

論文 減圧吸水による細骨材の密度および吸水率測定に関する基礎的研究

黒井登起雄^{*1}・松村 仁夫^{*2}・宮澤 伸吾^{*1}

要旨： 細骨材の密度および吸水率の測定は、JIS A 1109に規定される『フローコーン』によって『表面乾燥飽水状態』を再現して行われ、この状態を含水分の基準にしている。著者らは、含水分の基準を細骨材の絶乾状態とすることが適切と考え、『減圧による注水の始まる点を表乾状態に相当する骨材の境界面と判定する』新しい試験方法を提案した。本研究では、細骨材の『見掛けの絶対容積の経時変化』に及ぼす減圧圧力および細骨材の種類の影響を実験するとともに、各種細骨材の密度・吸水率測定に、減圧吸水による絶対容積の変化から求める方法を適用し、精度の高い測定が可能であることを明らかにした。

キーワード： 細骨材、密度、吸水率、見掛けの絶対容積、減圧吸水法

1. まえがき

コンクリート用細骨材は、1960年代からの川砂の枯渇に伴い、海砂、山砂、碎砂が多く使用されるようになってきている。また、近年、高炉スラグ、フェロニッケルスラグ、銅スラグなど産業副産物もJIS化され、一部ローカルな地域で使用されてきている。このように多様化した細骨材の密度および吸水率の測定は、JIS A 1109（細骨材の密度及び吸水率試験方法）に規定する方法により行われている。すなわち、密度は、表乾状態を再現し、メスフラスコを用いて置換法によって求めている。吸水率も密度と同様に、表乾状態の質量と絶乾状態の質量との差から算定している。いずれも、『フローコーン』によって表乾状態を再現して行われている。この方法は、表面水がある場合にコーン状に成形した細骨材が水の表面張力により崩れにくくなる性質を利用したものである。しかし、0.15mm以下の微粒分の多い、粒度に片寄りのある、丸い粒形である、あるいは、表面に微細な空隙が多いなどの場合は、湿潤状態の細骨材の吸水分と表面水の判別が粒径の違いによって異なる（粒子が細かいほど保水性が高くなる）などのために、『フローコーン』による表乾状態

の判定が困難となり、細骨材の密度、吸水率が精確に求められなくなる。これは、水分の基準として細骨材の表乾状態を採用していることに起因している。そこで、著者らは、絶乾状態を細骨材の水分の基準とすることに着目し、減圧圧力による注水の始まる点を表乾状態に相当する骨材表面（以後、表乾相当状態と云う）と考える新しい試験方法を提案するとともに、『減圧による見掛けの絶対容積の経時変化』に及ぼす減圧圧力および細骨材の種類の影響を実験によって検証した^{1~2)}。また、各種細骨材の密度および吸水率測定に、減圧吸水による絶対容積変化から表乾相当状態の絶対容積を求める方法を適用し、この方法の有効性も検証した。

2. 減圧吸水による細骨材の見掛けの絶対容積測定

2.1 測定の考え方

絶乾状態の細骨材の見掛けの絶対容積 V_s は、図-1 に示すように、容積計に一定量の試料と水を入れ、減圧による圧力差によって容積計中の気泡の除去と試料の注水を行ったときの加えた水の量 V_w から、置換法によって求めることができる。容積計の全容積を V とすれば、細骨

*1 足利工業大学助教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 足利工業大学教務職員 工学部土木工学科 （正会員）

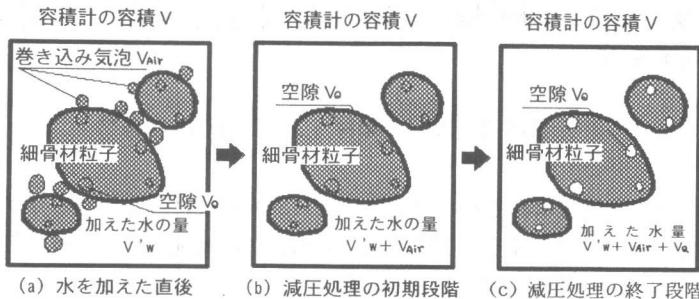


図-1 細骨材の絶対容積測定の概念図

材の絶対容積は、式[1]から算定できる。

$$V_i = V - (V'w + V_{Air} + V_p) \cdots \cdots [1]$$

ここで、 $V'w$ は、試料中に気泡と空隙が存在するときの容積計に加えた水の量である。 V_{Air} は、試料と水を混ぜたときの巻き込み気泡で、 V_p は、細骨材の空隙（吸水量に相当）である。

巻き込み気泡を除去したときの見掛けの絶対容積は、細骨材の表乾状態の見掛けの絶対容積に相当する。絶乾状態の試料を用いて、絶対容積を測定する場合、その値は、減圧圧力による細骨材の注水実験で得られる『減圧処理時間と見掛けの絶対容積との関係』（図-2）から求めなければならない。なお、細骨材により巻き込まれる気泡は、コンクリートのエントラップトエアーと同様に $100\mu\text{m}$ 程度以上の比較的大きい径を持つと考えられ、減圧圧力によって容易に取り除くことができるものと予想される。

2.2 測定手順

絶乾状態の細骨材の見掛けの絶対容積を求める場合、減圧圧力によって水の膨潤が起こるので、加えた水の量の容積は、容積目盛で読み取るよりも、質量測定で求める方が容易となる。その試験手順および算定式は、以下に示す。

- (1) 試料は、乾燥炉で絶乾状態にし、その質量 (W_0) を正確に測定する。
- (2) メスフラスコの一定の目盛り線まで水を入れ、質量 (W) を正確に測定する。このとき水温を測定し、水の密度 γ_{w1} を求める。フラスコの質量を W_0 とする。フラスコの容積 (V) は、式[2]から求める。

$$V = (W - W_0) / \gamma_{w1} \cdots \cdots \cdots [2]$$

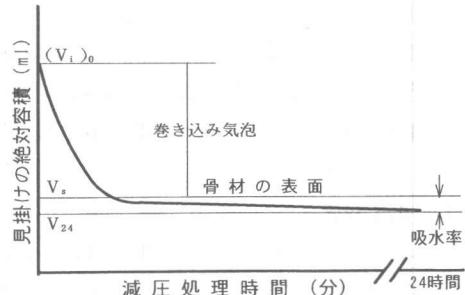


図-2 減圧処理時間と絶対容積との関係

- (3) メスフラスコに試料を入れ、さらに目盛り線まで水を加えた後、その質量 (W_{s+w}) を正確に測定する。なお、試料、水およびフラスコは、同一温度にし、水温を測定しておく。フラスコに加えた水の量 ($V'w$) は、式[3]から求める。

$$V'w = (W_{s+w} - W_0 - W_d) / \gamma_{w2} \cdots \cdots [3]$$

- (4) 試料と水を入れたフラスコを一定温度($20 \pm 3^\circ\text{C}$)で、所定の減圧圧力に設定した減圧処理を開始する。所定の処理時間経過ごとに水を目盛り線まで加え、その質量 (W_{s+w}) を正確に測定する。フラスコに加えた水の量 (V_w) は、式[4]から求める。

$$V_w = (W_{s+w} - W_0 - W_d) / \gamma_{w3} \cdots \cdots \cdots [4]$$

- (5) 試料の見掛けの絶対容積 (V_i)₀ および (V_i)_t は、 $\gamma_{w1} = \gamma_{w2} = \gamma_{w3}$ のとき、式[5]および式[6]から求める。

$$(V_i)_0 = V - V'w = \{(W - W_0) / \gamma_{w1}\} - \{(W_{s+w} - W_0 - W_d) / \gamma_{w2}\} = W - W_{s+w} + W_d \cdots \cdots \cdots [5]$$

$$(V_i)_t = V - V_w = W - W_{s+w} + W_d \cdots \cdots \cdots [6]$$

3. 見掛けの絶対容積測定の実験検証

3.1 実験目的

『減圧処理時間と細骨材の見掛けの絶対容積との関係』に及ぼす減圧圧力、試料量の影響および細骨材表面の判定方法を実験的に調べた。

3.2 使用材料、実験器具および実験方法

試料は、大井川産川砂（絶乾密度； 2.58 g/cm^3 、吸水率；1.46%（JIS試験による値））、鬼怒川産川砂（絶乾密度； 2.56 g/cm^3 、吸水率；2.14%（JIS試験による値））およびフェロニッケルスラグ細骨材〔電炉水碎〕（絶乾比重； 2.81 g/cm^3 、吸水率；0.73%（JIS試験による値））の3種類の細骨材とした。試料は、絶乾状態にした後に1.2mm以上と1.2mm未満に分ける分け、その量は約200gとした。一部の試験においては、10, 30, 50および100gの試料量についても行った。メスフラスコは、主に250mlのものを用いた。試料量が10～100gのときに、100mlのメスフラスコも用いた。減圧処理は、真空定温恒温器（（株）いすゞ製作所製 SVK-12PS）を用いた。減圧圧力は、-93.3kPa、-90.7kPaおよび-86.7kPaとした。なお、処理時間90分が経過した後は、吸水時間を短縮するため、-101.3kPaとした。処理時の温度は、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ とし、時間は、10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180分および24時間とした。

3.3 結果および考察

（1）見掛けの絶対容積測定の実験検証

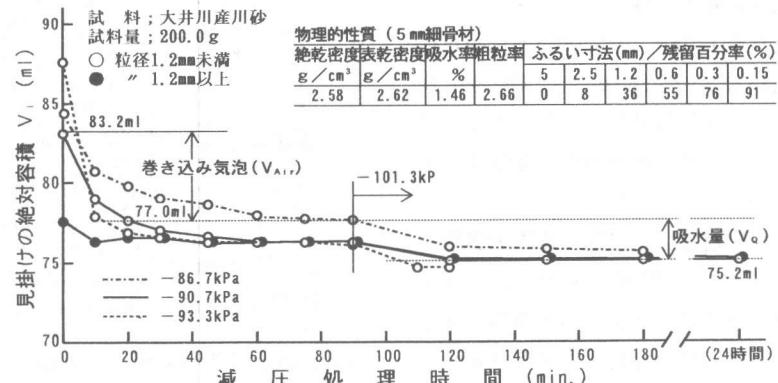


図-3 減圧処理時間と細骨材の見掛けの絶対容積との関係（大井川産川砂）

図-3は、減圧圧力を-93.3kPa、-90.7kPaおよび-86.7kPaとして実験したときの減圧処理時間と見掛けの絶対容積との関係を示す。

図-3より、粒径1.2mm未満の試料の見掛けの絶対容積は、減圧圧力が-90.7kPa以上のときに巻込み気泡が急速に除去されるため、処理時間30分程度まで急速に減少し、その後、24時間まで吸水域となるために、絶対容積は、緩やかに減少する。容積が緩やかに減少する部分は、細骨材の吸水域に当たるものと考えられる。また、粒径1.2mm以上の場合、巻き込み気泡が非常に少なく、それが約10分で急速に除去され、見掛けの絶対容積は、その後緩やかに減少する。この傾向は、鬼怒川産川砂およびフェロニッケルスラグの場合も同様である。

以上より、圧力-90.7kPaで巻込み気泡を処理すれば、試料の見掛けの絶対容積の経時変化における変曲点が得られる。この変曲点は、骨材の固体表面と判定できると考えられる。

（2）骨材の固体表面の判定

『処理時間と細骨材の見掛けの絶対容積との関係』の変曲点は、巻き込み気泡の減圧圧力による除去段階から注水段階に変わる部分と考えられる。また、この点は、骨材の固体表面を判定するうえで重要である。図-4は、処理時間90分までの3種類の細骨材（粒径1.2mm未満）の見掛けの絶対容積曲線から計算した容積の減少速度と処理時間との関係を示す。図より、絶対の減少速度は、処理時間20～30分まで急速に小

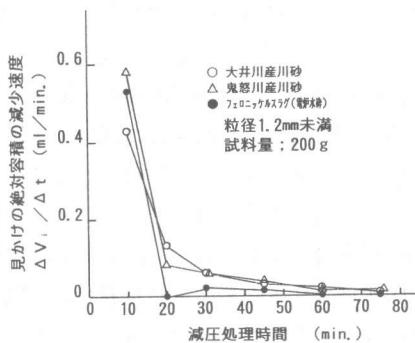


図-4 処理時間と絶対容積の減少速度との関係

さくなり、大きい径の巻き込み気泡は、この時間までに大部分除去されることが分かる。このときの見掛けの絶対容積は、骨材の固体表面における絶対容積、すなわち『表乾相当状態』と判定した骨材の絶対容積であると考えられる。また、表-1は、JIS A 1109に準じた（絶乾状態の細骨材使用）試験で求めた見掛けの真密度に及ぼす吸水時間の影響を示す³⁾。表より、密度は、24時間以上の吸水によって飽和状態となるため、一定の値になる。しかし、微細な空隙を多く含むフェロニッケルスラグ細骨材などは、48~72時間の吸水時間を要するようである。24時間あるいは48時間吸水後の絶対容積は、細骨材の実積部分の容積に非常に近づいていると考えられる。したがって、細骨材の吸水量は、骨材の固体表面における絶対容積と24時間あるいは48時間吸水後の絶対容積の差から求めることができる。

(3) 細骨材試料量の影響

図-5は、粒径1.2mm未満の試料の見掛けの絶対容積と試料量(10~200g)との関係を示す。図より、見掛けの絶対容積は、試料量が変わっても、減圧圧力による注水実験から精度よく測定できることが明らかである。

(4) 細骨材の密度および減圧吸水率の算定

表-2は、圧力-90.7kPaで処理したときの初期段階(処理時間10~60分)の細骨材の見掛けの絶対容積から求めた細骨材の密度(絶乾、表乾)および減圧吸水率を示す。表より、密度

表-1 細骨材の密度と吸水時間との関係

細骨材の種類	吸水時間/見掛けの真密度(g/cm ³)*		
	24 h	48 h	72 h
川砂(大井川産)	2.67	2.67	2.68
	2.67	2.67	2.67
	2.67	2.67	2.67
川砂(鬼怒川産)	2.71	2.71	2.71
	2.70	2.70	2.70
	2.70	2.70	2.71
海砂(長浜町産)	2.69	2.71	2.70
	2.69	2.70	2.70
	2.69	2.69	2.69
F N S B'	2.88	2.90	2.92
	2.88	2.90	2.91
	2.90	2.91	2.92
F N S D	2.93	2.93	2.94
	2.94	2.94	2.93
	2.93	2.93	2.94
F N S D	2.94	2.95	2.95
	2.95	2.96	2.96
	2.94	2.96	2.96
C U S C-25S	3.61	3.61	3.62
	3.61	3.61	3.61
	3.61	3.61	3.61
C U S C-12S	3.59	3.60	3.60
	3.59	3.59	3.59
	3.60	3.60	3.60

* 絶乾状態の試料500.0gを用い、JIS A 1109に規定する方法に準じて求めた試験値

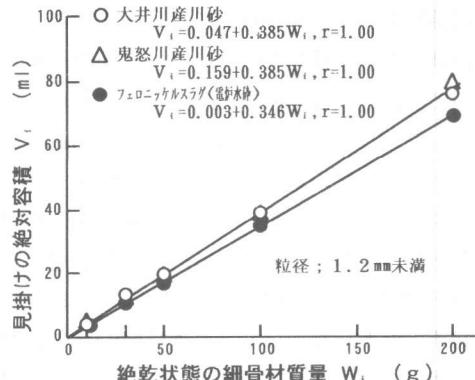


図-5 試料量と見掛けの絶対容積との関係

表-2 容積から求めた細骨材の物理的性質

減圧処理時間(分)	粒径の構成比<1.2mm≤	減圧吸水率(%)		密度(g/cm ³)**	
		<1.2mm≤	5mm	絶乾	表乾
10	0.64 : 0.36	1.85 : 0.50	1.36	2.56	2.60
20	"	1.20 : 0.65	1.00	2.59	2.62
30	"	0.90 : 0.65	0.75	2.60	2.62
45	"	0.70 : 0.50	0.63	2.61	2.63
60	"	0.55 : 0.55	0.55	2.62	2.64
大井川産川砂*		---		(1.46)	(2.58)
10	0.60 : 0.40	2.15 : 0.90	1.65	2.57	2.60
20	"	1.75 : 0.90	1.41	2.59	2.62
30	"	1.45 : 0.90	1.23	2.60	2.62
45	"	1.15 : 0.85	1.03	2.62	2.63
60	"	1.05 : 0.85	0.97	2.63	2.64
鬼怒川産川砂**		---		(2.14)	(2.56)
10	0.28 : 0.72	1.00 : 0.95	0.96	2.91	2.94
20	"	1.00 : 0.95	0.96	2.91	2.94
30	"	0.90 : 0.90	0.90	2.92	2.94
45	"	0.80 : 0.90	0.87	2.92	2.94
60	"	0.80 : 0.95	0.91	2.91	2.94
フェロニッケルスラグ(鉱粉)*		---		(0.73)	(2.81)

* 5mm細骨材

** ()内の値は、JIS A 1109の方法による密度および吸水率

および減圧吸水率の値は、処理時間30分以降の変化が小さくなる傾向が認められる。これは、

注水が処理時間30分程度から始まることを示し、このときの絶対容積を細骨材の減圧吸水率の基準値と考えてもよいと思われる。この方法で求めた密度および減圧吸水率は、JIS A 1109の方法で測定した値に比べ、密度が若干大きく、吸水率がかなり小さくなる傾向にある。これは、含水分の基準の違いの影響が大きいと思われる。

4. 減圧吸水法による各種細骨材の密度および吸水率の測定

4.1 使用材料および実験方法

試料は、洗砂（六ヶ所村産）、川砂（鬼怒川産）、山砂（青森県産、千葉・君津産）、ダム堆砂（秋田県産、青森県産）、碎砂（飯渕産、葛生産〈硬質砂岩〉）、火山灰（島原産）の普通細骨材9種類に、フェロニッケルスラグ細骨材（電炉風碎B'、電炉水碎D）2種類と銅スラグ細骨材（CUS 1.2S）1種類を加えた、合計12種類とした。減圧吸水法による測定は、以下に示す条件で行った。

① 試料は、絶乾状態の細骨材（粒径5.0mm未満、約500g）とした。② メスフラスコは、容量

500mlとした。③ 減圧処理は、真空定温恒温器を用い、時間は、10, 20, 30, 45, 60, 75, 90, 120, 150, 180分および24時間とした。④ 圧力は、開始90分まで、-90.7kPaとし、その後は、-101.3kPaとした。⑤ 処理時の温度は、約20°Cとし、試料の個数は、3個とした。

表乾密度 d_s 、絶乾密度 d_d および減圧吸水率 Q (%) は、式[7], [8], [9]によって求めた

$$d_s = (W_d + V_a) / V_s \quad \dots \dots \dots [7]$$

$$d_d = (W_d) / V_s \quad \dots \dots \dots [8]$$

$$Q = (V_a / W_d) \times 100$$

$$= \{(V_s - V_{24}) / W_d\} \times 100 \dots \dots \dots [9]$$

ここで、 W_d は絶乾状態の試料の質量 (g), V_a ($= V_s - V_{24}$) は注水量 (ml), V_s は巻き込み気泡が除去されたときの絶対容積 (ml) である。また、 V_{24} は、24時間間減圧吸水後の絶対容積 (ml) である。

比較のため、JIS A 1109法の試験も行った。

4.2 結果および考察

(1) 見掛けの絶対容積と骨材表面の判定

細骨材の見掛けの絶対容積は、巻き込み気泡が初期の約30分までに除去され、その後、緩や

表-3 減圧吸水法による密度および減圧吸水率試験の結果

細骨材の種類	表乾相当密度 ¹⁾ (g/cm ³)	絶乾密度 ¹⁾ (g/cm ³)	減圧吸水率 ¹⁾ (%)	真密度 ²⁾ (g/cm ³)
六ヶ所村産(洗砂)	2.62/0.02 [2.62]	2.58/0.02 [2.58]	1.50/0.27 [1.46]	2.68
鬼怒川産(川砂)	2.63/0.01 [2.60]	2.59/0.02 [2.56]	1.65/0.29 [1.76]	2.70
青森産(山砂)	2.68/0.01 [2.64]	2.64/0.00 [2.62]	1.47/0.09 [2.96]	2.75
君津産(山砂)	2.59/0.01 [2.57]	2.56/0.01 [2.56]	1.49/0.14 [1.38]	2.66
秋田産(ダム堆砂)	2.59/0.01 [2.48]	2.56/0.01 [2.36]	1.55/0.14 [4.89]	2.66
青森産(ダム堆砂)	2.58/0.01 [2.40]	2.54/0.01 [2.22]	1.58/0.07 [7.90]	2.64
飯渕産(碎砂 ²⁾)	2.63/0.02 [2.61]	2.60/0.02 [2.58]	1.36/0.25 [1.14]	2.67
葛生産(碎砂 ²⁾)	2.65/0.01 [2.55]	2.61/0.01 [2.50]	1.26/0.07 [1.19]	2.71
島原産(火山灰)	2.51/0.01 [2.47]	2.47/0.01 [2.45]	1.86/0.14 [3.01]	2.59
F N S B' (電炉風碎)	2.88/0.01 [2.94]	2.83/0.01 [2.91]	1.95/0.09 [1.13]	2.99
F N S D (電炉水碎)	2.93/0.01 [2.88]	2.90/0.01 [2.86]	1.07/0.02 [0.72]	2.99
C U S C (1.2S)	3.50/0.02 [3.61]	3.46/0.02 [3.60]	1.09/0.09 [0.22]	3.60

*1 結果は、平均値/標準偏差を示した。また、〔〕内の数値は、JIS A 1109「細骨材の密度及び吸水率試験方法」にしたがって求めた密度、吸水率を示す。

*2 見掛けの真密度である。 *3 岩種は、硬質砂岩である。

かに減少する。この傾向は、洗砂、川砂、ダム堆砂、碎砂、火山灰などにおいても、同様である。図-6は、巻き込み気泡の除去判定に使用した容積の減少速度と時間との関係の一例（ダム堆砂（秋田県産、青森県産））を示す。図より、産地および種類の異なる細骨材においても、容積の急激な減少が20分で終了し、この時間を表乾状態の絶対容積とすることができます。

(2) 細骨材の密度および減圧吸水率

表-3は、減圧吸水法により求めた細骨材の密度および減圧吸水率の測定結果（平均値／標準偏差）を示す。表より、減圧吸水法で求めた

表-4 試験値（密度、吸水率）に及ぼす各種要因の影響

要 因 - 水 準		JIS A 1109の場合	減圧吸水法の場合
粒子形状	角ばっている	影響大（密度を小さくする、吸水率を大きくする）	影響小
	表面が凹凸である	影響大（密度を小さくする、吸水率を大きくする）	影響小
	球状粒子が多い	測定困難	影響小
粒 度	0.15mm以下の微粉が多い 不連続である	影響大（密度を大きくする、吸水率を小さくする） 影響大（密度を小さくする、吸水率を大きくする）	影響大（密度を小さくする、吸水率を大きくする） 影響小

密度および減圧吸水率は、川砂、洗砂などの場合、JIS A 1109の方法による値とほぼ同じである。しかし、他の細骨材の場合、産地、種類の違いの影響を受け、JIS A 1109の方法による値とかなりの違いが認められる。すなわち、密度および吸水率は、粒子形状（角張りがある、球状である、凹凸がある）および粒度（微粒分が多い、不連続である）などの影響により、減圧吸水法による値とJIS A 1109の方法による値との間にかなりの違いが認められる。試験値に及ぼす粒子形状、粒度などの影響は、主に細骨材の表乾状態の判定、すなわち、吸水の水分過剰、または過少の判定に起因し、表-4のようになるものと考えられる。また、普通細骨材の場合、減圧吸水法による真密度 d_r [= W_d / V_{24} により算定] は、青森産ダム堆砂と島原産火山灰がそれぞれ 2.64 g/cm^3 および 2.59 g/cm^3 で、若

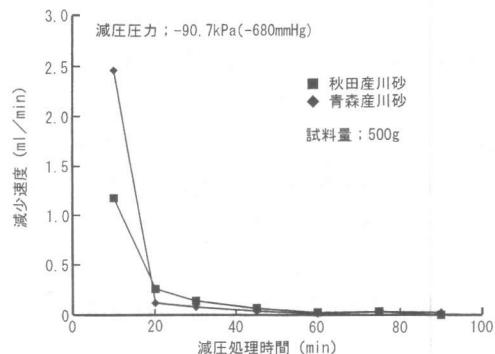


図-6 処理時間と容積の減少速度との関係
(ダム堆砂(秋田産、青森産)の場合)

干小さいが、大部分 $2.66 \sim 2.75 \text{ g/cm}^3$ の範囲にあり（表-3）、本実験で使用した細骨材は、堅硬な石質であると考えられる。したがって、今後は、粒子表面の特性（形状、凹凸、空隙の形成など）および粒度分布を調べ、減圧吸水法による密度および吸水率測定の有用性を詳細に検討する必要がある。

5.まとめ

細骨材の水分の基準を絶乾状態とし、減圧による注水の始まる点を表乾相当状態と判定する試験方法を提案するとともに、減圧圧力、試料量、細骨材の種類の影響および骨材固体面の判定方法などを検証した。その結果、 -90.7 kPa の減圧処理で得られる絶対容積の経時変化の変曲点から、細骨材の密度および減圧吸水率を高精度に測定できることが明らかにできた。

参考文献

- 黒井、松村；減圧吸水による細骨材の見掛け容積測定法に関する基礎研究、第23回関東支部技術研究発表会講演概要集(土木学会), pp. 626-627, 1996.3
- 松村、黒井；細骨材の比重・吸水率測定における減圧吸水法の適用、第51回年次学術講演会講演概要

- 集(土木学会), pp. 196-197, 1996.9
- 3) 松村、黒井；比重試験によるスラグ混合率の測定方法の提案、第25回関東支部技術研究発表会講演概要集(土木学会), pp. 812-813, 1998.3