

単純桁歩道橋の共振歩行時における動的応答特性に関する 2, 3 の考察

Some Considerations on Dynamic Response Characteristics of a Single Span Pedestrian Bridge in Resonant with the Human Walking Motion

米田昌弘*

Masahiro YONEDA*

* 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

Dynamic response is one of the most important themes in the design of pedestrian bridges. Investigations were conducted to study relationships between the numerical results and full scale measurements of dynamic response caused by a walking human. It was ascertained that the computed velocity response was larger than the measured value when a person was walking on the bridge at the same pace as the natural frequency of the bridge. When the human walking pace was considered variable in the numerical computation, the results were fairly in good agreements with the vibration test at resonant frequency.

Key Words : *pedestrian bridge, dynamic response characteristics, vibration serviceability human walking motion, dynamic response analysis*

1. まえがき

成人(高校生以上)が一般街路上を普通に歩く場合、歩調が 2.0 歩/秒で歩行速度が 1.4m/sec 程度であることが知られている。したがって、歩道橋の固有振動数が歩調域付近にあると共振現象によって振動し、場合によっては利用者に不安感や不快感を与えることになる。このようなことから、立体横断施設技術基準¹⁾や建設省の標準設計²⁾では、たわみ制限に加え、歩道橋のたわみ固有振動数が 1.5Hz~2.3Hz に入らないように規定している。しかしながら、立体横断施設技術基準が制定された 1979 年から建設省の標準設計が提示された 1985 年頃においては、斜張橋形式や吊床版橋形式などの人道橋も含め、今日のような長支間化、幅員化した多様な歩道橋は想定しておらず、対象とした歩道橋によっては上述した振動数の規定を順守できなかったり、たとえ順守できたとしても著しく不経済な設計になってしまうケースも見受けられるようになってきた。

歩行者に起因した歩道橋の振動は、当然予想されるように歩道橋の重量によっても変化し、重い歩道橋では、たとえ共振しても使用性が損なわれないこともあり得る。また、実際、田中・加藤³⁾は、数多くの歩道橋を測定するとともに動的応答解析を実施して、歩道

橋の単位長さ当たりの重量が 2.0tf/m 以上ならば、一人の人間が共振歩行しても、揺れの感じ方は「振動を感じる」領域内に収まるという実務上きわめて有用な知見を報告している。一方、斜張橋や吊橋ならびに吊床版橋のような吊形式の歩道橋では、歩調範囲内に多数の振動モードが存在することが多く、振動数の規定では使用性を適切に評価できない。これに対し、梶川ら^{4)~6)}は、数多くの吊形式歩道橋を対象として実橋試験や動的応答解析を実施し、吊形式歩道橋の使用性について有用な知見を報告している。

上述した解析に加え、歩道橋の使用性評価を目的とした動的応答解析はすでに多数実施されており、多種多様化した現在の歩道橋では、動的応答解析によって使用性を評価する手法も一般化しつつある^{7), 8)}。しかしながら、動的応答解析を実施した場合、解析で算出した値は一般に共振歩行実験で得られた測定値よりも大きくなることが知られている⁹⁾。これは、歩行者によって誘起される歩道橋の振動は共振現象であることから、被験者の歩調が歩道橋の固有振動数と少しでも相違すれば応答が大幅に低減してしまうと考えれば理解できる。

ところで、起振機を利用した橋梁構造物の振動実験では、事前に 0.7~0.9 程度の起振効率(実測値/解析値)を仮定した動的応答解析を実施して、実験時にお

表-1 対象とした歩道橋の構造諸元と単独共振歩行時の最大速度応答

名 称	有効幅員 B	支間長 ℓ	重 量 w	断面 2 次モーメント I	固有振動数 f_1	対数減衰率 δ	最 大 速度応答
Bridge-A	1.5 m	40.86 m	0.744 tf/m	0.0210 m ⁴	2.27 Hz	0.0063	5.31 cm/s
Bridge-B	1.5 m	43.50 m	0.740 tf/m	0.0209 m ⁴	2.00 Hz	0.0188	3.94 cm/s
Bridge-C	3.0 m	48.55 m	3.333 tf/m	0.0799 m ⁴	1.48 Hz	0.1194	0.27 cm/s
Bridge-D	2.0 m	42.00 m	1.630 tf/m	0.0789 m ⁴	2.81 Hz	0.0126	4.38 cm/s

ける動的応答量を予測する場合が多い。それゆえ、動的応答解析を実施して歩道橋の使用性を検討する場合にも、起振効率を定義して歩行者の歩調が変化する影響を考慮する必要があると思われるが、従来は歩行者の起振効率を明確な形で定義していなかった。なお、田中・加藤³⁾は、解析的に算出した歩道橋の変位応答に歩行者の加振円振動数を乗じて速度応答に変換した後、0.286 なる数値を乗じて速度応答の実効値（振動感覚の指標）を算出している。この 0.286 なる数値は解析結果を低減させる係数となっているが¹⁰⁾、厳密に言えば、一人の歩行者が歩道橋を渡り始めてから渡り終わるまでに感じる平均的な振動感覚を評価するためのもので、本研究で定義する起振効率と直接的な対応関係にはない。

以上に述べた現状を踏まえ、本研究では、単純桁形式歩道橋の共振歩行試験結果（歩行者による加振試験結果）を収集し、最大速度の実測値と新たに実施した計算値との対比から、歩行者の起振効率を算出することにした。また、歩調の変化に着目した動的応答解析も実施し、歩道橋の動的応答特性に及ぼす歩行者の歩調変化について実務設計上の観点から考察を加えることとした。その結果、単純桁形式歩道橋で算出された起振効率の最大値は 0.4 程度であること、歩調を変化させた動的応答解析を実施すれば共振歩行試験結果に近い解析値が得られることなど、歩道橋の設計に携わる実務技術者にとって示唆に富んだ知見が得られたことから、ここにその検討結果を報告する。

2. 対象とした歩道橋と歩行外力

(1) 対象とした歩道橋

歩道橋を対象とした共振歩行試験については、今までにも数多く実施されている。本研究では、これらの共振歩行試験結果^{11), 12)}の中から、重量、固有振動数、対数減衰率および共振歩行時の応答振幅が公表されている単純桁形式歩道橋を検討対象とした。対象とした歩道橋（4 橋）の構造諸元と単独共振歩行時における最大速度応答を表-1に示す。ここに、本研究で単純桁形式の歩道橋に限定したのは、この形式では基本振動（鉛直曲げ 1 次振動）のみが応答に寄与するこ

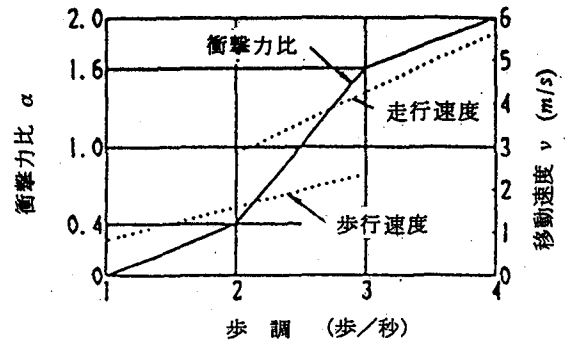


図-1 衝撃力比と移動速度

とから、起振効率を正しく算出できると考えたからである。なお、表-1に示した固有振動数と対数減衰率は測定値であり、断面 2 次モーメントは、固有振動数の解析値が測定値と一致するように調整した値である。

(2) 歩行外力

歩行者の体重（質量）は歩道橋の質量に比べて非常に小さいことから、歩行者の体重で歩道橋が静的に変形する量は無視しても差し支えない。すなわち、歩行外力としては、歩行にともなう衝撃力（歩行衝撃力）のみを考えれば十分である。わが国では、歩行衝撃力のモデル化として、正負の周期的な歩行外力を考慮する梶川の方法¹⁰⁾や小幡・林川ら⁸⁾が提唱する方法（余弦波における負の部分の荷重を除外する方法）が一般に利用されている。採用する歩行外力が相違すれば解析結果も変化するが、前者の方法は 2 歩/秒程度の歩調で歩行する場合（常にどちらか一方の足が橋面上に接している場合）に、後者の方法は負の部分の荷重を除外することから走行時の衝撃力を表現する場合に、それぞれ適した表現方法であると著者は考えている。

表-1に示したように、対象とした歩道橋の固有振動数は 1.48Hz~2.81Hz であり、共振歩行試験時には常に被験者のどちらか一方の足が橋面上に接していると考えられる。それゆえ、本研究では、正負の周期的な歩行外力を考える梶川の方法を採用することとした。すなわち、歩行外力の最大値 f_0 は歩行者の体重 W に衝撃力比と呼ばれる係数 α を乗ずれば算定できるもの

とし、歩行外力を

$$F(t) = f_0 \cos \omega t = \alpha W \cos \omega t \quad (1)$$

または、

$$F(t) = f_0 \sin \omega t = \alpha W \sin \omega t \quad (2)$$

で表現した。ここに、 ω は歩調に対応する円振動数で、歩調によって衝撃力比 α と歩行速度 v は図-1 に示すように変化することが知られている¹⁰⁾。

3. 動的応答解析の手法

(1) 解析解を用いる方法

単純桁形式の歩道橋では、振動工学の基礎理論を適用すれば、固有振動数や固有振動モードを容易に算出できる。したがって、歩行者が単純桁形式の歩道橋を一定の歩調で通行する場合、変位応答や速度応答は、やや複雑であるが以下に示す解析解を用いて算定できる。すなわち、時刻 $t=0$ で歩道橋が静止している場合、歩行者による歩道橋の変位応答 y は、 ℓ を支間長、 q_n を n 次振動の一般座標、 $\Phi_n(x)$ を n 次の振動モードとすれば、次式で算定できる。

$$y = \sum_n q_n(t) \Phi_n(x) \\ = \sum_n q_n \sin \frac{n\pi x}{\ell} \quad (3)$$

ここに、一般座標 q_n は、 ω_n を n 次の固有円振動数、 h_n を n 次振動モードの減衰定数とすれば、

$$q_n = \frac{f_0}{2M_n} \left\{ e^{-h_n \omega_n t} (C_1 \cos \omega_n t + C_2 \sin \omega_n t) \right. \\ \left. + \gamma_{np} \sin(\Omega_p t - \varphi_{np}) + \gamma_{nm} \sin(\Omega_m t - \varphi_{nm}) \right\} \quad (4)$$

ただし、

$$\omega_n = \sqrt{1 - h_n^2} \omega_n \quad (5)$$

$$\Omega_p = \frac{n\pi v}{\ell} + \omega \quad (6)$$

$$\Omega_m = \frac{n\pi v}{\ell} - \omega \quad (7)$$

$$\gamma_{np} = \frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \Omega_p^2)^2 + 4h_n^2 \omega_n^2 \Omega_p^2}} \quad (8)$$

$$\gamma_{nm} = \frac{1}{\sqrt{(\omega_n^2 - \Omega_m^2)^2 + 4h_n^2 \omega_n^2 \Omega_m^2}} \quad (9)$$

$$\phi_{np} = \tan^{-1} \left(\frac{2h_n \omega_n \Omega_p}{\omega_n^2 - \Omega_p^2} \right) \quad (10)$$

$$\phi_{nm} = \tan^{-1} \left(\frac{2h_n \omega_n \Omega_m}{\omega_n^2 - \Omega_m^2} \right) \quad (11)$$

$$C_1 = \gamma_{np} \sin \varphi_{np} + \gamma_{nm} \sin \varphi_{nm} \quad (12)$$

$$C_2 = \left\{ h_n \omega_n C_1 - (\gamma_{np} \Omega_p \cos \varphi_{np} \right. \\ \left. + \gamma_{nm} \Omega_m \cos \varphi_{nm}) \right\} / \omega_n \quad (13)$$

一方、速度応答 $\dot{y}$ は、式(4)を一回微分して得られる

$$\dot{q}_n = \frac{f_0}{2M_n} \left\{ e^{-h_n \omega_n t} (-C_1 h_n \omega_n \cos \omega_n t - C_1 \omega_n \sin \omega_n t \right. \\ \left. - C_2 h_n \omega_n \sin \omega_n t + C_2 \omega_n \cos \omega_n t) \right. \\ \left. + \gamma_{np} \Omega_p \cos(\Omega_p t - \varphi_{np}) + \gamma_{nm} \Omega_m \cos(\Omega_m t - \varphi_{nm}) \right\} \quad (14)$$

を次式に代入すれば算出できる。

$$\dot{y} = \sum_n \dot{q}_n(t) \Phi_n(x) \\ = \sum_n \dot{q}_n \sin \frac{n\pi x}{\ell} \quad (15)$$

(2) 簡易計算式を用いる方法

実務設計では、一般に振動感覚の指標である速度応答の実効値を算出すれば十分であるとの観点から、次式を適用する場合も多い³⁾。

$$\dot{y}_E = 0.286 \cdot \omega \cdot y_{\max} \quad (16)$$

ここに、 $\dot{y}_E$ は速度応答の実効値 (cm/s)、 ω は歩調に対応する円振動数 (rad/s) である。また、 $y_{\max}$ は変位応答の最大値 (cm) で、 M を歩道橋の全質量とすれば、次の近似式を用いても良い。

$$y_{\max} = \frac{1}{M} \frac{2f_0}{\sqrt{(\omega_1^2 - \Omega_m^2)^2 + 4h_1^2 \omega_1^2 \Omega_m^2}} \quad (17)$$

式(16)は歩道橋の使用性を論じる上で重要な評価式となっているが、式(16)中の係数 0.286 については十分な認識が必要である。すなわち、係数 0.286 は、元来、歩行者による振動波形を正弦波と見なした時の実効値とピーク値との比 $[1/\sqrt{2}]$ 、非定常波形における各ピーク値の平均と各ピーク値の最大との比 (ほぼ $2/\pi$)、移動する歩行者位置での応答の実効値と応答が最大になる点での実効値の比 (ほぼ $2/\pi$) をそれぞれ乗じて算出されるものである¹⁰⁾。したがって、式(16)で求めた速度応答の実効値 $\dot{y}_E$ は、一人の歩行者が歩道橋を渡り始めてから渡り終わるまでに感じる平均的な振動感覚を評価するためのものである。これに対し、対象とする歩道橋の使用性を厳密に評価する場合、一人の歩行者が歩道橋を渡り始めてから渡り終わるまでに生じた最大の速度応答 $\dot{y}_{\max}$ や速度応答の最大実効値 $\dot{y}_{E,\max}$ を用いなければならない。それゆえ、歩行者による最大応答速度や速度応答の最大実効値を算出する場合、理論的にはそれぞれ次式を適用する必要がある。

$$\dot{y}_{\max} = \omega \cdot y_{\max} \quad (18)$$

$$\dot{y}_{E,\max} = 0.707 \dot{y}_{\max} \quad (19)$$

しかしながら、式(18)や式(19)をそのまま適用した場合、式(16)を用いて歩道橋の振動感覚を論じた田中・加藤の研究³⁾と整合性がとれなくなってしまうが、歩行者の起振効率を明確な形で導入すればこの不整合を解決できる可能性がある。すなわち、応答計算によって歩道橋の使用性を評価する場合、共振歩行試験で

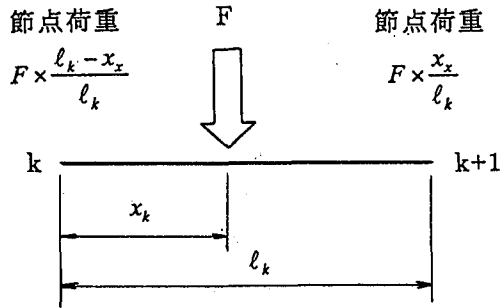


図-2 節点荷重への変換

実測した最大応答と計算から求まる最大応答の比を起振効率 β と定義し、

$$\dot{y}_{\max} = \beta \cdot \omega \cdot y_{\max} \quad (20)$$

$$\dot{y}_{E,\max} = 0.707\beta \cdot \dot{y}_{\max} \quad (21)$$

を適用するものとする。そして、 $0.707\beta \doteq 0.286$ ($\beta \doteq 0.405$) であれば、結果として、田中・加藤の研究は歩道橋の使用性を適切に評価していることになる。なお、起振効率 β の定量的な数値については、次章で詳細に検討する。

(3) 数値積分法

歩行者の歩調が変化する場合には解析解が簡単に誘導できないことから、本研究では、以下に示すような数値積分する手法を適用して歩行者による動的応答を算出することとした。

モーダルアナリシスを適用すれば、歩道橋の各節点におけるたわみは次のように展開できる。

$$\{y\} = \sum_n \{\phi\}_n q_n = [\Phi] \{q\} \quad (22)$$

ここに、 $\{\phi\}_n$ は第 n 次の固有振動モードを表すベクトル、 $[\Phi]$ はモーダルマトリックス、 $\{q\}$ は一般化座標 q_n を成分とするベクトルである。ところで、 $[I]$ を単位マトリックスとし、モーダルマトリックス $[\Phi]$ を

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = [I] \quad (23)$$

となるように正規化しておけば、歩道橋の運動方程式

$$[M] \ddot{y} + [C] \dot{y} + [K] y = \{F\} \quad (24)$$

は、次のように変形される。

$$\ddot{q} + 2[h] \dot{q} + [\omega^2] q = [\Phi]^T \{F\} \quad (25)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は、それぞれ歩道橋の質量、減衰、剛性を表すマトリックス、 $\{y\}$ は節点変位を表すベクトル、 $\{F\}$ は歩行外力ベクトルである。また、 $[h]$ 、 $[\omega]$ 、 $[\omega^2]$ は h_n と ω_n を第 n 次固有振動モードの構造減衰定数および固有円振動数とするとそれぞれ h_n 、 ω_n 、 ω_n^2 を対角要素とするマトリックスである。

ところで、マトリックス解析では、節点 k と節点 $k+1$ の途中に歩行者がいると、図-2に示すように節点荷重に変換しなければならない。それゆえ、

$$\varphi_k = \frac{l_k - x_k}{l_k} \quad (26)$$

$$\varphi_{k+1} = \frac{x_k}{l_k} \quad (27)$$

として、

$$\{\varphi(t)\} = \{0; 0; \dots; \varphi_k; \varphi_{k+1}; 0; \dots; 0\} \quad (28)$$

とすれば、歩行者外力ベクトル $\{F\}$ は、

$$\{F\} = \{f_0 \sin \omega_0 t\} \{\varphi(t)\} \quad (29)$$

となる。ただし、時間の経過とともに歩行者は移動するので $\{\varphi(t)\}$ は時間の関数となる。したがって、式(23)は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \ddot{q} + 2[h][\omega] \dot{q} + [\omega^2] q \\ & = [\Phi] \{f_0 \sin \omega_0 t\} \{\varphi(t)\} \end{aligned} \quad (30)$$

以上より、式(30)で与えられる方程式を、たとえば $q=0$ 、 $\dot{q}=0$ の初期条件（歩行者が進入する前に、歩道橋が静止している状態）で、Newmark の β 法などの手法を用いて数値積分すれば、歩行者による歩道橋の動的応答を求めることができる。

4. 共振歩行時における動的応答

(1) 歩調を一定とした場合

まず、時刻歴の実測波形が報告されている Bridge-A を対象として、解析解に基づく動的応答解析を実施した。解析にあたっては、2 次以上の振動数が 9Hz 以上と非常に高いことから 1 次振動のみを考慮し、構造減衰については表-1 に示した実測値 ($\delta=0.0063$) を使用した。また、一人の歩行者（体重 70kgf）が共振歩調である 2.27 歩/秒で歩行するものとし、歩行速度 v と衝撃力比 α は図-1 においてこの歩調に対応する $v=1.62\text{m/s}$ 、 $\alpha=0.723$ を採用するものとした。共振歩行時の実測値と計算値をそれぞれ図-3、図-4 に示す。図-3、図-4 を比較すればわかるように、共振歩行時に実測された最大速度応答は 5.31cm/s であるのに対し、解析値は 22.25cm/s と非常に大きくなっている。これは、共振歩行試験のように被験者が意図的に共振歩行を試みても、実際の歩調は微妙に変化し、完全な共振歩行を実現できなかったためと考えられる。これに対し、数値計算では完全な共振歩行状態が再現され、実測値と比較して応答が大きく算出されたものと言える。

加振を目的とした共振歩行試験を実施しても完全な共振歩行を実現できないことは、以下に示す結果からも推察できる。すなわち、Bridge-A の実測波形で速度応答が最大となる歩行位置は図-3 からわかるように径間の中央点付近を通過した場合であるのに対し、数値計算では図-4 からわかるように歩行を開始してから約 24 秒後の位置（約 0.95 l 点の位置）で生じている。一方、図-5 は歩調を 2.21 歩/秒（共振歩調 2.27 歩/秒の 97.5%、 $v=1.57\text{m/s}$ 、 $\alpha=0.652$ ）とした解析結果であるが、この場合には径間中央付近で約

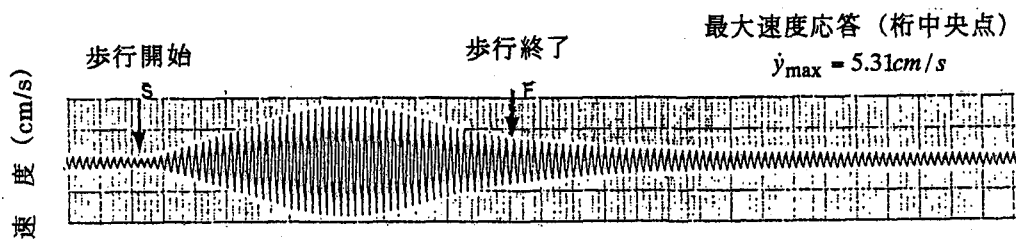


図-3 Bridge-A の単独共振歩行試験結果 (歩調; 2.27 歩/秒)

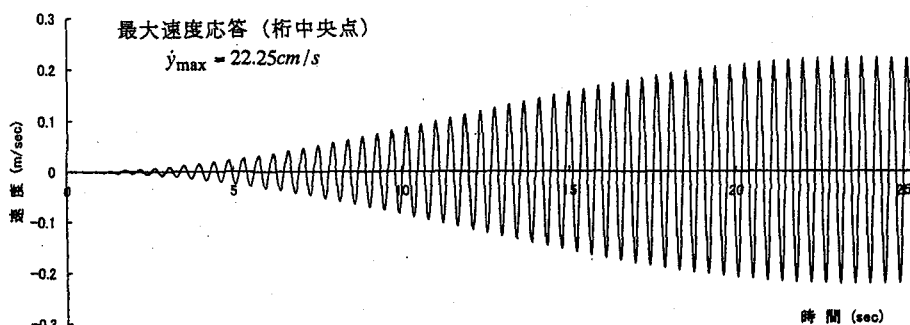


図-4 Bridge-A の動的応答解析結果 (歩調; 2.27 歩/秒)

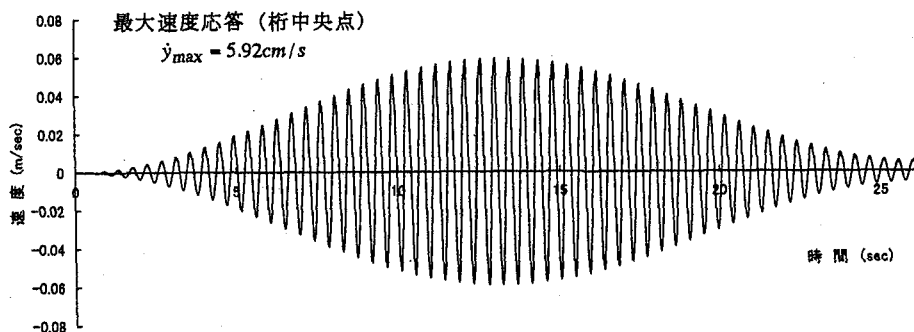


図-5 2.21 歩/秒 (共振歩調 2.27 歩/秒の 97.5%) で歩行した場合の動的応答解析結果 (Bridge-A)

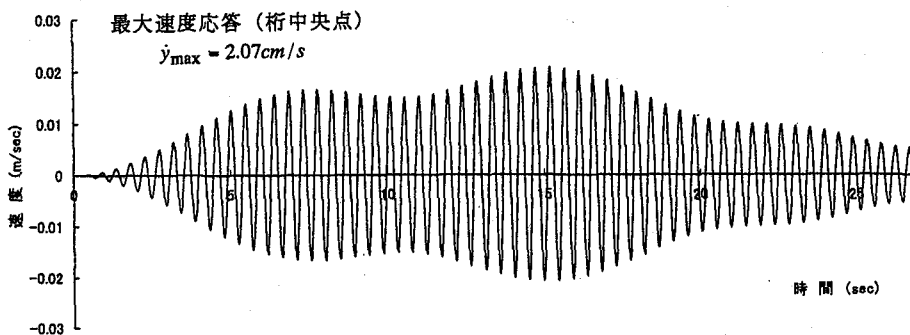


図-6 2.16 歩/秒 (共振歩調 2.27 歩/秒の 95%) で歩行した場合の動的応答解析結果 (Bridge-A)

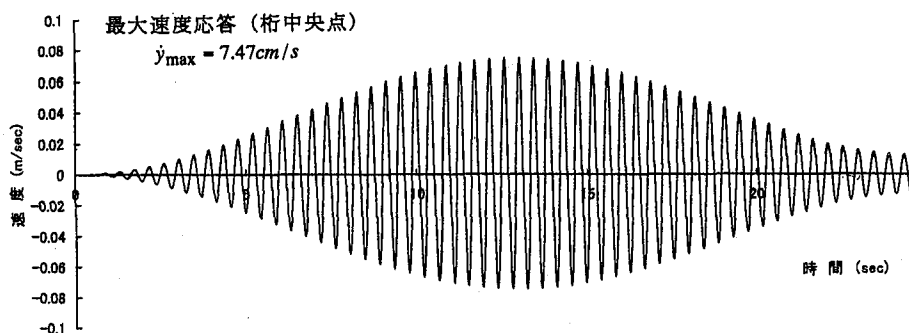


図-7 2.33 歩/秒（共振歩調 2.27 歩/秒の 102.5％）で歩行した場合の動的応答解析結果（Bridge-A）

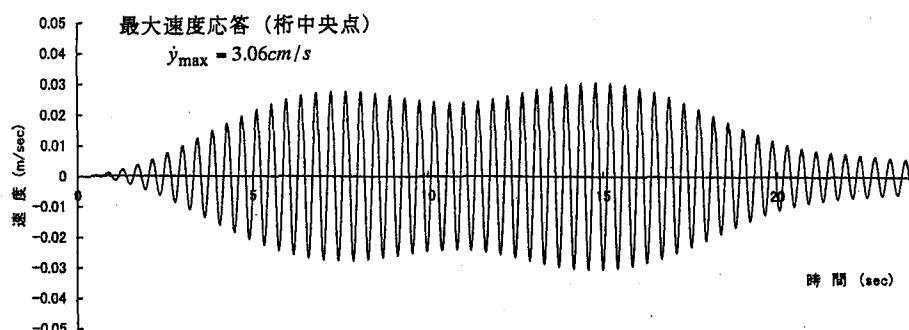


図-8 2.38 歩/秒（共振歩調 2.27 歩/秒の 105％）で歩行した場合の動的応答解析結果（Bridge-A）

5.92cm/s の最大速度応答が生じ、測定結果とも比較的類似した波形が得られている。ただし、歩調を 2.16 歩/秒（共振歩調 2.27 歩/秒の 95％、 $v=1.53m/s$ 、 $\alpha=0.592$ ）とした場合には、図-6 からわかるように速度応答の最大値は実測値より小さく、しかも波形にはうなりが生じている。このうなりは歩調に対応する強制振動成分と 1 次固有振動成分によって引き起こされたものであるが、実測波形にはこのようなうなりは生じていない。したがって、歩調を一定とした従来の解析では、共振歩調を 2％～3％程度低減させれば、実測結果に近い結果が得られる場合が多いと推察される。なお、図-7、図-8 は、歩調を 2.33 歩/秒（共振歩調 2.27 歩/秒の 102.5％、 $v=1.53m/s$ 、 $\alpha=0.592$ ）および 2.38 歩/秒（共振歩調 2.27 歩/秒の 105％、 $v=1.53m/s$ 、 $\alpha=0.861$ ）とした場合の解析結果であるが、これらの図からわかるように、歩道橋の 1 次固有振動数を上回る歩調で歩行した場合にもうなりは+2.5％の歩調で生じず、+5％の歩調で生じたことを付記しておく。

同様に、1 次固有振動数が 2.00Hz の Bridge-B について、共振歩調（2 歩/秒、 $v=1.40m/s$ 、 $\alpha=0.4$ ）、共振状態の 97.5％に対応する歩調（1.95 歩/秒、 $v=1.36m/s$ 、 $\alpha=0.390$ ）、共振状態の 95％に対応する歩調（1.90 歩/秒、 $v=1.32m/s$ 、 $\alpha=0.592$ ）で歩行した場合の応答計算をそれぞれ実施した。得られた

結果をそれぞれ図-9～図-11 に示す。これらの結果からわかるように、共振歩調（2.00 歩/秒）では実測値の 3.94cm/s と比べ非常に大きな速度応答（10.64cm/s）が算出されるのに対し、共振状態の 97.5％とした歩調（1.95 歩/秒）では径間中央付近で実測値の 3.94cm/s に近い最大速度応答（3.36cm/s）が得られている。また、共振状態の 95％とした歩調（1.90 歩/秒）では、Bridge-A と同様、波形にうなりが生じている。したがって、Bridge-B についても歩調を一定とした従来の解析では、共振歩調を 2％～3％程度低減させれば、実測結果に近い結果が得られる場合が多いと推察される。

さて、実務設計では、一般に振動感覚の指標である速度応答の実効値を算出すれば十分である。そこで、表-1 に示した 4 つの歩道橋に対して、単独共振歩行状態の実験結果と解析結果の対比から、起振効率 β を算定した。その結果を表-2 に示す。これらの結果より、Bridge-A では $\beta=0.24$ 、Bridge-B では $\beta=0.37$ 、Bridge-C では $\beta=0.40$ 、Bridge-D では $\beta=0.33$ とそれぞれの歩道橋でばらつきはあるが、起振効率の最大値は $\beta=0.40$ となっている。この値は $\beta=0.405$ と比べて近く、田中・加藤の研究は、結果として使用性を適切に評価していることになる。ただし、起振効率を $\beta=0.4$ とした Bridge-B の動的応答解析結果である図-12 からわかるように、起振効率を考慮した最大

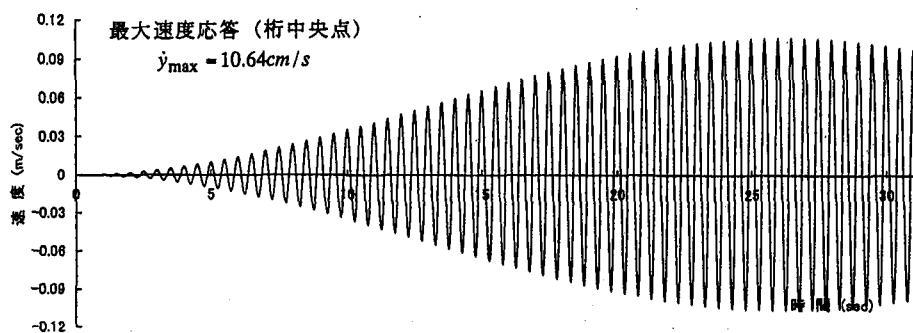


図-9 2.00 歩/秒 (共振歩調) で
歩行した場合の動的応答解析結果 (Bridge-B)

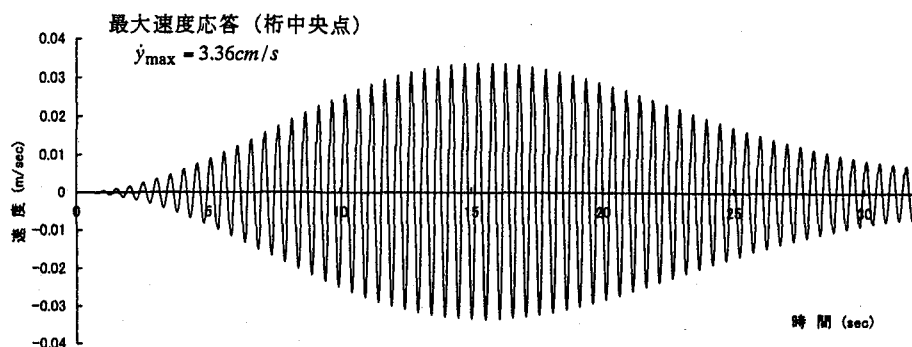


図-10 1.95 歩/秒 (共振歩調 2.00 歩/秒の 97.5%) で
歩行した場合の動的応答解析結果 (Bridge-B)

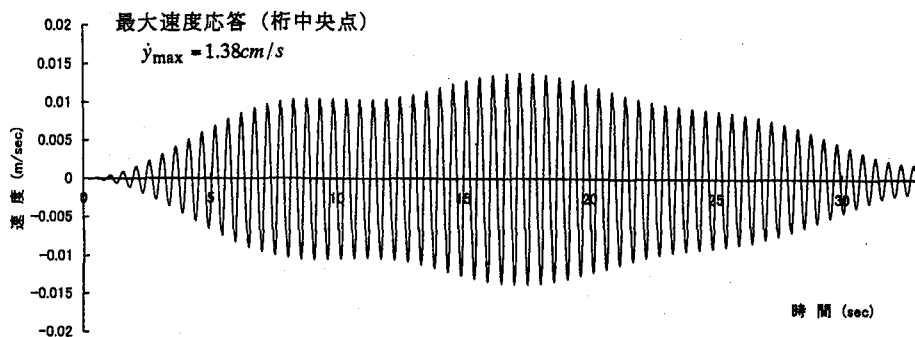


図-11 1.90 歩/秒 (共振歩調 2.00 歩/秒の 95%) で
歩行した場合の動的応答解析結果 (Bridge-B)

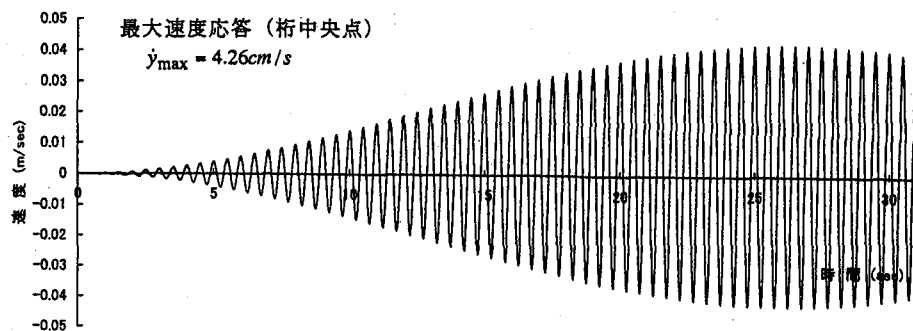


図-12 起振効率 $\beta = 0.4$ を考慮した動的応答解析結果
(Bridge-B, 2.00 歩/秒)

表-2 対象とした歩道橋での起振効率 β

名 称	固有振動数 f_1	最大速度応答		起振効率 β
		実測値	解析値	
Bridge-A	2.27 Hz	5.31 cm/s	22.25 cm/s	0.24
Bridge-B	2.00 Hz	3.94 cm/s	10.64 cm/s	0.37
Bridge-C	1.48 Hz	0.27 cm/s	0.670 cm/s	0.40
Bridge-D	2.81 Hz	4.38 cm/s	13.13 cm/s	0.33

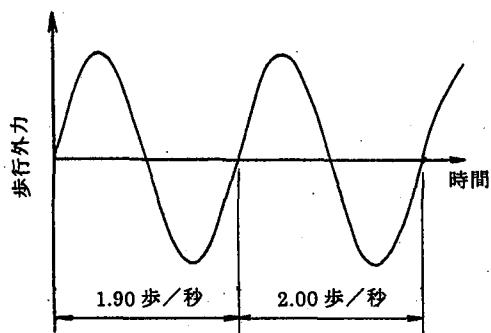


図-13 歩調変化の一例

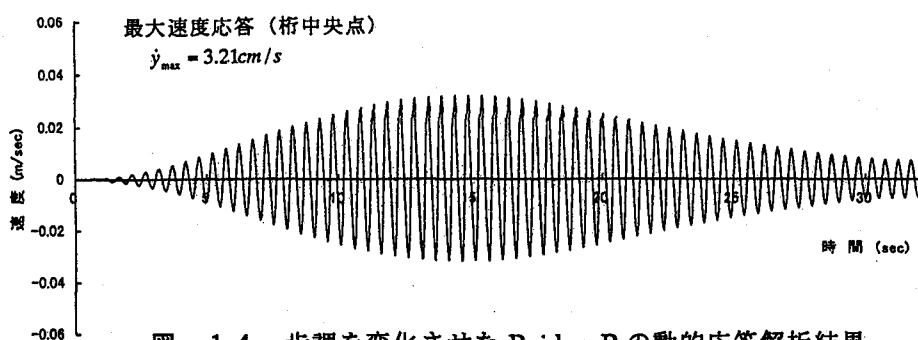


図-14 歩調を変化させた Bridge-B の動的応答解析結果
(CASE-1 ; 1.900 歩/秒, 2.000 歩/秒)

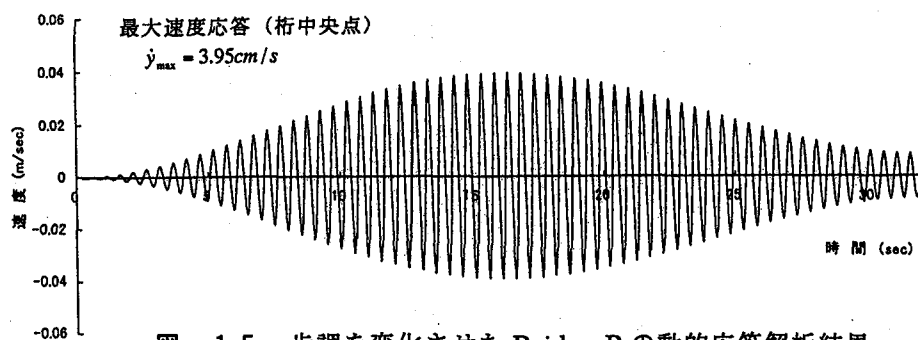


図-15 歩調を変化させた Bridge-B の動的応答解析結果
(CASE-2 ; 1.915 歩/秒, 2.000 歩/秒)

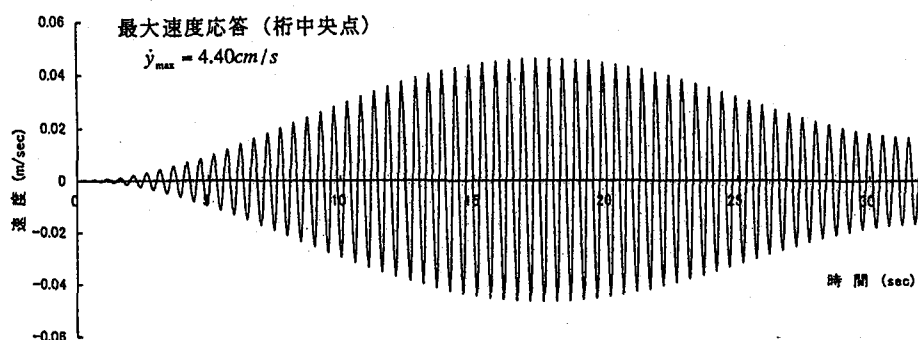


図-16 歩調を変化させた Bridge-B の動的応答解析結果
(CASE-3 ; 1.925 歩/秒, 2.000 歩/秒)

速度応答は実測値と概ね一致するものの、最大速度応答は約 25 秒後の位置（約 0.8 l 点の位置）で生じており、最大速度が径間中央部付近で生じる実測結果と相違することに留意しなければならない。

なお、本研究で対象とした歩道橋は 4 橋と非常に少なく、起振効率にもばらつきがあることから、今後はさらに多くの歩道橋に対して同様の検討を行い、より厳密な起振効率を算定する必要があることを付記しておく。

(2) 歩調を変化させた場合

前節で考察したように、共振歩行試験で得られた速度応答特性は、共振歩調を 2.5% 低減させた解析結果と類似していた。しかしながら、この結果は、必ずしも共振歩行試験における実際の歩調が共振状態の 97.5% であったことを意味するものでない。すなわち、加振実験時の歩行状態は、たとえば、ある時には 2 歩/秒、その次には 1.90 歩/秒というように変化すると考えた方が妥当であろう。そこで、このことを検証するため、Bridge-B を対象として歩行者の歩調を変化させた応答解析を数値積分法で実施することとした。

Bridge-B の固有振動数は 2.00Hz であることから、歩調を変化させた動的応答解析を実施する場合にも 2 歩/秒の歩調成分を含めた方が合理的であると考えられる。そこで、ここでは、図-13 に示すように 1 周期ごとに歩調が変化する場合を想定し、歩調変化をそれぞれ

- ① CASE-1 : 1.900 歩/秒, 2.000 歩/秒
- ② CASE-2 : 1.915 歩/秒, 2.000 歩/秒
- ③ CASE-3 : 1.925 歩/秒, 2.000 歩/秒

とした各ケースについて動的応答解析を実施した。ただし、動的応答解析にあたっては 1 次振動モードのみを採用し、積分時間刻み Δt を $\Delta t = 0.001$ 秒とした。また、歩調の変化が非常に小さいことから歩行速度として $v = 1.40\text{m/s}$ 、衝撃力比として $\alpha = 0.4$ の値（共振歩調である 2 歩/秒の値）を使用するものとした。得られた解析結果を図-14～図-16 に示す。

前節で示したように、共振歩調の 95% 前後の歩調で歩行した場合、速度応答波形の解析値にうなりが生じるが、図-14～図-16 からわかるように、2 歩/秒の共振歩調成分が含まれるとうなりは生じず、また、速度応答の最大値も実測値と同じく径間中央部付近を歩行する場合に生じている。Bridge-B の共振歩行試験によれば、3.94cm/s の最大速度応答が測定されているが、本解析結果では 1 周期ごとの歩調を 1.915 歩/秒（共振歩調の 95.75%）、2 歩/秒（共振歩調）と変化させた CASE-2 の場合に実測値ときわめて近い結果が得られている。

実際の歩調はより複雑に変化すると思われるが、以

上の検討結果より、共振歩行試験で得られる速度応答特性はここに示した単純な歩調変化を考慮した動的応答解析を実施しても概ね算出できると考えられる。

5. まとめ

本論文は、共振歩行試験結果と動的応答解析結果との比較を行い、単純桁形式歩道橋の共振歩行時における動的応答特性について検討したものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) Bridge-A の共振歩行時に実測された最大速度応答は 5.31cm/s であるのに対し、解析値は 22.25cm/s と非常に大きくなった。また、実測波形で速度応答が最大となる歩行位置は径間の中央点付近を通過した場合であるのに対し、数値計算では歩行を開始してから約 24 秒後の位置（約 0.95 l 点の位置）で生じていた。したがって、共振歩行試験のように被験者が意図的に共振歩行を試みても、実際の歩調は微妙に変化し、完全な共振歩行を実現できないと言える。

(2) Bridge-A について歩調を 2.21 歩/秒（共振歩調 2.27 歩/秒の 97.5%、 $v = 1.57\text{m/s}$ 、 $\alpha = 0.652$ ）とした解析では、径間中央付近で約 5.92cm/s の最大速度応答が生じ、測定結果とも比較的類似した波形が得られた。一方、歩調を 2.16 歩/秒（共振歩調 2.27 歩/秒の 95%、 $v = 1.53\text{m/s}$ 、 $\alpha = 0.592$ ）とした場合には、速度応答の最大値は実測値より小さく、しかも波形にはうなりが生じた。なお、このような歩道橋の動的応答特性は、固有振動数が 2.00Hz の Bridge-B についても同様であった。

(3) 4 つの単純桁歩道橋に対して、共振歩行状態の実験結果と解析結果の対比から、起振効率 β を算定した。その結果、それぞれの歩道橋でばらつきはあるが、起振効率の最大値は $\beta = 0.40$ となった。

(4) Bridge-B を対象として、歩調の変化を考慮した動的応答解析を実施した。その結果、1 周期ごとの歩調を 1.915 歩/秒（共振歩調の 95.75%）、2 歩/秒（共振歩調）と変化させた場合には、1.915 歩/秒のみの歩行で生じるうなりは発生しなかった。また、最大速度応答は実測結果と同じく径間中央部付近を歩行する場合に生じ、その値も実測値（3.94cm/s）とほぼ等しくなった。したがって、共振歩行試験による速度応答特性は、このような単純な歩調変化を考慮した動的応答解析を実施しても概ね算定できると考えられる。

本研究では単純桁形式歩道橋に限定したが、歩道橋には、歩調範囲内に多数の振動モードが存在する吊形式など、多種多様な形式が存在する。また、歩行時の歩調も実際にはより複雑に変化することから、歩行者に起因した動的応答特性に関しては、今後とも継続的な研究が必要であろう。しかしながら、本文で提示し

た、単純桁形式歩道橋に対する起振効率や歩調の変化を考慮した動的応答解析は、歩道橋の使用性を検討する上できわめて有用な情報を与えていると思われる。本論文が、歩道橋の設計に携わる実務技術者にとって示唆に富んだ有益な技術資料になることを心から願う次第である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：立体横断施設基準・同解説，丸善，pp.35～37，1979年1月。
- 2) 建設省土木研究所編：土木構造物標準設計第5巻解説書（横断歩道橋・地下横断歩道），全日本建設技術協会，pp.3～13，1985年2月。
- 3) 田中信治，加藤雅史：設計時における歩道橋の振動使用性照査法，土木学会論文集，第471号/I-24，pp.77～84，1993年7月。
- 4) 梶川康男，小間井孝吉，河島良秀，沢田寛幸：斜張橋形式歩道橋「雪吊橋」の振動実験，橋梁と基礎，Vol.20，No.9，pp.8～14，1986年9月。
- 5) 梶川康男，中平進夫，薄井王尚：斜め吊材を有する自碇式吊橋形式歩道橋の振動とその使用性，構造工学論文集，Vol.40A，pp.703～712，1994年3月。
- 6) 梶川康男，深田宰史，吉川裕晃：単径間PC吊床版歩道橋の振動特性，構造工学論文集，Vol.44A，pp.811～817，1999年3月。
- 7) 米田昌弘，柳沢則文，町田文孝，鴨野一夫：S字形曲線トラス歩道橋（あやとりはし）の振動とその使用性，構造工学論文集，Vol.39A，pp.801～810，1993年3月。
- 8) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一：人間の振動感覚に基づいた歩道橋の使用限界状態に関する研究，土木学会論文集，第537号/I-35，pp.217～231，1996年4月。
- 9) 鈴木森晶，加藤雅史：歩道橋の減衰特性と歩行時振動振幅の検討，構造工学論文集，Vol.39A，pp.811～818，1993年3月。
- 10) 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する研究，土木学会論文集，第325号，pp.23～33，1982年9月。
- 11) 田中信治，加藤雅史，鈴木森晶：支間40mを超える歩道橋の実振動特性，構造工学論文集，Vol.38A，pp.773～780，1992年3月。
- 12) 田中信治：歩道橋の振動特性と使用性設計手法に関する研究，名古屋大学学位論文，1994年10月。

(1998年9月18日受付)