

研究開発助成 研究概要

凍害と疲労の複合劣化下のコンクリート系構造物の性能予測

北海道大学大学院工学研究院 教授 上田 多門

概要：

成果を4つの項目にまとめると以下のようである。①凍害損傷の数値シミュレーションモデルの確立のために、凍結融解温度サイクル下のメソスケールのモルタル変形を実験的に観察し、膨張変形、収縮変形、温度変形の3つの要素からなる変形モデルを提示した。水分・熱量同時移動シミュレーションプログラムとこの変形モデルをカップリングさせることにより、モルタルの凍害シミュレーションが可能であることを示した。②湿潤環境下の疲労損傷メカニズムの解明に関して、湿潤環境下の材料特性を示すために、FRPシートと既設部コンクリートとの付着界面特性劣化を実験的に観察した。その結果、FRPやコンクリートの被接着体以上に付着界面の劣化が生じ、破壊モードがコンクリートの凝集破壊から付着界面破壊へと変わることを示した。③凍害と疲労の複合劣化による損傷メカニズムの解明に必要なメソスケール力学損傷モデルとして、凍結融解繰返し下の基本的なモデルを提示した。④移動輪荷重下の疲労損傷メカニズムの解明に関して、増厚補強スラブの移動輪荷重を行い、押抜きせん断疲労破壊を生じさせた。

キーワード：凍害、疲労、湿潤環境、複合劣化、押抜きせん断、メソスケール

1. はじめに

寒冷地において、凍害とそれ以外の劣化要因とが組み合わさった場合に、劣化が加速度的に生じることが多くの事例で明らかになっており、その対策は安全性の確保上、危急の課題である。本研究では、最近実構造物で明らかになった、凍害と疲労による複合劣化のメカニズムを解明し、その予測モデルを構築し、新設及び既設構造物の長寿命化や延命化対策に資することを目的とする。

平成 23 年度は、①凍害損傷の数値シミュレーションモデルの確立のためのモルタル変形モデル、②湿潤環境下の疲労損傷メカニズムの解明に関する湿潤環境下の付着界面特性劣化、③凍害と疲労の複合劣化による損傷メカニズムの解明に関するメソスケール力学損傷モデル、④移動輪荷重下の疲労損傷メカニズムの解明に関する増厚補強スラブの移動輪荷重下の破壊性状、に関して成果が出たのでここに報告する。

2. モルタル変形モデル

凍害損傷を生じさせる原因が、凍結融解温度履歴下でモルタルが変形することにある。この変形により、周辺

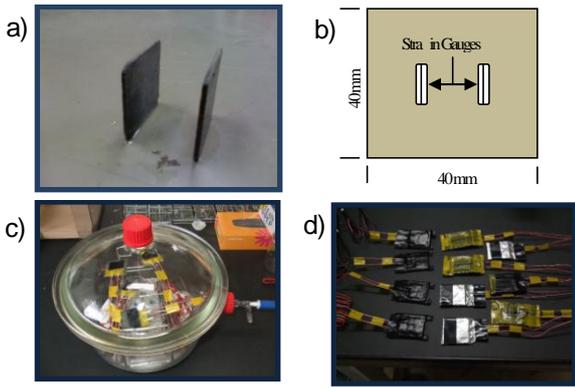
のモルタル内部や粗骨材とモルタル界面にひび割れを生じさせる。凍害損傷のシミュレーションするために、モルタル変形挙動をメソスケールで明らかにする。

(1) 実験概要

一定の湿潤状態に保たれたモルタルの、温度履歴下の変形状を実験的に調べるために、メソスケールの供試体(40×40×2 mm)を作成し(図 1 参照)、図 2 に示す温度履歴下のひずみをひずみゲージにより測定した。メソスケールとしたのは、供試体中の湿潤・温度状態が一樣にするためである¹⁾。特定の湿潤状態とするために、表 1 に示す塩類を入れたデシケータの中で供試体の重量が一定になるまで保った。モルタル供試体の配合として、セメント：水：細骨材を 1：2：6 とした。細骨材の最大骨材寸法は 1.2 mm である。

Table 1 Water content of specimens

Degree of Saturation	Medium for saturation	Moisture Condition (g/cc)	Specimens per condition
Absolutely dry	-	-	3
Fully saturated	H ₂ O	0.228	3
Partially saturated	NaCl	0.152	3



a) cut specimens; b) attachment of strain gauges; c) adjustment of moisture; d) sealed specimens
Fig. 1 Preparation of specimens

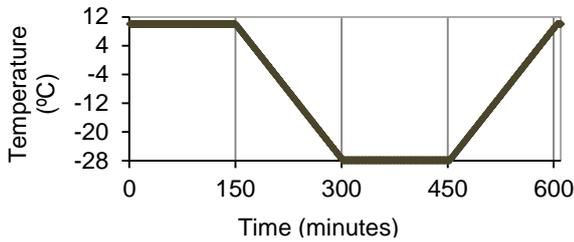


Fig. 2 One cycle of FTC

(2) 実験結果と考察

まず、凍害の影響のない絶対乾燥状態の供試体のひずみ測定を行い、熱膨張係数の測定も兼ねた。図3に示すように凍結融解温度サイクルに伴い、規則正しくひずみが生じている。飽水状態の供試体のひずみ測定結果を図4に示す。このひずみは、絶対乾燥状態の供試体で観察された温度による膨張収縮ひずみ(図3)を差し引いたひずみである。凍結時に膨張(引張)ひずみが増えていく状況が明らかである。水が液体から個体に代わるときの体積膨張が原因と考えられる(図5参照)。-5から-8°Cあたりで急激に膨張ひずみが増えているのは、過冷却された筐体内部の水が一気に凍ったためである。その後より小さい空隙内でも凍結が起こることにより、凍結水量が増え膨張ひずみも増加していく。

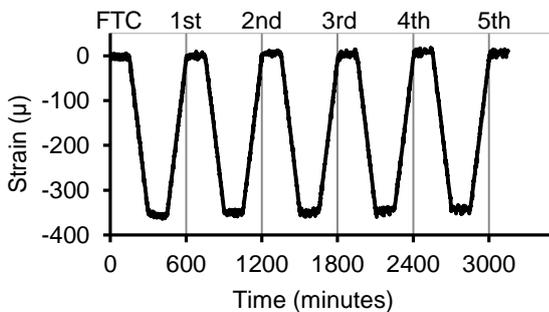


Fig. 3 Dry specimen's strains

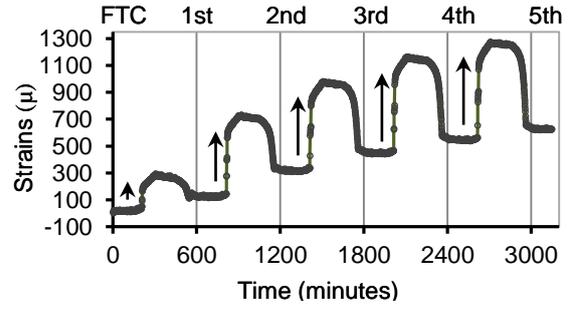


Fig. 4 Fully saturated (100%) specimen's strains

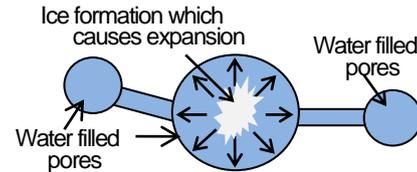


Fig.5 Representation of interconnected pores inside mortar: Ice formation causing large expansion and water filled pores

部分飽水状態の供試体のひずみ性状を図6に示す。飽水状態の供試体とは対照的に、凍結時に収縮(圧縮)ひずみ、融解時の前半に膨張ひずみ、後半に収縮ひずみを示している。各サイクルの最後には膨張ひずみが残留している。2サイクル目以降はひずみの変化性状がほぼ一定であり、ひずみの絶対値は飽水状態のひずみと比較すると小さい。凍結時に膨張ひずみではなく収縮ひずみを生じるのは、①内部空隙に水で満たされていない空間が十分にあり、水の凍結による体積膨張を吸収できること、②凍結水と未凍結水との間の化学ポテンシャルの違いから未凍結水の移動が起こり、その際に負の圧力が生じること、が理由と考えられる(図7参照)。

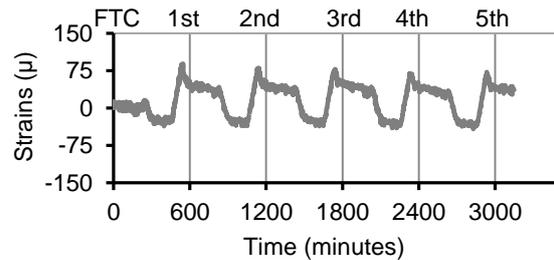


Fig. 6 Partially saturated (68.4%) specimen's strains

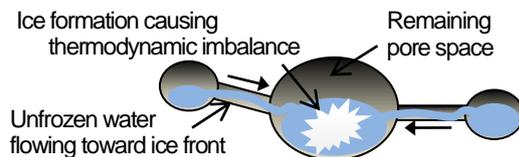


Fig.7 Representation of interconnected pores inside mortar: Ice formation in partially filled pores causing thermodynamic imbalance

飽水状態の供試体には、各凍結融解サイクル終了時に膨張ひずみ、つまり、残留引張ひずみが生じている。こ

これは凍結融解サイクルにより何らかの損傷がモルタル中に生じたことを示していると考えられる。各サイクル時の引張最大ひずみとそのサイクル後の残留ひずみとの関係を示したのが図 8 である。著者グループの既往の研究¹⁾と同様に両者には比例関係があり、凍結時の膨張が損傷の要因であることを示唆している。

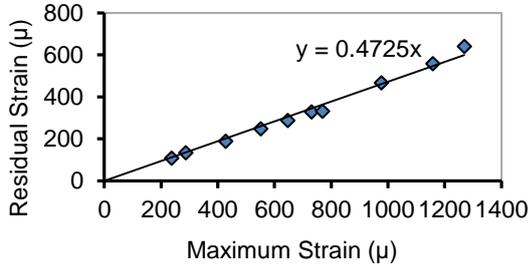


Fig.8 Relationship between maximum and residual strain

(3) メソスケール変形モデルの提案

実験で観察されたメソスケールのモルタル供試体の変形挙動から、ひずみ成分が次の 3 つの成分で構成されていると仮定した¹⁾。

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_s + \varepsilon_t \quad (1)$$

ここに、 ε_i , ε_s , ε_t は膨張ひずみ、収縮ひずみ、温度ひずみである。膨張ひずみは、凍結水量の内、膨張を生じさせる凍結水量以上の凍結水量と比例関係にあるとして以下の式で表現されるとした。

$$\varepsilon_i = \alpha_i \times (\Psi_i - \Psi_{ic}) \quad (2)$$

ここに、 α_i は定数、 Ψ_i は凍結水量、 Ψ_{ic} は膨張を生じさせる凍結水量の最小値である。収縮ひずみは、未凍結水量と比例関係にあると仮定して、以下の式を仮定した。

$$\varepsilon_s = \alpha_s \times \Psi_w \quad (3)$$

ここに、 α_s は定数、 Ψ_w は未凍結水量である。最後の温度ひずみが以下の式で表される。

$$\varepsilon_t = \alpha_t \times \Delta T \quad (4)$$

ここに、 α_t は定数で、絶対乾燥の供試体のひずみから求められる。 ΔT は温度変化である。

実験結果に基づき、以下のように残りの定数を求めた。まず、凍害損傷が見られなかった部分飽水供試体の収縮ひずみから、 α_s を未凍結水量の関数 $f(\Psi_w)$ と仮定し、次式のように求めた。

$$\alpha_s = f(\Psi_w) = 589.32 \cdot \ln \Psi_w + 1272 \quad (5)$$

上式中の未凍結水量は、全体の水量と凍結水量を、大岩らの研究²⁾で適用された水分・熱量同時移動シミュレーションプログラムを用いて計算することにより求めている。なお、このシミュレーションプログラムは、松本ら

の研究³⁾で提案されている三相系の基礎方程式に基づいている。次に、飽水状態の供試体のひずみから、式(5)で計算される収縮ひずみと温度ひずみを差し引くことにより、膨張ひずみを求めた。未凍結水量と凍結水量とを先ほどのシミュレーションプログラムで求めた上で、式(2)を適用することにより、次式のように α_i と Ψ_{ic} が求められた。

$$\alpha_i = 3410 \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$\Psi_{ic} = 0.038 \quad (7)$$

(4) モルタルの変形挙動のシミュレーション

図 9 に示す縦横 100 mm のモルタルの、上辺のみに相対湿度 100%、図 10 に示す温度履歴という境界条件を与え、図 9 の矢印で示した位置での全体の水量、凍結水量、温度、ひずみを(3)で示したメソスケール変形モデルと水分・熱量同時移動シミュレーションプログラムとをカップリングさせて計算した(図 11, 12 参照)。図より、凍結融解温度の 3 サイクル目で水量が凍結するに十分な量となり、凍結後にそれによるひずみが発生していることが示されている。

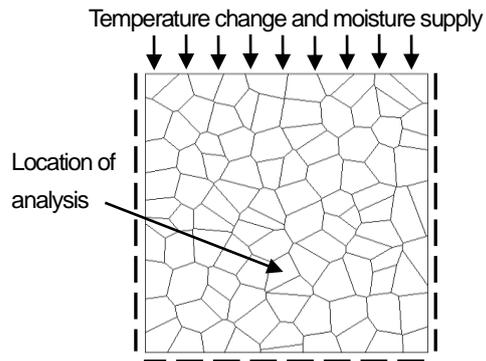


Fig.9 Mortar model

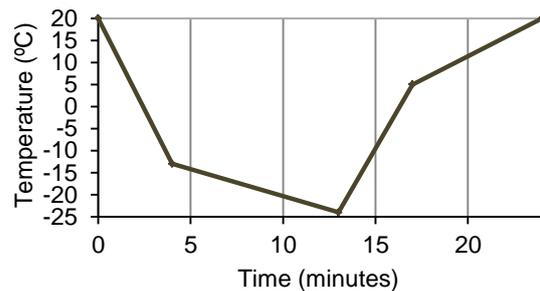


Fig.10 Temperature history applied on top side

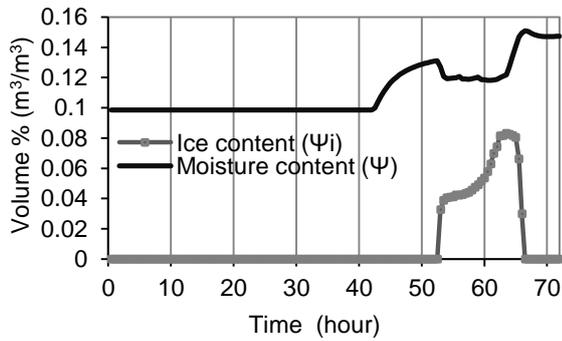
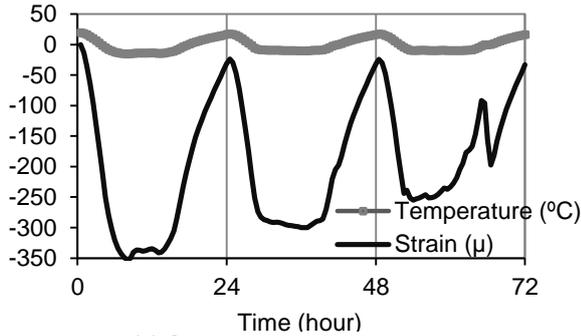
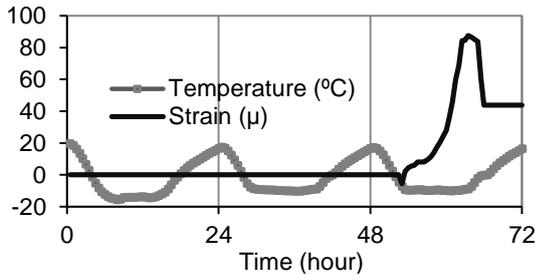


Fig. 11 Ice content and moisture content with time



(a) Strain with thermal strains



(b) Strain without thermal strains

Fig. 12 Strain and temperature with time

3. 湿潤環境下の付着界面特性劣化

この研究で特に対象としているのがコンクリート床板で、コンクリート床板は接着工法や増厚工法により補強されることが多い。その場合、補強材層と既設部との界面での付着は重要である。ここでは、湿潤環境下の付着界面特性劣化に関し、FRPシートと既設部コンクリートと付着を対象にした。湿潤環境下の材料特性劣化は、湿潤環境下の疲労損傷メカニズムの解明に必要である。

(1) 実験概要

付着界面のせん断付着強度と引張付着強度に与える湿潤環境の影響を調べる目的で、コンクリートブロックの側面にFRPシートを樹脂で貼り付けた供試体(図13参照)と2つのコンクリートブロック間にFRPシートを挟み樹脂で接着した供試体(図14参照)と、水中に沈め長期間保管した。その後、前者はシートを引抜くよう荷重をかけ(図13参照)、後者は全体を梁として3点曲

げ試験を実施した(図14参照)。

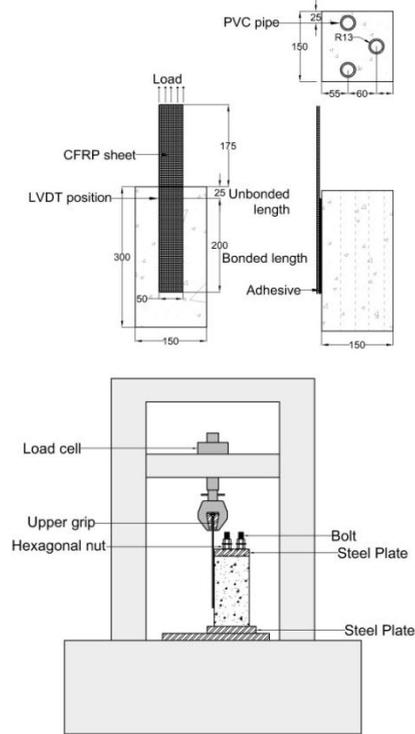


Fig. 13 Specimen for shear bond test

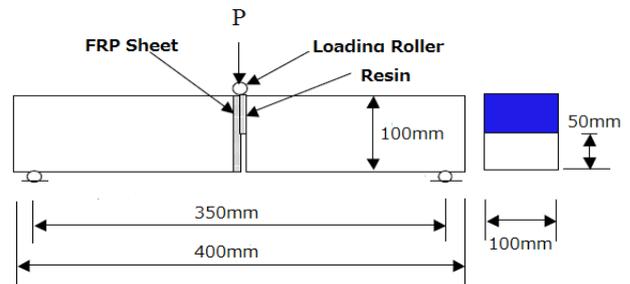


Fig. 14 Specimen for tension bond test

(2) 実験結果

付着界面のせん断付着強度と引張付着強度が、湿潤状態で少し低下することが明らかになった(図15, 16参照)。その程度は接着樹脂や既設部コンクリートの強度劣化より大きく、樹脂とコンクリートとの付着界面強度が母材強度より低下したと思われる。その結果として、浸水していない供試体では、コンクリート表層での凝縮破壊であったのに対し、浸水供試体ではシート樹脂層の付着界面破壊となった。また、湿潤環境下では引張付着破壊特性が靱性的となる傾向が見られた。

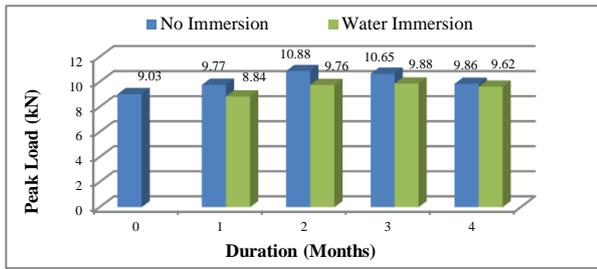


Fig. 15 Comparison of shear bond strength

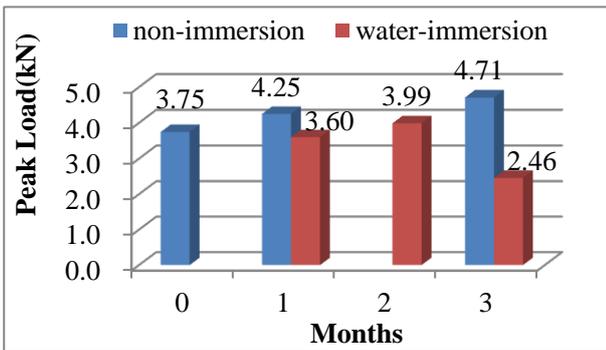


Fig. 16 Comparison of tension bond strength

4. メソスケール力学損傷モデル

疲労と凍害とはともにコンクリートの物理的な損傷である。本研究で適用するメソスケールの力学損傷モデルでは、これらの損傷をシミュレーションすることが可能であり、それらが同時に生じる場合も表現できる。

2章で示したメソスケールのモルタルの変形挙動の実験結果から以下のことが明らかとなった。凍結融解作用の繰返しにより、コンクリート（モルタル）内部の微小空隙構造がより大きな空隙が増える方向に徐々に変化し、結果としてより多くの水が凍結できるようになり、さら

にこの変化が継続していくと考えられる。この現象はメソスケールでは引張剛性の低下と残留引張ひずみの増加ということで表現される。

今後、凍害が常に湿潤環境下で生じることから、3章で示したような湿潤環境下での材料特性の劣化、および、空隙を満たしている水が疲労荷重の特徴である動的な応力作用下で周囲のモルタルに生じさせる損傷を考慮した力学損傷モデルの構築を目指す。

5. 増厚補強スラブの移動輪荷重下の破壊性状

現実に発生するコンクリートスラブの押抜きせん断破壊を詳細に観察するために、既設部スラブに移動輪荷重による疲労損傷を与えた後、セメント系材料（靱性モルタル）による増厚補強を施し、さらに移動輪荷重を載荷し、押抜きせん断破壊を生じさせた。現在、破壊性状などの詳細を調査中であるとともに、2体目の疲労試験を行っているところである。

参考文献

- 1) Ueda, T. and Arai, S.: Frost damage model to predict structural performance, Proceedings of the 2nd ICDCS, November 2010, 547-556, 2010.
- 2) Oiwa, Y., Sato, Y., Ueda, T. and Matsumoto, K.: Analysis of deformational behavior of mortar under freezing and thawing action, *Advances in Concrete Structural Durability*, Proceedings of the International Conference on Durability of Concrete Structures (ICDCS2008), Hangzhou, China, November 2008, 615-619, 2008.
- 3) Matsumoto, M., Hokoi, M. and Hatano, M.: Model for simulation of freezing and thawing processes in building materials, *Building and Environment*, 36, 733-742, 2001.