

歩行者により生じた吊橋の水平振動

東海大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 博士課程前期 学生会員 川崎 俊次
 東海大学 工学部 土木工学科 教授 フェロー 中村 俊一
 川田工業(株) 東京設計部 設計二課 正会員 大野 克紀

1. はじめに

近年、吊形式の歩道橋で、歩行者によって桁が水平振動する問題が相次いで報告されている。2000年6月、London Millennium Bridgeは、開通式当日に多くの人が歩行した際、桁の水平応答振幅は70mmにも及び、歩行に障害をきたすほどの振動であったため、直ちに橋は閉鎖された¹⁾。原因は歩行者による水平振動と確認されたが、そのメカニズムについては未解明の点が多くある。また、計測された水平振動の事例も少なく、設計基準化するためのデータも不足している。本研究では、M吊橋に生じた水平振動測定を実施し、その振動特性を把握する。また、歩行者にも加速度計を取り付け、桁と歩行者の同調性を調査し、振動メカニズムの解明を図る。さらに、桁応答変位に及ぼす種々の要因を分析し、今後の歩道橋設計に情報を提供する。

2. 構造概要

M吊橋は、スパン320mの歩行者専用単径間吊橋である²⁾(図-1)。主ケーブルは7本のスパイラルロープで構成されている。床版は2重構造であり、下層はオープングレーチング、上層は木製床版で一部に風抜き穴が設置されている。主桁は無補剛桁であり、横桁はハンガーを介してケーブルで吊られている(図-2)。耐風索は水平面から4度傾斜している。主塔は、2本の鋼管柱で構成され、高さは26.2mである(図-3)。

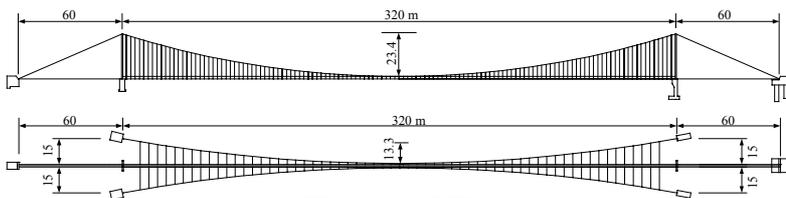


図-1 一般図

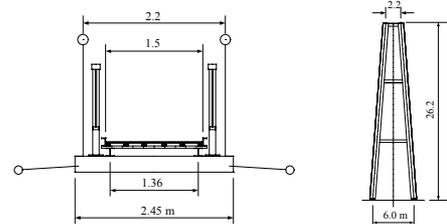


図-2 桁断面

図-3 主塔

3. 計測システム

本橋は景勝地に架橋されており、1年中多くの観光客が訪れる。振動測定は、秋の行楽シーズン中の2日間実施した。加速度計は、桁上の5箇所の高欄基部に取り付け、桁の水平方向加速度を測定した。加速度計は、電気ケーブルにより、主塔付近に設置された増幅器・A/D変換機・パソコンに接続した(図-4)。一人の歩行者の腰ベルトにも加速度計を取り付け、歩行者の水平加速度を測定した。測定歩行者は、ひずみ増幅器および送信機を入れたリュックを背負い、他の一般歩行者と一緒に桁上を歩行し、測定された加速度は無線で受信機に送られた。このような、無線を用いた振動計測の事例が少ないことから、今回の計測には新規性があると考えられる。測定歩行者は主塔から主塔を往復し、この間に振動測定を実施した。これを約20回繰り返した。一般歩行者は随時変化し、また測定歩行者の歩行挙動にも個人差があるため毎回別人とした。

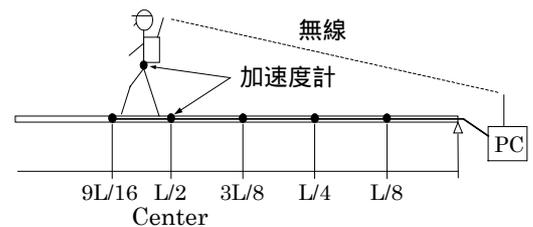


図-4 計測システム

4. 桁水平変位の応答特性

測定歩行者がL/4点を通じた時に測定された桁の水平変位の一例を図-5に示す。L/4点での桁水平変位はきれいな正弦波形を示している。最大振幅は約24mmである。他の桁位置での水平変位も、L/2点以外では、周期的波形を示している。これらの水平変位のパワースペクトルを図-6に示す。L/2点を除く全てのパワース

キーワード 水平振動, 歩道橋, 吊橋, 同調性

連絡先 〒259-1292 神奈川県平塚市北金目1117 東海大学工学部土木工学科 Tel 0463-58-1211

ペクトルは0.88Hzに鋭いピークがある。この振動数は、設計時のFEM解析で得られていた逆対称3次水平モードの固有振動数に近い値であった。各桁位置でもパワースペクトルのピーク値から最大振幅を推定し、それらとスパン位置との関係を図-7に示す。FEMの逆対称3次水平モード形状と、計測値のモード形状は良く一致しており、桁は逆対称3次水平モードで振動していたことが理解される。L/4点の桁と歩行者の水平変位を図-8に示す。歩行者が桁の変位に同調していることが明確であり、歩行者の位相は 120° から 160° 進んでいる。一般に、加振力と桁の位相差が 0° から 180° 間では正の仕事をし、応答振幅は増大する³⁾。したがって、図-8より、歩行者の水平力は桁の応答振幅を増大させる起振力となっていることが明らかである。

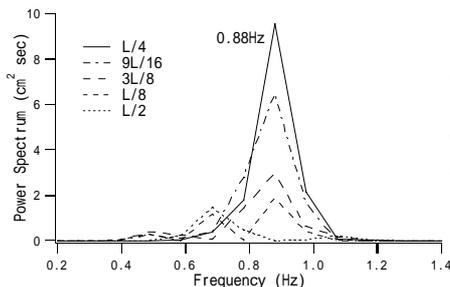


図-6 パワースペクトル

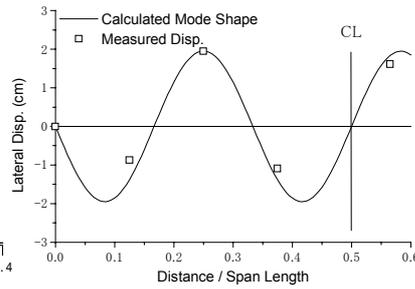


図-7 逆対称3次モード

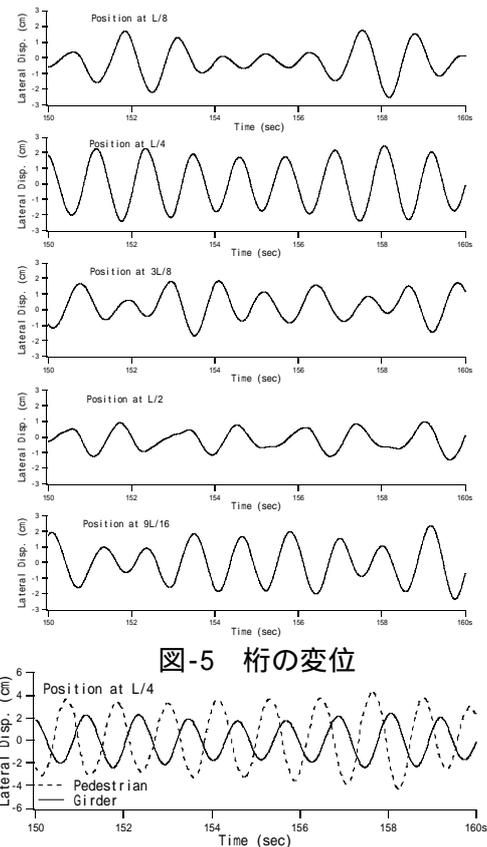


図-5 桁の変位

図-8 桁と歩行者の水平変位

5. 歩行者の同調性

桁水平振動のメカニズムは以下のように考えられる^{4),5)}。人は約2Hzで歩行し、この振動数の鉛直力が発生する。同時に、水平方向にも約1Hzの水平力が生ずる。これは、人が歩行する際、重心が左右にふれるために生ずる。過去の研究により、この水平力は歩行者自重の約4%であると報告されている⁶⁾。桁の固有振動数が、この歩行者の水平方向振動数(約1Hz)に近い場合、共振現象が生ずる可能性が高い。複数の歩行者がランダムな位相で歩行する場合は、この水平起振力は互いに打ち消される。しかし、歩行者は桁の動きに合わせるように歩行するため、歩行者どうしの位相が一致し、大きな起振力になると推定された。

6. まとめ

- 1) M吊橋に発生した歩道橋による水平振動計測を実施した。多くの歩行者が通行する際、桁は逆対称3次モードの固有振動数0.88Hzで振動していた。桁の応答振幅は24mmに達した。
- 2) 歩行者の加速度も測定した結果、桁と歩行者の水平変位は正弦波形を示し、歩行者は桁の変位に同調していることが認められた。歩行者の位相は、桁の位相より 120° から 160° 進んでおり、歩行者の水平力は桁の応答振幅を増大させる起振力となっていることが明らかになった。
- 3) 計測した桁の最大振幅は約45mmであった。この程度になると、自然に歩行することは困難になり、バランスを崩す人や、歩行を中断する人が現れる。したがって、歩道橋としての使用限界は45mm程度であると考えられた。

参考文献

- 1) Dallard, P., Fitzpatrick, A., Flint, A., Bourva, S. and Low, A., "The London Millennium Footbridge", The Structural Engineer, Vol.79, No.22, 2001, pp 17-35.
- 2) 柳崎, 高橋, 島田, 田口, 大野, 畠中: もみじ谷大吊橋の設計と架設, 橋梁と基礎, No.7, pp.17-23, 2000.
- 3) 長松: モード解析入門, 2.5.3 仕事とエネルギー, pp.55, コロナ社.
- 4) Fujino, Y., Pacheco, B., Nakamura, S. and Warnitchai, P., "Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.22, 1993, pp 741-758.
- 5) Nakamura, S. and Fujino, Y., "Lateral vibration on a pedestrian cable-stayed bridge", Structural Engineering International, IABSE, Vol.12, No.4, 2002, pp 295-300.
- 6) Bachmann, H. and Ammann, A., "A.: Vibrations in structures induced by man and machines", IABSE, Structural Engineering Document, 3e, 1987.