

論文 停滞を考慮したコンクリートへの液状水浸透予測手法に関する検討

鎌田 知久*1・岸 利治*2

要旨: 本研究では、コンクリートへの液状水浸透、特に浸透が停滞する際の停滞深さを予測する手法について検討を実施した。構築した停滞深さの予測式は、駆動力となる毛管張力と液状水をビンガム流体とした場合における降伏応力等の概念を導入した抵抗力とのつり合いから導出した。本予測式では、対象コンクリートのセメント種類、水粉体比、養生条件や空隙構造等を変数として与えることで、停滞深さを算出することが可能である。過去に報告されている実験値を対象に本手法を適用した結果、精度よく液状水の停滞深さを予測できることを確認した。

キーワード: 液状水浸透, 停滞深さ, 毛管張力, ビンガム流体

1. はじめに

コンクリート中への液状水浸透は、鉄筋腐食、凍害、ASR など多くの劣化を誘発する要因となる。実環境のコンクリート構造物には、雨水として液状水が供給されることが多く、一例として、雨水の影響を受ける箇所では、影響を受けない乾燥している箇所と比較して、コンクリート片の剥落が多く生じることが知られている¹⁾。このため、2013年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]²⁾においても、「水掛かり」の章が組み込まれており、その重要性が再認識されると同時に、コンクリート中への液状水の浸透挙動を適切に評価することが喫緊の課題となっている。一般にコンクリート等の多孔質材料への液状水浸透を評価する手法としては、Lucas-Washburnの式³⁾が用いられることが多く、本式で表現される液状水の浸透は、時間の平方根に比例する。

近年、実環境において、塩化物イオンの浸透が停滞する現象が確認されているが、本現象は移流、すなわち塩水の浸透が停滞することに起因するものと考えられている⁴⁾。これは、液状水の浸透が停滞することと同義であることから、コンクリート中への液状水の浸透挙動を適切に評価するためには、停滞という現象を考慮する必要があるものとする。また、液状水の浸透が停滞する深さを評価することが可能になれば、設計段階において、コンクリートの品質に応じた適切なかぶり厚さをより合理的に設定できるようになると思われる。しかしながら、上述したように、従来理論のLucas-Washburnの式では、液状水の浸透は時間の平方根に従うものとされているため、ある時間で浸透が停滞するような現象を表現することはできない。

以上を踏まえて本研究では、液状水の浸透停滞深さを評価する手法を確立することを目的に検討を実施した。

本研究では、コンクリートの微小な空隙内において、液状水がビンガム流体的な挙動を示すことが停滞の要因となっているものと仮定して、ビンガム流体的挙動に起因する抵抗力と液状水浸透の駆動力である毛管張力とのつり合いから、液状水の浸透停滞深さを算出する手法を提案した。また、既報の実験値と本手法から得られる解析値を比較することで、本手法の妥当性を検討した。

2. 液状水浸透停滞深さの評価手法の確立

2.1 液状水浸透を評価する既存の手法の一例

コンクリート中への液状水浸透を評価する手法として、式(1)に示したLucas-Washburnの式が用いられる。本式では、液状水の浸透が時間の平方根に比例するものと表現されており、セメント硬化体においても成立することが知られている⁵⁾。液状水浸透の駆動力は式(2)に示した毛管張力、浸透に対する抵抗力は式(3)のHagen-Poiseuilleの式で示される粘性摩擦力であり、両者のつり合いから式(1)が導出される。ただし本式は、非圧縮性ニュートン流体を対象としているため、降伏値を有するビンガム流体など非ニュートン流体に対しては適用外である。

一般に、間隙幅が小さくなるにつれて、液体の粘度が増加し、極微小な空間においては非ニュートン流体のような挙動を示すことが知られている⁶⁾。したがって、コンクリートが有する極微小な空隙内における液状水の挙動も同様に非ニュートン流体、特に降伏値を有するビンガム流体的挙動を示す可能性は極めて高い。また、1章で述べたような液状水の浸透が停滞する現象はビンガム流体的な挙動に起因しているのではないかと考えられる。このため、液状水の浸透停滞を評価するには、微小空間における比ニュートン性、延いてはビンガム流体的な挙動を考慮した手法が求められる。

*1 東京大学 生産技術研究所特任助教 博(工) (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所教授 博(工) (正会員)

$$L = \sqrt{\frac{\gamma r \cos \theta}{2\mu}} \cdot t \quad (1)$$

ここで、 L ：液状水浸透深さ、 γ ：表面張力、 r ：管半径（コンクリートの場合は空隙半径）、 θ ：接触角、 μ ：液体の粘性係数、 t ：時間である。

$$\Delta P_{\text{毛管張力}} = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (2)$$

$$\Delta P_{\text{粘性摩擦}} = \frac{8\mu LV}{r^2} \quad (3)$$

ここで、 $\Delta P_{\text{毛管張力}}$ ：毛管張力、 $\Delta P_{\text{粘性摩擦}}$ ：粘性摩擦力、 V ：管内の平均速度である。

2.2 ビンガム流体的挙動を考慮した液状水浸透停滞深さの評価手法の検討

本研究で提案する手法において、液状水浸透の駆動力は、Lucas-Washburn の式と同様に式(2)に示した毛管張力とした。一方、従来用いられる粘性摩擦力では停滞を表現することができないため、本研究では浸透に対する抵抗力として、式(4)を与えることとした。式(4)で示される抵抗力は微小空隙における液状水のビンガム流体的挙動、特に降伏応力に起因するものとなっている。図-1 に示すように、ここではまず、空隙壁面近傍では液状水の流動が拘束されており、この液状水の流動が拘束される領域には固相の濡れ性に応じた固有の厚さ（固有クリアランス）が存在するものと仮定した。さらに、空隙の寸法が固有クリアランスよりも大きい場合には、空隙中心部に液状水の流動が拘束されない領域が存在することになるので巨視的に見て液状水の浸透の停滞は生じないが、空隙の寸法が固有クリアランスよりも小さい場合には、空隙内の液状水の流動は多かれ少なかれ壁面から拘束されて巨視的に見た液状水の浸透は必ずどこかの深さで停滞するものと仮定した。そして、空隙壁面から最も遠い空隙中心に存在する液状水に作用する降伏応力の空隙壁面での大きさは、空隙の寸法が固有クリアランスよりも小さい場合、特に空隙寸法が 0 において最大値（ τ_y ）を取り、空隙寸法が大きくなって固有クリアランスと一致すれば 0 になって停滞が生じなくなるものと仮定した。

$$\Delta P = \frac{2\pi r \cdot \tau_y \cdot \frac{t-r}{t}}{\pi r^2} \cdot L_{\text{stag}} \quad (4)$$

ここで、 ΔP ：降伏応力（ビンガム流体的挙動）を考慮した場合における浸透に対する抵抗力、 τ_y ：空隙壁面における降伏応力の最大値(N/m)、 t ：空隙壁面近傍で液状水の流動が拘束される領域の厚さ（固有クリアランス）(m)、 r ：細孔径(m)、 L ：浸透停滞深さ(m)である。以上より、液状水の浸透停滞深さは、式(2)および式(4)より導出される

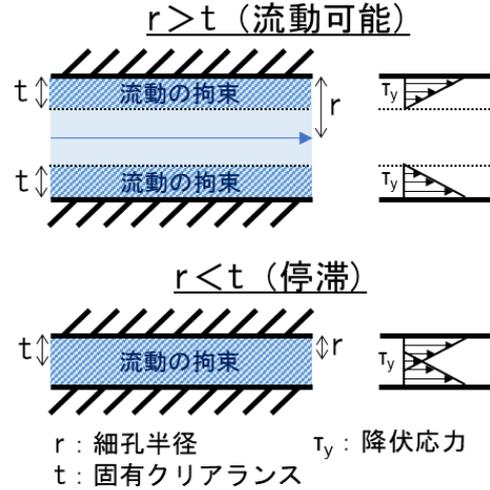


図-1 固有クリアランスの概念図

$$L_{\text{stag}} = \frac{\gamma \cos \theta}{\tau_y} \cdot \frac{t}{t-r} \quad (5)$$

式(5)により表現される。ここで、 θ ：接触角(°)である。

さらに、式(5)中の各種パラメータはそれぞれ式(6)から式(9)で表現され、いずれのパラメータも水粉体比(W/B)、使用材料（普通セメント： $\omega=1.0$ 、フライアッシュや高炉スラグ微粉末などの混和材： $\omega=1.15$ ）、養生条件（気中養生： $\beta=4.0$ 、封緘養生： $\beta=2.0$ 、水中養生： $\beta=1.0$ ）が変数となっており、対象コンクリートの条件を反映できる形としている。それぞれの式における各定数は、細孔径 r を最も適切に評価できるようにパラメトリックスタディにより決定した。また、式(6)から式(9)中の次数については、次章で述べるが、既往研究で実験的に確認されている接触角の値を適切に評価できるように同手法により決定した。いずれの式においても、水粉体比が高いほど、かつ質の悪い養生を施すことで値が大きくなるような形となっている。また、表面張力 γ は 0.073 (N/m) に、粘性係数は微小空間における粘度の増加を考慮して 10 (Pa・s) に設定した。なお、本式では浸透時間を考慮していない。そのため、浸透が停滞する時間および停滞するまでの期間に浸透する深さは、便宜的に式(1)の Lucas-Washburn の式を用いて算出することにした。

$$r = 35W/B \cdot \beta \cdot \omega \quad (6)$$

$$\theta = 45\omega^2 \sqrt{W/B} / \sqrt{\beta} \quad (7)$$

$$\tau_y = 0.75\omega^2 \sqrt{W/B} / \sqrt{\beta} \quad (8)$$

$$t = 150\omega^2 \sqrt{W/B} / \sqrt{\beta} \quad (9)$$

表-1 検証対象のコンクリートの概要

著者	名称	水粉体比	混和材(置換率:%) ^{※1}	養生方法 ^{※2}	浸透深さ(mm)	
鎌田ら(2017) ⁷⁾ 室内試験	N40A	0.40	-	気中	30	停滞
	N50A	0.50	-	気中	50	停滞
	N60A	0.60	-	気中	100	-
	FA50A	0.50	FA (20)	気中	100	-
	BB50A	0.50	BFS (50)	気中	100	-
	N40S	0.40	-	封緘	25	停滞
	N50S	0.50	-	封緘	40	停滞
	N60S	0.60	-	封緘	50	継続 (91 日時点)
	FA50S	0.50	FA (20)	封緘	20	停滞
	BB50S	0.50	BFS (50)	封緘	20	停滞
高橋ら(2010) ⁴⁾ 実構造物	F1-high	0.56	FA (19.7)	標準	45	停滞
	F1-middle	0.56	FA (19.7)	標準	45	停滞
	F1-low	0.56	FA (19.7)	標準	45	停滞
	F2-high	0.467	FA (21.3)	標準	35	停滞
	F2-middle	0.467	FA (21.3)	標準	35	停滞
	F2-low	0.467	FA (21.3)	標準	35	停滞

※1: FA(フライアッシュ), BFS(高炉スラグ微粉末), ※2: 気中→91 日間, 脱型時期: N(5 日), FA(14 日), BFS(7 日), 封緘→91 日間型枠内

ここで、W/B: 水粉体比, β : 養生係数, ω : 混和材係数である。なお、本手法で用いる細孔径 r は、物質移動抵抗性を評価する指標の一つである閾細孔半径を使用することとした。

3. 評価手法の妥当性に関する検証

3.1 検証対象のコンクリート

本研究で提案する液状水の浸透予測手法の妥当性を検証するために使用した既往研究のコンクリートの概要を表-1 に示す。本手法の適用対象はコンクリート中への液状水浸透であるが、本検証では検証材料を確保するために、塩分浸透深さを分析した結果を使用した。高橋ら⁴⁾により、塩分の浸透深さと液状水の浸透深さが一致することが確認されていることから、間接的にはなるものの、塩分浸透深さから液状水の浸透停滞深さを評価できると考えた。検証対象の結果は、室内試験および実構造物を対象に分析が行われたものであり、種々の水粉体比、セメント種、養生条件が揃っている。表中に電位差滴定試験により得られた塩分浸透停滞深さを示しているが、ここでの停滞深さとは、経時的に塩分の浸透深さに変化が見られなくなった時点の浸透深さとしている。本検証では、この値をみかけ上の液状水の浸透停滞深さとして使用した。

3.2 各種パラメータの検証結果

まず図-2 に示した細孔径に関しては、著者ら⁷⁾のデ

ータを用いて、酒井ら⁸⁾が提案する手法により著者が算出した閾細孔半径の結果を実験値として使用した。また高橋ら⁴⁾のデータには空隙構造に関する結果がないため、細孔径については検証の対象外とした。検証結果を見ると、全体的に実験値と計算値が概ね対応していることが分かる。BB50A だけ実験値が極めて大きな値を示しているが、分析用の試料が供試体表層部の空隙が粗大な領域を多く含んでいた可能性があり、BB50A の乖離はこれに起因しているのではないかと考えられる。BB50A 以外では±20%程度の精度で再現できていることから、式(6)により細孔径を算出可能であることを確認した。図-3 から図-5 に、接触角、降伏応力および固有クリアランスの計算値を示す。図-3 に示した接触角については、値が概ね 60 度程度になっており水粉体比の低下に伴い値が減少している。本結果は、中村ら⁹⁾が液滴法で確認したセメント硬化体が示す接触角の傾向と類似していることから、式(7)により対象コンクリートの空隙内における液状水の接触角を算出可能であると考えた。次に、降伏応力と固有クリアランスに関しては、計算値の結果を図-4 と図-5 に示しているが、いずれも実際の値が未知であるため、次節で述べる液状水の浸透停滞深さを精度良く評価することのできる値をパラメトリックスタディにより求めた。本手法で設定した値の妥当性を確認するためにも、特に降伏応力および固有クリアランスに関しては、今後実験的検証が必要であると考えている。

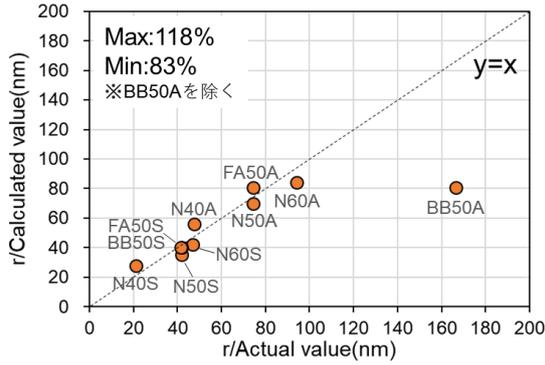


図-2 r : 細孔径 (実験値 vs. 計算値)

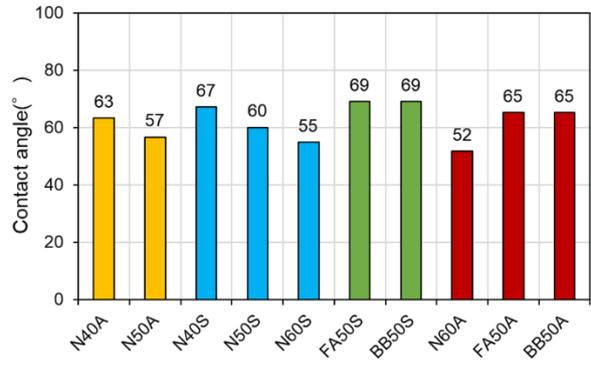


図-3 θ : 接触角 (計算値)

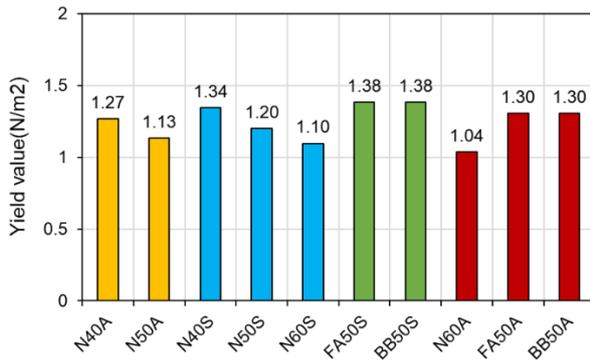


図-4 T_y : 降伏応力 (計算値)

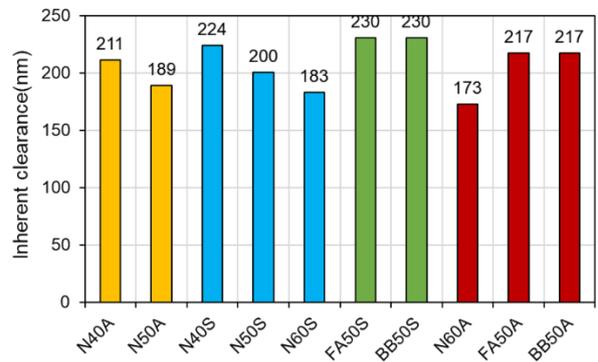


図-5 t : 固有クリアランス (計算値)

3.3 実測値と計算値の比較

停滞深さの実測値と本研究で検討した式(5)より得られた計算値を比較した結果を図-6に示す。図中縦軸は計算値、横軸は実測値となっている。また、計算に用いた各係数の値、計算値の詳細および評価精度を表-2に示す。なお、実構造物においては、示方書相当の標準養生が施されており、なおかつ海水に近く、その影響を受けていることを想定して、養生定数 β は2.0(封緘養生相当)に設定した。

図-6および表-2より、計算値が実験値を概ね良好に再現できていることを確認できる。評価精度を見ても、一部の結果を除いて $\pm 20\%$ 以内の精度を確保している。一方FA50AおよびBB50Aについては、評価精度が著しく悪く、実測値と計算値に大きな乖離が生じている。いずれにおいても、実測値の浸透深さが100mmとなっているが、過去に行われた分析⁷⁾の測定限界が100mmであったことから、実際にはそれ以上浸透しているものと考えられる。これは、文献⁷⁾でも考察されているように、混和材を用いて、かつ気中養生を与えたため、供試体表面部の空隙が粗大に形成され、液状水がその領域を選択的に浸透したことにより急激な移流が発生したことが原因であると考えられる。実環境のコンクリートは、同じ気中養生でも暴露面のみが大気に曝されるため、全面

が暴露されている室内試験の供試体とは液状水の浸透挙動が大きく乖離するものと推察される。したがって、実験値では、100mm以上浸透しているような結果が得られてはいるが、実環境においては、計算値のように、より浅い位置で液状水の浸透が停滞するのではないかと考えられる。本考察については、今後、より実環境に即した養生環境を与えて、液状水の浸透試験を実施することで、その妥当性を検証する予定である。また、N60Sについては、実測値において浸透が継続しているものとされているが、計算値と実測値が一致していることから、今後追加の分析を実施した場合、停滞していることを確認できるのではないかと考えられる。

以上より、既報の実測値を対象に検証を行った結果、本研究で検討した手法により液状水の浸透停滞深さを精度よく再現できたことから、その妥当性を確認した。しかしながら、本研究の検証対象は液状水の浸透深さではなく、塩分の浸透深さであるため間接的な検証にすぎない。そのため、検討した手法の妥当性および適用範囲をより詳細に検証するためにも、今後液状水単味の浸透試験を実施し、その結果と比較する予定である。

3.4 浸透停滞時間の算出

液状水の浸透停滞時間に関しては、式(1)を t に変換した式(10)より算出した。計算に用いる各種パラメータの

表-2 各係数の値, 計算値の詳細および評価精度

名称	W/B	混和材係数 ω	養生係数 β	実測値(mm)	計算値(mm)	評価精度(%)
N40A	0.40	1.0	4.0	30	35	117
N50A	0.50	1.0	4.0	50	56	112
N60A	0.60	1.0	4.0	100	85	85
FA50A	0.50	1.15	4.0	100	37	37
BB50A	0.50	1.15	4.0	100	37	37
N40S	0.40	1.0	2.0	25	24	96
N50S	0.50	1.0	2.0	40	37	92
N60S	0.60	1.0	2.0	50	50	100
FA50S	0.50	1.15	2.0	20	23	114
BB50S	0.50	1.15	2.0	20	23	114
F1-series*	0.56	1.15	2.0	45	42	94
F2-series*	0.467	1.15	2.0	35	36	103

*F1, F2については, 結果が同じであるため「series」として統合した。

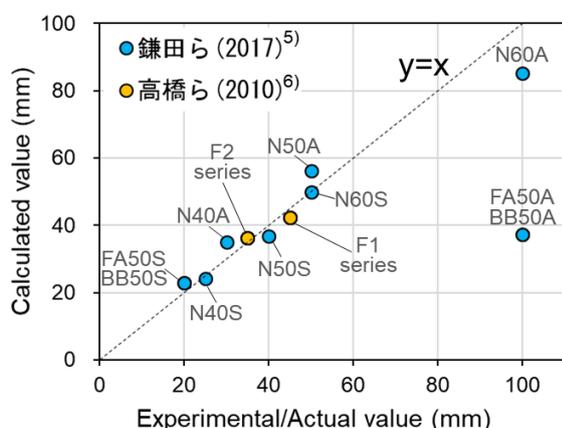


図-6 実測値と計算値の比較 (浸透停滞深さ)

$$t = \frac{2\mu}{r\gamma \cos \theta} \cdot L_{stag}^2 \quad (10)$$

値は, 前節の検証に使用したものと同一である。実測値と計算値を表-3に示す。実測値については, 任意の期間に分析が行われたため, 正確な浸透停滞時間を示すことはできないが, 少なくとも表に示した段階では浸透が停滞している。計算値を見ると, 実測値と比較して全体的により早期に浸透が停滞していることを示す結果となった。N40AとN50Aに関しては, 計算値と実測値の乖離が大きいが, これは液状水の浸透, すなわち移流は停滞しているものの, 塩化物イオンの拡散が継続していたため, より長期間浸透が継続しているように見えている可能性がある。また, N60A, FA50AおよびBB50Aに関しては, 実験条件の都合により停滞は確認されていないが, 前節で考察したように実環境に即した養生環境を与えることで, 液状水の浸透は7日から1か月程度で停滞するのではないかと考えられる。本検証により, 液状水の浸透は比較的早期の段階で停滞する可能性があること

表-3 浸透停滞時間の実測値と計算値

名称	実測値(day)	計算値(day)
N40A	91	8.3
N50A	91	13.9
N60A	-	23.5
FA50A	-	7.0
BB50A	-	7.0
N40S	28	9.0
N50S	28	13.9
N60S	-	17.3
FA50S	28	6.1
BB50S	28	6.1
F1-series	548(1.5年)	16.0
F2-series	548(1.5年)	18.6

が示唆された。ただし, 式(10)より得られる浸透停滞時間の妥当性をより詳細に検証するためには, 前節で述べたように液状水単味の浸透試験を実施する必要がある。

4. まとめ

本研究の結論を以下にまとめる。

- (1) 液状水浸透の駆動力となる毛管張力と, 微小空間におけるビンガム流体的挙動を考慮した抵抗力の関係から, 液状水の浸透停滞深さを算出する評価式を構築した。評価式は対象コンクリートの特性を反映する形となっており, 細孔径, 接触角, 降伏応力および固有クリアランスをパラメータとした。
- (2) 各種パラメータは水粉体比, セメント種類および養生条件によって表現される。細孔径に用いる値は, 物質移動を評価する指標の一つである閾細孔径と定義した。細孔径, 接触角ともに既往研究で報告さ

れている実測値とよく対応することを確認した。降伏応力および固有クリアランスについては、算出される値の妥当性を今後検証する必要がある。

- (3) 液状水の浸透停滞深さについて、既往の研究で報告されている実測値と構築した評価式から得られる計算値を比較した結果、両者が概ね良好に対応することを確認し、構築した評価式の妥当性を示した。また、Lucas-Washburn の式を用いて浸透停滞時間を算出した結果、液状水の浸透は比較的早期において停滞する可能性があることが示唆された。
- (4) 本研究では、塩分分析の結果を対象に検証を行ったことから、液状水の浸透停滞深さに関しては間接的な評価にとどまっている。このため、今後、液状水単味の浸透試験を実施することで、本研究で構築した評価式の妥当性をより詳細に検証する必要がある。

参考文献

- 1) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集，No.711/V-56，pp.125-134，2002.8
- 2) (社)土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，pp.114-118，2013
- 3) Washburn, E., W. : THE DYNAMICS OF CAPILLARY FLOW., THE PHYSICAL REVIEW., Vol.17, No.3, pp.273-283, 1921
- 4) 高橋佑弥，岸利治：フライアッシュコンクリートの塩分浸透抑制現象と液状水浸透限界の関与，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，第 V 部，pp.353-354，2010.9
- 5) 中村兆治，酒井雄也，岸利治：若材齢モルタル硬化体への液状水浸入挙動に関する基礎的研究，第 66 回セメント技術大会講演要旨，pp.104-105，2012.5
- 6) 北森武彦，庄子習一，馬場嘉信，藤田博之：マイクロ化学チップの技術と応用，丸善株式会社，2004
- 7) 鎌田知久：コンクリート中への塩分浸透の停滞現象とその支配機構に関する包括的研究，東京大学学位論文，2017.3
- 8) 酒井雄也，岸利治：閾細孔半径に基づくコンクリート中の物質移動の定量評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.688-693，2014.7
- 9) 中村兆治，酒井雄也，岸利治：見かけの接触角を指標とした配合の違いが毛管張力に与える影響の検討，土木学会第 67 回年次学術講演会公演概要集，第 V 部，pp.811-812，2012.9