

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04077

研究課題名(和文) ナノ・分子スケールのセメント水和物構造変化に基づくコンクリート構造の耐久性力学

研究課題名(英文) Durability mechanics of concrete structure based on nano-atomic scale alteration of C-S-H

研究代表者

丸山 一平 (Maruyama, Ippei)

名古屋大学・環境学研究科・教授

研究者番号：40363030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、鉄筋コンクリート構造物が、乾燥といった一般的な環境に対して、特に強度の変化、剛性の低下、ならびに収縮ひび割れの発生という材料レベルの変質を通じて構造性能を変化させるメカニズムの解明と将来予測に資するデータの蓄積を目的とした研究である。本研究では、セメントペーストの乾燥時のナノスケールの動的な空隙構造変化や強度の変化を明らかにするとともに、コンクリートで骨材とセメントペーストの体積変化の非均一性による相互作用が物性変化を決定することを数値解析によって明らかにした。さらに乾燥が鉄筋コンクリート壁の初期剛性低下や最大耐力時の変形に影響を与えることを実験的に確認した。

研究成果の概要(英文)：Structural performance of reinforced concrete member is dramatically changed due to drying. Concrete compressive strength, tensile strength, and Young's modulus are changed due to drying, and those material performance changes as well as shrinkage-induced cracks alter the structural performance of reinforced concrete member. To understand, predict, and control this phenomena, the understanding of nano-structural changes in hardened cement paste is crucial, and we found the dynamic microstructure change of hardened cement paste through small angle X-ray scattering and water vapor sorption isotherm. Concrete properties change is governed by inhomogeneous volume change between aggregate and cement paste and in this behavior, the interfacial transition zone has a significant role. The reinforced concrete walls with/without drying were investigated and it was found that drying has large influences on stiffness and deformation at the strength.

研究分野：建築材料学

キーワード：コンクリート 乾燥 剛性 収縮ひび割れ C-S-Hの変質

1. 研究開始当初の背景

近年、鉄筋コンクリート構造物の地震後の健全性評価を迅速に行うことや建築物の現有の構造性能評価を目的として、加速度センサなどを設置して構造物の振動計測を行い、振動モードと固有振動数、建物剛性、性能曲線（荷重変形関係）などを抽出する研究が試みられている。中小地震の記録からは特に鉄筋コンクリート造建物について固有周期の増大傾向が確認されている。（女川原発（原子力規制庁 2011）、建築研究所都市防災センター（鹿嶋・北川 2006）、名古屋大学・IB 電子情報館（福和ら 2013））。従来、構造的観点では、この変化は地震時に生じると想像される微細ひび割れによるものと推察されてきた。しかしながら、これらの挙動は材料学的観点に立つと、また別のメカニズムの存在が示唆された。（業績9）それは、乾燥によるコンクリートの剛性低下と収縮によるひび割れ発生である。本研究の着想は、普通コンクリートの剛性が一般環境下において6割程度まで低下する実験的事実と、収縮によって拘束条件下で生ずるひび割れによって鉄筋コンクリート部材剛性がさらに小さくなること、これらの剛性低下によって建物の固有周期が大きく変化する解析的結果が得られたことに基づいている。これらの知見から、材料的な変質、特にカルシウムシリケート水和物（C-S-H）の乾燥・温度下での変質速度を定量するとともに、コンクリート中の水分移動挙動について理解することで、コンクリートを用いた超高層建物の地震応答性状の変化や原子力発電所における重要設備支持機能の変化を時間軸に対して予測が可能となると考えた。

2. 研究の目的

超長期供用期間を想定した鉄筋コンクリート造建物の時間依存性構造性能の予測には、環境に応じたコンクリートの強度・剛性・体積の経年変化に関する基礎的現象の解明と数理モデルの構築が必要である。本研究では、申請者が過去に明らかにしたコンクリートの乾燥によるヤング率の低下、強度変化、収縮現象を支配する、1)セメント水和物の主成分であるカルシウムシリケート水和物の変質を水分子との相互作用力から明らかにし、2)部材性能の変化を材料物性の変質から説明可能であることの実証を目標とする。

3. 研究の方法

実験的検討としては、セメントペーストについて様々な乾燥状態とした試料について、吸着等温線やX線小角散乱、などの原子レベルから数十ナノメートル程度の大きさの情報を取得可能な分析を行い、乾燥時にさまざまに変化する微細構造についての評価を行う。コンクリートについては、異なる水セメント比、粗骨材種類のコンクリートについて

さまざまな条件で乾燥させた試料の载荷実験に関する分析を行い、数値解析での再現検討を行う。部材レベルの検討としては従来行われていない壁部材について、乾燥の影響の無が部材の剛性と耐力に及ぼす影響について実験的に確認するとともに、数値解析を用いて影響評価を行う。

4. 研究成果

4.1 セメントペーストの変質について
コンクリートが固まるのは、セメントが水和反応をして、カルシウムシリケート水和物（以下、C-S-H）と水酸化カルシウムを生成するからである。C-S-Hは層状の物質とされているが、X線回折などを実施しても多くのピークはみられず、微結晶の集合体になっていると考えられている。さらにC-S-Hは水との相互作用が強く、硬化後に乾燥を受けると変質していくことが指摘されているが、特にメソスケール（数nm～数十nm）の孔が大きく変化する傾向や、固体の強度が変化する点が報告されている。本研究ではこれらと関連する情報を取得する目的で、十分水和させたホワイトセメントを異なる湿度で2年程度乾燥させた試料について、Spring-8による平行度の高い放射光を用いて小角散乱分析を行った。測定の結果について、ディスク形状とそれぞれの寸法に分布をもたせた上、大きさについてはフラクタルを仮定したフィッティングを行い、特徴的な形状を抽出することを試みた。

結果は図1に示される散乱プロファイルとなっており、この結果から、C-S-H凝集構造は50%RHより大きい状況では35nm直径程度の大きさをもっているが、湿度が40%RH以下では凝集構造の基本構造は10nm程度になること、常にC-S-Hの層構造は2nm近くであり、層として1～2層を常に保持していること、また、湿度域として50～60%RH近傍では3～4層になり、凝集・圧密が進んで、この領域だけ見かけ上、層が厚くなる傾向があることがわかった。

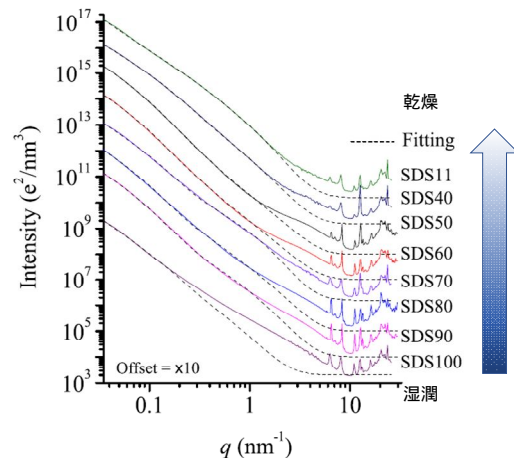


図1 異なる湿度で乾燥させた硬化セメントペーストの小角散乱プロファイル。試料名

の後ろの数値は乾燥させた空間の湿度を表す。

また、図1に示す 5 nm^{-1} 近傍の構造に着目すると、この構造の体積と代表寸法（球で近似したときの直径）は線形関係をもつことがわかった。すなわち、これらの構造の体積変化は1次元的であり、いわゆる層構造による、層間の変化が確認された。本研究では、この他に詳細な水蒸気吸着等温データ（図2）を取得し、微細構造の変化について定量的なデータを取得した。

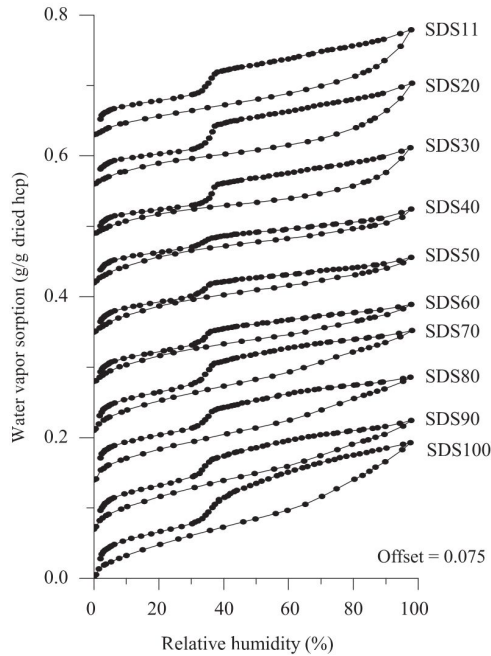


図2 異なる湿度で乾燥させた硬化セメントペーストの水蒸気吸着等温線。比表面積が変化するとともに、40%RH以上のヒステリシスの大きさや形状が大きく変化する。

4.2 コンクリートの乾燥による物性変化
 コンクリートの乾燥影響については、すでにデータを取得していたので、メカニズムを解明する目的で数値解析による再現実験を検討した。解析手法は、剛体バネモデル（Rigid-body spring-network model）を採用し、骨材について明示的にモデル化した（図3）。異なる乾燥度合いのコンクリートの載荷試験に対して荷重変形関係、とくにピーク強度の範囲までを再現する検討を行った（図5）。併せて、コンクリートの乾燥収縮ひずみ自体の再現も試みた（図6）。強度・ヤング率の変化、乾燥収縮ひずみ、ならびに骨材まわりのセメントペーストの損傷（図4）を表現するためには、1）骨材周囲の遷移体を明示的にモデル化すること、2）セメントペースト自体の乾燥による強度やヤング率の変化を明示的に考慮すること、3）骨材のセメントペーストへの拘束硬化を受動的に考慮できるようなモデルとすること、によって再現が可能であることを確認した。

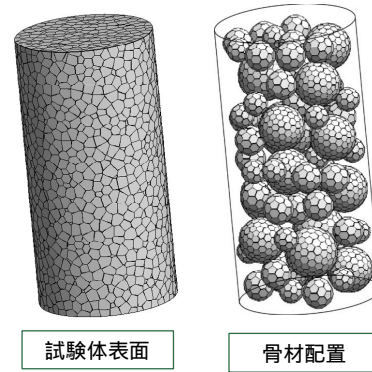


図3 圧縮試験結果を再現するためのメッシュ

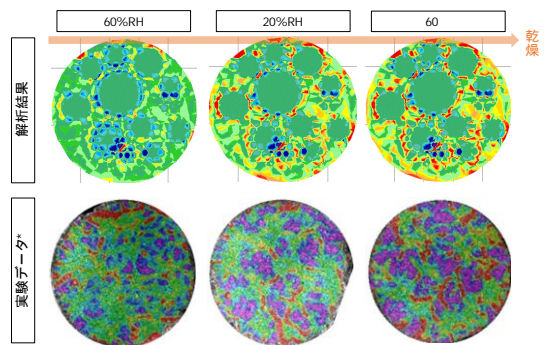


図4 骨材周囲の損傷に関する数値解析結果（上）と実験（下）の比較。実験は画像相関法によって実施した。

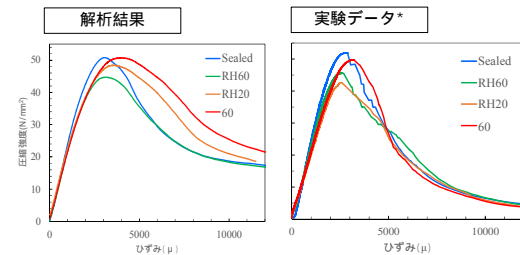


図5 異なる乾燥を受けたコンクリートの圧縮試験時の荷重変形関係

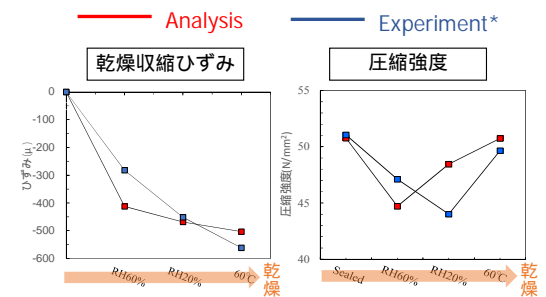


図6 異なる乾燥時のコンクリートの収縮ひずみと圧縮強度

今後、より詳細なモデルを構築していく予定である。

4.3 鉄筋コンクリート壁

約100日程度水中養生を行った鉄筋コンクリート(RC)壁を2体用意し、片方は乾燥前に載荷、片方は約1年の乾燥を室内で行い、乾燥収縮ひずみが平衡に達したのを確認してから、載荷実験を行った。試験体の概要を図7に示す。

載荷試験における荷重変形関係の包絡線を比較したものが図8である。この実験により、乾燥によってRC壁の初期剛性は半分程度まで低下する可能性があること、最大耐力は大きくは影響しないこと、ならびに最大耐力時の変形量は増大することを確認した。

これらを再現する数値解析の結果から、最大耐力は、コンクリートの材料レベルの強度と、載荷中に生じる構造的なひび割れ幅の両者によって決定するものであり、たとえば、よく収縮する骨材の場合で強度低下が生ずる湿度領域では、強度が低下する可能性があることが明らかになった。

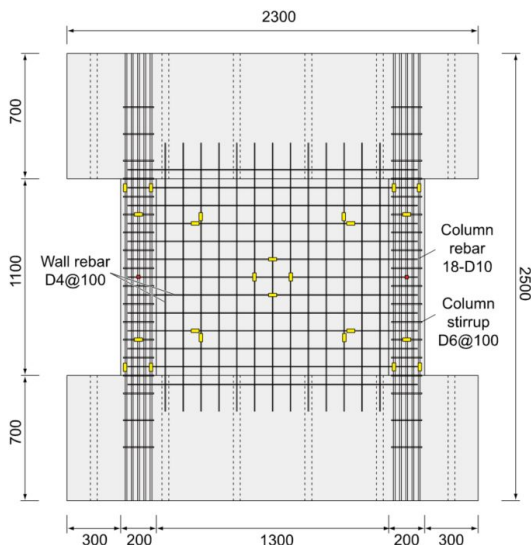


図7 試験体の概要

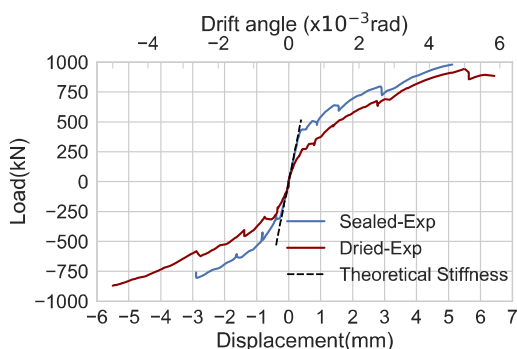


図8 荷重変形関係の比較

4.4 まとめ

さまざまなスケールでのコンクリートの変質と強度、部材性能変化の関連について、いくつかの新しい知見を獲得した。今後は、これらを時間軸で展開する予測手法の高度化

と構造自体の性能変化について着目して検討を行う必要がある。

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10件)

1) H. Sasano, I. Maruyama, Nakamura, A., Yamamoto, Y., Teshigawara, M., Impact of drying on structural performance of reinforced concrete walls, J. Adv. Conc. Tech., 16(5), 2018, 210-232 査読有

2) I. Maruyama, N. Sakamoto, K. Matsui, G. Igarashi, Microstructural changes in white Portland cement paste under the first drying process evaluated by WAXS, SAXS, and USAXS, Cement and Concrete Research 91(2017) 24-32 査読有

3) I. Maruyama, Multi-scale Review for Possible Mechanisms of Natural Frequency Change of Reinforced Concrete Structures under an Ordinary Drying Condition, Journal of Advanced Concrete Technology, 14 (2016) 691-705. (Invited paper) 査読有

4) I. Maruyama, K. Beppu, R. Kurihara, A. Furuta, Action Mechanisms of Shrinkage Reducing Admixture in Hardened Cement Paste, Journal of Advanced Concrete Technology, 14 (2016) 311-323 査読有

5) I. Maruyama, H. Sasano, M. Lin, Impact of Aggregate Properties on the Development of Shrinkage-Induced Cracking in Concrete under Restraint Conditions, Cement and Concrete Research, 85 (2016) 82-101 査読有

[学会発表](計16件)

1) H. Sasano, I. Maruyama, Multi-scale numerical model for bending performance of RC members affected by concrete shrinkage, 24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT-24, Busan, Korea, pp. D1-S5, Aug. 2017

2) R. Kurihara, I. Maruyama, Bending strength and Young's modulus changes of hardened cement paste using high early strength Portland cement after long-term drying, 24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT-24, Busan, Korea, pp. D1-S7, Aug. 2017

3) 丸山一平, コンクリートの乾燥を考慮した鉄筋コンクリートはりのせん断挙動に関する数値解析的検討, 日本建築学会学術講演会(関東), pp.1135-1136, 神奈川, 2015.9.

4) 小川浩太, 山本佳士, 丸山一平: NUMERICAL SIMULATION OF PROPERTIES OF DRIED CONCRETE CONSIDERING INTERFACIAL TRANSITION ZONE, 日本建築学会大会学術講演会, pp.645-646, 2016.8.

6. 研究組織

(1)研究代表者

丸山 一平 (MARUYAMA, Ippei)
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号：40363030

(2)研究分担者

寺本 篤史 (TERAMOTO, Atsushi)
広島大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：30735254

五十嵐 豪 (IGARASHI, GO)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：10733107