

長支間歩道橋の振動使用性設計規準に関する考察

A DESIGN CRITERION ON VIBRATION SERVICEABILITY FOR LONG SPAN PEDESTRIAN BRIDGES

杉本博之* 梶川康男**

By Hiroyuki SUGIMOTO and Yasuo KAJIKAWA

Minimum weight design of pedestrian bridges taking vibration serviceability into consideration is studied and applied to the design of long span pedestrian bridges. In this study an approximation method of vibration serviceability analysis and two-level optimization technique are applied successfully. The criteria on vibration serviceability provided in the Technical Standard for Pedestrian Bridges and Underpasses are investigated and following conclusions are gained. (1) The constraints that the maximum displacement shall be less than $L/600$ and the frequency of the beam shall not be within $1.5 \leq f \leq 2.3$ Hz are not proper. (2) The reasonable and efficient design can be obtained by estimating the vibration serviceability by the method of one of the authors.

1. まえがき

歩道橋の剛性に関する設計条項は、以前の横断歩道橋設計指針¹⁾〔以下、指針 (Guide) と略する〕では、活荷重によるたわみが支間長の $1/400$ 以下であったが、その後の振動使用性の問題等により、現行の立体横断施設技術基準²⁾〔以下、基準 (Standard) と略する〕では次のように修正された。

2-12 たわみ ; 活荷重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特に配慮を加えた場合は、支間長の $1/400$ 以下。

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

2-12の利用者への特別な配慮とは、2-13の事項を意味し、その解説には固有振動数が2 Hz前後(1.5~2.3Hz)にならないようにと指示されている。

2-12の利用者への特別な配慮には、著者の1人による振動使用性の評価法³⁾も含まれると思われるが、実際には上記の固有振動数に関する記述が、かなり強い拘束力を持って受けとめられているようである。ところが、幅員と床版の種類によっては、振動数を意識しないで設計するとその振動数がちょうど2 Hz前後になる支間長の範囲がある。その支間長の歩道橋に1.5~2.3Hzの振動数を避けることを要求すると、設計が困難になることが予想される。事実、1987年に金沢で開催された橋梁振動に関するコロキウム⁴⁾のディスカッションの中でも、長支間の歩道橋の設計において、1.5~2.3Hzの振動数を避けるために設計が大変困難にな

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部土木工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)

** 工博 金沢大学教授 工学部土木建設工学科 (〒920 金沢市小立野2-40-20)

る。2.3Hz より上に避けると腹板高が高くなるので、上位の鋼材（例えばSM53）を用いて1.5 Hzより下に避けるを得ないとの発言が、実務の設計者からあった。

そこで本論文においては、基準に従う3種類の設計（たわみ制限が $L/600$ 、たわみ制限が $L/400$ でかつ振動数が1.5～2.3Hzを避ける、およびたわみ制限が $L/400$ でかつ振動使用性を照査する）と指針に従う設計を、著者達の最小重量設計法^{5) 6)}で行い、その結果より上記の設計が困難になるという事実の確認、振動数制約の必要性、および振動使用性を考慮する歩道橋の適当な設計法について考察を加えた。

2. 歩道橋の設計

(1) 断面および構造

設計の対象とする歩道橋の構造は、図-1に示す主桁2本の単純桁とする。歩道橋としては長支間（30m～50m）を対象としているので、主桁断面は $L/6$ の点で変化させた。支間長を L 、幅員を B とする。

主桁断面は、図-2に示す上下・左右対称のI形断面とする。水平補剛材はないとし、腹板厚は、許される最小厚（mm単位）とする。

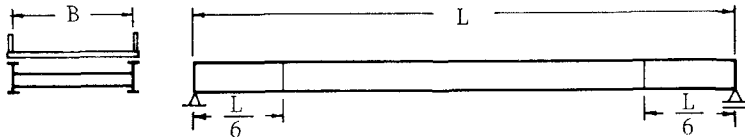


図-1 歩道橋の構造

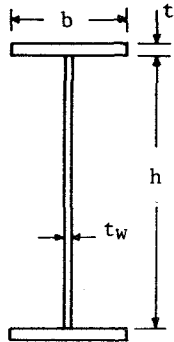


図-2 主桁断面

(2) 荷重および許容応力度

荷重は、主桁自重、主桁以外の死荷重、標識荷重、および活荷重を考慮し、桁の影響線に載荷してモーメント、たわみ等を求めた。主桁自重はその断面積より厳密に計算し、主桁以外の死荷重は、標準設計⁷⁾の結果を参考にして、支間長に関係なく表-1の値を用いた。標準設計には、幅員が2.25mのデッキプレート床版⁷⁾の例は挙げられていないので、表中の5.4t/mという値を仮定した。

表-1 主桁以外の死荷重（t/m）

幅員 (m)	床版タイプ	
	デッキプレート	鋼
1.5	4.0	2.3
2.1	5.1	2.8
2.25	(5.4)	2.9

許容曲げ圧縮応力度の割り増しは15%²⁾であり、フランジ固定点間距離は3mとした。

(3) 設計規準

本論文では、基準あるいは指針の指示に従う設計となるように、下記の制約条件を適当に組み合わせて、それぞれ最小重量設計を行い、結果を比較した。

・制約条件式（A） ； 応力および幅厚比等に関する条件。

$$\left. \begin{aligned} g^{(1)}_i &= \sigma_i - \sigma_{ai} \leq 0 \\ g^{(2)}_i &= b_L - b_i \leq 0 \\ g^{(3)}_i &= b_i / 32 - t_i \leq 0 \\ t^L &\leq t_i \leq t^U \end{aligned} \right\} \quad (i = 1 \sim n) \quad (1)$$

ここで、 n は部材数、 i は部材番号を示す。 σ は応力度、 σ_a は許容応力度、 b_L はフランジ幅の下限值、 t^U 、 t^L は、それぞれフランジ厚の上、下限値である。第3式は、自由突出板の板厚に関する条件であるが、腹板厚を無視しているので、余裕のある条件になっている。

- ・制約条件式 (B) ; 基準に定められている、振動使用性を考慮しない場合の活荷重による最大たわみに関する条件。

$$g^{(4)} = \delta - L/600 \leq 0 \quad (2)$$

ここで、 δ は活荷重による最大たわみである。

- ・制約条件式 (C) ; 指針、あるいは振動使用性を考慮する場合に基準に定められている最大たわみに関する条件。

$$g^{(5)} = \delta - L/400 \leq 0 \quad (3)$$

- ・制約条件式 (D) ; 固有振動数に関する条件。

$$f \leq 1.5 \text{ あるいは } f \geq 2.3 \quad (4)$$

ここで、 f は桁の固有振動数である。

式 (4) は、このままでは最適設計の制約条件式として使えないので、次式のように変換する。

$$g^{(6)} = 0.4 - |f - 1.9| \leq 0 \quad (5)$$

- ・制約条件式 (E) ; 振動使用性に関する条件³⁾。

$$g^{(7)} = r_s \cdot r_f \cdot S^* - r_R \cdot R^* \leq 0 \quad (6)$$

ここで、 S^* は歩行者が受ける振動使用性刺激量、 R^* は振動じょ限の基準値、 r_s は荷荷状態係数、 r_f は振動数係数、 r_R は反応係数である。詳細は、次節で説明する。

これらの条件を表-2のように組み合わせて、それぞれ基準 (1)、基準 (2)、基準 (3)、指針および応力のみとし、それらの制約条件の下で最小重量設計を行なった。

設計規準	制約条件式				
	A	B	C	D	E
基準 (1)	○	○			
基準 (2)	○		○	○	
基準 (3)	○		○		○
指針	○		○		
応力のみ	○				

3. 歩道橋の動的応答と振動使用性照査

最適化の過程では多数回の固有値解析を必要とするため、次のような近似法を用いて、文献3)に基づく振動使用性照査を行った。

(1) 変断面ばりの固有振動

文献3)では n 次の固有振動モード $\phi_n(x)$ が次式のような正弦級数で表されるものとして照査法が提案されている。

$$\phi_n(x) = \sum_{m=1}^{\infty} a_{nm} \cdot \sin(m\pi x/L) \quad (7)$$

ところが、式 (7) を用いて変断面ばりの固有振動解析、例えば、エネルギー法などは煩雑であり、しかも汎用性がないことから、曲げを受けるはりの有限要素によって剛性行列と質量行列を作成し、固有値解析にはサブスペース法を用いて固有振動数と固有モードを求めた。そして、固有振動数の値はそのままの値とし、固有モードについては各節点の鉛直変位のモード値からフーリエ正弦級数解析によって式 (7) の係数 a_{nm} を求めた。そして、モード係数 a_{nm} は次式の正規化条件を満たすものとした。

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_{nm}^2 = 2/\rho L \quad (8)$$

ここに、 ρ は単位長さ当りの質量であるが、近似的に一定であるとする。

(2) 最大変位応答スペクトルによる変位振幅

歩行者の衝撃周期力を $f(t) = f_0 \cdot \cos(\omega t)$ で表し、振動モード $\phi_n(x)$ が式 (7) で表されるとすると、各振動モードに対する運動方程式は次式で示される。

$$\ddot{q}_n + 2\eta\omega_n\dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = f_0 \cos(\omega t) \sum_{m=1}^{\infty} a_{nm} \sin(m\pi v t / L) \quad (9)$$

そして、歩行者の歩調が n 次振動数と一致 ($\omega = \omega_n$) し、共振した場合、着目点(x)の n 次振動による最大応答変位振幅 (y_n)は次式にて求められる。

$$y_n = q_n \cdot \phi_n(x) = (f_0 / 2) \left(\sum_{m=1}^{\infty} a_{nm} [R_D] \right) \sum_{m=1}^{\infty} a_{nm} \sin(m\pi x / L) \quad (10)$$

ここで、 f_0 は外力の振幅であり、(歩行衝撃比 α) $\times$ (体重 W) で表されるものとする。なお、 α については、文献3)に基づく値を採用した。そして、 $[R_D]$ は最大変位スペクトルであるが、今回移動する周期外力による定常応答項のみを考慮して、

$$[R_D] = \frac{(1/\sqrt{2}) [1 / \sqrt{\{\varepsilon(2\omega_n + \varepsilon)\}^2 + \{2\eta\omega_n(\varepsilon + \omega_n)\}^2} + 1 / \sqrt{\{\varepsilon(2\omega_n - \varepsilon)\}^2 + \{2\eta\omega_n(\varepsilon - \omega_n)\}^2}]}{2} \quad (11)$$

で表されるものとした。ここに、 ω_n は n 次の固有振動数、 v は荷重の移動速度、 η は歩道橋の減衰定数(今回、0.005を使用)、 ε は $m\pi v / L$ である。

(3) 振動使用性の照査

歩道橋の振動使用性を照査するときの荷重状態として、単独歩行、群集歩行および単独走行の3状態が考えられる。

表-3 橋梁架設地点による照査すべき荷重条件(○は照査の必要性を示す)

すべての歩道橋に対してこの3状態を考える必要はなく、表-3のように橋梁架設地点によって必要な荷重状態を考慮すべきであろう。今回、公園内記念歩道橋と都市内河川横断歩道橋(以下、それぞれ公園内歩道橋、河川歩道橋と略する。)を検討の対象とした。ただし、群集としての橋梁入口への歩行者の到着率を幅員に関係なく0.5人/秒とした。そして、式(6)の S^* は歩行者が受ける振動刺激量であり、 $r_t \cdot y_n \cdot \omega_n$ (振動速度の実効値)で与えられる。なお、実効値換算係数 r_t は0.3とし、他の係数 r_s 、 r_f 、 r_R および R^* は文献3)に提案されている通りとした。

架設目的	荷重条件	単独歩行	群集歩行	単独走行
公園内記念歩道橋		○	○	○
都市内交通路横断歩道橋		○	○	
都市内河川横断歩道橋		○		○
その他		○		

4. 最小重量設計法

骨組構造物の最小重量設計は、トラス構造、桁構造を問わず、2段階最適化手法^{5) 6) 8) 9)}を用いるのが一般である。著者達の2段階最適化手法^{5) 6)}は、設計変数および制約条件式の数の減少と板厚を離散値として扱える特徴がある。本研究の最適化問題は、そもそも規模の小さな最適化問題であるが、それでも設計変数、制約条件式の数は少ない方が収束性は良いし、板厚を離散値とするために2段階最適化手法を用いた。

2段階最適化手法においては、与えられた問題を構造レベルの最適化と部材断面レベルの最適化に分けて考える。前記の設計変数および制約条件式の数の減少は、構造レベルでの減少を意味するが、構造解析は構造レベルで行われるのでその効果は大きい。本研究においては、2.で説明したように5種類の制約条件式の組合せにおいて、それぞれ最小重量設計を行っている。それらのうち、例えば基準(3)の問題は、以下のように定式化される。

構造レベルの最適化 ;

$$\text{目的関数} : V = \sum_{i=1}^n \varrho_i A_i(I_i, h) \longrightarrow \min \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{制約条件式} : & \quad g_i \leq 0 \quad (i=1 \sim n) \\ & \quad g^{(5)} = \delta - L/400 \leq 0 \\ & \quad g^{(7)} = r_s \cdot r_f \cdot S^* - r_R \cdot R^* \leq 0 \\ & \quad h^L \leq h \leq h^U \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

設計変数 : $I_i (i=1 \sim n)$ 、 h

ここで、 V は総容積、 i は部材番号を示す。 l は部材長、 A は部材断面積、 I は部材断面2次モーメント、 g_i は応力および幅厚比等に関する制約条件式で、各部材毎に下で説明する部材断面レベルの最適化において計算される。 h^u 、 h^L は、それぞれ腹板高の上・下限値である。

部材断面レベルの最適化 ; 部材断面レベルの最適化は、本研究の場合は、設計規準に関係なく以下のように定式化される。部材番号を示す i は省略する。

目的関数 : $A = 2bt + t_w h \longrightarrow \min$ (14)

制約条件式 : $I_i, h \longrightarrow \text{given}$

$$\left. \begin{aligned} g^{(1)} &= \sigma - \sigma_a \leq 0 \\ g^{(2)} &= b_g - b_i \leq 0 \\ g^{(3)} &= b/32 - t \leq 0 \\ t^L &\leq t \leq t^u \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

設計変数 : b, t

詳細は省略するが、この部材断面レベルの最適化の変数は板厚 t のみとなり、その最適値を求めることは、変数の連続、離散に関係なく容易である。

この場合の最適化の流れ図を図-3に示した。

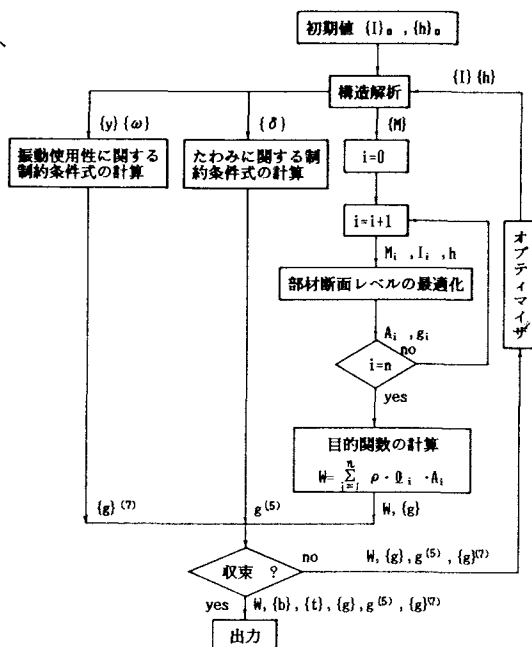


図-3 最適化の流れ図

5. 数値計算例および考察

本研究の手法を用いて、長支間単径間歩道橋の種々の最小重量設計を行い、その結果を検討した。支間長は、30m~50mを計算の対象とした。

数値計算は、まず、幅員として1.5m、2.1m、2.25m、床版形式として鋼床版、デッキプレート床版の組合せ5ケースの最小重量設計を、主に基準(1)、(2)、(3)のもとで行った。その結果より、振動数制約およびたわみ制限 $L/600$ が適当かどうかを検討した。

さらに、幅員が2.25mのデッキプレート床版を用いることの効果、上位鋼種を用いることの必要性および振動数制約を若干修正した場合の結果等を検討した。

以上は、特に振動使用性の条件が厳しい公園内歩道橋の場合であるが、最後に振動使用性の条件が厳しくない河川歩道橋について計算し、特に振動数について考察を加えた。

構造レベルの最適化の計算には、汎用最適化プログラムADS¹⁰⁾を用いた。

(1) 公園内歩道橋の最小重量設計の結果

鋼材としてSS41を用いた場合の公園内歩道橋の最小重量設計の結果を、図-4~図-8に示した。図は、縦軸が単位長さ当りの鋼桁容積 (V/L) であり、横軸は支間長 (L) である。

図中、一点鎖線は基準(1)、△あるいは○は基準(2)、太線は基準(3)による結果である。また、幅員が2.25mの鋼床版の場合(図-4)のみ、参考のために指針および応力のみによる結果を、それぞれ破線、点線で示してある。

△および○は、振動数制約がある場合の結果であるが、
△は $f \geq 2.3\text{Hz}$ 、○は $f \leq 1.5\text{Hz}$ で決定された結果である。
これらの図より、以下のことがわかる。

デッキプレート床版の場合は、3者の規準による設計
に大きな差はない。

鋼床版の場合は、基準（2）と（3）による設計において、支間長が35m～41mの範囲でピークが発生している。そのピークは、基準（2）による設計の方が大きい。例えば、幅員が2.25m（図-4）の場合において、支間長が41mと比較すると、基準（2）による設計は基準（1）による設計の20%強、基準（3）による設計より40%も V/L の値が大きい。

これらのことより、支間長が40m付近の歩道橋の設計に振動数制約を考慮すると、設計が難しくなることが予想される。また、基準（1）による設計の V/L の値は、床版形式に関係なく、支間長が40m以上の範囲において基準（3）による設計より大きい。

さらに、基準（1）および（2）による設計の振動使用性を式（6）により検討した。その結果、基準（1）による設計は、デッキプレート床版で30m付近、鋼床版で45m以上の支間長の範囲で振動使用性の条件を満足していなかった。また、基準（2）による設計は、 $f \geq 2.3\text{Hz}$ Hzで決定された（△）支間長の範囲で振動使用性の条件を満足していなかった。

基準（3）による設計が、応力等および振動使用性に関する制約条件式を満足している最小重量設計であることを考慮して以上を総合すると、基準（1）および（2）による設計は、経済性、振動使用性共に問題があり、基準の $L/600$ のたわみ制限および振動数制約は適当でないと考えられる。

以上の結果を参考にして、次に、幅員2.25mのデッキプレート床版を用いた場合、同じく幅員2.25mで鋼材としてSM53を用いた場合、および振動数制約について考察を加える。

（2） デッキプレート床版の使用の効果

歩道橋においては、支間長が長くなるに従い広幅員となり、幅員が2.25mの場合は、一般にデッキプレート床版は用いず鋼床版を用いる。ところが、図-7と8を比較してもわかるように、図-7において基準（2）、（3）のピークが出ている支間長では、デッキプレート床版を用いた方が鋼重は少ない。そこで、幅員が2.25mでも表-1の死荷重の値を仮定して、デッキプレート床版として最小重量設計を行った。

結果を図-9に示した。図は、線で示したのが鋼床版で、記号で示したのがデッキプレート床版の結果である。基準（2）では支間長36～43mの範囲で、基準（3）では支間長34～37mの範囲で、死荷重の重いデッキプレート床版を用いる方が、主桁の鋼重は減少するという結果になった。

（3） SM53の使用の効果

基準（2）による実設計では、振動数の制約条件を満足しない場合、 $f \geq 2.3\text{Hz}$ の方に逃げようとするとは桁高が高くなるので、 $f \leq 1.5\text{Hz}$ の方に逃げ、その結果応力的に厳しくなるのを上位の鋼材を用いることにより解決しているようである。そこで、鋼材をSM53として基準（2）、（3）および応力のみによる最小重

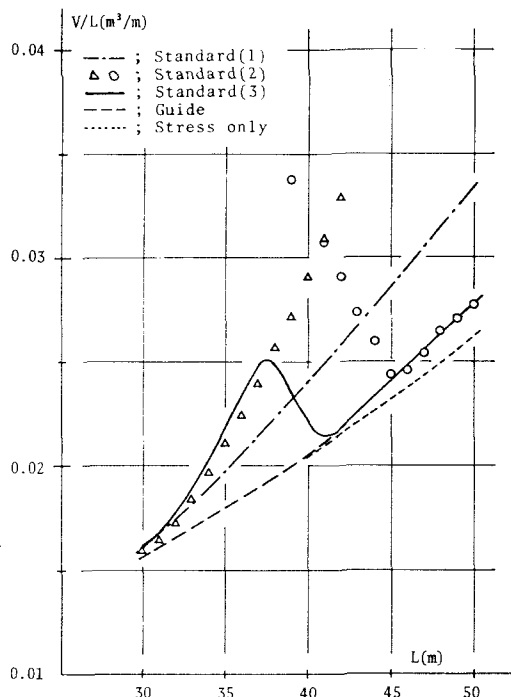


図-4 公園内歩道橋 (B=2.25m、鋼床版)
の結果

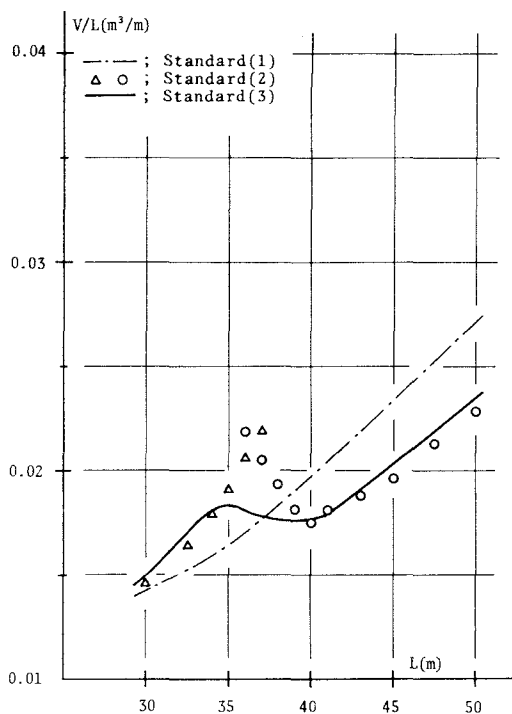


図-5 公園内歩道橋 (B=1.5m、鋼床版) の結果

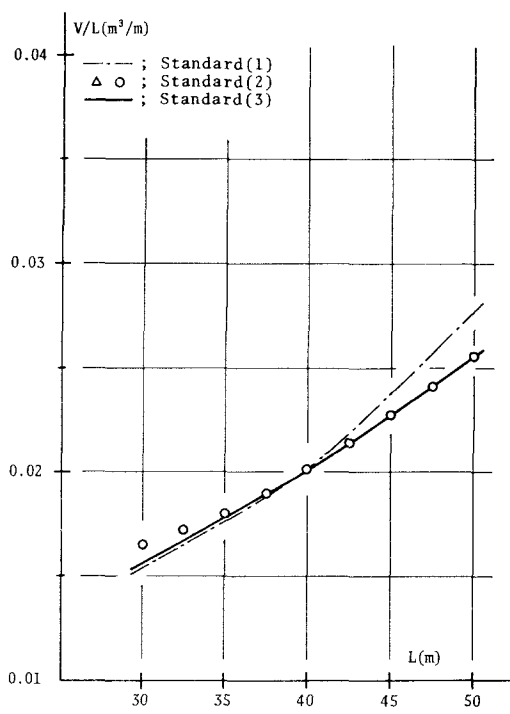


図-6 公園内歩道橋 (B=1.5m、デッキプレート床版) の結果

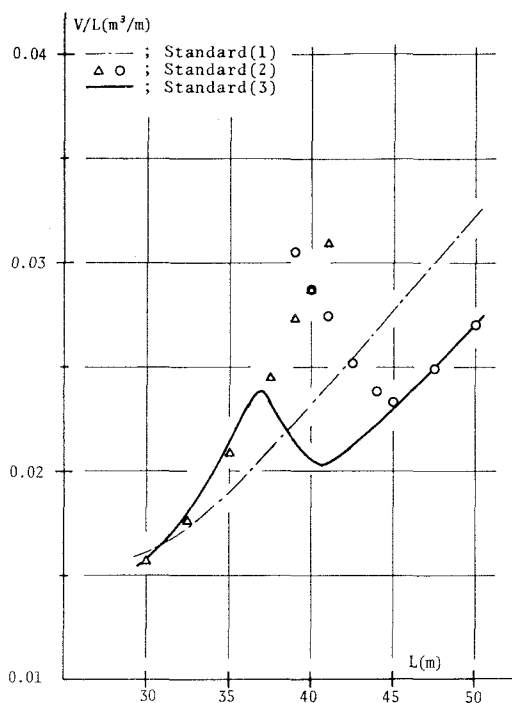


図-7 公園内歩道橋 (B=2.1m、鋼床版) の結果

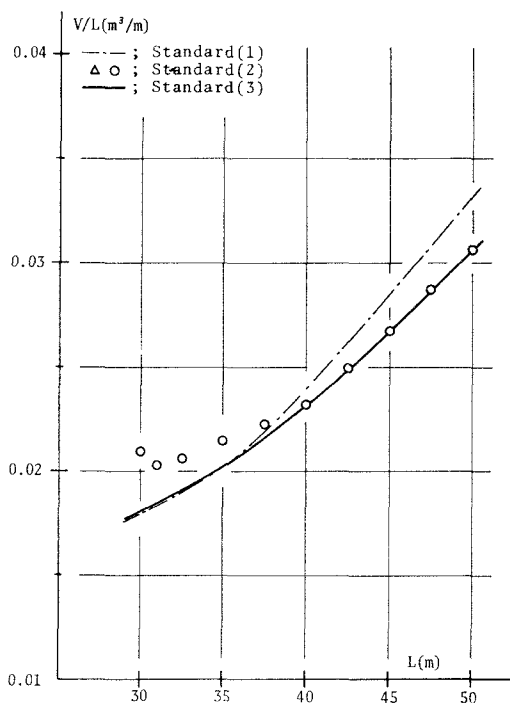


図-8 公園内歩道橋 (B=2.1m、デッキプレート床版) の結果

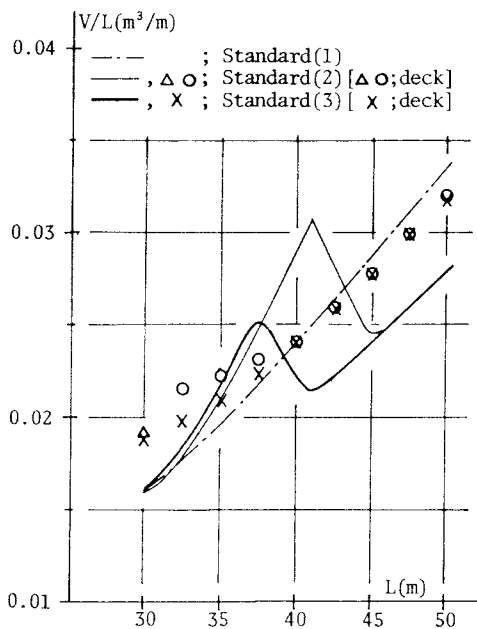


図-9 デッキプレート床版を用いた場合
($B = 2.25\text{m}$)

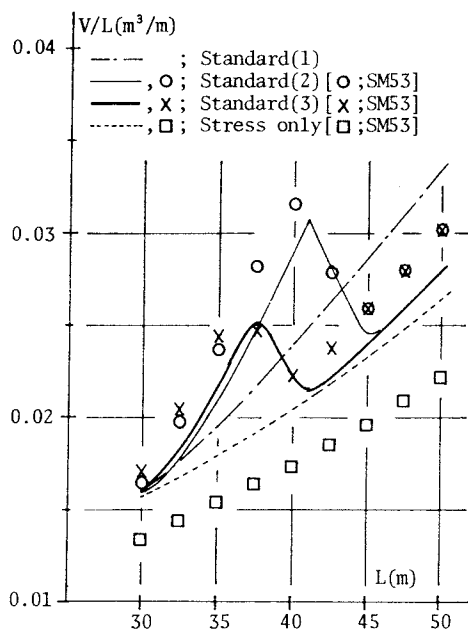


図-10 SM53を用いた場合 ($B = 2.25\text{m}$)

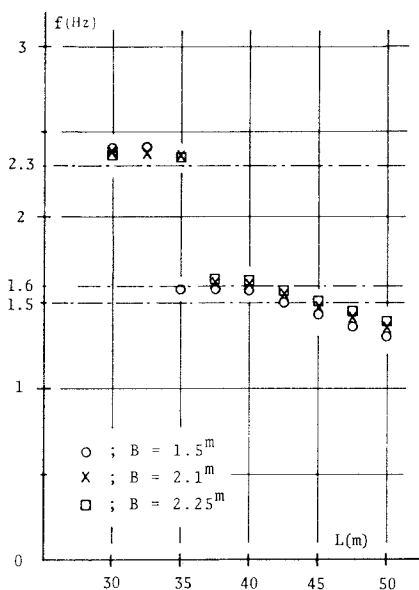


図-11 基準(3)による設計の振動数
(公園内歩道橋、鋼床版)

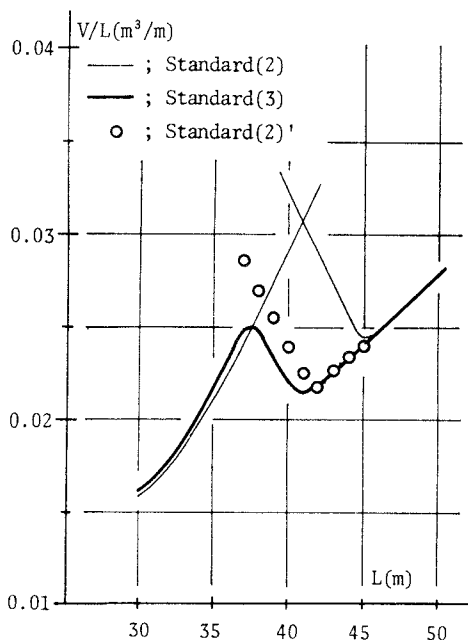


図-12 振動数制約の1.5を1.6にした場合
($B = 2.25\text{m}$ 、鋼床版)

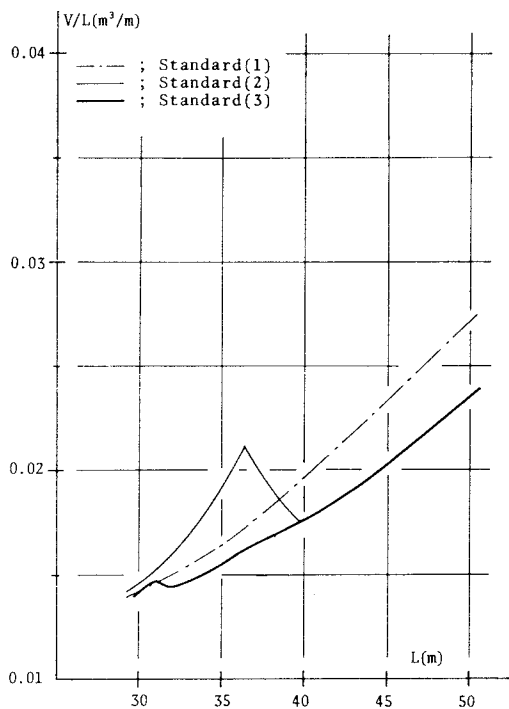


図-13 河川歩道橋（ $B = 1.5\text{m}$ 、鋼床版）の結果

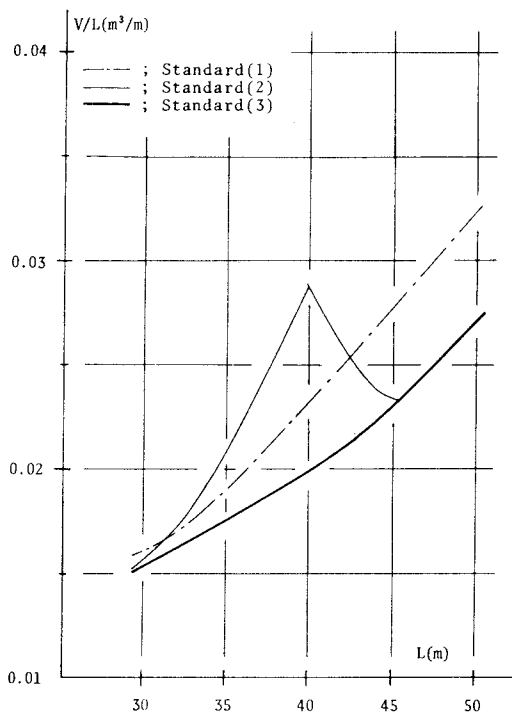


図-14 河川歩道橋（ $B = 2.1\text{m}$ 、鋼床版）の結果

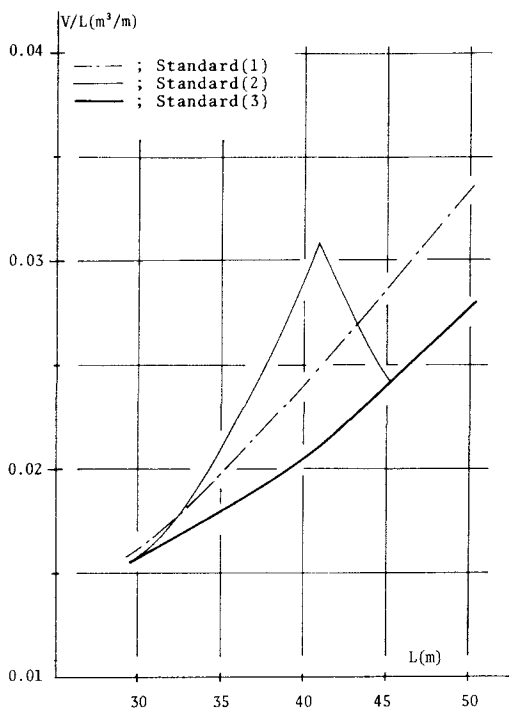


図-15 河川歩道橋（ $B = 2.25\text{m}$ 、鋼床版）の結果

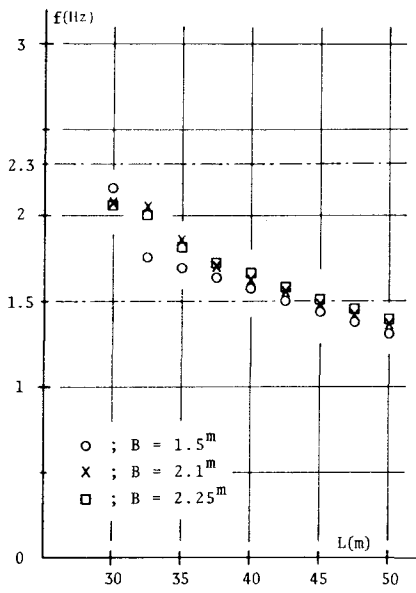


図-16 基準（3）による設計の振動数
（河川歩道橋、鋼床版）

量設計を行い、SS41を用いた場合の結果と比較した。結果を図-10に示した。図は、線で示したのがSS41を用いた場合の結果で、記号で示したのがSM53を用いた場合の結果である。応力のみの場合、SM53を用いることにより鋼重はかなり減少しているが、基準（2）、（3）による場合は逆に増加している。これは、例えば腹板高が150cmの時、SS41では0.9cmの腹板厚で良いが、SM53では1.1cm必要なことによる。

この結果は、支間長が30m以上であればある程度の剛性が桁には要求されるので、SS41より上位の鋼材を用いる効果は少ないことを意味している。

（4） 振動数の制約条件について

デッキプレート床版の場合は、基準（1）、（2）、（3）による設計の間に大きな差はなく、鋼床版においてその差は顕著であった。特に、振動数の制約条件を考慮した基準（2）による設計では、 $V/L-L$ 関係で極端なピークが発生した。図-11は、鋼床版を用いた場合の基準（3）による設計の振動数と支間長の関係を示したものである。図より、振動使用性を定量化して考慮した設計法においても2Hz前後の振動数を避けていることがわかる。

これより、振動数の制約条件は振動使用性と深い関係があるといえる。しかし、避けている範囲は、図より1.6~2.3Hzである。この結果を参考にして、振動数の制約条件式（5）を、

$$g^{(b)} = 0.35 - |f - 1.95| \leq 0 \quad (5)'$$

として最小重量設計を行った結果（ $B=2.25\text{m}$ ）が図-12である。図は、線で示したのが基準（2）、（3）による結果であり、○で示したのが、式（5）の代りに式（5）'を用いた基準（2）による結果である。式（5）'を用いることにより、基準（2）と（3）による結果がほとんど一致している。

（5） 河川歩道橋の場合

以上の計算は、すべて振動使用性の条件が比較的厳しい公園内歩道橋の場合であったが、ここでは、歩行者の数が比較的少ない河川歩道橋の鋼床版形式について検討した。

基準（1）、（2）による結果は、前記の図-4、5、7と同じであるので、基準（3）についてのみ計算し、結果を図-13、14、15に示した。この場合、基準（3）による結果は、公園内歩道橋の場合のようにピークは持たず、支間長が30m付近以外は振動使用性に関する条件がクリティカルにならなかった。つまり、指針による設計と同じということになる。

また、基準（3）による設計の振動数と支間長の関係を図-16に示したが、公園内歩道橋のように特に避けている振動数範囲はなく、1.4~2.2Hzの間に連続的に分布している。これは、河川歩道橋のように歩行者が少ない歩道橋の設計においては、振動数制約は必要ないことを表している。

6. 結 論

近似振動使用性照査法および2段階最適化手法を応用して、長支間歩道橋の最小重量設計を行い、基準のたわみ制限および振動数制約について検討を加えた。

本論文より得られた事項を箇条書にすると以下のようになる。

- （1） 30m以上の長支間歩道橋の設計においては、たわみ制限が $L/600$ である基準（1）は、経済性や振動使用性の点から好ましくない場合が多い。
- （2） 振動数を制約する基準（2）による設計は、設計を難しくすることがあるし、経済性からも好ましくない。河川歩道橋のように歩行者の数が少ない歩道橋では、振動数制約は必要ないし、歩行者の多い歩道橋のためには、基準の振動数の範囲（ $f \leq 1.5\text{Hz}$ ）は適当でなく、 $f \leq 1.6\text{Hz}$ とすることにより、基準（3）と同等の設計が可能である。

- (3) 30～40mの支間長範囲ではデッキプレート床版を用いる方が経済的になることもある。
- (4) 上位の鋼材を用いたとしても、振動使用性を考慮する場合は効果が少ない。
- (5) 振動使用性の照査法が若干複雑であるが、基準(3)による設計はすべての制約条件を満足させることが可能であり、最も合理的と思われる。

基準(3)による設計で $V/L-L$ の関係がピークの出た範囲については1.6～2.3Hzの設計を避けている結果になっている。しかし、この振動数範囲については、ダンパー等の使用を今後検討する予定である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：横断歩道橋設計指針 解説、丸善株式会社、1968.
- 2) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説、丸善株式会社、1985.
- 3) 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、第325号、pp.23-33、1982.
- 4) 橋梁振動研究会：橋梁振動に関するコロキウム講演概要・資料集、橋梁振動研究会、1987.
- 5) Sugimoto, H., Y. Kajikawa and G. N. Vanderplaats: On the Minimum Weight Design of Pedestrian Bridges Taking Vibration Serviceability into Consideration, Proc. of JSCE, No.386/1-8, will be published, 1987.
- 6) 杉本博之、吉岡修治、菅田紀之：板厚を離散変数とする格子構造物の最小重量設計について、第11回構造工学における数値解析法シンポジウム論文集、第11巻、pp.177-182、1987.
- 7) 全日本建設技術協会：建設省 土木構造物標準設計 第5巻 立体横断施設横断歩道橋、1985.
- 8) 大久保禎二：トラス構造物の最適設計法に関する研究、土木学会論文報告集、第177号、pp.9-19、1970.
- 9) Konishi, Y. and Y. Maeda: Optimum Design of Trusses Using Suboptimization, JSCE, No.333, pp.173-181、1984.
- 10) Vanderplaats, G. N. and H. Sugimoto: A General-Purpose Optimization Program for Engineering Design, Journal of Computers and Structures, Vol.24, No.1, PP.13-21、1986.

(1987年10月16日)