

歩道橋の時刻歴応答解析における人型歩行モデルに関する一考察

建設技術研究所

正 員 亀井 与志

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

1. まえがき

歩道橋においては、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、各種の照査手法または基準等が提案されている。近年においては振動使用性に関しても、動的応答量と振動限度を比較する限界状態設計法に対応した手法が主流となりつつあり、設計段階における構造物の振動特性および動的応答量の正確な把握がますます重要となってきた。ここで歩道橋の動的応答解析に言及すると、人間の歩行に伴い歩道橋に作用する外力は歩行者の歩調によって、床版、主桁等を与える動的荷重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比較的難しく、汎用的に用いられる歩行外力の算定方法は未だに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、人間を2自由度系にモデル化し、人間一橋梁系の動的相互作用を考慮した応答解析を行うことにより、ある程度正確に動的応答量の求めることのできる歩行外力について考察を加えたのでここに報告するものである。

2. 解析方法

本研究では、人間のモデル化に基づき、人間一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。時刻歴応答解析につ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。

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

ここで $\mathbf{M}$ および $\mathbf{K}$ はそれぞれ整合質量マトリクスおよび剛性マトリクスである。減衰マトリクス $\mathbf{C}$ にはレーレー減衰を用いることとした。また $\mathbf{F}(t)$ は歩行外力であり、 $\boldsymbol{\varphi}(t)$ は荷重分配係数ベクトルである。なお、ニューマークβ法の係数 β は 0.25、時間間隔 0.01sec とし、解析モデルとして立体骨組構造モデルを採用した。

図-1 に本研究で構築した2自由度系の人型モデルを示す。図-1 に示した記号を用いると、2自由度系人型モデルの運動方程式は以下ようになる¹⁾。

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

Keywords: 歩道橋、人型モデル、時刻歴応答解析

北海道大学大学院工学研究科 札幌市北区北13条西8丁目 TEL:011(706)6172 FAX:011(726)2296

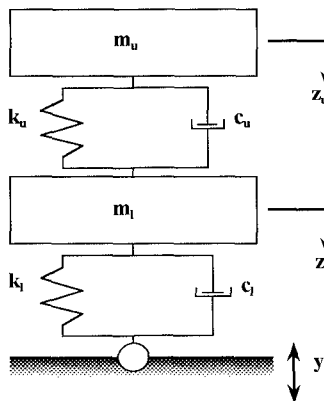


図-1 2自由度系人型モデル

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

ここで式(2)は人型モデルの上半身、式(3)は下半身の運動方程式を示している。

式(2)、(3)より歩行者が歩道橋に及ぼす外力 $\mathbf{P}(t)$ は以下のようになる。

$$\mathbf{P}(t) = c_l(\dot{z}_l(t) - \dot{y}(t)) + k_l(z_l(t) - y(t)) + (m_u + m_l)g \quad \cdots (4)$$

ここで g は重力加速度である。

式(4)より得られた歩行外力 $\mathbf{P}(t)$ を式(1)の $\mathbf{F}(t)$ に代入することにより、人間一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。

3. 解析結果

本研究においては、人型モデルの移動方法より、解析ケースとして3ケースを設定し、実験結果と比較してその妥当性について検討を行った。表-1 に本研究で設定した解析ケースを示す。また表-2 に本研究で用いた人型モデルの各パラメータを示す²⁾。

ここで Case 2、3 における強制変位とは、人間の移動に伴う体の上下動を意味し、今回の解析では歩行振動数に関わらずこれを 5cm とし計算を行った。

また表-2 のバネ定数は、歩行振動数と人間の質量に応じて、人間の固有振動数が歩行振動数と一致するように

表-1 解析ケース

Case 1	人型モデルの重心の移動のみを考慮した場合
Case 2	歩行に伴って生じるとされる人型モデルの体重移動を強制変位として入力した場合
Case 3	Case 1 と Case 2 を合わせた場合

表-2 人型モデルのパラメータ

		非共振時	共振時
質量 (kg)	上半身	35.07	35.07
	下半身	34.93	34.93
バネ定数 (t/m)	上半身	0.3179	0.8411
	下半身	0.3166	0.8377
減衰定数(%)		0.0	0.0

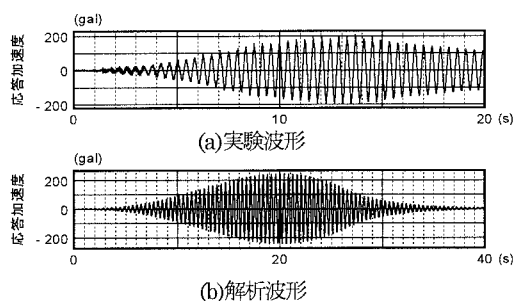


図-2 応答加速度波形の比較（共振時）

決定することとした。加えて、解析対象の歩道橋は、支間長 29.5m、幅員 1.5m の標準的な歩道橋である。

解析結果の一例として、図-2 に共振時のスパン中央における応答波形の比較を、図-3 に 1.5Hz 歩行時における応答波形の比較を示す。また図-4 は図-3 のそれぞれの結果に対するフーリエスペクトルである。

これらの結果に着目するとまず共振時に関しては、波形からほぼ完全な共振状態となっており、また最大応答値も比較的良く一致していることがわかる。ただし、最大応答値が得られる時間は一致しておらず、この原因としては本解析において、人型モデルの減衰定数を 0.0 としているためと考えられ、したがってこれを GA 等を用いて同定する必要があるものと考えられる。

つぎに非共振時の結果について考察を加えれば、最大応答値、振動性状ともに一致しているとは言いが、フーリエスペクトルの結果から、従来の解析手法³⁾のように歩行振動数は卓越せず、実験結果と同様に 1 次固有振動数が最も卓越し、高次モードもある程度生じるような結果となっている。以上より、人型モデルの自由度を増加させ、質量等のパラメータに関して十分に検討を加えれば、共振、非共振を問わず、比較的正確に動的応答量を求めることのできる歩行外力の設定が可能になるもの

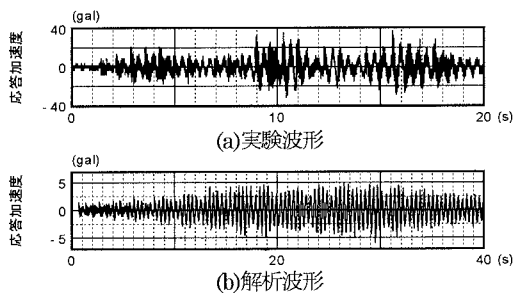


図-3 応答加速度波形の比較（非共振時）

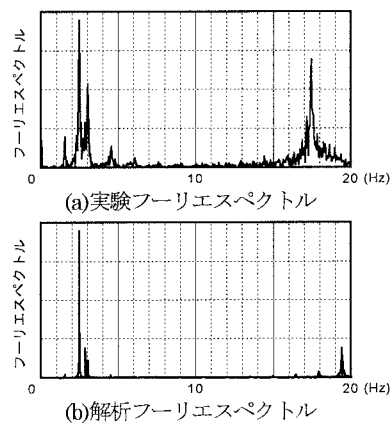


図-4 フーリエスペクトルの比較

のと推定できる。

4. あとがき

以上のように本研究は人型モデルを用いて、人間一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ものである。

実験結果と解析結果を比較することにより、本研究の解析手法は正弦波等を用いた従来の手法に比して、より正確に歩道橋の動的応答量あるいは振動特性が求められる可能性を有することが判明した。したがって、人型モデルの自由度数を増加し、質量、バネ定数、減衰定数等のパラメータについて検討を行うことにより、歩道橋設計時において、比較的正確に動的応答量を求めることのできる歩行外力が得られるものと考えられる。

参考文献

- 1) 橋梁振動の計測と解析（橋梁振動研究会編），技報堂出版，1993.
- 2) Nigam, S. P. and Marik, M.: A study on a vibratory model of a human body, J. Biomech. Eng. Trans. ASME, 109(2), pp.148-153, 1987.
- 3) 小幡卓司・亀井与志・伊藤公彦・林川俊郎・佐藤浩一：歩道橋の実態調査に基づいた応答特性と歩行外力の同定について，橋梁振動コロキウム'97 論文集，pp.293-299, 1997.