

歩道橋の水平挙動と群集歩行の共振現象に関する一考察

関東学院大学研究員 正会員 前嶋 純
関東学院大学 正会員 中藤 誠二

1.はじめに 群集歩行者による歩行運動によって歩道橋に横揺れが生じる場合がある。歩道橋と群集荷重の共振現象について設計指針では、歩行者による鉛直方向荷重の周波数(約 2Hz)に歩道橋の固有振動数が一致しないように定められているが、近年では橋梁形式の多様化、スパンの長大化によって、従来では考慮されていなかった歩行者の水平方向荷重の固有周波数(約 1Hz)によって、水平方向に大きな揺れが生じ、使用性を著しく損ねる事例が報告されており、特にロンドンのミレニアムブリッジにおいてこの問題が大きく注目された¹⁾。

そこで本研究は、日本で既に群集歩行による共振現象が報告されている歩道橋²⁾を対象に実測を行った。次に、メカニズムを検討するために、係数励振モデルを用いて、歩行者が橋の揺れに対して歩調を合わせるというフィードバックループを導入して計算を行った。

2. 歩道橋の振動の実測 実測はとくに歩行者の多い

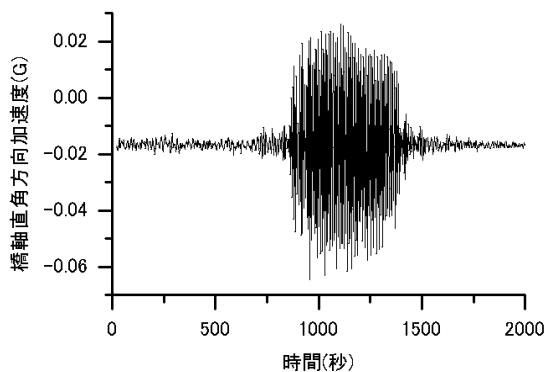


図2 橋軸直角方向加速度

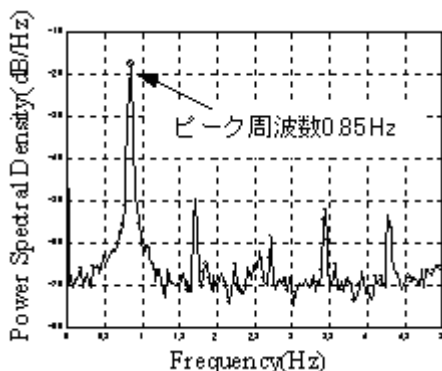


図3 橋軸直角方向加速度パワースペクトル

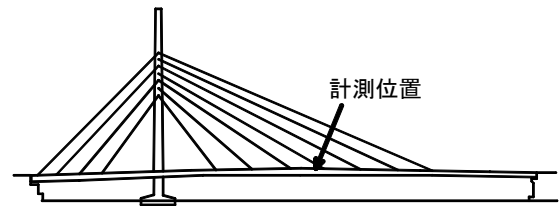


図1 対象橋梁の概略図

日を選び、計測機器には AHRS400CC (GYRO-VIEW) を使用した。橋梁の側面図を図1に示す。振動時には歩行者は右から左の方向へ非常に混雑して歩行する状態にあった。密集がピークに達した後、しばらくすると、歩道橋には水平方向に大きな揺れが生じた。橋軸直角方向の加速度を図2に示す。歩道橋の固有振動数を図2の橋軸直角方向加速度の比較的小さかった時間のデータについてスペクトル解析し、パワースペクトルのピーク周波数を求めると約 0.96Hz となり、これは文献²⁾にある FEM の結果ともほぼ一致する。

図3は図2で橋軸直角方向加速度が大きく変化した

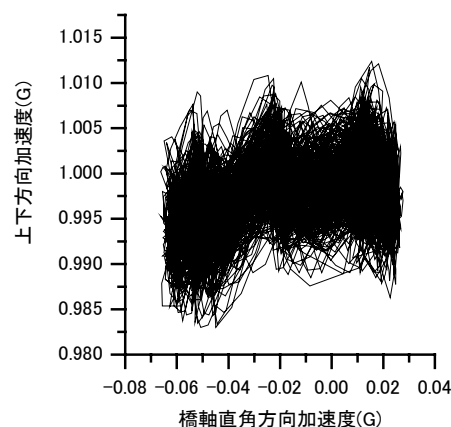


図4 桁の応答のリサージュ図

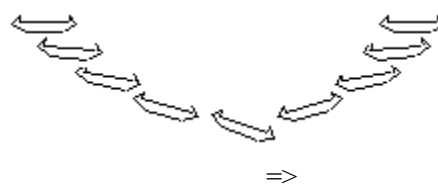


図5 桁横揺れの模式図

1020～1220 秒間の加速度データをスペクトル解析したものである。パワースペクトルからピーク周波数を読み取ると 0.85Hz であった。群集荷重によって橋の総重量が増加し固有振動数が小さくなったと考えられる。また、通常の人々の水平方向の歩行の周波数は 1Hz であることから、共振時には、橋の揺れに合わせ

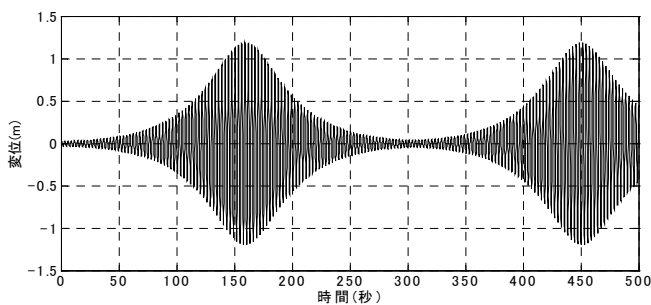


図6 一人乗りのブランコの応答

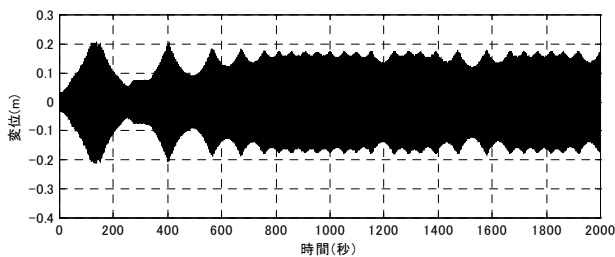


図7 一人乗りのブランコの応答（フィードバックあり）

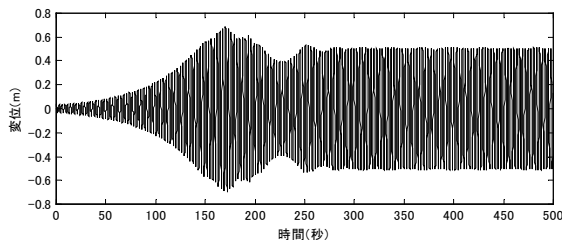


図8 二人乗りのブランコの応答（フィードバックあり）

るために歩調が遅くなっていると予想される。

図4は桁の挙動のリサージュ図で8の字に動く傾向が見られるが、さらに回転角の測定データを考慮して桁の挙動を模式的に表したものが図5である。回転が約1/4周期、横揺れより遅れていることから、振動中心に向かうときに頭下げになるような挙動を示すと考えられる。また、桁が振動中心位置に来たときに頭下げの状態から頭上げの状態に急に変化しており、橋の振動に合わせて「ドーン、ドーン」という鈍い衝撃音が聞こえていたため、桁が橋台等にぶつかることで、そのような挙動を示しているのではないと思われる。

3. 係数励振モデルによる考察 歩道橋と群集歩行の共振現象は、基本的には係数励振³⁾の代表的な事例であるブランコの挙動、すなわち上下に振動する動的荷重と振動する振り子でモデル化できるものと考えた。ブランコの挙動は次の式で表される。

$$\ddot{\theta} = \frac{m}{m(L_0 + L \cos \omega t)} g \sin \theta$$

θ : ブランコの角度, ω : 漕ぎ手の周期, L_0 : ブランコの長さ(支点から漕ぎ手の重心位置の平均までの距

離), L : 漕ぎ手の重心の振幅, m : 漕ぎ手の重さ, g : 重力加速度である。ブランコの漕ぎ手の加振振動数をブランコの固有振動数 ω_0 の2倍とし、漕ぎ手の重さ m を60kg, 振幅 L を0.1mとして解析を行った結果が図6である。時間積分にはルンゲ・クッタ法を用いた。漕ぎ手の加振振動数を一定としているため、ブランコの振幅の増加と共に固有振動数が小さくなり、漕ぎ手の加振振動数とずれが生じ、漕ぎ手の動作が減衰力として作用するため、振幅の増減を繰り返すと考えられる。

次に、以下に示す条件を満たした時に漕ぎ手の位相を変化させない、という条件を追加し、ブランコの挙動から漕ぎ手の挙動にフィードバックを行った。

1. ブランコの振れ角 $\theta > 2^\circ$
 2. 漕ぎ手の加振振動 $|\cos \omega t| > 0.8$
 3. 加振振動と振れ角の方向が同じ ($\theta \times \cos \omega t > 0$)
- これは、橋の揺れが大きくなり、歩調を合わせられないときに、重心を片足に預けてタイミングを遅らせるという動作に対応する。このようなフィードバックループを設けた結果、図7に示すように、一定時間経過後、揺れが持続するという結果が得られた。ただし、振幅はフィードバックを与えないときの最大より小さくなっている。

漕ぎ手を2人とし、初期条件として漕ぎ手ごとに異なる位相を与え、それぞれフィードバックを与えた。その結果、図8に示すように、一度、定常振幅状態になると、漕ぎ手が一人の時よりも振幅が一定になるという結果が得られた。

4. まとめ 群集歩行による歩道橋の共振現象の実測を行った。また、そのモデル化としてブランコの運動を対象に、係数励振にフィードバックループを考慮することで、ブランコの挙動をより忠実に再現できることが分かった。今後は、より具体的に歩道橋の共振現象に応用していく必要がある。またダンパーによる効果的な制振手法についても検討していく必要がある。

1) S. Zivanovic, A. Pavic, P. Reynolds: Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review, Journal of Sound and Vibration, Vol. 279, pp. 1-74, 2005

2) Yozo Fujino et al.: Synchronization Of Human Walking Observed During Lateral Vibration of A Congested Pedestrian Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics Vol.22,741-758, 1993

3) 背戸一登, 丸山晃一: 振動工学, 森北出版, 2002