

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13809

研究課題名（和文）乾湿によるコンクリート中の水分移動機構の理解と設計体系への反映

研究課題名（英文）Understanding of moisture transport due to wetting and drying in concrete and application to design method

研究代表者

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：コンクリートへの液状水浸潤における残存気泡の存在の確認と、浸入した水の乾燥過程の理解を目的として検討を実施した。

まず液状水浸潤における残存気泡に影響を与える要因を理解するため、様々なセメント硬化体を作製して、残存気泡量の評価を試みた。AE剤の量と混和材によって残存気泡量は変化し、今回の検討では最大で吸水量の12%に相当する残存気泡が存在すると推定された。次にMRIを用いて、セメント硬化体からの水分逸散の様子を観察した。観察の結果、これまで考えられていたような、表面から順に乾燥していくという挙動ではなく、表面に水分が残存した場合でも、不連続に内部から先に水分が失われるという現象が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートに浸入する水分は、鉄筋腐食や様々なコンクリート劣化の原因となり、その絶対量や分布に関する情報は、化学反応の予測のみでなくイオンの移動経路としても重要な情報となる。

今回存在が確認された残存気泡は、無視できない量が存在する可能性があり、コンクリート構造物の劣化メカニズムの理解や、高い精度劣化を予測するには考慮することが重要になると考えられる。またコンクリートの乾燥が表面から順に生じないことが示唆されたが、これはコンクリート中の水分状態の正確な把握や劣化振興の高精度な予測に寄与する情報である。

研究成果の概要（英文）：The objectives of this research was to confirm the existence of the remaining air bubble during water penetration into concrete and to understand the process of the evaporation of the penetrated water.

Firstly, to understand the factors that affect the remaining air bubble during the water penetration, specimens were prepared using various cementitious materials. The amount of the remaining air bubble varied depending on the amount of the AE agent and the admixture materials and the amount corresponds to 12% of the absorbed water at the largest. Next, moisture loss from cementitious materials was observed using MRI with 3T. MRI observation revealed that the drying process in concrete does not occur uniformly from the surface; the inner part dried even though the surface part was still wet.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート 気泡 水 乾燥 MRI セメントペースト モルタル 耐久設計

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

これまでのコンクリート構造物の耐久面に関する設計では、中性化と塩分による鉄筋腐食が考慮されてきた。しかし近年、中性化が進行しておらず、また塩分が供給される環境でないにもかかわらず、鉄筋の腐食が生じているという事例が多く報告されている。このことは、中性化と塩分以外に耐久設計で考慮すべき影響因子が存在することを示唆している。

現在の設計で考慮されていない影響因子として、雨水の影響が考えられており、現在、土木と建築の両分野で、設計において雨水の影響を考慮すべく議論が始まっている。雨水の影響を支持する事例として、例えば塩分が供給されない環境で雨掛かりを受けるコンクリート部材において、中性化が進行していないにもかかわらず鉄筋が腐食し、コンクリートが剥落している。コンクリート中では高アルカリ性であるため、中性化が進行するまでは不動態被膜が鉄筋を腐食から保護していると考えられてきた。しかし、近年の地球的な二酸化炭素濃度の増加により、日本における雨水の pH は 5 程度と酸性になっており、この雨水がコンクリート中に浸入すると、コンクリートが中性化せずとも、pH が十分に上がらない状態で鉄筋に到達しうる。浸入した雨水がしばらくして中和されても、晴天時には逸散し、雨天時に再び酸性の雨水が浸入するというサイクルが繰り返され、錆びが発生しているものと考えられる。地上に存在するコンクリート構造物はいずれも雨水の作用を受けうることから、水の浸潤・乾燥挙動を理解し、評価手法を確立することは、適切な耐久設計のために喫緊の課題であるといえる。

しかし、ここで問題となるのは、水の浸入速度や逸散を設計段階で評価・予測する手法が確立されていないということである。これまでコンクリートの緻密性を評価するために吸水試験が実施されることはあったが、評価項目は吸水量であった。雨水の浸潤による鉄筋腐食を評価するには、雨水が鉄筋に到達したか、すなわち浸潤深さが重要となるが、浸潤深さに関する報告は限られているのが現状である。またそもそも、コンクリート中への水の浸潤挙動には不明な点が多い。さらに難しいのは、後に述べるように、コンクリートへの雨水の浸入が乾湿繰り返し条件で生じることであり、コンクリートの水分逸散に関して、質量減少を研究した事例は多いが、乾燥過程におけるコンクリート内部での水分移動を検討した研究は限られており、乾燥時の水分移動に関して不明な点が多い。耐久設計体系が不適切な場合、問題が変状となって表れるまでにはある程度の時間を要する。問題が顕在化して設計基準が見直されるまでに、耐久性能上問題のある構造物が大量に建設されることになる。そのため現象を根本から理解した上で、適切な耐久設計体系を構築することは非常に重要である。

### 2. 研究の目的

本研究では、コンクリートへの降雨および乾燥に伴う水分移動の巨視的、微視的な挙動メカニズムを理解すること、また乾湿繰り返し条件下での水の挙動を、設計時に利用可能な情報から評価する方法を確立することを目的とする。設計においてこれまでに考慮されていなかった劣化機構を考慮するために必要不可欠な検討であり、土木および建築分野において世界に先駆けた耐久設計体系の構築に資するものである。

本研究の学術的独自性および創造性として、まず最新の MRI 技術を活用することで、これまでに取得することが困難であった、コンクリート中の三次元的な水分移動を把握するという点が挙げられる。近年の MRI 装置や制御ソフトの進化により、十分な解像度での観察が短時間で行えるようになったため、リアルタイムでの観察が可能になった。これを活用することで、水分の巨視的な挙動を把握し、適切な耐久設計体系の構築に役立てる。本研究では、このような複雑な現象を解き明かし、雨水の浸入挙動の評価にその知見を反映させる。降雨の影響を考慮した耐久設計は国外においてもいまだに存在しないことから、本研究の達成は、世界に先駆けた設計体系の実現を可能にするものである。

### 3. 研究の方法

本研究ではコンクリートへの液状水浸潤における残存気泡の存在の確認と、浸入した水の乾燥過程の理解を目的として検討を実施した。

まず液状水浸潤における残存気泡に影響を与える要因を理解するため、セメントペースト、モルタル、コンクリート試験体を作製して、大気圧下および減圧下で吸水させた。大気圧下で吸水させた場合、浸潤中にメニスカスが崩れて気泡を巻き込んだり、不飽和な状態のまま浸潤が進むなどして、浸潤フロント以浅においても完全な飽和状態にならないことが考えられる。一方で減圧下では、上記のような気泡が生じにくくなると期待される。このような仮定に基づき、それぞれの試験体の大気圧下および減圧下での吸水による重量増加の差から、残存気泡量の評価を試みた。

次に MRI を用いて、セメント硬化体からの水分逸散の様子を観察した。セメントペースト、モルタル、コンクリート試験体を作製して、水中養生を与えた後に、乾燥を与え、その過程を 3T の MRI で観察した。

### 4. 研究成果

まず残存気泡の影響については、検討の結果、液状水の浸潤深さが同等であっても、常に減圧下での浸潤の方が吸水による重量増加が大きくなった。重量の差は液状水が浸潤した際に飽和されずに残る残存気泡に起因するものと解釈した。AE 剤の量と混和材によって残存気泡量は変

化し、今回の検討では最大で吸水量の 12%に相当する残存気泡が存在すると推定された。ただ、減圧下であっても残存気泡が存在している可能性があり、実際にはさらに多くの残存気泡が存在する可能性がある。

MRI による観察では、これまでの研究ではコンクリートを観察する場合、白色セメントを用いなければ水分の観察が困難であった。今回、パラメータの最適化を行った結果、普通セメントを用いたコンクリートであっても水分の観察が可能となった。ただし、骨材には石灰石骨材を用いる必要がある。MRI での観察の結果、これまで考えられていたような、表面から順に乾燥していくという挙動ではなく、表面に水分が残存した場合であっても、不連続に内部から先に水分が失われたりと言った現象が確認された。

水の浸潤に伴う腐食や劣化に関して、上記のような現象を考慮することでより合理的な設計体系の達成が可能になると考えられる。

また本研究の成果は以下の形で公表されている。

Hanjing Lin, Yuya Sakai: Observation of moisture transport in drying cementitious materials using MRI, The 12th International Symposium of SSMS (Society for Social Management Systems), Tokyo, Japan, 2019

Hanjing LIN, Yuya SAKAI: Effect of mix design and curing condition on trapped air bubbles during water permeation, コンクリート工学年次論文集、Vol. 41、No. 1、pp. 701-706、2019

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Lin Hanjing, Yuya Sakai	4. 巻 41
2. 論文標題 EFFECT OF MIX DESIGN AND CURING CONDITION ON TRAPPED AIR BUBBLES DURING LIQUID WATER PERMEATION	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Hanjing LIN, Yuya SAKAI
2. 発表標題 Observation of moisture transport in drying cementitious materials using MRI
3. 学会等名 The 12th International Symposium of SSMS (Society for Social Management Systems) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考