

交通荷重下の疲労損傷評価における周波数領域法のための基礎的検討

東京大学 学生会員 ○国吉 竜太
東京大学 正会員 蘇 迪
東京大学 正会員 長山 智則

1. 背景と目的

道路橋の老朽化が進む我が国において、想定を上回る交通量や過積載車両の走行といった要因により引き起こされる疲労損傷が社会的問題となっている。そのため近年では Bridge Weigh in Motion (BWIM)技術等の通行車両の荷重情報を推定する技術を用いて、疲労評価を行う手法が着目されている。その際、推定されてきた荷重情報による時刻歴解析を用いた時間領域法は広く用いられその妥当性が認められている一方で、動的解析を行うために計算量は膨大であり、長時間の評価には適さない。本研究は BWIM により得られる長時間の交通荷重情報を活用するために有用と考えられる周波数領域法によって、疲労寿命を推定することを目的とする。その際、すでに手法が確立されているレインフロー法に基づく時間領域法を参考値とすることで比較を行う。

2. 周波数領域法による疲労評価の理論

周波数領域法とは、部材の応力応答のパワースペクトル(応力応答 PSD)を入力とし、疲労寿命を推定する手法である。まず、応力応答 PSD から応力範囲の確率密度関数を抽出する。スペクトルの特性を表す n 次スペクトルモーメントが片側 PSD から導かれ、このモーメントから応力範囲の確率密度関数 $P(S)$ を算出する。算出手法は様々な提案されており、本研究では機械工学にて一般的に用いられている Dirlik 法を採用した。Dirlik 法はモンテカルロシミュレーションにより複数の振動データの標本から準実験的に導入された理論である¹⁾。次に、累積疲労損傷側に従い応力範囲の確率密度関数と部材の S-N 曲線を比較することで疲労寿命を算定する。対象部材の S-N 曲線図の関係式が $S^k N = C_0$ として与えられているとき、疲労損傷度 $E[D]_{dirlik}$ は(1)式にて導かれる。ここで、 k は S-N 曲線の傾き、 C_0 は疲労強度定数、 $E[P]$ は振動の単位時間当たりのピーク数、 T は荷重の継続時間である。最後に、疲労寿命を疲労損傷度の逆数を用いて $1/E[D]_{dirlik}T$ として求めることができる。

$$E[D]_{dirlik} = \int_0^\infty \frac{E[P]TP(S)}{N(S)}dS = \frac{E[P]T}{C_0} \int_0^\infty S^kP(S)dS. \tag{1}$$

3. 計測データへの適用検討

周波数領域法の車両荷重への適用可能性を検証するために、本研究では実橋梁における実計測データを用いた。首都高渋谷 3 号線にて筆者らが行った計測の結果を対象とし主桁スパン中央、四分の一点、支点直上の下フランジ上面の 5 か所の異なる場所 (Case1-5) での、平日の午前 8 時からの 1 時間の応力履歴のデータを用いる²⁾。応答 PSD を得るためには、時刻歴応答に対しフーリエ変換を行う。本研究ではハミング窓を用いた Welch 法を採用し、さらに上述の手法により疲労寿命を算定する。その際、部材の疲労強度に由来する定数 C_0 はレインフロー法と同様に 2.0×10^{12} とした。結果を表 1 に示す。なお、各ケースのレインフロー法に対する相対誤差の平均値も表中に示した。この結果より、周波数領域法を用いた推定疲労寿命は時間領域法よりも長くなることが示された。

表 1. 各計測地点における推定疲労寿命

Case		1	2	3	4	5	平均相対誤差
(h)	レインフロー法	3.98×10^6	7.46×10^6	7.69×10^7	9.26×10^7	6.45×10^6	—
	Dirlik 法	6.62×10^6	1.16×10^7	1.31×10^8	1.86×10^8	1.04×10^7	71 %

キーワード 疲労寿命評価, 周波数領域法, Dirlik 法, 車両荷重
連絡先 〒113-8656 東京都文区本郷 7-3-1 工学部 1 号館橋梁研究室, TEL 03-5841-6097

4. 車両荷重の非ガウス性考慮

周波数領域法は荷重がガウス性を有するという仮定がある一方で車両荷重は必ずしもガウス性振動ではない。そこで、本研究では Gaussian Mixture Model 法（GMM 法）を適用する。本手法は対象とする振動を、確率密度関数が $P_1(S), P_2(S)$ である 2 つのガウス性振動の重ね合わせで下式のようにあらわすことができるというものである。

$$P_{NG}(S) = \alpha P_1(S) + (1 - \alpha)P_2(S). \quad (2)$$

この時、 $P_1(S), P_2(S)$ は各ガウス性振動の分散 σ_1^2, σ_2^2 が分かれば Dirlik 法により算出でき、さらに $\alpha, \sigma_1^2, \sigma_2^2$ については対象とする振動 $x(t)$ の時刻歴モーメント m_n に関する方程式を解くことによって定めることができる³⁾。

上述の GMM 法により Case1 の確率密度関数を求めたものを Dirlik 法の結果とともに図 1 に示す。参考値になるレインフロー法から求めた確率密度関数とよく一致することを確認できた。また各地点の推定結果を示した表 2 を見ても、GMM 法のほうが参考値との差が小さいことがいえる。

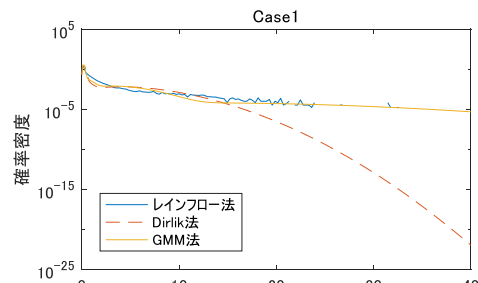


図 1. 応力範囲の確率密度関数

表 2. 各計測地点における GMM 法による推定疲労寿命

Case	1	2	3	4	5	平均相対誤差
疲労寿命(h)	3.72×10^6	6.90×10^6	7.19×10^7	9.09×10^7	5.85×10^6	-6 %

5. プレートモデルによる検証

BWIM により得られる車両荷重情報を活用した疲労評価のためには本研究で着目した周波数領域法に加え、荷重から応力応答 PSD を算出するための構造計算が必要となる。応力応答 PSD を計算するためには荷重の PSD を入力として与えて定常動的解析を行うが、車両荷重のような空間的な相関のある荷重への適用可能性は明らかでない。

そこで本研究では空間的相関性のある荷重について簡素化した現象を考え、プレートモデルの表面を直線上に移動荷重が作用するケースをシミュレーションし本手法の基礎的検討を行った。荷重に関しては時刻歴における荷重データが所与であるとして時刻歴荷重をフーリエ変換することで荷重の PSD を得る。解析結果は疲労寿命(サイクル)対数表示として図 2 のように得られる。時刻歴動的解析及びレインフロー法によって疲労寿命を推定した図 3 に示す結果と比較しても周波数領域法にて同様の解析結果が得られることが示された。

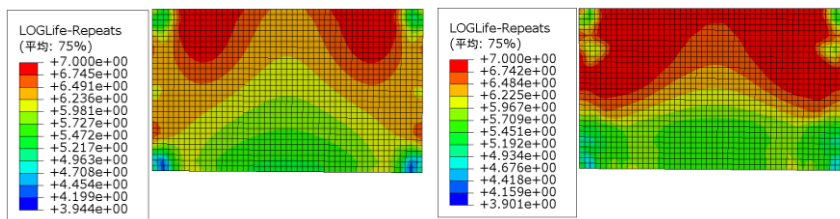


図 2. 周波数領域法による推定寿命 図 3. 時間領域法による推定寿命

6. まとめ

本研究では計測より得られる長時間にわたる車両荷重データを活用した疲労寿命評価を目的として、周波数領域法による疲労寿命推定手法の鋼橋への適用可能性を検討した。まず部材の応答から疲労寿命を推定する手法について実計測結果を用いて検討し、振動の非ガウス性を考慮する GMM 法を導入することでより妥当性の高い評価が可能であることを示した。さらに、構造計算も含めることで車両荷重を入力として疲労評価を行う手法に関しても、簡易化したモデルによってその適用可能性を示した。

参考文献

- 1) Turan Dirlik: Application of Computers in Fatigue Analysis, Ph.D. Thesis at University of Watwick, 1985.1
- 2) 蘇迪, 三輪陽彦, 藤野陽三, 長山智則: 首都高速道路高架橋における走行車両による交通振動計測とその解析, 構造工学論文集, vol. 59, pp. 281-289, 2013
- 3) D. Middleton: Non-Gaussian noise models in signal processing for telecommunications: new methods and results for class A and class B noise models, IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 45 No. 4, 1999.3