I-86 歩道橋の振動性状について

関東地建東京国道事務所　正会員　佐藤秀一
東京大学工学部　学生員○塩尻弘雄

1　まえがき

従来歩道橋は、活荷重として歩行者の静的重量を考え、静的荷重による応力度、たわみ等が、所定の値以下になるように設計されてきた。しかし、歩行に伴って橋に加えられる衝撃により振動が発生し、歩行者に不快感を与えたり、場合によっては慣性力により過大な応力が発生する可能性がある。ここでは、都内5ヶ所の歩道橋について行った振動実験をもとに、歩道橋の振動に関する解析を行った。

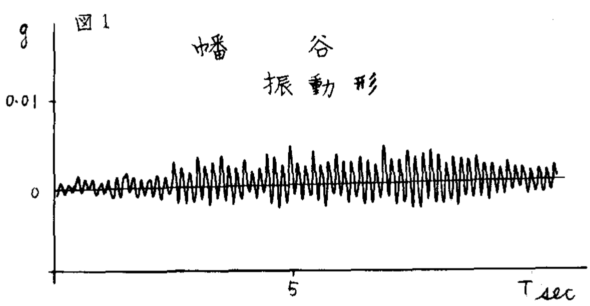
2　振動測定

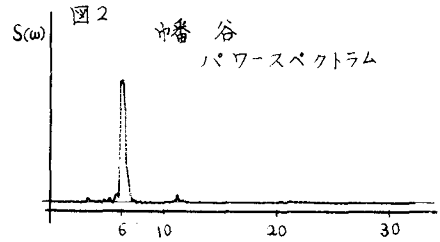
実測した橋は、明大前、幡ヶ谷、渋谷一丁目、渋谷西口、渋谷東口の5橋で、加速度計をスパンの½点、¼点、支点上に設置し、また、歩行に伴う衝撃力を測定するため、歩行者の腰にもとりつけた。データはすべて磁気記録計に記録した。測定項目は、①一人で支間を歩く、②一人で走る。③数人で歩く。④スパン中央点、¼点でジャンプする。の4種である。

3　結果

橋名	素材	スパン	固有振動数	対数減衰率	最大加速度
明大前	メタル	20.4m	4.00c/s	0.097	$5.70\times10^{-3}g$
幡谷	P.C	21.1m	6.02c/s	0.101	$3.61\times10^{-3}g$
渋谷一丁目	メタル	30.7m	2.97c/s	0.064	$1.16\times10^{-2}g$
渋谷東口	メタル	40.3m	2.51c/s	0.026	$5.70\times10^{-3}g$
渋谷西口	メタル	48.5m	2.09c/s	0.049	$2.34\times10^{-2}g$

表1に、測定された橋の諸特性を掲げる。最大加速度は、①の一人で歩いた場合に生じたものである。同じく一人で歩いた場合の支間½点における振動波形と、パワースペクトラムを、幡谷橋、渋谷西口橋の場合について図1～図4に掲げる。図5は、歩行者の加速度のパワースペクトラムである。歩行周期はすべての実験を通じ、ほぼ2歩/秒と一定している。これらの図からも明らかなように、橋は、歩行者の歩行周期でなく橋の一次の固有周期でゆれる傾向を持つ。これは、歩行者の衝撃中の、その周期の成分が極度に拡大されることを示す。特に渋谷西口のように、歩行周期と固有周期が一致している場合、非常に大きな振動が発生している。





4　シミュレーション

歩行者がランダムにやって来る場合の振動を推定するためシミュレーションを行う。橋のたわみ $\eta(x,t)=\sum_{n=1}^{\infty}\Phi_n(x)q_n(t)$ とおく。（$\Phi_n(x)$：n次のモード）

l：スパン長，M：橋の自重，W：歩行者の自重，ΔW：歩行者の変動重量，V：歩行速度，P_n：n次角速度，h_n：n次のモードの減衰定数，　$\varphi = \pi V/l$、　$\Phi_n = \sin(n\pi x/l)$，歩行者の衝撃力を，$\Delta W \sin \omega t$と仮定すると、振動方程式は、

$$\ddot{q}_n(t) + 2P_n h_n \dot{q}_n + P_n^2 q_n = Wg\{\sin(n\varphi t) + \tfrac{\Delta W}{W}\sin n\varphi t\cdot \sin\omega t\}/\tfrac{1}{2}M \cdots\cdots (a)$$

となる。重要なのは、ωとP_nが一致する場合で、$\omega = P_1$とおくと、

$$q_1(t) \doteqdot \Delta W\cdot g\{\sqrt{(P_1h_1)^2+\varphi^2}\cdot\cos(\varphi t+\varepsilon) - \varphi e^{-P_1h_1t}\}\cos P_1 t / P_1M\{(P_1h_1)^2+\varphi^2\} \cdots\cdots\cdots\cdots (b)$$

$$\varepsilon = \tan^{-1}(\varphi/\sqrt{(P_1h_1)^2+\varphi^2})$$

これに渋谷南口のデータ（$M = 77\cdot1$ ton，$P_1 = 6\cdot28$，$\varphi \doteqdot 0\cdot1$，$Ph = 0\cdot10$，$W = 60$kg，$\Delta W/W = 0\cdot3$）を入れると、$q = 0\cdot133$ cm となり、一方実測加速度より逆算した値は、$q = 0\cdot145$cm となって、ほぼ一致している。

ランダムに人がやってくる場合、一定時間内の通過人数は、ポアソン分布に従うと考えられる。

人間一人により発生する振動を$R_e(Ae^{at})$と、表わすとすれば、時間t_0後の変位の期待値と分散は、

$$E(t_0) = R_e\{(P/a)\cdot A(e^{at}-1)\} \cdots\cdots\cdots\cdots (c)$$

$$V(t_0) = \tfrac{1}{2}R_e\{PA^2(e^{2at}-1)/2a + PA\bar{A}(e^{(a+\bar{a})t}-1)/(a+\bar{a})\} \cdots\cdots (d)$$

P：単位時間に対する人間の出現率

(b)式より、人間が橋を通過した直後のq_1は、

$$q_1 \doteqdot \{\Delta Wg\varphi/P_1M(P_1^2h_1^2+\varphi^2)\}e^{-(P_1h_1)t}\cos(P_1t+\varepsilon)$$

よって過去通過した人間による振動の分散は、

$$V_1 \doteqdot (1/4)\{\Delta Wg/P_1M\sqrt{P_1^2h_1^2+\varphi^2}\}^2(P/P_1h_1)$$

現在橋に乗っている人間による振動の分散は、ほぼ

$$V_2 \doteqdot (1/4)\{\Delta Wg/P_1M\sqrt{P_1^2h_1^2+\varphi^2}\}(PT_0)$$

の程度と考えられる。従って、$\sqrt{V_1} \propto \sqrt{P/P_1h_1}$

$\sqrt{V_2} \propto \sqrt{PT_0}$　（T_0は橋の通過に要する時間）

渋谷西口橋の場合、$\sqrt{PT_0}$ は、通勤時約7程度である。従って、標準偏差は、$0\cdot45$cm，（$0\cdot07$g）となる。

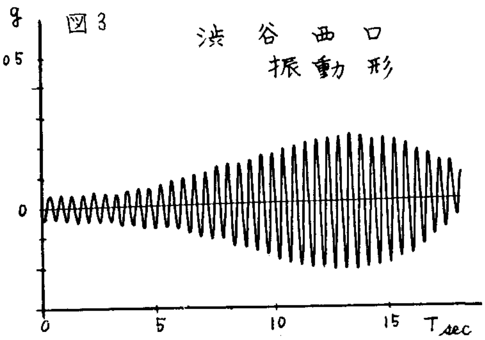


図3　渋谷西口 振動形

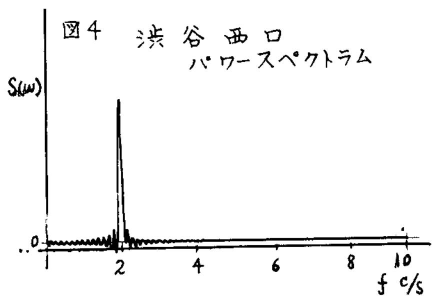


図4　渋谷西口 パワースペクトラム

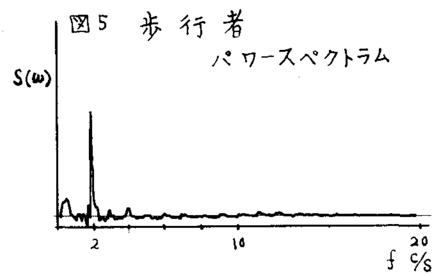


図5　歩行者 パワースペクトラム

これは、構造上は安定であるが、人間に対し、ある程度不快感を与える事は否定できない。

一般に、振動は、$\sqrt{PT_0}$に比例し、設計荷重はPT_0に比例するから、スパンが長くなるにつれ、静たわみと動たわみの比は小さくなる。しかし、スパンが長くなるとともに固有周期も低下し、ある点において、歩行周期と一致することになるが、その周期における動的拡大率がきわめて大きくなり（渋谷西口で44・3）、安全性の面からはともかく、歩行者に与える不快感の面から、無視し得ない振動が生ずる可能性がある。歩行者の周期は、老若男女を問わず、ほぼ110～130歩／分内に入ることが実測されており、固有周期2サイクル程度の橋は、その面からチェックが必要である。