

水平歩行外力の新たな提案と神経振動子に組み込んだ歩道橋の動的応答解析

近畿大学理工学部 フェロー 米田 昌弘

1. はじめに

ミレニアムブリッジでは、共用開始後に 75mm もの歩行に障害をきたすほどの水平振動が観測されたことから直ちに通行止めとなり、制振対策の検討が実施された。その検討にあたっては、水平歩行外力 F (単位は N) と桁速度 v (単位は m/s) に関する有名な $F = 300v$ の関係式が適用されたが、 $F = 300v$ の水平歩行外力式は桁速度 v の大きさのみに依存することから、何らかの要因で歩道橋が振動して桁速度が発生しない限り、水平歩行外力が生じないことになる。そこで、本研究では、新たな水平歩行外力式を提案するとともに、神経振動子に組み込んだ歩道橋の動的応答解析を実施することとした。

2. 水平歩行外力の新たな提案

ミレニアムブリッジで歩行者による大きな水平振動が問題になった後、直ちに水平歩行外力を解明するための実験が実施された。特に、インペリアルカレッジでは、7~8 歩の前進歩行が可能な長さ 7.2m の特殊なプラットフォームを作成し、加振周波数や振動振幅を変化させて DLF の平均値を算出している。その結果を図-1 に示す。なお、ここに、DLF とは Dynamic Load Factor の略で、歩行者の水平歩行外力と体重の比を表すものである。

インペリアルカレッジの実験において、桁速度がない場合すなわち桁変位が生じない場合の DLF は、図-1 中に▲印で示されているように約 0.04 である。一方、わが国で実施された実験データからも、2 歩/秒で歩行する歩行者の衝撃力比 (=鉛直の歩行外力/歩行者の体重) は 0.4 であり、水平歩行外力は鉛直歩行外力の 1/10 程度であることが知られている。そこで、インペリアルカレッジにおける歩行者の平均体重を 686N と仮定して $v=0$ での水平外力成分を考慮するとともに、速度の二乗である v^2 に関する項をも追加した新たな水平歩行外力評価式について検討することとした。その結果、インペリアルカレッジの計測データに最小二乗法を適用するとともに、工学的な見地から数値をまるめるなどの処置を施して、

$$F = -200v^2 + 300v + W \times 0.4 \times 0.1 \quad (2)$$

なる関係式をここに提案する。ちなみに、インペリアルカレッジの計測データとここで提案した水平歩

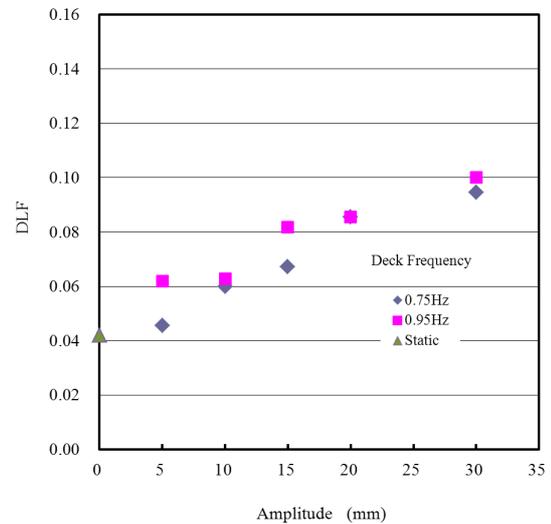


図-1 インペリアルカレッジで計測された DLF

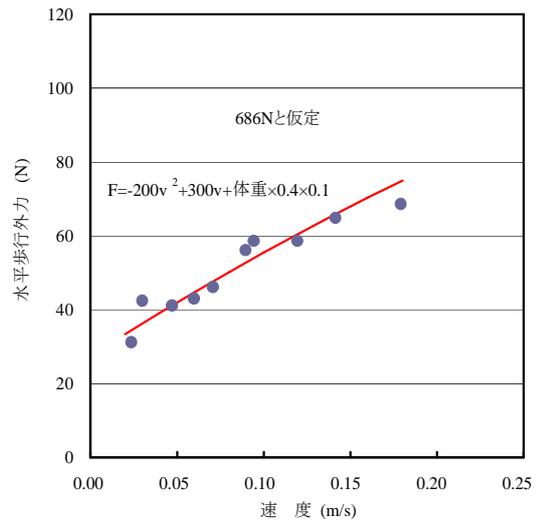


図-2 インペリアルカレッジの計測データと新たに提案した水平歩行外力評価式との比較

行外力評価式による対比結果を図-2 に示すが、当然のことながら、両者は比較的良く一致していることがわかる。

3. 神経振動子を組み込んだ動的応答解析

表-1 に示した諸元を有する歩道橋 (支間長が 50m で固有周波数が 1.000Hz) を対象とし、桁中央点での初期振幅がない場合 (歩道橋が静止している場合) について、ニューマークの β 法 ($\beta=1/6$, 時間刻み $\Delta t = 0.0025 \text{ sec}$) による動的応答解析 (モード解

キーワード：水平歩行外力，神経振動子，歩道橋，水平振動，動的応答解析

連絡先：〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1 TEL 06-6721-2332 FAX 06-6730-1320

表-1 対象とした歩道橋の構造諸元

モデル	橋長	単位長さ当たりの重量	弾性係数	断面2次モーメント	1次振動数
MODEL-100	50m	14.7kN/m	$20.58 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$	0.01844 m^4	1.000Hz

析法)を実施することとした。

解析にあたっては、歩行者間隔を 1m に設定し、231 人の歩行者(体重はすべて 686N と仮定)が歩行速度 1.4m/s で橋端部から歩行を開始する場合を対象とした。また、橋梁の構造対数減衰率は $\delta = 0.02$ とし、歩行者の初期周波数(歩調の初期値)は 0.95~1.05Hz の範囲で変化する場合(以下、必要に応じて F095105 と記す)を仮定したが、いずれの歩行者も CASE-151515(初期周波数によって τ_1 と τ_2 の値は異なるが、時定数の τ_1/τ_2 はいずれも $\tau_1/\tau_2 = 0.1$)の神経振動子でモデル化するものとした。ただし、ここで、歩行者の初期周波数は 0.95Hz から 0.01Hz ピッチで増加させて 1.05Hz になった後は、0.95Hz に戻って 1.05Hz まで初期周波数を同様に増加させるパターン(想定した歩行者数は 11 人 \times 21=231 人)を仮定した。

動的応答解析で得られた歩道橋中央点での変位応答を図-3に示す。この図から、最初の歩行者が歩行を開始してから95秒間程度までの時間帯では振動がほとんど生じていないにもかかわらず、95秒以降から急激に振動が発達し、155秒後には0.10m(10cm)にも達していることがわかる。なお、このような急激に応答が増加する発散的な振動応答は、ミレニアムブリッジの北スパンを対象とした群衆歩行試験(歩行者数を増加させて桁の応答を観測した実橋試験)でも実際に観測されている。

そこで、歩行者の歩行で発散的な振動応答が生じた原因を把握するため、一般化歩行外力(合計値)の周波数の時間変化(算定方法はゼロクロッシング法)を算出した。その結果を図-4に示す。図-4より、歩行者が歩行を開始してから広範囲にばらついていた歩行者の周波数は時間の経過とともにばらつきの程度がゆっくり低減し、110秒以降は歩道橋の固有周波数である 1.000Hz とほぼ等しい 1.000Hz~1.020Hz に急速に収束していることがわかる。それゆえ、共振現象で桁の応答が増加し、それにもなつて水平歩行外力が急激に大きくなり、その結果、桁応答の増加→水平歩行外力の増加→桁応答の増加…という発散振動に至るループが生じたことが容易に推察される。

4. まとめ

本研究から、新たな水平歩行外力を神経振動子に

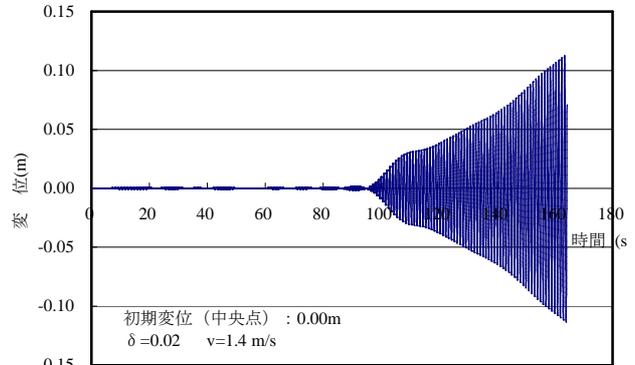


図-3 0.95~1.05Hz の歩行者列(F095105)が歩行する場合の中央点における変位応答(初期振幅=0.00m, 対数減衰率=0.02)

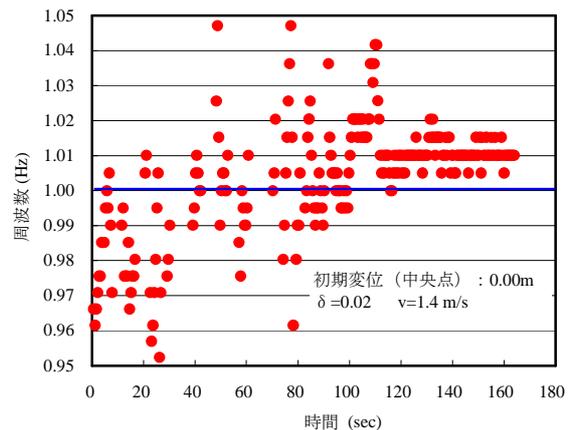


図-4 一般化歩行外力(合計値)の周波数(歩行者列 F095105 が歩行する場合, 初期振幅=0.00m, 対数減衰率=0.02)

組み込んで、引き込み現象を考慮した動的応答解析を実施すれば、群衆による歩道橋の水平振動をより合理的に検討できる可能性が高いと考えられる。それゆえ、今後は、実橋試験を実施するとともにその結果も取り入れて、神経振動子を組み込んだ歩道橋の動的応答解析手法がより精緻な手法となるように改善していく所存である。

参考文献

1) Dallard, P., Fitzpatrick, A.J., Flint, A., Bourva, S.Le, Low, A., Ridsdill Smith, R.M. and Willford, M. : The London Millennium Footbridge, The structural Engineer, Vol.79, No.22, pp.17-33, November, 2001.