

## 1. はじめに

近年、群衆が歩道橋を移動するときに、引き込み現象が生じて大きな水平振動が生じることがある。そこで、本研究では、群衆（歩行者間隔は 1m）が桁上を歩行する場合を想定した動的応答解析を実施し、神経振動子でモデル化した歩行者の引き込み特性について詳細な検討を実施することとした。

## 2. 神経振動子の概要

人間における神経振動子の存在は間接的にしか確認されていないが、そのモデルは松岡<sup>1)</sup>をはじめとする研究者によって解明されている。図-1に松岡の提案する神経振動子モデルを示す。この神経振動子モデルは、神経素子（ニューロン）の対を相互抑制的に結合することによって形成されており、以下のような2変数微分方程式で表すことができる。

$$\tau_1 \dot{x}_1 = -x_1 - \beta v_1 - \gamma [x_2]^+ + c - [u_f]^+ \quad (1)$$

$$\tau_2 \dot{v}_1 = -v_1 + [x_1]^+ \quad (2)$$

$$\tau_1 \dot{x}_2 = -x_2 - \beta v_2 - \gamma [x_1]^+ + c - (-1.0) \times [u_f]^+ \quad (3)$$

$$\tau_2 \dot{v}_2 = -v_2 + [x_2]^+ \quad (4)$$

ここに、 $x_1$  と  $x_2$  は神経素子（ニューロン）の膜電位、 $v_1$  と  $v_2$  は内部状態を表す変数、 $\tau_1$  と  $\tau_2$  は時定数、 $\beta$  は疲労係数とも呼ばれる順応の強度を表す係数、 $\gamma$  は二つの順応素子の結合係数、 $u_f$  は外部からの持続入力である。また、 $c$  は tonic な入力（tonic は「元気づける」という意味）で  $c=0$  だと振動は生じない。さらに、 $[x]^+$  は閾値関数で

$$[x]^+ = \max(x, 0) \quad (5)$$

と表される非線形関数である。ちなみに、 $x_1$  と  $x_2$  の正の部分が各神経素子の出力に対応することから、神経振動子の出力  $y_{out}$  は

$$y_{out} = y_1 - y_2 = \max(x_1, 0) - \max(x_2, 0) \quad (6)$$

で求められる。

## 3. 神経振動子を組み込んだ動的応答解析

表-1に示した諸元を有する歩道橋（支間長が 50m で固有周波数が 1.000Hz）を対象とし、桁中央点での初期振幅がない場合（歩道橋が静止している場合）に

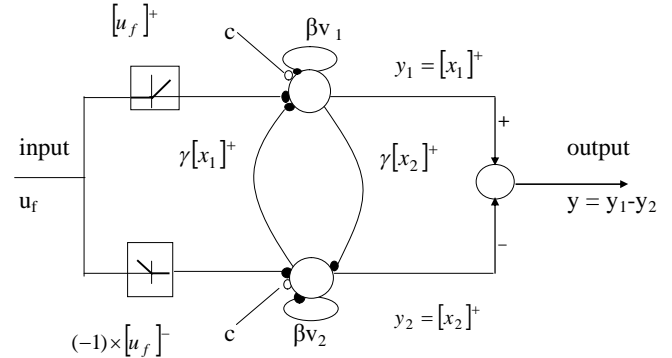


図-1 松岡の神経振動子モデル

ついて、ニューマークの  $\beta$  法 ( $\beta=1/6$ , 時間刻み  $\Delta t=0.0025\text{sec}$ ) による動的応答解析（モード解析法）を実施することとした。なお、桁上を歩行する総歩行者数は 150 人（歩行者間隔は 1m）で、ここでは歩行者（神経振動子）の固有周波数がすべて 0.970Hz となるように、時定数  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  を  $\tau_1=0.046804$ ,  $\tau_2=0.46804$  とし、パラメーター  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $c$  を  $\beta=1.5$ ,  $\gamma=1.5$ ,  $c=1.5$ （初期値は  $x_1=1.5$ ,  $x_2=-0.3$ ）に設定するものとした。また、水平歩行外力（鉛直歩行外力の約 1/10）は、神経振動子の出力波形に 27.44 の係数を乗じて算出するものとした。さらに、歩行者の歩行速度は 1.4m/s としたが、これは 2 歩/秒で歩行する場合の歩行速度に対応する。なお、本解析では、歩道橋の構造対数減衰率  $\delta$  を  $\delta=0.02$  と仮定した。

動的応答解析で得られた桁中央点での時刻歴応答波形を図-2に示す。この図より、歩行者の初期周波数を桁の基本固有周波数である 1.000Hz よりもやや小さい 0.970Hz とした場合、応答は時間とともに単純に増加せず、明確なうなりを呈しながら増加していることがわかる。

幾人かの代表的な歩行者（神経振動子）に着目し、その出力波形から、ゼロクロッシング法を適用してそれぞれの周波数を算出した。その結果を図-3に示す。この図より、どの歩行者（神経振動子）も出力周波数が時間とともに変化し、たとえば 100 番目（図中の  $\Delta$  印）の歩行者であれば応答振幅の最も大きな桁中央点を歩行する 89.3sec 付近において 1.000~1.005Hz まで増加したあと、その後は徐々に減少して 0.970Hz 付近に近づいていることがわかる。

表-1 対象とした歩道橋の構造諸元

モデル	橋長	単位長さ当たりの重量	弾性係数	断面2次モーメント	1次振動数
MODEL-100	50m	14.7kN/m	$20.58 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	0.01844 m <sup>4</sup>	1.000Hz

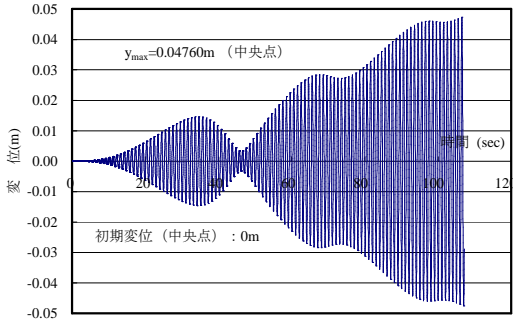


図-2 桁中央点における変位の時刻歴応答波形（神経振動子の初期周波数をすべて0.970Hzとした場合）

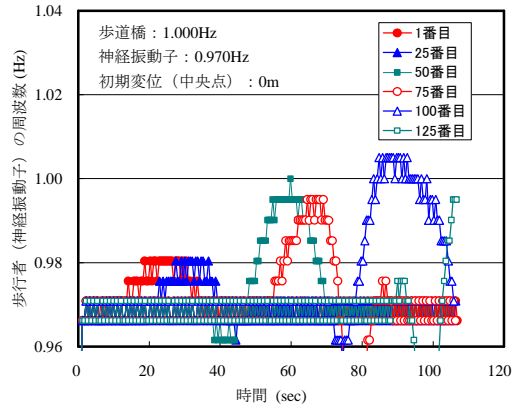


図-3 歩行者の周波数（神経振動子の初期周波数をすべて0.970Hzとした場合）

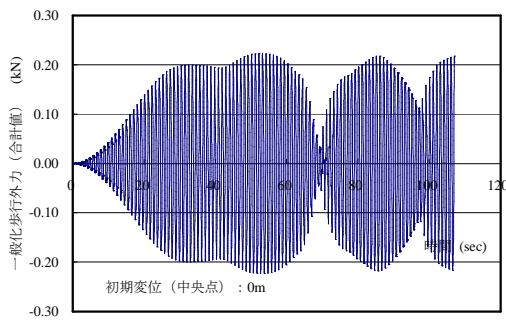


図-4 一般化歩行外力（神経振動子の初期周波数をすべて0.970Hzとした場合）

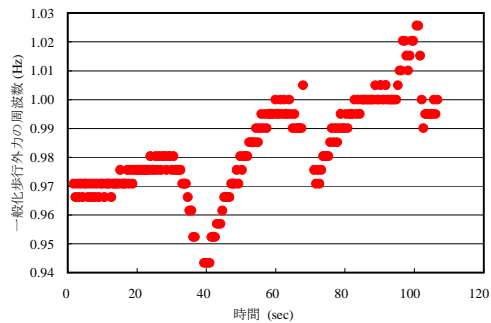


図-5 一般化歩行外力の周波数（神経振動子の初期周波数をすべて0.970Hzとした場合）

それ以外の歩行者も時間とともに歩調（神経振動子からの出力周波数）が変化することから、桁上にいるすべての歩行者に起因した歩行外力を、それぞれの歩行位置でのモード振幅も考慮して重ね合わせた一般化歩行外力を出力すれば、当然のことながら、その大きさは図-4に示すようにうなりをともなった複雑な特性を示すことになる。ちなみに、図-5は、この一般化歩行外力の周波数をゼロクロッシング法で算出した結果である。この図から、一般化歩行外力の周波数も時間とともに単調に増加せず、上昇と下降を繰り返しながら徐々に増加する複雑な特性を示していることがわかる。また、解析時間が90秒以降の後半部分において、周波数の最大値が歩道橋の基本固有振動数である1.000Hzを超えるオーバーシュート現象も生じていることがわかる。

#### 4. まとめ

本研究から、歩行者に神経振動子を組み込んで、引き込み現象を考慮した動的応答解析を実施すれば、群衆による歩道橋の水平振動をより合理的に検討できる可能性が高いと考えられる。それゆえ、今後は、神経振動子についてさらに詳細な検討を行うとともに、実在歩道橋を対象として、群衆が移動する場合の動的応答解析を実施し、歩行者と歩道橋との動的相互作用についてより詳細な検討を実施する所存である。

#### 参考文献

1) K.Matsuoka : Sustained Oscillations Generated by Mutually Inhibiting Neurons with Adaptations, Biological Cybernetics, Vol.52, pp.367~376, 1985.