

平成25年度（一財）港湾空港総合技術センター 研究開発助成 成果報告書

助 成 番 号 ：平成26年1月27日付 第13－5号

研究開発項目：（一般③）品質確保，環境保全，労働安全衛生に関するもの

栈橋下面コンクリートのかぶり品質の 非破壊評価方法の開発

平成27年4月30日

香川高等専門学校

林 和彦

目次

第1章 はじめに	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	1
1.3 報告書の構成	2
第2章 スラブ下面に適用できる表面吸水試験装置の開発	3
2.1 既往の表面吸水試験の概要	3
2.2 既往の表面吸水試験の性能	5
2.3 様々な角度への適用した事例（本研究以前の開発）	6
第3章 表面吸水試験の測定角度の影響	11
3.1 はじめに	11
3.2 測点の品質ばらつきの把握	11
3.2.1 供試体の概要	11
3.2.2 実験方法	11
3.3 設置角度を変化させた実験	12
3.3.1 実験方法	12
3.3.2 実験結果	12
3.3.3 検定	13
3.3.4 考察	14
3.4 第3章のまとめ	14
第4章 現場における測定実験	15
4.1 K県M港での測定試験	15
4.1.1 計測内容	15
4.1.2 計測結果	16
4.1.3 得られた知見	17
4.2 K県T港での測定試験	18
4.2.1 計測内容	18
4.2.2 計測結果	20
4.2.3 得られた知見	20
4.3 現行の表面吸水試験との比較試験	21
4.3.1 計測内容	21
4.3.2 使用する供試体	21
4.3.3 測定結果	21
4.3.4 得られた知見	22
4.4 第4章のまとめ	22
第5章 表面吸水試験と耐久性指標との関係	23
5.1 はじめに	23
5.2 塩化物イオン濃度の簡易測定法の開発	23
5.2.1 概要	23

5.2.2	測定方法の概要	23
5.2.3	実験の概要	24
5.2.4	蛍光 X 線装置の距離の影響	24
5.2.5	供試体切断時の切削粉回収	25
5.2.6	スライス片粉碎と切削粉の比較	26
5.2.7	まとめ	27
5.3	表面吸水試験と塩化物イオンの拡散係数の関係の把握	27
5.3.1	供試体概要	27
5.3.2	塩分浸漬方法	28
5.3.3	円柱供試体への表面吸水試験	29
5.3.4	供試体情報	29
5.3.5	蛍光 X 線装置の性能把握	30
5.3.6	切断計画について	30
5.3.7	切断後の供試体の管理方法	31
5.3.8	蛍光 X 線装置による測定	31
5.3.9	塩化物イオンの拡散係数の計算	35
5.3.10	表面吸水試験の結果との比較	36
5.4	第 5 章のまとめ	38
第 6 章	結論	39
6.1	研究で得られた成果	39
6.2	今後の課題	39
	参考文献	40

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

現在、高度経済成長期に多数作られたコンクリート構造物が次々と設計耐用年数を迎え、その維持管理が問題となっている。国や地方公共団体、民間等の構造物の管理者は、構造物を点検し、優先度に応じて補修補強を行うなど、費用の平準化を図るなどして対処している[1]。これらの状況を改善するためには、維持管理を行うための手間と費用を圧縮することに加え、今後作る新設構造物の耐久性を高めることが必要であると考えられる[2]。

コンクリート構造物の維持管理のためには、構造物の現状の劣化度を把握し、さらに将来の劣化の程度を予測する必要がある。例えば外来塩分による鉄筋コンクリート構造物の塩害について考えてみると、詳細調査においては、はつり等による鉄筋の発生の有無とその程度の把握、かぶりコンクリートから採取したコンクリートコアの塩化物イオンの濃度分布を調査し、鉄筋位置における塩化物イオン濃度を測定すると共に塩化物イオンの拡散係数を求めて将来の鉄筋腐食発生時期の予測を行う、などの作業が必要となる。

現在、既設コンクリート構造物のかぶりの塩化物イオンの拡散係数を測定するためには、コア採取、切断、微粉碎、滴定などの化学分析が必要となり、膨大な手間を有する。何らかの非破壊検査を用いて、塩化物イオンの拡散係数を精度良く求めることができれば、その手間を大幅に減らすことができることとなる。

一方、新設構造物においては、設計時においては塩害に対する耐久性設計が行われ、現行の示方書などにおいては水セメント比の制限とかぶりの大きさの確保により、耐久性が担保されるとしている。設計時においてそのコンクリートがもつ塩化物イオンの拡散係数を定め、それにより耐用期間中に想定した環境作用の範囲においては劣化が生じない、または劣化を限定した範囲に抑えるというものである。ここでの大前提は、設計で想定した塩化物イオンの拡散係数というコンクリートの性能が、新設構造物において達成されていることである[3]。そのためには、設計図書に規定された施工方法が満足されていることが前提となるが、現場の施工管理、プロセス管理に依存しており、必ずしもコンクリート標準示方書等に記載されている全ての事がらが満足されていることは担保できない[4]。さらに、完成したコンクリート構造物のかぶりの品質は大きくばらついており、特に打込み後の養生違いによって物質移動性は大きく異なることがわかっているものの、できあがったコンクリートの性能をチェックすることは、強度および外観、およびひび割れ観察程度の項目である。現在、テストピースを用いた一軸圧縮強度とかぶりの物質移動性は、必ずしも一対一に対応しないことがわかっているため、完成した構造物に対して原位置で直接的に耐久性を確認することが必要であると考えられる。原位置で耐久性を確認することでおのずから耐久性を担保することになるとともに、結果として、その途中の施工をきちんと行うことのインセンティブが発生し、品質が向上することが考えられる。

1.2 研究の目的

以上のような背景の下、著者らはコンクリートの吸水性により物質移動性を測定する完全非破壊の方法である表面吸水試験（Surface Water Absorption Test, SWAT）を開発した[5]。

本手法は既設および新設構造物のかぶりコンクリートの耐久性に関わる品質，具体的には物質移動抵抗性を把握することができる[6]。当初の開発対象は，壁面および床版上面への適用が主体で先行開発され，その後，トンネル内面などの傾斜面にも適用できるように拡張したものの，測定面よりも上方に空間がある場合に限定された[7]。

港湾構造物は，栈橋下面など，厳しい塩害環境に曝されるものの，床版下面には本手法は適用できなかった。上方に空間が無いためである。よって，栈橋床版下面に適用できる方法を開発することを目的とした。

さらに，現場における表面吸水試験と耐久性指標（ここでは塩化物イオンの拡散係数）との対応関係について明らかにすることも目的とした。

以上を踏まえ，研究の目的を，次のように設定した。

1) 下面に適用できる表面吸水試験装置の開発

床版下面のコンクリートに適用できる表面吸水試験装置を開発する。重力に逆らって水を吸水させる技術，微量水量を検出する方法を開発する。

2) 現場での適用性の検討

実際に船舶を使ってコンクリートの栈橋実構造物の測定を行い，測定方法を提案する。

3) 耐久性指標との関連性の検討

実構造物における表面吸水試験を用いて塩化物イオンの拡散係数を求める手法について提案する。本検討のためには，塩化物イオンの拡散係数を精度良く求める必要があり，その測定のための技術開発も併せて行う。

1.3 報告書の構成

第2章において，表面吸水試験の概要と，本助成金を用いて行った，下面に適用できる表面吸水試験装置の開発について報告する。

第3章において，本研究を行うために必要な測定角度の影響について検討した結果を報告する。角度の影響については，当初本助成金を用いて研究を検討していた内容については残念ながら成果を得ることができなかったものの，本助成金外の研究において得られた測定角度に関する研究成果は本研究の理解に必要な内容であるため，概要を報告する。

第4章において，本助成金を用いて行った，作製した装置を用いて実際に栈橋コンクリートを測定した結果について報告する。

第5章において，本助成金を用いて行った，塩化物イオンの拡散係数の測定手法の開発および，別の研究で算出した表面吸水試験と耐久性指標（ここでは塩化物イオンの拡散係数）の関係に対して第4章で調査した実構造物の結果を合わせて考察した結果について報告する。

第6章に，結論としての研究の総括および将来展望について報告する。

第2章 スラブ下面に適用できる表面吸水試験装置の開発

2.1 既往の表面吸水試験の概要

著者らが開発したコンクリートの表面吸水試験[5]とは、図2.1に概形を示すものであり、コンクリート表面に接した水をコンクリートが吸水する量を時々刻々測定し、10分間の吸水量や吸水速度を算出するものである。本吸水試験は、毛細管現象を利用した吸水であり、コンクリートの緻密性を評価し、特に養生の違いを敏感に検知できる特徴がある。単位面積あたりの吸水量および表面吸水速度(単位面積, 単位時間あたりの吸水量, 単位: $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)が小さいほどコンクリートが緻密であることを表す。

特に鉛直壁面に設置する装置を例に挙げ特徴と概要を示す。図2.1に示す、内径80mmの円形の吸水カップをコンクリート面に設置し、短時間(10秒以内)で注水を行い、吸水による水頭の減少から時々刻々の吸水量をセンサーにより連続的に計測を行うものである。吸水総量だけでなく、任意の時刻の吸水速度が得られ、吸水速度の時間変化から、かぶりコンクリートの品質を多角的に評価することが可能である。10分間の測定を標準とし、1回の測定から得られる3つの指標は、次の通りである。

- 1) 10分時点での表面吸水速度 p_{600} ($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)
- 2) 注水完了後1秒時点での表面吸水速度 a ($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)
- 3) 吸水速度の時間変化を表す指標 n

吸水カップは、別途真空ポンプを利用した真空パッドで固定したフレームに反力を取り固定するため、完全に非破壊で設置および測定が可能である。

図2.1に示す吸水カップの中心位置において、計測開始時には300mmの水頭が作用する。これは、激しい降雨時にスラブ上面に作用する圧力よりも若干大きい程度であり[8]、地上のコンクリート構造物に作用しうるオーダーの水の圧力といえる。測定時にコンクリートへの吸水とともにシリンダー内の水が減少し、吸水カップの下部に設置した高感度圧力センサーで圧力変化を検知することで吸水した水の体積を測定することができる。測定する水の吸水速度は流速としては非常に小さいため、水の微小な体積変化を計測する際にはこのような測定手法に利点がある。吸水とともに水頭は減少するものの、100mm～500mmの範囲では、水頭が鉛直壁面での吸水挙動に影響を及ぼさないことを既に報告している[9]。この程度の圧力下においては、吸水現象が卓越すると考えられる。

コンクリートが水に接した時点からコンクリートへの吸水が始まる。時間当たりの吸水量は吸水開始直後が大きいため、なるべく短時間で計測を開始することが重要である。本手法では10秒以内に注水を完了させ、注水開始から10秒時点を経算上の0秒として評価している。

10秒以内に注水を完了するために、図2.1に示す吸水カップ下方の注入口から注水する方法を採用した。カップの上からの注水では、内部の空気抜きをスムーズにできないため、10秒以内に注水を完了することができない。注水速度を大きくしすぎると、気泡を巻き込んでしまい、その気泡が抜けるまでの時間が余分にかかるため、適度な注水速度にする必

要がある。現状では、図2.2に示すように長さ1000mmのチューブに接続し上方に設置した注水タンクから、高低差を利用した注水を行うことで適切な水の速度を確保している。この高低差を設ける理由は適切な水の速度を与えるためであり、注水タンクの水面までの約1000mmの水頭をコンクリート面に作用させるものではない。センサーによる計測結果から、注水中にはコンクリート面には1000mmの水頭は作用しておらず、吸水カップやシリンダー内の水位上昇に伴う300mm以下の水頭であった。水がシリンダー上部まで達した時点で吸水カップ下部のバルブを閉め、その時を注水完了とする。注水完了時には直径80mmのコンクリート面の中心において300mmの水頭が作用している（図2.2）。

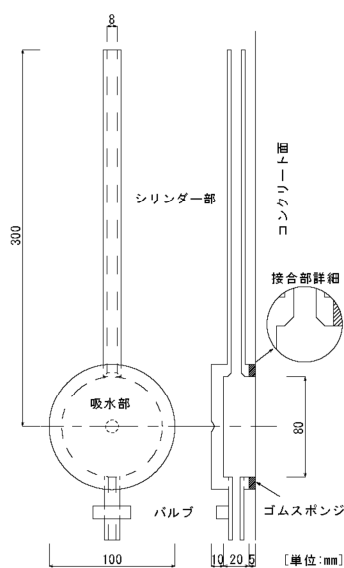


図2.1 吸水カップの形状

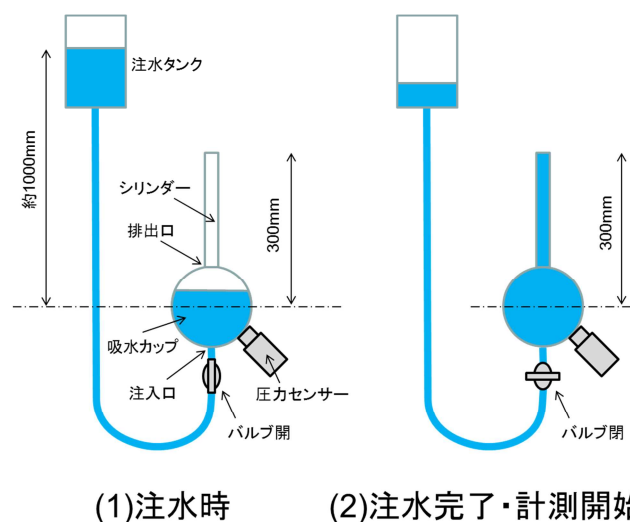


図2.2 注水方法と排出部の形状

実際の表面吸水試験をコンクリート鉛直面に適用したものを図2.3に、水平面上面に適用したものを図2.4に示す。今回の測定においては、後述する梁の上面および、角柱供試体の

側面にそれぞれ適用している。

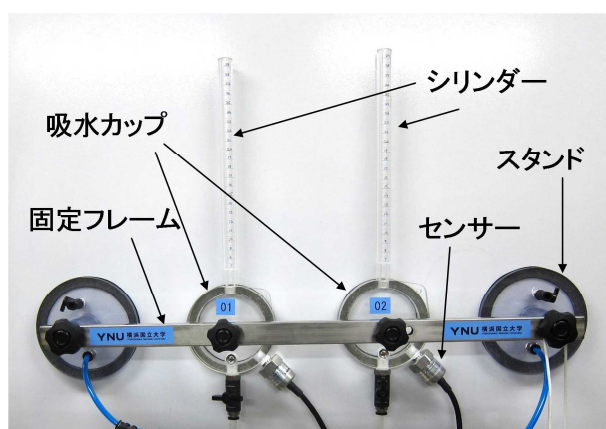


図2.3 鉛直面の測定

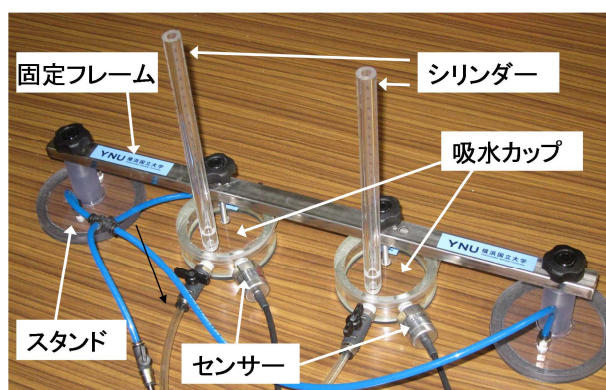


図2.4 平面の測定

2.2 既往の表面吸水試験の性能

表面吸水試験時にコンクリート面に生じる圧力が小さいことが毛細管現象による吸水を精度良く測定できる理由であると考えている。図2.5に、型枠存置期間を変化させて測定した既報の結果[6]を示す。7日または9日の標準的な型枠存置期間よりも短い1日脱型のものは極端に表面吸水速度が大きく、28日間型枠存置したものは小さくなっていることがわかる。このような表層の品質の差を検知できることが、本装置の特徴である。

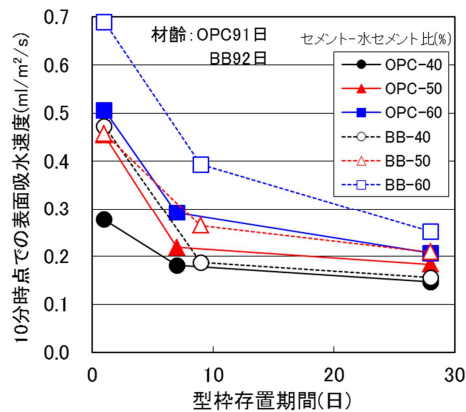


図2.5 表面吸水速度と型枠存置期間の関係[6]

2.3 様々な角度への適用した事例（本研究以前の開発）

前述の鉛直面以外にも、橋梁上部構造の桁下面・傾斜面、床版の上面、トンネル覆工コンクリートの傾斜面やクラウン部、等の角度のついた面で表面吸水試験を実施するニーズも高まっている。これらの部位では、試験装置の形状上、水頭をかけることや、空気だまりを作らずに水を短時間に注水することが技術的に難しく確立されていなかった。

特に、道路橋の床版は繰返し荷重により疲労劣化しやすい部位である上に、雨水や凍結防止剤を含む水の浸入により著しい劣化に至る事例が多数報告されており、適切な設計・施工により吸水抵抗性を高めておくことは重要である。

また、トンネルについては、二次覆工コンクリートは施工上、早期脱型されることが多い。部材厚さが小さく締固め作業が困難であることや、逆打ちとなるクラウン部のコンクリートの充填は容易ではない。必ずしも密実なコンクリートが施工されなかった覆工コンクリートにおいては、ひび割れが顕在化したり、寒冷地においては坑口付近の凍害劣化が見られたりするなど、品質確保へのニーズも高まってきている[10]。

著者は、既に、水平面の上面、天井面や桁下面である水平面の下面、トンネルやハンチなどの斜めの角度に適用できる手法を開発し、従来の鉛直面と同様に、短時間に気泡を含まずに注水を完了するシステムを構築した。この構築は、本助成金を受ける前の研究成果である。以下本節では、その概要について報告する[7]。

コンクリート面と水平面との角度が0度、90度、135度、180度の4つのケースを取り上げ、これらの角度に適用できる表面吸水試験手法を確立した。ただし180度に関しては、コンクリート表面よりも上の空間に張り出すことができる必要がある。よって大きな床版下面の中央部などは適用が困難であることや、箱桁内部の上床版下面などは横方向に移動することができないため、適用ができない。

図2.6に示すとおり水平とコンクリート面とのなす角度を、ここではコンクリート面の角度と定義する。床版上面などの水平面上面の角度を0度とし、鉛直壁面の角度が90度、床版の下面の角度が180度となる。トンネルの肩部を想定し、オーバーハングとなった傾斜面を代表して135度の角度も選定し、0度、90度、135度、180度の4つの角度について適用する方法を検討した。図2.7に参考までにトンネル内面の場合の角度を示す。

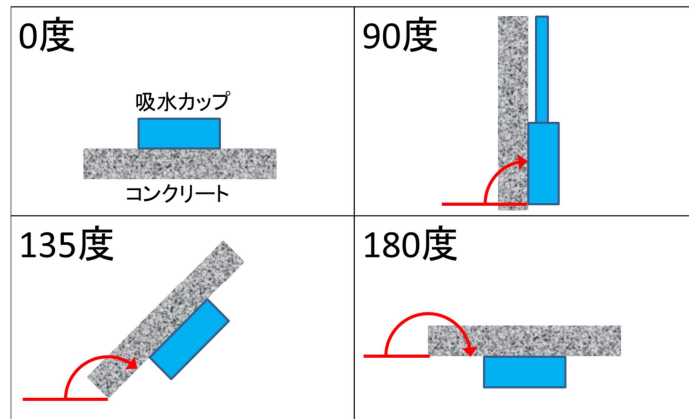


図2.6 表面吸水試験の角度の定義

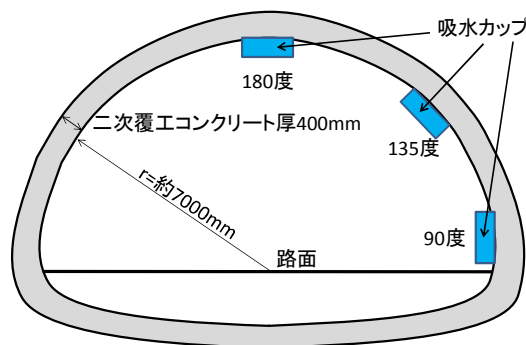


図2.7 トンネル内面の角度

90度のコンクリート面に適用する場合を基準として、それ以外の角度について装置を開発する場合の要件は、次の通りとなる。

- 1) 初期の水頭を300mmかけ、その後も同程度の圧力を付与することで、圧力を90度の場合と同程度にすること
- 2) 圧力センサーを用いて吸水量を検知すること
- 3) 注水を10秒以内に完了させること

ここでは簡便性を考慮し、以下の通り吸水カップよりも上部に張り出した鉛直のシリンダーを用いて圧力を付与する方法を採用した。一般に、特に床版下面やトンネルの頂上部である180度の場合においては、通常はコンクリート表面よりも上方の空間は用いることができない（図2.8(1)）。しかし、例えば桁下面や中空床版橋の床版下面の場合には、側方へ張り出せば延長したシリンダーを鉛直に設置することができるため、90度の場合とほぼ同様の手法で設置、計測が可能となる（図2.8(2)）。また、トンネルの建設時においては、出来形測定用のための検測孔が二次覆工コンクリートを貫通するようにクラウン部に存在し、その孔を利用してシリンダーを鉛直に設置して300mmの水頭の圧力を付与することができる（図2.8(3)）。

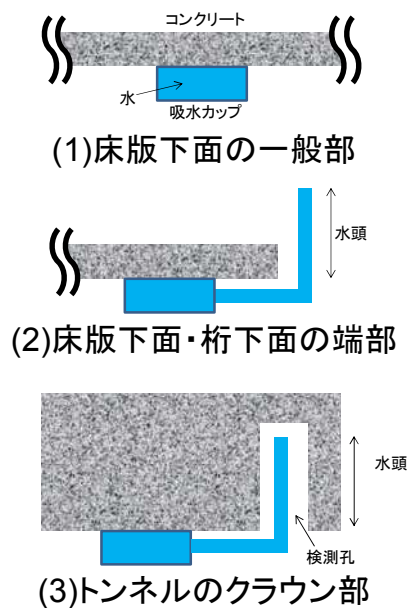


図2.8 180度の測定方法

以上を踏まえて，図2.9のように形状を決定した。角度0度および90度は吸水カップとシリンダーが剛結され，シリンダーが鉛直方向に設置されている。135度および180度では，吸水カップと水頭をかけるシリンダーは剛結されておらず，フレキシブルチューブと接続ブロックを介して鉛直シリンダーが設置されている。コンクリートの中心位置とシリンダー上部との高さの差が300mmになり，0度および90度の場合と同じ水頭がかけられている。

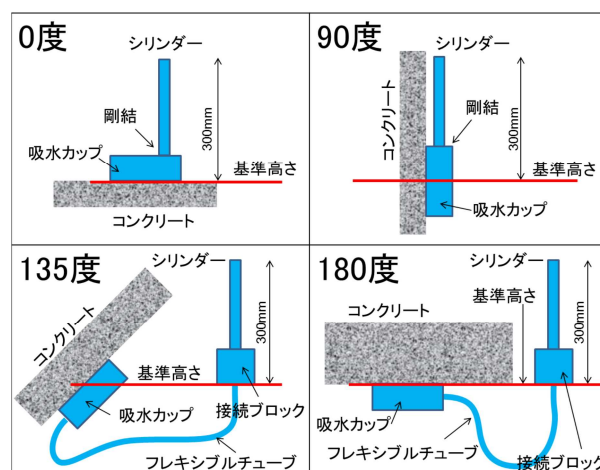


図2.9 角度毎の装置の概要

コンクリート部材に対して下面から吸水を行う角度180度の場合の手法について説明する。図2.10における方法Aではコンクリート面および注入・排出口との位置関係から，コンクリート面に接する部分に空気が溜まり，吸水試験を行うことができない。この部分の空気を排出し，カップ内を完全に水で満たす必要がある。

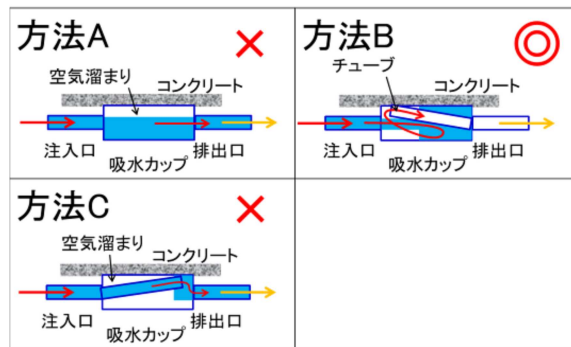


図2.10 180度の場合の注入方法

そのために、細いチューブを吸水カップ内の上方に配置し、チューブの先端から空気を排出することとした。チューブの根元は図2.9の180度の場合で示したとおりフレキシブルチューブ、接続ブロックを介して鉛直シリンダーに繋がっている。

図2.10の方法Bにおいては、注入口側（図左側）から注水する際に、吸水カップ内のコンクリート面近傍に設置したチューブを先端が注入口側（図左側）になるように設けておき、チューブの反対側は排出口に接続される。注水した水が排出口側（図右側）の側面に到達し、排出口側（図右側）から順に水が満たされていきチューブを通じて空気および水が排出され、カップ内の全ての空間を水で満たすことができた。方法Cでは、チューブの先端からの水が排出口へ達してしまうため、空気だまりができてしまい、適切な方法ではないことがわかった。

180度や135度の場合にはコンクリート面より上部に注水タンクを設置する空間が存在しない、または十分に確保できないことから、別途の注水装置により圧力をかけて注水する必要がある。図2.11に示す加圧ポンプを含む注水装置を用いて注水することとする。加圧ポンプと注水タンクの間、空気のリザーブタンクを設けることで、注水時にタンク内の水が減少することで瞬間的に圧力が低下するのを防ぐ。タンク内の空気の圧力を変化させることで、注水速度を制御することができる。

図2.11に示した注水装置（空気のリザーブタンク容量1L、ポンプ吐出能力12L/min）において、タンク内の空気の圧力を 0.1N/mm^2 、 0.05N/mm^2 、 0.01N/mm^2 の3段階に変化させて最適な圧力を検討した。 0.01N/mm^2 では注水速度が遅く、10秒以内に注水が完了しなかった。 0.1N/mm^2 、 0.05N/mm^2 では、10秒以内に空気を抜くことができた。ただし、 0.1N/mm^2 では速度が大きすぎて気泡を巻き込む傾向があったため、 0.05N/mm^2 を採用した。ただし、この値は注水装置の性能（リザーブタンク容量、ポンプ吐出能力）により異なる。

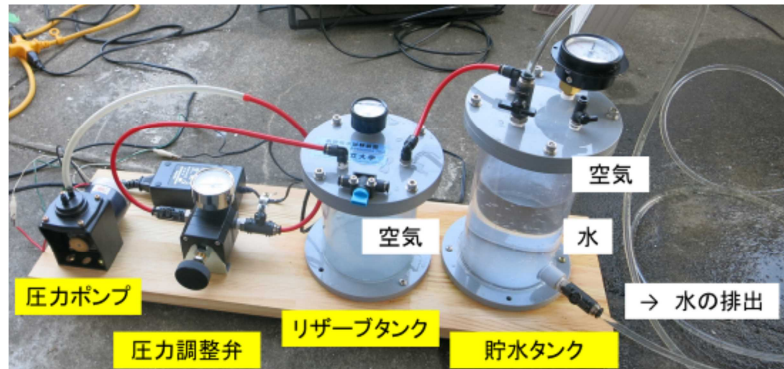


図2.11 水の注入装置

結果として135度と180度の場合の装置は同一形状となっている。135度の方法についても、135度に限定されるわけではなく、それよりも大きい角度、小さい角度でも適用可能である。ゆえにこの方法によって90度から180度まで1つの形状で任意の角度について適用できる。

本装置において、任意の角度について試験ができるようになったものの、課題は次の通り存在する。

- 1) 角度が180度のコンクリート面に対して試験できるようになったが、コンクリート面よりも上方に水頭をかけることと水量を計測するためのセンサーのためのシリンダーが張り出す空間が必要となる。その条件を満たす、180度の角度のコンクリート面は限られ、栈橋下面など、側方に配置する空間が存在しない構造物には対処ができない。
- 2) 装置が煩雑になるにつれて、バルブの操作が多くなるため、人為ミスも増えてしまう。より簡便に操作するためには、注水やバルブの操作を自動化することが求められる。

以上の課題を解決すべく、本研究において装置を開発した。本報告書においては、知的財産の処理が完了していないため、本章における装置の開発に関する内容は省略する。

第3章 表面吸水試験の測定角度の影響

3.1 はじめに

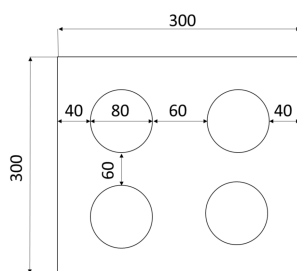
本研究において、栈橋下面に適用する表面吸水試験を開発した。栈橋下面という 180 度の角度で使用する際に、既存の方法である 90 度との相違を把握しておく必要がある。本助成金の範囲の研究においては、角度を変化させた際のコンクリート内部の影響範囲すなわち、水の浸透領域へ及ぼす影響を検討する予定であったが、装置開発や現場測定の実施を優先したため到達できなかった。

同時期に行った本助成金の研究外の検討においては、吸水量に及ぼす角度の影響に対しては、角度の変化に対して、10 分間の吸水量は統計的に有意ではないとの結果を得た。その成果を踏まえると、今回開発した新しい表面吸水試験装置はこれまでの装置と同様に使用できるものと考えている。よって、ここではその成果の概略を紹介する。

3.2 測点の品質ばらつきの把握

3.2.1 供試体の概要

供試体寸法は縦 300×横 300×厚さ 70mm の板状として、打込み時の底面を測定面とした。コンクリート打込み後、20℃、湿度 40%の室内にて養生し、材齢 7 日で脱型後、測定面の反対面と側面をシールして 1 方向の乾燥とした。測定時の材齢は 13 ヶ月である。使用セメントは高炉セメント B 種とした。w/c は 40%、55%、65%の 3 種類とした。供試体の数はそれぞれ 5 個である。各供試体に測点は 4 点ずつ設置した。図 3.1 に供試体の形状と測定位置を示す。



(単位 mm)

図 3.1 供試体形状と測定位置

3.2.2 実験方法

使用した供試体は初期品質自体の差や、若干の設置環境の違い等により各測点にコンクリートの品質のばらつきが考えられるため、そのばらつきを把握した上で、角度の影響を調べる必要がある。測定時の設置角度は全て 90 度とした。全ての測点で表面吸水試験を行い、各測点の 10 分時点での表面吸水速度と吸水総量を把握した。

3.2.3 実験結果および考察

図 3.2 に測定結果をそれぞれ示す。それぞれの測点において品質のばらつきがあること

がわかる。図より表面吸水速度と吸水総量には概ね比例関係があることがわかるため、設置角度を変化させた実験の測点の振分けには 10 分間の吸水総量を使用した。設置角度変化実験は、1 回の実験で 5 種類の角度で行い、各角度 3 測点ずつ測定するため、測点が 15 点必要である。品質のばらつき調査実験の結果で吸水速度と吸水総量の値が平均値の値から近い 15 点を使用する測点に選定した。その中で吸水量が多い順に 5 点ずつグループ 1, 2, 3 とグループ分けを行い 5 種類の角度を振り分けた。供試体は水分を与えない状態で室内に保管されており内部まで過度に乾燥していることが危惧されたため、一旦 1 日間水に浸漬させた上で、2 週間乾燥させることで、表面から内部にかけて湿度勾配を持たせた。よって、以後の設置角度変化実験では、コンクリートの含水率が若干上昇しているため、特に $w/c=40$ では 10 分間の吸水総量が大きく低下している。

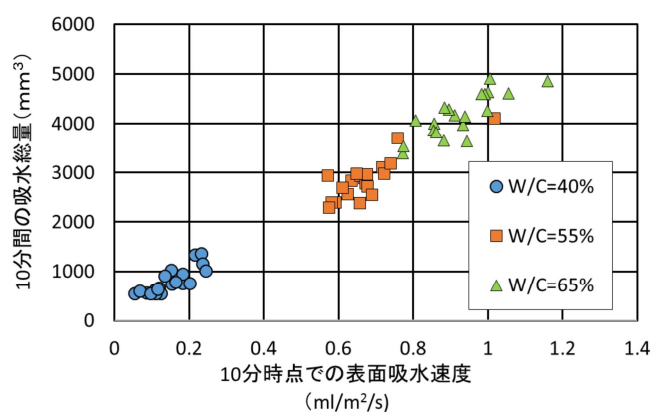


図 3.2 全ての測点の表面吸水試験結果(角度 90 度)

3.3 設置角度を変化させた実験

3.3.1 実験方法

本実験に使用する測定角度を図 3.3 のように 0° , 45° , 90° , 135° , 180° の 5 種類に定めた。さらに w/c ごとに 15 点の測点を、十分な乾燥期間とみなせる 10 日以上あけて 2 回の計 30 回測定を行った。1 回目と 2 回目の測定ではグループ内で測定角度を変えた。

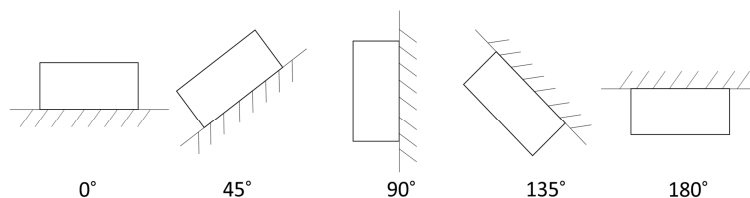


図 3.3 設定した角度

3.3.2 実験結果

測定に使用した測点にはグループごとに初期での吸水総量に若干差がある。グループ 1 と 3 には $w/c=65\%$ では 689.9mm^3 , $w/c=55\%$ では 506.4mm^3 , $w/c=40\%$ では 375.7mm^3 の差が

ある。この差がある状態でデータの比較を行うことは適切ではないため各グループの差を考慮して正規化を行った。図 3.4 に $w/c=40\%$ 、図 3.5 に $w/c=55\%$ 、図 3.6 に $w/c=65\%$ の測定結果をそれぞれ示す。

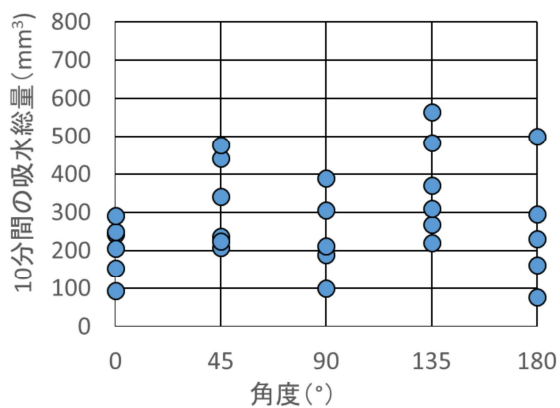


図 3.4 $w/c=40\%$ の測定結果

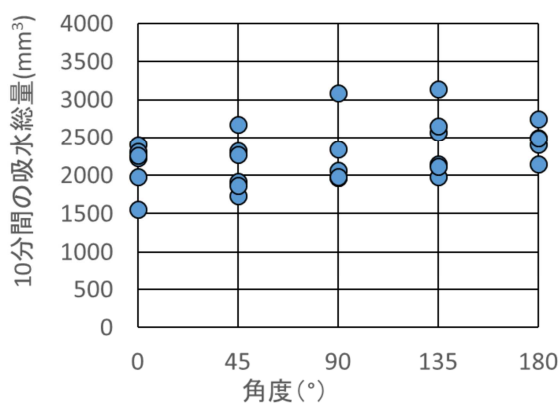


図 3.5 $w/c=55\%$ の測定結果

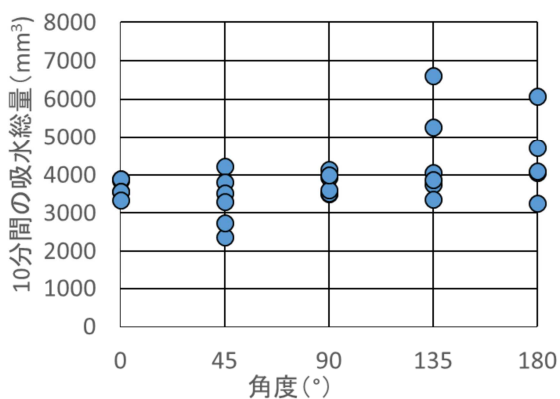


図 3.6 $w/c=65\%$ の測定結果

3.3.3 検定

設置角度の影響がないことを示すために、平均値の差の検定を行った。検定には t 検定を

用いた。t 検定とはいくつかのグループの平均の差が偶然的な誤差の範囲にあるか判断する検定である。観察された差が偶然で起こった確率である P 値が優意水準 5%を超えているとき有意な差はなく、見かけの差は誤差の範囲であるといえる。基準となる 90°の吸水総量とその他の角度の吸水総量についてそれぞれ検定を行った。その結果、全ての w/c で P 値が有意水準を超えた。よって、平均値で 90°の吸水総量とその他の角度での吸水総量には優意な差はないといえる。

3.3.4 考察

表面吸水試験における吸水現象はコンクリートの毛細管現象と透水現象によって成り立っている。設置角度によって水の吸水方向に対する重力の作用方向が変化すると、透水現象に影響し、コンクリート面における吸水挙動が変化する可能性もあると考えられるが、設置角度による影響よりもコンクリートの毛細管現象による力のほうが支配的であるため設置角度による影響がないと考えられる。

3.4 第3章のまとめ

w/c=40～65%の範囲において表面吸水試験の適用角度がコンクリートの吸水挙動に影響を及ぼさないことを統計的に示した。

第4章 現場における測定実験

今回開発した装置にて実際にコンクリートの吸水試験を行った。測定場所はK県M港の栈橋の床版下面とK県T港の栈橋の床版下面にて測定を行った。その他、室内にて現行の表面吸水試験との比較試験を行った。

4.1 K県M港での測定試験

4.1.1 計測内容

2015年1月12日に行ったK県M港での測定試験は、後述するK県T港の測定試験の事前練習という位置づけとした。陸から張り出した栈橋の下面にて測定を行った。測定時の様子を図4.1に示す。



図4.1 K県M港での測定準備状況

このように栈橋の下側は海であるため干潮より少し前に現場に行き、潮が引いている間に測定の準備を行った。測定点は栈橋の張り出している方向に向かって左側から50cmぐらい内側に入ったところで測定点を開発した表面吸水試験と現行の表面吸水試験で3点ずつ計6点選んだ。選んだ6点の位置関係を図4.2に示す。また測定時の装置の様子を図4.3に示す。なお測定面には幾つか大きなひび割れが確認できた。このひび割れに吸水カップや設置用の負圧カップなどが重なってしまうと、吸水時に水が漏れ出したり装置が墜落したりする可能性があるため可能な限りひび割れは避けるようにした。

今回の装置は吸水カップと空気タンクに高低差があると測定面にかかる水圧が水頭差により空気タンクで設定した圧力より下がってしまう。そのため吸水カップを取り付けるフレームと同様のフレームをタンクと電磁弁のユニットに取り付け、測定面に設置するようにした。

測定点

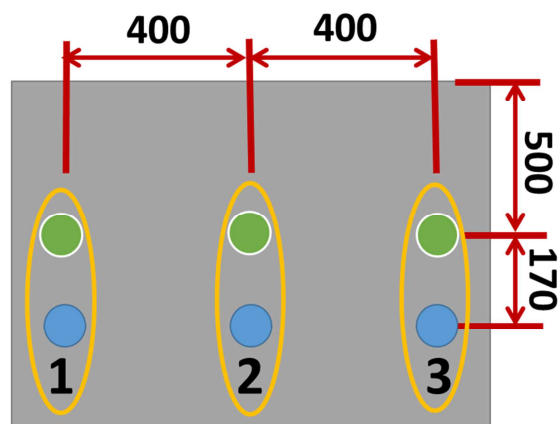


図 4.2 測定点の概略図

(非公開)

図 4.3 測定時の状況

4.1.2 計測結果

K 県M港栈橋での吸水測定の結果を表4.1に示す。また、各測定点の吸水量を現行の表面吸水試験と下面表面吸水試験をグラフにしたものを図4.4に示す

表4.1 K県M港の棧橋での測定結果

日付	2015/1/12	2015/1/12	2015/1/12	2015/1/12	2015/1/12	2015/1/12
測定場所	M港P1	M港P2	M港P3	M港P4	M港P5	M港P6
名前	下面SWAT	下面SWAT	下面SWAT	SWAT	SWAT	SWAT
備考				水漏れ有		
	R	L	R	L	R	L
水分率	4.2	4.5	4.5	4.1	4.3	4.3
表面温度	2.1	1.7	1.6	1.4	1.1	1.2
チューブの内径(mm)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
チューブの面積(mm ²)	50.27	50.27	50.27	50.27	50.27	50.27
カップの内径(mm)	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
カップの面積(mm ²)	5027	5027	5027	5027	5027	5027
a	9.901	7.556	3.955	12.643	7.837	4.604
n	0.372	0.214	0.307	0.378	0.374	0.317
10分時点での給水速度(ml/m ² /s)	0.914	1.916	0.556	1.124	0.717	0.607
10分間の吸水総量(mm ³)	4340.9	6046.7	2624.7	5615.4	3328.6	2559.6

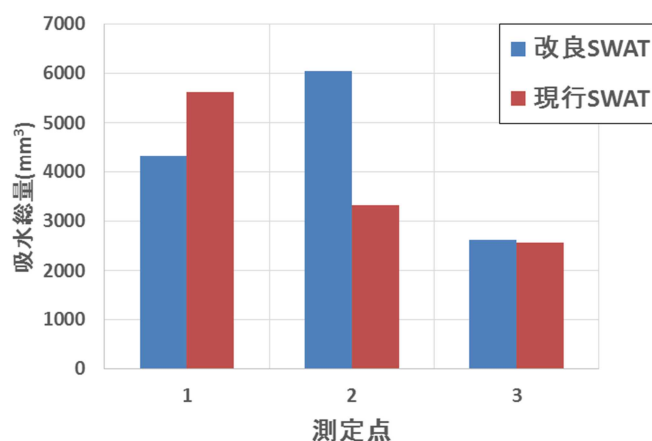


図4.4 各測定点の吸水総量

4.1.3 得られた知見

この結果より吸水総量では測定点1と3において今回の改良型と現行の表面吸水試験とで大きな差は見られなかった。しかし、測定点2の結果は改良型のほうの吸水量が2倍近くあり明らかに違う値を示している。これに関しては図4.5に示すように、通常であればコンクリートの吸水は吸水開始から数秒で吸水速度が遅くなり傾きが急激に小さくなっていくが、この測定点2については傾きが小さくなっておらず吸水挙動が直線的である。このことから考えられることとして、吸水面に大きなひび割れがあり、このひび割れから水が漏れており、吸水とは違った現象が起こっていたことが考えられる。よって測定点2の結果は考察の際に無視をした。

これらのことから改良型の表面吸水試験は現行の表面吸水試験と近い結果が得られる傾向が見られた。

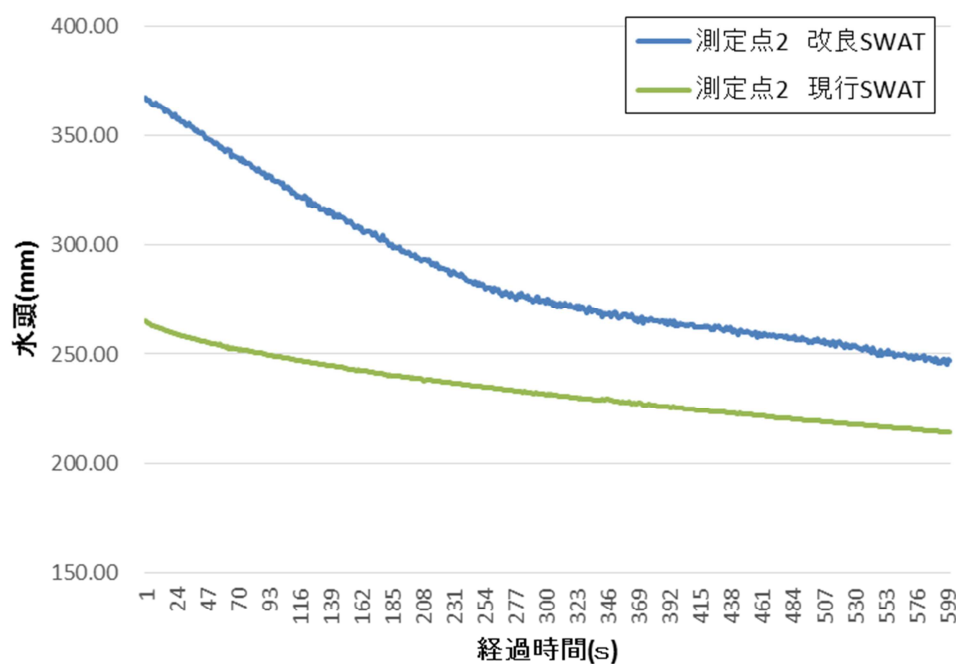


図4.5 測定点2における改良品と現行品の表面吸水試験の水頭変化

4.2 K県T港での測定試験

4.2.1 計測内容

2015年1月23日にK県T港の栈橋の下面にて測定試験を行った。測定点にはチャーターした小型船で向かい、船上から測定を行った。そのときの様子を図4.6, 図4.7, 図4.8に示す。示した図のように非常に狭い空間での測定であり、また潮の満ち引きや波の影響で舟が揺れていたため測定が非常に困難であった。あと、小型船には側面に穴が開いており、常時水が舟に溜まるようになっていたため、発電機の停止や電気の漏電などいくつかのアクシデントにみまわれた。昼からの測定では波が高くなり小型船の船主の意見を仰いだところ測定点に行くのは非常に危険ということで昼からの測定は中止した。そのようなことがあり予定していた量の測定ができず測定点としては現行の表面吸水試験が2点、改良型表面吸水試験が8点となった。



図 4.6 K 県 T 港 棧橋下側の様子

(非公開)

図 4.7 船上作業の様子

(非公開)

図4.8 装置の比較のための床版の縁での測定の様子

4.2.2 計測結果

改良型表面吸水試験の測定結果を表4.2に示す。測定点8以外は電磁弁からの空気漏れが発生していたため結果としては吸水と全く違う値を示しており参考にならない。ただ、測定点2においてコンクリートの変わりにアクリル板に吸水面をつけて空気漏れ測定を行い底から導かれた補正計算式を用いて補正を試みた結果を示している。測定点5, 6, 7に関しては空気漏れの修理の際に空気タンクの弁を閉めたのを忘れたまま測定を行ったため、空気の圧力が変化せずデータが取れていなかったため記入していない。また、測定点8についても表面吸水試験の結果整理の際に行われるカーブフィットで決定係数 $R^2=0.6$ となっており、通常は0.9以上となるため結果の信頼性は低い。

現行の表面吸水試験で測定した結果を表4.3に示す。この結果と改良型表面吸水試験の測定点8の結果を見比べてみると吸水総量が 4827mm^3 と 1200mm^3 となっており大きく違っている。これは測定点の違いによる品質の違いや荷重のかかり方の違いによるものであることが考えられる。現行の表面吸水試験で測定した部分は梁の側面部であったが、改良型表面吸水試験で測定した部分は床版の下面であった。床版の下面の方が上載荷重によるひび割れが大きいことが考えられるため、そのことが原因でこのような大きな差が生まれたのではないかと考えた。

表 4.2 K県 T 港 棧 橋 の 改 良 表 面 吸 水 試 験 の 測 定 結 果

日付	2015/1/23	2015/1/23	2015/1/23	2015/1/23	2015/1/23	2015/1/23	2015/1/23	2015/1/23	2015/1/23
測定場所	T港棧橋	T港棧橋	T港棧橋	T港棧橋	T港棧橋	T港棧橋	T港棧橋	T港棧橋	T港棧橋
名前	1	2	3	4	5	6	7	8	9
備考	空気漏れ(補正)	空気漏れ速度測定	空気漏れ(補正)	空気漏れ(補正)	失敗	失敗	失敗		別の場所から空気もれ
チューブの内径(mm)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
チューブの面積(mm ²)	50.27	50.27	50.27	50.27	50.27	50.27	50.27	50.27	50.27
カップの内径(mm)	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0
カップの面積(mm ²)	5027	5027	5027	5027	5027	5027	5027	5027	5027
a	20.422	#VALUE!	28.976	29.505	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	4.780	26.661
n	0.141	#VALUE!	0.354	0.347	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	0.174	0.160
10分時点での給水速度(ml/ m ² / s)	8.262	#VALUE!	3.012	3.215	#VALUE!	#VALUE!	#VALUE!	1.574	9.570
10分間の吸水総量(mm ³)	21086.4	0.0	12319.8	12252.5	0.0	0.0	0.0	4827.6	27218.8

表 4.3 K 県 T 港 棧 橋 の 現 行 表 面 吸 水 試 験 の 測 定 結 果

名前	梁B0410	梁B0410
備考		
チューブの内径(mm)	8.0	8.0
チューブの面積(mm ²)	50.27	50.27
カップの内径(mm)	80.0	80.0
カップの面積(mm ²)	5027	5027
a	6.899	9.705
n	0.570	0.652
10分時点での給水速度(ml/ m ² / s)	0.179	0.150
10分間の吸水総量(mm ³)	1190.7	1350.1

4.2.3 得られた知見

今回作成した改良型表面吸水試験は、現段階では電気を使用する部分が多いことや、測定面と吸水装置との間で常時チューブが繋がっていることなどから、海上で常に上下する船上での測定は環境が非常に厳しいということがわかった。また、電磁弁の空気漏れによ

り装置が上手く機能しないようになることがあるとわかった。そのため、測定前には必ず空気漏れなどがないかを確認しておき、また電磁弁の予備を用意しておく必要があることが分かった。

4.3 現行の表面吸水試験との比較試験

4.3.1 計測内容

前述したように2回ほど改良型の表面吸水試験と現行の表面吸水試験にて現場測定による比較試験を行った。しかし、条件が安定していない状態での試験であったため比較試験とは言いがたい内容であった。そのため、W/C=40%、55%、65%のコンクリート板の供試体にて比較試験を行った。

4.3.2 使用する供試体

使用する供試体[11]について現行の表面吸水試験にて90°の状態で作成した各供試体の各測定点すべてにおいて吸水試験を行い各測定点のばらつきを測定した。その結果から吸水総量の平均値との差が小さいものを各W/Cごとに現行表面吸水試験用の測定点を2点、改良型表面吸水試験用の測定点を2点選び出した。なお、選び出した各測定点についてもう一度、吸水総量の平均値を求め、変動係数を求めた。求めた変動係数と各供試体の測定点を選んだものを表4.4に示す。この結果から変動係数が最大2%であることが分かり、測定点ごとの誤差は結果には大きくは影響しないとした。

4.3.3 測定結果

各測定点での測定結果を表4.4および図4.9に示す。

表4.4 現行表面吸水試験と改良表面吸水試験の比較試験結果

W/C	現行のSWAT		下面SWAT	
	供試体名	平均からの差	供試体名	平均からの差
65	D-2	-0.479	C-1	-2.37
	C-2	0.144	B-2	2.28
55	A-3	0.563	B-3	2.51
	C-1	2.59	C-3	-2.93
40	C-1	-6.53	C-4	-6.16
	D-1	-7.29	D-3	-2.56

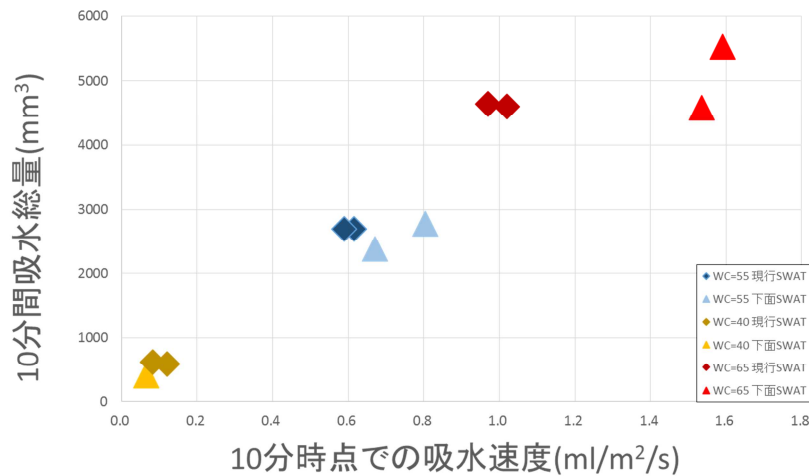


図4.9 現行表面吸水試験と改良表面吸水試験の比較試験結果

4.3.4 得られた知見

この結果を見てみるとW/C=40%, 55%のときの改良型表面吸水試験と現行表面吸水試験の結果は吸水総量と吸水速度のどちらもおおよそ近い値を示している。しかし、W/C=65%の結果だけ10分時点での吸水速度が大きく離れている。このことから考えられることとして、2.6で述べた圧力変化による吸水量測定の実験で行った排水の範囲が約2500mm³だったのに対して今回のW/C=65%の吸水総量が約5000mm³であることにより、検証した範囲外での測定となってしまったことが原因として考えられる。このことから2.6のときの検証において追加で試験を行う必要が出てきた。しかし、吸水総量に関してはどのW/Cでもおおよそ同じ値が出ていることから吸水量に関してはこれまでの表面吸水試験どのような試験が行えているということになる。

4.4 第4章のまとめ

- 1) 空気圧を用いることによって床版下面など上方に空間がない場所でも表面吸水試験を行える装置を開発した。これによりコンクリート構造物の下側やトンネル上面などこれまでの表面吸水試験では測定できなかった部分の測定が可能となった。
- 2) 今回開発した装置では、装置内部の空気の体積によって測定面での水圧と吸水量の関係を変化できることを示した。
- 3) 今回開発した装置では、装置内部の見かけの体積を装置の体積を既知の量だけ変更させることにより求めることができ、それによって求められた体積を利用することでボイルの法則を成り立たせることができることを示した。

第5章 表面吸水試験と耐久性指標との関係

5.1 はじめに

塩害の耐久性指標として塩化物イオン拡散係数を取り上げ、その値と表面吸水試験との関係を把握することを本章の目的とする。

表面吸水試験と塩化物イオン拡散係数の関係を求めるために、まず、円柱供試体を塩水浸漬させたものを用いて実験的に確認した。この部分の研究は、本助成金の適用外の研究であるが、後の実構造物の測定との対応のために、必要な情報であるため5.3に概要を報告する。

塩化物イオンの拡散係数のためには、構造物から採取したコアから塩化物イオン濃度の分布を求める必要があるが、その際にできるだけ簡易的に求めることが必要となる。よってその技術開発を本助成金の研究にて行った。5.2に報告する。

第4章で栈橋の実構造物を開発した装置を用いて船舶に乗って表面吸水試験を実施して測定し、塩化物イオン拡散係数との関係を求めた。その結果については本章ではなく第4章に示す。

5.2 塩化物イオン濃度の簡易測定法の開発

5.2.1 概要

既設の海洋コンクリート構造物や凍結防止剤の散布される構造物の塩化物イオンの拡散係数の測定にはコア採取、切断、粉砕を経て電気化学的に塩分濃度を測定する必要があり、膨大な手間が生じるため、より簡易的な測定方法が求められる。そこで蛍光 X 線による塩化物イオン測定方法[12]を採用し、コンクリート切断粉を採取して利用することで、その手間を減らすことを検討した。本助成金による成果である。

5.2.2 測定方法の概要

供試体の塩化物イオンの拡散係数を取得するために、滴定等の化学的方法に依らない蛍光 X 線装置を用いて塩化物イオン濃度を測定することとした。深さごとの塩化物イオン濃度を得る必要があるため図 5.1 の 2 種類の方法で検討した。

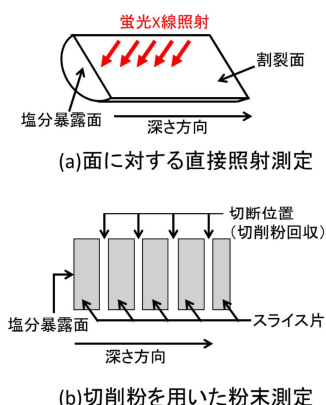


図 5.1 測定方法

方法(a)は面に対して垂直に蛍光 X 線を照射して深さごとに塩分濃度を点として測定する方法である。この方法では骨材の分布と測定点数の関係を明らかにする必要性や、試料を乱さないよう割裂した面が凸凹であるため測定結果に影響を及ぼす恐れがある。

方法(b)は供試体を深さ毎にスライス切断する際に発生する切削粉自体を回収し、その粉末の塩化物イオン濃度を直接測定する方法である。スライス片を粉砕せずに粉末を取得できること、簡易法として従来用いられているドリル削孔で骨材の偏在の影響を排除するために削孔数を増やす手間が軽減できるメリットがある。

5.2.3 実験の概要

供試体は本来であれば塩分を含有するコンクリートからコア採取された供試体を用いるべきであるが、今回は円柱供試体を塩分浸漬させた供試体[13]を用いた。濃度 10%の塩水に浸漬しており、開放面以外はアルミニウムおよびエポキシ樹脂でコーティングしているため、湿式によるコア採取時に切削面の塩分が乱されていない理想的な状態となっている。供試体は幅 100mm、高さ 200mm の円柱を縦に割裂したものである。

5.2.4 蛍光 X 線装置の距離の影響

方法(a)においては、切断等による塩分が乱されない測定面を割裂によって用意するものの、割裂面は粗骨材の存在や割裂面の湾曲等で蛍光 X 線装置からコンクリート面までの距離が測定毎に変化する。よって装置からコンクリートの測点までの距離の変化による蛍光 X 線の測定結果へ及ぼす影響を調べた。表面塩化物イオン濃度の大小 2 種類のコンクリートについて、蛍光 X 線装置の照射部からの距離を変化させて測定した。得られた結果を図 5.2 に示す。照射部からの距離の増加に応じて、測定で得られる塩化物イオン濃度が低下することがわかる。割裂面の凹凸は数 mm に達するため、測定時に距離の影響を大きく含んでしまうことが予想され、このままでは方法(a)は適用が難しい。

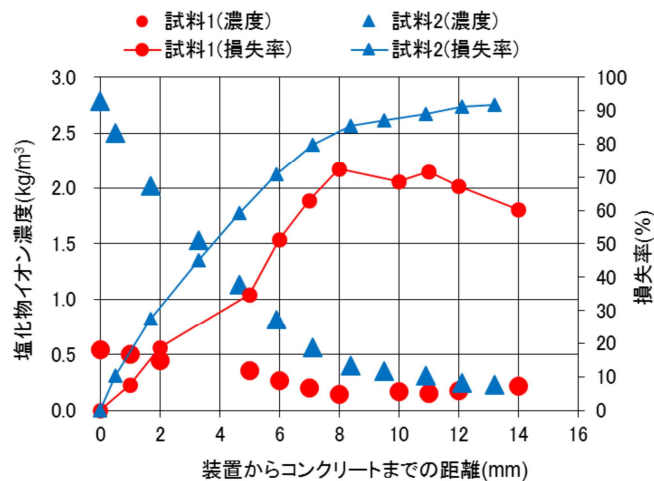


図 5.2 距離の影響

5.2.5 供試体切断時の切削粉回収

方法(b)において深さごとのコンクリート粉を得るために、ダイヤモンド刃を用いた高速切断機で暴露面と平行（深さ方向に垂直）にスライスし、その切削粉自体を回収した。切断毎に切削粉が混ざらないように、エアーコンプレッサを用いた圧縮空気で切断機周辺の粉を除去した。蛍光X線分析には約5g程度の粉が必要であり、今回は他の塩分濃度測定手法（チオシアン酸第二水銀吸光光度法、検量線作成目的）との比較のためにさらに10g以上の粉末が必要となる。供試体後部に受け皿を配置すると、リバウンドにより回収率が低かったため、種々検討した結果、箱形の回収箱を用いることにした。形状は図5.3に示し、材質は使用後水で洗い再度使用できるように塩化ビニル製の薄板を使用することにした。箱から漏れた粉は空中に舞い上がり回収できないため、覆いの中で切断を行い空中に舞った切削粉を堆積させて回収する方法も併せて検討した（図5.4）。

この回収箱を切断機内にセットして（図5.5）切断した結果、7回の平均で回収箱から5.9g（回収率20%）、堆積により10.5g（回収率35%）、合計16.4g（回収率55%）を得ることができた。今回の割裂後の供試体ではなく円柱をそのまま切断するとおよそ2倍の量は確保できる。ただしその場合、コア採取時の表面の塩分量が湿式切断により乱される影響範囲を把握し、その部位を除去する等の対処が必要となる。

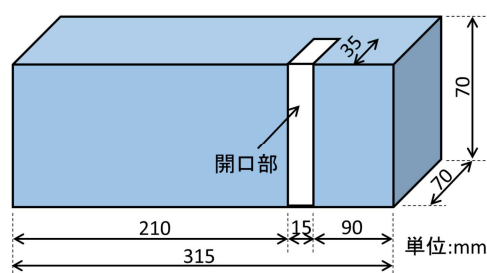


図 5.3 回収箱の寸法



図 5.4 床に舞った切断粉の回収方法

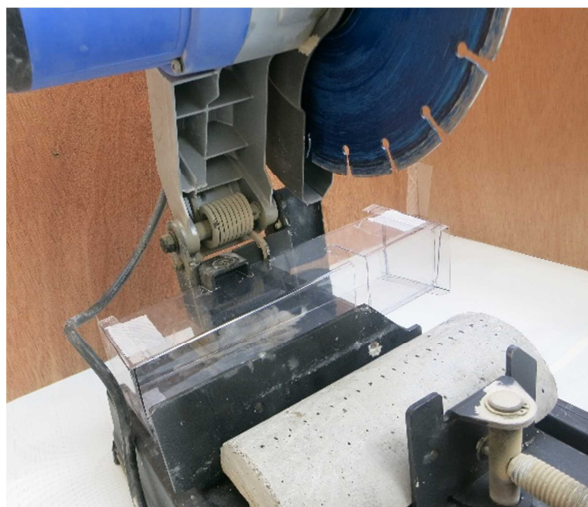


図 5.5 回収箱を設置した切断

5.2.6 スライス片粉碎と切削粉の比較

図 5.6 に示す寸法で切断を行い、隣り合うスライス片と切削粉を 3 体ずつチオシアン酸第二水銀吸光光度法により塩化物イオン濃度を測定した。スライス片の厚み(13.5mm と 12mm)、切断部位の厚み 3mm の重心の位置で評価した。その結果を図 5.7 に示す。得られる結果は必ずしも直線とはならないものの、今回はそれぞれ 3 つの点を結ぶ直線がほぼ一致していることがわかる。

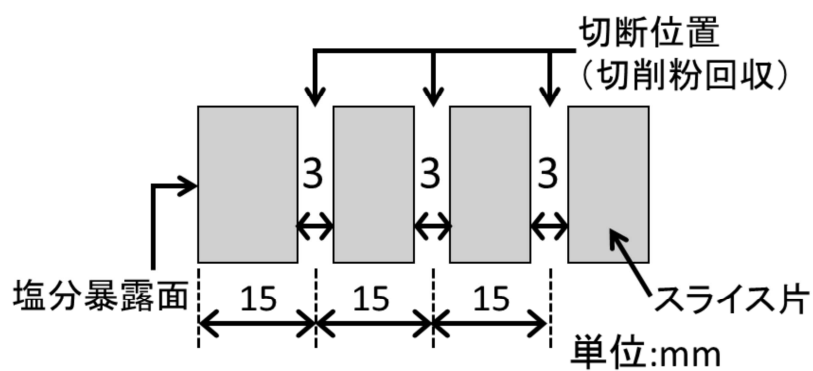


図 5.6 供試体の寸法

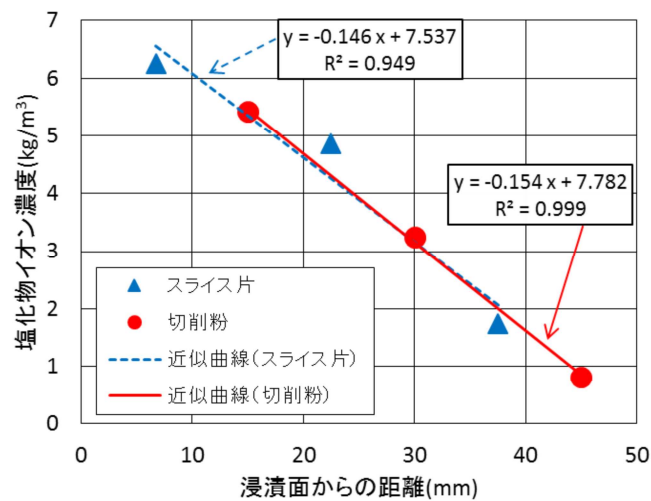


図 5.7 スライス片と切削粉の比較

5.2.7 まとめ

- 1) コンクリート切断時に発生する切削粉を用いて塩分分析を行うことで、粉砕の手間を大幅に軽減できる。
- 2) コンクリート切削粉の回収方法について検討し、回収箱を用いた捕捉と舞った粉の回収を併用すると 55%の回収率を得た。この量は蛍光 X 線分析および化学分析に対して十分な量を確保できる。
- 3) 蛍光 X 線分析装置は対象物までの距離の増加によって測定値が減少するため、割裂面に対しては距離の補正なしには適用が困難である。

5.3 表面吸水試験と塩化物イオンの拡散係数の関係の把握

5.3.1 供試体概要

寸法は、幅100mm、高さ200mmの円柱を縦に割裂したもの(図5.8)である。供試体の断面図、側面図を図5.9、図5.10に示す。濃度10%の塩水に浸漬しており、開放面以外はアルミニウムおよびエポキシ樹脂でコーティングしている。また、各供試体は塩分浸漬前に表面吸水試験を実施しており、浸漬後に限界浸潤深さの測定を硝酸銀噴霧法と吸水変色検出法の2ケースで行っている。



図5.8 使用した供試体

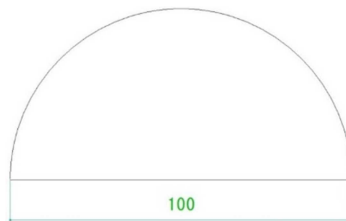


図5.9 断面図 (単位: mm)



図5.10 側面図 (単位: mm)

5.3.2 塩分浸漬方法

供試体の浸漬方法はJSCE-G 572-2010に基づいて行われた。図5.11のように開放面を横に向けて浸漬した。塩分濃度は10%で水面から上端までが50mm程度となるように浸漬されており、表面吸水試験後からの質量の増加がほぼなくなるまで浸漬を行った[13]。

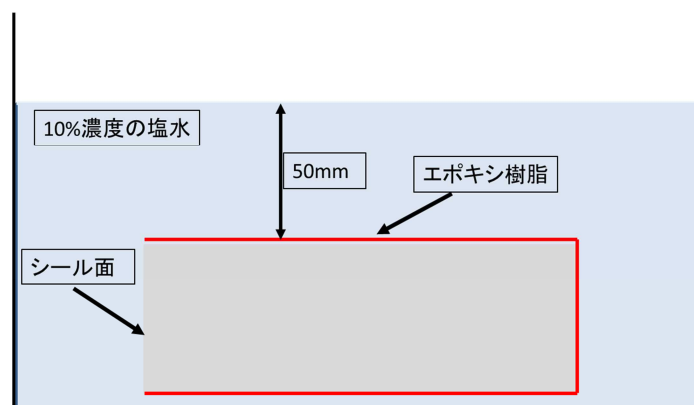


図5.11 浸漬方法[13]

5.3.3 円柱供試体への表面吸水試験

コンクリート壁面に取り付ける器具はコンクリートに接して吸水させる部分と水頭をかけ、吸水量の変化を読み取るシリンダー部により構成されている。吸水部中央からシリンダー上面までの高さは300mmである。円柱供試体に対する表面吸水試験は円柱の底面に対して行われた。

5.3.4 供試体情報

本実験に使用した供試体の情報を表5.1に示す。供試体は養生方法の違いで表5.2のように、末尾のアルファベットにより名前分けがされている。水セメント比は一般的な実構造物のそれを含んでいるものとしている。また養生方法についても同様である。

表5.1 供試体情報[13]

No.	供試体名	W/C (%)	セメント	脱型時の材齢 (日)	10分時点の吸水速度 (ml/m ² /s)
1	40-S	40	普通セメント	7	0.09
2	40-A	40	普通セメント	1	0.09
3	40-AD	40	普通セメント	1	0.19
4	40-W	40	普通セメント	1	0.09
5	40-SD	40	普通セメント	7	0.30
6	40-WD	40	普通セメント	1	0.18
7	60-A	60	普通セメント	1	0.37
8	60-AD	60	普通セメント	1	0.53
9	60-WD	60	普通セメント	1	0.14
10	60-SD	60	普通セメント	7	0.36
11	50A-1	50	普通セメント	1	0.34
12	50A-2	50	普通セメント	1	0.39
13	50S-2	50	普通セメント	7	0.24
14	50W-1	50	普通セメント	1	0.19
15	50AD-1	50	普通セメント	1	0.36
16	50SD-2	50	普通セメント	7	0.31
17	50WD-2	50	普通セメント	1	0.18

表5.2 養生方法の違い[13]

末尾のアルファベット	養生方法
S	材齢1日から7日まで封緘養生21日まで20℃湿度60%で気中養生
A	材齢1日から21日まで20℃湿度60%で気中養生
AD	材齢1日から7日まで20℃湿度60%で気中養生21日まで50℃湿度30%の恒温恒湿槽で乾燥
W	材齢2日から8日まで水中養生21日まで20℃湿度60%で気中養生
SD	材齢1日から7日まで封緘養生21日まで50℃湿度30%の恒温恒湿槽で乾燥
WD	材齢2日から8日まで水中養生22日まで50℃湿度30%の恒温恒湿槽で乾燥

5.3.5 蛍光X線装置の性能把握

(1) 蛍光X線装置について

蛍光X線分析法とはX線を試料に照射し、試料が反射した蛍光X線を分析する方法である。原子にX線が照射されると、そのエネルギーによって原子内では内殻軌道の電子が外にはじき出されて空孔ができる。この状態は原子にとって不安定であるので外殻軌道から電子が落ち込んでくる。外殻電子は内殻電子よりエネルギーがおおきいため、その差である蛍光X線が放射される。この蛍光X線は元素によって固有であるため、蛍光X線のエネルギー値から分析が行うことができる。

(2) 試験概要

各供試体の塩化物イオンの拡散係数を取得するために、割裂してある供試体を切断機によりスライスし、蛍光X線装置でその切削分の塩化物濃度を測定した。その結果と供試体の吸水速度との相関性を見出し、予測式として提案する。

5.3.6 切断計画について

前述の回収箱、切断方法で供試体の切断を行う。既往の方法はスライス片の厚さが20mmで切断を行っているが、実際に使う供試体のスライス幅は20mmの間であること、塩化物イオンの拡散係数予測のデータ数を増やすために10mm~15mmで切断を行った。また切断深さは限界浸潤深さを超えさらに1~2点まで切断を行うことにした。堆積粉回収のために使用する紙はA1の方眼紙を4枚繋げたものを使用し、他測点との混合を防ぐため、切断後の紙の表面をエアで飛ばし、重さを測り切断前から変化が無いことを確認して再度同じものを使用した。今回切断を行った供試体を表5.3に示す。使用した供試体は表面吸水速度が大きいものから小さいものまで分布するように選択した。

表5.3 切断した供試体

No.	供試体名	W/C(%)	セメント
1	40-S	40	普通セメント
3	40-AD	40	普通セメント
4	40-W	40	普通セメント
5	40-SD	40	普通セメント
7	60-A	60	普通セメント
8	60-AD	60	普通セメント
11	50A-1	50	普通セメント
16	50SD-2	50	普通セメント

5.3.7 切断後の供試体の管理方法

図5.12に示すように開放面から浅い順番にスライス，粉ともに1，2，3と番号を付けていく。スライスの場合にははじめにSを粉の場合はPをつける。スライスしたものに關しては表と裏の管理をしなくてはならないので切断後，スライスに印をつける。深さの浅いほうを表，深いほうを裏として扱う。名前の末尾に表の場合はF裏の場合はRをつける。

例えば，40AAの2番目のスライスの表面だとすると40AA-S2Fとする。40AAの3番目の粉とすると40AA-P3とする。切断した粉はシャーレに入れ，スライス片はチャック付きのポリエチレン袋に入れ保管した。

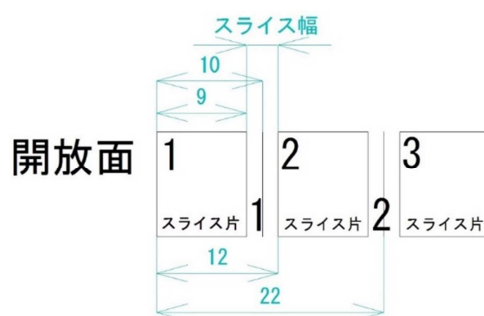


図5.12 供試体管理方法

5.3.8 蛍光X線装置による測定

(1) 測定方法

回収した切削粉を図5.13に示すプラスチック容器とポリプロピレンのシートを組み合わせて測定用のセルを作成し，そのなかに切削粉を入れ，図のように傾向X線装置により塩分濃度を測定する。

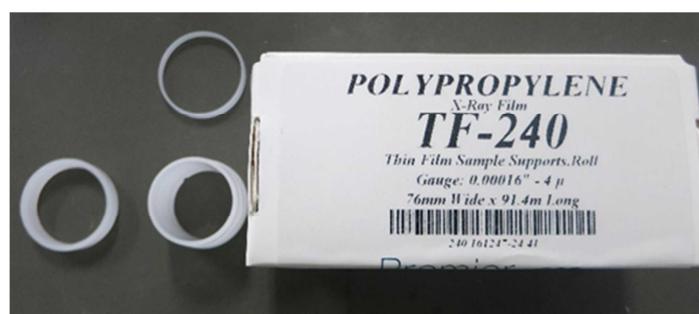


図5.13 プラスチック容器とポリプロピレンシート

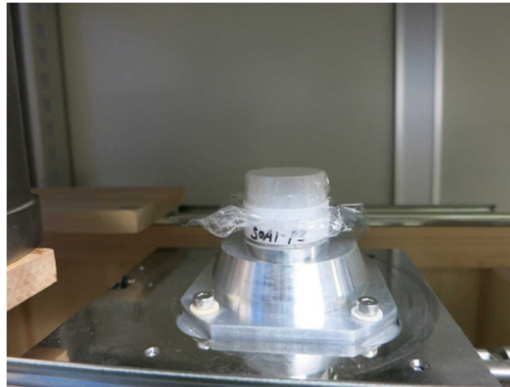


図5.14 蛍光X線装置での測定の様子

(2) 測定結果

蛍光X線装置で測定した結果を供試体ごとに表5.4～表5.11に示す。今回の測定では測定条件による検量線の誤差から定量値が0.7 kg/m³付近を塩化物濃度が0 kg/m³になると仮定して測定を行った。どの供試体においても限界浸潤深さよりも塩化物イオンが拡散していたことがわかる結果となった。

表5.4 40Sの測定結果

測点	深さ(cm)	強度 [CPS/mA]	定量値 (kg/m ³)	定量値平均 (kg/m ³)
P1-1	1	511.01	7.924	7.9735
P1-2		517.478	8.023	
P2-1	2	175.754	2.767	2.7615
P2-2		175.028	2.756	
P3-1	3.5	45.962	0.77	0.77
P3-2		45.964	0.77	
P4-1	5	44.658	0.75	0.7305
P4-2		42.112	0.711	
P5-1	6.5	42.132	0.711	0.7145
P5-2		42.548	0.718	
P6-1	8	49.932	0.831	0.874
P6-2		55.496	0.917	

表5.5 50SD2の測定結果

測点	深さ(cm)	強度 [CPS/mA]	定量値 (kg/m ³)	定量値平均(kg/m ³)
P1-1	1	467.076	7.248	7.255
P1-2		467.962	7.262	
P2-1	2	277.98	4.339	4.3425
P2-2		278.388	4.346	
P3-1	3	139.8	2.214	2.1975
P3-2		137.656	2.181	
P4-1	4	49.394	0.823	0.8455
P4-2		52.286	0.868	
P5-1	5	41.246	0.698	0.741
P5-2		46.852	0.784	

表5.6 40SDの測定結果

測点	深さ(cm)	強度 [CPS/mA]	定量値 (kg/m ³)	定量値平均 (kg/m ³)
P1-1	1.5	337.56	5.256	5.262
P1-2		338.33	5.268	
P2-1	3	61.568	1.01	1.032
P2-2		64.408	1.054	
P3-1	4.5	45.568	0.764	0.779
P3-2		47.484	0.794	
P4-1	6	47.168	0.789	0.825
P4-2		51.88	0.861	

表5.7 60Aの測定結果

測点	深さ(cm)	強度 [CPS/mA]	定量値 (kg/m ³)	定量値平均 (kg/m ³)
P1-1	1	575.288	8.913	8.9255
P1-2		576.95	8.938	
P2-1	2	399.524	6.209	6.3245
P2-2		414.572	6.44	
P3-1	3	313.682	4.888	4.8375
P3-2		307.092	4.787	
P4-1	4	246.304	3.852	3.8495
P4-2		245.97	3.847	
P5-1	5	166.462	2.624	2.592
P5-2		162.29	2.56	
P6-1	6	124.422	1.977	1.9805
P6-2		124.846	1.984	

表5.8 60ADの測定結果

測点	深さ(cm)	強度 [CPS/mA]	定量値 (kg/m ³)	定量値平 均(kg/m ³)
P1-1	1.5	449.788	6.982	6.888
P1-2		437.586	6.794	
P2-1	3	312.694	4.873	4.885
P2-2		314.228	4.897	
P3-1	4.5	87.938	1.416	1.4005
P3-2		85.924	1.385	
P4-1	6	46.546	0.779	0.7665
P4-2		44.93	0.754	

表5.9 50A1の測定結果

測点	深さ(cm)	強度 [CPS/mA]	定量値 (kg/m ³)	定量値平 均(kg/m ³)
P1-1	1	468.086	7.264	7.3005
P1-2		472.884	7.337	
P2-1	2	292.132	4.557	4.587
P2-2		296.012	4.617	
P3-1	3	170.058	2.679	2.657
P3-2		167.196	2.635	
P4-1	4	81.342	1.315	1.287
P4-2		77.706	1.259	
P5-1	5	43.322	0.73	0.6975
P5-2		39.090	0.665	

表5.10 40ADの測定結果

測点	深さ(cm)	強度 [CPS/mA]	定量値 (kg/m ³)	定量値平 均(kg/m ³)
P1-1	1	407.63	6.334	6.3445
P1-2		409	6.355	
P2-1	2	206.81	3.245	3.276
P2-2		210.858	3.307	
P3-1	3	90.546	1.456	1.451
P3-2		89.864	1.446	
P4-1	4	58.432	0.962	0.959
P4-2		58.028	0.956	
P5-1	5	67.392	1.1	1.0845
P5-2		65.354	1.069	
P6-1	6	72.422	1.177	1.205
P6-2		76.012	1.233	

表5.11 40WAの測定結果

測点	深さ(cm)	強度 [CPS/mA]	定量値 (kg/m ³)	定量値平均 (kg/m ³)
P1-1	1	445.054	6.909	6.868
P1-2		439.722	6.827	
P2-1	2	141.384	2.238	2.224
P2-2		139.548	2.21	
P3-1	3	47.12	0.788	0.8015
P3-2		48.888	0.815	
P4-1	4	50.516	0.84	0.8675
P4-2		54.078	0.895	
P5-1	5	40.824	0.691	0.736
P5-2		46.676	0.781	

5.3.9 塩化物イオンの拡散係数の計算

蛍光X線装置で分析した塩化物濃度の値、浸漬日数、各測点の切断深さの数値を用いてフィックの第二法則より、塩化物イオンの拡散係数を計算した。

フィックの第二法則は式(5.1)より表される式で、非定常状態拡散すなわち拡散における濃度が時間に対して変化する場合に用いられる。実際の拡散現象の場合は非定常状態の場合がほとんどであるので今回の供試体に起きた拡散現象も非定常状態であると仮定し、フィックの第二法則を使用した[14]。

$$C_{(x,t)} - C_i = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right) \right\} \quad (5.1)$$

ここに、 x は表面からの距離(cm)、 t は浸漬日数(年)、 $C_{(x,t)}$ は距離 x 、日数 t におけるCl濃度(kg/m³)、 C_0 は表面におけるCl濃度(kg/m³)、 C_i は初期含有Cl濃度(kg/m³)、 D_c は見かけの拡散係数(cm²/年)、 erf は誤差関数である。

式(5.1)を使用し、最小二乗法により各供試体およびK県T港の塩化物イオン拡散係数、表面塩化物濃度を算出した。その結果を表5.12に示す。

表5.12 各供試体および棧橋の塩化物に関する測定結果

	塩化物イオンの拡散係数 (cm ² /年)	表面塩化物濃度 (kg/m ³)
40AD	4.46	10.63
40SD	2.27	20.46
40S	2.25	17.15
40WA	2.12	15.79
50A1	11.64	10.89
50SD2	9.41	11.45
60AD	14.09	11.29
60A	23.15	10.74
K県T港棧橋	0.80	15.83

5.3.10 表面吸水試験の結果との比較

表面吸水試験はコンクリート構造物の吸水抵抗性を定量化できる試験である。そのため、水分を伴って塩化物イオンがコンクリート内に侵入する塩害と関係があると考え、拡散で移動する場合の速度の指標である塩化物イオンの拡散係数と表面吸水試験の結果との比較を行った。比較したそれぞれの値を表5.13に、結果を図5.15に示す。図5.15を見ると全体的に右上がりの結果となった。ただし、ばらつきも多く、線形近似、指数近似のどちらともとれるような傾向にあり、一つの式で定式化することはできない。

K県T港の測定結果もプロットしているが、低めの値が出ているものの、全体の傾向の中では外れているわけではない。完全に一致しないのは、K県T港は10年程度のデータ、それ以外は2ヶ月程度の室内の浸漬試験であるため、材齢や暴露期間の大きな違いも含んでいるためと考えられる。

W/Cごとに比較してみるとW/Cが低いほうが塩化物イオンの拡散係数も低いことが確認できる。つまり、W/Cの低いコンクリートのほうが表層における物質移動抵抗性が小さいといえる。

また、養生方法による塩化物イオンの拡散係数の違いだが、W/Cごとに拡散係数の大きい順番に並び変えたものを表5.14～表5.16に示す。表を見ると気中養生、封緘養生、水中養生の順番で拡散係数が高いことが確認できる。

表5.13 各供試体の表面吸水速度および塩化物イオンの拡散係数

	表面吸水速度 ($\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$)	塩化物イオンの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)
40AD	0.19	4.46
40SD	0.30	2.27
40S	0.09	2.25
40WA	0.09	2.12
50A1	0.34	11.64
50SD2	0.31	9.41
60AD	0.53	14.09
60A	0.37	23.15
K県T港栈橋	0.16	0.80

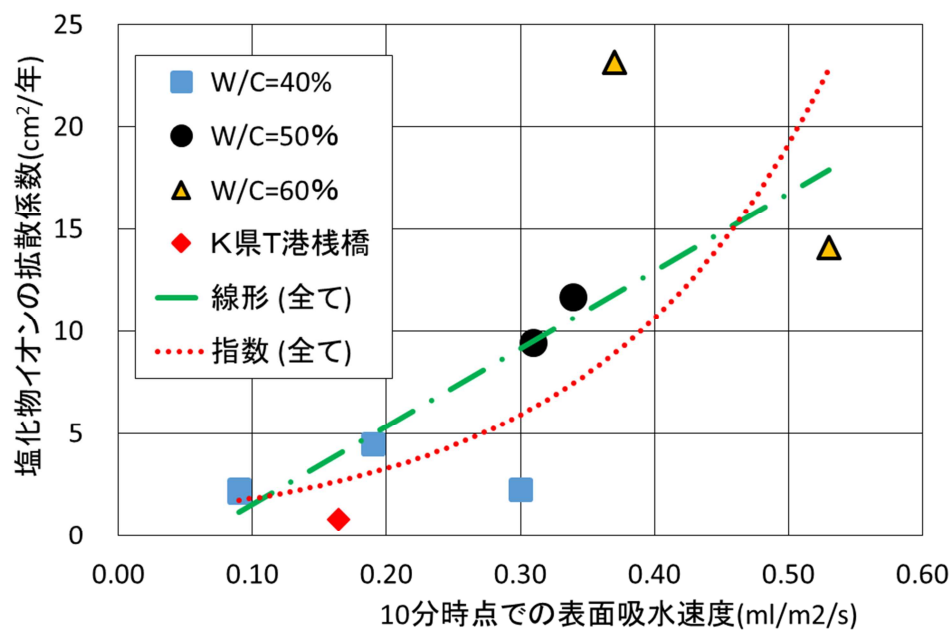


図5.15 表面吸水速度と塩化物イオンの拡散係数との比較

表5.14 W/C=40%の拡散係数

	表面吸水速度(ml/m ² /s)	塩化物イオンの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物濃度(kg/m ³)
40AD	0.19	4.46	10.63
40SD	0.3	2.27	20.46
40S	0.09	2.25	17.15
40WA	0.09	2.12	15.79

表5.15 W/C=50%の拡散係数

	表面吸水速度(ml/m ² /s)	塩化物イオンの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物濃度(kg/m ³)
50A1	0.34	11.64	10.89
50SD2	0.31	9.41	11.45

表5.16 W/C=60%の拡散係数

	表面吸水速度(ml/m ² /s)	塩化物イオンの拡散係数(cm ² /年)	表面塩化物濃度(kg/m ³)
60A	0.37	23.15	10.74
60AD	0.53	14.09	11.29

5.4 第5章のまとめ

表面吸水速度と塩化物イオンの拡散係数を比較した結果、いくつか傾向から外れる結果も得ているものの、概ね表面吸水速度の増加とともに塩化物イオンの拡散係数が増加する結果を得た。実構造物の測定結果も合わせると、ほぼ同じ値にプロットできることがわかった。塩化物イオンの拡散現象と毛細管吸水を単に比較しているため、メカニズムまでは一致しないものの、ある程度の相関性があることが示された。

第6章 結論

6.1 研究で得られた成果

本研究で得られた成果を取りまとめると次の通りである。

- 1) 栈橋等のコンクリート下面に適用できる、新しい表面吸水試験方法を開発した。すべてのケースにおいて精度が確認・担保されているわけではないが、空気圧を用いた方法で計測が可能であることが示された。これを用いると、これまで適用できなかった狭隘部にも設置が可能となる。
- 2) 開発した表面吸水試験を用いて船舶上から栈橋の測定を試みた。
- 3) コアを用いて塩化物イオンを測定するための簡易手法を開発した。
- 4) 表面吸水試験と塩化物イオンの拡散係数の間には、相関関係がみられる。

6.2 今後の課題

今後の課題、展望を取りまとめると以下の通りとなる。

- 1) 開発した表面吸水試験について、測定精度を高め、あらゆるコンクリートに対して確実に計測できるようにする必要がある。
- 2) 開発した表面吸水試験は電磁弁を用いて制御するため、現時点では手動操作であるが、自動化について開発を進めることで、船舶上の測定においても安定的に設置・測定が可能となると考えられる。
- 3) 表面吸水速度と塩化物イオンの拡散係数との関係性について、システマティックな供試体実験の実施および、実構造物の数を増やして検討することで、さらに確度の高い結果を得る必要がある。さらには実験だけでなく、駆動力のメカニズムについても併せて考察する必要がある。

参考文献

- 1) 嘉門雅史，太田貞次，鈴木智郎，三浦正純：道路管理者のための実践的橋梁維持管理講座，大成出版社，2011
- 2) 土木学会：構造物表層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)第二期 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.97，2012
- 3) 岸利治：「ひび割れ制御と耐久設計」を活かすために「品質」を問う，コンクリート工学，Vol.43，No.5，pp.75-80，2005・5
- 4) 日本コンクリート工学会：データベースを核としたコンクリート構造物の品質確保に関する研究委員会報告書・シンポジウム論文集，JCI-C83，2013.9
- 5) 林和彦，細田暁：コンクリート実構造物に適用できる表面吸水試験方法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1769-1774，2011
- 6) 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
- 7) 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
- 8) Neville, A. M., 三浦尚訳：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，pp.600-604，2006
- 9) 林和彦，細田暁，Usman AKMAL，藤原麻希子：コンクリートの表面吸水試験における計測方法およびデータ処理方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1804-1809，2012
- 10) 伊藤忠彦，細田暁，林和彦，西尾隆，八巻大介：覆工コンクリート品質向上の取組みと表層品質の評価，トンネル工学報告集，24巻，I-4号，pp.1-9，2014.12
- 11) 三宅純平，林和彦：表面吸水試験の設置角度の変化によるコンクリートの吸水挙動への影響，土木学会四国支部第20回技術研究発表会講演概要集，V-6，pp.255-256，2014.5
- 12) 金田尚志，石川幸宏，魚本健人：ポータブル型蛍光X線分析装置を用いたコンクリートの分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006
- 13) 岩本佳典：表面吸水試験を用いたかぶりコンクリートにおける限界浸潤深さの予測法の確立，横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 都市地域社会専攻 修士論文，2014.3
- 14) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会：海洋コンクリート構造物の防食Q&A，技報道出版，pp.127~132，2004