

疲労荷重と凍結融解による複合劣化を考慮した RC 床版の有限要素解析

Finite element analysis for an RC bridge slab considering combined deteriorations due to fatigue loading and freeze-thaw cycles

北海道大学大学院工学院
北海道大学大学院工学研究院

○ 学生員 林川 敬行 (Takayuki HAYASHIKAWA)
正員 松本 高志 (Takashi MATSUMOTO)

1. はじめに

積雪寒冷地における RC 床版上面は、凍結融解作用や路面に散布された融雪剤によるスケーリングや砂利化の進行に伴い、有効床版厚が減少し疲労寿命が著しく低下することが知られている。このような背景から、これまでに、凍結融解サイクル(以下、FTC)を受ける RC 床版の疲労実験・解析に関する研究が進められ、凍害が疲労寿命へ与える影響について検討されてきた¹⁾²⁾。

しかしながら、既往の研究においては、凍結融解を終えた RC 床版の疲労寿命の評価に留まっており、凍結融解の進行を逐次考慮した場合の疲労寿命へ及ぼす影響は検討されていない。

そこで本研究では、進行する凍結融解・輪荷重載荷の2つの複合要因による劣化が RC 床版の疲労寿命へ与える影響を有限要素解析により検討する。比較検討のため、三田村らが行った RC 床版の疲労実験¹⁾・その再現解析である Edalo らの解析手法²⁾に準拠し、同様の寸法・載荷プログラム等を用い、FTCを疲労載荷に応じて変化させることで進行する凍結融解を再現する。それに応じて生じるひび割れ、中央変位の差の比較をもとに、進行する凍結融解が与える疲労寿命への影響を評価することとする。

2. 解析概要

2.1 解析モデル

本研究では、非線形有限要素解析ソフト MSC/Marc を用いて疲労解析を行った。解析モデルは、寒地土木研究所で行われた輪荷重載荷実験¹⁾に用いられた道路橋 RC 床版の試験体に準拠し設定した。解析モデルは、対称性により、1/2 の RC 床版とした。図-1 に解析モデルの寸法、境界条件及び輪荷重走行位置を示す。表-1 に FTC の有無による RC 及び I 形鋼の材料特性を示す。床版は 8 節点ソリッド要素、I 形鋼は 4 節点シェル要素でモデル化した。床版厚 18cm のうち凍結融解層を上層 3cm、RC 層を 15cm とした。輪荷重走行は、輪荷重を RC 床版の中心部を始点として走行方向の要素に対して逐次載荷することで再現した。

2.2 凍結融解層の応力劣化モデル

Hasan らは前川らによって提唱された弾塑性破壊モデルにおける等価応力-等価ひずみ関係に対し、FTC による等価応力の減少を考えた³⁾。

等価応力-等価ひずみ関係に圧縮強度、最大圧縮応力時のひずみを掛けることで、図-2 の関係を得る。引張側は、引張強度に至るまで圧縮側の静弾性係数を用い、引張強度に至った以降は $\epsilon_{tu} = 0.005$ と仮定した終局引張ひずみに至るまで線形で結んだ。ここで用いた FTC 等

価塑性ひずみ $\epsilon_{pf} = 0.433$ の値は、FTC 150 回相当時の FTC 等価塑性ひずみである。

2.3 RC 層の架橋応力劣化モデル

繰り返し荷重を受ける RC 層のコンクリート劣化則には、架橋応力劣化の概念を用いる。架橋応力は骨材を介してひび割れ面間に伝達される応力であり、コンクリートのひび割れ挙動を表すために解析に導入している。この関係式を式(1)(2)に示す。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1} = f(\delta_{max}, N) \leq 1 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1} = 1 - (0.08 + 4 \times \delta_{max}) \log_{10} N \quad (2)$$

ここで、 σ_N/σ_1 は 1 サイクル目と N サイクル目の架橋応力劣化比であり、 δ_{max} はひび割れの最大亀裂幅である。

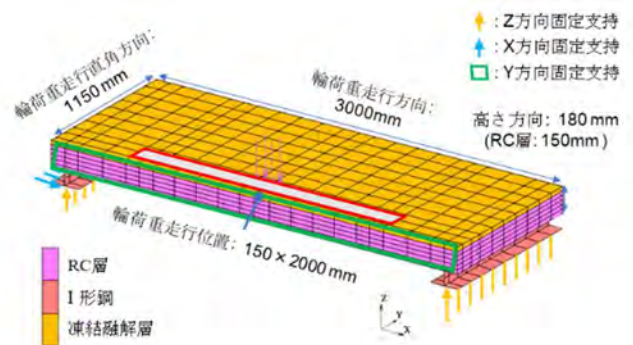


図-1 床版モデルと寸法

表-1 床版試験体の材料特性

材料 (MPa)	RC		I 形鋼
	FTC あり	FTC なし	
圧縮強度 f_c	41.0	40.1	-
引張強度 f_t	3.2	3.19	235 (SR235)
静弾性係数 E_c, E_s	27300	25000	200000

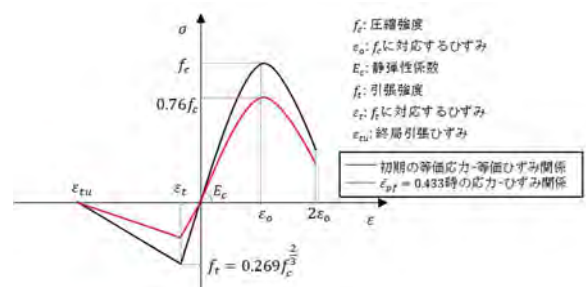


図-2 凍結融解層の応力-ひずみ関係

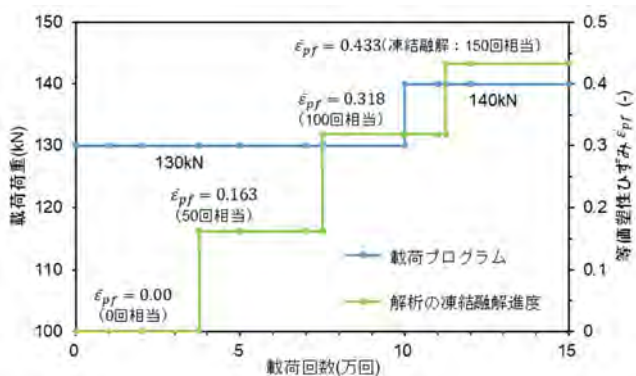


図-3 荷重プログラムと凍結融解の進行

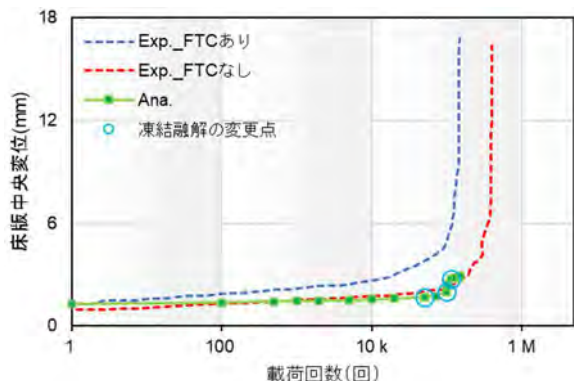


図-4 床版中央変位と荷重回数

2.4 疲労解析手順

疲労解析では、輪荷重荷重回数の増加に応じて、荷重荷重及び等価塑性ひずみを段階的に増加させる。また、各サイクル後にひび割れ要素を記録し、次のサイクルでそのひび割れ要素を適用することで RC の疲労挙動を再現することとする。

図-3に荷重回数に対する荷重荷重と等価塑性ひずみを示す。三田村らの実験では、FTCを受けたRC床版は15万回荷重時に破壊に至ったことから、本解析でも15万回荷重を行った。解析には、表-1のFTCありの材料条件を用いる。FTC等価塑性ひずみ $\bar{\epsilon}_{pf}$ はそれぞれ、凍結融解サイクル0、50、100、150回相当のFTC等価塑性ひずみである。本研究では、37500荷重回数ごとに値を増加させることで凍結融解の進行を再現した。

3. 解析結果

3.1 床版中央変位

図-4に、輪荷重荷重実験¹⁾と、2.4で示した解析の結果による荷重回数と床版中央変位を示す。解析結果は荷重回数の増加に伴う床版中央変位の増加は実験値に比べ少ないものの、10万回荷重時以降はFTCなしの床版に対する実験結果よりも上回る値を示した。また、凍結融解の進行に伴い、床版中央変位の増加率も高まることが分かった。 $\bar{\epsilon}_{pf} = 0.000$ の時、中央変位は1.30mmから1.60mmまで増加した。それぞれ、 $\bar{\epsilon}_{pf} = 0.163$ の時には1.60mmから2.01mmまで、 $\bar{\epsilon}_{pf} = 0.318$ の時には2.01mmから2.44mmまで中央変位が増加している。これを荷重回数で除した値は、それぞれ 8.00×10^{-7} 、

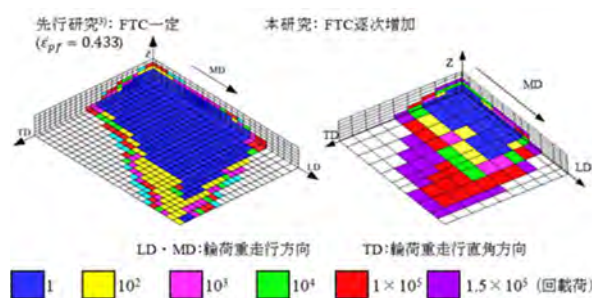


図-5 ひび割れ分布

1.09×10^{-6} 、 1.83×10^{-6} mm であることから、1回荷重当たりの中央変位の増加量は凍結融解の進行に伴い上昇するといえる。

3.2 ひび割れ分布

図-5にひび割れ分布を示す。FTCありの床版に対する実験を解析した先行研究²⁾とのひび割れ分布の比較を示す。逐次増加のケースでは、15万回荷重時にひび割れが上端部に至ったのに対し、FTC一定の床版では、100回荷重までに上端部へひび割れが進行している。また、FTC逐次増加のケースでは、1万回荷重以降にひび割れの進捗が大きい。これは、1万回までは凍結融解が進行していないためであり、凍結融解がひび割れ進展に及ぼす影響が大きいことが確認できる。

4. まとめ

本研究では、進行する凍結融解・輪荷重荷重の2つの複合要因による劣化がRC床版の疲労寿命へ与える影響を検討した。得られた結果をまとめる。

- (1) 床版中央変位について、凍結融解の進行は輪荷重による床版の中央変位増加を助長する。本研究では、凍結融解が50回相当増加する度、それぞれ約4割、6割程、1回荷重当たりの床版変位の増加率が上昇した。
- (2) 床版のひび割れ進展について、凍結融解の進行が床版のひび割れの進展を助長することが分かった。特に凍結融解が進行した10万回荷重以降ではひび割れの進展が早く、15万回荷重時にひび割れ要素が端部に達している。

今後は、FTCが逐次増加するケースをさらに増やし、凍結融解の進行と輪荷重荷重による床版の中央変位、ひび割れ進展の相関を検討してゆく。

参考文献

- 1) 三田村浩,佐藤京,本田幸一,松井繁之: 道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響、構造工学論文集 Vol.55A、p1420-1431、2009.
- 2) S. Edalo, T. Matsumoto, T. Hayashikawa: Fatigue analysis of Frost Damaged RC Slabs with Plain Bars Subjected to Moving Load, GJBS2016, Osaka, Japan, p049, 2016.
- 3) M. Hasan, H. Okumura, Y. Sato, T. Ueda: Stress-Strain Model of Concrete damaged by Freezing and Thawing Cycles, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 2, No. 1, p89-99, 2004.