

解析による大規模木製歩道橋の動的挙動と振動使用性

Dynamic behavior and vibration serviceability of a large-scale timber pedestrian bridge by analysis

○日下真彰* 本田秀行**

KUSAKA Masaaki and HONDA Hideyuki

*金沢工業大学 大学院 工学研究科 環境土木工学専攻(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

**工博 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科(〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

ABSTRACT Especially, the evaluation of vibration serviceability based on experiment or analysis is important problem for the pedestrian bridges. A purpose of this study is to formulate analytically vibration serviceability of timber pedestrian bridges, and then to investigate dynamic behavior and vibration serviceability on the bridges. In this analysis, three dimensional dynamic response analysis is formulated, and then the external force with various paces and frequencies of pedestrian has also been evaluated. The objected bridge in this study is T Bridge of large-scale timber pedestrian bridge with bridge length of 85 m constructed in kitakyushu-shi on 1995. The bridge is constructed by bongossi material. This study is investigated fundamental dynamic behavior of the bridge based on the analyzed results. Furthermore, vibration serviceability of the bridge is also investigated using the evaluation methods on vibration serviceability of many foreign countries including Japan.

Keyword : 大規模木製歩道橋、振動使用性、3次元動的応答解析

large-scale timber pedestrian bridge, vibration serviceability, three dimensional dynamic response analysis

1. まえがき

近年、我が国における近代木橋のほとんどは歩道橋であり、林道や村道あるいは町道にも多く架設されてきている。また、構造用集成材を使用した木橋の建設技術はめざましい発展を遂げており、スパンの長大化と多形式化が進んでいる。しかしながら、我が国の設計法や施工技術の信頼性を向上させるための研究・開発が必要であると同時に、これら技術の発展には幾多の実橋での性能照査等の実験や解析的研究によって得られる知見が大きく貢献することも自明の理である。

歩道橋は、振動使用性の検討が設計上あるいは維持管理上、重要な問題である。従来、我が国での歩道橋の振動使用性に関する実験的および解析的研究は、例えば梶川ら¹⁾、田中ら²⁾、小幡ら³⁾、米田⁴⁾など多くの研究者によって一連の研究が行われてきた。しかしながら、これらの研究は全てが鋼製あるいはコンクリート製の歩道橋であり、木製歩道橋の振動使用性に関する研究は、山田ら⁵⁾、および著者ら⁶⁾以外、ほとんど行われていないのが現状である。

そこで、本研究では、木製歩道橋の振動使用性を解析的に検討することを目的としている。対象とした橋梁は、北九州市に架設されている大規模木製歩道橋のT橋である。このT橋の振動使用性を解析的に検討するために、歩行者外力による歩道橋の3次元動的応答解析法、歩行者の外力評価および減衰性能の取り扱いなど、3次元動的応答解析のシステム化を作成した。木製歩道橋を設計・維持管理する上で振動使用性は重要な問題である。本研究のように振動使用性を3次

動的応答解析から検討する例は、世界的にもあまり見当たらないようである。

2. 歩行者外力による歩道橋の3次元動的応答解析

2.1 3次元動的応答解析法

(1) 解析の定義

解析の定義として、本解析で仮定した座標軸について述べる。本解析では立体構造解析モデルのため、各要素部材の座標系を図-2.1に示すように定める。部材軸方向に部材座標系の x 軸を定め、これに右手系をなすように y 、 z 軸を決める。ここで、 y 、 z 軸は節点 i を通り断面の主軸にする。この要素の2つの節点 i 、 j の変位、節点力を部材座標系に関して以下のように表す⁷⁾。

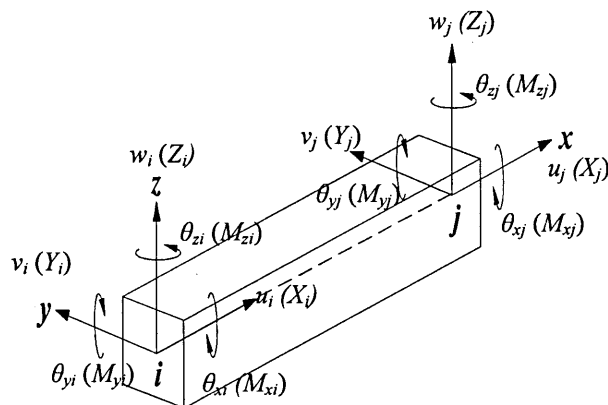


図-2.1 要素部材の節点変位と節点力

<変位>	<節点力>
u_i 、 u_j : 節点 i 、 j の材軸方向の変位	X_i 、 X_j : 節点 i 、 j に作用する軸方向力
v_i 、 v_j : y 方向への変位	Y_i 、 Y_j : y 方向のせん断力
w_i 、 w_j : z 方向への変位	Z_i 、 Z_j : z 方向のせん断力
θ_{xi} 、 θ_{xj} : ねじれ角	M_{xi} 、 M_{xj} : ねじりモーメント
θ_{yi} 、 θ_{yj} : y 軸まわりの回転角	M_{yi} 、 M_{yj} : y 軸まわりの曲げモーメント
θ_{zi} 、 θ_{zj} : z 軸まわりの回転角	M_{zi} 、 M_{zj} : z 軸まわりの曲げモーメント

(2) 直接積分法

動的応答解析法は、事前に計算した固有振動数と固有振動モードを用いるモーダルアナリシス法と運動方程式を直接積分していく直接積分法に大別される。直接積分法は、モーダルアナリシス法に比べて考慮するモード次数に対する配慮が必要ないため高次モードまで解析できるが、減衰マトリックスの設定上で不明確さや離散化した節点数が増加する大規模な橋梁を対象とする場合、マトリックスの項数が大きくなり、膨大な計算時間を要することになる。そのため、従来はモーダルアナリシス法を用いることが多かったが、近年の計算機能の向上により自由度の大きなマトリックスにおいても安易に計算できるようになり、直接積分法による解法も見直されている。本研究での動的応答解析は直接積分法を用いているため、この解析法について以下に述べる。

橋梁の各節点の変位ベクトルを Z とすると、歩行者と橋梁系の運動方程式はダ・ランベールの原理に基づいて式 (2.1) のように表される。

$$[M]\{\ddot{Z}\} + [C]\{\dot{Z}\} + [K]\{Z\} = \{F\} \quad \dots \dots (2.1)$$

ここに、 $[M]$ は橋梁の全体質量マトリックス、 $[C]$ は全体減衰マトリックス、 $[K]$ は全体剛性マトリックスである。 $\{F\}$ は歩行によって橋梁に加わる外力ベクトルである。

(3) 数値積分法

本解析では、式 (2.1) の運動方程式を解くために数値積分法として Newmark's β 法を用いた。なお、積分時間間隔を $\Delta t = 0.03$ 秒、速度と加速度を定義するパラメータに対して各 Δt ごとの取

束精度が高いとして一般的に用いられている⁶⁾ $\gamma = 1/2$ 、 $\beta = 1/4$ 、また各 Δt ごとに仮定した加速度と計算加速度との絶対値の差に対する収束精度を $1/1000$ として解析を行った。

(4) 減衰の考慮

本解析における減衰マトリックスは、Rayleigh 減衰を仮定している。Rayleigh 減衰は減衰が質量と剛性の1次結合であり、式(2.2)で表される。ただし、これらのパラメータ η 、 α は定数であり、実験値により定められることが多い。また、これらの減衰を用いる場合には、各次の振動モードは直交することが前提条件とされている。具体的な Rayleigh 減衰の算定法を式(2.2)～(2.4)に示す。なお、式中の f_i は橋梁の振動数(Hz)、 h_i は減衰定数である。

$$[C] = \alpha [K] + \eta [M] \quad \dots \dots (2.2)$$

$$\alpha = (h_1 f_1 - h_2 f_2) / (\pi(f_1^2 - f_2^2)) \quad \dots \dots (2.3)$$

$$\eta = 4\pi f_2 (h_2 - \pi f_2 \alpha) \quad \dots \dots (2.4)$$

η 、 α のいずれか一方のみを考える場合には、特定の1つの振動モードでの減衰定数と振動数が実験値から与えられれば減衰マトリックスが決定できる。また、 η と α の両方を考慮する場合は、2つ以上の振動モードの減衰定数と振動数が実験値から与えられれば定数 η と α を決定することができ、減衰マトリックスが求められる。各種の橋梁での減衰定数の実測値に基づいて、減衰定数が振動数に比例する係数 α は、 $\alpha = 3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-4}$ の範囲であり、これに対して振動数に逆比例する係数 η は、 $\eta = 1.0 \sim 0.01$ の範囲の値が一般的である。

2.2 歩行者の外力モデル化

本解析での歩行者外力は、歩行者の自重を考慮した式(2.5)を用いた。

$$\{F\} = P \phi(t) = \{mg + mg \xi \sin(2\pi q t)\} \phi \quad \dots \dots (2.5)$$

ここに mg は歩行者の体重(kgf)、 q は歩行者の歩調(Hz)、 $\phi(t)$ は歩行者が载荷している要素の両節点に比例分配する係数ベクトル、 ξ は歩行者の静的外力と歩行・走行時の動的外力との比で定義される衝撃力比で、一般的には図-2.2から決定される³⁾。実際の橋梁実験での歩行者の歩行試験及び走行試験では $2.0 \sim 2.5$ Hz の内のある一定の間隔で歩行・走行を行う場合が多いため、外力としては場合に応じて ξ の値を変えて解析を行う必要がある。

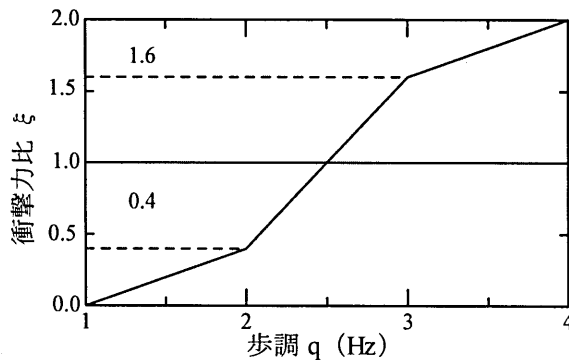


図-2.2 歩行者外力で用いる衝撃力比

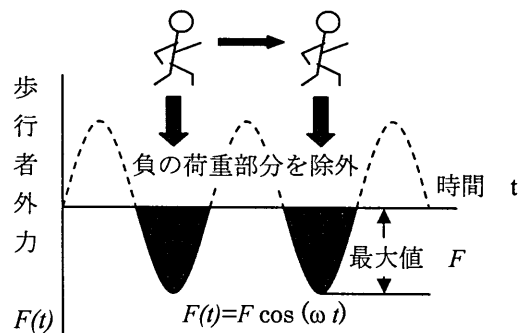


図-2.3 歩行者外力として用いた半余弦波

また、歩行者外力を求める文献はいくつか存在するが、本研究における歩行者外力は梶川⁸⁾らが提案した正弦波を用いる方法に若干の改良を加え、図-2.3に示すように、入力余弦波の負の荷重部分(足が床版から離れている時の外力)を除去して、半余弦波をある歩調で歩行した時の歩行者外力とする方法を用いた。

2.3 橋梁のモデル化

本解析は対象橋梁の T 橋に対して行った。動的応答解析用に作成した T 橋の構造解析モデルに対して 3 次元有限要素モデルの妥当性を確認するために、FORTRAN プログラムによるサブスペース法を用いて固有値解析を行った。なお、サブスペース法は実対称行列の固有値と固有ベクトルを同時に求める反復法である。

3. 振動使用性評価法

3.1 日本の振動使用性評価法

我が国で多く用いられている主な振動使用性の評価法は、小堀・梶川ら⁹⁾の研究成果に基づき振動速度から評価が行われる。この評価法には、振動速度の最大値で評価する方法と振動速度の実効値で評価する方法がある。図-3.1、3.2 にそれぞれの恕限度を表す。

図-3.1 は振動速度の最大値の恕限度と歩行者が歩行した時の振動感覚を表している。実験や解析で得られた振動速度の最大値が 0~0.6 cm/s の範囲で「振動を感じない」、0.6~1.2 cm/s で「振動をわずかに感じる」、1.2~2.4 cm/s の範囲では「振動を明確に感じる」という分類に分けられる。図-3.2 では、振動速度の実効値の恕限度と歩行者が歩行した時の振動感覚を表しており、振動速度の実効値が 0~0.425 cm/s で「振動を感じない」、0.425~0.85 cm/s で「振動をわずかに感じる」、0.85~1.7 cm/s では「振動を明確に感じる」と分類される。

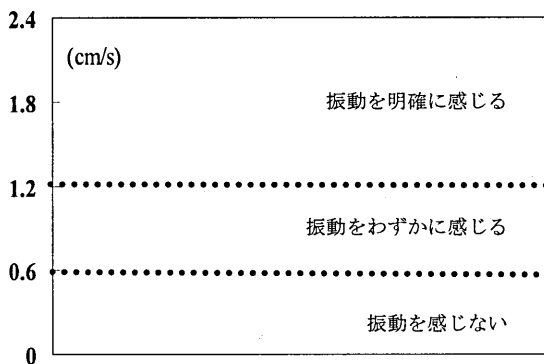


図-3.1 振動速度の最大値に対する恕限度

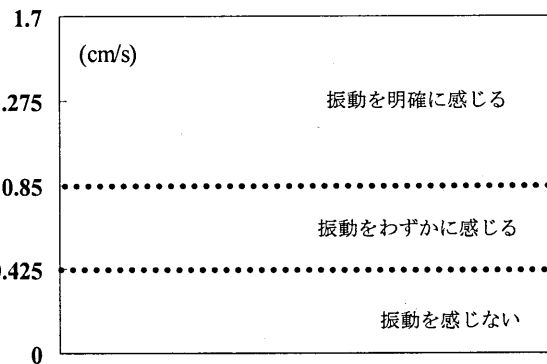


図-3.2 振動速度の実効値に対する恕限度

3.2 カナダ・オンタリオ州の振動使用性評価法

カナダ・オンタリオ州道路橋設計基準とイギリス BS5400 について概説する⁸⁾。これらの基準は Blanchard らによって提案された方法を採用しており、時刻 t における歩行外力は次式となっている。

$$\text{歩行者外力 } F=180 \sin (2 \pi q t) \text{ (N)} \quad \dots \dots (3.1)$$

$$\text{移動速度 } V=0.9 q \text{ (m/s)} \quad \dots \dots (3.2)$$

ここで、 q は橋の固有振動数と同じ歩行者の歩調 (Hz) である。

このような外力を歩道橋に作用させ、その時の鉛直方向の最大加速度を求めることを提案している。なお、比較的簡単な桁橋については次のような簡易な計算方法が示されている。

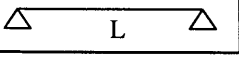
$$a=4 \pi^2 f_1^2 \delta K \phi \quad \dots \dots (3.3)$$

ここに、 a = 最大振動加速度 (m/s^2)、 f_1 : 橋の 1 次固有振動数 (Hz)、 δ : 700N の鉛直集中荷重による上部構造の静的最大たわみ (m)、 K : 表-3.1 より得られる構造形式に関する形状係数、 ϕ : 減衰定数 h をパラメータとして図-3.3 より得られる動的応答係数である。

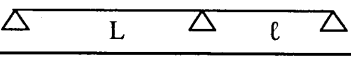
なお、照査するときの減衰定数のデータが未知の場合は、減衰定数として鋼構造の時 0.5 %、合成構造の時 0.6 %、コンクリート構造の時 0.8 %を用いるものと定められている。

表-3.1 構造形式による形状係数 (K)

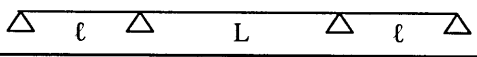
側径間比 l/L	2径間連続	3径間連続
1.00	0.70	0.60
0.80	0.92	0.82
0.60	0.96	0.92
0.40	0.96	0.92



L



L l



l L l

(注) 単純支持は $K=1$ とする。

以上の方法で計算された最大加速度が、図-3.4 に示すような上部構造の曲げ固有振動数の関数として与えられる制限値を超えないように、設計しなければならないとしている。図-3.4 では制限値が両基準で異なっており、カナダ・オンタリオ州の基準の方が少し厳しい値となっている。

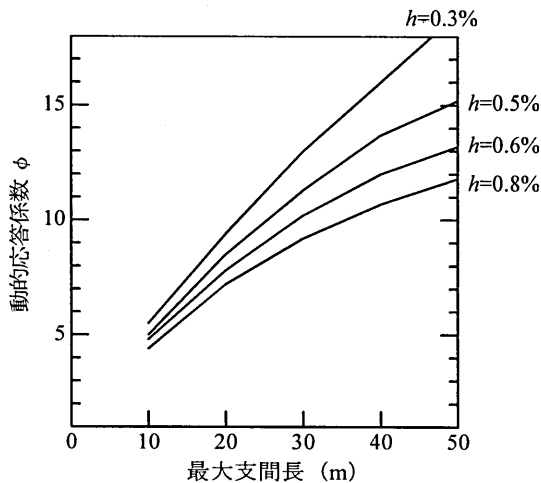


図-3.3 各減衰定数に対する動的応答係数

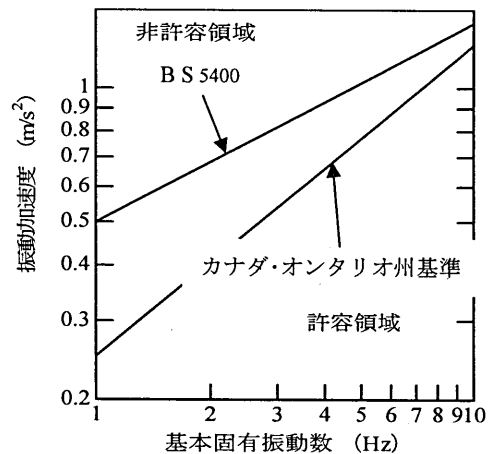


図-3.4 各振動数に対する振動加速度の制限値

3.3 ユーロコード5の振動使用性評価法

ユーロコードが世界的な情勢として性能規格化が進むと考えられるため、使用限界状態の歩行者による鉛直振動¹¹⁾について説明する。

まず、鉛直加速度 a_{vert} は、次の条件を満足することが望ましい。

$$a_{vert} \leq 0.7 \text{ m/s}^2 \quad \text{ただし } f_{vert} < 5 \text{ Hz}$$

基本固有振動数 f_{vert} を計算する場合には、弾性係数 $E_{0,mean}$ とユーロコードの中の ENV1995-1-1 4.2 (1) に準じた滑り係数 K_{ser} の平均値を使用することが望ましい。

表 3.2 による橋梁の形状に対して、鉛直加速度 (m/s^2) は次式 (3.4) から算出される。

$$a_{vert} = a_{vert,L} k_{vert,f} \quad \dots \dots (3.4)$$

横断歩道橋に対して、鉛直加速度 (m/s^2) は、次式 (3.5) から算出される。

$$a_{vert} = 0.027 L b (a_{vert,L}) (k_{vert,f}) \quad \dots \dots (3.5)$$

ただし、 $a_{vert,L} = 165 k_a ((1 - e^{-2\pi n h}) / (M h)) \quad \dots \dots (3.6)$

$$M = m L b \quad \dots \dots (3.7)$$

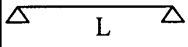
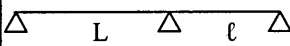
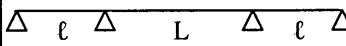
ここで、 L : 支間長 (m)、 b : 幅員 (m)、 m : 橋の単位面積あたりの質量 (kg/m^2)、 h : 減衰定数、 $n=L/0.9$: 支間 L を渡るのに必要とする歩数、 k_a : 形式係数で表-3.2 より決定、 $k_{vert,f}$: 図-3.5 より決定。

減衰比は以下のように決められるのが望ましい。

機械的継ぎ手のない主構造の場合は $h=0.010$ 機械的継ぎ手のある主構造の場合は $h=0.015$ 。

しかしながら、この簡便法は歩行者の歩調が構造物の基本固有振動数に等しいか、その半分の値になるという仮定に基づいているので注意が必要である。式 (3.4) は小さな集団の歩行者によって橋が加振される場合で、 $L \cdot b < 37 \text{ m}^2$ の橋の対して有効である。また、式 (3.5) は橋全体に歩行者の数が多く、歩行者の連続的な流れによって橋が加振される場合に相当する。

表-3.2 形式係数 k_a

構造形式	形式係数 k_a
	1.0
	0.7
	for $L_1/L=1.0, 0.6$ for $L_1/L=0.8, 0.8$ for $L_1/L=0.6, 0.9$

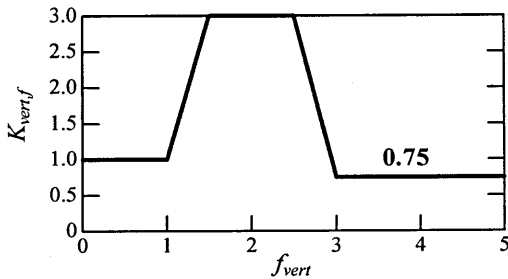


図-3.5 係数 $k_{vert,f}$ と基本固有振動数 f_{vert}

4. 対象橋梁

本研究で対象とした橋梁は、北九州市に架設されている T 橋である。この T 橋は、橋長が 85 m もある大規模な木製歩道橋で、橋軸方向には 9 ブロックに分割されており、その継手はヒンジ構造としたゲルバー桁形式となっている。また、8 本の主桁は各主桁とも 5 層の積層桁となっている特殊な橋である。この T 橋の設計概要を表-4.1 に示し、側面図を図-4.1、断面図を図-4.2、平面図を図-4.3 に示す。

表-4.1 設計概要

橋種	木製歩道橋
形式	5 層積層桁橋
形状	3 径間連続桁橋
橋長	85.0m (桁長 84.9m)
支間長	26.75+31.0+26.75m
幅員	有効 6m 全幅 7.2m
使用材料	ボンゴシ、チーク (親柱、高欄)
キャンバー	1.7m

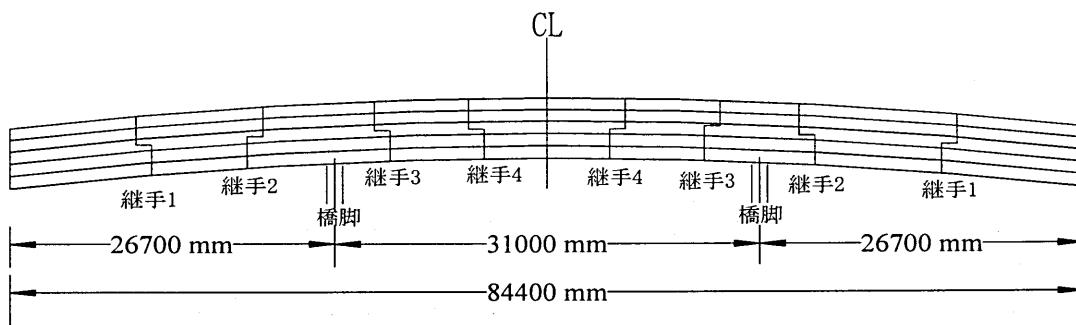


図-4.1 T 橋の側面図

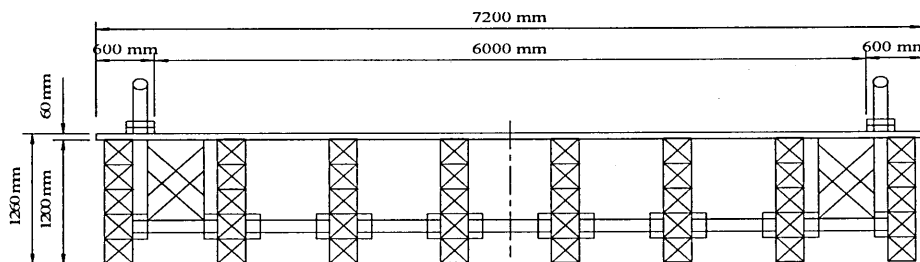


図-4.2 T 橋の断面図

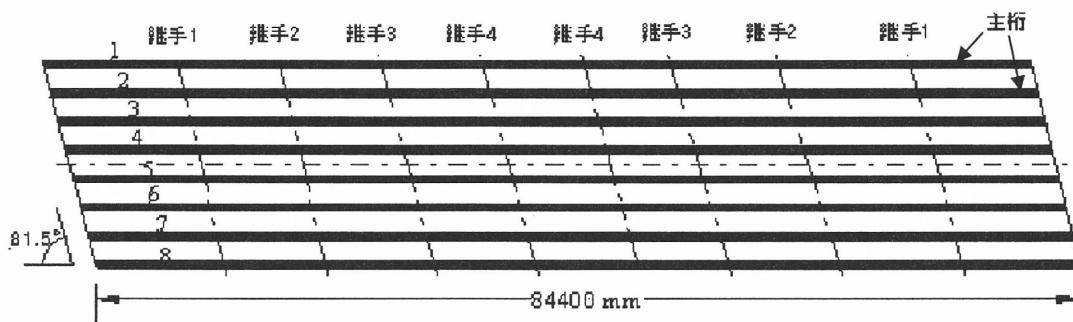


図-4.3 T橋の平面図

5. 動的応答特性

5.1 解析手順

最初に各要素を分布質量系とする有限要素法で構造解析モデルを作成して固有値解析を実施する。そして、実験値と整合性のある精度の高い解析値が得られたら3次元動的応答解析を行う。次に得られた解析解である振動速度により振動使用性の評価を行う。なお、本橋における実験から、鉛直曲げ1次振動の固有振動数 2.15 Hz 以外は明らかになっていないので、その固有振動数と一致する構造解析モデルを作成した。

5.2 構造解析モデルと固有値解析

まず、構造解析モデルを作成するに当たって、本橋の特徴であるヒンジ構造をどのようなモデルにするかを考えた。図-5.1、-5.2 を見ると、3層目以外は添接材で補強されていることから、単純桁を用いてヒンジ構造のモデル化を検討した。

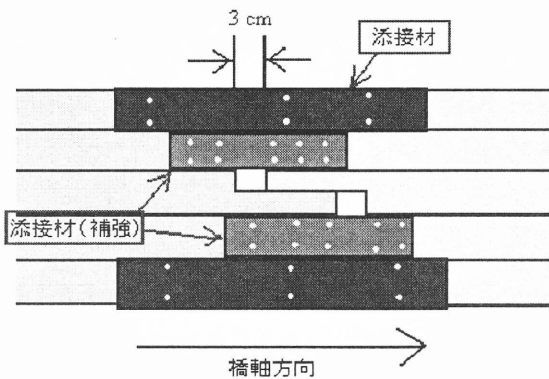


図-5.1 ヒンジ構造の詳細図

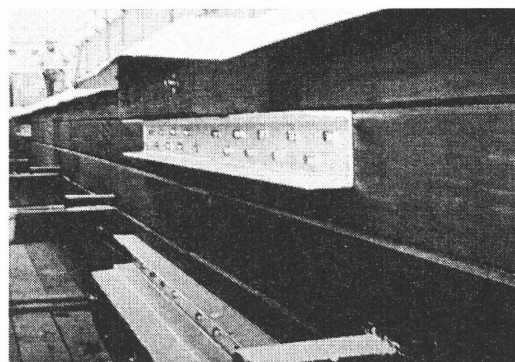


図-5.2 ヒンジ構造の写真

予備解析として、図-5.3 に示すヒンジ構造なしの簡易モデルと図-5.4 に示すヒンジ構造ありの簡易モデルを作成し、静たわみと固有振動数を比較した。解析で得た静たわみを図-5.5 に、固有振動数を表-5.1 に示す。

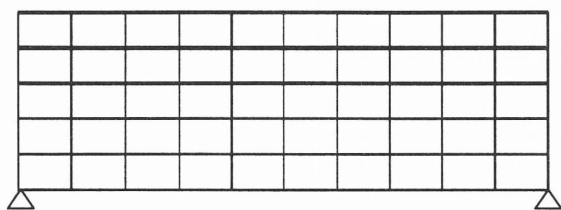


図-5.3 ヒンジ構造なしの簡易モデル

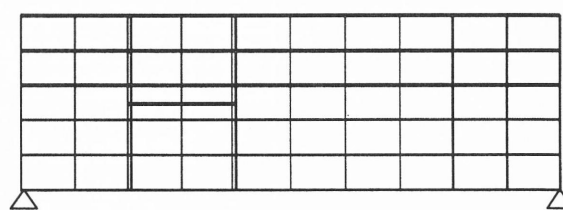


図-5.4 ヒンジ構造ありの簡易モデル

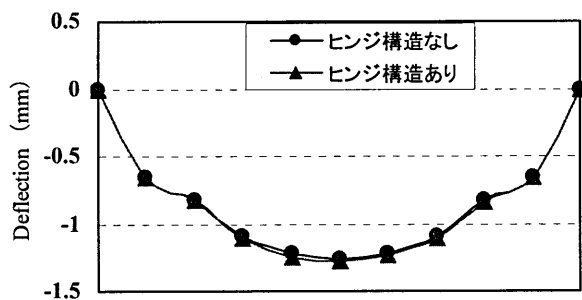


図-5.5 静たわみの比較

表-5.1 簡易モデルの固有振動数解析結果

振動 次数	固有振動数(Hz)	
	ヒンジ構造なし	ヒンジ構造あり
1	6.432	6.429
2	20.208	20.161
3	23.148	23.111

両方のモデルを比較すると、静たわみと固有振動数共にほとんど差異が見られない結果が得られたことから、本研究ではヒンジ構造なしの構造解析モデルを作成することにした。なお、本橋には2種類の横桁が設置されていることから、両横桁の配置と剛性は設計図面を基に、棒要素でモデル化した。

最初の解析モデルとしては、図-5.6のように実橋を忠実に再現した5層の積層モデルを作成した。そして、この解析モデルで固有値解析を行った結果、鉛直曲げ1次振動が2.19 Hzと近い値となった。そこで、この解析モデルを用いて3次元動的応答解析を実施したが、節点数や棒要素数および面要素数に制約があって、大規模で節点数が膨大なT橋の動的応答解析が困難であることが判明した。



図-5.6 5層の積層モデル

そこで、本研究では再度構造解析モデルを改良し、図-5.7に示すような2層の積層モデルに置き換え、簡易的な解析モデルを作成した。そのモデルでの固有値解析結果を表-5.2に示す。

表-5.2を見ると、鉛直曲げ1次振動において実験値と解析値の固有振動数が近い値となっていることがわかる。前述したように対象としたT橋の実験データが不足しているため、これ以上の解析モデルの作成は困難と判断し、この解析モデルを用いて3次元動的応答解析を行うことにした。なお、図-5.8に二層積層モデルにおける鉛直曲げ1次振動の振動モードを示す。

表-5.2 2層積層モデルの固有値解析結果

振動 次数	振動モード	固有振動数(Hz)	
		実験値	解析値
1	鉛直曲げ1次振動	2.15	2.16
2	鉛直曲げ2次振動	-	2.88
3	鉛直曲げ3次振動	-	3.83
4	水平曲げ1次振動	-	4.83
5	鉛直曲げ4次振動	-	6.63
6	鉛直曲げ5次振動	-	8.00
7	鉛直曲げ6次振動	-	8.26
8	ねじれ1次振動	-	9.67
9	ねじれ2次振動	-	10.55
10	ねじれ3次振動	-	10.72



図-5.7 二層の積層モデル

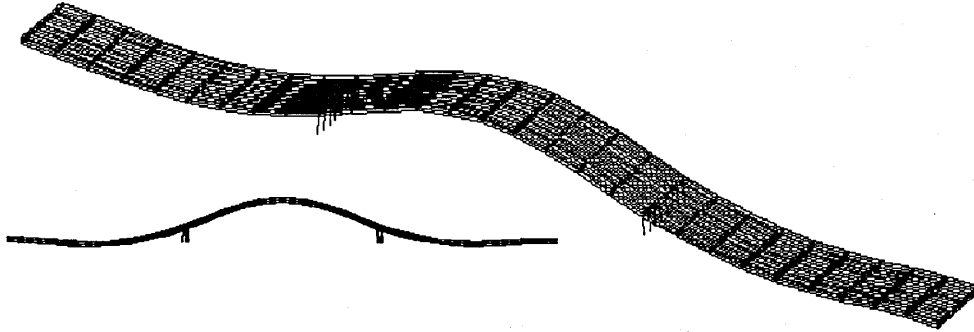


図-5.8 鉛直曲げ1次振動モード

5.3 3次元動的応答解析

(1) 解析条件

本解析の条件として、歩行者の体重を 70 kgf、共振現象を解析的に再現するために歩行者の歩調を 2.16 Hz、歩幅を 0.86 m、衝撃力比を 1.6 として解析を行った。なお、図-5.9 には解析点の位置と歩行レーンを示す。解析点は $A_1 \sim A_6$ の計 6 点で各径間の中央に設けた。歩行レーンは歩行者が歩く位置であり、下から 2 つ目の桁上を歩かせた。

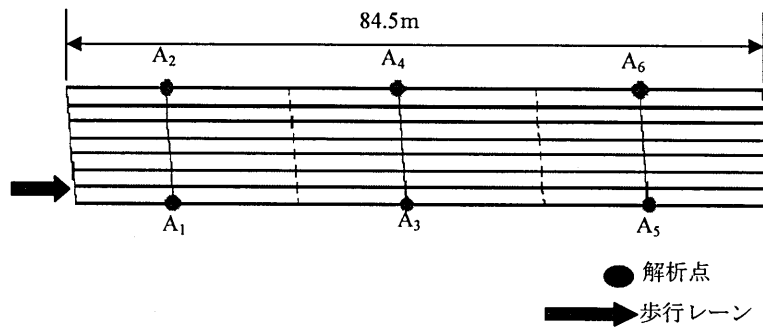


図-5.9 解析点と歩行レーン

(2) 解析結果

図-5.7 で示した 2 層の積層モデルを用いて 3 次元動的応答解析を実施し、各解析点で得られた振動速度波形を図-5.10 に、図-5.11 には振動加速度波形を示す。なお、解析条件は、上記の通りである。

図-5.10 および図-5.11 より、歩行レーンに近い解析点の波形とその最大値が大きくなっている。これは、各主桁間に横桁が設置されているが、横方向の荷重分配が明確に小さいことを示している。また、この T 橋は 3 径間連続桁橋であるため、橋脚部分を節とする各径間の応答波形に分かれていることも確認できる。そして、解析点の A_1 と A_3 および A_5 での振動波形を比較すると、解析点に近い箇所で大きな振動を生じていることも認められる。

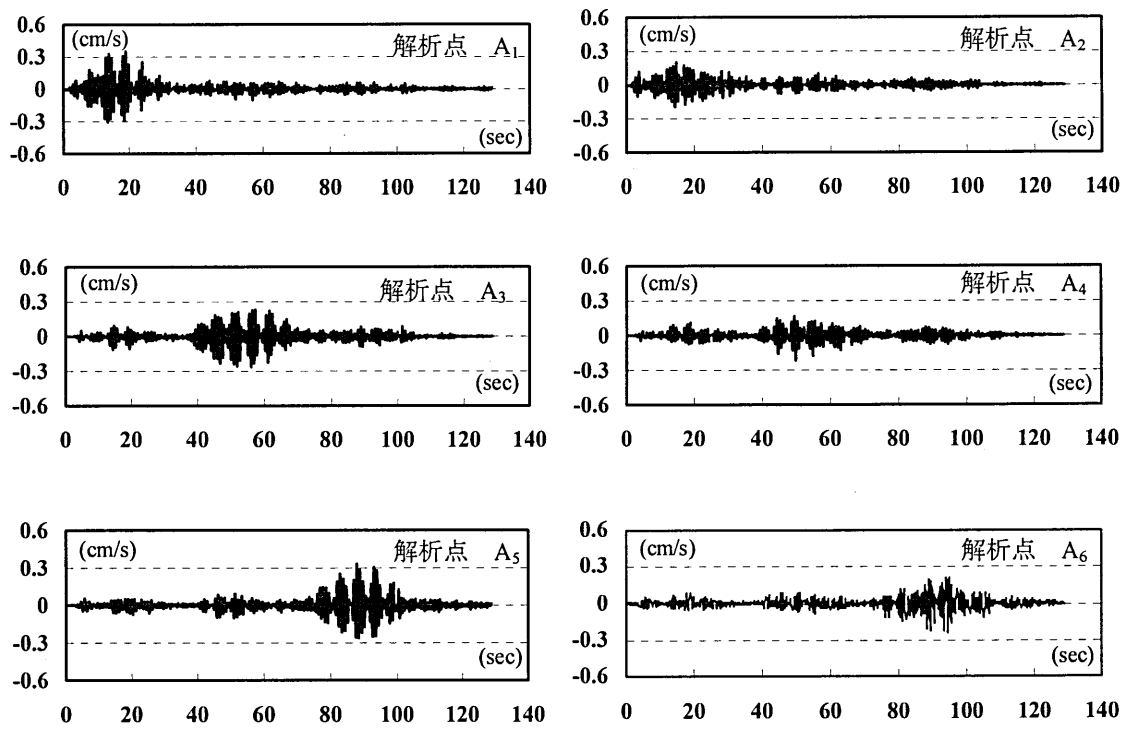


図-5.10 各解析点の振動速度波形（体重 70 kgf、歩調 2.16 Hz、衝撃力比 1.6 での一人共振歩行）

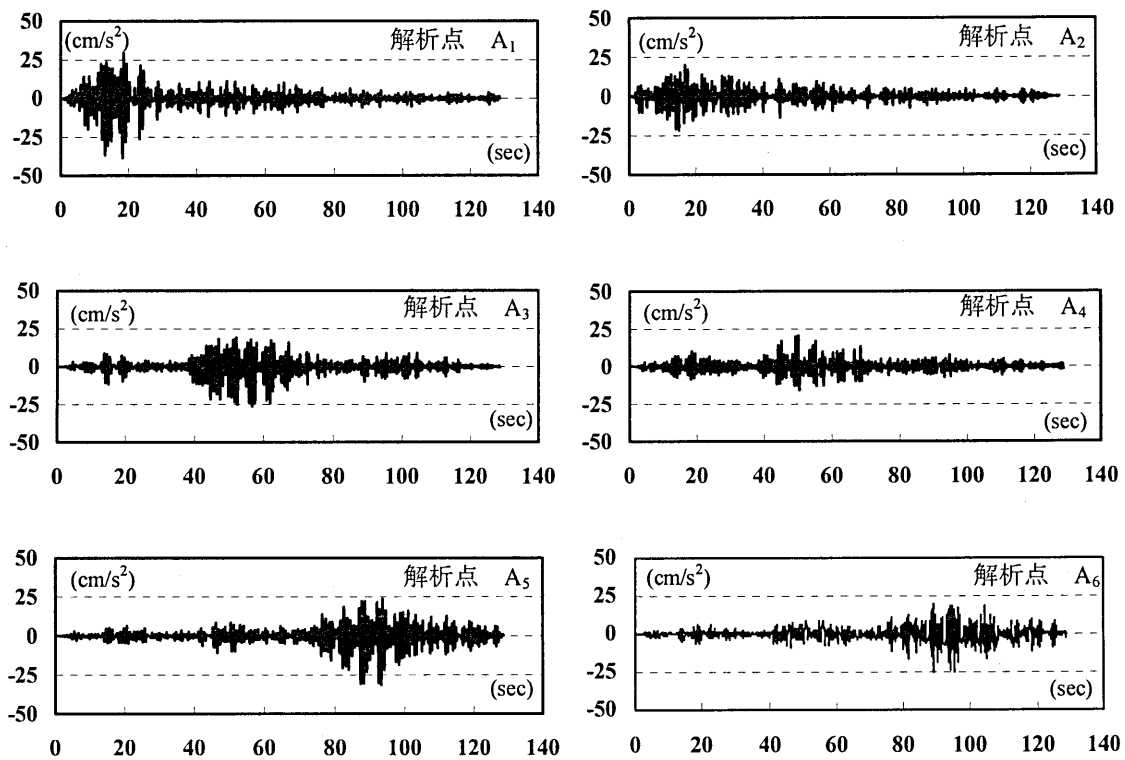


図-5.11 各解析点の振動加速度波形（体重 70 kgf、歩調 2.16 Hz、衝撃力比 1.6 での一人共振歩行）

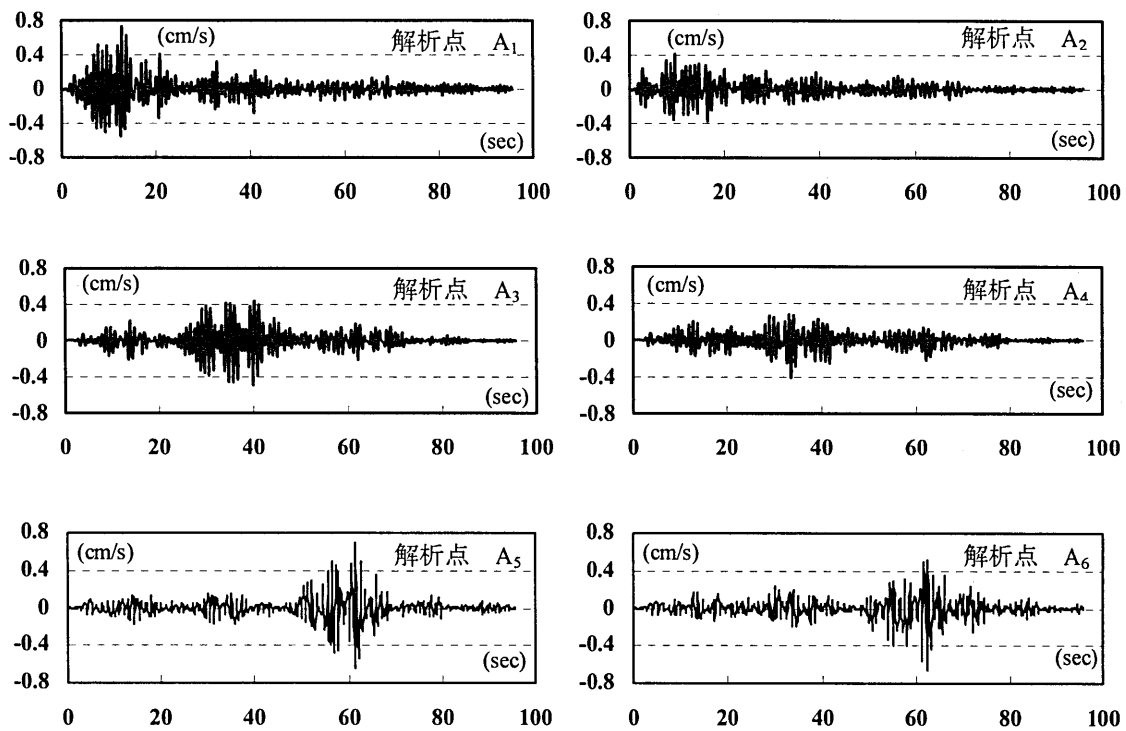


図-5.12 各解析点の振動速度波形（体重 70 kgf、歩調 2.16 Hz、衝撃力比 3.5 での一人共振走行）

図-5.12 は解析事例として、共振走行させた時の振動速度波形を示す。なお、解析条件は歩行者の体重を 70 kgf、歩調を 2.16 Hz、歩幅を 1.2 m とした。また、歩行者の走行時は歩行時よりも動的外力が増加するため歩行時より大きな値を採用し、一例として衝撃力比を 3.5 とした。そして、歩行レーンと解析点は共振歩行の場合と同じ解析条件で解析を行った。

図-5.12 より、振動波形の形状が図-5.10 の共振歩行させた場合と似た形状をしているが、衝撃力が増したことにより、振動速度は全体的に大きくなっている。また、図-5.10 では前述したように横方向の荷重分配が明確に小さくなっているが、共振走行させた場合の図-5.12 では明確に示されていない。特に解析点 A₅、A₆ においては最大値もあまり変わらない結果となった。

6. 振動使用性

3.1 の項に記述したように、日本で多く用いられている振動使用性の評価法は振動速度の最大値による評価法と実効値による評価法がある。実効値（二乗平均値）は変動データの平均値的な意味から、使用性評価が過小評価になる場合もあることから、本研究では振動速度の最大値で評価を行った。

図-6.1 には各解析点での最大振動速度を示している。その中でも A₁ の最大振動速度が一番大きく、0.346 cm/s となっている。この図より、この T 橋の振動使用性は「振動を感じない」という範囲の分類に含まれているため、振動使用性に問題はないと言える。なお、図中の■は共振走行させた時の振動使用性を示しているが、共振走行の場合でも「振動をわずかに感じる」の分類に含まれている程度である。

また、図-6.2 はカナダ・オンタリオ州の振動使用性評価を行った結果である。この結果からも解析で得られた最大振動加速度 0.384 m/s^2 は基準値を超えていないので、振動使用性について問題はないと考えられる。

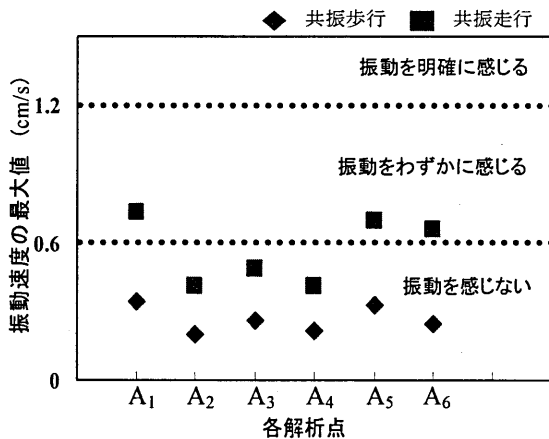


図-6.1 我が国での振動使用性評価

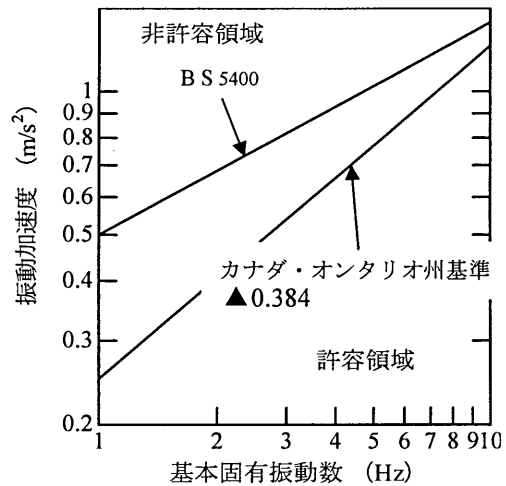


図-6.2 オンタリオ州の振動使用性評価

7. あとがき

本研究では、3次元動的応答解析に必要な事項や歩道橋に対する振動使用性の評価法について記述し、大規模木製歩道橋であるT橋の動的挙動と振動使用性について解析的に検討を加えた。しかし、本橋の実験データが不足しているため、本研究の結果を確認することは現時点で困難である。今後、T橋の振動実験を行って、実験値と解析値との整合性を検討し、精度の高い結果を得ると共に、木製歩道橋の剛性と振動使用性の評価基準との関係を検討していく所存である。

参考文献

- 1) 梶川康男：道路橋の振動とその橋梁の使用性に与える影響に関する研究（京都大学学位論文）、1979年。
- 2) 田中信治：歩道橋の振動特性と使用性設計手法に関する研究（名古屋大学学位論文）、1994年。
- 3) 小幡卓司：人間の振動感覚に基づいた歩道橋の振動使用性に関する研究（北海道大学学位論文）、1997年。
- 4) 米田昌弘：歩道橋上を群集が移動する場合の振動使用性評価、構造工学論文集、Vol.49A, pp.263-273, 2003年。
- 5) 山田基司・本田秀行・古村崇：アーチ木製歩道橋の構造特性と使用性、第2回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.59-64, 2003年。
- 6) 日下真彰・本田秀行：木歩道橋の振動使用性評価に対する3次元動的応答解析法の定式化、第5回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.37-77, 2006年。
- 7) 小堀為雄・吉田博：有限要素法による構造解析プログラム、丸善、1980年。
- 8) 土木学会：橋梁振動モニタリングのガイドライン、pp.121-125, pp.165-167, 2000年。
- 9) 小堀為雄・梶川康男・城戸隆良：振動感覚を考慮した歩道橋の設計、橋梁と基礎、Vol.8, No.12, pp.23-29, 1974年。
- 10) ユーロコード5：木構造物の設計 パート2：橋、ENV1995-2, pp.23-25, 1997年。