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
上田多門

寒冷地でのコンクリート床版の損傷

- 寒冷地以外では，交通荷重が厳しい橋梁で，押抜きせん断破壊
  → 疲労と湿潤環境の複合劣化
- 寒冷地では，交通荷重が厳しくない橋梁でも，押抜きせん断破壊
  → 疲労と湿潤環境に，凍害が加わった複合劣化

砂利化したコンクリート

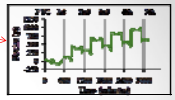
凍害と疲労の複合劣化下の性能予測手法

荷重による準微視的損傷シミュレーション
凍害と湿潤環境による準微視的損傷シミュレーション
↓
複合劣化下の準微視的損傷シミュレーション
↓
複合劣化下の損傷コンクリート特性シミュレーション
↓
複合劣化下の損傷コンクリートの構成則
↓
複合劣化下の構造性能の予測

材料解析
構造解析

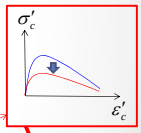
凍害コンクリートの準微視的シミュレーション

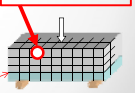
凍結融解繰り返し下の変形



↓
メソスケール変形モデル
↓
ひび割れ・残留変形のシミュレーション

↓
力学・耐久性特性の劣化シミュレーション
↓
凍害を受けたコンクリートの材料構成則





↓
凍害を受けたコンクリート構造物の性能予測

2012年度の成果（概要の対応個所）

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章）
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章）
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章）
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 （5章）

凍害と疲労の複合劣化下の性能予測手法と2012年度の成果との関係

2, 3章

荷重による損傷の準微視的シミュレーション
凍害と湿潤環境による損傷の準微視的シミュレーション
↓
複合劣化下の損傷の準微視的シミュレーション
↓
複合劣化下の損傷コンクリート特性シミュレーション
↓
複合劣化下の損傷コンクリートの構成則
↓
複合劣化下の構造性能の予測

4章
5章

材料解析
構造解析

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章）

新たな空隙寸法分布曲線推定法の提案

① 空隙中の水分（液相）の化学ポテンシャルμ_lと空隙寸法r_0の関係

$$\mu_l(r_0) = -\frac{2\gamma\cos\theta}{r_0 - \delta}v_l$$

② 水分吸着等温線式を水蒸気（気相）の化学ポテンシャルμ_gと水分量Wとの関係式に変換

$$W = \frac{CkV_m \exp(\frac{\mu_g}{RT})}{(1-k\exp(\frac{\mu_g}{RT}))[1+(C-1)k\exp(\frac{\mu_g}{RT})]}$$

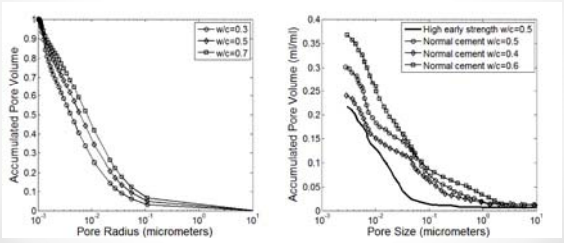
③ 水分吸着等温線で求まる水分は，それに対応する化学ポテンシャルと等しい空隙寸法とそれ以下の寸法の空隙が水分で満たされていると仮定

$$w(r_0) = \frac{(1-k)[1+(C-1)k]\cdot e^{\frac{2\gamma\cos\theta}{(r_0-\delta)RT}}}{(1-k\cdot e^{\frac{2\gamma\cos\theta}{(r_0-\delta)RT}})[1+(C-1)k\cdot e^{\frac{2\gamma\cos\theta}{(r_0-\delta)RT}})]}$$

④ 水分吸着等温線から空隙寸法分布曲線を求める

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章）

累積空隙容積寸法推定曲線は実験曲線と近い



推定曲線　　実験曲線

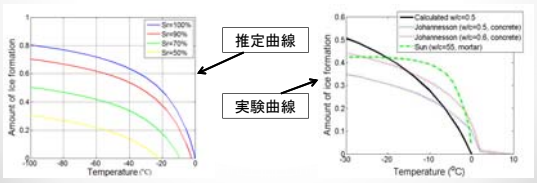
凍害損傷の数値シミュレーションモデル確立のためのコンクリート中の凍結水量推定モデル（2章）

空隙寸法分布曲線（推定曲線）を用いた凍結水分量推定法

① 空隙寸法rと凍結温度Tとの関係

$$T = T_0 - \frac{\gamma_{CL}\kappa_{CL}}{\Delta S_{fv}} \qquad \kappa_{CL} = \frac{2\cos\theta_{CL}}{r-\delta}$$

② 空隙寸法分布曲線からある温度のときの凍結水量を推定

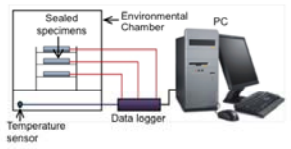


凍害損傷の数値シミュレーションモデルの確立のためのモルタル変形モデル（3章）

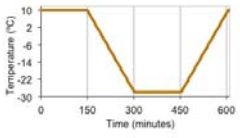
実験概要（供試体作成）

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章）

実験概要



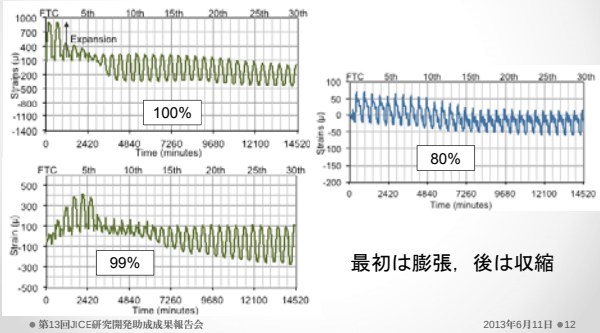
小型環境実験箱と測定装置



温度履歴

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章）

実験結果

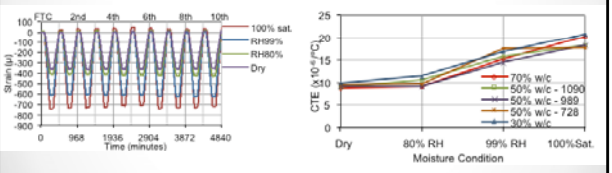


最初は膨張，後は収縮

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章）

実験結果

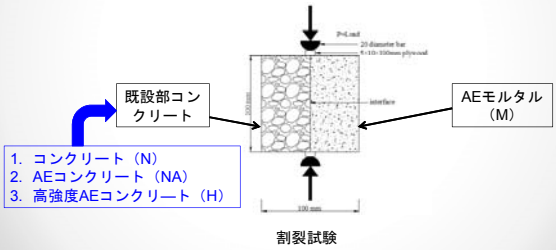
- 凍害を受けると温度ひずみが増える→線膨脹係数が大きくなる



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章）

増厚材（モルタル）と既設部コンクリートとの付着界面

- 引張付着強度

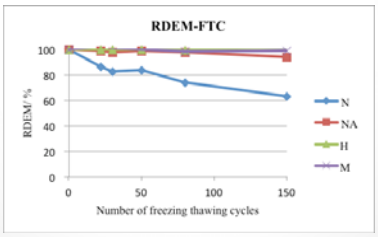


割裂試験

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章）

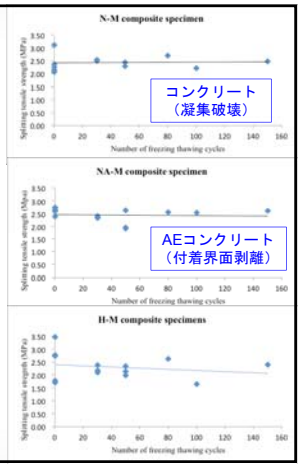
実験結果

- AE剤を入れていないコンクリート（N）のみ，凍害劣化を示した．



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章）

引張付着強度の目立った低下はなかった



コンクリート（凝集破壊）

AEコンクリート（付着界面剥離）

高強度AEコンクリート（付着界面剥離）

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（5章）

実験概要

① HPFRCCによる増厚補強
② 増厚補強前に，プレ載荷
③ 増厚部の補強筋（FRP格子筋）量が変数

表－2 コンクリートと HPFRCC の材料特性（材齢 28 日）

	圧縮強度(N/mm²)		弾性係数(N/mm²)	
	コンクリート	HPFRCC	コンクリート	HPFRCC
No.1	34.6	46.6	25,260	16,700
No.2	37.0		27,420	

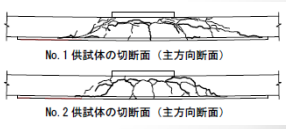
表－3 FRP 格子筋の材料特性

引張強度 (N/mm²)	引張弾性係数 (N/mm²)	断面積 (mm²)
1,400	100,000	26.4

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（5章）

実験結果

① 押抜きせん断破壊
② 増厚部との付着界面剥離は支配的でない
③ 増厚部補強筋量は，破壊耐力に影響を与えていない

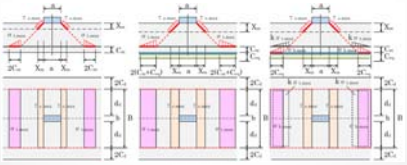


移動輪荷重下の疲労損傷メカニズムの解明に関する増厚補強スラブの移動輪荷重下の破壊強度（5章）

以下の耐力推定モデルで推定可能

① 既往の移動輪荷重下の押抜きせん断破壊耐力推定式（松井式）を拡張して適用→**増厚部の剛性と補強筋を考慮して，等価なかぶり厚さと補強筋位置を仮定**

② 既往の疲労寿命推定式（土研式）を適用



まとめ

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提示

② 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脹係数が凍害を受けると大きくなる

③ 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

④ 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

⑤ 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