

I-13 歩行者の歩行による4径間連続歩道橋の振動性状について

北大工学部 正員 芳村 仁
開発局港湾部 正員 ○ 上西 隆 広

1. まえがき

横断歩道橋は、歩行者の歩行状態によって比較的容易に大きな振動を発生する。この振動は大抵の場合、強度的にみれば十分に安全な程度であるが、歩行者に対し不安感や不快感を与えたり、時には部材の疲労による局部的な破損を招く事があるといわれている。横断歩道橋が振動し易いのは、これが剛性が小さく、細長い構造物である事、一般に溶接結合されているために減衰性能が低い事、人の荷重が歩道橋にとって周期的な外力となる事などによると考えられる。これが多径間連続橋形式の場合には、単純橋形式に比べて振動特性が複雑である。

本報告では、札幌市中央区にある南大通横断歩道橋（4径間連続橋）を例にとり、(1) 定常強制振動倍率曲線による連続橋の振動特性の考察、(2) 歩行者の接地圧の仮定と歩行状態のモデル化による歩行時振動の解析および実測結果との比較、の2点を主題とした。

本研究は、芳村および高松・米沢の研究成果¹⁾をもとにし、新たに仮定した歩行者の接地圧のパルスモデルの適用について考察したものである。

2. 歩行者の力学的特性

既往の調査・実験により、歩行者の動的荷重の特性として次の事が言える。

(1) 歩行時接地圧の時間的变化は、小原らの実測によると図-1のように接地瞬間の衝撃、踏込時のピーク圧、けり進む時の小さなピーク圧、および、滑かば減力から成っている²⁾。

(2) 歩行者の平均歩調、平均速度は、札幌川の調査ではそれぞれ2.0 SEC, 1.4 m/sec であり、その到着分布はほぼランダム分布である³⁾。

(3) 人が立位で居る時に、足元から受ける強制振動に対し、上体が4 Hz をピークに3~6 Hz 付近で共振するが、膝を曲げた状態では、共振点が認められず、3 Hz 以上の振動では、上体への伝達率が低くなる。⁴⁾

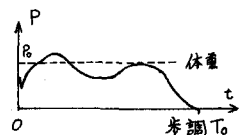


図-1 歩行時の接地圧

3. 南大通横断歩道橋の断面諸元、固有振動

径間割は図-2に示すように、第1、第3径間が長い4径間連続橋形式である。また曲げ剛性EI、死荷重W、減衰定数 ωb は

$$EI = 1.8414 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad 3-1$$

$$W = 1.59 \text{ ton/m} \quad 3-2$$

$$\omega b = 0.128 \quad 3-3$$

である。曲げ剛性は、橋の平均的断面による試算では $1.057 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ となる。しかし、この値で計算を行おう場合、牛尾らも指摘している⁵⁾ように、2次部材の剛性や支点の拘束度などの影響を無視している事により、1次固有振動周期が実測に対してやや長くなる⁶⁾であろう。よって、以下実測による1次固有振動周期($T_1 = 0.250 \text{ SEC}$)から逆計算して求めた曲げ剛性値を使用する。減衰定数も実測から求めた値である。

図-3は固有振動モードと固有振動周期である。

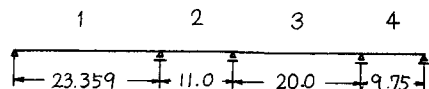


図-2 径間割 (単位 m)

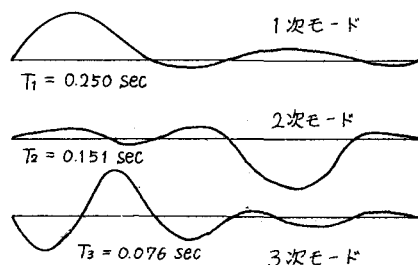


図-3 固有振動モード

4. 南大通横断歩道橋の定常強制振動

連続橋に定常集中外力

$$P = P_0 \cos \omega t$$

おはたらくときの荷重点の変位応答は

$$y(t) = \sum_{j=1}^{\infty} \left\{ C_j \cos \omega t + \frac{D_j}{\omega} \sin \omega t \right\}, \quad \frac{P_0 \Phi_j^2(x_0)}{M_j}$$

である。ここに

M_j ; j 次固有振動の一般質量

$\Phi_j(x)$; j 次固有振動モード

$$C_j = \frac{\omega_j^2 - \omega^2}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + 4\omega_b^2 \omega^2}$$

$$D_j = \frac{2\omega_b^2 \omega^2}{(\omega_j^2 - \omega^2)^2 + 4\omega_b^2 \omega^2}$$

式 4-2 の $\cos \omega t$ と $\sin \omega t$ の係数を 1 つの cosine 関数に変形すると、倍率 M_d 、遅れ位相角 ϕ が求まる。

$$M_d = \frac{1}{8\pi} \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{\infty} A_j \cos d_j \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{\infty} A_j \sin d_j \right)^2} \quad 4-5$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\sum_{j=1}^{\infty} A_j \sin d_j}{\sum_{j=1}^{\infty} A_j \cos d_j} \right) \quad (0 \leq \phi \leq \pi) \quad 4-6$$

ここに 8π は P_0 による静的たわみ量であり、また

$$d_j = \tan^{-1} \left\{ \frac{2 \cdot \frac{\omega_b}{\omega_j} \cdot \frac{\omega}{\omega_j}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2} \right\} \quad (0 \leq d_j \leq \pi) \quad 4-7$$

$$A_j = \frac{\omega_j^2 \cdot \Phi_j^2(x_0)}{M_j \sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{\omega_b}{\omega_j} \right)^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_j} \right)^2}} \quad 4-8$$

である。

南大通横断歩道橋の第 1 径間中央点の倍率曲線は

図-4 である。

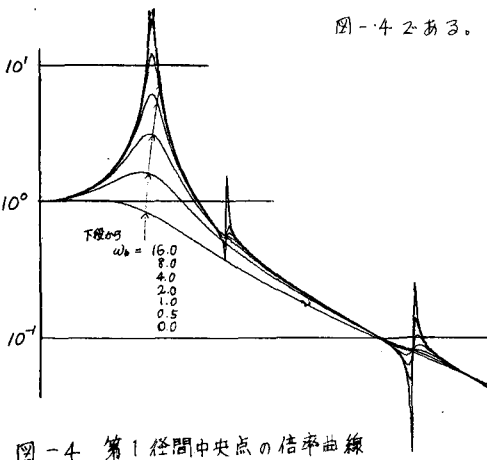


図-4 第 1 径間中央点の倍率曲線

この地点において倍率が 1 以上になるのは、1 次固有円振動数 ω_1 の前後が主であり、 ω_2, ω_3 についてはほとんど付近に限られている。しかしながら、図-3 の固有振動モードをみると分かるように、第 1 径間の中央付近からやや離れた所では必ずしもこの限りではない事が予想される。

5. 歩行外力による南大通横断歩道橋の振動解析

(1) 集中荷重に対する連続橋の振動応答¹⁾

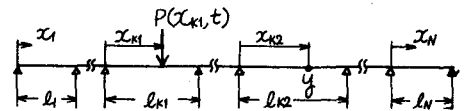


図-5

図-5 に示す N 径間連続橋の第 k 径間の x_{k1} 点に集中荷重 $P = P_0 f(t)$ ($t \geq 0$)

が作用したときの第 k 径間の x_{k2} 点の応答 $y(x_{k2}, t)$ は

$$y = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{P_0}{\omega_i^2 M_i} \cdot \Phi_{k1,i}(x_{k1}) \cdot \Phi_{k2,i}(x_{k2}) \cdot D_i(t) \quad 5-2$$

である。ここに $\Phi_{k,i}$ は第 k 径間の i 次固有振動モードである。また M_i は i 次固有振動の換算質量であり、

$$M_i = \int_0^{l_1} m \Phi_{1,i}^2(x_1) dx_1 + \dots + \int_0^{l_N} m \Phi_{N,i}^2(x_N) dx_N \quad 5-3$$

により計算される値である。また $D_i(t)$ は、式 5-4 で表わされる外力の変化 $f(t)$ のたたみ込み積分である。

$$D_i(t) = \int_0^t \frac{\omega_i^2}{\omega_i^2} e^{-\omega_i(t-\tau)} \sin \{ \omega_i(t-\tau) \} f(\tau) d\tau \quad 5-4$$

ただし

$$\omega_i' = \sqrt{\omega_i^2 - \omega_b^2} \quad 5-5$$

(2) 1 歩の接地圧の仮定と 5-4 式の計算

文献 1) では接地圧変化 $f(t)$ をサインの半周期と仮定して、2 径間連続橋の良好な解析結果を得た。

本報告においては、さらに図-6 で示される関数式 5-6 を仮定する。

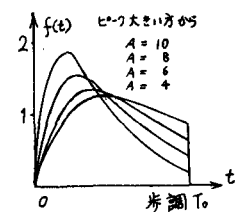


図-6

$$f(t) = \frac{A^2 T_0}{1 - e^{-A T_0} (1 + A T_0)} \cdot t e^{-A t} \quad (0 \leq t \leq T_0)$$

$$f(t) = 0 \quad (t < 0 \text{ or } t > T_0)$$

..... 5-6

この $f(t)$ による式 5-3 の $D_c(t)$ 、および 2 回微分 $\ddot{D}_c(t)$ の計算結果は式 5-7, 5-8 である。

$$D_c(t) = \frac{\omega_c^2 A^2 T_0 B_c}{\omega_c^2 (1 - e^{-AT_0} (1 + AT_0))} \left\{ \omega_c' F_{1L} - 2(\omega_b - A) \omega_c' B_c \cdot F_{2L} + (\omega_c'^2 - (\omega_b - A)^2) \cdot B_c \cdot F_{3L} + (\omega_b - A) \cdot F_{4L} \right\} \quad 5-7$$

$$\ddot{D}_c(t) = \frac{\omega_c^2 A^2 T_0 B_c}{\omega_c^2 (1 - e^{-AT_0} (1 + AT_0))} \left\{ \omega_c' G_{1L} - 2(\omega_b - A) \omega_c' B_c \cdot G_{2L} + (\omega_c'^2 - (\omega_b - A)^2) \cdot B_c \cdot G_{3L} + (\omega_b - A) \cdot G_{4L} \right\} \quad 5-8$$

ニニ

$$B_c = \frac{1}{\omega_c'^2 + (\omega_b - A)^2} \quad 5-9$$

また式中の F_{1L} , G_{1L} は

i) $t < 0$;

$$F_{1L} = F_{2L} = F_{3L} = F_{4L} = 0$$

$$G_{1L} = G_{2L} = G_{3L} = G_{4L} = 0$$

ii) $0 \leq t \leq T_0$;

$$F_{1L} = t e^{-At}$$

$$F_{2L} = e^{-At} - e^{-\omega_b t} \cos \omega_c' t$$

$$F_{3L} = -e^{-\omega_b t} \sin \omega_c' t$$

$$F_{4L} = 0$$

$$G_{1L} = (A^2 t - 2A) e^{-At}$$

$$G_{2L} = A^2 e^{-At} - \omega_c'^2 e^{-\omega_b t} \cos (\omega_c' t + 2\theta_c)$$

$$G_{3L} = -\omega_c'^2 e^{-\omega_b t} \sin (\omega_c' t + 2\theta_c)$$

$$G_{4L} = 0$$

iii) $t > T_0$

$$F_{1L} = e^{-AT_0} \cdot e^{-\omega_b (t-T_0)} \cdot T_0 \cdot \cos \omega_c' (t-T_0)$$

$$F_{2L} = e^{-AT_0} \cdot e^{-\omega_b (t-T_0)} \cdot \cos \omega_c' (t-T_0) - e^{-\omega_b t} \cos \omega_c' t$$

$$F_{3L} = e^{-AT_0} \cdot e^{-\omega_b (t-T_0)} \cdot \sin \omega_c' (t-T_0) - e^{-\omega_b t} \sin \omega_c' t$$

$$F_{4L} = e^{-AT_0} \cdot e^{-\omega_b (t-T_0)} \cdot T_0 \cdot \sin \omega_c' (t-T_0)$$

$$G_{1L} = \omega_c'^2 e^{-AT_0} e^{-\omega_b (t-T_0)} \cdot T_0 \cdot \cos (\omega_c' (t-T_0) + 2\theta_c)$$

$$G_{2L} = \omega_c'^2 e^{-AT_0} e^{-\omega_b (t-T_0)} \cdot \cos (\omega_c' (t-T_0) + 2\theta_c)$$

$$- \omega_c'^2 e^{-\omega_b t} \cos (\omega_c' t + 2\theta_c)$$

$$G_{3L} = \omega_c'^2 e^{-AT_0} e^{-\omega_b (t-T_0)} \cdot \sin (\omega_c' (t-T_0) + 2\theta_c)$$

$$- \omega_c'^2 e^{-\omega_b t} \sin (\omega_c' t + 2\theta_c)$$

$$G_{4L} = \omega_c'^2 e^{-AT_0} e^{-\omega_b (t-T_0)} \cdot T_0 \cdot \sin (\omega_c' (t-T_0) + 2\theta_c)$$

ニニに θ_c は

$$\theta_c = \tan^{-1} (-\omega_c' / \omega_b)$$

である

(3) 歩行状態のモデル化

歩行者が橋の端から歩調 T_0 、歩幅 X_0 で歩行する状態

の荷重モデルを、図-7 のように図-6 の集中荷重が時間的、空間的に変化して組合せたものと仮定する。1 歩目の荷重に対する応答が式 5-2 であり、これを

$$y_0(x_{k1}, t) \quad 5-11$$

とすると、第 N 歩目を歩行中の時刻 t での変位応答は、

$$y = \sum_{j=1}^N y_0(x_0, t - (j-1)T_0) \quad 5-12$$

により計算される。

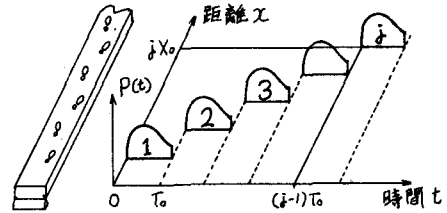


図-7 歩行外力モデル

(4) 南大通横断歩道橋の振動解析結果と実験値

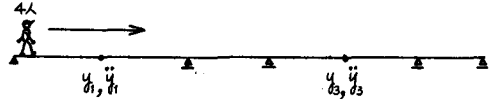


図-8

次ページ図-9 ～ 図-12 は、人が第1経間側から歩行を始めた状態の第1経間と第3経間中央点の変位、加速度応答の計算結果 $y_1, \ddot{y}_1, y_3, \ddot{y}_3$ である。

計算では、振動実験の際の歩行条件である歩調 T_0 、歩幅 X_0 、体重 P_0 を以下の値とした。

$$T_0 = 0.4872 \text{ sec} \quad 5-13$$

$$X_0 = 0.8215 \text{ m} \quad 5-14$$

$$P_0 = 269 \text{ kg} \quad 5-15$$

ニニに体重 269 kg とは4名の体重の合計値である。また、図-9 ～ 図-12 に示した計算では、式 5-6 における A の値を、図-6 の曲線群のうち比較的図-1 に近い曲線を与える定数として

$$A = 4.0 \quad 5-16$$

とした。

図-13 は、図-10 の状態に対応する振動実験による実験結果である。この実験では、式 5-13, 5-14 の歩行条件で4名が歩調を合わせ歩行を行い、第1経間中央点での加速度応答を測定した。

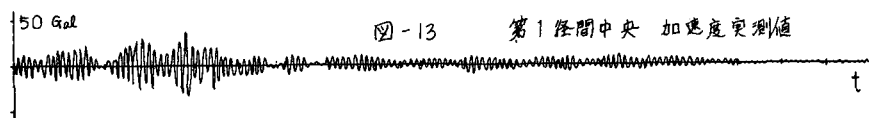
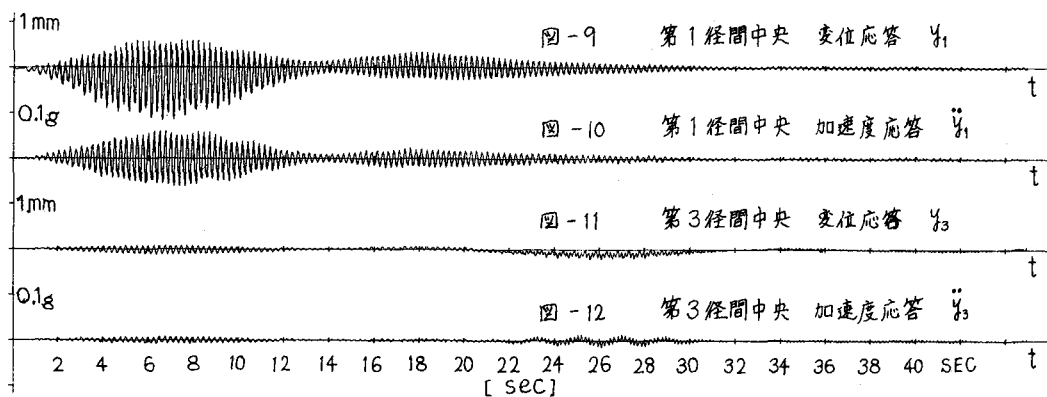


図-10は、図-13と比較すると細かい振動特性がかなり正確に再現していると考えられる。しかしながら、解析結果における加速度振幅の最大値が実測結果のものに対し、約1.8倍に大きく計算されている。この理由として2次の2点

- i) 実測時の4人の歩行者の僅かな歩調の乱れにより、歩行者の接地圧が図-1に示すものより平滑化されるため、図-13における振幅が1人で歩行した場合の4倍より小さめに計測されているだろうという事、(この事は牛尾らの実験⁵⁾でも確認されている)
- ii) 実測時には4名が1列に並んで歩行したので、むしろ振動も多少発生し、これがたわみ方向の加速振幅の計測値に影響しているのとは反いかという事、

が考えられる。

6. おまけ

文献1)に続いて新たに歩行者の荷重モデルを仮定し、このモデルによる24径間連続歩道橋の振動解析を行った結果、実測との振動性状を比較的良好に再現できた。

本報告をまとめるにあたり、北海道大学の荻沢教授、三上助平、佐々木助平には、御協力をいただいたことを感謝する。

参考文献

- 1) 芳村・高松・米沢「歩行者の歩行による連続橋の振動性状について」(道支部論文報集 昭和53年度)
- 2) 小原・内田・宇野「建築・室内・人間工学」(鹿島出版)
- 3) 梶川・小堀「動的応答からみた歩道橋の使用性に関する確率論的考察」(論文報告集 1977年10月)
- 4) 小堀・梶川「橋梁振動の人間工学的評価法」(論文報告集 1974年10月)
- 5) 牛尾・南条「歩道橋の振動に関する諸問題」(日立造船技報 第33巻第3号)