

(34) 生体脈波情報を利用した 歩道橋横断時の不快感評価の試み

原田隆郎¹・横山功一²

¹正会員 茨城大学准教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)
E-mail: harada@mx.ibaraki.ac.jp

²フェロー 茨城大学名誉教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 日立市中成沢町4-12-1)
E-mail: yokoyama@mx.ibaraki.ac.jp

近年の横断歩道橋の軽量化や長スパン化, さらに横断歩道橋の利用形態の変化などから, 歩道橋横断者の歩調が歩道橋の固有振動数と一致することで歩道橋が大きく揺れ, 利用者が不快な揺れを感じるケースが報告されている. 本研究では, このような歩道橋の不快な揺れを生体情報を利用して評価することを試みた. 具体的には, 歩道橋の振動と利用者の歩行時の動き, そして歩道橋横断時の利用者の生体脈波の関係を把握することで, 生体脈波が歩道橋横断時に生じる揺れによる不快感を定量評価するための指標として利用できることを実験的に確認した.

Key Words : *biological pulse wave, Lyapunov exponent, pedestrian bridges, bridge vibration*

1. はじめに

横断歩道橋の振動使用性を考える場合, 歩行者が歩道橋横断時の揺れによって感じる不快感が問題となる. これは, 歩道橋の固有振動数と歩行者の歩調が接近した場合に共振現象が発生することで, 歩道橋が大きな揺れを起こし歩行者に不快感を与えるといるものである¹⁾. 一般に, 歩行者の歩調は2Hz程度と言われており, 歩道橋の固有振動数が2Hz付近の場合は歩道橋が大きく揺れる. そこで, 立体横断施設技術基準・同解説²⁾では, 歩道橋の主桁の固有振動数が2Hz前後にならないように設計することが必要であると規定されている. このような横断歩道橋の振動使用性を評価する研究は多く, 田中ら³⁾は, 共振しやすい歩道橋タイプの試設計を行い, 共振時の揺れの感じ方を容易に精度よく算出できる簡易式を提案しているとともに, 梶川⁴⁾や小幡ら⁵⁾は, 振動限度と人間の振動感覚を踏まえて歩道橋の振動使用性を評価している.

一方, 医療や福祉工学の分野で利用され, 外部環境の急激な変化による人体の反応を観察するのに適しているとして, 人間の生体脈波を用いた感性評価の研究がいくつか展開されている^{6),7)}. ここで生体脈波とは, 身体組織のある部分への血液の流入によって生じる容積変化を体表面から波形としてとらえたものであり, 計測された脈波波形に対してカオス

解析などを実行することにより, 様々な生体情報の特徴量を得ることができる.

そこで本研究では, 歩道橋横断者の生体脈波を利用し, 歩道橋横断時の歩行者の生体脈波と歩行時の動き, そして歩道橋の振動特性(加速度や変位)との関係を実験的に把握した. そして, 歩道橋横断者が感じる不快な揺れを評価する指標として, 歩行者の生体脈波情報を利用することの可能性について検討した.

2. 生体脈波とその特徴量の抽出方法

(1) 生体脈波の測定原理

脈波測定は, 図-1に示すように指先や耳朶などの生体組織へ近赤外領域の光を照射し, その反射あるいは透過光を検出するもので, ヘモグロビンの近赤外光の吸光度を利用して血液の脈動を電氣的に測定するものである. つまり, ヘモグロビンの量の変化を電圧値で捉え, A/D変換回路により電圧値を数値化してPCに表示する. 脈波は横軸に時間, 縦軸にヘモグロビンの量の変化を電圧値で捉えた値で表現される.

(2) カオス解析による脈波の特徴量の抽出方法

脈波波形はカオス性を有することから, その特徴

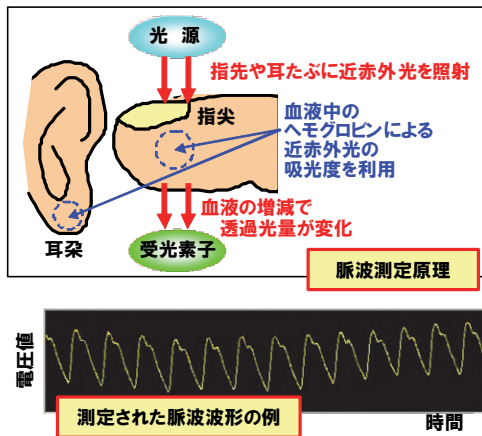


図-1 脈波測定の原理と計測脈波の例

量の抽出方法としては一般にカオス解析が用いられる⁸⁾。カオス解析では、まずTakensの埋め込み定理を用いて脈波波形から時間遅れ座標にアトラクタを構成する。生体情報が不安定な場合、アトラクタの軌道は複雑になり乱れる。このアトラクタの軌道の複雑さを表す指標がリアプノフ指数である。本研究では、このリアプノフ指数を脈波の特徴量を示す指標として利用する。

リアプノフ指数 $\lambda(f)$ は式(1)で計算され、力学系 $x_{i+1}=f(x_i)$ について、近接した2点から出発した2つの軌道がどのくらいの時に離れていくかを測る尺度として定義される⁸⁾。

$$\lambda(f) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \log |f'(x_i)| \quad (1)$$

ここで、 $f'(x_i)$ は写像拡大率、 N はサンプリングデータ数である。カオス解析としてのリアプノフ指数とは、写像拡大率の対数であり、アトラクタの軌道がどのくらい複雑かを表す指標である。例として、アトラクタが全く同じ軌道を描く場合にはリアプノフ指数は0となり、軌道が複雑になるほど、リアプノフ指数の値は大きくなる。リアプノフ指数が大きいということは、何らかの外界の変化に対して、脈波が変化しているということを示している。

(3) 本研究における不快感評価指標

本研究では、歩道橋横断時の利用者の不快感は、歩道橋の揺れと、それを受ける利用者の生体情報との相対関係から評価できると考えた。つまり、歩道橋の振動を利用者の視点から評価し、歩道橋の振動使用性を議論するため、前項で述べたリアプノフ指数を不快感の評価指標として定義した。具体的には、歩道橋利用者の脈波を定量化できるリアプノフ指数を不快感指標と対応づけることで、歩道橋横断時の歩行者が感じる不快感を評価することを試みた。

しかしながら、生体情報には個人差や時間依存性があり、脈波から算出されるリアプノフ指数の大小にもこれらが影響すると考えられている。これらの生体情報に含まれる個人差や時間依存性を取り除き、生体情報による評価指標の普遍性を検討している例もあるが、まだ十分に確立されていない⁹⁾。よって、本研究では生体脈波から算出されるリアプノフ指数から個人差や時間依存性を取り除き、乗り心地の絶対評価を行うのではなく、個人差や時間依存性の影響を含めた上で、歩道橋横断時の不快感の違いを相対的に評価できる指標として、脈波から算出されるリアプノフ指数を利用する。

3. 歩道橋横断時の不快感評価実験

本研究では、生体脈波を利用して歩道橋横断時の不快感を評価するため、Y歩道橋（埼玉県三郷市）を被験者に横断させ、被験者の生体脈波と歩調、そして歩道橋の振動を同時計測した。この歩道橋は図-2に示すように支間長65.0m、幅員3.0mの鋼桁桁橋であり、事前の自由減衰振動実験より桁の固有振動数は1.95Hzであることが確認されている。

被験者は20歳代の男性4名（被験者A～D）と女性1名（被験者E）、40歳代の男性1名（被験者F）の合計6名である。全員の被験者に対して、図-2に示すように歩道橋の【a】から【b】までを横断してもらい、そのときの耳葉脈波を株式会社CCI製「BACSディテクター」を用いて計測した。一方、被験者が歩道橋を横断するときの被験者の動きを把握するために、被験者の胸前面に3軸加速度計を取り付けた。また、歩道橋の振動加速度については、株式会社東京測器研究所製の3軸加速度計「ARF-20A」を用いて計測した。加速度計設置箇所は、歩道橋の桁振動は1次モードが卓越することを考慮して、図-2に示すスパン中央の丸印の箇所に設置した。

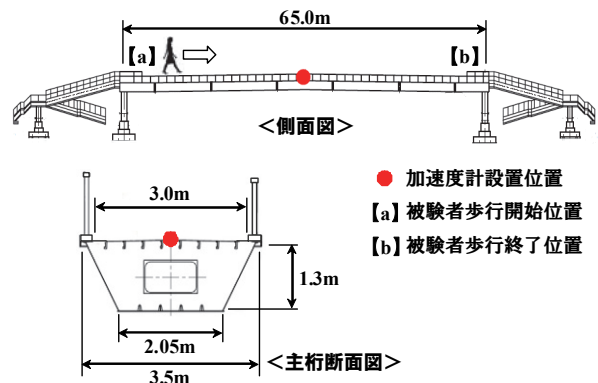


図-2 対象歩道橋と歩行区間及び加速度計設置箇所

4. 実験結果

(1) 振動変位と最大リアプノフ指数との関係

まず、20歳代の男性のうち1名（被験者A）と40歳代の男性（被験者F）のそれぞれに対して自由歩行時の桁の振動加速度と生体脈波を5回計測した。なお、サンプリング周波数はどちらも200Hzである。計測された振動加速度から振動変位を、生体脈波からリアプノフ指数をそれぞれ算出した。振動変位は、計測された加速度時刻歴を数値積分して求めた。そして、振動変位とリアプノフ指数のそれぞれの最大値を比較した。

図-3は20歳代（被験者A）と40歳代（被験者F）のそれぞれの被験者の結果を示したものである。どちらの被験者も振動変位が大きくなるとリアプノフ指数が増加しており、不快感を大きく感じている。ただし、脈波には個人差があることから、同程度の振動変位でも両者のリアプノフ指数には差が生じる結果となった。

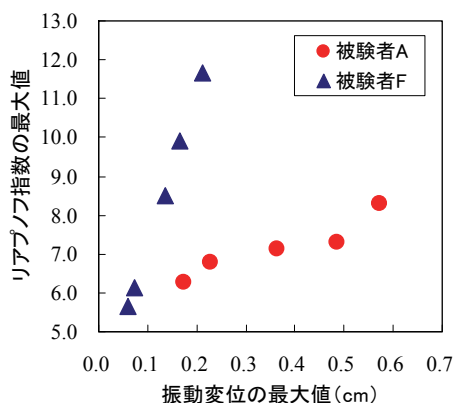


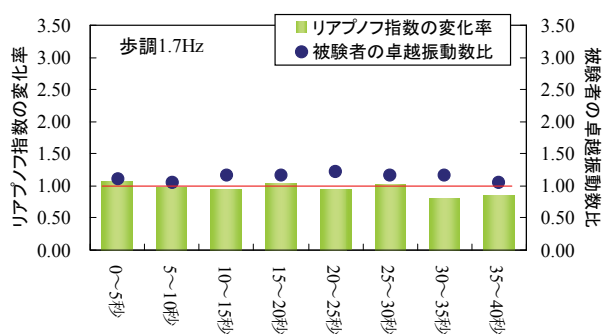
図-3 振動変位とリアプノフ指数の関係

(2) 被験者の歩調とリアプノフ指数の変化率との関係

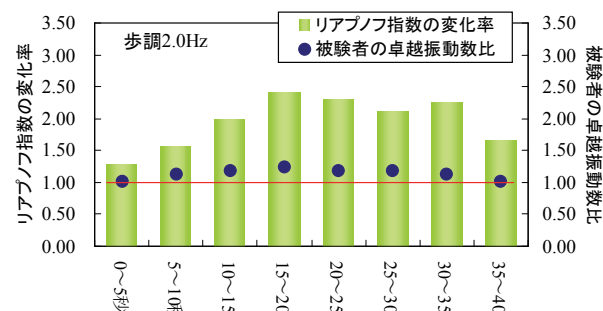
次に、20歳代の男性のうち1名（被験者A）に関して、歩調を1.7Hz、2.0Hz、2.3Hzの3パターンとしたときのリアプノフ指数の変化率を比較した。実験で計測されたそれぞれ1回分の生体脈波と被験者の振動加速度を5秒間隔で分割し、生体脈波からはリアプノフ指数を、被験者の振動加速度は鉛直（Z軸）方向成分のみを利用して卓越振動数を求めた。

図-4に歩調の違いによる5秒間隔のリアプノフ指数の変化を示す。図-4の左縦軸は被験者の通常歩行（揺れの少ない歩道を歩行している場合）のリアプノフ指数に対する揺れのある歩道橋を歩行している場合のリアプノフ指数の変化の割合（リアプノフ指数の変化率）である。なお、右縦軸には被験者の胸前面で計測された鉛直方向加速度の卓越振動数を、予

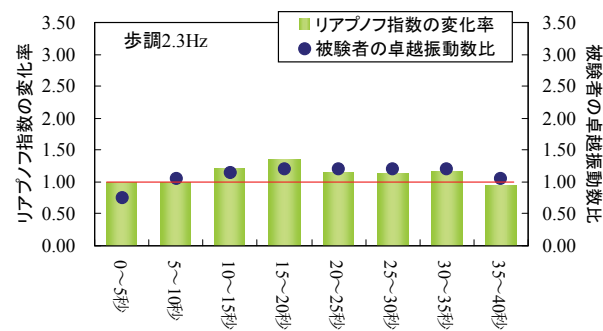
定された歩調（1.7Hz、2.0Hz、2.3Hz）で除した卓越振動数比を示した。図-4(a)から(c)において、被験者の卓越振動数比はほぼ1.0で、予定された歩調どおりの歩行を行っていると考えられる。これに対して、歩調1.7Hzおよび2.3Hzのリアプノフ指数の変化率を見ると、歩行前と歩行後でリアプノフ指数の変化は見られないが、被験者が歩調2.0Hzで歩行した場合、つまり歩道橋の固有振動数（1.95Hz）とほぼ一致するケースでは、歩行前と歩行後でリアプノフ指数の変化率は増加した。この結果より、被験者が歩道橋の固有振動数と歩調を合わせて歩行することで、被験者の脈波は大きく変化することがわかり、これが不快感に繋がることが推察できる。



(a) 歩調1.7Hzで歩行した場合



(b) 歩調2.0Hzで歩行した場合



(c) 歩調2.3Hzで歩行した場合

図-4 歩調の違いによるリアプノフ指数の変化

(3) 歩道橋—被験者間の2次元振動加速度距離比とリアプノフ指数の変化率との関係

最後に、歩道橋の振動と被験者の歩行時の動きとの相対関係を、それぞれの振動加速度から算出した

2次元加速度振幅距離の比 $R_{G/P}$ で評価し、生体脈波の変化（前節で求めたリアプノフ指数の変化率）との関係を考察した。2次元加速度振幅距離の比 $R_{G/P}$ は式(2)のように定義した。

$$R_{G/P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{i,G} / \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{i,P} \quad (2)$$

ここで、 $D_{i,G}$ は歩道橋の2次元加速度振幅距離[gal]、 $D_{i,P}$ は被験者の2次元加速度振幅距離[gal]であり、 N は加速度のサンプリング数である。また、歩道橋および被験者それぞれの2次元加速度振幅距離（ $D_{i,G}$ と $D_{i,P}$ ）は式(3)および式(4)のように定義した。

$$D_{i,G} = \sqrt{a_{xi,G}^2 + a_{zi,G}^2} \quad (3)$$

$$D_{i,P} = \sqrt{a_{xi,P}^2 + a_{zi,P}^2} \quad (4)$$

ここで、 i は加速度のサンプリング番号であり、 $a_{xi,G}$ は歩道橋の橋軸直角方向（x軸）の振動加速度[gal]、 $a_{zi,G}$ は歩道橋の鉛直方向（z軸）の振動加速度[gal]である。また、同様に $a_{xi,P}$ および $a_{zi,P}$ は被験者の橋軸直角方向（x軸）および鉛直方向（z軸）のそれぞれの振動加速度[gal]である。

解析では、前節で定義したリアプノフ指数の変化率のうち、歩道橋が最も大きく揺れるとき（被験者がスパン中央を通過する前後の5秒間）に着目し、同時帯の2次元加速度振幅距離の比 $R_{G/P}$ と比較した。なお、歩行実験はそれぞれの被験者（A～F）に対して2回ずつ実施した。

リアプノフ指数の変化率と $R_{G/P}$ の関係を図-5に示す。各被験者とも2回の計測結果がほぼ同様の結果となっていることがわかり、結果の再現性が確認できる。また、被験者F（40代男性）を除いては、 $R_{G/P}$ が大きくなるほどリアプノフ指数の変化率が大きくなるという傾向がみられ、歩行者の歩行時の動きに対して歩道橋がどの程度振動しているかを表している $R_{G/P}$ とリアプノフ指数の変化率とが相関関係にあることがわかる。このことから、生体脈波から算出されるリアプノフ指数は、その変化率を見ることが確認できた。

5. おわりに

本研究では、歩道橋利用者の生体脈波情報が、歩道橋横断時に歩行者が受ける不快な揺れ（不快感）の評価指標として利用可能かについて実験的に検討を行った。結論を以下に示す。

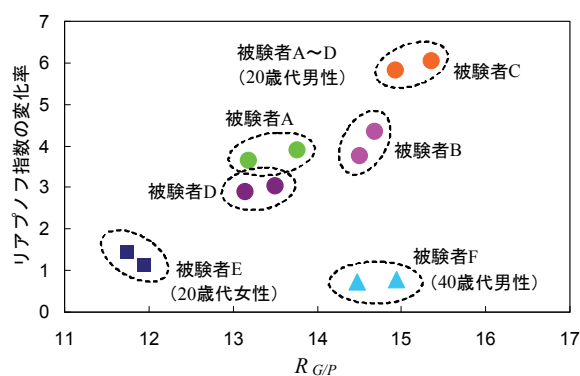


図-5 $R_{G/P}$ とリアプノフ指数の変化率の関係

- ① 生体脈波から算出されるリアプノフ指数の最大値は、歩道橋の鉛直方向加速度の最大値と正の相関があることがわかった。
- ② リアプノフ指数の変化率と歩行者の歩調との関係を調査した結果、歩道橋の固有振動数と歩行者の歩調が一致すると、歩行者のリアプノフ指数の変化率は大きく変化することがわかり、これが不快感に繋がることが確認できた。
- ③ 歩行者の2次元加速度振幅距離によって正規化された歩道橋の2次元加速度振幅距離（ $=R_{G/P}$ ）が大きくなるほど、歩行者の生体脈波の変化が大きくなり、両者に相関があることがわかった。ただし、歩行者属性（例えば年齢）によって不快感の感じ方が異なることが予想される。

参考文献

- 1) 例えば、梶川康男：歩道橋の振動使用性とその照査方法，プレストレストコンクリート，Vol.49，No6，pp.18-21，2007。
- 2) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1983。
- 3) 田中信治，加藤雅史：設計時における歩道橋の振動使用性照査法，土木学会論文集，No471/I-24，pp.77-84，1994。
- 4) 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性に関する考察，土木学会論文報告集，No.325，pp.23-33，1982。
- 5) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一：人間の振動感覚に基づいた歩道橋の使用限界状態に関する研究，土木学会論文報告集，No.537，pp.217-231，1996。
- 6) 清水俊行，苗鉄軍，下山修：指尖脈波のカオス分析を用いたドライバの心身状態の定量化，ヒューマンインタフェース学会研究報告集，Vol.6，No.1，pp.97-99，2004。
- 7) 原田隆郎，横山功一：生体脈波を用いた道路の乗り心地評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.68，No.1，pp.40-51，2012。
- 8) 合原一幸編，池口徹，山田泰司，小室元政著：カオス時系列解析の基礎と応用，産業図書，2000。
- 9) (社)人間生活工学研究センター：ストレス計測技術の安全対策への適用可能性に関する調査研究報告書，2004。