

歩道橋の通行時における振動感覚について

CONSIDERATION AND ANALYSIS OF HUMAN VIBRATION SENSIBILITY ON PEDESTRIAN BRIDGES

小幡 卓司*

林川 俊郎**

佐藤 浩一***

By Takashi OBATA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO

The purposes of this paper are to investigate the human vibration sensibility at the using of pedestrian bridges and to examine serviceability limit states.

In this study, the excitation experiments for human beings are executed and 25~75% sense quantites of verious vibration sensibility are obtained. The experimental results are compared with other studies, and are analyzed by using fuzzy reasoning. The following conclusions are obtained : It is considered that the experimental results are almost proper in comparison with the other studies. In case of the effective value of vibration speed is less than about 0.7cm/sec, vibration serviceability will be no problem. And, in case of the effective vibration speed is about 1.0cm/sec, it is considered that almost users do not feel unpleasant.

Key Words: vibration sensibility, pedestrian bridge, fuzzy reasoning

1. まえがき

昭和34年、我が国初の横断歩道橋が建設されて以来、今日までに約1万橋が全国いたるところに設置された。一般に、横断歩道橋は道路橋に比べ設計荷重が小さく剛性が低いため、比較的小さい動的外力を受けた場合でも振動が生じやすく、直接人間が歩いたり、立ち止まったりする歩道橋の性格上、その振動使用性が注目されるようになった。そのため、横断歩道橋設計のためのガイドとして、まず昭和42年に横断歩道橋設計指針が制定された。さらに昭和54年、立体横断施設技術基準・同解説¹⁾(以下基準と称す)が制定され、今日に至っている。この基準において、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固有振動数が2 Hz前後(1.5 Hz~2.3 Hz)にならないよう指示されている。

近年、いわゆる交通安全施設としての画一的な横断歩道橋の新設が減少する一方、人道橋や側道橋、あるいは遊歩道橋などと称される、単に道路を横断する以外の様々な目的に用いられる歩道橋が数多く建設されている。これらの橋梁は、その大部分が従来の横断歩道橋に比して長支間で幅員もかなり広く、中には道路橋に匹敵するような大規模なものもある。したがって、もともと横断歩道橋のために作られた現行の基準による照査では十分ではなく、避けるべき固有振動数が明記されているため、設計者に強い負担を与える結果となっている。また死荷重が概ね 2.0 tf/m 以上の大規模な歩道橋では、人の歩調と共振した場合でも十分な

* 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)

** 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)

使用性を有し²⁾、さらに人間の走行周期に近い3 Hz前後の振動数にも注意が必要であるとの報告もある³⁾。

海外でも、この種の振動問題は重要視され、イギリスの BS5400⁴⁾ (1978年)、カナダの Ontario code⁵⁾ (1983年) など、各国において振動使用性照査基準が設けられるようになってきた。海外では、使用性照査の対象となる構造物の動的応答量を求め、その解と許容振動量(以下恕限度と称す)を比較することによって評価を行うのが一般的であり、我が国でもある程度以上大規模な歩道橋では、このような使用性評価を行うのが現実的かつ実用的であると思われる。そのためには、明確で理解しやすい恕限度が示される必要がある。

我が国における恕限度の主な研究は、小堀・梶川の研究^{6, 7)}、梶川の研究⁸⁾、三輪・米川の研究⁹⁾ などがある。また海外でもこの種の研究は盛んに行われ、Janeway、Reiher & Meister、Smith、Leonard、ISO基準などが文献 6, 10, 11などに紹介されている。これらの研究の多くは、ある振動感覚(例えば、少し不快である等)の、計量心理学における閾値(反応の生起する確率が50%の値)¹²⁾を求めたものであり、反応が生起する確率が40%あるいは60%といった振動感覚量を明示した研究はほとんど無く、これらの感覚量に関して解析あるいは検討を加えた研究は著者らの知る限り皆無である。したがって恕限度も、ある振動感覚の閾値をそのまま用いる場合が多く、さらには恕限度と感覚量の関係が明確でないものもある。加えて、BS5400や Ontario codeなどのように固定的な恕限度を用いる場合、動的応答量が恕限度より僅かでも下回れば使用性は良好で、少しでも上回れば再設計というような、我が国の基準と同じような問題を生じる可能性を有している。本来、歩道橋の振動使用性というものは、対象となる歩道橋の立地条件(駅前である等)や使用状況(老人の利用者が多い等)を考慮して判定すべきものであろう。

以上の点を踏まえて、本研究では、ある振動刺激に対して延べ50回以上にのぼる人体に対する強制加振実験を実施し、人間の歩道橋通行時における振動感覚を明らかにすることを試みた。具体的には、まず実験結果から、ある振動感覚での25%~75%までの感覚量を求め、閾値に関しては最小2乗法を用いて等値線を計算し、他の代表的な研究と比較検討を行った。なお、本研究では、“明らかに振動を感じる”、“不快である”などの振動刺激に対する人間の反応を振動感覚と呼び、それぞれの振動感覚における、25%、75%といった、反応が生起する確率を感覚量と称することとする。また、実験終了後に被験者を対象として行った、橋梁振動に対する意識調査からも実験の妥当性を検討した。さらに、それぞれの振動感覚における閾値を基準とした、ファジィ推論を用いた解析を行い、25%、40%、60%、75%の各等値線を算出し、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. 振動感覚実験

2-1. 実験方法

実験は、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制作し、所定の振幅および振動数で加振して振動台上を歩行する被験者に対し、振動感覚アンケート調査を実施した。加振方法は桁の支間中央部に接続したクランクをモーターを用いて駆動し、正弦波を発生させ、所定の振幅、振動数を得た。振幅制御はクランク軸の偏心量を変化させることにより、支間中央で0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm、2.0 mm、3.0 mm、4.0 mm、5.0 mmの7ケースの振幅を発生することができる。振動数制御はベルトとプーリーを用いた変速機に加え、抵抗器による電

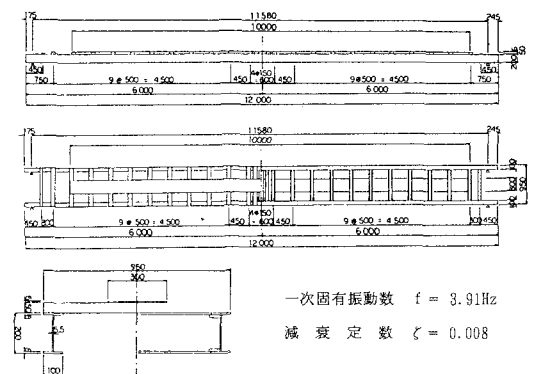


図-1 振動台一般図

圧調整を行うことにより、約0.5 Hz~約12 Hzまで無段階に制御することが可能である。また振動波形については、桁上にサーボ型加速度計を設置し、AD変換ボードを介して、パソコンにデジタルデータとして入力し、同時にFFT解析を行って、振動数を含め実験中常時監視し、人間の歩行による影響を極力排除するよう努めた。また、アンケート調査は計量心理学における系列カテゴリー法を採用した。系列カテゴリー法とは、

被験者に対してあらかじめ用意された数段階に順序づけされたカテゴリーの中から、ある刺激がどれに該当するかを評定させる手法である。一般的に刺激提示は単一刺激で行うことが多い。

具体的な実験手法は、実際の歩道橋上を歩行する場合により等しい状況を設定するため、前述の振動台を屋外に設置し、表-1に示す、振幅および振動数の組合せで加振した。被験者には振動に関する情報をいっさい与えず、1人ずつ振動台上を歩行させ、その際どのように感じたかを表-2に示す5段階のカテゴリーの中から選択し、記録用紙に記入することとした。被験者の歩行方法については、特別には指定せず、通常実際の歩道橋を歩行する場合と同様に、ごく自然に歩行するよう依頼した。実験回数については、ある1つの振動刺激について、15名の被験者に対してランダムに複数回行うことにより、延べ51回の測定を実施した。被験者は当研究室に所属する職員および学生に依頼し、年齢は大半が22~25歳、30代と40代がそれぞれ1名ずつであり、性別は全員が男性である。また予備実験により、振動台の地上高(約1.0m)や歩み版の幅員(約30cm)などが被験者のカテゴリー判断に心理的影響を与えないことを確認し、合わせて実験そのものの安全性も十分であることを判定した。さらに、実験終了後に各被験者が橋梁の振動についてどのような意識を持っているか、あるいは実験にどのような態度で臨んだかなどについて聞き取り調査を行い、実験結果を評価する際の一助とした。写真-1に実験風景を示す。

2-2. 実験結果

実験結果は、各振動刺激に対して被験者がどのカテゴリーを選択したか表-3のような度数分布を作成し、各カテゴリーにおける百分率を計算してその値を各刺激に対する評価値とした。一般に人間の振動感覚における刺激と感覚の関係は対数関係にあると言われている⁶⁾。したがって上記で得られた各カ

表-1 振動刺激

振幅(mm)	振 動 数 (Hz)
0.5	0.78 1.17 1.95 3.52 6.45 11.5
1.0	0.78 1.17 1.95 3.52 6.25 11.3
1.5	0.78 1.37 2.50 4.49 7.81
2.0	0.58 1.17 1.95 3.91
3.0	0.78 1.37 2.34 4.29 7.62
4.0	0.58 0.98 3.32 5.86
5.0	0.78 1.56 2.73 4.88

表-2 振動感覚カテゴリー

No	振動感覚のカテゴリー
①	振動を感じない
②	少し振動を感じる
③	明らかに振動を感じる
④	少し不快感を感じる
⑤	大いに不快感を感じる



写真-1 実験風景

表-3 実験結果集計表

振 幅	0.5						1.0						1.5					
振動数	0.78	1.17	1.95	3.52	6.45	11.5	0.78	1.17	1.95	3.52	6.25	11.3	0.78	1.37	2.50	4.49	7.81	
カテゴリー 1	46	49	37	5	1	0	48	32	5	0	0	0	49	30	1	0	1	
カテゴリー 2	5	2	14	38	18	0	3	19	31	1	0	0	2	19	3	1	0	
カテゴリー 3	0	0	0	8	28	12	0	0	15	31	12	0	0	2	2	32	4	
カテゴリー 4	0	0	0	0	4	24	0	0	0	17	26	5	0	0	0	14	29	
カテゴリー 5	0	0	0	0	0	15	0	0	0	2	13	46	0	0	0	4	17	
評定率 2	9.8	3.9	27.5	90.2	98.0	100.	5.9	37.3	90.2	100.	100.	100.	3.9	41.2	83.3	100.	98.0	
評定率 3	0.0	0.0	0.0	15.6	62.7	100.	0.0	0.0	29.4	98.0	100.	100.	0.0	3.9	33.0	98.0	98.0	
評定率 4	0.0	0.0	0.0	0.0	7.8	76.5	0.0	0.0	0.0	37.3	76.4	100.	0.0	0.0	0.0	35.3	90.2	
評定率 5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	29.4	0.0	0.0	0.0	3.9	25.5	90.2	0.0	0.0	0.0	7.8	33.3	
振 幅	2.0						3.0						4.0					
振動数	0.58	1.17	1.95	3.91	0.78	1.37	2.34	4.29	7.62	0.58	0.98	3.32	5.86	0.78	1.56	2.73	4.88	
カテゴリー 1	41	19	2	0	26	3	0	0	0	27	9	0	0	9	0	0	0	
カテゴリー 2	10	26	22	1	22	18	2	0	0	14	26	0	0	28	4	1	0	
カテゴリー 3	0	6	21	16	1	18	28	4	0	0	16	7	0	13	32	8	0	
カテゴリー 4	0	0	6	24	2	3	15	23	1	0	0	31	5	0	13	24	4	
カテゴリー 5	0	0	0	10	0	1	6	24	50	0	0	13	46	1	2	18	47	
評定率 2	19.6	62.7	96.1	100.	49.0	94.1	100.	100.	100.	27.5	82.4	100.	100.	82.4	100.	100.	100.	
評定率 3	0.0	11.7	52.9	98.0	5.9	43.1	96.0	100.	100.	0.0	31.4	100.	100.	27.5	92.2	98.0	100.	
評定率 4	0.0	0.0	11.8	66.7	3.9	7.8	41.2	92.2	100.	0.0	0.0	86.3	100.	2.0	29.4	82.4	100.	
評定率 5	0.0	0.0	0.0	19.6	0.0	2.0	11.8	47.1	98.0	0.0	0.0	25.5	90.2	2.0	3.9	35.3	92.2	

テゴリーの評価値を両対数グラフ上に展開し、比例配分によって、閾値である50%の評価値を算出した。さらに50%値から最小2乗法を用いて、各カテゴリーにおける閾値の等値線を得た。それらの結果を図-2に示す。また、図-3は、本研究の”明らかに振動を感じる”および”少し不快である”場合の閾値と他の代表的な研究による閾値または忍限度の比較図である。

小堀・梶川の研究^{6, 7)}によれば、振動の刺激Sとして次の関係式を与えている。

$$S = a \omega^m \dots \dots \dots (1)$$

ここで、a：振動の変位振幅（片振幅） ω ：円振動数

m：実験で求められる定数

また、Fechnerの法則から、感覚量Rと刺激量Sの関係は

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

ここで、k：k = C log₁₀10 Cは定数

式(1)を式(2)に代入し、刺激閾Soを単位に考えると

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

さらに式(3)を変形すると以下のような、振幅と振動数の関係式が得られる。

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

ここで、B：B = R/k + log₁₀S_o。

したがって図-2の等値線の勾配が式(4)の係数mによって与えられることがわかる。表-4に本研究で得られたmおよびBの値と小堀・梶川の実験で得られた値を示す。

まず、表-4に着目すると、本実験結果は”少し振動を感じる”場合をのぞき小堀・梶川の弛緩した立体の実験結果に近いことがわかる。加えて、一般的に振動刺激が増大するとmが大きくなり等値線の勾配が急になると言われており⁶⁾、この傾向とも一致する。”少し振動を感じる”場合については、まず振動刺激が他のカテゴリーに比較して小さいため得られた結果のバラツキが大きく、測定点数も少ないこと、刺激が小さい場合被験者の振動に対する期待感（そろそろ感じるのではないかという感情）が大きいこと、さらに最小2乗法を用いているため、データのバラツキによって結果が大きく変化しやすいことなどが原因として考えられる。特に、最小2乗法に関しては、他のデータと比較して特異点となると思われるデータを除外して計算を行うと、mは約1.0程度に収束することを確認した。

次に、図-3に着目すると、本研究で得られた閾値は、過去の研究^{6)~11)}と比較して、振動刺激に対する反応が、若干鈍重な結果となっている。これは、桁振動によって被験者に振動刺激を与えるため、桁端部付近では刺激量が小さく、桁中央部付近でのみ所定の刺激量となることに加え、被験者のほぼ全員が男子大学生で体力的に優れており、さらに全員が橋梁工学を専攻しているため、橋梁振動に対して予備知識があることなどが原因として考えられる。しかしながら、今回の実験方法は、現実には歩行者が歩道橋通過時に受ける振動刺激に極めて近く、また、”少し不快である”場合の閾値が全体の中程度であることを考慮す

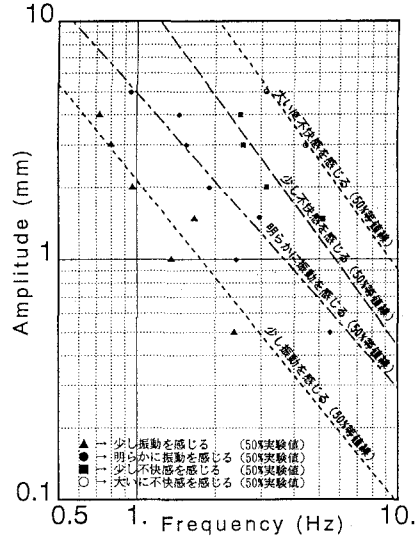


図-2 50%等値線

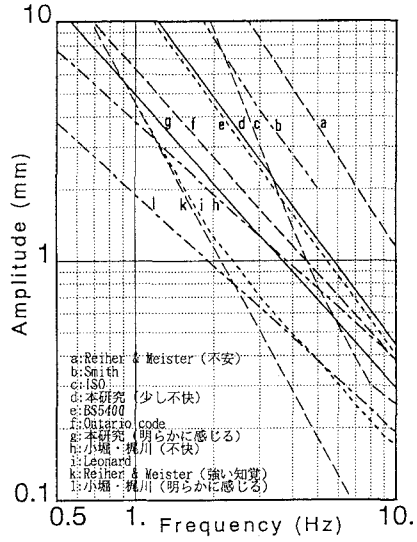


図-3 主な'不快'の結果

表-4 係数表

	本 研 究		小堀・梶川	
	m	B	m (立位)	m (歩行位)
少し感じる	1.3478	1.4066	1.0	約 1.0
明らかに感じる	1.2306	1.6775	1.0	
少し不快である	1.4862	2.3160	1.4	
大いに不快である	1.5167	2.6832	1.6	

ると本研究の実験結果はほぼ妥当であると思われる。

さらに、実験終了後の聞き取り調査では、日常生活において大部分の者が橋の揺れを感じているが（15名中13名）、そのうちの多くは橋の揺れに対して「特に気にならないので揺れてもかまわない」（9名）と答え、「気持ちの良いものではないので揺れない方がよい」と答えた者は4名にとどまった。このことは、本研究が全体にやや鈍い反応を示している根拠となる結果であろう。また、どのような揺れを不快と感じるかという質問には「船に乗っている時のように、大きな振幅でゆったり揺れるもの」を上げる声や、「脚に震えが来るような早い揺れの方が好ましくない」と答える者など、様々な意見が挙がった。しかしながら、このような意識の違いは各刺激のカテゴリー判断には明確な違いとして現れず、刺激の弁別や不快かどうかの判断に関してはほぼ同等の評価基準を持っていると思われる、今回の実験結果は被験者のカテゴリー判断基準の保持に関して十分信頼できるものであると判断できる。

以上の結果を踏まえて、本研究では閾値以外の感覚量、すなわち反応が生起する確率が25%、40%、60%および75%となる評定値を50%値の場合と同様の手法を用いて求めることを試みた。しかしながら、各カテゴリーともデータのバラツキが大きく、最小2乗法を用いた場合、各等値線が交差する現象がしばしば発生し、理論的には不十分な結果しか得られないことが判明した。図-4は最小2乗法で唯一得られた、“明らかに振動を感じる”場合の25%~75%の等値線である。図-4から、各等値線は比較的狭い帯域に分布することがわかる。

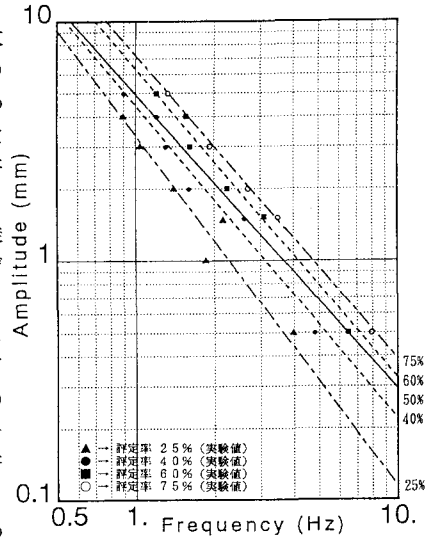
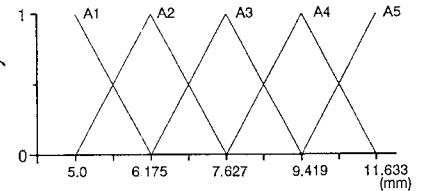
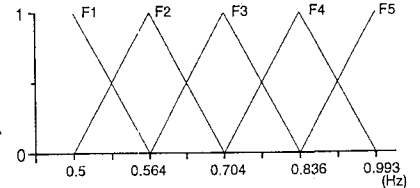


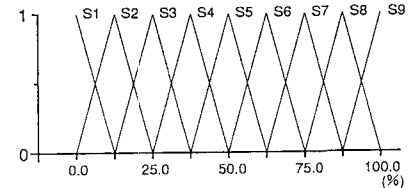
図-4 25%~75%の等値線



(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-5 メンバーシップ関数

3. 実験結果の解析と考察

3-1. 解析手法

以上で得られた実験結果に基づき、ある振動刺激に対してどの程度の感覚量であるかを数値で得る手段として、直接法によるファジィ推論を用いた解析を行った。ファジィ推論を行うためには、IF-THEN 形式で表現された推論規則群とそれに対応したメンバーシップ関数（ファジィラベル）が必要である。本研究では振幅、振動数および振動感覚をパラメータとした前件部2変数、後件部1変数からなる次のような推論規則を用いる¹³⁾。

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

また、メンバーシップ関数は一般的な三角形メンバーシップ関数を採用し、前件部に関しては、人間の振動感覚における刺激と感覚の関係が対数関係である⁹⁾ことを考慮して、振幅および振動数の台集合に対数座標を用いることとした¹³⁾。実験結果から、感覚量が25~75%に至る分布域がかなり狭いことが判明したため、台集合の範囲を各カテゴリーにおいて5~7程度に分割して解析を行った。なお、今回の解析では、1回の計算による解析範囲が非常に限定されているため、ある程度少ない規則数でも解の線形性および一意性が確保されていると考え、推論規則を25組、台集合の離散化数を17個に設定した。これに応じて、メンバーシップ関数は前件部についてそれぞれ5個づつ、

後件部に関しては9個のファジィラベルを作成し解析に用いた。図-5にメンバーシップ関数の一例を、表-5に規則表を、また図-6には”明らかに振動を感じる”場合の台集合の分割図を示す。

表-5 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

3-2. 解析結果とその考察

前述のとおり、各カテゴリーについて台集合の範囲を5~7程度に分割し、それぞれ感覚量が25%、40%、50%、60%、および75%となる評定率について解析を行った。表-6に各カテゴリーにおける台集合の範囲を、図-7~10に25%~75%の等値線を、さらに表-7にはそれぞれの等値線の式(4)における、係数mとBを示す。また、図-7~10には比較のため、現在我が国でよく用いられている小堀・梶川の歩行位における恕限度⁷⁾も併記した。図-8および図-9にはBS5400とOntario Codeの恕限度も示してある。

図-7~10より評定率50%の等値線は、各カテゴリーとも実験値とよく一致し、50%以外の評定率についても、解析結果の等値線は、各実験値に対して、よい近似を与えていると思われる。したがって、本研究におけるメンバーシップ関数および台集合の設定は、ほぼ妥当であると考えられる。25%~75%に至る評定率の分布域は、各カテゴリーともあまり差は無く、比較的狭い範囲に集中していることが解析により確認された。各カテゴリーの分布域の重複はあまり大きくなく、特に”少し振動を感じる”カテゴリーと”明らかに振動を感じる”カテゴリーでは、両者の分布域はほとんど重なり合わず、75%程度の人がわずかな揺れを認識している場合でも、明らかに揺れていると感じる人は、全体の25%程度にすぎないことが図-7および図-8から理解できる。このことは振動使用性問題における恕限度を考える上で非常に重要な要素であると思われる。なぜなら、現在用いられている恕限度の多くは、ある振動感覚についての閾値である評定率が50%の等値線のみを考慮して決定されている。しかしながら、一般的に、振動感覚の各カテゴリーにおける閾値の等値線は、それぞれある程度の幅を有しており、閾値のみを考慮した場合、過小あるいは過大な恕限度を設定してしまう可能性が非常に高いと考えられる。本研究では、各カテゴリーの閾値間の評定率を非常に明確な形で、また解析的に得ることができるので、歩道橋利用者の振動に対する反応や設置場所ならびに利用状況等を十分に考慮した恕限度を、極めて柔軟に設定することが可能である。また、検討対象の橋梁の動的応答量を求めることにより、容易に利用者の感覚量を把握できるため、

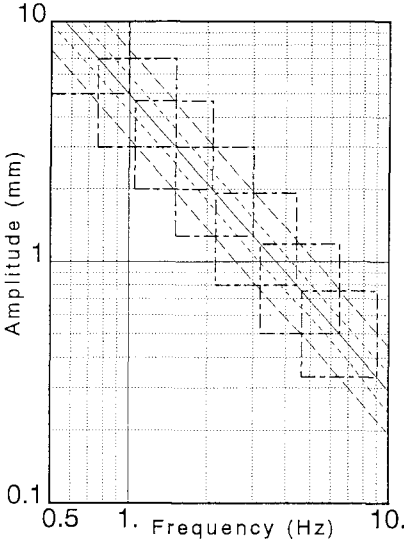


図-6 分割図

表-6 各カテゴリーの台集合

	少し振動を感じる		明らかに振動を感じる		少し不快感を感じる		大いに不快感を感じる	
	振 幅 (mm)	振 動 数 (Hz)	振 幅 (mm)	振 動 数 (Hz)	振 幅 (mm)	振 動 数 (Hz)	振 幅 (mm)	振 動 数 (Hz)
領域 1	2.0~5.452	0.5~1.052	5.0~11.323	0.5~0.993	4.812~11.70	1.1~2.0	5.61~16.051	1.5~3.0
2	1.3~3.464	0.7~1.448	3.0~7.0	0.755~1.504	2.634~7.029	1.55~3.0	3.63~10.376	2.0~4.0
3	0.8~2.142	1.0~2.076	2.0~4.668	1.05~2.091	1.718~4.812	2.0~4.0	2.0~5.610	3.0~5.92
4	0.487~1.298	1.45~3.0	1.283~3.0	1.504~3.0	1.0~2.701	2.95~5.756	1.267~3.559	4.05~8.0
5	0.331~0.842	2.0~4.0	0.8~1.933	2.15~4.402	0.613~1.718	4.0~8.0	0.7~1.961	6.0~11.83
6	0.191~0.487	3.0~6.0	0.5~1.185	3.2~6.45	0.440~1.215	5.05~10.0	—	—
7	0.111~0.282	4.5~9.0	0.332~0.758	4.6~9.0	—	—	—	—

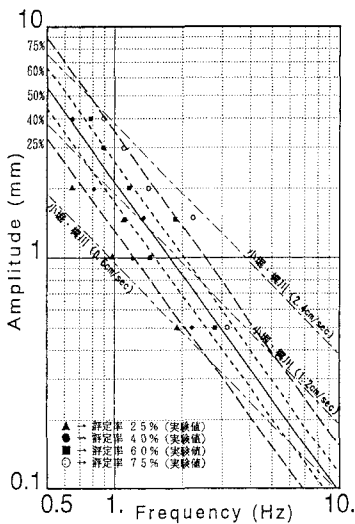


図-7 少し振動を感じる

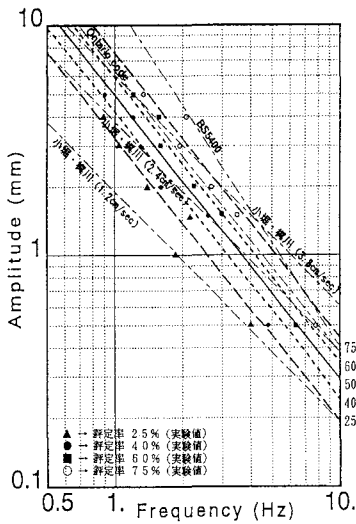


図-8 明らかに振動を感じる

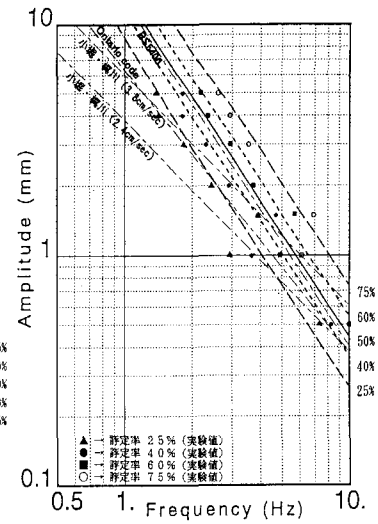


図-9 少し不快感を感じる

表-7 係数表

	カテゴリ-1		カテゴリ-2		カテゴリ-3		カテゴリ-4	
	m	B	m	B	m	B	m	B
評定率 25%	1.3336	1.1814	1.2173	1.4767	1.4804	2.6859	1.5104	2.4488
40%	1.3331	1.3046	1.2238	1.5928	1.4732	2.2102	1.5141	2.5869
50%	1.3478	1.4066	1.2306	1.6775	1.4862	2.3160	1.5167	2.6832
60%	1.3524	1.4878	1.2307	1.7457	1.4797	2.3881	1.5206	2.7820
75%	1.3611	1.6329	1.2311	1.8577	1.4748	2.5146	1.5258	2.9231

* カテゴリ-1 → 少し振動を感じる。 カテゴリ-2 → 明らかに振動を感じる。

カテゴリ-3 → 少し不快感を感じる。カテゴリ-4 → 大いに不快感を感じる。

設計者が独自の判断でその振動使用性を検討することもできると思われる。

図-7の少し振動を感じる場合の解析結果と小堀・梶川の恕限度を、振動使用性を検討する上で最も問題となる振動数が約1.5Hz～3Hz程度の範囲で比較すると、小堀・梶川の”少し感じる”恕限度（最大速度0.6cm/sec、実効速度0.42cm/sec）と”明らかに感じる”

恕限度（最大速度1.2cm/sec、実効速度0.85cm/sec）は、本研究における”少し振動を感じる”場合の、前者は約25%、後者は約50%～60%に相当することがわかる。これらの結果から、振動速度が最大値で1.0cm/sec（実効値で0.71cm/sec）程度であれば、1.5Hzで約40%、3Hzで約50%の人が少し振動を感じる程度であり、振動使用性に関して問題が生じる可能性は少ないであろう。また、多少揺れを許容するような場合、振動速度の最大値で約1.4cm/sec（実効値で約1.0cm/sec）程度でも、利用者が揺れを知覚する場合は増加するが、その感覚が不快感、不安感などに至るケースはあまり無いと推定される。

4. あとがき

以上のように、本研究は人間の振動感覚に着目し、人体に対する強制加振実験ならびにファジィ推論を用いた解析を行い、歩道橋の振動使用性照査に用いる恕限度について検討を加えたものである。

実験結果は従来の研究と比較してほぼ妥当であり、恕限度を検討する上の基礎的データとして十分信頼できるものと考えられる。これらのデータに基づいて、本研究ではそれぞれの振動感覚について、反応が生起

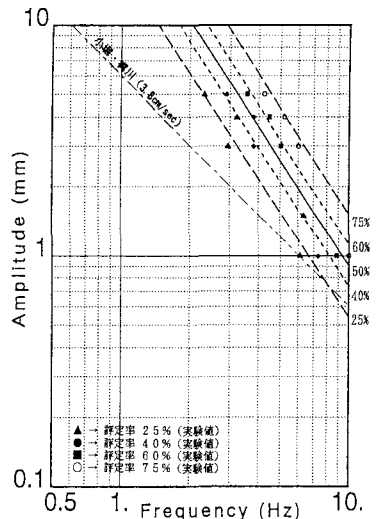


図-10 大いに不快感を感じる

する確率が25%～75%の感覚量等値線を解析によって求めた。

その結果、25%～75%に至る感覚量の分布域は意外と狭く、閾値を境界として感覚量が急激に変化するため、それぞれの振動感覚における分布域の重複は比較的小さいことが明らかになった。特に振動刺激が小さく、感覚レベルも低い場合、分布域はほとんど重複しないため、少し振動を感じる、あるいは明らかに振動を感じるといった感覚レベルで恕限度を決定する際には十分な注意が必要であることが判明した。また、本研究で得られた解と、我が国でよく用いられている小堀・梶川の恕限度を比較すれば、動的応答量が振動速度の実効値で約0.7cm/sec程度以下であれば使用性についてほとんど問題なく、さらに実効値で約1.0cm/sec程度でも、多少揺れを感じるケースは増加するものの、利用者に不快感、不安感などを与えることは極めて少ないと考えられる。ただし、これらの結果は、人体への強制加振実験で得られたデータのみに基づいている。したがって今後の課題としては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。

最後に振動台の制作を初めとして、実験実施に非常な尽力をいただいた北海道大学工学部、及川昭夫技官ならびに北海道開発局、桑島正樹氏（実験当時、北海道大学大学院土木工学専攻2年生）に感謝する。また、実験に参加していただいた北海道大学工学部土木工学科橋梁学講座、平沢秀之助手および同大学院生、学部4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。

なお、本研究の一部に平成4年度文部省科学研究費奨励研究（A）、（研究代表者 小幡卓司、課題番号04750445）の援助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，丸善，昭和54年
- 2) 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 pp77～84，1993.
- 3) 田中信治・加藤雅史・鈴木森晶：支間40mを越える歩道橋の実振動特性，構造工学論文集 Vol.38A pp773～780，1992.
- 4) BSI:Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2. Specification for loads, 7.1.5 Vibration serviceability, BS5400, 1978.
- 5) 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，pp40～45，1985.
- 6) 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 pp15～23，1974.
- 7) 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 pp23～31，1974.
- 8) 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 pp23～33，1982.
- 9) 三輪俊輔・米川善晴：振動の評価法1，2，3，日本音響学会誌27巻1号 pp11～39，1971.
- 10) 梶川康男・加藤雅史：歩道橋の振動と使用性設計，振動制御コロキウムPARTB論文集 pp9～14，1991.
- 11) 三輪俊輔：全身振動の評価法（ISO/TC108/DIS2631を中心として），日本音響学会誌29巻4号 pp252～258，1973.
- 12) 田中良久：心理学的測定法，東京大学出版会，1971.
- 13) 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 pp793～799，1993.
- 14) 小幡卓司・桑島正樹・林川俊郎・及川昭夫：人間の振動感覚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49号，pp309～pp312，1993.
- 15) 三矢直城・田中一男：C言語による実用ファジブック，ラッセル社，1989.

（1993年 9月 16日 受付）