート工学，Vol.35，No.4，pp.18-24，1997.4
- 2) 岩崎訓明：コンクリート配合の原点，セメント・コンクリート，No.564，pp.20-27，1994.2
- 3) 岸谷孝一，馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構，セメント・コンクリート，No.346，pp.30-40，1975.12
- 4) C.T.Kennedy：The Design of Concrete Mixes，Proceedings of the American Concrete Institute，Vol.36，pp.373-400，1940.
- 5) 前田悦孝，近田孝夫，松下博通：単一粒度細骨材を用いたモルタルのコンシステンシーに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.467-472，1994.6
- 6) 吉野公，西林新蔵，井上正一，黒田保：モルタルのレオロジー定数に及ぼす使用材料の性質の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.1，No.1，pp.461-466，1994.6
- 7) 橋爪進，谷川恭雄，森博嗣：細骨材の寸法・形状および混入率がフレッシュコンクリートの降伏値に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，No.558，pp.23-29，2002.8
- 8) 徳光善治：粉体のつめこみについて，粉体工学，pp.29-34，1965.9
- 9) G.H.Tattersall and P.F.G.Banfill：The Rheology of Fresh Concrete，Pitman Advanced Publishing Program，pp.97-100，1983.
- 10) 小村理恵，谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に対するレオロジー的研究，日本建築学会構造系論文集，No.462，pp.1-10，1994.8
- 11) T.C.Powers：The Properties of Fresh Concrete，John Wiley & Sons，Inc.，pp.32-37，pp.120-125，pp.282-288，1968.
- 12) 花井紀文，寺西浩司，谷川恭雄：建築物の構造躯体への適用を目的としたモルタルの開発 (その 5. 空気量がフレッシュ性状に及ぼす影響)，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.7-8，2006.9
- 13) 橋爪進：フレッシュモルタルの降伏条件に関する研究，名古屋大学学位論文，pp.73-81，2003.3
- 14) 鈴木道隆，市場久貴，長谷川勇，大島敏夫：粒度分布のある多成分粒子ランダム充填層の空間率，化学工学論文集，Vol.11，No.4，pp.438-443，1985.7
- 15) 大井孝和：多粒径成分を含む骨材粒子の充填密度について，日本建築学会構造系論文集，No.423，pp.11-16，1991.5
- 16) 寺西浩司，佐藤嘉昭：複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式 - 3 相モデルへの展開および外的要因の考慮 -，日本建築学会構造系論文集，No.602，pp.21-28，2006.4

(2006年8月29日原稿受理，2006年12月27日採用決定)