

(117) P C吊床版橋の構造パラメータと歩行者通行時の振動使用性

オリエンタル建設(株)技術部 正会員 ○角本 周
 金沢大学大学院自然科学研究科 梶川 康男
 オリエンタル建設(株)技術部 吉村 徹

1. はじめに

歩道橋として多くが架設されている吊床版橋では、橋体重量が軽くフレキシブルな構造であることから、歩行者の通行により励起される振動が歩行者に不快感を与えて使用性が損なわれる可能性がある。歩道橋の振動使用性に対する照査方法としては固有振動数が歩行者の歩調範囲内にならないようにするのが一般的であるが、吊床版橋では比較的低い振動数の範囲に多くの振動モードが存在することから、構造的な対処により歩行者の歩調範囲から固有振動数を外すことは困難である。一方、近年では、このような固有振動数による共振の可能性の照査から不快感と直結する振動レベルによる照査へと、歩道橋の振動使用性の照査方法が移行しつつある¹⁾。これは、橋梁完成後の振動実験により事後的に把握されていた歩行者通行時の振動レベルが^{2)~4)}、動的応答解析技術の確立により、設計時に減衰定数を定量的に評価することが可能であれば比較的良い精度で予測できるようになったためである⁴⁾。

そこで、本研究では単径間吊床版橋の鉛直曲げ振動モードを対象に、吊支間やサグ比、幅員等の構造パラメータと歩行者通行時の振動使用性の関係について動的応答解析により検討した。なお、検討には図-1に示すモデル吊床版橋を用い、構造パラメータの範囲は国内の架設実績を考慮して設定した。1996年度末までに架設された単径間吊床版橋の吊支間とサグ比の関係を図-2に、有効幅員別の橋梁数を図-3に示す。

2. 構造パラメータと固有振動特性

橋梁の動的応答を予測するには、固有振動数、振動モード、減衰定数および外力特性の4つのファクターの評価が重要となる。このうち、吊床版橋の固有振動数や振動モードは、幾何剛性を考慮した固有振動解析により精度良く推定できる⁴⁾。また、吊床版橋では著者らによりエネルギー吸収から減衰定数を評価する研究がされており、床版のひずみエネルギーに対する減衰エネルギーの比(ロスファクター)および全振動エ

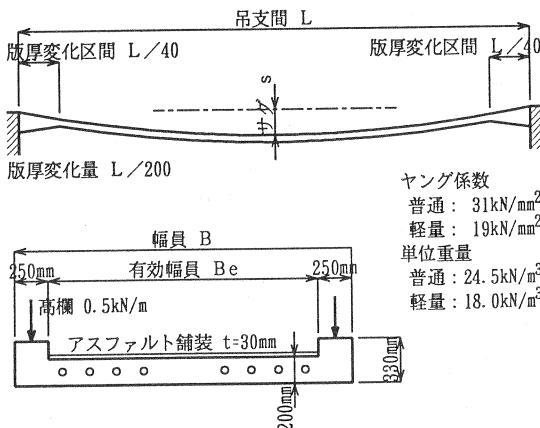


図-1 検討モデル吊床版橋

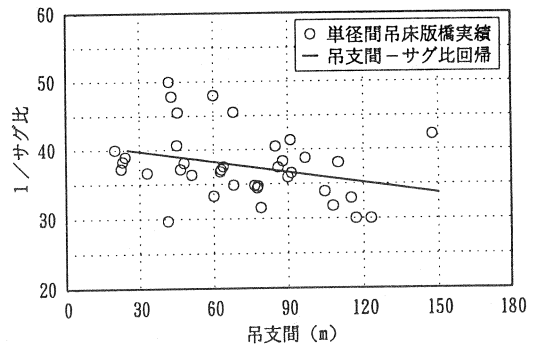


図-2 単径間吊床版橋の吊支間とサグ比

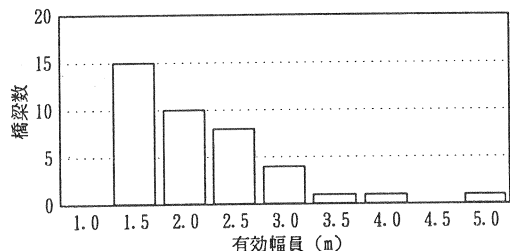


図-3 単径間吊床版橋の有効幅員

エネルギーに占めるひずみエネルギーの比から、式(1)より減衰定数を算出する方法を提案している^{5), 6)}。

$$h = \frac{\eta U_G}{U_A} = \frac{\eta U_G}{U_G + U_K} \quad (1)$$

ここに、 U_A は全振動エネルギー、 U_G は床版のひずみエネルギー、 U_K は幾何剛性によるポテンシャルエネルギーである。また、 η は高欄や舗装のエネルギー吸収を含んだ床版のロスファクターであり、単区間吊床版橋の実測された減衰定数の統計分析より本研究では $\eta = 0.010$ とした。

構造パラメータと固有振動特性の関係の一例として、吊支間、サグ比と各振動モードの固有振動数および減衰定数の関係をそれぞれ図-4、図-5に示す。また、サグ比と振動モード形状の関係を図-6に示す。吊支間が長くなるほど減衰定数は小さくなり、吊支間50mに対して吊支間100mで半分程度、吊支間150mで1/4程度の値となる。また、サグ比によっても減衰定数は変化し、対称1次と対称2次では両モードの固有振動数が最も近接するサグ比1/35付近で減衰定数の大きさが逆転する。

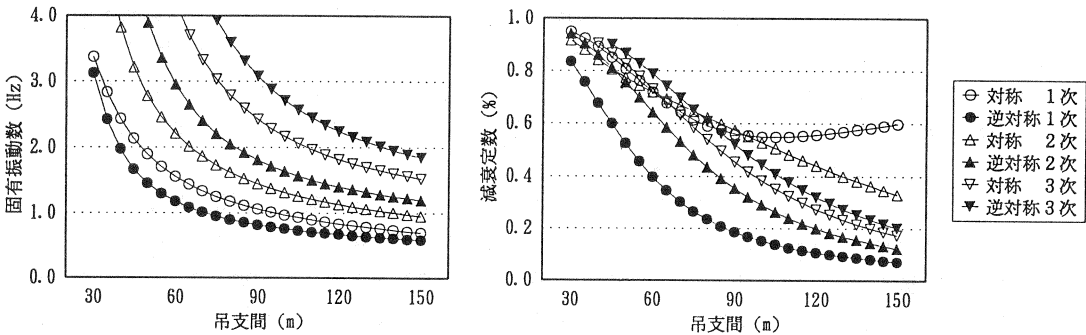


図-4 吊支間と固有振動数および減衰定数の関係 (有効幅員2.0m, サグ比1/35)

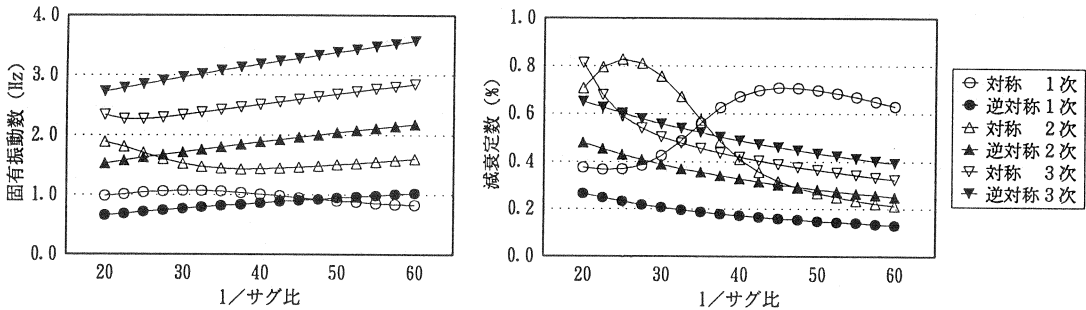
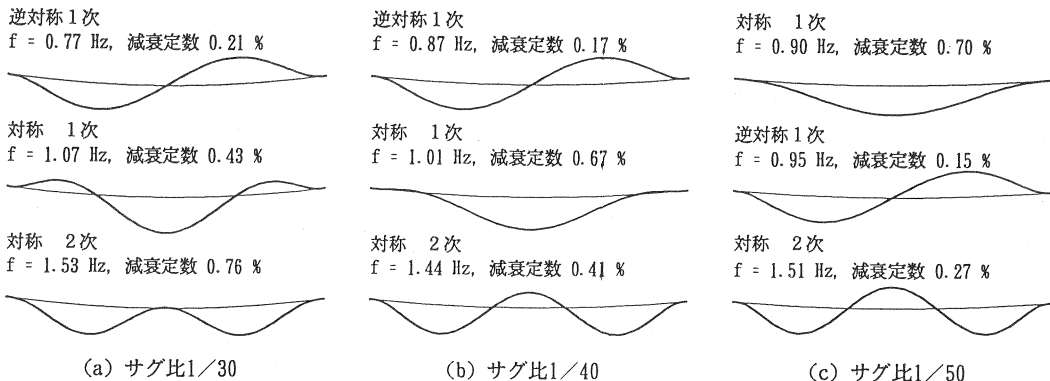


図-5 サグ比と固有振動数および減衰定数の関係 (有効幅員2.0m, 吊支間90m)



(a) サグ比1/30 (b) サグ比1/40 (c) サグ比1/50

図-6 サグ比と振動モード形状の関係 (有効幅員2.0m, 吊支間90m)

3. 歩行者通行時の動的応答解析

単径間吊床版橋の多くは山間部や郊外の公園等に架設されていることから、歩行者の通行状態としては単独歩行および走行状態を考慮することとし、動的応答は以下の方法で算出した⁴⁾。

①固有振動解析から得られた振動モード値 (一般化質量=1) を、ラグランジェ補間により等間隔な点のモード値 $\phi_n(x)$ に変換する。

②等間隔な点のモード値 $\phi_n(x)$ を、式(2)により有限フーリエ正弦級数 a_{nm} に近似する。

$$\phi_n(x) = \sum_{m=1}^M a_{nm} \sin \frac{m\pi x}{L} \tag{2}$$

③歩行外力 $f(t)$ は、本研究では腰部慣性力の近似式として式(3)の余弦波でモデル化する⁷⁾。

$$f(t) = F \cos 2\pi p t \tag{3}$$

これより、運動方程式は式(4)となり、着目点の動的応答は文献8)に示された理論解より算出できる。

$$\ddot{q}_n + 2h_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = F \cos 2\pi p t \sum_{m=1}^M a_{nm} \sin \frac{m\pi v t}{L} \tag{4}$$

ここに、 h_n は減衰定数、 ω_n は固有円振動数、 F は歩行外力振幅 (= αW)、 p は歩調、 v は歩行速度、 L は吊支間であり、歩行外力振幅における α は歩行衝撃力比、 W は歩行者体重である。

検討対象の振動モードは、歩行歩調の範囲 (1.5~2.5Hz) および走行ピッチの範囲 (2.5~4.0Hz) 内に固有振動数があるもので、逆対称4次までのものを選定した。また、歩行者(体重0.7kN)は共振歩調で歩行または走行するものとし、歩行衝撃力比および歩行速度は図-7に示す歩調に対応する値とした。

動的応答の指標には、移動する歩行者が受ける振動刺激を評価することから、歩行者の歩行または走行位置における応答速度の実効値 S (以下、振動刺激量) を用いた⁸⁾。

$$S = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^2 \right)} \tag{5}$$

ここに、 v_i は歩行または走行位置の応答速度、 n は歩行者が橋面上を通過する間のデータ数である。

動的応答解析の一例として、吊支間75m に対する対称2次および逆対称2次の応答速度波形を図-8に示す。サグ比1/35に対してサグ比1/45では、対称2次では最大応答値は10%程度小さいが振動刺激量は同程度であり、逆対称2次では最大応答値および振動刺激量とも20%程度大きくなる。

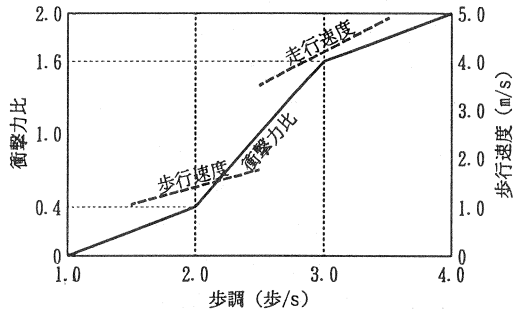
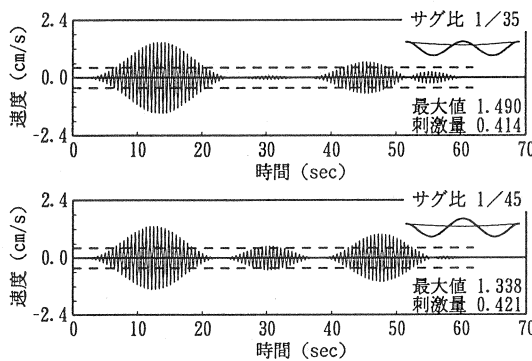
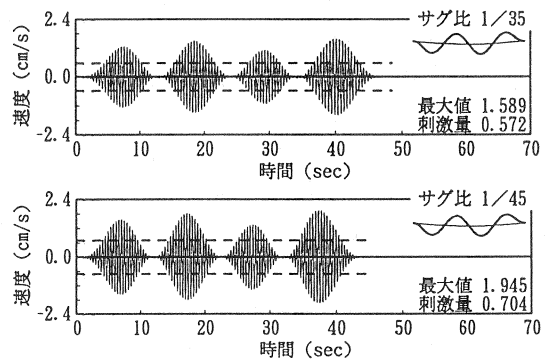


図-7 歩調と歩行衝撃力比および歩行速度



(a) 対称 2次



(b) 逆対称 2次

図-8 歩行位置の応答速度波形 (有効幅員2.0m, 吊支間75m)

4. 構造パラメータと歩行者通行時の振動使用性

歩行者通行時の振動使用性を検討する構造パラメータの範囲は、単径間吊床版橋の国内での架設実績を考慮し、サグ比 $1/25 \sim 1/55$ 、吊支間 $30 \sim 150\text{m}$ 、有効幅員 $1.5 \sim 3.0\text{m}$ とした。さらに、有効幅員 2.0m の場合に対しては、下部構造の作用水平力を低減するために床版に軽量骨材コンクリート(単位重量 18.0kN/m^3 、ヤング係数 19.0kN/mm^2)を使用したケースも検討した。

サグ比と振動刺激量の関係の一例を、歩行状態および走行状態それぞれに対して図-9に示す。ここに、図中の「少し感じた」および「明らかに感じた」等は、歩行者にそれぞれの反応が起きる確率が50%である振動刺激量を示している⁸⁾。歩行状態では、対称2次ではサグ比 $1/40$ 付近で振動刺激量が最小になるが、逆対称2次ではサグ比が小さいほど振動刺激量が大きくなる傾向がある。このように、歩行状態ではサグ比により振動刺激量に変化するが、一方、走行状態では顕著な差が生じていない。また、振動使用性に対して最も適したサグ比は、吊支間 60m ではサグ比 $1/40$ 付近、吊支間 75m ではサグ比 $1/30$ 付近、吊支間 90m ではサグ比 $1/40$ 付近であり、吊支間によって異なる結果となった。

吊支間と振動刺激量の関係の一例を、歩行状態および走行状態それぞれに対して図-10に示す。振動刺激量は、吊支間の増大とともに指数関数的に減少している。また、同一の振動モードにおいては、歩行状態では吊支間が増大すると振動刺激量は減少するが、走行状態では吊支間の増大が振動刺激量に与える影響は小さい。振動使用性の照査における限度は橋梁の架設地点や利用状態等を考慮して設定されるが¹⁾、「明らかに感じた」程度を限度とした場合では、有効幅員 1.5m では吊支間 75m 、有効幅員 2.0m では吊支間 60m 、有効幅員 3.0m では吊支間 45m を超えると振動刺激量は限度を満足する結果となる。この「明らかに感じた」程度の振動刺激量は、歩道橋に対して一般に適用される $1/600$ のたわみ制限を満足した単純桁形式の鋼歩道橋においても起こりうる振動レベルであることから⁹⁾、吊支間が 75m を超えた吊床版橋は単純桁形式の鋼歩道橋と同程度の振動使用性を有していると考えられる。なお、有効幅員 1.5m の場合や有効幅員 2.0m でも軽量骨材コンクリートを使用した場合では、吊支間 $30 \sim 40\text{m}$ 程度において振動刺激量が「少し歩きにくい」程度を超えており⁸⁾、このような構造パラメータに対する吊床版橋においては何らかの制振対策を設計時に検討しておくのが望ましいと考えられる¹⁰⁾。

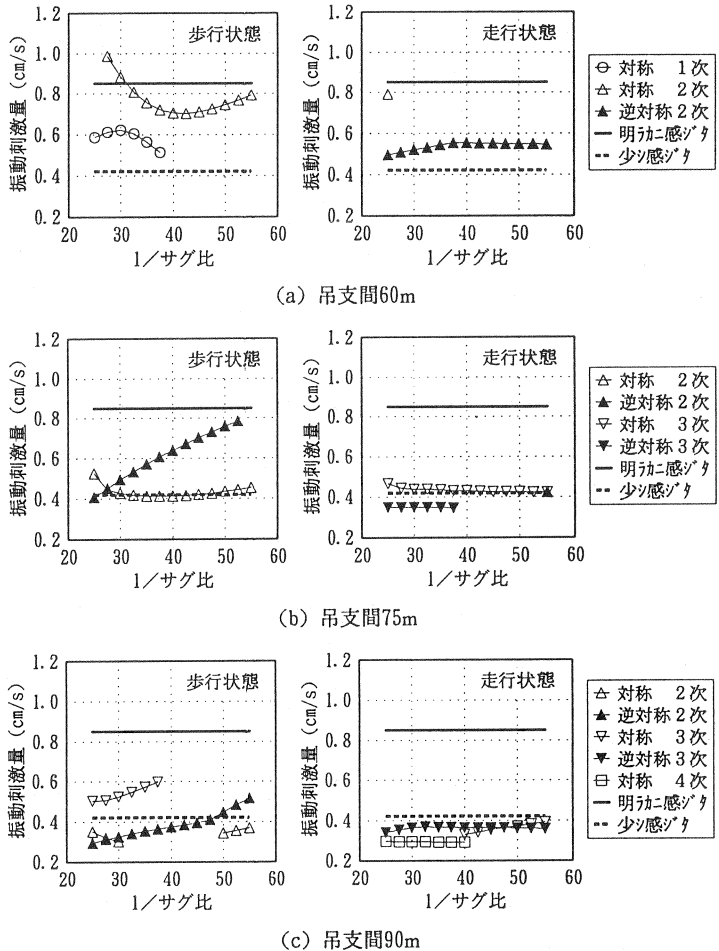
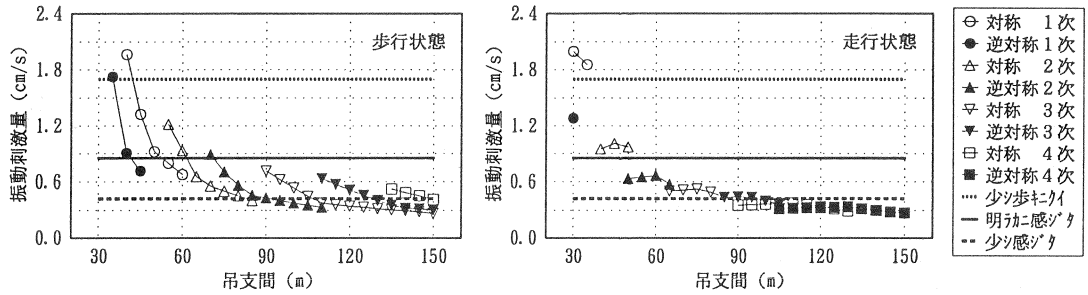
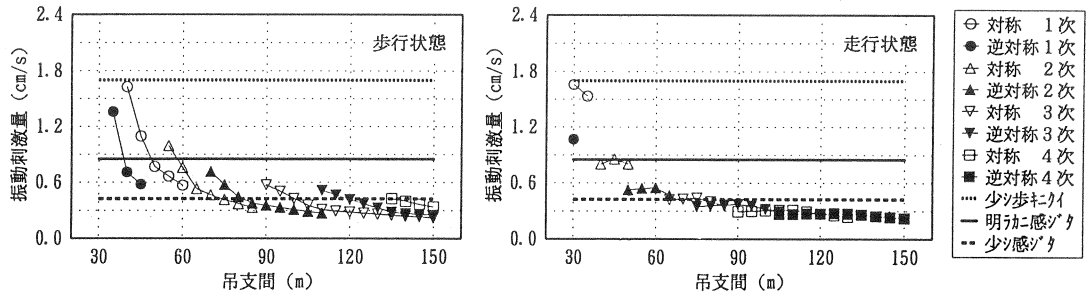


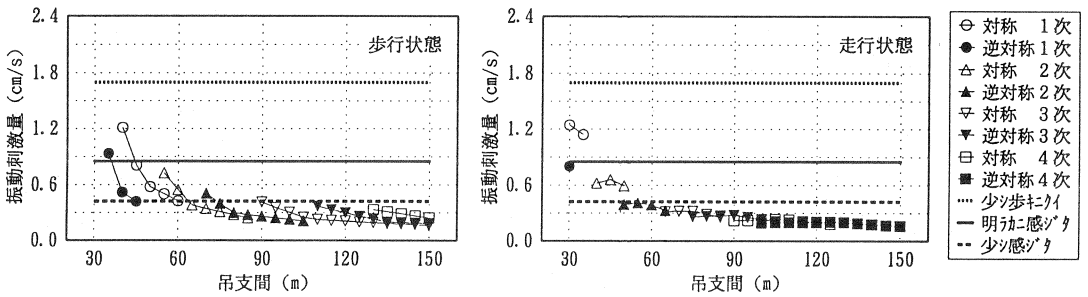
図-9 サグ比と振動刺激量(有効幅員 2.0m 、普通コンクリート)



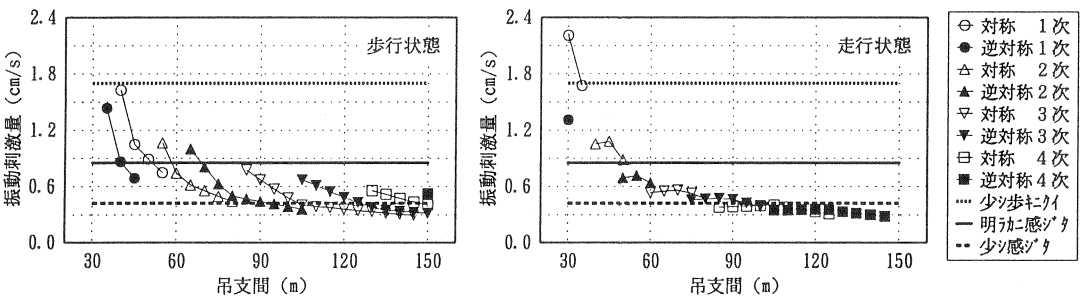
(a) 有効幅員1.5m, 普通コンクリート使用



(b) 有効幅員2.0m, 普通コンクリート使用



(c) 有効幅員3.0m, 普通コンクリート使用



(d) 有効幅員2.0m, 軽量骨材コンクリート使用
 図-10 吊支間と振動刺激量(サゲ比1/35)

単位長当りの死荷重と振動刺激量の関係を、図-11に示す。ここに、振動刺激量比は、各吊支間での振動モード毎の振動刺激量を有効幅員2.0m, 普通コンクリートを使用した場合(単位長当り死荷重16.2kN/m)の振動刺激量で正規化したもので、平均値および分布幅で示している。単位長当り死荷重が大きいほど振動刺激量は小さくなり、その比率はサゲ比に依存せず単位長当りの死荷重と比例関係にある。

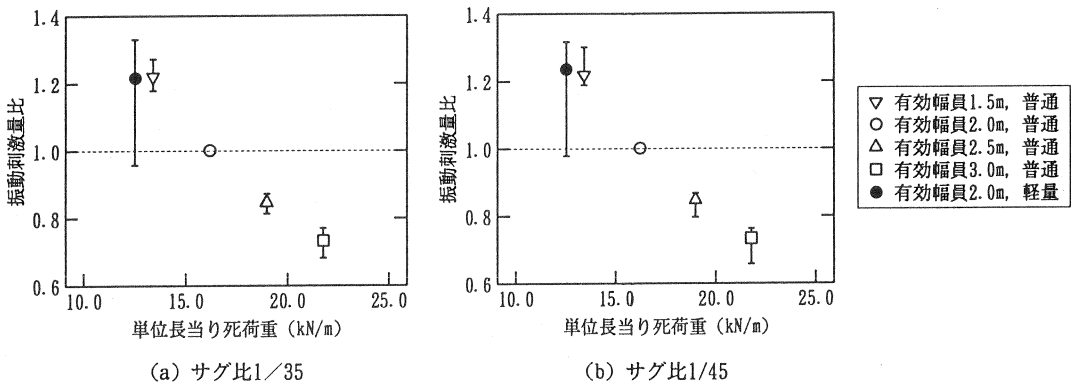


図-11 単位長当り死荷重と振動刺激量

5. まとめ

単径間吊床版橋の鉛直曲げ振動モードを対象に、歩行者単独歩行および走行時の振動刺激量を動的応答解析により算出し、吊支間やサグ比、幅員等の構造パラメータと振動使用性の関係について検討した。その結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) サグ比の変化により、歩行状態では振動刺激量が変化するが走行状態では顕著な差が生じない。また、振動使用性に対して最適となるサグ比は、吊支間により異なる。
- (2) 吊支間が増大するほど振動刺激量は減少し、有効幅員が2.0m(普通コンクリート使用)の場合では、吊支間が60mを超えれば単純桁形式の鋼歩道橋と同程度の振動使用性を有していると考えられる。
- (3) 単位長当り死荷重が大きいほど振動刺激量は小さくなり、その比率はサグ比に依存せず、単位長当り死荷重と比例関係にある。

今回の研究では、単径間吊床版橋の多くが架設されている山間部や郊外の公園等での一般的な通行量を考慮して、単独の歩行者のみに対する振動使用性について検討した。しかしながら、架設地点によっては群集が通行する状態も考えられることから、今後は群集歩行状態に対する振動使用性を含めて検討していく予定である⁹⁾。

参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会：これからの歩道橋，技報堂出版，1998. 5.
- 2) 錦・則武・熊谷：P C吊床版橋の振動使用性の照査，土木学会第44回年次学術講演会講演概要集，第5部，pp. 466-467，1989. 10.
- 3) 梶川・深田・吉川：単径間P C吊床版歩道橋の振動特性，構造工学論文集，Vol. 44A，pp. 811-817，1998. 3.
- 4) 梶川・津村・角本：P C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. 3.
- 5) 角本・前田・梶川・黒野：近接固有振動数を有する吊床版歩道橋の振動使用性に関する検討，橋梁交通振動に関するコロキウム論文集，PART B，pp. 207-214，1995. 11.
- 6) 角本・梶川・岡林：吊床版橋の振動使用性照査における減衰特性の影響，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第1部(B)，pp. 458-459，1997. 9.
- 7) 小堀・梶川・城戸：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. 12.
- 8) 梶川：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. 9.
- 9) 田中・加藤：設計時における歩道橋の振動使用性照査法，土木学会論文集，No. 471/I-24，pp. 77-84，1993. 7.
- 10) 岡林・小松・角本・下田：歩行者による吊床版橋振動のH[∞]制御理論によるアクティブ制御，土木学会論文集，No. 577/I-41，pp. 153-163，1997. 10.