

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

A STUDY ON DYNAMIC DESIGN OF PEDESTRIAN OVER-BRIDGES IN CONSIDERATION OF CHARACTERISTICS OF PEDETRIANS

松本 嘉司*・佐藤 秀一**・西岡 隆***・塩尻 弘雄****
By Yoshiji Matsumoto, Shuichi Sato, Takashi Nishioka and Hiroo Shiojiri

1. ま え が き

構造物の設計に対する最近の考え方は、荷重や材料の強度、施工の精度などの不確定性を考慮して、構造物が所定の期間使用できることを明らかにすることである。そのためは、単に構造物が破壊することばかりでなく、変形や振動が人間に対する許容値の限界内にあることなどを検討しなければならない。

従来歩道橋の設計では、活荷重としての歩行者を静的重量と考え、それによる応力度、たわみが所定の値以下になるように設計されている。そのように設計された歩道橋の一部には、歩行に伴って歩道橋に大きな振動が発生し、利用者に不快感を与えることが認められている。

ここでは都内 5 箇所の標準的な単純支持形式の歩道橋について行なった振動実験と、若干の補足実験から、歩行者によって橋に加えられる変動荷重の特性とそれによる橋の応答性状を明らかにし、歩道橋の確率統計的な応答特性について検討を加えた。さらに以上の結果に基づいて、振動を防止するための吸振器を歩道橋に取り付け、その実用可能性を検討した。

2. 歩行者による動的荷重の性質

歩道橋の振動を実測するに先立って、歩行者荷重の特性を明らかにするための予備実験を行なった。最初に歩行者の歩調の特性を明らかにするために、街路上を歩行している歩行者 505 人を無作為に抽出して、その歩調を測定した。図-1 は測定の結果を示したものである。図の中で破線は実験結果と同じ平均値、標準偏差をもつ正規分布を示している。これによれば歩行者の歩調は平均

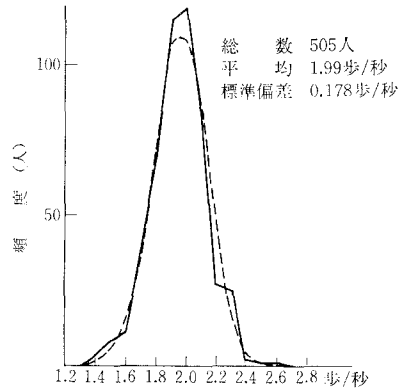


図-1 歩行者の歩調の分布

約 1 秒間に 2 歩であり、その分布形は正規分布と見なすことができる。また平均値に対する偏差はきわめて小さい。

歩行者が橋に与える力は、歩行者の重量と慣性力であると考えられる。そこで応答系である歩道橋が歩行者の慣性力に与える影響を無視できるものと仮定し、男女各 4 名ずつ、年齢 20 才から 40 才の者を対象に剛なコンクリート床上を歩行する時の歩行者の腰

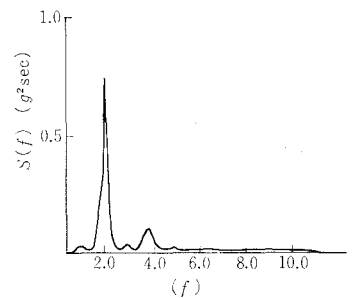


図-2 (a) 代表的な歩行者のパワースペクトラム(男性)

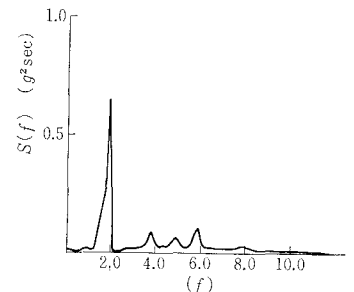


図-2 (b) 代表的な歩行者のパワースペクトラム(女性)

* 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
** 正会員 建設省道路局国道第一課建設専門官
*** 正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科
**** 正会員 工修 電力中央研究所技術第二研究所

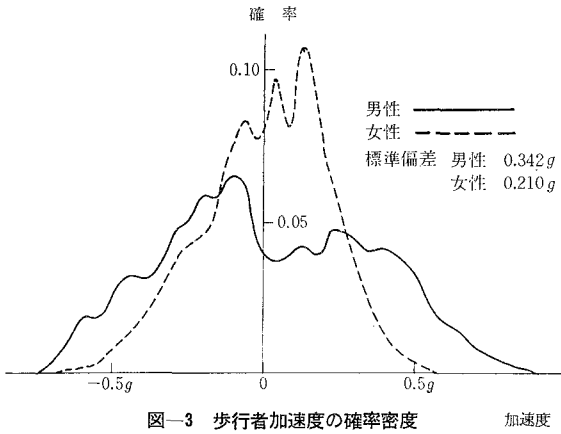


図-3 歩行者加速度の確率密度

部の位置での加速度を測定した。図-2 (a), (b) は実測の波形をハイブリッド計算機で処理して得られた代表的な加速度のパワースペクトラムを示している。周波数成分でみると、歩調の成分が大きく卓越している。したがって、歩行者による歩道橋の振動を考える際、歩調の影響が支配的であるものと思われる。図-3 は同じ被験者の加速度波形から加速度振幅の確率密度分布を求めたものである。標準偏差、すなわち平均加速度振幅は男性 0.342 g、女性 0.210 g で男性の方が女性より大きい。

3. 歩道橋の実測

実測した歩道橋は東京都内の明大前、幡ヶ谷、渋谷1丁目、渋谷西口、渋谷東口に設置された5橋である。表-1 に測定した歩道橋の諸特性を掲げる。測定は加速度計を支間の1/2点、1/4点に設置し、また歩行に伴う衝撃力を測定するため、被験者の腰部にも加速度計を取り付けた。測定は通行の跡絶える夜間に行なわれ、1人の被験者が種々の歩行状態で歩道橋を通過する時の加速度を測定し、その出力をデーターレコーダーに記録した。

表-1 測定した歩道橋の諸特性

歩道橋	材料	スパン長 m	1次の固有振動数 Hz	対数減衰率	最大加速度
明大前	鋼	20.4	4.00	0.097	$5.70 \times 10^{-3} g$
幡ヶ谷	PC	21.1	6.02	0.101	$3.61 \times 10^{-3} g$
渋谷1丁目	鋼	30.7	2.83	0.064	$1.16 \times 10^{-2} g$
渋谷東口	鋼	40.3	2.51	0.026	$5.70 \times 10^{-3} g$
渋谷西口	鋼	48.5	2.09	0.049	$2.34 \times 10^{-2} g$

ここで最大加速度は同一の被験者によって生じたものであるが、いずれも支間1/2点で発生している。普通の歩行による支間1/2点での振動波形を図-4に、フーリエ

変換の絶対値の二乗を図-5に示した。図-4および図-5において f_0 は1次の固有振動数を、 δ は対数減衰率を示している。これらの図や表から明らかなように、歩道橋の1次の固有周期成分が卓越していること、渋谷西口橋のように歩行者の歩調と1次の固有周期が一致し

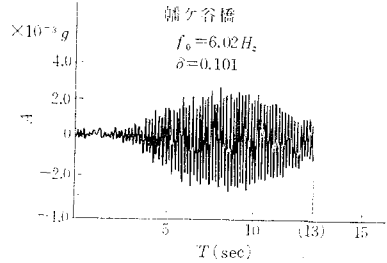


図-4 (a) 支間1/2点での振動波形

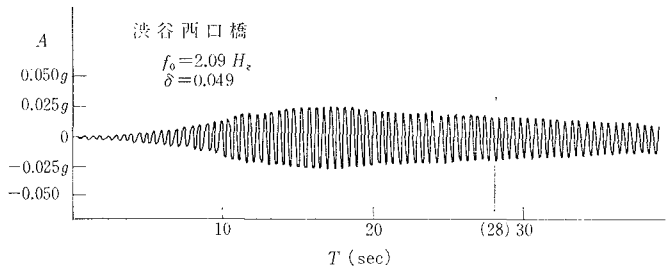


図-4 (b) 支間1/2点での振動波形

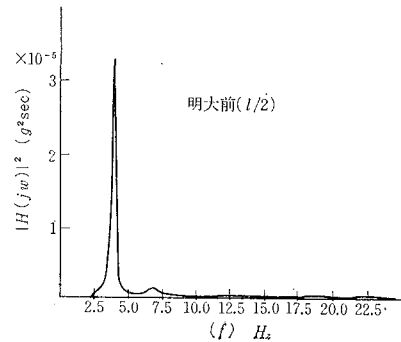


図-5 (a) 応答加速度のフーリエ変換絶対値の二乗

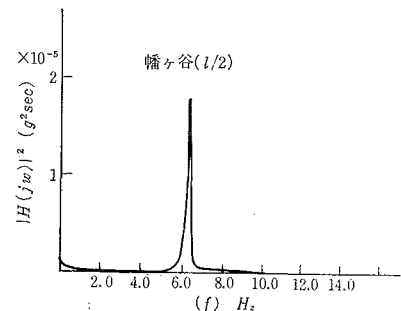


図-5 (b) 応答加速度のフーリエ変換絶対値の二乗

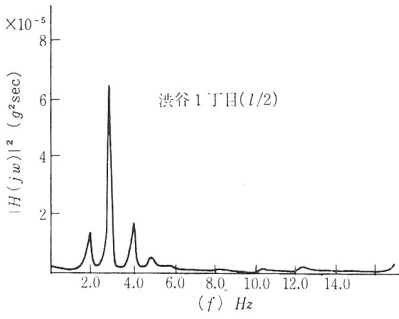


図-5 (c) 応答加速度のフーリエ変換絶対値の二乗

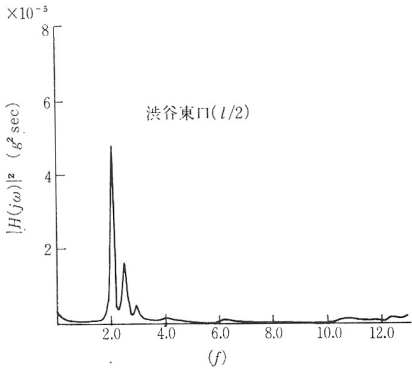


図-5 (d) 応答加速度のフーリエ変換絶対値の二乗

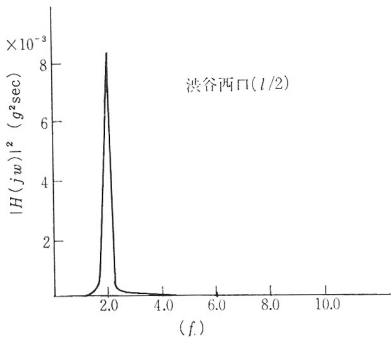


図-5 (e) 応答加速度のフーリエ変換絶対値の二乗

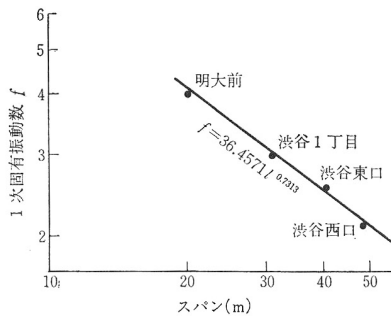


図-6 スパンと1次固有振動数

ている場合、非常に大きな振動が発生していることが明らかである。図-6 は測定した歩道橋のスパンと1次固有振動数の関係を示したものであるが、1次の固有振動数が歩行者の歩行周期に近い橋はスパンが40 m以上のものと考えられる。

写真-1 はパワースペクトラムの解析等に使用したハ

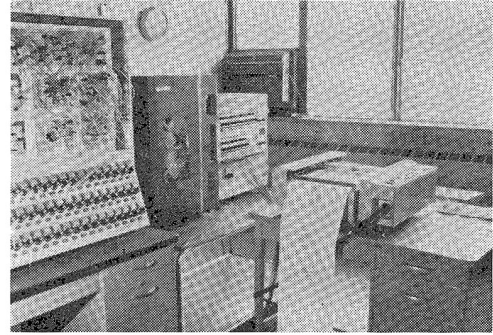


写真-1 ハイブリッド計算機と入出力装置

イブリッド計算機のアナログ部と入出力装置を示している。この計算機を用いて、記録波形から1分間2000程度のサンプリングをしてスペクトラムの計算を行ない、その結果を自動的にプロッターでグラフに書き上げた。

4. 単一歩行者による歩道橋の振動

単一の歩行者による橋の振動は各振動モードに分解して表示すれば、

$$\eta(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} q_n(t) \cdot \phi_n(x) \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。減衰が小さいものと仮定し、各モード間の減衰による影響を無視すれば、

$$\ddot{q}_n(t) + 2p_n h_n \dot{q}_n(t) + p_n^2 q_n(t) = Q_n(x,t) / \int_0^l \{\phi_n(x)\}^2 \cdot m(x) dx \dots \dots (2)$$

が成り立つ。ここで p_n, h_n はおのおの n 次のモードの固有円振動数、減衰係数を表わしている。 $m(x)$ は単位長さあたりの歩道橋の質量である。歩行者の自重を W 、変動荷重成分を $\Delta W(t)$ とすれば、一般外力 $Q_n(t)$ は次のようになる。

$$Q_n(t) = \{W + \Delta W(t)\} \phi_n(vt) \dots \dots \dots (3)$$

歩行者の移動によって自重 W が橋に与える影響は普通の歩行速度程度では静的たわみにほとんど一致し、動的拡大率はほぼ1.00に等しい。したがって歩行者が橋に与える動的な影響を検討するためには、歩行者の荷重の変動成分 $\Delta W(t)$ を考慮すれば十分である。実測の結果から、この変動成分が歩行者の歩調の周期 ω_0 で卓越することを考慮し、

$$\Delta W(t) = \Delta W \sin(\omega_0 t) \dots \dots \dots (4)$$

と仮定して、 $\Delta W(t)$ による振動をアナログ計算機でシミュレートした。図-7は幡ヶ谷橋の例を示している。縦軸は荷重 ΔW が静的にスパン中央に載荷された場合の橋の振幅との比を示している。また式 (2) に渋谷西口橋の諸数値を入

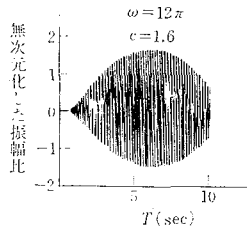


図-7 幡ヶ谷橋の応答のシミュレーション

れ、 ΔW として実験を行なった際の同一の被験者の値を用いて計算した結果によれば、最大加速度は $2.14 \times 10^{-2}g$ となり、実測値 $2.34 \times 10^{-2}g$ とほぼ一致した。図-8は歩道橋の固有振動数と歩調振動数に対する振動倍

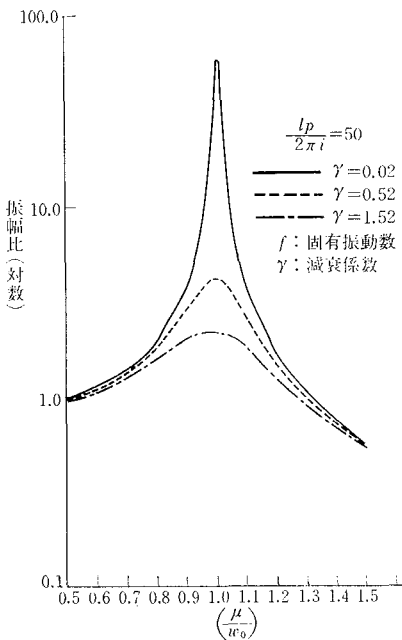


図-8 歩道橋 $l/2$ 点の振動倍率

率を示している。縦軸は ΔW がスパン $l/2$ 点に静的に加わった場合の静的たわみで動的たわみを除した値である。共振点では振動倍率は著しく増加するが、振動数比に対する倍率の偏差は少なく、歩行者の歩調の振動数が橋の1次の固有振動数から一割程度ずれることによって、倍率は特に減衰係数の低い場合には数倍にも低減する。

5. 歩行者の到着確率

多数の歩行者が歩道橋を無秩序に通過する時の解析では、歩行者の到着確率を明らかにして、そこから確率統計的に橋の応答を解析することが可能であると思われる。そこで渋谷西口において、平日の午後8時から15分

間、歩道橋を通過する人数を15秒ごとに測定した。図-9は15秒間に橋を通過する人数の頻度を調べたもの

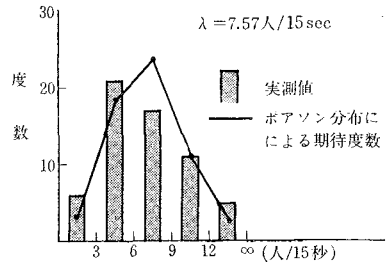


図-9 歩行者の到着分布

である。到着が完全にランダムであれば一定時間に通過する人数はポアソン分布にしたがう。そこで平均値の等しいポアソン分布との適合度を χ^2 検定によって検定したところ危険率 5% で有意差は認められなかった。

6. ポアソン到着する歩行者による橋の振動

歩道橋を通過する歩行者がポアソン到着するものと仮定すれば、単一の歩行者による歩道橋の振動 $h_i(t)$ を確率統計的に重ね合わせることによって複数の歩行者が歩道橋を通過する時の振動特性を検討することができる。橋のある点に着目して、1人の歩行者によるその着目点の振動を $h_i(t)$ とすれば、複数の歩行者による振動 $\eta(t)$ は

$$\eta(t) = \sum_i h_i(t-t_i) \dots\dots\dots (5)$$

と表わすことができる。ただし、 t_i は各歩行者が橋に到着する時間であり、ポアソン到着する場合にはランダムな値をとる。 $h_i(t)$ が歩行者によらず一定であれば、式 (5) はいわゆるショット・ノイズであるが、一般には $h_i(t)$ は歩行者によって異なっている。したがって各人の発生させる振動 $h_i(t)$ が有限な n 個のパターンのいずれかをとるものと考え、各パターンに属する人間の到着確率はそれぞれポアソン分布をなすものと仮定すれば、 $\eta(t)$ の平均値、 m_η 、分散、 σ_η^2 、パワー・スペクトラム $S_\eta(\omega)$ はそれぞれ

$$\left. \begin{aligned} m_\eta &= \lambda T_0 E \left[\int_0^\infty h_i(t) dt \right] = \lambda T_0 E [H_i(0)] \\ \sigma_\eta^2 &= \lambda T_0 E \left[\int_0^\infty h_i^2(t) dt \right] = \lambda T_0 E [\overline{S_i(\omega)}] \\ S_\eta(\omega) &= 2 \pi \lambda^2 T_0^2 E [H_i^2(0)] + \lambda T_0 E [|H_i(j\omega)|^2] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

で与えられる²⁾。ただし $H_i(j\omega)$ 、 $\overline{S_i(\omega)}$ はそれぞれ $h_i(t)$ のフーリエ変換、平均パワーを表わし、 λ は全体の平均到着数、 T_0 は歩道橋を通過するに要する時間である。

表-2 ポアソン到着する時の歩行者1人のたわみ振幅, 加速度振幅の期待値

歩道橋	歩道橋1次の固有振動数	無次元化した期待値		平均体重60 kg, $\Delta W/W=0.342$	
		たわみ振幅*	加速度振幅**	たわみ振幅†	加速度振幅††
明大前	4.00	1.00	0.253	0.0078 cm	0.0012 g
幡ヶ谷	6.02	1.00	0.112	0.0013	0.0002
渋谷1丁目	2.97	1.34	0.653	0.0134	0.0023
渋谷東口	2.51	3.81	2.809	0.0677	0.0124
渋谷西口	2.09	5.21	4.920	0.120	0.0196

* $\frac{\pi EI}{2 \Delta W l^3} \sqrt{E[S(\omega)]}$ ** $\frac{\pi EI}{2 \Delta W l^3 \omega_0^2} \sqrt{E[\omega^4 S(\omega)]}$ † $\sqrt{E[S(\omega)]}$ †† $\sqrt{E[\omega^4 S(\omega)]}$

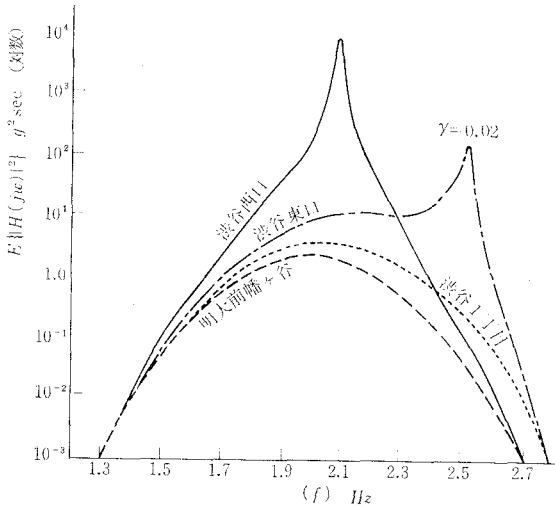


図-10 1人の歩行者によるパワースペクトラムの期待値

$h_i(t)$ の変動成分に限って考えれば $H_i(0)=0$ であるから、歩行者の到着がポアソン到着である場合には、分散およびパワースペクトラムは各歩行者によって橋に発生する振動 $h_i(t)$ のおのおの分散およびパワーの期待値の λT_0 倍と一致する。平均振幅は標準偏差 σ_n であるからポアソン到着する時の橋の平均振幅は $\sqrt{\lambda T_0}$ 倍になることが明らかである。

そこで実測した歩道橋について、歩行者の歩調が図-1の破線で示した正規分布をもつものと考え、橋の振動 $h_i(t)$ が式(1)で与えられる場合、橋 $l/2$ 点における1人の歩行者に対する平均振幅、パワースペクトラムの期待値をそれぞれ計算した。ただし各歩行者の体重は一定とし、歩調以外の周期成分は無視している。また減衰率は実測結果をもとに安全側にとって一律 $\delta=0.02$ とした。表-2は計算の結果求められたたわみ振幅、加速度振幅の期待値を図-10はたわみ振幅のパワースペクトラムの期待値を示したものである。図-10については式(4)で与えられる荷重 ΔW が歩道橋の $l/2$ 点に静的に加わった場合の振幅を用いて無次元化し、縦軸を対数尺で表示した。したがって図-10に示される値を λT_0 倍にすれば歩行者がポアソン到着するときの歩道橋に発生

する振動の無次元化したパワースペクトラムを求めることができる。表-2ではたわみ振幅、加速度振幅の無次元化した期待値と、歩行者の平均体重を60 kg、また実測結果から $\Delta W=0.342W$ にとった時の期待値をあわせて示した。現実には歩行者が歩道橋に与える外力は式(4)で与えられるような簡単な形ではなく、図-2(a), (b)に示す

ように歩調周期以外の振動成分もある程度含まれている。しかし実測の結果から橋の振動に与える外力の影響は主に歩行者の歩調であり、応答のうちで歩道橋の1次の固有振動数をもっとも卓越することを考慮すれば、上記の計算で十分であるものと考えられる。

表-2、図-10から明らかなように、歩行者の歩調の周期の平均値が歩道橋の1次の固有周期に近づくにつれて歩道橋の応答は著しく増大している。歩調の約2倍以上の固有周期をもつ明大前、幡ヶ谷橋では平均振幅比は1.00で、確率統計的に見れば動的影響は無視できるものと考えられる。しかし渋谷東口、西口橋のように歩道橋の1次の固有周期と歩行者の歩調の周期の差が25%以下のような橋では確率統計的に考えても振動の影響を無視することはできない。たとえば渋谷西口橋を例にとると、歩行者が橋に到着する平均到着数を実測結果から7.57人/15秒とし、歩行者の平均速度を1.05 m/secと仮定すれば、変動荷重による歩道橋の平均たわみ振幅は約0.581 cm、平均加速度振幅は約0.0947 g程度と考え

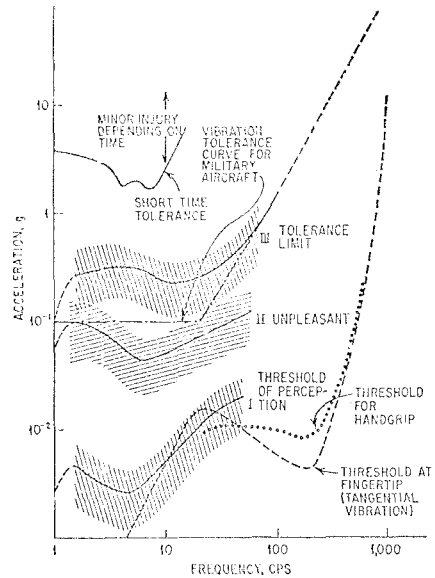


図-11 人間の加速度に対する感覚 (Shock and Vibration Handbook Vol. 3, p. 44-40 より)

られる。加速度に対する人間の感覚については、従来種々の研究が行われてきている⁷⁾。図-11に示すものはその一例で、人間に対する不安感、不快感の限界として約0.1gを与えている。この図から判断すれば渋谷西口橋は歩行者に対しある程度不快感を与えることは否定できない。

7. 極値とその再現期間

歩道橋が所定の期間使用に不適当な状態にならないことを検討するためには、振幅の標準偏差とともに振幅の極値とその再現期間を明らかにすることが重要である。ここでは歩道橋に発生するたわみ振幅 η が平均値0の正規分布をなすものと仮定し、極値と再現期間の関係について検討した。歩道橋の振幅が一定のレベル η_0 で再現する再現期間を $T(\eta_0)$ とすれば¹⁰⁾

$$T(\eta_0) = \frac{2\pi}{\sqrt{\sigma_4^2/\sigma_2^2} P(\eta > \eta_0|T)} \dots\dots\dots (7)$$

で与えられる。ただし σ_2^2, σ_4^2 はそれぞれパワースペクトラム $S(\omega)$ の2次および4次のモーメントの期待値を、 $P(\eta > \eta_0|T)$ は T 時間に振幅 η が η_0 を越える確率を表わしている。ここで $\sqrt{\sigma_4^2/\sigma_2^2}$ は単位時間にピークが起こる回数である。

歩行者が図-1に示すような歩調の分布で各歩道橋にポアソン到着する時のパワースペクトラムの期待値は図-10に示すとおりである。歩行者が歩道橋に到着する最大の到着数を歩道橋の幅員1mにつき1人/秒と仮定し、その時のたわみ振幅と加速度振幅の極値を与えれば、図-10からその極値が再現する期間を推定することができる。ここでは図-11から加速度振幅の極値として、加速度が人間に不快感、不安感を与えるおおよその限界である0.1gを用いた。一方たわみ振幅については、歩道橋設計上のたわみ制限値を用い、これから W による静的たわみの平均値を差し引いた値を変動たわみ振幅 η の極値とした。

計算の結果は表-3に示すようである。加速度振幅については明大前橋や幡ヶ谷橋では0.1gを越えるような加速度は歩道橋の使用期間中発生しないことが予想されるが、渋谷1丁目橋では1年に1回程度発生するものと考えられる。渋谷東口橋、西口橋では標準偏差で与えられる平均加速度振幅ですら、0.1gを越えている。たわみ振幅については渋谷西口橋をのぞいて、いずれも問題とはならない。渋谷西口橋については設計上のたわみ制限値をこえる極値の再現期間は10日に1回程度であるが、設計上たわみ制限値における応力度は許容応力度以下であり、極値がわずか増すだ

表-3 極値の再現期間 ($\lambda = 1 \text{人/sec/m}$)

歩道橋	標準偏差		再現期間	
	平均たわみ振幅	平均加速度振幅	たわみ振幅(極値)	加速度振幅(極値 0.1g)
明大前	0.052 ^{cm}	0.0081	100年以上 (4.4 cm)	100年以上
幡ヶ谷	0.007	0.0012	" (5.19 cm)	"
渋谷1丁目	0.089	0.0151	" (6.86 cm)	1年以上
渋谷東口	0.663	0.1216	" (6.92 cm)	常時
渋谷西口	1.417	0.2308	" (6.93 cm)	常時

()内は極値

けで再現期間が著しく増加することを考慮すれば、構造上の安全性をそれほどこなうことはないものと思われる。この実験後に、渋谷西口、東口橋は補強が行われ、現在ではその動的性状は著しく改善されたものになっている。

8. 吸振器による防振

以上から歩道橋の1次の固有周期と歩行者の歩調の周期が一致する時には、歩行者にとって不快な振動が発生し、快適な使用限界に保たれないことが明らかとなった。このような振動をとりのぞくための方法は、振動減衰を大きくとること、活荷重に対する死荷重の比を小さくとること、橋の1次の固有周期を歩調の周期と一致させないこと等が考えられる。

そこでこのような振動を防止する方法として、試験的に吸振器を製作し、その防振効果を測定した。実験の対象とした橋は種々の制約から渋谷1丁目橋とした。橋の1次の固有振動数に対応する系と、吸振器の系を図-12(a)に示すようにとれば、その共振曲線は図-12(b)のようになる。したがって計算上吸振器の固有周期が歩行周期とほぼ一致する時には、たとえ橋の固有周期が歩行周期と一致しても、歩行者が橋に与えるエネルギーはほとんど吸振器に吸収され、橋は振動しない¹¹⁾。吸振器を含む振動系は二自由度系であるから、共振点はもとの橋

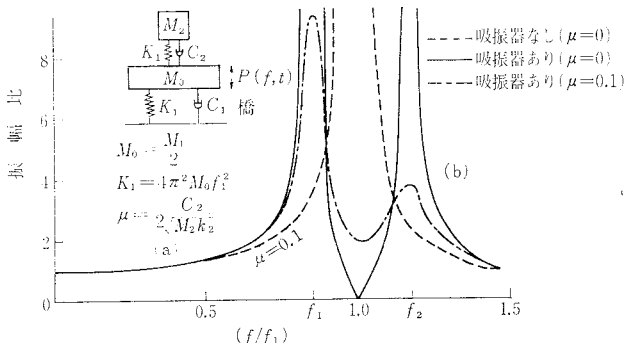


図-12 吸振器のモデルと共振曲線

の共振点をはさんで上下に2か所存在する。この共振点 f_1, f_2 の間が十分広く、図-1 に示す歩行周期の範囲外にあれば、吸振器としての効果を発揮することができる。橋の1次の固有振動数を取りのぞく場合、この共振点間の間隔 $f_2 - f_1$ は表-4 のように橋の質量と吸振器

表-4 M_1/M_2 の比と共振点間隔

M_1/M_2	20	30	40	50
$f_2 - f_1$	0.13	0.26	0.24	0.20

の質量比 M_1/M_2 によって異なってくる。 M_1/M_2 の比を小さくすれば吸振器としての効果は大きいが、吸振器の重量が大きくなり、歩道橋の設計上好ましくない。また吸振器に適切な減衰を与えれば、歩道橋の減衰を増すことと同等の効果も期待できる。

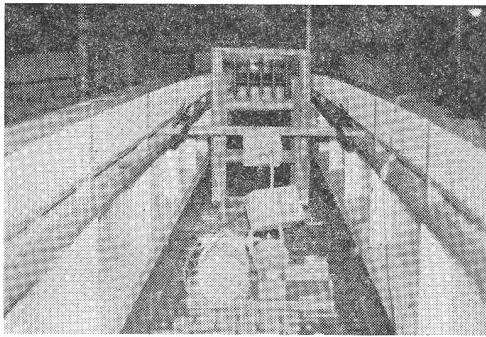


写真-2 渋谷1丁目橋におかれた吸振器と起振器

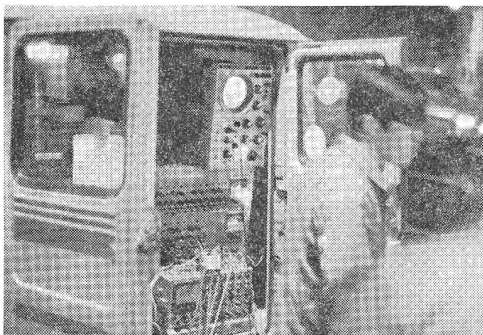


写真-3 測定車につままれた計測器

実験では M_1/M_2 の比を 50 にとり、吸振器の重量を 400 kg とし、その固有振動数が橋の固有振動数 2.8 Hz になるように吸振器のばねを設計した。吸振器は橋の $l/2$ 点に設置し、起振器、および歩行者によるランダムな外力を加えて橋を振動させた。図-13 は吸振器を取り付けた場合の橋の $l/2$ 点での加速度のパワースペクトルを示している。吸振器を取り付けない場合のスペクトル、図-5 (c) と比較すれば、吸振器を取り付けた場合には共振振動数がもとの1次の固有振動数をはさんで上下に現

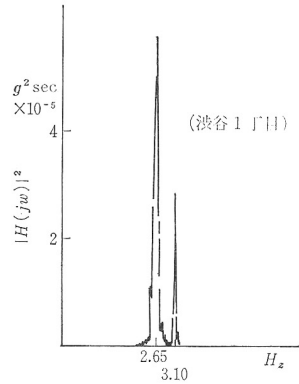


図-13 吸振器を取り付けた時の加速度のフーリエ変換絶対値の二乗

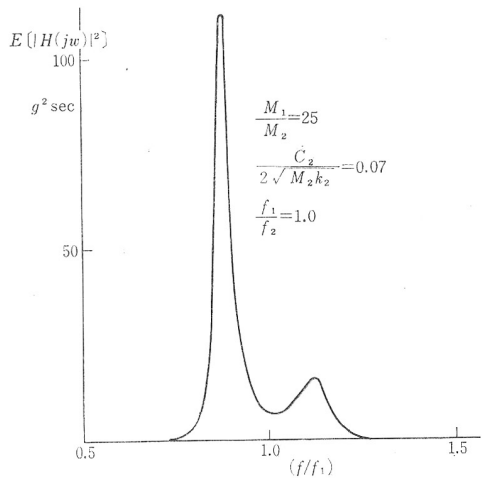


図-14 渋谷西口橋に吸振器を取り付けた時のフーリエ変換絶対値の二乗の期待値

われる。それゆえ歩道橋の1次の固有振動数が図-1 に示す歩調分布の近くにあつて、有害な振動が発生する場合には、吸振器を用いて共振振動数を歩調の振動数範囲からずらし、このような振動を防止することが可能であるものと思われる。そこで渋谷西口橋に吸振器を取り付けた場合を想定し、吸振器の効果を検討した。図-14 は吸振器の固有振動数を橋の固有振動数 2.05 Hz にとり、また吸振器の減衰 $\frac{C_2}{2\sqrt{m_2 k_2}}$ を 0.07 とした時の、1人の歩行者による橋のたわみ振幅のパワースペクトルの期待値を示している。この場合質量比 M_1/M_2 は 25 とし、歩行者の歩調分布は図-1 の結果を用いた。図-10 と比較して明らかなように、著しく振幅が減少することが期待できる。

9. 結 論

歩道橋設計指針によれば、歩道橋は歩行者荷重を静的荷重に置換えて設計するように定めており、その動的成分が橋に与える影響は直接には考慮されていない。しかし歩道橋の中には歩行者によって振動し、歩行者に不快感を与えるものが存在している。本研究では歩道橋を通過する歩行者によって発生する振動を解明し、歩行者に不快感を与える振動が主に歩道橋の1次の固有振動であることを明らかにした。特に1次の固有振動数が歩調の周期と共振することによって歩行者に不快感を与えることが明らかとなった。確率統計上、歩行者がポアソン到着する場合には、複数の歩行者による歩道橋の振動特性は1人の歩行者による振動特性と相似する。したがって今後歩道橋を設計するにあたっては、橋の1次の固有振動数が歩行者の歩調の振動数、約2 Hzと一致するような歩道橋は極力避けることが望まれる。実測の結果によれば、このような歩道橋はそのスパンが40 m以上の範囲にあることが推定される。歩行者に不快な振動を発生させる既設の歩道橋を改良するための一つの方法として、吸振器が考えられる。実験の結果、その防振効果を十分期待できることが明らかにされ、今後の検討にあたいするものと思われる。

10. 謝 辞

この研究を行なうにあたって、多くの方々のご指導、ご援助を頂いた。特に、東京大学工学部土木工学科学生佐原俊樹君をはじめ、交通研究室の諸氏、実験に際しては建設省東京国道工事事務所の諸氏に一方ならぬご援助、ご助言を頂いたことに対し厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤秀一・塩尻弘雄：歩道橋の振動性状について，第25回土木学会年次学術講演会，I-86，昭44年
- 2) Papoulis, A. : Probability, Random Variables and Stochastic Processes, Macgraw Hill, 1965
- 3) Papoulis, A. : 工学のための応用フーリエ積分，オーム社，1967
- 4) Rowe, Roy, E. : Current European Views on Structural Safety, Proc. of A.S.C.E., ST. 3, March 1970
- 5) 佐佐木 綱：交通流理論，技術書院，昭42年
- 6) 津田孝夫：モンテカルロ法とシミュレーション，培風館，昭44年
- 7) Harris and Crede : Shock and Vibration Handbook, Macgraw Hill, 1961
- 8) 三上 澄：横断歩道橋，山海堂，昭43年
- 9) Villasenor, A.J. : Digital Spectral Analysis, Nasa-Langley, 1968
- 10) Gumbel, E.J. : Statistics of Extremes
- 11) デン・ハルトック：機械振動論，コロナ社，昭和35年
(1972.2.28・受付)