

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：

凍害と疲労の複合劣化が起こる典型的な場合である、橋梁用のコンクリート床版の性能予測に関し、以下の4つの成果が得られた。①凍害損傷シミュレーションに必要なコンクリート内の凍結水量推定モデルを、コンクリート中の水分の吸着等温線に基づく空隙寸法分布曲線から構築した。②凍結融解繰返し下のモルタルの損傷は水分の補給がない場合、損傷は数回のサイクルのみで生じ、変形に大きな影響を与える線膨張係数が凍害を受けると大きくなることを示した。③増厚補強したコンクリート床版の付着界面は、凍害損傷が生じるとその箇所の凝集破壊となり、そうでない場合は付着界面剥離となる。増厚部が凍害損傷を受けない場合はその引張付着強度が低下しないことを示した。④増厚補強後の移動輪荷重下の押抜きせん断破壊は、増厚部の付着界面剥離が支配的ではない一體的な破壊となりうることを、増厚部を力学的に等価なものとして置き換えた一体の床版として既往の耐力推定式で推定できることを示した。

キーワード：凍害、疲労、湿潤環境、複合劣化、押抜きせん断、付着界面、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 24 年度は、①凍害損傷の数値シミュレーションモデル確立のためのコンクリート中の凍結水量推定モデル、②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、③凍害損傷メカニズムの解明に関する凍結融解繰返し作用下の付着界面特性劣化、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強度、に関して成果が出たのでここに報告する。

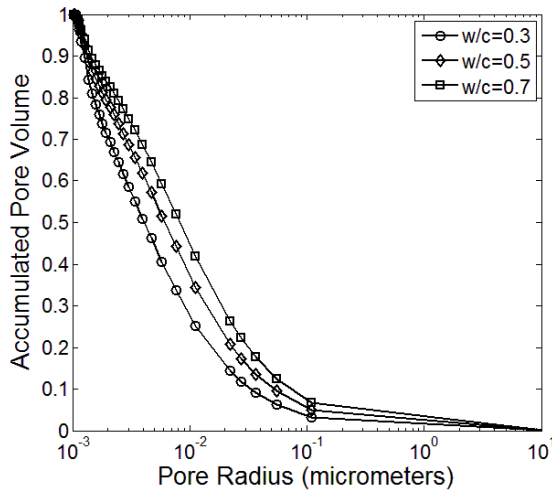
2. コンクリート中の凍結水量推定モデル^{1) 2)}

凍害を起こす要因はコンクリート中の水分凍結によりコンクリートが変形することにある。従って、コンクリート中の凍結水量の推定は、コンクリートの凍害の定量

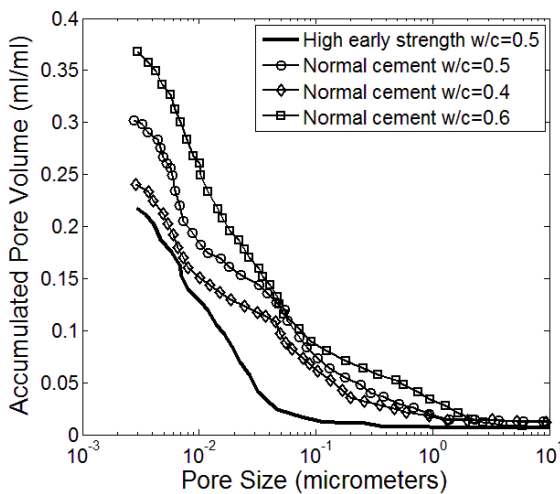
化や凍害損傷のシミュレーションには重要である。

コンクリート中の空隙内の水分の凍結温度は、空隙の寸法による。従って、凍結水量の推定には空隙寸法分布曲線を求める必要がある。本研究では、従来の水銀圧入ポロシメトリー法や窒素吸着法に代わる、水分の吸着等温線 (adsorption isotherm) を用いた方法を次のように提案した。①空隙中の水分 (液相) の化学ポテンシャルと空隙寸法との関係を求める、②既往の相対湿度と水分量との関係で表された水分吸着等温線を水蒸気 (気相) の化学ポテンシャルと水分量との関係式に変換する、③水分の液相と気相の化学ポテンシャルが等しいとして、水分吸着等温線で求まる水分は、それに対応する化学ポテンシャルと等しい空隙寸法とそれ以下の寸法の空隙が水分で満たされていると仮定する、④水分吸着等温線から空隙寸法分布曲線を求める。図 1 に提案した方法による算定結果と既往の実験結果とを累積空隙容積寸法曲線で示すが、比較的良好に一致しているのが見られる。

求められた空隙寸法分布曲線と空隙寸法と凍結温度との関係とを用いて、供試体 (セメントペースト) 温度と凍結水量との関係を算定し、既往の実験結果と比較したところ、実用的な精度であることが示された (図 2)。

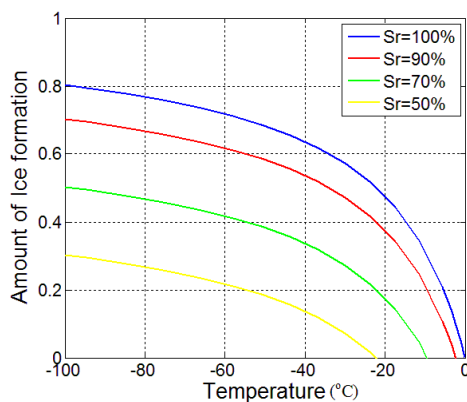


(a) Predicted results

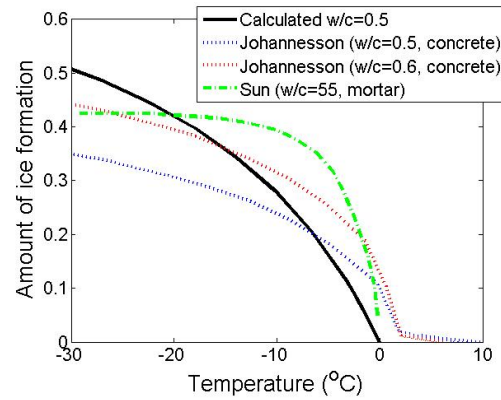


(b) Experimental results

Fig.1 Accumulated pore size distribution



(a) Predicted results



(b) Experimental results

Fig.2 Ice amount

3. モルタル変形モデル³⁾

昨年度に引き続き、凍結融解繰返し下のモルタルの変形をメソスケール ($40 \times 40 \times 2$ mm) の供試体により明らかにした。メソスケールとしたのは、供試体内の水分や温度が一様であると考えられるからである。供試体はシーリングを施し湿潤状態を一定に保ったまま、最高温度と最低温度を 10 度と -28 度とした 1 サイクル 10 時間（最低温度と最高温度保持時間は各 2.5 時間）の温度履歴を 30 サイクル与えた。湿潤状態としては、100%、99%、80% 飽和状態の 3 種類とした。

多くの供試体で、最初の数サイクルの間は凍結時に膨張ひずみ、融解時に収縮ひずみ、残留ひずみとして膨張ひずみが生じ、その後徐々に凍結時に収縮ひずみ、融解時に膨張ひずみ、残留ひずみとして収縮ひずみへと移行することが観察された（図 3）。凍結時及び残留ひずみとしての膨張ひずみは水分の凍結によるもので、凍結時及び残留ひずみとしての収縮ひずみは非凍結水の移動によるものと考えられた。いわゆる凍害現象である膨張ひずみが最初の数サイクルの間のみ観察されたのは、凍害により空隙が増え、実質上水分の飽和状態が緩和されたことによると考えられる。

30 サイクルの凍結融解繰返しを与えた供試体（凍害供試体）をオープンにより絶乾状態とした上で、10 サイクルの凍結融解繰返しを与え、湿潤状態での凍結融解繰返しを与えなかった供試体（乾燥供試体）と、その変形挙動を比較した（図 4）。変形挙動はいわゆる温度ひずみと考えられ、温度履歴と 1 対 1 で対応し、10 サイクルの間ほぼ同じ変形挙動が繰返し観察された。ただし、凍害供試体の線膨張係数は、乾燥供試体の通常のモルタルの線膨張係数と比較すると大きくなっており、その度合は 80%、99%、100% と飽和状態に近づくほど大きくなり、100% の状態時に 2 倍弱となっていた（図 5）。この線膨張係数の増加は、凍害損傷メカニズムには大変重要であると考えられる。

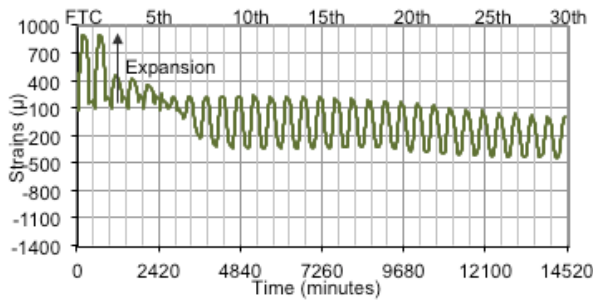


Fig.3 Strain behavior of mortar under freeze thaw cycles

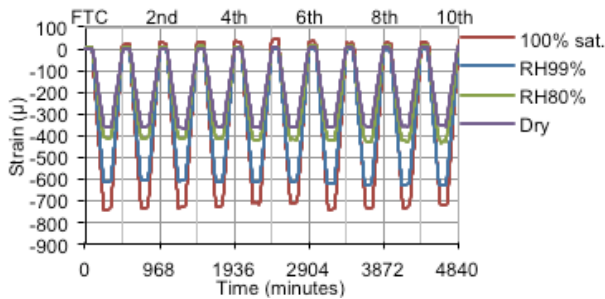


Fig.4 Strain behavior of mortar with and without frost damage

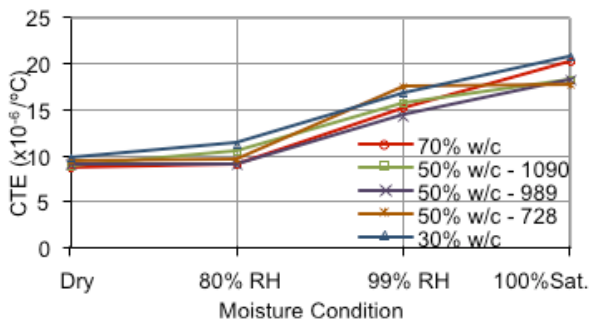


Fig.5 Coefficient of thermal expansion with and without frost damage

4. 凍結融解繰返し下の付着界面特性劣化⁴⁾

凍害と疲労の複合劣化を起こすコンクリート床版を補強する方法として、セメント系材料による増厚補強がある。モルタルによる増厚補強を想定して、モルタルと既設部コンクリートとの付着界面の引張付着特性が凍結融解繰返しにどのような影響を受けるかを実験的に明らかにするために、既設部コンクリートにモルタルを打ち継いだ供試体の割裂試験を行った(図6)。モルタルは耐凍害性を高めるためにAEモルタル(圧縮強度は50.7MPa)とし、既設部コンクリートには、コンクリート、AEコンクリート、高強度AEコンクリートの3種類を用意し、それらの圧縮強度は35.2, 25.7, 58.8MPaであった。

モルタルと既設コンクリートの相対動弾性係数は、AE材を添加しなかったコンクリートの場合を除き、凍結融解繰返し150回を作用させた後も低下しなかった。モル

タルとの付着界面の引張付着強度は、AE材を添加しなかったコンクリートの場合も含めて、ほとんど低下が見られなかった(図7)。破壊モードは、凍害による損傷を示さなかった(相対動弾性係数の低下がなかった)AEコンクリートと高強度AEコンクリートの場合、付着界面剥離(adhesion failure)であり、凍害により損傷したコンクリートの場合、コンクリート側の凝集破壊(cohesion failure)であった。増厚部や既設部の凝集破壊でない場合、増厚部や既設部の凍害による劣化指標(引張強度や相対動弾性係数)は付着界面強度の合理的な指標とはならないと考えられる。

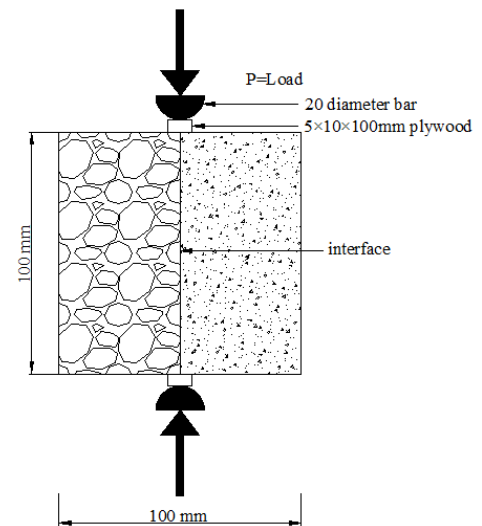


Fig.6 Splitting test for tensile bond strength

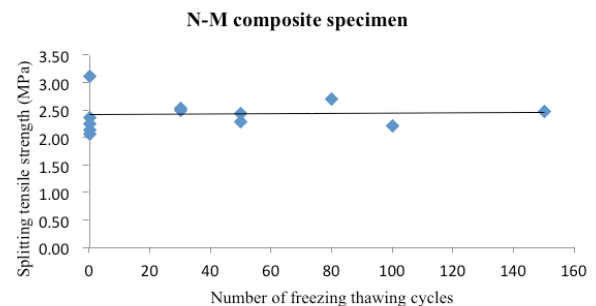


Fig.7 Tensile bond strength under freeze thaw cycles

5. 増厚補強スラブの移動輪荷重下の破壊強度⁵⁾

凍害と疲労の複合劣化を起こすコンクリート床版の補強法である増厚補強を施した後の、移動輪荷重下の疲労破壊耐力を実験的に確認した。増厚部には、短繊維を混入して引張靱性を高めたモルタル(HPFRCC)を用い、補強筋はCFRP格子筋であり、その補強量を変数とした2体の供試体(1体がもう一方の倍の補強量)を用意した。供試体の寸法は既設部が2800x4500x160mmであり、増厚部は10mmの厚さである。実際の構造物の状況を考慮して、増厚補強する前から3万回の移動輪荷重を与え

た。移動輪荷重は破壊するまで徐々に上げ、各ステップは 4 万回の载荷とした。

破壊は押抜きせん断破壊であり、既設部と増厚部との付着界面に沿う剥離が支配的ではなく、一体のスラブの場合の破壊性状と類似していた (図 8)。2 つの供試体とも破壊荷重と疲労寿命はほぼ同じで、増厚部の補強量の差の影響はほとんど見られなかった (図 9)。

押抜きせん断破壊耐力は、既往の増厚補強のないコンクリート床版の移動輪荷重下の押抜きせん断破壊耐力推定式を、増厚部の補強筋と既設部の補強筋との 2 段配筋と考え、さらに増厚部の剛性を考慮した等価かぶり厚を仮定することにより拡張した推定式で推定可能であることが明らかになった。また、疲労寿命も、既往の増厚補強のないコンクリート床版の推定式で推定可能であることを示した。既往の押抜きせん断破壊推定式は、曲げ圧縮部のコンクリート強度の関数となっており、この強度が凍害で劣化する場合、押抜きせん断破壊耐力も低下することになる。

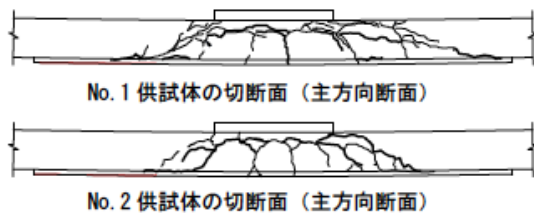


Fig.8 Punching shear failure pattern

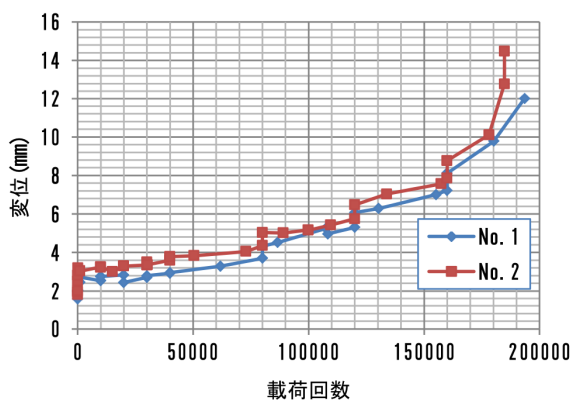


Fig.9 Relationship between deflection and loading cycles

6. まとめ

凍害と疲労の複合劣化が起こる典型的な場合である、橋梁用のコンクリート床版の性能予測に関し、以下の成果が得られた。すなわち、凍害損傷シミュレーションに必要なコンクリート内の凍結水量推定モデルを提示し、凍結融解繰返し下のモルタルの変形に大きな影響を与える線膨張係数が凍害を受けると大きくなることを示した。増厚補強したコンクリート床版の付着界面は、増厚部が凍害損傷を受けない場合はその引張付着強度が低下しないこと、増厚補強後の押抜きせん断破壊は、増厚部を力学的に等価なものとして置き換えた一体の床版として推定できること、曲げ圧縮部のコンクリートの凍害劣化により押抜きせん断破壊耐力が低下することを明らかにした。

参考文献

- 1) Gong, F., Sicat, E., Ueda, T. and Zhang, D.: 3D phase diagram for pore water in cement-based materials, Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies (SCMT3), Kyoto, Japan, 18-21 August 2013, 10 pages.
- 2) Gong, F., Sicat, E. and Ueda, T.: Estimation of pore size distribution of cement-based materials by using water adsorption isotherms, Proceedings of the Third International Conference on Durability of Concrete Structures (ICDCS2012), Belfast, UK, 17-19 September 2012, 8 pages.
- 3) Sicat, E., Gong, F., Ueda, T. and Zhang, D.: Observed deformation and degradation of coefficient of thermal expansion of mortar subjected to freeze-thaw cycles, Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol.35, No.1, 6 pages, 2013.
- 4) Qian, Y., Zhang, D. and Ueda, T.: Interfacial bonding of concrete-ordinary portland cement mortar under freezing thawing cycles, Proceedings of the Fourth Asia-Pacific Young Researchers & Graduates Symposium, Hong Kong, China, 4-5 December 2012, pp.317-325.
- 5) 島中悠企, 上田多門, 古内仁, 張大偉: 移動輪荷重下において下面増厚補強を施したRC床版の押抜きせん断耐力と疲労寿命, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, 2013, 6 ページ.