

箱根西麓・三島大吊橋の振動試験

Field Vibration Test on Mishima-Skywalk Suspension Footbridge in Japan

島中 真一 ^{*1}
Shinichi HATAKENAKA

田中 寛泰 ^{*2}
Hiroyasu TANAKA

田口 吉彦 ^{*3}
Yoshihiko TAGUCHI

長尾 悠太郎 ^{*4}
Yutaro NAGAO

向笠 正洋 ^{*5}
Masahiro MUKAIGASA

甲木 里沙 ^{*6}
Lisa KATSUKI

箱根西麓・三島大吊橋は、無補剛形式の吊橋としては国内最大の支間長 400m を有する人道吊橋である。架設位置は、国際観光都市箱根の西麓エリアに位置する、富士山と駿河湾を見渡せる風光明媚な高台であり、このような立地に「日本一」の肩書きを冠し、さらに多くの観光客を呼ぶ新たな名所として「三島スカイウォーク」の愛称で 2015 年 12 月に開通した。

本橋の設計に際しては、計画段階から綿密な地盤調査や風観測を実施し、様々な条件を想定した安全性の検討が行われた。中でも振動問題に関しては、構造解析により算定された固有振動数に基づいた耐風挙動に関する安定性を検討したことから、本橋完成後に実橋振動試験を行い、設計時に仮定した振動諸元の妥当性と安全性を確認する必要があった。本稿は、開通前に実施した 60 人規模での人力加振や歩行試験により、固有振動数と減衰特性を直接計測したので、その結果を報告するものである。併せて参加者を対象として実施した、歩行時の安定性に関するアンケートの結果についても報告する。

キーワード：吊橋、振動試験、人力加振、使用性、減衰

1. はじめに

箱根西麓・三島大吊橋は、無補剛形式の吊橋としては国内最大の支間長 400m を有する人道吊橋である。建設場所は図 1 に示すように、富士山と駿河湾を見渡せる風光明媚な高台にあり、さらに多くの観光客を呼ぶ新たな名所として 2015 年 12 月に開通した¹⁾。

本橋の設計に際しては、構造解析により算定された固有振動数に基づき、耐風挙動に関する安定性の検討^{2,3)}を行っている。しかしながら、過去にこの規模の人道吊橋に関して振動特性が確認された例は少なく⁴⁾、開通前に実橋振動試験を行い、事前検討時に仮定した振動諸元の妥当性を確認した。振動試験では加振要員約 60 人の歩行試験や強制加振を行い、固有振動数と減衰特性を直接計測したほか、歩行時の安定性についてもアンケート調査を行ったので、併せて結果を報告する。



図 1 箱根西麓・三島大吊橋 架設位置

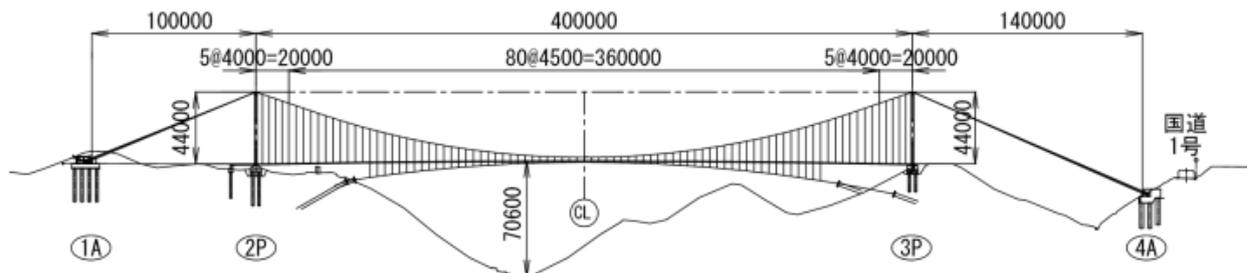


図 2 箱根西麓・三島大吊橋 一般図

*1 川田テクノロジーズ(株) 技術研究所 主幹

*2 川田工業(株)鋼構造事業部橋梁企画室 係長

*3 川田工業(株)鋼構造事業部工事事務部東京工務課 総括工事長

*4 川田工業(株)鋼構造事業部工事事務部東京工務課 係長

*5 川田工業(株)鋼構造事業部工事事務部東京工務課

*6 川田テクノロジーズ(株) 技術研究所

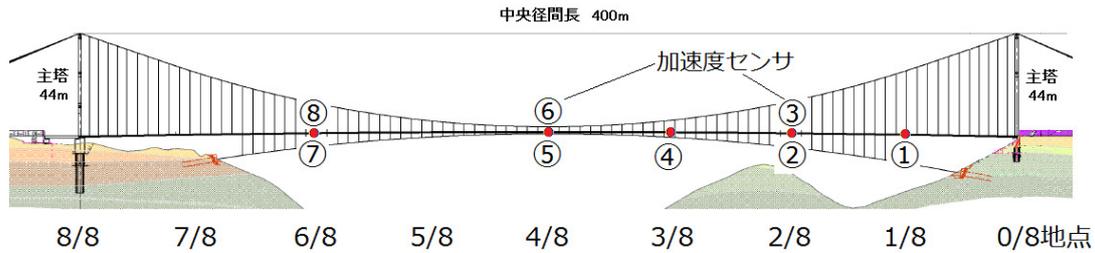


図3 8分点と加速度センサ配置

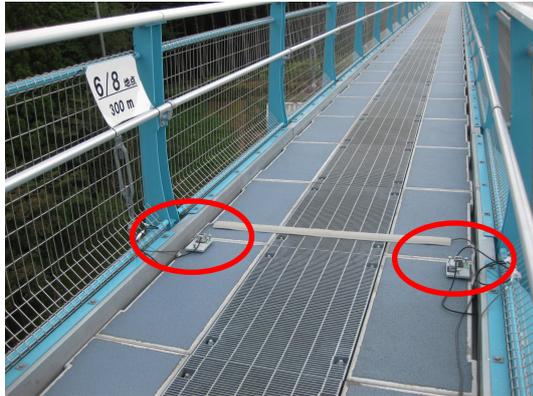


図4 加速度センサ設置状況



図5 人力加振状況

2. 試験方法

(1) 加速度センサの配置

計測にあたっては8台の加速度センサを用い、より多様な振動モードが計測できるよう、図3に示す8分点の中から、1/8・2/8・3/8・4/8・6/8の各地点に加速度センサ①～⑧を配置した。このうち、2/8・4/8・6/8の各地点には、図4に示すように橋面の山側と海側に1基ずつセンサを配置し、鉛直加速度の差分から、ねじれ振動成分を検出できるようにしている。また、水平振動(橋軸直角面外方向)の測定では、加速度センサの感度方向を適宜振り換えて測定した。

(2) 試験手順

構造物の固有振動数を把握するにあたり、最初に常時微動の測定を行った。風や近隣の交通振動の影響を受けて自然に振動している場合には、常時微動の測定により何通りかの固有振動数が得られる。さらに、複数の固有振動数を得るために、ランダム加振や歩行より外力を与え、振動を発生させた。具体的には、複数名での一斉跳躍(たわみ加振)や、屈伸運動、高欄を押し引きするような動作(ねじり加振)により橋体に衝撃力を与え、余韻として残る振動応答を記録した。

振動は複数のセンサに記録されるので、波形を分析し位相の相関を明らかにすることで、固有振動モードと振動数を特定する。

続いて、モード形状が判明した振動モードについて、

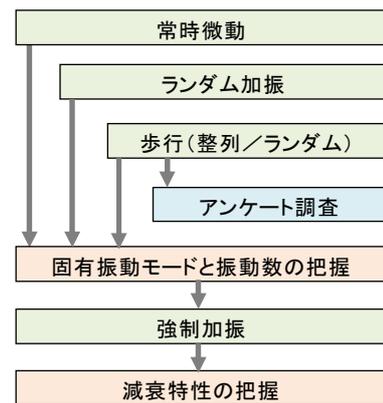


図6 振動試験フロー

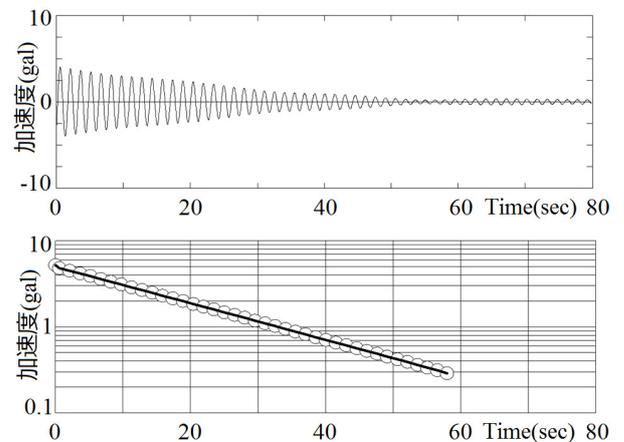


図7 減衰波形(ねじり 0.65Hz, $\delta=0.07$)

振幅が最大となる地点で強制加振を行う。今回の振動試験では最大63名の協力の下(図5)、メトロノームを利用して目標とする振動数に合わせて、振幅が発達するまで

表1 最低次の振動数と解析結果の比較

	振動モード(解析値)	解析値 (モード形)	計測値 f (Hz)	対数減衰率 δ
たわみ		0.28 Hz (対称2次)	0.31 Hz	0.03
ねじり		0.58 Hz (逆対称1次)	0.65 Hz	0.07
面外水平		0.17 Hz (対称1次)	0.20 Hz	0.06

屈伸運動を繰り返し加振した。加振停止後の自由減衰の波形を記録し、このデータから減衰率を算出した。

以上のような手順で、固有振動数と減衰特性の把握を行う。図6に振動試験のフローを整理して示す。

3. 結果と考察

図7の例は、3/8地点にて63名による加振を行った直後に記録された2/8地点でのねじり振動が減衰の様子である。加振直後は4.0gal程度であった振幅も、30秒ほどで1.0gal程度まで減衰し、さらに50秒以降は風などの外乱による常時微動と重なり、うねりを伴った振動が続いている様子が分かる。この例では、減衰の様子が明らかかな40波を対象として対数減衰率を算出した。以下に得られた結果を述べる。

(1)固有振動特性

表1に、たわみ・ねじり・面外水平の各振動試験から得られた最低次の振動数と対数減衰率、およびそれに対応した固有値解析結果を示す。実測された最低次の振動数 f は、たわみが0.31Hz、ねじりが0.65Hz、面外水平が0.20Hzとなり、解析値と比較すると10~15%高めの振動数となった、対数減衰率 δ はそれぞれ、 $\delta=0.03$, 0.07, 0.06と比較的大きな値となっており、歩行などの外力により振動が発生しても振幅が増大するような危険は生じにくいものと考えられる。

耐風検討時^{2,3)}に固有値解析に基づいて想定した振動モードは、たわみ振動が逆対称1次モードで0.24Hz、ねじり振動が対称1次モードで0.34Hzであったが、実測ではこれらより高次のモードのみが観測される結果となった。最低次モードは、加振してもすぐに別のモードに移行する性質の振動か、もしくは減衰率が大きいため振幅が大きにならない性質の振動であったと考えられる。

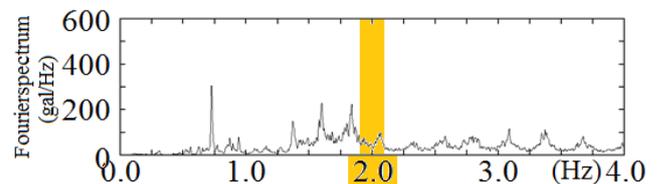
対数減衰率も当初想定した値(たわみ $\delta=0.02$, ねじり

$\delta=0.03$)よりも大きな値が得られており、振動数と減衰特性の両面から評価して、耐風検討の結果は十分な安全性が確保されていると判断される。

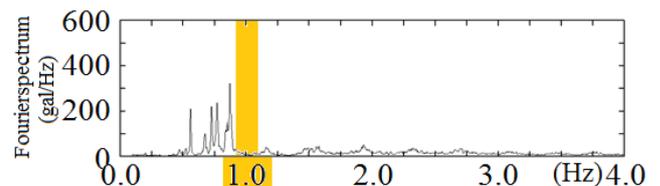
(2)振動数の分布

図8にランダム歩行中の振動のFFT解析結果を示す。図8(a)に見られる0.73Hzおよび1.37Hzのピークは、たわみの固有振動数である。1.6~1.8Hz付近のピークは他の試験結果における減衰時には観察されないことから、歩行から発生する振動が直接計測されたものと判断される。図8(b)の水平振動に着目すると、0.6~0.9Hzに4箇所程度の卓越振動数が散見されるが、鉛直振動と同様に歩行から発生する振動を直接計測したものと判断される。前述した0.20Hzの面外水平振動は、加速度の値としては極めて小さく、図8(b)では殆ど見えなくなっている。

以上の結果から総合的に判断するに、供用後の振動として懸念されている2.0Hz前後の鉛直振動や1.0Hz前後の水平振動が、歩行時に増大するような現象は、発生しにくいものと考えられる。



(a)鉛直振動



(b)水平振動

図8 ランダム歩行時の振動スペクトル分布

(3)アンケートの結果

整列歩行(2Hz)とランダム歩行による振動試験終了後、参加者を対象に揺れと歩きやすさに関するアンケート調査を行った。得られた41件の有効回答を集計した結果から、ゆれの程度と歩きやすさに関する評価を図9,10に示す。自発的に振動試験に参加された方々を対象としたアンケートであるため、そもそもの母集団に偏りがあると予想されるものの、図9に示すように、「思ったよりゆれない」と「ゆれは感じなかった」を合わせると全体の85%となった。残りの15%にあたる6人が「ゆれが大きい」と感じているが内訳を見ると、「怖かった(2人)」「何ともなかった・おもしろかった(3人)」であった。自由回答欄では、「もう少しスリルがあってもよい」や、「もう少しゆれてもよい」という意見も散見され、揺れるのを期待して渡る趣向が垣間見える結果となっている。

歩きやすさの面では図10に示すように、93%が「歩きにくいほどではない」又は「まったく問題ない」と回答しており、「歩きにくい」という回答は7%に留まった。なお、「歩きにくい」の程度に関しては全回答とも「少し歩きにくい」であり、「とても歩きにくい」と感じた参加者は皆無であった。

参考までに、歩行試験で得られた加速度のデータを各卓越振動数での速度に換算したところ、試験中に歩行者が感じた速度は最大で1.1cm/s(RMS)程度となった。文献5,6によると、1.7cm/s(RMS)を超える場合の振動感覚が「少し歩きにくい」レベルである分類されており、アンケートの結果と振動試験の結果はよく符合しているといえる。

4. おわりに

実橋振動試験により、国内で最大規模を有する人道吊橋の基本的な振動特性を把握することができた。設計当初に想定していた固有振動数および減衰率の設定も、安全性を評価する上で適切であったものと判断され、耐風安定性に関する検討が極めて妥当なものであったことが確認できた。また、歩行性に関しても安定性の高い構造物であることが確認され、今後、同様の形式・規模の橋梁を計画する際の有用な知見となるものと考えられる。

振動試験は開通前の2015年8月24日から26日にかけて、最大63名の荷重人員で歩行および加振を行う事ができたが、開通後には数百人の歩行者が同時に通行することから、今回よりも大きな振動の発生が予想される。しかしながら、実測された減衰率の大きさと過去の人道吊橋での通行例などを勘案すると、歩行性を妨げるような大きな振動には至らないと予想される。引き続き、開通後の振動挙動についても注視してゆく所存である。

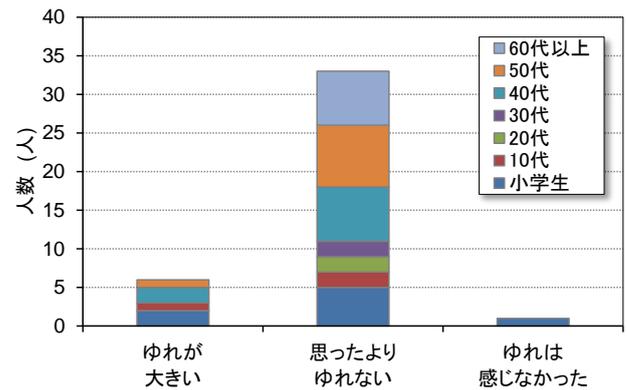


図9 アンケート結果【ゆれの程度】

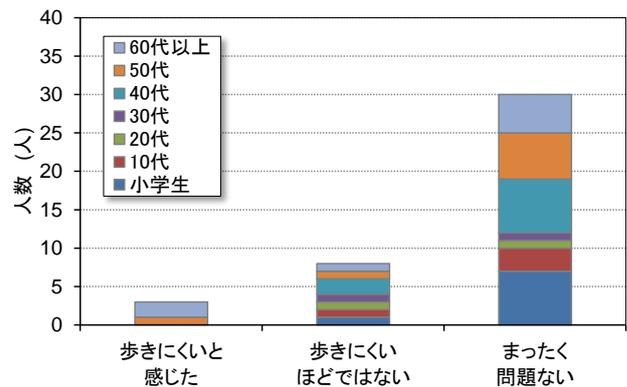


図10 アンケート結果【歩きやすさ】

最後に、夏休み終盤の天候のすぐれない中、振動試験にご参加くださった地元の皆様と、貴重な振動試験の機会をご提供いただいた株式会社フジコーの皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1)長尾悠太郎, 田口吉彦, 向笠正洋, 田中寛泰, 杉本浩士, 本江総:箱根西麓・三島大吊橋の建設 ~日本一の人道吊橋~, 川田技報, Vol.35, 2016.1.
- 2)宮澤俊二, 大村正弘, 岩井大, 小笠原照夫, 畠中真一:箱根西麓・三島大吊橋の計画(3)耐風対策:土木学会第67回年次学術講演会, I-358, 平成24年9月
- 3)畠中真一, 小笠原照夫, 大野克紀:箱根西麓・三島大吊橋の耐風検討, 川田技報, Vol.32, 2013.1.
- 4)本摩敦, 新谷順也, 坂田正二, 杉田俊介, 谷克浩, 米田昌弘:九重“夢”大吊橋の建設, 橋梁と基礎, 2007.11.
- 5)梶川康男:振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察, 土木学会論文集, 第325号,1982.9.
- 6)日本鋼構造協会:これからの歩道橋, 技報堂出版, 1998.5.