

論文 細骨材の表面水率簡易測定方法に関する研究

中村 有吾^{*1}・清水 昭之^{*2}・今本 啓一^{*3}

要旨: 昨今コンクリートの単位水量管理が重要視される中で、コンクリート製造時における適切な細骨材表面水の管理が必要とされている。本研究では単純な原理に基づく安価で簡易な試験器具を用いながら、迅速且つ精度の高い試験として塩分濃度差法を提案し、その表面水率推定方法及び、実用性について検討した。この結果、塩分濃度差法は十分に活用できる方法であることがわかった。

キーワード: 細骨材, 表面水, 塩分濃度屈折計, 生産工程管理

1. はじめに

コンクリートの品質安定化のためには単位水量の管理が重要である。その単位水量の管理を難しくしている要因に細骨材表面水の変動がある。実際生コンプラントでは貯蔵時に刻々と起こる細骨材表面水率の変動に対し、その測定は多くのプラントで1日2~3回しか行われない¹⁾のが現状である。コンクリートの品質をより安定させるためには、表面水率の測定回数を増やして、変動に対応する必要がある。そのために、簡易で正確な表面水率測定方法の確立が望まれている。^{2), 3), 4)}

本研究ではひとつの答えとして、塩分濃度の希釈変化を用いて表面水率を推定する方法を提案する。この方法は、試験の簡易さ、迅速さに加え、試験に使用する器具が非常に安価であり、複雑な機械を用いないため維持管理が容易であるという点に特長がある。

本研究で提案する方法は、JISによる方法(JIS A 1125, JIS A 1111, 以下JIS法)をその簡易さ、迅速さで補うためのものであり、コンクリートの製造時の品質管理に活用できる方法の確立を目的としている。

2. 塩分濃度差法

塩分濃度差法とは湿潤状態細骨材に既定濃度の塩化物水溶液(以下、塩水)を混合したとき、骨材表面の水分量が塩分濃度の希釈と比例関係にあることを利用し、骨材表面水量を推定する方法である。仮に塩水濃度の希釈と骨材の表面水量が単純な比例関係にあるならば、塩分濃度差法によって推定される表面水率は以下の式(式1)で表される。

$$W_s = \frac{S \times (C_b - C_a)}{C_b} \quad (式1)$$

Ws: 塩分希釈水量 (g)、S: 塩水添加量 (g)、Cb: 塩水の初期濃度 (%)、Ca: 塩水投入後の上澄み液の濃度 (%)

*1 伊藤忠建材株式会社 工修 (正会員)

*2 東京理科大学工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

*3 東京理科大学工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)

2.1 塩分濃度差法に関する基本事項

(1) 試料(湿潤状態細骨材)量

JIS法との比較を行う観点から、試験における細骨材の試料量は200gとした。

(2) 試薬(塩水)濃度、試薬量

塩分濃度差を用いて精度よく水量を推定するためには、希釈前後の濃度差を可能な限り大きくする必要がある。特に骨材表面水という少量の水で塩水を希釈させる本試験に適用する場合は、試料に添加する塩水をできる限り高濃度かつ少量にすることが重要と考えられる。そこで、試薬濃度は溶解度に近く、同一濃度を安定して得やすい25.0%とした。

また、試薬塩水量については骨材200gの平均的な実積率⁵⁾から、試料全体にいきわたり且つ上澄み液も採取できる最低限の量を想定し70gとした。

(3) 塩分濃度測定機

水溶液中の塩分濃度測定には様々な方法があるが、化学反応を利用したものと塩素イオン濃度を電気的に測定するものに大別できると考える。しかしそれらの方法は計測濃度範囲が狭く、本研究で扱うような高濃度領域且つ濃度差の大きい環境を測定するには簡易性、安定性に難があった。そこで本研究では清水らがその研究の中で、高濃度の領域でも比較的精度が安定している濃度測定方法として採用した⁶⁾、光学的塩分濃度測定機(図1)を使用することとした。これは液体の屈折率を用いて濃度を測定するもので、今回実験で使用した塩分濃度屈折計は、光の屈折に影響する物質を0.1%(試料100g中のNaCl換算質量で表示)の精度で測定することができる。

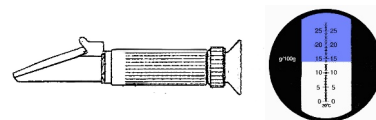


図-1 光学的塩分濃度測定機の例

(4)遠心分離機、遠心用チューブ

屈折計を用いた塩分濃度測定において攪拌直後の濁った塩水を試料とすると数値が読み難くなるため、濃度測定には懸濁分を沈殿させて得た上澄み液を使用する。本試験では試験時間短縮のため遠心分離機を用いることとした。

実験に使用した遠心分離機、遠心用チューブは市販のもの(図-2)で、仕様は以下の通りである。

- ・遠心分離機 遠心用チューブが設置できるもので、遠心加速度が 2000G 程度。
- ・遠心用チューブ 容量 1.5ml の微量遠心用チューブ。

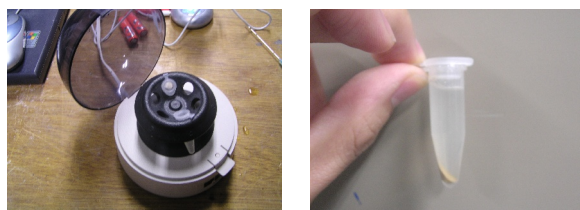


図-2 遠心分離機、遠心用チューブの例

2.2 塩分濃度差法の試験手順

- (1) 試薬は質量比で 25%塩化ナトリウム水溶液となるよう計量し、塩化ナトリウムの固体が確認できなくなるまで混合、溶解する。(試薬の準備)
 - (2) (1)で作成した試薬を屈折計で測定し、25.0%と読めるように屈折計の初期値を調整する。(屈折計の初期値調整)
 - (3) 広口容器に試料を入れ、質量(F)を 0.1g まで量る。
 - (4) 試薬液を容器に入れ、質量(S)を 0.1g まで量る。
 - (5) 試料と試薬を十分に混ぜ合わせるため、蓋をした容器を手を持ち、一方向に移動させ元の位置に戻す作業を 50 回以上行う。
 - (6) 濁った試薬液を採取し遠心チューブに移し、2000G の遠心力を 1~2 分程度加え、上澄み液の塩分濃度(Ca)を測定する。
 - (7) 算定式を用いて表面水率を求める。
- ※ 試験は 2 回行いその平均を試験結果とする。

3. 塩分濃度差を用いた表面水率試験の適用性確認実験

本実験では、塩分濃度差法を用いた表面水率試験の適用性を確認するとともに、塩分濃度差法の表面水率算定式についての検討を目的とする。

3.1 実験概要

2.2 (1)~(7)に示す手順に従い、塩分濃度差を用いた表面水率試験を行う。また同時に行った JIS 法(JIS A 1125, JIS A 1111)との比較検討を行う。なお 3.3 に示す塩分濃度差法の試験結果は(式 1)によって算定した塩分希釈水量を表面水量として考え、表面水率を推定している。

3.2 実験試料

実験の試料には大井川産水系の陸砂を用いた。表-1 に物性を示す。

表-1 骨材物性

吸水率(%)	表乾密度(g/cm ³)	絶乾密度(g/cm ³)	粗粒率
2.43	2.57	2.51	2.8

3.3 実験結果及び検討

縦軸に JIS A 1125 の試験結果、横軸に JIS A 1111 及び、塩分濃度差法の結果を置いた図を示す(図-3)。また、表-2 は具体的に JIS A 1125 による表面水率試験結果と JIS A 1111 及び塩分濃度差法による試験結果の差を表記したものである。

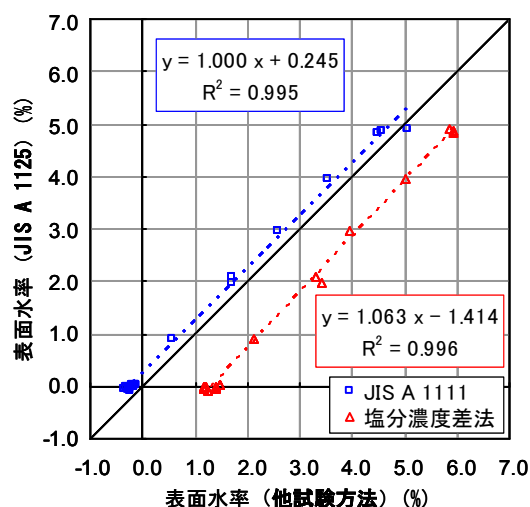


図-3 表面水率試験比較 (JIS A 1125 と JIS A 1111、塩分濃度差法)

表-2 表面水率試験比較 JIS A 1125との差

	JIS A 1111	塩分濃度差法
平均値(%)	0.3	1.2
標準偏差	0.09	0.17
試験数	18	18

JIS A 1125 と JIS A 1111 は非常に高い相関がみられるが、多少の差異も認められる。一方、JIS A 1125 と塩分濃度差法との関係にも高い相関がみられるが、全体的に塩分濃度差法は表面水率を過大に評価する。これは、塩分濃度希釈に表面水だけでなく骨材内部の水も影響したためと考えられる。すなわち、塩化物が骨材内部に入りこむことで希釈され、結果的に塩水全体の濃度が低下したと考えられる。しかし、この差は表面水率によらずほぼ一定であるため、塩分濃度差法においてはこの差を以降の検討で得られる表面水率算定式によって補正し、これにより簡易試験方法として提案する。

ここで、図-3 に塩分濃度差法の実験結果として示した 18 試料の湿潤細骨材 200 g あたりの含水量のうち、塩水

に希釈された水量（以下、希釈水量 (g/200g)）と希釈されなかったもの（以下、非希釈水量 (g/200g)）との関係を図-4に示す。細骨材含水量に関わらず、細骨材内部にはある一定の割合で非希釈水量が存在することがわかる。この非希釈水量と吸水量との差が JIS 法との差になるため、塩分濃度差法においてはこの値を評価することが重要になる。

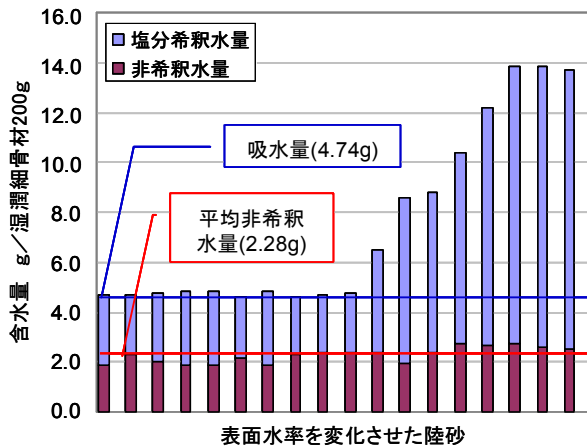


図-4 含水量中の非希釈水量

3.4 塩分濃度差法による表面水率算定式

塩分濃度差法を用いて JIS 法と同等の試験結果を得るためには、事前実験を行うことにより初期値を補正する必要があることが確認された。塩分濃度差法による表面水率 H_e の算定式を以下に示す、

事前実験により、非希釈水量 A を求める(式 2)。

$$A = Z' - Ws' \quad (式 2)$$

Z' : 含水量 (g), Ws' : 塩分希釈水量 (g),

A を用いて、実験試料の含水率 Z_s を推定する(式 3)。

$$Z_s = \frac{Ws + A}{F - (Ws + A)} \times 100 \quad (式 3)$$

Z_s : 塩分濃度差法で推定される含水率 (%), Ws : 塩分希釈水量 (g), A : 非希釈水量 (g), F : 細骨材試料質量 (g)

吸水率を用いて H_s を求める(式 4)。

$$H_s = (Z_s - Q) \times \frac{1}{1 + \frac{Q}{100}} \quad (式 4)$$

H_s : 塩分濃度差法で推定される表面水率 (%), Q : 吸水率 (%)

補正後の塩分濃度差法の値と、JIS A 1125 との差を表-3に示す。塩分濃度差法は補正することによって、JIS 法と同等の結果を得られることがわかる。以後、塩分濃度差法による表面水率はこの式を用いて求めることが本実験の範囲内では可能であると考え、以降において塩

分濃度差法の長所と思われる点について定量的な検討を行う。

表-3 表面水率試験比較 JIS A 1125との差

	JIS A 1111	塩分濃度差法
平均値(%)	0.3	0.1
標準偏差	0.09	0.09
試験数	18	18

4 塩分濃度差法の精度と迅速性

試験方法としての精度と迅速性について以下の 4.1~4.3 に示す項目について検証した。

4.1 試験自体の精度

25.0%の塩化ナトリウム水溶液 70.0g を、表面水率 5%の細骨材で希釈したとき(表面水のみ濃度変化に影響するとした場合)、その濃度変化は 3.0%であり、この濃度変化は希釈水量にすると 9.5g ($200 \times 0.05 / (1 + 0.05)$)となるので、この塩分濃度屈折計で読み取ることのできる水量は 0.3g ($9.5 / (0.03 / 0.1)$)となる。この量は細骨材表面水率に換算すると 0.17% ($0.3 / 190.5 \times 100$)となり、測定方法における読み取り精度は、表面水率の評価において、実用上十分な精度を与えると判定できる。

4.2 繰り返しの精度

JIS の表面水率試験は同時に採取した試料について 2 回行い、結果はその平均値である。そして、2 回の試験結果とその平均値からの差が 0.3%以下になるような精度が求められている。各表面水率試験における 1 回目と 2 回目の差を表-4に示す。塩分濃度差法における 2 試験間の差の平均は 0.1%で JIS A 1111 と同程度の値である。ここから、塩分濃度差法は JIS 法の基準を十分に満足する精度を有することがわかる。

表-4 繰り返し試験の差

試験法	試験数	繰り返し試験の差	
		平均値(%)	標準偏差
JIS A 1125	18	0.0	0.04
JIS A 1111		0.1	0.19
塩分濃度差法		0.1	0.08

4.3 試験者間の測定誤差・測定時間について

試験者間の測定誤差を表-5に示す。試験者は熟練者 A および未経験者 B, C で、表面水率の異なる 5 つの試料を用いて試験した。個人間の測定結果の最大の差は最大 0.3%で、平均 0.14%とその誤差は非常に小さい。試験者 B, C が未経験者であることを考えると、非常に簡易で安定した試験といえる。なお、測定誤差の原因としては個人間の屈折計濃度の読み取り誤差が挙げられる。デジタル表示ではないためどちらとも読めるような測定結果が出ることもあり、これが試験者間の差を生じた原因と思われる。

表-5 試験者間の測定誤差

試料	表面水率試験結果(%)				
	試験者A	試験者B	試験者C	最大差	平均
①	5.1	5.2	5.4	0.3	0.1
②	4.6	4.6	4.4	0.2	
③	2.5	2.5	2.6	0.1	
④	2.1	2.1	2.1	0.0	
⑤	0.9	0.8	0.8	0.1	

各試験者の測定時間を表-6に示す。どの試験者も1度経験すればその後の試験はスムーズに行え、1回目を除けば安定した測定時間になっている。早いものでは5分を切り、試験者によらず7分以内には行える方法である。この結果は実験室での測定とはいえ、JIS A 1125の試験時間が24時間以上、JIS A 1111でも1時間以上かかることから、塩分濃度差法は非常に迅速な試験方法といえる。

表-6 各試験者の測定時間

試料	表面水率試験結果(%)		
	試験者A	試験者B	試験者C
①	6分46秒	6分38秒	11分00秒
②	6分38秒	4分44秒	6分22秒
③	6分35秒	5分23秒	6分29秒
④	5分47秒	5分20秒	6分07秒
⑤	6分26秒	5分53秒	6分09秒
平均	6分23秒	5分29秒	7分39秒

5. 補正值の検討

3, 4において、塩分濃度差法はその精度、及び簡易性、迅速性からJIS法を補う試験方法としての有用性が示された。一方、塩分濃度差法は使用細骨材ごとに非希積水の影響を評価する必要があることが確認された。そこで5では細骨材種類と粒度が非希積水量に及ぼす影響について検証を行う。

5.1 検証実験結果 1 (細骨材種類の違いが塩分濃度差法に及ぼす影響)

本実験では様々な細骨材を用いて、さらに塩分濃度差法の適用性を確認するとともに細骨材間の非希積水量の違いについての検討を行う。

5.2 実験試料

実験試料は大きく天然砂、砕砂、スラグ、再生砂のグループに分けられ、計11種類の細骨材を使用した。表-7に物性を示す。吸水率で言うと0.89~3.75(%), 密度で言うと2.56~3.63(g/cm³)と非常に幅のある骨材を使用する。

表-7 骨材物性

試料	吸水率 (%)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	粗粒率	
天然砂	陸砂1	2.34	2.56	2.50	2.46
	陸砂2	2.91	2.64	2.57	-
	山砂	2.28	2.61	2.56	-
	川砂1	2.36	2.61	2.55	-
	川砂2	2.48	2.56	2.50	-
砕砂	砕砂1	0.89	2.66	2.64	2.52
	砕砂2	3.06	2.57	2.49	-
	石灰石	1.58	2.67	2.63	-
スラグ	EFS	1.05	3.63	3.59	2.46
	高炉スラグ	1.13	-	-	-
再生砂	3.75	2.56	2.47	2.51	

5.3 実験結果及び検討

図-6にJIS法と塩分濃度差法の関係を代表的な4試料について示す。どの細骨材を用いても傾きほぼ1の直線でその関係を精度良く表せる。他の細骨材を用いても同様の結果が得られた。

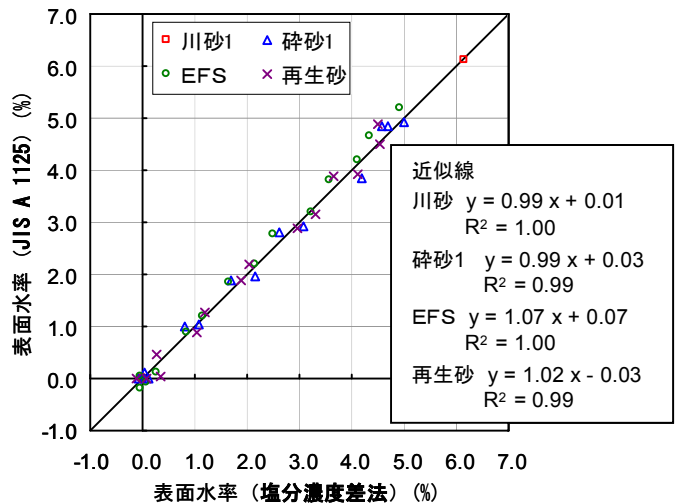


図-6 表面水率試験比較 (JIS A 1125と塩分濃度差法)

全ての細骨材についてのJIS法と塩分濃度差法による試験結果の差、及び、非希積水量を表-8に示す。

表-8 JIS法と塩分濃度差法の差、各細骨材の非希積水量

試料	試験数	JIS法との差 (%)		非希積水量 (g/200g)	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差
陸砂1	8	0.1	0.06	1.9	0.23
陸砂2	3	0.1	0.06	1.9	0.38
山砂	3	0.1	0.06	1.1	0.21
川砂1	3	0.0	0.01	1.2	0.09
川砂2	3	0.2	0.10	1.7	0.40
砕砂1	14	0.2	0.09	0.2	0.34
砕砂2	3	0.1	0.08	2.8	0.17
石灰石	3	0.2	0.05	0.4	0.34
EFS	14	0.2	0.08	1.0	0.28
高炉スラグ	3	0.1	0.09	1.0	0.45
再生砂	14	0.2	0.09	2.4	0.33

ここから細骨材ごとに非希積水量が異なること、しかし、この値を補正すれば塩分濃度差法は全ての細骨材に対して適用可能であることがわかる。

一方、各細骨材固有の非希積水量値を既知の物性から推定できるならば、事前実験を省略できるため、塩分濃度差法はより簡易な方法となる。そこで、いくつかの物性値と非希積水量の関係を調べた結果、吸水率と非希積水量の関係に最も相関がみられたため図-7に示す。

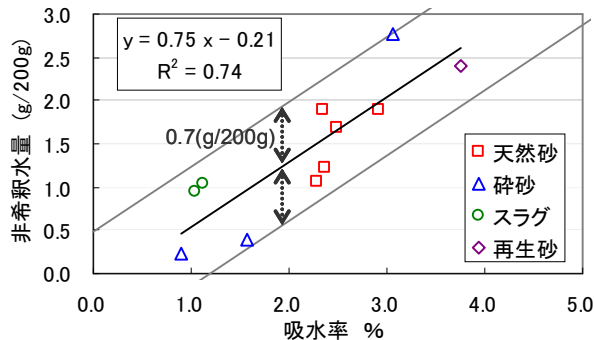


図-7 吸水率と非希積水量の関係

今回の実験の範囲においては、吸水率を用いた非希積水量の推定誤差はおよそ±0.7(g/200g)の範囲内に収まっている。この非希積水量の評価誤差による表面水率の評価誤差は0.4%程度と見込める。

JIS法と塩分濃度差法の差は、試験法自体の差が表-7より0.2%程度とわかるので、非希積水量の評価誤差と併せても最大0.6%程度である。更なる検討が必要ではあるが、塩分濃度差法は事前実験を行わない場合でもJIS法との差が0.6%以内で表面水率を推定できる可能性が示された。工場において、細骨材受け入れ時の大まかな表面水率の把握、またはそれ以降の表面水率変化の管理など、用途を限定すればこの簡易法でも対応できると思われる。

各細骨材の非希積水量の違いについては、細孔構造の違いが要因として考えられるため、全ての試験試料について水蒸気吸着試験を行った。水蒸気吸着試験とは、一定温度で相対湿度を変化させ試料に吸着する水量を測定するもので、試料内部の細孔はその細孔径によって水蒸気を吸着させる相対湿度が異なるため、試料の細孔径分布がわかる。具体的には低い相対湿度ほど小さな細孔径の情報が得られる。

相対湿度をそれぞれ50%、85%、99%とした時の水蒸気吸着量と非希積水量の関係を図-8に示す。相対湿度85%時に水蒸気吸着量と非希積水量の関係に最も相関がみられ、68.3Å(ケルビン式による)以下の細孔量と非希積水量の関係が考えられる。しかし、骨材表面に強く吸着した水は濃度希釈に寄与しないなど、他の要因も考えられるため非希積水量を骨材物性で一律に評価するに

は更なる検討が必要である。

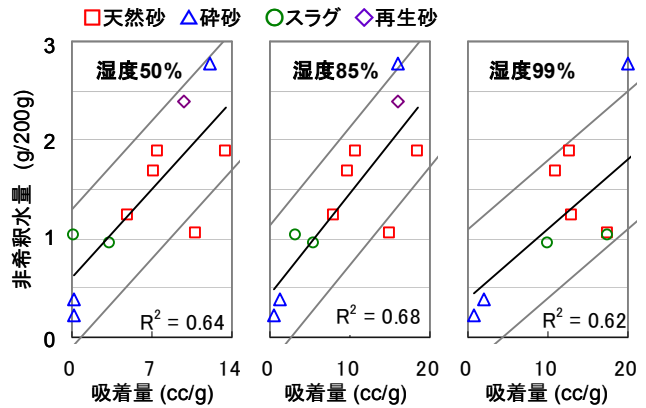


図-8 水蒸気吸着量と非希積水量の関係

5.4 検証実験結果 2 (細骨材粒度が塩分濃度差法に及ぼす影響)

本実験は塩分濃度差法における初期補正值の変動要因として細骨材粒度を取り上げ、塩分濃度差法に及ぼす影響について検証する。

5.5 実験概要

一般的に粒度は粗粒率を用いて表されるが、粗粒率が同じであってもその粒度分布は種々ある。そこで本実験では単粒度の細骨材を試料として粒度の影響を検討した後(5.2)。代表的な粒度分布の細骨材をいくつか用いて、実際に使用が想定される範囲で粒度の影響の有無を検討する(5.3)。

5.6 実験試料(単粒度細骨材)

細骨材は実験1と同様、大井川産水系の陸砂を用いた。この砂を粒度ごとに分けるため、ふるいの目開き寸法が0.15、0.3、0.6、1.2、2.5mmのふるいにかけて各粒度の砂を集める。各ふるいの上に残ったものを0.15、0.3、0.6、1.2、2.5mmの単粒度とした。

5.7 実験結果及び検討

各粒度の試料200gあたりの非希積水量を表-9に示す。

表-9 含水量中の非希積水量(単粒度)

試料	試験数	非希積水量 g/200g	
		平均	標準偏差
0.15mm	9	1.15	0.62
0.3mm	11	1.36	0.67
0.6mm	8	1.32	0.51
1.2mm	12	1.66	0.54
2.5mm	12	2.19	0.53

この試験結果は単粒度の細骨材を使用したため、細かいものでは塩水がうまく混ざりきらないことや、粒度の大きいものでは表面水の保持能力が低いなど、ばらつきも大きくなってしまった。しかし、傾向としては粒度が大きいもの、特に2.5mmは他の粒度のものに比べ非希積水

量が大きくなる可能性がみられた。

粒度ごとの非希積水量の違いの原因としては、細孔構造の違いや、骨材表面に強く吸着した水の影響などが考えられるが、これについては今後の検討課題である。

5.8 実験試料(粒度分布の異なる細骨材)

使用骨材物性を表-10に示す。

表-10 骨材物性

試料	吸水率 %	表乾密度 g/cm ³	粗粒率	200gあたりの各粒度ふるい残留質量							
				ふるい寸法 mm	5	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.15-
砂A	2.5	2.6	2.0	質量 g/200g	0.0	0.4	22.4	47.1	61.9	45.5	22.7
砂B	2.4	2.6	2.3	0.0	0.0	50.8	40.2	43.4	47.5	18.1	
砂C	2.5	2.6	2.7	0.0	0.0	85.6	29.7	32.4	35.0	17.3	
砂D	2.4	2.6	2.8	0.0	33.7	42.2	33.4	36.1	39.5	15.1	
砂E	2.5	2.6	3.1	0.0	29.4	57.3	51.3	38.0	17.1	6.9	

コンクリートに使用する細骨材粒度の中で、最も細かい上限の砂Aと、中間粒度の砂D、最も粗い下限の砂Eという3種の試料に加え、2.5mmの細骨材が非希積水量を大きく変化させると考えられたため、2.5mmが無混入で、他の粒度は中間粒度と同じ割合の砂B、および粗粒率がほぼ同じでも2.5mmが入っていない砂Cを用意した。

5.9 実験結果及び検討

粗粒率と非希積水量の関係を図-9に示す。また、単粒度の実験から得られた値を用いて、計算的に非希積水量を求めた結果を併せて記す。

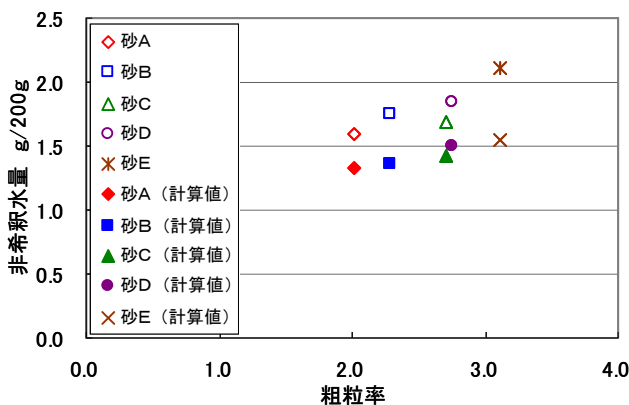


図9 粗粒率と非希積水量の関係

実験値をみると単粒度の時と同様、粒度によって非希積水量が変化することがわかる。また、実験値と単粒度の実験結果を用いた計算値を比較すると、非希積水量に0.3~0.6(g/200g)程度の違いがあった。これは、単粒度の実験にばらつきが多かったことや、0.15mm以下のものに関しては実験が成り立たずデータが得られなかったことが原因として考えられる。しかし細骨材間の非希積水量の差には同様の傾向がみられた。粒度の違いが塩分濃度差法に及ぼす影響は、粒度分布の違いでおおよそ推

定できる。しかし、極端な粒度である上限(砂A)、下限(砂E)の非希積水量の差は0.52(g/200g)。この差が表面水率に及ぼす影響は、細骨材の表面水率に比例して大きくなるが、仮に表面水率が5%であっても0.29%である。よって、粒度の違いが塩分濃度差法に及ぼす影響は小さい。

実用的な範囲においては中間粒度の非希積水量を補正值に使うことで、どの粒度の細骨材を用いても、JIS法と比較した時の誤差を許容範囲内に収めることができる。

6 まとめ

コンクリートの製造時の品質管理の向上を目的として、塩分濃度差法を用いた表面水率試験について検討した結果、以下のことが明らかになり、塩分濃度差法の有用性が確認された。

- (1) 事前実験により初期値(非希積水量)を補正することによってJIS法と同等の結果を得られる。
- (2) 迅速且つ簡易で個人差の生じにくい試験方法であるため、コンクリート製造時の表面水率管理に活用できる。
- (3) 事前実験を行わない場合でも表面水率を0.6%以内の誤差で推定できる可能性がある。
- (4) 細骨材粒度の違いが塩分濃度差法に及ぼす影響については、許容範囲内である。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：高流動コンクリート施工指針，土木学会，コンクリートライブラリー，No.93，pp.179-209，1998.7
- 2) 上野敦ほか：細骨材の電気抵抗値による吸水率決定方法の適用性評価，セメント論文集，pp.264-269，2000
- 3) 佐藤嘉昭他：コンクリート用細骨材の表乾状態の判定法に関する研究，セメント論文集，pp.214-219，1992
- 4) 加賀秀治他：遠心力による細骨材の表乾状態調整方法，コンクリート工学年次論文報告集，11-1，pp.25-30，1989
- 5) 建材試験センター：コンクリート骨材試験のみどころ・おさえどころ，工文社，pp.15-16，1996
- 6) 清水昭之，梅津裕二：コンクリート中の水量推定のための簡易試験方法に関する研究(その1)，日本建築学会学術講演梗概集，pp.1331-1332，1986.8