

愛媛大学工学部 正員 大久保 稔 二
建設省土木研究所 松本 秀 応

1. まえがき

構造物の最適設計の分野では、これまで主として構造物の機能および建設費の面から最適化する研究が行われており、そのモデル化および最適化手法に多くの提案がなされている。しかし、土木構造物は、その建設される環境から、さらに構造物の美観や使いやすさといったような、人間の感覚的な要素をも考慮して最適な設計をすることが望まれる。本研究は、このような観点から、2ヒンジ鋼アーチ橋の、製作費のみならず美観をも考慮した最適設計問題を、多目的を有する最適設計問題としてとらえ、その最適設計モデルを提案し、SWT法(Surrogate Worth Trade-off 法)にもとづく最適解の決定方法などについて検討した結果を発表するものである。

2. 最適設計モデルの設定

図-1 に示す2ヒンジ放物線リブアーチ橋の最適設計問題を考える。

リブアーチ橋では、アーチリブの断面寸法、ライズ比など多くの設計変数が考えられるが、製作費および美観に最も大きな影響を与えるのはライズ比 f であるので、本研究では、まず各 f について最小製作費(最小使用材料容積)を求め、最小製作費と f との関係式 $F_1(f)$ を導入するとともに、アーチの美観をも f の関数として表現した。すなわち、

$$\text{最小使用材料容積} = F_1(f), \quad \text{美観関数} = F_2(f) \quad (1)$$

一般に、アーチの美しさを $F_2(f)$ という陽な関数で絶対的に表現することはきわめて困難であるが、本研究で用いているSWT法によれば、 $F_2(f)$ は設計者の美意識により、 f の違いによるアーチの美しさの相対的な比較を表現している程度の単純な関数でよく、その相対的な関数形にはこだわらない。 f に関する相対的な大小関係が変わらなければ、 $F_2(f)$ の関数形に関係なく同一の最適解を得ることができる。このような $F_2(f)$ は、アーチ橋の建設地点の写真や完成予想図などを用いて、種々の f のアーチ橋の景観をシミュレーションすることにより、容易に決定することができる。また当然のことながら、この $F_2(f)$ は、同一の設計者であっても、アーチの設計地点が山間部か、あるいは都市部かなど、アーチの建設される環境により明らかに異なった傾向を示すものである。このように $F_1(f)$ 、 $F_2(f)$ を設定すると、アーチの最適設計問題は、 f を共通の変数とし、 $F_1(f)$ および $F_2(f)$ を目的関数とする多目的設計問題として考慮することができ、本研究ではHainesによって提案されたSWT法により最終的な最適解(選好解)を決定した。

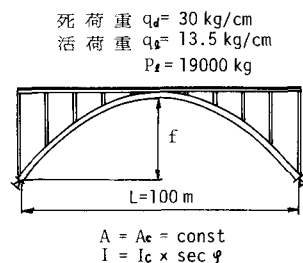


図-1 2ヒンジ鋼リブアーチ橋

3. SWT法による最適化の方法

SWT法により最適解を決定する過程は、次の2段階よりなる。(図-2 参照)

- (1) 非劣解の集合を作成する。
- (2) 非劣解集合から、主観により選好解(最適解)を選択する。

まず、非劣解集合(図-2の太線部分)を次式より求める。

$$\left. \begin{aligned} \min_{x \in R} F_k(x) \\ \text{Subject to } F_i(x) \leq \varepsilon_i, \quad (i=1, \dots, k-1, k+1, \dots, n) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 R は実行可能領域、 ε_i は設計者によって指定される目的 F_i の許容できる水準を表す。 ε を各目的関数において種々変化させ式(2)を解くことにより、非劣解集合を決定することができる。

つぎに、非劣解集合から、非劣解集合のなす曲面と、設計者の主観により

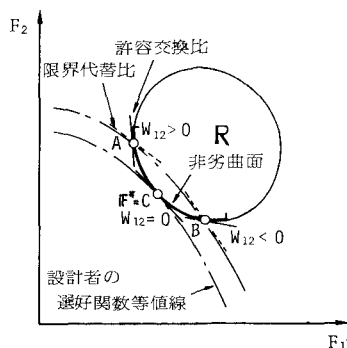


図-2 SWT法による
選好解の決定

規定される陽には与えられていない選好関数 $U\{F_1(X), \dots, F_n(X)\}$ の等値曲面が接す3点を、設計者との対話により、2者択一式の選択をつづけることにより決定する。すなわち、図-2に示す F_1, F_2 空間の場合には、次式を満足する点 C 点 (F^*) を選好解として決定する。

$$W_{12}(F^*) = \lambda_{12}(F^*) - m_{12}(F^*) = 0 \quad (3)$$

ここに、 $\lambda_{12}(F)$, $m_{12}(F)$ は、それぞれ非劣曲面上、および設計者の主観による選好関数 U の等値曲線の $F(F_1, F_2)$ 点の勾配である。

4. 設計例

よでのべた方法により、図-1に示す2ヒンジ放物線アーチ橋の最適設計を行った結果を示す。なお、計算は全てパソコンのFM-8により行った。

アーチリブ断面の最適設計 (F_1 の導入) アーチリブ断面として図-3に示すI形断面を考え、アーチクラウンにおいて $WH=200\text{cm}$ とした。また、使用鋼種はSM50とし、設計条件としては「道路橋示方書」に規定しているたわみ制限以外のすべての条件を考慮している。アーチの解析は微小変形理論により行い、影響線により死荷重および活荷重による最大応力の発生する位置および大きさを求め、最小断面積を決定した。このようにして求めたアーチリブのライズ f と全使用材料の最小容積 $V_{\min}$ の関係 $F_1(f)$ を図-4に示す。

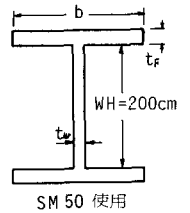


図-3 アーチリブ断面

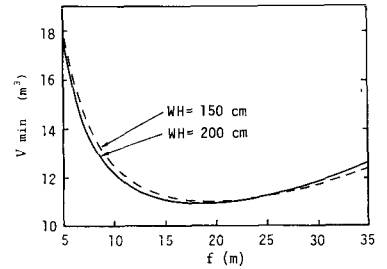


図-4 $V_{\min}$ - f 関係曲線

美観関数 (F_2) および選好関数 (U) 本研究では、美観関数: $F_2(f)$ として(4)式を仮定した。また、選好関数 $U(F)$ は必ずしも陽に規定する必要はなく、設計者との対話により、局所的な選好に関する情報を得ながら選好関数を近似し、式(3)の $W_{12}(F^*)=0$ となる F^* の探索を行うことができるが、ここでは数値例を示す必要性から、設計者の選好の判断は、式(5)の選好関数 U に従って行われるものと仮定した。

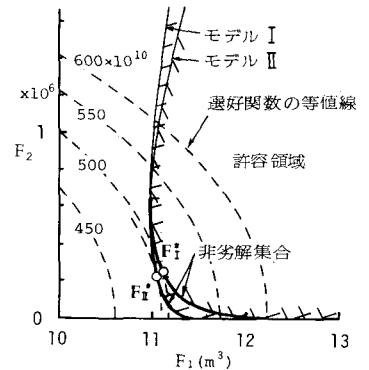


図-5 非劣解集合および選好解

$$\begin{aligned} \text{モデル I: } f &= 10\text{m} \text{ を最も美しいと感じる場合, } F_2(f) = (f-1000)^2 \\ \text{モデル II: } f &= 26\text{m} \text{ を最も美しいと感じる場合, } F_2(f) = (f-2600)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$U(F) = \{(200000 F_1)^2 + F_2^2\} \quad (5)$$

非劣解集合および選好解の決定 式(2)で最小化する目的関数を F_1 とすることにより、 $F_2(f)$ の種々の ε_2 に対する $F_1(f)$ の最小値は、図-4の関係式よりただちに決定され、各モデルに対して表-1の F_1, F_2 および図-5の太線部分のような非劣解集合が得られる。さらに、これらの非劣解における λ_{12} および m_{12} の値より W_{12} が求められ、 $W_{12}=0$ となる点が選好解 (f^*, F^*) となる。最適なライズ f^* として、モデル I で 15.4m 、モデル II で 21.3m を得た。各モデルとも、製作費 F_1 が相当減少する点で妥協解を得ている。

表-1 選好解の決定過程

5. まとめ

本研究で提案した最適設計モデルを用いることにより、製作費と美観を考慮したアーチ橋の非劣解集合が容易に求められ、2つの目的関数の選好関数が陽に表現できない場合でも、SWT法により、設計者との対話により、局所的な選好に関する情報を得ながらアーチ橋の最適解を簡単に求めることができる。

	ε_2 $\times 10^5$	f (cm)	F_1 (m^3)	F_2 $\times 10^5$	λ_{12} (m^3) $\times 10^{-6}$	m_{12} (m^3) $\times 10^{-6}$	W_{12} (m^3) $\times 10^{-6}$
モデル II	0.0	2600.00	11.390	0.000	0.0000	0.0000	0.0000
	0.5	2376.39	11.191	0.500	2.6341	0.1117	2.5224
	1.0	2283.77	11.127	1.000	1.0691	0.2246	0.8444
	1.5	2212.70	11.084	1.500	0.7308	0.3383	0.3925
	2.0	2152.79	11.054	2.000	0.5566	0.4523	0.1043
	2.5	2100.00	11.028	2.500	0.4178	0.5667	-0.1488
	3.0	2052.28	11.012	3.000	0.3154	0.6810	-0.3655
モデル I	3.5	2008.39	10.997	3.500	0.2422	0.7956	-0.5534
	1.5	1387.30	11.227	1.500	1.7245	0.3340	1.3905
	2.0	1447.21	11.159	2.000	1.2324	0.4480	0.7843
	2.5	1500.00	11.104	2.500	0.8879	0.5628	0.3250
	3.0	1547.72	11.070	3.000	0.6447	0.6774	-0.0327
	3.5	1591.61	11.039	3.500	0.5047	0.7926	-0.2879
	4.0	1632.46	11.020	4.000	0.3575	0.9074	-0.5499

[参考文献] 市川傳信編:「多目的決定の理論と方法」, 計測自動制御学会 (1980).