

人間の振動感覚に基づいた 歩道橋の使用限界状態に関する研究

小幡卓司¹・林川俊郎²・佐藤浩一³

¹正会員 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)

²正会員 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)

³正会員 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)

本研究は、人間の振動感覚に関する実験および解析を通じて、歩道橋の振動使用性判定に用いるための恕限度について検討を加えたものである。従来、比較的曖昧であった恕限度と人間の振動感覚の関係を、本研究では非常に明確かつ理解しやすい形で提示した。また、歩道橋の動的応答特性についても検討を行い、照査を必要とする歩道橋の固有振動数の範囲について考察を加えた。さらに、設計への適用方法にも検討を加え、合理的な使用性判定法の提案を試みた。

Key Words : *vibration serviceability, pedestrian bridges, human vibration sensibility, serviceability limit state*

1. ま え が き

公共構造物の設計を行う際に、考慮すべき項目として、合目的性、安全性、経済性等が挙げられるが、その中で合目的性が極めて重要な意味を持つと考えられている¹⁾。一般に、公共構造物は人間の生活水準を改善するために建設されるものであるから、合目的性の追求は設計において中心となる重要な課題であろう。

従来の構造物の設計法で、中心的に取り扱われているものは、主に強度に基づく安全性である²⁾。近年、これらの設計法は旧来の許容応力度設計法から限界状態設計法に移行しつつあるが、その定量的解析法の大半は依然として安全性中心であり、設計の対象となる構造物の利便性や、景観等の環境との調和に言及あるいは定量的手法を導入した例は、極めて少ないと思われる。強度の十分な確認によって、構造物が長期間その機能を発揮し得ることを考えれば、安全性の追求がその構造物の合目的性の検討から著しく逸脱しているとは言えないが、社会基盤が整備されつつある今日では、安全性の追求のみの設計では次第に不十分になりつつあると思われる。

特に歩道橋の設計を考えた場合、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、その使用に際しての快適性、すなわち振動使用性の検討は非常に重要な設計項目の一つである。歩道橋の振動使用性は、およそ20年前に問題提起され、我が国のみならず各国で多くの研究がなされており、その結果、各種の照査法または

基準等が提案されている。我が国においては、まず昭和42年に横断歩道橋設計指針が、さらに昭和54年には立体横断施設技術基準・同解説³⁾(以下基準と称す)が制定され、今日においてもその効力を発揮している。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低次の固有振動数が2 Hz前後(1.5 Hz~2.3 Hz)にならないよう指示されている。

社会資本の充実により、いわゆる交通安全施設としての画一的な横断歩道橋の建設は、近年では非常に減少した。代わって、人道橋や側道橋、あるいは遊歩道橋等と称される、単に道路を横断する以外の様々な目的に対応した歩道橋が数多く建設される傾向にある。これらの歩道橋の大部分は従来の横断歩道橋に比して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。このため設計者に強い負担を与えることも少なくなく、また死荷重が概ね2.0 tf/m以上の大規模な歩道橋では、人間の歩調と共振した場合でも、十分な使用性を有するとの報告⁴⁾もあり、本来、横断歩道橋のために制定された現行の基準による照査では、十分でない場合も生じてきている。

海外においても、イギリスのBS 5400⁵⁾、カナダのOntario code⁶⁾等に代表されるような振動使用性照査基準が、各国で設けられるようになってきた。海外における照査手法は、照査の対象となる構造物の動的応答量を求め、解析結果と振動許容量を比較する、いわば限界状

態設計法的な手法が主に採用されている。

このような使用限界状態を考慮した照査法を用いる場合、問題となるのはその振動許容量、いわゆる振動限度である。使用性評価手法に関する研究は、前述のとおり数多く知られているが、その研究の大半は、動的応答量の求め方を主体とした評価方法に関して検討を行ったものであり、限度そのものに関して実験あるいは解析を試みた研究は意外と少ない。また、限度に関する研究の大半は、ある振動感覚（少し振動を感じる等）の閾値（反応が生起する確率が50%の値）⁷⁾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、刺激に対する反応率が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。さらには、現行の限度の中には、限度と人間の振動感覚の関係が明確でないものもある⁸⁾。

一般に、歩道橋の振動使用性とは、検討の対象となる歩道橋の立地条件や利用者数、あるいは利用者層等を考慮して柔軟に検討されるべき性格のものであり、盲目的に限度あるいは固有振動数の範囲を守ればよいというものではないと思われる。このような柔軟な検討を可能にするためには、振動限度、つまり構造物の許容最大動的応答量と人間の振動感覚の関係を、明確かつ理解しやすい形で示す必要があるであろう。

以上の観点より、著者らは限度と人間の振動感覚に着目し、まず人体への強制加振実験を実施して、歩道橋通行時の人間の振動感覚を明らかにすることを試みた^{9),10)}。また、歩道橋の動的応答特性に関しても振動測定ならびに解析を実施し、合わせて実橋における振動感覚実験を行った^{11),12)}。

本研究では、上記の結果を踏まえて人間の振動感覚に基づいた振動限度を提案し、振動感覚の数量化を行うことによって、これらの関係を明確に提示することを目的とする。すなわち、まず振動感覚実験より歩道橋の使用限界状態について考察し、この結果と“少し振動を感じる”あるいは“明らかに振動を感じる”等の関係を簡単な代数式で算出できる手法を提案する。また、歩道橋の強制振動実験ならびにその解析結果から、照査を必要とする固有振動数等に関して検討を加え、これらの結果から、具体的な歩道橋の振動使用性評価手法について言及するものである。

2. 使用性評価に関する研究

歩道橋の振動使用性に関する研究は、大別して振動の人体への影響に関する研究と、橋梁の使用性評価に関する研究に分けられる¹³⁾。

まず前者に関しては、比較的古くから研究が行われ、いくつかの数量化の試みがなされている。代表的なもの

に Reiher と Meister¹⁴⁾ による実験データがある。また、いくつかの代表的な研究データ等に基づいて Janeway¹⁵⁾ が自動車の乗り心地限界について検討を加えた研究は、今日でもしばしば用いられている。

我が国においては、まず労働省労働衛生研究所の三輪・米川¹⁶⁾によって、人間の振動に対する心理尺度が求められた。この研究は、被験者10名に対して0.5 Hz～300 Hzの範囲について、20 Hzのときの振動を基準として等感度曲線を構成したものである。なお実験は、緊張した立位および座位について行われている。実験結果より、“振動の大きさのレベル” VGL (Vibration Greatness Level) および“振動の心理的な大きさ” VG (Vibration Greatness) を以下のように定義した。

$$VGL = 20 \log_{10}(a/a_0) \quad (1)$$

$$VG = 0.030VGL - 1.20 \quad VG \leq 1 \quad (2a)$$

$$VG = 0.023VGL - 0.92 \quad VG \geq 1 \quad (2b)$$

ここで、式(1)の a は振動加速度の実効値 (cm/sec²)、 a_0 は基準となる振動加速度の実効値 (1.0 cm/sec²) である。しかしながら三輪らの研究は、これをそのまま歩道橋に用いるには姿勢等においてやや疑問があり、使用性評価に用いられることは比較的少ない。

小堀・梶川^{17),18)}は、橋梁の使用性判定に用いる目的で弛緩した立位ならびに歩行位について同様な実験を行った。これらの実験は、基準振動を振動数3 Hz、振幅1 mmとして、振動数1～10 Hz、振幅0.1～5.0 mmの範囲で等感度曲線を求め、また、計量心理学における系列カテゴリ法¹⁹⁾によって振動刺激に対する人間の心理的反応を調査した。その結果、歩行位において振動刺激が比較的小さい範囲では、振動感覚は振動速度によってのみ支配されるとし、“振動のレベル” VGL と“振動の大きさ” VG を次のように定めた。

$$VGL = 20 \log_{10}(S/S_0) \quad (3)$$

$$VG = 0.05VGL - 2.0 \quad VGL \leq 40 \quad (4a)$$

$$VG = 0.03VGL - 1.2 \quad VGL > 40 \quad (4b)$$

ここで、式(3)の S は振動速度の実効値 (cm/sec)、 S_0 は基準となる振動速度の実効値 (1.4×10^{-2} cm/sec) である。

次に、振動使用性に関する研究について言及すると、1970年代前半から、1980年代にかけて比較的多くの研究がなされた。その主なものとして、まず松本²⁰⁾は、歩道橋の振動測定を実施して動的応答解析を行い、振動が大きくなる原因として人間の歩行振動数(約2 Hz)と歩道橋の固有振動数がほぼ一致した場合に共振によって生じるものとした。牛尾²¹⁾も、ほぼ同時期に歩道橋の振動測定を行って、人間の歩行状態と共振の心配のない歩道橋では、それほど振動が大きくなることを確認し、またランダム歩行では、たとえ多人数で加振した場合でも振幅の増加は小さいことを報告した。さらに開

表一 各種振動使用性照査法比較表

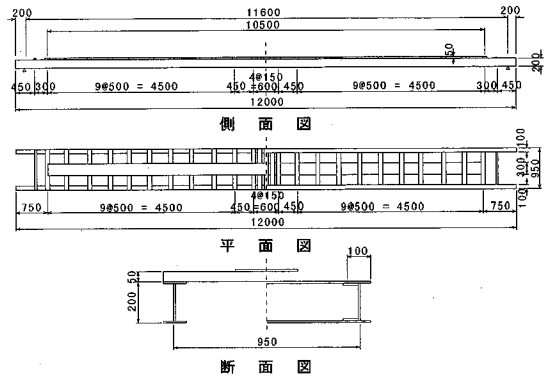
照査方法	荷重状態	単位	許容振動量	振動感覚
Leonard	多数の歩行者	cm/sec ²	34	—
小堀・梶川・城戸	最速歩調1人	cm/sec (RMS)	0.42	少し振動を感じる閾値
BS 5400, Blanchard	共振歩調1人	cm/sec ²	$0.5\sqrt{f}$	—
Wheeler	最速, 共振歩行1人	cm/sec (MAX)	2.40	少し歩きにくい閾値
松本ら	1人/秒/m	cm/sec ²	98	—
梶川・小堀	単独歩行状態	cm/sec (RMS)	1.7	少し歩きにくい閾値
	群集載荷状態	cm/sec (RMS)	1.7	少し歩きにくい閾値
	単独走行状態	cm/sec (RMS)	2.7	大いに歩きにくい閾値
田中・加藤	共振歩行1人	cm/sec (RMS)	0.85	明らかに振動を感じる閾値

断面を有する歩道橋の場合は共振時において振動が極めて大きくなるため、その固有振動数を2 Hz前後にしない必要があると述べている。西脇²⁾は東京都内の歩道橋23橋において振動測定と通行者へのアンケート調査を実施し、その結果から、歩行者の性別、職業、歩行目的等と振動の感じやすさの関係の検討を行った。また、三輪の“振動の心理的な大きさ”と歩道橋の剛性に関するパラメータを用いて主桁の必要とされる剛性の範囲を示した。しかしながら、心理的な振動の大きさの採用すべき値については、さらに検討が必要だとしている。

1980年代になって、Wheeler²³⁾は人間の歩・走行時の床面への作用力に関して詳細な検討を加え、衝撃作用時間、作用間隔等を考慮した歩行外力と、これを用いた有限要素法による動的応答の計算手法を提案した。この研究では、22橋の歩道橋に対する実験結果と解析結果の比較を行い、それらはよく一致していることが示されている。恕限度に関しては、小堀・梶川の“少し歩きにくい”場合の閾値 ($V_{RMS}=2.40$ cm/sec) が用いられている。

また梶川²³⁾は、歩道橋の振動を考えた場合、その構造が比較的単純であることから、固有振動数や固有モードは容易に求めることができるとし、動的応答量に関しても、使用性評価の際には歩行者の歩調とあるモードの共振状態を考えるので、応答計算はいわゆるモード解析法で十分であるとした。そこで梶川は、応答計算の解析的な式とその結果に基づく応答スペクトル図を示し、これを用いて群集載荷状態を対象にした確率的な照査方法の提案を試みた。歩行外力に関しては、歩調、移動速度および衝撃係数の関係がグラフによって提示されている²⁴⁾。

さらに最近では、田中・加藤^{4), 25)}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法の提案を行っている。これらの研究では、まず従来“ある程度規模の大きい”という曖昧な表現であった揺れにくい歩道橋の具体的な大きさを検討し、その結果死荷重が2.0 tf/m以上の歩道橋では人の歩調と共振した場合でも十分な使用性を持つことを確認



図一 振動台一般図

した。また、共振時の最大応答変位を求める簡易計算式の提案を行った。恕限度は、小堀・梶川の“明らかに振動を感じる”閾値 ($V_{RMS}=0.85$ cm/sec) を用いている。表一に主な振動使用性評価法の比較を示す²⁶⁾。

3. 強制加振実験

(1) 実験方法

前述のとおり、著者ら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解析を行ってきた。

まず、人間の振動感覚実験に関しては、図一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 $L=12$ 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することにより行った。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により駆動して正弦波を発生させ、所定の振幅、振動数を得ている。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。振動波形およびその振動

表一2 カテゴリー選択肢 (第1回実験)

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

表一3 カテゴリー選択肢 (第2回実験)

この橋を毎日渡るとき	
<input type="radio"/>	歩道橋として適当である。 -その理由として- ① 振動を感じない。 ② 多少振動を感じる程度である。 ③ 明らかに振動を感じるが、特に問題ない程度である。
<input type="radio"/>	歩道橋として不適当である。 -その理由として- ④ 不快感、不安感を感じないが歩きにくい。 ⑤ 大きく振動を感じ、不快感、不安感を感じる。 ⑥ 歩道橋の振動としては、信じられないほど大きい。

表一4 実験ケース

ケース No.	1	2	3	4	5	6	7
振動数(Hz)	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	共振

踏まえ歩道橋の使用性判定に用いることを考慮して、 $V_{RMS}=0.42 \text{ cm/sec} \sim 1.13 \text{ cm/sec}$ ($V_{max}=0.6 \text{ cm/sec} \sim 1.6 \text{ cm/sec}$) の範囲で、振幅および振動数の組み合わせ 27 ケースについて実験を行った。実験方法は基本的には第1回目と同様であるが、第1回実験終了後に行った歩道橋の振動に関する意識調査等を参考にして、いくつかの改良を行っている。

まず、カテゴリー選択肢は、表一3に示すように、歩道橋として適当であるかを判定し、その理由として振動感覚のカテゴリーを選択する方法を用いている。また、意識調査から“歩きにくい”場合と“不快感を感じる”場合のカテゴリー判断基準に有意な差が生じる傾向が認められたため、第2回実験では両者を厳密に区別し“不快感、不安感を感じないが歩きにくい”と“大きく振動を感じ、不快感、不安感を感じる”の2つのカテゴリーを用意した。また、第2回目の実験においては、被験者の振動刺激に対する慣れや、カテゴリー判断基準の変化等の影響を極力排除するため、ある振動刺激に対してそれぞれ1回のみ実験を実施することとし、よって実験回数は被験者総数 26 名に対し、全 27 ケースについてそれぞれ 1 回ずつ合計 702 回である。被験者については、第1回実験において、橋梁振動についての予備知識が実験結果に影響を与える傾向が認められたため、第2回実験では土木工学についてほとんど予備知識を持たない北海道大学教養部、ならびに水産学部 2 年生に依頼した。年齢については全員が 20 歳前後であり、また性別は 1 名を除いて男性である。さらに、本研究では桁振動によって振動刺激を与えるため、他の研究に比して刺激の総量は小さいが、第1回の実験結果からは全体の傾向は他の研究とほぼ一致し、加えて、本研究の実験手法は、歩道橋に限らず人間が日常生活において受ける振動刺激に極めて近いため、被験者に対する刺激の暴露時間については、特に補正は行わないこととした。

次に実橋における振動特性を把握するために、札幌市内の横断歩道橋 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、A/D 変換ボードを介して、パソコンに直接データを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波数は、200 Hz である。表一4に実験ケースを示す。

1 次および 2 次固有振動数の測定方法は、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

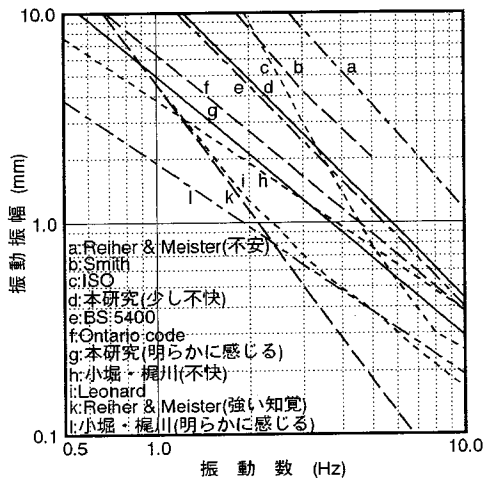
数については、桁上にサーボ型加速度計を設置し、A/D 変換ボードを介してパソコンにデジタルデータとして入力し、また同時に FFT 解析を実施して実験中常時監視することにより、人間の歩行による影響を極力排除するよう努めた。アンケート調査方法に関しては、計量心理学における系列カテゴリー法を採用した^{7),19)}。

なお本研究では、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、上記の振動台を屋外に設置し、2 回にわたって実験を実施した。

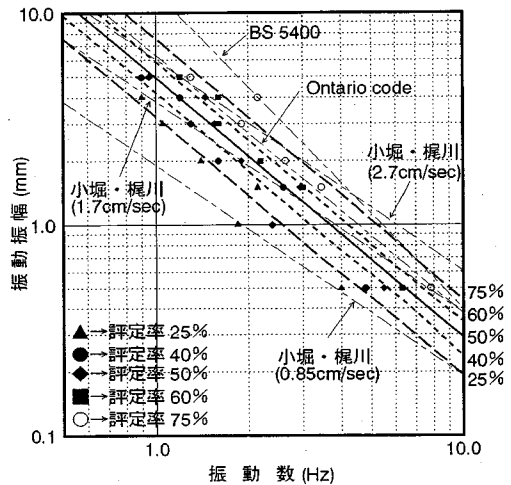
第1回目の実験は、人間の振動刺激に対する反応を比較的広い範囲で捉えることを目的として、振動数 0.58 Hz～11.5 Hz、振幅 0.5 mm～5.0 mm の範囲について、全 32 ケースの振動刺激を設定して実験を実施した。

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。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、約 50 回の測定を行った。総実験回数としてはおよそ 1700 回である。表一2に第1回実験で用いたカテゴリー選択肢を示す。歩行方法は基本的には被験者各自の通常のペースとし、その歩行周期が 2 Hz 前後と大きく異なる場合には個別に指導を行うこととした。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。

第2回目の振動感覚実験では、第1回目の実験結果を



図一2 実験結果の比較



図一3 解析結果 (明らかに感じる)

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電子メトロノームを携帯し、ある周期の発振音に歩調を合わせるにより加振した。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。

また、人体に対する強制振動実験結果を実橋において検証するため、上記と同様な手法を用いて歩道橋を強制加振し、その際に歩道橋上を歩行する被験者に対してアンケート調査を行った。カテゴリ選択肢は表一3と同様のものを用いている。

(2) 実験結果とその解析

以上のようにして得られた実験結果に関して、歩道橋の振動特性については5.に、動的応答解析との比較は6.において検討することとし、ここでは人体に対する強制加振実験結果とその解析について述べることにする。なお、本研究では“少し振動を感じる”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率と呼ぶことにする。また、振動速度値は特に断らない限り実効値で表現するものとする。

まず、第1回目の実験結果から、実験の妥当性を検討するために計量心理学における閾値を算出し、最小2乗法を用いて各カテゴリにおける閾値の等値線を得た。結果の一例として、図一2に既往の研究との比較を示す。

図一2に着目すると、本研究で得られた閾値は、過去の研究と比較して、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ると本研究の実験結果はほぼ妥当であると思われる。

以上の結果に基づき、反応が生起する確率が25%、40%、60%、75%となる評定率を閾値の場合と同様な手法を用いて求めることを試みた。しかしながら最小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。そこで本研究では、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^{9),10)}。

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

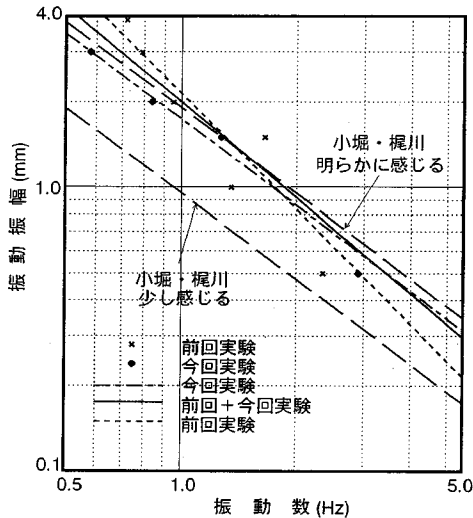
S : 振動感覚のファジィ集合

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¹¹⁾ことを

表一六 振動速度と感覚量

	少し振動を感じる					明らかに振動を感じる		
	振動速度 ファジィ推論 cm/sec*	最小2乗法 (第2回実験のみ)		最小2乗法 (第1回+第2回)		振動速度 ファジィ推論 cm/sec*	最小2乗法 (第2回実験のみ)	
		cm/sec*	Ⅲ	cm/sec*	Ⅲ		cm/sec*	Ⅲ
25%	0.494 (0.909)	—	—	0.518 (0.733)	-1.0394	0.832 (1.176)	0.946 (1.338)	-0.9010
40%	0.643 (0.909)	0.672 (0.950)	-1.1092	0.589 (0.833)	-1.2561	0.990 (1.400)	1.025 (1.450)	-0.9106
50%	0.754 (1.067)	0.770 (1.089)	-1.0035	0.794 (1.123)	-1.1182	1.110 (1.570)	1.129 (1.597)	-0.8669
60%	0.871 (1.232)	0.735 (1.039)	-1.0722	0.986 (1.394)	-1.0098	—	—	—
75%	1.064 (1.505)	1.127 (1.594)	-0.8440	1.312 (1.855)	-0.8917	—	—	—

* 括弧内は振動速度の最大値



図一四 閾値比較図 (少し振動を感じる)

表一五 係数表

%	少し振動を感じる			
	第1回実験	第2回実験	1回+2回	小堀・梶川*
25	1.0948	—	1.0384	—
40	1.8477	1.1092	1.2561	—
50	1.3478 (.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			
	第1回実験	第2回実験	1回+2回	小堀・梶川*
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	—	—	—

*歩行位.

** 特異点を除外した場合.

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^{9),10)}。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。用いた推論規則は25組、台集合の離散化数は17個である。解析結果の一例として、図一三に“明

らかに振動を感じる”場合の25%~75%の感覚量等値線を示す。これらの結果から、本手法を用いれば各カテゴリーの閾値以外の感覚量を非常に明確な形で、かつ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、歩道橋の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、きわめて柔軟に設定することが可能であると推定できる。

次に第2回目の振動感覚実験では、前述のとおり歩道橋の使用性判定に用いることを考慮して、比較的小さい振動刺激の範囲で実験を実施した。解析手法等は前回と同様のものを用いている。図一四に第2回実験における“少し振動を感じる”場合の閾値の比較を示す。図一四から、第2回目の実験結果は前回の実験結果とほぼ一致し、よって被験者のカテゴリー判断基準は前回実験とほぼ等しいと判断できる。

小堀・梶川の研究^{17),18)}によれば、振幅と振動数の関係式が次のように与えられている。

$$\log_{10}a = -m \log_{10}\omega + B \quad (5)$$

m, B : 実験等で得られる定数

a : 振動振幅 ω : 円振動数

式(5)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。表一五に最小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 の比較を示す。表一五に着目すると、特に第2回目の実験において m は約1.0となり、小堀・梶川の歩行位での実験結果にはほぼ一致することがわかる。この結果は、ある程度刺激の小さい範囲では、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。さらに表一六には、ファジィ推論および最小2乗法による解析によって得られた各カテゴリーにおける振動速度と感覚量の関係を示す。解析結果から、両者はよく一致し、ファジィ推論による解析結果はほぼ妥当であると考えられる¹⁰⁾。また図一五は、歩道橋として不適当と答えた人の割合である。図一五から0.8cm/sec付近を境界として、不適当と答える割合が急激に増加することがわかる。

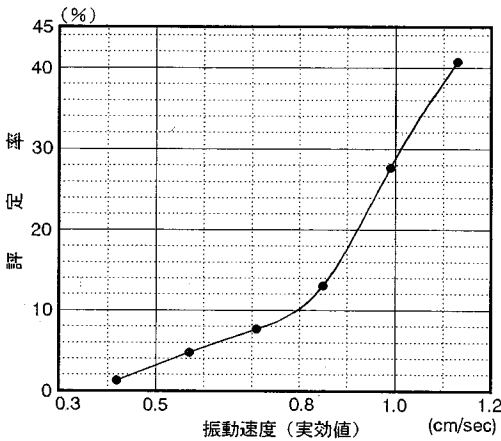


図-5 歩道橋として不適当と答える人の割合

表-7 実験結果

振動速度 cm/s	カテゴリー(人)						加振 振動数 (Hz)	a _{MAX} (gal)	a _{RRMS} (gal)	卓越 振動数 (Hz)
	適	当	不	適	不	適				
0.53	2	4	0	0	0	0	3.5	40.7	11.66	3.52
0.59	4	2	0	0	0	0	1.5	38.6	11.06	2.98
0.77	0	4	2	0	0	0	3.0	50.2	14.39	2.98
0.81	2	4	0	0	0	0	2.0	35.3	10.12	2.00
0.81	0	5	1	0	0	0	4.0	43.1	12.35	2.44
1.58	0	0	2	1	3	0	2.5	86.4	24.76	2.49
2.37	0	0	0	2	4	0	2.44*	124.4	35.65	2.39

* 2.44Hzは共振振動数

表-8 重み

カテゴリー No.	係 数		V _{RRMS} (cm/sec)	重 み
	m	B		
②	1.3478	1.4066	0.696	1.00
③	1.2306	1.6775	1.782	2.56
④	1.4862	2.3160	3.913	5.62
⑤	1.5167	2.6832	8.415	12.08

また、第2回目の実験における図-5の結果を実橋において検証するため、歩道橋を強制加振し、その際に歩道橋上を歩行する被験者に対してアンケート調査を行った¹²⁾。表-7にその結果を示す。表-7から、V_{RRMS}=0.8 cm/sec程度以下では、速度の増加に対して歩行者の反応はあまり増大せず、上記の結果と同様な傾向を有していると思われる。さらに、これらの実験結果の度数分布に対して、各カテゴリーに重みを与えることにより数値化し、その傾向を把握することを試みた。

重みに関しては、第1回目の実験結果から、ファジィ推論によって得られた式(5)における係数mとBを用いて、各カテゴリーにおける1~5 Hzでの閾値の振動速度の平均値を算出し、これらの振動速度に対して“少し振動を感じる”場合を基準とした速度比を重みとして採用することとした。なお、重みそのものの妥当性を検

討するために、同時に小堀・梶川の各カテゴリーにおける振動速度に基づいた重み付けも行い、両者を比較した結果、ほぼ同様の傾向を有することを確認した¹²⁾。表-8に各カテゴリーにおける係数mとB、振動速度ならびに重みを示す。

4. 人間の振動感覚の数量化

(1) 評価尺度

計量心理学^{7),19)}と呼ばれる分野では、以前から人間と刺激の関係を数量化する試みが数多くなされている。特に音響関係においては、多数の研究が行われ、PhonやSone等の尺度は現在広く用いられている。

振動関係においては前述のとおり三輪・米川¹⁶⁾や小堀・梶川^{17),18)}によって数量化が行われているが、本研究においても、3.の実験結果に基づいて振動刺激と感覚の数量化を試みる。

一般に、計量心理学では、刺激と感覚の関係について以下の式を与えている。

$$R = kS^n \quad (6)$$

ここで、R:感覚の相対的な大きさ(比例尺度値)

S:振動刺激

n:様相特性指数

k:基準値等に関する定数

式(6)において両辺の対数を取り、識閾に関する項S₀を含めて考えると

$$\log_{10} R = n \log_{10} (S/S_0) - b \quad (7)$$

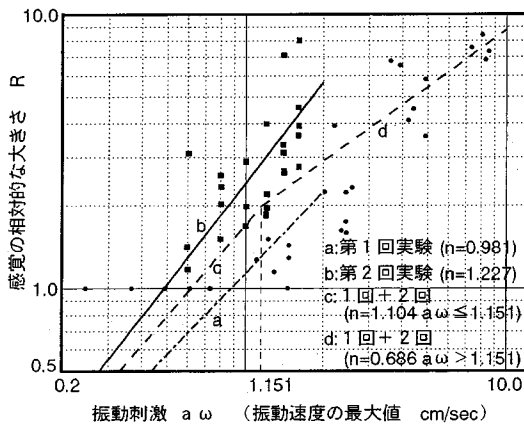
ここで、b = -log₁₀(kS₀ⁿ)である。

式(7)を三輪ら、小堀らの用いた記号によって表現すると、まずRを“振動の大きさ”VGに、nを20Nとし20 log₁₀(S/S₀)で表される量を振動の大きさのレベルVGLに置き換えれば、

$$\log_{10} VG = N(VGL - B) \quad (8)$$

となる。ここでBは、VG値の基準をVGLのどこに置くかで決まる任意な定数である。

式(6)のR、あるいは式(8)のVGは上記のとおり感覚の相対的な大きさである。よって本研究では、前章の表-8の重みを用いて実験結果の比例尺度値への変換を行った。これは、ある振動刺激に対して、各カテゴリーの重みとそれを選択した度数を乗じて合計し、その値を度数の合計で割り戻すことによって式(6)のRを得ることとした。振動刺激としては、実験結果から感覚量等値線の傾きがほぼ1.0になることから、振動速度を用いている。図-6にこれらの結果を示す。なお、図中の1点鎖線は第1回目の実験結果によるもの、実線は第2回目の実験によるもの、破線は両者の合計による最小2乗法を用いた推定線である。また、●は第1回の



図—6 最小2乗法近似線

実験値，■は第2回の実験値である。図—6から，本研究の様相特性指数 n は次の値となる。

$$S = a\omega \leq 0.814 \text{ cm/sec では } n = 1.104 \quad (9a)$$

$$S = a\omega > 0.814 \text{ cm/sec では } n = 0.686 \quad (9b)$$

この結果は，小堀・梶川の研究とほぼ同様の傾向が認められ，また刺激がある値以上であれば三輪らの研究や音響心理学における Sone と比較的よく一致する結果である。 $a\omega = 0.814 \text{ cm/sec}$ とは“少し振動を感じる”人が約 60% 程度の感覚量であり，図—5のグラフから，反応が急激に増加する変曲点と一致する興味深い結果が得られた。これは，人間の振動に対する判断基準が，刺激の小さい範囲では振動を認識できるか否かが中心であり，ある程度刺激が大きくなり揺れていることが認識できるようになると，その揺れ具合の大小が判定の中心材料に変化することを示していると思われる。一方，歩道橋の振動として許容できるか否かの問題に対しては， $a\omega = 0.8 \text{ cm/sec}$ 程度から，不適當と答える人が急増することを考えると，歩きながら振動を認識できるかどうか判断の目安となっていると考えられる。したがって，この付近の振動量に歩道橋の使用限界状態が存在するものと推定できる。

ここで，本研究における“振動の大きさ”VGを求めてみる。VG値は式(8)を用いることによって得られるが，そのためには“振動の大きさのレベル”VGLと定数 B を求める必要がある。本研究では，音響学における Sone 等や，三輪ら，小堀らの研究と同様に，図—6の2本の近似線(破線)が交わる点でVGLが40 dBとなり，またVGが1.0となるように定める。したがって，振動の大きさのレベルVGLは，

$$VGL = 20 \log_{10}(S/S_0) \quad (10)$$

$$S_0 = 8.14 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$$

となる。また“振動の大きさ”VGは，式(9)の様相

表—9 振動速度とパラメータの関係

V_{RMS} (cm/sec)	V_{MAX} (cm/sec)	VGL値 (dB)	VG値
0.0707	0.10	18.778	0.0672
0.1414	0.20	24.799	0.1446
0.2121	0.30	28.321	0.2263
0.2828	0.40	30.820	0.3110
0.3536	0.50	32.758	0.3980
0.4243	0.60	34.342	0.4868
0.4950	0.70	35.680	0.5772
0.5657	0.80	36.840	0.6690
0.6364	0.90	37.863	0.7620
0.7071	1.00	38.778	0.8561
0.7778	1.10	39.606	0.9512
0.8139	1.151	40.000	1.0000
0.8485	1.20	40.362	1.0288
0.9192	1.30	41.057	1.0863
0.9900	1.40	41.701	1.1425
1.0607	1.50	42.300	1.1973
1.1314	1.60	42.861	1.2510
1.2021	1.70	43.387	1.3037

特性指数より，次のようになる。

$$\log_{10} VG = 0.055(VGL - 40) \quad VGL \leq 40 \quad (11a)$$

$$\log_{10} VG = 0.034(VGL - 40) \quad VGL > 40 \quad (11b)$$

表—9に式(10)，(11)に基づいた振動速度，VGLならびにVGの関係を示す。

ここで，振動の大きさVGについて考察する。VG値はある振動刺激を基準として，その時の反応を1とおき，他の振動刺激に対する反応の割合を求めるものである。VG値は基準振動に対する，ある振動の大きさの比を表すことは可能であるが，その基準振動と使用性との関係，換言すれば各カテゴリーに対する感覚量や歩道橋の振動として適，あるいは不適か等の関係が明確でない限り，VG値のみを用いて歩道橋の振動使用性を検討することは困難であると考えられる。したがって，次に“振動の大きさのレベル”VGL，“振動の大きさ”VGと振動感覚ならびに感覚量の関係を求めることとする。

(2) 振動感覚と評価尺度の関係

前述のとおり，ここでは幾つかの振動感覚と評価尺度の関係を探明することを試みる。まず，歩道橋の振動として不適當と答える人の割合について考察を加える。図—7は前述の実橋における振動感覚実験において，重みづけを行い最小2乗法によってグラフ化したものである。一般に，人間の振動感覚は，刺激がある程度大きくなると刺激の増分 ΔS に対して，反応の増分 ΔR は次第に減少すると言われている。よって図—7には，共振時のデータを除外した場合の近似曲線も併記した。また図—8は，前出の図—5を最小2乗法で近似したものであり，およそ40%以上は近似線からの推定値である。両者を比較すれば，特に刺激の比較的小さい範囲(概ね

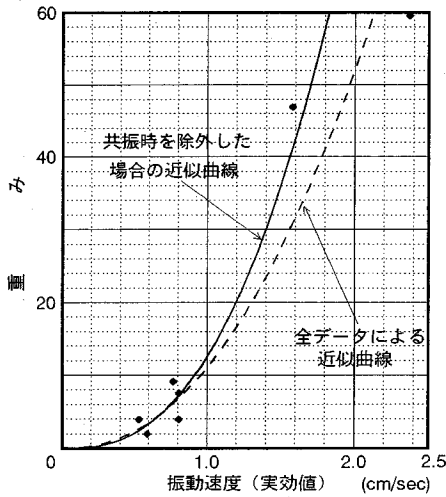


図-7 近似曲線

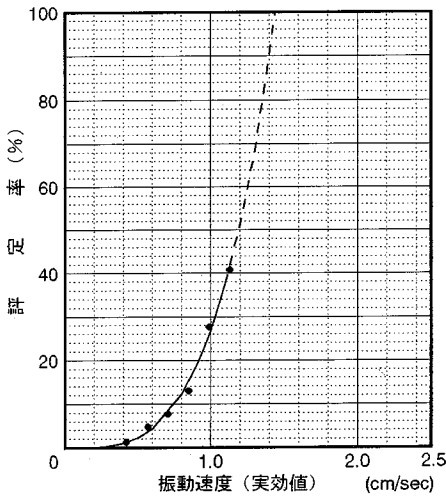


図-8 歩道橋として不適当と答える人の割合

$a\omega=1.1$ cm/sec 程度) で非常に近い傾向を有することがわかる。したがって図-7の結果は、評定率50%程度までは実橋においても信頼性を持つものと思われ、使用性判定に用いるには十分有効であると推定できる。この近似線は以下の式で表される。

$$\log_{10}R = m \log_{10}S + B \quad (12)$$

$$m = 3.545 \quad B = 1.428$$

図-9, 10にVG値およびVGL値と“歩道橋の振動として不適当”の関係をグラフ化したものを示す。VG値は、VG=1.0を境界として2本の直線で表されるので、図-9においても両者の関係は2本の直線で表されることになる。また、図-10からVGL値と“不適当”の関係は、片対数尺度上ではほぼ完全な直線関係となる。VGL値は振動速度 $a\omega$ を比例尺度上に展開したもので

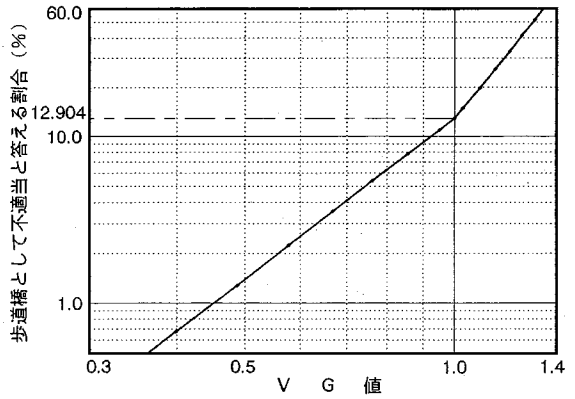


図-9 VG値と“不適当”の関係

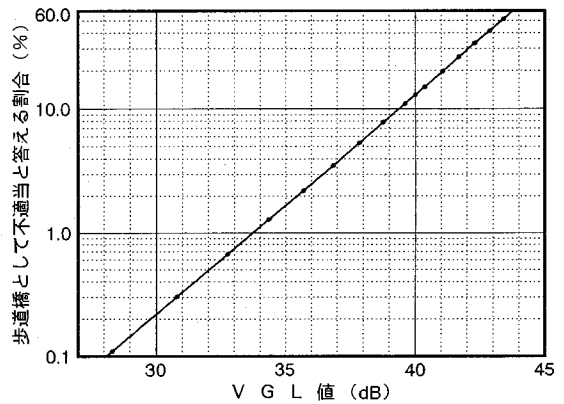


図-10 VGL値と“不適当”の関係

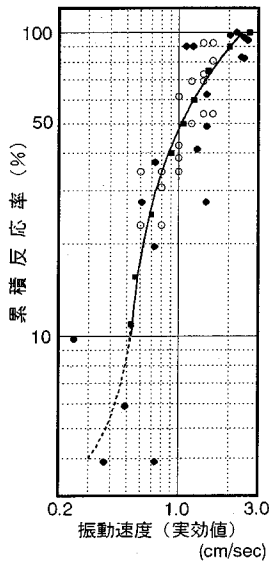
あるから、この結果は明らかであろう。これらの結果から、前述のように、歩道橋の振動として許容できるか否かを判定する基準となっているのは、歩行中に振動を認識するかどうかであると考えることが可能である。よって恕限度を考える場合には、VG値を用いるよりも、直接“不適当”と振動速度あるいはVGL値との関係を用いた方が、設計者には理解しやすいであろう。したがって、図-10を用いて、VGL値と“不適当”の関係を求めると以下ようになる。

$$\log_{10}R_S = 0.1773VGL - 5.98 \quad (13)$$

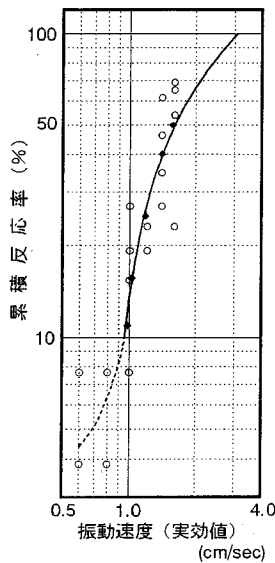
ここで、 R_S は歩道橋の振動として不適当と答える人の割合であり、VGLは $VGL = 20 \log_{10}(S/S_0)$ ($S_0 = 8.14 \times 10^{-3}$ cm/sec) で与えられる振動の大きさのレベルである。さらに、恕限度としての振動の大きさVGS (Vibration Greatness of Serviceability Limit State) を考える。VGL=40 dBでVGS=1.0となるようにすると

$$\log_{10}VGS = 0.1773(VGL - 40) \quad (14)$$

となる。ただし、式(13)、(14)の信頼性としては、



図—11 累積反応率
(少し振動を感じる)



図—12 累積反応率
(明らかに振動を感じる)

R_5 が 50% 程度までである。その理由として、前に述べたとおり、実験データが 50% 程度までであること、実橋における振動感覚実験においても刺激が大きくなると反応が鈍化する傾向があること等が挙げられる。しかしながら、歩道橋の振動として不適当と答える人が 50% にも上る歩道橋は、その使用性において実用的であるとは考えにくく、許容される最大値としては、不適当と答える人が 2~3 割程度だと思われる。したがって、式 (13) あるいは式 (14) を用いての使用性の判定は十分可能であると考えられる。

次に振動感覚と振動刺激の関連づけを試みる。図—11 および図—12 は、著者らの従来の研究に基づいたそれぞれのカテゴリーにおける累積反応率である。図—11 の●と○、図—12 の○はそれぞれ第 1 回目と第 2 回目の実験値、■および◆はファジィ推論による解析値である。また実線は、10% 以上における解析値に対する最小 2 乗法近似線であり、10% 以下の破線は実験値または他の研究を参考にした推定線である。図—11、12 からは 10% 以上において、実験値に対してはほぼ妥当な近似を与えていると思われる。累積反応率 R と振動速度の実効値 $a\omega$ (cm/sec) の関係は以下の式で表される。

$$R = A_0 + A_1 \log_{10} a\omega \quad (15)$$

ここで係数 A_0 および A_1 は

- 1) 少し振動を感じる : $A_0 = 6.8464 \times 10^1$
 $A_1 = 1.3675 \times 10^2$
- 2) 明らかに振動を感じる : $A_0 = 4.0266 \times 10^1$
 $A_1 = 1.7653 \times 10^2$

さらに、VGL 値との関係は、 $VGL = 20 \log_{10}(S/S_0)$ を

表—10 主なパラメータの関係

V_{RMS} (cm/sec)	VGL 値 (dB)	不適当 (%)	少し感じる (%)	明らかに感 じる (%)
0.3734	33.24	0.82	10.00	—
0.4243	34.34	1.28	17.54	—
0.4950	35.68	2.21	26.70	—
0.5657	36.84	3.55	34.63	—
0.6364	37.86	5.39	41.62	—
0.6739	38.36	6.61	45.02	10.00
0.7071	38.78	7.84	47.88	13.70
0.7778	39.61	11.00	53.54	21.00
0.8139	40.00	12.90	56.23	24.48
0.8485	40.36	14.96	58.71	27.67
0.9192	41.06	19.87	63.46	33.81
0.9900	41.70	25.84	67.86	39.49
1.0607	42.30	33.00	71.96	44.78
1.1314	42.86	41.48	75.79	49.73
1.2021	43.39	51.43	79.39	54.38

式 (15) に代入して整理すると

$$R = A_0 + A_1 (VGL/20 + \log_{10} S_0) = X_0 + X_1 \times VGL \quad (16)$$

ここで係数 X_0 および X_1 は

- 1) 少し振動を感じる : $X_0 = -2.1726 \times 10^2$
 $X_1 = 6.8375 \times 10^0$
- 2) 明らかに振動を感じる : $X_0 = -3.2858 \times 10^2$
 $X_1 = 8.8265 \times 10^0$

となる。以上のように振動速度や振動の大きさのレベル VGL 等と、人間の振動感覚との関係を簡単な計算で求めることが可能となった。したがって、使用性照査の対象となる歩道橋の動的応答量が求められれば、従来よりはるかに具体的な使用性の検討を行うことが可能であると思われる。表—10 にこれらの結果を示す。

(3) 振動限度の検討

ここでは、表—10 の結果等を用いて振動限度の検討を試みる。前述のとおり、VGL 値の基準としては、 $a\omega = 0.814$ cm/sec とし、このとき VGL が 40 dB、VG が 1.0 となるように決めてある。 $a\omega = 0.814$ cm/sec の意味は、この点で不適当と答える人が急増し、振動刺激に対する反応の増分は減少する、いわば変曲点に当たる値である。また、“歩道橋の振動として不適当”は、実験のカテゴリー選択方法から“少し歩きにくい”場合とほぼ等価であると考えられる。以上を踏まえて、限度度について考察を行う。

まず表—10 の変曲点付近に着目すると $a\omega = 0.8$ cm/sec 付近で“不適当”あるいは“少し歩きにくい”と答える人が約 13%、 $a\omega = 0.85$ cm/sec 程度で約 15% であり、この程度であれば使用性に問題が生じる可能性はほとんどないと思われる。また、“不適当”と感じる

表-11 実験結果

歩道橋	スパン (m)	固有振動数		減衰定数 ξ (%)		
		1次 (Hz)	2次 (Hz)	1次		2次
				波形	1/2法*	1/2法*
a	15.5	5.52	16.50	1.438	1.574	1.683
b	15.8	5.42	15.33	1.643	1.461	0.900
c	18.8	5.42	16.70	1.327	1.234	1.319
d	20.8	4.05	13.53	1.332	1.297	0.648
e	21.9	3.37	10.84	1.173	1.104	1.174
f	22.6	4.05	13.04	1.237	1.005	0.538
g	23.3	2.83	9.57	1.176	1.340	0.896
h	23.6	3.95	13.04	1.177	0.948	1.724
i	29.3	2.44	8.55	1.494	1.817	0.657
j	30.4	2.93	10.35	1.258	1.121	0.676
k	31.8	2.54	8.94	1.249	1.424	0.882

* 減衰定数の1/2法は、Half-Power-Methodによる。

人がどの程度まで許容できるかは異論のあるところと思われるが、一般的には概ね25~30%までが限度であろう。例えば、“不適当”がおよそ25%になる振動速度は、 $a\omega=1.0$ cm/sec程度である。ただし、 $a\omega=1.0$ cm/secはすでに変曲点を越えているため、仮に $a\omega$ が0.1 cm/sec大きくなっただけで40%付近まで“不適当”と答える人が増加する。よって、通行量があまり多くない場合や、多少振動を許容するような場合は、 $a\omega=1.0$ cm/sec程度でも使用性に問題が生じる可能性が少ないであろうが、通行量が多く、常時人が橋梁上に存在するような歩道橋では十分ではないと思われる。したがって十分な使用性を確保する必要があるような場合には、 $a\omega=0.8$ cm/sec程度以下が望ましいと考えられる。この場合では、大きな起振力が加わり、多少応答が大きくなっても、“不適当”と答える人はそれほど増大しないため、常時十分な使用性を確保できると推定される。以上をまとめると次のようになる。

- ① 振動速度の実効値で $a\omega=0.8$ cm/sec 以下の場合、使用性に問題はほとんど生じない。 $a\omega=0.8$ cm/secの振動量とは、VGL値で40 dB、歩道橋として不適当あるいは少し歩きにくいと感じる人が約13%、振動を少し感じる人がおよそ60%、明らかに振動を感じる人が約25%程度の値である。
- ② 立地条件等の理由で多少の振動を許容するような場合では、振動速度の実効値で $a\omega=1.0$ cm/sec程度、あるいはVGL値で42 dB以下ならば、通常の使用に際しては十分な使用性が確保できる。 $a\omega=1.0$ cm/secとは、歩道橋として不適当と答える人がおよそ25%、少し振動を感じる人が約70%、明らかに振動を感じる人は約40%程度となる振動量である。

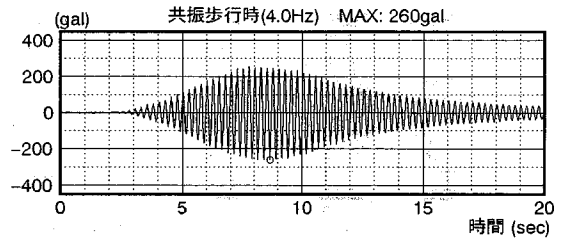


図-13 振動波形(共振時, f歩道橋)

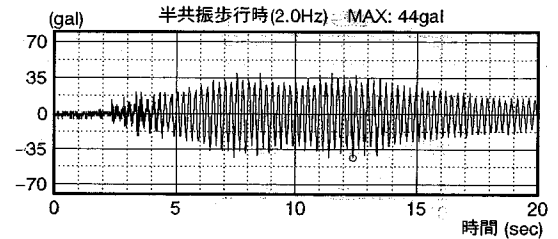


図-14 振動波形(半共振時, f歩道橋)

5. 歩道橋の応答特性

以上より、人間の振動感覚と忍限度の関係がほぼ明らかとなったので、次に歩道橋の動的特性から使用性に関する考察を加えることとする。

本研究では、歩道橋の動的応答特性を検討するために、札幌市内の標準的な横断歩道橋11橋について人力加振による強制振動実験を実施した。その結果を表-11に示す。

表-11より、まず1次の固有振動数に関しては、現在の基準における1.5~2.3 Hzに含まれる歩道橋は存在しなかった。しかし、人間の平均歩調のほぼ2倍に当たる約4 Hzの固有振動数を持つ歩道橋が3橋あり、これらに関しては興味深い結果が得られている。減衰定数に関しては、1次に関しておよそ1.0~1.5%、2次では0.6~1.5%程度の値が得られた。また、最大応答加速度に関しては、共振時にかなり大きい応答が得られるのは当然と言えるが、1次振動数の半分の振動数(以下、半共振と称す)で加振した場合にも比較的大きい応答値が得られることが判明した。図-13, 14に、強制振動実験により得られた波形の一例を示す。

図-14の応答性状は、波形から1次の共振状態となっており、実効値を考慮すれば歩行者に与える影響はかなり大きいと思われる。使用性を検討する際には注意が必要だと考えられる。また、共振および半共振以外の場合は30~50 gal程度の応答加速度が得られたケースも存在するが、波形からはこのような例のほぼ全部が歩行の衝撃による応答で、実効値で考慮すれば歩行者への影響は少ないと思われる。

さらに実験時における加振者の各振動数における歩行性状について言及すると、1.5 Hzでは非常にゆっくりとした歩き方で、2 Hz程度で通常の歩行となり、3 Hzではぼジョギング状態となる。特に2.3 Hz～2.7 Hz程度の歩行、あるいは走行状態は、現実にはあり得ない状態であり、この範囲に固有振動数を有するような歩道橋では、人間の歩行振動数と共振するケースは極めて稀であると思われる。また1.5 Hzの場合では、共振状態となる可能性はある程度有り得ると推定されるが、非常にゆっくりとした歩き方であるため起振力そのものが小さく、したがって応答も比較的小さくなることが予想される。加えて、文献27)では、振動数の下限値を1.6 Hzとした場合でも、使用性に問題は生じないことが報告されている。

以上より、照査を必要とすべき振動数の範囲は、現行の基準よりやや狭くして、1.6 Hz～2.2 Hz程度にしても十分であると思われる。ただし、運動公園内のジョギングコース等に架けられるような歩道橋では3 Hz程度の固有振動数は避けるべきである。また、通常の歩道橋の場合では、3 Hz程度でも使用性に問題はあまり生じないであろう。その理由は、“人が走ったために揺れた”ことがはっきり認識できれば、人間の心理反応としては不快感、不安感等があまり増大しないと思われるからである。加えて、前述のとおり4 Hz付近の固有振動数も、いわゆる半共振状態になった場合に比較的大きな応答量となる可能性を有することから、避けることが望ましいと思われる。

次に、照査を行う場合の荷重状態について考察する。上記のとおり、実験結果からは共振時以外でも多少大きい応答が生じる場合もあり得るが、これらは波形から衝撃による応答であり、継続的な振動ではないため、共振時以外では歩行者に与える影響は比較的小さく、よって共振時のみを考慮すれば十分であると考えられる。また荷重となる歩行者の人数であるが、過去の研究において、多数の歩行者のランダム歩行より共振歩行1名の方が応答値が大きくなること、日本の社会では多数の歩行者が歩調を合わせて歩行するケースは極めて稀であること、さらに振動が発生した原因が明確な場合には、人間の心理反応においてあまり不安感等は生じないと推定されること等が挙げられるため、共振歩行1名での照査を行えば十分であると考えられる。以上をまとめると以下のようになる。

- ① 振動数の範囲：1.6 Hz～2.2 Hzおよび4 Hz。ジョギングコース等に設けられる歩道橋の場合は上記に加えて3 Hz。
- ② 荷重状態：共振歩行あるいは走行1名。
- ③ 応答の最大値：使用性を重視する場合；振動速度の実効値で $a\omega = 0.8 \text{ cm/sec}$ 以下 ($a\omega_{\text{MAX}} = 1.13$

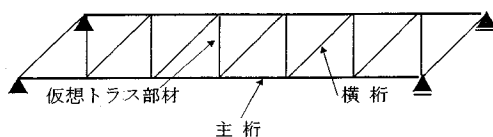


図-15 解析モデル

cm/sec)、または $VGL \leq 40 \text{ dB}$ 。

多少振動を許容する場合；振動速度の実効値で $a\omega = 1.0 \text{ cm/sec}$ 以下 ($a\omega_{\text{MAX}} = 1.41 \text{ cm/sec}$)、または $VGL \leq 42 \text{ dB}$ 。

6. 動的応答解析

本研究では、強制加振実験により得られた結果との比較を行うため、ニューマークβ法を用いた動的応答解析を行った。多自由度系の運動方程式は、

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \cdot \varphi(t) \quad (17)$$

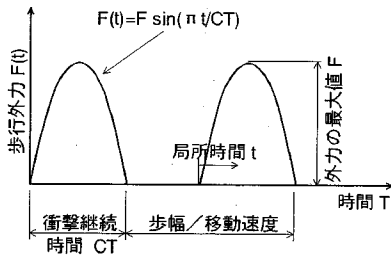
で表される。ここで M および K はそれぞれ整合質量マトリックスと剛性マトリックスであり、減衰マトリックス C はレーレー減衰を用いている。また式(17)における $\varphi(t)$ は、荷重分配係数ベクトルであり、移動する歩行外力を各荷重作用節点に分配するものである。なお、ニューマークβ法の係数βは0.25、時間間隔は0.01 secを採用した。解析モデルに関しては、床版のせん断変形を考慮した仮想トラス部材を有する3次元骨組構造モデルを用い、床版、高欄等の質量は主桁に付加することとした。図-15に解析モデルの一例を示す。

このような解析を行う場合、歩行外力 $F(t)$ がしばしば問題となるが、本研究では以下の3種類の方法を用いた。

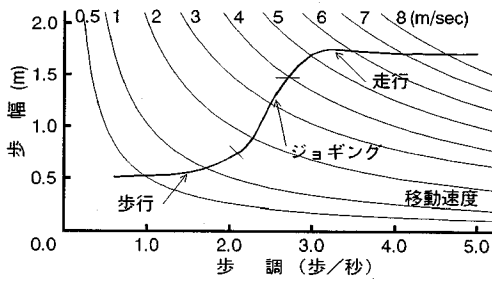
- ① オーストラリアのWheelerが提案する方法²³⁾。(以下、Wheelerの方法と称す)
- ② 梶川が提案する方法^{23), 24)}。(以下、梶川の方法と称す)
- ③ 梶川の方法における、入力余弦波の負の荷重部分(床版の下から上への荷重)を除外して、半余弦波として入力する方法。(以下、本研究の方法と称す)

図-16にWheelerの歩行外力を、図-17に梶川の歩行外力を、また、図-18に本研究で用いた歩行外力の入力波形を示す。

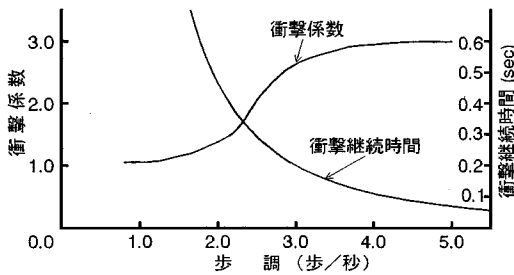
表-12ならびに図-19は、以上のようにして得られた解析結果である。なお図-19中の○はWheelerの方法による解析結果、◆は梶川の方法による解析結果、▲は本研究の方法によるもの、さらに、●および実線は実験結果である。実験結果と解析結果を比較すると、解析結果は必ずしも実験結果と一致しているとはいえないが、共振時に関してはWheelerの方法と本研究の方法は比較的良好な動的性状を表していると思われる。文献



(a) 入力波形



(b) 移動速度



(c) 衝撃係数と衝撃継続時間

図-16 Wheelerの歩行外力

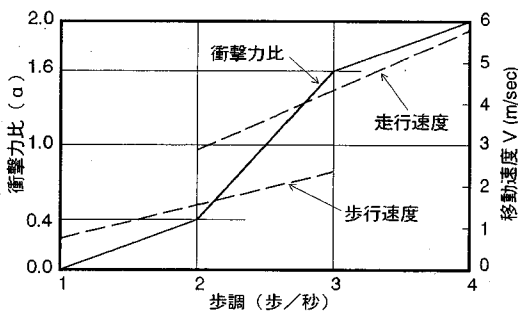


図-17 梶川の歩行外力

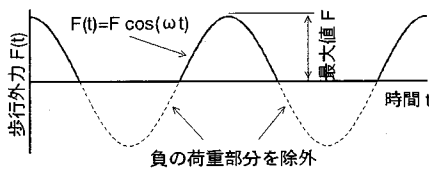
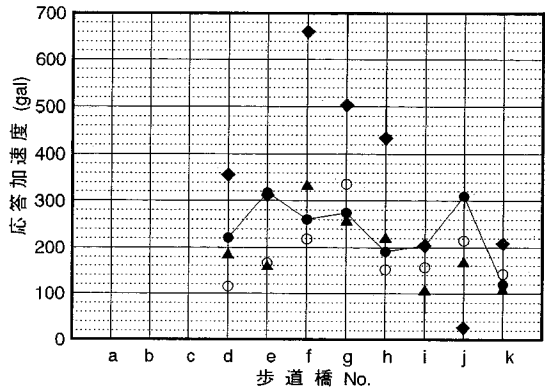


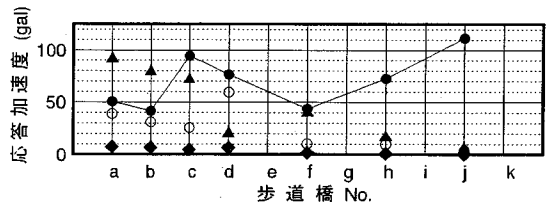
図-18 本研究における入力波形

表-12 解析結果比較表

橋梁	実験		Wheeler		梶川		本研究	
	共振	半振	共振	半振	共振	半振	共振	半振
a	—	51	—	39	—	8	—	92
b	—	42	—	31	—	7	—	80
c	—	95	—	26	—	5	—	72
d	221	77	115	6	356	7	184	21
e	318	—	166	—	312	—	158	—
f	260	44	219	11	660	2	332	40
g	274	—	336	—	503	—	256	—
h	192	73	152	10	434	1	219	17
i	205	—	158	—	205	—	105	—
j	310	112	215	4	26	1	167	6
k	121	—	143	—	209	—	107	—



(a) 共振時の解析結果



(b) 半共振時の解析結果

図-19 動的応答計算結果

22)によれば、Wheelerの方法は実験結果と比較的によく一致したことが報告されているが、これは歩道橋の動的応答変位に関して検討を加えたものであり、応答速度あるいは加速度応答値に関しては言及されていない。特に加速度応答の場合、簡単に考えれば、変位に対して固有円振動数 ω の2乗が乗ぜられるため、変位の誤差の比に対して、加速度応答値における見かけ上の数値の差が、かなり大きいものとなる可能性を有するものと判断できる。

梶川の方法においては、スパンが長い場合には実験値に比較的良好に一致するものの、スパンが短く、固有振動数が高い場合には、かなり大きめの解析結果が得られた。ただし梶川の方法は、モード解析法のための歩行外力で

あることから、これをそのままニューマーク β 法に用いることはやや無理があり、またスパンが長い場合には比較的よい解が得られるため、2 Hz 前後の場合であれば梶川の方法もかなりよい結果が得られると推定される。その理由は、固有振動数が高い場合には入力の衝撃係数が大きくなり、また余弦波をそのまま用いているために、床版の下から上への荷重が大きな影響を与えるが、低い固有振動数の場合では、衝撃力も小さく、上記の影響があまり生じないと思われるからである。半正弦波を用いている Wheeler の方法、半余弦波の本研究の方法では上記のような傾向は現れず、多少のパラメータの見直しで比較的よい結果が得られると推定される。

また、いわゆる半共振の場合では、梶川の方法では入力した振動数が卓越した解析結果となり、実験のように1次の共振状態とはならないことが判明した。よって、余弦波等をそのまま用いた場合には、半共振時の解析はほぼ不可能であると考えられる。Wheeler の方法ならびに本研究の方法では、解析結果は1次の共振状態となり、応答性状そのものは一致するが、応答の最大値等は必ずしも一致せず、今後課題を残す結果となっている。解の傾向としては、スパンが短く振動数が高い場合には解析値は比較的大きくなり、スパンが長い場合には解析値がかなり小さくなっている。したがって、半共振時の解析には、共振時とは別のパラメータを設定する必要があると思われる。

以上の結果から、まず共振時については、解析結果はある程度対象となる歩道橋の振動性状を把握することができ、使用性照査に用いることは可能であろう。ただし1種類の方法では十分でなく、現状では複数の方法で動的応答量を計算することが望ましいと思われる。また、半共振時に対しては現状では十分な結果を得ることは難しく、新たなパラメータを考慮する必要があると考えられる。

7. 歩道橋の使用性判定法

最後に、具体的な歩道橋の振動使用性判定方法について言及する。

まず、歩道橋の静的な設計が完了したら、その剛性、質量等を用いて固有振動数の計算を行う。ここで、その結果が1.6 Hz～2.2 Hz または4 Hz、ジョギング等が頻繁に行われる歩道橋ではこれらに加えて3 Hz 程度の固有振動数にならなければ、この時点で対象の歩道橋の使用性はほぼ問題がないことがわかる。

もし、上記の振動数の範囲に入るような場合には、次に共振時の最大動的応答量の計算を実施する。計算手法としては、今回用いた3種類の方法の他に、簡易計算法として BS 5400⁵⁾、Ontario code⁶⁾ で用いられる方法や、

田中・加藤が提案する方法⁴⁾等がある。

最大動的応答量が得られれば、これと前述の限度度の比較を行えばよい訳であるが、本研究で提案する限度度は振動速度実効値で表現されているので、得られた応答量も速度実効値に変換する必要がある。実効値の求め方に関しては、種々知られているが、その主なものとして梶川が提案する方法²³⁾がある。すなわち、支間中央で求められた最大応答値に係数 $\gamma_T=4/\sqrt{2}\pi^2$ を乗じる方法である。

限度度との比較においては、 $a\omega_{RMS}\leq 0.8$ cm/sec ならばその歩道橋の使用性はほぼ問題なく、 0.8 cm/sec < $a\omega_{RMS}\leq 1.0$ cm/sec の範囲であれば、設計者の判断で、対象となる歩道橋の立地条件、利用者等を考慮して検討を行えばよい。ここで、 $a\omega_{RMS}>1.0$ cm/sec となった場合、その歩道橋は使用性に問題が生じる可能性が大きく、再度静的な設計を行って剛性等を見直す必要があろう。

以後は、この過程を反復することによって、十分な使用性を有する歩道橋の設計が可能になると考えられる。

8. 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ならびに解析を通じて歩道橋の振動使用性判定に用いるための限度度について検討を加えたものである。また、歩道橋の動的応答特性に関しても検討を行い、設計段階での合理的な使用性判定法の確立を試みた。

その結果、まず限度度に関しては、振動速度あるいは“振動の大きさのレベル” VGL 値で表現された振動量に対して、電卓程度で簡単に人間の振動感覚を算定できる簡易式を誘導した。したがって、本方法では動的応答量に対する人間の振動感覚、あるいはその感覚量を簡単に計算できるため、設計者は従来の基準に比して、極めて柔軟に対象となる歩道橋の使用性を検討できるものと思われる。

一方、歩道橋の動的応答量からは、現行の基準で規定されている振動数の範囲よりもやや狭い範囲で検討を行っても、十分な使用性が確保できる可能性を有することが推定できる。ただし、ジョギングコース等に架けられる歩道橋では3 Hz 程度、また、いわゆる半共振状態を考慮した場合には4 Hz 程度の振動数にも注意が必要である結果が得られた。

動的応答量の解析方法に関しては、現状では十分とは言えず、今後課題を残す結果となっている。特に、半共振の場合については解析方法にかなりの検討が必要と思われ、歩行外力等のパラメータも独自に設定する必要があると考えられる。しかしながら、解析結果は動的性状そのものは比較的良好に一致するため、複数の方法で解析を行えば、ある程度応答量の推定が可能であり、した

がって設計時における使用性判定には有効であると思われる。

なお、本研究の一部に平成6年度文部省科学研究費奨励研究(A)(代表研究者 小幡卓司 課題番号 06750501)の援助を受けたことを付記する。また、実験に協力していただいた諸氏に対して、ここに記して深い謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 村上永一：土木構造物の設計とは何か，土木学会誌，57巻7号，pp.3-6，1972.
- 2) 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.
- 3) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，丸善，1979.
- 4) 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.
- 5) BS1 : Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2. specification for loads, 7.1.5 Vibration serviceability, BS 5400, 1978.
- 6) 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.
- 7) 田中良久：心理学的測定法，東京大学出版会，1971.
- 8) 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PART.B講演論文集，pp.9-14，1991.
- 9) 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.
- 10) 小幡卓司，窪田公二，林川俊郎，佐藤浩一：歩道橋の使用限界状態に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol.41A，pp.669-676，1995.
- 11) 小幡卓司，窪田公二，林川俊郎，佐藤浩一，及川昭夫：歩道橋の動的応答特性とその使用性について，土木学会北海道支部論文報告集，第51号(A)，pp.294-299，1995.
- 12) 小幡卓司，窪田公二，林川俊郎，佐藤浩一，及川昭夫：実歩道橋における歩行者の振動感覚について，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第1部(B)，pp.1032-1033，1995.
- 13) 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.
- 14) Reiher, H. & Meister, F. J. : The Effect of Vibration and People (in German), *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, Vol. 2, No.11, pp.381, 1931.
- 15) Janeway, R. N. : Passenger Vibration Limits, *SAE Journal*, Vol. 63, Aug., pp.48-49, 1948.
- 16) 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，pp.11-39，1971.
- 17) 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.
- 18) 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.
- 19) 中谷和夫：尺度構成法，講座心理学2，計量心理学第5章，東京大学出版会，1969.
- 20) 松本嘉司，佐藤秀一，西岡隆，塩尻弘雄：歩行者の特性を考慮した歩道橋の動的設計に関する研究，土木学会論文集，第205号，pp.63-70，1972.
- 21) 牛尾正之，南条正洋：歩道橋の振動に関する諸問題，日立造船技報，33巻3号，pp.28-33，1972.
- 22) Wheeler, J. E. : Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, *Journal of The Structural Division*, ASCE, Vol.108, No.ST9, pp.2045-2065, 1982.
- 23) 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.
- 24) 梶川康男，津村直宣，角本周：PC吊床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.
- 25) 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.
- 26) 梶川康男，中平進夫，薄井王尚：斜め吊材を有する自旋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.
- 27) 杉本博之，梶川康男：長支間歩道橋の振動使用性設計基準に関する考察，構造工学論文集，Vol.34A，pp.739-749，1988.

(1995.7.21 受付)

STUDY ON VIBRATION SERVICEABILITY LIMIT STATE OF PEDESTRIAN BRIDGES BASED ON HUMAN VIBRATION SENSIBILITY

Takashi OBATA, Toshiro HAYASHIKAWA and Koichi SATO

The purposes of this study are to investigate the human vibration sensibilities at the using of pedestrian bridges and to discuss serviceability limit states. Traditional ways of the relationship between the human vibration sensibilities and serviceability limit states are ambiguous. This relationship is presented in remarkably simple and the human vibration sensibilities obtained in this study can be applied easy to design pedestrian bridges.

The dynamic response characteristics of pedestrian bridges are investigated, and the range of the frequencies of pedestrian bridges that need the serviceability checking are considered in detail. And, the rational procedure to judge vibration serviceability on pedestrian bridges is proposed and the applicability is shown.