

遊園地内に架設された人道吊橋の歩行者による 水平振動とTLDを用いた制振

米田 昌弘¹

¹正会員 フェロー 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江3-4-1)

E-mail: yoneda@civileng.kindai.ac.jp

対象とした橋梁は、大阪府内の遊園地内に架設された人道吊橋（中央支間長は62.4m、幅員は150cm）である。この遊園地にはゴールデンウィーク時に1万人／日もの来園者があり、橋面上の歩行者数を20～30人に制限しても、水平対称1次振動であれば約4.2cm、水平逆対称1次振動であれば約2.8cmもの、歩行が困難になるほどの水平振動が誘起されていた。そこで、制振対策として容器寸法（内寸法）が450mm×300mm×200mm（高さ）のTLDを採用し、水深を60mmに設定して抑制効果を把握するための実橋試験を行った。その結果、20～30人の歩行者に対して、ほぼ十分な制振効果が得られたことを確認できた。

Key Words : suspension bridge, human-induced lateral vibration, full scale measurement, countermeasure, tuned liquid dampers

1. まえがき

供用開始後 75mm もの水平振動が観測されたミレニアムブリッジでは、歩行に障害をきたすほどの振動であったことから直ちに通行止めとなり、制振対策の検討が実施された¹⁾。その結果、水平振動を抑制するための減衰付加対策として、最終的に合計 37 個の粘性ダンパーをV字ブレースを介して橋面下に設置することによって通行が再開できるようになったが、このミレニアムブリッジの歩行者による水平振動は、わが国のみならず世界中の橋梁技術者に大きな衝撃を与えた。ただし、歩道橋の水平振動は、ミレニアムブリッジで問題になる以前、わが国では藤野らの研究グループが斜張橋形式のT橋でその発生を観測し、水平方向励振のメカニズムに関して有用な知見を報告している^{2,3)}。ちなみに、このT橋では、多いときに一日あたり13,000人を超える通行人があり、桁には8.3mm（ケーブルには300mm）の水平振動が生じていたことから、ケーブルに2次的な制振ワイヤを取り付けるとともに、箱桁内にTuned Liquid Damper（以下、TLDと記す）を設置する対策が施された。なお、T橋で採用されたTLDの寸法は360mm（橋軸直角方向）×290mm（橋軸方向）で水深は34mmであり、等価質量比は約0.7%であった。この制振対策の設置により、桁の振幅は8.3mmから2.9mmに低減したと報告さ

れている⁴⁾。

TLDは容器内の液体動揺を利用する制振対策であり、わが国でも、主に風による振動を抑制するための対策として、数多くの採用実績がある⁵⁾。ただし、土木分野に関して言えば、渦励振などの風による振動が発現する可能性がある塔状構造物の減衰付加対策として採用された場合がほとんどで、T橋のような歩行者による強制振動対策として採用された事例は少ない。

ところで、最近になって、わが国では観光地の集客を目的として、吊床版橋や長大な歩行者専用吊橋が幾つも建設されているが、これらの中には開通直後から歩行者によって高次の水平振動が発現したとの報告もなされている^{6,7)}。ただし、歩行に若干の困難をきたす場合があっても、従来は積極的に制振対策を施して水平振動を抑制するまでには至っていないケースがほとんどである。この理由として、これらの橋は観光地の集客を目的としていることから観光客自身も橋の揺れを体験することを期待して訪れていること、また、歩行が困難になるような大きな水平振動が発生した場合には橋面上の歩行者数を制限するなどの規制で対処できること、などが考えられる。加えて、これらの人道橋は比較的安価な建設費で架設されており、制振対策の設置には追加の費用が発生すること、水平振動に対して厳守すべき使用性の評価基準が確立されていないこと、水平振動を制御するために

は一般の技術者にとってやや難解な振動工学の知識が必要とされること、などの各種要因もあげることができる。

本研究で対象とした橋梁は、大阪府内の遊園地内に架設された人道吊橋（中央支間長は 62.4m で幅員は 150cm）であるが、この遊園地にはゴールデンウィーク時に 1 万人／日も来園者があり、橋面上の歩行者を 20～30 人に制限しても、歩行が困難になるほどの水平振動が誘起されていた。そこで、本研究では、実橋試験を実施して実際の来園者によって誘起された人道吊橋の水平振動を計測するとともに、制振対策として TLD を設置した後の抑制効果を具体的に把握することとした。その結果、歩行者による人道橋の水平振動と TLD を用いた制振対策に関して、実務技術者にとって有用な知見が得られたことから、ここにその検討結果を報告する。

2. 対象とした人道吊橋

対象とした橋梁は、大阪府内の遊園地内に架設された写真-1 に示す人道吊橋（中央支間長は 62.4m で幅員は 150cm）である。平成 21 年 1 月 22 日に実施した振動計測で、この橋の中央径間における水平方向基本振動モードは対称 1 次で、その固有振動数は 0.8545Hz であることがわかった。そこで、橋の中央点で 5 人が橋を水平方向に人力加振した後に、急停止して減衰自由振動波形を得た。桁中央点での減衰自由振動波形と FFT によるパワースペクトル解析結果をそれぞれ図-1、図-2 に示す。また、図-1 の減衰自由振動波形を用いて対数減衰率 δ を算出した。その結果を図-3 に示すが、この図から、振幅依存性は比較的小さく、水平対称 1 次の構造対数減衰率は $\delta=0.1242$ であることがわかった。なお、減衰自由振動実験時はほぼ無風状態であり、空力減衰の影響はきわめて小さいと考えて差し支えない。ちなみに、本橋は簡易な床組の上に擬木製床版を設置したきわめて簡素なもので、高欄は木製である。また、概略計算の結果、本橋の単位長さあたりの重量は 1.96kN/m/Br.程度であり、きわめて軽量であることがわかった。

これ以降も本橋を対象として何度か振動計測を行ったが、平成 24 年 1 月 19 日に測定したデータをスペクトル解析した結果、水平対称 1 次振動数が 0.8057Hz ないしは 0.8301Hz（データ個数を 8,192 個、サンプリングタイムを 0.005sec とすると分解能 Δf は $\Delta f=0.0244$ Hz）に低下していることがわかった。原因を調査した結果、歩行者による水平振動を少しでも小さくするため、橋軸方向に張り渡していた写真-2 の仮ワイヤを管理上の問題から撤去したためであることがわかった。ただし、構造対数減衰率は、図-4 に示すように $\delta=0.1286$ であり、仮ワイヤ撤去後も大きな変動は認められなかった。



写真-1 遊園地内の吊橋（順番待ちする歩行者の列）

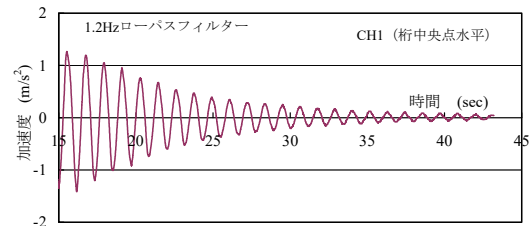


図-1 減衰自由振動波形（水平対称 1 次振動）

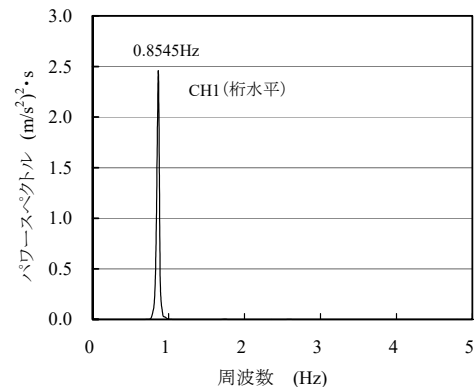


図-2 FFTによるパワースペクトル解析結果
（水平対称 1 次振動）

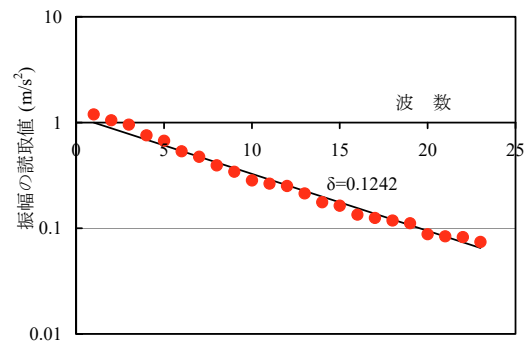


図-3 構造対数減衰率の算定結果
（水平対称 1 次振動）



写真-2 振動抑制用仮ワイヤ

次章に示すように、本橋では、歩行者によって水平対称1次振動のみならず水平逆対称1次振動も誘起されていたことから、仮ワイヤの撤去後に、水平逆対称1次振動に着目した減衰自由振動実験を実施した。1/4点での減衰自由振動波形とFFTによるパワースペクトル解析結果をそれぞれ図-5、図-6に示す。また、図-5の減衰自由振動波形から構造対数減衰率 δ を算出した。その結果を図-7に示すが、この図から、水平逆対称1次の構造対数減衰率は振幅依存性が比較的小さく、かつ、 $\delta=0.2065$ と水平対称1次($\delta=0.1286$)よりもさらに大きな値であることがわかった。なお、水平逆対称1次振動に着目した減衰自由振動実験時もほぼ無風状態であり、空力減衰の影響はきわめて小さいと考えて差し支えない。

3. 歩行者による水平振動

本人道吊橋が架設されている遊園地の来園者数は、ゴールデンウィーク時には1万人/日にも達することから、橋の両側に警備員を配置し、20~30人の通行制限を行っている。しかしながら、橋面上の歩行者数を20~30人に制限しても、歩行が困難になるほどの水平振動が誘起されていた。ちなみに、目視観測によれば、20~30人の歩行者集団が比較的ゆっくり歩行した場合には水平対称1次振動が、幾分急ぎ足で歩き出した場合には水平逆対称1次振動が誘起される傾向にあることがわかった。そこで、1/4点に加速度計を設置して歩行者による桁の水平加速度応答を計測した。水平対称1次振動が主に誘起された場合のスペクトル解析結果を図-8に、逆フーリエ変換法を用いてフィルター処理(0.5-1.0Hzのバンドパスフィルター処理)した波形を図-9に示す。また、水平逆対称1次振動が主に誘起された場合のスペクトル解析結果を図-10に、逆フーリエ変換法を用いてフィルター処理(1.0-1.4Hzのバンドパスフィルター処理)した波形を図-11に示す。これらはいずれも遊園地

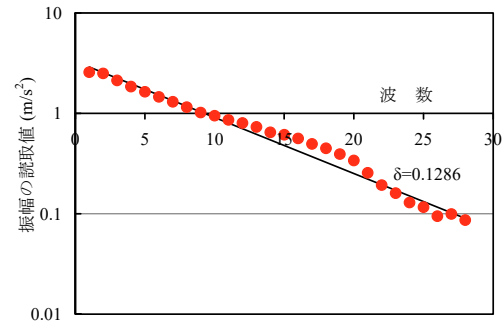


図-4 構造対数減衰率の算定結果 (仮ワイヤ撤去後の水平対称1次振動)

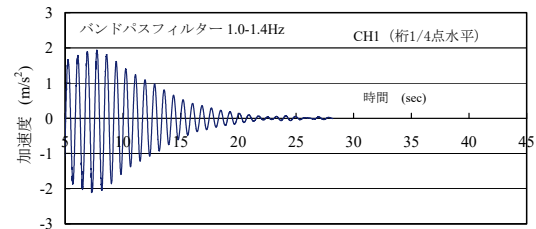


図-5 減衰自由振動波形 (水平逆対称1次振動)

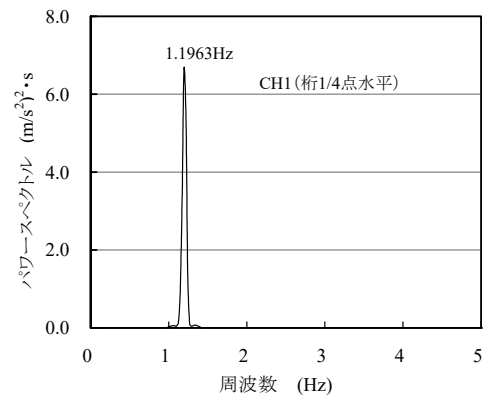


図-6 FFTによるパワースペクトル解析結果 (水平逆対称1次振動)

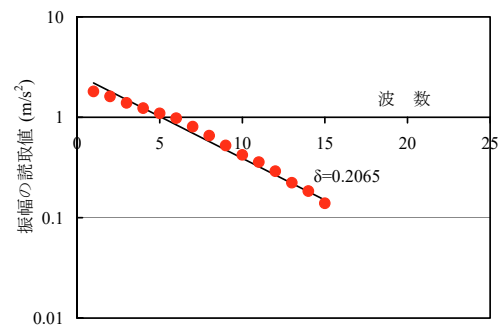


図-7 構造対数減衰率の算定結果 (水平逆対称1次振動)