

論文 温度履歴の異なる凍結融解試験によるモルタルの引張特性評価

橋本 勝文*1・横田 弘*2・佐藤 靖彦*3・三浦 泰人*4

要旨: 本論文では、メソスケールサイズのもルタルを対象に、凍結融解サイクルにおける温度履歴がもルタルの引張特性に及ぼす影響について考察した。その結果、(1)1日あたりの凍結融解回数および凍結速度が凍害の進行に影響を及ぼすこと、および(2)凍害の進行による引張強度、弾性係数等の力学特性値や破壊エネルギーの低下は残留ひずみと強い相関があり、残留ひずみが大きいほど低下するが、残留ひずみと最大ひび割れ幅の関係は不明確であり、(3)凍結融解作用を受け、ひび割れ発生後の応力-ひずみ曲線は著しく変化することが確認された。

キーワード: 凍結融解, 温度履歴, メソスケール, 引張軟化曲線, 引張強度, 弾性係数, 破壊エネルギー

1. はじめに

近年、コンクリート構造物においては、高耐久化の要請が高まり、構造物の長寿命化は早急に取り組むべき課題として挙げられている。その課題解決に向け、材料劣化の物理・化学的な劣化に伴う力学特性の評価を加えた合理的な寿命予測に基づく適切な維持管理対策を施すことにより、コンクリート構造物のライフサイクルコストの低減を図れるシステムの構築が必要不可欠であると著者らは考えている。

北海道のような寒冷地においては、凍害が最も重要視される劣化要因の一つである。凍害は、セメント硬化体中の水分が凍結と融解を繰り返し、主に凍結時の膨張圧と水分の浸入が要因となり、部材表面のスケーリングや微細ひび割れ、およびポップアウトなどを生じる現象であることは広く認められている。しかしながら、その劣化の進行を予測することは未だ容易ではないのが現状である。

大岩・佐藤らは、凍害の進行予測において、コンクリートをモルタルと粗骨材からなる複合材料として準微視的に捉えたメソスケール解析手法を用いることを提案している¹⁾。そのベースとなる解析法は、解析対象を数mm程度の大きさの要素の集合体で表わし、要素間をバネにより連結させた構造にモデル化する手法^{2), 3)}であり、バネの構成則として引張モデルとせん断モデルが必要となる。しかしながら、凍害を考慮したこれらのモデルは未構築である。

これまでの研究では、40×40×160mmの角柱供試体を対象とした室内試験が数多くなされている。それらの成果として、凍結融解サイクルにおける温度履歴もコンクリートのひずみおよびスケーリング量に影響を及ぼすことが報告されている^{4), 5)}。それゆえ、凍結融解サイク

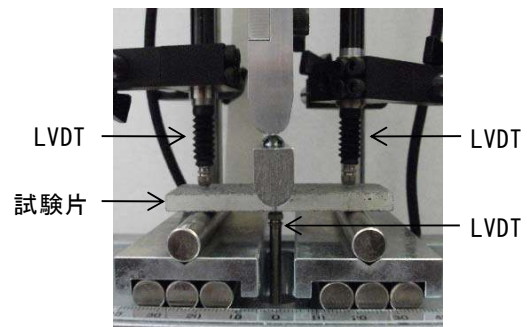


図-1 曲げ試験の様子

ルにおける温度履歴は材料の力学特性を変化させることが推察される。

そこで、本論文では、上記の解析モデルの構築のために、メソスケールサイズのもルタルを対象に、凍結融解サイクルにおける温度履歴がもルタルの引張特性に及ぼす影響について考察する。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用するセメントは普通ポルトランドセメントとし、AE剤は使用していない。W/Cを0.5とし、モルタルを構成する水とセメントと細骨材の割合は、0.5:1:3(質量比)とした。なお、細骨材には1.7mmのふるいを通したものをを使用した。

2.2 供試体の作製方法

型枠はJIS R 5201に準拠した40×40×160mmの鋼製型枠を使用した。打設から24時間後に脱型し、20℃の水中で材齢28日まで封緘養生した。養生終了後、40×40×160mmの角柱供試体の中でブリーディングの影響が少ないと思われる中心部から、1体の角柱供試体につ

*1 北海道大学大学院博士研究員 工学研究院北方圏環境政策工学部門 博士(工) (正会員)

*2 北海道大学大学院教授 工学研究院北方圏環境政策工学部門 博士(工) (正会員)

*3 北海道大学大学院准教授 工学研究院北方圏環境政策工学部門 博士(工) (正会員)

*4 北海道大学大学院 工学研究科環境創生工学専攻 (正会員)

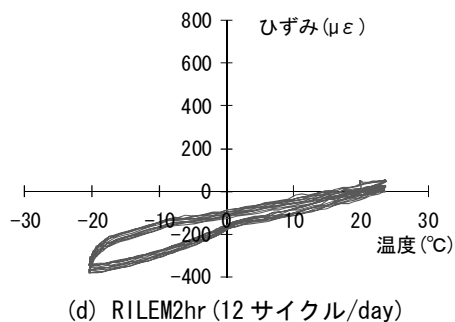
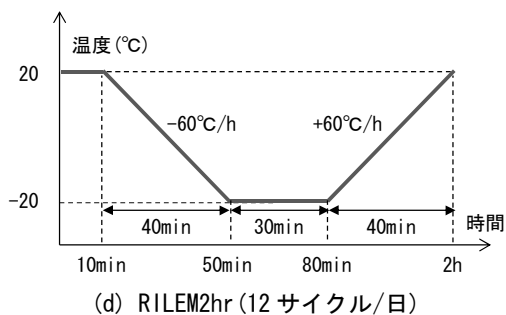
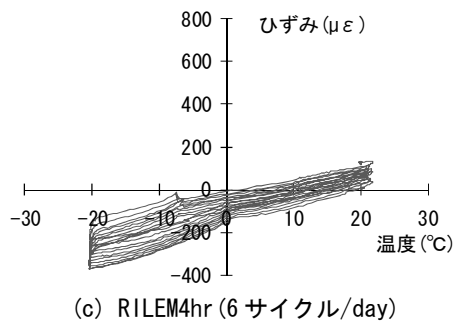
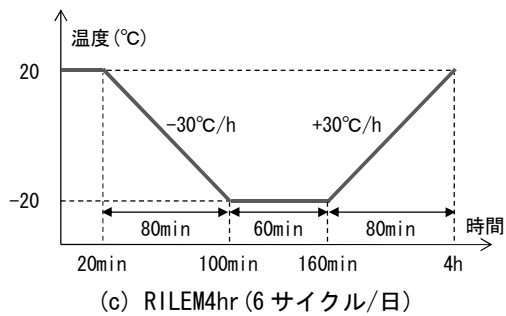
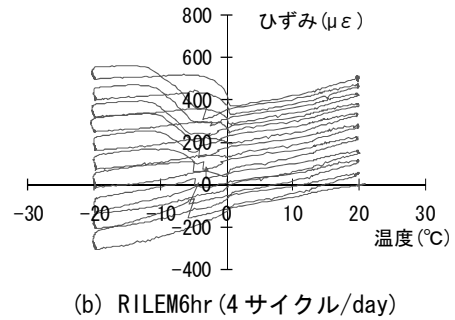
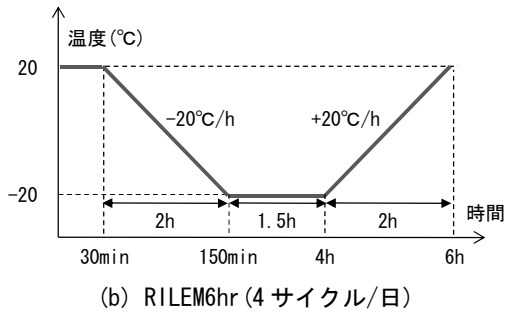
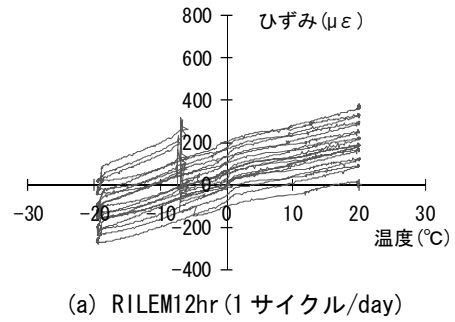
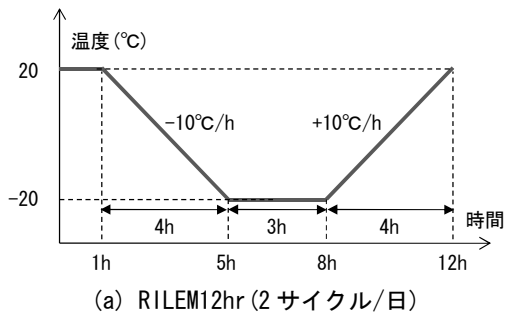


図-2 凍結融解サイクルにおける温度履歴

図-3 凍結融解サイクルにおける温度-ひずみ曲線

き 10 枚の試験片(30×70×5mm)を切り出した⁶⁾。なお、試験片を切出した後にアセトン処理により水和を停止させた。

2.3 曲げ試験

曲げ試験には、三浦・佐藤が構築した実験システム⁷⁾を使用した。すなわち、支点と荷重点直下に 1μm まで測定可能な LVDT を設置し、載荷速度を 1μm/s とした変位制御による 3 点曲げ試験を行い、得られた荷重-変位曲線から JCI-S-001-2003(多直線近似法による引張軟化曲線の推定)⁸⁾法を用いて引張強度、弾性係数、引張軟化

曲線を同定した。また、得られた引張軟化曲線から破壊エネルギーを算出した。本論文では、メソスケール解析に用いる要素として厚さ 5mm のモルタルの平均化構成則の同定を試みていることになる。

2.4 凍結融解サイクル

図-2 に本論文で用いた温度履歴を示す。これは、RILEM CDF 法(以下、RILEM)を参考にして設定したものである。RILEM では 1 サイクルに 12 時間を要するが、1 サイクルあたりの時間を変えた合計 4 種類の温度履歴を用意した。それらは、1 サイクル当たり従来通りの

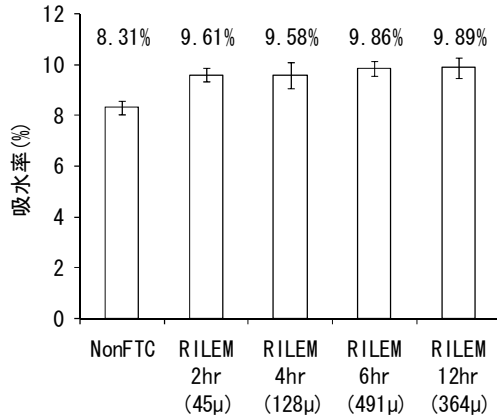


図-4 凍結融解サイクル(残留ひずみ)と吸水率

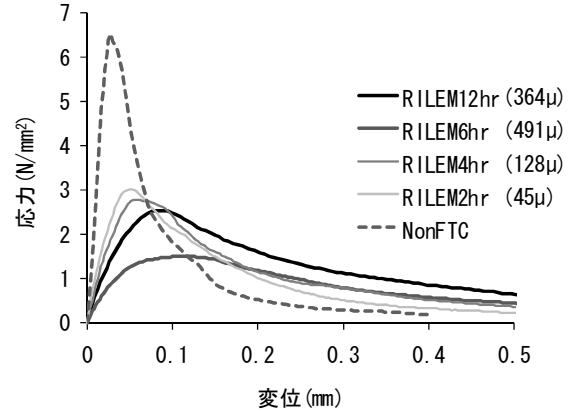


図-5 応力変位曲線

12 時間とした RILEM12hr, 6 時間とした RILEM6hr, 4 時間とした RILEM4hr および 2 時間とした RILEM2hr の 4 パターンである。いずれの場合もサイクル総数は 10 サイクルとした。なお、全てのサイクル開始前および 5 サイクル経過後に試験片にイオン交換水を真空吸水させた。所定の凍結融解サイクル中は、試験片に熱電対(各実験ケースにつき 1 体)およびひずみゲージ(各実験ケースにつき 4 体)を試験片表面に貼付して測定を行った。同じひずみゲージを石英に貼付した測定結果を減ずることにより、温度変化によるひずみ測定誤差要因を排除した。

2.5 引張軟化曲線の同定

引張軟化曲線の同定に使用した解析法⁸⁾は、有限要素法をベースとするもので、供試体を仮想ひび割れ部と線形弾性体で表現した。また、破壊が仮想ひび割れ部においてのみ生じると仮定し、曲げ試験から得られた荷重-変位曲線から逆解析により引張軟化曲線を推定した。

3. 実験結果

3.1 温度-ひずみ曲線

図-3 に凍結融解サイクルにおける温度ひずみ曲線を示す。ここで、温度は試験片表面に貼付した熱電対による測定結果である。これより、凍結融解サイクルの温度履歴は、凍害の進行に伴うひずみの増加に極めて大きな影響を及ぼすことが確認された。10 サイクル終了時点での最高温度(20℃)時の残留ひずみ(凍害による膨張ひずみのことで以降では単に「残留ひずみ」と呼ぶ)を大きい順にならべると、RILEM6hr(491μ)、RILEM12hr(364μ)、RILEM4hr(128μ)、RILEM2hr(45μ)となる。一方、図-4 に示すように、凍結融解作用を受け、試験片の吸水率が增加することが確認された。しかしながら、凍結融解サイクルの温度履歴が凍害の進行に伴う吸水率の増加に及ぼす有意な影響は認められない。既往の報告⁹⁾では、本論文と同様に、温度範囲を+20℃~-20℃とした場合、スケリング評価に基づく十分な凍害劣化を生じさせる

には、1日あたりの凍結融解回数を4サイクル/日以下とする必要があるとされている。本論文では、1日あたりの凍結融解回数を2(RILEM12hr)および4サイクル/日(RILEM6hr)とした場合の残留ひずみが大きく、残留ひずみに基づいた場合にも同様の知見が得られた。すなわち、残留ひずみが凍害を表す指標と考えると、1日あたりの凍結融解回数が多い場合ほど、凍害の進行が速くなるわけではないことが確認された。一方、凍結速度が-20℃/hr(RILEM6hr)よりも速い場合、1日あたりの凍結融解回数が多いほど、凍害の進行が遅く、凍結速度が-20℃/hr(RILEM6hr)よりも遅い場合、1日あたりの凍結融解回数が多いほど、凍害の進行が早くなることが確認された。すなわち、凍結融解サイクルの温度履歴における凍結速度が-20℃/hrよりも速い場合と遅い場合では、劣化メカニズムが異なる可能性がある。既往の文献において、凍害の進行に及ぼす要因が整理されており⁹⁾、1日あたりの凍結融解回数や最低温度、凍結速度^{10), 11)}に関する報告がある。上記のように、本論文においても1日あたりの凍結融解回数および凍結速度が凍害の進行に及ぼす影響が確認された。

3.2 応力-変位曲線

本論文では、曲げ試験から得られた荷重を断面の寸法誤差の影響を考慮するために次式により曲げ応力を算出した。

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

ここで、

P : 荷重[N]

L : スパン長[50mm]

b : 幅[30±0.5mm]

h : 厚さ[5±0.5mm]

図-5 に応力変位曲線を示す。なお、図中の NonFTC は本実験で凍結融解作用を受けていない材齢 28 日時点での結果を示している。凡例に残留ひずみを示す。これよ

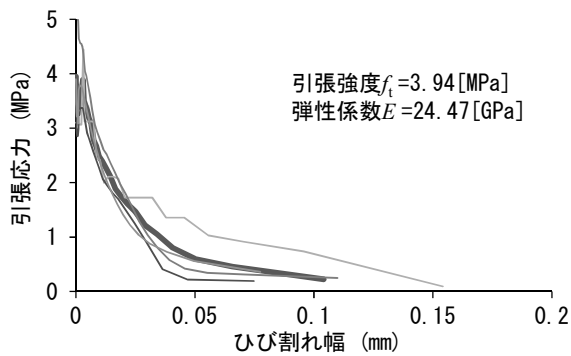


図-6 引張軟化曲線 (材齢 28 日)

り、凍結融解作用を受けた場合には、曲げ強度が著しく低下し、凍結融解作用を受けない場合の 50%程度以下となることが確認された。特に、最大応力の低下が著しいほど最大応力を示した後に緩やかに応力が低下する傾向が確認された。なお、RILEM4hr および RILEM6hr では、最大応力時の応力変位曲線の形状が平坦となる挙動が認められた。しかしながら、RILEM12hr の場合、最大応力時の応力変位曲線の形状に上記の特徴は見られず、RILEM6hr と同様の緩やかな応力低下が確認された。これは、前述の 1 日あたりの凍結融解回数および凍結速度が凍結融解作用による劣化メカニズムの違いが影響している可能性が考えられる。

3.3 引張特性

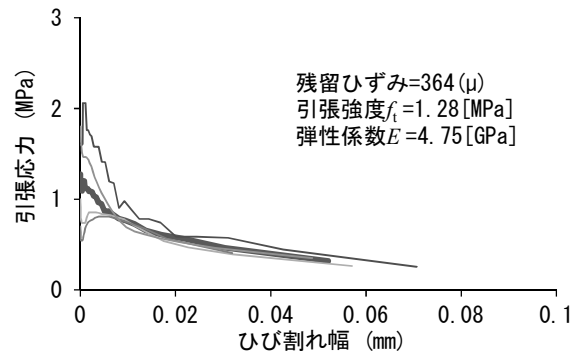
本論文では、前述のように、曲げ試験から得られた荷重-変位曲線から逆解析により引張軟化曲線を推定しており、解析における初期結合応力を引張強度、最大荷重の 3 分の 1 までの勾配から求めた割線弾性係数を弾性係数とした。また、得られた引張軟化曲線から破壊エネルギーを算出した。

(1) 引張軟化曲線

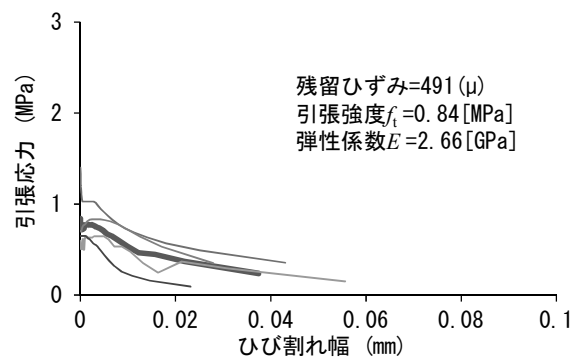
図-6 に材齢 28 日時点で得られた引張軟化曲線、図-7 に凍結融解サイクル終了後の試験片の引張軟化曲線を示す。なお、図中の太線は平均した引張軟化曲線を、また、図中に残留ひずみ、引張強度および弾性係数を示す。これより、凍結融解作用を受けた場合には引張軟化曲線は健全なものに比べて著しく変化することが確認された。特に、残留ひずみが大きいほど引張強度および弾性係数が小さくなることが確認された。また、引張軟化曲線の面積(破壊エネルギー)により同定される引張軟化域が小さくなることが確認された。

(2) 引張強度および弾性係数

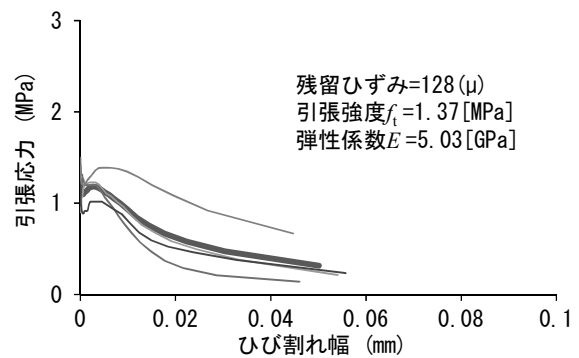
図-8 に引張強度と残留ひずみとの関係を示す。これより、引張強度と残留ひずみには強い相関があり、残留ひずみが大きいほど引張強度が小さくなることが確認され、両者は概ね線形式で補間できると考えられる。



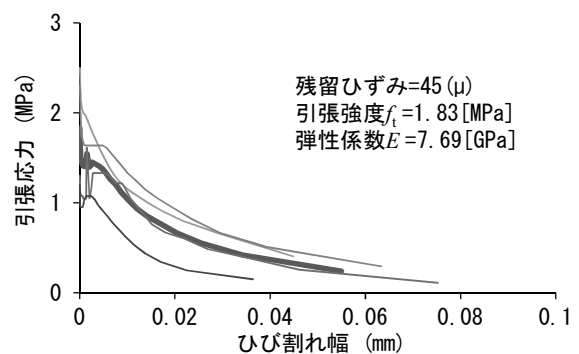
(a) RILEM12hr (2 サイクル/day)



(b) RILEM6hr (4 サイクル/day)



(c) RILEM4hr (6 サイクル/day)



(d) RILEM2hr (12 サイクル/day)

図-7 凍結融解サイクル後の引張軟化曲線

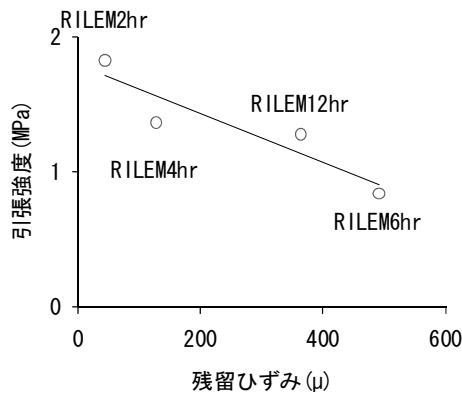


図-8 残留ひずみと引張強度の関係

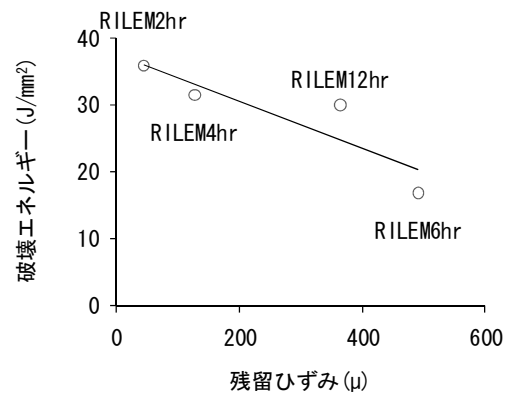


図-11 残留ひずみと破壊エネルギーの関係

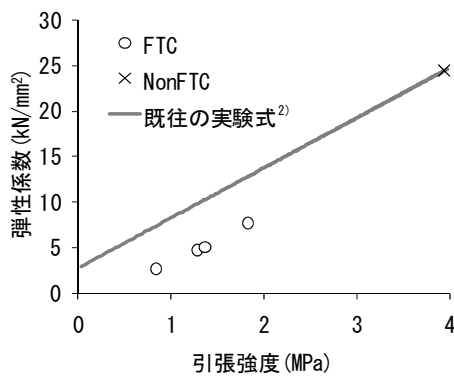


図-9 引張強度と弾性係数の関係

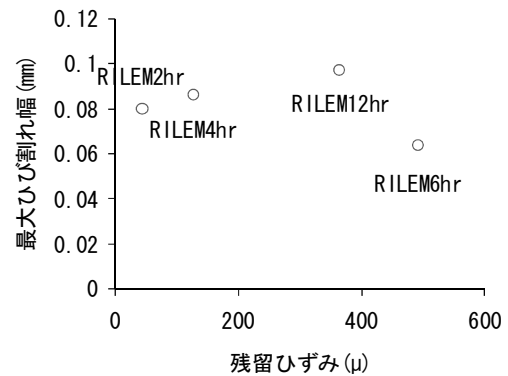


図-12 残留ひずみと最大ひび割れ幅

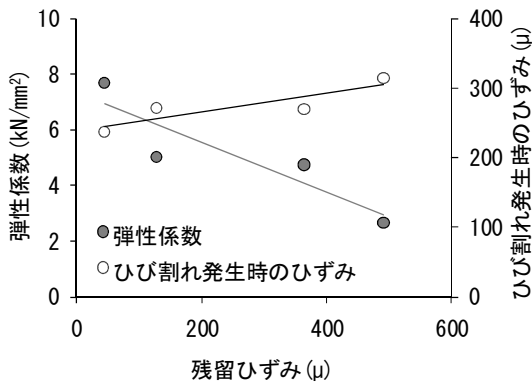


図-10 弾性係数およびひび割れ発生時のひずみ

図-9 に引張強度と弾性係数との関係を示す。図中の実線は、健全なモルタルで得られた関係²⁾(式(2)および(3)参照)を示している。

$$E = 1000\{7.7\ln(f'_c) - 5.5\} \quad (2)$$

$$f_t = 1.4\ln(f'_c) - 1.5 \quad (3)$$

ここで、

E : 弾性係数[N/mm²]

f'_c : 圧縮強度[N/mm²]

f_t : 引張強度[N/mm²]

これより、本実験で凍結融解作用を受けていない材齢

28 日時点で得られた引張強度と弾性係数の結果(NonFTC)は既往の実験式から得られる関係と一致する。しかしながら、凍結融解作用を受けた場合(FTC)には、任意の引張強度に対する弾性係数が健全な場合よりも大きく低下したものの、凍結融解作用を受けた場合においても引張強度と弾性係数の間に強い相関が認められた。これは、部材が凍結融解作用を受けた場合と受けない場合では、荷重による損傷機構が異なることを示唆している。

図-10 に残留ひずみと弾性係数およびひび割れ発生時のひずみの関係を示す。ここで、ひび割れ発生時のひずみは、引張強度に達するまでのプレピーク挙動を得られた弾性係数を有する直線と仮定し算出した。これより、残留ひずみの増加とともに弾性係数が低下し、かつひび割れ発生時のひずみが大きくなることが明らかとなった。

(3) 破壊エネルギーおよび最大ひび割れ幅

図-11 に残留ひずみと破壊エネルギーの関係を示す。また、図-12 に残留ひずみと最大ひび割れ幅の関係を示す。これより、破壊エネルギーは残留ひずみと強い相関があり、残留ひずみがいほど破壊エネルギーが小さくなることが確認された。一方、最大ひび割れ幅は残留ひずみとの相関は確認されず、1 日あたりの凍結融解回

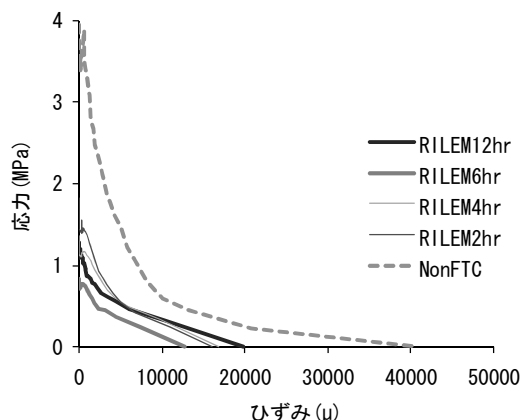


図-13 ひび割れ発生後の応力-ひずみ曲線

数および凍結速度が凍結融解による劣化メカニズムの違いに影響している可能性が考えられる。

(4) 応力-ひずみ曲線

図-13 にひび割れ発生後の応力-ひずみ曲線を示す。ここで、仮想ひび割れ帯を 5mm として図-6 および図-7 で得られたひび割れ幅を除することによりひずみを算出した。これより、凍結融解作用を受け、ひび割れ発生後の応力-ひずみ曲線は著しく変化することが確認された。

4. まとめ

本論文における凍結融解試験および曲げ試験で得られた主たる知見を以下に示す。

- (1) 凍結融解試験における温度履歴は、ひずみの増加に大きな影響を及ぼす。特に、1日あたりの凍結融解回数および凍結速度が凍害の進行に影響を及ぼす。
- (2) 凍害の進行による引張強度、弾性係数等の力学特性値や破壊エネルギーの低下は、残留ひずみと強い相関があり、残留ひずみが大きいほど低下する。残留ひずみと最大ひび割れ幅の関係は不明確である。
- (3) 凍結融解作用を受け、ひび割れ発生後の応力-ひずみ曲線は著しく変化することが確認された。

謝辞

本研究は、科学技術振興調整費アジア・アフリカ科学技術協力の戦略的推進「コンクリート構造物の LCM 国際標準の確立」の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 大岩祐司, 佐藤靖彦, 上田多門, 松本 幸嗣: 凍結及び融解時におけるモルタルの変形挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1179-1184, 2007
- 2) Matsumoto, K., Sato, Y., Ueda, T.: Mesoscopic analysis of mortar under high-stress creep and low-cycle fatigue loading, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, No.2, pp.337-352, 2008
- 3) Nagai, K., Sato, Y., Ueda, T.: Mesoscopic simulation of fracture of mortar and concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374, 2004
- 4) Shashank, B.: Strain-temperature hysteresis in concrete under cyclic freeze-thaw conditions, Cement Concrete Composites, Vol.30, No.5, pp.374-380, 2008
- 5) 原忠勝, 月永洋一, 庄谷征美: 凍結防止剤の種類がコンクリート中の温度変化とスケーリング量に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本コンクリート工学協会論文集, No.53, pp.177-182, 1999
- 6) 久田真, 松谷竜一: 酸性雨成分の作用によるセメント硬化体の物性変化, 土木学会論文集, No.746/V-61, 197-204, 2003
- 7) 三浦泰人, 佐藤靖彦: NaCl 溶液に浸漬したセメントペーストおよびモルタルの引張軟化特性評価, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.3, pp.77-86, 2010
- 8) 日本コンクリート工学協会: 多直線近似法による引張軟化曲線の推定マニュアル, コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会
- 9) 草間祥吾, 田口史雄, 林田宏, 遠藤裕丈: コンクリート構造物の凍害劣化要因の検討, 寒地土木研究所月報, No.659, pp.27-31, 2008
- 10) Jacobsen, S., Sellevold, J., E.: Frost testing of high strength concrete: Frost/Salt Scaling at Different Cooling Rates, Material and Structures, Vol.30, pp.33-42, 1997
- 11) 子田康弘, 庄谷征美, 月永洋一: 凍結防止剤浸漬下のコンクリートのスケーリング量に及ぼす凍結融解サイクル温度変化の影響に関する一考察, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.278-284, 2006
- 12) Hordijk, D., A.: Local approach to fatigue of concrete, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, 1991