

報告 一体型チャンバーを用いた圧力により水分浸透量を計算する表面吸水試験装置の開発

林 和彦*1・吉岡 崇*2・井川 倫宏*3・玉岡 優児*4

要旨：コンクリートの表層の水分浸透抵抗性を把握するための表面吸水試験をあらゆる角度に適用できるように改良方法を検討し、水室と空気室が隔膜を介して一体化した装置を考案した。本研究では両室の圧力計測の結果から計算によりコンクリートへの水分浸透量を把握する方法について検討した。その結果、両室の圧力は水分浸透量に対してともに線形の関係となることが示され、ボイルの法則を適用して計算値を比較すると精度よく水分浸透量を計算できることが示された。

キーワード：表面吸水試験, 水分浸透抵抗性, チャンバー, 圧力

1. はじめに

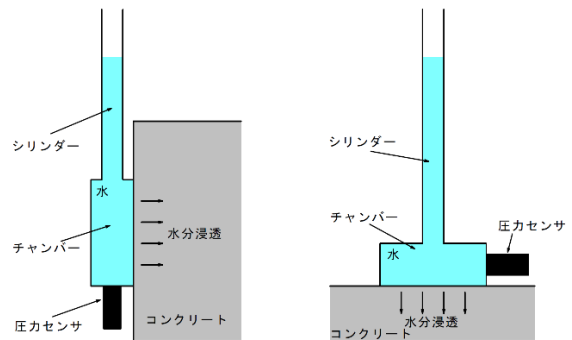
新設および既設のコンクリート構造物の表層における物質移動抵抗性が構造物の耐久性に大きな影響を与えることは指摘されており¹⁾, 土木学会 コンクリート標準示方書 設計編でのコンクリートの中性化に関する耐久性の照査において水の動きを直接的な形として評価するようになった²⁾。コンクリート標準示方書の直近の改訂においては、中性化自体が劣化でなく中性化することに加えて水の存在が鋼材腐食の劣化を進行させていることが明記され、設計編³⁾に加えて維持管理編⁴⁾でも取り上げられるなど、水の動きを直接的に評価することの意義は大きい。

著者らは表層でのコンクリートの水分浸透抵抗性を評価する手法として表面吸水試験を開発した⁵⁾。図-1に示すように表面吸水試験は水を媒体として過度な圧力を付与せずにコンクリートに作用させ、コンクリートへの水分浸透量を測定するものである。この試験は既往の200mm 定水位試験⁶⁾を参考にして、同程度の初期圧力を付与し初期水位 300mm から水分浸透と共にシリンダー水位が減少し、コンクリートに作用する水圧が徐々に低下する変水位試験にあたる。

原位置においてコンクリート表層部での水分浸透抵抗性を評価する手法として、水分浸透抵抗性試験の規程が制定され⁷⁾, 表面吸水試験方法⁸⁾も規定されている。

既往の試験装置⁵⁾は測定位置よりも上方にシリンダーを鉛直に設置することから、シリンダーを用いた表面吸水試験方法の適用箇所はコンクリート側面（壁面）やスラブ上面のように上方へ空間がある場所に限られ、コンクリートの下面（桁下や床版下面）や張出し床版直下の位置への適用はシリンダーを分離して回避できる場合⁹⁾

を除いて実施は難しかった。そこで、これらの設置位置の制約を根本的に回避することを目的にシリンダーを用いない方法を著者らは開発した^{10)~15)}。この手法は、水分浸透部を密閉空間としそこへ加圧した空気タンクを接続して初期水圧を付与するものである。概念図を図-2に示すとおり、密閉空間内での水量の変化（コンクリート



(a) 鉛直面への適用 (b) 水平上面への適用
図-1 表面吸水試験装置の概念図

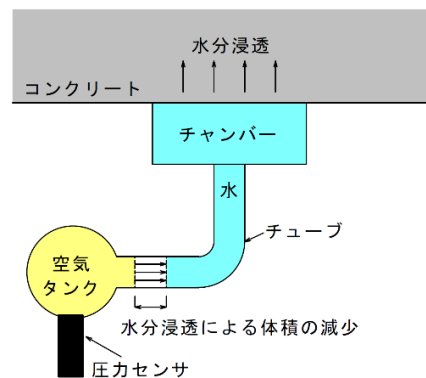


図-2 空気圧を使用した表面吸水試験装置の概念図

*1 香川高等専門学校 建設環境工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 香川高等専門学校 電気情報工学科講師 博士(工学)

*3 (株)八洋コンサルタント 営業技術部 (正会員)

*4 (株)八洋コンサルタント 技術センター

への水分浸透体積と等しい) を計測するためにタンク内の空気圧力を計測し、ボイルの法則の式(1)を利用して計算した空気体積を算出し、同体積となる水分浸透量が計算により求まる。

$$PV = \text{Const.} \quad (1)$$

ここに、 P : 空気圧力

V : 密閉空間内の空気体積

Const. : 定数 である。

密閉空間内の空気への加圧圧力の調整は測定開始時のみとし、コンクリートへの水分浸透とともに生じる空気の膨張により空気圧力が低下するこの方法では、空気タンクおよび空気配管内の体積を調整することにより、既存のシリンダーを利用した変水位試験と同等の水圧低下を再現することができる。この空気圧力式の試験装置の利点としては、設置位置の制約がなくなるだけでなく、設置するコンクリート面の傾斜角度の制約もなくなるため、コンクリート部材の任意の位置に設置ができることにある。傾斜角度が吸水挙動に与える影響は少ないことを別途確認しており^{16),17)}、例えば、桁やスラブの下面や、トンネル覆工コンクリート内面は曲面であるが曲率は十分に小さいため任意位置への設置も可能である。

本手法の課題としては、空気圧力を用いるために測定中の装置温度の変化に鋭敏であるため、温度変化による空気圧力の変化が直ちに目撃の水分浸透量に影響を及ぼすことが挙げられた^{11)~14)}。屋外で使用する本装置は直射日光等の影響を受けるため温度変化に対して過酷な状況にある。そこで、配管やセンサの断熱を高める受動的対策や、配管内部に 0.01°C 単位の温度計を設置しリアルタイムで温度補正する積極的制御を行い水量計算する手法を開発した¹⁵⁾。本研究は、温度補正による制御の煩雑さを改善するために空気タンクとチャンバーを一体化し、補正が必要となる温度の影響を極力排除した手法を提案し、その有効性について検討したものである。

2. 研究目的

2.1 一体型チャンバーの概要

既往の空気圧力を使用した装置^{10)~15)}では、水分浸透のためのチャンバーと加圧するための空気タンクが細い配管で結ばれている。チャンバーへの水の注入の際に、空気タンクの体積を一定とする目的でタンクを独立して設けたためである。ただし、2つの容器を用いることで全体の表面積が増え、継手や配管チューブが多数存在することで空気の漏れの可能性や表面積が増えることの外気温による影響が懸念された。そこで本研究において図-3に示す水と空気を弾力性のある隔膜で区切った一体型のチャンバーを考案した。図-3(a)のように、チャンバー内はコンクリートに触れる部分には柔らかいシ

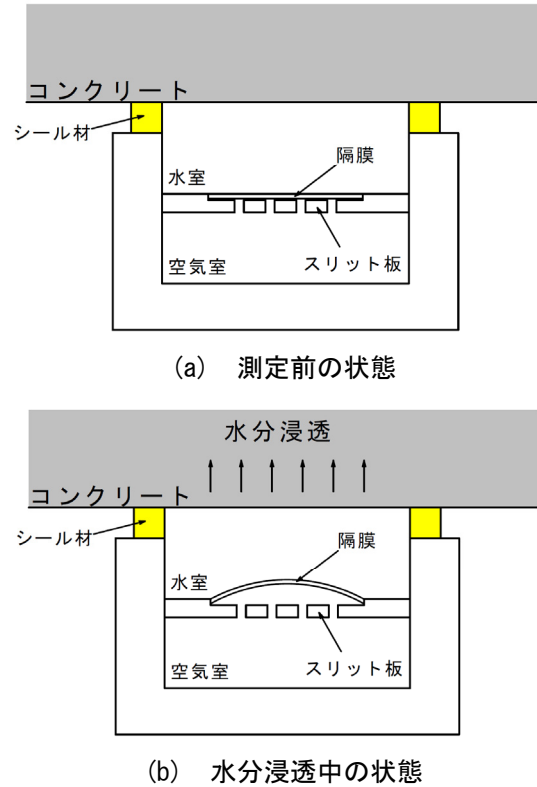


図-3 一体型チャンバーの概念図

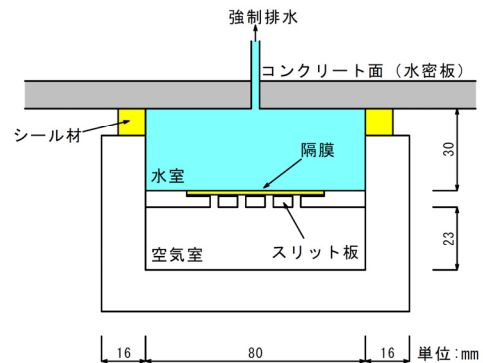


図-4 一体型チャンバーの寸法

ール材が配置されて密着され、コンクリート面に水を作用させるための水室と加圧を行うための空気室とが隔膜を介して分かれて配置されている。隔膜は片側がスリット板に接しており、実験開始時にはスリット板に接する形で隔膜が保持され空気室の体積が一定に保たれている。試験開始後にはコンクリートへ水が浸透すると、水は非圧縮性であるため、図-3(b)に示すように浸透した水の体積と同じ体積だけ隔膜が伸びて空気体積が増加する。水室および空気室に配置した圧力センサにより、後述する計算を用いて水分浸透量を求めることができる。

2.2 一体型チャンバーの詳細

一体型チャンバーは、図-4に示すようにコンクリートと接する部分が直径80mmの円形となっており、深さ30mmの水室と、隔膜とスリット板を介して、深さ23mm

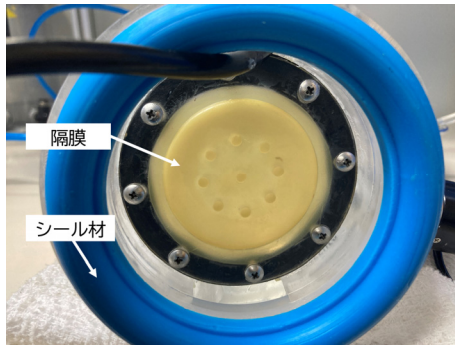


図-5 隔膜の配置状況

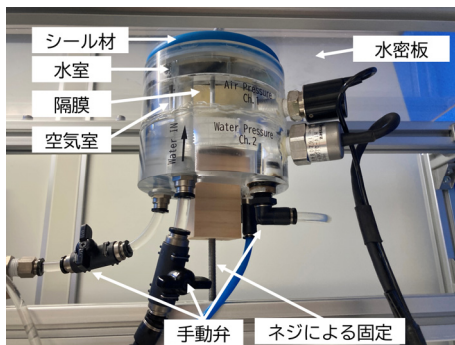


図-6 一体型チャンバーの全景

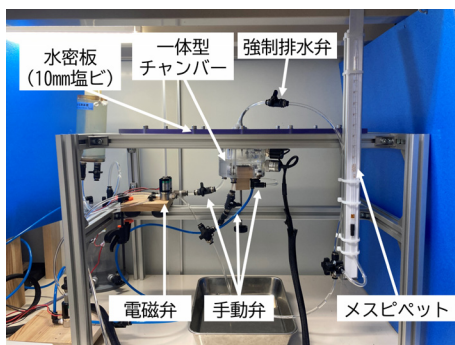


図-7 側方からの全景

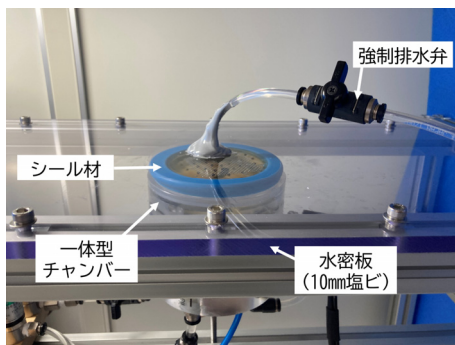


図-8 チャンバー付近の斜め俯瞰図

の空気室が繋がっている。図-5 に隔膜の配置状況を示す。今回の測定においては、隔膜にはシリコン製ゴムシート（厚さの実測値 0.45mm，規格の硬さ 48 デュロメ

ータ A) を用いた。コンクリート面には直径 80mm を確保するためのプレートを別途固定し、注水時にチャンバー内にスムーズに水が満たされるように空気抜きチューブが配置されている。図-6 にチャンバーの全景を示す。チャンバーは弾力性のあるシリコン樹脂（隔膜とは異なる素材）を用いたシール材を介してコンクリート面に押し当てて固定する。実構造物においてはこのチャンバーは、別途真空ポンプによりコンクリート面に固定したフレームを介してネジによりコンクリート面に押しつけて固定する。なお、今回は水分浸透体積を詳細に計測する必要があるため、図-4 の概念図、図-7 の側方からの全景および図-8 の斜め俯瞰図に示すとおり、コンクリート面ではなく水密板（透明の板厚 10mm の塩化ビニル板）に設置し、水密板を削孔し背面（上面）からチューブの末端に繋がれたメスピペットにより水の体積を計測できるようにしている。チューブの途中には強制排水のための手動弁が配置されている。

既存の表面吸水試験と同じ条件で行うため、初期の水頭は 300mm，圧力に換算すると 3kPa とし，加圧ポンプとレギュレータにより圧力を制御した。チャンバーへの注水の際には加圧ポンプを使用し，コンクリート面に対して高水圧が作用しないように水の注入の弁を先に閉じ，遅れて排出の弁を開めた。

2.3 本研究の目的

本研究では，提案する一体型チャンバーにおいて，内部の水または空気の圧力を計測することによって水分浸透量を把握する手法について検討することを目的とする。

水の注水，測定の開始，終了に際しては自動化を行うために電磁弁が配置されているが，今回はそれらが圧力変化に影響を及ぼすことを除外して実験を行うために，チャンバーから近い位置に配置した手動弁を操作し，制御のために電磁弁は用いないこととした。

3. 実験方法および実験結果

3.1 漏れによる圧力低下の影響

装置には多数のバルブやチューブが接続されていることから，加圧後には微量に空気が漏れることが予想される。そこで，どの程度漏れがあるかについて事前に把握し，補正等をおこなう必要がある。

計測開始時にコンクリート面に作用させる初期圧力は既往の手法と合わせて 3kPa（水頭 300mm）^{5),8)} とするが，初期圧力の変動でどの程度の漏れ量の違いがあるのかを把握する目的で，初期圧力の目標値を，0.5kPa から 4.0kPa まで 0.5kPa 刻みで合計 8 水準計測した。測定時間は表面吸水試験において過去に実績のある 600 秒⁵⁾ とし，それぞれの水準での試行は 1 回とした。計測には圧力センサを用い，高速データロガーにより 1kHz のローパスフィ

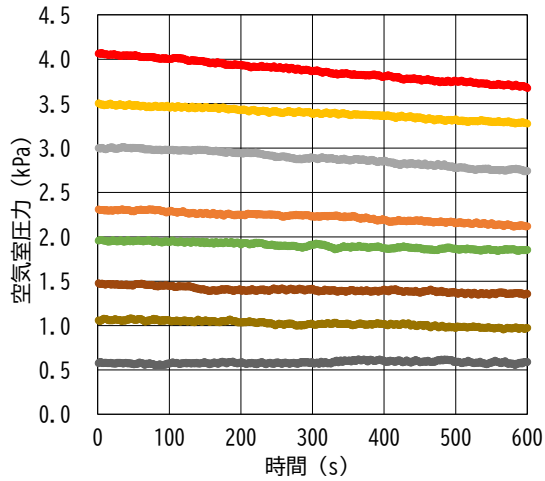


図-9 圧力の時間推移

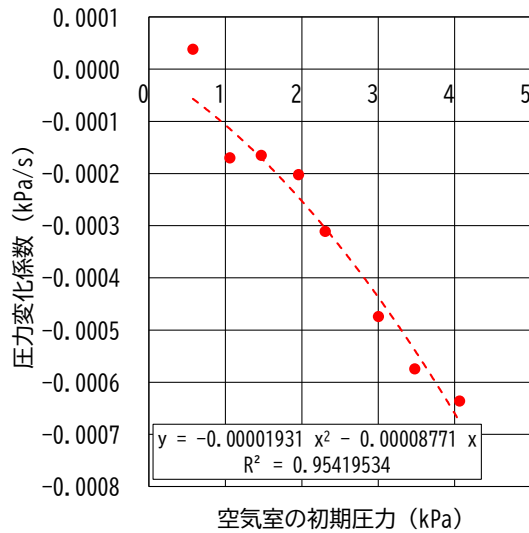


図-10 圧力変化係数と初期圧力の関係

ルタをかけ、100Hzのサンプリング周波数で収録した。測定で得られた、全ケースの空気室圧力の時間推移を図-9に示す。初期圧力が大きいほど圧力の低下が大きいことが見て取れる。そこで、各ケースについて、600秒間の60,000個の圧力データを用いて最小二乗法により1次関数で近似し、その傾きを圧力変化係数とした。圧力変化係数と空気室の初期圧力との関係を図-10に示す。概ね原点を通る関数で近似でき、今回は原点を通る2次関数で近似を行った。式(2)に得られた近似曲線を示す。

$$y = -1.931 \times 10^{-5} x^2 + 8.771 \times 10^{-5} x \quad (2)$$

ここに、 y : 圧力変化係数 (kPa/s)

x : 初期圧力 (kPa) である。

式(2)の決定係数は $R^2=0.951$ であった。

3.2 水分浸透量の把握

メスピペットへの排水を段階的に行い、圧力の変化を計測した。Case1~Case3 全て、1回の目標排水量を0.2ml

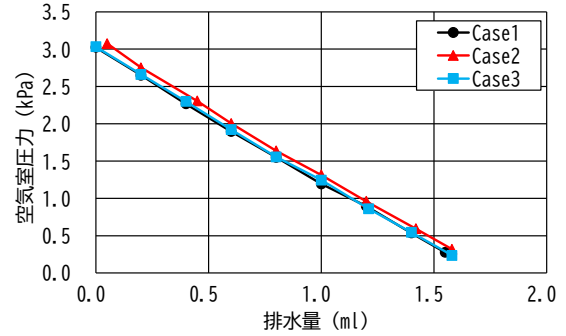


図-11 排水量と空気室圧力の関係

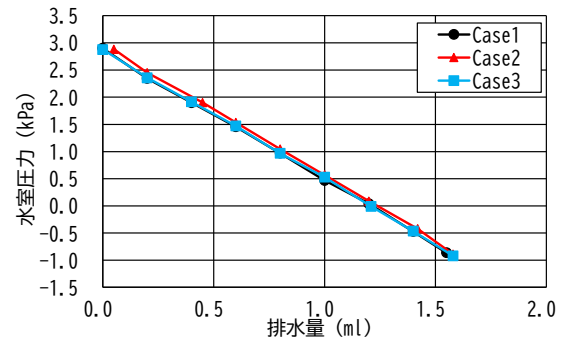


図-12 排水量と水室圧力の関係

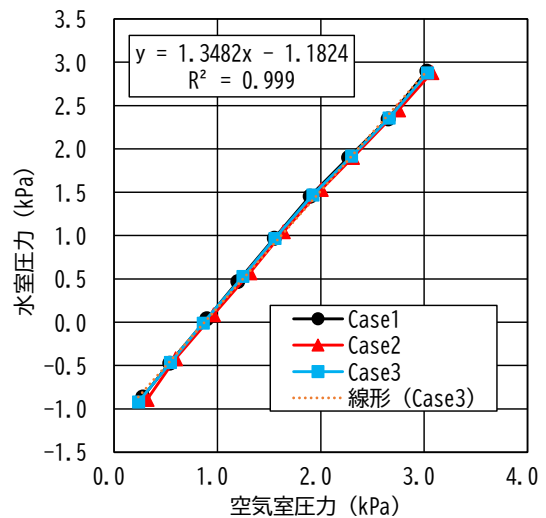


図-13 空気室圧力と水室圧力の関係

ずつ1分間に1回、合計10回排出し、3.1節と同じ条件で600秒間のデータロガーの計測を行った。1分間のうち、概ね15秒程度で目標排出量の排出を行い、残り45秒程度は静置し毎分50秒~55秒の5秒間のデータを平均して代表値とした。

測定により得られた圧力から、3.1節の式(2)で算出した漏れによる圧力成分を差し引き、排水に起因する圧力変化のみを抽出して計算に用いた。その結果得られた、排水量と空気室圧力の関係を図-11に、排水量と水室圧力の関係を図-12に示す。3ケースとも同様の結果とな

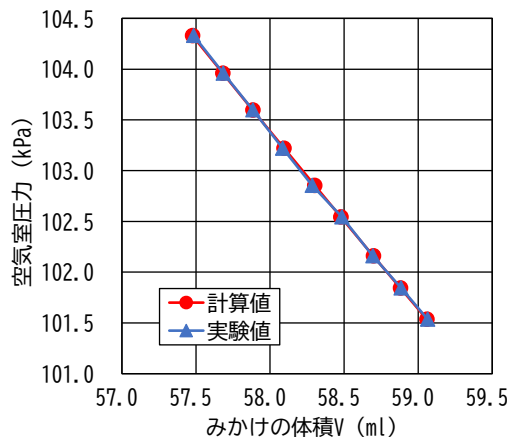


図-14 空気圧力と空気体積の関係

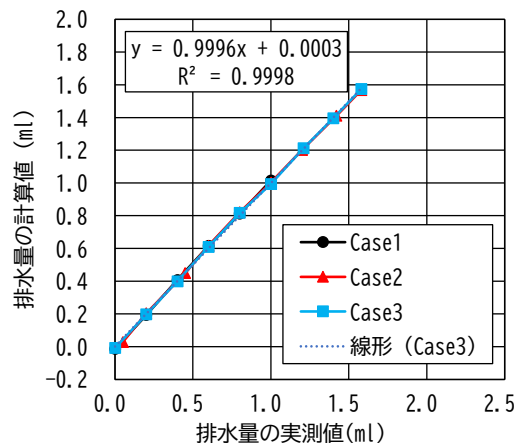


図-16 空気室圧力を用いた場合の排水量の実測値と計算値の関係

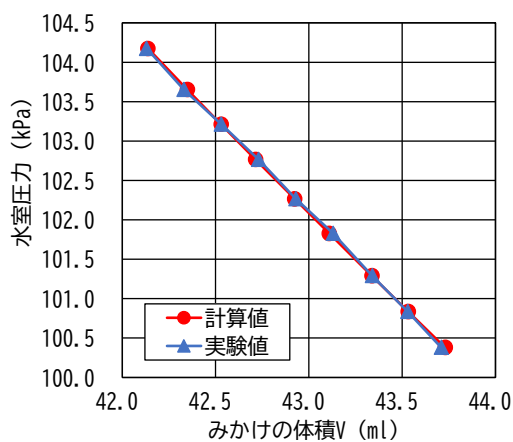


図-15 水室圧力と空気体積の関係

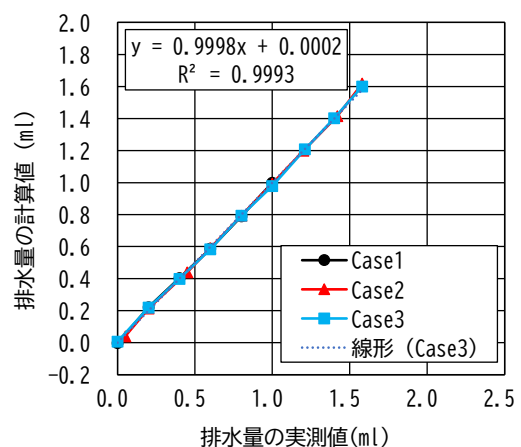


図-17 水室圧力を用いた場合の排水量の実測値と計算値の関係

り、試行回数によりばらつきはほとんど認められなかった。空気室圧力、水室圧力ともに、排水量が増加するにつれて直線的に減少した。図-13に空気室圧力と水室圧力の関係を示すが、同様に直線の関係が得られているものの、水室圧力の方が空気室圧力よりも値が小さくなり、水室圧力には負圧も発生している。この理由として、隔膜が抵抗をしていることが考えられる。水室と空気室が無抵抗の膜で隔てられていると両者は同じ圧力で均衡するが、隔膜の張力が発生すると空気室の方の圧力が大きくなる。

式(1)のボイルの法則を用いて圧力変化から体積を推定する手法を検討する。初期の空気体積は未知として仮の値を入れることとする。圧力は、絶対大気圧 1013hPa = 101.3kPa を加味して絶対圧力として計算する。式(1)の関係から、絶対圧力と空気体積の積が一定値になることを収束条件として、実験値を用いて初期の空気体積を収束計算により逆算した。

初期の空気体積に実測体積を用いない理由は、これまでの検討¹⁵⁾から、配管部分の体積を正確に求めるのは困難であることに加え、チューブや弁、継手の部分も圧力の増加に合わせて若干弾性変形をすることを加味すると、

それらの影響を含んだ見かけの初期の空気体積とするためである。絶対圧力と体積の積について、全データの平均値からの残差平方和を計算し、残差平方和が最小になる見かけの初期の空気体積を収束計算で求めた。

収束計算により求めた初期の空気体積を用い、式(1)のボイルの法則により求めた計算値と実験で得られた実験値について、空気圧力と見かけの空気体積についての関係を示したものを、空気室圧力センサを用いた場合と水室圧力センサを用いた場合について図-14と図-15にそれぞれ示す。3 ケースともほぼ同じ形となったため代表として Case3 のみ示す。理論上、圧力と体積は双曲線の関係になるが、絶対圧力に対して圧力の変動が小さい狭い範囲であるため、ほぼ右下がりの直線とみなせる。空気室圧力、水室圧力のどちらを使用した場合も計算値は実験値と近い。

空気室圧力と水室圧力について排水量の実測値と計算値の関係を図-16、図-17にそれぞれ示す。ともに実測値と計算値の関係はほぼ等しいことがわかる。

4. 結論

本研究において、空気室と水室とを弾力性のある隔膜で仕切った一体型チャンバーを提案し、以下の知見が得られた。

- (1) コンクリートへの水分浸透を模擬した強制排水によって空気室および水室の圧力を計測することで、ボイルの法則を用いて移動した水量を計算することができる。
- (2) 測定した範囲においては水室の圧力が空気室の圧力よりも若干小さくなり、隔膜の張力による効果と考えられた。両者の圧力はともに水量変化に対して線形に変化するため水量の推定に用いることが可能であり、実測値と計算値は一致した。

参考文献

- 1) 土木学会：構造物表面のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会(335 委員会)成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No.80，2008.4
- 2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018.3
- 3) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2023.3
- 4) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2023.3
- 5) 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013.3
- 6) M. Levitt: The ISAT - A Non-Destructive Test for the Durability of Concrete, British Journal of N.D.T., pp.106-112, July 1971
- 7) 日本非破壊検査協会：コンクリートの非破壊試験－水分浸透抵抗性試験，第 1 部：一般通則，NDIS 3440-1: 2023，2023.7
- 8) 日本非破壊検査協会：コンクリートの非破壊試験－水分浸透抵抗性試験，第 2 部：表面吸水試験方法，NDIS 3440-2: 2023，2023.7
- 9) 林和彦，細田暁，三宅純平：傾斜面および水平面を有するコンクリート部材へ適用できる表面吸水試験法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2170-2175，2014.7
- 10) 増尾敬，林和彦：コンクリートの様々な角度の面に適用可能な表面吸水試験装置の開発，土木学会第 71 回年次学術講演会概要集，V-477，pp.953-954，2016.9
- 11) 増尾敬，林和彦：空気圧力を用いたコンクリートの表面吸水試験装置の精度向上，土木学会第 72 回年次学術講演会概要集，V-262，pp.523-524，2017.9
- 12) 三谷聖，林和彦，長谷川雄基：コンクリートの様々な角度に適用できる表面吸水試験の自動測定装置の開発，令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会概要集，V-562，2019.9
- 13) 三谷聖，林和彦，長谷川雄基：表面吸水試験による傾斜面を有するコンクリートの品質評価法の開発，令和 2 年度土木学会四国支部第 26 回技術研究発表会講演概要集，V-9，jsce7-115-2020，2020.5
- 14) 三谷聖，林和彦，長谷川雄基，吉岡崇：空気圧力を用いたコンクリート表面吸水試験の温度補正方法の検討，令和 3 年度土木学会四国支部第 27 回技術研究発表会講演概要集，wV-1，jsce7-076-2021，2021.5
- 15) 林和彦，谷本圭一郎，吉岡崇，長谷川雄基，松本将之：空気圧力を用いた表面吸水試験の温度に起因する誤差補正方法，Vol.7，コンクリート構造物の非破壊検査シンポジウム論文集，日本非破壊検査協会，pp.137-142，2022.8
- 16) 原亮太，林和彦，増尾敬，井上翼：表面吸水試験の適用角度がコンクリートの吸水挙動に及ぼす影響，土木学会四国支部第 21 回技術研究発表会講演概要集，V-18，pp.265-266，2015.5
- 17) 横山勇氣，細田暁：表面吸水試験における各種の外乱要因の検討を踏まえた測定角度の影響に関する分析，コンクリート工学論文集，Vol.28，pp.71-78，2017.