

種々の歩行外力モデルを用いた単純桁歩道橋の動的応答解析と 共振歩行試験結果に対する考察

Relationships between Numerical Dynamic Responses using Various Human Walking Force Models and Full Scale Measurements of Single Span Pedestrian Bridges

米田昌弘*

Masahiro YONEDA*

* 工博 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

Dynamic response is one of the most important themes in the design of pedestrian bridges. Investigations are conducted to study relationships between the numerical results using various human walking force models and full scale measurements of dynamic response caused by a walking human. It is ascertained that the computed velocity responses for 8 single span pedestrian bridges are larger than the measured value when a person is walking on the bridge at the same pace as the natural frequency of the bridge. When the human walking pace decreased by 2~3% from resonant frequency is considered in the numerical computation, the results are fairly in good agreements with the vibration test.

*Key Words : pedestrian bridge, dynamic response analysis, vibration serviceability
human walking motion*

1. まえがき

歩道橋の使用性評価を目的とした動的応答解析はすでに多数実施されており、多種多様化した現在の歩道橋では、動的応答解析によって使用性を評価する手法も一般化しつつある^{1)~3)}。しかしながら、動的応答解析を実施した場合、解析で算出した値は一般に共振歩行実験で得られた測定値よりも大きくなることが知られている⁴⁾。これは、従来の動的応答解析では、複雑な歩行外力を正負の周期的な歩行外力に置換しているため、歩行外力の周期性が実際よりも高く評価されているためと考えられる。

このようなことから、小幡・林川ら⁵⁾は、歩行外力の周期性を低減させるため、動的応答解析の歩行外力として半正弦波や半余弦波（正弦波や余弦波の正の部分だけを考慮した歩行外力）を用いることを提案している。これに対し、著者は、たとえ橋を誘起させることを目的とした共振歩行試験であっても、被験者が歩道橋を渡り始めてから渡り終わるまで同一の歩調では歩行できないと考え、歩調変化を考慮した動的応答解析を実施することを提案している⁶⁾。一方、わが国の実務設計ではほとんど採用されていないが、歩行外力

を半正弦波としてモデル化し、作用時間や作用間隔などを歩調によって変化させる Wheeler の方法⁷⁾も知られている。この方法は歩行外力の取り扱いがきめ細かいことから、最も一般性の高い歩行外力モデルであると考えられている。

以上に述べたように、最近では幾つもの歩行外力モデルが提案されていることから、実務技術者の利用の便を考えれば、早急に動的応答解析における歩行外力モデルについて総合的な議論を実施しておく必要があると思われる。そこで、本研究では、単純桁形式歩道橋に着目し、種々の歩行外力モデルに対して動的応答解析を実施するとともに、共振歩行試験結果との対比も行つて、動的応答解析における歩行外力モデルについて実務設計上の観点から考察を加えることとした。その結果、歩行外力として半正弦波や半余弦波を用いる動的応答解析は、従来の正弦波を仮定した解析結果を 0.5 倍した値とほぼ一致し、速度応答が最大となる歩行位置も実測結果と相違する場合があること、Wheeler の歩行外力や歩調を変化させた動的応答解析を実施すれば、半正弦波や半余弦波を用いた場合よりもさらに共振歩行試験結果に近い解析値が得られることなど、歩道橋の設計に携わる実務技術者にとって示

表－１ 対象とした歩道橋の構造諸元と単独共振歩行時の最大速度応答 (Bridge-A～Bridge-D)

名 称	支間長 ℓ	重 量 w	断面 2 次モーメント I	固有振動数 f_1	対数減衰率 δ	最 大 速度応答
Bridge-A	40.86 m	0.744 tf/m (7.29kN/m)	0.0210 m ⁴	2.27 Hz	0.0063	5.31 cm/s
Bridge-B	43.50 m	0.740 tf/m (7.25kN/m)	0.0209 m ⁴	2.00 Hz	0.0188	3.94 cm/s
Bridge-C	48.55 m	3.333 tf/m (32.66kN/m)	0.0799 m ⁴	1.48 Hz	0.1194	0.27 cm/s
Bridge-D	42.00 m	1.630 tf/m (15.97kN/m)	0.0789 m ⁴	2.81 Hz	0.0126	4.38 cm/s

表－２ 対象とした歩道橋の構造諸元と単独共振歩行時の最大速度応答 (Bridge-E～Bridge-H)

名 称	支間長 ℓ	重 量 w	断面 2 次モーメント I	固有振動数 f_1	対数減衰率 δ	最 大 速度応答
Bridge-E	23.30 m	0.215 tf/m (2.11kN/m)	0.0010 m ⁴	2.83 Hz	0.0739	15.40 cm/s
Bridge-F	29.30 m	0.254 tf/m (2.49kN/m)	0.0022 m ⁴	2.44 Hz	0.0939	13.38 cm/s
Bridge-G	30.40 m	0.279 tf/m (2.73kN/m)	0.0040 m ⁴	2.93 Hz	0.0790	16.85 cm/s
Bridge-H	31.80 m	0.276 tf/m (2.70kN/m)	0.0036 m ⁴	2.54 Hz	0.0788	7.58 cm/s

峻に富んだ知見が得られたことから、ここにその検討結果を報告する。

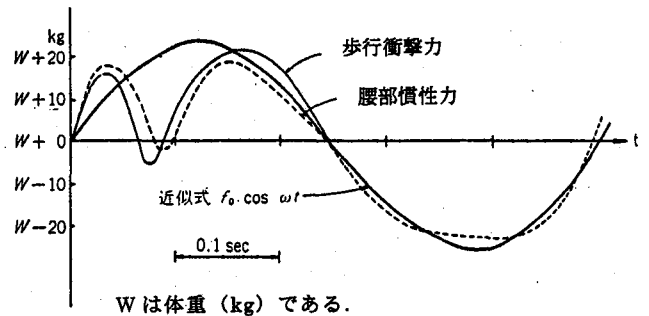
2. 対象とした歩道橋

本研究では、今までに報告されている共振歩行試験結果^{8)・9)}の中から、重量、固有振動数、対数減衰率および共振歩行時の応答振幅が公表されている、4つの単純桁形式歩道橋を選択した。検討対象の基本とした歩道橋 (Bridge-A～Bridge-D) の構造諸元と単独共振歩行時における最大速度応答を表－１に示す。これら4つの歩道橋については本研究で対象としたすべての歩行外力モデルを用いて解析したが、著者の提案する方法 (歩調変化を考慮する方法) についてはさらに表－２に示す Bridge-E～Bridge-H の歩道橋⁵⁾についても動的応答解析を実施することとした。ここに、本研究で単純桁形式の歩道橋に限定したのは、この形式では基本振動 (鉛直曲げ 1 次振動) のみが応答に寄与することから、歩行外力モデルの比較や対比が容易に行えると考えたからである。なお、表－１と表－２に示した固有振動数と対数減衰率は測定値であり、断面 2 次モーメントは、固有振動数の解析値 (部材長を約 0.25m に設定した平面モデルに対する固有振動解析結果) が測定値と一致するように調整した値である。

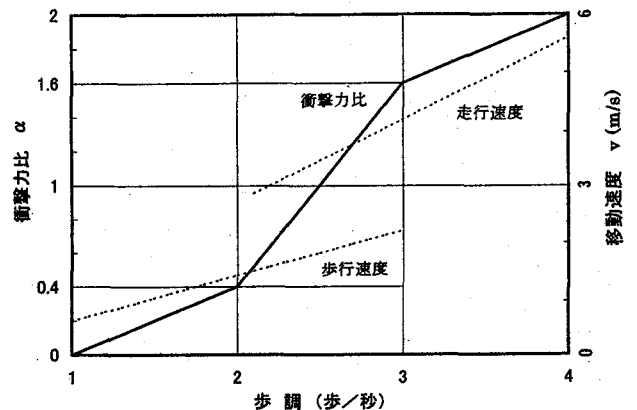
3. 歩行外力モデル

(1) 梶川の方法

梶川は歩行時における歩行衝撃力と腰部慣性力を測定し、図－１に示すような結果を得ている¹⁰⁾。その



図－１ 梶川が測定した歩行衝撃力と腰部慣性力



図－２ 衝撃力比と移動速度

結果、人体が床面に与える衝撃力は、人体を腰部への集中系として扱い、その慣性力が一応の近似を与えるものとしている。そして、歩行外力の最大値 f_0 は歩行者の体重 W に衝撃力比と呼ばれる係数 α を乗ずれば算定できるものとし、やや粗い近似ではあるが、歩行外力を

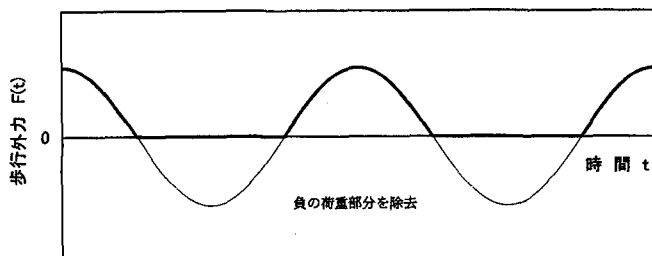


図-3 小幡・林川の歩行外力（歩行者の体重を無視）

$$F(t) = f_0 \cos \omega t = \alpha W \cos \omega t \quad (1)$$

または、

$$F(t) = f_0 \sin \omega t = \alpha W \sin \omega t \quad (2)$$

で表現した。ここに、 ω は歩調に対応する円振動数で、歩調によって衝撃力比 α と歩行速度 v は図-2 に示すように変化するものとしている¹¹⁾。この歩行外力モデルを、本研究では、必要に応じ、梶川の方法あるいは梶川の歩行外力と記すこととする。

(2) 小幡・林川の方法

上述の歩行外力モデル（梶川の方法）は、歩道橋の動的応答解析に際して一般的に用いられてきたが、一方で、梶川の方法で算出した解析値は共振歩行実験で得られた測定値よりも大きくなることが知られるようになってきた⁴⁾。これは、従来の動的応答解析では、複雑な歩行外力を正負の周期的な歩行外力に置換しているため、歩行外力の周期性が実際よりも高く評価されているためと考えられる。

このようなことから、小幡・林川ら⁵⁾は、歩行外力の周期性を低減させるため、動的応答解析の歩行外力として、半正弦波や半余弦波（正弦波や余弦波の正の部分だけを考慮した歩行外力）を用いることを提案している。参考までに、この場合の歩行外力モデルを図-3に示す。なお、小幡・林川らは、図-4に示すように、半正弦波や半余弦波に歩行者の体重をさらに加えた歩行外力モデルも提案しているが、動的応答特性に及ぼす歩行者の体重の影響については次の4章で具体的に検討する。

(3) Wheeler の方法

オーストラリアの Wheeler⁷⁾ は、歩行時の床面への衝撃について詳細に検討し、歩行外力を図-5に示すようにモデル化した。この場合、歩行外力は半正弦波として

$$F(t) = f_0 \sin(\pi/CT) \quad (3)$$

で与えられ、衝撃作用時間 CT や衝撃作用間隔（歩幅／歩行速度）は図-6と図-7を用いて算出することになる。

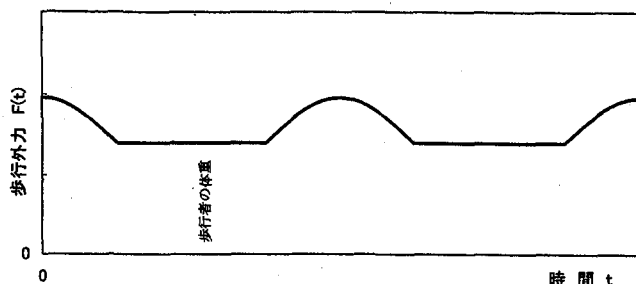


図-4 小幡・林川の歩行外力（歩行者の体重を考慮）

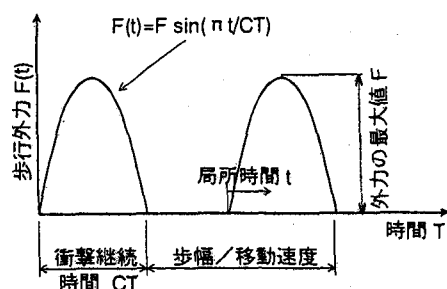


図-5 Wheeler の歩行外力

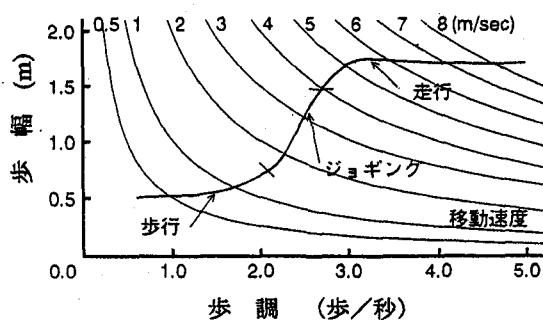


図-6 Wheeler モデルにおける移動速度

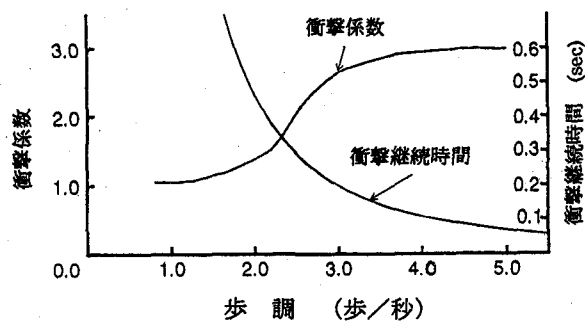


図-7 Wheeler モデルにおける衝撃係数と衝撃継続時間

表-3 Wheelerモデルの共振歩行特性

橋 名	共振歩調	歩 幅	接触時間	歩行速度	最大歩行外力 ^{注)}
Bridge-A	2.27 歩/秒	0.92 m	0.36 sec	2.04 m/s	1.64W kgf
Bridge-B	2.00 歩/秒	0.69 m	0.46 sec	1.33 m/s	1.38W kgf
Bridge-C	1.48 歩/秒	0.54 m	0.82 sec	0.77 m/s	1.12W kgf
Bridge-D	2.81 歩/秒	1.62 m	0.23 sec	4.48 m/s	2.49W kgf

注) W は歩行者の体重を表す。

本研究で対象とした 4 つの歩道橋 (Bridge-A ~ Bridge-D) に対して求めた, Wheeler モデルの共振歩行特性を表-3 にまとめる。Wheeler モデルの接触時間から算出した歩行外力の周波数は, Bridge-A (固有振動数は 2.27Hz) が 2.78Hz, Bridge-B (固有振動数は 2.00Hz) が 2.17Hz, Bridge-C (固有振動数は 1.48Hz) が 1.22Hz, Bridge-D (固有振動数は 2.81Hz) が 4.35Hz となる。したがって, Wheeler の方法では, 共振歩行時であっても歩行外力の周波数は固有振動数と一致せず, 梶川の方法と比べ, 歩行者による応答は一般に小さく算定されることになる。

(4) 米田の方法

著者は, 共振歩行試験のように被験者が意図的に共振歩行を試みても実際の歩調は微妙に変化すると考え, Bridge-B に対して 1 周期ごとの歩調を変化させた動的応答解析 (歩行外力モデルは正負の両方を考える梶川の方法) を実施した⁶⁾。その結果, Bridge-B (固有振動数は 2.00Hz) では, 1 周期ごとの歩調を 1.915 歩/秒 (共振歩調の 95.75%), 2 歩/秒 (共振歩調) と変化させた場合に実測値ときわめて近い応答波形が得られることを報告している。そこで, 本研究では, その他の歩道橋モデルも対象として歩調変化を考慮した動的応答解析を実施し, (1)~(3)の歩行外力モデルを用いた解析結果と対比することとした。

4. 動的応答解析結果と考察

本研究では, 有限要素法に基づく運動方程式を Newmark の β 法 ($\beta = 1/6$) を用いて数値積分し, 歩行者による動的応答を算出するものとした。ただし, 解析にあたっては, 対象とした単純桁歩道橋では 2 次以上の振動数が 1 次振動数よりも非常に高いことから,

1 次振動のみを考慮することとした。また, 積分時間刻み Δt は $\Delta t = 0.001$ 秒に設定し, 歩行者 (体重 70kgf=686kN) が進入するまで, 歩道橋は静止した状態にあるものと仮定した。

(1) 梶川の方法

時刻歴の実測波形が報告されている Bridge-A を対象として, 梶川の歩行外力 (正負の両方を考える従来の歩行外力) を用いた動的応答解析を実施した。ただし, 構造減衰については, 表-1 に示した実測値 ($\delta = 0.0063$) を使用した。また, 一人の歩行者 (体重 70kgf=686kN) が共振歩調である 2.27 歩/秒で歩行するものとし, 歩行速度 v と衝撃力比 α は図-2 においてこの歩調に対応する $v = 1.62\text{m/s}$, $\alpha = 0.723$ を採用するものとした。共振歩行時の実測値と計算値をそれぞれ図-8, 図-9 に示す。図-8, 図-9 を比較すればわかるように, 共振歩行時に実測された最大速度応答は 5.31cm/s であるのに対し, 解析値は 22.04cm/s と非常に大きくなっている。また, Bridge-A の実測波形で速度応答が最大となる歩行位置は図-8 からわかるように径間の中央点付近を通過した場合であるのに対し, 数値計算では図-9 からわかるように歩行を開始してから約 24 秒後の位置 (約 0.95 l の位置) で生じる結果となっている。

以上は Bridge-A に限定した考察であることから, その他の橋梁 (Bridge-B ~ Bridge-D) についても同様の解析 (梶川の歩行外力を用いた解析) を実施し, 共振歩行試験結果と対比することとした。その結果を表-4 に示す。ただし, 解析にあたって必要となる歩行速度 v と衝撃力比 α は, 図-2 を用いて, Bridge-B では $v = 1.40\text{m/s}$ と $\alpha = 0.400$, Bridge-C では $v = 0.98\text{m/s}$ と $\alpha = 0.192$, Bridge-D では $v = 2.05\text{m/s}$ と $\alpha = 1.372$ をそれぞれ用いている。この表から, 従来

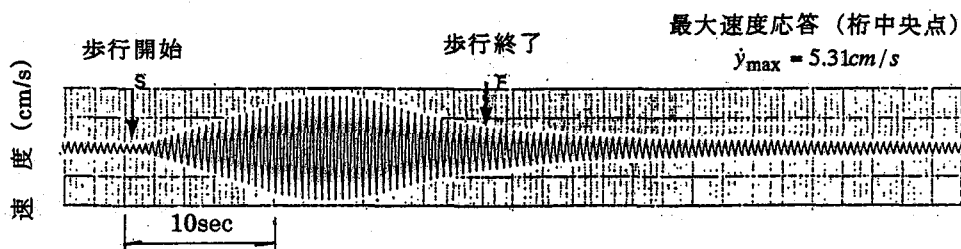


図-8 Bridge-A の単独共振歩行試験結果 (歩調; 2.27 歩/秒)

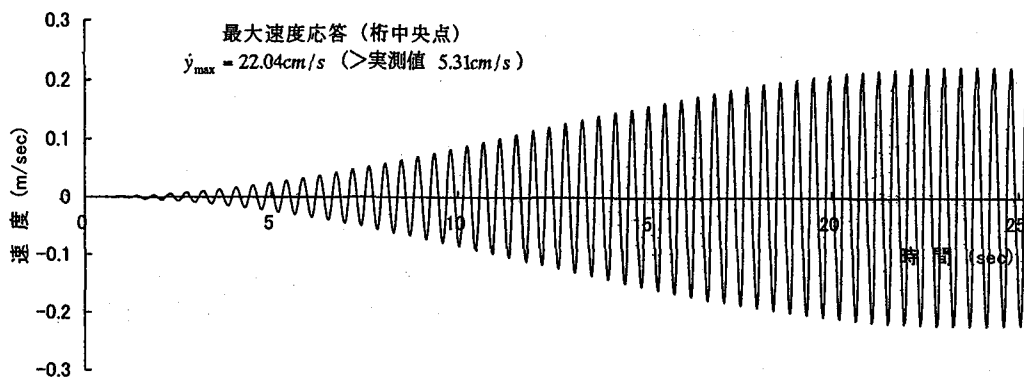


図-9 正弦波外力を用いた Bridge-A の動的応答解析結果 (歩調; 2.27 歩/秒)

表-4 梶川の歩行外力を用いた動的応答解析結果と実測値の比較

橋 名	最大速度応答		速度応答の比率 (解析値/実測値)
	解析値	実測値	
Bridge-A	22.04 cm/s	5.31 cm/s	4.15
Bridge-B	10.43 cm/s	3.94 cm/s	2.65
Bridge-C	0.440 cm/s	0.27 cm/s	1.63
Bridge-D	13.18 cm/s	4.38 cm/s	3.01

の歩行外力を用いた動的応答解析は、実測値と比べ、1.6 倍～4.2 倍程度も大きくなっていることがわかる。

(2) 小幡・林川の方法

まず、Bridge-A について、小幡・林川の歩行外力（正弦波の正部分だけを考慮した歩行外力）を用いた動的応答解析を実施した。その結果を図-10に示す。ただし、小幡・林川の歩行外力を用いた場合にも、歩行速度 v と衝撃力比 α は、(1)の計算と同じく共振歩調に対応する $v=1.62m/s$ 、 $\alpha=0.723$ を採用するものとした。図-10から、小幡・林川の歩行外力を用いた場合、最大速度応答は梶川の歩行外力（正負の歩行外力）を用いた場合と比べ明らかに低減していることがわかる。しかしながら、その最大値は 11.04cm/s と実測値の 5.31cm/s と比べ、なお倍程度も大きな結果を呈している。また、Bridge-A の実測波形で速度応答が最大となる歩行位置は径間の中央点付近を通過した場合であったのに対し、数値計算では図-10からわかるように歩行を開始してから約 23 秒後の位置（約 0.9 l 点の位置）で生じ、両者で明らかに相違する結果となっている。そこで、Bridge-B、Bridge-C、Bridge-D についても、同様に小幡・林川の歩行外力を用いた動的応答解析を実施することとした。その結果を図-11～図-13に示す。これらの図から、比較的大きな構造減衰（ $\delta=0.1194$ ）を有する Bridge-C では、最大速度応答の解析値（0.22cm/s）と測定値（0.27cm/s）が比較的良好く一致しているものの、Bridge-B と Bridge-D では、最大速度応答の解析値が

測定値よりもそれぞれ 1.3 倍、1.5 倍程度大きく、かつ、最大速度応答も径間の中央点付近で生じていないことがわかる。

以上の計算結果と考察より、小幡・林川の歩行外力を用いた動的応答解析は、正負の両方を考える梶川の歩行外力を用いた場合と比べ、実測により近い結果は得られるが、今回対象とした歩道橋では最大速度応答の解析値は実測値よりも最大で 1.5 倍程度大きく、速度応答が最大となる歩行位置も実測結果と相違する場合があると言える。

なお、表-5 は、小幡・林川の歩行外力（半正弦波）と梶川の歩行外力（正弦波）をそれぞれ用いた場合に得られた、Bridge-A～Bridge-D の最大速度応答値を比較したものである。この表から、当然予想されるように、小幡・林川の歩行外力を用いた最大速度応答は、梶川の歩行外力を用いた場合と比べ、約半分の大きさとなっている。それゆえ、歩道橋の使用性を検討するにあたり、最近ではしばしば実施されている半正弦波を用いた動的応答解析は、従来の正弦波を仮定した解析結果に 0.5 を乗ずれば算出できると言える。また、表-6 は小幡・林川の歩行外力において、歩行者の体重を無視した場合と考慮した場合の結果を比較したものである。この表より、両者の最大速度応答はほぼ等しく、それゆえ、半正弦波モデルにおいても歩行者の体重の影響はきわめて小さいと言える。

(3) Wheeler の方法

Bridge-A～Bridge-D のそれぞれ対して、Wheeler

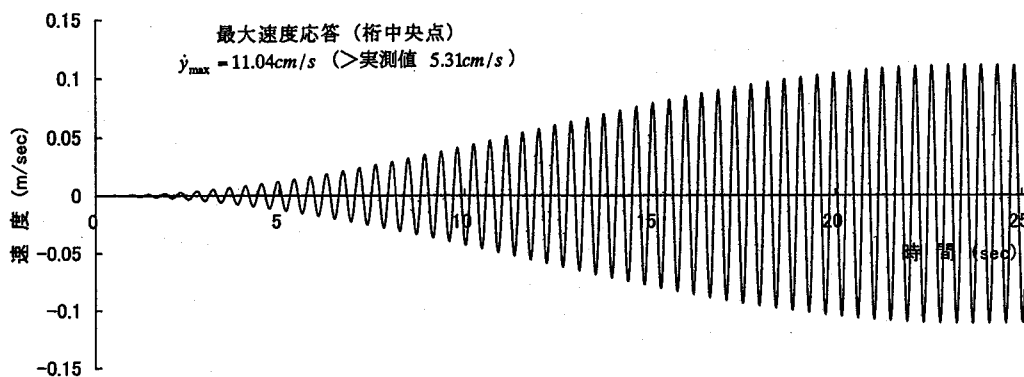


図-10 半正弦波外力を用いた Bridge-A の動的応答解析結果 (歩調; 2.27 歩/秒)

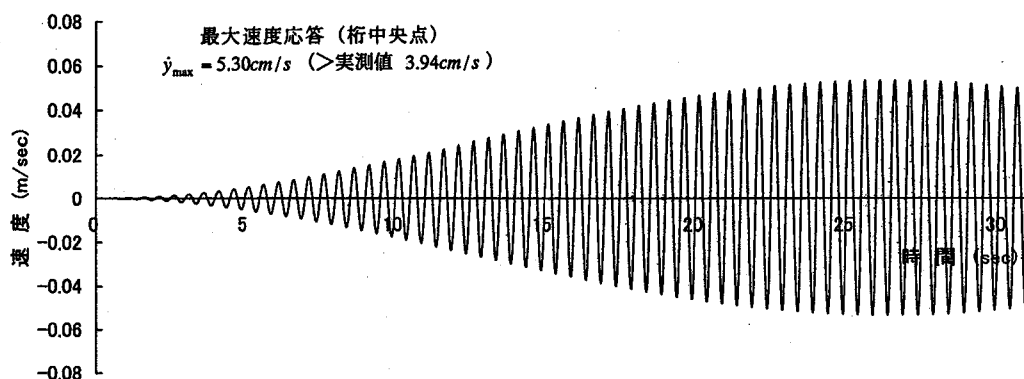


図-11 半正弦波外力を用いた Bridge-B の動的応答解析結果 (歩調; 2.00 歩/秒)

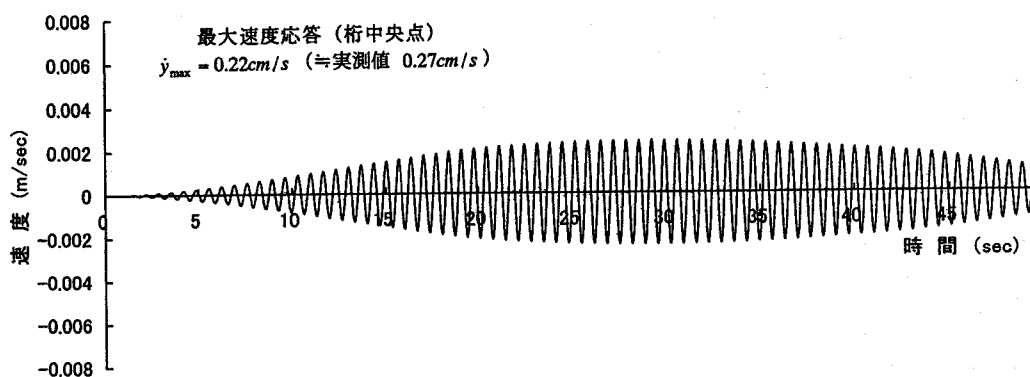


図-12 半正弦波外力を用いた Bridge-C の動的応答解析結果 (歩調; 1.48 歩/秒)

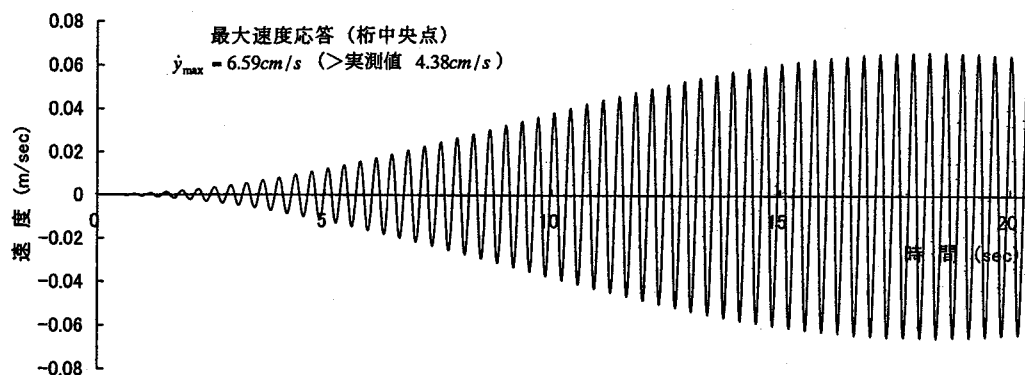


図-13 半正弦波外力を用いた Bridge-D の動的応答解析結果 (歩調; 2.81 歩/秒)

表－５ 半正弦波と正弦波を用いた動的応答解析結果（共振歩調時）

橋 名	実測された 最大速度応答	歩行外力モデル		速度応答の比率 (半正弦波/正弦波)
		半正弦波 (小幡・林川)	正弦波 (梶川)	
Bridge-A	5.31 cm/s	11.04 cm/s	22.04 cm/s	0.501
Bridge-B	3.94 cm/s	5.296 cm/s	10.43 cm/s	0.508
Bridge-C	0.27 cm/s	0.224 cm/s	0.440 cm/s	0.509
Bridge-D	4.38 cm/s	6.594 cm/s	13.18 cm/s	0.500

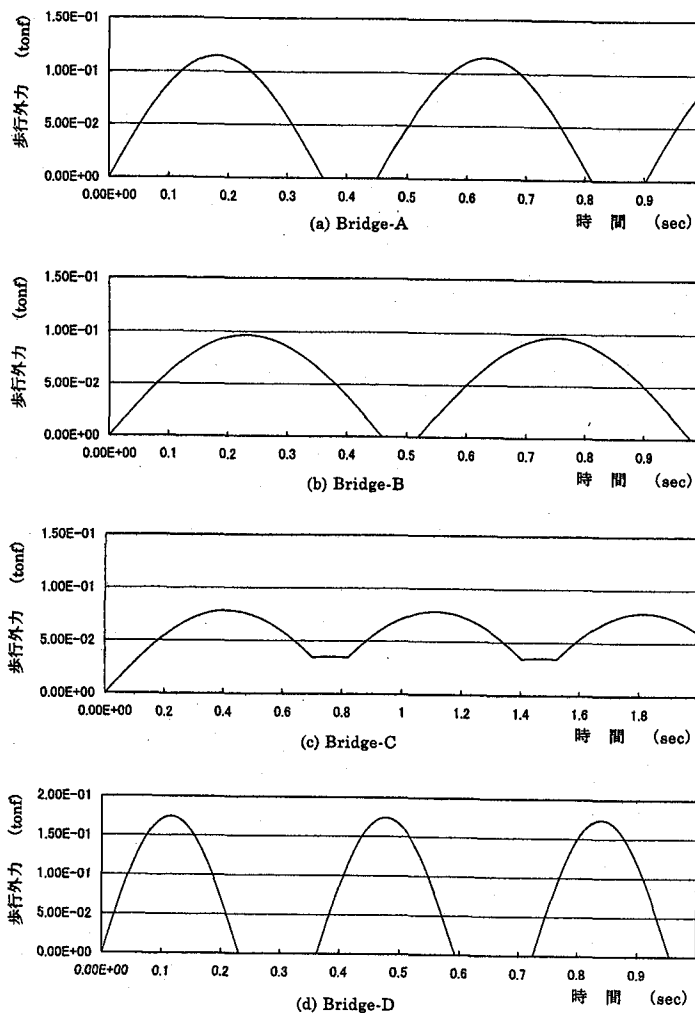
表－７ Wheeler の歩行外力を用いた動的応答解析結果
と測定値の比較

表－６ 半正弦波を用いた動的応答解析結果の比較

橋 名	半正弦波モデル	
	体重を無視	体重を考慮
Bridge-A	11.04 cm/s	11.15 cm/s
Bridge-B	5.296 cm/s	5.326 cm/s
Bridge-C	0.224 cm/s	0.236 cm/s
Bridge-D	6.594 cm/s	6.595 cm/s

橋 名	最大速度応答	
	Wheeler	測定値
Bridge-A	9.952 cm/s	5.31 cm/s
Bridge-B	3.206 cm/s	3.94 cm/s
Bridge-C	0.352 cm/s	0.27 cm/s
Bridge-D	5.774 cm/s	5.69 cm/s ^{注)}

注) 走行時の実測データ



図－１４ 解析で用いた Wheeler の歩行外力

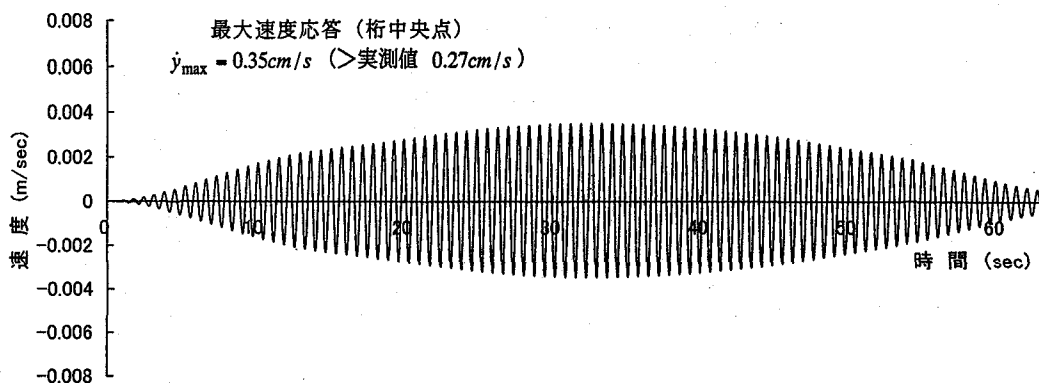


図-15 Wheelerモデルを用いた Bridge-C の動的応答解析結果

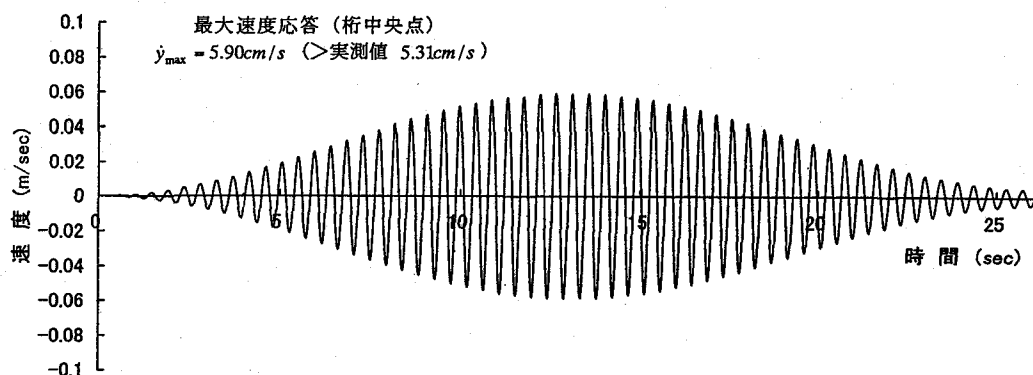


図-16 歩調変化を用いた Bridge-A の動的応答解析結果 (2.16 歩/秒+2.21 歩/秒+2.27 歩/秒)

表-8 共振歩調を変化させた場合の解析値と測定値の比較

橋 名	最大速度応答	
	解析値	測定値
Bridge-A	5.90 cm/s	5.31 cm/s
Bridge-B	2.71 cm/s	3.94 cm/s
Bridge-C	0.25 cm/s	0.27 cm/s
Bridge-D	3.75 cm/s	4.38 cm/s

表-9 共振歩調を変化させた場合と歩調を一定 (共振歩調の 97.5%) とした場合の比較

橋 名	歩調変化 (3つの歩調)	歩調一定 (平均歩調)
Bridge-A	5.90 cm/s	6.14 cm/s
Bridge-B	2.71 cm/s	2.82 cm/s
Bridge-C	0.25 cm/s	0.25 cm/s
Bridge-D	3.75 cm/s	3.92 cm/s

の歩行外力を用いた動的応答解析を実施した。それぞれの歩道橋における歩行外力を図-14に、解析と共振歩行試験で得られた速度応答の最大値を比較して表-7に示す。ただし、固有振動数が 2.81Hz の Bridge-D では、Wheeler の共振歩調がジョギング状態に対応することから、実測値は走行時に得られた結果を記している。表-7からわかるように、Bridge-A では解析値が実測値よりも 90% 程度大きくなっているものの、Bridge-B~Bridge-D については両者の結果は比較的良く対応している。これは、正負の歩行外力を考える梶川の方法と比べ、Wheeler の方法では、表-3からわかるように、共振歩行時であっても歩行外力の周波数は固有振動数と完全に一致していないため

と考えられる。なお、図-15は Wheeler の歩行外力を用いた Bridge-C の速度応答波形であるが、この図から Bridge-C では歩行者が中央点付近を通過する際に最大値を呈していることがわかる。

(4) 米田の方法

上述したように、Wheeler の方法を用いた動的応答解析結果は、Bridge-A を除き、実測結果とも比較的良く対応していた。しかしながら、その反面、Wheeler の方法は歩行外力の決定がかなり複雑で、通常の設計に適用する際には煩雑な事前作業 (歩行外力の設定作業) が必要となる。そこで、ここでは、著者が提案している 1 周期ごとの歩調を変化させた動的応

表-10 共振歩調を変化させた動的応答解析結果と測定値の比較 (Bridge-A~Bridge-D)

橋 名	最大速度応答			
	測定値	解析値		
		97.0%の歩調	97.5%の歩調	98.0%の歩調
Bridge-A	5.31 cm/s	4.22 cm/s	6.14 cm/s	8.19 cm/s
Bridge-B	3.94 cm/s	2.01 cm/s	2.82 cm/s	3.63 cm/s
Bridge-C	0.27 cm/s	0.22 cm/s	0.25 cm/s	0.30 cm/s
Bridge-D	4.38 cm/s	2.93 cm/s	3.92 cm/s	4.65 cm/s

表-11 共振歩調を変化させた動的応答解析結果と測定値の比較 (Bridge-E~Bridge-H)

橋 名	最大速度応答			
	測定値	解析値		
		97.0%の歩調	97.5%の歩調	98.0%の歩調
Bridge-E	15.40 cm/s	38.09 cm/s	41.82 cm/s	45.64 cm/s
Bridge-F	13.38 cm/s	17.65 cm/s	19.84 cm/s	22.11 cm/s
Bridge-G	16.85 cm/s	21.58 cm/s	26.63 cm/s	29.35 cm/s
Bridge-H	7.58 cm/s	15.60 cm/s	20.19 cm/s	22.78 cm/s

答解析（歩行外力モデルは正負の両方を考える梶川の方法）を実施し、共振歩行試験結果と対比することとした。

ところで、文献 6)の解析では 2 つの歩調を変化させていたが、本研究では歩調変化の複雑さを考え、3 つの歩調変化を考慮した動的応答解析を実施することとした。ここに、3 つの歩調は、先の研究成果を踏まえ、Bridge-A~Bridge-D のそれぞれについて、共振歩調の 95%、共振歩調の 97.5%、共振歩調（たとえば、Bridge-A では、2.16 歩/秒、2.21 歩/秒、2.27 歩/秒）に設定し、この順番で 1 周期ごとに变化させるものとした。また、歩行速度 v 、衝撃力比 α は、共振歩調の 97.5% に対応する値（たとえば、Bridge-A では、 $v=1.57\text{m/s}$ 、 $\alpha=0.656$ ）を採用した。解析で得られた時系列波形の一例を図-16 に、解析値と測定値の最大速度応答の比較結果を表-8 にまとめる。これらの結果から、歩調を変化させた解析を実施すれば、速度応答の最大値も実測値と同じく径間中央部付近を歩行する場合に生じること、また、小幡・林川の方法や Wheeler の方法と比べ、さらに実測値に近い結果が得られていることがわかる。

一方、単純桁歩道橋の振動使用性を検討する場合、実務設計では動的応答解析よりも解析解を用いる方法が一般に採用されると考えられる。そこで、ここでは歩調を共振歩調から若干低減させた歩調一定の解析も実施し、実務設計における解析データを提供することとした。表-9 に、3 つの歩調変化（共振歩調の 95%、

共振歩調の 97.5%、共振歩調）を考慮した場合と歩調を一定（共振歩調の 97.5%）とした場合の解析結果を比較する。この表から、共振歩調を若干低減させた歩調一定とした解析は、歩調を変化させた動的応答解析結果と比較的よく対応していると言える。そこで、Bridge-A~Bridge-D および Bridge-E~Bridge-H に対して、歩調をそれぞれ共振歩調の 97.0%、共振歩調の 97.5%、共振歩調の 98.0% とした解析を実施し、実測結果と対比することとした。それぞれの結果を表-10、表-11 に示す。これらの表より、歩調一定とした解析を実施する場合には、共振歩調を 2.5%~3.0% 程度低減させれば、実測結果をほぼ再現できることがわかる。実際の歩調はより複雑に変化すると思われるが、以上の検討結果より、共振歩行試験で得られる速度応答特性はここに示した単純な歩調変化を考慮した動的応答解析を実施しても概ね算出できると考えられる。

ただし、Bridge-E~Bridge-H については共振歩調を 3% 低減させても解析値は測定値よりやや大きい傾向を示している。この要因として、Bridge-E~Bridge-H の歩道橋では支間長が比較的短く（相対的に固有振動数が高く）、正負の両方を考える梶川の歩行外力モデルでは実際の歩行衝撃力を十分に表現できていないことが考えられる。それゆえ、歩行外力モデルに関しては、今後とも継続的な研究を実施する必要があると思われる。

5. まとめ

本論文は、単純桁形式歩道橋に着目し、種々の歩行外力モデルに対して動的応答解析を実施するとともに、共振歩行試験結果との対比を行って動的応答解析における歩行外力モデルについて実務設計上の観点から考察を加えたものである。得られた主要な結果を以下にまとめる。

(1) 小幡・林川の歩行外力（半正弦波）を用いた動的応答解析は、梶川の歩行外力（正弦波）を用いた場合と比べ、より実測に近い結果は得られるが、今回対象とした歩道橋では最大速度応答の解析値は実測値よりも最大で 1.5 倍程度大きく、速度応答が最大となる歩行位置も実測結果と相違する場合がある。

(2) 小幡・林川の歩行外力（半正弦波）を用いた場合、最大速度応答は、梶川の歩行外力（正弦波）を用いた場合と比べ、約半分の大きさとなる。それゆえ、歩道橋の使用性を検討するにあたり、最近ではしばしば実施されている半正弦波を用いた動的応答解析は、従来の正弦波を仮定した解析結果に 0.5 を乗ずれば算出できる。

(3) Wheeler の歩行外力を用いた場合、Bridge-A では解析値が実測値よりも 90% 程度大きくなっているものの、Bridge-B～Bridge-D については両者の結果は比較的良く対応していた。これは、正負の歩行外力を考える梶川の方法と比べ、Wheeler の方法では、共振歩行時であっても歩行外力の周波数は固有振動数と完全に一致していないためと考えられる。

(4) Bridge-A～Bridge-D を対象として、1 周期ごとの歩調を共振歩調の 95%、共振歩調の 97.5%、共振歩調と変化させた動的応答解析を実施した。その結果、いずれの歩道橋においても、速度応答の最大値は実測値と同じく径間中央部付近を歩行する場合に生じ、また、小幡・林川の方法や Wheeler の方法と比べ、さらに実測値に近い結果が得られることがわかった。

(5) Bridge-A～Bridge-D および Bridge-E～Bridge-H に対して、歩調をそれぞれ共振歩調の 97.0%、共振歩調の 97.5%、共振歩調の 98.0% とした解析を実施して実測結果と対比した。その結果、歩調一定とした解析を実施する場合には、共振歩調を 2.5%～3.0% 程度低減させれば、実測結果をほぼ再現できることがわかった。

本研究では単純桁形式歩道橋に限定したが、今後は歩調範囲内に多数の振動モードが存在する吊床版橋などの吊形式歩道橋に対しても、歩調変化を考慮した動的応答解析を実施する必要があると考えている。しかしながら、本文で提示した、単純桁形式歩道橋に対す

る動的応答解析上の知見は、歩道橋の使用性を検討する上できわめて有用な情報を与えていると思われる。本論文が、歩道橋の設計に携わる実務技術者にとって示唆に富んだ有益な技術資料になることを心から願う次第である。

参考文献

- 1) 梶川康男, 中平進夫, 薄井王尚: 斜め吊材を有する自旋式吊橋形式歩道橋の振動とその使用性, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.703～712, 1994 年 3 月.
- 2) 梶川康男, 深田幸史, 吉川裕晃: 単径間 PC 吊床版歩道橋の振動特性, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.811～817, 1999 年 3 月.
- 3) 米田昌弘, 柳沢則文, 町田文孝, 鴨野一夫: S 字形曲線トラス歩道橋（あやとりはし）の振動とその使用性, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.801～810, 1993 年 3 月.
- 4) 鈴木森晶, 加藤雅史: 歩道橋の減衰特性と歩行時振動振幅の検討, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.811～818, 1993 年 3 月.
- 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, 第 537 号/I-35, pp.217～231, 1996 年 4 月.
- 6) 米田昌弘: 単純桁歩道橋の共振歩行時における動的応答特性に関する 2, 3 の考察, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.623～632, 1999 年 3 月.
- 7) Wheeler, J.E.: Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST9, pp.2045～2065, 1982.
- 8) 田中信治, 加藤雅史, 鈴木森晶: 支間 40m を超える歩道橋の実振動特性, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.773～780, 1992 年 3 月.
- 9) 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 10 月.
- 10) 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, pp.23～29, 1974 年 12 月.
- 11) 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研究, 土木学会論文集, 第 325 号, pp.23～33, 1982 年 9 月.

(1999 年 9 月 17 日受付)