# 歩行者により励起される橋桁の水平応答値の推定法

Method of predicting horizontal girder response induced by pedestrians

川崎俊次 \* 中村俊一 \*\* Toshitsugu Kawasaki Shun-ichi Nakamura

\*東海大学連合大学院 理工学研究科 総合理工学専攻(〒259-1292 平塚市北金目 1117)
\*\* Ph.D. 東海大学 工学部 土木工学科 教授(〒259-1292 平塚市北金目 1117)

The equations of motion have been proposed to predict the horizontal girder response induced by pedestrians. The equations take into consideration the rate of pedestrian's horizontal force to pedestrian's weight, the pedestrian density, the rate of synchronized pedestrians, and the pedestrians' attitude to large vibration amplitude. This method is then applied to the two cable-supported bridges that have suffered the horizontal vibration. The predicted horizontal girder responses agree very well with measured girder responses of these bridges, which verify the prediction method.

Key Words: lateral vibration, pedestrian bridges, cable-supported bridges キーワード:水平振動、歩道橋、吊り形式橋

### 1.はじめに

近年,吊り形式の歩道橋で,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<sup>1)-3)</sup>.T-Bridge(斜 張橋)では,多くの人が歩行した際,桁が水平対称1次 モードで水平振動した<sup>1),2)</sup>.桁の応答振幅は10-15 mm程 度であり,歩行への悪影響および橋の安全性についての 問題はなかった.しかし,それまでに経験されていなか った新しい振動現象であったため,現地測定が実施され, 原因が究明された<sup>1),2)</sup>.その結果,歩行者が桁の水平固有 振動モードに同調することによって,共振が生じたと推 定された.

同様な水平振動がLondon Millennium Bridgeで 2000 年 6 月に発生した<sup>3)</sup>.開通式当日に多くの人が歩行した際に桁 が水平振動し,その応答振幅は 70mmにも及んだ.これ は,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.多くの現地振動実験が実施され, T-Bridgeで解明された基本的な振動メカニズムが再確認 された.

M-Bridgeは 1999 年に完成された吊橋であるが,開通直 後から桁の水平振動が発生した.筆者らは現地振動計測 を実施し,桁は水平対称4次モードおよび水平逆対称3 次モードで振動していること,桁と歩行者の位相差の値 を明確にした<sup>4</sup>.

歩行者による水平振動のメカニズムについては以下の ように考えられる.人は約2.0Hzで歩行し,この振動数の 鉛直力が発生する.同時に,人が歩行する際には重心が 左右にふれるため,水平方向にも約1.0Hzの水平力が生ず る.桁の固有振動数が,この歩行者の水平方向振動数(約 1.0Hz)に近い場合,共振現象が生ずる可能性が高い.し かし,桁の水平応答変位は,歩行者起振力の大きさ,歩 行者と桁変位の位相差,桁の振動に同調する歩行者の割 合など種々の要因により影響されると考えられる.これ ら個々の要因は実験によりある程度解明されている<sup>4,5</sup>. しかし,実橋での測定データが少ないため水平振動に対 する設計基準化には至っていない.

本論文では,実験データを基に,歩行者により励起さ れる桁の水平応答振幅の推定法を提案する.この推定法 は,桁の水平振動に影響すると考えられる上述した要因 を考慮している.さらに,この推定法を2つの実橋 T-Bridge<sup>1),2),6)</sup>とM-Bridge<sup>4),7)</sup>に適用し,別途実施した振動 測定データと比較し,提案式の適用性を検討した.実橋 での測定データは極めて少なく,推定応答値の妥当性を 検証することは貴重な技術成果であり,本論文の特徴で ある.

今後,橋梁技術の進歩により,さらに長大な歩道橋が 設計されると予想される.しかし,歩道橋は幅員が狭い ため,剛性の小さな構造物になり,揺れやすい橋になり がちである.現在,歩行者により励起される水平振動に 関する設計基準が確立されていないため,本論文は歩道 橋設計に有益な情報を提供すると考えられる.



図-1 London Millennium Bridge で提案された水平起振力



図-2 無次元化水平起振力(係数k<sub>1</sub>)

### 表-1 測定水平起振力の足し合わせ

				unit ( N
加振振幅 (mm)	単純加算		波形重ね合わせ	
	折れ線	直線近似	折れ線	直線近似
10	258.81	245.10	206.18	23.22
30	321.77	303.94	148.45	127.37
50	327.13	362.78	189.37	231.53
70	439.45	421.62	356.76	335.68





写真-1 水平起振力測定実験



図-3 被験者の同調割合(係数k2)



図-4 測定水平起振力の足し合わせ



図-6 関数H(x'<sub>B</sub>)(係数k<sub>3</sub>)

### 2.推定法の提案

桁を水平振動させる主要因は,人が歩行する際に生ず る水平方向の起振力である.London Millennium Bridgeで の水平振動に関する検討では,歩行者の水平起振力を式 (1)で表している<sup>3)</sup>.

$$\mathbf{F}_{\mathbf{p}} = \mathbf{k}\mathbf{v} \qquad (1)$$

ここで、v は桁の速度を表しており、起振力は桁の速度 に比例するという式である.係数 k の値は London Millennium Bridge での現地計測の結果より 300 N.sec/m と している(図-1).この式では、桁の速度に伴い応答変 位は単純増加し、起振力には上限がない.しかし、歩行 者は桁の速度が増加、すなわち桁の変位が大きくなると、 危険を感じ、歩行ペースが落ちる、あるいは歩行を中断 してしまうと考えられる.このような傾向は M-Bridge の 測定時でも確認された.そこで、これらの歩行者の挙動 を考慮し、新たに式(2)~式(5)を提案する.

$$M_{B}x''_{B} + C_{B}x'_{B} + K_{B}x_{B} = F_{P}(t)$$
 .....(2)

$$F_{P}(t) = k_{1}k_{2}H(x'_{B})G(f_{B})M_{P}g$$
 .....(3)

$$H(x'_{B}) = \frac{x'_{B}(t)}{k_{3} + |x'_{B}(t)|} \quad \dots \quad (4)$$

$$G(f_{\rm B}) = 1.0$$
 .....(5)

これらの式は以下に述べるような,桁を水平振動させる 要因を取り入れた式で構成されている.

式(2)は運動方程式であり, x<sub>B</sub>は桁の水平変位, x'<sub>B</sub>は 桁の水平速度, x"<sub>B</sub>は桁の水平加速度を表している.M<sub>B</sub>は 桁のモード質量, C<sub>B</sub>は桁のモード減衰係数, K<sub>B</sub>は桁のモ ード剛性である.

式(2)の右辺Fpはモード外力であり,橋上の全歩行者 の水平起振力を表している.ただし,水平起振力は歩行 者が固定した床上を歩行する際に生ずるものではなく, 水平振動している床上を歩行する際に生ずるものである. 過去の研究においては,このような水平起振力は明確に されてはいない.著者らは,式(3)に示すように,この 水平起振力は基本的には歩行者重量に比例すると考えた. ここで,Mpは歩行者モード質量,はgは重力加速度であ る.そして,鉛直力である歩行者重量の何割かが水平方 向に作用するのかを実験により推定した(係数k<sub>1</sub>).具 体的な係数値は次章で説明する.

次に,桁が水平振動するためには,歩行者1人ではな く,群集となった複数歩行者が歩行することが必要であ る.しかし,橋を振動させる力は,橋上にいる全員が起 振力となっているわけではない.すなわち,橋の固有周 期に同調する歩行者のみが起振力となる.そこで,水平 振動する加振台上での歩行実験を実施し,何割の歩行者 が同調するかを考慮した(係数k<sub>2</sub>).具体的な係数値は 次章で説明する.

関数H(x'<sub>B</sub>)は,歩行者は桁変位が大きくなり、それに伴って桁速度が大きくなると,歩行ペースが落ちる,あるいは歩行を中断してしまうという挙動を表している.本 関数内の係数k<sub>3</sub>を変化させることにより,最適な関数形状を選択できる.具体的な係数値は次章で説明する.

関数G(f<sub>B</sub>)は,橋の固有周期の影響を考慮したものである.前述したように,水平方向歩行者起振力は 1.0 Hz程度であり,橋の固有周期がこれに近い場合は,共振しやすいと言える.一方,橋の固有周期が 1.0 Hzから離れるほど共振は生じにくい.過去に水平振動が生じた橋の共振振動数はすべて 1.0 Hz程度であるため,本研究では関数G(f<sub>B</sub>)は 1.0 とした.

#### 3.係数の説明

本章では,提案式に用いた各係数を具体的に説明する. 係数k<sub>1</sub>は歩行者重量の水平方向に働く割合を表してい る.係数k<sub>1</sub>を求めるために,次のような実験を行った<sup>5)</sup>. 写真-1のように歩道橋の水平振動を模擬する加振台の上 で人が足踏みをし,水平反力を測定した.加振台は振幅 10mm~70mm,周波数0.75Hz~1.25Hzとして実験を行っ た.被験者は5人とした(男3人,女2人,質量45-80kg). また,被験者は橋梁技術者ではく,本実験の目的も知ら せなかった.測定の結果,振幅が増加するにつれ起振力 も増加した.加振振動数1.0Hzの場合,水平起振力を被験 者の体重で除した値(無次元化起振力)は約8%~18%で あった(図-2). すなわち,歩行者体重の約8%~18%が 水平方向に作用していることを表している.ここで,図 中の白抜きは5人の値を平均し,さらに回帰分析して直 線近似したものであり、今回の測定では傾き 0.001、切片 0.079 の一次関数が得られた.これを提案式の係数とした. 応答振幅を求めるためには,初期振幅を仮定し,推定計 算を繰り返せば係数k1が求められる.

係数k2は同調する人の割合を表している.前述の実験 において,加振台の加振振動数は0.75Hz,0.87Hz,1.00Hz, 1.25Hzで測定しているが,0.75Hzと1.25Hzでは5人の被 験者とも同調していなかった.同調したのは歩行者の水 平振動数である1.0Hzに近い値であり,この実験では 0.87Hzと1.00Hzが同調する結果となった.0.87Hzでは5 人の被験者のうち1人だけ同調した.すなわち,20%の 人が同調した.1.00Hzでは加振振幅にもよるが,2~3人 (平均2.5人)が同調した(図-3).実験は1人ずつ測定 したが,実際は複数人が歩行する.その際,加振台変位 と被験者変位の位相差は5人により若干の差があること が確認された.すなわち,加振台に対する5人の動きは 必ずしも一致してはいなかった.したがって,2~3人(平



写真-2 T-Bridge 混雑時の様子

$$k_{2} = \begin{cases} \frac{1_{\lambda}}{5_{\lambda}} = 0.2 \quad (0.87 \text{Hz}) \\ \frac{2.5_{\lambda}}{5_{\lambda}} \times \frac{(23.22 + 127.37 + 231.53)/3_{(ikt)}}{(245.10 + 303.94 + 362.78)/3_{(ikt)}} \\ = 0.5 \times 0.42 = 0.21 \quad (1.00 \text{Hz}) \\ & \cdots \cdots \cdots (6) \end{cases}$$

均 2.5 人)が同調する時の起振力は,各個人の起振力最 大値を単純に加算するのではなく,起振力波形を重ね合 わせなければならない.前述を"単純加算",後述を"波 形重ね合わせ"とすると,起振力の値はそれぞれ表-1 の ようになり,波形重ね合わせは単純加算より約半分の起 振力しか発生しないことがわかる(図-4).また,図中 の白抜きは単純加算データおよび波形重ね合わせデータ を回帰分析し直線近似した値である(図-4,表-1).表-1 で今回の現地測定で確認された振幅が 10mm~50mm に 着目すると,式(6)となり,同調する2.5 人にさらに0.42 を乗じ 0.21 となる.したがって,50%(5 人のうち 2.5 人)が同調しているが,起振力として働くのはその42% であるため,1.00Hz では21%が同調すると設定した.

式(4)は歩行ペースを表している.関数H(x'<sub>B</sub>)は,前 述したように,歩行者は桁変位が大きくなると,歩行ペ ースが落ちる,あるいは歩行を中断してしまうという挙 動を考慮している.図-5 はT-Bridgeで測定した水平変位 であり,時間とともに桁の振幅が大きくなっているが, ある時間からは増加していない.これは,前述した歩行 者挙動によると考えられる.また,図-3 の加振振動数 1.00Hzで加振振幅が 70mmと大きくなった場合に同調者 の割合が下がっているのも同様の理由によると考えられ る.

係数k<sub>3</sub>は歩行に関する形状係数である.水平起振力と



図-7 T-Bridge (対称1次モード)



桁速度の関係をグラフにしたものが図-6 であり,係数k<sub>3</sub>の関数となっている.係数k<sub>3</sub>の算出は以下とした.まず, 数種類の値を仮定し,T-Bridgeの検討ケースについて,推 定値と測定値を比較し,その誤差が最も小さくなる k<sub>3</sub>=0.01 m/secと設定した.また,図-6 の点線はLondon Millennium Bridgeの式(1)を表しており,初期は両者と も同様の挙動を示すが,桁速度が 0.02 m/sec以降は, London Millennium Bridge式は単純増加しているが,著者 らの提案式は歩行挙動を考慮し単純増加しないことを示 している.

#### 4.対象橋梁の概要および実測値と推定法の比較

検討対象とした橋は, T-Bridge と M-Bridge である.両橋梁の構造概要および水平振動時の歩行者密度,振動モード等を以下に示す.

#### 4.1 T-Bridge

T-Bridgeは主径間 134m, 側径間 45mの 2 面吊歩行者専 用斜張橋である(写真-2,図-7)<sup>6</sup>.桁は鋼箱桁でウェブ 高さ 1.8m, 幅員 5.25m, 主塔高さは 61.4mである.本橋 は競艇場とバスターミナルを結ぶ唯一の交通手段であり, レース終了時に一度に多くの歩行者が利用し,その際に 水平振動が発生した<sup>1).2)</sup>.



写真-3 M-Bridge



図-10 M-Bridge 検討ケース(逆対称3次モード)

水平振動時は対称1次モードで振動した.固有振動数 は 0.90Hzである.本橋においては歩行者密度の異なる 2 ケース(T-1, T-2)について比較する(図-7). T-1ケー スは歩行人数が多い日を選び,測定当日の歩行者密度は およそ 0.794 人/m<sup>2</sup>であった .T-2 ケースはT-1 ケースほど 歩行人数が多くなく,歩行者密度はおよそ 0.476 人/m<sup>2</sup>で あった.歩行者密度はビデオおよび写真から求めている. 橋梁の正確な減衰を求めるためには,大規模な強制加振 実験が望ましいが、本橋では実施していない、本橋では、 レース直後に歩行者が集中し,その際に共振現象が生ず る.しかし,その継続時間は短時間であり,その後は歩 行者がほとんどいなくなる.したがって,強制加振した 後,自由振動する現象に類似している.そこで,共振時 の測定水平変位データよりパワースペクトルを求め,ハ ーフパワー法により減衰定数を求めた(図-8、表-2).解 析条件は,時間刻みは0.01sec,データ数は約8,000個, 総解析時間は約80secとした.

#### 4.2 M-Bridge

M-Bridgeは主径間 320m,側径間 60mの歩行者専用の単 径間吊橋である(写真-3)<sup>7)</sup>.幅員は 1.5m,主塔高さは 26.2mである.景勝地に架橋され,多くの人が訪れる.今 回の測定も紅葉時期かつ週末に合わせ,多くの歩行者を



```
図-9 M-Bridge 検討ケース (対称 4 次モード)
```



図-11 RD法(スパン中央の水平変位)

見込んでの測定となった.現地測定により,水平振動時 は対称4次モードおよび逆対称3次モードで振動するこ とがわかった固有振動数はいずれのモードも1.0Hz前後 である.本橋においては歩行者密度の異なる8ケース (M-1~M-8)について比較する.歩行者密度は測定時に 撮影したビデオ画像を解析して算出した.対称4次モー ドでの振動をM-1~M-3(図-9),逆対称3次モードでの 振動をM-4~M-8(図-10)とする.

本橋においても大規模加振実験はされていないため, 減衰定数は常時微動波形から RD 法により求めた(図-11, 表-2).本橋は昼間のみ解放されており,夜間は閉鎖さ れる.したがって,常時微動データは夜間の無人時のも のを使用した.測定位置はスパン中央であり,解析条件 は,時間刻みは 0.01sec,データ数は約 16,000 個,総解析 時間は約 160sec とした.

#### 4.3 実測値と推定値の比較

歩行者密度の異なる 10 ケースを検討ケース対象とし て T-Bridge で 2 ケース, M-Bridge で 8 ケースの解析を行 った.

表-2,3 では代表例として固有振動モードの異なるT-1, M-1, M-4 ケースについての解析結果を示す.表-2 は各 ケースの解析条件である.係数k<sub>1</sub>(体重の水平方向に働

項目	T-1	M-1	M-4
固有振動モード	対称1次	対称4次	逆対称3次
固有振動数(Hz)	0.900	1.025	0.879
桁のモード質量 M <sub>B</sub> (kg)	214 010	97 200	97 200
桁のモード剛性 K <sub>B</sub> (kg/sec <sup>2</sup> )	7307 361	4031 566	2964 857
桁のモード減衰定数 C <sub>B</sub> (kg/sec)	28 262	3 387	2 905
步行者密度(人/m <sup>2</sup> )	0.794	0.074 ~ 0.652	0.051 ~ 0.622
歩行者のモード質量 M <sub>P</sub> (kg)	14 969	3 350	2 469
係数 k <sub>1</sub>	0.0987	0.1251	0.1227
<b>係数</b> k <sub>2</sub>	0.2	0.21	0.2
<b>係数</b> k <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.01
対数減衰率	0.071	0.017	0.017
減衰定数 h	0.0113	0.0027	0.0027

表-2 解析条件

表-3 実測値と推定法の比較

解析 ケース	振動モード	実測波形および推定法による波形		比率 De/Dm	
T-1	対称 1 次 モード	実測波形 Dm (1) $(1)$	13.3	1 49	
		推定法 De # <sup>2</sup> <sup>10</sup> / <sub>10</sub>	19.8	1.47	
M-1	対称 4 次 モード	実測波形 Dm	40.1		
		推定法 De #推 <sup>(wu)</sup> <sup>30</sup> <sup>30</sup> <sup>10</sup> <sup>10</sup> <sup>10</sup> <sup>10</sup> <sup>10</sup> <sup>10</sup> <sup>10</sup> <sup>1</sup>	48.4	1.21	
M-4	逆対称 3 次 モード	実測波形 Dm	34.8	1 28	
		推定法 De $f_{20}^{4}$ $f_{20}^{4}$ $f_{20}^$	44.5	1.20	

ケース番号	T-1	T-2	M-1	M-2	M-3
固有振動モード	対称1次	対称1次	対称4次	対称4次	対称4次
固有振動数(Hz)	0.900	0.900	1.025	1.025	1.025
步行者密度(人/m²)	0.794	0.476	0.074 ~ 0.652	0.074 ~ 0.474	0.044 ~ 0.421
対数減衰率	0.071	0.071	0.017	0.017	0.017
減衰定数 h	0.0113	0.0113	0.0027	0.0027	0.0027
係数 k <sub>1</sub>	0.0987	0.0885	0.1251	0.1238	0.1155
係数 k <sub>2</sub>	0.2	0.2	0.21	0.21	0.21
係数 k <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
推定值 De (mm)	19.8	9.6	48.4	46.0	38.0
実測値 Dm (mm)	13.3	8.0	40.1	41.3	31.7
比率 De/Dm	1.49	1.20	1.21	1.11	1.20
ケース番号	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
固有振動モード	逆対称3次	逆対称3次	逆対称3次	逆対称3次	逆対称3次
固有振動数(Hz)	0.879	0.879	0.879	0.879	0.879
步行者密度(人/m²)	0.051 ~ 0.622	0.061 ~ 0.343	0.025 ~ 0.343	0.024 ~ 0.343	0.036 ~ 0.343
対数減衰率	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
減衰定数 h	0.0027	0.0027	0.0027	0.0027	0.0027
係数 k <sub>1</sub>	0.1227	0.0915	0.0923	0.0976	0.1074
係数 k <sub>2</sub>	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
係数 k <sub>3</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
推定值 De (mm)	44.5	12.1	12.9	19.4	28.8
実測値 Dm (mm)	34.8	14.4	14.8	14.7	26.7
比率 De/Dm	1.28	0.84	0.87	1.32	1.08

表-4 解析結果一覧表

く割合)は次の手順により求めた.まず,適切な応答振幅を仮定し,図-2 で求めた一次関数より係数 $k_1$ 値を求める.そして,その値を用いた推定計算により応答値を求め、それに対して新たな係数 $k_1$ 値を算出し,再度,推定計算により応答値を求める.この手順を,推定振幅が収束するまで繰り返した.ただし,今回の検討では歩行者数などに関する誤差が大きいため,収束判定は5%とした.係数 $k_2$ (同調する歩行者の割合)はT-1,M-4 は固有振動数が0.87Hz前後のため0.2,M-1 は1.0Hzに近いことから0.21 と設定した. $k_3$ (歩行ペース)は各ケースとも歩行特性は同じと考え,0.01 で統一した.また,歩行者1人当たりの質量を着衣を含め70kgとした.

提案式は非線形微分方程式であるため,数値解析により解を求めた.時間刻みは0.1sec,初期変位を0mm,初期速度を0.001m/secとした.なお,数値解析の実施にあ

たっては,事前に時間刻みを0.1 秒,0.01 秒,0.001 秒に 変化させて解析値を比較した.その結果,0.1 秒と0.001 秒の解析値の誤差は0.9%以下であった.したがって,時 間刻みを0.1 秒としても妥当と考えた.ある時間が経過 すると定常状態に達し,その値を解とした.なお,解は 初期速度の値には影響されないことを確認した.

3 つの代表的な検討ケースに関する実測波形と推定法の波形を表-3 に示す.ここでは20secの波形を示したが, 波形および振幅ともに推定値と実測値はほぼ同一である.

さらに,全ケースの結果一覧表を表-4 に示す.実測値 と推定法の誤差は最大でも 20%以下であり,提案した推 定法は妥当であると考えられる.ただし,若干のケース で 30~50%の誤差がある.これは歩行者密度が正確に把 握できなかったためと思われる.

### 5.まとめ

歩行者により励起される吊り形式橋の水平振動に関し, 桁の応答振幅の推定法を提案した.本推定法では,歩行 者起振力の大きさ,桁振動に同調する歩行者の割合,大 変位状態での歩行者特性を考慮した.

歩行者が励起する水平力は歩行者重量に比例すると仮 定し,その割合は加振台上を歩行する実験結果を基にし て,桁の振幅が10mmは体重の9%,30mmは11%,50mm は13%,70mmは15%が作用するとした.また,歩行者 が桁の振動に同調する割合は桁振動が0.87 Hz では20%, 1.00 Hz では21%とした.

London Millennium Bridge では,起振力は桁の速度に単純比例するとしたが,実際には桁の速度が増加すると, 人間の心理から歩行ペースが落ちる,または中断してしまう.この歩行者の挙動も推定式に組み込んだ.

そして,実際に水平振動した歩道橋に提案式を適用し, 振動測定結果と比較した.T-Bridge は斜張橋で対称1次 モードで振動し,M-Bridge は対称4次モードおよび逆対 称3次モードで振動した.歩行者密度が異なる10ケース を検討対象とし,提案推定式を適用した.その結果,推 定値と実測値の誤差は最大でも20%程度であった.した がって,提案した推定式は妥当であると考えられた.

また,推定法の諸係数は歩行者の起振力実験から求め たが,被験者の数が少なく,データが不足している.ま た,「足踏み」ではなく「歩行」かつ複数歩行者による 同時歩行実験を実施すれば推定法の精度の向上が期待で きる.しかし,規模の大きな実験設備および高コストに より実施は困難であるため,これらは今後の課題とする. 吊り形式の歩道橋を設計する際,本推定式を用いれば 応答振幅が求められ,事前に対策を講ずることが可能で ある.今後は本研究を発展させ,歩道橋の水平振動に対 する設計基準を確立することを目指す所存である.

## 参考文献

- Fujino, Y., Pacheco, B., Nakamura, S. and Warnitcahi, P.: Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested pedestrian bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.22, pp.741-758, 1993.
- Nakamura, S. and Fujino, Y.: Lateral vibration on a pedestrian cable-stayed bridge, Structural Engineering International, IABSE, Vol.12, No.4, pp.295-300, 2002.
- Dallard, P., Fitzpatrick, A., Flint, A., Bourva, S. and Low, A.: The London Millennium Footbridge, The Structural Engineer, Vol.79, No.22, pp. 17-35, 2001.
- 川崎,中村,大野:歩行者により生じた吊橋の水平 振動計測,土木工学論文集,No.777/VI-65, pp.97-107, 2004.
- 川崎,中村,勝浦,横山:水平振動する床上での歩 行時水平起振力に関する実験的研究,土木工学論文 集, No.794/I-72, pp.281-290, 2005.
- 酒井,進藤,藤本,向山,金子:T-Bridge の設計,橋 梁と基礎, No.10, pp.11-16, 1987.
- 7) 柳崎,高橋,島田,田口,大野,畠中:M-Bridgeの 設計と架設,橋梁と基礎,No.7, pp.17-23, 2000.
  (2007年9月18日受付)