凍結融解試験の温度履歴がモルタルの引張特性に及ぼす影響

Influences of Temperature History in Freeze-Thaw Test on Tensile Characteristics of Mortar

北海道大学大学院 工学研究院 ○正会員 橋本勝文 Katsufumi Hashimoto 北海道大学大学院 工学研究院 正会員 佐藤靖彦 Yasuhiko Sato 北海道大学大学院 工学研究院 フェロー会員 横田弘 Hiroshi Yokota 北海道大学大学院 工学院 工学院 学生会員 三浦泰人 Taito Miura

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、凍害による劣化が 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 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モルタルを対象に、凍結融解 サイクルにおける温度履歴がモ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

(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た. 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 のふるいを通過したものを使用した.

AE 剤は使用していない.

(2) 供試体の作製方法

供試体は 40×40×160mm のモルタルとした. 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,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 体の供試体につ き 10 枚の試験片(30×70×5mm)を切り出した⁶. なお, 試験片を切り出した後にアセトン処理により水和を停止 させた.

(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.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.

(4) 凍結融解サイクル

図-1 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 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 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.

3. 実験結果

(1) 温度-ひずみ曲線

図-2 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.特に、10 サイクル終了時



図-1 凍結融解サイクルにおける温度履歴

点での最高温度(20[°]C)時の残留ひずみ(凍害による膨張ひ ずみ)を大きい順にならべると、RILEM6h(491 μ), RILEM12hr(364 μ), RILEM4hr(128 μ), RILEM2hr(45 μ)と なる.既往の報告 ⁵⁾では、本論文と同様に、温度範囲を +20[°]C~-20[°]Cとした場合、スケーリング評価に基づく+ 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



(d) RILEM2hr(12 サイクル/day)図-2 凍結融解サイクルにおける温度-ひずみ曲線

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,残留ひずみが凍害に よる劣化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,凍害による劣化の進行が早くなる わけではないことが確認された.一方で,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,凍害による劣化の進行が遅く,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,凍害による劣化の進行が早



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,凍害による劣化の進行に及ぼす要 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 び凍結速度が凍害による劣化の進行に及ぼす影響が確認 された.

(2) 引張特性

引張軟化曲線の同定に使用した解析法⁸⁰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.なお、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.

図-3 に引張強度と残留ひずみ(10 サイクル終了時点で の最高温度(20℃)時の凍害による膨張ひずみ)との関係を 示す.これより,引張強度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.

図-4 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⁾を示している. 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ほぼ一致 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関係に強い相関が認め 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,載荷による損傷機構が異なることを示 唆している.

図-5 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. 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.

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 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.



図-7 凍結融解サイクル後の引張軟化曲線

4. まとめ

メソスケールサイズのモルタルを対象とした凍結融解 試験および曲げ試験で得られた凍結融解サイクルの温度 履歴がモルタルの引張特性に及ぼす影響に関する主たる 知見を以下に示す.1)凍結融解試験における温度履歴 は、ひずみの増加に極めて大きな影響を及ぼす.2)1日 あたりの凍結融解回数および凍結速度が凍害による劣化 の進行に影響を及ぼす.3)残留ひずみが大きいほど、 引張強度、弾性係数、引張軟化域が小さくなる.4)力 学特性値の低下は、残留ひずみと強い相関があり、残留 ひずみが大きいほど、力学特性が低下する.

- 5. 参考文献
- 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.
- Koji Matsumoto, Yasuhiko Sato and Tamon Ueda: Mesoscopic analysis of mortar under high-stress creep and low-cycle fatigue loading, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.6, Vo.2, pp.337-352, 2008.
- Kohei Nagai, Yasuhiko Sato and Tamon Ueda: Mesoscopic simulation of fracture of mortar and concrete by 2D RBSM, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.2, No.3, pp.359-374, 2004.
- Bishnoi Shashank: 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.
- 5) 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, pp77-86, 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(http://www. jci-web.jp/committee_inv0001/TSDana/fmpana-j.html)
- 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.
- Stephan Jacobsen and Erik J. Sellevold: 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.