

論文 砂充填法による硬化コンクリートの密度試験に関する基礎的研究

田中 ころろ^{*1}・菊池 史織ラニヤ^{*2}・尾崎 風香^{*3}・緒方 英彦^{*4}

要旨: 硬化コンクリートの密度の測定方法は JIS で規定されておらず、密度を求めるために必要な体積は便宜的にノギス法や浮力法で測定されている。しかしノギス法では、劣化などにより表面形状が一定でない場合において体積を正確に測定することができない。また浮力法では、ひび割れなどの影響で吸水する場合において体積を正確に測定することができない。そこで本研究では、これらの問題点を解決するために、新たな密度測定方法として砂充填法を開発することにした。その結果、砂充填法に使用する充填砂が密度の測定に及ぼす影響を明らかにし、本手法の実用性を明らかにした。

キーワード: ノギス法, 浮力法, 充填砂, 珪砂, 陸砂

1. はじめに

現在、硬化コンクリートの密度の測定方法は、ISO 1920-5 (Testing of concrete- Part5: Properties of hardened concrete other than strength) (3種類の体積計算によって硬化コンクリートの密度を求める方法) や ASTM C 642-97 (Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete) (コンクリート供試体を浸漬し、煮沸することで密度を求める方法) では規定されているものの、JIS では規定されていない。そのため密度は、便宜的にノギス法 (ノギスを用いて測定した供試体の各辺の長さから供試体の体積を求める方法) や、浮力法 (空気中における供試体の質量と水中における供試体の質量の差から供試体の体積を求める方法) により求められている。しかしこれらの手法は、劣化による剥離やひび割れが原因で、表面形状が一定でない供試体や吸水する供試体の測定には適さない。また、供試体の表面状態や吸水状態によっては、ノギス法と浮力法で測定結果に違いが生じることが懸念される。

ノギス法による供試体寸法の測定方法には、JIS A 1108 : 2006 (コンクリートの圧縮強度試験方法) と JIS A 1107 : 2012 (コンクリートからのコアの採取方法および圧縮強度試験方法) がある。

JIS A 1108 では、型枠で作製する供試体の直径および高さはそれぞれ 0.1mm および 1mm まで測定することが規定されている。また直径は、供試体の中央で互いに直交する 2 方向について測定することが規定されている。一方、JIS A 1107 では、コンクリートから採取したコア供試体の高さは最大値と最小値とを $\pm 1\%$ 以内の精度で測定し、その平均値とすることが規定されている。また供試体の平均直径は、コア供試体の上下端面付近および

高さの中央付近で互いに直交する 2 方向の直径を $\pm 1\%$ 以内の精度で測定することが規定されている。つまり、JIS 基準では、型枠で作製した供試体と採取したコア供試体において寸法の測定方法が異なることがわかる。特にコア供試体を対象にした JIS A 1107 では表面形状の不均一に留意していることが伺える。

一方で、浮力法は、JIS A 1110 : 2006 (粗骨材の密度および吸水率試験方法) を参考に実施されており、この基準では、供試体の気中質量と水中質量を測定する際に 0.1g まで測定することが規定されている。また、JIS A 1107 では、供試体の質量を 0.1% 以内の精度で測定することが規定されている。このことから、ひび割れなどがあり吸水・排水しやすい供試体の場合は、気中質量と水中質量の測定が精度良く行えないことが懸念される。

田部¹⁾らは、試験方法の違いによるコンクリート供試体の体積のばらつきについて検討し、標準養生において水セメント比が小さいコンクリートほど水和反応で生成した空隙に水が十分に吸収されないために空隙が水中で浮力として測定され、水中質量が実際よりも小さく測定されることを明らかにしている。また、供試体の体積のばらつきの度合いは、供試体の作製方法によって異なり、特にコンクリートから採取したコア供試体は、供試体表面の凹凸の影響を受けやすいため、ばらつきが大きくなることを明らかにしている。さらに、松村²⁾らは、硬化コンクリートの密度試験について検討し、乾燥過程および湿潤過程におけるコンクリートの密度は体積の測定方法 (ノギス法や浮力法)、水セメント比などによって変化することを明らかにしている。

これらを前提に本研究では、ノギス法や浮力法ではなく、土質分野における JIS A 1214 : 2013 (砂置換法によ

*1 鳥取大学 農学部生物資源環境学科 (学生会員)

*2 鳥取大学 大学院持続性社会創生科学研究科 博士前期課程

*3 鹿島道路株式会社 技術研究所

*4 鳥取大学 農学部生物資源環境学科 教授 博士 (農学) (正会員)

表-1 充填砂の概要

種類	内容	粗粒率	吸水率 (%)
珪砂	セメント強さ試験用標準砂として使用されるもの	2.25	0.42
陸砂	鳥取県産陸砂で2mmふるいを通し、75 μ mふるいに95%残留するもの	1.61	1.59
ブレンド砂	陸砂において粗粒率1.61で0.15mmふるいを通すものを10%含むもの	1.61	1.59

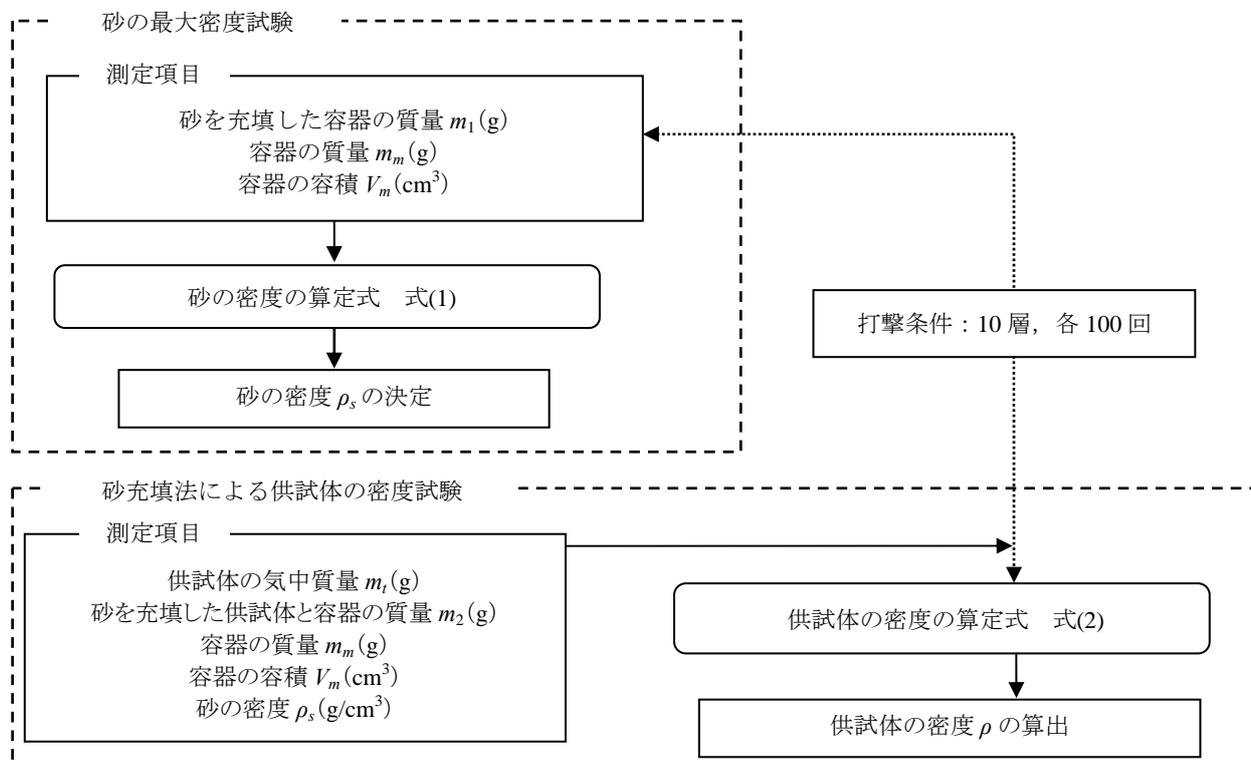


図-1 砂充填法による密度試験のフロー図

土の密度試験)をベースに、硬化コンクリートの新たな密度測定方法として砂充填法の開発を行うことにした。これは、容器に砂のみを充填した質量と、容器に供試体と砂を充填した質量をそれぞれ測定し、質量差を砂の密度で除して供試体の体積を求める方法である。

本研究では、砂充填法に使用する充填砂の違いが測定密度に及ぼす影響の検討とノギス法や浮力法に代わる試験方法として利用できるかの実用性について検証した。用いた充填砂は気乾状態の珪砂、陸砂、粒度の調整を行った陸砂(ブレンド砂)の3種類である。充填砂の概要を表-1に示す。珪砂と陸砂の粒度の違い2種類で試験を行うことで砂の粒度が砂充填法の結果に及ぼす影響について比較できるようにした。測定に用いた供試体は体積がほぼ同じで密度が異なる供試体と、密度が同じで体積が異なる供試体である。本研究では珪砂を用いた試験をシリーズ1、陸砂を用いた試験をシリーズ2、粒度の調整を行った陸砂(ブレンド砂)を用いた試験をシリーズ3とする。

2. 砂充填法による密度試験の概要

砂充填法で用いる器具は、容器としてフレッシュコンクリートの空気量試験で用いられるワシントンエアメータの容器(内径:204.5mm,高さ:213mm)、砂をすくうボウル、振動締固めのための木槌、容器に満たした砂を容器の縁で平坦に均すためのストレートエッジ、0.1gまで測れるはかりである。ここで、容器にワシントンエアメータの容器を用いた理由は、コンクリートを扱う技術者に広く普及しており、木槌による打撃にも耐えるものであるからである。

砂の充填方法としては、10層で砂を充填することとし、1層充填することに100回(25回×4方向(90°ごと))の水平打撃を木槌で加え、砂を均一に締固める。この10層、100回の打撃条件は、層数と打撃回数を変えて実施した砂の最大密度試験結果を踏まえ、最終的にJIS A 1224:2009(砂の最小密度・最大密度試験方法)と同じに設定した。

砂充填法による密度試験の流れを図-1に示す。本方



(a) 1層目充填後 (b) 6層目充填・打撃後 (c) 10層目打撃前・余盛 (d) 10層目打撃・すり切り

写真-1 砂充填法における作業手順および砂の充填状況



(左 : No.1-1, 中 : No.1-2, 右 : No.1-3)

(a) 密度の異なる3種類の供試体



(左 : No.2-1, 中 : No.2-2, 右 : No.2-3)

(b) 体積の異なる3種類の供試体

写真-2 コンクリート供試体

法は、試験者によって打撃エネルギーが異なることを考慮し、充填する砂の最大密度試験と供試体の密度試験の2段階で構成されている。

まず、砂の最大密度試験の測定項目は、砂を充填した容器の質量 m_1 、容器の質量 m_m 、容器の容積 V_m である。 m_m と V_m は、砂を充填する前に測定する。 m_1 は、容器の10層目まで砂を充填し終えたときの質量である。ここまでの測定結果で砂の密度 ρ_s を式(1)で求める。

$$\rho_s = \frac{m_1 - m_m}{V_m} \quad (1)$$

次に供試体の密度試験を行う。この試験の測定項目は、供試体の気中質量 m_t 、砂を充填した供試体と容器の質量 m_2 、容器の質量 m_m 、容器の容積 V_m 、砂の密度 ρ_s である。 m_t は、あらかじめ測定しておき、 m_m 、 V_m 、 ρ_s は、砂の最大密度試験の測定結果を用いる。

供試体の密度試験では、1層目は容器に砂のみを充填させる。これは、供試体底面の空隙まで砂を充填させるためである。2層目からは供試体を入れ、その上で砂の最大密度試験と同様に10層目まで砂を充填する。最後に質量を測定する。これが m_2 である。供試体の密度 ρ は、最終的に式(2)で求める。

$$\rho = \frac{m_t}{V_m - \frac{m_2 - m_m - m_t}{\rho_s}} \quad (2)$$

供試体の密度試験の作業状況を写真-1に示す。(a)は、1層目充填後である。この段階では供試体を入れていないことから砂のみの充填である。(b)は、試験途中の6層目充填・打撃後である。打撃を加えていくと供試体

が少しずつ上に浮いてくる場合があるので、供試体の上面を手で押さえるなど、容器内に供試体が収まるよう注意する必要がある。(c)は、10層目打撃前・余盛の状態である。このように余盛をしておくことで、充填後に砂が不足することがないようにしている。(d)は、10層目打撃・すり切り後の状態である。ここでストレートエッジを用いて容器の縁で余盛した砂をすり切る。

3. 珪砂を用いた試験

シリーズ1は、砂充填法の充填砂に珪砂を使用した場合である。試験には、密度が異なり体積がほぼ同じ供試体3本と、密度がほぼ同じで体積が異なる供試体3本を使用した。密度測定は、砂充填法に加えてノギス法、浮力法でも試験を行うことで、試験方法間での違いを比較できるようにした。

3.1 供試体の概要

コンクリート供試体は、写真-2に示す異なる配合で作製した体積がほぼ同じで密度が異なる直径100mm、高さ200mmの円柱供試体3本(No.1-1~No.1-3)と、同じ配合で作製した密度が同じで体積が異なる直径150mm、高さが100mm、150mm、200mmの円柱供試体3本(No.2-1~No.2-3)である。No.1-1~No.1-3の供試体は、鳥取大学農学部基盤造構学研究室において長期材齢試験用に保管されていたものであり、配合は不明である。一方、No.2-1~No.2-3の供試体の示方配合は、表-2のとおりである。セメントは普通ポルトランドセメント(密度3.15g/cm³)を使用し、細骨材(密度2.59g/cm³、吸水率1.59%、F.M.1.83)ならびに粗骨材(密度2.59g/cm³、吸

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					水	セメント	細骨材	粗骨材
20	8	60	2.0	41.6	191	318	746	1,033

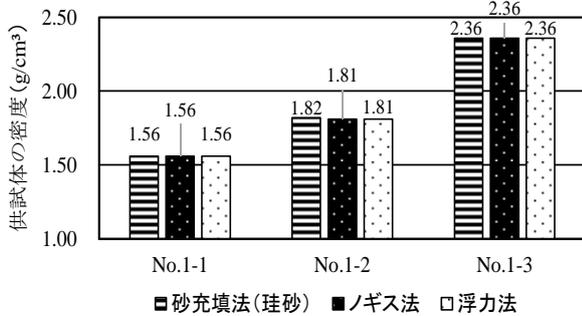


図-2 密度の異なる3種類の供試体 (シリーズ1)

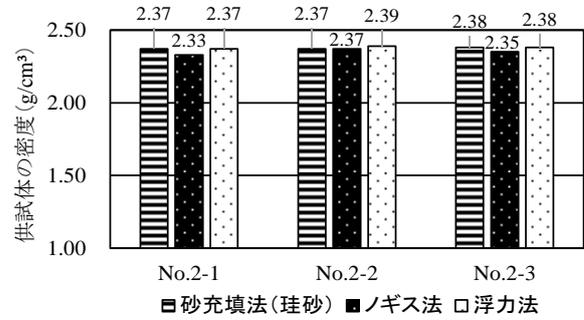


図-3 体積の異なる3種類の供試体 (シリーズ1)

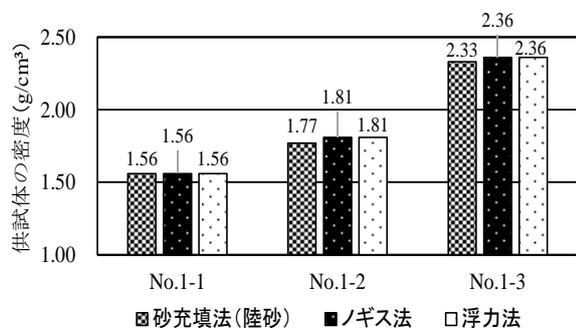


図-4 密度の異なる3種類の供試体 (シリーズ2)

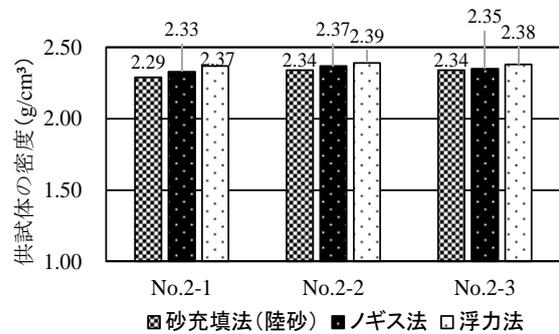


図-5 体積の異なる3種類の供試体 (シリーズ2)

水率 1.62%, F.M.6.68) は鳥取県産を使用した。試験に用いた供試体は、材齢1年以上経過したものである。

供試体は、水温 20±1℃の水中養生していたものを測定直前に水槽から取り出し、表面水を布でふき取った後、速やかに試験に使用した。

3.2 試験結果および考察

図-2は、密度の異なる3種類の供試体の測定結果である。これは、異なる測定者による3回の測定値の平均値である。以降の結果も同様である。砂充填法による供試体の測定密度はノギス法と浮力法にほぼ同値となった。このことから、砂充填法の実用可能性が示された。

図-3は、体積の異なる3種類の供試体の測定結果である。砂充填法では、供試体に関わらずほぼ一定の測定値が得られた。ノギス法および浮力法において測定値にばらつきが生じたのは、供試体表面の微小な不陸や細かい空隙が各辺の長さや水中質量の測定に影響していたと考えられる。

4. 陸砂を用いた試験

シリーズ2では珪砂より身近な砂でも砂充填法が実施

可能であるのか検証するため、細骨材でもある陸砂を用いて試験を行った。試験では、シリーズ1と同様に測定直前まで水中養生していた密度が異なり体積がほぼ同じ供試体3本と、密度がほぼ同じで体積が異なる供試体3本を使用した。

4.1 試験結果および考察

図-4は、密度の異なる3種類の供試体の測定結果である。供試体の測定密度は、No.1-1では全て同じ測定値が得られたが、その他ではノギス法と浮力法が同じであるのに対して陸砂による砂充填法は小さく求められた。この原因は、供試体の密度を求める式(2)から考察することができる。式より砂が十分に充填されていなければ、質量 m_2 が小さくなり、砂の体積 $((m_2 - m_m - m_i)/\rho_s)$ が小さくなる。そして砂の体積が小さくなることで、式(2)の分母で求められる供試体の体積が大きくなり、結果的に供試体の密度が小さくなる。つまり、砂充填法で密度が小さく求められたのは、容器と供試体との間の砂が十分に充填されなかったことが原因であると考えられる。

図-5は、体積の異なる3種類の供試体の測定結果である。供試体の測定密度は、密度の異なる供試体と同様

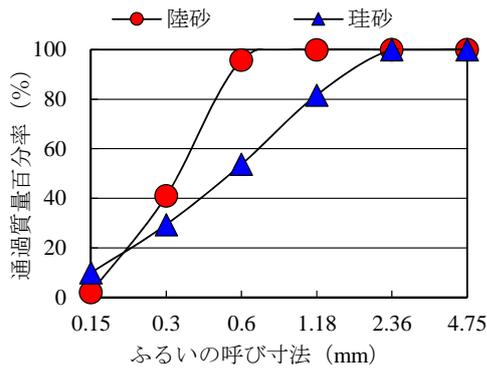


図-6 珪砂と陸砂の粒径加積曲線

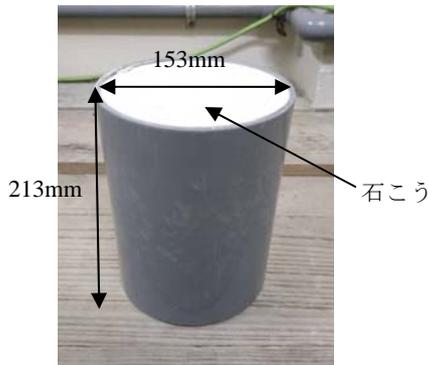


写真-3 塩ビ管供試体

に、陸砂による砂充填法はノギス法と浮力法よりも小さく求められた。

シリーズ1とシリーズ2の結果には珪砂と陸砂の粒度の違いが影響していると考えられた。充填砂の粗粒率について考察を加える。充填砂の粗粒率は、珪砂が2.25、陸砂が1.61であり、陸砂の方が粗粒率から言えば小さいため、充填されやすいと考えられる。しかし今回は、珪砂の方が十分に充填された。このことから、充填砂の粒径について検討を行った。

4.2 砂の粒径の検討

図-6は、珪砂、陸砂の2種類の砂の粒径加積曲線を示したものである。この図の0.15mmの値に注目すると0.15mmを通過する砂の割合は、陸砂において2%であるのに対して、珪砂では10%である。このことから0.15mm以下に限定した場合、珪砂の方が細かい粒子を多く含んでいることが分かる。つまりシリーズ1、2で珪砂の方が十分に充填されたのは、珪砂では、供試体表面の微小な不陸や細かい空隙まで砂が充填されるが、陸砂では、供試体表面の微小な不陸や細かい空隙まで十分に充填されなかったため、前述の式(2)を用いた考察と同様に陸砂での測定密度が小さく求められたと考えられる。この理由を検証するため、写真-3に示す塩ビ管に石こうを詰めた供試体(以下、塩ビ管供試体とする)を用いて試験を

表-3 塩ビ管供試体での密度試験結果 (g/cm³)

砂充填法(陸砂)	0.99
ノギス法	1.00

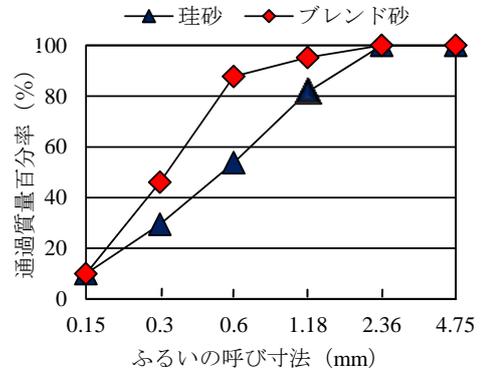


図-7 珪砂とブレンド砂の粒径加積曲線

行った。

表-3は、塩ビ管供試体を用いて行った陸砂での砂充填法、ノギス法の試験結果である。表面が滑らかで、各辺の長さが均一である塩ビ管供試体では、砂充填法の測定密度は、ノギス法とほぼ近値となった。この結果から、表面が滑らかで各辺の長さが均一であれば陸砂でも密度測定が十分可能であるが、表面が不均一な供試体の場合は、供試体表面の微小な不陸や細かい空隙まで砂が十分に充填されるように細かい砂の割合を増やす必要があることが示唆された。

5. 粒度の調整を行った陸砂を用いた試験

シリーズ1、2の結果から、陸砂の粒度を調整したブレンド砂を用いて砂充填法を行うことで、珪砂と陸砂との間に生じた測定密度の差を小さくすることができると考えた。この試験がシリーズ3である。

ブレンド砂は、シリーズ2で使用した鳥取県陸砂をふるい分け、図-7に示すように、粗粒率は1.61のまま0.15mmふるいを通過するものを10%含むものである。

供試体は、シリーズ1、シリーズ2と同じであるが、シリーズ3では水分状態が異なる。水温 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生していたものを養生水槽から取り出し、2週間空气中に放置することで気中養生したものを試験に使用した。その理由は、水中養生のものを用いた場合、特に細かい砂が供試体表面に付着するのを未然に避けるためである。また、ノギス法による長さの測定および砂を充填する際の打撃エネルギーについては、シリーズ1とシリーズ2の結果をふまえ、次のようにした。供試体表面の微小な不陸の影響を受けないように、供試体の各辺におけるノ

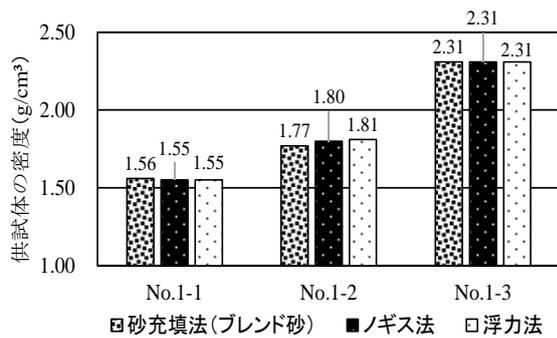


図-8 密度の異なる3種類の供試体 (シリーズ3)

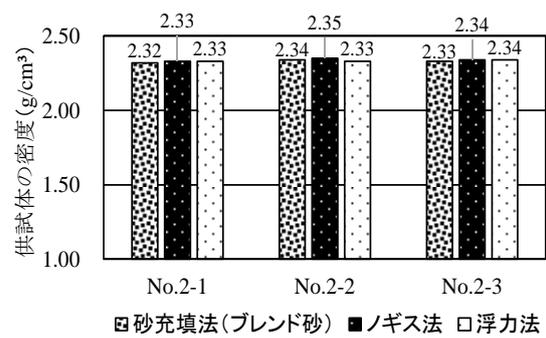


図-9 体積の異なる3種類の供試体 (シリーズ3)

ギス法での測定をきめ細かく複数点で行った。シリーズ1とシリーズ2の砂充填法における打撃方法は、1層につき100回の打撃を全ての供試体に連続して加えており、このような連続作業を手動で行ったために打撃エネルギーが異なり、測定密度に若干の差が生じたことが考えられる。このことから、砂を充填する際は、打撃エネルギーの維持を意識して試験を行う必要があることがこのシリーズの試験により明らかになった。そこでシリーズ3では打撃エネルギーの維持を考慮し、供試体ごとの測定に時間差を設けて試験を行った。

5.1 試験結果および考察

図-8は、密度の異なる3種類の供試体の測定結果である。また、図-9は、体積の異なる3種類の供試体の測定結果である。供試体の測定密度は、No.1-2を除いてブレンド砂による砂充填法の値は、ノギス法と浮力法に近値または同値となった。このように、ブレンド砂を用いて試験を行うことでシリーズ1,2の課題を改善することができた。ただし、No.1-2については供試体自体に特異的な問題（奥行きが深い空隙の数が多く、そこに十分に砂が充填されなかった）があったためであり、粒度を調整したブレンド砂でも適当な結果を得ることができなかった。

6. まとめ

本研究で明らかとなったことを以下にまとめる。

- (1) 砂充填法による硬化コンクリートの密度測定方法における測定要領を明らかにした。
- (2) 充填砂に求められる粒度を明らかにした。充填砂は、粗粒率が小さい方が望ましいが、特に0.15mm

以下の細かい粒子を多く含んでいるものが望ましい。

- (3) 砂充填法は硬化コンクリートの密度測定方法として実用性があることを確認した。

最後に、本研究により明らかとなった砂充填法の留意点を以下にまとめる。

1つ目として、供試体の質量は含水状態により異なるため、毎回測定しなければならない。2つ目として、充填砂は試験中にこぼれたり、異なる砂と混ざってしまうことがないように、砂の粒度の維持に注意する必要がある。3つ目として、砂を充填する際は一定の力で打撃を加える必要があるため、打撃エネルギーの維持にも注意が必要である。

謝辞：本研究の実施には、鳥取大学農学部農業造構学研究室の加地弘奈氏、武美伸宗氏に多大なるご協力をいただきました。また、鳥取大学農学部の兵頭正浩准教授、鹿島道路株式会社技術研究所の坂本康文氏、五傳木一氏、芳賀潤一氏には、貴重なご意見をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田部奈津子, 中田善久, 大塚秀三, 宮田敦典: 試験方法の違いによるコンクリート供試体の体積のばらつきに関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.2026-2031, 2014.7
- 2) 松村仁夫, 黒井登起雄: 硬化コンクリートの密度試験に関する基礎的検討, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.529-530, 2005.9