

I-72 歩道橋の応答特性に基づいた歩行者の動的外力に関する一考察

北海道大学工学部 学生員 伊藤 公彦
 北海道大学工学部 正 員 小幡 卓司
 北海道大学工学部 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学工学部 フェロー 佐藤 浩一

1. まえがき

近年におけるコンピュータの性能および計算技術の発達により、動的応答解析は容易に行うことが可能となった。例えば大地震時に構造物が衝撃を受ける場合や、その非線形挙動あるいは風等の荷重が作用する場合の解析も計算そのものは比較的簡単にできるようになりつつある。しかしながら設計時に構造物の断面性能や減衰定数あるいは実際の動的外力を正確に予測することは困難であると思われる。

特に歩道橋においては、その振動使用性を検討する上で、設計段階での動的応答特性の正確な把握は極めて重要であると考えられる。我が国においては、社会資本の充実に伴って従来の横断歩道橋に代わり側道橋、人道橋、遊歩道橋等と称される比較的大規模な歩道橋が盛んに建設されつつある。上記のような歩道橋では BS5400¹⁾ に代表されるように振動使用限界状態を考慮した使用性評価が行われることも多く、このため設計段階での動的応答特性の正確な把握は今後ますます重要になるものと予想される。

一般に動的応答解析を行う際、最も重要な問題となるのは構造物に作用する外力である。我が国においては、地震力あるいは耐風設計の際の風速等については示方書等により規定されているものの、歩道橋に作用する歩行者の外力に関しては明確に規定されていないのが現状である。この歩行外力は歩行者の歩調によって、床版に与える衝撃力、移動速度等が逐次変化するため、その取り扱い是比较的煩雑であり、汎用的な決定方法は未だに確立されていない²⁾。

以上をふまえて、著者らは札幌市内の横断歩道橋11橋について強制加振実験ならびに時刻歴応答解析を実施して歩道橋の動的応答性状の把握を試みた。さらに学習、最適化の手法として最近注目されている遺伝的アルゴリズム（以下 GA と称す）を導入し、実橋実験に基づいた歩行外力の同定を行った³⁾。

そこで本研究では歩道橋の設計段階において、共振時、非共振時を問わずある程度正確に動的応答量を求めるための歩行外力の検討を試みた。具体的には、まず実験結果に含まれるノイズ、衝撃応答の影響を除去するため、バンドパスフィルタを用いて応答波形の補正を行った。さらに、歩行者の衝撃力を遺伝子列で表現し、GA を適用することによって、補正後の実験結果に対して歩行外力の同定を実施した。またこれらの結果から、設計時において動的応答解析を行う際に用いるべき汎用的な歩行外力に関して新たな提案を行い、既往の研究^{4, 5)}における歩行外力との比較を通じてその妥当性について考察を加えるものである。

2. 解析理論

2-1. バンドパスフィルタ

上述のように、ノイズ等を含んだ信号を処理し必要な情報を取り出す手法の一つとして、バンドパスフィルタが有効であることが知られている。

一般に、デジタルフィルタには FIR 型 (Finite Impulse Response) と、IIR 型 (Infinite Impulse Response)

Consideration of Human Walking Force based on Dynamic Characteristics of Pedestrian Bridges

by Kimihiko ITOH, Takashi OBATA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO

がある⁹⁾。前者はシステムの応答が有限時間で終わるような場合であり、フーリエ級数等により比較的簡単に設計が可能となる。また、後者はインパルス応答が無限に続くようなシステムであり、具体的には過去の出力の値が現在の出力に影響を与える、一般にはフィードバック型と称されるものである。

なお、本研究においてはフーリエ級数に基づいた FIR 型バンドパスフィルタを採用して、実測応答波形のノイズの除去を行った。

FIR フィルタの入出力関係は以下のように表される。

$$\begin{aligned} Y(n) &= h_0 X(n) + h_1 X(n-1) + h_2 X(n-2) + \cdots + h_k X(n-k) \\ &= \sum_{i=0}^k h_i X(n-i) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで $Y(n)$ 、 $X(n)$ 、 h_i はそれぞれフィルタ出力、入力、フィルタ係数であり、 k はフィルタ次数を表している。

パスバンドのエッジ周波数を f_s 、 f_u とし、サンプリング周波数を f_s とすると、サンプリング周波数で正規化されたパスバンドエッジの角周波数は、

$$\omega_u = 2\pi f_u / f_s, \quad \omega_l = 2\pi f_l / f_s$$

となり、ここで

$$\omega_c = (\omega_u - \omega_l) / 2, \quad \omega_o = (\omega_u + \omega_l) / 2$$

と置くと、目的とするバンドパスフィルタは、 ω_c をカットオフ角周波数とするローパスフィルタを左右に ω_o だけ平行移動したものとなる。

次に、フーリエ級数を利用したローパスフィルタのフィルタ係数 $h_d(i)$ は、

$$\begin{aligned} h_d(i) &= (1/\pi i) \sin(i\omega_c) \\ i &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots, \pm k \quad (k: \text{フィルタ次数}) \end{aligned} \quad (2)$$

と表されることから、バンドパスフィルタ係数 $h_{bp}(n)$ は、以下の式により得られる。

$$h_{bp}(i) = 2 \cos(i\omega_o) h_d(i) \quad (3)$$

以上のようにして得られたフィルタ係数は、パスバンド中のゲインが振動的に変化する特性を有することになる。そこでこれらに適当な窓関数を用いることにより、パスバンド中のゲインを一定に保持することが可能となる。以下にその式を示す。

$$\begin{aligned} G(i) &= h_{bp}(i) w(i) \\ i &= 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \cdots, \pm k \quad (k: \text{フィルタ次数}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで $w(i)$ は i 次の窓関数であり、 $G(i)$ はバンドパスフィルタのゲインである。

本研究においてはフィルタ次数を 400 とし、窓関数としてハニングウインドを用いている。またカットオフ角周波数は、実験応答波形から得られた 1 次固有振動数に応じて各歩道橋について適宜決定することとした。

2-2. 時刻歴応答解析

強制振動の解析を行うための一般的な手法として、モード解析法と呼ばれるものと、運動方程式をそのまま解く直接積分法がある。本研究では、ニューマーク β 法を用いた直接積分法を採用し、解析を行った。

一般に多自由度系の運動方程式は、

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \cdot \psi(t) \quad (5)$$

として表される。ここで、質量マトリックス M には整合質量法を適用し、 K は剛性マトリックスを表している。減衰マトリックス C にはレーレー減衰を用いており、その係数は実橋における減衰定数の測定値に応じて算定した。また、式(5)における $\psi(t)$ は荷重分配係数ベクトルであり、移動する歩行外力を各荷重作用点に分配するものである。なおニューマーク β 法の係数 β は0.25、時間間隔は0.01secとして解析を行い、解析モデルに関しては2次元骨組構造モデルを採用している。

加えて、歩行外力 $F(t)$ の取り扱い方にはいくつかの方法が提案されているが^{4, 5)}、本研究においては入力波を負の荷重部分（床版の下からの上への荷重）を除外した半余弦波（図-1参照）として計算を行った。

2-3. 遺伝的アルゴリズム (GA)

GA は生物進化の原理に着想を得た手法であり、基本的な遺伝的操作として初期集団となる個体の染色体をランダムに生成し、交叉、突然変異等の処理を経て、各々の個体に対して目的関数を用いることにより適応度の評価を行うものである^{7, 8)}。

本研究においては、交叉率 70%、突然変異率を10%とした単純 GA を用いて、歩行者の体重に対する衝撃係数 α ($0 \leq \alpha \leq 3$) を8ビットの遺伝子列によってコード化し同定を行うこととした。目的関数に関しては、実験値と解析値の二乗差が最小となる、式(6)に示すような関数を用いて適応度を評価した。

$$\text{目的関数 } EL = |AEmax^2 - ACmax^2| \quad (6)$$

$AEmax$: スパン中央点における最大応答加速度実験値 (gal)
 $ACmax$: スパン中央点における最大応答加速度解析値 (gal)

なお収束条件に関しては、式(6)の平方根の値が10.0以下になるか、または最も適応度の高い個体が10個体となった場合に計算を終了することとしている。図-1に本研究における解析手法を示す。

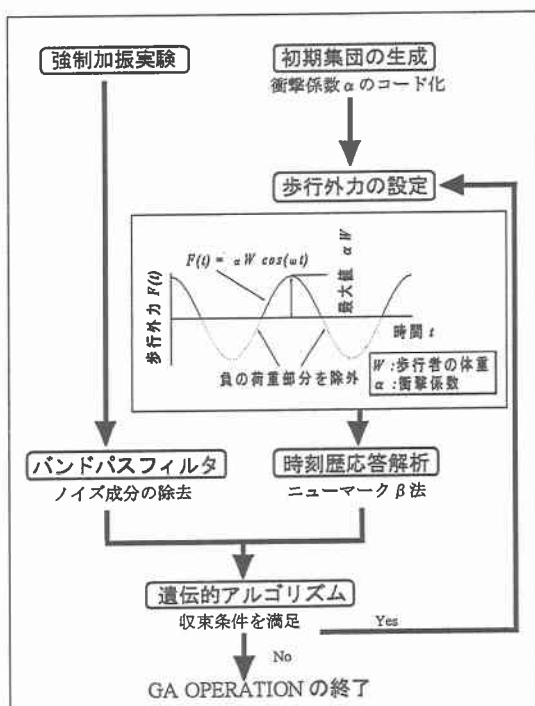


図-1 解析手法

3. 解析結果とその考察

以上のような手法を用いて、実験結果に対して最適な歩行外力の同定を実施した。ここでは解析結果に先立ち、まず著者らが行った実橋実験の概要について述べる。上述のように、横断歩道橋における応答特性の検討を行うために、札幌市内の横断歩道橋11橋について人力による強制加振実験を実施した。測定方法としては、歩道橋のスパンを6分割し1/6点～5/6点の各点に加速度ピックアップを設置して、加速度応答値をA/D変換ボードを介して直接パソコンに記録した。なおサンプリング周波数は200Hzとし、歩行振動数は1.5Hz～3.5Hzおよび固有振動数の6ケースについて実験を実施した。さらに固有振動数が2Hz前後の歩道橋についても検討を加えるために、文献9, 10)に記載されている比較ス

表－１ 実験結果

歩道橋	スパン (m)	有効幅員 (m)	橋梁形式	固有振動数		減衰定数 ζ (%)				最大応答値 (共振時) (gal)
				1次 (Hz)	2次 (Hz)	1次		2次		
						波 形	1/2法	波 形	1/2法	
a橋	15.6	1.5	コンクリート床版1桁	5.52	16.50	1.44	1.57	-	1.68	*50.54
b橋	15.8	1.5	コンクリート床版1桁	5.42	15.34	1.64	1.46	-	0.90	*41.57
c橋	18.5	1.5	コンクリート床版1桁	5.42	16.81	1.33	1.23	-	1.32	*95.4
d橋	20.8	1.5	鋼床版1桁	4.05	13.53	1.33	1.30	-	0.85	221.00
e橋	21.8	1.5	コンクリート床版1桁	3.37	10.85	1.17	1.10	-	1.17	318.20
f橋	22.7	1.5	鋼床版1桁	4.05	13.04	1.24	1.01	-	0.54	259.80
g橋	23.0	1.5 [*]	鋼床版1桁	2.83	9.58	1.18	1.34	-	0.90	274.30
h橋	23.7	1.5	コンクリート床版1桁	3.96	12.99	1.18	0.95	-	1.72	192.30
i橋	28.9	1.5	鋼床版1桁	2.44	8.55	1.49	1.82	-	0.66	204.90
j橋	30.5	1.5	鋼床版1桁	2.93	10.35	1.26	1.12	-	0.68	310.10
k橋	33.1	1.5	鋼床版1桁	2.54	8.94	1.25	1.42	-	0.88	121.40

歩道橋	スパン (m)	有効幅員 (m)	橋梁形式	固有振動数		減衰定数 ζ (%)				最大応答値 (共振時) (kine)
				1次 (Hz)	2次 (Hz)	1次		2次		
						波 形	1/2法	波 形	1/2法	
l橋	40.9	1.5	鋼床版1桁	2.27	8.22	0.10	0.40	-	-	5.30
m橋	43.5	1.5	鋼床版1桁	1.99	7.29	0.30	0.70	0.30	-	3.94
n橋	42.0	2.0	鋼床版桁桁	2.81	-	0.20	-	-	-	4.38
o橋	49.5	4.0	鋼床版桁桁	1.65	5.08	0.60	-	0.60	-	1.18
p橋	48.6	3.0	合成鋼桁桁	1.48	5.08	1.90	2.00	1.10	0.80	0.50

* a橋～c橋は半共振歩行時の応答値である。

パンの長い歩道橋5橋についても同時に解析を行うこととした。これらの結果を表－１に示す。なおa橋～k橋は著者らによる実験結果であり、1橋～p橋は文献9, 10)によるものである。表－１中のa橋～k橋における2次減衰定数に関しては、ノイズや衝撃等の影響により減衰自由振動波形が得られず、したがって1/2法の結果のみを示してある。

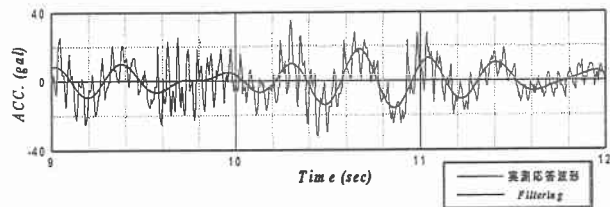
次に解析結果について言及すると、表－２は実測値に対しバンドパスフィルタを適用した結果であり、図－２は得られた応答波形の一例である。まず共振歩行時に関しては卓越する振動成分は1次固有振動数のみであり、その最大応答加速度もかなり大きいため、ノイズあるいは高次モードの振動成分が1次モードの応答に比べて極めて小さく、これらが実際の応答値に与える影響は少ないことが確

認された。また非共振歩行時の応答波形においては、その解析値は実測値のおよそ半分程度になっていることがわかる。この理由として、非共振時では1次モード以外の振動成分もかなり多く含まれており、また最大応答値も比較的小さいことから、実際の応答に対するノイズ等の成分の比が無視できないほど大きいことが容易に理解できる。

さらに、上記で得られた表－１ならびに表－２の結果に対して、GAを用いて衝撃係数の同定を実施した。表－３にその結果を示す。表－３により解析結果は実験結果に非常によく一致し、GAによる歩

表－２ バンドパスフィルタによる解析結果
(最大応答加速度 gal)

歩道橋	スパン	固有振動数 (Hz)	歩行振動数						
			1.5Hz	2.0Hz	2.5Hz	3.0Hz	3.5Hz	共振	
a橋	15.6	5.52	実験値	47.6	33.8	35.9	33.8	33.5	50.5
			Filtering	18.5	19.0	10.1	16.8	14.2	24.0
b橋	15.8	5.42	実験値	32.9	26.3	35.0	34.1	30.2	41.6
			Filtering	14.4	7.7	13.4	10.7	15.5	22.7
c橋	18.5	5.42	実験値	25.7	21.8	26.3	21.8	30.5	95.4
			Filtering	20.8	14.3	18.0	14.7	23.9	78.4
d橋	20.8	4.05	実験値	28.7	77.2	32.3	25.4	39.5	221.0
			Filtering	20.4	58.5	13.7	13.3	28.6	181.1
e橋	21.8	3.37	実験値	18.9	16.4	21.5	69.4	212.9	318.2
			Filtering	7.0	6.7	11.8	60.6	199.2	300.7
f橋	22.7	4.05	実験値	23.0	43.7	21.5	23.6	47.3	259.8
			Filtering	19.6	34.3	10.7	13.9	39.8	226.4
g橋	23.0	2.83	実験値	41.9	31.4	40.7	93.3	64.0	274.3
			Filtering	33.2	15.2	25.2	87.4	46.8	240.9
h橋	23.7	3.96	実験値	52.0	73.0	42.2	28.1	56.5	192.3
			Filtering	10.8	68.4	11.8	14.6	43.7	177.9
i橋	28.9	2.44	実験値	37.4	27.2	116.6	61.6	44.6	204.9
			Filtering	17.5	12.7	83.5	34.4	15.6	177.6
j橋	30.5	2.93	実験値	112.2	113.9	79.3	244.0	78.1	310.1
			Filtering	26.2	11.6	32.0	186.4	34.3	289.1
k橋	33.1	2.54	実験値	89.1	46.7	157.3	62.2	88.2	121.4
			Filtering	6.2	9.2	97.4	38.1	26.8	84.6



図－２ 応答波形の比較

行外力の同定は極めて有効な手法であると考えられる。

これらの結果に基づき、歩行外力の検討を試みる。まず歩行振動数 f を各歩道橋の固有振動数 f_0 で無次元化した場合の、衝撃係数との関係を図-3に示す。図-3より歩行振動数が固有振動数よりも小さくなるに従い、衝撃係数はほぼ1.0程度に収束することがわかる。応答倍率を考慮すれば、一般に入力波の振動数が固有振動数から離れるに伴って、その倍率は急速に0に漸近するため、上述のような結果が得られていると思われる。したがって非共振時の場合には、歩行振動数と固有振動数の比が $0.5 \leq f/f_0 \leq 0.7$ 程度の範囲において、その衝撃係数として約1.0~1.3を用いれば比較的正確な動的応答量の計算が可能になるものと推定される。

次に図中の共振付近 ($f/f_0 = 1.0$ 付近) に着目すると、その応答は各歩道橋の曲げ剛性あるいは減衰定数等に直接依存するため、かなりばらついた結果となっている。よってこれらを振動数領域で表現すると図-4のようになる。なお図中の実線は3次関数で最小二乗近似を行ったもの、また点線は同様に4次関数で近似を行ったものである。

図-4より衝撃係数はおよそ1.5Hz~2.0Hzにおいて1.0程度であり、その後3.0Hz付近において2.5程度、3.0Hz以上ではその傾きはやや小さくなっている。したがって本研究ではこれらの結果に基づき以下のような共振歩行時における歩行外力を提案する。

$$\alpha = 1.00 \quad (1.5\text{Hz} \leq f_0 \leq 2.0\text{Hz})$$
$$\alpha = 1.20 f_0 - 1.40 \quad (2.0\text{Hz} < f_0 \leq 3.0\text{Hz})$$
$$\alpha = 0.67 f_0 + 0.20 \quad (3.0\text{Hz} < f_0)$$
$$\alpha : \text{衝撃係数} \quad f_0 : \text{固有振動数}$$

(7)

図-5は本研究の衝撃係数を、従来しばしば用いられている梶川および Wheeler の歩行外力と比較を行ったものである。これらの結果より、本研究における衝撃係数は両者のほぼ中間的な値となっているが、2.0Hz以上の振動数においては Wheeler が提案する歩行外力とほぼ同様の傾向を示している。これは梶川が歩道橋に対して人間の体重による影響は極めて小さいと

表-3 GA 同定結果

歩道橋	スパン (m)	固有振動数 (Hz)	最大応答値 実験値	解析値	衝撃係数	誤差 (%)
a橋	15.640	5.520	24.00	24.51	*0.98	2.12
b橋	15.800	5.420	22.74	23.19	*0.29	1.98
c橋	18.450	5.420	78.43	78.84	*1.27	0.53
d橋	20.750	4.050	181.14	181.48	1.08	0.19
e橋	21.800	3.370	300.72	300.76	2.78	0.01
f橋	22.700	4.050	226.43	226.67	1.34	0.10
g橋	23.000	2.830	240.87	240.76	1.30	0.04
h橋	23.700	3.960	177.88	177.16	1.37	0.40
i橋	28.890	2.440	177.61	177.77	1.44	0.09
j橋	30.480	2.930	289.09	289.54	2.30	0.17
k橋	33.082	2.520	84.58	84.27	0.75	0.37
歩道橋	スパン (m)	固有振動数 (Hz)	最大応答値 実験値	解析値	衝撃係数	誤差 (%)
l橋	40.880	2.270	5.903	5.26	0.94	0.88
m橋	43.500	1.990	3.937	3.95	0.83	0.26
n橋	42.000	2.810	4.376	4.46	2.25	1.88
o橋	49.500	1.650	1.181	1.20	1.02	1.49
p橋	48.550	1.480	0.499	0.50	0.54	0.11

* a橋~c橋は半共振歩行時の衝撃係数である。

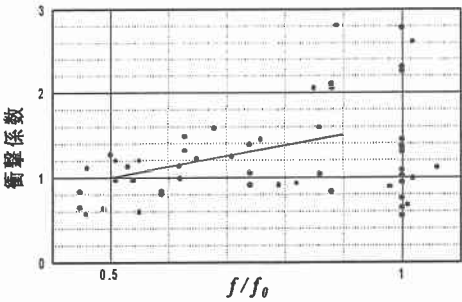


図-3 固有振動数による無次元化

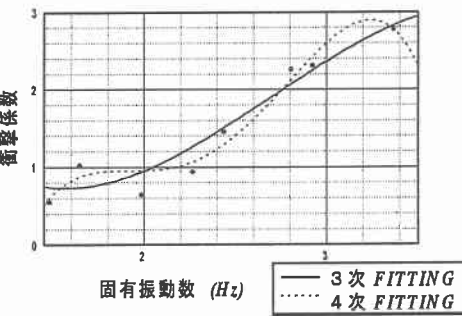


図-4 共振歩行時の衝撃係数

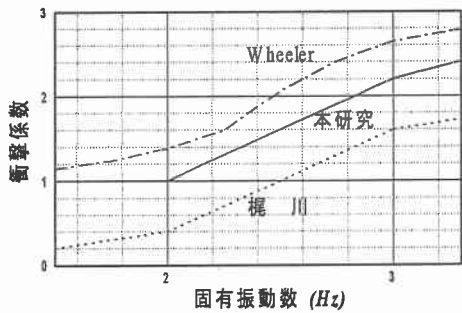


図-5 歩行外力の比較

考え、入力波に余弦波をそのまま用いているため、衝撃係数を小さめに設定しているのに対して、Wheeler は半正弦波を採用していることから、本研究による歩行外力と同様の傾向を示すものと考えられる。

4. あとがき

以上のように本研究では、歩道橋の強制加振実験結果に基づき、バンドパスフィルタを用いた応答波形の補正ならびに GA による歩行外力の同定を行い、設計時における動的応答解析に用いるべき汎用的な歩行外力の提案を試みたものである。

まず、実験結果に対してバンドパスフィルタを適用することにより、ノイズあるいは高次モードの影響を消去して GA によって歩行外力を同定した結果、その解析値は実験値と非常によく一致し、この種の問題に対する GA の応用は極めて有効であることが確認された。

次に歩行外力に関しては、非共振歩行時において歩行振動数と固有振動数の比が $0.5 \leq f / f_0 \leq 0.7$ 程度の範囲について、その衝撃係数として $1.0 \sim 1.3$ を用いれば比較的正確な動的応答量の計算が可能になるものと推定される。また共振歩行時については、解析結果より式(7)に示すような衝撃係数を設定し、梶川の歩行外力ならびに Wheeler の提案する歩行外力と比較を行った結果、本研究の歩行外力は両者の中間的な値となっていることが判明した。

しかしながら本研究で提案を行った歩行外力は、比較的単純な構造の歩道橋における実験結果に基づき設定されたものであり、今後の課題として、例えば斜張橋等のより複雑な構造を有する歩道橋に対して、実橋実験ならびに応答解析を通じて十分な検討を加える必要があると思われる。

《参考文献》

- 1) BSI : Steel, Concrete and Composite Bridges, Part2. Specification for loads, 7.1.5 Vibration serviceability, BS5400, 1978.
- 2) 梶川康男・加藤雅史：歩道橋の使用と振動設計，振動制御コロキウム Part.B 講演論文集，pp.9-14, 1991.
- 3) 小幡卓司・伊藤公彦・林川俊郎・佐藤浩一・亀井与志：歩道橋の動的応答と歩行外力の同定に関する一考察，鋼構造年次論文報告集第4巻，pp.447-454, 1996.
- 4) 梶川康男・津村直宜・角本周：P C 吊床版歩道橋の振動とその使用性，構造工学論文集，Vol.36A, pp.685-695, 1990.
- 5) Wheeler J.E. : Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, Journal of Structural Engineering, Proc. of ASCE, No.ST9, pp.2045-2065, 1982.
- 6) 中村尚五：ビギナーズ デジタルフィルタ，東京電機大学出版局，1995.
- 7) 北野宏明：遺伝的アルゴリズム，産業図書，1993.
- 8) 杉本博之・鹿ビアン麗・山本洋敬：離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究，土木学会論文集，No.471/I-24, pp.685-695, 1990.
- 9) 鈴木森晶・加藤雅史：歩道橋の減衰特性と歩行時振動振幅の検討，構造工学論文集，Vol.39A, pp.811-818, 1993.
- 10) 田中信治：歩道橋の振動特性と使用性設計手法に関する研究，名古屋大学学位論文，1994.