

歩道橋上を群衆が移動する場合の振動使用性評価法

近畿大学理工学部 正会員 米田昌弘

1. はじめに

歩行者に起因した歩道橋の水平振動は、歩行にともなう踏力の水平成分が鉛直成分のほぼ 1/10 と小さいこともあり、従来はあまり注目されていなかった。しかしながら、最近になって、テムズ河に架かるミレニアムブリッジ、セーヌ河に架かるソルフェリーノ歩道橋で、それぞれ群衆による大きな水平振動が生じ、相次いで閉鎖される事態が生じた。斜張橋形式や吊床版橋形式など多種多様化した歩道橋が数多く架設されている現在、わが国においても群衆に起因した歩道橋の水平振動に対して検討を要する事例が増加すると予想される。そこで、本研究では、群衆によって誘起される歩道橋の水平応答量を推定できる簡易手法を提案し、その有用性を検討することとした。

2. 振動使用性評価式

等間隔で完全共振歩行（歩調だけでなく位相特性も完全に一致した歩行）する j 人によって誘起される最大速度応答は、当然のことながら、歩行間隔を無視した j 人が完全共振歩行する場合の応答よりも小さくなる。そこで、文献 1) で提示した推定式に歩行間隔の影響を表す補正係数 C_{mp} を新たに導入すれば、等間隔で完全共振歩行する j 人によって誘起される最大速度応答 $\dot{y}_{\max}$ は、次式で算定できるものと推察される。

$$\dot{y}_{\max} = \omega_n \times \frac{1}{M_n} \frac{j \times F_0}{\sqrt{(\omega_n^2 - \Omega_m^2)^2 + 4h_n^2 \omega_n^2 \Omega_m^2}} \times d \times C_{mp} \quad (1)$$

ここに、 F_0 は梶川の最大歩行外力、 M_n は n 次モードの一般化質量、 ω_n は n 次の固有円振動数、 h_n は n 次モードの減衰定数である。また、 Ω_m は、 ω を共振歩調に対応する円振動数、 v を共振歩調時の歩行速度、 ℓ_m を代表長とすれば、

$$\Omega_m = \frac{\pi v}{\ell_m} - \omega \quad (2)$$

と表示される。さらに、 d は歩行間隔を無視した場合の補正係数で、単純桁歩道橋から算定した次式を用いるものとする。

$$d = 0.0152 \times x_{np}^4 - 0.1637 \times x_{np}^3 + 0.6573 \times x_{np}^2 - 1.2092 \times x_{np} + 1.8981 \quad (3)$$

ここに、 x_{np} は、歩行者が歩道橋を渡り終えるまでに加振する回数を表す無次元パラメーターで、次式であ与えられる。

$$x_{np} = \frac{\omega_n \times \ell}{10v} \times \delta \quad (4)$$

補正係数 C_{mp} は、歩行者が等間隔で完全共振歩行する場合の動的応答解析結果と式(1)で $C_{mp} = 1.0$ を代入した推定

表 - 1 補正係数 C_{mp} の算定式 ($0.052 \leq x_{np} \leq 5.23$)

x / ℓ_m	補正係数 C_{mp}
0.0	$C_{mp} = 1.000$
0.2	$C_{mp} = -0.012 \log x_{np} + 1.003$
0.3	$C_{mp} = -0.024 \log x_{np} + 0.986$
0.4	$C_{mp} = -0.036 \log x_{np} + 0.965$
0.5	$C_{mp} = -0.054 \log x_{np} + 0.937$

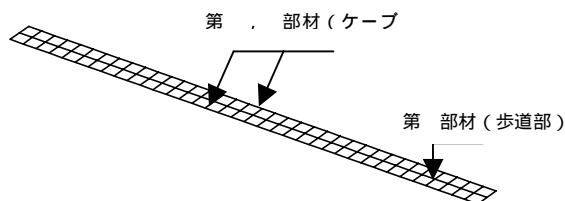


図 - 1 数値計算例で対象とした歩道橋モデル

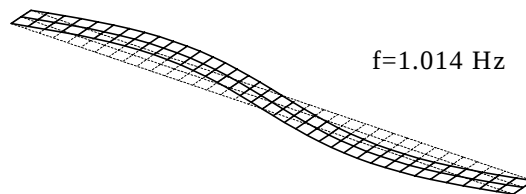


図 - 2 水平逆対称 1 次振動モード

キーワード：歩道橋，群衆，水平振動，簡易評価式

連絡先：〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1 TEL 06-6721-2332 FAX 0729-95-5192

値との比から算出できる．支間長 40m の歩道橋を対象として算出した補正係数 C_{mp} を表 - 1 にまとめる．なお，表 - 1 中の x/ℓ_m において， x は先頭と最後尾の歩行者間隔を表している．

3．数値計算例

本章で対象とした橋梁は，ミレニアムブリッジの主径間部分を簡易モデル化した，図 - 1 に示すような歩道橋（支間長は 144m）である．なお，図 - 1 において，第 部材と第 部材はそれぞれケーブル部材を，第 部材は歩道部を表している．参考までに，固有振動解析で得られた水平逆対称 1 次モードを図 - 2 に示す．

動的応答解析と簡易推定法との対比にあたっては，CASE-1～CASE-3 の 3 通りの完全共振歩行者列を採用した．ここに，CASE-1 は $x/\ell_m = 0.3$ （代表長 ℓ_m は水平逆対称 1 次モードを対象としていることから $\ell_m = 72\text{m}$ ）で 42 人が約 0.527m 間隔で完全共振歩行する場合，CASE-2 は $x/\ell_m = 0.4$ で 22 人が約 1.371m 間隔で完全共振歩行する場合，CASE-3 は $x/\ell_m = 0.5$ で 22

人が約 1.714m 間隔で完全共振歩行する場合に，それぞれ対応している．ただし，動的応答解析では，歩行者の体重をすべて 686N（=70kgf）と仮定した．また，先頭者が代表長である半波長区間（長さは 72m）の通行を開始するまで歩道橋は静止状態にあるものとし，先頭者

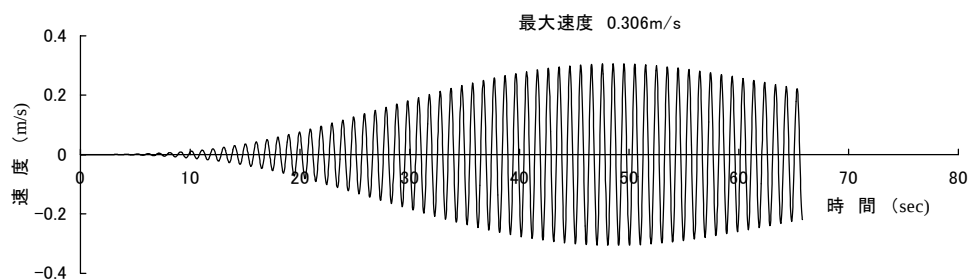


図 - 3 CASE-1 の時刻歴応答波形（CASE-1， $\delta=0.03$ ）

が半波長区間を渡り始めてから最後尾の歩行者が半波長区間を渡り終えるまでの時間領域で動的応答（ $L/4$ 点での速度応答）を算出するものとした．

一例として，構造対数減衰率を $\delta=0.03$ に設定した，CASE-1 の時刻歴応答波形（モード振幅が最大となる $L/4$ 点における速度応答）を図 - 3 に示す．なお，この解析にあたっては，面外の水平逆対称 1 次振動数が 1.014Hz であることから，歩行速度 v は $1.014 \times 2 = 2.028$ 歩 / 秒の歩調に対応する $v = 1.422$ m/s を採用している．また，2.028 歩 / 秒に対応する鉛直方向の衝撃力比が $\alpha = 0.434$ であることから，この値に 1/10 を乗じた 0.0434 を水平方向の衝撃力比に設定している．その他のケースについても同様に動的応答解析を実施できる．CASE-1～CASE-3 において完全共振歩行者グループが 1 回だけ移動する場合について，構造

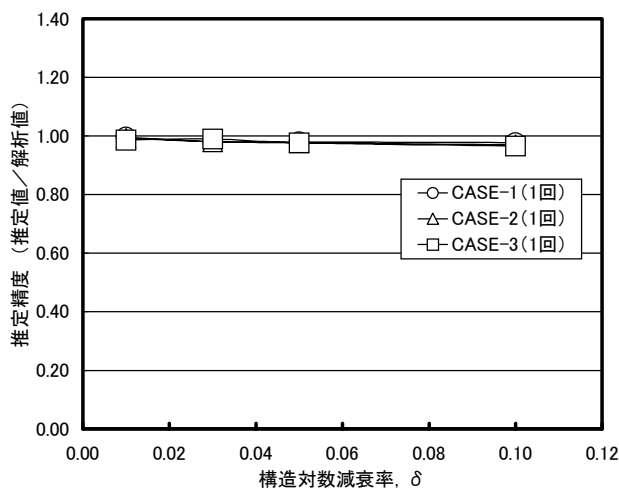


図 - 4 推定精度

対数減衰率をそれぞれ $\delta=0.01$ ， 0.03 ， 0.05 ， 0.10 に設定した動的応答解析結果と推定値の比を比較して図 - 4 に示す．図 - 4 からわかるように，完全共振歩行者の人数や歩行間隔にかかわらず，推定精度は 0%～4%程度であり，提案式に基づく推定値はいずれのケースも動的応答解析結果と非常に良く一致している．したがって，事前に固有振動解析を実施して，固有振動数と一般化質量を算定する必要があるものの，本提案式を適用すれば，比較的簡単にしかも精度良く，群衆に起因した歩道橋の水平応答量を推定できると言える．

【参考文献】

- 1) 米田昌弘：歩行者によって誘起される吊床版橋の動的応答特性とその設計用使用性評価式，構造工学論文集，Vol.46A，2001 年 3 月．
- 2) Spans Sway underfoot in Europe：ENR，July 10，2000．