

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K06663

研究課題名(和文) 曲げ応力場における構造体コンクリートの耐久性評価および劣化予測システムへの展開

研究課題名(英文) Durability Evaluation and Deterioration Prediction of Structural Concrete in Bending Stress Field

研究代表者

権代 由範 (Gondai, Yoshinori)

仙台高等専門学校・総合工学科・准教授

研究者番号：00553520

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、常時曲げ応力、静的繰り返し曲げ応力および動的繰り返し曲げ応力がコンクリートの耐久性に及ぼす影響について実験的に検討した。常時曲げ応力を再現した試験では、作用応力の違いによる劣化傾向の把握には至らなかったが、偶発的に生じる視認不可能な微細ひび割れや表層組織の局所的緩みが耐久性を左右する可能性が示唆された。繰り返し曲げ応力を受ける構造体コンクリートの耐久性を室内試験で評価しようとした場合、曲げ載荷が耐久性に及ぼす影響を過小評価する可能性がある。また、曲げ疲労荷重を受ける場合、耐久性の低下は大略載荷回数に依存する様相が認められた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、耐久性照査・劣化予測技術を発展させる概念として、構造体コンクリートに常時作用する応力が劣化進行速度に及ぼす影響について実験的に検討を行い、試験データの蓄積を行ったものである。耐久性評価の分野において、考慮されることのなかった応力場の影響に着目して取得したデータは、応力作用下にあるコンクリートの各種耐久性を定量的に評価し、劣化進行機構を解明する足掛かりとなり、構造体コンクリートの効率的な改修時期の推定手法や維持管理手法の確立に資するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)： In this study, the effects of constantly bending stress, repeated static bending stress and repeated dynamic bending stress on the durability of concrete were experimentally investigated. In the test in which the bending stress was constantly applied, it was not possible to grasp the deterioration tendency due to the difference in the applied stress. However, it was suggested that accidental occurrence of invisible fine cracks and local loosening of the surface structure may affect the durability. When attempting to evaluate the durability of structural concrete subjected to repeated bending stress by laboratory tests, there is a possibility of underestimating the effect of bending loading on durability. Also, the decrease in durability due to bending fatigue load may depend on the number of loads.

研究分野：建築材料

キーワード：コンクリート 曲げ応力場 応力強度比 耐久性 耐凍害性 スケーリング

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

構造体コンクリートの耐久性評価は、供試体を用いた室内実験から得られる評価値や予測式によって検討され、構造体に常時作用する自重や外力、プレストレス等に起因する応力の影響は考慮されていない。実環境において応力場にあるコンクリートは、生じる応力の程度で微細ひび割れの発生性状や細孔構造が異なる事が知られており、外的劣化因子の浸透・拡散に起因する劣化に対する抵抗性を照査しようとした場合、これら部材に生じる応力の影響を無視することはできない。しかし、応力場におけるコンクリート組織の変質と耐久性を直接的に関連付けた研究は極めて少なく、常時応力作用環境を再現した耐久性評価の前例はほぼない。以上の背景から、申請者は、圧縮応力場におけるコンクリートの劣化進行メカニズムに関する検討を進めてきた。例えば、実構造体に常時作用する圧縮応力を室内試験レベルで再現(図1)した劣化促進試験では、作用応力レベルの違いが劣化進行速度に影響を及ぼし、異なる劣化形態を示すことを明らかにしている(図2)。これらの成果は、応力の影響を考慮した耐久性評価の必要性を示唆している。

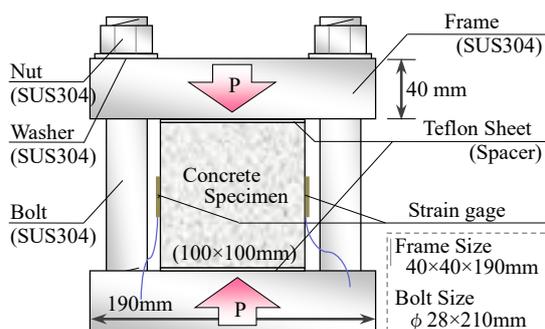


図1 圧縮応力導入フレームによる応力場の再現

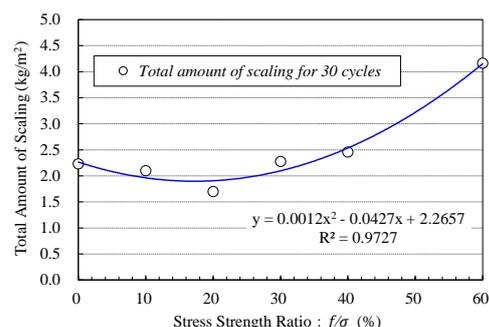


図2 応力レベルによるスケーリング量の変化

### 2. 研究の目的

構造体コンクリートが曝される種々の荷重条件下で生じる「応力」が、耐久性(劣化進行速度)に及ぼす影響を明らかにし、定量的かつ合理的な耐久性能照査・劣化予測手法の確立に寄与する知見の蓄積を目的とする。本研究では、これまで圧縮応力場に着眼し実施してきた検討の範囲を拡大し、構造体コンクリートに生じる「曲げ応力場」を考慮したコンクリートの材料特性について検討する。対象とする「曲げ応力場」は、主に外的劣化因子の浸透・拡散による劣化が懸念される梁下端、繰り返し曲げ応力を生じる柱を想定しているが、加えて、道路床版に見られる活荷重による曲げ疲労と劣化の複合劣化環境下での耐久性についても検討対象とする。

### 3. 研究の方法

#### (1) コンクリート供試体に常時曲げ応力を導入する簡易載荷治具の検討

室内試験(耐久性試験)において曲げ応力場を再現する簡易載荷治具を製作するため、複数の治具の試作を行う。この載荷治具は、コンクリート供試体に簡易的に曲げ応力を導入することが可能であり、応力導入状態を保持したまま各種耐久性試験に供することが可能であることが求められる。そこで、載荷時における供試体のひずみを計測するとともに、初期導入応力の経時変化(減衰)を把握し、各種耐久性試験時における導入応力の制御方法を決定する。

#### (2) 導入応力レベル[常時応力]の違いによる劣化進行速度に関する検討

導入曲げ応力のレベルの違いが物質移動抵抗性に及ぼす影響を把握するため、最大曲げ応力度に対して20%、40%、60%の曲げ引張応力を導入した供試体を対象に吸水試験を実施した。また、常時曲げ応力作用下における耐久性を把握するために、スケーリング試験を実施した。

#### (3) 弾性域における繰り返し曲げ載荷を受けたコンクリートの劣化挙動に関する検討

曲げ載荷によるひび割れの発生が確認される前の組織状態における劣化挙動を把握するため、弾性域(曲げ載荷による残留ひずみが生じない応力領域)における静的繰り返し載荷を実施した供試体を対象に、吸水試験およびスケーリング試験を実施した。

#### (4) 曲げ疲労荷重を受けた鉄筋コンクリートの劣化進行速度に関する検討

曲げ疲労荷重が鉄筋コンクリートの劣化進行速度に及ぼす影響を把握するため、初期ひび割れ発生荷重に対する載荷荷重の割合および載荷回数を変化させた曲げ疲労載荷を行った供試体を対象に、吸水試験およびスケーリング試験を実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) コンクリート供試体に常時曲げ応力を導入する簡易載荷治具の検討

載荷治具は各種耐久性試験において、曲げ応力を導入する試験面に干渉せず取り回しが容易に行え、かつ、必要最小限のボリュームに抑える必要がある。図3に試作型治具の一例を示す。100×100mmの立方体に成形した供試体の上端部のみに圧縮荷重を作用させ、供試体下面(試験面)に曲げ引張応力を導入する方法である。しかし、この方法では試験面に所定の応力を導入することは可能であるが、そのために供試体上端に過剰な圧縮力を作用させる必要があり、供試体自体が破損して導入応力が減衰するほか、治具自体の緩みによる早期の応力減衰が見られた。複

数体の試作ののち、本研究で採用した改良型の簡易載荷治具を写真1に示す。本治具は、写真2に示すように治具と供試体が一体となるようにコンクリートを打ち込み、供試体上部に突き出した左右のパネルをボルトで引き付けることで、平面保持仮定に基づき供試体底面に強制的に曲げ引張応力を導入するものである。これにより、不安定であった導入応力の制御が比較的安定し、治具自体の緩みに起因する応力の減衰も抑制することができた。続いて、導入応力の保持性能を把握するため、図4に示すように最大曲げ応力に対して20%、40%、60%の応力を導入し、応力導入後のひずみ計測を行った。その結果(図5)、載荷によるクリープや乾燥収縮の影響により急激に導入応力が減衰し、ボルトの締め直しを行わなければ、導入応力を保持できないことが分かった。そこで、試験開始材齢を91日に設定し十分な乾燥期間を設けた所、凡そ初期導入応力を保持することができたものの、クリープ等に起因する導入応力の減衰は完全に排除できず、耐久性試験については、ナットの締め直しにより導入応力を保持して実施することとした。

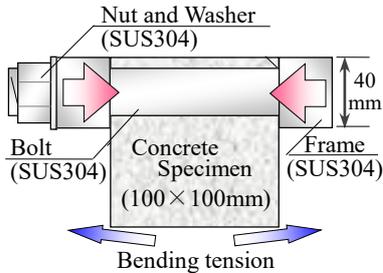


図3 試作型簡易載荷治具



写真1 改良型簡易載荷治具



写真2 供試体打ち込み状況

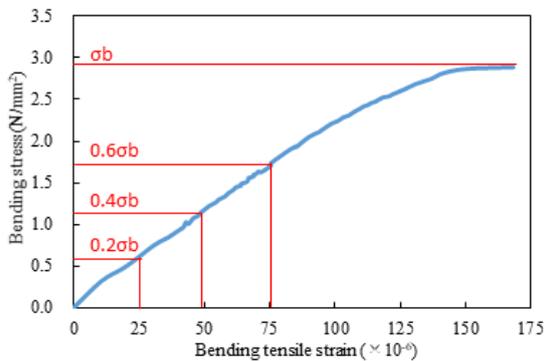


図4 初期導入応力の検討(4点曲げ載荷試験)

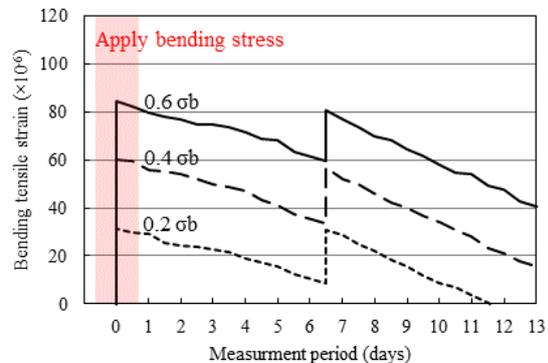


図5 曲げ引張作用面(試験面)のひずみ挙動

## (2) 導入応力レベル[常時応力]の違いによる劣化進行速度に関する検討

図6は吸水期間7日間における吸水率の推移を示したものである。実験当初の想定通り、応力を導入していない無載荷の供試体「Unloaded」の吸水量と比較して、常時曲げ応力を導入した供試体「0.2σb、0.4σb および 0.6σb」の吸水率が增加する様相が確認された。また、導入応力レベルの違いによる比較をすると、導入応力の割合が大きくなるにつれて、吸水率も増加する傾向を確認できる。静的圧縮載荷により生じるひび割れは、応力強度比50%程度までの領域において、その多くが遷移帯中に安定組織として存在し、それ以降の領域ではひび割れがマトリクス中にも形成され始める。常時曲げ引張応力が作用する場合、低応力領域においても、コンクリートの引張強度に依存し、連続的なクラックシステムが形成され、吸水率が增加するものと考えられる。しかし、曲げ応力導入した供試体の試験面の観察では、吸水試験開始前後において、視認可能なひび割れは観察されなかった。図7は、導入曲げ応力の異なる供試体を対象に実施したスケーリング試験の結果を示したものである。応力導入によりスケーリングの発生傾向に変化が生じることが明らかとなった。しかし、スケーリングをはじめとする凍害劣化は一般に飽水度の上昇により進行するため、吸水量の多いケースほどスケーリング量が増加するものと推測されたが、無載荷供試体と比してスケーリング量が減少する様相が確認された。また、曲げ応力の導入割合についても、スケーリング発生量は  $0.4\sigma_b > 0.6\sigma_b \geq 0.2\sigma_b$  という序列関係となり、導入応力割合との相関関係は確認できなかった。そこで、調合条件や養生条件等の変更も含めて複数回にわたる検証実験(図8)を実施したものの、吸水量や導入応力割合とスケーリング発生量との間の明確な相関関係を確認するには至らなかった。

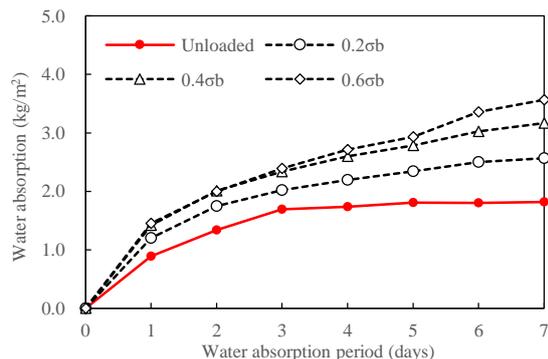


図6 導入応力レベルの違いによる吸水量の変化

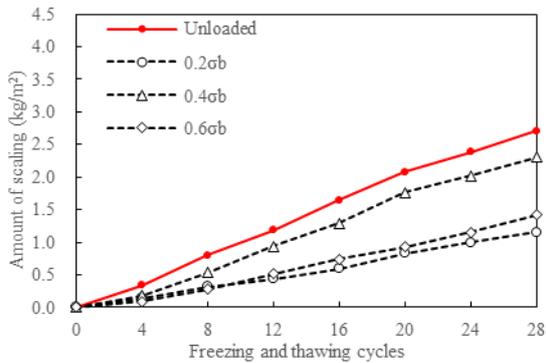


図7 常時曲げ応力場におけるスケーリング性状 (初回実験データ)

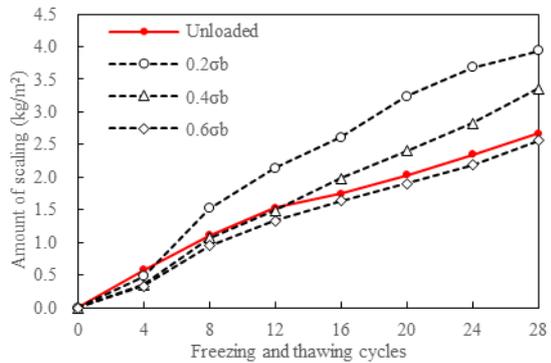


図8 常時曲げ応力場におけるスケーリング性状 (検証実験データの一例)

曲げ応力の導入によるスケーリングの発生傾向の違いに影響を及ぼす要因を明らかにするため、顕微鏡による表面観察や細孔構造特性評価を行った。本実験において導入した応力レベルでは、曲げ引張作用面にひび割れ等による損傷は確認できず、曲げ応力の導入前後における細孔構造の大きな変化も確認できなかった。以上のことから、曲げ応力導入によるスケーリングの発生傾向の違いは、偶発的に発生する視認不可能な内部の微細ひび割れや表層組織の局所的な緩みに依存するものと考えられる。

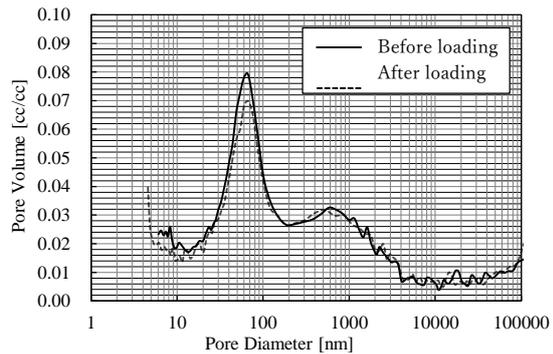


図9 曲げ応力導入前後における細孔構造の変化

### (3) 弾性域における繰り返し曲げ荷重を受けたコンクリートの劣化挙動に関する検討

常時曲げ応力を受ける状態にあるコンクリートの劣化挙動と繰り返し曲げ応力を受けた後に除荷した状態にあるコンクリートの劣化挙動の相違を把握するため、ひび割れの発生を伴わない曲げ応力が作用したコンクリート供試体を作製した。予備実験により15回の静的繰り返し曲げ荷重を行い、除荷後の残留ひずみが $10 \times 10^{-6}$ 以下となる領域を求め、この領域を弾性域と仮定し、荷重回数5回、25回、50回および100回の静的繰り返し曲げ荷重を与え、供試体とした。図10に荷重回数5回、25回、50回および100回の静的繰り返し曲げ荷重による曲げ引張ひずみの挙動を示す。繰り返し荷重回数の増加に伴って、残留ひずみが大きくなる様相が見られるが、残留ひずみはどれも $20 \times 10^{-6}$ 以下であり、顕微鏡によるひび割れの観察においても全ての供試体に視認可能なひび割れの発生は

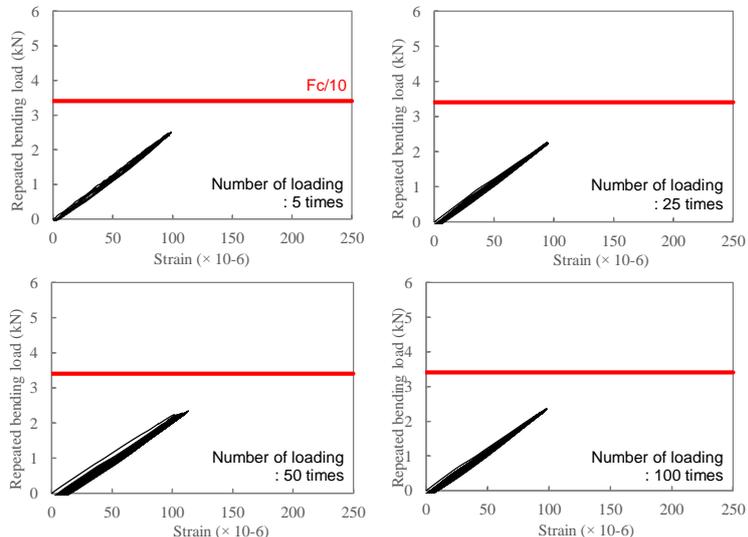


図10 静的繰り返し曲げ荷重によるコンクリートの歪挙動

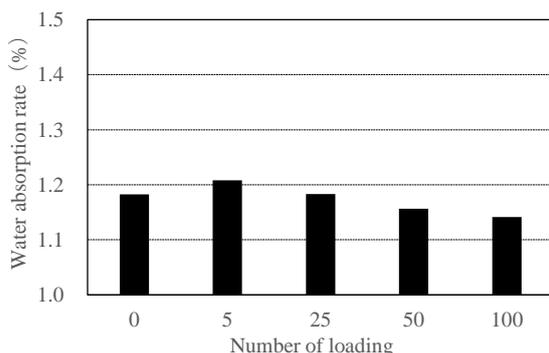


図11 荷重回数の違いによる吸水率

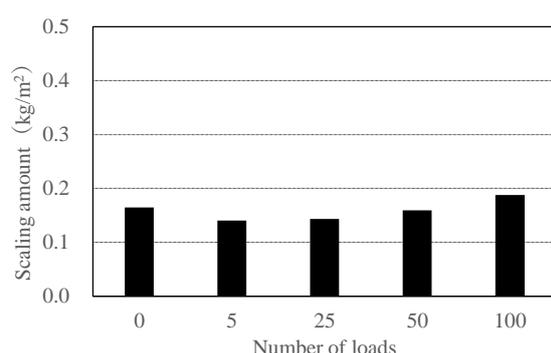


図12 荷重回数の違いによるスケーリング量

確認されなかった。ここで作製した供試体を対象に前掲(研究成果(2))と同様に、下面吸水による吸水量試験および RILEM CDF によるスケーリング試験を実施した。

図 11 に繰り返し曲げ載荷回数異なる供試体の吸水期間 7 日間における吸水率を示す。吸水率は、載荷回数の増加に伴い僅かに減少する傾向がみられるが、その差は 0.5% 程度であり明確に載荷回数に起因した差異であるとは言い切れない。また、常時曲げ応力を受けた状態で行った吸水率試験においては、導入応力の割合の増加により吸水率も相対的に増加する様相が確認されており、常時曲げ応力を受ける構造体コンクリートの吸水性状を把握する上で、応力導入後に除荷する室内試験では吸水率を小さく評価してしまう可能性が示唆された。図 12 に凍結融解試験による載荷回数ごとのスケーリング量を示す。吸水試験の結果と同様に、載荷後に除荷したコンクリート供試体では、載荷回数に起因するスケーリング量の明確な差異は確認されなかった。

#### (4) 曲げ疲労荷重を受けた鉄筋コンクリートの劣化進行速度に関する検討

コンクリートの基礎物性試験から得た各種強度を参照して初期ひび割れ発生荷重を算出し、そのひび割れ発生荷重の 30% および 60% の荷重による 4 点曲げ疲労試験を実施した。また、載荷回数による比較も行うため、超音波伝播速度測定から、上記の疲労試験において初めてひび割れが確認される載荷回数を求め、その回数の 40% および 80% の載荷回数を設定した実験も併せて実施した。ひび割れ発生荷重の 30% および 60% の荷重による疲労試験における載荷回数と超音波伝播速度の関係の一例を図 13 に、これらの条件設定による実験水準の一例を表 1 に示す。

図 14 は、表 1 の実験水準により疲労荷重を与えたコンクリート供試体の純曲げ区間を乾式コンクリートカッターで切り出して実施した吸水試験の結果を示したものである。無載荷 [Unloaded] の供試体に対し、曲げ疲労荷重を受けた供試体における吸水量の増加が認められた。各実験水準における吸水量を比較すると、載荷荷重の大きい L60 シリーズに対して載荷荷重の小さい L30 シリーズの吸水量が多くなり、載荷回数については載荷回数の多い T80 シリーズの吸水量が多くなる傾向が認められた。各実験水準における載荷回数の絶対数は、L30-T80 > L30-T40 > L60-T80 > L60-T40 (> Unloaded) であり、吸水量の序列関係と一致する。このことから、曲げ疲労荷重を受けたコンクリートを対象とした本実験では、吸水量は載荷荷重の大きさより、載荷回数の絶対数に依存する傾向が認められた。動的な曲げ疲労荷重を多数回受けることにより、ひび割れ発生荷重以下の荷重であっても組織的な緩みを発生させ、吸水量が増加するものと考えられる。

図 15 に、各実験水準における凍結融解サイクル数とスケーリング量の関係を示す。前述した飽水度の観点から、吸水試験における吸水量に対応し、スケーリング量も同様の傾向を示すものと思われたが、最終的なスケーリング量の序列関係は、L30-T80 > L60-T80 > L30-T40 ≧ L60-T40 ≧ Unloaded となり吸水試験の結果とは異なる傾向を示した。凍害劣化の進行は、気泡組織や細孔構造に起因する凍結水圧の緩和や氷点降下、飽水度の上昇など、様々な理論や要因が複雑に影響しあい組織の緩み、あるいは、表層剥離といった形態をとって劣化が進行する。したがって、曲げ疲労により形成される空隙構造をさらに深く理解するために検討を継続することで、曲げ疲労荷重を受けるコンクリートの劣化進行機構の解明に近づくものと思われる。

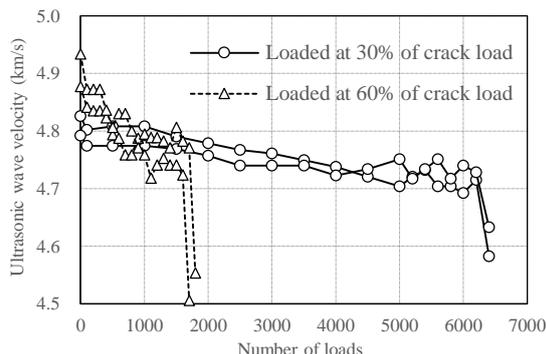


図 13 疲労試験における超音波伝播速度の推移

表 1 曲げ疲労試験における実験水準

Symbol	Applied load to crack load (%)	Load times to crack occurrence times (%)
Unloaded	0%	0%
L30-T40	30%	40%
L30-T80		80%
L60-T40	60%	40%
L60-T80		80%

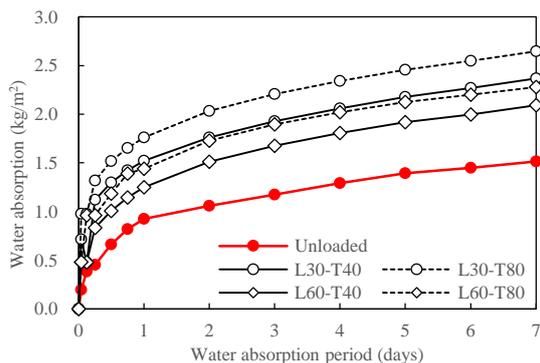


図 14 浸漬期間による吸水量の推移

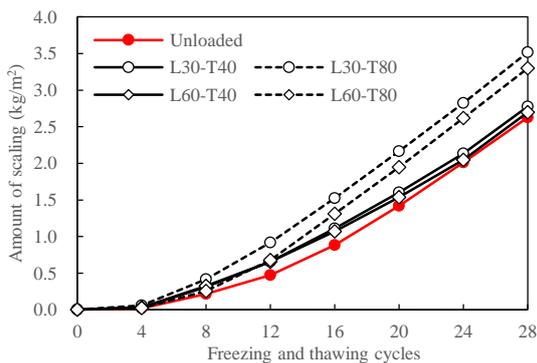


図 15 凍結融解サイクルとスケーリング量

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 権代由範、岩崎立
2. 発表標題 振動 締固めによる 気泡の逸脱 がコンクリートの 強度および耐久 性能 に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会東北支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩崎立、権代由範
2. 発表標題 化学混和剤による気泡制御が モル タの細孔構造およびスケーリング 特性 に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会東北支部
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩崎立、権代由範
2. 発表標題 化学混和剤の破泡・抑泡作用がコンクリートの気泡組織と耐凍害性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会東北支部
4. 発表年 2018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
研究分担者	藤田 智己  (FUJITA Tomomi)  (10552458)	仙台高等専門学校・総合工学科・准教授     (51303)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	月永 洋一  (TSUKINAGA Yoichi)  (60124898)	八戸工業大学・大学院工学研究科・教授    (31103)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関