

I-20

歩道橋の多目的最適化システムの開発について

室蘭工業大学工学部	正 員	杉 本 博 之
室蘭工業大学工学部	学生員	亀 廻 井 寿 明
金 沢 大 学工学部	正 員	梶 川 康 男
甲 南 大 学理学部		中 山 弘 隆

1. まえがき

歩道橋、特に支間長が30mを越えるような長支間の歩道橋においては、振動使用性が問題になり設計が複雑になる。現行の立体横断施設技術基準¹⁾(以下、基準と略する)では、振動使用性に関して、以下のよう記述されている。

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、利用者に不快感を与えないものでなければならない。

これらにおいて、2-12における特別な配慮とは、2-13を意味し、利用者に不快感を与えないための具体的な対策の一つとして、桁の固有振動数が1.5～2.3Hzにならないように指示されている。

固有振動数の条件を考慮せず、かつある程度合理的に設計された歩道橋は、支間長が短い場合は、その固有振動数は2.3Hzより大きく、逆に支間長が長い場合は、1.5Hzより少なくなる。当然、ある支間長の範囲では、1.5～2.3Hzになる場合があり、この場合には、固有振動数に関する条件は支配的になる。場合によっては、設計を大変困難にしている要因にもなっているようである。

以上のような背景の下で、杉本と梶川は²⁾は、梶川³⁾が提案した振動使用性を考慮した歩道橋の最小重量設計法を提案し、更に、長支間歩道橋の種々の最小重量設計の結果より、基準におけるたわみ制限、固有振動数制限に対して考察を加えた⁴⁾。その結果、基準のたわみ制限、固有振動数制限には不合理な点があり、振動使用性を定量化した方法で設計する方が望ましいこと等を指摘した。

文献4)においては、振動使用性を制約条件にした場合のその上限値は、文献2)における振動じょ限度の基準値とした。しかし、これらの値は、本来は上限値というよりは目標値として設定した方が適当な値と考えられる。また、固有振動数の制限も、振動使用性および総鋼重との兼ね合いで定められるべきものであり、やはり何らかの目標値として設定した方が合理的と考えられる。

結局、歩道橋の設計は、最小重量設計という単一の目的関数の最小化ではなく、総鋼重、振動使用性、および固有振動数の3者を目的関数とする多目的最適化問題として定式化した方がより合理的でないかと考えられる。

多目的最適化問題の解法として、中山⁵⁾は満足化トレードオフ法を発表し、斜張橋の精度管理システム等に応用している⁶⁾。また、亀廻井、杉本、中山⁷⁾⁸⁾は、満足化トレードオフ法における補助的スカラー化問題の定式を若干修正して満足度パラメータを導入し、比較的大規模な構造設計のために満足化トレードオフ法を改良した改良型満足化トレードオフ法を発表している。

そこで、本研究においては、歩道橋の設計を上記のように多目的最適化問題として定式化し、それに改良型満足化トレードオフ法を応用することを試みた。また、それらを用いて歩道橋の多目的最適化システムを作成した。本論文では、理論とシステムの概要をいくつかの計算例と共に説明し、特に支間長が長い歩道橋の設計について若干の考察を加えている。

Development of the System for the Multi-Objective Design of Pedestrian Bridges
by Hiroyuki SUGIMOTO, Toshiaki KAMENOI, Yasuo KAJIKAWA and Hiroataka NAKAYAMA

2. 歩道橋の多目的最適設計問題

(1) 歩道橋の構造、荷重条件および断面

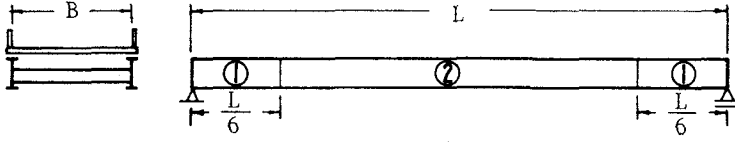


図-1 歩道橋の構造

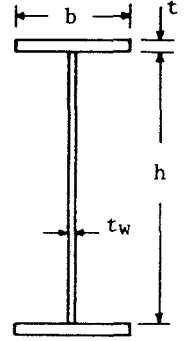


図-2 主桁断面

本研究の解析に用いた歩道橋の構造は、図-1に示す主桁2本の単純桁とし、支間長をL、幅員をBとする。歩道橋としては長支間を対象としているので、主桁断面は、 $L/6$ の点で変化させる。ただし、腹板高は全断面で一定としている。主桁断面は、図-2に示す上下・左右対称のI型断面とし、水平補剛材は用いていない。

荷重については、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、たわみ等を求めている。

最適設計における設計変数としては、腹板高、フランジ厚、フランジ幅が考えられるが、断面決定においては、2段階最適化手法^{2) 9)}を用いている。したがって、部材断面レベルの最適化においては、設計変数はフランジ厚 t のみとなり、板厚を離散変数として取り扱うことが可能になる。また、構造レベルの最適化における設計変数は、腹板高と2つの断面における断面2次モーメントの3変数となり、これらの値により最適断面が決定される。

腹板厚は、入力データとして与えている。

(2) 振動感覚を考慮した歩道橋の多目的最適設計問題

まえがきにも記述したように、本研究の目的関数としては、鋼桁容積、振動感覚、および桁の固有振動数としている。それらの目的関数と制約条件等を示すと以下ようになる。

$$\text{○目的関数} : F_1 = V/L \rightarrow \min (\text{単位長さ当りの鋼桁容積, m}^3/\text{m}) \quad (1)$$

$$F_2 = \{\gamma_s \cdot \gamma_f \cdot S^*/\gamma_R\}_{sw} \rightarrow \min (\text{単独歩行の受ける刺激量, cm/sec}) \quad (2)$$

$$F_3 = \{\gamma_s \cdot \gamma_f \cdot S^*/\gamma_R\}_{cw} \rightarrow \min (\text{群集歩行の受ける刺激量, cm/sec}) \quad (3)$$

$$F_4 = \{\gamma_s \cdot \gamma_f \cdot S^*/\gamma_R\}_{sr} \rightarrow \min (\text{単独走行の受ける刺激量, cm/sec}) \quad (4)$$

$$F_5 = |1.9 - f_B| \rightarrow \max (\text{固有振動数, Hz}) \quad (5)$$

$$\text{○制約条件} : \left. \begin{array}{l} g^{(1)}_i = \sigma_i - \sigma_{ai} \leq 0 \\ g^{(2)}_i = b^L - b_i \leq 0 \\ g^{(3)}_i = b_i/32 - t_i \leq 0 \end{array} \right\} (i = 1 \sim n) \quad (6)$$

$$g^{(4)} = \delta - L/600 \leq 0 \quad \text{あるいは} \quad g^{(4)} = \delta - L/400 \leq 0 \quad (7)$$

$$\text{○上下限值} : t^L \leq t_i \leq t^U \quad (i = 1 \sim n) \quad (8)$$

$$h^L \leq h \leq h^U \quad (9)$$

$$\text{○設計変数} : \{x_1 \ x_2 \ x_3\} = \{I_1 \ I_2 \ h\} \quad (10)$$

ここで、 V は鋼桁総容積 (cm^3)、 L は橋長 (cm)、 n は部材数、 i は部材番号、 σ は応力度 (kgf/cm^2)、 σ_a は許容応力度 (kgf/cm^2)、 b^L はフランジ幅の下限値 (cm)、 t^U 、 t^L はそれぞれフランジ厚の上下限值 (cm)、 h^L 、 h^U は腹板高の上下限值 (cm)、 δ は活荷重による最大たわみ (cm)である。

振動使用性の目的関数 ($F_2 \sim F_4$)において、 S^* は歩行者が受ける振動刺激量の基準値 (cm/sec)、

γ_s は載荷状態係数、 γ_f は振動数係数、 γ_R は振動じょ限度の変動性を考慮する反応係数である。これらの目的関数については、振動じょ限度の基準値 R^* と比較するために、 S^* に γ_s 、 γ_f をかけて γ_R で割った値を用いている。

目的関数 F_6 については、桁の固有振動数ができるだけ 1.5 ～ 2.3 Hz の中間値である 1.9 Hz より離れることを目的として設定した。

式 (7) はたわみに関する制約条件であるが、問題の設定の仕方により、活荷重による最大たわみが、 $L/400$ 、 $L/600$ のどちらかが自動的に選ばれるようになっている。

上式では、目的関数は 5 種類示されているが、以下に説明するように、実際の使用に際しては、上記の 5 つの目的関数の中から 1 ～ 5 つの適当な目的関数を選択できるようになっている。

なお、理論の詳細については、文献 2)、3) を参照されたい。

3. 歩道橋の多目的最適設計システムの説明

(1) 概要

本システムは、著者らが開発した多目的最適設計支援システムに、振動使用性を考慮した歩道橋の解析のためのプログラムを結合し、システムの 1 部を若干改良して歩道橋の多目的最適化システムとして作成したものである。以下に、このシステムの概要を簡単に説明する。

本システムでは、多目的最適化問題を取り扱うに当り、著者らが提案している改良型満足化トレードオフ法⁷⁾⁸⁾を組み込んでいる。これは、従来の満足化トレードオフ法を、より構造設計に適したものにするために、新たに満足度パラメータと最悪点を導入し改良を試みたものである。満足度パラメータは、設計者が先験的に持っている各目的関数の達成度に対する要求の度合いを 0 ～ 1 の実数値で与えられる。これにより、多目的最適化の過程の初期から、ある程度設計者の意思を反映した設計が得られることになり、トレードオフの回数の減少が期待できるものである。

このシステムには、設計の効率、システムの使用性を向上させるために、次のような機能を組み込んでいる。①初期値改良、②最適化プログラムの内部パラメータの変更、③収束過程の情報表示、④再計算の手続き（最適化手法、初期値の変更、内部パラメータの変更）、⑤満足度パラメータを設定しての多目的最適化の実行、⑥ラグランジュ乗数を用いるトレードオフ等である。

以下に、システムの構成、入出力等について説明する。

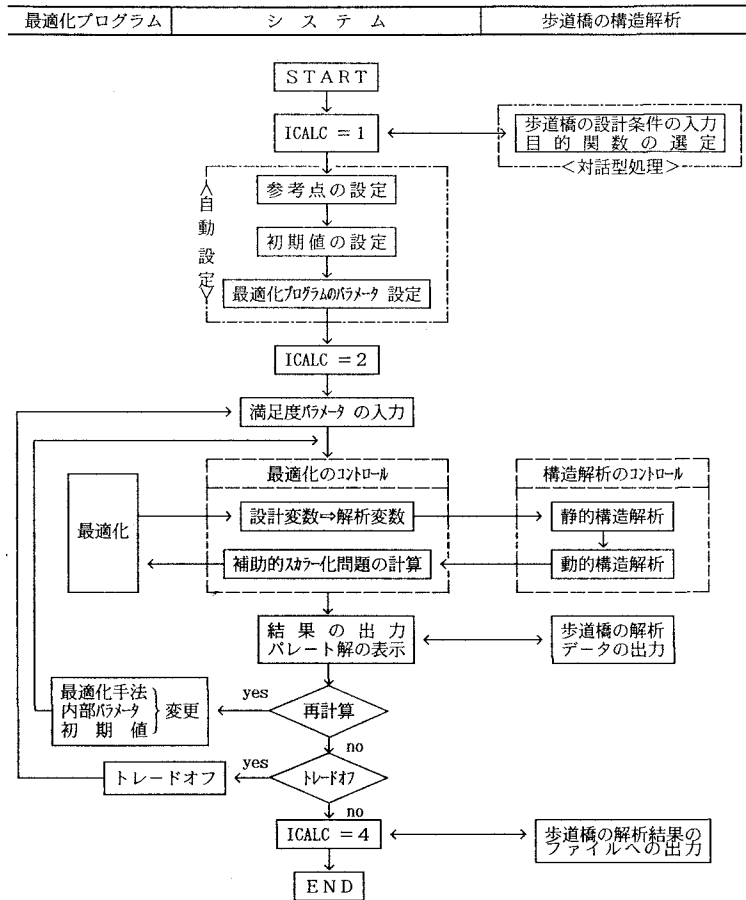
(2) システムの構成

本研究で開発した歩道橋の多目的最適設計のためのシステムの構成および流れを図-3 に示した。

全体の構成は、大きく分けて 3 つの部分より構成される。それは、最適化の部分¹⁰⁾、全体をコントロールするシステムの部分、および歩道橋の構造解析の部分である。

設計がスタートすると、まず最初に、歩道橋の設計条件の入力、および目的関数の選定が行われ、次に、最適化に必要な種々のパラメータの値が自動設定され、満足度パラメータの値が対話型処理により入力される。これらの詳細は、次節で説明される。

入力関係の手続きが終了すると、満足化トレードオフ法で副問題として定式化される補助的スカラー化問題が最適化手法により解かれ、最初のパレート解の候補が計算される。この解に関係する種々の情報が画面上に出力され、まず、最適化計算の結果を受け入れるかどうかの判断が求められる。ここで、収束状況に関する種々の事柄より、受け入れないと判断した場合は、最適化手法、内部パラメータ、あるいは初期値等を変更して、再度最適化計算が実行される。受け入れられた場合は、今度はパレート解として受け入れるかどうかの判断が求められる。受け入れれば設計は終了する。もし受け入れられない場合は、参考点を変更して



図－３ 歩道橋の多目的最適化システムの構成

のトレードオフを行うか、あるいは満足度パラメータを変更しての最適化が行われる。両者を同時に行うこともできる。最終的に、すべての目的関数間のバランスにより、設計者が満足するまで繰り返される。

(３) 入力

入力は、対話型で処理される場合と内部で自動的に設定される場合がある。それらを表－１および表－２に示した。

表－１は、対話型で処理される８種類のデータの入力項目とその選択肢を示している。架設目的は、歩道橋が架設される場所の状況が入力される。架設地点の状況により振動使用性の照査法が異なる。次に、橋長、幅員、床版形式、鋼材、腹板厚の順に入力される。鋼材については、歩道橋ではＳＭ５０より上位の鋼材を使うことのメリットはないと考えられる^{４)}が一応４種類用意した。また、本研究の最適化理論では、腹板厚を離散値として扱えないので、パラメーターとして与えることにし入力データとした。多目的最適化問題の目的関数は、式（１）～（５）のように設定されているが、従来の最小重量設計、あるいは、いくつかの目的関数の組み合わせで検討する場合も考慮して、４種類の組み合わせの中から選択することにした。最後のデータは満足度パラメータで、各目的関数に自動的に設定される希求水準に対して、あらかじめこの程度は達成してほしいという要求があれば、その程度に応じて０～１の値が入力される。０であれば一般の多目的最適化における目的関数と同じに扱われ、その値が希求水準に達することは期待できない。また１であ

表－１ 対話型で処理される入力データ

順番	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
入力項目	架設目的	橋 長 (m)	幅 員 (m)	床版形式	鋼材	腹板厚 (cm)	目的関数	満足度 パラメータ
選 択 肢	公園内記念歩道橋	任 意	1.50	デッキレート	SS41	0.9	容積	0～1の 任意の実数
	交路路横断歩道橋		2.10		SM50	1.0	容積+振動数	
	河川横断歩道橋		2.15	鋼 床 版	SM53	1.1	容積+振動感覚	
	その他				SM58		容積+振動感覚+振動数	

れば、その目的関数の希求水準にかならず達することになる。

本研究の改良型満足化トレードオフ法では、参考点として、理想点、希求水準、および最悪点の3点の値が各目的関数毎に設定されなければならない。

これらの値は、本来は設計者の判断により設定されるべきものであるが、これらの値の数学的意味が比較的難解であること、

また、歩道橋の設計システムという問題を限定したプログラムであるので、それらの適当な値は予想されること等の理由により、自動設定とした。それらの値を表－２に示した。

表－２ 自動設定される参考点の値

参 考 点		理想点	希求水準	最悪点	目 的
鋼桁容積 (m ³ /m)		0.0	V _a *	V _n *	min
振 動 感 覚	単独歩行 (cm/sec)	0.0	1.7	3.4	min
	単独走行 (cm/sec)	0.0	2.7	5.4	min
	群集歩行 (cm/sec)	0.0	1.7	3.4	min
振 動 数 (Hz)		1.9	0.4	0.0	max

* 支間長に応じて適当な値が設定される

(4) 出力

歩道橋の多目的最適化システムにおいては、補助的スカラー化問題の最適化計算の終了後、このレベルでのデータが出力される。このデータの内容としては、歩道橋の構造解析の結果（固有振動数、各部材断面における寸法、応力度等）と、最適化に関する情報（各設計変数、制約条件式の値、収束状況のグラフ表示、およびパレート解等）である。設計者は、これらを総合的に判断して、得られた最適解を受け入れるかどうかの判断をすることになる。このためには、最適設計の数値計算に関する若干の経験が必要であろう。

次に、パレート解レベルでの出力であるが、トレードオフの際の一つの目安として、感度の情報が出力される。ここで、感度とは、ラグランジュ乗数に目的関数の重みをかけたもの⁵⁾であり、これがトレードオフの一つの目安となる。トレードオフは、得られたパレート解について、設計者が、改善したい目的関数、他の目的関数の改善のためには犠牲にしても良い目的関数、および現状のままで良い目的関数の3つに分類して、それぞれ新希求水準を設定しなければならない。これらの設定は、一般に簡単ではない。そこで、本研究のシステムでは、新希求水準は、設計者が設定できるようにもなっているが、自動的に計算されるようにも配慮している。

なお、上記の収束状況のグラフ表示は、VAX11/750 上でVAX/GKS を用いてなされている。

4. 数値計算例

本研究で作成した歩道橋の多目的最適設計システムの使用例をここでは説明する。

表－１の順で設計条件等を説明すると以下ようになる。架設目的は「公園内歩道橋」、橋長は40.0m、幅員は2.25m、床版形式は「鋼床版」、鋼材はSS41、腹板厚は0.9 cm、目的関数は「鋼桁容積+振動感覚+

固有振動数」である。満足度パラメータは、最初すべて0に設定して計算した。それらの結果を表-3に示した。

表-3には、各断面寸法の値の他に、式(1)～(5)の目的関数の値も示してある。

初回の結果を見ると、振動感覚はすべて希求水準に達しているが、振動数が希求水準より離れている。そこで、まずトレードオフを用いる方法を試みることにし、振動数

の希求水準を上げて再計算した。その結果が、[トレードオフ]の欄に示してある結果である。鋼桁容積は犠牲になっているが、振動数はかなり改善されている。

一方それらとは別に、最初から満足度パラメータを与えて計算した結果が、[満足度変更]の欄に示してある結果である。備考欄に書いてあるように、2種類の組み合わせの満足度パラメータの下で計算したが、トレードオフを試みることにし、1度の計算でほぼトレードオフをした結果と同様の設計が得られていることが示されている。

5. あとがき

振動使用性が問題になるような長支間の歩道橋の設計においては、経済性のみを目的関数とし、残りの応答値を制約条件として設計するよりは、経済性、振動使用性、及び振動数を目的関数とする多目的最適化問題として定式化した方が合理的ではないかと考え、そのための最適化システムを作成した。

紙面の都合で、多くの計算例を説明できなかったが、効率の点でも、使用性の点でも、ほぼ満足できるシステムができたと考えている。今後、最悪点等の参考点の設定をより合理的にし、多径間および変断面の場合にも拡張していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 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。
- 2) Sugimoto, H., Y. Kajikawa & G. N. Vanderplaats: On the Minimum Weight Design of Pedestrian Bridges Taking Vibration Serviceability into Consideration, Proc. of JSCE, No. 386/I-8, pp. 105-113, 1987.
- 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、土木学会論文集、第325号、pp. 23-33、1982。
- 4) 杉本博之・梶川康男：長支間歩道橋の振動使用性設計規準に関する考察、構造工学論文集、Vol. 34A, pp. 739-749, 1988。
- 5) 中山弘隆：多目的計画に対する満足化トレードオフ法の提案、計測自動制御学会論文集、Vol. 20, pp. 29-35, 1984。
- 6) 古川浩平・井上幸一・中山弘隆・石堂一成：多目的計画法を用いた斜張橋の架設時精度管理システムに関する研究、土木学会論文集、No. 374/I-6, pp. 495-502, 1986。
- 7) 亀廻井寿明・杉本博之・中山弘隆：多目的計画法の構造設計への応用に関する基礎的研究、土木学会北海道支部論文報告集、第47号、pp. 95-100、1991。
- 8) 亀廻井寿明・杉本博之・中山弘隆：構造最適設計のための改良型満足化トレードオフ法に関する研究、土木学会論文集、No. 441/I-18, (掲載予定)。
- 9) 杉本博之・吉岡修治：2段階最適化による格子構造の最小重量設計に関する研究、構造工学論文集、Vol. 33A, pp. 687-695, 1987。
- 10) Vanderplaats, G. N. & H. Sugimoto: A General-Purpose Optimization Program for Engineering Design, Journal of Computers and Structures, Vol. 24, No. 1, pp. 13-21, 1986。

表-3 歩道橋の多目的最適設計例

	初 回	トレードオフ	満足度変更	満足度変更
b_1 (t_1) (cm)	20.0 (2.0)	29.0 (1.4)	25.4 (3.0)	20.1 (3.0)
b_2 (t_2) (cm)	21.7 (3.8)	30.4 (3.8)	25.4 (3.8)	22.2 (3.8)
h (t_w) (cm)	111.1 (0.9)	98.0 (0.9)	102.8 (0.9)	108.9 (0.9)
鋼桁容積 (m^3/m)	0.0237	0.0265	0.0272	0.0251
振動感覚	単独歩行 (cm/sec)	0.690	0.690	0.540
	単独走行 (cm/sec)	0.712	0.712	0.692
	群集歩行 (cm/sec)	1.550	1.550	1.186
振 動 数 (Hz)	1.606	1.561	1.564	1.590
備 考	——	振動数の希求水準のみを上げる	振動数の満足度パラメータを0.7	鋼桁容積と振動数の満足度パラメータを0.5と0.7