

歩道橋における振動感覚の数量化と設計への応用

NUMERICAL EVALUATIONS OF PSYCHOLOGICAL EFFECTS OF FOOT-BRIDGE-VIBRATIONS AND APPLICATIONS TO DESIGNS OF FOOT-BRIDGES

西 脇 威 夫*

By Takeo NISHIWAKI

1. ま え が き

公共構造物を設計する場合に、その設計の基準とすべき項目として村上¹⁾は、(1) 合目的性、(2) 安全性、(3) 経済性、(4) 施工性、(5) 環境との調和を挙げ、その中で合目的性が極めて重要な意味を持つと述べている。また公共構造物は無目的的に建設されることはなく、それは人間の物質的な生活水準を改良するため、あるいは改良しようとするプロジェクトの一環として建設されるのであるから、設計者はその目的が最も効率よく達成されるように構造物を設計すべきである。また近年品質管理という概念が構造物の設計ならびに特に施工の過程に導入されてきつつあるが、それを実施する目標は構造物の合目的性の追求にほかならないであろう。

従来設計作業において定量的に取扱われるものは、主として強度に基づく安全性であった。構造物が使用に耐えるということは、構造物が構造物として最も基本的な機能を果たしているにすぎないのであって、そのことによって、それがよい構造物あるいは総合的に能率のよい構造物であると見なすことはできないであろう。総合的に構造物の経済性を広い意味で把握しようとするとき、合目的性が何かの形で定義づけられ、さらに従来の設計作業の進め方に立脚すると、それを数量化しておくことが設計作業を進める上に好都合である。

現存する構造物の大部分は、数量的には強度を基礎とする安全性の確認のみで設計・架設されてきているが、それらが、おびただしく合目的性から逸脱しているとは考えられない。これは、構造力学、材料ならびに接合法などが相互に関連し、強度的にその安全性が保証されることで合目的性がある程度みとされ、安全性の数量的評価の陰に合目的性の数量的評価が隠されてしまったためであろう。そのために合目的性の検討が重視されてい

なかったのではなからうか。また品質管理という概念が合目的性の追求のため重要視され、いくたの手法が開発されつつあるが、いかにすぐれた手法であっても管理の目標すなわち合目的性が明確化されていない限り管理は困難である。構造物に対して望まれるべき要求の数量化すなわち合目的性の数量化がこの面でも重要な問題となってくるのではあるまいか。

高層建築の風に起因する振動による不快感への着目²⁾は、構造物の合目的性の数量化への一つの試みであった。合目的性をどのように定義し、どのように数量的に評価して設計にそれをしん酌すべきかについては、不明な点が極めて多く、その必要性を認めながらも、それへの実験面でのアプローチの実例は少ない。

歩道橋はその構造も割合簡単であり、かつ架設目的も他の橋梁と比較すると具体的に把握し易い。すなわち、歩道橋は危険な車道あるいは歩行に危険または困難な場所の歩行を歩行者に要求せず、車道の交通流を停止させることなく歩行者に歩行の場を提供し、しかも歩行者が欲する時刻に安全な歩行の場所を提供しようとする構造物である。横断歩道橋では、地表を車に譲って歩行者にある高さまでの昇降を強いるのであるから、安全であること以外にその不便さを少しでも軽減する配慮が当然必要である。歩道橋上を歩行するとき、歩道橋の持つ何らかの原因で歩道橋上の歩行が地上の歩行よりおびただしく不快であったり、困難となることは、歩道橋の目的を上記のように認識する限り、架橋の目的が十分果たされている歩道橋とは認め難いものと考えなければならないと思われる。また横断歩道橋に限らず、在来橋に並列架設される歩道橋においても、その快適な歩行性は、当然要求されるべきものであって、計画さらに設計において、ただ単純に歩行の空間のみの提供を意図することは慎まなければならないであろう。

このような観点から、筆者は歩道橋の合目的性に関し、歩行時に歩行者などが原因となる橋の振動が、歩行者に

* 正会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部土木工学科

与える心理的な量—情緒量—を評価することで合目的性の充足の度合を評価することとした。このような試みにまず必要なことは、振動感覚の数量化であろう。そして数量化された振動感覚と情緒量の関係、そして設計にあたって設計者が制御できる設計変数とそれらの関係を求めることによって、いわゆる設計作業の中に合目的性の数量的評価を導入することができるであろう。

2. 振動感覚に関係した最近の研究

振動感覚に関係した研究として、古くは 1930 年頃より乗心地などの研究、機械振動の人体への影響などに注目して、振動感覚の数量化をはかったものがあり、それらは、R.J. Steffens¹⁴⁾あるいは K.M. Solomon¹⁵⁾らによってまとめられている。

振動感覚を比例尺度上に数量化しようとした試みは小堀・梶川²⁾のものと三輪³⁾のものがある。前者は橋上を歩行する歩行者の心理応答を対象としており、後者は、各種の姿勢についての数量化を実施している。これらについてはさらに 3. において検討を加える。

数量化された心理的な応答を橋の設計に導入しようとした研究は、筆者の知る限りでは小堀⁴⁾の歩道橋の腹板高/支間長と心理量を扱ったものと、筆者⁵⁾らのもののみである。

橋梁の振動の歩行者に与える心理的な影響に論及したのものとしては、松本¹⁷⁾、牛尾¹⁸⁾、片山¹⁹⁾、星谷²⁰⁾、小堀²¹⁾の研究がある。

欧米において、橋の振動が歩行者に及ぼす心理的効果のことにふれたものは、筆者の知る限りでは Scatazzini, P.⁵⁾のみである。彼はスイスに支間長約 46 m の P C 桁を主構造とする歩道橋が架設されたとき、それが歩道橋であるので、振動特性が重要な意味を持つとしてその振動を測定した。振動数と振幅の関係は K 値で整理されている。集団で歩調を合わせて歩行する場合が、 K 値で 30 以上となるが、単独で歩行する場合の方が多人数で歩調を合わせず歩行する場合よりやや大きく、前者は 10 をわずかに超えるが、後者の場合 10 を超えなかったことが報告されている。しかしそれらの測定結果に基づいての設計に対するアプローチには言及していない。

Peter W. Chen らは、実験室内にての振動に対する心理的応答に関する測定結果を報告している⁹⁾。彼らの実験はのべ 112 人の被験者に対する 0.067~0.2 Hz というかなり周期の大きい領域での実験であり、近年増加しつつある高層建築物中の居住性の数量的な評価を目指したものである。心理的な応答として感じない場合も含めて、情緒的な応答を 6 段階に分け、全く感じない場合 (0) またはわずかに感ずる (1) を怒限度とみなし、怒限

度に影響する因子を調べた。この実験の対象となった振動数領域では怒限度は振動数に関係せず、一定加速度でそれを表わしうると見なした。また振動に対する期待感によって怒限度は下り、被験者が歩行しているか否かによっても怒限度は異なり、怒限度に影響を与えらると思われた因子 7 個に対して怒限度への影響の度合を検討したが、それらのうち最も効果が大きかったものは期待感であったと述べている。さらに、因子が組合されることにより怒限度の分布の幅が変わり、それは対数正規分布になると述べている。従来諸外国の研究例が 1 Hz 以上であることからはこのように低い振動数領域の研究は注目すべきものである。

John F. Wiss らは、建物の利用者の歩行によって生ずるような、床の鉛直過渡振動の心理応答について加速度、最大振幅及び減衰定数を因子として、測定結果を報告している¹⁰⁾。実在の建物の床の振動を測定した結果を基として、被験者に実験室において与えるべき過渡振動を、約 0.2 秒で最大振幅になりそれ以後減衰し、増加過程のピークは直線で、減衰過程のピークは指数曲線で結ばれるような波形を提案した。実験に採用した振動数の領域は 2.5~25 Hz であった。この実験の範囲では、振動数と振幅の積が一定の場合に、一定の応答を示すことを述べているが、これは小堀や三輪の研究の結果と一致する。さらに振幅と振動数の積で定義された量と、5 段階に分けた情緒量と減衰の間の関係を調べ、情緒量を指数法則に準ずる形で表わすと実験結果と最もよく合うと述べている。

前記の P.W. Chen はかなり低振動数の振動を取扱い、J.F. Wiss はそれより高い振動数領域であり、振動の持続時間はかなり短い振動に対する研究をしたが怒限度には大きな相違が双方にないことがわかる。

Fu-Kuei Chang¹¹⁾、Robert J. Hansen¹²⁾、そして J.W. Reed¹³⁾ は自然風によって生ずる実在の高層建築物の振動によって、建築物を利用する人がどのような情緒的反応を示したかを述べている。

Chang はすでに文献 7) に風によって生ずる振動と情緒との関係を、建物の周期と風によって生ずる振動の振幅との関係で示しているが、それが実在の建物の使用者の反応と一致するか否かを 4 つの建物の使用者について調べた。その結果として、風によって生ずる振動は、そのパラメーターが狭い範囲でしか動かないから、従来の実験結果から外挿してもよいと述べ、さらに情緒量のおのおのに対応する加速度領域も示した。

Hansen は、2 つの建物の使用者に対し、強い嵐のあとアンケート調査及び面接を行い心理的反応について詳細な調査を行った。その結果、建物の居住者は、短時間の振動を、一つの強風時の不快感と認識するので、1 年

間に不快感を感じる場合の数を設計の対象とすることを提案した。すなわち1年間に不快感を感じるほどの強風の襲来する確率を求め、その確率を基礎として、不快感を感じる人の期待値を百分率で求める式を示した。それらより、上記の期待値と、再現期間との関係を示し、一つの提案として、設計の対象とすべき強風の再現期間を6年としてそのとき居住者の2%が不快感を感じずような設計基準を示した。

ニューヨークの世界貿易センタービル¹⁸⁾の設計にあたっては、すでに述べた Chen⁹⁾の研究結果に基づき、10 mGの水平加速度をもつ水平振動が発生する回数を1年に12回をこえないようにした。

3. 心理尺度と振動感覚

(1) 心理尺度

人間の行動決定の因子となる刺激と、何らかの意味でその結果と考えられる行動との間に一義的な関数関係を作ることは一般的には不可能なことであろう。しかし当面する問題では刺激としてはいくつかのパラメーターから成り立つ振動を考え、行動としては、それをその一側面から把握する感情またはその強度としての情緒として、それらの数量化を試み、それを設計へ数量的に反映させるのが本論の目的である。

振動は、人間への刺激として、振幅、振動速度、振動

加速度、振動加速度の変化率そして振動数などを持つが、それが人間に加えられたとき、人間には刺激である振動により、大小関係のある意識内容がひき起こされる。ある振動が人間に加えられたときその人間の内面にひき起こされる意識内容の大小を比例尺度上に求めたものを振動感覚の心理尺度と称える。心理尺度が構成されれば、振動は物理的には前述のように多くのパラメーターを持つが、それらが合成された一つの刺激として人間に作用していると思なすことができ、そのように一次元の尺度上に数量化された刺激に対応する情緒の強さをさらに他の一つの尺度上に構成することにより刺激と行動間の関数関係を見出し得るものと思なすこととする。本論では、情緒は序数尺度上に構成した。

問題としている橋の振動に起因する歩行者の振動感覚の数量化に用いる現時点で構成されている心理尺度には、小堀²⁾の尺度と三輪³⁾の尺度があり本論ではその両者によって振動感覚の数量化を行った。そこで、以下数量化を行って振動感覚を評価するうえに重要と思われる二、三の点について比較検討する。

(2) 等感度曲線と振動レベル

振動によって生ずる人間の意識内容は、すでに述べた振動の各種のパラメーターの組合せによって、あるレベルに達する。これらは、小堀や三輪が実施したように、被験者に各種の組合せから成るいくつかの振動を与え、被験者の意識が等しくなるものを被験者を選択させるこ

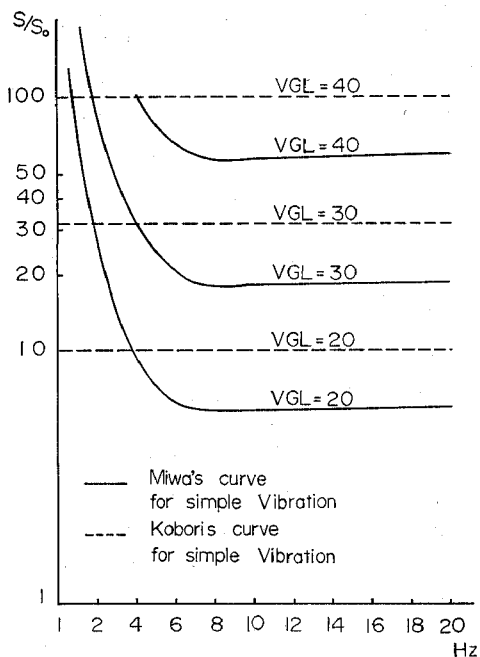


Fig. 1 Equal sensation curves by Miwa and Kobori

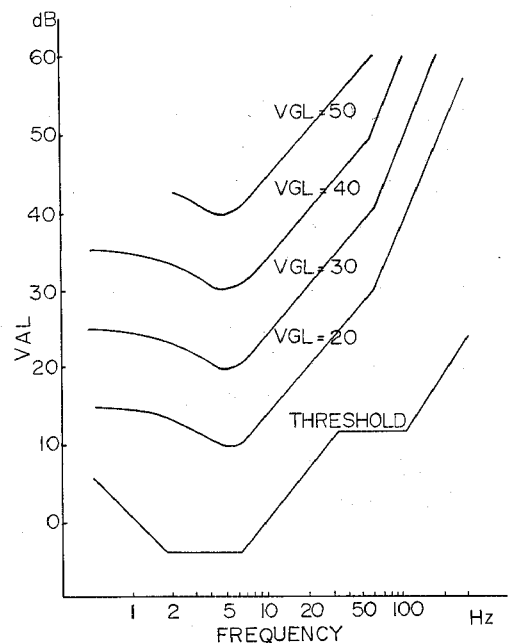


Fig. 2 Equal sensation curves represented by acceleration levels by Miwa

などにより得られる。

このようにしていわゆる等感度曲線が得られるが、両者の求めた等感度曲線の最も大きな相違は、被験者に与える振動の振動数が 20 Hz 程度までのとき、小堀は、振動感覚は、振動速度によってのみそれが支配されるものとした。すなわちその範囲ではある振動速度の振動はどのような振動数の振動であっても、それを同一のレベルとして被験者は受取るというのに対し、三輪は、6~8 Hz から 20 Hz 位までは、小堀とほぼ同じと見なす、がそれ以下では必ずしも一定振動速度が一定振動レベルに対応するとはしていない点にある。橋の振動がかなり低い振動数領域で発生していることから、この相違は数量化に一つの問題を与えている。両者の関係を示すものが Fig. 1 である。三輪は Fig. 2 に示すように加速度レベルで等感度曲線を与えているので、それを速度レベルに変換して Fig. 1 に三輪の曲線として示した。

振動レベル (VGL) はそれぞれ次式で与えられている。

$$\left. \begin{aligned} \text{三輪の振動レベル } VGL &= 20 \log_{10} \left(\frac{a}{a_0} \right) \\ a_0 &= 1 \text{ cm/sec}^2 \\ \text{小堀の振動レベル } VGL &= 20 \log_{10} \left(\frac{S}{S_0} \right) \\ S_0 &= 1.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.1)$$

なお三輪はすでに述べたように振動数によって振動感覚が異なるので VGL としては、20 Hz のときの感覚を基礎として、等感度曲線を構成した。

(3) 振動の大きさ

上述の振動レベルは、それぞれ与えられた振動を同じレベルに感ずる加速度レベルまたは速度レベルを示すのであって、それらはともに比例尺度上に構成されているものではない。感覚を数量化し、設計計算に数量として用いるためにはそれらに四則演算の可能性を与えなければならぬ。すなわち振動レベルを比例尺度上にあらためて構成することが必要である。この比例尺度上の数値の単位として、両者とも VG を用いている。

振動の大きさ VG は、それぞれ次式で与えられている。

$$\left. \begin{aligned} \text{三輪の振動の大きさ} \\ \log_{10} VG &= 0.030 VGL - 1.20 \quad VG \leq 1 \\ \log_{10} VG &= 0.023 VGL - 0.92 \quad VG \geq 1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2 \cdot a)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{小堀の振動の大きさ} \\ \log_{10} VG &= 0.05 VGL - 2.0 \quad VGL \leq 40 \\ \log_{10} VG &= 0.03 VGL - 1.20 \quad VGL > 40 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2 \cdot b)$$

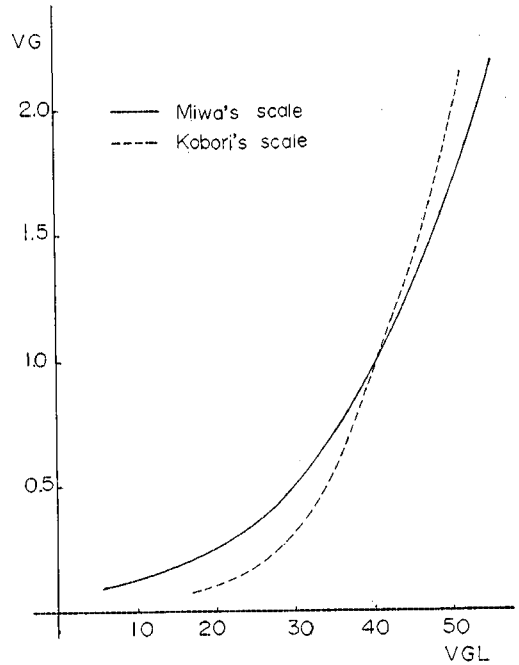


Fig. 3 Relations between Miwa's scale and Kobori's scale

これらの関係を示すものが Fig. 3 である。双方、VGL が 40 の振動の大きさを 1 としているが、Fig. 1 に示したように、ほぼ 4 Hz の振動の振動レベルが両方で一致している。また三輪は式 (3.2.a) の周波数依存性を実験的に確認した結果大きな依存性は認められないと述べている³⁾。

振動速度 S の正弦振動を、両尺度で評価するとき両尺度によって生ずる差を示したものが Fig. 4 である。

また両尺度で与えられる VG の関係を示したものが Fig. 5 である。

(4) 複合振動の振動の大きさ

(3) に述べたことは、人間に加えられる振動が単一の振動数成分のみを持つ単純正弦振動の場合に対するものである。われわれが実際に橋あるいは建物などから感ずる振動は、通常の場合、単純な正弦振動の合成である複合正弦振動またはそのように見なしうる振動であって、このような振動による感覚が実際には重要である。

前述のように、三輪の尺度と小堀の尺度は (1)~(3) の範囲では数値のとり方などに若干の差異はあったが、尺度を構成する思想に大きな相違はなかった。しかし複合振動の評価については、両尺度はその見解をやや異にしている。

三輪は 2~4 個の振動数成分から成り立つ複合正弦振動の各成分の振動レベルと、20 Hz の単純正弦振動のレベルが等しくなるものを実験的に求めて、それを式 (3.2

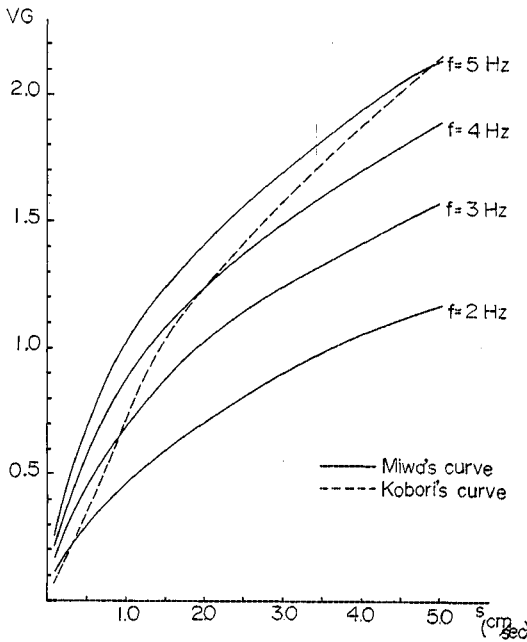


Fig. 4 Vibration greatness evaluated by Miwa's scale and Kobori's scale

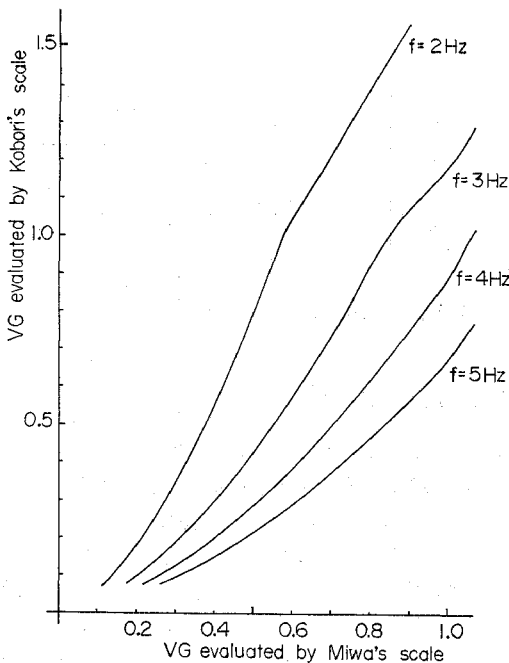


Fig. 5 Theoretical Relations between Miwa's scale and Kobori's scale

・a) で振動の大きさに換算した。さらに各成分間に、S.S. Stevens の荷重加算法が成立するとしてその係数を実験的に求めた。その結果次式を得ている³⁾。

$$VG_T = VG_M + 0.3(\sum VG_i - VG_M) \dots (3.3.a)$$

一方小堀は、2つの正弦振動を成分とする複合正弦振

動を被験者に与え、2つの成分のうち基本となる振動成分の振動数を持つ単純正弦振動と、与えた複合正弦振動の振動レベルが等しくなる単純正弦振動の振動数と振幅をまず求めた。それより等価された単純正弦振動の振動速度と、被験者に与えた複合正弦振動の成分の速度の二乗和の平方根を比較した結果より成分の二乗和の平方根によって S を求めてよいとした。

すなわち

$$S = \{\sum \sigma_{vi}^2\}^{1/2} \dots (3.3.b)$$

(5) ランダム振動の振動の大きさ

複合正弦振動と同様にこの場合にも、両者は見解を異にする。三輪は等感覚曲線が、単純正弦振動のものとは若干異なることを述べ、12 Hz の単純正弦振動は、1 オクターブバンドランダム振動(中心周波数)より約 7 dB 強く感ずると述べている。またランダム振動の等感覚曲線を加速度の実効値のレベルで描くと、3~15 Hz で、周波数に関係せず一定であり、さらに等感覚曲線はバンド幅が 1/3 オクターブになっても変わらないと報告している。また各成分の振動の大きさと、ランダム振動の大きさの間には、S.S. Stevens の荷重加算法が複合正弦振動の場合と同様に成立すると報告している。式 (3.3.a) を 1/3 オクターブバンドで求めた成分を用いて示すと次式になる。

$$VG_T = VG_{M,1/3} + 0.13(\sum VG_{i,1/3} - VG_{M,1/3}) \dots (3.3.c)$$

小堀は実橋の測定記録をランダム振動として被験者に与え、その卓越振動数をもつ正弦振動と等しい振動レベルとなる振幅を求めた。その結果、橋梁の振動に関する限り、正弦振動によって得られた評価法がそれに適用できると述べている。

(6) 歩道橋の振動による両尺度の比較

後に示す東京都内にある 23 橋の歩道橋の実測記録に対して、両者の心理尺度を用いて振動の大きさを求めた。得られた振動は複雑な波形を示してはいるが、それらはランダム振動ではなく、複合正弦振動であると見なして、三輪の尺度による場合、正弦振動の等感覚曲線によったが、測定値の整理を 1/3 オクターブごとに整理したので、 VG_T の算出は式 (3.3.c) によった。その結果を Fig. 6 に示す。

卓越振動数をパラメーターとして、両者を比較すると、両者間にはかなりよい直線関係が得られる。その一例を Fig. 7 に示す。小堀の尺度によって求められる VG を Y 、三輪の尺度によって得られるそれらを X とすると

$$Y = aX - b \dots (3.4)$$

Fig. 6 に示されたデータを卓越振動数ごとに分類して、直線回帰を行って得られた係数 a, b を Table 1 に示す。

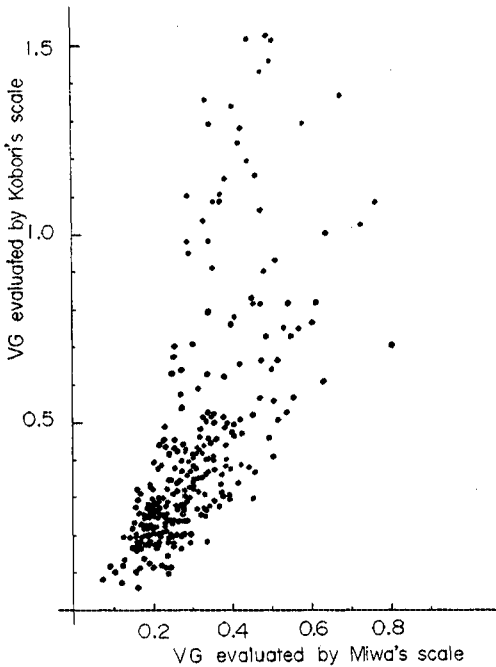


Fig. 6 Measured Relations between Miwa's scale and Kobori's scale

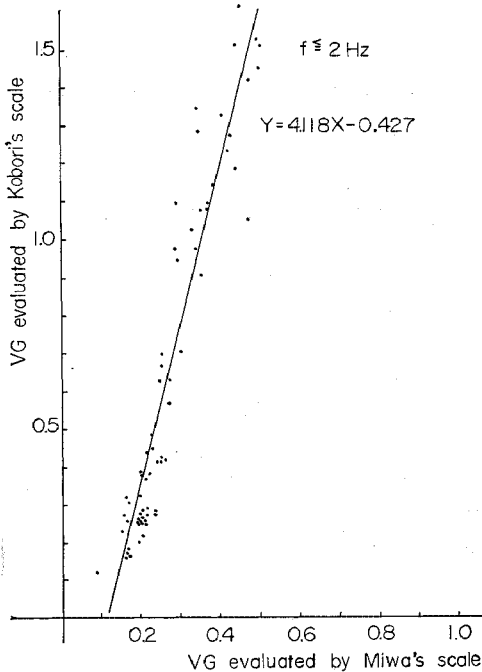


Fig. 7 Relation between Miwa's scale and Kobori's scale

Table 1 式 (3.4) の係数 a, b

卓越振動数	a	b
2 Hz 以下	4.118	0.427
2~3 Hz	1.969	0.166
3~4 Hz	1.312	0.043
4 Hz 以上	1.773	0.246

卓越振動数が 4 Hz 以上のカテゴリーに属する振動の場合は、卓越する振動成分の振幅と他の成分の振幅とに顕著な差が見出し得ないが、それ以外の場合は卓越する振動成分の振幅に対し他の成分の振幅はかなり小さくなる傾向を持っている。

(7) 振動の大きさと情緒

以上述べた振動の大きさは、人間に加えられた刺激に対する人間の感覚（知覚器官によって得られる反応）である。そのような感覚として得られた刺激が人間に好ましいものであれば、それをより多く採入れる方向への運動が生じ、それを忌避すべきものと認めればそれから遠ざかるうとする運動が生ずる。この運動にもレベルが存在し、そのレベルを情緒レベルとする。

本論で採用したレベルは Table 2 に示す 5 段階である。

Table 2 情緒レベル

1	Imperceptible
2	Barely perceptible
3	Distinctly perceptible
4	Strongly perceptible
5	Severe

4. 数量化された歩道橋の振動

(1) 測定とデータ処理

測定の対象とした歩道橋は、都内にあってその諸元が明らかであり、歩行者の比較的多いと見なされたもの、さらに本学よりなるべく近くに存在しているものとした。さらに構造は単純支持または 2 径間の連続支持となっていて、力学モデルと実橋の構造形式がなるべく近くなるものを選んだ。その総計は 23 橋である。

現場における実測は、午前 8 時より午後 5 時まで、15 分間隔に支間中央の鉛直振動加速度を、アナログデータレコーダに記録するとともに、その時点の歩行者数を記録し、さらにその時の歩行者に対し渡り終ったときに面接して、アンケート調査を行った。

データレコーダに記録されたデータは、研究室において AD 変換して紙テープに穿孔し、その紙テープより直ちに電子計算機により、両尺度による振動の大きさな

ど、任意の必要な解析結果が計算機出力として得られるようにした。

(2) 測定結果

測定したデータを心理尺度を用いて振動の大きさに変換したものの一部を各橋ごとに三輪の尺度で示すと Fig. 8 になり、一つの橋において荷重の状態(歩行状態)によって、振動の大きさはかなり広い幅に分布することがわかる。

Fig. 9 に、15 分ごとに測定した振動の大きさとその時の歩行者の数との関係の一例を示した。歩行者数には時刻によって明らかに卓越するところが存在する。この橋は、中小高校および大学が近くにあり、それらの生徒・学生の下校時に明らかなピークが歩行者数において生ずる。一方振動の大きさには、歩行者の数ほど顕著なピークが生じない。振動の心理的な大きさに関係するものとして、歩行者の数はそれほど大きな影響を持たないと思われる。

歩行者に対する面接アンケートは、約 500 名の歩行者に対して実施された。その解答は、心理的な大きさに関係すると思われるいくつかの因子に対して分析されたが、それら因子の代表的なものとして 1) 性別、2) 歩行状態、3) 歩行の目的、4) 年齢、5) はき物、6) 職業などが分析の対象となった。これらの因子に対する歩行者群の構成は Fig. 10 のようであった。

(3) 歩行者の振動感覚と情緒量

歩行者または橋上に静止する者が、歩行者によってひき起こされる振動によって感ずる振動感覚の大きさ(三輪の尺度による VG_T または小堀の尺度による VG)と、Table 2 に示す情緒量の関係をすべてのデータを用いて累積分布曲線で示すと Fig. 11 (a) および Fig. 11 (b)のごとくなる。Fig. 11 (a)において情緒量 1 の累積曲線の 10% から 100% までに対応する振動の大きさは VG_T 0.05 から VG_T 0.2 までの VG_T の差は 0.15 であるのに対し、他の情緒量の累積曲線は、その 2~3 倍の幅にわたっている。これは、振動を感じな

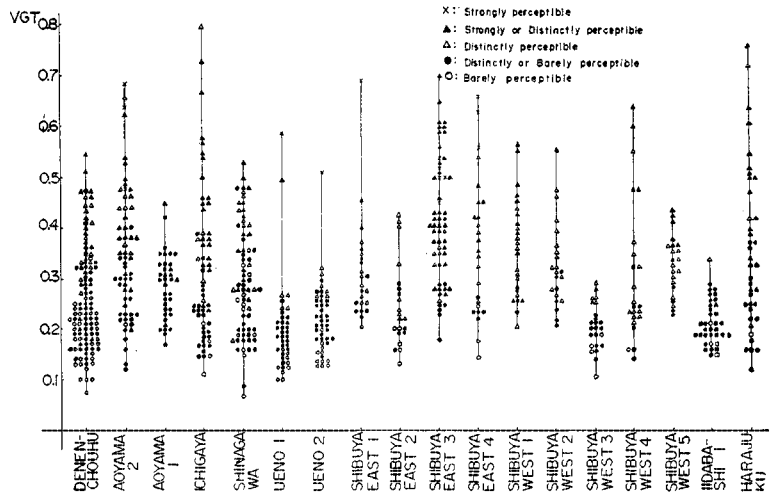


Fig. 8 Measured Vibration Greatness

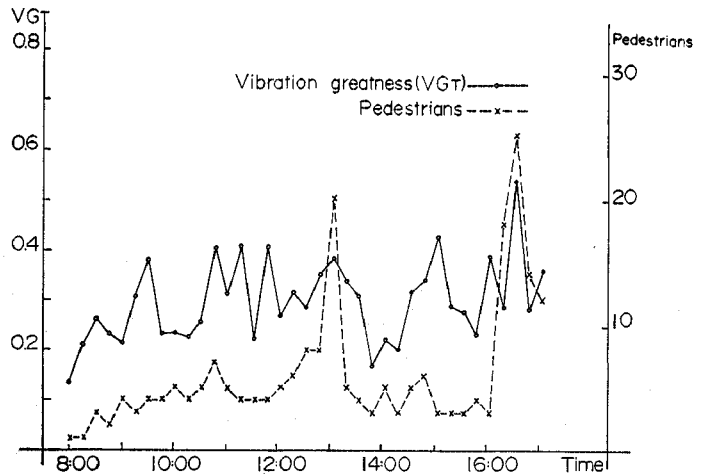


Fig. 9 Vibration greatness and Numbers of Pedestrians

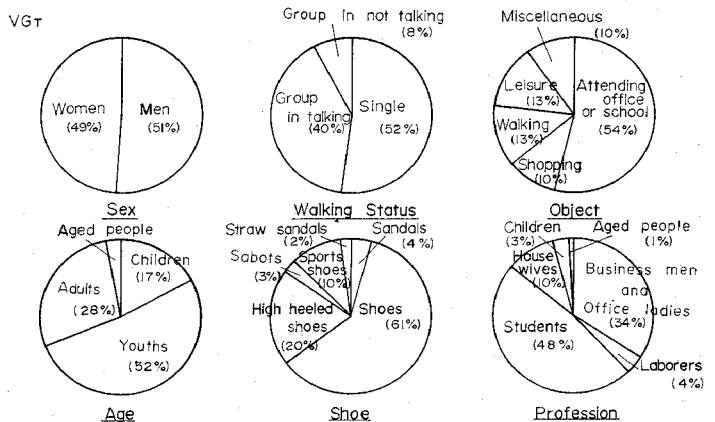
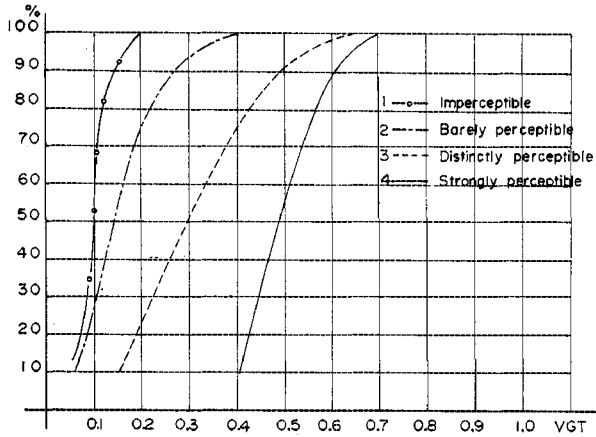
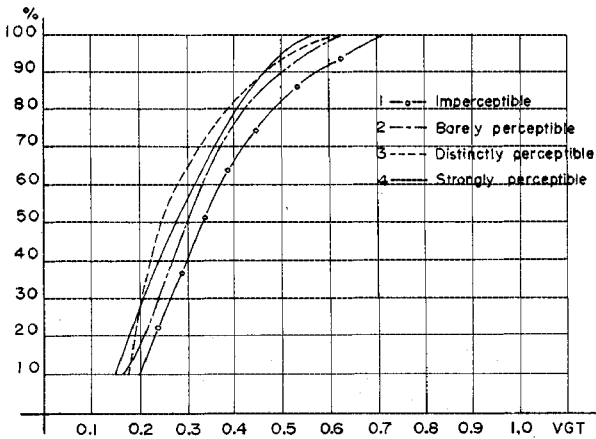


Fig. 10 Constitutions in each of factors



(a) Standing



(b) Walking

Fig. 11 Cumulative distribution curves for Emotions of Pedestrians on Foot-bridges

いことに対する大勢の人の意見は一致するが、振動の感じ方には個人差があることを示し、振動による情緒量の数量化の難しさと、さらに、もし将来それを示方書あるいは指針などに導入するとしたならば、技術的な視点からではない検討が必要であることを示しているものと見てよいであろう。情緒1の50%累積値に対する VG_T の値を以て振動の怒限度とするならばそれらは、Table 3 のようになる。これより極めて平均的には、歩行中には、静止状態において振動を感じ始める振動の3倍の振動で、ようやく振動を感じずということがわかる。静止中の人が感ずる振動の大きさと情緒の関係は、同じように累積値50%に対応する値をとると、Table 4 のように評価できる。

一方歩行中には静止中に比べて振動に対する情緒は鈍くなり全体として情緒的な認識程度を論ずることは難しい。Fig. 10 に示したような因子ごとに累積値50%に対する VG_T 値で情緒を示すと Table 5 のようにな

Table 3 怒 限 度

	三輪の尺度 (VG_T)	小堀の尺度 (VG)
歩 行 中	0.35	0.36
静 止 中	0.10	0.16

Table 4 情緒量と振動の大きさ (静止中)

情 緒 量	1	2	3	4	5
振動の大きさ	0.1	0.15	0.3	0.5	—

Table 5 振動の大きさ

Factor	Emotion	1	2
		Imperceptible	Barely Imperceptible
Standing		0.10	0.13
Walking	Men	0.32	0.35
	Women	0.31	0.32
	Businessmen	0.30	0.38
	Laborers	0.37	0.40
	Students	0.32	0.34
	Housewives	0.25	0.28
	Children	0.36	0.27
	Single	0.33	0.37
	Talking	0.39	0.31
	Group Not talking	0.30	0.26
	Business	0.33	0.37
	Shopping	0.27	0.27
Walking	0.26	0.20	
Miscellaneous	0.32	0.34	

る。情緒として1および2のみ示してあるが、アンケート調査の答えとしては3、または4も存在している。しかし、3および4と答えた人は、おそらくは、アンケートを受けてはじめて振動の大きさを意識したもので、歩行中振動の大きさに特に興味を持っていなかったのではないと思われるので、それらは集計の対象とはしなかった。

かなり明瞭に情緒の変化が見られる因子としては、性別における男性、歩行状態別における単独、歩行目的別における通勤通学、年代別における青年および壮年、靴の種類別においては革靴そして職業別においてホワイトカラー族と学生などである。それらの累積曲線の一例を Fig. 12 (a) および Fig. 12 (b) に示す。

Table 5 において情緒1に対応する振動の大きさのうち、因子“主婦”、“買物”および“散歩”と、因子“ホワイトカラー”、“労働者”、“学生、生徒”、“ビジネス”に属するものとの間に0.05~0.1の違いがある。このことは住居地域と考えるべきところと、ビジネス地域とみなしうところでは、利用者の振動に対する心理的反応に数量的な違いがあると見なしてよいことを示していると考えてよいであろう。振動の感覚を設計因子とすれば、ビジネス地域に架ける歩道橋より、住居地域に架ける橋

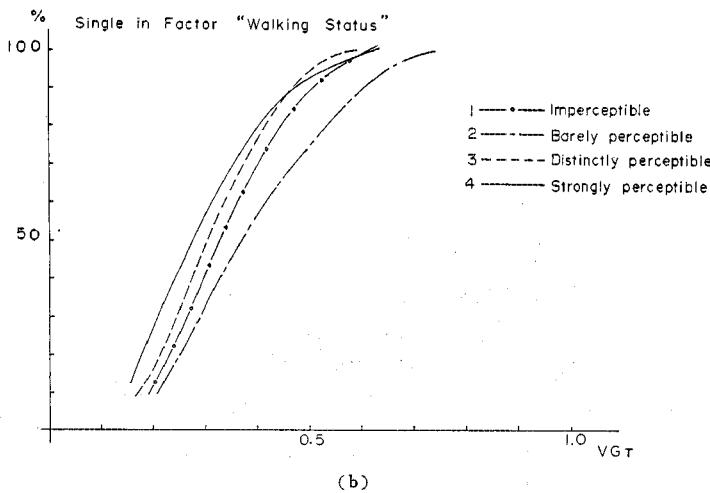
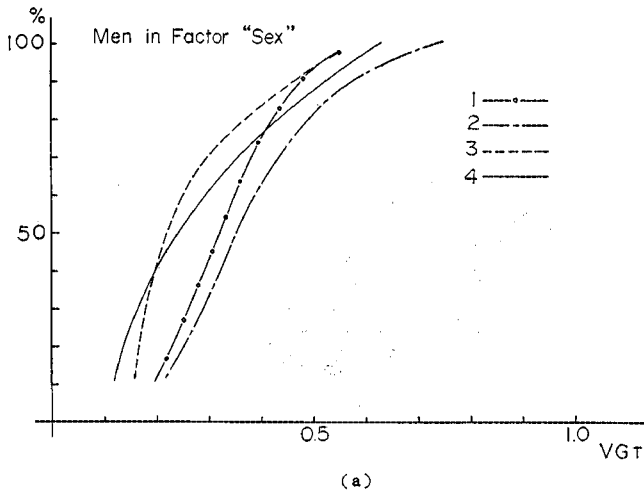


Fig. 12 Cumulative distribution curves for Emotions of pedestrians on Foot-bridges

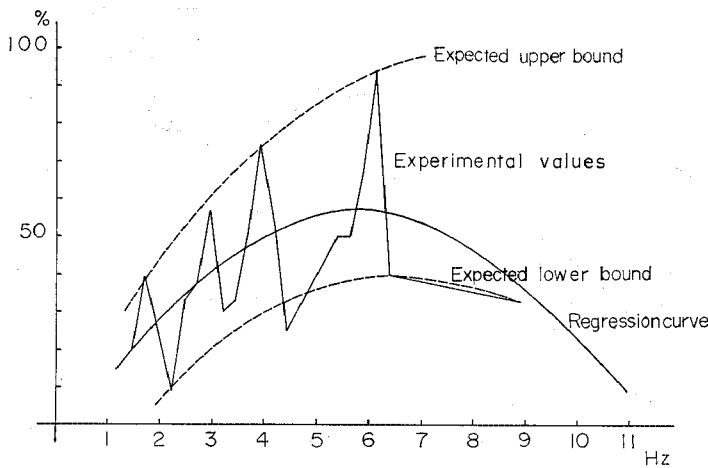


Fig. 13 Probability curve that pedestrians feel such that vibrational greatness is greater than 0.3

に対し厳しい条件をつけても、合目的性は数量的に同一となることを示唆している。

さらに男性と女性を比べると、女性の方がやや鋭く振動を弁別しており、特に職業別で分類すると主婦の弁別の度合は鋭い。歩行目的で分類すれば、買物とか散歩の場合が鋭く、勤務中は感覚が鈍くなっている傾向が見られる。

5. 振動の大きさと歩道橋の構造特性

(1) 卓越振動数と振動の大きさ

測定分析した歩道橋の振動記録の振動数スペクトラムから、それについて次のような特性があることがわかった。すなわち、(1) 10 Hz をこえる振動数成分が含まれることはあまりなく、あっても極めて小さい。(2) 最も大きな値を持つ成分の振動数が 3 Hz 以下の場合には、それ以外の成分は小さい。(3) 最も大きな値を持つ成分の振動数が 3 Hz を越える場合は、それに続く大きさの成分の大きさが、最大成分のそれに比べて、たいして小さくならない。

このようなことから、振動数スペクトラムの中で卓越する振動成分の振動数と、振動の大きさの関係を調べた。Fig. 13 にその一例を示す。測定されたデータのうち、振動の大きさが 0.3 を越える場合の数の割合を縦軸に、横軸に卓越振動数をとった。換言すれば、振動の大きさが 0.3 を越える確率を実測された卓越振動数に対して示したことになる。荷重である歩行者の歩調は、その平均値が 1.99 歩/秒¹⁷⁾であると報じられているが、これから見ると歩行者の歩調による周期的加振は、特殊の場合を除けば、それほど大きな影響を持っていない。平均値が 1.99 歩/秒の周期的加振力を持つ荷重が、確率的に位相差を持ちながら分布して橋に進入すると見なすと、その分布はポアソン分布になるといわれており^{17), 18)}、歩道橋の荷重はいわゆる不規則な変動荷重であるからであろう。

また卓越振動数と、計算で得た固有振動数も必ずしも一致しない。たとえば、2.3 Hz の固有振動数を持つ橋の測定データ 38 個のうち、卓越振動数が 3.6 Hz のもの 2、3.9 Hz のもの 14、4.2 Hz のもの 19、4.4 Hz のもの 1、6.8 Hz のもの 1、8.5 Hz のもの 1 であり、半数のデータが 4.2 Hz の卓越振動数を持った。ほとんどのデータの卓越振動数は固有振動数より大きい。中には固有振動数 2.2 Hz の橋の測定結果 36 データのうち 1.7 Hz のデータが 12、2.0 Hz のデータ 23、2.2 Hz のデータ 1 のごとく、固有振動数より低めの卓越振動数を持つ測定結果が得られたものもある。

これらから、橋の固有振動数または、橋を加振する荷重の持つ周期性が直接、橋の振動の心理的大きさに関係してはいないと思われる。

また、同図から、振動の大きさが 0.3 を越える確率に、下限値と上限値が存在することが推定できる。たとえば、測定して得られる卓越振動数が 3 Hz のときには、振動の大きさが 0.3 を越える確率は、25%~55% と、本測定からは推定できる。

上述のようなデータの整理は、振動の大きさが 0.3 以外の値に対しても可能である。ここで 0.3 としたのは、情緒として 4 またはそれ以上を考えることを意味し、歩行中に振動していることをかなり不快に感ずる状態を取扱ったものである。

(2) 剛度との関係

剛度に関するパラメーターとして gEI/wl^4 を採り上げる。これの平方根に、支持条件より定まる係数を乗ずると、その橋の固有振動数となる。したがって Fig. 13 に示した横軸が、橋に対する実測振動数であるのに対し、Fig. 14 で取扱うパラメーターは計算による固有振動数に関する値で、設計するおりに、設計者の判断で選ぶことの可能となる数値である。パラメーターとして固有振動数を採ることもできるが、測定される橋の境界条件は必ずしも力学的に厳密な状態とはなっていない場合もあり得るので、境界条件の入っていない値とした。

横軸にパラメーター gEI/wl^4 を採り、縦軸にある大きさの振動の発生する確率をとる。Fig. 14 は、振動の大きさを VG_T で表して 0.3 の場合を示す。折れ線で示されるものが実測の結果として得られ、それらから求めた回帰曲線も示してある。この図からわかることは、(1) 単純橋の方が連続橋に比べ、振動の大きさが 0.3 を越える確率は一般的には大きく、回帰曲線で比べて 10% 以上の相違がある。(2) VG_T が 0.3 を越える確率が 50% であるような単純支持の歩道橋の gEI/wl^4 は 6~400 であって、ほとんどすべての単純支持の歩道橋はこの中に含まれるのに対し、連続支持であると gEI/wl^4 は 5~80 であって、この範囲に含まれない歩道橋も存在する。このことは単純支持の歩道橋の場合、すべての橋の歩行者の半分は不快感に近いものを感じているといえる。(3)

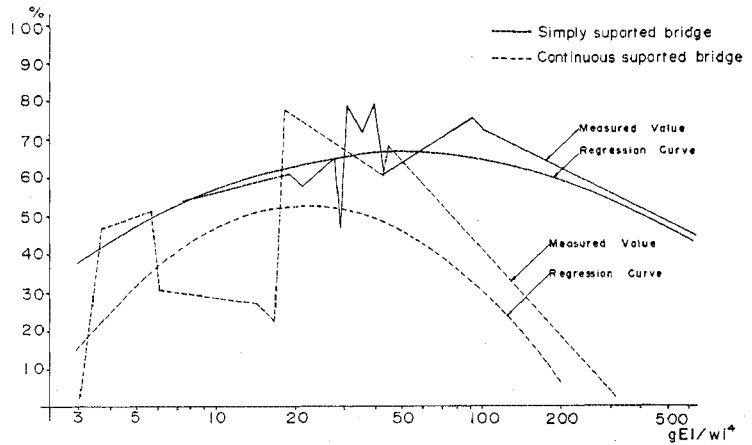


Fig. 14 Probability curve that pedestrians feel such that vibrational greatness is greater than 0.3

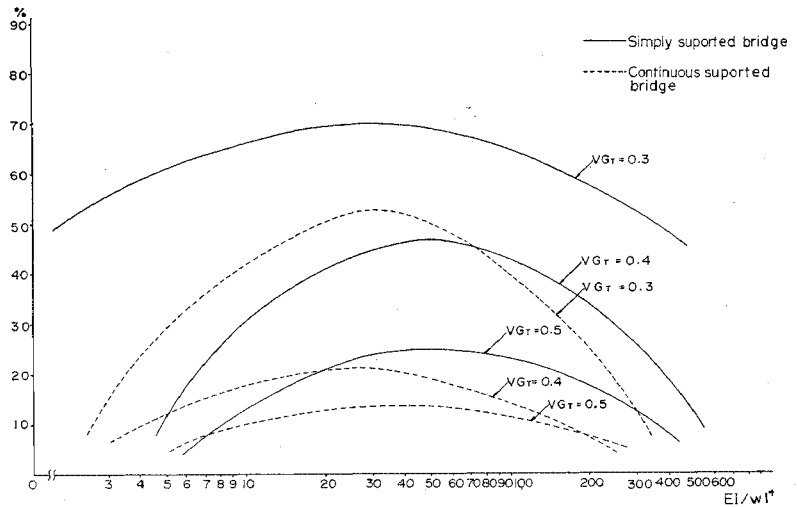


Fig. 15 Probability curve that pedestrians feel such that vibrational greatness is greater than 0.3, 0.4 and 0.5

連続支持の歩道橋でも、二、三の歩道橋では、 VG_T が 0.3 を越える確率が極めて大となっている。

6. 振動の心理的大きさの設計への導入

Fig. 14 はすでに述べたように、 gEI/wl^4 を設計のパラメーターと見なしたとき、振動の心理的大きさが 0.3 を越える確率を与えている。振動の大ききさとして 0.4 あるいは 0.5 を採っても、**Fig. 14** に似た曲線が得られる。横軸を EI/wl^4 としても同様な曲線が得られるが、その一例を **Fig. 15** に示す。**Fig. 15** は実測値より得られた回帰曲線であり、それらには 5. (2) に述べた性質があることを頭に入れておかなければならない。

歩道橋を設計するにあたり、まず限界とする振動の心理的大きさ VG_T を定め、さらに大ききさの振動の発生する確率を定めると、それらの数値によって、単純支持あるいは連続支持に対して、採らなければならない剛性の範囲が **Fig. 15** によって与えられる。その範囲としては、ある値以下またはある値以上が、設計条件に適合する範囲であって、設計条件に適合しない上限値と下限値を **Fig. 15** は示す。しかし、**Fig. 15** によって得られる下限値より小さな値の場合には強度的に不十分となることが期待され、結局 **Fig. 15** によると、剛性を大とすることによって目的を達し得るという常識的な結果となる。

設計の出発点となる心理的な振動の大ききさの採るべき値については、さらに検討することが望ましく、本論では数量的にそれらを与えることはできない。

7. あとがき

従来構造物の設計に、その利用者の心理的な応答を数量的に考慮することは、ほとんど行われていない。本論は、歩道橋のような利用者が限られ、利用目的が明らかかな場合にはそれが可能であることを述べた。

本論の諸数値は、武蔵工業大学橋梁研究室の当時学生であった中島清、島村与志、坂牧勉、高杉樹典、谷岸淳一、吉村恭夫、武内和夫、寺下徹らの諸君が卒業論文として測定解析したデータによっている。また、数値計算は、武蔵工業大学および長大橋設計センターの FACOM 270-30 によったが、長大橋設計センターによって与えられた数値計算に対する便宜には深い謝意を表するものである。

本研究の一部には昭和 49 年度文部省試験研究費が与えられたことを付記する。

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) 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，No. 230, pp. 23~31, 1974.10.
- 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，No. 222, pp. 15~23, 1974.2.
- 3) 三輪俊輔・米川善晴：正弦振動の評価法，日本音響学会誌，Vol. 27, No. 1, pp. 11~20, 1971.
- 三輪俊輔・米川善晴：複合正弦振動とランダム振動の評価法，日本音響学会誌，Vol. 27, No. 1, pp. 21~32, 1971.
- 4) 小堀為雄・梶川康男・城戸隆良：振動感覚を考慮した歩道橋の設計，橋梁と基礎，Vol. 8, No. 12, pp. 23~29, 1974.
- 小堀為雄・梶川康男・城戸隆良：土木学会中部支部講演会，I-26, 1975.
- 5) Scatazini, P.: Vibration Tests on the Bircherweid Foot-Bridge, I.C.E. Monthly, Vol. II, No. 4, 1971/72, pp. 189-192.
- 6) Ruderman, J.: High Rise Steel Office Buildings in the U.S., Structural Engineer, Vol. 43, No. 1, 1965.
- 7) Chang, F.K.: Wind and movement in tall Buildings, Civil Engineering-ASCE, Aug., 1967, pp. 70-72.
- 8) 西脇威夫ほか：歩道橋の振動感覚と二、三のパラメータとの関係について，土木学会年次学術講演会，I-210, 1973.
- 振動感覚を考慮する場合の二、三の設計条件について，日本道路会議，pp. 527, 1973.
- Quantitative Analysis of Psychological Response Against Vibration in Bridge Design, Symposium of IABSE, Dresden, Sept., 1975.
- 9) Chen, P.W. and L.E. Robertson: Human Perception Thresholds of Horizontal Motion, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 98, No. ST 8, Proc. Paper 9142, Aug., 1972, pp. 1681-1695.
- 10) Wiss, J.F. and R.A. Parmelee: Human Perception of Transient Vibrations, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 100, No. ST 4, Proc. Paper 10495, April, 1974, pp. 773-787.
- 11) Chang, F.K.: Human Response to Motions in Tall Buildings, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 99, No. ST 6, Proc. Paper 9811, June, 1973, pp. 1259-1272.
- 12) Hansen, R.J., J.W. Reed and E.H. Vanmarcke: Human Response to Wind-Induced Motion of Buildings, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 99, No. ST 7, Proc. Paper 9868, July, 1973, pp. 1589-1605.
- 13) Reed, J.W.: Wind Induced Motion and Human Discomfort in Tall Buildings, Department of Civil Engg., Research Report R 71-42, Illinois Univ., Nov., 1971.
- 14) Steffens, R.J.: Structural Vibration and Damage, Building Research Establishment Report, Department of the Environment, U.K., 1974, pp. 14-23.
- 15) Solomon, K.M., Solomon, R.J. and Silien, J.S.: Passenger Psychological Dynamics, Sources of Informations on Urban Transportation, Report Number 3, June, 1968, PB 188886.
- 16) Feld, L.S.: Superstructure for 1350 ft World Trade Center, Civil Engineering-ASCE, June, 1971, pp. 66-70.
- 17) 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

- 文報告集, No. 205, pp. 63~70, 1972.
- 18) 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, Vol. 33-3, 1972.
- 西村 昭・佐々木茂範・牛尾正之：梅新東歩道橋の振動実験, 橋梁と基礎, Vol. 5, No. 8, pp. 16~20, 1971.
- 19) 小川慶策・片山恒雄：橋梁の振動限度について, 土木学会第 27 回年次学術講演会講演概要集, I-191, 1972.
- 20) 星谷 勝・中根健一：橋の振動による心理的反応の理論解析, 土木学会論文報告集, No. 246, pp. 1~8, 1976.
- 21) 小堀為雄・梶川康男：単一動荷重に対する道路橋の振動感覚, 土木学会論文報告集, No. 248, pp. 11~23, 1976.
(1976.6.3・受付)
-