細骨材表面が拘束する水量の算定方法に関する基礎的研究

山下 彩 桜井邦昭

平 田 隆 祥

Calculation of the Quantity of Water Retained

on the Surface of Fine Aggregate

Aya Yamashita Kuniaki Sakurai

Takayoshi Hirata

Abstract

Bleeding and material separation of concrete causes defects in Reinforced Concrete (RC) structures, and reduces their durability. Before concrete mixing, the volume of water retained on the surfaces of cement and fine aggregate has to be estimated in order to predict bleeding. However, it is difficult to estimate this for fine aggregate because its composite materials have different types and origins. This study analyzes calculation methods to inform estimation of water retention using the results of fine aggregate mechanical testing. The following results were obtained: 1) the retained water volume can be estimated by fine aggregate surface area and consideration of particle shape, quantity, and size distribution, and 2) there is a linear relationship between area retained water volume that is not influenced by the type and origin.

概 要

コンクリートにブリーディングや材料分離が生じると、充填不良などの初期欠陥が生じ、コンクリート構造 物の耐久性が低下する懸念がある。配合設計の段階で、コンクリートのブリーディングを予測するには、セメ ントや細骨材がその表面に拘束する水量を把握する必要がある。特に、細骨材は種類や産地が多様であり、表 面に拘束する水量を推定することは容易でない。本研究は、細骨材の物理試験で得られる物性値の情報を用い て、細骨材が拘束する水量を簡便に算出する方法について検討した。その結果、細骨材の種類や産地の違いに よらず、粒度分布、粒形および表面に付着している微粒分量を考慮した表面積と細骨材が拘束する水量との間 に線形関係があり、拘束する水量を推定できる可能性があることを明らかにした。

1. はじめに

コンクリート構造物は、適切な配合のコンクリートを 適切に打込み、充填できれば、耐久性の高い構造物とな る。しかし、ブリーディングや材料分離が生じ、充填不 良などの初期欠陥が生じると、コンクリート構造物の耐 久性は大きく低下する懸念がある^{1,2}。

初期欠陥を生じず,コンクリート構造物の品質を確保 するためには、ブリーディングの少ないコンクリート配 合を用いることが重要である。それを配合設計の段階で 予測することができれば、ブリーディングの少ない最適 な配合を提示することができると考える。ブリーディン グ水量を予測する研究は多く行われているが,配合設計 の段階で使用材料と配合条件などの情報から,簡易に予 測するには未だ課題が残る。

本研究は,配合設計の段階で使用材料と配合条件など の情報から,簡易にブリーディング水量を予測する手法 を構築するための一考察を示したものである。

1.1 拘束水の概念

ブリーディングを考えるうえで、フレッシュコンクリ



Fig. 1 コンクリート中の拘束水の概念図⁴⁾ Conceptual Diagram of Retained Water in Concrete

ート中の水は、フレッシュコンクリート中を自由に移動 できるか否かによって、自由水と拘束水に分類される³。 自由水とは、フレッシュコンクリート中において自由に 移動できる水のことである。拘束水とは、フレッシュコ ンクリート中における自由水以外の水で、セメントや骨 材などの固体粒子表面に吸着した水や、粒子径の小さい 粉体粒子間に拘束された水などのことである。Fig. 1に 拘束水の概念図を示す⁴)。ここでは、固体粒子間に拘束 される水も、固体粒子表面が拘束する水として考慮して いる。ブリーディングに伴い上昇する水は自由水であり、 ブリーディングを予測するには、セメントや細骨材がそ の表面に拘束する水量を把握する必要がある。そのため には、セメントや細骨材の表面積を適切に把握する必要 があると考える。既往の研究^{4)、5}では、セメントなどの 粉体はその表面に一定の水量を拘束する、すなわち粒径 の違いによらず、一定の厚さの水膜を拘束することが示 されている。粉体の凝集や分散を考慮した表面積を求め ることで、セメントの拘束水量が算出できる。一方、細 骨材は産地や製造方法が多種多様であり、その表面が拘 束する水量を把握することは容易ではない。

1.2 拘束水に関する既往の研究と本研究の位置づけ

既往の研究では、細骨材が拘束する水量を求める手法 として,次のような提案がなされている。上野ら⁶は, モルタルを遠心脱水試験し、その浮き水量を自由水とし て考えている。残った水量をセメントや骨材の粒子に拘 束する水量として,個々の粒子の表面積を考慮して算出 している。枝松ら^{7),8)}は,セメントペースト(以下ペー ストとよぶ)および細骨材の容積比を一定としたモルタ ルにおいて、水粉体容積比と相対フロー面積比との間に 直線関係が成立することを明らかにしている。そして文 献^{4), 5)}では、この関係から、細骨材がその表面に拘束す る水量と細骨材容積との比である拘束水比(βs)を求める 手法を構築している(Fig. 2)。この拘束水比(βs)に細骨材 の容積を乗じることで,細骨材が拘束する水量を算出で きる。しかし、これら手法は、細骨材の拘束水比を直接 的に測定する方法であり,細骨材の種類や産地が変わる たびに試験する必要がある。

そこで本研究では、細骨材の物理試験方法により得ら れる物性値の情報などを用いて、簡便に細骨材の拘束水 比を推定し、細骨材が拘束する水量を算出する方法につ いて基礎的に検討した。

2. 実験概要

2.1 細骨材の拘束水比の算出方法

細骨材の拘束水比に細骨材の容積を乗じることで、細 骨材が拘束する水量を算出できる。細骨材の拘束水比は、 文献^{4,5,7,8}において、以下の①~③方法で算出できる と提案されている。

- 水粉体容積比(V_w/V_p)を変化させたペーストおよびモルタルを用いて、フロー試験を行う。ここに、V_w:水の容積,V_p:粉体(セメント)の容積とする。
- ② 相対フロー面積比と水粉体容積比の関係から、その 傾きを変形係数(Ep, Em),切片をペーストおよび モルタルの拘束水比(βp, βm)とする(Fig. 2参照)。 ここで、変形係数(Ep, Em)とはペーストおよびモ ルタルが変形する際のペーストの変形しやすさの 程度を表すものである。拘束水比(βp, βm)はペー ストおよびモルタルが変形し始める時の水粉体容 積比である。
- ③ 細骨材の拘束水比(βs)は、以下の式(1)で算出する。



Fig. 2 細骨材の拘束水比の概念図⁴⁾ Conceptual Diagram of Restrained Water Ratio of Fine Aggregate

$$\beta_s = \frac{\left(\beta_m - \beta_p\right)\left(1 - V_s/V_m\right)}{V_s/V_m(1 + \beta_m)} \quad (1)$$

 $\beta_s: 細骨材の拘束水比$ $<math>\beta_m: モルタルの拘束水比$ $\beta_p: ペーストの拘束水比$ $V_s: 細骨材の容積$ $V_m: モルタルの容積$

 V_s/V_m :モルタル中の細骨材容積比

前提条件は、ペーストとモルタルそれぞれの相対フロ ー面積比と水粉体容積比の関係は直線関係であること、 およびペーストとモルタルの変形係数はおおよそ等しい こととする。この前提条件は、モルタルの細骨材容積比 (Vs/Vm)が 0.3 以下において成り立つことが既往の研 究で確認されている^{5),8)}。細骨材容積比が 0.3 以上にな ると、セメント粒子表面と細骨材表面に拘束される水量 の影響だけでなく、細骨材同士のかみ合いによる拘束が 生じるためである⁸⁾。

よって、本研究では細骨材容積比が 0.3 以下のモルタ ルを用いて、上記の提案されている方法で試験を行い、 細骨材の拘束水比を求めた。

2.2 実験で用いた細骨材

本研究では,産地の異なる砂2種類(以下,陸砂,山砂 という)と,砕砂を1種類用いた。使用した細骨材の物理 的性質をTable1に,粒度分布をFig.3に示す。

本研究では、細骨材の種類や産地の違いによる表面積 の違いが、拘束する水量に及ぼす影響を整理することを 目的とし、細骨材の検討項目を次の3点とした。

- 同一種類の砂で、粒度分布が異なる場合 ここでは、陸砂を用いて粒度分布を調整した。JISA 5308の粒度範囲の上限値に調整した粒度分布「細」、 下限値に調整した粒度分布「粗」、さらに各粒径の 上限値と下限値の中間に調整した粒度分布「中」の 3 種類を用いた。
- ② 粒度分布は一定で、砂の種類が異なる場合

細骨材	粒度	表乾	絶乾	吸水率	粗粒率	ふる	いを通る	るものの)質量百	分率	(%)	単位容	実積率	粒形判定
の種類	分布	密度	密度			5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	積質量		実積率
		(g/cm^3)	(g/cm^3)	(%)	(F.M.)	mm	mm	mm	mm	mm	mm	(kg/l)	(%)	(%)
	調整無	2.59	2.53	2.44	2.24	100	98	90	58	33	11	1.73	68.4	
「たってい	紿	2.59	2.53	2.44	2.10	100	100	90	65	35	10	1.66	65.5	58.0
座切	中	2.59	2.53	2.44	2.69	95	90	70	45	23	6	1.72	68.0	38.0
	粗	2.59	2.53	2.44	3.08	90	80	50	25	10	2	1.70	67.0	
山市	調整無	2.55	2.50	2.02	2.69	98	85	72	47	22	6	1.63	65.3	59 7
山仰	中	2.55	2.49	2.44	2.71	95	90	70	45	23	6	1.69	67.7	38.7
てわてい	調整無	2.88	2.84	1.49	3.08	100	86	58	30	13	4	1.86	65.6	59 5
和干尔少	中	2.88	2.81	2.44	2.68	95	90	70	45	23	9	1.97	69.4	38.5

Table 1 細骨材の物理的性質 Physical Properties of Fine Aggregate



The Particle Size Distribution of each Fine Aggregate Sample

ここでは,陸砂,山砂および砕砂を JIS 粒度範囲(陸 砂,山砂は JIS A 5308,砕砂は JIS A 5005 に従う) の中間とした粒度分布「中」に調整した試料を用い た。

③ 粒度分布を調整せずに、産地や種類が異なる場合 ここでは、陸砂、山砂および砕砂の粒度調整を行わ ない試料を用いて、これらを粒度「調整無」とした。 各試料の粒度分布は、ふるい分け試験の結果を用い た。

2.3 使用材料と配合

使用材料には,普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³,比表面積 3370cm²/g),水道水,および細骨材 3 種類(Table 1)を用いた。ペーストおよびモルタルの配合 は水セメント比を 35~55%の範囲で 5%ずつ変化させた 5 種類とし,モルタル中の細骨材容積比(Vs/Vm)は 0.2 で 一定とした。

ペーストおよびモルタルの練混ぜは,JIS R 5201-2015 「セメントの物理試験方法」に準じて行った。

2.4 検討の流れ

本研究では、以下の①~④の手順で検討を行った。

 各々の細骨材について、JIS に定められる骨材の物 理的試験(密度・吸水率試験(JIS A 1109-2006), ふる い分け試験(JIS A 1102-2006), 実積率(JIS A 1104-2009), 粒形判定実積率(JIS A 5005-2009))を実 施する。

- ② ペーストのフロー試験および各種細骨材を用いた モルタルのフロー試験を行い、0打フロー面積の測 定結果から細骨材の拘束水比を算出する。
- ③ 細骨材の実積率および粒形判定実積率と②で得ら れた細骨材の拘束水比とを比較する。
- ④ 細骨材の表面積を様々な方法で算出し、これと②で 得られた細骨材の拘束水比とを比較する。なお、表 面積の算出方法は、3.3節、3.4節、および3.5節で 述べる。

3. 実験結果および考察

3.1 細骨材の拘束水比の算出結果

算出した細骨材の拘束水比の結果をTable 2に示す。陸 砂において、粒度が細かくなるほど、拘束水比が大きく なることが分かる。細骨材の種類別にみると、陸砂、山 砂、砕砂の順で細骨材の拘束水比が大きくなることが分 かる。

3.2 実積率、粒形判定実積率と拘束水比の関係

各細骨材の実積率と拘束水比の関係をFig. 4に示す。 実積率は粒度分布の大小および砂粒の角張りを表現し た指標であるが、細骨材の拘束水比との関係性は認めら れない。また粒形判定実積率は、砂粒の角張りを評価す る指標であるが、Table 1から、各細骨材の粒形判定実積 率の差は小さく、細骨材の拘束水比との関係性は見いだ せなかった。細骨材の表面に拘束する水量を評価するた めには、細骨材の表面状態を表現する別の指標が必要と 考えられる。

3.3 細骨材を球体と仮定した表面積と拘束水比の関係

既往の研究^{4),5)}で示された粉体の拘束水量の算出方法 と同様に,細骨材の表面にも一定の厚さの水膜を拘束し, 細骨材の表面積に依存すると考え,細骨材表面の総面積 を算出する方法を検討した。まず,細骨材の粒形を球体 と仮定した。ふるい分け試験における各ふるい目の中間 値を粒径(R)として球体の表面積を算出し,細骨材1m³に おける粒径ごとの表面積を求め,その総和を細骨材の表 面積とした。各細骨材の粒径ごとの表面積の算出結果を Table 3に示す。これらの結果と,Table 2で得られた各々 の拘束水比との関係をFig.5に示す。

図を見ると、同じ陸砂で粒度分布が異なる場合は、表 面積が大きくなるほど、すなわち粒径の小さい砂が多い ほど、拘束水比も大きくなることが分かる。陸砂の粒度 分布を調整した粒度粗、中、細の3点で近似直線をひくと、 粒度分布を調整していない粒度調整無の陸砂も直線上に 位置することが分かった。この意味は、細骨材の種類お よび産地が同一であれば、ふるい分け試験の結果から粒 形を球体とした表面積を求めることで、細骨材の拘束水 比を算定できることを示しており、生コン工場の品質管

> Table 2 細骨材の拘束水比の算出結果 Calculation Result of Retained Water Ratio of Fine Aggregate

細骨材 の種類	粒度 分布	変形係数 Ep, Em	拘束水比 βp, βm	近似直線 相関係数 R ²	細骨材の 拘束水比 βs
ペースト	_	0.122	0.975	0.978	_
	調整無	0.127	1.039	0.999	0.125
はあってい	紿	0.126	1.050	1.000	0.147
PE 119	中	0.130	1.037	1.000	0.121
	粗	0.129	1.015	1.000	0.080
1 I I I I I	調整無	0.135	1.073	0.995	0.188
Щ 49	中	0.127	1.080	0.998	0.202
石九石小	調整無	0.122	1.105	0.999	0.248
11-119	中	0.137	1.131	0.995	0.293

₩Vs/Vm=0.2

ふるい目の中間

理手法として採用できる可能性があると考えられる。

一方,山砂や砕砂の拘束水比は,陸砂の近似直線上に は位置しておらず,細骨材の産地や種類が異なる場合に は、粒形を球体とした表面積の評価だけでは不十分で, 更なる考慮が必要と考える。







Fine Aggregate as Sphere and Retained Water Ratio

	Table	3	細骨材	を球	体とした場	帚合の	表面積の算	舏	結果(細	骨材	容積1	m ³ あたり)		
Calculation	Result	of	Surface	Area	Assuming	Fine	Aggregate	as	Sphere	(per	Fine	Aggregate	Volume	1m ³)

粒径	値を用いた粒径 R				表面積	$f(m^2/m^3)$			
(mm)	(mm)	陸砂 調整無	陸砂 細	陸砂 中	陸砂 粗	山砂 調整無	山砂 中	砕砂 調整無	砕砂 中
5~10	7.50	70	0	40	80	12	40	0	40
$2.5 \sim 5$	3.75	181	0	80	160	214	80	220	80
$1.2 \sim 2.5$	1.85	311	324	649	973	435	649	902	649
$0.6 \sim 1.2$	0.90	867	1667	1667	1667	1639	1667	1865	1667
0.3~0.6	0.45	2978	4000	2933	2000	3348	3000	2286	3000
0.15~0.3	0.225	8333	6667	4533	2133	4168	4400	2520	3733
0.15以下	0.075	3200	8000	4800	1600	5096	4800	3109	6800
面積総和	-	15939	20658	14702	8613	14912	14635	10902	15969

Table 4 粒形を考慮した半径増加率の算出結果 Calculation Result of Radius Increase Rate Considering Particle Shape of Fine Aggregate

		周長(2πr)の			長径と短径	半径増加率				
細骨材 種類	周長 ^{※1} (µm)	換算半径 ^{**2} r (µm)	長径 ^{**3} (µm)	短径 ^{**3} (µm)	の平均/2 ^{※4} r' (µm)	半径増 a'(=r/I	加率 ^{※5} ') /N1	N20の 平均 a	標準偏差	
ガナナト	9061	1442	3142	2521	1416	最小 1.02		1.04	0.026	
座砂	6943	1105	1682	2335	1004	最大	1.10	1.04	0.030	
山石	6263	997	1905	1580	871	最小	1.14	1.26	0.092	
山 11少	7780	1238	2030	1623	913	最大	1.36	1.20	0.082	
74.74	9881	1573 3103		2351	1364	最小	1.15	1.20	0.041	
117-119	12489	1988	4258	2145	1601	最大	1.24	1.20	0.041	

※1 試料N20個のうち半径増加率が最小,最大値の試料1個の周長の値。

※2 試料N20個のうち半径増加率が最小,最大値の試料1個の周長を2πで除した値(粒形を考慮した半径)。

※3 試料N20個のうち半径増加率が最小,最大値の試料1個の長径,短径の測定値。

※4 ※3の長径、短径の平均値の2分の1の値(粒形を考慮しない場合の半径)。

※5 試料N20個のうち半径増加率が最小,最大値の試料1個の半径増加率。



(a)陸砂

(b)山砂 Photo 1 細骨材の実体顕微鏡観察写真(20倍拡大) Stereoscopic Microscope Observation Picture of Fine Aggregate

3.4 細骨材の粒形を考慮した表面積と拘束水比の関係

前節の結果を踏まえ、細骨材の粒形を評価し、表面積 に反映することとした。細骨材は実際には表面に凹凸の ある多角形である。そこで、細骨材を球体とした場合の 表面積と粒形を考慮した場合の表面積とを比較した。粒 形を考慮した表面積の算出方法を以下の①~⑤に示す。

- 粒径1.2~2.5mmの各細骨材から20粒を無作為に抽出 し、実体顕微鏡(倍率20倍)で撮影する。観察する粒 径を1.2~2.5mmとしたのは、粒径判定実績率の試験 で用いる粒径であり、粒形の観察に適していると考 えたためである。また、試料数を20としたのは、文 献⁹において, N20個で信頼度95%を得られることに よる。各細骨材から抽出した20個の試料の観察結果 をPhoto 1に示す。
- (2)各試料の凹凸を捉えるように周囲をなぞり,周長を 測定する(Photo 2参照)。測定した周長を円(2πr)と して, 逆算した半径を求める。これを, 粒形を考慮 した場合の換算半径(r)とする。
- ②の同一試料で,長径と短径を測定し(Photo 2参照), (3)その平均値を球の粒径として半径を求める。これを, 粒形を考慮しない場合の半径(r')とする。
- (4)②および③両者の半径の比(r/r')を試料1個の半径



Photo 2 細骨材の周長および長径・短径測定の写真 Measurement of Circumference, Major Axis, and Minor Axis of Fine Aggregate

増加率(a')とする。

3.3節で検討したふるい目の中間値(R)を直径とした (5)粒径に④の半径増加率(a')のN20個の平均値(a)を乗 じたものを、粒形を考慮した粒径(R×a)として球の 表面積を求める。

陸砂、山砂、砕砂の3種類の細骨材から抽出したN20個 の測定値から得られた結果のうち、半径増加率(a')が 最小および最大値を示したものと、N20個の半径増加率 の平均値a,標準偏差をTable 4に示す。粒形を考慮した 粒径を用いた表面積の算出結果をTable 5に示す。これら

粒径	陸砂の粒形を 考慮した粒径 R×a(陸砂)		陸砂の (m ² /	表面積 ′m ^³)		山砂の粒形を 考慮した粒径 R×a(山砂)	山砂の (m ² /	表面積 ′m ³)	砕砂の粒形を 考慮した粒径 R×a(砕砂)	砕砂の (m ² /	表面積 m ³)
(mm)	(mm)	調整無	細	中	粗	(mm)	調整無	中	(mm)	調整無	中
5~10	7.80	75	0	43	87	9.45	19	64	9.00	0	58
2.5~5	3.90	196	0	87	173	4.73	339	127	4.50	317	115
1.2~2.5	1.92	337	351	702	1052	2.33	691	1030	2.22	1299	934
0.6~1.2	0.94	937	1803	1803	1803	1.13	2603	2646	1.08	2686	2400
0.3~0.6	0.47	3221	4326	3173	2163	0.57	5315	4763	0.54	3292	4320
0.15~0.3	0.234	9013	7211	4903	2307	0.284	6617	6985	0.270	3629	5376
0.15以下	0.078	3461	8653	5192	1731	0.095	8090	7620	0.090	4477	9792
面積総和	-	17240	22343	15902	9316	-	23675	23235	-	15699	22995

Table 5 細骨材の粒形を考慮した場合の表面積の算出結果(細骨材容積1m³あたり) Calculation Result of Surface Area in Consideration of Fine Aggregate Shape (per Fine Aggregate Volume 1m³)

の結果と、各細骨材の拘束水比との関係をFig. 6に示す。

Photo 1を見ると、山砂は陸砂に比べて角張りの大きい 粒形であり、砕砂は陸砂に比べて表面の凹凸が大きい粒 形である。Table 4の半径増加率aの値においても、陸砂 に比べて山砂と砕砂の値が大きい。本測定方法で算出し た表面積はある程度粒形を考慮できていると考えられる。 Fig. 6の拘束水比との関係を見ると、山砂と砕砂はFig. 5 に比べて表面積が大きくなり、特に山砂は3.3節で求めた 陸砂の近似直線に近づくことが分かる。本実験で用いた 陸砂と山砂は産地が異なるが、いずれも同じ天然の材料 である。よって,破砕等を行わない天然の材料であれば, 粒度分布および粒形を考慮した表面積から細骨材の拘束 水比を算出することができる可能性がある。一方、砕砂 は近似直線上に位置しておらず、表面積と拘束水比の関 係が認められない。砕砂のように破砕して製造する細骨 材の場合は、粒度分布および粒形を考慮した表面積だけ では拘束水比を算定できないといえる。破砕で生じる微 粒分を考慮しなければならないと考える。

3.5 細骨材の表面に付着した微粒分を考慮した表面積 と拘束水比との関係

3.5.1 細骨材の拘束水比の評価方法 砕砂のような 微粒分の多い細骨材の拘束水比を評価するために,細骨材の表面に付着した微粒分の重さを測定し,それらを表面積に考慮する方法を検討した。

3.5.2 表面積の算出方法

(1) 測定対象 ふるい分け試験により,ふるい目 0.075mm以下の微粒分を測定することはできるが,ふる い分け試験を行っても表面に付着する微粒分は残る。そ 着した微粒分を測定対象とした。

(2) 付着率の算出方法 砂粒の表面に付着した微 粒分(以下,付着微粒分という)の個数は砂の表面積に対 して一定であると仮定する(仮定①)。このとき,各粒 径の表面積は3.4節で求めた粒形を考慮した表面積を用 いる。まず,粒形判定実績率で用いる粒径1.2~2.5mmの 砂を用いて,単位表面積あたりの付着微粒分の個数(付 着率)を求めた。その算出方法を以下に示す。

まず,陸砂,山砂,砕砂の粒径1.2~2.5mmの細骨材を



Relationship between Surface Area and Retained Water Ratio Considering Particle Shape of Fine Aggregate

500g(絶乾状態)用いて, ふるい目0.6mmのふるいの上に試 料を置き, 水を張ったパレットの中で静かに水洗いする。 濁りがなくなるまで水洗いを繰り返し, 再び絶乾状態に する。その重さ*M*'_{1.2~2.5mm}を測定し, 500gからの重さ減 少分を付着微粒分の重さ*m*_{1.2~2.5mm}とする。

次に,付着微粒分を粒径0.075mm以下の微粒分と仮定 し(仮定②),3.4節と同様に,粒形を考慮した粒径(R ×a)を求めて,その球体の体積に各細骨材の調整無の絶 乾密度(Table 1)を乗じて,付着微粒分1個の重さ *m*_{n11-2-25mm}を求める。

付着微粒分の重さm_{1.2~2.5mm}を付着微粒分1個の重さ m_{n112~2.5mm}で除して付着微粒分の個数N_{m12~2.5mm}を求め る。

水洗い後の絶乾状態とした粒径1.2~2.5mmの砂の重 さ*M*′_{1.2~2.5mm}の表面積*A_{M′12~2.5mm}*に対する,付着微粒分 の個数を求める。これを付着率F(個/mm²)とし,以下の式 (2)で求める。

$$F_{1.2\sim2.5mm} = \frac{N_{m_{1.2\sim2.5mm}}}{A_{M'_{1.2\sim2.5mm}}}$$
(2)

F_{1.2~2.5mm}: 粒径1.2~2.5mmの砂の付着率 (個/mm²) N_{m1.2~2.5mm}: 粒径1.2~2.5mmの砂に付着した 付着微粒分の個数

A_{M'1.2~2.5mm}:付着微粒分を除いた粒径1.2~2.5 mmの砂の表面積

(3) 各粒径における付着微粒分量の算出方法 次に、0.15mm以上の他の粒径の付着微粒分量を求める。粒径1.2~2.5mmの砂から求めた付着率Fは0.15~5mmの他の粒径においても同値であると仮定し(仮定③)、前述で求めた付着率Fに0.15~5mmの各粒径における表面積を乗じて、付着する微粒分量を求める。以下の式(3)を解く。ただし、0.15mm以下の砂は、0.075mm以下の砂も含まれていることから、付着微粒分を算出せず、表面積は3.4節で求めた値とした。

$$F_{1.2\sim2.5mm} = F = \frac{\frac{m}{m_{n1}}}{A_{M'}}$$

$$= \frac{\frac{m}{m_{n1}}}{\frac{M-m}{M_{n1}} \times A_{M_{n1}}}$$
(3)

- F_{1.2~2.5mm}:粒径1.2~2.5mmの砂の付着率 (個/mm²)
- F:粒径0.15mm以上の任意の粒径範囲の砂の 付着率(個/mm²)
- m:任意の粒径範囲の砂に付着した微粒分の重
 さ(g)
- *m*_{n1}:付着微粒分の砂粒1個の重さの代表値 (g)
- A_M,:付着微粒分を除いた任意の粒径範囲の砂 の表面積
- M:ふるい分け試験で得られる任意の粒径範囲 の砂の重さ(g)
- *M*_{n1}: 任意の粒径範囲の砂粒1個の重さの代表値
 (g)
- A_{Mn1}:任意の粒径範囲の砂粒1個の表面積の代表値(mm²)

これを解くと、以下の式(4)となる。

$$m = \frac{F_{1.2\sim2.5mm} \times A_{M_{n1}} \times \frac{M}{M_n}}{\frac{1}{m_{n1}} + F_{1.2\sim2.5mm} \times \frac{A_{M_{n1}}}{M_n}}$$
(4)

なお、任意の粒径範囲の砂粒1個の重さの代表値 M_{n1} は、 3.4節で求めた粒形を考慮した粒径 ($\mathbf{R} \times \mathbf{a}$) 用いて、その 球体の体積に各細骨材の調整無の絶乾密度 (Table 1) を 乗じて求めた。また、任意の粒径範囲の砂粒1個の表面積 $A_{M_{n1}}$ は、3.4節で求めた粒形を考慮した表面積を用いた。



Fig. 7 細骨材の粒形および付着微粒分を考慮した 表面積と拘束水比の関係

Relationship between Surface Area and Retained Water Ratio Considering Particle Shape and Adhesion Fine Particles on the Surface of Fine Aggregate

(4) 付着微粒分量を考慮した表面積の算出方法 式(4)で求めた付着微粒分の重さmを除いた,各粒径の真 の重さM'を求める。各粒径の真の重さM'を各粒径の砂粒 1個の重さM_{n1}で除して,各粒径1個の表面積A_{Mn1}を乗じ ることで,各粒径の表面積が求まる。求めた各粒径の付 着微粒分の重さmの総和を各細骨材の付着微粒分量とし て,付着微粒分の表面積を求める。

なお、仮定①「付着微粒分の個数は表面積に対して一 定であること」および仮定③「粒径1.2~2.5mmの砂から 求めた付着率F は0.15~5mmの他の粒径においても同値 である」に関して、各細骨材の他の粒径2.5~5.0mmの試 料を用いて同様に水洗い試験を行い、付着率Fがおおよ そ等しいことを確認した。また、仮定 ②「付着微粒分を 粒径0.075mm以下とする」に関しても、水洗いで流出し た試料を採取し、乾燥後にふるい試験を行ったところ、 0.075mmのふるいを通過することを確認した。

3.5.3 表面積の算出結果と拘束水比 (2)の粒径1.2 ~2.5mmの砂500gのうち、付着微粒分の重さの測定結果 は, 陸砂0.3g, 山砂2.9g, 砕砂15.2gであった。付着率F(個 /mm²)はそれぞれ,陸砂6.2,山砂41.0,砕砂243.1となっ た。水洗いを行ったところ、陸砂は洗い水の濁りがなく、 山砂は若干の濁りがあり、砕砂は濁りが顕著であった。 実体顕微鏡で観察したところ、砕砂は水洗いで表面の白 い微粒分が洗い出され、微細な凹凸が観察できた。既往 の研究4), 5), 7), 8)において, セメントなどの粉体は表面に 水を拘束すると考えられている。細骨材の微粒分の粒径 も同程度であるため、その表面も水を拘束すると考える。 砕砂の表面には多くの微粒分が付着しており、これらの 微粒分が水を拘束することを考えると, 付着微粒分量を 算出して、表面積を求めることは妥当であると考える。

付着微粒分を考慮した各粒径の表面積の算出結果と,

各細骨材の拘束水比との関係をFig. 7に示す。Fig. 7から, 付着微粒分量の少ない陸砂では表面積はほとんど変化し ていないが,付着微粒分の多い砕砂の表面積は増加して いることがわかる。また,すべての細骨材が原点を通る 近似直線上に位置する結果が得られた。原点を通ること は,細骨材の表面積が0値の場合に,細骨材が拘束する水 も0値であることを示す。この近似直線を用いれば,粒度 分布に加え,粒形および付着微粒分量を考慮した表面積 を求めることで,拘束水比を推定することができる。

Fig. 7中に示す近似直線の決定係数R²は0.95であり,高い相関が得られた。このことは,細骨材は種類によらず, その表面に一定の水量を拘束している,つまり一定の厚 さの水膜を拘束していることを示すものと考える。水膜 の厚さは、近似直線の傾きであり,本研究結果では7.4 μ mとなる。

ー般的なコンクリート配合で、細骨材の拘束水量を求 めてみる。たとえば、細骨材として調整無の陸砂(拘束 水比 β sが0.125)を300L/m³(密度:2.59g/cm³,単位重量: 778kg/m³)用いる配合の場合、拘束水比に容積を乗じて 求めた拘束水量は37.5kgとなる。水膜の厚さが7.4 μ mで 一定であるとして、300L/m³の細骨材の表面積(調整無の 陸砂:17593m²/m³)を乗じて求めた拘束水量もおおよそ 同じ値である。既往の文献⁶において、モルタルの遠心 脱水試験で細骨材の拘束水量が求められているが、同様 の配合での細骨材の拘束水量は31kg/m³と求められてお り、おおよそ近い値となることが分かった。

以上より,細骨材の表面が拘束する水膜厚さが一定で あると考えた場合,細骨材の粒度分布,粒形および付着 微粒分量を考慮して表面積を求めれば,細骨材の拘束水 比が推定できると考えられる。その拘束水比に細骨材の 容積を乗じることで,細骨材が拘束する水量が求められ る。

4. まとめ

以下に、本研究で得られた主な結果をまとめて本論文 の結論とする。

- 細骨材の実積率および粒径判定実積率は、細骨材の 拘束水比との因果関係はない。
- 破砕等を行わない天然砂で、粒形が丸みを帯びている場合、粒子を球体と仮定して、粒度分布から表面積を求めることで、拘束水比を推定できる。
- 破砕等を行わない天然砂で、粒形が比較的角張っている場合、粒形を考慮した表面積を求めることで、 拘束水比を推定できる。

- 5) 細骨材の種類によらず、粒度分布、粒形および付着 微粒分量を考慮した表面積と拘束水比とは高い相 関があり、細骨材はその表面に一定の厚さの水膜を 拘束すると考えられる。

本研究で得られた,細骨材が拘束する水量の算定方法 を用いて,配合計画表と細骨材の物理試験結果から,細 骨材が拘束する水量を算出することができる。セメント が拘束する量は既往の研究^{4),5)}で算定方法が提案されて おり,それらを用いることで,単位水量のうちセメント と細骨材が拘束する水量がわかり,残りの自由水がブリ ーディング水に起因すると考えられる。今後,コンクリ

- ートの品質向上に関する管理手法について検討する。 参考文献
- 1) 日本コンクリート工学会:コンクリート技術の要点 16, pp. 60-61, 2016.9
- 2) 岩崎訓明: コンクリートの特性, 共立出版, pp. 38-4 3, 1975.12
- 日本コンクリート工学会:構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会報告書, pp. 5-6, 2017.6
- 4) 桜井邦昭,丸山久一,近松竜一:セメントの凝集や 細骨材による拘束水量を考慮したブリーディングの 予測モデル,土木学会論文集E2, Vol. 69, No. 3, p p. 295-308, 2013.8
- 5) 桜井邦昭: 材料分離抵抗性と流動性を適切に考慮で きるコンクリートの配合設計法の開発,長岡技術科 学大学博士論文,2014.3
- 上野敦,国府勝郎,宇治公隆:コンクリートの流動 性およびブリーディング性状に及ぼす粉体材料の影
 響評価に関する基礎検討,土木学会論文集,No. 725, Vol. 58, pp. 213-225, 2003.2
- 7) 枝松良展,山口昇三,岡村甫:モルタルフローにおける粉体と細骨材の役割と境界,土木学会論文集,N
 o. 571, Vol. 36, pp. 131-147, 1997.8
- 9) 吉村優治,小川正二:砂のような粒状体の粒子形状の簡易な定量化法,土木学会論文集,No. 463,Ⅲ-2
 2, pp. 95-103, 1993.3