

# 歩道橋の振動使用性とその照査方法

梶川 康男\*

## 1. はじめに

普通に歩いていてびっくりするほど、よく揺れる歩道橋に出会うことがある。また、立ち止まって、他人が歩くときの揺れ方を観察しようとする、ほとんど揺れないこともある。これは実際によく起きることで、誰が歩いても揺れるような歩道橋はおそらく不安定であり、危険であろう。歩道橋は、歩行者の歩調と共振して大きく揺れることがあることは、すでに30数年前から指摘されている。

最近、河川や鉄道、高速道路などによって分断されている地域のコミュニケーションを図るための、歩行者専用の歩道橋や、シンボリック要素を含んだ遊歩道的な歩道橋がさかんに建設されている。このような歩道橋は、桁下空間の条件を満足させたりするため、従来の歩道橋よりは幅員が広く、しかも長スパンの橋が多くなってきている。また、構造的に複雑な形式や新しい形式ならびに高強度な材料を用いた橋が増えており、一般的に軽量なものが多くなってきており、振動問題が再び大きく取り上げられるようになってきた。

## 2. 立体横断施設としての歩道橋のたわみの照査

このような歩道橋を設計する場合、道路橋に比べて設計活荷重が小さいために、同じスパンをもつ橋であれば桁高は低く、スレンダーな剛性の小さい、振動しやすい構造となる。そこで、歩道橋の剛性に関する設計条項は現行の立体横断施設技術基準（1979年制定）<sup>1)</sup>でつぎのように規定されている。

2-12 たわみ：群集活荷重  $3.43 \text{ kN/m}^2$  ( $350 \text{ kgf/m}^2$ ) による主桁の最大たわみは、主桁の支間長の  $1/600$  以下。ただし、利用者への影響についてとくに配慮を加えた場合は、主桁の支間長の  $1/400$  以下まで緩和できる。

2-13 振動：活荷重による主桁の振動は、利用者に不快感を与えないものでなければならない。



\* Yasuo KAJIKAWA

金沢大学大学院 自然科学研究科  
教授

そして、歩道橋の標準設計の解説書と基準の解説に、「主桁のたわみ振動の固有振動数は平均歩調  $2 \text{ Hz}$  前後 ( $1.5 \sim 2.3 \text{ Hz}$ ) にならないように」と指示されている。

一方、欧米諸国でも長スパンの歩道橋が多く建設され、思わぬ大きな振動が生じて問題となっており、限界状態設計法や性能設計の関係から、具体的な振動使用性に対する照査方法が示されるようになってきた。

## 3. 振動使用性に対するいろいろな照査方法

歩道橋の場合、立体横断施設技術基準<sup>2)</sup>において、主桁のたわみ振動の固有振動数が  $2 \text{ Hz}$  前後にならないように共振域を避けた場合にも、たわみ振動がなお歩行者に不快感を与えることのないようにする必要があるとして、つぎのようなことが解説されている。すなわち、設計活荷重 ( $3.43 \text{ kN/m}^2$ ,  $1 \text{ m}^2$  あたりに5人程度) の  $1/5$ , したがって  $1 \text{ m}^2$  あたりに1人程度の通常の使用状況において、これらの歩行者が  $2 \text{ Hz}$  の強制周期力を橋に与えた場合の最大加速度が  $0.1 \text{ g}$  ( $\text{g}$  は重力加速度) 以下になるように設計することが望ましいとされている。

このように、わが国では、図-1に示すように  $1.6 \text{ 歩/秒}$  から  $2.4 \text{ 歩/秒}$  の領域に一般歩行者の実測歩調のほとんどがあることに配慮して、歩道橋の設計はその振動数範囲にかなり左右されてきた感があるが、ジョギングをする人など周波数のより高い外力を受ける場合があり、それらとの共振によって大きく揺れることも考えられる。したがって、利用者に不安感や不快感を与えない程度の振動に確実に抑えるためには、周期外力の振動数を限定することなく、予測される動的応答の最大値を歩道橋の振動特性にも配慮した適切な方法で求め、それに対する照査を行うことが必要となる。

近年では、わが国のみならず、世界各国でもスレンダー

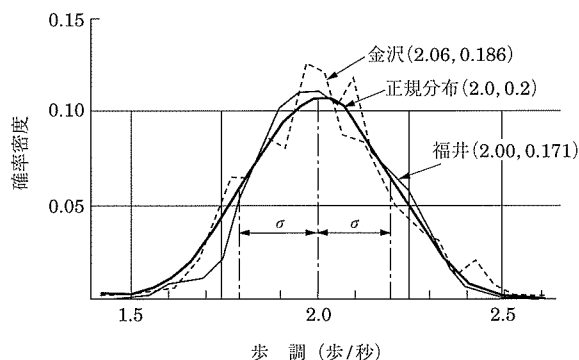


図-1 歩行者の歩調の実測結果 (括弧内は平均と標準偏差、歩/秒)

な歩道橋が数多く建設され、それらのために振動使用性の照査方法が規定されるようになってきており、これらの照査方法における動的応答量（振動量）の計算方法、および、最大応答値に対する制限値としての振動じょ限度<sup>\*1</sup>の設定などは、次のようなものに集約されつつある。

3.1 動的応答（振動）量の計算方法

基本的には、歩行者の移動周期外力を受ける構造物の動的応答計算をすればよく、計算法そのものは特別難しいわけではないが、与えられている照査用数値の根拠が簡単には理解できないものや、特殊なパラメータを決定する必要があるものなどもある。なお、ISO18649<sup>2)</sup>のAnnexCにも歩行外力のモデル化のいくつかの方法が示されている。

(1) BS 5400 や fib のガイドラインに採用されている計算方法

イギリスの Transport Road Research Laboratory（以下、TRRL と略記）の Blanchard ら<sup>3)</sup>は、歩道橋の固有振動数  $f$  (Hz) と同じ歩調で、歩幅を 0.9 m として、歩行者の歩行外力を  $F = 180 \sin(2\pi ft)$  (N)、移動速度を  $V = 0.9 f$  (m/s) なる式で与え、このような外力を歩道橋に作用させたときの鉛直外力の最大加速度  $a$  を求めることを提案しており、照査対象の橋梁の減衰に関するデータがないときには、対数減衰率  $\delta$ （減衰定数  $h$ ）として鋼構造の場合は 0.03（0.5%）、合成構造の場合は 0.04（0.6%）、コンクリート構造の場合は 0.05（0.8%）を用いることを薦めている。

さらに、単純桁や対称な 2、3 径間連続桁などの桁橋については、 $a = 4\pi^2 f^2 y_s K \Psi$  (m/s<sup>2</sup>) なる式で表される簡易計算式により、最大加速度  $a$  を求めてもよいことが提案されている。ここに、 $f$  (Hz) は歩道橋の基本振動数、 $y_s$  (m)

は歩行者の静的荷重 700 N による最大たわみである。ここに、 $K$  は構造形式に関する表 - 1 に示す形状係数を表し、 $\Psi$  は支間長と減衰の値をパラメータとする図 - 2 に示す動的応答係数を表している。このような Blanchard らによる最大加速度の計算方法が、BS 5400 の 7.1.5 項<sup>4)</sup>に採用され、また、少し形は異なるが実質的には同じ内容で、fib のガイドライン<sup>5)</sup>に採用されている。

(2) Ontario Code に採用されている計算方法

カナダの Ontario Code 2.6.2 項では、BS 5400 に採用された Blanchard らによる動的応答計算法がほぼそのまま採用されており、歩行加振力の式には同じものが適用されているが、歩調と歩幅に関しては、1 次曲げ振動数とジョギング者に対する上限値である 4 Hz のうち小さい方を仮定歩行周波数（歩調）として、この歩調で歩行する場合の移動速度が 2.5 m/s となる歩幅と 0.9 m のうち小さい方を仮定歩幅とすることが定められている<sup>5)</sup>。

(3) 提案されているその他の計算法

オーストラリアの Wheeler<sup>6)</sup>は、歩行時の床面への衝撃について詳細に検討し、半正弦波と仮定して衝撃力、衝撃作用時間、ストライド長、および、進行速度などを歩調に応じて図 - 3 に示すように与え、これを外力として有限要素法による一般的な橋梁構造に対する計算方法を提案している。さらに、オーストラリアの 22 橋の歩道橋に対する計算結果を示しており、それらの歩道橋で実施された歩行試験結果と比較し、よく一致していることを報告している。このような成果は、外力の扱い方の緻密さに加えて、有限要素法を用いてより精度の高い動的応答解析を行うことによるものと考えられ、もっとも一般性のある方法といえる。

さらに、わが国において提案された計算法の 1 つとして、歩道橋の場合は歩行者の歩調とある振動モードとの共振を考えればよいと考え、動的応答計算にいわゆるモード解析

表 - 1 橋梁形式に関する形状係数  $K$

橋梁形式	$K$
$\triangle - L - \triangle$	1.0
$\triangle - L - \triangle - L - \triangle$	0.7
	支間比 $L_1/L$
	1.0
	0.8
	0.6 以下

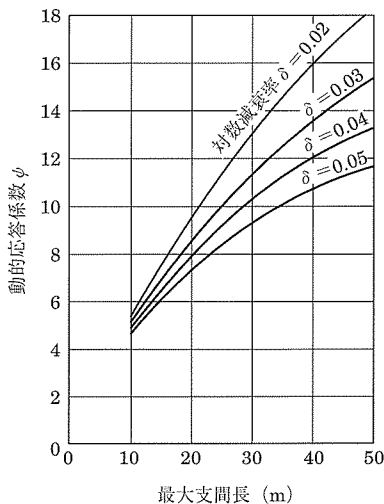


図 - 2 動的応答係数  $\Psi$

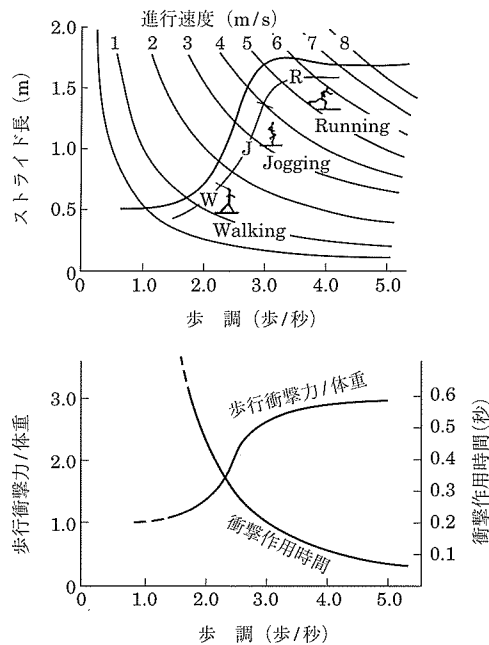


図 - 3 歩行衝撃力のパラメータ

法を適用する方法があり、1 質点系の強制振動の振動解を利用することによって、容易に動的応答値が与えられる。また、有限要素モデルで求めた骨組構造に対して、歩行外力を作用させて、動的応答値を求めている。

### 3.2 振動じょ限度の設定

人間の振動感覚は図 - 4 に示したように振動数に依存しており、さまざまな表現がされている。歩行者の振動感覚を考慮した最大加速度による振動じょ限度は、次の代表的な 3 つに分類される。

#### (1) BS 5400 に採用されているじょ限度

イギリスでの歩道橋振動については、従来、TRRL における Leonard の実験データ<sup>8)</sup> が参考にされてきた。その後、Smith が発表した実験データは、実は Leonard の実験データの 5 倍ほど大きなところにじょ限度があり、両者の振動数に対する勾配こそ、似てはいるものの、あまりにかけ離れている感があった。これらに対して、Smith が共著者でもある前出の Blanchard らの文献<sup>3)</sup> では、じょ限度として、 $0.5f^{1/2}$  m/sec<sup>2</sup> ( $f$  Hz: 振動数) を提案しており、図 - 4 に示すように、「振動を感じる閾値 \*2」としての Leonard の実験データと「これ以上の振動は許されない」という Smith の実験データのほぼ中間を結んだ形となっている。この Blanchard らのじょ限度は、BS 5400 の 7.1.5 項に採用されるだけでなく、Ontario Code や Wheeler にも参考にされている。

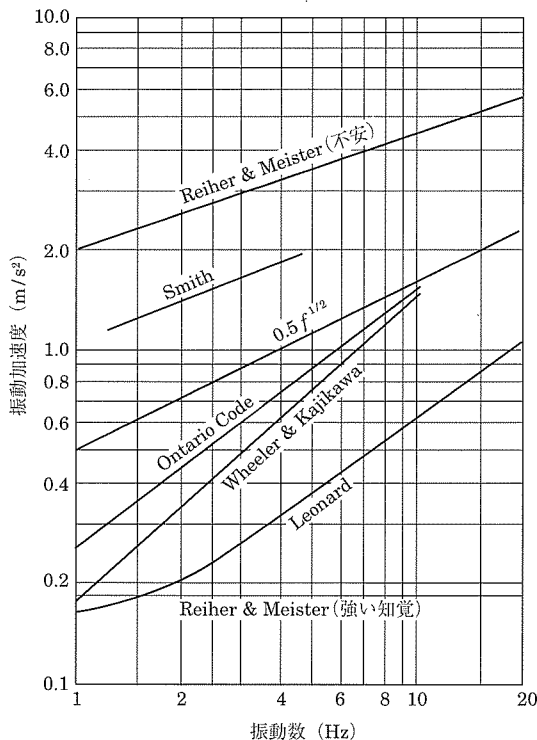


図 - 4 歩道橋振動に対するじょ限度

#### (2) Ontario Code に採用されている振動じょ限度

Ontario Code 2.6.2 項では、動的応答計算法については、BS 5400 における Blanchard らによる方法とほぼ同様であるが、振動じょ限度については、図 - 5 に示すように独自の

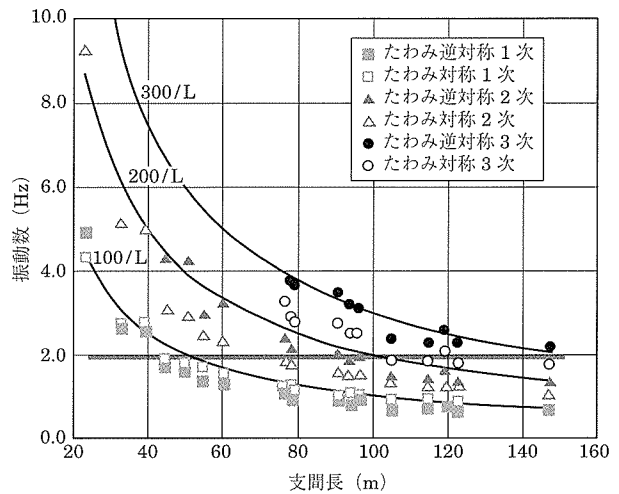


図 - 5 PC 吊床版歩道橋の支間長と卓越振動数

ものを採用している。その解説によると、建築床振動に対する人の反応データをも参考にしたようであり、最大加速度が 1 Hz で 0.25 m/sec<sup>2</sup>、10 Hz で 1.5 m/sec<sup>2</sup> となるように両対数軸上で結んだものを許容限度としている。さらに、上部構造の水平振動数（橋軸方向とその直角横方向の振動数）が、1 次曲げ振動数の 1.5 倍と 4 Hz のうち小さい方の値を下回らないように、設計しなければならないとしている。

#### (3) 提案されている他のじょ限度

Wheeler も、Blanchard らと同様に、応答計算を提案した前述の文献においてじょ限度を同時に提案している。薦められたじょ限度（最大振動速度で約 24 mm/sec）は振動感覚実験<sup>7)</sup> のデータから図 - 4 のように得られたもので、振動感覚カテゴリ “不快”，あるいは “少し歩きにくい” と感ずる人が 50 % となる振動に対応している。振動速度で整理すると振動数に依存しないが、図 - 4 のように加速度で整理すると振動数に依存した形となり、Wheeler・Kajikawa のじょ限度と呼ばれている。この提案は、Ontario Code 作成の際に参考にされ、チェコの Strasky による吊床版橋の振動使用性の照査でも実際に適用されている。また、Wheeler・Kajikawa のじょ限度は、わが国においては、文献<sup>6) 7) 10)</sup> で提案され、“少し歩きにくい” という感覚に対応して適応が薦められている限界値（実効値として 17 mm/sec であり、正弦波を仮定すれば、 $17 \times \sqrt{2} = 24$  mm/sec となる）と一致するとともに、道路橋に対する BS 5400 の規定やわが国における道路橋に対する提案とも整合するものである。なお、図 - 4 には、参考のため、振動に対する人体感覚の基準としてよく参照される Meister の感覚曲線を加速度表示したものを付記した。

## 4. PC 吊床版歩道橋の振動照査

スレンダーな構造となる歩道橋は、一般的には低い振動数領域に多くの卓越振動があり、歩行者の通行時に大きな振動が発生し歩行者に不快感を与える可能性があることから、著者らは、多くの歩道橋の振動実態を調査した<sup>11)</sup>。そのなかで、PC 吊床版歩道橋<sup>12, 13)</sup> について、その振動の解説をする。

(1) 支間長と卓越振動数

図 - 5 には、PC 吊床歩道橋の観測された各振動モード (対称と逆対称モードの 1, 2, 3 次) の卓越振動数と支間長の関係を示した。対称 1 次振動数 ( $f_{1, sym}$ ) がおよそ、 $100 / L$  (支間長) となっており、鋼橋も含めた他の形式橋と同じ程度の振動数であるが、逆対称 1 次振動数は対称 1 次よりも、やや低くなっており、吊形式橋梁の特徴を示している。また、より大きい支間長の橋でも、高次振動数が歩調範囲にあり、共振の可能性があることを示している。とくに、支間長が 100 m を超えてくると、1 ~ 3 Hz の狭い範囲に多くの卓越振動があり、歩行時や走行時にさまざまな振動モードが出現することから、注意が必要である。

(2) 振動加速度振幅と使用性

図 - 6 には、衝撃加振実験などで、確認されている卓越振動数が 1.5 ~ 2.5 Hz のときは、2 人が指定した共振振動数で歩行したときの加速度振幅を、そして、卓越振動数が 2.5 ~ 3.5 Hz のときは、1 人が指定した共振振動数で歩行したときの加速度振幅を示した。もっとも大きく揺らしたときの振動の大きさと考えてよく、非常に大きな振幅を示している橋梁もある。これらの振動がただちに、歩行者の使用上、問題になるわけではないが、一般の歩行者の歩行や走行によって共振すれば、PC 橋であっても、この程度の大きな振動が発生し、歩行者がびっくりするような事態が生ずることもありうることを示している。

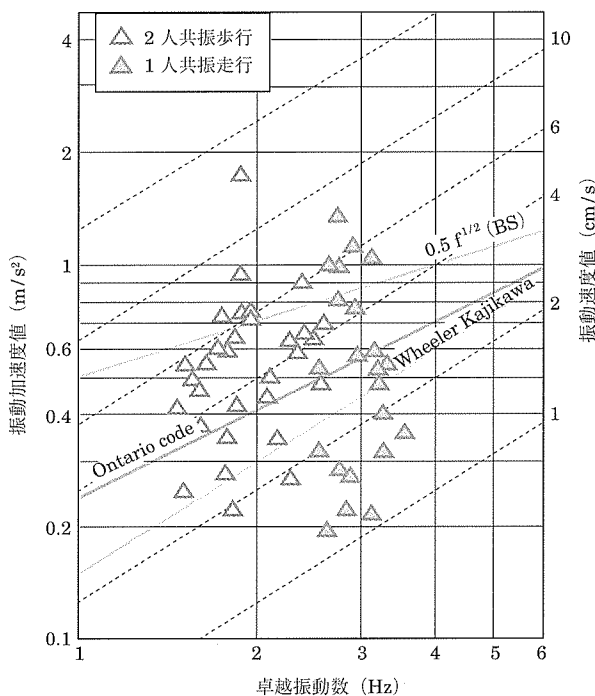


図 - 6 PC 吊床歩道橋加振実験時の振動数と振動加速度振幅 (斜め線と右側の数値が振動速度値)

5. ま と め

本文では、歩道橋の振動使用性の照査方法について示してきたが、このような照査事例は、簡単な構造では多くあり、設計時に参考にされている。しかし、最終的には完成系の実験によって、振動使用性は確認されることが多い。その蓄積されたデータが、より精度の高い性能設計を可能にするであろう。

参考文献

- 1) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1979 年
- 2) ISO18649 (2004)：Mechanical vibration and shock - Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges (橋梁の動的試験結果の評価)
- 3) Blancard J., B.L.Davis and J.W.Smith: Design Criteria and Analysis for Dynamic Loading of Footbridges, Proc. of Symposium of Dynamic Behavior of Bridge, TRRL, Supplementary Report 275, Ministry of Transport Road Research Laboratory (UK TRRL), pp.90 ~ 106, 1977
- 4) BS1 : Steel, Concrete and Composite Bridges, Part2. Specification for loads, 7.1.5 Vibration serviceability, BS 5400, 1978
- 5) 九州橋梁・構造工学研究会：カナダ・オンタリオ州道路橋設計規準 1983 年版 (共通編・鋼橋編)，同解説，1985 年
- 6) Wheeler J.E. : Prediction and Control of Pedestrian-Induced Vibration in Footbridges, Proc. of ASCE, Vol.108, No. ST9, pp. 2045 ~ 2065, 1982
- 7) 小堀為雄・梶川康男：橋梁振動の人間工学的評価法，土木学会論文誌，No.230, pp.23-31, 1974 年
- 8) Leonard D.R. : Human Tolerance Levels for Bridge Vibrations, TRRL report No.34, Ministry of Transport Road Research Laboratory (UK TRRL), 1966
- 9) fib Bulletin 32 : Guidelines for the design of footbridges, 2005
- 10) 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，No. 325, pp.23 ~ 33, 1982 年
- 11) 深田宰史・吉川裕晃・梶川康男：鋼歩道橋の動的特性と振動使用性の実態調査，構造工学論文集，Vol. 43A, pp.765 ~ 772, 1997 年
- 12) 梶川康男・深田宰史・吉川裕晃：単径間 PC 吊床歩道橋の振動特性，構造工学論文集，Vol. 44A, pp.811 ~ 817, 1998 年
- 13) 角本周・梶川康男：PC 吊床版橋の減衰定数の評価と振動使用性照査における影響，土木学会論文誌，No. 612 / I - 46, pp.337 ~ 348, 1999 年

注 \*1 振動じよ限度：さまざまな観点から決定される許容振動量

注 \*2 閾値：生体の感覚に反応を引き起こさせるのに必要な刺激の強さの最小量

【2007 年 10 月 10 日受付】