

I - B 276 歩道橋の動的応答性状に基づいた人型歩行モデルの同定について

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 林川 俊郎
 北海道大学大学院工学研究科 フェロー 佐藤 浩一
 (株)日鉄鉱業 正 員 能登潤一郎
 北海道大学大学院工学研究科 学 生 員 宮森 保紀

1. まえがき

近年の周辺環境や都市景観に対する意識の向上、高齢化あるいは身障者への配慮等の社会情勢の変化から、歩道橋においても「人へのやさしさ」が求められるようになり、新たな設計指針等の整備も行われつつある¹⁾。一般に、歩道橋は人間が直接利用する構造物であるため、使用時における快適性は上記の観点から、その設計において重要視される一項目であると考えられる。

振動使用性の検討は、立体横断施設技術基準²⁾においては、必ずしも歩道橋の動的応答量に直結するとは言えない静的たわみあるいは低次の固有振動数の制限によって照査が行われてきたが、最近では照査の対象となる構造物の動的応答量を求め、その結果と許容限界振動量を比較する限界状態設計法に対応した方法が多用されるようになってきた。この照査方法を用いるに際しては、対象となる歩道橋の動的応答量のある程度正確に求めることが極めて重要な要素となることは言うまでもない。しかしながら、コンピュータの性能および計算技術の著しい発達により、動的応答解析そのものは比較的容易に行うことが可能となったものの、人間の歩・走行時における歩道橋への動的外力は歩行者の歩調によって 歩行速度、歩幅あるいは床版に与える衝撃力等が逐次変化するため、その取り扱いには比較的难度があり、汎用的な歩行外力は未だに明確に規定されていないのが現状である。

本研究では、人間—橋梁系の動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析を行い、遺伝的アルゴリズム(以下、GAと称す)を用いて人型歩行モデルの同定を行うことにより³⁾、歩道橋の設計段階である程度正確に動的応答量を求めることの出来る歩行外力の検討を目的とする。具体的には、人間を3自由度系バネマスモデルとして構築し、これを所定の歩幅、歩行振動数で解析的に歩道橋上を移動させることにより動的応答量を得た。人間のモデル化に関しては、人間の剛性ならびに粘性減衰定数をパラメータとした単純 GA を用いて、実橋実験結果に基づき同定することを試みた。したがって、本研究はこれらの結果を報告するものである。

2. 解析手法

2. 1 時刻歴応答解析

動的応答量の計算手法は種々知られているが、本研究においてはニューマークβ法を用いた直接数値積分法による解析を行った。一般に、多自由度系の運動方程式は以下のように表される。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{y}(t) = \mathbf{f}(t) \cdot \boldsymbol{\varphi}(t) \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $\mathbf{M}$ および $\mathbf{K}$ はそれぞれ整合質量マトリックスおよび剛性マトリックスを表しており、減衰マトリックス $\mathbf{C}$ にはレーレー減衰を用いることとした。また、 $\mathbf{f}(t)$ は人型モデルによる歩行外力そのものであり、 $\boldsymbol{\varphi}(t)$ に関しては歩行外力を人間の移動に応じて構造物モデルの節点に分配する、荷重分配係数ベクトルである。本研究においては、係数βは0.25に、また時間刻みΔtは0.01secとして解析を行った。

2. 2 人型歩行モデル

一般の道路橋を対象とした走行荷重による振動解析において、多自由度系の車両モデルが用いられている例は数多く知られている。本研究では、それらを参考にして人型歩行モデルの構築を試みた⁴⁾。ここでは、人型モデルとして図-1のような3自由度系バネマスモデルを考えると、運動方程式は以下になる。

$$m_1\ddot{z}_1 + k_2(z_1 - z_2) + c_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_1(z_1 - r) + c_1(\dot{z}_1 - \dot{r}) = 0 \cdots \cdots (2)$$

$$m_2\ddot{z}_2 + k_3(z_2 - z_3) + c_3(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + k_2(z_2 - z_1) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = 0 \cdots \cdots (3)$$

$$m_3\ddot{z}_3 + k_3(z_3 - z_2) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) = 0 \cdots \cdots (4)$$

ここで、 $m_1 \sim m_3$ は各質点の質量、 $k_1 \sim k_3$ および $c_1 \sim c_3$ は人型モデルの剛性(ばね定数)と粘性減衰を表し、 $z_1 \sim z_3$ ならびに r は、各質点および構造物の応答変位である。これらの式から、人型モデルが構造物に与える外力は、式(5)のように与えられる。

$$\mathbf{f}(t) = (m_1 + m_2 + m_3)g - m_1\ddot{z}_1 - m_2\ddot{z}_2 - m_3\ddot{z}_3 \cdots \cdots (5)$$

ここで、 g は重力加速度である。したがって、式(5)により計算された外力 $\mathbf{f}(t)$ を、式(1)の運動方程式に代入すれば、人間—構造物系の動的相互作用を考慮した応答解析が可能となる。また、本研究では歩行に伴う人体の上下運動を考慮して、歩行周期ごとに1.0cmの強制変位を加えることとした。

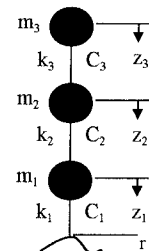


図-1 人型モデル

Keywords : 歩道橋、人型歩行モデル、遺伝的アルゴリズム、同定

北海道大学工学研究科 札幌市北区北13条西8丁目 TEL: 011-706-6172 FAX: 011-726-2296

2. 3 遺伝的アルゴリズム (GA) の適用

本研究では、人型モデルのばね定数 k および減衰係数 c の同定に GA を用いた³⁾。具体的には k, c を 12 ビットの 2 進数にコード化し、一様乱数を用いて各個体毎にそれぞれ 2 組の遺伝子列を持つ初期集団を発生させた。GA の計算過程における、個体の選択にはルーレット戦略を、交叉には 2 点交叉を用い、突然変異に関しては遺伝子列に対し、定められた確率に基づいて直接遺伝子座を操作して行った。また初期集団は 50 個体、交叉率は 0.5、突然変異率は 0.07 とし、収束判定は最良線列が全個体の 20% に達した時点で計算を終了させることとした。なお、解析は共振歩行時を対象として実施し、非共振時に関しては結果の確認のため、応答解析のみ行った。

GA においては個体の適応度の評価が必要となるが、本研究においては簡便に適応度を判定するために、振動実験によって観測された加速度の最大値 a_0 に対する、時刻歴応答解析において得られた応答加速度の最大値 $a_{\max}$ の差を評価関数 J_{GA} とし、これによって求められた評価関数の値が小さいものを適応度の高い個体として GA を適用した。式(6)に、評価関数 J_{GA} を示す。

$$J_{GA} = |a_0 - a_{\max}| \cdots \cdots (6)$$

3. 解析結果とその考察

解析対象の歩道橋は、支間長 29.3m、幅員 1.5m の鋼床版を有する一般的な横断歩道橋を用いている。表-1 に実橋実験から得られた、固有振動数、減衰定数ならびに共振歩行時の最大応答加速度を示す。表-2 は、GA によって同定された人型モデルのばね定数ならびに減衰定数であり、図-2(a),(b) に 1.5Hz 歩行時および共振時の応答加速度を、図-3(a)～(d) にそれらのフーリエスペクトルを示す。なお、図-2 中の点線は実験値を表している。

これらの結果に着目すると、まず共振時に関してはその波形ならびにフーリエスペクトルとも、極めて良い一致が得られていることがわかる。最大応答値が得られる時間に関しても、解析と実験ではほぼ同一となっており、解析結果は比較的高い信頼性を有するものと考えられる。また、非共振時の結果について考察を加えれば、解析値は実験値と比較して、その最大応答値は差違が認められるが、フーリエスペクトルはある程度同様な傾向を有しているものと判断でき、従来の歩行外力に比して歩道橋の振動性状を良く表しているものと思われる。最大応答値が一致しない理由としては、非共振実験時には応答値そのものが小さいためにノイズの影響が相対的にかなり大きく影響すること、今回の解析では歩行に伴う人体の運動を歩行振動数に関わらず強制変位 1.0cm として取り扱ったこと等が考えられる。したがって、上記の強制変位もパラメータとして取り扱い、さらに多くの歩道橋に対して同定を行えば非共振時においても十分な精度を持つ人型歩行モデルの設定が可能になるものと思われる。

4. あとがき

以上のように本研究は、人間一橋梁系の動的相互作用を考慮して、

GA を用いて人型歩行モデルの同定を行うことにより、歩道橋設計時における汎用的な歩行外力の検討を行ったものである。

解析値と実験値の比較から、本研究で用いた人型歩行モデルは、従来の半余弦波等を用いた歩行外力に比して歩道橋の振動性状をある程度良い精度で求めることが可能であると思われる結果が得られた。よって、人間の歩行に伴う強制変位もパラメータとして取り扱い、さらに多くの歩道橋に対して同定を行えば、共振時、非共振時を問わず歩道橋の動的応答性状を比較的確確に把握が可能な、歩道橋の振動使用性照査等に用いる汎用的な歩行外力となりうる可能性を有するものと考えられる。

【参考文献】 1) 日本鋼構造協会編：これから

の歩道橋, 技報堂出版, 1998. 2) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説, 丸善, 1979. 3) 小幡卓司, 能登潤一郎, 林川俊郎, 佐藤浩一, 宮森保紀：人型歩行モデルを用いた歩道橋の動的応答特性に関する研究, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 55 号(A), pp.304-307, 1999. 4) 橋梁振動研究会編：橋梁振動の計測と解析, 技報堂出版, 1993.

表-1 歩道橋の振動特性

固有振動数		減衰定数		最大応答値 (共振時) (gal)
1st (Hz)	2nd (Hz)	1st (%)	2nd (%)	
2.44	8.55	1.5	0.7	205

表-2 人型歩行モデル

	質量 (kg)	ばね定数 (t/m)	減衰係数 (t·s/m)
頭 部	37.526	23.51	1.02
上半身	33.119	7.89	1.28
下半身	3.251	8.03	0.12

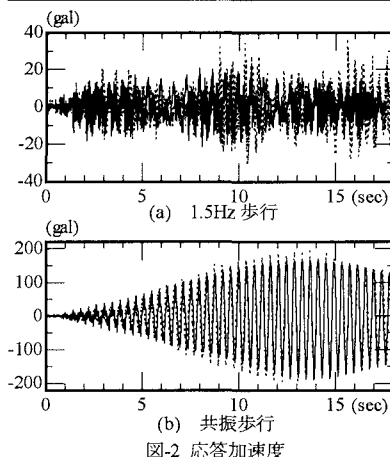


図-2 応答加速度

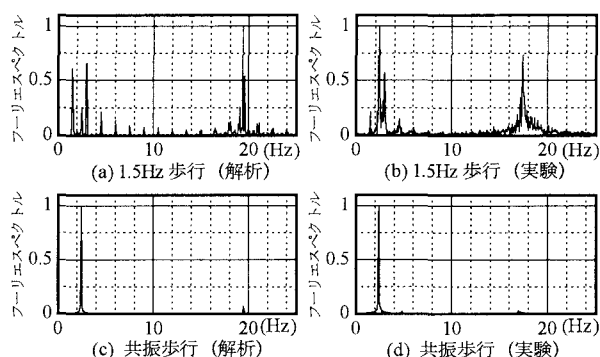


図-3 フーリエスペクトル