RIを用いたコンクリートの単位容積質量および水分量の非破壊測定方法に関する研究

STUDY OF NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT FOR UNIT WEIGHT AND WATER CONTENT OF CONCRETE USING RADIO ISOTOPE METER

酒井正樹 — * 1 神代泰道 — * 2
植松俊幸 — * 3 池永太一 — * 4

Masaki SAKAI — * 1 Yasumichi KOSHIRO — * 2
Toshiyuki UEMATSU — * 3 Taichi IKENAGA — * 4

キーワード：
コンクリート, 単位容積質量, 水分量, 放射性同位元素

Keywords:
Concrete, Unit weight, Water content, Radio isotope

This paper discusses a measurement method of unit weight and water content of concrete using radio isotope meter. Concrete members with different unit weight were measured them at the age of 7, 28 and 91 days. As a result, it was found the following things. If the unit weight of concrete is high, the measurement accuracy of the unit weight and water content using radio isotope meter is low. Inserting the radio isotope source a sleeve, it can reduce variations in measurements. The drying of concrete read from radio isotope meter. The calibration curve between the unit weight of concrete and the attenuation of radiation was created.

1. はじめに

原子力発電所施設や放射線治療施設に用いられるコンクリートは、 α , β , γ 線もしくは中性子線に対する遮蔽性能が要求される場合がある。一般的に、 α , β , γ 線に対してはコンクリートの単位容積質量が大きいほど、中性子線に対してはコンクリート中の自由水量および結合水量（以下、水分量と称す）が大きいほど、高い遮蔽性能を有することが分かっている。著者らはこれまでに、重量骨材を使用して、気乾単位容積質量が 3,000 kg/m³ を超えるコンクリート^{1)~3)}について検討を行ってきた。その一方で、それらのコンクリートの遮蔽性能については、構造体コンクリートと同時に採取した管理供試体による間接的な評価となっており、構造体コンクリートにおける材料・施工のばらつきや打継ぎ部の影響などは考慮できていない。

原位置における材料の単位容積質量や水分量を直接測定する方法として、RI (Radio Isotope; 放射性同位元素) を用いた方法がある。この測定方法は、密度や水分量の違いにより放射線 (γ 線, 中性子線) の減衰量が異なる性質を利用したものである。土質材料の分野では、RI 密度計および RI 水分量計として一般化されている。一方、コンクリートの分野では、フレッシュコンクリートの単位水量管理⁴⁾を行った例があるが、硬化したコンクリートではほとんど検討されていない。

本研究は、構造体コンクリートの単位容積質量および水分量について、原位置にて直接測定する方法を検討するため、RI 密度計および RI 水分量計の硬化したコンクリートへの適用について実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2. 1. 実験目的

(1) RI 密度計および RI 水分量計の硬化コンクリートへの適用

土質材料を対象とした RI 密度計および RI 水分量計は、コンクリートのような高密度の材料にはほとんど用いられていない。そこで本研究では、硬化したコンクリートへの適用について検討する。

(2) 単位容積質量の異なるコンクリートにおける測定値の検証

骨材種類を変えることで単位容積質量の異なる 4 種類のコンクリート模擬部材を作製し、RI 密度計および RI 水分量計により単位容積質量の違いが確認できるかを検討する。

(3) 材齢経過に伴うコンクリートの単位容積質量の変化の検証

材齢経過に伴う、乾燥によるコンクリートの単位容積質量および水分量の低下を、RI 密度計および RI 水分量計により評価できるかを検討する。

2. 2. 実験計画

実験計画を表 1 に示す。試験体として、図 1 に示す構造体コンクリートを模擬した 600mm×600mm×400mm の部材を作製した。模擬部材の中央付近には、設備などのスリーブ孔を利用した測定方法を検討するため、 $\phi 42\text{mm} \times 600\text{mm}$ の穴を湿式コアボーリングにより削孔した。コンクリートの条件は、目標単位容積質量が 3,800, 3,400, 3,000, 2,400kg/m³ の 4 種類の調合とした。測定項目は、ロードセルおよび RI 密度計による単位容積質量, RI 水分量計による水分量とした。模擬部材の打込みは、600mm×600mm を底面として、打込み高さが 400mm となるよう行った。また、養生条件は、材齢 7 日まで封かん養生とし、その後 91 日まで温湿度の管理されていない室内静置

¹⁾ ㈱大林組技術研究所生産技術研究部 主任
(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)

²⁾ ㈱大林組技術研究所生産技術研究部 主任研究員

³⁾ ㈱大林組技術研究所生産技術研究部 主任

⁴⁾ ソイルアンドロックエンジニアリング㈱

¹⁾ Researcher, Obayashi Corporation, Technical Research Institute

²⁾ Head Researcher, Obayashi Corporation, Technical Research Institute

³⁾ Researcher, Obayashi Corporation, Technical Research Institute

⁴⁾ Soil and Rock Engineering Co., Ltd.

とした。なお、養生期間中の室内の環境条件は、温度が 19～26℃、相対湿度が 66～82%R. H. の範囲であった。

コンクリートの使用材料を表 2 に示す。セメントは中庸熱ポルトランドセメントとした。重量骨材には、表乾密度 5g/cm³ 程度の金属系細骨材 AS、表乾密度 4g/cm³ 程度の金属系スラグ細骨材 BS と粗骨材 BG、表乾密度 3.5g/cm³ 程度の電気炉酸化スラグ細骨材 CS と粗骨材 CG を使用した。なお、CS と CG は JIS A 5011-4 に適合する骨材であるが、その他の骨材は規格化されていない。化学混和剤は、増粘型と標準型の 2 種類の高性能 AE 減水剤と増粘型流動化剤とした。

コンクリートの調合を表 3 に示す。水セメント比は 40%、単位水量は 160kg/m³ と 175kg/m³ の 2 種類とした。骨材の組合せは、調合 No. 1 では AS と BG、調合 No. 2 では BS と BG、調合 No. 3 では CS と CG とした。調合 No. 4 では普通骨材を用いた普通コンクリートとした。重量骨材は微粒分が少なく、フレッシュコンクリートの分離が懸念されたため、細骨材率を 50～70% と大きく設定した。また、調合 No. 1、3 では増粘型の高性能 AE 減水剤を使用し、調合 No. 2 では増粘型の流動化剤を使用した流動化コンクリートとして、材料分離抵抗性を高めた。なお、目標スランブは 21cm、目標空気量は 3.0% とした。

2. 3. RI 密度計および RI 水分量計の測定方法

(1) 測定器

RI による密度測定は、盛土工法のダムコンクリートや一般土質材料の密度管理に用いられている RI 密度計（写真 1）を使用した。この測定器は、密度の違いにより γ 線の減衰量が異なる性質を利用している。放射線源はコバルト 60 による γ 線であり、高感度の γ 線検出器を備えている。

RI による水分量の測定は、土工事で土の締め固め管理に用いられている RI 水分量計（写真 2）を使用した。この測定器は、水分量の違いにより中性子線の減衰量が異なる性質を利用しており、放射線源はカリホルニウム 252 による中性子線である。

(2) 測定方法

使用する RI 密度計および RI 水分量計は土質材料を対象とした測定器であるため、通常は測定端子先端の放射線源を土中に差し込んで測定を行う。しかしながら、硬化後のコンクリートでは測定端子

写真 1 RI 密度計

写真 2 RI 水分量計

表 1 実験計画

対象	項目	摘要	水準数
試験体条件	模擬部材寸法	600mm×600mm×400mm	1
	スリーブ形状	φ42mm×600mm	1
コンクリート条件	目標 単位容積質量	3,800 kg/m ³ (調合 No. 1) 3,400 kg/m ³ (調合 No. 2) 3,000 kg/m ³ (調合 No. 3) 2,400 kg/m ³ (調合 No. 4)	4
	測定項目	密度(ロードセルを用いた実測) 密度(RI を用いた非破壊測定) 水分量(RI を用いた非破壊測定)	3
測定条件	RI 密度計 測定方法 (図 1 参照)	隅角法 スリーブ法 透過法	3
	測定材齢	材齢 7 日 材齢 28 日 材齢 91 日	3

図 1 模擬部材の概要

表 2 コンクリートの使用材料

分類	概要
水	W 清瀬市上水道水
セメント	C 中庸熱ポルトランドセメント、密度 3.21g/cm ³
細骨材	AS 金属系スラグ骨材、表乾密度 5.24g/cm ³ 、吸水率 1.97%、FM2.48
	BS 金属系スラグ骨材、表乾密度 4.14g/cm ³ 、吸水率 1.91%、FM3.71
	CS 金属系スラグ骨材、表乾密度 3.73g/cm ³ 、吸水率 1.47%、FM2.55
	NS 木更津産陸砂、表乾密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 1.60%、FM2.77
粗骨材	BG 金属系スラグ骨材、表乾密度 4.30g/cm ³ 、吸水率 0.53%、実積率 61.0%
	CG 金属系スラグ骨材、表乾密度 3.69g/cm ³ 、吸水率 0.95%、実積率 59.4%
	NG 青梅産碎石、表乾密度 2.65g/cm ³ 、吸水率 0.92%、実積率 58.9%
混和剤	SP1 高性能 AE 減水剤 (増粘型)
	SP2 高性能 AE 減水剤 (標準型)
	VSP 増粘型流動化剤

表 3 コンクリートの調合

調合 No.	目標 単位容積質量 (kg/m ³)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									混和剤 (C×%)		
				W	C	細骨材				粗骨材			SP1	SP2	VSP
						AS	BS	CS	NS	BG	CG	NG			
1	3,800	40.0	50.0	160	400	1796	—	—	—	1474	—	—	1.15	—	—
2	3,400	40.0	70.0	160	400	—	1986	—	—	884	—	—	—	0.6	0.35
3	3,000	40.0	60.0	175	438	—	—	1474	—	—	972	—	0.75	—	—
4	2,400	40.0	50.0	160	400	—	—	—	901	—	—	908	—	1.05	—

を材料中に差し込めない。そのため、図2に示す模擬部材の隅角部に放射線源を押し当て、受信器に対して斜めに放射線を透過させる方法（以下、隅角法と称す）、土質材料と同様の考え方で、設備などのスリーブ中に放射線源を差し込み、受信器に対して斜めに放射線を透過させる方法（以下、スリーブ法と称す）および放射線源を部材の片面（図2のA面）、受信器を部材の裏面（図2のB面）に押し当て、部材を貫通させて放射線を透過させる方法（以下、透過法と称す）の3種類の測定方法について検討した。なお、測定におけるコンクリート中の放射線の透過距離は、隅角法およびスリーブ法では約29cm、透過法では約30cmである。本検討では、それぞれの測定方法に対して、測定値のばらつきを検討するため、同一箇所でも5回の測定を行った。測定材齢は、7日、28日および91日とした。

圧縮強度は標準養生したφ100×200mmの円柱供試体により、JIS A 1108に準じて測定した。ヤング係数は、圧縮強度の測定に用いた円柱供試体を併用し、JIS A 1149に準じて測定した。模擬部材の単位容積質量は、ロードセルにより実測した質量を、コンクリートの内部空隙を無視した体積（600mm×600mm×400mm）からスリーブ孔の体積（φ42mm×600mm）を除いた値で除して算出した。本検討では、このロードセルによる単位容積質量を、模擬部材の実測値と表現した。

（3）測定値の処理

RI密度計およびRI水分量計では、材料中を透過して受信器でカウントされた放射線量と放射線源で発生した放射線量の差である、放射線の減衰量が測定値として出力される。そのため、コンクリートの単位容積質量および水分量を評価するためには、放射線の減衰量をコンクリートの単位容積質量および水分量に換算するための関係式が必要となる。また、放射線は材料中を透過して減衰するほか、時間の経過によっても減衰する性質がある。そのため、測定値として出力される放射線の透過量を、基準物質の放射線の減衰量に対する相対値（以下、計数率比という）に変換することで、時間の経過に伴う減衰に対する補正を行った。加えて、自然界の放射線測定量（バックグラウンド）に対しても、測定値として出力される放射線

の減衰量から差し引いて補正を行った。

RI密度計の計数率比と単位容積質量の関係式⁵⁾を式(1)および(2)に示す。式(2)の実験係数A、Bは材料固有の値であるが、コンクリートでは水和に伴う物性変化により変化することが考えられる。本研究では、材齢7日におけるRI密度計の計数率比と模擬部材の単位容積質量の実測値からフィッティングにより実験係数を算出し、単位容積質量の経時変化に対して測定精度を検証した。

$$Rd = (Nd - BG) / Sd \quad (1)$$

$$\rho = \ln(Rd/A) \times (1/B) \quad (2)$$

ここに、 ρ ：単位容積質量(kg/m³)

Rd：密度計の計数率比(-)

Nd：密度計の放射線減衰量(×10cpm)

BG：自然界の放射線測定量(×10cpm)

Sd：標準物質の放射線減衰量(×10cpm)

A, B：実験係数

RI水分量計の計数率比と水分量の関係⁵⁾を、式(3)および(4)に示す。式(4)の実験係数C、Dは、土質材料およびフレッシュコンクリートに対して適用可能とされている測定器の実験係数を用いた。水分補正係数 α は、材齢7日におけるRI水分量計の計数率比と調査上の単位水量からフィッティングにより算出し、水分量の経時変化に対して測定精度を検証した。

$$Rm = Nm / Sm \quad (3)$$

$$m = (\ln(Rm/C) \times (1/D) - \alpha \times \rho) / (1 - \alpha) \quad (4)$$

ここに、 m ：水分量(kg/m³)

Rm：水分量計の計数率比(-)

Nm：水分量計の放射線減衰量(×10cpm)

Sm：標準物質の放射線減衰量(×10cpm)

C, D：実験係数， α ：水分補正係数

図2 RI密度計およびRI水分量計の硬化コンクリートに対する測定方法

表4 コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状

調査 No.	フレッシュ性状			硬化性状						
	スランブ	空気量	単位容積質量	圧縮強度(N/mm ²)		ヤング係数(kN/mm ²)		模擬部材の単位容積質量(kg/m ³)		
	(cm)	(%)	(kg/m ³)	材齢7日	材齢28日	材齢7日	材齢28日	材齢7日	材齢28日	材齢91日
1	21.0	3.6	3764	39.5	57.3	40.3	46.0	3840	3830	3827
2	19.0	2.3	3465	38.8	59.0	39.5	42.8	3462	3451	3446
3	20.0	3.1	3050	48.6	69.7	38.4	45.2	3131	3123	3122
4	20.5	2.5	2397	38.1	59.0	29.4	33.9	2418	2409	2406

3. 実験結果および考察

3. 1. コンクリートの基礎性状

コンクリートのフレッシュ性状および硬化性状を表4に示す。フレッシュ性状は、全ての調合において目標スランプおよび目標空気量を満足した。圧縮強度は、調合 No.1, 2, 4 で概ね等しかったが、調合 No.3 ではそれらの調合と比較して 2 割程度大きくなった。この理由として、調合 No.3 では電気炉酸化スラグ骨材を用いているため、セメントペーストとの化学反応や骨材表面の凹凸などにより、セメントペーストと骨材の付着力が増加した影響⁹⁾などが考えられる。ヤング係数は、コンクリートの単位容積質量と概ね相関が認められた。また、いずれの調合においても、材齢経過に伴い、乾燥の影響による単位容積質量の低下が確認された。

3. 2. RI 密度計および RI 水分量計による測定結果

(1) RI 密度計および RI 水分量計による計数率比

RI 密度計および RI 水分量計により測定された、材齢 91 日の計数率比を図3に示す。なお、図中に示した数値は、同一箇所における 5 回の測定の変動係数(CV)を示している。

RI 密度計による計数率比は、コンクリートの単位容積質量が大きいほど小さくなった。これは、単位容積質量が大きいほど、放射線の減衰量が大きくなった結果と解釈できる。測定方法による違いでは、隅角法とスリーブ法による計数率比は概ね同等となったが、透過法による計数率比は、それらと比較して 6 割程度まで小さくなった。この理由として、透過法におけるコンクリート中の放射線の

透過距離が、隅角法およびスリーブ法と比較して若干大きいことが考えられる。なお、いずれの測定方法においても、5 回の測定での変動係数は 0.003~0.040 と小さくなり、顕著なばらつきは認められなかった。

RI 水分量計による計数率比は、コンクリートの単位容積質量の違いによる明確な差は認められなかった。また、コンクリート中の水分量に関係する指標である調合上の単位水量は、調合 No.1, 2, 4 では 160kg/m³、調合 No.3 では 175kg/m³であるが、それらについても明確な差は認められなかった。測定方法による違いでは、スリーブ法で最も大きく、次いで隅角法、透過法の順となり、RI 密度計による計数率比とは異なる傾向となった。隅角法や透過法では、放射線源の片側が大気に開放された状態となるため、周囲への放射線の拡散や周辺反射物の影響を受けるが、スリーブ法では、放射線源をスリーブに差し込むことでそれらの影響が小さくなり、放射線の透過量が大きくなるものと考えられる。

以上より、RI 密度計および RI 水分量計による測定精度は、コンクリート中の放射線の透過距離や周囲への放射線の拡散影響などにより、スリーブ法で最も高く、透過法で最も低くなると考えられる。

(2) RI 密度計および RI 水分量計による単位容積質量と水分量

RI 密度計および RI 水分量計による計数率比から求めたコンクリートの単位容積質量および水分量を表5および図4に示す。なお、図中に示した数値は、同一箇所における 5 回の測定の変動係数(CV)を示している。コンクリートの水分量は、調合上の単位水量と比較するため、表2に示した骨材の吸水率より、骨材中に含有されてい

図3 RI 密度計および RI 水分量計により測定された計数率比 (図中の数値は測定 5 回の変動係数(CV))

表5 RI 密度計および RI 水分量計による計数率比から求めたコンクリートの単位容積質量および水分量

		調合No. 1				調合No. 2				調合No. 3				調合No. 4			
		実測値	隅角法	スリーブ法	透過法	実測値	隅角法	スリーブ法	透過法	実測値	隅角法	スリーブ法	透過法	実測値	隅角法	スリーブ法	透過法
単位容積質量 (kg/m ³)	材齢7日	3840	3811	3809	3779	3462	3473	3488	3497	3131	3173	3154	3200	2418	2394	2399	2374
	材齢28日	3830	3797	3792	3806	3451	3480	3468	3509	3123	3165	3132	3207	2409	2392	2387	2381
	材齢91日	3827	3801	3769	3771	3446	3462	3434	3478	3122	3112	3104	3164	2406	2359	2373	2358
水分量※ (kg/m ³)	材齢7日	単位水量 (160)	160	160	158	単位水量 (160)	164	165	165	単位水量 (175)	180	179	182	単位水量 (160)	161	162	160
	材齢28日		150	150	145		159	153	159		163	173	190		155	153	120
	材齢91日		145	142	139		148	158	124		163	182	212		152	148	141

※骨材中の含有水分量 (調合No. 1 : 42kg/m³, 調合No. 2 : 42kg/m³, 調合No. 3 : 33kg/m³, 調合No. 4 : 22kg/m³) を差し引いた値

る水分量を計算して差し引いた値を示した。

RI 密度計により算定したコンクリートの単位容積質量は、模擬部材の実測値と比較して最大 60kg/m³ 程度の差異が認められたが、5 回の測定での変動係数は 0.001~0.007 と小さかった。また、材齢経過に伴う単位容積質量の変化も概ね捉えられており、RI 密度計を用いて構造体コンクリートの単位容積質量を概ね評価することができると考えられる。測定方法による違いでは、スリーブ法により算定した値が模擬部材の実測値と最も近似しており、高い適用性を有していると判断できる。

RI 水分量計により算定したコンクリートの水分量は、隅角法とスリーブ法では、コンクリートの調査上の単位水量と比較して、材齢 7 日で 5 kg/m³ 程度の差異が認められたが、5 回の測定での変動係数は 0.018~0.057 と比較的小さかった。このことから、初期材齢にお

いては、RI 水分量計を用いて構造体コンクリートの水分量を概ね評価できると考えられる。一方、透過法では、5 回の測定での変動係数は 0.055~0.244 と非常に大きく、RI 水分量計の適用にあたっては、測定方法の変更もしくは測定回数の増加などの改善が必要であると考えられる。なお、材齢経過に伴う水分量の変化については、模擬部材の水分量が実測できていないため、正確な検証ができなかった。

RI 密度計および RI 水分量計により算定した単位容積質量および水分量の材齢経過に伴う変化を図 5 に示す。なお、模擬部材の水分量は実測できていないため、ここでは単位容積質量の変化を、乾燥に起因する水分量の変化と仮定した。

コンクリートの単位容積質量については、一般的なコンクリートの単位容積質量を有する調査 No. 4 において、RI 密度計により算定

図 4 RI 密度計および RI 水分量計により算出したコンクリートの単位容積質量および水分量 (図中の数値は測定 5 回の変動係数 (CV))

図 5 材齢経過に伴うコンクリートの単位容積質量と水分量の変化

した単位容積質量と模擬部材の実測値の差が最も小さくなった。一方、単位容積質量が大きな調合 No. 1, 2, 3 においては、両者の差が大きくなった。この理由として、コンクリートの単位容積質量が大きいくほど、放射線の減衰量が大きくなることが考えられる。測定方法による違いでは、スリーブ法および隅角法により算定した単位容積質量は、材齢経過に伴い模擬部材の実測値との差が大きくなったものの、乾燥の影響により単位容積質量が低下する傾向が再現された。一方、透過法では、材齢 28 日において単位容積質量が増加する傾向を示すなど、材齢経過に伴う模擬部材の実測値の変化を捉えられなかった。この理由として、材齢経過に伴う水和の進展により、コンクリートの組織が緻密化したことで放射線の減衰量が大きくなった影響などが考えられる。先に述べたとおり、透過法ではコンクリート中の放射線の透過距離や周囲への放射線の拡散影響などを受け、放射線の透過量が小さくなる測定方法であり、コンクリート組織の影響を受けやすいものと考えられる。

コンクリートの水分量については、単位容積質量の違いによる明確な違いは認められなかった。また、RI 水分量計により算定したコンクリートの水分量と模擬部材の実測値の差は比較的小さかった。測定方法による違いでは、スリーブ法および隅角法により算定した水分量は、材齢経過に伴う模擬部材の実測値の変化を概ね捉えることができたが、一部の調合においては、材齢経過に伴い水分量が増加するものもあった。この理由として、RI 密度計の場合と同様に、材齢経過に伴う水和の進展により、コンクリートの組織が緻密化したことにより放射線の減衰量が大きくなった影響などが考えられる。

3. 3. RI 密度計による計数率比と単位容積質量の関係(校正曲線)

材齢 7 日における、RI 密度計による計数率比と模擬部材の単位容積質量の実測値の関係を検討する。この関係を一般化することにより、RI 密度計による測定値(計数率比)をコンクリートの単位容積質量に変換することができる。RI 密度計による計数率比と単位容積質量の関係(以下、校正曲線という)を図 6 に示す。ここでは、測定精度が比較的高かった隅角法およびスリーブ法について検討した。また、図 6 には土質材料で用いられている校正曲線を併せて示した。単位容積質量が $2,300\text{kg/m}^3$ を超える領域におけるコンクリートを対象とした校正曲線を検討したところ、密度の小さな領域における土質材料の校正曲線を連続的に補完する形で成立することを確認した。しかしながら、コンクリートの単位容積質量が大きくなるほど、材料中の放射線の透過量が小さくなり、RI 密度計による計数率比の変化が小さくなるため、測定誤差が生じやすくなるものと考えられる。

4. まとめ

構造体コンクリートの単位容積質量および水分量について、原位置で直接測定する方法を検討するため、RI 密度計および RI 水分量計の硬化コンクリートへの適用について実験的に検討した。

その結果、以下のことが分かった。

図 6 RI 密度計の測定値(係数率比)と単位容積質量の関係

- (1) RI 密度計を用いて、硬化したコンクリートの単位容積質量を評価することができる。
- (2) RI 水分量計を用いて、硬化したコンクリートの水分量(本検討では、調合上の単位水量)を評価することができる。
- (3) コンクリートの単位容積質量の増大に伴い、放射線の減衰量が大きくなるため、測定精度が低くなる。
- (4) RI 密度計により、材齢経過に伴う乾燥の影響による単位容積質量の低下が確認できる。
- (5) RI 密度計の測定値とコンクリートの単位容積質量の関係を校正曲線として示すことができる。

参考文献

- 1) 神代泰道, 酒井正樹, 吉田理紗, 並木憲司: 重量コンクリートを用いた実大施工実験, 日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集, pp. 781-782, 2015. 9
- 2) 酒井正樹, 神代泰道, 吉田理紗, 西間木亮: 特殊骨材を用いた高性能な流動化コンクリートに関する実験的研究, 12 回日本・韓国建築材料施工 Joint Symposium 論文集, pp. 153-158, 2015. 7
- 3) 植松俊幸, 神代泰道, 酒井正樹, 吉田理紗, 気乾単位容積質量 3.0t/m^3 以上の重量コンクリートの性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 38, No. 1, pp. 1845-1850, 2016. 7
- 4) 瀬古繁喜, 米澤敏男, 井上孝之, 熊原義文: RI 水分計によるフレッシュコンクリート中の単位水量測定に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 19, pp. 403-408, 1997. 6
- 5) 日本道路公団試験所編, RI 計器で土の密度・水分量をはかるしくみ(測定原理と校正曲線の作成), 日本道路公団試験所技術資料, 第 213 号, pp. 34-40, pp. 91-98, 1984. 3
- 6) 五味信治, 梶田桂寛, 青沼隆嗣, 保坂綱鎮: スラグ骨材を使用した高密度コンクリートの調合とその性質に関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 2, pp. 433-438, 2008. 7

[2016 年 5 月 31 日原稿受理 2016 年 8 月 16 日採用決定]