

I - B239

歩道橋における歩行者の動的外力に関する一考察

株式会社 フジタ 正 員 伊藤 公彦
 北海道大学工学部 正 員 小幡 卓司
 北海道大学工学部 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学工学部 フェロー 佐藤 浩一

1. まえがき

一般に歩道橋においては、振動使用性がしばしば問題となることが知られている。主な照査方法としては、人間の歩調と構造物の共振を避ける手法や、振動使用限界状態を考慮した方法等が挙げられるが、後者の場合問題となるのは、動的応答量の求め方である。近年においては、コンピュータの性能および計算技術の発達により動的応答解析は容易に行うことができるが、この歩行外力は歩行者の歩調によって、床版に与える衝撃力あるいは移動速度等が逐次変化するため、その取り扱いが煩雑であり、設計段階において汎用的な手法は確立されていないのが現状である。

以上を踏まえて本研究では、まず実橋実験結果にバンドパスフィルタを適用してノイズ等の影響を除去し、さらに、学習、最適化の手法として最近注目されている遺伝的アルゴリズム(以下 GA と称す)を導入し、実橋実験の結果に基づいた歩行外力の同定を試みるものである。これにより、設計段階において動的応答解析を行う際に用いるべき汎用的な歩行外力について新たな提案を行い、その妥当性について考察を加えるものである。

2. 解析理論

2-1. バンドパスフィルタ

本研究においては、実験結果に含まれる電氣的なノイズあるいは歩行による衝撃応答の影響を除去するため、フーリエ級数に基づいた FIR(Finite Impulse Response)型バンドパスフィルタを用いて応答波形の補正を行った。

一般に FIR 型フィルタの入出力関係は、以下のよう

$$Y(n) = h_0 X(n) + h_1 X(n-1) + \dots + h_k X(n-k) \\ = \sum_{i=0}^k h_i X(n-i) \quad (1)$$

ここで、 $Y(n)$ 、 $X(n)$ 、 h_i はそれぞれフィルタ出力、入力、フィルタ係数であり、 k はフィルタ次数を表している。さらに、 f_u 、 f_l をパスバンドのエッジ周波数とし、その際のサンプリング周波数を f_s とすると、

$$\omega_c = \frac{\pi(f_u - f_l)}{f_s} \quad \omega_0 = \frac{\pi(f_u + f_l)}{f_s} \quad (2)$$

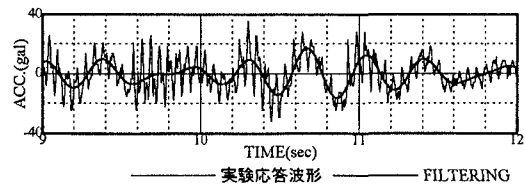


図-1 応答波形

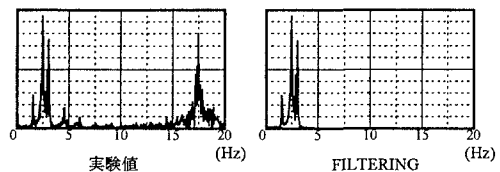


図-2 フーリエスペクトル

となり、設計するバンドパスフィルタにおけるフィルタ係数 $h_{BP}(i)$ は、以下の式で表される。

$$h_{BP}(i) = \frac{2}{\pi} \cos(i\omega_0) \sin(i\omega_c) \cdot w(i) \quad (3) \\ i=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm k$$

ここで、 $w(i)$ は窓関数を表し、本研究においてはハニングウィンドを使用している。また、フィルタ次数 k は 400 として解析を行った。解析結果を図-1 ならびに図-2 に示す。これらの結果から本研究によって設計されたバンドパスフィルタは、実験応答波形に含まれるノイズあるいは衝撃応答等を、ほぼ完全に除去できるものと思われる。

2-2. 時刻歴応答解析

動的応答解析に際して、本研究ではニューマーク β 法を用いた直接積分法を採用した。一般に、多自由度系における運動方程式は以下のように示される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \cdot \psi(t) \quad (4)$$

ここで、質量マトリックス M には 整合質量法を採用し、 K は剛性マトリックスを表している。減衰マトリックス C には、レーレー減衰を用いており、その係数は実験結果に基づいて算定した。なお、ニューマーク β 法の係数 β は 0.25、時間間隔は 0.01sec として解析を行い、解析モデルに関しては立体骨組構造モデルを採用した。

keywords : 歩行外力、遺伝的アルゴリズム、バンドパスフィルタ

〒060 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 北海道大学工学部土木工学科 TEL. (011)706-6172 FAX. (011)726-2296

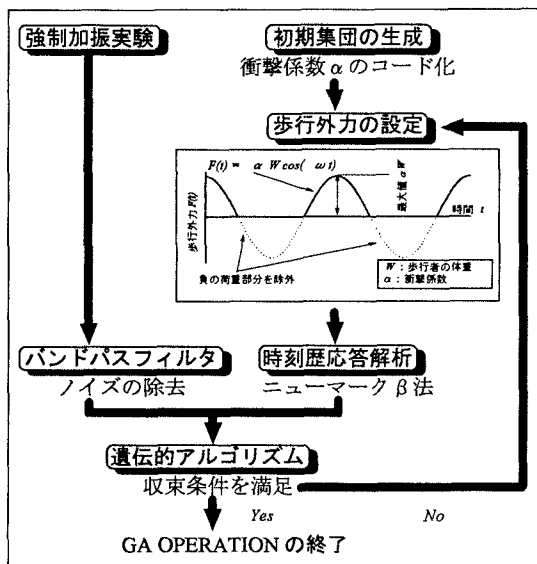


図-3 解析手法

2-3. 遺伝的アルゴリズム(GA)

GAは生物進化の原理に着想を得た手法であり、選択、交叉、突然変異等の処理を経て、各個体における適応度により最適解を検索するものである。

本研究においては、交叉率70%、突然変異率10%とした単純GAを用いて、歩行者の体重に対する衝撃係数 α ($0 \leq \alpha \leq 3$)を8ビットの遺伝子列としてコード化し解析を行った。また、以下に示す目的関数により各個体の適応度を評価している。

$$\text{目的関数} \quad EL = |AE_{\max}^2 - AC_{\max}^2| \quad (5)$$

AE_{max}: スパン中央点における最大応答加速度実験値(gal)

AC_{max}: スパン中央点における最大応答加速度解析値(gal)

なお収束条件に関しては、式(5)の平方根の値が10.0以下になるか、または最も適応度の高い個体の数が10個体となった場合に計算を終了することとした。なお、図-3は本研究における解析手法であり、表-1に歩行外力の同定結果を示す。ここで、表-1のGAの同定結果に着目すると、実験値に対する解析値の誤差は最大のもでも2%程度であり、この種の最適化問題に対するGAの適用はきわめて有効であると考えられる。

表-1 同定結果

歩道橋	スパン (m)	固有振動数 (Hz)	最大応答値(gal)		衝撃係数	誤差 (%)
			実験値	解析値		
a橋	15.64	5.52	24.00	24.51	0.38	2.1
b橋	15.80	5.42	22.74	23.19	0.29	2.0
c橋	18.45	5.42	78.43	78.84	1.27	0.5
d橋	20.75	4.05	181.14	181.48	1.08	0.2
e橋	21.80	3.37	300.72	300.76	2.78	0.0
f橋	22.70	4.05	226.43	228.87	1.34	0.1
g橋	23.00	2.83	240.87	240.76	1.30	0.0
h橋	23.70	3.96	177.88	177.16	1.37	0.4
i橋	28.89	2.44	177.61	177.77	1.44	0.1
j橋	30.46	2.93	269.09	269.54	2.30	0.2
k橋	33.08	2.52	84.58	84.27	0.75	0.4
歩道橋	スパン (m)	固有振動数 (Hz)	最大応答値(kine)		衝撃係数	誤差 (%)
			実験値	解析値		
h橋	40.86	2.27	5.30	5.26	0.94	0.9
m橋	41.50	2.17	1.25	1.27	0.22	1.7
n橋	43.50	1.99	3.94	3.95	0.83	0.3
o橋	42.00	2.81	4.38	4.48	2.25	1.9
p橋	49.50	1.65	1.18	1.20	1.02	1.5
q橋	48.55	1.48	0.50	0.50	0.54	0.2

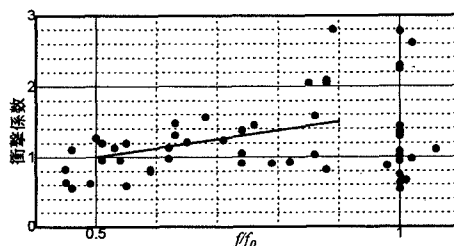


図-4 固有振動数による無次元化

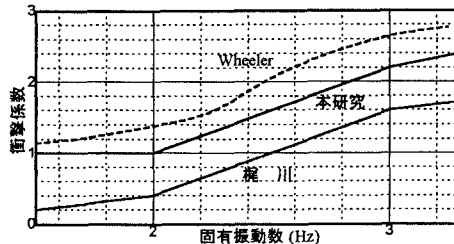


図-5 共振歩行時の衝撃係数

3. 歩行外力の検討

以上のような結果に基づき、動的応答量の計算を行う際の歩行外力について検討を加える。

まず、歩行振動数 f を各歩道橋の固有振動数 f_0 で無次元化した結果を図-4に示す。この結果から、非共振歩行時における衝撃係数 α は、歩行振動数と固有振動数の比が $0.5 \leq ff_0 \leq 0.7$ の範囲において、約1.0~1.3程度の値を用いれば、比較的正確な動的応答量の計算が可能であると思われる。

次に、図-5は本研究における共振歩行時の歩行外力である。本研究が提案する歩行外力は、従来しばしば動的応答量を計算する際に用いられている梶川およびWheelerの歩行外力のほぼ中間的な値となっていることが判明した。さらに、本研究における歩行外力を用いて再度動的応答量の計算を実施した結果、標準的な構造を有する歩道橋について、実験結果に対する解析結果の誤差は約10%程度であることが確認された。

4. あとがき

以上のように本研究では、歩道橋の強制加振実験結果に基づき、設計時における汎用的な歩行外力の提案を試みたものである。まずバンドパスフィルタおよびGAに関しては、この種の最適化問題において非常に有効な手法であることが確認され、今後様々な分野においての応用が期待できるとと思われる。また本研究の歩行外力を用いれば、比較的正確に共振あるいは非共振歩行時における動的応答量の算定は可能であると考えられる。

【参考文献】

- 1) 梶川 康男・津村直宣・角本 周: PC吊床歩道橋の振動とその使用性構造工学論文集Vol.36A, 1990.
- 2) Wheeler, J.E.: Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, Journal of The Structural Division, ASCE, Vol.108, No.S19, 1982.
- 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評価法, 土木学会論文集, No.471/1-24, 1993.
- 4) 杉本博之・鹿比 安隆・山本洋教: 離散的構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究, 土木学会論文集, No.471/1-24, 1993.