

I-62

歩道橋の動的応答特性とその使用性について

北海道大学工学部 正 員 小幡 卓司
 北海道大学工学部 学生員 窪田 公二
 北海道大学工学部 正 員 林川 俊郎
 北海道大学工学部 正 員 佐藤 浩一
 北海道大学工学部 正 員 及川 昭夫

1. まえがき

我が国においては、昭和40年代からの高度経済成長に伴い、橋梁、ダム等の公共構造物が次々と建設された。一般に、従来の設計法では主に強度の確認による、安全性の追求が中心となっている。しかしながら社会資本の充実により、今日では安全性の追求のみならず構造物の利便性や景観との調和等が、次第に重要視されつつある。特に歩道橋の設計を考えた場合、その使用に際しての快適性、すなわち振動使用性は非常に重要な設計項目の一つであると考えられる。この振動使用性は、20年ほど前から我が国のみならず海外でも注目され、現在までに多くの研究がなされ、各種の基準、照査法等が整備されつつある。主な基準としては、BS 5400¹⁾ (イギリス)、Ontario Code²⁾ (カナダ)、立体横断施設技術基準・同解説³⁾ (日本・以下基準と称す) 等がある。

海外における歩道橋の使用性判定は、対象となる構造物の動的応答量を求め、その結果と人間の振動感覚に基づいた振動限度を比較する、いわば限界状態設計法的な方法が主流となりつつある。我が国においても、歩道橋の固有振動数が2 Hz 前後(1.5Hz~2.3Hz)になるような場合、梶川の方法⁴⁾ 等が用いられるケースが増えてきた。

動的応答量を求めること自体は、今日のパソコンをはじめとしたコンピュータの飛躍的な性能向上で、さほど困難ではなくなった。しかしながら歩道橋の場合には、人間の歩行外力の取り扱い方が意外と難しく、歩行者の衝撃力等の決定すべきパラメータも多い。また歩道橋は、道路橋に比べ主桁の剛性が低いため、高欄、舗装等の影響が相対的に大きくなり、固有値解析の結果と実測値とが一致しない場合もしばしばある。

以上より、本研究では使用性判定に用いる際の、歩道橋の動的応答量の解析手法を検討するために、札幌近郊の横断歩道橋11橋について実験ならびに解析を行った。また、それらの結果から歩行外力の取り扱いおよび剛性評価について考察を加えた。よって、本研究は以上の結果を報告するものである。

2. 実橋実験およびその結果

前述のとおり、本研究では札幌市内における横断歩道橋11橋について人力加振による減衰自由振動実験、ならびに人間一人の歩行による強制加振実験を実施した。

測定方法は、歩道橋のスパンを6分割して1/6点~5/6点の各点に加速度ピックアップを設置し、AD変換ボードを介して、パソコンに直接データを

表-1 実験ケース

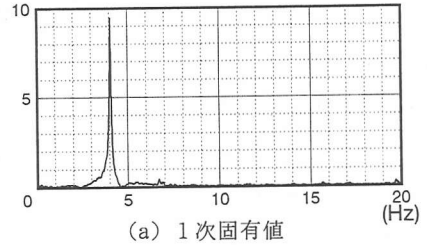
入力することにより加速度応答値を得た。
 用いたサンプリング周数波は200 Hz であ

ケースNo.	1	2	3	4	5	6	7	8
実験	1次固有値	2次固有値	1.5Hz歩行	2.0Hz歩行	2.5Hz歩行	3.0Hz歩行	3.5Hz歩行	共振歩行

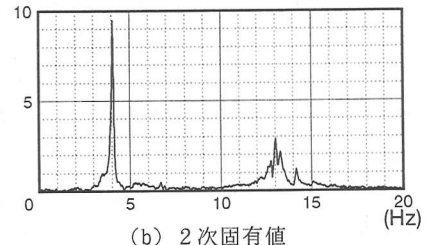
*Dynamic Responce Characteristics and Vibration Serviceability on Pedestrian Bridges
 by Takashi Obata, Kouji Kubota, Toshiro Hayashikawa, Koichi Sato and Akio Oikawa*

る。表-1に実験ケースを示す。1次固有値および、2次固有値の測定についてはそれぞれのモード形状を考慮して、前者はスパンの1/2点、後者は1/4点で跳躍し、歩道橋を加振することにより、実験を行った。また強制加振については、荷重となる歩行者がメトロノームを携帯し、ある周期の発信音に歩調を合わせるにより加振を行った。なお、共振歩行は1次減衰自由振動実験の結果に応じて加振することとした。1次固有振動数が高く、歩行が不可能となるような場合には、その固有振動数の1/2で歩行する、いわば半共振歩行で実験を実施している。なお実験時においては、同時にFFT解析を行い、フーリエスペクトルから固有値を求めた。その結果の一例として図-1に1次および2次固有値のFFT解析の結果を示す。2次固有値測定（1/4点跳躍）の際にも、スペクトルのピークは1次固有値で発生しており、歩道橋では1次モードが2次モードに比べ、卓越することが確認された。

表-2は、実験で得られた各歩道橋の1次および2次固有値と減衰定数である。なお1次減衰定数は、実験から得た波形より算出した値と、パワースペクトル波形より算出する、いわゆるHalf-Power-Methodでの値である。また2次減衰定数に関しては、ノイズまたは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Half-Power-Methodの結果のみ示してある。



(a) 1次固有値



(b) 2次固有値

図-1 FFT解析結果

表-2 実験結果

歩道橋	スパン(m)	1次固有	2次固有	1次減衰定数 ξ (%)		2次減衰定数 ξ (%)	
		振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	波形	1/2法	波形	1/2法
A	22.6	4.05	13.04	1.237	1.005	—	0.538
B	23.3	2.83	9.57	1.176	1.340	—	0.896
C	23.6	3.95	13.04	1.177	0.948	—	1.724
D	21.9	3.37	10.84	1.173	1.104	—	1.174
E	15.5	5.52	16.50	1.438	1.574	—	1.683
F	15.8	5.42	15.33	1.643	1.461	—	0.900
G	29.3	2.44	8.55	1.494	1.817	—	0.657
H	20.8	4.05	13.53	1.332	1.297	—	0.648
I	18.8	5.42	16.70	1.327	1.234	—	1.319
J	31.8	2.54	8.94	1.249	1.424	—	0.882
K	30.4	2.93	10.35	1.258	1.121	—	0.676

3. 歩道橋の剛性評価および解析

3-1 固有値解析に基づく剛性評価

動的応答解析に先立ち、まず歩道橋の剛性を評価するための固有値解析を実施した。具体的には、剛性を① 主桁のみ、② 主桁+床版、③ 主桁+高欄、④ 主桁+床版+高欄の4パターンについて評価を行い、それぞれの各パターンにおける1次固有振動数をグラフ上にプロットし、剛性評価曲線を求め、実験から得た1次固有振動数との交点より、動的応答解析に用いる剛性を決定した。解析モデルに関しては、床板を仮想トラス部材とした3次元モデルを用い、床板、高欄の質量は主桁に付加することとした。図-2に剛性評価曲線の一例を示す。

3-2 動的応答解析

強制振動を解析するための一般的な応答解析法には、モード解析法と呼ばれる方法と、運動方程式をそのまま解く直接数値積分法がある。本研究では、ニューマーク β 法を用いた直接数値積分法を採用し、解析を行った。多自由度系の運動方程式は、次のように表される。

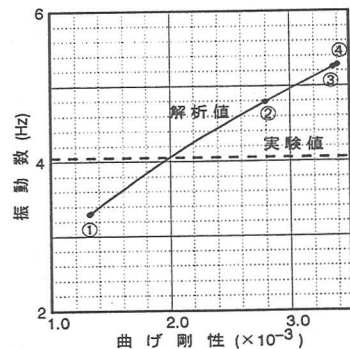


図-2 剛性評価曲線

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \cdot \phi(t) \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 M 、 C 、 K はそれぞれ構造物全体の質量、減衰、剛性マトリックスであり、 $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 u 、 $F(t)$ はそれぞれ加速度ベクトル、速度ベクトル、変位ベクトル、外力ベクトルである。また $\phi(t)$ 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節点に分配するものである。

なお、本研究ではニューマーク β 法の β を1/4、 Δt を0.01secとして解析を行った。したがって、式(1)の右辺の歩行外力を決定すれば、各節点における加速度応答値を得ることができる。

歩行外力の取り扱い方は、いくつかの方法が提案されているが、本研究ではオーストラリアのWheelerの方法⁵⁾、梶川の方法、^{4)、6)}ならびに梶川の方法を若干改良した方法を用いるものとする。

Wheelerの方法とは、人間の歩・走行時の床面への衝撃、歩行速度について、詳細に検討を行った結果より提案された方法で、入力波形としては半正弦波を用いている。その入力パラメータとしては、歩行速度、歩幅、衝撃係数、衝撃作用時間、体重を図表によって与えている。(図-3参照)文献5では、オーストラリアのパスにある22橋の歩道橋に対する、歩行実験結果と解析結果が比較されており、それらはよく一致していることが示されている。この方法は、有限要素法を用いた動的応答解析を行う場合の外力の取り扱い方として、比較的有效であると考えられるが、他の方法に比べ、決定すべき入力パラメータの数が多く、外力の計算がやや煩雑になると思われる。表-3にWheelerの方法の、各振動数におけるそれぞれのパラメータを示す。

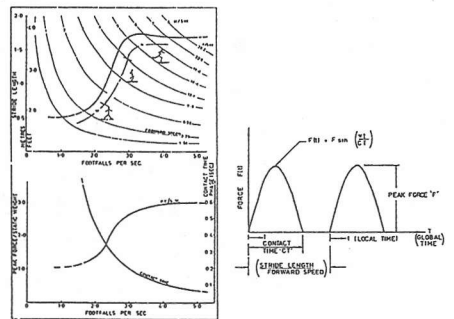


図-3 Wheelerの歩行外力

表-3 歩行外力パラメータ(Wheeler)

歩行振動数 f (Hz)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
歩行速度 v (m/s)	0.8	1.4	3.0	5.0	6.0
歩幅 SL (m)	0.6	0.75	1.25	1.7	1.75
衝撃係数 α	1.2	1.4	2.2	2.7	2.8
衝撃作用時間 CT (s)	0.8	0.5	0.3	0.2	0.15

次に 梶川の方法とは、歩道橋の構造が比較的単純であることから、その解析はいわゆるモード解析法で十分であると考え、歩行外力はWheelerの方法と同様、歩行時の衝撃を考慮して外力振幅を $F_0 = \text{体重} \times \text{衝撃係数}$ 、歩調を周期とした余弦波を採用している。歩行外力は以下の式で表される。

$$F(t) = \alpha W \cos 2\pi f t \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 α は衝撃係数、 W は歩行外力の重量(体重)、 f は歩調である。

衝撃係数 α の取り扱いは、Wheelerの方法とは若干異なり、人間の体重は歩道橋の重量に比べ十分小さいと考え、衝撃力に人間の体重を加味しないものとしている。両者の衝撃係数を比較すると約1.0の差が生じていることがわかる。この方法は、Wheelerの方法と比較して、非常に簡単で取り扱いも容易であるが、梶川の方法は実際の歩行ではあり得ない、床面に対して下から上への、いわば負の荷重が作用する問題点を有している。そこで本研究では、その点を改良した方法も合わせて解析した。改良点としては、

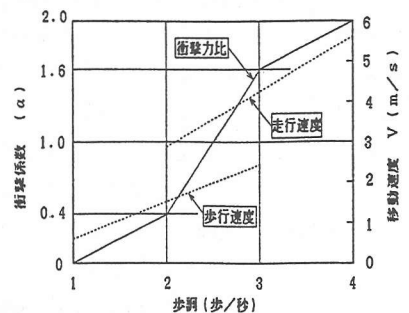
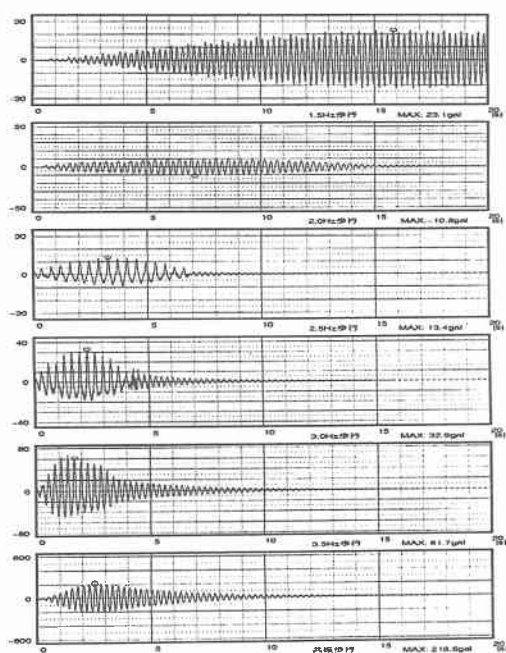


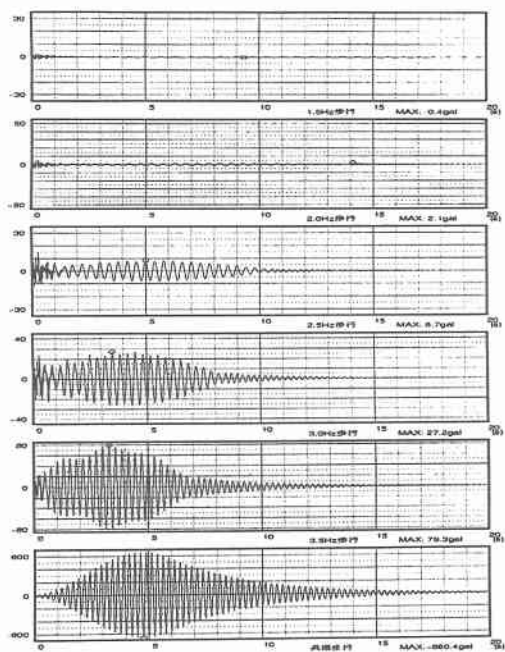
図-4 梶川の歩行外力

表-4 歩行外力パラメータ(梶川)

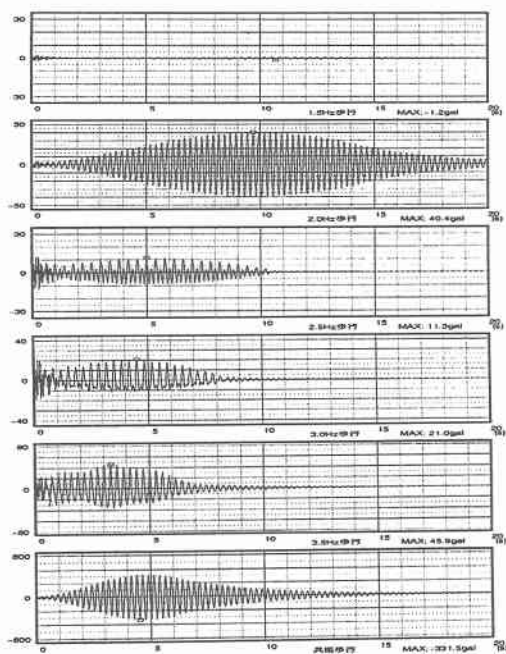
歩行振動数 f (Hz)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
歩行速度 v (m/s)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
衝撃係数 α	0.2	0.4	1.0	1.6	1.8



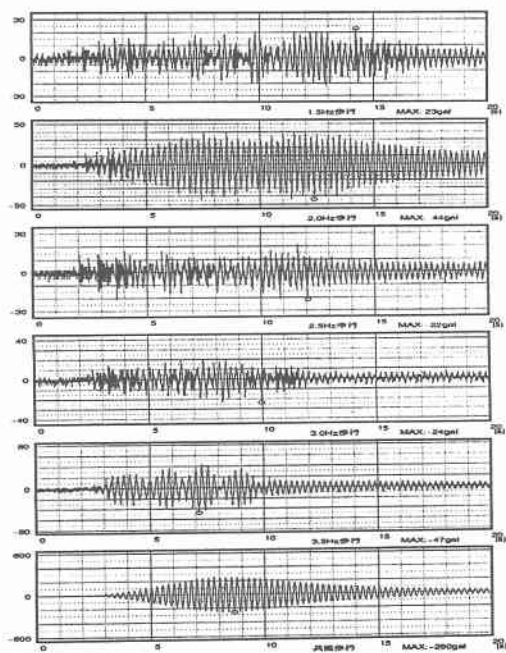
(a) Wheelerの方法



(b) 梶川の方法



(c) 本研究



(d) 実験結果

図-5 加速度波形

負の荷重が作用する際には、その時間での荷重を0としたことである。また、Wheelerの方法と同様、図表から入力パラメータを導き、歩調、歩行速度、衝撃係数、体重を与える。（図-4 参照）表-4 に梶川の方法の各振動数におけるパラメータを示す。

両方法のパラメータを比較すると、歩行速度について、歩調が速くなるにしたがいその差が増大することがわかる。これは、梶川の方法では歩行速度と走行速度を完全に分離して考えているのに対し、Weelerの方法では、歩調の周期が速くなるのに伴い、歩行状態から走行状態へ移行するようなパラメータの設定になっているためである。

4. 解析結果および実験結果の比較

解析結果ならびに実験結果の一例として、1次および2次固有振動数が、それぞれ4.05Hz、13.04HzであるA歩道橋のスパン中央における実験結果と、解析から得られた加速度波形を図-5に、歩行実験におけるFFT解析の一部を図-6に示す。また表-5は、各ケースにおける応答加速度の最大値である。なお解析での最大応答値は、衝撃係数が増大するにつれて、一步目の歩行外力の衝撃がそのまま最大値となるケースがいくつか発生したため、表-5には歩行外力が作用しはじめてから、1.5秒後以降の最大値を示している。

まず実験においては、共振歩行以外の時は応答が衝撃的な波形となっており、この結果は全橋について同様な傾向が認められた。表-5からもわかるように、特に1.5、2.0、2.5Hz等の1次固有値からやや離れた振動数の場合には、その最大応答値が同程度の値をとっている。このような衝撃応答が卓越するような場合、最大値は比較的大きいと判断できるが、それは瞬間的な値であり、応答波形から考慮すればその実効値はかなり小さく、振動使用性に関しては問題が生じる可能性は少ないと思われる。

また、共振振動数の1/2の振動数で歩行した場合は、ピークの値こそ共振時に比べ小さいが、波形、ならびにFFT解析の結果に着目すると、1次の共振状態となっており、上記のように実効値で考慮すると比較的大きい応答値となる可能性を有し、使用性判定の際には注意が必要と考えられる。よって、1次固有振動数の1/2値が2Hz前後となる歩道橋の場合には、半共振状態での検討が必要となるケースもあり得ると推定される。

次に解析結果において、共振歩行時の応答に着目すると、最大応答値には差があるものの、応答波形はどの方法も共振状態を示しており、実験結果と比較してその振動性状はほぼ一致していると思われる。したがって、歩行外力のパラメータを

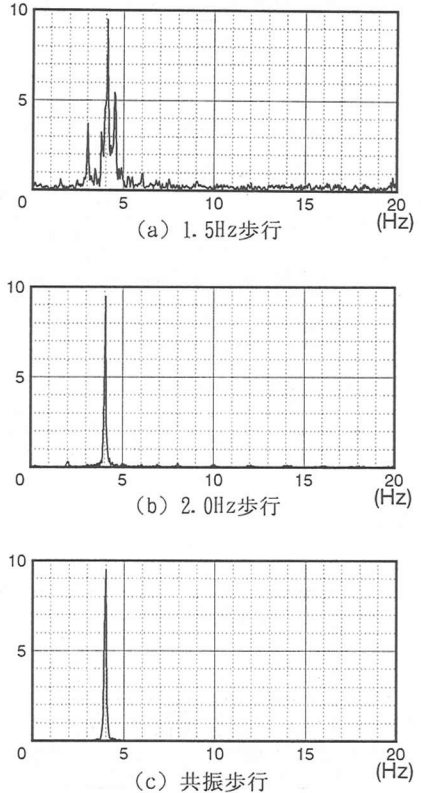


図-6 FFT解析結果

表-5 最大応答加速度

	1.5Hz 歩行				2.0Hz 歩行				2.5Hz 歩行			
	梶川	Wheel	本研究	実験	梶川	Wheel	本研究	実験	梶川	Wheel	本研究	実験
5/6点	0.7	12.0	-1.3	31	-2.0	-5.7	21.0	-41	6.5	7.8	-12.9	29
4/6点	0.5	20.5	-1.3	-33	2.3	-9.5	35.4	-45	7.5	12.1	16.4	-28
3/6点	-0.4	23.1	-1.2	23	2.1	-10.8	40.4	-44	8.7	13.4	11.3	-22
2/6点	0.4	-20.0	-1.3	31	-2.3	-9.1	-34.8	-45	7.4	11.6	14.2	-26
1/6点	0.3	-11.8	-0.9	32	-2.2	5.6	-20.3	-35	-4.2	7.6	12.0	-28

	3.0Hz 歩行				3.5Hz 歩行				共振歩行 (4.05Hz)			
	梶川	Wheel	本研究	実験	梶川	Wheel	本研究	実験	梶川	Wheel	本研究	実験
5/6点	17.3	30.5	14.6	-24	-43.5	35.0	31.1	29	-335.1	-112.6	-174.0	-134
4/6点	23.8	41.1	18.0	-30	68.6	53.6	40.9	-44	-572.7	187.3	-291.9	228
3/6点	27.2	32.9	21.0	-24	79.3	61.7	45.9	-47	-660.4	218.6	-331.5	260
2/6点	23.4	40.0	17.8	-26	68.3	52.6	39.9	-42	-571.1	192.3	286.8	232
1/6点	13.4	29.2	10.6	-24	30.2	34.9	25.2	-26	-329.3	114.1	167.3	112

単位 (gal)

検討することによって共振状態に関しては、比較的容易に解析値を得ることが可能であると推定できる。

半共振歩行の場合は、Wheelerの方法や本研究の方法では、応答波形の卓越振動数が1次固有値と一致し、実験における振動性状をよく表していることがわかる。一方梶川の方法では、その応答は入力振動数と一致し、最大応答値もかなり小さい値となっている。これは、実際には起こり得ない負の荷重が作用しているためであり、共振時以外の解析を行う場合には注意を要するものと思われる。

共振および半共振時以外の解析結果では、衝撃的な波形は認められず、入力した歩行外力の振動数と一致しており、特に梶川の方法の場合その傾向が顕著である。したがって、共振以外の応答が問題となるような場合、このような解析方法では不十分であり、衝撃係数等の歩行外力に関するパラメータも共振時とは別個に考える必要があると思われる。

5. あとがき

以上より本研究は、歩道橋の振動使用性に用いる際の動的応答量の解析手法について、実験ならびに解析を通じて検討を行ったものである。

実験結果からは、全ての加振ケースに対して1次モードが卓越し、また共振時以外では比較的大きな衝撃応答値が得られることが判明した。また、1次固有振動数の1/2で加振した場合、最大応答値は共振時ほどではないものの、振動性状としては1次共振状態となる傾向が認められた。

また、解析結果と実験結果の比較からは、共振時に関してはその振動性状はほぼ一致するものの、共振時以外に関しては解析値は入力した歩行外力の振動数と一致し、このような場合は不十分な結果しか得られないことが明らかとなった。歩道橋の振動使用性を考えた場合、共振時のみならず半共振状態、または共振状態以外の応答値をある程度正確に求める必要があると考えられる。しかしながら現時点では、共振時においては歩行外力のパラメータの若干の見直しで、比較的良好な応答値が得られることが予想されるが、他の場合についてはかなりの検討が必要であり、今後の課題を残す結果となっている。よって今後、衝撃係数等のパラメータが確立できれば、実験値とほぼ一致するような応答値が得られると思われる。

最後に、実験に参加していただいた諸氏に感謝の意を表し、また固有値解析ならびに計算データ作成に助力をいただいた北海道大学工学部土木工学科4年目伊藤公彦氏に謝辞を記すものである。

【参考文献】

- 1) BSI:Steel, Concrete and Composite Bridges, part 2. Specification for loads, 7.1.5 Vibration Serviceability, BS5400, 1978.
- 2) 九州橋梁・構造工学研究会:カナダ・オンタリオ州道路橋設計基準1983年版(共通編・鋼橋編), 2-6, 限界状態照査基準, 2-6.2 使用限界状態・同解説, pp.40-45, 1985.
- 3) 日本道路協会:立体横断施設技術基準・同解説.丸善, 1979.
- 4) 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, 土木学会論文報告集第325号 pp.23-33, 1982.
- 5) Wheeler J.E. :Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, Proc. of ASCE, No. ST9, pp.2045-2065, 1982.
- 6) 梶川 康男・津村 直宣・角本 周:PC吊床板歩道橋の振動と使用性, 構造工学論文集 vol136A pp.685-695, 1990.