

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420475

研究課題名(和文) 生体情報による横断歩道橋の振動使用性評価システムの開発

研究課題名(英文) Development of evaluation system of serviceability of pedestrian bridges 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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：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との関係を実験的に調査した。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、歩行者の生体脈波を利用することの可能性について検討した。その結果、生体脈波から求められるリアプノフ指数の変化率は、歩行者が感じる歩道橋横断時の不快な揺れを相対的に評価することができる指標と考えられ、本手法は、生体脈波を利用した振動使用性評価の一手法として利用できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：It is most important to propose the evaluation technique of the unpleasantness which a human body receives due to bridge vibration. In this study, the experiment to measure physiological information was performed in order to propose evaluation technique of serviceability of pedestrian bridges. In the experiment, the vibration of both pedestrian bridges and pedestrians were measured simultaneously, and the relation of both vibration characteristic and the biological pulse wave have been investigated. As the result, it is found that the Lyapunov exponent of biological pulse wave could be used as an index for evaluating the unpleasant bridge vibration which pedestrians feel.

研究分野：構造工学、維持管理工学

キーワード：横断歩道橋 振動使用性 生体脈波 リアプノフ指数

1. 研究開始当初の背景

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、歩道橋の固有振動数と歩行者の歩調が接近し共振現象が発生することで歩道橋が大きく揺れる。このような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。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。

また、最近の歩道橋の利用形態は様々で、散歩やジョギングなどでも頻繁に利用され、単に利用者が横断のために歩行するパターンとは異なった周波数の外力が作用するケースも多くなっている。このように横断歩道橋の振動使用性の評価はより複雑になっており、歩道橋管理者が一般的に設計時に検討する振動変位や振動モードなどの力学的な観点だけでなく、歩行者が直接的に感じる歩行時の不快感なども加えた評価手法の提案が望まれている。

2. 研究の目的

本研究では、歩行者が直接的に感じる歩行時の不快感を加えた横断歩道橋の振動使用性の評価を行うため、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生体脈波を利用した。近年、生体脈波を用いた感性評価の研究は多く、土木分野においても、人間のストレスや不快感を定量的に評価するために生体情報を利用する例が増えている。そこで、本研究では脈波の安定性（不安定性）を最も良く表現できると言われるリアプノフ指数を利用し、横断歩道橋の振動使用性を評価する。ただし、一般に生体脈波には個人差が生じると言われることから、リアプノフ指数を直接利用するのではなく、同一人物・同一時間帯の脈波から求められたリアプノフ指数との比率（リアプノフ指数の変化率）から歩道橋横断時の不快感を評価することとした。

以上より、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との関係を実験的に調査することを目的とし、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、歩行者の生体脈波を利用することの可能性を検討した。

3. 研究の方法

(1) 生体脈波の測定と特徴量の抽出方法

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（縦軸はヘモグロビンの変化量を電圧で捉えた値）に測定する。

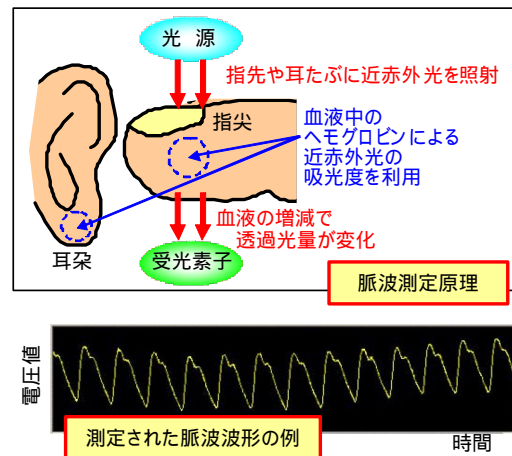


図-1 脈波測定の原理と計測された脈波の例

脈波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脈波波形から時間遅れ座標にアトラクタを構成する。脈波が不安定な場合、アトラクタの軌道は複雑になり乱れ、こ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、脈波波形の安定性（不安定性）を最も良く表現できると言われる、このリアプノフ指数を脈波の特徴量を表す指標として利用する。

リアプノフ指数 λ は式(1)で計算される量であり、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。

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

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ことを示している。

(2) 本研究における不快感評価指標

本研究では、歩道橋が大きな揺れを起こし歩行者に不快感を与えるケースを対象としている。そこで、歩道橋横断時に歩行者が感じる不快な揺れを、リアプノフ指数を利用した評価指標によって表現した。一方、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。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、絶対値を求めるのではなく、個人差や時間依存性の影響を含めた上で、歩道橋横断時に歩行者が受ける不快感の違いを相対的に評価するために、リアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ を用いることとした。

リアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ は式(2)で定義でき、歩行者の通常時（本研究では揺れのない一般の歩道を歩行している場合）の脈波から求められるリアプノフ指数 λ_0 に対する、歩道橋横断時の歩行者の脈波から求められるリアプノフ指数 λ の比率とした。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad (2)$$

この考え方は、同一人物がほぼ同一時間帯に通常歩行と歩道橋を横断した場合のリアプノフ指数を比較（変化率を算出）することで、それぞれの歩行時に同様に含まれる個人差をキャンセルし、歩行状態の違いによる影響だけを抽出しようとするものである。式(2)では、分母と分子のどちらのリアプノフ指数にも個人差は含まれるが、同一人物のほぼ同一時間帯におけるリアプノフ指数を利用すれば、通常歩行時に対する歩道橋横断時のリアプノフ指数の変化の割合が求められる。これによって、理論的には歩行者が歩道橋横断時に受ける不快な揺れによるリアプノフ指数の変化だけを抽出できる。

(3) 歩道橋横断時の不快感評価実験の概要

本研究では、歩行中の揺れによる不快感が大きいとされる Y 歩道橋（埼玉県三郷市）を対象とした不快感評価実験を行った。この歩道橋は図-2 に示すように支間長 65.0m、幅員 3.0m の鋼箱桁橋であり、この桁の固有振動数は事前の自由減衰振動実験より 1.95Hz であることを確認している。

評価実験では、まず被験者の歩調を変化させた歩行実験を行い、被験者の歩行パターンの違いが歩道橋の不快感を生じさせ、リアプノフ指数およびその変化率 $\Delta\lambda$ に影響を与えるかを検討した。また、本研究で提案するリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ が、被験者の歩行状態の違いのみを反映させた相対的な不快感評価指標として有効であるかについても確認した。次に、本研究の対象歩道橋において最も共振が大きくなる歩行パターンである歩調 2.0Hz に限定した評価実験を行い、歩道橋の振動加速度だけでなく、被験者の歩行時加速度も考慮した 2 次元的な加速度の影響が、リアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ に対して、どのような影響を与えるかを、歩道橋横断時を時間分割して詳細に調査した。

実験の被験者は 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】地点から【b】地点までを一人ずつ横断してもらい、そのときの耳朵脈波を株式会社 TAOS 研究所製の「BACS ディテクター」

を用いて計測した（図-3）。被験者の歩道橋上の通行位置は橋面上の中央である。被験者の歩行パターンについては、各実験の目的によって変化させた。

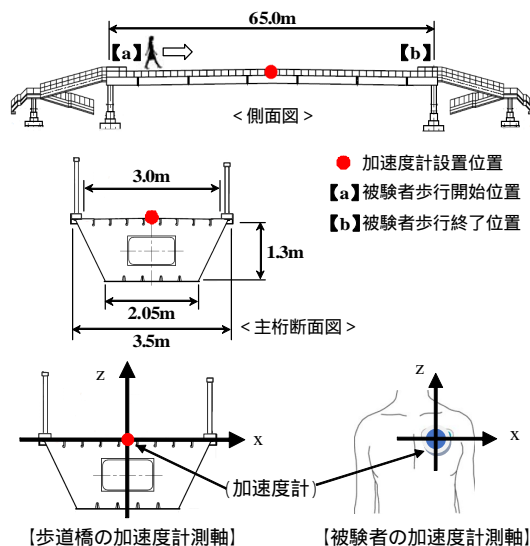


図-2 対象歩道橋と歩行区間および加速度計設置箇所

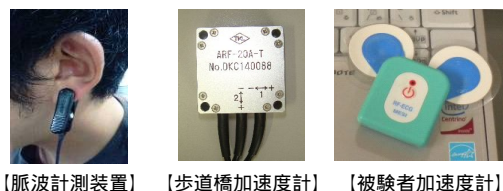


図-3 脈波計測装置、歩道橋および被験者の加速度計

計測した被験者の脈波はリアプノフ指数 λ として定量化し、これを被験者の歩道橋横断時のリアプノフ指数とした。一方、各被験者がそれぞれの歩行実験を実施する直前に、通常歩行（揺れのない一般の歩道を歩行している場合）の耳朵脈波も約 30 秒間計測し、この脈波から求められるリアプノフ指数を λ_0 として、両者を利用して式(2)によりリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ を求めた。なお、通常歩行の場合の歩調は指定せず、被験者が普段歩くペースの一定歩調で歩行してもらった。また $\Delta\lambda$ は通常歩行と歩道橋横断時のそれぞれのリアプノフ指数を直接利用しており、ほぼ同一時間帯に実施された一連の実験における両者の違いをそのまま定量化した。

また、本評価実験では被験者の生体脈波計測と同時に、被験者の歩行時の加速度と歩道橋の振動加速度も計測した。被験者の歩行時加速度を計測する目的は、被験者が歩道橋を横断するときの動きを把握するためであり、被験者の胸前面に無線式の 3 軸加速度センサを取り付けて計測した（図-3）。歩道橋の振動加速度については、(株)東京測器研究所製の 3 軸加速度計「ARF-20A-T」を用いて計測した（図-3）。歩道橋の加速度計設置箇所は、この歩道橋が 1 次モードの桁振動が卓越すること

を考慮して、図-2 に示すスパン中央の赤丸印の箇所とした。

4. 研究成果

(1)被験者の歩調とリアプノフ指数の変化率との関係

本研究では、歩道橋横断時の不快感と生体脈波のリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ との関係把握するため、被験者の歩調を変化させた歩行実験を行った。被験者の歩調は、歩道橋の固有振動数 (1.95Hz) と概ね一致させた場合と、それ以外の歩調による場合とした。また、リアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ が、歩道橋横断時の歩行者の不快感の違いを、個人差の影響を含め相対的に評価できるかについても評価した。

まず、すべての被験者 (A~F) に対して、揺れない一般の歩道を歩行している通常歩行の場合の脈波を約 30 秒間計測し、この脈波からリアプノフ指数 λ_0 を算出した。次に、各被験者が歩道橋を 1.7Hz, 2.0Hz (歩道橋の固有振動数 1.95Hz に最も近い歩調), 2.3Hz の 3 パターンで横断したときの脈波からリアプノフ指数 λ をそれぞれ算出した。表-1 は、すべての被験者の通常歩行におけるリアプノフ指数 λ_0 と各歩調で歩行した場合のリアプノフ指数 λ 、そしてリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ の計算結果である。なお、各歩調で歩行した場合のリアプノフ指数 λ は 3 回の歩行実験を実施した結果の平均値であり、3 回分のリアプノフ指数 λ はすべて平均値に対して 1 割以内の差で収まっており、最大で 9.4% の差であった。

表-1 より通常歩行時のリアプノフ指数 λ_0 は被験者間で 1.22 ~ 4.56 とばらつきがあることが確認できる。これは被験者ごとに生体脈波の安定性に違いがあることを表しており、被験者の個人差の影響である。次に、各歩調で歩道橋を横断した場合のリアプノフ指数 λ を見ると、被験者 A~E の 5 名に関しては、通常歩行時のリアプノフ指数 λ_0 と同様にばらつきがあるものの、いずれも λ_0 より大きな値を示しており、歩道橋横断時の不快感が増していることがわかる。具体的には、歩調 1.7Hz および 2.3Hz のリアプノフ指数の変化率が概ね 1.5 程度であるのに比べ、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) とほぼ一致する歩行パターンでは、リアプノフ指数の変化率は 2.0 前後と増加している。

以上より、被験者 A~E の 5 名に関しては、リアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ は、リアプノフ指数 λ で比較するよりも被験者ごとの違いが少なくなっていることがわかる。また、被験者が歩道橋の固有振動数と歩調を合わせて歩調 2.0Hz で歩行する場合の $\Delta\lambda$ が他の歩調よりも大きめに算出されることから、 $\Delta\lambda$ が対象とする歩道橋の大きな揺れによる不快感を適確に示していることがわかるとともに、不快感の違いを相対的に評価できる指標と

して利用できる可能性を確認できた。ただし、被験者 F のリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ については、いずれの歩調においても 1.0 を下回っており、 $\Delta\lambda$ から歩道橋横断時の不快感は特定できなかった。

表-1 各歩行パターンにおけるリアプノフ指数(上段)とその変化率(下段)

被験者	通常歩行 λ_0	上段: λ , 下段: $\Delta\lambda (= \lambda/\lambda_0)$		
		歩調 1.7Hz	歩調 2.0Hz	歩調 2.3Hz
A	3.69	5.39 1.46	7.11 1.93	6.52 1.77
B	2.48	3.86 1.56	5.55 2.24	4.31 1.74
C	3.84	5.55 1.45	8.44 2.20	6.83 1.78
D	3.00	3.55 1.18	5.99 2.00	4.69 1.56
E	1.22	1.73 1.42	2.58 2.11	2.09 1.71
F	4.56	4.60 1.01	4.30 0.94	4.07 0.89

(2)被験者の歩行時の動きと歩道橋の振動加速度に対するリアプノフ指数の変化率の影響

概要

被験者の歩行時加速度と歩道橋の振動加速度とを歩行時間ごと分割して分析することで、これらの相互作用が被験者のリアプノフ指数の変化率にどのような影響を与えるかを検討した。ここでは、被験者 F を除く 5 名 (被験者 A~E) に、歩道橋の固有振動数とほぼ同じ歩調 (2.0Hz) で歩道橋を横断してもらい (共振歩行)、被験者の脈波と歩行時加速度、そして歩道橋の振動加速度をそれぞれ 2 回ずつ計測し、両者を x - z 方向の 2 次元的に分析した。

各計測データの解析においては、図-4 に示すように被験者が歩道橋中央を通過する前後の 10 秒間を区間 iii) として、その前後の 10 秒間を区間 ii) と区間 iv)、さらにその前後を区間 i) と区間 v) のように 5 区間に時間分割して分析を行った。総データ取得時間は被験者の歩道橋横断時間により若干異なるが、いずれも 45 ~ 48 秒程度であった。よって、区間 ii) ~ 区間 iv) の 3 区間は 10 秒間の計測データが分析対象となるが、区間 i) と区間 v) は 10 秒に満たない区間となる。このデータ分析区間の考え方は生体脈波においても同様とした。そして、それぞれの区間における通常歩行のリアプノフ指数に対する変化率 $\Delta\lambda$ によって比較した。

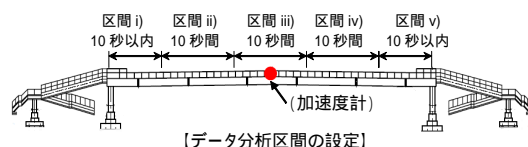


図-4 データ分析区間の考え方

被験者と歩道橋の x - z 方向加速度とリアプノフ指数の変化率との関係

まず、被験者 A の歩道橋と被験者の x - z 方向加速度を図-5 に示す。図の(a)は被験者が各区間を共振歩行したときの歩道橋中央部の x - z 方向加速度であり、(b)は被験者自身の歩行中の x - z 方向加速度である。なお、紙面の関係で被験者 A の 1 回目のデータのみ示した。

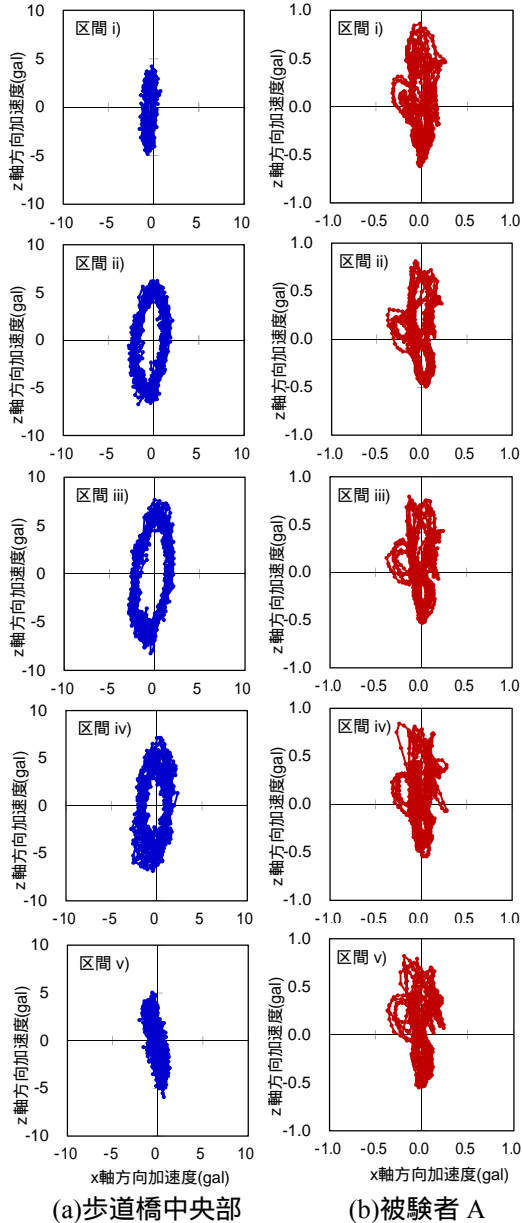


図-5 共振歩行したときの歩道橋中央部と被験者 A の x - z 方向加速度 (1 回目)

図-5 を見ると、被験者 A が区間 ii) ~ 区間 iv) を歩行しているとき、歩道橋中央部の加速度は、鉛直方向 (z 軸) だけでなく、橋軸直角方向 (x 軸) も大きくなっている。そして、歩道橋の端【a】から中央部に近づくにつれて、桁は x - z 面において鉛直振動と水平振動が合わさっていることがわかる。これは、被験者の歩行による鉛直および水平外力に起因すると考えられ、被験者の歩行による外力は区間全体を通して、鉛直方向 (z 軸) だけでなく水平方向 (x 軸) にも生じており、この外

力の共振振動によるものと推察される。このような傾向は、その他の被験者 (B ~ E) においても共通的に見られ、被験者の共振歩行によって歩道橋中央部は x - z 面において大きく振動している。つまり、このような桁の振動の影響を受けて、歩行中の被験者には、図-5(b) に示されるような 2 次元的に複雑な動きが生じていると考えられる。

次に、各区間のリアプノフ指数の変化率を図-6(a) および (b) に示す。各被験者とも、中央の赤い棒グラフが、各被験者が 2.0Hz で共振歩行したときの歩道橋中央部を通過する前後の 10 秒間、つまり区間 iii) の値である。グラフより、いずれの被験者についても区間 ii) ~ 区間 iv) のリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ が高い傾向がある。この区間は、前述のとおり歩道橋中央部が x - z 方向に 2 次元的に振動している区間であり、被験者のリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ はこのような桁の x - z 方向の鉛直振動と水平振動によって上昇しており、それは区間 iv) または区間 v) まで継続されていると考えられる。

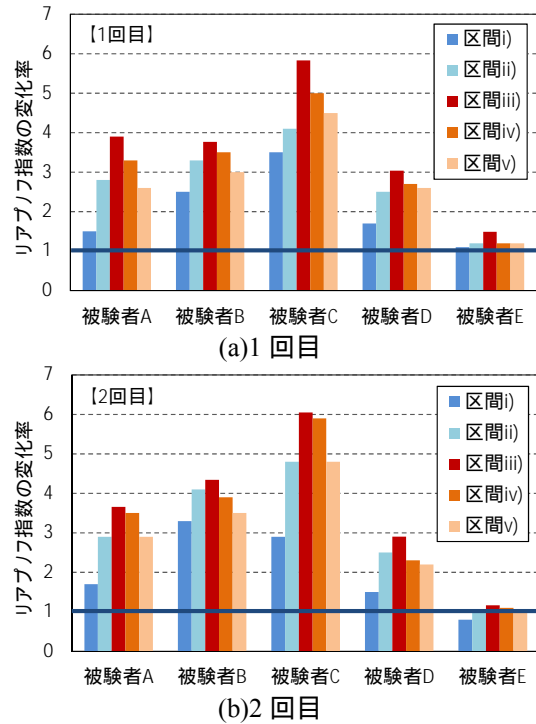


図-6 各被験者のリアプノフ指数の変化率

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

前述のとおり、被験者は歩行中に桁の鉛直振動と水平振動を同時に感じていることが確認されたことから、被験者の歩行時加速度と歩道橋の桁の振動加速度の 2 次元的な相互作用が、歩道橋横断時の被験者のリアプノフ指数の変化率とどのような関係にあるかを分析した。そのため、本研究では歩道橋の振動と被験者の歩行時の動きとの相対関係を、それぞれの加速度から算出した 2 次元加速度振幅距離の比 R_{GP} として定義し、リアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ との関係を検討した。

2次元加速度振幅距離の比 $R_{G/P}$ は式(3)によって計算される。つまり、 $R_{G/P}$ は歩道橋の桁の2次元振動を、被験者ごとに異なる歩行中の2次元動的な動きで正規化したものと捉えることができる。この2次元加速度振幅距離の比 $R_{G/P}$ とリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ との関係性を考察することで、被験者の個人差の影響を受けない評価ができる。

$$R_{G/P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{i,G} / \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{i,P} \quad (3)$$

ここで、 $D_{i,G}$ は歩道橋の加速度 i における2次元振幅距離 [gal]、 $D_{i,P}$ は被験者の加速度 i における2次元振幅距離 [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加速度の2次元振幅距離 ($D_{i,G}$ と $D_{i,P}$) は、式(4)および式(5)のように定義した。

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

$$D_{i,P} = \sqrt{a_{xi,P}^2 + a_{zi,P}^2} \quad (5)$$

ここで、 $a_{xi,G}$ は歩道橋の橋軸直角方向 (x 軸) の加速度 [gal]、 $a_{zi,G}$ は歩道橋の鉛直方向 (z 軸) の加速度 [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) のそれぞれの歩行時加速度 [gal] である。

解析では、リアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ 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10秒間 = 区間 iii) に着目し、同時間帯の2次元加速度振幅距離の比 $R_{G/P}$ と比較した。なお、前述したとおり歩行実験はそれぞれの被験者 (A~E) に対して2回ずつ実施しており、ここでは2回の結果に違いがあるかについても確認した。

リアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ と2次元加速度振幅距離の比 $R_{G/P}$ の関係を図-7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。そして、被験者 A~E の5名ともに、 $R_{G/P}$ が大きくなるほどリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ 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 $\Delta\lambda$ とが相関関係にあることが確認できた。なお、被験者 E (20歳代女性) の $\Delta\lambda$ は、被験者 A~D (20歳代男性) の $\Delta\lambda$ よりやや小さめではあるが、被験者 A~E の全体を見た場合、 $R_{G/P}$ が上がると $\Delta\lambda$ も増加するという相関関係に合致しており、同様の傾向を表していると判断できる。(3)まとめ

以上より、生体脈波から求められるリアプノフ指数の変化率 $\Delta\lambda$ は、歩行者が感じる歩道橋横断時の不快な揺れを相対的に評価することができる指標と考えられ、本手法は、生体脈波を利用した横断歩道橋の振動使用

性評価の一手法として利用できると考えられる。今後は、年齢や性別など個人属性の異なる被験者のデータをさらに収集・分析する必要がある。

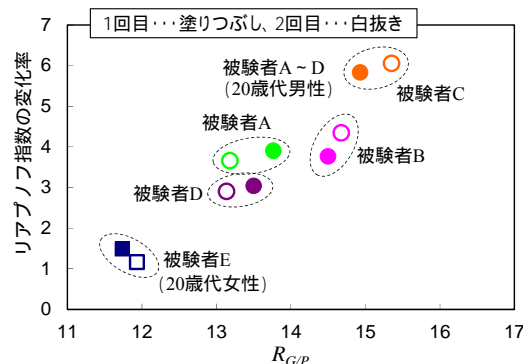


図-7 2次元加速度振幅距離の比 $R_{G/P}$ とリアプノフ指数の変化率の関係

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)

原田隆郎, 横山功一, 『生体脈波を利用した歩道橋横断時の不快感評価に関する基礎的研究』, 土木学会構造工学論文集, Vol.62A, pp.40-51, 2016.3, 査読有

〔学会発表〕(計3件)

原田隆郎, 作山卓也, 『生体脈波を用いた高速道路の走行安全性評価に関する基礎的研究』, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015.9.18, 岡山大学津島キャンパス(岡山県・岡山市)

原田隆郎, 亀山大輝, 『生体脈波を用いた車両走行による橋梁通過時の乗り心地に関する考察』, 土木学会第69回年次学術講演会, 2014.9.10, 大阪大学豊中キャンパス(大阪府・豊中市)

原田隆郎, 横山功一, 『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』, 土木学会第38回土木情報学シンポジウム, 2013.9.17, 土木学会(東京都・新宿区)

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