

歩道橋の使用限界状態に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF VIBRATION SERVICEABILITY LIMIT STATE ON PEDESTRIAN BRIDGES

小幡 卓司* 窪田 公二** 林川 俊郎*** 佐藤 浩一****

Takashi OBATA, Kouji KUBOTA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO

* 北海道大学助手 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
 ** 北海道大学大学院 土 木 工 学 専 攻 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
 *** 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
 **** 工博 北海道大学教授 工学部土木工学科 (〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

The general method of analyzing of vibration serviceability on pedestrian bridges is accomplished by comparing the dynamic response of structures to vibration serviceability limit state. There are many studies on serviceability limit state, but most of these studies have only analyzed the threshold value of some categories of vibration sensibility.

In this study, the excitation tests for humans are performed and are analyzed sense quantity of 25~75% for some categories of vibration sensibilities by using fuzzy reasoning. Accordingly, serviceability limit states are examined from these results. The major conclusions obtained in this study are shown as follows: In case of that the frequency range is near by 2Hz and the effective value of vibration speed is less than approximately 0.7cm/sec, vibration serviceability will be no problem. When the frequency range is excepted about 2Hz and the effective vibration speed is less than 1.0cm/sec approximately, it is considered that most users will not experience an unpleasant feeling.

Key Words: serviceability limit state, pedestrian bridge, vibration sensibility

1. ま え が き

近年、構造物の設計法は従来の許容応力度設計法から、構造物の限界状態に対して安全性を評価し設計する限界状態設計法に移行しつつある。

歩道橋の振動使用性評価においても、海外では構造物の動的応答量を求め、その結果と振動許容量（以下、忍限度と称す）を比較する手法が一般的である。その主なものとして、BS 5400¹⁾（イギリス）、Ontario Code²⁾（カナダ）、Wheelerの方法³⁾（オーストラリア）等が知られている。我が国においても、およそ20年前から歩道橋の使用性が問題視され、その結果昭和54年に制定された立体横断施設技術基準・同解説⁴⁾（以下基準と称す）において利用者への振動の影響について配慮を加えるよう明記され、具体的には歩道橋の低次の固有振動数が1.5Hz~2.3Hzにならないよう指示されている。

昭和34年から今日まで約1万橋が建設された横断歩道橋も、その利用の不便さ、また景観上の問題等により最近ではほとんど建設されなくなった。代わって、人道橋、遊歩道橋等の建設は近年ますます盛んである。これらの歩道橋の大部分は従来の横断歩道橋に比べ長支間で幅員も広いため、現行の基準を満足することが困難な場合が起き得る。このような、2Hz前後の固有振動数が避けられない場合には、梶川の照査方法⁵⁾がしばしば用いられている。また最近では、田中・加藤が歩道橋の試設計と

その固有値および動的応答解析を通じて、設計時における振動使用性照査手法の提案を行っている^{6), 7)}。これらの方法は実効速度で表現された使用限界値と応答量との比較によって照査を行う方法である。

このような使用限界状態を考慮した使用性の照査を行う場合、問題となるのがその振動許容量、いわゆる振動忍限度である。使用性評価手法に関する研究は、日本のみならず海外でも盛んに行われ、多数の成果が発表されているが、忍限度そのものに関する研究は意外と少なく、特に歩道橋あるいは道路橋に用いる目的で行われた研究は、著者らの知る限りではBlanchardらの研究⁸⁾と小堀・梶川の研究^{9), 10)}のみである。また忍限度に関する研究の大半は、ある振動感覚（例えば、明らかに感じる等）の閾値（反応が生起する確率が50%の値）¹¹⁾を求めたものであり、それぞれの振動感覚における閾値の関係や、あるいは反応が生起する確率が50%以外の感覚量について解析を行った研究はほとんど知られていない。一般に、“明らかに振動を感じる” “不快である” 等の各振動感覚における閾値の等値線は各々ある程度の幅を有しており、閾値のみを用いて忍限度の設定を行えば過大あるいは過小な忍限度となる可能性が非常に高いと推定できる。また、現行の忍限度の中には振動感覚、あるいはその感覚量が明確でないものもあるが、このような場合設計者はその忍限度を盲目的に守らざるを得ないため、歩道橋の設置場所や利用状況に応じた使用性の柔軟な判定は極

めて困難であると思われる。本来、歩道橋の振動使用性というものは、検討の対象となる歩道橋の立地条件、利用者数や利用者層等を考慮して検討される性格のものであり、そのためには恕限度と振動感覚、あるいは恕限度に用いた振動感覚における感覚量等の関係を明確に示す必要があるであろう。なお本研究では、ある振動刺激に対する“少し振動を感じる”あるいは“少し不快感を感じる”等の人間の反応を振動感覚と称し、これらの振動感覚における25%、50%といった反応の生起する確率を感覚量または評定値と呼ぶこととする。

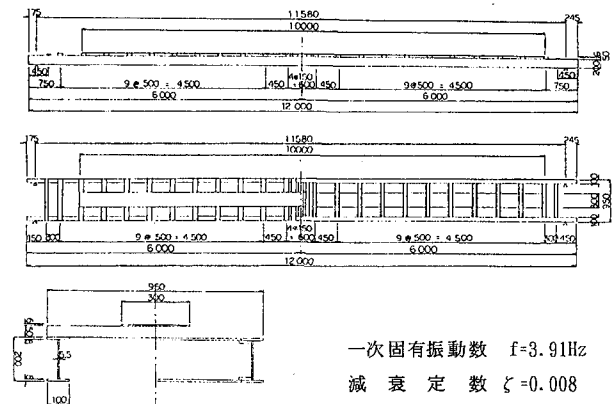
以上を踏まえて、著者らはまず人間の振動感覚の定量的な解析手法を確立するため、文献12においてファジィ推論を応用した定量的解析法について検討を行った。また、文献13においては34ケースの振動刺激に対してそれぞれ51回、延べ1700回以上にのぼる人体に対する強制加振実験を実施してファジィ推論を用いた解析を行い、他の研究結果との比較検討を通じて、歩道橋の動的応答量が振動速度の実効値で約 0.7cm/sec程度以下であればその使用性はほとんど問題なく、また実効値で約 1.0cm/sec程度でも利用者に不快感、不安感等を与えることは極めて少ないと推定できる結果を得た。

本研究では、上記の結果についてさらに詳細な検討を加えるため、振動速度の実効値で $V_{RMS}=0.42\text{cm/sec}\sim 1.13\text{cm/sec}$ （最大値で $V_{MAX}=0.6\text{cm/sec}\sim 1.6\text{cm/sec}$ ）の範囲について再度人体に対する強制加振実験を行い、歩道橋の設計時における使用性評価に用いるための恕限度を明らかにすることを試みた。具体的には、所定の振幅、振動数の組み合わせ27ケースについて、それぞれ26回（被験者数延べ26名）、合計約 700回の実験を実施して、歩道橋の振動として許容しうるか、あるいは不適であるかを含めたアンケート調査を行った。これらの実験結果と文献13における実験結果、または他の研究との比較により、実験の妥当性ならびに振動速度のパラメータとしての有効性等について検討した。さらに、“少し振動を感じる”“明らかに振動を感じる”場合についてファジィ推論を用いた解析を行い、上記の歩道橋の振動としてのアンケート調査結果との比較検討によって振動感覚ならびに感覚量と恕限度の関係を明確にし、それらの結果から振動使用性判定のための恕限度について考察を加えた。したがって本論文はこれらの結果を報告するものである。

2. 強制加振実験

2-1. 実験手法

本研究で用いた実験手法は基本的には文献13で行った実験手法と同様に、図-1に示すような歩道橋を想定した両端にヒンジ支承を有する橋長 $L=12\text{m}$ の機械式鉛直振動台を用いて行った。今回の実験では前述のとおり、歩道橋の使用限界状態について詳細な検討を加えるため、振動速度の実効値で $V_{RMS}=0.42\text{cm/sec}$ （最大値で $V_{MAX}=0.6\text{cm/sec}$ ）、 0.57cm/sec （ 0.8cm/sec ）、 0.7cm/sec （ 1.0cm/sec ）、 0.85cm/sec （ 1.2cm/sec ）、 0.99cm/sec （ 1.4cm/sec ）、 1.13cm/sec （ 1.6cm/sec ）の6ケースについて、振動台上を歩行する被験者に対し振動感覚および歩道橋としての適



実際の実験に際しては、桁上にサーボ型変位計を設置し、AD変換ボードを介してパソコンで振動波形および振動数を実験中常時監視し、被験者の歩行中所定の振動刺激を与えるよう細心の注意を払った。また、上記のとおり今回の被験者は土木工学に関する知識がほぼ皆無に近いため、実験前にミーティングを行い実験の目的、実験方法等について十分な説明を加えて趣旨の徹底を図った。さらに、被験者各人のカテゴリー選択について相互に影響を与えないよう、カテゴリー選択に関して被験者同士が相談等を行うことを禁止して実験を実施した。また実験は3回にわたって行われ、それぞれの被験者は1回目10名、2回目6名、3回目10名である。

表-4 感覚量集計表 (単位: %)

V _{RMS} (cm/s) (V _{MAX})		0.42 (0.60)	0.57 (0.80)	0.71 (1.00)	0.85 (1.20)	0.99 (1.40)	1.13 (1.60)
全	少し感じる	38.5	42.3	52.3	70.8	75.4	82.3
	明らかに感じる	9.0	14.4	22.3	33.8	50.8	60.8
	不適当である	1.3	4.8	7.7	13.1	27.7	40.8
部	不快である	1.3	1.9	1.5	2.3	9.2	13.8
	少し感じる	28.8	29.5	44.2	64.4	72.1	79.8
	明らかに感じる	5.8	6.4	17.3	23.1	42.3	52.9
除	不適当である	1.9	3.8	3.8	6.7	17.3	29.8
	不快である	1.9	1.3	1.0	1.0	3.8	7.7
	少し感じる	57.7	80.8	84.6	96.2	88.5	92.3
の	明らかに感じる	15.4	38.5	42.3	76.9	84.6	92.3
	不適当である	0.0	7.7	23.1	38.5	69.2	84.6
	不快である	0.0	3.8	3.8	7.7	30.8	38.5

表-5 係数表

	少し振動を感じる			
	前回実験	今回実験	今回+前回	小堀・梶川 (歩行位)
25%	1.0948	—	1.0994	—
40%	1.8477	1.1092	1.2561	—
50%	1.3478 (0.9174)	1.0035	1.1182	1.0
60%	1.6632	1.0720	1.0098	—
75%	1.5299	0.8440	0.8917	—
	明らかに振動を感じる			
	前回実験	今回実験	今回+前回	小堀・梶川 (歩行位)
25%	1.4643	0.9010	0.8330	—
40%	1.4347	0.9106	0.7958	—
50%	1.2306	0.8669	0.7096	1.0
60%	1.5556	0.7899	0.8815	—
75%	1.2687	—	—	—

また、Fechnerの法則より感覚量Rと刺激量Sの関係は、

$$R = k \log_{10} S \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、k : $k = C \log_e 10$ (Cは定数)

式(1)を式(2)に代入し刺激閾S₀を単位に考えると、

$$R = k \log_{10} (a \omega^m / S_0) \quad \dots \dots \dots (3)$$

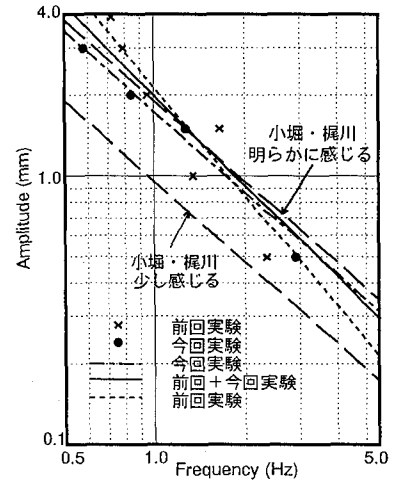
さらに式(3)を変形すると、振幅と振動数の関係が以下のようになれる。

$$\log_{10} a = -m \log_{10} \omega + B \quad \dots \dots \dots (4)$$

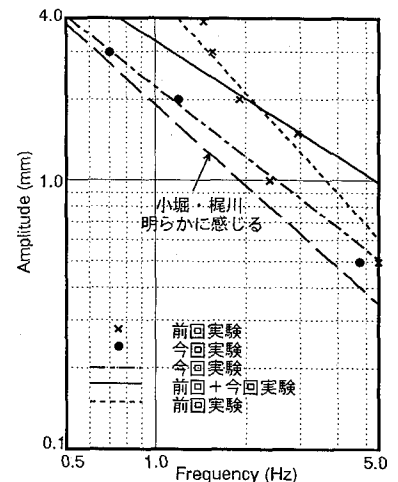
ここで、B : $B = R/k + \log_{10} S_0$

よってこの式の係数mは、等しい感覚を生じさせている刺激に振動数がどの程度関係するかを示す指標であり、感覚量等値線の傾きを示している。表-5に最小2乗法で得られた“少し振動を感じる”および“明らかに振動を感じる”場合の係数mの比較表を示す。これらの結果より、以下のことがわかる。

まず“少し振動を感じる”場合については、図-2 (a)より今回の実験結果は前回の実験結果の特異点を除いた場合¹⁴⁾によく一致することがわかる。したがって今回の実験結果は、“少し振動を感じる”場合に関しては前回の結果と比較してカテゴリー判断基準がほぼ等しいと推定できる。等値線の傾きmは、今回の実験のみの場合と今回に前回の結果を加えて計算を行った場合のいずれも、25%~75%の範囲でほぼ1.0程度になることが確認された。これは、小堀・梶川の歩行位での実験結果と一致する結果である。また振動速度で考えると、“少し振



(a) 少し振動を感じる



(b) 明らかに振動を感じる

図-2 閾値比較図

動を感じる”閾値は0.778cm/sec ($V_{MAX}=1.1$ cm/sec)となり、小堀・梶川の結果よりやや大きめの値となっている。具体的には、本研究の“少し振動を感じる”閾値は小堀・梶川の“明らかに振動を感じる”閾値(0.85cm/sec $V_{MAX}=1.2$ cm/sec)にほぼ等しく、小堀・梶川の“少し振動を感じる”閾値(0.42cm/sec $V_{MAX}=0.6$ cm/sec)は本研究においては、反応が生起する約25%の等値線に相当する。この理由としては、前回と同様に桁振動によって被験者に振動刺激を与えているため、桁通過時に与える刺激の総量が他の研究に比較してかなり小さいためと考えられる。“明らかに振動を感じる”場合に関しては、前回の実験と比較してかなり鋭敏な反応を示している。この原因の1つとして、今回の実験における刺激の最大値が他の研究と比較してかなり小さいことが上げられる。式(1)の指数mを仮に $m=1.0$ として振動刺激の最大値を考えた場合、今回の実験では1.6、前回の実験では15.3、また小堀・梶川の研究⁷⁾では6.28程度である。一般に人間は記憶する動物であり、一度大きい刺激、あるいは長時間刺激を受け続けると、次第に慣れが生じて刺激に対する反応が鈍くなったり、カテゴリー判断基準が変化する傾向があるため、刺激の最大値が小さい場合にはこのような反応の鈍化や、カテゴリー判断基準の変化が生じにくく、よって前回の実験よりも大きな反応を

示していると思われる。また、本研究ではカテゴリー選択肢がただ単に振動感覚を答えるだけでなく、歩道橋として適当か不適当かを判断することを前提としていることも結果に影響を及ぼしているものと推定される。さらには“明らかに振動を感じる”カテゴリーそのものがかかなり曖昧（極端に言えば“少し振動を感じる”場合は、振動刺激を知覚しているので“明らかに振動を感じている”とも考えられる）で“少し振動を感じる”場合と“明らかに振動を感じる”場合の境界が判然としないため、被験者の経験、与える刺激の大小等の理由により結果が左右されやすいためと思われる。

次に、表-5から、式(1)および式(4)のmについて考察を加えると、本実験結果は $m = 0.8 \sim 1.1$ 程度となりほぼ小堀・梶川の実験結果に一致することがわかる。前回の実験結果を加えて計算を行った場合についても、“少し振動を感じる”場合で $m = 0.9 \sim 1.26$ 程度、“明らかに振動を感じる”場合で $m = 0.71 \sim 0.88$ 程度である。したがってこれらの結果は、小堀・梶川の研究と同様に人間に振動感覚を生じさせる刺激としては振動速度が妥当であることを示している。すなわち、振動速度、振動感覚とその感覚量ならびに歩道橋として適当かどうかの関係を示すことによって、忍限度としての具体的な振動速度値を提示することが可能であると考えられる。

また今回の実験結果において振幅が1.0mmの場合は、他の振幅と比較して非常に大きな反応を示している。前述のとおり本研究では、実験は3回にわたって行ったが3回とも同様な傾向が認められた。この原因としては振動数が考えられる。すなわち振幅1.0mmの実験6ケースについて、いわゆる2Hz前後の振動数に含まれる、あるいは近傍(2.55Hz)のものが4ケースあり、特に1.91Hz(0.85cm/sec)以上の場合、歩道橋として不適当と答える人の割合が急激に増大する傾向を有している。表-4を用いて比較すれば、振幅1.0mmの場合0.71cm/sec(1.59Hz)で不適当と答える人が25%以下なのに対し、0.85cm/sec(1.91Hz)の場合では約40%、さらに0.99cm/sec(2.23Hz)では約70%の人が不適当と答えている。同様に、表-3から他の振幅について2Hz付近の結果に着目すれば、振幅0.5mm、0.42cm/sec(1.91Hz)の場合でその反応は振幅2.0mm、0.57cm/sec(0.64Hz)ないしは振幅3.0mm、0.71cm/sec(0.53Hz)と比較してやや小さい程度であり、振幅0.5mm、0.57cm/sec(2.55Hz)についてはその感覚量は両者にほぼ匹敵し、比較的大きめの反応を示していることがわかる。また1.13cm/secの場合でも、振幅が1.0mm以外(振動数1.7Hz以下および5.09Hz)では歩道橋として不適と判断した人が最大で40%程度であるのに対し、振幅1.0mmの場合でも0.71cm/sec(1.91Hz)ではほぼ同様な反応が表れる。以上から、現行の基準にもあるように依然として2Hz前後の振動数には注意が必要であり、また1.5Hz~1.7Hz程度よりも2.0Hz~2.6Hz程度のやや高めの振動数が、より悪影響を及ぼすだろうことが推定できる。

さらに、図-3は歩道橋として不適当であると答えた人の確率である。図-3から、0.85cm/sec付近を境界として不適当と答える確率が急激に増加することがわかる。

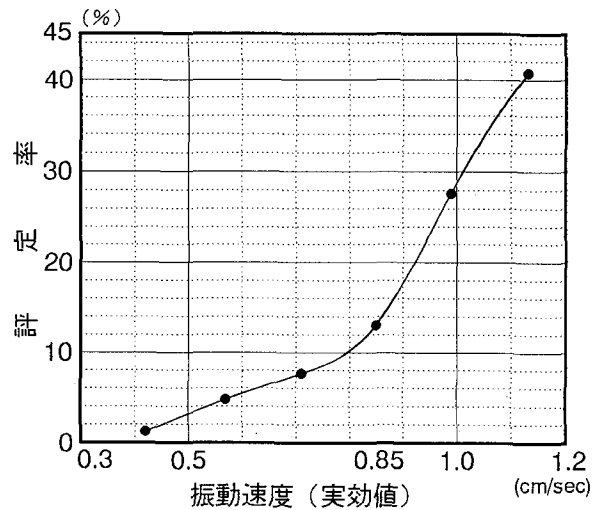


図-3 歩道橋として不適当と答えた人の確率

したがって、これらの結果から振動数で2Hz前後の場合では0.7cm/sec程度で約25%、0.85cm/sec程度で約40%の人が歩道橋として不適当と答えること、0.85cm/sec程度から不適当と答える人が急激に増加すること等を考慮すれば、歩道橋の振動忍限度としておよそ0.7cm/sec($V_{MAX} = 1.0$ cm/sec)程度以下であれば、2Hz前後の固有振動数を有する歩道橋においても、その使用性に問題が生じる可能性は極めて少ないと推測される。

3. 実験結果の解析

本研究では、歩道橋の振動として適当であるかのアンケート調査結果と、振動感覚ならびにその感覚量との関係を明確にするため“少し振動を感じる”および“明らかに振動を感じる”場合に関して本実験結果ならびに、参考のため文献13における実験結果を加えた直接法によるファジィ推論を用いた解析を行った。本研究における推論規則群と、メンバーシップ関数は基本的には著者らの従来の研究を参考とした次のようなものを用いた。まず推論規則に関しては、振幅および振動数を前件部、振動感覚を後件部とした以下のような推論規則を採用することとした¹⁵⁾。

規則例：もし振幅が大きくて振動数が高ければ
不快感を感じる

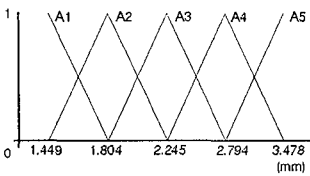
IF x is A and y is F THEN z is S

ここで、A：振幅のファジィ集合

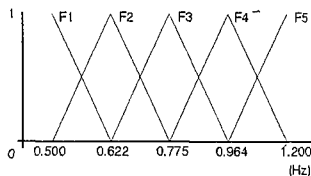
F：振動数のファジィ集合

S：振動感覚のファジィ集合

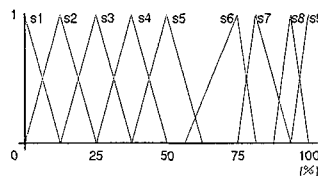
メンバーシップ関数に関しては、従来と同様に一般的な三角形型メンバーシップ関数を用い、前件部の台集合については、人間の振動感覚における刺激と感覚の関係が対数関係にあることを考慮⁹⁾して対数座標を用いている¹²⁾。本研究では、実際の実験値との解の整合性を考慮してメンバーシップ関数の調整を行ったが、そのため50%以上の感覚量については解が周期的に変化する傾向が現れた。したがって、60%、75%等の解析値は1周期分の解に対する平均値を採用することとした。また推論規則数に関しても、前回同様25規則とし、台集合の離散化



(a) 振幅のメンバーシップ関数



(b) 振動数のメンバーシップ関数



(c) 振動感覚のメンバーシップ関数

図-4 メンバーシップ関数

数は17個を用いている。さらに解析範囲については5分割程度に分割し、より厳密な解析が行えるよう配慮した。図-4に今回用いたメンバーシップ関数を、表-6に規則表を示す。

具体的な解析に際しては、前述のとおり実験結果より式(1)の指数 m を1.0とおき、したがって解析結果については振動速度で表現することとする。解析対象の感覚量等値線に関しては、“少し振動を感じる” 場合についてはそれぞれ 25%、40%、50%、60%、75%とし、また “明らかに振動を感じる” 場合は、今回の実験結果が刺激が小さく50%値までしか得られなかったため、25%、40%、50%について解析を行った。図-5に “少し振動を感じる” 場合の解析結果を、図-6に “明らかに振動を感じる” 場合の解析結果を、さらに表-7には今回用いた各カテゴリーの台集合の範囲を示す。加えて図-5および図-6には最小2乗法によって得られた閾値と、小堀・梶川の忍限度を併記した。また表-8は実験、最小2乗法ならびにファジィ推論で得られた振動速度と感覚量の関係である。なお最小2乗法における速度値は1.0Hz～5.0Hzの平均値を示してある。

これらの結果から、“少し振動を感じる” 場合と “明らかに振動を感じる” 場合のそれぞれのファジィ推論と最小2乗法から求めた実効速度の差に着目すると、今回と前回の実験結果を加えた場合における感覚量75%の結果に多少大きな値がでているものの、他の結果ではその差は 0.1cm/sec程度であり、解析値は実験結果と比較して良好な推定結果となっていると思われる。

4. 振動忍限度の検討

以上の実験結果ならびに解析結果を用いて、歩道橋における振動許容量、すなわち振動忍限度の検討を試みる。検討に先立ち、本研究の実験および解析によって得られた知見を以下にまとめる。

- ① 小堀・梶川の研究と同様に、人間に振動感覚を生じさせる刺激のパラメータとして振動速度が妥当であると思われる。
- ② ある振動刺激に対して歩道橋の振動として不適当であると考え人の確率は、0.7cm/sec ($V_{MAX}=1.0$ cm/sec) 程度までは比較的緩やかな増加にとどまっているが、0.85cm/sec ($V_{MAX}=1.2$ cm/sec) 程度から急激に増大する傾向が認められる。
- ③ 振動数が2 Hz前後の場合、以前から指摘されるとおり大きな反応を示す結果が得られたが、1.5Hz～1.7 Hz程度ではその反応はそれほど増大せず、1.9Hz～2.6Hz程度のやや高めの振動数の方がより大きな反応

表-6 規則表

	A1	A2	A3	A4	A5
F1	S1	S2	S3	S4	S5
F2	S2	S3	S4	S5	S6
F3	S3	S4	S5	S6	S7
F4	S4	S5	S6	S7	S8
F5	S5	S6	S7	S8	S9

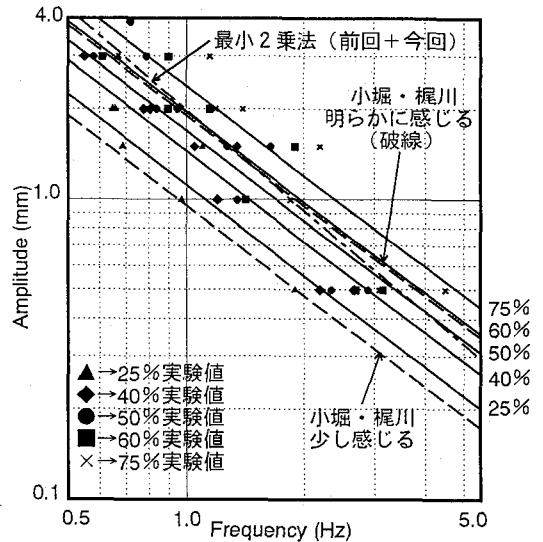


図-5 少し振動を感じる

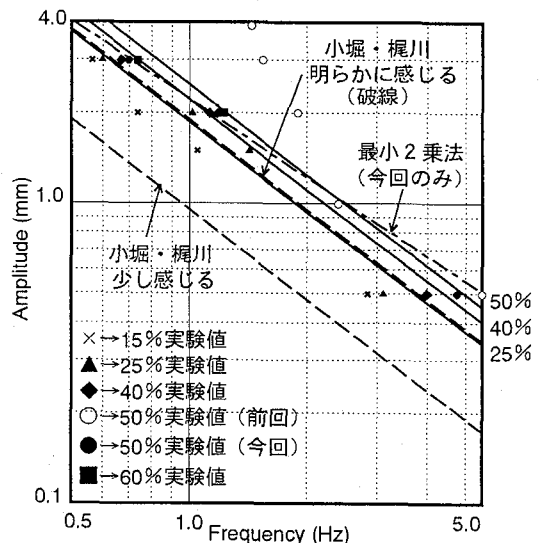


図-6 明らかに振動を感じる

表-7 台集合の範囲

	少し振動を感じる		明らかに振動を感じる	
	振幅(mm)	振動数(Hz)	振幅(mm)	振動数(Hz)
領域1	1.449～3.478	0.50～1.20	2.839～4.997	0.50～0.88
2	0.870～2.121	0.82～2.00	1.785～3.123	0.80～1.40
3	0.512～1.242	1.40～3.40	1.136～2.082	1.20～2.20
4	0.316～0.783	2.22～5.50	0.735～1.281	1.95～3.40
5	—	—	0.454～0.833	3.00～5.50

を示す傾向が認められる。

- ④ ファジィ推論を用いた解析より、振動速度と感覚量の関係を示すことが可能となった。具体的には “少

し振動を感じる” 場合については、0.49cm/sec($V_{MAX}=0.70$ cm/sec)でおよそ25%、0.64cm/sec (0.91cm/sec)で40%、0.75cm/sec(1.07cm/sec)で50%、0.87cm/sec(1.23cm/sec)で60%、1.06cm/sec(1.51cm/sec)で75%であり、“明らかに振動を感じる” 場合では、0.83cm/sec(1.18cm/sec)でおよそ25%、0.99cm/sec(1.40cm/sec)で40%、1.11cm/sec (1.57cm/sec)で50%の感覚量である。

これらの結果に基づき恕限度について考察を加えることとする。まず、実験結果から②の特徴を踏まえて具体的な数値を挙げれば、0.71cm/secで約 8%、0.85cm/secで約13%の人が歩道橋の振動として不適当と答えている。また、2 Hz前後（振幅 1mmの場合の実験結果）に着目すると0.71cm/secでおよそ23%、0.85cm/secで39%の人が不適当と判定した。西脇の研究¹⁶⁾によると、振動刺激に対する反応の変化が生じる因子として、性別、年齢、職業等が上げられており、その中で“学生”、“青年”、“男性”等は比較的反応が鈍重となる因子となっている。

表－ 8 振動速度と感覚量

(a) 実験結果

振動速度 $V_{RMS}(V_{MAX})$ cm/s	少し振動を感じる 全結果	1mm除く 全結果	明らかに振動を感じる 全結果	1mm除く 全結果
0.42 (0.60)	38.5%	28.8%	9.0%	5.8%
0.57 (0.80)	42.3%	29.5%	14.4%	6.4%
0.71 (1.00)	52.3%	44.2%	22.3%	17.3%
0.85 (1.20)	70.8%	64.4%	39.8%	23.1%
0.99 (1.40)	75.4%	72.1%	50.8%	42.3%
1.13 (1.60)	82.3%	79.8%	60.8%	52.9%

(b) 解析結果（少し振動を感じる）

振動速度 ファジィ推論 $V_{RMS}(V_{MAX})$ cm/s	最小 2 乗法 (今回実験のみ) $V_{RMS}(V_{MAX})$ cm/s	m	最小 2 乗法 (今回+前回実験) $V_{RMS}(V_{MAX})$ cm/s	m	感覚量
0.494 (0.699)	—	—	0.518 (0.733)	-1.0394	25%
0.643 (0.909)	0.672 (0.950)	-1.1092	0.589 (0.833)	-1.2561	40%
0.754 (1.067)	0.770 (1.089)	-1.0035	0.794 (1.123)	-1.1182	50%
0.871 (1.232)	0.735 (1.039)	-1.0722	0.986 (1.394)	-1.0098	60%
1.064 (1.505)	1.127 (1.594)	-0.8440	1.312 (1.855)	-0.8917	75%

(c) 解析結果（明らかに振動を感じる）

振動速度 ファジィ推論 $V_{RMS}(V_{MAX})$ cm/s	最小 2 乗法 (今回実験のみ) $V_{RMS}(V_{MAX})$ cm/s	m	感覚量
0.832 (1.176)	0.946 (1.338)	-0.9010	25%
0.990 (1.400)	1.025 (1.450)	-0.9106	40%
1.110 (1.570)	1.129 (1.597)	-0.8669	50%

前述のとおり、本研究の被験者はほぼ全員が20歳前後の男子学生であり、その反応は他の研究に比べやや鈍く、上記とほぼ一致する傾向となっている。したがって、反応が鋭いとされる“女性”ないしは“主婦”等を含めた不特定多数の利用者層について考慮すれば、歩道橋として不適当と判定する人の割合は今回の実験結果よりもさらに増大するだろうことが推定できる。

加えて、0.85cm/sec程度から不適と答える人が急激に増大することを考え合わせれば、歩道橋の低次の固有振動数が2 Hz前後の場合、あるいは立地条件等の理由により使用性の向上が必要な場合は、その振動恕限度として0.7cm/sec程度以下にすることが望ましいと思われる。0.7cm/secにおける感覚量は解析結果より、およそ 50%の人が少し振動を感じ、20%程度の人が明らかに振動を感じる感覚量である。一方、歩道橋の固有振動数が2 Hz前後にならない場合、あるいは多少振動を許容しても良いような場合に関して検討を加えると、実験結果より1.0cm/secでも不適当と答える人が 30%以下であり、また2 Hz前後を除けば20%以下となることから、この程度でも十分な使用性を確保することが可能であると考えられる。1.0cm/secの際の感覚量は、約 70%の人が少し振動を感じ、40%程度の人が明らかに振動を感じる感覚量である。

また、2 Hz前後の振動数の範囲については、従来現行の基準等で1.5Hz～2.3Hzが用いられているが、実験結果からは2 Hz前後で歩行した場合、③のように1.5Hz～1.7 Hzでは反応はそれほど小さくなく、1.9～2.6Hz程度でより大きい反応が生じている。これらを考慮すると、固有振動数が 2.3Hzを少し越えるような歩道橋では、現行の基準は満足していても、その利用状況によっては使用性に問題が生じるケースを有すると推定できる。したがって、注意を必要とすべき2 Hz前後の振動数の範囲としては、現行の基準の上限値を若干大きくし、1.5Hz～2.6Hz程度を考慮する方が使用性判定に際して有効であると考えられる。

加えて文献7では、歩道橋の減衰定数を 0.5%とした場合の振動速度と死荷重強度の関係式が以下の様に表されている。

$$V_E = 1.36/D_m + 0.137 \dots\dots\dots (5)$$

ここで V_E : 振動速度の実効値 (cm/sec)

D_m : 歩道橋の死荷重強度 (tf/m)

表－ 9 各種振動使用性照査法比較表

照 査 方 法		荷 重 状 態	単 位	振動許容値	振 動 感 覚
Leonard		多数の歩行者	cm/s ²	34	—
小堀・梶川・城戸		最頻歩調 1 人	cm/s (RMS)	0.42	少し振動を感じる閾値
BS 5400, Blanchard		共振歩調 1 人	cm/s ²	0.5 f ^{0.5}	—
Wheeler		最頻、共振歩調 1 人	cm/s (MAX)	2.40	少し歩きにくい閾値
松本ら		1 人 / 秒 / m	cm/s ²	98	—
梶川・小堀		単独歩行状態	cm/s (RMS)	1.7	少し歩きにくい閾値
		群集載荷状態	cm/s (RMS)	1.7	—
		単独走行状態	cm/s (RMS)	2.7	大いに歩きにくい閾値
田中・加藤		共振歩行 1 人	cm/s (RMS)	0.85	明らかに振動を感じる閾値
本研究	2 Hz前後	共振歩行 1 人	cm/s (RMS)	0.7	少し振動を感じる約 50 % 値
	使用性重視				明らかに振動を感じる約 20 % 値
	2 Hz前後以外 多少振動を許容				少し振動を感じる約 70 % 値 明らかに振動を感じる約 40 % 値

すなわち、式(5)を用いて評価を行えば、0.7cm/secに対しては2.42tf/m、1.0cm/secの場合は1.58tf/mとなる。一般に、歩道橋の振動特性は、橋梁形式、支間長、減衰定数等に依存し、一概に言及することは困難ではあるが¹⁷⁾、比較的規模が大きく減衰定数が0.5%以上期待できる歩道橋に関しては、設計時において死荷重が概ね2.5tf/m以上となる場合は、その固有振動数が仮に2Hz前後となっても、使用性に問題が生じる可能性はほとんど無いと考えられる。表-9にこれらの結果と歩道橋の振動使用性に関して提案されている各種の照査方法の比較表を示す¹⁸⁾。

5. あとがき

以上のように本研究は、人間の振動感覚についての実験と解析を通じて、歩道橋の振動使用性照査に用いる忍限度について検討を加えたものである。

実験結果からは、まず人間の振動感覚のパラメータとして振動速度が妥当であると思われる結果が得られた。また、ある振動刺激に対して歩道橋の振動として不適当であるとする人の確率は振動速度の実効値で $V_{RMS}=0.7\text{cm/sec}$ ($V_{MAX}=1.0\text{cm/sec}$) 程度までは比較的緩やかに増加するが、 $V_{RMS}=0.85\text{cm/sec}$ ($V_{MAX}=1.2\text{cm/sec}$) 程度から急激に増大する傾向が認められた。2Hz前後の振動数に関しては、現行の基準の範囲(1.5Hz～2.3Hz)よりもやや広い範囲(1.5～2.6Hz)まで注意が必要であると考えられる。また、実験結果に対してファジィ推論を用いた解析を行い、“少し振動を感じる”および“明らかに振動を感じる”場合について振動速度と感覚量の関係を明らかにした。

以上を踏まえて、歩道橋の振動忍限度について検討を行った結果、歩道橋の固有振動数が2Hz前後または立地条件等の理由で使用性の向上が必要な場合は、その振動忍限度として $V_{RMS}=0.7\text{cm/sec}$ ($V_{MAX}=1.0\text{cm/sec}$) 程度、また固有振動数が2Hz前後にならない場合、あるいは多少の振動を許容するような場合については、 $V_{RMS}=1.0\text{cm/sec}$ ($V_{MAX}=1.4\text{cm/sec}$) 程度でも十分な使用性を確保できると考えられる。さらにこれらの結果から、設計時において減衰定数が0.5%以上期待でき、また死荷重が概ね2.5tf/m以上となる歩道橋に関しては使用性に問題が生じる可能性は極めて少ないことが判明した。

しかしながら、これらの結果は人間に対する強制加振実験の結果のみに基づいているため、今後実橋において以上の結果を検証する必要があると思われる。

最後に、実験実施の際に尽力をいただいた北海道大学工学部 及川 昭夫技官に感謝する。また実験に参加していただいた北海道大学教養部ならびに水産学部2年生の諸氏に対し、ここに記して深い謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) BSI:Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2. Specification for loads, 7.1.5 Vibration serviceability, BS 5400, 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) Wheeler J.E. : Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, Proc. of ASCE, No. ST9, pp. 2045～2065, 1982.
- 4) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，丸善，1979.
- 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，土木学会論文報告集第325号，pp. 23～33，1982.
- 6) 田中信治・加藤雅史：設計時における歩道橋の振動使用性照査法，土木学会論文集 No. 471/I-24, pp. 77～84，1993.
- 7) 田中信治・加藤雅史：桁形式歩道橋の設計時振動使用性照査手法の提案，構造工学論文集 Vol. 40A, pp. 693～702，1994.
- 8) Blanchard J., B. L. Davis and J. W. Smith : Design Criteria and Analysis for Dynamic Loading of Foot-Bridges, Proc. of Symposium of Dynamic Behavior of Bridges, Supplementary Report 275, UK TRRL, pp. 90～106, 1977.
- 9) 小堀為雄・梶川康男：道路橋の振動とその振動感覚，土木学会論文報告集第222号，pp. 15～23，1974.
- 10) 小堀為雄・梶川康男：橋梁振動の人間工学的評価法，土木学会論文報告集第230号，pp. 23～31，1974.
- 11) 田中良久：心理学的測定法，東京大学出版会，1971.
- 12) 小幡卓司・林川俊郎・桑島正樹：歩道橋の振動使用性に関する一考察，構造工学論文集 Vol. 39A, pp. 793～799，1993.
- 13) 小幡卓司・林川俊郎・佐藤浩一：歩道橋の通行時における振動感覚について，構造工学論文集 Vol. 40A, pp. 685～692，1994.
- 14) 小幡卓司・林川俊郎・佐藤浩一・及川昭夫：歩道橋の振動忍限度に関する実験と解析について，土木学会北海道支部論文報告集第50号，pp. 64～67，1994.
- 15) 三矢直城・田中一男：C言語による実用ファジィブック，ラッセル社，1989.
- 16) 西脇威夫：歩道橋における振動感覚の数量化と設計への応用，土木学会論文報告集第257号，pp. 1～12，1977.
- 17) 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.
- 18) 梶川康男・中平進夫・薄井王尚：斜め吊材を有する自碇式吊橋形式歩道橋の振動とその使用性，構造工学論文集 Vol. 40A, pp. 703～712，1994.

(1994年 9月14日 受付)