

ず、ごく自然に歩行するよう指導し、また被験者には振動に関する情報は一切与えずに加振した。被験者は当研究室に所属する職員および学生の合計15名に依頼し、それぞれにランダムに複数回実験を反復し所定のデータを得た。なお、被験者の年齢は大半が22～25歳で、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。

2-2. 実験結果

以上で得られた実験結果から、各カテゴリーの閾値である50%の評定値を計算し、さらに最小2乗法を用いてそれぞれの50%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^{4, 5)}によれば、図-2の等値線の振幅と振動数の関係式を以下のように与えている。

$$\log_{10} a = -m \log_{10} \omega + B \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 a : 振動の変位振幅 (片振幅) ω : 円振動数
 m, B : 実験で求められる定数

したがって、図-2の等値線の勾配が式(1)の係数mによって与えられることがわかる。表-2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-2から、本研究の各カテゴリーにおける等値線の勾配は、小堀・梶川の弛緩した立位の実験結果にほぼ一致することがわかる。また、一般に、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、この傾向とも一致する。また、図-3より、本研究の”少し不快である”閾値は、他の研究と比較して、全体の中位よりやや大きめの値となっている。これは、本研究で用いた振動台が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になることが主な原因であろう。したがって、被験者が振動台通過時に受ける振動刺激の全体量は、他の多くの研究に比して少ないため、結果的にやや鈍い反応を示していると考えられる。仮に、他の研究と同程度の刺激量を加えれば、”少し不快”の結果は全体の中位以下となると推定される。加えて、今回の実験方法は現実には歩行者が歩道橋通行時に受ける振動刺激に極めて近いことを考慮すると、本研究の実験結果はほぼ妥当であると考えられる。

3. 数値解析およびその結果

3-1. 解析手法

以上で得られた実験結果に基づき、各カテゴリーにおける閾値以外の感覚量、すなわち反応が生起する確率が、25%, 40%, 60%および75%となる評定値を求めるために、直接法によるファジィ推論を用いた解析を行った。一般に、ファジィ推論では推論規則群とメンバーシップ関数が必要であるが、本研究では前件部に振幅および振動数、後件部に振動感覚をパラメータとした以下のような推論規則を用いる⁷⁾。

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

表-1 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

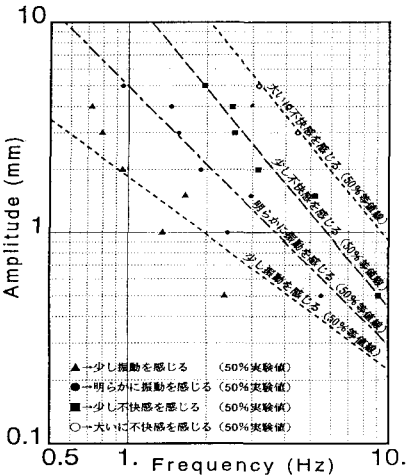


図-2 50%等値線

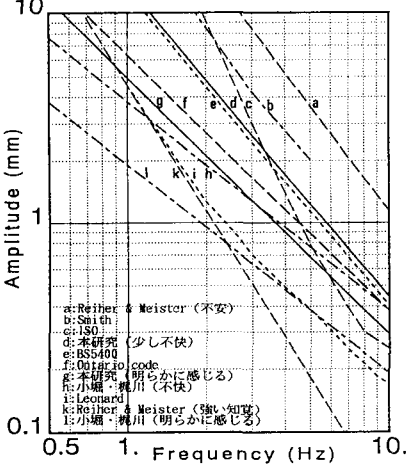


図-3 主な”不快”の結果

表-2 係数表

	本 研 究		小堀・梶川	
	m	B	m (立位)	m (歩行位)
少し感じる	0.9174	0.9987	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	

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

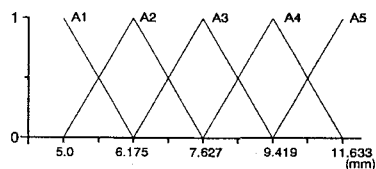
また、メンバーシップ関数は三角形型のものを使用し、特に前件部に関しては、人間の振動刺激と感覚の関係が対数関係であることを考慮してメンバーシップ関数の台集合に対数座標を採用した。なお、推論規則数は25組、台集合の離散化数は17個である。台集合の範囲については、比較的少ない規則数で解析を行うため、各カテゴリにおいてそれぞれ5～7程度に分割して計算を行った。図-4にメンバーシップ関数の一例を、表-3に台集合の範囲の一例を示す。

3-2. 解析結果とその考察

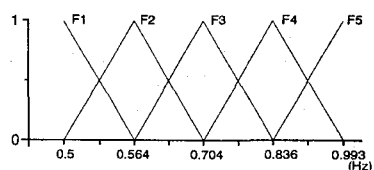
前述のとおり、各カテゴリについて感覚量が25%, 40%, 60%, 75%となる評定値について解析を行った。図-5～8に各カテゴリの25%～75%の等値線を、表-4に式(1)におけるそれぞれの等値線の係数 m と B を示す。また各図には、比較のため、実験による25%～75%値と小堀・梶川の歩行位における恕限度を併記した。

図-5～8から、評定率50%の等値線は各カテゴリともよく一致し、50%以外の評定率についても解析結果は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、本研究のメンバーシップ関数と台集合の設定はほぼ妥当であると考えられる。解析結果から、25%～75%に至る評定率の分布域は各カテゴリとも比較的狭い範囲に集中しており、閾値を境界として感覚量が急激に変化することがわかる。また、各カテゴリの分布域の重複は、特に3 Hz程度までの低振動数領域ではあまり大きくなく、閾値のみで恕限度を考慮する場合、十分な注意が必要であると思われる。

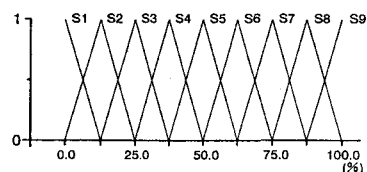
図-5の“少し振動を感じる”場合の解析結果と小堀・梶川の恕限度を比較すると、小堀・梶川の“少し感じる”恕限度と“明らかに感じる”恕限度は本研究の“少し感じる”場合の、前者は約20%程度、後者はほぼ50%に一致することがわかる。したがって、これらの結果から、振動速度が最大値で1.0 cm/s (実効値で0.71 cm/s) 程度であればおよそ40%の人が少し振動を感じる程度であり、振動使用性に関してはほとんど問



(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

表-3 台集合の一例

(明らかに振動を感じる場合)

	明らかに振動を感じる	
	振 幅 (mm)	振 動 数 (Hz)
領域 1	5.0～11.323	0.5～0.993
2	3.0～7.0	0.755～1.504
3	2.0～4.668	1.05～2.091
4	1.283～3.0	1.504～3.0
5	0.8～1.933	2.15～4.402
6	0.5～1.185	3.2～6.45
7	0.332～0.758	4.6～9.0

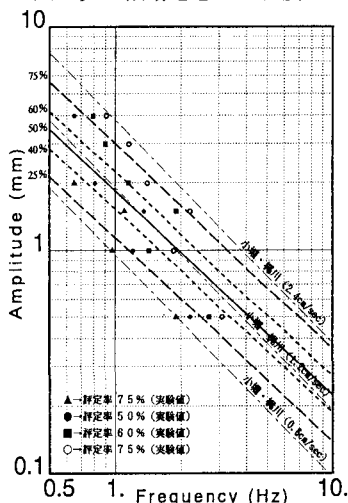


図-5 少し振動を感じる

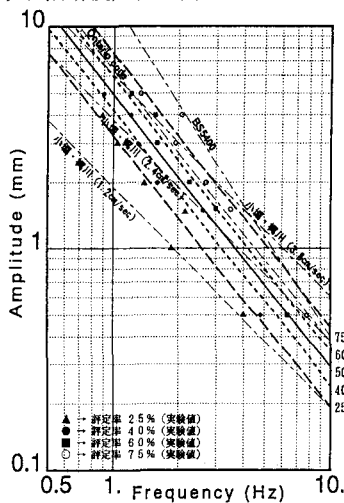


図-6 明らかに振動を感じる

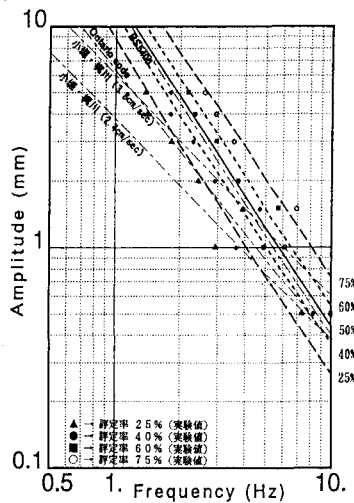


図-7 少し不快感を感じる

表-4 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%	0.9147	0.7853	1.2173	1.4767	1.4804	2.0859	1.5104	2.4488
40%	0.9160	0.9173	1.2238	1.5928	1.4732	2.2102	1.5141	2.5869
50%	0.9174	0.9987	1.2306	1.6775	1.4862	2.3160	1.5167	2.6832
60%	0.9173	1.0845	1.2307	1.7457	1.4797	2.3881	1.5206	2.7820
75%	0.9175	1.2081	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。

題ないと思われる。また、立地条件等の理由で多少振動を許容するような場合、振動速度の最大値で 1.4cm/s（実効値で約1.0 cm/s）程度でも振動使用性は十分確保できると推定される。

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で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。

つぎに解析結果から、各カテゴリにおける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、その分布域の重複は比較的小さいことが明らかとなった。このため、ある振動感覚の閾値のみで恕限度を考慮する場合、十分な注意が必要であると思われる。

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ると、動的応答量が振動速度の実効値でおよそ 0.7cm/s程度以下であれば使用性はほとんど問題なく、さらに、実効値で約 1.0cm/s 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。

加えて、本解析結果を用いれば、任意の振動数、振幅に対する振動感覚が非常に明確に得られるため、設計者が独自の判断で振動使用性を検討することも可能であり、極めて応用性の高いモデルであると思われる。

最後に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, 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，pp40～45, 1985.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.

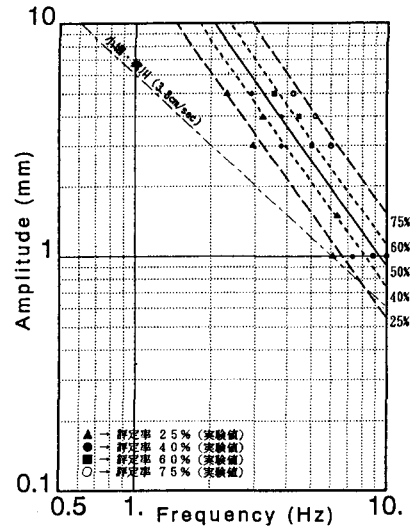


図-8 大いに不快感を感じる