

I-435

歩行者による歩道橋の水平横振動のメカニズム

東京大学大学院 学生員 阿部雅人

東京大学 正員 藤野陽三

1. はじめに 歩行者による動的荷重によって歩道橋に水平横振動が励起されることがある。しかしながら、歩行に伴う踏力の水平横成分は小さいので、歩行者がお互いに独立に歩いているとすると、この現象は説明できない。そこで、関口ら¹⁾は実橋での観察から、岡本ら²⁾は振動台上での実験によって、水平横振動する桁上では、人間の歩行が桁の振動に同調する現象が認められることを示した。水平励振現象を歩行者の踏力の水平横方向成分による共振現象であると考え、踏力と橋桁の位相差は270度と考えるのが自然であるが、実橋での観察や実験からは200度程度と見積られており、人間-橋桁系の動的相互作用を考える必要があるように思われる。ここでは、人間のモデルとして簡単な2足剛体モデルを導入して、この相互作用についてのシミュレーションを行い、現象について考察する。

2. 歩行のモデル 一般に、人間の運動は複雑な要因が絡み合ったものと考えられるが、歩行のような日常的な運動については、筋力の負担を小さくするために、重力を利用した効率的な運動がなされていると推測される。従ってここでは、図1のような質点と質量のない2本の足からなる、剛体ロッキング運動を行うモデルを考える。また、進行方向には進まずに面内で横方向に振動するものとする。人間-橋桁系の方程式は以下ようになる。

$$L\ddot{\theta} = -\operatorname{sgn}(\theta) \cdot g \cdot \cos(\alpha + |\theta|) - \ddot{X} \sin(\alpha + |\theta|) \quad (1)$$

$$\ddot{X} + 2h\omega\dot{X} + \omega^2 X = \frac{m}{M} F_X(t - \tau) \quad (2)$$

$$F_X(t) = -L\ddot{\theta} \sin(\alpha + |\theta|) - \operatorname{sgn}(\theta) \cdot L\dot{\theta}^2 \cos(\alpha + |\theta|) - \ddot{X} \quad (3)$$

なお、 g は重力加速度であり、 m , M , w , h 等の記号は図1に説明してある。 θ は、右に倒れているときを正、左に倒れているときを負とし、以下の図では静的な状態でこの人間モデルが転倒する限界の $\theta_0 = (\pi/2) - \alpha$ で除して θ/θ_0 で表示する。 $\operatorname{sgn}(\theta)$ は、 θ の符号、 τ は重心の動きと踏力の位相差に対応した時間遅れである。また、 θ の正負が切り替わるときに主たるエネルギー・ロスがあると考えて、切り替わり後の各運動量がそれ以前の c (≤ 1.0) 倍になるとする。桁を固定し、 $c=1.0$, $\tau=0$ として人間モデルを自由振動させたときの水平横方向踏力を数値積分によって求めると図2の様になるが、実験値とオーダー、波形ともよく合うことが確かめられている。

岡本らの実験に対応して0.9Hz、振幅2cmの正弦強制変位を桁に与えたときの人と桁の変位が図4である。ここで、人間のモデルが倒れず、振動し続ける(歩き続ける)ことを条件に c の値を経験的に0.95とした。桁と人間の振動数は一致し、かつ重心との位相差は180度となっており、岡本らの実験結果と整合する。また、人の変位は自由振動の時の約1.5倍になっており、振動時に首の振幅が大きくなるという実験結果とも定性的に整合する。しかしながら、踏力の水平成分は自由振動時よりやや小さくなり、岡本らの知見と異なる。これは、振動時には足の開きが大きくなることによって踏力も大きくなると考えられるが、本モデルには足の開きの変化は含まれていないことによる。

3. 相互作用のシミュレーション ここでは、水平横振動が観測されている実橋³⁾ ($m/M=0.04$, $h=0.01$, $\omega/2\pi=0.91$, 観測されている振幅 ~ 1 cm以上) を例にとって、人間-橋桁系の相互作用を計算する。岡本らによれば、強制振動時の人の変位と踏力との位相差はおおよそ30度と見積られるので、式(2)に於ける τ を位相差30度に対応する時間遅れとする(図4)。初期条件としては、人間に、通常の歩行の振動数である1Hzに対応する θ の値を与えている。図5a) にみるように、この様な連成系は大振幅の横振動に成長していくことがわかる。またその振幅は実橋に近い値を与えている。図5b) は、桁の1波毎の振動数をとったものである。これを見ると、揺れはじめは振幅が小さく振動数が高いが、振幅が大きくなっていくにつれて振動数は桁の振動数に近付いていくこの現象は、実橋においても観測されている。このモデルでは個人差を考慮していないため、最初から人が足をそろえて歩くことになり、現実よりも振動の成長する速度が早いと思われるが、定性的には現象をよく表わしているといえる。

4. 考察 このモデルを用いて、歩道橋の水平励振のメカニズムを説明すると以下ようになる。

「歩道橋の固有振動数が1 Hz 近傍であると、人間の通常の歩行の振動数は1 Hzであるので、多数の歩行者が通行すると1 Hz前後の比較的小振幅の振動が励起される。その振動は、歩行者の歩行に影響を与え、人間の歩行は徐々に橋桁の動きと位相差180度付近に同調するようになる。そのため、加振力が大きくなり振幅が大きくなっていくが、振幅が大きくなっていくに従って、人間—橋桁系の振動数は橋桁の固有振動数に引き込まれていく。そして、さらに大振幅の振動に成長していく。」

実際には、個々の人間によって振動への感受性が異なるため、振幅が大きくなるとより多くの人が同調するという意味での自励振動的現象も、同時に起こっていると考えられる。

<参考文献> [1] 関口他：人の歩行特性と橋の横方向励振可能性、第45回年次学術講演会概要集、1990年 [2] 岡本他：水平横振動する床上的での人の歩行特性、第46回年次学術講演会概要集、1991年 [3] Pacheco, B. et. al.: Synchronization of human walking observed during lateral vibration of a congested bridge, Proc. of 6th US-Japan Bridge Workshop, 1990

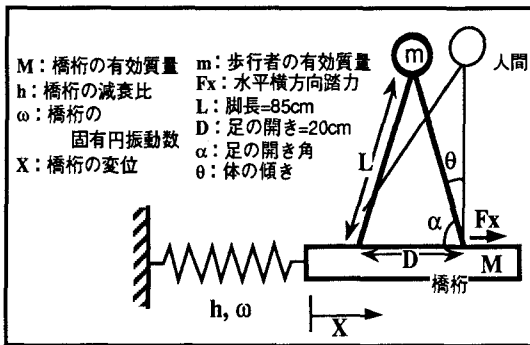


図-1 人間—橋桁系のモデル

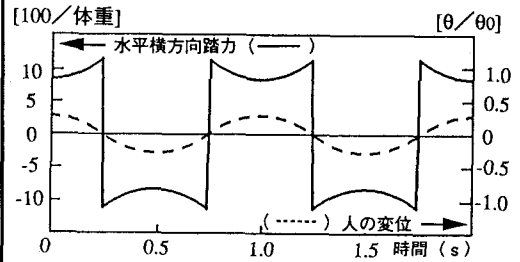


図-2 水平横方向踏力の計算結果

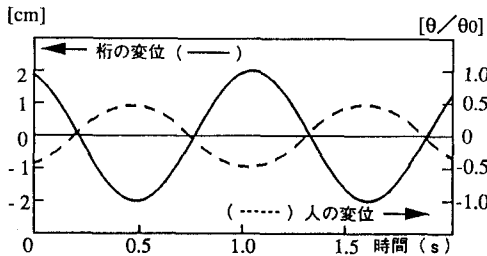


図-3 強制振動時の人の動き

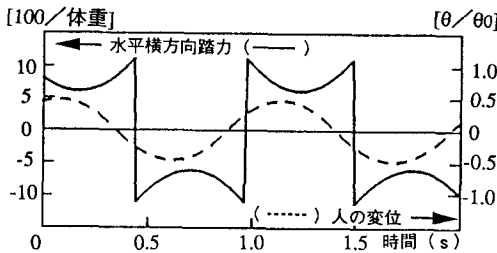
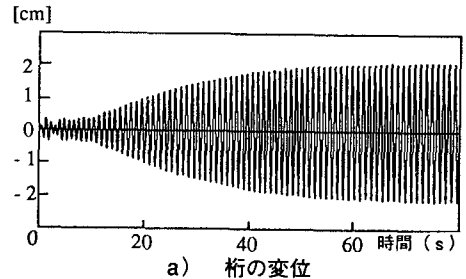


図-4 人の変位と踏力の位相関係

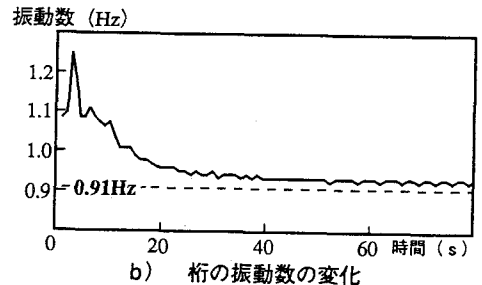


図-5 相互作用の計算結果