

論文 コンクリートのドリル削孔粉を用いた含水率測定におけるばらつきに関する基礎的検討

木野瀬 透^{*1}・今本 啓一^{*2}・田中 章夫^{*3}

要旨：コンクリート構造物の耐久性調査における含水率測定は、従来、乾式で採取したコンクリートコアにより行われているが、乾式コアの採取はコストや現場作業における労力が大きい。本研究では振動ドリルによる削孔粉を用いた簡易的な含水率測定方法について検討した。最終的には試験方法を提案することを目的とするが、まず、ドリル削孔粉により含水率を測定する際に生じうるばらつきの要因として、使用器具、試料の量、骨材の偏在の影響について検討した。その結果、乾燥容器にはアルミカップを用い、1試料当たり 10g 以上採取して、3 試料の平均値を求めることで比較的高精度の含水率測定を行えることが分かった。

キーワード：含水率、乾式コア、ドリル削孔粉、ばらつき評価、ヒストグラム、コンクリート

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の耐久性を考える際、コンクリートの含水状態を評価することが注目されている¹⁾。

RC 造構造物の供用限界の目安は、コンクリートの中性化の進行を基準に判断されてきた。これは、中性化深さが鉄筋のかぶり厚さを超えると、鉄筋の不動態被膜が破壊されて腐食環境に至るという劣化機構が一般的に認知されているからである。この考え方によると、高度経済成長期に建設された築 50 年を超える多くの建築物が供用限界を迎えることになる。一方で、著者らは、RC 造構造物の耐久性調査を通して、中性化の進行速度は含水状態に影響を受けること²⁾や、鉄筋まで中性化が到達しても、水分の影響を受けない環境では腐食しにくくなること³⁾を報告している。以上のように、RC 造構造物の鉄筋腐食環境を適切に評価することを目的として、コンクリートの含水状態を把握することが重要となる。

コンクリートの含水状態は、一般的に絶乾状態における質量に対する自由水（化学的に結合していない水）の量の比（含水率）で評価される。RC 造構造物では、削孔時に冷却水を用いない乾式によりコンクリートコア（以下、コア）を採取し、JISA 1476「建築材料の含水率測定方法」に準じて 105℃で自由水を乾燥させる方法（乾燥法）が用いられている。この方法では直接的にコンクリート中の水分量を測定できる一方で、一般的に普及している湿式によるコアの採取と比較して、コア採取に関わるコストや現場作業における労力が大きくなる。そのため、電気化学的特性値（電気抵抗や静電容量）⁴⁾の測定による含水状態評価と同様の原理を利用した市販の含水率計を用いて測定されることがある。しかし、電気化学的

な測定にはコンクリートの含水状態のみではなく、測定対象とするコンクリートの使用材料、塩化物イオン量等の影響を受けることが報告されている⁵⁾。したがって、含水率計により測定された値は同一配合のコンクリートにおいて相対比較を行う上では有効であるが、適切な補正を行わなければ異なるコンクリート間での定量的な比較は困難である。それゆえ、乾式コアを振動ドリルによる削孔粉に置き換えて質量法による含水率を簡易的に測定する方法が検討されている⁶⁾⁷⁾。硬化したコンクリートはセメントペースト、細骨材、粗骨材で構成される複合材料であり、自由水の多くはセメントペースト部分に存在するため、小径で削孔した際に、粗骨材の偏在による測定結果のばらつきが生じることが考えられる。田中ら⁷⁾は、刃径 5mm、10mm および 20mm の 3 種類のドリルビットを用いて 10 孔ずつから深さ 40mm までの削孔粉を採取してばらつきを評価しているが、ヒストグラムを描くためのサンプル数としては少ない。

そこで本研究では、振動ドリルの刃径によるばらつきをさらに詳細に検討することを目的として、刃径 5mm、10mm、20mm および 26mm のドリルビットを用いて各 30 孔から削孔粉を採取して含水率を測定した。なお、乾燥したコンクリート粉は空気中の水分を吸湿しやすいことや、測定に用いるガラス器具等の絶縁体は加熱乾燥による静電気の影響を受けやすいことから、目量の小さい高精度な電子天秤による正確な質量測定（計量）が困難になることがある⁸⁾。したがって、ドリルビットの刃径の検討と合わせて、ドリル削孔粉の適切な乾燥や計量方法および試験に用いる測定試料の必要量について検討することとした。

*1 （一財）日本建築総合試験所 試験研究センター 材料部 材料試験室（正会員）

*2 東京理科大学 工学部建築学科 教授 博士（工学）（正会員）

*3 日本工業大学 建築学部建築学科 准教授 博士（工学）（正会員）

2. 実験方法

2.1 ドリル削孔粉の乾燥に用いる器具の検討（実験 1）

（1）測定試料の準備

実験にはコンクリート供試体から採取したドリル削孔粉を用いた。コンクリートの使用材料および配合を表-1 および表-2 に示す。コンクリートは練り混ぜ後、縦 40cm、横 30cm、高さ 12cm 程度のプラスチック製型枠に詰め込み、材齢 28 日まで封かん養生を施したのち脱型した。その後、側面および打設面をエポキシ樹脂でシールし、型枠底面側の一面を開放面として空調管理していない屋内で 28 日間乾燥させた。

乾燥後の供試体から振動ドリルにより刃径 26mm のドリルビットを用いて約 100mm までの深さで 8 箇所を 35mm 間隔で削孔し、得られたすべての削孔粉をポリエチレン袋中で十分に混合したものを測定試料とした。なお、刃径 26mm のドリルビットで深さ 100mm まで削孔した際に得られる 1 孔当たりの質量は平均 110g であり、合計 880g であった。また、振動ドリルは無負荷回転数最大 1,100min⁻¹ (回/分)、全負荷回転数最大 4,300min⁻¹ (打撃/分) の性能を有するものを用いた。

表-1 使用材料

材料	記号	種類等
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.15g/cm ³
水	W	回収水・地下水
細骨材	S	京都府亀岡市産砕砂 表乾密度 2.65g/cm ³
粗骨材	G	京都府亀岡市産碎石 2005 表乾密度 2.69g/cm ³
混和剤	CA	AE 減水剤（I 種） リグニンスルホン酸およびポリカルボン酸エーテルの複合体

表-2 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)				
(%)	(%)	W	C	S	G	CA
49	45.1	175	357	798	985	3.57

（2）乾燥に用いる器具および計量方法

測定試料の乾燥には、導電性の異なる 2 種類の容器として、ガラスびーカー（公称容量 100ml、約 70g）または使い捨てアルミカップ（容量約 50ml、約 1.3g）を用いた。各容器に測定試料 10g を 30 試料ずつ 0.1g 単位ではかり取り、105℃の定温恒温器内で乾燥させた。次に、乾燥後の測定試料（容器含む）をシリカゲルデシケーター内で室温まで放冷したのち、乾燥後の測定試料と容器の質量を 0.1g 単位で測定した。なお、測定試料の乾燥は、105℃乾燥、放冷および質量測定の手続きを 24 時間ごとに繰り返し、前回の測定結果との質量差が 0.1%となるまで行っ

た。この時の測定試料の質量を絶乾質量とした。また、使用する容器はあらかじめ 105℃で乾燥させてシリカゲルデシケーター内で室温まで放冷したのち、質量を測定してから用いた。

なお、コンクリートのような多孔質体は、周囲の環境により乾燥や吸湿の影響を受けやすいため、測定試料の質量は風防付き電子天秤（秤量 220g、目量 0.1mg）を使用した。また、粉体やガラス器具は加熱乾燥や低湿度環境において静電気を帯電しやすいため、静電気防止用イオナイザーを電子天秤の脇に設置して計量した。計量を行った室内の環境は、温度 20℃、相対湿度 25%であった。

（3）含水率の計算

乾燥前後の測定試料および容器の質量から式(1)および式(2)により含水率を測定した。なお、含水率の計算結果は四捨五入により小数点以下 2 けたに丸めた。

$$M = \frac{m_{\text{con, initial}} - m_{\text{con, dry}}}{m_{\text{con, dry}}} \times 100 \quad (1)$$

$$m_{\text{con, dry}} = m_{\text{all, dry}} - m_{\text{tool, dry}} \quad (2)$$

ここに、M：含水率（%）

$m_{\text{con, initial}}$ ：乾燥前の測定試料の質量（g）

$m_{\text{con, dry}}$ ：乾燥後の測定試料の絶乾質量（g）

$m_{\text{all, dry}}$ ：乾燥後の測定試料と容器の質量（g）

$m_{\text{tool, dry}}$ ：容器の質量（g）

2.2 含水率測定における必要量に関する検討（実験 2）

（1）測定試料の準備

実験 1 と同様に作製したコンクリート供試体から乾燥日数 28 日時点において、刃径 26mm のドリルビットを用いて約 100mm までの深さで 28 箇所を 35mm 間隔で削孔し、得られたすべての削孔粉（合計約 3100g）をポリエチレン袋中で十分に混合したものを測定試料とした。

（2）含水率測定に用いる試料の量および測定方法

測定試料をアルミカップに 2g、5g、10g、20g および 50g を 30 試料ずつ 0.1mg 単位ではかり取り、105℃の定温恒温器内で絶乾状態まで乾燥させ、10 分間シリカゲルデシケーター内で放冷してから各測定試料の乾燥後の質量を測定した。さらに、10 分間放冷した測定試料を再度 105℃で 3 時間乾燥させ、シリカゲルデシケーター内で 60 分間放冷してから各質量を測定し、放冷時間が試験結果に及ぼす影響を検討した。10 分間および 60 分間放冷して測定した各試料の質量を 105℃乾燥後の質量として各放冷時間における含水率を求めた。

2.3 ドリルビットの刃径の影響に関する検討（実験 3）

（1）供試体およびドリルビットの刃径

実験 1 で使用したコンクリート供試体から乾燥日数 35 日において、刃径 5mm、10mm、20mm および 26mm の

ドリルビットを用いて各刃径 30 箇所まで深さ 60mm まで削孔し、孔別に削孔粉を採取した。削孔間隔は、各刃径 +5～10mm とした。なお、採取後の吸湿や乾燥を防ぐため、削孔粉はチャック付きアルミ袋に採取した。

(2) 含水率の測定方法

各削孔粉を測定試料として、実験 1 と同様に含水率を求め、刃径が含水率の測定結果に及ぼす影響を検討した。なお、刃径 20mm までのドリルビットで採取した削孔粉については実験 1 および実験 2 と同様に容量 50ml のアルミカップを用いたが、刃径 26mm で採取したものでは測定試料の量が多くなったため、容量 70ml のアルミカップ（約 1.5g）を用いて計量した。

また、上記では各孔のばらつきを評価するために 1 孔から採取した削孔粉を測定試料として含水率を求めたが、コンクリート中の骨材の偏在や部材上部下部等の多少の削孔位置の違い等によるばらつきが生じることがある。したがって、実際に構造物に適用する際には複数孔で試験して平均値を求めることが望ましいと考えられる。そこで、上記で求めた各刃径 30 孔の含水率から 3 孔ずつの組み合わせすべて（4060 通り）の平均含水率を求め、平均含水率の発生確率を求めた。

3. 実験結果

3.1 ドリル削孔粉の乾燥に用いる器具の検討（実験 1）

各容器を用いて 30 試料ずつ測定した含水率の試験結果（最大値、最小値、平均値および標準偏差）を表-3 に示す。また、使用した容器による含水率のヒストグラムを図-1 に示す。図中の 4.0% の位置は、含水率 4.00% から 4.09% までの度数を示している。

ガラスビーカーと比較してアルミカップを用いた含水率の試験結果の方が標準偏差は小さく、ばらつきは小さくなった。また、ガラスビーカーを用いた測定では、デシケーターから取り出した直後に測定したものの、電子天秤の指示値が安定するのに時間を要することがあった。さらに、ガラスビーカーを電子天秤の計量皿に触れないように浮かせると、指示値に変動があり、静電気を帯電している状況が確認できた。加熱乾燥後のガラス器具は静電気を帯びやすいため、本実験においてはイオナイザーを用いても完全に静電気を除去できていなかった可能性が考えられる。

また、アルミカップでは約 10 分で室温まで放冷したのに対し、ガラスビーカーでは約 45 分の時間を要した。放冷期間中のシリカゲルデシケーター内の相対湿度は 9 ～12%であったが、長時間の放冷により測定試料が吸湿して乾燥後の質量（式(1)の $m_{all, dry}$ ）が大きく測定された可能性がある。そのため、今回の実験結果で示される通り、ドリル削孔粉で含水率を測定する場合、誤差要因を

表-3 各容器による含水率測定結果

容器の種類	含水率(%)			
	最小	最大	平均	標準偏差
ガラスビーカー	3.90	4.49	4.27	0.16
アルミカップ	3.98	4.26	4.15	0.07

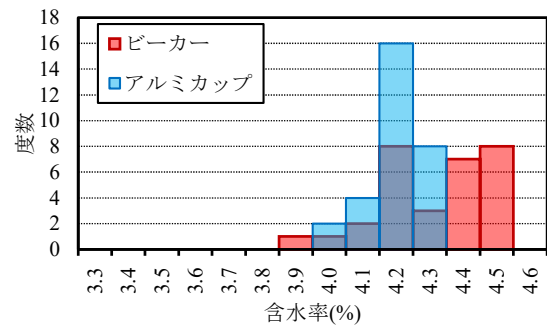


図-1 容器による含水率のヒストグラム

減らすためにはできるだけ短時間で放冷し、静電気の影響を受けにくいアルミカップを用いて測定することが適切であると考えられる。なお、放冷時間による吸湿の影響については実験 2 で詳細に検討した。

3.2 含水率測定における必要量に関する検討（実験 2）

各計量値で含水率を測定した結果を放冷時間別に表-4 および表-5 に示す。また、計量値による含水率の比較結果を図-2 に、各計量値で測定した含水率のヒストグラムを図-3 に示す。

放冷による測定結果の差を比較すると、いずれの計量値でも放冷時間が長くなると含水率の平均値が小さくなる傾向が認められた。また、各計量値の標準偏差に大きな差はないが、計量値が小さいほど含水率が低くなった。この要因として、放冷期間中の吸湿により乾燥後の測定試料の質量が大きくなったことが考えられる。つまり、計量値が小さいものでは、デシケーター内で空気に曝される体積当たりの表面積が大きいことで吸湿しやすくなるため、10 分放冷した時点で大きく吸湿したが、計量値が大きいものでは比較的吸湿が緩やかになったことが推察される。このように、少量試料では 10 分の放冷であっても含水率が低く評価されたと考えられる。なお、本実験において、計量値が 10g 以上では含水率の測定結果は概ね同様であるため、ドリル削孔粉により含水率を測定する場合、少なくとも 10g 以上採取し、105℃乾燥後の放冷はできるだけ短時間で行うとよいといえる。

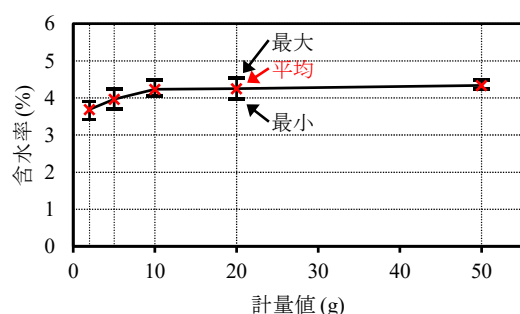
なお、本実験では放冷時間 10 分と 60 分の 2 条件の比較のみであったが、放冷時間 10 分までの短期間の吸湿の影響や、乾燥期間中の測定試料の炭酸化により質量増加が生じる可能性については検討できていない。今後詳細な検討が必要である。

表－4 計量値による含水率測定結果（10分放冷）

計量値	含水率(%)			
	最小	最大	平均	標準偏差
2g	3.43	3.89	3.69	0.10
5g	3.70	4.24	3.96	0.11
10g	4.07	4.47	4.23	0.15
20g	3.98	4.54	4.25	0.16
50g	4.24	4.47	4.34	0.06

表－5 計量値による含水率測定結果（60分放冷）

計量値	含水率(%)			
	最小	最大	平均	標準偏差
2g	3.39	3.99	3.68	0.15
5g	3.78	4.08	3.92	0.08
10g	3.99	4.27	4.11	0.14
20g	3.88	4.43	4.12	0.17
50g	4.18	4.40	4.29	0.06

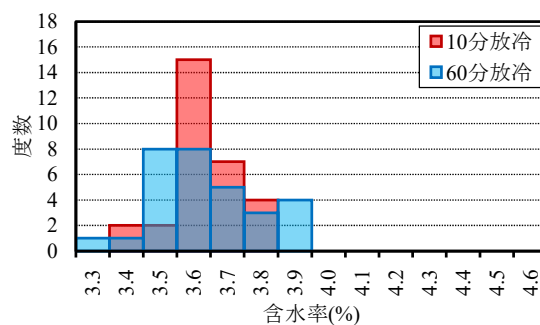


図－2 計量値による含水率の比較結果（10分放冷）

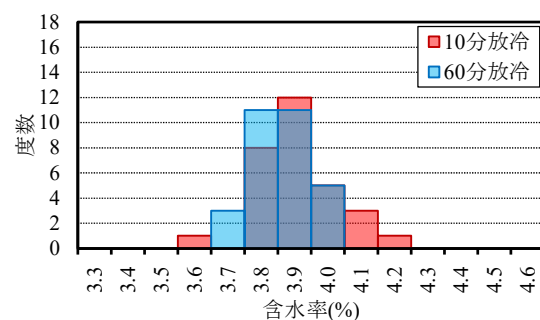
3.3 ドリルビットの刃径の影響に関する検討（実験3）

各刃径のドリルビットで得られた削孔粉の含水率測定結果を表－6に示す。また、刃径による含水率の比較結果を図－4に、各刃径で測定した含水率のヒストグラムを図－5に示す。なお、図－5中のヒストグラムは含水率0.2%間隔で示しており、例えば1.5%の部分は1.50～1.69%の含水率の度数を示している。

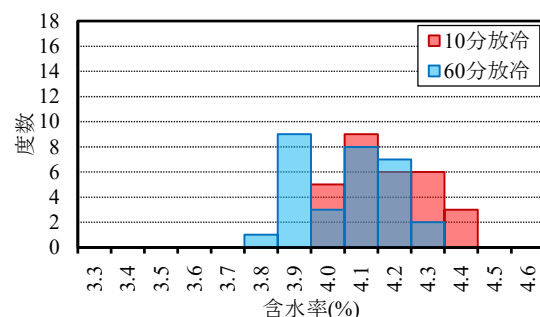
まず、各刃径の1孔当たりの採取量の平均値は、1.82g（5mm）、8.03g（10mm）、33.94g（20mm）および55.76g（26mm）であった。そのうえで、各刃径の試験結果を比較すると、刃径が小さいことで試料の採取量が少なくなったものほど含水率が低く評価され、計量値による比較実験（実験2）と同様の傾向を示した。なお、刃径20mmと26mmを比較すると、26mmの含水率の平均値が低くなった。今回用いた振動ドリルでは、削孔時の抵抗が大きく、摩擦熱による乾燥を生じた可能性がある。また、異なる孔から採取したことで、いずれの刃径においても同一試料を用いた計量値の比較実験より標準偏差が大きくなった。これは骨材の偏在による影響と考えられる。



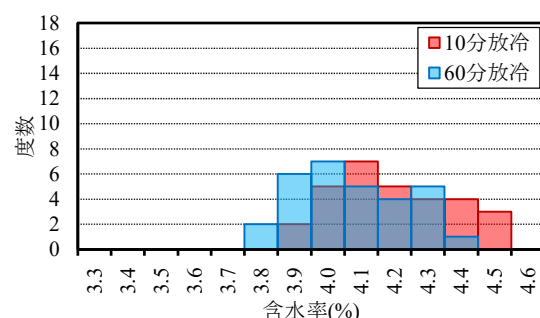
(a) 計量値 2g



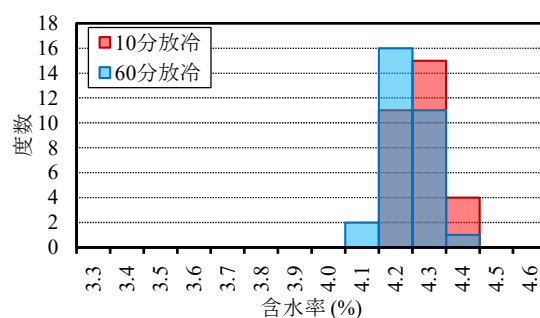
(b) 計量値 5g



(c) 計量値 10g



(d) 計量値 20g



(e) 計量値 50g

図－3 計量値による含水率のヒストグラム

次に、各刃径 30 孔の個々の含水率測定結果から 3 孔ずつ組み合わせせた 4060 通りの平均含水率を求めた結果を表-7 に、平均含水率の発生確率を求めたヒストグラムを図-6 に示す。図中には、3 孔の平均含水率の平均値、平均値の前後 5%、平均値の前後 10%の範囲を示す。

各刃径の計算結果について、刃径によらず 1 孔で求める場合と比較して 3 孔平均では標準偏差が小さくなり、骨材の偏在の影響を緩和した評価が出来たといえる。

また、各刃径の平均含水率の発生確率について、刃径 20mm および 26mm については、それぞれ 62.5%および 82.7%の確率で平均値の前後 5%の幅の範囲に、91.1%および 99.8%の確率で平均値の前後 10%の範囲に収まった。刃径 20mm の平均含水率の一部に平均値より $\pm 0.8\%$ 程度となる値もあるが、確率としては極めて低く測定精度は十分であると考えられる。したがって、刃径 20mm および 26mm では 3 孔から測定試料を採取して平均値を求めることで、含水率で前後 0.4%程度の誤差で評価できると言える。一方で、刃径 5mm および 10mm では平均値の前後 10%に収まる確率は 70%程度とばらつきが大きくなった。刃径 5mm および 10mm では、採取量が少ないことから複数孔から採取した削孔粉をまとめて約 10g 以上としたものを 1 試料として、3 試料測定した平均値を求めることでの高い測定が行える可能性がある。

本研究では、ドリル削孔粉による含水率の測定結果のばらつきを検討したが、乾式コアと比較検証はしていない。今後、様々なコンクリート供試体を用いて両手法を比較したデータを蓄積する予定である。また、実構造物から採取した場合、測定までに時間を要することがあるため、採取後の削孔粉の保管方法や乾燥までの時間が含水率測定に及ぼす影響等の詳細な検討が必要である。

表-6 刃径による含水率測定結果 (1 孔毎)

ドリルビット の刃径	含水率(%)			
	最小	最大	平均	標準偏差
5mm	2.14	3.84	2.84	0.42
10mm	1.84	4.99	3.52	0.68
20mm	3.29	5.38	4.29	0.44
26mm	3.54	4.59	4.06	0.26

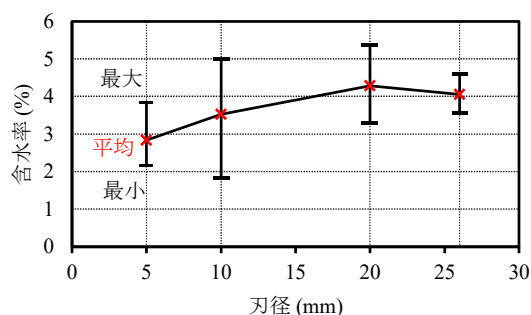
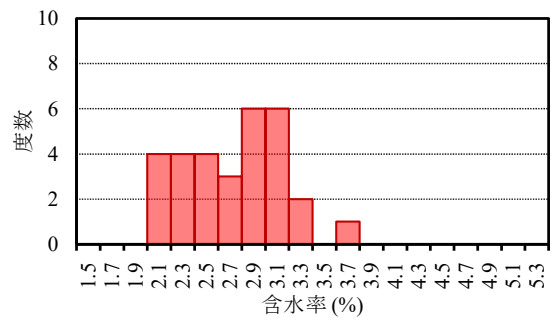
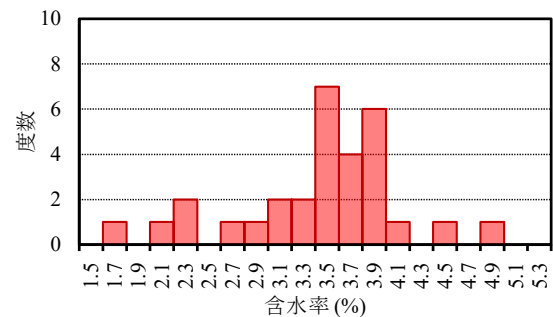


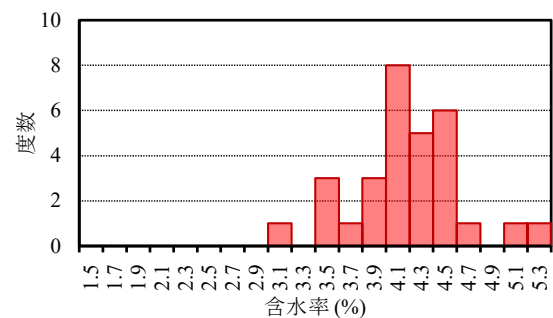
図-4 ドリルビットの刃径による含水率測定結果



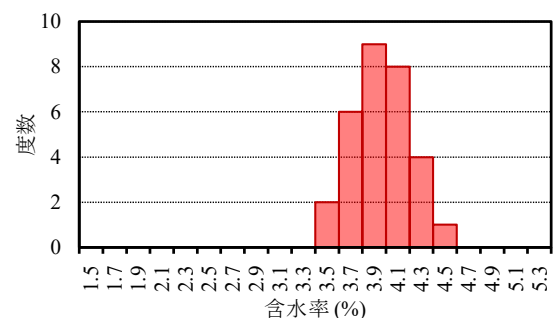
(a) 刃径 5mm



(b) 刃径 10mm



(c) 刃径 20mm

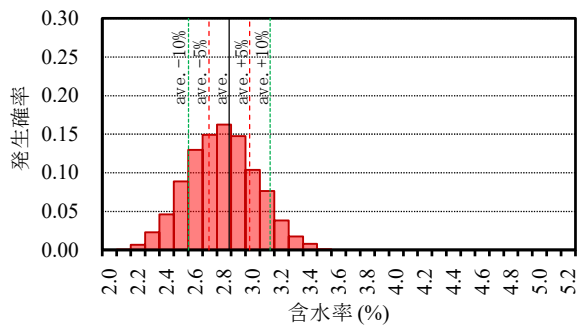


(d) 刃径 26mm

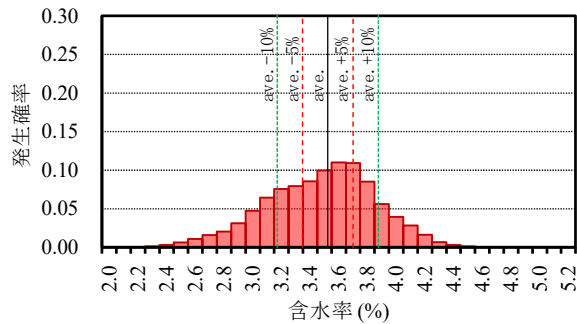
図-5 刃径による含水率のヒストグラム
(1 孔ごとの測定結果)

表-7 刃径による含水率測定結果 (3 孔平均)

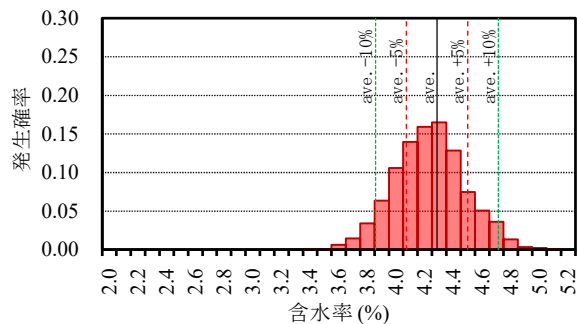
ドリルビット の刃径	含水率(%)			
	最小	最大	平均	標準偏差
5mm	2.18	3.55	2.84	0.24
10mm	2.12	4.64	3.52	0.38
20mm	3.48	5.12	4.29	0.25
26mm	3.63	4.51	4.06	0.15



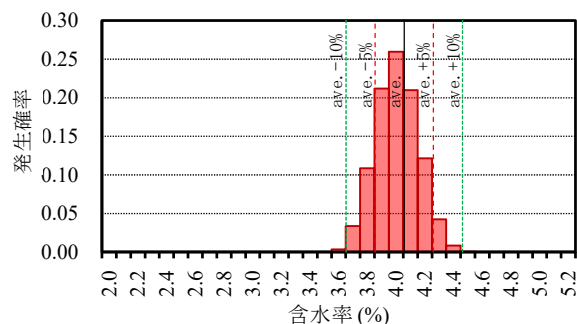
(a) 刃径 5mm



(b) 刃径 10mm



(c) 刃径 20mm



(d) 刃径 26mm

図-6 刃径による含水率のヒストグラム

(3 孔平均, 4060 通りの発生確率)

4. まとめ

ドリル削孔粉によるコンクリートの含水率測定におけるばらつきに及ぼす各種要因について検討した結果、以下の結論を得た。

- ① 乾燥に用いる容器にアルミカップを用いることでガラスピーカーよりも含水率の測定結果のばらつ

きが小さくなった。ガラスピーカーのばらつきが大きくなった要因として、加熱冷却で生じる静電気やデシケーター内での放冷に要する時間が長くなったことが考えられる。

- ② 含水率測定に用いる試料の量が少ないと、放冷中の吸湿の影響を受けやすく、ばらつきが生じることが分かった。ドリル削孔粉により含水率を測定する場合、10g 以上採取して、放冷時間はできるだけ短くすることが望ましい。
- ③ 異なる孔から採取したドリル削孔粉では、骨材の偏在により含水率の測定結果のばらつきが大きくなった。20mm 以上の刃径のドリルビットを用いて 3 孔から採取した削孔粉の平均値を求めることで高精度の測定が行えることがわかった。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考—中性化は寿命か？—, 2017 年度日本建築学会大会（中国）材料施工部門パネルディスカッション資料, 2017.8
- 2) 木野瀬透, 今本啓一, 田沼毅彦, 清原千鶴：コンクリート中の水分を考慮した中性化後における鉄筋腐食予測に向けた基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.601-606, 2015
- 3) 木野瀬透, 今本啓一, 清原千鶴：実構造物の鉄筋腐食に影響を及ぼすひび割れ, 中性化および含水率に関する実地調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1227-1232, 2016
- 4) E. H. Waters: Determining the Moisture Content of Concrete: The use of Electrical Resistance Methods, Building Science, Vol.9, pp.289-297, 1974
- 5) R. du Plooy, G. Villain, S. Palma Lopes, A. Ihmouten, X. Dérobert and B. Thauvin: Electromagnetic non-destructive evaluation techniques for the monitoring of water and chloride ingress into concrete: a comparative study, Materials and Structures, Vol.48, pp.369-386, 2015
- 6) 田中俊成, 酒井雄也：ドリル掘削による含水率分布測定のための基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.1534-1539, 2020
- 7) 田中章夫, 中田清史：乾式工法を用いたコンクリートコア・ドリル削孔粉による含水率測定の基礎的研究, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1023-1024, 2021
- 8) 宮下文秀：“はかる”ための基礎知識 質量, 容量の正確な計量, ぶんせき, Vol.1, pp.2-10, 2008