

I-80

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

北海道大学大学院工学研究科 正 員 小幡 卓司
 北海道大学工学部 ○学生員 能登潤一郎
 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
 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

歩道橋は、交通安全施設としての画一的な横断歩道橋のみならず、歩行者専用的人道橋、公園内に架けられる遊歩道橋等と称される各種形式の橋梁の総称である。従来の横断歩道橋の技術基準としては、昭和 54 年に制定された立体横断施設技術基準・同解説¹⁾が用いられてきたが、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^{2),3)}。

一般に、歩道橋は人間が直接利用する構造物であるため、振動使用性に代表されるような、使用時における快適性は今後一層重要視される傾向にあるものと思われる。この振動使用性の検討は、立体横断施設技術基準においては、必ずしも歩道橋の動的応答量に直結するとは言い難い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、構造形式、規模、利用目的等の多様化に伴い、その設計自由度を著しく阻害する場合もしばしば見受けられる。一方、構造物の設計手法は、従来広く用いられてきた許容応力度設計法から限界状態設計法への移行が進みつつあり、歩道橋の振動使用性判定法においても、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。

ここで、上述の限界状態設計法に対応した照査手法について言及すれば、問題となるのは振動限度と動的応答量の求め方である。まず振動限度については、車両の乗り心地等をはじめとして比較的古くから研究が進められ、歩道橋の使用性照査においても数多くの提案がなされており、統一的なコンセンサスが得られた限度は未だに提示されていないものの、各種の限度を比較することにより比較的容易に歩道橋の利用形態に応じた限度を推定することは可能であると考えられる^{3),4)}。次に後者に関しては、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、一般に構造物に作用する外力は不確定要素が多いため、この取り扱いが極めて重要な問題となっている。我が国においては、耐震設計に用いる地震力や耐風設計における基準風速等の整備は進みつつあるが、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、その扱いは比較的難しく、汎用的な歩行外力は未だに明確に規定されていない。よって、設計段階においてその動的応答量を正確に予測することはかなり困難であると考えられ、設計時の解析値と完成後の実測値とが一致しない場合も多く見受けられる。

以上を踏まえて、本研究では、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して、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った。すなわち、従来人間の体重に対する割り増し係数と、入力波としての余弦波あるいは半正弦波等によって取り扱われてきた歩行外力に対して、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、近年最適化の手法として注目されている遺伝的アルゴリズム⁵⁾ (以下、GA と称す)を用いて、人間の剛性ならびに粘性減衰定数を、著者らが以前行った実橋実験と解析における最大応答値とパラメータとして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通じて、歩道橋の使用性判定における動的応答量の求め方に関して検討を加えたので、ここに報告するものである。

Study of Dynamic Response Characteristics on Pedestrian Bridges by Using Human Walking Models.
 by Takashi OBATA, Junnichi NOTO, Toshiro HAYASHIKAWA, Koichi SATO and Yasumori MIYAMORI

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。レーレー減衰の各係数は、解析対象の歩道橋における減衰自由振動実験にて得られた1次および2次の固有振動数ならびに減衰定数に基づいて決定した。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。本研究においてはニューマークβ法の係数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⁹⁾。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、運動方程式は以下ようになる。

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

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

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

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。

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

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 $F(t)$ 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。なお、本研究では $m_1 \sim m_3$ の質量をそれぞれ 37.526kg、33.119kg、3.251kg とし、またばね定数および粘性減衰は便宜的にすべて等しいものとして解析を行った。

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⁹⁾。具体的には k, c を 12 ビットの2進数にコード化して各々の遺伝子列を表現し、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。この初期集団に対して図-2に示すような GA オペレーションを実施し、人型モデルにおける構造パラメータ k および c を同定するものである。GA の計算過程にお

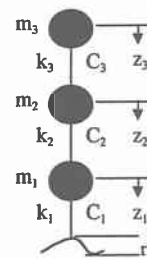


図-1 人型モデル

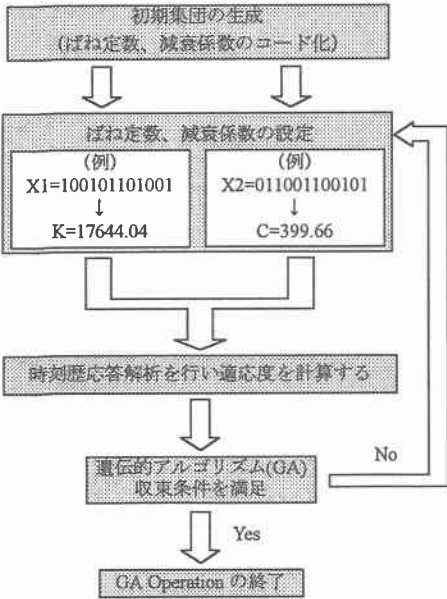


図-2 GA の適用

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2進数で表現されている遺伝子列に対し、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。

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。

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

3. 実橋振動実験

本研究では、解析対象の歩道橋における固有振動数、動的応答応答量等を測定するため、人力加振による減衰自由振動実験ならびに強制加振実験を実施した⁷⁾。対象とした歩道橋は、写真-1に示すような支間長29.3m、幅員1.5mの鋼床版を有する一般的な横断歩道橋である。

測定方法としては、歩道橋の支間を6分割して1/6点～5/6点の各点に加速度ピックアップを設置し、動ひずみ計およびA/D変換ボードを介して加速度応答値を直接パソコンに記録した。なおサンプリング周波数は200Hzを用いている。加振方法は、1次及び2次モードの固有振動数の測定においてはそれぞれの振動モード形状を考慮して、前者はスパンの1/2点、後者は1/4点で人間1名が跳躍することによって行った。強制加振実験に関しては、人間1名が1.5Hz～3.5Hzおよび1次の共振振動数で歩行あるいは走行して歩道橋を加振した。表-1は本歩道橋の振動特性の一覧であり、また、図-3,4に実験結果の一例として、3.5Hz加振時の支間1/6点における波形とフーリエスペクトルを示す。

4. 解析結果とその考察

以上のように、本研究ではGAを用いて人型モデルの同定を試みた。解析は3.5Hz歩行時における支間1/6点の加速度応答最大値を評価関数のパラメータとして行い、また、歩道橋の解析モデルは図-5のような2次元モデルを用いている。解析結果として、表-2に、適応度の高い組み合わせ15個体の人型モデルの定数を、図-6に実験結果との整合性が比較的高いと思われるばね定数と粘性減衰の組み合わせを用いた場合の支間1/6点における応答波形を、また、図-7にそのフーリエスペクトルを示す。

まず、表-2から人型モデルのパラメータに関して考察を加えると、減衰係数が解析結果に大きな影響をおよぼすことが判明した。すなわち、ばね定数が



写真-1 解析対象の歩道橋

表-1 歩道橋の振動特性

固有振動数		減衰定数			
1次 (Hz)	2次 (Hz)	1次		2次	
		波形	1/2法	波形	1/2法
2.44	8.55	1.49	1.82		0.66

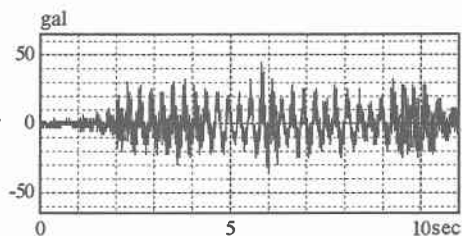


図-3 応答加速度

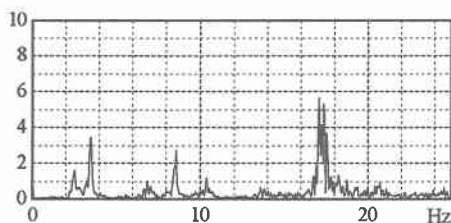


図-4 フーリエスペクトル

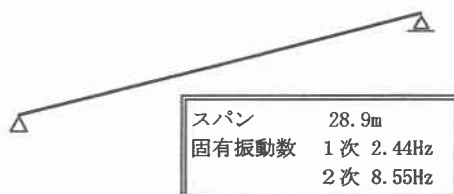


図-5 歩道橋モデル

大きく変化しても解析結果の変化は小さいが、粘性減衰の増減に応じて解析値は極めて敏感な反応を示していることが分かる。このことは、実際の人間の歩・走行において、そのエネルギー吸収が構造物に与える外力の大小に関して非常に重要なメカニズムとして作用しているものと思われる。また、図-6 および図-7 より、本解析結果はその最大値は実験値とある程度一致していると考えられるが、振動波形における振動数特性の整合性は不十分である。図-7 のフーリエスペクトルに着目すれば、非共振振動数を対象とした解析においても歩道橋の1次固有振動数が卓越する結果となっている。本研究の解析手法では従来の余弦波等を用いた解析とは異なり、歩行振動数は周期性は移動速度の算定のみに用いられ、歩行による衝撃力等にはほとんど反映されていない。このため、人型歩行モデルを用いた場合は解析値に実験とはやや異なる傾向が得られたものと推定できる。

加えて、問題点としては、今回の解析では剛性および減衰定数を各質点間においてすべて同一として取り扱っており、上記における減衰の増減に対する影響を考慮すると、本研究の人型モデルが実際の人間の歩行を表現しているとは言い難いものとなっている。したがって、今後はさらにモデルの自由度を増加させ、同定するパラメータに関しても十分な検討を加える必要がある。

5. あ と が き

前述のとおり本研究は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できる歩行外力の検討を目的として、3自由度系の人型歩行モデルのパラメータをGAを用いて同定し、人間一橋梁系の動的相互作用を考慮した応答解析を行ったものである。

解析結果と実験結果の比較により、人型モデルを用いた場合にはその振動波形および最大値の両者とも実験値と比較的によく一致し、その振動性状は実験と同様な傾向が得られる可能性を有するものと考えられる。また、人間の歩・走行においては、減衰に伴うエネルギー吸収が構造物に与える外力の大小に関して非常に重要な影響を与えると推定される結果が得られた。以上より、人型モデルの自由度をさらに増加させ、剛性等の各種パラメータの同定を詳細に行えば、歩道橋の設計時における振動使用性判定に用いるための汎用的な歩行外力の設定が可能になるものと考えられる。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，丸善，1979.
- 2) 関西道路研究会 道路橋調査研究委員会編：人道橋の景観設計，鹿島出版会，1991.
- 3) 日本鋼構造協会編：これからの歩道橋，技報堂出版，1998.
- 4) 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，No.537/I-35，pp.217-231，1996.
- 5) 下田和敏，小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一，宅和大助：GAを用いたファジィアクティブ制御の効率化に関する研究，構造工学論文集，Vol.43A，pp.685-692，1997.
- 6) 小幡卓司，亀井与志，林川俊郎，佐藤浩一：人型モデルを用いた歩道橋の時刻歴応答解析について，土木学会北海道支部論文報告集，第54号(A)，pp.124-127，1998.
- 7) 小幡卓司，伊藤公彦，林川俊郎，佐藤浩一，亀井与志：歩道橋の動的応答と歩行外力の同定に関する一考察，鋼構造年次論文報告集，第4巻，pp.447-454，1996.

表-2 人型モデルの定数

順位	ばね定数	減衰係数
1	2182.62	73.24
2	2124.02	73.24
3	2153.32	72.27
4	336.91	80.57
5	1948.24	78.61
6	2182.62	78.13
7	2124.02	78.61
8	2167.97	78.61
9	2182.62	80.57
10	2651.37	80.08
11	2124.02	88.87
12	249.02	111.33
13	25861.82	688.48
14	20676.27	301.27
15	24125.98	329.83

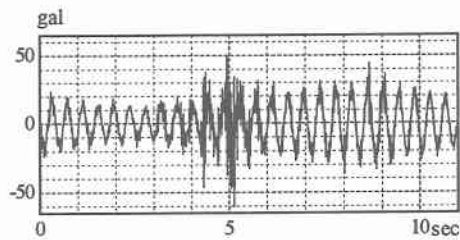


図-6 応答加速度

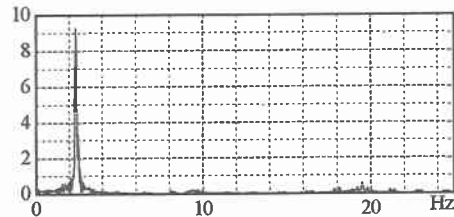


図-7 フーリエスペクトル