

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249060

研究課題名(和文) 液状化浸潤 / 塩分浸透停滞現象の実態把握と機構解明およびその耐久設計への実装

研究課題名(英文) Elucidation and perception for stagnations of liquid water seepage and salt ion permeation and its application for durability design

研究代表者

岸 利治 (KISHI, TOSHIHARU)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：90251339

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンクリート中への塩分浸透およびその停滞挙動の機構を解明するため、様々な検討を実施した。その結果、拡散による塩分浸透は直径10nm程度の極めて小さい空隙においては空隙壁面の電氣的相互作用によって停滞する可能性があること、液状水の移動に伴う物質の侵入である移流に関しては、コンクリートの緻密さや空隙内での液状水の存在が移流に起因する塩分浸透の阻害要因になること、具体的には、空隙中での気泡の存在や気液界面の存在が液状水の侵入を阻害したり制動をかけたたりすることを明らかにした。さらに、移流と拡散双方の浸透機構に基づいて、塩分浸透停滞現象を考慮した簡易な塩分浸透算定手法の検討を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study lots of experiments were carried out to elucidate the mechanisms on stagnations of liquid water seepage and salt ion permeation into hardened cement based concrete. Firstly, it was clarified by a series of experiments using micro and nano-channels on glass chip that diffusion of Chloride ion through condensed water in very fine pore less than 10nm diameter could be blocked due to electrical double layers formed on the wall. Secondary, their stagnations were experimentally verified by mortar specimens which were made from various powder admixtures and cured under different conditions. Then, it was confirmed that to use powder admixtures such as fly ash, silica fume and blast furnace slag which consumes free calcium hydroxide are beneficial to restrain liquid water permeation and related Chloride ion suction and diffusion through relatively larger connective pores. It was also suggested that air bubbles and liquid-water interface directly blocks and brakes them in pores.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 塩害 塩化物イオン 停滞 移流 拡散 耐久設計 気泡

1. 研究開始当初の背景

研究代表者らはコンクリート構造物の品質と劣化進行との関係を定量的に把握することを目的として、実環境下における構造物の表層品質ならびに物質移動抵抗性を評価するため、同一構造物に対して経時的な調査を実施してきた。その結果、塩分の浸透がある時期から停滞し、その後の浸透プロファイルはほとんど変化しないという停滞現象を確認した。図1は、護岸コンクリートに打設された配合の異なる2種類のフライアッシュコンクリート(F2およびF1)と普通コンクリート(B0)中への塩分浸透状況を、材齢1.5年、3.5年および8.75年の時点で調査したものである。その結果、3回にわたる調査を行っても、全塩化物イオン濃度にほとんど変化が認められないという極めて興味深い現象を確認した。また、塩分侵入停滞位置と液状水浸透停滞位置との比較を行い、遮塩性の高いコンクリートにおいては、表面からコンクリート中に塩分が侵入できる範囲は、不飽和のコンクリート中に表面から液状水が浸透できる範囲内に限定されている可能性があることを指摘した。現状の耐久性照査設計において塩分浸透は

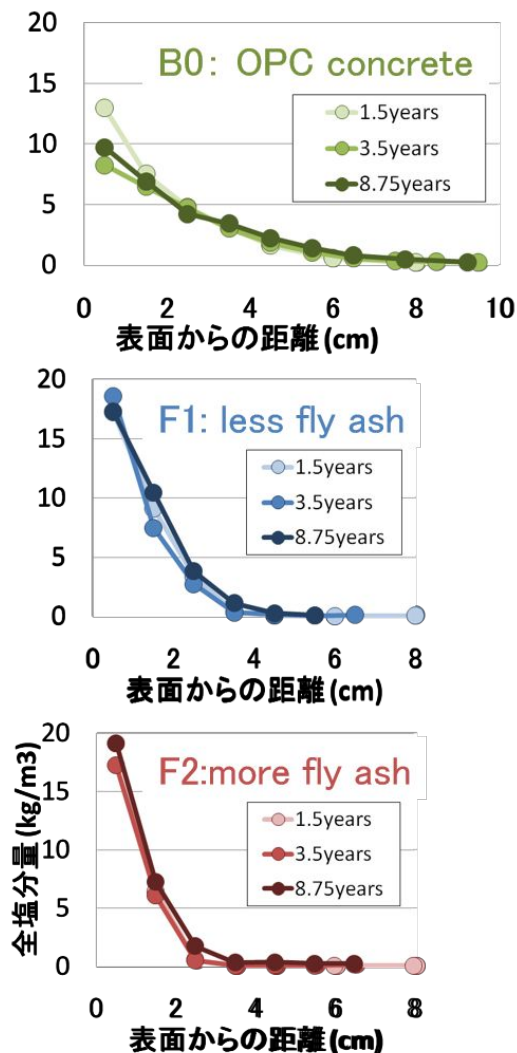


図1 護岸コンクリートから採取したコアの全塩化物イオン量分布の経年比較

Fickの拡散則により予測されており、濃度勾配があれば必ず塩分は深部に浸透することを前提としている。その妥当性に関しては以前から疑問が呈されて来たが、上記測定結果はその疑問を強く裏付ける証拠である。塩化物イオンは液状水の存在場のみを移動すると考えられ、実際に塩分の浸透深さと液状水の浸入深さがほぼ一致することが確認されたことから、塩分浸透の予測には液状水浸入の正確な評価が必要不可欠であると考えられた。

2. 研究の目的

本研究は大きく分けて3つの柱から構成される。液状水浸入や塩分浸透の停滞が現実には生じるのであれば耐久設計等に与える影響は非常に大きい。停滞現象の存在を結論付けるには検証が不十分であることから、実構造物調査を更に重ねて液状水浸入/塩分浸透の停滞現象を示すデータの蓄積を図る。次に、モデル流路を用いて微細空隙中の液状水やイオンの挙動を直接的に観察ならびに計測することで定量的に把握し、その結果に基づいてコンクリート内部の液状水および塩化物イオンの挙動を理解することを目指す。更に、得られた知見を耐久設計に反映させるべく、液状水および塩分浸透の停滞現象のモデル化と定式化について検討した。

3. 研究の方法

(1)コンクリート中の空隙が液状水で満たされているとしても、ある閾値以下の空隙には、壁面とイオンの電気的相互作用によりCl⁻が侵入できないことが考えられる。化学や生物などの分野ではナノスケールでの計測技術が確立されていることから、ナノチャンネルを有するガラス製チップおよびMQAEというCl⁻と反応するとその蛍光強度が減少する蛍光試薬を用いて、空間サイズとCl⁻の侵入挙動に関して光学的手法による検討を行った。

本研究で用いたチップは3cm×3cmのガラス基板上に2つのU字のマイクロチャンネル(深さ30μm、幅500μm)およびそれらを繋ぐ32本のナノチャンネル(深さ95、28、16nm、幅5μm、長さ500μm)から構成されている。実験手順としては、右のマイクロチャンネルをPBで満たす。その後、左のマイクロチャンネルに濃度0.25mMのMQAE溶液と濃度1mMのPB、濃度5mMのKCl溶液をそれぞれ同体積で混合した溶液を導入する。左のマイクロチャンネルから蛍光が確認されたら、PR=PL=0として流れを止め、時間毎に蛍光顕微鏡の画像を取得し、画像解析によりナノチャンネル内の蛍光強度を測定する。そしてKClを硝酸カリウム(KNO₃)で置換して同様の実験を行い、それらの蛍光強度を比較する。もし、ナノチャンネル内がほぼ電気二重層の内部になっているとすると、陽イオンであるMQAEはナノチャンネルに容易に侵入できるのに対し、陰イオンであるCl⁻は侵入が抑制され、KClを混合した場合とKNO₃を混合した場合のナノチ

チャネルからの蛍光強度の差が小さくなる。
(2)次に、異なる初期条件のコンクリート供試体を作製して塩水浸せき試験を実施し、各種分析を実施することで塩分浸透を抑制する要因を明らかにし、その機構を理解することを試みた。初期条件は、乾燥処理や水分供給により調整し、重量変化の測定や空隙構造分析により把握した。塩分浸透挙動は塩水浸せき試験を行い複数の浸せき材齢で塩分分析を実施することで確認した。

ベース供試体(N)には普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比を40~60%の3水準に設定した。混和材を使用した供試体は、フライアッシュ20%内割置換(FA)と高炉スラグ微粉末50%内割置換(BB)の2種類を用意し、水粉体比を50%に設定した。養生は気中養生と封緘養生の2種類を与えた。気中養生(A)では、初期の反応を担保するため使用材料ごとに異なる脱型時期を設定した。Nは5日、FAは14日、BBは7日である。脱型後は20 RH60%の室内に材齢91日まで静置した。封緘養生(S)では、材齢91日まで供試体を型枠内に存置した。

供試体は4分割し、供試体の初期条件を変化させるため乾燥過程と吸水・吸湿過程を施した。乾燥過程では乾燥温度を40と105に設定した。40乾燥(40D)は40、RH10%の恒温恒湿槽内で56日間、105乾燥(105D)は供試体内が絶乾に近い状態になるように105の電気乾燥炉内で28日間の乾燥を与えた。乾燥後は供試体内部の含水条件を変化させるため、吸水過程および吸湿過程を施した。吸水過程(WA)では供試体を20の水中に7日間浸せきさせた後、20 RH60%の室内で21日間の乾燥を与えた。吸湿過程(MA)では20 RH95±5%の環境に調整したコンテナ内に28日間供試体を静置し水分を供給した。各処理終了後は、浸せき面以外からの塩水の浸透を防ぐため、浸せき面を以外の面をエポキシ樹脂によりコーティングした。

4. 研究成果

(1)チャネル深さを95、28、16nmの3水準に設定し、それぞれにおけるKCIを混合した場合の蛍光強度FKCIとKNO₃を混合した場合の蛍光強度FKNO₃を比較した。チャネル深さ95nmにおいては、FKCIがFKNO₃と比較すると減少しており、ナノチャネル内にCl⁻が侵入していることを確認した。蛍光強度の比率FKNO₃/FKCIは1.36となった。チャネル深さ28nmにおいては、FKNO₃/FKCIは1.15となり、95nmの時と比較するとナノチャネルに侵入しているCl⁻の量が減少した。そして、チャネル深さが16nmの時は、FKNO₃/FKCIは1.06となり、ナノチャネル内にはCl⁻がほぼ侵入していないことが確認された。今回の実験で使用した溶液の濃度から電気二重層の厚さを表すデバイ長を算出するとD=6.7nmとなる。すなわち、チャネル深さ16nmの内、13.4nmが電気二重層内部となっており、実質的に

Cl⁻が侵入できる領域は2.6nmとなるため、Cl⁻の侵入が大きく抑制されたと考えられる。

(2)各浸せき期間(28、91、182日)における塩分浸透深さと表面塩化物イオン濃度を測定した。特に、FAおよびBBでは、気中養生を施した場合、急激な浸透により塩分が深部まで浸透しているのに対して、封緘養生を施した場合には早期かつ浅部(20mm)で浸透が停滞することを確認した。

種々の前処理を与えたコンクリート供試体の初期含水状態および空隙構造が塩分浸透挙動に与える影響を検討した結果、以下のような結論が得られた。

フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の混和材を用いた場合、適切な養生を与えることで塩分浸透抵抗性が向上し、早期の段階で浅部において塩分の浸透が停滞することを確認した。また、適切な養生を行うことで、供試体内部に水分が多く残存し、空隙構造が密に形成されていた。

105乾燥を与えた供試体では、絶乾状態かつ粗な空隙構造を示していたが、供試体深部において塩分の浸透が停滞した。コンクリートの含水状態や空隙構造は塩分浸透抵抗性、特に塩分浸透深さに影響を与える要因ではあるが、塩分浸透停滞現象を直接決定付ける要因ではないことが明らかとなった。

乾燥後に液状水として水分を供給した供試体は、乾燥後と比較して水分が多く存在し、空隙量も減少していたにも拘わらず、塩分浸透抵抗性は低下していた。養生後に自然に存在する水分と乾燥後に供給された水分では、空隙内における存在位置や状態が異なるものと推察され、これにより塩分浸透挙動が大きく変化したものと考えられた。

(3)結論として、移流の停滞については、気泡による抑制と液状水のピンガム流体的な挙動により停滞する可能性が高いこと、また、拡散については、直径10nm程度の微小空隙中においては空隙壁面との電氣的相互作用により塩化物イオンの浸透が大きく抑制されて停滞する可能性が高いことが明らかとなった。最後に、塩分浸透停滞現象を表現可能な塩分浸透簡易算定手法についての検討を行い、移流と拡散双方の停滞現象を考慮可能な算定手法の枠組みを提案した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Muzafalu Kayondo, Toshiharu Kishi, Water Flow and Air Bubble Generation Mechanisms in Narrow Interfaces Such as Concrete Cracks、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol38No1、2016、pp1671-1676
http://data.jci-net.or.jp/data_html/38/038-01-1274.html

鎌田知久、岸利治、微小空隙に存在する液状水が移流による塩分浸透に与える影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol38No1、2016、pp849-854
http://data.jci-net.or.jp/data_html/38/038-01-1137.html

鎌田知久、岸利治、実構造物コアを用いた室内塩水浸せき試験による各種混和剤の塩分浸透抵抗性の評価、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol37No1、2015、pp787-792
http://data.jci-net.or.jp/data_html/37/037-01-1126.html

小池賢太郎、山口明伸、武若耕司、福重耕平、移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン浸透モデルに関する検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol36No1、2014、pp904-909
http://data.jci-net.or.jp/data_html/36/036-01-1144.html

中村兆治、酒井雄也、岸利治、コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学の実験による検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol35No1、2013、pp841-846
http://data.jci-net.or.jp/data_pdf/35/035-01-1136.pdf

〔学会発表〕(計 6 件)

与那嶺一秀、山路徹、審良善和、長期海洋暴露試験に基づく高炉スラグ微粉末の置換率を変化させたコンクリートの塩分浸透性に関する検討、第 44 回土木学会関東支部技術研究発表会、2017 年 3 月 7 日、埼玉大学(埼玉)

志村雅仁、岸利治、鎌田知久、コンクリート中への塩分浸透停滞現象の支配要因に関する実験的検討、第 69 回セメント技術大会、2015 年 5 月 12 日、ホテルメトロポリタン池袋(東京)

按貴彰、山口明伸、武若耕司、福重耕平、コンクリート中の空隙構造が水分移動および塩化物イオン浸透特性に与える影響に関する検討、平成 26 年度土木学会西部支部研究発表会、2015 年 3 月 7 日、琉球大学千原キャンパス(沖縄県西原町)

Idrees Zafar and Takafumi Sugiyama、Experimental Factors with regard to Increased Corrosion Resistance in Fly Ash Concrete、EURO COAL ASH2014、査読有、2014 年 10 月 14 日、pp251-264、Munchen(Germany)

Md.Shafiqul、Toshiharu Kishi、Importance of water behavior on Chloride ion ingress in cover concrete –A case study、Proceedings of the RILEM International workshop in performance-based specification and control durability、査読有、2014 年 6 月 11 日、pp117-124、Zagreb(Croatia)

中村兆治、酒井雄也、岸利治、コンクリートへの塩化物イオン浸透停滞の機構に関するガラス製マイクロ/ナノ複合チップを用いた光学の実験による検討、セメント技術大会、2013 年 5 月 13 日、ホテルメトロポリタン池袋(東京)

〔その他〕
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

岸利治(KISHI、Toshiharu)
東京大学・生産技術研究所・教授
研究者番号：90251339

(2)研究分担者

武若耕司(TAKEWAKA、Koji)
鹿児島大学・理工学域工学系・教授
研究者番号：10155054

山田義智(YAMADA、Yoshitomo)
琉球大学・工学部・教授
研究者番号：80220416

山口明伸(YAMAGUCHI、Toshinobu)
鹿児島大学・理工学域工学系・教授
研究者番号：50305158

杉山隆文(SUGIYAMA、Takafumi)
北海道大学・工学研究員・教授
研究者番号：70261865

山路徹(YAMAJI、Toru)
国立研究開発法人・港湾空港技術研究所・構造研究領域・領域長
研究者番号：10371767

岡崎慎一郎(OKAZAKI、Shinichiro)
香川大学・工学部・准教授
研究者番号：30510507

酒井雄也(SAKAI、Yuya)
東京大学・生産技術研究所・講師
研究者番号：40624531

(3)連携研究者
なし()
研究者番号:

(4)研究協力者
松田 芳範 (MATSUDA、Yoshinori)
上田 洋(UEDA、Hiroshi)
蔵重 勲(KURASHIGE、Isao)