

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月19日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560471

研究課題名（和文）生体情報による橋梁環境振動評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of bridge vibration evaluation system
by using physiological information

研究代表者

原田 隆郎（HARADA Takao）

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：00241745

研究成果の概要（和文）：

橋梁の各種振動によって人体が受ける影響度の定量化手法を提案するため、本研究では歩道橋の振動問題に着目し、歩道橋横断時に利用者が感じる不快な揺れを生体脈波で評価するための実験的検討を行った。実験では、歩道橋の振動を実測するとともに、歩道橋利用者の歩行時の振動を同時計測し、両者の振動特性と人間の生体脈波の関係を把握した。その結果、歩道橋の振動変位が大きくなればなるほど不快感も大きくなるとともに、利用者の歩調が歩道橋の固有振動数と一致する場合に利用者の生体脈波が大きく変化することを確認した。

研究成果の概要（英文）：

It is important to propose the evaluation technique of influence which a human body receives due to variety bridge vibration. In this study, the experiment to measure physiological information of pedestrian bridges user was performed in order to propose evaluation technique of serviceability of pedestrian bridges. In the experiment, the vibration of both pedestrian bridges and user were measured simultaneously, the relation of both vibration characteristic and the biological pulse wave have been investigated. As the result, it is found that the user's displeasure also becomes larger as displacement amplitude of pedestrian bridges becomes large, and the biological pulse wave of user changes a lot when user's walking pace is in agreement with natural frequencies of pedestrian bridges.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：振動使用性評価，モニタリング

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：橋梁振動，歩道橋，生体脈波，リアプノフ指数，振動加速度

1. 研究開始当初の背景

近年、歩道橋横断時の揺れや橋梁振動を原

因とする低周波音などによる様々な苦情や被害が利用者および周辺住民から寄せられ

ている。しかしながら、これらの橋梁振動問題に対して人体が直接受ける影響度の定量化手法は確立していない。つまり、橋梁振動によって生じる人体への様々な影響を定量評価するために、人間の生体情報を計測し、橋梁振動による人体への影響度の評価方法を提案することが求められている。

2. 研究の目的

前述の背景を踏まえ、本研究では歩道橋の振動使用性問題に着目し、歩道橋横断時に利用者が感じる不快な揺れを生体脈波で把握することを目的とした。

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し歩行者に不快感を与えるというものである。一般に、歩行者の歩調は約 2Hz とされており、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（日本道路協会、1983 年）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。

これに対し、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言われていた生体脈波を用いることで、歩行者の生体脈波と歩道橋の振動変位および歩行者の歩調の関係を実験的に把握し、歩道橋横断時の感じる揺れに対する不快感を評価することが可能であると思われる。

以上より本研究では、横断時に歩道橋が揺れることで不快を感じる歩道橋を対象として、歩道橋の振動変位と被験者の生体脈波の関係を実験的に調査するとともに、被験者の歩調と桁の固有振動数が共振する場合の生体脈波の変化を検討した。そして、生体情報による橋梁振動の評価手法を提案するための基礎的な知見を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 生体脈波の計測と不快感の考え方

本研究では、歩道橋横断時の生体情報として脈波を利用する。脈波計測では、指先や耳などの生体組織へ近赤外領域の光を照射したときの反射あるいは透過光を検出し、ヘモグロビンによる近赤外光の吸光度を利用して血液の脈動を電氣的に計測する（図-1）。計測された波形はカオス性を有することから、その特徴量の抽出方法としては一般にカオス解析が用いられる。カオス解析では、まず Takens の埋め込み定理を用いて波形から時間遅れ座標にアトラクタを構成する。生体脈

波が不安定な場合、アトラクタの軌道は複雑に乱れる。そして、このアトラクタの軌道の複雑さを表す指標をリアプノフ指数と定義している。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。

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

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。よって、アトラクタがまったく同じ軌道を描く場合にはリアプノフ指数は 0 となり、軌道が複雑にずれるほどリアプノフ指数の値は大きくなる。計測された脈波波形のリアプノフ指数が大きいということは、人体が何らかの外界の変化に対して反応している状態であると考えられ、本研究では、このリアプノフ指数を不快感の指標として用いることとした。つまり、不快を感じていない場合には生体情報が安定しているためリアプノフ指数は低い値を示し、逆に不快を感じている場合には生体情報が不安定となりリアプノフ指数は安定時に比べ大きな値を示すことになる。

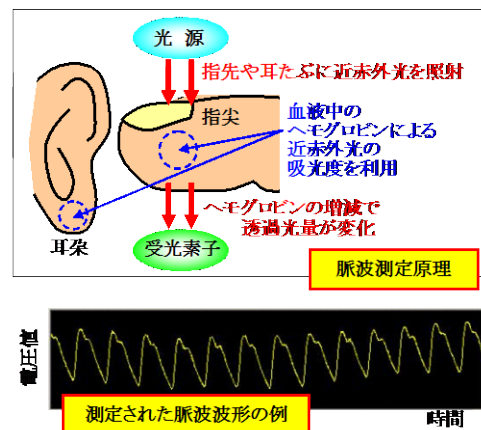


図-1 脈波計測原理と脈波波形の一例

(2) 歩道橋横断時の不快感評価実験概要

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 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 歳代と 40 歳代の男性 2 名であり、図-2 に示すように被験者が歩道橋の④から⑥までを横断するときの耳脈波を株式会社 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歩調は、被験者の胸前面に取り付けた加速度計の鉛直方向成分から求めた。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加速度計の鉛直方向成分を利用した。そして、生体脈波から算出したリアプノフ指数と比較するため、計測された加速度時刻歴を数値積分して振動変位を求めた。なお、歩行者の歩調の違いと生体脈波の変化率の関係を検討する際は、各計測データを5秒間隔で分割（サンプリングはどちらも200Hz）し、生体脈波はリアプノフ指数に変換し、被験者と歩道橋の振動加速度は高速フーリエ変換によって卓越振動数を求めた。

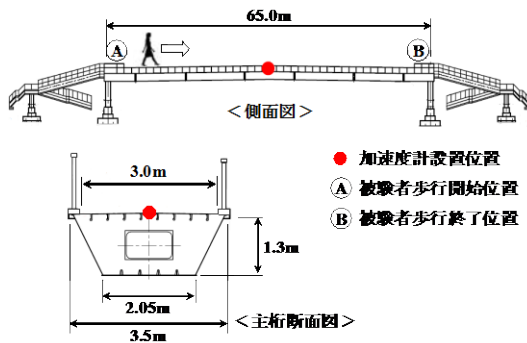


図-2 対象歩道橋と被験者歩行区間及び加速度計設置箇所

4. 研究成果

(1) 振動変位と生体脈波の関係

まず、2名の被験者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、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歳代と40歳代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（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た。

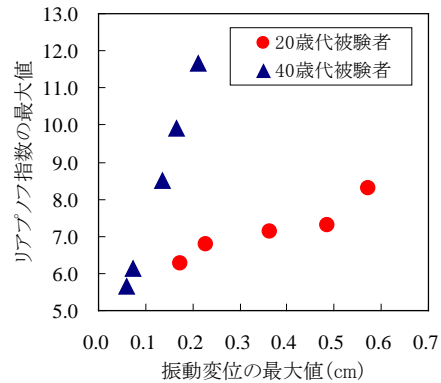


図-3 被験者の違いによる振動変位とリアプノフ指数の関係

次に、20歳代被験者が単独自由歩行した場合と歩道橋を強制的に大きく揺らしながら歩行した場合に受ける不快感の違いを検討した。図-4は3回計測した振動変位とリアプノフ指数のそれぞれの平均値を比較したものである。被験者の単独自由歩行による振動変位やリアプノフ指数よりも、強制的に振動を与えた場合の振動変位とリアプノフ指数が格段に大きくなっている。このことより、歩道橋の振動変位が大きくなればなるほど不快感（リアプノフ指数）も大きくなることが再確認できた。

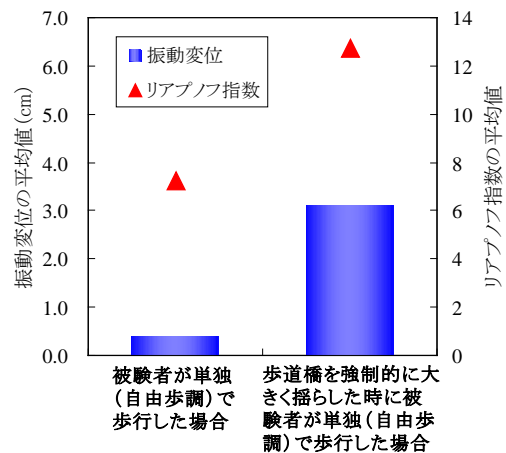


図-4 強制的に大きな振動を与えた場合のリアプノフ指数の変化

(2) 歩行パターンによる振動変位と生体脈波の関係

被験者の歩行状態の違いが不快感に及ぼす影響を確認するため、40歳代被験者にメトロノームを持たせ、それに合わせて歩行パターン（図-5の①～③）と歩調（1.7Hz, 2.0Hz, 2.3Hz）を変化させた実験を行った。図-5にそれぞれの歩行パターンと歩調における振動変位の最大値とリアプノフ指数の最大値を示す。振動変位の最大値が大きい場合はリアプノフ指数の最大値も大きくなる傾向が

あることがわかり、前出と同様に振動変位とリアプノフ指数の相関が確認できる。また、①のように被験者が単独歩行する場合よりも②や③のように被験者が同伴者と一緒に歩行する場合の方が高いリアプノフ指数を示す傾向がある。なお、被験者の歩調を変化（1.7Hz, 2.0Hz, 2.3Hz）させた実験も行ったが、被験者が確実に一定歩調で歩行できたとは言えず、歩調の違いによる不快感の影響は十分に把握できなかった。

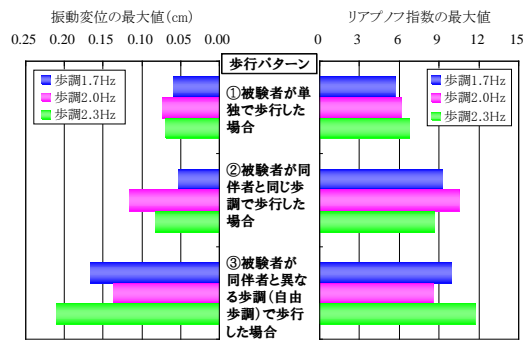


図-5 各歩行パターンにおける振動変位とリアプノフ指数

(3) 歩行者の歩調の違いと生体脈波の変化率の関係

図-6 に 20 歳代の被験者を対象に、歩調を 1.7Hz, 2.0Hz, 2.3Hz の 3 パターンに変化させたときの実験結果を示す。各図の左縦軸は被験者が歩行する前の脈波から求められたリアプノフ指数に対する歩行後のリアプノフ指数の変化の割合であり、右縦軸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である。

各図ともに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ができたと考えられる。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と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確認できた。

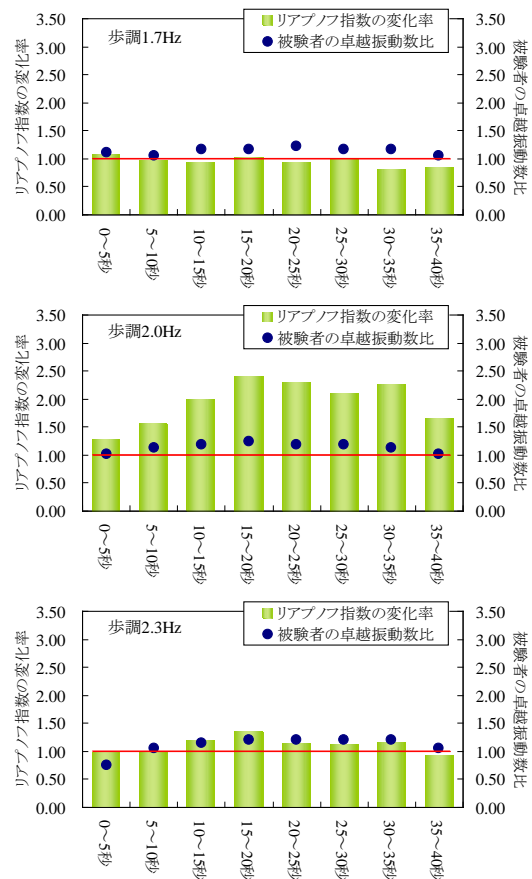


図-6 歩調の違いによる被験者のリアプノフ指数の変化

以上より、本研究では生体脈波を利用することで歩道橋横断時の利用者の不快感を定量的に評価することが可能であることを示した。現在、横断歩道橋の振動使用性は歩道橋の振動加速度や速度、変位などを考慮して検討されているが、歩道橋利用者が受ける生体の各種情報を利用することで、ユーザ側の評価を取り込んだ新しい指標が提案される可能性がある。

今後は、歩道橋と被験者の振動をより詳細に解析し、生体脈波の変化と対応づける手法を提案するとともに、脈波以外の生体情報についても、橋梁振動の新しい評価ツールとして確立させる必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① 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, 40-51, 2012, 査読有, doi:10.2208/jscejcm.68.40

〔学会発表〕(計2件)

①原田隆郎, 亀井啓太, 『生体脈波の変化に着目した歩道橋横断時の不快感評価に関する検討』, 土木学会第67回年次学術講演会, 2012.9.5, 名古屋大学東山キャンパス

②原田隆郎, 横山功一, 沼尾達弥, 『不快感およびストレス評価における生体情報の適用可能性に関する基礎的検討』, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9.1, 北海道大学札幌キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田 隆郎 (HARADA TAKAO)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号: 00241745

(3) 連携研究者

横山 功一 (YOKOYAMA KOICHI)

茨城大学・名誉教授

研究者番号: 20302325