

I-25

人型モデルを用いた歩道橋の時刻歴応答解析について

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 学 生 員 亀井 与志
 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

1. ま え が き

歩道橋とは、交通安全施設としての横断歩道橋のみならず、道路橋の側方に架けられる側道橋や歩行者専用的人道橋、公園等に架けられる遊歩道橋等と称される種々の橋梁の総称である¹⁾。これらの歩道橋は、人間の生活道路の一部としての機能を有していることから、たとえどんなに大規模なものであっても使用時における快適性への配慮を行うことが義務づけられている。このため、我が国のみならず各国において照査手法・基準が提案され、その主なものとして立体横断施設技術基準・同解説（日本、以下基準と称す）、BS 5400（イギリス）あるいは Ontario code（カナダ）等が知られている。

近年、構造物の設計法は、従来の許容応力設計法から限界状態設計法に移行しつつある。歩道橋の使用性判定法においても、上記の海外の基準に代表されるように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り、設計段階における固有振動特性ならびに動的応答量の正確な把握は今後ますます重要になると考えられる。

一方、時刻歴応答解析に着目すれば、ここ数年のコンピュータの性能および計算技術のめざましい発展により、動的応答解析そのものは容易に行うことが可能となったものの、構造物に作用する外力は不確定要素が多く、一般にこの取り扱いが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、耐風設計の際の風速等については道路橋示方書あるいは耐風設計便覧により規定されているが、歩道橋に作用する歩行者の外力に関しては明確に規定されていないのが現状である。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、歩行速度、歩幅等が逐次変化するため、その取り扱いが比較的難しく、汎用的な歩行外力の決定方法は未だに確立されていない^{2,3,4)}。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、設計段階における解析値と完成後の実測値が一致しない例も多く見受けられる。これらの問題点を踏まえて、著者らは以前より横断歩道橋における強制加振実験および減衰自由振動実験を実施してきた⁵⁾。また、固有振動解析ならびに時刻歴応答解析を行ない実験結果と比較することにより、現在までに提案されている解析手法の有効性あるいは問題点等に関して考察を加えた^{5,6)}。

以上より、本研究では設計段階において共振、非共振歩行時を問わず、ある程度正確に歩道橋の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、人間-橋梁系の動的相互作用を考慮した応答解析を行った。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、あるいは半正弦波のみによって取り扱われてきた歩行外力（以下、従来型と称する）に対して、人間そのものをバネ-マスモデルを用いて多自由度系に表現し、これを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。したがって、本研究はこれらの結果と、著者らが行った実験結果あるいは従来の歩行外力を用いた解析結果の比較を通じて、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考察を加えたものである。

2. 解 析 手 法

2-1 動的応答解析

本研究で用いた解析対象は、写真-1に示すようなスパン 29.3m、幅員 1.5m の鋼床版を有する一般

The Dynamic Response Analysis of Pedestrian Bridges by Using Human Models,
 by Takashi Obata, Yoshi Kamei, Toshiro Hayashikawa and Koichi Sato.

的な歩道橋である。解析に先立ち行われた、減衰自由振動実験および強制加振実験によって得られた本歩道橋の振動特性を表-1に示す。

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を採用し、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表される⁷⁾。

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

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ている。レーレー減衰の係数

は、各歩道橋において実橋より測定された1次および2次の減衰定数に基づいて決定した。また、 $\mathbf{F}(t)$ は上述の歩行外力そのものであり、 $\boldsymbol{\varphi}(t)$ については歩行外力を人間の移動に応じて各作用節点に分配する、荷重分配係数ベクトルである。

また解析モデルに関しては、図-1に示すように床版のせん断変形を考慮した仮想トラス部材を有する3次元骨組み構造モデルを採用している。なお、ニューマークβ法の係数βは0.25、時間間隔は0.01secとして解析を行った。

2-2. 人型モデル

多自由度系の人型モデルを用いて動的応答解析が行われた例は極めて少ないが、本研究では文献8)および文献9)を参考として、図-2に示すような2自由度系の人型モデルを構築し計算を実施した。

図-2に記した記号を用いれば、2自由度系人型モデルの運動方程式は以下のようになる⁷⁾。

$$m_u \ddot{z}_u(t) + c_u (\dot{z}_u(t) - \dot{z}_1(t)) + k_u (z_u(t) - z_1(t)) = 0 \quad \cdots \cdots (2)$$

$$m_l \ddot{z}_l(t) + c_l (\dot{z}_l(t) - \dot{y}(t)) - c_u (\dot{z}_u(t) - \dot{z}_l(t)) + k_l (z_l(t) - y(t)) - k_u (z_u(t) - z_l(t)) = 0 \quad \cdots \cdots (3)$$

表-2 人型モデルのパラメータ

	上半身	下半身		共振時	非共振時
質量(kg)	35.07	34.93	歩行振動数(Hz)	2.44	1.5
ばね定数(kg/m)	124.9	40.7	移動速度(m/s)	1.098	0.608
減衰定数(%)	0.0	0.0	歩行時間(sec)	26.685	43.407



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(%)				最大応答値 (共振時) (gal)
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	204.9

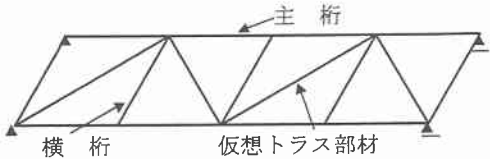


図-1 解析モデル

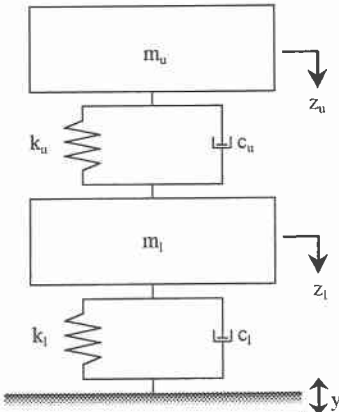


図-2 2自由度系の人型モデル

式(2)および式(3)より、歩行者が歩道橋に及ぼす外力 $P(t)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} P(t) &= -(m_u \ddot{z}_u(t) + m_l \ddot{z}_l(t)) + (m_u + m_l)g \\ &= k_l(z_l(t) - y(t)) + c_l(\dot{z}_l(t) - \dot{y}(t)) + (m_u + m_l)g \end{aligned} \quad \cdots (4)$$

ここで、式(2)～(4)において m_u, c_u, k_u はそれぞれ上半身の質量、減衰定数、バネ定数であり、 m_l, c_l, k_l は脚部（下半身）における質量、減衰定数およびバネ定数である。また、 z_u, z_l, y は人間の上半身と脚部の鉛直方向変位および歩行者の移動位置における歩道橋の鉛直方向変位であり、さらに g は重力加速度である。したがって、式(4)で得られた歩行外力 $P(t)$ を、式(1)の $F(t)$ に代入することにより、人間－橋梁系の動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析が可能となる。

また、上記の質量、剛性等の具体的な数値に関しては、文献 9) に示されている値を平均化したものを用い、人間の移動に関しては歩幅を 45cm（半歩）として振動数を掛け合わせた移動速度を採用することとした。表-2 に本研究で用いたパラメータの値を示す。なお表-2 より人型モデルの減衰定数に関しては、本研究においては上半身、下半身とも 0.0 として解析を行った。

3. 解析結果およびその考察

以上の手法を用いて、本研究では人型モデルを導入した時刻歴応答解析を行った。なお、ここで人型モデルの重心の移動のみを考慮した場合をケース 1、歩行に伴って生じるとされる足部から構造物に作用する衝撃力を、パルス波として人型モデルに加味した場合をケース 2 と称することとする。図-3(a),(b),(c)に、共振歩行時の実験およびケース 1、ケース 2 の応答加速度を、図-4(a),(b),(c)に FFT 解析結果を示す。また表-3 は、共振歩行時と非共振(1.5Hz)歩行時の人型モデルの上半身における最大応答加速度である。

これらの結果から、まず歩道橋の応答性状に関して考察を加えると、応答波形を見る限りにおいては、その最大応答値が大きく異なるため整合性は判然としないが、FFT 解析結果に着目すると、

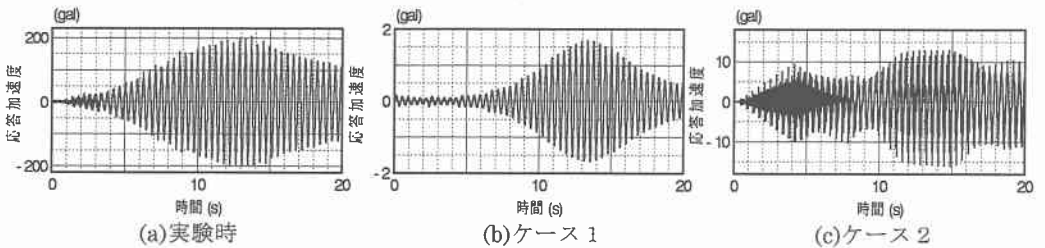


図-3 応答加速度波形

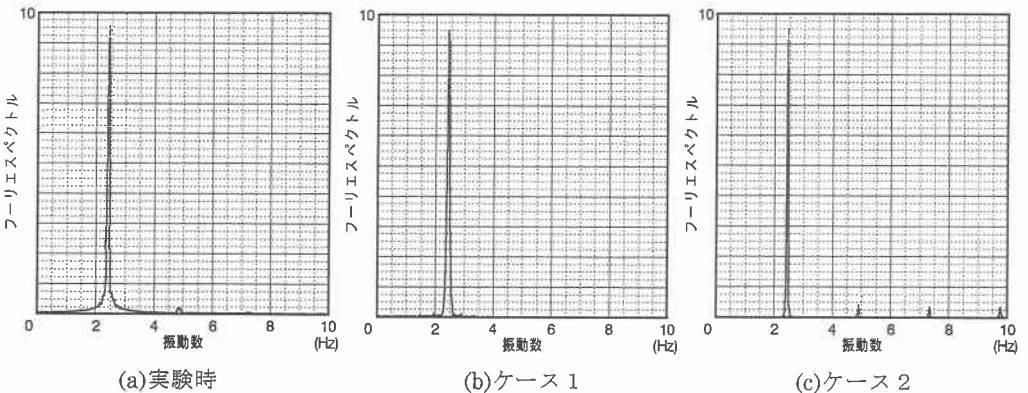


図-4 FFT 解析結果（共振歩行時）

ケース2の方がより実験時の応答特性に近い結果となっていると思われる。すなわち、ケース1においてはその卓越振動数は歩道橋の固有振動数(2.44Hz)のみであるが、ケース2では実験結果と同様に、5Hz 付近ならびに 7.25Hz 付近に小さなピークが認められ、全体的なスペクトルの形状は比較的良好一致する傾向があるものと判断できる。

また、本研究の解析手法では上記の通り振動性状は比較的良好一致を得たものの、最大応答値に関してはかなりの差が生じている。その理由としては、今回用いた人型モデルのパネ定数等のパラメータが現実と一致しているとは言い難いこと、あるいは、人型モデルの自由度そのものが不足していることが原因として考えられる。したがって、汎用的な歩行外力として用いるためには、今後はさらに自由度を増加させ、またGA等を用いてパラメータの同定を行う必要があるものと思われる。

次に、表-3 に着目すれば、共振歩行時における上半身の応答は非常に大きくなっていることがわかる。共振により、歩道橋の応答が増大することを考慮すればこの結果は当然ではあるが、人間-橋梁系の相互作用を考え合わせると、単に橋梁の応答のみならず人間の応答そのものも振動感覚に影響を及ぼすものと思われる。このことは、著者らが行った歩行時の振動感覚実験⁵⁾において、2Hz 前後で加振した際に被験者の反応が大きくなる傾向が見受けられたが、歩行振動数と加振振動数が一致した際に、人間-橋梁系の相互作用により上半身の応答がより増大し反応が鋭敏になったものと考えられる結果が得られた。

4. あ と が き

以上より、本研究では設計段階において共振、非共振歩行時を問わず、ある程度正確に歩道橋の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、2自由度系の人型モデルを用いて人間-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、その最大応答値は大きく異なるものの、FFT 解析結果からは今回用いた解析手法が歩道橋の応答性状をある程度正確に再現できる可能性を有することが判明した。また、歩行振動数と加振振動数が一致した際に、人間-橋梁系の相互作用により人間そのものの応答が増大し、その結果振動感覚がより鋭敏になる可能性が推定できる結果が得られた。

したがって、人型モデルの自由度をさらに増加させ、またGA等を用いて各質点の質量あるいは剛性等のパラメータの同定を行えば、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) 梶川康男・加藤雅史：歩道橋の振動と使用性設計，振動制御コロキウム Part.B 講演論文集，pp.9-14，1991.
- 2) Wheeler, J. E. : Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST9, pp.2045-2065, 1982.
- 3) 梶川康男：振動感覚を考慮した歩道橋の使用性照査法に関する考察，土木学会論文報告集，第325号，pp.23-33，1982.
- 4) 梶川康男・津村直宜・角本周：PC吊床版歩道橋の振動とその使用性，構造工学論文集，Vol.36A，pp.685-695，1990.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 橋梁振動の計測と解析（橋梁振動研究会編），技報堂出版，1993.
- 8) Coermann, R.R. : The mechanical impedance of the human body in sitting and standing position at low frequencies, Hum. Factors, 4, pp.227-253, 1962.
- 9) Nigam, S. P. and Malik, M. : A study on a vibratory model of a human body, J.Biomech.Eng. Trans. ASME, 109(2), pp.148-153, 1987.

表-3 最大応答加速度（人型モデル）

	最大応答加速度(gal)
共振歩行時	27.3
非共振歩行時	8.6